

学校的理想装备

电子图书·学校专集

校园网上的最佳资源

物理教师手册



内容简介

本书共分四编：一、概念规律及其应用；二、物理学史和物理学家；三、物理量和单位制；四、常量与数据。以一、二编为重点，约占全书的五分之四。本书针对中等学校物理教学的需要，在基础知识、联系实际、近代科学技术新发展、物理概念规律的形成发展过程、物理学的思想方法等方面均提供了丰富的资料，既结合中等学校物理教学内容，又有所扩展和提高，是物理教师的良师益友。

本书可供普通中学、中等师范学校、职业中学和中等专业学校物理教师，高等师范院校物理系师生和物理教学研究人员使用。也可供爱好物理的中学生学习参考。

前 言

中等学校物理学科包含了物理学的基础知识，并涉及到许多科学技术领域的专业知识，为了较深入地理解这些知识，更好地掌握教学内容，提高教学的科学水平，教师必须查阅大量有关的专著和期刊；对于大多数中等学校物理教师来说，由于时间、精力和诸多客观条件的限制，这是相当困难的。我们从中等学校物理教学的这种实际需要出发，把上述各门类的基本知识和资料提炼出来，编纂成了这本手册。这是一本工具书，主要是为物理教师备课、钻研教材提供有益的参考资料。希望它有助于教师钻研业务和提高教学水平。

本书共分四编：一、概念规律及其应用，二、物理学史和物理学家，三、物理和单位制，四、常量与数据。

概念规律及其应用这一编按力学、热学、电学、光学、原子和原子核物理学、粒子物理学的顺序编排，共分 26 章。在这一编里，把中等学校物理教材中涉及的物理概念和规律，着重从物理意义上，简明扼要地加以解释，此外，还针对中等学校物理教学中的一些重要疑难问题进行了分析，澄清错误观念。同时，提供一些联系实际的内容，如解释一些自然现象，介绍物理原理在现代科学技术中的应用以及现代科学技术新发展的某些情况和资料，还涉及到一些中等学校物理课本没有讲到，但为了深入研究教学需要了解的概念和规律。

物理学史和物理学家一编有三部分内容。第一部分是从事为纲介绍力学、热学、电学、光学、原子及原子核物理学的发展简史，现代中国物理学发展史以及技术发展简史，第二部分是按生年顺序介绍了 117 位中外物理学家，第三部分是介绍了 54 位中外科学家、学者的名言录，在这一编里，不但记叙了一些重要的物理概念、规律的形成、发展的来龙去脉，也提供了对学生进行物理思想、物理方法以及非智力因素教育的生动材料。在介绍物理学家时，既介绍了他们的成就，也介绍了他们的失误和遭遇的困难，尽可能使讲者对他们的科学生涯有一个较全面的了解。

物理量和单位制这一编有七部内容。第一部分介绍有关量和单位的基本概念。第二部分介绍国际单位制及其用法。第三部分介绍我国的法定计量单位。第四部分介绍可与国际单位制并用的其他单位。第五部分以表格形式列出常用物理量的符号及其单位。第六部分介绍几种未列入国家标准又不能与国际单位制并用，但过去常用乃至现在仍为理论界、科技界采用的单位制。第七部分介绍常用单位的换算。

常量与数据这一编介绍以下内容：物理学基本常量，物理学常用数据，邻近学科中与物理学关系密切的数据、图表和符号，技术上的数据，有关我国国民经济发展情况的数据，常用数学公式等。本编数据从国内外出版物搜集或由有关部门提供而来。内容比较广泛，教师可根据教学的需要选择使用。

为了便于读者使用，本书除在每编之前按内容前后列出词条目录外，在全书正文之后还编有内容索引，索引包括本书全部条目所涉及的主要概念、规律、名词和人物等。索引按所列主题第一字的汉语拼音字母的顺序排列，并给出在正文中的页码。不熟悉汉语拼音的读者，可以先在索引之后的汉语首字笔画检索汉语拼音表中查出需查主题首字的汉语拼音，再从

索引中查找主题。

本书由刘克桓主编。第一编的执笔人是邢蕙兰(一、二)，刘克桓(三、四、五、六、七、八、十六、二十三、二十四、二十五、二十六)，扈剑华(九)，窦国兴(十、二十二)，彭前程(十一、十二)，张同恂(十三、十四)，马冬玲(十五)，董振邦(十七、十九、二十、二十一)，杜敏(十八)，李福利(二十二)。第二编的执笔人是邹延肃，陈毓芳，杨福征，李平，陶澄，赵定柏，沈鸿敏，钟金城，张立，曹富田，李笙，魏励勇，马志民，张建华，秦幼云。第三编的执笔人是刘克桓。第四编的执笔人是邢蕙兰(一、二)，马淑美(三、四)，马冬玲(五)，刘克桓(六、七、八)。全书的科学家头像由李惠乔绘制，其他插图由何慧君绘制。在编写过程中，编者查阅、参考了许多教材、专著和论文，主要参考文献在每章之后已列出，在此一并致谢。

本书“概念规律及其应用”一编经雷树人审阅，“物理学史和物理学家”一编经申先甲、戴念祖、朱荣华、牛秀岩审阅，“物理量和单位制”一编经窦国兴审阅，“常量与数据”一编经常林和窦国兴审阅。

本书涉及知识面较广，尽管编者作了很大努力，还难免有不足或错误之处，热切希望读者批评指正。

编者
1995年12月

一、力

标量和矢量 (scalar and vector)

只有大小的量，即可用一个数完全确定的量，叫标量。国际单位制中的七个基本量都是标量。物理学中的标量可归为两类：一类是恒正的标量，如长度、质量、动能、热力学温度等；另一类是可以取负值的标量，如功、重力势能、热量、电流、电荷量、电势、电动势等以及一切标量的增量。标量间的运算遵循一般的代数法则。

矢量是一种既有大小又有方向的量，它的合成遵循平行四边形定则。物理学中的位移、力、力矩、电场强度等都是矢量。矢量的大小（绝对值）又叫矢量的模。与某一给定矢量同方向而它的模等于 1 的矢量叫给定矢量的单位矢量。所有的矢量都可以表示为它的模和单位矢量的乘积。

矢量可用有向线段来表示。在直角坐标系 $O-xyz$ 中，表示矢量 a 的有向线段的方向余弦 l, m, n 之间存在 $l^2+m^2+n^2=1$ 的关系，因此矢量的方向可由两个数来决定，再加上模的数值，所以矢量又可定义为能用三个数完全确定的量。

物理学中的矢量可分为三类：自由矢量：指向固定、起点任意的矢量，如平动刚体的位移，作用在刚体上的力偶矩等； 位移矢量：指向固定、起点可在矢量作用线上任意移动的矢量，如作用在刚体上的力，做定轴转动刚体的角速度等； 固定矢量：指向、起点都固定的矢量，如运动质点的速度，非匀强电场中点电荷受到的电场力等。

矢量遵循如下的运算法则：

矢量的相等（或相反） 两个矢量 a 和 b ，若它们具有同样的单位，相同的模，平行且指向相同（或相反），它们就是相等（或相反）矢量。

矢量的和与差 两个矢量的和可用平行四边形定则或三角形定则求出，它们的相加顺序是可以互易的： $a+b=b+a$ 。多个矢量的和可用多边形定则来求，它们的相加顺序也具有可交换性。矢量的减法运算也用三角形定则或多边形定则，但要把减去的矢量用它的相反矢量来表示，即把 $a-b$ 表示成 $a+(-b)$ 。

矢量的积 矢量乘法有三种情况：标量和矢量的乘积是个矢量，如动量等于质量与速度矢量的乘积。矢量和矢量相乘，其积是标量的称为标积或点积，它的定义是 $a \cdot b = ab \cos \alpha$ (α 是 a, b 间的夹角)，如机械功等于力矢量和位移矢量的标积。矢量和矢量相乘，其积是矢量的称为矢积或叉积，它的定义是： $a \times b = c, c = ab \sin \alpha$, c 的方向垂直于 a 和 b 所在的平面，指向由右手螺旋定则确定，即：如果矢量 a 经过小于 180° 的角转到矢量 b 的方向为右手螺旋的旋转方向，则螺旋前进的方向就是矢量 c 的方向（图 1-1-1）。标积中的两个矢量是可以互易的： $a \cdot b = b \cdot a$ ；矢积中的两个矢量是不可互易的： $a \times b = -b \times a$ 。

物理学中有些物理量也规定了方向，但它们不是矢量，这可从它们的合成是否遵从平行四边形定则来判断。例如，非无限小的角位移，可根据右手螺旋定则定出它的方向，但它的合成不遵从平行四边形定则，相加的顺序不可互易，所以它不是矢量。

力 (force)

力是物理学中使用最广泛的基本概念之一。自然界有四种基本的力，即万有引力、电磁力、强作用力和弱作用力。后两种力只在原子核内部或基本粒子之间起作用（参见“粒子间的相互作用”）。

力是物体之间的相互作用，是使物体运动状态发生变化的原因。牛顿第二定律给出了力的定义：力是动量对时间的变化率，对于质量一定的物体，力等于质量和加速度的乘积。在上述定义里，物体被看作一个质点。

力是矢量。在经典力学里，力的方向跟它使质点产生的加速度的方向相同。但在相对论力学里，即在物体运动的速度接近光速时，虽然力仍可用动量对时间的变化率来定义，但力所产生的加速度的大小，一般并不与力成正比，力与加速度的方向也不一致。

力是物体之间的相互作用，意思是只要有力出现，必然同时存在施力物体和受力物体，而且相互作用的双方是对等的，任何一方既是施力物体又是受力物体。

为了研究宏观物体间的相互作用规律，又将宏观物体间常见的相互作用力按其性质和规律分为重力、弹力和摩擦力。在力学中，还常常根据力的作用效果将一些力叫做压力、拉力、支持力、牵引力、向心力等等，这些力可以是一个力，也可以是几个力的合力。

力的大小既可以用一个标准物体得到的加速度大小来量度，也可以用固体形变的大小来量度。但一般说来我们不能无条件地采用“力与形变成正比”的关系来量度力，因为这样定出来的力的大小不一定跟“力与加速度成正比”定出来的力的大小相一致。只有在比例限度内，固体的形变才与由“力与加速度成正比”所定出来的力成正比。弹簧秤就是在弹性体的比例限度内，应用“力与形变成正比”的关系来量度力的大小的。

力的三要素 (three factors of force)

力的大小、方向和作用点是力的三要素。为了直观地说明力的作用，常常用一根带箭头的线段来表示力。线段是按一定比例（标度）画出的，它的长短表示力的大小，它的指向表示力的方向，箭头或箭尾表示力的作用点，箭头所沿的直线叫做力的作用线。这种表示力的方法，叫做力的图示。

作用于刚体的力，可以沿着作用线任意滑移，力的作用点虽然改变了但并不改变力对刚体的作用，这叫做力的可传性。因此，对于刚体来说，力的作用可由力的大小和作用线决定，力是可以沿着作用线改变作用点的滑移矢量。在中学物理课本中，常常把支持力画在被支持物体的重心上就是这个道理。

在弹性体和流体力学中，力的作用点是不能变动的。

力矩 (moment of force)

力矩是表示力对物体作用时产生的转动效应的物理量。设 O 为空间中的一点, A 为力 F 的作用点, A 相对于 O 点的位矢 r 与力 F 的矢积 M_0 称为力 F 对 O 点的力矩 (图 1-1-2) :

$$M_0 = r \times F .$$

根据矢积的定义, M_0 的大小为

$$M_0 = rF \sin \theta = Fd$$

式中 θ 为 r 与 F 间的夹角, d 为 O 点到力 F 作用线的垂直距离; M_0 的方向垂直于矢量 r 和 F 确定的平面, 其指向可由右手螺旋定则来确定。

设 OD 为空间中过 O 点的任意轴, 则力 F 对 O 点的力矩 M_0 沿 OD 轴方向的分量 M_{0D} 称为力 F 对 OD 轴的力矩 (图 1-1-3), 也称为转矩。

M_{0D} 的大小为

$$M_{0D} = u \cdot M_0$$

式中 u 是 OD 方向上的单位矢量。

如果过力 F 的作用点 A 作垂直于 OD 轴的平面与 OD 轴交于 O' 点, 则力 F 与 OD 轴垂直的分量 F_{\perp} 对 O' 点的力矩, 等于力 F 对 OD 轴的力矩 M_{0D} 。它的大小等于 F_{\perp} 与 O' 点到 F 所沿直线的垂直距离 d 的乘积 M_{0D} 的方向可用正负号来确定。根据右手螺旋定则, 力矩的方向与轴的正方向一致时取正号, 反之则取负号。

力偶 (couple)

大小相等、方向相反、作用线不在一直线上的一对力，称为力偶。这一对力所在的平面叫做力偶的作用面。组成力偶的一对力不能合成为一合力。

力偶中的两个力对作用面内某一参考点 O 的力矩的矢量和称为力偶矩。用 $F_1=F$ 和 $F_2=-F$ 表示力偶，用 r_1 和 r_2 分别表示由 O 点到 F_1 和 F_2 两个力的作用线、且与这两条作用线垂直的矢量 (图 1-1-5)，用 M 表示力偶矩，则有

$$\begin{aligned} M &= r_1 \times F_1 + r_2 \times F_2 \\ &= r_1 \times F + r_2 \times (-F) \\ &= (r_1 - r_2) \times F . \end{aligned}$$

由于 $|r_1 - r_2|$ 等于两个力的作用线间的垂直距离 d ，所以

$$M = Fd .$$

d 叫做力偶臂。力偶矩的大小等于二力中任一力的大小与力偶臂的乘积。力偶矩矢量 M ，与作用面内参考点的选择无关。力偶矩完全确定了力偶对刚体的作用，而且具有自由矢量的性质。

根据作用在刚体上的力和力偶的性质，可将作用在刚体上任意一点 A 的力 F 平移到另一点 O (图 1-1-6)；但是必须添加这样一个力偶，它的力偶矩等于原来的力 F 对 O 点的力矩。这叫做力的平移定理。

应用力的平移定理，作用在刚体上的任何力系，可简化为作用线通过任意点 O (约化中心) 的一个力 R (称为主矢量) 和一个力偶矩为 M_0 (称为主矩) 的力偶。

共点力的合成 (composition of concurrent force)

作用在物体上的几个力，如果它们有共同的作用点，或者它们的作用线相交于一点，这几个力就叫共点力。共点力组成的力系可以约化成一个力，称为共点力的合力，它等于力系中各个力的矢量和。合力对物体的力学效应，与力系中各个力对物体共同作用的力学效应相等。求共点力的合力，叫共点力的合成，简称力的合成。

二力合成遵循矢量合成的平行四边形定则。如图 1-1-7 所示，两个力 P, Q 的合力，可由以 P, Q 为邻边所作平行四边形的对角线 R 来求出。

二力合成可用余弦定理和正弦定理直接求解。图 1-1-7 中 $R=P+Q$ ，故有

$$R^2 = P^2 + Q^2 + 2PQ \cos(\widehat{P, Q}),$$
$$\frac{P}{\sin(\widehat{Q, R})} = \frac{Q}{\sin(\widehat{R, P})}$$
$$= \frac{R}{\sin(\widehat{P, Q})}.$$

以上二式中 P, Q 和 $(\widehat{P, Q})$ 都是已知的，可以求出 R 的大小及其与 P, Q 二力的夹角。

多个共点力的合力，可用解析法求解。设 n 个共点力 F_1, F_2, \dots, F_n 的合力为 R $R = F_1 + F_2 + \dots + F_n = \sum_{i=1}^n F_i$ ，则有

$$R_x = \sum_{i=1}^n F_{ix}, \quad R_y = \sum_{i=1}^n F_{iy}, \quad R_z = \sum_{i=1}^n F_{iz},$$
$$R = \sqrt{R_x^2 + R_y^2 + R_z^2}.$$
$$\cos(\widehat{R, x}) = R_x / R, \quad \cos(\widehat{R, y}) = R_y / R,$$
$$\cos(\widehat{R, z}) = R_z / R$$

作用在物体上的非共点力 F_1, F_2, \dots, F_n 组成的力系，一般不能约化成一个单力，而只能约化成作用在任意点 O (称为约化中心) 的单力 R 和一个力偶矩为 M 的力偶。理论的分析证明，只有当力系的主矢量 $R \neq 0$ ，且对任意约化中心的主矢量 R 与主矩的标积 $R \cdot M = 0$ (即 $R \perp M$ ，例如，平面力系) 时，力系才能约化为一个单力，称为力系的合力。这里，应该注意主矢量和合力两个概念的差别。不过在有些参考书中，有时也把主矢量称为合力。

平行力的合成 (resultant of parallel forces)

平行力组成的力系，当主矢量 $R \neq 0$ 时，可以约化为一个单力，这就是平行力系的合力。求平行力系的合力叫平行力的合成。

(1) 两个同向平行力的合成 作用在 A、B 两点上的同向平行力 F_1 ， F_2 的合力 R ，它的大小 $R=F_1+F_2$ ，它的方向与二力相同，它的作用线通过 AB 联线上的一点 C，点 C 把 AB 线段内分为与二力成反比的两部分。

这个结果可应用力的可传性和等效力系的原理来证明。

在 A，B 两点沿 AB 线分别加上大小相等、方向相反的两个力 S_1 和 S_2 (图 1-1-8)，则 F_1, F_2, S_1, S_2 构成的力系与原来的力系等效。应用平行四边形定则求出 F_1 与 S_1 的合力 R_1 和 F_2 与 S_2 的合力 R_2 ，则 R_1 与 R_2 构成的力系也与原来的力系等效。把 R_1 和 R_2 沿它们各自的作用线滑移到两条作用线的交点 O，再求出它们的合力 R ， R 就是平行力系的合力。延长合力 R 的作用线与 AB 线段交于 C 点，根据相似三角形对应边成正比的关系

系可以得出： $\frac{F_1}{S_1} = \frac{OC}{AC}, \frac{F_2}{S_2} = \frac{OC}{CB}$ 。两式相除得 $\frac{F_1}{F_2} = \frac{CB}{AC}$ ，C 是内分点。

(2) 两个反向平行力的合成 作用在 A，B 两点上的反向平行力 F_1 和 F_2 ($F_1 > F_2$) 的合力 R ，它的大小 $R = F_1 - F_2$ ，它的方向与 F_1 相同，它的作用线通过 AB 延长线上的一点 C，点 C 把线段 AB 外分为与二力成反比的两部分。

这个结果可根据同向平行力的合成与分解来证明。把作用于 A 点的较大的力 F_1 分解为两个同向平行力，一个分力是作用在 B 点上的 $-F_2$ (即与力 F_2 大小相等方向相反)，另一个分力则是作用在 C 点上的 R (图 1-1-9)， R 就是反向平行力 F_1 和 F_2 的合力。由于 F_1 是平行力 R 与 $-F_2$ 的合力，所

以 $F_1 = R + F_2$ ， $R = F_1 - F_2$ ，且 $\frac{F_2}{CA} = \frac{R}{AB} = \frac{F_1}{CB}$ 。即 $\frac{F_1}{F_2} = \frac{CB}{CA}$ ，C 为外分

点。

如果两个反向平行力的大小相等，即 $F_1=F_2$ ， $R=0$ ，它们组成的力系就叫做力偶，力偶不能够用一个和它等效的力来代替。

力的分解 (decomposition of force)

用几个力代替原来的一个力，使这几个力的共同作用与原来的那个力等效，叫做力的分解。一般是把一个力分解为几个共点力，也有时要把一个力分解为两个平行力。分解所得的几个力叫做原来那个力的分力。

力往往是根据研究问题的需要进行分解的。例如，常把力分解为沿着两个或三个直角坐标轴方向的分力，这并不意味着这两个或三个分力都是分别作用在物体上的实在的力，而只是为了计算的方便。坐标系是可以任意选择的，选用不同方向的坐标轴，沿着坐标轴方向的分力的方向和大小，也就随之改变了。又如，图 1-1-10 中把物体所受的重力 G 分解为沿悬绳 AO 和 BO 方向的两个分力 G_1 和 G_2 ，也是为了便于研究物体和两段悬绳间的相互作用而虚设的。

把一个力分解为两个互成角度的共点力，可以有无穷多的解，因为对于一个给定的对角线，存在着无穷多个平行四边形。如果给定两个分力的方向或给定其中一个分力的方向和大小（这是两种最常见的情况），力的分解就有唯一的确定解。

把一个力分解为两个平行力（同向的或反向的），只要给出两个分力各自通过的一个点，就有唯一的确定解。

重力 (gravity)

重力有三种不同的定义。

第一种：地球对物体的引力称为重力。根据万有引力定律，物体离地球越远重力越小。以 R_e 表示地球半径， M_e 表示地球质量，在地球表面附近质量为 m 的物体所受的重力为

$$F = -G \frac{mM_e}{R_e^2} R_e = mg,$$
$$g = -G \frac{M_e}{R_e^3} R_e$$

g 为地表附近的重力加速度， g 的大小近似为 9.8m/s^2 。由于地球不是一个严格的球体，质量分布也不完全是对称的，地球表面不同位置的 g 值略有差别。

按照上述定义，重力成为独立于测量所在的非惯性参考系的力，它遵从牛顿第三定律。从经典力学理论系统的完备性来看，这个定义是妥当的。但是，它与在地面上用平衡称量法直接测得的结果不一致。

第二种：地球对物体的引力和使该物体参与地球自转的向心力的矢量差称为重力。这是从原点在地心、坐标轴指向恒星的惯性系出发来定义重力的，根据这个定义，也可以把重力看成是地球引力的一个分力。地面上所有物体随地球自转而绕地轴做圆周运动的向心力是地球引力的一个分力，方向指向地轴，地球引力的另一个分力就是使物体产生相对于地面自由下落加速度的力，即这个定义中的重力。

第三种：地球对物体的引力与因地球自转而使该物体具有的惯性离心力的合力称为重力。这是以转动的地球为参考系来定义重力的。

上述三个定义中的后两个，与在地面上用平衡称量法直接测得的结果相一致。但是，在这两个定义中引入了引力的一个分力和惯性离心力，由于它们不存在反作用力，使得重力成为不满足牛顿第三定律的力，从经典力学理论系统的完备性来看，这两种定义是有缺点的。

采用平衡称量法所测得的重力，可以称为视重或表观重力，地球对物体的引力称为真重。视重与真重大小之差在 0.35% 以内。真重 W 与视重 W' 间有如下的近似关系

$$W' = W - mR_e \omega_0^2 \cos^2 \varphi.$$

其中 φ 为物体所在处的纬度， ω_0 为地球自转的角速度。

重量 (weight)

我国在 1993 年颁布的国家标准《量和单位》的备注中说明：“‘重量’一词按照习惯仍可用于表示质量；但是，不赞成这种习惯”。

在科学技术领域，质量和重量则是两个不同的物理量。1901 年第三届国际计量大会申明：重量一词表示的物理量与力的性质相同。物体的重量是该物体的质量与重力加速度的乘积，特别是一个物体的标准重量是该物体的质量与标准重力加速度 ($g_0 = 9.80665\text{m/s}^2$) 的乘积。这个规定实际上把重量定义为使物体自由下落的力的量值。

重心 (center of gravity)

重力的作用点叫做物体的重心。把物体看成许多质点组成的质点组，则每个质点的重力都作用在质点上，因为质点的重心可以看作与质点自身重合。如果物体的体积不太大，则各个质点的重力是平行的，物体的重力就是作用在各个质点上的平行力的合力。这个合力等于各个平行力的和，它的作用点，即平行力的中心，就是物体的重心。

质量分布均匀且形状对称的物体，重心必定在它的对称面、对称轴或对称中心上。物体重心有时位于物体之外，均质圆环的重心就是一个例子。由于物体的形状复杂和质量分布不均匀，常用实验方法确定物体重心的位置。

对物体重心的研究，在工程技术上有重要的意义。例如，为了减少高速旋转物体的振动，需使其重心偏离转轴的距离（偏心距）不超过规定的数值。在汽车和飞行器的设计、制造和实验时，也需计算和测定重心的位置，严格控制重心的变动范围，使汽车和飞行器具有良好的动力性能。

形变 (deformation)

在外力作用下，物体中质点相对位置的变化所引起的物体形状变化叫形变。

除去外力后，如果物体的形变也随之消失，物体又恢复到原来的形状，这样的形变叫做弹性形变。当外力超过一定限度引起固体较大的形变，从而使一部分形变在除去外力以后仍保留下来，这种保留下来的形变叫做塑性形变。

形变有伸长、缩短、剪切、扭转、弯曲等几种类型。伸缩和剪切是弹性形变的两种基本类型，其他形变实际上是这两种形变的复合。

弹力 (elastic force)

在外力作用下弹性物体形变后所产生的恢复力。弹力的大小跟物体形变的大小成正比。

弹力是一种保守力，它对变形物体所做的功并不转化为热，只能引起物体的动能和弹性势能之间的相互转化。

弹力是自然界中广泛存在的一种力，例如，变形弹簧作用于物体的力；绳对所系物体的拉力；相互挤压物体通过接触面作用的压力；支持面的支持力等都是弹力。

张紧的绳上，各处都由于处于拉伸状态而存在着弹性恢复力，因而在任意截面的两侧都有相互作用的拉力 T 和 T' ，这两个拉力大小相等： $T = T'$ 。在这种情况下，我们说绳上该截面处的张力为 T 。可以不计质量的轻绳，绳上各处的张力都相等。质量不能忽略不计时，绳上各处的张力一般是不相等的。绕在滑轮上的轻绳，如果滑轮与绳之间的摩擦可以忽略不计，滑轮两边绳子上的张力是相等的；如果滑轮与绳之间的摩擦不能忽略不计，滑轮两边绳子上的张力不一定相等，传动装置的皮带轮两边的皮带的张力就不相等，紧边的张力与松边的张力之差，等于作用于皮带上的摩擦力。

弹力由直接接触的物体间的弹性形变引起。物体的形变一般都很小，不易被察觉，有时要根据牛顿运动定律或其他物理定律来判断是否有弹力存在。比如，两个相互接触的物体在光滑的水平面上前进时，很难从形变上判断它们之间是否有弹力作用。可是从牛顿第二定律却很容易判断出来。如果它们的运动是匀速的，相互间就没有弹力作用，如果它们的运动是变速的，相互间通常会有弹力作用。关于弹力的方向，有的是清楚的，如支面间或支面与支点间的弹力必垂直于支面且指向受力物体；球面与球面间的弹力必沿半径方向指向受力物体；轻绳拉物体的弹力沿绳且离开受力物体；有的是不清楚的，如用铰链连接的板条，这时可根据物体的平衡条件或牛顿运动定律等物理规律来确定弹力的方向。

应力和应变 (stress and strain)

物体受到外力发生形变时，在它内部不同部分之间就产生了相互作用的内力，使物体有恢复原状的趋势。物体内部任一假想平面两侧相互作用力的大小与平面的面积有关。平面两侧的相互作用力与平面的面积之比，叫做物体在该平面上的应力。由于物体内部应力的分布一般是不均匀的，可在平面上任取一个包含 P 点的面元 S ，面元一侧通过面元对另一侧的作用力为 Q ，则当面元无限缩小趋于 P 点时，极限值 $F = \lim_{\Delta S \rightarrow 0} \frac{\Delta Q}{\Delta S}$ 就是

作用在该平面上 P 点的应力。平面两侧应力的方向一般不与平面垂直。应力在平面法线方向上的分量称为法向应力或张应力，它的切向分量称为切向应力或剪应力。由于通过 P 点可以有不同取向的平面，平面的取向不同，作用在平面上的应力也随之而异，因此讲到应力时，不仅要指明作用在弹性体中的哪一点，还要指明作用在什么样取向的平面上。

物体在外力作用下其形状和大小发生的相对变化称为应变。应变有三种类型：

(1) 张应变物体内某线段形变后长度的改变量 Δl 与原长度 l_0 之比 $\epsilon = \Delta l / l_0$ 叫张应变（也叫拉伸应变或线应变）。

(2) 剪应变物体内两相互垂直的平面形变后所夹角度的改变量 $\phi = \Delta \alpha / \alpha_0$ (图 1-1-11) 叫剪应变（也叫切应变或角应变）。

(3) 体应变形变后物体体积的改变 ΔV 与原体积 V_0 比 $\epsilon_v = \Delta V / V_0$ ，叫体应变。

比例极限和弹性极限 (Limit of Proportionality and elastic limit)

在工程技术上和实验室里，通常用应力和应变这两个量来描述物体受外力作用后变形的宏观状态。如果我们用一条均匀的金属棒作拉伸实验，逐次增加棒的负载，记下各次的应力和应变，可以得到如图 1 - 1 - 12 的应力-应变曲线。

曲线中的 OA 段为一直线，表明在这个应力范围内，应变与应力成正比。对应于 A 点的应力是保持正比关系的最大应力，称为比例极限。

曲线中的 AB 段，应变与应力不再是正比关系，但仍是弹性形变，过了 B 点以后，虽然撤去外力，形变会有残留。对应于 B 点的应力叫做弹性极限。

曲线中的 CD 段几乎与横轴平行，表明在这一范围，应变迅速增加，而应力并无明显增大。这种情况叫做材料的屈服。C 点所对应的应力叫做屈服应力。

许多材料，特别是轻合金，并不显示出清晰确定的比例极限、弹性极限或屈服点。在工程技术上常常根据一定的残余变形以及与其对应的应力来规定弹性极限（例如残余变形达 0.02%）和屈服应力（例如残余变形达 2%）。

在工程技术中，为了保证安全，必须使构件的应力小于屈服应力，因此在设计中规定了允许出现的应力，叫做许可应力，许可应力要比屈服应力小许多。屈服应力与许可应力的比值叫做安全系数。安全系数的大小要根据实际情况确定，使它既能确保安全又不浪费材料。

胡克定律 (Hooke law)

英国物理学家胡克于 1678 年发现,弹性体在比例极限内受到外力后产生的形变与外力的大小成正比。这就是胡克定律。对于长度为 L , 横截面积为 S 的直杆, 其形变 ΔL 与施加的外力 F 之间的正比关系可写作

$$F=k \Delta L \quad (1)$$

式中的 k 称为直杆的劲度系数, 简称劲度。

由于变形直杆的应力 $\sigma = \frac{F}{S}$, 应变 $\varepsilon = \frac{\Delta L}{L}$, 由(1)式可得应变与应力成正比:

$$\varepsilon = \frac{1}{E} \sigma \quad (2)$$

这是胡克定律的另一种表述。(2)式中的 E 称为杨氏模量, 由材料的性质决定。 E 的倒数 $\alpha = \frac{1}{E}$, 称为弹性系数。

由(1), (2)可得直杆的劲度

$$k = E \frac{S}{L} \quad (3)$$

对于弹性体的剪切形变, 胡克定律可表示为

$$\gamma = \frac{1}{G} \tau \quad (4)$$

式中的 γ 为剪应变, τ 为剪应力, G 称为剪切模量, 也是由材料性质决定的常量。

常见的弹簧, 它的形变较复杂, 既有扭转又有弯曲, 但它的伸长(缩短) ΔL 与外力的关系仍可由(1)式决定, 式中的 k 则称为弹簧的劲度。理论的研究证明, 弹簧的劲度随弹簧丝半径 r 的增大而增大, 随弹簧圈半径 R 和总圈数 n 的增大而减小。对于弯曲应力与扭转应力相比可以忽略不计的密圈弹簧,

$$k = G \frac{r^4}{4R^3 n} \quad (5)$$

式中 G 为弹簧材料的剪切模量。

摩擦 (friction)

摩擦是在两个物体之间有相对运动或有相对运动趋势时，在它们的接触面上所产生的阻碍相对运动的机械相互作用。这种作用可以是力或力偶，即摩擦力或摩擦力偶。重要的摩擦类型有滑动摩擦、滚动摩擦和固体在流体中的摩擦。滑动摩擦和滚动摩擦都有静摩擦和动摩擦之分(参见“滑动摩擦”和“滚动摩擦”)。

在摩擦中，除静摩擦外，都会产生热效应。在有摩擦的运动中，一部分机械能会转变成热能，机械能不守恒。摩擦生热会使机械效率下降，因此要想办法减小摩擦。但摩擦又是人类生存、发展不可缺少的条件。正因为有摩擦，人才能在地面上行走，车辆才能在地面上行驶，机器才能传动和制动，结构才能靠螺栓、螺钉联结，棉纱才能编织成布。如果没有摩擦，人类生活就会发生不可设想的困难。

滑动摩擦 (sliding friction)

一个固体在另一个固体表面上滑动或有滑动趋势时，就在两个物体的接触面上产生阻碍它们之间相对滑动的力，这种现象叫滑动摩擦。当物体间有滑动趋势而尚未滑动时的滑动摩擦，又称为滑动静摩擦，简称静摩擦。阻碍物体做相对运动的力叫摩擦力。摩擦力总是成对出现的。相互接触的甲、乙两物体，如果甲对乙作用一个摩擦力 F_1 ，则乙必然对甲作用一个摩擦力 F_2 ， F_1 和 F_2 大小相等方向相反。摩擦力也分为静摩擦力和动摩擦力，通常所说的滑动摩擦力就是指动摩擦力。

滑动静摩擦力作用在两物体接触面的公切面上，方向与相对滑动的趋势方向相反。滑动静摩擦力的大小随产生相对滑动趋势的外力的增大而增大，直到一个最大值，当外力超过这个最大值时，两个物体就发生相对滑动这个最大值叫做最大滑动静摩擦力，简称最大静摩擦力。最大静摩擦力的大小 F_{\max} 与两个物体间的正压力（即接触面法线方向上的压力） N 成正比：

$$F_{\max} = \mu_0 N$$

其中的比例系数 μ_0 叫做滑动静摩擦系数。

滑动摩擦力作用在两个物体接触面的公切面上，方向与相对滑动的方向相反。滑动摩擦力的大小 F 与两个物体间的正压力 N 成正比，即

$$F = \mu N$$

其中的比例系数 μ 叫做滑动摩擦系数。 μ 比滑动静摩擦系数 μ_0 小，但两者相差不大，通常可用 μ 代替 μ_0 。

摩擦力产生的原因比较复杂。一种看法认为，它起因于物体表面的粗糙不平，当一个物体在另一个物体表面上滑动时，相互啮合的凹凸部分会相互碰撞，并且被破坏，阻碍物体的运动。按这种观点，两接触表面越是光滑平整，摩擦力就越小，许多观察结果与这种看法相符。但是当两接触面被加工到光洁度极高时，却表现出极大的摩擦力，用以上看法就解释不通了。另一种看法认为，物体的表面表观上无论多么光滑，实际上总是凹凸不平的。当两个物体接触时，真实接触面积跟表观接触面积相比是很小的，这就使接触处的压强很大，以致超过弹性极限，产生塑性形变，相互接触的双方的原子分子很接近，处于它们的引力范围之内，即使接触体本身产生粘合，就像把它们焊接起来一样。在相互接触的两个物体有相对滑动趋势或发生相对滑动时，这些熔合起来的地方就受到剪切作用，即双方大量分子间引力的切向分量的总和将提供摩擦力。还有一种看法认为，在极光滑的表面摩擦中可能带上异号电荷，它们之间的静电作用也是产生摩擦力的一个原因。

在物理书上经常把“光滑表面”作为无摩擦表面的理想模型，在这里“光滑表面”只是“摩擦力可以忽略不计”的同义语，并不是光洁度极高的表面。实验事实表明，物体之间的摩擦并不总是表面越光滑，摩擦就越小。滑冰时摩擦力很小，并不是因为冰面光滑，而是由于在压力作用下，形成了一层水膜，这层水膜起了润滑作用的缘故。

摩擦定律 (law of friction)

早在 15 世纪欧洲文艺复兴时代就开始研究滑动摩擦的规律了,其代表人物是意大利的达·芬奇 (LeonardodaVinci1452~1519)。他曾经写道:“虽然接触表面具有不同的长和宽,但是在相同的负载下,当物体开始运动时,摩擦力的大小都是一样的。”“如果重量增加一倍,那末摩擦力也增加一倍”。后来,法国的阿蒙顿 (Amonton) 做了大量实验总结出两条规律:(1)摩擦力的最大值与接触面积无关;(2)摩擦力的最大值与正压力成正比。除此之外,他还认为对于所有的材料,摩擦系数都是 0.3。到 1781 年,法国的库仑 (CharlesAugustindeCoulomb1736~1806),经过大量实验,积累了许多数据之后,证明阿蒙顿总结出的两条规律是正确的,同时推翻了阿蒙顿认为不同材料的摩擦系数都相同的观点。他首先把滑动摩擦分为静滑动摩擦和动滑动摩擦两种,并总结出摩擦定律。由于摩擦机理的复杂性,摩擦定律只是实际的某种近似,可概述如下:

关于滑动静摩擦:

(1)摩擦力的最大值与接触面积无关。

(2)摩擦力的最大值 F_{\max} 与正压力 N 成正比,即 $F_{\max}=\mu_0N$, μ_0 为滑动静摩擦系数。

(3)摩擦力的最大值与两个物体的组成材料及其表面的物理条件(例如温度、湿度、粗糙程度等)有关。

关于滑动摩擦:

(1)滑动摩擦力与接触面积无关。

(2)滑动摩擦力 F 与正压力 N 成正比,即 $F=\mu N$, μ 为滑动摩擦系数。

(3)滑动摩擦力与两个物体的组成材料及其表面的物理条件有关。

(4)滑动摩擦系数小于滑动静摩擦系数。

此外,滑动摩擦系数 μ 与滑动的相对速度 v 的大小也有关系。 μ 与 v 的关系大致如图 1-1-13 所示: μ 值随 v 的增大而减小,最后趋于一个极限值,而当 $v=0$ 即两物体相对静止时 μ 值最大,一般资料给出的 μ 值,都是在某一速度范围内的平均值。在精确度要求不高的情况下可用滑动静摩擦系数代替滑动摩擦系数。

滑动摩擦系数一般都小于 1。但是从现代摩擦理论来看,由于把整块固体分开需要很大的力,可以想象摩擦力有时也会很大的,甚至会超过正压力,即滑动静摩擦系数和滑动摩擦系数可以超过 1。像玻璃和玻璃的摩擦系数可以达到 1,橡胶与固体的摩擦系数可以高达 4.0,摩擦系数还与表面光洁度、表面薄膜等有关。将两个仔细清洗过的金属表面放在高真空室内使其不能形成表面氧化膜,两个表面间的摩擦因数会变得很大,它们实际上牢固地焊在一起了。

摩擦角 (angle of friction)

当物体与固定支承面间的摩擦为静摩擦时，支承面对物体的反作用力 R 为法向反作用力 N 和切向反作用力即静摩擦力 F 的合力。当摩擦力为最大静摩擦力 F_{\max} 时，支承面对物体的反作用力 R 与法向反作用力 N 之间的夹角 φ (图 1 - 1 - 14) 叫做支承面对于物体的摩擦角。摩擦角的正切等于 F_{\max} 与 N 的比，即等于滑动静摩擦系数 μ_0 ($\operatorname{tg}\varphi = \mu_0$)。以摩擦角的两倍为顶角，以 N 的方向为轴，以 R 为母线所构成的圆锥叫做支承面对该物体的摩擦锥。

由摩擦角和摩擦锥的定义可以看到，当作用于物体的指向支承面的主动力（即除固定支承面的反作用力以外的其他的力）的合力的作用线在摩擦锥内部时，无论这个力有多大，支承面都会提供与它平衡的力，使物体与支承面保持相对静止。这种现象叫做自锁或摩擦自锁；当外部作用力的合力的作用线在摩擦锥以外时，支承面就不可能提供与它平衡的力，因而物体一定会相对于支承面发生滑动。

摩擦角可以用下面的方法进行测量：将所测量的两个物体中的一个倾斜放置作为斜面，另一个放在它的上面，逐渐增大倾角，当达到某一数值时，物体刚刚能够下滑，这时的斜面倾角就是该物体在这个支承面上的摩擦角。由此可以看出，如果斜面的倾角小于摩擦角，斜面上物体受到的重力即主动力的作用线总是在摩擦锥内，这时无无论重物多重，物体都会在斜面上处于平衡状态，这就是斜面自锁的条件。相反地，如果斜面的倾角大于摩擦角，无论多轻的物体也不能静止在斜面上。

滚动摩擦 (rolling friction)

滚动摩擦是一个物体在另一物体上滚动或有滚动趋势时接触面处产生的不对称变形引起的一种阻碍滚动的作用。滚动摩擦有静摩擦和动摩擦两种。

放在支承面上的车轮静止而无滚动趋势时，车轮与支承面的变形是对称的，支承面对车轮的支承力通过车轮的质心，车轮保持平衡。当车轮滚动或有滚动趋势时，变形就不对称了，支承力的作用点向前移动。图 1 - 1 - 15 显示出支承面不对称形变的情形。图中 W 为车轮的负荷， G 为车轮受到的重力， F 为车轮中心 O 处受到的水平拉力， R 为支承面对车轮的反作用力， N 为 R 的竖直分力，可近似看作支承面对车轮的支承力。 f 为 R 的水平分力，亦即支承面阻碍轮缘发生相对滑动的摩擦力。从图中可以看出 F 和 f 组成一个力偶使车轮向前滚动。所以支承面对轮子的摩擦力一方面阻碍车轮的滑动，另一方面又促使车轮向前滚动。从图还可以看出，支承面对车轮的反作用力 R 不通过车轮的最低点，而前移了一小段距离。当车轮没有滚动以前， R 跟 F 、 W 、 G 汇交于一点互相平衡。 R 的竖直分量 N 与 $W+G$ 构成一对力偶，这就是滚动静摩擦力偶，它与 F 和 f 组成的那对力偶平衡，起着阻止滚动发生的作用。增大水平拉力 F ， R 的水平分量 f 会相应增大，促使滚动的力偶矩变大，这时 R 的作用点进一步前移，使 N 与 $W+G$ 间的距离增大，阻止滚动发生的力矩也增大。当 N 与 $W+G$ 间的距离增大到可能达到的最大值时，再增大水平拉力 F ，滚动摩擦力偶就阻止不了滚动的发生了，车轮就开始滚动。

在两个保持相对静止又相互接触的物体中，一个受到外力矩作用而对于另一个物体有相对滚动的趋势时，产生的阻碍发生相对滚动的力偶，就是滚动静摩擦的静摩擦力偶。它的力偶矩随外力矩的增大而增大，但具有一最大值。这一最大值就叫做最大静摩擦力偶矩。这个力偶矩的方向与外力矩的方向相反。最大静摩擦力偶矩的大小 M_{\max} 与两物体的正压力 N 的大小成正比，即

$$M_{\max} = \mu_0 N。$$

其中 μ_0 称为滚动静摩擦系数，它具有长度的量纲，近似地依赖于两物体的材料并与接触面的粗糙程度有关。

当两个相互接触的物体中的一个相对于另一个作无滑动的滚动并有相对角速度时产生的阻碍相对滚动的力偶，叫做滚动摩擦力偶。在没有外力矩作用的情况下，滚动摩擦力偶矩将使相对滚动的角速度逐渐减小而趋于零。它的方向与相对角速度的方向相反。滚动摩擦力偶矩的大小 M 与两物体之间的正压力 N 的大小成正比，即

$$M = \mu N。$$

其中 μ 称为滚动摩擦系数，它具有长度的量纲，近似地依赖于两物体的材料并与接触面的粗糙程度和滚动速率有关。

初中物理教科书上说“滚动摩擦比滑动摩擦小得多”是把滚动摩擦简化为一个等效的滑动摩擦来考虑问题的。当推车匀速前进时，推力与支承面对轮的静摩擦力这对力偶的力偶矩与滚动摩擦力矩平衡，即

$$fr = N。$$

这就是说通过轮心必须施力 $F(=f)$ 才能使轮匀速滚动，所以

$$F(=f) = \frac{\delta}{r} N$$

若把滚动摩擦当作一个等效的滑动摩擦，可以把 $\frac{\delta}{r}$ 叫做“滚动摩擦因数”（在研究车轮滚动的动力学中，常把它叫做滚动阻力因数），它是一个无量纲的量。由于 δ 远小于 r ， δ/r 比滑动摩擦系数 μ 小得多，说滚动摩擦比滑动摩擦小得多，就是说的这种意义上的滚动摩擦系数比滑动摩擦系数小得多。

主要参考资料

1. D. Kleppner, R.J. Kolenkow. 力学引论，第1版。北京：人民教育出版社，1980。
2. 中国大百科全书出版社编辑部。中国大百科全书·物理学，第1版。北京：中国大百科全书出版社，1987。
3. 缪钟英，罗启蕙。力学—问题讨论，第1版。北京：人民教育出版社，1989。
4. 刘克哲，任宝祥。物理学概念：分析·例题·常见错误，第1版。济南：山东科学技术出版社，1984。
5. 郭士。理论力学，上册。第1版。北京：人民教育出版社，1982。
6. 科学出版社名词室。物理学词典上册，第1版。北京：科学出版社，1988。
7. 漆安慎，杜婵英。力学基础，第1版。北京：人民教育出版社，1982。
8. H.H. 蒲赫哥尔茨。理论力学基本教程上册，第3版。北京：商务印书馆，1956。
9. M. 亚沃尔斯基，A.A. 杰特拉夫。物理学手册，第1版。北京：科学出版社，1986。
10. 乔际平等。初中物理备课手册，第1版。北京：人民教育出版社，1990。
11. 梁绍荣等。普通物理学第一分册力学，第1版。北京：高等教育出版社，1987。
12. F.V. 沃诺克，P.P. 本哈姆。固体力学和材料强度，第1版。北京：人民教育出版社，1982。
13. 刘德成。浅谈矢量和标量。物理教学，1984(9)：19~20
14. 贾维孝。力的作用效果浅析（也谈什么样的力使物体发生形变）。教学通讯：理科版（郑州），1984（12）：41~42
15. 陈鹏万。大学物理手册，第1版。济南：山东科学技术出版社，1985。

二、质点的运动

参考系和坐标系 (reference frame and frame of axes)

参考系是为了确定物体的位置和描述物体的运动而选做标准的一个物体或一组相对位置不改变的物体。参考系是可以任意选取的。从运动学的观点来看,所有的参考系都是等效的,无优劣可言。不过,一个物体的确定的运动,对于不同的参考系可表现为不同的运动,选择合适的参考系可以简化物体运动的描述,便于探索运动的规律。在研究地面上物体的运动时,人们通常都选地面或相对于地面静止的物体作参考系。

参考系有惯性参考系和非惯性参考系两类。惯性定律成立的参考系叫做惯性参考系。相对于惯性参考系做匀速直线运动的参考系都是惯性参考系。地球可以看作一个不很精确的惯性参考系。相对于惯性参考系做变速运动的参考系叫做非惯性参考系,牛顿第一、第二定律在非惯性参考系中,不成立。

为了定量地描述物体相对于参考系的运动,必须在参考系中建立坐标系,运动物体上的每一个点相对于参考系的位置,就可以用该点的三个坐标单值地确定。在力学中常用的坐标系有直角坐标系、柱坐标系和球坐标系(图1-2-1)。

由直角坐标变为柱坐标及其逆变换的公式为:

$$\begin{cases} p = \sqrt{x^2 + y^2}, \\ \varphi = \arctan \frac{y}{x}, \\ z = z; \end{cases} \quad \begin{cases} x = p \cos \varphi, \\ y = p \sin \varphi, \\ z = z \end{cases}$$

由直角坐标变为球坐标及其逆变换的公式为

$$\begin{cases} r = \sqrt{x^2 + y^2 + z^2}, \\ \varphi = \arctan \frac{y}{x}, \\ \theta = \arctan \frac{\sqrt{x^2 + y^2}}{z}; \end{cases} \quad \begin{cases} x = r \sin \theta \cos \varphi, \\ y = r \sin \theta \sin \varphi, \\ z = r \cos \theta \end{cases}$$

参考系配以计算时间的时钟就成为计算系统。

物体的运动是客观的,但是对它的运动状态的描述,却随参考系的选择而异,计算的繁简程度也会大不相同。例如,选用以太阳为原点的恒星参考系,行星的运动都是椭圆;选用以地球为原点的恒星参考系,行星的运动就成了很复杂的曲线运动,在恒星背景上,不仅有顺行(自西向东),还有逆行(自东向西),在由顺行变为逆行(或相反)之间,还有短暂的静止停留期。

质点 (masspoint)

具有一定质量而其几何尺寸可以忽略的物体叫做质点。质点是从实际物体中抽象出来的简化模型。一个物体能否看成质点,取决于这个物体的尺寸跟所研究的问题中具有重要意义的空间尺度相比是否足够小;同时也

取决于所研究的运动的特性。半径数千公里的行星，跟它们绕日公转的轨道相比，完全可以看作是空间中的质点。物体作平动时，内部各点的运动状态完全相同，也可以把它看成质点。在研究物体的转动或物体的形变时，物体的几何尺寸就是不可忽略的了，因而不能再把物体看作质点。在一定条件下把物体抽象为质点，正是体现了在研究问题时抓住对象的主要矛盾这一思想。

同一个物体在一个力学问题中可以看做质点，而在另一个问题中就不能看做质点。比如地球，在研究它绕太阳的运动时，可以看做质点，而在研究它的自转时就不能看做质点了。

在理论计算中要用质点代表实物，但在研究质点运动规律的实验中又要用实物去模拟质点。实验中选用的实物的大小和形状，在所研究的问题中应该是可以忽略的。质点代表的物体通常并不很小，不能把它同微观粒子如电子、质子混同起来。

位置矢量 (position vector)

质点在空间的位置可用位置矢量来表示；位置矢量可由直角坐标系中三个坐标来确定。

以坐标系原点 O 为起点，以质点的位置 P 为终点的矢量 r ，叫做质点的位置矢量，简称为位矢。位矢依赖于坐标系的选择。如 P 在直角坐标系 $O - xyz$ 中的位矢为 r ，在直角坐标系 $O - x' y' z'$ 中的位矢为 r' （图 1-2-2）， r 与 r' 的方向和数值都不相同。

位矢可用它在所选的直角坐标系的三个坐标轴上的投影来表示，即

$$r = xi + yj + zk。$$

式中的 i, j, k 分别为 x 轴， y 轴和 z 轴方向上的单位矢量。

当质点运动时，质点的位置随时间而变化，这种变化在直角坐标系中可用

$$x = x(t), y = y(t), z = z(t) \quad (1)$$

来表示，也可用位置矢量

$$r = r(t) \quad (2)$$

来表示。(1)，(2)两式是质点运动轨道方程。(2)式是一个矢量方程，它意味着位矢的方向和大小都是时间的函数。

位移 (displacement)

描述质点空间位置变更大小和方向的物理量叫做位移矢量，简称位移。如果一个质点的初位置为 A，末位置为 B，该质点的位移就用从 A 到 B 的有向线段表示（图 1 - 2 - 3），其大小是 AB 的长度，方向由 A 指向 B，位移与一定的时间间隔 t 相对应，一般说来，在不同的时间间隔内有不同的量值和方向。

位移不同于路程。运动质点在它的运动轨迹上移动的总长度叫做路程，它是一个没有方向的标量。位移能够告诉我们运动质点的最后位置，而路程却不能。

质点的位移 r ，可用位矢的差表示：

$$\Delta r = r_2 - r_1$$

其中 r_1 和 r_2 分别表示质点的初位置和末位置。用 x_1, y_1, z_1 和 x_2, y_2, z_2 分别表示初、末两位置的坐标，则有

$$r = (x_2 - x_1) i + (y_2 - y_1) j + (z_2 - z_1) k。$$

位移不依赖于坐标系的选择。

速度 (velocity)

即瞬时速度，描述质点瞬时运动的方向和位置变化快慢的物理量，是个矢量。

设质点在时间 $t = (t + \Delta t) - t$ 内的位移为 $\Delta r = (r + \Delta r) - r$ ，则 $\bar{v} = \frac{\Delta r}{\Delta t}$ 称为质点在 t 时间内的平均速度。在 $\Delta t \rightarrow 0$ 时 \bar{v} 的极限值

$$v = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{\Delta r}{\Delta t} = \frac{dr}{dt}$$

就是质点在 t 时刻的速度，也就是说，速度等于质点的位移对时间的变化率。用直角坐标 x, y, z 表示质点的位置，则

$$v = v_x i + v_y j + v_z k;$$

$$v_x = \frac{dx}{dt}, v_y = \frac{dy}{dt}, v_z = \frac{dz}{dt}$$

v 的大小，即速度矢量的模 $|v|$ ，称为速率，也叫瞬时速率。

$$v = |v| = \sqrt{\left(\frac{dx}{dt}\right)^2 + \left(\frac{dy}{dt}\right)^2 + \left(\frac{dz}{dt}\right)^2}$$

v 的方向为该时刻质点所在处轨道曲线的切线方向。

在用极坐标方程 $r = f(\theta)$ 表示质点 P 的平面运动轨道时，质点的速度 v 还可像图 1-2-4 那样分解为沿 r 方向的径向分量 v_r ，和与它垂直的横向分量 v_θ ：

$$v = v_r + v_\theta,$$

$$v_r = \dot{r} \hat{r},$$

$$v_\theta = r \dot{\theta} \hat{\theta}$$

式中的 \hat{r} 为向径 r 方向上的单位矢量 (r 增大方向为正)， $\hat{\theta}$ 为与 \hat{r} 垂直的单位矢量 (θ 增大方向为正)。

速度的测量不可能也不必要按定义去测量满足数学上无穷小时间间隔内的平均速度，只要测出某一“足够小”的时间间隔内的平均速度就可以了。这个“足够小”要小到 $\frac{\Delta r}{\Delta t}$ 没有可测出的变化为止 (不是越小越好)

)。在实际中要根据不同的运动情况和实验精度的要求来确定“足够小”要小到什么程度。对匀速直线运动， Δt 可以任意大，速度变化越快， Δt 就要越小。对自由落体运动，如果对 v 的测量精确到 1m/s ， Δt 要小于 $\frac{1}{10}\text{s}$ ，精确到 0.1m/s ， Δt 要小于 $\frac{1}{100}\text{s}$ ，等等。提高极小时间间隔和极小长度的测量技术，会提高瞬时速度的测量精确程度。

加速度 (acceleration)

即瞬时加速度, 是描述质点运动速度的大小和方向随时间变化快慢的物理量, 是个矢量。

设质点在时间间隔 $t=(t_2 - t_1)$ 内的速度增量为 $\Delta v = (v_2 - v_1) - v_1$, 则 $\bar{a} = \frac{\Delta v}{\Delta t}$ 称为质点在时间间隔 t 内的平均加速度, 当 $t \rightarrow 0$ 时,

\bar{a} 的极限值 $a = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{\Delta v}{\Delta t} = \frac{dv}{dt} = \frac{d^2 r}{dt^2}$, 就是质点在时刻 t 的加速度, 即加速度等于质点的速度对时间的变化率。引入直角坐标 x, y, z , 则有

$$a = a_x i + a_y j + a_z k,$$

其中

$$a_x = \frac{dv_x}{dt} = \frac{d^2 x}{dt^2}$$

$$a_y = \frac{dv_y}{dt} = \frac{d^2 y}{dt^2}$$

$$a_z = \frac{dv_z}{dt} = \frac{d^2 z}{dt^2}$$

加速度 a 的大小为 $a = \sqrt{a_x^2 + a_y^2 + a_z^2}$, 方向由 a 与各坐标轴间夹角的方向余弦决定, 即由 $\cos(\widehat{a, i}) = a_x / a$, $\cos(\widehat{a, j}) = a_y / a$, $\cos(\widehat{a, k}) = a_z / a$ 决定。

如果加速度 a 的方向与速度 v 的方向之间的夹角为 φ , 将加速度 a 分解为速度方向的分量 a_τ 和沿轨迹主法线方向的分量 a_n (图 1-2-5), 则 a_τ 称为切向加速度, a_n 称为法向加速度。

$$a_\tau = a \cos \varphi,$$

$$a_n = a \sin \varphi.$$

a_τ 和 a_n 与质点速率 v 和轨迹曲率半径 ρ 之间的关系为

$$a_\tau = \frac{dv}{dt},$$

$$a_n = \frac{v^2}{\rho}$$

切向加速度是加速度沿轨迹切线方向的分量, 它等于速率对时间的导数, 表示速度矢量大小的变化率。它和 v 同号时, 质点做加速运动; 异号时, 质点做减速运动。法向加速度是加速度沿轨迹主法线方向的分量, 即指向质点轨迹的曲率中心, 它表明速度矢量方向的变化率, 其大小与速率的平方和轨迹的曲率 $\frac{1}{\rho}$ 成正比。由此可见, 加速度的大小又可表示为 $a = \sqrt{\left(\frac{dv}{dt}\right)^2 + \left(\frac{v^2}{\rho}\right)^2}$ 。

$$a = \sqrt{\left(\frac{dv}{dt}\right)^2 + \left(\frac{v^2}{\rho}\right)^2},$$

方向可由 a 对于切线方向的单位矢量 τ 和主法线方向的单位矢量 n 的夹角的余弦决定, 即 $\cos(\widehat{a, \tau}) = a_\tau / a$, $\cos(\widehat{a, n}) = a_n / a$ 。

匀速直线运动 (uniform rectilinear motion)

速度保持不变的运动叫做**匀速直线运动**。匀速直线运动的基本特点是：在任何相等的的时间里，具有相等的位移。沿 x 轴方向的匀速直线运动的方程是

$$x = x_0 + v(t - t_0),$$

其中 v 是质点运动的速度， x_0 是 t_0 时刻质点的位置坐标， x 是 t 时刻质点的位置坐标。如果坐标原点取在 x_0 处，并取 t_0 时刻为计算时间的起点，即 $x_0 = 0$ ， $t_0 = 0$ ，匀速直线运动的方程可写为

$$x = vt.$$

匀速直线运动的规律，除了用方程表示外，还可以用速度-时间图 ($v - t$ 图) 和位移-时间图 ($x - t$ 图) 来表示。 $v - t$ 图是一条平行于时间轴的直线，它与横轴、 $t = t_1$ 和 $t = t_2$ 四条直线围成的矩形面积在量值上等于运动质点在时间 $t_2 - t_1$ 内的位移。 $x - t$ 图的斜率表示质点的速度： $v =$

$$\frac{x - x_0}{t - t_0}$$

匀加速直线运动 (uniformly accelerated re-ctilinear motion)

加速度的大小和方向保持不变的直线运动叫做匀加速直线运动。匀加速直线运动的基本特点是：在任意相等的时间内，速度的增量都相等。

沿 x 轴方向的匀加速直线运动的方程是

$$x = x_0 + v_0 t + \frac{1}{2} a t^2,$$
$$s = x - x_0 = v_0 t + \frac{1}{2} a t^2. \quad (1)$$

匀加速直线运动的速度表达式为

$$v = v_0 + a t. \quad (2)$$

上两式中的 x_0 , x 为初始时刻和 t 时刻质点的位置坐标, v_0 和 v 为初始时刻和 t 时刻质点的速度, a 为质点的加速度, s 为质点在时间 t 内的位移。从以上两式中消去 t , 可以得到质点在任何时刻的速度和位置坐标的关系

$$v^2 = v_0^2 + 2a(x - x_0). \quad (3)$$

(1)、(2)、(3)三个方程中, 只有两个是独立的, 包含五个运动学的量。五个量中最多允许有两个是未知量, 才能由选用的两个方程建立完备的方程组求出解答。

匀加速直线运动的规律除了用公式表示外, 还可以用图表示。通常以 t 为横坐标, 并分别以 x 、 v 、 a 为纵坐标, 画出坐标-时间图 ($x-t$ 图), 速度-时间图 ($v-t$ 图) 和加速度-时间图 ($a-t$ 图)。 $x-t$ 图是一条抛物线, 从它可以求出质点在时间 t_2-t_1 内的平均速度, 它在量值上等于通过 (t_1, x_1) , (t_2, x_2) 两点的割线的斜率; 还可以求出质点在时刻 t 的瞬时速度, 它在量值上等于过 (t, x) 点的曲线切线的斜率。 $v-t$ 图是一条斜直线, 从它可以求出运动质点的加速度, 它在量值上等于斜直线的斜率; 还可以求出质点在时间 t_2-t_1 内的位移 $x=x_2-x_1$, 它在量值上等于斜直线、横轴、 $t=t_1$ 和 $t=t_2$ 这四条直线所围成的梯形的面积。 $a-t$ 图是一条平行于时间轴的直线。

自由落体运动 (motion of freely falling body)

物体向地球表面下落的运动，是近似的匀加速运动。当空气阻力不存在时，所有物体从地面上方同一地点下落时，不论各个物体的大小、质量，成分如何，下落的加速度都相同，而且只要高度不太大，在整个下落过程中加速度保持不变。这种理想的、空气阻力和加速度随高度的变化都可忽略不计的运动叫做自由落体运动。自由落体的加速度叫做重力加速度，通常用符号 g 来表示。

取竖直向上的方向为 y 轴的正方向，取自由落体的初始位置为坐标原点，即在 $t=0$ 时， $y=0$ ，则自由落体的方程为

$$v = -\frac{1}{2}gt^2$$

$$v = -gt$$

式中的 g 为重力加速度的大小。从距地面高度为 h 处下落到达地面所需时间 t 和落地速度 v 分别为

$$t = \sqrt{\frac{2h}{g}},$$

和

$$v = -\sqrt{2gh}。$$

重力加速度 (acceleration of gravity)

一切物体在只受到重力作用的情况下，自由下落的加速度都相同，这个加速度叫做重力加速度，用 g 表示。一个从静止开始下落的物体，在开始很短的距离内，下落速度较小，空气阻力不大，可以看做是自由落体。这就是在实验室里可用物体下落的加速度代替 g 的依据。

地球表面上同一地点的物体，都具有相同的重力加速度。由于地球是个椭球，极半径比赤道半径约小 0.3%，加上地表面附近的物体是随着地球一起转动的，不同地点的重力加速度略有不同。把地球当作旋转椭球，重力加速度的计算公式为：

$$g=9.7803(1+0.0052884\sin^2\varphi-0.0000059\sin^22\varphi)\text{m/s}^2,$$

式中 φ 为物体所在处的地理纬度。例如，在赤道 $\varphi=0$ ， $g=9.78\text{m/s}^2$ ，在两极 $\varphi=90^\circ$ ， $g=9.83\text{m/s}^2$ 。重力加速度还和物体离地面的高度 h 有关。当 h 远小于地球半径 R_e 时，

$$g_h = g \left(1 - \frac{2h}{R_e} \right)$$

例如珠穆朗玛峰海拔 8848m，地球半径 $R_e = 6370\text{km}$ ， $\frac{2h}{R_e} = 2.778 \times 10^{-3}$ ，

珠峰上的重力加速度比同纬度海平面上的重力加速度约小 $\frac{3}{1000}$ 。

地面上的重力加速度可以用专门的仪器进行测量，由地面上各处重力加速度值的异常变化可以间接了解地下矿藏的情况。现已有海洋重力测量，将重力仪放在船上或经密封后放置在海底进行动态或静态观测，可以确定海底地壳各种岩层质量分布的不均匀性。同时还有井中重力测量，采用专用的井中重力仪，沿钻孔测量重力随深度的变化，从而得出钻孔周围一定范围内岩石密度的变化。

太阳、月亮或其他星球表面上的物体，由于受到引力，也受有重力，自由下落到它们上面的物体也有重力加速度。月面上自由落体的重力加速度 $g_{\text{月}}=1.62\text{m/s}^2$ 。太阳表面重力加速度为 $2.74 \times 10^2\text{m/s}^2$ 。

抛体运动(projectile motion)

向空中任意方向抛出的物体称为抛体。抛体运动又叫斜抛运动，是一种加速曲线运动，在空气阻力可以忽略的理想情况下，抛体运动的加速度等于重力加速度，可以把它看做为水平方向上的匀速直线运动和竖直方向上的上抛或下抛运动的合运动。在水平方向为 x 轴，竖直方向为 y 轴的直角坐标系中，当坐标原点与抛体运动的起点重合时，如果抛射的初速度为 v_0 ， v_0 与 x 方向的夹角为 α ， v_0 的 x 和 y 的分量为：

$$v_{x0} = v_0 \cos \alpha,$$

$$v_{y0} = v_0 \sin \alpha.$$

所以速度的 x 和 y 的分量为：

$$v_x = v_0 \cos \alpha,$$

$$v_y = v_0 \sin \alpha - gt.$$

当 $\alpha = \frac{\pi}{2}$ 时， $v_{x0} = 0$ ， $v_{y0} = v_0$ ， $v_x = 0$ ， $v_y = v_0 - gt$ ，是以竖直向上的初速度 v_0 为速度的匀速直线运动和自由落体运动的合运动，这种运动叫做竖直上抛运动。

当 $\alpha = -\frac{\pi}{2}$ 时， $v_{x0} = 0$ ， $v_{y0} = -v_0$ ， $v_x = 0$ ， $v_y = -v_0 - gt$ ，是以竖直向下的初速度 v_0 为速度的匀速直线运动和自由落体运动的合运动，这种运动叫做竖直下抛运动。

当 $\alpha = 0$ 时， $v_{x0} = v_0$ ， $v_{y0} = 0$ ， $v_x = v_0$ ， $v_y = -gt$ ，是以水平方向的初速度 v_0 为速度的匀速直线运动和自由落体运动的合运动，这种运动叫做平抛运动。

当 $v_0 = 0$ 时， $v_x = 0$ ， $v_y = -gt$ ，是自由落体运动。

向心加速度 (centripetal acceleration)

圆周运动的法向加速度 a_n 是指向圆心的, 所以也叫做向心加速度。向心加速度只起改变速度方向的作用。改变速度大小的是切向加速度 a_t 。

匀速圆周运动只有向心加速度, 它的大小为

$$a_n = \frac{v^2}{r} = \omega^2 r$$

式中的 r 为圆周半径, v 和 ω 分别为运动质点的线速度和角速度的大小。下面是这个公式的两种不同的推导方法。

(1) 设在 t 时刻, 运动质点位于圆周上的 A 点, 其速度为 v ; 经过 Δt 时间后, 质点到达圆周上的 B 点, 速度的增量为 Δv (图 1-2-6); Δt 时间内质点的角位移为 $\Delta\phi$ 。 Δt 很小时, $\Delta\phi$ 也很小, 有

$$\Delta v = v\Delta\phi, \frac{\Delta v}{\Delta t} = v \frac{\Delta\phi}{\Delta t}$$

当 $\Delta t \rightarrow 0$ 时,

$$\lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{\Delta v}{\Delta t} = v \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{\Delta\phi}{\Delta t},$$

即 $a_n = v \frac{d\phi}{dt}$,

由于 $\frac{d\phi}{dt} = \frac{v}{r}$, $v = \omega r$, 上式可改写为

$$a_n = \frac{v^2}{r} = \omega^2 r$$

(2) 做匀速圆周运动的质点, 经过一微小时间 Δt 后, 由 A 点到达 B 点。在这段时间内发生的位移 \vec{AB} 可看做沿 A 点切线方向的位移 \vec{AC} 与指向圆心的位移 \vec{CB} 之和 (图 1-2-7)。由此可得

$$AC^2 = CB \cdot CD。$$

由于

$$AC = v \cdot \Delta t,$$

$$CB = \frac{1}{2} a_n \Delta t^2,$$

$$CD = BD = 2r。$$

故有

$$v^2 \Delta t^2 = \frac{1}{2} a_n \Delta t^2 \cdot 2r。$$

由此得

$$a_n = \frac{v^2}{r}。$$

绝对运动、相对运动和牵连运动 (absolute motion、relative motion and convected motion)

当一个质点相对于某个参考系运动，而这个参考系又相对静止参考系运动时，质点对于静止参考系的运动叫绝对运动，质点相对运动参考系的运动叫相对运动，任一瞬间，质点在运动参考系中所占的位置对于静止参考系的运动称为该质点的牵连运动。在运动参考系只做平动时，牵连运动就是运动参考系对于静止参考系的运动。质点绝对运动的速度和加速度分别叫绝对速度和绝对加速度，用 v_r 和 a_r 表示；质点相对运动的速度和加速度分别叫相对速度和相对加速度，用 v_f 和 a_f 表示：

在运动参考系只做平动的情况下，有如下的关系：

$$v_a = v_r + v_f \quad (1)$$

$$a_a = a_r + a_f \quad (2)$$

运动参考系只做转动时，绝对速度与相对速度之间有如下的关系：

$$v_a = v_r + \omega \times r'$$

式中 ω 为运动参考系转动的角速度， r' 为质点相对于运动参考系原点的位矢。其中的 $\omega \times r'$ 一项是质点的牵连速度，因为它只与质点在运动参考系的位置和运动参考系的运动有关，因此(1)式仍然成立。(1)式称为速度合成定理，它告诉我们：绝对速度等于相对速度与牵连速度的矢量和。

在运动参考系只做转动的情况下绝对加速度 a_a 与相对加速度 a_r 之间有如下关系：

$$a_a = a_r + \frac{d\omega}{dt} \times r + \omega \times (\omega \times r) + 2(\omega \times v_r)$$

式中 $\frac{d\omega}{dt} \times r$ 为质点在运动参考系中的切向加速度， $\omega \times (\omega \times r)$ 为

质点在运动参考系中的离心加速度。这两项之和

$$\frac{d\omega}{dt} \times r + \omega \times (\omega \times r)$$

只与运动参考系的运动和质点在运动参考系中的位置有关，是质点的牵连加速度，即 a_f 。另外， $2(\omega \times v_r)$ 是由于质点的相对运动而产生的加速度，叫科里奥利加速度，用 a_c 表示，则有

$$a_a = a_r + a_f + a_c \quad (3)$$

(3)式称为加速度合成定理，它告诉我们：绝对加速度等于相对加速度、牵连加速度和科里奥利加速度的矢量和。

运动参考系既做平动又做转动时，(3)式仍然适用，不过 a_f 项中含有运动参考系的平动加速度。当运动参考系只做平动时， $\omega = 0$ ， $a_c = 0$ ，(3)式即简化为(2)式，即绝对加速度等于相对加速度与牵连加速度的矢量和。

主要参考资料

1. 郭士。理论力学，上册。第1版。北京：人民教育出版社，1982。
2. M.亚沃尔斯基，A.A.杰特拉夫。物理学手册，第1版。北京：科学出版社，1986。
3. 中国大百科全书出版社编辑部。中国大百科全书·物理学。第1版。北京：中国大百科全书出版社，1987。

4. 赵景员,王淑贤。力学。第1版。北京:人民教育出版社,1979。
5. 蔡伯濂。力学。第1版。长沙:湖南教育出版社,1985。
6. 缪钟英,罗启蕙。力学一问题讨论。第1版。北京:人民教育出版社,1989。
7. 刘克哲,任宝祥。物理学概念:分析·例题·常见错误·第1版。济南:山东科学技术出版社,1984。
8. 梁绍荣等。普通物理学,第一分册,力学。第1版。北京:高等教育出版社,1987。
9. D.哈里德,R.瑞斯尼克。物理学基础,上册。第1版。北京:人民教育出版社,1979。
10. 中山大学数学力学系力学教研室。力学教程。第1版。北京:人民教育出版社,1978。

三、运动定律

牛顿第一定律(Newton first law)

牛顿在他所著的《自然哲学的数学原理》一书中对这一定律的陈述是：“任何物体，都保持其静止状态，或匀速直线运动状态，除非施加外力迫使其改变这种状态。”这里的物体指的是质点或做平动的刚体。这个定律说明维持物体原有的运动状态并不需要力，要改变物体的运动状态才需要力的作用，或者说，力是改变物体运动状态的原因。这个定律从定性上说明了什么是力。

任何物体都具有的保持其原有运动状态的性质称为惯性。所以牛顿第一运动定律也称为惯性定律。当作用在物体上的合外力为零时，惯性表现为物体保持其原有的运动状态不变，即保持静止或匀速直线运动状态，当作用在物体上的合外力不为零时，惯性表现为外力改变物体运动状态的难易程度。在同样的外力作用下，加速度较小的物体惯性大，加速度较大的物体惯性小。

有人认为，第一定律只不过是第二定律的当然结果，不是一个独立的定律。应该注意，只是由于我们选用了某种特定的参考系，即惯性参考系，第二定律才能成立，才可以把第一定律看作第二定律的必然结果；而惯性参考系是要用牛顿第一定律来定义的。所以有的书籍把牛顿第一定律表述为：存在着一种惯性参考系，相对于这种参考系，不受其他物体作用的物体，运动速度是恒定的。

惯性定律不是由实验事实中直接归纳出来的，而是经过理想实验的推理方法得出的。它的结论是否正确，要看应用这一定律推得的结果能否经得起实验的检验。

惯性参考系(inertial reference frame)

惯性定律成立的参考系称为惯性参考系，简称惯性系。相对于每一个惯性系做匀速直线运动的参考系都是惯性系；相对于某一惯性系做加速运动的参考系，惯性定律都不成立，称为非惯性系。所有的惯性系都是等效的，即在不同的惯性系中，描述自然现象的定律具有相同的形式。在一个封闭系统中，不可能通过力学实验来判断惯性参考系是静止的还是在做匀速直线运动。在经典力学中，联系两个任意惯性系之间的坐标变换是伽利略变换；在狭义相对论中任意两个惯性系之间的坐标变换是洛伦兹变换。

由于引力是不可屏蔽的，不可能有一个完全不受外力作用的环境，因此，绝对的惯性系并不存在，只存在着不同程度上近似的惯性系。一个给定的参考系是否可以看作惯性系，取决于这个参考系的微小加速度效应是否可以被忽略。在一般情况下，分析地面上的物体相对于地球的运动时，可以把地球当作惯性参考系应用牛顿第二定律而不致发生显著偏差。但是由于地球的自转，使地球参考系中的点有微小的加速度。例如，地球赤道上的质点，有一个指向地心的约 0.034m/s^2 的加速度，因此，对于有些问题，特别是天文学问题，以地球作为惯性系得出的结论就不正确了。在研究行星、彗星等天体的运动时，可选择以太阳中心为坐标原点，坐标轴指向其他恒星的日心—恒星参考系。这是更精确的惯性系，在这个参考系中，地球在绕太阳运动轨道上的加速度约为 $6 \times 10^{-3}\text{m/s}^2$ 。

公认的自然定律在惯性系中成立，而在非惯性系中不成立，这是经典力学的一个缺陷。广义相对论解决了这个问题，使人们对惯性系获得了更深刻的认识。作为广义相对论基础的等效原理告诉我们：参考系的加速运动等效于某种引力场。在引力场中自由下落的实验室内，一切力学现象跟在一个没有引力场的惯性系中是一样的。这就是说，在局部范围内，我们可以实现把引力的动力学效应从一切现象中消除掉的参考系。这里所说的局部范围，就是引力场可以看作均匀场的范围。这种消除了引力效应的参考系，就称为局部惯性系。在这种参考系中，一切不受外力（引力以外的其他力）作用的质点，都做匀速直线运动，它符合惯性系的定义。由于引力场的不均匀性，牛顿体系中大范围的、甚至全空间统一的惯性系是不存在的，惯性系只存在于有限范围之内。

牛顿第二定律(Newton second law)

牛顿在他所著的《自然哲学的数学原理》一书中对这一定律的陈述是：“运动的变化永远跟所加的外力成正比，而且是沿着外力作用的直线方向发生的。”用现代的术语，可陈述为：物体动量对时间的变化率跟物体所受的外力成正比，并和力的方向相同。其表达式为

$$F = k \frac{d(mv)}{dt} .$$

选择适当的力、质量、速度和时间的单位，使比例系数 $k=1$ ，牛顿第二定律可表示为

$$F = \frac{d(mv)}{dt} . \quad (1)$$

在经典力学中物体的质量 m 为一常量，上式可写作

$$F = ma , \quad (2)$$

即物体的加速度 a 同作用于该物体上的力 F 成正比，同物体的质量 m 成反比，力和加速度的方向相同。这就是一般中等程度的物理书籍中对牛顿第二定律的陈述。这里所说的物体，指的是质点或只做平动的刚体。

根据牛顿第二定律，对于任一给定的物体，作用在它上面的力与物体获得的加速度成正比： $f \propto a$ 。由此可得力的定量规定。设两个不同的力 f_1

和 f_2 作用在给定的标准物体上产生的加速度分别为 a_1 和 a_2 ，可以规定 $\frac{f_2}{f_1} = \frac{a_2}{a_1}$ 。如果选择 f_1 为力的单位，则 $f_2 = \frac{a_2}{a_1} f_1$ 。

根据牛顿第二定律，同一个力作用在不同物体时，产生的加速度大小与物体的质量成反比： $a \propto \frac{1}{m}$ 。由此可得质量的定量规定。设质量为 m_1 与 m_2 的物体，在一定的外力 f 作用下产生的加速度分别为 a_1 和 a_2 ，可以规定 $\frac{m_1}{m_2} = \frac{a_2}{a_1}$ ，如果选择 m_1 为质量单位，则 $m_2 = \frac{a_1}{a_2} m_1$ 。

牛顿第二定律是大量实验观察的总结，它不能由理论推导得出，是经典动力学的基本定律。

牛顿第二定律只在惯性参考系中且物体的运动速度远小于光速时才是适用的。当物体的速度接近光速时，牛顿第二定律不再成立，物体的运动规律由狭义相对论决定。对于微观粒子的运动，它的规律一般要用量子力学来描述。只有在粒子所处的势场变化缓慢而且平稳的情况下，牛顿第二定律才可以应用。

质量 (mass)

物理学的七个基本量之一。最初，牛顿把质量定义为物质的量，同物质的密度和体积成正比。直到 19 世纪下半叶，以马赫为代表的一批物理学家对牛顿力学的基础进行了认真的考查，对牛顿的质量定义提出了非议，在实验事实的基础上建立了惯性质量和引力质量的概念。

在牛顿运动定律中，质量是物体惯性大小的量度，叫做惯性质量。在万有引力定律中，质量反映物体受到的和产生的引力的大小，与惯性无关，叫做引力质量。惯性质量和引力质量反映的是物体的两种不同属性，它们之间有什么关系呢？牛顿在《自然哲学的数学原理》一书中，对运动定律和万有引力定律都用同一个“质量”的概念，隐含着惯性质量等于引力质量，牛顿的这种作法是否正确呢？牛顿虽然没有提出惯性质量和引力质量的概念，但他是意识到这个问题的，并用单摆实验来求两者的关系。如图 1-3-1 所示，设单摆摆长为 l ，摆球的惯性质量为 m_i ，引力质量为 m_G ，在摆角 θ 很小时，单摆的运动方程为：

$$m_i a = -m_G g \frac{x}{l}。$$

由此求出摆球作简谐振动的周期为：

$$T = 2\pi \sqrt{\frac{l}{g}} \sqrt{\frac{m_i}{m_G}}。$$

采用不同材料做成不同质量的摆球，但保证摆长相同，实验结果是周期全都相同。这就证明，对所有摆球， m_i 与 m_G 的比值是一个普适常量。

上述实验的精度不高，只能准确到 10^{-3} 。1890 年匈牙利物理学家厄缶 (R. Eötvös, 1848 ~ 1919) 提出一个精确的实验，以 10^{-9} 的精度证明了上述结果。1964 年，美国的 R. H. 狄克改进了厄缶实验，图 1-3-2 是狄克实验的示意图：在灵敏扭秤的横梁两端各放一个引力质量相同材料不同的球 A 和 B，横梁只能绕竖直轴转动。A 和 B 既受地球吸引，也受太阳吸引。地球的引力在竖直方向上，不能使扭秤转动。如果引力质量与惯性质量之比不是常量，太阳的引力将使扭秤转动。设初始时横梁与阳光垂直，则有：

$$m_{iA} a_A = G \frac{M_{GS} m_{GA}}{r^2}$$

和

$$m_{iB} a_B = G \frac{M_{GS} m_{GB}}{r^2}，$$

因此，

$$a_A = \frac{GM_{GS}}{r^2} \left(\frac{m_{GA}}{m_{iA}} \right)，$$
$$a_B = \frac{GM_{GS}}{r^2} \left(\frac{m_{GB}}{m_{iB}} \right)。$$

式中的 G 是万有引力常量， M_{GS} 是太阳的引力质量， r 是太阳与地球的距离。设 a_0 为地球相对于太阳的加速度，则对地球上的观察者来说，A、B 两球相对于他的加速度将是

$$a_A = a_A - a_0，$$

$$a_B = a_B - a_0。$$

如果 m_G 与 m_i 的比值是个普适量，则 $a_A = a_B$ ，地球上的观察者将看不到横梁的任何摆动。如果 m_G 与 m_i 的比值随材料而改变，则观察者将因地球的自转而看到横梁以 24 小时为周期的摆动。狄克以 10^{-11} 的实验精度证明了 m_G 与 m_i 的比值是个普适量。后来，到 70 年代初，布拉金斯基等人又把实验的精度提高到 0.9×10^{-12} 。

既然 m_G 与 m_i 的比值是个普适量，只要选取适当单位，就可以使二者相等，即 $m_G = m_i$ 。这样，我们就可以不再区分它们，而认为质量既表示引力质量又表示惯性质量。

爱因斯坦深刻地看出了这个简单结论的重要意义，在引力质量与惯性质量相等的基础上提出了“等效原理”，这一原理成为爱因斯坦建立广义相对论的基本原理之一。

密度 (density)

分布均匀的物质，它的密度定义为由该物质组成的物体的质量与体积之比，或单位体积内所含该物质的质量。用 m 和 V 分别表示物体的质量和体积，用 ρ 表示组成该物体的物质的密度，则有 $\rho = \frac{m}{V}$ 。密度的单位是千克每立方米，符号是 kg/m^3 。

分布不均匀的物质，可用质量与体积之比表示物体的平均密度：

$$\rho_{\text{平均}} = \frac{m}{V}。$$

物质的密度随外界的压强和温度的变化而变化，一般说来，压强增大物质密度也增大，温度升高物质密度减小，水是一个例外，它在 4℃ 密度最大。

在给定条件下某一物质的密度 ρ_1 与另一参考物质的密度 ρ_2 的比 $d = \frac{\rho_1}{\rho_2}$ ，叫做该物质的相对密度。相对密度是一个无量纲的量。密度的倒数称为比体积。

物质分布不均匀的物体，物体中各点的密度不同。某一点的密度 ρ 定义为含有该点的体积元 ΔV 的质量 Δm 与 ΔV 之比，当 ΔV 收缩到一点时的极限值：

$$\rho = \lim_{\Delta V \rightarrow 0} \frac{\Delta m}{\Delta V} = \frac{dm}{dV}。$$

整个物体的质量可表示为

$$m = \int_0^V \rho dV。$$

如果质量分布在曲面或曲线上，则可类似地给出相应的面密度 σ 和线密度 λ 的定义，及其与整体质量的关系：

$$\begin{aligned} \sigma &= \frac{m}{S}, & \sigma_{\text{平均}} &= \frac{m}{S}, \\ \sigma &= \lim_{\Delta S \rightarrow 0} \frac{\Delta m}{\Delta S} = \frac{dm}{dS}; & m &= \int_0^S \sigma dS. \\ \lambda &= \frac{m}{l}, & \lambda_{\text{平均}} &= \frac{m}{l}, \\ \lambda &= \lim_{\Delta l \rightarrow 0} \frac{\Delta m}{\Delta l} = \frac{dm}{dl}; & m &= \int_0^l \lambda dl. \end{aligned}$$

式中的 S 表示曲面上面元的面积， l 表示曲线上线元的长度。

比重 (specific gravity)

物体重量跟它的体积之比称为比重。这里的重量指的是物体所受的重力。也有的把比重定义为物体的重量跟与物体同体积的水的重量之比，这时比重是一个没有量纲（量纲一）的量，它跟把水取为参考物质时相对密度的概念有相同的功用。

牛顿第三定律 (Newton third law)

牛顿在他所著的《自然哲学的数学原理》一书中对这一定律的陈述是：“每个作用总有一个大小相等而方向相反的反作用，或者说，两个物体的相互作用总是大小相等而方向相反。”这里的“作用”和“反作用”指的是两个物体间相互作用的力，即一个物体对另一个物体施加作用力，受力物体也必然对施力物体施加反作用力。因此第三定律也可以称为作用力和反作用力定律。现在，这个定律一般表述为：两个物体间发生相互作用时，作用力与反作用力大小相等，方向相反。用数学式子，牛顿第三定律可表示为：

$$F_{12} = -F_{21}$$

式中 F_{12} 表示第一个物体对第二个物体的作用力， F_{21} 表示第二个物体对第一个物体的作用力。

第三定律跟第一、第二定律的不同点在于：前两个定律是描述单个质点运动规律的，第三定律则不是描述质点运动的，而是有关两个（或两个以上）质点或物体之间相互作用力的规律。第三定律是研究质点系力学的基础。

牛顿第三定律并不是对于一切相互作用都适用的。例如，图 1 - 3 - 3 所示的运动电荷 A，通过它所激发的磁场作用于运动电荷 B 的力 F_{AB} 并不在 AB 的连线上，而这时运动电荷 B 激发的磁场对电荷 A 却没有作用力。第三定律在这里失效了。以电磁场为媒介传递的近距离作用，总存在着时间的推迟。对于这种相互作用，牛顿第三定律显然是不适用的。实际上只有沿着二物连线方向的作用（称为有心力），并可不计这种作用的传递时间（即可看作直接的超距作用）时，牛顿第三定律才是有效的。服从第三定律的力称为牛顿力。

惯性力 (inertial force)

由于非惯性系相对于惯性系运动的加速度而引起的作用在非惯性系物体上的力，称为惯性力。

牛顿定律只适用于惯性系。要想在非惯性系中用牛顿第二定律的形式来研究质点的运动，必须引入惯性力 F_i ，使

$$ma_r = F + F_i$$

式中的 a_r 是质量为 m 的质点在非惯性系中的加速度，即相对加速度， F 为该质点受到的其他物体作用的合力。这就是在非惯性系中质点的运动方程。

惯性力不满足牛顿第三定律，它没有施力物体，也没有相应的反作用力，因而有人称之为虚拟力或赝力。但是，在非惯性系中，惯性力确实起着与真实力相同的作用，而且是可以观测到和进行测量的。

惯性力的方向、大小及其具体表达式，与非惯性系对惯性系的运动以及质点在非惯性系内的运动情况有关。

在平动非惯性系内，质点所受的惯性力为

$$F_i = -ma_0,$$

式中 a_0 为非惯性系相对于惯性系的加速度。

在匀速转动的非惯性系内的静止质点 M 受到的惯性力称为惯性离心力，它的方向与转轴垂直且背离转轴，大小为 $F_i = m \omega^2 r$ ，其中 ω 为非惯性系转动的角速度， r 为质点到转轴的垂直距离。如果用 r 表示质点在转动参考系中的矢径（如图 1-3-4，原点 O 在转轴上），惯性离心力可写成矢量式

在加速转动的非惯性系内的静止质点，除惯性离心力外还有切向惯性力，它的方向与质点在转动参考系中的切向加速度 a_t 方向相反，大小为

ma_t 。由于 $a_t = \dot{\omega} \times r$ ，作用于质点的惯性力为

$$F_i = -m \dot{\omega} \times r' - m\omega \times (\omega \times r').$$

当质点以速度 v_r 相对于转动非惯性系运动时，质点除惯性离心力和切向惯性力外，还受到一个科里奥利惯性力 F_c （简称科里奥利力）的作用： $F_c = -2m \omega \times v_r$ 。作用在质点上的惯性力为：

$$F_i = -m \dot{\omega} \times r' - m\omega \times (\omega \times r') - 2m\omega \times v_r.$$

在既做平动又做转动的参考系中，运动质点所受的惯性力为：

$$F_i = -ma_0 - m\omega \times r' - m\omega \times (\omega \times r') - 2m\omega \times v_r.$$

惯性力的问题可用加速度合成定理来讨论。这个定理可写作

$$a = a_r + a_f + a_c.$$

其中：

a 为绝对加速度，即运动质点相对于固定惯性系的加速度；

a_r 为相对加速度，即质点在非惯性系中的加速度；

a_f 为牵连加速度，它只与非惯性系的运动和质点在非惯性系中的位置有

关：

$$a_f = a_0 + \omega \times r + \omega \times (\omega \times r');$$

a_c 为科里奥利加速度，它反映了非惯性系的转动引起的质点相对速度的变化：

$$a_c = 2(\omega \times v_r)。$$

由上述定理，质点在非惯性系中的运动方程可写作

$$ma_r = ma + (-ma_f) + (-ma_c)$$

或

$$ma_r = F + F_f + F_c，$$

其中 $F = m\vec{a}$ 为质点所受的真实力， $F_f = -ma_f$ 为牵连力， $F_c = -ma_c$ 为科里奥利力。后二者都是惯性力： $F_i = F_f + F_c$ 。

地球可看作是一个匀速转动的参考系， $\dot{\omega} = 0$ 。地面上的静止物体， $ma_r = F - m\omega \times (\omega \times r')$ 。式中的 ma_r 为物体所受的重力， F 为地球对物体的引力， $-m\omega \times (\omega \times r')$ 为物体所受的惯性离心力。因此地球表面上的物体所受的重力常小于它所受的地球引力，只有在两极， $\omega \times r' = 0$ ， $ma_r = F$ ，重力才与地球引力相等。除赤道和两极外，重力的方向也不与地球引力的方向一致。地面上的运动物体，由于有相对速度 v_r 除惯性离心力外，还要受到科里奥利力的作用。自由落体落点总要偏东。在北半球，南北向的铁路，右侧路轨磨损得多些，南北向的河流也对右岸冲刷得厉害些；在南半球则相反。两极的冷气流，在向赤道推进时移动方向偏西，在北半球形成东北贸易风，在南半球形成东南贸易风。低气压的中心，在北半球形成反时针方向的旋转风，在南半球则形成顺时针方向的旋转风。远程火箭的轨道，当火箭向上运动时会偏西，向东飞行时会偏上，向西飞行时会偏下。这些都是科里奥利力作用的结果。

失重和超重(weightlessness and overweight)

物体所受的重力可用弹簧秤来测量。把物体挂在对地面处于相对静止状态的弹簧秤下方，弹簧秤的示数就等于物体所受的重力。如果在一个对地面做相对运动的参考系中，把物体挂在弹簧秤的下方，随着参考系运动状态的不同，弹簧秤的示数可能不等于物体所受的重力。这时弹簧秤示数表示的力称为物体的视重。当视重为零时，称为物体处于失重状态；当视重大于物体所受的重力时，称为物体处于超重状态。视重不为零但小于物体所受重力时，物体处于部分失重状态。

失重和超重这两种状态都是由于物体所在的参考系相对于地面做加速运动造成的。自由降落的电梯、在轨道上运行的人造卫星、沿抛物线下落的飞行器，它们相对于地面的加速度都等于重力加速度 g 。在以这些物体为参考系的非惯性系中，物体都受到一个跟重力大小相等而方向相反的惯性力，它抵消了重力的作用，使物体的视重为零，物体即处于失重状态。加速上升的火箭和飞机、正在返回地面的卫星等，它们相对于地面的加速度都跟重力的方向相反，在这些参考系中，物体都受到一个跟重力方向相同的惯性力，二者之和使物体的视重大于物体的重力，物体即处于超重状态。

人在失重条件下，心跳和呼吸减慢，体液会在体内重新分布，大部分移到上身，身高增长，体重减轻，腿部动静脉变得脆弱，出现贫血。重返地面时会感到全身乏力和平衡感丧失。但这些反应会很快消失，一周左右即可复原。比较严重的问题是在失重条件下，骨中所含的钙质会逐渐减少。因此，对于未来的长期航天飞行，须设计旋转的航天器，用惯性离心力来模拟重力。

宇航员在飞船起飞和返回地面时处于超重状态，特别是在升空时，超重可达重力的 9 倍。超重使人不适，起初会感到头晕、呕吐，超重达到 3 倍重力时即感呼吸困难，超重达到 4 倍重力时，颈椎已不能支持头颅，有折断的危险。所以升空时宇航员须采取横卧姿式，以增强对超重的耐受能力。

离心机 (centrifuge)

也叫离心分离机,是利用转动产生的惯性离心力将悬浮液中的液体与固体颗粒分开,或将乳浊液中两种密度不同又互不相容的液体分开的机械。

分离悬浮液时,由于悬浮颗粒的密度比悬浮液大,它在转动的离心机中所受的净力等于作用在颗粒上的惯性离心力与液体对颗粒的阻力之差。所以悬浮颗粒不断向周边运动,几乎可以和悬浮介质完全分离。依据这一原理,也可以分离两类大小不同的颗粒。从乳浊液中分离不同的液体,也是利用密度不同的各种成分在离心力作用下沉降分层的原理实现的。由于惯性离心力的大小与离心机转速 n 的平方成正比 ($F=4\pi^2 mn^2 R$), 转速越大,分离效果越好。目前实验上达到的离心加速度已超过 10^9g 。

工业上常用的离心机,主要部分是一个可转动的圆筒,叫转鼓。把物料放在鼓内,使鼓高速转动,产生的惯性离心力便可把不同密度的物料分开。转鼓有两种:一种壁上有孔,衬有滤布,操作时液体穿过小孔,固体则被截留在转鼓内壁,这种离心机叫过滤离心机。过滤离心机也可用来分离成件湿固体中的液体,例如甩干湿衣服。另一种转鼓壁上无孔,操作时固体颗粒或密度大的液体被甩出附于内壁,密度小的液体则由中央导管连续排出。这种离心机叫沉降离心机。

沉降离心机的转鼓还有管式、碟式等不同的形式。例如,奶油分离机的转鼓就是碟式的。在供奶槽下的转轴上装一套圆锥形转碟,从顶部流下的牛奶分布在各个转碟上,以 $6000r/min \sim 8000r/min$ 的转速,使较轻的乳脂从牛奶中分离出来,集中在中央,从靠进碟心的出口流出。高效分离机的脱脂牛奶,残留脂肪量低于 0.01% 。

离心机大量应用于化工、石油、食品、制药、选矿、煤炭、水处理和船舶等部门。

主要参考资料

1. F.W.Sears. 大学物理学, 第一册。第 1 版。北京: 人民教育出版社, 1979。
2. K.W.Ford. 经典和近代物理学, 第二册。第 1 版。北京: 人民教育出版社, 1982。
3. 中山大学数学力学系力学教研室。力学教程。第 1 版。北京: 人民教育出版社, 1978。
4. 周衍柏。理论力学教程。第 1 版。北京: 人民教育出版社, 1979。
5. . . . 涅符兹格利亚多夫。理论力学, 上册。第 1 版。北京: 人民教育出版社, 1964。
6. 刘辽。广义相对论。第 1 版。北京: 高等教育出版社, 1987。
7. R.P. 费曼等。费曼物理学讲义, 第 3 卷。第 1 版。上海: 上海科学技术出版社, 1989。
8. 威·弗·马吉编。物理学原著选读。第 1 版。北京: 商务印书馆, 1986。
9. . . . 基科英, A.K. 基科英。苏联中学课本(八年级)物理。第 1 版。北京: 文化教育出版社, 1980。
10. 缪钟英, 罗启蕙。力学——问题讨论。第 1 版。北京: 人民教育出版社, 1989。
11. 中国大百科全书出版社编辑部编。中国大百科全书。物理学。第

1 版。北京：中国大百科全书出版社，1987。

12. 科学出版社名词室合编。物理学词典，上册。第 1 版。北京：科学出版社，1988。

13. . . 亚沃尔斯基，A.A.杰特拉夫。物理学手册。第 1 版。北京：科学出版社，1986。

14. 陈鹏万主编。大学物理手册。第 1 版。济南：山东科学技术出版社，1985。

15. 中国大百科全书出版社编辑部编。中国大百科全书。机械工程。第 1 版。北京：中国大百科全书出版社，1987。

四、万有引力定律

托勒密体系(Ptolemaic system)

公元 2 世纪，托勒密 (Claudius Ptolemaeus, 约 90 ~ 168) 在其巨著《天文学大成》中，总结前人成就，提出了地心体系宇宙图景。其主要内容可概括为：

1. 地球静止不动地位于整个宇宙中心，距地球由近及远的天体是：月球、水星、金星、太阳、火星、木星、土星、恒星；在恒星之外，还有一层“最高天”。

2. 五大行星各自都在一个较小的“本轮”上做匀速圆周运动，但本轮的中心又在一个庞大的“均轮”上绕地球做匀速圆周运动。太阳和月球没有本轮，直接在均轮上运动，地球又稍稍偏离所有均轮中心。通过选择各个本轮、均轮半径的比、它们转动的不同速度比以及两种轮子轨道平面的不同倾角，就可以解释行星视运动中的“顺行”、“逆行”、“合”、“留”等现象。

3. 水星和金星的本轮中心始终位于日地的连线上，本轮中心在均轮上一年转一周。所以水星和金星只能出现在黄昏后和黎明前。火星、木星、土星这三颗行星与本轮中心的连线，始终与日地连线平行，这三颗行星每年绕其本轮中心转一周。

4. 日、月、行星除了做上述复杂的轨道运动外，还随恒星一起每天做东升西落的周日运动。

托勒密的地心体系，选择了固连于地球的参考系，未能反映出行星运动的本质；但它仍对古希腊科学的发展做出了重大贡献。在地心体系中，天体按固有规律运动，否认了上帝的自由意志，因而在很长一段时期为教会所不容；直到 1215 年教会还不准在大学里讲授托勒密学说。格列高利 9 世 (Gregory, IX, 1227 ~ 1241 在位) 当了教皇以后，局面才发生了变化。格列高利精心地改造并利用了托勒密学说，宣传地球居于宇宙中心绝非偶然，乃是上帝把他按照自己的形象创造的人类放在宇宙的中心去管理天地万物。这就使原来具有进步意义的学说变成了神学的理论支柱，从而桎梏了科学的发展。

哥白尼体系 (Copernican system)

哥白尼 (Nicolaus Copernicus, 1473 ~ 1543) 在 1543 年出版的《天体运行论》中提出的日心体系宇宙图景, 基本论点是:

1. 宇宙的中心不是地球而是太阳, 所有行星都在绕太阳做匀速圆周运动。由太阳向外各行星的次序是: 水星、金星、地球、火星、木星、土星。

2. 地球是绕太阳旋转的普通行星, 月球则是绕地球旋转的卫星, 它在绕地球做匀速圆周运动的同时还跟着地球一起绕太阳运动。

3. 天穹实际上并不转动, 只是因为地球每天自西向东自转一周, 才造成了天体每天东升西落的视现象。

4. 与日地的距离相比, 恒星离地球都十分遥远, 比日地间的距离大得多。

以后的观测事实, 不断地证明了哥白尼日心体系的优越。但是, 限于当时的科学发展水平, 哥白尼的学说也有缺点。其一是把太阳当作宇宙的中心, 实际上太阳只是太阳系的中心天体, 并不是宇宙的中心。其二是沿用了行星在圆形轨道上作匀速运动的旧观念, 实际上行星轨道是椭圆的, 行星的运动也不是匀速的。

开普勒定律(Kepler law)

开普勒(Johannes Kepler 1571 ~ 1630)于1609年到1619年提出的有关行星运动规律的三条定律,其内容如下:

1. 行星运动第一定律(椭圆定律):所有行星绕太阳的运动轨道都是椭圆,太阳位于椭圆的一个焦点S上(图1-4-1)。用极坐标方程表示行星绕太阳的轨道可写成

用极坐标方程表示行星绕太阳的轨道可写成

$$r = \frac{p}{1 + e \cos \theta}$$

式中 $p = a(1 - e^2)$ 称为半通径, a 为半长径, e 为偏心率。

2. 行星运动第二定律(面积定律):行星的向径 r (从日心到行星中心的连线)在相等的时间内扫过的面积相等。

这可以表示为

$$r^2 \dot{\theta} = \text{常量}。$$

这个式子是行星运动角动量守恒的表达式。由此可知,行星在远日点时速度最小,在近日点时速度最大。

3. 行星运动第三定律(调和定律):行星绕太阳运动的公转周期(T)的平方与它们的轨道半长径(a)的立方成正比。即

$$\frac{a_1^3}{T_1^2} = \frac{a_2^3}{T_2^2} = \frac{a_3^3}{T_3^2} = \dots = \text{常量}。$$

今天看来,这三条定律都是万有引力定律的必然结果。但开普勒却是经过艰苦的计算得到这三条定律的。这三条定律为后来发现万有引力定律奠定了基础。

开普勒定律可有直接的应用。在第三定律中,如果 a 的单位用天文单位, T 的单位用恒星年,则有

$$\frac{a_1^3}{T_1^2} = \frac{a_2^3}{T_2^2} = \dots = 1 \frac{\text{天文单位}^3}{\text{恒星年}^2}。$$

用天文方法测出行星的周期,就可求得行星与太阳的距离。

第三定律还可用于测天体质量。对行星来说,定律中的常量与太阳质量 M 有关:

$$\frac{a^3}{T^2} = \frac{G}{4\pi^2} M$$

式中的 G 为引力常量。因此,只要测出行星轨道的半长径 a 和公转周期 T ,就可以求出太阳的质量。这个定律也可用于行星和卫星之间,即求得卫星轨道的半长径和绕行星公转的周期,即可求出行星的质量 $M_{\text{行}}$ 。

在发现了万有引力定律以后,经过进一步的研究,人们认识到,上面讲的开普勒第三定律是一个近似的定律,其准确的形式应该是

$$\frac{a^3}{T^2} = \frac{G}{4\pi^2} (M_1 + M_2)$$

式中的 M_1 和 M_2 是两个互相绕转的天体质量。取 $M_1 = M_{\text{日}}$, $M_2 = M_{\text{行}}$,即可用于太阳-行星系统;取 $M_1 = M_{\text{行}}$, $M_2 = m_{\text{卫}}$,即适用于行星-卫星系统。对双星系统, M_1 、 M_2 就是两颗星的质量。

对于太阳系所有行星，都有 $M \gg M_{\text{行}}$ ， $M_{\text{行}}$ 可以忽略不计。下表验证了开普勒第三定律。表中用日常生活中的回归年代替了恒星年。1 回归年 = 365.24219 日，1 恒星年 = 365.25636 日。两者相差甚微。

开普勒第三定律的验证

行星	a/天文单位	T/回归年	a^3	T^2
水星	0.3871	0.24084	0.05801	0.05800
金星	0.7233	0.61519	0.37840	0.37846
地球	1.0000	1.00000	1.00000	1.00000
火星	1.5237	1.8808	3.5375	3.5374
木星	5.2028	11.862	140.84	140.71
土星	9.5388	29.457	867.92	867.71

万有引力定律(law of universal gravitation)

任意两个质点相互间都有引力作用。这种相互作用的引力称为万有引力。两个质量分别为 m_1 和 m_2 、距离为 r 的质点间的引力 F ，与两个质点质量的乘积成正比，与两质点间的距离的平方成反比，即

$$F = -G \frac{m_1 m_2}{r^2}。$$

这就是万有引力定律。式中的 $G=6.67 \times 10^{-11} \text{N} \cdot \text{m}^2/\text{kg}^2$ ，称为引力常量，式中的负号表示质点间的作用力为引力。

由开普勒关于行星运动的三条定律可推得太阳对行星间的引力 F 与距离 r 的平方反比关系：

$$F = -\mu \frac{m}{r^2}。$$

式中的 m 为行星的质量， μ 为只与太阳质量有关的常量，称为太阳的高斯常量。

考虑某一行星，它对太阳的引力 F' 也具有同样形式：

$$F' = -\lambda \frac{M}{r^2}。$$

式中 M 为太阳的质量， λ 为该行星的高斯常量。根据牛顿第三定律， $|F| = |F'|$ ，即

$$\frac{\mu m}{r^2} = \frac{\lambda M}{r^2}，故有$$
$$\frac{\mu}{M} = \frac{\lambda}{m}。$$

这一关系对于任一行星都成立。也就是说，不论恒星或行星，它们各自的高斯常量与其自身的质量之比都有相同的量值，即为一普通常量。用 G 来表示这一常量，则有 $\mu = MG$ ， $\lambda = mG$ ，故有

$$|F| = |F'| = G \frac{Mm}{r^2}。$$

把恒星与行星间的引力关系推广到任意两个质点，就得到万有引力定律。由万有引力定律，也可以反过来推导出开普勒行星运动三定律。开普勒的行星运动定律不过是万有引力定律的必然结果。

万有引力定律对于质量分布均匀或只有径向变化的球体，也是适用的。对于不能看作质点的物体，可把两个物体都分割成微小的体积元，一个物体的每个体积元与另一物体的每个体积元之间，万有引力定律都是成立的。求出所有这些体积元之间的引力的和，就得出两个物体间的引力。如果两个物体的形状和密度分布都是规则的，就可用积分方法求出两个物体的引力。

引力场(gravitational field)

任何一个物体的周围都存在着引力场，物体间的引力相互作用是通过引力场来实现的。处于引力场中的任何质点都会受到方向指向场源的引力作用，这个引力的大小与该质点的质量成正比。表征某点引力场矢量特性的量叫做引力场强度 g ，它等于在该点作用于质点上的引力 F 与质点质量 m 之比：

$$g=F/m。$$

在重力场中，场强等于重力加速度。

引力是一种保守力，可以引入一个叫做引力势的标量函数 来描述物体周围的引力场。引力场中各点的引力势在数值上等于把单位质量的质点由无限远移至该点场力所做的功。当场源可看作质量为 M 的质点时，在距场源 处，

$$\phi = \int_{\infty}^r \frac{GM}{r^2} dr = -\frac{GM}{r}。$$

引力场强与引力势之间存在着一定的关系，即引力场强等于引力势梯度的负值：

$$g = -\frac{\partial \phi}{\partial n} \hat{n}$$

式中 $\frac{\partial \phi}{\partial n}$ 为过该点的等势面正法线方向上 值变化率， \hat{n} 为该法线方向上的单位矢量。用矢量分析的梯度算符，上式可写作

$$g = -\nabla \phi = -\left(\frac{\partial \phi}{\partial x} \mathbf{i} + \frac{\partial \phi}{\partial y} \mathbf{j} + \frac{\partial \phi}{\partial z} \mathbf{k} \right)。$$

第一宇宙速度 (first cosmic velocity)

在地球引力作用下，在半径等于地球半径的圆形轨道上运行的人造地球卫星的速度，叫第一宇宙速度，也叫环绕速度。这种卫星运动的向心加速度等于地面上的重力加速度 g 。用 $R_{地}$ 表示地球半径，用 v_1 表示第一宇宙速度，则有

$$\frac{v_1^2}{R_{地}} = g$$

由于地球的 $g=9.8\text{m/s}^2$ ， $R_{地}=6400\text{km}$ ，所以

$$v_1 = \sqrt{gR} = 7.9\text{km/s} .$$

由于 $g = \frac{GM_{地}}{R_{地}^2}$ ，式中 G 为引力常量， $M_{地}$ 为地球质量，第一宇宙速度的公式也可写作

$$v_1 = \sqrt{\frac{GM_{地}}{R_{地}}} .$$

这个公式可适用于任一天体，只要把公式中的 M 和 R 换成该天体的质量和半径，就可求出那个天体的环绕速度。

第二宇宙速度(second cosmic velocity)

人造天体脱离地球引力束缚所需的最小速度叫第二宇宙速度,它的大小 $v_2=11.2\text{km/s}$ 。第二宇宙速度可用如下方法求出:

设地球质量为 $M_{\text{地}}$, 半径为 $R_{\text{地}}$, 把质量为 m 的人造天体从地球表面送到无穷远需要做的功为

$$W = \int_{R_{\text{地}}}^{\infty} \frac{GM_{\text{地}}m}{r^2} dr = \frac{GM_{\text{地}}m}{R_{\text{地}}}$$

根据能量守恒定律, 上述功 W 应该等于人造天体发射时具有的动能, 即

$$\frac{1}{2}mv_2^2 = \frac{GM_{\text{地}}m}{R_{\text{地}}}$$

由此得

$$v_2 = \sqrt{\frac{2GM_{\text{地}}}{R_{\text{地}}}} = \sqrt{2}v_1 = 11.2\text{km/s}$$

第三宇宙速度(third cosmic velocity)

人造天体脱离太阳引力束缚所需的最小速度叫做第三宇宙速度,它的大小为 $v_3=16.7\text{km/s}$ 。第三宇宙速度可用如下方法求出:

设太阳质量为 $M_{\text{日}}$, 日地距离为 d , 则在距离太阳为 d 的地方发射质量为 m 的人造天体, 若能脱离太阳的引力达到无穷远, 所需做的功为

$$W \int_d^{\infty} \frac{GM_{\text{日}} m}{r^2} dr = \frac{GM_{\text{日}} m}{d}。$$

这个功应该等于发射的人造天体具有的动能, 即

$$\frac{1}{2} mv^2 = \frac{GM_{\text{日}} m}{d},$$

所以有

$$v = \sqrt{\frac{2GM_{\text{日}}}{d}}$$

v 为人造天体相对于太阳的速度。由于 $M_{\text{日}}=1.989 \times 10^{30}\text{kg}$, $d=1.496 \times 10^{11}\text{m}$, 所以

$$v=42.12\text{km/s}。$$

考虑到地球本身已有 $v_0 = 29.79\text{km/s}$ 的轨道速度, 如果从地球表面上沿着地球轨道速度的方向发射人造天体, 只要它相对于地球具有 $v-v_0=12.33\text{km/s}$ 的速度, 即可逃脱太阳引力的束缚。这就要求发射的人造天体在克服地球引力之后仍有 $v-v_0$ 的剩余速度, 即有

$$\frac{1}{2} mv_3^2 - \frac{GM_{\text{地}} m}{R_{\text{地}}} = \frac{1}{2} m(v-v_0)^2$$

式中的 $M_{\text{地}}$ 为地球质量, $R_{\text{地}}$ 为地球半径。由此得

$$\begin{aligned} v_3 &= \sqrt{\frac{2GM_{\text{地}}}{R_{\text{地}}} + (v-v_0)^2} \\ &= 16.7\text{km/s}。 \end{aligned}$$

地球同步轨道 (geosynchronous orbit)

运行周期与地球自转周期（23 小时 56 分 4 秒）相同的顺行人造地球卫星轨道，称为地球同步轨道。这种轨道的倾角小于 90° ，轨道上的卫星总是自西向东运行。如果不考虑轨道的摄动，地球同步轨道上运行的卫星，每天在相同时刻经过相同地点的上空，卫星在地面上的投影点（称为星下点）的轨迹，是一条 8 字形的封闭曲线，离赤道的最大地心张角等于轨道的倾角。对地面上的观察者来说，每天相同时刻，卫星会出现在相同方向上。

地球静止卫星轨道 (geostationary satellite orbit)

倾角为零的圆形地球同步轨道，称为地球静止卫星轨道。它是一条特殊的地球同步轨道，在这条轨道上运行的卫星，在地面上的投影是赤道上的一个固定点，在地面上的人看来，卫星是静止不动的。一颗静止卫星，可以俯视地球上大约 40% 的面积。由于卫星相对于地面不动，地球站容易跟踪，通信卫星、广播卫星和气象卫星，选择这样的轨道是很有利的。如果以对地心张角为 120° 的空间间隔配置三颗静止卫星，则可覆盖两极地区以外的全球表面。

地球静止卫星轨道距地面的高度为 35785km，卫星在轨道上的运行速度为 3.07km/s。

静止卫星的轨道精度要求很高，稍有偏差，卫星就会漂移。轨道周期比地球自转周期大时，卫星向西漂移；轨道周期比地球自转周期小时，卫星向东漂移。周期差万分之一，卫星每天漂移 0.036 度。轨道不圆时，卫星每天沿东西方向来回摆动一次，摆动的最大幅度是轨道偏心率的两倍。轨道倾角不为零时，卫星将在南北方向上偏离赤道。因此，使卫星真正“静止”，是相当困难的。即使卫星已经静止在赤道某处上空，摄动也会引起轨道的变化。太阳和月球的引力以及地球扁率的影响，会使轨道倾角产生变化。地球扁率会使卫星向东漂移。地球赤道不圆会引起卫星东西方向摆动。为了克服轨道误差和摄动力引起的漂移，卫星必须具有轨道修正能力。这要借助于地面和卫星上的无线电测控系统来配合完成。

太阳同步轨道(sun-synchronous orbit)

轨道平面相对于太阳的取向保持恒定的人造卫星轨道，称为太阳同步轨道。由于地球不停地绕太阳公转，太阳同步轨道的轨道平面，必须绕地轴自西向东转动，且其转动的角速度应与地球公转的平均角速度相等，即每天转动大约 1° 。

卫星轨道平面绕地轴转动，是由于地球不是理想的球体，其赤道部分比两极凸出而引起的摄动。轨道平面转动的方向和快慢决定于轨道的倾角、偏心率和半长轴的大小。轨道平面倾角小于 90° 的是顺行轨道（卫星自西向东运行），轨道平面自东向西转动；轨道平面倾角大于 90° 的是逆行轨道（卫星自东向西运行），轨道平面自西向东转动；轨道平面倾角等于 90° 的是极轨道，轨道平面不转动。所以太阳同步轨道一定是轨道平面倾角大于 90° 的逆行轨道。太阳同步轨道的倾角 i 、偏心率 e 和半长轴 a （单位公里）这三个轨道要素之间必须满足以下关系：

$\cos i = -4.7736 \times 10^{-15} (1 - e^2) a^{7/2}$ 。由此可知，轨道为圆形时，最大倾角为 180° ，卫星的高度不会超过 6000 公里。

在太阳同步轨道上运行的卫星，从同一方向经过同一纬度的当地地方时（即以当地子午线为基准的时间）都是相同的。例如，卫星自北向南（升段）飞过位于北纬 40° 的北京上空时，北京的地方时是上午九时，则卫星自南向北飞过同样位于北纬 40° 的其他地点上空时，当地的地方时也是上午九时。因此，选择适当的发射时间，可以使卫星经过一些地区时地面上始终具有较好的光照条件，并且卫星在这些地区的上空始终处于太阳光的照射下，不会进入地球阴影，太阳电池可以充分供电而不会中断。倾角稍大于 90° 的太阳同步轨道卫星，还具有极轨道卫星的特点，可以俯瞰全球。气象卫星、地球资源卫星和照相侦察卫星，一般都采用太阳同步轨道，使拍摄的地面目标图像最清晰。

主要参考资料

1. H. H. 蒲赫哥尔茨。理论力学基本教程。第 3 版。北京：商务印书馆，1956。

2. 赵景员，王淑贤。力学。第 1 版。北京：人民教育出版社，1977。

3. 张明昌，肖耐园。天文学教程，上册。第 1 版。北京：高等教育出版社，1987。

4. 中国大百科全书出版社编辑部。中国大百科全书·天文学。第 1 版。北京：中国大百科全书出版社，1980。

5. 中国大百科全书出版社编辑部。中国大百科全书·航空航天。第 1 版。北京：中国大百科全书出版社，1985 年。

6. . 亚沃尔斯基，A.A. 杰特拉夫。物理学手册。第 1 版。北京：科学出版社，1986。

7. 袁运开，顾明远。科学技术社会辞典（STS 辞典）物理。第 1 版。杭州：浙江教育出版社，1991。

五、动量和角动量

质点系(system of particles)

彼此互相影响的若干个质点的集合称为质点系，也称力学体系。所谓相互影响指的是质点系中任一质点的位置或运动都与所有其余质点的位置或运动有关。毫无联系的一些质点，由于它们的运动是相互独立的，不必把它们作为质点系来研究。

质点系的例子很多。一个物体就是一个质点系，爆炸物分裂成的一群碎片也可以看成质点系。就整个宇宙来说，太阳系也是一个质点系。在一些质点系中，各个质点间的距离是可以改变的，就称为可变质点系；也有一些质点系，各个质点间的距离可以看作是不变的，就称为不变质点系。刚体就是理想的不变质点系。

内力和外力(internal force and external force)

同一质点系中各个质点之间的相互作用力，称为内力。作用于质点系中某一质点的力，不来自质点系中其他质点的，称为外力。内力和外力的区别是相对的，要根据被考察的体系来确定。就整个太阳系而言，太阳和地球之间的引力是内力；但是，如果只考察地球绕太阳的运动，作用于地球的太阳引力就是外力了。

根据牛顿第三定律，两个质点间的内力是相互作用的有心力，即作用在两个质点连线的方向上，而且大小相等、方向相反。因此，质点系的内力具有如下两个性质：

1. 质点系中所有内力的矢量和恒等于零；
2. 质点系中所有内力对任一定点（或定轴）的力矩之和恒等于零。

对于不变质点系，如刚体，内力是一个平衡力系；对于可变质点系，内力可以使质点间发生相对位移，从而改变质点系的运动状态。

质心 (centre of mass)

“质量中心”的简称，是研究物体或质点系运动的一个重要参考点。在 n 个质点组成的质点系中，用 m_i 和 r_i ；分别表示第 i 个质点的质量和位矢，用 $M = \sum_i m_i$ 表示质点系的总质量，则位矢为

$$r_c = \frac{\sum_i m_i r_i}{M}$$

的点 C 称为质点系的质量中心。或者用 $r_e(x_c, y_c, z_c)$ 的坐标来表示：

$$x_c = \frac{\sum_i m_i x_i}{M}, y_c = \frac{\sum_i m_i y_i}{M},$$
$$z_c = \frac{\sum_i m_i z_i}{M}。$$

式中 x_i, y_i, z_i 为第 i 个质点的坐标。

如果质点系是质量连续分布的物体，上面的式子可写成

$$r_c = \frac{\int \rho r dr}{\int \rho dr}$$

或

$$x_c = \frac{\int \rho x dr}{\int \rho dr}, y_c = \frac{\int \rho y dr}{\int \rho dr},$$
$$z_c = \frac{\int \rho z dr}{\int \rho dr}。$$

其中 ρ 为体积元 d 处的密度，积分遍及整个体积。

对于地面附近不太大的物体，质心与重心重合，但它们是两个不同的概念。在不受重力作用的空间，质心仍然是有意义的，重心则没有意义。

质心是质点系力学和刚体力学中的一个重要概念。刚体的各种复杂的运动可看成平动和转动的合成，用质心的运动研究其平动部分，对于刚体运动的研究最为方便。

质心运动定理(theorem for motion of centre of mass)

描述质点系运动时其质心运动规律的定理。它指出：质点系质心的运动和一个质点的运动相同，这个质点的质量等于质点系的总质量，作用在这个质点上的力等于作用于质点系的所有外力的矢量和。用 M 表示质点系的总质量，用 a_c 表示质心的加速度，用 $F_i^{(外)}$ 表示质点系中第 i 个质点所受的外力，这个定理可写作

$$Ma_c = \sum_i F_i^{(外)} .$$

所以质心运动定理也可表述为：质点系的总质量与质心加速度的乘积等于质点系所受一切外力的矢量和。

质心运动定理表明：

1. 质点系的内力不会影响质心的运动状态。如果质点系所受外力的矢量和为零，不论质点系内部运动状态如何变化，质心总是保持静止或做匀速直线运动。

2. 质心运动定理只给出质心运动的情况，不能给出各个质点围绕质心的运动和质点系内部各个质点间的相对运动。即质心运动定理不能对质点系的运动做全面的描述。

质心系 (centre-of-mass system)

也称质心坐标系，指坐标原点与质点系的质心重合，且坐标轴的方向相对于惯性系保持不变的坐标系。质点系相对于质心系的运动有许多特殊的性质，例如，在质心系中，系统的总动量恒等于零；系统相对于任一坐标系运动的动能等于它相对于质心系运动的动能与将整个系统的质量集中于质心时质心相对于该坐标系所具有的动能之和。因为在质心系中力学关系常具有比较简单的表示式，在某些问题（例如碰撞）的分析中，常选用质心系做参考系。

动量 (momentum)

质点的质量和它的速度的乘积，称为该质点的动量。动量是个矢量，它的方向与质点速度的方向相同。用 m 表示质点的质量， v 表示质点的速度， P 表示质点的动量，则有

$$P=mv。$$

式中的 m ，在经典力学中是一个常量。当质点的运动速度可与光速比拟时， m 为相对论质量，它的值随质点运动速度而变（参看“相对论性动量”）。

质点系的总动量是该质点系中所有各个质点动量的矢量和。用 p 表示 n 个质点组成的质点系的总动量，则有

$$p = \sum_{i=1}^n p_i = m_1 v_1 + m_2 v_2 + \dots + m_n v_n。$$

根据质心的定义：

$$r_c = \frac{\sum m_i r_i}{M}$$

可得 $v_c = \frac{\sum m_i v_i}{M}$ ，

$$p = \sum_i m_i v_i = M v_c$$

即质点系的总动量等于共总质量与质心速度的乘积。

冲量 (impulses)

作用在一个质点上的力 F ，在微小的时间 t 内可看作恒力，力 F 与 t 的乘积就叫做力 F 在时间间隔 t 内的元冲量，用 I 表示：

$$I = F \cdot t。$$

如果力 F 的作用时间较长，不能再看作恒力，则可用 I 表示在作用时间 $t = t_2 - t_1$ 内力 F 对时间的积分：

$$I = \int_{t_1}^{t_2} F dt。$$

I 叫作力 F 在时间 t 内的冲量。引入力对时间的平均值

$$F = \frac{\int_{t_1}^{t_2} F dt}{t_2 - t_1}$$

则有

$$I = \bar{F}(t_2 - t_1)。$$

在研究某些实际问题（例如两个物体的碰撞）时，物体相互作用的时间很短，作用力的变化却很大（图 1 - 5 - 1），引入力对时间平均值的概念，可使问题得到简化。

如果在时间 $t_2 - t_1$ 内力 F 不变（恒力），则有 $I = F(t_2 - t_1)$

动量定理(theorem of momentum)

作用于质点或质点系的外力与该质点或质点系的动量之间关系的定理。对于单个质点 动量定理可表述为：作用在质点上的力 F 在时间 $t=t_2-t_1$ 内的冲量 I ，等于受力质点在这段时间内动量的增量 P 。用 m 表示受力质点的质量，用 v_1 和 v_2 分别表示在这段时间内质点的初速度和末速度，则有

$$I = \int_{t_1}^{t_2} F dt = \Delta P = mv_2 - mv_1 \quad (1)$$

当 F 为恒力时，得

$$I = F(t_2 - t_1) = mv_2 - mv_1。$$

对于由 n 个质点组成的质点系，动量定理可表述为：作用在质点系的所有外力在时间 $t=t_2-t_1$ 内的冲量的矢量和，等于质点系在这段时间内动量的增量。用 m_i 表示质点系中第 i 个质点的质量，用 v_{i1} 和 v_{i2} 分别表示第 i

个质点在这段时间的初速度和末速度，用 $F_i^{(外)}$ 表示第 i 个质点所受的外力，则有

$$\sum_{i=1}^n \int_{t_1}^{t_2} F_i^{(外)} dt = \sum_{i=1}^n (m_i v_{i2} - m_i v_{i1})。 \quad (2)$$

质点系的内力只能引起各个质点的动量变化，不能引起系统总动量的变化。

(1)，(2)两式对 t 取导数，分别得

$$F = \frac{dp}{dt} = ma \quad (3)$$

$$\sum_{i=1}^n F_i^{(外)} = \frac{dp}{dt} = Ma。 \quad (4)$$

(3)式就是牛顿第二定律，(4)式就是质点系的质心运动定理。

动量守恒定律(law of conservation of momentum)

自然界最普遍的定律之一，对于单个质点或质点系都成立，可表述如下：

质点如果不受力的作用或者作用在质点上的合力始终为零，则质点的动量保持不变。

质点系如果不受外力作用或者作用于质点系的外力的矢量和始终为零，则质点系的总动量保持不变。

动量守恒定律可简单推导如下：

对于单个质点，根据牛顿第二定律有 $F = \frac{dp}{dt}$ 。当 $F = 0$ 时， $\frac{dp}{dt} = 0$ ，所以 $P = \text{常量}$ 。

同理，对于质点系， $\sum_i F_i = \frac{dp}{dt} = \frac{d}{dt}(\sum_i p_i)$ 。由 $\sum_i F_i = 0$ 可得 $\frac{dp}{dt} = 0$ ， $p = \sum_i p_i = \text{常量}$ 。

如果质点或质点系所受外力的矢量和不为零，但在某一方向上不受力，或在该方向上外力的分量之和为零，则质点或质点系在该方向上动量的分量保持不变。

动量守恒定律是被无数事实证明了的独立定律。在经典力学范围内，我们虽然可从牛顿定律把它推导出来，但是它的适用范围比牛顿定律更广，在牛顿定律失效的领域，动量守恒定律仍然适用。

有关守恒定律的研究，几个世纪以来一直是个相当重要的课题。到了本世纪，德国女数学家爱米·诺特(Emmy Noether 1882~1935)提出：一种守恒定律总是和某种对称性联系在一起的(诺特定理)。所谓对称性就是物理规律与某种变换无关的不变性。动量守恒定律就是和空间平移对称性联系在一起的。所谓空间平移对称性就是物理规律对于坐标的平移变换(移动坐标原点)具有不变性。也就是说，在空间中任意地方，物理规律都是一样的，要想选择一个特殊的空间位置，是没有意义的。

变质量系统的运动(motion of variable-mass system)

在经典力学中，物体的质量被认为是不变的。但也有因排出或并入物质而使系统质量发生变化的情况，如喷气飞机、火箭、雾中下落的雨滴、因冻结或融化而不断增减其质量的浮冰等，这些系统的质量是时间的函数。不过这些变质量系统在它们的大小远小于运动经过的距离，或其转动可以忽略时，都可看作质点。

设一质点在时刻 t 时的质量为 m ，速度为 v 。经过时间 Δt 后有一微小质量 Δm 以速度 u 并入 m (排出质量时 $\Delta m < 0$)，合并后质点的速度为 $v + \Delta v$ 。则在时间 Δt 内，变质量物体的动量变化为

$$\Delta p = (m + \Delta m)(v + \Delta v) - mv - \Delta m u = m \Delta v + (v - u) \Delta m。$$

这里略去了二级微量 $\Delta m \Delta v$ 。当 $\Delta t \rightarrow 0$ 时，根据 $\frac{dp}{dt} = F$ (F 为合外力) 可得

$$m \frac{dv}{dt} = F + (u - v) \frac{dm}{dt}。$$

其中 $u - v$ 是 dm 对质量 m 的相对速度。用 v_r 表示 $u - v$ ，则有

$$m \frac{dv}{dt} = F + v_r \frac{dm}{dt}。$$

这就是变质量质点的运动方程。上式右边中的第二项，可看作因质量变化而引起的附加作用力。在 $\frac{dm}{dt} < 0$ 即排放质量的情况下，如果 v_r 与 v 反向，则附加作用为推进力，如果 v_r 与 v 同方向，则附加作用为制动力。并入质量时情况恰好相反。

火箭的运动(motion of rocket)

火箭的运动是变质量物体运动的典型实例：火箭利用自尾部向后喷射的高速气流产生的推力加速主体部件，它的质量变化率 $\frac{dm}{dt}$ 等于每秒钟消耗的燃料质量，它的气流喷射速度（或称排气速度）就是放出质量对主体部件的相对速度 v_r 。

如果只考虑重力的影响，忽略空气的阻力，则有外力 $F=mg$ ，可得真空中的火箭运动方程（参看“变质量系统的运动”）

$$m \frac{dv}{dt} = mg + v_r \frac{dm}{dt}。$$

假定排气速度 v_r 为常量，可得火箭速度

$$v = v_0 + v_r \ln \frac{m}{m_0} + gt。 \quad (1)$$

式中 v_0 ， m_0 分别为 $t=0$ 时火箭的初始速度和初始质量，后者包括储备的燃料质量 m_p 和火箭的载空质量 m_e ，即 $m_0=m_p + m_e$ 上式只适用于气流喷射阶段，停止喷射气流，火箭就达到结尾速度 v_e 。

火箭竖直发射时，取方程(1)在竖直轴方向上的投影，有

$$v = v_0 + v_r \ln \frac{m_0}{m} - gt$$

这个方程只适用于燃烧阶段。设燃料的燃烧时间为 t_e ，则可求得火箭在重力场中竖直发射的结尾速度

$$v_{e\text{竖直}} = v_0 + v_r \ln \frac{m_0}{m_e} - gt_e \quad (2)$$

由(2)式可知，要提高火箭的结尾速度，必须提高火箭的初速度 v_0 、排气速度 v_r 和质量比 m_0/m_e 。 v_r 与燃料性能有关， m_0/m_e 决定于火箭的设计， v_0 则可用多级火箭来提高，前一级火箭的结尾速度就是后一级火箭的初速度。

角动量(angular momentum)

又称动量矩，描述物体转动效应的物理量。设 O 为空间中的一点， P 为质点 A 的动量， A 相对于 O 点的位矢 r 与 P 的矢积 L_0 称为质点 A 对 O 点的角动量（图 1 - 5 - 2）：

$$L_0 = r \times p。$$

根据矢积的定义， L_0 的大小为

$$L_0 = rps \sin \theta = pd。$$

式中 θ 为 r 和 p 的夹角， d 为 O 点到动量 p 所沿直线的垂直距离。 L_0 的方向垂直于由矢量 r 和 P 所确定的平面，其指向由右手螺旋定则来确定。

设 OD 为空间中过 O 点的任意轴， P 为质点 A 的动量，则质点 A 对 O 点的角动量 L_0 沿 OD 轴方向的分量 L_{OD} 称为质点 A 对 OD 轴的角动量（图 1 - 5 - 3），它的大小为：

$$L_{OD} = u \cdot L_0$$

式中 u 是 OD 轴上的单位矢量。

如果过 A 点作垂直于 OD 轴的平面与 OD 轴交于 O' 点，则动量 P 的与 OD 轴垂直的分量 P' 对 O 点的角动量，等于动量 P 对 OD 轴的角动量 L_{OD} 。它的大小等于 P' 与 O 点到 P' 所沿直线的垂直距离 d 的乘积（图 1 - 5 - 4）：

$$L_{OD} = p' d。$$

L_{OD} 的方向可用正负号来确定。根据右手螺旋定则，角动量的方向与轴的正方向一致时取正号，反之则取负号。

对于具有 n 个质点的质点系来说，质点系内各个质点对定点 O 的角动量的矢量和就是该质点系对点 O 的角动量：

$$L_O = \sum_{i=1}^n r_i \times p_i$$

质点系中每个质点对任意轴 OD 的角动量的代数和，就是该质点系对 OD 轴的角动量。刚体也是质点系，关于它的角动量，请参见“刚体的角动量”。

角动量定理(theorem of angular momentum)

也称动量矩定理。关于质点的角动量定理可表述为：质点对某定点(或轴)的角动量对时间的变化率等于作用在质点上的合力对定点(或轴)的力矩。用 $L = r \times p$ 表示质点对定点(或轴)的角动量，用 M 表示作用在质点上的合力对定点(或轴)的力矩，则有

$$\frac{dL}{dt} = \frac{d}{dt}(r \times p) = M。$$

对于质点系，由于系统的内力是成对出现，而且每一对力都是大小相等、方向相反、作用在同一直线上，因而内力对定点(或轴)的力矩之和等于零。所以质点系的角动量定理可表述为：质点系对某定点(或轴)的角动量对时间的变化率等于该质点系中各质点所受外力对定点(或轴)的力矩的矢量和。用 $L_i = r_i \times p_i$ 表示 n 个质点组成的质点系中第 i 个质点对定点(或轴)的角动量，用 M_i 表示作用在第 i 个质点上的外力对定点(或轴)的力矩，则有

$$\frac{d}{dt} \sum_{i=1}^n L_i = \frac{d}{dt} \sum_{i=1}^n r_i \times p_i = \sum_{i=1}^n M_i。$$

质点系的角动量定理不适用于一般的非惯性系。但是，对于质心坐标系来说，在质点系统绕质心的运动中角动量定理可以适用。

角动量守恒定律(law of conservation of angular momentum)

又称**动量矩守恒定律**，它反映了质点或质点系统一点或轴转动的规律，是物理学中普遍的规律之一。

关于质点的角动量守恒定律可表述为：如果作用在质点上的力对某定点（或轴）的力矩等于零，则质点对该定点（或轴）的角动量保持不变。

这一结论可由质点的角动量定理直接推得： $\frac{dL}{dt} = M$, $M = 0$ 时， $L = \text{常量}$

。对于围绕太阳运动的行星来说，所受太阳的引力指向太阳，引力矩 $M = r \times F = 0$ ，所以行星绕太阳运动的角动量是一常量。

关于质点系的角动量守恒定律可表述为：如果作用在质点系中各个质点上的外力对某定点（或轴）的力矩的矢量和等于零，则质点系对定点（或轴）的角动量保持不变。这一结论也可由质点系的角动量定理直接推得。要注意的是质点系在角动量守恒的条件下，部分质点的角动量可能因内力矩的作用而改变。例如，站在静止转盘上的人，将手举过头顶，沿某一方向描划水平圆圈。转盘将向相反方向转动；在冰上旋转的运动员可伸开或缩回双臂改变旋转速度；翻斛斗时缩回手脚也可加快旋转速度。

如果质点或质点系所受外力矩的矢量和虽不为零，但它在某一特定方向上的投影为零，则总角动量在这一方向上的分量保持不变。

角动量守恒定律，对于非惯性系一般不适用，但适用于绕质心的相对运动，即如果作用在质点系中各个质点上的外力对质心（或通过质心的轴）的力矩的矢量和等于零，则质点系对质心（或通过质心的轴）的角动量保持不变。

角动量守恒定律是和空间转动对称性，或者说空间的各向同性相联系的。空间转动对称性，就是说当坐标轴发生转动时，物理规律的形式不会改变。也就是说，在自然规律中要去找一个特殊的空间方向是没有意义的。例如，两个质点 i 、 j 间的势能仅取决于它们之间的距离大小 $|r_i - r_j|$ （ r_i 、 r_j 分别为两质点的位矢），而与它们之间连线的取向无关： $U = U(|r_i - r_j|)$ 。当坐标系转动时， U 是个不变量，即不论坐标轴转向何方，质点间的作用力总是作用在两质点间的连线方向上，而且 $F_{ij} = -F_{ji}$ ，使系统的角动量保持不变。所以角动量守恒定律，反映了空间的转动对称性。

主要参考资料

1. 郭士。理论力学，上册。第1版。北京：人民教育出版社，1982。
2. 漆安慎，杜婵英。力学基础。第1版。北京：人民教育出版社，1982。
3. D. 哈里德，R. 瑞斯尼克。物理学基础，上册。第1版。北京：人民教育出版社，1979。
4. 卓崇培，刘文杰。时空对称性与守恒定律。第1版。北京：高等教育出版社，1983。
5. . 朗道，E.M. 栗弗席茨。力学与电动力学。第1版。北京：高等教育出版社，1986。
6. 中国大百科全书出版社编辑部。中国大百科全书·物理学。第1版。北京：中国大百科全书出版社，1987。
7. 科学出版社名词室。物理学词典。第1版。北京：科学出版社，1988。
8. 中国大百科全书出版社《简明不列颠百科全书》编辑部。简明不列

颠百科全书，2．第1版。北京：中国大百科全书出版社，1985。

9．中国大百科全书出版社《简明不列颠百科全书》编辑部。简明不列颠百科全书，6．第1版。北京：中国大百科全书出版社，1986。

六、机械能

功(work)

恒力 F 作用在某一物体上，且物体做直线运动，如果力的作用点的位移为 s ，则力 F 与位移 s 的标积叫做力 F 在这段位移上对物体所做的功，用 W 表示：

$$W = F \cdot s = F s \cos \alpha$$

式中的 α 为 F 和 s 间的夹角。当 $\alpha = 0$ ，即力 F 与位移同方向时， $W = Fs$ ；当 $\alpha = 90^\circ$ ，即力与位移互相垂直时， $W = 0$ ，力不对物体做功；当 $90^\circ < \alpha < 180^\circ$ 时， $W < 0$ ，即力对物体做负功，这种情形也叫做物体克服阻力做功。

作用力 F 是变力时，则须考虑力的作用点的微小位移 d ，并认为在这一位移过程中力是不变的， d 称为元位移。在元位移 d 上，力 F 所做的功称为元功，用 δW 表示：

$$\delta W = F \cdot d$$

力 F 的作用点从 A 移到 B 的过程中， F 所做的功可用

$$W_{AB} = \int_A^B F \cdot dr = \int_{s_A}^{s_B} F_r ds$$

来表示。式中 F_r 为力 F 沿物体运动轨迹的切向分量， $ds = |d\mathbf{r}|$ ， s_A ， s_B 分别表示从某一参考点到 A 、 B 两点的路程。如果给出 F_r 对 s 的关系图(图 1-6-1)，则在物体由轨迹上的 A 点移动到 B 点的过程中力 F 所做的功可由图中曲线下方带斜线的图形 $ABDC$ 的面积来代表。

几个力同时作用于一个物体上时，由于图 1-6-1 变力做的功是标量，合力所做的功等于各个分力做功的代数和。

由功的定义可知，只有力的作用点有位移，而且在位移方向上有力作用，才谈得上做功。物体受力而无位移，例如木块静置在桌面上，虽然桌面对木块有作用力，这个力并不做功。物体受力并有位移，但力和位移垂直，这个力也不做功。如在水平路面上推车，作用在车上的重力不做功，曲线运动中的向心力也不做功。有时，物体在外力的方向上虽有位移，但力的作用点没有位移，外力也不做功，如在地面上做纯滚动的轮子，轮缘与地面接触处无滑动，轮缘与地面间的静摩擦力不做功。

在讨论刚体的转动时，还要考虑力矩做功问题，(参见“力矩的功”)。

以上讨论的都是与物体的机械运动状态变化相联系的功，可以称为机械功。在物理学中，功的概念要广泛得多，除机械功外，还有电场功、磁场功等，做功所引起的也不只是系统机械运动状态的变化，还可以有热运动状态、电磁运动状态的变化等等。(参见“准静态过程中的功”)。

功是能量转化的一种量度。外界对物体或系统做功，或者物体或系统对外界做功，都能使物体或系统的状态发生变化，它们的能量也相应地有所增加或减少。例如，在重力场中，重力对物体做功，物体的动能增加，重力势能减少；电源中的非静电力做功，电能增加，其他能减少；电路中的电场力做功，电能减少，其他能增加。除做功外，传热也能改变物体或系统的状态，引起能量的变化。功不是能量变化的唯一量度。

功率(power)

力所做的功与做功用的时间之比，叫做功率。功率是表示做功快慢的物理量，有平均功率和瞬时功率之分。

一个力在时刻 t 到 $t + \Delta t$ 的时间间隔 Δt 内对物体所做的功是 δW ，在这段时间内力做功的平均功率是

$$\bar{P} = \frac{\delta W}{\Delta t} .$$

上式中当 $\Delta t \rightarrow 0$ 时，就得到力在时刻 t 做功的瞬时功率：

$$P = \frac{\delta W}{dt} .$$

由于元功 $\delta W = F \cdot dr$ ，有

$$P = F \cdot \frac{dr}{dt} = F \cdot v$$

所以瞬时功率等于瞬时力与力的作用点移动速度的标积。如果力 F 与速度 v 方向相同，则有

$$P = Fv ,$$

即瞬时功率等于力的大小与速度大小的乘积。如果 F 是恒力，也可用 $\bar{P} = F\bar{v}$ 计算平均功率。

由上述结果可以看出，发动机的功率一定时，牵引力和速度成反比。例如汽车在平路上行驶时，用力小，速度大；上坡时用力大，速度小。但这并不意味着可以无限减小作用力以获得无限大的速度，也不意味着可以把速度降低到很小以得到极其巨大的力。由于任何机器都不能避免摩擦，为了维持连续运转，它的作用力不能小于摩擦阻力，因而它的速度也有最大的限度。同时，由于机器的构造和运转条件等的限制，也不可能承受过大的作用力。实际上任何机器在设计时都规定了它的正常功率和最大作用力。上述反比关系只在不超过最大作用力的范围才能适用。

简单机械(simple machine)

杠杆、滑轮、轮轴、斜面、螺旋和劈的总称。前三种称为杠杆类简单机械，后三种称为斜面类简单机械。复杂的机械含有多种简单机械。利用简单机械做功，或者可以省力，即用小的动力克服较大的阻力，或者可以缩小力的作用点移动的距离，或者可以改变力的作用方向，使人们得到某些方便。简单机械的输出力与输入力之比，称为机械利益。

简单机械工作时，可把它的运动分为平动和转动两种情况。平动时用力的大小与力的作用点沿力的作用线移动距离的乘积来计算功；转动时用力矩的大小与绕转轴的转角的乘积来计算功。如果不考虑摩擦所消耗的功，即在理想情况下，简单机械处于平衡状态时，输入功与输出功的大小相等。或者输入功为正，输出功为负，则输入功与输出功的代数和为零。这称为机械功原理。根据这一原理，使用任何机械都不能省功。

机械效率(mechanical efficiency)

任何机械在运转时，动力对机械所做的功，总有一部分要消耗在克服机械内部摩擦和机械自身的重力等阻力上。因此，机械对外所做的功，总小于动力对机械所做的功。动力对机械所做的功称为输入功，用 $W_{\text{输入}}$ 表示；机械对外所做的功称为输出功，用 $W_{\text{输出}}$ 表示；输出功与输入功之比称为机械效率，用 η 表示：

$$\eta = \frac{W_{\text{输出}}}{W_{\text{输入}}}。$$

也等于输出功率 $P_{\text{输出}}$ 与输入功率 $P_{\text{输入}}$ 之比：

$$\eta = \frac{P_{\text{输出}}}{P_{\text{输入}}}。$$

机械效率是表示动力功能在多大程度上被有效利用的物理量，或者说是表征机械对能量的转换本领的物理量，是机械性能优劣的重要标志。

杠杆 (lever)

刚性的直杆或曲杆在外力（动力）作用下能绕杆上一固定点转动的简单机械称为杠杆。杠杆的受力点称为力点，固定点称为支点，克服阻力（如重力）的点称为重点。支点到动力作用线的垂直距离称为力臂，也叫动力臂；支点到阻力作用线的垂直距离称为重臂，也叫阻力臂。动力和动力臂的乘积等于阻力和阻力臂的乘积，这叫作杠杆原理。杠杆的机械利益等于阻力与动力之比，也等于动力臂与阻力臂之比。

按支点、力点和重点的相互位置不同，可把杠杆分为三类：

第一类杠杆的支点在中间，机械利益可为任何值，撬棍、剪刀、克丝钳、天平和过去使用的杆秤都属于这类杠杆。其中杆秤和天平为量度物体质量的常用器械。杆秤的阻力臂长度不变，在确定秤星（定盘星）的位置时，要使秤杆、秤砣对支点的力矩之和与秤钩（或秤盘）对支点的力矩平衡。这时秤砣的力点即为刻度的起点（图 1 - 6 - 2）。天平则是一个特制的等臂杠杆，横梁（质量为 m ）的重心在梁下方的指针上（与横梁距离为 h ）。两侧吊盘中的质量有一微小差 ΔM 时，横梁 AB 可保持一微小

倾斜角 达到平衡（图 1 - 6 - 3）。
$$\theta = \arctan \frac{\Delta M l}{m h}$$
。 m 和 h 的值越小天

平的灵敏度就越高。（图 1 - 6 - 3）。

第二类杠杆，重点在中间，机械利益总大于 1，核桃夹子，独轮手推车，都属于这类杠杆。

第三类杠杆，力点在中间，机械利益总小于 1，筷子、镊子、缝纫机的踏板都属于这类杠杆。

轮轴 (wheel and axle)

把轮（大鼓轮）和轴（小鼓轮）固定在一起，使它们能绕同一轴线转动的简单机械。如果在轮缘上用力使它转动，固定在轴上的绳子就会卷起而提升系在绳子另一端的重物。在轮上施较小的动力 F ，就可以克服较大的阻力 W 。如果轮半径为 R ，轴半径为 r ，则机械利益 $MA = \frac{R}{r}$ 。轮子越大越省力。常用摇柄带替轮子使结构简化，便于工作。旋钮、辘轳、绞盘和汽车方向盘都是轮轴类机械。

也可以用齿轮代替鼓轮，并组合起来使用，以提高机械利益。如图 1 - 6 - 4 中的齿轮装置（齿轮没有画出），其机械利益为

$$MA = \frac{W}{F} = \frac{R_1 R_2 R_3}{r_1 r_2 r_3}。$$

滑轮 (pulley)

由周边有槽、可以绕水平中心轴转动的圆轮和跨在轮槽上的绳子组成的简单机械。轴的位置固定不动的滑轮叫做定滑轮，可用来改变力的方向。轴的位置可以和重物一起升降的滑轮叫做动滑轮，可用来提升重物。如果忽略滑轮的质量和绳子与轮槽间的摩擦，用动滑轮提升重物可节省一半的力。

定滑轮和动滑轮可组成不同形式的滑轮组，如图 1 - 6 - 5 所示。滑轮组可以省更多的力或者既省力又改变力的方向。如果滑轮的质量和绳子与轮槽间的摩擦可以忽视，甲图所示的滑轮组，动力 F 与物重 G 的关系为

$$F = \frac{G}{n}, \text{机械利益 } MA = \frac{G}{F} = n。$$

式中的 n 为承重绳子的股数。乙图所示的滑轮组，动力 F 与物重 G 的关系为

$$F = \frac{G}{2^n}, \text{机械利益 } MA = \frac{G}{F} = 2^n。$$

式中的 n 为动滑轮的数目。

为了得到很大的机械利益，常用差动滑轮组（图 1 - 6 - 6）。这时，定滑轮是固定在一起的两个不同直径的同轴塔轮（实际上是个轮轴），大轮半径为 R ，小轮半径 r 。提升物体时，定滑轮上的大轮卷起绳子，小轮放下绳子，动滑轮和物体一起上升。当动力的作用点 A 下降距离为 S_A 时，

动滑轮和重物上升的距离 $s_B = \frac{R-r}{2R} S_A$ 。动滑轮的质量可以忽略时，

$$F = \frac{R-r}{2R} G, \text{机械利益 } MA = \frac{G}{F} = \frac{2R}{R-r}。$$

R 和 r 相差很小时，可得到很大的机械利益。

斜面 (inclined Plane)

同水平面成一倾斜角的平面，是一种简单机械。沿斜面向上推拉物体比竖直提升物体省力。设高度为 h ，长为 s 的斜面 AB 的倾角为 α （图 1-6-7）。用一沿斜面向上的力 F 推或拉一重为 G 的物体。如果摩擦可以忽略，当物体静止或做匀速直线运动时，有 $F=G\sin\alpha$ 。斜面的机械利益为

$$MA = \frac{G}{F} = \frac{1}{\sin\alpha} = \frac{s}{h}。$$

即输出力与输入力之比等于斜面的长与高之比，这就是斜面原理。盘山公路，物料运输机中的斜面传送带，都是应用斜面原理。

研究斜面的机械效率，必须考虑摩擦。图 1-6-7 所示的斜面，如果它与重物间的摩擦系数为 $\mu = \tan\phi$ （ ϕ 为摩擦角），沿着与斜面成一锐角的方向上推物体，就有可能出现自锁现象（参见“摩擦角”）。考虑在该斜面上用水平力 F 上推物体的简单情况（图 1-6-8）。当物体静止或做匀速直线运动时，推力 F 、重力 G 和斜面全反力 R （即斜面对物体的支持力和摩擦力的合力）可看作平衡的共点力。如果 $BC=l$ ， $AC=h$ ，根据平衡条件

$$F\cos\alpha - G\sin\alpha - \mu(F\sin\alpha + G\cos\alpha) = 0，$$

可得斜面的机械利益和机械效率分别为：

两者都是斜面倾角 α 的函数。当 $\alpha + \phi = \frac{\pi}{2}$ 时， $MA = 0$ ， $\eta = 0$ ，这时就发生了自锁现象：无论用多大的水平推力，也不能使物体上移。

螺旋 (screw)

能把转动动力矩变成平动推力的斜面型简单机械，它的结构是在圆柱体的侧表面上刻出螺旋形沟槽，也可以把它看成是斜面绕在圆柱体上构成的。

利用螺旋可以省力。如图 1-6-9 所示，柄长 l 、螺距 h 的螺旋起重器，柄端所受的力为 F ，螺旋所受的力矩为 M ，螺母所受的轴向力为 P ，则根据机械功原理可得

$$2 \quad M = F \cdot 2 \quad l = Ph$$

机械利益为：

$$MA = \frac{P}{F} = \frac{2\pi l}{h}。$$

螺旋是斜面类简单机械，其机械效率为：

$$\begin{aligned} \eta &= \frac{Ph}{2\pi M} \\ &= \frac{\tan \alpha}{\tan(\alpha + \varphi)}。 \end{aligned}$$

式中 α 为螺旋的导角，即螺纹对垂直于螺旋轴线的平面的倾角， φ 为螺旋和螺母间的摩擦角。

螺旋可用来增力、紧固和传动。用来紧固物体或制作起重器的螺旋，要符合螺旋自锁条件，即螺旋的导角必须小于它与螺母间的摩擦角： $\alpha < \varphi$ 。这时，如不施加力矩，无论螺杆的轴向荷载多大，螺旋都不会下降。

劈 (wedge)

纵截面为三角形（一般为等腰三角形）、两侧面间具有尖锐夹角的坚硬物体称为劈。使用劈可以增大作用力并改变力的作用方向。加在劈背上的力 F 是输入力，与两个侧面垂直的劈开力 F_1 、 F_2 是输出力。

如图 1-6-10 所示，如果不考虑摩擦力，劈所受的力有三个：输入力 F 和劈开力的反作用力 F'_1 、 F'_2 。平衡时这三个力组成一个闭合的力三角形。

如果劈的尖角为 2θ ，则有 $F_1 = F'_1 = \frac{F}{2\sin\theta}$ 。 θ 角很小时，用小的输入力就

可以得到很大的输出力。劈的机械利益为

$$MA = \frac{F_1}{F} = \frac{1}{2\sin\theta}。$$

如果劈的侧面长为 l ，劈背厚度为 d ，则有 $\sin\theta = \frac{d}{2l}$ ，可得机械利益

$$MA = \frac{1}{2\sin\theta} = \frac{l}{d}。$$

利用劈的这一性质，可以劈开物体，也可以用来撬起重物。例如用较小的力把劈打入平台和地面的缝隙，就可以使很重的平台离开地面。

也可以用劈来卡紧物体。劈的锐角足够小时，可以嵌入木缝或墙缝中，依靠摩擦力的作用，不会掉出。如图 1-6-11 所示，略去重力，劈的 AC、BC 两个面，各受两个力的作用。AC 面受到法向压力 F_1 和摩擦力 f_1 的作用，二者的合力为 F_{12} ；BC 面受到法向压力 F_2 和摩擦力 f_2 的作用，二者的合力为 F_{21} 。 F_{12} 和 F_{21} 大小相等，方向相反，作用在一条直线上，满足二力平衡条件，劈即静止。根据摩擦定律， $f_1 = \mu F_1$ ， $f_2 = \mu F_2$ ， $f_1/F_1 = f_2/F_2 = \tan\alpha$ ，只要 $\tan\alpha \leq \mu = \tan\varphi$ ，即 α 小于或等于劈与夹紧物体之间摩擦角 φ ，上述平衡条件就可以实现。这叫做劈的摩擦自锁。在机床夹具中广泛应用楔形块来锁紧工件，木器家具中常在榫接处打入木楔，都是应用劈的摩擦自锁原理。

能量 (energy)

描述系统状态的物理量，简称能，用 E 表示。系统在外界的作用下，状态会发生变化。外界作用可能是外力所做的功，也可能是外界与系统之间的热量传递或者其他作用。不论是哪一种形式的作用，它们与机械功之间都有确定的当量关系，因此，可以将所有的外界作用归结为等效的机械作用，即一定量的机械功。当系统从一种状态 E_1 过渡到另一种状态 E_2 时，外界对系统作用的机械功当量的总和 W ，只由系统的初末两态来决定，而与过渡的方式无关，即

$$E_2 - E_1 = W。$$

这样就确定了系统在两个状态之间的能量差。如果选定系统的某一状态作为参考状态，即规定系统处于该状态时能最为零，则可以定出系统处于任一状态时的能量 E 。

在上述定义中，由于选定一个任意的状态作为能量的零点，确定的每一状态的能量值都包含了一个任意常量，而不是一个完全确定的值。爱因斯坦在他建立的狭义相对论中，确定了质能关系，得出了“物体的质量是它所包含的能量的量度”这一结论。这就可以确定绝对能量，而排除了经典的能量零点的任意性。

能量具有多种形式。在力学中只讨论机械能，其中包括动能、重力势能和弹性势能。在热现象中要讨论物体的内能。此外还有电磁能、化学能（即原子的外层电子变动导致电子结合能改变而释放的能量）和核能。当物质的运动形式发生转变时，能量的形式也发生转变，但能的总量保持不变。这就是能量守恒定律。

动能(kinetic energy)

物体由于做机械运动而具有的能量。质量为 m 的质点以速率 v 运动时，它的动能为 $E_k = \frac{1}{2}mv^2$ 。如果用 $p = mv$ 来表示质点动量的大小，则有

$$E_k = \frac{p^2}{2m}。$$

质点系的动能是它所有各个质点的动能之和： $E_k = \sum_i \left(\frac{1}{2} m_i v_i^2 \right)$ 。式中的 m_i 和 v_i 分别为质点系中第 i 个质点的质量和速率。刚体的动能包括平动动能和转动动能（参见“转动刚体的动能”）。

具有动能的物体，可以对外界做功，以改变其他物体的机械运动状态，或者使其他物体发热、发光、发声、产生电磁效应，把动能转化为其他形式的能量。

当质点的速率足够大，以至可与光速相比时，要考虑相对论效应。

动能的表达式 $E_k = \frac{1}{2}mv^2$ 不再适用。

动能定理(theorem of kinetic energy)

动力学中一条普遍的规律，它定量地给出了动能的变化与功的关系。

质点的动能定理可表述为：质点动能的增量等于作用于质点的合力所做的功。用公式表示就是：

$$\frac{1}{2}mv_2^2 - \frac{1}{2}mv_1^2 = W$$

用T表示质点的动能 $\frac{1}{2}mv^2$ 质点的动能定理还可写成微分形式： $dT =$

W 即质点动能在一微小位移上的增量等于作用在质点上的合力在该位移上所做的元功。

质点系的动能定理可表述为：质点系动能的增量等于作用在质点系中各个质点的所有内力和外力所做功的代数和。用公式表示就是

$$\left(\sum_i \frac{1}{2}mv_i^2 \right)_2 - \left(\sum_i \frac{1}{2}mv_i^2 \right)_1 \\ = \sum_i W_i^{(外)} + \sum_i W_i^{(内)}$$

质点的动能定理是质点系动能定理的特例，对于单个质点，没有内力可言。质点系的动能定理，必须考虑内力的功。这是因为，在可变质点系中，由于质点间相对距离的变化，作用力和反作用力作用点的位移可以不同，内力功的代数和不为零。例如，在汽车和车厢内装载的物体组成的系统中，当汽车紧急刹车时，物体在车厢内滑动一段距离。在这过程中，物体和车厢地板间的一对摩擦力虽然等值而反向，但这两个力所做的功却反号而不等值，它们的代数和不等于零。对于刚体，由于其内部各个质点间的距离保持不变，内力功的代数和等于零。

上面讲的是积分形式的动能定理。这个定理还可表述为微分形式：质点系动能T的微分dT等于作用在质点系上的所有外力和内力所做元功的代数和，即 $dT = \sum_i \delta W_i^{(外)} + \sum_i \delta W_i^{(内)}$ 。

保守力 (conservative force)

当质点在力场中运动时，场力所做的功仅由质点的初位置和末位置决定，而与质点的运动路径无关，这样的力场称为保守场，它的场力称为保守力。重力、万有引力、弹力、静电力做功都有这样的性质，都是保守力。

保守场中存在着一个由位置坐标决定的单值标量函数 $U(x, y, z)$ ，称为力函数，场力本身以及场力所做的功都可由这个函数来表示：

$$F_x = \frac{\partial U}{\partial x}, F_y = \frac{\partial U}{\partial y}, F_z = \frac{\partial U}{\partial z};$$

场力所做的元功是

$W = F \cdot dr = F_x dx + F_y dy + F_z dz = dU$ 。设在保守力场中 P_1 和 P_2 两点力函数的值分别为 U_1 和 U_2 ，则质点由 P_1 移到 P_2 时场力所做的功为

$$W_{12} = \int_{P_1}^{P_2} \delta W = \int_{P_1}^{P_2} dU = U_2 - U_1$$

即场力所做的功等于力函数的增量。当 P_1 与 P_2 重合，即质点绕任一闭合曲线移动一周时，场力所做的功等于零。这个结果也可表述为：场力 F 的旋度等于零，即

$$\nabla \times F = \left(\frac{\partial F_y}{\partial z} - \frac{\partial F_z}{\partial y} \right) \mathbf{i} + \left(\frac{\partial F_z}{\partial x} - \frac{\partial F_x}{\partial z} \right) \mathbf{j} + \left(\frac{\partial F_x}{\partial y} - \frac{\partial F_y}{\partial x} \right) \mathbf{k} = 0,$$

$$\text{或 } \frac{\partial F_y}{\partial z} - \frac{\partial F_z}{\partial y} = 0, \frac{\partial F_z}{\partial x} - \frac{\partial F_x}{\partial z} = 0,$$
$$\frac{\partial F_x}{\partial y} - \frac{\partial F_y}{\partial x} = 0。$$

这就是力场是保守场的必要且充分的条件。

非保守力(non-conservative force)

如果一个力对运动质点所做的功不仅与质点的初位置和末位置有关，而且与质点运动的路径有关，这个力就是非保守力。也可以说，非保守力对沿着任何闭合路径运动一周的质点所做的功不等于零。汽车的牵引力就是一种非保守力，从甲地到乙地，走远路比走近路牵引力做的功要多。在电子感应加速器中，涡旋电场对运动电子的作用力也是非保守力：电子每绕环形真空室转一周，动能都会增加。滑动摩擦力和流体的阻力也是非保守力，它总是对运动的物体做负功，使系统的机械能不断减少，在初末两位置间经过的路径越长，机械能减少得越多。因此，物体在受到非保守力的作用时，它的机械能不再守恒。对运动物体做负功的非保守力，也叫耗散力。

势能 (potential energy)

在保守力场中，仅由质点的位置决定的能量，称为质点的势能，也叫位能。

质点在保守力场中运动时，如果场力对质点做正功，质点的动能就增加，势能就减少；如果场力对质点做负功，即质点反抗场力做功，质点的动能就减少，势能就增加。场力对质点所做的元功等于质点势能增量的负值。用 W 表示功， V 表示质点的势能，则有

$$W = -dV。$$

用 U 表示力场的力函数（参见“保守力”），有 $W = dU$ ，所以势能和力函数的关系是 $-dV = dU$ 。 $V = -U + \text{常量}$ 。

势能 V 的值只有相对的意义。在选定了零等势面后，质点在任意等势面上的势能才有确定的值。设 P_0 为零等势面上的一点，则质点位于任意一点 P （或通过 P 点的等势面）上时，它的势能 V 为

$$V = -\int_{P_0}^P \delta W = -\int_{P_0}^P \mathbf{F} \cdot d\mathbf{r} = -\int_P^{P_0} \mathbf{F} \cdot d\mathbf{r}。即质点位于P点时的势能等于$$

质点由该点移到零势能面过程中场力所做的功。

由于 $F = -\nabla U$ ， $V = -U + \text{常量}$ ，所以有 $F = -\nabla V$ ，即保守力场中作用在质点上的场力等于质点势能梯度的负值，力 F 指向势能减少的方向。

关于质点系，除了外力场的作用外，还要考虑内力场的作用。内力场是与系统内部各质点的位置分布有关的。在外力和内力都是保守力的条件下，质点系的势能 V 是与系统的位形也就是系统中质点的相对位置分布及其在外力场中的位置有关的。这部分能量又分为外势能 $V_{\text{外}}$ 和内势能 $V_{\text{内}}$ ， $V = V_{\text{外}} + V_{\text{内}}$ 。例如，两个小球由轻弹簧连结组成的系统（图 1-6-12），在

重力场中运动时，其势能为 $V = m_1gh_1 + m_2gh_2 + \frac{1}{2}kx^2$ ，前两项表示两个

小球的重力势能，为外势能，最后一项表示系统内部的弹性势能，为内势能。关于势能还有另外一种处理方法，即认为势能是属于物体系统的，保守力是系统的内力。即在讨论保守力做功及系统能量的变化时，扩大研究的系统，把施力者也包括在内，使势能成为系统内部的能量，这种处理方法，在处理实际问题时得到的结果与上面讲的处理方法是相同的。

在保守力场中引入势能的概念，可以把比较复杂的力的矢量场的计算用比较简单的势能的标量场来代替，使某些问题的处理得到简化。根据势能值，还可以作出保守力场的等势面。质点从同一等势面上的一点移到另外一点不做功，因此保守力场的力线处处与等势面正交。利用力线和等势面可以对力场进行比较形象的描述，给力场提供一个比较完整的图景。

重力势能(potential energy of gravity)

质点在重力场中具有势能叫做重力势能，也叫重力位能。如果取 z 轴竖直向上，用 k 表示 z 轴方向上的单位矢量，用 g 表示重力场强（即重力加速度）的大小，则质量为 m 的质点在重力场中所受的重力为 $G=-mgk$ 。把物体从 $z=0$ 处移到 $z=h$ 时，重力所做的功为 $W=G \cdot h=-mgh$ 。根据势能的性质，重力对质点所做的功等于质点重力势能增量的负值，如果选定 $z=0$ 处为零势能面，则 $z=h$ 处的重力势能为

$$V=-W=mgh。$$

通常取地面作零势能面， h 就是距地面的高度。重力场的等势面就是不同高度的水平面，力线方向竖直向下。当质点所在处低于零势能面时， h 取负值。

引力势能(gravitational potential energy)

质点在万有引力场中具有势能，称为引力势能。取引力中心的位置为坐标原点，设引力源的质量为 M ，则距引力中心为 r 、质量为 m 的物体所受的引力为 $F = -\frac{GMm}{r^2}$ 。取无穷远处 ($r \rightarrow \infty$) 的引力势能为零，由于引力所做的功等于引力势能增量的负值，物体距引力中心为 r 时，它的引力势能为

$$V = -\int_{\infty}^r F \cdot dr = \int_{\infty}^r \frac{GMm}{r^2} dr = -\frac{GMm}{r}。$$

引力场的等势面是以引力中心为球心的不同半径的球面，力线沿球面半径指向球心。

弹性势能(elastic potential energy)

质点在弹性力场中的势能。以弹簧为例，取弹簧的固定端为原点，则劲度（倔强系数）为 k 、自然长度为 r_0 的弹簧产生的弹力为 $F = -k(r - r_0)$ 。根据势能的性质，弹力对质点所做的元功等于弹性势能增量的负值，如果以弹簧的自然状态弹性势能为零，则质点伸长到长度为 r 时弹簧的弹性势能为

$$\begin{aligned} V &= -\int_{r_0}^r F \cdot dr = k \int_{r_0}^r (r - r_0) dr \\ &= \frac{1}{2} k(r - r_0)^2。 \end{aligned}$$

机械能守恒定律(Law of conservation of mechanical energy)

关于质点的机械能守恒定律可表述为：如果只有保守力(重力和弹力)对质点做功，则质点的动能和势能的总和保持不变。这一定律可简单地推证如下：

设在保守力场中运动的某一质点，在位置 1 时的动能和势能分别为 T_1 和 V_1 ，在位置 2 时的动能和势能分别为 T_2 和 V_2 ，质点由位置 1 移到位置 2 的过程中，场力所做的功为 W_{12} 。根据质点的动能定理，有

$$T_2 - T_1 = W_{12},$$

根据势能的性质，有

$$W_{12} = V_1 - V_2,$$

由此可得

$$T_2 - T_1 = V_1 - V_2$$

即

$$T_2 + V_2 = T_1 + V_1 = \text{常量}。$$

质点系的机械能守恒定律可表述为：如果质点系所受的外力和内力中，只有保守力(重力和弹力)做功，非保守力都不做功，则质点系的动能和势能(包括外势能和内势能)的总和保持不变。

如果把保守力看成系统的内力，势能是系统内部的能量，机械能守恒定律可表述为：如果质点系内只有保守力(重力和弹力)做功，作保守内力和一切外力都不做功。系统内动能和势能的总和保持不变。

机械能守恒定律，或者更普遍的能量守恒定律，是与时间平移对称性相联系的。所谓时间平移对称性，就是物理规律不随时间的变化而改变。例如，万有引力定律、静电力的库仑定律，在今天和古代是一样的。要测量某些物理常量，例如电子的电荷或引力常量，前天测得的结果跟今天测得的结果是一样的。这就是说，把计算时间的起点从 t 移到 $t = t + t_0$ ，或者反过来由 t 移到 $t - t_0$ ，物理规律的形式不会改变。

功能原理(principle of work and energy)如果作用在质点系上的外力和内力，除保守力外还有非保守力，而且非保守力也做功，质点系的机械能就会发生变化：非保守力所做的总功等于质点总机械能的增量。用公式表示就是

$$W_{\text{非保}} = T + V = E。$$

功能原理可简要推证如下：

根据动能定理，质点系所受外力和内力做功的代数和等于质点系动能的增量。把外力和内力分为保守力与非保守力，则

$$W_{\text{非保}} + W_{\text{保}} = T。$$

其中保守外力和保守内力做功的代数和等于系统势能增量的负值

$$W_{\text{保}} = -V，$$

故有 $W_{\text{非保}} = T + V = E。$

当非保守力所做的总功等于零时，质点系总机械能的增量也等于零。这就得到机械能守恒定律。

如果把保守力看成系统的内力，把势能看成系统内部的能量，即把场源物体也包括在系统之内，功能原理可表述为：系统所受外力和非保守内力做功的总和等于系统机械能的增量。

能量图(energy diagram)

由于质点的势能是它的位置坐标的单值函数，把它的势能和位置间的关系用图线表示出来，可以更清楚看出运动的特征。图 1-6-13 绘出了重力势能、弹性势能和引力势能的曲线。

在甲图中，以高度 h 为横坐标，能量 E 为纵坐标，重力势能 V 的曲线为一通过坐标原点的直线。利用它可以研究不计空气阻力的抛体运动和自由落体运动，还可以研究物体沿光滑斜面的滑动。如果物体的总机械能为 E ，它在某一高度处势能为 V ，则动能为 $T=E-V$ 。在最低处 $h=0$ ，动能最大，势能为零；在最高处， $h=H$ ，动能为零，势能最大。物体的运动不能超过这个最大高度。

在乙图中，以质点离开平衡位置的位移为横坐标，能量为纵坐标，弹性势能曲线为一顶点在坐标原点的抛物线。通过这条抛物线，不仅可以看出初始能量为 E 的弹簧振子在不同位移处动能和势能的大小，还能确定振子位移的界限。振子可以从两个不同的方向以最大动能通过原点，然后做减速运动，在到达转折点 x_1 或 x_2 时，振子静止，然后又向着原点做加速运动。

在丙图中，以质点位置 r 为横坐标，能量为纵坐标，引力场的势能曲线为一以横轴为渐近线的单调增加上凸曲线，这条曲线可以用来研究引力场中不同位置的质点动能和势能的大小关系以及天体的逃逸速度等问题。从图上可以看出，只有总能量 $E = V_{\max}$ 的物体即动能 $T = E - V$ 的物体，才能从引力场中逃逸出去。

物理过程不同，势能曲线也就不同。图 1-6-14 甲是原子、分子等有相互作用的质点的典型势能曲线。如果相互作用的两个质点的总能量为 E_1 时，系统只能在 a 、 b 之间振动不能越出势能谷；如果总能量大于 E_2 ，系统的运动可以越出势能谷，两个质点可以分开任意大的距离。这种具有谷型曲线的势，称为势阱。图乙的势能曲线是一种典型的方势阱，质点的总能量小于阱壁的高度时，它只能在方阱中运动。丙图的势能曲线称为势垒，如果质点在原点， E 的总能量小于势垒高度，就只能在势垒左方运动而不能穿过势垒到达右方

上面的结论，都是根据经典理论得出的。根据量子力学理论，微观粒子的能量小于势垒高度时，仍然有一定的几率能穿透势垒，尽管这种几率是比较小的。这种现象叫做势垒贯穿，也称隧道效应。原子核的衰变，就属于这种现象。

碰撞 (collision)

做相对运动的两个物体或粒子互相接近时，由于相互作用，在很短时间内，它们的运动状态发生显著变化，改变物体的形状或转变为其他粒子，这种现象称为碰撞。微观粒子的碰撞又称为散射。

宏观物体的碰撞可用经典力学描述。在碰撞过程中，相互作用的冲力极大，其他作用力相对说来都很小，可以忽略不计。将相互碰撞的物体当作一个系统，可以认为系统只有内力相互作用，因而遵从动量守恒定律。

碰撞过程中两个物体不能看作刚体，它们都要经过变形和恢复两个阶段，应该把两个物体看作可变形的弹塑性体。宏观物体的碰撞分为完全弹性碰撞、非完全弹性碰撞和完全非弹性碰撞三种，后两种碰撞，物体都要发生塑性形变。物体发生塑性形变时，部分机械能转化为内能等其他形式的能量，这种碰撞过程机械能不守恒。

微观粒子的碰撞要用量子力学描述。由于量子力学中的不确定关系，微观粒子的位置和速度不可能同时精确测定，以一定初速度运动的微观粒子碰撞后的运动状态也就不是唯一的。用量子力学可以确定碰撞后粒子处于某种状态的概率。微观粒子在碰撞过程中可以因相互作用而产生或湮没，这也是与宏观物体不同的。

恢复因数(coefficient of restitution)

两个物体在正碰（即碰撞前两个小球的相对速度沿着两个小球质心连线的方向）后相对速度大小与碰撞前相对速度大小的比值，称为恢复因数。用 v_1, v_2 表示两个物体在碰撞前的速度，用 u_1, u_2 表示碰撞后两个物体的速度，恢复系数可表示为

$$e = \frac{u_2 - u_1}{v_1 - v_2},$$

式中的 v_1, v_2, u_1, u_2 都用正负号表示其方向。对于完全弹性碰撞， $e=1$ ；对于完全非弹性碰撞， $e=0$ ；对于非完全弹性碰撞， $0 < e < 1$ 。用任意两种给定物质制成的两个球状物体，其恢复系数仅由制作它们的材料决定，近似为一常量。

恢复系数可用如下方法来测量。用一种材料制成小球，另外一种材料制成厚重的平板。令小球自高度为 H 处自由下落与水平平板相撞，测出小球反弹的高度 h 。小球碰撞平板前的速度为 $v_1 = \sqrt{2gH}$ ，反弹的速度为 $u_1 = -\sqrt{2gh}$ ；平板始终静止不动， $v_2 = u_2 = 0$ 。由此可得

$$e = \frac{u_2 - u_1}{v_1 - v_2} = \frac{\sqrt{2gh}}{\sqrt{2gH}} = \sqrt{\frac{h}{H}}。$$

完全弹性碰撞(perfect elastic collision)

碰撞后两个物体的总动能与碰撞前的总动能相等的碰撞叫做完全弹性碰撞。在这种碰撞中，碰撞物体或粒子间的相互作用力是弹力，碰撞过程中只有弹力做功，机械能的总量是守恒的，碰撞后又不存在势能的储存和消耗，因而碰撞前后系统的动能不变。

设两个参加完全弹性碰撞的小球的质量为 m_1 和 m_2 。在最简单的正碰情况下，碰撞前的速度分别为 v_1 和 v_2 ，碰撞后的速度分别为 u_1 和 u_2 ，则有

$$u_1 = \frac{m_1 - m_2}{m_1 + m_2} v_1 + \frac{2m_2}{m_1 + m_2} v_2,$$

$$u_2 = \frac{2m_1}{m_1 + m_2} v_1 + \frac{m_2 - m_1}{m_1 + m_2} v_2。$$

当 $m_1=m_2$ 时，有 $u_1=v_2$ ， $u_2=v_1$ ，即碰后两个小球交换了速度；如果碰撞前有一个小球是静止的，例如 $v_2=0$ ，则碰撞后 $u_1=0$ ， $u_2=v_1$ ，即运动的球突然静止，静止的球开始运动，其运动速度与碰撞前运动的球的速度相同。

当 $m_1 \ll m_2$ ，且 $v_2=0$ 时，可得 $u_1 = -v_1$ ， $u_2 = 0$ 。即用质量很小的轻球去碰静止的重球时，重球不动，轻球以原来的速率弹回。用乒乓球去撞铅球或墙壁，都会出现这种情况。

当 $m_1 \gg m_2$ ，且 $v_2=0$ 时，可得 $u_1 = v_1$ ， $u_2 = 2v_1$ 。即用质量很大的球去碰质量很小的静止的球，重球几乎以原来的速度前进，轻球则以 2 倍于重球原来的速度前进。

完全非弹性碰撞(perfect inelastic collision)

碰撞后两个物体不再分离，以同一速度运动的碰撞，叫做完全非弹性碰撞。在这种碰撞中，动量虽然守恒，但因为两个物体都发生了不可恢复的塑性形变，内部各部分间有相对运动，内摩擦力做负功，使物体的一部分动能转变为内能，因而碰撞后的动能小于碰撞前的动能。

在最简单的正碰情况下，用 m_1 ， m_2 分别表示两个物体的质量，用 v_1 ， v_2 分别表示它们碰撞前的速度，用 u 表示它们碰撞后的共同速度，则有

$$u = \frac{m_1 v_1 + m_2 v_2}{m_1 + m_2}$$

非完全弹性碰撞(imperfect elastic collision)

碰撞后两个物体仍有一定的相对速度，但其总动能小于碰撞前的总动能，这种碰撞称为非完全弹性碰撞。在这种碰撞过程中，动量是守恒的，但有一部分机械能因局部不可恢复的形变，内摩擦力做负功而转变为物体的内能。

对于最简单的正碰，用 m_1 和 m_2 分别表示两个物体的质量，用 v_1 和 v_2 分别表示它们碰撞前的速度，用 u_1 和 u_2 分别表示它们碰撞后的速度，当两个物体间的恢复系数为 e 时，有

$$u_1 = v_1 - \frac{m_2}{m_1 + m_2}(1 + e)(v_1 - v_2)$$

$$u_2 = v_2 + \frac{m_1}{m_1 + m_2}(1 + e)(v_1 - v_2)。$$

主要参考资料

1. 郭士。理论力学，上册。第1版。北京：人民教育出版社，1982。
2. D. Kleppner, R. T. Kolenkow. 力学引论。第1版。北京：人民教育出版社，1980。
3. C. 基特尔等。力学，伯克利物理教程第一卷。第1版。北京：科学出版社，1979。
4. 华东水利工程学院工程力学教研组理论力学编写组。理论力学。上册。第1版。北京：人民教育出版社，1978。
5. C. X. K. H. 力学的物理基础，上册。第1版。北京：人民教育出版社，1980。
6. 漆安慎，杜婵英。力学基础。第1版。北京：人民教育出版社，1982。
7. 杨仲耆。大学物理·力学。第1版。北京：人民教育出版社，1979。
8. 赵景员，王淑贤。力学。第1版。北京：人民教育出版社，1979。
9. 程守洙，江之永。普通物理学第一册。第1版。北京：人民教育出版社，1979。
10. R. 瑞斯尼克，D. 哈星德。物理学，第一卷第一册。第1版。北京：科学出版社，1979；第二卷第一册。第1版。北京：科学出版社，1978。
11. 缪钟英，罗启蕙。力学——问题讨论。第1版。北京：人民教育出版社，1989。
12. 冯·劳厄。物理学史。第1版。北京：商务印书馆，1978。
13. A. 爱因斯坦等。相对论原理。第1版。北京：科学出版社，1980。
14. 蔡建华。量子力学，上册。第1版。北京：人民教育出版社，1980。
15. 中国大百科全书出版社编辑部。中国大百科全书·物理学。第1版。北京：中国大百科全书出版社，1987。
16. 科学出版社名词室。物理学词典，上册。第1版。北京：科学出版社，1988。
17. M. 亚沃尔斯基，A. A. 杰特拉夫。物理学手册。第1版。北京：科学出版社，1986。
18. 中国大百科全书出版社《简明不列颠百科全书》编辑部。简明不列颠百科全书，5。第1版。北京：中国大百科全书出版社，1986。

七、刚体的运动与平衡

刚体(rigid body)

如果物体在外力作用下各部分的相对位置保持不变，这样的物体就称为刚体。因此，刚体的形状和大小是不能改变的。这是一种简化的理想模型。事实上，绝对的刚体是不存在的，任何物体在外力作用下都会发生形变。但是，有许多坚硬的固体，在通常的外力作用下发生的形变极其微小，跟物体本身的几何尺寸相比，可以忽略不计，这样的物体就可以近似地看作刚体。

如果把刚体看成由无数微小部分所组成，每一微小部分都可当作质点，刚体就是一个不变质点系，其中各质点间的距离保持不变，质点间内力的矢量和等于零，内力的功也等于零。

自由刚体，作为一个不变质点系，它的位置由系统中任意三个不共线的质点 M_1 、 M_2 和 M_3 来确定。这三个质点共有九个空间坐标。由于三点中任意两点间的距离 M_1M_2 、 M_2M_3 和 M_3M_1 都是不变的常量，九个空间坐标中只有六个是彼此独立的。在力学中常把确定质点系位置的独立坐标个数称为质点系的自由度，所以自由刚体有六个自由度。

自由刚体的运动可分解为平移和绕定点的转动。它的六个自由度中有三个是线坐标，用来描写平移，另外三个是角坐标，用来描写绕定点的转动。例如，在分析飞机或投掷出去的手榴弹这类物体的运动时，常取物体的质心作为代表点来考察物体的平移，再加上物体绕质心的转动。

作用在刚体上的力可沿作用线任意移动，作用点虽然改变，但对刚体的作用不变。这叫做力的可传性。因此，作用在刚体上的力具有滑移矢量的性质，即力的大小、方向和作用线是固定的，力的作用点可在作用线上任意选取。

刚体的平移(translation of rigid body)

刚体内的任一直线在运动过程中始终保持与原来的方向平行，这样的运动叫做刚体的平移。平移的刚体中所有各点，在每一时刻都具有相同的速度和加速度，各点的运动轨迹（可以是直线也可以是曲线）相同。也就是说，刚体平移时，内部各点具有相同的运动，其中任意一点的运动，都可以代表整个刚体的运动。因此，研究刚体的平移可归结为研究点的运动。平移刚体具有三个自由度。

刚体的平移可用它的质心运动来代表。应用质心运动定理可建立刚体平移应满足的运动微分方程：

$$M \frac{dv_c}{dt} = F。$$

式中 M 为刚体的质量， v_c 为刚体质心的速度， F 为作用在刚体上的所有外力的矢量和。

刚体做平移的条件是： F 必须通过刚体的质心，且刚体绕质心的初始角速度为零。

刚体的定轴转动(fixed-axis rotation of rigid body)

刚体内有一条直线保持不动的运动，叫做刚体的定轴转动。这条不动的直线称为转轴。显然，刚体内转轴以外的各点，都在垂直于转轴的各平面内分别做圆周运动，其圆心都在转轴上。

定轴转动的刚体，只有一个自由度，它的运动方程可写作：

$$\varphi = \varphi(t).$$

其中 φ 表示刚体对某固定平面转过的角度。由此可求得刚体的角速度和角加速度：

$$\omega = \frac{d\varphi}{dt} = \dot{\varphi},$$

$$\alpha = \frac{d\omega}{dt} = \ddot{\varphi} = \dot{\omega}.$$

应用角动量定理可建立刚体定轴转动的运动微分方程：

$$I_z = \frac{dM_z}{dt} = M_z.$$

式中 I_z 是刚体绕转轴的转动惯量， M_z 为作用在刚体上所有外力对转轴力矩的代数和。这个运动方程可与质点的运动方程 $m \frac{d^2x}{dt^2} = F$ 类比。同质点质量 m 对应的是 I_z 是质点运动时惯性的量度； I_z 则是刚体做定轴转动时转动惯性的量度。这正是“转动惯量”一词的由来。

刚体绕定轴转动的运动微分方程也称为转动定理。

角位移 (angular displacement)

描述刚体定轴转动时转动方向和转角大小变化的物理量。

在参考系上固定一直角坐标系 $Oxyz$ ，令 z 轴与转轴重合。在图 1-7-1 中， z 轴垂直于纸面指向读者。显然，凡具有相同的 x, y 坐标但 z 坐标不同的质点都有相同的运动状态。因此，可用 Oxy 平面在刚体中截取一平面图形，在平面图形上任选一不与 O 点相重的点 A ，由于 OA 的长短不变， A 点的位置可由 OA 从 Ox 轴方向转到 OA 方向时转过的角 φ 来表示。规定 OA 绕 z 轴逆时针方向转动时 φ 为正，角 φ 就称为定轴转动刚体的角坐标。

设定轴转动的刚体在时刻 t 和 $t + \Delta t$ 的角坐标分别为 $\varphi(t)$ 和 $\varphi(t + \Delta t)$ ，则 $\Delta\varphi = \varphi(t + \Delta t) - \varphi(t)$ 称为转动刚体在时间 Δt 内的角位移。

转轴不固定的刚体，有限转动的角位移，不满足矢量合成的交换律，因而不是矢量。但是无限小的角位移满足矢量合成的交换律，因而是矢量，其方向沿刚体转轴，指向由右手螺旋定则确定。

做定轴转动的刚体上任意一点 A 在时间 Δt 内的位移，称为线位移。当线位移 Δr 和角位移 $\Delta\varphi$ 都是无限小时，两者满足 $\Delta r = r \Delta\varphi$ 的关系，式中 r 为 A 点到转轴的距离。

角速度 (angular velocity)

描述刚体转动快慢和方向的物理量。设定轴转动刚体在时刻 t 和 $t + \Delta t$ 的角坐标分别为 $\varphi(t)$ 和 $\varphi(t + \Delta t)$ ，则刚体在时间 Δt 内的角位移 $\Delta\varphi = \varphi(t + \Delta t) - \varphi(t)$ 与时间 Δt 的比，当 $\Delta t \rightarrow 0$ 时，称为转动刚体在时刻 t 的角速度，常用 ω 表示

$$\omega = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{\Delta\varphi}{\Delta t} = \frac{d\varphi}{dt} = \dot{\varphi}。$$

刚体的角速度可表示为沿转轴的滑移矢量： $\omega = \omega k$ ， k 为转轴方向的单位矢量， ω 的正负由右手螺旋定则确定。

随刚体转动的质点的速度，称为线速度，以区别于其角速度。以角速度 ω 做定轴转动的刚体上一点 A 的线速度为：

$$v = \omega \times r，$$
$$v = \omega r \sin \theta。$$

式中 r 为 A 点的位置矢量， θ 为 ω 与 r 间的夹角 (图 1-7-2)。

角加速度 (angular acceleration)

描述刚体转动角速度变化的快慢和方向的物理量。设定轴转动的刚体在时刻 t 和 $t + \Delta t$ 的角速度分别为 ω 和 $\omega + \Delta\omega$ ，则刚体在时间 Δt 内角速度的增量 $\Delta\omega$ 与时间 Δt 的比，当 $\Delta t \rightarrow 0$ 时，称为转动刚体在时刻 t 的角加速度，常用 α 表示

$$\alpha = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{\Delta\omega}{\Delta t} = \frac{d\omega}{dt} = \alpha$$

刚体的角加速度可表示为沿转轴的滑移矢量： $\alpha = \alpha k$ ， k 为转轴方向的单位矢量， $\alpha > 0$ 为正值与 k 同向， $\alpha < 0$ 为负值与 k 反向。

随刚体转动的质点的加速度，称为线加速度，以区别于其角加速度。设做定轴转动的刚体上一点 A 的位矢为 r ，它的线速度 $v = \omega \times r$ ，则它的线加速度

$$\begin{aligned} \alpha &= \frac{dv}{dt} = \frac{d}{dt}(\omega \times r) \\ &= \alpha \times r + \omega \times v \\ &= \alpha \times r + \omega \times (\omega \times r) \end{aligned}$$

上式中的

$$\alpha \times r = \alpha \times r = \alpha r \sin \theta$$

与 r 垂直，称为切向加速度。

上式中的

$$\omega \times v = \omega \times (\omega \times r) = -\omega^2 r \cos \theta$$

与 v 垂直，称为法向加速度，

$$a_n = \omega^2 r \cos \theta$$

式中的 θ 为矢径 r 与转轴的夹角 (图 1-7-3)。

转动惯量(moment of inertia)

物体转动时惯性的量度。其定义为：物体中每个质点的质量 m_i 与其到某一已知轴的垂直距离 r_i 的平方的乘积之和，称为物体对该轴的转动惯量，常用 I 表示：

$$I = \sum_i m_i r_i^2。$$

对于质量连续分布的物体，上式可写作积分形式：

$$I = \int r^2 dm = \int \rho r^2 d\tau$$

其中 ρ 为体积元 d 处物体的密度， r 为体积元与轴的距离。转动惯量是个标量。

转动惯量除与物体的质量有关外，还与物体的大小、形状以及各部分的密度和质量分布有关。例如，机器的飞轮常做得边缘厚而中间薄，使它的质量大部分集中在边缘，就是要使飞轮在一定质量下具有较大的转动惯量。

转动惯量还与轴的位置有关，例如同一均质细棒，对通过棒的中心并与棒垂直的轴和对通过棒的一端并与棒垂直的轴，转动惯量不同：后者大于前者。

刚体对某轴的转动惯量 I 可表示为刚体的质量与某个长度 k 的平方的乘积： $I = mk^2$ ， k 称为刚体对该轴的回旋半径。

如果刚体的密度是均匀的，形状是对称的，就可用公式计算它对于对称轴的转动惯量。形状复杂的物体，则要通过实验测量它的转动惯量。下表列出了一些密度均匀、形状对称的刚体的转动惯量：

某些刚体的转动惯量

刚体	转轴位置	转动惯量
圆环 (半径为 r)	通过环心与环面垂直	mr^2
	沿环的直径	$\frac{1}{2}mr^2$
细棒 (棒长为 l)	通过棒的中心与棒垂直	$\frac{1}{12}ml^2$
	通过棒的一端与棒垂直	$\frac{1}{3}ml^2$
圆板 (半径 r)	通过中心与板面垂直	$\frac{1}{2}mr^2$
	沿圆板的直径	$\frac{1}{4}mr^2$
中实圆柱 (端面半径 r ，长 l)	沿圆柱的轴线	$\frac{1}{2}mr^2$
	通过中心与圆柱轴线垂直	$\frac{1}{4}mr^2 + \frac{1}{12}ml^2$
空心圆柱体(内径 r_1 ，外径 r_2)	通过中心轴	$\frac{1}{2}m(r_1^2 + r_2^2)$
实心球(半径 r)	通过球心	$\frac{2}{5}mr^2$
球壳(半径 r)	通过球心	$\frac{2}{3}mr^2$

平行轴定理(parallel axis theorem)

亦称斯坦纳 (Steiner) 定理, 可表述为: 刚体对任意转轴的转动惯量 I 等于刚体对通过质心的平行轴的转动惯量 I_C 加上刚体的质量 m 乘以两平行轴间距离 l 的平方。即

$$I = I_C + ml^2。$$

刚体的角动量(angular momentum of rigid body)

刚体对于定点O的角动量 $L = \sum_i \mathbf{r}_i \times \mathbf{p}_i = \sum_i m_i \mathbf{r}_i \times \mathbf{v}_i$ ，式中 $\mathbf{r}_i(x_i, y_i, z_i)$ 是在以O为原点的固定坐标系Oxyz中刚体中的质点 p_i 的位矢， m_i 和 \mathbf{v}_i 分别为 p_i 的质量和速度(图1-7-4)。由于 $\mathbf{v}_i = \boldsymbol{\omega} \times \mathbf{r}_i$ ，所以

$$L = \sum_i m_i \mathbf{r}_i \times (\boldsymbol{\omega} \times \mathbf{r}_i)$$

对于绕定轴z转动的刚体， $\dot{x} = \dot{y} = 0$ ，刚体对z轴的角动量

$I_{zz} = \sum_i m_i (x_i^2 + y_i^2)$ 是刚体对z轴的转动惯量。即绕定轴Oz转动的刚

对该轴的角动量等于刚体对该轴的转动惯量与绕轴转动的角速度的乘积。
角动量又叫动量矩。

力矩的功(work done by moment of force)

刚体转动时，外力所做的功可用研究转动时常用的物理量力矩和角位移来表示。即作用在刚体上的合外力所做的元功 W 等于所有外力相对于转轴的合力矩 M_z 与刚体绕转轴转过的元角位移 d 的乘积：

$$W=M_z d$$

积分可得

$$W = \int_0^{\theta} M_z d\theta。$$

如果 M_z =常量，则 $W=M_z$ ，即恒为矩所做的功等于力矩与角位移的乘积。

由 $dw=M_z d$ 可得力矩的功率

$$P = \frac{dW}{dt} = M_z \frac{d\theta}{dt} = M_z \omega$$

即力矩的功率等于力矩与角速度的乘积。

转动刚体的动能(kinetic energy of rotation rigid body)

刚体对定点 O 的转动动能为

$$T = \frac{1}{2} \sum_i m_i v_i^2$$
$$= \frac{1}{2} \sum_i m_i \mathbf{v}_i \cdot (\boldsymbol{\omega} \times \mathbf{r}_i)。$$

式中的 m_i 、 \mathbf{v}_i 和 \mathbf{r}_i 分别为刚体中质点 P_i 的质量、速度和位矢， $\boldsymbol{\omega}$ 为刚体转动的角速度。

上式变形可得

$$T = \frac{1}{2} \boldsymbol{\omega} \cdot \sum_i (\mathbf{r}_i \times m_i \mathbf{v}_i)$$
$$= \frac{1}{2} \boldsymbol{\omega} \cdot \mathbf{L}。$$

当刚体绕固定轴转动时，上式可以简化成

$$T = \frac{1}{2} I \omega^2，$$

式中 I 为刚体对固定转动轴的转动惯量。

由于刚体是一个不变质点系，内力做功的总和等于零，根据质点系的动能定理，刚体转动动能的增量等于作用在刚体上的外力矩做功之和。这就是刚体转动的动能定理。

刚体的平衡(equilibrium of rigid body)

作用在刚体上的空间力系平衡的必要与充分条件是力系的主矢 R 和主矩 M_0 都等于零：

$$R = \sum_i F_i = 0, M_0 = \sum_i (r_i \times F_i) = 0$$

其中的矩心 O 可以是空间中任意一点。

因此，空间力系的平衡条件是：在每一坐标轴上所有外力的投影之和都等于零；对每一坐标轴所有外力的力矩之和也都等于零。对于共点力系作用下的物体，只应用 $R=0$ 即可求出平衡条件；对于有固定转轴的物体，只应用 $M_0=0$ 即可求出平衡条件。

对于平面力系，如果力系在 Oxy 平面内，平衡方程可写成：

$$R_x = \sum_i F_{ix} = 0, R_y = \sum_i F_{iy} = 0,$$

$$M_{Oz} = \sum_i (x_i F_{iy} - y_i F_{ix}) = 0。$$

平衡的稳定性(stability of equilibrium)

处于平衡位置的力学系统，在受到外力的微小扰动后，有的趋向于恢复到原来的平衡位置，有的则趋向于越来越远离平衡位置；前一种情况，力学系统处于稳定平衡，后一种情况，力学系统处于不稳定平衡。这就是力学系统的平衡稳定性问题。物体处于不稳定平衡位置时，受到外界扰动后重心降低；物体处于稳定平衡位置时，受到外界扰动后重心升高。圆锥体放在水平面上，有三种平衡情况（图 1-7-5）：稳定平衡、不稳定平衡和中性平衡。中性平衡系统在运动过程中它的重心既不升高也不降低。物体在重力作用下的中性平衡也叫随遇平衡。1644 年 E. 托里拆利已经发现，一个物体系统当其重心处于最低位置时，系统是稳定的。物体系统的重心处于最低位置时，其重力势能最小。

对于保守系统（机械能守恒），如果它的势能在某个平衡位置是个孤立的极小值，则系统在这个位置上的平衡是稳定的。如果保守系统在某个位置上势能不是极小值，则系统在这个位置的平衡是不稳定的。这是因为，对于保守系统，动能 T 和势能 V 之和为一常量，当系统处于静止时 ($T=0$)，如果势能 V 不处于极小值，它的量值可以减小而部分地转化为动能，系统将从静止变为运动。如果系统处于静止时 ($T=0$) 势能 V 处于极小值，它的量值不可能再减小，没有可能发生势能向动能的转化，物体将继续保持其静止状态。由图 1-7-6 的势能曲线可看出：在势能的极小值 L_1 、 L_2 和极大值 M_1 、 M_2 处，曲线的切线是水平的，在这些地方系统所受的力 $f = -\frac{dV}{ds} = 0$ ，因而处于平衡状态。系统发生位移时，它将受到力的作用：在 L_1 、 L_2 处，力是阻碍系统远离平衡位置的，因而是稳定平衡；在 M_1 、 M_2 处，力是协助物体远离平衡位置的，因而不稳定平衡。在曲线的水平段 N_1N_2 ，也有 $f = -\frac{dV}{ds} = 0$ ，系统也处于平衡状态，但当系统发生位移时，不受力的作用，属于中性平衡。所以，当系统处于“势阱”中时，将存在稳定平衡，并且与其他区域相隔的“势垒”愈高，平衡也愈稳定。

对于存在着耗散力的非保守系统，耗散力不影响平衡位置的稳定特性，原来稳定的仍然稳定，原来不稳定的仍然不稳定。

主要参考资料

1. 肖士。理论力学简明教程。第 2 版。北京：高等教育出版社，1983。
2. 郭士。理论力学。第 1 版。北京：人民教育出版社，1982。
3. 周衍柏。理论力学教程。第 1 版。北京：人民教育出版社，1979。
4. 赵景员，王淑贤。力学。第 1 版。北京：人民教育出版社，1979。
5. 漆安慎，杜婵英。力学基础。第 1 版。北京：人民教育出版社，1982。
6. M. Alonson, E. J. Finn。大学物理基础，第一卷，力学与热力学。第 1 版。北京：高等教育出版社。1983。
7. E. A. 史特劳夫。分子物理学，上册。第 1 版。北京：高等教育出版社，1959。
8. 中国大百科全书出版社编辑部。中国大百科全书·物理学。第 1 版。北京：中国大百科全书出版社，1987。
9. 中国大百科全书出版社编辑部。中国大百科全书·力学。第 1 版。

北京：中国大百科全书出版社，1985。

10. 科学出版社名词室。物理学词典，上册。第1版。北京：科学出版社，1988。

八、流体力学

流体(fluid)

液体和气体统称为流体。流体与固体的一个显著差别在于流体很容易变形：不必费多大力，就可以使互相邻近的若干个流体质点间的距离发生很大变化。这种特性叫流体的易流动性。形成固体和流体间这种差别的原因是：固体的剪应力很大，而且与应变成正比，例如，把铁块的下层固定，不用很大的力去推它的上面一层，上下层之间就不可能发生错移，这是因为剪应力起了阻碍作用。流体则不能承受剪应力，或只能承受很小的剪应力，而且流体剪应力与变形没有直接的关系，只与变形的快慢——变形率成正比，因而使流体缓慢变形并不费力。

流体的另一个特性是它的粘滞性（参见“粘性流体”）。

液体和气体的主要差别在于气体容易被压缩；但是，当外加压强无限减小时，气体又会无限膨胀，从而总是充满容纳它的整个容器。液体则不容易被压缩，而且能凝聚在一起，在容器中形成自由表面。根据气体和液体的上述特性，通常把气体称为可压缩流体，液体称为不可压缩流体。不过这种区分不是绝对的，还要看它们的运动条件。低速飞行的飞机周围空气的压缩性可以忽略；传播声音或水下爆炸时，水就要看成可压缩的了。

从微观方面看，流体是由分子组成的，分子之间存在着空隙。但是在流体力学中，并不考虑流体的分子结构，而把它们看作连续的流体介质，即认为流体完全充满它所占有的空间而没有任何空隙。因为在一般情况下，1立方微米气体中含有 2.7×10^7 个分子，1立方微米水中含有 3.3×10^{10} 个分子，可以认为流体的任何一个宏观的微小体积中都含有大量分子，不会因为分子随机出入而影响它的统计平均特性。所以，从宏观方面看，把流体当作连续介质，是完全合理的。这样就可以把流体的一切力学性质——速度、加速度、密度、压强等都当作连续分布的，给流体力学的研究带来很大方便。只有在极其稀薄的气体中，连续介质的概念才不适用。

流体静压强(static pressure of fluid)

作用在静止流体内部的应力大小称为流体静压强。在静止流体内部任取一个面元 S ，根据流体的性质，面元 S 两侧的流体间不存在切向力，也不存在张力，只存在垂直于面元 S 的压力 F 。我们把比值 F/S 称为流体在这个面元上的平均压应力，通常称为平均压强。当面元无限缩小趋于一点时，上述比值的极限值就是流体在该点的静压强，用 p 表示

$$p = \lim_{\Delta S \rightarrow 0} \frac{\Delta F}{\Delta S}。$$

静止流体内一点的压强与过这一点的面元的取向无关。这个结论可做如下推证：

如图1-8-1所示，在静止流体中取一直角三棱柱，它的高 $\overline{OO'} = \overline{AA'} = \overline{BB'} = h$ ， $\angle OAB = \alpha$ 。设三棱柱侧面所受其余流体的压力分别为 F_1, F_2, F_3 ，三个侧面上的平均压强为 $\bar{p}_1, \bar{p}_2, \bar{p}_3$ ，则有

$$F_1 = p_1 h \overline{OA} = \bar{p}_1 h \overline{AB} \cos \alpha,$$

$$F_2 = \bar{p}_2 h \overline{OB} = \bar{p}_2 h \overline{AB} \sin \alpha,$$

$$F_3 = \bar{p}_3 h \overline{AB}。$$

三棱柱的两个底面 OAB 和 $O'A'B'$ 所受的压力与上述三个力垂直，不影响上述三个力的平衡。这个三棱柱虽受重力，但当它保持形状不变而向 O 点无限缩小时，由于压力与面积成正比，重力与体积成正比， F_1, F_2, F_3 变为二阶无穷小，而重力则变为三阶无穷小，因此可略去重力而只考虑上述三个压力的平衡。由 Y 轴方向的平衡可得

$$F_3 \cos \alpha = F_1, \quad \bar{p}_3 = \bar{p}_1;$$

由 X 轴方向的平衡可得

$$F_3 \sin \alpha = F_2, \quad \bar{p}_3 = \bar{p}_2。$$

即三个无穷小面元上的压强 p_1, p_2, p_3 相等。由于侧面 $ABB'A'$ 的取向是任意的，因此，无论面元取在哪个方向，求得的流体内部同一点的压强，其结果总是相同的。

在重力场中，静止流体内部的压强只是高度的函数，在同一高度上不同点上的压强相等，否则流体就会发生水平流动。对于不同水平面上的两点 A 和 B ，若高度差 $h_A - h_B = h$ ，在液体中，其压强差为 $\rho g h$ ，即

$$p_B - p_A = \rho g h \quad \text{或} \quad p_B = p_A + \rho g h。$$

式中 ρ 为液体的密度， g 为重力加速度。对于气体，因为它的密度很小，如果 A, B 两点的高度差不大， $\rho g h$ 不能与 p_A, p_B 相比，可以认为静止气体中各点压强相等。如果气体的高度范围很大，这个结论就不正确了（参见“玻耳兹曼分布律”）。

流体静力学佯谬(paradox of hydrostatics)

底面积相等、高相等而容积不等的容器甲、乙、丙(图 1-8-2), 盛满同种液体时, 虽然作用在各容器中液体的重力并不相等, 但液体对几个容器底面的压力却是相等的。在流体静力学的规律尚未被人们完全认识上前, 这是个令人难以理解的现象, 因而被称为流体静力学佯谬。

其实, 根据流体静力学原理, 容器底面所受的液体压强, 只与液面下的深度有关, 而与容器的形状无关, 上述结果是十分自然的, 没什么谬误可言。

我们还可以从液体和器壁间的相互作用对容器底面所受压强的影响来理解这个问题。

图 1-8-3 是容器乙的竖直剖面图。可以看出, 底面 $A_2B_2C_2D_2$ (用 A_2B_2 表示) 上方的液柱(用 $A_2B_2B_2A_2$ 表示) 体积与图 1-8-2 容器甲中液体的体积是相同的, 因而两个容器底面所受上方液柱的压力也相同。液柱 $A_2B_2B_2A_2$ 两侧的液体(分别用 A_2A_2I 和 B_2B_2J 表示) 分别对两个侧壁(用 A_2I 和 B_2J , 表示) 施加压力, 其方向与侧面垂直; 两个侧面也分别对这两部分液体施加反作用力, 作用力与反作用力大小相等、方向相反。侧壁 A_2I 和 B_2J 分别对 A_2A_2I 和 B_2B_2J 这两部分液体的反作用力的竖直分量, 支持了这两部分液体所受的重力, 因而它们对容器底面的压力没有影响。

容器丙的情况有所不同。图 1-8-4 是容器丙的竖直剖面图。中间的 $M_3N_3M_3$ 表示一个直六面体的竖直液柱。它的底面(用 M_3N_3 表示) 所受的液体压强与容器甲乙的都相同。这个液柱两侧的液体(分别用 A_3M_3 和 B_3N_3 表示), 对其下方底面(分别用 A_3M_3 和 B_3N_3 表示) 产生的压强要比中间的液柱 $M_3N_3M_3$ 对 M_3N_3 面产生的压强小。但是由于这两部分液体分别对侧壁(用 A_3M_3 和 B_3N_3 表示) 施加压力, 同时也受到侧壁对它们的反作用力, 作用力与反作用力大小相等、方向相反。这两个反作用力都有向下的竖直分量, 它们分别增大了在它下方的容器底面 A_3M_3 和 B_3N_3 受到的压强。定量的计算可以证明, 上述效应的结果, 是使容器丙的整个底面所受的压强跟甲乙两个容器底面所受的压强相等。因而这三个容器底面所受的压力也相等。

帕斯卡定律(Pascal law)

描述液体传递压强规律的定律：对密闭液体任一部分施加的压强，将按其原来的大小传递到液体各处和容器壁上。应该注意，这里说的施加在密闭液体上的压强，指的是施加在液体界面上的外力（表面力）引起的压强。这种外力，可以通过活塞作用在液体界面上的力，也可以是作用于液体自由表面上的气体压力。液体各部分所受的重力（质量力或体积力）引起的压强则不能传递。所以有的流体力学教科书把帕斯卡定律表述为：对处于平衡状态的液体，由于部分界面上的外力作用而产生的压强，将等值地传给液体中所有各点。

传递外力引起的压强是液体的特性。对于固体，作用于一端的力可以按原来的大小传递到另一端，而这个力在固体两端的压强，却因两端面积的大小不同而不同（如用手按图钉时）。这是固体跟液体不同的地方。

液压机(hydraulic press)

应用帕斯卡定律制成的锻压机器。用高压泵把液体泵入装有滑动活塞的液压缸，通过活塞施力于密闭液体，液体又对铁砧或底板产生压力，广泛用于各种需要强大压力的工作。图 1 - 8 - 5 是液压机的工作原理图，计算公式为

$$\frac{F_2}{F_1} = \frac{S_2}{S_1} \quad (1)$$

其中 F_2 和 F_1 分别为大小活塞上的压力， S_2 和 S_1 分别为大小活塞的面积。如果 $S_2 \gg S_1$ ，则有 $F_2 \gg F_1$ 。因此，使用液压机可用很小的力得到很大的力。

应该注意，公式(1)只有在活塞质量和液体所受重力可以忽略的情况下才适用。否则，就应该把活塞所受的重力计入活塞上的压力 F_1 和 F_2 ，并考虑液压缸内不同液面高度引起的液体压强差：

$$\frac{F_1}{S_1} + \rho gh = \frac{F_2}{S_2} \quad (2)$$

在实际的液压机里，外加压力远大于活塞和液体所受的重力，公式(1)近似成立，得到的压力小的约 10^4N ，大的可达 10^8N 以上。根据工作物质的不同，液压机又有油压机和水压机之分。

浮力(buoyancy force)

全部或部分浸没在静止流体中的物体受到的流体从各个方向对它施加的压力的合力叫作浮力。浮力的方向竖直向上，即与重力的方向相反。浮力的大小由阿基米德定律确定。浮力的作用线通过同形流体（即物体尚未占据这块空间时充满该空间的流体）的重心（称为浮力中心或浮心）

物体所受的浮力，如果小于它所受的重力，则物体下沉，如果大于它所受的重力，则物体上浮，如果等于它所受的重力，物体就悬浮在流体中。

产生浮力的根本原因是由于物体在流体中所受的向上的压力大于它所受的向下的压力，两者之差就是物体所受的浮力。（某些漂浮在液体表面上的物体只受液体向上的压力。）有些情况下，浸入流体中的物体沉到流体底部并与容器表面紧密接触，只受到流体向下的压力，不受流体向上的压力（图 1-8-6），就不会受到流体的浮力了。

阿基米德原理(Archimedes principle)

关于物体在流体中所受浮力大小的原理，可表述为：物体浸入流体时受到的浮力大小，等于物体排开的流体所受的重力。即物体在流体中所受的浮力为

$$F = \rho g V$$

式中 ρ 是流体的密度， g 是重力加速度， V 是浸入流体中的物体体积。

阿基米德原理可以这样来证明：在静止流体内部，取任意形状的一部分流体作为讨论的对象。因为整个流体是静止的，所以周围流体作用在这部分流体界面上的合力的水平分量为零；而合力的竖直分量跟这部分流体所受的重力大小相等，方向相反，它的作用线通过这部分流体的重心。现在假定把这部分流体取掉，代之以形状完全相同的固体，这个固体表面上各点所受的力跟以前完全一样。因此，周围流体作用于固体的合力也跟以前完全一样，即固体受到一个作用在原来那部分流体重心（固体的浮心）处的竖直向上的浮力，它的大小等于固体排开的那部分流体所受的重力。

潜艇(submarine)

也叫潜水艇，能在水下对敌方舰船或陆地目标发动攻击的舰艇。潜艇的排水量从数十吨至万余吨不等。常规动力潜艇只能短时间下潜，下潜深度一般不超过400m。核动力潜艇则能一连数月在水下潜航，潜航速度可达20kn~30kn(节)，下潜深度一般为300m~500m，有的可达700余米，可在水下连续航行数万公里。核潜艇还能在水下发射远程导弹，打击敌方目标，被公认为当代重要的战略武器。

潜艇是利用阿基米德原理潜水的。潜艇的体积和它在水中所受的浮力是一定的，它的下潜或上浮是靠改变自身所受的重力来实现的。潜艇的艇体由双层船壳构成，内层为耐压壳，主要在水下承受海水的压力，外层为非耐压壳，两层之间是水柜。从船头到船尾有许多隔板，把水柜分成许多部分，每一部分上部有通气阀，下部有通海阀。要使潜艇潜水，可同时打开主水柜的通气阀和通海阀，通海阀进水，水柜内的气体从通气阀排出，主水柜内注满水时潜艇就潜入海中。在操作程序上，通常是先向艇首和艇尾的主水柜注满水，使潜艇处于半潜状态(甲板以上部分露出水面)，然后再向中间的主水柜注水使潜艇全潜。欲使潜艇上浮，可关闭通气阀，向水柜内压入高压空气，水柜中的水从通海阀排出，潜艇就上浮。排水也分两步，操作顺序与注水时相反。潜艇在水中航行时，还可操纵升降舵来改变潜水深度。艇内还设有专门的调整水柜，以便在潜艇因物资、弹药的消耗而减少质量或因海水密度改变而引起浮力变化时，调整潜艇所受的重力，保持潜艇平衡。在艇首尾还设有均衡水柜，通过调整前后水量以消除潜艇在水下可能产生的纵向倾斜。

飞艇(airship)

利用空气浮力升空的航空器。主要由艇体、动力装置、尾翼和吊舱组成。艇体的气囊内充以浮升气体——氢气或氦气，利用它所受的空气浮力，飞艇才能浮在空中。动力装置用来推进飞。艇尾翼用来起稳定、控制作用和改变运动方向。吊舱用来载人和货物。飞艇的升降调整有多种方法，如改变浮升气体量（放气或充气）、抛掉压舱物（水或沙袋）、利用艇体或翼面的气动升力、改变推力方向等。

飞艇按其结构可分为软式、半硬式和硬式三种。

(1)软式飞艇艇体由主气囊和前后副气囊组成(图 1-8-7)。气囊不仅要求密封，还要有承受一定压力的强度。气囊上装有安全活门，压力超过规定值时，能自动放气，保证气囊不被胀破。主气囊内充以浮升气体，副气囊内充以空气。副气囊的作用是在不排放主气囊内浮升气体的条件下，保持主气囊内外压力差为定值。当飞艇高度增加，外界大气压强降低时，副气囊放气使主气囊增大容积，从而维持主气囊内外原来的压强差。当外界大气压增高时，向副气囊内充气使它膨胀，从而减小主气囊的容积，仍能保持主气囊的压强略高于外界大气压。

(2)半硬式飞艇气囊构造与软式飞艇相似，但在气囊下部增加刚性的龙骨梁，组成半硬式飞艇的艇体。

(3)硬式飞艇艇体由刚性骨架外罩蒙布或薄铝皮构成(图 1-8-8)。整个艇体不密封，主要起维持流线型和连接各部分的作用。艇体内部由隔框分割成许多小气室，每个小气室内放有密封的小气囊，内充浮升气体。在地面时，小气囊没有完全胀满气室，随着飞行高度增加，外界大气压下降，囊内气体随之膨胀，在达到规定高度时，气囊恰好胀满气室。众多小气囊可提高飞艇的抗损性和安全性。部分小气囊受损，整个飞艇的浮力不会完全丧失。

第一艘飞艇是法国的 H·吉法尔于 1852 年制成的。1900 年，德国的齐柏林公司开始制造大型硬式飞艇，在第一次世界大战期间，曾多次用飞艇进行远程轰炸。

充氢气的飞艇容易发生事故，同时飞机在 30 年代和 40 年代有了很大发展，因此在此后飞艇就不再生产了。但是跟飞机相比，飞艇也有许多优点。它耗油少、噪音小、空气污染轻，运载量大，且能垂直起落和悬停在空中。因此，在 70 年代又有些国家提出制造大型充氦飞艇的设想，并在逐步实现中。今后，飞艇在勘探、运输、救灾、海洋研究，通讯广播中，将有广阔的应用前景。

理想流体(ideal fluid)

不可压缩的和没有粘性的流体，叫理想流体，也叫无粘流体，是在研究流体运动时采用的一种模型。

实际的流体都是可压缩的而且具有粘性。不过液体的压缩性很小，通常可以忽略不计；气体的压缩性虽然较大，但在压强差较小、运动速度不大，且没有显著的温度变化时，体积的变化也可以忽略不计。一般液体的粘性很小，气体的粘性更小。所以许多实际流体的性质与理想流体的性质很接近。引入理想流体模型可使问题大大简化。

定常流动(steady flow)

在流体所占据的空间每一点上，流体质点的速度矢量、压强和密度等都不随时间改变的流动，称为定常流动，简称定常流。不满足这个条件的流动（如石头入水、炸药爆炸引起的流体流动），称为不定常流动，简称不定常流。

在定常流中实际上总是存在着微小的扰动。扰动有时会很快增长，使定常流动变成非定常流动。如果小的扰动会很快衰减以至消失，运动就是稳定的。也就是说，稳定性取决于加给处于初始状态的流体的小扰动是增长还是衰减。

流线(streamline)

在流体中假想的一些曲线，在这些曲线上各个流体质点的速度方向都跟曲线切线的方向相同。图 1-8-9 中的曲线 LL 就是一条流线，它上面的流体质点 1, 2, 3 的速度矢量分别为 u_1, u_2, u_3 。

流线不是单个流体质点在一段时间中流动的轨迹（称为迹线），而是描述某一特定时刻流体速度空间分布的曲线（这点与力场中的力线很相似），因而它所描写的是速度场。在另外的时刻，当流体中各质点的速度矢量改变即速度场发生变化时，流线就不再是原来的曲线了。只有在定常流中，速度场和流线不随时间变化，迹线才跟流线相重。

在每一瞬时的速度场中，除源点和汇点外，每一点的流速，方向是唯一的，因而流线不会相交。（图 1-8-10）。

流管(stream tube)

由流线组成的管状曲面。在流体中取一封闭曲线，通过曲线上各点的流线就组成一个流管。由于流管是由流线组成的，因而具有流线的一切特性。在定常流动中，流管的形状也不随时间而改变。又由于流线不会相交，流管内的流体只在流管内流动，流管外的流体也只能在流管外流动，流管具有与固体管道类似的性质。

连续性方程(Continuity equation)

表明流体流动的连续性的方程，是质量守恒定律在流体力学中的具体形式。

对于最简单的一维定常流，即流体通过的横截面积、流体的流速和流体密度只由一维空间坐标确定、不随时间而改变的情形，可以考虑一根很细的流管，流体流动的连续性表现为：单位时间内流过任一截面的流体质量相等。因为如果流过任何两个截面的流体质量不等，流管中这两个截面间的流体质量就会不断增加或减少，这与定常流的假设相矛盾。用 A 、 v 和 ρ 分别表示流管中某处的横截面积、流速和流体密度，则有

$$Av = \text{常量。}$$

这就是一维定常流的连续性方程。对于不可压缩流体，有

$$Av = \text{常量。}$$

这表明在不可压缩流体的定常流动中，流管内某处的流速与流管的横截面积成反比。

对于三维空间的一般情况，可以流体占据的空间中任一点 P 为中心作一个微小的直六面体体积元，如图 1-8-11 所示，它的 dx ， dy ， dz 三边分别平行于 x ， y ， z 轴。在 P 点流体质点的速度分量为 v_x ， v_y ， v_z ，密度为

。时间 dt 内流入 AB 面的质量是

$$Q_1 = \left\{ \rho v_x - \frac{1}{2} \frac{\partial(\rho v_x)}{\partial x} dx \right\} dydzdt,$$

流出 CD 面的质量是

$$Q_2 = \left\{ \rho v_x + \frac{1}{2} \frac{\partial(\rho v_x)}{\partial x} dx \right\} dydzdt, ,$$

x轴方向的净流入量为 $-\frac{\partial(\rho v_x)}{\partial x} dx dy dz dt$ 。同理在y轴方向和z轴方向的净流入量分别是 $-\frac{\partial(\rho v_y)}{\partial y} dx dy dz dt$ 和 $-\frac{\partial(\rho v_z)}{\partial z} dx dy dz dt$ 。因此时间dt内流入体积元的净质量为 $-\left\{ \frac{\partial(\rho v_x)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho v_y)}{\partial y} + \frac{\partial(\rho v_z)}{\partial z} \right\} dx dy dz dt$ 。

另一方面，由于体积元内流体质量的变化，其中的流体密度由 ρ 变为 $\rho + \frac{\partial \rho}{\partial t} dt$ ，因而时间dt内的质量增量为 $\frac{\partial \rho}{\partial t} dx dy dz dt$ 。根据连续性条件和质量守恒定律，流入体积元内的质量等于体积元内的质量增量，可得

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial(\rho v_x)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho v_y)}{\partial y} + \frac{\partial(\rho v_z)}{\partial z} = 0。 \quad (1)$$

这就是流体运动的连续性方程。对于定常流， $\frac{\partial \rho}{\partial t} = 0$ ，方程(1)变为

$$\frac{\partial(\rho v_x)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho v_y)}{\partial y} + \frac{\partial(\rho v_z)}{\partial z} = 0。 \quad (2)$$

对于不可压缩流体， ρ 为一常量，定常流的方程(2)又变为

$$\frac{\partial v_x}{\partial x} + \frac{\partial v_y}{\partial y} + \frac{\partial v_z}{\partial z} = 0。 \quad (3)$$

伯努利方程 (Bernoulli equation)

对定常流动的理想流体，沿流线表述机械能守恒定律而得到的方程。用 p 、 ρ 、 v 分别表示在流线上任意一点流体的压强、密度和流速，用 h 表示流体对水平基准的竖直高度，伯努利方程可写作

$$\frac{p}{\rho} + \frac{v^2}{2} + gh = \text{常量。}$$

式中的第二项和第三项分别表示单位质量流体的动能和重力势能，第一项表示单位质量流体的压强势能（即作用在流体界面上的压力对单位质量流体所做的功），是流体特有的能量形式。伯努利方程表明这三者之和为一常量。

伯努利方程可用如下方法进行简单的推证：在定常流中取一细流管，并取流管中任意两个横截面 a_1 、 a_2 之间的一段流体作为研究对象（图 1-8-12）。设在一段很短的时间里，这段流体由 a_1 、 a_2 之间流到了 a_1' 、 a_2' 之间。从能量变化来看，上述过程相当于把 a_1 、 a_1' 之间的一小段流体移到了 a_2 、 a_2' 之间。设这小段流体的质量为 m ，流体在 a_1 、 a_1' 间的流速为 v_1 ，在 a_2 、 a_2' 间的流速为 v_2 ， a_1 、 a_1' 段相对于水平基准的高度为 h_1 ， a_2 、 a_2' 段相对于水平基准的高度为 h_2 。在上述过程中，机械能的增量为

$$\Delta E = \frac{1}{2} \Delta m v_2^2 + \Delta m g h_2 - \frac{1}{2} \Delta m v_1^2 - \Delta m g h_1。$$

由于研究对象是理想流体，不存在粘滞力，流体内部没有非保守力做功。在上述过程中，流管外的流体对这段流体的压力与这段流体的运动速度垂直，因而不做功，只有这段流体两端的压力对流体做了功，其总功为

$$\begin{aligned} W &= p_1 \Delta S_1 \Delta l_1 - p_2 \Delta S_2 \Delta l_2 \\ &= \frac{\Delta m}{\rho} (p_1 - p_2)。 \end{aligned}$$

其中 p_1 和 p_2 分别为 a_1 、 a_1' 和 a_2 、 a_2' 两小段流体的压强， S_1 和 S_2 分别为它们的横截面积， l_1 和 l_2 分别为它们的长度， ρ 为流体的密度。根据功能原理

$$\begin{aligned} \frac{1}{2} \Delta m v_2^2 + \Delta m g h_2 - \frac{1}{2} \Delta m v_1^2 - \Delta m g h_1 \\ = \frac{\Delta m}{\rho} (p_1 - p_2)， \end{aligned}$$

故有

$$\frac{p_2}{\rho} + \frac{1}{2} v_2^2 + g h_2 = \frac{p_1}{\rho} + \frac{1}{2} v_1^2 + g h_1$$

因为位置 a_1 和 a_2 是任意选取的，所以对细流管的任意横截面，或者说得更严格些，对同一流线上的任意点，都有

$$\frac{p}{\rho} + \frac{1}{2} v^2 + gh = \text{常量。}$$

托里拆利定理 (Torricelli law)

容器壁上开一小孔，容器内盛入液体时，液体就以速率 v 从小孔流出（图 1-8-13），我们把 v 称为射流速率。当容器内的液面与小孔的高度差为 h 时， $v = \sqrt{2gh}$ 。也就是说，射流速率与由高度 h 处下落的自由落体末速度大小相同。这就是托里拆利定理。

托里拆利定理可由伯努利方程导出。我们把容器中的液体近似地看作理想流体，并把整个液流看作一个流管。那么，作用于流管两端，即液体表面 A 和小孔 B 处的压强都等于大气压强 p_0 。由于液面 A 的面积远大于小孔 B 的面积，根据连续性方程可知，液面 A 的下降速度 v_0 远小于小孔 B 处的液体流速 v 。因而 v_0 可以忽略不计。由伯努利方程可得

$$\frac{p_0}{\rho} + \frac{1}{2}v^2 = \frac{p_0}{\rho} + gh, v = \sqrt{2gh}.$$

实际上由于存在粘滞性能量损耗，射流速率略小于计算结果（约小 1% ~ 2%）。

如果在器壁上开若干个不同高度的小孔，从上到下，射流速率依次增大。但把容器放在地面上时，从小孔喷出的射流的射程，由于喷出液体的落地时间因小孔高度而异，其最大值并不出现在容器底部。设容器中液面高度为 H ，则距液面为 h 的小孔喷出的液体，其落地时间 t 满足 $H - h = \frac{1}{2}gt^2$

，所以

$$t = \sqrt{2(H - h)/g}$$

水流射程

$$\begin{aligned} s &= vt = \sqrt{2gh} \cdot \sqrt{2(H - h)/g} \\ &= 2\sqrt{h(H - h)} = 2\sqrt{\frac{h^2}{4} - \left(\frac{H}{2} - h\right)^2}. \end{aligned}$$

故当 $h = \frac{H}{2}$ 时，射程 s 有最大值： $s_{\max} = H$ 。

空吸作用 (suction effect)

高速流体压强变小而吸取液体或气体的作用，称为空吸作用。

在定常流中，如果流管在同一水平面上，伯努利方程变为

$$\frac{p}{\rho} + \frac{1}{2}v^2 = \text{常量。}$$

这表明，在同一水平面内，流速大的地方压强小。在图 1-8-14 所示的装置中，水平管在 A、C 两处的横截面积远大于 B 处的横截面积。在 A 处加一外力（如推动活塞）使管中流体自 A 向 C 流动，水平管本身就是一个流管。根据连续性方程，流管的横截面积与流速的乘积等于常量，B 处的流速一定远大于 A、C 两处的流速，因而 B 处的压强也远小于 A、C 两处的压强。如果 B 处的压强比大气压强还小，容器 D 中的流体由于大气压强的作用就会沿竖直管上升到 B 处，而被水平管中的流体所带走。

空吸作用有广泛的应用；如喷雾器、水流抽气机、内燃机中的汽化器等，都是根据这一原理制成的。

粘性流体 (viscous fluid)

粘性不能忽略的实际流体。粘性的表现是：当流体内任一截面两侧的流体层具有沿截面的相对速度时，两个流体层间会产生阻碍相对运动的切向内摩擦力，使流体的动能转化为内能。流体的粘性是否可以忽略是跟所研究的问题性质有关的。例如在研究物体在流体中的运动时，就不能忽略流体的粘性，否则就不能解释物体在流体中运动时所受的阻力。在研究实际流体的定常流动时，虽然流体的压缩性可以忽略不计，但由于流体的内摩擦力引起的能量损耗是必须考虑的。

粘性流体的层流中，相邻流层的内摩擦力 F 与接触面法线方向 n 的速度梯度 $\frac{dv}{dn}$ 成正比，与接触面积 A 成正比，即

$$F = \eta A \frac{dv}{dn} \quad (1)$$

式中的比例系数 决定流体粘性的大小，称为流体的动力粘度。动力粘度的单位为帕斯卡秒，简称帕秒，符号为 $\text{Pa} \cdot \text{s}$ 。

液体的动力粘度随温度的升高而减小，随压强的增加而增大，但压强对液体动力粘度的影响较小。气体的动力粘度随温度的升高而增大，随压强改变的变化可以忽略不计。

(1)式也可改写成 $\frac{F}{A} = \eta \frac{dv}{dn}$ ，式中 $\frac{F}{A} = C$ 表示流体内部的剪应力， $\frac{dv}{dn}$

表示剪切速率，两者间存在正比关系（ η 为比例常量），这是牛顿在他的名著《自然哲学的数学原理》中早已指出的。剪应力和剪切速率间满足正比关系的流体称为牛顿流体。还有一些流体，不满足上述关系，有的流体，粘度系数不仅依赖于剪切速率，还依赖于受到剪切作用的时间（如触变性流体，受到搅拌时变稀薄），这样一些流体，我们称之为非牛顿流体。高分子量的流体，中等浓度悬浮物的流体，软纤维和质点悬浮物的流体，都是非牛顿流体。非牛顿流体在化工、化纤、塑料、石油、轻工和食品等许多工业部门有着广泛的应用。

层流 (laminar flow)

又称片流，是粘滞流体的一种比较稳定的流动状态，各流体质点的迹线都是有规则的光滑曲线。管道内的层流，流体质点的迹线都平行于管壁。例如在圆形截面的管道中，流体形成平行于管壁的圆筒状薄层，每个薄层内的流速相同，靠近管壁的外层比内层流得慢，中心轴附近流速最大，紧靠管壁的一薄层，附着在管壁上，可认为其流速为零。

斯托克斯公式(stokes formula)

确定球形物体在粘滞液体中运动时所受粘滞阻力的公式：

$$f=6\pi\eta rv,$$

它表明，球形物体在粘滞流体中运动时所受的粘滞阻力 f 与流体的粘度系数 η 、物体的半径 r 和物体的运动速度 v 都成正比。这个公式是英国物理学家斯托克斯 (G.G.Stokes, 1819 ~ 1903) 于 1851 年依据流体动力学方程推导出来的。它只适用于物体很小、运动速度缓慢的情况，在气象学以及密立根油滴实验等许多问题中有重要的应用。

终极速度 (terminal velocity)

在粘滞流体中下落的物体，受到三个力：重力、流体的浮力和流体的粘滞阻力。重力和流体的浮力，一般可看作常量，流体的阻力 f 则随物体的下落速度 v 而变： $f=f(v)$ 。下落速度小时 f 与 v 成正比： $f=k_1v$ ；下落速度较大时 f 与 v^2 成正比： $f=k_2v^2$ 。开始下落时物体做加速运动，速度增大到一定程度，物体受到的重力跟流体的浮力和粘滞阻力平衡，物体将以稳定速度 v_s 匀速下落。这个稳定速度 v_s ，就是下落物体的终极速度。

在流体中下落的物体，运动方程可写作

$$m \frac{dv}{dt} = P - f(v)$$

式中的 P 是物体的重力与流体浮力的合力。物体匀速下落时， $\frac{dv}{dt} = 0$ ，

可得 $P - f(v) = 0$ ， $f(v) = P$ 。

$$\text{当 } f(v) = k_1v \text{ 时，终极速度 } v_s = \frac{P}{k_1}；$$

$$\text{当 } f(v) = k_2v^2 \text{ 时，终极速度 } v_s = \sqrt{\frac{P}{k_2}}。$$

伞兵从空中降落时， $f=k_2v^2$ ， k_2 的值约 $0.2\text{kg/m} \sim 0.3\text{kg/m}$ 。如果伞兵的体重 75kg ，可得终极速度 $50\text{m/s} \sim 60\text{m/s}$ 。若张开降落伞， k_2 的值增大百倍，终极速度约 $5\text{m/s} \sim 6\text{m/s}$ ，相当于从不到 2m 高处跳下时的落地速度，是人体完全可以承受的。

液滴在空气中降落时，阻力 $f=k_1v$ 。根据斯托克斯公式， $k_1=6\pi\eta r$ ，式中 r 为液滴半径， η 为空气的动力粘度。如果液滴的密度为 ρ ，空气的密度为 ρ' ，则有

$$\begin{aligned} v_s &= \frac{P}{k_1} = \left(\frac{4}{3}\pi r^3 \rho g - \frac{4}{3}\pi r^3 \rho' g \right) / 6\pi\eta r \\ &= \frac{2r^2(\rho - \rho')g}{9\eta} \end{aligned}$$

这表明下落液滴的终极速度与滴液半径的平方成正比。这正是为什么细小雾滴下落缓慢的原因。可以反过来应用上述结果，测出液滴的终极速度，从而算出难以直接测量的液滴半径。

湍流 (turbulent flow)

也称紊流，是流体的不规则运动。管道中处于湍流状态的粘滞流体，其流速和压强都随时间而不断变化，流体质点既做平行于管壁的运动，也做无规则的横向运动，互相混杂、碰撞，这线极其复杂。

管道内的粘滞流体是否处于湍流状态可用雷诺数来判断。英国物理学家雷诺 (O.Reynolds, 1842 ~ 1912) 于 1883 年发现，截面几何形状相似的管道中流动的粘滞流体，不论其 ρ 、 η 、 v 、 l 如何不同，只要比值 lv/η 相同，流动情况就相同。这个比值就称为雷诺数，用 Re 表示：

$$Re = \frac{\rho v l}{\eta}。$$

上式中的 ρ 为流体密度、 η 为流体的动力粘度， v 是代表流体运动特点的特征速度， l 是按研究的问题特点约定的特征长度。在考虑直管中流动的流体时可取管内流体的平均流速为 v ，管道横截面直径为 d 。考虑固体圆球在空中飞行或在风洞中做实验时可取圆球直径为 d 。

雷诺数是个无量纲的数，不随测量时选用的单位制而改变，它有一个临界值，即临界雷诺数 Re_{cr} ，是划分层流和湍流的界限。直管中流体的 Re_{cr} 值约为 2300 ~ 2800。当 $Re < Re_{cr}$ 时，流动是层流，在这种情况下，一旦发生小的随机扰动，随着时间的推移，扰动会自动衰减下去；当 $Re > Re_{cr}$ 时，层流就不可能存在，一旦有小的扰动，扰动就会增长而变为湍流。

升力 (ascensional force)

如果气流作用在物体上的合力有一个向上的竖直分力, 这个分力就叫升力, 又称上举力。

升力的产生, 有时是由于物体自身的旋转。在静止空气中自右向左做无旋运动的球, 根据运动的相对性, 可以看成是静止的球处在自左向右做定常流动的气流中 (图 1-8-15 甲)。由空气流线的对称分布可知, 球上方和球下方对应点的空气流速是相等的。根据伯努利方程, 球上方和下方对应点的空气压强也相等, 球并没有因为空气流动而受到向下或向上的力。如果球绕垂直于纸面的轴做顺时针方向的旋转, 由于空气的粘滞性, 球会带动周围的空气一起旋转。空气旋转的速度方向, 在球的上方与原来气流的方向一致, 在球的下方与原来气流的方向相反。空气旋转速度与原来气流速度叠加的结果, 使球上方各点的气流速度比球下方对应点的气流速度快, 流线变得上下不对称了 (图 1-8-15 乙), 速度大的地方, 流管细, 流线也密。根据伯努利方程可知, 球下方的空气压强大于球上方的空气压强, 因而球受到了升力。球类运动中上飘的旋转球就是由于这种升力的作用。

物体的形状和它在气流中的取向, 也会使物体受到升力。如飞机的机翼, 上下两面是不对称的, 而且前缘到后缘的连线 AB (称为翼弦) 与气流的方向有一个小的倾角 (称为冲角或攻角), 其剖面如图 1-8-16 甲所示。当机翼在空气中运动时, 除贴近机翼表面的一薄层气体外, 都可看作理想流体, 贴近表面的气体薄层 (称为附面层), 则不能忽略其粘滞性。由于贴进机翼下表面的薄层中的气流, 在到达机翼尾 B 时, 比贴近机翼上表面的薄层气流经过的路程短, 受粘滞阻力的影响小一些, 它的速度比后者大, 压强却比后者小。因此, 下方薄层中的气流要由 B 拐向 S, 又在到达 S 之前耗尽其动能向 B 回流, 这就形成涡旋, 如图 1-8-16 乙所示。这个涡旋称为起动涡旋。根据角动量守恒定律, 在机翼后缘产生涡旋的同时, 必有一股朝相反方向旋转的气流产生。这个气流绕机翼循环, 称为机翼环流 (图 1-8-17 甲)。环流的速度在机翼上方与原来的气流速度方向相同, 在机翼的下方与原来的气流方向相反, 两者叠加的结果; 使机翼上方气流速度增大 (流线密度增大), 机翼下方气流速度减小 (流线密度减小), 如图 1-8-17 乙所示。这就使机翼下方的压强大于机翼上方的压强, 机翼因而得到升力。

主要参考资料

1. 漆安慎, 杜婵英。力学基础。第 1 版。北京: 人民教育出版社, 1982。
2. 赵景员, 王淑贤。力学。第 1 版。北京: 人民教育出版社, 1979。
3. C.力学的物理基础, 下册。第 1 版。北京: 高等教育出版社, 1983。
4. F.W.Sears 等。大学物理, 第一册。第 1 版。北京: 人民教育出版社, 1979。
5. 梁绍荣等。普通物理学第一分册: 力学。第 1 版。北京: 高等教育出版社, 1987。
6. 郭士 . . .理论力学, 下册。第 1 版。北京: 人民教育出版社, 1982。
7. 梁昆森。力学, 下册。第 1 版。北京: 人民教育出版社, 1980。
8. A.H. 巴特勒雪夫。流体力学, 上册。第 1 版。北京: 高等教育出版社, 1958。

9. 西安交通大学流体力学教研室。流体力学，上册。江俊宏。第 1 版。北京：高等教育出版社，
10. 易家训。流体力学。第 1 版。北京：高等教育出版社，1982。
11. L. 普朗特.流体力学概论。第 1 版。北京：科学出版社，1966。
12. . .洛强斯基。液体与气体力学，上册。第 1 版。北京：高等教育出版社，1958。
13. 西安交通大学、哈尔滨建筑工程学院。水力学。第 1 版。北京：人民教育出版社，1979。
14. [日] 寺泽宽一，今井功。航空力学。岩波书店，1942。
15. [日] 谷一郎。应用流体力学。岩波书店，1941。
16. 中国大百科全书出版社编辑部。中国大百科全书·物理学。第 1 版。北京：中国大百科全书出版社，1987。
17. 中国大百科全书出版社编辑部。中国大百科全书·军事，2。第 1 版，北京：中国大百科全书出版社，1989。
18. 中国大百科全书出版社编辑部。中国大百科全书·航空航天。第 1 版。北京：中国大百科全书出版社，1985。
19. 科学出版社名词室。物理学词典，上册。第 1 版。北京：科学出版社，1988。
20. 乔际平等。初中物理备课手册。第 1 版。北京：人民教育出版社，1990。
21. 中国大百科全书出版社《简明不列颠百科全书》编辑部。简明不列颠百科全书，5。第 1 版。北京：中国大百科全书出版社，1986。
22. 中国大百科全书出版社《简明不列颠百科全书》编辑部，简明不列颠百科全书，6。第 1 版。北京：中国大百科全书出版社，1986。
23. 张宪魁。流体静力学的佯谬。物理教学，1981(5)：23~24
24. 陈文方，范椿。非牛顿流体力学。自然杂志，1985(4)：243~244

九、机械振动和机械波

机械振动 (mechanical vibration)

力学系统中某一物理量在所观测的时间内不停地经过最大值和最小值而变化的现象称为机械振动，简称振动。振动可分为周期振动和非周期振动。如果每隔一固定时间 T ，振动量的变化就完全重复一次，这种振动称为周期振动。时间 T 称为这个振动的周期，周期的倒数 $f = \frac{1}{T}$ 称为振动的频率。用 y 表示周期振动的量在任意时刻 t 的值，则 y 为时间的周期函数

$y = y(t) = y(t+T) = y(t+2T) = \dots$ 乐器的振动都是周期振动，非周期振动则形成噪声。

振动产生的原因，一是由于物体偏离平衡位置时受到指向平衡位置的恢复力，二是由于物体本身具有惯性。偏离平衡位置的物体，在恢复力的作用下回向平衡位置，但惯性使物体不停止在平衡位置，继续向另一方向偏离平衡位置，因而又受到恢复力的作用。如此往复循环，就形成振动。恢复力一般是弹性力或准弹性力。准弹性力的本质不是弹性力，但其变化规律与弹性力相同。如单摆摆球在振动时所受的沿圆弧切线的分力，就是准弹性力。

振动现象在科学技术领域有突出的重要意义。在工程技术中，振动过大会造成机械、桥梁、交通工具或建筑物的损坏。对于转动机械，其转速达到一定程度（称为临界转速）时，转子或轴会产生共振，造成破坏。强烈的振动还会使测试仪表失灵。振动在生产技术中也被广泛加以利用，如凿岩机、汽锤、风镐、振动筛、医疗中的按摩器以及混凝土浇注中的捣振等。振动对人体也有影响。人体可看成一个弹性体，其共振频率在几赫兹到几十赫兹不等。人体直立或正坐时，对 $4\text{Hz} \sim 8\text{Hz}$ 的上下振动最敏感，振动加速度超过一定值，人就会感觉不舒适，以致疲劳、工作效率降低。在设计交通工具及由人操纵的设备时，都要考虑使振动在人感觉舒适的标准内。低频振动对人体的危害大。 $0.1\text{Hz} \sim 0.6\text{Hz}$ 的振动会影响人的平衡系统，导致运动病（如晕车、晕船）。

除了机械振动外，非力学系统的物理量也会发生与机械振动类似的现象。广义地说，某一系统的物理量在观测时间内不停地经过最大值与最小值而变化的现象，称为振荡，如电磁振荡。振荡是一般术语，振动则仅指机械振动。

自由振动 (free vibration)

系统不受外力作用，也不受任何阻力，只在自身恢复力作用下的振动。又称无阻尼振动，或固有振动。由于没有阻尼，则能量没有损失，振动将永远继续下去。这是一种理想情况，实际上并不存在。

自由振动的振幅，决定于振动开始时系统所具有的能量。自由振动的频率，决定于系统本身的特性。称为固有频率。

简谐振动是一种最简单、最基本的自由振动。

振幅 (amplitude)

描述振动强弱的物理量。

狭义地说，它表示振动物体的最大运动幅度，即物体离开平衡位置的最大距离。

广义地说，它也表示按一定规律振荡的物理量所能达到的最大值。如正弦交流电的电压（或电流）的最大值称为电压（或电流）的振幅。

振幅是标量，没有方向，且永远为正。它的大小与频率无关，由系统的能量决定，振幅大，则表示系统的能量大。

简谐运动 (simple harmonic motion)

质点的位移按余弦 (或正弦) 规律随时间而变化的振动称为简谐运动, 它可用下述方程表示:

$$x = A \cos(\omega t + \varphi),$$

或

$$x = A \sin(\omega t + \varphi).$$

其中 A 为振幅, $\omega = 2\pi f$ (f 是频率) 为角频率或圆频率, φ 为初相。

由于在 xy 平面内做匀速圆周运动的质点的运动轨道方程可写作 $r = r \cos(\omega t + \varphi) \cdot i + r \sin(\omega t + \varphi) \cdot j$ 可知运动质点在 x 轴和 y 轴上的投影

$$x = r \cos(\omega t + \varphi),$$
$$y = r \sin(\omega t + \varphi),$$

都做简谐运动。

由式 $x = A \cos(\omega t + \varphi)$ 可得

$$\frac{d^2 \xi}{dt^2} = -\omega^2 \xi.$$

即做简谐运动的质点的加速度, 始终与质点偏离平衡位置的位移成正比, 方向与位移相反。由此可得简谐运动的动力学定义: 若振动质点所受的恢复力始终与它的位移大小成正比, 方向与位移相反, 则质点做简谐运动。在不考虑媒质阻力的情况下, 弹簧振子的振动、单摆和复摆的微幅振动, 浮体在竖直方向上的微小振动, 都是简谐运动。

简谐运动也可用复指数函数来表示, 这种表示方法可把求解简谐运动问题过程中比较复杂的三角函数运算简化为指数函数的运算。用 j 表示虚数 $\sqrt{-1}$, 根据欧拉方程 $\cos \theta + j \sin \theta = e^{j\theta}$ 可得

$\cos(\omega t + \varphi) + j \sin(\omega t + \varphi) = e^{j(\omega t + \varphi)}$ 。因此简谐运动 $x = A \cos(\omega t + \varphi)$ 即为 $z = A e^{j(\omega t + \varphi)}$ (的实部; 用 $A e^{j(\omega t + \varphi)}$ 代替 $A \cos(\omega t + \varphi)$ 求解问题时, 可只取所得解的实部。简谐运动 $y = A \sin(\omega t + \varphi)$ 即为 $z = A e^{j(\omega t + \varphi)}$ 的虚部; 用 $A e^{j(\omega t + \varphi)}$ 代替 $A \sin(\omega t + \varphi)$ 求解问题时, 可只取所得解的虚部。

简谐运动是最基本最简单的振动, 任何复杂的自由振动都可以由许多不同频率和振幅的简谐运动合成。

相 (phase)

在简谐运动方程 $A=A \cos(\omega t + \phi)$ 中, 相当于角度的部分 $(\omega t + \phi)$ 称为相或相位, 是确定质点在时刻 t 的运动状态的物理量。

振动开始时, 即 $t=0$ 时的相位 ϕ , 称为初相或初相位。它表示振动的初始状态。

频率相同的两个简谐振动的初相位不同, 则在任意时刻的相位也不同。它们在同一时刻的相位的差值, 称相差。相差为 $2n$ ($n=0, \pm 1, \pm 2, \dots$) 时称为同相, 相差为 $(2n+1)\pi$ 时称为反相

单摆 (Simple Pendulum)

又称数学摆。一根不会伸长的轻细线(其质量可以忽略),上端固定,下端悬挂一个体积很小。可以看成质点的小球,使小球稍微偏离平衡位置后放开,它在重力作用下在竖直平面内往复摆动,这种振动系统称为单摆。

单摆的振动,在所受阻力和摆幅也很小的情况下,可以看成简谐运动。

摆球所受的阻力可以忽略时,可认为它只受重力和绳的拉力作用,使摆球在竖直平面内沿半径(摆长) l 的圆弧往复摆动的恢复力是重力沿圆弧切线方向的分力 $F = -mgsin\theta$ (图1-9-1)。其中,负号表示力的方向始终与位移方向相反。根据牛顿第二定律 $F = ma$ 和圆周运动的切向加速度 a

$= l \frac{d^2\theta}{dt^2}$,单摆的运动方程为:

$$ml \frac{d^2\theta}{dt^2} = -mg \sin\theta.$$

$$\text{即} \quad \frac{d^2\theta}{dt^2} + \frac{g}{l} \sin\theta = 0. \quad (1)$$

这是一个非线性微分方程。当振幅很小,即摆角 θ_0 很小时, $\sin\theta \approx \theta$,方程变为线性的:

$$\frac{d^2\theta}{dt^2} + \frac{g}{l} \theta = 0. \quad (2)$$

即单摆做线性振动,其解为

$$\theta = \theta_0 \cos\left(\sqrt{\frac{g}{l}}t + \alpha\right)$$

这是一个振幅(最大摆角)为 θ_0 ,角频率 $\omega = \sqrt{g/l}$,初相位为 α 的简谐运动。它的周期为

$$T = \frac{2\pi}{\omega} = 2\pi\sqrt{\frac{l}{g}}. \quad (3)$$

T 只由摆长 l 决定,而与振幅和摆球质量无关。这就是单摆线性振动的等时性。

当摆角较大时, $\sin\theta \neq \theta$,根据方程(1),单摆做非线性振动。一般振动系统在平衡位置附近的微小振动都可看作线性振动,大的振动则是非线性的。与非线性振动不同,非线性振动不再有一定的固有周期,振动的周期是随振幅而变化的。在大摆角的情况下,单摆的周期可表示为

$$T' = 2\pi\sqrt{\frac{l}{g}}\left(1 + \frac{1}{4}\sin^2\frac{\theta_0}{2} + \frac{9}{64}\sin^4\frac{\theta_0}{2} + \dots\right). \quad (4)$$

由此可知,单摆只有在振幅足够小,即 $\theta_0 \rightarrow 0$ 时,才具有等时性。这个“足够小”应该小到什么程度,要依研究问题所需的精确度来确定。显然,用(3)式中的 T 代替(4)式中的 T' ,其相对误差近似等于

$$\eta = \frac{T' - T}{T} = \frac{1}{4}\sin^2\frac{\theta_0}{2}.$$

下表列出了与几个最大摆角 θ_0 相应的 η 值:

θ	60 °	30 °	15 °	10 °	5 °
	0.0625	0.0167	0.00426	0.00190	4.76×10^{-4}

由表可见，在摆角不大于 15 ° 时，相对误差小于 5‰，对于一般要求，已足够精确了。如果要求精确度更高，摆角小于 5 ° 时，相对误差小于 0.5 ‰。

用单摆做实验时，要注意摆长不可过短亦不可过长。如果摆长很短，摆球只要偏离平衡位置很小的距离，其偏角就会大到不符合线性振动条件： $\sin \theta \approx \theta$ ，单摆就不是作简谐运动了。并且摆长短，则周期短，测量误差易大；如果摆长过长，除了实验不方便之外，更重要的是这时摆线的质量就不可忽略，摆的运动也就不符合单摆运动规律了。

复摆 (compound pendulum)

又称物理摆。能在重力作用下绕固定水平轴做自由摆动的刚体称为复摆。

如图 1-9-2 所示 ZZ 为水平轴, C 为刚体的质心, 刚体质量为 m , 通过 C 点的竖直平面与垂直于该平面的水平轴 ZZ 的交点为 O 。当刚体偏离平衡位置, 即 CO 偏离竖直方向某一角度 θ 时, 重力对转轴 ZZ 的力矩为 $M = mgl \sin \theta$, 其中 $l = CO$ 是质心到转轴的距离。

当摆角很小时, $\sin \theta \approx \theta$ (以弧度为单位),

$$M = mgl \theta。$$

设 I 为刚体绕轴 ZZ 的转动惯量, 则得

$$I \frac{d^2 \theta}{dt^2} = -mgl \theta。$$

设 k 为这个刚体的回旋半径, 则 $I = mk^2$, 代入上式, 有

$$\frac{d^2 \theta}{dt^2} + \frac{gl}{k^2} \theta = 0。$$

这说明在摆角很小时, 复摆的振动也是简谐运动, 其振动周期为

$$T = 2\pi \sqrt{\frac{k^2}{gl}},$$

$L = \frac{k^2}{l}$ 称为等效单摆长度, 即摆长等于这个长度的单摆的周期与复

摆的周期相同。

扭摆 (torsional pendulum)

细金属悬线下固定一刚体，悬线通过刚体质心，使刚体绕悬线转过一小角度，放开后，刚体以悬线为轴往复扭动，这种装置称为扭摆（图 1-9-3）。

当刚体在方向与悬线平行的力偶矩作用下发生转动时，金属悬线被扭转，因而产生一个反向的扭转力矩，即恢复力矩 M ，作用在刚体上，这力矩与外力矩平衡，并与扭转角成正比： $M=-c\theta$ ，式中 c 为比例常量，决定于金属悬线的性质。去掉外力矩后，恢复力矩使刚体反向转动。当刚体转回平衡位置时，恢复力矩为零，但由于惯性，刚体继续转动，使悬线被反向扭转，悬线又产生正向力矩，使刚体的转动减速，直至角速度为零，而正向力矩又使刚体朝正向转动。达到平衡位置时，又由于惯性继续转动，又使悬线被正向扭转。这样，当阻力可以不计，扭摆就反复扭转摆动下去。

设刚体的转动惯量为 I ，根据转动定律，有

$$I \frac{d^2\theta}{dt^2} = M = -c\theta。$$

即

$$I \frac{d^2\theta}{dt^2} + c\theta = 0。$$

由此可知，扭摆的振动也是简谐运动，它的周期为

$$T = 2\pi \sqrt{\frac{I}{c}}。$$

阻尼振动(damped vibration)

又称减幅振动，是在恢复力和阻力作用下的振动。振动系统由于克服阻力损失能量而使振幅逐渐减小。使系统损失能量的阻尼作用有两方面：一是摩擦阻尼，它使振动能量逐渐转变为振动系统和周围介质的内能；二是辐射阻尼，即振动系统引起周围介质的振动，使系统能量逐渐向四周辐射出去，变为波动能量。

质量为 m 的振子做阻尼振动的微分方程为

$$m \frac{d^2x}{dt^2} = -kx - \gamma \frac{dx}{dt},$$

式中 x 表示振子的位移， $-kx$ 为恢复力， $-\gamma \frac{dx}{dt}$ 为与振子速度成正比的阻力，其中 γ 称为阻尼系数，其大小决定于振子的形状、大小和介质的性质。阻尼较小时，可得阻尼振动位移与时间的关系

$$x = A_0 e^{-\beta t} \cos(\omega t + \phi_0).$$

式中 $\beta = \frac{\gamma}{2m}$ 称为阻尼因数， $\omega = \sqrt{\omega_0^2 - \beta^2}$ ， $\omega_0 = \sqrt{k/m}$ 为振子在无阻尼时的固有圆频率； $\cos(\omega t + \phi_0)$ 表示振子周期性地达到位移极大点（或通过平衡位置）； $A_0 e^{-\beta t}$ 表示阻尼作用使振幅按指数律衰减（图1-9-4）。由于振幅的衰减，阻尼振动严格说来并不是周期运动，可称为准周期运动。

当阻尼较小，即 $\beta^2 < \omega_0^2$ ($\gamma < 2\sqrt{mk}$) 时， $\omega > \omega_0$ ，可得阻尼振动的“周期”，即振子相邻两次从同一方向通过平衡位置所经历的时间 $T = \frac{2\pi}{\omega} = \frac{2\pi}{\sqrt{\omega_0^2 - \beta^2}}$ ，它大于无阻尼时振子的周期 $T_0 = \frac{2\pi}{\omega_0}$ 。

在阻尼较大的情况下，即当 $\beta^2 > \omega_0^2$ 时，由于能量的迅速消耗，振子连一次振动也不能完成，而是逐渐趋近于平衡位置（图1-9-5）。通常把 $\beta^2 > \omega_0^2$ 的情况称为过阻尼；而把 $\beta^2 = \omega_0^2$ 的情况称为临界阻尼，即阻尼的大小刚好使振子做非周期运动。

由于阻尼振动的能量 E 与振幅 A 的平方成正比，而 $A = A_0 e^{-\beta t}$ ，所以有 $E = E_0 e^{-2\beta t}$ ，式中 E_0 为初始时刻系统的能量。由 $\frac{dE}{dt} = -2\beta E$ 可得 $E/dE = -\frac{1}{2\beta dt}$ 。当 $dt = T = \frac{2\pi}{\omega}$ （ ω 为振子圆频率）时，有 $\frac{E}{dE} = -\frac{1}{2\pi} \left(\frac{\omega}{2\beta} \right)$ 。令 $Q = \frac{\omega}{2\beta}$ ，则 $Q/2$ 等于系统中贮存的能量 E 与每周期损耗的能量 dE 之比。

这里的 Q ，称为振动系统的品质因数，又称 Q 值，它是一个反映振动系统能量衰减快慢的物理量。 Q 值越大，振动衰减得越慢。音叉的 Q 值约为 10^4 ，钢琴弦或小提琴弦的 Q 值约为 10^3 。

受迫振动 (forced vibration)

系统在周期性外力的持续作用下进行的振动。这持续的周期性变化的外力称为驱动力。例如机械运转时引起机座的振动、电磁力引起喇叭纸盆的振动等都是受迫振动。

最基本、最简单的受迫振动是驱动力按余弦（或正弦）规律变化的振动。这时振动体共受三个力作用：弹性恢复力，可表示为 $F = -kx$ ；摩擦力，可表示为 $f = -\lambda \frac{dx}{dt}$ ；驱动力，可表示为 $F = F_0 \cos pt$ 。它的运动方程可以写成

$$m \frac{d^2 x}{dt^2} = -kx - \gamma \frac{dx}{dt} + F_0 \cos pt. \quad (1)$$

令 $\omega_0^2 = k/m$, $\beta = \frac{\gamma}{2m}$ 上式变为

$$\frac{d^2 x}{dt^2} + 2\beta \frac{dx}{dt} + \omega_0^2 x = \frac{F_0}{m} \cos pt.$$

解此微分方程可得

$x = A_0 e^{-\beta t} \cos(\omega_0 t + \varphi) + A \cos(pt + \varphi)$ 。(2) 这个解的第一部分是阻尼振动，振幅随时间按指数规律减小，第二部分是等幅振动。可见，在受迫振动开始的一段时间内，这两种振动同时存在，合运动很复杂，并且不稳定。但经过一段时间后，第一部分所表示的阻尼振动近于消失，振动就是稳定的等幅振动 $x = A \cos(pt + \varphi)$ ，其振动周期（或频率）与驱动力的周期（或频率）相同，但与驱动力并不同相，而有一相差 φ 。

从能量的角度来看，受迫振动中同时进行着两个过程，一方面由于阻尼使振动机械能损耗，另一方面，由于驱动力的作用而获得能量。开始时一般来说外力的功常大于振动系统克服阻尼而消耗的能量，因而振动系统能量增大，振幅增大，但随着速度增大阻尼也增大，当驱动力对振动系统做的功等于由于阻尼而消耗的能量时，振动系统就处于稳定的等幅振动状态（图 1-9-6）。

把稳定的等幅振动 $x = A \cos(pt + \varphi)$ 代入运动方程(1)，可得

$$A = \frac{F_0 / m}{\sqrt{(\omega_0^2 - p^2)^2 + 4\beta^2 p^2}},$$
$$\tan \varphi = -\frac{2\beta p}{\omega_0^2 - p^2}$$

如果介质的阻力等于零，即 $\beta = 0$ ，则 $\varphi = 0$ ，振动与驱动力有相等的相位，在其他情形下 $\varphi \neq 0$ 。振动的振幅 A 与力幅 F_0 成正比，并与驱动力的频率 p 有关（参见“共振”）。

共振 (resonance)

一种特殊的受迫振动现象。物体系统做受迫振动时，当驱动力的频率很接近或等于振动系统的固有频率时，受迫振动的振幅急剧增大，这种现象称为共振。

根据受迫振动方程的解得出受迫振动进入稳定状态时的振幅为（参见“受迫振动”）

$$A = \frac{h}{\sqrt{(\omega_0^2 - p^2)^2 + 4\beta^2 p^2}}。$$

其中 p 为驱动力圆频率， ω_0 为振动物体的固有圆频率， h 为驱动力“振幅” F_0 与振动物体的质量 m 之比， β 为阻尼因数。

使振幅 A 达到最大值的共振圆频率为：

$$p_{\text{共}} = \sqrt{\omega_0^2 - 2\beta^2}。$$

共振时的振幅为

$$A_{\text{共}} = \frac{h}{2\beta\sqrt{\omega_0^2 - \beta^2}}。$$

可见，当有阻尼存在时共振频率不等于系统的固有频率，阻尼越小，共振频率越接近固有频率。共振时的振幅随阻尼因数的减小而增大（图 1-9-7）。如果阻尼因数很小即 $\beta \rightarrow 0$ 时，则共振的振幅极大，称为锐共振。因为，此时，驱动力总是与振动同相，不断地对振动系统做正功，使其能量不断增加，振幅越来越大。有时会导致振动系统损坏。

共振现象在科学技术上有很多应用。在振动的发生器中，往往利用共振现象，使振动系统能够从能源取得最多的能量，来激发强烈的振动。测量振动的仪器中也有共振式仪器，它的振动系统的固有频率调节到与待测振动的频率相同时，仪器就会有很大的灵敏度，即使待测的振动很微弱，仪器也能显示出足够大的振动。共振也会产生有害作用。例如转动的机器往往对转轴施加周期性的作用力，如果这周期性力的频率等于转轴的固有频率，就会引起共振，使转轴激烈振动，甚至断裂。又如桥梁受到与它的固有频率相近的周期性作用力，也会发生共振，引起激烈的振动，甚至被破坏。在这些情况下，就要避免驱动力的频率接近固有频率，或用增大阻尼因数的办法，防止共振的发生。

简谐运动的合成 (composition of simple harmonic motions)

在许多物理过程中，一个系统会同时受到两个或多个简谐运动的作用。这样的例子在声学中特别普遍。传声器的膜片，人耳的鼓膜，通常受到的作用就是简谐运动的某种复杂组合。下面讨论的简谐运动组合过程的几种特殊情形，都遵从这样一条基本假定：两个或多个简谐运动的合成运动，就是这些单个运动的叠加。这个假定能否成立，取决于位移是否跟产生它的力严格地成正比。上述假定能够成立的系统称为线性系统。

(1) 两个方向和频率都相同的简谐运动的叠加设两个简谐运动分别为

$$\begin{aligned}x_1 &= a_1 \sin(\omega t + \phi_1), \\x_2 &= a_2 \sin(\omega t + \phi_2).\end{aligned}$$

则合振动为

$$\begin{aligned}x &= x_1 + x_2 = R \sin(\omega t + \theta), \\R^2 &= a_1^2 + a_2^2 + 2a_1 a_2 \cos(\phi_2 - \phi_1), \\ \tan \theta &= \frac{a_1 \sin \phi_1 + a_2 \sin \phi_2}{a_1 \cos \phi_1 + a_2 \cos \phi_2}.\end{aligned}$$

如果用旋转矢量表示简谐运动，用几何方法同样可以求得上述结果(图 1-9-8)。

(2) 两个方向和振幅都相同但频率不同的简谐运动的叠加设两个简谐运动分别为

$$\begin{aligned}x_1 &= a \sin \omega_1 t, \\x_2 &= a \sin \omega_2 t.\end{aligned}$$

其中 $\omega_2 > \omega_1$ ，则合运动为

$$\begin{aligned}x &= x_1 + x_2 = a(\sin \omega_1 t + \sin \omega_2 t) \\ &= 2a \cos \frac{(\omega_2 - \omega_1)t}{2} \sin \frac{(\omega_1 + \omega_2)t}{2}\end{aligned}$$

上面求出的合运动不一定具有周期性。

合运动具有周期性的条件是两个分运动的周期是可公度的，即存在着两个整数 n_1 和 n_2 ，使

$$n_1 T_1 = n_2 T_2 = T。$$

这时，合运动的周期就是采用 n_1 和 n_2 的最小值写出上面这个关系式时所得的 T 值。

当 ω_1 和 ω_2 相差不大时，上式表明，振动频率为 $(\omega_1 + \omega_2)/2$ 的正弦项的振幅 $2a$ 受到频率极低的余弦项 $\cos \frac{(\omega_2 - \omega_1)t}{2}$ 的调制，在 0 与 $2a$ 之间变化(图 1-9-9)。这种现象在声学上称为“拍”， $\omega_2 - \omega_1$ 称为拍频。两个频率相近的音叉同时发声就能听到时强时弱按拍频变化的声音。

(3) 两个频率相同的互相垂直的简谐运动的叠加设两个简谐运动分别为

$$\begin{aligned}x &= a_1 \sin(\omega t + \phi_1), \\y &= a_2 \sin(\omega t + \phi_2).\end{aligned}$$

从上两式中消去 t ，可得做叠加运动的质点的轨迹：

$$\frac{x^2}{a_1^2} + \frac{y^2}{a_2^2} - \frac{2xy}{a_1 a_2} \cos(\phi_2 - \phi_1) = \sin^2(\phi_2 - \phi_1)。$$

这是一个椭圆方程。当 $\delta = \phi_2 - \phi_1 = \frac{\pi}{2}$ 时，方程变为 $\frac{x^2}{a_1^2} + \frac{y^2}{a_2^2} = 1$ ，x轴和y轴成为椭圆的轴（长轴和短轴）；当 $a_2 = a_1$ 时，轨迹变为圆。图1-9-10给出了 等于不同值时质点的运动轨迹。

(4)两个频率不相同的互相垂直的简谐运动的叠加这种情况下的合运动更复杂，质点描绘的轨迹图形称为李萨如图形。图1-9-11给出了分运动频率比最简单的几个例子。

振动的分解(resolution of vibration)

任何一个复杂的(非简谐的)周期性振动 $x=f(t)$, 都可以应用傅里叶级数分解为数目足够多的、有不同频率和振幅的简谐运动的组合:

$$f(t) = \sum_{n=0}^{\infty} (A_n \cos n\omega t + B_n \sin n\omega t)$$

式中 $A_n = \frac{2}{T} \int_{-\frac{T}{2}}^{\frac{T}{2}} f(t) \cos n\omega t dt, (n \neq 0),$

$$A_0 = \frac{1}{T} \int_{-\frac{T}{2}}^{\frac{T}{2}} f(t) dt,$$

$$B_n = \frac{2}{T} \int_{-\frac{T}{2}}^{\frac{T}{2}} f(t) \sin n\omega t dt$$

式中与原振动频率一致的分振动 ($n=1$) 称为基频振动, 这个频率就称为基频; 其他分振动 ($n=2, 3, \dots$) 由于频率都是基频的整数倍, 因而称为谐频振动, 其频率相应地称为谐频。

下面是两个振动分解的实例:

(1) 图 1-9-12 所示的方波的振动, 可分解为

$$f(t) = \frac{2A}{\pi} \left(\cos \omega t - \frac{1}{3} \cos 3\omega t + \frac{1}{5} \cos 5\omega t - \dots \right)$$

(2) 图 1-9-13 所示的锯齿波的振动, 可分解为

$$f(t) = \frac{2A}{\pi} \left(\sin \omega t - \frac{1}{2} \sin 2\omega t + \frac{1}{3} \sin 3\omega t + \dots \right)$$

根据傅里叶级数中各个分振动的频率和振幅, 可以画出振动的频谱。图 1-9-14 就是图 1-9-12 中方波振动的频谱。这种频谱是分立的线状谱。

对于非周期振动, 不能把它分解为具有一系列分立频率 $\omega, 2\omega, 3\omega, \dots$ 的简谐运动的组合, 但可以应用傅里叶积分把它分解为“相邻”振动的频率相差为无限小、并且各个元振动的振幅也是无限小的无限多个简谐运动的组合。

非周期振动的频谱, 不是分立的线状谱, 而是连续谱, 它表示的是具有一切频率的振动。图 1-9-15 给出了方脉冲和它的连续谱的示意图。有些频率的振幅为负值表明各个频率的波相位不同。

机械波 (mechanical wave)

机械振动在媒质中的传播称为机械波。形成机械波需要两个条件：一是有做机械振动的物体即波源，二是有传播振动的媒质，二者缺一不可。在弹性媒质中依靠弹性力传播的波，称为弹性波。这是一种很重要的机械波，但不是唯一的机械波。例如，在液体表面，重力和表面张力都有使液面恢复到平衡位置的作用。一旦液面受到某种扰动，在重力和表面张力的作用下就会产生液面的波动过程。这种波，称为表面波，也是一种机械波，但不是弹性波。

按照传播方向和振动方向之间的关系，机械波可分为横波和纵波两种：质点的振动方向与波的传播方向垂直的波称为横波。如，在弦上的弹性波。质点的振动方向与波的传播方向平行的波称为纵波。又称为疏密波。如声波。在固体中，既能传播横波又能传播纵波；在液体和气体中，只能传播纵波。值得注意的是液面上传播的表面波，如水波，不是横波也不是纵波。表面波中的液体质点，既有横向位移又有纵向位移。对于深水波（水深远大于波长），液体质点做圆周运动，在波峰处向前行进，在波谷处向后行进。对于浅水波（水深小于波长），液体质点做椭圆运动。

波面 (wave surface)

波源引起的振动在媒质中向四面八方传播，则在波源周围到处都会出现相位顺次落后的振动。在波传播的媒质中某一时刻所有同相点所组成的面叫做波面。

通常根据波面的形状将波分为平面波，球面波等。

在离波源很远处，球面波的一小部分可以看成平面波。

波的传播过程中，最前面的一个波面，即由波源振动传播到的各点组成的波面，称为波前，也称为波阵面，波前上各点的振动相位等于波源开始振动时的相位。

波面在媒质中传播的规律遵从惠更斯原理。这个原理告诉我们：媒质中任意波面上的各点，都可以看作是发射子波的波源，在其后的任意时刻，这些子波波面的包迹就是新的波面。这个原理是荷兰物理学家惠更斯于1690年提出的。

波长 (wave length)

波源的振动一个周期内在媒质中传播的距离叫波长。由于经过一个周期后，振动状态恢复原状，重复以前的运动，因而在波传播方向上相距一个波长或波长的整数倍的质点的运动状态时刻都是一致的，这样的点叫做同相点。所以波长又可以定义为：在波的传播方向上相邻的两个同相点之间的距离。波长的大小决定于波的频率和媒质中的波速。波的频率表示波在单位时间内向前传播的全波的个数，它等于波源的振动频率。波速表示单位时间内某一振动状态在媒质中的传播距离，它由媒质的弹性和惯性来决定。用 λ 表示波长，用 f 表示频率，用 v 表示波速，则有

$$v = \frac{v}{f} \quad \text{或} \quad v = \lambda f.$$

波长的倒数 $\frac{1}{\lambda}$ 叫做波数，在波谱学中常用它来描述波的特征。也有时把

$\frac{2\pi}{\lambda}$ 称为波数，用 k 表示，即

$$k = \frac{2\pi}{\lambda}, \quad k = \frac{1}{\lambda}$$

多普勒效应 (Doppler effect)

当观测者与波源之间有相对运动时，观测者测得的波的频率与波源发出的频率不同的现象。这一现象是由奥地利物理学家多普勒 (Johann Christian Doppler, 1803 ~ 1853) 于 1842 年首先发现的，他先发现了声波的多普勒效应，还预言了光波也有相似的效应，但因光速太大当时未能加以证明。

设声源和观察者的相对运动发生在两者的连线上，波在媒质中传播的速度为 V ， f 为声源的振动频率。若声源固定，观察者相对于媒质以速度 v 运动。当观察者向着声源运动时，相当于声波以速度 $V+v$ 通过观察者，则观察者接收到的频率为

$$f' = \frac{V+v}{\lambda} = \frac{V+v}{\frac{V}{f}} = \left(1 + \frac{v}{V}\right) f > f$$

即观察者接收到的频率是声源振动频率的 $\left(1 + \frac{v}{V}\right)$ 倍。若观察者背离声源

而去，有 $f' = \frac{V-v}{\lambda} = \left(1 - \frac{v}{V}\right) f$ ，则 $f' < f$ ，观察者接收到的频率比声源振动

的频率低。当 v 与 V 大小相等时，则 $f' = 0$ ，观察者就接收不到声音了。

若观察者固定不动，声源相对于媒质以速度 u 运动，当声源迎着观察者而来，且 $u < V$ 时，由于声速 V 只由媒质的特性决定，与声源是否运动无关。在一个周期 T 内声源在原来位置 S 点发出的振动向前传播距离为一个波长，如图 1-9-16 中的 SP 。但声源在此时间内向前运动了距离 uT 而到达 S' 点，这就像整个波被挤压在 uT 距离内，如图 1-9-16 中的 $S'P$ 。因声源匀速运动，这一“挤压”是均匀的，观察者看到的波长变短：

$$\lambda' = VT - uT = \frac{V-u}{f}$$

此时，波相对于观察者的速度仍为 V ，则观察者接收到的振动频率为

$$f' = \frac{V}{\lambda'} = \frac{V}{V-u} f$$

故有 $f' > f$ ，即观察者接收到的频率变高。若声源背离观察者而去，则有

$$f' = \frac{V+u}{f}, f' = \frac{V}{V+u} f, \text{ 即 } f' < f, \text{ 观察者接收到的频率变低。人们见}$$

到一列火车鸣笛而来时，听到的笛声音调变高，火车鸣笛离去时，笛声的音调变低，就是这个道理。

可见，无论是声源运动，还是观察者运动，当它们相向运动时，观测到的频率都会比声源振动频率高，反之，则观测到的频率变低。但它们产生的机理是不同的：观察者相对于媒质运动时，频率变化是由于相对波速变化引起的；当声源相对于媒质运动时，频率变化则是由于波长变化引起的。

如果观察者和声源同时运动，可以证明

$$f' = \frac{V+v}{V-u} f$$

如果声源与观测者的运动不在它们的连线上，则上式中的 u, v 分别表

示声源和观察者的速度在它们连线方向上的分量。

多普勒效应是波所具有的共同特征，不但机械波，光波也有多普勒效应，在天文观测中发现，从遥远的星系发来的光的特征谱线比静止光源发出的同一谱线的波长发生了变化。如有的星系谱线向红光端移动、波长变长，称为“红移”。这就是由于星系相对于地球的退行运动所发生的多普勒效应。

多普勒效应在科学技术上有着广泛的应用。利用声波的多普勒效应可以测定流体的流速、人体内血管中血液的流速，工业上管道中液体的流速，还可以检查车速。利用电磁波的多普勒效应可以测定星球相对于地球的运动速度、人造卫星的运动速度等等。

简谐波 (simple harmonic wave)

由简谐运动在媒质中传播所形成的波叫简谐波。简谐波是最简单、最基本的波。任何复杂的波都可以看成是由若干个不同频率、不同振幅的简谐波叠加而成的。

设波源位于原点、沿 x 轴正方向传播的平面简谐波在任意时刻 t 波源振动的位移为

$$y_0 = A \cos(\omega t + \varphi)$$

当振动无衰减地传到距波源为 x 的任意点 P 时， P 就重复波源处的振动情况

，由于传播过程需用时间为 $\frac{x}{v}$ (v 为波速)，则 P 点比波源处振动相位落后了 $\omega \frac{x}{v}$ ，所以 P 点的振动的位移为

$$y = A \cos \left[\omega \left(t - \frac{x}{v} \right) + \varphi \right]$$

由于 $\omega / v = \frac{2\pi}{\lambda} = k$ ，上式可写作

$$y = A \cos(\omega t - kx + \varphi)。 \quad (1)$$

这就是平面简谐波的波动方程。它也可写成复数形式： $y = A e^{j(\omega t - kx + \varphi)}$

如果波是向着相反的方向，即 x 轴的负方向传播的，则波动方程可写作

$$y' = B \cos(\omega t + kx + \varphi) \quad (2)$$

由(1)式可得

$$\frac{\partial^2 \xi}{\partial x^2} = \frac{1}{v^2} \frac{\partial^2 \xi}{\partial t^2} \quad (3)$$

这就是平面简谐波的微分方程。由于任何非简谐的平面波都可以看作若干个平面简谐波的叠加，(3)式对于任何平面波都是适用的。

波的能量 (energy of wave)

机械波的传播过程，也是机械能的传播过程，波传到某处就使该处原来静止的媒质开始振动，因而具有动能与势能，这能量来自波源。

波的能量常用传播波的媒质内单位体积所具有的能量来计量，称为波的能量密度。简谐波在媒质中各点的能量密度随时间周期性地变化，在任一时刻，沿波线上各点的能量密度也随位置而变化。用 $\xi = A \cos \omega \left(t - \frac{x}{v} \right)$

表示平面简谐波，媒质中各点的能量密度为

$$\varepsilon = \rho A^2 \omega^2 \sin^2 \left(t - \frac{x}{v} \right)$$

其中 ρ 为媒质密度。

某一点的能量密度在一个周期内对时间的平均值，与任一时刻能量密度在空间两个同相波面之间对空间的平均值是相等的，这个值叫做平均能量密度。简谐波的平均能量密度为

$$\bar{\varepsilon} = \frac{1}{2} \rho A^2 \omega^2$$

在单位时间内通过与波的传播方向垂直的单位面积的能量叫做能流密度。实用上常取能流密度在一个周期内的平均值，称为平均能流密度，又称波强，它等于波的平均能量密度与波速的乘积。由于能流密度的方向与波速的方向一致，能流密度的公式可写成如下的矢量式：

$$I = \bar{\varepsilon} v = \frac{1}{2} \rho A^2 \omega^2 v$$

机械波的反射和折射 (reflection and refraction of mechanical wave)

机械波在两种媒质的界面处会发生反射和折射。但由于流体媒质只传递纵波，固体媒质既传递纵波又传递横波，所以反射和折射的情形比较复杂。我们只考虑平面波入射到两种各向同性均匀媒质的无限大平面分界面的情况。可分两种情形：

1. 垂直入射的情形当平面波从第一种媒质垂直入射到它跟第二种媒质的分界平面上时，一部分沿原方向进入第二种媒质成为透射波，另一部分反向返回第一种媒质成为反射波。如果入射波是横波，反射波和透射波也都是横波；如果入射波是纵波，反射波和透射波也都是纵波。能量的反射因数 r 和透射因数 τ 决定于两种媒质的特性阻抗 $z_1 = \rho_1 c_1$ 和 $z_2 = \rho_2 c_2$ 的大小：

$$r = \left(\frac{z_1 - z_2}{z_1 + z_2} \right)^2,$$
$$\tau = \frac{4z_1 z_2}{(z_1 + z_2)^2},$$

其中 ρ_1 、 ρ_2 分别为两种媒质的密度， c_1 、 c_2 分别为两种媒质中的波速。当 $z_1 = z_2$ 时， $r=0$ ， $\tau=1$ ，即只有透射波没有反射波。也就是说，当两种媒质的特性阻抗相等时，从波的传播来看两种媒质没有区别，和没有分界面一样。

2. 斜入射的情形如果两种媒质都是流体，入射波、反射波和折射波都是纵波。如果两种媒质都是固体，且入射波是振动方向平行于界面的横波，则入射波、反射波和折射波都是横波。除了这两种情况外，在固体中都会引起波型转换，即反射波和折射波不再是单一的。例如，当声波（纵波）从流体射到固体上时，反射波有一个，折射波有两个；从一种固体媒质射入另一种固体媒质时，反射波和折射波都有两个。图 1-9-17 给出了两种媒质都是固体时，入射纵波的反射和折射的情形，其中入射角 i ，反射角 r 和 α ，折射角 β 和 γ ，遵循斯涅耳定律

$$\frac{\sin i}{c_{11}} = \frac{\sin r}{c_{11}} = \frac{\sin \alpha}{c_{11}} = \frac{\sin \beta}{c_{12}} = \frac{\sin \gamma}{c_{12}}, (i = r).$$

式中 c_{11} 和 c_{12} 是在固体1和固体2

中的纵波速度， c_{11} 和 c_{12} 是在固体1和固体2中的横波速度。如果入射波为横波，则有， $\frac{\sin i}{c_{11}} = \frac{\sin r}{c_{11}} = \frac{\sin \alpha}{c_{11}} = \frac{\sin \beta}{c_{12}} = \frac{\sin \gamma}{c_{12}}, (i = \alpha)。$

波的反射和折射有很重要的应用。例如，在超声探伤技术中，必须辨清斜投射时固体分界面处的几种反射波，否则会导致错误的判断。又如在材料的弹性测定中，可利用液体和固体界面处的反射和折射，测定纵波和横波的临界角，就能根据已知的液体中的声速测出固体中的纵波速度和横波速度，从而确定固体的各种弹性常量。

半波损失 (half-wave loss)

平面简谐波从特性阻抗 $z_1 = \rho_1 c_1$ 的媒质入射到特性阻抗 $z_2 = \rho_2 c_2$ 的另一种媒质时，如果 $z_1 \neq z_2$ ，波在两种媒质的分界面上要发生反射。当 $z_1 < z_2$ 时，反射波的振动位移与入射波的位移反相，这种情况称为反射波的位移存在半波损失。当 $z_1 > z_2$ 时，反射波的声压（与媒质中的应力大小相等、方向相反）与入射波的声压反相，这种情况称为反射波的声压存在半波损失。

半波损失现象是由分界面上的边界条件决定的。边界条件有两个：一是振动位移的连续性，即在分界面处两种媒质中质点的位移相等，这个条件反映了物质的连续性和不可入性；二是应力的连续性，即在分界面处两种媒质的应力相等，这个条件反映了牛顿第三定律，说明作用力和反作用力大小相等。根据这两个边界条件就可以得出，当 $z_1 < z_2$ 时，分界面处反射波与入射波的振动位移是反相的；当 $z_1 > z_2$ 时，分界面处反射波与入射波的声压是反相的。

波的干涉 (interference of wave)

大量的事实证明，几列由不同波源产生的波在同一媒质中传播时，每列波的频率、波长、振幅、振动方向及传播方向等特性各自保持不变、互不影响。在几个波列相遇的区域中，媒质中每一质点的振动等于各列波单独传播时在该点所引起的振动之和。这称为波的叠加原理。

波的叠加情况是很复杂的。其中最简单、最重要的情况是一种特殊的叠加现象——波的干涉现象。

两个频率相同、振动方向相同、相位差恒定的波源称为相干波源，这两列波称为相干波。两列相干波相遇时，发生叠加，使得相遇区域的媒质的一些质点振动被加强，另一些质点振动被削弱，这种现象称为波的干涉。只有波的叠加才能产生干涉现象，因而，干涉是波所特有的现象之一。

设两列相干波源的相位相同、在相遇区域某点 两列波引起的振动分别为

$$\xi_1 = A_1 \cos 2\pi \left(ft - \frac{r_1}{\lambda} \right)$$

$$\xi_2 = A_2 \cos 2\pi \left(ft - \frac{r_2}{\lambda} \right)$$

其中 f 为波源的振动频率， λ 为波长， r_1 、 r_2 分别为 点到两个波源的距离（称为波程）。根据振动合成规律， 点的振幅为：

$$A = \sqrt{A_1^2 + A_2^2 + 2A_1A_2 \cos 2\pi \frac{r_2 - r_1}{\lambda}}$$

由上式可见，合振幅 A 的大小与 $r_2 - r_1$ 有关。令 $\delta = r_2 - r_1$ ，称为波程差。

如果 $\delta = n\lambda$ （ n 为整数）则 $\cos 2\pi \frac{\delta}{\lambda} = 1$ ，即二列波在该点总是同相叠加

， A 有最大值；如果 $\delta = (2n + 1)\frac{\lambda}{2}$ （ n 为整数），则 $\cos 2\pi \frac{\delta}{\lambda} = 0$ ，即二

列波总是在该点反相叠加， A 有最小值。所以，波源振动相位相同的两列波叠加时，叠加区域内波程差等于波长的整数倍的各点振幅最大，波程差等于半波长奇数倍的各点振幅最小。如果两相干波源的相位不同，

则需在 $2\pi \frac{r_2 - r_1}{\lambda}$ 之外再加上波源的相位差，以确定叠加区内各点的振

幅。

声波的干涉现象比较容易观察到。用低频信号发生器连在两个扬声器上，并使其离开适当距离，两个声源便在附近空气中产生干涉现象，在距声源几米的范围内某些地点会感到音量很大、某些地点则音量极小，几乎为零。

驻波 (standing wave)

一种特殊的干涉现象。两列振幅相同的相干波沿相反方向传播而叠加就形成驻波。常利用一列入射波在媒质边界被反射，使反射波与入射波叠加而产生驻波。图 1-9-18 是在弦线上产生的驻波。

设入射波和反射波分别为

$$y_1 = A \cos 2\pi \left(ft - \frac{x}{\lambda} \right) = A \cos (\omega t - kx),$$

$$y_2 = A \cos 2\pi \left(ft + \frac{x}{\lambda} \right) = A \cos (\omega t + kx),$$

入射波和反射波叠加后各点的振幅为

$$\begin{aligned} y &= y_1 + y_2 = 2A \cos 2\pi \frac{x}{\lambda} \cos 2\pi ft \\ &= 2A \cos kx \cos \omega t \end{aligned}$$

由此可知，叠加区域中各个质点都做频率为 f 的简谐运动，只是其振幅的大小由质点所在的位置来决定，这就是驻波。

在 $x = \pm n(2n+1) \frac{\lambda}{2}$ ($n = 0, 1, 2, \dots$) 的各点，振幅最大，等于原来

振幅的两倍，即 $2A$ ，这些点称为驻波的波腹。在 $x = \pm (2n+1) \frac{\lambda}{4}$ ($n = 0, 1, 2, \dots$) 的各点，振幅等于零，这些点称为驻波的波节。两相邻波节之间的点振动同相位（即同上同下）它们的振幅按正弦形分布，其正中位置的点即为波腹。波节两侧的点振动相位相反。各点振动的相位不在空间“传播”，好像波在空间“停住了”，“驻波”的名称就由此而来。

相邻的两波节或波腹间的距离等于波长的 $\frac{1}{2}$ 。实际应用上常用这一点来测波长。

波的衍射 (diffraction of wave)

波在传播过程中遇到障碍物或障碍物中的孔隙时，能绕过障碍物或孔隙的边缘，呈现路径弯曲，这种现象称为波的衍射。

在障碍物或孔隙的大小与波长相近时即可发生衍射现象。障碍物或孔隙比波长小得越多，衍射现象越明显。衍射现象也是波所特有的现象之一。

应用惠更斯原理，可以解释波的衍射现象：平面波到达一尺寸与波长相近的缝隙（或障碍物）时，波阵面上每一点都可以看做是一个新的波源，各自发射子波（图 1-9-19）。这些子波互相叠加，在靠近障碍物边缘处，波面不再是平面，而是弯曲了，波的传播方向发生改变，绕到了障碍物的后面。

声波的衍射是极易观测到的，如声波可以绕过不太高的墙或门而传播开去。

声波 (sound wave)

在弹性媒质中传播的压力、应力、质点位移和质点速度等的变化称为声波。声波的频率从 10^{-4} 赫到 10^{12} 赫 范围相当宽广。其中振动频率在 20 ~ 20000 赫之间的波传入人耳时，使耳膜作受迫振动、刺激听觉神经，引起声音感觉，这种声波叫做可听声。频率低于 20Hz 的声波称为次声；频率在 $2 \times 10^4 \text{Hz} \sim 5 \times 10^8 \text{Hz}$ 之间的称为超声 频率为 $5 \times 10^8 \text{Hz} \sim 10^{12} \text{Kz}$ 的称为特超声。

固体、液体、气体都可以传播振动。在气体和液体中，振动都是以纵波的形式传播的，在固体中振动可以纵波也可以横波或以横纵波等其它较复杂的形式传播。日常生活中最常见的是通过气体传播的纵波。

声速(sound velocity)

声波的传播速度叫做声速，它与媒质的性质(弹性和惯性)和状态(如温度)有关。在固体媒质中，横波与纵波的速度分别为

$$v = \sqrt{\frac{G}{\rho}} \quad (\text{横波}), \quad (1)$$

$$v = \sqrt{\frac{Y}{\rho}} \quad (\text{纵波}), \quad (2)$$

而在液体和气体中，纵波的速度为

$$v = \sqrt{\frac{B}{\rho}} \quad (3)$$

上列各式中， G 为剪切模量， Y 为杨氏模量， $B = -\frac{dp}{dV}$ 为体积弹性模量， ρ 为媒质的密度。

对于空气来说，由于声波传播时空气的压缩和膨胀进行得非常迅速，可以认为是绝热过程，因而有 $pV^\gamma = \text{常量}$ 。由此式可得

$$\gamma p = -\left(\frac{dp}{dV}\right)V = B.$$

代入(3)式即得空气中的声速

$$c = \sqrt{\frac{\gamma p}{\rho}} = \sqrt{\frac{\gamma RT}{\mu}} \quad (4)$$

式中 T 为热力学温度， R 为气体普适常量， μ 为空气的摩尔质量。由上式可得

$$c = c_0(1 + 0.61t/273) \quad (5)$$

式中 $c_0 = 331.45\text{m/s}$ 为 0°C 时空气中的声速， t 为摄氏温度。

在液体和固体中，声波的传播速度一般也随温度的升高而增大，但关系比较复杂。

一般来说，声速在气体中较小，在液体中比较大，在固体中最大。空气中的声速还与空气压强、密度、湿度等多种因素有关。

声强 (intensity of sound)

声波的能流密度叫做声强。也就是单位时间内通过与声波传播方向垂直的单位面积的能量。单位是瓦/每平方米(符号 $W \cdot m^{-2}$)。用 I 表示声强。得

$$I = \frac{1}{2} \rho c A^2 \omega^2$$

式中 ρ 为空气密度, c 为声速, A 为声振动的振幅, ω 为声振动的圆频率。

振动的振幅越大、频率越高则声强越大。震耳欲聋的炮声的声强约为 $1W \cdot m^{-2}$ 。

在声频范围内, 若声波的声强很小, 人们会“充耳不闻”; 若声强很大, 则会引起痛觉。图 1-9-20 给出了人的听觉和痛觉的声强范围, 对于频率为 1000Hz 的声波, 一般正常人听觉能忍受的最高声强为 $1Wm^{-2}$, 称为“痛阈”; 能听到的最低声强为 $10^{-12}W \cdot m^{-2}$ 。称为“听阈”。

国际上把这一最低声强规定做为测定声强的比较标准 I_0 。从实验得知人耳主观感觉对声音强弱的反应不是与声强成正比, 而是近似与声强的对数成正比。又由于可闻声的声强数量级相差悬殊 (10^{12} 倍), 为了计量与表达方便, 引入声强级来量度声音的客观强弱。声强 I 与标准声强 I_0 之比的对数叫做声强 I 的声强级, 用 L_I 表示

$$L_I = \lg \frac{I}{I_0}$$

声强级的单位是贝尔 (B)。实际上, 这个单位太大, 通常用贝尔的 $\frac{1}{10}$, 做为单位, 叫做分贝 (dB), 则可表示为

$$L_I = 10 \lg \frac{I}{I_0} (\text{dB})$$

可知, 人的听阈 (声强为 $10^{-12}W \cdot m^{-2}$) 的声强级是 0dB, 一般交谈时声强约为 $10^{-6}W \cdot m^{-2}$, 声强级为 60dB 左右。

声压 (sound pressure)

空气中有声波传播时某点的压强与没有声波时的压强 (称静压强, 也就是大气压) 之差, 叫做这一点的声压。可以证明, 平面简谐波声压的最大值为

$$P_m = \rho c A \omega$$

其中 ρ 是空气密度, c 是声速, A 是声振动的振幅, ω 是圆频率。与声

强 $I = \frac{1}{2} \rho c A^2 \omega^2$ 比较可得

$$I = \frac{P_m^2}{2\rho c}$$

即在一定的媒质中, 声强与声压的平方成正比。利用这一关系即可根据测出的声压计算声强。与声强类似, 也可以规定出声压级, 用 L_p 表示。声压级的定义为

$$L_p = 20 \lg \frac{P}{P_0}$$

式中的 P_0 为基准声压, 在空气中 $P_0 = 20 \mu\text{Pa}$ 。声压级的对数前乘以 20 是由于声压的平方与声强成正比。对于平面波, 声压级 L_p 与声强级 L_I 之间有如下关系:

$$\begin{aligned} L_p &= 10 \lg \frac{P^2}{P_0^2} = 10 \lg \frac{P^2 / \rho c}{P_0^2 / \rho c} \\ &= 10 \lg \frac{I}{I_0} + 10 \lg \frac{I_0}{P_0^2} \rho c \\ &= L_I + 10 \lg \frac{I_0}{P_0^2} \rho c \end{aligned}$$

由于 $I_0 / P_0^2 = \frac{1}{400} \text{m}(\text{Pa} \cdot \text{s})$, 当空气的特性阻抗 $\rho c = 400 \text{Pa} \cdot \text{s}/\text{m}$ 时, 有

$L_p = L_I$ 。在通常情况下, $\rho c = 415 \text{Pa} \cdot \text{s}/\text{m}$, L_p 比 L_I 约大 0.1dB, 这是个很小的数量, 可认为声压级与声强级相等。

&&

弦的振动(vibration of string)

把柔软的线两端张紧固定，就是乐器中常用的弦。弦的振动方程是：

$$\frac{\partial^2 y}{\partial x^2} = \frac{1}{c^2} \frac{\partial^2 y}{\partial t^2},$$
$$c = \sqrt{\frac{T}{\mu}} \quad (1)$$

式中的 y 为弦上任何点自其平衡位置的位移， x 为弦长方向上的坐标， t 为时间， c 为任何扰动在弦上的传播速度， T 为弦两端的张力， μ 为弦的线密度。

一系列正弦波或余弦波，在长度为 l 的弦的两个固定端反射后形成驻波，两个固定端必定是波节，即弦的边界条件是：对 $x=0$ 和 $x=l$ ， $y=0$ 。满足这个边界条件的解是：

$$y_n = A_n \sin \frac{n\pi x}{l} \cos \left(\frac{n\pi c}{l} t + \phi_n \right),$$
$$n = 1, 2, 3, \dots \quad (2)$$

A_n 和 ϕ_n 是由初始条件决定的常数。弦振动的固有频率是

$$f_n = \frac{nc}{2l} = \frac{n}{2l} \sqrt{\frac{T}{\mu}}, n = 1, 2, 3, \dots \quad (3)$$

由(3)式可知，弦振动的频率与弦长成反比，与弦上张力的平方根成正比，与弦的线密度的平方根成反比。所以弦乐器常用改变弦长和弦上张力的方法来改变弦振动的频率。

(3)式给出的频率不是单一的。其中 f_1 称为基频， f_n 称为 n 次谐频(或第 $n-1$ 次倍频)， y_n 称为第 n 次谐波。(3)式给出的每一频率相应于一种可能的振动模式，即弦上所有的质点都以同样的频率做简谐振动，这种振动模式，称为简正模式，简称为简正模。振动的弦有无数个简正模，而且这些振动模式能相互无关地同时进行。弦受到任意扰动后的实际运动，是这些模式的叠加，即弦上任何一点的位移，等于各简正模对应的位移之和：

$$y = \sum_{n=1}^{\infty} y_n = \sum_{n=1}^{\infty} A_n \sin \frac{n\pi x}{l} \cos \left(\frac{n\pi c}{l} t + \phi_n \right)$$

由于 A_n 的值随 n 的增大而减小，例如，用弦弓演奏的弦乐器，如二胡、提琴等， $A_n = A_1/n^2$ ，所以弦的实际运动主要决定于 $n=1, 2, 3, \dots$ 等最初几个简正模。

气柱的振动(vibration of air column)

长管内的空气称为气柱。气柱的振动方向与管轴同向(即纵向振动),振动的传播可看作平面波。在管的两端,平面波受到反射,在管内形成驻波。波在管的开口端也受到反射,是因为空气在管内受到粘滞力作用,声速较自由空间小。气柱振动的方程是

$$\frac{\partial^2 \xi}{\partial x^2} = \frac{1}{c^2} \frac{\partial^2 \xi}{\partial t^2}, c = \sqrt{\frac{v p}{\rho_0}}$$

式中 ξ 表示空气质点离开平衡位置的位移(这里所说的质点,其线度远小于声波的波长但又远大于分子的大小), x 为管长方向上的坐标, t 为时间, c 为管中空气的声速, v 为空气的比热容比, p 为空气的压强, ρ_0 为空气

的密度。在开口端,管内外的压强差等于零,故有 $\frac{\partial \xi}{\partial x} = 0$ 。在封闭端,空气质点的速度为零,即 $\frac{\partial \xi}{\partial t} = 0$ 。两种常见的情形是:

(1) 两端开口的管,边界条件是 $x = 0$ 和 $x = l$ 处 $\frac{\partial \xi}{\partial x} = 0$ 。其中 l 是管的长度。满足这个条件的解是:

$$\xi_n = A_n \cos \frac{n\pi x}{l} \sin \left(\frac{n\pi c}{l} t + \phi_0 \right), \\ n = 1, 2, 3, \dots$$

A_n 和 ϕ_0 是由初始条件决定的常量。振动的固有频率是

$$f_n = \frac{nc}{2l}, n = 1, 2, 3, \dots$$

$n=1$ 时为基频振动, $n=2, 3, \dots$ 时为谐频振动。基频振动和谐频振动叠加,可得气柱的振动方程:

$$\xi = \sum_{n=1}^{\infty} A_n \cos \frac{n\pi x}{l} \sin \left(\frac{n\pi c}{l} t + \phi_n \right)$$

气柱的两端都是波腹。

(2) 一端($x = 0$ 处)开口、一端($x = l$ 处)封闭的管,边界条件是: $x = 0$ 时 $\frac{\partial \xi}{\partial x} = 0$, $x = l$ 时 $\frac{\partial \xi}{\partial t} = 0$ 。满足这个条件的解是:

$$\xi_{2n-1} = A_{2n-1} \cos \frac{(2n-1)\pi x}{2l} \cos \left[\frac{(2n-1)\pi c}{2l} t + \phi_n \right]$$

A_n 和 ϕ_n 是由初始条件决定的常量,振动的固有频率是:

$$f_{2n-1} = \frac{(2n-1)c}{4l}$$

可见,一端开口、一端封闭的管,除基频振动外,只有奇次谐频,基频振动和谐频振动的叠加可得气柱的振动方程

$$\xi = \sum_{n=1}^{\infty} A_{2n-1} \cos \frac{(2n-1)\pi x}{2l} \cos \left[\frac{(2n-1)\pi c}{2l} t + \phi_n \right]$$

开口端是波腹,封闭端是波节。

两种管的气柱振动的腹节位置如图 1-9-21 所示:

事实上,气柱振动的波腹并不恰好与管的开口端重合,管的有效长度

总是稍大于它的实际长度。这是因为，在开口端，空气的运动不完全限于管内，而是扩展到管外。端部的校正值近似地等于 $0.6R$ ，其中 R 为管的半径。因此，长度相等而半径不等的两个管，粗管较细管的频率为低。

乐音 (musical tone)

乐音又称复音，指的是由一些频率不同的简单正弦分量合成的声波，或具有一个以上音调的听觉。瞬时值为一简单正弦时间函数的声波，或具有单一音调的听觉，则称为纯音。乐音中可用耳分清为一个简单声音而不能再分的分量称为分音。乐音中频率最低的分量或音调最低的分音称为基音，频率比基音高的分量称为泛音，频率为基音频率整数倍的分音称为谐音。频率为基音频率 n 倍的分音，称为第 $n-1$ 次泛音，或第 n 次谐音。

音调(pitch)

音调是听觉分辨的声音高低程度，是个主观量。根据音调可把声音排列成由低到高的序列。纯音音调的高低主要由声音的频率来决定，频率越高，人主观感觉的音调也越高。但音调也不是单纯由频率决定的，它还和声音的强度有关。大体上，2000 赫以下的低频纯音的音调随强度的增加而下降，3000 赫以上高频纯音的音调随强度的增加而上升。

对音调可以进行定量的判断。音调的单位称为美(mel)：取频率 1000 赫、声压级为 40 分贝的纯音的音调作标准，称为 1000 美，另一些纯音，听起来调子高一倍的称为 2000 美，调子低一倍的称为 500 美，依此类推，可建立起整个可听频率内的音调标度。这样得到的声压级 40 分贝的纯音音调与频率的关系见下表：

纯音的音调

频率 f/Hz	音调/mel	频率/fHz	音调/mel
20	0	900	929
30	24	1000	1000
40	46	1250	1154
60	87	1500	1296
80	126	1750	1428
100	161	2000	1545
150	237	2500	1771
200	301	3000	1962
250	358	3500	2116
300	409	4000	2250
350	460	5000	2478
400	508	6000	2657
500	602	7000	2800
600	690	10000	3075
700	775		
800	854		

音调还与声音持续的时间长短有关。非常短促(毫秒量级或更短)的纯音，只能听到像打击或弹指那样的“喀嚓”一响，感觉不出音调。持续时间从 10 毫秒增加到 50 毫秒，听起来觉得音调是由低到高连续变化的。超过 50 毫秒，音调就稳定不变了。

乐音(复音)的音调更复杂些，一般可认为主要由基音的频率来决定。

响度 (loudness)

响度是感觉判断的声音强弱，即声音有多响的程度，根据它可以把声音排成由轻到响的序列。响度的大小主要依赖于声强，也与声音的频率有关。

对于响度可进行定量的判断。响度的单位称为宋 (sone)：频率 1000 赫、声压级为 40 分贝的纯音的响度定为 1 宋，大致相当于耳语的声级。任何一个声音的响度如果被听者判断为 1 宋的 n 倍，这个声音的响度就是 n 宋。

响度是个主观量，是根据多数人听觉的判断确定的；它是一个线性量，是可加的，即两个以上非相干性声音叠加的响度等于各个声音的响度之和。

作为主观量的响度，可以和客观上的声强联系起来。取频率 1000 赫的纯音的声压级为标准，可确定声音的“响度级”。响度级的单位为方 (phon)，数值等于等响的 1000 赫纯音声压级的分贝数。例如，与 1000 赫、80 分贝纯音等响的声音，不论其声压级有多大，其响度级都是 80 方。据此可用实验方法绘制出不同频率纯音的响度级与声压级的关系曲线，称为等响曲线(图 1-9-22)。

响度级 L_N 和响度 N 的对数存在着简单的线性关系：

$$L_N = 40 + 10 \lg N \quad \text{或} \quad N = 2^{0.1(L_N - 40)}$$

由此可知，响度级每增加 10 方，响度就增加一倍。例如，40 方的响度为 1 宋，50 方的响度为 2 宋，60 方的响度为 4 宋，等等。

音色 (timbre)

音色又称音品，是听觉感到的声音的特色。纯音不存在音色问题，它是伴随着复音而出现的。音色主要决定于声音的频谱，即基音和各次谐波的组成，也和波形、声压及声音的时间特性有关。如果留声机的唱片反向转动，声谱虽然未变，音色却显著地改变了。这说明音色在很大程度上与各泛音在开始和终了时振幅上升和下降的特点有关。

尽管人耳对音色的差别极为敏感，但目前对音色这个主观感觉的属性还不能像对音调和响度那样进行定量的研究。

音色对电乐器的研制有非常重要的意义。目前正是根据各种乐器声音的频谱、基音和各次谐波的相对强度，用电声方法进行模拟来制作电乐器。但是由于对人耳判别声音的特点尚未完全明了，所以设计制作的电乐器的音色往往与它所模拟的真实乐器有别，具有一种特殊的音色感觉。利用这种特殊的音色，可以收到其他乐器无法得到的艺术效果。

音程和音阶(interval and scale)

音程(频程)指两个音在频率上的间隔,可以用这两个音的频率之比来表示。如音乐中C大调的“1”(Do)音的频率 $f_1 = 264\text{Hz}$,“2”(Re)音的频率 $f_2 = 297\text{Hz}$,它们之间的音程为 $\frac{f_2}{f_1} = \frac{9}{8}$ 。又如,C大调中的“6”(La)音的频率 $f_6 = 440\text{Hz}$,“7”(Si)音的频率 $f_7 = 495\text{Hz}$,它们之间的音程为 $\frac{f_7}{f_6} = \frac{9}{8}$ 。“1”和“2”,“6”和“7”,它们的音程是相等的,即等

音程。C大调中的“ $\dot{1}$ ”(D $'_0$)频率 $f'_1 = 528\text{Hz}$,“1”和“ $\dot{1}$ ”之间的音程为 $\frac{f'_1}{f_1} = 2$,这两个音称为相差一倍频程。“1”和“ $\dot{1}$ ”,“2”和“

$\dot{2}$ ”等等,听起来像一个音,只是后者比前者“尖”,它们的音程都是一倍频程,在音乐乐理上称它们之间相距八度,即通常所谓高八度。

音乐中的音从低到高按一定音程的排列叫做音阶(也叫乐律)。表1是自然音阶(也叫自然律)中各音的频率关系:

音阶不论怎样划分,都是以一个八度为一组,每组音的排列是重复相同的,即这个八度内任意两个音的音程,同下一个八度内对应的两个音的音程是相同的,即划分方式是相同的。

几个音,如果它们的频率之比是较小的整数之比,同时奏出时是很和谐的,称它们是和谐音。如自然音阶中的“1”、“3”、“5”三个音,频率之比为4 5 6,是较小的整数之比,同时奏出时很和谐,在乐理中称为大三和弦。在自然音阶中,从“1”到“2”这9个音中就有三个大三和弦,即:“1、3、5”;“4、6、 $\dot{1}$ ”;“5、7、2”。

但自然音阶在变调中却不方便,如在D大调中是以D音297Hz作为最低音“1”(D $_0$),按上表的音程划分,则可得出D大调中“1、2、3、4、5、6、7、 $\dot{1}$ ”各音的频率分别为:297Hz、334Hz、371Hz、396Hz、445Hz、495Hz、557Hz、594Hz。这里只有“1”、“4”、“6”三个音与C大调中的音有相同的频率,其余4个音都是C大调中没有的,即新增加的音。调再多,就要增加更多的新音。为了避免这种复杂情形,人们还设计出另一种音阶,叫做等程音阶(也称平均律)。

等程音阶中,在一个八度中分出12个所谓半音,其中任意一个音都可选为新调的第一个音,而不需要增加新音,这12个半音中相邻两个音之间有固定的音程,它们的频率比都是2的12次方根,即 $\sqrt[12]{2} = 1.05946$ 。等程音阶中各音的频率关系如表2:

这样得出的音阶,不论怎样转调,都不会出现新增加的音,即都在上述12个半音中,用起来比较方便,但是各音的频率并不与自然音阶相同,如“1”、“5”的频率之比是1 1.49831,而不是自然音阶中的2 3,即1 1.5,听起来差些,好在人们的听觉会把它们当作2 3来感受。

表 1

音	中尖 C 1 (Do)	D 2 (Re)	E 3 (Mi)	F 4 (Fa)	G 5 (So)	A 6 (La)	B 7 (Si)	C' 1 (Do')
频率 f/Hz	264	297	330	352	396	440	495	528
后一个音 与前一个 音的音程	9/8 大全音	10/9 小全音	16/15 半音	9/8 大全音	10/9 小全音	9/8 大全音	16/15 半音	

表 2

音	中尖 C 1 (Do)	D 2 (Re)	E 3 (Mi)	F 4 (Fa)	G 5 (So)	A 6 (La)	B 7 (Si)	C 1 (Do')
频率 f/Hz	261.6	293.7	329.6	349.2	392.0	440.0	493.9	523.2
后一个音 与前一个 音的音程	$\sqrt[2]{2}$ 全音	$\sqrt[2]{2}$ 全音	$\sqrt[3]{2}$ 半音	$\sqrt[2]{2}$ 全音	$\sqrt[2]{2}$ 全音	$\sqrt[2]{2}$ 全音	$\sqrt[2]{2}$ 全音	$\sqrt[3]{2}$ 半音

双耳定位和立体声(binaural localization and stereophony)

凭听觉判断声源的位置，必须靠两只耳朵，这就是所谓双耳定位。对同一声源发来的声音，两耳感觉到的声音强度不同；两耳感受到的时间有先后；两耳感受到的声波的相位不同，这三个因素的不同虽然微小，但两耳就是根据这种微小的差异，来判断声源是在什么位置的。

在音乐厅里听乐队演奏，由于双耳定位，我们可以听出不同乐器的声音各来自何方，如果在这个音乐厅里放一个传声器(话筒)，把演奏的声音接收并录制下来，比如用磁带录下来，然后听录音，并且，放音时也是用一个扬声器播出(图 1-9-23)，那么，双耳只能判断声音是从扬声器中发出的，而不能分辨不同乐器的声音各来自何方，不能形成身临其境时各种不同音响来自不同方位的“立体”感。这就是所谓单通道声。

如果用两个传声器分开一定距离，分别把现场的声音接收并录制下来，比如同时录制在一条磁带的两条磁性声道上，放音从这两条磁性声道分别送到两个分开一定距离的扬声器播放出来，那么，听者将有身临其境的方位“立体”感。这就是双声道立体声(图 1-9-24)。现在的立体声磁带录音机大多是双通道声的。立体声唱片通常也是双通道的。由两个传声器传来的声音信号，分别录制在唱片的 V 形槽的两个槽壁上，并分别用两个扬声器播放。

为了取得更好的立体声效果，还有四通道立体声(图 1-9-25)。道理与双通道的相同，只是有四个传声器同时接收声音信号，其中两个靠近舞台的左前(LF)和右前(RF)，拾取直达声信号；另两个较远的传声器在左后(LB)和右后(RB)，拾取环境声的信号。扬声器也有四个，位于相应的位置。

四通道立体声也可以用耳机收听，左、右两耳罩中各放置两个发声单元。

宽银幕立体声电影有四个通道，在放映用的影片上录制有四条磁性声道，其中三条分别通到银幕后的左、中、右三个扬声器上，另一条通到影院四周的小扬声器上，播出背景声。

另外，把一个单通道声的高频和低频声分开，分别送到听者前面的左、右两个扬声器播出，听到的声音类似双通道立体声，但效果较差。这种声音称为仿真立体声(赝立体声)。

混响 (reverberation)

室内声源发出的声波，在室内各个壁面之间来回反射，每反射一次，声能被界面吸收一次，因而声能逐渐衰减，这种现象称为室内混响。室内一般可存在两种声音。一种是自声源直接到达接收点的声音，叫直达声；另一种是经过壁面一次或多次反射到达接收点的声音，听起来好像直达声音的延续，这种声音称为混响声。

声音衰减过程的特点，可以用混响时间 T 来表示。混响时间 T 是指从声源停止发声起，声强衰减到百万分之一，即降低 60 分贝所需的时间。取 60 分贝，是因为人听到的声音常常是 60 分贝左右，降低 60 分贝，声音就衰减到听不见了。 T 可由下式求得：

$$T = 0.163 \frac{V}{S \cdot \bar{a}} \text{ (s)}$$

其中 V 为房间的容积， S 为房间的表面积， \bar{a} 为房间表面的平均吸声系数。吸声系数的定义是：发生一次反射时，被表面吸收的能量与入射能量之比。上式是赛宾 (Wallace Clement Ware Sabine, 1868 ~ 1919) 在 1900 年得到的，叫做赛宾公式。

混响时间对人的听音效果有重要影响。房间内比较理想的混响时间称为最佳混响时间。它一般是响度要求和清晰度要求之间折中的结果。选择最佳混响时间是保证室内音质良好的重要措施。最佳混响时间的选择因房间使用目的不同而异。教室、会议室、报告厅、大会堂等专门或主要为语言应用的建筑、以及办公室、实验室、研究室等脑力劳动场所要求混响时间短，以保证语言有足够的清晰度。专门为音乐欣赏用的音乐厅、剧院等，则要求混响时间较长，以便听起来感到丰满。其他有多功能综合应用的房间，最佳混响时间介于上述二者之间。另外，无论做哪种应用，厅堂体积越大，最佳混响时间也越长。图 1-9-26 是最佳混响时间的建议值。

噪声(noise)

从声波的物理性质来看，噪声是紊乱、断续或随机的声振动，听起来嘈杂，是无调声。从声波对人的危害来看，噪声是不需要的声音，它可以是无调的嘈杂声，也可以是有调的乐音。有调的乐音，在影响人们的工作和休息，使人感到厌烦时，也属于噪声。噪声是在不同的环境中被人们判定为不需要的声音。

随着现代工业建设、交通运输、城市建设的发展，噪声日益严重，它已经成为污染环境的公害之一。噪声广泛影响着人们的各种活动，其危害主要表现为：

(1)噪声对人体有生理影响。噪声对听力会造成损害，甚至会造成耳聋。噪声会引起人体紧张的反应，致使心率改变和血压升高。噪声会引起失眠、头痛、记忆力减退等。

(2)噪声对人体有心理影响，表现为引起人们的烦恼，使人激动；容易使人疲劳，影响精力集中，降低工作效率。

(3)噪声对语言、通讯有干扰作用。

任何声学系统都是由声源、传输路径和接收者这三部分组成的，噪声也是如此。控制噪声，把噪声降低到符合允许标准的程度，就要从这三方面着手，即控制噪声源，控制噪声的传输路径和保护接收者。其中控制噪声源是根本性的。

噪声源可分为两类。一类是机械声源，一类是气流声源。机械声源又可分为稳态振动声源和撞击性声源。

稳态声源是由机器部件进行稳态振动而形成的。如机器运转部分调节不好；重心不在轴上；齿轮啮合或传动系统接触不良；轴承或相互摩擦部分润滑不足；机械零件松动等都会引起噪声。控制稳态振动声源，就是设法降低或消除上述这类振动。

气锤、冲床以至印刷机、打字机等声源，都是撞击性声源，撞击声源发出的声音可分为两部分，一部分是撞击时因撞击物体突然停止而产生的噪声；另一部分是被撞击物体受击后振动而产生的。对前一部分的噪声控制，要从撞击速度和撞击物的体积着手；对后一部分，要从降低被撞击物体的振动着手。

喷气式飞机、火箭以至汽车、汽动工具等排气时产生的噪声，都是气流声源发出的噪声。气流噪声是由于气流在流动中产生大量湍流而发出的声音。降低气流速度、改变喷口形状，都可以降低噪声。保持喷口总面积不变，用大量小孔代替大孔，可以降低噪声。

控制噪声传输路径，包括隔声、吸声和消声。所谓隔声，就是用屏蔽物把声音挡住，隔离开来。用墙壁、门窗把室外的噪声挡住，就属于隔声。用隔声罩把声源罩起来，是控制机器噪声传输常采用的措施。所谓吸声，就是利用吸声材料把入射的声能吸收，以降低噪声。这种措施主要用于室内空间，如厂房、会议室、办公室、剧场等。所谓消声，是利用各种消声器来降低通过管道或狭窄空间传播的噪声。通常用在控制气流噪声，如控制通风管道和排气管道的噪声。

如果噪声已传到入耳附近，就要采取办法保护接收者。个人保护办法有耳塞、耳罩、耳棉等。

声呐 (sonar)

声呐是利用声波在水中的传播，通过电声转换以及信号处理，进行水下探测的设备。声呐是英文 sonar 一词的音译。sonar 一词是 sound navigation and ranging 的略语，直译为“声导航和定位”，曾译作“水声定位仪”。

声呐与雷达在原理上很相似。它们的差别是：声呐利用声波进行工作，观测的是水下目标；雷达则利用电磁波工作，观测的是空气中的目标。探测水下目标所以要用声波，是因为海水对声波的吸收很小，声波在水中容易传播很远的距离。而海水是电的良导体，电磁波在水下传播时将很快衰减，不能传播很远。

声呐可分为主动声呐(有源声呐)和被动声呐(无源声呐)两类。

图 1-9-27 为主动声呐的原理方框图，发射机产生并放大电脉冲信号，通过换能器转换成声脉冲信号，向水中发射出去。声脉冲碰到水下目标(比如潜艇)发生反射，产生回波。回波返回换能器，又被转换成电信号，送到接收机中进行放大和处理，再由指示器显示出来。目标的距离可通过发射脉冲与回波返回的时间差来估算。目标方位的测定，是在双耳定位的基础上发展起来的。在水中放两个换能器，测出回波到达两个换能器的相位差，则可以测得目标方位。

被动声呐通过接收目标的辐射噪声来探测目标，与主动声呐的区别，只是没有发射部分。一般被动声呐只能测定目标方位，原理与主动声呐相同。

研究表明，在低频范围内，海水对声波的吸收较小，因此，采用低频声可以提高探测距离。几百赫的低频声，具有长距离(上万公里)探测的潜在能力。主动声呐的工作频率一般为 14kHz ~ 25.5kHz；被动声呐的工作频率一般为 70Hz ~ 12kHz。

声呐的用途很广泛。军事上，声呐用来搜索敌方的舰艇、鱼雷、水雷等。它是探测潜艇的主要手段，又是潜航在水中的潜艇了解周围环境的主要手段。在民用方面，声呐可用于探深、捕鱼、海底地质勘探，海底矿源探察、海底石油开发以及为船舶导航等各个领域。

次声波(infrasonic wave)

次声波是频率低于可听声的声波。它的频率范围大约是 $10^{-4}\text{Hz} \sim 20\text{Hz}$ 。

能产生次声波的次声源是很多的：

地震，喷发的火山，咆哮的大海，坠入大气的流星，以至美丽的极光都能产生次声波。这都属于自然次声。核爆炸时会产生次声波，而且这是极强的次声源。核爆炸产生的次声波，在大气中可绕地球几周，还可以传播到几百公里的高空，引起电离层的扰动，干扰无线电波的传播。高速飞行的喷气式飞机和火箭也会产生次声波，在火箭发射场附近，这种次声波很强，对周围建筑和仪器会产生破坏作用。跨度大的桥梁，桥面振动时会有次声波产生。这些属于人工次声。台风、龙卷风、海啸、雷电等也会产生次声波，称为气象次声。可见次声波是相当普遍的。

由于对次声波的研究取得了较大进展，次声波的应用已开始为人们所注意。

次声波的应用大致可分为以下几方面：

(1)通过研究自然现象产生的次声波的特性，来认识这些自然现象的特征和规律。如通过研究极光所产生的次声波的特性，来认识极光活动的规律，通过研究火山产生的次声波的特性，来区分火山活动的类型和计算火山喷发的能量等。

(2)利用次声波探测次声源的位置和特性。如接受核爆炸的次声波，探测核爆炸的有关参量。

(3)许多灾害性现象如地震、火山爆发前会辐射次声波，可利用次声波这种前兆现象预测事件的发生。

(4)利用次声波在大气中的传播特性，探测某些大规模气象活动的性质和规律。

(5)通过测定次声波与大气中其他波动的相互作用，探测其他波动的活动特性。如电离层中的次声波可以使电磁波的传播受到干扰，测定次声波的特性，可以揭示电离层扰动的规律。

(6)人和生物能对次声波产生某种反应，而且其器官也会发出微弱的次声，因此，可以利用次声波了解人体或生物相应器官的活动。

超声波 (supersonic wave)

超声波是频率高于可听声频率范围的声波。它的频率在 20000Hz 以上。

自然界中许多动物都能发出超声波。如蝙蝠、蟋蟀、蚂蚱、纺织娘、老鼠、座头鲸、白鳍豚等等。蝙蝠就是靠发出和接收超声波来定位，从而躲避障碍物和捕捉昆虫等食物的。

超声波具有一些特殊的性质，如：

1. 方向性好，几乎沿直线传播。

2. 穿透能力强，能穿透许多电磁波不能穿透的物质。在一些不透明的物体中，能穿透几十米的厚度。在碰到杂质和媒质界面时，有显著的反射。

3. 由于频率高、能量很大，并且很容易会聚，使能量集中，因而在媒质中传播时能产生巨大的作用力。

第一个人工的超声波发生器是 1883 年英国人设计的“超声波哨笛”，它里面的高压气流以很大的速度通过狭窄的喷口喷射出来，并冲击着哨笛内腔的金属片的尖形边缘，使它激发出高频(约 170kHz)的超声波。之后又发明了超声波气笛。哨笛和气笛都是机械型超声波发生器，它们使用起来很不方便。本世纪初机电型超声波发生器的出现使得超声波的获得和应用技术有了巨大的变革与发展。

机电型超声波发生器所应用的物理现象是：磁致伸缩和电致伸缩(逆压电效应)磁致伸缩是指在磁场作用下某些晶体(特别是含铁、钴、镍及其合金的铁磁性物质)体积发生微小变化的现象。如果在这些晶体上加交变磁场，晶体就会发生振动，产生超声波，如果频率适当，还会发生共振。电致伸缩，也称逆压电效应，是指某些电介质(如石英、电气石、酒石酸钾钠等)在外加电场作用下发生弹性形变。与磁致伸缩相类似，在交变电场的作用下，石英也可发生振动，产生超声波。

借助于磁致伸缩和电致伸缩的逆效应，就可以制成超声波接收仪器：超声波可以迫使“磁致伸缩铁心”或石英片振动从而产生相应的磁场或电场并可以用仪器记录下来。

超声波的应用十分广泛，归纳起来可分为两大类：

一类是利用较弱的超声波来进行各种检验、测量和控制。称之为超声波检测或控制技术。

如：超声探伤。用来对金属机械工件或混凝土构件进行无损检测。用超声波射向被测工件，如果工件内部有孔、缝隙、伤痕等。超声波在这些地方会发生异常反射，根据仪器接收到的这些反射波可以判定有无缺陷以及缺陷所在的位置及大小等。

超声波测距、测厚。

超声声呐，可以用来测海深、鱼群、潜艇等等。

超声波医疗诊断。用弱超声波射向人体，可用来检查人体内脏有无病变及病变位置，孕妇的胎儿情况等等。

由于超声波可以会聚，还可以制成超声显微镜，从而得到不透明物体的像。近代还出现了声全息成像技术，在医疗诊断、工业无损检测、水下地质勘探等方面都有比较成功的应用。

另一类是利用较强的超声波来改变物质的性质和状态。称之为超声波加工或超声波处理技术。

用超声波可以对宝石、金刚石、陶瓷、钢铁等硬脆材料进行加工，比如钻孔、雕刻或其他普通机械不能或难于加工的复杂形状等的加工，并且加工速度快，光洁度好。

用超声波可使工件表面污垢或杂质产生高频振动而自动脱落，从而施行超声波清洗，多用于结构复杂或体积微小的机械零件、医用器械等。清洗的清洁度好，效率高。

应用超声波技术还可以达到节能的目的。比如，在超声波作用下使油水混合，水分散成小滴，使汽油包在水滴外形成乳化油，以便于油充分燃烧，既节约燃料油，又减少污染。也可以用超声波使油掺煤制成油煤浆，既提高燃烧效率，又节省较贵的油料，且能充分燃烧，减少污染。

超声波的应用方面还有很多，随着科学技术的发展和对声学的深入研究将会开辟更多的新领域。

主要参考资料

1. 中国大百科全书出版社编辑部. 中国大百科全书. 物理学. 第1版. 北京: 中国大百科全书出版社, 1987.
2. 魏墨. 机械振动与机械波. 第1版. 北京: 人民教育出版社, 1978.
3. 马大猷, 沈. 声学手册. 第1版. 北京: 科学出版社, 1983.
4. (英)佩因. 振动与波动物理学. 陈难先, 赫松安. 第1版. 北京: 人民教育出版社, 1980.
5. 陈鹏万. 大学物理学手册. 第1版. 济南: 山东科学技术出版社, 1985.
6. 梁绍荣. 普通物理学, 第一分册, 力学. 第1版. 北京: 高等教育出版社, 1987.
7. 缪钟英, 罗启蕙. 力学——问题讨论. 第1版. 北京: 人民教育出版社, 1989.
8. 科学出版社名词室. 物理学词典. 第1版. 北京: 科学出版社, 1988.
9. C. . 福里斯等. 普通物理学, 第1卷. 梁宝洪. 第1版. 北京: 人民教育出版社, 1979.
10. 王沛清. 中学物理教学中容易混淆的问题. 第2版. 长沙: 湖南人民出版社, 1982.
11. A. P. 弗伦奇. 振动与波. 徐绪笃. 第1版. 北京: 人民教育出版社, 1981.
12. G. 贝克斐, A. H. 巴雷特. 电磁振荡电磁波和辐射. 第1版. 北京: 人民教育出版社, 1981.
13. . 朗道. 连续介质力学. 彭旭麟. 第1版. 北京: 人民教育出版社, 1978.
14. 吕如榆, 高彦良. 现代生活中的声音. 第1版. 北京: 人民教育出版社, 1990.
15. F. W. 西尔斯. 大学物理学. 恽英等. 第1版. 北京: 人民教育出版社, 1980.
16. 李允武等. 声音. 第1版. 北京: 科学出版社, 1981.
17. 丁时祺. 声学趣谈. 第1版. 北京: 人民教育出版社, 1988.
18. 马大猷. 环境声学. 第1版. 北京: 科学出版社, 1984.
19. 杜功焕等. 声学基础下册. 第1版. 上海: 上海科学技术出版社,

1981 .

20. 刘天齐等 . 环境保护概论 , 第九章 , 环境噪声及其控制 . 第 1 版 . 北京 : 人民教育出版社 , 1982 .

21. 陈克棠 , 胡嘉忠 . 声呐和 underwater 观测 . 第 1 版 . 上海 : 上海科学技术出版社 , 1981 .

22. 屠焰 , 赵树卿 . 奇异的次声 . 第 1 版 . 北京 : 科学出版社 , 1979 .

23. 施仲坚 . 奇妙的听不见的声音 . 第 1 版 . 北京 : 人民教育出版社 , 1989 .

十、相对论初步概念

经典时空观(classical space-time view)

时间和空间是物质存在的形式，时间是物质运动变化的持续性和顺序性的表现，空间是物质运动的广延性的表现。时空观是人们对时间和空间的基本观点，它反映人们对时间和空间物理性质的认识。随着生产和科学技术的发展，在不同的历史时期，人们有不同的时空观。

在科学不发达的古代，人们在地面上较小范围内从事简单的生产活动，凭直觉产生一种朴素的认识，以为大地是平的，天空像一口大锅扣在大地上，认为天在上，地在下，上和下有绝对意义。到了二千多年前，由于天文观测和航海事业的发展，人们逐渐认识到地球是球形，并认为整个宇宙是由环绕地球的一些同心球层组成的，产生了以托勒密(公元 2 世纪)为代表的地心说。在这种时空观中，上和下失去了绝对意义，只有相对意义，因为地球是球形的，地面上某一区域的人认为是上的方向，住在地球另一侧的人则认为是下。可见，空间并没有绝对的上下方向，各个方向都是平等的。但那时人们认为地球是“宇宙的中心”，因而认为物体在空间的位置，即相对于“宇宙中心”的位置，有绝对意义。到了 16 世纪，随着通商航海事业的继续发展和对天体运动的进一步观察研究，哥白尼提出了日心说，指出地球和其他行星一样在绕着太阳转动。这就否定了地球是整个宇宙中心的意义，因而宇宙中各种物体的位置只有相对意义，没有绝对意义。伽利略在研究运动现象时进一步指出，一切力学现象对于所有相互做匀速直线运动的参考系来说都是相同的，不存在特殊的参考系。

牛顿在前人研究的基础上，总结出运动三定律，并发现了万有引力定律，证明了天上物体跟地上物体的运动，遵从同样的力学规律。在牛顿的运动方程中，位移和时间跟起点的选择没有关系，也就是说，在任何地点，从任何时刻开始，做同样的力学实验，相对于一切惯性参考系所得的规律是相同的。这表明，一切时间和空间都是平等的，不存在特殊的时间和空间。

在牛顿的时空观中，时间和空间本身是绝对的，跟任何外界物体的存在和运动情况无关，时间和空间之间也没有联系。牛顿在他的《自然哲学的数学原理》一书中写道：“绝对的、真正的纯数学的时间，就其自身和其本质而言，是永远均匀流逝的，不依赖于任何外界事物。”“绝对的空间，就其本性而言，是与外界事物无关而永远是相同和不动的。”这种时空观叫做牛顿的“绝对时空观”。全部经典力学都是建筑在这种绝对时空观上的，因此这种时空观也叫经典时空观。伽利略变换可以看作是这种时空观的数学表示(参见“伽利略变换”)。

经典时空观跟人们的日常经验是一致的，因此容易被人们接受。但 20 世纪以来科学技术的进一步发展，发现时间的长短和空间距离的长短并不是绝对的，而跟物体的相对运动速度有关，因而具有相对性，并且时间和空间之间也有一定的联系。于是经典时空观又发展成相对论时空观(参见“时间的相对性”、“长度的相对性”和“洛伦兹变换”)。

伽利略变换(Galilean transformation)

研究物体的运动可以选用不同的参考系和坐标系，因此需要知道不同参考系之间的坐标变换关系。在经典力学范围内惯性参考系之间的这种坐标变换关系，叫做伽利略变换。

设有两个惯性系 S 和 S' ，惯性系 S' 相对于 S 以速度 v 运动，并这样建立坐标系，使 S' 系的 x' 轴与 S 系的 x 轴重合，且与速度 v 的方向一致，如图 1-10-1 所示。取两坐标系完全重合时为计时起点，这时 $t' = t = 0$ 。这样，运动物体 P 在两坐标系中的坐标 x, y, z, t 和 x', y', z', t' 之间将有下列关系：

$$\begin{aligned}x' &= x - vt, \\y' &= y, \\z' &= z, \\t' &= t.\end{aligned}$$

这组关系式就是伽利略变换式，简称伽利略变换。从上式也可以得出逆变换式：

$$\begin{aligned}x &= x' + vt', \\y &= y', \\z &= z', \\t &= t' .\end{aligned}$$

在上面的变换式中， $t' = t$ ，表明在各个惯性系中有共同的时间，这一点并没有给予证明，而是认为自然成立的。

从上述变换式可以求出，在不同惯性系中长度是不变的。即

$$\begin{aligned}l' &= \sqrt{(x'_2 - x'_1)^2 + (y'_2 - y'_1)^2 + (z'_2 - z'_1)^2} \\&= \sqrt{(x_2 - x_1)^2 + (y_2 - y_1)^2 + (z_2 - z_1)^2} \\&= l\end{aligned}$$

这正是经典时空观的必然结果。因此，可以把伽利略变换看成是经典时空观的数学表示。

以太和以太参考系(ether and ether reference frame)

最初提出“以太”假说的,是17世纪的笛卡儿(1596~1650),他用“以太”作为光的传播介质,认为“以太”充满宇宙空间,以此来解释光在宇宙空间的传播。由于牛顿提出的光的微粒说占了上风,笛卡儿的“以太”说就被人们淡忘了。后来,光的波动说取得胜利,特别是麦克斯韦从理论上指出电磁波的存在和光是一种电磁波以后,“以太”假说才又被提了出来。许多物理学家在当时力学理论已取得辉煌成就而电磁理论才开始发展的形势下,受机械唯物论思想的影响,认为光如果是电磁波,光的传播也应像声的传播一样需要有介质,依靠介质才能把光的电磁扰动传向四面八方。于是仍把这种传播光的介质叫做“以太”,认为光在真空中的速度就是电磁波在“以太”中的传播速度,约为 $3 \times 10^8 \text{m/s}$,像一切机械波一样,这个速度值与光源的运动无关,只决定于“以太”的性质。

既然假定真空中的光速就是电磁波在“以太”中的速度,自然可以设想“以太”是静止不动的,那么选取“以太”为参考系,就有了绝对不动的“以太参考系”,并可以解释光在“以太”中向各个方向的传播速度都相同,这跟牛顿的绝对时空观是一致的。

但是,“以太”是否存在,必须用实验来证实。更使人感到困惑的是如何解释“以太”的性质。“以太”必须充满全部空间,而任何物体在静止不动的“以太”中运动时又看不到有什么阻力。同时,由于光波是横波,又要求“以太”有固体属性,有很大的切变模量。这些互相矛盾的性质,使各种观点都难以自圆其说。许多寻找“以太”的实验也都没有成功(参见“迈克耳孙-莫雷实验”)。爱因斯坦发表相对论后,关于“以太”的假说就被人们最后抛弃了。

“以太”假说虽然失败了,但这个假说认为真空不空的观点还是正确的。爱因斯坦在创建广义相对论时曾提出,真空不过是引力场的一种特殊状态,可用引力势来描写真空的空间状态,从而否定了空间在物理上是虚空的见解。物理学发展到微观领域后,认为真空是量子场系统的基态,它产生的一些物理效应,与实验观测的结果符合。当然,“以太”并不是今天所说的一场”。

迈克耳孙-莫雷实验(Michelson-Morley experiment)

在企图证实“以太”存在的许多实验中，最著名的是美国科学家迈克耳孙和莫雷在 1887 年做的实验。这个实验的设计思想是，如果“以太”存在，而且确实静止不动，那么地球在“以太”中运动就像物体在静止空气中运动一样，必然受到一股“以太风”的作用，这“以太风”对光的传播将发生影响。设光在静止“以太”中的速度是 c ，那么在“以太”中以速度 v 运动的观察者将测到光的速度为 c' ，而 $c' = c - v$ 。迈克耳孙想用实验来检验这个结果。

迈克耳孙首先在 1881 年做了这个实验，以后在 1887 年与莫雷合作又进行了更精密的实验。他们是用迈克耳孙发明的干涉仪做这个实验的，实验装置如图 1-10-2 所示。

从光源 S 发出的光，射到半镀银镜 M 后，分成强度大致相等的两束光，一束光透过 M 沿 OM_1 方向前进；另一束光被反射，沿 OM_2 方向前进。这两束光是从同一光源产生的，因此是相干光。 M_1 和 M_2 是两块平面镜，互相垂直，离 O 点的距离相等从 M_1 和 M_2 反射回的光线到达 M 后，仍有一部分透过，一部分被反射，于是从 M 处沿 OT 方向射出两束相干光进入望远镜筒 T，在那里产生干涉条纹。假设地球相对于“以太”沿 OM_1 方向运行，那么光在 OM_1 间往返一次所需要的时间就跟在 OM_2 间往返一次所需要的时间不同，这两束光在 O 点相遇时将产生一定的相位差，因此从望远镜的目镜可以看到一定的干涉条纹。

迈克耳孙把这套仪器装在一个十分平稳的大理石桌面上，并让大理石漂浮在水银槽中的水银上，于是可以使仪器平稳地绕竖直轴转动。实验时，先使光束 1 沿着地球绕太阳公转的速度 v 的方向，然后把仪器转动 90° ，使光束 2 沿着 v 的方向，观察干涉条纹的变化情况。地球绕太阳公转的速度是 $3 \times 10^4 \text{m/s}$ ，迈克耳孙从理论计算得出，在这种转动过程中将有 0.4 的条纹移动。这可使原来的亮纹处变为暗纹，原来的暗纹处变为亮纹如果“以太”存在，这个结果应该很明显地被观察到。然而出乎意料，在实验中并没有观察到条纹移动。后来，在不同的季节(地球在公转轨道上的运动方向不同)、在白天和夜晚(考虑到地球的自转可能产生的差别)反复做了多次实验，都得到了否定的结果。这表明地球的运动对光速并没有影响，即光在地面上沿任何方向传播的速度都相同。这为相对论的建立奠定了基础。

相对性原理(relativity principle)

相对性原理是一条基本自然规律。早在 1632 年，伽利略就发现，一切力学规律在所有惯性系中都相同，也就是说，不能用任何力学实验来证明物体是静止的或是在做匀速直线运动。这个原理叫做伽利略相对性原理或力学相对性原理。1905 年，爱因斯坦把它推广，指出：一切物理规律(不论是力学的、光学的或电磁学的)在所有惯性系中都相同，也就是说，不能用任何实验(不论是力学的、光学的或电磁学的)来证明物体是静止的或是在做匀速直线运动。这表明，一切惯性系都是平等的，不存在绝对静止的“特殊参考系”，静止和运动是相对的。这个原理是爱因斯坦建立狭义相对论的基础，叫做狭义相对性原理。1907 年，爱因斯坦提出等效原理，即一个不受引力作用的加速系统跟一个受引力作用的惯性系统等效，于是又把狭义相对性原理推广到一切参考系，也就是说，一切参考系，不论它们的运动状态如何，对于描述自然规律都是等效的。这个原理叫做广义相对性原理，是建立广义相对论的基础。

光速不变原理(principle of constancy of light velocity)

迈克耳孙-莫雷实验表明，光的传播速度不受地球运动的影响。可是，地球除了自转和公转，还参与太阳系在银河系中的整体运动，自然光速也不受太阳系运动的影响，同样，也不会受到其他任何运动的影响。1905年爱因斯坦提出，光在真空中的速度，对于一切惯性参考系来说，都是相同的。它跟光源的运动速度无关，也跟观察者(或测量仪器)的运动速度无关。这就是光速不变原理。它是爱因斯坦建立狭义相对论的两条基本假设之一(另一条基本假设是相对性原理)，已被大量实验证实。光速不变原理跟经典时空观是矛盾的，它是建立相对论时空观的基础。

同时性的相对性(relativity of simultaneity)

同时的概念，在经典时空观中是绝对的，如果说在某一时刻发生了两个事件，那么不论这两个事件是发生在同一地点，或是发生在相隔遥远的两个地点，或者一个发生在地面上，一个发生在高速飞行的火箭上，都可以说它们是同时发生的。但根据光速不变原理，同时的概念并不是绝对的，它跟参考系的选择有关，为了说明这个原理，爱因斯坦举了一个假想的火车实验。

如图 1-10-3 所示，在一列火车正中间的车厢内有一个观察者 A 和一台闪光器 S，在车头和车尾分别装一台光的接收器 P 和 Q。假设火车以很高的速度 v 向前运行，在站台上有一观察者 B，在火车驶过站台，A 和 B 相遇的一瞬间，闪光器发出一次闪光，这闪光被车头和车尾的两个接收器接收。车厢中的观察者 A 认为，光信号相对于他(或火车)以同样的速度向各个方向传播，PQ 两个接收器与发生闪光处的距离相同，所以光信号到达 P 和 Q 这两个事件是同时的。但在站台上的观察者 B 则认为，光信号相对于他(或地面)以同样的速度向各个方向传播，在光信号传播的这段时间中，P 顺着光传播方向运动，使距离增大，Q 迎着光传播方向运动，使距离减小，因此光信号先到达 Q，后到达 P，也就是说，光信号到达 P 和 Q 这两个事件不是同时的。可见，对一个参考系来说是同时的两事件，对另一个参考系来说就不是同时的。这就是同时性的相对性。当然，在同一地点发生的两个事件的同时性，对于任何参考系来说都是正确的。

时间的相对性(relativity of time)

时间的长短不是绝对的，而跟参考系的选择有关，这种现象叫做时间的相对性。

时间是用钟表来测量的，而每一种能测量时间的工具都可以看作是一种钟。图 1-10-4 甲是一种雷达钟，它有一部雷达和一块反射板，反射板跟雷达之间的距离是 d 。雷达发出电磁波信号，经反射板反射后又被雷达接收。设这信号往返一次所用的时间是 t_0 ，由于信号往返一次通过的路程是 $2d$ ，电磁波的传播速度是 c ，所以

$$t_0 = \frac{2d}{c}$$

如果雷达钟以速度 v 向右做匀速直线运动，例如把雷达钟装在水平飞行的飞机上(图 1-10-4 乙)，那么同雷达一起运动的观察者，由于始终跟雷达钟保持相对静止状态，他将测得 t_0 仍等于 $2d/c$ ，即跟雷达钟静止时一样。而不随雷达钟运动的观察者，例如停在地面上的观察者，则发现雷达信号往返所通过的路程如图 1-10-4 乙中的斜线所示。设斜线的长度为 l ，则信号往返一次所通过的路程是 $2l$ ，而电磁波的传播速度仍是 c ，所以信号往返一次所用的时间 t 将等于 $2l/c$ 。由于 $l > d$ ，因此 $t > t_0$ 。根据 l 和 d 的关系，可以证明

$$t = \frac{t_0}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}}$$

式中 v 是物体(雷达钟)相对于观察者的速度， c 是真空中光速， t_0 是静止参考系中的时间，简称静止系时间。这个关系式表明，一切处于相对运动中的观察者所观测到的时间 t (简称运动系时间)都比 t_0 长，并且不是唯一的值，而是随着相对运动速度 v 的变化而变化。这就是时间的相对性，通常简单地说是“运动的时钟变慢”或“运动系的时间延长”。这种现象已被实验证实。

长度的相对性(relativity of length)

物体的长度不是绝对的，而跟参考系的选择有关，这种现象叫做长度的相对性或空间的相对性。

仍用雷达钟来讨论(参见“时间的相对性”)。设雷达天线跟反射板间的距离等于一根直尺的长度(图 1-10-5)。设这根直尺在静止参考系中的长度是 l_0 ，这个长度叫做它的静长度。让雷达钟沿直尺长度方向以速度 v 运动。雷达钟从天线 A 发出的信号经反射板 B 反射后又被雷达接收。从相对于雷达钟为静止的观察者来说，信号往返所经过的时间是 t_0 ， t_0 跟 l_0 之间的关系是

$$ct_0 = 2l_0$$

但从静止于地面(即对雷达钟有相对运动)的观察者来说，这段时间等于 t ， t 和 t_0 的关系是

$$t = \frac{t_0}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}}$$

设信号从 A 运动到 B 的时间是 t_1 ，信号从 B 返回到 A 的时间是 t_2 ，则

$$t = t_1 + t_2$$

为了简单起见，我们不讨论雷达钟，只讨论直尺的运动。从地面观察者来说，信号从 A 到 B 这段时间中，直尺已到达 A_1B_1 位置(图 1-10-6)，即前进了 vt_1 一段距离，所以这时信号前进的距离 $ct_1 = l_0 + vt_1$ ，即

$$t_1 = \frac{l_0}{c - v}$$

信号从 B 再返回 A 时，直尺已到达 A_2B_2 ，即又前进了 vt_2 的距离，所以这时信号通过的距离 $ct_2 = l_0 - vt_2$ ，即

$$t_2 = \frac{l_0}{c + v}$$

于是得

$$t = t_1 + t_2 = \frac{2cl_0}{c^2 - v^2} = \frac{2l_0}{c} \cdot \frac{1}{1 - \frac{v^2}{c^2}} \quad (1)$$

而根据 t 和 t_0 的关系，又因 $t_0 = 2l_0/c$ ，因此有

$$t = \frac{t_0}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}} = \frac{2l_0}{c} \cdot \frac{1}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}} \quad (2)$$

比较(1)、(2)两式的右端，可得

$$l = l_0 \sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}$$

这表明，运动尺的长度 l 小于 l_0 ，并且不是唯一的值，而是随着相对运动速度 v 的变化而变化。这就是长度的相对性或空间的相对性，通常简单地说是“运动的直尺收缩”。应该说明的是，如果运动速度 v 的方向跟长度方向垂直，则长度并不收缩。

洛伦兹变换(Lorentz transformation)

根据相对性原理和光速不变原理，可以得出相互做匀速直线运动的两个坐标系之间的时间坐标和空间坐标的变换关系。这种变换关系是在狭义相对论建立以前由洛伦兹等人从不同的观点出发得出的，通常叫做洛伦兹变换。它是狭义相对论时空观的数学表示。

假设有一个物理事件，在惯性系 S 中的时空坐标是 (x, y, z, t) ，在惯性系 S' 中的时空坐标是 (x', y', z', t') 。现在来求这两组时空坐标之间的变换关系。为了讨论方便，假定 S' 系相对于 S 系沿 x 轴方向以速度 v 匀速运动。由于两个参考系都是惯性系，所以同一事件的时空坐标在两参考系间的变换必须是线性的，否则对一个参考系是匀速运动，对另一参考系就不是匀速运动了。另外，假定两参考系有共同的时空坐标原点，即当 S' 系的原点 O' 和 S 系的原点 O 重合的一瞬间开始计时，即这时 $t' = t = 0$ 。因为沿 y 轴和 z 轴的坐标与运动无关，所以保持不变。下面只讨论 x 和 t 的变换。

因为变换是线性的，同一物理事件在两系中的坐标关系可写为

$$x' = a_{11}x + a_{12}t + a_{13},$$

$$t' = a_{21}x + a_{22}t + a_{23}.$$

式中 a_{11} 、 a_{12} 、 a_{13} 、 a_{21} 、 a_{22} 、 a_{23} 是常系数，与时空坐标无关。因为两系有共同的时空原点，当 $t' = t = 0$ 时， $x' = x = 0$ ，代入上式可得 $a_{13} = a_{23} = 0$ 。于是上式简化为

$$x' = a_{11}x + a_{12}t, \quad (1)$$

$$t' = a_{21}x + a_{22}t. \quad (2)$$

因为 S' 系的原点 O' 相对于 S 系的速度是 v ，应有 $x' = x - vt$ ，当 $x' = 0$ 时， $x = vt$ 。把这个结果代入(1)式得： $x' = a_{11}vt + a_{12}t = 0$ 。所以， $a_{12} = -a_{11}v$ 。于是(1)式可写成

$$x' = a_{11}x - a_{11}vt. \quad (3)$$

由光速不变原理，如果有一束光在两系重合时离开原点，经一段时间后到达一时空点 P ，它在 S 系的坐标是 (x, y, z, t) ，在 S' 系的坐标是 (x', y', z', t') 。在 S 系，光传播的距离是

$$\sqrt{x^2 + y^2 + z^2} = ct,$$

即 $x^2 + y^2 + z^2 - c^2t^2 = 0$ 。

在 S' 系，光传播的距离是

$$\sqrt{x'^2 + y'^2 + z'^2} = ct'$$

即 $x'^2 + y'^2 + z'^2 - c^2t'^2 = 0$ 。

这两组坐标间应有下述关系：

$$\begin{aligned} x^2 + y^2 + z^2 - c^2t^2 \\ = k^2(x'^2 + y'^2 + z'^2 - c^2t'^2). \end{aligned}$$

其中的 k^2 是一比例常数， k 应该与两惯性系间的相对速度 v 有关。根据相对性原理，由于惯性系间的正变换必须与逆变换对等，即 k 必须是 v 的偶函数，也就是说 $k(v) = k(-v)$ 。如果 $x' = k(v)x$ ，那么设想有另一惯性系 S'' ，它相对 S' 系以速度 $-v$ 向左运动，则 $x'' = k(-v)x' = k(-v)k(v)x$ 。但是，实际上 S'' 系就是 S 系，所以 $x'' = x$ ，于是 $k(-v)k(v) = 1$ ，即 k^2

= 1。所以上式应写成

$x^2 + y^2 + z^2 - c^2 t^2 = x'^2 + y'^2 + z'^2 - c^2 t'^2$ 。可见， $x^2 + y^2 + z^2 - c^2 t^2$ 在坐标变换中是不变量。由于 S 系和 S' 系只在 x 方向有相对运动，在 y、z 方向相对静止，即 $y = y'$ ， $z = z'$ ，所以上式简化为

$$x^2 - c^2 t^2 = x'^2 - c^2 t'^2 \quad (4)$$

代入(2)式和(3)式的值，得

$$\begin{aligned} & x^2 - c^2 t^2 \\ &= (a_{11}x - a_{11}vt)^2 - c^2(a_{21}x + a_{22}t)^2 \\ &= (a_{11}^2 - a_{21}^2c^2)x^2 - 2(a_{11}^2v + a_{21}a_{22}c^2)xt + (a_{11}^2v^2 - a_{22}^2c^2)t^2 \end{aligned}$$

上式对任意变量 x、t 都成立的条件是两端对应项的系数相等，于是得

$$\left. \begin{aligned} a_{11}^2 - a_{21}^2c^2 &= 1, \\ a_{11}^2v + a_{21}a_{22}c^2 &= 0, \\ a_{11}^2v^2 - a_{22}^2c^2 &= -c^2. \end{aligned} \right\} \quad (5)$$

解这个方程组，得：

$$\left. \begin{aligned} a_{11} &= \frac{1}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}}, \\ a_{21} &= \frac{-\frac{v}{c^2}}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}}, \\ a_{22} &= \frac{1}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}}. \end{aligned} \right\} \quad (6)$$

把这三个系数的值代入(3)式和(2)式，就得到洛伦兹变换公式：

$$x' = \frac{x - vt}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}}, \quad (7)$$

$$y' = y, \quad (8)$$

$$z' = z, \quad (9)$$

$$t' = \frac{t - \frac{v}{c^2}x}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}} \quad (10)$$

如果用 $-v$ 代替 v ，就可得到逆变换：

$$x = \frac{x' + vt'}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}} \quad (7')$$

$$y = y', \quad (8')$$

$$z = z', \quad (9')$$

$$t = \frac{t' + \frac{v}{c^2}x'}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}} \quad (10')$$

可以看出，当 $v \ll c$ 时，上述变换式就变成经典的伽利略变换式。

双生子佯谬(twin paradox)

也叫时钟佯谬，是由“运动的时钟变慢”和相对性原理引出的问题。假设有两只完全相同的时钟，一只放在地面上，另一只放在高速飞行的火箭上。从地面上的观察者看来，随火箭运动的时钟要比地面上的时钟走得慢；而根据相对性原理，火箭中的观察者同样应观测到地面上的时钟比火箭中的时钟走得慢。如果这只火箭又返回地面，那么到底是火箭中的时钟慢呢，还是留在地面上的时钟慢呢？这就是时钟佯谬问题。这个问题也可以换一种说法，假设有一对双生子，弟弟留在地面上，哥哥乘飞船离开地球，以接近光速的速度 v 飞往另一星球，然后再以同样大小的速度返回地球。到达地球后，是哥哥比弟弟年轻呢，还是弟弟比哥哥年轻呢？这就是双生子佯谬问题，实质上也是时钟佯谬问题。

根据狭义相对论，假定留在地面上的双生子测得飞船往返所需要的总时间是 T ，那么忽略飞船起飞时加速、返回时改变速度方向和接近地面时减速过程的时间(这几段时间跟全部航行时间比起来可以认为是很短)，飞船中的双生子测得的总时间将是

$$T\sqrt{1-v^2/c^2},$$

即随飞船运动的哥哥返回地面时将比弟弟年轻。

这个结论已得到实验证实。例如，1971年美国物理学家哈菲尔(J. C. Hafele)和基廷(R. E. Keating)把4只铯原子钟装在飞机上，让飞机环绕地球飞行一周，返回地面后跟放在地面的铯原子钟比较。虽然飞机的速率只有600英里/小时(约270m/s)，但铯原子钟能记录 10^{-9} s，结果证实了从相对论得出的结论是正确的。在1966年~1972年间，西欧原子核研究中心的实验小组，用 μ 子做实验，让 μ 子沿着圆形轨道高速飞行，速率 $v=0.996c$ ，同时测定 μ 子的寿命，证实高速运动的 μ 子的寿命比静止 μ 子的寿命长

$$1/\sqrt{1-v^2/c^2}$$

倍，与相对论预言的结果相符。

怎样解释双生子佯谬呢？关键是相对性原理是针对两个相互做匀速直线运动的惯性参考系说的，这两个参考系是对称的，而在双生子佯谬问题中，两个双生子间不存在对称性：留在地球上的弟弟始终处在同一个惯性系中，往返航行的哥哥，则从一个惯性系(相对于地球的速度为 v)变换到另一个惯性系(相对于地球速度为 $-v$)。这就是兄弟之间在绝对意义上的一种差别。考虑到这一事实，用狭义相对论计算的结果，仍然是飞船上的钟比地球上的钟慢，即哥哥比弟弟年轻。

双生子佯谬问题用广义相对论可以得到进一步的解决。做往返运动的飞船，在改变航向时要经历一个加速的过程。在广义相对论里，有加速度的参考系跟引力场局部等效，一个处于加速运动状态的时钟就像处在引力场中一样会由于它的加速度而变慢。从广义相对论得到的结论也是运动的时钟变慢。

相对论性速度加法公式 (relativistic velocity addition formula)

在相对论中，任何物体的运动速度都不能超过真空中的光速 c ，这跟经典理论也是矛盾的。例如，物体 A 在惯性系 S 中的速度是 u ，而 S'

又以速度 v 相对于另一惯性系 S 运动，假定运动方向都沿 x 方向(图 1-10-7)，那么按照经典的速度合成法则，物体相对于 S 系的速度是 $u + v$ ，

如果 u 和 v 都大于 $\frac{c}{2}$ ，合速度就大于 c 。在相对论中，经典的速度合成法则不再适用，因为 u 和 v 是在不同的参考系中测量的，不能直接相加。要求出物体相对于 S 系的速度，应该进行速度变换。

设物体在 S 系的时空坐标是 (x, y, z, t) ，在 S' 系的是 (x', y', z', t') 。根据洛伦兹变换式。

$$\left. \begin{aligned} x' &= \frac{x - vt}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}}, \\ y' &= y, \\ z' &= z, \\ t' &= \frac{t - \frac{v}{c^2}x}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}} \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

对上述各式的两侧求微分得

$$\begin{aligned} dx' &= \frac{dx - vdt}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}}, \\ dy' &= dy, \\ dz' &= dz, \\ dt' &= \frac{dt - \frac{v}{c^2}dx}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}}. \end{aligned}$$

于是该物体在 S' 系的速度分量是

$$\begin{aligned} u'_x &= \frac{dx'}{dt'} = \frac{dx - vdt}{dt - \frac{v}{c^2}dx}, \\ u'_y &= \frac{dy'}{dt'} = \frac{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}} \cdot dy}{dt - \frac{v}{c^2}dx}, \\ u'_z &= \frac{dz'}{dt'} = \frac{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}} \cdot dz}{dt - \frac{v}{c^2}dx}. \end{aligned}$$

各式右端分子分母各除以 dt ，得

$$\left. \begin{aligned} u'_x &= \frac{u_x - v}{1 - \frac{v}{c^2} u_x}, \\ u'_y &= \frac{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}} \cdot u_y}{1 - \frac{v}{c^2} u_x}, \\ u'_z &= \frac{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}} \cdot u_z}{1 - \frac{v}{c^2} u_x}. \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

式中的 $u_x = \frac{dx}{dt}$, $u_y = \frac{dy}{dt}$, $u_z = \frac{dz}{dt}$, 是物体在 S 系中的速度分量。上式的逆变换式是

$$\left. \begin{aligned} u_x &= \frac{u'_x + v}{1 + \frac{v}{c^2} u'_x}, \\ u_y &= \frac{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}} \cdot u'_y}{1 + \frac{v}{c^2} u'_x}, \\ u_z &= \frac{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}} \cdot u'_z}{1 + \frac{v}{c^2} u'_x}. \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

这两组速度变换式也叫相对论性速度加法公式。如果运动是沿 x 方向, 则 $u_y = u_z = 0$, 于是速度

$$u' = \frac{u - v}{1 - \frac{v}{c^2} u}, \quad (4)$$

或

$$u = \frac{u' + v}{1 + \frac{v}{c^2} u'}. \quad (5)$$

当 $v \ll c$ 时, $u = u' + v$, 即与经典的速度合成法则一致。当 u 和 v 接近 c 时, u 也不会超过 c 。当 u 和 v 有一个等于 c 或二者都等于 c 时, 从(5)式可以求出 u 也等于 c , 而不会大于 c 。即光速相对于任何参考系都等于 c 。

相对论性动量(relativistic momentum)

在相对论中，动量仍定义为物体的质量跟速度的乘积，即 $p = mv$ 。但物体的质量 m 不是恒定的，在不同的参考系中有不同的值。

早在 1901 年，即相对论建立以前，考夫曼(W. Kaufman, 1871 ~ 1947, 德国物理学家)就从实验中发现，电子的质量随速度的增大而增大。物体的质量随速度变化的关系可根据动量守恒定律和速度变换关系推导出来。

假设有两个惯性系 S 和 S' ， S' 相对于 S 以速度 v 沿 x 方向运动。有两个完全相同的小球 A 和 B，相对于惯性系 S 来说，A 球以速度 v 沿 x 方向运动，B 球静止；相对于惯性系 S' 来说，A 球静止，B 球以速度 $-v$ 沿 x 轴的负方向运动。运动球的质量为 m ，静止球的质量为 m_0 。两球发生完全非弹性碰撞，碰后粘在一起成为一个物体，对 S 系来说具有质量 M 和速度 u ，对 S' 系来说具有质量 M' 和速度 u' (图 1-10-8)。假设碰撞过程中没有质量损失，因此碰撞前后质量是守恒的，于是有：

$$M = m_0 + m = M'$$

对于 S 系，根据动量守恒得：

$$mv + m_0 \cdot 0 = Mu = (m + m_0)u,$$

$$\frac{v}{u} = \frac{m + m_0}{m} \quad (1)$$

对于 S' 系，根据动量守恒得：

$$m_0 \cdot 0 + m(-v) = M' u' = (m_0 + m)u',$$

$$\frac{v}{u'} = -\frac{m_0 + m}{m} \quad (2)$$

根据相对论的速度加法公式：

$$u' = \frac{u - v}{1 - \frac{vu}{c^2}} \quad (3)$$

又根据式(1)和(2)，可得 $u' = -u$ ，代入(3)式得：

$$u = \frac{v - u}{1 - \frac{vu}{c^2}}$$

整理后得：

$$\frac{v}{u} - 1 = 1 - \frac{u}{v} \frac{v^2}{c^2}$$

由(1)式知 $v/u = (m + m_0)/m$ ，代入上式得

$$\frac{m + m_0}{m} - 1 = 1 - \frac{m}{m + m_0} \frac{v^2}{c^2}$$

化简后得

$$m^2 - m_0^2 = \frac{m^2 v^2}{c^2},$$

所以

$$m = \frac{m_0}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}} \quad (4)$$

这就是相对论的质量与速度的关系式，简称质速公式。式中的 m_0 是物体在相对静止的惯性系中的质量，叫做“静质量”， m 是物体相对观察者有相对运动速度 v 时的质量，简称“动质量”。显然， $v \ll c$ 时， $m \approx m_0$ ，这就是经典力学中的情况，这时可以认为物体的质量是恒定的，与物体的运动状态无关。当速度 v 较大时，质量就不能再认为是恒定的，而明显地随着速度的增大而增大。当速度 v 趋近于真空中的光速 c 时，物体的质量趋近于无限大。

采用相对论的质量公式，动量可表示为

$$p = mv = \frac{m_0 v}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}}$$

这就是相对论性动量的公式。采用这个动量公式，在一切惯性参考系中动量守恒定律均成立，而采用经典的动量公式，如在某一惯性参考系中动量守恒，则在另一参考系中动量不守恒，因质量和速度与参考系有关。

相对论性能量(relativistic energy)

在经典力学中, $F = m \frac{dv}{dt}$, 是认为 m 不随速度 v 变化。在相对论力学中, 应改写为

$$F = \frac{d}{dt}(mv) \\ = \frac{d}{dt} \frac{m_0 v}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}} \quad (1)$$

根据动能定理, 合外力对物体所做的功等于该物体动能的增量。设在某惯性参考系中合外力 F 作用在静质量为 m_0 的质点上, 质点在力的作用下通过位移 dx 时, 它的动能将增加

$$dE_k = Fdx = Fvdt$$

式中 $v = dx/dt$, 是质点的运动速度。把(1)式代入, 得

$$dE_k = vd \left[\frac{m_0 v}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}} \right] \\ = m_0 v \left[\frac{dv}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}} + \frac{\frac{v^2}{c^2} dv}{\left(1 - \frac{v^2}{c^2}\right)^{3/2}} \right] \\ = \frac{m_0 v dv}{\left(1 - \frac{v^2}{c^2}\right)^{3/2}}$$

当质点的速度从零增加到 v 时, 获得的总动能为

$$E_k = \int_0^v \frac{m_0 v dv}{\left(1 - \frac{v^2}{c^2}\right)^{3/2}} \\ = \frac{m_0 c^2}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}} - m_0 c^2 \quad (2)$$

上式就是相对论性动能表示式。当 $v \ll c$ 时, 由于

$$\frac{1}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}} = 1 + \frac{v^2}{2c^2} + \frac{3v^4}{8c^4} + \dots$$

只取前两项, 于是(2)式就变为经典的动能公式:

$$E_k = \frac{m_0 v^2}{2}$$

(2)式可简写为

$$E_k = mc^2 - m_0 c^2,$$

移项得

$$mc^2 = E_k + m_0c^2 . \quad (3)$$

式中的 m_0c^2 叫做物体的静止能量，简称静能， mc^2 叫做物体的总能量，所以上式表示：物体的总能量等于它的动能与静能之和。用 E 表示物体的总能量，则

$$E = mc^2 . \quad (4)$$

或

$$E = E_k + E_0 , \quad (3)$$

式中 $E_0 = m_0c^2$ ，即物体的静能。这就是相对论性能量的表示式。

在相对论中，物体的能量和它的动量有紧密的联系，形成一个统一的整体。由动量 $p = mv$ ，质量 $m = \frac{m_0}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}}$ 和能量 $E = mc^2$ 可以证明：

$$p^2 - \frac{E^2}{c^2} = m^2v^2 - \frac{m^2c^4}{c^2} = -m_0^2c^2 ,$$
$$\text{或 } E^2 - p^2c^2 = m_0^2c^4 \quad (5)$$

(5) 式在任何参考系中都是成立的，即它对于洛伦兹变换是一不变式。对于光子等粒子，静质量 $m_0 = 0$ ，上式简化为

$$E = pc . \quad (6)$$

即能量 E 等于它的动量 p 与光速 c 的乘积。可见，光子的动能就是它的全部能量，光子在任何参考系中总是以相同的速度 c 运动，并且这个速度 c 表示出了它的能量和动量之间的联系。

静能 (rest energy)

静止物体具有的能量 $E_0 = m_0c^2$ ，式中的 m_0 是物体的静质量， c 是真空中的光速(参见“相对论性能量”)。物体具有静能已被核物理和粒子物理实验所证实。在核反应中发生静质量亏损时，与静质量相当的静能 m_0c^2 就会释放出来(参见“质能关系”)。

质能关系(mass-energy relation)

关系式 $E = mc^2$ 和 $E_0 = m_0c^2$ 表示了物体的质量跟能量之间的关系，叫做质能公式，是相对论得出的重要结果之一(参见“相对论性能量”)。如果物体的速度增大时，它的能量和质量将同时增大，其间的比例系数等于 c^2 (c 是真空中光速)。所以，如果物体的能量增加 E ，它的质量增加 m ，则

$$E = mc^2$$

如果物体的质量减少 m ，它的能量也减少 E ，这个能量将以各种方式释放出去。这个关系式已被核反应实验所证实，是人类利用核能的重要理论依据。由于 c^2 是一个巨大的数量，所以，当物体的质量有微小变化时，它的能量将发生巨大的变化。

牛顿力学的适用范围

牛顿力学即经典力学，它是根据宏观物体的运动规律总结出来的。宏观物体的运动速度比光速小得多，相对论效应可以忽略不计，洛伦兹因子

$$\gamma = \frac{1}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}} \gg 1, \text{ 因此牛顿力学是适用的。在这种条件下, 可以认为伽利略变换是正确的, 即时间是“绝对的”, 没有“钟慢效应”和“尺缩效应”, 物体的质量也不随速度变化。从具体计算可以知道, 当物体的运动速度 } v < 0.14c (c \text{ 是光在真空中的速度}) \text{ 时, 用非相对论的经典公式进行有关的计算, 其结果的误差不超过 } 1\%, \text{ 因此, 一般可以认为牛顿力学是适用的; 当 } v > 0.14c \text{ 时, 必须用相对论性的公式进行有关计算, 其结果才符合实际。}$$

略变换是正确的，即时间是“绝对的”，没有“钟慢效应”和“尺缩效应”，物体的质量也不随速度变化。从具体计算可以知道，当物体的运动速度 $v < 0.14c$ (c 是光在真空中的速度) 时，用非相对论的经典公式进行有关的计算，其结果的误差不超过 1%，因此，一般可以认为牛顿力学是适用的；当 $v > 0.14c$ 时，必须用相对论性的公式进行有关计算，其结果才符合实际。

宏观物体是人的感官可以直接观察或使用一般仪器能直接观察到的物体，它们的质量远大于原子。质量与原子相当或小于原子的物体，叫做微观物体。微观物体的速度可以达到很大，有的达到光速，而且具有许多新的性质，主要是：1．具有波粒二象性；2．能量和角动量具有量子化的分立数值；3．粒子的动量和坐标不能同时具有确定值，其间具有不确定关系（测不准关系）。牛顿力学没有考虑微观物体的特性，因此，对于研究微观物体的运动规律，一般说来是不适用的。但微观物体的特性与普朗克常量 h 有关， $h = 6.626 \times 10^{-34} \text{ J} \cdot \text{s}$ ，它具有 [能量] \times [时间] 或角动量的量纲，如果物体的角动量或 [能量] \times [时间] 的值远远大于 h ，上述的微观粒子的特性可以忽略，那就仍然可以用牛顿力学来分析它的运动规律；如果这个值与 h 可以相比或小于 h ，微观粒子的特性不能忽略，牛顿力学就不适用了。例如，质子在回旋加速器中以 $5 \times 10^5 \text{ m/s}$ 的速率沿半径为 0.5 m 的圆形轨道运动，角动量为 $4.2 \times 10^{-22} \text{ J} \cdot \text{s}$ ，大约是 h 的 10^{12} 倍，因此可以用牛顿力学去计算。如果电子以 $2 \times 10^6 \text{ m/s}$ 的速率在氢原子核外沿半径为 $0.5 \times 10^{-10} \text{ m}$ 的圆形轨道运动，角动量为 $9 \times 10^{-35} \text{ J} \cdot \text{s}$ ，小于 h ，因此就不能用牛顿力学去分析它的运动规律了。

总起来看，牛顿力学的适用范围有两条边界，即速度和质量边界，牛顿力学只适用于速度不太大（远小于光速）、质量不太小（远大于原子）的低速、宏观世界。在高速运动情况下，相对论力学代替了牛顿力学；对于原子、质子、电子等微观世界，除了普朗克常量 h 可以看作等于零、微观粒子的特性可以忽略的情况外，都不能用牛顿力学处理，这时量子力学代替了牛顿力学。

广义相对论(general relativity)

爱因斯坦于 1916 年发表的理论。广义相对论有两条假设，一条假设把狭义相对性原理从惯性参考系推广到任意参考系，就是说，对于一切参考系，物理规律都相同。这条假设通常叫做广义相对性原理。第二条假设是，一个不受引力作用的加速系统跟一个受引力作用的惯性系统等效。这条假设通常叫做等效原理。建立在这两条假设基础上的相对性理论，就叫做广义相对论。

等效原理是在研究质量问题的基础上提出的。在经典力学中，根据牛顿第二定律，质量是物体惯性大小的量度。也就是说，在一定外力作用下，物体产生的加速度越大，它的质量就越小；反之，产生的加速度越小，它的质量就越大。这样定义和测得的质量叫做惯性质量。牛顿又发现了万有引力定律，证明了万有引力也是物质的一种属性，因此也可以根据万有引力的大小来衡量物体质量的大小。这样测得的质量叫做引力质量。牛顿并没有注意区分这两种不同的质量，而在他的万有引力定律的公式中直接应用了惯性质量，并简称为物体的质量。匈牙利物理学家厄缶(1848~1919)及其他物理学家先后用不同的实验证明物体的惯性质量与它的引力质量相等(或成正比)。爱因斯坦认为，物体的惯性质量等于引力质量不是偶然的巧合，而有深刻的联系。为此，他深入分析了自由降落的电梯里发生的现象，终于提出了等效原理。

假设一电梯的缆索被切断，电梯在地球引力作用下自由降落。在这种自由降落的“实验室”里发生的力学过程，跟一个没有加速度和引力的实验室(惯性参考系)里发生的力学过程完全相同。同样的，如果设想电梯在没有引力的空间以加速度 $a = g$ 上升，那么在这种匀加速上升的“实验室”里发生的力学过程，跟电梯停在地面上时发生的力学过程完全相同。因此，可以把一个不受引力作用的加速系统看作是处在引力场中的惯性系统，也可以把一个引力场中的惯性系统看作是一个不受引力作用的加速系统。这就是等效原理。同时，也揭示出了引力质量和惯性质量相等的秘密。原来，从惯性系统看来是引力质量的物理量，在加速系统看来就是惯性质量，这两个质量是对同一现象的两种不同表述。

根据等效原理，爱因斯坦用引力场中的惯性系统来处理加速系统的问题，于是就使物理规律在一切参考系中都具有相同形式(符合广义相对性原理)。如果引力场很弱可以忽略时，那么广义相对论的结果就跟狭义相对论的相同。这就像物体的运动速度远小于光速时，狭义相对论的结果就跟牛顿力学的结果相同一样。

广义相对论的一个重要结论是，天体的质量越大，周围的引力场越强，那里的时间越长，即时钟越慢，并且那里的空间不是平直的，而是弯曲的，光从那里经过时，不是沿直线前进，而是沿曲线前进，引力场越强，空间弯曲得越厉害。

从广义相对论得出的许多重要结论，有一些已得到实验证实。下面是几个例子。

1. 水星轨道近日点的进动。水星是离太阳最近的一颗行星。从天文观测发现，水星绕日运动的椭圆轨道在空间缓慢地改变方向，这可以从水星轨道近日点的变动观测出来，这种运动叫做水星近日点的旋进(进动)。根据牛顿的引力理论，水星轨道长轴的转动速度等于每百年 $1^{\circ} 32' 37''$ ，

而观测值是每百年 $1^{\circ} 33' 20''$ ，相差 $43''$ ，不能解释。爱因斯坦根据广义相对论成功地计算出水星轨道的多余旋进值恰好是每百年 $43''$ 。

2. 光线在引力场中弯曲。爱因斯坦指出，光线从太阳附近经过时，由于受到强引力场的影响，光线要发生偏转，偏转角等于 $1.75''$ 。1919年爱丁顿率领英国观测队去西非的普林西比岛拍摄了日全食时太阳附近的星空照片，然后跟太阳不在这个天区时的星空照片相比较，可以求出光线偏转角度的数值，跟理论预言的结果符合得很好，证实了光线在引力场中弯曲。

3. 光谱线的引力红移。根据广义相对论，引力场越强，那里的时钟走得越慢，一切周期过程越缓慢，频率越小。因此，在太阳表面的氢原子发出的光，它的频率将比地球上氢原子发出的光的频率低一些，即它的光谱线将向光谱的红端发生移动。这种现象叫做光谱线的“红移”。实验证实了光谱线在引力作用下的红移。

4. 雷达回波的时间延迟。这个实验的原理是，用雷达发射信号电磁波，射向某一天体，然后接收从天体反射回的电磁波，测出信号电磁波往返所用的时间。选择适当的实验时机，一次让信号电磁波往返的途中要经过太阳附近，受到引力场的作用；另一次往返的路程要远离太阳，这时太阳引力场的作用可以忽略不计。比较两次的结果，就会发现前一种情况收到回波的时间要比后一种情况迟一些，延迟的时间跟广义相对论所预言的相符。这个实验是美国物理学家夏皮洛(I. I. Shapiro)等人在60年代进行的。

5. 脉冲双星相互绕行周期的变化。美国物理学家赫尔斯(R. A. Hulse)和泰勒(J. H. Taylor)于1974年发现脉冲双星 PSR1913 + 16(即双星在天球上的坐标约为赤经 19 时 13 分，赤纬 $+16^{\circ}$)，使广义相对论又得到一次有力的验证，并因此获 1993 年诺贝尔物理学奖。

脉冲星是一种中子星(参见“中子星”)，它快速自转，有很强的磁场，它发出的电磁辐射有很强的方向性，当这束电磁辐射扫过地球时，在地球上可观测到一个电磁脉冲。PSR1913 + 16 的特别之处，是它除有 59ms 的脉冲周期，还有一个缓慢变化的周期(27906.98s 或 0.323d)。赫尔斯和泰勒认为，这表明这颗脉冲星是处在双星系统中，这个缓慢变化的周期就是该脉冲星与其伴星在引力作用下相互绕行的周期。

按广义相对论，相互绕行的两个质量应辐射出引力波。引力波会从双星系统中带走能量，这应导致双星系统中相互绕行的周期逐渐减小。从 1974 年到 90 年代初对 PSR1913 + 16 的观测结果，与广义相对论理论预期的结果符合得非常好。理论预言轨道运动周期的变化率为 -2.402×10^{-12} ，实际观测结果为 -2.422×10^{-12} 。

PSR1913 + 16 的观测结果虽不是对引力波的直接探测，但却为引力波的存在提供了第一个定量的证据。

白矮星(white dwarf)

恒星演变的归宿之一。恒星是靠热核反应产生的压力跟物质间的引力平衡的。当恒星中的核燃料燃烧殆尽时，恒星物质在引力作用下将不断地坍缩，体积不断地缩小，直到它的简并压力跟引力平衡为止。根据量子力学的泡利不相容原理，原子中处于各能态的电子数都是有限的。当物质受到高度压缩时，几乎所有完整的原子都被挤破，使大量的电子游离到一起，形成电子流体，而原子核则成了这种电子流体中的漂浮物。物质的这种状态叫做简并态。这时挤在一起的电子间的电磁斥力形成一种压力，就叫做电子的简并压力。依靠电子的简并压力跟引力平衡而形成的晚年恒星，就是白矮星。白矮星的密度高达 $10^5\text{g/cm}^3 \sim 10^7\text{g/cm}^3$ 。初期的白矮星，由于外层物质向内坍缩的动能变为内能，变得非常热，因而呈白色。但因为缺少能量补充，它在不断向外辐射能量后，温度逐渐下降，最后不再发光，直到它的温度和宇宙背景一致，变成一颗黑矮星。这个过程可长达数十亿年。最早发现的白矮星是天狼星的伴星，目前已观测到 1000 颗以上的白矮星。白矮星由于质量大、体积小，具有很强的表面引力，因而很早就观测到了谱线的引力红移，为验证相对论提供了实测的数据。

中子星(neutron star)

主要由简并中子组成的致密星。1967年，英国射电天文学家休伊什和贝尔等发现了脉冲星。不久确认脉冲星就是快速自转的、有强磁场的中子星。中子星也是恒星演变的归宿之一。当恒星的质量大于1.44个太阳质量时，由于引力过大，电子的简并压力不足以跟引力达成平衡，因此不能停留在白矮星阶段(参见“白矮星”)，而要继续坍缩。于是，不仅一切完整的原子被压碎，原子核也被压碎成中子和质子，质子和电子结合又形成中子，结果变成密集的中子流体。这种状态叫做简并中子态。中子的简并压力比电子的简并压力大得多，于是能跟引力达成平衡，成为密度更大的星体。中子星的密度约为 $10^{13}\text{g}/\text{cm}^3 \sim 10^{16}\text{g}/\text{cm}^3$ 。正如白矮星的归宿是黑矮星一样，中子星的归宿是黑中子星。

黑洞(black hole)

广义相对论预言的一种特殊天体。它有一个封闭的界面，叫做视界。由于它的引力十分强大，视界外的物体可以进入视界，而视界内的任何物质包括光，都不能跑到视界外面。因此它是不可见的天体，所以叫做“黑洞”。

早在 18 世纪，法国数学家拉普拉斯(P . S . M . Laplace , 1749 ~ 1827) 根据牛顿的引力理论就预言过宇宙中可能存在由于引力特别大而成为不可见的天体——黑洞。1939 年，奥本海默(J . R . Oppenheimer , 1904 ~ 1967 , 美国物理学家) 等根据广义相对论证明，天体物质在自身引力作用下形成半径 $r_g = 2GM/C^2$ 的球体时，这个球体所发射的光或任何其他粒子都不能逃到 r_g 球以外，这就形成了黑洞。式中 G 是引力常量， M 是球体的质量， c 是真空中光速。

黑洞也是恒星演变的归宿之一。从理论研究知道，当恒星的质量大于 3.2 个太阳质量时，由于引力过大，在引力坍缩过程中，中子的简并压力也不足以跟引力平衡，因此不能停留在中子星阶段(参见“中子星”)，而要继续坍缩，最后坍缩到半径等于 r_g 时，就形成了黑洞。

关于黑洞的理论，仍处在探索阶段。黑洞的经典理论与热力学有矛盾。按照热力学，当黑洞的温度高于环境温度时，它应该向外辐射能量，但经典理论的黑洞只能吸收能量，不能向外辐射能量。1974 年霍金(S . W . Hawking , 1942 ~ , 英国物理学家) 根据量子场论证明，黑洞也可以发射粒子和辐射。考虑到黑洞周围空间的真空极化效应，如果在真空涨落中产生了正反粒子，其中具有负能的一个粒子进入黑洞，另一个具有正能的粒子远离黑洞，就形成了黑洞的发射。黑洞得到负能粒子，它的质量减少，就像黑洞本身发射出了正能粒子一样。这种发射的强度与黑洞的质量成反比。大质量黑洞的发射温度很低，发射过程中黑洞质量减少缓慢，相当于一种蒸发过程；小质量黑洞，温度很高，发射强度很大，会迅速蒸发甚至引起爆发。这些结果只是理论上的一种推测。

寻找黑洞，从实验观测中证实黑洞，是相对论天体物理学的重要课题。目前采取的主要方法是寻找双星体系中的黑洞。如果双星体系中有一个天体是黑洞，那么测出可见星的运转周期和轨道的大小，就可以确定双星系统的总质量，再根据可见星的质量，就可以推测出黑洞的质量。另外，黑洞在吸引物质时，物质在强引力的作用下会被压缩得很厉害，温度升得很高，以致在进入黑洞之前会发射出 X 射线。因此，探测这些 X 射线源，以及观测“黑洞蒸发”辐射出的物质，也是寻找黑洞的一种方法。目前的探测资料表明，天鹅座 X-1 最有可能是黑洞。它的质量大于 5.5 个太阳质量，具备形成黑洞的条件。小质量的黑洞尚未探测到。有人认为，高能天体物理研究中发现的一些高能爆发过程，可能是由小黑洞的发射及其最后的爆发引起的。主要参考资料

1. 刘佑昌。相对论并不神秘。第 1 版。北京：人民教育出版社，1985。
2. 熊荣先、林辉。相对论与近代时空观。第 1 版。沈阳：辽宁教育出版社，1987。
3. 魏凤文。时空物理纵横。第 1 版。北京：北京出版社，1988。
4. [英] W . G . V . 罗瑟。相对论导论。岳曾元等译。第 1 版。北京：

科学出版社，1980。

5. 张元仲。狭义相对论实验基础。第 1 版。北京：科学出版社，1979。

6. H. L. 西普门。黑洞、类星体和宇宙。黄克谅等译。北京：科学出版社，1987。

7. [英] 格里宾。白洞宇宙中的喷射源。刘金铭译。第 1 版。北京：科学出版社，1985。

8. 邓祖淦。A. Hulse, J. H. Taylor 以脉冲双星 PSR1913 + 16 的发现获 1993 年诺贝尔物理学奖。物理，1994(3)：1~3

9. 卞毓麟。1993 年诺贝尔物理学奖获奖项目——脉冲双星与引力波。现代物理知识，1994(3)：4~6

十一、气体动理论

分子(molecule)

组成物质并保持该物质原有化学性质的最小微粒。

分子由原子组成，原子是比分子更小(单原子分子除外)的微粒，原子间通过一定的化学结合力(称为化学键)组成分子。

由一个原子组成的分子称为单原子分子，它的分子就是原子。由两个原子组成的分子称为双原子分子。由三个或三个以上原子组成的分子称为多原子分子。

由相同原子组成的物质称为单质，由不同原子组成的物质称为化合物。

分子按其是否具有固有电矩可分为有极分子和无极分子。整个分子中电荷的代数和为零，但正、负电荷并不集中于一点。在离开分子的距离比分子线度大得多的地方，分子中全部负电荷对于这些地方的影响相当于一个等效的负点电荷，这个等效的负点电荷的位置称为负电荷的中心。相应地，分子中所有正电荷也有一个中心。如果分子中正、负电荷的中心不重合，形成一定的电偶极矩——分子固有极矩，则这类分子称为有极分子；反之，称为无极分子。

分子具有一定的大小和质量，分子的大小一般用分子半径表示，分子的质量一般用该种分子质量与 ^{12}C 原子质量的 $1/12$ 之比来表示，称为相对分子质量。无机物分子的大小和质量一般都很小。例如水分子半径约为 $1.5 \times 10^{-10}\text{m}$ ，相对分子质量为18。而有些有机物分子的大小和质量却比无机物的大得多。例如，生物细胞内存在的生物大分子(蛋白质和核酸)一般都由几千甚至几十万个原子组成，相对分子质量从几万到几百万以上。再如高分子化合物，又称高分子(淀粉、橡胶、树脂、合成纤维等)，其分子一般也由几百个、几千个甚至几万个彼此结合起来的原子组成，相对分子质量也可以达到几万至几百万以上。

摩尔 (mol)

计量物质的量的单位。1mol 物质中所包含的结构粒子数与 $0.012\text{kg} \text{}^1_6\text{C}$ 的原子数相等，即1mol物质中所包含的结构粒子数为 6.0221367×10^{23} 。物质的结构粒子可以是原子、分子、离子、电子、其他粒子或这些粒子的特定组合，所以在使用摩尔时应指明其结构粒子是什么。摩尔的旧称为克分子与克原子。

1mol 物质所占的体积叫做摩尔体积。对于固体和液体，由于不同物体分子的大小不同，分子间的排列又很紧密，所以它们的摩尔体积也不同。对于气体，由于分子间距离较大，所以分子自身的大小对整个气体体积的影响很小，一般情况下都不考虑这种影响。

根据阿伏加德罗定律，同温、同压下，1mol 任何理想气体的体积都相等。在标准状况(温度 0°C ，压强 101325Pa)下，理想气体的摩尔体积 $V_m = 22.41410 \times 10^{-3}\text{m}^3 \cdot \text{mol}^{-1}$ 。实际气体在标准状况下的摩尔体积也近似地等于这一数值。

1mol 任何物质的质量 M 叫做该物质的摩尔质量。摩尔质量等于组成该物质的一个结构单元质量 m 乘以阿伏加德罗常量 N_A 。即

$$M = N_A \cdot m .$$

阿伏加德罗常量(Avogadro constant)

1mol 任何物质内所含分子的个数，叫做阿伏加德罗常量，用符号 N_A 表示。实验测得 $N_A = 6.0221367 \times 10^{23} \text{mol}^{-1}$ ，在通常计算中可取 $N_A = 6.022 \times 10^{23} \text{mol}^{-1}$ 。阿伏加德罗常量是宏观量与微观量相联系的桥梁。

1811年，意大利科学家阿伏加德罗在前人研究的基础上提出：在相同的温度与压强下，相等体积的任何气体所含分子数(或摩尔数)相等。这就是著名的阿伏加德罗定律，后来被实验所证实。

在标准状况下，根据气体动理论的基本公式有

$$n_0 = \frac{p_0}{kT_0} = 2.686773 \times 10^{25} \text{m}^{-3}$$

式中 k 为玻耳兹曼常量， n_0 为标准状况下 1m^3 体积气体的分子数。 n_0 与气体性质无关，是一个普适量，称为洛施密特常量。

由阿氏定律可知，在相同的温度与压强下，1mol 任何气体所占的体积相等。在标准状况下，1mol 理想气体的体积已由实验测得： $V_m = 22.41410 \times 10^{-3} \text{m}^3 \cdot \text{mol}^{-1}$ ，由此可得阿伏加德罗常量

$N_A = n_0 V_m = 6.022137 \times 10^{23} \text{mol}^{-1}$ 。阿伏加德罗常量可用密立根油滴实验或溶液的电解实验等方法测定。

气体动理论(kinetic theory of gases)

从物质的微观结构出发来阐明热现象规律的理论，包括下面三个基本的观点：

1. 宏观物体由大量的微观粒子——分子(或原子)组成。
2. 分子在做永不停息的无规则热运动，其剧烈程度与物体温度有关。温度越高，无规则热运动越剧烈。
3. 分子间存在着相互作用力。

分子间的作用力使分子聚集在一起，在空间中形成某种有序排列；而分子的无规则热运动又不断地破坏这种有序排列。这两种相互对立的作用使得物质在不同的温度下表现出不同的聚集态。温度较低时，分子间的作用力占主导地位，分子按一定的顺序排列并只能在固定的平衡位置附近振动，此时物质呈固态；温度较高时，分子无规则热运动程度加剧，分子虽还在平衡位置附近振动，但是平衡位置已不再是固定的，而是不断地移动，不过分子间的作用力仍可以使分子彼此不致远离，此时物质呈液态；温度再高时，分子无规则运动的程度更加剧烈，以至于分子彼此远离，分子间作用力已很小，分子可以看作自由分子，此时物质呈气态。

分子动理论主要在研究气体性质中发展起来，并在解释气体的性质和行为方面取得了巨大成功，例如对气体压强和扩散等的解释。定量的分子动理论是在统计的方法引入后实现的。

布朗运动(Brown[ian] motion)

悬浮在液体中的小颗粒物质(称为布朗粒子)由于受到周围液体分子的不平衡碰撞而做的连续的不规则运动,称为布朗运动。它是英国植物学家布朗(Robert Brown, 1773 ~ 1858)于 1827 年发现的。布朗运动在分子动理论的建立中曾起过重要作用。

布朗运动发现后的几十年,人们始终不能正确地解释这种运动。直到 1877 年德耳索(Joseph Delsaulx, 1828 ~ 1891)才正确地指出,布朗粒子毫无规则的运动是由于受到周围液体分子不平衡的碰撞而引起的。1905 年以后爱因斯坦、朗之万等先后进行了布朗运动的理论研究。爱因斯坦等将布朗粒子看作巨大的分子,认为它的运动完全是由于周围液体分子无规则运动而产生的一种涨落不定的碰撞力而引起的。在这种假设的前提下,运用相应的动力学和统计理论,可推得布朗粒子在时间 τ 内的位移在水平面 x 方向投影的平方平均值为

$$\overline{x^2} = \frac{kT}{3\pi\eta a} \tau$$

式中 η 为液体的粘滞系数, a 为布朗粒子的半径, T 为液体的热力学温度, k 为玻耳兹曼常量。

这一理论结果被佩兰(J.B.Perrin 1870 ~ 1942)于 1908 年用实验所证实。这就完全确立了分子始终处于无规则的热运动中而且存在着涨落现象的理论,使得当时一些不承认原子、分子的科学家不得不改变了他们的看法。

分子间力(inter-molecular force)

分子间相互作用的引力或斥力，也称分子力，在分子间距为 1nm 或更近时才显现出来，是一种进程力。在 0.3nm 或更近的距离上，分子力表现为斥力，在远距离(通常大于 0.3nm)，分子力表现为引力。

分子间的引力，对于有极分子，是由于分子的固有偶极矩间的库仑引力造成的。分子进一步靠近时产生的诱导偶极矩间也有库仑引力。对于无极分子，虽然平均说来没有固定的电偶极矩，但由于分子内部的电子运动，仍然具有大小和方向都不断变化的瞬间偶极矩，这个偶极矩使另一分子极化，两个分子间就产生了吸引力。瞬间偶极矩的方向发生变化时，又可使其他的分子极化，两者间产生库仑引力。因此，只要平均运动使每一分子周围的分子都有对称分布时，库仑引力就可以保持。这种吸引力通常称为伦敦力或色散力。

当分子被挤压到一起，电子云互相重叠时，分子相互间就呈现出斥力。它有两个方面：一方面是核与核、电子与电子之间的直接的库仑斥力，另一方面，是由于量子力学效应，使电子云之间相互排斥；这后一种力称为泡利力或交换力。

分子间作用力很难用简单的数学公式来表示。实际中，常用实验的方法测定分子间的引力和斥力随分子间距离 r 的变化曲线。为了研究问题的方便通常在实验的基础上再采用一些简化模型。例如，假设分子间的作用力具有球对称性，并近似地用半经验公式

$$f = \frac{\lambda}{r^s} - \frac{\mu}{r^t} \quad (s > t)$$

表示。式中等号右侧的第一项表示斥力，第二项表示引力， λ 、 μ 、 s 、 t 都是正数，要根据实验来确定。一般来说， s 介于 9 到 15 之间， t 介于 4 到 7 之间。由于 s 和 t 都比较大，所以分子间作用力随分子间距离 r 的增大而急剧地减小，超出一定的距离——有效作用距离，可以认为分子间作用力就不存在了又由于 $s > t$ ，所以斥力的有效作用距离比引力的。图 1-11-1 上、下两条虚线分别表示斥力和引力随分子间距离变化的情况，实线

为引力和斥力的合力随分子间距离变化的情况。由图可知，在 $r = r_0 =$

$\left(\frac{\lambda}{\mu}\right)^{\frac{1}{s-t}}$ 处，引力和斥力相互抵消，合力为零，这一位置叫平衡位置。在

$r < r_0$ 范围内，分子间作用力呈斥力；在 $r > r_0$ 范围内分子间作用力呈引力。

分子间作用力是物质各种基本特性形成的主要原因。例如，物质三种聚集态间的变化，液体和固体难以压缩，晶体分子的排列顺序及固体弹性的原因等都取决于分子间的作用力。

分子动能(kinetic energy of molecule)

分子运动所具有的能量。

组成物质的大量分子无时不在做无规则的热运动，这些分子有的运动速率大，有的运动速率小，但是它们整体所表现出的宏观效果，却只与大量分子运动的平均效果有关。因而，在热现象中谈到的分子动能都是指大量分子动能的平均值(统计平均)。

如果组成物质的分子是单原子分子，则分子的运动只是平动，因而也只具有平动能；如果分子属于双原子分子或多原子分子，则分子的运动除具有平动外还具有转动和振动，其动能应该是平动能、转动能和振动动能之和。

对于理想气体，分子的平均平动能 $\bar{E}\left(\frac{1}{2}mv^2\right)$ 与温度有如下的关系(参见“气体分子的平均平动能”)

$$\bar{E} = \frac{3}{2}kT,$$

式中 k 为玻尔兹曼常量。

大量分子的热运动是杂乱无章的，按统计的观点其平动沿 x 、 y 、 z 三个方向投影的平均值应该是相同的。即应有如下的关系

$$\begin{aligned}\overline{v_x^2} &= \overline{v_y^2} = \overline{v_z^2}, \\ \overline{v^2} &= \overline{v_x^2} + \overline{v_y^2} + \overline{v_z^2}, \\ \frac{1}{2}m\overline{v_x^2} &= \frac{1}{2}m\overline{v_y^2} = \frac{1}{2}m\overline{v_z^2} = \frac{1}{3}\left(\frac{1}{2}m\overline{v^2}\right) \\ &= \frac{1}{2}kT\end{aligned}$$

x 、 y 、 z 各自对应平动的一个自由度，也就是说平均平动能按三个自由度均分。

单原子分子只有平动，因而只有三个自由度。双原子分子除平动自由度外还有两个转动自由度，一个振动自由度(非刚性分子)。多原子分子有三个转动自由度；如果分子是由 n 个原子组成的，则振动自由度有 $3n-6$ 个($n > 2$)。当分子的自由度数大于 3 时，上面的结论应推广为：在温度为 T

的热平衡状态下，分子的每个自由度，平均地具有同样的动能 $\frac{1}{2}kT$ 。如果某些自由度有势能，如简谐运动的势能，则每一个这样的自由度的平均势能也是 $\frac{1}{2}kT$ 。这就是能量按自由度均分定律，简称能量均分定律。

分子势能(Potential energy of molecule)

分子由于分子间的相互作用而具有的能量。

分子间作用力属于保守力，因而可以引入势能的概念。如果两个分子间的距离改变为 dr ，则势能的增量

$$dE_p = -fdr$$

即，分子间势能的增量等于分子间作用力 f 在距离 dr 内所作功的负值。

若选取两个分子间相距极远($r = \infty$)时的势能为零，则距离为 r 时，分子间的势能

$$E_p = -\int_{\infty}^r fdr$$

如果采用分子间作用力半经验公式 $f = \frac{\lambda}{r^s} - \frac{\mu}{r^t}$ ($s > t$)，则有

$$E_p = -\int_{\infty}^r fdr = \frac{\lambda'}{r^{s-1}} - \frac{\mu'}{r^{t-1}}$$

式中

$$\lambda' = \frac{\lambda}{s-1}, \mu' = \frac{\mu}{t-1}$$

图 1-11-2 是根据上面的公式画出的势能曲线。由图可见，曲线在 $r =$

r_0 处，有一极小值，即 $\left(\frac{dE_p}{dr}\right) = 0$ 。由 $f = -\frac{dE_p}{dr}$ 可知，在 $r = r_0$ 处 $f = 0$ 。

分子动能与温度有关，分子势能与分子间的距离有关，二者的大小决定了物质存在的状态。如果分子在平衡位置 $r = r_0$ 处的动能小于势能的绝对值，则分子只能在平衡位置附近作微小的振动。这就是物质处于凝聚态（液态或固态）时的情形。

内能 (internal energy)

任何一个物体或物体系在平衡态有一个态函数 U , 叫做它的内能, 当这个物体系从第一个态 U_1 经过一个绝热过程到第二态 U_2 后, 它的内能的增量等于在这过程中外界对它所做的功 W_a :

$$U_2 - U_1 = W_a$$

内能的上述定义是在焦耳实验的基础上建立起来的。焦耳用多种实验证明, 在绝热过程中, 为使系统状态变化所需绝热功的多少只与系统的初末两态有关, 而与实施绝热过程的途径无关。

由分子动理论可知, 系统的内能应该等于所有分子各种形式的动能、分子内部原子间的振动势能和分子间相互作用势能总和。对于理想气体, 由于不计分子间的相互作用力, 也就不计分子间的相互作用势能, 所以其内能只是分子的各种形式的动能和分子内原子间振动势能之和, 因而只与温度有关。对于实际气体, 考虑到分子间的作用力, 其内能不仅与温度有关, 而且与体积有关。1852年, 焦耳和汤姆孙做的多孔塞实验证实了这一结论。

广义地讲, 内能除包括分子动能和势能外, 还应包括分子的内禀能量 (如原子能量、原子核能等), 但是它们在热力学研究的范围内并不发生变化, 在内能的增量中可作为常量消去。

另外, 内能不包括物体整体的机械能。

玻意耳定律(Boyle law)

描述理想气体在等温变化中压强和体积关系的定律。其内容为：一定质量的气体，在温度不变的情况下，它的压强 p 跟体积 V 成反比。即

$$pV = C$$

式中的 $C = \nu RT$ ， ν 为气体的摩尔数， R 为普适气体常量。T 为热力学温度。

上述定律是由玻意耳和马略特分别于 1660 年和 1676 年独立发现的。

图 1-11-3 是系统做等温变化的 p - V 曲线，又叫等温线(直角双曲线)，曲线上每一点都对应等温过程的一个状态，曲线上所有点的温度都相同。

玻意耳定律严格适用于理想气体。实际气体在压强不太高，温度不太低的情况下，近似地遵从玻意耳定律。

等温压缩率(isothermal compressibility)

系统作等温变化时，其体积对压强的变化率与原体积之比。其数学表示式为

$$k = -\frac{1}{V} \left(\frac{\partial V}{\partial p} \right)_T$$

它给出了等温条件下增加单位压强所引起的物体体积的相对变化。式中的负号表示压强增加时物体的体积减小。

等温压缩率常简称压缩率，它表征的是物体被压缩的难易程度。对于理想气体，由玻意耳定律 $pV=C$ 有

$$k = \frac{1}{p}$$

即理想气体的压缩率与压强成反比， k 的单位是每帕[斯卡] (Pa^{-1})

压缩率的倒数称为体积模量 K ，即 $K = \frac{1}{k} = -V \left(\frac{\partial p}{\partial V} \right)_T$ ，

它表示静压强和所产生的体应变的比值。

查理定律(Charles law)

描述理想气体在等体变化中压强和温度之间关系的定律，其内容为：一定质量的气体，在体积不变的情况下，其压强随温度作线性变化。其数学表示式为

$$p_i = p_0(1 + \alpha_p t) \quad (1)$$

式中 p_0 、 p_i 分别表示一定质量的气体在温度为 0 和 t 时的压强， α_p 为气体的相对压力系数。

理想气体严格遵从查理定律，并且 $\alpha_p = 1/273.15$ 。由摄氏温标与热力学温标的关系有

$$p_t = p_0 \alpha_p T \quad (2)$$

即一定质量的理想气体在体积不变的情况下，其压强与热力学温度成正比。这是查理定律的另一种表述。

以 t 为横轴， P 为纵轴，按(1)式作出的 t 曲线称为等体线(图 1-11-4)。等体线为一直线，直线的反向延长线(虚线)与横轴的交点 A 的横坐标为 $t =$

$$-\frac{1}{\alpha_p} = -273.15 \quad , \text{即热力学温标的零点。}$$

对于实际气体，不同的气体 α_p 略有不同，但差别不大，都近似地等于 $1/273$ 。在温度不太低，压强不太高的情况下，实际气体近似地遵从查理定律。

相对压力系数(relative pressure coefficient)

系统做等体变化时，其压强对温度的变化率与原压强之比，其数学表示式为

$$\alpha_p = \frac{1}{p} \left(\frac{\partial p}{\partial T} \right) \quad (3)$$

它给出了在等体积条件下，升高单位温度引起的物体压强的相对变化。

对于理想气体，由查理定律可求得

$$\alpha_p = \frac{1}{T} \quad (4)$$

即理想气体的相对压力系数与热力学温度成反比。 α_p 的单位是每开 (K^{-1})。

盖-吕萨克定律 (Gay-Lussac law)

描述理想气体在等压变化中体积与温度关系的定律，其内容为：一定质量的气体，当压强保持不变时，它的体积随温度作线性变化。其数学表示式为

$$V_t = V_0(1 + \alpha_v t) \quad (1)$$

式中 V_t 和 V_0 分别表示气体在摄氏温度为 t 和 0 时的体积， α_v 称为体膨胀系数，也叫体胀系数。

只有理想气体才严格地遵从盖-吕萨克定律，并且 $\alpha_v = 1/273.15$ 。由摄氏温标与热力学温标的关系可知

$$V_t = V_0 \alpha_v T \quad (2)$$

即一定质量的理想气体，在压强不变的情况下，体积和热力学温度成正比。这是盖-吕萨克定律的另一种表述。

以 t 为横坐标， V 为纵坐标，按 (1) 式作出的 $V-t$ 曲线称为等压线 (图 1-11-5)。等压线为一直线，直线的反向延长线 (虚线) 与 t 轴的交点 A 的横坐标为 $t = -\frac{1}{\alpha_v} = -273.15$ 。是热力学温标的零点。

对于实际气体，在温度不太低，压强不太高的情况下，近似地遵从盖-吕萨克定律，不同的气体 α_v ，略有不同，但是都近似地等于 $1/273$ 。

体膨胀系数(cubic expansion coefficient)

系统作等压变化时，其体积对温度的变化率与原体积之比。数学表示式为

$$\alpha_v = \frac{1}{V} \left(\frac{\partial V}{\partial T} \right)_p$$

它给出了在等压条件下，升高单位温度所引起的物体体积的相对变化，表征的是物体热膨胀的性质。

对于理想气体，由盖-吕萨克定律和上面 α_v 的定义式可求得

$$\alpha_v = \frac{1}{T}$$

即理想气体的体膨胀系数与热力学温度成反比。 α_v 的单位为每开(K^{-1})。

等温压缩率 k 、压强温度系数 α_p 、体膨胀系数 α_v 存在下述关系

$$\alpha_v = k\alpha_p$$

理想气体(ideal gas)

严格遵守气体定律和焦耳定律的气体称为理想气体。

理想气体是为了研究问题方便抽象出来的理论模型，反映的是实际气体在压强趋于零时的极限性质。从微观上讲，就是不考虑实际气体分子的自身体积和分子之间的相互作用；认为分子间以及分子与器壁间的碰撞是完全弹性碰撞。

理想气体的 α_p 与 α_v 严格相等，都等于 $1/273.15$ 。在一般的温度和压强下，可以把实际气体近似地看作理想气体。

理想气体的物态方程 (equation of state for ideal gases)

表明理想气体的温度和各个态参量间函数关系的方程。

由玻意耳定律和查理定律可推得气体态参量 (p 、 V) 与温度 T 之间的关系为

$$\frac{pV}{T} = \text{常量} \quad (1)$$

由阿伏加德罗定律知道，对于相同摩尔数的各种气体，(1)式右侧的常量均相等。设对 1mol 理想气体，(1)式中的常量为 R ，则 1mol 理想气体的物态方程为

$$pV = RT \quad (2)$$

ν 摩尔理想气体的物态方程为

$$pV = \nu RT, \quad (3)$$

或

$$pV = \frac{m}{\mu} RT \quad (4)$$

式中 m 为气体质量， μ 为气体的摩尔质量。常量 R 称为普适气体常量，简称气体常量，其值为 $8.314510 \text{ J} \cdot \text{mol}^{-1} \text{ K}^{-1}$ 。

理想气体物态方程，首先由法国工程师克拉珀龙得出，所以也称为克拉珀龙方程。

普适气体常量(universal gas constant)

1mol理想气体的压强 p 和体积 V 的乘积与热力学温度 T 的比值 $\frac{pV}{T}$ ，称为普适气体常量，它可由任一状态下的 pV/T 值求得。实验求得在冰点($T_0=273.15\text{K}$)和 $p_0=101325\text{Pa}$ 下的理想气体摩尔体积 $v_0=22.41410 \times 10^{-3}\text{m}^3 \cdot \text{mol}^{-1}$ 。所以

$$R = \frac{p_0 v_0}{T_0} = 8.314510 \text{ J} \cdot \text{mol}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$$

玻耳兹曼常量(Boltzmann constant)

奥地利物理学家玻耳兹曼在研究熵的统计表示式时引入的一个重要普适量，符号为 k ，单位是 J/K。它等于气体常量与阿伏加德罗常量之比

$$k = \frac{R}{N_A} = \frac{8.314510 \text{ J} \cdot \text{mol}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}}{6.0221367 \times 10^{23} \text{ mol}^{-1}}$$

气体常量 R 属于 1mol 气体的常量，具有局限性和宏观性质；玻耳兹曼常量 k 属于一个分子的常量，具有普遍性和微观性质，在分子动理论及统计物理中占有重要地位。

理想气体的压强(Pressure of ideal gas)

理想气体压强的实质可认为是大量气体分子对容器壁碰撞的平均效果，即大量分子在单位时间内施加在器壁单位面积上的平均冲量。将牛顿定律运用于被认为是刚性小球的单个气体分子，并对大量分子求和取平均值可求得理想气体的压强

$$\begin{aligned} p &= \frac{1}{3} N_0 m \overline{v^2} \\ &= \frac{2}{3} N_0 \left(\frac{1}{2} m \overline{v^2} \right) \\ &= \frac{2}{3} N_0 \bar{E} \end{aligned}$$

式中 N_0 为单位体积内的分子数， m 为分子质量， $\overline{v^2}$ 为分子速度平方的平均值， \bar{E} 为分子的平均平动能。

上式说明理想气体的压强与分子的质量、单位体积中的分子数和速度平方的平均值成正比。也可以说，与分子数密度和分子的平均平动能成正比。

只有对大量分子的无规则碰撞谈压强才有意义。个别气体分子，每次碰撞给予器壁多大的冲量，作用在什么地方，完全是偶然的，大量分子碰撞的平均效果才有确定的值。

气体分子的平均平动能 (average molecular translational energy of gases)

对于理想气体，由压强公式 $p = \frac{2}{3} N_0 \bar{E}$ 和物态方程 $pV = \nu RT$ 可得

$$\bar{E} = \frac{3}{2} \frac{R}{N_A} T$$

式中 R 为气体常量， N_A 为阿伏加德罗常量。由于 $R/N_A = 1.38 \times 10^{-23} \text{J} \cdot \text{K}^{-1}$ ，即玻耳兹曼常量，上式变为

$$\bar{E} = \frac{3}{2} kT$$

由此式可以看出，理想气体的平均平动能与热力学温度成正比。

理想气体的内能(internal energy of ideal gas)

气体的内能是各个气体分子的能量和分子间相互作用能量的总和。各个分子的能量(包括动能和分子内原子间的相互作用势能)总和只是温度的函数,与气体的体积无关;分子间的相互作用能量则与分子间的平均距离有关,因而与气体的体积有关。对于理想气体,分子间的距离很大,分子间的相互作用可以忽略,内能就与体积无关了。所以理想气体的摩尔定容热容 $C_{V,m}$ 可表示为 $C_{V,m} = m \frac{dU}{dT}$ 。取温度为 T_0 时1 mol理想气体的内能 U_0 作为计算内能的参考状态,则温度为 T 时1mol理想气体的内能为

$$U = \int_{T_0}^T C_{V,m} dT + U_0$$

在通常实际问题涉及的温度范围内,大多数气体的摩尔定容热容近似地为一常量,因而上式可写成

$$U = C_{V,m}(T - T_0) + U_0$$

麦克斯韦速度分布(Maxwell velocity distribution)

说明平衡态下，不同速度的理想气体分子是如何分布的。

1. 麦克斯韦速率分布

设处于热平衡态下某气体的分子总数为 N ，速率分布在 $v \sim v+dv$ 间的分子数为 dN ，则速率分布在 $v \sim v+dv$ 间的分子数占总分子数的比率 $\frac{dN}{N}$ 应与 v 有关，并且与 dv 成正比。设 $\frac{dN}{N}$ 与 v 间的函数关系为 $f(v)$ ，则

$$\frac{dN}{N} = f(v)dv$$

如果求 $v_1 \sim v_2$ 间的分子数 N ，应有

$$\frac{\Delta N}{N} = \int_{v_1}^{v_2} f(v)dv$$

如果对所有速率的分子求积分，即 $v_1=0$ ， $v_2=\infty$ ，则应有 $N=N$ ， $\int_0^{\infty} f(v)dv = 1$ 。式中 $f(v)$ 称为速率分布函数。如果确定了函数 $f(v)$ ，也就确定了气体分子按速率分布的规律。

英国物理学家麦克斯韦用统计的方法求出了 $f(v)$ 的具体表达式，即

$$f(v) = 4\pi \left(\frac{m}{2\pi kT} \right)^{3/2} e^{-mv^2/2kT} v^2,$$

式中 m 为一个分子的质量， k 为玻耳兹曼常量， T 为热力学温度。

速率分布函数曲线如图 1-11-6 所示。它形象地描绘了气体分子按速率分布的规律。图中任意区间 $(v \sim v+dv)$ 曲线下的面积，表示速率在这一区

间的分子数占分子总数的比率 $\frac{dN}{N}$ (也可解释成为，一个分子速率在 $v \sim v+dv$ 之间的概率。速率在 $v_1 \sim v_2$ 区间内的分子占分子总数的比率为这一区间内曲线下的面积。从图上可以看出，速率分布曲线从原点出发，随着速率的增大而逐渐升高，经过一极大值后逐渐降低，并接近横坐标轴。这说明，气体分子的速率可以取从零到无穷大之间的任何数值，速率很大和很小的分子所占比率都很小，具有中等速率的分子所占比率较大。

与曲线极大值相对应的速率，称为最概然速率。用 v_p 表示。它的含义是，如果把整个速率范围分成许多相等的小区间，则分布在 v_p 所在区间内的分子所占比率最大。 v_p 可根据求极值的方法，令 $\frac{d}{dv} f(v) = 0$ 求得

$$v_p = \sqrt{\frac{2kT}{m}}$$

可见 v_p 与 T 的平方根成正比，与 m 的平方根成反比。如果 m 一定， T 增大，则气体分子运动加剧，速率小的分子数减少，速率大的分子数增多， v_p 增大，曲线的极值向右移。但由于速率分布曲线下的面积恒等于 1，所以极值必然降低，曲线变得较为平坦。如果 T 一定， m 变小，则 v_p 变大，曲线的极值也向右移，情形与 T 增大相仿(图 1-11-7)。

2. 麦克斯韦速度分布

如果考虑气体分子运动的方向，用 v_x 、 v_y 和 v_z 分别表示气体分子速度 v 在直角坐标轴 x 、 y 和 z 方向上的分量，则麦氏速率分布变成麦氏速度分布。

$$\frac{dN}{N} = \left(\frac{m}{2\pi kT} \right)^{3/2} e^{-m(v_x^2 + v_y^2 + v_z^2)/2kT} dv_x dv_y dv_z$$

上式中 $\frac{dN}{N}$ 为速度分量 v_x 在区间 $v_x \sim v_x + dv_x$ 内， v_y 在区间 $v_y \sim v_y + dv_y$ 内， v_z 在区间 $v_z \sim v_z + dv_z$ 内的分子比率。这就是同时考虑了速度的数值和方向后，分子按速度分布的规律。

施特恩实验(Stern experiment)

最早测定分子速率的实验，由美籍德国实验物理学家施特恩(Otto Stern, 1888 ~ 1969)于1920年完成。

实验装置如图1-11-8所示。A、B为两个可以绕同轴OO'转动的圆筒，它们的半径分别为R和r，OO'为一根镀银的铂丝，圆筒B有一条窄缝S(见图乙)，仪器装置内部抽成高度真空。

给处在转轴位置的铂丝加热到1000℃以上，会有银分子逸出。如果圆筒不转动，逸出的分子就会从窄缝S穿过，沿直线打到外筒A的内壁P处。如果A、B两个同轴圆筒以 ω 的角速度逆时针方向转动，分子的速率为v，分子由B筒飞到A筒所需时间为t，当分子打到A的内壁时，原来的P点将会运动到P'点(见图乙)。设PP' = l，则有

$$t = \frac{R - r}{v},$$
$$l = R\omega t$$

解此方程组得

$$v = \frac{\omega}{l} R(R - r)$$

由于R和r都是定值，实验中只要测出l和 ω 就可以算出分子的速度。

实验发现，两个同轴圆筒转动后，给铂丝加热，逸出的银分子打在外筒的内壁上并不集中于一点，而是在P点后的一段弧内都有分子分布。这说明，在同一温度下，分子速率的大小不是一定的，在一定的范围内，各种速率的分子都存在。分析筒壁上银分子的厚度，可以得出不同速率分子的分布情况，从而验证理论上得出的分子速率分布的规律。

玻耳兹曼分布律(Boltzmann distribution law)

表明物体在保守力场(如重力场)中,各种速度的分子在空间中如何分布的定律。在研究速度分布律中,如果考虑处在保守力场中的分子,则不仅要考虑分子的动能 E_k ,而且要考虑分子在场中的势能 E_p 。由于势能与分子处在保守场中的位置有关,所以麦氏分布律中的能量 E 应换为动能 E_k 与势能 E_p 的和,微分元中不仅要考虑速度的因素,而且还要考虑位置的因素。这样就有玻耳兹曼分布律:当系统在力场中处于平衡态时,其中坐标介于区间 $x \sim x+dx, y \sim y+dy, z \sim z+dz$ 内,同时速度介于 $v_x \sim v_x+dv_x, v_y \sim v_y+dv_y, v_z \sim v_z+dv_z$ 内的分子数为

$$dN = n_0 \left(\frac{m}{2\pi kT} \right)^{3/2} e^{-(E_k+E_p)/kT} dv_x dv_y dv_z dx dy dz \quad (1)$$

式中 n_0 表示在势能 E_p 为零处单位体积内具有各种速度的分子总数, m 为分子质量, T 为热力学温度, k 为玻耳兹曼常量。(1)式称为玻耳兹曼分子按能量分布定律,也称玻耳兹曼分布律。

如果对上式所有可能的速度积分,由麦氏分布函数的归一化条件

$$\int_{-\infty}^{+\infty} \int_{-\infty}^{+\infty} \int_{-\infty}^{+\infty} \left(\frac{m}{2\pi kT} \right)^{3/2} e^{-E_k/kT} dv_x dv_y dv_z = 1,$$

则上面玻耳兹曼分布律公式变为

$$dN' = n_0 e^{-E_p/kT} dx dy dz.$$

dN' 表示分布在坐标区间 $x \sim x+dx, y \sim y+dy, z \sim z+dz$ 内具有各种速度的分子总数。如果再以 $dx dy dz$ 除上式,则可得在 (x, y, z) 处单位体积中的分子数

$$n = n_0 e^{-E_p/kT} \quad (2)$$

这个关系式称为玻耳兹曼分子按势能分布定律,也简称玻耳兹曼分布律。

应该注意,玻耳兹曼分布律不仅对气体分子成立,而且对所有微粒(固体、液体、气体的分子和原子以及做热运动的任何微粒)都成立,是一条应用范围很广,具有普遍意义的规律。

由(2)式可求出气体分子在重力场中按高度分布的规律。在重力场中,(2)式里的势能 E_p 即为重力势能。取 z 轴竖直向上,并取 $z=0$ 处的势能为零,则 $E_p = mgz$, n_0 即为 $z=0$ 处单位体积中的分子数。于是分布在高度 z 处单位体积中的分子数为

$$n = n_0 e^{-mgz/kT} \quad (3)$$

由(3)式可知,在重力场中,气体分子的数密度 n 随高度的增大按指数规律减小。(3)式还表明,分子的质量 m 越大 n 减小得越迅速,气体的温度 T 越高 n 减小得越缓慢。图 1-11-9 给出了在两种不同温度下,气体分子数密度随高度变化情况的示意图。

对于理想气体,当温度一定时,压强 $p = nkT = n_0 kT e^{-mjz/kT}$, 故有

$$p = p_0 e^{-\mu gz/RT} \quad (4)$$

式中 $p_0 = n_0 kT$ 表示 $z=0$ 处的压强, μ 为气体的摩尔质量。(4)式称为等温

气压公式，它表明大气压强随高度按指数规律减小。将(4)式取对数可得

$$z = \frac{RT}{\mu g} \ln \frac{p_0}{p} \quad (5)$$

在登山运动和航空中，应用(5)式可根据测得的大气压强计算上升高度。但是，由于大气的温度随高度而变化，应用(5)式只能得到近似的结果。

真实气体的等温线(isotherm of real gas)

真实气体，例如氧气、二氧化碳等的等温线与理想气体的等温线有着一定的差别，特别是当温度较低时，这种差别就更显著。图 1-11-10 是一定质量的 CO_2 气体在等温条件下的实验曲线。由图可见，温度较高时（60

以上）， CO_2 的等温线与该状态下理想气体的等温线相近似，几乎都是直角双曲线，所以此种状态下，可以将真实气体看作理想气体。但是温度较低时，真实气体的等温线与理想气体的等温线则明显不同。当温度低于 31.1（ CO_2 的临界温度）时， CO_2 气体在高压下开始液化；等温线中间的平直部分，表示液汽共存，即二相平衡状态；等温线左侧陡峭部分表示液相，要使体积减小必须急剧增大压强。在这些情况下，我们就不能再把真实气体看作理想气体了。

真实气体在较低温度和较大密度时出现的与理想气体性质的偏离，是因为在理想气体中，我们不考虑气体分子自身的体积和分子间相互的作用力，而当温度较低和密度较大时，这两种被忽略了的因素显得突出起来。在这种情况下，要想对真实气体作比较实际的描述就应同时考虑这两种因素。

真实气体的物态方程 (equation of state for real gases)

在分子密度不太大的情况下，真实气体可以近似地看作理想气体，其态参量与温度的关系可近似地由理想气体物态方程给出。但是，当气体分子密度增大时，真实气体与理想气体的偏差也随之增大，这时要确定各个态参量与温度的关系，就要用真实气体的物态方程。

真实气体物态方程有很多，其中以范德瓦耳斯方程和卡末林-昂内斯方程最有代表性。

1. 范德瓦耳斯方程 它是对理想气体中不计的分子间作用力和分子自身的体积两项因素加以修正而得到的。1mol 气体的范氏方程为

$$\left(p + \frac{a}{V_m^2}\right)(V_m - b) = RT$$

式中 V_m 为气体摩尔体积， a 与 b 均为常量，其值视不同的气体而异，可由实验测定。 b 为考虑真实气体分子的体积而引入的修正量，它表示 1mol 气体处于最紧密状态时所占有的体积，理论上等于 1mol 气体内所有分子体积的 4 倍。1mol 真实气体的分子可以自由活动的空间应为 $V_m - b$ 。 a/V_m^2 为考虑真实气体分子间的引力而引入的修正量。由于分子间引力的作用，靠近容器壁很薄的一层分子对器壁的压强比不考虑引力时小。这一减小量与 V_m^2 成反比。所以，描述实际气体的范氏方程应在理想气体物态方程 $pV_m = RT$ 中，用 $\left(p + \frac{a}{V_m^2}\right)$ 代替 p ，用 $(V_m - b)$ 代替 V_m 对于任意质量 M 的气体，

范氏方程为

$$\left(p + \frac{M^2 a}{\mu^2 V^2}\right)\left(V - \frac{M}{\mu} b\right) = \frac{M}{\mu} RT$$

式中的 V 为气体的体积， μ 为气体的摩尔质量。

范氏方程是荷兰物理学家范德瓦耳斯 (1837 ~ 1923) 于 1873 年提出的，方程中的常量 a 、 b 虽然需由实验测定，属于半经验方程，但是它的基本出发点仍是物质结构的微观理论，它的物理意义清楚，而且实用价值也很高。

2. 卡末林-昂内斯方程 荷兰物理学家卡末林-昂内斯于 1901 年提出的用级数表示的气体物态方程。常见的形式是

$$pV = A + Bp + Cp^2 + Dp^3 + \dots$$

式中 A 、 B 、 C 、 D ……分别叫第一、第二、第三、第四…位力系数，它们都是温度的函数。当压强趋于零时，上式应变为理想气体物态方程，所以对于 1mol 的气体，第一位力系数 $A = RT$ 。其他位力系数要根据实验测定。实验表明，从第二位力系数开始，以后的位力系数的数量级依次减小得很快。这说明方程中前几项比较重要，所以在实际应用中往往只取前二项或三项就够了。

卡末林-昂内斯方程除第一位力系数外，其他系数都需要由实验确定，因而它的适用范围较大，并且也具有很重要的理论意义。

卡末林-昂内斯方程也可写成如下形式

$$pV = A + \frac{B'}{V} + \frac{C'}{V^2} + \frac{D'}{V^3} + \dots$$

式中的 B , C , D ...也叫位力系数。

温度计 (thermometer)

测量物体温度的仪器。

物体的性质随温度的变化而改变。一般总是选择其随温度而显著变化的某种性质——某种物理量，作为温度的标志。测量温度时，则直接测量这个物理量的大小，然后根据相应的物理规律计算出物体的温度。根据测温方法的不同，温度计分为以下几类：

膨胀测温法类温度计：采用几何量(体积、长度)作为温度的标志。这类温度计有液体温度计、双金属温度计和定压气体温度计等，其中常见的是液体温度计。最普通的液体温度计是一个玻璃毛细管下连着一个温泡，泡内及毛细管中装有液体，常用的液体为水银和酒精。毛细管内的液面高度随温度的变化而改变，直接显示出温度。液体温度计使用方便，但是测量范围小，只能测液体沸点与凝固点间的温度，而且不够精确。水银温度计的测量范围为 $-30 \sim 600$ (在高限方面可增加压强使沸点升高)。

压力测温法类温度计：采用压强作为温度的标志。这类温度计有定体气体温度计、低温下的蒸汽压温度计和工业用压力表式温度计。其中定体气体温度计是保持气体的体积不变，用随温度变化的压强来表示温度。这种温度计的优点是测量精确，灵敏度高，测温范围大，复现性能好，是测量热力学温度的主要手段。但是它操作麻烦，达到热平衡迟缓，很少用于一般测量，只适宜作复现温标的基准温度计。而蒸汽压温度计是用液体的饱和蒸气压来确定温度的。该温度计由温泡、连接毛细管和精密气压计等组成。这种温度计用于低温测量。氮蒸汽压温度计测温范围为 $-220 \sim -200$ ，氢 $-260 \sim -216$ ，氦 $-272 \sim -268$ 。测量 1K 以下的温度用磁温度计。

电学测温法类温度计：采用某些随温度变化的电学量作为温度的标志。这类温度计常见的有电阻温度计、温差电偶温度计和半导体温度计。电阻温度计是通过测量随温度变化的金属丝的电阻来确定温度。金属丝的电阻一般用惠斯通电桥测量。最常用的电阻温度计是铂电阻温度计，它的测量精度高(可达 $10^{-3}\text{K} \sim 10^{-4}\text{K}$)，测量范围大($-259.34 \sim 1200$)。但是它的计温关系复杂，使用不方便，因此多用作基准温度计。温差电偶温度计是利用两种金属丝两个接头处的温差所造成的电动势来测量温度。通常将两种金属丝接头的一端置于冰水混合物中(保持 0)，另一端作为待测端。温差电偶温度计使用方便，测量范围广($-200 \sim 2000$)，是工业上常用的温度计。

辐射测温法类温度计：采用光谱辐射度(即光谱辐射亮度)或辐射出射度(即热辐射通量密度)作为温度标志。这类温度计有根据光的亮度来测量温度的光学高温计和光电高温计；有根据热辐射通量密度来测量温度的辐射高温计和比色高温计。这几种高温计都用来测量高温(500 以上)，原则上可测量无限高的温度。

除以上介绍的各类温度计外，还有磁学测温法类、声学测温法类和频率测温法类温度计。

气压计 (barometer)

测量大气压强的仪器。分水银气压计和无液气压计两种。

1. 水银气压计

较精确地测量大气压强一般用水银气压计。实验室常用的福丁气压计如图 1-11-11 所示。甲图是整体图，乙图是上、下部分的剖面图。A 为水银槽上部的玻璃圆筒；G 是盛水银的玻璃管，它装在铜管 B 中；C 是水银槽中的皮囊；在 B 的上部窗口露出一部分玻璃管，用来观测水银面的位置；转动旋钮 M 即可上下移动游标 DD；H 为向下的象牙尖，固定在水银槽盖上，用以对准水银面的起始位置；S 是一旋钮，可以调节水银槽中水银面的位置；T 为温度计，用来测量室内温度。

测量时，先将气压计竖直挂好(不得倾斜)，旋转旋钮 S 使水银槽内的水银面刚好与 H 下端的尖相接触，调节旋钮 M 使游标 DD 的下沿连线和水银柱顶端相切，这时从游标读出标尺上的读数，就是水银柱的高度，亦即大气压强。

精确测量时要考虑到三方面的修正：温度修正(由热胀冷缩引起)；纬度修正(g 值不同引起)；器差(表面张力及象牙尖安装不正确等因素引起)。

2. 无液气压计

无液气压计又称金属盒气压计。它是利用大气压强使气压计中的真空金属盒发生形变来显示大气压强的。图 1-11-12 是无液气压计的原理图。当大气压强增大时，真空盒的表面向内凹，与真空盒相连的连杆向图中箭头所示的方向运动，转轴及固定在其上的扇形齿轮向逆时针方向转动，进而带动小齿轮和指针向顺时针方向转动，从指针指示的刻度，就可以读出大气压强的值。如果大气压强减小，过程刚好与上述过程相反。

无液气压计使用和携带都很方便，但是不够准确，常常需要用水银气压计校准。

真空泵 (vacuum pump)

获得真空的机械。常用的有机械泵和扩散泵。

(1) 机械泵 属于前级泵，常用来产生预备真空。机械泵有许多种，如转片式、定片式和活门式等。一般常采用油封转片式机械泵，它的结构如图 1-11-13 所示。在圆柱形气缸(定子)内装有一偏心圆柱(转子)，当转子绕轴转动时，其上部与气缸内表面紧密接触。沿转子的直径装有两个滑片，它们之间装有弹簧，以保证转子转动时滑片与气缸内表面紧密接触。当转子按图中箭头所示方向不断转动时，滑片就不断地将工作室内的气体从排气阀门挤出，被抽容器内的压强也就不断地减小。

为了闭免漏气和减小摩擦，排气阀及其下部的泵体空腔部分用油密封。

机械泵所能达到的真空程度——真空度是有限的，它的极限真空度一般为 $1\text{Pa} \sim 10^{-2}\text{Pa}$ ，抽气速率一般为每秒十分之几升到每秒十几升。

(2) 扩散泵

机械泵抽真空的程度有限，要想继续抽真空可用扩散泵。由于扩散泵属次级泵，所以它必须与机械泵串联起来使用。图 1-11-14 是实验室中常采用的油扩散泵结构图。工作时先将机械泵打开，待容器内压强达到油扩散泵的预备真空条件(低于 1Pa)后，合上电炉开关给硅油加热。当硅油被加热到沸腾时，将会从各级喷嘴向外急剧地喷出大量硅油蒸气，喷嘴附近形成低压区。这样被抽容器中的气体分子就会向下扩散，并随向下喷出的硅油蒸气流运动到下方被机械泵抽走。硅油蒸气遇到较冷的泵壁凝结，并流回蒸发器内。

油扩散泵所能获得的真空程度主要取决于它的蒸气压。一般硅油扩散泵可抽真空到 10^{-5}Pa 左右。

实际中还有其他一些常用的真空泵。例如涡轮分子泵(可获得 10^{-8}Pa 的超高真空)，吸气剂泵(可获得低于 10^{-8}Pa 的真空)，低温吸附泵等。

真空规 (vacuum gauge)

测量真空的仪器，也叫真空计。

真空规有许多种，按测量的量所反映的性质分绝对真空规和相对真空规两大类。绝对真空规可以通过其本身所测得的物理量直接求出气压的大小，相对真空规必须经过绝对真空规的校正才能测定气压。下面是几种常用的真空规。

(1) 麦克劳德真空规 其原理是将被测的气体隔离出一部分，然后压缩到压强可以直接测量的状态，再利用玻意耳定律求出原来气体的压强。麦克劳德真空规的结构如图 1-11-15 所示。E 端接到待测压强的容器上，另一端用橡皮管与一个可以上下移动的水银容器 R 相连接。当把容器 R 向上提时，水银面随着上升，使 B 中气体和待测压强的容器隔开。然后使水银面继续升高，直到 D 管中水银面正好与 C 的顶端相齐。测出 C、D 两管中水银面的高度差 h_1 ；再根据公式 $p = \frac{ah^2}{V}$ (式中 a 和 V 是仪器常数) 就可以得到待测压强 p 的值。麦克劳德真空规属于绝对真空规，可测量到 10^{-4} 帕。但它不能连续测量变化的压强，用起来也不太方便，一般用来校正相对真空规。

(2) 皮拉尼真空规 根据低压下气体的导热系数与压强成正比的原理制成。图 1-11-16 是这种真空规的结构示意图。真空规的下端接测量电阻电路 (如惠斯通电桥)，金属丝通以恒定电流加热。当真空规内气压变化时，气体的导热系数也随之变化，在通电电流恒定的情况下，金属丝的温度也将随之变化，其电阻也将变化。由测量电路测出变化后的电阻，再根据一定的关系式就可推出真空规内气体的压强，也就是待测容器内的压强。

皮拉尼真空规属相对真空规，使用时应先用绝对真空规校正。它的测量范围一般是 $10\text{Pa} \sim 10^{-2}\text{Pa}$ ，优点是能连续地记录待测压强。

(3) 温差电偶真空规 也是根据在低压情况下，气体的导热系数与压强成正比的原理制成的，其结构与皮拉尼真空规相仿，只是金属丝上接一温差电偶，测量电阻电路改为测量电偶的电动势。其结构示意图如图 1-11-17 所示。

温差电偶真空规也属相对真空规，其测量范围为 $10\text{Pa} \sim 10^{-1}\text{Pa}$ 。

(4) 电离真空规 利用压强不同时，气体分子被电离后的电离电流不同的原理制成。最简单的电离真空规就是一只三极管。图 1-11-18 是它的结构示意图。工作时在灯丝电路中通以电流，灯丝受热后发射电子。在栅极上加一正电压，栅极便吸引灯丝发射出来的电子。电子在趋向栅极的过程中被加速并与气体分子相碰使分子电离，气体的分子密度越大，碰撞机会越多，产生的正离子也就越多。在板极与灯丝间再加一电压，使板极为负，则板极吸引正离子，使得板极电路中形成电流。气体分子密度越大 (即压强大)，板极电流也就越大，通过测定板极电流，便可确定气体的压强。

电离真空规也属于相对真空规，其测量范围为 $10\text{Pa} \sim 10^{-5}\text{Pa}$ 。

另外，还有可测到 10^{-9}Pa 的测超高真空的真空规和可测到 10^{-11}Pa 的新型磁放电式电离真空规。

主要参考资料

1. 中国大百科全书出版社编辑部。中国大百科全书·物理学。第 1 版。北京：中国大百科全书出版社，1987。
2. 科学出版社名词室。物理学词典。第 1 版。北京：科学出版社，1988。
3. 赵凯华，陈熙谋。电磁学。第 2 版。北京：高等教育出版社，1985。
4. 汪镇藩等。物理学词典：分子与原子物理学分册。第 1 版。北京：科学出版社，1984。
5. 姜国渭，张素德。热学。第 1 版。石家庄：河北人民出版社，1984。
6. 李椿等。热学。第 1 版。北京：人民教育出版社，1979。
7. 王竹溪。统计物理学导论。第 1 版。北京：人民教育出版社，1978。
8. 顾建中。热学教程。第 1 版。北京：人民教育出版社，1981。
9. 熊吟涛。统计物理学。第 1 版。北京：人民教育出版社，1981。
10. 汪志诚。热力学·统计物理。第 1 版。北京：人民教育出版社，1980。
11. 肖国屏。热学。第 1 版。北京：高等教育出版社，1989。
12. 杨述武等。普通物理实验一、力学、热学部分。第 1 版。北京：高等教育出版社，1982。
13. 王竹溪。热力学。第 1 版。北京：高等教育出版社，1955。
14. 黄淑清等。热学教程。第 1 版。北京：高等教育出版社，1985。

十二、热力学定律

平衡态(equilibrium state)

热力学性质相对稳定的状态，即在没有外界影响的情况下，系统的宏观性质在长时间内不发生变化任何变化的状态，也称热力学平衡态。这里说的不受外界影响，指的是与外界没有功和热的交换。

平衡态下系统的宏观性质不变，但是系统内大量的分子始终在做着无规则的热运动，只是这些分子运动的平均效果(统计平均)不变。所以，平衡态是一种热动平衡。另外，即使在平衡态下，系统宏观物理量的数值也会发生偏离统计平均值的变化——涨落，这种涨落在适当的条件下可以观察到，这是统计平均的必然结果。一般情况下，由于涨落很小，所以热力学中不考虑这种变化，而认为平衡态下，系统的宏观性质不变。

平衡态是一种理想的状态，实际中并不存在。因为实际上没有完全不受外界影响的系统，说系统的宏观性质长时间内不变也只是相对的。但是，实际中有许多状态非常接近平衡态，因此平衡态的概念具有很重要的理论和现实意义。

态参量(state Parameter)

描述系统宏观特性的物理量。

平衡态下，系统的各种宏观物理量都有确定的值，这些物理量之间有着一定的函数关系，可以根据问题的需要选择其中方便的独立变量作为自变量，系统中其他的物理量则可由一定的函数关系得到。这样，系统内的全部物理量就可以由这几个独立变量完全确定。系统中的这些独立变量称为态参量。可用态参量的函数表达的量，称为系统的态函数。态参量与态函数之间没有严格的界限。例如，描写理想气体的状态，若取压强和体积为态参量，则温度为态函数；若取体积和温度为态参量，则压强为态函数。

态参量一般来说有四类。即几何参量，用以描述系统的大小、形状、体积等几何性质；力学参量，用以描述系统的压强，应力、表面张力等力学性质；化学参量，用以描述组成系统的各种化学成分的数量等化学性质，例如组分的摩尔数；电磁参量，用来描述系统处在电磁场作用下的性质，如电场强度，电极化强度，磁场强度和磁化强度等。如果研究的是简单系统，并不需用全部上述四类参量。例如，气体状态，只需用体积和压强两个参量即可确定。

温度 (temperature)

决定一个系统是否与其他系统处于热平衡的物理量。

实验表明，如果两个热力学系统中的每一个都与第三个热力学系统处于热平衡，那么这两个系统也一定处于热平衡。这一结论叫热力学第零定律。第零定律告诉我们，互为热平衡态的所有热力学系统具有一个数值相等的态函数，这个态函数就是温度。

温度也可以说是描述物体冷热程度的物理量。热的物体温度高，冷的物体温度低。若将两个冷热不同的物体相互接触，它们之间必然要产生热交换，最后达到热平衡，具有相同的温度。这为测量温度提供了依据。

由理想气体平均平动能与温度的关系

$$\bar{E} = \frac{3}{2} kT$$

可以看出，平均平动能 \bar{E} 与温度 T 成正比。也就是说，分子运动得越剧烈，温度越高。所以说，温度是组成系统大量分子无规则运动剧烈程度的标志。

要完全确定物体的温度还要确定温标，即温度的数值表示法。国际上规定的最基本的温标是热力学温标(参见“热力学温标”)。另外，还有两种常用的温标，摄氏温标和华氏温标。

摄氏温标在我国比较常用，它与热力学温标的关系为

$$t = T - T_0, T_0 = 273.15\text{K}$$

式中 t 为用摄氏温标确定的温度， T 为热力学温度。由上式可知，热力学温度的 273.15K 为摄氏温标的零点 ($t=0$)。

华氏温标在西方国家比较常用，它是由德国物理学家华伦海特创立的。华氏温标规定，在 101kPa 下冰与盐水的混合物温度为零度，水的沸点为 212 度，中间分为 212 等分，每一等分为 1 华氏度，用符号 $^{\circ}\text{F}$ 表示。华氏温标与摄氏温标的关系为

$$F = \frac{9}{5} t + 32^{\circ}\text{F}$$

准静态过程(quasi-static process)

热力学中一种理想化的状态变化过程。系统在准静态过程中所经历的每一状态都可以看作是平衡态。实际上，在任意两个平衡态之间的变化过程中的状态都是非平衡态，但是如果过程进行得足够慢，就可以将此过程近似地看作准静态过程。

例如，带有活塞的圆筒中的气体处于平衡态，如果迅速地提高活塞，使气体的体积增加 ΔV (图 1-12-1)，气体将不再处于平衡态，但经过一段时间后，气体又会重新恢复到平衡态。这段恢复时间称为弛豫时间，用 τ 表示。如果使气体同样改变 ΔV 的体积，但是所经历的时间大于 τ ，这样在体积缓慢变化的过程中，气体便有足够的时间来恢复平衡，这个过程就可以看作准静态过程。气体压强的弛豫时间约为 10^{-16} s。转速 1500r/min 的四冲程内燃机，整个压缩冲程的时间为 2×10^{-2} s，与压强的弛豫时间相比，这一过程进行得足够缓慢，可以近似地看成准静态过程。而气体中浓度的均匀化，需要分子做大距离的位移，弛豫时间可达几分钟。

平衡态下系统具有确定的态参量，而准静态过程中的每一状态都是平衡态，所以准静态的变化过程可在 P-V 图中用曲线表示出来，非准静态过程则不能。

准静态过程中的功(quasistatic work)

在准静态过程中，热力学系统可以通过机械的或电磁的相互作用与外界交换能量。如果外界对系统做功，则系统增加等量的内能；如果系统对外界做功，则系统减少等量的内能。

首先考虑由流体组成的系统在发生体积变化时外界对它所做的功。如果不考虑所受外界的摩擦力，由于是准静态过程，所以外界压强必然等于系统内的压强。这样外界对系统所做的功就可以用系统自身的内参量 p 和 V 来表示。例如，一带有活塞的圆筒中盛有气体，在准静态过程中活塞移动 dx (图 1-12-2)，外界对系统所做的功为 $W=pAdx$ 。 p 为外界压强，等于系统内部压强， A 为活塞面积。由于气体体积的变化 $dV=-Adx$ ，所以外界对系统所做的功可以表示为

$$W=-pdV \quad (1)$$

式中的负号表示 dV 与 W 符号相反，当系统被压缩时， $dV < 0$ ，外界做正功， $W > 0$ ；当系统膨胀时， $dV > 0$ ，外界做负功， $W < 0$ 。系统对外界所做的功，则为

$$-W=pdV$$

如果系统的变化过程是有限的，例如体积由 V_A 变至 V_B ，则外界对系统所做的功为(1)式的积分

$$W = -\int_{V_A}^{V_B} pdV \quad (2)$$

在图 1-12-3 中，准静态过程 $p-V$ 曲线下画斜线的小长方形的面积为 $pdV=-\delta W$ ，而曲线弧 AB 下的总面积为 $-W$ ，即等于外界在这过程中对系统所做功的负值，或者说等于系统在这过程中对外界所做的功。

(2)式的积分依赖于 $P(V)$ 的表达式，如果是等压变化，则

$$\begin{aligned} W &= -p(V_B - V_A) \\ &= -p \Delta V \end{aligned}$$

除系统体积变化时外界做功外，下面几种准静态过程的功也是常见的：

取液体表面为热力学系统，系统的表面张力为 σ ，表面积增大 dA 时，外界对系统所做的功为 $W = \sigma \cdot dA$ 。

电介质所处的外电场 E 增强使电介质极化时，电介质总电矩的增量为 dp ，电场使电介质极化所做的功为 $W = E \cdot dp$ 。

磁介质所处的外磁场 H 增强使磁介质磁化时，磁介质总磁矩的增量为 dM ，磁场使磁介质磁化所做的功为 $W = H \cdot dM$ 。

一般地讲，在准静态过程中外界对系统所做的元功可以写成

$$\delta W = \sum_i Y_i dy_i$$

的形式，其中 y_i 称为决定系统状态的广义坐标， Y_i 称为与 y_i 相应的广义力。例如，在气体压缩过程中，元功 $W=-pdV$ ，气体体积 V 是广义坐标，压强 p 就是广义力。

热量(heat)

也称传递着的热量，指由温度差别而转移的能量，它与功一样，是系统能量传递的一种形式，并可作为系统能量变化的量度。

热和功一样都不是系统的态函数，而与系统变化的过程有关。如图 1-12-4，A、B 两点为系统的初末两态，由初态 A 到末态 B，系统能量的变化都是 $E_A - E_B$ ，但是对于不同的过程 1、2、3，系统做功则依次减少，向外传递的热量依次增多。做功与传递的热量之和等于系统内能的变化。

系统与外界的热量交换可由

$$Q = cm \Delta t$$

求出。式中 c 为系统物质的比热容， m 为系统的质量， Δt 为系统的温度变化。(参见“比热容”)

18 世纪，随着化学、计温学和量热学的发展，人们曾认为热量是一种没有质量的物质，称作热质。热质可以在物体间传递，传递过程中，热质守恒；物体含热质多，温度就高，含热质少，温度就低；各种物质的比热容不同，表明同样质量的各种物质容纳热质的本领不同，而每种物质的比热容则是一个与过程无关的常量。这种热质说能解释一些热现象，但对另一些热现象则不能解释，尤其不能解释摩擦生热的现象，后来被事实证明是错误的。19 世纪焦耳通过大量的实验指出，一定热量的产生(或消失)总是伴随着等量的其他某种能量的消失(或产生)。这说明，热量不是传递着的热质，而是传递着的能量。

热力学第一定律(first law of thermodynamics)

能量转换和守恒定律在热力学中的具体表现，是表明系统与外界交换的功 W 、吸放的热量 Q 和内能的变化 U 三者间具体关系的定律。其数学表示式一种为

$$U=W+Q \quad (1)$$

即系统内能的增量等于系统在变化过程中外界对系统所做的功与系统从外界吸收的热量之和。另一种表示式为

$$Q= U+W \quad (2)$$

即系统从外界吸收的热量等于系统内能的增量与系统对外界所做功之和。

上面公式为有限过程下热力学第一定律的数学表示。如果过程为无穷小，则上面(1)和(2)式分别变为 $dU= W+ Q$

和 $Q=dU+ w$

这里 Q 、 W 和 w 都不是全微分，而仅为一无穷小量。因为 Q 和 W 不是态函数，都与过程有关。

第一种永动机(perpetual motion machine of the first kind)

违反能量转换和守恒定律的机器，或者说违反热力学第一定律的机器。

历史上曾有人想制造不消耗任何能量而能不断做功或者少消耗能量而能作更多当量的功的机器，人们把这种机器称为第一种永动机。人们通过大量的实验和客观事实发现第一种永动机是不可能实现的。尤其是在发现和总结出了热力学第一定律后，人们就更加清楚这种永动机为什么不可能实现。在机器连续工作的情况下，其工作物质(热力学系统)必须完成循环，因而工作物质的内能不变，即 $\Delta U=0$ 。由热力学第一定律： $Q = \Delta U + W$ ，有 $Q = W$ 。这表明在一个循环过程中机器对外界所做的功等于在该循环中机器从外界吸收的热量。如果机器不吸热， $Q=0$ ，则必有 $W=0$ ，即机器不对外做功。所以热力学第一定律也可以表述为：第一种永动机不可能造成。

比热容 (specific heat capacity)

物体升高单位温度时所吸收的热量，称为该物体的热容，用符号 C 表示。单位质量物体的热容称为构成该物体的物质的比热容，用符号 c 表示。如果物体的质量为 m ，物体热容与比热容的关系为

$$C=mc$$

对于气体，在不同变化过程中其热容与比热容的值都是不同的；对于固体和液体，这种差别很小，可以忽略。

气体在等体变化过程中的比热容称为比定容热容，用符号 c_v 表示。

气体在等压变化过程中的比热容称为比定压热容，用符号 c_p 表示。

气体的比定压热容与比定容热容之比称为比热容比，用符号 γ 表示，即

$$\gamma=c_p/c_v$$

摩尔热容(molar heat capacity)

1mol 物质的热容称为该物质的摩尔热容，用符号 C_m 表示。

对于气体，不同变化过程的摩尔热容不同。

气体在等体变化过程中的摩尔热容称为摩尔定容热容，用符号 $C_{v,m}$

表示。 $C_{v,m} = \frac{R}{\gamma - 1}$ 。式中的 γ 为比热容比， R 为普适气体常量。

定体摩尔热容与定体比热容的关系为

$$C_{v,m} = \mu C_v$$

式中 μ 为气体的摩尔质量。

气体在等压变化过程中的摩尔热容称为摩尔定压热容，用符号 $C_{p,m}$

表示。 $C_{p,m} = \gamma \frac{R}{\gamma - 1}$ 。

定压摩尔热容与定压比热容的关系为

$$C_{p,m} = \mu C_p$$

迈耶公式(Mayer formula)

表明理想气体的摩尔定压热容与摩尔定容热容之间关系的公式。其数学表示式为

$$C_{p,m} - C_{v,m} = R$$

即理想气体的摩尔定压热容与摩尔定容热容之差等于气体普适量。

理想气体的摩尔定压热容大于摩尔定容热容。因为在等体过程中，系统对外不作功，吸收的热量仅等于系统内能的改变；在等压过程中，系统除内能改变外还要对外做功，二者之和为系统吸收的热量。所以 $C_{p,m}$ 大于 $C_{v,m}$ 。

如果理想气体分子的自由度为 i ，则由能量均分定理，可知理想气体的摩尔内能为：

$$u = \frac{i}{2} RT$$

$$C_{v,m} = \frac{du}{dT} = \frac{i}{2} R$$

$$C_{p,m} = C_{v,m} + R = \frac{i+2}{2} R$$

$$\gamma = C_{p,m} / C_{v,m} = \frac{i+2}{i}$$

对于单原子分子， $i=3$ ，

$$C_{v,m} = \frac{3}{2} R,$$

$$C_{p,m} = \frac{5}{2} R, \gamma = 1.67$$

对于双原子分子，如果把分子看成是刚性的(不考虑分子内部振动自由度)，则 $i=5$ ，

$$C_{v,m} = \frac{5}{2} R, C_{p,m} = \frac{7}{2} R, \gamma = 1.4$$

上述结果，对于单原子分子和大多数双原子分子符合得相当好。对于多原子分子，刚性分子模型和经典的能量均分定理就不适用了。这个问题只有用量子统计理论才能解决。

等体积过程(isochoric process)

系统的体积保持不变的变化过程，简称等体过程。如汽油机内燃气燃烧得很快，释放能量过程中，体积来不及膨胀，可以看作等体过程。

等体过程在 p - V 图上对应于一条垂直于 V 轴的直线，其方程为

$$V=V_0(\text{常量})$$

由物态方程 $pV=nRT$ 可得理想气体在等体过程中压强与温度的关系为

$$p_1/p_2=T_1/T_2(\text{查理定律})$$

在等体过程中，由于 $dV=0$ ，所以系统对外所做的功 $W=pdV=0$ 。由热力学第一定律 $Q=U+W$ 得 $Q=U$ ，即在等体过程中系统与外界交换的热量等于系统内能量的改变。当温度由 T_1 变至 T_2 时， n mol 气体吸收的热量为

$$Q=U_2-U_1=n\int_{T_1}^{T_2}C_{v,m}dT$$

由于摩尔定容热容 $C_{v,m}$ 近似为一常量，故有

$$Q=nC_{v,m}(T_2-T_1)$$

等压过程(isobaric process)

系统的压强始终保持不变的变化过程。柴油机内柴油燃烧的过程可以认为是等压过程。物质三态间的转变，大气中进行的化学反应过程，都是等压过程。

等压过程在 p - V 图上对应于一条平行于 V 轴的直线，其方程为：

$$p=p_0 \text{ (常量)}$$

由物态方程 $pV=nRT$ 可得理想气体在等压过程中体积与温度的关系为 $V_1/V_2=T_1/T_2$ (盖-吕萨克定律)

n mol 的气体，在等压过程中温度由 T_1 变化至 T_2 ，吸收的热量和增加的内能分别为

$$Q = n \int_{T_1}^{T_2} C_{p,m} dT, \Delta U = n \int_{T_1}^{T_2} C_{v,m} dT$$

对于理想气体， $C_{v,m}$ 和 $C_{p,m}$ 近似为常量，故有

$$Q = nC_{p,m}(T_2 - T_1),$$

$$U = nC_{v,m}(T_2 - T_1)$$

由热力学第一定律 $Q = U + W$ 可得在等压过程中系统对外所做的功

$$\begin{aligned} W &= Q - U = nC_{p,m}(T_2 - T_1) - nC_{v,m}(T_2 - T_1) \\ &= nR(T_2 - T_1) \end{aligned}$$

这个功也可由功的定义直接求得：

$$\begin{aligned} W &= \int_{V_1}^{V_2} p dV = p(V_2 - V_1) \\ &= nR(T_2 - T_1) \end{aligned}$$

等温过程(isothermal process)

系统的温度始终保持不变的变化过程。如果过程进行得很慢，使热力学系统能充分地、与周围的恒温热源交换热量，就可以保证过程在恒温下进行。

等温过程在 p - V 图上对应于一条直角双曲线(图 1-12-5)，其方程为

$$pV = \text{常量} (\text{玻意耳定律}) .$$

由于理想气体的内能仅是温度的函数，因而在等温过程中理想气体的内能保持不变，即 $\Delta U = 0$ ，由热力学第一定律 $Q = \Delta U + W$ 可知，在等温过程中

$$Q = W$$

这表明在等温膨胀过程中，系统吸收的热量全部转化为对外界所做的功；在等温压缩过程中，外界对系统所做的功全部转化为系统对外所放出的热量。

在等温过程中， n mol 理想气体由状态 1(p_1, V_1) 变化到状态 2(p_2, V_2) 系统对外界所做的功为

$$\begin{aligned} W &= \int_{V_1}^{V_2} p dV = nRT \int_{V_1}^{V_2} \frac{dV}{V} \\ &= nRT \ln \frac{V_2}{V_1} \end{aligned}$$

其结果在数值上等于图 1-12-5 中等温线下阴影部分的面积。由于在等温过程中 $p_1 V_1 = p_2 V_2$ ，上式的功也可表示为

$$W = nRT \ln \frac{p_1}{p_2}$$

绝热过程(adiabatic process)

系统与外界无热量交换的变化过程。

绝热过程是一种理想化过程，实际中并不存在。在实际中，如果器壁导热性较差，过程进行得又很快，以致来不及和外界进行显著的热量交换，这种过程就可以近似地看作是绝热过程。例如，汽油机压缩冲程和做功冲程中，气缸内燃气的变化过程就可以近似地看作绝热过程。

对于准静态绝热过程有

$$pV^\gamma = \text{常量}$$

它是法国物理学家泊松(S.D.Poisson)于 1823 年导出的，故也称泊松公式。

由上面的公式画出的 P-V 曲线，称为理想气体的绝热线(图 1-12-6)。把绝热线与等温线比较可以发现，前者比后者陡。

利用理想气体物态方程还可以将上面的绝热方程变为如下的两种形式
注意三个方程中的常量并不相等。

由于绝热过程中系统与外界没有热交换，即 $Q=0$ ，根据热力学第一定律 $Q = \Delta U + W$ 有 $\Delta U + W = 0$ ， $W = -\Delta U$ ，即在绝热过程

中系统对外界所做的功等于系统内能的减少。用 T_1 和 T_2 分别表示初态和末态的温度，则 n mol 理想气体在绝热过程中对外界所做的功为

$$\begin{aligned} W &= -\Delta U = nC_{v,m}(T_1 - T_2) \\ &= \frac{nR}{\gamma - 1}(T_1 - T_2) \end{aligned}$$

如果用体积和压强来表示这个功，则有

$$W = \int_{V_1}^{V_2} p dV = \frac{1}{\gamma - 1}(p_1 V_1 - p_2 V_2)$$

式中 p_1 和 V_1 表示初态的压强和体积， p_2 和 V_2 表示末态的压强和体积。

多方过程(polytropic process)

理想气体的态参量 p 和 V 在变化过程中满足下述关系

$$pV^n = \text{常量}$$

式中 n 为一常数，则这个过程称为多方过程，常数 n 称为多方指数。它可以取 $-\infty \sim +\infty$ 之间的任何值。

等压、等温、绝热和等体四种过程都是多方过程的特例。多方指数 n 取某些特定值时，即可得到上述四种特定过程的方程(见下表)：

理想气体的几种特殊过程

n 值	过程方程	过程名称
0	$p = \text{常量}$	等压过程
1	$pV = \text{常量}$	等温过程
	$PV^\gamma = \text{常量}$	绝热过程
$\pm\infty$	$V = \text{常量}$	等体过程

多方过程各种特例的 p - V 曲线如图 1-12-7 所示。多方过程在热力学工程中有重要的意义。工作气体在实际过程中与外界的热交换既不是理想的良好，又不是完全绝热，而是介于等温与绝热之间的过程，即多方指数 n 在 $1 < n < \gamma$ 的范围内的多方过程。

多方过程中功的表达式只需将绝热过程中功的表达式中的 γ 换为 n 即可。即在多方过程中，系统对外界所做的功为

$$\begin{aligned} W &= \frac{1}{n-1}(p_1 V_1 - p_2 V_2) \\ &= \frac{nR}{n-1}(T_1 - T_2) \end{aligned}$$

内能的增量 $\Delta U = nC_{v,m}(T_2 - T_1)$ ，由外界吸收的热量 $Q = \Delta U + W$ ，由

于 $C_{v,m} = \frac{R}{\gamma-1}$ ，所以

$$Q = nC_{v,m} \left(\frac{\gamma-n}{1-n} \right) (T_2 - T_1)$$

多方过程的摩尔热容为

$$C_n = C_{v,m} \frac{\gamma-n}{1-n}$$

n 取不同值时气体的摩尔热容也不同。当 $1 < n < \gamma$ 时， C_n 为负值。在这种情况下气体膨胀对外所做的功大于它所吸收的热量，这部分能量来自系统本身内能的减少，因而温度降低， C_n 就为负值。

循环过程(cyclic process)

系统从某一状态出发，经过任意的一系列连续的状态变化，最后又回到原来状态的过程。

如果循环过程的每个分过程都是准静态过程，则整个过程可以用闭合的 p - V 曲线来表示。图 1-12-8 表示系统由状态 A 准静态地沿 ACB 过程变化至状态 B，然后又由状态 B 准静态地沿 BDA 过程变化，回到原来的状态 A，这样系统就经历了一个循环。在 p - V 图上，如果循环过程沿顺时针方向进行，则称该循环为正循环(如图中所示的循环)，反之称为逆循环。

对于正循环，系统对外界所做功为正，数值等于整个循环曲线所包围的面积(图中斜线部分)；对于逆循环，外界对系统所做的功为正，数值也等于整个循环曲线所包围的面积。

系统经过一个循环过程后，其内能变化 $U=0$ 。由热力学第一定律可知，对于正循环，由于系统对外界做正功，所以整个循环中，系统吸收的热量 Q_1 一定大于放出的热量 Q_2 ，二者之差等于系统对外所做的功；对于逆循环，由于外界对系统做正功，所以整个循环中，系统放出的热量一定大于吸收的热量，二者之差等于外界对系统所做的功。

热机的工作过程就是个正循环过程。工作物质从高温热源吸收 Q_1 的热量，一部分用来对外做功，一部分在低温热源处放掉，然后回到原来的状态。热机效率

$$\eta = \frac{W}{Q_1} = \frac{Q_1 - Q_2}{Q_1} = 1 - \frac{Q_2}{Q_1}$$

制冷机的工作过程是逆循环过程。工作物质从低温热源吸取 Q_2 的热量，连同外界对工作物质做功 W 等价的热量一起放给高温热源，使低温热源的温度更低。制冷机的制冷效能用制冷系数 表示

$$\varepsilon = \frac{Q_2}{W} = \frac{Q_2}{Q_1 - Q_2},$$

式中 Q_1 为在一个循环过程中制冷机释放给外界高温热源的热量。

卡诺循环(carnot cycle)

由两个等温过程和两个绝热过程组成的理想循环，它只与两个恒温热源交换能量，即只从一个高温热源吸热，只向一个低温热源放热。

对于理想气体在准静态过程中的卡诺循环，其 $p-V$ 曲线如图 1-12-9 所示。AB 段表示气体由状态 A 等温膨胀至状态 B，这过程中气体从高温热源吸取 Q_1 的热量；BC 段表示气体由状态 B 绝热膨胀至状态 C，温度由 T_1 降到 T_2 ；CD 段表示气体由状态 C 等温压缩至状态 D，气体向低温热源释放 Q_2 的热量；DA 段表示气体由状态 D 绝热压缩回原状态 A，温度由 T_2 又升到 T_1 。这里 T_1 和 T_2 分别为高温热源和低温热源的温度。

卡诺循环的效率

$$\eta = \frac{Q_1 - Q_2}{Q_1} = 1 - \frac{T_2}{T_1}$$

由此式可见，理想气体准静态过程卡诺循环的效率只由高温热源和低温热源的温度所决定，与工作物质无关。卡诺循环的研究为提高热机的效率指出了努力的方向。即尽可能地提高高温热源的温度，降低低温热源的温度。逆卡诺循环的致冷系数

$$\varepsilon = \frac{Q_2}{Q_1 - Q_2} = \frac{T_2}{T_1 - T_2}$$

热力学第二定律(second law of thermodynamics)

判定与热现象有关的过程进行方向的定律，有多种表述形式，两种最常见的表述形式是：

开尔文表述：不可能从单一热源吸热，使之完全变成有用的功，而不引起其他变化。

克劳修斯表述：不可能把热量从低温物体传到高温物体，而不引起其他变化。

上面两种表述中，都提到了“不引起其他变化”，这是很重要的条件。因为，如果允许引起其他变化，就可以从单一热源吸热，使之完全变成有用的功；也可以使热量从低温物体传到高温物体。例如，理想气体的等温膨胀就是从单一热源吸热，并完全变成对外所作的功。但是它引起了气体体积膨胀的变化；致冷机就可以使热量从低温物体传到高温物体，但是它引起了做功的变化。

热力学第二定律的上述两种说法是等效的，如果其中一种表述不成立，可以证明另一种表述也不成立。热力学第二定律还有许多不同的说法(如效率为 100%的热机不可能实现)，上述两种说法只是各选择了一种比较典型的热现象加以说明的。其实质是一切与热现象有关的实际过程都是不可逆的(参见“可逆过程和不可逆过程”)。

第二种永动机(perpetual motion machine of the second kind)

指从单一热源吸热，使之完全变成有用的功而不产生其他影响的机器。例如，历史上曾有人试图设计一种热机，它能从海洋或空气中吸取热量，并且完全转变为功，不向低温热源放热。由于海洋和空气中贮藏着极丰富的内能(有人计算，只要海水的温度下降 0.01K，它放出的热量就可以使全世界的机器开动十几个世纪)，这种机器是一种永动机。这种永动机并不违背热力学第一定律，但是却违背热力学第二定律。因而热力学第二定律也可表述为：第二种永动机是不可能制成的。

可逆过程和不可逆过程 (reversible process and irreversible process)

如果系统经历某一变化过程后，还可以沿着与原来相反的过程返回原状态，同时消除对外界产生的一切影响，这样的过程称为可逆过程；反之，如果系统经历某一变化过程后，不能无任何影响地返回原状态，这样的过程就称为不可逆过程

无摩擦的准静态过程是可逆过程。只要令过程直接反向进行，当系统回到初始状态时，外界也就同时恢复原状。但是实际中，无摩擦的准静态过程不存在，因而可逆过程也就不存在，只是有些过程可近似地看作可逆过程，所以可逆过程仍有其理论和实际上的意义。

热力学第二定律的开尔文表述实质是说，功变热是一个不可逆过程；克劳修斯表述实质是说，热传导是一个不可逆过程。两种说法是等效的。其实，一切与热现象有关的过程都是不可逆的，并且都是相互关联的，由其中一过程的不可逆性就可以推断出另一过程的不可逆性。例如，可以由功变热过程的不可逆性推断出气体自由膨胀的不可逆性等等。所以热力学第二定律的说法可以有多种形式。

卡诺定理(carnot theorem)

阐明热机效率的定理，其内容分两部分：

(1)在相同的高温热源和相同的低温热源之间工作的一切可逆热机，其效率都相等，与工作物质无关；

(2)在相同的高温热源和相同的低温热源之间工作的一切不可逆热机，其效率都不可能大于可逆热机的效率。

以上两部分结论都可以用热力学第二定律证明。

由于定理中条件的限制，所说的热机必然是卡诺热机，其循环是由两条等温线和两条绝热线所组成的卡诺循环。

由卡诺定理还可以证明，任何可逆热机的效率都不可能大于工作于其最高温度 T_1 和最低温度 T_2 之间的可逆卡诺热机的效率。也就是说， $\eta =$

$\frac{T_1 - T_2}{T_1}$ 是任何热机效率的最高限。

热力学温标(thermodynamic scale of temperature)

一种不依赖于物质特性的温标，单位为开(K)。

由卡诺定理可以证明，如果温标选择得合适，可逆卡诺热机两个热源放、吸热之比 Q_2/Q_1 等于两个热源温度之比 T_2/T_1 。即

$$\frac{Q_2}{Q_1} = \frac{T_2}{T_1}$$

这实质上是取热量作为测温特性。由于 Q_2/Q_1 ，与工作物质的特性无关，所以引进的温标显然也不依赖于任何具体物质的特性，而是一种绝对温标，称为热力学温标，有时也称作热力学绝对温标。

上式只是定义了两个温度的比值，要完全确定一个温标，还需要确定一个特定的温度。1954 年国际计量大会规定水的三相点的热力学温度为 273.16K，这样，热力学温标就完全确定了。

热力学温标和理想气体温标是一致的。对于这两种温标，可逆卡诺热机中低、高温热源温度之比，都等于热机在低温热源放出的热量与在高温热源吸取的热量之比，并且二者都规定水的三相点的温度值为 273.16K。所以说二者是一致的。

热力学温标是在热力学第二定律的基础上建立的，由于它不依赖测温物质的特性，所以是科学的、严谨的。可以用理想气体温度计来测定热力学温度，但是由于实际气体都与理想气体有些偏差，所以用实际气体温度计测出的温度值，还需要加以修正。

熵(entropy)

由卡诺定理可以证明,对于可逆过程有

$$\oint \frac{\delta Q}{T} = 0, \quad (1)$$

式中 δQ 为系统从温度为 T 的热源所吸取的热量, $\frac{\delta Q}{T}$ 称为热温比, 上式称为克劳修斯等式。

由克劳修斯等式可以证明, 系统由状态A经过不同的可逆过程(如图1-12-)10中1、2两过程到状态B, 积分 $\int_A^B \frac{\delta Q}{T}$ 的值相等。这说明积分 $\int_A^B \frac{\delta Q}{T}$ 与可逆过程的路径无关, 故可引入一个态函数, 用 S 表示, 称之为熵, 它的定义是

$$S_B - S_A = \int_A^B \frac{\delta Q}{T} \quad (2)$$

即系统由状态A变到状态B时熵的增量等于由状态A经任一可逆过程变到状态B时热温比的积分。

上式给出的是初、末两平衡态间熵的差值, S_B 和 S_A 中还可含有一个相同的任意常量。但是对于实际问题这并不重要, 重要的是两态间熵的变化。

(2)式可以称为可逆过程的热力学第二定律的积分形式。对于无穷小可逆过程有

$$dS = \frac{\delta Q}{T} \quad (3)$$

(3)式称为可逆过程的热力学第二定律的微分形式。

对于可由压强和体积确定的简单系统, 由热力学第一定律的微分形式 $dU = Q + W$, 体积功 $W = -pdV$ 和(3)式可得

$$dU = TdS - pdV \quad (4)$$

(4)式综合了热力学第一定律和第二定律的结果, 是热力学理论的基本方程。

熵增加原理(Principle of entropy increase)

判定过程的性质和方向的定理，其内容是：系统经绝热过程由初态变化至终态，它的熵永不减少，熵在可逆绝热过程中不变，在不可逆绝热过程中增加。其数学表达式为

$$S_B - S_A \geq 0,$$

式中 S_B 、 S_A 分别表示终态和初态时的熵。等号适用于可逆过程，不等号适用于不可逆过程。

熵增加原理可以看作是热力学第二定律的数学表述。由它可知，在绝热系统(或孤立系统)中，不可逆过程总是朝着熵增加的方向进行的。还可以由此定理判定一个绝热过程是否可逆，熵不变，过程可逆；反之不可逆。

由于孤立系统中所发生的过程必然是绝热的，所以孤立系统的熵永不减少。

熵增加原理是对绝热或孤立系统中进行的过程而言的。对于任意系统的任意过程，熵既可能增加，也可能减少或不变，这要看过程吸、放热的情况而定。例如，理想气体被可逆等温压缩，其熵就减小。

用统计的观点来说，熵是系统中微观粒子无规则运动的混乱程度的量度。熵增加原理说明，孤立系统中发生的不可逆过程总是朝着混乱程度增加的方向进行。

热力学第二定律的统计意义(statistical sense of the second law)

热力学第二定律指出：一切与热现象有关的宏观过程都是不可逆的。这是因为，一个不受外界影响的“孤立系统”，其内部发生的过程，总是由概率小的状态向概率大的状态进行；由对应微观状态数目少的宏观状态向对应微观状态数目多的宏观状态进行。这就是热力学第二定律的统计意义。

以气体的自由膨胀过程为例：假设有 n 个气体分子盛在中间有挡板的容器的 A 半部分，B 半部分为真空(图 1-12-11 甲)。如果抽去中间的挡板，分子将会由 A 自由地向 B 膨胀，那么由于分子运动的无规则性，有没有可能抽去挡板后的某一瞬间，分子又都运动到原来的状态呢(图 1-12-11 乙)？根据统计理论的计算表明，抽去挡板后，在这两半部分中分子可能出现的总的微观状态数为 2^n (其中分子分布均匀的宏观状态对应的微观状态数最多)，恢复到原来的微观状态的概率为 $1/2^n$ 。若 $n=1$ ，则分子出现在 A 半部分和 B 半部分的概率各为 $1/2$ ，因此过程是可逆的。但是实际中气体内的分子数目是非常大的。例如，标准状况下， 1m^3 容器内的空气 $n \approx 3 \times 10^{25}$ ，那么 $1/2^n$ 将是一个无限小的数字。因此可以说气体在无外界条件的影响下完全恢复到原来状态的可能性是不存在的。这就是气体自由膨胀这一不可逆过程的统计意义。其他热现象过程的不可逆性，都可以用统计的观点揭示其实质。

利用统计理论可以证明，某一宏观状态的熵 S 和它所对应的微观状态数 Ω 间存在如下的关系

$$S = k \ln \Omega$$

k 为玻耳兹曼常量，上式称为玻耳兹曼关系。

由玻耳兹曼关系可以看出熵增加原理的微观实质是：孤立系统内发生的过程，总是从微观状态数少的宏观状态过渡到微观状态数多的宏观状态。

热寂(heat death)

热寂又称热死。自 1854 年克劳修斯引入“熵”的概念，重新表述了热力学第二定律(熵增加原理)后，就有许多颇有名望的科学家(如亥姆霍兹及克劳修斯本人)提出了宇宙终将进入永恒的静止状态，即热死状态。他们根据熵增加原理提出，宇宙中随时都在进行着不可逆过程，这些不可逆过程使宇宙的熵不断增加，将来总有一天，宇宙的熵达到极大值，于是整个宇宙达到平衡态。即，宇宙处于“热寂”状态。

热寂说一出现即遭到了社会各界的强烈批判。当时的批判观点中有两家之言比较有影响。一个是 1827 年玻耳兹曼提出的“涨落说”，即热平衡态总伴随着涨落现象，而涨落是不遵从热力学第二定律的。玻耳兹曼认为，在宇宙的某些局部可以偶然地出现巨大的涨落，这些地方熵不但不增加，还有可能在减少。另一个是恩格斯在《自然辩证法》中阐述的：“散射到太空中的热一定有可能以某种方式——阐明这种方式是以后自然科学的课题——转变为另一种运动形式，在这种运动形式中它能够重新集结和活动起来”。除了上述的两家之言外，还有其他的一些批判观点。如认为宇宙是有限的、不是封闭的，因而不能把热力学第二定律推广到全宇宙。上述批判，总感到说服力不强，有的批判其大前提是否成立，还有疑问，如宇宙是否无限的问题，目前尚不能做出科学的结论。

现在有许多学者认为“热寂”的说法在“大爆炸宇宙模型”面前不攻自破。大爆炸宇宙论认为，宇宙不是静态的，而是不断膨胀的。对于每一个静态体系，熵有一个可能达到的固定极大值 S_{\max} ；但对于膨胀着的系统，每一瞬时熵可能达到的极大值 S_{\max} 是与时俱增的，如果膨胀进行得足够快，实际熵值 S 的增大落后于 S_{\max} 的增长，二者的差距愈来愈大，系统的熵虽然不断增加，但它与平衡态却愈来愈远。因此，宇宙演化的整体图景恰与“热寂说”所预言的相反：不是由非平衡态逐渐向平衡态演化，而是从一开始的温度均匀、物质分布均匀的高温热平衡状态逐渐演化到现在的温度非均匀、物质分布非均匀有结构的非平衡态。

热力学第三定律(third law of thermodynamics)

研究低温下物质的性质的热力学基本定律，通常有两种表述：

1. 当温度趋近于绝对零度时，物质状态的任何变化都不能引起熵的改变，即

$$\lim_{T \rightarrow 0} \Delta S = 0$$

2. 不可能用有限的步骤使物体的温度达到绝对零度。

表述 1 也常称为能斯脱定理，它是由德国物理学家能斯脱 (W.F.H.Nernst, 1864 ~ 1941) 在研究大量的低温下化学反应的实验基础上，于 1906 年提出的。

能氏定理说明，在绝对零度，系统的熵与状态参量无关，不再是态函数。我们知道熵是微观粒子运动状态混乱程度的量度，温度越低，粒子运动越有序，其熵值 S 也就越小。当温度为绝对零度时，熵值也应最小。1911 年，普朗克提出将绝对零度时的熵定为零，即

$$\lim_{T \rightarrow 0} S = 0$$

这样确定的熵称为绝对熵。

普朗克的这一假定与量子统计物理中对熵的计算相一致。绝对零度时，系统处于一个能量最小、完全有序的状态，这种状态占有的热力学几率 $\omega = 1$ 。根据玻耳兹曼公式

$$S = k \ln \omega$$

有绝对零度时，系统的熵

$$S_0 = 0$$

表述 2 又常称为绝对零度达不到原理。绝对零度达不到原理可由能氏定理推出；同样，能氏定理也可由绝对零度达不到原理推出。热力学第三定律虽然说明了绝对零度不可能达到，但它并不阻止人们尽可能地去设法接近这一温度。当然，温度越低，进一步降低温度就越困难。下表列出了近百年来向绝对零度逼近的纪录。

向绝对零度逼近的纪录

时间	科学家	国家	方法	温度 t/K
1895	Linde	德国	首次获得液化空气	90
1898	Dewar	英国	首次液化氢	20.4
1908	Onnes	荷兰	首次液化氦	4.2
1919	Onnes	荷兰	液氦减压	1.0
1932	Keeson	荷兰	用油扩散泵液氦减压	0.71
1933	Giauqu	美国	顺磁盐绝热去磁	0.27
1935	deHass	荷兰	同上方法	0.0044
1956	Kurti 和 Simon	英国	首次用核去磁	2×10^{-5}
1963	Kurti 等	英国	同上方法	1.2×10^{-6}
1979	Ehnholn	荷兰	二级核去磁	5×10^{-8}

热力学第三定律的建立为绝对熵的计算提供了依据，在熵和自由能的计算及制表工作以及化学反应平衡计算中发挥了重大作用；对低温下的实验研究起了重要的指导作用。由该定律推得的许多重要结论(如 $T \rightarrow 0$ 时，

压缩系数 $K = 0$ ，相对压力系数 $\alpha_p = 0$ ），都由实验得到了很好的证明。这也间接地说明了该定律的正确性。

蒸汽机(steam boiler)

利用蒸汽在汽缸内膨胀推动活塞对外做功的动力装置。

蒸汽机属于外燃机，即燃料的燃烧是在汽缸外的锅炉内进行的。燃料在锅炉的燃烧室内燃烧并使锅炉中的水变成高温高压的水蒸气，蒸汽经过一定的管道进入蒸汽机的汽缸内并在汽缸内膨胀推动活塞运动。活塞的往复运动通过连杆、曲柄变成飞轮的转动(如图 1-12-12)。

蒸汽机的工作过程可用兰金(W. J. M. Rankine, 1820 ~ 1872)循环来描述。

1. 进汽

进汽前缸内汽体体积为 V_0 ，压强为 p_0 ，对应于图 1-12-13 中的 A 点。由锅炉来的水蒸气经过一定的管道进入汽缸，缸内压强突然增大到 P_1 ，体积变化极小，对应于图中的 B 点。此后蒸汽不断进入汽缸，缸内蒸汽等压膨胀至 C 点。设此过程蒸汽体积由 V_0 变化至 V_1 ，则蒸汽所做功为

$$W_1 = p_1(V_1 - V_0)$$

2. 绝热膨胀

进汽结束后，蒸汽作绝热膨胀，过程沿绝热线 CD 进行，最后到达 D 点。设此时蒸汽体积为 V_2 ，并将蒸汽近似地看作理想气体，则此过程中蒸汽做功为

$$W_2 = \frac{P_1 V_1}{\gamma - 1} \left[1 - \left(\frac{V_1}{V_2} \right)^{\gamma - 1} \right]$$

3. 排汽

绝热膨胀后，排汽门打开，蒸汽压强突然降低，蒸汽沿 DE 过程等体降压，而后沿 EA 等压排汽。此过程中，蒸汽对外做功为

$$W_3 = -p_0(V_2 - V_0)$$

至此，蒸汽机完成了一个循环。在这一循环中，蒸汽机对外做的总功为

$$W = W_1 + W_2 + W_3$$

数值上等于图 1-12-13 中循环曲线所包围的面积。这种循环称为理想兰金循环，实际中的循环与理想兰金循环有些差别，对外做的功比这里的 W 要小。

蒸汽机是热机中最早出现的一种，它虽然笨重，效率也低，但是由于它所使用的燃料价格比较便宜，贮量比较丰富。所以它曾对工业、交通和运输业等做出了巨大的贡献。由于科学技术的不断发展，新的热机不断出现，蒸汽机已在不断地被内燃机、蒸汽轮机等取代。

汽轮机(steam turbine)

一种旋转式蒸汽动力装置，属于外燃机。

在蒸汽机中，活塞的往复运动要变成机轴的转动，要想使这种转动比较均匀，就必须在机轴上安装重大的飞轮，这样蒸汽机就十分笨重。

人们在利用蒸汽动力的过程中受水轮机的启发，发明了汽轮机，它克服了蒸汽机的上述缺点。图 1-12-14、1-12-15 是汽轮机工作的示意图。高压蒸汽通过喷嘴时，快速膨胀，流速增大，蒸汽的内能转换为汽流的动能；离开喷嘴的高速气流冲击叶片使叶轮旋转做功。

根据能量转换时工作原理的不同，汽轮机分冲击式和反击式两种类型。

1. 冲击式汽轮机 蒸汽的内能转换为动能的过程全部在喷嘴中实现，再把这种动能传递给叶轮。

2. 反击式汽轮机 蒸汽的内能不仅在喷嘴中转换为动能，而且在蒸汽流经叶片间的流道时，其压力仍继续降低，相对速度继续增大，产生推动叶轮转动的反作用力。

为了充分地利用蒸汽的内能，提高汽轮机的工作效率，汽轮机多采用多级式。即几个叶轮联在一起，第一级叶轮出来的蒸汽，再通过第二级喷嘴推动第二级叶轮，然后再通过第三级喷嘴推动第三级叶轮……依此类推。

汽轮机除设备及做功的方式与蒸汽机不同外，其工作原理都相同，都可用兰金循环来描述。

汽轮机与蒸汽机比较有如下优点：

比同功率的蒸汽机体积小，质量小；效率高，约为 25~30%；转速大，可直接带动机器，不需要任何变速装置；废汽凝结的水污染小。由于以上优点，现代火力发电厂中都用汽轮机来带动发电机。汽轮机同时还广泛应用于工矿和运输部门。

内燃机(internal-combustion engine)

燃料在气缸或燃烧室内燃烧并将燃烧气体的内能转换为机械能的动力装置。

常见的汽油机和柴油机都属于内燃机。内燃机按点火的方式不同,可分为点燃式与压缩式两类,汽油机属前一类,柴油机属后一类。下面以这两种内燃机为例,说明内燃机中比较典型的两种循环过程。

1. 奥托循环

图 1-12-16 是汽油机的简单示意图。汽油机工作时分四个冲程(图 1-12-17)。

吸气冲程进气门打开,活塞由气缸最左端向右端运动,空气和汽油混合气体由进气门进入气缸,并做等压膨胀,等到活塞运动到最右端,吸气冲程结束。此过程相当于图 1-12-17 中的 AB 过程。

压缩冲程吸气冲程结束后,两个气门都关闭,活塞由最右端运动到最左端,气体被绝热地压缩,相当于 BC 过程。

做功冲程压缩冲程刚一结束的瞬间,缸内的火花塞 N 点火,引燃缸内压缩后的可燃混合气体。由于燃烧极其迅速,活塞位于最左端几乎未发生变化,因此燃烧过程可认为是在等体积情况下进行,这相当于 CD 过程。燃烧后,缸内压强很高,然后气体在气缸内绝热膨胀推动活塞由左端向右端运动对外做功。这相当于图中 DE 过程。

排气冲程排气门打开,缸内压强突然降低,相当于图中 EB 过程。接着活塞由最右端运动到最左端,废气被排出,这相当于图中 BA 过程。以后汽油机的工作过程将重复这四个过程。

汽油机的这种循环过程称为奥托循环。奥托循环的效率为

$$\eta = 1 - \frac{1}{\left(\frac{V_2}{V_1}\right)^{\gamma-1}}$$

$\frac{V_2}{V_1}$ 称为压缩比, γ 是比热容比。显然想办法提高压缩比可以提高奥托循环的效率,但是也不能无限地提高,以免引起爆震。目前汽油机的压缩比一般在 6.5—9 之间。奥托循环也是一种理想循环,实际中应该将绝热过程按多方过程处理。

奥托机的优点是热量损失少,效率高,轻便,广泛应用于汽车工业和航空事业;缺点是燃料较昂贵。

2. 狄塞尔循环

柴油机的工作过程与汽油机大体相仿,只是柴油机靠增大压缩比使喷入气缸内的柴油自燃。柴油机工作的循环过程如图 1-12-18 所示,这种循环称为狄塞尔循环,其效率

$$\eta = 1 - \frac{\left(\frac{V_3}{V_2}\right)^{\gamma-1}}{\gamma \left(\frac{V_1}{V_2}\right)^{\gamma-1} \left(\frac{V_3}{V_2} - 1\right)}$$

和奥托循环一样，压缩比 $\left(\frac{V_1}{V_2}\right)$ 越大，其效率越大。

柴油机的特点是气缸长，压缩比大，不用电火花点火。由于压缩比大，气缸要做得牢固，因而也就笨重，但是它功率大，燃料价格低，多用在重型卡车、拖拉机和轮船上。

燃气轮机(gas turbine)

一种以空气和燃气为工质的旋转式动力装置。

内燃机虽然没有像蒸汽机中那样庞大的锅炉设备，但是它的活塞往复式的运动必须转换为机轴的转动，这就增加了这种转换的设备，而这种转换设备不可避免地限制了机轴的转速。因为转速过大，这些转换设备就会出故障。如果想省去这些设备，就应该考虑像汽轮机一样，燃气燃烧膨胀通过喷嘴推动叶轮转动，使燃料燃烧后的内能直接转换为机轴的转动能。这就是燃气轮机的原理。

可见，燃气轮机兼备内燃机的“内燃”和汽轮机的“旋转”两个特点，因此，可以制成高速大功率机组。它具有同功率下，体积小、重量轻、启停和增减负荷快，所需冷却水少等优点。但是由于燃气轮机的部件是在高温下连续工作，因此进入第一排叶片的燃气温度要受到金属材料耐热强度的限制。这使它的工作循环的最高温度偏低，所以它的热效率远低于内燃机。采取回热等措施虽然可以提高其热效率，却又增加了设备，抵消了上述的一些优点。要想提高燃气轮机的热效率，就应提高金属的耐温性，提高冷却喷管、叶片的技术。近年来，人们在这些方面已做了不少的努力，取得了很大的成绩。

主要参考资料

1. 顾建中。热学教程。第2版(修订版)。北京：人民教育出版社，1981。
2. 李椿等。热学。第1版。北京：人民教育出版社，1979。
3. 汪志诚。热力学·统计物理。第1版。北京：人民教育出版社，1980。
4. 钟云霄。热力学与统计物理。第1版。北京：科学出版社，1988。
5. 中国大百科全书出版社编辑部。中国大百科全书·物理学。第1版。北京：中国大百科全书出版社，1987。
6. 姜国渭，张素德。热学。第1版。石家庄：河北人民出版社，1984。
7. 马本等。热力学与统计物理学。第1版。北京：人民教育出版社，1980。
8. 王竹溪。热力学。第1版。北京：高等教育出版社，1955。
9. 赵凯华。定性与半定量物理学。第1版。北京：高等教育出版社，1991。
10. 蒋汉文。热工学。第1版。北京：高等教育出版社，1984。
11. 沈维道。工程热力学。第1版。北京：人民教育出版社，1979。
12. 赵凯华。挖掘与开拓——关于在物理教学中引入物理学史的几点看法。物理，1991(4)：243~245

十三、固体和液体的性质

晶体(crystal)

固体可分为晶体和非晶体两类。晶体中粒子(原子、离子或分子)在长距离上具有周期性的规则排列,表现为长程有序。晶体的微观结构决定晶体具有下述宏观性质。

(1)晶体具有规则的几何外形。如图 1-13-1 和图 1-13-2 所示,晶体的外形都是由若干平面围成的凸多面体。围成多面体的平面叫做晶面。同一种晶体,不论外形如何不同,两个对应晶面间的夹角是恒定不变的。如 NaCl 晶体,各晶面间的夹角都是 90° 。对石英晶体, a、b 面间的夹角总是 $141^\circ 47'$, b、c 面间的夹角总是 $120^\circ 00'$, a、c 面间的夹角总是 $113^\circ 08'$ 。

(2)晶体具有各向异性的特点。晶体的物理性质,如力学性质(硬度、弹性模量),热学性质(热胀系数、导热系数),电学性质(介电常数、电阻率),光学性质(折射率、吸收系数),沿不同方向各不相同。

(3)晶体具有一定的熔点。

晶体有单晶体和多晶体之分。单晶体是粒子沿空间的三个方向整整齐齐堆积成的固体;多晶体是由许多取向不同的单晶体颗粒(晶粒)组成的固体。多晶体中每个晶粒内部有严格的周期性,但晶粒之间没有周期性联系。

固体的微观结构(solid microstructure)

在固体中粒子之间的作用较强，粒子被束缚在平衡位置附近做微小的振动。

固体可分为晶体和非晶态固体两大类。在晶体中粒子在长距离范围内具有周期性的规则排列，即表现为长程有序。晶体的结构决定晶体具有确定的熔点(参见“熔解和凝固”)，宏观性质一般呈各向异性。非晶态固体也称作非晶体或无定形固体，非晶体中的粒子在长距离上没有规则排列，长程有序受到破坏，但具有短程有序的特点，即粒子与邻近其他粒子之间相对地有近似规则的排列。非晶体的宏观性质呈各向同性；没有确定的熔点，温度升高，逐渐软化，流动性随之增加。

晶体的结合力(crystal binding force)

晶体中粒子之间的相互作用力，称为结合力。按照结合力的性质，晶体可分为几种基本结合形式。

(1) 离子晶体

离子晶体又称极性晶体，构成这种晶体的基本单元是离子，晶体的结合是靠正负离子之间的库仑力，形成所谓离子键。最典型的离子晶体是碱金属元素 Li、Na、K、Rb、Cs 和卤族元素 F、Cl、Br、I 之间形成的化合物如 NaCl 晶体是以 Na^+ 和 Cl^- 为单元结合成的离子晶体，正负离子交错地排列在晶体的格点上。

离子晶体中没有自由电子，是热和电的不良导体。但在高温下可以离子导电。离子键的作用较强，离子晶体的硬度大，熔点高。

(2) 共价晶体

共价晶体又称原子晶体，构成这种晶体的基本单元是原子，晶体的结合是靠两个原子各贡献一个电子，形成两原子的共有电子而产生的结合力，这种结合力称为共价键。原子分布在点阵的格点上。金刚石(C)是典型的共价晶体，半导体材料锗(Ge)和硅(Si)也是共价晶体。

共价键的作用较强，所以共价晶体硬度大，熔点高，且挥发性低。

(3) 金属晶体

金属晶体简称金属，其中原子失去部分或全部电子而成为正离子，正离子排列在点阵的格点上，脱离原子的电子为全体正离子所共有，自由地在点阵内运动，称为自由电子。正离子与自由电子之间的作用力使各粒子结合在一起，这种结合力称为金属键。

金属中存在自由电子，因而金属有良好的导电性和导热性。金属键的作用可以很强，因而金属具有高的熔点和高的硬度。

(4) 分子晶体

构成分子晶体的基本单元是分子，分子保持它原来的结构，排列在点阵的格点上。分子之间的相互作用力，称为范德瓦耳斯力。分子晶体靠范德瓦耳斯力结合在一起，这种结合力称为范德瓦耳斯键。大部分有机化合物晶体，惰性气体元素在低温下形成的晶体，都是分子晶体。

范德瓦耳斯键的作用很弱，所以分子晶体的硬度小，熔点低，且易于挥发。

上述四种结合是晶体的基本结合形式，实际晶体的结合具有复杂的性质，不仅一种晶体可以兼有几种结合形式，而且可以具有某两种结合之间的过渡性质。

晶体的结合能(crystal binding energy)

不同的晶体，粒子间结合力的性质不同(参见“晶体的结合力”)。但是，在定性上，结合力和晶体的相互作用势能仍具有共同的普遍性质。图 1-13-3 定性地表示出结合力 f 、相互作用势能 U 随粒子间距离 r 而变化的情形。

结合力包含引力和斥力两部分。如图甲所示，两粒子相距无穷远时，结合力为零；当两粒子相距较远时，引力大于斥力，结合力表现为引力(取负值)； $r=r_0$ 时，引力等于斥力，达到平衡位置；距离比 r_0 小时斥力大于引力，结合力表现为斥力，且斥力随距离减小而迅速增大。

设两粒子之间相互作用势能为 u ，则晶体中所有粒子之间相互作用势能的总合即为晶体的相互作用势能 U 。取粒子相距无限远时势能为零，当粒子接近时，引力做功， U 下降为负值；当粒子都处于平衡位置 r_0 时， U 下降到最小值 $-U_0$ ；当晶体再被压缩时，要反抗斥力做功， U 转为增大。整个变化情况如图乙所示。

U_0 称为晶体的结合能。结合能在数值上等于把分散的粒子结合成晶体时所释放的能量，或者等于把晶体离解成分散粒子所必须供给的能量。把 1mol 晶体离解成分散粒子所供给的能量，等于 1mol 晶体的结合能，也就是升华热。结合能的大小反映出晶体结合的牢固程度。如氯化钠(离子键)的结合能为 774kJ/mol，金刚石(共价键)的结合能为 712kJ/mol，铁(金属键)的结合能为 402kJ/mol，晶体氩(范德瓦耳斯键)的结合能仅为 7.5kJ/mol。

非晶态固体(non-crystalline solid)

指非晶体或无定形固体。与晶体不同，非晶体不具有规则的几何外形，宏观性质呈各向同性，没有确定的熔点。在通常温度下，非晶体仅在保持一定形状和体积方面与晶体有共同特征。当温度升高时，非晶体逐渐变软，出现流动性。非晶体可认为是粘滞性很大的液体。

与晶体不同，非晶体中的粒子在长距离上没有周期性的规则排列，即长程有序受到破坏，但粒子与邻近其他粒子之间相对地有近似规则的排列，而与较远的粒子之间就显得完全没有规律，即只具有短程有序的特点。

天然石英(水晶)为结晶态，受热溶解后再凝固，通常就成为玻璃状非晶态固体。图 1-13-4 为石英(SiO_2)的晶体与非晶体的微观结构的比较。在石英晶体中，氧离子 O^{2-} 与硅离子 Si^{4+} 间为共价键结合，组成四面体，氧离子位于四面体的四个顶点，硅离子位于四面体中心(图甲)。石英晶体就是由这种四面体单位按一定规律堆积而成，图乙是石英晶体在某一方向的平面投影图，其中各个六角形环大小相等且周期地沿各方向重复着，表现为长程有序。图丙是非晶体石英玻璃的微观结构平面图，氧离子和硅离子只在较小范围内(几个离子间的距离)保持一定程度的类似四面体结构的规则排列，粒子仅在最邻近的区域内才保持规则性，表现为短程有序。

液体的微观结构(Liquid microstructure)

液体分子在很小的范围内(线度与分子距离同数量级)作有规则排列,表现为近程有序。液体中这种能保持规则排列的微小区域是由若干分子暂时形成的,它的边界和大小随时都在改变;这种微小区域有时会完全瓦解,有时又重新形成。液体是由大量这种微小区域构成,各微小区域的方位毫不相干,杂乱分布,不像晶体那样表现为长程有序,因此宏观上液体表现为各向同性。

与固体类似,液体中分子之间距离较小,分子间的作用力很大,与固体有相同数量级。分子的热运动主要表现为在平衡位置附近的振动。液体比固体结构松散,所以液体分子没有长期固定的平衡位置,在某一平衡位置振动一小段时间后,就转到另一平衡位置去振动,每个分子都可以在整个液体中移动。

分子在某一位置附近振动的时间长短不一,但在一定的温度和压强下,这个时间对每种液体有一平均值,称为定居时间 τ 。对液态金属,的数量级为 10^{-10} s。液体分子的振动频率与固体同数量级,为 10^{13} Hz,振动周期 τ_0 为 10^{-13} s。虽然很小,但比 τ_0 仍大千百倍。这就是说,在保持分子规则排列的微小区域有较大变动之前,分子在某一位置已振动了千百次。在通常情况下,外力作用于液体的时间比 τ 长得多。在这段时间内分子已经可以发生很大移动,即引起液体流动,这就是液体的流动性。

液晶(liquid crystals)

液晶是介于各向同性液体与晶体之间的一种物质状态。液晶在力学性质上与液体相同，如具有流动性，可形成液滴等；但在光学性质、电磁性质等方面又具有明显的各向异性，即具有晶体的某些特征。

某些高分子聚合物，加热后熔化而成的液晶，叫做热致液晶。热致液晶只在一定温度范围($T_1 \sim T_2$)内存在，当温度 $T < T_1$ 时凝固成晶体，当温度 $T > T_2$ 时成为液体。某些高分子聚合物溶解于适当的溶剂(如水、硫酸、甲苯等)里，也可以形成液晶，这种液晶叫做溶致液晶。

热致液晶的分子是长条形的，长约数纳米，宽为十分之几纳米。热致液晶依其结构不同可分为三类。(1)向列型液晶(亦称长丝状液晶)：长条形分子沿一定方向排列比较整齐，具有平行排列的倾向，如图 1-13-5 甲所示。(2)胆甾型液晶(亦称螺旋状液晶)：分子分层排列，每层内分子平行地排列，但相继各层中分子排列的取向相差一个小角度，形成各层分子排列方向依次旋转，构成螺旋状结构，如图 1-13-5 乙所示。(3)近晶型液晶(亦称碟层状液晶)：分子分层排列，每层内分子具有像晶体那样的有序程度，如图 1-13-5 丙所示。

液晶分子的排列可以受到电的控制而改变其光学性质，从而可作为显示材料，如液晶显示的手表和计算器都是采用液晶显示数码的。

液晶与生物的关系极为密切，在各种生物膜中都发现液晶结构，可以把一些重要生命现象(如衰老、癌变等)和生物细胞膜的液晶态的有序排列联系起来，为人们了解生命现象提供一条线索。

表面张力(surface tension)

在液体表面上，任意相邻的两部分液面之间，都存在相互作用的拉力，如果在液面上想象一条分界线，则分界线两侧液面间的相互作用力，其方向与液面相切并垂直于分界线，这个力叫做表面张力。表面张力使液面具有收缩的趋势。

表面张力是由于液体表面层内分子之间的相互作用不同于液体内部而产生的。

分子力由引力和斥力两部分组成。分子引力的有效作用距离 s 的数量级约为 10^{-9}m ；斥力的有效作用距离更短，可认为仅在分子相接触时才起作用。现以分子引力的有效作用距离 s 作为表面层的厚度。在表面层以下液体内部某一分子，所受周围分子的作用力，由于对称而相互抵消(图 1-13-6A)。在表面层内某一分子 b ，所受周围液体分子的引力并不对称，引力的合力指向液体内部(图 1-13-6B)；所受周围液体分子的斥力仍互相抵消(除了分子 b 极靠近上表面)。这样，在表面层内的液体分子都要受到指向液体内部的引力作用。

按照玻耳兹曼分布定律，表面层内分子在引力的作用下，其分子密度将发生连续变化，即越靠近液体表面，分子密度越小，分子间的距离越大。这跟地球周围大气层内分子密度随高度而减小，道理是相同的。在液体表面层里分子间的距离大，引力和斥力都减小，但斥力减小得更快，所以分子间的相互作用表现为引力，这正是表面张力的来源。

表面张力系数(surface tension coefficient)

设在液面上有一分界线，长度为 l ，实验表明，通过这一分界线相互作用的表面张力 f 的大小与分界线的长度 l 成正比：

$$f = \sigma l$$

式中 σ 叫做表面张力系数，数值等于液体表面单位长度分界线上的表面张力。

(1) 表面张力系数 σ 与液体特性有关。密度小、容易蒸发的液体(如乙醚、酒精)的 σ 值较小，特别是液氢和液氦的 σ 值很小；不易蒸发的液体(如水银)的 σ 值较大，熔化了了的金属的 σ 值很大。

(2) 温度升高时， σ 值减小。

(3) σ 值与相邻物质的化学性质有关。如在 20℃ 时，在水与苯为界的情形下，水的 σ 值为 $33.6 \times 10^{-3} \text{N/m}$ ，在与乙醚为界时为 $12.2 \times 10^{-3} \text{N/m}$ 。

(4) σ 值与物质中所含杂质有关，加入杂质能显著改变液体的 σ 值，有的杂质能使 σ 值减小，有的杂质能使 σ 值增大。能使 σ 值减小的物质称为表面活性物质，肥皂就是最常见的能使水的 σ 值显著减小的表面活性物质。

表面能(surface energy)

表面层里的液体分子都受到指向液体内部的引力作用，因此，要把液体分子从内部移到表面层中，必须克服这种引力做功，所做的功变成分子势能。这样，位于表面层内的液体分子，比起内部的液体分子，具有较大的势能。表面层中全部分子所具有的额外势能的总和，叫做表面能。表面能是内能的一种形式。液体的表面越大，具有较大势能的分子数越多，表面能就越大。

一系统处于稳定平衡时，势能应为最小。因此，一定质量的液体，其表面要尽可能收缩，使表面能成为最小。这是从能量的观点对表面张力现象的解释。

球形液面下的附加压强

由于表面张力的存在，使弯曲液面内无限接近液面处液体的压强中与液面外的压强 P_0 之间存在着压强差 $p = P - P_0$ ，此压强差称为弯曲液面下的附加压强。

对球形液面来说，有

$$p - p_0 = \frac{2\sigma}{R}$$

其中 σ 为表面张力系数， R 为球面半径。对凸液面(如液滴)， R 取正值，附加压强是正值，液体内部的压强 p 大于液面外压强 P_0 ；对凹液面(如液体中的气泡)， R 取负值，液体内部的压强 p 小于液面外压强 P_0 。

现就凸液面的情况推导上式。如图 113-7，取一球冠形小液块。其球面周边上处处受表面张力的作用，而在微元 dl 上所受的表面张力为 $df = \sigma dl$ 。 df 在平行于球冠底面方向的分量 $df_2 = df \cdot \cos \theta$ ，此力沿整个球面周边对称，互相抵消。 df 在垂直于底面方向的分量 $df_1 = df \cdot \sin \theta$ ，其合力方向向下，大小为

$$f_1 = \oint df_1 = \sigma \sin \theta \oint dl = \sigma \sin \theta \cdot 2\pi r_0$$

作用在球冠形小液块上的向上压力为

$$(p - p_0)\pi r_0^2$$

忽略小液块本身的重量，小液块平衡时应有

$$(p - p_0)\pi r_0^2 = \sigma \sin \theta \cdot 2\pi r_0$$

把 $\sin \theta = r_0/R$ 代入上式得

$$p - p_0 = \frac{2\sigma}{R}$$

弯曲液面下的附加压强

任意弯曲液面下的附加压强由拉普拉斯公式给出：

$$p - p_0 = \sigma \left(\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} \right)$$

式中 σ 为表面张力系数， R_1 和 R_2 是弯曲液面上互相垂直的两条法截线的曲率半径。对球形液面来说， $R_1 = R_2 = R$ ，上式化为 $p - p_0 = 2\sigma / R$ (参见“球形液面下的附加压强”)。对柱形液面来说， $R_1 = R$ ， $R_2 = \infty$ ，上式化为

$$p - p_0 = \frac{\sigma}{R}。$$

如图 1-13-8，在弯曲液面上取一点 O，作法线 ON，并作包含法线 ON 的两互相垂直的平面 P_1 和 P_2 ， P_1 和 P_2 在曲面上截出的曲线 A_1B_1 和 A_2B_2 即为两条互相垂直的法截线，其曲率半径分别为 R_1 和 R_2 。曲率中心在液面内时， R_1 和 R_2 取正值；曲率中心在液面外时， R_1 和 R_2 取负值。

对某一曲面来说，过 O 点的不同法截线一般具有不同的曲率半径，但微分几何关于曲面的理论证明，过 O 点的任意两条互相垂直的法截线，它们的曲率之和 $\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2}$ 都是相同的。

浸润(infiltration)

浸润和不浸润是液体与固体接触处发生的边界现象，是由液固分子间相互吸引力（附着力）大于还是小于液体分子间相互吸引力（内聚力）所决定的。

在液体和固体接触处取一液体薄层，厚度为分子引力的有效作用距离（取固液分子间和液体分子间有效作用距离较大者），此液体薄层称为附着层。附着层内分子既受固体分子作用，又受液体分子作用，而处于一种特殊状态。

(1)如图 1-13-9 甲，当内聚力大于附着力时，附着层内的分子受到的合力 f 将垂直于附着层而指向液体内部，类似于表面层，附着层里液体分子比液体内部稀疏，出现类似于表面张力的收缩力(参见“表面张力”)。从能量观点看，要把液体分子从内部移到附着层必须克服引力 f 做功，使附着层内分子势能增大(参见“表面能”)。附着层要尽可能收缩，以减小分子势能。这在宏观上表现为液体不浸润固体。

(2)如图 1-13-9 乙，当附着力大于内聚力时，情况正相反，附着层内的分子受到的合力 f 指向固体，附着层里出现液体相互排斥的力，分子在附着层内比在液体内部有较小的势能，附着层有扩展趋势，宏观上表现为液体浸润固体。

接触角(contact angle)

为表明液体对固体浸润或不浸润的程度，引入接触角的概念。在液体与固体接触处作液体表面的切线和固体表面的切线，此二切线在液体内部一侧所夹的角，叫做接触角（图 1-13-10）。

为锐角时，液体浸润固体。 $\theta = 0$ 时，液体将延展在全部固体表面上，表示完全浸润。为钝角时，液体不浸润固体。 $\theta = 180^\circ$ 时，表示完全不浸润。水与洁净的玻璃浸润程度最大， $\theta = 0$ 。水银不浸润玻璃， $\theta = 138^\circ$ 。

毛细现象(capillarity)

浸润液体在毛细管中上升和不浸润液体在毛细管中下降，这种现象叫做毛细现象。上升或下降的高度 h 可用下式计算：

$$h = \frac{2\sigma \cos \theta}{\rho g r}$$

式中 σ 为表面张力系数， θ 为接触角， ρ 为液体的密度， g 为重力加速度， r 为毛细管的内半径。液体浸润毛细管壁时， $\theta < \frac{\pi}{2}$ ， $h > 0$ ，表示毛细管中液面高于容器液面；液体不浸润毛细管壁时， $\theta > \frac{\pi}{2}$ ， $h < 0$ ，表示毛细管中液面低于容器液面。

现就浸润液体推导上式(图 1-13-11)。管内液体上升高度 h 停止时，表面张力向上的拉引作用和管内升高的液柱的重量达到平衡。液体与管壁接触处为一圆周(设毛细管为圆管)，在此圆周上处处有表面张力作用，而在微元 dl 上所受的表面张力 $df = \sigma dl$ ，此力在竖直方向的分量为 $df_1 = df \cdot \cos \theta = \sigma dl \cdot \cos \theta$ ，竖直方向的合力 f_1 为

$$f_1 = \oint df_1 = \sigma \cos \theta \oint dl = \sigma \cos \theta \cdot 2\pi r$$

管内升高的液柱的重量 W 为

$$W = \pi r^2 h \rho g$$

由 $f_1 = W$ 可得

$$h = \frac{2\sigma \cos \theta}{\rho g r}$$

主要参考资料

1. 中国大百科全书出版社编辑部。中国大百科全书·物理学。第 1 版。北京：中国大百科全书出版社，1987。
2. 黄淑清等。热学教程。第 1 版。北京：高等教育出版社，1985。
3. 肖国屏。热学。第 1 版。北京：高等教育出版社，1989。
4. 黄昆。固体物理学。第 1 版。北京：人民教育出版社，1979。
5. 清泉。固体物理学简明教程。第 1 版。北京：人民教育出版社，1978。
6. 李椿等。热学。第 1 版。北京：人民教育出版社，1979。
7. 顾建中。热学教程。第 2 版(修订版)。北京：人民教育出版社，1981。

十四、物态变化

聚集态(state of aggregation)

物质在一定温度、压强条件下所处的相对稳定的状态。在通常的情况下，物质呈现三种聚集态，即固态、液态、气态、固态和液态统称为凝聚态。

固体有固定的形状和体积，对晶体来说，分子或原子只能围绕各自的平衡位置作微小振动，分子或原子之间保持长程有序的周期性排列。液体有一定体积，无固定形状，分子或原子没有固定的平衡位置，但不致分散远离，分子或原子之间保持短程有序的排列。气体没有固定的形状和体积，分子或原子分散远离，可以到处移动，因而气体可充满所能达到的空间。

随着科学的发展，人们认识到上述的物质三态只是在地球以及与地球类似的星球中物质存在的形式，在宇宙中还存在着其他形式的聚集态。人们认为应增划物质的第四态和第五态。

物质的第四态是等离子体状态。由于高温或电离的作用，使气体原子电离，成为自由电子和离子的混合物，物质的这种状态叫做等离子体。等离子体中含有的正电荷和负电荷几乎处处相等，因而等离子体宏观上是电中性的。由于带电粒子之间的作用主要是长程的库仑力，每个粒子都同时和周围许多粒子发生作用，因而等离子体表现出与普通气体不同的特点。

电弧、日光灯中发光的电离气体，就是等离子体。围绕地球的电离层，太阳和其他恒星的表面气层，很多星际物质，都是等离子体。天然的等离子体在地球上虽不多见，但在宇宙间却是物质存在的主要形式，占宇宙间物质总量的绝大部分。

物质的第五态是超固态。当原子所受压强达百万数量级大气压时，原子的电子壳层被“压碎”，使得原来内部很“空旷”的原子成为电子与原子核紧密地挤在一起，物质的这种状态叫做超固态。科学家认为，地心的压强高达 350 万个大气压，那里的物质呈超固态。

相(phase)

相是指系统中性质完全均匀的部分，它和其他部分之间有界面隔离开来。

在水和水蒸气组成的系统中，水是一相，水蒸气是一相，共有两相。在冰水共存的系统中，冰是一相，水是一相。空气是混合物，但各部分性质均匀，是一相。水和酒精的混合物，也是一相。水和水银不能混合，在水和水银组成的系统中，水是一相，水银是一相。

相和聚集态并不等同。同一种物质的固态可以呈现不同的相。金刚石和石墨的点阵结构不同，具有不同的性质，是固态碳的两种相。在不同温度下，固态铁有 α 铁、 β 铁、 γ 铁、 δ 铁四种相。液态氦有两种相，即正常液态氦和超流液态氦。

相变(Phase transition)

物质所发生的从一相到另一相的转变，叫做相变。物质的固液气三态的转变，即通常所说的物态变化，是常见的相变的例子。

相变的发生是有条件的。在一定压强下，相变是在一定的温度下发生的。如在 101kPa 下，冰在 0℃ 时熔化为水，在 100℃ 时沸腾变为水蒸气。在 101kPa 下，铁液在 1538℃ 时凝固为体心立方结构 (δ 铁)，降到 1400℃ 时转变为面心立方结构 (γ 铁)，到 910℃ 以下又转变为体心立方结构 (α 铁)，在 768℃ 时由顺磁性的 α 铁转变为铁磁性的 α 铁。

通常的固液气三态的转变具有两个特点。第一，相变时体积发生改变。如液相变为气相时，体积增大。多数物质由液相变为固相时，体积减小，也有少数物质如水、锑、铋等体积增大。第二，相变时要吸收或放出热量，这热量只改变物质的相，而不改变温度，通常叫做相变潜热。汽化热、熔化热、升华热都是相变潜热(参见“相变潜热”)。具有这两个特点的相变叫做一级相变。

还有一种相变，不具有上述两个特点，但相变时定压比热容 c_p 、膨胀系数 α 和压缩率 k 都发生有限的不连续变化，这种相变叫做二级相变。在没有外磁场的情况下，温度降低时超导物质由正常导电态转变为超导态，就是二级相变。还有一种相变，也不具有上述两个特点。但在逼近相变点时，两相的定压比热容 c_p 都趋于无穷大。在 2.17K 附近，液态氦从正常液态氦进入超流液态氦，就是相变。

相变潜热(latent heat of phase change)

单位质量的物质从一相转变为同温度的另一相时吸收或放出的热量，叫做相变潜热。单位是焦每千克。汽化热(凝结热)、熔化热(凝固热)、升华热(凝华热)都是相变潜热。

单位质量某种液体变成同温度气体时吸收的热量，叫做汽化热；相反过程放出的热量，叫做凝结热。

单位质量某种物质熔解成同温度液体时吸收的热量，叫做熔化热；相反过程放出的热量，叫做凝固热。

单位质量某种物质升华成同温度气体时吸收的热量叫做升华热；相反过程放出的热量，叫做凝华热。

相变时吸收的相变潜热，一部分用来增大分子势能，从而使内能增大，如汽化时克服分子间引力做功而增大分子势能，熔化时破坏晶体的点阵结构而增大分子势能；另一部分因体积发生变化要用来克服外界压强做功。

设 u_1 和 u_2 分别表示 1 相和 2 相单位质量的内能， v_1 和 v_2 分别表示 1 相和 2 相单位质量的体积(比容)，根据热力学第一定律，单位质量物质由 1 相转变为 2 相时吸收的相变潜热 l ，等于内能的增量 $u_2 - u_1$ ，加上克服恒定外界压强 p 所做的功 $p(v_2 - v_1)$ 。即

$$l = (u_2 - u_1) + p(v_2 - v_1)$$

相变潜热 l 可分为两部分。一部分 $u_2 - u_1$ 表示两相内能之差，叫做内潜热；另一部分 $p(v_2 - v_1)$ 叫做外潜热。例如在 101kPa 下，水的沸点为 100

这时汽化热 $l = 2.26 \times 10^6 \text{ J/kg}$ ，内潜热为 $2.09 \times 10^6 \text{ J/kg}$ ，外潜热为 $1.69 \times 10^5 \text{ J/kg}$ 。汽化热中大部分为内潜热。固体和液体的比容相差不大，熔化热主要是内潜热。

根据热力学第一定律还知道：汽化热等于凝结热，熔化热等于凝固热，升华热等于凝华热。

相变潜热与温度有关系。汽化热随温度升高而减小，这是因为随温度的升高，气相和液相间的差别逐渐减小的缘故。熔化热随温度不同而略有不同。升华热和汽化热一样，也是随温度升高而减小。

相平衡(Phase equilibrium)

系统中有几个相同时存在，而在宏观上停止相变，则系统处于相平衡。例如水和水汽组成的体系，水和水汽之间可以互相转变，如果宏观上这种转变停止，则这个系统处于相平衡。

一个有几相存在的热力学系统，在达到热力学平衡时，必须同时达到热平衡、力学平衡和相平衡(假定未发生化学变化)。热平衡的条件是系统中各部分的温度相等，力学平衡的条件是系统中各部分的压强相等。例如水和水汽组成的体系在达到热平衡和力学平衡时，水和水汽有共同的温度和共同的压强。热力学理论证明，要达到相平衡，两相的化学势必须相等。

由下式定义的热力学函数

$$G = U + pV - TS$$

叫做吉布斯函数，式中 U 为内能， p 为压强， V 为体积， T 为绝对温度， S 为熵。在处理相平衡的情况下， G 取为 T 和 p 的函数。对于单一成分的物质， 1mol 物质的吉布斯函数叫做化学势，通常以 μ 表示。

设系统中两相的共同温度为 T ，共同压强为 p ，第 1 相的化学势为 μ_1 ，第 2 相的化学势为 μ_2 ， μ_1 和 μ_2 是 T 和 p 的函数，可写为 $\mu_1(T, p)$ 和 $\mu_2(T, p)$ ，则相平衡的条件是

$$\mu_1(T, p) = \mu_2(T, p)$$

上式说明，在两相达到平衡时，温度和压强必须满足一定的关系，这就是说，在一定压强下必须达到一定温度，才能达到相平衡。解上式可得到这个关系：

$$p = p(T)$$

对气液两相的平衡，上式表示饱和汽压与温度的关系，也就是沸点与外界压强的关系。对固液两相的平衡，上式表示熔点(凝固点)与压强的关系。对固气两相的平衡，上式表示固体上方的饱和汽压与温度的关系。

相图(Phase diagram)

根据相平衡条件，在两相达到平衡时，温度和压强必须满足一定的关系：

$$p=p(T)$$

在 p - T 平面上可以作出 $p=p(T)$ 的函数图形，这种图形叫做相图，也叫做相平衡曲线。图 1-14-1 和图 1-14-2 分别给出了 H_2O 和 CO_2 的三相图。

图中的 OK 是气液两相平衡曲线，它表示饱和汽压和温度的关系，亦即沸点和外界压强的关系，叫做汽化曲线。这条曲线上的各点表示气液两相平衡共存的状态。汽化曲线终止于临界点 K ，温度高于临界点的温度(临界温度)，不存在气液两相平衡共存的状态，只存在气相。曲线 OL 是固液两相平衡曲线，它表示熔点(凝固点)和压强的关系，叫做熔化曲线。这条曲线上的各点表示固液两相平衡共存的状态。曲线 OS 是固气两相平衡曲线，它表示固体上方饱和汽压和温度的关系，叫做升华曲线。这条曲线上的各点表示固气两相平衡共存的状态。

三条平衡曲线交于一点 O ，叫做三相点。三相点对应于一个确定的温度和一个确定的压强，是固液气三相共存的唯一状态。

利用三相图可以确定在某一压强和温度下物质处于什么状态，并分析物质的相变现象。

汽化曲线和升华曲线下方为气相区域，这是因为此区域中某点所处的状态，其压强比同一温度下液气两相(或固气两相)平衡共存时的压强小，即压强小于饱和汽压，因此物质呈气相存在。在汽化曲线和熔化曲线当中的区域中，某点所处的状态，其温度比同一压强下的熔点高，但比沸点低，因此这一区域为液相区域。同样的道理可以确定另一区域为固相区域。

现以 CO_2 为例分析相变现象。从 CO_2 的三相图可以知道，在 $1 \times 10^5 Pa$ 下， CO_2 只能以固相或气相存在；对敞开在大气中的固相 CO_2 加热，固相 CO_2 不经过液相而升华为气相，所以称为干冰。只有在压强高于 $5.11 \times 10^5 Pa$ 的条件下， CO_2 才能以液相存在，如在 20 时，贮存在钢瓶内的液态 CO_2 与其饱和汽平衡共存，压强为 $56 \times 10^5 Pa$ 。如果打开钢瓶阀门，使液态 CO_2 喷出，则喷出的液态 CO_2 的压强由 $56 \times 10^5 Pa$ 骤然降至 $1 \times 10^5 Pa$ ，在室温下 $1 \times 10^5 Pa$ 的 CO_2 只能处于气态，因而喷出的 CO_2 将迅速汽化。汽化过程中吸收大量汽化热，可导致另一部分 CO_2 冷却而凝固成干冰，其温度可达 -78 左右，保存起来可作致冷剂使用。

熔化和凝固(melting and solidification)

物质由固相转变为液相，叫做熔化；由液相转变为固相，叫做凝固。

在一定的压强下，晶体要升高到一定温度才发生熔化，这个温度叫做熔点，也就是相反过程即由液相转变为固相的凝固点。在熔化或凝固过程中，虽然温度保持不变，但要吸收或放出相变潜热。单位质量某种物质熔化成同温度液体时吸收的热量，叫做熔化热；相反过程放出的热量，叫做凝固热；熔化热等于凝固热。

在熔化和凝固的过程中既有固相，也有液相，加热则向液相转变，放热则向固相转变。因此，熔点(凝固点)就是在一定压强下固液两相平衡共存的温度。

晶体具有一定熔点，决定于晶体具有远程有序的点阵结构，破坏这种结构所需的能量是一定的。当温度升到一定数值，平均热运动能达到晶体的结合能时，一处的结构能够被解离(熔化)，另一处在同一温度下同样能够被解离，这个温度就是熔点。非晶体不具有远程有序的特点，只具有近程有序的微观结构，破坏不同的微观结构需要不同的能量，因而表现为随温度升高而逐渐软化和熔化。

熔化时所需的熔化热主要用于破坏晶体的点阵结构，因此熔化热可以用来衡量晶体结合能的大小。

过冷液体(super-cooling liquid)

液态物质在温度降低到凝固点以下仍不发生凝固或结晶，也不放出凝固热，这种现象叫做过冷，这种液体叫做过冷液体。

过冷液体是不稳定的，只要投入少许该物质的晶体，即能诱发结晶，并使过冷液体的温度回升到凝固点。这种在微小扰动下能很快发生转变的不稳定状态，叫做亚稳态。过冷液体即是处于亚稳态。

熔点与压强的关系

熔点是在一定压强下固液两相平衡共存温度，压强改变时要在新的温度下两相才能重新平衡共存，因此熔点与压强有关。熔点与压强的关系，在相图中用熔化曲线表示。

熔点 T 和压强 p 的关系，可利用由热力学理论得到的克拉珀龙方程来确定：

$$\frac{dp}{dT} = \frac{l}{T(v_2 - v_1)}$$

上式中 v_1 表示固体的比容， v_2 表示液体的比容， l 表示熔化热。

大多数物质熔化时体积膨胀，即 $v_2 > v_1$ ， l 和 T (绝对温度) 均为正值，

故 $\frac{dp}{dT} > 0$ 。这表示压强增大时 ($dp > 0$)，熔点升高 ($dT > 0$)。

少数物质 (如水、铋等) 熔化时体积减小，即 $v_2 < v_1$ ，因而 $\frac{dp}{dT} < 0$ 。

这表示压强增大时 ($dp > 0$)，熔点降低 ($dT < 0$)。

由于固体和液体的比容相差很小，所以熔点随压强的变化并不显著。例如冰在 $T = 273.15\text{K}$ ， $p = 1 \times 10^5 \text{Pa}$ 下， $l = 334\text{kJ/kg}$ ，冰的比容 $v_1 = 1.0908 \times 10^{-3} \text{m}^3/\text{kg}$ ，水的比容 $v_2 = 1.0002 \times 10^{-3} \text{m}^3/\text{kg}$ ，由克拉珀龙方程可得

$$\frac{dT}{dp} = \frac{T(v_2 - v_1)}{l} = -7.5 \times 10^{-8} \text{K/Pa}$$

即压强每增加 $1 \times 10^5 \text{Pa}$ ，冰的熔点才降低 0.0075 。

汽化和液化(vaporization and liquefaction)

物质由液相转变为气相，叫做汽化；由气相转变为液相，叫做凝结或液化。单位质量某种物质汽化时吸收的热量，叫做汽化热；相反过程放出的热量，叫做凝结热；汽化热等于凝结热。

汽化有蒸发和沸腾两种不同的形式。蒸发是在液体表面平静发生的汽化过程；沸腾是在整个液体中(包括内部和表面)激烈发生的汽化过程。蒸发在任何温度下都在进行；在一定外界压强下，沸腾只在一定温度下进行，这个温度叫做沸点。从相变的机构看，蒸发和沸腾并没有根本区别。沸腾时相变仍是在气液分界面上以蒸发的方式进行，只是液体内部大量涌现小气泡，大大增加了气液的分界面。

某种液体的饱和汽是与该液体平衡共存的气体。在气液两相平衡共存的条件下，气液两相可以互相转变。增大饱和汽的体积，液相转变为气相；减小饱和汽的体积，气相转变为液相。下面用气液二相图说明气体的液化。

饱和汽压随温度而改变，改变的情形可用汽化曲线 OK 来表示(图 1-14-3)。汽化曲线上一点的温度和压强，也就是气液两相平衡共存的温度和压强。汽化曲线的始点是三相点 O，在 O 点以下，气相只能与固相平衡共存。汽化曲线的终点是临界点 K，温度高于临界点的温度(临界温度) T_K ，只存在气相。在汽化曲线右方区域中，某点所表示的状态，比相同温度下汽化曲线上一点的压强小(或者比相同压强下汽化曲线上一点的温度高)，所以这个区域表示气相存在的区域。汽化曲线左方的区域表示液相存在的区域。

利用气液二相图可以清楚地看出：在临界温度以下，可以采取等温加压的办法，使气体的状态变到汽化曲线上，继续加压即可液化；也可以采取等压降温的办法，使气体的状态变到汽化曲线上，继续降温即可液化。其实，不论用什么办法，只要把气体的状态变到汽化曲线上，就可以经过气液两相共存而转变为液体。

在临界温度以上，采取等温加压的办法，不能使气体液化。采取降温的办法，如果变化过程穿过汽化曲线，则经过气液两相共存而转变为液体；如果变化过程从临界点上方绕过汽化曲线而达到液相区域，则可从气相连续地转变为液相，在转变过程中没有不连续的现象发生，也没有两相共存的情形，相反的过程即由液相转变为气相，也是这样。

饱和蒸气压(saturation pressure)

在一定温度下，与液体保持平衡共存的蒸气叫做饱和汽，它的压强叫做饱和蒸气压。液体与其饱和汽的平衡是一种动态平衡，这时单位时间内从液面逸出的分子数 n_1 ，等于单位时间内返回液体的分子数 n_2 。 n_1 与液体的温度有关，温度越高，分子的平均动能越大， n_1 就越大。 n_2 与蒸气的密度有关，密度越大，蒸气分子间碰撞越频繁， n_2 就越大。

在一定的温度下，气液两相平衡时，由于 $n_1=n_2$ ，可知饱和汽的密度是一定的。因此，不论饱和汽的体积如何，饱和蒸气压是一定的，即饱和蒸气压与体积无关。

当温度升高时， n_1 增大，蒸气密度相应地增大，使 n_2 增大，才能重新保持新的动态平衡。因此，饱和蒸气压随温度升高而增大。

饱和蒸气压 p 对温度的依赖关系 $p=p(T)$ 叫做蒸气压方程，在相图中用汽化曲线来表示。蒸气压方程可利用克拉珀龙方程

$$\frac{dp}{dT} = \frac{l}{T(v_2 - v_1)} \quad (1)$$

来推导。上式中 v_1 表示液体的比容， v_2 表示饱和汽的比容， l 表示汽化热。

液体的比容 v_1 比饱和汽的比容 v_2 小得多，可略而不计。在温度远低于临界温度的情况下，饱和汽的密度较小，可视为理想气体，并满足理想气体状态方程

$$pv_2 = RT/M,$$

或
$$v_2 = RT/pM. \quad (2)$$

式中 M 是摩尔体积。将(2)式代入(1)式，得

$$\frac{dp}{dT} = \frac{pMl}{RT^2},$$

或
$$\frac{dp}{p} = \frac{Ml}{R} \cdot \frac{dT}{T^2}$$

当温度变化范围不大时， l 可视为常量，积分上式得

$$\ln p = -\frac{Ml}{RT} + C,$$

或
$$p = Ce^{-\frac{Ml}{RT}} \quad (3)$$

这就是蒸气压方程。可见，饱和蒸气压按指数规律随温度的升高而增大。

沸点与压强的关系

沸点是饱和蒸气压等于外界压强时的温度，因而沸点就是在一定压强下气液两相平衡共存的温度；压强改变时要在新的温度下气液两相才能重新平衡共存，亦即饱和蒸气压与温度有关，或者沸点与压强有关。这个关系在相图中用汽化曲线表示。

沸点 T 与压强 p 的关系，可利用由热力学理论得到的克拉珀龙方程来确定：

$$\frac{dp}{dT} = \frac{l}{T(v_2 - v_1)}$$

上式中 v_1 表示液体的比容， v_2 表示气体的比容， l 表示汽化热。

气相的比容总大于液相的比容，即 $v_2 > v_1$ ， l 和 T (绝对温度) 均为正值，故 $\frac{dp}{dT} > 0$ 。这表示压强增大时，沸点总要随着升高。

以水为例，在 $T=373.15\text{K}$ ， $p=1 \times 10^5\text{Pa}$ 下， $l=2.26 \times 10^6\text{J/kg}$ ，水气的比容 $v_2=1.67\text{m}^3/\text{kg}$ ，水的比容 $v_1=1.04 \times 10^{-3}\text{m}^3/\text{kg}$ ，由克拉珀龙方程可得

$$\frac{dp}{dT} = \frac{l}{T(v_2 - v_1)} = 3.6\text{kPa} / \text{K}$$

这表示压强大约每增加 3.6kPa ，沸点就升高 1 。

沸腾 (boiling)

沸腾是在整个液体中(包括内部和表面)激烈发生的汽化过程。液体在饱和蒸气压等于外界压强时才发生沸腾,沸点就是饱和蒸气压等于外界压强时的温度。利用相平衡可以说明上述的沸腾条件。

设液体中有一气泡(图 1-14-4),泡内只充满该液体的饱和蒸气,且气液两相达到热力学平衡。这时整个系统达到热平衡,有共同温度 T 。整个系统还要达到力学平衡。设外界压强为 p_0 ,泡内饱和蒸气压为 p ,泡的半径为 r ,则气液两相保持力学平衡的条件为

$$p = p_0 + \frac{2\sigma}{r} \quad (1)$$

式中的 σ 为液体的表面张力系数, $\frac{2\sigma}{r}$ 是由表面张力引起的附加压强。

整个系统还要满足相平衡条件,即液相的化学势 $\mu_1(p_1, T)$ 等于气相的化学势 $\mu_2(p_2, T)$ 。 p_2 为气相的压强,等于 p 。 p_1 为液相的压强,等于 $p - \frac{2\sigma}{r}$ 。因此

$$\mu_1\left(p - \frac{2\sigma}{r}, T\right) = \mu_2(p, T)$$

根据热力学理论可从上述式得出:与弯曲液面平衡的饱和蒸气压即气泡内饱和蒸气压 p 与温度 T 之间的关系,即

$$\ln \frac{p_\infty}{p} = \frac{2\sigma v_1}{RT r} \quad (2)$$

式中 v_1 是液相的摩尔体积, R 是摩尔气体常量, p_∞ 为温度 T 时平液面的饱和蒸气压,即由蒸气压方程所确定的饱和蒸气压(参见“饱和蒸气压”)。

(1)式和(2)式是气泡(其中只有该液体的蒸气)与液体达成热力学平衡的条件。从(1)式可知, $p > p_0$,而从(2)式可知 $p_\infty > p$ 。可见,在给定的 p_0 和 T 的情况下,气泡中的饱和蒸气压 p 必须满足下式才可能达到热力学平衡:

$$p_\infty > p > p_0$$

设在蒸气压方程中与 p_0 对应的温度为 T_0 ,如对水, $p_0=101\text{kPa}$, $T_0=373\text{K}$ 。在给定的外界压强 p_∞ 下,只有 $T > T_0$,才能满足 $p_\infty > p_0$ 的条件,才有适合的 p 值和 r 值满足(1)式和(2)式,液体中才能有气泡,发生沸腾,这就是过热现象(参见“过热液体”)。

在给定的压强 p_0 下,如果 $T < T_0$,则 $p_\infty < p_0$ 。如对水, $T=303\text{K}$ 时, $p_\infty=4.24\text{kPa}$, $p_\infty < p_0$ 。这跟上述条件 $p_\infty > p_0$ 矛盾,表示不可能有适合的 p 值和 r 值满足(1)式和(2)式,即在 $T < T_0$ 时液体中不可能产生气泡。即使因涨落现象有小气泡产生,由于 $p < p_0 + \frac{2\sigma}{r}$,气泡也会被消灭。

沸腾的发生要借助于空气泡作为汽化核,来加大气泡内部压强,同时增大气泡的半径,以便在 $p_0 > p$ 的条件下保持气泡的力学平衡。

设气泡内空气的压强为 $p' = \frac{nRT}{V}$ ，则在 p_0 和 $T < T_0$ 的条件下，气泡的力学平衡条件为

$$p' + p = p_0 + \frac{2\sigma}{r} \quad (3)$$

温度 T 升高时，泡内饱和蒸气压 p 增大，泡的半径也增大，气泡可重新达到平衡。当温度 T 升高到 T_0 时， $p_\infty = p_0$ 。由(2)式可知，这时只要 r 足够大。 p_∞ / p 就趋近于1，而 p 和 $\frac{2\sigma}{r}$ 都趋于零。例如，当 $T = 373\text{K}$ ， $r = 10^{-3}\text{m}$ 时， $p_\infty / p = 1.00000085$ ， $\frac{2\sigma}{r} = 146\text{Pa}$ 。这时水中气泡不再靠胀大维持平衡，因所受浮力而挣脱器壁，从液体中涌出，发生沸腾。这样，我们就得到沸腾条件

$$T = T_0 \text{ 时, } P_\infty = P = p_0$$

过热液体(super-heated liquid)

液体中气泡(其中只有该液体的蒸气)与周围液体达到热力学平衡的条件为(参见“沸腾”)

$$p = p_0 + \frac{2\sigma}{r} \quad (1)$$

$$\ln \frac{p_\infty}{p} = \frac{2\sigma v_1}{RT_r} \quad (2)$$

由以上二式可知,对给定的 p_0 和 T , 气泡中的饱和蒸气压 p 必须满足下式才可能达到热力学平衡

$$p_\infty > p > p_0$$

设在蒸气压方程中与 p_0 对应的温度为 T_0 , 即正常情况下的沸点为 T_0 , 则在给定的 p_0 下, 只有 $T > T_0$ 才能满足上述条件 $p_\infty > p > p_0$ 。这时液体的温度已超过正常的相变温度, 故称为过热液体。

对给定的 p_0 和 $T (> T_0)$, 有适合的 p 值和 r 值满足(1)和(2)式, 此 r 值叫做临界半径 r_c 。过热液体要沸腾, 必须在液体中有半径比临界半径 r_c 大的气泡, 这时气泡才能增大, 发生沸腾。半径比临界半径 r_c 小的气泡将会缩小以至消失。久经煮沸过的液体, 因缺乏空气泡作为汽化核, 液体过热的程度会很大。

过热液体处于不稳定的亚稳态。在缺乏汽化核的过热液体中, 如果人为地引入汽化核, 例如加入含有空气泡的新鲜水, 能引起急剧的沸腾(暴沸)。暴沸时甚至能把容器炸破。为了避免暴沸, 锅炉中的水在加热前要加强进一些溶有空气的新水, 或放进一些附有空气的细玻璃管的碎片或无釉陶瓷块等。

升华(sublimation and sublimate)

物质由固相转变为气相，叫做升华；由气相转变为固相，叫做凝华。单位质量某种物质升华时吸收的热量，叫做升华热；相反过程放出的热量，叫做凝华热。升华热与凝华热相等。

衣箱中的樟脑丸放久了会变小直至消失，就是由固相直接变为气相，发生了升华现象。寒冷季节地面上的霜，是由水汽凝华而成的冰晶。物质的升华热很大，所以常用升华现象致冷。工业上用干冰（固态 CO_2 ）作致冷剂，是用 CO_2 的升华现象。现代高速飞机克服“热障”——飞机高速飞行时与空气摩擦生热造成的危害，措施之一就是利用涂于飞机表层的石墨升华来降温。

在升华(凝华)的情况下，与固相平衡的蒸气的压强叫做固体上方的饱和蒸气压。表示固体上方饱和蒸气压和温度的关系曲线叫做升华曲线（参见“相图”），升华曲线上的各点表示固气两相平衡共存的状态。在压强比三相点压强低的情况下加热固体，就可以不经熔化而直接升华为气体。

一般固态物质如金属，饱和蒸气压很低，用精密仪器才能量出，可以忽略，实际上不发生升华现象。有的固态物质如干冰、碘等，饱和蒸气压很高，所以容易见到这些物质的升华现象。

临界态(critical state)

汽化曲线 OK 的终点 K 叫做临界点(参见“相图”，“汽化和液化”)。此点所对应的状态叫做临界态。临界态的温度、压强、比容分别叫做临界温度、临界压强、临界比容。

临界温度是气体可以直接通过加压的办法而液化的最高温度；温度高于临界温度，只存在气相。临界压强是临界温度下的饱和蒸气压，是饱和蒸气压的最高值。临界比容是液体具有的最大比容。

物质处于临界状态下，液体与其饱和汽之间一切差别都消失，不能分出气液两相。在临界温度以下，随着温度的升高，平衡共存的气液两相的比容(或者比容的倒数，即密度)相互接近，液相比容增大，饱和汽的比容减小；到达临界温度时，二者比容相等，差别消失。在临界态时，液体的表面现象消失，分界面也消失，汽化热为零等等。

临界态是一种特殊的物质状态，此时既不能说物质处于液态，也不能说处于气态，只能说处于一种特殊的流体状态。

空气湿度(air humidity)

空气湿度用来表示空气中水汽含量的多少，即空气的潮湿程度。湿度的大小，可用下面一些量来表示。

(1)绝对湿度 单位体积空气中所含水汽的质量，叫做绝对湿度(a)。绝对湿度也就是空气中水汽的密度。

(2)水汽压 空气中水汽所产生的分压强，叫做水汽压(p)。把理想气体状态方程用于水汽，可以求出绝对湿度 a 和水汽压 p 的关系。由理想气体状态方程

$$pV = \frac{m}{M} RT$$

可得出

$$p = \frac{m}{V} \cdot \frac{RT}{M},$$

即

$$p = a \cdot \frac{RT}{M} \quad (1)$$

(3)比湿 在一团湿空气中，水汽质量与该团湿空气总质量之比，叫做比湿(q)。用 m_w 表示该团湿空气中水汽的质量， m_d 表示该团湿空气中干空气的质量，则比湿

$$q = \frac{m_w}{m_d + m_w} \quad (2)$$

将理想气体状态方程代入上式可得出

$$q = \frac{M_w}{M} \cdot \frac{p}{p'} \quad (3)$$

上式中 M_w 为水汽的摩尔质量($18 \times 10^{-3} \text{kg/mol}$)， M 为湿空气的摩尔质量(可取为 $29 \times 10^{-3} \text{kg/mol}$)， p 为水汽压， P 为湿空气的压强，亦即大气压。

(4)混合比 一团湿空气中，水汽质量与干空气质量之比，叫做混合比(S)。

$$S = \frac{m_w}{m_d} \quad (4)$$

(5)相对湿度 空气中的水汽压(P)与同温度下的饱和水汽压(P)的百分比，叫做相对湿度(B)。

$$B = \frac{P}{p} \times 100\% \quad (5)$$

(6)露点 在一定大气压下，保持比湿不变，使一团湿空气冷却刚好达到饱和时的温度，称为露点。

从(3)式知道，在一定大气压(p)下，保持比湿(q)不变，则水汽压(P)不变，因此露点时的饱和水汽压也就是原来空气中的水汽压。中学教材中所讲的利用杯壁上出现露滴的实验测定露点，就是在保持大气压和比温不变这一条件下测定的。

露和霜(dew and frost)

大气中水汽的凝结可以发生在空中，形成云和雾；也可以发生在地表面或地表面的物体上，形成露和霜。

夜晚，地表面因向外辐射而冷却，温度迅速降低，与地表面接触的空气，温度也逐渐降低；当空气的温度降低到露点时，空气中的水汽就凝结在地表面或地表面的物体上。如果此时的露点温度在 0 以上，在地表面或地表面的物体上就出现微小的水滴，这就是露。如果此时的露点温度在 0 以下，水汽就直接凝华为白色的冰晶，这就是霜。

露和霜经常发生在晴朗、无风的夜晚。晴朗无风的夜晚，地表面辐射散热快，地表面可迅速冷却；无风，则可使近地面的空气有足够长的时间与冷地面接触，使之温度降低。山谷和洼地，冷空气容易积蓄，对露和霜的出现有利，产生露和霜的频率最大。

霜和霜冻不同。霜是指白色固体凝结物，霜冻是指气温下降，足以引起农作物遭受伤害或死亡的现象。如果气温还在 0 以上，则只有霜冻而无霜；但有霜时常伴有霜冻，因为这时气温已下降到 0 以下。

雾和云(fog and cloud)

大气中水汽的凝结可以发生在地表面或地表面的物体上，形成露和霜；也可以发生在空中，形成云和雾。

大量的细小水滴或冰晶悬浮在近地面的空气层中，就形成雾。形成雾的基本条件是：近地面空气中水汽充沛，有凝结核存在，有使水汽发生凝结的冷却过程。由于引起空气的冷却方式不同，雾可分为辐射雾、平流雾、蒸发雾、锋面雾等，其中最常见的是辐射雾和平流雾。

辐射雾同露、霜一样，都是由地表面辐射冷却形成的。辐射雾大多出现在晴朗、微风的夜晚或早晨。晴朗无云的夜间，地表面辐射散热快，迅速冷却，近地面水汽又比较充沛，有利于水汽的凝结。同露、霜的形成不同的是，需要有微风。如果无风，辐射冷却只局限在贴近地面的空气层中，则只能形成露和霜，而不能形成雾；如果风大了，上层空气的热量大量地向下传递，妨碍下层空气冷却，使气温不易降低到露点，也难以形成雾。只有微风(风速 $1\text{m/s} \sim 3\text{m/s}$)，对雾的形成最合适。微风既能使冷却作用扩展到较厚的空气层中，又不致影响下层空气的充分冷却，所以最有利于雾的形成。

辐射雾是在晴朗无云的条件下形成的，早晨日出之后，地表面温度逐渐升高，雾也就逐渐消散，雾散后又是个晴天。“十雾九晴”的谚语，指的就是辐射雾。

平流雾是暖湿空气流经冷的地面或海面，暖湿空气低层逐渐冷却而形成的。形成平流雾，暖湿空气与地面或海面的温差要比较大，暖湿空气低层才能迅速冷却。还要有适宜的风向和风速。适宜的风向，可不断地送来暖湿空气；适宜的风速，使雾达到一定的厚度。

大量的细小水滴或冰晶悬浮在高空中，就形成云。云和雾本质上是一回事，只是云的底部不接触地面，而雾却是接触地面的。可以说，云是高空的雾，雾是地面的云。形成云的基本条件与雾相同，所不同的是，形成云要有空气的上升运动以及因上升运动而引起的绝热冷却。

云有各种不同的形态，主要是由空气上升运动的形式不同造成的。

有一类云，叫做积状云，它们是因空气对流产生上升运动而形成的。上升的潮湿空气，体积膨胀，造成绝热冷却，当上升到一定高度后，水汽凝结，形成积状云(图 1-14-5)。空气当暖空气向冷空气一侧移动时，由于暖密度小，暖湿空气沿冷空气斜坡缓慢滑升，绝热冷却，则形成层状云(图 1-14-6)。层状云的底部同斜坡面大体吻合，顶部近于水平。暖湿空气越过大范围的山脉时，在山脉迎风坡一侧，整层暖湿空气被迫抬升，也会形成层状云。

此外，还有波状云以及一些特殊形状的云。

降水和人工降雨(precipitation and artificial rainfall)

降水是指液态的或固态的水汽凝结物从云中降至地面的现象。下雨、下雪都是降水现象。

降水的来源是云，但有云并不一定产生降水。云中的水滴和冰晶(统称云滴)，体积很小，半径大多为2~15微米，在空气阻力和上升气流的作用下，降落速度很小，还没有落到地面就会蒸发掉。只有云滴增大到半径为毫米数量级，能克服空气阻力和上升气流的顶托，且下降过程中不被蒸发掉，才能形成降水。可见，降水的形成，就是云滴增大为雨滴、雪花、冰雹等，并降至地面的过程。

云滴增大的过程，主要有两种：云滴凝结(或凝华)增长，云滴相互冲并增长。

由于云内空气继续上升绝热冷却，或者由于云外不断有水汽输入云中，使云内的水汽压大于云滴的饱和蒸气压，则水汽就会凝结(或凝华)在云滴上，使云滴增大，这种过程称为云滴凝结(或凝华)增大。一旦水汽凝结(或凝华)在云滴上，水汽从空气中析出，云滴周围便不能维持过饱和状态，凝结(或凝华)将停止进行。要使这种凝结(或凝华)增长不断进行，云内还需存在冰水云滴共存、冷暖云滴共存、大小云滴共存这三种情况的一种。

云内有冰晶和过冷却水滴共存时，由于在同一温度下，与冰晶平衡共存的饱和蒸气压小，与过冷却水滴平衡共存的饱和蒸气压大，因此，当云内实际水汽压介于上述两个饱和蒸气压之间时，这个实际水汽压对冰晶是过饱和，对过冷却水滴是未饱和，于是过冷水滴蒸发，水汽转移而凝华到冰晶上，冰晶不断增大。当冷暖云滴共存时，与冷云滴平衡共存的饱和蒸气压小，与暖云滴平衡共存的饱和蒸气压大，同样的道理，冷云滴将不断增大。当大小云滴共存时，大云滴的曲率半径小，与之平衡共存的饱和蒸气压比与小云滴平衡共存的饱和蒸气压小，因而大云滴将不断增大。

云内云滴的大小不一，终极速度不同，大云滴的终极速度大，下降过程中可以追上小云滴，与之合并成为较大的云滴；较大的云滴在下降过程中，又可合并更多的小云滴，像滚雪球一样，越来越大。这种现象叫做云滴相互冲并增长。

上述两种云滴增大过程，在云滴转化为降水过程中始终存在。在云滴增长初期，凝结(或凝华)增长为主，冲并增长为次；云滴增大到一定程度，凝结(或凝华)增长退居次要地位，而以冲并增长为主。

如果云里的温度在0℃以上，云滴全是水滴，降落下来便是雨。如果云里的温度在0℃以下，而云下的温度在0℃以上，从云中降下的冰晶进入云下暖气层后，也可化为雨滴而降至地面。如果这时云下的温度在0℃以下，云里的云滴可一直降到地面，成为雪花。至于冰雹，形成比较复杂，是在具备一些特殊条件时，云中云滴随气流上下往返若干次而形成的。

人工降雨是根据降水形成的过程，人为地补充形成降水的条件，以形成降水。因云的性质不同，采用的方法也不同。

含有大量过冷却水滴的冷云(温度在0℃以下的云)，不能产生降水的原因，主要是云中缺少冰晶，不具备前述冰水云滴共存的条件。目前在冷云内产生人工降水的办法是：在云内撒播干冰或碘化银等，使冰晶增多，以形成降水。撒入云中的干冰，升华时吸热，可使云中过冷却水滴的温度

降低，冻结成为冰晶，或者使云中水气直接凝华成冰晶。

暖云（温度在 0 以上的云）不能产生降水，主要是缺少大水滴，不具备前述大小云滴共存的条件。目前在暖云内产生人工降水的办法是：在云内撒播氯化钠、氯化钾等吸湿性物质，它们的微粒进入云中能吸收云中水汽形成大水滴。向云中喷射水滴，也可起到增加大水滴的作用。

主要参考资料

1. 中国大百科全书出版社编辑部。中国大百科全书·物理学。第 1 版。北京：中国大百科全书出版社，1987。
2. 黄淑清等。热学教程。第 1 版。北京：高等教育出版社，1985。
3. 李椿等。热学。第 1 版。北京：人民教育出版社，1979。
4. 肖国屏。热学。第 1 版。北京：高等教育出版社，1989。
5. 王竹溪。热力学。第 1 版。北京：高等教育出版社，1955。
6. 马本 等。热力学与统计物理学。第 1 版。北京：人民教育出版社，1980。
7. 顾建中。热学教程。第 2 版(修订版)。北京：人民教育出版社，1981。
8. 周淑贞。气象学与气候学。第 2 版。北京：高等教育出版社，1985。
9. 陆正华，许以平。气象学基础知识。第 1 版。北京：中国青年出版社，1985。
10. 南京大学物理化学教研组。物理化学(上册)。第 1 版。北京：人民教育出版社，1961。

十五、静电场

电荷(electric charge)

电是物质的一种属性。公元前6世纪，古希腊人就发现琥珀与毛织物摩擦后能吸引轻小物体。物体有了吸引轻小物体的性质，就说物体带了电，或者说带了电荷。最初由于不了解电的本质，认为电是一种附着在物体上的可以流动的物质，所以把它叫做电荷。习惯上也常把带电体本身简称为电荷，如运动电荷，自由电荷等。实验表明，所有物体，无论用什么方法起电，所带的电荷或者与丝绸摩擦过的玻璃棒上所带的电荷相同，或者与毛皮摩擦过的硬橡胶棒上带的电荷相同。所以，自然界中只存在两种电荷；而且，同种电荷互相排斥，异种电荷互相吸引。我们把用丝绸摩擦过的玻璃棒上的电荷称为正电荷；把用毛皮摩擦过的硬橡胶棒上的电荷称为负电荷。静止电荷间的相互作用力称为静电力，也称为库仑力。

现代科学指明，一切物体都是由大量的原子构成的，而原子是由带正电的原子核和带负电的电子组成的。通常，每个原子中正负电荷数量相等，整个物体被认为是不带电的或电中性的。当因某种原因(如摩擦、受热、化学变化等)而失去一部分电子时，就带正电；获得额外电子时，就带负电。

电荷的多少称为电荷[量]。电荷量的单位是库仑，简称库，用符号C表示。电荷量有一个基本单元，即一个质子或一个电子所带电荷量的绝对值 $e=1.60217733 \times 10^{-19}\text{C}$ 。称为元电荷。

如果一个带电体的大小比它到其他带电体的距离小得多，在研究它与其他带电体的作用时可不考虑它的形状、大小和电荷的分布情况，而认为其所有的电量都集中于一点，这样的电荷称为点电荷。

验电器(electroscope)

验电器是检验物体是否带电的仪器。常用的是金箔验电器，如图 1-15-1 甲所示。在金属圆筒上装一橡胶塞，塞中插一根金属杆，杆的上端有一金属球，下端挂着一对金属箔。当带电体与金属球接触时，一部分电荷通过金属杆传到下端的箔片上，两片金属箔因带同种电荷相互排斥而张开。所带的电荷越多，张角就越大。在金属杆上不安金箔，而安装一根可以偏转的金属指针，并在杆的下端装一个弧形的标度尺，用来量度指针偏转的角度，如图 1-15-1 乙所示。这样的仪器，叫做静电计，它可以用来测量电势和电势差。当金属杆与外壳分别与有电势差的两个导体连接时，指针所带电荷量与它和外壳之间的电势差成正比，因为指针与外壳之间的电容是固定的。如果外壳接地，则由指针的偏转即可测得与金属杆连接的导体的电势。

莱顿瓶(Leyden jar)

莱顿瓶是一种电容器，因最先在荷兰的莱顿大学发现它有蓄电的作用而命名。其构造如图 1-15-2 所示，在一玻璃瓶的内外面上各贴有金属箔作为电容器的两个极板，另有一根金属棒从瓶栓插入，上端有一金属球，下端有一金属链，金属链与内层金属箔接触，以便使瓶充电或放电。

将起电机的一极接于金属球上，就可给莱顿瓶充电。莱顿瓶的电容很小，但能承受很高的电压。

如果将放电叉的一个球与充电莱顿瓶外面的金属箔接触，将另一球移近上面的金属球，距离接近到一定程度，空隙间就有火花产生，同时伴有爆破声。这就是莱顿瓶的火花放电。

导体 绝缘体 半导体(Conductor insulator semiconductor)

能使电荷从产生的地方迅速转移或传导到其他部分的物体称为导体。在导体中存在着大量的可以自由移动的带电粒子。金属是最常见的导体。金属原子最外层的价电子很容易挣脱原子核的束缚而成为自由电子，自由电子就是金属中可以自由移动的带电粒子。金属中自由电子的浓度很大，约为 10^{22}cm^{-3} 。金属导体的电阻率约为 $10^{-8} \cdot \text{m} \sim 10^{-6} \cdot \text{m}$ 。

酸、碱、盐的水溶液也是导体。在酸、碱、盐的水溶液中，有失去电子和得到电子的原子或原子团，前者称为正离子，后者称为负离子。这些离子都能在溶液中自由移动，起到传导电荷的作用。

电离的气体也能导电，其中可以自由移动的带电粒子是电子和正、负离子、人体、大地也是导体。

有一些物体，产生的电荷几乎只能停留在原来的地方，这样的物体称为绝缘体，又称为电介质、玻璃、橡胶、丝绸、琥珀、松香、硫磺、陶瓷、油类、塑料、云母以及未被电离的气体等都是良好的绝缘体。绝缘体中的电子，受到原子核很强的束缚，在一般情况下，几乎没有可以自由移动的带电粒子，所以不能导电。绝缘体的电阻率很大，约为 $10^8 \cdot \text{m} \sim 10^{20} \cdot \text{m}$ 。

绝缘体在某些外界条件下，例如加热、加高电压等，其电阻可以突然减小，电流增大，甚至发生结构损坏。这种现象称为“电介质的击穿”。

导电性能介于导体和绝缘体之间的物体称为半导体。其电阻率介于导体与绝缘体之间，且随温度的升高而逐渐减小。半导体中杂质的含量以及外界条件的改变(例如光照、温度或压强的改变)，都会使它的导电性能发生显著的变化。

用图 1-15-3，从能带的观点也可以说明导体和非导体的区别(参见“能级和能带”)。在导体中，除了完全被电子充满的能带即满带外，还有只被电子部分填充的能带，也称导带。导带中的电子很容易在外电场作用下改变其能量状态，呈现出良好的导电性。在非导体中，电子恰好填满一系列能带，更高的各带全部是空的。空带和满带都不起导电作用，而在满带和空带之间隔着禁带。电场很难把满带中的电子激发到能级较高的空带上去，改变能带的填充情况，因而不导电。半导体和绝缘体都属于非导体。半导体有较窄的禁带，可以用热激发的方法使少数电子由满带激发到导带产生导电性(本征导电)。也可以用引入杂质的方法，使空带中有少数电子或满带中出现少数空穴，从而有一定的导电性。绝缘体与半导体相比，有较宽的禁带。在不十分强的外电场作用下，满带中的电子很难跃迁到空带上去，所以在通常情况下绝缘体不导电。

电荷守恒定律(law of conservation of charge)

电荷守恒定律是物理学的基本定律之一。它的内容是：电荷既不能被创造，也不能被消灭，它们只能从一个物体转移到另一个物体，或者从物体的一部分转移到另一部分。这个定律也可以这样表述：在一孤立系统内，无论发生怎样的物理过程，该系统电荷量的代数和总是保持不变。

在通常情况下，原子核带的正电跟核外电子总共带的负电数量相等，整个原子是中性的，因而物体也呈中性。当两个物体相互摩擦时，由于摩擦做功使电子激发，两个物体中都有电子脱离原子核的束缚跑到另一物体上去。由于不同物质的原子核束缚电子的本领不同，两个物体彼此向对方转移的电子数目也不相同，从总体上看，一个物体得到了电子，另一个物体失去了电子，使两个物体带上等量异种的电荷。在静电感应中，当我们把带正电的物体移近一个绝缘导体时，绝缘导体里的自由电子被吸引过来，导体两端分别带上了等量异种电荷。因此，静电感应也不是创造了电荷，只是电荷从物体的一部分转移到了另一部分。

电荷守恒定律不仅适用于一切宏观过程，它也是一切微观过程(如核反应和粒子转化过程)所普遍遵守的。

库仑定律(Coulomb law)

法国物理学家库仑于 1785 年发现的电磁学的基本实验规律之一。库仑定律的内容是：

两个静止的点电荷 q_1 和 q_2 ，在真空中相互作用力 F 的大小与 q_1 和 q_2 的乘积成正比，与它们间的距离 r 的平方成反比； F 的方向在它们的连线上，同种电荷相斥，异种电荷相吸。

在不使用矢量的情况下，库仑定律的表达式为：

$$F = k \frac{q_1 q_2}{r^2} \quad \text{或} \quad F = \frac{q_1 q_2}{4\pi\epsilon_0 r^2}$$

后一式子是令 $k = \frac{1}{4\pi\epsilon_0}$ 而得出的，使用后一式子，是为了使电磁学的表

式有理化，即凡是球对称的表达式中都出现 4 因子，非球对称的表达式中没有 4 因子。式中正电荷取正值，负电荷取负值， F 为正值表示斥力， F 为负值表示引力。

上式中的 k 叫静电常量， ϵ_0 叫真空电容率，也叫真空介电常量，其值由实验测出，与采用的单位制有关。在国际单位制中，

$$k = 8.98755179 \times 10^9 \text{ N} \cdot \text{m}^2 / \text{C}^2,$$

$$\epsilon_0 = 8.85418782 \times 10^{-12} \text{ C}^2 / \text{N} \cdot \text{m}^2$$

通常用 $k = 9.0 \times 10^9 \text{ N} \cdot \text{m}^2 / \text{C}^2$ 已足够准确。根据电磁学理论还可证

明： $\epsilon_0 \mu_0 = \frac{1}{c^2}$ ，式中的 $\mu_0 = 4 \times 10^{-7} \text{ N} / \text{A}^2$ 是真空磁导率， c 为真空中的

光速。把真空中的光速和电容率、磁导率联系起来是麦克斯韦理论的重要成果。中学物理课本中已介绍过库仑所做的实验，但这个实验的精度并不高。从库仑定律可以推导出高斯定理，把高斯定理应用到处于静电平衡的导体，可得出导体内部没有净电荷的结论。利用这个结论可以间接地精确检验库仑定律的正确性。设库仑力与距离的依赖关系为 $1/r^{2+\delta}$ ，1971 年威廉斯、费勒、希尔用这一方法求出 δ 的极限值为 $(2.7 \pm 3.1) \times 10^{-16}$ 。现在大家认为，库仑定律在距离为 $10^{-16} \text{ cm} \sim 10^{-15} \text{ cm}$ 的范围内是极其精确的。

量子场论认为，两个粒子间的相互作用，是通过交换另一种粒子来实现的。被交换的粒子质量越大，其交换力的作用范围就越小。例如，核子间交换的是 π 介子，其质量大约是电子质量的 280 倍，核力的作用范围就大约只有 10^{-13} cm ，这是一种短程力。电磁相互作用是通过交换光子来实现的(这种交换过程中的光子不能用仪器观察到，因此叫做虚光子)。如果光子的静质量为零，库仑力就严格遵从平方反比律。作用范围是“无限”的。如果光子的静质量不为零，即使很小，库仑力就不严格遵从平方反比律，作用范围将限于某一距离之内。因此，虽然库仑定律已发现 200 多年，但更加精确地检验库仑力是否严格遵从平方反比律，从而检验光子的静质量是否为零，仍是物理学家很感兴趣的问题之一。

电场(electric field)

电荷或变化磁场周围空间中存在的一种特殊形态的物质，其基本特性是：放在其中的电荷将受到力的作用。静止电荷周围空间中的电场，不随时间而变化，称为静电场；存在于变化磁场周围的电场称为感应电场，也称涡旋电场(参见“涡旋电场”)。普遍情形下的电场，是静电场和感应电场的叠加，并且是和磁场紧密联系在一起。变化的电场产生磁场，变化的磁场产生电场，电场和磁场是统一的电磁场中互相依存、互相制约的两个方面；静电场只不过是电磁场的一种特殊情形。

关于电荷或带电体之间的相互作用是怎样进行的，历史上曾有过一种观点，认为电荷之间的相互作用是“超距作用”，就是说，这种作用是直接进行的，既不需要任何物质作媒介，也不需要时间。

近代物理学的发展证明，这种观点是错误的，电荷间的相互作用力是通过电场来传递的，电场的传递作用虽然进行得很快(约 $3 \times 10^8 \text{m/s}$)，仍然是需要时间的。这一点在静电场中还不很明显，在电磁场中将明显地显示出来。传递电荷间的相互作用力是电场的物质性的一种表现。

电场的物质性的另一种表现是具有能量(真空电场的能量密度为 $\frac{1}{2}\epsilon \cdot E^2$)，并能和带电体——普通的实物形态的物质——交换能量。当带电体在电场中移动时，电场力对带电体做功(正功或负功)，带电体获得(或减少)的能量恰好是电场减少(或获得)的能量。这就是说，场与物质只是物质的不同形式，它们有着共同的运动量度——能量。

电场的物质性，在迅速变化的情况下，即以电磁波的形式向前传播时，才能更清楚地显示出来。迅速变化的电磁场，不仅和实物形态的物质一样具有能量和动量，还可以脱离电荷和电流而独立存在，并且有它自己的运动规律。场与实物形态的物质间的差别就在于：实物是一种不连续形态的物质，而场则是充满空间的连续形态的物质。

在量子场论中，场是更基本形态的物质，各种不同的实物粒子则是不同场的激发态的表现。

电场强度(electric field strength)

电场强度是描述电场对位于其中的电荷有作用力这一基本性质的物理量，它是一个矢量。位于电场中某一点的试探电荷所受到的电场力 F 与其电荷量 q 的比值，称为该点的电场强度，用 E 来表示，即

$$E = \frac{F}{q}$$

满足以下条件的电荷，叫做试探电荷。首先，它所带的电荷量必须很小，引入电场后，在实验精确度的范围内，不会对原有电场有显著的影响。其次，它的线度必须充分小，可以把它看做点电荷。这样的电荷才可以用来研究空间各点的电场性质。

在国际单位制中，力的单位是牛顿，电荷量的单位是库仑，所以电场强度的单位是牛每库。电场强度的单位还可写作 V/m (参见“电势梯度”)。

由库仑定律可知，在真空中点电荷 Q 产生的电场中，距离 Q 为 r 的一点 P 的电场强度为：

$$E = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{Q}{r^2} \vec{e}_r$$

式中的 \vec{e}_r 为沿着由点电荷 Q 到 P 点的矢量 \vec{r} 的单位矢量。

如果点电荷 Q 是在电容率为 ϵ 的无限大均匀电介质中，那么在距离 Q 为 r 的点 P 处的场强是

$$E = \frac{1}{4\pi\epsilon} \frac{Q}{r^2} \vec{e}_r$$

电场强度叠加原理 (superposition principle of electric field strengths)

在 n 个点电荷 q_1, q_2, \dots, q_n 产生的电场中, 试探电荷 q_0 在某点所受的合力 F 等于各个点电荷对 q_0 的作用力 F_1, F_2, \dots, F_n 的矢量和, 即

$$F = F_1 + F_2 + \dots + F_n$$

两边除以 q_0 , 得

$$\frac{F}{q_0} = \frac{F_1}{q_0} + \frac{F_2}{q_0} + \dots + \frac{F_n}{q_0}$$

根据场强的定义, 得

$$E = E_1 + E_2 + \dots + E_n$$

上式表示, 一组点电荷在某点所产生的场强, 等于各点电荷单独存在时在该点产生的场强的矢量和。这就是电场强度叠加原理。

根据电场强度叠加原理, 真空中一组点电荷在空间中一点 P 的场强可表示为

$$\begin{aligned} E &= \frac{q_1}{4\pi\epsilon_0 r_1^2} \vec{e}_1 + \frac{q_2}{4\pi\epsilon_0 r_2^2} \vec{e}_2 + \dots + \frac{q_n}{4\pi\epsilon_0 r_n^2} \vec{e}_n \\ &= \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \sum_{i=1}^n \frac{q_i}{r_i^2} \vec{e}_i \end{aligned}$$

式中 r_i 是第 i 个电荷到 P 点的距离, \vec{e}_i 是沿矢径 r_i 方向的单位矢量。

在实际情况下, 可以把电荷看成是在某一空间区域 V 内连续分布的。在 V 内某点 M 周围取一体积元 dV 。设 dV 中的体电荷密度为 ρ , 则体积元内所含的电荷为 $dq = \rho dV$, 因而 dq 在空间中距 M 为 r 的 P 点激发的电场强度为

$$dE = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{dq}{r^2} \vec{e} = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{\rho dV}{r^2} \vec{e}$$

遍及电荷分布的区域 V 进行积分, 可得 P 点的场强

$$E = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \int_V \frac{\rho \vec{r}}{r^2} dV$$

电场线(electric field line)

为了形象地描述电场的分布引入的假想曲线。在电场中画出一系列从正电荷出发到负电荷终止的曲线，使曲线上每一点的切线方向都跟该点的场强方向一致，这些曲线就叫做电场线。电场线的疏密程度则表示电场强度 E 的大小。

在点电荷的电场中，电场线是以点电荷为中心的对称分布的辐射状直线。正的点电荷的电场线发散，负的点电荷的电场线收敛，如图 1-15-4 所示。在两个等量异种的点电荷形成的电场中，电场线从正电荷出发，终止于负电荷，而且是对称分布的(图 1-15-5 甲)；在两个等量的正点电荷形成的电场中，电场线从正电荷出发，延伸至无限远，也是对称分布的(图 1-15-5 乙)。

在静电场中，电场线不会形成闭合曲线，也不会没有电荷的地方中断。在感应电场中，电场线是闭合曲线。由于每一点只有一个电场方向，所以任何两条电场线不能相交。电场线表示正电荷在电场中各点所受电场力的方向，并不表示正电荷的速度方向，因此，电场线不能看成是正电荷在电场中的运动轨迹。

电通量(electric flux)

如果在匀强电场中，有一与电场强度方向垂直的平面(图 1-15-6)，就把电场强度 E 的大小和平面的面积 S 的乘积称为通过这个平面的电通量。用 ϕ_e 表示电通量，则

$$\phi_e = ES$$

如果平面不与电场强度方向垂直，平面法线 n 的方向与电场强度 E 之间有一夹角 (图 1-15-7)，我们规定电场强度 E 在平面的法线方向上的分量 $E\cos\theta$ 与平面面积 S 的乘积为通过该平面的电通量，即

$$\phi_e = E\cos\theta S$$

由于在做电场线图时，垂直于场强方向的单位面积中所通过的电场线条数和该处的场强成正比，所以电场强度也可用垂直于场强方向的单位面积上所通过的电场线的条数来表示。根据电通量的定义，可以用通过一个面的电场线的条数来形象地表示通过该面的电通量。

在不均匀的电场中，通过面积为 S 的任意曲面的电通量，可用面积分求得：在曲面上任取一面元 dS ，由于 dS 很小，可以认为通过面元上各点的电场强度 E 相同，通过面元 dS 的电通量为

$$d\phi_e = E\cos\theta ds$$

式中 θ 为 E 与面元法线方向间的夹角。由此可得通过曲面 S 的电通量为

$$\phi_e = \iint_S E\cos\theta dS$$

如果把面元写成矢量形式 dS ， dS 的方向为面元法线方向，其大小为 dS ，则通过曲面 S 的电通量为

$$\phi_e = \iint_S E \cdot dS$$

高斯定理(Gauss theorem)

反映通过闭合曲面的电通量与自由电荷分布的相互关系的定理，它可以表述如下：通过电场中任一闭合曲面S的电通量 ϕ_e 等于该曲面包围的所有电荷量的代数和 $\sum_i q_i$ 除以 ϵ_0 ，而与闭合曲面外的电荷无关。高斯定理的数学表达式如下。

$$\phi_e = \oiint_s \mathbf{E} \cdot d\mathbf{S} = \frac{1}{\epsilon_0} \sum_i q_i \quad (1)$$

高斯定理可证明如下：如图 1-15-8 所示，曲面内有一电荷 q ，其电场通过面元 dS 的通量为

$$\mathbf{E} \cdot d\mathbf{S} = E \cos\theta dS = \frac{q}{4\pi\epsilon_0 r^2} \cos\theta dS$$

式中 θ 为面元 dS 与 r 的夹角， $dS \cos\theta$ 为面元投影到以 r 为半径的球面上的面积。 $\cos\theta dS / r^2$ 为面元 dS 对电荷 q 所张的立体角 $d\Omega$ ，由于 $\oint d\Omega = 4\pi$ ， E 对闭合曲面S的通量为

$$\oiint_s \mathbf{E} \cdot d\mathbf{S} = \frac{q}{4\pi\epsilon_0} \oiint_s d\Omega = \frac{q}{\epsilon_0}$$

上述结果推广到具有 n 个自由电荷 $q_i (i=1, 2, \dots, n)$ 的情况，即得(1)式。

对于电荷按体积连续分布的电场，(1)式可写成

$$\begin{aligned} \phi &= \oiint_s \mathbf{E} \cdot d\mathbf{S} \\ &= \frac{1}{\epsilon_0} \int_V \rho dV \end{aligned} \quad (2)$$

其中 V 为闭合曲面 S 所包围的体积， ρ 为体积元 dV 中的电荷密度。

高斯定理表明通过不包含自由电荷的任一闭合曲面的电通量等于零。当闭合曲面所包围的自由电荷的代数和为正时， $\phi_e > 0$ ，表示有电场线穿出闭合曲面；当闭合曲面所包围的自由电荷的代数和为负时， $\phi_e < 0$ ，表示有电场线穿进闭合曲面。因此，高斯定理说明电场线始于正电荷，终于负电荷，即静电场是有源场。电荷所在处，即电场线的始点和终点，称为电场的源头；负源头(负电荷所在处)有时也称为场的尾闾。

在静电场的研究中，高斯定理与库仑定律等效。当电荷分布及其电场具有对称性时，利用高斯定理可以很方便地求出它的场强。附表中给出了几种这类电场的场强。

根据散度定理，对任一矢量 \mathbf{A} 有 $\oiint_s \mathbf{A} \cdot d\mathbf{S} = \int_V \nabla \cdot \mathbf{A} dV$ ，可得

$$\oiint_s \mathbf{E} \cdot d\mathbf{S} = \int_V \nabla \cdot \mathbf{E} dV$$

由(2)式可得 $\int_V \nabla \cdot \mathbf{E} dV = \frac{1}{\epsilon_0} \int_V \rho dV$ 由此可得高斯定理的微分形式：

$$\nabla \cdot \mathbf{E} = \frac{\rho}{\epsilon_0} \quad (3)$$

可见，电场中 $\nabla \cdot E = 0$ 的那些点，就是体电荷所在处，即场的源头(3)式中的 ρ 为源头的体电荷密度。 $\nabla \cdot E$ 也叫做源头强度。

(3)式是麦克斯韦电磁场方程之一，它反映了电荷对电场作用的定域性：空间某处场的散度只与该处的电荷密度有关，而与其他地点的电荷分布无关；电荷只直接激发其邻近的场，而远处的场则是通过场本身的内部作用传递出去的。只有在静电情况下远处的场才能以库仑定律的形式表示出来，对于一般的运动电荷，远处的场不能再用库仑定律来表示，但(3)式表示的定域关系仍然成立。

附表 几种具有对称性的电场场强

带电体	电场强度
带均匀正电的半径 R 的球壳 (电荷量为 q)	$E = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{q}{r^2} (r > R)$ $E = 0 (r < R)$
带均匀正电的半径 R 的球体 (电荷量为 q)	$E = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{q}{r^2} (r > R)$ $E = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{qr}{R^3} (r < R)$
带均匀正电的无限长细棒 (线电荷密度为 η)	$E = \frac{\eta}{2\pi\epsilon_0 r}$
带均匀正电的无限大薄平面 (面电荷密度为 σ)	$E = \frac{\sigma}{2\epsilon_0}$

静电场的环路定理(circuital theorem of electrostatic field)

反映静电场没有涡旋结构。即电场线不闭合这一性质的定理，可表述如下：静电场 E 沿任一闭合环路 L 的线积分等于零。环路定理的数学表达式为

$$\oint_L E \cdot dl = 0$$

其中 dl 为闭合环路 L 上的线元。

环路定理可证明如下：点电荷 q 激发的电场 E 沿任一环路 L 的线积分

$$\oint_L E \cdot dl = \oint_L \frac{q}{4\pi\epsilon_0 r^2} \cos\theta dl,$$

式中 r 为 q 到 dl 的距离， θ 为 r 与 dl 间的夹角(图 1-15-9)。由于 $dl \cos\theta = dr$ ，上式可简化为

$$\oint_L E \cdot dl = \frac{q}{4\pi\epsilon_0} \oint_L \frac{dr}{r^2} = -\frac{q}{4\pi\epsilon_0} \oint_L d\left(\frac{1}{r}\right)$$

式中的被积函数 $d\left(\frac{1}{r}\right)$ 是一个全微分。由闭合曲线 L 的任一起点绕 L 一周后

回到原来那一点，函数 $\frac{1}{r}$ 也回到原来的值，所以 $\oint_L d\left(\frac{1}{r}\right) = 0$ ，由此得

$$\oint_L E \cdot dl = 0 \quad (1)$$

上述证明很容易推广到有多个自由电荷的一般情形。

(1)式还可化为微分形式。把环路 L 不断缩小直至只含一个面元 dS ，根据矢量分析

$$\oint_L A \cdot dl$$

中旋度的定义 $\nabla \times A = \lim_{\Delta S \rightarrow 0} \frac{\oint_L A \cdot dl}{\Delta S}$ ，(1)式可写成 $\nabla \times E \cdot dS = 0$ 。由于 dS 可任意选取，可得

$$\nabla \times E = 0 \quad (2)$$

(2)式表明静电场的旋度为零，也就是说，静电场是无旋场。

由(1)式可知，在静电场中，试探电荷 q 绕任一环路运动一周，电场力对它所做的功恒等于零：

$$W = \oint_L F \cdot dl = \oint_L qE \cdot dl = q \oint_L E \cdot dl = 0$$

电势与电势差 (electric potential and electric potential difference)

根据静电的环路定理 $\oint_C \mathbf{E} \cdot d\mathbf{l} = 0$ ，在环路C上任取两点A和B，把环路分成两条由A到B的不同路径 C_1 和 C_2 ，则有

$$\int_{C_1}^B \mathbf{E} \cdot d\mathbf{l} + \int_B^A \mathbf{E} \cdot d\mathbf{l} = 0, \text{ 所以}$$
$$\int_{C_1}^B \mathbf{E} \cdot d\mathbf{l} = -\int_B^A \mathbf{E} \cdot d\mathbf{l} = \int_A^B \mathbf{E} \cdot d\mathbf{l}$$

由于环路可任意选取，上式表明线积分 $\int_A^B \mathbf{E} \cdot d\mathbf{l}$ 只与始末两点A和B的位置有关，而与由A到B的路径无关。由于试探电荷q在电场中所受的力 $\mathbf{F} = q\mathbf{E}$ ，有 $\int_A^B \mathbf{F} \cdot d\mathbf{l} = q \int_A^B \mathbf{E} \cdot d\mathbf{l}$ ，也可以说，在静电场中移动某一试探电荷，电场力所做的功只与电荷移动的始点和终点的位置有关，而与电荷移动的路径无关。因此，在静电场中可以引入一个只与位置有关的标量函数V，使

$$V_A - V_B = \int_A^B \mathbf{E} \cdot d\mathbf{l} = -\int_B^A \mathbf{E} \cdot d\mathbf{l} \quad (1)$$

函数V称为电势，而 $V_A - V_B = U_{AB}$ 称为A、B两点间的电势差。所以静电场是势场。

用 W_{AB} 表示把点电荷q由电场中的A点移动到B点电场力所做的功，则有

$$W_{AB} = \int_A^B \mathbf{F} \cdot d\mathbf{l} = q \int_A^B \mathbf{E} \cdot d\mathbf{l} = q(V_A - V_B)$$

即

$$W_{AB} = qU_{AB} \quad (2)$$

(2)式表明，电场中的电荷由A点移动到B点时电场力所做的功等于该电荷的电荷量与A、B两点间电势差的乘积。也可以说，A、B两点间的电势差 U_{AB} 等于把电荷q由A移到B的过程中电场力所做的功 W_{AB} 与电荷所带电荷量q的比值

$$U_{AB} = \frac{W_{AB}}{q} \quad (3)$$

(1)(2)两式只能确定A、B两点的电势差 U_{AB} ，而不能确定两点的电势 V_A 和 V_B ，只有选定一个电势零点，电场中各点的电势才有确定的值。

电势的零点是人为地选定的。在(1)式中如果选取B点的电势 $U_B = 0$ ，则有

$$U_A = \int_A^B \mathbf{E} \cdot d\mathbf{l} = -\int_B^A \mathbf{E} \cdot d\mathbf{l} \quad (4)$$

在处理某个问题时，必须采用同一个电势零点；但在不同的问题里，可以选用不同的电势零点。例如，当激发电场的电荷分布在空间有限的范围内时，在理论计算中常取无穷远处作为电势的零点；这时，电场中任意一点的电势，在数值上就等于单位正电荷从该点移到无限远时电场力所做的功。在电工技术中，电器都接有地线，取地球表面作为电势零点，研究问题比较方便。改变所选取的电势零点，各点的电势将随之改变，但两点间

的电势差与电势零点的选择无关。

对于点电荷 q 的电场中一点 P 的电势，可以选取无穷远处作为电势零点(图 1-15-10)。根据(4)式，并选取沿矢径的直线作为积分路径，则与点电荷相距 r 的一点 P 的电势

$$\begin{aligned} V_P &= \int_r^{\infty} \mathbf{E} \cdot d\mathbf{r} = \int_r^{\infty} E dr \\ &= \int_r^{\infty} \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{q}{r^2} dr = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{q}{r} \end{aligned}$$

电势叠加原理(Superposition principle of electric potential)

设点电荷组 $q_1, q_2, q_3 \dots q_n$ 在空间中激发的电场强度分别为 E_1, E_2, \dots, E_n , 根据场强的叠加原理, 总电场强度 $E = E_1 + E_2 + \dots + E_n$ 。取无穷远处为电势的零点, 点电荷组电场中任一点 P 的电势可写成

$$\begin{aligned} V_P &= \int_P^{\infty} E \cdot dl \\ &= \int_P^{\infty} (E_1 + E_2 + \dots + E_n) \cdot dl \\ &= V_{1P} + V_{2P} + \dots + V_{nP} \end{aligned}$$

式中 $V_{1P} = \int_P^{\infty} E_1 \cdot dl = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{q_1}{r_1},$

$$V_{2P} = \int_P^{\infty} E_2 \cdot dl = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{q_2}{r_2},$$

.....

$$V_{nP} = \int_P^{\infty} E_n \cdot dl = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{q_n}{r_n}$$

$V_{1P}, V_{2P} \dots V_{nP}$ 分别为点电荷 $q_1, q_2 \dots q_n$ 单独存在时, 电场中 p 点的电势(图 1-15-11)。所以上式表明, 点电荷组的电场中某点的电势, 等于各个点电荷单独存在时在该点所产生的电势的代数和。这个结论叫做电势叠加原理。

等势面(equipotential surface)

一般说来，静电场内不同的点具有不同的电势值，但也有一些点的电势值是相同的，而且这些点总是在一个曲面上。静电场内电势相等的各点构成的曲面称为等势面。

在点电荷 q 所产生的电场中，与电荷 q 相距为 r 的各点的电势均为 $V = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{q}{r}$ 。这说明一个点电荷产生的静电场的等势面是以点电荷为中心的球面

1-15-12 是点电荷电场中的等势面的截面图。图中的一系列实线代表电势值不同的等势面，图中虚线代表点电荷的电场线。由于点电荷的电场线是由正电荷沿半径方向发出(或向负电荷会聚)的一系列直线，显然，这些电场线与等势面处处正交。

不仅点电荷的电场是这样，在任何静电场中，电场线与等势面都是处处正交的。这个问题可以这样来证明：设试探电荷沿某等势面作一微小位移，这时虽然电场对试探电荷有力的作用，但根据等势面的定义，电场力没有做功。因此，可以肯定试探电荷在等势面上任一点所受的力总是与等势面垂直，即电场线的方向总是与等势面正交。

通常在画等势面时规定，电场较强的地方，等势面较密；电场较弱的地方，等势面较疏。从等势面的分布情况，大致可以判断电场的强弱。

电势梯度(electric potential gradient)

电场中一点 P 的电势梯度是一矢量，它的方向与过 P 点的等势面的法线方向相同，且指向电势值增大的方向，它的大小等于电势值在法线方向上的变化率。

图 1-15-13 中的 1 和 2 是两个邻近的等势面，它们的电势分别为 V 和 $V+dV$ ，且 $dV > 0$ 。过等势面 1 上的一点 P，作等势面 1 的法线，法线的正方向指向电势升高的方向。以 n 表示法线方向的单位矢量，用 dn 表示等势面 1 和等势面 2 在 P 点处的法向距离 PQ。这个距离是这两个等势面之间在 P 点处的最短距离，亦即法线方向是电势变化率最大的方向。

由电势差的定义

$$dV = V_Q - V_P = -E \cdot dn, \quad (1)$$

可得

$$E = -\frac{dV}{dn} \vec{n} \quad (2)$$

用 ∇V 表示 V 的梯度，(2)式也可写成

$$E = -\nabla V \text{ 或 } \nabla V = -E. \quad (3)$$

即电场中某点的电场强度等于该点电势梯度的负值。

(3)式是静电场中电势和场强的一般关系，已知电势可以由它来求场强，已知场强也可由它来求电势。由于电场强度是矢量，而电势是标量，矢量计算常比标量计算复杂，因而在实际计算中往往根据电荷分布情况先求出电势，再由电势和场强的关系求出场强。

静电体系的能量(energy of electrostatic system)

电荷之间存在着相互作用力，因此，形成任何带电体系时，都要克服带电体之间的相互作用力而做功。最简单的带电体系由两个点电荷 q_1 与 q_2 组成，它们之间的距离是 r_{12} 。假定它们是从无穷远处移至 P_1 、 P_2 两点的(图 1-15-14)。设想先将 q_1 从无穷远处移至 P_1 点，这时由于 q_2 在无穷远处，它们之间的相互作用可以忽略不计，外力不需做功。当 q_1 位于 P_1 后，将 q_2 从无穷远处移至 P_2 ，所需做的功等于 q_1 在 P_2 点产生的电势 V_{12} 与 q_2 的乘积，即

$$W = q_2 V_{12} = q_2 \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{q_1}{r_{12}} = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{q_1 q_2}{r_{12}}$$

如果先将 q_2 从无穷远处移至 P_2 点，再将 q_1 移至 P_1 点，结果也是一样：

$$W = q_1 V_{21} = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{q_1 q_2}{r_{12}}$$

通常把形成上述两个点电荷的静电体系所需做的功写成对称形式

$$W = q_1 V_{21} = q_2 V_{12} = \frac{1}{2}(q_1 V_{21} + q_2 V_{12}),$$

并把它称为静电体系的相互作用能，简称互能。

上述结果很容易推广到 n 个点电荷组成的静电体系，这个体系的相互作用能为

$$W = \frac{1}{2} \sum_{i=1}^n q_i V_i,$$

式中 V_i 为第 i 个点电荷 q_i 所在处的电势。

如果静电体系由连续分布的电荷组成，可将它们分成许多电荷元，把每一个电荷元当成一个点电荷，仍可应用上式进行计算。

电荷之间的相互作用能，并不等于一个静电体系的能量，因为在电荷相互作用能中，没有计及形成每个电荷的那部分能量。这部分能量等于带电体在带电过程中外力所做的功，称为电荷的自能。因此，一个静电体系的能量应等于各个电荷的自能与彼此之间的相互作用能的总和。

把静电体系的能量分为自能和互能两部分，有一定的方便之处。在讨论问题时，我们可以把一个静电体系分解为若干个子系，并且寻求使每个子系的自能保持不变的划分方法。这样，从功能关系考虑问题时，就只需考虑体系中互能的变化，从而使计算简化。

电荷在外电场中的电势能 (electric potential energy of electric charge in external electric fields)

有时需要把带电体系中的某个电荷或电荷组(如电偶极子)分离出来, 把它们看作试探电荷。这样, 带电体系的其余部分产生的电场, 对试探电荷来说就是外电场。普遍地说, 一个试探电荷 q 在外电场中具有电势能, 它在外电场中 A、B 两点的电势能 ϵ_A 和 ϵ_B 的差等于沿某一路径把电荷由 A 点移动到 B 点时电场力所做的功 W_{AB} :

$$\epsilon_A - \epsilon_B = W_{AB} = q(V_A - V_B),$$

式中的 V_A 和 V_B 分别表示 A、B 两点的电势。若取 B 为无穷远点, 并令 $V_\infty = 0$, $W_\infty = 0$, 则电荷 q 在外电场中 A 点的电势能

$$\epsilon_A = qV_A$$

在中学教材中所讲的“点电荷 q 在静电场中一点的电势能”, 就是这里所说的“点电荷 q 在外电场中的电势能”。在一般情况下, 点电荷 q 的自能是不变的, 如果激发外电场的电荷的分布也不发生变化, 它的自能也是不变的。因此, “点电荷 q 在外电场中的电势能”是指“点电荷 q 与激发外电场的电荷间的互能”。

密立根油滴实验(Millikan oil-drop experiment)

电子所带电荷量最早是由美国科学家密立根(Robert Andrews Millikan 1868 ~ 1953)所做的油滴实验测出的。密立根实验的原理如图 1-15-15 所示：两块水平放置的平行金属板与电源相接，使上面的板带正电，下面的板带负电。油滴从喷雾器喷出后，经上面金属板中间的小孔，落到两板之间的匀强电场 E 中。大多数油滴在经过喷雾器喷嘴时，因摩擦而带电。油滴在电场力、重力和空气阻力的作用下下降。观察者可在强光照射下，借助显微镜进行观察。假设两板之间有一质量为 m 的油滴带负电 q ，适当调节两板间的电势差，使它所受的电场力等于所受的重力。由 $Eq=mg$ 可得

$$q = \frac{mg}{E} = \frac{mgd}{U} \quad (1)$$

上式中 U 是两板间的电势差， d 是两板的距离，它们都可直接测得。但是油滴太小，其质量 m 很难直接测出。密立根通过测量油滴在空气中下落的终极速度来测量油滴的质量。未加电场时，由于空气的粘性，油滴所受的重力很快就等于油滴与空气的摩擦力，而使油滴匀速下落，设这时油滴的速度为 v_1 ，根据流体力学中的斯托克斯定律

$$mg = 6\pi\eta rv_1, \quad (2)$$

式中 η 是空气的粘性系数， r 是油滴半径。考虑到空气的浮力，(2)式可改正为：

$$\frac{4}{3}\pi r^3(\rho - \rho_0)g = 6\pi\eta rv_1,$$

式中的 ρ 和 ρ_0 分别为油滴和空气的密度。由此可得油滴半径与其下落的终极速度之间有如下的关系：

$$r = \left[\frac{9\eta v_1}{2(\rho - \rho_0)g} \right]^{\frac{1}{2}} \quad (3)$$

(1)式也可改正为：

$$q = \frac{4}{3}\pi r^3(\rho - \rho_0)gd / U \quad (4)$$

把(3)式代入(4)式可得油滴所带电荷量：

$$q = 6\pi\eta v_1 \left[\frac{9\eta v_1}{2(\rho - \rho_0)g} \right]^{\frac{1}{2}} \frac{d}{U} \quad (5)$$

实际上，测量时往往在完成 v_1 的测量之后，加一足够强的电场，使油滴做竖直向上的运动。在油滴达到终极速度 v_2 时，油滴所受的静电力与重力、阻力平衡，即有

$$Eq = \frac{4}{3}\pi r^3(\rho - \rho_0)g + 6\pi\eta rv_2 \quad (6)$$

把(3)式代入(6)式即得油滴所带电荷量：

$$q = 9\sqrt{2}\pi d \left[\frac{\eta^3 v_1}{(\rho - \rho_0)g} \right]^{\frac{1}{2}} \frac{(v_1 + v_2)}{U} \quad (7)$$

密立根测定了数千个带电油滴的电荷量，发现这些电荷量都等于某个

最小电荷的整数倍，从而证实了电荷是量子化的，并求得了元电荷即电子或质子所带的电荷量 e 。在密立根实验之后，人们做了许多实验，进一步测定电子的电荷量，现在测得的元电荷的精确值是

$$e=1.6021892 \times 10^{-19}\text{C},$$

通常可取 $e=1.60 \times 10^{-19}\text{C}$ 。

元电荷是物理基本常量之一，它的测定在理论上和实际上都有重大的意义。密立根实验不仅表明了元电荷的存在，而且测出了 e 的值后，由电解定律求出了阿伏加德罗常量。元电荷的数值成了测定现代物理学里一些最重要的常量的基础。

示波管(oscillograph tube)

示波管是阴极射线示波器中将电讯号变换成可观察图像的器件。它是一个抽成真空的管状玻璃泡，里面装有一系列金属制的电极，图 1-15-16 是其外形及结构示意图。示波管的一端是阴极，它的外形是一个圆筒，中间有加热用的灯丝。阴极顶端涂有能发射电子的金属氧化物，当灯丝未通电时温度比较低，电子的平均动能比较小，能逸出阴极表面的电子为数极少。当灯丝通电发热后，动能大于逸出功的电子增多，有较多的电子可以逸出阴极表面，当温度足够高时(一般在 1000K 以上)，阴极就显著地发射电子。阴极外面套有中间开有小孔的圆筒状的电极，称为栅极。阴极受热后发射的电子从栅极的小孔射出。相对于阴极来说，栅极上加的是负电压，即栅极的电势比阴极低。改变栅极和阴极间的电压可以控制通过栅极小孔的电子数，从栅极出来的电子接着经过第一阳极、第二阳极、第三阳极，这三个极上加的都是正电压。调节这些极上的电压可以使电子加速，并会聚成很细的电子束打到管子另一端的荧光屏上，形成一个亮点。

在电子束到达荧光屏之前，还受偏转系统的控制，分别称为水平偏转板和竖直偏转板。在偏转系统的两对极板上加上变化的电压，电子束的运动方向就随外加电压而改变，屏上亮点的运动轨迹就反映了加在偏转板上的电压的变化情况。若在水平偏转板上加锯齿形的扫描电压(图 1-15-17)，并使扫描的周期与竖直偏转板上加的讯号周期相同或为其整数倍时，荧光屏上亮点的轨迹就可以显示出加在竖直偏转板上的信号波形。

导体的静电平衡(electrostatic equilibrium of conductor)

当一带电体系中的电荷分布与电场分布都不随时间而变化时，就说该带电体系达到了静电平衡。

导体的静电平衡条件是：导体内部的电场强度处处为零。

这个平衡条件的论证如下：如图 1-15-18 所示，当把一个不带电的导体放进场强为 E_0 的外电场中时，导体中的自由电子将在电场力的作用下，逆着场强 E_0 的方向作定向运动(图甲)，这就是静电感应现象。由于静电感应，在导体两端聚集的正、负电荷所产生的附加电场 E' 跟外电场 E_0 相叠加(图乙)。叠加的结果，使导体内外的电场都重新分布。在导体内部，附加电场 E' 与外电场 E_0 方向相反，叠加的结果削弱了导体内部的电场。只要合场强 $E=E_0 + E'$ 不等于零，导体内部就会继续有电荷移动，使 E' 继续增大。当导体两端的正、负电荷积累到一定程度，合场强处处为零时，自由电荷的定向移动就停止了，导体处于静电平衡状态(图丙)。

从导体的静电平衡条件出发，还可得出如下推论：

(1) 导体是个等势体，导体表面是个等势面。

因导体达到静电平衡时，其内部电场强度为零。由电场强度和电势梯度的关系可知，这时导体内部电势梯度处处为零，因而电势相同，是个等势体，从而其表面是个等势面。

(2) 导体外的场强处处与它的表面垂直。

因为电场线处处与等势面正交，所以导体外的场强一定与它的表面垂直。

(3) 导体内部处处没有未抵消的净电荷，电荷只分布在导体的表面。因为导体内部电场为零，因而通过导体内部任一闭合曲面的电通量都等于零，根据高斯定理，所有这些闭合曲面内部都不含有净电荷。

静电感应(electrostatic induction)

把带电体移近绝缘导体，导体上离带电体近的一端就出现和带电体异种的电荷，远的一端出现同种电荷。这种现象叫做静电感应。如图 1-15-19 所示，如果带电体原来带负电，就把导体里的自由电子推斥到远的一端，近的一端因缺少电子而带正电，远的一端因有多余电子而带负电。如果带电体原来带正电，就把导体里的自由电子吸引过来，近的一端因有多余的电子而带负电，远的一端因缺少电子而带正电。因此，静电感应是导体上的电荷在外电场的作用下重新分布的现象，并不是产生了电荷。

发生静电感应现象时，导体两端出现感生电荷的电荷量相等，这时若将带电体移去，外电场消失，导体两端的等量异种电荷将中和，导体呈不带电状态。如果在带电体移去前，把导体从当中分成两部分，它们就会分别带上等量异种电荷。利用静电感应使物体带电的方法叫做感应起电。

尖端放电(point discharge)

带电导体尖端附近大气中所发生的放电现象称为尖端放电。导体带电后，尖端部分聚集的电荷最多，因此尖端附近的电场特别强。在尖端附近强电场的作用下，空气中残留的离子会发生激烈的运动。当它们和空气分子相碰时，会使空气分子电离，从而产生新离子，使空气变得易于导电。与尖端上电荷同种的离子受到排斥，远离尖端而去。与尖端上电荷异种的离子被吸引到尖端，与尖端上的电荷中和，产生放电现象。尖端放电时，在尖端周围出现光晕，叫做电晕，在黑暗中看得比较明显。夜间，在高压电力线路中，往往会看到电晕放电。这种现象浪费了电能，因此高压输电线应尽量做得光滑。一些高压设备的电极做成光滑的球形，也是为了防止尖端放电，以维持高电压。

尖端放电也有可以利用的一面，典型的例子就是避雷针。当带电云层接近地面时，由于静电感应使地面上的物体带上了异种电荷，这些电荷比较集中地分布在突出于地面的物体上，如高大建筑物、烟囱、大树、铁塔等。当电荷积累到一定程度时，在带电云层和这些物体之间就会发生强烈的火花放电，这就是雷击。为了避免雷击，可在建筑物上安装避雷针。避雷针是一个用金属制成的尖端导体，安装在建筑物的顶端，并用粗导线与埋在地下的金属板连接，以保持与大地接触良好。当带电云层接近建筑物时，建筑物上由感应所产生的电荷通过避雷针不断地进行放电，逐渐跟云里的电中和，就避免了因电荷大量累积发生雷击损坏建筑物。即使建筑物和云里的电来不及缓慢中和，在它们之间发生了较强的放电，电流也会沿避雷针导入地下，不致击坏建筑物。

范德格拉夫起电机(Van de Graaff generator)

范德格拉夫起电机是一种静电起电机，由美国物理学家范德格拉夫(Robert Jemison van de Graaff 1901~1967)发明。它的构造和作用原理如图 1-15-20 所示。空心的金属圆球 A 放在直立的绝缘管 C 上，B 为由一对滑轮带动的绝缘传送带。下滑轮用电动机带动旋转，使传送带运转。金属尖端 D_1 与数万伏的直流电源正极相接，电源负极接地。由于尖端的放电作用，电荷不断地被喷射到传送带上。另一金属尖端 D_2 与球 A 的内表面相连，当带电的传送带转动到尖端 D_2 附近时，传送带上的电荷就转移到尖端 D_2 并转移给球 A 的外表面。随着传送带的不断运转，球 A 上的电荷量越来越多，电势不断增高。球 A 能达到的最高电压与球的半径大小有关。干燥空气的击穿电场强度约为 $E_m = 3 \times 10^6 \text{ V/m}$ ，对于球形导体， $E_m = \frac{q_m}{4\pi\epsilon_0 r^2}$ ，

q_m 是球上所带的最大电荷量， r 是球的半径，因此导体球的最高电势为

$$V_m = \frac{q_m}{4\pi\epsilon_0 r} = r \times 3 \times 10^6 \text{ V/m}。 \text{ 当 } r = 0.6\text{m} \text{ 时， } V_m = 1.8 \times 10^6 \text{ V/m}。 \text{ 实际}$$

上，由于很难制成理想的球面和保持空气的干燥，这样的电势值，只有当球形电极周围密封并充以达到十个大气压的气体(如 N_2 ， CO_2 ， SF_6 等)，使电离过程大大减弱时才能达到。

范德格拉夫起电机主要用于加速带电粒子。将离子源放在球壳内，配上分析器、稳压装置和真空系统、控制系统等部件，就可成为正离子静电加速器。由于金属圆球相对于地的电势很高，因此将离子从球壳引入加速管时，在电场力的作用下会获得很大的动能。这种高速带电粒子可用于原子核反应实验等，是低能核物理的主要设备。

范德格拉夫起电机，只要改变装置中喷电电源的极性，就可以改变它的电压极性，用来加速电子，成为电子静电加速器。由于负极性高压电极的击穿电压比正极性的高，电子枪及其所属电源也比离子源简单等原因，电子静电加速器所占空间要比质子静电加速器小。

电容和电容器(capacitance and capacitor)

电容是描述导体或导体系统容纳电荷性能的物理量。孤立导体的电容等于孤立导体所带的电荷量与其电势的比值，即孤立导体每升高单位电势所需的电荷量。它反映了孤立导体容纳电荷的能力。用字母 C 表示电容，则

$$C = \frac{Q}{U}$$

电容的国际单位制单位为法拉，简称法，国际符号是 F。实际上常用的单位还有微法和皮法， $1F=10^6\mu F=10^{12}pF$ 。

如果带电导体附近有其他导体或带电体，这个导体的电势就会改变。可见非孤立导体的电势不仅与它自身所带电荷量的多少有关，还受到它周围导体的影响。如果把一带电导体 A 封闭在另一金属壳 B 中，根据静电屏蔽的原理，壳外的电荷就不会影响壳内导体 A 的电势了。实际上，对金属导体的封闭要求并不太高，使 A、B 两导体为间距不大的一对导体板(同轴圆筒或一对平行板)就可以了。这一对互相绝缘的导体组成的体系，叫做电容器。组成电容器的两导体叫做电容器的极板。

电容器的一个极板所带的电荷量跟两极板间的电势差的比值称为电容器的电容。即

$$C = \frac{Q}{U_A - U_B}$$

由于孤立导体的电势 U 就是该导体与无穷远处的电势差，因此，孤立导体的电容可以理解为该导体与无穷远处的“极板”所构成的电容器的电容。

电容器的电容的大小仅取决于两导体的形状、大小、相对位置，当导体间充有电介质时，还与电介质的电容率有关系，而与极板所带电荷量与极板间的电势差无关。因为当所带电荷量增加时，极板间的电势差按比例增加，其比值不变，所以电容是反映电容器本身

几种简单电容器的电容

	平行板电容器	柱形电容器	球形电容器
结 构	极板面积为 S， 极板间距离为 d， $d \ll \sqrt{S}$	内外圆柱半径为 r、 R，圆柱长为 l， $(R - r) \ll l$	内外球面半径为 r、R
极板间为真空时的电容	$C = \frac{\epsilon_0 S}{d}$	$C = \frac{2\pi\epsilon_0 l}{\ln \frac{R}{r}}$	$C = \frac{4\pi\epsilon_0 Rr}{R - r}$
极板间充满相对电容率为 ϵ_r 的介质时的电容	$C = \frac{\epsilon_r \epsilon_0 S}{d}$	$C = \frac{2\pi\epsilon_r \epsilon_0 l}{\ln \frac{R}{r}}$	$C = \frac{4\pi\epsilon_r \epsilon_0 Rr}{R - r}$

属性的物理量。

电容器在实际中(主要是交流电路、电子电路)有着广泛的应用，并且种类繁多。按两极板间所用的电介质来分，有真空电容器、空气电容器、云母电容器、纸质电容器、油浸纸介电容器、陶瓷电容器、涤纶电容器、电解电容器等；按其电容量是否可变来分，有可变电容器、半可变或微调

电容器、固定电容器等；按极板的形状分，有平行板电容器、柱形电容器、球形电容器等。

附表给出了几种简单电容器的电容公式。

电偶极子(electric dipole)

一对等量异号电荷 $+q$ 和 $-q$ ，相距为 l ，当所考虑的场点到它们的距离远大于 l 时，这种带电体系叫做电偶极子。从 $-q$ 到 $+q$ 的矢量 l 称为电偶极子的轴。电偶极子的特征用电荷 q 与 l 的乘积来表示，称为电偶极矩，简称电矩。电偶极矩是一个矢量，用 P 表示：

$$p=ql。$$

在电偶极子激发的电场中任意一点 P 的电势为：

$$V_p = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{p \cos\theta}{r^3}$$

式中的 r 为电偶极子中心 O 到 P 点的矢径长， θ 为矢径与偶极子轴间的夹角(图 1-15-21)。根据电场强度等于电势梯度的负值 $E=-\nabla V$ ，由上式还可求出 P 点的场强 E_p 。

在场强为 E 的匀强外电场中(图 1-15-22)，电偶极子受到一个力矩 M 的作用： $M=qE \cdot l \sin \alpha = pE \sin \alpha$ 。

式中的 α 为偶极子轴与场强矢量间的夹角。上式也可写成矢量式：

$$M=p \times E。$$

偶极子还具有电势能

$$\begin{aligned} W &= qV_1 - qV_2 = ql \cdot \frac{V_1 - V_2}{l} \\ &= -pE \cos \alpha \end{aligned}$$

或者

$$W = -p \cdot E$$

上式表明，当电偶极子的取向与外电场方向一致时， $\alpha=0$ ， $\cos \alpha=1$ ， $W=-pE$ ，电势能最低；取向相反时， $\alpha=\pi$ ， $\cos \alpha=-1$ ， $W=pE$ ，电势能最高。如果电偶极子可以绕中心 O 自由转动，它总是趋向于取 $\alpha=0$ 的稳定平衡位置。

在非匀强电场中，除力矩外，还有一个力 F 作用在电偶极子上，这个力等于偶极子势能梯度的负值。取通过偶极子中心指向场强梯度方向的坐标轴为 Z 轴，则有：

$$F = -\frac{\partial W}{\partial z} = \frac{\partial}{\partial z} (p \cdot E) = p \frac{\partial E}{\partial z} \cos \alpha$$

也可写成矢量式： $F=-\nabla W=\nabla(p \cdot E)$ 。电偶极矩 p 与场强平行时则有

$$F = p \frac{\partial E}{\partial z}$$

在此情形下，电偶极子的受力方向指向场强绝对值较大的区域，而且电场的梯度越大，即电场越不均匀，这个力越大。

电偶极子在理论上和实际上都有很重要的意义。例如，在外电场的作用下，电介质的原子或分子里的正负电荷产生微小的相对位移，形成电偶极子。在无线电发射天线里，由于电子作周期性运动，使天线两端交替地带正负电荷，形成振荡偶极子。当我们用悬浮在蓖麻子油中的奎宁结晶来显示电场线图时，外电场使奎宁晶粒极化，一端出现正电荷，另一端出现负电荷，成为电偶极子，并使它们转向外电场的方向，沿着电场方向排列起来。摩擦起电后的玻璃棒或硬橡胶棒吸引轻小物体，是由于轻小物体在棒的静电场作用下极化，成为电偶极子，并在棒的不均匀电场中，受到指向棒的力的作用。

电介质的极化(dielectric polarization)

电介质在外电场作用下显示电性的现象叫做电介质的极化。

任何物质的分子(或原子)都是由带负电的电子和带正电的原子核组成的,而且正、负电荷数量相等,不显电性。一般说来,分子中的正、负电荷并不集中于一点。但从与分子的距离比分子的线度大得多的地方看来,分子中全部负电荷对这个地方的影响与全部负电荷集中于某一点的情况等效,这个位置称为这个分子的负电荷的中心。同样,每个分子的正电荷也有一个中心。从微观结构来看,电介质可以分成两类:在一类电介质(如氢、氮、聚乙烯等)中,当外电场不存在时,分子的正、负电荷的中心是重合的,这类分子叫做无极分子;在另一类电介质(如水、玻璃、陶瓷等)中,即使不存在外电场,分子的正、负电荷的中心也不重合,形成一定的电偶极矩(称为分子的固有电矩),这类分子叫做有极分子。

电介质极化的微观机制如下:无极分子在没有外电场时,整个分子没有电矩。当有外电场时,无极分子中的正、负电荷的中心发生了偏离,形成了一个电偶极子,分子电偶极矩的方向跟外电场的方向一致。对于一块均匀电介质来说,每个电偶极子都沿电场方向排列,其内部仍是电中性的,但在和外电场垂直的两个界面上,一端出现负电荷,另一端出现正电荷,如图 1-15-23 所示。这种电荷不能离开电介质转移到其他物体上,也不能在电介质内部自由运动,叫做束缚电荷。也可以说,在外电场的作用下,电介质出现束缚电荷的现象叫做电介质的极化。在外电场作用下,无极分子的极化机制常称为位移极化。

有极分子在没有外电场时,就有固有电矩。但由于分子的无规则热运动,电矩的方向是紊乱的,在宏观上呈电中性。当有外电场作用时,每个分子的电矩(图 1-15-24 中黑的一端为正电荷)都受到力矩作用转向外电场方向。外电场越强,分子的电矩排列得越整齐。对于整个电介质来说,在垂直于电场方向的两端面上也产生了束缚电荷。这种极化机制称为取向极化。从微观上看,两类电介质的极化过程不同,但宏观效果是一样的。

电子位移极化效应在任何电介质中都存在,而取向极化是由有极分子构成的电介质所独有。不过,在有极分子构成的电介质中,取向极化效应比电子位移极化强得多,因而取向极化是主要的。在由无极分子构成的电介质中,位移极化是唯一的极化机制。

电极化强度(electric polarization)

电极化强度是表征电介质极化状态(包括极化的程度和极化的方向)的物理量。

当电介质没有被极化时,电介质的任一宏观小体积元 ΔV 内分子的电矩矢量之和互相抵消即 $p_{\text{分子}}=0$, 而当电介质处于极化状态时, $p_{\text{分子}} \neq 0$ 。为了定量地描述电介质内各处的极化情况,引入了电极化强度矢量。在电介质中,单位体积内分子电偶极矩的矢量和称为电极化强度矢量,简称极化强度,用 P 表示,即

$$P = \frac{\sum P_{\text{分子}}}{\Delta V} \quad (1)$$

极化强度 p 与束缚电荷间存在着一定的关系。如果介质是均匀的,界面上的束缚电荷面密度 ρ_p 等于极化强度 P 的法向分量,即

$$\rho_p = P_n$$

极化率 (polarizability)

极化率是表征电介质属性的物理量。

当把电介质放到外电场中时，由于介质中出现的束缚电荷也要产生电场，因而介质中各点的总电场强度 E 等于外电场的电场强度 E' 和束缚电荷所产生的附加电场强度 E'' 的矢量和，即

$$E = E_0 + E'$$

实验表明，对于大多数各向同性的电介质，极化强度 P 与 E_0 方向相同，且在数值上成正比关系。即

$$P = \chi_e \epsilon_0 E$$

式中 ϵ_0 是真空介电常量。比例常数 χ_e 叫做电介质的极化率，它只与介质的性质有关，而与场强 E 无关。

一些晶体材料(如水晶)的电性能是各向异性的，极化强度 P 与场强 E 的关系为

$$P_x = (\chi_e)_{xx} \epsilon_0 E_x + (\chi_e)_{xy} \epsilon_0 E_y + (\chi_e)_{xz} \epsilon_0 E_z ,$$

$$P_y = (\chi_e)_{yz} \epsilon_0 E_x + (\chi_e)_{yy} \epsilon_0 E_y + (\chi_e)_{yz} \epsilon_0 E_z ,$$

$$P_z = (\chi_e)_{zx} \epsilon_0 E_x + (\chi_e)_{zy} \epsilon_0 E_y + (\chi_e)_{zz} \epsilon_0 E_z$$

这时极化率需用 $(\chi_e)_{xx}$ 、 $(\chi_e)_{xy}$ 、…… $(\chi_e)_{zz}$ 等九个分量来描述。这样的物理量叫做张量。

电容率(permittivity)

表征电介质在外电场作用下极化性质的物理量。对于某种给定的电介质材料，一个电容器充满了这种电介质时的电容 C 和其中为真空时的电容 C_0 的比值，称为该材料的相对电容率(相对介电常量)，用 ϵ_r 表示，即

$$\epsilon_r = \frac{C}{C_0}。相对电容率是个无量纲的量。$$

ϵ_r 与真空电容率 ϵ_0 的乘积称为电介质的绝对电容率，用 ϵ 表示，即 $\epsilon = \epsilon_r \epsilon_0$ 。绝对电容率是一个与 ϵ_0 有相同量纲的量。真空的相对电容率 $\epsilon_r=1$ ，绝对电容率为 ϵ_0 ，所以通常把在库仑定律中引入的这个有量纲的系数 ϵ_0 叫做真空电容率。

相对电容率与极化率之间的关系(参见“电位移”)为 $\epsilon_r=1 + \chi_e$ 。

电位移 (electric displacement)

电位移是描述电介质中电场的一个辅助物理量，用符号 D 表示，其定义为

$$D = \epsilon_0 E + P.$$

式中 ϵ_0 为真空电容率， E 为介质中的场强， P 为介质的极化强度。

在各向同性的电介质中，极化强度矢量 P 与电场强度矢量 E 成正比，即 $P = \chi_e \epsilon_0 E$ ，于是上式可表示为

$$D = (1 + \chi_e) \epsilon_0 E = \epsilon_r \epsilon_0 E, \text{ 即 } D = \epsilon E$$

上式表明，如果 P 与 $\epsilon_0 E$ 成正比，则 D 也与 $\epsilon_0 E$ 成正比。

引入电位移矢量 D ，在某些情况下可以简化电介质中场强的计算。在有介质存在时必须把极化电荷产生的场考虑在内，静电场的高斯定理变为

$$\oiint_S E \cdot dS = \frac{1}{\epsilon_0} (q_f + q_p)$$

式中的 q_f 和 q_p 分别表示自由电荷和极化电荷 (束缚电荷)。由于闭合曲面 S 内的极化电荷 q_p 与面束缚电荷等值反号， $q_p = -\oiint_S P \cdot dS$ (参见“极化强度”)，可得

$$\oiint_S (\epsilon_0 E + P) \cdot dS = q_f$$

引入矢量 D ，则有

$$\oiint_S D \cdot dS = q_f,$$

由于 $\oiint_S D \cdot dS = \int_V \nabla \cdot D dV$ (散度定理)，所以有 $\nabla \cdot D = \rho_f$

即 D 的散度 (不是 D) 只与自由电荷有关。在实际问题中，自由电荷比较容易受实验条件的直接控制和观测，束缚电荷则不然。引入 D 矢量，在场强计算中可避开束缚电荷求出 D ，再应用 $E = D / \epsilon_0$ 的关系求出 E (是可以测量的)。

在有介质存在的电场中，类似于电场线 (E 线)，可以引入电位移线，即 D 线。 D 线上任意一点的切线方向与该点的 D 矢量方向相同。 D 线的起点和终点都在自由电荷上，而 E 线的起点和终点既可以在自由电荷上，也可以在束缚电荷上。

在电介质中， E 矢量仍然满足高斯定理 $\left(\oiint_S E \cdot dS = \frac{1}{\epsilon_0} (q_f + q_p) \right)$ 和环路定理 $\left(\oint_L E \cdot dl = 0 \right)$ 。这说明介质中的静电场和在真空中一样，也是有源而

无旋的。而 D 矢量一般说来并不满足环路定理。可以证明，只有在整个空间为均匀的电介质所充满或不同介质的分界面为等势面时， D 矢量才能满足环路定理。因此，在有电介质存在的电场中，代表场强的仍然是 E 矢量，而不是 D 矢量。 D 矢量只是为了方便而引入的辅助量。

驻极体 (electret)

极化后其极化强度能长期保持的电介质叫做驻极体。把融化的树脂、蜂蜡等的混合物放在电容器中用强电场使之极化，并在电场中使之凝固即可制得。这种利用加热使之熔化并在电场中冷却而制得的驻极体称为热驻极体。此外，还有利用光照而制得的光驻极体，利用辐射而制成的辐射驻极体以及只利用施加电场而制得的电驻极体。形成驻极体的机理虽然已有几种说法，但还不能阐述清楚。

能制成驻极体的材料有天然蜡、树脂、松香、磁化物、某些陶瓷以及有机玻璃等。驻极体能长期保持其极化强度的特性，与永磁体的性质有些类似，常用来制造电容麦克风、静电计等。

铁电体 (ferroelectrics)

电容率很大且随外电场而变化的电介质称为铁电体。铁电体内，在不存在外电场时也有着自发极化的小区域，这种小区域称为电畴。不过各个电畴自发极化的方向并不相同，所以整个铁电体的电矩为零。

在外电场作用下，铁电体呈现出很强的极化，且极化强度 P 与 $\epsilon_0 E$ 之间呈现出复杂的非线性关系，并显示出“电滞效应”，即铁电体中电极化强度对于场强的滞后关系。若大小和方向都能改变的交变电场作用于铁电体上，当电场第一次从零变到正时，极化强度沿曲线 $0a$ 增大(图 1-15-25)。a 点相当于极化强度的饱和点。减小电场强度，极化强度也随之减小，但并不沿着 $a0$ 减小，而是沿着曲线 ab 减小，当 $E=0$ 时 P 并不消失，而是保留了 $0b$ 线段所示的剩余电极化强度，只有在反向电场作用下， P 才会消失。这个使 P 消失的场强由线段 $0c$ 来表示。继续增强反方向电场，铁电体会在相反方向上达到饱和极化强度。如果电场强度再由负值向正的方向改变，极化强度将沿曲线 $a b c a$ 改变。这样就得到了一条封闭曲线，叫做电滞回线。这种现象与铁磁质的磁滞现象类似。

当温度超过某一定值时，热运动将破坏电畴结构，使铁电特性消失。这一温度称为居里温度。

最早发现的铁电体是酒石酸钾钠 $[\text{NaK}(\text{C}_4\text{H}_4\text{O}_4) \cdot 4\text{H}_2\text{O}]$ ，又称罗歇盐。以后又发现磷酸二氢钾 KH_2PO_4 、钛酸钡 BaTiO_3 以及各种金属的钛酸、锆酸、铌酸和钽酸等化合物都是铁电体。铁电体中酒石酸钾钠很特殊，有上、下两个居里点： 24°C 和 -18°C ，在两点之间才有铁电性。

铁电体在工程技术上有广泛的应用。例如钛酸钡，可用来制造温度无须严格稳定的大电容的电容器。因为它有很高的电容率和足够的机械强度。铁电体还可作频率倍增器，这是因为铁电体制成的电容器，它的电容对电压具有非线性关系，当交变的正弦波电压加在钛酸钡制成的电容器上时，流经电容器的电流便含有能够分离出来的高次谐波。铁电体这种非线性特性还可用来制作电介质放大器。由于铁电体具有显著的压电效应，还可用作压电元件。

压电效应 (piezoelectric effect)

有些固体电介质，由于结晶点阵的特殊结构，当晶体沿某一方向上受到压力发生应变时会产生极化，在相对的两面上产生异种的束缚电荷，且所产生的电荷量与压力成正比。这种现象叫做压电效应。具有这种现象的物质以石英、电气石、钛酸钡、酒石酸钾钠为代表。这些物质受到张力时两端面出现与受到压力时符号相反的电荷(图 1-15-26)。

压电现象还有逆效应。当在晶体上加电场时，晶体会发生应变，应变的大小与外加场强成正比，外电场的方向改变，应变的正负号也改变。

电介质在外电场中还会产生与场强的二次方成正比的应变，这种效应称为电致伸缩电致伸缩的另一特点是应变的正负与外电场的方向无关。电致伸缩起因于电介质的极化，是一切电介质都具有的性质。

压电效应和逆压电效应已被广泛地应用于近代技术中。利用压电效应的例子如下：利用压电晶体的机械振动可以变为电振动的性质可以做成晶

体振荡器。这种振荡器的突出优点是频率高度稳定。压电晶体还应用于扩音器、电唱头等电声器件，把机械振动(声波)变为电振动。利用压电效应还可以测量各种情况下的压力、振动频率以及振幅。利用电致伸缩的例子如下：在电话耳机中利用压电晶体的电致伸缩效应把电的振荡还原为晶体的机械振动，再使这种振动通过金属片发出声音。利用电致伸缩效应还可以产生超声波。将压电晶片放在平行板电极间，在电极间加上频率与晶片的固有频率相同的交变电压，晶片就产生强烈的振动而发射出超声波。

电场的能量和能量密度 (energy and energy density of electric field)

一带电体或一带电系统的带电过程，同时也就是带电体或带电系统的电场的形成过程。在静电场中，由于电荷和电场总是同时存在相伴而生的，我们无法分辨电能是与电荷相联系，还是与电场相联系。而在交变电磁场中，能量可以脱离电荷以电磁波的形式传播，证实了能量储存在电磁场中。从场的观点来看，带电体或带电系统的能量也就是电场的能量。这样，电能的公式就可以用描述电场的物理量电场强度表示出来。下面通过平行板电容器的例子来说明。

电容为 C 的平行板电容器，当两个极板之间的电势差为 U 时，所储存的能量为

$$W = \frac{1}{2}CU^2 .$$

将 $U = Ed$ ， $C = \frac{\epsilon S}{d}$ 代入上式得

$$W = \frac{1}{2} \frac{\epsilon S}{d} E^2 d^2 = \frac{1}{2} \epsilon E^2 Sd = \frac{1}{2} \epsilon E^2 V . \quad (1)$$

式中 V 表示电容器极板间电场所占空间的体积。

上式表明，平行板电容器所储存的电能与电容器内电场强度、电介质的电容率以及电场的空间体积有关系。由于电容器中电场是均匀分布的，所储存的能量也是均匀分布的。因此，单位体积内所储存的电场能量

$$w = \frac{W}{V} = \frac{1}{2} \epsilon E^2 = \frac{1}{2} DE . \quad (2)$$

上式是一个普遍适用的公式， w 叫做电场的能量密度。

公式(1)和(2)也表明了电场是电能的携带者，这对于了解电磁场的性质，具有很大的意义。能量是物质固有的属性之一，电场的能量就是电场物质性的一种表现。

静电除尘 (electrostatic precipitation)

为了防止空气污染，静电除尘广泛地应用于发电、炼铁、冶金、水泥以及其他伴随着粉尘和烟雾发生的各种工矿企业中。静电除尘的物理原理是让带电的粉尘或烟雾微粒在电场力作用下，奔向电极并吸附到电极上。使气体中的粉尘或烟雾粒子带电的方法，一般采用电晕放电。

圆筒型静电除尘器的构造和原理如图 1-15-27 所示。将细金属丝 A 悬挂在接地的金属圆筒 B 中， A 接高压电源负极， B 接高压电源正极。当电压达到某一数值时，在金属丝与圆筒之间有很强的电场，并且距金属丝越近电场越强。这时，金属丝附近的空气就被电离。正离子跑到金属丝上又变

成空气分子。在电子奔向带正电的圆筒的过程中，遇到从圆筒下方进入圆筒的含有粉尘或烟雾的气体时，就会使它们带上负电。在电场的作用下它们被吸附在圆筒的内壁上进行放电并堆积在那里，净化了的气体从圆筒上方逸出。堆积的粉尘，在敲打圆筒时，落入下部的集尘器中。外边的带正电的圆筒电极叫做集尘极，里面的带负电的金属丝叫做放电极。

静电喷涂(electrostaticpainting)

在静电力作用下，使带电的涂料微粒在工件表面上形成光滑的涂层。静电喷涂的原理如图 1-15-28 所示。具有锐利边缘的金属喷杯高速旋转着，涂料从中心管送到喷杯里，旋转喷杯中的涂料由于受离心力的作用沿杯壁甩出，并分散成雾状。为了使涂料都能吸附在被涂工件上，把喷杯和被涂工件接到直流高压电源上，喷杯接电源的负极，工件接电源的正极，并使工件接地。这样，在喷杯和被涂工件之间就有几万乃至 10 万伏的高压，形成很强的电场，在杯口的边缘产生强烈地电晕放电。因此，由喷杯喷出的雾状涂料微粒都带负电，在电场力的作用下奔向工件并吸附在工件表面上。在现代化的连续作业中，把工件挂在接地的传送链上，依次从喷杯前面通过。在喷涂大的工件时，同时配备几个喷杯，以使每个侧面都能喷上。目前我国许多工厂都采用这种喷涂法为自行车、汽车以及家用电器产品进行喷涂。

静电植绒

利用静电在布底以及其他材料的面上栽植短纤维，或在布底上栽植花纹，叫做静电植绒。图 1-15-29 是静电植绒的工作示意图。1 是一块接高压直流电源(约 40kV ~ 50kV)正极的金属平板，2 是一个接高压直流电源负极的金属网框，上面放着绒毛。用粘着剂涂成花纹的纺织品紧贴着金属板。当接通高压电源以后，金属网和金属板之间就形成很强的电场。开动马达使卷轴 3 和 4 转动，纺织品就匀速地经过强电场。绒毛在电场中被极化，接近下面金属板的一端带负电，远离金属板的一端带正电，从而下端受到金属板的吸引，上端受到金属网的吸引而直立起来。由于绒毛上端与金属网接触，正电荷被中和，失去了金属网对它的吸引力，便在它下方金属板引力的作用下疾速落到纺织品上。落到纺织品上涂有粘着剂的地方的绒毛被粘住，落到纺织品上其他地方的绒毛，所带的负电荷被纺织品中和后带上了正电荷，并在电场力的作用下又回到金属网，金属网再中和它所带的正电荷。这样反复下去，我们就可以看到纺织品上涂有粘着剂的地方植上了很多绒毛，并随着纺织品的运动构成了精致的图案。

静电分选(electrostaticseparation)

利用静电场的作用来进行物质的分离、提纯、分级等一类技术，叫做静电分选。利用电晕放电的圆筒式分选装置如图 1-15-30 所示，其分选原理主要是利用物质电导率的差别进行分选。图中的回转圆筒接地，圆筒前方的放电极接高压直流电源负极。由于电晕放电，放电极附近的空气电离，所以和放电极极性相同的空气负离子向着圆筒的方向喷射。这些负离子与从料斗里出来落在圆筒上的混合粒子碰撞，使它们带上了负电荷。电导率高的粒子，立刻把负电荷传给了圆筒，并作为圆筒的尖端聚集了正电荷，

被排斥而离开圆筒向前方落下。电导率较低的粒子带上负电荷后，不会马上把负电荷传给圆筒，因而被吸附在圆筒上。中等电导率的粒子，被吸附一段时间失去了全部负电荷后带上了正电荷，就会受到圆筒的排斥而落在圆筒的下方。电导率很小的粒子，则一直吸附在圆筒上，被后边的刮板刮落。

目前，静电分选的方法广泛地应用于矿石、食品、煤炭以及城市垃圾的处理回收等方面。

静电危害的防止

静电引起的危害，在生产、生活上给人们带来很多麻烦。防止静电危害的基本办法是，控制静电的产生和积累，消除或减轻周围环境爆炸和火灾的危险。

控制静电的产生和积累主要是控制工艺过程以及工艺过程中所用材料的选择，来限制静电的产生和加速静电的泄漏和中和。例如，用降低工艺过程的速度，以降低摩擦的强度来限制静电的产生。还可以人为地使生产物料与不同材料制成的设备发生摩擦，使物料与一种材料制成的设备摩擦时带正电，与另一种材料制成的设备摩擦时带负电，以使物料上的静电互相抵消。抗静电剂具有较好的导电性，把它加入容易产生静电的材料中，能加速静电泄漏，消除静电危险。例如，在化纤行业，为了控制静电的危害，经常采用抗静电的油剂，以增大合成纤维的电导率。在橡胶行业，用添加炭黑的办法来增大橡胶的电导率，制造出导电轮胎、导电软管和导电传送带。人们还常常用涂抗静电剂来进行表面处理，以增加表面电导率。例如，用抗静电剂来喷洒传送带或地板。

用增湿的办法也可以增加静电沿绝缘体表面的泄漏，这是因为随着湿度的增加，绝缘体表面上形成很薄的水膜，水膜含有杂质和溶解物质，有较好的导电性。例如，在聚乙烯粉末的生产过程中，采用了在输送和分离过程中先给粉末浇水，分离后再行干燥的方法。在有静电危险的场所，还可以安装空调设备、喷雾器来提高空气的相对湿度。

接地是消除静电危害最常见的办法。在生产过程中，凡用来加工、储存、运输各种易燃液体、易燃气体和粉体的设备，如储气罐、过滤器、干燥器、泵等都必须接地。工厂及车间的氧气、乙炔的管道以及其他能产生静电的管道和设备都必须连接成整体后，予以接地。油罐车行驶时，为了导走汽车轮胎与路面摩擦而产生的静电电荷，有一条拖在地上的金属链条，链条的一端和油罐车底盘相连，另一端与大地接触。进入危险场所的人员，应穿上导电鞋，保持人体与大地的电气接触。

消除或减轻周围环境爆炸和火灾的危险，就要防止有爆炸性混合物存在，并消除引起爆炸和火灾的条件。例如，在化工行业的一些工艺过程中，常常用易燃液体汽油和煤油洗涤设备或设备零部件上的油污。而汽油和煤油在表面附近产生的蒸气容易与空气形成爆炸性混合物，燃点很低，又比较容易产生静电。因此，可采用危险性较小的三氯乙烯、四氯化碳溶剂作为洗涤剂。还可以在爆炸和火灾危险场所采用通风装置或抽气装置及时排出爆炸性混合物，使混合物浓度不超过安全限度，以防静电火花引起爆炸或火灾。另一方面要减少爆炸性混合物中氧的含量，消除引起燃烧的条件。通常情况下，混合物中氧的含量不超过 8% 时即不会引起燃烧。比较常见

的方法是在爆炸性混合物中填充氮或二氧化碳，对于镁、铝等粉尘爆炸性混合物，填充氩、氦等惰性气体。

主要参考资料：

1. 赵凯华，陈熙谋。电磁学(上册)。第1版。北京：人民教育出版社，1978。
2. 上海师范大学物理系。物理学 电磁学。第1版。上海科学技术出版社，1979。
3. 程守洙，江之永。普通物理学(第二册)。第3版。北京：人民教育出版社，1979。
4. 梁绍荣，刘昌年，盛正华。普通物理学(第三分册：电磁学)。北京：高等教育出版社，1988。
5. 中国大百科全书出版社编辑部。中国大百科全书·物理学。第1版。北京：中国大百科全书出版社，1987。
6. 科学出版社名词室。物理学词典(上册)。北京：科学出版社，1988。
7. 郭硕鸿。电动力学。北京：人民教育出版社，1979。
8. 梁百先等。电磁学教程。北京：高等教育出版社，1983。
9. 梁灿彬等。电磁学。北京：人民教育出版社，1980。
10. E. M. 珀塞尔。电磁学。北京：科学出版社，1975。
11. C. . 福里斯，A. B. 季莫列娃。普通物理学(第二卷)。北京：商务印书馆，1953。
12. . B. 史包尔斯基。原子物理学(第一卷)。北京：高等教育出版社，1954。
13. [日] 菅义夫。静电手册。北京：科学出版社，1981。
14. 文荆江。静电及其应用。北京：科学出版社，1978。
15. 陈鹏万。电磁学。北京：人民教育出版社，1978。
16. 张济怀。静电场。北京：北京师范大学出版社，1982。
17. 杨有启。静电安全技术。北京：化学工业出版社，1983。
18. 海因茨·哈斯。静电危害性——评价和控制。北京：机械工业出版社，1984。

十六、恒定电流

电流(electric current)

电荷的定向流动形成电流。产生电流的条件有两个：(1)存在自由电荷；(2)存在电场。

在金属中，电流是由带负电的电子的流动形成的。而在电解液和气态导体中，电流却是由正负离子及电子形成的。因为负电荷沿某一方向运动和等量的正电荷沿反方向运动所产生的电磁效应相同(霍耳效应是个例外)，为了研究问题方便，传统上规定正电荷流动的方向为电流的方向。这样，在导体中，电流的方向总是沿着电场的方向从高电势处指向低电势处。

单位时间内通过导体任一横截面的电量叫做电流强度。如果从时刻 t 到 $t + \Delta t$ 通过导体任一横截面的电量为 q ，那么在 t 时刻的电流强度就是

$$I = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{\Delta q}{\Delta t} = \frac{dq}{dt} .$$

电流强度的单位是安培，简称安，用符号 A 表示。是国际单位制中七个基本单位之一。

电流强度是标量，它只能描述导体中通过某一截面电流的整体特征。可是，在实际中有时会遇到电流在大块导体中流动的情形，这时导体的不同部分电流的大小和方向都不相同，形成一定的电流分布，叫做电流场。电流场用电流密度来描述。电流密度是一个矢量，电流场中某点的电流密度 j ，其方向为通过该点的电流方向，其量值等于通过该点垂直于电流方向的面积元 dS 的电流强度 dI 与面积元 dS 之比： $j = \frac{dI}{dS}$ 。所以有

$$dI = j dS$$

如果所取的面积元 dS 不与该点的电流方向垂直，它的法线 n 与电流方向的夹角为 θ ，则

$$dI = j dS \cos \theta .$$

写成矢量式是

$$dI = j \cdot dS .$$

通过导体任意截面 S 的电流强度 I 可用下式表示：

$$I = \iint_{(S)} j \cdot dS = \iint_{(S)} j \cos \theta ds .$$

电流的连续性方程 (continuity equation of electric current)

电流场必须满足的方程，它的实质是电荷守恒定律。

设想在导体内取任一闭合曲面 S ，在 S 面上处处取外法线，则通过 S 面的电流强度 $I = \oiint_{(S)} j \cdot dS$ ，它表示单位时间内由 S 面内流出的电量。根据

电荷守恒定律，它应该等于单位时间内 S 面内电荷的减少量。设在时间 dt 内包含在 S 面内的电量的变化为 dq ，则在单位时间内 S 面内的电量减少

为 $-\frac{dq}{dt}$ 。由此得

$$\oiint_{(S)} j \cdot dS = -\frac{dq}{dt} .$$

上式是电流连续性方程的积分形式。根据矢量分析中散度的定义

$$\nabla \cdot \mathbf{j} = \lim_{\Delta V \rightarrow 0} \frac{1}{\Delta V} \oiint_{(S)} \mathbf{j} \cdot d\mathbf{S} = \frac{\partial j_x}{\partial x} + \frac{\partial j_y}{\partial y} + \frac{\partial j_z}{\partial z},$$

连续性方程还可写成微分形式

$$\nabla \cdot \mathbf{j} = -\frac{dp}{dt}.$$

即某点处电流密度的散度等于该点处电荷密度的减少率。

恒定电流 (steady current)

电路中各点电流密度的大小和方向都不随时间而变化的电流叫做恒定电流。

在恒定电流的情况下，空间的电荷分布必须不随时间变化，即 $\frac{dp}{dt} = 0$ ，

这就是恒定电流的条件。由电流的连续性方程，上述条件可写作

$$\oiint_{(S)} \mathbf{j} \cdot d\mathbf{S} = 0 \text{ 或 } \nabla \cdot \mathbf{j} = 0,$$

恒定电流的条件表明，单位时间内从闭合曲面某些部分流入的电荷量必须等于从该闭合曲面其他部分流出的电荷量。因此，恒定电流没有源头，它的电流线或者是闭合的，或者是来自无限远去至无限远。

既然在恒定电流中电荷的空间分布始终是恒定的，恒定电流激发的电场，就应该和静止电荷按照这个电荷分布所激发的静电场相同。既然空间每一点的电荷密度保持不变，尽管由于电流的存在，空间某点上的电荷会被另外的电荷所代替，也不会影响到电场强度。因此，恒定电流的电场，和静电场一样，是个恒定电场，而且是有势场，它的场强 E 可用电势梯度来表示： $E = -\nabla V$ 。

恒定电流的恒定场和静电场的最根本的差别在于：要维持前一种电场必须连续地消耗能量，而在静电场中不会发生任何的能量转换。电荷在电场力作用下沿导体移动时，电场力做了功，和这个功等值的能量以焦耳热的形式释放出来。释放的全部能量，都要由其他形式的能量——机械能(发电机)、化学能(电池)、内能(温差电池)等来补偿。换言之，要维持恒定电流，必须在电路的某一区段有非静电起源的电动势。消耗在焦耳热上的电能，由这种电动势所做的功来补偿。

电路 (electric circuit)

由电源、负载及中间环节三部分组成的电流的通路称为电路。

电源是供应电能的装置。常用的电源有电池和发电机，它们将非电能(化学能和机械能等)转换为电能。

负载是用电设备，如电灯、电动机、电炉或某些电路元件。它们将电能转换为其他形式的能量。

中间环节是传递、分配和控制电能的部分。电源接在它的输入端，负载接在它的输出端。最简单的中间环节是由导线、开关和熔断器组成的。其中开关和熔断器分别是起控制和保护作用的元件。中间环节也可以是比较复杂的网络或系统。

电路中的电流是不随时间而变化的恒定电流时，称为直流电路。电路

中任何一个闭合路径都称为回路。只有一个回路的电路称为无分支电路。较复杂的电路包含着不只一个回路，称为有分支电路，其中的每一条分支都称为支路，每一条支路中通过的是同一的电流。图 1-16-1 所示的电路中，有 abcd、ad、afed 三条支路，其中 abcd 和 afed 两条支路内含有电源，称为有源支路，ad 支路是不含电源的，称为无源支路。电路中三条或三条以上支路的联接点称为节点。图 1-16-1 的电路中，有 a、d 两个节点。

全部由线性元件组成的电路称为线性电路。电路中含有非线性元件的，叫做非线性电路。

电阻(resistance)

导体两端的电压 U 与通过导体的电流强度 I 之比，叫做导体的电阻，常用符号 R 表示：

$$R = \frac{U}{I} .$$

在端电压一定的条件下，电阻 R 是确定通过导体电流强弱的物理量。

由 $I = \frac{U}{R}$ 可知，导体的 R 越大，通过导体的电流 I 就越小。因此可以认为

R 描述了导体阻碍电流通过的特性。这正是电阻一词的由来。

根据金属的经典理论，金属的电阻起源于自由电子与点阵上的原子碰撞所造成的对电子定向迁移运动的阻碍作用(参见“欧姆定律”)，这也是电阻通电时会产生焦耳热的原因。

截面积均匀的导体，它的电阻跟它的长度 L 成正比，跟它的截面积 S 成反比，即

$$R = \rho \frac{l}{S} .$$

这个关系叫做电阻定律。关系式中的比例常量 ρ 是材料的电阻率，是表征材料导电性能的物理量。

电阻的单位是欧姆，简称欧，符号是 Ω 。 $1 \Omega = 1V/A$ 。电阻率的单位是欧米符号是 $\Omega \cdot m$ 。

不只导体，半导体和绝缘体都有电阻。导体的电阻率最小，具有良好的导电性，而绝缘体的电阻率很大，在未被击穿的情况下，可以认为它是不导电的。

电阻的倒数称为电导，常用 G 表示：

$$G = \frac{I}{U} .$$

电导的单位是西门子，简称西，符号是 S ， $1S = 1 \Omega^{-1}$ 。

电阻率的倒数称为电导率，常用 σ 表示。电导率的单位是 S/m 。

欧姆定律(Ohm law)

恒定电流的基本定律，常表述如下：加在导体两端的电压 U 与通过导体的电流强度 I 成正比，即 $U \propto I$ 。写成等式就是

$$U = RI \text{ 或 } I = \frac{U}{R} . \quad (1)$$

式中的常量 R ，即为导体的电阻。欧姆定律适用于金属导体和电解液。对于气态导体(如日光灯管中的汞蒸汽)和电子管、晶体管等电子器件，欧姆定律不适用。

(1)式表示的是欧姆定律的积分形式，它描述了一段有限长度、有限截面积的导体的导电规律。欧姆定律还可表述为微分形式：导体上任意一点的电流密度矢量 j 的方向与该点的电场强度 E 的方向相同，它的大小与 E 成正比，写成等式即为

$$j = \sigma E \quad (2)$$

式中的比例常量 σ ，为导体的电导率。微分形式的欧姆定律把属于导体上某一点的两个物理量联系起来。

应该注意，(2)式所示的微分形式的欧姆定律，只适用于各向同性的导体。对于各向异性的导体(单晶体)， j 与 E 的方向通常并不相同，它们之间有如下的关系：

$$\begin{aligned} j_x &= \sigma_{xx}E_x + \sigma_{xy}E_y + \sigma_{xz}E_z \\ j_y &= \sigma_{yx}E_x + \sigma_{yy}E_y + \sigma_{yz}E_z \\ j_z &= \sigma_{zx}E_x + \sigma_{zy}E_y + \sigma_{zz}E_z \end{aligned}$$

这个关系也可写作

$$j_i = \sigma_{ik}E_k$$

式中的 σ_{ik} 是个二秩张量，称为电导率张量。

欧姆定律也可推广到含源电路(参见“闭合电路的欧姆定律”)和交流电路。不过在交流电路中，不仅有电阻，还有电感和电容，它们都对电流起阻碍作用，所以(1)式中的电阻 R 要用阻抗 Z 来代替(参见“阻抗”)。

伏安特性曲线(volt-ampere characteristics)

以加在电学元件两端的电压 U 为横坐标、通过元件的电流 I 为纵坐标画出的曲线，叫做该元件的伏安特性曲线，简称伏安特性。能适用欧姆定律的元件，伏安特性是一条通过原点的直线(图 1-16-2)，这条直线的斜率等于元件电阻的倒数(即电导)，是一个与电压和电流无关的常量；具有这种性质的元件称为线性元件。欧姆定律不能适用的电学元件，伏安特性是通过坐标原点的曲线，它的电阻值随电压和电流而改变，不是常量；具有这种性质的电学元件，称为非线性元件。图 1-16-3 甲和图 1-16-3 乙，是两种常用的非线性元件的伏安特性。对于非线性元件，也常说它的电阻，这时是把 U/I 作为其电阻来定义的。

电阻温度系数(temperature coefficient of resistance)

各种材料的电阻率都随温度而变化，其中金属导体电阻率的变化比较规则。设在 0°C 时某种金属的电阻率为 ρ_0 ，温度变化到 t ($^\circ\text{C}$)时电阻率变为 ρ_t ，若温度的变化范围不太大时， ρ_t 与 ρ_0 间近似地有如下的线性关系：

$$\rho_t = \rho_0(1 + \alpha t)$$

式中的 α 为一常量，称为该种金属的电阻温度系数。

对于绝缘体和半导体，电阻率随温度的升高而急剧减小，而且变化不是线性的。图 1-16-4 甲、乙显示出金属和半导体材料的电阻率随温度而

变化的不同特点。

电阻温度计(resistance thermometer)

应用电阻率随温度而变化的特性，通过测量金属丝电阻来确定温度的装置。电阻的测量用惠斯通电桥。

纯金属铂电阻温度计，是一种最准确最可靠的仪器，常作为实用的标准温度计。为了使测得的温度尽量接近热力学温度，采用了较复杂的测温关系。

在冰点(0)与铟点(即铟的熔点 630.5)之间，纯铂的电阻与温度 t 的关系可表示为

$$R_t = R_0(1 + At + Bt^2)。 \quad (1)$$

其中 R_0 , A , B 为常量，它们的数值由在三个固定温度的电阻来确定，这三个固定温度是：(1)冰点(0)，(2)汽点(100)，(3)硫点 444.600 (即硫磺在 101 kPa 下的沸点)。精密铂电阻温度计最高准确度可达万分之一摄氏度，而(1)式中的 t 与气体温度计的差一般不超过 0.02 。

在冰点与氧点(即氧在 101kPa 下的液化点—182.970)之间，电阻与温度 t 之间的关系改用下式：

$$R_t = R_0 [1 + At + Bt^2 + C(t-100)t^3]。 \quad (2)$$

其中 R_0 , A , B , C 为常量，由四个温度下电阻的数值来确定，这四个温度是：(1)冰点，(2)汽点，(3)硫点，(4)氧点。用(2)式确定的温度，准确度比(1)式所确定的略低一些。

超导体(superconductor)

某些金属、合金和化合物，冷却到一定温度时，电阻突然消失，这种性质称为超导电性。具有超导电性的物体称为超导体，电阻为零的状态称为超导态，电阻不为零的状态称为正常态，由正常态转变为超导态的温度 T_c 。称为临界温度。目前已知有二十余种金属元素、几千种合金和化合物都具有超导电性。超导金属元素中已知临界温度最高的是铌， $T_c=9.3K$ ；1986年以前发现的超导合金和化合物中，临界温度最高的是铌三锗， $T_c=23.2K$ ；1986年以来，发现了钇钡铜氧、铋锶钙铜氧和铊钡钙铜氧等氧化物高温超导体体系，临界温度最高的可达 130 K。最近发现的汞系超导体，据报道临界温度已达 164 K。

磁场中的超导体，在场强超过一定值 H_c 时，超导电性会被破坏，这一场强值称为临界磁场。临界磁场与温度的关系为 $H_c = H_0 [1 - (T/T_c)^2]$ 。式中 H_0 为 0K 时的临界磁场。临界磁场可以是外加的，也可以由通过超导体的电流来产生。所以超导体能承载的电流也有一定的限制。超导体所能承载的最大电流密度 J_c 称为临界电流密度。

因此。超导态只能在图 1-16-5 中过 T_c 、 H_c 和 J_c 三点的曲面下方的区域内出现，在这个区域之外，超导体回复到正常态。通过 T_c 、 H_c 和 J_c 三点的曲面称为超导体的临界曲面。

超导体除电阻为零外，还具有抗磁性。超导材料冷却到临界温度以下转变成超导体时，就会排斥外加磁场，使超导体内部的磁感应强度变为零，

而且不管磁场是在试样冷却前加上的，还是在冷却后加上的，只要磁场小于临界值就行。这是因为外加磁场使超导体在它的表面上产生无损耗的环绕电流，这个电流在超导体内部产生的磁感应强度处处与外磁场产生的磁感应强度大小相等、方向相反，因而在试样内部磁感应强度完全被抵消。

超导体按照它排斥磁场的方式可分为两类。第一类超导体，在磁场达到 H_c 之前，磁场完全被排除在试样之外，而在磁场高于 H_c 时，磁场完全透入试样中，材料回复到正常态。除钒、铌、锆外，所有的金属元素超导体都属于第一类超导体。第二类超导体，存在着下临界磁场 H_{c1} 和上临界磁场 H_{c2} (图 1-16-6)。磁场低于 H_{c1} 时，材料完全处于超导态，电阻为零，磁场不能透入试样。从磁场达到 H_{c1} 开始，电阻虽然仍等于零，但试样中部分区域有磁场透入，变为正常态。这种正常态与超导态并存的状态称为混合态。随着磁场的增强，试样中能透入磁场的区域不断扩大，直到磁场达到 H_{c2} 时，试样完全变为正常态，回复到正常电阻。钒、铌、锆三种元素超导体和大多数合金、化合物超导体，都属于第二类超导体。第一类超导体的 T_c 和 H_c 值都比较小，在技术上有重大意义的都是第二类超导体，特别是那些在强磁场下仍然显示出超导电性的材料。

普通导体的电阻是由于传导电子与点阵之间的散射改变了电子的动量，使电子沿电场方向的加速运动受到阻碍。超导电性的产生则是一种传导电子的合作现象。根据巴丁 (Bardeen)、库珀 (Cooper) 和施里弗 (Schrieffer) 的超导微观理论 (通称 BCS 理论)，超导体内电子系统的基态 (即超导体在绝对零度下的状态) 是由库珀电子对凝聚而成的。库珀电子对是动量和自旋都相反的一对电子通过点阵的间接作用相互吸引，当这种吸引作用超过两电子间的库仑排斥作用时，就结合成电子对。库珀电子对与单个的传导电子不同，它在散射时总动量保持不变。在没有外电场时，每对的总动量等于零。在有外电场时，库珀电子对在外电场作用下获得动量后，每对的总动量都等于某一非零的值。去掉外电场后，附加的动量也不会因散射而减小，因而由附加动量引起的电流不会衰减，这就形成了超导电性。随着温度的升高，超导体由基态向激发态跃迁，一些库珀电子对被拆散，成为正常的传导电子；当温度上升到临界值时，库珀电子对完全被拆散，试样就由超导态过渡到正常态。BCS 理论是金属超导体理论，如何解释氧化物高温超导体的行为，目前学术界尚无定论。

超导体应用的一个重要方面是用来制造磁体。跟用常规方法制备的电磁铁相比，用超导线绕制的电磁铁体积小、重量轻、能耗小，能达到很高的磁场值，目前已制造出磁感应强度达 18 特斯拉的超导磁体。超导磁体在医用磁共振成像、高能加速器和实验室用磁体方面应用已相当广泛；在磁约束聚变、磁悬浮列车、磁流体发电等方面的应用也有广阔的前景。

超导体应用的另一个重要方面，是利用约瑟夫森效应，制造超导量子器件。两块超导体间夹一薄绝缘层 (称为约瑟夫森结)，超导电子对可穿过绝缘层从一个超导体进入另一超导体。在没有任何电场或磁场的情况下，有直流电流通过结，这叫直流约瑟夫森效应。如果在结的两端加一直流电压 U ，则在结中产生射频电流振荡，发射频率为 $\nu=2eU/h$ 的电磁波，即库珀电子对从高电势超导体穿过结到达低电势超导体时，会把从结中获得的能量发射出去；如果在结上加直流偏压 U 的同时，加一 $\nu=n \cdot 2eU/h$ 的交流

射频电压($n=1, 2, \dots$), 就会有直流成分的超导电流通过结: 这叫做交流约瑟夫森效应。应用交流约瑟夫森效应, 测出直流偏压 U 和电流振荡频率 ν , 多就可精确确定 e/h 的值; 反之, 已知 e/h 值又可精确测定 U 值。所以交流约瑟夫森效应用以确定电压的自然标准。用含有双结的超导环制成的超导量子干涉器, 可精确测定磁场, 常用作磁强计测量磁感应强度, 分辨能力可达 $10^{-11}\text{T} \sim 10^{-12}\text{T}$ 。

近几年来制备的高温超导材料, 因受到材料制备难, 临界电流较小等限制, 要达到实用化尚需一定时间。根据约瑟夫森效应在电子学方面的应用, 则是可以较快实现的。1996年, 日本的住友电气工业公司用铋系超导体成长 1000 米的线材, 临界电流密度达 $16000\text{A}/\text{cm}^2$, 向超导的实际应用方面又跨出了一步。

电阻的串联(series connection of resistances)

把多个电阻一个接着一个地联结起来, 使电流只有一条通路, 这样的联接方式叫做电阻的串联。串联电路的特点是:

(1) 通过各个电阻的电流相同: $I_1=I_2=\dots=I_n=I$ 。

(2) 串联电路两端的总电压等于各个电阻上的电压之和: $U=U_1+U_2+\dots+U_n$ 。

(3) 串联电路的总电阻(等效电阻)等于各个电阻之和: $R=R_1+R_2+\dots+R_n$ 。

(4) 各个电阻上的电压与电阻的阻值成正比: $\frac{U_1}{R_1}=\frac{U_2}{R_2}=\dots=\frac{U_n}{R_n}=I$

(5) 各个电阻上消耗的电功率与电阻的阻值成正比:

$$\frac{P_1}{R_1}=\frac{P_2}{R_2}=\dots=\frac{P_n}{R_n}=I^2$$

在实际电路中, 串联在一起的几个电阻的阻值有时相差几个数量级。在这种情况下, 外加电压几乎全部降落在高电阻上, 等效电阻和电流也主要由高电阻决定, 低电阻的作用实际上可以忽略。

串联电路可以用来分压。满偏电流较小的电流计, 串联一个远大于其内阻的分压电阻, 就可以改装成电压表(伏特表)。如果已知电流表的内阻为 R_g , 满偏电流为 I_g , 要把它改装成量程为 U 的电压表, 必须串联的分

$$\text{压电阻为 } R_m = \frac{U}{I_g} - R_g$$

电阻的并联(parallel connection of resistances)

把多个电阻并排地联接起来, 使电路有两个结点和多条支路, 这样的联接方式叫做电阻的并联。并联电路的特点是:

(1) 各个电阻两端的电压相同: $U_1=U_2=\dots=U_n=U$ 。

(2) 通过并联电路的总电流强度等于通过各个支路的电流强度之和: $I=I_1+I_2+\dots+I_n$ 。

(3) 并联电路的总电阻(等效电阻)的倒数等于各个电阻的倒数之和:

$$\frac{1}{R} = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} + \dots + \frac{1}{R_n}$$

(4) 通过各个电阻的电流与电阻的阻值成反比： $I_1 R_1 = I_2 R_2 = \dots = I_n R_n = U$ 。

(5) 各个电阻上消耗的功率与电阻的阻值成反比： $P_1 R_1 = P_2 R_2 = \dots = P_n R_n = U^2$ 。

在实际电路中，并联在一起的几个电阻的阻值有时相差几个数量级。在这种情况下，电流几乎全部由低电阻通过，等效电阻和电流也主要由低电阻决定，高电阻的作用实际上可以被忽略。

并联电路可以用来分流。满偏电流较小的电流计，并联一个远小于其内阻的分流电阻，就可以改装成电流表(安培表)。如果已知电流表的内阻为 R_g ，满偏电流为 I_g ，要把它改装成量程为 I 的电流表，必须并联的分流

$$\text{电阻为 } R_s = \frac{I_g}{I - I_g} R_g$$

伏安法(voltmeter-ammeter method)

用电压表测出电阻两端的电压 U ，同时用电流表测出通过该电阻的电流 I ，由欧姆定律即可求出电阻 $R = \frac{U}{I}$ 。这种测量电阻的方法称为伏安

法。伏安法原理简单、操作方便，但电表的内阻会影响测量的结果。

用伏安法测量电阻，有两种接线方法(图 1—16—7)。在甲图中，电流表的读数 I 等于通过待测电阻的电流 I_x ；电压表的读数 U 则不是待测电阻两端的电压 U_x ，而是 $U = U_x + U_A$ ， U_A 为电流表两接线柱间的电压。所以测得的电阻值为

$$R = \frac{U}{I} = \frac{U_x + U_A}{I_x} = R_x + R_A = R_x \left(1 + \frac{R_A}{R_x}\right)$$

式中 R_A 为电流表的内阻， R_A/R_x 是电流表的内阻给测量带来的相对误差。可见，采用这种接法测得的电阻值比实际值偏大。如果已知 R_A ，则可求得待测电阻

$$R_x = R - R_A = R \left(1 - \frac{R_A}{R}\right)$$

在乙图中，电压表的读数 U 等于电阻两端的电压 U_x ，电流表的读数 I 则不等于通过待测电阻的电流 I_x ，而是 $I = I_x + I_V$ ， I_V 为通过电压表的电流，所以测得的电阻值为

$$\begin{aligned} R &= \frac{U}{I} = \frac{U_x}{I_x + I_V} = \frac{U_x}{I_x} \left(1 + \frac{I_V}{I_x}\right)^{-1} \\ &\approx \frac{U_x}{I_x} \left(1 - \frac{I_V}{I_x}\right) = R_x \left(1 - \frac{R_x}{R_V}\right) \end{aligned}$$

式中 R_V 为电压表的内阻， R_x/R_V 是电压表的内阻给测量带来的相对误差。可见采用这种接法测得的电阻值比实际值偏小。如果已知 R_V ，则可求得待测电阻

$$R_x = \frac{U_x}{I - I_v} = \frac{U_x}{I} \left(1 - \frac{I_v}{I}\right)^{-1}$$

$$\approx \frac{U_x}{I} \left(1 + \frac{I_v}{I}\right) = R \left(1 + \frac{R}{R_v}\right).$$

惠斯通电桥 (Wheatstone bridge)

将元件(如电阻器、电容器、电感器等)联结成四边形的电路,叫做桥式电路,也叫电桥。四边形的每一边都称为电桥的“臂”。四边形一条对角线的两端是输入端,与电源相接;另一条对角线的两端是输出端,与检测器或指示仪表相接。桥式电路不能简化为元件的串联、并联或其组合。

由电阻元件组成的桥式电路称为惠斯通电桥。如图 1-16-8 所示,当 A 和 B 间接通直流电源时,如果 C 和 D 间的检流计有电流通过,则称为不平衡电桥;如果 C 和 D 间的检流计没有电流通过,则称为平衡电桥。电桥的平衡条件是

$$\frac{R_1}{R_2} = \frac{R_3}{R_4}.$$

由此可知,四个电阻中已知任何三个,就可以求出其余的一个。设 R_4 为待测电阻,用 R_x 表示,则有 $R_x = \frac{R_2}{R_1} R_3$ 。当 R_2 / R_1 接近 1 时,测量的准确度较高。测量时最好使标准电阻 R_3 与待测电阻 R_x 的阻值相差不要太大。

用惠斯通电桥测量电阻,不用安培计和伏特计,而是将待测电阻和标准电阻相比较以确定待测电阻是标准电阻的多少倍。由于标准电阻的误差很小,电桥法测电阻可达到很高的准确度。

电容器的充电和放电 (charge and discharge of condenser)

在 RC 电路中,加一由零突变到 ε 的电动势给电容器充电,或使电动势由 ε 突变至零使电容器放电,电容器极板上的电荷 q 不会发生瞬时的突变,从开始发生变化到逐渐趋于稳态,要经过一个过程,这个过程称为 RC 电路的暂态过程。这一过程中,电路里有充电或放电电流 i 通过, i 也是逐渐变化的。

在图 1-16-9 所示的电路中,如将开关 S 拨到位置 1,则电容器被充电,这时电源电动势 ε 应等于电容器 C 两极板上的电压与电阻 R 上的电势降落之和,即

$$\varepsilon = \frac{q}{C} + iR, \quad (1)$$

i 是电路中的瞬时电流。当把开关接到位置 2 时,电容器 C 通过电阻 R 放电。这时电路中 $\varepsilon = 0$,所以放电时的方程为

$$\frac{q}{C} + iR = 0. \quad (2)$$

将 $i = \frac{dq}{dt}$ 代入(1)和(2)两式得

$$R \frac{dq}{dt} + \frac{1}{C}q = \varepsilon, \quad (3)$$

$$R \frac{dq}{dt} + \frac{1}{C}q = 0. \quad (4)$$

充电时的初始条件为 $t=0, q_0=0$ ；放电时的初始条件为 $t=0, q_0=C\varepsilon$ 。用 $q_f = C\varepsilon$ 表示充电完了时电容器极板上的电荷，则可解得：

$$\text{充电：} q = q_f (1 - e^{-\frac{t}{RC}}). \quad (5)$$

$$\text{放电：} q = q_0 e^{-\frac{t}{RC}}. \quad (6)$$

图 1-16-10 甲、乙中分别画出了充电和放电时电容器极板上电量 q 随时间变化的曲线。可以看出，RC 电路的充电和放电过程的快慢由 $\tau = RC$ 的大小来决定， τ 越大，充电和放电过程越慢。称为 RC 电路的时间常量。

由(5)、(6)两式可知，充电和放电的电流都是按指数律衰减的。用 $i_0 = \frac{\varepsilon}{R}$ 表示充电和放电的初始电流，则有

$$\text{充电：} i = \frac{dq}{dt} = i_0 e^{-\frac{t}{RC}},$$

$$\text{放电：} i = -\frac{dq}{dt} = i_0 e^{-\frac{t}{RC}}.$$

电功率 (electric power)

电流在电路内通过时，电场力对电荷做功。如果电路两端的电压为 U ，当电荷 q 通过这段电路时，电场力所做的功为 $W = qU$ 。用 I 表示电路中的电流强度，用 t 表示电荷 q 通过这段电路所用的时间，则有 $q = It$ 。所以

$$W = IUt.$$

导体内电场力单位时间里所做的功叫做电功率。用 P 表示电功率，则有

$$P = IU.$$

电功率的单位用瓦(W)和千瓦(kW)，电功的单位用焦耳(J)和千瓦时($\text{kW} \cdot \text{h}$)，千瓦时通常也称为“度”。

$$1\text{kW} \cdot \text{h} = 3.6 \times 10^6 \text{J} = 3.6\text{MJ}.$$

焦耳定律 (Joule law)

电流通过导体时，电场力对电荷做功，电势能转化成导体的内能，导体的温度升高，要放出热量。英国物理学家焦耳通过实验得出如下规律：电流通过导体时放出的热量 Q 与电流 I 的平方、导体的电阻 R 和通电的时间 t 成正比，即

$$Q = kI^2Rt. \quad (1)$$

式中的 k 是比例常数。上式表达的规律叫焦耳定律(也叫焦耳—楞次定律，因为楞次也独立地发现了这一定律)。导体通过电流时放出的热量叫做焦耳热。在国际单位制中，(1)式中的常数 $k=1$ ，因此有

$$Q = I^2Rt. \quad (2)$$

另一方面，根据能量守恒定律，导体通电时放出的热量 Q 等于电场力对导体中通过的电荷 q 所做的功 W ，如果导体两端的电压为 U ，由于 $q = It$ ， $W = qU = IUt$ ，故有

$$Q=W=IUt。 \quad (3)$$

由欧姆定律 $R = \frac{U}{I}$ 可知 $IU = I^2R$ ，所以在纯电阻电路中，(2)、(3)两式是等效的。

由于电功率 $P = \frac{W}{t}$ ，由(2)、(3)两式可得 $P = I^2R$ 和 $P = IU$ 。对于纯电阻电路，这两个式子都可以表示电阻消耗的电功率。

引入热功率密度 p (即单位体积的热功率)，由 $p=I^2R$ 可得焦耳定律的微分形式

$$p = \frac{j^2}{\sigma} = \alpha E^2。 \quad (4)$$

式中 σ 是导体的电导率， j 是电流密度， E 是导体中的电场强度。

如果在导体通电过程中还伴随有其他能量的变化，如电路中有电动机(伴随有机械能的变化)或电解槽(伴随有化学能的变化)，则 $W=Q$ 不再成立，即电场力所做的功 $W=IUt$ 不再等于焦耳热 $Q=I^2Rt$ ，因而 $P = IU$ 与 $P=I^2R$ 两个式子，也就不相等了。这时， $P=IU$ 表示的是电路消耗的总功率，而 $P = I^2R$ 只表示电路中的电阻消耗的功率，其他用电器消耗的功率须另行计算。

经典金属电子论(classical electron theory of metal)

用自由电子的运动来解释金属的导电性和导热性的经典理论，是在上世纪末至本世纪初由里克(carl Viktor Eduard Riecke 1845 ~ 1915)和德鲁德(Paul karl Drude 1863 ~ 1906)提出的。

经典金属电子论认为，固态金属的原子处在电离状态，即离解成一个或几个电子和正离子。正离子排列在晶体点阵的结点上，只能在平衡位置附近振动，它们组成金属物体的坚固骨架。脱离了离子的电子，在各离子之间做不规则的运动，称为自由电子，它们组成了特殊种类的电子气。

设在单位体积金属内有 n_0 个质量为 m 、电荷为 e 的自由电子。在没有外电场时电子的运动是不规则的，所以电子速度在各个方向上的概率都一样，整个电子气对点阵上的各个正离子是静止的，电流的平均密度等于零。在外电场 E 作用下，电子发生了沿电场力 $-eE$ 的方向附加的有规则的运动，这种运动对于金属点阵来说具有一个平均速度 u 。在时间 t 内通过导体内垂直于矢量 u 的面元 S 的电子数目为 $n_0 u t S$ ，所带的电量为 $q=n_0 e u t S$ 。因而金属内的电流密度为 $j = q / t S = n_0 e u$ 。写成矢量式，即为

$$j = n_0 e u。 \quad (1)$$

电子获得的附加速度 u ，是它在与点阵离子连续两次碰撞之间在电场力作用下做加速运动的平均速度。由于在每次碰撞时，电子速度的方向和大小都是随机改变的，在碰撞后的瞬间，电子的平均速度 u_0 等于零，而在

碰撞前的瞬间，电子的平均速度 $u_1 = -\frac{eE}{m} \tau$ ， τ 表示两次碰撞之间电子的

平均自由飞行时间。由此可得附加速度 u 的大小为

$$u = \frac{1}{2} \frac{eE}{m} \tau . \quad (2)$$

如果电子的平均自由程为 l ，在外电场不存在时电子不规则运动的平均速度为 v ，由于实际上 $v \gg u$ ，在计算 τ 值时 u 可以忽略不计，可得

$$\tau = \frac{l}{v} . \quad (3)$$

把(2)，(3)两式代入(1)式，即得

$$j = \frac{e^2 n_0 l}{2mv} E . \quad (4)$$

(4)式也就是欧姆定律的微分形式： $j = \sigma E$ ，其中导体的电导率为

$$\sigma = \frac{e^2 n_0 l}{2mv} \quad (5)$$

可见，经典金属电子论可以很简单地解释金属导电的欧姆定律。

对于焦耳定律，也可做如下的解释：电子在它们的运动中与金属离子相撞而把它们在电场力作用下获得的多余动能传递给离子，从而使离子热运动的能量增加，即使金属变热。

由(2)，(3)两式可得，单个电子与离子碰撞时传递给离子的动能为：

$$E_k = \frac{1}{2} m u_1^2 = \frac{e^2 l^2 E^2}{2m v^2}$$

用一个电子单位时间内的平均碰撞次数 $z = \frac{v}{l}$ 和单位体积内的电子数 n_0 乘 E_k ，就可得到单位时间内传递给单位体积导体的能量，即热功率密度 p ：

$$p = \frac{e^2 n_0 l}{2mv} E^2 = \sigma E^2 .$$

这正是焦耳定律的微分形式。

经典金属电子论虽然可以解释导电现象，但与实验结果还有严重的矛盾。把经典统计理论应用于电子气，可得电子动能 $\frac{2}{1} m v^2 = \frac{3}{2} kT$ ，式中 k 为玻耳兹曼常量， T 为热力学温度。由此可得金属电导率

$$\sigma = \frac{e^2 n l}{2\sqrt{3} m k T} .$$

要使这个式子跟电导率与热力学温度成反比的实验结果相符合，只有假定 $n l$ 与 \sqrt{T} 成反比才行，而这是难以论证的。

经典金属电子论与实验结果之间更为严重的矛盾，表现在金属比热容问题上。金属中大量自由电子的存在，必然导致这样的结论：金属的比热容应该比不导电固体的比热容大很多。假定自由电子的数目与原子的数目数量级相同，则每一摩尔金属物质中都有附加的内能，即做不规则运动的电子的动能，这个能量等于 $\frac{3}{2} k N T = \frac{3}{2} R T$ 。式中的 N 是阿伏加德罗常量， R 是普适气体常量。但在实验中观察不到自由电子对金属比热容的这部分贡献。

可见，经典的金属电子理论，只能用来定性解释金属的导电性和其他

一些性质，而不能做出与实验完全一致的描述。自由电子模型只是实际情况的某种近似，这个理论遇到的困难要用量子理论才能解决。

直流电源(direct current source)

能使电路中形成恒定电流的装置，如干电池、蓄电池、直流发电机等，称为直流电源。

直流电源有正负两个电极，正极的电势高，负极的电势低；当两个电极与电路连通后，直流电源能维持两个电极之间的恒定电势差，从而在外电路中形成由正极到负极的恒定电流。

要使电源两极间的电势差保持恒定必须使在外电路中由正极流到负极的正电荷，在电源内部逆着电场力的方向，由负极返回到正极去。这个过程不能靠静电力，只能靠某种与静电力方向相反的“非静电力”来实现。因此，电源就是一种提供非静电力的装置，通过非静电力做功，把非电能转化为正负电极之间的电势能。

表征电源特征的重要物理量有两个：一个是电源电动势 \mathcal{E} ，另一个是电源的内电阻(简称内阻) r_0 。

直流电源的类型很多，不同类型的直流电源，非静电力的性质不同，能量转换的过程也不同。例如，在化学电池中，非静电力来自与离子的溶解和沉积过程相联系的化学作用，化学电池放电时，化学能转化为电能和电路中的内能。在直流发电机中，非静电力来自电磁感应作用，直流发电机供电时，机械能转化为电能和电路中的内能。

电动势(electromotive force)

表征电源性能的特征量，它的定义是：将单位正电荷从负极通过电源内部移动到正极时非静电力所做的功： $\mathcal{E} = \int_{-}^{+} \mathbf{F} \cdot d\mathbf{l}$ 。式中 \mathcal{E} 为电动势， \mathbf{F}

为单位正电荷在电源内部所受的非静电力，积分路径经由电源内部从负极到正极。由于非静电力所做的功等于电源内其他形式的能量转化成电能的数量，所以电动势表征了电源把其他形式的能量转化成电能的本领。

当非静电力遍及整个回路(如感生电动势)时，闭合回路的电动势定义为单位正电荷绕行回路一周时非静电力所做的功：

$$\mathcal{E} = \oint \mathbf{F} \cdot d\mathbf{l} .$$

电动势是标量，它的单位是伏特，即与电势差的单位相同。电源开路时，两极间的电势差(即端电压)就等于它的电动势。不过，电动势与电势差并不是一回事，后者表示静电力对单位正电荷所做的功，前者表示非静电力对单位正电荷所做的功。

为了讨论问题方便，规定自负极经过电源内部到正极的方向为电动势的方向。

电池(cell)

一般指化学电池，是把化学能直接转化为电能的电源装置。电池的主要部分包括正负两个电极和电解液，工作时在外电路中，电子由负极流到正极，电流由正极流到负极；而在电解液内，正负离子分别向两极迁移，电流从负极流到正极：这叫做电池的放电。放电时，两个电极上都发生化

学反应，放电过程一直进行到电路断开，或者一种反应物质耗尽。

电池的电动势取决于电极材料的化学性质，与电池的大小无关。电池放电后，由于电极上的化学反应，产生不导电的气体如氢等覆盖在电极表面上，电动势随即降低，这叫做电池的极化现象，可用去极化剂消除极化。电池的内阻取决于电极的面积，面积越大，内阻越小。

电池所能输出的总电荷量叫做电池的容量，通常用安培小时做单位。电池的容量与电极物质的数量有关，即与电极的体积有关。

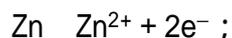
实用的化学电池可以分为原电池和蓄电池两类。原电池制成后即可产生电流，放电完毕后即被废弃。蓄电池又称二次电池，使用前须先进行充电，然后才可放电使用；放电完毕后还可以充电再用。充电时电能转化为化学能，放电时化学能转化为电能。

广义上讲，电池也指将其他形式的能量(除机械能外)转化为电能的装置，如温差电池、太阳电池、原子电池等。

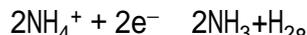
干电池(dry cell)

原电池的一种。常用的是碳—锌干电池，负极是锌做的圆筒，内盛氯化铵做电解质，再加入少量氯化锌、惰性填料(如二氧化锰)和水，调成糊状；正极是一根碳棒，位于糊状电解质的中央。由于电解质是不流动的，故名干电池。

电极反应是：负极处锌原子氧化成锌离子 Zn^{2+} ，释出电子：



正极处铵离子(NH_4^+)得到电子还原成氨与氢：



用二氧化锰驱除正极表面的氢气以消除极化



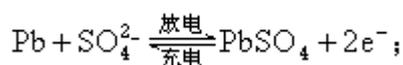
电池工作时，正极上生成的氨同部分锌离子化合，生成络离子 $[Zn(NH_3)_4]^{2+}$ ，这个反应抑制了锌离子浓度的增大，从而保持了电动势的稳定，也防止了由于氨气在正极上的聚集而造成的极化。

碳—锌干电池的电动势约为 1.5 伏。

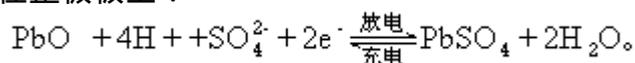
铅蓄电池(lead storage battery)

一种最常用的蓄电池，它的极板是用铅合金制成的格栅，电解液为稀硫酸，两极板均覆盖有硫酸铅。但充电后，正极板上的硫酸铅转变成二氧化铅，负极板上的硫酸铅转变成金属铅。放电时则发生反方向的化学反应。充放电的化学反应是：

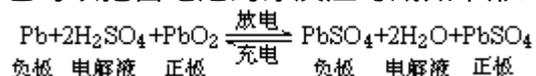
在负极板上：



在正极板上：



也可以把蓄电池的净反应写成如下形式：



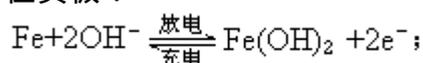
放电反应消耗电解液中的硫酸，生成水，结果是硫酸溶液的浓度下降，比重也随之下降；充电时极板上的硫酸铅变成铅和二氧化铅，把硫酸根放回电解液，与水生成硫酸，结果是电解液的浓度上升，比重也随之上升。因此，可用测量电解液比重的方法判断蓄电池是否需要充电或者充电过程是否可以结束。电解液的浓度，需根据电池的型式及构造做出合理的选择。一般以比重等于 1.27 的稀硫酸作为电池完全储电时电解液的浓度，稀硫酸的比重降至 1.10 时，作为电池放电终了时电解液的浓度。

铅蓄电池的电动势约为 2 伏，电动势高，且放电时电动势较稳定，是它的优点，但比能量(单位质量所蓄的电能)小，对环境腐蚀性强。铅蓄电池在大电流放电性能上不如银锌蓄电池，使用寿命不如铁镍蓄电池和镍镉蓄电池长。

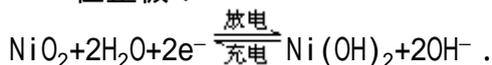
铁镍蓄电池(iron-nickel storage battery)

也叫爱迪生电池，正极为氧化镍，负极为铁，电解液为碱性的氢氧化钾溶液。充放电的化学反应是

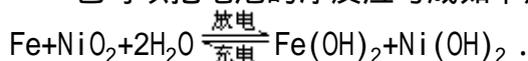
在负极：



在正极：



也可以把电池的净反应写成如下形式



铁镍蓄电池的电动势为 1.4 伏，比铅蓄电池低。这种电池必须密封使用，否则氢氧化钾会与空气中的二氧化碳反应变成碳酸盐。这种电池轻便坚固，能经受大电流放电，而且寿命比较长，平均能充放电 2000 次。

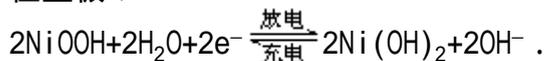
镍镉蓄电池(nickel cadmium storage battery)

镍镉蓄电池的正极是氢氧化镍，负极是镉，电解液是氢氧化钾水溶液。充放电的化学反应是

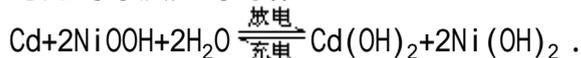
在负极：



在正极：



电池的净反应可写作：

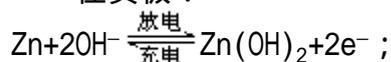


镍镉蓄电池电动势 1.2 伏，工作寿命长(可充放电上千次)。大电流放电电压平稳，机械强度高，无论汽车的奔驰、飞机的起动还是卫星发射时的振动都不影响电池的寿命和性能，而且低温性能好，在严寒地区也能使用，因而应用日趋广泛，从军用发展到民用和空间应用，在小型电子设备上也常用这种电池。

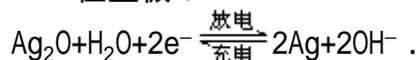
银锌蓄电池(silver zinc storage battery)

正极为氧化银、负极为锌，电解液为氢氧化钾溶液的蓄电池。充放电的化学反应是：

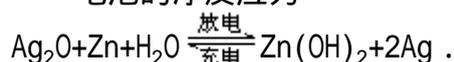
在负极：



在正极：



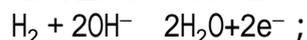
电池的净反应为



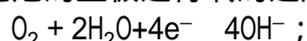
银锌蓄电池的电动势约 1.5 伏。它的比能量大(为铅蓄电池的 3 倍 ~ 4 倍)能大电流放电并保持稳定的工作电压，多用作飞机、潜艇、宇航器、人造卫星等的直流电源。但因其造价高、寿命较短(充放电次数 100 次 ~ 150 次)，而限制了它的应用。

燃料电池(fuel cell)

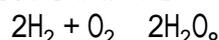
把气体燃料燃烧时产生的化学能直接转变为电能的装置。燃料电池也有正负两个极和电解液，工作原理基本上与一般化学电池相同，不同的是两极的活性物质(即参加化学反应的物质)贮存在电池外面。燃料电池的活性物质包括燃料(氢、甲烷等)和氧化剂(氧气、空气等)，它的电极也和一般电池的电极不同，是多孔的气体扩散电极，可用浸有氧化钴、铂或银等催化剂的碳制成。图 1-16-11 是氢氧燃料电池的结构示意图。工作时负极方面连续送入气态燃料(氢)，正极方面连续送入氧化剂(氧)，电池即可不断地输出电能。为了保证电池的正常工作，还要有一个排除反应产物(水)和排热的辅助系统。氢氧燃料电池的电解液是氢氧化钾水溶液。在电池的负极进行氢的氧化反应：



在电池的正极进行氧的还原反应，



总的化学反应是



即氢氧的燃烧反应。

氢氧燃料电池的电动势为 1.23V。燃料电池对化学能的利用效率达 50% ~ 70%，远高于其他化学电池，比能量也远大于其他化学电池，可做成各种功率(数十毫瓦至数十兆瓦)的电源，并可连续供电。它还有设备轻巧、无噪声、少污染等优点。但由于辅助系统较复杂，且要用贵金属做催化剂，成本较高，使用受到限制，目前仅限于一些特殊用途，如宇宙航行、浮标、灯塔、无人气象站、潜艇及一些军用通信设备等。

接触电势差(contact potential difference)

两种不同金属紧密接触达到平衡时，接触面两侧的电势并不相等，它们之间的电势差叫做接触电势差。上述现象表明：在两种金属的接触面上存在着一种非静电力，或者说存在着电动势，它使电子从一种金属转移到另一种金属中去。这种在两种金属接触面上出现的电动势称为帕耳贴

电动势。

从经典金属电子论来看，帕尔贴电动势来源于金属中自由电子的扩散作用。设金属 A 中的自由电子密度 n_A 大于金属 B 中的自由电子密度 n_B ，则经过接触面从 A 扩散到 B 的电子比从 B 扩散到 A 的电子多，其结果在接触面的 B 侧出现负电荷，而在 A 侧出现正电荷，它们激发的静电场有阻止金属 A 中的电子进一步向金属 B 中扩散的倾向。最终达到静电平衡时 A、B 间的电势差就是接触电势差。接触电势差很小，其数量级为 $10^{-3}\text{V} \sim 10^{-2}\text{V}$ ，但它在温差电现象中却起着重要作用，因为它除与两种金属的性质有关外，还与温度有关。

用两种金属接成闭合回路，如果两个接头的温度相同，则两个接头处的接触电势差大小相等，回路中的总接触电势差为零。如果用多种金属接成闭合回路，只要各个接头处的温度相同，总接触电势差也等于零。所以，仅有接触电势差存在是不会产生电动势的。只有当闭合电路中除第一类导体外还含有第二类导体，即电流通过时发生化学变化的导体，闭合电路(其各部分的温度相同)中才能够发生电动势。

温差电效应(thermoelectric effect)

两种不同金属导体组成闭合回路，如果回路的两个接头处于不同温度，回路中就会产生电动势。这一现象由德国物理家塞贝克(Thomas Johann Seebeck 1770 ~ 1831)首先发现，称为温差电效应，产生这种效应的回路称为温差电偶，所产生的电动势称为温差电动势。产生温差电动势的原因有二：一是高温接头与低温接头的接触电势差不同；二是有温度梯度的金属两端存在着电势差。在一定温度范围内，温差电动势 E 与两接头处的温度差 $T_1 - T_2$ 成正比：

$$E = a(T_1 - T_2),$$

式中的 a 称为塞贝克系数。金属的温差电效应较小，塞贝克系数 a 约为 $0 \sim 80 \mu\text{V}/\text{K}$ ，常应用于测量温度。半导体的温差电效应较大，塞贝克系数 a 约为 $50 \mu\text{V}/\text{K} \sim 1000 \mu\text{V}/\text{K}$ ，可制造温差发电机。

和温差电效应相反的现象称为帕耳贴效应：当电流流过两种导体组成的闭合回路时，一个接头处会变热(吸热)，另一接头处会变冷(放热)。这种现象是由法国物理学家帕耳贴(Jean Charles Athanase Peltier 1785 ~ 1845)于 1834 年首先发现的。人们把接头处放出或吸收的热称为帕耳贴热。哪个接头放热，哪个接头吸热，则与电流的方向有关。当电流在接头处是由高电势流向低电势时接头放热，反之接头吸热。

闭合电路的欧姆定律(ohm law for closed circuit)

表示闭合电路中电流强度跟电源电动势，电源内阻和负载电阻间的关系的定律，可表述为：电源电动势与总电阻之比等于电路中的电流强度。这里的总电阻指电源内阻与负载电阻的总和。用 \mathcal{E} 表示电源电动势、 r 表示电源内阻、 R 表示负载电阻、 I 表示电路中的电流强度，则有

$$I = \frac{\mathcal{E}}{R + r}.$$

如果电路中含有多个电源和负载电阻，则闭合电路的欧姆定律可写成

更普遍的形式：

$$I = \frac{\Sigma \mathcal{E}}{R}$$

式中 $\Sigma \mathcal{E}$ 为电路中电源电动势的总和， R 为电源内阻和负载电阻的总和。

应该注意的是，在应用欧姆定律时必须考虑电动势的方向和符号。如图 1-16-12 的电路中，含有一个反电动势， \mathcal{E}_1 和 \mathcal{E}_2 具有相反的方向和符号。如果取其中一个电动势为正，则另一个电动势为负。当 $|\mathcal{E}_1| > |\mathcal{E}_2|$ 时， \mathcal{E}_1 的方向与电流的方向一致，取 \mathcal{E}_1 为正， \mathcal{E}_2 为负，则有 $\Sigma \mathcal{E} = \mathcal{E}_1 - \mathcal{E}_2$ 。也可以选取任意方向为正，电动势和电流与这个方向相同的取正值，反之取负值。关于闭合电路中电流和电动势的符号问题，请参阅“基尔霍夫方程组”。

欧姆定律也可应用于一段含源电路，例如图 1-16-13 中的一段电路。先在这段电路上任意规定一个方向，如 AB，凡符合这个方向的电动势和电流都取正值(如 I_1 、 \mathcal{E}_2)，反之则取负值(如 I_2 、 \mathcal{E}_1 、 \mathcal{E}_3)。沿这个方向电势升高是 $\Sigma \mathcal{E}$ ，在电阻上的电势降落是 (RI) ，使电势最后升高了 $U_B - U_A$ 。所以有

$$U_B - U_A = \Sigma \mathcal{E} - (RI)$$

这叫做一段含源电路的欧姆定律。在图 1-16-13 的特例中，

$$U_B - U_A = \mathcal{E}_2 - I_1 - I_2 R_1 - I_2 R_2 - I_2 R_3$$

端电压 (terminal voltage)

电源两极间的电压叫端电压，也叫路端电压，根据闭合电路的欧姆定律，当电源放电时，端电压 U 可由外电路上的电势降落求得： $U = IR = \mathcal{E} - Ir$ ，即端电压等于电源电动势减去电源内阻上的电压降；当外电路断开 ($R \rightarrow \infty$, $I = 0$) 时， $U = \mathcal{E}$ ，即端电压等于电源电动势；当电源充电时， $U = \mathcal{E} + Ir$ ，即端电压等于电源电动势与电源内阻上的电压降之和。

电源输出功率 (output power of source)

在闭合电路中，电源提供的总功率 $P_{\text{总}}$ 和它对外电路的输出功率 $P_{\text{出}}$ ，不仅与电源的电动势 \mathcal{E} 和内阻 r 有关，还与外电路中负载电阻 R 的大小有关。用 I 表示电路中的电流，根据闭合电路欧姆定律，可得

$$P_{\text{总}} = I\mathcal{E} = \frac{\mathcal{E}^2}{R+r}, \quad P_{\text{出}} = I^2 R = \frac{\mathcal{E}^2 R}{(R+r)^2}$$

用 $\eta = P_{\text{出}}/P_{\text{总}}$ 表示电源的工作效率，有

$$\eta = \frac{R}{R+r}$$

图 1-16-14 中的曲线 I、II、III 分别表示出 $P_{\text{出}}$ 、 $P_{\text{总}}$ 和 η 与负载 R 之间的关系。从中可以看出。

图 1-16-14 电源的总功率、输出功率与工作效率。

当 $R = 0$ 时, $P_{\text{总}} = \frac{\varepsilon^2}{r}$ 最大, 而 $P_{\text{出}}$ 和 η 都等于零。这时电源对外不做功, 全部功率消耗在内阻上, 放出大量焦耳热, 可能把电源烧毁。

当 $R = r$ 时, $P_{\text{出}} = \frac{\varepsilon^2}{4r}$ 最大, $P_{\text{总}} = \frac{\varepsilon^2}{2r}$, $\eta = \frac{1}{2}$ 。 $R = r$ 称为负载电阻与电源的匹配条件。这个概念只在电源内阻较高、输出功率很小的电子电路中才有实际意义。在通常的低电阻、大功率电路中, 匹配条件会导致过大电流, 是有危险的。在通常的电路中总是取 $R > r$, 或 $R \gg r$, $P_{\text{出}}$ 虽然减小了, 但 $P_{\text{总}}$ 减少得更多, η 值随之提高。

当 $R \rightarrow \infty$ 时, $\eta = 1$ 最大, 但 $P_{\text{总}}$ 和 $P_{\text{出}}$ 都趋于零。所以 $\eta = 1$ 这个条件, 是没有实际意义的。

基尔霍夫方程组(Kirchhoff equations)

解决比较复杂的电路问题的基本方程, 包括两个方程组:

基尔霍夫第一方程组, 又称节点电流方程组。如果规定流入节点的电流为负, 自节点流出的电流为正(也可以做相反的规定), 则汇于任一节点各支路电流强度的代数和为零。写成数学形式为 $\sum I = 0$ 。对于有 n 个节点的电路, 写出的 n 个方程中有 $n-1$ 个是彼此独立的, 其余的一个方程可由这 $n-1$ 个方程得出。这个方程组的理论依据是电流的连续性方程。

基尔霍夫第二方程组, 又称回路电压方程组。如果规定电势从高到低的电势降落为正, 电势从低到高的电势降落为负, 则沿电路中任一闭合回路环绕一周, 电势降落的代数和为零。写成数学形式为 $\sum \varepsilon + \sum IR = 0$ 。具体确定电势降落的正负号时, 对于电阻(包括电源内阻)要看环绕方向与电流方向的关系: 沿电流方向看去, 电势降落为正, 逆电流方向看去, 电势降落为负; 对于电源, 要看环绕方向与电源极性的关系: 从正极到负极看去, 电势降落为正, 从负极到正极看去, 电势降落为负。闭合回路的选取, 要注意回路的独立性。每次选定新回路时, 至少要有一条支路是已选过的回路中未曾出现过的, 这样所得的一组回路才是互相独立的。基尔霍夫第二方程组的理论依据是恒定电场的环路定理: 沿回路环绕一周回到出发点时, 电势值不变。

设复杂电路共有 p 条支路、 n 个结点、 m 个独立回路, 未知的电流数为 p 。根据基尔霍夫方程组, 对未知的电流共可列出 $n + m - 1$ 个彼此独立的方程。根据拓扑学中的一条定理, 总有 $p = n + m - 1$ 。未知量的数目与方程的数目相等, 方程组总是可解的, 而且有唯一解。

在列方程组时, 各个支路上电流方向可以任意假定, 解出的结果如为负值, 即说明假定的电流方向与实际电流的方向相反。

电解质(electrolyte)

在溶液或熔融状态中可离解为正、负离子而能导电的物质叫做电解质。最常见的电解质有酸、碱和盐。电解质的溶液或熔融状态的电解质叫做电解液。在电解液中插入两个电极, 用电源在两电极间加上一定的电压, 电解液中的正离子就移向与电源负极相连接的电极, 负离子就移向与电源正极相连接的电极, 从而形成电流, 这叫做电解液导电。可见, 电解

液导电与金属导电的机理不同，电解液导电的载流子是正、负离子，所以叫做离子导电。

在熔融状态下，电解质的分子完全离解为正、负离子；在电解质溶液中，电解质分子全部或部分地离解为正、负离子；这种现象叫做电解质的电离。产生电离现象的原因有二：一是分子的热运动；二是由离子耦合组成的溶质有极分子与溶剂(如水)的有极分子之间的相互作用，使离子间的耦合减弱；而当溶质分子与高速运动的溶剂(或溶质)分子相互碰撞时，离子的耦合就容易被破坏。

在电解液中，离解成正、负离子的分子数 n_1 与溶质分子总数 n_0 之比叫做电解液的电离度。电高度的大小取决于电解质和溶剂的相互作用。例如，氯化氢在碳氢化合物中不电离，在水中则完全电离。这是因为水分子是具有固定电偶极矩的有极分子，它与无极分子相比具有很高的电极化率 X_e 和相对电容率 ϵ_r ，使电解质分子在水中离解为正、负离子所需的能量仅等于在真空条件下的 $1/\epsilon_r$ 。

电解(electrolysis)

电流通过电解液引起的化学变化叫做电解。电解是电能转变为化学能的过程。用于电解的装置叫做电解池或电解槽。电解池是由正、负两个电极浸在含有正、负离子的电解液中构成的。在极间电压作用下，正离子向负极迁移，在负极上获得电子，还原成中性原子或原子团；负离子向正极迁移，在正极上失去电子，氧化成中性原子或原子团。例如，电解熔融氯化钠时，负极的反应是： $\text{Na}^+ + e^- \rightarrow \text{Na}$ ，正极的反应是 $2\text{Cl}^- \rightarrow \text{Cl}_2 + 2e^-$ ，净反应是： $2\text{NaCl} \rightarrow 2\text{Na} + \text{Cl}_2$ 。电解的最终结果与电极上发生的化学反应有关，这种反应称为副反应。副反应不仅取决于电解液，而且与电极物质有关。同一种电解液，用不同的电极进行电解，所得的结果可以不同。例如，硫酸水溶液的电解，用化学性质较活泼的铅做电极时，在负极，氢离子 H^+ 获得电子分离出气态氢： $2\text{H}^+ + 2e^- \rightarrow \text{H}_2$ ，在正极，硫酸根与铅发生化学反应生成硫酸铅： $\text{SO}_4^{2-} + \text{Pb} \rightarrow \text{PbSO}_4$ ；用化学性质不活泼的铂做电极时，在负极仍分离出气态氢，在正极硫酸根并不与铂发生化学反应，而是和水发生化学反应，重新生成硫酸，并放出气态氧： $2\text{SO}_4^{2-} + 2\text{H}_2\text{O} \rightarrow 2\text{H}_2\text{SO}_4 + \text{O}_2 + 4e^-$ 。这两种反应，前者电解的是硫酸，后者电解的是水。

由于电解可将电解液中的物质分离出来，在工业上有广泛应用：

(1)电冶 用电解法提取或精炼金属。原矿石通常浸制成水溶液进行电解，使纯金属淀积在负极上。用这种方法生产的金属有铜、镉、铬、钴、锰、镍和锌。有些金属如铝、铍、钙、锂、镁和钠，可直接从熔融矿石中提取。以纯度很高的铜做负极、粗铜做正极，可提炼出纯度高达 99.999% 的铜。

(2)电镀 用电解方法可在导体表面上沉积金属薄层，以防止锈蚀(镀锌、镀镉)、增加美观(镀金、镀银)、提高耐磨性(镀铬)和导电性(镀银)等。在用石墨、导电漆等处理过的非导体(如塑料、木材、皮革等)表面上也可以进行电镀。

(3)电铸 用电解法获得金属复制品。仿照待复制的物品用塑性材料

制成一导电模型作负极，以复制所用的金属作正极，一同放在金属盐电解液中进行电解，就可在模型上淀积出金属薄层。使薄层与模型分离，即可得到与模型形状相同的金属复制品。电铸也可用于制造印刷活版的复制品。

法拉第电解定律(Faraday law of electrolysis)

关于电解过程中从电解液析出的物质质量与通过电解液的电量间的关系的两条定律，是英国物理学家、化学家法拉第在大量实验事实基础上总结出来的。

(1) 电解第一定律 电解过程中，在电极上析出物质的质量 m 与通过电解液的电量 Q 成正比，即

$$m = kQ, \quad (1)$$

(1) 式中的 k 是析出物质的电化学当量，它在数值上等于电解液中通过单位电量时电极上析出的物质质量。电化学当量常用的单位有 g/C 和 mg/C 。

(2) 电解第二定律 元素的光学当量 k 与该元素的摩尔质量 M 成正比，与该元素的化合价 z 成反比：

$$k = C \frac{M}{z}, \quad (2)$$

把两个定律合在一起，并用 $\frac{1}{F}$ 代替(2)式中的常量 C ，则有

$$m = \frac{1}{F} \frac{M}{z} Q. \quad (3)$$

式中的 F 称为法拉第常量，实验测得 $F = 9.6485 \times 10^4 C/mol$ 。

由(3)式可知，析出 $1mol$ z 价原子电解液中通过的电量在数值上等于 zF ，所以每个 z 价离子的带电量

$$q = \frac{zF}{N_A}.$$

式中的 N_A 为阿伏伽德罗常量。

1 价离子 ($z=1$) 所带电量的绝对值等于电子的带电量(基元电荷) e ，所以

$$e = \frac{q}{z} = \frac{F}{N_A}.$$

法拉第电解定律曾启发物理学家形成电荷具有原子性的概念，对于发现基元电荷和建立物质电结构的理论具有重大意义，在密立根测出电子电荷后，曾根据电解定律的结果计算阿伏伽德罗常量。

电解液中的电流(current in electrolyte)

电解液的导电符合欧姆定律。这个结论可证明如下：

电解液中的电流由正负两种离子的运动产生。设在单位体积的电解液中溶解 n_0 个电解质分子，溶液的电离度为 α ，则单位体积中正负离子对的数目为 $n_0 \alpha$ 个。用 q 表示离子的带电量， v_+ 和 v_- 分别表示正负离子的运动速率， j_+ 和 j_- 分别表示由正负离子的运动产生的电流密度，则有 $j_+ = n_0 \alpha q v_+$ ， $j_- = n_0 \alpha q v_-$ 。因而电解液中的电流密度为

$$j = j_+ + j_- = n_0 q (v_+ + v_-) \quad (1)$$

离子在电场中受到的力有两个：一个是电场力，方向与离子运动的方向相同；另一个是媒质的阻力（离子被中性溶剂分子所包围），方向与离子运动方向相反。电场力的大小为 qE ， E 为电场强度；阻力在离子运动速度的范围内可以认为与速度成正比，对于正离子它的大小为 $k_+ v_+$ ，对于负离子它的大小为 $k_- v_-$ ， k_+ 、 k_- 为比例常量。在离子以恒定速率运动时，电场力与阻力的合力为零，即

$$qE - k_+ v_+ = 0, \quad qE - k_- v_- = 0,$$

由此得

$$v_+ = \frac{q}{k_+} E = v_+^0 E, \quad v_- = \frac{q}{k_-} E = v_-^0 E \quad (2)$$

式中的 $v_+^0 = \frac{q}{k_+}$ 和 $v_-^0 = \frac{q}{k_-}$ ，在数值上等于两极间场强值为单位场强时正

负离子的运动速率，叫做离子迁移率。把(2)式代入(1)式即得

$$j = \alpha n_0 q (v_+^0 + v_-^0) E \quad (3)$$

上式与欧姆定律的微分形式 $j = \sigma E$ 是一致的，其中

$$\sigma = \alpha n_0 q (v_+^0 + v_-^0) \quad (4)$$

(4)式表明，电解液的电导率与电离度 α 和离子迁移率之和 $v_+^0 + v_-^0$ 成正比。

气体放电(gaseous discharge)

电流通过气体的现象叫做气体放电，也叫气体导电。在通常情况下，气体是由中性分子或原子组成的，是良好的绝缘体。但是当气体中出现电子和离子即气体电离时，在外电场作用下，电子和离子做定向漂移运动，气体就导电了。用紫外线、X 射线或各种放射性射线照射气体，都能使气体电离。这些能使气体电离的射线叫做电离剂。电离剂实际上是能量足够大的光子、电子或离子，当它们撞击分子或原子时，就使分子或原子分离成电子和正离子，这叫做碰撞电离。给气体加热到足够高的温度，由于气体分子间的相互碰撞也可以产生电离，这叫做热电离。

气体放电的伏安特性曲线如图 1-16-15 所示。电压小时(曲线中的 OA 段)，电流 I 与电压 U 成正比(即服从欧姆定律)，电压继续增大，电流的增加就变慢(曲线中的 AB 段) 电压增大到一定程度 电流就达到饱和值 I_s (曲线中的 BC 段)。特性曲线的这种特征，是因为导电气体中存在着三种过程：电离过程、复合(即电子和正离子复合成中性分子)过程和带电粒子迁移到电极上去的过程。外电场较弱时，前两种过程是主要的，只有少数带电粒子迁移到电极上，而电离与复合则达到动平衡，电子和正离子的数密度保持不变，它们在电场中的漂移速度都和电场强度 E 成正比，跟电解液导电的情形相似，欧姆定律 $j = \sigma E$ 可以适用，电导率 σ 与正负带电粒子的数密度成正比。外电场继续增大时，被驱赶到电极上去的带电粒子数目增多，单位体积内的正负带电粒子数减少，电导率减小，电流密度的增加变慢(曲线中的 AB 段)。当外电场足够大时，因电离剂作用产生的全部电子和离子

都被迅速地驱赶到电极上去，不再发生复合，于是电流就达到饱和(曲线中的BC段)。上述气体放电过程中，如果撤去电离剂，气体中的离子和电子因复合而迅速消失，放电随之停止，这种放电称为被激放电或非自持放电。

电流达到饱和值后继续增高电压，当电压达到某一数值 U_c 后，电流突然急剧增加(曲线中的CD段)，这时即使撤去电离剂，仍能继续放电，这种放电称为自激放电或自持放电。气体由被激放电过渡到自激放电，称为气体被击穿(或点燃)。使气体击穿的电压称为击穿电压。气体过渡到自激放电，主要是因为气体中的电子在电场力作用下获得的动能大，在与分子或原子发生非弹性碰撞中把自己的动能给予原子或分子，而使它们电离，而且这样的过程链式地发展下去会形成电子簇射。正离子与分子或原子的碰撞，也能使原子和分子电离，但只有在电场足够强的情况下才能发生。此外，正离子撞击阴极，也能使电子从阴极逸出；加热阴极以及放电发光所引起的光电效应，也会使阴极发射电子；加热阳极也可以发射正离子。这些都是维持自激放电的带电粒子的来源。气体自激放电常伴有发声、发光现象，它的特性取决于气体的种类、压强、电极材料和形状、电极温度、两极间距离等多种因素，而有辉光放电、弧光放电、火花放电、电晕放电等不同的形式。

辉光放电(glow discharge)

低压(约几百帕)气体或蒸汽中伴有发光现象的自激放电。辉光放电的极间电压较高(几百伏至 1000 V 左右)，电流强度较小(几毫安)，其特征是放电管中出现几个特殊的亮区和暗区(图 1-16-16)。辉光的颜色随气体而异。

辉光放电时，在放电管两极的电场作用下，阴极吸引正离子排斥电子，在它的附近形成带正电的空间电荷区；阳极吸引电子排斥正离子，在它的附近形成带负电的空间电荷区，于是就使极间的电场变成非均匀场。因为正离子的漂移速度比电子的漂移速度小得多，所以带正电的空间电荷区的电荷密度比带负电的空间电荷区的电荷密度大得多，因而阴极附近的电势降落比阳极附近的电势降落大得多。阴极电势降落的大小取决于阴极材料和气体的性质。在正常辉光放电时，两极间的电压不随电流而变化。

放电管内出现的亮区和暗区，可简要解释如下：在阴极附近，发出的次级电子尚未得到足够大的动能，不能使气体分子电离或激发，所以这一区域不发光，叫做阿斯顿暗区。而在邻近的阴极辉区中，电子已获得足够的能量，可以使分子激发发光。在阴极暗区即克鲁克斯暗区中，来自阴极的电子获得愈来愈大的动能，但已超过使分子激发的概率最大的动能值，激发愈来愈少，在明亮的负辉区衬托下显得暗。但在这个区域里，电子引起大量电离，新生的电子很多，这些电子，到达负辉区时已得到足够能量，引起大量的激发，加上电子与正离子复合发光，使负辉区成为辉光放电中最明亮的区域。但是由于电子在负辉区中消耗了大部分能量，在法拉第暗区，电子的能量又不足以使气体分子激发或电离。然后就是一个较长的正柱区，又出现气体受激发光现象，这是因为电子在法拉第暗区重新受到加速。在正柱区中，气体处于高度电离状态，正离子和电子形成的空间电荷密度大体相等，成为等离子区，电场是均匀的。从正柱区进入阳极

区电子的能量是不大的。这些电子在阳极电场的作用下受到加速，通过阳极暗区就具备了足够大的速度，在阳极前面引起激发和电离，造成了阳极辉区。

利用辉光放电的发光效应可制作霓虹灯，利用辉光放电的稳压特性可制作稳压管。稳压管可用来稳定几十伏至几百伏的电压，在大多数电子仪器中都采用这种管子。

弧光放电(arc discharge)

电源提供较大功率时，在不高的极间电压(几十伏)下，两极间的气体中持续地通过较强的电流(几安到几十安)，并发出强烈的光辉，产生几千到上万摄氏度的高温，这种自激放电叫做弧光放电。

弧光放电与辉光放电的主要不同在于弧光放电时阴极上产生热电子发射(叫做热阴极弧光，例如碳弧)或场致发射(叫做冷阴极弧光，例如汞弧)。产生热阴极弧光放电的通常方法是使两电极接触后随即分开，因短路发热使阴极表面温度大增，产生热电子发射。热电子发射使碰撞电离和阴极的二次电子发射急剧增加，因而两极间的气体具有良好的导电性。在冷阴极弧光放电中，电极由低熔点材料(如汞)制成。阴极表面蒸发出的蒸气被电离而在阴极表面附近形成空间正电荷层。阴极附近的强电场引起场致发射，从而使极间电流剧增，形成电弧。弧光放电的重要特性是：当电流增大时，两极间的电压反而下降。

弧光放电的主要应用有：用作强光源；光谱分析中用作激发元素光谱的光源；在工业上用于冶炼、熔化、焊接和切割高熔点金属；医学上用作紫外线源(汞弧灯)；用作将交流变为直流的整流器(汞整流器)等。但在断开大电流电路时，会产生有害的弧火，须采取灭弧措施。

火花放电(spark discharge)

两极间的电压很高但电源的功率不大时，极间有火花产生并伴有爆裂声的气体自激放电现象，称为火花放电。雷电就是自然界的大规模火花放电现象。

在火花放电的空间内，气体分子的碰撞电离，是沿着狭窄曲折的发光通道产生的。由于空气被击穿后突然由绝缘体变为导体，电流猛增，但电源功率不够，因而电压下降使放电中断，待电压恢复后才能再行放电，因此火花放电是间歇性的。电极间的电容越大，电压升高所需的时间也越长，火花和脉冲电流的持续时间随之延长，脉冲电流的最大值也随之增大。由测量火花的亮度和所放出的能量可知，放电通道里的温度非常高，常达10000℃，可使气体热电离，气体压强也达到很高的数值。高压强区的迅速形成及其在气体中的传播，是一种爆炸现象，这就是伴随着火花放电出现爆裂声的原因。当电源有足够大的功率或两极间的电容足够大时，火花放电就转变成弧光放电。

火花放电的点燃电压等于自激放电的点燃电压，在其他条件相同时，这个电压唯一地决定于两个电极间的距离。因此，测量两个球形电极间有火花跳过时的距离，就可确定加在电极间的电压。这是高压工程中常用的一种测量高电压的方法。火花放电还用在光谱分析、金属电火花加工、内燃机的点燃装置等方面。

电晕放电(corona discharge)

在表面曲率较大的导体或电极附近(其他导体或电极距离较远),当电场强度达到某一临界值以上时,由于非均匀强电场的作用,气体发生雪崩式碰撞电离引起的自激放电,叫做电晕放电。

电晕放电时,在导体或电极周围形成发光的电晕层,相应的电极叫做起晕电极。电晕层以外的区域,电场很弱,气体不发生碰撞电离,是不发光的暗区,仅靠与起晕电极同号的离子传导电流,称为电晕放电的外围区域。电晕放电与其他类型放电的区别在于:电流不取决于外电路的电阻,而取决于放电外围区域的电阻,在外围区域中存在着单极性的空间电荷区,它阻碍带电粒子的通过。放电空间中的电势降,也大部分发生在外围区域。当起晕电极与周围导体间的电压增大时,电晕层逐渐扩大到附近的其他导体,电晕放电就过渡到火花放电。

电晕放电是高压输电线上漏电的主要原因。利用电晕放电,可使导体上的电荷逐渐消失。在导体尖端处发生的电晕放电,叫做尖端放电,它是避雷针泄放电荷的原因。电晕放电还可用以消除气体中的尘粒:使含有尘粒的气体通过电晕放电的空间,尘粒便获得与起晕电极同号的电荷,而向另一电极迁移,并在那里沉积下来。这种器件,按其构造可分为管式和箱式两种。前者是在圆筒中轴处置一导线,工作时在圆筒与导线间加上高电压;后者是一矩形截面的金属小箱,中间置一根有发射作用的金属丝。

霓虹灯(neon lamp)

即氖灯,应用气体辉光放电发光的原理制成的广告、招牌用灯。将细长玻璃管弯制成各种字形、图案或其他形状,装上电极,抽去管内空气,充入少量氖或汞蒸气和其他惰性气体,通电后,即发出彩色光,颜色随充入的气体而异,如氖气发红橙色光,氖和汞蒸气混和发绿色光。如果在管内壁上涂上不同的荧光物质,可获得多种颜色的光。

由于霓虹灯的灯管较长(若干米)、直径小(10mm~20mm),又用冷阴极,启动电压和工作电压都相当高(仅阴极电势降就约100V),所以要配有几千伏的高压变压器才能使用。

汞灯(mercury lamp)

在汞蒸气中放电发光的光源,也叫水银灯。灯管两端装有电极,制造时抽去空气,充入汞和少量氩气。通电后汞蒸发,汞原子受电子碰撞激发而发光。按汞蒸气的压强可分为低压汞灯、高压汞灯和超高压汞灯。低压汞灯有冷阴极辉光放电型和热阴极弧光放电型两种;高压汞灯和超高压汞灯都是弧光放电型的。

低压汞灯发出波长253.7nm的强紫外线。这是因为蒸气压较低时汞原子被激发到 6^3P_1 能级的概率较大,处于该激发态的原子在返回基态时发出253.7nm的辐射。低压汞灯的最佳蒸气压为0.8Pa,这时253.7nm辐射的能量占输入能量的比达最大值,约为60%,而可见光的辐射很少,只占输入电能的2%左右。可见,低压汞灯的光效很低。由于它发出的辐射很接近杀菌效率最高的波长——265.0nm,所以它可做消毒杀菌等用的紫外光源。在低压汞灯的内壁涂上荧光粉,可制成光效较高的低压汞荧光灯,即日光

灯。用一种特殊的荧光涂料，可把 253.7nm 的辐射转变成 300nm ~ 400nm 的近紫外辐射，就是诱捕昆虫用的黑光灯。

高压汞灯的汞蒸气压为几十万帕，灯的发光效率随气压增高而增高。这是因为在高压条件下，气压升高使更多处于 6^3P_1 态的汞原子与电子碰撞，被激发到更高的能级，并在更高的能级之间跃迁而发出可见光。高压汞灯在紫外、可见和红外区域都有辐射，但它的光色偏蓝绿，缺少红色成分，可用作晒图的光源、保健日光浴治疗、紫外探伤，广场和街道照明等方面。管壁内涂上荧光粉，制成高压汞荧光灯，不但能改变光色，还能提高光效。

汞蒸气压在 10^3Pa 以上的汞灯，是超高压汞灯，它不仅发光效率高，放电的功率密度也大，因而提高了灯的亮度。为了防止管壁过热，或是采取气冷、水冷(水冷套)方法，这就是毛细管形超高压汞灯(图 1-16-17)；或是制成球状灯泡，增大泡壳表面积，并使电弧远离泡壳，这就是球形超高压汞灯(图 1-16-18)。球形灯的电弧集中成一个亮度很高的点光源，主要用于荧光显微镜、光学示波器和投影系统中。

钠灯(sodium lamp)

在钠蒸气中进行弧光放电的气体放电光源。放电管用防钠腐蚀的玻璃制成，两端装有电极，抽去管内空气，加一定量的钠和氖氩混合气体。通电后，钠蒸发，钠原子受电子碰撞激发而发光。

钠灯因灯管内钠蒸气压的不同可分为低压钠灯和高压钠灯。低压钠灯发出波长为 589.0nm 和 589.6nm 的黄光，在钠蒸气压为 0.4Pa 时辐射效率最大。为了保持一定的钠蒸气压，放电管表面要维持 250 ~ 300 的温度。所以在放电管之外，还有一层玻璃外壳，两层之间抽成真空，以防止气体对流和传导引起的热损耗，再在外壳的内壁涂上红外反射层，以减少辐射造成的热损耗。因为低压钠灯发出的光很接近对人眼最敏感的波长区域，所以光效很高，但颜色过于单调。可用作光学仪器中的单色光源，公路、货场、矿井的照明，以及在多雾的港口、码头上做信号灯和照明光源。

提高钠的蒸气压，制成高压钠灯，可改善色调。在蒸气压为 $3 \times 10^4\text{Pa}$ 左右时，灯的光效最高，有近 30% 的电转变为可见光能，发出的光呈金黄色。蒸气压达 $6.7 \times 10^4\text{Pa}$ 时，发出的光呈白色，但因含有红、蓝成分的光，发光效率有所下降。高压钠灯管壁温度须在 700 以上，灯管要用既能耐高温又能抗钠腐蚀的半透明多晶氧化铝陶瓷材料。高压钠灯可用作街道、广场、机场、车站、港口、体育馆、展览馆等需要高亮度场所的照明光源。

氙灯(xenon lamp)

在惰性气体氙中进行弧光放电的气体放电光源。灯壳用耐高温、膨胀系数小的透明石英玻璃制成，两端装有钨(或钼钨)电极，内充高压纯氙。由于在常温下灯管内仍保持很高气压，氙灯要靠触发器才能点燃。触发器发出高频高压脉冲把灯管中的气体击穿，形成火花放电，使电极局部发热至热电子发射温度，发射出大量电子，这时主电源向灯供电，使火花通道扩展，过渡到自激弧光放电，灯就点燃了。氙灯的最大特点是它发出的光颜色和太阳光相近，故有“小太阳”之称。

氙灯按发光电弧的长短分为长弧氙灯和短弧氙灯两种。国产长弧氙灯极间距离 15cm ~ 130cm，自然冷却的一般充气 $2.7 \times 10^3 \text{Pa} \sim 2.7 \times 10^4 \text{Pa}$ 水冷的一般充气 $1.3 \times 10^4 \text{Pa} \sim 5.3 \times 10^5 \text{Pa}$ ，工作电压 60V ~ 220V，功率 1500W ~ 20000W，有光效高、寿命长等优点，适合于广场、体育场、车站、码头等处的大面积照明，还可做布匹颜色检验，织物、药物、塑料、橡胶等的老化试验，人工气候室植物培养以及光化学反应等用的光源。水冷的长弧氙灯(图 1-16-19)体积较小，相当大一部分红外线被水吸收，适于室内使用，可用于人工老化机、复印机等。短弧氙灯，又叫超高压氙灯，多做成球形或椭球形(图 1-16-20)。国产中小功率短弧氙灯的极间距离 1.0mm ~ 6.5mm，充气 $5 \times 10^5 \text{Pa} \sim 3 \times 10^6 \text{Pa}$ ，工作电压 16V ~ 30V，功率 75W ~ 3000W，是一种亮度极高的点光源，可用作标准白色光源或连续紫外辐射源，也可用作太阳模拟光源，更大量的则用于放映彩色电影和舞台照明等场合。

电子发射(electron emission)

金属中的自由电子从金属表面逸出现象叫做电子发射。电子要从金属表面逸出，必须具备一定的能量，以克服金属边界的势垒。根据使电子获得能量的不同方法，可分为热电子发射、电子轰击发射、正离子轰击发射、中性原子轰击发射、场致发射和光电发射等。气体自激放电中的电子发射，主要是热电子发射、正离子轰击发射和场致发射。

(1)热电子发射 随着金属温度的升高，自由电子的平均速度增大，有越来越多的电子得到足够的动能，超越边界势垒，从金属表面逸出。功函数为 ϕ 的金属材料，在绝对温度为T时发射的电流密度为

$$j = A_0 T^2 e^{-\frac{\phi}{kT}},$$

$$A_0 = \frac{4\pi e m k^2}{h^3} (1-r)$$

$$= 1.2 \times 10^6 (1-r) \text{A} / \text{m}^2 \cdot \text{K}^2。$$

式中 k 为玻尔兹曼常量 h 为普朗克常量 e 和 m 分别为电子的电荷和质量， r 为金属材料的电子反射率。这个公式称为里查孙-德西曼方程(Richardson-Dushman equation)。由上述方程可知，在 T 和 r 相同条件下，功函数小的金属发射的电流密度大。因此，热电子发射中的热阴极，常使用功函数小的材料。由于一些碱土金属的氧化物()氧化钡 BaO 和氧化锶 SrO 功函数小，常把它们敷在阴极上。对热阴极材料的另一个要求是要有较高的熔点和较小的蒸发率。否则，即使功函数很小，也不能用作热发射阴极。如铯的功函数虽很小，但熔点也低(28.5)，不能做热阴极材料。

(2)正离子轰击发射 速度较慢的正离子撞击金属表面时，将它的动能传递给金属的晶体点阵。连续不断的撞击使金属表面局部在短时间内得到加热，引起了热电子发射。至于很缓慢的正离子引起的电子发射，则是靠正离子的电离能来实现的。这种情况下，正离子的电离能至少要大于金属功函数的 2 倍。当向金属表面接近的正离子离开表面还有一定距离时，就有一个电子跃迁到离子上去，从而得到了一个激发态的原子，然后借助于第二类非弹性碰撞的作用，把原子的激发能量传递给第二个电子，使它从金属表面逸出。

气体辉光放电中阴极上的电子发射主要是正离子碰撞发射。因此，辉

光放电不要求阴极材料有高熔点，但要求阴极材料能耐受正离子的轰击，一般采用铝、镍、铁、铜等金属。为了降低功函数，也可涂上碱土金属氧化物。

(3)场致发射 也叫冷发射。根据量子力学的隧道效应，任意速度的电子都有可能穿透金属边界的势垒。冷发射的电流密度

$$j = C_1 E e^{-\frac{C_2}{E}}$$

式中 E 是电场强度， C_1 和 C_2 是由冷发射材料决定的常量， C_1 与功函数 ϕ 的平方根成反比， C_2 与 $\phi^{3/2}$ 成正比。发射材料的功函数越小，发射的电流密度越大，冷发射的特点是与发射材料的温度无关。

阴极射线(cathode ray)

从放电管阴极发射出来的电子束，叫做阴极射线，也叫电子射线。产生阴极射线的放电管，一般要抽成真空或充以低压强的某种气体。阴极可以是冷的，也可以是热的。电子通过外加电场的场致发射、正离子轰击发射或热电子发射，从阴极射出。电子束中的电子，可以用电场使它加速，也可以用电场、磁场或者二者兼用使它聚焦和偏转。各种类型的阴极射线示波器中的示波管、电视摄像机和显像管、雷达信号的显示、电子显微镜以及电子感应加速器，都是利用电子射线的上述性质进行工作的，高能量的电子束打在某些金属上，可以产生很强的 X 射线，据此可制成 X 射线管。电子束还可以直接用于一些材料的加工，如切割、熔化、焊接等。

真空管(vacuum tube)

由电子在密封的真空管子里传导电流的电子器件叫做真空管，也叫电子管。

二极管 最简单的真空管是二极真空管，它是英国物理学家弗莱明(John Ambrose Fleming, 1894 ~ 1945)于 1904 年发明的。管内只有两个电极，一个是阴极，用来发射电子(热发射)；另一个是阳极，也叫板极，用来接收电子。大的二极管，阴极用纯金属钨；小的二极管，多采用氧化物阴极，即在镍等金属上涂上氧化钡层或氧化锶层。热阴极有两种形式：一种是直接加热的直热式阴极；另一种是用加热器加热的旁热式阴极，加热器也叫灯丝，与阴极保持绝缘，阴极制成圆筒状，灯丝放在圆筒内。二极真空管可用图 1-16-21 的符号来表示。

在两极间加上电压，且板极电压为正时，阴极发射的电子就向板极运动，二极管内就有电流通过，这个电流叫做板极电流。测量二极管的电压电流特性，可得如图 1-16-22 所示的特性曲线。板极上的电压变得很高时，从阴极发射出来的电子全部到达板极，电流达到饱和。根据里查孙-德西曼方程(参见“电子发射”)，饱和电流的值 I_p 由绝对温度 T 决定：

$$I_p = A_0 T^2 e^{-\frac{e\phi}{kT}}$$

当板极电压低时，一部分热电子分布在板极和阴极之间，形成空间电荷，从而起到排斥后面来的电子的作用。在稳定状态下，单位时间内从阴极发射出来并到达板极的电子数目，要由积存在阴极附近的电荷所形成的电场来决定，所以这时的电流称为空间电荷限制电流。在平行平板电极的

情形下，空间电荷限制电流 I_p 和板极电压 U_p 之间近似地有如下关系：

$$I_p = KU_p^{3/2}$$

K 是由电极结构决定的常量，称为真空管导电系数。上式称为朗缪尔公式。实际上，即使在 $U_p=0$ 时，也有微弱电流，这是由热电子的初速度引起的，叫做初始电流。

当板极电压为负值时，管内就没有电流通过。这表明二极管具有单向导电性，因而二极管可以用于整流和滤波。

三极管 在二极管的阴极和板极之间加上一个网状的电极，即栅极，就成了三极真空管。三极管是美国发明家德福雷斯特 Lee deForest (1873~1961) 于 1907 年发明的。三极真空管可用图 1-16-23 的符号来表示。

在三极管中，板极电流 I_p 决定于板极电压 U_p 和栅极电压 U_G 。当 U_p 为正时，如果栅极的电压比阴极高 (U_G 为正) 则栅极产生的电场和板极产生的电场对阴极而言方向相同，结果使从阴极奔向阳极的电子数目增加，也就是增大了板极电流。但是这时栅极电路中也要出现电流 I_G ，它会影响电子管的工作性能。因此，通常总是使栅极的电压比阴极低 (U_G 为负)，因而 $I_G=0$ 。这时，栅极产生的电场能阻止一部分速度较低电子通过栅极，到达板极的电子数目因而减少，也就是减小了板极电流。栅极电压比阴极越低，板极电流越小，当栅极负压低到一定值时，可使板极电流为零。这时的负栅压称为截止栅压。可见三极管中栅极的作用如同一个阀门，控制着板极电流的大小，所以栅极也称为控制栅极。由于栅极离阴极较近，栅压的微小变化就足以引起板极电流较大的变化，这就是三极管能用作放大元件的原因。如果以栅极电压为参量，画出三极管的电流电压特性，可得图 1-16-24 的特性曲线。

由于板极电流 I_p 是板极电压 U_p 和栅极电压 U_G 的函数，即 $I_p=f(U_p, U_G)$ ，当 U_p 、 U_G 发生微小变化 ΔU_p 和 ΔU_G 时， I_p 的变化 ΔI_p 为

$$\Delta I_p = \frac{\partial I_p}{\partial U_p} \Delta U_p + \frac{\partial I_p}{\partial U_G} \Delta U_G .$$

$$\text{令 } \frac{\partial I_p}{\partial U_p} = \frac{1}{r_p}, \frac{\partial I_p}{\partial U_G} = g_m, \text{ 则有}$$

$$\Delta I_p = \frac{\Delta U_p}{r_p} + g_m \Delta U_G .$$

式中的 $r_p = \frac{\partial U_p}{\partial I_p}$ 称为板极电阻，是栅极电压为常数时板极电压增量与板极电流增量的比值； g_m 称为互导，表示栅极电压对板极电流的控制作用。

当 I_p 保持不变 (即 $\Delta I_p=0$) 时，板极电压的增量 ΔU_p 与栅极电压的增量 ΔU_G 之比的负值称为三极管的放大系数 μ ：

$$\mu = -\left(\frac{\Delta U_p}{\Delta U_G}\right) = r_p g_m .$$

r_p 、 g_m 和 μ 是三极真空管的三个重要参数。三极管的放大系数在 3~100 之间。放大系数的大小也与电子管的结构和工作情况有关。栅极愈密或者板极离阴极愈远，板极电压对板极电流的影响也就越小，放大系数也

就越大。

主要参考资料

1. 赵凯华, 陈熙谋。电磁学。第 2 版。北京: 高等教育出版社, 1985。
2. F. W. Sears 等。大学物理(第三册)。第 1 版。北京: 人民教育出版社, 1979。
3. C. . 福里斯, A. B. 季莫列娃。普通物理学(第二卷)。第 1 版。北京: 商务印书馆, 1953。
4. 程守洙, 江之永。普通物理学(第二册)。第 4 版。北京: 人民教育出版社, 1982。
5. 金原寿郎。基础物理学(下卷)。第 1 版。北京: 人民教育出版社, 1979。
6. E. M. 珀塞尔。电磁学。第 1 版。北京: 科学出版社, 1975。
7. 伊·耶·塔姆。电学原理(上册)。第 2 版。北京: 人民教育出版社, 1962。
8. 王竹溪。热力学。第 1 版。北京: 高等教育出版社, 1955。
9. 熊吟涛。热力学。第 1 版。北京: 人民教育出版社, 1979。
10. 华中工学院, 天津大学, 上海交通大学。物理实验·基础部分(工科用)。第 1 版。北京: 人民教育出版社, 1981。
11. 田志伟。普通物理实验技术。第 1 版。北京: 高等教育出版社, 1957。
12. 哈尔滨工业大学电工教研室, 秦曾煌。电工学(上册)。第 1 版。北京: 人民教育出版社, 1978。
13. 大连工学院电工教研室, 蒋德川。电工学(上册)。第 2 版。北京: 高等教育出版社, 1986。
14. 林存良。电子技术基础。第 1 版。北京: 人民教育出版社, 1978。
15. A. C. 罗斯-莫尼斯, E. H. 罗德兰克。超导电性理论。第 1 版。北京: 人民教育出版社, 1981。
16. I. M. 弗思。超导电性。第 1 版。北京: 科学出版社, 1977。
17. W. H. 内博盖尔。普通化学(第三分册)。第 1 版。北京: 人民教育出版社, 1979。
18. 卢国奇。铅蓄电池的原理与构造。第 1 版。北京: 国防工业出版社, 1988。
19. 李金章。镉-镍电池。第 1 版。北京: 人民邮电出版社, 1988。
20. 林世宁。气体电子学。第 1 版。北京: 人民教育出版社, 1961。
21. 复旦大学电光源教研室。电光源原理。第 1 版。上海: 上海科学技术出版社, 1979。
22. W. 艾伦巴斯。光源。第 1 版。北京: 轻工业出版社, 1981。
23. S. T. 赫德逊等。灯与照明(上册)。第 1 版。北京: 轻工业出版社, 1976。
24. 成都电讯工程学院。气体放电及离子管。第 1 版。北京: 人民教育出版社, 1961。
25. H. A. 卡普卓夫。气体与真空中的电现象(上册)。第 1 版。北京: 高等教育出版社, 1958。

26. 中国大百科全书出版社编辑部。中国大百科全书·物理学。第1版。北京：中国大百科全书出版社，1987。
27. 科学出版社名词室。物理学词典(上册)。第1版。北京：科学出版社，1988。
28. 陈鹏万。大学物理手册。第1版。济南：山东科学技术出版社，1985。
29. .M. 亚沃尔斯基, A. A. 杰特拉夫。物理学手册。第1版。北京：科学出版社，1986。
30. [日]物理学辞典編集委员会。物理学辞典。初版。培风馆。1984。
31. 电子工业技术辞典编辑委员会。电子工业技术辞典。第1版。北京：国防工业出版社，1980。
32. 简明不列颠百科全书(2)。第1版。北京：中国大百科全书出版社，1985。
33. 阎守胜。高温超导材料的应用遇到困难。物理，1990(2)：97
34. 王劲松等。创 T_c 最新纪录的汞系氧化物超导体。物理，1994(6)：332
35. 沙恩。超导研究大事记。现代物理知识。1992(5)：18

十七、磁场

磁体 (magnet)

具有磁性(能吸引铁、镍、钴等物质的属性)的物体。有天然磁体和人造磁体两种。天然磁体通常叫磁石，是一种以 Fe_3O_4 为主要成分的铁矿石。约在公元前 4 世纪成书的《管子》卷第二十三《地数》中有“上有慈石者下有铜金”，这是我国已发现的古籍中关于磁石的最早记载。明确提出磁石能吸铁的最早记载是公元前 3 世纪成书的《吕氏春秋》所写的“慈石召铁，或引之也”。东汉高诱在《吕氏春秋注》中说：“石，铁之母也。以有慈石，故能引其子。石之不慈者，亦不能引也。”所以汉以前把磁石写成“慈石”，意即“慈爱之石”。英文磁体(magnet)一词来源于西方最早发现天然磁铁矿石的产地地名——小亚细亚的 Magnesia。

人造磁体是用矫顽力高的所谓永磁材料(也叫硬磁材料或恒磁材料)制成的，通常称为永久磁体或永磁体。

人造磁体常制成针形、条形或马蹄形，称为磁针、条形磁体或蹄形磁体。每一磁体上都有两部分磁性最强，称为磁极。磁针、条形磁体、蹄形磁体的磁极都在接近两端处。一个磁体无论折断成多少段，每一段都是有两个磁极的磁体，而得不到只有一个磁极的磁体。可以在水平面内自由转动的磁针或条形磁体，在地磁场的作用下静止时，方向大致指向南北；指北的一端称北极(N 极)，指南的一端称南极(S 极)。磁体的同名磁极相斥，异名磁极相吸。

永久磁体主要用于需要有固定磁通的仪表和设备中，例如，电气测量仪表、小电机、受话器、扬声器、磨床上的磁盘、净谷用的磁力分离器等。

磁单极子(magnetic monopole)

也叫磁单极，即只有磁南极或磁北极的粒子。1931 年英国物理学家狄拉克把量子力学与宏观电磁理论结合起来进行理论研究时提出：假如宇宙中存在磁单极子，将可以解释电荷的量子化。设磁单极子具有磁荷 g ，则

$$e = n\left(\frac{hc}{2g}\right) \quad (n = \text{任何整数})$$

式中 h 是普朗克常量的 $\frac{1}{2}$ 分之一， c 是真空中光速。这个式子表示：

电荷 e 是一个最小单位 $\left(\frac{hc}{2g}\right)$ 的整数倍。

磁单极子的假说提出后，不断有物理学家寻找它，但是经过 50 年的时间还没有找到。美国斯坦福大学的物理学家们，从 1981 年开始，利用一个直径为 5 厘米共 4 匝的超导铌线圈作为探测器，寻找磁单极子；假如磁单极穿过铌线圈，线圈中将产生感应电流，在相联的仪器上会记录下来。在 1982 年 2 月 14 日的记录上，他们发现了线圈中产生了感应电流，很可能是磁单极引起的。但是因为只有这一个事例，还不能做出结论。

磁库仑定律 (magnetic Coulomb law)

法国物理学家库仑发现的点磁荷间相互作用的规律。人类在认识磁与电的联系以前，认为磁体的 N、S 两极类似正、负带电体，带电体上有电荷，磁极上有磁荷，并且把 N 极上的叫正磁荷，S 极上的叫负磁荷。同号磁荷相斥，异号磁荷相吸。当磁极本身的线度远小于磁极之间的距离时，可以

认为磁极上的磁荷是点磁荷。

库仑通过实验发现两个点磁荷之间相互作用的规律：两个点磁荷之间的相互作用力 F ，沿着它们之间的连线，与它们之间的距离 r 的平方成反比，与每个磁荷的数量（或称磁极强度） q_{m1} 和 q_{m2} 的乘积成正比。这就是磁库仑定律。用公式表示，则有

$$F = k \frac{q_{m1} q_{m2}}{r^2}。$$

式中比例系数 k 与点磁荷周围的介质，以及式中各量单位的选择有关。如果点磁荷是在真空中，在采用国际单位制的情况下（磁荷的单位是 $\frac{N \cdot m}{A}$ ，距离的单位是 m ），

$$k = \frac{1}{4\pi\mu_0}。$$

其中 $\mu_0 = 4 \times 10^{-7} \frac{N}{A^2}$ ，叫真空磁导率。

分子电流 (molecular current)

法国科学家安培，根据电流的磁效应，在 1822 年提出了磁现象本质的假说，可以解释永磁体的磁现象。安培认为：任何物质的分子中都存在一种环形电流，称为分子电流。分子电流相当于一个微小的磁体，但在通常情况下，由于物质中分子电流的排列是杂乱无章的，所以从整体来看，物体对外不显示磁性，如图 1-17-1 甲所示。但如果把物体放在外磁场

图 1-17-1

中，分子电流在外磁场的作用下，可以排列整齐而趋向一致，对外显示磁性了，如图 1-17-1 乙所示。在安培时代人们还不了解原子的结构，因此不能解释分子电流是怎样形成的。现在知道，原子是由带正电的原子核和绕核旋转的带负电的电子组成的。电子不仅绕核旋转，而且还有自旋。电子的绕核运动和自旋运动就形成了分子电流。

罗兰实验 (Rowland experiment)

罗兰 (Henry Augustus Rowland 1848 ~ 1901) 是美国物理学家。1875 年他接受了约翰·霍普金斯大学的教授职位，并到欧洲进行了一年学术访问。访问期间，他在德国亥姆霍兹的实验室中做了带电旋转盘的磁效应实验，第一次揭示了运动电荷能够产生磁场。罗兰实验装置(参看图 1-17-2)的主要部分

图 1-17-2

是一个直径 21.1cm、厚度为 0.5cm 的硬橡胶盘，它能绕一垂直轴以 61 周每秒的速度转动。盘的两面在距 0.6cm 处固定直径为 38.9cm 的两玻璃板，玻璃板的中心开一直径为 7.8cm 的圆孔。硬橡胶盘的两面都镀上金，两玻璃板的内面有镀金的圆环，外径为 24.0cm，内径为 8.9cm。利用电池使硬橡胶盘带电。利用盘附近悬挂的磁针检验带电硬橡胶盘旋转时产生的磁场。磁针的偏转可以从反光镜反射的光线看出。

磁场 (magnetic field)

电流、运动电荷、磁体或变化的电场周围空间里存在的一种特殊形态的物质，它的基本特性是对其中的运动电荷、电流、磁体有力的作用。磁场可以用磁感应强度 B 来描述。

磁场的分布可以用磁力线形象地表示出来。磁力线，也叫磁感应线或 B 线，是一些有方向的曲线，它的每一点的切线方向与该点的磁感应强度 B 的方向一致。磁力线是闭合曲线。例如，通电直导线的磁力线是在垂直于导线的平面上以导线为圆心的同心圆；永磁体的磁力线在磁体外部是从它的北极出来回到它的南极，在磁体内部是从它的南极到它的北极，构成闭合曲线。磁力线概念是法拉第 (Michael Faraday 1791 ~ 1867) 为描述磁体间的相互作用在 1831 年前后提出的。他认为两个磁体之间的磁作用，是靠两磁体之间的磁力线逐步传递过去的，而不应该是“超距作用”。法拉第认为磁力线是真实存在的。现在知道，磁场是传递磁作用的物质，磁力线不过是形象描述磁场的一种工具，并不真实存在。

磁场的物质性，是由于电磁场的物质性得到证实而被证明的(参见“电磁场”)，因为磁场，以及电场，都是统一的电磁场的一个方面。

磁感应强度 (magnetic induction)

又称磁通(量)密度，是描述磁场强弱、方向的物理量。它是一个矢量，通常用字母 B 表示。有三种定义磁感应强度的方法：通过磁场对运动电荷的作用力(洛伦兹力)，或者对通电导线的作用力(安培力)，或者对通电线圈的力矩来定义。这三种定义方法是等效的。无论采取哪种定义方法，磁场中某点的磁感强度矢量 B 的方向(可简称为该点的磁场方向)，都与放在该点的小磁针北极所指的方向一致。

(1) 点电荷 q 通过磁场中的某一点，如果它的速度 v 垂直于该点的磁场方向，它受到的洛伦兹力是 F ，那么该点的磁感应强度 B 的大小被定义为

$$B = \frac{F}{qv}。$$

(2) 在磁场中某处有长度为 L 的一小段通电导线垂直于该处的磁场方向，导线中的电流为 I ，受到的安培力是 F ，那么该处的磁感应强度 B 的大小被定义为

$$B = \frac{F}{IL}。$$

(3) 在磁场中某处有一小的单匝通电线圈，通过的电流是 I ，线圈面积是 S ，线圈平面与该处磁场方向平行时，线圈受到磁场的力矩为 M ，那么该处的磁感应强度 B 的大小被定义为

$$B = \frac{M}{IS}。$$

高等学校教学用书中，通常通过磁场对运动电荷或电流元所施的力，以矢量式的形式给出磁感应强度 B 的定义式：

$$F = qv \times B \text{ 或 } dF = IdL \times B。$$

上面式子中的 q 为代数量， q 为正 ($q > 0$) 表示运动电荷为正电荷， q 为负 ($q < 0$) 表示运动电荷为负电荷； LdL 称为电流元，是矢量，它的方向即

电流的方向。从上面的矢量式，根据矢量积（叉积）的右手螺旋关系可以确定 v 、 B 、 F 或 IdL 、 B 、 dF 方向之间的关系：以从 v （或 IdL ）经小于 180° 的角转到 B 的方向为右手螺旋柄的旋转方向， F （或 dF ）就指向螺旋前进的方向（参看图 1-17-3 甲和乙）。

图 1-17-3

在国际单位制中，磁感应强度的单位是特斯拉，符号是 T 。
 $1T=1Wb/m^2=1N/(A \cdot m)=1V \cdot s/m^2$ 。在高斯单位制中，磁感应强度的单位是高斯，符号是 Gs ， $1Gs=10^{-4}T$ 。

矢量 B 是与电场强度 E 对应的，本应该叫“磁场强度”，但是由于历史的原因，已有另一个矢量 H 叫做磁场强度，所以习惯上把矢量 B 叫磁感应强度。

磁通量 (magnetic flux)

表征磁介质（或真空）中磁场分布情况的物理量。通过磁场中任一面积元 dS 的磁通量 $d\phi$ ，等于该面元处磁感应强度矢量 B 在该面元法线 n 方向上的分量与面元面积的乘积

$$d\phi = B \cos \theta \, dS$$

式中 θ 是 B 与 n 的夹角。对于磁场中一块有限曲面 S ，要求出穿过 S 的磁通量，可以采用积分的办法

$$\phi = \iint_S B \cos \theta \, dS = \iint_S B \cdot dS$$

式中 $dS = ndS$ 为面元矢量。

磁通量的单位是韦伯，国际符号是 Wb 。

$$1Wb = 1T \times 1m^2 = 1T \cdot m^2$$

如果面元 dS 与 B 垂直，这时有 $d\phi = BdS$ ，或

$$B = \frac{d\phi}{dS}$$

可见 B 在数值上等于通过垂直于 B 的单位面积的磁通量。因此有时称 B 为磁通（量）密度，用韦伯/米²作它的单位。

为了借助磁力线的疏密程度来描绘磁场的强弱，人们规定：通过磁场中任一面积元的磁力线条数等于该面元的磁通量。即通过 dS 的磁力线条数 $= B \cdot dS$ 。

磁通量在研究电磁感应现象时要经常用到。

磁链 (flux linkage)

与导电线圈交链的磁通量，称为磁链，也称为磁通匝数或通匝。磁链等于导电线圈匝数与穿过该线圈磁通量的乘积。单位为韦匝。

地磁场 (field of terrestrial magnetism)

地球表面和近地空间存在着地球的磁场，简称地磁场。地球本身相当于一个大磁体。地磁两极的连线——地磁轴与地球的自转轴并不重合，有 11.5° 的交角。地面任一点的磁感应强度 B 可以分解为竖直（地球径向）分量 B_r 和水平分量 B_θ 。 B_θ 一般与地理子午线之间有一夹角，叫磁偏角。 B

一般与水平面之间也存在夹角，叫磁倾角。磁偏角、磁倾角、磁感应强度的水平分量，合称为地磁三要素。测得某一地点地磁三要素即可求出该点的磁感应强度。

地磁场的起源，目前还是一个没有解决，有待深入研究的问题。地磁场主要来源于地球内部，来自外层空间的影响不到 1%。目前为多数学者接受的是 1945 年物理学家埃尔萨塞 (Walter Maurice Elsasser) 提出的假说。这一假说认为：地球内部的地核中有一层液态物质，主要成分是铁，也有少量镍及其他元素。这层液态物质既可流动，又可导电，被称为导电流体。由于地球自转，导电流体发生运动。如果起初在地核内有非常微弱的磁场，就会在导电流体中激发电流，经过非常复杂的相似于自发电机的机制，磁场和电流的相互作用达到一定的稳定性，形成稳定的地磁场。

近年来，利用人造卫星和宇宙探测器发现地磁场有一定的边界。同时，由于太阳风（是从太阳外层大气向周围空间发射出的高速带电粒子流）的影响，朝向太阳的一面，地磁场边界至地球中心的距离只有 8~11 个地球半径。当太阳激烈活动时，则被增强的太阳风压缩到 5~7 个地球半径。背向太阳的一面，地磁场可以延伸到几百个甚至一千个地球半径以外，形成一条长长的磁尾，如图 1-17-4 所示。但是，在距地面几千千米范围内可以认为地磁场相对于地磁轴是对称的。

图 1-17-4

地球表面上的磁感应强度的大小和方向处处有差异，但是邻近地点的地磁差异一般都很小。如果某个地区有大型磁铁矿藏，那么该地区的磁感应强度跟邻近地区的相比，将有显著的差异，这称为地磁异常。寻找地磁异常区，对于发现铁矿有重要作用。

地磁场的磁感应强度，除了随经纬度及离地面的高度变化外，还随时间变化。地磁场随时间的变化可分为长期变化和短期变化。根据古地磁学的研究，地磁场的极性会发生周期性变化。从七千六百万年前到现在，地磁极已发生过一百多次倒转。根据人造卫星测量，地磁极性的倒转过程仍在继续进行之中。地磁场的短期变化有年变、日变和突变。年变是以年为周期的变化。年变中夏季的变化比冬季为大。以一昼夜为周期的变化称为日变，在日变中，夜间的变化比白天为小。地磁场的突变是突然出现的地磁不规则变化，发生时间有几小时到几天不等。地磁场的突变也叫磁暴，磁暴发生时，磁罗盘失去作用，无线电通讯发生障碍，甚至可能中断。磁暴和极光发生的周期均为 11 年左右，与太阳黑子群出现的周期相同。此外，磁暴还和太阳上的耀斑有关，目前流行的看法是：黑子本身是太阳的等离子体剧烈运动的强磁场区，而当太阳产生耀斑时，大量高速带电粒子放射到周围空间，当进入大气层时，由于受地磁场影响而偏向地磁两极将大气激发产生辉光，这些高速带电粒子本身形成的电流产生的附加磁场，以及黑子本身磁场的影响，则是磁暴的源。

人类的许多活动都与地磁场密切相关。指南针普遍用来指示方向。地震前往往会发生地磁异常现象。局部地区的地磁异常意味着地下有丰富的矿藏。短波通讯的质量依赖于地磁场的稳定性，许多电气仪表要受地磁场的影响。特别重要的是，地磁场为地球提供了一把生命的保护伞：来自太阳的高能带电粒子进入地磁场后，在洛伦兹力的作用下，沿着磁力线作螺

旋运动，大部分避开了地球，被引向地球后面的磁尾，只有一小部分进入地磁两极上空。假如没有地磁场，强大的太阳风将杀伤地球上的一切生命。

毕奥-萨伐尔定律 (Biot-Savart law)

表示电流和由它所激发的磁场之间的关系的定律。1820年法国物理学家毕奥 (Jean Baptiste Biot 1774 ~ 1862) 与萨伐尔 (Félix Savart 1791 ~ 1841) 用实验得出长直电流对磁极的作用力与距离成反比。不久，拉普拉斯 (Pierre Simon Laplace 1749 ~ 1827) 把载流回路对磁极的作用看成是各个电流元的作用的矢量和，从毕奥和萨伐尔的实验结果倒推出电流元的磁场公式。所以通常把电流元的磁场公式叫做毕奥-萨伐尔定律，或毕奥-萨伐尔-拉普拉斯定律。它的内容是：在真空中，恒定电流元矢量 Idl 在空间一点 P 所激发的磁感应强度 dB 为

$$dB = \frac{\mu_0}{4\pi} \frac{Idl \times r}{r^3} \quad (1)$$

式中 dI 为载流导线上的线元， dI 沿着其中电流的方向， r 为电流元到 P 点的矢径， $\mu_0 = 4 \times 10^{-7} \text{H/m}$ 是真空磁导率。磁感应强度 dB 的大小为

$$dB = \frac{\mu_0}{4\pi} \frac{Idl \sin\theta}{r^2} \quad (2)$$

式中 θ 为电流元矢量 Idl 和矢径 r 间的夹角。若 I 的单位为 A， dI 和 r 的单位为 m，则 dB 的单位为 T。 dB 的方向垂直于电流元和矢径的平面，其指向由安培右手定则决定，当右手四指由 Idl 经小于 θ 的角转向 r 时，则大拇指所指的方向就是 dB 的方向 (图 1-17-5)。

整个恒定电流电路在 P 点激发的磁感应

图 1-17-5 电流元件 Idl 在空间产生的磁感应强度 dB 强度 B 等于各电流元所激发的磁感应强度 dB 的矢量叠加，即

$$B = \frac{\mu_0}{4\pi} \oint \frac{Idl \times r}{r^3} \quad (3)$$

运动电荷也激发磁场。实际上，电流元引起的磁场本质上就是运动电荷引起的磁场。当电荷 q 以远小于光速 c 的速度 v 匀速运动，在空间任一点 P 引起的磁感应强度

$$dB = \frac{\mu_0}{4\pi} \frac{qv \times r}{r^3} \quad (4)$$

式中 r 是电荷所在处到 P 点的矢径。此式和(1)式的形式相同，表明毕奥-萨伐尔定律是对低速运动电荷成立的近似定律。

应用毕奥-萨伐尔定律可直接计算某些电流的磁场。

(1) 载流直导线的磁场 根据毕奥-萨伐尔定律可知，图 1-17-6 甲中载流直导线

图 1-17-6 载流直导线的磁场

A_1A_2 上任意电流元 Idl 在 P 点产生的 dB 的方向都一致(在 P 点垂直于纸面向内)。因此，总磁感应强度 B 的大小为各 dB 的代数和：

$$B = \int_{A_1}^{A_2} dB = \frac{\mu_0}{4\pi} \int_{A_1}^{A_2} \frac{Idl \sin\theta}{r^2}$$

若导线为无限长，P点与导线的距离为 r_0 ，则

$$B = \frac{\mu_0 I}{2\pi r_0} \quad (5)$$

长直导线周围的磁力线是沿着垂直于导线的平面内的同心圆（图 1-17-6 乙）。

(2) 载流圆线圈轴线上的磁场 电流强度为 I 、半径为 R 的圆线圈上任一电流元 Idl 在线圈轴线上 P 点所产生的微小磁感应强度

$$dB = \frac{\mu_0 Idl}{4\pi r^2}$$

式中 r 是 dI 到 P 点的距离， $r > dl$ 。由图 1-17-7 甲可知， dI 在线圈上的位置不同， dB

图 1-17-7 载流圆线圈的磁场

的方向不同。将 dB 沿 x 轴、 y 轴、 z 轴方向分解，由于对称关系，所有的 dB_y 、 dB_z 都两两相消，而所有的 dB_x 方向一致，它们的叠加结果就是载流圆线圈在 P 点所产生的磁感应强度。因为

$$dB_x = dB \sin\theta = \frac{\mu_0 Idl}{4\pi r^2} \cdot \frac{R}{r}$$

$$\begin{aligned} \text{所以 } B &= \int dB_x = \frac{\mu_0 IR}{4\pi r^3} \int_0^{2\pi R} dl \\ &= \frac{\mu_0}{4\pi} \cdot \frac{2\pi R^2 I}{r^3} = \frac{\mu_0}{2} \frac{R^2 I}{(R^2 + x^2)^{3/2}} \end{aligned} \quad (6)$$

式中 x 是 P 点离线圈中心的距离。当 $x=0$ 时，就得到载流圆线圈中心的磁场

$$B_0 = \frac{\mu_0 I}{2R} \quad (7)$$

载流圆线圈的磁力线是一些套在电流环上的闭合曲线（图 1-17-7 乙）。

(3) 载流螺线管中的磁场 半径为 R 、总长为 L 、单位长度内匝数为 n 的密绕螺线管，当有恒定电流 I 通过时（图 1-17-8 甲），其轴线上一点 P 处的磁感应强度 B ，可根据毕奥-萨伐尔定律求得为

$$B = \frac{\mu_0}{2} nI (\cos\theta_2 - \cos\theta_1) \quad (8)$$

式中 θ_1 、 θ_2 分别为 P 点到线圈两端的直线与 x 轴所夹上角（图 1-17-8 乙）。当螺线管的半径远小于其长度（ $R \ll L$ ），螺线管可看作“无限长”时，管内轴线上一点的磁感应强度

$$B_{\text{内}} = \mu_0 nI \quad (9)$$

表明无限长螺线管内轴线上各点的 B 值与各点在轴线上的位置无关；可以证明，非轴线上各点的 B 值也是这样，即载流长螺线管内的磁场是均匀的。

图 1-17-8 丙的曲线表示出载流长螺线管内轴线上各点 B 值的情况，图 1-17-8 丁表示出它的磁力线分布情况。它内部的磁力线方向可用安培右手定则判定。

安培定则 (Ampère rule)

表示电流和它所引起的磁场之间方向关

图 1-17-8 载流螺线管的磁场

系的定则，又称安培右手定则。

(1) 直线电流的磁场 用右手握住导线，使拇指指向电流方向，与拇指垂直的其余四指所指的方向就是磁力线的方向 (图 1-17-9)

(2) 螺线管电流的磁场 用右手握住螺线管，使四指指向电流方向，与四指垂直的拇指所指的方向就是螺线管内部磁场磁力线的方向 (图 1-17-10)。

磁场的高斯定理 (Gauss law of magnetic field)

反映磁场基本特性的定理：自然界不存

图 1-17-9 图 1-17-10

在磁荷，磁力线是无头无尾的闭合曲线。到目前为止，没有发现与正、负电荷相对应的磁荷——磁单极。磁力线不像电力线那样有头（正电荷）有尾（负电荷），而是无头无尾的闭合曲线。因为每一条磁力线都是闭合的，所以对于任一闭合曲面来说，穿出的磁通量必然等于穿入的磁通量，总起来看，正的磁通量与负的磁通量互相抵消。也就是：通过任意闭合曲面的磁通量恒等于零。这就是磁场的高斯定理，又叫磁通量连续性原理，它的数学表达式为

$$\oiint_S \mathbf{B} \cdot d\mathbf{S} = 0 \quad (S \text{——任意闭合曲面})。$$

利用矢量分析中的高斯定理可以导出上式的微分形式

$$\nabla \cdot \mathbf{B} = 0。$$

上述方程反映了磁场的基本特性，所以是电磁学的基本方程之一（参见“麦克斯韦方程组”）。

安培环路定理 (Ampère circuital theorem)

关于恒定磁场性质的一条基本定理。安培环路定理的表述是：磁感应强度 \mathbf{B} 沿任何闭合环路 L 的线积分，等于穿过这环路所有电流强度代数和的 μ_0 倍。即

$$\oint_L \mathbf{B} \cdot d\mathbf{l} = \mu_0 \sum I \quad (L \text{——任意闭合环路})。$$

(1) 式中电流 I 的正负是这样规定的：以积分的环绕方向为右螺旋柄的旋转方向，如果电流方向与螺旋前进方向相同，则 $I > 0$ ，反之， $I < 0$ 。如果电流 I 不穿过回路 L ，则不应计入上式中的 I 。

安培环路定理可以从毕奥-萨伐尔定律出发来证明。利用这一定理可以计算某些对称分布电流的磁场。

当存在磁介质时，介质被磁化，存在磁化强度 \mathbf{M} ，出现磁化电流 I' 。磁化电流 I' 也像传导电流 I 一样，对磁场有贡献。因此，存在磁介质时 (1) 式应为

$$\oint_L \mathbf{B} \cdot d\mathbf{l} = \mu_0 I + \mu_0 I' \quad (2)$$

由于磁化强度 \mathbf{M} 与磁化电流 I' 存在下述关系

$$\oint_L \mathbf{M} \cdot d\mathbf{l} = I' ,$$

将它代入(2)式, 可得 $\frac{1}{\mu_0} \oint_L \mathbf{B} \cdot d\mathbf{l} - \oint_L \mathbf{M} \cdot d\mathbf{l} = I_0$ 。令

$$\mathbf{H} = \frac{\mathbf{B}}{\mu_0} - \mathbf{M} , \quad (3)$$

则存在磁介质时的安培环路定理的公式变为

$$\oint_L \mathbf{H} \cdot d\mathbf{l} = I_0 \quad (4)$$

假定传导电流 I 是体分布的, 其密度为 \mathbf{j} , 那么利用矢量分析中的斯托克斯定理可以导出(4)式的微分形式

$$\nabla \times \mathbf{H} = \mathbf{j} \quad (5)$$

新引入的辅助矢量 \mathbf{H} 叫**磁场强度**, (3)式是它的定义式。引入 \mathbf{H} 矢量的好处是可使安培环路定理的表达式中不出现磁化电流 I' 。

对于非恒定电流, (4)式不再成立。麦克斯韦引入位移电流的概念, 把(4)式中的传导电流 I 推广为全电流, 从而得出麦克斯韦方程组的一个核心方程(参见“位移电流”和“麦克斯韦方程组”)。

涡旋场 (vortex field, rotational field)

又称旋度场或有旋场, 是矢量场的一种, 它的特点是场线为无头无尾的闭合曲线, 如水的旋涡那样。磁场和由于磁场变化而感应出的电场都是涡旋场, 它们的磁力线或电力线是闭合曲线, 它们的磁感应强度 \mathbf{B} 或电场强度 \mathbf{E} 沿任一闭合回路的线积分—环流可以不等于零(参见“安培环路定理”)。这与静电场不同, 在静电场中电力线不是闭合曲线, 电场强度沿任一闭合回路的线积分总等于零(参见“静电场的环路定理”), 所以静电场属于无旋场。属于无旋场的静电场, 可在场中任一点上引入一单值标量势函数, 即电势, 来表征电场, 而属于涡旋场的磁场, 一般说来, 在磁场中任一点上不能引入一个单值的标量势函数来表征磁场(在某些情况下, 为了简化磁场的计算, 可以引入一个称为“磁标势”的辅助物理量)。

安培力 (Ampère force)

载流导线在外磁场中所受的磁力。由于是安培通过实验总结出这种力的规律, 所以称它为安培力, 并把安培总结出的规律称为安培定律。安培定律的内容是: 处于外磁场中的电流元所受的磁力的大小等于电流元、磁感应强度以及电流元 Idl 与磁感应强度 \mathbf{B} 之夹角 θ 的正弦之乘积, 即

$$dF = IdlB \sin \theta \quad (1)$$

安培力 dF 总是垂直于 Idl 与 \mathbf{B} 组成的平面, 其方向可根据右手螺旋定则来判断: 以从 Idl 经小于 180° 的角转到 \mathbf{B} 的方向为右手螺旋柄旋转方向, dF 就指向螺旋前进的方向。可见 dF 的方向是 Idl 与 \mathbf{B} 的矢量积的方向, 因此安培定律可用矢量式表示为

$$dF = Idl \times B. \quad (2)$$

上式常称为安培力公式。

安培力的方向也可以用左手定则帮助记忆：如图 1-17-11 所示，伸开左手，使拇指与其余四指垂直，并都和手掌在同一平面内，使磁力线垂直进入手心，其余四指指向电流方向，则拇指所指即载流导线受到的磁力方向。由于安培定律是电动机的理论基础，所以左手定则也常称为电动机定则。

图 1-17-11 左手定则

利用安培力公式可以计算各种形状的载流导线在外磁场中所受的力和力矩。

(1) 平行载流长直导线间的相互作用力如图 1-17-12 所示，两导线相距为 a ，其中电流分别为 I_1 、 I_2 ，设两电流方向相同。根据毕奥-萨伐尔定律可知 I_2 在距离 a 处产生的磁感应强度

$$B_2 = \frac{\mu_0 I_2}{2\pi a},$$

方向与 I_1 垂直（图 1-17-12 甲）。根据安培定律可知导线 1 上的电流元 $I_1 dl_1$ 受到的安培力的大小

$$dF_1 = I_1 dl_1 B_2 = \frac{\mu_0 I_1 I_2}{2\pi a} dl_1$$

dF_1 的方向在两导线所确定的平面内，并指向导线 2。导线 1 上每单位长度所受安培力大小为

$$f_1 = \frac{dF_1}{dl_1} = \frac{\mu_0 I_1 I_2}{2\pi a}. \quad (3)$$

同理可知导线 2 上每单位长度所受的安培力 f_2 与 f_1 等值而反向（图 1-17-12 乙），所以两电流同向时其间的安培力表现为引力。

图 1-17-12 载流导线间的相互作用力

当两电流反向时，每条导线单位长度所受安培力的大小仍可由(3)式求出，但两导线间相互作用的安培力表现为斥力。

(2) 矩形载流线圈在匀强磁场中所受的力矩

如图 1-17-13 所示，在匀强磁场 B 中有一通有电流 I 的矩形线圈 $abcd$ 。令 $\overline{ab} = \overline{cd} = l_1$ ， $\overline{bc} = \overline{da} = l_2$ ，线圈平面的法线 n 与 B 的夹角为 θ ，而线圈平面与 B 的夹角为 α ，线圈两个边 bc 、 da 都与 B 垂直。根据安培定律可知：

图 1-17-13 矩形载流线圈在匀强磁场中所受的力矩

ab 与 cd 两边受的安培力 F_2 、 F'_2 的大小相等、方向相反，又在同一直线上，对线圈的运动不起作用；而 bc 、 da 两边所受的安培力 F_1 、 F'_1 的大小均为 Il_2B 、方向相反（图 1-17-13 乙）但不在一条直线上，构成力偶，对线圈产生力矩 M_1 。力偶臂为 $\overline{cd} \cos\alpha = l_1 \sin\theta$ ，所以 $M_1 = Il_2B \cdot l_1 \sin\theta$ 但 $l_1 l_2 = S$ 为矩形线圈的面积，因此对单匝线圈

$$M_1 = IBS \sin \theta. \quad (4)$$

如果线圈是用细线紧密地绕成 N 匝，则所受力矩

$$M = NIBS \sin \alpha$$

n 与 B 垂直时， $\alpha = 90^\circ$ ， M 最大， n 与 B 方向相同时， $\alpha = 0^\circ$ ， $M = 0$ 。 M 的作用是力图使线圈平面的法线方向转到与磁感应强度的方向相同。

磁矩 (magnetic moment)

描述磁体、载流线圈的磁性质以及微观粒子物理性质的物理量。

(1) **条形磁体的磁矩** 磁极强度为 Q_m 、两磁极间距离为 l 的条形磁体的磁矩

$$m = Q_m l$$

条形磁体的磁矩是矢量，它的方向是从磁体的 S 极到 N 极的方向；用矢量式表示可写成 $m = Q_m l$ 。

(2) **载流平面线圈的磁矩** 面积为 S 的单匝平面线圈中有电流 I 通过时的磁矩大小为

$$m = IS$$

载流平面线圈的磁矩也是矢量，它的方向由右手螺旋定则确定，即当电流绕着螺旋柄旋转的方向流过时。磁矩方向沿着螺旋前进的方向；用矢量式表示可写成 $m = ISn$ ，式中 n 是与 I 成右手螺旋的单位矢量。

在平面线圈是由细线紧密绕成共有 N 匝的情况下，磁矩 m 的大小为

$$m = NIS$$

(3) **微观粒子的磁矩** 原子中电子绕核运动与载流平面线圈相当，所以也有磁矩，称为轨道磁矩。电子本身由于自旋也具有磁矩，称为自旋磁矩或本征磁矩。无论是自旋磁矩还是轨道磁矩都是量子化的，近代物理的理论和实验都证明，原子核、质子、中子以及其他基本粒子都具有确定的自旋磁矩。直流电动机原理 (principle of direct current motor)

直流电动机是由于安培力的作用而旋转，将电能转换为机械能的。图 1-17-14 是直

图 1-17-14

流电动机动作原理说明图。如甲所示，当电流从电刷 A 经换向器片进入电枢线圈 $abcd$ 沿图中方向流动时，由于安培力 F 的作用，线圈逆时针方向旋转。当转到线圈平面与磁力线垂直时，两换向器片的间隙恰好转到电刷处，线圈中无电流，这个位置叫做电动机的死点。但是由于惯性，线圈将冲过死点继续旋转，同时两换向器片调换所接触的电刷，使线圈中电流变为沿 $dcba$ 方向流动 (参看图 1-17-14 乙)，安培力使线圈继续逆时针旋转。由于换向器的作用，线圈每转半周线圈中的电流方向改变一次，从而保证线圈不停地朝一个方向旋转下去。

改变磁场的方向，或者改变电流的方向 (改变电刷所接的电源的电极)，直流电动机将反转。

直流电动机的电枢线圈 (绕组) 旋转时切割磁力线，因此电枢线圈中产生感应电动势，它的方向与电源加在电枢上的电压 U 的方向相反，称为反电动势。如果用 E 表示直流电动机的反电动势， r 表示电枢线圈的电阻， I 表示电枢线圈中的电流 (图 1-17-15)，那么根据基尔霍夫方程组可知，直流电动机的电

图 1-17-15

压方程为

$$U = E + Ir。$$

以电流 I 乘上式可得

$$IU = IE + I^2r。$$

式中 IU 是电枢的输入功率， I^2r ，是电枢电阻转化为焦耳热的功率， IE 是克服反电动势 E 的功率，根据能量守恒定律可知，正是这部分功率转换为电动机的输出功率（这里略去了轴承、电刷等摩擦损耗及风损）。

洛伦兹力 (Lorentz force)

运动点电荷在磁场中受到的作用力。它是荷兰物理学家洛伦兹 (Hendrik Antoon Lorentz 1853 ~ 1928) 于 1895 年建立经典电子论时，作为基本假定而首先提出的。运动点电荷所受的洛伦兹力 F 同它的电量 q 、速度 v 及点电荷所在处的磁感应强度 B 之间的关系是

$$F = qv \times B。 \quad (1)$$

洛伦兹力的大小

$$F = q|v|B \sin \theta。 \quad (2)$$

式中 θ 为 v 与 B 之间的夹角。洛伦兹力的方向可根据右手螺旋定则来确定：以从 v 经小于 180° 的角转向 B 为螺旋柄的旋转方向，则螺旋前进的方向就是洛伦兹力的方向。在电场和磁场同时存在的情况下，运动电荷受到的总作用力为电场力和磁场力之和，即

$$F = q(E + v \times B)。 \quad (3)$$

洛伦兹力公式是反映电磁场对电荷作用的重要公式，它和麦克斯韦方程组一起构成经典电动力学的基础。

洛伦兹力不仅对于宏观点电荷成立，而且对微观元电荷也成立。电流元在磁场中受到的安培力就是洛伦兹力的宏观表现。洛伦兹力始终垂直于电荷的运动方向，所以它对电荷不做功，它不改变电荷的速率和动能，只改变电荷运动的方向。但是作为它宏观表现的安培力却可以做功，这可以从下面的分析得到理解。

如图 1-17-16 所示，设载流导线在安培力作用下以速度 v_2 向上运动，此时导线内自由电子 $-e$ 除以原来的定向速度 v_1 向左运动外，还跟随导体以速度 v_2 向上运动，其合速

图 1-17-16

度为 v 。相应下 v_1 的洛伦兹力为 $f_1 = -ev_1 \times B$ ，方向向上。相应于 v_2 的洛伦兹力为 $f_2 = -ev_2 \times B$ ，方向向右。合力 $f = f_1 + f_2$ 方向如图 1-17-16 所示，可以证明 $f \perp v$ ，即 f 为 $-e$ 所受的总的洛伦兹力，与 $-e$ 的速度 v 垂直，不做功。但 f_1 与 v_2 同向，故 f_1 做正功，其功率为 f_1 与 v_2 的标量积

$$P_1 = -e(v_1 \times B) \cdot v_2。$$

f_2 与 v_1 反向，故 f_2 做负功，其功率为 f_2 与 v_1 的标量积

$$P_2 = -e(v_2 \times B) \cdot v_1。$$

P_1 与 P_2 大小相等、符号相反，所以总功率为零。

安培力是各自由电子所受 f_1 的总和，它仅是总的洛伦兹力（各自由电子所受 f 的总和）的一个分量，它做正功，而洛伦兹力的另一个分量 f_2 的总和做等量的负功。这就是总的洛伦兹力不做功而安培力做功的道理。

由于 f_2 与 v_1 反向，自由电子定向运动受阻。要维持电子定向运动速度 v_1 不变，必须由形成电流的电场（即由外加电压）提供一个与 f_2 相等、相反的力。从能量角度看，当安培力做功时，电源要额外克服力 f_2 做功。可见，安培力做功实际是由电源提供能量，而不是由外磁场提供能量。洛伦兹力起了能量的中转作用，即将电源的能量转变为安培力做功所得的机械能。

磁聚焦 (magnetic focusing)

由通电线圈产生的磁场来使电子束会聚成点（聚焦）或成像。在电子束器件（如示波管、显像管、电子显微镜等）中，由于电子束中的电子从电子源发射出时的初始位置和初速度方向不同，以及电子间存在斥力，电子束的横截面有逐渐扩大的趋势，聚焦就是克服这种趋势，将电子束会聚在给定的横截面内。磁聚焦是利用磁场对运动电子的洛伦兹力来聚焦的。

当带电粒子以初速 v 垂直于磁感应强度 B 进入磁场时，带电粒子在洛伦兹力作用下做匀速圆周运动，其回旋共振频率（参见“回旋加速器”） $f = qB / (2\pi m)$ 与粒子速率和回旋半径无关。当带电粒子的初速 v 与磁感应强度 B 成任意夹角 θ 时，则 v 可分解为平行于和垂直于 B 的两个分量 $v_{//}$ 和 v_{\perp} 。
 $v_{//} = v \cos \theta$, $v_{\perp} = v \sin \theta$ 。若只有 $v_{//}$ 分量，磁场对粒子没有作用力，粒子将沿 B 的方向（或其反方向）做匀速直线运动。若只有 v_{\perp} ，则粒子将在垂直于 B 的平面内做匀速圆周运动。这两个分量同时存在时，粒子运动轨迹将为一螺旋线（图 1-17-17），其螺距

$$h = v_{//} T = v_{//} / f = \frac{2\pi m v_{//}}{qB}。$$

它与 v 无关。

图 1-17-17 带电粒子在磁场中的螺旋运动

设想从磁场某点 A 发射出一束很窄的电子，它们的速率 v 差不多相等，并且与 B 的夹角都很小，那么， $v_{//} = v \cos \theta$, $v_{\perp} = v \sin \theta$ 。由于各电子的 θ 不同，它们将沿不同半径的螺旋线前进。但由于它们的 $v_{//}$ 差不多相等，经过距离 $h = 2\pi m v_{//} / (qB)$ 后，它们又重新会聚在 A 点（图 1-17-18）。这就实现了磁聚焦。

图 1-17-18 均匀磁场的磁聚焦

上述均匀磁场的磁聚焦要靠长螺线管来实现，而实际上用得最多的是短线圈产生的非均匀磁场的磁聚焦（图 1-17-19），这里线圈的作用与光学中的透镜相似，所以称为磁透镜。

图 1-17-19 磁透镜

比荷 (specific charge)

又称荷质比，即带电粒子的电荷量与质量之比。荷质比是带电微观粒子的基本参量之一。测定荷质比的方法很多，最早的是 1897 年汤姆孙（Joseph John Thomson 1856 ~ 1940）测电子荷质比的方法：测定带电粒子流在磁场区沿圆弧运动时的圆弧半径，再用静电力与洛伦兹力相抵消的办法测定粒子的速度，进而算出荷质比。

带电粒子以初速 v 垂直于磁感应强度 B 进入匀强磁场，由于洛伦兹力的作用，将在垂直于 B 的平面内做匀速圆周运动（参见“回旋加速器”），圆周的半径 $R = mv / (qB)$ 。从这个关系式可知，荷质比 $q / m = v / (RB)$ ，测出 R 、 B 、 v 就可以算出荷质比。汤姆孙测 v 的方法是让粒子垂直进入互相垂直的电场和磁场，调节电场强度 E （或磁感应强度 B ），使粒子所受的电场力 qE 与所受的洛伦兹力 qvB 平衡，即 $qE = qvB$ ，则粒子的速度方向不变（图 1-17-20），其大小 $v = E / B$ 可根据测得的 E 、 B 求出。这样就可以求得粒子的荷质比

图 1-17-20 电场力与洛伦兹力平衡时粒子运动方向不变

$$\frac{q}{m} = \frac{E}{RB^2}$$

汤姆孙测电子荷质比的仪器结构如图 1-17-21 所示。玻璃管抽成真空，在阳极 A 与

图 1-17-21 汤姆孙法测荷质比

阴极 K 之间维持数千伏的电压，阳极 A 及第二个金属屏 A' 的中央各有一个小孔， C 、 D 是电容器的两个极板，其间可产生竖直方向的电场，图中圆形阴影部分可由管外的电磁铁产生一方向垂直纸面的磁场。阴极发射出的阴极射线（电子流）被 K 、 A 间的电场加速，只有很窄的一束穿过 A 、 A' 上的小孔。在玻璃管中部没有电场、磁场的情况下，电子束将依惯性前进，直射在玻璃管另一端荧光屏 S 的中央，形成一个光点 O 。当加上垂直纸面向内的磁场时，电子束在磁场区内将沿圆弧运动，荧光屏 S 上的光点将向下偏移到 O' 点；根据光点移动距离 OO' 和仪器中的一些几何参数可求出圆弧的半径 R 。再在 C 、 D 间加一竖直向下的电场，并调节场强 E 使荧光屏上的光点回到 O ，从这时的 E 、 B 值可求出电子的速度 v ，进而求出电子的荷质比 e / m 。汤姆孙从 26 次实验求得 e / m 平均值约为 $2 \times 10^{11} \text{ C / kg}$ ，现在更精确的测量值为（电子速率远小于光速 c 的情形下）

$$\frac{e}{m} = 1.7588047 \times 10^{11} \text{ C / kg}$$

在汤姆孙的这个实验之前，人们还不知道阴极射线中带电粒子的本性。虽然汤姆孙没有测得电子的电量 e 或电子的质量 m ，但他测出的荷质比与阴极材料无关，具有确定的数值，说明“阴极粒子”是一切物质共有的成分——电子，所以汤姆孙仍然被公认为电子的发现者。

电子速度很大时，根据相对论原理，速度对质量的影响（速度大质量也大）应当表现出来，因此，荷质比随速度增大而减小。这已为实验测定所证实。

利用磁聚焦法测荷质比，可以比较精确地测定电子（或其他带电粒子）的荷质比。这种方法的实验装置如图 1-17-22 所示。在抽

图 1-17-22 磁聚焦法测荷质比

成真空的玻璃管中装有热阴极 K 和带小孔的阳极 A，并在 K、A 之间加电压 U。当阴极发射的电子在电压 U 作用下加速运动，穿过 A 的小孔后便形成很窄的电子束，电子的速度 v 可从它加速时获得的动能求出：

$$\frac{1}{2}mv^2 = eU, v = \sqrt{\frac{2eU}{m}}。$$

在电容器 C 上加不大的横向交变电压，使不同时刻通过这里的电子发生不同程度的偏转。在电容器 C 和荧光屏 S 之间加一纵向均匀磁场 B，则电子从 C 出来后将沿螺旋线运动，并聚焦在螺距 $h=2\pi mv / (eB)$ 的地方(参见“磁聚焦”)。适当调节磁感应强度 B 的大小，可使电子流的焦点刚好落在荧光屏 S 上，这时螺距 h 等于电容器到荧光屏的距离 L，把 L、v 代入螺距 h 的关系式，整理后可得

$$\frac{e}{m} = \frac{8\pi^2 U}{L^2 B^2}$$

上式右端各量都可以直接测定，因而可以算出荷质比的值。

质谱仪 (mass spectrograph)

分析各种元素的同位素并测量其质量及含量百分比的仪器。质谱仪有各种不同类型，但不外由离子源、分析器和收集器三部分组成。要研究其同位素的物质先在离子源部分形成离子，当它们经过分析器(例如恒定的磁场或电场)时，由于各同位素的离子质量不同，各沿不同路径到达收集器，从它们到达收集器的位置和强度，可求得各同位素的质量和含量的百分比。

图 1-17-23 表示出现代质谱仪的工作原理。从离子源产生的离子，经过狭缝 S_2 和 S_1 之间的加速电场，以速率 v 进入 P_1 和 P_2 两板间的狭缝。 P_1 和 P_2 间有电势差，所以有垂直板面向左的电场。设其场强为 E、离子所带电荷为 q，则离子所受电场力为 qE，方向和板面垂直向左。同时有垂直于纸面向内的匀强磁场 B_p 存在于 P_1 和 P_2 间，则离子所受洛伦兹力为 qvB_p ，方向也和板面垂直，但向

图 1-17-23 质谱仪工作原理

右。如果某些离子的速度 v 恰好使离子所受的电场力和洛伦兹力平衡，即

$$qE = qvB_p, v = \frac{E}{B_p}。$$

那么这些离子就能沿直线运动从狭缝 S_3 射出，进入分析器。分析器中存在垂直纸面向内的匀强磁场 B，离子受洛伦兹力作用将做匀速圆周运动，圆周的半径 $R=mv / (qB)$ (参见“回旋加速器”)。从狭缝 S_3 射出的离子的速率 v 和电荷 q 都相等，如果这些离子有不同的质量，它们轨迹的半径 R 就不一样，因而它们将按质量的不同而分别射到照相底片 AA 的不同位置上，形成谱线状的细条。从细条的位置可知圆周半径 R，可从

$$m = \frac{RqB}{v} = \frac{RqBB_p}{E}。$$

求出离子的质量。根据不同谱线处底片的曝光程度，可知各同位素含量的百分比。图 1-17-24 是用质谱仪得到的铯的质谱示意图，谱线上的数字是同位素的质量数。

图 1-17-24 质谱示意图

回旋加速器 (cyclotron)

一种使带电粒子沿圆弧轨道运动被固定频率的高频电场加速以获得高能装置。1930 年美国物理学家劳伦斯 (Ernest Orlan-do Lawrence 1901 ~ 1958) 提出了回旋加速器的工作原理。1932 年，第一台直径为 27cm 的回旋加速器在劳伦斯伯克利实验室投入运行，它能将质子加速到 1MeV。

回旋加速器的工作原理是基于这样一个事实：在匀强磁场中，带电粒子在垂直于磁感应强度的平面内做圆周运动的周期与粒子的速度无关。设粒子的电量为 q ，质量为 m ，初速度为 v ，垂直于磁感应强度 B ，在洛伦兹力作用下做匀速圆周运动的圆周半径为 R 。由于洛伦兹力即粒子做圆周运动的向心力，即 $qvB = mv^2 / R$ ，所以圆周半径

$$R = \frac{mv}{qB}。$$

粒子回转一周所需的时间 (即周期) 为

$$T = \frac{2\pi R}{v} = \frac{2\pi m}{qB}。$$

而单位时间所绕的周数 (即频率) 为

$$f = \frac{1}{T} = \frac{qB}{2\pi m}。$$

上面的 T 、 f 分别叫做带电粒子在磁场中的回旋共振周期、回旋共振频率，显然它们都与 v 和 R 无关，只由带电粒子的荷质比 q/m 和磁感应强度 B 决定。

回旋加速器的主要装置如图 1-17-25 所示，两个 D 形扁平铜盒 (D 形电极)，彼此间有一很窄缝隙，放在真空室里，分别接到约 10^4V 的高频交流电源两极上。在缝隙间装有发射被加速粒子的离子源 P 。整个离子室放

图 1-17-25 回旋加速器构造原理

在垂直于 D 形盒的匀强磁场中。粒子在 D 形盒中运动情况如图 1-17-26 所示，假定某一时刻带正电的粒子从 P 发射出来，这时恰好左边电极 D 的电势高、右边电极 D 的电势低，则粒子在缝隙中被电场加速进入 D 里，而

图 1-17-26 粒子在 D 形盒中运动示意图

一旦粒子进入盒里，由于金属盒的屏蔽作用而盒里没有电场，所以粒子在盒里时不再被加速，只是由于存在磁场而受洛伦兹力作用做匀速圆周运动。当粒子运动半周从 D 里出来时，电极的极性改变— D 的电势高、 D 的电势低。这样，从 D 出来的粒子在缝隙间又一次被电场加速而进入 D 里。在 D 里绕行半周出来时，再次改变电极的极性，使粒子在缝隙间再一次加速。如此重复多次加速，粒子的能量渐渐增大，同时圆周运动的半径也随着增大。粒子的轨迹为螺旋线，最后沿 D 形盒边缘的切线射出。由于粒子的回旋共振周期、频率只由 q/m 和 B 决定，有确定的值，所以只要使

高频交流电源的频率等于粒子的回旋共振频率，就能完成预期的加速粒子的工作。

在回旋加速器中，粒子被加速至能量相当大时，由于相对论效应 ($m = m_0 / \sqrt{1 - v^2 / c^2}$)，粒子质量的增大就很明显，回旋周期变长，与高频交流电源加于两 D 形电极间的交变电场变化的周期步调不一致，这就引起粒子通过两极间的缝隙时受到的加速作用减弱，甚至会受到电场的减速。解决这个困难的一个办法是：随着粒子的回旋周期增长、回旋频率降低，使加于两 D 形电极间的交变电场变化的频率也同步地降低，从而保证粒子每次通过缝隙时都得到加速。这种磁场恒定、加速电场随着粒子回旋频率同步降低的回旋加速器，叫同步回旋加速器，又名调频回旋加速器或稳相加速器。

回旋加速器适于用来加速质子、氘核或氦核之类的带电粒子，加速最大能量可达 20 兆电子伏。同步回旋加速器加速粒子的最大能量可达 700 兆电子伏。它们的用途，（参见“粒子加速器”）。

霍尔效应 (Hall effect)

当通有电流的导体或半导体置于与电流方向垂直的磁场中时，在垂直于电流和磁场的方向，物体两侧产生电势差的现象。这个现象是 1879 年美国物理学家霍尔 (Edwin Herbert Hall 1855 ~ 1938) 对铜箔做实验时最先发现的。霍尔效应可以用洛伦兹力来说明。

图 1-17-27 霍尔效应原理

如图 1-17-27 所示，厚为 d 、宽为 l 的导电薄片，沿 x 轴有电流 I 通过，当在 y 轴方向有匀强磁场 B 时，导电片中以漂移速度 v 定向运动的载流子，无论带电量是 $+q$ 还是 $-q$ ，都将受洛伦兹力作用沿 $+z$ 轴方向运动，使 A_1 、 A_2 两侧出现电荷堆积，产生电场 E_H ，阻碍载流子沿 $+z$ 轴的运动。当电场力与洛伦兹力平衡时，即

$$qE_H = qvB, \text{ 或 } E_H = vB \quad (1)$$

时， A_1 、 A_2 两侧停止电荷积累，而在 A_1 、 A_2 间建立一个稳定的电势差 U ，由于 $U = E_H l$ ，所以

$$U = vBl。 \quad (2)$$

当载流子带正电时， A_1 侧积累的是正电荷， A_2 侧积累的是负电荷， A_1 的电势高、 A_2 的电势低。当载流子带负电时，则情况相反， A_1 的电势低， A_2 的电势高。

显然，测量 $A_1 A_2$ 的电势差，从 A_1 、 A_2 的电势高低即可知载流子是正电荷还是负电荷。在半导体技术中就利用这种方法判定半导体材料是 N 型还是 P 型。

利用霍尔效应做成的霍尔元件有很多用途，下面举两个例子。

(1) 高斯计是利用霍尔元件测磁感应强度 B 的仪器。设图 1-17-27 中导电片中的载流子密度为 n ，则电流 $I = nqvS = nqvld$ ， $v = I / (nql d)$ 。将 v 代入(2)式，可得 $U = IB / (nqd)$ ，令

$$K = \frac{1}{nq}, \quad (3)$$

则

$$U = K \frac{IB}{d} \quad (4)$$

K 称为霍尔系数，是由霍尔元件材料决定的，有确定的值，厚度 d 对既定的元件也是定值。所以只要使待测磁场垂直于霍尔元件表面，给霍尔元件通以恒定电流 I，测出霍尔电势差，即可根据(4)式求出 B 值。

(2) 强大直流电流的测量通电导线周围存在磁场，这磁场的强弱与导线中的电流成正比，利用霍尔元件测出磁场，就可求得待测电流的值。图 1-17-28 是这种测量方法的示意图：将霍尔元件放在待测电流 I_x 流经的导线旁边，霍尔元件 1、2 端通以一恒定电流 I，测出 3、4 端间的霍尔电势差的大小，就可知道待测电流 I_x 的大小了。这种方法特别适用于检测几千至数万安培的强大直流电流，它的优点是不需要断开待测电流，不消耗待测电流的电源功率，对被测回路没影响。

图 1-17-28 霍尔元件测大电流

磁流体发电机 (magnetohydrodynamic dynamo)

有液态金属磁流体发电和等离子体磁流体发电两种。液态金属和等离子体都是导电流体。都有可以自由移动的带电粒子。如图 1-17-29 所示，使导电流体从磁场中的发电通道流过，流体中的正、负带电粒子就会受到洛伦兹力作用而向相反方向偏转，发电通道两侧壁的电极上就会聚集正、负电荷，产生电压。如果在两电极间接上负载，就会有电流从负载上流过。两电极间的最高电压可利用中学电学知识求出。

图 1-17-29

在两电极间不接负载的情况下，随着电荷在两电极上的积累，两电极间的电压升高，两电极间的电场增强，导电流体中带电粒子受到的电场力增大。当粒子受到的电场力与洛伦兹力大小相等时，电荷不再向两电极积累，两电极间的电压达到最大值 U_m 。设粒子所带电量为 q，以垂直于磁场方向的速度 v 进入磁场，磁场的磁感应强度是 B，两电极间的距离是 d，

那么在电压达到 U_m ，带电粒子受的由场力 $f = Eq = \frac{U_m}{d}q$ ，洛伦兹力 $f = qvB$

由 $f=f$ 可知

$$U_m = Bvd。$$

现在磁流体发电用的等离子体是含有百分之一左右碱金属（通常是钾或铯）化合物的高温气体；这是因为碱金属容易电离，在较低的温度下，例如在 2000K ~ 3000K 范围内其中一部分即可成为电离气体。等离子体进入发电通道的速度为声速的 0.8 ~ 2.5 倍。

磁流体发电机直接将燃料燃烧放出的热能转化为电能，而不像普通火力发电那样要经过蒸汽轮机将热能转化为机械能，再经过发电机将机械能转化为电能，因此磁流体发电机的效率高。目前我国火力发电站效率平均约 30%，而磁流体发电站效率可达 45 ~ 55%。由于磁流体发电技术难度较大，目前离实用化还有一段距离，还需要付出艰巨的劳动和创造性的工作。

磁介质 (magnetic medium)

能够影响磁场的物质称为磁介质。磁介质放在磁场中由于磁场的作用而处于磁化状态，磁化后的磁介质将产生附加磁场 B' ，使得介质中的磁场 B 为无介质时的磁场 B_0 和附加磁场 B' 的矢量和，

$$B=B_0+B'。$$

在均匀磁介质充满整个磁场空间时， $\mu_r = \frac{B}{B_0}$ 称为磁介质的

相对磁导率， μ_r 的量值反映了附加磁场 B' 对磁场的影响程度。由于 B' 的不同，磁介质分为三类：一类为顺磁质， B' 和 B_0 同向， $B > B_0$ ， $\mu_r > 1$ ，例如锰、铬、铂、氮等。一类为抗磁质， B' 和 B_0 反向， $B < B_0$ ， $\mu_r < 1$ ，例如水银、铜、硫、银、金、锌、铅等。顺磁质和抗磁质， B' 只约为 B_0 的十万分之几， μ_r 与 1 相差甚微，所以顺磁质和抗磁质又统称为弱磁质。第三类为铁磁质， B' 和 B_0 同向，且 $B' \gg B_0$ ， $\mu_r \gg 1$ ，可达几千到几万，例如铁、钴、镍以及这些金属的合金。由于铁磁质 $\mu_r \gg 1$ ，所以又称它为强磁质。

磁化强度 (magnetization)

表征介质磁化程度和方向的物理量。通常用 M 表示。它的定义是单位体积内分子磁矩的矢量和。如果在磁介质内取一个宏观体积元 V ，用 $m_{\text{分子}}$ 代表这个体积元内所有分子磁矩的矢量和，则磁化强度的定义可表示为

$$M = \frac{\sum m_{\text{分子}}}{\Delta V}。$$

对于顺磁质和抗磁质，没有外加磁场时， M 恒为零，存在外加磁场（又叫磁化场）时，则有

$$M = \chi_m H。$$

其中 H 是介质中的磁场强度， χ_m 是介质的磁化率，其值由介质的性质决定。对于顺磁质， $\chi_m > 0$ ， M 为正值，即各分子磁矩的矢量和与磁化场的方向一致。对于抗磁质， $\chi_m < 0$ ， M 为负值，即各分子磁矩的矢量和与磁化场的方向相反。对于这两类磁介质，它们的 $|\chi_m| \ll 1$ ，而且都是与 H 无关的常数，因而 M 与 H 存在简单的线性关系。铁磁质的 χ_m 一般都很大，而且不是常数，所以 M 与 H 不是简单的线性关系。

在国际单位制中。磁化强度的单位是安培每米，符号是 A/m 。

磁场强度 (magnetic intensity)

描述磁场的一个辅助量，通常用 H 表示，它的定义是

$$H = \frac{B}{\mu_0} - M。 \quad (1)$$

式中 B 是磁感应强度， M 是磁化强度， $\mu_0 = 4\pi \times 10^{-7} H/m$ [或 $Wb/(A \cdot m)$]，叫真空磁导率。引入磁场强度这个辅助量的好处是：可以使安培环路定理在有磁介质的情况下具有简单的形式，即沿任意闭合回路的

线积分可以不考虑磁化电流（参见“安培环路定理”）。磁场强度 H 的单位在国际单位制中为安培每米，在高斯单位制为奥斯特。 $1\text{A/m} = 4 \times 10^{-3}\text{Oe}$ 。

(1)式也可写为

$$B = \mu_0 H + \mu_0 M \quad (2)$$

这是 B 、 H 、 M 之间的普遍关系式，称为磁介质的特性方程。 H 和 B 随着物质的不同还有不同的关系。在真空中，由于 $M=0$ ，所以

$$B = \mu_0 H, H = \frac{B}{\mu_0} \quad (3)$$

除存在比例系数 μ_0 外， B 和 H 性质完全相同。在磁介质中，从(2)式可以看出， B 和 H 有明显的差异。在各向同性的顺磁质和抗磁质中， M 与 H 成正比，即

$$M = \chi_m H \quad (4)$$

式中 χ_m 称为磁化率，每种顺磁质和抗磁质都有确定的值。

$$\begin{aligned} B &= \mu_0 (H + M) = \mu_0 (1 + \chi_m) H \\ &= \mu_0 \mu_r H = \mu H \end{aligned} \quad (5)$$

式中 μ 叫做（绝对）磁导率，

$\mu_r = \frac{\mu}{\mu_0} = 1 + \chi_m$ 叫做相对磁导率。对每种顺磁质和抗磁质， μ 都是

接近于 1 的定值，因而 B 和 H 成正比。但是铁磁质是非线性磁介质， B 和 H 之间没有成正比的关系，这表现在磁滞回线上。磁场强度是在人们认清磁性起源于电流之前提出的，当时人们认为磁性起源于磁荷，得到了与静电库仑定律相似的磁库仑定律

$$F = \frac{1}{4\pi\mu_0} \frac{q_{m1}q_{m2}}{r^2} \quad (6)$$

据此，就很自然地定义磁场强度 H 为

$$H = \frac{F}{q_{m0}} \quad (7)$$

即某处磁场强度的大小等于单位磁荷在该处所受磁场力的大小，其方向为正磁荷在该处所受磁场力的方向。还仿照用电力线形象描绘电场的办法，用 H 线（当时叫磁力线，本书将 B 线——磁感应线叫磁力线）形象地描绘磁场：以力线上任何一点的切线方向表示该点磁场强度 H 的方向，以力线的疏密程度表示磁场的强弱。

后来人们发现，产生磁作用的是分子电流，或者一般说来，是运动的电荷。但是由于沿用历史上的名词，现在描述磁场在力的方面的性质的量称为磁感应强度 B （与电场强度 E 对应），而不是磁场强度 H （与电位移矢量 D 对应）。虽然自由磁荷并不存在，但作为电流的一种等效表示，磁荷观点仍有不少方便之处。

H 线与磁荷有关， B 线则是闭合的。在真空中， H 线和 B 线的方向和分布情况都相同，二者只差个倍数（ $B = \mu_0 H$ ），即一个疏些，一个密些。但在磁铁中二者则有明显区别。因为 $B = \mu_0 H + \mu_0 M$ ，在磁铁内部， H 和 B 不仅大小不同，而且方向也各异，甚至反向；其 H 线和 B 线分布和方向大致如

图 1-17-30、图 1-17-31 所示（为了便于对比，两图中力线的疏密程度画成一样）。

图 1-17-31 条形磁铁的 B 线

磁强计 (magnetometer)

测量磁场强度的仪器。根据小磁针在磁场作用下能产生偏转或振动的原理制成。它的构造如图 1-17-32 所示，是将一根小磁针

图 1-17-32 磁强计

a 固定在一根张紧的悬丝 bb 上（悬丝的回复力矩很小），小磁针中点固定一面小镜子 c，利用它的反射光可以清楚地显示出小磁针的偏转。测量时，使磁针的指向偏离待测磁场的方向，磁针由于受磁场力的作用而发生振动。（这种情况正如使单摆的摆线偏离重力的方向，单摆由于受重力的作用而摆动。）在强弱不同的磁场中，磁针的振动周期不同。根据振动周期可以算出磁场强度。或者使磁强计处于两互相垂直的磁场中，磁针就会发生一定的偏转，只要知道其中一个磁场强度，根据两磁场对磁针的转矩平衡，就可以求出另一个磁场强度。磁强计可以用来测量地磁场强度，在磁法探矿中可根据地磁异常了解地下矿床情况。

磁化率 (magnetic susceptibility)

描述介质磁特性的一个参数，表示介质对外磁场（磁化场）的反应。它的定义为介质内某点的磁化强度 M 与该点的磁场强度 H 之比。用 χ_m 表示磁化率，则

$$\chi_m = \frac{M}{H}$$

对各向同性介质， χ_m 为一纯数，对各向异性介质， χ_m 为一张量。

铁磁质的磁化率 χ_m 一般都很大，其数量级为 $10^2 \sim 10^3$ ，甚至 10^6 以上。对于同一种铁磁质， χ_m 不是定值，这是因为铁磁质的 M 和 H 不是简单的比例关系，并且 M 的值还与磁化的历史有关。对于顺磁质， $\chi_m > 0$ ，对于抗磁质， $\chi_m < 0$ 。这两类介质的磁性都很弱，它们的 $|\chi_m| \ll 1$ ，而且都是与 H 无关的常数，可以看作它们的特性常数。

磁导率 (magnetic permeability)

表示物质磁化性能的一个物理量，是物质中磁感应强度 B 与磁场强度 H 之比：

$$\mu = \frac{B}{H}$$

μ 的单位在国际单位制中称作“亨每米”，也可称作“特安每秒”或“韦每安米”或“牛每二次方安”。根据上式定义的磁导率 μ 也称为磁介质的绝对磁导率，但通常使用磁介质的相对磁导率 μ_r ，并常常把 μ_r 简称为磁导率。相对磁导率的定义是磁介质的绝对磁导率 μ 与真空的磁导率 $\mu_0 (= 4 \times 10^{-7} \text{H/m})$ 之比，即

$$\mu_r = \frac{\mu}{\mu_0}。$$

μ_r 是一个无量纲的纯数。对于顺磁质 $\mu_r > 1$ ，对于抗磁质 $\mu_r < 1$ ，但它们都与 1 相差很小（例如铜的 μ_r 与 1 之差的绝对值是 0.94×10^{-5} ）。然而铁磁质的 μ_r 可以大至几万。

研究物质磁性时还常常用到起始磁导率和最大磁导率。起始磁导率是表示 H 趋近于零时的磁导率的极限值，常用符号 μ_i 表示。最大磁导率是指 $\mu-H$ 曲线上的最大值，常用符号 μ_m 表示（参看图 1-17-33）。

图 1-17-33 μ_i 和 μ_m 定义的示意图

顺磁质 (Paramagnet)

磁介质的一种，这种磁介质的磁化率和相对磁导率为正值，放入磁场 B_0 中后，由磁化产生的附加磁场 B 的方向与 B_0 相同，但数值很小（ B 仅为 B_0 的十万分之几），因此，总的磁感应强度略大于原来的磁场 B_0 。锰、铬、铂、氮等都属于顺磁质。顺磁质的分子或原子内部，各个电子的磁效应（包括电子自旋与电子轨道运动这两种磁效应）并不相消，因而从整个分子来看，其磁效应可等效于一个分子电流产生的磁场，分子电流的磁场与其磁矩（ $m=iSn$ ， i 为分子电流， S 为分子电流的截面积， n 为 S 法线的单位矢量）成正比。在没有外磁场时，分子电流的排列是杂乱无章的，它们的磁矩互相抵消，所以从总体上看对外不显示磁性，但当有外磁场 B_0 作用时（例如把圆柱形的顺磁质放入载流螺线管中间，如图 1-17-34 所示），分子电流顺着外磁场的方向作取向排列，使它们的磁矩互相加强，因此，分子电流所形成的附加磁场对原来的磁场起加强作用。温度升高时，顺磁质的磁化程度随温度的升高而减弱，这是由于热运动加剧，破坏分子电流取向排列的缘故。

图 1-17-34

抗磁质 (diamagnet)

磁介质的一种。这种磁介质的磁化率和相对磁导率是负值，放入磁场 B_0 中后，由磁化产生的附加磁场 B 的方向与 B_0 的方向相反，但数值很小（约为 B_0 的十万分之几），因此总的磁感应强度略小于原来的 B_0 。氢、铜、锌、铋、硫、水银等，都属于抗磁质，在没有外磁场（磁化场）的情况下，它们的分子或原子内各个电子的磁矩互相抵消，因而整个分子或原子的净磁矩为零。当有外磁场时，这些分子或原子，由于电磁感应而产生抗磁效应，净磁矩不再为零，其机理可以根据郎之万（Paul Langevin 1872 ~ 1946）在 1905 年提出的理论，在经典电动力学范围内，定性说明如下：

从没有外磁场到有一个恒定的外磁场总要经历一个过程，在这个过程中，磁场是由弱到强变化的。考虑一个垂直于外磁场 B_0 的电子轨道，如图 1-17-35 甲所示。电子 e 的轨道运动等效于电流 i 的回路，其磁矩为 m 。当外磁场由零增强时，穿过 i 回路的磁通量 变化，在回路中要引起一个感应电流 i （实际是电子轨道运动速度减小），来阻碍磁通量的增强，这

一个感应电流的磁矩 m 与外磁场 B_0 方向相反,也与原来的磁矩 m 方向相反,其结果是使回路的磁矩减弱。电子轨道运动还可以看成电阻为零的电流回路。因此,感应电流 i 产生后能保持住,只要外磁场 B_0 存在,图甲中电子轨道运动的磁矩就比原来弱。对于与图甲中电子运动方向相反的另一电子(如图 1-17-35 乙所示),回路的磁矩 m 与外磁场 B_0 方向相反,在外磁场由零增强过程中引起的感应电流 i 的磁矩 m ,与 B_0 方向相反,与原来的 m 方向相同,其结果是使回路的磁矩增强。如果图甲、乙中的两个电子都属于一个分子(例如氢分子),在没有外磁场时,它们轨道运动的磁矩互相抵消,在外磁场作用下,它们都产生与外磁场反方向的附加磁矩 m ,结果使分子得到与外磁场反向的净磁矩。

图 1-17-35

上述的抗磁效应,在具有固有磁矩的顺磁质中同样存在,只不过它们的顺磁效应比抗磁效应强得多,抗磁效应被掩盖了。

铁磁质 (ferromagnet)

磁介质的一种,磁场 B_0 中加入这种磁介质后,出现的附加磁场 B 与 B_0 同向,而 $B \gg B_0$,因而总的磁感应强度 B 比 B_0 大大增强(可增强几千倍到几十万倍)。铁、钴、镍、钆、镧以及它们的一些合金都属于铁磁质。铁磁质能够大大增强原来的磁场,是由于铁磁质的原子的相互作用,在铁磁质内部形成肉眼看不见的小区域叫做磁畴,在每个小区域内原子磁矩排列得非常整齐,因此具有很强的磁性,这种现象称为自发磁化。由于自发磁化,铁磁质内部存在着强大的内磁场。铁磁质的磁化机制如图 1-17-36 所示:

图 1-17-36

在没有外磁场作用时,各个磁畴原子磁矩排列的方向彼此不同(图甲),磁性彼此抵消,所以对外不显磁性。加上外磁场后,起初磁化方向与外磁场方向相同或接近的那些磁畴扩大自己的疆界,而反向磁化的磁畴体积减小(图乙、丙),对外显示磁性。随着外磁场的不断增强,磁畴的磁化方向不同程度地转向外磁场方向(图丁)。当所有的磁畴的磁化方向都按外磁场的方向排列好,介质的磁化达到饱和(图戊)。由于每个磁畴中的原子磁矩都排列得很整齐,所以铁磁质的磁性比顺磁质强得多。

铁磁质的温度高于某一温度时自发磁化强度为零,这一温度叫居里温度或居里点,是铁磁质转变为顺磁质的临界温度。当温度降到居里温度以下时,铁磁质又恢复其铁磁性。不同铁磁质的居里温度不同,如铁的居里温度是 769°C ,镍是 358°C ,钴是 1131°C 。

磁滞回线 (hysteresis loop)

表示铁磁质磁化滞后现象的曲线,可以通过实验测绘出来。实验装置如图 1-17-37 所示,把待研究的铁磁质做成环状,上面均匀地绕满导线,形成一个为铁芯所充满的螺绕环,藉换向开关 S 可以改变其中的电流方向。使环状铁磁质磁化的磁场强度可由 $H=nl$ 求出。式中 n 为单位长度上的

匝数。环状铁磁质上再绕一粗线圈接于测量仪表，可测得被磁化的铁磁质中的磁感应强度 B 。常用来测 B 的仪表是冲击电流计。当换向开关 S 突然使螺绕环中电流反向时，粗线圈中产生的感生电动势使冲击电流计偏转，其偏转角的最大值与感生电动势，从而与磁感应强度的变化成正比。所以根据冲击电流计的最大偏转角，可以求出磁感应强度的变化情况。

图 1-17-37

测绘磁滞回线的实验开始时 $H=0$ 、 $B=0$ ，即电路是断开的、铁磁质未磁化。将 R 的最大值接入电路，将 S 掷于 1 的位置，安培计指示一个小电流，铁磁质内有一个小的 H 值。测出这时的 B 值，就在 $B-H$ 图上得到一个点。调节 R 逐渐增大 H ，测出许多对 H 、 B 值，便可描出一条起始磁化曲线 $OASC$ 。这条曲线过 S 点后几乎与 H 轴平行，表明 H 值增加， B 值几乎不再增加，即磁化已达饱和。这时的磁感应强度 B_0 称为饱和磁感应强度。

此后若逐渐减小 H ，从 S 点开始， B 随 H 的变化偏离原先的起始磁化曲线，虽然 H 减小时 B 也随着减小，但 B 的减小“落后于” H 的减小，这种现象称为磁滞。当 H 减小至零时， B 并不减小至零（图 1-17-38 中的 R 点），这时的磁感应强度 B_S 称为剩磁。

图 1-17-38

将开关 S 掷于 2 的位置以改变电流（从而改变 H ）的方向，并令 H 从 0 逐渐增大至 $-H_S$ ，描出的曲线如图 1-17-38 的 RDS 段，它与 H 轴交于 D 点。 D 点的 $B=0$ ，而 $H=-H_S$ 。表明为消除剩磁必须加一反向的 H_C ； H_C 叫做矫顽力。

当铁磁质达到反向磁饱和（ $-B_S$ ）后，再令 H 从 $-H_S$ 减小到 0 而后反向增至 H_S ，描出的 $B-H$ 曲线如图 1-17-38 中的 $S R D S$ 段。这样，当 H 从 H_S 到 $-H_S$ 再到 H_S 的过程中，铁磁质的磁化状态沿闭合曲线 $SRDS R D S$ 变化。这条闭合曲线叫磁滞回线。如果在小于 H_S 的 $\pm H_m$ 间反复磁化，则得较小的磁滞回线，称为小磁滞回线或局部磁滞回线。对应于不同的 H_m 值，可以有不同的小磁滞回线。

磁滞回线的形状对铁磁质的分类和选用都有很大作用。磁滞回线窄的铁磁质（图 1-17-39），矫顽力小，在交变磁场中由于反复磁化而引起的能量损耗（磁滞损耗）小，适用于做变压器、电机的铁芯，叫做软磁材料。磁滞回线宽的铁磁质，矫顽力大，适用于做永久磁体，叫做硬磁材料。

图 1-17-39

硬磁材料 (hardmagneticmaterials)

具有较高矫顽力和剩磁，适于制作永磁体的材料，也称为永磁材料或恒磁材料。永磁材料大致可分为以下三类：

(1) 金属永磁材料：磁性钢，包括铬钢(1.5%~4%铬)、钨钢(5.0%~6.5%钨)、铬钴钢(6%铬和6%钴)、高钴钢(30%钴和5.5%铬)等，以高钴合金的性能最好，其矫顽力可达 18.3kA/m ，剩磁可达 0.95T ；铁基无碳合金，包括铝镍合金、铝镍硅合金、铝镍钴合金(铁和3%~13%铝、14%~28%镍、0~40%钴、0~8%铜、0~8%钛)等，最后一种性能最好，矫顽力可达 167kA/m ，剩磁可达 1.35T ，是目前应用最广的一种永磁材料，大

都用于行波管、磁控管等电真空器件和小型的电声器件中；可加工永磁合金，包括库尼非合金(60%铜、20%镍、20%铁)，库尼可合金(50%铜、21%镍、29%钴)，维加洛合金(52%钴、35%铁、13%钒)，阿格马尔合金(86.75%银、8.8%锰、4.45%铝)，它们有很好的加工性能，可锻造、热轧、冷轧、冷拔、切削、冲压、弯曲，而铝镍钴合金、铁氧体、稀土永磁合金的共同缺点是脆性大，不能进行一般的机械加工，只能研磨或电火花加工；稀土永磁合金，是60年代崛起的磁性最强的新型永磁材料，突出的特点是矫顽力大，其中80年代初诞生的被称为“永磁之王”的钕铁硼合金的矫顽力比铝镍钴合金大5~10倍。

(2) 铁氧体永磁材料：主要有钡铁氧体和锶铁氧体两大类，钡铁氧体的矫顽力可达223~239kA/m、剩磁可达0.40~0.43T，锶铁氧体的矫顽力可达239~263kA/m，剩磁可达0.41T~0.45T。虽然铁氧体永磁材料的永磁性能比不上稀土、铝镍钴等金属永磁材料，但它具有料源广、价格低、电阻率高、矫顽力大等特点，因而不少国家铁氧体永磁材料的产量已超过铝镍钴合金。这种材料主要用于制造扬声器、拾音器、行波管和直流电机、小型发电机的磁体。

(3) 其他材料：如复合永磁材料、半永磁材料等。复合永磁材料是将永磁粉末和其他材料(如合成橡胶、塑料、低熔点金属等)混合制成的，可制成高精度、易加工、可挠性的永磁体，主要用于转速表、曝光表、微电机、密封圈等。半永磁材料指矫顽力在0.8kA/m~20kA/m之间的永磁材料，是60年代以来由于电子工业的飞速发展而逐渐形成的一类材料，包括某些早期发展的磁性钢，如碳钢、铬钢、钴钢，以及通过调整成分和热处理使一些永磁材料(如铝镍钴、铁钴钒)的磁性符合需要，目前主要用于磁滞电机、剩磁自保持型继电器、磁传感器等。

扬声器 (loudspeaker)

俗称喇叭。将电能转换为声能并将声音有效地在空气中辐射出去的一种电声器件。输入扬声器的音频电信号，通过电磁、压电或静电效应，使扬声器纸盆或膜片振动，推动周围空气产生比较宏亮的声音。扬声器，按换能原理的不同可分为电动式、静电式、电磁式、压电式、离子式、气动式；按换能元件的不同可分为动圈式、电容式、舌簧式、晶体式；按发声材料的不同可分为纸盆式、号筒式、膜片式；按发音频率的不同可分为低音扬声器、中音扬声器、高音扬声器；按音圈阻抗的不同可分为低阻抗扬声器，高阻抗扬声器；按纸盆形式的不同可分为圆形、方形、椭圆形、双纸盆及橡皮折环。目前品种最多、使用最广的是电动扬声器。舌簧扬声器和压电扬声器，在有线广播网中得到普遍使用。

电动式扬声器又称动圈式扬声器。目前使用广泛的纸盆扬声器和号筒式扬声器(俗称高音喇叭)都属于电动扬声器，都是根据通电导体在磁场中受力而运动的原理制成的。图1-17-40是纸盆扬声器的结构示意图，它主要由永磁体、纸盆、音圈组成。当音频电流通过音圈时，在永磁体磁场的作用下，音圈将随着音频电流的变化而振动，带动纸盆发声。纸盆扬声器广泛用于收音机、录音机、电视机以及电影放音、室内扩音。

1-17-40 纸盆扬声器结构示意图

舌簧扬电声器是由舌形簧片带动纸盆发声的，属于电磁扬声器的一种，图 1-17-41 表示出它的结构。舌簧（即衔铁）位于线圈内并与纸盆相连接。当线圈通入音频电流时，线圈内的舌簧被磁化，舌簧与永磁体的磁力相互作用，使舌簧片随音频电流的变化而振动，带动纸盆发声。舌簧扬声器阻抗高、灵敏度较高、工艺简单，但频率范围较窄、音质较差。

图 1-17-41 舌簧扬声器的结构示意图

压电扬声器又称晶体扬声器、陶瓷扬声器，是利用某些材料的压电效应制成的。当把音频电压加在压电片上时，压电片即会产生形变，形变的规律与音频电压相对应，压电片连着纸盆或振动膜，即能向空气辐射声音。压电片过去常用酒石酸钾钠，现已被钽钛酸铅等压电陶瓷所代替。压电扬声器阻抗高、灵敏度高、结构极简单、成本低，但频率范围窄，经研究改进后的压电扬声器性能已经可与舌簧扬声器相比。

压电蜂鸣器（Piezoelectric buzzer）压电蜂鸣器是由压电陶瓷发声元件和振荡电路组成的电声元件。图 1-17-42 表示出

图 1-17-42

了压电陶瓷发声元件的构造，它是由压电陶瓷片和金属片粘贴成的圆形振动片，经振荡电路激励，它就振动而发出清晰的声音。压电陶瓷片由锆钛酸铅或铌镁酸铅等压电陶瓷材料制成。

压电陶瓷通常是由几种氧化物或碳酸盐烧结成的多晶体，其自发极化是紊乱取向的，没有压电性能。对它施加强直流电场进行极化处理，使紊乱取向的自发极化沿电场方向取向，去除电场后，陶瓷仍保留着剩余极化，就有了压电性能。压电陶瓷片的两面镀有银层，用环氧树脂把它跟黄铜片或不锈钢片粘到一起成为发声元件，当在沿极化方向的两面施加振荡电压时，交变的电信号使压电陶瓷片带动金属片一起产生弯曲振动而发声。

图 1-17-43 和图 1-17-44 给出两个简单的压电蜂鸣器的电原理图。图 1-17-43 中晶体三极管和变压器等组成振荡器，压电陶瓷片是振荡器的负载，变压器三个线圈的数据如右表，铁芯截面积为 $4\text{mm} \times 6.3\text{mm}$ 。图 1-17-44 中振荡电路由两个直接耦合的三极管等组成，压电陶瓷片既是反馈元件，又是发声元件。

图 1-17-43

图 1-17-44

	线径 d / mm	圈数
L_1	0.23	32
L_2	0.13	57
L_3	0.13	900

压电蜂鸣器的特点是：体积小、重量轻、厚度薄、耗电省、可靠性好，

造价低廉。因此它适用于电子手表、袖珍计算器、电子门铃和电子玩具等小型电子用品上作发声器件。

永磁电机 (magneto)

利用永磁材料做成转子或定子的电机。同利用电磁体做转子或定子的电机相比，永磁电机不需要电流励磁，节省了电能、结构更简单、运行更可靠、寿命更长，这是它的优点。但是永磁体的磁场不如电磁体的磁场强，所以永磁电机的功率比较小，一般小型交、直流电动机、发电机多为永磁电机，磁滞电动机和步进电动机也属于永磁电机。

图 1-17-45 表示出一种磁滞电动机的结构。转子是由半永磁材料做成的薄壁圆筒，

图 1-17-45 磁滞电动机的结构示意图

被紧固在非磁性材料做成的轴套上。定子由单相交流电源供电。定子转子附近分成两组，其中一组套有短路铜环，它将在交变磁场感应下产生涡流，从而使套着铜环的一对定子部分处的磁通的相位，落后于另一对定子部分处的磁通约 90° 。这两组相位差约 90° 的交变磁通合成为旋转磁场。当电机开始工作时，转子的半永磁圆筒被定子磁场磁化（参看图 1-17-46 甲），当旋转磁场转过一个角度时，由于半永磁材料有磁滞现象，转子的磁化

图 1-17-46 磁滞电动机旋转原理
(以永磁体的磁场代替定子磁场)

取向不能立即跟着转过同样角度，而只能转过一个较小的角度（参看图 1-17-46 乙），因此旋转磁场方向与转子磁极轴线间就有一个夹角存在，叫做失调角。失调角的出现，使旋转磁场和转子磁极之间的作用力存在着切向分量 F_t ，这个分量产生力矩，使转子开始起动，并加速，直到达到同步转速为止。磁滞电动机具有结构简单、起动性能好（能自行起动）等优点，在精确的计时或记录装置、电报传真机、陀螺仪表中得到广泛应用。

图 1-17-47 表示出石英手表中用的一种微型步进电动机的结构和工作原理。其转子直径 2.5mm、厚 0.3mm、质量 0.01g，由高永磁性能的合金做成，有一对磁极。当线圈中通过正脉冲电流时（图 1-17-47 甲），定子磁极左边是 N 极，右边是 S 极，转子在定子磁场作用下转半周；当线圈中通过负脉冲电流时，定子磁场反向，转子又将转半周。如果输入脉冲的周期是 1 秒，那么转子恰好每秒转一周。这样，就可以通过适当的齿轮系统使石英手表中的指针精确计时。

软磁材料 (soft magnetic materials)

容易磁化和退磁的材料，其特点是矫顽力低，磁导率高。软磁材料和硬磁材料没有绝对的界限，通常把矫顽力小于 0.8kA/m 的材料称为软磁材料，矫顽力大于 8kA/m 的称为硬磁材料，而矫顽力介于它们之间的称为半硬磁材料。软磁材料可分为金属软磁材料和铁氧体软磁材料，前者电阻率小，主要用于直流和低频范围，后者电阻率大，可用于高频、超高频范围。

属于金属软磁材料的有：工业纯铁（又称阿姆柯铁），是人类最早利

用的金属软磁材料，起始磁导率 500 ~ 1000，最大磁导率可达 5000，矫顽力约 70A / m，主要用来制造继电器轭铁，磁屏蔽和电磁体等。铁硅合金，含硅 0.5% ~ 4%，比纯铁的磁滞损耗低，电阻率也较高，为减少涡流损耗需热轧成 0.35mm 或 0.5mm 厚的片材，所以一般称为硅钢片，主要用于制作电机、变压器的铁芯。铁镍合金，又称坡莫合金，含镍量一般在 38% ~ 90% 范围内，起始磁导率可达 30000，矫顽力仅 0.8A / m，可用于测量仪器、特种变压器和继电器。铁铝合金，含铝 5% ~ 16%，性能接近含镍量低的铁镍合金，由于不含价格昂贵的镍，因而具有较大的经济意义，可代替一部分铁镍合金用于通信变压器，也适于作记录磁头和超声换能器材料。铝硅铁合金，含铝 5.4%、硅 9.6%，是一种高磁导率合金，非常脆，很容易碎成粉末，可作为磁头材料和粉碎作为磁介质材料。铁钴合金，含钴 20% ~ 25%、钒 1.7%，是目前磁性材料中饱和磁感应强度最高的一种合金，可作为电磁体的极靴和耳机中的振动膜片等。

属于铁氧体软磁材料的有：锰锌铁氧体，一般在 1KHz 到 10MHz 范围内使用，可作电感器、变压器、滤波器等磁芯，以及天线棒、磁头等。镍锌铁氧体，可在 1MHz ~ 300MHz 的高频下使用，可用作电视机的中周变压器、磁头、短波天线棒、调谐电感电抗器以及磁饱和放大器等的磁芯。超高频软磁铁氧体，这类铁氧体的晶体结构为六角晶系（即磁铅石型），具有一个易磁化的晶体平面，其中以 $\text{CO}_2\text{Z} (\text{Ba}_3\text{CO}_2\text{Fe}_{24}\text{O}_{41})$ 的特性为最好，主要用于电调电感器、宽频变压器等。

电磁体 (electromagnet)

即电磁铁，是利用电流的磁效应使铁芯磁化而产生吸力的装置。通常由软磁材料制成的铁芯和激磁线圈组成，在原理上相当于一个具有气隙的铁芯线圈，由磁路定律可估算出空隙的磁感应强度。当线圈中通以电流时，铁芯被磁化，对铁磁体产生吸力，电流越强，吸力越大；电流不通时，铁芯去磁，吸力消失。当电磁铁两极之间的空隙不大时，能在空隙中获得约几特斯拉的磁感应强度。

在工程技术中电磁体有广泛的应用。例如：在电磁继电器和接触器中，电磁体用来驱动触头动作。在起重机械中电磁体两极安装在同一平面内，能够吸住带有起重吊钩的平板型钢制衔铁；如果货物是由磁性材料制成的（如钢制或铸铁制零件、钢板、型材等），那么可以直接用电磁体吸住这些货物。在选矿时，常用电磁体把有磁性的矿石碎块与没磁性的石块分离开。在通讯设备和仪表中经常采用极化电磁体。在极化电磁体中，铁芯或衔铁（或二者在一起）处在永久磁体的作用之下，因此具有永磁性。当电流经过这种电磁体的线圈时，铁芯或衔铁的磁性会有强弱变化（同电流的强弱或方向有关）；电话的听筒就是极化电磁体应用的一个实例。

用铌锆、铌锡、铌铝锆等耐强磁场的超导材料绕制的电磁体——超导电磁体，在极低的温度（临界温度）下，通以一定的电流（小于临界电流）时，可以长时间保持 1T ~ 20T 的磁场而不需消耗线圈功率，这是普通电磁体所不能办到的。超导电磁体已开始应用于高能物理、核聚变研究，磁流体发电，磁悬浮列车和某些磁测量技术等方面。

电磁继电器 (electromagnetic relay)

一种利用电磁系统自动接通或切断受控电路的控制器件。电磁继电器的典型结构如图 1-17-48 所示，主要由感受机构（线圈和铁芯）、传动机构（衔铁和返回弹簧）、执行机构（动触头和静触头）三部分组成。当有电流经过 1、2 端流过线圈时，铁芯就产生一定的磁通，

图 1-17-48 电磁继电器的典型结构

衔铁就会在电磁吸力作用下克服返回弹簧的拉力吸向铁芯，从而带动动触点，将与 3、5 端相连的电路断开，而使与 3、4 端相连的电路接通。线圈断电后，电磁吸力消失，衔铁和动触点在返回弹簧作用下回到原来位置，3、5 接通，3、4 断开。

电磁继电器的主要电参数有额定电流（或额定电压）、吸合电流（能将衔铁吸合所需要的通过线圈的最小电流）、消耗功率、吸合时间等。

电磁继电器被广泛用于控制、执行、保护、调节和传递信息等目的，是自动控制系统、遥控系统和通信系统的重要元件。例如，在强电流技术中需要广泛应用电磁继电器来保护机器、变压器、电动机等不受短路电流和其他不正常现象的损害。防止过量电流的“过电流继电器”是这类应用的典型代表，它的线圈串联在需要保护的线路中，当电路电流超过极限值时，继电器吸合衔铁，使与衔铁有机械联系的开关断开。引起电磁继电器动作的因素，除电流外，还有电压、电阻、功率等。如常用来保护电动机的“欠电压继电器”，当电压降到规定值以下时，它使电动机电路断开以保护电动机，使它在电压恢复时不致在起动电阻已短接的条件下起动。

干簧管 (dry reed tube)

是干式舌簧管的简称，是一种有触点的开关元件，具有结构简单、体积小、便于控制等优点。与永磁体配合可制成磁控开关，用于报警装置及电子玩具中。与线圈配合可制成干簧继电器，在电子设备中迅速切换电路。干簧管按作用的功能不同可分为常开型和转换型。

常开型（H 型）干簧管的构造如图 1-17-49 所示，它是两片既导磁又导电的材料（通常为铁镍合金）做成的簧片平行封入玻璃管中所构成的，两簧片间留有一定间隙（一般 0.2 毫米左右），当条形永磁体平行靠近干簧管时，两簧片被磁化而互相吸引，触点闭合。当永磁体远离时，触点又分开。

图 1-17-49 常开型干簧管

转换型（Z 型）干簧管构造如图 1-17-50 所示，簧片 1 由只导电不导磁的材料做成，簧片 2、3 仍用既导电又导磁的材料做成。平时靠弹性使簧片 1 和簧片 3 闭合，构成常闭触点，而簧片 2 和 3 不闭合，构成常开触点。当永磁体靠近时，2、3 被磁化而闭合，同时 1、3 分开，实现电流通路的转换。

图 1-17-50 转换型干簧管

干簧管与永磁体配合的几种基本使用方法如图 1-17-51 所示，甲：永磁体每转一周，舌簧触点开闭两次；乙、丙、丁：永磁体沿箭头所示方向运动，靠近两簧片时触点闭合，远离两簧片时触点分开；戊：铁片插入永

磁体与干簧管之间时，触点分开，铁片移出时触点闭合。

图 1-17-51 用永磁体控制干簧管动作

干簧管外绕上励磁线圈就成了干簧继电器，因干簧管的类型不同，干簧继电器也分为常开（动合）式和转换式两种。同一个励磁线圈中可以同时有 2、3 或 4 支干簧管，即可同时控制 2、3 或 4 条电路的通断或转换。干簧管的主要参数有：(1)外形尺寸， ϕD 表示直径， l 表示管的长度，一般 ϕD 为 3mm ~ 8mm， l 为 20mm ~ 50mm；(2)吸合安匝，安匝是磁动势的单位，等于线圈匝数与线圈通过的电流的乘积，安匝数越大，产生的磁场越强，吸合安匝是使干簧管常开触点闭合所需要的安匝数，小的 20 ~ 40，大的 180 ~ 330；(3)释放安匝，是使闭合的常开触点恢复常态的安匝数，小的 8，大的 60；(4)动作时间（吸合时间），从干簧管加额定值时起至触点达到工作状态时止所需的时间，快的 0.9ms，慢的 5ms；(5)接触电阻，指从干簧管的引出端所测得的一对闭合簧片间的电阻值，一般为 0.1 ~ 0.5；(6)触点容量，等于触点电压（触点断开时允许加在两触点上的最大电压）与触点电流（触点闭合时允许通过触点的最大电流）的乘积，小的有 12V × 0.05A，大些的有 24V × 0.2A，更大的达 200W。

下面是部分干簧管、干簧继电器的技术参数。

几种干簧管的技术参数

参数	JAG - 2		JAG - 4	JAG - 5	
	H 型	Z 型	H 型	H 型	Z 型
触点形式	常开	转换	常开	常开	转换
外形尺寸 d/mm	$\phi 4 \times 38 \phi 4 \times 35$	$\phi 3 \times 20$	$\phi 7.5 \times 42$	$\phi 8 \times 50$	
吸合安匝	60 ~ 80	45 ~ 65	20 ~ 40	180 ~ 330	180 ~ 330
释放安匝	25	20	8	60	60
吸合时间 t/ms	1.7	2.5	0.9	5	5
接触电阻 R/	0.1	0.15	0.15	0.5	0.5
触点容量（阳性）	DC24V × 0.2	ADC12V × 0.1A	DC12V × 0.05A	最大电压：300V 最大电流：2A 最大功率：200W	

型号	绕组			电流参数		动作时间 t / ms		工作电压(工作电流)	装干簧管
	线径 d / mm	直流电阻 $\pm 5\%$ ()	圈数	吸合 I / mA	释放 I / mA	常开 (H)	转换 (Z)		
A	0.10	93	2200	44	9	1.7	2.5	6V	1
JAG - 2 - 1B	0.07	370	4200	22	4.5			12V	
C	0.05	1200	7000	13.5	32			4V	

续表

型号	绕组			电流参数		动作时间 t / ms		工作电压(工作电流)	装干簧管
	线径 d / mm	直流电阻 ± 5%()	圈数	吸合 I / mA	释放 I / mA	常开 (H)	转换 (Z)		
JAG - 2 - 1B	A	0.07	370	4200	9	1.8	0.9	18mA	1
	B	0.05	1250	7000	5	1.11		10mA	
	C	0.04	2900	11000	3.5	0.7		7mA	
JAG-4-1 H	0.27	50	2500	130	35			12v	2
JAG-5-2 Z	0.27	50	2500	130	35			12v	

舌簧继电器(reed relay)

利用线圈与密封在玻璃管内的舌簧片构成的一种特殊形式的电磁继电器。有干簧继电器、水银湿式舌簧继电器等多种。

干簧继电器是干式舌簧继电器的简称，结构如图 1-17-52 所示，是由线圈和干簧管组成

图 1-17-52

(参见“干簧管”)。当线圈通电时，两舌簧片被磁化，它们在管内的自由端分别形成 N 极与 S 极而吸引到一起，使被控电路接通。线圈断电后，舌簧片在本身弹力的作用下分开，将被控电路切断。水银湿式舌簧继电器也叫汞润舌簧继电器，结构如图 1-17-53 所示，是由湿簧管和线圈组成。湿簧管下部有水银，动簧片上刻有细槽，下部水银由于毛细作用沿细槽上升至动触点表面，将动触点表面润湿有一层水银膜。上、下极靴和动簧片都由软磁性材料制成。当线圈未通电时，动簧片在弹簧片作用下偏于右侧，使动触点与右侧的静触点接触，获得常闭输出。当线圈通电时，上、下极靴和动簧片都被磁化，于是动触点转换为与左侧的静触点接触。在湿簧管内由于动触点表面有水银膜，从而使动静触点接触时的接触面积大大增加，接触电阻显著减小并且十分稳定。

图 1-17-53

与其他电磁式继电器相比，舌簧继电器具有小型、快速、灵敏、结构简单等特点，因而在自动控制中获得广泛应用。

铁氧体 (ferrite)

也叫“铁淦氧”或“磁性瓷”。它的性能和铁磁质相似。它是用 Fe_2O_3 或 Fe_3O_4 粉末，加入少量锌、锰、镁、镍、钴、铜等的粉末（要求的性能不同则加入的金属粉末也不同）及水，放入球磨机中研磨，待水干后按需要压制成各种形状，然后放入高温电炉加热（1200 ~ 1400）而成。它与一般金属磁性材料的主要区别是不导电，其电阻率比铁的电阻率大 $10^4 \sim 10^{15}$ ，因而可以大大减少涡流损失，适合于高频无线电电路和计算机中高速运算的需要。晶体管收音机中磁性天线的磁棒、中频变压器中的磁芯都是铁氧体做成的。（参见“软磁材料”和“硬磁材料”）。

磁路 (magnetic circuit)

磁通量所通过的由磁介质构成的回路；通常是由磁导率很高的强磁性材料构成的闭合回路，或者具有不大的空气间隙或非强磁性材料的间层。如果磁通量是从一种介质完全进入另一种介质，则说这两种介质的磁路是串联的。换句话说，串联磁路各个横截面通过的磁通量都相等。如果磁通量分支成若干部分，而这些部分以后又会合起来了，则说这些磁通量分支所通过的磁介质是并联磁路。磁通量在并联的各分支磁路中的分配规律，与电流在各分支电路中的分配规律相似。如果仿照电阻概念引入磁阻概念，即一段磁路的长度越短、横截面越大、介质的磁导率越大，这段磁路的磁阻越小，那么磁通量在并联各支路的分配与这些支路的磁阻成反比。在由铁磁性物质所构成的闭合或几乎闭合的回路中，由于铁磁性物质的磁导率远比周围空气的大，所以差不多全部磁通量都通过这个回路，而只有微不足道的部分散布于周围空间。因此可以认为铁磁性物质构成的回路是通过全部磁通量的磁路。变压器的磁路是由硅钢片叠成的闭合铁芯，一般不留空气隙；磁电式仪表的磁路是由永久磁体、磁极铁芯、空气隙及圆柱形铁芯构成；电机的磁路由磁极铁芯、空气隙、电枢铁芯和机轭构成。

分析磁路的基础是安培环路定律，根据它可计算磁路的励磁电流、磁通量和磁感应强度。

磁屏蔽 (magnetic shielding)

为了尽可能避免外界磁场对设备的影响，或者为了避免设备的磁场对外界的影响，需要把设备放在封闭或近乎封闭的金属软磁材料制成的罩子里，这种措施称为磁屏蔽。软磁罩子称为磁屏。磁屏蔽的原理可利用并联磁路的概念来说明。如图 1-17-54 所示，将一个铁壳放在外磁场中，则铁壳的壁与空腔中的空气可看作并联磁路。由于空气的相对磁导率接近于 1，而铁壳的相对磁导率至少有几千，所以空腔的磁阻比铁壳的磁阻大得多，于是外磁场的磁感应通量绝大部分沿铁壳壁通过，很少进入空腔，从而达到屏蔽目的。为了提高屏蔽效果，可采用双层或多层磁屏。

在磁屏蔽应用中，对软磁材料的要求是磁导率要高。一般在外磁场较弱时可以采用 78%Ni-Fe 合金；当外磁场较强时多采用 45%Ni-Fe 合金或电磁纯铁。在高频电磁场的情况下，屏蔽效率与磁导率和电导率都有关系，因此通常采用磁导率高的软磁合金和电导率高的铝或铜相组合的方式来实现屏蔽。

图 1-17-54 磁屏蔽原理

主要参考资料

1. 简明综合技术辞典编委会。简明综合技术辞典。第 1 版。北京：高等教育出版社，1965。
2. 辞海，理科分册（上）。上海辞书出版社，1977。
3. 蔡宾牟，袁运开。物理学史讲义—中国古代部分。第 1 版。北京：高等教育出版社，1985。
4. 人文出版社编委会。物理大辞典。第 1 版。台中：人文出版社有限

公司，1979。

5. 简明不列颠百科全书编辑部。简明不列颠百科全书，2. 第1版。北京：中国大百科全书出版社，1985。

6. 辞海，理科分册（下）。上海辞书出版社，1978。

7. 电子工业技术词典编委会。电子工业技术词典（合订本）（上）。北京：国防工业出版社，1980。

8. 张世远等。磁性材料基础。第1版。北京：科学出版社，1988。

9. 广东师范学院物理系。电工学，上册。第1版。北京：人民教育出版社，1976。

10. [美] E·H·威切曼。伯克利物理学教程，第二卷，电磁学。第1版。复旦大学物理系。北京：科学出版社，1979。

11. 赵凯华，陈熙谋。电磁学。第2版。北京：高等教育出版社，1985。

12. 中国大百科全书总编辑委员会《物理学》编辑委员会。中国大百科全书物理学。第1版。北京：中国大百科全书出版社，1987。

13. 束炳如，倪汉彬，杜正国。物理学家传。第1版。长沙：湖南教育出版社，1985。

14. 王谟显改编。物理学，第二册。第1版。北京：人民教育出版社，1977。

15. 梁百先等。电磁学教程，下册。第2版。北京：高等教育出版社，1984。

16. 梁灿彬，秦光戎，梁竹健。电磁学。第1版。北京：人民教育出版社，1980。

17. 杨仲耆等。大学物理学，电磁学。第1版。北京：人民教育出版社，1980。

18. 辞海，工程技术分册（上）。上海：上海辞书出版社，1978。

19. 杨诚明。电磁场的基本物理量 E·D·B·H。第1版。北京：人民教育出版社，1982。

20. [美] 费曼 (Feynman, R.P.) 等。费曼物理学讲义，第二卷。第1版。王子辅。上海：上海科学技术出版社，1981。

21. 梁昆森等。大学物理专题选讲，电磁学。南京：江苏教育出版社，1988。

22. 梁绍荣等。普通物理学，第三分册：电磁学。第1版。北京：高等教育出版社，1988。

23. 姚海彬。电工学 电工技术。第1版。北京：高等教育出版社，1991。

24. 朱祖福等。电子显微镜。第1版。北京：机械工业出版社，1984。

25. 冯慈璋。极化与磁化。第1版。北京：高等教育出版社，1986。

26. [美] 哈里德 (Halliday, D.)，瑞斯尼克 (Resnick, R.) 物理学，第二卷，第一册。李仲卿等。北京：高等教育出版社，1965。

27. 张美敦。简明无线电词典。第1版。上海：上海辞书出版社，1985。

28. 廖玄九等。电工学，下册。第1版。北京：人民教育出版社，1979。

29. 朱承高。电工及电子技术手册。第1版。北京：高等教育出版社，1990。

30. 青年无线电实用手册。第1版。北京：中国青年出版社，1983。

31. 上海无线电八厂, 哈尔滨工业大学。继电器及其应用。第1版。上海: 上海科学技术出版社, 1978。
32. 朱顺波。磁流体发电的新进展。物理教师, 1988(1): 37~38
33. 王海兴。地磁简介。物理教师, 1984(4): 34~37
34. 耿文学。浅谈干簧开关。无线电, 1982(6): 46
35. 张建忠。谈谈干簧管的参数。无线电, 1988(1): 42
36. 沈荣章, 邵性廉。压电蜂鸣器。无线电, 1980(5): 26~27
37. 陈有卿。简易晶体管压电蜂鸣器。无线电, 1984(5): 42~43
38. 物理教学。磁单极子。物理教学, 1981(3): 40
39. 物理教学。地磁场简介。物理教学, 1984(7): 35~36
40. 物理教学。地球磁场溯源。物理教学, 1984(9): 39
41. 吴培祥。浅谈地磁场。物理教学, 1988(5): 10~11, 15
42. [美] Susan B. Felch。寻找磁单极子和分数电荷(下)。胡国宝。大学物理, 1987(2): 12~15
43. 洗鼎昌。磁单极问题。物理通报, 1983(4): 1~4
44. 居滋象。磁流体发电的原理和前景。物理通报, 1988(11): 37~40
45. 陈现平。磁流体发电产生的电压有多高。中学物理教学参考, 1987(4)

十八、电磁感应

电磁感应 (electromagnetic induction)

穿过导体回路的磁通量发生变化时，在导体闭合回路中产生电流的现象，叫做电磁感应。

磁通量的变化可以有不同的原因。磁场恒定，回路中部分导体发生运动，切割磁感线，可以使穿过回路的磁通量发生变化；回路静止不动，磁场发生变化，也可以使穿过回路的磁通量发生变化。这两种情况都能产生电磁感应现象。

闭合回路中产生电流，说明回路中存在着某种电动势。这种因磁通量变化而引起的电动势，叫做感应电动势。导体在磁场中运动时产生的感应电动势称为动生电动势；因磁场变化产生的电动势称为感生电动势（参见“感应电动势”）。

感应电动势比感应电流更能反映电磁感应现象的本质。因为在回路不闭合时也会发生电磁感应现象，这时并没有感应电流，却仍然有感应电动势。

法拉第电磁感应定律 (Faraday law of electromagnetic induction)

确定感应电动势的实验定律，可表述为：导体回路中感应电动势的大小，跟穿过回路所围面积的磁通量变化率成正比。如果在时间 dt 内穿过回路所围面积的磁通量的变化为 $d\phi$ ，则法拉第电磁感应定律可写成

$$\varepsilon = \frac{d\phi}{dt}, \text{ 或 } \varepsilon = -k \frac{d\phi}{dt}。$$

在国际单位制中，磁通量 ϕ 的单位是韦伯，时间 t 的单位是秒，电动势 ε 的单位是伏特，比例常数 $k=1$ ，因此法拉第电磁感应定律的表达式变为

$$\varepsilon = -\frac{d\phi}{dt}, \quad (1)$$

式中的负号指明了感应电动势的方向。电动势和磁通量都是标量，它们的正负都是相对于某一标定方向而言的。研究电磁感应现象时，约定回路绕行方向与它所围曲面面积的法线矢量 n 成右手螺旋关系，如图 1-18-1 所示。感应电动势的方向与回路绕行方向一

图 1-18-1

致为正值；与回路绕行方向相反为负值。磁感应强度 B 与 n 的夹角为锐角时， ϕ 为正值；与 n 的夹角为钝角时， ϕ 为负值。利用法拉第电磁感应定律判定的感应电动势的方向如图 1-18-2 所示。(1) 式中的负号表明：感应电动势的正负总是与磁通量变化率的正负相反，它与楞次定律确定的感应电动势的方向是一致的。

图 1-18-2

对于由多匝导线组成的回路，在整个回路中产生的感应电动势等于在各匝线圈中产生的电动势之和，如果 $\phi_1, \phi_2, \dots, \phi_N$ 分别是通过各匝线圈的磁通量，则在回路上产生的总电动势

$$\varepsilon = - \left(\frac{d\phi_1}{dt} + \frac{d\phi_2}{dt} + \dots + \frac{d\phi_N}{dt} \right),$$

用 ψ 表示磁链， $\psi = \phi_1 + \phi_2 + \dots + \phi_N$ ，则

$$\varepsilon = - \frac{d\psi}{dt} \quad (1)$$

如果穿过每匝线圈的磁通量相同，都为 ϕ ，则穿过 N 匝线圈的磁链 $\psi = N\phi$ ，因此有

$$\varepsilon = -N \frac{d\phi}{dt} \quad (2)$$

由于 $\varepsilon = \oint_L \mathbf{E} \cdot d\mathbf{l}$ ， $\psi = \oint_S \mathbf{B} \cdot d\mathbf{S}$ ，(1)式可写成

$$\oint_L \mathbf{E} \cdot d\mathbf{l} = - \frac{d}{dt} \int_S \mathbf{B} \cdot d\mathbf{S} \quad (3)$$

式中的 \mathbf{E} 是感应电场强度。(3)式与(1)式意义完全相同，它是法拉第电磁感应定律的积分形式。

楞次定律 (Lenz law)

判定感应电流和感应电动势方向的定律，是楞次在概括了大量的实验结果后得出的。其内容如下：闭合回路中感应电流的方向，总是使得它所激发的磁场来阻止引起感应电流的磁通量的变化。感应电动势的方向则是通过感应电流的方向来判定的。用楞次定律来判定感应电流的方向，通常分为下面四个步骤：

- (1) 判明穿过闭合回路的磁通量的方向；
- (2) 判明穿过闭合回路的磁通量发生什么变化（增加还是减少）；
- (3) 根据楞次定律确定由感应电流激发的磁场的方向（与原来磁场方向相同还是相反）；
- (4) 利用安培定则根据感应电流的磁场方向确定感应电流的方向。

楞次定律还有另一种表述：感应电流的效果总是反抗引起感应电流的原因。在某些只需判定感应电流引起的机械效果而无需判定感应电流方向的问题中，楞次定律的这种表述方式，用起来更方便些。

楞次定律符合能量守恒定律。按照楞次定律，向一线圈中插入磁铁的 N 极时，穿过线圈的磁通量增加，线圈中会感应出电流，其方向如图 1-18-3 所示。感应电流的磁场与磁铁磁场方向相反，它们之间存在斥力。磁铁插入过程中必有外力克服这个斥力做功。外力做的机械功转化成线圈中感应电流的焦耳热释放出来。

图 1-18-3

右手定则 (right-hand rule)

用来判定导体切割磁感线时在导体中产生的感应电流方向的定则。可表述为：伸开右手，使大拇指跟其余四个手指垂直，并且都跟手掌在一个平面内。把右手放入磁场中，让磁感线垂直穿入手心，大拇指指向导体运动的方向，那么其余四个手指所指的方向就是感应电流的方向（图

1-18-4)。

图 1-18-4

应用右手定则，只能判断在磁场中运动的一段导线中产生的感应电流的方向，不能判断因磁场的变化而在闭合电路中产生的感应电流的方向。而应用楞次定律则可判断上述两种不同情况下产生的感应电流的方向。楞次定律是普遍适用的，右手定则仅是楞次定律的特例。但在实际中判断导体切割磁感线产生的感应电流方向时，用右手定则比较简便。

感应电动势 (induction electromotive force)

由穿过导体回路的磁通量发生变化而在导体内产生的电动势叫做感应电动势。由于使磁通量产生变化的原因不同，感应电动势可分为动生电动势和感生电动势。

图 1-18-5

在恒定磁场中运动着的导体内产生的感应电动势称为动生电动势。动生电动势由磁场作用于导体中带电粒子的洛伦兹力引起。如图 1-18-5 所示，导体以速度 v 在磁感应强度为 B 的均匀磁场中运动，导体内的自由电子受到的洛伦兹力 $f = -e(v \times B)$ ， f 的方向由 C 指向 D。在洛伦兹力的作用下，大量的自由电子向 D 端聚集，在导体的 C 端由于缺少自由电子而聚集正电荷，使得导体 CD 中产生静电场 E ，自由电子受到电场力 $-eE$ 的方向与 f 相反。当电场力、洛伦兹力达到平衡时，导体两端有一定的电势差，导体 CD 可以看作是一个电源，C 端为正极，D 端为负极，在线框中出现了逆时针方向的感应电流。这时的电动势是单位正电荷在电源内

部由负极移到正极过程中洛伦兹力（非静电力） $K = \frac{f}{-e} = v \times B$ 。所以

动生电动势

$$\varepsilon = \int_C^D K \cdot dl = \int_C^D (v \times B) \cdot dl。$$

式中的 dl 为导体线元。当导体的运动速度 v 与磁场的磁感应强度 B 的方向一致时，不产生感应电动势；当导体的运动速度 v 与磁场的磁感应强度 B 垂直时，产生的感应电动势最大。

在磁场中运动着的导体，其中的自由电子不仅以速度 v 随导体运动，还要在洛伦兹力作用下在导体中做定向移动，移动速度为 u ，自由电子受到的总洛伦兹力为

$$f_{\text{总}} = -e(v + u) \times B。$$

$f_{\text{总}}$ 与自由电子的合速度 $(v+u)$ 垂直，因此，总洛伦兹力不做功，如图 1-18-6 所示。因此，洛伦兹力并没有给导体提供能量，而是外力克服洛伦兹力的一个分力 f' 做功，提供了感应电流的能量。

处于变化磁场中的导体上产生的电动势叫做感生电动势。感生电动势是由变化磁场激发出的涡旋电场引起的。感生电动势 $\varepsilon = \oint_L E \cdot dl$ ，

其中 E 为由变化磁场激发出的涡旋电场。由法拉第电磁感应定律

$\varepsilon = -\frac{d\phi}{dt}$ 可得 $\oint_L \mathbf{E} \cdot d\mathbf{l} = -\frac{d\phi}{dt} = -\frac{d}{dt} \int_S \mathbf{B} \cdot d\mathbf{S}$, S 是以 L 为周界的曲面。环路

不变时有 $-\frac{d}{dt} \int_S \mathbf{B} \cdot d\mathbf{S} = -\int_S \frac{\partial \mathbf{B}}{\partial t} \cdot d\mathbf{S}$ 可得 $\varepsilon = -\int_S \frac{\partial \mathbf{B}}{\partial t} \cdot d\mathbf{s}$ 。

式中 $\int_S \frac{\partial \mathbf{B}}{\partial t}$ 为磁感应强度随时间的变化率。

在产生感生电动势的这种电磁感应中，产生的电能是由磁能转化来的。把感应电动势分成动生电动势和感生电动势，在一定程度上只有相对意义。例如，在磁棒和线圈做相对运动时，如果在以线圈为静止的参考系内观察，磁棒的运动引起空间磁场的变化，线圈中的电动势是感生的；如果在以磁棒为静止的参考系内观察，则磁棒是静止的，空间的磁场也没有发生变化，而线圈却在运动，因而线圈内的电动势是动生的。这就出现了这样一种情况：同一感应电动势，在某一参考系内看是感生的，在另一参考系内看则是动生的了。当然，上述情况仍属特例，在普遍情况下不可能通过坐标变换把感生电动势完全归结为动生电动势，反过来也是一样。

交流发电机原理 (principle of alternating current generator)

交流发电机是根据电磁感应原理工作的。

交流发电机主要由定子和转子构成。通过定子、转子的相对运动产生感应电动势，把机械能转换为电能。

最简单的交流发电机如图 1-18-7 所示，

图 1-18-7

它的定子是一对磁极 N、S，转子是一个单匝线圈 ABCD。线圈可以绕固定转轴在磁极间的匀强磁场中转动。线圈的 AB 边和 CD 边分别接在两个与线圈一起转动的铜环上，铜环通过两个带有弹性的金属触头与外电路接通。当线圈在磁场中匀速转动时，线圈的 AB 边和 CD 边由于切割磁感线而产生感应电动势，它的大小和方向，随线圈的转动而发生变化。设线圈的 AB 边和 CD 边的长为 l ，BC 边和 DA 边的长为 d ，线圈面积则为 ld 。当线圈平面的法线方向 n 与竖直方向的夹角为 θ (图 1-18-8) 时，在 AB 边上产生的感应电动势为

$$\begin{aligned} \varepsilon_{AB} &= \int_A^B (\mathbf{v} \times \mathbf{B}) \cdot d\mathbf{l} \\ &= \int_A^B vB \sin\left(\frac{\pi}{2} + \theta\right) \cdot dl \\ &= vBl \cos \theta \end{aligned}$$

图 1-18-8

在 CD 边产生感应电动势为 $\varepsilon_{CD} = \int_C^D (\mathbf{v} \times \mathbf{B}) \cdot d\mathbf{l} = \int_C^D vB \sin\left(\frac{\pi}{2} - \theta\right) dl = vl \cos \theta$

以上二式中的 v 为 AB 或 CD 边转动的线速度， B 为定子磁场的磁感应强度。用右手定则可以判断出 AB 边和 CD 边中产生的感应电动势在线圈回路中的方向相同，整个回路中的感应电动势为

$$\varepsilon_{ABCD} = \varepsilon_{AB} + \varepsilon_{CD} = 2vBl \cos \theta$$

设线圈在磁极间旋转的角速度为 ω 。取线圈平面处于水平位置时作为计时的零点，则

$$v = \frac{d}{2} \cdot \omega, \\ = \omega t_0$$

所以

$$\varepsilon_{ABCD} = 2Bl \frac{d}{2} \cdot \cos \omega t \\ = BS \cos \omega t_0$$

式中 S 为线圈的面积。

由计算结果可以看出，线圈在磁场中匀速转动产生的感应电动势是按余弦（或正弦）曲线规律变化的，线圈每转动一周，电动势的大小和方向要完成一次周期性的变化。

实际的交流发电机，构造比较复杂，线圈匝数很多，磁场用电磁铁激发。大型发电机多为转动磁极式，即转子是电磁铁，电枢（绕组）做定子；小型发电机多为转动电枢式，即电枢转动，磁体不动。各种实际的交流发电机的磁极一般也不止一对。

涡旋电场 (vortex electric field)

电场线是闭合的、呈涡旋状的电场叫做涡旋电场。涡旋电场不是由电荷激发的，而是由变化的磁场激发的，因此，涡旋电场也叫做感生电场。

涡旋电场对电荷有作用力，这一点与静电场是相同的。与静电场不同的是它不是保守场，不能引进势能的概念。如果用 E 表示涡旋电场的场强，则 E 的环量不等于零，即

$$\oint E \cdot dl \neq 0。$$

由于磁场变化产生的感生电动势，其非静电力是涡旋电场力。

涡旋电场可以驱使带电粒子运动，这个原理应用在电子感应加速器中，（参见“电子感应加速器”）。

电子感应加速器 (betatron)

利用变化磁场产生的感生电场加速电子的装置叫做电子感应加速器。常见的电子感应加速器是回旋式的，电子在变化的磁场中沿着固定的圆周轨道不断回旋得到加速。

在变化的磁场中运动的电子，如果它的运动方向与磁场方向垂直，则将在一平面中运动，并受到感生电场的作用力；当电子逆着感生电场的方向运动时，它就被加速。为了把电子的运动约束在稳定的圆形轨道上，轨道上的磁场必须满足一定的条件。实际上，只要在加速过程中，保持每一时刻电子运动轨道面上的磁通量 ϕ 与轨道上磁感应强度 B 之间有如下关系： $\phi = 2 \pi R^2 B$ ，式中 R 是轨道半径，电子就能在固定的圆周轨道上加速运动。

图 1-18-9 电子感应加速器结构示意图

电子感应加速器的结构如图 1-18-9 所示，它主要由上下磁极、上下磁轭、电磁铁绕组和环形真空盒组成；真空盒内安装着电子枪。磁极和磁轭用硅钢片制成，磁场是轴对称的。真空盒用优质玻璃或陶瓷材料制成，

其内部的真空度约为 $1.3 \times 10^{-4} \text{Pa}$ ，电子轨道位于真空盒的圆形中心轴线上。当电磁铁绕组中通入交变电流时，上下磁极间产生交变磁场，电子轨道所包围的平面内有随时间变化的磁通穿过，能在轨道上产生加速电子的感生电场，所以这部分磁通叫做加速磁通。除了加速磁通外，还有施加在电子轨道上的磁场叫做主导磁场。在加速电子的过程中，加速磁通增大，主导磁场的 B 值也相应地增大，以便把电子约束在稳定的圆形轨道上。在磁场由弱变强时电子枪发出电子，磁场增强到最大值时，电子已在真空盒里回旋了数兆周，被加速到最高能量。在这以后，磁场开始减弱，感生电场方向的改变使电场力的方向与电子速度的方向相反。因此，应在电场改变方向之前，利用偏转装置或引出设备，使电子打在内靶上产生射线或者把电子束引到加速器外面。所以，感应加速器输出的电子束是脉冲式的，每秒钟输出的脉冲数等于交变磁场的频率。在采用简单的正弦式交变电流进行励磁的情况下，只有 $\frac{1}{4}$ 周期可用来加速电子。

利用感生电场加速电子的想法，于 1932 年由斯莱皮恩 (J. Slepian 1891 ~ 1969) 提出。1940 年在克斯特 (D. W. Kerst 1889 ~ 1950) 解决了电子轨道的稳定问题后，建成了世界上第一台电子感应加速器，可把电子加速到 2.3MeV。目前多数电子感应加速器的能量在 20MeV ~ 30MeV 以下，能量最大的为 315 MeV，电子轨道半径 1.22m。

电子感应加速器输出的电子束及其打靶时产生的射线，广泛应用于放射性治疗和无损探伤，还可用来进行活化分析和光核反应，以及用作其他方面的辐射源。

电子感应加速器还有直线式的，它的工作原理如图 1-18-10 所示。铁磁性材料制成的环形铁芯上绕有线圈。绝缘体制成的加速管置于铁环的中心轴线上，加速管的一端装有电子枪。环形铁芯的线圈中通入脉冲电流时，铁芯中的磁感应强度发生变化，在铁环的中心轴线上产生感生电场。电子枪适时地发射电子，感生电场就能使电子加速。直线感应加速器的感生电场很强，电子运行很短的路程，就可获得很高的能量。

图 1-18-10 直线式电子感应加速器结构示意图

涡电流 (eddy current)

由于电磁感应，在大块金属中形成的感应电流，其流线呈涡旋状 (图 1-18-11)，因而称为涡电流，简称涡流。涡电流是法国物理学家傅科 (J. B. L. Foucault 1819 ~ 1868) 发现的。

图 1-18-11 涡电流

金属块的电阻一般很小，不大的感应电动势就能在它的内部形成强大的涡电流，释放出大量的焦耳热。涡电流的这种热效应在工业上有广泛的应用，冶炼工业用的感应电炉就是一例 (参见“感应电炉”)。高频焊接是涡电流热效应的又一应用。图 1-18-12 是高频焊头的示意图。外层是空心的高频线圈，里面是待焊工件。当线圈中通入高频电流时，就在工件上产生涡流。由于接缝处电阻很大，通电后该处将发出大量的焦耳热，使金属熔化，接缝处便熔合在一起。涡电流的热效应还用于真空技术，例如，

利用涡电流的热效应可使电视机显像管内金属电极受热释放出它吸附的气体，在抽气过程中将其排出。

图 1-18-12 高频焊头示意图

涡电流的热效应用于有铁芯的装置，如变压器、电动机等的运行是有害的。这是由于涡电流产生的热会使铁芯的温度升高，缩短线圈绝缘材料的寿命。涡电流的热效应要消耗能量，使变压器、电动机的效率降低。为了减少涡电流造成的损耗，变压器和电动机的铁芯都用互相绝缘的薄硅钢片叠压而成，不用整块金属。

涡电流还有许多应用，如电磁阻尼、电磁驱动等，(参见“电磁阻尼”)。

硅钢片 (silicon steel plate)

用含硅量 0.8%~4.5%的合金钢制成的薄片，用于制作电机、变压器、继电器、互感器、开关等，是制作铁芯的材料。硅钢是软磁材料，它具有软磁材料具有的各种性能：高磁导率、低铁损、低矫顽力、磁致伸缩小。它的硬度较高，脆性较大。硅钢是体心立方晶系的多晶体。每个晶粒有三个互相垂直的易磁化方向。但在多晶体中晶粒的排列是杂乱的。在材料制造过程中，可采取工艺措施，使晶粒具有一定的取向。按硅钢晶粒取向类型，硅钢片分为以下三种：

1. 单取向硅钢片 (或晶粒取向硅钢片)：各个晶粒最易磁化的方向沿着轧制方向，在这个方向上，硅钢片的磁性最强，铁损最低，多用于制作变压器、继电器。这种硅钢片在磁场方向与轧制方向成一定角度时，磁化会发生困难。

2. 无取向硅钢片 (或取向度小的硅钢片)：几乎没有磁各向异性，在各个方向上磁化的磁性差别很小。多用于制造电机，因为电机在转动时，磁化方向不固定。这种硅钢片占硅钢产量的大部分。

3. 双取向硅钢片：在沿轧向和垂直于轧向方向都能取得较好的磁性。它也适用于电机铁芯，但它的生产工艺比较复杂。按硅钢片的使用条件，可分为弱磁场条件下使用的和高温条件下使用的。弱磁场下使用的硅钢片，用于高频变压器，脉冲变压器、磁放大变压器中。高温下使用的硅钢片，仅在电讯工业中用于高频器材上。

硅钢片的厚度越大，涡流损耗越高，因此一般硅钢片呈薄片型。为了减小用硅钢片制作的铁芯的涡流，叠装的各硅钢片之间涂有绝缘漆或附有绝缘氧化层，把涡流限制在各薄片内。电力变压器、大型交流发电机、大型电动机中的铁芯，一般用 0.35mm 厚的冷轧硅钢片叠制；大型直流电动机和中、小型交流电动机的铁芯，一般用 0.50mm 厚的冷轧硅钢片叠制。电讯工业用的硅钢片厚度在 0.05mm~0.20mm 之间。

感应电炉 (induction furnace)

利用金属在交变磁场中产生的涡流来加热材料的方法叫做感应加热，使用感应加热方法的电炉叫做感应电炉。感应电炉可以分为加热炉和熔炼炉两大类，分别进行金属材料加热和熔炼合金钢、铸铁、有色金属等。

由于感应电流在材料上产生趋肤效应 (即交变电流通过导体时，导体横截面上的电流分布随着电流频率的增大越来越集中于导体的表面)，频

率越高，材料的受热表层越薄。因此，用感应电炉来熔炼金属材料和加热整体金属材料时，不能选择太高的电源频率。而电源频率太低，功率传递的效率又太低。因此，各种不同用途的感应电炉，需要选择适宜频率的电源。感应电炉使用的电源频率有三种，分别为工频（工业上用的电源频率，我国为 50Hz），中频（50Hz ~ 10000Hz）和高频（10 000 Hz 以上）。

图 1-18-13

感应电炉又分为有芯炉和无芯炉两种。图 1-18-13 所示的是有芯感应电炉。闭合的铁芯常用薄的、表面绝缘的硅钢片叠合而成，也有用卷制铁芯的。在这种感应电炉中，被加热的材料相当于次级线圈。它的工作原理同变压器一样，所用的电源都是工频的。图 1-18-14 所示的是无芯感应电炉，这种电炉中要加热的材料就是芯棒，或是坩埚中被熔炼的材料。无芯感应熔炼炉又叫坩埚式感应熔炼炉，它的坩埚可根据需要采用不同的材质制作。一般说来，熔炼炉的装料容量越大，所用的电源频率就越低。大的工频熔炼炉装料容量有达 650 t 的，功率 21 000 kW，用于熔炼钢铁。中频熔炼炉的装料容量小的只有 20 kg，大的可达 20 t，功率在几十至几百千瓦之间。高频熔炼炉的装料容量最多只有 50 kg 左右，输入功率只有几十千瓦，适合于小规模生产或实验室熔炼特种合金使用。

图 1-18-14

电磁灶 (electromagnetic range)

利用涡流的焦耳热和磁性材料的磁滞发热的烹调器具，1971 年问世，外形如图 1-18-15 所示。它的结构主要由面板、感应线圈、变换器（用调节开关控制）和安全保护电路四部分组成（图 1-18-16）。当灶内的感应线圈通过交变电流时，所形成的交变磁场作用于铁磁材料制成的烹饪锅，在锅体上产生涡流。涡流由于锅体的阻抗而产生焦耳热。同时，制作烹饪锅的铁磁性材料在磁场中被磁化，其中的磁畴按交变磁场的频率迅速改变取向，使铁磁材料分子因摩擦、碰撞而发热，即磁滞发热。

图 1-18-15

图 1-18-16

电磁灶的面板呈平板状，一般用 4 mm 厚的结晶陶瓷玻璃制成，具有良好的耐热、绝缘、耐水、耐腐蚀性能，有较强的机械硬度、机械冲击强度和热冲击强度。感应线圈位于面板下部，用铜丝绕成，也呈平板状。变换器为电磁灶提供所需频率的电流。灶内的安全保护电路，用于控制、显示灶在使用过程中的温度、防止温度异常上升以及检测面板裂纹等。电磁灶按发热电流的频率，分为高频电磁灶和低频电磁灶两种。高频电磁灶的感应加热线圈中通入的电流，频率为 15kHz ~ 50kHz。它的热效率高一些，噪声小。低频电磁灶直接使用 50Hz 的电源。

电磁灶输入功率为 1200W ~ 1500W，热效率大约为 80%。

电磁灶必须使用铁磁材料制做的平底锅。使用电磁灶时，不要将锅空烧，不要将电磁灶靠近其他热源、水源或蒸汽源。

电磁灶工作时辐射电磁波，对录音设备、录像设备以及电视机的工作产生干扰。

微波炉 (microwave oven)

利用微波加热的用电器，1945 年问世。用于加热的微波频率一般为 2 450 MHz (家用微波炉) 和 915 MHz (烘烤干燥、消毒物品)。家用微波炉的外形如图 1-18-17 所示。微波辐射到食物上，食物中极性分子的取向随微波电场的方向而改变，由于微波频率较高，食物中极性分子的取向每分钟发生数十亿次的变化，从而在相邻分子之间激烈的摩擦、碰撞，产生大量的热，使食物的温度迅速升高，完成烹饪加热的过程。

图 1-18-17

微波炉由电源、磁控管 (微波发生器)、烹调腔和控制系统组成。磁控管发射微波，它需要电源提供 4 000 V 的高电压。它的电源是个变压器，将 220 V 交变电流转换为 4 000 V 交变电流。烹调箱内有传输微波的波导管。搅拌器的结构类似一个电风扇，由电动机带动，或用鼓风机的气流带动，它能将微波均匀地反射到灶腔各处。控制系统控制炉门、工作程序和安全连锁装置。为防止微波泄漏，微波炉外壳用金属制做，炉门用金属框架制作，夹有微孔金属网玻璃。

微波炉中盛放食物的器皿用绝缘材料制作。

微波炉的功率在 200W ~ 1500W 之间。

微波炉使食物内部及表面同时加热，食物受热均匀，加热速度快 (比一般炉灶快 4 倍 ~ 10 倍)，热效率达 80% 左右，是一种清洁安全的烹饪炉。

使用微波炉时要注意以下几点：

1. 磁性材料不能靠近磁控管。
2. 金属盘不能放入炉内，避免引起高频管短路和损坏磁控管。
3. 微波炉不能空烧 (避免损坏微波管)。
4. 烹调腔内不宜放脏物，以免污损。

电磁阻尼 (electromagnetic damping)

金属导体在非均匀磁场中运动要引起涡流，根据楞次定律，这种涡流的磁场总是反抗引起它的原因，即要阻碍金属导体在磁场中的运动。这种现象叫做电磁阻尼。

如图 1-18-18 所示，把用金属片制成的摆悬挂在电磁铁的两极之间，并使之摆动。

图 1-18-18

电磁铁不通电时，摆的运动几乎不受影响。电磁铁通电后，摆动很快就停下来。这是因为，摆在进入磁场时，感应电流的磁场与电磁铁的磁场方向相反，磁场对摆的斥力阻碍摆进入磁场；摆在离开磁场时，感应电流的磁场与电磁铁磁场的方向相同，磁场对摆的引力阻碍摆离开磁场。如果把摆片做成梳状 (图 1-18-19)，摆内的涡流大大减小，阻尼现象就不明显了。利用电磁阻尼，可以防止仪表中各种可动部分的振动。在磁电式仪表中，通常把线圈绕到一个铝框上，当线圈通电摆动时，铝框上产生涡电流。由

于电磁阻尼作用，线圈迅速地停止摆动，静止在平衡位置上。

图 1-18-19

由于电磁阻尼是阻碍金属和磁体间的相对运动的，这种效应反过来也可用于电磁驱动。一个金属圆盘，靠近磁铁两极而不与磁铁接触，当磁铁绕轴转动时，圆盘也跟着一起转动（图 1-18-20）。这种效应是由于圆盘中出现感应电流，感应电流的磁场阻碍了圆盘对磁铁的相对运动。因为圆盘的运动是转动磁铁驱动的，圆盘的转速总是小于磁铁的转速。感应式异步电动机的运转就是根据这个道理。

图 1-18-20

电磁驱动作用可用来制成磁性式转速计测量转速。其主要结构如图 1-18-21 所示。测量转速时将转速计中的磁铁转轴连于机器转轴上，磁铁随机轴转动，因而在感应片中产生涡流，使感应片受到与磁铁转动方向相同的转矩。指针在这个转矩和游丝的恢复转矩共同作用下，偏转一定角度而达到平衡。磁铁的转速越大，指针的偏转角也越大，由此便可显示出机轴的转速。

图 1-18-21

自感 (self-inductance)

由于线圈中的电流发生变化，在线圈自身中产生感应电动势的现象叫做自感。这样产生的电动势叫做自感电动势。

穿过每匝线圈的磁通量 ϕ 由电流 i 产生， ϕ 正比于电流 i ，即

$$\phi = Ki。$$

设线圈的匝数为 N ，线圈的磁链为

$$\psi = N\phi = NKi。$$

上式中的 NK 常用 L 表示，于是有

$$\psi = Li。 \quad (1)$$

根据法拉第电磁感应定律，当线圈中的电流改变时， ψ 也要改变，产生的自感电动势为

$$\varepsilon = -\frac{d\psi}{dt} = -\left(L\frac{di}{dt} + i\frac{dL}{dt}\right)，$$

在线圈中不存在铁磁质的情况下， L 为一常量，自感电动势

$$\varepsilon = -L\frac{di}{dt}。 \quad (2)$$

(2)式中的负号，表示当回路电流增加，即 $\frac{di}{dt} > 0$ 时，自感电动势的方向

与电流方向相反；当回路电流减小，即 $\frac{di}{dt} < 0$ 时，自感电动势的方向与

电流方向相同。(1)、(2)两式中的比例系数 L 称为自感系数。由上述两个式子，自感系数可有两种定义。根据(2)式，自感系数在数值上等于回路中电流变化率为 1A/s 时的自感电动势。根据(1)式，自感系数在数值上等于回路中电流强度为 1 安培时的磁链。

在国际单位制中，自感系数的单位是亨利，简称亨，符号是“H”。

$$1H = 1V \cdot s/A,$$

或 $1H = 1Wb/A。$

常用的自感系数单位还有 mH 和 μH 。自感系数的大小与导体回路的形状、大小、匝数以及周围介质的磁导率有关。每匝线圈的面积为 S、单位长度上的匝数为 n、总长度为 l 的螺线管，内部充满相对磁导率为 μ_r 的介质时，其自感系数为

$$L = \mu_r \mu_0 n^2 S l。 \quad (3)$$

式中的 μ_0 为真空磁导率。如果磁介质是铁磁质，自感系数还跟通过螺线管的电流有关。改变螺线管自感系数的最有效的办法是更换螺线管内的介质材料。在螺线管内放置磁导率很大的铁磁质材料时，通过同样的电流就能产生较强的磁感应强度，大大增加它的自感系数。

自感系数 L 的计算方法一般比较复杂，在实际中常常采用实验的方法测定它的数值。

自感现象在电工、无线电技术中有广泛的应用。自感现象的存在，使得任何回路中的电流发生改变时，都会引起自感对这个改变产生阻碍，因而对迅变电流有抑制作用。在电子电路中，常被用来抑制高频电流的扼流圈就是利用自感原理制成的。无线电设备中的谐振电路、某些滤波电路以及自耦变压器的工作等，也都应用了自感的原理。

在供电系统中，由于自感现象在切断电源时会产生强大的电弧。为保护电路，保障人身安全，在一些电路中要加灭弧装置。在线绕电阻上，常采用双线绕法（图 1-18-22），使方向相反的电流紧密地靠在一起，由于电流产生的磁场互相抵消，自感的作用就削弱了。

图 1-18-22

互感 (mutual inductance)

由于一个线圈中电流变化，使与它邻近的另一个线圈中产生感应电动势的现象叫做互感。这样产生的感应电动势叫做互感电动势。

在图 1-18-23 中，两个邻近的线圈 1 和 2 中分别通过电流 i_1 和 i_2 ，两个线圈中均不存在铁磁质。 i_2 在线圈 2 中产生的磁链 ψ_{21} 正比于 i_1 ，即

$$\psi_{21} = M_{21} i_1, \quad (1)$$

同理，电流 i_2 在线圈 1 中产生的磁链为 ψ_{12} ，

$$\psi_{12} = M_{12} i_2。 \quad (2)$$

这里的比例系数 M_{21} 、 M_{12} 在不存在铁磁质时，是与线圈中电流无关的常量。

当线圈 1 中的电流 i_1 、线圈 2 中的电流 i_2 变化时， ψ_{21} 、 ψ_{12} 都要变化，将在线圈 2 和 1 中产生互感电动势，根据法拉第电磁感应定律得到

$$\varepsilon_{21} = -M_{21} \frac{di_1}{dt}, \quad \varepsilon_{12} = -M_{12} \frac{di_2}{dt}。 \quad (3)$$

(1)、(2)、(3) 式中的比例系数 M_{21} 和 M_{12} 叫做互感系数，互感系数越大，互感电动势就越大。理论和实验都证明 $M_{21} = M_{12}$ （参见“互感磁能”），一般用 M 来表示互感系数，即

$$M_{21} = M_{12} = M, \quad (4)$$

不再区分哪个线圈对哪个线圈的互感系数。

互感系数可有两种定义。由 (3) 式，两个线圈的互感系数在数值上等于其中一个线圈中的电流变化率为 1A/s 时另一线圈中的感应电动势。由 (1)、(2) 两式可得互感系数的另一定义：两个线圈的互感系数在数值上等于其中一个线圈中通过 1A 的电流产生的磁场穿过另一线圈的磁链。

互感系数的单位同自感系数一样，也是亨利。

互感系数的大小与线圈的几何形状、大小、两线圈的相对位置以及周围磁介质的性质有关。当线圈周围有铁磁性物质时，互感系数还与电流有关。

两个线圈之间的互感系数与各自的自感系数有联系。在无磁漏（每个线圈产生的磁通量对于每一匝来说都是相等的，并且全部穿过另一个线圈的每一匝）情形下，互感系数

$$M = \sqrt{L_1 L_2}。$$

式中的 L_1 、 L_2 分别为两个发生互感的线圈各自的自感系数。在有磁漏的情况下，自感系数 M 比 $\sqrt{L_1 L_2}$ 小。

互感系数 M 的计算方法一般比较复杂，在实际中常采用实验的方法测定它的数值。互感现象在电工和无线电技术中有广泛的应用。通过互感作用，能量或信号可以方便地从一个线圈传递到另一个线圈。电工、无线电技术中使用的各种变压器都是互感器件。

互感也有有害的一面。有线电话往往会由于两路电话之间的互感而串音，无线电设备中也往往由于导线间或器件间的互感而影响正常工作。

自感磁能 (magnetic energy of self induction)

一个线圈在建立电流的过程中，电源要克服线圈产生的自感电动势做功。电源做的这部分功以磁场能的形式储存于线圈中。这种磁能叫做自感磁能。

自感磁能的大小可以通过它建立电流过程中电源抵抗自感电动势做功来计算。线圈接通电源时，由于自感，其中的电流 i 由零变为稳定值 I ，要经过一定的时间 t 。在 dt 时间内，电源反抗自感电动势所做的功

$$dA = -\varepsilon_L i dt，$$

由于 $\varepsilon_L = -L \frac{di}{dt}$ ，所以

$$dA = Li \frac{di}{dt} \cdot dt = Lidi。$$

在建立电流的整个过程中，电源反抗自感电动势所做的功

$$A = \int dA = \int_0^I Lidi = \frac{1}{2} LI^2。$$

因此，自感磁能

$$W_m = \frac{1}{2} LI^2。$$

自感磁能的值都是正值。

在给含有线圈的电路切断电源时，与线圈并联的灯泡突然发亮，就是线圈释放其储存的自感磁能的缘故。当切断电源时，电流由稳定的值 I 减

少到零，线圈中产生与电源提供的电流方向相同的自感电动势，线圈中储存的自感磁能以自感电动势做功的形式释放出来。

互感磁能 (magnetic energy of mutual in-duction)

两个以上相邻的线圈，在各自建立电流的过程中，各自的电源要克服互感电动势做功。电源做的这部分功以磁场能的形式储存于各个线圈中。这种磁场能叫做互感磁能。互感磁能的大小可以通过线圈建立电流过程中电源抵抗互感电动势做功来计算。设两个相邻的线圈 1 和 2 中，分别有电流 I_1 和 I_2 ，两电源抵抗互感电动势做的功分别为 A_1 、 A_2 ，所做的总功

$$\begin{aligned} A &= A_1 + A_2 = \int dA_1 + \int dA_2 \\ &= -\int_0^{I_1} \varepsilon_{12} i_1 dt - \int_0^{I_2} \varepsilon_{21} i_2 dt \\ &= -\left[-\int M_{12} \frac{di_2}{dt} \cdot -\int M_{21} \frac{di_1}{dt} \cdot dt \right] \\ &= M \int_0^{I_1} \int_0^{I_2} d(i_1 i_2) = M I_1 I_2 \end{aligned}$$

写成对称的形式

$$A = \frac{1}{2} M_{12} I_1 I_2 + \frac{1}{2} M_{21} I_2 I_1$$

由此可推广到有 k 个线圈存在的更普遍的情形

$$A = \frac{1}{2} \sum_{\substack{i,j=1 \\ i \neq j}}^k M_{ij} I_i I_j$$

式中的 M_{ij} 是线圈 i 、 j 之间的互感系数。

因此互感磁能

$$W_m = \frac{1}{2} \sum_{\substack{i,j=1 \\ i \neq j}}^k M_{ij} I_i I_j$$

线圈储存的互感磁能可能为正值，也可能为负值。

互感磁能与线圈中电流建立的次序无关。利用这一性质可以证明互感系数 $M_{21}=M_{12}$ 。先在线圈 1 中建立电流 I_1 ，再在线圈 2 中建立电流 I_2 ，在此过程中调节线圈 1 的外接电源使 I_1 保持不变，则外接电源抵抗互感电动势所做的功为：

$$\begin{aligned} A &= -\int \varepsilon_{12} I_1 dt = M_{12} I_1 \int_0^{I_2} di_2 \\ &= M_{12} I_1 I_2 \end{aligned}$$

同样，先建立 I_2 ，再建立 I_1 ，在这过程中保持 I_2 不变，则互感磁能为 $M_{21} I_2 I_1$ 。由此可得 $M_{21}=M_{12}$ 。

磁能密度 (magnetic energy density)

单位体积内磁场具有的能量，叫做磁场能量体密度，简称磁能密度。对于均匀的磁场，磁能密度可用下式表示

$$w_m = \frac{W_m}{V} = \frac{1}{2} \mathbf{B} \cdot \mathbf{H} \quad (1)$$

式中的 B 为磁场的磁感应强度， H 为磁场强度。

对于非均匀的磁场，可把磁场划分为无数微小的含有均匀磁场的体积元 dV ，磁能密度

$$w_m = \frac{dW_m}{dV} \quad (2)$$

在有限体积 V 内，磁场能量等于磁能密度对磁场占有的全部空间积分，即

$$\begin{aligned} W_m &= \iiint w_m dV \\ &= \frac{1}{2} \iiint \mathbf{B} \cdot \mathbf{H} dV \end{aligned} \quad (3)$$

(1)式可由螺线管自感磁场的特例推导出来。设螺线管的长度为 l ，截面积为 S ，单位长度上的匝数为 n ，管内充满相对磁导率为 μ_r 的介质，其自感系数为

$$L = \mu_r \mu_0 n^2 l S = \mu_r \mu_0 n^2 V$$

式中的 $V=IS$ 为螺线管的体积。根据自感磁能的公式

$$W_m = \frac{1}{2} LI^2 \text{ 可得}$$

$$W_m = \frac{1}{2} \mu_r \mu_0 n^2 VI^2$$

所以磁能密度

$$w_m = \frac{W_m}{V} = \frac{1}{2} \mu_r \mu_0 n^2 I^2$$

由于 $H=nl$ ， $B=\mu_r \mu_0 H=\mu_r \mu_0 nl$ ，可得 $\mu_r \mu_0 n^2 I^2=B \cdot H$ ，所以

$$w_m = \frac{1}{2} \mathbf{B} \cdot \mathbf{H}$$

日光灯 (fluorescent lamp)

照明用的一种荧光灯。它的电路如图 1-18-24 所示，主要由灯管、镇流器、起动器组成。

图 1-18-24

图 1-18-25

日光灯灯管的结构如图 1-18-25 所示，由灯头、灯丝和玻璃管组成。两个灯头位于玻璃管两侧，各有两只导电的灯脚，里面与灯丝相连。灯丝用螺旋状的钨丝制成，上面涂有三元碳酸盐（碳酸钡、碳酸锶、碳酸钙）。灯丝受热时，可以发射电子，又叫阴极。玻璃管内壁涂有均匀的荧光粉薄层。灯管内抽成真空，充入少量惰性气体（氙或氩）和水银。

镇流器是一个有铁芯的电感线圈，图 1-18-26 所示的是它的外形和符号。镇流器的铁芯用含硅量较低的硅钢片叠制，线圈用油基性漆包线或聚脂缩醛高强度漆包线绕制。

图 1-18-26

起动器有辉光式和热开关式两种。辉光式起动器使用广泛，其结构和图形符号见图 1-18-27。它的外壳为圆柱形铝壳或塑料壳，里面有一个小型电容器（ $0.005\ \mu\text{F}$ 左右）和一个玻璃泡（内有动触极和静触极，并充入惰性气体），也叫跳泡。电容器与跳泡并联。跳泡起自动开关作用，它的动触极用双金属片制造。电容器的作用是避免电极断开时产生火花将触片烧坏，也可以消除日光灯工作时对附近无线电设备的干扰。起动器一般在 20 时 4s 内起跳，使用寿命不少于 5000 次。

图 1-18-27

在日光灯电路中，日光灯灯管和镇流器串联，和起动器并联。

当开关闭合后，电源电压通过镇流器、灯丝加在起动器两电极间，起动器中的低压气体开始辉光放电。放电产生的热使 U 型双金属片（动触极）与静触极（图 1-18-28）接触，

图 1-18-28

电源、镇流器、灯丝和起动器构成闭合回路，使灯丝预热并发射电子；预热时间约 $1\text{s} \sim 3\text{s}$ 。起动器两电极接触短路后，辉光放电熄灭，双金属片冷缩，使起动器两极断开（图 1-18-29）。

图 1-18-29

在断开瞬间，电路电流突然消失，使镇流器两端产生比电源电压高许多的感应电动势。脉冲感应电动势加在预热了的两端灯丝间。在脉冲电压作用和两端灯丝发射出的电子的撞击下，使灯管内的惰性气体电离引起弧光放电。随着管内温度逐渐升高，使水银气化，灯管由惰性气体放电过渡到水银蒸气放电。放电过程中被激发的水银原子辐射出波长为 $2537 \times 10^{-10}\text{m}$ 的紫外线。紫外线又激发灯管内壁的荧光粉发出可见光。在电路刚刚接通电源时，由于镇流器与灯管串联，加在镇流器两端的电压很小，几乎所有的电压都降落在起动器的两极上；灯管放电后，灯管阻抗变小，电路的一部分电压降落在镇流器上，起了限制日光灯电流的作用。这时起动器两极间电压为日光灯工作电压，不能使起动器产生辉光放电，使它处于断路状态。

日光灯在电源电压正常时，要求镇流器与灯管严格配套使用。这是由于镇流器的规格是根据灯管的要求设计的。如果将小功率镇流器与大功率灯管配套，会使起动困难，由于电流过低使灯丝预热不充分，起动器要反复“跳火”才能点燃灯管，会加速灯管老化；如果将大功率镇流器与小功率灯管配套，会使灯丝过热，加剧灯丝上能够发射电子物质的扩散，使灯管很快报废。

使用日光灯时，不宜频繁开关。每起动一次，灯管两端的灯丝间就受到一次脉冲高电压的冲击，会消耗灯丝上可以发射电子的物质。一般来说，日光灯每起动一次，连续点燃 3h，灯管寿命不少于 3000h；起动一次，连续点燃 1h，灯管寿命缩短到 70% 以下；起动一次，连续点燃 6h，灯管寿命可延长到 125%。

延时继电器 (time-delay relay)

继电器的一种，用于自动控制系统对时间的控制，又叫时间继电器。延时继电器的种类很多，有电磁式的，空气式的，阻尼式的，机械式的，电子式的等等。无论哪种延时继电器，在输入信号以后，都要经过一定的时间延迟，才能输出信号。延迟的时间称为延时。

电磁式时间继电器是利用电磁感应原理使继电器的衔铁释放时间延缓来获得延时的。电磁式时间继电器的结构如图 1-18-30 所示，在一般的电磁式继电器的线圈上加一个短路铜套（也叫阻尼环）。当给继电器的线圈通直流电时，衔铁闭合，触头闭合。当线圈断电时，铁芯中的磁通迅速减少，这时套在铁芯上的短路铜套中由于电磁感应而产生涡流，涡流的磁通将阻止铁芯中磁通的减少。这就使铁芯中的磁通衰减变慢，直到磁通衰减到电磁吸力比返回弹簧的拉力小时，衔铁才被释放，从而获得了延时。

图 1-18-30

电磁式时间继电器用于线圈断电延时，延时范围为 0.3s ~ 20s。它使用直流电，多用于直流电路。由于它的价格便宜，也有把它用在交流电路中的。在交流电路中使用电磁式继电器，需要用整流器把交变电流变成直流电供给电磁式继电器，才能对电路实现时间的控制。

感应圈 (induction coil)

一种应用电磁感应原理来获得高电压的实验室电源设备。它由直流电源 ε 、开关 S、带铁芯的线圈、电磁式自动断续器、电容器等组成，图 1-18-31 是它的结构示意图。其电源电压为直流 0V ~ 12V，电流为 1.5 A ~ 2.2A。线圈的铁芯用薄硅钢片叠制，呈圆柱状。铁芯上绕两个线圈。原线圈匝数 N_1 较少（约 250 匝），用粗导线（直径 1.2mm 的纱包线）绕制，跟电源相连；副线圈匝数 N_2 较多（大约是原线圈匝数的 300 倍），用细导线（直径 0.12mm 的高强漆包线）绕在原线圈的外层，输出端 D、D' 与用电器相连。两层线圈的层间有良好的绝缘。

图 1-18-31

感应圈工作时，输入原线圈的电流是断续的。电流的断续是由衔铁、触点（用螺旋调节）组成的电磁式自动断续器来实现的。当开关 S 闭合时，原线圈中有电流通过，铁芯被磁化，吸引衔铁 P，使触点 Z 断开，切断电路。触点断开后，衔铁由于弹簧的作用恢复正常状态，又使电路接通，电路重复上述动作。

原线圈中电流的变化，要在它自身中产生自感应电动势（几百伏），这使得电路断开时原线圈中的电流不能突变。其电流变化如图 1-18-32 甲所示。从图可以看出，电路断开时电流变化率比电路接通时大。由于互感，在匝数为原线圈 300 倍的副线圈上产生高达几万伏的互感电动势 ε_2 ，其变化情形如图 1-18-32 乙所示。如果副线圈是接通的，电动势为正值时，副线圈中电流的方向与原线圈中电流方向相同；电动势为负值时，副线圈中的电流方向与原线圈中的电流方向相反：副线圈中产生非对称的交变电

流。如果副线圈没有

图 1-18-32

接通，在 D 与 D' 间保留一个相当大的间隙。在电路接通时，由于电流变化率不大，产生的感应电动势较小，不能击穿 DD' 间的空气，这时副线圈中没有电流。只有在电路断开时，由于产生的感应电动势 ε_2 较大，才能击穿 DD' 间的空气，产生火花放电。因此，感应圈副线圈输出的电流是脉动直流电（图 1-18-32 丙）。

为防止感应圈原线圈在电路断开点上产生电弧，烧坏触点，保障输出高电压，在感应圈的两触点间并联一个电容器（图 1-18-31 中的 C）。

磁记录 (magnetic recording)

利用磁性材料的磁性变化记录信号的技术。

1. 磁记录系统 一般包括磁头、磁记录介质、磁记录介质传送机构、记录放大器、重放放大器等几部分。其中主要部分是磁头和磁记录介质。

磁头有记录磁头、重放磁头、消磁头等。各种磁头的基本结构如图 1-18-33 所示，由软磁材料制作的铁芯和线圈组成，铁芯上有一条细缝，叫做工作缝隙。根据磁头的不同用途，磁头的工作缝隙、输入输出阻抗不一样。一般来说，记录磁头比重放磁头的工作缝隙稍宽一些。

图 1-18-33

各种磁头外面都有一个屏蔽罩。

记录介质是记录信号的载体，有磁带、磁盘以及磁鼓、磁芯、磁卡片、磁性薄膜、磁片、磁泡和磁光盘等。不同的记录设备可选用不同的记录介质，其中磁带的使用最为广泛。磁带的结构大致如图 1-18-34 甲所示，下层是带基，上层是磁性层。带基一般用醋酸纤维或涤纶薄膜，厚 $10\mu\text{m} \sim 30\mu\text{m}$ 。磁性层厚 $5\mu\text{m} \sim 20\mu\text{m}$ ，是用微粒磁粉与粘合剂均匀混合后涂覆在带基上，并经历了磁场微粒定向处理，烘干、压光等工艺过程。磁盘是用于数字记录的磁记录介质，为薄圆盘。它的结构如图 1-18-34 乙所示，有基片和磁性层。硬磁盘的

图 1-18-34

基片是铝质的，软磁盘的基片是聚脂薄片。磁性层厚度为 $1\mu\text{m} \sim 5\mu\text{m}$ 。磁盘上磁粉微粒的定向为环形。

适于制做磁记录介质磁性层的磁粉都具有针状外形，颗粒均匀细小。它的饱和磁化强度大、有适当矫顽力，为硬磁性材料。常用的磁粉材料有铁的氧化物 ($\gamma\text{-Fe}_2\text{O}_3$ 、 Fe_3O_4)、添加钴 (Co) 的氧化铁、二氧化铬 (CrO_2)、钡铁氧体以及金属铁、氮化铁等。根据磁记录的不同要求，记录介质的磁性层选用不同的材质。

根据磁化场的磁感线在磁记录介质内通过的方式不同，磁记录有垂直记录、横向记录、纵向记录三种方式，图 1-18-35 甲、乙、丙分别是这三种记录方式的示意图。

图 1-18-30

2. 磁记录原理 包括记录、重放、消磁三部分。

记录是将信号记录在磁记录介质上的过程。记录时，磁带以一定的速度移过磁头，磁性层与磁头的工作缝隙接触。磁头的线圈中输入信号电流，在铁芯中形成与信号电流变化成比例的磁场，磁头工作缝隙的漏磁通使靠近它的记录介质上的磁性层磁化，在记录介质上留下了对应于信号电流变化的剩磁。

对应于一个周期的电信号，磁带上的剩磁也构成一个空间分布的周期磁信号，这个周期磁信号在空间的长度就叫做记录信号的波长。它与磁带移动速度成正比，与记录电流的变化频率成反比。如果用 λ 表示记录波长，用 v 表示磁带移动的速度，用 f 表示记录电流的变化频率，三者之间的关系为

$$\lambda = \frac{v}{f}$$

在带速一定的情况下，记录信号的频率越高，记录波长越短，记录水平越高。早期磁记录记录波长为 $100 \mu\text{m}$ ，现在达到小于 $1 \mu\text{m}$ 的水平。

正确记录信号的关键，在于磁带上每个小单元通过磁头工作缝隙的时间 t 要远小于信号周期 T 的一半，即 $t \ll \frac{T}{2}$ 。 t 的大小，取决于磁头

头缝隙宽度 g 和走带速度 v ， $t = \frac{g}{v}$ 。因此记录介质与磁头的相对速度越

快，工作缝隙越小， t 就越小，越有利于信号的准确记录。

图 1-18-36 示出了磁带上剩磁的分布。

图 1-18-36

重放是将以剩磁形式记录在磁记录介质上的信号还原为电信号的过程。重放时，磁头工作缝隙与载有信号的磁记录介质接触，让磁记录介质以记录时相同的速度移过磁头工作缝隙。根据电磁感应原理，由于磁记录介质不同位置上的剩磁不同，介质的移动使磁头线圈中产生感应电动势。记录信号波长越小，频率越高，重放时磁头线圈中产生的感应电动势越大。当信号频率增加一倍时，重放电压值也增大一倍，换成分贝表示为 6dB / 倍频程。实际重放时，当记录波长短到磁头工作缝隙宽度时，由于接触区间记录介质的磁力线不能通过铁芯，感应电动势为零，这个记录波长为临界波长 $\lambda_{\text{介}}$ ， $\lambda_{\text{介}} = \frac{v}{f_{\text{介}}}$ 。实际中使用的上限频率，为临界频率的 $\frac{1}{2}$ ，即记

录波长 $\lambda = 2g$ 。当信号频率过低时，磁头不能提供低磁阻通路，重放电压也受损失。重放的高频、低频损失原理见图 1-18-37。

图 1-18-37 通过磁头线圈的磁通与记录波长的关系

图 1-18-38 是磁记录的记录、重放原理示意图。

图 1-18-38

消磁是清除介质中以剩磁形式储存的信号，有直流消磁法和交流消磁法。交流消磁法效果好，使用广泛。消磁时，给消磁头中通入强交变电流，形成强交变磁场（在 $8.0 \times 10^4 \text{A/m}$ 以上），频率满足 f ，一般为信号频率的 5 倍以上。磁性介质先逐渐接近消磁头工作缝隙，受到高频交变磁场的作用，很快使剩磁达到最大值，即达到磁化饱和状态，把原来记录的信号抹去。然后，磁性介质又逐渐远离消磁头的工作缝隙，由于它所受交变磁场的作用逐渐减小，磁性层的磁化状态由最大的磁滞回线，几次迂回，最后恢复到磁中性状态，即剩磁变为零。

磁记录记录的频带宽（可记录直流至 2MHz 以上的信息），信息能长久保存，随时可以重放，记录内容可随时洗去，重新记录新的内容。它能同时进行多路信息记录，还能根据记录对象的变化过程和研究的需要，改变信息的时基（可高速记录，慢速重放，也可慢速记录、快速重放），还可配用其他记录仪、显示器、数据处理器等。因此，磁记录技术现在被广泛应用于国防、科研、广播、教学、生活的各个领域。

录音 (Sound recording)

也叫“录声”，是把声音转换成信号记录下来的过程。

录音的实现有三种方式：机械录音、光电录音、磁录音。

机械录音是利用声波振动记录声音。

光电录音是把声音先转换成电信号，再把电信号转换成光束的强弱或宽窄，在移动的感光胶片上记录下来。

磁录音是应用磁记录技术记录声音。磁录音系统由磁头（录音磁头、放音磁头、消音磁头）、磁带、磁带传送机构、记录放大器、重放放大器组成。

录音磁头的基本结构同图 1-18-33 所示。磁头的工作缝隙因磁头用途而异。录音磁头缝隙一般为 $4 \mu\text{m} \sim 7 \mu\text{m}$ ，放音磁头工作缝隙一般为 $2 \mu\text{m} \sim 5 \mu\text{m}$ ，消音磁头工作缝隙约 $50 \mu\text{m} \sim 100 \mu\text{m}$ 。有些录音系统采用录放兼用磁头，还有用录、放、消二用磁头的（图 1-18-39）。

图 1-18-30

录音磁带有普通磁带，LH 磁带（高输出低噪声磁带），二氧化铬磁带，铁铬磁带，金属磁带。普通磁带适用于对音质要求不高的情况。LH 带的高频特性较普通磁带好。录音磁带都采用针状微粒磁粉与粘合剂均匀混合制作。盒式磁带宽 3.81mm，走带速度 4.75cm/s，微型盒式磁带宽 3.81mm，走带速度 2.38cm/s。

磁录音带磁化方式为纵向记录。

录音时，声音首先进入话筒，由话筒把声音信号变换为与声音变化规律相同的音频电信号。音频电信号经放大处理后送至录音磁头。录音磁头把音频电信号转变为与它的变化规律一致的磁场信号。这个信号从磁头的工作缝隙溢出，使得以恒定速度通过缝隙的磁带磁化，磁带上留下的磁信号（剩磁）按声音变化规律分布，称为磁迹。

放音是录音的逆过程，是将记录在磁带上的磁迹还原为声音。放音时，磁带以恒定的速度（与录音时磁带移动的速度相同）移过放音磁头的工作

缝隙，由磁带上记录下的磁信号产生变化的磁通，使放音磁头的线圈上感应出电流。这个电流的变化规律与磁带上记录的磁信号变化规律一致，因此也与录音时的音频电流的变化规律完全一致。录音磁带上记录下的磁信号很微弱放音时还原出的音频电流也是很微弱的，必须用放大器放大再送入扬声器，扬声器将音频电流还原为声音。

声音录放过程如图 1-18-40 所示。

图 1-18-40 声音录放过程

磁录音采用直接记录方式，即把输入信号放大后直接记录在磁带上。为了消除磁滞回线的非线性引起的重放信号畸变，改善记录质量，录音时又给输入信号叠加一个信号——偏磁信号。偏磁信号的振幅，要在与被记录信号叠加后，使被记录信号的磁化曲线始终在磁化特性曲线的直线部分上。直接记录原理见图 1-18-41。偏磁有两种方法，一

图 1-18-41

种是直流偏磁，在向录音磁头输入音频电流的同时，加一个稳定的直流电流。这种方式多用于低档录音机中。另一种是交流偏磁，用一个频率比音频信号的最高频率高 5 倍以上的超音频电流与录音信号线性叠加，同时送入录音磁头。交流偏磁录音合成原理见图 1-18-42。它利用了磁滞回线的两个侧边，由于磁滞回线的特殊对称性，使非线性相互抵消了一部分，扩展了线性范围，使得记录的信号最大限度地不失真。

图 1-18-42 交流偏磁录音

录像 (videorecording)

把活动图像及其伴音信号记录下来称为录像。它的实现方法，除光电录像 (电影) 外还有磁带录像。磁带录像是以电视技术为基础，应用电视技术的信号、图像转换方法，利用磁记录技术记录信号。

录像系统是处理图像、记录图像、显示图像的声、光、电综合系统。在录像系统中，图像由摄像机的摄像管转变为图像信号，转换过程中采用电子束扫描的方法，把一幅图像分解成许多行，每行由不同亮度和色彩的小点组成 (参见“电视”)。由于视频信号在相位上要求十分严格，为保证相位的严格同步，要给图像信号加上一些控制同步的信号。完整的电视图像信号还包括：行同步脉冲、行消隐脉冲、场同步脉冲和均衡脉冲。电视图像信号的频带宽近于 0~6 MHz，上限频率一般在 5 MHz~6 MHz 之间。

磁带录像同时录下伴音。伴音信号的记录与录音相同。

磁带录像机是用磁带记录电视图像信号的装置。

录像机上有视频磁头、音频磁头、控制信号磁头、插入信号磁头、时间地址码磁头，以及各种信号的总消磁头。视频信号磁头装在磁鼓边上，录放共用。视频磁头的个数因录像机不同而异，有单磁头、双磁头、四磁头之分。磁鼓转动时，磁头被带动绕着磁鼓转动。视频磁头体积很小，用热压铁氧体或单晶铁氧体制成，磁头工作缝隙宽约 $0.4\ \mu\text{m}\sim 1.0\ \mu\text{m}$ 。由

于磁带磁化时的相对移动方式不同，视频磁头的扫描方式有横向扫描和螺旋扫描两种。横向扫描在垂直于磁带长度的方向上磁化，它的磁迹如图 1-18-43 甲所示；螺旋扫描时磁头相对于磁带做螺旋运动，在磁带上扫出的磁迹有倾斜角，扫描后的磁迹如图 1-18-43 乙所示。

图 1-18-43

录像机上的音频磁头、控制磁头、消磁头固定在磁鼓两侧，如图 1-18-44 所示。

图 1-18-44

录像磁带上不仅记录视频信号，还记录音频信号。视频信号的磁迹与音频信号磁迹的走向不同。图 1-18-45 示出了 1/2 英寸盒式录像带上的各种磁迹分布。

图 1-18-45

视频信号的上限频率很高。这要求记录磁头的工作缝隙很窄或磁带相对于磁头运动的速度很大。由于工艺原因，视频磁头工作缝隙不能太窄，一般在 $1\ \mu\text{m}$ 以下，较音频磁头窄几倍，这要求大大提高磁带相对磁头的运动速度。录像机工作时，视频磁头随着磁鼓高速转动，磁带在磁鼓外围作缓慢移动，这样就提高了磁头与磁带的相对速度，使录放的上限频率达到了记录图像信号的要求。同其他磁记录的重放特性一样，磁带录像重放电压也具有 $6\ \text{dB}/\text{倍频程}$ 的上升特性。视频信号的频带宽度高达 $0\sim 6\ \text{MHz}$ ，直接记录这样宽频带的信号，会使低频端与高频端的输出电压相差 $100\ \text{dB}$ 以上。因此，图像信号的记录方式采用调制频率的方式来压缩图像的相对带宽。受录放频率范围的限制，录像采用低调制度。一般把频带调到 6 个倍频程左右。

录像时，摄像机把图像的光信号变成电信号。经编码器后形成全电视信号送入录像机。经过录像机的记录信号电路将信号调制后送入磁头，再由磁头在录像带上把信号记录下来。重放时，在重放信号电路中，不但要进行重放特性校正，还要对调频信号进行解调，还原为全电视信号，才能送入监视器中显示出图像。电视信号的录放过程如图 1-18-46 所示。

图 1-18-46

主要参考资料

1. 中国大百科全书出版社编辑部。中国大百科全书，物理学。第 1 版。北京：中国大百科全书出版社，1987。
2. 赵凯华，陈熙谋。电磁学。第 2 版。北京：高等教育出版社，1985。
3. 科学出版社名词室。物理学词典。第 1 版。北京：科学出版社，1988。
4. [美] P. 劳兰，D.R. 考森。电磁场与电磁波。第 1 版。陈成钧译。北京：人民教育出版社，1980。
5. 梁绍荣等。普通物理学。第 1 版。北京：高等教育出版社，1988。

6. 实用电工技术问答 2500 题编写组。实用电工技术问答 2500 题。第 1 版。呼和浩特：内蒙古人民出版社，1988。
7. 徐建铭。加速器原理。第 1 版。北京：科学出版社，1974。
8. 梁百先等。电磁学教程。第 2 版。北京：高等教育出版社，1984。
9. 上海市普陀区教师红专学院。电光源。第 2 版。上海人民出版社，1976。
10. 栾文波。日光灯镇流器基础知识。第 2 版。天津市科学技术出版社，1982。
11. 上海无线电八厂，哈尔滨工业大学。继电器及其应用。第 1 版。上海科学技术出版社，1978。
12. 刘景铭。磁记录原理与应用。第 1 版。北京。中国农业机械出版社，1983。
13. 林正豹等。录像。第 1 版。北京：科学出版社。
14. 孙克，罗河烈。磁记录介质。第 1 版。北京：人民教育出版社，1989。
15. 肖和祥等。录音机的原理及使用常识。第 1 版。北京。科学普及出版社，1983。
16. 电子工业部电声专业情报网。磁带录音机。第 1 版。上海：上海科学技术出版社，1983。
17. 梁雄健等。现代录像技术。第 1 版。北京：机械工业出版社，1985。
18. 西安电炉研究所。电炉。第 1 版。北京：机械工业出版社，1974。
19. 电机工程手册编委会。电机工程手册，第 2 卷。第 1 版。北京：机械工业出版社，1982。
20. 章守华。合金钢。第 1 版。北京：冶金工业出版社，1981。
21. 复旦大学《物理学》编写组。物理学（中册）。第 2 版。北京：高等教育出版社，1985。
22. 严济慈。电磁学第 1 版。北京：高等教育出版社，1989。

十九、交变电流

交变电流 (alternating current)

大小和方向都随时间作周期性变化，而且在一个周期内平均值为零的电流。交变电流常简称为交流电或交流。交流电的波形可以多种多样，图 1-19-1 只是几个例子。但是现代电力网中的都是正弦交流电(正弦电流)，即按正弦规律变化的交变电流。如果没有特殊说明，一般说到交流电就是指正弦交流电。

图 1-19-1

(1) 交流电的产生和应用

交流电的来源大致有两类：一类是由机械振动或其他非电信号转换为电振荡，如传声器将声音变为电振荡，压电晶体把机械振动变为电振荡；另一类是交流发电机或电子振荡器。电力网中所用的交流电，是利用了电磁感应的原理，由在磁场中匀速转动的线圈产生的，即由交流发电机产生。提高交流发电机的转速可以提高交流电的频率，但由于受机械结构强度的限制，转速不能太高，因此频率也就不能很高，一般限于 10 000 Hz 以下。要获得更高频率的交流电，可以采用电子振荡器。广播电台、高频感应加热、声呐等装置上所需要的更高频率的交流电就是由电子振荡器产生的。

在法拉第 1831 年发现电磁感应现象后第二年，第一台最简单的交流发电机就已问世，然而交流电开始广泛应用是 19 世纪 80 年代以后，那时相继发明了变压器、三相制、旋转磁场和异步电动机。1907 年三极电子管的发明，为产生更高频率的交流电及其在无线电方面的应用提供了条件。

交流电按频率划分名称、产生方法及用途示意表

注：本表只是根据一般习惯所作大体上的划分，并非准确定义和严格界限

目前，在动力方面，绝大部分电力网是交流的，这是因为：交流电可以方便地变换电压；在远距离输电时，可通过升高电压减少线路损耗，而使用时，又可以降为低压，既有利于安全，又能降低对设备的绝缘要求；此外，交流电动机与直流电动机比较，具有结构简单、造价低廉、维护简便等优点。

(2) 描述交流电的物理量：

周期 交流电完成一次完整的变化所需的时间，称为交流电的周期，用符号 T 表示，单位是秒。我国电网交流电的周期为 0.02s。

频率 交流电每秒钟周期性变化的次数叫频率，用符号 f 表示，单位是赫兹。我国电网交流电的频率是 50 Hz。频率与周期互为倒数，

$$\text{即 } f = \frac{1}{T}, T = \frac{1}{f}.$$

角频率 交流电 $i = I_m \sin \omega t$ 变化一周就相当于角度 (ωt) 变化 2π rad。交流电在单位时间内变化的角度 ω ，称为交流电的角频率，单位是弧度每秒。角频率是频率的 2π 倍，即 $\omega = 2\pi f$ 。

相角、初相角、相差 正弦交流量，如图 1-19-2 甲所示，以角速

度（角频率） 从中性面开始匀速转动的线圈产生的正弦交变电动势 $e = E_m \sin \omega t$ ，其中正弦函数的角度（ ωt ）确定 e 在时刻 t 的值，被称为相角，它表示时刻 t 线圈平面与中性面的相对位置。

图 1-19-2

正弦交流量数学表达式中正弦函数的角度，称为相角或相位，常简称为相。

如果计时开始时（ $t=0$ ）线圈平面不与中性面重合，而成 ϕ 角（图 1-19-2 乙），交变电动势的数学表达式就是 $e = E_m \sin(\omega t + \phi)$ ，相角是（ $\omega t + \phi$ ），计时开始时的相角 ϕ 叫初相角。

正弦交流量在计时开始时的相角，称为初相角或初相。

两个初相角不同而频率相同的正弦交流量，例如图 1-19-3 甲所示两个线圈产生的两个正弦交变电动势 $e_1 = E_{m1} \sin(\omega t + \phi_1)$ 和 $e_2 = E_{m2} \sin(\omega t + \phi_2)$ ，它们的相角之差 $\phi = (\omega t + \phi_1) - (\omega t + \phi_2) = \phi_1 - \phi_2$ ，叫做它们的相角差，表示两个线圈的相对位置。

图 1-19-3

两个频率相同的正弦交流量的初相角之差，称为相角差或相位差，常简称相差。

在图 1-19-3 乙中， e_1 较 e_2 先达到最大值（或零值），我们说 e_1 超前 e_2 一个（ $= \phi_1 - \phi_2$ ）角，或者 e_2 滞后于 e_1 一个 ϕ 角。

瞬时值 交变电动势、电压、电流的值都随时间作周期性变化，它们在某一时刻的数值，称为它们在该时刻的瞬时值。

最大值 交变电动势、电压、电流在一周期中出现的最大瞬时值，称为它们的最大值或峰值，也常称为它们的振幅或幅值。

平均值 交变电动势、电压、电流在半周期内所有瞬时值的平均数。正弦交流电的平均值等于最大值的 $\frac{2}{\pi}$ 或 0.637 倍，例如 $e = E_m \sin \omega t$ 的平均值

$$\begin{aligned} E_a &= \frac{2}{T} \int_0^{\frac{T}{2}} E_m \sin \omega t dt \\ &= \frac{2}{\omega T} \int_0^{\pi} E_m \sin \omega t s(\omega t) = \frac{2}{\pi} E_m \end{aligned}$$

有效值 交变电流通过电阻器 R ，经过一个周期时间所发出的热量，与某直流电 I 通过同一电阻器、经过同等时间所发出的热量相等，则此直流电 I 就是该交流电 i 的有效值。因此，有下列等式关系：

$$RI^2 T = \int_0^T Ri^2 dt,$$

所以
$$I = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T i^2 dt} .$$

在正弦交流电 $i = I_m \sin \omega t$ 的情况下

$$I = I_m \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T \sin^2 \omega t dt} = \frac{I_m}{\sqrt{2}}$$

$$= 0.707 I_m$$

同理可得正弦交变电动势和电压的有效值与最大值的关系：

$$E = \frac{E_m}{\sqrt{2}}, U = \frac{U_m}{\sqrt{2}}。$$

交流电的旋转矢量表示法 (rotating vector representation of alternating current)

绕原点以角速度 ω 逆时针匀速旋转的矢量 A 在 y 轴上的投影 $y = \overline{OA} \sin(\omega t + \phi)$ 是正弦函数 (图 1-19-4)。因此, 正弦交流电可以利用一个绕原点匀速旋转的矢量来表示, 这个矢量的大小等于交流电的最大值, $t=0$ 时与 x 轴的夹角等于交流电的初相, 角速度等于交流电的角频率。交流电的这种表示方法叫旋转矢量表示法。

图 1-19-4 正弦量的旋转矢量表示法

用旋转矢量表示交流电的好处是：可以用简单的矢量加减代替比较繁复的正弦函数加减。例如, 两个正弦交变电动势 $e_1 = E_{1m} \sin(\omega t + \phi_1)$ 和 $e_2 = E_{2m} \sin(\omega t + \phi_2)$ 之和, 可以从表示它们的旋转矢量 E_{1m} 、 E_{2m} 求出 (图 1-19-5)：合成电动势的最大值 E_m , 等于

图 1-19-5

以 E_{1m} 与 E_{2m} 为邻边的平行四边形的对角线, 初相可由下式算出：

$$\tan \phi = \frac{E_{1m} \sin \phi_1 + E_{2m} \sin \phi_2}{E_{1m} \cos \phi_1 + E_{2m} \cos \phi_2}。$$

应该注意：电动势、电压、电流都不是矢量。这里的表示它们的旋转矢量, 只不过是个表示随时间作正弦变化的物理量符号, 不同于力、电场强度等真正有大小、方向的空间矢量。

交流电的复数表示法 (complex number representation of alternating current)

正弦量可以用旋转矢量表示, 而矢量可以用复数表示 (图 1-19-6)。用复数表示正弦交流电的方法, 就是交流电的复数表示法。一个代替正弦量的复数, 常称为相量。因此, 复数表示法常称为相量表示法。

图 1-19-1 矢量和复数

(1) 复数 复数包括实数和虚数两部分。一个复数可以写成三种表达形式, 在字母上加一黑点表示复数, 则

$$\dot{A} = a + jb = A (\cos \phi + j \sin \phi) = A e^{j\phi}。$$

$a + jb$ 为代数形式, $A (\cos \phi + j \sin \phi)$ 为三角函数形式, $A e^{j\phi}$ 为指数形

式。在电工计算中还常用 $\dot{A} = A \angle \phi$ 表示复数。这些表示式中, A 是复数

\dot{A} 的模, ϕ 是 \dot{A} 的辐角。

复数运算的基本规律如下：

两复数相加（减）时，它们的实数和虚数部分分别相加（减），其结果组成一新的复数，如 $(a + jb) + (c + jd) = (a + c) + j(b + d)$ 。复数相加（减）时写成代数式最简便。

两复数相等，则它们的实数部分与虚数部分分别相等。

两复数相乘（除）时，其乘积（商）也是一复数。复数相乘除时，最好写成指数形式。如

$$\begin{aligned}\dot{A}_1 &= A_1 e^{j\phi}, \dot{A}_2 = A_2 e^{j\phi_2}, \\ \dot{A} &= \dot{A}_1 \dot{A}_2 = A_1 A_2 e^{j(\phi_1 + \phi_2)}, \\ \dot{A} &= \frac{\dot{A}_1}{\dot{A}_2} = \frac{A_1}{A_2} e^{j(\phi_1 - \phi_2)}\end{aligned}$$

即乘积的模为两复数模的乘积，乘积的辐角为两复数辐角之和；商的模为两复数模的商，商的辐角为两复数辐角之差。

以模等于 1 的复数，即 $e^{j\phi}$ 乘另一复数，相当于被乘的复数在复平面上旋转了一个角度 ϕ ，而模不改变；特别是以 $e^{\pm j\frac{\pi}{2}}$ 乘一复数，等于被乘的复数旋转 $\pm 90^\circ$ （图 1-19-7）。

图 1-19-7

复数的微分、积分结果仍为一复数。如果 $i = I_m e^{j\omega t}$ ，则

$$\frac{di}{dt} = j\omega i, \int i dt = \frac{1}{j\omega} i$$

可见，用复数表示时，可以用乘除运算代替微分、积分运算。

(2) 用复数表示交流电设 I_m 、 I 分别为正弦交流电的幅值和有效值， ϕ 为交流电的初相，则定义交流电的复数幅值（幅值相量）和复数有效值（有效值相量）分别为

$$\dot{I}_m = I_m e^{j\phi}, \dot{I} = I e^{j\phi}$$

交流电的瞬时值 $i = I_m \sin(\omega t + \phi)$ 用复数表示则为

$$\dot{i} = I_m e^{j(\omega t + \phi)} = I_m e^{j\omega t} e^{j\phi} = \dot{I}_m e^{j\omega t},$$

用有效值表示则为 $\dot{i} = \sqrt{2} \dot{I} e^{j\omega t}$ 。

同理 $\dot{e} = \dot{E}_m e^{j\omega t} = \sqrt{2} \dot{E} e^{j\omega t}$,

$$\dot{u} = \dot{U}_m e^{j\omega t} = \sqrt{2} \dot{U} e^{j\omega t}.$$

上面各式中的 $e^{j\omega t}$ 称为旋转因子，表示与它相乘的复数在复平面上以角速度 ω 旋转（图 1-19-8）。在一定的情况下，时常可以不考虑这个因子，而只用复数幅值或复数有效值表示正弦量，作矢量图时也只用复数的模的长度及相应的辐角来表示正弦量。

图 1-19-8

由于复数运算与代数运算相同，所以，采用复数表示正弦交流电以后，

加、减、乘、除、微分、积分等运算，都比用三角函数或矢量表示时简便。特别是复数可以分别用乘、除运算代替微分、积分运算，使运算大大简化

交流电路的功率 (power in alternating current circuit)

(1) 瞬时功率

交流电路中任一瞬间的功率称为瞬时功率，它等于电压和电流的瞬时值的乘积，是随时间而变的。对于正弦交流电

$$i = \sqrt{2}I \sin \omega t, u = \sqrt{2}U \sin(\omega t + \phi), \text{ 瞬时功率}$$

$$p = ui = 2UI \sin \omega t \sin(\omega t + \phi) \\ = UI \cos \phi - UI \cos(2\omega t + \phi). \quad (1)$$

可见，瞬时功率包含两个部分：第一部分为 $UI \cos \phi$ ，是不随时间变化的恒量，另一部分为 $-UI \cos(2\omega t + \phi)$ ，是以两倍于电源角频率随时间作正弦变化的分量（参看图 1-19-9）。

图 1-19-9

(2) 有功功率、平均功率

交流电路的瞬时功率在一个周期内的平均值，称为平均功率，又称为有功功率，以 $P_{\text{有功}}$ 表示，单位是瓦特。

$$P_{\text{有功}} = \frac{1}{T} \int_0^T p dt = \frac{1}{T} \int_0^T u i dt. \quad (2)$$

在正弦交流电路中，当瞬时功率如(1)式所示时，

$$P_{\text{有功}} = \frac{1}{T} \int_0^T [UI \cos \phi - UI \cos(2\omega t + \phi)] dt \\ = UI \cos \phi$$

它不同于直流功率，它等于 U 、 I 的乘积再乘以 \dot{U} 、 \dot{I} 相位差的余弦 $\cos \phi$ 。

(3) 视在功率

式(3)中的 UI 乘积虽然也有功率的量纲，但是它不是电路实际消耗的功率，所以称为视在功率，以 S 表示，单位为伏安。

$$S = UI. \quad (4)$$

任何电机或电器都设计在一定的电压有效值下与一定的电流有效值内运行的，分别称为额定电压与额定电流，因而视在功率 $S = UI$ 有确定的值，这个值也常被称为该电机或电器的容量

(4) 功率因数

式(3)中的 $\cos \phi$ 称为功率因数。功率因数等于有功功率与视在功率的比值，即

$$\cos \phi = \frac{P_{\text{有功}}}{S} = \frac{P_{\text{有功}}}{UI}$$

$\cos \phi$ 的 ϕ 角称为功率因数角，它也是电流滞后于电压的相角，也就是阻抗角。虽然 ϕ 的正负并不影响 $\cos \phi$ 的值，但说明了电路阻抗的性质是容性还是感性。所以功率因数常需注明滞后 ($\phi > 0$) 或超前 ($\phi < 0$)。

(5) 无功功率

以复数表示视在功率时， $\dot{S} = S \cos \phi + j S \sin \phi = UI \cos \phi + j UI \sin \phi$ ，其

中实数部分 $UI\cos\phi$ 即为有功功率，虚数部分 $UI\sin\phi$ 称为无功功率，用 $P_{\text{无功}}$ 表示，单位是乏 (var)。

$$P_{\text{无功}} = UI\sin\phi \quad (6)$$

在交流电路中，除了从电源吸收一部分能量成为输出的有功功率外，还有一部分能量，由于电压和电流有相差（电路为电感性或电容性），在一周期的一部分时间内由电源输送给电路，另一部分时间内电路又将它全部送回电源。这部分在电源、电路间来回交换的能量对外不做功。无功功率就是这部分能量交换率的最大值。

(6) 功率三角形

在正弦交流电路中，视在功率 S 、有功功率 $P_{\text{有功}}$ 、无功功率 $P_{\text{无功}}$ 符合下面的关系：

$$S^2 = P_{\text{有功}}^2 + P_{\text{无功}}^2 \quad (7)$$

S 、 $P_{\text{有功}}$ 、 $P_{\text{无功}}$ 这三种功率可以构成一个直角三角形（图 1-19-10），称为功率三角形。 S 与 $P_{\text{有功}}$ 的夹角就是功率因数角 ϕ ，并且

$$\tan\phi = \frac{P_{\text{无功}}}{P_{\text{有功}}}$$

图 1-19-10 功率三角形

品质因数 (quality factor)

亦称 Q 值或优值，常见的定义有：

(1) 一个电抗元件（线圈、电容器）的品质因数定义为它在电路中的无功功率同有功功率的比值，用 Q 表示，

$$Q = \frac{P_{\text{无功}}}{P_{\text{有功}}} \quad (1)$$

用 R 表示电抗元件的有功电阻，用 X 表示电抗元件的电抗，由于 $P_{\text{有功}} = I^2R$ ， $P_{\text{无功}} = I^2X$ ，所以 $Q = \frac{X}{R}$ 。对于线圈， $X = X_L = \omega L$ ，对于电

容器， $X = X_C = \frac{1}{\omega C}$ ，所以它们的品质因数 Q_L 、 Q_C 分别为

$$Q_L = \frac{\omega L}{R}, Q_C = \frac{1}{\omega CR} \quad (2)$$

电抗元件在无线电技术中的重要应用之一是组成谐振电路，起储能能量的作用，在这种情况下，希望各种能量损耗（欧姆损耗及介质损耗）越小越好，也就是希望它的有功功率小。它的 Q 值越高，损耗越小。从(2)式可知，电抗元件的有功电阻越小， Q 值越高。(2) 一个谐振电路的品质因数定义为电路中储存的能量与每个周期内消耗能量之比的 2 倍，即

$$Q = 2\pi \frac{W_S}{W_R} \quad (3)$$

式中 W_S 为谐振状态下稳定地储存在电路中的电、磁能， W_R 为一个周期里电路的有功电阻消耗的能量。 Q 值越高，意味着相对于储存的能量来说所需付出的能量消耗越少，也就是谐振电路储能的效率越高。由于

$$W_S = LI^2 \left(\text{或} \frac{I^2}{\omega_0^2 C} \right), W_R = RI^2 T,$$

$$T = \frac{1}{f_0}$$

所以从(3)式可得谐振电路的品质因数

$$Q_r = \frac{2\pi f_0 L}{R} = \frac{\omega_0 L}{R} = \frac{1}{\omega_0 CR} \quad (4)$$

式中 f_0 是谐振频率, ω_0 是谐振角频率。(4)式表明谐振电路的电阻越小, 它的品质因数越高。

在线圈、电容器组成的串联谐振电路中, 线圈、电容器、谐振电路的品质因数 Q_L 、 Q_C 、 Q_r 存在下述关系:

$$\frac{1}{Q_r} = \frac{1}{Q_L} + \frac{1}{Q_C} \quad (5)$$

(3)通常规定, 在谐振电路中, 其功率为最大功率的一半(即电流 I 为最大电流 I_m 的 $\frac{1}{\sqrt{2}} = 0.707$ 倍)时的频率为半功率点。图1-19-11表

示出了上半功率点 f_2 和下半功率点 f_1 。上半功率点与下半功率点之差, 称为通频带或通频带宽度。在图1-19-11中, 通频带宽度为 $\Delta f = f_2 - f_1$, 在此频率范围内, I 的数值都超过 $70.7\% I_m$ 。

图 1-19-11

在无线电技术中, 谐振电路的品质因数定义为该电路的谐振频率(f_0)与通频带宽度($\Delta f = f_2 - f_1$)的比值,

$$Q = \frac{f_0}{\Delta f} = \frac{f_0}{f_2 - f_1} \quad (6)$$

Q 值越高, 谐振曲线越尖锐(图1-19-12), 电路的频率选择性越强。可以证明(3)式与(6)

$$\text{即} 2\pi \frac{W_S}{W_R} = \frac{f_0}{f_2 - f_1}$$

图 1-19-12

电阻元件 (resistance element)

具有消耗电能并将电能转化为热能性质的元件。理想的电阻器(即只有电阻, 没有电感和电容的电阻器)就是电阻元件。实际的电阻器、电热器, 它们的电感、电容很小, 可以忽略时, 也是电阻元件。电阻元件的阻值不随温度、电流等而改变, 保持恒定的, 这样的电阻元件称为线性电阻元件, 否则称为非线性电阻元件。线性电阻元件服从欧姆定律

$$u = Ri$$

电阻元件通过的电流和电阻元件上的电压同相。

电阻元件在任意时刻的瞬时功率

$$p = ui = i^2 R = \frac{u^2}{R} .$$

上式表明无论电阻元件中电流与电压如何变化，瞬时功率永远为正，即电阻元件总是消耗电能，所以电阻元件常常称为耗能元件。

电感元件 (inductance element)

具有储存磁场能量性质的元件。电感元件的特性用电感 L 表示。理想的空心线圈（其电阻、电容为零）是电感元件。通常的空心线圈可近似视为电感元件。电感 L 保持恒定的电感元件，称为线性电感元件，否则称为非线性电感元件（有铁芯的线圈属于非线性电感元件）。对于线性电感元件，其两端电压与电流对时间的变化率成正比，即

$$u = L \frac{di}{dt}$$

电感元件上电压的相位超前于电流 $\frac{\pi}{2}$ 。电流通过电感元件建立磁场。

某一时刻电感元件从电源吸收的瞬时功率

$$p = ui = Li \frac{di}{dt} .$$

从 $i=0$ 时刻开始计时，在 $0 \sim t$ 这段时间内，电感元件吸收的电能（转化为磁场能）为

$$\begin{aligned} W_L &= \int_0^t p dt = \int_0^t ui dt = L \int_0^{i_L} i di \\ &= \frac{1}{2} Li_L^2 . \end{aligned}$$

式中 i_L 为 t 时刻的电流值。上式表明当 $|i_L|$ 增大时，电感元件中的磁场能量增加，当 $|i_L|$ 减小时，电感元件中的磁场能量减少，表示磁场在逐步消失，磁场能又转化为电能返回电源。由于电感元件具有储存磁场能的性质，所以也称它为储能元件。

电容元件 (capacitance element)

具有储存电场能量性质的元件。电容元件的特性用电容 C 表示。理想的电容器（其电阻、电感为零）是电容元件。实际电容器通常可视为电容元件。电容 C 保持恒定的电容元件，称为线性电容元件，否则为非线性电容元件，如果作用于线性电容元件上的电压是变化的（增大或减小），则电荷也将是变化的，在电容元件中就出现电流。如果选定电流的正方向与加于电容元件上的电压的正方向一致，在这种条件下，电流

$$i = \frac{dq}{dt} = C \frac{du}{dt} .$$

电容元件上电压的相位滞后于电流 $\frac{\pi}{2}$

电容元件充电建立电场时，电容元件从电源吸收电能，并以电场能的形式储存在自己的电场中。某一时刻电容元件从电源吸收的瞬时功率

$$p = ui = Cu \frac{du}{dt} .$$

从 $u=0$ 时刻开始计时, 在 $0 \sim t$ 这段时间内, 电容元件吸收的电能(储存的电场能) 为

$$\begin{aligned}W_C &= \int_0^t p dt = \int_0^t u i dt = C \int_0^t u du \\ &= \frac{1}{2} C u_L^2 .\end{aligned}$$

式中 u_L 为时刻 t 时的电压值。

电容元件也是储能元件。

容抗 (capacitive reactance)

在具有电容的电路里, 由于电容而对交流电所起的阻碍作用。它在数值上等于电容 C 乘以交流频率 f 的 2 倍的倒数, 即容抗

$$X_C = \frac{1}{2\pi f C} = \frac{1}{\omega C} .$$

式中 ω 为角频率。容抗的单位是欧姆。频率越高、电容越大, 容抗越小。在纯电容电路中容抗 X_C 等于电压有效值 U 与电流有效值 I 的比值,

$$X_C = \frac{U}{I} .$$

感抗 (inductive reactance)

在具有电感的电路里, 由于电感而对交流电所起的阻碍作用。它在数值上等于电感 L 与交流频率 f 乘积的 2 倍, 即感抗 $X_L = 2\pi f L = \omega L$ 。式中

ω 为角频率。感抗的单位是欧姆。频率越高、电感越大, 感抗越大。在纯电感电路中感抗 X_L 等于电压有效值 U 与电流有效值 I 的比值。

$$X_L = \frac{U}{I} .$$

电抗 (reactance)

在具有电感与电容或仅有电感或电容的电路里, 由于电感、电容对交流电所起的阻碍作用, 单位是欧姆。感抗、容抗都属于电抗。电抗与电路的能量消耗无关, 电路在四分之一周期的时间内从电源吸收能量, 使电感元件产生电流建立磁场, 使电容元件充电建立电场, 即把从电源吸收的电能转化为磁场能、电场能储存起来。在下一个四分之一周期的时间内, 电路又把全部储存的能量返还给电源。电路消耗的能量决定于有效电阻。

由于电压在电感元件上和电容元件上有 180° 的相位差, 在矢量图上方向相反, 所以电抗 X 为感抗 X_L 与容抗 X_C 的代数和, 即

$$X = X_L - X_C = \omega L - \frac{1}{\omega C} .$$

有效电阻 (effective resistance)

交流电路中所消耗的电功率与电流有效值平方的比值。有效电阻又名有功电阻, 用欧姆作单位。有效电阻比直流电阻(即直流电时的电阻) 大, 这是由于除了直流电阻消耗电能外, 涡流损耗、铁芯损耗、介质损耗、趋肤效应等都消耗电能, 而表现为有效电阻。

阻抗 (impedance)

具有电阻、电感、电容的电路对交流电的阻碍作用。阻抗 Z 等于电路两端电压的有效值 U 与电路中电流的有效值 I 的比值，单位是欧姆。

$$Z = \frac{U}{I} .$$

如果电压、电流都用复数表示，它们的比值也是复数，称为复阻抗，

$$\dot{Z} = \frac{\dot{U}}{\dot{I}} = Z e^{j\phi} = R + j\left(\omega L - \frac{1}{\omega C}\right) .$$

式中 ϕ 是电压与电流的相位差。复阻抗的实数部分是电阻，虚数部分是电

抗 ($X = X_L - X_C = \omega L - \frac{1}{\omega C}$)

阻抗 Z 、电阻 R 、电抗 X 符合下面的关系：

$$Z^2 = R^2 + X^2 .$$

Z 、 R 、 X 三者可以构成一个直角三角形 (图 1-19-13)，称为阻抗三角形。利用阻抗三角形，在知道 R 、 L 、 C 、 ω 的情况下，很容易求出阻抗 Z

$$Z = \sqrt{R^2 + \left(\omega L - \frac{1}{\omega C}\right)^2} .$$

图 1-19-13

电纳 (susceptance)

在研究并联交流电路时，可应用交流电导与电纳进行计算。交流电导 (G) 是电阻除以阻抗平方，即 $G=R/Z^2$ 。电纳 (B) 是电抗除以阻抗平方，即 $B=X/Z^2$ 。它们的单位都是西门子。应用它们会使交流电的计算简便。

电纳可以分为电容性电纳 ($B_C = \frac{1}{\omega C}$) 和电感性电纳 ($B_L = \frac{1}{\omega L}$) 两类，

与电抗的容抗和感抗相对应。

导纳 (admittance)

交流电导与电纳的矢量和，叫导纳，表示交流电路对交流电的传导和容纳作用。导纳的大小等于电路中交流电流的有效值与电路两端电压的有效值的比值，即等于阻抗的倒数，一般用 Y 表示，单位是西门子，

$$Y = \frac{I}{U} = \frac{1}{Z} = \sqrt{G^2 + B^2} \\ = \frac{1}{\sqrt{R^2 + \left(\omega L - \frac{1}{\omega C}\right)^2}}$$

电路两端的电压 U 乘电导 G ，就得电流的有功分量

$I_{\text{有功}} = UG$ 。(是与 U 同相的分量)

电路两端的电压 U 乘电纳 B ，就得电流的无功分量

$I_{\text{无功}} = UB$ 。(是与 I 与 U 垂直的分量)

电压 U 乘导纳 Y ，就得电流

$$I = UY .$$

I 、 $I_{\text{有功}}$ 、 $I_{\text{无功}}$ 三者成一直角三角形，叫电流三角形（图 1-19-14）。

图 1-19-14 电流三角形

电压 U 乘有功电流 $I_{\text{有功}}$ ，得有功功率

$$P_{\text{有功}} = UI_{\text{有功}} = U^2 G$$

电压 U 乘无功电流 $I_{\text{无功}}$ ，得无功功率

$$P_{\text{无功}} = UI_{\text{无功}} = U^2 B,$$

引入电导、电纳、导纳使交流电路的计算更方便。

串联交流电路 (seriesacircuit)

串联交流电路中，通过各元件的电流 i 相同；电路两端总电压 u 的瞬时值，等于各元件上分电压的瞬时值的代数和；总电压 u 的有效值，等于各元件上分电压的有效值的矢量和。（下文中采用有效值）

(1) RC 串联

电路和矢量图如图 1-19-15：电阻 R 上

图 1-19-15 RC 串联

的电压 $U_R = IR$ 与电流 I 同相，电容 C 上的电压 $U_C = \frac{I}{\omega C}$ 电流 I 滞后 90° ，电路两端总电压 U 等于 U_R 、 U_C 的矢量和， $U = U_R + U_C$ 。

$$\begin{aligned} U &= \sqrt{U_R^2 + U_C^2} = \sqrt{(IR)^2 + \left(\frac{I}{\omega C}\right)^2} \\ &= I \sqrt{R^2 + \left(\frac{1}{\omega C}\right)^2}. \end{aligned}$$

I 与 U 的相位差

$$\phi = -\tan^{-1} \frac{U_C}{U_R} = -\tan^{-1} \frac{1}{\omega CR}.$$

“-”号表示 I 超前于 U 。

RC 串联电路的阻抗

$$Z = \frac{U}{I} = \sqrt{R^2 + \left(\frac{1}{\omega C}\right)^2}.$$

(2) RL 串联

图 1-19-16 RL 串联

电路和矢量图如图 1-19-16：电阻 R 上的电压 $U_R = IR$ 与电流 I 同相，电感 L 上的电压 $U_L = I\omega L$ 比电流 I 超前 90° ，电路两端总电压 $U = U_R + U_L$ ，

$$\begin{aligned} U &= \sqrt{U_R^2 + U_L^2} \\ &= I \sqrt{R^2 + (\omega L)^2}. \end{aligned}$$

I 与 U 的相位差

$$\phi = \tan^{-1} \frac{U_L}{U_R} = \tan^{-1} \frac{\omega L}{R} .$$

ϕ 为正值表示 I 落后于 U 。

阻抗

$$Z = \frac{U}{I} = \sqrt{R^2 + (\omega L)^2} .$$

(3) RLC 串联

电路如图 1-19-17 甲。矢量图有图 1-19-17 的乙、丙、丁三种情况； $U_L=IR$ 与电流 I 同相， $U_R=I L$ 比 I 超前 90° ， U_C 比 I 滞后 90° ；

因 L 大于、等于、小于 $\frac{1}{\omega C}$ ，而有图乙、丙、丁

图 1-19-14 RLC 串联
的矢量图。电路两端的电压 $U=U_R+U_L+U_C$ 。

$$\begin{aligned} U &= \sqrt{U_R^2 + (U_L - U_C)^2} \\ &= I \sqrt{R^2 + \left(\omega L - \frac{1}{\omega C}\right)^2} . \end{aligned}$$

I 与 U 的相位差

$$\phi = \tan^{-1} \frac{U_L - U_C}{U_R} = \tan^{-1} \frac{\omega L - \frac{1}{\omega C}}{R} .$$

式中 $X_L = \omega L$ 是感抗， $\frac{1}{\omega C}$ 是容抗。 $X_L > X_C$ 时 ϕ 为正值， I 滞后于 U ，电路为电感性（图 1-19-17 乙）； $X_L = X_C$ 时 ϕ 为零， I 与 U 同相，电路为电阻性（图 1-19-17 丙）； $X_L < X_C$ 时 ϕ 为负值， I 超前于 U ，电路为电容性（图 1-19-17 丁）。

阻抗

$$\begin{aligned} Z &= \frac{U}{I} = \sqrt{R^2 + X^2} \\ &= \sqrt{R^2 + (X_L - X_C)^2} \\ &= \sqrt{R^2 + \left(\omega L - \frac{1}{\omega C}\right)^2} . \end{aligned}$$

并联交流电路 (parallel circuit)

并联交流电路中，各元件两端的电压 u 是共同的；总电流 i 的瞬时值，等于通过各元件的分电流瞬时值的代数和；总电流 i 的有效值，等于通过各元件的分电流有效值的矢量和。（下文中采用有效值）

(1) RC 并联

电路和矢量图如图 1-19-18：电阻 R 通

图 1-19-18 RC 并联

过的电流 $I_R = \frac{U}{R}$ 与电压 U 同相；电容 C 支路通过的电流 $I_C = U \omega C$ 超前于电压 90° ；干路总电流 I 等于 I_R 、 I_C 的矢量和， $I = I_R + I_C$ 。

$$I = \sqrt{I_R^2 + I_C^2} = \sqrt{\left(\frac{U}{R}\right)^2 + (U\omega C)^2}$$

$$= U \sqrt{\frac{1}{R^2} + (\omega C)^2}$$

I 与 U 的相位差

$$\phi = \tan^{-1} \frac{I_C}{I_R} = \tan^{-1} (\omega CR) .$$

“-”号表示 I 超前于 U 。

阻抗

$$Z = \frac{U}{I} = \frac{1}{\sqrt{\frac{1}{R^2} + (\omega C)^2}}$$

(2) RL 并联

电路和矢量图如图 1-19-19： $I_R = \frac{U}{R}$ 与

图 1-19-14 RL 并联

U 同相， $I_L = \frac{U}{\omega L}$ 落后于电压 90° ；干路总电流

$$I = I_R + I_L$$

$$I = \sqrt{I_R^2 + I_L^2} = \sqrt{\left(\frac{U}{R}\right)^2 + \left(\frac{U}{\omega L}\right)^2}$$

$$= U \sqrt{\frac{1}{R^2} + \frac{1}{(\omega L)^2}}$$

I 与 U 的相位差

$$\phi = \tan^{-1} \frac{I_L}{I_R} = \tan^{-1} \frac{R}{\omega L} .$$

I 滞后于 U 。

阻抗 $Z = \frac{U}{I} = \frac{1}{\sqrt{\frac{1}{R^2} + \frac{1}{(\omega L)^2}}} .$

(3) RLC 并联

电路如图 1-19-20 甲。矢量图有图 1-19-20 的乙、丙、丁三种情况：

$I_R = \frac{U}{R}$ 与电压 U

图 1-19-20 RLC 并联

同相; $I_C = U \omega C$ 超前于电压 90° ; $I_L = \frac{U}{\omega L}$ 滞后于电压 90° ; 因 X_L 小于、等于、大于 $\frac{1}{\omega C}$, 而有图乙、丙、丁的矢量图. 干路的总电流 $I = I_R + I_L + I_C$.

$$I = \sqrt{I_R^2 + (I_L - I_C)^2}$$

$$= U \sqrt{\frac{1}{R^2} - \left(\frac{1}{\omega L} - \omega C\right)^2}$$

I 与 U 的相位差

$$\phi = \tan^{-1} \frac{I_L}{I_R} = \tan^{-1} \frac{\frac{1}{\omega L} - \omega C}{\frac{1}{R}}$$

$$= \tan^{-1} \frac{R(1 - \omega^2 LC)}{\omega L}$$

式中 $X_L = \omega L$ 是感抗, $\frac{1}{\omega C} = X_C$ 是容抗. $X_L < X_C$ 时, ϕ 为正值, I 滞后于 U, 电路为电感性(图1-19-20乙); $X_L = X_C$ 时, $\frac{1}{\omega C} = \omega L$, ϕ 等于零, I 与 U 同相, 电路为电阻性(图1-19-20丙); $X_L > X_C$ 时, $\frac{1}{\omega C} < \omega L$, ϕ 为负值, I 超前于 U, 电路为电容性(图1-19-20丁)。

阻抗

$$Z = \frac{U}{I} = \frac{1}{\sqrt{\frac{1}{R^2} + \left(\frac{1}{\omega L} - \omega C\right)^2}}$$

$$= \frac{\omega LR}{\sqrt{R^2(1 - \omega^2 LC)^2 + (\omega L)^2}}$$

谐振 (resonance)

由电容和电感组成的电路中, 在信号源或电源提供的激励电压作用下, 将引起振荡。调节电感值或电容值, 或者调节激励电压的频率, 当电路中的电流与激励电压同相, 电路呈纯电阻性时, 称为谐振。谐振时振荡幅度最大。

(1) 串联谐振

在电阻、电感、电容组成的串联电路中, 出现串联电路两端电压与电流同相的现象, 叫串联谐振。产生串联谐振的条件是感抗与容抗相互补偿, 电路总电抗等于零, 使电路呈纯电阻性, 即

$$X = \omega L - \frac{1}{\omega C} = 0, \omega L = \frac{1}{\omega C}$$

谐振的角频率 ω_0 、频率 f_0 分别为

$$\omega_0 = \frac{1}{\sqrt{LC}}, f_0 = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}}$$

由于 ω_0 、 f_0 只由电路本身的 L 值、C 值决定，所以称 ω_0 为电路的固有谐振角频率，称 f_0 为电路的固有谐振频率，常简称为固有频率。

串联谐振的特点是：电抗 X 等于零，电路呈纯电阻性，电路的阻抗最小，电流最大，在电感上的电压 U_L 与电容上的电压 U_C 大小相等而反相，并且它们的大小都等于电路两端电压 U 的 Q 倍（ Q 为品质因数，往往远大于 1），因而可能比 U 大很多倍。所以，串联谐振也称为电压谐振。

由于串联谐振时电感、电容上的电压可能比外加电压大很多倍，所以收音机调谐回路可利用这一点选择接收某一频率的信号。但是在电力工程上，由于串联谐振会出现高电压以致将电器设备的绝缘击穿，所以要避免串联谐振。

(2) 并联谐振

在电感、电容并联的电路中，出现并联电路两端电压与干路总电流同相的现象，叫并联谐振。实际电感线圈和电容器都有电阻，等效于图 1-19-21 所示的混联电路，其中 X_L

图 1-19-21

和 X_C 是两条支路的电抗部分， R_L 和 R_C 是

两条支路的电阻部分。并联谐振的条件是电路的总电纳等于零，即

$$B = \frac{X_C}{R_C^2 + X_C^2} + \frac{X_L}{R_L^2 + X_L^2} = 0$$

在无线电技术中，通常是 $X_C \gg R_C$ 、 $X_L \gg R_L$ ，电路可简化为 L、C 并联，这时的谐振条件简化为 $X_C + X_L = 0$ ，即表示一条支路的电抗与另一条支路的电抗大小相等、性质相反。因而谐振条件与串联时的谐振条件一样了，即

$$\omega L = \frac{1}{\omega C} .$$

谐振角频率 ω_0 与谐振频率 f_0 分别为

$$\omega_0 = \frac{1}{\sqrt{LC}}, f_0 = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}} .$$

并联谐振的特点是：电纳 B 等于零，电路呈纯电阻性，电路的阻抗最大，干路中的总电流 I 最小，在电感支路中的电流 I_L 与电容支路中的电流 I_C 大小相等而反相，并且它们的大小都等于干路总电流 I 的 Q 倍（ Q 为品质因数，往往远大于 1），因而可能比 I 大很多倍。所以，并联谐振也称为电流谐振。

并联谐振时，由于并联电路两端的电压与干路中的总电流同相，使电路的功率因数达到最大值（ $\cos\phi=1$ ），而且并联谐振不会产生危害电器设备安全的高电压，因此，为提高功率因数提供了有效的办法。

多相制 (polyphase system)

具有几个频率相同而初相角各不相同的交变电动势的电源，称多相电源。多相电源中产生电动势的每一绕组称为一相。采用多相电源供电的系统，称为多相系统或多相制。由多相电源供电的负载，称为多相负载。

如果在多相系统中，各相电动势的振幅都相等，并且相邻两相的相位差都等于 $\frac{2\pi}{n}$ （ n 为相数），称为对称多相系统或对称多相制。实际应用的多相制有两相、三相、六相、十二相等多种。其中三相广泛地应用在发电、输电、配电与用电各领域。两相一般用在控制技术方面。六相和十二相一般用在大功率整流设备上，以减小整流后的纹波。

三相交流电源 (threephase alternating current supply)

由三个频率、振幅都相同而相位互差 120° 的正弦电动势组成的电源，称为三相交流电源。由三相交流电源获得的三个正弦交变电流，称为三相交流或三相交流电。实用的三相交流电源是三相发电机。图 1-19-22 表示出了两极三相发电机的构造。在定子铁芯槽内安装了三个完全相同但空间相隔 120°

图 1-19-22 两极三相发电机示意图

的绕组（线圈）。三相绕组的头尾分别用 A、X、B、Y、C、Z 表示。当转子磁体以角速度 ω 匀速旋转时，它的磁力线依次切割三个绕组，在绕组中就会产生频率、振幅相同，而相位依次互差 120° 的感应电动势 e_A 、 e_B 、 e_C （图 1-19-23）。如果用 E_m 表示感应电动势的最大

图 1-19-23 三相电动势波形图

值， E 表示有效值， ω 表示角频率，从 $e_A=0$ 开始计时，那么这三个感应电动势可以表示为：

$$\begin{aligned} e_A &= E_m \sin \omega t = \sqrt{2}E \sin \omega t \\ e_B &= E_m \sin(\omega t - 120^\circ) \\ &= \sqrt{2}E \sin(\omega t - 120^\circ) \\ e_C &= E_m \sin(\omega t + 120^\circ) \\ &= \sqrt{2}E \sin(\omega t + 120^\circ) . \end{aligned}$$

以复数形式表示，则

$$\begin{aligned} \dot{E}_A &= E e^{j0^\circ} = E, \\ \dot{E}_B &= E e^{-j120^\circ}, \\ \dot{E}_C &= E e^{-j120^\circ} \end{aligned}$$

同单相交流电相比，三相交流电有很多优点。例如，制造三相发电机、变压器都比制造同样容量的单相发电机、变压器省材料，而且构造简单，性能优良；在输送同样功率的情况下，三相输电线比单相输电线可节约有色金属 25%，而且电能损耗较单相输电时少；三相四线制配电很容易得到高低不同的两种电压（线电压和相电压）；三相电能产生旋转磁场，可以驱动结构远比直流电动机简单的感应电动机。因此三相交流电广泛地应用在发电、输电、配电和用电各领域。

星形接法 (star connection)

也称 Y 接法。三相电源和三相负载都可以采用星形接法。电源的星形接法（图 1-19-24）是把电源三个绕组的末端 X、Y、Z 连接在一起，这个连接点 O 叫做中性点或零点，三

图 1-19-24 电源的星形接法 图 1-19-25 负载的星形接法
个绕组的始端 A、B、C 作为连接外电路用。如果负载也作星形接法（图 1-19-25），它的中性点是 O'，则连接两个中性点的导线（图 1-19-26 中的 OO'），称为中性线或零线；接地的中性线，俗称地线。连接在电源和负载之间的三根导线（AA'、BB'、CC'），称为端线；俗称火

图 1-19-26 三相四线制
线。这样连接的总体，称为三相四线制。如果三个负载的阻抗相同（三相平衡负载），中性线中的电流为零，中性线可以省掉，则成为三相三线制。

在三相电路中，电源每个绕组两端的电压，即每根端线与中性线间的电压（图 1-19-27 中的 U_A 、 U_B 、 U_C ），称为相电压。电源绕组中的电流和负载各相中的电流，都称为相电流。两根端线之间的电压（图 1-19-27 中的 U_{AB} 、 U_{BC} 、 U_{CA} ），称为线电压。各端线中的电流（图 1-19-27 中的 I_A 、 I_B 、 I_C ），称为线电流。

图 1-19-27 三相四线制的相电压和线电压
在三相四线制系统中，不论电源或负载，存在下列基本关系：

- (1) 相电流就是线电流。
- (2) 两相间的线电压等于该两相电压的矢量差，即

$$\begin{aligned}\dot{U}_{AB} &= \dot{U}_A - \dot{U}_B, \\ \dot{U}_{BC} &= \dot{U}_B - \dot{U}_C, \\ \dot{U}_{CA} &= \dot{U}_C - \dot{U}_A.\end{aligned}$$

从图 1-19-28 的矢量图中可知：因为

图 1-19-28 星形接法的线电压等于相电压的矢量差

$\dot{U}_A - \dot{U}_B = \dot{U}_A + (-\dot{U}_B)$ ，所以 \dot{U}_{AB} 为 \dot{U}_A 与 $-\dot{U}_B$ 的矢量和，由 \dot{U}_A 末端 M 做 \dot{U}_{AB} 的垂线与 \dot{U}_{AB} 交于 N 点，则 $ON = \frac{1}{2}U_{AB} = U_A \cos 30^\circ = \frac{\sqrt{3}}{2}U_A$ ，即 U_{AB} ，线电压是相电压的 $\sqrt{3}$ 倍。

- (3) 中性线中的电流（ I_N ）等于三个线电流之和

$$\dot{I}_N = \dot{I}_A + \dot{I}_B + \dot{I}_C$$

在三相平衡负载的情况下，由于 I_A 、 I_B 、 I_C 大小相等，相位差互为 120° ，它们的矢量和为零，所以中性线中的电流为零。

- (4) 不论三相负载是否平衡，不论有无中性线，三个相电压之和为零。

$$\dot{U}_{AB} + \dot{U}_{BC} + \dot{U}_{CA} = 0$$

三角形接法 (deltaconnection)

也称 接法。电源的三角形接法 (图 1-19-29), 是把一相绕组的末端与邻相绕组的始端顺次连接起来, 接成一个三角形, 即把 X 与 B 相连、Y 与 C 相连、Z 与 A 相连。构成三

图 1-19-29 电源的三角形接法 图 1-19-30 负载的三角形接法
角形回路, 再从三个连接点 (XB、YC、ZA) 引出三根端线。三相负载的三角形接法与三相电源的三角形接法相同 (图 1-19-30)。采用三角形接法时的供电系统 (图 1-19-31), 也属于三相三线制。

图 1-19-31 三角形接法的线电流和相电流

在三角形接法三相三线制系统中, 存在下述基本关系:

(1) 相电压就是线电压。

(2) 线电流 (即端线中的电流) 等于相邻两个相电流 (即每相绕组或负载中的电流) 的矢量差, 即

$$\dot{I}_A = \dot{I}_{AB'} - \dot{I}_{C'A'}$$

$$\dot{I}_B = \dot{I}_{B'C'} - \dot{I}_{A'B'}$$

$$\dot{I}_C = \dot{I}_{C'A'} - \dot{I}_{B'C'}$$

在三相平衡负载的情况下, 三个相电流的大小相等。从图 1-19-

32 的矢量图中可知: 由于 $\dot{I}_{AB} - \dot{I}_{C'A'} = \dot{I}_{A'B'} + (-\dot{I}_{C'A'})$, 所以 \dot{I}_A 为

$\dot{I}_{A'B'}$ 与 $(-\dot{I}_{C'A'})$ 的矢量和, 由 $\dot{I}_{A'B'}$ 末端 M 做 $\dot{I}_{A'B'}$ 的垂线交于 N 点,

则 $ON = \frac{1}{2} I_A = I_{A'B'} \cos 30^\circ = \frac{\sqrt{3}}{2} I_{A'B'}$, 即 $I_A = \sqrt{3} I_{A'B'}$, 线电流是相电流的

$\sqrt{3}$ 倍。

图 1-19-32 三角形接法的线电流等于相电流的矢量差

三相电路中的功率 (power in threephasecircuit)

一个三相电源发出的总有功功率等于每相电源发出的有功功率之和; 一个三相负载消耗的总有功功率等于每相负载消耗的有功功率之和。不论是星形接法还是三角形接法, 只要三相电路对称, 则三相功率就等于 3 倍的单相功率, 即

$$P_{\text{有功}} = P_{\text{有功}A} + P_{\text{有功}B} + P_{\text{有功}C}$$

$$= U_A I_A \cos \phi_A + U_B I_B \cos \phi_B$$

$$+ U_C I_C \cos \phi_C$$

因为三相对称, 所以

$$P_{\text{有功}} = 3U I \cos \phi$$

式中 $P_{\text{有功}}$ 表示三相有功功率, U_ϕ 表示相电压, I_ϕ 表示相电流。

在对称三相电路中, 如果用线电压 U_L , 线电流 I_L 表示三相功率, 当

星形接法时 $U_L = \sqrt{3}U_\phi$, $I_L = I_\phi$, 三角形接法时 $U_L = U_\phi$, $I_L = \sqrt{3}I_\phi$, 所以, 论是星形接法还是三角形接法, 有功功率都是

$$P_{\text{有功}} = \sqrt{3}U_L I_L \cos \phi。$$

同样道理, 三相电源或三相负载的总无功功率等于各相无功功率之和, 即

$$\begin{aligned} P_{\text{无功}} &= P_{\text{无功A}} + P_{\text{无功B}} + P_{\text{无功C}} \\ &= U_A I_A \sin \phi_A + U_B I_B \sin \phi_B + U_C I_C \sin \phi_C。 \end{aligned}$$

如果是对称三相电路, 则

$$\begin{aligned} P_{\text{无功}} &= 3U I \sin \phi \\ &= \sqrt{3}U_L I_L \sin \phi。 \end{aligned}$$

三相有功功率和无功功率的矢量和, 是三相视在功率,

$$\begin{aligned} S &= \sqrt{P_{\text{有功}}^2 + P_{\text{无功}}^2} \\ &= 3U I。 \\ &= \sqrt{3}U_L I_L。 \end{aligned}$$

如果三相负载不对称 (或者说不平衡), 则应分别计算各相功率, 三相功率等于各相功率之和。

三相三线制 (threephase three-wire system)

不引出中性线的星形接法或三角形接法, 只有三条端线, 称为三相三线制。它只应用在三相平衡负载 (三相对称负载), 如三相电动机、三相电炉等。参见星形接法和三角形接法条目。

三相四线制 (threephase four-wire system)

引出中性线的星形接法, 称为三相四线制。它可以应用在三相平衡负载或不平衡负载。这种供电系统可以同时获得线电压和相电压, 广泛应用于 380 / 220V 低压配电网。参见星形接法条目。

接地和接零 (connect to earth and connect to neutral)

把电气设备的金属外壳及与外壳相连的金属构架用接地装置与大地可靠地连接起来, 以保证人身安全的保护方式, 叫保护接地, 简称接地。把电气设备的金属外壳及与外壳相连的金属构架与中性点接地的电力系统的零线连接起来, 以保护人身安全的保护方式, 叫保护接零 (也叫保护接中线), 简称接零。保护接地一般用在 1000V 以下的中性点不接地的电网与 1000V 以上的电网中。保护接零一般用在 1000V 以下的中性点接地的三相四线制电网中, 目前供照明用的 380 / 220V 中性点接地的三相四线制电网中广泛采用这种保护措施。

在中性点不接地的系统中, 假设电动机的 A 相绕组因绝缘损坏而碰金属外壳, 外壳带电 (参看图 1-19-33), 在没有保护接地的

图 1-19-33 保护接地示意图

情况下, 当人体接触外壳时, 电流经过人体和另外两根火线的对地绝缘电

阻 R_B 、 R_C （如果导线很长，还要考虑导线与大地间的电容）而形成回路。如果另外两根火线对地绝缘不好，流过人体的电流会超过安全限度而发生危险。在有保护接地的情况下，当人体接触带电的外壳时，电流在 A 相碰壳处分为两路，一路经接地装置的电阻 R_d ，一路经人体电阻 R_r ，这两路汇合后再经另外两根火线的对地绝缘电阻 R_B 和 R_C 构成回路。由于 $R_d \ll R_r$ ，所以通过人体的电流很小，这就避免了触电危险。

根据电气安装规程规定，在 1000V 以下中性点接地系统中，用电设备不允许采用保护接地（图 1-19-34）。这是因为当某一相绝缘破损与金属外壳接触时，电流 I_d 便会经过

图 1-19-34 中性点接地系统不允许采用保护接地。大地回到变压器的中性点，而这时流过保险丝的电流很可能小于保险丝的熔断电流，保险丝不断，金属外壳仍与电源相连。金属外壳对地的电压 U_d 等于 I_d 在 R_d 上的电压降，而 $I_d = U_{\text{相}} / (R_0 + R_d)$ ， $U_d = U_{\text{相}} R_d / (R_0 + R_d)$ 。在一般三相四线制系统中， $U_{\text{相}}$ 是 220V， R_0 约 4 Ω ， R_d 通常都超过 4 Ω ，即使 R_d 与 R_0 一样，也按 4 Ω 计，金属外壳的对地电压也为 110V，超过安全电压。

在 1000 伏以下中性点接地系统中，应该采取图 1-19-35 所示的保护接零，一旦某一相绝缘破损与金属外壳接触，就会形成单相短路，电流很大，于是保险丝熔断（或自动开关自动切断电路），电动机脱离电源，从而避免了触电危险。

图 1-19-35 保护接零

许多单相家用电器的电源线接到三脚插头上，三脚插头的粗脚连着家用电器的金属

图 1-19-36 保护接零应接电源中性线

外壳。这种插头要插到单相三孔插座上，插座的粗孔应该用导线与电源的中性线相连。绝不允许在插座内将粗孔与接工作中线的孔相连。因为一旦用电器的工作中线断线（参见图 1-19-36），发生外壳带电时，保险丝不熔断，而会引起触电事故。

在三相四线制中性点接地的 380 / 220V 照明供电系统中，由于普遍采用保护接零，若保护接零的中性线切断，可能造成触电事故，所以一般只在相线上装熔断器，不允许在中性线上装熔断器。但是单相双线照明供电线路，由于接触的大多数是不熟悉电气的人，有时由于修理或延长线路而将相线和中性线接错，所以中性线和相线上都接保险丝（熔断器）。

变压器 (transformer)

利用电磁感应现象改变交流电压、电流或改变阻抗的一种电气装置。一般变压器由硅钢片叠成或铁氧体制成的铁芯和两个或多个线圈（绕组）构成（图 1-19-37）。接电源的或输入电能的线圈叫初级线圈或原线圈，其余的线圈输出电能，叫次级线圈或副线圈。初级线圈一侧的电路叫初级电路或原边，次级线圈一侧的电路叫次级电路或副边。

图 1-19-37

(1)理想变压器的电压变比公式如图 1-19-37,当变压器的初级线圈AB两端加上交变电压 \dot{U}_1 时,便在初级线圈中产生交变电流——初级电流 \dot{I}_1 ,在变压器铁芯中产生交变磁通 $\dot{\Phi}$,从而在次级线圈CD中激起感应电动势 \dot{E}_1 ,同时在初级线圈中激起感应电动势 \dot{E}_2 ,同时在初级线圈中激起感应电动势 \dot{E}_1 ,

$$\dot{E}_1 = -n_1 \frac{d\dot{\Phi}}{dt}, \dot{E}_2 = -n_2 \frac{d\dot{\Phi}}{dt} .$$

n_1 、 n_2 分别为初、次级线圈的匝数。

如果是理想变压器,即没有磁漏,通过两线圈每匝的磁通量 都一样;线圈中没有电阻,因而没有电流热效应带来的损失;铁芯中没有磁滞损耗、涡流损耗等铁损;初、次级线圈的感抗趋于无穷大(因而空载电流——励磁电流趋于零)。那么加于初级线圈的电压 \dot{U}_1 与感应电动势 \dot{E}_1 大小相等相位相反,次级线圈输出的电压 $\dot{U}_2 = \dot{E}_2$,理想变压器的电压变比公式

$$\frac{U_1}{U_2} = \frac{n_2}{n_1} .$$

变压器初级线圈匝数 n_1 与次级线圈匝数 n_2 之比,叫做变压器的电压比,通常用 K 表示。 $K > 1, U_1 > U_2$, 是降压变压器; $K < 1, U_1 < U_2$, 是升压变压器。

(2)理想变压器的电流变比公式

没有功率损失的理想变压器,初级线圈的输入功率 P_2 ,等于次级线圈的输出功率 P_1 。因 $P_1 = U_1 I_1, P_2 = U_2 I_2$, 所以 $I_1 / I_2 = U_2 / U_1$, 而 $U_2 / U_1 = n_2 / n_1$, 因此

$$\frac{I_1}{I_2} = \frac{n_2}{n_1}$$

这就是理想变压器的电流变比公式。

(3)变压器改变阻抗的作用

初级电流 $I_1 = I_2 (n_2 / n_1) = I_2 / K$ 表明 I_1 随次级电流 I_2 的改变而改变,而 I_2 随次级阻抗 Z_2 的改变而改变,这样,变压器初级阻抗 Z_1 的大小就好像由次级阻抗 Z_2 决定一样。这种现象叫阻抗反射。在理想变压器情况下, $P_1 = P_2, P_1 = U_1^2 / Z_1, P_2 = U_2^2 / Z_2, U_1 / U_2 = n_1 / n_2 = K$, 所以

$$\frac{Z_1}{Z_2} = \frac{n_1^2}{n_2^2} = K^2, Z_1 = K^2 Z_2 .$$

如果电源要求接阻抗为 Z_1 的负载,而现有负载的阻抗为 Z_2 ,那么利用一个电压比为 $K = \sqrt{Z_1 / Z_2}$ 的变压器,就可以使负载阻抗符合要求。

(4)变压器中的相位关系

理想变压器次级开路时它在初级电路中的作用,相当于一个纯电感的

电感器，初级电流 \dot{I}_0 比电压 \dot{U}_1 滞后 90° 。 \dot{I}_0 起励磁作用，叫励磁电流，它使铁芯产生主磁通 $\dot{\Phi}$ ，从而初、次级线圈中感应出电动势 \dot{E}_1 、 \dot{E}_2 。 $\dot{U}_1 = -\dot{E}_1$ ， $\dot{U}_2 = \dot{E}_2$ 。这些量间的相位关系如图1-19-38和图1-19-39所示。

图 1-19-38 理想变压器空载时的矢量图

图 1-19-39 空载变压器中的相位关系

变压器运行时次级电路接通，有电流 \dot{I}_2 通过次级线圈并在铁芯中产生磁通，因而主磁通及其在初级线圈中感应的电动势都将改变。但是由于外加电压未变， $\dot{U}_1 = \dot{U}_2 = -\dot{E}_1 = n_1 \frac{d\Phi}{dt}$ 仍成立，主磁通 $\dot{\Phi}$ 应保持不变（主磁通不变原理），初级电流将由 \dot{I}_0 增为 \dot{I}_1 以抵销 \dot{I}_2 对主磁通的影响。理想变压器的励磁电流 \dot{I}_0 很小， $\dot{I}_1 - \dot{I}_0 = \dot{I}_2$ 。所以 \dot{I}_1 与 \dot{I}_2 反相。 \dot{I}_2 与 \dot{U}_2 的相位差则因负载为电感性或电容性而滞后或超前。

由于 \dot{U}_1 与 \dot{U}_2 反相、 \dot{I}_1 与 \dot{I}_2 反相，所以 \dot{U}_1 与 \dot{I}_1 的相位差 φ_1 等于 \dot{U}_2 与 \dot{I}_2 的相位差 φ_2 。

(5) 变压器的功率损耗

实际的变压器是有功率损耗的，这包括：铜损——线圈电阻通电时发热；漏磁损耗——一部分磁力线没有穿过初、次级线圈的每一匝；铁损——铁芯的磁滞损耗、涡流损耗和磁饱和损耗。但是跟其他电气设备相比，变压器的功率损耗是小的，大多数变压器的效率是 $90\% \sim 99\%$ 。

由于变压器的损耗小，非常接近理想情况，所以前面根据理想变压器得出的结论，在多数情况下是适用的。

(6) 变压器的种类

按用途分：电力变压器，用于输配电系统的升压或降压；试验变压器，产生高压，对电气设备进行高压试验；仪用变压器，如用于测量仪表或继电保护装置的电流互感器、电压互感器；电子设备用变压器，如电源变压器、音频变压器、中频变压器，高频变压器；特殊用途变压器，如冶炼用的电炉变压器、电解用的整流变压器，焊接用的电焊变压器等。

按相数分：单相变压器，用于单相负载和三相变压器组；三相变压器，用于三相系统的升压、降压。

按绕组形式分：自耦变压器，初、次级线圈合为一个；双绕组变压器，初、次级线圈各一个；多绕组变压器。

按铁芯形式分：壳式变压器（图 1-19-40）；心式变压器（图

1-19-41)。

图 1-19-40 壳式变压器外形 (甲) 和铁芯 (乙)

图 1-19-41 心式变压器外形 (甲) 和铁芯 (乙)

按冷却方式分：干式变压器，靠空气对流冷却，一般用于局部照明、电子设备中；油浸变压器，用于输配电系统中，有油浸风冷、油浸水冷、油浸自冷、强迫油循环等多种。

阻抗匹配 (impedancematching)

使负载阻抗从一个网络、传输线或其他设备获得最大能量传输的措施。常见的阻抗匹配实例如下：

(1) 负载与电源的匹配

电动势为 ε ，内电阻为 r 的电源，当负载电阻为 R 时，电源向负载提供的输出功率为

$$P_{\text{出}} = UI = I^2 R = \left(\frac{\varepsilon}{R+r} \right)^2 R。$$

要知道 $P_{\text{出}}$ 对 R 的微商，并令它等于 0：

$$\frac{dP_{\text{出}}}{dR} = \varepsilon^2 \cdot \frac{(r-R)}{(R+r)^3} = 0。$$

由此得出 $P_{\text{出}}$ 达到最大值的条件为

$$R = r。$$

上式表明负载电阻与电源内阻相等时电源输出的功率最大。 $R=r$ 叫做负载电阻与电源的匹配条件。应当强调指出，“匹配”的概念只是在电子电路（如多级晶体管放大电路）中才使用，因为在电子电路里电源（即晶体管放大器）的内阻一般是较高的，且输出讯号的功率本来就很小，所以才需要使负载与电源匹配以提高输出功率。通常在低内阻大功率的电路中不需要考虑匹配，而且这样做会导致电流过大，引起事故。

(2) 扩音机与扬声器的阻抗匹配

定阻抗式扩音机有确定的输出阻抗 $Z_{\text{扩}}$ 和相应的输出电压 $U_{\text{扩}}$ ，它的额定输出功率 $P_{\text{扩}} = U_{\text{扩}}^2 / Z_{\text{扩}}$ 。每只喇叭都有自己的额定功率 $P_{\text{喇叭}}$ 、阻抗 $Z_{\text{喇叭}}$ 和能承受的电压 $U_{\text{喇叭}}$ ($U_{\text{喇叭}}^2 = P_{\text{喇叭}} Z_{\text{喇叭}}$)。在连接扬声器与扩音机时，为了得到宏亮的声音和良好的音质，并且保护扩音机和喇叭都不损坏，必须作到功率匹配和阻抗匹配。所谓功率匹配，就是要求扩音机所接喇叭（包括假负载）的总的额定功率，等于（或稍大于）扩音机的额定输出功率，每只扬声器的额定功率等于或大于实得功率，以确保扬声器不过载而被烧坏。所谓阻抗匹配，就是要求所接喇叭的总阻抗与扩音机的输出阻抗相等或相接近，但喇叭的总阻抗不允许小于扩音机的输出阻抗。要求阻抗匹配的原因如下：

将阻抗为 $Z_{\text{喇叭}}$ 的喇叭接在扩音机输出阻抗为 $Z_{\text{扩}}$ 的两接线柱之间时，这

$$\text{两接线柱间的电压 } U_{\text{喇叭}} = \sqrt{P_{\text{扩}} Z_{\text{喇叭}}}, \text{ 喇叭实得的功率 } P = \frac{U_{\text{喇叭}}^2}{Z_{\text{喇叭}}} = \frac{Z_{\text{扩}}}{Z_{\text{喇叭}}} \cdot P_{\text{扩}}。$$

显然 $Z_{\text{喇叭}}=Z_{\text{扩}}$ 时, $P=P_{\text{扩}}$, 喇叭实得功率等于扩音机的额定功率。当 $Z_{\text{喇叭}}<Z_{\text{扩}}$ 时, $P>P_{\text{扩}}$, 喇叭实得功率(即扩音机输出功率)大于扩音机额定功率, 扩音机过载, 可能烧坏, 这是不允许的。当 $Z_{\text{喇叭}}>Z_{\text{扩}}$ 时, $P<P_{\text{扩}}$, 扩音机还有多余的功率, 可加接喇叭或假负载。

定阻抗式扩音机的输出变压器的次级有很多抽头, 不同抽头的输出阻抗不同, 目的是便于扩音机与喇叭配接。在扩音机输出变压器次级的接线柱旁标出了输出阻抗的数值, 一般有 4、8、16、32、100、150、250、500 等。在功率匹配的前提下, 如果喇叭的总阻抗与标出的输出阻抗值相等(或接近), 可以将喇叭直接配接到相应的接线柱上实现阻抗匹配。如果喇叭的规格与扩音机所有的接线柱难于直接配接实现阻抗匹配, 则可利用变压器改变阻抗的作用, 采用间接配接来实现阻抗匹配。间接配接的具体作法是将专起改变阻抗作用的变压器(线间变压器)的次级接喇叭, 初级接扩音机输出变压器次级的接线柱, 根据喇叭的阻抗 $Z_{\text{喇叭}}$ 和扩音机要求线间变压器初级线圈应有的阻抗 $Z_{\text{线}}$, 来确定线间变压器初、次级匝数 n_1 、 n_2 之比, $n_1/n_2 = \sqrt{Z_{\text{线}}/Z_{\text{喇叭}}}$ 。

自耦变压器 (auto-transformer)

初级和次级共用一个线圈(绕组)的变压器。普通变压器初级回路与次级回路间没有电的直接联系, 而自耦变压器初、次级回路间有电的直接联系。自耦变压器有单相的(图 1-19-42)和三相的(图 1-19-43)。与同容量

图 1-19-42 图 1-19-43

与普通变压器相比, 自耦变压器具有损耗小, 效率高、材料省、体积小、造价低等优点, 广泛用在输入回路和输出回路不需要分隔开的条件下升压或降压。巨型高压自耦变压器用在电力系统中。小型自耦变压器可利用滑动接触以改变输出电压, 用于起动电动机。

三相变压器 (three-phase transformer)

三相制输配电系统中变换电压, 可以使用三只单相变压器组成的三相变压器组(图 1-19-44), 但更多的是使用图 1-19-45 所示

图 1-19-44

图 1-19-45

的具有三个铁芯柱的三相变压器。三相变压器是由图 1-19-44 所示的三相变压器组演化来的。可以设想将图 1-19-44 中的三个单相变压器铁芯无绕组的长边贴合在一起, 各相的磁通都经过这共同的中间铁芯柱。如果三相相对称, 则三相磁通的幅值相等, 相角差 120° , 通过中间铁芯柱的总磁通 $=0$, 也就是说中间铁芯柱可以取消, 而整个铁芯形状如图 1-19-46 所示。但是图 1-19-46 所示形状的铁芯在制造上比较复杂, 因此, 通常把三个铁芯柱排列在同一平面上, 如图 1-19-45 所示。这种三相变压器比图 1-19-44 所示的三相变压器组效率高、成本低、体积小, 因此得到广泛的应用。

图 1-19-46

三相变压器的高压绕组可以接成星形，也可以接成三角形，低压绕组也可以接成星形或三角形，因此可组成四种接法： Y/Y ， Y/Δ ， Δ/Y ， Δ/Δ 。其中分子表示高压绕组的接法，分母表示低压绕组的接法；如果星形接法采用有中性线的三相四线制，则用 Y_0 表示。

电流互感器 (current transformer)

将高电压交流大电流变换成小电流以供测量和继电保护用的电器。它的原理与变压器相同。它通常由硅钢片或高导磁合金制成的铁芯和原、副线圈组成，原线圈匝数少，串联在高电压大电流的回路中，匝数多的副线圈连接测量仪表（图 1-19-47）或继电保护装置

图 1-19-47

置的电流线圈。这样，电流互感器就把大电流按一定比例准确地变换为小电流，可靠地隔离高电压，保证了人身和装置的安全。而且由于电流互感器的次级额定电流一律规定为 5 安培，这就有利于仪表和继电器制造的标准化。运行时，电流互感器的副线圈不允许开路，以免副线圈感应出的高电压危害工作人员。

钳形电流表，简称钳表，是由一个特殊的电流互感器和安培计组合而成（图 1-19-48），

图 1-19-48

它不需要切断电线就可测出其中的电流。钳表的铁芯不是一整块，而是由两块可以张开或闭合的铁芯组成，铁芯上绕着电流互感器的副线圈，安培计串联在副线圈上。使用时夹紧把手，使钳口张开，将待测电流的导线从钳口引入铁芯的中间，放松把手使钳口重新闭合。这时待测电流的导线相当于电流互感器的原线圈，安培计指示出待测的电流值。

电压互感器 (voltage transformer)

将交流高电压变换成低电压以供测量和继电保护用的电器。它的工作原理和构造同普通变压器相同，只是容量小，通常仅有几十或几百伏安。匝数多的原线圈并联在高压线路上，匝数少的副线圈与测量仪表（图 1-19-49）或继电保护装置相连接，副线圈的低电压可以按一定的比例准确地反映原线圈高电压

图 1-19-49

的变化。这样，不仅解决了高电压测量的困难，还由于它可靠地隔离了高电压，从而保证了测量人员、仪表或保护装置的安全。此外，电压互感器次级额定电压都定为 100V，有利于使仪表和继电器标准化。

远距离输电 (electrical power transmission over great distances)

将发电厂或变电所的电能经变压器升压后，通过输电线路，送到远距离的工业区、城市或农村。远距离输电有高压交流输电和高压直流输电两种方式。

(1) 为什么需要远距离输电

为了合理开发和利用能源，在煤炭资源集中的地区宜于发展大型坑口发电厂，实行煤电综合开发，以减轻煤的运输量。在水力丰富的江河地带，应集中梯级开发，兼收发电、防洪、航运、灌溉等综合效益，有条件的地方还应发展大流量、高水头的大型水电基地。许多靠近能源基地的大型发电厂远离用电中心，这就需要远距离输送电能。

需要远距离输电的另一个原因是：在一天当中的不同时刻，一年当中的不同季节，用户对电能的需要量相差悬殊。如果一个地区只由一座发电厂供电，这座发电厂就必须按用电高峰装发电机，并且要有备用的机组，而一旦这座发电厂因故停电，它的供电地区会遭受很大损失。如果把相距数百千米（甚至更远）的若干座大发电厂，用远距离输电线路连成一个大电网，使它们可以互相支援，调剂余缺，就能节省总的机装机容量，提高供电的可靠性。

(2) 对输电线路的基本要求

主要是：必须安全可靠地运行，不能常出事故，停电；要保证电能质量，即供电电压及频率的偏差都不超出允许值（表 1、表 2）；最大的经济性，即输电线的建造费用低，电能损耗少。

表 1: 用户供电电压允许变化范围

线路额定电压 U_e	电压允许变化范围
35kV 及以上	$\pm 5\%U_e$
10kV 及以下	$\pm 7\% U_e$
低压照明	+5 % U_e ~ -10 % U_e
农业用户	+5 % U_e ~ -10 % U_e

表 2: 电力系统频率允许偏差

运行情况		允许频率偏差(周/秒)
正常运行	中、小容量系统	± 0.2
	大容量系统	± 0.5
事故运行	30 分钟以内	± 1
	15 分钟以内	± 1.5
	绝不允许	-4

(3) 高压交流输电

由于输电导线有电阻，有电流通过时必然会产生电压降和发热，使电压、电能都受损失。远距离输电的电压损失一般限制在 10%以内，电能损失一般限制在 4%以内。从减小电压损失和发热损失来看，都需要减小输电线的电阻和减小输送的电流。铜的电阻率小，但价格较贵，机械强度也不够大。所以目前远距离输电线路的架空导线一般采用钢芯铝绞线（图

1-19-50)，由机械强度大的钢芯承

图 1-19-50 钢芯铝绞线断面图

担架空线受的拉力，由电阻率虽比铜稍大，但比铜便宜而且轻得多的铝制导线承担导电任务（由于趋肤效应，沿钢芯传导的电流很小）。在输电距离、导线材料既定的情况下，要减小电阻需增大导线截面，从而增加导线成本和架线难度，并且从焦耳定律 $Q=I^2Rt$ 看，减小电阻远不如减小电流对减少发热更有效。在保证输送的电功率一定的条件下，要减小电流需升高电压。因此，远距离交流输电主要采取升高电压的办法减小损失；输电距离越远，电压越高（表 3）。导线截面，只要保证导线的机械强度符合要求，发热和电晕损失的能量不超过允许值，就够了。表 4 是钢芯铝绞线在周围气温为 25 及导体最高允许温

表 3：各级电压输电线路的输送能力

额定线电压/kV	送电容量/Mw	送电距离/km
35	2.0 ~ 15	20 ~ 50
60	3.5 ~ 30	30 ~ 100
110	10 ~ 50	50 ~ 150
220	100 ~ 500	100 ~ 300
330	200 ~ 800	200 ~ 600
500	1000 ~ 1500	150 ~ 850
750	2000 ~ 2500	500 以上

表 4：钢芯铝绞线按允许持续发热条件的输送容量

导线截面 mm ²	电压/kVA		
	35	110	220
输送容量/kVA			
50	13.3		
70	16.6	52.4	
95	20.3	63.7	
120	23.0	72.3	
150	27.0	85.7	
185	31.2	98.0	
240	36.9	116.0	
300		135	270
400		161	322
500			368

度为 70 时，在不同电压下的送电容量与导线截面的关系。三相线路的年平均电晕损失功率，一般不应大于线路有功功率损失的 20%。电压越高、导线截面越小，电晕损失越大。为避免电晕损失过大，110kV 架空输电线

路,钢芯铝绞线的截面不应小于 70mm^2 ,220kV 线路,截面不应小于 300mm^2 。

(4) 高压直流输电

随着电力系统的扩大,输电的功率增加、距离增长,交流输电遇到了一些技术困难。例如,由交流输电线路联结起来的大电网中的所有发电机都必须同步运行,电网覆盖地域越广,实现同步运行的技术难度越大;输电导线不但有电阻,还有电感、电容,它们不仅影响线路各点电压、电流的大小,而且影响各点的电压与电流的相位差,导线越长,影响越大,同步运行越难;必须用水下电缆跨越海峡输电时,电缆的金属芯线与海水构成的电容器对受电端有旁路作用,220kV 电缆每 km 旁路的漏电流达 23A,电缆长度超过 50km,交流输电已无实际意义。这些困难采用直流输电时都可以解决,因为由直流输电线路联结的发电机不需要同步运行,电感、电容对稳定的直流电不起作用。

远距离直流输电的电压高达几百千伏,而直流发电机的电压最高只有几千伏,所以需要把交流电经变压器升压再经过整流器整流来获得所需的直流高压。正因为如此,50 年代出现高压汞弧整流器后,高压直流输电才得到发展。现在则用可控硅装置代替高压汞弧整流器来整流。在受电端有专用的逆变装置将直流电变为交流电,再经过变压器降压,送给用户。目前,高压整流和逆变装置(统称为换流装置)的造价高,抵消了一部分线路建设费用低的经济效果,对架空线路,大约超过 $640\text{km} \sim 960\text{km}$,高压直流输电才比交流输电经济。

电机 (electric machine)

将机械能转化为电能,或者将电能转化为机械能的机械。前者叫发电机,后者叫电动机。同一台电机,既可以作为发电机用(输入机械能,输出电能),又可以作为电动机用(输入电能,输出机械能),这叫电机的可逆性。每台电机都是由固定部分和运动部分组成。根据运动部分的运动形式不同,分为直线电机和旋转电机,前者作直线运动,后者作转动。现在广泛应用的是旋转电机。电机的固定部分叫定子,转动部分叫转子。通常这两部分都装有绕组。此外,还有把交流直流相互变换(一般是交流变直流)的交流机、改变电流频率的变频机以及放大电功率的电机放大机等。

发电机 (electric generator)

把机械能转化为电能的电机。有直流发电机和交流发电机。直流发电机输出的端电压的符号不变,交流发电机输出的端电压则从正到负再从负到正作周期性变化,并且通常是按正弦规律变化。

直流发电机的定子是电磁铁(图 1-19-51 中的 1),它的励磁绕组通电时产生磁场,在磁场中旋转的转子是由电工钢片叠成的电枢 2,上面绕有绝缘的铜线绕组。当电枢旋转时,在电枢绕组中感应出交变电动势,借助于换向器 3 将这个交变电动势变成两个电刷(图 1-19-51 中的 5)之间的单向电压。电刷是炭制的,固定在机座 4 上,与换向器接触并相对滑动。发电机的励磁绕组可以由外电源供电(他励),也可以由发电机本身供电(自

图 1-19-51

励)。自励之所以可能，是由于励磁绕组的铁芯和机座中存在剩磁的缘故。

根据励磁绕组的接法，直流发电机分为(1)他励发电机(图 1-19-52)；(2)并励发电机(图 1-19-53)；(3)串励发电机(图 1-19-54)；(4)复励发电机(图 1-19-55)。并励发

图 1-19-52 图 1-19-53

图 1-19-54 图 1-19-55

电机的特点是负载改变时输出电压变动较小，利用励磁绕组串联的变阻器(图 1-19-53)，可以非常简便地调节磁场，从而调节输出电压。因此并励发电机是最常用的直流发电机。串励发电机(图 1-19-54)由于负载改变时励磁电流随之改变，从而使输出电压有很大改变，因而使用范围受到限制，只用在为数不多的特殊情况(如要求输出电压随电流增大而增大的专用设备)。复励发电机(图 1-19-55)，由于并联的和串联的励磁绕组的共同作用，在负载变动时它的输出电压几乎不变，因此它特别适用于负载剧烈变动的情况。他励发电机(图 1-19-52)的输出电压比并励发电机的更稳定，这是因为这种发电机的励磁电流与发电机的电压变化无关，而由独立的励磁电路随意控制。它的缺点是要由另外的电源提供励磁电流，使结构和维修都比较复杂。它应用在电压调节范围很广的场合(从零到额定值)。直流发电机用于电力驱动系统中给具有很大调速范围的直流电动机供电，用于电解，用于给交流发电机励磁以及给蓄电池充电，等等，它的功率从几瓦特到几万千瓦，电压从几伏到几百、几千伏。

交流发电机分为同步的和异步的两种。同步发电机的特点是它的感应电动势的频率严格地正比于转子的转速，也正比于发电机磁极的数目。通常同步发电机的磁极是转动的，电枢是固定的。在这种结构中不需要用滑动触头把电流从电枢中引出。同步发电机是现代发电站所用发电机的主要形式。它的功率已超过 100 万千瓦，电压已超过 20 千伏。同步发电机的结构可分为两类：(1)凸极的(图 1-19-56)和(2)隐极的(图 1-19-57)。

图 1-19-56 图 1-19-57

凸极式结构用于低速发电机(如水轮发电机)或功率不大的发电机。隐极式结构用于高速的大功率发电机(如汽轮发电机)。同步发电机需要用直流电励磁；励磁用的直流电由励磁机(直流发电机)通过两个滑环引入励磁绕组中。励磁机通常与同步发电机装在同一轴上。异步发电机实际是异步电动机与电容器组合起来进行发电。在小型水电站中，如果一时找不到同步发电机而有异步电动机，就可以利用它发电。利用它发电时，水轮机带动它的鼠笼式转子以大于同步转速(即定子绕组中电流所产生的旋转磁场的转速)的速度旋转。

旋转磁场 (rotating magnetic field)

电机定子绕组中通过多相交变电流时产生的在空间旋转的磁场；交流电动机就是利用这种旋转磁场来工作的。三相交变电流产生的两极旋转磁

场最容易理解。图 1-19-58

图 1-19-58

是经过简化的三相交流电动机定子绕组的结构示意图，其中每相绕组由一个线圈组成，三相绕组 D_1D_4 、 D_2D_5 、 D_3D_6 在定子空间内彼此相隔 120° 角，作星形连接。当将三个绕组的始端 D_1 、 D_2 、 D_3 分别接到三相电源的端线上，便有三相交变电流

$$\begin{aligned}i_A &= I_m \sin t, \\i_B &= I_m \sin (t - 120^\circ), \\i_C &= I_m \sin (t + 120^\circ),\end{aligned}$$

通入三相定子绕组，产生三个交变磁场，而在定子内部空间形成一个合成磁场。假定电流的正方向（即电流为正值时）都从始端流入、末端流出，电流为负值时从末端流入、始端流出；凡电流流入的一端标以“ \otimes ”，电流流出的一端标以“ \ominus ”。那么从图 1-19-59 可以看出：

图 1-19-59

当 $t=0$ 时， i_A 为零， i_B 为负， i_C 为正，即 A 相绕组没有电流，B 相绕组电流由 D_5 流入、由 D_2 流出，C 相绕组电流由 D_3 流入、由 D_6 流出，合成磁场磁力线自下而上——下方相当 N 极，上方相当 S 极。当 $t=90^\circ$ 时，合成磁场沿顺时针方向转过 90° 。当电流变化一周时，合成磁场刚好沿顺时针方向旋转一周。可以证明这个合成磁场的大小是不变的。如果把接绕组始端的三根电源线中的任何两相（例如 A 相和 B 相）对调过来，磁场的旋转方向也随之改变为逆时针方向。

如果有 6 个绕组 D_1D_4 、 $D'_1D'_4$ 、 D_2D_5 、 $D'_2D'_5$ 、 D_3D_6 、 $D'_3D'_6$ 分别放在 12 个槽的定子铁芯中（图 1-19-60），每个绕组的始端在空间相隔 60° ，并把始端相隔 180° 的两绕组串联起来作为一相（参看图 1-19-61），当接通三相电源时，定子空间就产生四个磁极的旋转磁场，当电流变化一周时，磁场旋转半周。

图 1-19-61

旋转磁场的转速叫同步转速，它决定于交变电流的频率 f 和磁极对数 p ，并且通常用每分钟的转数 n 来表示，

$$n = \frac{60f}{p}$$

不仅三相交变电流可以产生旋转磁场，在相隔 90° （或某一角度）的两个绕组中通入相角差为 90° （或）的两相交变电流也可以产生旋转磁场。这种旋转磁场被利用来使单相异步电动机起动。

电动机 (electric motor)

将电能转化为机械能的电机。按所需电流的种类来分，有直流电动机和交流电动机。

电动机的机械性能可用机械特性和起动转矩特性来说明。机械特性表示转速 n 与负载力矩 M 之间的关系，而起动转矩特性则表示电动机的起动转矩和电枢电流 I 之间的关系。直流电动机的特性曲线的形状和电动机的励磁方式有关。

按励磁方式，直流电动机可分为：串励直流电动机（图 1-19-62），并励直流电动机

图 1-19-62 图 1-19-63

图 1-19-64 图 1-19-65

（图 1-19-63）；和复励直流电动机（图 1-19-64）。并励电动机在负载增大时转速的变化不大（图 1-19-65 中的曲线 a），而起动转矩的增大与电枢电流成正比（图 1-19-66 中的曲线 a）。在串励电动机中，电枢电流就是流过励磁绕组的励磁电流，转速随负载变化而急剧变化（图 1-19-65 的 b），起动转矩的增加几乎与电枢电流的平方成正比（图 1-19-66 的 b）。在复励发电机中，这两种特性曲线都位于上述两类电动机的相应特性曲线之间（图 1-19-65 和图 1-19-66 中的 c）。

图 1-19-66

由图 1-19-66 可知：在重负载起动（大的起动转矩）时，并励电动机的起动电流最大，而串励电动机的起动电流最小。因此，在要求起动转矩大的电力牵引（电气化铁路、电车等）以及起重设备中，串励电动机得到了广泛应用。并励电动机由于负载变动而转速变化不大，所以适用于负载频繁变动而要求转速基本稳定的工作机械，如轧钢机、大型精密机床等。特性介于前两种电机之间的复励电动机，用于起动转矩较大，转速变化不大的负载，如空气压缩机、冶金辅助传动机械等。直流电动机的速度调节是利用电枢电路中的起动调节变阻器 R_Q （参看图 1-19-62、1-19-63、1-19-64）和励磁电路中的调节变阻器 R_f 来实现的。

交流电动机分为同步电动机和异步电动机，它们都是利用定子绕组中通过交变电流时产生的旋转磁场来工作的。它们的定子构造相同，而转子构造不同。

异步电动机也叫感应电动机，是靠定子空间的旋转磁场与转子上短路绕组中产生的感应电流的相互作用，产生与磁场旋转方向一致的转矩。转子的转速小于旋转磁场的转速（同步转速），即所谓转子与磁场异步旋转。只有在转速存在这种差异的情况下，转子绕组的导线才有可能切割磁力线，并在绕组中感应出电流，产生使转子旋转的转矩。通常把旋转磁场和转子转速之差（ $n_1 - n$ ）与旋转磁场转速 n_1 之比，叫做异步电动机的转差率，用 s 表示，即

$$S = \frac{n_1 - n}{n_1}。$$

转差率是异步电动机的重要参数，它与转子中的电动势、电流、功率因数

等都有关系。异步电动机在额定转数时， $s=0.02 \sim 0.06$ 。

异步电动机有三相的和单相的。它们的转子绕组都不需要与电源相连接。按转子绕组型式，异步电动机可分为鼠笼式和绕线式。鼠笼式转子由铁芯和嵌在铁芯上的闭合导体构成。闭合导体由嵌在铁芯凹槽中的铜条（或铝条）和两个铜环（或铝环）连在一起制成，形状像个鼠笼（图 1-19-67 丙）。鼠笼式转子结构简单牢固，应用最广，小功率的异步电动机大多为鼠笼式。绕线式转子铁芯凹槽内嵌入对称的三相绕组，三相绕组接成星形，末端接在一起，始端则分别接至轴上三个彼此绝缘的铜制滑环上。滑环与转轴绝缘，并靠电刷与外界起动变阻器相接（图 1-19-68），可以改善起动特性并在必要时用以调速。

三相异步电动机具有结构简单，制造、使用和维护方便，运行可靠以及重量较轻、成本较低等优点，其重量和成本分别为同功率、同转速的直流电动机的 $1/2$ 和 $1/3$ 。它的机械特性与并励直流电动机相类似，能满足大多数工农业生产机械的拖动要求，是各种电动机中应用最广、需要量最大的一种。90%左右的电气原动力为异步电动机，其用电量在电网的总负荷中占 60%以上。单相异步电动机的效率比三相的低，大部分制成小功率的，

图 1-19-67 三相异步电动机的定子（甲）和鼠笼式转子（乙）广泛用于单相供电的家用电器（电冰箱、电风扇、洗衣机等）和专用装置中。异步电动机的缺点是：功率因数不高，不能均匀地而又简单、经济地调节转速；而鼠笼式电动机除上述缺点外，其起动转矩较小，而且起动电流也较大。

同步电动机和异步电动机不同，它的转子上有励磁绕组，由励磁机或由直流电力网供电。励磁绕组在转子中激励的磁场与定子绕组中交变电流产生的旋转磁场相互作用，便产生使转子旋转的转矩。在运转时，转子速度严格保持不变，等于定子旋转磁场的同步转速。因此同步电动机适用于负载变化不大而转速要求稳定的场合，如粉碎机、通风机等。

直线电动机 (linear motion electric machine)

将电能直接转换成直线运动机械能的电力传动装置。直线电动机可以看作是由旋转电动机演变而来的。可以设想把图 1-19-69 甲所示的旋转电动机沿径向剖开，并将电动机的圆周展成直线，这就得到了最原始的直线电动机。由定子演变来的一侧叫做初级，由转子演变来的一侧叫做次级。直线电动机

图 1-19-68 绕线式转子接线示意图

图 1-19-69

的运动方式不限于初级是固定的，也可以固定次级而使初级运动。既然直线电动机的初、次级要相对运动，像图 1-19-69 乙那样初、次级长度相等的直线电动机实际是无法利用的。实用上是做成短初级或短次级（图 1-19-70 的甲、乙）。图 1-19-70 所示的直线电动机，

图 1-19-70

只在次级的一侧有初级，这种结构型式称为单边型，它的一个显著特点，就是除了沿次级长度的方向能产生推力外，在垂直于次级长度的方向——法向也产生磁作用力。在有些情况下，法向的磁作用力是可以利用的（参见“磁悬浮列车”），但很多情况下，是不希望有这种作用力的。如果在次级两边各装一个初级，磁作用就可以抵消，这样的结构称为双边型。从原理上看，每一种旋转电动机都可以有与之对应的直线电动机，然而从实用角度看，只有分别与旋转感应电动机（异步电动机）和同步电动机对应的直线感应电动机和直线同步电动机才经济可行。同旋转电动机相比，直线电动机的主要优点是可以省掉中间传动装置，使结构简化，提高了运行的可靠性，还有可能做到运行时无机械接触，减小阻力，降低磨损。它的缺点主要有初、次级间的气隙比较大，因而效率和功率因数比同容量的旋转电动机低；对于次级固定、初级运动的直线电动机，当速度较高或行程较长时馈电比较复杂。直线电动机的主要用途有：驱动由金属带或金属网制成的传送带（图 1-19-71 甲），制做输送液态金属的电磁泵（图 1-19-71 乙），在铁路交通中驱动高速列车，等等。

图 1-19-71

磁悬浮列车 (magnetic levitation train)

一种新型的高速客运列车，它利用电磁力使车辆悬浮，也就是使车辆本身与轨道之间没有机械接触，利用直线电动机驱动车辆高速前进。从原理上讲，同一套直线电动机系统能够同时产生驱车前进的推力和使车悬浮的电磁力，但由于技术上的原因，目前研制的磁悬浮列车大都由两个系统分别承担驱动任务和悬浮任务。电磁悬浮系统有吸引型和推斥型两种，分别如图 1-19-72 和图 1-19-73 所示。主要用来产生悬浮作用的系统叫做直

图 1-19-73 推斥型悬浮系统

线悬浮电机，而主要用来驱动的仍叫直线电动机。采用吸引型直线悬浮电机的列车，轨道由铁磁材料制成，靠车上的电磁铁与铁磁轨道之间产生的吸引力使车辆悬浮，它在列车低速（甚至静止）时仍能保持车辆悬浮。推斥型直线悬浮电机的次级由良导体（例如铝）制成，当装在车辆上的磁体随车辆高速运动时，次级中产生涡流，磁体与涡流之间的推斥力使车辆悬浮。它只能在列车速度足够高时才能保持车辆悬浮，低速时列车还要靠车轮在轨道上行驶。预计磁悬浮列车的速度可达 50km/h

电磁式仪表 (electromagnetic instrument)

利用可动铁片与固定的通电线圈之间（或者与被此线圈磁化的固定铁片之间）的作用，来指示电流或电压值的仪表，也叫动铁式仪表。电磁式仪表有两种结构，一种是吸引型，用得较少，另一种是排斥型，用得较多。图 1-19-74 是吸引型结构，当待测电流通过线圈 A 时，偏心地安装在轴 C

上的椭圆形铁

图 1-19-74 图 1-19-75

片 B 便被吸入线圈 A 中，从而转动安装在轴 C 上的指针。图 1-19-75 是排斥型结构，在固定的圆形线圈 A 内，有块固定的铁片 B 和装在转轴上的可动铁片 C，当待测电流通过线圈 A 时，两铁片均被磁化，同一侧的极性相同，因而互相排斥，使可动铁片 C 以及转轴、指针偏转。通入直流电时，可动铁片所受的转矩 M 与电流 I 的平方成正比，

$$M \propto I^2。$$

通入交变电流时，可动铁片所受的平均转矩 M 与电流有效值 I 的平方成正比， $M \propto I^2$ 因而电磁式仪表不仅可测直流，而且可测交流，只是刻度不均匀。

电磁式仪表的优点是：构造简单，价格低廉，可用于交直流，能测量大电流和允许较大的过载，缺点是：刻度不均匀，易受外界磁场及铁片中磁滞和涡流影响，因而准确度不高

磁电式仪表 (permanent-magnet moving-coil instrument)

利用永久磁铁的磁场与通电线圈的相互作用，来指示电流或电压值的仪表。常见的是动圈式结构，即由不动的永久磁铁 a 和可以转动的线圈 K 组成 (图 1-19-76)，线圈中

图 1-19-76

间是个圆柱形铁芯，线圈两端各接在一个产生反作用力矩的螺旋弹簧上，线圈经过这两个螺旋弹簧连接着仪表的正、负接线柱。当可动线圈中通有电流 I (A) 时，线圈在磁隙间的两个边受磁场力的作用，使线圈受到一个转矩 M (N·m)，

$$M = IBnS。$$

式中 B 是磁隙间的磁感应强度 (T)，n 是线圈匝数，S 是线圈面积 (m²)。即转矩 M 与电流 I 成正比，这就是磁电式仪表能指示出电流大小的原理。

磁电式仪表的优点是准确度高 (可达最大刻度值 0.1% 或更高)、灵敏度高、刻度均匀、外磁场影响和温度影响较小。磁电式仪表适用于测直流电，但与固体整流器配合也可以测交变电流。

磁电式仪表的另一种结构是把磁铁放在可动线圈之内，以减小仪表体积，称作内磁式结构。

电动式仪表 (electrodynamometer instrument)

利用可动的通电线圈和固定的通电线圈之间的作用，来指示电流、电压、电功率等数值的仪表。图 1-19-77 为电动式仪表的结构，

图 1-19-77 电动式仪表的结构

固定线圈由两个相同的半线圈 A 组成，这两个半线圈之间穿有轴 C，轴 C 上装有可动线圈 B、指针 S 和阻尼器叶板 m。当电流通过固定线圈和可动线圈时，可动线圈受到转矩作用，力图使可动线圈的磁通与固定线圈的磁通

方向一致（图 1-19-78）。这个转矩 M

图 1-19-78 电动式仪表工作原理
与固定线圈中的电流 I_A 和可动线圈中的电流 I_B 的乘积成正比，即

$$M \propto I_A I_B$$

电动式功率表的固定线圈用粗导线绕成，匝数少，测量时与负载串联，用来反映负载电流（图 1-19-80），所以常称为电流线圈；可动线圈用细导线绕成，匝数多，串联一个高阻值的分压电阻——倍率器（图 1-19-79 和图 1-19-80 中的 R_V ），测量时与负载并联，用

图 1-19-79 电动式功率表内部接线

图 1-19-80 电动式功率表与负载的连接
来反映负载两端电压，所以常称为电压线圈。由于转矩 M 与 I 和 I_V 的乘积成正比，而 I_V 与负载两端的电压 U 成正比，所以 M 与负载的功率 $P=IU$ 成正比。这就是电动式功率表的原理。电动式功率表既可测直流，又可测交流，它的刻度是均匀的。

电动式电流表中的固定线圈与可动线圈串联着，都通过待测电流。电动式电压表中固定线圈与可动线圈串联后再串联上倍率器。电动式电流表和电压表也是交直流两用，但刻度不均匀。

电动式仪表，由于机构中没有铁磁性物质，所以没有磁滞引起的误差，比较准确（可达最大刻度的 0.1%），常用于实验室中作校验电磁式仪表的标准表。此外，由于线圈的感抗不大，因而受频率的影响较小，可测较高频率（几百赫）的交变电流。它的缺点是本身磁场弱，易受外磁场影响，转矩小，不能测小电流，小电压，过载能力弱，价格也较贵。

在工业测量中常用铁磁电动式仪表，制成开关板式功率表，颠簸与振动条件下用的电流表、电压表、功率表以及自动记录仪表。图 1-19-81 是这种仪表的结构，固定线圈 A 套在硅钢片叠成的铁芯上。测量时，通电的可动线圈 B 处于 A 产生的磁场中受到转矩作

图 1-19-81 铁磁电动式仪表的结构
用而偏转。由于有铁磁性物质作铁芯，磁场增强，转矩增大（约为无铁芯时的 100 倍以上），能测小电流、小电压，但有磁滞引起的误差和交流频率误差，准确度不高（只能达最大刻度的 0.5%）。

整流式仪表 (rectifier instrument)

由直流电表和整流装置组合成的，用来测交流电流或交流电压的仪表。最常见的是由磁电式仪表和半导体整流器组成的，用来测工频及音频以下的交流电流或电压。这种电表的优点是灵敏度高，功率消耗小。主要缺点是电表读数与被测量的波形有关，在非正弦波形的将引起较大误差。

感应式仪表 (induction instrument)

利用固定不动的交流电磁铁产生的交变磁场与磁场在活动部分中感应

的电流的相互作用而制成的仪表。它只能用于交流电路，而且主要用作电能表计量用电器所消耗的电能。目前最广泛应用的感应式仪表的结构，是三磁通式结构，分为辐射式和切线式两种。

图 1-19-82 所示是辐射式结构，其驱动元件由电压电磁铁 1 和电流电磁铁 2 组成。电压电磁铁（铁芯由硅钢片叠成）的绕组由细导线绕成，匝数多，测量时与负载并联，称为并联绕组或电压绕组。电流电磁铁的绕组由粗导线绕成，匝数少，测量时与负载串联，称为串联绕组或电流绕组。

图 1-19-82 辐射式感应电能表结构

转动元件由铝质圆盘 3 和转轴组成。铝盘位于两电磁铁之间，可以带动转轴自由转动。转轴上装有蜗杆，通过蜗轮把盘的转数传递给计数器 5 以记录电能。永久磁铁 4 是制动元件，用来产生制动力矩。

这种结构的电压电磁铁沿着铝盘半径方向安放，故称为辐射式结构。而切线式结构的电压电磁铁与铝盘半径垂直。这两种结构的基本原理相同。

仪表工作时，负载电流 i 流过电流绕组，并在电流电磁铁中产生磁通，此磁通在电流电磁铁两极所对的铝盘处以相反的方向穿过，因此铝盘这两处分别有大小相等、方向相反的磁通 Φ_1 和 Φ_2 穿过（参看图 1-19-83）。与此同时，电压绕组中电流 i_{w1} 在电压电磁铁中产生磁通，使铝盘有磁通 Φ_3 穿过。 Φ_1 、 Φ_2 、 Φ_3 都是交变磁通，分别在铝盘中感应出涡电流 i_{w1} 、 i_{w2} 、 i_{w3} 。 i_{w1} 和 i_{w2} 穿过 Φ_3 ，分别受到磁场力 F_1 和 F_2 ， i_{w3} 穿过 Φ_1 和 Φ_2 ，分别受到磁场力 F_3 和 F_4 。这

图 1-19-83

4 个力的合力矩 M 与负载消耗的电功率 P 成正比，即 $M=KP$ ，其中 K 是比例系数。铝盘在 M 作用下转动。

永久磁铁（图 1-19-82 中的 4）的磁通 Φ_M 穿过铝盘，当铝盘转动切割 Φ_M 时铝盘中感应出涡电流 i_M ， i_M 与 Φ_M 相互作用使铝盘受到制动力矩 M_T ， M_T 与铝盘转速 ω （转/秒）成正比，即 $M_T=K_T\omega$ ，其中 K_T 是比例系数。

当转动力矩 M 与制动力矩 M_T 平衡时，铝盘匀速转动，从 $M=M_T$ ，

$KP = K_T\omega$ ，可知 $P = \frac{K_T}{K}\omega = C\omega$ ，即负载消耗的电功率与铝盘的转速成

正比，式中 C 是常数。用 W 表示一段时间 t 负载消耗的电能， $n(= \omega t)$ 表示同一段时间内铝盘的转数，则

$$W = Cn。$$

即负载所消耗的电能与铝盘的转数成正比，这就是电能表的原理。

通常将常数 C 的倒数用 N 表示，即

$$N = \frac{1}{C} \frac{n}{W}$$

N 称为电能表常数，并标在电能表盘上，它等于耗电 $1\text{kW} \cdot \text{h}$ 相应的转数。

主要参考资料

1. 中国大百科全书总编辑委员会《物理学》编辑委员会。中国大百科全书，物理学。第1版。北京：中国大百科全书出版社，1987。
2. 电子工业技术词典编辑委员会，电子工业技术词典(合订本)(上)。北京：国防工业出版社，1980。
3. 梁百先等。电磁学教程，下册。第2版。北京：高等教育出版社，1984。
4. 高礼魁。电工学(建工类专业用)。第1版。北京：高等教育出版社，1989。
5. 广东师范学院。电工学，中册。第1版。北京：人民教育出版社，1976。
6. 华中师范学院等。电工学。第1版。北京：高等教育出版社，1983。
7. 江苏师范学院物理系编委会。电磁学讲义，下册。第1版。北京：人民教育出版社，1960。
8. 辞海，工程技术分册(上)。第1版。上海辞书出版社，1978。
9. 赵凯华，陈熙谋。电磁学。第2版。北京：高等教育出版社，1985。
10. [苏] A.C.卡萨特金，M.B.涅姆佐夫。电工学。黄正中译。第1版。北京：高等教育出版社，1990。
11. 简明综合技术辞典编委会。简明综合技术辞典。第1版。北京：高等教育出版社，1965。
12. 广东中小学教材编写组。农村有线广播。第1版。北京：人民教育出版社，1976。
13. 周波。电能的输送。第1版。北京：人民教育出版社，1966。
14. 上海工业大学，上海电机厂。直线异步电动机。第1版。北京：机械工业出版社，1979。
15. [美] S.A.纳斯尔，[罗马尼亚] I.波尔达。直线电机。第1版。龙遐令等译。北京：科学出版社，1982。
16. 《实用电工技术问答 2500 题》编写组。实用电工技术问答 2500 题(上)。第1版。呼和浩特：内蒙古人民出版社，1988。
17. 机械工程手册、电机工程手册编委会。电机工程手册，第1卷。第1版。北京：机械工业出版社，1982。
18. 廖玄九等。电工学，下册。第1版。北京：人民教育出版社，1979。
19. 华南师范学院物理系，孙崇德。无线电电子学(上册)。第1版。北京：人民教育出版社，1978。
20. 贺德昌，曾杰。交流电。第1版。北京：人民教育出版社，1989。
21. 浙江大学电工学教研室，罗守信。电工学(上册)。第2版。北京：高等教育出版社，1985。

二十、电磁振荡和电磁波

电磁振荡 (electromagnetic oscillation)

电路中储能元件内电能与磁能不断周期性相互转化的过程。能产生电磁振荡的电路叫振荡电路。最简单的振荡电路是如图 1-20-1 所示由电容器 C 和电感线圈 L 串联

图 1-20-1

组成的 LC 振荡电路。假设电容器 C 充有电荷 Q，当合上开关 S 使电容器 C 和电感线圈 L 接通时，电容器开始放电，电路中有电流 i 出现，电容器内储存的电场能开始转化为电感线圈的磁场能。到电容器放电完毕，线圈的磁场能量达到最大值。此后，由于自感现象，电路中有与电容器放电电流方向相同的自感电流，使电容器反方向充电，磁场能又转化为电场能。到自感电流消失时，电容器充电完毕，电场能量达到最大值，但这时电容器极板上电荷的符号同起始情况相反。以后电容器又开始放电（电流方向与起始情况相反），电场能又转化为磁场能。这样的振荡过程一直持续到充给电容器的起始能量全部转化为电路导线耗散的热时为止。

(1)自由振荡 在 LC 振荡电路中，只需在起始时接受外界一次能量，便能维持电能、磁能周期性相互转化的振荡，叫做自由振荡或固有振荡。在振荡电路中，除储能元件 L、C 外，必然存在耗能的电阻 R，这样，在振荡过程中，起始接受的外界能量会被 R 逐渐转化为热而散失，振荡的振幅逐渐减小，最后趋近于零（图 1-20-2）。这种存在阻尼作用

图 1-20-2 阻尼振荡

的自由振荡叫做阻尼振荡或衰减振荡。在理想情况下，振荡电路中没有电阻，振荡的振幅不衰减，是等幅振荡，这种理想的自由振荡叫做无阻尼振荡。

自由振荡的周期、频率决定于振荡电路本身的参数 L、C、R。无阻尼自由振荡， $R=0$ ，角频率 ω_0 和频率 f_0 分别为

$$\omega_0 = \frac{1}{\sqrt{LC}}, f_0 = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}},$$

称为振荡电路的固有角频率、固有频率。阻尼自由振荡，当 $R < 2\sqrt{\frac{L}{C}}$ 时，振荡角频率

$$\omega = \frac{1}{\sqrt{LC}} \left(1 - \frac{R^2 C}{4L} \right)^{\frac{1}{2}}$$

显然 $\omega < \omega_0$ 。但实际的振荡电路中 R 值很小， $R^2 C \ll 4L$ ，所以 $\omega \approx \omega_0$ 。

如果 $R > 2\sqrt{\frac{L}{C}}$ ， $R^2 C > 4L$ ， ω 为虚数，这时电路中的电流 i 和电容器上的

电压 U、电荷 Q 都将随时间 t 按指数规律下降，即因电路中电阻太大，电

路储存的能量不足以维持振荡一周的消耗，从而不能形成振荡。

(2) 受迫振荡 振荡电路受外加振荡信号的控制（例如图 1-20-3，外加振荡信号通过耦合线圈控制 LC 振荡电路）所产生的振荡叫做受迫振荡。受迫振荡的频率决定于外加信号的频率，而振幅与电路的固有频率 f_0 同外加信号频率 f 的比值有关，当 $f_0/f=1$ ，即外加频率等于电路的固有频率时，振幅达到最大值，发生了电谐振。

图 19-20-3

在受迫振荡电路中，电阻所消耗的能量可以由外加振荡源补充，因此受迫振荡为等幅振荡。

振荡器 (oscillator)

在没有外界信号输入的情况下，能持续地将直流电源提供的能量转换成具有一定频率和一定波形的交流电信号输出的装置。无线电技术中常见的振荡器由电子管或晶体管和电阻、电感、电容等元件或压电石英等组成。

振荡器按照它是否需要外界信号激励来起振，分为他激振荡器和自激振荡器；按电路结构可分为变压器耦合振荡器、电感三点式振荡器、电容三点式振荡器、石英晶体振荡器等；按工作频率可分为低频振荡器、高频振荡器、甚高频振荡器、超高频振荡器等；按输出波形可分为正弦波振荡器、方波振荡器、锯齿波振荡器等；按工作状态可分为连续振荡器、间歇振荡器、脉冲振荡器等。

正弦波振荡器能够产生频率高达几百兆赫低至几赫的交流电信号，是广播、通信系统和测量、遥控、自动控制等技术领域的重要组成部分。正弦波振荡器由放大器、选频网络和反馈电路三部分组成。图 1-20-4 是电压

图 1-20-4 变压器反馈式 LC 正弦波振荡器

反馈式 LC 正弦波振荡器。图中 NPN 型三极管起放大作用， R_{b1} 、 R_{b2} 、 R_e 和 C_e 组成稳定它的工作点的分压式偏置电路，它的集电极负载是个 LC 振荡电路，是这个振荡器的选频网络，反馈线圈 L_1 经过 C_b 接到三极管的基极（对高频电流 C_b 可视为短路）。接通电源时在 LC 振荡电路（选频网络）中激起频率为其固有频率 f_0 的振荡电流，这个振荡信号经 L 、 L_1 、 C_b 加到三极管基极，经放大使 LC 电路中的振荡电流加强，补偿了振荡电路中的能量损失，维持了等幅振荡，并经过 L 、 L_2 的耦合输出。图 1-20-5 是超外差收音机的本机振荡电路，它也是变压器反馈式 LC 正弦振荡器，与图 1-20-4 不同的是：用了 PNP 三极管放大、选频网络接在发射极和基极间（ C_e 和 C_b 对高频电流可视为短路）、反馈线圈 L_1 接在集电极。

图 1-20-5 超外差收音机的本机振荡电路

运流电流 (convection current)

宏观带电物体或带电粒子（电子或离子）在空间运动时形成的电流；亦称对流电流。运流电流也会产生磁场，而且与传导电流产生的磁场性质完全相同。

由于带电体在原来没有电磁场的空间中匀速运动（如果略去空气阻力）不需要外力维持，所以运流电流不需要电动势来维持，也不引起热效应。由于传导电流与运流电流都是由于电荷运动而形成的，所以运流电流的电流密度 j_v 和电流强度 I_v 的表达式与传导电流的相同，即

$$j_v = \rho v$$

$$I_v = \int_S \rho v \cdot dS$$

式中 ρ 是电荷体密度， v 是电荷匀速运动的速度， dS 是面积元。与传导电流不同的是，传导电流产生在导体内，它服从欧姆定律，而运流电流产生在真空中或非常稀薄的物质中，电荷受到机械力或电场力的作用而运动，不能找到欧姆定律那样简单的关系。

位移电流 (displacement current)

电位移通量随时间的变化率。位移电流概念是麦克斯韦于 1862 年在英国的《哲学杂志》上发表的《论物理力线》中提出的，这是麦克斯韦在建立普遍的电磁理论过程中的关键性的一步。麦克斯韦注意到当把恒定电流情况下得出的安培环路定理

$$\oint_L H \cdot dl = I_0$$

推广到非恒定电流的情况时会得到矛盾的结果。例如在图 1-20-6 所示的含有电容器的

图 1-20-6 穿过以 L 为边线的曲面 S_1 、 S_2 的传导电流不相同
 交变电流的电路中，将安培环路定理应用于闭合曲线 L ，显然对于曲面 S_1

$$\oint_L H \cdot dl = \iint_{S_1} j_0 \cdot dS = I,$$

而对曲面 S_2

$$\oint_L H \cdot dl = \iint_{S_2} j_0 \cdot dS = 0,$$

两者互相矛盾。麦克斯韦意识到要使恒定情况下得出的安培环路定理适用于非恒定情况，必须对这条定理的公式进行修正。

麦克斯韦注意到图 1-20-6 情况下曲面 S_2 虽然没有传导电流穿过，但在电路中存在交变电流的情况下电容器极板上的电荷 q 不断变化，电容器间的电场不断变化。根据电、磁的对称性，他提出：既然变化的磁场会激发电场，那么变化的电场也会激发磁场。也就是他认为磁场不仅可由传导电流激发，也可以由变化的电场激发，要把安培环路定理推广到非恒定情况下，需要在这条定理公式右边增加一项反映电场的变化。于是麦克斯韦得到也适用于非恒定情况的安培环路定理公式

$$\oint_L H \cdot dl = I_0 + \frac{d\phi}{dt}.$$

式中 I_0 是传导电流， $\phi_D = \iint D \cdot dS$ 是电位移通量，

$$\frac{d\phi_D}{dt} = \frac{\partial D}{\partial t} \cdot dS .$$

$\frac{d\phi_D}{dt}$ 是电位移通量的时间变化率，即麦克斯韦增加的反映电场变化的一项，麦克斯韦称之为位移电流，并称 $\frac{\partial D}{\partial t}$ 为位移电流密度。

位移电流假设是麦克斯韦电磁场理论的重要基础之一，而麦克斯韦电磁场理论已被电磁波的存在等大量实验事实所证实，这就为位移电流假说提供了有力的证据。

麦克斯韦把传导电流 $I_0 = \iint j_0 \cdot dS$ 与位移电流合在一起称为全电流。

这样，对于图 1-0-6 中的曲面 S_1 和 S_2

$$\iint_{S_1} \left(j_0 + \frac{\partial D}{\partial t} \right) \cdot dS = \iint_{S_2} \left(j_0 + \frac{\partial D}{\partial t} \right) \cdot dS$$

上式表明全电流在任何情况下都是连续的。

全电流 (total current)

通过某一截面的传导电流、运流电流和位移电流的总和（代数和）称为通过该截面的全电流。全电流这个概念，是麦克斯韦提出位移电流假设后引入的，从而把电流连续性原理推广到一般情况，即无论电流恒定或不恒定（包括有交变电流的含电容器的电路），全电流永远是连续的。若用数学公式表示这个原理，可以先把它的表述变换为通过任一闭合曲面 S 的全电流等于零，而后写成

$$I + \oiint_S \frac{\partial D}{\partial t} \cdot dS = 0 .$$

式中 I 为通过 S 面的传导电流 I_0 及运流电流 I_v 的总和，即 $I = I_0 + I_v$ ，

$\oiint_S \frac{\partial D}{\partial t}$ 为通过 S 面的位移电流。应该指出，对于一个截面可以同时有传

导电流和运流电流通过，但是在空间同一点上，由于传导电流和运流电流存在的条件不同，传导电流密度 j_0 和运流电流密度 j_v 不可能同时存在。所以在空间某一点的全电流密度 j_t 只能理解为

$$j_t = j_0 + \frac{\partial D}{\partial t} \text{ 或 } j_t = j_v + \frac{\partial D}{\partial t} .$$

电磁场 (electromagnetic field)

相互联系的变化电场和变化磁场的总称，是物质存在的一种形式。磁场的任何变化会产生电场，电场的任何变化又会产生磁场，二者互相依存、互为因果，形成变化的电磁场。这种变化的电磁场不仅可以存在于电荷或电流的周围，而且能够脱离电荷和电流、不依靠其他物质在空间传播，形

成电磁波。

承认电磁场是物质存在的一种形式，是有一定困难的，原因在于人类历史上很长时间以来把物质概念与所谓“实物”概念（原子、分子及其所组成的物体）联系在一起，“实物”具有较大的质量密度和能量密度，集中在空间的一定位置上出现，它所占据的空间别的实物就不能再占据了。而电磁场则不具备这些特征，这是电磁场与实物间存在的差异。但是电磁场与实物间有许多相同的更为基本的特征：

(1)电磁场具有能量从电磁学知道电场的能量密度 w_e 和磁场的能量密度 w_m 分别为

$$w_e = \frac{D \cdot E}{2} \quad w_m = \frac{B \cdot H}{2}$$

电磁场的总能量密度

$$w = w_e + w_m = \frac{1}{2} (D \cdot E + B \cdot H)。$$

在空间任意体积 V 中的电磁场能量

$$W = \frac{1}{2} \iiint_V (D \cdot E + B \cdot H) dV。$$

电磁场具有能量是电磁场具有物质实在性的重要证据。这说明电磁场不是什么“虚空”，而是像实物一样具有可做功的能量。与实物的区别只是量的不同——能量密度极小。

(2)电磁场具有动量根据麦克斯韦方程组可以推导出任意体积 V 的电磁场的动量

$$G = \frac{1}{c^2} \iiint_V (E \times H) dV。$$

根据电磁场具有动量，可以推导出光垂直照射物体表面会产生光压

$$P = \frac{EH}{c} (1 + \rho) = \frac{u}{c} (1 + \rho)$$

式中 c 是真空中光速， ρ 是物体表面的反射系数， u 是光的能流密度。

光压的存在，已于 1901 年为列别捷夫用实验证实。

(3)电磁场具有质量光压存在的实验，已经可以证明电磁场具有质量。另外根据爱因斯坦的质能关系式 $W=mc^2$ 还可以从电磁场具有的能量 W 求出电磁场的质量 m 。与实物不同的是，构成电磁场的光子的静止质量为零，而实物粒子——电子、质子、中子等的静止质量不为零。

(4)在微观条件下，电磁场和实物都具有二象性，而且可以相互转化，例如电子和正电子湮没可以转化为一对光子，而光子也可以转化为电子与正电子对。

麦克斯韦方程组 (Maxwell equations)

英国物理学家麦克斯韦根据电磁现象的经验规律和涡旋电场、位移电流两个假设，在 1864 年提出的作为经典电磁学理论基础的 4 个方程。现代形式的麦克斯韦方程组是德国物理学家 H.R. 赫兹和英国物理学家 O. 亥维塞 (Heavisid 1850–1925) 给出的。麦克斯韦方程组的积分形式是：

$$\oiint \mathbf{D} \cdot d\mathbf{S} = q_0 \quad (1)$$

$$\oint \mathbf{E} \cdot d\mathbf{l} = - \iint \frac{\partial \mathbf{B}}{\partial t} \cdot d\mathbf{S}, \quad (2)$$

$$\oiint \mathbf{D} \cdot d\mathbf{S} = q_0 \quad (3)$$

$$\oint \mathbf{H} \cdot d\mathbf{l} = - \iint \left[\mathbf{j}_0 + \frac{\partial \mathbf{D}}{\partial t} \right] \cdot d\mathbf{S} \quad (4)$$

方程(1)表示：通过任意闭合曲面的电位移 (\mathbf{D}) 通量等于该曲面所包围的自由电荷的代数和 (q_0)。这个方程是研究静电场时得出的高斯定理，麦克斯韦把它推广到电荷和场都随时间变化的一般情况。它的物理意义是： \mathbf{D} 线或者是起始于正自由电荷而终止于负自由电荷，或者是闭合的。

方程(2)表示：电场强度 (\mathbf{E}) 沿任意闭合曲线的线积分等于以该曲线为边线的曲面的磁通量的变化率的负值。这个方程是研究磁场缓慢变化时得出的法拉第电磁感应定律，麦克斯韦将它推广到磁场迅速变化的情况。它的物理意义是：电场不仅可以由电荷产生，而且可以由随时间变化的磁场产生。方程(3)表示：通过任意闭合曲面的磁通量恒等于零。这个方程与研究恒定磁场时认识到的磁荷不存在有关，由于不存在磁荷，磁力线都是闭合的，通过任一封闭曲面的磁力线的代数和为零或磁通量为零；麦克斯韦把它推广到磁场变化的一般情况。方程(4)表示：磁场强度 (\mathbf{H}) 沿任意闭合曲线的线积分等于穿过以该曲线为边界的曲面的全电流。这个方程是麦克斯韦根据安培环路定理和位移电流假设建立的（参见“位移电流”），它的物理意义是：磁场不仅是由运动的电荷产生，也由变化的电场产生。麦克斯韦方程组中物理量 \mathbf{D} 与 \mathbf{E} 之间， \mathbf{H} 与 \mathbf{B} 之间，以及 \mathbf{j}_0 （传导电流密度）与 \mathbf{E} 之间存在的关系，由所谓的介质的特性方程来决定。对各向同性介质来说

$$\mathbf{D} = \epsilon \mathbf{E}, \mathbf{B} = \mu \mathbf{H}, \mathbf{j} = \gamma \mathbf{E}. \quad (5)$$

式中 ϵ 为绝对电容率， μ 为绝对磁导率， γ 为电导率。

麦克斯韦方程组和介质的特性方程，全面总结了电磁场的规律，是宏观电动力学的基本方程组，利用它们原则上可以解决各种宏观电磁场的问题。

麦克斯韦方程组的积分形式表征的是一定范围内（例如在一个闭合路径或一个闭合曲面内）的电磁场，而不能表征某一点的电磁场。但在实际应用中更重要的是能表征每一点上的电磁场。为此，只要把积分方程组中闭合曲线或闭合曲面缩成无限小，就可以把积分式变成微分式，得到麦克斯韦方程组的微分形式：

$$\mathbf{D} = \epsilon \mathbf{E}, \mathbf{B} = \mu \mathbf{H}, \mathbf{j} = \gamma \mathbf{E}. \quad (5)$$

式中 ϵ 是矢量微分运算符号。

通常说的麦克斯韦方程组是指麦克斯韦方程组的微分形式。当作为时间和坐标函数的电荷、电流给定时，从麦克斯韦方程组根据初始条件（以及必要的边界条件）就可以完全决定空间任一点的电磁场变化。

从麦克斯韦方程组可以导出变化的电磁场以光速向外传播，麦克斯韦据此预言电磁波的存在和光是电磁波。麦克斯韦的预言被德国物理学家赫

兹在 1887 年用实验所证实，从而开辟了电磁波通讯的新时代。

麦克斯韦方程组概括了（反映了）电磁场运动的基本规律，它在电磁学中的地位相当于牛顿定律在力学中的地位。但是麦克斯韦的电磁场理论认为能量是连续变化的，所以它属于经典（古典）理论，当电磁场的频率非常高以致量子效应成为主要的情况下，麦克斯韦方程组不再适用。要让位给量子电动力学。

电磁波 (electromagnetic wave)

在空间传播着的交变的电磁场。电磁波的传播速度等于光速，在真空中是 $3 \times 10^8 \text{m/s}$ 。电磁波的存在，早在 1832 年法拉第就预言了。到 1865 年麦克斯韦从理论论证了变化的电磁场必然以波的形式在空间传播，并且传播速度等于光速。麦克斯韦的电磁波理论，到 1887 年为赫兹用实验所证实。

麦克斯韦电磁波理论的核心内容是两条：变化的磁场激发涡旋电场；变化的电场（位移电流）激发涡旋磁场。设想空间某处有交变的电流或电场，它在自己周围激发涡旋磁场，由于这磁场也是交变的，它又在自己周围激发涡旋电场。交变的涡旋电场和涡旋磁场相互激发，电磁场在空间传播开来，形成电磁波。

在远离波源的自由空间（没有自由电荷和传导电流的无限大的均匀介质）中传播的电磁波，可以看成平面波。研究平面电磁波可以了解电磁波的下列普遍性质：

(1) 电磁波是横波：振动的电矢量 E ，磁矢量 H 都与电磁波的传播方向垂直。

(2) 电矢量 E 与磁矢量 H 垂直。

(3) E 和 H 同相位。

(4) E 和 H 的振幅值有比例关系：

$$\sqrt{\epsilon}E_0 = \sqrt{\mu}H_0$$

(5) 电磁波的传播速度

$$v = \frac{1}{\sqrt{\epsilon\mu}}$$

在真空中 $\epsilon = \epsilon_0 = 8.85 \times 10^{-12} \text{C} \cdot \text{N}^{-1} \cdot \text{m}^{-2}$ ， $\mu = \mu_0 = 4\pi \times 10^{-7} \text{N} \cdot \text{A}^{-2}$ ，所以在真空中电磁波的速度

$$c = \frac{1}{\sqrt{\epsilon_0\mu_0}} = 3 \times 10^8 \text{m/s}$$

这就是真空中光的传播速度。

不同波长（或频率）的电磁波，具有不同的特性，其获得方法也不同。为了对各种电磁波有个全面了解，通常按波长或频率把电磁波划分为若干波段排列在一起，这就是所谓的电磁波谱（图 1-20-7）。

图 1-20-7 电磁波谱

坡印亭矢量 (Poynting vector)

电磁波在空间传播时，某一点处电场强度 E 与磁场强度 H 的矢量积 S

($=E \times H$)，称为该点的坡印亭矢量，也称为乌莫夫-坡印亭矢量或能流密度矢量。它的数值等于单位时间内通过该点处垂直于电磁波传播方向的单位面积的电磁能量。它的方向即电磁能量的传播方向，与 E 和 H 都垂直，并且与 E、H 构成右螺旋关系。

坡印亭矢量的概念不仅适用于迅变的电磁场，也适用于恒定的电磁场，如直流供电时的情况。

赫兹实验 (Hertz experiment) 德国物理学家赫兹 (Heinrich Rudolf Hertz 1857 ~ 1894) 在 1887 年第一次证实了电磁波存在，并证明了电磁波与光波的同—性。1875 年柏林大学教授亥姆霍兹向学生提出一个竞赛题目：用实验方法证实麦克斯韦理论。他的学生赫兹从那时起开始致力于这个课题的研究。经过 12 年的努力才首次用实验证实了麦克斯韦 1865 年提出的理论。那时，麦克斯韦已去世 8 年了。赫兹曾作过许多实验，图 1-20-8 是他用过的装置之一。装置中有一感应圈，它的副

图 1-20-8 赫兹证实电磁波存在的实验装置原理图

线圈接金属棒，棒又与金属板相接以便调节电路中的电容。这个电容和副线圈的电感组成串联振荡电路，作为发射机。在相隔几米处放一带有间隙的圆形检测线圈作为接收机。当发射机放电时，在接收机间隙处观察到了火花，从而证明了电磁波的存在。这个

频段名称	频率范围	波长范围	波段名称	主要用途
极低频 (ELF)	3kHz	100km	极长波	水下通信
甚低频 (VLF)	3 ~ 30kHz	10 ~ 10km	超长波	导航、频率标准
低频 (LF)	30 ~ 300kHz	10 ~ 1km	长波	
中频 (MF)	300 ~ 3000kHz	10 ~ 100m	中波	导航、广播
高频 (HF)	3 ~ 30Mhz	100 ~ 10m	短波(米波)	导航、广播、无线电天文
甚高频 (VHF)	30 ~ 300Mhz	10 ~ 1m	超短波(米波)	导航、电视、雷达 调频广播
特高频 (UHF)	300 ~ 3000Mhz	10 ~ 1dm	分米波	
超高频 (SHF)	3 ~ 30Ghz	10 ~ 1cm	厘米波	微波 导航、电视、雷达
极高频 (EHF)	30 ~ 300Ghz	10 ~ 1mm	毫米波	
至高频	300 ~ 3000Ghz	1mm ~ 0.1mm	丝米波	天文、业务通信、 宇宙通信

发射机的振荡频率 $f_0 = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}} \approx 10^8 \text{ Hz}$ ，因而发射的电磁波的频率也

约为 10^8 Hz 。赫兹又用驻波方法测量出所发射的电磁波的波长 $\lambda = 2.8 \text{ m}$ ，这样就得到电磁波的传播速度 $v = f_0 \lambda = 2.8 \times 10^8 \text{ m/s}$ 。在当时看来，这与光速 $S = 3 \times 10^8 \text{ m/s}$ 已很接近了。后来，赫兹又改进了他的实验，作了波长较短 (0.33m)、发射机和接收机相距较远 (16m) 的实验，研究了电磁波的反射、折射和偏振等现象，发现电磁波的行为和光的行为完全相同，唯一的区别在于电磁波是不可见的。当时赫兹曾说：“我觉得，所谈到的这些实验至少消除了光、热辐射和电磁波的等同性问题上的怀疑。”

无线电波 (radio wave)

在空间传播的、频率范围从几十赫到 3000 千兆赫(波长范围在几万千米到 0.1 毫米)的电磁波。无线电波的传播特性随频率(或波长)不同而有差别。习惯上,把无线电波按频率(或波长)划分为若干频段(或波段)。上页的表是无线电波的频段和无线电波的波段的简介。无线电波通过介质或在介质分界面(包括电离层界面)会被折射、反射、散射、吸收,也会发生干涉、衍射、偏振等现象。

耦合电路 (coupledcircuit)

两个或两个以上的电路构成一个网络时,其中某一电路中电流或电压发生变化,能影响到其他电路也发生类似变化,这种网络叫做耦合电路。组成耦合电路的目的是把某一电路的能量输送到与它耦合的其他的电路中去。实现耦合的条件是,电路彼此间必须有公共阻抗。根据公共阻抗性质的不同可分为:电阻耦合、电感耦合、电容耦合、阻容耦合、互感耦合(变压器耦合)等多种(图 1-20-9)。阻容耦合(电阻电容耦合)、互感耦合在无线电技术中应用较为广泛。

载波 (carrier wave)

用以载送调制信号而尚未调制的高频振荡,称为载波。载波可以是正弦波,也可以是非正弦波,如方波、脉冲波等,一般为等幅波。载波的频率称为载频或中心频率。载波的功率越大,其无线电波的传播距离越远。

经过调制的载波称为已调波,已调波中被调制的高频振荡,也称为载波。

调制 (modulation)

为了实现无线电广播、通信和有线电多路通信,而使被称为载波的高频电振荡(电流、电压)的参数按照要传送的信息的特征变化的过程。

电磁振荡频率越高辐射电磁波的效率越高,频率越低,辐射效率越低。音频振荡实际辐射不出电磁波,需要借助高频振荡将它从发射天线辐射出去,这是无线通信需要调制的原因。有线通信要利用同一条线路同时传输不同的信息而不互相干扰,可以把它们分别加在不同频率的高频振荡上传输,到接收端再经过选频(滤波)而区分开,这就是有线多路通信。

作为载波的高频振荡一般是正弦波,由振幅、频率、相位三个参数来描述,因此对它进行调制可以分调幅、调频、调相三种方式。

(1)调幅 调幅是使载波的振幅受调制信号振幅控制而改变的一种调制方式,常用英文字母 AM 表示。调幅过程如图 1-20-10 所示,只要把载波和调制信号同时输入幅度调制器,得到的输出信号就是振幅变化规律与调制信号振幅变化规律一致的高频波,称为调幅波。调幅波的包络线反映了调制信号,

图 1-20-9 耦合电路举例

图 1-20-10 调幅过程示意图

在接收机中只要使调幅波经过检波、滤波,就能得到原来的调制信号。

如果载波的频率是 f_c ，调制信号的最高频率是 f_s ，那么这个调幅波的频谱范围就是从 $(f_c - f_s)$ 到 $(f_c + f_s)$ ，这个调幅波的频带宽度是 $2f_s$ 。国际上规定，每个调幅广播电台所占用的频带宽度为 9kHz。这样，传送声音信号的最高频率就必须限制在 4500Hz 以内，对于传送语言信号，已有余量；对于传送音乐信号，则显得高音不足。

(2) 调频 调频是使载波的频率受调制信号控制而按调制信号振幅的变化规律而变化的一种调制方式，常用英文字母 FM 表示。图 1-20-11 是调频过程的原理说明图。

图 1-20-11 调频过程

调制信号经过频率调制器去控制高频振荡器的振荡频率，从而得到频率变化而振幅不变的已调波——调频波。调制信号的正半周，高频振荡的频率增高，对应于调频波较密部分；调制信号的负半周，高频振荡的频率降低，对应于调频波较疏部分。调频波的频率好像在载波频率 f_c 的左右摆动，频率由中心频率 f_c 向一侧摆动的最大范围称为频率偏移，简称频偏或频移。频偏与调制信号的振幅成比例。

对于同样的调制信号，调频波的频带比调幅波的频带要宽。例如目前使用的调频制声音广播的频带宽度规定为 200kHz。由于它频带宽，能把声音的低频成分和高频成分都不折不扣传送出去，收听时就感到特别优美悦耳。与调幅系统相比，调频系统还有抗干扰性较强和机器设备较简单等优点。但由于调频波占用的频带宽，在一定波段内可以容纳的发射台的数目较少，例如在中、短波范围内只排一百多个调频电台就会被占满了。所以调频系统不适用于中波段和短波段，只应用于超短波以上波段。

(3) 调相 调相是载波的相位受调制信号控制而按调制信号振幅变化规律而变化的一种调制方式。经过调相后的已调波（调相波）是振幅不变的等幅波，但是它的瞬时相位偏离载波相位的量与调制信号振幅的瞬时值成比例。

调相时载波的频率也有变化，只是这种情况下的频率变化不与调制信号的振幅成比例。调相技术广泛应用于无线电测量和定位技术中。

除以上三种调制方式外，还有一种调制方式，是先用信号去调制脉冲序列中各脉冲的参数（脉冲幅度、脉冲宽度或脉冲位置等），再用这组已经调制过的脉冲序列去调制一高频正弦波。这种调制方式称为脉冲调制，应用于数字通信中。

地波 (ground wave)

由天线发出、沿地球表面传播的无线电波。变化的电磁场沿地球表面传播时会由于在地面上引起感应电流而损失能量，并且电磁场的频率越高，能量损失越快。所以地波由于传播过程中的能量损失而传播不远；波长越短，衰减越快。但是地波传播不受气候影响，可以实现可靠的通信。长波及较长波段的中波通信和广播，通常利用地波传播，可达数百千米。短波通信，地波传播一般情况下只有几十千米，因而实现远距离通信要靠天波。

如果收、发天线离地面的高度远大于通信所用的无线电波的波长，那

么可以认为接收点收到的地波是从发射点经由空间直线(图 1-20-12 中的(1))传播到接收点的(有时包括图 1-20-12 中的(2)被大地反射的成

图 1-20-12 空间波示意图

分)。这样的地波叫空间波。空间波的传播距离一般限于视线区域;在传播过程中电波的强度衰减较慢。利用空间波传播是超短波和微波通信的方式之一。

天波 (skywave)

由天线发出,经电离层反射而返回地球表面的无线电波,又称电离层波。长波、中波、短波和超短波低端的无线电波都可以用天波方式传播。由于电离层经常变化,天波传播不够稳定,夜间比白天传得远。天波传播是目前短波无线电通信和广播所利用的主要传播方式。

在短波无线电通信中,天波所能达到的、离发射点最近的距离,叫做越程(图 1-20-13),又叫做跳距。比越程近的区域,天波不

图 1-20-13 越程和静区

能到达,而其中距发射点近的地区还可以靠地波接收发射的信号。由于短波的波长短,地波衰减快,能靠地波接收信号的距离小于天波的跳距。所以在跳距内存在天波与地波都不能到达的地区,这个地区叫静区。在静区内接收不到发射点发射的信号。跳距和静区都随无线电波的频率、电离层的高度和电子浓度等因素改变,因而要受昼夜、季节等变化的影响。

电离层 (ionosphere)

又称电离圈,是指从 60km 到 2000km 左右处于电离状态的高层大气区域。造成中性大气电离的主要有:太阳紫外线辐射、太阳日冕的软 X 射线和从太阳表面喷射出来的微粒流等。根据实测,在电离层内存在若干层电子浓度不同的区域,电子浓度较高的几层约离地面 50km~400km。近地面的称为 D 层,也称 D 区,约离地面 50km~90km,电子浓度约 10^3 个~ 10^4 个每立方厘米,它只是白天存在,对短波和中波主要起吸收作用,对长波起反射作用。在高度约 90km~130km 的区域称为 E 层,白天最大电子浓度约为 $(1\sim 2)\times 10^5$ 个每立方厘米,而夜间约为 10^3 个~ 10^4 个每立方厘米。E 层主要由氧分子电离形成,可以反射中波和短波。在 E 层以上是 F 层,夏季,白天,F 层又可分为 F_1 层(高约 180km、最大电子浓度约为 $2\sim 4.5\times 10^5$ 个每立方厘米)和 F_2 层(高约 300km~500km,最大电子浓度约为 10^6 个每立方厘米)。短波可以利用 F 层的反射作用进行远距离通信。电离层各层的电子浓度及高度等参数,随太阳活动、季节、昼夜、经度、纬度等而发生复杂的变化。

微波中继通信 (microwave radio relay communication)

利用微波传送电信号的一种通信方式。微波的低频端为 300MHz,高频端达 300GHz,波长从 1mm 到 10dm,它的性质很像光波。一方面,地面对微

波有强烈的吸收，它不能像中波那样沿地面传播；另一方面，微波能穿透电离层，它不能像短波那样靠电离层反射传播。它只能像光波那样，在视线距离内沿直线传播。由于地球表面是个曲面，所以微波在地面传播的距离有限，一般为 40km~60km。为了进行远距离微波通信，就在两个终端站之间设置许多中继站（图 1-20-14），

图 1-20-14 微波中继通信示意图

按接力的方式将信号一站一站地传下去。所以微波中继通信又称为微波接力通信。相邻两个中继站一般相距 50km。

每个微波中继站都有抛物面天线将前一站发射的微波接收下来，经过放大，再发射给下一站。抛物面天线由抛物反射面和在它上面用四个绝缘支柱支撑的副反射器，以及位于它们轴线上的圆锥形喇叭辐射器组成（图 1-20-15）。微波发信机输出的微波信号经波

图 1-20-15 抛物面天线

导馈线从抛物反射面的背后送入喇叭辐射器，电磁波由喇叭口辐射出来后照射在副反射器上，副反射器位于抛物面的焦点，它对着喇叭口的一面是一个凸形的双曲反射面，这个反射面把微波信号发散开来，并反射到抛物面上，经抛物面第二次反射后的微波就成为很窄的平行波束发射出去。接收天线与发射天线结构相同，经过两次反射进入喇叭的电磁波，再经波导系统进入接收机（图 1-20-16）。

图 1-20-16 收发天线工作示意图

微波中继通信的特点是：(1)工作波段很宽，可安排几个高频波道而不互相干扰，每个波道可传送一路彩色电视或几百至几千路电话；(2)受外界干扰（如工业干扰、雷电干扰等）的影响小，传输质量较高；(3)与短波、超短波通信相比，可采用较小的天线；(4)与电缆通信相比，可节省有色金属，建设费用较低（但保密性不如电缆通信）；(5)由于天线方向性好，中继站距离近，所以发射机功率较小。

同步轨道通信卫星（synchronous orbit communication satellite）

发射到与地球自转同步（周期为 24 小时）的圆轨道上的通信卫星。这种卫星的轨道高度为 35800km。如果轨道平面与地球赤道平面的交角不为零，从地面任一观察点看去，卫星有沿经度方向的运动，没有沿纬度方向的运动。如果轨道平面与地球赤道平面的交角为零，即卫星发射到赤道上空与地球自转同向运行，从地面任一观察点看去，卫星是静止不动的，所以这样的同步轨道通信卫星常叫做**静止通信卫星**，这样的轨道叫做**静止轨道**。目前绝大多数的卫星通信系统采用静止通信卫星。

从静止通信卫星向地球引两条切线，两切线的夹角为 17.34° （图 1-20-17）。这样，一颗静止通信卫星能供地球上将近三分之一的地区通信。如果发射三颗静止通信卫星，彼此相隔 120° ，就能覆盖全球大部分地区，实现全球通信。

图 1-20-17 静止通信卫星覆盖示意图

调谐 (tuning)

改变振荡电路的电抗, 使它的固有频率同信号频率相同从而发生谐振 (共振) 的过程。无线电接收机要靠调谐选择接收信号。图 1-20-18 是 LC 调谐选择电路的原理图,

图 1-20-18 LC 调谐电路

图 1-20-19 调谐电路的等效电路

图 1-20-19 是它的等效电路。不同电台发射的不同频率的电磁波都会在接收天线激起感应电动势, 并经过感应耦合在 LC 电路中激起相应频率的感应电动势 e_1 、 e_2 、 e_3 ……改变 LC 电路中的电感或电容可以改变它的固有频率 f_0 , 当 f_0 与某信号源的频率相等, 例如与 e_2 的频率 f_2 相等, 则电路对 e_2 发生谐振, 由 e_2 产生的振荡电流最强, 并且使电感、电容两端产生很高的电压 (可以是 e_2 的几十倍甚至几百倍), 使 e_2 得到了放大, 而其他频率的信号 e_1 、 e_3 ……被 LC 电路所抑制, 这样 e_2 就被选择出来了。

谐振时电感 (或电容) 上的电压与信号源电动势的比值, 只决定于 LC 电路的参数, 通常用 Q 表示:

$$Q = \frac{\omega L}{R} = \frac{1}{\omega RC}.$$

式中 $\omega = 2\pi f$, 当信号频率一定时, 电感线圈的电阻 R 越小, L 与 R 的比值越大, 电感 (或电容) 两端的电压越高, 选择性越好。所以 Q 值的大小是衡量一个 LC 回路选择性好坏的重要指标, 称为品质因数。图 1-20-20 表示出了 Q 值对电路的选择性的影响, 纵坐标 i 表示电路中的电流, 横坐标 f 表示信号的频率, 当信号频率 f 等于电路的固有频率 f_0 时, 发生谐振, 电路中的电流最强, 即在 $f=f_0$ 时曲线有个峰值。电路的电阻 R 越小, Q 值越大, 曲线越尖锐, 选择性越好。

图 1-20-20 Q 值对选择性的影响

调谐方式有两种: 一种是机械调谐, 如转动可变电容器或改变线圈中磁芯的位置; 另一种是电调谐, 如通过改变振荡电路中变容二极管上的反向电压来改变它的电容, 从而改变电路的固有频率与信号谐振。

收音机通常用改变电容的办法来调谐, 电视机通常用改变电感的办法来调谐。

检波 (detection)

广义的检波通常称为解调, 是调制的逆过程, 即从已调波提取调制信号的过程。对调幅波来说, 是从它的振幅变化提取调制信号的过程; 对调频波来说, 是从它的频率变化提取调制信号的过程; 对调相波来说, 是从它的相位变化提取调制信号的过程。

狭义的检波是指从调幅波的包络提取调制信号的过程。因此, 有时把

这种检波称为**包络检波**或**幅度检波**。图 1-20-21 表示出了这种检波的原理：先让调幅波经过检波器（通常是晶体二极管），从而得到依调幅波包络变化的脉动电流，再经过一个低通滤波器滤去高频成分，就得到反映调幅波包络的调制信号。

图 1-20-21 包络检波原理

灵敏度 (sensitivity)

一般指仪器、设备对微小外加信号显示出的敏感程度。例如，电表的灵敏度是指一个单位的被测量（如 $1\ \mu\text{A}$ 电流、 1mV 电压）输入电表时所引起的指针偏转格数。

收音机的灵敏度被定义为：当收音机的输出功率为规定的标准功率（标准功率通常为标称功率的十分之一或其他规定值）时，在输入端所需要的信号强度或场强。信号强度以 μV 计，场强以 mV/m 计；这些数字越小，灵敏度就越高，收音机能接收的电台越远、越多。灵敏度是衡量接收机质量的一个重要指标。

选择性 (selectivity)

电路或电子设备抑制干扰而选择有用信号的能力。接收机的选择性是指选出所要接收的频率信号而抑制邻近频率信号的能力。接收机的选择性越好，越不容易受其他电台的干扰。因此，选择性是决定接收机质量的一个重要指标。

直放式收音机 (high-frequency-amplification receiver)

又称**高放式收音机**，将接收到的广播电台高频信号直接进行放大然后检波的收音机。图 1-20-22 是直放式收音机的方框图，由天线和调谐电路接收到的高频调幅信号，先进行高频放大，再进行检波和低频放大，最后由耳机或扬声器发声。直放式收音机的结构简单，但选择性和灵敏度都比较差，目前很少采用。

图 1-20-22 直放式收音机方框图

超外差式收音机 (superheterodyne receiver)

将接收到的广播电台的高频信号先同接收机本机所产生的振荡混合产生一个中频信号，然后进行检波的收音机。图 1-20-23 是超外差式收音机的方框图。同直放式收音机相比，是在检波以前增加了变频和中频放大。由于高频放大不容易获得较高而稳定的放大倍数，所以直放式收音机的灵敏度很难提得很高。此外，直放式收音机通常只有一个调

图 1-20-23 超外差式收音机方框图

谐回路，对频率相近的广播信号的抑制能力有限，进一步提高选择性也很

难。这些缺点，增加了变频和中频放大得以克服。

变频包括本机振荡（也叫本地振荡）和混频两部分。本机振荡是收音机本身的振荡器，它产生的高频等幅信号的频率总比要接收的高频调幅信号的频率高 465kHz。高频调幅信号和本机振荡的高频等幅信号同时进入混频器后，得到的是它们的差频——465kHz 的中频调幅信号。不论要接收的电台的信号频率是多少，由于本机振荡器与调谐回路是同时调整的（用一个双连可变电容器同时调整），它们的频率一起改变，变频后总是得到 465kHz 的中频信号，送到中频放大器去放大。中频放大器是专门为放大 465kHz 的中频信号而设计的，放大倍数高而且稳定，因而收音机的灵敏度可以大大提高。而且中频放大器都有固有频率为 465kHz 的中频调谐回路，这就提高了对其他频率的信号的抑制能力，因而使收音机的选择性大大改善。

无线电报（radiotelegram）

利用无线电波传送书面信息的通信方式。电报通信的基本方法是在发报端将文字变成电码发送，在收报端再将电码还原成文字。无线电报的发送端有振荡器，用手直接或通过打字机式的字键来操纵电报电键，使振荡器的电路接通或断开，以便从天线发送出与电码符号相对应的各种不同持续时间或间隔时间的等幅振荡脉冲的电磁波。在收报端，可由译电员将收到的电码译成文字，也可由电报译码机将电码自动译成文字并印出来。

同有线电报比，无线电报不需要架线，设备费用低，灵活性大，机动性强，特别适用于航海、航空、宇航等移动通信的需要，但保密性差，易受各种干扰的影响。同无线电话比，无线电报所需的频带较窄，为达到同样的通信距离，发射机所需的功率较小。

电码（code）

电报的单元电信号，由电流脉冲及其间隔按一定方式组合而成。电码的种类是多种多样的，在我国常用的电码有莫尔斯电码和五单位电码。

(1)莫尔斯电码莫尔斯电码是用“点”和“划”两种符号的不同组合来代表英文字母、数字和标点符号的，如下表所示。例如数字“1”用一点一划来代表；数字“5”用五点来代表；字母“B”用一划三点来代表。“点”和“划”的长短有统一规定。如果把一个“点”的时间作为一个单位，则一“划”的时间是三个单位，“点”与“划”的间隔时间为一个单位，字母（数字或标点）与字母之间的间隔为三个单位，而字与字间的时间间隔为五个单位。只要把这些点、划符号变换成相应的电信号传送出去，对方根据收到的点、划符号，就可以

莫尔斯电码

英文字母		数字		标点符号
A · ·	N- ·	(1)小打符号	(2)大打符号	[·] · · · · ·
B- · · ·	O- - -	1 · ·	1 · · · · ·	[,] - - - - -
C- · · ·	p · · · ·	2 · · ·	2 · · · · ·	[:] - - - · ·
D- · · ·	Q- - - ·	3 · · · · ·	3 · · · · ·	[—] - - - · ·
E ·	R · · ·	4 · · · · ·	4 · · · · ·	[/] - · · · ·
F · · · ·	S · · · ·	5 · · · · ·	5 · · · · ·	['] - · · · · ·
G- · ·	T-	6- · · · · ·	6- · · · · ·	["] · · · · ·
H · · · ·	U · · ·	7- - - · · ·	7- - - · · ·	[(] - - - - -
I · ·	V · · · ·	8- · · ·	8- - - · · ·	[)] · · · · ·
J · · · ·	W · · ·	9- ·	9- - - · · ·	[?] · · · · ·
K- · ·	X- · · ·	0-	0- - - · · ·	[=] - · · · ·
L · · · ·	Y- - - ·			
M- ·	Z- · · ·			

再翻译成字母、数字或标点符号。

由于中国汉字的字形数量很多，不能给每一个字都规定一种点划符号来传送，因此规定一个汉字用4个十进制数字来代表，4个数字的不同组合（编码）就代表不同汉字。例如“中”字用“0022”来代表，“国”字用“0948”来代表。只要用“点”、“划”信号发送出“0022 0948”这两组编码，就代表发送了“中国”二字。明码电报各个汉字的编码，在《标准电码本》中有统一规定，如果是密码电报，则由收、发双方自行规定编码。莫尔斯电码主要用于人工电报中，便于用电键发送和用音响器抄收。

(2)五单位电传电码 为了便于国际之间互通电报，国际电报电话咨询委员会建议采用统一的电传机电码，其中使用较普遍的是国际2号五单位电码。

五单位电码是用5个二进制符号来代表字母、数字和标点符号。二进制符号就是“1”和“0”，5个二进制符号的不同组合，就构成五单位电码。例如字母“A”用“11000”表示，字母“D”用“10010”表示，十进制数字“6”用“10110”表示。由于5个二进制符号总共只有 $32(=2^5)$ 个不同组合，因此，每一个五单位电码组合代表两个字符——一个是字母，一个是数字或标点符号。（在发报机中有“字母”、“数字”发信电键，通过它们预先发送一个“字母”或“数字”信号；在收报机中有“字母-数字”转换设备，以便按收到的信号分别印出字母或数字。）

五单位电码变换成电信号，是用5个时间相等的电脉冲来组成。二进制符号为“1”时有电流脉冲信号，称为“传号”，符号为“0”时无电流脉冲信号，称为“空号”。为了使收、发双方同步，在每组信号前面加1单位长度的起动信号，后面加1.5单位长度的停止信号，并规定起动信号均为空号，停止信号均为传号。五单位电传电码见下表，表中“ ”代表传号，即有电流信号，它在凿孔纸条上表示有孔信号；表中空白代表空号，即无电流信号，它在凿孔纸条上表示无孔信号。

(3)五单位数字保护电码 在我国国内电报通信中，采用四个数字代表一个汉字的方式进行通报。所以在报文中数字出现的机会比字母和标点出现的机会要多得多。为了减少电报差错、提高通报质量，以国际2号五单位电码为基础，改变某些字符的码组，使0~9共十个数字均具有3(传号):2(空号)的组合。当接收的某数字码组中有任意一个电码信号发生差错时，该组电码就变成了2 3或4 1的组合，在接收端将印出标点或字母，这样大部分在传输过程中引起的电报差错就可以检查出来了。为了便于对照，将五单位数字保护电码和国际2号五单位电码并列于上页的表中。

由电传机接收来的电报信号，经凿孔机打成凿孔纸条，然后把凿孔纸条送至中文电报译码机，即可印出汉字报文。

无线电话 (radiotelegraph)

利用无线电波传送信息达到互通语言的通信方式。在发话端，振荡器产生的高频振荡被送话器产生的低频(音频)振荡所调制(改变)，已调制的高频振荡进入发射机的天线，再由天线以电磁波的形式辐射出去。这些电磁波在接收天线中激起振荡电流，其波形与频率同发射机天线中的振荡电流相同。在接收机内经过放大、检波，分离出相当于调制频率的低频(声频)电流，再经过低频放大送入受话器，或不经放大而直接送入听筒，使人们听到声音。

远距离无线电话，使用2MHz至30MHz的短波段频率，靠电离层反射来实现无线电波的远距离传输。近距离的无线电话，则使用更高的频率，靠电磁波的直线传播。

无线电话与无线电广播大体相似，它们都是把声音信号转变成电信号利用电磁波传送出去。不同的是，无线电广播要把电磁波发射到四面八方，使各地都能收听，而无线电话一般只是两地之间通话，为了增大通话距离，无线电话可以采用定向天线，只向受话地发射电磁波；无线电广播是单方向传递声音信号，即由广播电台发送，千家万户收听，而无线电话要双方在两地通话，每一方都既有发送设备，又有接收设备。

无线电导航 (radio navigation)

利用无线电设备确定舰船、飞机或其他航行体的位置，并引导它们沿着预先指定的航线航行的方法和技术。无线电导航的任务，是要保证在各种气象条件下，引导车辆、舰船、飞机等用户沿预定路线安全航行；引导飞机起飞和降落；引导船只进出港口、通过水道或停靠码头；对飞机和船只的活动进行调度，实行交通管制，以防发生碰撞；引导车辆在丛林、沙漠等特殊环境下行驶。在军事上，除完成飞机和军舰的一般引导任务外，导航还要空能配合完成如武器投射、侦察、巡逻、反潜、中集合、空中编队、援救等任务。在国民经济中，由于导航具有高精度定位的能力，它还可以配合完成如海上石油勘探、海上捕鱼、海洋调查、海底电缆铺设、大地测量、航空测绘以及气象探测等任务。

无线电导航是用辐射电磁波的方法，测量导航用户与某些导航台间的相对位置，以确定导航用户自己的位置。因此，无线电导航设备和系统与雷达有很多相似之处。但是，由于导航用户是运动的物体，所以这种系统

的定位方法就与本身是固定的雷达所采用的定位方法不同。

目前除雷达导航外，其他各种无线电导航系统，几乎都是先由导航台发射出具有一定特征的无线电导航信号，再由用户（航行体）导航设备所接收；用户根据导航台的方向和位置，即可确定出自己的位置。例如，如图 1-20-24 所示，A、B 是两个导航台，P 是在这两个导航台作用距离内的航行体，航行体只要利用定向接收天线测出两个导航台的方

图 1-20-24 测向-测向系统定位原理

向，就可以求出这两个导航台的方位角 α_1 和 α_2 ，再根据航行图上 A、B 两个导航台的实际地理位置和方位角 α_1 、 α_2 ，引直线 AL、BK，即可确定航行体 P 自身的位置。

现在无线电导航技术的发展方向主要是：实现设备的微小型化和自动化；实现具有全球覆盖、全天候、高精度和适于各种用户等优点的卫星导航系统；实现除完成导航任务外，还能完成通信、监视、武器制导、授时等任务，即能够综合利用的无线电导航系统。

遥控 (remotecontrol)

利用有线或无线通信技术对远处设备进行操作的一种控制方式，也叫远距离控制或远距离操纵。利用有线通信技术的遥控称为有线遥控，利用无线通信技术的遥控叫无线遥控。被控对象可以是固定的，也可以是活动的。固定的被控对象分为集中型的（如工厂、电站等）和分散型的（如油田、气田、输油输气管道、微波中继站等）；活动的被控对象如飞机、导弹、卫星和宇宙飞船等。根据被控对象的控制状态，遥控又可分为两类：一类是对被控对象的工作状态的调整进行远距离控制，如对输油输气管中的流量的控制，对电机转速的控制等；另一类是对被控对象作单一的或两种极限动作的远距离控制，如控制电闸的开或关，控制电机的启动或停机等。

图 1-20-25 是无线遥控电动机系统的方框图。发射部分由操作开关、低频振荡器和发射天线组成。当开关 S_1 接通时，低频振荡器 G_1 工作，产生频率为 f_1 的低频振荡，即产生指令信号，用它来调制发射机的高频振荡，然后经天线发射出去。接收部分包括接收机、选频电路、继电器、执行机构和被控对象。电磁波信号被接收以后经选频电路 I_1 选出频率为 f_1 的指令信号，使继电器 K_1 动作，通过执行机构将电动机与电源接通，电动机起动。如果要让电动机停止工作，可在发射端按下停机开关 S_2 ，这时低频振荡器 G_2 开始工作，用它产生的频率为 f_2 的低频振荡去调制发射机高频振荡，经天线发射出去。在接收端，指令信号 f_2 经选频电路 I_2 选出后，使继电器 K_2 动作，通过执行机构将电动机与电源断开，从而使电动机停机。

图 1-20-25 无线遥控电动机系统方框图

遥控技术已广泛应用于工业生产自动化、运输、医疗、地质钻探、科学研究和宇宙飞行等各个领域。

传真 (facsimile)

利用电信号来传送手稿、书信、文件、图表、照片等静止图像的通信方式。传真既传送书面消息的内容，又保留其形式。传真的原理是：在发送端，将欲传送的图像分解为很多微小单元（像素），并按一定的顺序将这些单元转换成电信号（电信号的幅度或频率与

图 1-20-26 机械扫描照片传真原理图

所传送的像素的亮度成比例），然后通过传输系统（有线或无线电路）传送出去；在接收端把收到的电信号再转换成相应亮度的微小单元，再按发送端相同的顺序组合成图像。传真按传输通路可分为有线传真和无线传真，按用途可分为气象传真、照片传真、新闻传真、文字报表传真等。

图 1-20-26 是一种照片传真的原理图。在发送端，将准备传送的照片固定在滚筒上，滚筒由同步电动机带动旋转，同时沿轴向缓慢移动，而光学扫描系统不动。光学扫描系统由激励灯、聚光镜、物镜、光阑和光电倍增管组成。激励灯发出的光被聚光镜会聚，射在照片上形成一个光点并被反射。滚筒在旋转的同时横向移动，光点则在照片上完成扫描。从照片上反射出来的光的强弱决定于反光处的黑白程度。反射光经物镜会聚射入光电倍增管。光电倍增管是一种灵敏度很高的光电转换器件，它输出的电流随射入它的光的强弱而变化，也就是随照片反光处黑白程度而变化，光信号变成了电信号。从光电倍增管得到的电信号，经过调制、放大，由有线或无线传输通路到达接收机，又经过放大、解调，加到录像灯上。录像灯发光强弱随通入电流的大小而变，电信号又变成了光信号，再经过透镜、光阑，在感光纸上形成一个小光点。感光纸随滚筒旋转并横向移动的情况与送发端照片的完全一样。光点在感光纸上扫描形成潜像，经过显影，定影，就得到传送的照片

电视 (television)

利用电来把活动图像传送到远处；靠无线电波传送到远处叫无线电视，靠电线传送到远处叫电缆电视。通常所说的电视都是指无线电视。

现代电视的原理是：把图像分解为许多像素，然后把这些像素变成电信号，再按一定的严格的次序传送和接收这些信号，最后把电信号转变成光信号，在电视接收机屏幕上聚合成图像。电视系统的清晰度取决于图像分解的行数。目前我国采用的是每秒钟发射 25 帧图像，每帧图像分解为 625 行，约 50 万个像素。

图 1-20-27 甲表示为两条对角线构成的需要发送的图像，而图乙、丙、丁表示像素数目不同时这两条对角线重现时的质量。在一行里传送和重现像素的顺序是从左到右，而从一行到另一行的顺序则是由上往下。电视系统的简化方框图如图 1-20-28 所示。图像 A 经物镜投射到摄像管的光电靶（光电阴极）

图 1-20-28

上，经电子束扫描变换为电脉冲，然后经放大电路放大，加到超短波发射机中去。电子束在摄像管光电靶上的扫描由扫描振荡器通过偏转线圈控

制。为了使光点在电视接收机显像管屏幕上的排列次序同所发射的图像对应，必须使显像管中的电子束的移动和摄像管中电子束的移动完全一致，即必须保持同步扫描（图 1-20-29），所以电视发射机在发射图像信号的同时还发射同步信号，同步脉冲振荡器就是用来产生同步信号的。电视伴音是利用相邻的独立波道以调频发射机来发送（图 1-20-28 中未画出）。电视接收机由图像通道和伴音通道（图 1-20-28 中未画出）组成。天线、输入电路接收到电视信号后，有专门的电路将伴音信号、图像信号、同步信号分开。伴音信号由声音通道鉴频、放大，使扬声器发声。图像信号由图像通道检波、放大，进入显像管，并对应于所传送图像中每一像素的亮度。在显像管屏幕上显示相应的光点。虽然在每一瞬间屏幕上仅出现一个光点，但由于视觉暂留，我们感到图像却是连续而完整的，显像管屏幕上显示的光点是由电子束扫描引起的，电子束的扫描是由同步信号经扫描振荡器、偏转线圈来控制的。此外，电视接收机内还有对显像管阴极供电的高压电源。

彩色电视系统传送的是彩色图像。彩色摄像机的镜头后面有由棱镜组成的分光系统

图 1-20-29

（图 1-20-30），从镜头出来的彩色光经分光系统分解为红、绿、蓝三种基色光，分别在 R、

图 1-20-30 彩色摄像机的棱镜分光系统示意图

G、B 三只摄像管的光电靶面上形成红、绿、蓝的图像并进行光电转换（参见“摄像管”）。这样，从彩色电视发射台发出的就是带有三种基色光图像的信号。在彩色电视接收机里，每一种基色光图像信号控制显像管中一束电子束使屏幕上相应基色的荧光粉发光。这样，显像管荧光屏上就同时呈现着红、绿、蓝三种基色光的图像，这三种基色光混合在一起便引起人们的彩色视觉。

电视的应用日益广泛，除了广播新闻、文艺节目、体育竞赛、教育内容，还应用在工业、交通、军事以及科学研究等方面。例如，大的工厂、矿山可利用电视全面了解生产进行情况；在大型铁路枢纽站、港口、机场，电视可帮助调度人员监视全盘情况；将电视设备装在侦察飞机或卫星上，可监视敌方的军事活动；电视还可代替人去观察核爆炸、监视反应堆运行、到太空中去探秘。

目前电视技术主要发展目标是提高图像的清晰度和真实感，增大传送距离、缩小接收机的厚度而增大屏幕，等等。

摄像管 (television camera tube)

电视摄像机中将光的图像转换为电信号的电子束管。从发展过程来看，有光电摄像管、超光电摄像管、正析像管、超正析像管、光电导摄像管等。光电导摄像管也叫视像管，常根据光电靶的材料来命名，如氧化铅视像管、硒化镉视像管、碲化锌镉视像管、硒碲视像管、硅靶视像管等。目前用得最多的是氧化铅视像管。

氧化铅视像管的结构如图 1-20-31 所示，图中还画出了必不可少的控

制电子束聚焦、扫描的外部线圈。玻壳内部抽成真空，它的前端是研磨得很平、透光率很高的玻璃。前

图 1-20-31 氧化铅视像管结构示意图

端玻璃的内表面敷一层氧化锡构成的透明导电薄膜，叫信号极。光电靶贴在信号极上，出三层材料组成：紧挨信号极的是一层 N 型氧化铅半导体，面向电子枪的是一层 P 型氧化铅半导体，中层是纯度很高的本征氧化铅半导体（用 I 表示，参看图 1-20-32）。N、P 两

图 1-20-32 氧化铅靶结构示意图

层极薄，I 层厚度为 $10\mu\text{m}$ 至 $20\mu\text{m}$ 。景物图像的光电转换主要发生在 I 层内。电子枪包括发射电子的阴极、给阴极加热的灯丝、控制电子流大小的栅极以及加速极和聚焦电极等，各电极均由管脚引出。电子枪的作用是形成一束很细的电子束，以便在偏转线圈的磁场作用下扫描光电靶。光电靶附近有一层栅网，通常与聚焦电极联结，电势较高，使栅网与靶之间形成电子束的减速电场，使电子到达靶时速度接近于零，避免打出大量二次电子。

视像管的核心是光电靶和扫描电子枪。光电靶由 PIN 三层半导体组成，I 层具有很大电阻，电阻率为 $10^8 \cdot \text{m}$ ，夹着它的 P、N 两层相当电容器的两个极板，总电容约为 1000 至 2000 pF。电子扫描把光电靶分解为几十万个像素，每一个像素相当于一个大电阻 R_e 和一个小电容 C_e 并联（图 1-20-33）。并联的 $R_e C_e$ 一端接信号极，处于高电势，另一端悬空可以接受电子束的扫描。I 层氧化铅本征半导体是光敏材料，当光透过 N 层射入 I 层时在 I 层内激发电子空穴对，从而使它沿光线方向的电阻率大大下降。光越强处电阻越小，光越弱处电阻越大。入射光是景物通过镜头在靶上形成的光像。显然，靶上形成光像的同时也形成了“电阻像”。电子束相当于单刀多掷开关，当它扫描时顺序接通靶上的 $R_e C_e$ ，等效电路如图 1-20-33，其中 R 为电子束等效内阻、 R_L 为外接负载电阻约 100k、K 为摄像管阴极，处于零电势、G 为靶电源。

图 1-20-33 视像管等效电路

在未摄像时，光电靶处于全黑状态，此时 R_e 很大并处处相等。电子束扫描 $R_e C_e$ 时，对 C_e 充电，使各个 C_e 的右端都下降到阴极零电势（由于 R 的存在，实际电势为 1V 至 2V），各个 C_e 的左端则保持 G^+ 电势。当摄取光像时，由于形成光像的同时形成了电阻像， C_e 要通过与其并联的 R_e 放电， R_e 大处放电慢， R_e 小处放电快， C_e 放电时其右端电势上升，趋向 G^+ ，所以光像形成的同时 C_e 右端形成了“电势像”。光越强处电势越高。在形成电势像的同时电子束进行扫描分解像素，使 C_e 右端电势重新下降到零。显然，电势像电势高处下降到零需要的充电电流大，电势像电势低处下降到零需要的充电电流小。流过负载电阻 R_L 的充电电流反映了像素的电势高低，也就反映了像素的亮度大小。因而 R_L 上的电压变化反映了像素亮度，从这里可以得到图像信号，供电视发射台去放大，发射。

显像管 (television picture tube, kinescope)

电视接收机中显示图像的电子束管。只能显示景物的明暗程度的，称为黑白显像管，能显示景物的彩色图像的，称为彩色显像管。黑白显像管的结构如图 1-20-34 所示。显像

1. 灯丝 2. 阴极
3. 栅极 4. 加速极
5. 第一阳极 (聚焦极)
6. 第二阳极

图 1-20-34 黑白显像管结构示意图

管的玻壳中抽成真空。显像管的细长管颈里，有一组电极组成的电子枪。电子枪的作用如图 1-20-35 乙所示，被灯丝加热的阴极发射出的电子，经加速极 (几百伏) 加速后，进入由第一阳极 (0V ~ 400V 可调)、第二阳极 (9kV ~

图 1-20-35 光学透镜和电子透镜的聚焦作用

图 1-20-35 光学透镜和电子透镜的聚焦作用 16 kV) 组成的电子透镜，被会聚成很细的电子束打在荧光屏上，产生直径约 0.2mm 的发光点。显像管锥体部分内外表面都涂有导电的石墨层，外表面的石墨层在显像管工作时接地，以屏蔽外电场的干扰，内表面的石墨层接第二阳极，用来提高电子速度，从而提高荧光屏上光点的亮度。靠近显像管的锥体部分装有偏转线圈，可以使电子束扫描荧光屏形成光栅，并且可以在电视台发射的同步信号控制下使显像管中电子束的扫描与摄像管中电子束的扫描保持同步。这时，如果在显像管栅极加上电视台发射的图像信号，控制电子束中的电子数量，从而控制光点的亮度，在显像管荧光屏上就可以看到黑白图像。

彩色显像管目前应用最广的是所谓自会聚管。它的荧光屏内侧有一荫罩板，上面开有几十万个矩形条孔，成“悬砌砖”型排列 (图 1-20-36)。荧光屏上，一组一组地有规则地排满红、绿、蓝三基色的荧光粉条。它同时产生三束电子，分别受电视台发射的红、绿、蓝三基色图像信号的控制，可简称为红、绿、蓝电子束 (注意：并非电子有颜色)；它们从荫罩板上同一个矩形孔穿过分别打在对应的红、绿、蓝荧光粉条上，激发出红、绿、蓝三个光点组成一个彩色像素。收看节目时，三束电

图 1-20-36 彩色显像管中荫罩板的作用

子一同扫描整个荫罩板，从荧光屏上就可以看到几十万个彩色像素组成的彩色图像。显像管是以它荧光屏对角线的长度代表显像管的尺寸，例如 35 cm (14 英寸) 显像管的荧光屏对角线长 35 cm。

雷达 (radar)

英文 radio detection and ranging 的缩拼字 “radar” 的音译，原意为“无线电侦察和定位”，一般指利用无线电波搜索和测定目标位置以及跟踪移动目标的设备。雷达是第二次世界大战期间为了及早发现敌方飞机而发明的。由于它突出的搜索、探测能力，二次世界大战以来发展十分迅

速，除用于军事目的外，也日益广泛地应用到民用事业和科学研究中，如气象、航海、捕鱼、地图测绘、交通管制、宇宙航行等。雷达的探测范围不断扩大，大到几十万千米，小到几十米；工作波段越来越宽，低到几兆赫，高到 3×10^9 兆赫，进入可见光范围（激光雷达）。在这样宽的频率范围内，雷达所采用的各种技术有很大不同，但基本原理并没有多大变化。

雷达的工作基于无线电波的反射现象。无线电发射机发射的信号在其传播路程中遇到飞机、船舶、冰山等障碍物时发生反射现象，有一部分返回雷达站被专用的接收机所接收。测出从发射信号到接收到障碍物（搜索目标）反射回来的信号所经过的时间（如 $10 \mu s$ ），根据无线电波的传播速度（ $300000 km/s$ ），即可确定障碍物的距离（ $1500m$ ）。所以雷达技术主要是准确而迅速地测定极短的时间间隔。

雷达站的发射机以脉冲方式向空间发射无线电波，脉冲信号发射出以后，发射机就停止工作。发射机的停息时间比脉冲的持续时间（百万分之几秒）长几百倍甚至几千倍。发射机停息时，雷达站上的接收机便开始工作，以接收反射回来的无线电波。为了测量极短的时间，雷达站应用了电子射线管。加到电子射线管水平偏转板上的电压是来自扫描振荡器的锯齿形电压，它可以使电子束在荧光屏上扫描形成一条自左向右的亮线（扫描线）。电子束的扫描与发射机的工作相配合，每一条扫描线的起点相当于发射脉冲的瞬间，脉冲以“尖峰”的形式出现在荧光屏左边扫描线的起始点上。电子束自左向右扫描移动的距离，与脉冲从开始发射时起计量的时间成正比，也就是与脉冲在空中传播的距离成正比，所以扫描线的长度可以作为脉冲传播距离的量度，而在荧光屏上直接标上表示距离（以千米为单位）的刻度（图 1-20-37）。

图 1-20-37

从目标反射回来的脉冲信号，为接收机接收，并加在电子射线管的竖直偏转板上，这就在荧光屏上相应于所测目标的距离的位置出现第二个“尖峰”。如果从天线发射的脉冲信号是很窄的波束，并且天线不断地旋转或摆动，使波束扫过空间进行搜索，那么根据收到反射信号时天线所指的方位角，可确定目标的方向（参看图 1-20-38）；根据距离和天线所指的仰角，可确定目标的高度。

图 1-20-38

雷达可以按照不同的方法进行分类，如按所用无线电波段可分为米波雷达、分米波雷达、厘米波雷达、毫米波雷达等；按雷达发射的信号形式可分为脉冲雷达、连续波雷达；按雷达架设地点可分为地面雷达、机载雷达、船舶雷达、航天雷达等；按雷达完成的战术任务可分为远程警戒雷达、指挥引导雷达、炮瞄雷达、导弹制导雷达等。

电磁污染 (electromagnetic pollution)

干扰人类生活、工作环境或有损人体健康的天然的和人为的电磁辐射。天然的电磁污染是某些自然现象引起的。最常见的是雷电，除了可能对电器设备、飞机、建筑物等直接造成危害外，而且会在广大地区从几千

赫到几百兆赫以上的频率范围内产生严重电磁干扰。火山喷发、地震和太阳黑子的活动引起的磁暴等都会产生电磁干扰。天然的电磁污染对短波通信的干扰特别严重。人为的电磁干扰主要有：脉冲放电——如切断大电流时的火花放电；工频交变磁场——如大功率电机、变压器附近的强电磁场；射频电磁辐射，例如无线电广播、电视、微波通讯等发射设备附近区域的射频辐射。目前，射频电磁辐射已经成为电磁污染环境的主要因素。

射频污染的危害主要是：

(1)危害人体健康。受电磁辐射作用的人，会出现神经衰弱、心动过缓、白血球减少、免疫力降低和造成某些视觉障碍，等等。

(2)影响电子设备、仪器仪表的正常工作，使信息失误，控制失灵，对通信联络产生干扰和破坏。美国国防部一台大型电子计算机曾因受到干扰而误报前苏联向美国发起导弹攻击，引起一场虚惊。

(3)造成引燃、引爆的危险。如强高频电磁场可能使相邻金属器件间打火，引起火药、可燃液体或可燃气体的燃烧或爆炸。

为防止电磁辐射对人体健康造成危害，我国卫生部 1987 年 12 月 22 日发布了《环境电磁波卫生标准》(GB9175—88)，下表就是从这个卫生标准引来的环境电磁波容许辐射强度，表中的“安全区”是指在该环境电磁波强度下长期居住、工作、生活的一切人群(包括婴儿、孕妇和老弱病残者)，均不会受到任何有害影响的区域，“中间区”指在该环境电磁波强度下长期居住、工作和生活的一切人群

波长	单位	容许场强	
		一级(安全区)	二级(中间区)
长、中、短波	V/m	10	< 25
超短波	V/m	5	< 12
微波	μ W/cm ²	10	< 40
混合	V/m	按主要波段场强，若各波段场强分散，则按复合场强加权确定	

可能引起潜在性不良反应的区域。

电磁污染传递途径有两条，一条是通过空间直接辐射，另一条是藉助电磁耦合由线路传导。电磁辐射的防护手段是在电磁场传递的途径中安设电磁屏蔽装置，使有害的电磁场强度降低至容许范围以内。电磁屏蔽装置一般为金属材料制成的封闭壳体，当交变的电磁场传到金属壳体时，一部分被壳体反射，一部分被壳体吸收，使透过壳体的电磁场大幅度衰减。可以用电磁屏蔽包围电磁污染源，防止它对外部环境的影响，也可以用电磁屏蔽包围需要保护的区域，防止外部电磁场对区域内的环境造成污染。

信噪比(signal to noise ratio)

“信号噪声比”的简称，表征有用信号强度同噪声强度之比的一个参数。在通信接收设备中，有时用所接收的有用信号的平均功率同噪声的平均功率之比的对数来表达，常用的单位为分贝。如果用 S/N 代表信噪比，则

$$S/N = 10 \lg \frac{\text{信号平均功率}}{\text{噪声平均功率}} \text{dB}。$$

设备的信噪比越大，噪声对信号的干扰越小，通信质量越高。信噪比是通信设备的一项指标。

主要参考资料

1. 中国大百科全书总编辑委员会《物理学》编辑委员会。中国大百科全书，物理学。第1版。北京：中国大百科全书出版社，1987。
2. 梁百先等。电磁学教程下册。第2版。北京：高等教育出版社，1984。
3. 《电子工业技术词典》编委会。电子工业技术词典。北京：国防工业出版社，1980。
4. 简明综合技术辞典编委会。简明综合技术辞典。第1版。北京：高等教育出版社，1965。
5. 辞海，工程技术分册(上)。第1版。上海：上海辞书出版社，1978。
6. 张美敦。简明无线电词典。上海：上海辞书出版社，1985。
7. 蒋德川。电工学下册。电子技术和自动控制。第2版。北京：高等教育出版社，1986。
8. 晏桂滇。实用电子技术基础。第1版。北京：高等教育出版社，1989。
9. 杨诚明。电磁场的基本物理量 E、D、B、H。北京：人民教育出版社，1982。
10. 辞海，理科分册(上)。第1版。上海：上海辞书出版社，1978。
11. 赵凯华，陈熙谋。电磁学。第2版。北京：高等教育出版社，1985。
12. 梁灿彬，秦光戎，梁竹健。电磁学。第1版。北京：人民教育出版社，1980。
13. 徐在新，宓子宏。从法拉第到麦克斯韦。第1版。北京：科学出版社，1986。
14. 钱时惕。物理学及现代科技概论。北京：高等教育出版社，1991。
15. 梁绍荣，刘昌年，盛正华。普通物理学第三分册电磁学。第1版。北京：高等教育出版社，1988。
16. 杨今昔。无线电世界。第1版。北京：电子工业出版社，1987。
17. 时振栋等。电磁波的应用。第1版。北京：高等教育出版社，1990。
18. 机械工程手册电机工程手册编委会。电机工程手册，第8卷。第1版。北京：机械工业出版社，1982。
19. 吴源。电视世家新一代。第1版。长沙：湖南教育出版社，1986。
20. 中专试用教材电视原理与接收机。第1版。天津：天津科技出版社，1982。
21. 张琦。彩色电视摄像机。第1版。北京：中国广播电视出版社，1988。
22. 段玉平。摄像机录像机编辑机监视器原理装配维修。北京：中国广播电视出版社，1988。
23. 中国大百科全书总编辑委员会《环境科学》编辑委员会。中国大百科全书，环境科学。第1版。北京：中国大百科全书出版社，1983。
24. 妾象鲤等。环境保护讲座。北京：中国标准出版社，1989。

二十一、电子技术基础

本征半导体 (intrinsic semiconductor)

一般指纯度高、结构完整的半导体。其中参与导电的电子和空穴数目相等；这种类型的导电叫本征导电。

在不受热激发或光激发的情况下，本征半导体的价带为价电子所充满，而成为满带，导带中没有电子，而成为空带。在热激发或光激发的作用下，价电子由满带跃迁到导带中去（图 1-21-1）。这时，导带中出现了电子，

图 1-21-1 本征半导体价电子被激发

而满带中则出现了缺电子的空状态。这种满带中的空状态，叫做空穴；它在外电场作用下，相当带 $+e$ 电荷的粒子，做定向运动形成电流。因而空穴可认为是带正电荷的载流子。在本征半导体中，导带中的电子都来自满带，因而参与导电的电子数目与空穴数目相等。

本征半导体的共价键结构使它产生空穴。典型的半导体，如硅、锗，是由共价键结合的晶体，具有图 1-21-2 所示的金刚石结构。图 1-21-3 是由共价键结合的锗晶体点阵结构的平面示意图。所谓共价键，就是指两个原子结合时，通过形成共有电子对（每个

图 1-21-2 金刚石结构

图 1-21-3 锗晶体点阵结构的平面示意图

原子供给一个电子)而产生的相互结合作用。锗是 IV 价元素，每个锗原子最外层有 4 个价电子。在锗晶体中，每个锗原子都跟周围 4 个原子形成共价键。于是，相邻的两个锗原子就由两个共有的电子构成的共价键连接在一起。当价电子由于受激发而挣脱共价键的束缚时，在晶体中就留下一个空穴（图 1-21-4）。晶体中的空穴可能被来自邻近锗原子的

图 1-21-4 电子被激发，键中出现空穴

电子所占有，从而出现新的空穴。这新的空穴又会被其他邻近锗原子的电子所占有，再出现新的空穴。依此类推，由于电子逐步向空穴转移。空穴在晶体中就发生了移动。

在半导体中，由导带中电子移动引起的导电性，叫做电子导电，由价带中空穴移动引起的导电性，叫做空穴导电。在本征半导体中，电子导电和空穴导电起着同样重要的作用。

杂质半导体 (extrinsic semiconductor)

导电性能取决于杂质的类型和含量的半导体。杂质半导体分为 P 型半导体和 N 型半导体。如果在 4 价元素硅或锗中掺入微量的 3 价元素硼、铝或镉，所形成的杂质半导体为 P 型半导体；如果在 4 价元素硅或锗中掺入微量的 5 价元素磷、砷或锑，形成的杂质半导体为 N 型半导体。

如图 1-21-5 所示，将 5 价杂质原子砷

图 1-21-5 砷原子掺入硅，多余的价电子绕 As^+ 离子运动

(As) 掺入到 4 价半导体硅 (Si) 中，砷的 5 个价电子中的 4 个与相邻的硅原子形成共价键，第 5 个价电子可环绕带正电的砷离子 (As^+) 作轨道运动。这个电子在 As^+ 的电场中的电离能约为 $0.05eV$ ，它比硅的禁带宽度 ($E_g=1.09eV$) 要小得多，很容易因热激发而脱离砷原子并进入硅的导带中，参与导电。这时，在半导体硅的价带和导带之

图 1-21-6 施主能级

间产生一个离导带很近的附加能级 (图 1-21-6)。这个附加能级是由于在 4 价半导体中掺入 5 价杂质引起的，能为导带提供参与导电的电子，因而叫施主能级，而像砷这类 5 价杂质，则叫施主杂质。由于掺有施主杂质的半导体中的载流子是带负电的电子，“负”的英文第一个字母是“N”，因而这种杂质半导体叫 N 型半导体，也叫电子型半导体；它靠电子导电。应该注意，N 型半导体并不带负电，而是电中性。

如图 1-21-7 所示，将 3 价杂质原子硼 (B) 掺入到 4 价半导体锗 (Ge) 中，硼有 3 个

图 1-21-7 硼原子掺入锗，空穴绕 B^- 离子运动

价电子，它和相邻的锗原子构成共价键时，缺少一个价电子，于是就形成一个带 $+e$ 电量的空穴。这个空穴环绕带负电的硼离子 (B^-) 作轨道运动。这个空穴在 B^- 电场中的电离能约为 $0.01eV$ ，它比禁带的宽度 ($E_g=0.72eV$) 要小得多。这时，在半导体锗的价带和导带之间，产生一个离价带很近的附加能级 (图 1-21-8)，这个能级可接受价带来的电子，从而为价带提供空穴，所以这个能级叫受主能级，而像硼这类 3 价杂质，则叫受主

图 1-21-8 受主能级

杂质。由于掺有受主杂质的半导体中的载流子是带正电的空穴，而“正”的英文第一个字母是“P”，因而这种半导体叫 P 型半导体，也叫空穴型半导体，它靠空穴导电。P 型半导体并不带正电，而是电中性。

实际上，由于在任何有限温度下，总有或多或少的电子从价带被热激发到导带，所以无论 N 型或 P 型半导体中都存在一定数量的反型号的载流子，称为少数载流子，处于主导地位载流子，称为多数载流子。温度足够高时，由价带激发到导带的电子可以远超过杂质提供的载流子，这时参与导电的电子和空穴的数目基本相等，这时半导体的导电呈本征导电。

载流子 (carrier)

导体或半导体中电流的载体，叫载流子。

金属是最常见的导体，它的载流子是自由电子。金属原子最外层的价电子很容易挣脱原子核的束缚而成为自由电子，留下的正离子 (原子实) 形成规则的点阵。金属中自由电子的浓度很大，约为 10^{22} 每立方厘米。

电解质的水溶液及熔融的电解质也是导体，其中的载流子是正负离子。电离的气体也能导电，其中的载流子是电子和正负离子。

在半导体中，载流子是电子和空穴。

能级和能带 (energy level and energy band)

微观粒子系统（如分子、原子、原子核）只能处于一系列不连续的、分立的稳定状态，这些状态分别具有一定能量，它们的数值各不相同。为了形象化，人们按某一比例以一定高度的水平线代表一定的能量，并把这些状态的能量按大小排列，像梯级似的，所以叫能级。

微观粒子系统只能处于分立的稳定状态，最初是在研究原子光谱的过程中发现的。最简单的原子是氢原子，图 1-21-9 是氢原子

图 1-21-9 氢原子的能级图

的能级图。丹麦物理学家玻尔，在 1913 年，根据经典理论和普朗克能量量子化概念推导出氢原子可能具有的能量的公式

$$E_n = -\frac{me^4}{8\epsilon_0^2 h^2} \frac{1}{n^2}, n = 1, 2, 3, \dots$$

式中 m 是电子的质量， e 是电子的电荷， ϵ_0 是真空的电容率， h 是普朗克常量， n 是主量子数。将 $n=1, 2, 3, 4, 5, \dots$ 依次代入上式，可得氢原子的可能能量分别为 -13.6eV ， -3.40eV ， -1.51eV ， -0.85eV ， $-0.54\text{eV}, \dots$ ，这是不连续的能级。按照玻尔理论，在正常情况下，氢原子中的电子处于最低能量状态 ($n=1$)——基态。如果电子由于受到激发跃迁到较高的能级上，当它再从较高的能级跃迁到较低能级时将辐射光子，这个光子的能量等于电子先后所在的两能级的能量差。由于氢原子可能具有的能量是不连续的，它的电子跃迁时辐射出的光子可能具有的能量也是不连续的，而只能是某些确定的值，所以氢原子的光谱也不是连续的，而是线光谱。从玻尔理论推导出的氢原子光谱的各条谱线的频率值与实验测得的符合得很好。

固体（晶体）是大量质点（原子，离子或分子）有规则排列的集合体。不同晶体中各原子之间的距离虽有不同，但都与原子的大小差不多，数量级约 10^{-10}m 。在原子靠得这样近的情况下，每个原子的电子，除了受自己的原子核的作用外，还要受邻近的原子核的作用。在这种情况下，原来处于孤立状态时原子的每一能级都要分裂成若干个新的能级。由 N 个原子组成的晶体，它的 S 能级分裂成 N 个新的能级。晶体中的原子数 N 非常大，每 mm^3 体积中约有 10^{19} 个原子。每一能级所分裂的新能级中，最高能级和最低能级的间隔，一般不超过 10^2eV ，相邻能级之间的间隔约为 10^{-17}eV 的数量级。这些由一个能级分裂成的间隔非常小的新能级总体，叫做能带（图 1-21-10）。在相邻能带之间有一段不存在能级的区域，叫做禁带。

图 1-21-10 能级分裂为能带

电子具有自旋，根据泡利不相容原理知道，每个能级最多只能容纳两个电子。根据最小能量原理，晶体中的电子将先填充低的能级，然后依次填充较高的能级。如果某一能带中各能级都被电子填满，这样的能带叫做

满带。一般来说，内层电子能级所分裂的能带都是满带。价电子所在能级分裂成的能带，叫做价带。如果能带中各能级都没有电子，这样的能带叫做空带（图 1-21-11）。由于热的激发、光的照射或掺入杂质等原因，有电子从价带跃迁到空带，则空带成为导带。跃迁到导带的电子成为载流子，参与导电。

图 1-21-11 晶体的能带

光敏电阻器 (photoresistor)

光敏电阻器是利用半导体的光电效应制成的一种电阻值随入射光的强弱而改变的电阻器；入射光强，电阻减小，入射光弱，电阻增大。光敏电阻器一般用于光的测量、光的控制和光电转换（将光的变化转换为电的变化）。

通常，光敏电阻器都制成薄片结构，以便吸收更多的光能。当它受到光的照射时，半导体片（光敏层）内就激发出电子-空穴对，参与导电，使电路中电流增强。一般光敏电阻器结构如图 1-21-12 甲所示。

图 1-21-12 光敏电阻器的结构（甲）和图形（乙）

根据光敏电阻的光谱特性，可分为三种光敏电阻器：

紫外光敏电阻器：对紫外线较灵敏，包括硫化镉、硒化镉光敏电阻器等，用于探测紫外线。

红外光敏电阻器：主要有硫化铅、碲化铅、硒化铅、铋化铟等光敏电阻器，广泛用于导弹制导、天文探测、非接触测量、人体病变探测、红外光谱、红外通信等国防、科学研究和工农业生产中。

可见光光敏电阻器：包括硒、硫化镉、硒化镉、碲化镉、碲化镓、硅、锗、硫化锌光敏电阻器等。主要用于各种光电控制系统，如光电自动开关门户，航标灯、路灯和其他照明系统的自动亮灭，自动给水和自动停水装置，机械上的自动保护装置和“位置检测器”，极薄

几种密封硫化镉可见光光敏电阻器主要参数

型号	额定功率 P/mW	测试电压 V/V	1001x 亮阻 R/k	暗阻 R/M	最高工作 电压 V/V
MG-41-20A	20	2	1	0.1	
MG-41-20B	20	2	2	1	
MG-41-100A	100	50	100	50	
MG-41-100B	100	50	200	100	
MG-42-5A	5	2	2	0.1	20
MG-42-5B	5	2	5	0.5	20

注：“lx”是照度单位，中文名称为勒克斯。1勒克斯等于1该明的光通量均匀照在1米²表面上所产生的照度。

零件的厚度检测器，照相机自动曝光装置，光电计数器，烟雾报警器，光

电跟踪系统等方面。页末的表绘出了几种硫化镉可见光光敏电阻器的主要参数。

从下表可知，光敏电阻的亮阻也是以千欧计，若把它直接串接在指示或控制电路中，电流过弱，所以必须经过一级或几级放大器放大。图 1-21-13 是个最简单的用光敏电阻控制红、绿灯亮灭的电路。光敏电阻不受光照时基极电流 I_b 极小，集电极电流 I_c 也很小，继电器不动作，与常闭触点相连的红灯亮。当光敏电阻受到光照而阻值减小时， I_b 增大， I_c 随之增大，继电器动作，常开触点闭合，绿灯亮而红灯灭。

图 1-21-13

热敏电阻器 (thermistor)

是电阻值对温度很敏感的一种电阻器；它可由单晶、多晶、塑料等半导体材料制成，所以也叫半导体热敏电阻器。这种电阻器最基本的特性是其阻值随温度变化有极为显著的变化，以及伏安特性曲线呈非线性。

图 1-21-14 中曲线 1、2、3、4 表示四个类

图 1-21-14

型不同的热敏电阻器的阻值随温度变化的情况，其中曲线 1、3 表示电阻温度系数为负值（电阻值随温度升高而减小），曲线 2、4 表示电阻温度系数为正值。（但比金属的电阻温度系数大得多，直线 5 表示白金的电阻温度特性。）曲线 3、4 表示突变型热敏电阻，即电阻温度系数在某一温度发生阶越式下降或上升，而曲线 1、2 表示缓变型热敏电阻。缓变型热敏电阻，负温度系数一般每 1°C 为 $-2\% \sim -6\%$ ，正温度系数一般每 1°C 为 $1\% \sim 10\%$ ，它们都比通常金属大几倍到几十倍。负温度系数热敏电阻器的机理是：当温度升高时，载流子受热激发，使半导体内载流子浓度大大增加，从而使阻值急剧下降。正温度系数热敏电阻的机理是由于结晶情况随温度变化引起的。

普通线性电阻器的伏安特性是如图 1-21-15 中 1 所示的过原点的直线，而热敏电阻的伏安特性是如图 1-21-15 中的曲线 2、3 或 4 所示（因电阻温度系数、发热和散热情况而异）。热敏电阻的伏安特性是装有热敏电阻

图 1-21-15

器的电路或仪表的工作基础。

热敏电阻器现在被广泛地应用在温度测量、温度控制、温度补偿、火灾测量、过负荷保护以及红外线探测等方面。图 1-21-16 表示出了热敏电阻温度计的原理：探测温度的热敏电阻 R_t 作为不平衡电桥的一个臂，电桥对角线间的微安表的示数可以反映热敏电阻

图 1-21-16 图 1-21-17

探测的温度。热敏电阻温度计的测温范围约为-10 至 1200 ，精度可达 0.1 。图 1-21-17 表示收音机中常用的带热敏电阻(负温度系数)温度补偿的放大电路，其中下偏流电阻由 R_{b2} 和热敏电阻 R_t 承担，当温度升高静态集电极电流增大时，下偏流电阻值减小，偏压下降，基极电流减小，从而控制了集电极电流的增大，使静态工作点基本稳定。

PN 结 (P-N junction)

一块半导体中，掺入施主杂质的 N 型(电子型)半导体部分和掺入受主杂质的 P 型(空穴型)半导体部分的交界层，叫做 PN 结。PN 结是构成半导体二极管、太阳能电池等器件的基础。

N 型半导体中的多数载流子是电子，P 型半导体中的多数载流子是空穴。当这两种类型半导体结合在一起时，N 型半导体中的一部分电子将扩散到 P 型半导体中去与空穴复合，P 型半导体中的一部分空穴也会扩散到 N 型半导体中来与电子复合。N 型半导体失去电子后形成带正电的离子层，P 型半导体失去空穴后形成带负电的离子层。这样，在 P 型和 N 型的交界处就出现了空间电荷区，P 型一侧带负电，N 型一侧带正电，形成一个“内电场”，电场方向是由 N 指向 P(图 1-21-18)。这个电场力将阻止 P 区的多数载流

图 1-21-18 空间电荷区的形成

子(空穴)向 N 区扩散，也阻止 N 区的多数载流子(电子)向 P 区扩散。同时，这个电场力会使 P 区的少数载流子(电子)向 N 区移动，也会使 N 区的少数载流子(空穴)向 P 区移动，我们把载流子由于扩散运动形成的电流叫扩散电流，把载流子在电场力作用下运动而形成的电流叫漂移电流。在 PN 结形成过程中，刚开始时扩散电流占优势，空间电荷区随之加厚，电场增强，于是扩散电流减弱，漂移电流增强，直到扩散电流与漂移电流相等时，空间电荷区不再加厚，达到了动态平衡。空间电荷区，由于电子和空穴的“复合”，载流子消耗殆尽，所以又叫做耗尽层或阻挡层。

如果将 PN 结与一个低压电源连接，P 型半导体接电源正极，N 型半导体接电源负极(图 1-21-19 甲)，这种接法叫做 PN 结的正向连接或正向偏置，加在 PN 结上的电压叫正向电压。这时 PN 结两侧的多数载流子，都将在电源提供的外电场作用下，持续不断地越过 PN 结而形成电流。这个电流由电源正极流出，经过 PN 结返回电源负极，叫做正向电流，其值较大。这时 PN 结在电路中呈

图 1-21-19 PN 结的正向偏置(甲)和反向偏置(乙)

现的电阻叫正向电阻，其值较小。相反地，将 P 型半导体接电源负极，N 型半导体接电源正极(图 1-21-19 乙)，这种接法叫做 PN 结的反向连接或反向偏置，加在 PN 结上的电压叫反向电压。这时，电源提供的外电场，只能使 PN 结两侧的少数载流子越过 PN 结形成非常微小的反向电流，PN 结在电路中呈现极大的反向电阻。

可见，PN 结在正向偏置时有较大的正向电流，这种情况叫导通；反向偏置时只有非常微小的反向电流(通常可以略去不计)，这种情况叫截止。

PN 结具有的这种特性叫做 PN 结的单向导电性。

PN 结的正、负离子层，与极板带正、负电荷的电容器相似，所以 PN 结也像电容器那样具有电容，叫做结电容。结电容很小，数量级是几个皮法。

制备 PN 结的常用工艺有三种：第一种是所谓合金法，即在 P 型（或 N 型）半导体上放 -N 型（或 P 型）杂质，在杂质连同附近的半导体一起熔化后，在再结晶时，因大量的 N 型（或 P 型）杂质的掺杂，在交界处形成一个 PN 结。第二种是扩散法，即把 P 型（或 N 型）半导体放在含有大量 N 型（或 P 型）杂质条件下，依靠扩散，使 N 型（或 P 型）杂质向原来的半导体内扩散而形成 PN 结。第三种工艺称为外延生长法，使 P 型（或 N 型）半导体单晶在高温下继续生长晶体，而使新生长的晶体掺有 N 型（或 P 型）杂质，形成 PN 结。

如果用扩散方法，在 P 型半导体表面上掺入 N 型杂质，形成 PN 结，而 N 型部分很薄（ $\frac{1}{4} \mu\text{m}$ ），当太阳光照射在 N 型薄层上时，在 N 型薄层中产生大量的电子-空穴对，其中空穴扩散到耗尽层边界，被耗尽层内电场驱入 P 型区，而电子则留在 P 型区。在太阳光照射下，这一过程继续进行，结果使 PN 结两边分别带上正、负电荷。这样的 PN 结就相当于一个电池，这种现象叫光生伏打效应。太阳能电池就是利用光生伏打效应制成的。

半导体二极管（semiconductor diode）

也叫晶体二极管，是一种由半导体材料制成的、具有单向导电性的两极器件，可以用于整流、检波、混频、开关、稳压等。半导体二极管是由一个 PN 结焊上两根电极引线，再加上外壳封装而成，与 P 型半导体相接的电极叫正极，与 N 型半导体相接的电极叫负极。在电路图中，半导体二极管用图 1-21-20 所示的符号来表示。

图 1-21-20 半导体二极管的符号

(1) 半导体二极管的伏安特性

半导体二极管最重要的特性是单向导电性，即当外加正向电压时，它呈现的电阻（正向电阻）比较小，通过的电流比较大，当外加反向电压时，它呈现的电阻（反向电阻）很大，通过的电流很小（通常可以忽略不计）。反映二极管的电流随电压变化的关系曲线，叫做二极管的伏安特性，如图 1-21-21 所示。图 1-21-21 中右上方为正向伏安特性，左下方

图 1-21-21 半导体二极管的典型伏安特性

为反向伏安特性。当外加正向电压时，随着电压 U 的逐渐增加，电流 I 也增加。但在开始的一段，由于外加电压很低，外电场不能克服 PN 结的内电场，半导体中的多数载流子不能顺利通过阻挡层，所以这时的正向电流极小（见曲线的 OA 段，该段所对应的电压称为死区电压，硅管的死区电压约为 $0\text{V} \sim 0.5\text{V}$ ，锗管的死区电压约为 $0\text{V} \sim 0.2\text{V}$ ）。当外加电压超过死区电压以后，外电场强于 PN 结的内电场，多数载流子大量通过阻挡层，使正向电流随电压很快增长（曲线中的 AB 段）。当外加反向电压时，所加的反向

电压加强了内电场对多数载流子的阻挡，所以二极管中几乎没有电流通过。但是这时的外电场能促使少数载流子漂移，所以少数载流子形成很小的反向电流（曲线中的 OC 段）。由于少数载流子数量有限，只要加不大的反向电压就可以使全部少数载流子越过 PN 结而形成反向饱和电流，继续升高反向电压时反向电流几乎不再增大（曲线中的 CD 段）。当反向电压增大到某一值（曲线中的 D 点）以后，反向电流会突然增大，这种现象叫反向击穿，这时二极管失去单向导电性。所以一般二极管在电路中工作时，其反向电压任何时候都必须小于其反向击穿时的电压。

(2) 半导体二极管的主要参数

正向直流电流 I_F 在规定的使用条件下，在电阻性负荷的正弦半波整流电路中，允许连续通过二极管的最大工作电流的平均值。在二极管连续工作时，工作电流不应超过 I_F ，否则可能使管子因过热而损坏，一般锗管， I_F 为数十毫安以下，而大功率硅管可达数百安。

反向直流电流 I_R 在室温下，加上规定的反向电压如（10V、25V、50V、75V 或 100V）时的反向电流。 I_R 越小，二极管的品质越好。一般锗管，约数百微安；一般硅管，在 1 微安至数十微安。

反向峰值击穿电压 U_{BR} 它是二极管能承受的最高反向电压，超过后将导致二极管被击穿。

反向工作峰值电压 U_{RWM} 是指二极管工作时所允许施加的最大反向峰值电压，它一般为反向峰值击穿电压的一半或三分之二。一般锗管， U_{RWM} 为数十伏以下，而硅管可达数百伏。

最高工作频率 f_M 由于二极管的 PN 结具有电容，因而当使用的频率过高时，它的性能将变差。 f_c 是二极管能够正常使用时的最高工作频率。二极管的结电容（极间电容）越小， f_M 越高。

(3) 半导体二极管的分类

按照所使用的材料不同，可分为锗二极管、硅二极管和砷化镓二极管等。按照内部结构的不同，可分为点接触型和面接触型（图 1-21-22）。按照功率的不同，可分为小功率管和大功率管，按照用途的不同，可分为：

图 1-21-22 点接触型和面接触型二极管的内部结构

普通二极管 如 2AP、2CP 等系列，主要用于高频检波和小功率整流。

整流二极管 如 2CZ、2DZ 等系列，主要用于整流电路中。

开关二极管 半导体二极管导通时相当于开关闭合（电路接通），截止时相当于开关断开（电路切断），所以二极管可作开关用。开关二极管是专门用来作开关用的二极管，它由导通变为截止或由截止变为导通所需的时间比一般二极管短，常见的有 2AK、2DK 等系列，主要用于电子计算机、脉冲和开关电路中。

稳压二极管 也叫齐纳二极管，是利用硅二极管反向击穿特性来稳定直流电压的——在反向击穿时通过它的电流尽管在很大范围内改变，而它两端的电压几乎不变。它不同于一般二极管的是一般二极管反向击穿后就毁灭了，而它只要不超过最大允许工作电流就不会毁灭；实际应用时，它正

是在反向击穿状态下工作。常见的有 2 CW、2 DW 系列。

变容二极管 二极管的 PN 结具有结电容，当加反向电压时，阻挡层加厚，结电容减小，所以改变反向电压的大小可以改变 PN 结的结电容大小，这样二极管就可以作为可变电容器用。结电容一般只有几个皮法，至多一二百皮法，所以变容二极管都用于高频电路，例如作为电视接收机调谐回路中的可变电容器。常见的有 2 AC、2 CC、2 DC 等系列。

光敏二极管 也叫光电二极管。当光线照射 PN 结时，可以使 PN 结中产生电子-空穴对，使少数载流子的密度增加。这些载流子在反向电压下漂移，使反向电流增加。因

此可以利用光照强弱来改变电路中的电流，常见的有 2 CU、2 DU 等系列。

发光二极管 简称为 LED，由镓 (Ga) 与砷 (As)、磷 (P) 的化合物制成的二极管，当电子与空穴复合时能辐射出可见光，因而可以用来制成发光二极管，在电路及仪器中作为指示灯，或者组成文字或数字显示。磷砷化镓二极管发红光，磷化镓二极管发绿光，碳化硅二极管发黄光。

图 1-21-23 是一些特种二极管的符号。

图 1-21-23 一些特种二极管的符号

(4) 半导体二极管的简易判别

半导体二极管上如果没有标记，可根据正向电阻较小，反向电阻较大这一特性利用多用电表的电阻挡，判断它的极性和好坏。对于耐压较低、电流较小的二极管只能用 $R \times 1k$ 或 $R \times 100$ 挡，不能用 $R \times 10k$ 或 $R \times 1$ 挡，因为 $R \times 10k$ 挡电压较高， $R \times 1$ 挡电流较大，可能使二极管损坏。判断的具体方法如下表：

测试项目	测量方法	正常数据	极性判别
正向电阻		几百欧至几千欧	多用电表黑表笔连接的一端为二极管的正极
反向电阻		大于几百千欧	多用电表黑表笔连接的一端为二极管的负极

被测二极管正反向电阻相差越大越好，如果相差不大，表明二极管性能不好或损坏。

发光二极管 (light emitting diode)

半导体二极管的一种，可以把电能转换成光能；常简称为 LED。发光二极管与普通二极管一样是由一个 PN 结组成，也具有单向导电性。当给发光二极管加上正向电压后，从 P 区注入到 N 区的空穴和由 N 区注入到 P 区的电子，在 PN 结附近数微米内分别与 N 区的电子和 P 区的空穴复合，产生自发辐射的荧光。不同的半导体材料中电子和空穴所处的能量状态不同，当电子和空穴复合时释放出的能量多少不同，释放出的能量越多，则发出的光的波长越短。常用的是发红光、绿光或黄光的二极管，它们的材料和主要特性大致如本页末的表（准确的参数要看手册）

发光二极管的反向击穿电压约 5V，它的正向伏安特性曲线很陡，使用时必须串联限流电阻以控制通过管子的电流。限流电阻 R 可用下式计算。

$$R = \frac{E - U_F}{I_F}$$

式中 E 为电源电压， U_F 为 LED 的正向压降， I_F 为 LED 的一般工作电流。发光二极管的两根引线中较长的一根为正极，应接电源正极。有的发光二极管的两根引线一样长，但管壳上有一凸起的小舌，靠近小舌的引线是正极。

与小白炽灯泡和氖灯相比，发光二极管的特点是：工作电压很低（有的仅一点几伏）；工作电流很小（有的仅零点几毫安即可发光）；抗冲击和抗震性能好，可靠性高，寿命长；调制通过的电流强弱可以方便地调制发光的强弱。由于有这些特点，发光二极管在一些光电控制设备中用作光源，在许多电子设备中用作信号显示器。把它的管心作成条状，用 7 条条状的发光二极管组成 7 段式半导体数码管（图 1-21-24），每个数码管可显示 0~9 十个数目字。

图 1-21-24

整流器 (rectifier)

把交流电变换为直流电的过程叫做整流。实现整流的装置叫做整流器。整流器按整流的方法不同，分为机械整流器和电子整流器。机械整流器是利用机械运动来实现整流的，直流发电机的整流器——换向器，属于这一类。电子整流器是利用单向导电的电子器件来实现整流的，现在广泛应用在电工技术和电子技术中整流器中单向导电的电子器件叫做整流元件。按整流元件的不同，常

类 型	发光颜色	最大工作电流 I/mA	一般工作电流 I/mA	正向压降 V/V
磷化镓红色 LED	红	50	10	2.3
磷砷化镓 LED	红	50	10	1.5
碳化硅 LED	黄	50	10	6
磷化镓绿色 LED	绿	50	10	2.3

用的电子整流器可分为：真空管整流器、充气管整流器、汞弧整流器（水银整流器）、半导体整流器、可控硅整流器等。人们日常生活中最常见到的是半导体整流器，用半导体二极管作整流元件。

常用的整流电路有单相半波整流、单相全波整流、单相桥式整流和倍压整流等几种。本页末的表中画出了半波、全波、桥式整流电路。单相半波整流电路最简单，由于半导体二极管的单相导电性只有当变压器次级电压 e_2 为正半周时，才有电流 i_L 流过负载电阻 R_L ， e_2 为负半周时则 i_L 被截止。交流电只有半周得到利用，所以叫半波整流。这种整流电路虽然简单，但是变压器的利用系数低，二极管承受的反向电压高（等于变压器次级电压的最大值，约为 R_L 上的电压在整个周期内的平均值 U_L 的 3.14 倍），整

流电压的脉动系数大，因此仅用于小功率整流器。全波整流的变压器的利用系数高，整流电压的脉动系数小，但是变压器需要有中心抽头。桥式整流不需要变压器次级有中心抽头，但需要多用两个整流元件。后两种整流电路广泛应用在中、小功率整流器中。

图 1-21-25 甲是一种二倍压整流电路， C_1 、 C_2 的电容都比较大，负载电阻 R_L 也比较大。在变压器副线圈的电压 e_2 的正半周， D_1 导通，将电容器 C_1 充电（图 1-21-25 乙）使它两极板上的电压约等于 e_2 的峰值 E_{2M} ，在 e_2 负半周时， C_1 还来不及放电， C_1 上的电压与 e_2 相加，经过 D_2 给 C_2 充电，使它两极板间电压约等于 $2E_{2M}$ （图 1-21-25 丙）。

图 1-21-25 二倍压整流电路

电路名称	电路图	输出电压波形	每个元件承受的最大反向电压	单个元件的平均电流
单相半波			$3.14U_L$	I_L
单相全波			$3.14U_L$	$0.5I_L$
单相桥式			$1.57U_L$	$0.5I$

这个过程继续下去，与 C_2 并联的负载 R_L 两端的电压即约为变压器次级电压峰值的二倍，所以叫做二倍压整流电路。

在某些场合（例如阴极射线管的供电、试验耐压强度的设备中），需要整流器给出很高的电压而电流极小，常采用三倍压、四倍压或更多倍压的整流电路。在这种多倍压的整流器中，其倍压数目与整流元件以及电容器的数目相等。例如图 1-21-26 所示为四倍压整流器，必须有 4 个整流元件和 4 个电容器。

图 1-21-26 四倍压整流电路

滤波器 (filter)

一种由电容器、电感线圈（扼流线圈）等组成的装置，它允许所需要的频率范围的电流通过，而阻止不需要的频率范围的电流。滤波器的这种滤波作用是由于电感线圈对高频电流的感抗很大，并且其感抗随频率增高而增大；而电容器对高频电流的容抗较小，并且其容抗随频率增高而减小。滤波器广泛应用于有线通信技术和电子技术设备中，例如在通信电路中用所谓带通滤波器滤去通带（所需要的允许通过滤波器的频率范围叫通带）以外的信号电流；在整流器后用所谓平滑滤波器滤去交流分量，得到稳定的直流输出。

最常用的平滑滤波器有图 1-21-27 所示的几种形式。图 1-21-28 甲是带有电容滤波器的半波整流电路，电解电容器 C 和负载电阻 R 并联。由于并联电路有分流作用，当电容器的电容 C 比较大时，容抗比较小，整流后的脉动电流（波形如图乙中虚线所示）的交流成分大部分通过电容器而滤

掉，因此负载电阻的电流和电压就平稳多了（波形如图乙中实线所示）。图 1-21-29 是带有电感滤波器的全波整流电路，电感线圈（低频扼流圈）L 和负载电阻 R 串联。由于串联电路有分压作用，当低频扼流圈的电感比较大时，感抗也比较大，电压的交流成分大部分降在低频扼流圈上，低频扼流圈的电阻一般比负载电阻小得多，电压的直流成分大部分降在负载电阻上。因此负载电阻的电流和电压也平稳多了。采用把电容、电感滤波结合起来的 L 型滤波器（图 1-21-27）和 π 型滤波器（图 1-21-30 甲）可以使负载电阻得到更加平稳的电流和电压。如果负载需要的电流不大，可以用电阻代替低频扼流圈，就成了 RC 滤波器（图 1-21-30 乙），效果虽然差一些，但体积小、成本低。

图 1-21-27

图 1-21-28

图 1-21-29

图 1-21-30

半导体三极管 (semiconductor triode)

也叫晶体三极管，还常常简称为晶体管，是一种具有三个电极，能起放大、振荡或开关等作用的半导体器件。按工作原理的不同，可分为结型晶体管和场效应晶体管，目前习惯上讲晶体三极管时只指结型晶体管，而不包括场效应晶体管。

结型晶体管是在半导体单晶上制备两个结合得很紧、能相互影响的 PN 结，组合成 N-P-N（或 P-N-P）结构（图 1-21-31），中间的 P 型（或 N 型）区域叫基区，边上的两个区域分别叫发射区和集电区。集电区和基区的交界处的 PN 结叫集电结，发射区和基区的交

图 1-21-31 结型晶体管的结构示意图和符号

界处的 PN 结叫发射结。由三个区所引出的电极，分别称为发射极（e）、基极（b）、集电极（c）。晶体管的主要结构特点是基区很薄，一般只有几微米至几十微米，发射区的多数载流子浓度远远大于基区的多数载流子浓度，一般要大 100 倍以上。

(1) 半导体三极管的放大作用

以 NPN 型晶体管共发射极接法为例。这种接法时，发射结由 E_b 供给较低的正向电压，集电结由 E_c 供给较高的反向电压。在这种情况下，N 型发射区的多数载流子（电子）在正向电压作用下很容易越过发射结进入基区，同时 P 型基区中的多数载流子（空穴）也很容易进入发射区，它们共同形成发射极的电

图 1-21-32 共发射有接法时晶体管中载流子的运动。（图中空心箭头表示载流子运动方向）

流。但是由于基区的多数载流子浓度不足发射区多数载流子浓度的百分之

一，可以忽略不计，所以可以认为发射极电流 I_e 是由发射区的多数载流子（电子）形成的。由于基区很薄，从发射区来的大多数电子很容易扩散到集电结，并且在集电结的反向电压作用下进入集电区，形成集电极电流 I_c （这里忽略了N型集电区中少数载流子——空穴在反向电压作用下越过集电结而形成的电流）。从发射区进入基区的电子，有很小一部分与基区的空穴相遇而复合，与基区相连的电源 E_b 不断地将基区共价键中的电子拉走（这相当于不断向基区补充空穴），而形成基极电流 I_b 。

根据基尔霍夫定律

$$I_e = I_c + I_b$$

通常集电极电流 I_c 约为发射极电流 I_e 的 90% 至 99%，典型值为 98%。而且晶体管一经制成，这个比值基本上是一定的。正是由于这三个电流的比例关系基本不变，晶体管才有放大作用。

在图 1-21-32 所示的晶体管电路中，假定最初 $I_e=5\text{mA}$ ， $I_c=4.8\text{mA}$ ， $I_b=0.2\text{mA}$ ， $I_c / I_b=24$ ，现在调节基极电路中的电位器 R_b 的阻值，使 I_b 增大为 0.3mA ，由于电流的比例关系基本不变， I_c 增大到约 7.2mA 基极电流变化量 $\Delta I_b=0.1\text{mA}$ ，集电极电流变化量 $\Delta I_c = 7.2\text{mA}-4.8\text{mA}=2.4\text{mA}$ ， $\Delta I_c / \Delta I_b = 24$ 。可见，基极电流有很小变化，能引起集电极电流的较大变化，这就是晶体管的电流放大作用。

在图 1-21-32 的电路中，当调节电位器 R_b 阻值使基极电流发生 ΔI_b 变化时，实际上就是将加于发射结的电压发生 U_{be} 的变化。 ΔI_b 引起较大的 ΔI_c ，后者将在集电极的负载电阻 R_c 上产生电压变化 $\Delta U_{RC}=R_c \cdot \Delta I_c$ 。只要 R_c 足够大，就能使 ΔU_{RC} 比 ΔU_{be} 大很多倍，这样就获得了电压放大。

在共发射极接法中，虽然 I_c 受 I_b 控制，但 $I_b=0$ 时 I_c 并不等于 0。从图 1-21-32 可知，基极开路时， E_c 使集电结为反向电压，使发射结为正向电压，N 型集电区中的少数载流子（空穴）将越过集电结进入基区，同时 N 型发射区中的多数载流子（电子）将越过发射结进入基区，两者除了在基区复合满足 $I_b=0$ 的条件外，多余的电子将越过集电结进入集电区，形成集电极与发射极之间的穿透电流（基极开路时，集电极-发射极反向截止电流） I_{ce0} ，这一电流虽然很小，但对晶体管的放大性能有影响。

(2) 半导体三极管的三种连接方法

根据输入电路和输出电路共用的电极（接地端）的不同，半导体三极管有共发射极、共基极和共集电极三种接法（图 1-21-33），其中以共发射极电路应用最广。这三种接法的特点如下表：

图 1-21-33 NPN 型晶体管的三种接法（PNP 型晶体管三种接法的电源极性相反）

	共发射极电路	共基极电路	共集电极电路
输入电阻	中(约几百欧)	小(约几十欧)	大(几十千欧以上)
输出电阻	中(约几千欧)	大(约几百千欧)	小(约几十欧)
电压放大倍数	大(几百~千倍)	较大(几百倍)	小(小于1,接近1)
电流放大倍数	大(几十~二百倍)	小(小于1,接近1)	大(几十~二百倍)
功率放大倍数	大(几千倍)	中(几百倍)	小(几十倍)
频率特性	高频性能差	频率性能好,频带宽	频率性能好,频带宽
应用范围	放大电路,开关电路	高频放大,振荡	阻抗变换电路

(3) 电流放大系数

输出电流与输入电流之比,叫直流电流放大系数。输出电流变化量与输入电流变化量之比,叫交流电流放大系数。

在共发射极电路中

$$\text{直流电流放大系数 } \bar{\beta} = \frac{I_c}{I_b},$$

$$\text{交流电流放大系数 } \bar{\beta} = \frac{\Delta I_c}{\Delta I_b},$$

$$\bar{\beta} \approx \beta。$$

在共基极电路中

$$\text{直流电流放大系数 } \bar{\alpha} = \frac{I_c}{I_e}, (<1)$$

$$\text{交流电流放大系数 } \bar{\alpha} = \frac{\Delta I_c}{\Delta I_e}, (<1)$$

$$\bar{\alpha} \approx \alpha。$$

从 $I_e = I_b + I_c$ 和 $I_e = I_c / \alpha$, $I_b = I_c / \beta$ 可得

$$\beta = \frac{\alpha}{1-\alpha}, \quad \alpha = \frac{\beta}{1+\beta}。$$

半导体三极管的 β 值以 20~100 为好,

β 值过大时三极管工作不稳定。

(4) 特性曲线

输入特性 在不同的输出电压下,输入电流随输入电压变化的曲线族,称为晶体管的输入特性。图 1-21-34 是共发射极接法时的输入特性。

图 1-21-34 结型晶体管共发射极输入特性

当输出电压 $U_{ce}=0$ 时,曲线与 PN 结正向特性相似。当 U_{ce} 从 0 变到 1V 时, I_b 值明显减小,曲线侧移。但 $U_{ce}>1V$ 时,不同 U_{ce} 时的输入特性曲线密集,所以一般只给出一条 $U_{ce} > 1V$ 的输入特性曲线。

输出特性 在不同的输入电流下,输出电流随着输出电压变化的曲线族,称为晶体管的输出特性。图 1-21-35 是共发射极接法时的输出特性,各条曲线的形状基本相似,差别在于输入电流 I_b 越大,对应的 I_c 也越大。

图 1-21-35 结型晶体管共发射极输出特性

晶体管特性曲线的分散性较大（同型号的管子，特性也有差别），因此具体使用晶体管时最好测出所用管子的特性曲线。测试的一种方法是逐点测出晶体管各电极的电流和电压，然后根据测得的数据来描绘；另一种方法是用晶体管特性图示仪直接在屏幕上显示出来。

(5) 电极和有关参数的简易判别

晶体三极管的电极和各项参数可由手册查得，或由晶体管特性图示仪测出。在不具备这些条件时可利用多用电表进行简易判断（见以下两个表）。

管型和电极引线的简易判断

判断内容		方法	说明
第一步判断基极	PNP 型晶体管	两次读数均较小	可以将晶体管看成两个二极管来分析。用 $R \times 100$ 或 $R \times 1k$ 挡，当红表笔接某一管脚、黑表笔分别接另二管脚，测得的二阻值均较小时，红表笔所接管脚为 PNP 管基极。
	NPN 型晶体管		用 $R \times 100$ 或 $R \times 1k$ 挡，当黑表笔接某一管脚，红表笔分别接另二管脚，测得的二阻值均较小时，黑表笔所接管脚为 NPN 管基极。
第二步判断集电极		指针偏转较大 (即阻值较小)	测出基极后，用双手分别将两表笔与另外两管脚相接，再用舌头舔一下基极，注意指针摆动情况，然后将表笔对调，重做这个试验，找出指针摆动较大（即阻值较小）的一次；对于 PNP 管，这时红表笔所接的是集电极；对于 NPN 管，这时黑表笔所接的是集电极。

晶体管性能的简易比较 (PNP 型)

比较内容	方法	说明
穿透电流 I_{ce0}		用 $R \times 100$ 或 $R \times 1k$ 挡测集电极—发射极反向电阻，阻值越大，说明 I_{ce0} 越小，晶体管性能越稳定。一般硅管比锗管阻值大，高频管比低频管阻值大，小功率管比大功率管阻值大。低频小功率锗管应超过几千欧。
共发射极电流放大系数		如果再在基极—集电极间接入 $100k$ 电阻，集电极—发射极反向电阻便减小，电表指针偏转。偏转角度越大，表明 β 越大。
稳定性能		在判断 I_{ce0} 的同时，用手捏住晶体管，由于受人体体温影响，它的集电极—发射极的反向电阻将减小，如果指针摇摆较大或阻值迅速减小，则晶体管稳定性能差。
备注	对 NPN 型管，应将“说明”中所述红、黑表笔对调。	

输入电阻 (input resistance)

从放大电路输入端向里看的一个等效电阻；也就是输入电压与输入电

流之比。如图1—21—36所示，当有输入电压 \tilde{U}_{sr} 加于放大电路输入端，就有输入电流 \tilde{I}_{sr} 产生，可以设想从放大电路输入端a—a 向放大电路里看去，有一个等效电阻 $r_{sr} = \tilde{U}_{sr} / \tilde{I}_{sr}$ ，这个等效电阻 r_{sr} 就是放大电路的输入电阻。

图 1-21-36 放大电路的等效输入电阻

输入电阻的大小表明对信号源（图中的 E_x 、 R_x ）影响的大小。放大设备，特别是测量仪器中的放大设备，总希望有很高的输入电阻，以减小对被测电路的影响。

输出电阻 (output resistance)

从放大电路输出端向里看的一个等效电阻。如图 1-21-37 所示，从放大电路输出端 b—b 向放大电路里看去，放大电路相当一个电源，有电动势 \tilde{E}_{sc} 和内电阻 r_{sc} 。这个内电阻， r_{sc} 就是从放大电路输出端看进去的等效电阻——放大电路的输出电阻。

图 1-21-37 放大电路等效一个电源

就一个电源来说，内电阻越小，连接负载后输出电压下降越小，也就是带动负载的能力越强。与此类似，放大电路的输出电阻的大小，表明它带动负载能力的强弱。一般要求输出电阻越小越好。

电平 (level)

一种表示电量（功率、电压或电流）相对大小的方法。功率电平是指某一功率 P （如放大器的输出功率）与作为标准的功率 P_0 （如放大器的输入功率）之比的对数值，其单位为分贝（dB）。功率的电平值（分贝数）可表示为

$$\text{电平值} = 10 \lg \frac{\text{所给功率}}{\text{标准功率}} \text{ dB}。$$

如果取 1 毫瓦为标准功率，即作为零电平，当所给功率为 10 毫瓦时，则 10 毫瓦功率的电平值=10lg (10 / 1) dB=10dB。电平为正值，表示所给功率大于标准功率；电平为负值，表示所给功率小于标准功率。可见电平可表示两个同类电量间的相对大小。

电压（或电流）的电平值（分贝数）可表示为

$$\text{电平值} = 20 \lg \frac{\text{所给电压（或电流）}}{\text{标准电压（或电流）}} \text{ dB}。$$

根据标准量的不同又将电平分为相对电平和绝对电平。相对电平只用来表明两个同类量的相对大小，而不规定标准量的具体数值。绝对电平则必须确定标准量的具体数值，例如，专门用来测量电平的电平表，有些是以 600 欧姆电阻上消耗 1 毫瓦功率作为零电平进行绝对电平刻度的，它的标准功率 $P_0 = 1\text{mW}$ ，标准电压 U_0 可按公式 $P_0 = U_0^2 / R_0$ 计算

$$U_0 = \sqrt{P_0 \cdot R_0} = \sqrt{1 \times 10^{-3} \times 600} \text{ V}$$

$$=0.775V。$$

其中 $R_0=600$ 称为该绝对电平的零电平基准电阻。

晶体管的三种工作状态

即放大状态、饱和状态、截止状态。根据晶体三极管两个 PN 结上所加偏压方向的不同，可使晶体三极管分别处于这三种工作状态：

工作状态	发射结偏压	集电结偏压
截止	反向	反向
放大	正向	反向
饱和	正向	正向

晶体管处于放大工作状态时，它工作于输出特性的放大区（图 1-21-38），输出电流 I_c 几乎不随集电极-发射极电压 U_{ce} 改变（曲线几乎与 U_{ce} 轴平行），而受输入电流 I_b 控制， I_b 有较小的变化就可使 I_c 有较大的变化，即有电流放大作用。

图 1-21-38 晶体三极管的三个工作区

晶体管处于截止工作状态时，它工作于输出特性的截止区， $I_b = 0$ ， $I_c = 0$ ， $U_{ce} = E_c$ ，其中 E_c 是集电极电路的直流电压，这时的晶体管如同断开的开关。

晶体管处于饱和工作状态时，它工作于输出特性的饱和区，这时的 U_{ce} 叫做集电极-发射极饱和压降，常用 U_{ces} 代表，只有 $0.2V \sim 0.3V$ ，可以略去不计，而 $I_c = E_c/R_0$ ，其中 R_c 是集电极的负载电阻。这时 I_c 不受 I_b 控制，而且几乎与晶体管本身的参数无关，主要由集电极电路的参数（ E_c 、 R_c ）决定，晶体管如同闭合的开关。

利用截止和饱和状态，可使晶体管起开关作用。

晶体管放大器 (transistor amplifier)

以输入信号通过晶体管来控制电源，而得到一个比输入信号强的输出信号的装置。晶体管放大器是许许多多电子设备的重要组成部分。它的种类很多。按工作频率分类，有直流、低频、中频、高频，视频等放大器；按频带宽度分类，有宽频带、窄频带放大器；按放大任务分类，有电流、电压、功率等放大器；按结构分类，有阻容耦合、变压器耦合、直接耦合等放大器；按工作状态分类，有甲类、乙类、丙类、丁类等放大器。

(1) 放大器的静态工作点

没有信号输入时放大器的工作状态称为静态。静态时晶体管放大器的电流值和电压值（一般是指基极电流 I_{b0} 、集电极电流 I_{c0} 、集电极-发射极电压 U_{ce0} 的值），在晶体管输出特性曲线上由一个点表示出来，这个点叫做放大器（或放大电路）的静态工作点，常简称为工作点。图 1-21-39 丙的 Q 点，就是图 1-21-39 甲的单管放大器的静态工作点，它表示 $I_{b0}=30$

μA 、 $I_{c0}=1.5\text{mA}$ $U_{ce0}=3\text{V}$ 。

设计放大器时，工作点选得正确，可以保证放大器的工作范围合适，不失真地放大信号。分析已有的放大器时，找到它的工作点，可以了解它的工作性能，如是否失真，放大倍数是多少，等等。

图 1-21-39 单管放大器（甲）的直流通路（乙）和静态工作点（丙）

(2) 放大器的直流负载线

晶体管放大器静态时，在晶体管输出特性上画出的表示集电极电流 I_{c0} 与集电极-发射极电压 U_{ce0} 关系的直线，称为放大器的直流负载线。直流负载线的主要作用是确定放大器的静态工作点。

图 1-21-39 丙中直线 MN 就是图 1-21-39 甲的放大器的直流负载线。它是这样绘制的：画出放大器的直流通路（图 1-21-39 乙），可以看出

$$U_{ce0} = E_c - R_c I_{c0}$$

当 $I_{c0}=0$ 时， $U_{ce0}=E_c=6\text{V}$ ，即图中的 M 点；当 $U_{ce0}=0$ 时， $I_c=E_c/R_c=3\text{mA}$ ，即图中的 N 点；连接 M、N 即得直流负载线。从图 1-21-39 乙还可看出

$$I_{b0} = \frac{E_c - U_{be0}}{R_b}$$

其中 U_{be0} 是发射结电压，静态时硅管大约是 $0.6\text{V} \sim 0.7\text{V}$ （锗管大约是 $0.2\text{V} \sim 0.3\text{V}$ ）。设 $U_{be0}=0.6\text{V}$ ，即可知 $I_b=30\mu\text{A}$ ；而 $I_b=30\mu\text{A}$ 的输出特性曲线与 MN 的交点 Q，即所求的直流工作点。

(3) 放大器的动态工作范围

有待放大的交流信号输入时，放大器的工作状态称为动态。动态时，晶体管放大器的电流值和电压值的变化范围，叫做放大器的动态工作范围。放大器的动态工作范围可以用负载线上的两个点表示出来。

图 1-21-40 动态工作范围

图 1-21-40 中负载线上 Q_1 和 Q_2 两点就表示图 1-21-39 甲的放大器当基极电流 i_b 随时间而在 $40\mu\text{A}$ 和 $20\mu\text{A}$ 之间变化时的动态工作范围。图中还表示出了这时 i_b 在 2mA 和 1mA 之间变化， u_{ce} 在 2V 和 4V 之间变化。

放大器的主要任务是要不失真地将输入信号加以放大，为此必须正确地选择工作点，而且输入信号不可过大，否则将产生非线性失真——输出信号和输入信号不成直线关系（正比关系），或者说放大倍数不恒定，而随输入信号大小变化。图 1-21-41 表示出了两种非线性失真：由于工作点选择过高， i_b 正峰值时晶体管进入饱和区引起的失真；工作点选择过低， i_b 负峰值时晶体管进入截止区引起的失真。

图 1-21-41 非线性失真

放大器电路的参数一经选定，就决定了静态工作点及其最大可能的不失真的动态工作范围。在理想情况下，如果忽略穿透电流 I_{ce0} 和饱和压降 U_{ces} ，输出特性将如图 1-21-42 所示，如果工作点选在 Q_1 点， i_b 在 0 和 i_{b4} 之间变化还不致失真，可能获得的最大输出电压的动态工作范围是 $0 \sim E_c$ 。如果工作点选在 Q_2 点， i_b 只能在 0 和 i_{b2} 之间变化才不致失真，可能获得

的最大输出电压的动态工作范围是 $E_c / 2 \sim E_c$ ，即减小了一半。工作点选在 Q_3 处，最大动态工作范围也要减小一半。

图 1-21-42 在不失真情况下的最大动态工作范围

晶体管放大器的偏置电路 (bias circuit of transistor amplifier)

要使晶体管放大器正常工作，必须有一个合适的静态工作点(参见“晶体管放大器”)。在共发射极放大电路中，当电源 E_c 和集电极电阻 R_c 确定时，静态工作点取决于基极电流 I_b ，这个电流就是所谓偏流，建立偏流的电路叫做偏置电路，或偏流电路。图 1-21-43 给出了几种常用的偏置电路。

固定偏流式偏置电路最简单，当 E_c 、 R_b 一经确定，基极电流 $I_b = \frac{E_c}{R_b}$

也就确定了。这种电路的缺点是静态工作点常因外界条件的变化而变动。

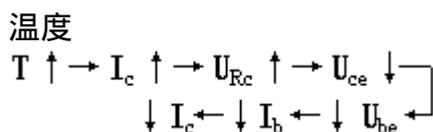
影响工作点变动的因素很多，如温度的变化，晶体管和电阻、电容元件的老化，供电电压的波动，以及元件的更换导致参数不一致等等，其中以温度变化的影响最大。当温度升高时，晶体管的集电极反向饱和电流 I_{cbo} 将随之增大，晶体管的穿透电流 $I_{ceo} = (1 + \beta) I_{cbo}$ 也相应增大。由于 I_{ceo} 是集电极电流 I_c 的一部分，因而使 I_c 增大而导致晶体管的输出特性曲线族上移(图 1-21-44)。在固定偏流式电路 I_b 不变的情况下，静态工作点将随着特性曲线族(沿着直流负载线)向上移，使原来正常工作的电路变得不能正常工作。因此，要保证放大电路可靠的工作，需要在电路中采取稳定工作点的措施，这些措施(图 1-21-43 中的乙、丙、丁)都是在温度升高而 I_c 增大时能使增大的 I_c 再下降回来。

图 1-21-43 常用的偏置电路

图 1-21-44 温度对工作点的影响

在电压负反馈式偏置电路(图 1-21-43 乙)中， R_b 跨接在基极和集电极之间，它不仅供给所需偏流，同时还有电压负反馈作用。假设温度升高， I_c 增大，工作点向上移，则电路将引起一系列变化，而最终使 I_c 自动减小，工作点有回到原来位置的趋势，其大致过程如下(参看图 1-21-45)：

图 1-21-45



在分压式电流负反馈式偏置电路(图 1-21-43 丙)中，基极电势 U_b 由分压电路 R_{b1} 、 R_{b2} 和 E_c 决定，即

$$U_b \approx E_c \frac{R_{b2}}{R_{b1} + R_{b2}}$$

不随温度变化。当温度升高， I_c 增大时，发射极电流 $I_e (=I_b + I_c)$ 随着增大，发射极电阻 R_e 上的电压降 $U_e = I_e R_e$ 也增大，由于基极电势 U_b 不变，基极与发射极间的电压 $U_{be} = U_b - U_e$ 则减小， I_b 随着减小，导致 I_c 也减小，从而使工作点稳定。这个过程可表示如下：



图 1-21-43 丁是把电压负反馈与分压式电流负反馈结合起来的混合式偏置电路，稳定性更好，因而更常用。

场效应晶体管 (field effect transistor)

利用场效应控制电流通路 (沟道) 中的载流子密度，以控制沟道电流的一种半导体器件。与结型的 PNP 或 NPN 晶体管靠电子和空穴这两种极性相反的载流子导电不同，场效应晶体管只靠一种载流子 (电子或空穴) 导电，因此前者通常称为双极型晶体管，而后者称为单极型晶体管。场效应晶体管能作放大、振荡、开关等应用，常见的有两种：结型场效应管和绝缘栅场效应管。后者由于制造工艺简单，目前已大量制成集成电路。

(1) 结型场效应管 又称 J 型管，图 1-21-46 是它的结构示意图和图形符号。它是

图 1-21-46 结型场效应管结构示意图 (甲) 和图形符号 (乙)

在 N 型硅半导体两侧作两个 P 型区，从 N 型硅两端各引出一个电极，分别称为源极 (S) 和漏极 (D)，从两侧 P 型区引出的电极连在一起称作栅极 (G)。两侧的 PN 结处各出现一个没有载流子的耗尽层 (“参见 PN 结”)，当 G、S 间加反向电压时，由于电场的效应，耗尽层会变厚；反向电压越大，耗尽层越厚，两耗尽层的沟道越窄，电阻越大。结型场效应管就利用电场对 PN 结耗尽层的效应，通过改变栅极与源极之间的反向电压，来改变源极与漏极间导电沟道的电阻，从而控制漏极电流 I_D 的强弱。实际的结型场效应晶体管，栅-源之间的电压 U_{GS} 有很小的变化，就会引起漏极电流 I_D 的显著变化，从而获得放大作用。当 U_{GS} 足够大时，两 PN 结的耗尽层会连接在一起，而将导电沟道夹断，这时 $I_D = 0$ ，晶体管截止 (相当于断路)，所以结型场效应管也可以起开关作用。导电沟道被耗尽层夹断 ($I_D = 0$) 时的栅-源电压，称为“栅源夹断电压” (一般 $< -9V$)。 $U_{GS} = 0$ 时的漏极电流，称为“饱和漏极电流” (一般约 $0.3mA \sim 10mA$)。

结型场效应管也可以是在 P 型半导体两侧各作一个 N 型区，而构成 P 型沟道的结型场效应管。

图 1-21-47 绝缘栅场效应管 (增强型) 的结构、原理和图形符号

(2) 绝缘栅场效应管 图 1-21-47 画出了这种晶体管的结构，是在一块杂质浓度较低的 P 型薄硅片衬底上扩散两个掺杂浓度很高的 N 型区，通过铝层引出两个电极，分别作为源极 S 和漏极 D。两个 N 型区之间的硅片

表面用热氧化法生成厚度在 $0.1\mu\text{m} \sim 0.2\mu\text{m}$ 的 SiO_2 绝缘层，绝缘层上加一铝电极作为栅极 G。由于栅极与其他电极绝缘，所以称为“绝缘栅场效应管”。又由于它是由金属 (metal)、氧化物 (oxide)、半导体 (semiconductor) 组成，所以又称为“金属-氧化物-半导体场效应管”，简称为“MOS 管”。MOS 管根据导电沟道类型不同分为 N 型沟道和 P 型沟道，可分别简称为“NMOS 管”和“PMOS 管”，前者载流子为电子，后者载流子为空穴，它们的工作原理相同，只是因载流子的电极性相反，使用时所接电压的极性也相反。

当照图 1-21-47 乙那样在 G 极和 P 型衬底间加一定的电压，形成指向 P 型半导体的电场时，P 型半导体中的少数载流子——电子，会因电场的效应被吸到衬底上方与空穴复合，形成耗尽层。当电压增大到超过所谓“开启电压”（约几伏特）时，被电场吸引到衬底上方的电子数超出与空穴复合的数目，而形成 N 型导电沟道；由于它与 P 型衬底导电类型相反，所以称为“反型层”。外加电压越大，电场越强，反型层越厚，导电沟道的电阻越小。照图 1-21-47 而那样在漏极与源极之间加上电压 U_{DS} ，可以使栅极与衬底（连着源极）间的电压 U_{GS} 有微小变化而漏极电流 I_D 有显著变化，从而实现放大作用。显然， $U_{GS}=0$ 时不存在导电沟道，晶体管截止，相当于断路，而 $U_{GS} >$ 开启电压时晶体管导通。所以 MOS 管也可以起开关作用。

如果在用热氧化法在硅衬底表面生成 SiO_2 绝缘层时掺入大量正离子，这些正离子产生的电场就会将衬底中的大量电子吸引到硅衬底表面形成 N 型沟道（图 1-21-48 甲）。在 $U_{GS}=0$ 时就存在导电沟道的 MOS 管叫“耗尽型场效应管”，它也有 N 型沟道和 P 型沟道两类，前面讲的 $U_{GS}=0$ 时不存在导电沟道的，则称为增强型场效应管。

(3) 场效应管的特点和使用时应注意的问题场效应管的输入电阻大（可达 $10^6 \sim 10^{12}$ 而双极型三极管的输入电阻仅 $10^2 \sim 10^4$ ），几乎没有栅极电流，功耗小，噪声低，热稳定性好，抗辐射能力强，制造工艺比较简单，便于制作集成电路。

场效应管的漏极、源极可以互换使用。（但有些在出厂前已将源极与衬底连在一起，则漏极、源极不能互换。）耗尽型场效应管的 U_{GS} 可正、可负，均有漏极电流 I_D ，适于作放大用。增强型场效应管， $U_{GS}=0$ 时 $I_D=0$ ， $U_{GS} >$ 开启电压才有 I_D ，适于作开关用。场效应管的最大缺点是容易损坏，特别是绝缘栅场效应管的栅极被绝缘，一旦由于静电感应等原因栅极积存了电荷，很难泄放，造成电压升高，将 $0.1\mu\text{m} \sim 0.2\mu\text{m}$ 的 SiO_2 绝缘层击穿。因此，任何时候都不能让栅极悬空，要为栅极泄放电荷提供通路。存放时，应将三个管脚短路。焊接时，电烙铁的外壳要接地，功率不超过 25W 或者用烙铁余热焊接，并且先焊源、栅极，后焊漏极。

集成电路 (integrated circuit)

使用半导体工艺或薄，厚膜工艺（或者这些工艺的结合）将晶体管、电阻、电容等元件及其相互连线一起制作在半导体片或绝缘片上，形成紧密联系的整体电路，叫做集成电路（常用 IC 代表）。

与分立元件构成的电路相比，集成电路大大减小了体积、重量，引出

线和焊点数目，提高了电路的工作性能和可靠性，同时降低了成本，便于批量生产。从分立元件到集成电路，是半导体电子技术发展的一个飞跃。

目前，集成电路不仅在电子计算机、雷达、人造卫星中占有非常重要的地位，而且在自动化仪表、工业自动化控制、通讯及家用电器等方面得到广泛的应用。

集成电路按制作工艺的不同，可分为：

半导体集成电路—在半导体单晶硅片上，使用外延、氧化、光刻、扩散等半导体工艺来制作晶体管、电阻、电容等元件及施行隔离，并用金属蒸发工艺（使铝蒸发、淀积在硅片上）进行互连，这样构成的集成电路叫半导体集成电路。

薄膜集成电路—厚度在 $1.0\mu\text{m} \sim 1.5\mu\text{m}$ 以下的金属或介质膜，称为薄膜。用真空蒸发、溅射、化学气相淀积等方法形成薄膜的工艺，称为薄膜工艺。在绝缘基片（如陶瓷片）上由薄膜工艺形成电阻，电容等元件和连线的电路，即薄膜集成电路。

厚膜集成电路—厚度为几微米至几十微米的膜，一般称为厚膜。形成厚膜的工艺如电镀、丝网漏印、烧结、喷涂等称为厚膜工艺。在绝缘基片上由厚膜工艺形成电阻、电容等元件及连线的电路，即厚膜集成电路。

在单块晶片（单片）上或单个封装中构成集成电路所包含的最大元件数，称为集成度。按照集成度的不同，集成电路又可分为：

小规模集成电路—集成度少于 100 个元件。

中规模集成电路—集成度在 100 ~ 1000 之间。

大规模集成电路—集成度在 1000 以上者。

超大规模集成电路—尚无公认的一致标准，目前可以认为集成度超过 10 万的，为超大规模集成电路。

数字电路 (digital circuit)

用来传输数字信号，或对数字信号进行变换、放大或测量等工作的电路。自然界的物理量尽管各不相同，但就变化规律的特点来看可分为两类：一类是连续变化的量，如模拟语言的音频信号，称为模拟信号；另一类是不连续的量，例如自动生产线的产品计数器输出的信号（每通过 1 件产品输出 1 个信号），称为数字信号。数字信号通常用二进制“0”和“1”组合的数码表示（图 1-21-49）；

图 1-21-49 数字信号

表现为电信号就是一连串脉冲和电平变化。例如产品计数器电子线路的输出端，每当 1 件产品通过时就输出 1 个脉冲—输出端的电势有短暂的突然升高；用二进制数表示时可以用“0”表示低电平，用“1”表示高电平，或者说用“0”表示无脉冲，用“1”表示有脉冲。数字电路只有“0”和“1”两种状态。

在脉冲信号较强时，外部干扰一般只影响脉冲的波形和大小，不影响脉冲的有无，因此利用数字信号传输信息比利用模拟信号的抗干扰能力强。现代电子技术中，往往把模拟信号先转换为不连续的数字信号（叫做“量化”或“离散化”），再进行放大、计数、译码等处理，这些都要靠

数字电路来完成。数字电路广泛应用于数字通信、电子计算机、雷达，以及各种程序控制设备。这些设备都是用大量的数字电路部件组成的复杂系统，但就其单元电路来看，只有少量几种数字电路，主要是一些门电路和触发器。

逻辑电路 (logical circuit)

数字电路中能体现一种因果判断关系的电路。例如，一个电路有三个输入端 A、B 和 C，一个输出端 Y，只有当 A、B、C 都出现某一规定信号（例如高电平）时，Y 才输出规定信号，输入端任何一个没有出现规定信号，Y 就不输出规定信号。这就体现了对输入条件进行判断的一种因果关系，很像人的思想对事件进行判断那样。因此把这类能作因果判断的电路称为逻辑电路，它主要由一些基本的门电路组成。逻辑电路所完成的工作过程叫做实现一定的“逻辑功能”。从这个意义出发，对输入条件进行判断选择、计数、存储等等，都可以看作是数字电路所完成的一种逻辑功能。因此，逻辑电路一般可以当作数字电路的别称。

真值表 (truth table)

将一个逻辑电路的各个输入端所有可能的取值，和输出端相应的取值，共同排在一张表上，叫真值表。因为真值表列举了所有可能的事件，所以给出真值表便能全面反映一个逻辑电路的功能。可见，真值表是研究逻辑电路的一种重要手段。利用真值表可证明某些逻辑电路的等效关系，或对已给逻辑电路进行逻辑分析，还可以根据给定条件，通过真值表来设计逻辑电路。真值表一词源于数理逻辑，是用来确定复合命题的真或假（即真值）的图表，电子技术把它引用来反映逻辑电路的功能。

门电路 (gate circuit)

凡是对脉冲通路上的脉冲起着开关作用的电子线路就叫做门电路，是基本的逻辑电路。门电路可以有一个或多个输入端，但只有一个输出端。门电路的各输入端所加的脉冲信号只有满足一定的条件时，“门”才打开，即才有脉冲信号输出，从逻辑学上讲，输入端满足一定的条件是“原因”，有信号输出是“结果”，门电路的作用是实现某种因果关系——逻辑关系，所以门电路是一种逻辑电路。基本的逻辑关系有三种：“与”逻辑、“或”逻辑、“非”逻辑。与此相对应，基本的门电路有“与”门、“或”门、“非”门。

“与”门图 1-21-50 甲是“与”逻辑一例，只有当开关 A 与 B 都闭合时（条件），灯泡才亮（结果）；A 与 B 中只要有一个不闭合，灯泡就不亮。“与”逻辑可以概括为：当条件 A 与 B 与 C 与……都具备时，事件才能发生。图 1-21-50 乙是由二极管 VD_A 和 VD_B 组成的“与”门，A、B 是两个输入端（实际可以有多只二极管、多个输入端），设输入脉冲的低电势为 0V，高电势为 3V，Y 是输出端。输入信号的电势有 4 种组合：

(1) A、B 都是高电势 3V，两只二极管都导通，输出端 Y 的电势等于 A（或 B）的电势加二极管（设为硅管）的正向压降 0.7V（若为锗管正向压降是 0.3V），即等于 3.7V。

(2) A 是 3V、B 是 0V，二极管 VD_B 导通使 Y 的电势等于 0.7V（二极管

VD_A 处于反向偏置)。

图 1-21-50

(3) A 是 0V、B 是 3V， VD_A 导通， VD_B 截止，Y 仍为 0.7V

(4) A、B 都是 0V， VD_A 、 VD_B 都导通，Y 为 0.7V。

用“1”表示高电势、“0”表示低电势，可得图 1-21-50 乙“与”门电路的真值表。

A	B	Y
1	1	1
1	0	0
0	1	0
0	0	0

图 1-21-50 丙是“与”门的图形符号，丁是曾用过的“与”门图形符号。

“或”门图 1-21-51 甲是“或”逻辑一例。开关 A 闭合或开关 B 闭合，灯都会亮。“或”逻辑可以概括为：当条件 A 或 B 或 C 或……有一个或一个以上具备时，事件就能发生。图 1-21-51 乙是由二极管 VD_A 、 VD_B 组成的“或”门，两个输入端 A、B 输入的脉冲的电势也有四种组合。仿照是面对图 1-21-50 乙的分析可知，A、B 中只要有一个输入为高电势 (3V)，输出端 Y 就是高电势 ($3V - 0.7V = 2.3V$)，只当 A、B 都是低电势 (0V) 时，Y 才是低电势 (-0.7V)。图 1-21-51 丙是“或”门的图形符号，丁是曾用过的“或”门图形符号。

A	B	Y
1	1	1
1	0	1
0	1	1
0	0	0

“非”门 图 1-21-52 甲是“非”逻辑一例。开关 A 闭合时，灯灭，开关 A 断开，灯反而亮。“非”逻辑可以概括为：当条件 A 出现时，事件不发生；条件 A 不出现时，事件反而发生。图 1-21-52 乙是由三极管组成的“非”门电路。当与基极相连的 A 端输入足够高的电势时，三极管饱和导通，集电极输出端 Y 为低电势 (三极管饱和压降约 0.3V)。当 A 端输入为低电势时，三极管截止 (可视为开路)，Y 处于高电势。图 1-21-52 乙中，基极经 R_C 接 -12V，是为了保证 A 为低电势时三极管能可靠地截止；集电极经 R_C 接 +12V、经二极管接 +2.5V，目的是使输出的高电势为 3.2V：三极管截止时二极管导通，Y 点电势等于 2.5V 加二极管正向压降 0.7V。图 1-21-52 丙是“非”门的图形符号，图丁是曾用过的图形符号。

A	Y
1	0
0	1

图 1-21-52

由基本门可以组成复合门。最重要的复合门是由“与”门、“非”门组成的“与非”门，由“或”门、“非”门组成的“或非”门。图 1-21-53 是由二极管和三极管组成的“与非”门电路（甲）及其图形符号（乙）。

“与非”门真值表，可概括为：“全 1 出 0，有 0 出 1”。

A	B	Y
1	1	0
1	0	1
0	1	1
0	0	1

“与非”门能组合成“与”门、“或”门、“非”门。如图 1-21-54 甲，“与非”门的所有输入端并接为一个输入端，或者只用它的一个输入端（其余的悬空或接高电势），就成了“非”门。两个“与非”门串联就成了“与”门（图 1-21-54 乙）。照图 1-21-54 丙方式连接三个“与非”门就成了“或”门。

图 1-21-53

图 1-21-54

门电路可用分立元件组成，也可做成集成电路，但目前实际应用的都是集成电路。由于单一品种的“与非”门可以构成各种复杂的数字逻辑电路，而器件品种单一，给备件、调试都会带来很大方便，所以集成电路工业产品中并没有简单的“与”门、“非”门，而供应“与非”门和由“与非”门构成的“与”门、“非”门。

晶体管-晶体管逻辑“与非”门（transistor-transistor logic NAND gate）

图 1-21-56

简称 TTL “与非”门，是输入级和输出级都采用晶体管、能完成“与非”逻辑功能的电路。由于“与非”门可以组成各种基本门和复合门完成多种逻辑功能，所以它是大规模逻辑集成电路的主要单元电路，也作为独立元件大量生产供应。独立元件的 TTL “与非”门集成块，是将若干个晶体管和电阻元件组成的系统集中制造在一块很小的硅片上，封装起来；外形有图 1-21-55 甲所示的双列直插式和图 1-21-55 乙所示的扁平式两种。

图 1-21-55

最简单的 TTL “与非”门电路如图 1-21-56 甲所示，A、B、C 为输入端，Y 为输出端。VT₁ 为多发射极晶体管，它有多个发射结（图中只画出 3 个）和一个集电结，相当于多个二极管与一个二极管“背靠背”连接，其等效电路如图 1-21-56 乙所示。显然，R₁ 与 VT₁ 组成“与”门，R₂ 与 VT₂ 组成“非”门，整个电路组成“与非”门。一块集成电路中往往不只有一个“与非”门，例如 T063 型就有两个 4 输入端“与非”门，图 1-27-57 表示出了它的外引线排列。

图 1-21-57 TTL 与非门外引线排列

TTL “与非门”的重要参数有：

输出高电平电压 U_{OH} 和输出低电平电压 U_{OL}：这是说明门电路输出特性的参数。TTL 电路的电源电压规定为 +5V，参数规定只要输出高于 2.4V，就算高电平“1”，低于 0.4V 就算低电平“0”。即 U_{OH} > 2.4V，U_{OL} < 0.4V，为合格品。

导通电压 U_{ON} 和截止电压 U_{OFF}：这是说明输入和输出之间关系的参数。当输入电压等于或大于 U_{ON} 时，输出电压由 U_{OH} 降至 U_{OL}，即“与非”门开启，所以 U_{ON} 叫导通电压或开门电压。当输入电压等于或小于 U_{OFF} 时，输出电压由 U_{OL} 上升至 U_{OH}，即“与非”门关闭，所以 U_{OFF} 叫截止电压或关门电压，产品规范值 U_{ON} = 2V，U_{OFF} = 0.8V。

电源电流 I_{CC}：TTL “与非”门有 +5V 的直流电源，这个直流电源供给的电流就是电源电流 I_{CC}，它的大小反映“与非”门消耗电功率的大小。输出低电平电压时（“与非门”导通）的电源电流 I_{CCL} 与输出高电平电压时（“与非”门截止）的电源电流 I_{CCH} 不相等，I_{CCL} > I_{CCH}。目前我国各系列 TTL 门的 I_{CCL} 值相差很多，低功耗的可小于 0.3mA，高功耗的可达 4mA 左右。

用多用电表可简单地判断 TTL “与非”门的好坏：先把“与非”门的“电源”和“地”分别接 5V 电源的正、负极上，然后使输入端全部开路（相当于接高电势），用多用电表测输出电压，若低于 U_{OL}（0.4V），则说明它能实现“全 1 出 0”的逻辑功能。接着把一个输入端接地，其余的仍旧开路，用多用电表测输出电压，若高于 U_{OH}（2.4V），则说明这个输入端是好的，能实现“有 0 出 1”的逻辑功能。把每个输入端都这样逐个试过，即可判定这个“与非”门的好坏。

当选用的“与非”门的输入端数目多于实际需要时，多余的输入端可以悬空，也可以照图 1-21-58 所示的三种办法，把多余的输入端并接

图 1-21-58

到某一输入端上，把多余的输入端并接在一起，经过一个几千欧姆电阻 R 或者直接接到电源正极。当需要把集成电路直接焊在印刷电路板上时，必须用 25W 以下的电烙铁，焊接时间要短，防止多余的热量损坏芯片。对于扁平式集成块，应先将管脚弯曲成图 1-21-59 所示形状再焊。

图 1-21-59

国产 TTL 与非门与国外型号对照表

电路名称	国内型号	对应国外型号
四 2 输入与非门	T065, T095, T1000	SN54/7400, SN74LS00
双 4 输入与非门	T063, T093, T1020	SN54/74LS20
8 输入与非门	T060, T090, T1030	SN54/7430, SN74LS30

部分 TTL 与非门老产品与类似功能的新型号

电路名称	老产品型号	类似功能新产品型号
单与非门	Z11A、B、C	T060
	7MY13A、D	
双与非门	Z21A、B、C	T063
	7MY23A、D	
四与非门	7MY43A、D	T065

金属-氧化物-半导体门电路 (metal-oxide-semiconductor gate circuit)

简称 MOS 门电路,是以金属—氧化物—半导体场效应晶体管(MOS 管)为基本元件组成的门电路。由于 MOS 管可以起开关作用,所以能方便地组成各种门电路,例如:

NMOS “非”门可由一个 NMOS 管 V_T 和一个漏极电阻 R_D 照图 1-21-60 甲那样组成,栅极 G 是输入端,漏极 D 是输出端。

图 1-21-60 NMOS “非门”原理

假定电源电压是+5V,栅极开启电压是 2V,高电平“1”是 5V,低电平“0”是 0V。当输入为“0”,即 $U_i=0V$ 时, V_T 截止,输出为“1”,即 $U_o=5V$ (参看图 1-21-60 乙);而输入为“1”, $U_i=5V$ 时, V_T 导通,输出为“0”, $U_o=0V$ (图 1-21-60 丙)。负载电阻 R_D 可照图 1-21-60 丁那样用一只 MOS 管 V_{T2} 代替;这种情况下 V_{T2} 称为负载管, V_{T1} 称为开关管或驱动管。

NMOS “与非”门 照图 1-21-61 那样将两个 NMOS 管串联起来都作为开关管,一个 NMOS 管 V_{T3} 作负载管,则组成一个“与非”门。

图 1-21-61 NMOS “与非”门

两个开关管的栅极就是“与非”门的输入端 A、B。这个电路只当输入 A、B 都是高电平“1”时, V_{T1} 、 V_{T2} 才都导通,输出 Y 为低电平“0”,A、B 中有一个是低电平“0”,Y 就是高电平“1”。

现在实用的 MOS 门电路都制成集成电路,而不是由分立的 MOS 管去组成。以 N 型沟道 MOS 器件构成的集成电路,靠电子导电,简称为“NMOS 集成电路”;以 P 型沟道 MOS 器件构成的集成电路,靠空穴导电,简称为“PMOS 集成电路”。二者统称为“单沟 MOS 集成电路”。以 NMOS 和 PMOS 器件互相补充组合成的集成电路,简称“互补 MOS 集成电路”或“CMOS

集成电路”。

MOS 集成电路同 TTL 集成电路相比，开关速度比较低（40ns ~ 60ns，而 TTL 的可达 3ns ~ 10ns），但是输入阻抗大，静态功耗小（每个门仅 0.01mw，而 TTL 的约 2mw ~ 20mw），电路和制作工艺都比较简单，适于制作大规模和超大规模集成电路。所以 MOS 集成电路与 TTL 集成电路现在都得到了广泛应用，并且都在迅速发展。

与场效应晶体管容易因静电感应被击穿相似，MOS 集成电路也容易因静电感应而损坏或工作失常。MOS 集成电路中不使用的端了不允许悬空，要接到电源端或高电平上（对于“与”门和“与非”门），或者接到地端或低电平上（对于“或”门和“或非”门）；焊接时应使用功率不大于 20W 的烙铁并保证烙铁有良好的接地；测试时仪表的外壳要可靠接地；保存和运输时要把 MOS 集成块用铝箔包好或放在屏蔽盒内。

电子计算机 (electronic computer)

电子计算机是一种能自动、高速进行大量计算工作的电子设备。它通过对输入数据进行指定的数值运算和逻辑运算来求解各种问题。如果将它和自动控制系统结合起来，可以作为控制器，能根据外部条件的改变，进行控制与调整。根据运算原理，可分为电子模拟计算机和电子数字计算机。由于 70 年代以来，使用的电子计算机，90% 以上是电子数字计算机，所以，如果没有特殊说明，电子计算机通常是指电子数字计算机。

电子模拟计算机 它是一种用连续变化的电压($\pm 100V$ 或 $\pm 10V$ 间连续变化) 表示被运算的变量，使用各种放大器的组-合连接进行加法、乘法等算术运算和微分、积分等数学运算。电子模拟计算机的优点是：运算速度快，积分运算直接、方便，采用连续变化的电压与原型物理量（如流速、温度、压强、机械的或电子的速度或角位置等）对应，便于了解所解问题的整体情况，工程人员容易学习和掌握。缺点是：精度较低(10^{-2} - 10^{-4})，逻辑功能及存储能力有限，程序自动化较差，变换题目较慢。一般适用于解常微分方程问题。

电子数字计算机 它是一种以数字表示被运算的变量在机器内部进行计算的电子计算机。在这种计算机中，数的表示方法一般采用二进制，即只有“0”和“1”两个数字，因而可以用具有两种状态的器件来表示不同的数字和进行运算。世界上第一台数字计算机是 1945 年底制成，1946 年开始使用的，它用了 18000 个电子管，质量达 30t，占地 150m²，每秒运算 5000 次，造价 1000 万美元。从第一台数字计算机诞生到现在，四十多年中，数字计算机已经历了五代：

代别	使用元件	年度	系统软件
第一代	电子管	1945 ~ 1958	手编程序
第二代	晶体管	1957 ~ 1966	汇编程序、语言及操作系统
第三代	集成电路	1964 ~ 1978	高级语言、大型操作系统、虚拟存储
第四代	大规模集成电路	1978 ~ 1990	数据库、计算机网、人工智能
第五代	超大规模集成电路	1990 ~	逻辑推理语言、知识库、自然语言及图象识别、高级人工智能

电子数字计算机的分类方法很多。按规模分大、中、小型，近年来又出现了巨型和微型机；按使用范围分有通用的和专用的，等等。数字计算机的优点是解题精度高，灵活性大，又便于信息存储，因此被广泛应用在国民经济、文化教育、科学技术和军事的各个领域。目前，正向更高的运算速度（每秒几百亿次）、更强的功能、更高的稳定性以及进一步缩小体积和减少能耗方向发展。

数字通信 (digital communication)

传送的信号为数字形式的通信方式，称为数字通信。在数字通信系统中，传送的数字信号可以代表离散取值（即不连续）的数字、文字及各种数据，也可以代表连续取值的语音、图像等模拟信号，但要经过“模拟/数字”与“数字/模拟”变换。

数字通信系统的基本组成如图 1-21-62 所示，图中的信息源和受信者分别是发出和接受数字信号的末端设备。编码器将信息源发出的离散符号按一定规则增加一些多余符

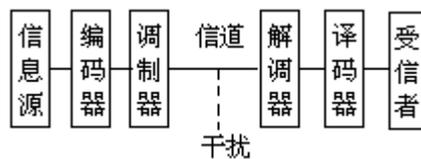


图 1-21-62

号，从而达到自动发现并纠正传输中可能发生的差错。译码器则是把收到的码组（可能含有错误）正确地译出。调制器把信息符号转变成适合信道传送的数字信号。解调器则把信道传来的数字信号进行反变换—还原为信息符号。信道是指传送数字信号的媒质，例如传输线。信号在传输过程中会遇到各种干扰，它影响对数字信号的接收。此外，在数字通信系统中，还有图中未表示出的同步系统，它的作用是保证收发端同步工作。

数字通信由于传送的是一系列数字信号，因而具有下列优点：(1)数字信号的产生、存储均较方便，也便于与其他数字设备（如电子数字计算机）联用；(2)由于数字信号是有限个取值，接收时只要识别或判定相应的有限取值，所以在干扰下容易检测；(3)便于实现抗干扰编码和保密编码，以提高通信的可靠性和保密性；(4)由于大量采用的是数字逻辑电路，所以便于电路集成化，也易于利用现代固体器件以及计算技术的成果。

微电子技术 (microelectronic technique)

微小型电子器件、元件和电路的研制、生产技术，以及用它们实现电子系统功能的技术领域，称为微电子技术。集成电路就是比较活跃的微电子技术的领域之一。

微电子技术的研究对象的特点是：尺寸小、重量轻、可靠性高、成本低，而且使电子系统的功能大大提高。因此，微电子技术的发展既促进了电子技术水平的提高，又推动了它在国民经济各方面的普及应用，促进了生产自动化和办公自动化的发展。

自动控制 (automatic control)

自动控制是指在无人直接参加的情况下，采用自动化装置对控制信号进行测量、变换、传递和计算，并用来控制被控对象(如机器或生产过程)，使被控对象达到预定的运动状态或具有所要求的控制功能。

自动控制技术所用的工具，最初是以机械、气动、液压等类型为主；五十年代后，逐步发展为电动、电子式的了，气动、液压、射流技术也有所发展。自动控制工具一般是机电式、电动液压式和电子式的混合系统。

自动控制的应用非常广泛。从用一个继电器控制水槽的水位，到采用大量电子、机电设备组成一个复杂系统来控制电力、化工等生产过程，以及火箭、导弹、空间实验室、宇宙探测器等的遥控、遥测系统，都离不开自动控制技术。因此，自动控制技术在工农业生产、国防和科学研究上都有着广泛的应用。

数控机床 (numerical controlled machinetool)

是数字程序控制机床的简称，是指加工过程由计算装置按照用数码表示的程序来控制

图 1-21-63

制的机床，是自动化机床的一种。图 1-21-63 表示出了用数控机床加工零件的基本过程。首先，根据加工图纸编制出以数码表示的程序(包含机床各运动部件的加工量、速度及动作次序)并制成穿孔纸带，由数控装置(专用电子计算机)读出穿孔带上的数码与指令，经过译码和运算后，发出脉冲信号，控制伺服机构，以驱动机床，使刀具对工件进行符合图纸要求的各种加工运动。数控机床具有加工精度高、效率高，灵活性、适应性好的特点，适用于小批量、多品种、形状较复杂的零件加工。

程序控制 (program control)

按照事先规定的程序，对生产过程进行控制的一种自动控制方式。被各种工业部门广泛应用。例如，机械加工中各种半自动和自动机床的操作，高炉程序加料装置控制加料，各种注塑机与模压机的开模、合模、装卸料控制等，都属于程序控制。程序控制装置最初采用凸轮等机械装置，随后采用继电器等电气装置，近年来数字式控制装置得到迅速发展，出现了各种专用与通用的逻辑控制装置及数字控制装置(参见“数控机床”)。

机器人 (robot)

完全能够自我控制的一种电子、电机、机械的综合装置。20 世纪 60 年代研制出来的第一代机器人是程序控制机器人，能成功地模拟人的运动功能，不仅能够搬运零件、成品，还能喷漆、磨削、焊接和切割、包装和打印商标、分类、挑出废品，甚至还能修剪、绘画、弹奏钢琴、雕刻大理石。这种机器人的工作过程，是先需要编制程序，输送到机器人的记忆装置（存贮装置）中进行记忆，此后机器人即按记忆的程序控制它的执行机构完成所要求的动作。这种机器人执行记忆的程序的过程中，不随外界条件的变化而变化，如果要让它完成别的工作，需要重新编制程序。所以第一代机器人又叫做固定程序控制机器人。70 年代末 80 年代初，第二代机器人——适应性程序控制机器人问世，它增加了感觉装置——传感器，能模拟人的感觉功能，能看，能听，有触觉，有嗅觉……所以也叫有感觉的机器人。这种机器人工作时，能识别出条件的变化并且自动调整控制装置，以适应外界的变化，完成所要求的性能指标。到了 80 年代中期，研制出了第三代机器人——智能机器人，它能模拟人的思维功能，会识别，会记忆，会思考，会尝试，会犯错误并在错误中学习，它能自行判断周围环境，有选择地采取行动，可以代替人完成一些较复杂的劳动，例如把随意摆放的零件组装起来。目前，更高级的机器人正在研制中。专家们预言，未来的机器人朝着两个方向发展：一是拟人化，即研制具有逻辑推理和决策判断能力，集视、听、感、说于一身的超级智能机器人；另一是多样化，让机器人具备更多的功能，以承担更广泛的工作，如建筑安装，捕鱼，喷洒农药，甚至冲锋陷阵。

主要参考资料

1. 南京工学院等七所工科院校。物理学下册。马文蔚，柯景凤。第 2 版。北京：人民教育出版社，1982。
2. 中国大百科全书总编辑委员会《物理学》编辑委员会。中国大百科全书物理学。第 1 版。北京：中国大百科全书出版社，1987。
3. 复旦大学《物理学》编写组。物理学下册。第 2 版。北京：高等教育出版社，1987。
4. 电子工业技术词典编辑委员会，电子工业技术词典(合订本)(上)。北京：国防工业出版社，1980。
5. 朱承高。电工及电子技术手册。第 1 版。北京：高等教育出版社，1990。
6. 王洪启。几种光敏电阻主要特性。无线电，1984(7)：45~46
7. 武汉无线电元件厂。半导体热敏电阻。无线电，1975(4)：7~8
8. 连俊有。晶体管收音机中的热敏电阻。无线电，1986(1)：45~46
9. 大连工学院电工学教研室。电工学下册。第 2 版。北京：高等教育出版社，1986。
10. 清华大学自动化系。电子技术。第 1 版。北京：人民教育出版社，1976。
11. 《实用电工技术问答 2500 题》编写组。实用电工技术问答 2500 题(下)。第 1 版。呼和浩特：内蒙古人民出版社，1988。
12. 孙汉鹏等。无线电爱好者手册(上)。第 1 版。北京：人民邮电

出版社，1985。

13．上海市业余工业大学。晶体管整流电路。第1版。北京：科学出版社，1983。

14．(苏)布斯连科。我们的伙伴：机器人。陈殿兴等。北京：三联书店，1987。

15．刘铁墉。发光二极管。无线电，1977(4)：26

16．王本轩。发光二极管的应用。无线电，1981(3)：30

17．姚昆瑶，林荫森。MOS型场效应晶体管。无线电，1984(9)：37～39

18．简明综合技术辞典编委会。简明综合技术辞典。第1版。北京：高等教育出版社，1965。

19．沈尚贤。电子技术导论。第1版。北京：高等教育出版社，1985。

20．蒋和乾。电工及电子实验基本知识。第1版。北京：高等教育出版社，1989。

21．上海市业余工业大学。晶体管放大与振荡电路。第1版。北京：科学出版社，1971。

22．甘为众等。实用无线电技术手册。北京：北京出版社，1983

23．俞鹤飞。MOS集成逻辑电路。无线电，1989(10)：38～40

24．高维宏。电路和电子技术。第1版。北京：高等教育出版社，1989。

25．王忠庆等。数字电子技术基础。第1版。北京：高等教育出版社，1990。

26．晏桂滇。实用电子技术基础。北京：高等教育出版社，1989。

27．俞鹤飞。复合门电路。无线电，1988(8)：40

28．俞鹤飞。基本门电路。无线电，1988(6)：41

29．王祥堃等。工业电子学。第1版。北京：高等教育出版社，1990。

30．俞鹤飞。TTL门电路的应用。无线电，1989(1)：41～42

31．阙维明，张锦智。现代科技管理辞典。第1版。广州：广东高等教育出版社，1986。

32．刘兴良。机器人基础。第1版。北京：新时代出版社，1986。

二十二、光

光的电磁理论 (electromagnetic theory of light)

说明光在本质上是电磁波的理论。光的电磁理论是由麦克斯韦首先提出的。在麦克斯韦以前，人们已经认识到光是横波，并且对光的速度进行了测量。1864年至1865年间，麦克斯韦发表了著名论文《电磁场的动力学理论》，提出电磁场是以波的形式传播，形成电磁波，电磁波是横波，它在真空中传播速度为

$$c = \frac{1}{\sqrt{\epsilon_0 \mu_0}}$$

其值为 $3 \times 10^8/s$ ，恰好等于由实验测定的光速。由此麦克斯韦得出结论：光是一种电磁波， c 就是光在真空中传播的速度。1888年赫兹用实验证实了电磁波的存在，并测量了电磁波速，接着他又证实电磁波与光波一样有衍射、折射、偏振等性质，最终确立了光的电磁理论。

根据电磁场的波动方程，电磁波在介质中的传播速度为

$$v = \frac{c}{\sqrt{\epsilon_r \mu_r}}$$

由光学知道，介质中光速为真空中光速除以折射率 n 。于是由上式得介质中光的折射率为

$$n\sqrt{\epsilon_r \mu_r}$$

在非磁性介质中， $\mu_r = 1$ ，此时 $n = \sqrt{\epsilon_r}$ 。于是可以比较实验测出的 n 与 $\sqrt{\epsilon_r}$ 的值，从而判断光的电磁理论的正确性。下表给出了一些数值：

实验测定的 n 与 $\sqrt{\epsilon_r}$ 值的比较		
气体	n (黄光)	$\sqrt{\epsilon_r}$
空气	1.000299	1.000295
氢气	1.000138	1.000132
二氧化碳	1.000449	1.000473
一氧化碳	1.000340	1.000345

这些数值上的吻合，证明光的电磁理论的正确。

光波的能量 (energy of light wave)

光波在传播过程中总是伴随着能量的传递，表明光波具有一定的能量。光波的能量一般用两种方式表示。

(1) 光波的能量密度

任何光波在传播中都充满空间的某一区域，因而可以用单位体积内光的辐射能量—能量密度，来表示光波的能量。

由电动力学可知，对于单纯的电场，能量密度为

$$\omega_E = \frac{1}{2} ED = \frac{\epsilon_0}{2} E^2$$

对于单纯的磁场，能量密度为

根据麦克斯韦方程组的微分形式，可导出电磁场中 E 与 B 的关系式：

$$E = cB. \left(c \text{为光速}, c = \frac{1}{\sqrt{\epsilon_0 \mu_0}} \right)$$

由此可以得到

$$w_E = w_B$$

因此，光波的能量密度为

$$w = w_E + w_B = 2w_E = \epsilon_0 E^2,$$

或

$$w = 2w_B = \frac{1}{\mu_0} B^2$$

也可表示为

$$w = \frac{1}{2} \epsilon_0 E^2 + \frac{1}{2\mu_0} B^2$$

(2) 光波的能流密度

光波在单位时间内通过单位面积传输的能量，叫做光波的能流密度，用 S 表示。

以光速 c 通过面积为 A 行进的一束光波（图 1-22-1），在时间间隔 t 内，有 w(c t A)

图 1-22-1 光波的能流

的能量通过面积 A，则能流密度

$$S = \frac{wc\Delta tA}{\Delta tA} = wc$$

利用上面能量密度的表示式，可写成

$$S = \frac{1}{\mu_0} EB$$

在各向同性介质中，能量沿波传播的方向流动，对应的矢量 S 是

$$S = \frac{1}{\mu_0} \times B, \text{ 或 } S = c^2 \epsilon_0 E \times B$$

称为坡印亭矢量：

w 和 S 是随时间变化非常快的函数，它的瞬时值无法测量，可采用求平均的办法。在简谐平面波的情况下，

$$E = E_0 \cos(k \cdot r - \omega t),$$

$$B = B_0 \cos(k \cdot r - \omega t)。$$

坡印亭矢量的平均值的大小 \bar{S} 为

$$\bar{S} = \frac{1}{T} \int_0^T c^2 \epsilon_0 |E \times B| dt,$$

由于 $\frac{1}{T} \int_0^T \cos^2(k \cdot r - \omega t) dt = \frac{1}{2},$

$$\bar{S} = \frac{c^2 \epsilon_0}{2} |E_0 \times B_0| = \frac{c \epsilon_0}{2} E_0^2$$

\bar{S} 是一个重要的物理量,叫做辐照度,一般用I(国家标准用E)表示。
在线性、均匀、各向同性的电介质中,

$$I = \epsilon v E^2$$

式中 ϵ 为电容率(又叫介电常数), v 为介质中的光速。

光波的动量 (momentum of light wave)

光波在传播过程中,能量的传递伴随着动量的传递。光波动量的表示式为

$$p = \frac{W}{c}$$

式中 p 为光波的动量, W 为光波的能量, c 为光速。这个表示式可以由光波与带电粒子的相互作用推导出来

如图 1-22-2 所示, 一列光波沿 z 轴正方向传播, k 为波矢量, 其方向与 E 、 B 垂直, 大小为 $2\pi/\lambda$ 。在 $z=0$ 处, 光波的能量被电子吸收, 光波的电场 E 施加给电子一个力, 策动

图 1-22-2 作用在电子上的电磁力

电子获得一个运动速度 v_x 。由于电子的运动, 磁场 B 对电子施加一个力 $qv_x \times B$, 方向沿着 $+z$ 方向, 与光波的传播方向相同, 它的大小为

$$F_z = qv_x \times B。$$

光波对电子单位时间内所做的功为

$$F \cdot v_x = q[E + (v_x \times B)] \cdot v_x$$

其中, F 为作用在电子上的电磁力, 由于 $(v_x \times B) \cdot v_x = 0$, 所以 $F \cdot v_x = qE \cdot v_x$, 即

$$\frac{dW_e}{dt} = qv_x E$$

W_e 为电子获得的能量。比较 F_z 与 $\frac{dW_e}{dt}$ 示式, 并考虑 $E = cB$, 有

$$F_z = \frac{1}{c} \cdot \frac{dW_e}{dt}$$

因为 F_z 等于电子动量 p_e 的时间变化率

$$\frac{dp_e}{dt} = \frac{1}{c} \cdot \frac{dW_e}{dt}$$

可得

$$p_e = \frac{W_e}{c}$$

电子获得的动量是由光波传递给的, 所以光波的动量为

$$p = \frac{W}{c}$$

按照量子理论及狭义相对论, 光子的能量与动量的关系为

$$W = \sqrt{(cp)^2 + (m_0c^2)^2}$$

由于光子的静止质量为 0, 则有

$$p = \frac{W}{c}$$

这说明用光波传递动量导出的动量和用光子模型得到的动量结果完全一致。

由于光波的能量一般用能量密度 w 表示，用体积除式 $p = \frac{W}{c}$ 两边得到

$$g = \frac{\omega}{c}$$

这里 g 是光波单位体积的动量，而且方向沿着光波传播的方向，根据坡印亭矢量 S 与 w 的关系 $S = wc$ ，有

$$g = \frac{S}{c^2} = \frac{1}{\mu_0 c^2} E \times B = \epsilon_0 E \times B$$

由于光波能够传递动量，当光波作用到物体上时，对物体内电荷的作用力转化为对物体的作用力。这种作用力对物体产生的压强叫做光压。由于光压比较小，日常生活中很少考虑。如太阳光对地球表面的平均光压为 $4.51 \times 10^{-6} \text{Pa}$ 。又如一大功率脉冲式 CO_2 激光器，输出功率为 10^7kW ，它对物体的光压为 $1.1 \times 10^5 \text{Pa}$ 。如这一激光光束截面的半径为 1cm ，当它照射到物体上时，对物体产生的推力约为 30N 。

电磁波谱 (electromagnetic wave spectrum)

无线电波、光波、X 射线、 γ 射线都是电磁波，但它们的波长（或频率）不同，产生的方式也不同。如按波长（或频率）把它们排列起来，就构成了电磁波谱（图 1-20-7）。

无线电波（参见“无线电波”）由振动的电荷产生。

光波中包括红外线、可见光和紫外线。红外线的波长范围从 770nm 到 1mm ，红外线具有显著的热效应；可见光的波长从 400nm 到 770nm ；紫外线的波长从 5nm 到 400nm ，紫外线具有显著的化学效应和荧光效应。光波是由原子的外层电子跃迁产生的。

X 射线的波长约在 $10^{-6} \text{nm} \sim 10^2 \text{nm}$ 之间。X 射线有很强的穿透力，它是由原子的内层电子跃迁产生的。

γ 射线的波长短于 0.2nm ，它有很强的贯穿本领。 γ 射线是由原子核内能级发生跃迁时产生的。

随着超短波无线电技术的发展，无线电波的范围不断朝波长更短的方向进展；另外由于红外技术的发展，红外线的范围不断朝波长更长的方向扩充。无线电波与红外线的范围有了一定的重叠。随着 X 射线技术的发展，产生的 X 射线的波长范围不断朝两个方向扩充，在长波段已与紫外线有所重叠，短波段已进入 γ 射线波长范围。这样，在划分不同的电磁波时，主要根据不是波长，而是按照它们的产生方式和探测方式划分的。随着科学技术的发展，除了可见光，各种电磁波段都已与其相邻的电磁波段重叠起来。目前在电磁波谱中，除了波长极短（ $10^{-15} \text{m} \sim 10^{-14} \text{m}$ 以下）的一端外，不再留有未知的空白。

遥感技术 (technics of remote sensing)

从远处探测、感知物体的技术。通常把在不同高度处利用传感器收集

地物的电磁波信息，再把这些信息传输到地面并进行处理，达到对地物的识别与监测的技术，叫做遥感技术。

“遥感”这个术语是美国海军研究局的普鲁伊特（E.Pruitt）最先提出，1962年在美国密执安大学召开第一次国际环境遥感讨论会后被普遍采用的。它是建立在20世纪20年代航空摄影的基础上，随着空间技术和电子计算机技术的发展，到60年代才形成的一门新的综合性探测技术。

遥感可按运载工具分为地面遥感（把传感器架设在地面上或装在汽车、轮船上）、航空遥感（把传感器装在飞机或气球上）和航天遥感（把传感器装在探测火箭、人造地球卫星、宇宙飞船或航天飞机上）。地面遥感主要用来配合航空遥感和航天遥感使用，它起校准和辅助作用。航空遥感具有分辨率高、不受地面条件的限制、调查周期短、测量精度高、资料回收方便等特点。航天遥感的特点是，可以对地球进行综合、长期、动态的监测，大大开阔了人们的眼界，加深了对监测物的了解。

传感器是遥感技术系统的核心，它是发射电磁波或记录地物反射或辐射电磁波能量的装置，分主动式和被动式两类。主动式传感器是由人工辐射源向目标物发射辐射能量，然后接收从目标物反射回来的能量，如测视雷达、激光雷达、微波散射计等。被动式传感器是接收自然界地物反射或辐射的能量，如摄影机、扫描仪、红外辐射计、微波辐射计等。摄影机、扫描仪和成像雷达得到的是图像；辐射计等是把探测到的地物辐射强度用数字或图线表示。

遥感信息向地面传输有两种方式，一种是直接回收，另一种是视频传输。直接回收是传感器把地物反射或发射电磁波的信息记录在胶卷或磁带上，等到运载工具返回地面时回收，这是航空遥感常用的方法；航天遥感有时利用航天飞机或返回式卫星，也可采用这种方法。它的优点是回收比较方便，不经过转换，信息量损失少，保密性较强。缺点是信息不能适时回收，数据容量小，成本高，不能满足多种用途。视频传输是传感器把接收到的地物反射或辐射的电磁波信息，经过光电转换，通过无线电设备将数据传送到地面接收站。这种传输方式又可分为两种，一种是实时传输，即传感器接收到信息后，立即通过无线电波送到地面接收站；另一种是非实时传输，即把信息暂时存贮在磁带上，待卫星通过地面接收站接收范围时，再把信息发送到地面接收站。这种传输方式的优点是可以传输大量信息，及时或比较及时，能连续得到信息，缺点是保密性较差。

地面接收站接收到的遥感信息，因受多种因素的影响，如传感器的性能、卫星姿态的不稳定性、大气的不均匀性和局部变化等，使地物的几何特征和光谱特征可能发生一些变化，因此必须进行一系列的处理，才能提高信息的质量和使用价值。

遥感图像的处理，主要是借助光学技术或电子计算机处理技术，对图像进行增强处理，使图像更清晰、目标物体更明显，提高可辨认性。例如，采用多波段彩色合成技术，可把黑白的遥感图像处理成彩色图像；采用等密度分割加色技术，把黑白图像的色调变化分成若干等级，每一级用一种颜色表示，显示出彩色的等密度图像；采用相关掩膜增强技术来增强图像的反差和边缘轮廓，等等。数字图像的处理，是把数字化的图像输入电子计算机，由计算机进行图像的各种处理。例如，彩色增强处理，即根据像元数据值的大小和性质，分别归入计算机规定的程序中，每种像元赋与一

种颜色，经过计算机处理，输出的彩色像元点按一定顺序排列，就形成彩色合成图像；反差增强处理，即把图像中过于集中分布的像元值拉开，进行再分配，以增加图像的层次；频率（滤波）增强处理，即把扫描线组成的图像，按像元的灰度值由计算机画出曲线，再把曲线分解成具有不同波长（频率）的简单波形曲线，去掉其中不需要的曲线，选择适宜的频率波形曲线，由计算机重新绘成新的图像，就可突出所要观察的地物；比值增强处理，即把图像中每个像元的某一波段的数值与同一像元的另一波段的数值相除，所得的比值作为该像元的新数值，重新显示出图像，这就是比值（增强）图像，其中色调的深浅反映的是两个波段光谱反射率比值的差异，不同的地物在不同的比值图像上可以被淡化，也可以被突出，可根据需要，选择清晰的比值图像供判读使用；等等。

遥感技术不仅能获得地物在可见光波段的信息，而且可以获得紫外、红外、微波等波段的信息，扩大了人们观测的范围，加深了对事物的认识。

遥感的应用十分广泛，可以宏观地研究地面各种自然现象及其分布的规律，并能及时地获取各种信息。例如，在林业方面，可以用来清查森林资源、监测森林火灾和病虫害；在农业方面，可从宏观上识别田野中的各种农作物，计算其种植面积、估计生长情况和产量；在作物生长过程中，可分析其长势，指导灌溉、施肥和收割，预报灾情；在地质矿产方面，可进行地质普查，为矿产资源调查和找矿提供重要依据和线索；在水文海洋方面，可进行水资源调查、水资源动态研究、冰雪研究及海洋研究等；在环境监测方面，可监测大气污染、土地污染、海洋污染等；在测绘方面，航空摄影已成为测绘地形图的主要方法，根据其他遥感资料也可编制各种专用地图；在地理方面，遥感资料可供国土整治、区域开发、城乡建设、环境保护等研究使用；在军事国防方面，可作各种侦察用，广泛地获取各种信息，已是现代战争和加强国防不可缺少的重要手段。

光波的相速度与群速度（phase velocity and group velocity of light-wave）

光波中与任一振动相位对应的状态（例如波峰）向前传播的速度，叫做光波的相速度，其数值等于光波波长与频率的乘积。

如一系列单色平面波的波动方程为

$$\phi = A \cos(kr - \omega t)$$

$k = \frac{2\pi}{\lambda}$ 和 $\omega = 2\pi\nu$ 都是不随 r 和 t 改变的量，因此，相位不变的条件为

$$kr - \omega t = \text{常量}$$

对上式微分得

$$kdr - \omega dt = 0$$

有
$$\frac{dr}{dt} = v = \frac{\omega}{k} = v\lambda$$

上式中的 v 表示单色波的相速度，在真空中 $v = c$ 。

实际中的光波一般都不是单色波，而是几种频率不同波的叠加。在一些介质中，不同频率光波的相速度不同（这种现象叫做色散现象），若这些波的频率相差不大，则合成后的波仍将在一定空间范围内维持为一个整体（波群），以一定速度传播。这种在一定空间范围内维持为一整体的波

群叫做波包。它的传播速度称为群速度。

设有两列频率相近且振幅相等的单色波沿同一方向传播（图 1-22-3），

图 1-22-3 两列单色波组成的波包

$$\begin{aligned} \phi_1 &= A_0 \cos(k_1 r - \omega_1 t), \\ \phi_2 &= A_0 \cos(k_2 r - \omega_2 t), \end{aligned}$$

叠加后

$$\begin{aligned} \phi &= \phi_1 + \phi_2 \\ &= A_0 \cos(k_1 r - \omega_1 t) + A_0 \cos(k_2 r - \omega_2 t) \\ &= 2A_0 \cos\left(\frac{k_1 - k_2}{2} r - \frac{\omega_1 - \omega_2}{2} t\right) \times \\ &\quad \cos\left(\frac{k_1 + k_2}{2} r - \frac{\omega_1 + \omega_2}{2} t\right). \end{aligned}$$

由于两列波的频率和波长相差很小，可以认为

$$\begin{aligned} k_1 &= k + \Delta k, & \omega_1 &= \omega + \Delta\omega, \\ k_2 &= k - \Delta k, & \omega_2 &= \omega - \Delta\omega, \end{aligned}$$

则 $\phi = 2A_0 \cos\left(\frac{\Delta k}{2} r - \frac{\Delta\omega}{2} t\right) \cos(kr - \omega t)$ ，引入

$$A = 2A_0 \cos\left(\frac{\Delta k}{2} r - \frac{\Delta\omega}{2} t\right),$$

合成波的方程就为

$$\phi = A \cos(kr - \omega t).$$

这是一个振幅变化的简谐波。它的波包传播速度就是群速度，也就是能量传播速度。由于 k 和 ω 不随 r 和 t 变化，则 A 不变的条件为

$$\begin{aligned} \frac{\Delta k}{2} r - \frac{\Delta\omega}{2} t &= \text{常量}, \\ kdr - \omega dt &= 0, \\ \frac{dr}{dt} &= u = \frac{\delta\omega}{\delta k} \end{aligned}$$

u 为群速度。

光的相速度 v 与群速度 u 有一定的关系。考虑相速度是光波波长的函数， $v = \frac{\omega}{k}$ 。

$$\begin{aligned} u &= \frac{\delta\omega}{\delta k} = \frac{\delta(vk)}{\delta k} = v + k \frac{\delta v}{\delta k}, \\ \delta k &= \delta\left(\frac{2\pi}{\lambda}\right) = \frac{2\pi}{\lambda^2} \delta\lambda \\ \frac{\delta v}{\delta k} &= \frac{\delta v}{\delta\lambda} \cdot \frac{\delta\lambda}{\delta k} = -\frac{\lambda^2}{2\pi} \cdot \frac{\delta v}{\delta\lambda}, \\ k \frac{\delta v}{\delta k} &= -\frac{2\pi}{\lambda} \cdot \frac{\lambda^2}{2\pi} \cdot \frac{\delta v}{\delta\lambda} = -\lambda \frac{\delta v}{\delta\lambda}, \end{aligned}$$

最后得

$$u = v - \lambda \frac{\delta v}{\delta \lambda}$$

在真空中没有色散， $\frac{\delta v}{\delta \lambda} = 0$ ，因而群速度和相速度相等。

光的多普勒效应 (Doppler effect of light)

在各向同性介质中，无论采用什么参照系，光都以确定的速度 c 传播，因此，光不适用于经典的多普勒效应，而适用于相对论性多普勒效应。

如图 1-22-4 所示，一个光源 S 以速度 v 相对于观测者 O 沿与连线 SO 成 θ 角的方向

图 1-22-4

运动，观测者测得的频率为：

$$v' = \frac{\sqrt{1 - \left(\frac{v}{c}\right)^2}}{1 - \frac{v}{c} \cos \theta} \cdot v$$

式中 v 为光源的光波频率。

光的多普勒效应有三个主要特点。第一，不论是光源还是观测者在运动，多普勒频移仅与两者的相对运动速度有关；第二，当光源和观测者运动的方向与两者之间的连线成直角时，仍存在多普勒频移；第三，光在介质中传播时，观测到的光波频率不受介质运动的影响。

光的多普勒效应在天文观测中被广泛应用。如确定天体相对于地球的运动速度。假定观测一颗星的光谱时，它的钠原子光谱两条黄色线不在 $0.5890 \mu\text{m}$ 和 $0.5896 \mu\text{m}$ 波长位置上，而分别移到波长为 $0.5884 \mu\text{m}$ 和 $0.5890 \mu\text{m}$ 的位置上，就可以断定这颗星在以沿观测方向速度分量为 300km/s 的速度向地球运动。利用光的多普勒效应还可以确定恒星的转动速度。旋转着的恒星，只要它的转轴不是正对着观测者，这颗恒星就会有一侧是朝向观测者运动，而另一侧是离开观测者运动的，对其光谱观测的结果，就会产生对某一谱线的增宽。测定了谱线增宽的情况，在扣除其他因素所引起的增宽后就可确定出恒星的转动速度。另外，由于河外星系远离我们运动的速度与距我们的距离有确定的关系，因此，利用光的多普勒效应可以测得河外星系到我们的距离。

光的直线传播 (rectilinear propagation of light)

在同一种各向同性的均匀介质中，光在两点之间总是沿着连接这两点的直线传播的。光的直线传播，是几何光学的基本规律之一。光照射到不透明物体时，在物体后面产生本影和半影，以及小孔成像现象，都是光的直线传播的例证。光的直线传播规律适用的范围是，障碍物或孔的线度 $l \gg \lambda$ ， λ 是光波的波长。如果 $l \sim \lambda$ ，这时光的衍射现象显著（参见“光的衍射”），光的直线传播规律就不适用了。普通光学仪器，如幻灯、投影机、照相机、潜望镜、望远镜和显微镜，都是以光的直线传播规律为基础的；在天文观测和大地测量以及射击的瞄准中，也是以它为根据的。

光的直线传播规律可根据费马原理推导出来。费马 (Pierre de

Fermat, 1601 ~ 1665, 法国数学家)指出,光在两点间传播,实际的光程总是一个极值。即光沿光程值为最小、最大或恒定的路程传播。这是几何光学中一个最普遍的基本原理,叫做费马原理。在一般情况下,实际光程大多是取极小值。由于直线是两点间的最短距离,所以可以从费马原理直接得出光在均匀介质中沿直线传播的结论。

光线和光束 (light ray and beam)

表示光传播途径的几何线叫做光线。在均匀的各向同性介质中,光线是垂直于波阵面的直线。例如,从点光源发出的光,它的每条光线就是以光源为中心的球的径线;在远离光源的地方,光的波阵面趋于平面,每条光线近似于相互平行的线。光线只是一个数学抽象,不能把很窄的一束光叫做光线。

当光的波阵面线度远大于光的波长时,借助于光线的概念以及一些实验定律和几何定律,可以很简便地解决许多实际光学问题,特别是在光学技术成像和照明工程等方面,而不涉及光的本性问题。这部分以几何定律和某些实验定律为基础的光学称为几何光学或光线光学。反映光的波动性的那部分光学称为波动光学。几何光学所研究的实际上就是波动光学中当光波的波长 $\rightarrow 0$ 的极限情况。

光波波面的法线的集合称为光束。由点光源的光构成的光束叫做单心光束(或同心光束)。在各向同性的均匀介质中,单心光束与波动光学的球面波对应;发光点在无限远处的单心光束与波动光学的平面波对应。由不相交于一点的有一定关系的光构成的光束叫做像散光束。在各向同性的均匀介质中,像散光束与非球面的高次曲面波对应。像散光束会聚成两条互相垂直的、相隔一段距离的线段,叫做焦线。离光学系统主光轴较远的物点,经光学系统后形成的光束就是像散光束(参见像差条目中的“像散和像面弯曲”)。

作为光学系统成像对象的实际物体,它的每一点都发出一个单心光束,经过光学系统后,如果仍保持为单心光束,则这个经光学系统后光束的心叫做光学系统对物点成的像。经过平面镜反射的光束可以保持光束的单心性。

光的反射与折射 (reflection and refraction of light)

一束光传播到两种介质的平滑界面时,一般分解为两束光:一束返回原介质,成为反射光束;另一束进入第二种介质,并发生偏折,成为折射光束。这就是光的反射和折射现象(图 1-22-5)。表示入射光束传播方向

图 1-22-5

的光线,叫做入射光线;表示反射光束传播方向的光线,叫做反射光线;表示折射光束传播方向的光线,叫做折射光线。反射光线和折射光线的方向,分别由反射定律和折射定律确定。

反射定律 光在两种介质的平滑界面上反射时,反射光线 OR 位于由入射光线 IO 与界面在入射点 O 的法线 ON 决定的平面内;反射光线和入射光线位于法线两侧;反射角 i' 与入射角 i 大小相等,即

$$i' = i.$$

根据不同的界面情况，可能是全反射，也可能是部分反射。

折射定律 光在两种介质的平滑界面上发生折射时，折射光线 OT 位于由入射光线 IO 与界面在入射点 O 的法线 ON 决定的平面内；折射光线和入射光线位于法线两侧；入射角 i 的正弦与折射角 r 的正弦之比是一个与入射角大小无关、仅由两介质折射率 n_1 和 n_2 所决定的常数，即

$$\frac{\sin i}{\sin r} = \frac{n_2}{n_1} \text{ 或 } n_1 \sin i = n_2 \sin r$$

n_1 和 n_2 分别为入射光和折射光所在介质的折射率。这一规律是荷兰数学家斯涅耳于 1621 年发现的，因此又叫做斯涅耳定律。

折射率 (refractive index)

光学介质的一个基本参量。介质的折射率是光在真空中的速度 c 与光在该介质中的速度 v 之比值，即

$$n = \frac{c}{v}$$

一种介质的折射率 n_1 与另一种介质的折射率 n_2 之比叫做相对折射率，即

$$n_{12} = \frac{n_1}{n_2}$$

按折射定律 $n_1 \sin i = n_2 \sin r$ ，相对折射率 $n_{12} = \frac{\sin r}{\sin i}$ 。

通常所说的各种介质的折射率，实质上是相对于空气的相对折射率。空气本身的折射率稍大于 1 (20、101 × 10³Pa 时为 1.00027)。

介质的折射率随光波波长的不同而变化，由此而产生的现象称为色散。在工程中通常用阿贝数 v 表示光学材料的色散特性：

$$v = \frac{n_D - 1}{n_F - n_C}$$

n_D 、 n_F 、 n_C 分别是对于 D、F、C 这几种光谱线 (波长分别为 589.3 nm、486.1nm、656.3nm) 的折射率。另外，气体的折射率随温度和压强而变化，液体的折射率也随温度有微小的变化。通常物理课本中所列介质的折射率，是室温条件下的 n_D 值。

菲涅耳公式 (Fresnel formula)

也叫菲涅耳反射折射公式，是法国物理学家菲涅耳 (Augustin Jean Fresnel, 1788 ~ 1827) 于 1823 年首先导出的反射光、折射光振幅与入射光振幅的关系式。菲涅耳是根据光的弹性理论得出的，后来人们根据光的电磁理论得出了同样的关系式，仍叫做菲涅耳公式。

光照射到完全透明的两种介质的分界面时，一部分光发生反射，另一部分光发生折射。分别用 A、R、T 表示入射光、反射光和折射光的振幅，只讨论光波中电矢量的变化，并把电矢量分解为平行于入射面的成分 A_p 、 R_p 、 T_p 和垂直于入射面的成分 A_s 、 R_s 、 T_s ， i 表示入射角，用 r 表示折射角，

则 R_p 、 R_s 、 T_p 、 T_s 与 A_p 、 A_s 的关系是：

$$R_p = \frac{\tan(i-r)}{\tan(i+r)} A_p;$$

$$R_s = -\frac{\sin(i-r)}{\sin(i+r)} A_s$$

$$T_p = \frac{2 \sin r \cos i}{\sin(i+r) \cos(i-r)} A_p;$$

$$T_s = \frac{2 \sin r \cos i}{\sin(r+i)} A_s$$

上面的关系式就是菲涅耳公式。根据菲涅耳公式不仅可以求出反射光和折射光的强度，并能求出反射率和透射率，解释全反射、半波损失和额外程差（参见“半波损失”和“额外程差”）。

虹和霓 (rainbow and secondary rainbow)

虹霓是阳光射入水滴经折射、反射而形成在雨幕上的彩色圆弧。雨后新霁时，在空中残留着许多雨滴，在阳光照耀下，就有可能看到虹霓。

虹是由阳光射入雨滴，经一次反射和两次折射而被分散为各色光线形成的。如图 1-22-6 所示，表示阳光经过雨滴后的偏向

图 1-22-6 虹的形成

角（即出射光线与入射光线方向间的夹角），是它的补角。当为最小，即为最大时，以接近角出射的光近乎平行光束，使进入观察者眼睛的光有足够的光强（以其他角度出射的光均是发散的，比较弱，可忽略不计）。经理论推导可得出，对于紫光来说， $\theta_{紫}$ 约为 40° ，对于红光 $\theta_{红}$ 约为 42° ，这与实际观测的角度相符。因此，虹中的红光分布在约为 42° 的一个锥面上，虹中的紫光分布在约为 40° 的一个锥面上，在二者之间依次是橙、黄、绿、蓝、靛等色。色带排列为外红内紫。

霓是由阳光射入雨滴，经两次折射和两次反射后形成的（图 1-22-7）。因为与虹相比多一次反射，出射光比较弱，光带色彩不如虹鲜明。经理论推导可得出， $\theta_{紫}$ 约为 54° ， $\theta_{红}$ 约为 51° ，色带排列为内红外紫。虹和霓同

图 1-22-7 霓的形成

时出现时，虹位于内侧，霓位于外侧。在地面上，一般只能看到虹霓的一部分，呈弧形。若在空中，比如在飞机上，就可能看到虹霓的全貌，即闭合的彩色带环。

实像和虚像 (real image and virtual image)

物体发出的光经过光具组（由若干反射面或折射面组成的光学系统）反射或折射后，重新会聚所形成的像，叫做实像。实像可以映在屏幕上，能使照相底片感光。物体发出的光经过光具组反射或折射后，成为发散光线，如它们的反向延长线相交时，就可以在交点处看到物体的像，这种像

叫做虚像。虚像不能映在屏幕上，只能用眼观察到。在放大镜、显微镜、望远镜等光学仪器中观察到的放大的像都是虚像。除理想的平面镜和椭球面镜，一般光学仪器形成的像都有像差，但可设法减小像差（参见“像差”）。

薄透镜（thin lens）

折射曲面为球面（或一面为平面）、厚度与球面曲率半径相比很小的透镜。

薄透镜的光学性质主要由焦点位置和焦距大小决定。在薄透镜置于空气中时，如图 1-22-8 所示， f 和 f' 为物方和像方焦距，它们与薄透镜两个折射曲面的曲率半径 r_1 、 r_2 和薄透镜材料的折射率 n 之间有如下关系：

$$\phi = \frac{1}{f'} = -\frac{1}{f} = (n-1) \left(\frac{1}{r_1} - \frac{1}{r_2} \right)$$

式中 ϕ 为薄透镜的光焦度。

薄透镜可分成正透镜（凸透镜）和负透镜（凹透镜）两类。正透镜具有正的像方焦距值，从而有正的光焦度，能对光束起会聚作用，因此又叫做会聚透镜；负透镜具有负的光

图 1-22-8 薄透镜的焦点和焦距

焦度，对光束起发散作用，因此又叫做发散透镜。按形状不同，正透镜可分为双凸、平凸和月凸（或正弯月形）透镜，其共同特征是中心部分比边缘部分厚。负透镜可分为双凹、平凹和月凹（或负弯月形）透镜，其共同特征是中心部分比边缘部分薄。

光焦度（focal power）

表示共轴光学系统使光束会聚或发散能力大小的量，符号为 ϕ 。若长度单位用米时，光焦度的单位名称叫做屈光度，符号为 D 。

在透镜置于空气中的情况下，光焦度的表示式为：

$$\phi = \frac{1}{f'} = -\frac{1}{f} = (n-1) \left(\frac{1}{r_1} - \frac{1}{r_2} \right) + \frac{(n-1)^2}{n} \frac{d}{r_1 r_2}$$

式中 n 为透镜材料的折射率， r_1 、 r_2 为第一和第二折射面的曲率半径， d 为透镜沿主光轴的厚度。在薄透镜情况下， d 可视为零，则光焦度为：

$$\phi = \frac{1}{f'} = -\frac{1}{f} = (n-1) \left(\frac{1}{r_1} - \frac{1}{r_2} \right)$$

由两个薄透镜组合成的共轴光学系统，它的光焦度的表示式为：

$$\phi = \phi_1 + \phi_2 - d \phi_1 \phi_2$$

式中 ϕ_1 、 ϕ_2 为两个薄透镜独立时的光焦度， d 为两个薄透镜光心（薄透镜上的一点，光线通过它时不发生偏折）之间的距离。

由两个以上薄透镜组合成的共轴光学系统，它的光焦度可按照两个薄透镜组合的情况逐项求出。

像差（aberration）

在实际光学系统中，物点发出的光偏离理想成像光路，使成像产生的缺陷。

对于单色光有 5 种不同性质的像差：球差、彗差、像散、像面弯曲和畸变。对于复色光还有色差。

球差即球面像差。主光轴上物点发出的光束，经过光学系统以后，与主光轴成不同角度的光线与主光轴相交于不同点，因此在像面上得到的不是一个理想的点，而是形成一圆形弥散斑，这就是球差。一般以实际光线与近轴光线的像方截距之差来度量。如图 1-22-9 所示， L' 、 l' 为上述二光线的像方截距球差值为 $LA=l'-L'$ 。球差值 LA 与孔径角 u 或光束在光学系统上的高度 y 有关，即 LA 为 u 或 y 的函数。

图 1-22-10 彗差

彗差 即彗形像差。主光轴外的物点发出的较宽光束，经过光学系统成像时产生的彗星形弥散光斑。这种像差在很靠近主光轴的点上就会产生。如图 1-22-10 所示，光线 p 和光线 a 、 b 与像面交点的高度分别为 y'_p 、 y'_a 、 y'_b ，则彗差 $k = y'_p - \frac{1}{2}(y'_a + y'_b)$ 。

像散。离主光轴较远的物点，即使以细光束成像，也不可能会聚于一点。垂直光束（子午光束）和平行光束（弧矢光束）的聚焦点位于不同位置，在像面上呈现一个较大的椭圆形弥散光斑，这种成像缺陷叫像散。像散差以二焦线投影到主光轴上的间距 x' 表示：

$$X' = x' i - x' s.$$

如图 1-22-11 所示。光束与主光轴间的夹角（即视场角）越大，像散差就越大。

图 1-22-11 像散

像面弯曲。一个垂直于主光轴的较大的平面物成像时，像面将不是平的，而是弯曲的。这种现象叫像面弯曲。当光学系统存在较大的像散时，一般像面弯曲的程度也较大。

畸变是由于光学系统的横向放大率（像高跟物高之比）在整个视场范围内不能保持常数而引起的成像缺陷。畸变量的大小可用下式表示：

$$\text{dist} = \frac{\beta_0 - \bar{\beta}}{\beta_0} \times 100\%$$

式中 dist 表示畸变（distortion）， β_0 为近轴横向放大率， $\bar{\beta}$ 为光线形成某一较大视场角时的横向放大率。当像面上的横向放大率随视场角增大而变大时 ($|\bar{\beta}| > |\beta_0|$)，所产生的畸变叫枕形畸变；反之叫桶形畸变，如图 1-22-12 所示。

图 1-22-12

前四种像差的共同特点，是像点被弥散斑所代替，破坏了成像的清晰度。而畸变则不影响成像的清晰度，仅影响与物的几何相似性。在实际光学系统中畸变可以得到一些有益的应用，如拍摄和放映宽银幕电影等。在一般的观察用光学系统中，只要畸变引起的图像变形不为人眼所觉察，是

可以允许的。但是在一些要求精确的测量用光学系统中，畸变是不能允许的严重缺点，必须减小或消除。

色差即色像差。它是由于光学材料的折射率随波长而异，复色光经光学系统成像时，因各色光之间的光路差而产生的像差。如图 1-22-13 所示，物 SQ 上的点 S、Q 分别发出各种颜色的光束。物点 S 的紫光 (F) 像点为 S'_F ，红光 (C) 像点为 S'_C ；物点 Q 的紫光 (F) 像点为 Q'_F ，红光 (C) 像点为 Q'_C 。通常用像点 S'_F 和 S'_C 的间隔 l'_C 表示光学系统的轴向色差，也叫位置色差：

$$l'_{CF} = l'_C - l'_F$$

用像点 Q'_F 和 Q'_C 的像高之差表示光学系统的横向色差，也叫放大率色差：

$$y'_{CF} = y'_C S - y'_F$$

即使在近轴条件下，色差也不能避免，在高质量成像系统中，必须考虑使用消色差系统。

为消色差，须采用组合光学系统，即借助于组合系统各组元的焦距与组元介质色散参数的恰当组合，或组元间隔的合理确定。设组成消色差系统的两个薄透镜的光焦度分别为 ϕ_1 和 ϕ_2 ，光心间的距离为 d ，则系统的光焦度为：

$$\phi = \phi_1 + \phi_2 - d \phi_1 \phi_2$$

此系统对紫光与红光所产生的光焦度之差为：

图 1-22-13 色差

$$\Delta\phi = \frac{\phi_1}{v_1} + \frac{\phi_2}{v_2} - \frac{d\phi_1\phi_2(v_1 + v_2)}{v_1v_2}$$

式中的 v_1 、 v_2 分别是两薄透镜介质的阿贝数，阿贝数 $v = (n_D - 1) / (n_F - n_C)$ ， n_D 、 n_F 、 n_C 分别是透镜对钠黄光、紫光和红光的折射率。当使系统的 $\Delta\phi = 0$ 时，就得到消色差的光学系统。

若将两薄透镜接触在一起， $d=0$ ，则得到消色差的条件为

$$\frac{\phi_1}{v_1} + \frac{\phi_2}{v_2} = 0$$

由于这时 $\phi = \phi_1 + \phi_2$ ，有

$$\left. \begin{aligned} \phi_1 &= \frac{v_1}{v_1 - v_2} \phi \\ \phi_2 &= \frac{v_2}{v_1 - v_2} \phi \end{aligned} \right\}$$

由上式看出，由于 v_1 、 v_2 均为正数，所以 ϕ_1 、 ϕ_2 必须反号，即只有凸透镜与凹透镜组合起来的系统才能消色差。另外 $v_1 - v_2$ 不能为零，所以两薄透镜应由阿贝数不同的材料组成。

若两透镜是由同一种材料制成，间隔 d 不为零，则得到消色差系统的条件是

$$d = \frac{\phi_1 + \phi_2}{2\phi_1\phi_2} .$$

光路可逆性 (reversibility of optical path)

光入射到两种介质的分界面上时，要发生反射和折射，当光线沿反方向行进时，光线仍按原来的路径行进：原反射光线或折射光线成为入射光线，原入射光线成为反射光线或折射光线。光线能够在两个相反的方向上通过相同路径的性质叫做光路可逆性。

光路可逆性可直接用反射定律和折射定律推导出来。但就最普遍的意义来说，光路的可逆性可由费马原理来解释。费马原理指出：光沿着光程为极值的路径传播。在介质中光从 A 点到 B 点和光从 B 点到 A 点的光程为极值的路径是唯一的，所以光路是可逆的。

在成像系统中，按照光路的可逆性，物与像的位置可以互换。

照相 (photography)

也叫摄影，是一种将客观图像忠实记录下来的技术，它包括光学成像装置、感光材料以及显影过程。来自物体的光投影到感光材料上形成潜像，然后用化学或物理方法变成可见的影像。这里只介绍成像。现代的成像装置多为照相机，除普通照相机外，还发展了配合各种专业需要的专业照相机，如天文、航空、制版、显微等，尽管它们在形式上很不相同，但最基本的部分是共通的。

物镜 它是照相机的主要部件，起光学成像的作用，一般由透镜组成。高质量的成像物镜由两组以上的透镜组构成，它可以程度不同地校正像差。照相机物镜按焦距与相片尺寸之间的关系分为标准、广角和远摄三类。焦距约等于照片对角线长度的为标准（这时成像的视角与人眼的视角相近），例如 135 型照相机的标准镜头焦距为 50mm，120 型的为 75mm。焦距比标准短的属于广角，比标准长的属远摄。近些年又发展了焦距可变的物镜，通过移动透镜组中的某些透镜，使整个透镜组的焦距连续改变，但物与像的位置不受影响。在机械补偿式变焦物镜中，可移动的有两部分：一部分叫变倍组，通过它的前后移动来改变成像放大率；另一部分叫补偿组，通过它的移动来调整由于变倍组的移动产生的像面移动，使像面保持在原来的位置。在实际应用中变倍组与补偿组是连动的，制造工艺较复杂。变焦距物镜的应用满足了表现不同题材的摄影要求。

光圈数 它是表示进入物镜的光量多少的照相参数，一般用字母 f 表示。f 的值等于物镜焦距除以光瞳直径，所以光量越大，f 数越小。国际上通用的光圈数系列为：...1, 1.4, 2, 2.8, 4, 5.6... 每一个数是

前一个数的 $\sqrt{2}$ 倍，由于光量与光瞳面积成正比，因此相邻的光圈数在相同时间内的光量相差 1 倍。

曝光与快门 照相感光材料记录光学像的过程叫曝光。曝光量是像的照度与曝光时间的乘积，像的照度决定于光圈数，曝光时间决定于快门的控制。常见的有中心快门和焦平面快门两种。中心快门位于物镜组中间，所以也叫镜间快门，它由若干张可转动的金属片构成，通过开和关的动作控制曝光时间。焦平面快门紧靠焦平面，它是一个带有可调狭缝的幕，所以也叫幕帘式快门，通过卷起幕帘、狭缝掠过而控制曝光时间。现在还出

现了由小型电路控制的电子快门，以及结合小型计算机对快门、光圈数、调焦乃至输送胶卷的一并自动化系统。

取景器 明确所拍景物范围的装置。有一种双镜头照相机，它有两个物镜，一个照相，一个取景成像于毛玻璃上。还有一种单镜头照相机，照相、取景都通过物镜。取景时把成像光路通过一平面镜引向取景窗（如图 1-22-14 所示），拍摄时举起平面镜，使物体的像成于像平面（即底片平面）处。

图 1-22-14 单镜头照相机取景器光路

景深 照相中的景物一般都有一定的纵深分布，而照相机物镜只能调焦到一个平面，景物前后物体都不能成最清晰的像。但是人眼对稍不清晰的像有一定的容忍程度，因而在调焦平面的前后有一范围，在这一范围内的物体成像可认为是清晰的。这个范围就叫做景深。景深的大小跟景物的远近、物镜的焦距和光圈数有关。对于物镜焦距固定的照相机，景物越远，光圈数越大，景深越大。电影（movie）

电影 是照相技术发展的一个分支，是使照片的像活动起来的技术。电影的原理是根据人眼的视觉暂留现象：如果一种连续运动被拍摄为一系列的断续照片并使它的像按一定顺序迅速地呈现在眼前，则看上去运动就是连续的。电影的拍制就是将连续动作分为许多帧照片，放映时使它们的像相继出现在银幕上，这种帧频速率至少得 16 帧/秒，一般取 24 帧/秒。电影摄像机与一般照相机的主要区别是多了个输片机构，令胶片不断输送到曝光位置，在曝光位置暂停并曝光，然后继续运动。如果拍摄时让输片速度大于 24 帧每秒，放映时仍然用 24 帧每秒进行，画面将出现“慢动作”镜头。反之，如果拍摄时的时间间隔很长，而用一般速度放映，就会出现“快动作”，例如可以看到花朵的开放过程在几秒钟内完成。

全反射（total reflection）

光从光密介质射到光疏介质的界面时，全部被反射回原介质的现象。光从光密介质（折射率为 n ）射向光疏介质（折射率为 n' ， $n' < n$ ）时，折射角 r 总大于入射角 i ；与 $r=90^\circ$ 相对应的入射角 i_c 叫做临界角，

$\sin i_c = \frac{n'}{n}$ ， $i_c = \arcsin \frac{n'}{n}$ 。入射角大于或等于临界角 i_c 的光线不能进入

分界面的另一侧而发生全反射。除了光波，其他波也会发生全反射。全反射可以用菲涅耳公式来解释。当 $r > i$ ，且 $r=90^\circ$ 时，由菲涅耳公式有：

$$R_p = \frac{\tan(i-r)}{\tan(i+r)} A_p = \frac{-\tan(90^\circ - i)}{\tan(90^\circ + i)} A_p$$

$$= \frac{-\cot i}{-\cot i} A_p = A_p ;$$

$$R_s = -\frac{\sin(i+r)}{\sin(i+r)} A_s = -\frac{\sin(90^\circ - i)}{\sin(90^\circ + i)} A_s。$$

反射光振幅 R_p （平行分量）和 R_s （垂直分量）的绝对值分别等于入射光振幅 A_p （平行分量）和 A_s （垂直分量）的绝对值，说明入射光全面被反射。

全反射的应用很多，如传导光束（参见“光导纤维”）。借助光在玻璃纤维的光滑内壁上接连不断地发生全反射，可使光从玻璃纤维的一端传导到另一端，因此可以实现光通信。另外，利用全反射可以改变光的方向，为此而制造出各种全反射棱镜，广泛应用于光学仪器和光学技术装置中。如双筒望远镜中利用两块直角棱镜把倒像正立过来；在单镜头照相机的取景器中，利用一个五角棱镜使像转过 90° 。利用全反射还可以根据临界角测出介质的折射率，为此制造出了折射计。

海市蜃楼 (mirage)

也叫“蜃景”。地面附近上下层空气的密度有很大差别时，远处景物发出的光线经过折射率不同的空气层，发生显著折射或全反射，使景物的像呈现在空中或地面下的奇妙景观。它常常发生在海面上空和沙漠地带。图 1-22-15 是海市蜃楼的两种情况。

上层大气密度小（折射率小）
下层大气密度大（折射率大）

甲：上现蜃景

下层大气密度小（折射率小）

乙：下视蜃景

图 1-22-15

当大气温度随高度的增大而升高时（如海面上空），低处的大气密度大、折射率大，高处的大气密度小、折射率小，这时远处物体发出的光线折向地面，观察者看到物体像的位置比实际物体位置高，这就是上现蜃景。当大气温度随高度的增大而降低时（如沙漠地带），低处的大气密度小、折射率小，较高处的大气密度大、折射率大，这时远处物体发出的光线折向天空，观察者看到物体像的位置比实际物体位置低。如果物体发出的光线在某处是下视蜃景。

用一块较长的长方形铁板，上面铺上砂子，下面用煤气炉加热，在离铁板一端适当距离处点上蜡烛，从铁板的另一端就可以看到蜡烛的蜃景。

光导纤维 (optical fiber)

也叫光学纤维，简称光纤。一种能够传输光的细丝，由内芯和包层组成，内芯材料的折射率大于包层材料的折射率。其结构多为圆柱形，一般用高透明度的玻璃或石英制成，也有用塑料制成的。按折射率分布情况分，光纤主要有阶跃折射率型（也叫套层光学纤维或均匀芯光学纤维）和渐变折射率型（也叫梯度折射率光学纤维、渐变折射率光学纤维或非均匀芯光学纤维）两类（图 1-22-16）。光

图 1-22-16

线在阶跃折射率光纤中传输的基本原理，是在内芯与包层界面上发生全反射，子午光线（与光纤轴相交的光线）的传输轨迹是锯齿形折线，斜光线

(与光纤轴不相交的光线)的传输轨迹是围绕纤维轴的螺旋线。对于梯度折射率光纤,它的折射率在内芯中呈梯度分布,子午光线的传输轨迹是正弦曲线,斜光线的传输轨迹是围绕光纤轴的螺旋线。表征光纤集光本领的重要参数是数值孔径,它表示为:

$$\text{N.A.} = n_0 \sin \theta_m = \sqrt{n_1^2 - n_2^2}。$$

n_0 表示光纤所在处介质的折射率,对于阶跃折射率光纤, n_1 、 n_2 分别表示内芯与包层的折射率;对梯度折射率光纤, n_1 表示光纤中心处的折射率, n_2 为包层的折射率, θ_m 表示光纤端面入射临界角,只有小于 θ_m 的入射光线才能被传输。

光纤的应用已十分广泛。用光纤束可以传像,如各种潜望镜、医用内窥镜(如胃镜、肠镜、膀胱镜、子宫镜等)。用光纤导光,如各种形式的光学纤维照明器、信号显示器、传感器等。特别是激光通信光缆有着显著特点,它传输带宽、容量大、损耗低、中继距离长、抗干扰性能好,而且质量小,造价低。

由于光纤可以做得很细(如直径为 0.1mm~0.15mm),在医学上应用很多。如进行人体内脏器官手术时,不用开刀而把微型手术器和光纤通过人体血管送进内脏,光纤作为手术照明器或观察器,以保证手术准确无误。

明视距离 (distance of distinct vision)

最适合正常人眼观察物体的距离。人眼要看清楚物体,必须在眼的视网膜上得到该物体的像。眼使不同距离的物体均能成像在视网膜上,要靠睫状肌的收缩,使晶状体两曲面的曲率半径改变来实现。当眼中睫状肌松弛时,晶状体两曲面的曲率半径为最大,这时能在视网膜上成清晰像的物点到眼的距离叫做远点;当物点移近时,为看清它,眼中睫状肌就要收缩使晶状体的曲率半径变小。当物点移近到某一距离时,晶状体两曲面的曲率半径已达最小,若物体再移近,就无法看清这个物体了。这时物点到眼睛的距离叫做近点。

对每个人来说,在整个生命过程中,近点、远点并不是保持不变的。儿童时期,近点约在眼前 7cm~8cm 处,远点在无限远处。40 岁~50 岁时,近点约在眼前 25cm 处。到了老年,近点可能远移到眼前 1m 以上。

在合适的照度下(50lx~100lx),人们看眼前 25cm 处的物体时是不费力的,很舒适。为了便于光学仪器的设计,一般规定 25cm 为明视距离。如放大镜和显微镜的放大率都是根据成像于离人眼 25cm 处计算的。

视角 (viewing angle)

从物体两端向眼的光心引出的两条光线的夹角。物体越小或距离越远,视角越小,在人眼的视网膜上所成的像也越小。当像小到一定程度,人眼就不能看清物体了。在生理光学上,把眼能分辨物体的最小细节所对应的视角(以分为单位)的倒数叫做视敏度,它表示视觉系统的空间分辨能力。正常人眼的视敏度对应的视角约为 0.5'~1'。从生理解剖角度,视敏度可以解释为是由视锥细胞在视网膜上镶嵌排列的精细程度决定的;而从光学角度,则可以认为是受到眼光学系统的衍射极限的限制。观察很小或很远的物体时常使用光学仪器(如显微镜、望远镜等)以增大视角。

显微镜 (microscope)

观察微小物体用的光学仪器。显微镜由物镜、目镜和镜筒等部分组成，另外还有一个照明物体的聚光系统。图 1-22-17 表示显微镜系统成像原理， L_1 为物镜， L_2 为目镜。物体 AB 位于物镜焦点以外，经物镜成一个放大倒立的实像 $A'B'$ ，这个实像位于目镜焦点之内，靠近焦点；从目镜观察时，可以看到 $A'B'$ 的放大正立的虚像 $A''B''$ 于明视距离 (25cm) 处。显微镜的放大率为

图 1-22-17 显微镜成像原理

$$M = M_0 M_e = -\frac{25\text{cm} \times \Delta}{f_1 f_2} = -\frac{25\text{cm}}{f'}$$

式中 25cm 是明视距离，其他长度均以厘米为单位， $M_0 = -\frac{\Delta}{f_1}$ 为物镜的

横向放大率， $M_e = \frac{25\text{cm}}{f_2}$ 为目镜的视角放大率， f_1 、 f_2 分别为物镜、目

镜的焦距， Δ 为光学筒长，即物镜的像方焦点到目镜的物方焦点间的距离，负号表示像是倒立的， f' 为物镜与目镜的组合焦距，即显微镜相当于焦距为 f' 的放大镜。显微镜的物镜、目镜各由数只组成一套，它们的不同组合构成不同的放大倍率。关于显微镜的分辨本领见助视仪器的分辨本领条目中的“显微镜的分辨本领”。

随着近代科学的发展，出现了各类特殊显微镜。双目立体显微镜，观察物体时有空间立体感，眼睛不易疲劳，视场较大，常用于检验、装配和修理细小精密的零件以及电子线路的焊接等工作。金相显微镜用于观察金属磨片，由于试样不透明，照明光束从上面照射到试样上。干涉显微镜由显微镜和干涉仪组合而成，可以测量物体表面的微观不平度及透明物体的折射率不均匀性等。偏光显微镜利用偏振光的光学性质可分析和识别物质，广泛应用于矿物学、岩石学、生物学、药物学和冶金等方面。

望远镜 (telescope)

用来观察远处物体能增大视角的光学仪器。第一架望远镜是荷兰制造眼镜的工匠李普希 (H. Lippershey, 1587 ~ 1619) 发明制造的。他在 1608 年申请这种仪器的专利，有关资料保存在海牙档案馆里。意大利的伽利略听到发明望远镜的消息后，立即磨制透镜，在 1609 年制出了更好的望远镜，并用它观察天体，发现了木星的卫星和月球表面有山和谷等。这种望远镜是用一块凸透镜做物镜，用一块凹透镜做目镜制成的，通常叫做“伽利略望远镜”。此后不久，1611 年开普勒在他的光学著作中首先论述了望远镜原理，并于 1615 年制造出用凸透镜做目镜的望远镜。这种望远镜通常叫做“开普勒望远镜”。

伽利略望远镜的物镜和目镜间的距离较小，结构比较紧凑，并且能形成正像，可满足一般观察的需要。它的光路如图 1-22-18 所示。从远处物体射来的近乎平行的光线，进入物镜后在形成实像前，被目镜 (凹透镜) 折射成发散光线，这些光线进入观察者眼中，观察者可在这些光线的反向

延长线的交点处看到物体的虚像（为便于长时间观察，实际上像也位于无限远处）。这种望远镜由于中间没有成实像的平面，无法在像平面处设置十字

图 1-22-18 伽利略望远镜的光路

丝或带刻度的光阑，因此不能作瞄准和测量用。

开普勒望远镜的光路如图 1-22-19 所示。进入物镜的光线在镜后的焦平面处形成倒立的实像，从目镜可看到这实像的放大虚像（实际上，虚像也位于无限远处）。这种望远镜中有成实像的平面，可在实像平面处设置十字丝或带刻度的光阑，因此能作瞄准和测量用。

图 1-22-19 开普勒望远镜的光路

1672 年牛顿制成了反射望远镜。此后又有许多种不同形式的反射望远镜问世（图 1-22-20）。这种望远镜的物镜是凹面镜，靠反射成像，因此叫反射望远镜。由于凹面镜的反射不产生色差，又便于校正球差，并且大孔径的反射镜比透镜容易制造，所以大孔径（2 米以上）的天文望远镜的物镜都是用反射镜制成的。

图 1-22-20 反射望远镜

放大率 望远镜的放大率指的是视角放大率，即通过望远镜看远物的像的视角与眼睛直接观察该物的视角之比。用 M 表示放大率，用 θ 表示直接观察远物时的视角，用 θ' 表示通过望远镜看该物的像的视角，由图 1-22-19 可知：

$$M = \frac{\theta'}{\theta} = \frac{\tan \theta'}{\tan \theta} = \frac{f_0}{f_e}。$$

式中的 f_0 是物镜的焦距， f_e 是目镜的焦距。物镜的焦距长、目镜的焦距短，可使望远镜有较大的放大率。

磷光 (phosphorescence)

一种发光现象。物体受到外界的激发（如受到光或不可见光的照射或电子等粒子的轰击），当激发源被移走或停止作用后，物体仍能继续发光的现象。通常，物质的原子从外界吸收能量，从基态或较低的能态跃迁到高能态后，立即返回低能态或基态，同时以光的形式辐射出能量，时间约 10^{-9} s。物质发磷光的时间比这长得多，可从 10^{-3} s 到 1 天以上。能发磷光的物质叫做磷光物质，或磷光体。例如，金刚石经日光照射后，在暗处能发出较长时间的青绿色的光。此外，萤石、石英、方解石及锌、钙、锶等的硫化物都能发出磷光。某些有机物质如煤油等也能发出磷光。物质发磷光的机理，是其中的原子被激发后跃迁到亚稳态，需要靠其他激发因素，如热激发，才能回到低能级或基态，因此发光的时间较长，特别是在低温下发光的时间更长。磷光有许多应用，例如根据物质发出磷光的波长和强度，可以鉴别物质。这种方法叫做磷光分析。

荧光 (fluorescence)

一种发光现象。物质受到激发后能维持较短时间（一般不超过 10^{-3} s）

的发光现象，叫做荧光。有些荧光的发光时间能持续到 10^{-3}s 以上，叫做迟发荧光。因此，荧光和磷光（见磷光条目）并没有严格的界限。一切物质在紫外线或 x 射线照射下都能发出荧光。最容易产生荧光的物质叫做荧光物质。不同的荧光物质发出的荧光颜色不同。根据荧光光谱也可以鉴别物质，这种方法叫做荧光分析。荧光物质常用在荧光灯和电视机的荧光屏上。利用能发出蓝紫色荧光的物质，可制成荧光增白剂。因衣物的白色纤维在日光作用下容易变黄，洗衣时加入能发出黄色的补色的荧光物质，它发出的荧光能使衣物增白，所以叫增白剂。

发光强度 (luminous intensity)

表示光源在某一方向上发光强弱的物理量。

发光强度的单位，最初是英国于 1860 年规定的，叫做烛光。它是用鲸油制成直径为 $\frac{7}{8}$ 英寸（约 2.2 厘米）、质量是 $\frac{1}{6}$ 磅（约 76 克）的标准蜡烛，每小时燃烧耗油 120 格令（7000 格令为 1 磅，120 格令约等于 7.76 克）时，在水平方向的发光强度。这个单位于 1881 年在国际电工技术委员会上被承认为国际标准。1909 年，美、英、法等国把一组特制的 45 个碳丝白炽电灯发光强度的平均值，定为发光强度的单位，叫做国际烛光。这些单位已不使用。现在国际单位制中采用的发光强度的单位是坎德拉，简称坎，英文名称是 candela，单位符号是 cd。1979 年第 16 届国际计量大会上规定的坎德拉的定义是：坎德拉是一光源在给定方向上的发光强度，该光源发出 $540 \times 10^{12}\text{Hz}$ 的单色辐射，且在此方向上的辐射强度为 $\frac{1}{683}\text{W/sr}$ 。坎德拉是国际单位制中 7 个基本单位之一。1 坎德拉约等于 0.98 烛光。

在物理学中，以前通常用光源在某一方向的单位立体角内发出的光通量来定义发光强度。用 I 表示发光强度，用 d 表示某一方向的小立体角，用 $d\phi$ 表示光源在 d 立体角内发出的光通量，则

$$I = \frac{d\phi}{d\Omega}。$$

如果光源是各向同性的，则它的发光强度在各方向都相同；否则，上式只表示某一方向的发光强度。

光通量 (luminous flux)

单位时间内通过某一面积的光能（以引起人眼亮暗感觉的强弱为标准进行测量），叫做通过这一面积的光通量。

光通量的单位可由发光强度的单位导出来。如果点光源的发光强度是 1 坎德拉，以点光源为中心，作半径是 1 米的球面，通过球面上每 1m^2 面积的光通量，就定为光通量的单位，叫做流明，简称流，英文名称是 lumen，单位符号是 lm。即 1 流明 = 1 坎德拉 · 球面度。

发光强度的单位坎德拉是根据 $540 \times 10^{12}\text{Hz}$ 的光定义的。其他频率的光，在辐射功率相同的情况下，引起人眼亮暗感觉的程度较小，因此它的发光强度和它发出的光通量也较小。例如，要引起与 1 毫瓦的 $540 \times 10^{12}\text{Hz}$ 的黄绿光（在空气中的波长为 555nm）相同的亮暗感觉，对于 510nm 的绿

光就需要 2mW。这个比值

$$\frac{1\text{mW}}{2\text{mW}} = 0.5。$$

叫做视见函数或光视效率 $V(\lambda)$ 。即取 555nm 的黄绿光的视见函数为 1，则 510nm 的

图 1-22-21 视见函数曲线

绿光的视见函数是 0.5。其他频率（或波长）的光的视见函数也都小于 1。视见函数的曲线如图 1-22-21 所示。实际上在 390nm ~ 760nm 范围以外，视见函数的值已趋于零。所以，光通量的大小既与单位时间内通过某一面积的光能有关，又与光的视见函数有关（等于二者的乘积）。

光亮度（luminance 或 brightness）

简称亮度，表示光源发光表面上一点在某方向发光强弱的物理量。用符号 L 表示。它的定义如下：如果观察方向与发光表面上某点的法向方向间的夹角是 θ ，包含该点在内的发光表面的面积是 dA ，这个小面积的发光强度是 dI ，则它的亮度等于 dI 与 $dA\cos\theta$ 之比，即

$$L = \frac{dI}{dA\cos\theta}。$$

式中的 $dA\cos\theta$ 等于 dA 在垂直于观察方向的投影面积。所以，亮度在数值上等于发光表面在垂直于观察方向的单位投影面积的发光强度。亮度的单位是坎德拉每平方米，单位符号是 cd/m^2 。这个单位以前叫做尼特，符号是 nt ，已废除。

亮度一般随观察方向而变，但有些光源，如太阳、黑体、粗糙的发光面，其亮度与方向无关。这类光源叫做朗伯光源。

亮度的概念也可以应用于本身不发光而反射光的物体。粗糙的表面向各个方向反射光线，如粗糙的白纸表面、放映电影的屏幕等，这类物体也可近似看作朗伯光源。

光照度（illuminance）

简称照度，表示受照面明亮程度的物理量。用 E 表示。它的定义是：照射在表面某点所在的小面积上的光通量 $d\phi$ 与小面积 dA 之比，叫做表面上该点的照度。即

$$E = \frac{d\phi}{dA}。$$

在国际单位制中，照度的单位是流明/米²，叫做勒克斯，简称勒，英文名称是 lux ，单位符号是 lx 。

照度定律（law of illumination）

表明被照表面的照度与光源的发光强度、距离和光线的入射角之间的关系物理规律。

如果光源是点光源，它发出的总光通量 $\Phi = 4\pi I$ ，均匀地垂直照在以点光源为球心的球面 S 上，被照面与光源的距离是 r ，那么被照面上的照度

$$E = \frac{\phi}{S} = \frac{4\pi I}{4\pi r^2} = \frac{I}{r^2}。$$

这个结果表示，用点光源照明时，与光线垂直的被照面上的照度与光源的发光强度成正比，与被照面到光源的距离的二次方成反比。这个规律叫做照度第一定律。

如果被照面与入射光线不垂直，被照面上的照度还与入射角的余弦成正比，即 $E = E_0 \cos \theta$ 。式中的 E_0 是光线垂直照射时的照度， θ 是光射到被照面的入射角，这个规律叫做照度第二定律。

综合以上两条规律可知，点光源在物体表面某点产生的照度，与光源的发光强度 I 和光的入射角 θ 的余弦成正比，与该点到光源的距离 r 的二次方成反比，即

$$E = \frac{I}{r^2} \cos \theta。$$

这个规律叫做照度定律，是光度学的基本定律。

光的干涉 (interference of light)

两束 (或多束) 光波相遇时产生的光强分布不等于各束光单独产生的光强之和，而出现明暗相间的现象。

产生干涉的条件是：两光波的频率相同；两光波的相位差在可观察的时间内保持不变；两光波的振幅不能相差太大；两光波的偏振面 (振动方向) 须大体一致。前两个条件是最基本的条件，后两个条件不满足时也能产生干涉现象，但不明显，四个条件都满足时才产生明显的干涉现象。满足这些条件的光源或光波，叫做相干光源或相干光波。

一般光源发出的光，它们的初相位是迅速变化的，每一列光波持续的时间不超过 10^{-8} 秒的数量级，每隔 10^{-8} 秒左右，就要被另一列新的光波所代替，而两列光波的频率、初相位、振幅和振动面之间并没有固定的联系，而是随机变化的，因此，两个一般光源或同一光源的两部分发出的两束光互相叠加时并不产生干涉现象。

由一般光源产生相干光波的方法可分为两种：分波面法和分振幅法。

分波面法是从同一波源的波面上分出两个或两个以上的部分，使它们继续传播互相叠加而发生干涉。杨氏的双缝干涉、菲涅耳双镜、劳埃德镜等干涉实验法属于这一种方法。分振幅法是使一束入射光波在两种光学介质的分界面处一部分发生反射，另一部分发生折射，然后使反射波和折射波在继续传播中相遇而发生干涉。牛顿环和薄膜干涉属于这一种方法。

激光器发出的激光束是单色性非常好的光，经扩束后分成两部分，再使这两部分光互相叠加，就可以产生明显的干涉现象。全息摄影就是利用激光的这种特性而拍摄的，全息照片上得到的是光的干涉图样，而不是物体本身的形像 (参见“全息摄影”)。

双缝干涉 (double slit interference)

英国物理学家杨在 1801 年首先用实验观察到了光的干涉现象，为光的波动说的确立奠定了基础。他的实验方法是让日光通过一个针孔，射到相隔很近的两个针孔上，然后从两个针孔射出的光互相叠加就产生了干涉现象。现在实验室中的杨氏实验器是用狭缝代替了针孔，这种实验现象叫做

双缝干涉。双缝干涉实验原理如图 1-22-22 所示。如果用激光器（如氦氖激光器）作光源，则可

图 1-22-22 双缝干涉

以不用狭缝 S，直接使激光照射到狭缝 S₁ 和 S₂ 上，在屏 D 上就可以看到明暗相间的条纹。

如果从 S₁ 和 S₂ 发出的两列光波到达屏上某一点 P 的光程差 $\delta = nr_2 - nr_1$ （式中的 n 是介质的折射率，对于空气可取 n=1）等于波长的整数倍，两列波到达 P 点时的相位相同，叠加后互相加强，这里就出现亮条纹；如果光程差 δ 等于半波长 $\lambda/2$ 的奇数倍，两列波到达 P 点时的相位相反，叠加后互相减弱或抵消，这里就出现暗条纹。

由于 $r \gg d, r \gg x$ ， $r_2 - r_1 \approx d \sin \theta \approx d \frac{x}{r}$ （式中的 d 是双缝间的距离，r 是双缝到像屏 D 的距离，x 是屏上任一点 P 到中央 O 点的距离），当 n=1 时，屏上

$$x = k \frac{r\lambda}{d}, k = 0, \pm 1, \pm 2, \dots$$

的地方出现亮条纹。k=0 时，x=0，出现的是中央亮条纹；k=±1, ±2, …… 时，出现的是中央条纹两侧的正负第一级、第二级……亮条纹。

$$x = (2k-1) \frac{r}{d} \cdot \frac{\lambda}{2}, k = \pm 1, \pm 2, \dots$$

的地方出现暗条纹。k=±1, ±2, …… 时，出现的是正负第一级、第二级……暗条纹。

从上述条件可知，相邻两条亮条纹或相邻两条暗条纹间的距离为

$$\Delta x = x_{i+1} - x_i = \frac{r}{d} \lambda$$

即波长 λ 越大，屏与双缝的距离 r 越大，双缝间的距离 d 越小，条纹越宽。

菲涅耳双镜 (Fresnel bimirror)

菲涅耳于 1818 年采用两块平面镜获得相干光束的方法。他使两平面镜间的夹角接近 180°（图 1-22-23）。S 是光阑上的狭缝（垂直于纸面），用单色光照射，S 就成为一个线状的单色光源。它发出的光经两平面镜 M₁ 和 M₂ 反射后，在屏 D 上有一部分叠加，产生干涉，出现平行的明暗相间的干涉条纹。

图 1-22-23 菲涅耳双镜

图中的 S₁ 和 S₂ 是 S 经 M₁ 和 M₂ 所成的虚像，从 S 发出的光经 M₁、M₂ 反射后到达屏 D 上的一点 P，就像从 S₁、S₂ 发出的光一样，S₁ 和 S₂ 可以看作是两个相干光源，它们发出的光在屏上产生干涉。由于这两束光的光程不同，而出现相互加强或减弱的现象，即出现明暗条纹。

设 S₁ 和 S₂ 间的距离是 d（它相当于双缝干涉中双缝间的距离），SO=S₁O=S₂O=r，O 点到屏 D 的距离是 l，两平面镜 M₁、M₂ 间的夹角是 2θ ，则 S₁O=S₂O=2r sin θ ，S₁、S₂ 到屏 D 的距离（相当于双缝干涉中双缝到屏的距离）

近似等于 $r+l$ ，屏上条纹间的距离（参见“双缝干涉”）：

$$x = \frac{r+l}{d} = \frac{r+l}{2r\sin\theta}。$$

杨氏实验装置中的小孔或狭缝都很小，它们的边缘由于衍射而对实验产生影响，菲涅耳双镜法排除了这些影响，可在更简单的情况下看到更清晰的干涉条纹。

劳埃德镜 (Lloyd mirror)

劳埃德 (H.Lloyd, 1800 ~ 1881 爱尔兰物理学家) 在 1834 年采用的观察干涉现象的方法。他用一块平面镜（或一面涂黑的玻璃板）观察到了光的干涉现象，方法如图 1-22-24

图 1-22-24 劳埃德镜

所示。缝光源 S 发出的光，有一部分直接射到屏 D 上，另一部分经镜面 M 反射后射到屏 D 上，对镜面的入射角接近 $\frac{\pi}{2}$ ，这两部分光在屏上重叠部分产生干涉，出现明暗相间的条纹。劳埃德镜的干涉，相当于光源 S 和它在平面镜中的虚像 S' 发出的两束光的干涉。条纹间的距离 $x = \frac{l}{d}$ ，式中的 d 是 S 和 S' 间的距离，l 是 S 和 S' 的连线到屏的距离， λ 是光的波长。

劳埃德从实验中发现，如果使屏与平面镜接触，则屏与平面镜的接触处出现的是暗条纹。这表明经平面镜反射的光波的相位改变了 π 。相位改变了 π ，相当于多走了半个波长的光程，因此这种现象叫做半波损失。根据光的电磁理论，光从光疏介质射向光密介质的分界面，在掠射（入射角 $i = 90^\circ$ ）或正射（ $i = 0^\circ$ ）时，在反射过程中都产生半波损失（参见“半波损失”）。

维纳驻波干涉实验 (Wiener standing wave interference experiment)

维纳 (Otto Heinrich Wiener, 1862 ~ 1927 德国物理学家) 在 1890 年做的光的驻波干涉实验。证明入射光和反射光相遇时，能发生干涉而形成驻波。他用单色光垂直照射到镀有银层的反射镜 M 上（图 1-22-25），

图 1-22-25 维纳驻波干涉实验

镜上放有透明的感光片 G，感光片与反射镜间有很小的夹角 θ （只有几分）。反射光与入射光叠加，振幅最大处，是驻波的波腹，那里的感光片被感光，显影后出现黑条纹；振幅最小处，是驻波的波节，那里的感光片不感光，显影后出现白条纹。从图中可以看出，相邻两条黑条纹之间的距

离 $d = \frac{\lambda}{2\sin\theta}$ 。光波的波长 λ 的数量级是 10^{-4} mm，如果 $\theta = 1'$ ，则 d 约等于 1mm。

维纳实验表明，感光片与镀银平面镜接触的地方没有感光，即那里是波节，证明反射光相对于入射光相位是相反的，即光在介质表面上垂直反射（ $i = 0$ ）时也产生了半波损失。

半波损失和额外程差 (half-wave loss and extra optical path difference)

劳埃德镜实验和维纳驻波干涉实验都证明, 光从光疏介质射向光密介质的分界面, 在掠射 (入射角 $i = 90^\circ$) 和正射 ($i = 0^\circ$) 时, 反射光波的相位改变 π , 相当于多走了半个波长的光程。这种现象叫做半波损失(参见“ 劳埃德镜 ” 和 “ 维纳驻波干涉实验 ”)。

用菲涅耳公式可以解释半波损失 (参见 “ 菲涅耳公式 ”)。光从光疏介质射向光密介质时, 入射角 $i >$ 折射角 r , 在掠射的情况下, $i = 90^\circ$, $i+r > 90^\circ$ 。令入射光中的 A_s 和 A_p 均取正值, 则从菲涅耳公式可得反射光中的 R_s 和 R_p 均为负值。在掠射的情况下, 反射光的强度近似等于入射光的强度, 且反射光和入射光的传播方向几乎相同。由于反射后反射点

处的反射光中电矢量的两个分量都变为负值, 且 $\left| \frac{R_p}{A_p} \right| = \left| \frac{R_s}{A_s} \right| = 1$, 它们的合

矢量几乎与射向这里的入射光中的电矢量方向相反, 即相位改变了 π 。由于 E 、 H 和传播方向三者之间构成右螺旋关系, 电矢量 E 反向时, 磁矢量 H 也反向, 即相位也改变 π 。这种现象就是半波损失。

在正射 ($i = 0^\circ$) 时, 仍设 $n_1 < n_2$, 即 $i > r$, 则从菲涅耳公式可得反射光中的 R_s 为负, R_p 为正。但按规定的正方向 (通常规定入射光中各分量的方向为正方向, 即垂直分量以垂直纸面向外为正方向, 平行分量与垂直分

图 1-22-26 正射时电矢量的变化

量的正方向和光的传播方向形成右手正交系时, 平行分量的方向为它的正方向), R_s 和 R_p 都分别与入射光中的 A_s 和 A_p 的方向相反(图 1-22-26),

且 $\left| \frac{R_p}{A_p} \right| = \left| \frac{R_s}{A_s} \right| = 1$, 表明合矢量的方向也变为相反, 即相位也改变了 π , 也产生了半波损失。

光从反射性质不同 (从光疏到光密和从光密到光疏) 的表面反射出的两束光, 它们的电矢量的振动方向相反, 这相当于在通过不同光路引起的光程差之外, 又增加了 $\lambda/2$ 的程差, 这种程差叫做额外程差。例如, 把折射率为 n_2 的介质薄膜放在折射率为 n_1 的介质中, 设 $n_2 > n_1$, 则光在薄膜第一表面反射时, 是由光疏介质到光密介质, 在薄膜第二表面反射时, 是由光密介质到光疏介质。根据菲涅耳公式可以证明, 从两表面反射出的反射光中, 平行和垂直振动分量的变化相反, 合矢量的方向相反, 即相位相差 π , 相当于引起了额外程差 $\lambda/2$ 。同样可以证明, 当 $n_2 < n_1$ 时, 在入射角小于临界角的情况下 (入射角大于临界角将发生全反射, 光不能进入第二种介质中), 上述结论也是正确的。但折射光束不产生额外程差。

等倾干涉 (equal inclination interference)

几束光发生干涉时, 光的加强或减弱的条件只决定于光束方向的一种干涉现象。例如, 光通过两面平行的透明介质薄膜时, 从上下表面反射的

光产生的干涉就属于这种干涉。设薄膜的厚度是 d ，折射率是 n_2 ，周围介质的折射率是 n_1 ，光射入薄膜时的入射角是 i ，在薄膜中的折射角是 r ，则从反射光中看到明暗条纹的条件是：

$$2d\sqrt{n_2^2 - n_1^2 \sin^2 i} = (2m + 1)\frac{\lambda}{2} \quad \text{亮条纹}$$

$$2d\sqrt{n_2^2 - n_1^2 \sin^2 i} = 2m\frac{\lambda}{2} \quad \text{暗条纹}$$

$$m = 0, 1, 2, \dots$$

$$\text{或 } 2dn_2 \cos r = (2m + 1)\frac{\lambda}{2} \quad \text{亮条纹}$$

$$2dn_2 \cos r = 2m\frac{\lambda}{2} \quad \text{暗条纹}$$

$$m = 0, 1, 2, \dots$$

从上述条件可以看出，产生明暗条纹的条件只决定于光的入射角或折射角，即光的干涉情况只决定于光的倾角。

对于等倾干涉来说，不仅点光源可以产生清晰的干涉条纹，扩展光源也可以产生清晰的干涉条纹，即光源的大小对等倾干涉条纹的形状没有影响。实际上，光源上每一点都会产生一组等倾干涉条纹，而且这些条纹的位置互相重合，因此使干涉条纹更加明亮。例如，图 1-22-27 中的 a 和 b 是从光源的 S_1

图 1-22-27 等倾干涉

和 S_2 点发出的两束平行光，它们对薄膜的入射角 i 相同。从薄膜的上下表面反射出的两束光的光程差相同，干涉情况相同。由于这些反射光也是平行光，经透镜 L 后会聚于同一点 S （如果不用透镜，它们的干涉条纹将产生在无限远处）。具有其他倾角的光线将会聚于另一点。

等倾干涉条纹也可以通过薄膜的透射光中看到。由于直接透射的光比经过两次或更多次反射后透射出的光强得多，所以透射光的干涉条纹不如反射光的条纹清晰。薄膜的厚度对条纹的影响比较大。厚度 d 越大，相邻亮条纹间的距离越小，即条纹越密，越不易辨认。

等厚干涉 (equal thickness interference)

光在厚度不同的薄膜表面发生干涉时，光的加强或减弱的条件只决定于膜的厚度的一种干涉现象。观察等厚干涉现象，通常让光线垂直射到薄膜的表面上（入射角 $i = 0$ ），这时由膜的上下表面反射出的两束相干光的光程差近似等于 $2nd$ ， n 是膜的折射率， d 是该处膜的厚度。考虑到反射时有半波损失，则从反射光中看到明暗条纹的条件是：

$$2nd = (2m + 1)\frac{\lambda}{2} \quad \text{亮条纹}$$

$$2nd = m \quad \text{暗条纹}$$

$$m = 0, 1, 2, \dots$$

厚度 d 相同的各处，产生的干涉条纹的明暗情况相同，因此这种干涉条纹叫做等厚干涉条纹。如果光线不是垂直入射，由于薄膜很薄，并且膜的两

个表面的夹角很小，光程差近似地等于 $2d\sqrt{n_2^2 - n_1^2 \sin^2 i}$ ， n_2 是膜的折射率， n_1 是膜周围介质的折射率， i 是入射角。在平行光照射下，各处的入射角 i 相同，这时产生的明暗条纹的条件也只决定于膜的厚度 d ，这种干涉也是等厚干涉。

如果用白光照射，由于各色光产生的干涉条纹的位置不同，互相叠加后就出现不同的颜色。肥皂泡上的彩色花纹就是这样出现的。

等厚干涉在光学测量中有很多应用。如测量微小角度、细小的直径、微小的长度，以及检查光学元件表面的不平度，都可以利用光的等厚干涉。

牛顿环 (Newton ring)

牛顿最先详细研究过的一种等厚干涉现象。把一个曲率半径很大的凸透镜放在一块平面玻璃板上，其间有一厚度逐渐变化的空气层。用单色光垂直照射 (图 1-22-28)，从

图 1-22-28 牛顿环

反射光中可以看到一组明暗相间的圆环，这是光从空气层上下表面反射后产生的等厚干涉条纹。这些环形的干涉条纹就叫做牛顿环。由于有半波损失，中心 O 点处 (光程差 $\delta=0$) 是暗点，第 m 条暗环的半径是：

$$r_m = \sqrt{mR\lambda}, m = 1, 2, 3, \dots$$

式中 R 是凸透镜的曲率半径， λ 是光在真空中的波长。相邻各环半径之比 $r_1 : r_2 : r_3 \dots = 1 : \sqrt{1} : \sqrt{3} \dots$ 即随着级数 m 增大，干涉条纹变密。如果测出某一暗环的半径 r_m 及它外面另一暗环的半径 r_{m+k} ，也可由下式求出凸透镜的曲率半径：

$$R = \frac{r_{m+k}^2 - r_m^2}{k\lambda}$$

从透射光中也可以看到环形的明暗条纹，但明暗条纹的位置与反射光中的相反，它的中心是亮点。

牛顿环现象可用来检查生产出的光学元件 (透镜) 表面的曲率是否合格，并能判断应如何进一步研磨使其符合标准。

减反射膜 (antireflecting film)

利用薄膜的干涉来减小反射光的一种方法，这种膜也叫增透膜，即使透射光增强。

光在空气中垂直射到玻璃表面时，反射光能约占入射光能的 5%，反射损失并不大。但在各种光学仪器中为了矫正像差或其他原因，常常要用多个透镜。例如，照相机的物镜有的用 6 个透镜，变焦距物镜有十几个透镜，潜水艇用的潜望镜中约有 20 个透镜。透镜的每个界面上都有反射损失，合计起来损失的光能就很多了，上述照相机物镜损失的光能可达 45%，潜望镜中损失的光能可达 90%。此外，大量的反射光会产生有害的杂光，影响成像的清晰度。为了减小反射损失，近代光学仪器中采用真空镀膜或化学镀膜的方法，在透镜表面镀上一层透明薄膜，这就是减反时膜。膜上方的介质通常是空气 (折射率为 n_1)，膜下方的介质通常是玻璃 (折射率

为 n_2), 设膜的折射率为 n , 且 $n_1 < n < n_2$, 当膜的厚度 d 满足 $nd = (2m + 1) \lambda / 4$ 时, 从膜上下两表面反射出的两束光的相位差是 π , 相干后光强最小, 从理论上可进一步证明, 当 $n = \sqrt{n_1 n_2}$ 时, 从膜的上下表面反射出的两束光波的振幅大致相等, 干涉后相消, 可使反射光几乎全部消失。目前用的镀膜的材料一般是氟化镁, 它的折射率 $n = 1.38$ 。

由于减反射膜只能使一定波长的反射光达到极小, 通常助视光学仪器或照相机, 一般是针对可见光的中部对人眼视觉最敏感的黄绿光 (波长 555nm) 来选取膜的厚度的。因此, 这种镜头的反射光中由于缺乏黄绿光而呈现出与它互补的蓝紫色。

利用薄膜的干涉也可以使反射光得到加强, 这种膜叫做高反射膜。例如, 氦-氖激光器谐振腔的全反射镜镀 15 层 ~ 19 层的硫化锌-氟化镁薄膜, 可使 632.8nm 的红光的反射率达到 99.6%。

测量微小角度 (measurement of a small angle)

根据等厚干涉条纹可以测量微小角度。图 1-22-29 表示两平板玻璃间形成一劈形空

图 1-22-29 用干涉法测量微小角度

气薄膜。用单色平行光从上面垂直照时, 可以看到明暗相间的等厚干涉条纹 (见乙图)。由于相邻条纹处空气膜的厚度差等于 $\lambda / 2$ (λ 是单色光的波长), 条纹间隔 x 与劈形空气薄膜顶角 α 之间关系为

$$x = \frac{\lambda}{2\alpha} \text{ 或 } \alpha = \frac{\lambda}{2\Delta x}$$

如果波长 λ 已知, 测出 x , 就可从上式求出 α 角。利用这种方法测出的小的角度可达 $1'$ 的数量级。

如果测量两块平板间的夹角, 但不知劈形空气膜哪边薄哪边厚, 即不知顶角在哪边, 这时可以轻轻按一下平板的左边或右边, 看看条纹变疏还是变密, 即 x 是变大还是变小, 就可知夹角 α 是变大还是变小, 从而可以判断夹角的顶角在哪边。

测量长度的微小变化 (measurement of a small change of length)

根据干涉条纹的移动可以测出长度的微小变化。例如, 利用迈克耳孙干涉仪, 使 M_1 和 M'_2 (即 M_2 在半镀银镜 P_1 中的虚像, 参见图 1-22-31) 之间有一小的夹角, 这时从望远镜 T 中可看到平行且等距的等厚干涉条纹。然后调节 M_1 镜, M_1 镜每移动 $\lambda / 2$ 的距离, 在视场中就移过一条条纹, 因此数出移过条纹的数目 N , 即可知道镜子 M_1 移动的距离 l ($l = N \lambda / 2$)。现代的干涉测长仪中采用光电自动计数技术, 能准确地读出 N 的数值, 使长度的测量可达到 $10^{-2}\mu\text{m}$ 的精度。

图 1-22-30 干涉热胀仪

图 1-22-30 是利用上述原理制成的干涉热胀仪。它的主要部分是一个熔融水晶制成的环 R , 它的热膨胀率很小, 并已精确测定。环上放有一块光学平玻璃板 P , 环中放待测样品 M , 它的上表面已磨平, 与 P 的下表面间

形成一个尖劈形的空气薄层。用单色的平行光从上面垂直照射时，可看到等厚干涉条纹。给热胀仪加热，由于样品和水晶环的膨胀率不同，空气层的厚度发生微小变化 Δl ，干涉条纹将发生移动，设移过的条纹数是 N ，则 $\Delta l = N \lambda / 2$ 。读出 N ，求出 Δl ，就可以计算出样品的膨胀率。

由于其他原因，如压力或张力引起物体长度的微小变化，也可用类似的干涉方法测出来。

迈克耳孙干涉仪 (Michelsoninterferometer)

迈克耳孙于 1881 年设计的两束光的干涉仪。构造如图 1-22-31 所示。从光源 S 发

图 1-22-31 迈克耳孙干涉仪

出的光到达半镀银镜 P_1 后，分成强度大致相等的两束光，一束被反射，沿 OM_1 方向前进；另一束光透过 P_1 ，沿 OM_2 方向前进。这两束光是从同一光源产生的，因此是相干光。 M_1 、 M_2 是两块平面镜，互相垂直。其中 M_2 是固定的， M_1 可精密地前后移动。从 M_1 、 M_2 反射回的光到达 P_1 后，又有一部分透过，一部分反射，于是沿 OT 方向射出两束光，这两束光好像是从 M_1 和 M_2 在 P_1 中的虚像 M'_2 处发出的，从望远镜 T 可以看到这两束光的干涉条纹。玻璃板 P_2 是补偿板，它的厚度和折射率与 P_1 完全相同，是供补偿光程用的：反射光束 1 是从 P_1 的后表面发生反射的，这束光前后共通过 P_1 三次，而透射光束 2 只通过 P_1 一次；放入 P_2 后，透射光束往返通过 P_2 两次，从而使两光束在玻璃介质中的光程完全相等。

迈克耳孙最初是为了研究光速问题而设计上述干涉仪的。这种干涉仪把两相干光束分开，并使光束 1 和光束 2 的传播方向互相垂直，这就便于研究地球的运动速度对光速的影响。迈克耳孙于 1881 年做了这种实验，1887 年他与莫雷合作，做了更精密的实验。这些实验的否定结果为相对论的建立打下了基础。

迈克耳孙干涉仪可用来观察许多干涉现象，如等厚干涉条纹、等倾干涉条纹，并能用来进行各种精密测量以及研究光谱线的精细结构等。1893 年迈克耳孙首先用光的波长测定了国际标准米的长度，他测出了镉红线的波长 $\lambda = 6438.4722 \text{ \AA}$ ($1 \text{ \AA} = 10^{-10} \text{ m}$)，即 $1 \text{ m} = 1553163.5 \lambda$ 。这就把长度的标准建立在一个永久不变的基础上。

光的衍射 (diffractionoflight)

光遇到障碍物后偏离直线传播规律，进入几何光学阴影区的现象。光的衍射现象是光的波动性的一个证据。

光的衍射现象是意大利学者格里马尔迪 (F.M.Grimaldi, 1618 ~ 1663) 发现的。他在 1665 年出版的《关于光、色和虹的物理数学研究》一书中，描述了他对光的衍射进行的研究。法国物理学家菲涅耳于 1815 年首先做了光的衍射实验，他把铁丝放在从狭缝射出的光束中，观察到铁丝的影子中产生了衍射条纹，并发表了《光的衍射》的论文。菲涅耳把惠更斯的理论和干涉原理结合起来，建立了波动理论的基础，提供了衍射的完整理论，

并根据波动理论解释了光的直进现象。光的衍射现象通常不容易观察到，因为光波的波长很短，普通光源是发光面较大的非相干光源。如果用较强的点光源（如碳弧灯）照射小孔、狭缝或细丝，就会在适当距离的光屏上看到清晰的衍射现象。用氦氖激光器做光源，不用暗室，也可以看到清晰的衍射现象。理论证明，单缝衍射中央亮条纹的半角宽度（相当于光强度为第一最小值的点所对应的衍射角，参见“夫琅禾费单缝衍射”）与缝的宽度 a 成反比：

$$\theta \approx \lambda / a$$

式中的 λ 是光波的波长。因此，缝或其他障碍物的宽度远大于波长（ 10^3 以上）时，衍射效应不明显，近似于直线传播。缝变窄（约为 $10 \sim 100 \lambda$ ）后，衍射现象才明显，缝的宽度可以与波长相比拟时（与 λ 同数量级），衍射现象十分明显，衍射范围可以达到全部视野。利用衍射现象可以得到衍射光谱和精确地测定光波的波长（参见“衍射光栅”）。

惠更斯-菲涅耳原理 (Huygens-Fresnel principle)

说明波动现象中波阵面在介质中传播规律的基本原理。最初由惠更斯于 1678 年提出，叫做惠更斯原理。后来菲涅耳在 1815 年对惠更斯原理加以发展，引入波的干涉作用，修改后的原理一般叫做惠更斯-菲涅耳原理。它的主要内容是：波面上的任意一点都可以看作是发出次级子波的波源，这些子波与波面上其他点发出的次级子波互相叠加发生干涉效应；波面发出的波传播到空间某一点时，该点的波的强度决定于整个波面所有各点发出的次级子波在该点相互干涉的总效应。根据惠更斯-菲涅耳原理可以计算出波面发出的光在空间某一点产生的光强，因而能解释衍射现象中出现的明暗条纹，并能解释光的直进现象。这个原理为光的波动理论的确立奠定了基础。

菲涅耳衍射和夫琅禾费衍射 (Fresnel diffraction and Fraunhofer diffraction)

光的衍射的两种基本类型。光源和观察衍射图样的屏，或两者之一距产生衍射现象的物体为有限远时的衍射，叫做菲涅耳衍射；光源和屏距产生衍射现象的物体均为无限远时的衍射，叫做夫琅禾费衍射。夫琅禾费衍射是菲涅耳衍射的一种特殊情况，因夫琅禾费 (Joseph von Fraunhofer, 1787 ~ 1826, 德国物理学家) 最先研究这种衍射而得名。观察菲涅耳衍射最简单，只需要一个小光源、一个衍射障碍物和一个观察衍射图样用的屏，如图 1-22-32 甲所示。

图 1-22-32 菲涅耳衍射 (甲) 和夫琅禾费衍射 (乙)

观察夫琅禾费衍射，可以在小光源的后面适当距离处放一凸透镜，使通过透镜的光变成平行光再射到衍射障碍物上，如图 1-22-32 乙所示。这样就相当于光源从无限远处射来平行光。在衍射障碍物后也可以放一凸透镜，使平行光经过这个透镜后会聚到光屏上，相当于不用透镜时光屏位于无限远处。由于加了透镜，不仅缩短了实验装置的距离，而且增强了衍射

图样的亮度，便于观察。

菲涅耳圆孔衍射 (Fresnel circular hole diffraction)

点光源发出的光通过圆孔后在有限距离处产生的衍射现象。如图 1-22-33 所示，S

图 1-22-33

是点光源，CC 是不透光屏上的小圆孔，图 1-22-34 甲和乙是孔后不同距离处产生的两种衍射图样，一个中心是亮点，另一个中心是暗点。为了说明衍射图样中出现明暗条纹的原因，下面先分析图 1-22-33 中轴线 SS 上任意一点 P 处的光强。根据惠更斯-菲涅耳原理，P 点处的光强是由光的波面 CC 上各点发出的光在 P 点叠加产生的，为了便于分析，可以采取半波带法：从 P 点向波面 CC 引直线 PB_0 、 PB_1 、 PB_2 …… PB_k ，其中 PB_0 沿着轴线 SS，是从波面中点引向 P 点的法线， PB_1 、 PB_2 的长度逐次增加光波波长的一半，即 $PB_1 - PB_0 = PB_2 - PB_1 = PB_3 - PB_2 = \dots = PB_k -$

$PB_{k-1} = \frac{1}{2}$ 。然后令这些直线绕轴线 SS 旋转，于是就把波面 CC 分割成许多环带。在这些环带中，从相邻环带的两相应点到 P 点的光程差是半波长，相位差是 π ，即相邻环带在 P 点产生的振动方向相反，一为正，另一则为负。这种环带叫做菲涅耳半波带。从理论上可以证明，这些半波带的面积均相同。因此，各半波带在 P 点产生振动的振幅不同，只是因为各环带到 P 点的距离不同和各带法线对 P 点连线的倾角 θ_k 不同。随着

图 1-22-34

k 增加，距离 r_k 和倾角 θ_k 也增大，因而各环带在 P 点所产生的振动的振幅随号码 k 的增大而减小。如果用 a_1 、 a_2 、 a_3 …… a_k 分别表示第一、第二、第三……第 k 半波带在 P 点产生的振幅，则

$$a_1 > a_2 > a_3 > \dots > a_k \quad (1)$$

可以近似地认为中间的半波带产生的振幅等于前后两相邻半波带产生的振幅之和的一半，即

$$a_2 = \frac{a_1 + a_3}{2}, a_4 = \frac{a_3 + a_5}{2}, \dots \quad (2)$$

设 A_k 为 k 个半波带在 P 点产生的合振幅，考虑到相邻半波带产生的振动的相位相反，则

$$A_k = a_1 - a_2 + a_3 - a_4 + \dots \pm a_k \quad (3)$$

上式末项 a_k 的正负号取决于 k 是奇数还是偶数，奇数为正，偶数为负，考虑到(2)式，把上式改写为

$$A_k = \frac{a_1}{2} + \left(\frac{a_1}{2} - a_2 + \frac{a_3}{2} \right) + \left(\frac{a_3}{2} - a_4 + \frac{a_5}{2} \right) + \dots + \left(\frac{a_{k-2}}{2} - a_{k-1} + \frac{a_k}{2} \right) + \frac{a_k}{2},$$

由于括号中的量等于零，所以

$$A_k = \frac{a_1}{2} + \frac{a_k}{2} \quad (4)$$

这是 k 为奇数的情形。如 k 为偶数，类似地可以证明

$$A_k = \frac{a_1}{2} - \frac{a_k}{2} \quad (5)$$

或合起来写成

$$A_k = \frac{a_1}{2} \pm \frac{a_k}{2} \quad (6)$$

可见， P 点的振幅与半波带的数目 k 有关，当 k 为奇数时，振幅较大，光强较强（光强与振幅的平方成正比），当 k 为偶数时，振幅较小，光强较弱。当光源和圆孔的位置确定后， k 的数目与 P 点的位置有关， P 点向远移， k 的数目逐步增大，那里的光强随 k 的变化而变化，所以有时较强，有时较弱。在垂直于轴线 SS 方向上，各点的光强也可以用菲涅耳半波带来分析，同样是有些地方较强，有些地方较弱。光强的分布对于轴线 SS 是对称的，所以在 P 点的周围出现的是明暗交替的圆环。图 1-22-34 甲、乙是两幅衍射图样，是在不同位置上观察到的，所以一幅的中心是亮点，另一幅的中心是暗点。

如果圆孔比较大，半波带的数目 k 很大，则第 k 个半波带在轴线上的 P 点产生的振幅 a_k 很小，可以忽略不计。在这种情况下，从式(6)可以看出，通过孔的光波在轴线上产生的振幅 $A_k = \frac{a_1}{2}$ ，与 k 无关。即轴线上各点的光强相同，不再出现强弱变化，与几何光学的结论一致。

菲涅耳圆盘衍射 (Fresnel circular disk dif-fraction)

点光源发出的光通过圆盘后在有限距离处产生的衍射现象。参看图 1-22-35，设 S 为

图 1-22-35

点光源， D 为不透光的圆盘， P 为光屏 M 上一点，位于点光源和圆盘中点连线的延长线上。参看菲涅耳圆孔衍射，仍采用菲涅耳半波带理论分析。设圆盘遮住了光源 S 发出的波阵面中的前 k 个半波带，于是从第 $k+1$ 个带开始。所有其余的带所发出的子波都能到达 P 点。这些子波叠加后，在 P 点产生的合振幅等于

$$A = \frac{a_{k+1} + 1}{2}。$$

式中的 a_{k+1} 是第 $k+1$ 个半波带发出的光在 P 点产生的振幅。这表明，不论

圆盘的大小和位置如何，在圆盘几何影子的中心处总有光照到，那里永远是一个亮点。但圆盘越大，遮住的半波带越多， k 越大， a_{k+1} 越小，亮点的强度越弱。当圆盘相当大时， $a_{k+1} \rightarrow 0$ ，圆盘的阴影中心就看不到亮点了，这种结果与几何光学的结论一致。

圆盘阴影中心会出现亮点，是支持光的微粒说的泊松在 1818 年审查菲涅耳提交给巴黎科学院的论文时，当作菲涅耳论点的谬误，首先根据理论分析的结果指出来的。后来阿拉果及菲涅耳本人均用实验证明小圆盘阴影中心确实存在亮点。这是光的波动说取得胜利的一个重要证据。图 1-22-36 是圆盘衍射图样的照片。

图 1-22-36 圆盘衍射

从圆盘衍射的理论分析和实验中可以看出，圆盘有使点光源成实像的作用。如果制作一种圆盘，只让奇数的半波带透光或只让偶数的半波带透光，那么透过圆盘的光在轴线某一点所产生的合振幅则为

$$A = a_1 + a_3 + a_5 + a_7 + \dots$$

或

$$A = - (a_2 + a_4 + a_6 + \dots)$$

即光强都可以得到加强，而产生相当强的亮斑。这种圆盘叫做菲涅耳半波带片，简称波带片（图 1-22-37）。

波带片与普通透镜相比，它的优点是没有球差和彗差等像差，而且容易制成大面积的，并且轻便、可折叠。特别适用于远程光通信、测距及宇航技术中。由于波带片容易透过各种射线，给微波、红外线、紫外线及 X 射线的成像提供了新的方法，并在全息照相术等技术中有重要应用。

菲涅耳直边衍射 (Fresnel straight edged diffraction)

光波通过具有直边的障碍物在有限距离处产生的衍射现象。如图 1-22-38 所示，假

图 1-22-38 直边衍射

设 S 是与障碍物直边平行的线光源（一段垂直于纸面的发光直灯丝）， D 是具有直边的不透光屏，其直边与纸面垂直， MM 是观察衍射现象的幕或光屏。按照几何光学，屏上 P 点以下应为阴影区， P 点以上应为有光照射的明亮区。实际上，靠近边界的阴影区内仍有相当强度的光，强度逐渐减小到零；靠近边界的明亮区域中有若干条明暗相间的条纹，这就是光通过直边后的衍射现象（图 1-22-39）。

图 1-22-39 直边衍射图样

直边衍射中光强度的分布规律，可以用波带法进行分析。图 1-22-38 中 CC 是线光源 S 的柱面波面，假设沿着直边方向把这个波面分割成许多个直条形波带，这些波带在观察点 P 产生的振幅互相叠加，就可以得到总振幅。图 1-22-40 中 a_1 代表对着 P 点的第

图 1-22-40 振幅矢量的叠加

一个波带在 P 点产生的振幅矢量； a_2 代表第二个波带产生的振幅矢量，第二个波带离 P 点稍远，它产生的振动相位落后一些，因此矢量方向与 a_1 相差一个小的角度，并稍微短些；同样， a_3 、 a_4 代表第三、第四个波带在 P 点产生的振幅矢量，等等。大量的振幅矢量相接，将形成一条螺线，终端趋近于 Z。AZ 代表合振幅矢量，它的长度表示合振幅的大小。如果去掉障碍物，原来被遮住的波带对 P 点的作用也可以用类似的矢量叠加方法来研究，振幅矢量连接成的曲线在第三象限，形状与上半支相似。如果每条波带的面积为无限小，则得到的曲线为一条光滑的螺线（图 1-22-41）。这条螺线叫做考纽螺线。

图 1-22-41 考纽螺线

下面利用考纽螺线来分析 P 点上方（明亮区域）和 P 点下方（阴影区域）光强度的分布规律。

在 P 点上方，例如 P 点（图 1-22-38），与 P 点相比，相当于 a_1 波带的下方又露出几个波带，于是振幅矢量的起点 A 将沿螺线向下移动，假定移到 M 点（图 1-22-42），则 MZ 就是在 P 点的合振幅。P 点离 P 点越远，M 点沿螺线移动越接近 Z 点。在这个过程中，合振幅矢量的长度有时长、有时短，即表示 P 点上方各点的光强度按一定规律发生强弱变

图 1-22-42

化，但光强度不为零。当 P 点离 P 点足够远时，合振幅矢量为 ZZ，这以后光强度不再变化，与光波未受障碍物阻挡时相同。在 P 点下方，例如 P 点（图 1-22-3-38），与 P 点相比，相当于 a_1 波带的上方又有几个波带被遮挡，于是振幅矢量的起点 A 将沿螺线向上移动，假定移到 M 点（图 1-22-42），则 MZ 就是在 P 的合振幅。P 点离 P 点越远，M 点沿螺线移动越接近 Z 点。在这个过程中合振幅矢量的长度越来越小，即光强度越来越弱。当 P 点离 P 点足够远时，合振幅矢量趋于零，即光强度实际上可以看作等于零，这以后光强度不再变化，与几何光学的阴影区相同。图 1-22-43 是光强度曲线，它与图 1-22-39 照片中的光强度分布规律是一致的。

图 1-22-43 直边衍射光强度分布曲线

夫琅禾费单缝衍射 (Fraunhofer single slit diffraction)

光源和观察衍射现象的屏离单缝均为无限远或相当于无限远的衍射。这种衍射现象是夫琅禾费首先在 1821 ~ 1822 年研究的，故称为夫琅禾费单缝衍射。

实验方法如图 1-22-44 所示。S 是缝光源或一段直灯丝，D 是中间有一狭缝的屏，缝与线光源平行， L_1 、 L_2 是凸透镜，M 是观察衍射现象的光屏。产生的衍射图样是一组平行于狭缝的明暗相间的条纹，中央条纹最亮，

并且最宽。

图 1-22-44 夫琅禾费单缝衍射示意图

透镜 L_1 的作用是把光源的光变为平行光，相当于光源位于无限远处，透镜 L_2 的作用是把平行光会聚到光屏上，相当于光屏位于无限远处。在这种条件下，光屏上光强的分布规律可以用数学方法计算出来。

如图 1-22-45 所示，AB 表示放大的狭缝，O 点是狭缝的中点。设缝的宽度为 a ，即 $AB=a$ ，屏上 P 点的光强是通过缝的光在与狭缝法线成 θ 角方向上衍射光的强度，它

图 1-22-45

等于从缝发出的各个子波在该方向叠加后产生的总作用。把缝分为许多窄条，每一窄条一波面元的宽度为 dx ，位于中心 O 点的波面元 dx 在 P 点产生的光振动可用下面的方程表示：

$$dy_0 = A_0 \sin 2\pi \left(\frac{t}{T} - \frac{r_0}{\lambda} \right) dx,$$

式中 λ 是光波的波长， r_0 是 O 点到 P 点的光程。同样，AB 中任一点 Q 处的波面元 dx 在 P 点产生的光振动可表示为：

$$dy_Q = A_0 \sin 2\pi \left(\frac{t}{T} - \frac{r_0 - \delta}{\lambda} \right) dx,$$

式中的 δ 是 Q 点和 O 点到 P 点的光程差， $\delta = x \sin \theta$ ， x 是 O 点到 Q 点的距离。把此值代入上式，并把所有波面元在 P 点的作用加起来，即得 P 点的振动：

$$\begin{aligned} & y \int_{-\frac{a}{2}}^{\frac{a}{2}} A_0 \sin 2\pi \left(\frac{t}{T} - \frac{r_0 - x \sin \theta}{\lambda} \right) dx \\ &= A_0 a \frac{\sin \frac{\pi a \sin \theta}{\lambda}}{\frac{\pi a \sin \theta}{\lambda}} \sin 2\pi \left(\frac{t}{T} - \frac{r_0}{\lambda} \right) \end{aligned}$$

令 $u = \frac{\pi a \sin \theta}{\lambda}$ ， $I_0 = (A_0 a)^2$ ，则光强度可表示为：

$$I = I_0 \frac{\sin^2 u}{u^2}。$$

对于衍射角 θ 相同 (u 相同) 的屏上各点，光强度 I 相同，因而屏上的衍射图样中，明暗条纹是平行于狭缝的直线。

在 $u=0$ ($\theta=0$) 处，光强度 $I=I_0$ ，正比于狭缝宽度 a 的平方 [$I_0 = (A_0 a)^2$]，是光强度最大处。

当 $u=k$ ($k=1, 2, 3, \dots$)，即 $a \sin \theta = k \lambda$ 时， $I=0$ ，是光强度最小处。在两相邻的极小值之间有一个次极大值，这些次极大值的位置可由理论求出，如图 1-22-46 所示。从图

图 1-22-46 夫琅禾费单缝衍射光强度分布

中可以看出，中央亮条纹的宽度是其他亮条纹宽度的二倍；暗条纹间的距离是相等的，但次极大值不在两相邻暗条纹的正中间，而是在稍稍靠近中央亮条纹的地方，如第一个次极大值在 $u=1.43$ 处，第二个次极大值在 $u=2.46$ 处。

中央亮条纹的角宽度的一半，等于光强度为第一极小值的点所对应的衍射角 θ_1 ，由于

$$\frac{\lambda}{a}$$

可见中央亮条纹的宽度与波长 λ 成正比，与狭缝宽度 a 成反比，即狭缝越窄，中央亮条纹的宽度越大。如果缝很宽， $\lambda/a \rightarrow 0$ 时， $\theta_1 \rightarrow 0$ ，即衍射现象可忽略不计，所得结果与几何光学的一致。

衍射光栅 (diffraction grating)

简称光栅，是利用衍射现象产生光谱用的一种装置。通常是在平面或球面上刻成许多平行的沟槽制成的，前一种叫做平面光栅，又分为透射光栅和反射光栅两种；后一种叫做凹面光栅，只作为反射光栅用。平面光栅需跟透镜组合起来应用，凹面光栅不需要透镜就可得到光谱，这是它的优点。世界上第一块光栅是夫琅禾费在 1819 年制成的。现在通常是在抛光的玻璃或金属坯子上用金刚石等刻刀刻出许多平行、等宽、等间隔的沟槽，作为光栅的原型，然后用合成树脂作成复制光栅。也可以用照相方法制作光栅。先在基坯表面上涂感光材料，再把它放在单色激光的双光束干涉场内进行曝光，经过显像处理，再在真空系统中镀上反射膜和保护膜即制成了光栅。这种光栅叫做全息光栅，它记录下的是间距相等的干涉条纹，比刻划的光栅更均匀整齐。

下面以透射光栅为例，说明光栅的作用原理。

如图 1-22-47 所示， S 是缝光源，位于透

图 1-22-47 光栅的作用

镜 L_1 的焦面处，通过 L_1 后变为平行光照射到光栅 G 上。光栅 G 有 N 条狭缝，狭缝的宽度为 a ，缝间不透光部分的宽度为 b 。透镜 L_2 把通过狭缝后沿着与光栅法线成 θ 角的衍射光线会聚到焦面上的 P 点。 P 点的光强度

$$I = I_0 \frac{\sin^2 u}{u^2} \frac{\sin^2 Nv}{\sin^2 v}$$

式中 $u = \frac{\pi a \sin \theta}{\lambda}$ ， $v = \frac{\pi(a+b) \sin \theta}{\lambda}$ 。第一个因数 $\frac{\sin^2 u}{u^2}$ 表示宽度为 a 的

单狭缝衍射的作用(参见“夫琅禾费单缝衍射”)，第二个因数 $\frac{\sin^2 Nv}{\sin^2 v}$ 表

示通过 N 个缝的光束的干涉作用。这两个因数中只要有一个为零，光强度 I 即为零。当 $v=k$ 时，产生干涉的极大值，对应的衍射角 θ 可由下式求出：

$$(a+b) \sin \theta = \pm k \lambda, \quad k=0, 1, 2, 3, \dots$$

上式叫做光栅方程式，式中的 $a+b$ ，即缝的宽度与缝间不透光部分的宽度之和，叫做光栅常数， k 叫做主极大的级数。

当 $v = k \lambda / (a + b)$ ，而 $k = N, 2N, 3N, \dots$ 时，光强度 $I = 0$ ，即当

$$(a + b) \sin \theta = \pm k \frac{\lambda}{N},$$

$$k = 1, 2, 3, \dots, N-1, N+1, \dots, 2N-1, 2N+1, \dots$$

时，光强度为零，在衍射角 θ 满足上式的位置处出现极小值。可以看出，在两个主极大之间有 $N-1$ 个极小值。而在两个极小值之间均有一个极大值，主极大值之外的极大值叫做次极大值，即在两个主极大值之间有 $N-2$ 个次极大值。这些次极大值的强度远小于主极大值的强度。所以，光栅的衍射图样是以夫琅禾费单缝衍射图样为包络线的一些窄细的亮线和其间由许多次极大形成的相当弱的背景组成的，如图 1-22-48 所示。

图 1-22-48 光栅衍射光强度分布图象

光栅的缝数 N 越大，主极大的宽度（即亮线的宽度）越窄。通常用主极大值的方向与其相邻的第一个极小值方向的夹角 $\Delta\theta$ 表示主极大的半宽度：

$$\Delta\theta = \frac{\lambda}{N(a + b) \cos \theta}$$

实用的光栅，缝数 N 很大，可达几十万条（每毫米内有上千条狭缝），所以主极大的宽度很窄。另外，主极大值（亮线）的位置与波长 λ 有关。除中央明条纹（ $k=0$ ）外，不同波长的同一级的主极大值的位置均不重合。所以，复色光通过光栅后，在中央明条纹的左右两侧，由短波到长波分散成光谱，这种光谱叫做衍射光谱。在白光的衍射光谱中，靠近中央白条纹的里侧是紫色，依次是蓝、绿、黄、橙等色，最外侧是红色，这种排列次序同棱镜光谱是相反的。在 θ 角不很大的情况下，不同波长的光在光栅光谱中离零级主极大位置的距离与波长成正比，即波长长一倍，这个距离也大一倍，因此光栅光谱是正比光谱或匀排光谱（棱镜光谱不是正比光谱）。

由于光栅能产生精细的光谱，常用在光谱仪中，用来分析光谱的组成和测定光波的波长。

干涉与衍射的区别和联系 (the difference and reference of interference and diffraction)

干涉是两列以上的波叠加时，由于各波的相位不同而使各点的合成波具有不同强度的现象。衍射是波在传播中绕到障碍物后面的现象。所以，干涉和衍射本来是两种不同的现象，是完全可以区别的。但是，波的衍射中，各子波互相叠加时也产生干涉现象，衍射现象中的强弱或明暗条纹就是干涉现象，而干涉现象中各波束的传播往往也有衍射现象，这就使干涉和衍射成为互相联系而不易区别的现象。一般说来，只有衍射现象可以忽视的两波束，例如符合几何光学传播规律的两光束，叠加时产生的干涉才是纯干涉现象。如果互相叠加的各光束本身的传播明显地超出了几何光学的范围，那么每一光束都存在衍射现象，而各光束之间又有干涉作用，这时的现象既有衍射又有干涉，两种现象就联系在一起了。例如在光栅的衍射中就有这种情形，表示光栅衍射光强度的公式中，第一个因数反映的是

单缝的衍射作用，第二个因数反映的是通过各缝光束的干涉作用。由于各缝非常窄，衍射现象十分显著，所以这种现象叫做光栅的衍射。如果缝比较宽，衍射现象是次要的或可以忽略，如杨氏的双缝实验，则叫做双缝干涉。

助视仪器的分辨本领 (resolving power of auxiliary sighted optical instruments)

望远镜、显微镜等助视光学仪器都是由透镜等光学元件组成的，由于光通过透镜等光学元件要产生衍射现象，任何光学仪器都不可能得到无限放大的完全清晰的像，而有一定的分辨本领。这个分辨本领一般可由瑞利判据来决定。

瑞利判据 无限远处一个点光源经圆孔衍射后形成的衍射花样，是在中央亮斑（也叫艾里斑）外面出现一些明暗交替的同心圆环，

图 1-22-50

光能的 84%集中在中央亮斑。中央亮斑的大小由第一暗环对应的衍射角决定（图 1-22-49）：

$$= \frac{0.61\lambda}{R}。$$

图 1-22-49 圆孔衍射的中央亮斑

式中 λ 是光波的波长， R 是圆孔的半径。如果无限远处有两个点光源，经圆孔衍射后，则形成两个衍射花样。当两个点光源离得较远时，可以毫不困难地判断这是两个点光源的像（图 1-22-50 甲）；当两个点光源离得较近时，两个衍射花样叠加，就难以区分了。瑞利 (J.W.S.Rayleigh, 1842 ~ 1919, 英国物理学家) 提出，能够区分两点的极限是，一个点的衍射图样的中央极大值与另一点的衍射图样的第一极小值重合，这时由两个衍射图样合成后的光强分布曲线仍有两个极大值（图 1-22-50 乙），两极大值之间的最小值约为极大值的 80%。大多数人的视觉仍能判断这是两个点的像。两点的距离再小就难以判断了（图 1-22-50 丙）。上述判据叫做瑞利判据。

眼睛的分辨本领 用眼睛观察远处物体时，视网膜上的像是物体各点发出的光经过瞳孔后产生的衍射图样。设瞳孔的直径是 d ，光在眼内的波长是 λ' ，则眼睛的最小分辨角（根据瑞利判据）是：

$$= \frac{1.22\lambda'}{d} = \frac{1.22\lambda}{nd}$$

式中的 λ 是光在真空中的波长， n 是眼内物质的折射率。对于远处物体上的两点，如果它们对眼睛的张角大于或等于上式的，则能够分辨，否则不能分辨。由于人眼的焦距很小（约 20mm），对于明视距离（眼前 250mm）处的物体，也可用上式估计其最小分辨角。白天，人眼瞳孔的直径约 2mm，对于绿光 $\lambda = 5.5 \times 10^{-4} \text{mm}$ 的最小分辨角为

$$= \frac{1.22\lambda}{nd} = \frac{1.22 \times 5.5 \times 10^{-4}}{1.33 \times 2} = 2.5 \times 10^{-4} \text{ (rad)}。$$

实验表明，人眼的最小分辨角约为 $1' (=2.9 \times 10^{-4} \text{rad})$ ，与上式的计算结果基本相符。

望远镜的分辨本领 设望远镜物镜的通光孔径的直径为 D ，它的最小分辨角为

$$= \frac{1.22\lambda}{D}。$$

由于望远镜的通光孔径 D 大于人眼的瞳孔 d ，所以用望远镜观察远处物体时，提高了对物体的分辨本领，提高的倍数等于 D/nd 。为了充分利用这个分辨本领，望远镜必须有足够的放大率。放大率不足 ($< D/nd$)，望远镜的分辨本领就得不到充分利用；放大率过大 ($> D/nd$)，并不能提高分辨本领，只是使像的形状放大得更大。

显微镜的分辨本领 显微镜是用来观察近处小物体的，显微镜的分辨本领，通常不用角度，而用刚好能分辨开的物体上两点的最小距离 y (图 1-22-51) 来表示：

$$y = \frac{0.61\lambda}{n \sin u}。$$

图 1-22-51

式中的 n 是物体所在空间的折射率 (对于油浸镜头为油的折射率，一般为空气的折射率)， λ 为光的波长， u 是物点对物镜张角的一半。其中 $n \sin u$ 的值叫做物镜的数值孔径，通常用 $N.A.$ 表示。显微镜物镜上一般都标出这个数值，如 $N.A. 0.1$ ，就表示它的数值孔径是 0.1。

从上式可以看出，波长 λ 越小，物镜的数值孔径越大，可分辨的两点间距离 y 越小，即它的分辨本领越大。为了增大数值孔径，应使物体尽量靠近物镜，张角接近 $\frac{\pi}{2}$ 时， $\sin u = 1$ ，如果 $n = 1$ (物体在空气中)，

数值孔径 $N.A.$ 就等于 1，这是最大值。如果用油浸物镜，油的折射率 $n=1.5$ ，则数值孔径可达 1.5，分辨本领也增大到 1.5 倍。

如果减小波长，例如使用紫外线，由于紫外线的波长 ($2 \times 10^{-4} \text{mm} \sim 2.5 \times 10^{-4} \text{mm}$) 比可见光的波长短一半，显微镜的分辨本领可增大两倍。但使用紫外线的显微镜不能直接用眼睛观察，可以进行照相。显微镜的分辨本领比眼睛的分辨本领约大 200 倍。显微镜的目镜只能把物镜所成的像进一步放大，但不能增大分辨本领。

偏振光 (polarized light)

相对于传播方向振动方式不对称，即在特殊方向以特殊方式振动的波。根据光波中电矢量 (通常用电矢量代表光矢量，光波中的磁矢量与电矢量垂直) 的振动方式，偏振光分为线偏振光 (或平面偏振光)、椭圆偏振光和圆偏振光三种。如果电矢量总是在通过传播方向的某一固定平面内振动，这种光就是平面偏振光；由于它的电矢量在垂直于传播方向的平面上的投影是一条直线，因此平面偏振光也叫做线偏振光。如果电矢量以传播方向为轴，随时间旋转，电矢量的末端在垂直于传播方向的平面上的投影是椭圆或圆，就叫做椭圆偏振光或圆偏振光。纵波相对于传播方向的振

动是对称的，只有横波的振动才是不对称的，所以，光的偏振现象表明光是横波。通常，在自然状态下每一发光原子发出的光，它的振动方向是确定的，即线偏振光。但每一原子一次发光持续的时间很短，约 10^{-8}s ；光源中含有大量发光原子，它们在同一时刻发出的光，振动方向、振幅、相位互不相同。因此，普通光源发出的光是由互不相干的大量的线偏振光组成的，这种光叫做自然光。就平均效果来看，自然光可以看作是由振幅相同、振动方向互相垂直、互不相干的两组线偏振光组成的，通常用图 1-22-52 所示的符号表示。箭头表示光的传播方向，箭杆

图 1-22-52

上短线表示振动方向在图面内，圆点表示振动方向与图面垂直。

在自然光和线偏振光之间，还有一种光，它虽然具有沿各个方向振动的光，但沿某一方向振动的光较强。这种光叫做部分偏振光。图 1-22-53 是部分偏振光的符号，其中甲图表示在图面内振动的光较强，乙图表示与图面垂直振动的光较强。

图 1-22-53

利用偏振片可以从自然光中得到偏振光（参见“偏振片”），并能检验偏振光。偏振光有许多应用，如立体电影、光测弹性、偏光显微镜以及利用偏振片制作可演示运动状态的投影幻灯片等。

反射光与折射光的偏振 (polarizing of reflected and refracted ray)

自然光可分解为振动方向互相垂直的两种光。自然光射到两种透明介质的分界面上发生反射和折射时，由于反射率和折射率与光的振动方向有关，反射光和折射光都将成为部分偏振光，在特殊情况下，反射光将是线偏振光。

用 E_p 表示平行于入射面的电矢量振动的振幅， E_{p1} 、 E_{p1} 、 E_{p2} 分别代表入射光、反射光和折射光的电矢量振动的振幅， i 表示入射角， r 表示折射角，则根据菲涅耳公式（参见“菲涅耳公式”），反射比

$$r_p = \frac{E'_{p1}}{E_{p1}} = \frac{\tan(i-r)}{\tan(i+r)}, \quad (1)$$

透射比

$$t_p = \frac{E_{p2}}{E_{p1}} = \frac{2\sin r \cos i}{\sin(i+r)\cos(i-r)} \quad (2)$$

用 E_s 表示垂直于入射面的电矢量振动的振幅， E_{s1} 、 E_{s2} 、 E_{s2} 分别代表入射光、反射光和折射光的电矢量振动的振幅，则反射比

$$r_s = \frac{E'_{s1}}{E_{s1}} = -\frac{\sin(i-r)}{\sin(i+r)} \quad (3)$$

透射比

$$t_s = \frac{E_{s2}}{E_{s1}} = \frac{2\sin r \cos i}{\sin(i+r)} \quad (4)$$

由(1)式可知, 当

$$i + r = \frac{\pi}{2}$$

时, $E_{p1}/E_{p1}=0$ 。这表示反射光中没有平行于入射面的电矢量, 即反射光成为垂直于入射面的线偏振光。所以这是利用反射从自然光得到偏振光的一种方法。这时的入射角 i 叫做偏化角, 通常用 i_p 表示。

$$\begin{aligned} \text{由于 } i_p + r = \frac{\pi}{2}, n_1 \sin i_p &= n_2 \sin r, \sin r \\ &= \cos i_p, \text{ 所以} \end{aligned}$$

$$\tan i_p = \frac{n_2}{n_1}, i_p = \arctan \frac{n_2}{n_1}。 \quad (5)$$

这个公式所表示的规律叫做布儒斯特定律, i_p 又叫布儒斯特角。

图 1-22-54 反射光的偏振

反射引起偏振的现象是法国物理学家马吕斯 (Malus, Etienne Louis, 1775 ~ 1812) 在 1808 年发现的。反射起偏的规律, 即布儒斯特定律, 是英国物理学家布儒斯特 (Brewster, D. B. 1781 ~ 1868) 在 1812 年发现的。这个规律可用实验验证。

仪器结构如图 1-22-54 所示。主要部分是装在支架上的两块平面镜 M_1 和 M_2 , 自然光射到 M_1 上发生反射后, 变成部分偏振光, 再射到反射镜 M_2 上, 沿 BC 方向射出。以 AB 为轴, 旋转 M_2 , 可以发现, 当 M_1 、 M_2 平行 (图 1-22-54 乙) 时, 从 M_2 射出的光最强; 当 M_2 与 M_1 的入射面垂直时, 从 M_2 射出的光最弱。如果使自然光以布儒斯特角入射, 从 M_1 沿 AB 方向射出的是振动面垂直于入射面的线偏振光, 当 M_2 的入射面与 M_1 的入射面垂直时, 从 M_2 反射的光的强度则为零, 即没有反射光 (图 1-22-54 丙)。

自然光射到两种透明介质分界面上产生反射和折射, 当入射角等于布儒斯特角 i_p 时, 反射光中没有平行于入射面的光, 即这种光完全进入第二种介质成为折射光, 所以, 利用多次折射 (例如把许多片玻璃片叠成玻璃片堆) 可以使折射光成为振动面平行于入射面的较完全的线偏振光。

双折射 (birefringence)

在各向异性的介质中一束入射光产生两束折射光的现象。许多晶体都会产生双折射现象, 只有立方系晶体 (如岩盐晶体) 不产生双折射现象。

在双折射现象中, 有一束折射光总是在入射面内, 并且入射角的正弦和折射角的正弦之比等于晶体对该种光的折射率, 即符合折射定律, 这束光叫做寻常光, 简称 o 光; 另一束折射光一般不在入射面内, 并且入射角的正弦和折射角的正弦之比不是常数, 随入射角而变, 即不符合折射定律, 这束光叫做非常光, 简称 e 光。o 光和 e 光都是线偏振光。在晶体中有一个特殊方向, 沿着这个方向入射的光不发生双折射, 这个方向叫做晶体的光轴。例如, 在方解石中, 通过三个钝角面相交的顶点并和三个面成等角的一条直线 (图 1-22-55 中的 AB) 所指的方向, 就是方解石的光轴。需要注意的是, 光轴不是一条直线, 而是一个方向, 因此在图 1-22-55 中与 AB

线平行的其他直线所指的方向也是它的光轴。方解石、石英、冰等晶体中只有一个光轴，叫做单轴晶体。云母、硫黄、黄玉等晶体中有两个光轴，叫做双轴晶体。包含晶体光

图 1-22-55

轴和晶体中入射光线的平面，叫做晶体的主截面。对于不同的入射光线，晶体的主截面也不同。

o 光和 e 光的不同，是因为它们的振动方向不同。o 光的电矢量的振动方向垂直于自己的主截面，e 光的电矢量的振动方向在自己的主截面内。当晶体的光轴在入射面内时，o 光和 e 光的主截面重合，两光的振动方向互相垂直。在一般情况下，o 光的主截面与 e 光的主截面有一不大的夹角，两光的振动方向不完全垂直。

对于双折射现象的解释，首先是惠更斯在 1690 年出版的《论光》中提出的。他认为在晶体中 o 光的波面是球面，e 光的波面是旋转椭球面。这与现代的观点是一致的。按照现代的光的电磁理论，自然光进入各向异性的晶体后，分解为电矢量的振动方向与主截面垂直的光和在主截面内振动的光，前一种光的振动方向总是跟光轴垂直，向各个方向传播的速度大小相同，因此波面是球面，这种光就是 o 光；后一种光的振动方向在主截面内，跟光轴的夹角随光的传播方向而异，传播速度的大小也随传播方向而不同，因此波面是旋转椭球面，这种光就是 e 光。图 1-22-56 表示一束自然光进入各向异性晶体后产生两束折射光的情形，ZZ 表示晶体的光轴，

图 1-22-56

o 光和 e 光的两个波面在光轴方向相切。图 1-22-57 是透过方解石晶体看物体呈现两个像的情形。

图 1-22-57 方解石的双折射

利用双折射可以制成产生偏振光的仪器（参见“尼科耳棱镜”）。

尼科耳棱镜 (Nicolprism)

英国物理学家尼科耳 (William Nicol, 1768 ~ 1851) 在 1828 年设计制作的偏振光棱镜，简称尼科耳。它的构造如图 1-22-58 所示。取一块长度约为宽度 3 倍的方解石，

图 1-22-58 尼科耳棱镜

把两端面磨去一部分，使主截面上的角由 71° 变为 68° 。然后把晶体沿垂直于端面和主截面的方向（即沿图中的 A C 线）切成两块，并把切面磨成光学平面，再用加拿大树胶粘合在一起，就成了尼科耳棱镜，它的端面为菱形，如图右侧的侧视图所示。

自然光沿着平行于长边棱 A D 的方向射入棱镜，分解为 o 光和 e 光。方解石对 o 光的折射率较大，对 e 光的折射率较小，而加拿大树胶的折射

率介于二者之间（例如，对于钠黄光，加拿大树胶的折射率是 1.550，方解石对 o 光的折射率 $n_o=1.658$ ，对 e 光的主折射率 $n_e=1.486$ ），所以，o 光射到树胶层时，是从光密介质射到光疏介质，入射角约为 76° ，大于临界角（ $i_{\text{临}} = \arcsin \frac{1.550}{1.658} \approx 70^\circ$ ），发生全反射，而被棱镜周围涂黑的物质

吸收；e 光射到树胶层时，是从光疏介质射到光密介质，不发生全反射，可以从棱镜中穿出。于是，从棱镜底面射出的是线偏振光，它的振动方向平行于底面菱形的短对角线，如图 1-22-58 右图中的箭头所示。

用尼科耳棱镜可从自然光得到偏振光，因此可做起偏器用。偏振光射到尼科耳棱镜的端面上时，只有电矢量的振动方向在主截面内时，透过的光才最强（ $I=I_0$ ）；旋转尼科耳，入射光的振动方向与主截面的夹角逐渐增大，透过的光就逐渐减弱（ $I=I_0\cos^2\theta$ ）；当夹角 $\theta = \frac{\pi}{2}$ 时，透过的光强为零。因此，尼科耳棱镜也可做检偏器用。

偏振片 (polaroid)

能使入射的自然光透过后变成线偏振光的薄片。最初是用电气石（一种矿物，主要成分是硼铝硅酸盐）做的。自然光通过电气石薄片时，在 1mm 厚度内，寻常光几乎全被吸收，透过的只是非常光（线偏振光）。这种对于振动方向不同的光（寻常光和非常光）具有不同吸收本领的特性，叫做二向色性。

用天然产的电气石切出的薄片都比较小，而且价格贵。现在多用人造偏振片。制作方法是，把某些晶体微粒，如碘化硫酸奎宁，沉积在聚氯乙烯或其他塑料膜中，然后沿一定方向拉塑料膜，使晶体按拉伸方向排列整齐，薄膜就显示出二向色性，吸收 o 光，使 e 光透过。这种方法是美国哈佛大学的 19 岁学生兰德（E. H. Land）在 1928 年发明的。1938 年他又发明一种更简便的方法，把聚乙烯醇加热，沿一定方向拉伸，使聚合物分子在拉伸方向排列成长链，然后使薄膜在含碘溶液中浸过，碘附着在长链上，使薄膜也具有二向色性。人造偏振片的制造工艺简单，价格便宜，并且可制成较大面积的，因此得到了广泛的应用。观看立体电影的偏振光眼镜、能显示运动状态的抽拉式幻灯片、以及给水下或展览橱窗中物体照相时用的偏光滤光片，都是用人造偏振片制作的。偏光显微镜、量糖计以及其他装置中的起偏器、检偏器，也要用偏振片。

虹霓的偏振 (polarizing of rainbow)

虹和霓是太阳光在雨珠中经折射和反射后形成的（参见“虹和霓”）。由于反射光和折射光都是部分偏振光，所以虹和霓的光也是偏振光，并且

偏振度很高。偏振度 $p = \frac{I_s - I_p}{I_s + I_p}$ ，式中 I_s 表示电矢量垂直于入射面的光强度，

I_p 表示电矢量平行于入射面的光强度。根据菲涅耳公式可以算出偏振度，用尼科耳或偏振片也可以检查出虹霓的光是偏振光。虹的偏振度在 90% 以上，霓的偏振度在 80% 以上。偏振光的振动方向与虹霓的圆弧切线方向平行。虹霓的偏振是法国物理学家毕奥（Jean Baptiste Biot, 1774 ~ 1862）

在 1811 年首先发现的。

立体电影 (stereomovie)

立体电影起源于 19 世纪的实体镜。实体镜是让人用两眼分别观看两张略有差别的图片或照片，产生立体感，仿佛看到真实景物一样。1880 年，威廉·弗里斯·格林把实体镜的原理应用于银幕上，用来产生成对的影像。20 世纪初，法国卢米埃尔兄弟和丘·波特等人拍摄了实验性质的立体电影短片《未来的电影》，是第一部立体电影片。

1932 年，美国发明家埃德温 H·兰德发明了偏振光镜。1936 年和 1937 年意大利和德国先后摄制成第一部用偏振光镜的立体故事片《乞丐的婚礼》和第一部彩色立体故事片《你可以触摸它》。这以后，偏光镜立体电影就逐渐流行起来。

偏光镜立体电影是利用偏振光原理，使左右两眼分别看到银幕上的两幅画面。原来，拍摄时用两部摄像机，两机镜头中心间的距离相当于一般人两眼间的瞳孔距离，因此从两个角度拍摄两套略有差异的影片。放映电影时也用两部电影机，在它们的镜头上分别装上偏光滤光镜，使透过滤光镜的偏振光的偏振方向互相垂直，放映出两套影像都呈现在银幕上。观众观看时，戴上偏振光眼镜，左眼镜的偏振方向跟左放映机前偏光滤光镜的偏振方向相同，右眼镜的偏振方向跟右放映机前偏光滤光镜的偏振方向相同，这样，左眼看到的是左放映机放映出的画面，右眼看到的是右放映机放映出的画面，于是就产生了立体感。

这种方法比较简单，得到了广泛的应用。我国的立体电影院也都采取偏光镜法。《魔术师的奇遇》、《快乐的动物园》等有趣的立体故事片就是采用这种方法放映的。

还有一种立体形象的摄影技术——全息摄影法，正在应用在电影中，可能成为未来理想的立体电影。

全息摄影是利用强度较大的激光拍摄的。拍摄时，先把激光束扩束，变为较宽的光束，然后把它分成两部分，一部分激光照到被摄物体上，从被摄物体表面反射回来后叫做物光光束，照到照相底片上；另一部分激光经反射镜反射后叫做参考光束，也照到底片上（图 1-22-59）。这两部分激光是相干光，在底片上叠加时产生干涉，曝光后形成一些干涉条纹。这些条纹中包含着被摄物体的全部信息——空间形状和颜色，所以叫做全息摄影。放映时，只要用相同的激光束照射底片，在空间就会呈现出跟被摄物体一样的立体像。非常有趣的是，观众从不同的角度可以看到不同的形象，头歪一下，就可以看到被前方物体挡住的后面的物体像，就像从不同角度观看实物一样，产生极其逼真的效果。

图 1-22-59 拍摄全息影片的原理示意图

双眼效应 (binoculareffect)

人的正常视觉是由双眼来完成的，双眼视觉能把空间的物体看成是立体的，能产生深度感、判断物体的远近和相互位置。这些作用，叫做双眼效应。

用双眼注视眼前一个平面物体时，像成在两眼视网膜中央的相应位置上，产生一个像的单一视觉。两眼视网膜上成像的这些对应点，叫做相应点。如果两眼中成像不在相应点时，就会看到两个像，产生复视现象。例如，用手指轻压一只眼的眼角时，看到的眼前物体的像就是双像，而不再融合为一个像。

用双眼注视眼前一个立体物体时，由于两眼视线的角度不同，左眼看到物体的左侧多些，右眼看到物体的右侧多些，两眼视网膜中的像不完全相同，也不完全落在视网膜的相应点上，因此两像不能完全融合，经过视神经传到大脑，就产生了有立体感的视觉。1838年英国物理学家惠斯通（C.Wheatstone）用实体镜证明双眼视差在立体感中的作用。从不同的角度拍摄同一物体的两张照片，拍摄时用两架照相机，两个镜头间的距离等于两眼瞳孔间的距离，约65mm，然后用左眼看左照相机拍的照片，右眼看右照相机拍的照片，虽然照片都是平面像，两眼同时看时却产生了立体感。

只用一只眼睛观察时，没有双眼视差，因此缺乏立体感，也不能精确地判别深度和远近。这时仍然有一些立体感，那是经验造成的印象。检查单眼视觉缺乏立体感是很容易的，例如闭上一只眼睛，两手各拿一支铅笔，两臂前伸，使两支铅笔的笔尖迅速地碰到一起，是相当困难的，往往是一支铅笔落在另一支铅笔的后面，判断不出两支铅笔的远近。如果用两只眼睛观察，要做到这一点就容易多了。

看近处物体，双眼视差大，立体感强；看远处物体，双眼视差小，立体感弱。距离超过1000m，双眼视差很小，就看不出远近了。远山看起来是平的，眼睛看不出星星的远近，就是这个缘故。

光的吸收 (absorption of light)

光在物质中传播时，光能被物质吸收的现象。一定波长的单色光在物质中传播时被吸收的光能的多少跟经过物质的厚度有关系。设一束平行的单色光，强度为 I_0 ，在物质中经过距离 d 时，强度变为 I ，从理论分析和实验知道 $I=I_0e^{-\alpha d}$ ，式中的 α 叫做物质对光的吸收系数。 α 的值可由实验测定，不同物质具有不同的 α 值，同一种物质对于不同频率的光， α 值也不同。上式叫做朗伯定律，是德国物理学家朗伯（Lambert, Johann Heinrich, 1728~1777）在1760年得出的。物质吸收光能，可使物质中的原子、分子激发，振动和转动能量增加，最后转化为内能，使温度升高。有时，其中的一部分能量又以光的形式放出，这就是荧光和磷光现象。

各种物质对光的吸收能力有很大差别。无色透明物质，是对可见光吸收很少的物质。例如，1cm厚的玻璃板对于通过它的可见光约只吸收1%。但玻璃对于紫外光和长波红外光的吸收却很显著。冕牌玻璃能透过的波长范围是350nm~2000nm，火石玻璃是380nm~2500nm，石英是180nm~4000nm，岩盐是175nm~14500nm。

不透明物质，是由于其中含有一些物质微粒对光起散射或反射作用，因而光不能透过。

金属不透明，是因为它有大量自由电子，光波的电场引起自由电子的运动，在表面形成微弱的振荡电流。光波的一部分能量变为内能；另外，电子的振荡又辐射出电磁波，向外传播形成反射光。金属表面的反射系数可高达90%。

稀薄原子气体只对某些频率的光有强烈吸收，可以形成吸收线光谱，吸收线的宽度约为百分之几纳米或几皮米。对于其他频率的光则不吸收。因此，这种吸收叫做选择吸收。吸收线的频率跟原子的能级有关（参见“玻尔的原子理论”）。对于稀薄气体分子，吸收光谱是由一些不同频率区域的许多组密集的吸收线组成的，这些吸收线跟分子中原子的振动能级及分子的转动能级有关。由于每一组的谱线很密，这种吸收线组通常叫做吸收带。光的吸收在科学技术中有广泛的应用。根据物质的吸收光谱可以分析物质的化学结构、研究原子的能级和半导体的能带结构等，而且具有很高的灵敏度。

光的散射 (scattering of light)

光通过不均匀介质时，一部分光向各个方向散开，因而能从侧面看到光的现象。例如，在清水中加几滴牛奶，用强光照射，除透射光，在其他方向也可以看到光，这些光就是散射光。这种散射是英国物理学家廷德尔 (John Tyndall, 1820 ~ 1893) 在 1869 年发现的，叫做廷德尔现象。1871 年，英国物理学家瑞利 (Rayleigh, 1842 ~ 1919) 假设物质中存在着远小于光波波长的微粒，从理论上导出了散射现象的规律。根据经典电磁理论，在光波的电场的作用下，物质中的原子或分子成为以光波频率振动的电偶极子，吸收光波的能量，并发出辐射。这种辐射就是散射光。光的散射、漫反射和反射都起源于光波引起的自由电荷或束缚电荷的受迫振动，同时发出辐射，它们的区别在于受光物体本身的情况不同。如果物体表面较大，又较平，做受迫振动的电荷发出的子波在某一方向上互相加强，看到的的就是反射光；如果物体表面不平（不平度远大于波长），子波互相加强的方向不一致，看到的就是漫反射；如果物体中的微粒小于光波的波长，微粒中电荷的振动相当于电偶极子的振动，发出的子波是球面波，产生的就是散射现象。电偶极子的振幅与电子振动的加速度成正比，设电子振动的位移 $x = x_0 \cos \omega t$ ，式中的 ω 表示圆频率，则加速度 $a = \ddot{x} = -x_0 \omega^2 \cos \omega t$ ，所以散射光的振幅与 ω^2 成正比，散射光的强度与 ω^4 成正比，写成公式即

$$I \propto \frac{1}{\lambda^4}。$$

瑞利在 1871 年得到的结果与上式一致，因此上式表示的规律叫做瑞利定律。这种散射光的频率与入射光的频率相同，但入射光的频率越大（波长越小），散射光越强。

在表面上看来是纯净的均匀介质中，也能看到散射光，虽然这种散射光很弱。产生这种散射的原因是由于分子的运动使介质中各部分的密度有小的起伏，破坏了介质的光学均匀性。这种散射也叫分子散射。分子散射的规律也符合瑞利定律。

如果散射粒子比较大，它的线度接近光波的波长或大于波长，散射现象就不符合瑞利定律了。1908 年德国物理学家米氏 (G. Mie, 1868 ~ 1957) 研究了大粒子的散射，发现粒子的线度较大时，散射光的强度几乎与波长无关。这种散射叫做米氏散射。这可以说明许多胶体悬浮液的散射现象，天空中的白云在阳光下呈白色也可由较大水滴的散射作用来说明。

1928年，喇曼（C. V. Raman, 1888~1970, 印度物理学家）在苯、甲苯、水及其他液体、一些气体和洁净的冰中发现，散射光中除了频率与入射光相同的部分，还有频率 $\nu = \nu_0 - \nu_m$ 的光（这种光谱线叫做斯托克斯线）和频率 $\nu = \nu_0 + \nu_m$ 的光（这种光谱线叫做反斯托克斯线），频率差 $\nu_m/2$ 等于分子中原子振动的频率（一般在红外波段）。这种散射叫做喇曼散射或并合散射。

散射光一般是部分偏振光。在垂直于入射光的方向，可以看到完全偏振光（线偏振光）。

光的散射现象在科学技术部门有广泛应用。对散射光进行测量，可以了解介质中散射粒子的浓度、大小、形状等。研究散射光谱可以确定物质中分子和原子的特性。近年来由于有了强光源——激光，使散射光的研究和应用有了进一步的发展。

天空的颜色 (colour of sky)

天空的颜色是变化的。在晴朗干燥的日子里，洁净的天空是蔚蓝色的。空气本来是无色透明的，这蔚蓝色是空气中的气体分子对阳光发生散射的结果。根据瑞利定律（参见“光的散射”），散射光的强度 $I \propto \frac{1}{\lambda^4}$ 。在太阳光中，红光的波长约为紫光的2倍，因此在散射光中，紫光的强度约为红光的16倍。由于波长短的蓝紫光散射的多，人们看到这些散射光，就感到天空是蔚蓝色的。

在多云和阴雨天气，大气中水汽较多，空中有许多悬浮的小水珠。由于小水珠的大小比光的波长大，各种波长的光差不多可以同样地被散射（参见“光的散射”中的米氏散射），又因散射光较暗，天空看起来就是灰白色的。至于蓝天中的白云，虽然也是较大的小水珠对阳光的散射造成的，但因晴天的阳光充足，白云的散射光较强，在蔚蓝色的天空衬托下，显得特别白，而不像阴天的云那样灰暗。

如果空气不清洁，充满烟尘，例如在没有采取除尘措施的大工厂区，由于空中烟尘颗粒比较大，也可以散射各种波长的光，透射的阳光较少，天空总是灰蒙蒙的，这是环境受到严重污染的标志。

如果空中没有大气，例如升到20000m以上的高空，或是在月球上观察，因为没有散射光，天空就是黑的了，白天也可以看到满天星斗，如同在夜间观察一样。

光的色散 (dispersion of light)

光通过物质时不同颜色的光互相分开的现象。在真空中，各种频率的光的传播速度相同，没有色散现象。在其他介质中，光的传播速度与光的频率有关；不同频率的光具有不同的传播速度，因而介质对于不同频率的光（即不同颜色的光）具有不同的折射率（ $n=c/v$ ，其中c是真空中光速，v是介质中的光速）。因此，不同的色光从真空进入某种介质时将向不同的方向偏折，于是就发生了色散现象。

光的色散现象，我国古代早就注意到了。例如，北宋初年的杨亿（974~1020）著的《杨文公说苑》中就记载了峨嵋山的“菩萨石”，说“日光射之，有五色”。对色散现象的科学研究，是从牛顿开始的。牛顿于1666

年用玻璃三棱镜研究了太阳光的色散现象，证明了白光是色光的混合体。

通常的光学材料，折射率随着光的频率增大（波长减小）而增大，如图 1-22-60 所示。这种条件下产生的色散，叫做正常色散。由于图线是曲线，而且波长较小处曲线上升较快，所以经由这些材料的折射所得到的光谱，蓝紫光部分展开得宽，红光部分展开得窄，谱线的分布不是均匀的。

根据色散图线，柯西（A.L.Cauchy，

图 1-22-60 色散图线

1789 ~ 1857，法国数学家）在 1836 年得到一个经验公式：

$$n = A + \frac{B}{\lambda^2} + \frac{C}{\lambda^4} \dots\dots$$

式中的 A、B、C 是常数，由实验测定。当波长的范围不大时，只取式中前两项就够了。上式叫做柯西公式，对于可见光透明的材料，有相当高的准确度。

1860 年，法国物理学家勒鲁（F.P.Le-Roux，1832 ~ 1907），在充满碘蒸气的棱镜中观察折射现象时，发现红光比紫光偏折大（红光和紫光之间的色光被碘蒸气吸收，未观察到）。勒鲁把这种现象叫做反常色散。其实，各种材料都有选择吸收特性（参见“光的吸收”），在吸收带的两侧均有反常色散现象。因此，反常色散也是物质的一种正常性质，叫做反常色散只具有历史意义。图 1-22-61 是石英吸收带两侧的色散曲线，石英的吸收带在红外区。

图 1-22-61 石英的色散曲线

1871 年，塞耳迈耶尔（W.Sellmeier）根据电磁波与物质相互作用的理论，得到了能表示正常色散和反常色散的方程：

$$n^2 = 1 + \frac{A\lambda^2}{\lambda^2 - \lambda_0^2}$$

式中的 λ_0 是物质吸收线或吸收带的波长，也就是对应于物质中微粒的固有振动频率的电磁波在真空中的波长。在远离吸收带的区域，这个方程能很好地反映正常色散的规律，在吸收带附近的区域也能近似地反映反常色散的规律（在 λ 无限接近 λ_0 时，方程无意义）。这个方程叫做塞耳迈耶尔方程。由于物质中分子的振动可能有几个固有频率 ν_0 、 ν_1 、 ν_2 ……相当于波长 λ_0 、 λ_1 、 λ_2 ……于是一般形式的塞耳迈耶尔方程可写成下面形式：

$$n^2 = 1 + \sum_i \frac{A_i \lambda^2}{\lambda^2 - \lambda_i^2}$$

塞耳迈耶尔方程的严重缺点是， λ 趋近 λ_i 时， n 趋向无限大，这是没有意义的。亥姆霍兹（H.L.F.Helmholtz）首先指出上述缺点是

因塞耳迈耶尔方程没有考虑光能量被吸收，实际上物质中分子做受迫振动时是有“阻尼”的，假设阻尼力的大小与振子的振动速度成正比，亥姆霍兹得到的色散方程是：

$$n^2 (1 - k^2) = 1 + \sum_i \frac{A_i \lambda^2}{(\lambda^2 - \lambda_i^2) + \frac{g_i \lambda^2}{(\lambda^2 - \lambda_i^2)}}$$

式中的 k 是一个与入射光在物质中的吸收系数有关的量， g_i 是与阻尼力有关的量。

色散现象的经典理论解释是，光波以速度 c 在物质中传播时，使电子做受迫振动，因此在原子或分子周围产生子波。这些子波的振幅和相位决定于受迫振动的振幅和相位，而受迫振动的振幅和相位又随入射波的频率和固有振动频率而变。子波与原光波叠加，合成波与原波有不同的振幅和相位，它的波速不同于原波速，受迫振动越强，速度差别越大，因而出现色散现象。入射光的频率接近固有频率时，受迫振动的振幅很大，子波很强，光波的速度与真空中光速有很大差别，折射率与 1 相差很多。在这种情况下，吸收也很大。这时出现的色散现象就是反常色散。

光谱 (spectrum)

复色光分解后按照波长顺序排列成的光带。广义的光谱，不限于可见光，包括一切波长的电磁辐射。

光谱可分为发射光谱、吸收光谱和散射光谱三类。

发射光谱是光源发出的光直接经分光仪器分解后形成的，按光谱特征可分为线状谱、带状谱和连续谱三种。线状谱是游离的原子发光产生的，也叫原子光谱，其中只有一些分立的亮线，亮线之间是黑暗的区域。每种原子都有自己的独特的线状谱，根据光谱线的位置可以测出光谱线的波长。氢原子光谱是最简单的原子光谱。氢原子光谱中最强的一条谱线是 1853 年由瑞典物理学家埃斯特朗 (Anders Jonas Ångström, 1814 ~ 1874) 探测出来的。由于他在光谱研究方面的贡献，后来曾以他的姓氏命名光波波长的单位，1 埃 (Å) 等于 10^{-10} 米。采用国际单位制后，才不使用埃这个长度单位了。带状谱主要是由分子发光产生的，也叫分子光谱，其中有一些亮带。实际上，每一个亮带都不是连续的，而是由许多相隔很近的亮线组成的。连续谱是由炽热的固体、液体或高压气体发光产生的，其中包括一切波长的光，各种色光的分布是连续的，中间没有暗线或暗区。

吸收光谱是一束具有连续波长的光通过物质时，某些波长的光被吸收后产生的光谱。这种光谱是以连续光谱为背景，其中有暗线、暗带或暗区。不同物质产生的吸收光谱不同。

散射光谱是由散射光产生的光谱。在散射光中，除了与入射光频率相同的部分，还有一些新频率的光，这种散射叫做喇曼散射 (参见“光的散射”)，这种散射光的光谱叫做喇曼光谱。

人类研究光谱已有一百多年的历史了。1666 年牛顿用棱镜得到太阳光谱，是对光谱最早的研究。太阳光谱是吸收光谱，但牛顿没有发现其中的暗线，因为他是使太阳光通过圆孔而不是通过狭缝产生的光谱。1802 年英国科学家沃拉斯顿 (W. H. Wollaston, 1766 ~ 1828) 和 1814 年夫琅禾费分别独立地观察到了太阳光谱中的暗线，夫琅禾费并认识到这些暗线有固定的位置，以不同的字母命名了一些主要的暗线。后来就把这些暗线叫做

夫琅禾费线。1859至1861年，基尔霍夫和本生解释了这些暗线，认为这些暗线是太阳光球发出的连续波长的光被太阳大气（主要是色球层）中的原子吸收产生的，并创立了光谱分析方法，即根据蒸气混合物所辐射的光谱来判断它的化学成分。1860年本生用这种方法从含有锂、钠、钾的天然矿物中发现了两种新元素——铷和铯，后来又用光谱分析方法发现了铊（1862年）、铟（1863年）、镓（1875年）和氦（1895年）。氦是先从太阳大气的光谱中发现的，氦（helium）的命名就来源于希腊语的太阳（hlios）。

光谱在科学研究中有重要作用。由于原子发光的频率与原子的结构和能级有关，因此研究发射光谱可以得到原子与分子的结构和能级的知识。吸收光谱主要用于研究分子的性质，特别是在有机化学分析中有重要应用，因为一定的原子团吸收一定频率的光。喇曼光谱与分子的振动和转动能级有关，因此研究喇曼光谱可以得到分子结构及其振动能级和转动能级的知识。喇曼光谱本来是很微弱的，有了激光器以后，很容易得到比较明显的喇曼光谱，使它的应用范围有了很大的扩展，并可用来分析空气质量、探测环境污染等。

单色光和非单色光 (monochromatic light and nonmonochromatic light)

具有单一频率或波长的色光，叫做单色光；由多种单色光混合成的色光，叫做非单色光或复色光。实际上，严格的单色光并不存在，一般的单色光也包含很窄的波长范围，因此正确的名称应该是准单色光 (quasi-monochromatic light)。通常把通过棱镜后不再分解为其他色光的光叫做单色光，能分解为其他色光的光，叫做非单色光或复色光。在实用中，一般把原子发出明线光谱中某一谱线的光，作为单色光。例如，氦氖激光器发出的波长632.8nm(纳米)的红光，氩86发出的波长605.8nm的橙光，都是较好的单色光。从连续光谱中用分光器分出具有某一颜色的光，也可作单色光用。单色光的频率范围 $\Delta \nu$ 跟可干涉时间 (相干时间) t 有一定的关系： $\Delta \nu \sim 1/t$ ；跟可干涉距离 (相干长度) l 之间也有一定的关系： $l \sim c/\Delta \nu$ ， c 是真空中光速。单色性越好，即 $\Delta \nu$ 越小，相干时间 t 和相干长度 l 越长，因此越容易产生干涉现象。

物体的颜色 (colour of objects)

物体 (通常指不发光体) 的颜色，是由反射 (或透射) 光的颜色决定的 (发光物体的颜色叫做光源色，光源色是由光源所发光的光谱决定的)。由于人们的生活习惯，通常把物体在日光照明下呈现的颜色，叫做物体的颜色。如果一个物体主要反射白光中的绿光，而吸收其他波长的光，这个物体就是绿色的；如果它主要反射红光而吸收其他波长的光，这个物体就是红色的。在其他光源照明下，物体的颜色会发生变化，因为这时物体吸收和反射的光不同了。例如，用红光照射绿布，因为没有绿光可供反射，而红光又被它吸收了，所以这时绿布就变成黑色的了。如果物体能全部反射各种色光，它就是白色的；如果物体能全部吸收各种色光，它就是黑色的。实际上，纯粹白色和纯粹黑色的物体是没有的，通常对各种色光的反射率在70%以上的物体就感觉是白色的，标准白板的反射率可达90%以上。反射率在10%以下的物体就是黑色的。反射率在10-70%之间的物体，

表现为不同程度的灰色。

物体的颜色有三种特性：明度、色调、饱和度。明度是明暗的程度。物体的反射率越高，明度越高。色调是指光的颜色，光的频率（或波长）不同，颜色也不同。饱和度是纯度，单色光的饱和度最高，混入的其他色光越多，越不饱和。

色调虽然是由光的波长决定的，但是每一种色调并不是只决定于一种波长。例如，520nm 的光是绿色光，用 510nm 和 530nm 的光混合，也可以得出同样的绿色光；570nm 的光是一种黄光，用适当比例的 650nm 的红光和 530nm 的绿光混合，也可以得到黄色光。实验表明，用红、绿、蓝三种色光按不同的比例混合，可以得出一切颜色的光。例如，用色轮做实验，在色轮上贴上不同颜色的纸，让色轮迅速旋转，就可以得出混合色。例如，红纸的面积占 34%，绿纸的面积占 66%，混合色就是黄色。如果红色面积占 20%，绿色面积占 48%，蓝色面积占 32%，混合色就是白色，实际是中等明度的灰色。

用三原色的混合，可以按下式来表示任何一种光谱色：

$$(C) \quad r(R)+g(G)+b(B)。$$

式中 (C) 表示某一种光谱色。(R)、(G)、(B) 表示红、绿、蓝三原色，r、g、b 表示每种原色的比例系数， $r+g+b=1$ 。例如， $r=g=b$

$=0.33$ ，表示标准白色。如果某颜色 $(C)=0.06(R)+0.63(G)+0.31(B)$ ，则可以知道这种颜色主要是绿色。

国际照明委员会 (CIE) 在 1931 年制定了色度图（也叫色品图），规定三原色以 700nm (R)、546.1nm (G)、435.8nm (B) 为标准，这个色度图叫做“CIE1931 色度图”，如图 1-22-62 所示。其中 x 坐标表示红原色的比例（即 r 值），y 坐标表示绿原色的比例（即 g 值）。蓝原色的比例（b 值）可由 $r+g+b=1$ 计算出来。从图中可见，光谱的红色波段在图的右下部，绿色波段在图的左上部，蓝色波段在图的左下部。图线呈马蹄

图 1-22-62 CIE1931 色度图

形，图线上各点代表 380nm（紫色）到 780nm 之间的所有单色光。下部从紫到红的直线是光谱中没有的由紫到红的颜色。不在图线上而在图中各点也代表一定颜色，但不是纯光谱色，而是几种光谱色的混合色。C 点代表标准白色，相当于晴天中午阳光的颜色，它的色度坐标是 $x=0.3101$ ， $y=0.3162$ 。如果想知道图中任一点所代表的颜色，例如 Q 点，可以从 C 点向 Q 点引直线，交于光谱轨迹上一点 O（640nm 处），则 Q 点所代表的主波长就是 640nm，即红色。从 Q 点离 C 点的远近可以看出它的饱和度，即色纯度。离 C 点越近，饱和度越小（颜色越浅）。Q 点位于 CO 距离的 45%

处，它的饱和度就是 45%（饱和度% = $\frac{CQ}{CO} \times 100$ ）。S 点和 K 点的主波长

相同；都是 530nm，即绿色，S 点比 K 点离 C 点远，所以 S 点的饱和度大。从图中还可以看出两种色光混合后的颜色，如 Q 色和 S 色相加，得到 QS 连线上各点的过渡色。例如 T 点，它的主波长是 573nm，即黄色；从 T 点到 C 点的距离还可知道它的饱和度。色度图在实际工作中有重要用途。从事彩色电视、彩色摄影等工作中，都需要选择适当的颜色来复现白色和其他颜色，这时就可以借助色度图来确定颜色的色调和饱和度等。

色觉 (coloursensation)

各种色光射到视网膜上引起的颜色感觉。不同波长的光引起不同的色觉，如 450nm 的光引起蓝色感觉，510nm 的光引起绿色感觉，700nm 的光引起红色感觉，在这些波长间还有各种中间色。

各种色光的波长范围（参见第四编光学部分的“不同色光波长和频率的范围”数据表），是在一般条件下人眼所能观察到的大致波长范围，实际上各种色光的界限并不明显，从一种颜色过渡到另一种颜色是渐变的。在日常生活中，通常是各种波长的光一起进入眼睛，看到的是混合光的颜色，各种光的比例不同而呈现不同的颜色，例如短波的光较多时呈蓝色，长波的光较多时呈红色。

物体的颜色并不是在什么条件下看来都是一样的。例如，把同一张绿色纸片贴在蓝色和黄色纸板上时，感觉就不一样，贴在蓝色纸板上时，绿色纸片显得发黄；贴在黄色纸板上时，绿色纸片显得发蓝。这是色调对比产生的感觉。如果眼睛长时间注视一种颜色，然后去看另一种颜色，也会发生色调对比现象。例如，长时间注视一块红纸，然后去看白纸，会看到白纸显出绿色——红色的补色。过一段时间，绿色逐渐变淡，白纸逐渐变为白色。这是色适应过程。

如果在一张纸上画有不同的颜色，每种颜色的面积比较大，它们间的分界线是明显的；如果各种颜色的面积很小，是一些彩色小点，就看不清各种颜色的界线，而产生混合色的感觉。这种现象叫做色融合。

上述现象是色觉的一些特性。

具有正常视觉的人，视网膜的中央部分有大量的锥体细胞，能分辨各种颜色。从中央向边缘过渡，锥体细胞减少，杆体细胞增多，对颜色的分辨能力逐渐减弱，直到对颜色的感觉消失。在中央区的外部，先丧失对红色、绿色的感觉，再向外，对黄色、蓝色的感觉也丧失。因此，正常色觉对白色的视野范围最大，对黄蓝色的视野范围次之，对红绿色的视野范围最小。

另外，色觉还有一种特性，就是光照条件变化时，人能根据物体原有的颜色来感知它们，色觉保持相对不变。例如，中午的照度比日出日落时大几百倍，太阳光谱分布也有很大变化，但我们认为红花仍是红的，绿草仍是绿的。白天和夜晚观察煤块和白雪，虽然阳光下煤块反射出的光量比夜晚白雪反射出的还大些，但感觉雪总是白的，煤块总是黑的。这种现象叫做颜色的恒常性。

关于色觉的理论，主要有两个。一个是托马斯·杨在 1807 年提出的三色说。认为视网膜上存在三种感觉神经，一种对红光最敏感，对绿光和蓝光的感受较低；另一种对绿光最敏感，对红光和蓝光的感受较低；第三种对蓝光最敏感，对红光和绿光的感受较低。在白光作用下，三种感光神经都兴奋，产生白色感觉，强度越大，感觉越亮，所以有明暗的区别。三种神经受到强弱不同的刺激，就可以产生不同颜色的感觉。1860 年，亥姆霍兹进一步完善了这种学说，因此也叫杨-亥姆霍兹三色说。另一个学说是赫林 (E. Heling) 在 1878 年提出的四色对抗说。赫林认为，在视网膜中有三对感光视素，一对是红-绿视素，能感受红光和绿光的刺激；一对是黄-蓝视素，能感受黄光和蓝光的刺激；还有一对是白-黑视素，能接受各种色

光的刺激。这三对视素对神经的兴奋和抑制作用具有对抗性质，例如，对红-绿视素来说，在红光作用下被分解，产生红色感觉；在绿光作用下这种视素又重新合成，产生绿色感觉。对黄-蓝视素来说，在黄光作用下分解，产生黄色感觉；在蓝光作用下合成，产生蓝色感觉。对白-黑视素来说，有光作用时分解，产生白色感觉；无光作用时合成，产生黑色感觉。

三色说能较好地解释色光的混合现象，各种颜色的确可以由红、绿、蓝三色光以不同的比例混合而得到。但三色说不能解释某些色盲现象。例如，不能解释红色盲患者为什么往往又是绿色盲患者；红光和绿光可以合成黄光，红绿色盲患者似乎也应不能看到黄色，但他们都能看到黄色，并且有白色感觉。四色说能很好地解释色盲现象。红绿色盲是缺少红-绿视素，黄蓝色盲是缺少黄-蓝视素，全色盲是缺少这两种视素，但有白黑视觉，即有明暗感觉。但四色说不能解释色光的混合现象，不能解释红光和绿光混合形成黄光的事实。

20世纪50年代末，拉斯顿(Ruston)发现人的视网膜内确实有红、绿、蓝三种敏感色素，分别对红光、绿光、蓝光最敏感，有力地支持了三色说。稍后，瓦格纳(Wagner)、德瓦洛斯(Devalois)在60年代发现，在视觉中枢中存在着对白光反应及对红-绿、黄-蓝光相互对抗反应的细胞，如有些细胞对红光发生正电势反应，对绿光发生负电势反应；也有些细胞对红光发生负反应，对绿光发生正反应。类似地，还有另外两种细胞，一种对黄光发生正反应，对蓝光发生负反应；另一种对黄光发生负反应，对蓝光发生正反应。这四种细胞的综合作用，很像赫林的四色对抗说。根据这些情况，现代多数研究色觉的科学家认为，视觉过程可分为几个阶段，第一阶段由视网膜的三种感色细胞接受光的刺激，是一种三色机制。三种不同的锥体细胞分别对红、绿、蓝光有最大的敏感性，同时产生明暗(白黑)的感觉。第二阶段发生在颜色视觉信号向大脑的传输过程中，是一种四色机制，同时传递明暗信号。第三阶段是由大脑产生综合印象，即产生各种颜色和明暗程度的视觉。

图1-22-63是沃斯·瓦尔拉伦(Vos-walraren)提出的一种颜色视觉过程模型。

图 1-22-63

视网膜上三种感光细胞 R(红)、G(绿)、B(蓝)接受光刺激后，红光信号与绿光信号之比组成第一彩色通道 F；红光信号与绿光信号相加得到黄色信号(y)，黄色信号与蓝色信号之比组成第二彩色通道(S)；红、绿、蓝相加得到白色信号，组成第三非彩色通道(L)。这些信号传到大脑后就产生一定的颜色视觉和明暗视觉。

主要参考资料

1. 中国大百科全书出版社编辑部。中国大百科全书物理学。第1版。北京：中国大百科全书出版社，1987。
2. 苏和，王文亮。基础物理手册。第1版。呼和浩特：内蒙古人民出版社，1981。
3. 赵凯华，陈熙谋。电磁学。第2版。北京：高等教育出版社，1985。

4. G. Bekefi, A. H. Barrett. 电磁振荡电磁波和辐射。王志符, 刘思可, 朱镇龙等译。第1版。北京: 人民教育出版社, 1981。
5. 钟锡华。光波衍射与变换光学。第1版。北京: 高等教育出版社, 1985。
6. R. W. 狄区本。光学。程路译。第1版。北京: 高等教育出版社, 1988。
7. E. 赫克特, A. 赞斯。光学。秦克诚、詹达三、林福成译。第1版。北京: 人民教育出版社, 1980。
8. 梁灿彬、秦光戎、梁竹健。电磁学。第1版。北京: 人民教育出版社, 1980。
9. 母国光, 战元令。光学。第1版。北京: 人民教育出版社, 1978。
10. 姚启钧原著, 华东师大《光学》教材编写组改编。光学教程。第2版。北京: 高等教育出版社, 1989。
11. 赵凯华, 钟锡华。光学。第1版。北京: 北京大学出版社, 1984。
12. F. A. Jenkins, H. E. White。光学基础。杨光熊, 郭永康译。第1版。北京: 高等教育出版社, 1990。
13. 林仲贤, 孙秀如。视觉及测色应用。第1版。北京: 科学出版社, 1987。
14. 汤顺青。色度学。第1版。北京: 北京理工大学出版社, 1990。
15. K. 拿骚。颜色的物理与化学。李士杰, 张志三译。第1版。北京: 科学出版社, 1991。
16. 张之翔。光的偏振。第1版。北京: 高等教育出版社, 1985。

二十三、原子结构

粒子散射实验(α -Particlesscatteringexperiment)

用 α 粒子轰击金箔, 观察 α 粒子与金原子发生相互作用时产生的 α 粒子散射现象。这个实验是卢瑟福的学生盖革和马斯登于 1909 年做的。图 1-23-1 是实验装置的示意图。实验结果表明, 当 α 粒子穿过金箔时, 大多数沿原方向前进, 少数 α 粒子发生了大角度的偏转, 偏转角在 90° 以上的约占 $1/8000$, 极少数粒子偏转角达 180° 。卢瑟福对实验结果进行了理论分析, 得出了意义深远的结论。

图 1-23-1 α 粒子散射实验装置

S-放射源 T-金箔

A、B-有小孔的屏

D-可绕 O 转动的探测器

(1) 否定了汤姆孙原子模型, 建立了原子的核式结构学说。在汤姆孙模型里, 正电荷均匀分布在球形原子中, 电子则嵌在其中, 人们形象地称之为“葡萄干面包模型”。根据静电学的高斯定理, 当 α 粒子穿过“汤姆孙原子”时, 在原子的边缘处受到的静电斥力最

图 1-23-2 α 粒子在汤姆孙原子中的受力情况

图 1-23-3 α 粒子在核型原子中的受力情况

大, 进入原子后, 所受斥力反而减小了(图 1-23-2), 斥力的最大值为 $F = \frac{Z_1 Z_2 e^2}{4\pi\epsilon_0 R^2}$ 。式中 R 为原子半径, Z_1 和 Z_2 分别为 α 粒子和金原子的电荷数。

因此, 入射 α 粒子只有在沿原子的边缘掠射时所受原子斥力的冲量最大, 粒子的动量变化和偏转角也最大(图 1-23-4)。这时, 速度为 v 的粒子的动量大

图 1-23-4 散射引起的动量变化与散射角的关系

小的变化不超过 $\Delta p = F \cdot t = F \cdot 2R/v$ 。用 E_α 表示 α 粒子的动能, 则 α 粒

子的偏转角不超过 $\Delta p / p = \frac{F \cdot 2R / v}{m_\alpha v} = FR / R_\alpha = \frac{Z_1 Z_2 e^2}{4\pi\epsilon_0 R E_\alpha}$ 。把 $Z_1 = 2,$

$Z_2 = 79, R = 10^{-10} \text{ m}, E_\alpha = 5 \text{ MeV}$ 代入上式进行估算, 可得 $\theta \sim \frac{\Delta p}{p} \text{ rad} \approx 0.03^\circ$

可见, 在汤姆孙模型里, α 粒子要产生大角度的偏转是不可能的。相反, 如果原子的正电荷集中在原子的中心, 即存在一个很小的带正电的核, 则 α 粒子越接近核所受的库仑斥力越大(图 1-23-3), 大角度的偏转就是可能的了。

(2) 正确解释了 α 粒子散射的规律。根据经典电磁理论, 入射 α 粒子对固定原子核的瞄准距离 b 与散射角 θ (图 1-23-5) 之间存在着

图 1-23-5 带电粒子的库仑散射

$$b = \frac{a}{2} \cot \frac{\theta}{2}, \text{ 其中 } a = \frac{Z_1 Z_2 e^2}{4\pi\epsilon_0 E_\alpha} \quad (1)$$

的关系。这个公式叫库仑散射公式，式中的 a 叫库仑散射因子。由公式 (1) 可以看出， b 越小 θ 越大。根据卢瑟福的计算，在 α 粒子射入金箔的散射中，如果金箔的厚度为 t ，单位体积中含有 n 个原子，每秒钟入射到金箔上的 N 个 α 粒子中有 dN 个散射角在 θ 与 $\theta + d\theta$ 之间，则 N 与 dN 有如下的关系：

$$\frac{dN}{Ntn} = \frac{a^2 d\Omega}{16 \sin^4 \frac{\theta}{2}} \quad (2)$$

式中 $d\Omega = 2\pi \sin \theta d\theta$ 是 α 粒子被散射进入的立体角。这就是著名的卢瑟福散射公式。由这个公式可知，对于同一 α 粒子源和同一散射体， dN 与 $\sin^4 \frac{\theta}{2}$ 成反比。这就是为什么大角度散射的粒子很少的原因。

由 (2) 式还可以知道：同一 α 粒子源和同一材料的散射体， dN 与散射体的厚度 t 成正比；用同一散射体在同一散射角， dN 与 E_α^2 (或 v_α^4) 成反比；用同一 α 粒子源在同一散射角，对同一 Nt 值， dN 与散射体原子电荷数的平方成正比。这些结论都被盖革和马斯登在 1913 ~ 1914 年的实验所证实。

原子的核式结构 (atomic nuclear-model structure)

卢瑟福根据 α 粒子散射实验的结果，设想原子的全部正电荷和绝大部分质量集中在原子中心很小的体积内，形成原子核，在原子核外面散布着绕核旋转的电子。

根据 α 粒子散射理论，可以估计原子核的大小。设图 1-23-5 中瞄准距离为 b 的入射 α 粒子，在远离原子核时的速度为 v_0 ，当它到达距核最近处 r_m 、受到原子核的作用力 $F = Z_1 Z_2 e^2 / 4\pi\epsilon_0 r_m^2$ 时，速度减为 v_m 。根据有心力场中的能量守恒定律和角动量守恒定律，有

$$\begin{aligned} \frac{1}{2} m v_0^2 &= \frac{1}{2} m v_m^2 + \frac{Z_1 Z_2 e^2}{4\pi\epsilon_0 r_m} \\ m v_m r_m &= m v_0 b \end{aligned}$$

用 E_α 表示 α 粒子的动能，注意到 $v_0 = \sqrt{\frac{2E_\alpha}{m}}$ ，可从上二式和库仑散射公式解得

$$r_m = \frac{1}{2} \frac{Z_1 Z_2 e^2}{4\pi\epsilon_0 E_\alpha} \left(1 + \csc \frac{\theta}{2} \right),$$

式中 θ 是 α 粒子的偏转角。当 $\theta = 180^\circ$ ，即 α 粒子与原子核发生正碰被反弹回来时， r_m 有最小值：

$$r_m = \frac{1}{2} \frac{Z_1 Z_2 e^2}{4\pi\epsilon_0 E_\alpha} = a$$

这就是原子核半径的上限，它等于库仑散射因子 a 。显然，在库仑定律适

用的范围内，入射粒子的能量越大， r_m 就越小、越接近原子核的真实大小。对于 Cu 原子，当 $E_\alpha=5.30\text{MeV}$ (^{210}Po 放出的 α 粒子能量) 时， $r_m=1.57 \times 10^{-14}\text{m}$ 。这就是说，铜原子核的半径比 $1.57 \times 10^{-14}\text{m}$ 还小。

卢瑟福的原子模型，也存在一些不可克服的矛盾和困难。主要的是：根据经典电磁理论，绕核做加速运动的电子要发射电磁波损失能量，从而使原子成为不稳定的。设在距核 R 处绕核做圆周运动的电子速率为 v ，运动的向心力是库仑力，则有

$$\frac{m_e v^2}{R} = \frac{Ze^2}{4\pi\epsilon_0 R^2}$$

由此得电子的加速度和动能分别为

$$a = \frac{v^2}{R} = \frac{Ze^2}{4\pi\epsilon_0 R^2}$$

$$E_k = \frac{1}{2} m_e v^2 = \frac{Ze^2}{8\pi\epsilon_0 R}$$

对于氢原子， $Z=1$ ， $R = 0.5 \times 10^{-10}\text{m}$ ，代入进行估算可得 $a=1.0 \times 10^{23}\text{m/s}^2$ ， $E_k=2.3 \times 10^{-18}\text{J}$ 。

电子辐射能量的功率为

$$P = \frac{e^2}{6\pi\epsilon_0 c^3} a^2 = 5.7 \times 10^{-8}\text{W}$$

这个功率随着 R 的减小还会不断增大。即使假定电子以不变的功率发射能量，耗尽其全部动能坠入原子核所需的时间仅为

$$\tau = \frac{E_k}{P} = 4.0 \times 10^{-11}\text{S}$$

这与原子稳定性的事实不符。这个矛盾暴露了经典理论无法解释原子内部的运动规律。

黑体辐射 (black-body radiation)

当辐射照射到不透明物体上时，一部分辐射被反射，其余的辐射被吸收。浅色物体反射绝大部分辐射，黑色物体则吸收绝大部分辐射。把入射的所有辐射全部吸收的物体叫绝对黑体，简称黑体。绝对黑体实际上并不存在。最接近绝对黑体的物体是开有一个小孔的空腔。从小孔进入腔内的辐射，在被腔壁吸收以前，很少有机会反射出来。

与周围环境处于热平衡的黑体在吸收辐射的同时，必然以同样的速率发出辐射，否则它就会自动地变得高于或低于周围环境的温度，而不能与周围环境保持热平衡。实验证明，黑体辐射的能量及其波长分布只与黑体的绝对温度 T 有关，而与黑体的其他特性（形状和组成物质）无关。具体地说，黑体的辐射出射度（单位表面积、单位时间内放出的能量） M 与绝对温度的四次方成正比（斯特藩-玻尔兹曼定律）：

$$M = \sigma T^4, \\ \sigma = 5.67032 \times 10^{-8} (\text{m}^2\text{K}^4)$$

M 的波长分布函数 M_λ （单位表面积、单位时间内放出的波长在 λ 和 $\lambda+d\lambda$ 之间的辐射能量）有一个极大值。跟这个极大值对应的波长 λ_m 与绝对温度

T 成反比（维恩位移定律）：

$$\lambda_m T = 2.898 \times 10^{-3} \text{m} \cdot \text{K}。$$

图 1-23-6 为在不同温度下，黑体辐射出射度的波长分布函数曲线。

图 1-23-6 黑体辐射出射度的波长分布

普朗克量子理论（Planck quantum theory）

19 世纪末至 20 世纪初，为了解释黑体辐射的光谱分布，经典物理学家们做了重大努力，推出了两个公式。

维恩假设，黑体辐射发源于许多分子类型的谐振子，其辐射的波长与强度都是发出辐射的分子速度的函数，根据经典统计力学，得出了著名的维恩公式（1896 年）：

$$w_\lambda \propto \frac{1}{\lambda^5} e^{-\frac{c1}{\lambda T}}, c_1 = \text{常量}。$$

瑞利和金斯假设黑体辐射发源于空腔内电磁波的驻波，驻波的可能振动方式的数目，由形成驻波的条件来确定。再根据经典的能量均分原理，每种振动方式的能量都是 $\bar{\epsilon} = kT$ ，从而得到瑞利 - 金斯公式（1900 ~ 1905 年）：

$$w_\lambda = \frac{8\pi kT}{\lambda^4}$$

两个公式中的 w_λ 表示黑体辐射能量密度的波长分布。但是，这两个公式都不能与实验结果完满地符合。维恩公式只在光谱的短波部分与实验相符，长波部分与实验不符。瑞利 - 金斯公式只在光谱的长波部分与实验相符，在短波部分与实验完全不符，甚至导致 w_λ 随波长的减小而无限增大的荒谬结论。这个结果被称为紫外灾难。两个公式与实验结果的关系见图 1-23-7。

图 1-23-7

上述问题，由于普朗克于 1900 年引入量子假设而得到解决。普朗克也把黑体看作是由带电的谐振子组成的，但他假定这些振子的能量不能连续变化，而只能取一些分立值，它们是最小能量 $\epsilon = h\nu$ 的整数倍。其中 ν 是辐射的频率， $h = 6.6260755 \times 10^{-34} \text{J} \cdot \text{S}$ 是普朗克常量。这就是普朗克的量子假设。这个假设是违背经典理论的，根据经典理论，振子的能量不受任何限制。普朗克在量子假设的基础上，根据经典统计理论求出谐振子的平均能量。

$$\bar{\epsilon} = \frac{\sum_n \epsilon_n e^{-\frac{\epsilon_n}{kT}}}{\sum_n e^{-\frac{\epsilon_n}{kT}}} = \frac{h\nu}{e^{\frac{\epsilon_n}{kT}} - 1}$$

式中 $\epsilon_n = nh\nu$ ， $n = 1, 2, 3, \dots$ ，再把这个平均能量乘上单位体积内波长位于 λ 和 $\lambda + d\lambda$ 之间的振子数目，就得到黑体辐射的普朗克公式：

$$w_\lambda = \frac{8\pi hc}{\lambda^5} \frac{1}{e^{\frac{hc}{\lambda kT}} - 1}$$

这个公式与实验结果符合得相当好，且在短波极限，即 $\lambda \rightarrow 0$ 时，与

维恩公式一致，在长波极限，即 $hc/\lambda kT \ll 1$ 时 ($e^{hc/\lambda kT} - 1 \approx hc/\lambda kT$)，与瑞利-金斯公式一致。

光电效应 (photoelectric effect)

在光的照射下，物体内部的电子会逸出物体表面，这种现象叫做光电效应或光电发射。图 1-23-8 是光电效应实验的示意图。单

图 1-23-8 光电效应实验示意图

色光照射到阴极的金属表面上，使金属逸出光电子，在电路中产生光电流。A、C 两极间不加电压时，光电流较小，两极间加上几伏的电压，光电流即达到饱和值，饱和值的大小与入射光的强度成正比(图 1-23-9)。两极间加上反向电压 -U (C 的电压比 A 的电压

图 1-23-9 光电流强度与入射光强度和极间电压的关系。曲线 I、II、III 的入射光强度不同，入射光强度大的饱和电流大。

高)，光电流会减小。这是因为光电子逸出表面的初始动能不同，一部分初始动能小的电子，因反向电压的减速作用不能到达 A 板。设光电子的最大初动能为 $\frac{1}{2} m_e v_{\text{最大}}^2$ ，当 U 增大到

$$eU = eU_0 = \frac{1}{2} m_e v_{\text{最大}}^2 \quad (1)$$

时，逸出的光电子都不能到达 A 板，光电流 $I=0$ 。 U_0 叫遏止电压。

实验表明， U_0 的大小，也就是说光电子最大初动能的大小，与光强无关，而以非常简单的方式依赖于入射光的频率，即随频率而线性地增加(图 1-23-10)，并且存在着一个

图 1-23-10 入射光频率与遏止电压的线性关系

截止频率 ν_0 (也叫阈频或红限)，频率小于 ν_0 的入射光不能产生光电效应。这个事实是经典理论无法解释的。根据经典电磁理论，金属中的电子从入射光波中吸收能量，可以摆脱原子核中正电荷的束缚逸出金属表面，不过一定时间内电子从光波中获得能量的大小取决于入射光的光强，即只决定于光的振幅，而与光的频率无关。

另一个无法用经典理论解释的现象，是光电效应的瞬时性。按照经典理论，入射光波的能量均匀分布在被照表面上。电子获得足以逸出金属表面的能量所需的时间可根据入射光的强度估算出来。设波长 400nm 的紫光以 10^{-2}W/m^2 的能流率照射到钾金属表面上，钾原子的半径 $r = 10^{-10} \text{m}$ ，电子逸出钾表面要做的功(称为逸出功或功函数)为 2.22 eV。原子中的电子吸收 2.22 eV 的辐射能所需的时间为

$$t = \frac{2.22 \text{eV}}{\pi r^2 \times (10^{-2} \text{W/m}^2)} = 1.1 \times 10^3 \text{s} \\ = 18 \text{min}$$

但实际上当光照射到金属表面时，在 10^{-9}s 内即可发射光电子。

上面讲的这些现象，只有用爱因斯坦提出的光子说才能解释。爱因斯坦认为，普朗克在解决黑体辐射问题时提出的能量量子化理论，是光的普遍特性。光在传播时能量也不是均匀分布在经过的空间里，而是由能量为 $E=h\nu$ 的不连续的光量子（也称光子）所组成的。金属中的电子吸收了一个能量为 $h\nu$ 的光子，如果 $h\nu$ 大于金属的逸出功 ϕ ，立即可以逸出金属表面，它能达到的最大初动能为

$$\frac{1}{2} m_e v_{\text{最大}}^2 = h\nu - \phi. \quad (2)$$

这个方程叫爱因斯坦光电效应方程。它说明了光电子最大初动能与光频 ν 的线性关系，也说明了阈频 ν_0 的存在，因为 $h\nu < \phi$ 时，电子是不能从金属中逸出的。由式(2)可知， $\nu_0 = \frac{\phi}{h}$ 。金属的逸出功一般为几个电子伏。

光的量子理论揭示了光的粒子性。光子不仅具有能量 $E=h\nu$ ，而且具有相应的动量 $p = \frac{E}{c} = \frac{h}{\lambda}$ （也可写作 $p = k\hbar$ ，式中 $k = \frac{2\pi}{\lambda}$ ）。

光的量子理论揭示了光的粒子性。光子不仅具有能量 $E=h\nu$ ，而且具有相应的动量 $p = \frac{E}{c} = \frac{h}{\lambda}$ （也可写作 $p = k\hbar$ ，式中 $k = \frac{2\pi}{\lambda}$ ）。

根据相对论的能量动量关系

$$E^2 = c^2 p^2 + m_0^2 c^4,$$

光子的静止质量为零，运动质量为

$$m = \frac{E}{c^2} = \frac{h\nu}{c^2}$$

光电管 (photoelectric tube)

应用光电效应原理制成的光电转换器件。在抽出空气的玻璃壳内，半面涂上光电发射材料做阴极，并封入球状或环状的金属阳极，就制成了真空光电管。可见光光电管可用普通玻璃制作；紫外线光电管必须用石英玻璃制作。如在管内充入少量惰性气体，就成为充气光电管。光电材料是多种多样的，可用锂、钠、钾、铷、铯等金属，银，以及铋与钾、钠、铯等制成的复合材料。应根据使用的光谱波段，选用量子效率（释放的电子数与入射的光子数之比）高和暗电流（完全没有光照时的板极电流）小的光电材料。

充气光电管，工作中会产生气体放电电流，使光电管的灵敏度增大几倍乃至十几倍。但如果电压过高，会产生辉光放电，无法用光照控制电流，阴极材料也会损坏。因此，在电路里要串接高阻值的保护电阻。真空光电管具有稳定性好，响应迅速、寿命长、光照和输出电流间有良好线性关系等优点。

光电管在光度测量、有声电影、电送传真、自动计数、自动控制、自动报警等方面有广泛应用。但由于它灵敏度低、体积大、易破碎，正逐步为固体光电探测器所取代。

光学录音 (optical sound recording)

有声电影中使用的在胶片上记录声音信号的录音系统。有声电影片的主片旁边有一条记录声音信号的窄带（图 1-23-11），叫做声道，也叫声迹。在 35 毫米的胶片上，声道位于齿轮洞内侧约 2.5 毫米处。

图 1-23-11 电影胶片上图像区和声音道的位置

甲、变面积式声道 乙、变密度式声道

光学录声的原理是：先把声波通过传声器转变成电振动，产生电脉冲。电脉冲经放大后进入光调制器。调制器依照电信号改变射向胶片边缘的光束通路上的狭缝宽度，使在狭缝后面匀速运动的胶片感光，成为声道。根据光调制器的不同类型，声道有两种：一种是变面积式的，一种是变密度式的。前一种声道的宽度是变化的；后一种声道宽度不变，变化的是它的浓淡和密度。目前，变面积声道逐渐取代了变密度声道。下面简单介绍变面积调制系统。

图 1-23-12 是变面积式光学调制系统的原理图。三角形孔径由灯和透镜系统均匀照明。孔径的像由检流计反射镜反射后聚焦到机械狭缝上，狭缝再聚焦成像在胶片上。反射镜随检流计线圈的电流变化而围绕平行于

图 1-23-12 变面积式声道录声原理

甲 录声系统图 乙 负片声道 丙 正片声道

丁 透视图 戊 剖视图 己 机械狭缝

纸面的轴摆动，三角孔径的像就在机械狭缝上上下下移动。结果负片声道曝光部分的宽度就随电流计的旋转振动面变化，形成变面积式声道。

放映电影时，灯光通过会聚透镜聚焦在机械狭缝上，狭缝再聚焦成像在胶片的声道上，当声道以恒定速率通过光束的聚焦线时，透过声道的光照射到光电管上。照到光电管上的光量随声道的宽度而起伏变化。光电管又把这起伏变化的光按照同样的变化转换成起伏的电流，输送到放大器和扬声器中，就把声道中的信号还原成声振动。图 1-23-13 是有声电影放声系统的原理图。

图 1-23-13 有声电影放声系统原理图

内光电效应 (internalphotoelectric effect)

用某种波长的光照射半导体，把光子的能量传给其中的电子，使电子的能量增加而不逸出物体表面，这也是一种光电效应。由于它没有光电发射，所以称之为内光电效应。其中最重要的是光电导和光生伏打效应。

(1) 光电导 光照能使半导体的电导明显地增大，而且光强有很小的改变就可以引起电导的很大变化。光电导还与光的波长有关。每种半导体材料都有自己的长波限 λ_0 ，波长超过 λ_0 光电导很快下降。这是因为只有能量大于半导体禁带宽度 $h\nu_0=hc/\lambda_0$ (波长小于 λ_0) 的光子才能把价带电子激发到导带，产生电子-空穴对，引起光电导现象。光电导的这种特性成为确定半导体禁带宽度的有效方法。

利用光电导现象，制成了各种类型的光敏电阻。灵敏度高的光敏电阻可以用作光电自动控制元件。用各种不同材料，可以制成从 γ 射线直到远红外线的探测器和测量元件。

(2) 光生伏打效应 在 PN 结 (或金属和半导体的接触面) 附近，由于内光电效应而产生电动势的现象，叫做光生伏打效应。我们知道，在 PN

结处有一个空间电荷区（也叫耗尽层），其中存在着方向由 N 区指向 P 区的电场，称为自建电场。由于光照，空间电荷区内产生的电子-空穴对，在自建电场的作用下被分离，电子被推向 N 区，空穴被推向 P 区，形成光致电流。在空间电荷区附近一定范围内产生的电子和空穴，只要它们能扩散到空间电荷区，同样会被分别推向 N 区和 P 区，形成光致电流。光致电流使 N 区和 P 区分别积累了负电荷和正电荷，在 PN 结上形成电势差，引起与光致电流方向相反的正向电流。当 PN 结两侧的电势差增大到正向电流恰好与光致电流相抵消的时候，就达到稳定状态。这时的电势差称为开路电压。

金属与半导体相接触的光生代打效应，跟上面的情形完全类似，因为在金属与半导体接触处也形成自建电场，光子照射到接触处附近，在半导体中产生的电子、空穴两种载流子，也会被自建电场分开，在金属和半导体之间形成开路电压。

光电池 (photoelectric cell)

根据光生伏打效应，用半导体制成的把光能转换为电能的装置。一种广泛应用的光电池是 PN 结型的硅太阳电池，它的构造如图 1-23-14 所示。在 N 型硅衬底上渗进一

图 1-23-14 太阳电池的基本结构

薄层硼形成 PN 结（也可以 P 型硅为衬底覆以 N 型薄层）。日光射到薄层上时，就在 PN 结的 P 侧和 N 侧间产生电势差。为了使光照产生的载流子不致在到达 PN 结之前即被复合，P 型薄层做得很薄，只有 $1\mu\text{m}\sim 2\mu\text{m}$ 。单个元件的开路电压约 0.55V，输出的最大功率与输入的太阳能功率之比，即转换效率，可达 13%。除了硅太阳电池外，还有砷化镓太阳电池，它的开路电压为 0.84V，转换效率可达 16%，工作温度也比硅高。太阳能电池的功率为 5 毫瓦 ~ 10 毫瓦每平方厘米结面积。

康普顿效应 (Compton effect)

当单色的 X 射线受到物体的散射时，散射光中包含两个成分，一个具有原来的波长 λ_0 ，另一个则具有较长的波长 λ_1 ，这两个波长之差 $\lambda_1 - \lambda_0$ 只是散射角 θ 的函数而与入射波的波长和散射体的材料无关。这种现象是康普顿于 1923 年发现的，称为康普顿效应。图 1-23-15 是康普顿实验装置的示意图，图 1-23-16 是实验得到的散射谱。

图 1-23-15 康普顿散射实验装置示意图

图 1-23-16 康普顿散射实验得到的散射谱

康普顿效应无法用经典理论来解释。按照经典理论，当原子中的束缚电子在 X 射线的交变电磁场作用下以一个比其自然频率大得多的频率振动时，就发出跟入射光频率相同的散射光，而不可能发出跟入射光频率（或波长）不同的光。

康普顿把具有波长变化的散射解释为光子与自由电子间的弹性碰撞产

生的效应。因为原子对外层电子的束缚很弱，束缚能只有几个电子伏，而X射线光子的能量为10keV~1MeV，两者相比，前者完全可以看成是自由的。碰撞中入射光子有一部分能量传给电子，因此散射光子的能量比入射光子的能量小，所以散射光的波长比入射波的长。

设入射光子的能量和动量分别为 $E_0=hc/\lambda_0$ 和 $P_0=h/\lambda_0$ ，散射光子的能量和动量分别为 $E_1=hc/\lambda_1$ 和 $P_1=h/\lambda_1$ ，散射角为 θ ，电子的静能为 $m_e c^2$ ，散射后反冲电子的动量为 P_e ，能量为 $E_e = c\sqrt{m_e^2 c^2 + p_e^2}$ (图1-23-17)。根据动量守恒定律和能量守恒定律有

图 1-23-17 康普顿散射中能量和动量的关系

$$p_e^2 = p_1^2 = p_0^2 - 2p_1 p_0 \cos \theta$$

$$c\sqrt{m_e^2 c^2 + p_e^2} - m_e c^2 = hc/\lambda_0 - hc/\lambda_1$$

$$= hc \left(\frac{1}{\lambda_0} - \frac{1}{\lambda_1} \right)$$

由上二式中消去 P_e 可得

$$\lambda_1 - \lambda_0 = \frac{h}{m_e c} (1 - \cos \theta)$$

或

$$\lambda_1 - \lambda_0 = \frac{2h}{m_e c} \sin^2 \frac{\theta}{2}$$

这就是康普顿散射公式，它表明散射光与入射光的波长之差只与散射角的大小有关，跟实验符合得相当好。康普顿效应为光的粒子性提供了有力的佐证。把上式写成

$$\lambda_1 - \lambda_0 = \lambda_c (1 - \cos \theta),$$

就有

$$\lambda_c = \frac{h}{m_e c}$$

$\lambda_c = 2.42631058 \times 10^{-12} \text{m}$ ，称为电子的康普顿波长，它等于入射光子的能量与电子的静止能量相等时的光子波长。

散射光中也有不改变入射光波长的成分，是因为光子与原子中束缚得很紧的电子碰撞时，它要跟整个原子交换能量。由于原子的质量比光子质量大得多，光子不会显著地失去能量，因而散射光的频率不会有显著的改变。

1926年，我国物理学家吴有训的实验表明：在原子质量小的物质中，康普顿散射较强，在原子质量大的物质中，康普顿散射较弱。这是因为原子质量大的物质只有少数外层电子束缚较弱，内部电子都是束缚得非常紧的。

氢原子光谱 (spectrum of hydrogen atom)

氢原子光谱是最简单的光谱。在可见光和近紫外部分，氢原子的光谱是由一个谱线系组成的，谱线波长间的间隔朝着短波的方向以一种有规律的方式递减。这个规律首先由巴耳末用数学公式表达出来：

$$\lambda = B \frac{n_1^2}{n_1^2 - 4}, \quad (1)$$

式中的 $n_1=3, 4, 5, \dots$ 。 $B=0.36456 \mu\text{m}$ 。(1)式就叫巴耳末公式，它所代表的谱线系叫巴耳末系。

巴尔末公式后来改写成

$$\sigma = R \left(\frac{1}{2^2} - \frac{1}{n_1^2} \right)$$

式中 $\sigma = \frac{1}{\lambda}$ ，是谱线的波数， $R = \frac{4}{B}$ 叫里德伯常量，它的现代精确数值为

$$R = 1.0973731534 \times 10^7 \text{m}^{-1}.$$

如果把上述公式中的 2^2 换成 n_2^2 ，令 $n_2 = 1, 3, 4, 5, \dots$ 且对每个 n_2 值都取 $n_1 = n_2 + 1$ ，则可以得到另外一些线系的波数。这些线系实际上已经被观察到。 $n_2=1$ 的线系在远紫外区，被莱曼观察到， $n_2=3, 4, 5, 6, \dots$ 的线系，都在红外区，分别由帕邢、布喇开、普逢德 (August Herman Pfund, 1879 ~ 1949) 和哈姆泼雷斯 (C · S · Humphreys) 所发现。

因此，氢原子光谱的所有线系，可用一个公式来表示：

$$\sigma = \frac{R}{n_2^2} - \frac{R}{n_1^2}$$

这个公式叫里德伯公式，式中的 n_1 和 n_2 ，都是整数，且 $n_1 > n_2$ 。对于

某一线系来说， n_2 是一常数。当 n_1 递增时 趋向一极限值 $\sigma_\infty = \frac{R}{n_2^2}$ ，这就

是线系极限。从理论上说，靠近线系极限处有无限多条谱线。图 1-23-18 是氢原子的光谱图。

图 1-23-18 氢原子光谱图

氢原子的玻尔理论 (Bohr theory for hydrogen atom)

按照经典理论，卢瑟福的有核原子是不稳定的，而且原子光谱应该是连续的，这不符合实验事实。为了说明原子的稳定性及其发光特性，玻尔提出了两个基本假定：

(1) 定态假定：在无穷多个按经典力学都有可能的电子绕核运动轨道中，只有某些分立的轨道是实际允许的。与经典电磁理论相反，电子在这些轨道做加速运动时并不发射电磁波。原子的这种状态称为定态。

(2) 频率条件假定：辐射的发出或吸收是电子从一个定态跃迁到另一个定态时发生的。两个定态之间的能量差是一个光子的能量：

$$h\nu = E_{n_1} - E_{n_2}.$$

当原子从高能态 n_1 跃迁到低能态 n_2 时发射光子，相反的过程吸收光子。

这两条基本假定是实验事实的理论概括。但是只有这两条假定，还不能确定各分立定态的能量。一些普通物理教程，为了推导各定态的能量，引入了角动量量子化假定，称为玻尔的第三假定（目前的中学课本也讲了这一假定）。这样做只是为了教学上的方便，跟玻尔原来的思路是不一致的。角动量量子化条件不是玻尔理论中最实质的内容，而且也不是玻尔一人的贡献。玻尔当时是根据后来被称之为“对应原理”的另一假定，推导

氢原子的分立能量的。对应原理表述的是量子理论与经典理论的关系，它指出：在大量子数的极限情况下，量子体系的行为将渐近地趋于经典力学体系。

下面介绍一种根据玻尔的两个基本假定和对应原理推导氢原子分立能量和角动量量子化条件的方法。

根据经典理论，在半径为 a 的圆形轨道上绕氢原子核运动的电子，它的运动速度大小为 v ，则有

$$\frac{e^2}{4\pi\epsilon_0 a^2} = m \frac{v^2}{a}$$

式中的 m 和 e 分别为电子的质量和电荷， ϵ_0 为真空电容率。由此可得

$$v = \frac{e}{2\sqrt{\pi\epsilon_0 m a}} \quad (1)$$

电子的能量 E 和运动频率 ν 分别为

$$E = \frac{1}{2} m v^2 - \frac{e^2}{4\pi\epsilon_0 a} = -\frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{e^2}{2a} \quad (2)$$

为了把上述结果量子化，首先把里德伯方程（参见“氢原子光谱”）

$$\sigma = R \left(\frac{1}{n_2^2} - \frac{1}{n_1^2} \right) \text{ 改写成}$$

$$v = R c \left(\frac{1}{n_2^2} - \frac{1}{n_1^2} \right) \quad (4)$$

由玻尔频率条件 $h\nu = E_{n_1} - E_{n_2}$ 可知， $E_{n_1} = -\frac{Rhc}{n_1^2}$ ， $E_{n_2} = -\frac{Rhc}{n_2^2}$ 一般地有

$$E_n = -\frac{Rhc}{n^2} \quad (5)$$

由(2)，(5)两式可得

$$-\frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{e^2}{2a_n} = -\frac{Rhc}{n^2}$$

所以有

$$a_n = n^2 \cdot \frac{e^2}{8\pi\epsilon_0 Rhc} \quad (6)$$

(5)，(6)两式已给出了氢原子的分立能级和轨道半径公式，不过两个公式中都含有里德伯常量 R ，它是一个半经验常量。为了从(5)，(6)两式中消去 R ，先将(4)式变形为

$$v = R c \frac{(n_1 + n_2)(n_1 - n_2)}{n_1^2 n_2^2}$$

当 n 很大时，考虑两个相邻定态 n_1 和 n_2 之间的跃迁。由于 $n_1 - n_2 = 1$ ， $n_1 \approx n_2 \approx n$ ，上式可化为

$$v = \frac{2Rc}{n^3}$$

根据对应原理，它应该与经典关系式(3)一致：

$$\frac{e}{4\pi\sqrt{\pi\epsilon_0 m a_\pi^3}} = \frac{2Rc}{n^3}$$

所以

$$a_n = \frac{n^2 \sqrt[3]{e^2}}{4\pi^3 \sqrt{\epsilon_0 m R^2 c^2}} \quad (8)$$

由(6), (8)两式可得

$$R = \frac{me^4}{8\epsilon_0^2 h^3 c} \quad (9)$$

(9)式与光谱实验结果符合得相当好。这样 R 就不再是半经验常量了。把(9)式代入(5)式, 可得

$$E_n = -\frac{1}{n^2} \cdot \frac{me^4}{8\epsilon_0^2 h^2} \quad (10)$$

这就是著名的玻尔能级公式。上式也可写成

$$E_n = -\frac{1}{n^2} E_0, E_0 = -\frac{me^4}{8\epsilon_0^2 h^2}$$

$E_0 = -13.6\text{eV}$ 是氢原子基态能量。

把(9)式代入(6)式, 可得

$$a_n = n^2 \cdot \frac{\epsilon_0 h^2}{\pi m e^2}$$

上式也可写成

$$a_0 = 0.529 \times 10^{-10}\text{m}, \text{称为玻尔半径。}$$

为求得角动量量子化条件, 先将(11)式代入(1)式, 得

$$v_n = \frac{1}{n} \frac{e^2}{2\epsilon_0 h} \quad (12)$$

由(11), (12)两式可得角动量

$$L_n = m v_n a_n = n \cdot \frac{h}{2\pi} \quad (13)$$

弗兰克-赫兹实验 (Franck-Hertz experiment)

验证玻尔关于原子中能量量子化假设的实验。图 1-23-19 是实验装置的示意图。在

图 1-23-19

充有适量水银蒸汽的三极管中, 栅极 G 相对于阴极 C 的电压为 V_G , 板极 P 有一稍低于栅极的电压 $V_P = V_G - V$, V 一般为零点几伏。在阴极发射热电子时, 连续改变 V_G 的值, 测定板极电流 I 。当 V_G 由零开始升高时, I 也随之增大, 但 V_G 升高到临界值 $V_G = 4.9\text{V}$ 时, 电流 I 突然减小。当 V_G 显著地超过 V_G 时, 电流 I 又开始增加, $V_G = 2V_G$ 时, 电流 I 再次降落。这种效应在 $V_G = 3V_G$ 、 $V_G = 4V_G$ ……时还会重现。 I 与 V_G 的关系, 如图 1-23-20 的曲线所示。

图 1-23-20

上述实验事实，可做如下解释：

在栅极电压 $V_G < V_C$ 时，电子在 CG 间被加速获得的能量小于 eV_C （4.9 电子伏），它与管中水银原子发生的碰撞是弹性碰撞，并不损失动能，在穿过栅极后可以克服 GP 间的负电压到达板极。这时板极电流 I 随 V_G 的增加而增大，因为由于热灯丝的发射而聚集在灯丝附近的负空间电荷，随着电子更快地被栅极吸引而迅速减少。

板极电流在 V_G 达到 V_C 这个临界值时突然减小，说明电子被加速到能量等于 eV_C 时，与水银原子发生了非弹性碰撞，水银原子被激发跃迁到高能态，而电子则失去其全部动能，无法克服 GP 间的负电压到达板极。

当 V_G 显著地超过 V_C 时，板极电流又开始增加，是因为与水银原子发生非弹性碰撞的电子在碰撞后仍保留一部分动能，速度虽然减小了但仍能达到板极。

当栅极电压增加到 $2V_C$ 时，板极电流 I 再次降落，是因为电子和两个不同的原子进行两次非弹性碰撞，因而损失了全部动能不能到达板极。

这种效应在 $V_G=3V_C$ ， $V_G=4V_C$ 等处的重现，可用电子与不同的原子连续进行三次、四次非弹性碰撞来解释。

实验还证明，当电子与水银原子发生非弹性碰撞时，水银蒸汽开始发出辐射，其波长 $\lambda = 253.7\text{nm}$ ，能量恰好是 4.9eV 。4.9V 恰好是水银原子的第一激发电势。

由此可见，原子只能从电子那里取得一份严格确定的能量 $W=eV_C$ 。这个事实有力地支持了玻尔理论中原子具有分立能态的概念。

德布罗意波 (de Broglie wave)

在确认了光的粒子性以后，德布罗意于 1923 年提出实物粒子也具有波动性。表征实物特性的物理量 E （能量）和 P （动量）与表征波的特性的物理量 ν （频率）和 λ （波长）之间有如下的关系：

$$E = h\nu = \eta \quad ,$$

$$p = \frac{h}{\lambda} = \eta k$$

这后一个关系是德布罗意从理论上推导出来的，称为德布罗意方程， λ 叫德布罗意波长。根据德布罗意的基本思路，可做如下推导：

由狭义相对论，实物粒子的能量可表示为

$$E_0 = m_0c^2, E = mc^2, m = \frac{m_0}{\sqrt{1 - v^2/c^2}} \quad (1)$$

式中的 m_0 为粒子的静质量， E_0 为粒子的静能， v 为粒子的运动速度， c 为光速， m 和 E 分别为运动粒子的质量和能量。

如果把实物粒子看成一种波，并且假定适用于光子的公式 $E=h\nu$ 也适用于粒子，则有

$$E_0 = hv_0 = \eta\omega_0, E = hv = \eta\omega,$$

$$\omega = \frac{1}{\sqrt{1 - v^2/c^2}} \quad (2)$$

式中的 v_0 和 v 分别是在相对于粒子为静止的参照系 K 和相对于粒子以速度 v 运动的参照系 K' 中观测到的与粒子相联系的波的频率。

比较(1), (2)可得

$$\eta\omega = mc^2, \omega = \frac{mc^2}{\eta} \quad (3)$$

如果用

$$= A \sin \omega t_0$$

表示参照系 K 中粒子对应的波, 根据洛伦兹变换 $t_0 = \frac{t - vx/c^2}{\sqrt{1 - v^2/c^2}}$, 在

参照系 K' 中这个波为

$$\psi(x, t) = A \sin\left(\omega t - \frac{\omega vx}{c^2}\right)$$

$$= A \sin(\omega t - kx). \quad (4)$$

式中

$$k = \frac{2\pi}{\lambda} = \frac{\omega v}{c^2}. \quad (5)$$

为 K' 系中观察到的粒子波长。由此有

$$\lambda = \frac{2\pi c^2}{\omega v}$$

把(3)式代入上式有

$$\lambda = \frac{h}{mv} = \frac{h}{p}$$

即
$$p = \frac{h}{\lambda} = \eta k.$$

(4)式表示的是具有单一频率的平面简谐波, 根据(5)式, 它的相速度

$$v_p = \frac{\omega}{k} = \frac{c^2}{v}$$

比光速还要大。考虑到这种平面简谐波在空间中是无限扩展的, 它不能确定粒子的位置, 因此可以设想, 与粒子联系的波是由无限多个振幅、频率各不相同的简谐波(中心频率为 v) 叠加而成的波包(图 1-23-21)。由(2)式和(5)式可知这个波包的群速度 v_g 恰好等于粒子的速度 v :

$$v_g = \frac{d\omega}{dk} = \frac{d\omega/dv}{dk/dv} = v$$

图 1-23-21

这种与物质粒子相联系的波叫做德布罗意波或物质波。

对于宏观粒子, 德布罗意波长很短, 例如质量 $m=10^{-9}\text{kg}$, 速度 $v=10^{-2}\text{m/s}$ 的微粒, 德布罗意波长为 $\lambda = 6.6 \times 10^{-23}\text{m}$ 。这样短的波长是无法观测的, 因此可以不考虑宏观物体的波动性。微观粒子情况就不同了, 例

如电子的德布罗意波长

$$\lambda = \frac{h}{m_e v} = \sqrt{\frac{150\text{eV}}{E_k}} \times 10^{-10} \text{ m}$$

当电子的动能 $E_k=150\text{eV}$ 时, $\lambda=10^{-10}\text{m}$, 与原子大小同数量级, 在晶体散射中会观察到衍射现象。

电子衍射和干涉 (diffraction and interference of electrons)

(1)戴维森-革末实验 (1927) 图 1-23-22 是实验装置的示意图。电子枪把有确定速

图 1-23-22 电子从单晶体表面衍射示意图

度的电子垂直射向晶体镍的 (111) 面。接收散射电子的收集器可以沿环绕晶体的圆弧移动, 晶体本身也可绕与入射电子束同方向的轴旋转, 这样就可以测量晶面前方不同方向上电子的散射强度。实验结果是, 用动能 $E_k=54\text{eV}$ 的电子束, 在散射角 $\theta=50^\circ$ 时观察到极大值。根据晶体衍射的理论, 只有在 $n\lambda = d\sin\theta$ 时才出现衍射极大值。式中的 λ 是电子的波长, d 为晶体原子间的间隔 (图 1-23-23), 也叫空间光栅常数。 n 是衍射极大值的级次。对于晶体镍, $d=2.15 \times 10^{-10}\text{m}$, 当 $n=1$ 时, 可得电子的波长 $\lambda=1.65 \times 10^{-10}\text{m}$ 。这个值与由德布罗意公式计算所得的结果 $\lambda=1.67 \times 10^{-10}\text{m}$ 在误差范围内是一致的。

图 1-23-23 衍射极大发生在 $d\sin\theta$ 为波长整数倍的方向上

(2)G. P. 汤姆孙实验 (1927) 电子衍射, 不仅能在单晶体上观察到, 也能在多晶体上观察到。图 1-23-24 是实验的示意图。

图 1-23-24 多晶体的电子衍射

原初电子束通过一层多晶体薄膜 (厚度约 10^{-7}m) 射向照相底片 P。薄膜中的小单晶体的排列是杂乱无章的, 构成了空间衍射光栅。电子散射强度极大值的方向满足布喇格条件

$$n\lambda = 2d\sin\varphi. \quad (1)$$

式中 λ 是电子的德布罗意波长, d 是空间光栅常数, φ 是射线与光栅平面的夹角, n 是衍射极大值的级次。薄膜中满足这一条件的任一小单晶体 K, 可在底片 P 上投射一束衍射电子 KQ, 使 Q 处出现斑点。由于薄膜中小晶体排列的无规性, 必然有一些小晶体它们与小晶体 K 的位置之差只是围绕 SO 轴转动了一个角度。因为 SO 轴的方向与入射电子束的方向是重合的, 在底片上会得到一个以 O 为圆心、OQ 为半径的环。用 D 表示环的直径, L 表示底片到薄膜的距离, 则有

$$\tan 2\varphi = \frac{D}{2L}. \quad (2)$$

当 φ 很小时, 由 (1), (2) 可得

$$n\lambda = d \frac{D}{2L}. \quad (3)$$

对于非相对论性电子有

$$\lambda = \frac{h}{m_e v} = \frac{h}{\sqrt{2m_e eV}} \quad (4)$$

式中的 e 为电子电荷， V 为电子枪的加速电压。由(3)，(4)可知，对于同一级次 n ，有

$$D\sqrt{V} = \frac{2L}{d} \frac{nh}{\sqrt{2m_e e}} \quad (5)$$

上式右边为一定值，所以 D 与 \sqrt{V} 成反比。这个关系在实验中得到很好的证实。

(3) 电子干涉实验 (Möllenstedt 和 Duker 1954) 图 1-23-25 为实验的示意图。电子枪由 S 射出电子束，一根带正电的细金属丝 F (半径约 1 微米) 放在电子束通过的路径上。经过金属丝左侧的电子，受到金属丝的吸引向右偏转，经过金属丝右侧的电子，受到金属丝的吸引向左偏转。所有来自 F 右侧的电子好像都从同一点 S_1 射出，所有来自 F 左侧的电子好像都从同一点 S_2 射出， S_1 和 S_2 是以 S 为中心的对称点， $S_1 S_2 = d$ 。在垂直于 SZ 轴且与 S 相距 L 处的底板上，显示出电子的干涉条纹，两相邻极大值间的距离 $x =$

图 1-23-25 电子干涉实验

$\lambda \frac{L}{d}$ ，其中 $\lambda = \frac{h}{mv}$ 是电子的德布罗意波长。

电子显微镜 (electron microscope)

简称电镜，是一种利用电子透镜聚焦电子束，形成高放大倍率物体像的装置。电镜有三种不同的类型：

(1) 透射式电镜 (TEM) 其构造与光学显微镜相似，由电子枪、会聚透镜、物镜、投影镜和真空系统组成。只不过这里的透镜不是由实物构成的，而是由磁场或电场构成的电子透镜。电子枪用来发射电子束，会聚镜用来会聚电子束和调节电子束的强度，物镜用来获得样品的放大像，投影镜则把物镜放大的像再一次放大，并产生可在屏幕上观察投影的最终像。图 1-23-26 是这种电镜的“光路”图。

图 1-23-26 透射式电镜“光路”示意图

透射电镜成像的原理是：电子束照射样品时，遇到样品内原子的那些电子被散射而改变了出射方向，不参与成像作用，只有穿过原子间空隙的透射电子才参与成像作用。这些反映物质内部结构的透射电子，就形成了有明暗反差的物体放大像。为了得到清晰的像，要使用单一能量的电子，而且须把要观察的样品切得很薄 (小于 50 纳米)，使透过物体的电子在成像时能量不致改变。真空系统也是为了防止电子与空气分子碰撞而损失能量。由于样品太薄，限制了视场深度，只能得到二维的平面像。因为电子的波长远比可见光的波长短，这种电镜的分辨能力远优于光学显微镜，可达 0.2 纳米。

(2) 扫描式电镜 (SEM) 精确聚焦的电子束在样品上扫描时，电子

与样品中的原子相互作用，可以被反射（反向散射），也可以引起次级电子发射。通过电子探测器把这些电子收集起来，形成与电子数目成正比的电流，用来调制进行同步扫描的显像管。由于样品表面凹凸不平，激发的次级电子有朝向探测器的，也有背向探测器的，因而在显像管上显示出具有明暗反差、富有立体感的表面形貌。这种电镜的分辨能力较低，约为 3 纳米。图 1-23-27 是扫描电镜的原理图。

图 1-23-27 扫描电子显微镜原理图

(3)扫描透射电镜（STEM） 精确聚焦的电子束在样品上进行扫描，用透射出去的电子去调制一个同步扫描的显像管。这种电镜兼有上述两种电镜的优点，既有高分辨能力（0.3 纳米），又能显示物体表面的三维形貌。

波粒二象性（wave-Particle dualism）

在经典物理学中，理想的粒子可以看作质点，在任何时候，它都有确定的位置和速度；理想的波具有完全确定的频率和波长，它在空间中是无限扩展的。从经典的观点看，这两个概念是互相排斥的，不能用这两个概念去描述同一物理现象。

现代物理学的发展，突破了经典观点的局限性。一些实验（如光电效应）迫使人们把原来看成是波的光看成粒子；另一些实验（如电子衍射）迫使人们把原来看成是粒子的电子看成波。不论是光还是电子，都是既具有波动性又具有粒子性的实体，人们把这称为波粒二象性。描述粒子特征的物理量——能量和动量跟描述波动特征的物理量——频率和波长，由爱因斯坦和德布罗意公式

$$E = h\nu, p = \frac{h}{\lambda}$$

联系起来。

应该注意的是我们不可能同时观测到物质的波动性和粒子性。一个客体，例如电子，它的行为更像波还是更像粒子，不仅取决于电子本身，也部分地取决于电子的周围环境。当电子与一个能指示其位置的装置相互作用时，它的粒子性就比波动性更占优势；当电子与一个能测量其动量的装置发生相互作用时，它的波动性就比粒子性更占优势。

波动性和粒子性的矛盾，可以通过统计性的概念统一起来。在电子或光子的衍射实验中，如果入射电子流或光子流的强度很大，即在单位时间内有许多电子或光子穿过晶体，照相底片上立即出现衍射图样。如果入射电子流或光子流强度很小，在整个衍射过程中电子或光子几乎是一个一个地穿过晶体，在照相底片上就出现一个个感光点，这些感光点开始时是无规则分布的，但随着时间的延长，感光点的数目增多，最终它们也会在底片上形成衍射图样。

由此可见，在衍射过程中，每一个电子或光子的行为与其他电子或光子无关，也就是说衍射图样不是电子或光子之间相互作用形成的，而是电子或光子具有波动性的结果。这种波动性表现在：尽管单个电子或光子没有确定的轨迹，出现在什么地方是不确定的，但当我们考察组成电子束或光子束的全部电子或光子的运动时，电子或光子的运动就表现出与波动理

论结果一致的规律性。电子或光子的衍射现象表现为许多电子或光子在同一实验中的统计结果，或者表现为一个电子或光子在多次相同实验中的统计结果。从统计的观点看，大量电子或光子被晶体衍射和它们一个个地被晶体衍射之间的差别，仅在于前一实验是对空间的统计平均，后一实验是对时间的统计平均。在前一种情况下可以说，从空间上看电子或光子在某些地方出现得稠密些，在后一种情况下可以说，从时间上看，电子或光子在某些地方出现得频繁些。由此可以得出，波在某一时刻在空间某点的强度就是该时刻在该点出现粒子的概率。

应该注意的是电子和光子这类微观客体，并不是经典的波，也不是经典的粒子。经典波的振幅是可以测量的，物质波的振幅则是不可测量的，只有 $|\psi|^2$ 才是可测量的。经典的粒子是有确定的位置和速度的，微观粒子则不能同时确定其准确的速度和位置。微观客体很难用经典的概念完全描述。光子和电子（实物粒子）虽然都具有波粒二象性，但两者还是有区别的。跟光子联系的是电磁波，跟电子联系的是物质波。光子的静止质量为零，在真空中以同一速度传播；电子的静止质量不为零，可以具有小于光速的任何速度。

不确定原理 (uncertainty principle)

也称测不准原理，是海森伯于 1927 年提出的。海森伯原来的叙述是：“假如对任何客体进行测量，并且测量其动量的 x 分量，不确定量为 Δp_x ，那么关于其 x 位置，就不可能同时知道得比 $\Delta x = h / \Delta p_x$ 更准确。”即在任何时刻，位置的不确定量和动量的不确定量的乘积必定大于普朗克常量， $\Delta x \Delta p_x > h$ 。这就是说：在任意时刻，我们对粒子位置知道得越准确（ Δx 越小），则对粒子运动的知识就越不准确（ Δp_x 越大）；反之亦然：我们对粒子的运动知道得越准确（ Δp_x 越小），则对粒子的位置知道得越不准确（ Δx 越大）。

不确定关系是量子力学中极为重要的关系，是微观粒子波粒二象性的必然结果。为了描述定域化（位置确定）的粒子，必须构成一个波包，它在一点上振幅很大，而在其余各处振幅很小。把大量波长不同的波叠加起来，就可构成这样的波包，而且波长的范围越宽，构成的波包越窄，描述的粒子也就更加定域化了。定量地研究表明，波包的宽度 Δx 与波数的范围 Δk 有如下的关系：

$$\Delta x \Delta k \approx 1.$$

由德布罗意方程 $p = \hbar k$ 可得 $\Delta p_x = \hbar \Delta k$ ，故有

$$\Delta x \Delta p_x \approx \hbar.$$

这与海森伯叙述的不确定关系是一致的。一般把动量的 x 分量记作 p_x ，即

$$\Delta x \Delta p_x \approx \hbar$$

在经典理论中，是用决定论来描述世界的：首先需要知道每个粒子的初始位置和初始动量，然后才能用运动方程确定它们的未来轨道。由于(1)式表明粒子的位置和动量不可能同时无限精确地加以确定，它意味着对经典理论中决定论描述的适用范围施加的量子力学的限制。

不仅在位置 x 和动量 p_x 两个变量间存在不确定关系，在时间 t 与能量

E两个变量间也存在不确定关系。设有一速度为 $v = \frac{p}{m}$ 的粒子沿x方向运动。要知道粒子经过某一点 $x=x_0$ 的时刻，可在 x_0 处设一屏幕，观测粒子穿过屏幕的时刻。如果把粒子看成长度为 Δx 的波包，则粒子穿过屏幕的时刻有一不确定量 $\Delta t = \frac{\Delta x}{v}$ ，故有 $\Delta x = v \Delta t$ 。根据 $\Delta x \Delta p_x \geq \frac{h}{2}$ 可得

$$\Delta p_x \Delta t \geq \frac{h}{2} \quad \text{由于 } E = \frac{p_x^2}{2m}, \quad \Delta E = \frac{p_x}{m} \Delta p_x = v \Delta p_x, \quad \text{即有}$$

$$\Delta t \Delta E \geq \frac{h}{2} \quad (2)$$

(2)式的含义是：当我们测量粒子沿x轴通过某一确定点 $x=x_0$ 的时刻时，其准确度不能超过 $\Delta t \geq h/2\Delta E$ 。也就是说，我们对粒子的能量知道得愈准确 (ΔE 愈小)，则对粒子通过确定点 x_0 的时刻的知识就愈不准确 (Δt 愈大)。反过来也是一样，我们对粒子通过确定点 x_0 的时刻知道得愈准确 (Δt 愈小)，则我们对粒子能量的知识就愈不准确 (ΔE 愈大)。

当某一体系存在着以 τ 为特征时间的变化过程时，体系能级的不确定量 ΔE 应满足时间-能量不确定关系： $\tau \Delta E \geq \frac{h}{2}$ 。在定态情况下， τ 为无穷大，能量可确定到任何精确度。但是，对于具有有限寿命的态，其相应的能量就是不能精确确定的。

上面只对不确定关系的数量级做了粗略的讨论。更严格的论证可得

$$\Delta x \Delta p_x \geq \frac{\hbar}{2},$$

$$\Delta t \Delta E \geq \frac{\hbar}{2}.$$

波函数 (wave function)

在经典力学中，质点的状态用它的位置和动量来描写。由于微观粒子具有波粒二象性，粒子的位置和动量不能同时有确定值，因而质点的经典描写方式也就不适用于微观粒子了。描写微观粒子的运动状态要用波函数。一个微观系统的波函数包含着所有力学性质的信息，如果系统某个态的波函数是已知的，就可通过适当的运算导出该态下系统的全部可测性质。波函数用 $\psi(r, t)$ 来表示，一般是复函数。例如，描写具有确定动量 P 和能量 E 的粒子状态的波函数为

$$\psi(r, t) = A_0 e^{i(P \cdot r - Et)/\hbar}$$

粒子的波函数 $\psi(r, t)$ 本身是个不可测量的量，因而没有直接的物理意义。只有 $|\psi(r, t)|^2 = \psi(r, t)\psi^*(r, t)$ 才是有物理意义的，它与粒子在时刻 t 出现在 r 处体积元 $d\tau$ 内的概率 $dp(r, t)$ 成正比，即

$$dp(r, t) = C |\psi(r, t)|^2 d\tau \quad (1)$$

把(1)式对整个空间取积分，就得出粒子在空间各点出现的概率之和，这个和等于1。

$$\int dp(r, t) = C \int |\psi(r, t)|^2 d\tau = 1. \quad (2)$$

由此可求出比例常数

$$C = \frac{1}{\int \psi^2 d\tau} \quad (3)$$

由于粒子在空间各点出现的概率的总和等于 1，因而粒子在空间各点出现的概率只决定于波函数在空间各点强度的比，而不决定于强度的绝对大小。也就是说，将波函数乘上一个常数后，所描写的粒子状态并不改变。所以我们可以用波函数 $\psi'(r, t) = \sqrt{C}\psi(r, t)$ 来代替 $\psi(r, t)$ 。

这时，在时刻 t 和 r 点附近的体积元 $d\tau$ 内找到粒子的概率是

$$dp(r, t) = |\psi'(r, t)|^2 d\tau$$

式中的 $|\psi'(r, t)|^2$ 就是在时刻 t 和 r 点粒子的概率密度。而(2)式可写为

$$\int |\psi'(r, t)|^2 d\tau = 1 \quad (4)$$

(2)式和(4)式称为波函数归一化条件， \sqrt{C} 称为归一化因子，满足(4)式的波函数 $\psi'(r, t)$ 称为归一化波函数。

量子力学还要求波函数必须满足以下条件：波函数在变量变化的全部区域内是单值的，除有限个点外是有限的和连续的，这个条件称为波函数的标准条件。

薛定谔方程 (Schrödinger equation)

非相对论性量子力学的基本方程。它反映了微观系统的状态随时间变化的规律。微观系统的状态由波函数 $\psi(r, t)$ 来描写，薛定谔方程是波函数 $\psi(r, t)$ 的一个微分方程，其形式为

$$i\hbar \frac{\partial \psi}{\partial t} = \frac{\hbar^2}{2m} \nabla^2 \psi + U(r, t) \psi$$

式中的 m 是粒子的质量， $U(r, t)$ 是粒子所在力场的势函数。或者也可写成

$$i\hbar \frac{\partial \psi}{\partial t} = \hat{H} \psi$$

式中的 \hat{H} 是哈密顿算符：

$$\hat{H} = -\frac{\hbar^2}{2m} \nabla^2 + U(r, t)$$

在经典力学中，能量 E 与动量 p 和势能 $U(r, t)$ 的关系为：

$$E = \frac{p^2}{2m} + U(r, t)$$

如果把上式中的能量 E 和动量 p 分别看做算符 $i\hbar \frac{\partial}{\partial t}$ 和 $-i\hbar \nabla$ ，薛定谔方程即

可由上述关系中得出。

应该特别指出，上述说明绝不是薛定谔方程的推导或证明，只是为了说明它的思路而与经典力学所做的对比。薛定谔方程不是推导出来的。我们必须把它当作一个合理的假设和理论的基本出发点，它的正确性除了用实验来检验外，无法用其他方法来证明。

一般说来，只要知道粒子的质量和它在势场中的势函数 U 的具体形式，就可以写出它的薛定谔方程，再根据给定的初始条件和边值条件，就

可求出描述粒子运动状态的波函数。例如，对于一维运动的自由粒子， $U=0$ ，薛定谔方程为

$$i\hbar \frac{\partial \psi}{\partial t} = -\frac{\hbar^2}{2m} \frac{\partial^2 \psi}{\partial x^2},$$

解出其波函数为

$$\psi(x, t) = Ae^{-i(kx - \omega t)}.$$

当势函数 $U(r, t)$ 与时间 t 无关时，薛定谔方程的解可以写成

$$\psi(r, t) = \psi(r) e^{-i(kx - \omega t)}.$$

式中的 $\psi(r)$ 满足定态薛定谔方程

$$-\frac{\hbar^2}{2m_0} \nabla^2 \psi + U(r)\psi = E\psi$$

氢原子的量子理论 (quantum theory for hydrogen atom)

用量子力学处理氢原子问题，要解定态薛定谔方程

$$-\frac{\hbar^2}{2m} \nabla^2 \psi + U\psi = E\psi$$

式中的 $U = -\frac{e^2}{4\pi\epsilon_0 r}$ ， m_0 作为一级近似可用电子质量 m_e ，精确解可用电子和质子的约化质量

$$m_0 = \frac{m_e m_p}{m_e + m_p} = \frac{m_e}{1 + m_e/m_p}.$$

上述方程的解，即氢原子的波函数。采用球面坐标 (图 1-23-28)，可分解为径向

图 1-23-28 球面坐标

波函数 $R_n^l(r)$ 和球谐函数 $Y_l^m(\theta, \varphi)$ 的乘积，即

$$\psi_{nlm} = R_n^l(r) Y_l^m(\theta, \varphi)$$

式中的 n, l, m_l 是波函数的三个量子数： n 是主量子数； l 是轨道角动量量子数，也叫角量子数； m_l 是磁量子数。

用量子力学研究氢原子得出如下结果：

(1) 氢原子的能量是量子化的，绕核旋转的电子可处于不同的量子态。每个量子态都用 n, l, m_l 三个量子数组成的数组来标记。一般主量子数用数字直接表示，角量子数分别用 s, p, d, f, g, h, \dots 等字母表示 $l=0, 1, 2, 3, \dots$ 等状态。如 $n=3, l=0, 1, 2$ 的态分别记作 $3s, 3p, 3d$ 。

量子力学中也使用“轨道”的概念，如 $1s$ 轨道， $3d$ 轨道等。不过它的意义与玻尔原子中的轨道不同，不是描述电子绕核运动的轨迹（根据不确定原理，在原子尺度内电子的轨迹是不确定的），而是描述电子在原子中的概率分布，即波函数。知道了某一量子态的波函数 $\psi(r)$ ，也就知道了原子中任意一点出现电子的概率密度。

(2) 氢原子的能量只取决于主量子数 n ， n 可取任何正整数值。与主量子数 n 对应的能量分立值为

$$E_n = -\frac{m_e e^4}{32\pi^2 \pi^2 \epsilon_0^2 \hbar^2 n^2} = -\frac{13.6\text{eV}}{n^2} .$$

(3)轨道角动量取决于角量子数 l , l 可取由零到 $n-1$ 的任何整数。与角量子数 l 对应的角动量分立值为

$$L = \sqrt{l(l+1)}\hbar$$

(4)磁量子数 m_l 决定轨道角动量的空间取向。 m_l 可取 l 与 $-l$ 之间的任何整数。角动量在外磁场方向上的分量 L_z 只能取分立值

$$L_z = m_l \hbar$$

图 1-23-29 给出了 $l=1, 2$ 时角动量的取向。

图 1-23-29 角动量的空间量子化

由 n, l, m_l 的关系可知, 对应于每个能级 E_n 都有 $\sum_{l=0}^{n-1} (2l+1) = n^2$

个独立的波函数, 它们分别描述轨道角动量的不同状态。所以主量子数为 n 的态是 n^2 重简并的。下表给出了 $n=1, 2$ 时氢原子的波函数, 表中的 a_0 为玻尔半径。

氢原子的波函数

n	l	m_l	状态记号	$\psi_{n l m_l}$
1	0	0	1s	$\psi_{100} = \frac{1}{\sqrt{\pi a_0^3}} e^{-r/a_0}$
2	0	0	2s	$\psi_{200} = \frac{1}{\sqrt{2\pi a_0^3}} \left(2 - \frac{r}{a_0}\right) e^{-r/2a_0}$
2	1	0	2p	$\psi_{210} = \frac{1}{4\sqrt{2\pi a_0^3}} \frac{r}{a_0} e^{-r/2a_0} \cos \theta$
2	1	1	2p	$\psi_{211} = \frac{1}{4\sqrt{2\pi a_0^3}} \frac{r}{a_0} e^{-r/2a_0} \sin \theta \cos \varphi$
2	1	-1	2p	$\psi_{2,1,-1} = \frac{1}{4\sqrt{2\pi a_0^3}} \frac{r}{a_0} e^{-r/2a_0} \sin \theta \sin \varphi$

电子云 (electron cloud)

根据量子理论, 原子中每个电子的运动状态都可用波函数 $\psi_{n l m_l}$ 来描述, 不过我们无法知道某一时刻电子的准确位置, 只能知道它在某一体积元 d 内出现的概率 $* d = |\psi|^2 d$ 。这里的 $* = |\psi|^2$ 表示电子在 d 处单位体积内出现的概率, 称为概率密度。由于波函数 ψ 和概率密度 $|\psi|^2$ 在空间中是连续的, 因而电子在整个核外空间都留下了自己的踪迹, 而不是像玻尔理论所认为的那样, 电子只分布在平面轨道上。为了形象地描述电子运动的这种特性, 我们设想, 在原子核外的空间中围绕着一团云雾, 称为电子云, 电子云的浓度是不均匀的, 它在各处的浓度大小与该处电子出现的概率密度 $|\psi|^2$ 成正比: $|\psi|^2$ 大的地方电子云稠密, $|\psi|^2$ 小的

地方电子云稀薄。当然，电子并不能同时占据电子云分布的整个空间，相反地在量子力学中，电子仍然是点粒子。这意味着任意时刻，在原子中给定的位置上，要么没有电子，要么就是整个电子。电子云概念有着纯粹的统计意义，它只不过是电子概率密度分布的形象描述。图 1-23-30 给出了氢原子 2s 态电子的概率密度分布截面图。这个分布具有旋转对称性。围绕纸面内通过对称中心的轴旋转就可得到概率密度分布的三维图。

图 1-23-30 氢原子 2s 态电子概率密度分布示意图
考虑基态氢原子的波函数

$$\Psi_{100} = \frac{1}{\sqrt{\pi a_0^3}} e^{-r/a_0}$$

式中的 a_0 为玻尔半径， r 为电子距原子中心的距离。显然 $|\Psi|^2$ 是单调减小的，即电子在离原子中心较近处的概率密度比离原子中心较远处的概率密度大。但是，考虑到径向概率密度分布，即在半径为 r 的球壳上概率密度的积分 $4\pi r^2 |\Psi|^2$ ，则它的最大值出现在 $r=a_0$ 处。这就是说，从整体上看，基态氢原子中，电子出现在距原子中心等于玻尔半径处的机会最多，尽管在其他距离处电子出现的概率并不等于零，但是只要离开玻尔半径很小的距离，径向概率密度的数值就小得微不足道了。这就是在氢原子的量子理论中玻尔半径具有的意义。

自旋 (spin)

粒子固有的角动量，称为自旋角动量，简称自旋，用符号 S 表示。与轨道角动量的情形相似，

$$S = \sqrt{s(s+1)}, S_z = m_s \hbar$$

式中的 S 是自旋量子数， m_s 是自旋磁量子数。 m_s 的取值范围是 $s, s-1, \dots, -s$ ，共有 $2s+1$ 个值。

最早研究的是电子的自旋，它是为了解释电子的多重结构，特别是碱金属的双线结构，由乌仑贝克 (G.E.Uhlenbeck, 1900 ~ 1974) 和古兹密特 (S.A.Goudsmit, 1902 ~ 1978) 于 1925 年提出的。碱金属双线结构的一个例子是光学实验中常用的钠光源的 D 线，在高分辨率的光谱仪中分裂为两条谱线，波长分别为 589.0 纳米和 589.6 纳米。钠光谱的 D 线是价电子由 3p 态跃迁到 3s 态时发出的。既然这条谱线分裂成两条谱线，一定是始态或终态的能级发生分裂的结果。如果只考虑原子核和其他电子对价电子的库仑作用，在没有外磁场的情况下，量子数 n 和 l 完全确定了价电子的运动状态和能级，因此，双线结构所显示的能级分裂，不可能是由电子的轨道运动引起的，一定是由于电子在绕核运动的轨道角动量 L 外，还有某种固有的角动量。乌仑贝克和古兹密特把它称为电子自旋。实验表明，电子自旋在磁场中只能有两种取向 (参见“施特恩-格拉赫实验”)，所以 $2s+1=2$ ，由此得

$$s = \frac{1}{2}, S = \sqrt{\frac{1}{2} \left(\frac{1}{2} + 1 \right)} \hbar = \frac{\sqrt{3}}{2} \hbar,$$

$$m_s = \pm \frac{1}{2}$$

钠原子作为一个单电子系统，它的总角动量 J 等于轨道角动量 L 与自旋角动量 S 之和： $J = L + S$ 。由于 $s = \frac{1}{2}$ ， j 有两个可能值： $j = 1 + \frac{1}{2}$ ， $j = 1 - \frac{1}{2}$ ，即电子自旋相对于轨道角动量有两个可能的取向。这正是原子能级（除 $l=0$ 的 s 态外）分裂成双，引起钠光谱出现双线的原因。

对钠光谱 D 线的初态—— $3p$ 态， $l = 1$ 总角动量量子数为 $j = l + s = 1 + \frac{1}{2} = \frac{3}{2}$ 或 $j = l + s = 1 - \frac{1}{2} = \frac{1}{2}$ ，因此 $3p$ 态分裂为 $3^2 P_{1/2}$ 和 $3^2 P_{3/2}$ 两个能级（光谱项符号 p 左上角的 2 表示双重线，右下角的 $\frac{1}{2}$ ， $\frac{3}{2}$ 为量子数 j ）。

而对于钠光谱 D 线的末态—— $3s$ 态，由于 $l=0$ ，总角动量就是自旋角动量， $j = s = \frac{1}{2}$ 只取一个值，因此 $3s$ 态不分裂。所以钠光谱 D 线分裂成两条谱线（图 1-23-31）。

图 1-23-31 钠光谱 D 线

下面根据自旋-轨道相互作用，对能级劈裂的起源略加说明。从固定于原子核的参考系 K 中看来，电子绕原子核旋转，其角动量为 L 。但从固定于电子的参考系 K' 中看，核在绕电子旋转，它在电子所在处产生一磁场 B ， B 平行于 L 。电子的自旋磁矩 μ_s 与电子自旋角动量 S 平行。 μ_s 与核磁场 B 之间的相互作用能量为 $E = -\mu_s \cdot B$ ，因而 E 也与 $L \cdot S$ 成正比： $E = aL \cdot S$ 。式中的 $L \cdot S$ 称为自旋-轨道耦合项， a 取决于影响电子运动的各个变量。由于 S 相对于 L 有两种不同的取向，相应地 E 也有两种不同的值。所以自旋-轨道相互作用把每一个具有给定 l 值的电子能级劈成两个相隔很近的能级。

引入自旋磁量子数后，氢原子核外电子的状态就由 n, l, m_l, m_s ，四个量子数确定，跟每个主量子数 n 对应的量子态为 $2n^2$ 个。

粒子的自旋有不同的取值。有的粒子自旋为半整数（以 \hbar 为单位），如中子、质子、电子、 μ 子和中微子的自旋都是 $\frac{1}{2}$ ，有的粒子，自旋取整数值，如光子的自旋为 1，介子的自旋为零。自旋为半整数的粒子称为费米子，自旋为整数的粒子称为玻色子。

应该注意的是自旋是一个纯粹的量子力学量，不可能进行经典的描述。如果把电子看作一个半径 10^{-16} 米，电荷 $-e$ 的小球（目前的实验数据表明，电子的线度远小于 10^{-16} 米），自旋角动量为 $\frac{1}{2} \hbar$ 的电子，它表面上的切向速度会远大于光速。所以“自旋”一词，只不过是借用经典比喻的一种形象说法。

施特恩-格拉赫实验 (Stern-Gerlach experiment)

直接证明空间量子化和原子磁矩量子化的实验，是由施特恩 (Otto Stern, 1888 ~ 1969) 和格拉赫 (Walter Gerlach, 1889 ~ 1979) 于 1921 年完成的。在高真空容器中，使一窄缝形的银原子射线束通过非均匀磁场，观察射线在磁铁后方的底板上留下的痕迹 (图 1-23-32)。由于原子磁矩 μ 在磁场中的势能为

$$U = -\mu \cdot B,$$

图 1-23-32 斯特恩-格拉赫实验装置示意图

它在磁场中所受的力为

$$F = \mu \left(\frac{\partial B}{\partial z} \right) \cos \theta$$

其中 $\frac{\partial B}{\partial z}$ 为磁场梯度， θ 为 μ 与 B 的夹角，如果磁矩 μ 由于原子的热运

动而在磁场中有各种不同的取向，则 $\cos \theta$ 有不同的值，原子射线在板上的痕迹应扩展为带状，而实验结果是银原子的射线分裂为两条清晰的射线，这表明在磁场中只能取两个分立值，而不是经典理论预言的那样连续分布。这就为空间量子化提供了有力的佐证。

但是，实验结果只用电子轨道角动量的量子化又不能给予完满的解释。因为对任一角量子数 l ， $\cos \theta$ 的分立值有 $2l+1$ 个， l 为整数， $\cos \theta$ 的分立值应有奇数个；对 $l=0$ 的 s 态原子束不会分裂。如果认为电子除了轨道运动外还有自旋，当银原子处于 s 态时，整个原子的磁矩都是由自旋磁矩引起的；假定电子的自旋磁矩有正负两个态 ($s = \frac{1}{2}$, $m_s = \pm \frac{1}{2}$)，原子束就被不均匀的磁场分为两束。这样，施特恩-格拉赫实验就得到了圆满的解释。

原子磁矩 (magnetic moment of atom)

原子中做轨道运动的电子相当于一个圆电流，具有相应的磁矩 μ_l ，称为轨道磁矩，

$$\mu_l = -\frac{e}{2m_e} L.$$

式中的 m_e 为电子的静止质量， e 为电子的电荷， L 为电子的轨道角动量，负号表示磁矩方向与轨道角动量的方向相反。采用量子力学的 L 值，则有

$$\mu_l = \frac{e\hbar}{2m_e} \sqrt{l(l+1)}$$

上式可写作

$$\mu_l = -\sqrt{l(l+1)} \mu_B$$

其中 $\mu_B = \frac{e\hbar}{2m_e} = 9.27 \times 10^{-24} \text{ A} \cdot \text{m}^2$ ，称为玻尔磁子。

原子处于磁场 B 中时，圆电流受到力矩 $\tau = \mu_l \times B$ 的作用，电子轨道运动的平面，以

图 1-23-33 拉莫尔旋进

外磁场B的方向为轴，做角速度为 $\omega = \frac{eB}{2m_e}$ 的旋进（图1-23-33）。这叫做

拉莫尔旋进。

电子除轨道角动量外还有自旋角动量 S，相应地存在着自旋磁矩 μ_s 。由实验可知

$$\begin{aligned}\mu_l &= -\sqrt{s(s+1)}g_s\mu_B = -\sqrt{3}\mu_B, \\ g_s &= 2,\end{aligned}\quad (1)$$

式中 $s = \frac{1}{2}$ 为自旋量子数， g_s 称为朗德g因数，简称g因数。

也可以把轨道磁矩写作

$$\mu_l = -\sqrt{l(l+1)}g_l\mu_B \cdot g_l = 1. \quad (2)$$

其中的g因数 $g_l=1$ 。g因数是一个反映物质内部运动的重要物理量。

对于所有原子序数为奇数的单电子系统（偶数个电子的角动量双双抵消），电子轨道磁矩 μ_l 与自旋磁矩 μ_s 的合磁矩为

$$\mu = \mu_l + \mu_s.$$

由于 $g_s/g_l=2$ ，合磁矩 μ 不在总角动量 $J=L+S$ 的延长线上（图 1-23-34），但它和 μ_l 、 μ_s

图 1-23-34 电子磁矩与角动量的关系

一起，都围绕 J 的延长线方向旋进。把 μ 分解为沿 J 方向的分量 μ_j 和垂直于 J 方向的分量。由于后者绕 J 旋转，对外的平均效应为零，只有 μ_j 是个恒矢量，对外界发生作用。我们把 μ_j 称为原子的总磁矩：

$$\mu_j = \mu_l \cos(l, j) + \mu_s \cos(s, j). \quad (3)$$

(l, j)和(s, j)分别表示 μ_l 和 μ_j 之间以及 μ_s 和 μ_j 之间的夹角。引入朗德 g 因数 g_j ， μ_j 可写作

$$\mu_j = -\sqrt{j(j+1)}g_j\mu_B. \quad (4)$$

把(1)、(2)两式代入(3)式并应用三角形的余弦定理，可以求出(4)式中 g 因数的值为

$$g_j = \frac{3}{2} + \frac{s(s+1) - l(l+1)}{2j(j+1)}. \quad (5)$$

这就是单电子系统的 g 因数表达式。

对于另外一些原子，因多数情况下 L-S 耦合占优势，即可把电子的自旋、轨道角动量分别相加（“耦合”）成总自旋 S 和总轨道角动量 L，再把 S 和 L 耦合成总角动量 J。对于这样一些原子，仍可应用(5)式，只要把 s, l, j 分别改用 S、L、J 就可以了。

泡利不相容原理 (Pauli exclusion principle)

原子结构理论中的一个基本原理，也是自然界中一个重要定律。原子

中每个电子的状态可用 n, l, m_l 和 m_s 四个量子数来描述。泡利认为：在一个原子（或任何系统）中，任何两个电子不能有完全相同的四个量子数。

泡利原理不仅适用于电子，而且适用于所有具有半奇数自旋的费米子。泡利原理的更基本的表述形式是：由电子（或任何半奇数自旋的全同粒子）组成的体系，它的波函数必须是反对称波函数，即互相交换任何两个粒子，波函数的正负号就会改变。这种讲法跟前面的讲法是等效的。

原子的壳层结构和元素周期表 (atomic shell structure and periodicity of elements)

多电子原子中各个核外电子的状态，可近似地认为仍由四个量子数 n, l, m_l, m_s 来确定。这些核外电子按一定的壳层排列。主量子数 n 不同的电子分布在不同的壳层上。对 $n=1, 2, 3, 4, 5, \dots$ 的电子，其壳层分别用 K、L、M、N、O、……等符号表示。主量子数相同而角量子数 l 不同的电子，分布在不同的支壳层上。与 $l=0, 1, 2, 3, \dots$ 对应的支壳层分别用 s、p、d、f、……等符号表示。根据泡利不相容原理，角量子数为 l 的支壳层最多可容纳的电子数目为

$$Z_l = 2(2l+1),$$

主量子数为 n 的壳层最多可容纳的电子数目为

$$Z_n = \sum_{l=0}^{n-1} 2(2l+1) = 2n^2$$

门捷列夫元素周期表中各种元素的物理和化学性质随元素电荷数的增加而呈现周期性的变化，就是由于核外电子依次填充各个壳层时最外层电子（价电子）的数目发生周期

原子中各壳层和支壳层可容纳的最多电子数								
$n \backslash l$	0	1	2	3	4	5	6	Z_n
	s	p	d	f	g	h	i	
1K	2	-	-	-	-	-	-	2
2L	2	6	-	-	-	-	-	8
3M	2	6	10	-	-	-	-	18
4N	2	6	10	14	-	-	-	32
5O	2	6	10	14	18	-	-	50
6P	2	6	10	14	18	22	-	72
7Q	2	6	10	14	18	22	26	98

性变化引起的，核外电子是按照怎样的次序填充各个壳层和支壳层的呢？光谱学的实验研究表明：K、L 两个壳层是按量子数 n, l 的次序依次填满的。其他壳层都是在前一个壳层并未填满的情况下，就开始了下一个壳层的填充。例如，从 ^{19}K 到 ^{28}Ni 的各个原子，M 壳层的 3d 支壳层尚未填充，就有电子填入 N 壳层的 4s 支壳层了。这是因为 3d 支壳层的能级稍高于 4s 支壳层的能级，而核外电子总是趋向于占据最低的能级。实验表明，周期表中各原子的支壳层的填充次序为：1s, 2s, 2p, 3s, 3p, 4s, 3d, 4p, 5s, 4d, 5p, 6s, 4f, 5d, 6p, 7s, 5f, 6d, 7p。由此可得出适用于整个

周期表的电子填充规则：(1)所有的支壳层可按 $n+l$ 值分组；(2)按 $n+l$ 值增大的次序依次填充各组；(3)每组内的支壳层按 l 值减小的次序依次填充。参看图 1-23-35。在依次填充各个支壳层的过程中，每开始填充一个新的壳层，周期表就进入下一个周期。因此在元素周期表上，第一个周期只有两个元素，第二和第三个周期都有 8 个元素，第四和第五个周期都有 18 个元素，第六个周期有 32 个元素，第七个也就是最后一个周期，在自然界中只存在少数几种元素，到 $Z=92$ 的铀元素为止。第 93 号以后的超铀元素，都是用人工方法造出的（参看图 1-23-35）。

为什么某些主量子数大的支壳层能级会低于某些主量子数小的支壳层的能级呢？在多电子原子中，对于同一主量子数 n ，电子的能量总是随着角量子数 l 的增大而增大。按照索末菲理论，具有相同主量子数 n 而角量子数 l 不同的态，对应于半长轴相同而偏心率不同的椭圆轨道。图 1-23-36 给出了 $n=3$ 的三个容许轨道，分别用 $l=0, 1, 2$ 来表示， $l=2$ 的轨道是圆形的，其他两个轨道是椭

图 1-23-35 电子壳层的填充次序

图 1-23-36 根据索末菲理论得出的氢原子的电子轨道。角量子数越小，轨道的偏心率越大。轨道偏心率大的电子，可以贯穿内层电子的屏蔽，达到离核较近的地方，因而在一个运动周期的某段时间里，受到较大的核吸引力（受核的束缚强），使它的能量降低了。在主量子数小（ $n=1, 2$ ）时，相邻 n 值间的能量差大于因 l 的不同引起的能量差。当 n 变大时， n 和 l 的变化引起的能量差，数量级是相同的，因而引起了 $4s$ 能级稍低于 $3d$ 能级； $5s$ 、 $6s$ 和 $7s$ 能级，也分别低于 $4d$ 、 $5d$ 和 $6d$ 能级等现象。

X 射线 (X-ray)

也叫伦琴射线，是一种波长很短的电磁辐射，其波长范围从 10^{-3}nm 到 1nm （或更长一些）。当高速电子撞击金属靶时，就能产生 X 射线。图 1-23-37 是一种产生 X 射线的装置——X 射线管的基本构造示意图。A 为阳极（重金属），K 为灯丝，射线管内抽成真空，灯丝通电加热后发射热电子，在阳极和灯丝之间加上几万伏的高电压，热电子在高压电场的作用下被加速，撞击阳极表面，发出 X 射线。X 射线能使一些晶体发出荧光，能使气体电离和照相底片感光；它还具有很强的贯穿力，在工业上常用作金属零件的探伤，医学

图 1-23-37 X 射线管

上用来透视人体，诊断疾病。

对 X 射线光谱进行系统的分析后发现 X 射线可分为两类：韧致辐射和标识辐射。

图 1-23-38

当加速电子的电场不超过某一临界值时，X 射线的光谱是连续的，这种辐射称为轫致辐射。图 1-23-38 给出了在几种不同电压下电子轰击钨靶时产生的 X 射线连续谱。从图中可以看出辐射强度随波长而变化，但在短波方面有一极限波长 λ_{\min} ，它的大小只与加速电子的电压有关。

轫致辐射是由于高速电子与靶原子碰撞时骤然减速而产生的。电子被高压电场加速后具有的动能为

$$\frac{1}{2} m_e v^2 = eU$$

式中的 U 为加速电场的电压。当电子撞击靶时，一部分动能转化为靶的内能，另外一部分能量，以光子的形式发射出去，就是 X 射线，光子的能量介于 0 和 $\frac{1}{2} m_e v^2$ 之间，其最大值为

$$h\nu_{\max} = eU$$

所以 X 射线有连续谱，且有短波极限

$$\lambda_{\min} = \frac{hc}{eU}$$

当加速电子的电压超过某一临界值时，发射的 X 射线除连续谱外还出现线状谱。这

图 1-23-39 钨的 X 射线谱（电压 35kV）

种线状谱与靶物质有关，即每种物质都有自己独特的 X 射线光谱。这种辐射称为标识辐射。图 1-23-39 是加速电压为 35KV 时钨靶的 X 射线光谱。

标识辐射可用原子的壳层结构来说明。当高速电子与靶原子的某一内层电子，设为 K 电子碰撞时，K 电子就被激发。由于靶是重元素构成的，靶原子的内壳层，如 L、M 等壳层，都填满了电子，被激发的 K 电子不能跃迁到邻近的壳层，只能跃迁到最外层，或者完全脱离原子而使原子电离，失去了一个电子的 K 壳层，立即产生一个空穴；这时，外层电子，例如 L 电子，就要跃迁到这个能量较低的壳层上来填补空位，从而发射出光子能量为 $h\nu = E_L - E_K$ 的谱线。这条谱线就叫做 K_{α} 线。不只 L 层，其他外壳层，如 M 层、N 层上的电子，也有可能跃迁到 K 层，从而发射 K_{β} 、 K_{γ} 等谱线，这就形成了 K 系谱线。如果被高速电子撞击而脱离原子的不是 K 电子，而是 L 层或 M 层的电子，同样也会有更外层的电子跃迁到 L 层或 M 层上来，从而发出 L 系或 M 系谱线。由于这些谱线是靶物质所特有的，因而称为标识谱线。

X 射线的标识谱线可用图 1-23-40 所示的能级图表示出来。由于标识谱线是由原子

图 1-23-40 原子内层能级与 X 射线谱

内层电子的跃迁产生的，原子内层出现空穴是产生标识光谱的先决条件。这就要求轰击重金属靶的电子要有足够的能量，使靶原子的内层电子被电

离出来。所以加速电压必须超过某一临界值才能产生标识辐射。

用不同的金属靶做实验发现，所有元素的标识光谱结构都很相似，只是随着原子序数 Z 的增加，谱线都向高频方向移动。英国物理学家莫塞莱 (H. G. Moseley, 1887 ~ 1915) 于 1913 年发现，标识谱线波数的平方根与靶的原子序数之间存在着线性关系，这一规律称为莫塞莱定律。对于 K_{α} 系，莫塞莱得到如下的经验公式：

$$\nu_{K_{\alpha}} = 0.248 \times 10^{16} (Z-b)^2 \text{ Hz}, \quad b = 1 \quad (1)$$

就在这一年，玻尔发表了关于原子的量子理论，莫塞莱发现，从玻尔理论可以导出

$$\begin{aligned} \nu_{K_{\alpha}} &= \frac{c}{\lambda} \\ &= R c Z^2 \left(\frac{1}{1^2} - \frac{1}{2^2} \right) = \frac{3}{4} R c Z^2 \\ &= 0.246 \times 10^{16} Z^2 \text{ Hz} \quad (2) \end{aligned}$$

(2) 式与 (1) 式只有 Z^2 与 $(Z-1)^2$ 的差别。这可以认为，当 $n=1$ 壳层出现一个空穴时，考虑到电子的屏蔽作用， $n=2$ 壳层中的电子只受到 $Z-1$ 个正的基元电荷的吸引。因此， $n=2$ 壳层内的电子向 $n=1$ 壳层跃迁时发出的辐射频率，恰应为 (1) 式。

(1) 式可改写成

$$\begin{aligned} \Delta E_{K_{\alpha}} &= h R c (Z-1)^2 \left(\frac{1}{1^2} - \frac{1}{2^2} \right) \\ &= \frac{3}{4} \times 13.6 \times (Z-1)^2 \text{ eV} \quad (3) \end{aligned}$$

(3) 式的物理意义十分明显：其中的 $\frac{3}{4}$ 表示内层电子的跃迁（由 $n=2$ 到 $n=1$ ）， 13.6eV 是与里德伯常量相应的能量， $(Z-1)^2$ 表示跃迁的电子受到 $Z-1$ 个正基元电荷的吸引。这样，就可以根据标识谱线的频率精确地确定原子的 Z 值。这个方法，正是由莫塞莱第一次提出的。

主要参考资料

1. 杨福家。原子物理学。第 2 版。北京：高等教育出版社，1990。
2. 苟清泉。原子物理学。第 3 版。北京：高等教育出版社，1983。
3. 保罗·A. 蒂普勒。近代物理基础及其应用。第 1 版。上海：上海科学技术出版社，1981。
4. 吴大猷。量子论与原子结构。第 1 版。北京：科学出版社，1983。
5. 陈仁烈。统计物理引论。第 2 版。北京：人民教育出版社，1978。
6. E. H. 威切曼。量子物理学（伯克利物理学教程第四卷。第 1 版。北京：科学出版社，1978。
7. 科学技术百科全书第四卷。第 1 版。北京：科学出版社，1984。
8. 马大猷，沈嶸。声学手册。第 1 版。北京：科学出版社，1983。

- 9 . H.E.怀特。现代大专物理学(下册)。第 1 版。北京：科学出版社，1991。
- 10 . 黄昆。固体物理学。第 1 版。北京：人民教育出版社，1979。
- 11 . 中国大百科全书物理学。第 1 版。北京：中国大百科全书出版社。1987。
- 12 . K. Seeger。半导体物理学。第 1 版。北京：人民教育出版社，1981。
- 13 . 靳恭，武驷。半导体及其应用。第 1 版。北京：科学出版社，1975。
- 14 . [美]爱德华.S. 杨。半导体器件基础。第 1 版。北京：人民教育出版社，1981。
- 15 . [法]B.凯格纳克等。近代原子物理学。第 1 版。北京：科学出版社，1980。
- 16 . 程守洙，江之永。普通物理学(第三卷)。第 3 版。北京：人民教育出版社，1980。
- 17 . G.赫兹堡。原子光谱与原子结构。第 1 版。北京：科学出版社，1959。
- 18 . 倪光炯，李洪芳。近代物理。第 1 版。上海：上海科学技术出版社，1979。
- 19 . . 布洛欣采夫。量子力学原理。第 1 版。北京：人民教育出版社，1981。
- 20 . [美]波姆。量子理论。第 1 版。北京：商务印书馆，1982。
- 21 . [美]R.P.费曼，R.B.莱登，M.桑兹。费曼物理学讲义(第一卷)。第 1 版。上海：上海科学技术出版社，1983。
- 22 . [英]阿特金斯。量子·物质结构概念手册。第 1 版。北京：科学出版社，1986。
- 23 . 吴大猷。量子力学(甲部)。第 1 版。北京：科学出版社，1984。
- 24 . J.Rayski，J.M.Rayski。论时间-能量测不准关系的意义。大学物理，1988(4)期：48~50 页。
- 25 . 周世勋。量子力学。第 1 版。上海：上海科学技术出版社，1961。
- 26 . M.Alonso，E.J.Finn。量子物理学与统计物理学(大学物理基础第三卷)。第 1 版。北京：人民教育出版社，1981。
- 27 . 科学出版社名词室。物理学词典。第 1 版。北京：科学出版社，1988。
- 28 . A.P.弗伦奇，Edwin.F.泰勒。量子物理学导论。第 1 版。北京：高等教育出版社，1990。
- 29 . [美]D.S.萨科森。初等量子力学。第 1 版。北京：高等教育出版社，1985。
- 30 . 金原寿郎。基础物理(下册)。第 1 版。北京：人民教育出版社，1979。
- 31 . 褚圣麟。原子物理学。第 1 版。北京：人民教育出版社，1979。

二十四、激光

激光 (laser)

激光一词来自英文的 laser,音译莱塞,本是“受激辐射光放大”(Light amplification by stimulated emission of radiation)的简称,现在多用来指根据受激放大原理激发的相干光辐射。

根据量子理论,处于激发态的原子是不稳定的,经过很短时间(10^{-8} 秒量级),就自动返回较低的能态,而把两个能态间相差的能量,以光子的形式辐射出去,这个过程叫做自发辐射。如果处于激发态 E_2 的原子,受到外来光子的影响,向低能态 E_1 跃迁,这个过程叫做受激辐射。发生受激辐射的条件是外来光子的能量恰好满足 $h\nu_{21}=E_2-E_1$ 这个关系。受激辐射发出的光子与自发辐射发出的光子不同,它不仅与外来光子有相同的频率,而且有相同的相位、相同的偏振态和相同的出射方向。如果一个入射光子能够引起一连串的受激辐射,使更多具有上述特征的光子从受激原子中辐射出来,就实现了光放大。

但是,在一个原子系统中,自发辐射、受激辐射和辐射吸收这三种过程是同时存在的。在热平衡条件下,原子布居在能态 E_n 的概率为 $e^{-E_n/kT}$ 。因此,低能态的原子远多于高能态的原子。当外来光子入射到这个系统中时,被吸收的过程总是胜过引起受激辐射的过程,使光放大不能实现。要改变这种情况,必须使系统中处在高能态的原子数多于处在低能态的原子数。系统的这种状态叫做粒子数反转。为了实现粒子数反转,要从外部向系统供给能量,这个供给能量的过程,叫做抽运。

为了实现粒子数反转,除了有效的抽运手段外,还须原子系统有适当的能级结构。常用的激光工作物质,都是三能级或四能级系统(二能级系统不能实现粒子数反转)。在三能级系统中,抽运过程使原子从基态 E_1 跃迁到 E_3 态(图 1-24-1), E_3 态又迅速跃迁到 E_2 态, E_2 态是个亚稳态,寿命比较长(10^{-3} 秒量级)。当抽运功率较大时,就在 E_2 态和 E_1 态之间实现了粒子数反转。四能级系统与此类似(图 1-24-2),先使原子由基态跃迁到 E_4 态,再由 E_4 态跃迁到 E_3 态, E_3 态是个亚稳态,而 E_2 态寿命很短,因而在 E_3 态和 E_2 态之间实现了粒子数反转。

图 1-24-1 三能级系统 图 1-24-2 四能级系统

在实现了粒子数反转的系统中,处于高能态的原子向低能态跃迁时,受激辐射的光子数与自发辐射的光子数之比跟辐射的能量密度成正比。对于通常的热光源来说,自发辐射是主要的,受激辐射的光子数比自发辐射的光子数少得多。只有在热光源的温度达到数万开时,受激辐射过程才能超过自发辐射过程。为了在通常条件下得到光放大,可用一种装置,使在某一方向上的受激辐射不断得到放大和加强,最终超过自发辐射,这种装置就是光学谐振腔。图 1-24-3 是光学谐振腔的示意图。在实现了粒子数反转的工作

图 1-24-3 光学谐振腔示意图

物质中，一些处于高能态的原子，经过自发辐射跃迁到低能态。自发辐射的光子射向四面八方，其中偏离谐振腔轴线方向的光子，很快逸出腔外，只有沿着轴向运动的光子，不会逸出腔外，而且在谐振腔两侧受到反射镜的反射，沿轴线往复运动，使沿谐振腔轴线方向的受激辐射，得到雪崩式的放大，经由部分反射镜输出腔外，就是激光。由工作物质、抽运系统和光学谐振腔三部分组成的装置，就是激光器。

激光器作为一种新型光源，它发出的光具有普通光源无法比拟的下述特性：

(1) 高方向性激光在一个极小的立体角范围（一般为 10^{-5} 球面度 $\sim 10^{-8}$ 球面度）内向前传播，几乎是不发散的。

(2) 高单色性激光器发出的激光，集中在很小的频率范围内，其中心频率与频谱宽度之比高达 $10^{10} \sim 10^{13}$ ，而较好的普通单色光源，其 $\nu/\Delta\nu$ 的数量级只有 10^6 左右。

(3) 高亮度自然界最强的光源太阳，发光的亮度约为 $L = 10^3 \text{W}/(\text{cm}^2 \cdot \text{sr})$ 量级，而目前高功率激光器输出的亮度可达 $L = 10^{10} \sim 10^{17} \text{W}/(\text{cm}^2 \cdot \text{sr})$ 量级。如果考虑单色亮度 $L_\nu = L/\nu$ （单位频谱宽度的发光亮度），对太阳而言，在 500nm 附近， $L_\nu = 10^{-12} \text{W}/(\text{cm}^2 \cdot \text{sr} \cdot \text{Hz})$ 量级，而目前的高功率激光，单色亮度可达 $L_\nu = 10^4 \sim 10^7 \text{W}/(\text{cm}^2 \cdot \text{sr} \cdot \text{Hz})$ 。

(4) 高相干性激光的高单色性和高定向性使它比较接近理想的相干光。光的单色性越好，每个原子的发光时间 t 越长（ $t \propto \frac{1}{\Delta\nu}$ ），发出的波列长度——相干长度也越长。普通单色光源的相干长度，最好的只有几十厘米，而激光的相干长度可达数百米至数百千米。由于激光的发散角极小，横向的相干性也极高，整个光束截面内各点的振动都是彼此相干的。

固体激光器 (solid-state laser)

固体激光器种类很多，主要有红宝石激光器、掺钕的钇铝石榴石激光器 (YAG 激光器)、钕玻璃激光器等。

固体激光器的工作物质都是在一定的基质中掺入激活剂形成的。红宝石的基质是三氧化二铝 Al_2O_3 ，激活剂是氧化铬 Cr_2O_3 ，后者只占红宝石质量的 0.05%。图 1-24-4 是这种激光器的结构示意图。一小块直圆柱形红

图 1-24-4 红宝石激光器构造示意图

宝石，它的两个端面已被抛光，并镀上了银膜，一端是全反射膜，另一端有百分之几的透射率，形成谐振腔。把红宝石裹在氙闪光灯的螺旋状灯管中间，进行脉冲放电。在光的抽运作用下， Cr_2O_3 中的 Cr^{3+} 离子跃迁到高能级 E_3 。处于激发态的 Cr^{3+} 离子，把能量迅速地传递给晶格，无辐射地跃迁到亚稳态 E_2 ，因此在 E_2 和基态 E_1 之间形成粒子数反转，最后发出波长为 694.3 纳米的激光。这种激光器是三能级系统，图 1-24-5 是它的简化能级图。

图 1-24-5 红宝石激光器工作过程的简化能级图

红宝石激光器的效率在 0.2% 左右。氙灯的脉冲持续时间是几毫秒，单脉冲输出能量为几千焦。激光输出也是脉冲式的，单脉冲输出的功率可达 10^3 瓦量级。如果在谐振腔内引入一个快速光开关（调 Q 装置），把激光脉冲缩短到纳秒级，输出的峰值功率可达 10^9 瓦。

钇铝石榴石激光器和钕玻璃激光器的激活剂都是 Na^{3+} 离子，输出的激光波长都是 1.06 微米的红外光。这两种激光器的结构与红宝石激光器基本相同，不过工作物质的能级结构是四能级系统，钇铝石榴石激光器还能连续输出激光。

固体激光器由于激励光源的光能大部分转化为工作物质的内能，需要良好的冷却设备，一般采用水冷方式。固体激光器的优点是体积小、输出功率高，缺点是发出的激光在相干性和频率的稳定性上，都不如气体激光器。固体激光器主要用于激光测距、激光加工和激光医疗等方面。

气体激光器 (gas laser)

气体激光器种类繁多，从工作物质上看，有原子、离子、分子、准分子之分。这里首先介绍一种用途广泛的原子气体激光器——氦氖激光器。

氦氖激光器的工作物质为氖，辅助物质为氦，它由放电管、电极、反射镜和氦氖混合气体所组成，有内腔式和外腔式之分（图 1-24-6）。也有半外腔式的。外腔式放电管窗口与管轴成布儒斯特角，使垂直于纸面方向的偏振光经窗口的多次反射，完全逸出腔外，而平行纸面方向的偏振光毫无损失，能满足谐振的要求。放电管的长度，短的十几厘米，长的可达 2 米。管内气体压强在 130 帕上下，氦氖的压强比为 5 : 1 至 10 : 1。

图 1-24-6 氦氖激光器

这种激光器用气体放电方式激励氖原子。氦氖的能级结构如图 1-24-7 所示。当放电管加上几千伏直流电压后，从阴极发射出来的电子在向阳极做加速运动过程中，与氦氖原子碰撞，把能量传递给它们。被激发到亚稳态 2^1S 和 2^3S 的氦原子，根据选择定则，不能直接向基态跃迁。但是，氖原子的两个激发态 2S_2 与 3S_2 分别与这两个氦的亚稳态十分接近。处于 2^1S 和 2^3S 态的氦原子与基态

图 1-24-7 氦氖激光器的能级

氖原子碰撞时，就把自身的能量传递给氖原子，使它们分别跃迁到 2S_2 态和 3S_2 态，从而在 3S_2 和 3P_4 、 3S_2 和 2P_4 、 2S_2 和 2P_4 这三对能级间造成了粒子数反转，氦原子失去能量后又回复到基态。在实现了粒子数反转的氖气体中，自发辐射引起受激辐射，分别发出波长为 3.39 微米、632.8 纳米和 1.15 微米的激光。采取适当的技术措施，可抑制其中两种波长，输出单一波长的激光。

氦氖激光器可连续输出功率数毫瓦至数十毫瓦的平面偏振光，虽有输出功率小的缺点，但由于单色性好，在导向、准直、测距、测长和全息照相等许多方面，有着广泛的应用。

离子气体激光器中最常用的是氩离子激光器。工作物质为惰性气体氩，工作气压一般在 130 帕以下。以大电流直流放电使中性氩原子电离，并激励氩离子，实现粒子数反转，可发出多种波长的激光，其中以波长为 488.0 纳米和 514.5 纳米的最强。氩离子激光器可获得输出功率几十瓦的连续运转激光，主要用于激光显示、信息处理、激光激励、全息照相和激光光谱学研究、激光化学、激光医疗等方面。

分子气体激光器中常用的有二氧化碳激光器和氮分子激光器。二氧化碳激光器通常用气体放电激励，用于连续运转时工作物质的气压在 1300 帕以下，用于脉冲状态时工作气压要高于大气压。输出波长在 10.6 微米附近的中红外光谱区。二氧化碳激光器的主要优点是能量转换效率较高（可达 20%），可获得几千焦的大能量脉冲输出，主要用于激光加工、激光治疗、激光通信、非线性激光光谱学研究等方面。氮分子激光器是一种工作在紫外波段的脉冲气体激光器，用快速大电流脉冲放电进行激励，实现粒子数反转，输出波长主要分布在近紫外区，最常用的波长为 337.1 纳米，输出脉冲功率峰值达兆瓦以上，可用于激光荧光分析、制造集成电路、激光育种、激光治疗、探测污染、激光激励以及非线性光学的基础研究等方面。

准分子激光器也是工作在紫外波段的气体激光器。准分子是处于激发态的不稳定分子，其寿命只有几十纳秒量级。可用于产生激光的有惰性气体准分子、惰性气体与卤素原子结合的准分子以及金属原子与卤素原子结合的准分子。准分子激光器采用快速放电或注入脉冲电子束的激励方法，输出的激光波长主要分布在近紫外区和真空紫外区（波长小于 200 纳米），其应用范围与氮分子激光器大致相同。

液体激光器 (liquid laser)

可供激光器使用的液态工作物质有三类：(1) 稀土元素的螯合物溶液，(2) 稀土元素的无机化合物溶液，(3) 有机染料溶液。用第一种工作物质，激光器输出功率太小，第二种工作物质有很大的毒性和腐蚀性，目前最常用的工作物质是各种有机染料，如若旦明 6G、若旦明 B 等。使用这类工作物质的激光器又称染料激光器。

有机染料是复杂化合物，能级结构也较复杂。由于分子中各个原子的振动和整个分子的转动，每个电子态上叠置了许多振动能级，每一振动能级又叠置了许多转动能级，转动能级之间的间隔只有 $10^{-4}\text{eV} \sim 10^{-3}\text{eV}$ ，结果使电子能级展宽为接近于连续分布的能带。激励时，染料分子由基态 S_0 被激发到激发态 S_1 后，由于与周围溶剂分子的碰撞，迅速地无辐射地弛豫到 S_1 中的最低态，然后发出辐射向 S_0 的较高态跃迁，最后再弛豫到 S_0 的最低能级。激光振荡就发生在 S_1 到 S_0 的辐射跃迁过程中。所以有机染料是四能级系统（图 1-24-8）。

图 1-24-8 染料激光器的能级

有机染料须用短脉冲大功率的光束进行激励，因此要用固体激光器或脉冲氙灯做激励光源。由于染料的吸收谱带很宽，从激发态 S_1 到基态 S_0

发射的光谱带也很宽，改变染料溶液的浓度、温度或 PH 值，或改变液槽的长度，发射光谱的峰值就会移动，所以染料激光器输出的激光频率是可以调谐的。还可以在谐振腔内放入衍射光栅等色散元件，对振荡频率进行选择控制，可在数十纳米范围内，获得单色性较好的可调谐激光输出。由于可供使用的有机染料品种繁多，实际上可以得到从近紫外到可见光和远红外区域（340 纳米 ~ 1200 纳米）的任何波长的激光。

同其他激光器相比，液体激光物质的光学均匀性好，可以通过循环流动散热。染料激光器的转换效率也比较高，可用于全息照相、光化学、激光定向和其他一些科学技术领域。

半导体激光器 (semiconductor laser)

半导体激光工作物质与其他工作物质的不同特点在于：其中的原子不是各自独立的，必须把整个晶体看成一个整体。由于外层电子轨道的重叠，分立的能级变成能带，每个能带都包含大量极其密集的能态。受激跃迁就决定于两个能带——价带和导带内粒子分布的情况。

最简单的半导体激光器是结型二极管激光器，又称注入式半导体激光器。在重掺杂的 PN 结（施主和受主浓度达 10^{18} 厘米⁻³）上加正向偏置电压，将 N 区导带底部集居的电子和 P 区价带顶部集居的空穴注入到结区，电子和空穴就在结区复合发光，发出的光子能量约等于导带与价带的能量差（图 1-24-9）。如果对 PN 结注入的电流密度超过一定阈值，使在结区复合发光决定的增益远大于各种可能的光损耗，就可以形成相干的激光振荡。

图 1-24-9 正向偏置的 PN 结——二极管激光器原理

图 1-24-10 是一个结型二极管激光器的示意图。阴影区表示的结区，通常很薄，只有 0.1 微米。为了得到激光，要把两个端面抛光成互相平行的平面，形成谐振腔。因为半导体的折射率大，在它跟空气的界面上有足够高的反射率，可不镀反射层。另外的两个端面要磨粗，以抑制在不需要的方向上产生光振荡。

图 1-24-10 半导体激光器示意图

目前效果最好和使用最普遍的是双异质结型砷化镓 (GaAs/GaAlAs) 二极管激光器，图 1-24-11 是其截面图，这种激光器可在室温条件下以较高重复脉冲率运转或连续运转，输出波长在 0.8 微米左右的激光，并可按一定方式在有限的光谱范围内进行调谐。

图 1-24-11 双异质结激光器的截面图激活区为 GaAs(p)层

半导体二极管激光器在激光通信，信息储存、处理与显示，激光测距，制导，夜视及激光光谱学研究等领域都有重要的应用。

激光放大器 (laser amplifier)

一台红宝石激光器，单脉冲输出能量几焦耳，脉冲持续时间几毫秒，输出功率可达 10^3 瓦数量级。采用调 Q 装置，将激光脉冲时间缩短到纳秒级，输出功率可达 10^9 瓦数量级。要达到更高的功率输出，须用激光放大

器。

激光放大器的工作原理与激光器大致相同。放大器内处于粒子数反转状态的工作物质，受到入射光子的影响而产生受激辐射，受激辐射光子与入射光子具有相同的频率、偏振态和传播方向。激光放大器的结构也与激光器相似，不过不需要共振腔系统。输入的激光辐射，通常采取单次通过放大器内工作物质的方式获得行波放大。

我国于 1986 年在上海建成的神光装置，是目前世界上为数不多的大型激光装置之一。这台装置用非线性效应较小的磷酸盐钕玻璃作为放大器的工作物质，其激光波长为 1.054 微米。同时选用激光波长与磷酸盐钕玻璃相近的新型激光晶体：掺钕氟化钇锂（Nd:YLF，激光波长 1.053 微米）作为激光器的工作物质。这套装置可把激光器输入的能量放大 $10^4 \sim 10^5$ 倍，采取一些技术措施，可使光束的性能保持不变。神光装置用两路激光放大系统，末级放大器的输出能量为 800 焦，光脉冲持续时间 1 纳秒，即每路激光放大器输出的功率为 8×10^{11} 瓦。

神光装置可用于激光核聚变、X 射线激光和高温高压高密度等离子体行为等方面的基础研究。

激光测距仪和激光雷达 (Laser range finder and lidar)

实用的激光测距仪种类很多，基本原理

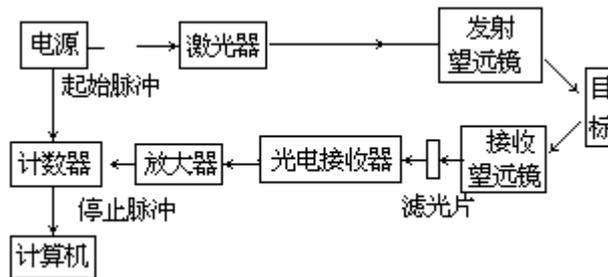


图 1-24-12 脉冲式激光测距仪原理

都是利用激光的高定向性，测量光往返一定距离所需的时间。图 1-24-12 是一种脉冲式激光测距仪的原理方框图。激光器发出一定波长的脉冲激光，经发射望远镜进一步减小其发散角后，射到被测目标上，并用接收望远镜收集反射回来的光。用滤光片把通过接收望远镜的其他波长的杂散光滤掉，只让与发出的激光波长相同的反射光进入光电接收器，为了测得光脉冲信号的往返时差，安装一个计数器，当测距仪开始工作发射光脉冲时，计数器便发出同步信号，开始计数，接收到反射光信号时，计数器立即停止工作。根据计数器显示的脉冲数目 N ，可得出目标的距离

$$s = \frac{Nc}{2nc}$$

式中 c 为光速， n_c 为激光器每秒钟发出的脉冲数目。整个计算过程都由计算机来完成。

激光测距配上跟踪系统（包括接收系统和伺服系统）就成为激光雷达。

最简单的光电跟踪装置是四象限光电跟踪器。在垂直于接收望远镜光轴的平面内，放置四个光电接收器，它们的位置如图 1-24-13 所示（ O 是平面与望远镜光轴的交点）。目标正对中心位置 O 时，四个接收器上接收

到的反射光通量相等，没有信号输出给伺服系统，雷达装置静止不动。一旦目标偏离了上

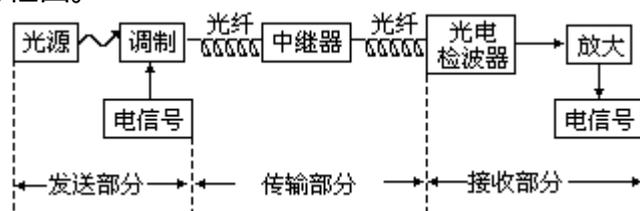
图 1-24-13 四象限探测器

述位置，四个光电接收装置接收到的反射光通量不等，就会向伺服系统发出指令，伺服系统将自动把雷达调整到对准目标的方向。这样，激光雷达就能在测距的同时，给出方位和速度的数据。

激光雷达测距精度在米、分米甚至厘米量级，角度测量精度达到千分之五到万分之一度，测速精度可达厘米每秒量级，这都是无线电雷达望尘莫及的。激光雷达的不足之处是，激光在大气中传播时会受到空气分子、尘粒等的吸收、散射而衰减，限制了它的作用距离，测距范围仅达几十公里。另外，激光束很细，不便于大范围搜索目标。激光雷达在气象和军事方面有广泛应用。

光纤通信 (optical fiber communication)

光纤通信是以光为载波，以光导纤维为波导的通信系统，图 1-24-14 是它的原理方框图。



光纤通信是本世纪 70 年代以后发展起来的新技术。70 年代以前虽然已有了用光纤作传输介质进行光通信的设想，但面临着光纤损耗过大的困难。1966 年首次提出低损耗光纤的概念时，最好的玻璃介质损耗也达 1000dB/km，也就是说，光沿着光纤传播 1km 后光能只剩下原来的 10^{100} 分之一。1970 年制成了损耗为 20dB/km (在 850 纳米波段) 的石英光纤 (光波沿光导纤维传播 1km 只损耗光能的 1%)，光纤通信的研究才有了突破性的进展。同年，能在室温下连续振荡的镓铝砷半导体激光器 ($\lambda=850\text{nm}$) 也研制成功，它体积小，耗电少又能直接用电流调制，有力地推进了光纤通信的实用化。到 1979 年，制成了在 $1.55\mu\text{m}$ 波段损耗只有 0.2dB/km 的低损耗光纤，同一波段的能在室温下连续振荡的镓铟砷磷半导体激光器也研制成功。光纤通信的发展又上了一个台阶。

光在光纤中传输时，往往有多种传输模式。在光纤的孔径角 θ_{\max} 内射入光纤端面并满足全反射条件的光线中，只有某些以特定角度射入光纤端面的才能在光纤中传播。每条能在光纤中传播的光线就代表了光的一个传输模式。模式的总数与光纤的特性常数和折射率分布有关。芯径较大、能传播多个模式的光纤叫多模光纤；芯径很小，只允许与光纤轴一致的光线通过的光纤叫单模光纤。

多模光纤，特别是突变型光纤，由于不同传输模式光的传播路程不同 (图 1-24-15)，脉冲信号在传输到终点时会会有一个时间差，因而导致脉冲展宽会使间隔较近的两个信号，在传输一定距离之后，彼此重叠而难于分辨 (图 1-24-16)。这就限制了光纤系统的传输码速，降低了传递信息

的容量。单模光纤中也有脉冲展宽，主要是由于介质色散以及一部分光在包层中比在纤芯中传播得快（叫做结构色散）引起的，它对光脉冲的影响比传输模式不同引起的畸变要小得多，而且采用谱线宽度窄的激光光源，可以大大减小脉冲展宽。因此，大容量、长距离通信，要用单模光纤，以激光器为光源。

目前，以短波长（ $0.8\mu\text{m}\sim 0.9\mu\text{m}$ ）半导体源和多模石英光纤为代表的第二代光纤通信系统，技术上已很成熟，已在中小容量、中短距离的通信线路中推广应用；以长波长（ $1.0\mu\text{m}\sim 1.6\mu\text{m}$ ）光源和单模光纤为代表的第三代光纤通信系统也已成熟，正在向长途干线推广应用；以超长波长（ $2\mu\text{m}$ 以上）光纤、光集成和外差通信技术为代表的第四代光纤通信系统，也正在迅速发展。

全息照相 (holograph)

利用干涉和衍射原理记录并再现物体光波波前的一种技术。普通照相只记录物体表面的光强分布，在照相纸上显现出物体的平面像。全息照相则在记录光强分布的同时，把光的相位也记录下来，借助于再现光在空间中显示出物体的立体像。拍摄全息图的简单装置如图 1-24-17 所示：激光器射出的相干光被分为两束。一束照射物体，再由物体表面反射到感光底片上，这部分光称为物光；另一束经反射镜反射后直接照到底片上，这部分光称为参考光。物光和参考光叠加，在底片上感光，显影定影后就成为全息图。显示时用一束与参考光的波长和传播方向完全相同的再现光照射全息图，从另一面观察就能在拍摄时放置物体的方向上。看到物体的立体像。

全息照相的基本原理是一种广义的双光束干涉理论。设 xy 平面为感光平面，光源发出的单色平面光波

$$I_0 = E_0 \cos^2 \omega t$$

分为物光波 I_1 和参考光波 I_2 。

$$I_1 = E_1(x, y) \cos[\omega t + \varphi_1(x, y)],$$

$$I_2 = E_2 \cos[\omega t + \varphi_2(x, y)], E_2 = E_0。$$

这里，物光波的振幅以及物光波和参考光波的相位，都是感光面上位置坐标 x 、 y 的函数。物光波和参考光波叠加形成干涉条纹，被感光底片记录下来，其光强分布 $I(x, y)$ 为 $(I_1 + I_2)^2$ 的时间平均值，可由下式给出：

$$I(x, y) = \frac{1}{2} E_1^2 + \frac{1}{2} E_2^2 + E_1 E_2 \cos(\varphi_2 - \varphi_1)$$

当用再现光 I_3 照射全息照片时，照片上

的干涉条纹对再现光构成了一个衍射光栅，只不过“狭缝”不是直的，宽度也不相等。最终形成的波，其振幅 E_F 又与 $I(x, y)$ 和 I_3 的乘积成正比

$$E_F \propto I(x, y) \cdot I_3, I_3 = E_3 \cos(\omega t + \varphi_2)$$

$$I(x, y) \cdot I_3 = \frac{1}{2} E_3 (E_1^2 + E_2^2) \cos(\omega t + \varphi_2) + \frac{1}{2} E_3 E_1 E_2 \cos(\omega t + \varphi_1) \\ + \frac{1}{2} E_3 E_1 E_2 \cos(\omega t + 2\varphi_2 - \varphi_1).$$

上式中第一项不含有物光波的相位 φ_1 ,

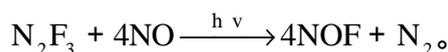
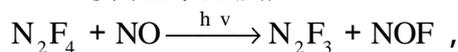
只描述对再现光波振幅的调制,它代表图 1-24-18 中的衍射零级直射光束。第二项和第三项是被全息图衍射的一级光谱。其中第二项具有物光波的相位 φ_1 ,它跟从感光片的背面观察时看到的立体像相对应,是图 1-24-18 中+1 级衍射光所成的虚像。第三项中含有与物光波相反的相位 $-\varphi_1$,它形成一个前后倒置的立体像,是图 1-24-18 中的-1 级衍射光所成的实像,因而能用感光底片拍摄下来。

把氦氛激光器发出的红光(632.8 纳米)、氩离子激光器发出的蓝光(488.0 纳米)和绿光(514.5 纳米)混合使用(图 1-24-19),可拍得彩色全息图。拍摄时须用三面反射镜,每面反射镜只反射一种颜色的参考光。参考光与物光在感光底片上发生干涉,三种不同的干涉条纹被重叠地记录在底片上(图 1-24-20)。再现时,使光源、反射镜和全息图保持与拍摄时完全相同的相对位置,就可显示出物体的彩色立体像。

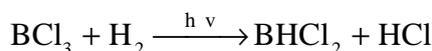
激光化学(laser chemistry)

激光化学的研究对象,广义上说,包括激光在化学各个领域中的应用,但主要是研究激光如何引发和控制化学反应。

由于激光具有高单色性和高亮度,可以把物质分子激发到用加热方法难以达到的激发态,从而引发一些前所未有的化学反应。特别是红外激光,由于它的频率范围与分子中的振动频率范围大体相符,因此,可以用一定频率的红外激光照射反应物分子,使分子中具有相近振动频率的某一化学键发生共振,引起断裂,而对分子中其他化学键的影响较小。这样就有可能引发我们希望的特定反应,而抑制不希望发生的副反应,制得用普通方法难以合成的化合物,也可以使某些在高温下才能发生的反应在常温下进行。例如, N_2F_4 和NO的混合物,用加热方法只能发生 N_2F_4 的分解,而不发生相互反应。用 CO_2 激光器发出的波长10.6微米的红外激光照射,因为激光的频率跟N-F键的振动频率(2.80×10^{13} 赫和 2.87×10^{13} 赫)较接近,当照射强度达到 $30W/cm^2$ 时发生下述反应



又如,苯和氨直接生成苯氨和氢的反应,在高温高压下也难进行,用 CO_2 激光,在常温下就可生成苯氨。 BCl_3 与 H_2 反应,用加热方法所得的产物,除 $BHCl_2$ 外还有 B_2H_6 等一系列副产物,如果用 CO_2 激光脉冲引发,反应是



产物几乎都是 $BHCl_2$ 。

多原子分子吸收两个或两个以上的光子,可引起多光子离解。例如,

OCS 分子吸收两个 ArF 激光器发出的波长 193 纳米的紫外光子，可离解为 CO 和 S；SF₆ 分子吸收多个 CO₂ 激光器发出的红外光子，可离解为 SF₅ 和 F。

激光可以促进催化作用，加快化学反应速度。在烯烃异构化反应中使用的催化剂五羰基铁 Fe(CO)₅，用 KrF 或 Ar⁺ 激光照射，可使催化剂产生催化活化中心或使失去的催化活性复活。在多相催化反应中，也可用激光帮助脱去催化剂毒物。

激光可以用来提纯物质和清除杂质。在集成电路和半导体器件工业中，用硅烷气体来沉积多晶硅，氮化硅和氧化硅薄膜。但硅烷气体中通常含有磷烷、砷烷、硼烷等杂质，这些杂质与硅烷的基本物性差别很小，用常规方法只能达到很少的选择性分离。用激光可以选择性地激发杂质，而对硅烷几乎不发生作用，达到较高的提纯效果。

激光化学中最诱人的前景是“分子剪接”的设想。这就是用激光有选择地“剪断”分子中某一特定的化学键，再在断键上有目的地接上某种原子或分子基因，就会成了用其他方法无法得到的新分子。这样就可以根据事先的设计造出人们需要的新物质。要实现这一设想，还须克服许多困难，它的实现必将给人类的生活带来新的奇迹。

激光分离同位素 (isotope separation by laser)

同一种元素的同位素，由于其化学性质相同，不容易把它们分离开来。但由于原子的质量不同，它们对相同波长的光有不同的吸收系数，因而吸收光谱上峰值的位置，有一个很小的波长位移。如果用波长恰好跟其中一种同位素的吸收峰一致、谱线宽度又小于两种同位素吸收峰位移的激光，去照射含有这两种同位素的物质，就可以激发其中一种同位素，而对另一种同位素并无影响。由于受激原子、分子在物理和化学性质上与基态原子、分子差异较大，再进一步采用其他物理的或化学的方法，就可以把两种同位素分离开来。

例如，对于含有 ³⁵Cl 和 ³⁷Cl 的一氯化碘 ICl，可用它与溴苯 C₆H₅Br 的混合物做原料，用染料激光器发出 605 纳米的激光，激发 I³⁷Cl 而不激发 I³⁵Cl 分子。由于受激的 I³⁷Cl 与溴苯迅速反应，生成稳定的产物氯苯 C₆H₅³⁷Cl，未激发的 I³⁵Cl 却很少与溴苯反应，就浓集了含 ³⁷Cl 的氯苯。

某些元素的同位素，可以通过光致离解分离出来。有的用一步法，有的用两步法。例如，用紫外激光从甲醛中浓集 ¹⁸O 同位素，可用一步法。选用 Ne 离子激光器发出的波长 332.375 纳米的激光与含 ¹⁶O 的甲醛分子的特征吸收峰相匹配，而很少被含 ¹⁸O 的甲醛分子所吸收，在光解产物一氧化碳中，¹⁸O 的含量从天然丰度的 0.22% 提高到 2% 左右。从六氟化铀 UF₆ 分离铀同位素就用两步法。先用四氟化碳激光器发出的波长 16 微米的远红外激光选择性激发 ²³⁵UF₆ 分子，而 ²³⁸UF₆ 分子不被激发；再用紫外激光使处于激发态的 ²³⁵UF₆ 进一步受激离解，得到 ²³⁵UF₅ 和 F 原子，²³⁵UF₅ 就从气相中沉积出来。也可以用 HCl 为捕集剂，反应生成 ²³⁵UF₅Cl 和 HF，使 ²³⁵U 分离出来。激光分离铀同位素是科学技术前沿领域，用不同原料进行的试验研究，仍在进行中。

红外多光子离解，即多原子分子一次吸收几十个红外光子发生的离解，也是分离同位素的一种方法。用 CO₂ 激光器，已从 SF₆、BCl₂、CH₂Cl₂、

CH₂O、CF₂Cl₂、SiF₄、CCl₄和OsO₄等一系列多原子分子中，通过选择性红外多光子吸收，浓集了氢、硼、硫、碳、硅和氧等多种同位素。

综上所述，用激光分离同位素须具备的条件可概括为：（1）同位素吸收峰有明显的位移；（2）有能选择性激发同位素原子、分子的合适的激光器（波长、功率都合适）；（3）有能把激发的原子、分子从同位素混合物中分离出来的化学的或物理的方法。（4）在分离过程中保持选择激发的原子、分子不与其他同位素的原子、分子发生碰撞转移能量。因此，操作气体的压强增大，分离的效果就会降低。

激光生物学 (laser biology)

由于激光同生物大分子、细胞、组织、器官、个体和群体等各个生命层次都有相互作用，三十多年来激光技术与生物技术结合得越来越紧密，形成了一门新兴的边缘科学——激光生物学。这一学科，对于改进生物学研究中的分析和测试手段，揭示生命现象的奥秘，以及促进生物化学、生物物理、生物工程、遗传学、医学、药理学、农业科学和环境科学的发展方面，起着日益重要的作用。这从下面举出的一些简单的例子可见一斑。

喇曼散射光谱，可反映生物大分子的振动模式，从而能提供大分子的化学组分信息，帮助确定它的结构。由于喇曼散射光非常微弱，散射谱的测量必须有足够强的激发光源。具有高亮度和高方向性并能聚焦成极小光斑的激光可以满足上述要求，用来确定生物大分子的结构。

激光具有很窄的谱线宽度，因而可以测量它的微小多普勒频移。应用这一技术可以测量微血管中的血流速度。把这种技术同显微技术结合起来，还可以测出植物细胞中细胞质的流动速度。

用激光微束在细胞膜上打孔，可以导致两个细胞相互融合，这是动物育种的好方法。强激光对生物组织的作用，常引起组织烧蚀，因而在医学上可用来汽化病变组织和代替手术刀来切割组织。由于热效应，激光切割部位邻近的血管会自动凝固，可起止血作用，还可杀死伤口中的细菌，因而不容易感染。利用光敏物质在癌组织中比在正常组织中滞留时间更长的特点，还可用激光选择性地杀死癌组织而使正常组织不受损伤。在农业科学中，用弱激光（不会对生物体直接造成不可逆损伤）刺激动植物，可改善其生理机能，提高农作物产量，改善家畜、家禽的品质，选育优良新品种。弱激光刺激还可使多种菌类加速生成和繁殖。在医学上，用毫瓦级 He - Ne 激光以及扩束 CO₂ 激光，通过穴位照射（光针），可治疗多种疾病。

把某种除草剂喷在植物上，在激光作用下，可以有选择地杀灭某种有害杂草，而作物本身却能正常生长。类似的方法也可用来杀灭害虫。

激光生物学是一门新兴学科，它的研究内容和方法还在不断发展，还不能认为激光只是作为一种工具在生物学中得到应用。理论和实验都表明，生物系统本身与激光系统非常相似。首先，它们都是远离平衡态的耗散结构。另外，现已证实，任何有生命的物质，从细胞到人，都在不间断地向外辐射从紫外到红外的准连续光，其波长覆盖 200 纳米 ~ 800 纳米的范围，它的强度极弱，每平方厘米面积上每秒钟只辐射几个到几百个光子，相当于 10 千米外一根蜡烛的光强。生物体系这种辐射光子的现象称为生物超弱发光，它与生物系统的氧化代谢、细胞分裂、肿瘤发生、光合作用及细胞死亡等重要生命过程有着内在的联系，是生物体的固有性质。实验表

明，生物超弱发光具有高度相干性，这为人们展现了一个崭新的量子生物学的雏形。可见激光与生物学的结合不仅仅是激光技术在生物学中的应用，而是激光理论本身也可能运用到生物学中去解释各种生命现象。

主要参考资料

1. 姚启钧。光学教程。第1版。北京：人民教育出版社，1981。
2. 母国光，战元令。光学。第1版。北京：人民教育出版社，1978。
3. E.赫克特，A.赞斯。光学（下册）。第1版。北京：人民教育出版社，1980。
4. R.W.狄区本。光学。第1版。程路。北京：高等教育出版社，1988。
5. [日]松平维石等。基 实验。共立社，1972。
6. 巴伊鲍罗金等。激光技术手册。第1版。北京：机械工业出版社，1986。
7. [意]斯维尔托。激光原理。第1版。北京：科学出版社，1983。
8. F.T.阿雷克等。激光器（激光手册第二分册）。第1版。北京：科学出版社，1980。
9. 余文炎，雷仕湛。神光装置。自然杂志，1988（5）：352~356
10. 任长征等。激光漫谈。第1版。上海：复旦大学出版社，1988。
11. 杨同友。光纤通信技术。第1版。北京：人民邮电出版社，1986。
12. 意大利通信研究中心实验室。光纤通信，戴未央等。北京：中国铁道出版社，1987。
13. [日]岛田贞晋。光通信技术读本。赵灵基等。北京：人民邮电出版社，1982。
14. 明长江。激光在化学工业中的应用。自然杂志，1986（8）：580~585
15. 秦启宗。激光化学。自然杂志，1978（2）：95~98
16. 陈达明。用激光生产核燃料。自然杂志，1986（2）：113~118
17. 刘颂豪，孟耀勇。激光生物学。物理。1992（9）：513~517
18. F.T.阿雷克等。激光的技术应用（激光手册第六册）。第1版。北京：科学出版社，1983。
19. 中国大百科全书，物理学。第1版。北京：中国大百科全书出版社，1987。

二十五、原子核

原子核 (atomic nucleus)

原子核是原子中体积很小却集中了几乎原子全部质量的带正电的中心体。

(1) 原子核的电荷 原子核的电荷是基元电荷 e 的整数倍, 这个倍数与元素周期表中原子序数 Z 是一致的。天然元素中原子序数最大的元素是铀, $Z=92$ 。到 1994 年底, 人造元素中 Z 值已达 111。近年来又有制成第 112 号元素的报道。

(2) 原子核的质量和质数 原子核的质量通常用原子质量单位 u 表示。原子质量单位是碳-12 质量的 $\frac{1}{12}$ 。 $1u = 1.660566 \times 10^{-27} \text{ kg}$ 。

(1961 年以前, 国际上通用的原子质量单位是氧-16 原子的 $\frac{1}{16}$, 记作 amu。

氧单位比碳单位略小, 两者之比为 $1 : 1.003180$) 用 u 为单位的原子质量数值, 都跟整数很接近, 这些整数叫原子核的质量数, 用 A 表示。

(3) 原子核的大小 原子核的形状近似球形, 因此一般用核半径 R 表示核的大小。核半径有两种不同的定义: 一是电荷分布半径, 二是核力作用半径。用不同实验方法测量的结果, 电荷分布半径略小于核力作用半径, 但两者差异不大, 而且都与质量数 A 的立方根成正比:

$$R = r_0 A^{1/3}.$$

式中的 r_0 是个常量, 对于电荷分布半径, $r_0 = 1.2 \times 10^{-15} \text{ m}$, 对于核力作用半径, $r_0 = 1.2 \sim 1.5 \times 10^{-15} \text{ m}$ 。由上述结果可以推知, 各种不同的原子核, 其密度是相同的。 $\rho = 10^{17} \text{ kg/m}^3$

(4) 原子核的组成 原子核是由质子和中子组成的。质子 p 是氢原子核, 带一个基元电荷的正电 ($+e$), 质量 $m_p = 1.007276u$; 中子 n 是电中性的, 质量 $m_n = 1.008665u$ 。由于质子和中子的质量用原子质量单位来表示其数值几乎都是 1, 所以原子的质量数 A 就代表了组成原子核的质子和中子的总数, 而原子序数 Z 代表的是原子核内的质子数, 所以 $N = A - Z$ 就是核内的中子数。质子和中子统称为核子。

(5) 原子核的自旋和磁矩 原子核具有角动量 I ,

$$|I| = \sqrt{I(I+1)}h.$$

原子核的角动量习惯上称为原子核的自旋, I 称为自旋量子数。原子核的自旋在空间某一方向上的投影, 例如 z 轴方向上的投影为

$$I_z = M_l h$$

M_l 为原子核的自旋磁量子数, 它可以取 $-l, -l+1, \dots, l-1, l$ 等 $2l+1$ 个数值。

原子核的自旋是组成原子核的质子和中子自旋的矢量和。由于质子和中子的自旋量子数都是 $\frac{1}{2}$, 质量数 A 为偶数的核 I 为整数, 质量数 A 为

奇数的核I为半奇数 $\left(\frac{1}{2}, \frac{3}{2}, \dots\right)$ 。

质子和中子都是有磁矩的，原子核也有一个总磁矩：

$$M_I = g\sqrt{I(I+1)} \frac{h_e}{2m_{p0}} = g\sqrt{I(I+1)}\mu_N$$

式中的 $\mu_N = \frac{h_0}{2m_p} = 5.0507866 \times 10^{-27} \text{ A} \cdot \text{m}^2$ 是核磁子，g是核的g因数，

对不同核素取不同的数值。由于 m_p 的质量是电子质量的1836倍，核磁子远小于玻耳磁子，核磁矩也比原子磁矩小得多。

原子核的自旋和磁矩导致原子能级的劈裂，形成原子能级的超精细结构。研究超精细结构的情况，可以确定原子核的自旋。

(6) 原子核的电四极矩 在研究原子结构时可把原子核看成均匀带电的球体，用一个点电荷来代替它。研究更精细的效应发现，多数原子核的形状为旋转椭球体，核电场可看作点电荷与电四极子电场的叠加。电四极子是由电偶极矩等值反向的两个电偶极子电场的叠加，图1-25-1给出两个简单的例子。

由于椭球体的轴对称性原子核电四极子的电场可由电四极矩Q决定：

$$Q = \frac{2}{5}Z(a^2 - b^2).$$

式中的a是旋转椭球体沿对称方向的半轴长，b为垂直于对称轴的半轴长，Z为核的原子序数。可见电四极矩Q反映了原子核的形状对球形的偏离程度。

自旋大于 $\frac{1}{2}$ 的核都有电四极矩，不过不同核的电四极矩差别很大。

例如 ^2H 的电四极矩为 $0.002875 \times 10^{-24} \text{ cm}^2$ ，而 $^{167}_{71}\text{Lu}$ 的电四极矩为 $8.0 \times 10^{-24} \text{ cm}^2$ 。

(7) 原子核的宇称 宇称描写微观粒子在空间反演下的性质。把描写原子核内部状态的波函数 (x, y, z) 的空间坐标x, y, z分别用-x, -y, -z代换时，可能出现两种情况： $(-x, -y, -z) = (x, y, z)$ 和 $(-x, -y, -z) = -(x, y, z)$ ，如果把上述代换的结果用 $(-x, -y, -z) = P(x, y, z)$ 来表示，P称为原子核的宇称。前一种情况中 $P=+1$ 为偶宇称，后一种情况中 $P=-1$ 为奇宇称。原子核的一定状态具有确定的宇称。同一原子核的基态和激发态的宇称可以是不同的。

核素 (nuclide)

具有确定质子数Z和确定质量数A的一类原子核，称为一种核素。核素的一种表示方法是在元素符号的左上角标上质量数，左下角标上原子序数，如 ^1_1H ， $^{16}_8\text{O}$...等。已发现的核素近三千种，其中二百八十多种是稳定的。不稳定核素大部分都是人工合成的，自然界存在的仅有三十多种。

质子数相同而质量数不同的核素称为同位素。如 ^1_1H ， ^2_1H 和 ^3_1H 是氢的三种同位素。质量数相同而质子数不同的核素，称为同量异位素。

原子核可以处于不同的能量状态。能量最低的状态称为原子核的基

态，能量较高的状态称为原子核的激发态。质子数和质量数都相同而能量状态不同的核素称为同质异能素。激发态的表示方法是在核素符号右上标的位置加上一个 m (或星号 $*$)，如 ^{99m}Mo 就是 ^{99}Mo 的激发态。

核结合能 (nuclear - binding energy)

实验发现，原子核的质量总是小于组成它的核子的质量之和。组成原子核的核子总质量与原子核的质量之差，叫做原子核的质量亏损。用 m_p 和 m_n 分别表示质子和中子的质量，用 $m(Z, A)$ 表示原子序数为 Z 、质量数为 A 的原子核的质量，则核的质量亏损为

$$B(Z, A) = Zm_p + (A - Z)m_n - m(Z, A)$$

核的质量亏损表明，自由核子结合成原子核时要释放能量，这种能量称为核的结合能。根据爱因斯坦的质能关系方程，原子核的结合能 E_B 可用下式表示：

$$E_B = B(Z, A) C^2。$$

不同核素的原子核结合能各不相同。一般说来，质量数 A 大的核素，结合能 E_B 也大。原子核中平均每个核子占有的结合能，叫做比结合能 $= E_B / A$ 。

图 1-25-2 以 A 为横轴， E_B/A 为纵轴，作出了比结合能曲线。从这条曲线可以看出：

(1) 当 $A < 30$ 时，曲线的趋势是上升的，但是有明显的起伏，峰的位置都在 A 为 4 的整数倍的地方，如 ^4He 、 ^{12}C 、 ^{16}O 、 ^{20}Ne 和 ^{24}Mg 。这些原子核的原子数 Z 和中子数 $N=A-Z$ 都是偶数，称为偶偶核。

(2) 当 $A > 30$ 时，与 A 很小时曲线的明显起伏不同，近似地有 $E_B/A \approx 8 \text{ MeV}$ ，即 E_B/A 为常量， $E_B \propto A$ 。这表明原子核的结合能粗略地与核子数成正比。

(3) 曲线的形状是中间高、两端低，说明 E_B/A 为 50 ~ 150 的中等质量的核结合得比较紧，很轻的核和很重的核 ($A > 200$) 结合得比较松。因此，一个很重的核分裂成两个中等质量的核，或者两个很轻的核聚合成一个重一些的核，都会由小变大，释放出能量。

核力 (nuclear force)

核子之间的相互作用力称为核力。核力的性质及其本质，相当复杂，粗略说来，核力有如下一些特点。

(1) 核力是一种短程力，其力程为 $10^{-15} \text{V}(r)$ 米量级。这么短的力程，大致又可分为三段 (图 1-25-3)：长程部分 $2 \times 10^{-15} \text{米} \sim 3 \times 10^{-15} \text{米}$ ，在这一区域内，核力表现为很弱的吸引力。中程部分： $0.3 \times 10^{-15} \text{米} \sim 2 \times 10^{-15} \text{米}$ 在这一区域中，核力表现为很强的引力，其强度比库仑力约大两个数量级，存在着一个引力势能为数兆电子伏的最大值；正是这种很强的吸引力，使原子核中的质子不致因互相排斥而散裂。短程部分：小于 $0.3 \times 10^{-15} \text{米}$ ，这部分有一个“排斥心”，当两个核子接近到这一距离时，将受到很强的斥力，它保证了原子核不致坍缩。

(2) 核力的饱和性，也就是原子核中的核子只与其附近的几个核子有作用力，而不是与原子核中的所有核子有作用力。这一点可由各种较重原子核 ($A > 40$) 的比结合能大体相等、核的密度也大体相等来推知。

(3) 核力的电荷无关性，即核子之间的相互作用，无论是质子与质子、质子与中子、中子与中子，它们之间核力是相等的。

核子间的作用力是怎样产生的？日本物理学家汤川秀树于 1935 年提出了核力的介子场理论，认为核力也像电磁力一样是通过交换某种媒介粒子而发生作用的。汤川还根据核力的力程估计了这种媒介粒子的质量。由于核子间的距离只有 $x = 2.0 \times 10^{-15} \text{m}$ ，假定媒介粒子以光速 c 运动，它在两个核子之间存在的时间只有 $t = x/c$ 。根据不确定关系 $E \cdot t \sim h$ ，这段时间内最大的能量转移为 $E = h/t = hc/x = 100 \text{MeV}$ 。假定这些能量全部转化为媒介粒子的静能，它约为电子静能 0.51MeV 的 200 倍。由于这种媒介粒子的质量介于电子和核子之间，所以名之曰介子。1937 年发现了质量为电子 207 倍的 μ 子，但它不参与核子间的强相互作用；直到 1947 年，才在宇宙线中发现了参与核子间强相互作用的介子，名之曰 π 介子，分为带电的 π^+ ， π^- 和不带电的 π^0 。 π^+ ， π^- 介子的质量为电子的 273 倍， π^0 介子的质量为电子的 264 倍。

核子间的 π 介子交换可有如下几种情形。

在质子和中子之间交换 π^{\pm} 介子：

$$p \leftrightarrow n + \pi^+ ; n \leftrightarrow p + \pi^- .$$

在这些情形里交换的是带电粒子，使质子变成中子、中子变成质子，其结果是质子和中子交换了位置，这种力称为交换力。

在质子和质子间，中子和中子间交换 π^0 介子：

$$p \leftrightarrow p' + \pi^0 ; n \leftrightarrow n' + \pi^0 .$$

在这些情形里交换的是中性粒子，核子的电荷不变，不发生质子和中子位置的交换，这种力称为非交换力。不过如果在同类核子间因交换 π^0 介子而发生自旋方向的交换，这种力也是交换力。

所以，核力是交换力与非交换力的混合。其中非交换力表现为引力，交换力则在不同情况下可以表现为引力，也可以表现为斥力。上面讲的交换力和非交换力都是有心力。研究表明，核力中除有心力外，还存在着微弱的非有心力，它的强度跟两个核子间的距离以及核子的自旋与两核子连线间的倾角有关。

目前，对核力的研究虽已取得相当的进展，但距揭示核力的实质相去尚远，有很多问题有待进一步研究。

液滴模型 (liquid-drop model)

由于对核子间的作用还没有了解得很清楚，在原子核的研究中，常常采用唯象的模型方法，即以实验事实为依据，用人们已经熟悉的某种事物作比喻，提出原子核结构或核反应机制的模型，再与理论和实验的结果进行比较，检验其正确性，确定其适用范围。液滴模型就是一种早期的原子核模型。根据核半径 R 和它的质量数 A 之间的简单关系

$$R = r_0 A^{\frac{1}{3}}$$

可知，核的体积

$$V = \frac{4}{3}\pi R^3 = \frac{4}{3}\pi r_0^3 A$$

与质量数 A 成正比。这说明核物质密度是一样的。原子核的形状又近似球形。核力具有饱和性。核子的比结合能（可以想象为从核中取出一个核子所需的能量），大体上是常量。这几个特点都很像一个由不可压缩的流体组成的液滴：液体的密度不因其体积变化而改变；液滴由于表面张力作用而呈球形；液滴中各个分子间的作用力也具有饱和性，液滴的蒸发热也是常量。液滴模型就是以这些事实为依据提出的，可用来研究原子核某些方面的性质。

应用液滴模型，只用由实验得出的五个参量，由外茨赛格半经验公式就可以相当准确地确定核素的质量和结合能，能解释一些核现象，特别是能对重核的裂变做出相当满意的解释。外茨赛格公式为

$$m(Z, A) = Zm_p + (A - Z)m_n - a_v A + a_s A^{2/3} + a_c \frac{Z^2}{A^{1/3}} + a_a \frac{(A - 2Z)^2}{A} + \begin{cases} + a_p A^{-3/4} & (\text{偶偶核}) \\ 0 & (\text{奇偶核}) \\ - a_p A^{-3/4} & (\text{奇奇数}) \end{cases}$$

五个参数的一组实验值为

$$a_v = 1.5 \times 10^{-2} u \text{ 约 } 14.1 \text{ MeV (对应于体积能) ,}$$

$$a_s = 1.4 \times 10^{-2} u \text{ 约 } 13 \text{ MeV (对应于表面能) ,}$$

$$a_c = 6.39 \times 10^{-4} u \text{ 约 } 0.595 \text{ MeV (对应于库仑能) ,}$$

$$a_a = 2.04 \times 10^{-2} u \text{ 约 } 19 \text{ MeV (对应于反对称能) ,}$$

$$a_p = 3.6 \times 10^{-2} u \text{ 约 } 33.5 \text{ MeV (对应于对偶能) 。}$$

壳层模型 (shell model)

实验事实表明，原子核具有与元素周期性类似的性质。原子核的质子数或中子数为 2, 8, 20, 28, 50, 82 和中子数为 126 的核特别稳定，在自然界中的含量也比较丰富。上面讲的这些数目字称为幻数。幻数的存在启示人们，原子核内部可能存在着与原子类似的某种壳层能级结构。

但是，原子的壳层结构是由原子核的有心力场决定的，而在原子核内，并没有对所有核子都起作用的中心体。不过可以设想每个核子都处在其余核子平均作用下的有心引力场中，按照量子力学，对于这个平均场存在着一系列单粒子能级。由于泡利不相容原理，相邻的能级均已被占满，核子间一般不能进行导致状态改变的碰撞，因此，核子能在核内相当自由地运动，保持在一个特定的能态上。另外，核子的能级不仅取决于轨道角动量 l 的大小，还取决于轨道角动量 l 相对于自旋 s 的取向： s 与 l 平行时的能量跟 s 与 l 反平行时的能量是不同的，同一条 l 的能级将劈裂成两条。因此，对于单个核子来说，平均场 V 是由球对称的有心力场 $V(r)$ 和一个自旋轨道耦合项组成的：

$$V=V(r)-f(r)s \cdot l$$

式中的 r 是力场中某一点至场中心的距离， $f(r)$ 称为自旋轨道耦合势的形状因子。图 1-25-4 就是上述平均场中粒子的能级图。

图 1—25—4 核子能级

中左侧是未考虑自旋轨道耦合项的单粒子能级，右侧是考虑了自旋轨道能级劈裂后的能级，能级的相对集中就形成壳层。图中的能级是用量子数 v, l, j 标记的。 $v=n-l$ 是径向量子数。量子数 l 仍采用原子结构中的 s, p, d, \dots 符号，如 $2d_{3/2}$ 表示 $v=2, l=2, j=\frac{3}{2}$ 的能级。由于 j 在空间中可以有 $2j+1$ 个不同的取向，这些能级都是 $2j+1$ 度简并的，根据泡利原理，它们各自可以容纳 $2j+1$ 个核子。能级的简并度用圆括号中的数字标出。方括号中的数字则指明了它下面的所有低能级的简并度之和（即可容纳的总粒子数）。上述能级结构组成的壳层，给出了全部幻数：两个幻数间的各能级，形成一个主壳层。主壳层内的每一能级叫支壳层。主壳层间的能量间隔较大，支壳层间的能量间隔较小。质子和中子各有一套能级。由于质子间的库仑斥力，质子能级比相应的中子能级要高一些。质子能级与中子能级的次序也有一些差别。质子数和中子数都是幻数的核，如 ${}^4_2\text{He}$ 、 ${}^{16}_8\text{O}$

称为双幻核，这种核两种核子都是满壳层，因而特别稳定。壳层模型理论预言，82 以后的质子幻数可能是 114，126 以后的中子幻数是 184。 $Z=114, N=184$ 的核是双幻核，这个核及其附近的一些核，可能有相当大的稳定性。这种核称为超重核。超重核至今尚未发现，它是核结构研究中颇受重视的一个研究方向。

壳层模型在说明原子核基态特性、原子核衰变到低能级的特性和同质异能跃迁的存在等问题上是成功的。但它在考虑每个核子的运动时，把其余核子的运动看成是一个平均场，忽略了核子的集体运动，使原子核的许多运动性质（如振动能级和转动能级的规律）无法解释。

集体模型 (collective model)

也叫综合模型，是在壳层模型基础上发展起来的一种核模型。它保留了壳层模型的基本概念，即认为核子在平均核场中独立运动并形成壳层结构，又对壳层模型做了重要补充，即认为原子核可以发生形变——由球形变为非球形，并产生转动和振动等集体运动。

满壳层的原子核，即双幻核，稳定的形状是球形。如果原子核在满壳层外还有外围核子，则外围核子的运动将使满壳层的核子部分（称为核实）受到一定的力而产生形变。这叫做外围核子对核实的“极化”作用。核实外面只有少数核子时，极化作用较小，不足以使原子核产生稳定的形变，因为核实中的核子间有相互作用，可以反抗外围核子的极化作用，尽量保持原来的形状。当有足够多的外围核子时，极化作用增大，反极化作用相对变小，原子核将产生稳定的形变。具有形变的原子核（例如椭球形原子核），势场不是球对称的，而具有一定的方向性。原子核的转动，就是指核势场空间取向的变化。因此，球形核没有集体转动可言，形状为轴对称的原子核围绕对称轴的集体运动，也是没有意义的。

原子核的振动是外围核子的极化作用和核实的反极化作用引起的。假

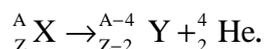
定核物质是不可压缩的，因而在振动过程中核的体积保持不变，只做形状变化的表面振动。由于原子核的集体运动，核场不是静止的，而是变动的。然而，原子核集体运动的周期一般要比核内单个粒子运动的周期长得多。所以，集体模型在考虑核子在平均场中运动时，可以近似地认为平均场是不变的。即首先研究在平衡形状和某一方向的核场中的单粒子运动，然后再考虑缓慢的原子核集体运动。用这种方法，可以计算出单粒子能级，也可以计算出转动和振动能级。

放射性 (radioactivity)

已知的近三千种核素绝大多数是不稳定的，它们会自发地发射 α 射线或发射 β 射线和中微子同时发射 γ 射线，变成另一种核素。这种现象叫放射性衰变。能发生放射性衰变的核素叫放射性核素。原子序数大于 83 的天然核素都是放射性的。原子序数小于 84 的天然核素中，也有一些是放射性的，它们都是长寿命的放射性核素。还有一些寿命较短的放射性核素，如 ${}^2_1\text{H}$ 、 ${}^{14}_6\text{C}$ 等，是宇宙射线和地球表层或外围的大气作用后产生的。除此以外的放射性核素，都是在反应堆和粒子加速器中通过核反应产生的，称为人工放射性核素。

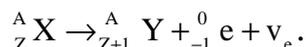
放射性衰变主要有三种：

(1) **衰变** 原子核自发地放射出 α 粒子 ${}^4_2\text{He}$ 而发生的衰变。衰变后的剩余核 (通常叫子核) 与衰变前的核 (通常叫母核) 相比，电荷数减少 2，质量数减少 4。用 X 表示母核，Y 表示子核， α 衰变可用下列方程表示



(2) **衰变** 又可分为三种情况：

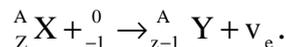
原子核自发地发射电子 ${}^0_{-1}\text{e}$ 和电子型反中微子 $\bar{\nu}_e$ 而发生的衰变称为 β^- 衰变，可用下列方程表示：



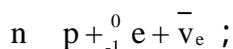
原子核自发地发射正电子 ${}^0_1\text{e}$ 和电子型中微子 ν_e 而发生的衰变称为 β^+ 衰变，可用下列方程表示：



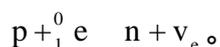
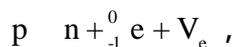
轨道电子俘获 原子核俘获一个核外轨道电子 (一般为 K 电子) 发射出电子型中微子而发生的衰变称为轨道电子俘获，可用下列方程表示：



三种类型的 β 衰变中，子核与母核的质量数都相同，只是电荷数相差 1，即子核与母核是相邻的同量异位素。 β^- 衰变相当于原子核中的一个中子变为质子



β^+ 衰变和轨道电子俘获相当于原子核中的一个质子变为中子



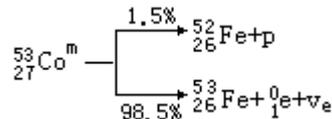
(3) **跃迁** 衰变或 β 衰变的子核往往处于激发态，处于激发态

的原子核要向基态跃迁而发出 射线。这种跃迁称为 跃迁。因此， 跃迁总是伴随着 衰变或 衰变而发生的。 跃迁不会导致核素的变化，而只是改变了原子核的内部状态。

除上述三种主要的放射性衰变，原子核还会发生自发裂变以及一些其他方式的衰变。

自发裂变：某些重原子核可以自发地分裂成两个质量差不多的原子核，并放出几个中子。

质子放射性：1970年发现，处于激发态的 $^{53}_{27}\text{Co}^m$ ，除 β^+ 衰变外，还能以发射质子的方式衰变：



1982年又发现基态的 ^{151}Lu 、 ^{147}Tm 、 ^{113}Cs 、 ^{104}I 都有质子放射性。

重离子放射性：1984年发现 ^{223}Ra 能发射 ^{14}C 。以后又发现 ^{222}Ra 、 ^{224}Ra 也能发射 ^{14}C ， ^{232}U 能发射 ^{24}Ne 。1987年又发现 ^{234}U 能同时发射 ^{24}Ne 和 ^{28}Mg 。近年又发现了 ^{32}Si 、 ^{34}Si 等衰变模式。

双 衰变 1987年观察到 ^{82}Se 发射两个电子和两个反中微子的双衰变，确定了它的半衰期为 $1.1^{+0.8}_{-0.3} \times 10^{20}$ 年。

还有些具有重大理论意义的可能的放射性衰变方式，如无中微子双衰变和重核的 介子自发发射，也在研究和探索中。

放射性衰变 (radioactive decay)

单个的放射性原子核什么时候衰变完全是偶然的，无法预先知道。但是对于大量原子核而言，衰变是有规律的。设 $t=0$ 时某种放射性核素的原子核总数为 N_0 ，经过时间 t 后，剩下的原子核总数为 N 。从时刻 t 到时刻 $t+dt$ 的无限小时间间隔内，衰变的原子核数 $-dN$ 应该跟 N 和 dt 成正比，即

$$-dN = \lambda N dt \quad (1)$$

式中的负号，表示放射性原子核数随时间的延长而减少，比例系数 叫做衰变常量。由(1)式及初始条件可得

$$N = N_0 e^{-\lambda t} \quad (2)$$

(2)式表明，放射性原子核的数目是按指数律衰减的，这是对任何一种放射性核素都适用的基本规律。常量 越大，放射性核素衰变得越快。

人们感兴趣而又便于测量的是：在单位时间内有多少放射性原子核发生衰变，即放射性活度 $A = -\frac{dN}{dt}$ 。由(1)式可得

$$A = -\frac{dN}{dt} = \lambda N = \lambda N_0 e^{-\lambda t} = A_0 e^{-\lambda t} \quad (3)$$

式中的 $A_0 = \lambda N_0$ 是 $t=0$ 时的放射性活度。可见放射性活度跟放射性原子核的数目是按相同的指数律衰减的。

放射性活度的单位是贝可勒尔，简称贝可，符号Bq。1Bq=1s⁻¹。过去常用的放射性活度单位是居里(Ci)，1Ci=3.7×10¹⁰Bq。

描述放射性核素衰变快慢，除了用衰变常量 外，还可用半衰期 $T_{1/2}$ 和平均寿命 。

半衰期是放射性原子核减少到原来的一半所需的时间。由(2)式，当 $N = \frac{1}{2}N_0$ 时， $t = T_{1/2}$ 可得

$$T_{1/2} = \frac{\ln 2}{\lambda} = \frac{0.693}{\lambda} \quad (4)$$

平均寿命 是指放射性原子核平均生存的时间。根据(1)式，从时刻 t 到时刻 $t+dt$ 的无限小时间间隔内有 $-dN$ 个原子核发生衰变，可以认为这 dN 个原子核的寿命为 t ，总寿命为 $(dN)t = -Ndt$ 。因为 $t=0$ 时 $N=N_0$ ，

所以这 N_0 个原子核的总寿命为 $\int_0^{\infty} t\lambda N dt = \int_0^{\infty} \lambda N_0 t e^{-\lambda t} dt = N_0 / \lambda$ 。由此得 N_0 个原子核的平均寿命为

$$\tau = \frac{1}{\lambda}$$

$$T_{1/2} = 0.693 \tau$$

当放射性核素具有分支衰变(如 ^{64}Cu 可同时发生 β^- 衰变与 β^+ 衰变)时，总的衰变常量 应是各分支衰变方式的衰变常量 的和

$$\lambda = \sum \lambda_i$$

第 i 种分支衰变的放射性活度为

$$A_i = \lambda_i N = \lambda_i N_0 e^{-\lambda t}$$

如果衰变是一代接一代连续进行的递次衰变，则任何一代的放射性物质被分离出来单独存放时，它们的衰变都满足(2)式的指数衰减律。但是，把它们混合存放时，其中任一子体的衰变，不仅跟它本身的衰变常量有关，而且跟前面所有放射体的衰变常量都有关，不再服从简单的指数衰减律了。

如果多代子体递次衰变的母体半衰期很长，在观察时间内看不出母体放射性的变化，且各代子体的半衰期都比母体的半衰期短得多，则不管各代子体的半衰期相差多么悬殊，经过足够长的时间以后，整个衰变系列各个放射体的放射性活度都将相等，即 ${}_1N_1 = {}_2N_2 = {}_3N_3 = \dots$ 。自然界中存在的三个天然放射系，就属于这种情况。

放射系 (radioactive series)

地壳中存在的一些重的放射性核素，形成三个递次衰变系列，通称天然放射系。它们的母体半衰期都很长，跟地球的年龄相近或更长，因而经过漫长的地质年代后还能保存下来。衰变系列中的各个核素，大多数是放射性的，少数具有 α 放射性，一般都伴随有 γ 辐射，但没有一个具有 β^+ 放射性或轨道电子俘获的。每个放射系从母体开始，都经过至少 10 次连续衰变，最后衰变为稳定的铅同位素。这三个天然放射系是：

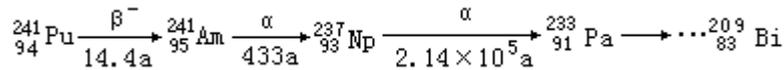
(1) 钍系 从 ${}_{90}^{232}\text{Th}$ 开始，经过 10 次连续衰变，最后衰变为稳定核素 ${}_{82}^{208}\text{Pb}$ 。钍系中的核素，质量数都是 4 的整数倍，即 $A = 4n$ ，所以钍系也叫 $4n$ 系。母体 ${}_{90}^{232}\text{Th}$ 的半衰期为 1.41×10^9 年，子体中半衰期最长的是 ${}_{88}^{226}\text{Ra}$ ， $T_{1/2} = 5.76$ 年。

(2) 铀系 从 ${}_{92}^{238}\text{U}$ 开始，经过 14 次连续衰变，最后衰变为稳定核素

$^{208}_{82}\text{Pb}$ 。铀系中的核素质量数都是4的整数倍加2，即 $A = 4n + 2$ ，所以铀系也叫 $4n+2$ 系。母体 ^{232}U 的半衰期为 4.468×10^{10} 年。子体半衰期最长的是 ^{234}U ， $T_{1/2} = 2.45 \times 10^5$ 年。

(3) 锕系 从 $^{235}_{92}\text{U}$ 开始，经过11次连续衰变，最后衰变为稳定核素 $^{207}_{82}\text{Pb}$ 。由于 ^{235}U 俗称锕铀，因而这个放射系称为锕系。锕系中的核素，质量数都是4的整数倍加3，即 $A = 4n + 3$ ，所以锕系也叫 $4n+3$ 系。母体 ^{235}U 的半衰期为 7.038×10^8 年。子体半衰期最长的是 ^{231}Pa ， $T_{1/2} = 2.38 \times 10^4$ 年。

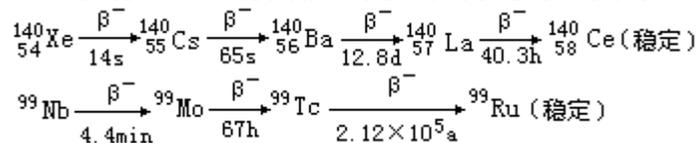
地壳中只存在着 $4n$ ， $4n+2$ ， $4n+3$ 三个天然放射系，但缺少 $4n+1$ 系。后来用人工方法制成了 $4n+1$ 系。把 ^{238}U 放在反应堆中照射，连续俘获三个中子变成了 $^{241}_{92}\text{U}$ ，它经过两次 β^- 衰变变成了具有较长寿命 ($T_{1/2} = 14.4$ 年) 的 $^{241}_{94}\text{Pu}$ 。 $^{241}_{94}\text{Pu}$ 具有下列递次衰变：



在这个衰变系列中， $^{237}_{93}\text{Np}$ 的半衰期最长，经过足够长的时间后， $^{241}_{94}\text{Pu}$ 和 $^{241}_{95}\text{Am}$ 几乎衰变完了， $^{237}_{93}\text{Np}$ 还会存在，并与其子体建立起平衡，所以这个系叫做镱系，即 $4n+1$ 系。由于 ^{237}Np 的半衰期比地球年龄小很多，地壳中原有的 ^{237}Np 早已变成 ^{209}Bi ，所以在天然放射系中没有 $4n+1$ 系。

应用人工放射性核素的生产方法，不仅制出了人工放射系——镱系，也制成了三个天然放射系中已不存在的 $Z > 92$ 的核素。

人工放射性中还有由核裂变产物得到的裂变碎片放射系，如



电离室 (ionization chamber)

利用粒子对气体的电离作用探测粒子的装置，其构造是在充气的密闭容器中装上两个电极：一个叫集电极，经过记录仪器与地联接；另一个叫高压电极，加上几百伏的电压（正压或负压）。电离室的形状有平行板状的，也有圆筒状的。电离室按其工作性质可分为脉冲电离室和电流电离室两类。

脉冲电离室 又称计数电离室，用于测量 α 粒子、质子、氘核等重粒子的数目和单个重粒子的能量。

当带电重粒子进入电离室使室内气体电离时，大量电子和正离子，在电场的作用下，将沿着相反的方向朝两个不同的电极漂移。由于电子和正离子的运动，它们在两个极板上的感应电荷随之而变化。这种变化始于离子对的形成，终于离子全部被收集，时间约 1 毫秒。因此每进入一个入射粒子，记录仪器上就出现一个短暂的电压或电流脉冲，脉冲的大小只依赖于射线在电离室中产生的离子对的多少，而与极间电压无关。因此，脉冲

电离室可用于测量单个带电重粒子的能量。重粒子在电离室内引起的电压脉冲在毫伏数量级，须经放大才能在记录仪器中记录下来。由于放大器本身具有量级为 10^{-5} 伏的噪声脉冲，因此脉冲电离室只能记录能量大、电离能力强的重粒子，而不能记录能量小、电离能力弱的粒子。

脉冲电离室可充入氩、氮或甲烷等气体而不用空气，因为空气中的氧能产生分子负离子，它的质量远大于电子，运动速度慢，会延迟正极收集负电荷的时间，脉冲的幅度也会减小。

电流电离室 又称**累计电离室**，只能测量大量粒子引起的足够大的电离效应，不能测量单个粒子。

带电粒子流、X 射线或 γ 射线进入电离室时，使气体分子电离；电离产生的正负离子，在极间电场的作用下，分别向正负极漂移，在外电路中形成电离电流。饱和电流的大小只与射线的初始强度有关，与外电压的大小无关。测出饱和电流就可以知道射线的强度。

电流电离室可以充入空气。

正比计数器 (proportional counter)

利用在一定电压区域内气体电离时的离子增殖效应制成的探测器。一般以圆筒状的金属器壁为负极，中间安一根金属丝做正极，管内的工作气体为甲烷或氩和碳氢化合物。工作电压提高到一定范围后，由于靠近中心金属丝处的电场强度很大，可使管内初始电离的电子获得足够高的速度，在与气体分子的碰撞中引起二次电离、三次电离……形成电子雪崩，使工作气体本身具有放大作用，放大倍数(称为**气体放大系数**)可达 $10^3 \sim 10^4$ ；而且对于固定的电压，气体放大倍数是恒定的。因此，入射粒子能在外电路中产生相当大的脉冲，脉冲的幅度与初始电离的离子对数成正比。所以正比计数器可以辨别入射粒子的种类和能量。

盖革-弥勒计数器 (Geiger-Müller counter)

结构与工作原理跟正比计数器相似的核辐射探测装置(参见“正比计数器”)，它的工作电压比正比计数器高，气体放大系数也随着工作电压的升高而急剧增大，可达 $10^6 \sim 10^8$ ，并失去了与初始电离的离子对数间的正比关系。因此，入射粒子只起触发放电作用，增殖的总离子对数和输出脉冲的幅度，只与两极间的电压有关，而与粒子的性质和能量大小无关。这种计数器不能区别不同粒子，多用于探测 α 射线和 β 射线。

盖革-弥勒计数器充入的工作气体 90%为惰性气体，10%为乙醇、二乙醚等有机气体。充入少量有机气体是为了：阻止管中的阳离子撞击阴极时产生次级电子，阻止管中的受激分子退激时发出光子撞击阴极产生光电子，使计数器被粒子触发放电后能迅速终止放电，回到原来的状态。这些少量气体叫**猝灭气体**。

闪烁计数器 (scintillation counter)

利用射线与物质相互作用时产生的发光效应制成的一种放射性探测器，由装在暗盒中的闪烁体、光电倍增管和脉冲记录电路组成。常用的闪烁体分为无机晶体和有机晶体两大类。无机晶体大都是含有少量杂质的无机盐晶体，如 NaI (Tl)、ZnS (Ag) 等，有机晶体有蒽、萘等。当射线作

用于闪烁体时，晶体分子被激发，退激时便发出荧光。荧光射向光电倍增管的光阴极，打出光电子。光电子再经过放大形成可探测的脉冲信号。

闪烁计数器是一种高效率的探测器，分辨时间短（约 1 纳秒），最高计录率可达每秒 1000 万次左右。由于输出脉冲的高度与入射粒子在晶体中损失的能量成正比，它还能鉴别辐射的性质，并能根据脉冲的大小测量辐射的能量。

云室 (cloud chamber)

早期核物理学中用于研究带电粒子径迹的装置。云室有两种：一种是膨胀云室，另一种是扩散云室。

膨胀云室即威尔孙云室，是一个圆筒形密闭容器，底部有一个可以上下移动的活塞，容器内充以氙气和酒精的饱和蒸汽。膨胀云室的典型尺寸是直径 15 厘米、深 2.5 厘米。当入射的带电粒子进入云室，在它的路径上使气体分子电离成正负离子对时，让云室突然膨胀。由于膨胀十分迅速，因而是绝热膨胀，云室内气体温度下降，原来的饱和汽变成过饱和汽，就以粒子径迹上的离子为凝结核，形成液滴。用强光照射，就可以看到粒子的径迹，还可以对径迹进行立体拍照（可用两个照相机同时在不同角度拍照），做进一步的研究。

云室膨胀后，热量渐渐从外部透入室内，经过一定时间，就不能在离子上发生凝结。能发生凝结而把粒子径迹记录下来的这段时间称为膨胀云室的灵敏时间。膨胀云室的灵敏时间较短，大多数情况下为 0.1 秒量级，这是云室的一个缺点。为了使云室中粒子的径迹不发生畸变，要尽量减小云室内气体温度的不均匀性。因此，云室膨胀后必须经过一定时间才能进行下一次膨胀。一般的膨胀云室每分钟的重复率不超过二次，因而不能连续工作，这是它的另一缺点。

扩散云室是一种能够连续工作的云室。它与膨胀云室的不同之处是产生过饱和蒸汽的方法不同。扩散云室的壁是用绝缘材料制成的，它的顶部和底部保持不同温度，例如顶部 20℃，底部 -40℃，蒸汽从顶部向底部扩散，在靠近底部的区域，蒸汽成为过饱和的，可以在离子上形成液滴。这个区域称为扩散云室的灵敏区域（图 1-25-4）。一种典型的扩散云室，直径 35 厘米，高 18 厘米，灵敏区域的深度 5 厘米 ~ 7.5 厘米。

图—125—5 扩散云室的灵敏区域

不论是膨胀云室还是扩散云室，都要用静电场经常清除云室中的残余离子。扩散云室的重复率比膨胀云室约大一个数量级。根据带电粒子在云室中的径迹，可以判断粒子的性质。

把云室放在强磁场 B 中，入射的带电粒子因受洛仑兹力而偏转，径迹呈圆弧形。根据径迹的偏转方向可知粒子带电的正负。根据拍摄的照片测出圆弧的曲率半径 r ，由公式 $r = \frac{mv}{zeB}$ ，只要知道粒子的带电量 ze ，就能求出粒子的动量 $mv = zeBr$ 。

粒子的带电量怎样确定呢？可以分析粒子的电离密度，即单位长度径迹上产生离子对的数目。把粒子径迹的照片放在显微镜下放大就看到组成

径迹的小液滴。数出单位长度上的液滴数就可以知道粒子径迹上的电离密度。粒子径迹照片中电离密度较小的与放射性物质发出的射线具有同等的电离密度，因此，可以认为形成这类径迹的粒子带电量为 e 。如果粒子的带电量为 $2e$ ，由于电离密度与粒子带电量的平方成正比，它的电离密度是同速度的单电荷粒子的电离密度的 4 倍，因而会形成相当浓的径迹。粒子所带电量越大 (z 越大)，径迹上的电离密度也越大。

由于粒子在单位长度径迹上损失的能量 $-\frac{dE}{dx}$ (电离密度与产生一对离子损耗的能量的乘积) 是粒子速度 v 的函数: $-\frac{dE}{dx} = z^2 f(v)$, 式中 z 是带电粒子的电荷数。因此，知道了粒子的带电量，根据理论上推导出来的公式，还可以求出粒子的速度。对于一个未知的粒子，知道了它的动量和速度也就知道了它的质量。

泡室 (bubble chamber)

利用过热液体的不稳定性显示带电粒子径迹的装置。

在耐高压的容器中装有透明液体 (如液氦、液氢、丙烷、戊烷等)。液体的温度低于在该压强下的沸点。压强突然降低，沸点也随之降低，液体就处于过热状态。当有带电粒子通过液体时，沿着粒子的径迹，液体被电离，并在离子周围沸腾而出现气泡。在强光照射下，就可以看到由气泡组成的粒子径迹。泡室减压时间的典型值为 10 毫秒，灵敏时间也约 10 毫秒。减压结束时射入粒子，1 毫秒就显现气泡。以后泡室再次加压，每次循环需时约 1 秒。

泡室的大小从几立方厘米到几十立方米不等。以氢、氦等做工作物质的泡室在低温下使用，以丙烷等碳氢有机物做工作物质的泡室在常温下使用。与云室相比，泡室的一个很大特点是它的液体工作物质比云室中气体工作物质的密度大很多，因而粒子射程短，更适于对高能粒子的研究，因为在一幅照片上可以更多地显示出高能粒子的变化情况。

核乳胶 (nuclearemulsion)

可以记录带电粒子径迹的特殊照相乳胶。核乳胶与普通乳胶有如下一些区别：核乳胶中溴化银的浓度比普通照相乳胶大 4 倍；核乳胶的厚度 (25 微米 ~ 2000 微米) 比普通乳胶 (2 微米 ~ 3 微米) 大几十到几百倍；原子核乳胶中溴化银的晶粒 (直径 0.07 微米 ~ 0.3 微米) 要比普通乳胶的晶粒 (直径 0.5 微米 ~ 3 微米) 小得多，而且是彼此分离的；原子核乳胶对光是不灵敏的。当带电粒子通过核乳胶片时，粒子经过的路径上有些溴化银晶粒成为潜像，显像后，就在乳胶片上还原为黑色的银粒，不能显像的晶粒，在定像过程中被定像液溶解。这样，在乳胶中就显示出带电粒子的径迹。乳胶径迹中单位长度上的银颗粒数目叫乳胶的颗粒密度，它跟入射粒子的电荷、质量和速度有关。电荷大、速度慢的入射粒子，电离本领强，形成的潜像大，颗粒密度大。粒子的射程也是速度的函数。粒子在乳胶中运动与原子碰撞而多次散射，会改变运动方向，使径迹折曲。根据径迹上的颗粒密度、射程大小和径迹折曲的程度，可以判别粒子的种类和速度。

核乳胶是固体，密度为 4g/cm^3 ，对粒子的阻止本领为空气的 1800 倍。

所以在空气中有几米射程的粒子，在乳胶中的射程只有几毫米。一个复杂的高能现象，可以在一个很小的体积中显示出来。

射线探伤法 (gamma-ray materiology)

用射线检验金属材料与工件内部缺陷的方法。通常采用射线照相法。让射线穿过被检查的工作，在工件后面放上底片，并尽量与工作贴紧。穿过缺陷部分到达底片的射线比穿过正常部分到达底片的射线，强度要大，在显像后的底片上会显示出黑色区域，用这种方法可以发现工件内部缺陷，并确定其大概的形状和位置。

为了使拍照的影像清晰，放射源与工件的距离应比工件大。还可以在底片前面放一张重元素屏，例如铅屏（称为增感屏），因为穿过工件的射线会在屏中产生光电子和康普顿电子，这些次级电子可以增强底片的感光。增感屏的最佳厚度，主要由射线的能量决定，也跟所用底片的性质有关。射线探伤经常采用的放射源有 ^{60}Co ， ^{137}Cs ， ^{192}Ir 等。不同放射性核素发出的射线能量不同。低能射线探测的灵敏度高，但探伤厚度不及高能射线。 ^{60}Co 的射线能量为1.17MeV和1.33MeV，可探测5cm~30cm的钢铁制品， ^{192}Ir 的射线能量为0.137MeV和0.651MeV，可检验1cm~6cm的钢铁制品。

放射性示踪法 (radioactive tracer method)

由于放射性核素不断发出辐射，无论它运动到哪里，都很容易用探测器探知它的下落，因此可以用作示踪物来辨别其他物质的运动情况和变化规律。这种放射性示踪物称为示踪原子或标记原子。

1911年，G.赫维西(G. Hevesy, 1885—1966)第一次使用了放射性示踪物。为了确定女房东是不是把星期天剩下的馅饼掺到后几天的膳食中，他把一些放射性钷放到新做好的馅饼中，到了星期三，借助于验电器指给女房东看，在蛋奶酥中含有放射性物质。不久，他就把示踪法引入到研究工作中去。自那以后，放射性示踪技术已有长足进步：放射性核素的数目及其有效性大大增加了，探测方法的灵敏度及其在能量的选择性方面都有很大改进。例如，第101号元素钷(Md)，只要有20个原子，就能把它鉴别出来。因此，放射性示踪技术，在工农业生产、医疗卫生和科学研究等方面都有广泛的应用。例如，可以将放射性同位素引入待研究的机械材料中去，在制成的机件运转时，收集磨损下来的碎屑和落下的润滑油，定时测量它们的放射性，就可以确定机件的磨损情况。又如，用放射性杂质代替寻常杂质，扩散到半导体中，然后逐层磨下，测量其放射性强度，就可以了解杂质扩散的情况。在农业上，可以用放射性示踪研究作物对肥料的吸收情况：把放射性颗粒状磷肥放到作物根旁土壤中，15分钟~20分钟，叶片上就有放射性磷出现，观察放射性增加的速度，就能估计作物吸收磷肥的速度。在医学和生命科学的研究方面，把用放射性核素标记的物质A引入动物体，经过一段时间，从排出物或组织中分离出另一化合物B，含有相当数量的上述标记核素，即可确定A在动物体内可以转变为B。例如，将 ^{14}C 标记的糖喂给大鼠，发现从其脂肪中分离出来的脂肪酸有很强的放射性，就证明了糖在动物体内可以变成脂肪这一很重要的代谢规律。也可以用放射性标记某种物质，追踪这种物质在动物体内转移和移动的速度，

研究其吸收、摄取、浓集、分布、分泌、排泄以及药物作用原理等问题。

放射性示踪的应用，隐含着两个假定：一是放射性核素和它的稳定同位素化学性质相同；二是研究对象的化学特性不受放射性衰变的影响。第一个假定仅当同位素的质量效应很重要时才是不正确的，这种情况只在氘-氘-氘互相取代时才会发生。第二个假定，只要示踪物的浓度很小就是正确的。

核电池 (nuclear battery)

将放射性核素辐射的核能转变成电能的装置，有几种不同的类型：

恒流充电型 放射性源放出的电子，给绝缘导体充电后被收集器收集起来。放射性源一端失去电子成为正极，收集器一端得到电子成为负极，在正负极之间形成电势差。这种核电池可产生高达 150 千伏的电压，但电流很小，最大短路电流只有 10^{-11} 安。

温差电偶型 用放射线的能量给温差电偶的一个结点加热升温，得到温差电。实际装置是用一层转换体把放射性源包起来，转换体外面还有一绝缘层。转换体吸收了全部放射性粒子的能量，把核能转变为内能，温差电偶的热结点与转换体接触，其温度 T_h 与转换体温度相同，外端的温度为 T_c ，最大效率为

$$\eta = \frac{T_h - T_c}{T_c}。$$

接触电势差型 把具有接触电势差的两个电极经由电阻连接起来，用放射性源发出的射线使电极间的气体电离，就可产生电流。

PN 结型 与光电池原理类似，用放射线照射 PN 结，产生电子-空穴对，在自建电场的作用下，空穴移向 P 区，电子移向 N 区，从而在 P 区和 N 区间产生电势差。可用于核电池的核素有许多种，最常用的有两种：一种是经济易得的 ^{90}Sr ($T_{1/2}=28.5\text{a}$ 年)，一种是半衰期长、易于防护的 ^{238}Pu ($T_{1/2}=87.75\text{a}$)。

核电池具有结构紧凑，运行可靠，不受周围环境影响，能长期工作而无须看管等优点，可用于宇宙航行，空间考察，海上灯塔，海底电缆（增音器），沙漠、高山和险滩中的自动气象站、地震观测站等，5 年 ~ 10 年不需更换电源。医用的心脏起搏器也要使用核电池。

放射性测定年代 (radioactive age determination)

应用放射性核素的衰变规律，可以测定矿石、地层的生成年代，也可以测定某些古文物的年代和古生物遗骸的死亡年代。前者可用铀铅法，后者用 ^{14}C 法。

铀铅法 ^{238}U 的半衰期为 4.5×10^9 年，它的最终子体是稳定的 ^{206}Pb 。假定矿石在生成时不含铅，单位质量中 ^{238}U 的原子数为 N_0 (^{238}U)，为 ^{238}U 的衰变常量，矿石的年龄为 t ，则目前每单位质量中， ^{238}U 的原子数目为

$$N(^{238}\text{U}) = N_0(^{238}\text{U})e^{-\lambda t}$$

^{206}Pb 的原子数为

$$N(^{206}\text{Pb}) = N_0(^{238}\text{U}) - N(^{238}\text{U}) - N'$$

N' 为单位体积中所有 ^{238}U 的放射性子体的原子数目。当 t 很大 (超过 10^5 年) 时, $N' \ll N(^{206}\text{Pb})$, 则有

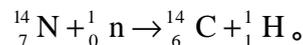
$$\begin{aligned} N(^{206}\text{Pb}) &= N_0(^{238}\text{U}) - N(^{238}\text{U}) \\ &= N(^{238}\text{U})(e^{-\lambda t} - 1) \end{aligned}$$

由此可得

$$t = \frac{1}{\lambda} \ln \left[\frac{N(^{206}\text{Pb})}{N(^{238}\text{U})} + 1 \right]$$

所以测出矿石样品单位体积中 ^{206}Pb 原子数与 ^{238}U 原子数的比, 就可以知道矿石的年龄。

^{14}C 法在碳元素中除了含有大量稳定的 ^{12}C 和 ^{13}C 外, 还含有微量的放射性同位素 ^{14}C , 半衰期为 5730 年, 它是宇宙射线中的中子穿过大气层时与空气中的 ^{14}N 核碰撞发生核反应生成的:



宇宙射线不断地射到地球上, ^{14}C 不断地产生又不断地衰变, 结果大气中 ^{14}C 的含量保持不变。大气中的 ^{14}C 与氧化合生成放射性二氧化碳 $^{14}\text{CO}_2$, 通过光合作用进入植物体。动物以植物为食, ^{14}C 又进入动物体。

因此, 在生物体内 ^{14}C 与非放射性碳的含量比与大气中二氧化碳里二者的比相同。生物体死亡以后停止了与外界的物质交换, 体内原有的 ^{14}C 只能不断地衰变而得不到补充。因此, 从古代生物遗骸中 ^{14}C 与非放射性碳的含量比, 就可以求出它死亡的年代 t 。用 λ 表示 ^{14}C 的衰变常量, $A_0 = \lambda N_0$ 表示处于交换运动中的 ^{14}C 的放射性活度, $A = \lambda N$ 表示所测样品的 ^{14}C 的放射性活度, 仿照铀铅法的推理, 则有

$$t = \frac{1}{\lambda} \ln \frac{A_0}{A}$$

构成生物体的碳中, ^{14}C 的含量极少, ^{12}C 与 ^{14}C 原子含量的比为 10^{12} : 1。因此, 测定 ^{14}C 的放射性相当困难, 需用特殊的技术与装置。

辐射防护 (radioprotection)

核辐射的生物效应主要由于电离作用对生物分子的破坏。因此, 一切致电离辐射——能直接引起电离的 α 粒子、 β 粒子和质子, 能间接引起电离的 γ 射线和中子, 都可能成为伤害人体的来源。

致电离辐射在人体某种组织中造成的伤害程度, 首先取决于辐射在该组织中沉积的能量。其次, 能量沉积的距离 (或体积) 也是重要的。如果能量在短距离内沉积, 它对某种组织的伤害大于沉积距离大的情况。例如,

α 粒子在人体组织中的射程非常短, 就是说它们在短距离内沉积能量, 所以进入体内的放射性源发出的 α 粒子所造成的伤害, 比 γ 射线源 (不管是体内的还是体外的) 沉积同样能量所造成的伤害大。

外部照射的损伤主要由体外辐射源发出的 γ 射线所引起。 α 和 β 粒子几乎不会引起损伤, 除非它的源非常接近人体或就在皮肤表面上。而以各种方式进入体内的 α 粒子、 β 粒子、 γ 射线或中子的源, 则引起内部照射。这时, 人体就将连续不断地遭受辐射照射, 放射性物质的量只能靠自然衰变和人体排泄而减少。

某些元素天然倾向于集中在特定的组织或器官中，这些元素的放射性同位素的行为与其稳定的同位素一样。例如，所有碘的同位素都倾向于聚集在甲状腺中，钙的同位素则沉积在钙化的骨组织中。锶、钡和镭与钙的化学性质类似，它们具有置换骨中钙的倾向。钷如果溶入血液中则将部分地沉积在某些骨骼表面或肝脏中，存留相当长的时间。比较难溶解的钷化合物，如二氧化钷，吸入肺之后，可以存留数年之久。

微弱的放射性照射对人体并无损伤。人们是经常处于射线的照射之下的。自然界存在的 ^{14}C 、 ^{40}K 、 ^{226}Ra 等放射性元素，在人体内不断地新陈代谢，并发出射线。但人们对此都能自然地适应，并不影响健康。只有超过一定剂量的照射，才会造成伤害：能引起各种放射病，重者可以致死；远期效应可引起各种恶性肿瘤、不育甚至早亡。

对体外照射的防护应从以下四个方面着手：在使用放射性物质时（如在实验工作中）用量要尽可能少。受照射的时间尽可能短，不要在放射性物质的周围做不必要的停留，用放射性物质进行的操作，力求熟练、迅速。与放射性源的距离尽可能远，如操作时利用各种夹具或进行远距离操纵。屏蔽，常用的材料有铅、铁、水泥、砖、石、泥土、硼酸、石蜡、铝、铅玻璃、有机玻璃、水和氯化锌水溶液等。

对不同的放射性粒子，可采用不同的措施。α粒子射程很短，工作时只要戴上手套，不直接去摸放射性物质就可以了。β射线比α粒子的贯穿能力强，在空气中的射程可达数米，但它容易被不太厚的铝层、铜片、有机玻璃或玻璃所吸收。不过原子量较大的物质，例如铅，一般不适于做射线的屏蔽物，特别是对于高能量的β射线更不适宜，因为它们较易引起贯穿力很强的X射线（韧致辐射）。射线的贯穿能力比α、β射线大得多，要选用原子序数大、密度大的材料，如铁、铅、铅玻璃等来屏蔽。考虑到经济实用，也可用混凝土、水等廉价材料。中子的防护可归结为快中子的减速和慢中子的吸收。中子的减速用轻元素，最好的是氢，实用上多采用水、石蜡做中子的慢化剂。氢也是比较好的吸收剂，但效果不如锂和硼，一般常用硼酸水溶液做吸收剂。

对内照射的防护，必须避免放射性物质进入体内和污染身体。要禁止在可能存在放射性污染的地区抽烟、进食或饮水。通风系统的设计必须使空气总是从辐射水平较低的区域流向辐射水平较高的区域。尘埃也要加以控制，最好用真空除尘，清扫时应有足够湿度，以防止尘埃飞扬。在空气尘埃难以避免的区域内工作时，应戴适当的面具。对出入可能存在放射性污染区域的人员，应提供一次性使用的工作服、手套和鞋套；这些物品应留在规定的出口，根据情况进行去污或另作处理。对离开现场的工作人员要仔细进行放射性监测。

吸收剂量 (absorbed dose)

物质的电离程度和它吸收致电离辐射能量的多少有关。单位质量的物质吸收的辐射能量越多，产生的正负离子对也越多。因此，致电离辐射与物质相互作用的程度，可以用辐射授予某一体积内物质的能量来度量。致电离辐射授予某一体积元中物质的平均能量 d_m 除以该体积元中物质的质量 dm 定义为吸收剂量 D ，即

$$D = \frac{\overline{d\varepsilon}}{dm}$$

吸收剂量的 SI 单位为戈瑞，简称戈，符号 Gy。1Gy=1J/kg。

一般说来，某一吸收剂量产生的生物效应与射线的种类、能量和照射条件有关。为了统一表示各种射线对机体的危害程度，采用了剂量当量这一物理量。剂量当量 H 定义为：在要研究的组织中某点处的吸收剂量 D、品质因数 Q 和其他一切修正因数 N 的乘积：

$$H=DQN$$

目前，国际辐射单位与测量委员会 (ICRU) 规定 N=1；Q 则与照射类型和射线种类有关，如对于外照射，X 射线、 γ 射线和电子 Q=1，热中子 Q=3，快中子 Q=10，重反冲核 Q=20。剂量当量的 SI 单位是希沃特，简称希，符号是 Sv，1Sv=1J/kg。

根据射线对人体伤害的资料和对动物进行实验的结果，制订了可以容许人体接受的（即对人体造成严重损害的概率微不足道的）最大剂量，称为剂量当量限值（原来称最大容许剂量），这个限值是内、外照射剂量的总和。

核反应 (nuclear reaction)

原子核与原子核或原子核与其他粒子（ α 粒子、质子、中子等）之间的相互作用所引起的变化过程，称为核反应。为了使核反应能够发生，原子核或其他粒子必须足够接近另一原子核，达到核力作用范围以内，即小于 10^{-14} 米。从放射性源、宇宙射线、带电粒子加速器或核反应堆都可得到高速运动的粒子，满足发生核反应的条件。

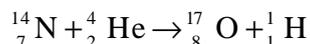
核反应一般可表示为



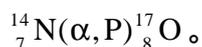
式中 A 和 a 分别表示靶核和入射粒子，B 和 b 表示剩余核和出射粒子。核反应还可简写为



例如，用 α 粒子轰击氮原子核引起的核反应



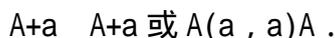
可简写为



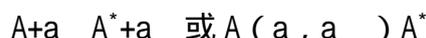
核反应，可分为核散射和核转变两大类。

出射粒子和入射粒子相同的核反应称为核散射，又可分为弹性散射和非弹性散射两种。

散射前后系统的总动能不变，即原子核内部的能量不生变化的散射叫做弹性散射，一般表示式为



散射前后系统的总动能不相等，即原子核内部能量发生变化的散射叫做非弹性散射。最常见的非弹性散射是剩余核处于激发态的情形，它的一般表示式为



出射粒子与入射粒子不同的反应称为核转变。

核反应按入射粒子的种类不同可分为如下几种：

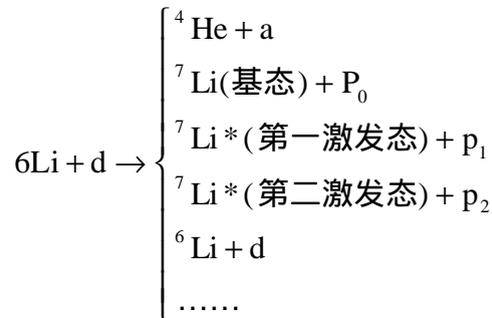
(1) 中子核反应：如中子弹性散射 (n, n) ，中子非弹性散射 (n, n') ，中子辐射俘获 (n, γ) 等，还有能使中子增殖的 $(n, 2n)$ 型反应。

(2) 带电粒子核反应：如质子引起的核反应 (p, p) ， (p, n) ， (p, α) ， (p, γ) ；氘核引起的核反应 (d, p) ， (d, n) ， (d, α) ， $(d, ^3\text{H})$ ， $(d, 2n)$ 等； α 粒子引起的核反应 (α, n) ， (α, p) 等；重离子（即比 α 粒子更重的离子）引起的核反应，如 $(^{12}\text{C}, 4n)$ ， $(^{16}\text{O}, 3n)$ 等。

(3) 光核反应，即光子引起的核反应，如 (γ, n) ， (γ, p) 等。

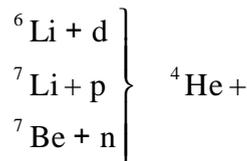
此外，电子也可以引起核反应，其特点与光核反应类似。

对于一定的入射粒子和靶核，能发生的核反应过程往往不止一种。例如能量为 2. 兆电子伏的氘核轰击 ^6Li 时，可产生如下一些反应：



式中 p_0 ， p_1 和 p_2 分别表示相应反应中放出的质子。

对于每一种核反应过程，称为一个反应道。反应前的道称为入射道，反应后的道称为出射道。对于同一个入射道可以有若干个出射道，如上例所示，对于同一个出射道，也可以有若干个入射道，例如



各反应道出现的概率是不相等的，而且这种概率随入射粒子能量的变化而不同。

核反应过程遵守以下的守恒定律，即电荷守恒定律、质量数守恒定律、能量守恒定律、动量守恒定律、角动量守恒定律和宇称守恒定律。

反应能 (reactionenergy)

在核反应中往往要释放或吸收能量。我们把核反应中释放的能量称为反应能。用 Q 来表示。当 $Q > 0$ 时核反应是放能反应， $Q < 0$ 时核反应是吸能反应， $Q=0$ 时核反应是弹性散射。考虑到反应能，核反应的表示式可写作

$$A+a \rightarrow B+b+Q.$$

例如 ${}^6\text{Li} + d \rightarrow {}^4\text{He} + p + 22.4\text{MeV}$ 是放能反应， ${}^9\text{Be} + n \rightarrow {}^8\text{Be} + n - 1.67\text{MeV}$ 是吸能反应。

设靶核、入射粒子、剩余核和出射粒子的静止质量分别为 m_A 、 m_a 、 m_B

和 m_b ，并且反应前后的粒子都处于基态，应用广义质量亏损的概念 $m = m_A + m_a - m_B - m_b$ ，我们有

$$Q = mc^2 \\ = (m_A + m_a - m_B - m_b) c^2 .$$

式中所有原子核的质量，都可以用相应同位素的原子质量来代替。这是因为原子核的总电荷在反应前后保持不变，原子中的电子总数反应前后也不变，在原子质量相减过程中，电子的质量互相抵消了。当然，反应前后电子在原子中的结合能是有变化的，但这个变化很小，可以忽略不计。

对于 $Q < 0$ 的吸能反应，只有入射粒子的动能达到一定数值才能发生，这个数值叫做吸能反应的阈能。阈能比反应能要大。根据动量守恒定律，在实验室坐标系中，反应前后系统的总动量不变，因此，剩余粒子和出射粒子都具有动量，因而也具有动能。这就决定了入射粒子的动能除了供给在反应过程中被系统吸收的反应能 $|Q|$ 外，还要供给一些额外的能量，以保持系统在反应前后动量的守恒。根据在质心坐标系中，反应前后系统的总动量都等于零，阈能就等于反应能 $|Q|$ 。在实验室坐标系中，可以证明，

$$E_{\text{阈}} = \frac{m_a + m_A}{m_A} |Q|$$

反应截面 (reaction cross-section)

当入射粒子流轰击靶子时，并非每个人

射粒子都能与原子核发生反应，即每个粒子能发生散射或引起核转变的概率并不是百分之百的。在原子核物理学中常以“反应截面”来形象地表示发生核反应概率的大小。

有一薄靶，它的厚度 x 很小，可以认为入射粒子垂直通过靶时它的能量不变。设靶中单位体积内的靶核数为 N_v ，则单位面积靶上的靶核数为 $N_s = N_v x$ 。如果入射粒子的束流强度，即单位时间的入射粒子数为 I ，则单位时间内入射粒子与靶核发生的反应数 N 与 I 和 N_s 成正比，即

$$N \propto I N_s .$$

用 σ 表示上式中的比例系数

$$N = I N_s \sigma , \text{ 则} \\ \sigma = \frac{N}{I N_s} = \frac{\text{单位时间发生的反应数}}{\text{单位时间入射的粒子数} \times \text{单位面积的靶核数}}$$

称为反应截面或有效反应截面，它的物理意义是：一个入射粒子跟单位面积靶上的一个靶核发生核反应的概率。

反应截面具有面积的量纲，它的单位用米²。常用的单位还有靶恩 (barn)，符号为 b ， $1b = 10^{-24} \text{cm}^2 = 10^{-28} \text{m}^2$ 。

对于一定的入射粒子和靶核，常有若干个反应道。每个反应道都有自己的分截面，总截面等于所有分截面之和。

对于一定的入射粒子和靶核，反应截面的大小是入射粒子能量的函数。

例如，中子与 ^{235}U 的裂变截面近似地与 $\frac{1}{\sqrt{E}}$ 成正比，即 $\sigma \propto \frac{1}{\sqrt{E}}$ 。由此

可知，中子的能量越小， ^{235}U 的裂变反应截面越大。

核反应机制 (nuclear reaction mechanism)

核反应过程可分为三个阶段：

第一阶段：入射粒子接近到靶核核场作用范围内，入射粒子在靶核核场中运动，保持相对独立性，所以通常叫做独立粒子阶段。

第二阶段：粒子被靶核吸收后，反应进入第二阶段。在这一阶段中，粒子与靶核发生了能量交换，因而不再能看作是粒子在整个靶核作用下独立运动，而可以认为入射粒子和靶核形成了一个复合系统，所以叫做复合系统阶段。能量交换方式可以有如下几种：入射粒子把能量交给靶核表面或体内的一个或几个核子使反应直接推向第三阶段。这种过程分别叫做表面直接作用和体内直接作用。入射粒子也可能在核内碰撞多次再发射出来，这叫做多次碰撞。入射粒子把部分能量交给靶核后飞出。这时靶核被集体激发，引起核的集体转动和振动。以上几种统称为直接作用。在直接作用过程中，入射粒子在不同程度上保留了原有特性。入射粒子与靶核经过多次碰撞，不断损失能量，最后留在核内，和靶核融为一体，形成一个中间过程的原子核，叫做复合核。因此，可以认为复合核已“忘记”了原来的入射粒子，即“忘记”了复合核是怎样形成的。应该注意，复合系统比复合核更广泛的概念。在复合核内，入射粒子不再和其他粒子有所区分；而在复合系统中，并不考虑入射粒子能否与其他核子区分，而认为它是入射粒子与靶核交换能量的一个阶段。

第三阶段：复合系统分解为出射粒子和剩余核。这一阶段类似第一阶段经过时间反演的变换。

由上面的讨论可以看到，核反应主要通过直接作用和复合核这两种机制来进行。两种机制各有其特点，就反应的作用时间而言，复合核过程可长达 10^{-15}s ，而直接过程一般只有 $10^{-20}\text{s} \sim 10^{-22}\text{s}$ 。也有一些反应介于两种机制之间或两种机制同时并存。

裂变 (fission)

一个重原子核分裂成两个中等质量的核，叫做裂变。重核裂变有自发裂变和诱发裂变之分。

自发裂变 在没有外来粒子轰击的情况下，自然发生的裂变，是重原子核的一种衰变方式。对于 $Z = 92$ 的核素，主要的衰变方式是 α 衰变，自发裂变的分支比很小，可以忽略。但是，超铀元素 $^{252}_{98}\text{Cf}$ (镅252)，自发裂变的分支比为3%，由于裂变时要发射中子，可用作中子源。 $^{254}_{98}\text{Cf}$ 自发裂变的分支比为 99.7%，裂变是它的主要衰变方式。

诱发裂变 在外来粒子轰击下重原子核发生的裂变。诱发裂变可记作 $A(a, f)$ ，其中的 a 表示入射粒子， A 为靶核， f 表示裂变。通常具有一定能量的入射粒子，如中子、 α 粒子、质子、氘核、 γ 粒子和重离子等都可以诱发核裂变。由于中子与靶核的作用没有库仑势垒，能量很低的中子就可以引起某些重核的裂变。某一入射粒子诱发核裂变的概率常用裂变截面来描述。

中子诱发的裂变 热中子(能量约 $\frac{1}{40}$ 电子伏)诱发的 ^{235}U 裂变可表示为



$^{236}\text{U}^*$ 为处于激发态的复合核 X 和 Y 是裂变碎片 Z 为裂变中放出的中子数。 ^{235}U 俘获一个中子可以有30多种不同的裂变方式,两个裂变碎片的质量一般都不相等,分裂为两个相等的碎片的概率只有0.01%。 ^{235}U 有时也可分裂为三个或四个碎片,称为三分裂变、四分裂变,其发生的概率要比二分分裂变小得多。三分裂变对二分分裂变的比为 0.003 ± 0.001 ,四分裂变对二分分裂变的比为 0.0003 ± 0.0002 。三分裂变和四分裂变都是我国物理学家钱三强和何译慧在1946年~1947年发现的。

一个 ^{235}U 核裂变时,平均产生2.5个中子。裂变中子中有99%在 10^{-14} 秒内发出,称为瞬发中子;另外的1%则在发生裂变的几分钟内发出,称为迟发中子,它们是裂变碎片衰变产物发出的。

裂变碎片一般含有的中子数太多,因而要通过一系列衰变(其中个别核素发出迟发中子)变为稳定的核素。

裂变过程中还发出射线,称为瞬时射线。另外,裂变产物在一系列衰变过程中也会发出射线。

^{235}U 核裂变释放的能量约200兆电子伏,能量的近似分布如下:

裂变碎片的动能	168 MeV
瞬时射线能量	7 MeV
裂变中子的动能	5 MeV
裂变产物放出的粒子	7 MeV
裂变产物放出的射线	6 MeV
中微子	10 MeV
总裂变能	~ 200 MeV

^{235}U 、 ^{239}Pu 和 ^{233}U 都是可由热中子诱发裂变的核,所以称为易裂变核,又称核燃料,它们都有很大的热中子裂变截面。 ^{238}U 和 ^{232}Th 则不能由热中子诱发裂变,只有当入射中子的能量增高到一定值时,这些核才能发生裂变。这样的裂变称为有阈裂变,这些核称为可裂变核。

为什么热中子能使 ^{235}U 发生裂变却不能使 ^{238}U 发生裂变呢?

要使原子核分裂,首先必须使它发生形变(图1—25—7)。形变使表面积增大,从而使原子核的表面能增加;另一方面,形变又使核内质子间的距离增大,从而使原子核的库仑能减小。开始时表面能的增大超过库仑能的减小,所以形变使原子核的能量增大(曲线中的b段)。原子核继续形变,由于核力的短程性,表面能的增加将会减慢,而库仑能的减小并不放慢,因此存在一个临界状态,在这种状态下,对于一个无限小的形变,表面能的增大恰好等于库仑能的减小。这时原子核的能量达到极大值,它比基态能量大 E_f (曲线中的C点)。再继续形变,由于库仑能的减小已大于表面能的增加,核的能量就开始减小(曲线中的d段)。可见,要使原子核分裂,首先要给原子核以 E_f 的能量使它达到C点,以后原子核就不再需要供给能量而继续形变下去,直至分裂。能量 E_f 称为裂变阈能,也叫激活能。

在 ^{235}U 的裂变反应中，中子与 ^{235}U 形成复合核 $^{236}\text{U}^*$ ，裂变核是 ^{236}U ，它的裂变阈能 $E_f=5.9\text{ MeV}$ 。复合核的激发能 E^* 由 ^{236}U 的最后一个中子的结合能确定：

$$E^*=[m(92,235)+m_n-m(92,236)]c^2 \\ =16.54\text{MeV}.$$

由于 $E^* > E_f$ ，所以热中子能诱发 ^{235}U 裂变。

在 ^{238}U 的裂变反应中，裂变核是 ^{239}U ，它的裂变阈能 $E_f=6.2\text{MeV}$ ，而复合核 $^{239}\text{U}^*$ 的激发能为

$$E^*=[m(92,238)+m_n-m(92,239)]c^2=4.80\text{MeV}$$

由于 $E^* < E_f$ ，热中子不能诱发核裂变。当入射中子的能量提高到 1.4MeV 时， $E^* \geq E_f$ ，即中子能量达到裂变阈能，才能诱发 ^{238}U 的裂变反应。

链式反应 (chain reaction)

易裂变核，如 ^{235}U ，吸收一个热中子发生裂变，放出 2 个 ~ 3 个裂变中子。裂变中子又可以诱发核裂变反应，核裂变又产生下一代中子……这样裂变反应就可以继续下去。这就是链式反应。

链式反应能够自持进行的条件是：平均每次核裂变释放的中子中至少有一个能引起又一次核裂变。否则，核裂变就会逐渐衰减，最后停下来，链式反应成为收敛的。例如，天然的金属铀块中不会发生链式反应，因为天然铀中 99.3% 是 ^{238}U ，大部分裂变中子经过非弹性散射，能量很快降到 1 兆电子伏以下，被 ^{238}U 吸收，能引起 ^{235}U 裂变的概率非常小。纯粹的 ^{235}U 金属，如果它的体积很小，裂变中子大部分逸出金属块之外，也不能实现自持的链式反应。纯 ^{235}U 的金属球，半径达到 8.74 厘米（质量 52 千克）时，链式反应才能是自持的。如果外面包上一层厚 20 厘米的 ^{238}U 反射层，球半径达到 6.19 厘米（质量 18.48 千克），就能实现自持链式反应。在一定条件下，使裂变物质实现自持链式反应的最小体积，称为临界体积，与临界体积相应的裂变物质的质量称为临界质量。核燃料的体积或质量超过临界值，如果不加以控制，就会产生瞬发链式裂变反应，即核爆炸。

核反应堆 (nuclear reactor)

可以人为控制其反应快慢的裂变物自持链式反应装置。核反应堆的核心部分叫活性区（也叫堆芯），由核燃料、控制棒、中子慢化剂（也叫减速剂）组成。活性区外面包有中子反射层。此外，还有冷却系统和控制系统。在快中子反应堆中，没有慢化剂。

核燃料用铀、钚金属或它们的合金。为了便于补充消耗掉的燃料，要把核燃料放在密封外壳中制成燃料元件。燃料元件放置在可以顺利装入、卸出的燃料管道中。

堆芯里装的核燃料要大于临界质量，然后用镉、硼、铪等强烈吸收中子的材料制成的控制棒，放在反应堆内吸收多余的中子，使反应堆保持在临界状态。随着核燃料的逐渐消耗和吸收中子的裂变产物的积累，可以将控制棒慢慢向外抽，使反应堆总是处于临界状态。当核燃料中所含的裂变物质低于一定限度不利于链式反应继续进行时，就要用新的燃料元件去替换原有燃料元件中的一部或全部。

在热中子反应堆中，必须利用慢化剂使裂变产生的平均能量约为 2 兆电子伏的中子迅速慢化为能量在 0.1 电子伏以下的热中子。慢化剂应具有慢化能力强、吸收中子少、与冷却剂及元件覆盖层不起化学作用等特点，此外，在核辐照作用下性能不应有妨碍反应堆工作的变化。常用的慢化剂有水、重水、石墨、铍和氧化铍以及某些有机物。

中子反射层紧贴着活性区的外围，它的作用是把活性区内逸出的中子反射回去。构成反射层的材料，吸收中子的能力要尽量地小，散射中子的能力要大。对热中子堆来说，这和对慢化剂的要求是一致的。所以，在热中子堆内，慢化剂都可作为反射层的材料。

堆内燃料元件发出的热量，要用冷却剂经由主回路（也叫初级回路）带出堆外，这就是冷却系统。冷却剂可以是气体，如二氧化碳、空气和氦，也可以是液体，如水、重水和有机物。快中子反应堆中常用熔融金属如钠或钠钾合金做冷却剂。冷却剂应有良好的热性能，它对结构材料的腐蚀应该很小。有时冷却剂和慢化剂用同一种物质。冷却剂在主回路中循环流动，从活性区带出热量，然后进入热交换区（或蒸汽发生器），把热量传给二次回路中的工质（如水）。最后，温度降低了的冷却剂，用循环泵又送回反应堆。

反应堆在工作时放出大量对人体有害的中子和 γ 射线。所以，通常活性区的外面要有很厚的防护层，对射线进行屏蔽。

目前用得最多的堆型有：

压水堆 用高压水做慢化剂和冷却剂。300 兆帕以上的冷却水出堆后通过蒸汽发生器生产出高温蒸汽。为此，要有能承受 10^7 帕以上高压的压力壳。燃料通常使用浓缩铀。这种反应堆，体积小，又具有相当大的比功率，安全性能也好。

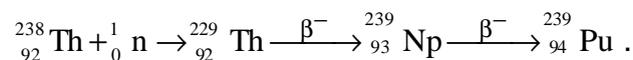
沸水堆 是一种水慢化和水冷却的反应堆。水在堆芯内沸腾并直接产生蒸汽，不需要外部蒸汽发生器，除了简化设备、提高经济效益外，还可以在同样的燃料温度下得到较高温度的蒸汽。堆的性能也是稳定的。

重水堆 用重水作慢化剂的热中子反应堆。可以用重水兼作冷却剂，也可以用普通水、有机物或气体作冷却剂。重水的慢化性能仅次于轻水，而吸收热中子的概率比普通水小得多，因此，重水堆可以用天然铀作燃料。

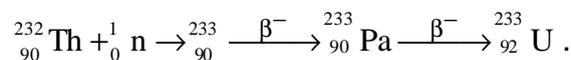
高温气冷堆 不用细棒状燃料元件，而是用硬质陶瓷把燃料颗粒包起来，放到石墨块中的各个区域，再把石墨块擦起来做成堆芯。石墨使中子慢化。冷却剂用高压氦，氦气流过石墨块的内部和四周，使堆芯冷却。

增殖堆 (breeder)

能增殖核燃料的反应堆。在以 ^{235}U 为裂变原料的天然铀或浓缩铀反应堆中，存在着大量的 ^{238}U 。 ^{238}U 俘获中子后，经过两次 β^- 衰变生成新的裂变燃料 ^{239}Pu ：



易裂变核 ^{232}Th 俘获中子后也会生成新的裂变燃料 ^{233}U ：



在以 ^{235}U 为燃料的慢中子堆中，裂变放出的二次中子数平均为 2.4。这些中子中有一个用来维持链式反应，剩下的 $-1=1.4$ 个中子中，如果平均说来至少有一个被反应堆中的 $^{238}_{92}\text{U}$ 核或 $^{232}_{90}\text{Th}$ 核所吸收，生成新的易裂变核，这个反应堆就可以增殖核燃料，就是一个增殖堆。增殖堆中，每消耗一个裂变核生成的新的易裂变核的数目，叫增殖比。核裂变产生的二次中子数，随裂变中子能量的增加而增大。所以快中子堆对核燃料的增殖较为有利。此外，对于快中子引起的裂变， $^{238}_{94}\text{Pu}$ 发出的二次中子数目比 $^{235}_{92}\text{U}$ 和 $^{233}_{92}\text{U}$ 发出的二次中子数目大，所以 $^{239}_{94}\text{Pu}$ 用作增殖堆的燃料较为适宜，

原子弹 (atomic bomb)

又称裂变弹，是利用重元素原子核瞬发裂变链式反应释放出的巨大能量来起杀伤破坏作用的核武器。其主要组成部分是核装料、引爆装置、中子反射层、中子源和弹壳。原子弹爆炸后产生冲击波、光热辐射、贯穿辐射和放射性沾染等四种杀伤破坏因素。

^{235}U 和 ^{239}Pu 都可作为原子弹的装料。原子弹装料的临界质量取决于所用核燃料的种类、纯度和密度，以及装料的形状和结构。但是，由于核爆炸时燃料燃烧效率不是 100%，实际上原子弹内的装料要大于临界质量。一般铀弹的装料为 15 千克 ~ 25 千克，钚弹的装料为 5 千克 ~ 10 千克。

原子弹根据其引发机构的不同，可分为“枪式”和“内爆式”两种。

“枪式”原子弹 它是利用一种“炮筒”装置，将两块小于临界质量的裂变物质迅速合拢使之超过临界质量而发生爆炸的。在这种装置中，一块裂变物质固定于“炮筒”的一端，位于另一端的另一块裂变物质借助于烈性炸药的爆炸射向那块固定的裂变物质，两块裂变物质即可合在一起，发生爆炸。在裂变物质的外面有中子反射层。为了延迟裂变物质的飞散以提高原子弹的效率，要把原子弹装在坚固的外壳内（图 1 - 25 - 8）。

“枪式”原子弹，结构简单，较易制造。但有两个缺点：（1）核装料利用率低。这是因为两块裂变物质都不能超过临界质量，合拢时只比临界质量多出不到一倍，不能有较高的爆炸效率。另外，在“枪式”结构中，虽然两块裂变物质高速合拢，在合拢过程中所经历的超过临界状态的时间仍然较长，以致有可能在两块裂变物质没有完全合并以前，就由自发裂变所释放的中子引起爆炸，而且这种概率是相当大的。这种“过早点火”也会造成低效率的爆炸，不能达到预期的威力。（2）很难用 ^{230}Pu 作核装料。因为 ^{239}Pu 中不可避免地会含有一些 ^{240}Pu ， ^{240}Pu 的自发裂变概率要比 ^{239}Pu 的大四万多倍。

“内爆式”原子弹 它的原理是利用普通烈性炸药的向心爆炸作用，使核燃料同时向中心合拢实现核爆炸。（图 1-25 - 9）。“内爆式”结构优于枪型结构的地方是，向心爆炸压缩效应所需的时间远比“枪式”结构装料合拢所需的时间短，因而“过早点火”的概率大为减小。于是可用一个可控制的中子源，等到压缩效应最大时才点燃它引起核爆炸。 ^{235}U 和 ^{239}Pu 都可作为这种炸弹的装料。

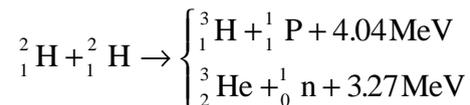
梯恩梯当量 核武器爆炸时释放的能量常用梯恩梯（TNT）当量表

示。梯恩梯学名三硝基甲苯，是一种烈性的黄色炸药。1 吨梯恩梯炸药爆炸时能产生 4.18×10^9 焦的能量。1 千克 ^{235}U 原子核完全裂变放出的能量约 2×10^4 吨梯恩梯当量。

聚变 (fusion)

较轻原子核聚合成较重原子核的核反应。轻原子核的比结合能有高有低，总的说来都比中等质量的核的平均比结合能 8.4 兆电子伏低，尤其是几个最轻的核比结合能特别低，如氕的比结合能为 1.112 兆电子伏，氘的比结合能为 2.227 兆电子伏。因此，在氘和氚聚合成 ^4_2He 核 (比结合能为 7.075 兆电子伏) 的反应 $^3_1\text{H} + ^2_1\text{H} \rightarrow ^4_2\text{He} + ^1_0\text{n} + 17.58\text{MeV}$ 中，平均每个核子释放出 3.84 兆电子伏的能量，跟 ^{235}U 裂变时平均每个核子释放 0.85 兆电子伏的能量相比，前者为后者的 4.5 倍。一般说来，轻原子核的聚变比重原子核的裂变更能释放出更大的能量。宇宙中能量的主要来源就是原子核的聚变。太阳和宇宙中的大量恒星能够长时期地发光、发热，都是轻核聚变的结果。

利用加速器可以产生核聚变反应。例如，用加速到 50 千电子伏的氘核去轰击固体氚靶，可以产生聚变反应



但是理论的计算表明，用这种方法产生聚变反应的截面太小，大约 100 万个氘核进入靶内，只有一个氘核引起聚变反应，其他氘核都因库仑散射而把能量损失掉了。从能量平衡角度来看，这是得不偿失的。

为了使聚变反应具有较大的截面，可以把反应物加热到一定的温度，使粒子的动能能够克服库仑势垒。两个氘核相撞，其库仑势垒的高度约为 0.4 兆电子伏。由于势垒穿透效应，氘核的动能比 0.4 兆电子伏低一些就可以发生聚变反应。由图 1 - 25 - 10 可见，当氘核的能量为 0.1 兆电子伏时， $^2\text{H}-^2\text{H}$ ， $^2\text{H}-^3\text{H}$ 和 $^2\text{H}-^3\text{He}$ 的反应截面已有相当大的数值了。如果氘

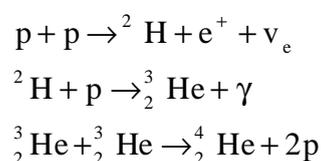
核的平均动能 $E_k = \frac{3}{2}kT = 0.1\text{MeV}$ ，可得相应的温度值 $T = 10^9 \text{K}$ 。由于

氘核热运动的能量服从麦克斯韦分布，当温度 $T=10^8\text{K}$ 时，麦克斯韦分布中高能部分的粒子，可以具有 0.1 兆电子伏的能量。可见，如果达到 10^8K 左右的高温，氘核的聚变反应就有可能发生。我们把这种高温下发生的聚变反应称为热核反应。

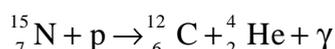
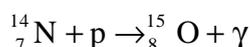
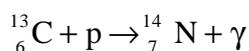
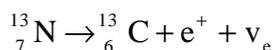
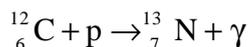
太阳能 (solar energy)

太阳和恒星能量的来源都是轻核的聚变。太阳和恒星中存在的主要元素是氢，核聚变是 4 个氢核结合成 1 个氦核，这个过程是通过一定的反应链实现的。人们认为在太阳和其他恒星中存在着两种反应链：

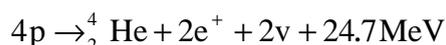
(1) 质子-质子反应链



(2) 碳-氮反应链



两个反应链反应的结果都是



在碳-氮反应链中，C、N、O 等元素只起催化剂的作用。当恒星开始形成时， ${}^{12}\text{C}$ ， ${}^{13}\text{N}$ ， ${}^{13}\text{C}$ ， ${}^{14}\text{N}$ 等核素的量是变化的，但是经过几百万年就形成了稳定的丰度。

上面两个反应链在恒星中到底哪个起主要作用，取决于恒星的成份和它的中心温度。从图 1 - 25 - 11 可以看出，当 $T=1.8 \times 10^7\text{K}$ 时，两个反应链的能量产生率相等。当恒星中心温度高于 $1.8 \times 10^7\text{K}$ 时，能量主要来源于碳-氮反应链；温度低于 $1.8 \times 10^7\text{K}$ 时，反应以 p-p 链为主。太阳的中心温度是 $1.5 \times 10^7\text{K}$ ，反应以 p-p 链为主，产生的能量约占总能量的 96%。

上述两个反应链中都释放出正电子 e^+ 。 e^+ 与 e^- 相遇而湮没： $\text{e}^+ + \text{e}^- = 2\gamma$ ，还要释放 $2 \times 0.511\text{MeV}$ 的能量，所以 4 个氢核聚成一个氦核，如果计入 γ 射线和中微子，实际上会释放出 $26.7\text{MeV} = 4.27 \times 10^{-12}\text{J}$ 的能量。由此可算出 1kg 氢聚合成氦时释放的能量为 $6.38 \times 10^{14}\text{J}$ 。由于太阳上的核反应是在内部中心附近的核反应区进行的，当核反应区的氢耗尽时，氢聚合成氦的反应便不能再维持下去。这时，太阳上消耗的氢约占太阳总质量的 1/10。从这以后，太阳将以氦为核燃料，向红巨星演化，从而结束其稳定存在的时期，逐渐进入衰亡期。恒星的稳定存在期称为主序演化阶段，约占恒星寿命期的 80%。太阳质量为 $M_{\odot} = 2 \times 10^{30}\text{kg}$ ， $0.1M_{\odot}$ 的氢聚合成氦可释放的能量为 $Q = 0.1 \times 2 \times 10^{30} \times 6.38 \times 10^{14}\text{J} = 1.28 \times 10^{44}\text{J}$ 。太阳的总辐射功率为 $P = 3.83 \times 10^{26}\text{W}$ 。由此可以推知太阳作为一个稳定的恒星存在的寿命为

$$\begin{aligned}\tau = Q / P &= \frac{1.28 \times 10^{44}\text{J}}{3.83 \times 10^{26}\text{W}} \\ &= 3.3 \times 10^{17}\text{s} \approx 10^{10}\text{a}.\end{aligned}$$

太阳的年龄已有 50 亿年，它的主序演化阶段大约已渡过了一半的时间。

氢弹 (hydrogenbomb)

又称“聚变弹”，是利用轻元素原子核聚变反应（热核反应）时瞬间释放的巨大能量起杀伤破坏作用的爆炸性核武器。由计算可知 1 千克氘氚混合物全部聚变，将释放出约八万吨梯恩梯当量的能量。利用热核反应制造的核武器，没有临界质量的限制，可以做得很大，它的爆炸威力一般要

比原子弹大几十倍到上千倍。不过氢弹仍须用原子弹来引爆核燃料。图 1 - 25 - 12 是氢弹的原理图。

氢弹的原料可以是氘和氚，也可以是氘化锂-6。氘和氚在常温常压下呈气态，只有在低温（零下二百余摄氏度）高压下将它们液化，才能作氢弹的装料，这是相当困难的。而且氚具有放射性，半衰期 $T_{1/2}=12.6a$ ，不便于长期贮存。采用氘化锂-6 作氢弹的装料，当引爆的裂变弹爆炸时，发出大量中子，中子与锂-6 反应生成氚： ${}^6\text{Li}+n \rightarrow {}^3\text{H}+{}^4\text{He}+4.8\text{MeV}$ ，氚与氘再发生聚变 ${}^3\text{H}+{}^2\text{H} \rightarrow {}^4\text{He}+n+17.6\text{MeV}$ 。总的反应式为 ${}^6\text{Li}+2\text{H} \rightarrow {}^4\text{He}+22.4\text{MeV}$ ，释放出巨大的能量。氘化锂-6 的成本比较低，没有放射性，便于长期贮存，而且是固体化合物，不需要冷冻装置，可使氢弹小型化。

氘氚聚变反应产生 14 兆电子伏的高能中子，能使 ${}^{238}\text{U}$ 发生裂变而放出能量。在氢弹的热核装料外面包上一层 ${}^{238}\text{U}$ 外壳，就构成裂变-聚变-裂变型的“三相”氢弹。“三相”氢弹又称氢铀弹，释放的总能量中，裂变能量和聚变能量大约各占一半。由于爆炸后裂变碎片的放射性污染严重，这种氢弹被认为是“肮脏”氢弹。在爆炸总能量中，相对地增大聚变能量而减少裂变能量，从而减少放射性污染，这种氢弹就是“干净”氢弹。但由于无法避免用原子弹引爆，“干净”的氢弹仍会产生大量的放射性裂变碎片。

中子弹 (neutron bomb)

被称为第三代核武器，与原子弹和氢弹相比，冲击波和热辐射的杀伤作用大为减弱，放射性污染也轻得多，主要是利用聚变反应中放出的高能中子，杀伤包括坦克乘员在内的敌方战斗人员。由于冲击波和热辐射的作用减弱，对建筑物和设施、装备的破坏有限；又因为放射性污染较轻，且多属中子激活引起的，所以在引爆后几小时，攻击者即可进入被袭击的区域，并可以利用原有的建筑物和设施、装备。因而中子弹被称为“干净”的核武器。

中子弹的构造，尚属未公开的军事秘密。根据已报道的中子弹的特点可以推断：中子弹是聚变弹。中子弹爆炸时有强中子辐射，必然是由于内部进行了猛烈的产生中子的核反应。重核裂变和轻核聚变都产生中子，但对于相同质量的核燃料，聚变反应产生的中子数比裂变反应产生的中子数多得多。另外，中子弹的放射性污染轻，裂变会造成强烈的放射性污染，氘氚聚变的产物 ${}^4_2\text{He}$ 没有放射性。氘氚聚变放出的中子能量高达 14.1 兆电子伏；放出的 ${}^4_2\text{He}$ 核能量只有 3.5 兆电子伏，在空气中的射程只有几厘米，爆炸后其能量传给几厘米内的空气，使空气产生高温高压，形成冲击波和热辐射。因此，纯粹的中子弹（纯聚变弹），理论上冲击波和热辐射的能量只占 20%。

不过，目前的中子弹，还要用小型原子弹来引爆，因而还不是纯中子弹，只不过是相对地减少了冲击波、增强了中子辐射的小型氢弹而已。所以目前的中子弹正式定名为弱冲击波强辐射弹 (Reduced Blast / Enhanced Radiation Warhead)，简称强辐射弹。纯中子弹要在激光聚变引爆技术（或其他不用原子弹的引爆技术）成熟以后，才能实现。

受控热核聚变 (controlled thermonuclearfusion)

到目前为止，人工实现的热核反应都是不可控制的，不能为人类提供有用的能源。实现受控热核反应的困难来自两个方面：一是要得到上亿度的高温，二是要把高温聚变物质约束一定的时间，使之有足够多的机会互相碰撞，实现聚变反应。

高温聚变物质处于等离子体状态，在等离子体中，由于电子不断和离子发生弹性碰撞，改变运动速度，而发出辐射（轫致辐射）损失能量。要想使核聚变自持地进行下去，必须使聚变产生的能量大于或等于因等离子体辐射而损失的能量。理论计算表明，这只有在 10^8K 以上的高温才有可能。达到高温的加热方法有：对等离子体进行绝热压缩，使电子和离子一起加热；在等离子体中通以大电流，先加热电子，再把能量传给离子；

先在加速器中加速离子，如氘核，使其超过热核反应所需的能量，然后射入等离子体起点火作用。这些方法可以单独使用，也可以联合使用。

在高温等离子体中，电子和离子运动速度都是很大的。约束这样高温的等离子体使它们不致飞散，不能用任何容器，只能用磁约束或惯性约束两种方法。

磁约束 在磁感应强度 B_0 的匀强磁场中，等离子体的带电粒子就好像串绕在一条条磁力线上，沿着磁力线做微小的螺旋运动，直到粒子间进行碰撞才能使它们离开原来各自串绕的磁力线。如果等离子体所在的区域是一个如图 1 - 25 - 13 所示的圆柱体，则每一个做螺旋运动的带电粒子，都是一个微小的螺旋形电流，它产生的磁场都是跟外加的感应磁场 B_0 方向相反的。这些单个微小电流叠加的结果，宏观上表现为在圆柱表面横向流动的电流 I 。这个表面电流产生的磁场 B_1 把圆柱内部原有的磁场 B_0 抵消了一部分，结果圆柱内的磁场为 $B_i = B_0 - B_1$ ，圆柱外的磁场仍为 B_0 。引入等离子体压强 p 和磁压强 $B^2/2\mu_0$ 的概念，根据磁流体力学，对圆柱内外的

任何一点都有 $p + \frac{B^2}{2\mu_0} = \text{常量}$ ，即 $p_{\text{内}} + \frac{B_i^2}{2\mu_0} = p_{\text{外}} + \frac{B_0^2}{2\mu_0}$ ，式中的 μ_0 为真

空中的磁导率。由于 $p_{\text{外}} = 0$ ，故有 $p_{\text{内}} = \frac{1}{2\mu_0} (B_0^2 - B_i^2)$ 。由 $B_0 > B_i$

可知，圆柱外的磁压强大于圆柱内的。磁压强，两者之差即可平衡圆柱内的等离子体压强，圆柱内的等离子体，就在垂直于磁场的方向上受到了约束。

惯性约束 任何物体都有惯性。尽管聚变物质的原子核在热核反应的温度下飞行速度极快，它们从被加速起直到飞出反应区域，总还需要一定的时间。如果我们用激光束或电子、离子束，同时从几个对称的方向轰击聚变燃料小球，使聚变燃料等离子体尚未来得及飞出反应区域之前就发生了聚变反应，即可不必采取外部措施来约束等离子体，等离子体将由其自身的惯性对自己进行了约束。

劳逊判据 理论研究表明，为了使聚变产生的能量多于加热等离子体和等离子体辐射损失的能量，除了要把等离子体加热到 10^8K 的高温外，等离子体的数密度 n 和约束的时间，还须满足一定的条件。对于氘-氘反应来说是 $n \cdot 10^{20} \text{ m}^{-3} \cdot \text{s}$ ，对于氘-氚反应来说是 $n \cdot 10^{22} \text{ m}^{-3} \cdot \text{s}$ 。这个条

件叫做劳逊 (Lawson) 判据。

受控核聚变的研究，已有五十年，其目的是为了解决人类社会的能源问题，目前仍处于实验研究阶段，尚未达到点火条件。聚变能源的实际应用与开发，估计要到下个世纪才能实现。

托卡马克 (tokamak)

一种环形磁约束受控热核反应实验装置，也叫环流器。在这种装置中，等离子体被约束在一个环管状的金属反应室中，约束磁场则由环向磁场和角向磁场组成 (图 1 - 25 - 14)。其工作原理如下：

当等离子体所在的区域是一个圆柱体时，可用平行于柱轴的匀强磁场，在垂直于磁场的方向上使等离子体受到约束，但却不能在沿着磁场的方向上约束等离子体，等离子体在圆柱体的两端发生漏失 (见受控热核反应条目)。如果把圆柱体改为环形装置，使之没有终端，用围绕环形室的外部线圈产生的强环向磁场约束等离子体，就可以消除终端漏失现象。然而，环向磁场不再是均匀的，环的内侧磁场强，外侧磁场弱，其结果使等离子体向环形室的外侧漂移，破坏了磁场对等离子体的约束。为了解决这个问题，在强环向磁场上又附加了弱的角向磁场。用环形室代替变压器的次级线圈，初级线圈中通以交变电流，环形室中的等离子体就会产生流动，形成感生的环向电流。环向电流不但可以加热等离子体，还可以在等离子体周围产生角向磁场。环向场和角向场的合成磁场，是“扭曲”的，磁力线呈螺旋形。在这种磁场中，等离子体的漂移，一会儿向着环形室的外侧，一会儿向着环形室的内侧，其总的效应使等离子体向环形室外侧的漂移大大减弱，从而实现了磁约束。

下表列出了世界上一些主要的托卡马克装置的数据：

一些托卡马克实验装置数据

装置名称	TFTR (美国)	JET (西欧)	JT-60 (日本)
环的大半径 R/m	2.50	2.96	3.00
等离子体半宽 l/m	0.85	1.25	0.95
磁场 B/T	5.2	3.5	4.5
环向电流 I/MA	3.0	4.8	3.0
实验开始期	1982—12—24	1983—06—25	1985—04—08
温度 T/10 ⁸ K	2.3 ~ 4.6	0.35 ~ 0.46	
离子数密度 n/m ³	10 ¹⁹	3 × 10 ¹⁹	
粒子约束时间 /s	0.35	0.9	

激光核聚变 (laser fusion)

激光引发的核聚变是通过惯性约束来实现的。先把氘氘燃料制成半径 1 毫米的固体靶丸，然后用多束激光从四面八方同时压缩和加热靶丸，使其发生聚变反应。

对于激光聚变，劳逊判据 (参见“受控热核反应”) 同样适用，只不过磁约束着眼于延长约束时间，惯性约束则用等离子体在无约束条件下

的飞散时间 t 来代替约束时间，着眼点放在提高等离子体的密度 n 上。在没有任何外加约束的条件下，一团高温等离子体的飞散时间 t 由粒子的平均热运动速度 v 和等离子体球的半径 R 来决定： $t=R/v$ 。由 $T=10\text{keV}$ 时 $v=2 \times 10^6\text{m/s}$ 和 $R=10^{-3}\text{m}$ ，可得 $t=5 \times 10^{-10}\text{s}$ 。这个时间相当短，只有磁约束时间的 10^{-6} 到 10^{-9} 倍，因而激光聚变中等离子体的密度必须比磁约束的等离子体密度大 10^6 倍到 10^9 倍。根据惯性约束的这一特点，可以把劳逊判据改写成惯性约束的点火条件：D-T 反应： $nR=2 \times 10^{26}\text{m}^{-2}$ ，D-D 反应： $nR=2 \times 10^{28}\text{m}^{-2}$ 。激光聚变的实际过程可分为四步：激光吸收、传热增压、聚心压缩和芯部点火。这个过程也可称为聚爆过程。聚爆中的靶丸，可用图 1 - 25 - 15 表示。其中：

1 代表靶丸的外边界。1、2 之间是靶丸的最外层——冕区，由较稀薄的等离子体组成，它的外边界并不清晰。冕区由外向内逐渐稠密，激光吸收就发生在这个区域。

2、3 之间称为烧蚀区。这一层比较薄，边界是明确的。激光能量被冕区吸收后很快传到这里，把它加热到几千电子伏。由于高温、高密，这层物质产生了巨大的热压强，它的外层以接近这个温度下的粒子热运动速度向四面八方喷射，喷射造成的反作用力由内层承受，结果以巨大的速度向靶心挤压，形成收缩壳。传热增压和聚心压缩的动力都发生在这一层里。

3、4 之间是压缩区，是一个迅速向中心收缩的高密度壳层——收缩壳。在收缩过程中，这层的密度和温度都不断增加，聚心压缩就发生在这层中。

在聚爆的最后阶段，边界 4 接近靶丸中心，边界 3 也到达点火条件所要求的靶丸半径处，这时，这层的密度高达 $10^3 n_0$ ，温度接近 5 千电子伏。接着收缩壳的收缩被遏止，它所携带的动能迅速转化成热能，使这一层中的等离子体，首先从中心处开始升温、加密到 10 千电子伏， $10^4 n_0$ ，开始了热核反应，并迅速波及靶丸外层。最后，聚变生成的粒子的能量又被等离子体吸收，进一步加热靶丸，使聚变速率更加提高，在靶丸飞散之前，达到了聚变，放出的能量远大于外界供给的能量。

目前，激光核聚变的实验研究，要达到点火条件还有相当距离。关键之一，是要研制出高功率、短脉冲的激光器。估计能量得失相当要求束能 1 兆焦 ~ 10 兆焦，功率大于 10^{14} 瓦，聚焦到几毫米的靶丸上。其次是激光对靶丸的照射，要求有极高对称性以及很高的聚爆效率。

主要参考资料

1. 褚圣麟 . 原子核物理学导论 . 第 3 版 . 北京 : 高等教育出版社 , 1987.
2. 卢希庭 . 原子核物理 . 第 1 版 . 北京 : 原子能出版社 , 1981.
3. 梅镇岳 . 原子核物理学 . 第 3 版 . 北京 : 科学出版社 , 1983.
4. 蒋明 . 原子核物理导论 . 第 1 版 . 北京 : 原子能出版社 , 1983.
5. 吴知非 . 原子核物理学 . 第 1 版 . 北京 : 高等教育出版社 , 1983.
6. 王永芬 . 原子核物理学基础 (上、下) . 第 1 版 . 北京 : 清华大学出版社 , 1986.
7. 梅镇岳 . 和 放射性 . 第 1 版 . 北京 : 科学出版社 , 1964.

8. 杨福家. 放射性的新发现. 自然杂志, 1984 (12): 883~
9. 李业祥. 一种新的天然放射性. 物理, 1988 (8):
10. 于忠孝等. 核辐射物理学. 第2版. 北京: 原子能出版社, 1986.
11. 中国科学院原子能研究所. 放射性同位素应用知识. 第1版. 北京: 科学出版社, 1959.
12. 复旦大学、清华大学、北京大学合编. 原子核物理实验方法(上册). 第1版. 北京: 原子能出版社, 1981.
13. 于群等. 原子核物理实验方法. 第1版. 北京: 人民教育出版社, 1961.
14. 卢玉楷等. 放射性核素概论. 第1版. 北京: 科学出版社, 1987.
15. E. 薛格雷. 核与粒子(上册). 第1版. 北京: 科学出版社, 1984.
16. 汉斯. 弗朗费尔德, 欧内斯特. M. 亨利. 亚原子物理学. 第1版. 北京: 原子能出版社, 1981.
17. S. 格拉斯登, A. 塞桑斯基. 核反应堆工程. 第1版. 北京: 原子能出版社, 1986.
18. 施士元. 核反应堆物理基础. 第1版. 上海: 上海科学技术出版社, 1960.
19. 吴桂刚. 中子弹. 第1版. 北京: 原子能出版社, 1987.
20. 郭星渠. 核能它的原理历史现状和前景. 第1版. 北京: 人民教育出版社, 1986.
21. 小安东尼. V. 内罗. 核反应堆知识入门. 第1版. 北京: 原子能出版社, 1984.
22. 孟先雍. 原子能工业. 第1版. 北京: 原子能出版社, 1978.
23. 张明昌, 肖耐国. 天文学教程(上册、中册). 第1版. 北京: 高等教育出版社, 1987.
24. 白唐, 尹儒英. 崭新的能源——受控热核聚变浅说. 第1版. 成都: 四川人民出版社, 1976.
25. M. O. 哈格勒, M. 克利蒂安森. 受控核聚变导论. 第1版. 北京: 原子能出版社, 1981.
26. 胡希伟. 受控核聚变. 第1版. 北京: 科学出版社, 1981.
27. 倪光炯, 李洪芳. 近代物理. 第1版. 上海: 上海科学技术出版社, 1979.
28. 保罗. A. 蒂普勒. 近代物理基础及共应用. 第1版. 上海: 上海科学技术出版社, 1987.
29. 中国大百科全书物理学. 第1版. 北京: 中国大百科全书出版社, 1987.
30. 科学出版社名词室. 物理学词典(下册). 第1版. 北京: 科学出版社, 1988.
31. 原子能名词浅释编辑组. 原子能名词浅释. 第1版. 北京: 原子能出版社, 1973.

二十六、粒子物理初步概念

粒子间的相互作用 (interactions between particles)

物质世界运动变化多样性的根源在于自然界存在着四种基本相互作用，即强相互作用、电磁相互作用、弱相互作用和引力相互作用。

强相互作用存在于重子、介子等强子之间的基本相互作用。核子之间的核力是它的一个典型实例。强相互作用是一种短程力，作用范围为 10^{-15} 米量级，作用强度约为电磁相互作用的 10^2 倍。目前，对强相互作用的机制还不清楚。近年来发展的量子色动力学 (QCD) 能解释强相互作用的一些问题。这个理论认为强相互作用是通过胶子 (g) 传递的。实验上已观察到胶子存在的迹象，但还没有直接的证据证明胶子的存在。

电磁相互作用 这是目前了解得最清楚的一种相互作用，量子电动力学 (QED) 可以对它进行精确的计算。电磁相互作用是一种长程力，作用于所有微观或宏观带电或带磁矩的物体之间。大到天体，小到 10^{-18} 米范围内，理论计算都跟实验事实符合得很好。量子电动力学认为，电磁相互作用是由电磁场的量子——光子传递的。

弱相互作用 广泛存在于轻子和轻子间、轻子和强子间、强子与强子间的一种基本相互作用。原子核的 β 衰变是它的一个实例。弱相互作用也是一种短程力，作用范围比强相互作用还要短，作用强度约为强相互作用的 10^{-12} 倍。弱相互作用是通过质量很重的中间玻色子 W^\pm 和 Z_0 传递的，它们的质量分别为： $m_W^\pm = (80.9 \pm 1.5) \text{ GeV}$ ， $m_{Z^0} = (95.6 \pm 1.4) \text{ GeV}$ 。

引力相互作用 支配着宏观物体运动变化，例如天体运动规律的一种长程力。在微观领域里，引力相互作用远远弱于其他三种相互作用，以致实际上无法检验在微观领域里万有引力定律是否仍然正确。例如，根据万有引力定律考虑两个质子间的引力相互作用与它们间的强相互作用的强度之比仅为 10^{-38} 。理论上，传递引力相互作用的量子是引力子。目前，实验上尚未发现引力子的存在。

现代的量子场论认为，每一种粒子都有一种与之对应的场存在。场没有不可入性，各种不同粒子的场互相重叠，充满整个空间。场能量的最低态称为基态；场的激发态表现为出现相应的粒子，不同的激发态表现为粒子数目和状态的不同。场处于基态时没有粒子出现。所有的场都处于基态时，就是物理真空。所以场是比粒子更基本的物质形态。无论是处于基态或处于激发态的场，都可以与其他的场发生相互作用；粒子间的相互作用和转化，乃是场之间相互作用的结果。以 β^- 衰变 $n \rightarrow p + e^- + \bar{\nu}_e$ 为例：开始时中子场处于激发态，表现为存在一个中子，而质子场、电子场和中微子场则处于基态，表现为没有质子、电子和中微子。经过中子场与质子场、电子场和中微子场的弱相互作用，中子场跃迁到基态，由于能量的传递使质子场、电子场和中微子场受到激发，表现为中子消失而产生了一个质子、一个电子和一个反中微子。这就是通过弱相互作用的 β^- 衰变的量子场论图景。

在粒子世界里，除了强相互作用、电磁相互作用和弱相互作用外，有迹象表明，可能还有超弱相互作用与超强相互作用存在。某些相互作用间

可能有本质的联系，可以统一理解。例如，已由实验证实的弱电统一理论，就把弱相互作用和电磁相互作用做了统一的解释。还有大统一理论和超统一理论，则企图在更广泛的范围内统一理解各种相互作用的本质。这些方面的理论和实验工作都在进行中。

基本粒子 (elementary particle, fundamental particle)

构成物质的最基本的组分。这是一个历史的概念。19世纪末，人们还认为原子是构成物质的基本单元，即基本粒子。本世纪初，发现原子是由电子和原子核组成的。1932年发现了中子，人们认识到原子是由质子、中子和电子组成的，原子不再被认为是基本粒子了。这一时期形成了现代基本粒子的概念。1905年，A·爱因斯坦提出电磁场的基本结构单元是光子，后来为康普顿效应所证实。1931年，泡利为了解释衰变中能谱的连续性，设想了一种静止质量为零的粒子——中微子（实际上是反中微子，于1956年被发现）。相对论性量子力学预言了反粒子的存在，并于1932年发现了第一个反粒子——正电子。因此，在30年代初期，人们认为质子、中子、电子、中微子、光子以及它们的反粒子（光子的反粒子就是光子本身），就是构成物质世界的基本粒子。

然而，自那以后，基本粒子的研究不断发展。在汤川秀树于1935年提出核力的介子理论以后，1937年发现了 μ 子，1947年发现了介子，以后又发现了一系列奇异粒子和大量的共振态粒子。到60年代初期，发现的粒子数目比元素周期表中元素的数目还要多，而且新发现的粒子有增无已。目前，发现的粒子已有数百种。这么多的粒子不可能都是基本的。这些粒子按其参与相互作用的性质，可分为三类：

1. 轻子 主要参与弱相互作用，不参与强相互作用，带电的轻子也参与电磁相互作用。已发现的有电子(e^-)， μ 子(μ^-)， τ 子(τ^-)，电子型中微子(ν_e)， μ 子型中微子(ν_μ)以及它们的反粒子，共10种。普遍认为还有另一种中微子及其反粒子存在，但尚未得到实验的证实。

2. 强子 参与强相互作用和弱相互作用，带电强子和中性带磁矩的强子还参与电磁相互作用。强子又可分为介子和重子（包括核子和超子）两类。

3. 媒介子 传递各种相互作用的粒子。已发现的有传递电磁相互作用的光子和传递弱相互作用的 W^\pm 粒子和 Z^0 粒子。理论上预言存在着8种传递强相互作用的胶子和传递引力相互作用的引力子，在实验上有表明胶子存在的迹象，引力子的存在还没有证据。

目前发现的粒子绝大部分是强子。实验证明，强子是有内部结构的。1964年，盖耳曼和G·兹韦格(G·Zweig)提出了强子结构的夸克模型（在我国，有些人把夸克称为层子）。经过近30年的发展，目前普遍认为存在着六种味道的夸克： s, u, d, c, b, t ，每一种味道的夸克又有三种不同的颜色：红、绿、蓝，因此共有18种夸克，加上它们的反

粒子，共有36种。夸克的带电量分别为 $\pm \frac{2}{3}e$ 和 $\pm \frac{1}{3}e$ 。根据夸克模型，

介子是由正反夸克组成的，重子则由3个夸克组成（参见“夸克模型”）。到目前为止，还没有观察到自由夸克。

目前，轻子和夸克都是尚未发现具有内部结构的点粒子，可以看成组成物质的基本组分。轻子和夸克都是自旋 $\frac{1}{2}$ 的费米子，它们可分为三代，每一代中都有两味一色的轻子和两味三色的夸克，共 8 个粒子，它们的电荷之和等于零：

	轻子 (一色)		夸克 (三色)	
电 荷	0	-1	2/3	-1/3
第一代	e	e	u	d
第二代	μ	μ	c	s
第三代			t	b

反粒子 (antiparticle)

粒子的性质要用质量、寿命、电荷、磁矩、自旋、宇称、同位旋、轻子数、重子数、奇异数和超荷数等参量或量子数来表示。实验发现，对于每种粒子，都有一种质量、寿命、自旋跟它相同，而电荷、磁矩、轻子数、重子数、奇异数和超荷数跟它等量异号的粒子存在。这后一种粒子称为前一种粒子的反粒子。对于费米子，粒子和反粒子的宇称是相反的；对于玻色子，粒子和反粒子的宇称是相同的。粒子和反粒子的同位旋也是相同的，但同位旋第三分量，等量异号。一些中性玻色子，如光子和 0 介子，它们的反粒子就是它们本身。

电子的反粒子——正电子，发现于 1932 年。质子的反粒子——反质子发现于 1955 年。1956 年又发现了反中子。1961 年发现了反氦核，说明反质子与反中子间作用着与质子、中子间同样的核力。以后又陆续发现了由反核子组成的各种复杂的原子核，这就告诉我们，除了由已知的粒子组成的世界外，还可能有由反粒子组成的世界。

以前认为，由稳定的粒子——质子、中子和电子组成的世界，永远不会消失，也不会产生。反粒子的发现使人们认识到，物质世界的变化比以前想象的丰富得多。正反粒子可以湮没，也可以成对产生。电子和正电子的湮没主要是电磁性质的，放出 γ 光子。核子和反核子的湮没最常见的是放出 π 介子，偶尔也放出 K 介子，它们的电磁湮没，放出 γ 光子或电子-正电子对的机会，要比产生 π 介子的湮没少得多。

费米子和玻色子 (fermion and boson)

自旋为半奇数的粒子统称费米子。自旋为 $\frac{1}{2}$ 的轻子、夸克、核子、

超子以及自旋为 $\frac{3}{2}$ ， $\frac{5}{2}$ ， $\frac{7}{2}$ 的共振粒子，都属于费米子。费米子服从泡

利不相容原理，即不能有两个以上的全同费米子出现在同一个量子态中。这类粒子服从费米-狄拉克统计 能级为 ϵ_p 的量子态 P 上的平均粒子数为

$$\bar{n}_p = \frac{1}{e^{(\epsilon_p - \mu)/kT} + 1}$$

式中的 μ 为系统的化学势。

自旋为整数的粒子统称为玻色子。自旋为零的介子、自旋为 1 的光子

以及尚未经实验证实的自旋为 2 的引力子等，都是玻色子，这类粒子服从玻色-爱因斯坦统计，能量为 ϵ_p 的量子态 P 上的平均粒子数为：

$$\bar{n}_p = \frac{1}{e^{(\epsilon_p - \mu)/kT} + 1}$$

在玻色统计中，化学势 μ 常为负值，而对于光子， $\mu=0$ 。

费米子系统的总波函数，对于交换其中的任意两个粒子，是反对称的，而对于玻色子系统，交换其中的任意两个粒子，波函数是对称的。

由奇数个费米子组成的系统仍是费米子，由偶数个费米子组成的系统则是玻色子，如 ${}^2_1\text{H}$ ， ${}^{14}_7\text{N}$ 是玻色子，而 ${}^3_1\text{H}$ 和 ${}^{15}_7\text{N}$ 则是费米子。

轻子 (lepton)

不参与强相互作用的自旋为 $\frac{1}{2}$ 的费米子。轻子包括电子、 μ 子、

子与它们相应的中微子 (ν_e 、 ν_μ 及 ν_τ) 以及这些粒子的反粒子。

及其反粒子，虽然普遍相信它们的存在，但在实验中尚未发现。电子的质量为 $m_e=0.51\text{MeV}$ ， μ 子的质量为电子的 207 倍。由于这两种粒子的质量远小于核子，所以称之为轻子。但是，1975 年发现的 τ 子，根据我国 1992 年的最新测量值，其质量 $m_\tau = (1776.9 \pm 0.5) \text{MeV}$ ，比核子还大，所以也称为重轻子。轻子一词已失去了其原有的意义。电子、 μ 子和 τ 子都带一个单位的负电荷，它们的反粒子带有一个单位的正电荷。中微子是中性的粒子，它可能是以光速运动的静止质量为零的粒子。

在轻子参与的所有弱相互作用和电磁相互作用过程中，发现有一个守恒的量子数——轻子数 L。轻子中所有正粒子的轻子数 $L=+1$ ，反粒子的轻子数 $L=-1$ ；轻子以外的所有粒子的轻子数都是零。在有轻子参加的反应中，反应前后轻子数的代数和不变。这就是轻子数守恒定律。

1962 年实验上发现存在着两种中微子 ν_e 和 ν_μ ，它们分别与电子和 μ 子相联系，因而 $\nu_\mu + p \rightarrow n + e^+$ 类型的反应不能发生，人们又把轻子数分为电子轻子数 L_e 与 μ 子轻子数 L_μ ，在反应过程中，这两种轻子数分别守恒。发现 τ 子后，尚未发现 ν_τ ，是否存在 τ 子轻子数 L 的守恒尚待证实。

近十几年来，有人认为轻子数守恒可能不是绝对的。大统一理论预言质子衰变 $P \rightarrow \pi^0 + e^+$ ， $P \rightarrow K^0 + M^+$ 等过程，也有人在探索不放射中微子的双衰变： $(A, Z) \rightarrow (A, Z+2) + 2e^+$ ， $(A, Z) \rightarrow (A, Z-2) + 2e^-$ ，在这些过程中轻子数不守恒，但在实验上还没有观察到这些过程。

重子 (baryon)

一切参与强相互作用的费米子，如核子 (P, n)、超子 (Λ , Σ , Ξ , Ω) 和共振态费米子统称为重子。它们的反粒子称为反重子。

可以定义一个守恒的量子数——重子数 N，对于所有的重子都有 $N=1$ ，对于所有的反重子都有 $N=-1$ ，对于重子和反重子以外的粒子 (媒介子、轻子和介子) 都有 $N=0$ 。一个体系的重子数等于构成体系的各粒子的重子数之和。在所有的相互作用中，重子数的代数和不变。这就是重子数守恒定律。由于所有的重子，最后都衰变为质子，重子数的守恒，保证了质子的

稳定性。目前有一些理论，如企图统一描述弱相互作用。电磁相互作用和强相互作用的大统一理论，认为重子数不是严格守恒的，质子也可以衰变，但是尚未得到实验的证明。

超子 (hyperon)

奇异数 (参见“奇异粒子”) 不为零的重子称为超子。最早发现的超子是 Σ^+ 超子，它是 1947 年罗彻斯特 (George Dixon Rochester, 1908~) 和巴特勒 (Clifford Charls Butler, 1922~) 在宇宙射线中发现的。以后又陆续发现了 Σ^0 超子、 Σ^- 超子、 Λ^0 超子及其反粒子，其中的反西格马负超子 ($\bar{\Sigma}^-$ 超子) 是 1959 年由我国物理学家王淦昌领导的小组发现的。这些粒子因为他们的质量都比核子大，而命名为超子。超子是不稳定的，寿命最长的约 10^{-10} 秒。

介子 (meson)

参与强相互作用的玻色子，统称为介子。它包括 π 介子、K 介子、 η 介子以及大量的共振态介子。历史上，是在 1935 年汤川秀树研究核力的介子场理论时首先预言了介子的存在，因其质量介于电子与核子之间，所以称之为介子。后来在实验中发现的介子，有质量介于电子与核子之间的，也有比核子的质量还要大的，介子一词已失去了其原有的意义。介子可以在粒子的相互作用过程中产生和湮没，因此，不存在和轻子数守恒、重子数守恒相似的定律。

同位旋 (isospin)

同位旋的概念是在研究核力的电荷无关性的基础上提出的。1932 年，海森伯提出，可以把质子 (p)、中子 (n) 看作是同一种粒子 (核子 N) 的两种不同状态，并且指出，如果没有电磁作用，这两种状态应当具有完全相同的能量和质量。这种情况非常类似于一个自旋为 $s = \frac{1}{2}$ 的粒子，在空间不均匀的情况下 (例如在有外磁场时)，具有两种不同的状态：

$s_3 = \pm \frac{1}{2}$ 。因此，对于核子我们可以引入一个假想的同位旋空间 (或称

电荷空间) 和在这个空间中的同位旋矢量 I ， $I = \frac{1}{2}$ ，同位旋的第三分量

I_3 可取 $2I + 1 = 2$ 个值： $I_3 = \pm \frac{1}{2}$ ，这两个值分别表示质子和中子。在考

虑电磁作用时， $I_3 = +\frac{1}{2}$ (质子) 和 $I_3 = -\frac{1}{2}$ (中子) 的两种核子就显

示出差异。除去电磁作用的影响后，核子处于简并态， $I_3 = \pm \frac{1}{2}$ 的两种

核子具有相同的强相互作用。

50 年代，在粒子物理学的发展中，发现 ρ 介子、K 介子和超子等强子都具有同位旋。例如，对于 ρ 介子， $I=1$ ，其第三分量 I_3 可取 $2I+1=3$ 个值， $I_3=1, 0, -1$ ，分别对应于 ρ^+ 、 ρ^0 、 ρ^- 介子。对于单独的粒子，如 ω 超子和 η 超子， $I=0$ 其第三分量只有 $2I+1=1$ 个值： $I_3=0$ 。

同位旋 I 相同的 $2I+1$ 个粒子，具有相近的质量、相同的自旋和宇称，不同的电荷。这些粒子称为同位旋多重态，它们对于强相互作用而言，具有相同的性质。在强子间的强相互作用中，同位旋是守恒的。

奇异粒子 (strange particle)

40 年代末到 50 年代初，发现了 K 介子、 Λ 超子、 Σ 超子和级联超子。这些粒子总是通过强相互作用成对产生，又通过弱相互作用单独衰变。例如， π^- 介子打到氢靶上，当相互作用的能量超过 1GeV 时，可以发生如下反应： $\pi^- + p \rightarrow K^0 + \Lambda^0$ ，反应时间只需 10^{-23} 秒，而反应中产生的 K^0 介子和 Λ^0 超子，其衰变过程为 $K^0 \rightarrow \pi^+ + \pi^-$ 和 $\Lambda^0 \rightarrow p + \pi^-$ 粒子的寿命长达 10^{-10} 秒 $\sim 10^{-8}$ 秒。粒子的这些奇异性质，用当时已有的理论无法加以解释，因而被称为奇异粒子。

上述事实暗示了奇异粒子除了受当时已知的规律支配外，还被一个新的内部自由度所遵循的规律约束着。当时已知核子和介子的电荷 Q 、同位旋第三分量 I_3 和重子数 N 之间存在着 $Q = I_3 + \frac{N}{2}$ 的关系。可是，对于奇异粒子，上述关系不成立了。实验表明，对于 K^+ 和 K^0 介子， $Q = I_3 + \frac{N}{2} + \frac{1}{2}$ ；对于 Λ 和 Σ 超子、 K^- 和 \bar{K}^0 介子， $Q = I_3 + \frac{N}{2} - \frac{1}{2}$ ；对于

Σ 起子， $Q = I_3 + \frac{N}{2} - 1$ 。1954 年，盖耳曼等人为了把有关奇异粒子的这些关系式统一起来，引入了奇异量子数（简称奇异数） S ，对于核子和介子 $S=0$ ，对于奇异粒子 $S \neq 0$ 。电荷 Q 、同位旋第三分量 I_3 、重子数 N 和奇异数 S 之间的关系，可统一写成

$$Q = I_3 + \frac{N+S}{2}$$

根据上面讲过的那些实验结果，就可以确定各个奇异粒子的奇异数。

引入超荷量子数 $Y=N+S$ ，上式可改写成：

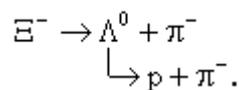
$$Q = I_3 + \frac{Y}{2}$$

这就是著名的盖耳曼-西岛关系。下表给出了各强子的奇异数以及跟它有关的量子数。

强子的量子数

粒子	Q	S	N	I	I ₃	Y
p	1	0	1	1/2	$\begin{Bmatrix} 1/2 \\ -1/2 \end{Bmatrix}$	1
n	0					
Λ^0	0	-1	1	1	$\begin{Bmatrix} 1 \\ 0 \\ -1 \end{Bmatrix}$	0
Σ^0	0					
Λ^0	0	-2	1	1/2	$\begin{Bmatrix} 1/2 \\ -1/2 \end{Bmatrix}$	-1
Σ^0	0					
Λ^0	0	-3	1	0	0	-2
Σ^0	0					
Λ^0	0	0	0	1	$\begin{Bmatrix} 1 \\ 0 \\ -1 \end{Bmatrix}$	0
Σ^0	0					
K^+	1	1	0	1/2	$\begin{Bmatrix} 1/2 \\ -1/2 \end{Bmatrix}$	1
K^0	0					
\bar{K}^0	0	-1	0	1/2	$\begin{Bmatrix} 1/2 \\ -1/2 \end{Bmatrix}$	-1
K^-	-1					

奇异粒子的产生和衰变，遵循确定的选择定则。强相互作用过程，遵从奇异数守恒定律，即反应前后 $S=0$ 。实验事实，如奇异粒子只能成对产生，而且 Λ^0 、 Σ^0 、 Σ^0 、 Σ^0 可以同 K^+ 、 K^0 成对产生，但不能同 K^- 、 K^0 成对产生， K^+ 、 K^0 可以同它们的反粒子成对产生，超子同超子不能成对产生，都符合这一规律。在电磁相互作用中，奇异数也是守恒的。对于弱相互作用的衰变过程，反应前后 $S=\pm 1$ 。凡不满足 $S=\pm 1$ 的反应，都是被禁止的。这就解释了奇异数为-2的超子的级联衰变性质，即必须经过两次衰变才能变为奇异数为零的普通强子：

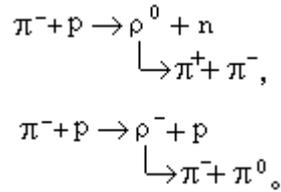


共振态 (resonance)

共振态的最初观念，是指在原子核的散射和反应过程中形成的亚稳复合核。当入射粒子的能量达到某一确定值时，散射或反应的截面迅速增大；截面的这种行为跟经典物理学中的共振现象一致。这表明：入射粒子已与原子核结成亚稳复合核，经过一段时间，这个复合核又衰变为末态粒子。这个亚稳复合核就称为共振态。

1952年以后，E·费米等人发现，用 π 介子和核子碰撞时，在质心系总能量为 1236MeV 附近，呈现出明显的共振现象，形成自旋和同位旋都是 $3/2$ 的共振态。这是人们发现的第一个粒子共振态，后来命名为 $\Delta(1236)$ 。由于它的同位旋 $I = \frac{3}{2}$ ，是一个同位旋四重态 ($2I+1=4$)，因而有四个不同的电荷态： Δ^{++} ， Δ^+ ， Δ^0 ， Δ^- 。到 60 年代中期，发现的共振态已达数十种。由于这些共振态跟人们熟知的粒子一样，都有确定的电荷、自旋、

同位旋等量子数，也有确定的质量，人们已经认为它们是一些新的粒子。这些粒子可以分为两类：一类是重子共振态（费米子），它们的衰变产物中也有重子， (1236) 就是一例： $\Delta^+ + N \rightarrow (1236) N^+$ 。另一类是介子共振态（玻色子），它们衰变成两个或两个以上的介子，例如 ρ 介子就是一个共振态：



共振态和过去熟知的粒子间的主要差别在于，所有的共振态都是通过强相互作用衰变的短寿命粒子。为了避免不必要的含混，凡是不能通过强相互作用衰变的粒子都称为稳定粒子，凡是可以通过强相互作用衰变的粒子都称为共振态。按照这个理解，共振态都是强子，并和稳定粒子中的强子属于同一层次。

平均寿命 (meanlifetime)

粒子稳定性的量度。根据目前的实验，除了光子， e^- ， e^+ ， p ， p^- 和中微子以外，其他各种粒子都要衰变。从一个粒子产生到它衰变所经历的时间称为它的“寿命”。由于微观粒子遵从量子力学规律，同一种粒子的寿命不具有完全确定的值，而按一定的概率分布。如果有 N_0 个相同粒子经过时间 t 以后还剩下 N 个，则

$$N = N_0 e^{-t/\tau} \quad (1)$$

式中的 τ 称为这种粒子的平均寿命。平均寿命是一种粒子衰变到只剩下原有数目的 $1/e$ 所需的时间。

由于相对论效应，一个粒子以高速 v 运动时，它的平均寿命 τ 比在它静止的参考系中的平均寿命 τ_0 要长：

$$\tau = \frac{\tau_0}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}}$$

通常所说的粒子的平均寿命是指在它静止的参考系中的平均寿命。

各种粒子的平均寿命按长短分，可以分成三类，这与引起粒子衰变的相互作用有关：通过弱相互作用衰变的粒子平均寿命最长， 10^{-14} 秒。通过电磁相互作用衰变的粒子平均寿命略短，为 10^{-16} 秒 $\sim 10^{-20}$ 秒。通过强相互作用衰变的粒子平均寿命最短，为 10^{-20} 秒 $\sim 10^{-25}$ 秒。人们通常把不通过强相互作用衰变的粒子 ($\tau > 10^{-20}$ 秒) 都称为“稳定”粒子。

上面讲的是三种类型衰变寿命的典型值。一种具体粒子的平均寿命还与它衰变时释放的能量大小有关。例如中子的衰变 $n \rightarrow p + e^- + \bar{\nu}$ 释放的能量很小，因而平均寿命达 900 秒。

由于粒子的平均寿命悬殊很大，所以测量方法各不相同。当平均寿命大于 10^{-9} 秒时，可用计数的方法，记录不同时刻粒子数的变化率，由 (1) 式算出粒子的平均寿命。当平均寿命在 10^{-8} 秒至 10^{-15} 秒之间时，可通过测量粒子衰变前飞过的距离和飞行的速度，求出它的寿命。对于寿命短到

10^{-23} 秒的粒子，上述测量方法都不能应用。由于这类粒子属于共振态，可通过共振峰的宽度 Γ 求出平均寿命 τ 的值。不稳定粒子，通过实验测量其能量时，测得的能量值 E 并不完全确定；如果测量次数很多，则各次测量值形成一定的分布，图 1 - 26 - 1 为其分布曲线，其中 $E_0 (=m_0c^2)$ 为 E 的期待值，即粒子伪能量， Γ 为能量值分布到峰高一半处的宽度，根据能量-时间测量的不确定关系 $\Delta E \Delta t \approx h$ ， Γ 与粒子平均寿命 τ 之间存在 $\Gamma \tau \approx h$ 的关系。测出宽度 Γ 即得

$$\tau \approx \frac{h}{\Gamma}$$

夸克模型 (quarkmodel)

强子结构的一种模型。从 50 年代末到 60 年代初，人们已经认识到，强子都有内部结构。盖耳曼和兹韦格于 1964 年提出：强子是由三种更基本的粒子组成的，这就是三种味道的夸克 (u、d、s) 及其反粒子。这三种夸克的电荷、自旋、同位旋、重子数、奇异数和质量见下表。由于没有发现自由夸克，他们的

夸克	电荷 Q	自旋 J	同位旋 I	同位旋第 三分量 I_3	重子数 N	奇异数 S	粲数 C	底数 B	顶数 (T)	质量 (GeV)
u(上)	+ 2/3	1/2	1/2	1/2	1/3	0	0	0	0	~ 0.3
d(下)	-1/3	1/2	1/2	-1/2	1/3	0	0	0	0	0 ~ 0.3
s(奇)	-1/3	1/2	0	0	1/3	-1	0	0	0	~ 0.5
c(粲)	2/3	1/2	0	0	1/3	0	1	0	0	~ 1.6
b(底)	-1/3	1/2	0	0	1/3	0	0	-1	0	~ 5.0
t(顶)	-2/3	1/2	0	0	1/3	0	0	0	1	~ 176

质量是估计值，是不很可靠的，尤其是 u 夸克和 d 夸克的质量，有人认为比表中的估计值要小得多。

根据这个模型，所有的重子都是由三个夸克所组成的，例如，中子的组成是 udd，质子的组成是 uud；所有的介子都是由一个正夸克和一个反夸克组成的，例如 π^- 介子的组成是 u^-d ， π^+ 介子的组成是 ud^+ ，等等。这个模型能够说明强子的各种性质（图 1 - 26 - 2）。

夸克模型当时遇到的一个重要困难就是：夸克是自旋为 $\frac{1}{2}$ 的费米子，应服从泡利不相容原理。但在组成重子时往往要有两个甚至三个相同的夸克同在一个量子态中，如 Λ^0 (ssu) 和 Σ^{++} (uuu)，这是违反泡利不相容原理的。因此，有必要给夸克引入新的自由度。研究的结果，把每种夸克分为红、绿、蓝三种不同的“颜色”。事实上颜色也是一种量子数，只不过为了方便，形象地称之为“颜色”罢了。带颜色的夸克组成强子时遵循如下规则：第一，组成重子的三个夸克要有三种不同的颜色；第二，组成介子的夸克和反夸克的颜色互为补色（具有相反的色量子数）。红绿蓝三色合在一起变成白色，任何一种颜色跟它的互补色合在一起也变成白色，所以重子和介子都是白色的，称之为“色单态”。

70 年代以来，夸克模型有了进一步的发展。1974 年，发现了新的大质量、长寿命粒子—— J/ψ 粒子，其静止质量为 $3.1\text{GeV}/c^2$ ，寿命为 10^{-20} 秒。它以共振态形式出现，但它的寿命却比通常的强子共振态长 100 倍。 J/ψ 粒子的奇特性质可以用一种新夸克 c (粲夸克) 来解释，c 夸克的质量要比原有的三种夸克大得多， J/ψ 粒子是由 cc^+ 组成的。1977 年，又发现了新的粒子和 ψ' ，它们的静止质量分别为 $9.5\text{GeV}/c^2$ 和 $10.0\text{GeV}/c^2$ 。研究的结果认为， ψ' 粒子可能是由第五种夸克——b 夸克（底夸克）和它的反粒子组成的。根据对称性的考虑，人们认为至少还应该第六种夸克——t 夸克（顶夸克）存在，它的质量比 b 夸克还要大。1994 年，美国费米实验室的科学家已发现了顶夸克存在的证据。1995 年 3 月，正式宣布发现了顶夸克。c 夸克、b 夸克和 t 夸克的有关参量和量子数也列在上表中。

随着粲夸克、底夸克和顶夸克的引入，也引入了粲数 C、底数 B 和顶数 T 这三个新的量子数。相应地，盖尔曼-西岛关系（见“奇异粒子”）也扩展为

$$Q = I_3 + \frac{N + S + C + T}{2}。$$

由夸克模型得到的结果，与一系列实验事实符合得相当好，因此，人们相信夸克是真实存在的。但是，自 1964 年迄今，始终没有找到自由夸克。这可能是由于夸克很重，目前实验所能达到的能量还不足以把它们从强子

中分离出来。另一种可能的解释则是夸克由于某种原因被囚禁在强子内部而不能以自由状态存在，即所谓“夸克囚禁”。

对称性和守恒定律 (symmetry and conservation laws)

关于对称性，根据德国数学家韦耳 (Weyl, Hermann, 1885~1955) 的定义，可表述如下：如果能对一个事物施加某种变换，并且变换以后的情况与原来的完全相同，则这个事物对于该种变换是对称的。最简单最常见的对称性是时空对称性。对空间性质进行变换 (如平移、转动、镜像反射) 所对应的对称性称为空间对称性。对时间性质进行变换 (如时间平移、时间反演) 所对应的对称性称为时间对称性。还有与空间、时间变换相独立的变换所对应的其他一些对称性，物理学中称之为内部对称性。

物理规律与对称性之间究竟有什么关系？德国数学家诺特 (Emmy Noether, 1882~1935) 回答了这个问题：如果物理规律在某一不明显依赖于时间的变换下具有对称性，必存在一个相应的守恒定律。这叫做诺特定理。例如，物理规律如果具有空间平移对称性、空间转动对称性和时间平移对称性，则相应地分别有动量守恒定律、角动量守恒定律和能量守恒定律。诺特定理首先是在经典物理学中建立起来的，经过推广，在量子力学中仍然成立。

对称性所涉及的变换，可以是连续变换，也可以是分立变换。连续变换可用一个运动参量的连续变化来描写；分立变换则不能用一个运动参量的连续变化来描写。连续变换对称性所决定的守恒量是相加性守恒量，即系统中各部分该守恒量的代数和 在运动过程中不变。分立变换对称性所决定的守恒量是相乘性守恒量。即系统中各部分该守恒量的乘积在运动过程中不变。动量、角动量、能量、电荷、同位旋、奇异数、重子数等都是相加性守恒量。宇称则是相乘性守恒量。

守恒定律可分为两类，从而守恒量也分为两类：一类是严格守恒的，一类是近似守恒的。如果一个守恒定律对各种相互作用都成立，则称为严格守恒定律；如果一个守恒定律对某些相互作用成立，但对另一些相互作用则不成立，不过在运动过程中后者的影响是次要的，则称为近似守恒定律或部分守恒定律。

下页的表列出了粒子物理学中已知的对称性、与之相应的守恒量以及该对称性适用的相互作用范围。表中的“+”表示具有该种对称性，“-”表示不具有该种对称性。表中的 C 变换是将所有粒子都变成其反粒子的变换，称为正反粒子变换或电荷共轭变换。如果一个粒子或多个粒子组成的系统，它的状态经 C 变换后只改变一个常数相因子，则这个相因子称为该粒子或粒子系统的 C 宇称，C 宇称只能取+1 或-1 两个值。一切强子都有确定的 C 变换性质，但只有中性普通介子才具有 C 宇称。

表中的 G 变换是 C 变换和在同位旋空间中绕第二轴转动 180° 所构成的联合变换。如果一个粒子或多个粒子组成的系统，它的状态经 G 变换后只改变一个常数相因子，则这个相因子称为 G 宇称，G 宇称只能取+1 或-1 两个值。一切强子都具有确定的 G 变换性质，但只有普通介子才具有 G 宇称。由表中可以看出：在电荷共轭 (C) 和空间反射 (P) 联合变换下，弱相互作用不具有对称性，反映了 CP 宇称在弱相互作用下不守恒，但这不守恒的部分只占千分之二左右，

对称性与守恒量一览表

	对称性	守恒量	强作用	电磁作用	弱作用
连续变换	空间平移	动量	+	+	+
	空间转动	角动量	+	+	+
	时间平移	能量	+	+	+
	电荷规范	电荷	+	+	+
	重子数规范	重子数	+	+	+
	电轻子规范	电轻子数	+	+	+
	μ 轻子规范	μ 轻子数	+	+	+
	轻子规范	轻子数	+	+	-
	同位旋转动	同位旋	+	+	-
	绕同位旋第三轴转动	同位旋第三分量	+	+	-
	奇异数规范	奇异数	+	+	-
	粲数规范	粲数	+	+	-
	底数规范	底数	+	+	-
	分立变换	C 变换	C 宇称	+	+
空间反射		宇称	+	+	-
时间反演		G 宇称	+	+	+
G 变换		CP 宇称	+	+	-
CP 联合变换			+	+	+
全同粒子交换			+	+	-

因此，仍可近似地认为在弱相互作用下 CP 宇称是守恒的。CP 破坏现象，目前还不能从理论上给予满意的解释。

量子场论中的 CPT 定理告诉我们，在电荷共轭、空间反射和时间反演的联合变换中，物理定律的形式不会改变。因而 CP 破坏现象的发现，或者意味着 CPT 定理不再正确，或者是在弱相互作用下，时间反演对称性也有相应地破坏，因而补偿了 CP 破坏效应，使 CPT 定理仍然成立。目前的证据

有利于后一种假定。

表中全同粒子交换变换给出的守恒量即该交换变换本身，它的守恒性质表现为粒子满足费米统计还是玻色统计的性质在运动过程中是不变的。

宇宙线 (cosmic rays)

亦称宇宙射线，是来自宇宙空间的各种高能粒子，主要是质子，其次是 α 粒子，还有少量锂、铍、硼、碳、氮、氧原子核和极少量的重元素原子核，以及电子、中微子和高能光子 (X 射线和 γ 射线)。原子核中质子约占 87%， α 粒子约占 12%。电子的流强约为质子的 1%。宇宙线中存在能量极高的粒子，已观测到的最高能量达 10^{20} 电子伏以上。

宇宙线粒子进入地球大气层后，与大气中的原子发生作用，逐渐损失能量。一般把与大气作用前的宇宙线粒子称为初级宇宙线，把与大气作用后的粒子以及作用中产生的粒子称为次级宇宙线。在地面上探测到的，除中微子外，几乎都是次级宇宙线。按照穿透物质能力的大小，次级宇宙线可以分为硬成分和软成分。硬成分包括穿透能力很强的 μ 子，还有质子、中子、 π 介子等强作用粒子。软成分包括电子、正电子和光子，它们能被数厘米的铅全部吸收。

宇宙线中的带电粒子，在银河系空间中传播时，受星际磁场的影响，路径发生弯曲，沿螺旋线运动，它们到达地球时的方向已不是宇宙线源的方向。然而初级宇宙线中的带电粒子却是各向同性地从各个方向射到地球表面。

宇宙线的来源还没有完全研究清楚。银河系内恒星所发射的粒子，只占银河宇宙线中的一小部分，大多数宇宙线带电粒子来源于超新星的爆发以及爆发后形成的超新星遗迹。能量高于 10^{17} 电子伏的带电粒子主要来自银河系外。

加速器 (accelerator)

用人工方法加速带电粒子、产生带电粒子束的装置。

早在 20 年代以前，人们就利用天然放射性物质发出的 α 粒子去轰击原子核，研究原子核的结构和它的变化规律。但是，天然放射性物质放出的粒子能量不高，不能满足科学研究的需要，于是开始研究人工加速带电粒子的方法。20 年代探讨过许多加速带电粒子的方案。30 年代初，高压倍加器、回旋加速器、静电加速器相继问世。40 年代至 50 年代，出现了电子感应加速器、同步加速器和直线加速器，60 年代又有了对撞机。目前已能将电子、质子、重离子等带电粒子加速到接近光速，提供各种高能带电粒子束，是人们变革原子核和各种粒子、认识物质深层结构的主要工具。

加速器是利用电场对电荷的作用力来加速带电粒子的。加速器的主要

设备包括三个部分：1. 带电粒子源，如发射电子的电子枪或产生离子的离子源；2. 产生加速电场的电源；3. 真空系统，它的作用是使带电粒子在真空中被加速，免得与气体分子碰撞损失能量。按照采用的加速电场来区分，加速器可分为三类：1. 利用高压电源来产生加速电场的高压加速器；2. 利用随时间变化的磁场产生的感应电场来加速电子的电子感应加速器；3. 利用高频电场的谐振加速器，包括直线加速器、回旋加速器、同步加速器等。60年代末期出现的超高能装置——对撞机，是在同步加速器的基础上发展起来的。

粒子加速器的效能通常以粒子所达到的能量来表征。粒子能量在100MeV以下的称为低能加速器，能量在0.1Gey~1GeV之间的称为中能加速器，能量高于1GeV的称为高能加速器。电子的质量很小，在较低的能量（约2MeV）就接近光速，而质子和重离子则要在很高的能量（每个核子2GeV以上）它们的速度才能接近光速。

低能加速器除了核物理和核工程外，在工业、农业等各方面都有广泛的应用。在工业上，可利用加速器产生的射线进行辐射合成、辐射聚合，生产性能好的材料。如聚乙烯经辐射处理后，在300的高温下仍能保持原有性能。橡胶也可以用辐照方法使其不易老化，提高抗磨能力。还可以用射线进行金属原件的探伤。在农业上，可用射线进行辐照育种、消灭粮仓中的害虫和虫卵，还可用辐照处理来抑制农产品的发芽，延长保存期。在医疗卫生方面，也可用射线进行透视诊断、治疗癌症。低能加速器还应用于化学、放射生物学、放射医学、固体物理等方面的研究。

中高能加速器主要供核物理和粒子物理等基础研究之用，有些加速器也兼顾其他方面的研究工作，特别是强流中能加速器，则是放射化学、固体物理学、放射生物学、医学以及核工程等多学科共同使用的设备。

高能加速器，随着能量的不断提高，其体积也越来越大。例如，根据已遭美国国会否决的超级超导对撞机（SSC）计划，需要建造一个周长87公里的加速环，才能把粒子能量提高到 $2 \times 20\text{TeV}$ 。这实际上接近了现有加速技术所能达到的极限。要想建造一个同样能量但体积更小的加速器，就需要增大引导磁场和加速电场的强度，但是使用现有的加速器技术要大幅度地提高场强是不可能的。当磁力比使磁性物质结合在一起的内部引力更大时，产生强磁场的磁铁本身就会被撕碎；当加速电场能使加速器支承系统内部的电子达到原子对它的束缚能量时，系统中的全部电子就会脱离它们的原子核。要进一步大幅度提高加速器的能量，必须开辟使用新的加速器技术的途径。自70年代以来，已有几种新的加速器原理和技术正在研究实验中。例如有人提出一种用等离子体波内的电场加速粒子的新技术。理论上讲，这种加速器能维持的电场比现有的加速器技术允许的电场强度大几千倍，一个几百米长的等离子体型加速器，就能达到周长87公里的超导

超级对撞机所能达到的能量。目前各种新加速器原理，尚处于小规模实验研究阶段，要达到实用阶段，还有一段很长的路程。

直线加速器 (linear accelerator)

一种用高频电场加速带电粒子的谐振加速器，粒子在加速器中运动的轨道是一条直线。高频电场的强度和方向是随时间而变化的。而在加速器中，必须使带电粒子只在一个方向上被加速，这就要保持粒子与高频电场之间的谐振关系。图 1 - 26 - 3 是直线加速器的工作原理图。在管形真空室里装有若干金属圆筒，叫漂移管，它们排列在一条直线上。漂移管之间的间隙叫加速间隙。按照排

列的顺序，凡是奇数的漂移管都与高频电源的同一个输出端连接，凡是偶数的漂移管都与高频电源的另一个输出端连接。被加速的粒子从左端射入。如果射入的是正离子，而且在它们走出第一个漂移管，通过第一个加速间隙这段时间里，恰好奇数漂移管为正电压，偶数漂移管为负电压，则粒子将在第一个加速间隙被加速。粒子进入第二个漂移管后，由于管内没有电场，粒子不会受到加速或减速作用。假如漂移管和加速间隙的长度选择适当，使粒子通过加速间隙时受到加速，当电场改变方向起减速作用时，粒子正好处在漂移管中受到屏蔽，就能一步步地把粒子加速到较高的能量。

直线加速器既能加速电子，也能加速质子或其他离子。目前世界上最大的电子直线加速器，已能把电子加速到 22GeV 的能量（美国斯坦福直线加速器中心）；最大的质子直线加速器已能把质子加速到 800MeV 的能量（美国洛斯阿拉莫斯科学实验室）。

对撞机 (collider)

用高能粒子束轰击实验室中的静止靶时，有效作用能只占打靶的高能粒子能量的一小部分，并且打靶粒子的能量越高，有效作用能所占的比例越小。这是因为有相当大一部分能量要用在保持质心的运动上。如果用两束相向运动的高能粒子进行对撞，粒子能量的利用率要大得多。例如，两束 31GeV 的质子束对撞时，质心系能量约为 62GeV，如果一束质子轰击静止质子靶，要得到同样大小的质心系能量，质子束的能量必须达到 2000GeV。因此，目前许多高能加速器还不能进行的超高能实验，就可用对头碰撞的方法来进行。实现相对运动粒子对头碰撞的装置叫对撞机。近 20 年来发展起来的高能加速器，多数都是对撞机。图 1 - 26 - 4 是欧洲核子研

究中心 (CERN) 的质子对撞机 (质子储存环 ISR) 的示意图。粒子先在同步加速器中加速, 然后射入对撞机。在对撞机里, 两束粒子沿相反的方向回旋并进一步被加速, 在轨道交叉的地方相互碰撞。对撞机也有直线式的。

对撞机能进行质子与质子、质子与反质子、质子与电子、电子与正电子之间的对撞, 已建成的能量最高的质子-反质子对撞机是美国费米实验室的 TEVATRON, 1988 年 ~ 1989 年实现了 $2 \times 900\text{GeV}$ 的质子-反质子对撞。已建成的最高能量的电子-正电子对撞机, 有美国斯坦福直线加速器中心 (SLAC) 的直线对撞机 (SLC) 和西欧核子研究中心 (CERN) 的大型正负电子对撞机 (LEP), 两台对撞机的能量都能达到 $2 \times 50\text{GeV}$ 。我国自行设计并于 1988 年建成的北京正负电子对撞机 (BEPC), 最高能量 $2 \times 2.8\text{GeV}$, 可用来进行强物理和轻子物理的研究, 它是目前国际上在该研究领域内唯一的性能最好的装置。

环形电子加速装置的副产物是“同步辐射”。在磁场中高速回旋的电子做的是加速运动, 它会发出电磁辐射。由于这种辐射是在电子同步加速器中发现的, 所以称为同步辐射。同步辐射有如下一些特点: (1) 具有连续光谱, 光谱的分布范围从红外线、可见光直到紫外线和 X 射线。(2) 在空间分布上有很窄的角分布, 即有很好的方向性。(3) 由于储存环中的电子是不连续的束团分布, 辐射是脉冲式的。(4) 辐射是偏振的, 在电子运动的轨道平面上同步辐射是线偏振光, 在紫外线和 X 射线能区中, 同步辐射是唯一可用的偏振光源。(5) 辐射具有很高的强度和稳定性。目前, 同步辐射光源已成为物理、化学、生物等学科研究方面的强有力工具, 一些国家已建立了专用的同步辐射装置。我国也在合肥建立了可提供从紫外到软 X 射线的同步辐射装置 (HFSYRL)。

主要参考资料

1. 章乃森。粒子物理学。第 1 版。北京: 科学出版社, 1986。
2. E. 薛格雷。核与粒子。第 1 版。北京: 科学出版社, 1985。
3. 秦旦华, 高崇寿。粒子物理学概要。第 1 版。北京: 高等教育出版社, 1988。
4. 高崇寿, 曾谨言。粒子物理与核物理讲座。第 1 版。北京: 高等教育出版社, 1990。
5. 卢希庭。原子核物理。第 1 版。北京: 原子能出版社, 1981。
6. 褚圣麟。原子核物理学导论。第 2 版。北京: 高等教育出版社, 1987。
7. 梅镇岳。原子核物理学。第 3 版。北京: 科学出版社, 1983。
8. W.M. 吉布森, B.R. 波拉德。基本粒子物理学中的对称性原理。第 1

版。北京：高等教育出版社，1982。

9. 科学出版社名词室。物理学词典（下册）。第1版。北京：科学出版社，1988。

10. 中国大百科全书物理学。第1版。北京：中国大百科全书出版社，1987。

11. 中国大百科全书天文学。第1版。北京：中国大百科全书出版社，1980。

12. 徐建铭。加速器原理。第1版。北京：科学出版社，1974。

13. 方守贤，梁岫如。我国粒子加速器的发展和展望。物理，1991(8)：473~479

14. 张闯。立足当前瞄准未来——第15届国际高能加速器会议综述。现代物理知识，5卷1期：8~13

15. J.M.道森著，郑国桐编译。等离子体型的粒子加速器。现代物理知识，5卷4期：35~37

16. 郑志鹏。粒子质量的最新数据。物理，1993(1)：2~3

第二编 物理学史和物理学家

一、物理学史	555
1. 力学发展简史	555
中国古代对力学的研究	555
中国古代在声学上的贡献	557
亚里士多德关于运动的理论	559
地心说与日心说	5560
伽利略的运动理论和科学方法	562
万有引力定律的建立	566
牛顿力学体系的建立及其对物理学的影响	569
关于运动的量度	573
能的概念机械能守恒定律	574
大气压强的发现与测量	576
2. 热力学的建立和发展	579
中国古代的热学知识	579
历史上关于热本质的争论	581
能量守恒定律的建立	582
热力学第二定律的建立	584
气体动理论的发展	586
3. 静电学发展简史	588
中国古代对电现象的认识	588
摩擦起电电荷	589
富兰克林的风筝实验与避雷针的发明	591
库仑定律的建立	592
4. 电流	594
伽伐尼电流的发现和伏打电池的发明	594
电解定律的发现蓄电池的发明	596
欧姆定律的建立	597
低温物理与超导研究的发展	598
5. 电磁联系的研究电磁理论的建立	600
中国古代对磁的认识	600
西方古代对磁的认识	602
电与磁联系的初步研究	603
法拉第电磁感应定律的建立	605
场的概念的提出与建立	607

6. 对光和光的本性的认识	609
中国古代对光的认识	609
反射定律和折射定律	614
牛顿的光学实验	615
光速测定的发展	617
光的电磁说的确立	619
以太论思想的发展及“以太漂移”的研究	620
狭义相对论的建立	623
光的波粒二象性概念的形成和发展	625
7. 对原子及物质结构的认识	628
X射线的发现	628
关于阴极射线本质的争论	629
电子的发现	630
放射性的发现及放射现象的研究	632
对原子结构的认识过程	633
中子的发现	635
对原子核结构的认识简史	636
重核裂变的发现	637
原子弹的研究（曼哈顿工程）	639
正电子的发现	640
μ 子和介子的发现	640
中微子的发现	641
反质子的发现	642
8. 现代中国物理学发展史	643
17世纪以来物理学在中国的传播	643
20世纪上半叶物理学在中国的兴起	644
近代我国物理教育的发展简况	645
近代我国物理学研究工作的发展简况	646
中国物理学会的创立和发展	647
20世纪中国物理学家的成就概述	648
9. 技术发展简史	657
航空航天发展简史	657
热机发展简史	661
电光源发展简史	662
电机发展简史	663
无线电发展简史	665
微电子技术发展简史	667

二、对物理学发展有贡献的物理学家（按生年顺序排列）	670
墨翟（约前 468 ~ 前 376）	670
德谟克利特（约前 460 ~ 前 370）	671
亚里士多德（前 384 ~ 前 322）	671
阿基米德（约前 287 ~ 前 212）	673
王充（27 ~ 约 97）	674
张衡（78 ~ 139）	675
托勒密（约 90 ~ 168）	677
沈括（约 1031 ~ 1095）	678
哥白尼（1473 ~ 1543）	679
朱载堉（1536 ~ 约 1610）	680
吉伯（1544 ~ 1603）	681
第谷（1546 ~ 1601）	682
布鲁诺（1548 ~ 1600）	683
伽利略（1564 ~ 1642）	684
开普勒（1571 ~ 1630）	687
宋应星（1587 ~ ?）	688
笛卡儿（1596 ~ 1650）	689
盖利克（1602 ~ 1686）	691
托里拆利（1608 ~ 1647）	692
马略特（1620 ~ 1684）	692
帕斯卡（1623 ~ 1662）	694
玻意耳（1627 ~ 1691）	695
惠更斯（1629 ~ 1695）	696
胡克（1635 ~ 1703）	698
牛顿（1643 ~ 1727）	699
罗默（1644 ~ 1710）	703
莱布尼兹（1646 ~ 1716）	704
哈雷（1656 ~ 1742）	705
华伦海特（1686 ~ 1736）	705
伯努利（1700 ~ 1782）	706
摄尔修斯（1701 ~ 1744）	707
富兰克林（1706 ~ 1790）	708
卡文迪什（1731 ~ 1810）	709
瓦特（1736 ~ 1819）	710
库仑（1736 ~ 1806）	711
伽伐尼（1737 ~ 1798）	712

赫歇耳 (1738 ~ 1822)	712
伏打 (1745 ~ 1827)	713
查理 (1746 ~ 1823)	713
本杰明·汤普森 (伦福德) (1753 ~ 1814)	714
托马斯·杨 (1773 ~ 1829)	715
布朗 (1773 ~ 1858)	716
安培 (1775 ~ 1836)	717
阿伏伽德罗 (1776 ~ 1856)	718
里特 (1776 ~ 1810)	719
高斯 (1777 ~ 1855)	719
奥斯特 (1777 ~ 1851)	720
盖·吕萨克 (1778 ~ 1850)	721
欧姆 (1787 ~ 1854)	722
菲涅耳 (1788 ~ 1827)	723
法拉第 (1791 ~ 1867)	724
卡诺 (1796 ~ 1832)	727
亨利 (1797 ~ 1878)	728
克拉珀龙 (1799 ~ 1864)	729
惠斯通 (1802 ~ 1875)	730
楞次 (1804 ~ 1865)	731
韦伯 (1804 ~ 1891)	731
勒威耶 (1811 ~ 1877)	732
伽勒 (1812 ~ 1910)	732
安德鲁斯 (1813 ~ 1885)	733
迈尔 (1814 ~ 1878)	733
焦耳 (1818 ~ 1889)	735
亚当斯 (1819 ~ 1892)	737
傅科 (1819 ~ 1868)	737
菲佐 (1819 ~ 1896)	739
亥姆霍兹 (1821 ~ 1894)	740
克劳修斯 (1822 ~ 1888)	741
开尔文 (1824 ~ 1907)	742
基尔霍夫 (1824 ~ 1887)	744
巴耳末 (1825 ~ 1898)	745
麦克斯韦 (1831 ~ 1879)	745
马赫 (1838 ~ 1916)	747
玻耳兹曼 (1844 ~ 1906)	747

伦琴 (1845 ~ 1923)	749
爱迪生 (1847 ~ 1931)	750
罗兰 (1848 ~ 1901)	751
贝克勒耳 (1852 ~ 1908)	752
迈克耳孙 (1852 ~ 1931)	752
洛伦兹 (1853 ~ 1928)	754
开默林-昂内斯 (1853 ~ 1926)	755
里德伯 (1854 ~ 1919)	756
汤姆孙 J.J (1856 ~ 1940)	756
特斯拉 (1856 ~ 1943)	757
赫兹 (1857 ~ 1894)	758
普朗克 (1858 ~ 1947)	760
居里, P. (1859 ~ 1906)	761
帕邢 (1865 ~ 1947)	762
居里, M. (1867 ~ 1934)	762
密立根 (1868 ~ 1953)	764
威耳孙 (1869 ~ 1959)	764
卢瑟福 (1871 ~ 1937)	765
赖曼 (1874 ~ 1954)	767
迈特纳 (1878 ~ 1968)	767
哈恩 (1879 ~ 1968)	768
爱因斯坦 (1879 ~ 1955)	769
夫兰克 (1882 ~ 1964)	771
盖革 (1882 ~ 1945)	771
玻恩 (1882 ~ 1970)	772
玻尔 (1885 ~ 1962)	772
薛定谔 (1887 ~ 1961)	774
查德威克 (1891 ~ 1974)	775
德布罗意 (1892 ~ 1989)	776
康普顿 (1892 ~ 1962)	777
约里奥-居里夫妇	778
约里奥-居里, I. (1897 ~ 1956)	778
约里奥-居里, F. (1900 ~ 1958)	778
布莱克特 (1897 ~ 1974)	779
泡利 (1900 ~ 1958)	780
劳伦斯 (1901 ~ 1958)	780
费米 (1901 ~ 1954)	781

海森伯 (1901 ~ 1976)	782
狄拉克 (1902 ~ 1984)	783
安德森 (1905 ~)	784
汤川秀树 (1907 ~ 1981)	784
吴健雄 (1912 ~ 1997)	785
杨振宁 (1922 ~)	786
李政道 (1926 ~)	787
丁肇中 (1936 ~)	788
三、科学家名言录	791

一、物理学史

1. 力学发展简史

中国古代对力学的研究

力学知识起源于古代人对自然现象的观察和生产劳动中的实践经验，并逐步发展为生产技术和初步的自然哲理，这在东西方古代都是如此。

在我国古代，手工工艺技术成果远比经验性的理论总结突出得多，这是中国古代对力学研究的主要特点。从时间来看，大体可分为春秋战国、两汉、宋明三个高潮。（1）春秋战国时期（公元前 770 ~ 前 221 年）

公元前 316 年，蜀守李冰修建都江堰，“正面取水，侧面排沙”，其飞沙堰工程巧妙地利用了弯道环流，说明当时测河水流量、了解泥沙规律等水力学知识及水利工程已有相当的水平，成都平原二千多年来始终受益。传为齐人著的《考工记》，是记录我国古代农具、兵器、乐器、炊具、酒具、水利、建筑等古代手工艺规范的专著，现存版本中如《裘氏》、《筐氏》、《雕氏》等篇内容已散佚。其中惯性现象的记述（“马力既竭，辘_一犹能一取焉”），车轮大小与拉力的关系（轮太低，马总是像上坡一样费劲），箭羽影响箭飞行速度的关系（“后弱则翔，中强则扬，羽丰则迟”），检验木料强度的经验方法（如“置而摇之，以视其蜎_一”，“横两墙间，以视其桡之均”“横而摇之，以视其劲”），以及堤坝设计的经验尺寸等，都反映了我国当时的生产技术和经验知识水平。

与《考工记》几乎同时的《墨经》，则进一步得出一些初步的力学哲理（如“奋”、“衡”、“本”、“标”、“重”、“权”等），给力下了比较科学的定义：“力，刑（形）之所以奋也。”可惜这一形成科学的抽象思维进程在后世没有顺利继续下去。

这一时期是以记录与积累生产经验为主，也形成了初步哲理。

（2）两汉到五代时期（前 206 ~ 960）

简单机械逐渐发展为精巧的或大型的联合机械，如张衡的水运浑天仪、候风地动仪（见“张衡”条目），西汉末巧工丁缓（公元 1 世纪）的“被中香炉”是世界上已知最早的常平支架，祖冲之（429 ~ 500 年）的水磨等等。

隋代造船业已很发达，如隋炀帝的龙舟已高 40 尺，宽 50 尺，长 200 尺。李春主持建造的河北涿州赵县安济桥（公元 595 ~ 605 年），跨度最大（37.02 米），弧度最浅（拱矢高 7.23 米），至今 1300 多年，下沉水平差只有 5 厘米，说明实用结构力学发展的水平。浮力的利用甚多，如：浮

桥的建造（唐李吉甫：“以船为脚，竹箴亘之”，“架黄河为之”）；东晋僧人惠远在庐山造建花漏作为记时工具：“取铜叶制器，状如莲花，置盆水之上，孔底漏水，半之则沉”，即莲花漏由孔底进水到一半时就逐渐下沉，“每一昼夜十二沉”，非常巧妙。还有著名的曹冲称象故事，在陈寿著《三国志》卷二十及《江表传》中均有记载。

上述种种成就，集之于书的不多，北齐信都芳曾“集浑天、地动、敲器、漏刻诸巧事并画图名曰器准”，但已散失。

这一时期带有直觉经验型的物理哲理性著作是王充的《论衡》（参见“王充”），在他的著作中对于运动的疾舒（快慢）、力与运动、物与运动、内力与外力的关系等作了叙述。其次是运动的相对性概念，晋天文学家束皙（261~303年）说过：“乘船以涉水，水去而船不徙矣”（《隋书·天文志》）；晋葛洪（283~363年），号抱朴子，在其著作《抱朴子·内篇·塞难》中说：“游云西行，而谓月之东驰。”《晋书卷十一天文志》更将这一相对运动的思想用于解释天体运行：“天旁转如推磨而左行，日月右行，随天左转，故日月实东行，而天牵之以西没。譬之蚁行磨石之上，磨左旋而蚁右去，磨疾而蚁迟，故不得不随磨以左回焉。”有极大价值的是至少成书于东汉时代的《尚书纬·考灵曜》（著者不详，收入明代孙穀编纂的《古微书》卷一《尚书纬》），该书在提出“地有四游，冬至地上行北而西三万里，夏至地下行南而东三万里，春秋二分是其中矣”的同时，提出了著名论断：“地恒动而人不知，譬如闭舟而行，不觉舟之运也。”这种对运动相对性的观点，《考灵曜》比伽利略的《对话》至少早约1500年。此观点说明我国古代物理思想达到过的高度。

这一时期在机械、水力等技术发展基础上物理思想活跃，但对物理现象很少作定量叙述。

（3）宋元明时期（960~1644）

我国古代技术成就极为丰富，但往往著述不详或流散失传，只知其名而不知其详，因而许多“巧器”历代都有人重新“创制”。如由仰韶文化时期尖底陶罐发展而成的敲器，“虚则敲，中则正，满则覆”（《荀子·宥坐》），是由于重心由高变低而又变高而致的，晋人杜预、南北朝祖冲之，魏、隋、唐、宋都有多人试制，指南车也有东汉张衡、三国马钧、祖冲之、宋燕肃、吴德仁等多人多次制成或未成。后魏时有郭善明与马岳同时研造，郭未成但心怀妒嫉，见马岳垂成，便用毒酒杀之。而燕肃在造这种凭靠齿轮传动使木人手指方向不变的指南车遇困难时，出门“见车驰门动而得其法”（宋陈师道《后山丛谈卷一》），这也是从机械原理中悟出的。可惜的是往往因古代人悟而未述或述而失传。记里鼓车也是利用齿轮传动，使车轮走满一里时有一齿轮转满一圈并拨动小人打鼓一次。这说明我国手工机械制造中齿轮构造等工艺相当娴熟，但直到宋代才记载较详。

苏颂(1020~1101)和韩公廉1092年建成了我国古代最大型的先进天文钟楼“水运仪象台”，其结构详细载于苏颂《新仪象法要》中，它涉及天文、力学、机械制造，其中有相当于钟表擒纵器的“天衡”，是保证等时性的杠杆装置。元代郭守敬(1231~1316)在天文仪器制造的种类(简仪、仰仪、定时仪、日月食仪等十几种)、结构和精度方面达到很高水平。

宋代曾公亮(997~1087)在《武经总要》这一军事著作中除记载兵工机械、枪炮、军用油泵(“猛火油柜”)等外，还在《寻水泉法》中详载了虹吸管(“渴乌”)，它在《后汉书·张让传》及唐代《通典》中都有记载，包括“取大竹去节”，“油灰黄蜡固封”，“竹首插入水中五尺”，烧火使“火气潜通”入水，“则水自中逆上”等。

河北石家庄隆兴寺的转轮藏建于北宋，人在台上绕轴走动时轮藏会缓慢地反向转动，这实际上是动量矩原理的应用。宋应星(1587~1644(?))的《天工开物》是明代农业和手工业生产技术的百科全书，在卷十五《佳兵篇》中记述了测试弓弦弹力大小的方法：“凡试弓力，以足踏弦就地，秤钩搭挂弓腰，弦满之时，推移秤锤所压，则知多少。”方法十分巧妙(图2-1-1)。该书在我国失传300年，于1926年才由日本找回翻印本。

总的来说，我国古代力学知识与古代精湛的工艺技术往往密不可分。但各时期对技术知识的整理汇集、研究提高、保存流传都未受到重视，致使技术特别是科技理论不能代替人力形成明显的生产力，科举八股把教育与知识分子的注意力引到文字游戏或仕途官场上。一方面是大量生产知识与技术积累而又散失，缺乏系统整理，一方面是经验性的定性的力学概念始终带有思辨色彩(如“气”、“道”、“理”)，缺乏数学的定量引用和系统实验的基础，因此经典力学理论只能等待西方传入。

中国古代在声学上的贡献

在中国古代物理学中，声学的成就可以说是一枝独秀，有特别加以记述的必要。（1）乐器制作与乐律理论：

中国古代音乐是世界文明中的一个宝库。河南舞阳县贾湖村的骨笛，是公元前 5000 ~ 6000 年新石器时代的遗物，这是迄今发现的世界最早的乐器。西周时期，见于《诗经》记载的乐器就有 29 种，其中频率固定的打击乐器有鼓、磬、钟、铃、鞀（摇鼓）等，调频弹拨乐器有琴、瑟，管类乐器有箫、管、埙（陶埙）、篪、笙等。《汉书·律历志》已将当时的乐器品种按质料分为八种：“土曰埙，匏曰笙，皮曰鼓，竹曰管，石曰磬，金曰钟，木曰祝，丝曰瑟。”从众多出土的古乐器中，引人注目的是编磬（图 2 - 1 - 2）和编钟（图 2 - 1 - 3）。编磬是用特殊石头（如玉石）制成的具有若干固定音列的组合磬。1950 年在安阳武官村出土的殷代大理石磬，82 × 42 × 2.5 厘米，音色浑厚如铜；1970 年在湖北江陵出土的楚国编磬 25 只，其形状已颇为规则，音域达三个八度。编钟是由一系列铜制的钟挂在木架上的组合钟。1978 年在陕西扶风曾出土了西周的青铜编钟，1979 年在湖北隋县的战国曾侯乙墓出土了公元前 443 年的编钟，一套共 65 件，总重 2500 余斤，总音域跨五个八度，12 个半音齐全，音色优美，效果极佳，充分显示了我国古代音乐、冶金和乐器制造水平之高超。

由于重视“礼、乐、术、数”，我国古代研究乐音数学规律的律学相当发达，《二十四史》有许多律历志的记载。最晚到殷商时期已产生了宫、商、角、徵、羽五声，西周编钟已刻有十二律中的一些铭文。以黄钟为标准音高之首，逐次按半音降低，就形成了十二律。最早的乐律计算法见于《管子·地员篇》中的“三分损益法”，约产生于公元前 7 ~ 3 世纪间，即将主音律的弦（或管）长三等分，取其两份（全管长的 $\frac{2}{3}$ ，为损一），或增加一份（全管长的 $\frac{4}{3}$ ，为益一），依次确定十二律中其他各律的方法。这种以弦长为准的方法，与欧洲当时以频率为准的五度相生法是成倒数关系的。16 世纪末，朱载堉提出了十二平均律的理论和算法（参见“朱载堉”）。十二平均律是我国对音乐声学的重大贡献。

（2）声的传播与发声原理的探讨

据北魏郦道元《水经注》卷三十四《江水》记载：陈遵在造江陵金堤（公元 512 ~ 518）时，曾利用鼓声推算高地的高度。可能是利用鼓声的传播速度推算的。这一记载很有意义。

对于发声原理，东汉王充在《论衡·论死篇》中先说明人的语言是由于“气括口喉之中，动摇其舌，张合其口”而生的，然后推广到“箫笙之管，犹人之口喉也，手弄其孔，犹人之动舌也”。宋代张载（1020 ~ 1077）

及明代王夫之（1619~1692）进一步形成“形”（物体）与“气”相冲突而发声的观点：“声者，形气相轧而成”。可以是“两气”相碰，如“谷响雷声之类”，“两形”相碰，“桴鼓所击之类”，“形轧气，羽扇敲矢__之类，...气轧形，人声笙箫之类”（《张子正蒙注》）。明宋应星具体考察了声的发生的几种情况：“冲”（“飞矢”），“界”（“跃鞭”），“振”（“弹弦”），“辟”（“裂缯”，即撕丝织品），“合”（鼓掌），“击”（挥椎）。他认为发声第一必须有气：“气而后有声”，“气本浑沦之物，分寸之间，亦具生声之理，然而不能自生”；第二必须是“以形破气”，“气之一动”，“急冲急破，其声方起”，例如“击物”就是“气随所持之物而逼及于所击之物有声焉”。（《论气·气声》）

关于声音发生与传播更为深刻的见解是王充和宋应星指出的。王充在《论衡·变虚篇》中将鱼“动于水中，振旁侧之水”与人的“操行”（行动）引起“气应而变”加以对比。宋应星则明确提出“物之冲气也，如其激水然。气与水，同一易动之物。以石投水，水面迎石之位，一拳而止，而其文浪以次而开，至纵横寻丈而犹未歇。其荡气也亦犹是焉，特微渺而不得闻耳。”（《论气·气声七》）。他们明确指出：“气”被“冲”如同“水”被“激”，“荡气”与水的“文浪”相似，可从“一拳”依次“开”至“纵横寻（古8尺）丈”犹未止，只是“荡气”微小到听不见而已，这就是“气声”。对声波的发生与传播从物理上分析如此精辟，在我国古代物理学中是很突出的。

关于共鸣现象的趣闻，庄子调瑟时发现共振现象，沈括在弦共振时作纸人试验，喷水鱼洗的研究等，文献记载相当丰富。

（3）古代建筑中的声学效应

利用声学效应的建筑在我国已发现不少。古典籍中关于空穴传声类的记载与建筑有关的也有“地听”、“墙听”（《墨子·备穴篇》）等。用陶瓮口向内砌墙可以隔音，在琴室及戏台下埋大缸可增加混声回响效果。著名的北京天坛中的回音壁、三音石与圜丘都巧妙地利用了声的反射效应。还有河南郟县蛤蟆音塔，四川潼南县大佛寺的石琴等。近年来深入研究了山西永济县普救寺莺莺塔的蛙声。《西厢记》中“日午当庭塔影圆”，就是指此塔。该塔初建于隋唐，现存的塔重修于1564年明嘉靖年间，是一座方形空筒式十三层密檐式砖塔，高36.7米，建于窄堵坡的高处，周围空旷，整个塔身和塔檐由涂釉青砖建成，这些青砖的声反射系数达0.95~0.98，是声音的良反射体。塔身成空筒形，对声波起着谐振腔作用。由于十三层塔檐各层砌砖所成曲线的巧妙配合，对来自塔前距离约24米处的击石声产生良好的反射及会聚作用。因而“于地击石，有声如吠蛙”。同样，远处的声音通过十三层塔檐反射就会聚在檐前附近，使人耳接受到的声波能量大增。五里外的蒲州镇的演唱声，犹如塔内有戏台。

我国古代建筑是利用声学效应的科学宝库，还有待于进一步发掘。上述成就体现了声学与音乐、声学与哲学和声学与建筑、军事等的结合，这也是我国古代物理学发展的根本特点之一。

亚里士多德关于运动的理论

亚里士多德从日常最常见的简单事实出发，对当时关于运动的观点从哲学上加以系统化。首先他断言地球是宇宙的中心，认为天上地下的运动是有区别的。他在《天论》中说：“我把那些在没有其他干扰条件下总是向上运动的东西称为轻物体，总是向下的物体称作重物体。”他把运动分为自然运动与强迫运动。地上物体各依其四元素（土、水、气、火）构成的本质找寻其“天然处所”，“趋向于自己特有的空间”，重者向下，轻者向上，天上最完美的物质“以太”则永远围绕地球这一宇宙中心做匀速圆周运动。这些原始的猜想成了他解释一切运动现象的“科学”假设，这正是亚里士多德在物理学上的悲剧的起点。亚里士多德从简单的直觉经验和相信自然必须服从简单的比例法则的信念出发，建立了以下两条比例定律：

（1）落体定律：

“我们看到同一重量或者说同一物体运动的快慢有两个原因：运动所通过的介质不同（如通过水或土或空气），运动物体自身轻或重的程度不同，如果运动的其他条件相同的话。”在《天论》中，他说：“物体下落的时间与重量成反比，如一物重量是另一物的两倍，则在同一下落运动中，只用一半的时间”，“如果空气比水稀两倍，则同一运动物体在水中运动时要耗费两倍时间”写成公式为：

$$v(\text{速度}) \propto W(\text{重量}) / R(\text{阻力或介质密度})$$

这个公式引起了后人许多试验和争论。

（2）强迫运动定律

在《物理学》中，他说：“凡运动着的事物必然都有推动者在推动着它前进”。“假设 F 为推动者， v 为运动者， s 为被通过了的距离， t 为所经过的时间，于是在相等的时间里相等的力 F 将会使 $s/2$ 通过 $2t$ 的距离，而在 $t/2$ 的时间里使 $s/2$ 通过 t 的距离”，这就是比例定律。按照这一比例关系得出的结论是 $v \propto F$ 或 $F \propto v$ 。这个定律在16~17世纪以前被教会吹捧为神圣的不许怀疑的教条，以迎合上帝是最大推动者的需要。

在试图解释为甚么不存在真空时，亚里士多德的论证方式是奇特的：“我们看到有较大动势——重的向下、轻的向上——的物体（假设结构上的其他方面相同）通过同一距离的速度也较大，并且速度的比等于这些物体量的比。因此它们将以同样的速度比通过虚空。但这是不行的。因为，为甚么一物体要比另一物体运动得快些呢？在实的空间里情况必然如此，

因为力较大的物体分开介质的速度也较快，因为物体破开介质前进的速度若非取决于形状，就取决于自然运动物体或被抛扔物体所具有的动势。因此在没有介质的虚空中一切物体就会以同样的速度运动了，但这是不可能的。”以上论述的许多基本概念今天看来是含混的，如“动势”（或译“冲量”，impulse），“速度比”，“力较大的物体”“物体量”“破开介质前进的速度”等等，而且主要结论是前后矛盾的。（真空中一切物体的“速度”还是“速度比”相同？）

亚里士多德的运动理论在首次引用数学方法来考察具体物理定律方面起了先导作用：但由于其理论与方法的缺陷，被宗教势力奉为经典近两千年，又成为对物理学发展的严重障碍。他的直觉经验加粗略思辨的认识方法，对于缺乏科学训练的中学生来说却几乎是默然相通的。破除这种认识方法乃是科学方法训练的起点。

地心说与日心说

对于日月星辰周而复始的运行，古代有各种天真朴质的猜想与解释。公元前4世纪柏拉图提出一个重要问题：天上的星体是代表神圣的永恒的存在，它们沿着一种最完美的圆周运行，但少数星体如日、月、行星为甚么在天上徘徊，画出复杂的轨迹甚至逆行呢？天体应该按照与其高贵地位相适应的方式运动，不是圆，也会是圆的组合，只有找出这些匀速圆周运动是如何组合起来的，才能“挽救”这种与其身份不相称的“现象”。这可以说是古“地心说”的“理论基础”。这种理论经过亚里士多德和托勒密的综合，变成由九层同心球层组成的地心体系（月、水星、金星、太阳、火星、木星、土星、恒星天和原动力天），对每个行星又有小圆（“本轮”）围绕大圆（“均轮”）旋转，在与观测不符时又加上所谓“偏心轮”，“偏心等距点”等等。这些分解的圆周，在欧多克斯（Eudoxus，前409～前356）时是26个，亚里士多德把它增为48个，托勒密时达80个左右。

日心说的思想在古代已有人提出。华达哥拉斯学派成员菲洛劳斯（Philolaus，活动时期约公元前475年）猜想太阳、地、月、五大行星、银河等都围绕“中心火”旋转。亚历山大城的阿里斯塔克（Aristarchus，公元前3世纪）大胆提出：“行星与地球沿以太阳为中心的圆周绕太阳运动，而恒星所在的天球的中心与太阳中心相重合”。在阿里斯塔克的著作《日月的大小与距离》中，还利用月的上下弦位置及当时地球对日、月的张角 87° ，估算出月地距与日地距的比例为 $1/19$ ，利用日、月食对月影、日影、地影之比估计太阳与地球直径之比大于 $19/3$ ，小于 $43/6$ 等等。这些数据虽不准确，但却肯定了太阳比地球大得多，是小物绕大物转而不是相反，只是当时支持他的人很少，有人控告他“亵渎神明”，“竟敢把上帝的圣城（地球）推出中心”。

地心说在教会支持下，直到16世纪才受到哥白尼《天体运行论》的沉重打击（参见“哥白尼”）

哥白尼曾这样描述过他的思考过程：“我对传统数学在研究各个天体运动中的可疑之处思索了很长时间以后，对于哲学家们不能对……宇宙机构提出正确的理论而感到气愤，……因此我不辞辛苦地重读了我所能得到的哲学著作，看看在各天球运动方面有没有跟数学学派不同的假说”。“最初我在西塞罗（Cicero）的著作中发现希克达斯（Hicetas）发表过地球运动的见解，后来又在普路塔克（Plutarch）的著作中发现……”[下面他引用了前述菲洛劳斯的中心火后，不敢直接提到被控告的阿里斯塔克，接着又指出赫拉克利德（Heracleides，前388～前315）和埃克方杜斯（Ecphantus）提过的地球自转运动]。这些历史根据增添了哥白尼提出日

心理理论的勇气。哥白尼经过长期观测和大量计算，认为地心说不但过于烦杂，而且“好像一个艺术家为了画像，从不同的模特儿身上选取手、脚、头和身体其他部分，每一部分都画得很好，但不属于同一个人的身体，大小不能互相配合，结果不是人而是一个怪物了”。而日心说可以一举解决地心说所不能解决的许多难题，如：

1. 分清真运动与视运动，包括相对运动。

2. 各行星在自身的运动之外从地球上看来都要再加上地球自转、公转和地轴回转三种运动的影响。以日为心，避免了天象解释繁杂，数学上大为简化。

3. 更合理地解释行星的逆行现象。如图 2-1-4 所示，人们在地球轨道上 A、B、...

图 2-1-4 哥白尼体系对行星视运动的解释 S-太阳； 1-地球轨道 2-某行星轨道 3-行星运动轨迹

N 处，看到某行星位于相应的 A、B...N 处，就形成星图上的逆行轨迹 A、B、...N。

他驳斥了“地心说”的责难，如“地球上的一切由于旋转而崩溃”，“地球上的云和其他东西会不会被抛到地球后面去”等等。但他当时还不能解释以日为心时地球运动到不同位置处何以观测不到恒星的周年视差，他只能认为是由于仪器精密度不够和恒星太远。直到 1838 年德国天文学家贝塞尔 (Bessel, 1784 ~ 1846) 才首次测得恒星视差。

哥白尼还没有彻底摆脱行星作圆周运动的传统观念，因而他的日心系还需要 34 个辅助圆，经过第谷和开普勒的观测研究，行星运动问题才真正得到解决。在对宇宙观的影响方面，则经过了布鲁诺与伽利略等的斗争，特别是牛顿万有引力定律的确立，日心说才发展为科学的天文学和科学的天体力学。

伽利略的运动理论和科学方法

伽利略的运动理论内容丰富，大体说来可分为运动学（引入匀速运动和匀加速运动定义，相对性原理，运动叠加原理）和动力学（落体定律，单摆等时性，惯性等）两大方面。

（1）伽利略的运动理论

速度与加速度的定义

伽利略在研究物体运动的性质时，首先从能否进行定量测量的角度区分了不可测的量（色、香、味等）和可测的量（如长短、体积、快慢、位移、速率等），提倡用数学语言（图形、符号、数字）来“读自然界这本大书”。其次，他在着重观察和描述物体怎样运动时，进一步按运动的可测程度定义“匀速运动”和“天然加速运动”，并力求追究物体下落的“加速度按什么比例进行”，使这种描述贴近客观真实，从而真正创立了运动学。

匀速运动的科学定义是从伽利略开始的。他在《关于两门新科学的对话与数学证明对话集》一书（简称《两门新科学的对话》，两门新科学指材料力学和动力学）中说：“我指的稳定或匀速运动，是运动质点在任意相等的时间内通过的距离彼此相等”。这里的“任意”已成为向瞬时速度的过渡。在同书中他明确宣布：“在每一甚至很小的时间间隔中都包含有大量数目的瞬间”。

对于速度变化的运动，他说：“我们决定用在自然界中实际发生的一种加速度来考虑重物的自由下落现象”，并称之为“天然加速运动”。这种运动他定义为：

“若一物体从静止状态出发并在相等的时间间隔内获得相等的速度增量，则称该物体的运动为匀加速运动。”

这样，伽利略所定义的匀速运动、瞬时概念、天然加速运动、匀加速运动，即速度和加速度，就成了全部力学科学奠基性的物理量，由此生长出运动学和动力学。

乍看起来，匀加速运动的定义是天然而又最简单的。拿伽利略自己的话说，是要“找出最符合自然现象的定义”，“自然界教我们在研究各种不同过程中用最一般最简单和最平常的方法”。事实上，在找寻加速度定义时他走过弯路。他曾考虑过 v 是否可随距离 s 或 $1/s$ 变化，即令

$= \alpha = \frac{\Delta v}{\Delta s}$ 。但随即发现，这样会导出谬误，因此才选定 $= v/t$ 。

相对性原理

伽利略在《关于托勒密和哥白尼两大世界体系对话》一书（简称《两

大体系对话》)中,为了驳斥人们对哥白尼地动说的非难,不仅详细地描述与讨论了船上桅杆顶端的石子仍旧落在桅杆底端并不偏西的实验,还讨论了运动中的地球上众多的物理现象:“为甚么我们感觉不到地球的运动”?“为甚么飞鸟和地上物体不会往后抛散?”“向东向西发射的炮弹为甚么射程不变”等等。在此基础上他敏锐地提出了运动与静止的相对性。他说:“运动只是相对于没有这种运动的物体才存在”;“唯一可以观察到的就是我们所没有参与的运动”,从而打破了长期以来人们存在的“绝对静止”概念,为运动学奠定了坚固的理论基石。为了描述与严格论证相对性原理,在《两大体系对话》中有一段关于大船舱内蝴蝶、水滴、小虫、鱼、苍蝇照常运动的精彩叙述,值得注意的是他紧接着说的一段话:“所有这些一致的现象,其原因在于船的运动是船上一切事物所共有的,也是空气所共有的。这正是为甚么我说,你应该在甲板下面的缘故;因为如果这实验是在露天进行,就不会跟上船的运动,那样上述某些现象就会发现或多或少的显著差别。毫无疑问,烟会同空气本身一样远远落在后面。至于苍蝇、蝴蝶,如果它们脱离船的运动有一段可观的距离,由于空气的阻力,就不能跟上船的运动”。伽利略相对性原理否定了绝对空间这一先验观念,因此后来爱因斯坦在彻底改变经典力学的各种概念时,唯独将它保留并且上升为狭义相对论的两条基本原理之一。因此,伽利略相对性原理对物理学的发展起了重大作用。

惯性概念的提出

伽利略早就观察到:“风已经停了,甚至风帆已经卷起,然而船仍继续地航行许多哩”。在《两门新科学的对话》第3日以及《两大世界体系对话》第2日,他分别从钢球在斜面上速度的变化以及在平面上的运动论证得出:“一个运动的物体假如有了某种速度以后,只要没有增加或减小速度的外部原因,便会始终保持这种速度——这个条件只有在水平的平面上才有可能,因为假如在沿斜面运动的情况里,朝下运动则已经有了加速的起因,而朝上运动则已经有了减速的起因,由此可知,只有水平平面上的运动才是不变的;”“假如有一个像镜子一样光滑的平面,是用钢那样的坚硬材料做成的……放在一个既不向上也不向下的平面上……如果这样一个平面是无限的,那末在这个平面上的运动同样是无限的”。这样就第一次打破了亚里士多德“运动要靠力维持”的直觉经验,把力和物体运动的变化联系起来,又把匀速运动和物体的不受力状态联系起来,从而为后来惯性定律的建立及近代力学的发展开辟了道路。但是伽利略错误地认为圆运动也是惯性运动。在《两门新科学的对话》中,提出:“沿地平线的运动,既不向上也不向下,将是环绕一个中心的圆周运动”,“……只要一切外界的阻碍都被排除,这样(绕地心沿圆周航行)的运动也不会消失”。这种“圆惯性”思想直到笛卡儿才予以纠正。

运动叠加原理

在 1606 年的《几何新仪器》上绘出的炮弹路线（图 2-1-5），代表了当时人们的流行观点。它由 PG 与 GV 两部分组成：PG 代表强迫运动，弧 GV 是垂直下落 GT（“自然运动”）与“强迫运动”的混合运动。

为了弄清真相，伽利略不只限于简单的实验，而且访问了炮手，根据炮手们提供的仰

角 45° 时炮弹射程最远等事实，他决心“要理解为甚么发生这种情况”。正是为了研究炮弹射程问题，他才开始研究重物下落、斜面、惯性……等等问题的。在这些问题取得成果后，他进而剖析抛体这一复杂运动。他从阿基米德把螺旋线运动看做直线运动和圆运动的叠加这一历史经验受到启发，把抛体运动分为两部分：“水平运动一直是匀速的，竖直运动照时间平方的比例不断向下加速，而且这样的运动和速度总是不变地、无干扰地、互不妨碍地结合着。”这里的互不干扰的结合，就是运动独立或叠加原理。它广泛应用于后来的物理学发展中。

上述有关运动的定量描述、相对性原理、惯性概念的提出和运动叠加原理，是伽利略运动理论的核心，为力学科学奠定了理论基石，而他深入研究的自由落体、斜面、斜抛和摆的运动等，则提供了解决具体力学实际问题的首批范例。特别是他的实验、逻辑推理和数学表述相结合的科学方法，按照爱因斯坦的说法，“是人类思想史上最伟大的成就之一，标志着物理学的开端”。

（2）伽利略的科学方法

伽利略在《两大体系对话》中提出：“我们的方法是根据推理逐步从一个结论进展到另一个结论，而上帝的认识方法是靠上帝的直觉”。“我先用数字来演算，然后用手和眼来检验，如果得出相同的答案，这个答案一般就是正确的。”在教育青少年如何在观察与实验的基础上逐步建立科学思维方法方面，可以从伽利略的历史活动中汲取巨大的精神财富。

伽利略从大量实际问题中选择一个最基本、最典型而又为前人弄错了的问题（重物下落）入手来研究运动问题。从早年（1591）写的《论运动》中和后来的《两大体系对话》（1632）以及《两门新科学的对话》（1638）中，对这一问题的讨论都占了大量篇幅。这是了解他的科学方法的典型例证。

伽利略的科学方法首先是细心观测、热爱实验，强调实验和逻辑是基础。伽利略是否在比萨斜塔上作过证明成分相同、重量不同、在同样介质中同时下落时运动速度相同的落体实验，这是科学史家考证中的问题。但我们应注意以下事实：伽利略各种著作中描述重物下落的实验很多，如 1591 年在《论运动》中就有 6 次之多讲到“高塔”“塔楼”实验。这种实

验的难度不在地点而在于精确性。《两大体系对话》中更具体讲到：以一只铁球从一百码高度落到地面上……经反复实验后算出来是 5 秒”，并用此批驳逍遥派“从月球落到地球中心的炮弹需要 6 天”的估计（据伽利略计算只要 4 小时）。伽利略一生工作的显著特点就是重视和热爱观察和实验，除重物下落外，摆、浮力、天平、重心、温度计、各种水钟、望远镜、抛射体、光速等等都是他的研究对象或工具，他拥有自己的家庭实验作坊。下面一段是他在《两门新科学的对话》中描述的自己做过的一次观察：

“我在童年时就看到了有人能在适当时机使用多次冲量来打一口大钟，以致后来用 4 个人甚至 6 个人抓住绳索试图停止它的时候，他们都从地上被提升起来了，因为他们所有的人合在一起不能与一个适时推拉的人所传给它的动量相抗衡”。在伽利略的两本《对话》中几乎每页都谈到一些实验，有的是平凡而常见的经验性观察，有的则十分巧妙而典型。他不仅是一般地热心和善于动手动脑，而且强调思维逻辑与实验的基础作用。他认为“从这样普通的甚至是微不足道的现象中，找出了种种不仅鲜明新颖、而且往往是我们意想不到的事实，……”（他以两个大小不同的石头捆在一起下落将会出现什么情况的推理，粉碎了重快轻慢的传统观念就是一例）。他还强调“把……原理更好地建立在逻辑和实验的基础上”，“只要一次实验或确证就足以推翻所有可能的理由”。以上事实都说明，伽利略确实不愧是实验科学的开山大师。

理想化方法是伽利略把实验基础、逻辑推理和数学论证三者巧妙结合起来的有效方式。

伽利略依靠理想化的方法开辟了实验基础上进行逻辑推演与数学表述的成功道路。理想化方法大体可分为理想模型、理想实验和数学简示三个环节。

理想模型：伽利略在开始研究落体运动时，曾同时考虑了下落物体的成分、介质密度等许多因素，后来才忽略掉一些次要因素（特别是空气的阻力），形成了“轻重不同的物体”（即今“质点”）这一模型。“光滑斜面”的模型，他是这样规定的：“要求其中没有偶然的或外来的阻力，要求这些斜面坚硬光滑并要求运动体完全是圆的，使斜面 and 运动体都不粗糙”。“所有这些障碍一经排除”，就可以用“理智”来推证和判断。在上述模型的基础上，形成了“天然加速运动”、“惯性”等概念。

理想实验：伽利略创造了这种以实验为内容、以深刻的逻辑推理为精髓的形象化、理想化方法，有极大的说服力。这里举《两大体系对话》中的一个精彩地讨论穿过地心的落体问题的例子。

“萨：如果把地球打个洞，穿过地球的中心，再把一颗炮弹从洞里扔下去，它就会靠它自身的天然和内在原因到达地球的中心，而且所有这些运动都是自动地作出而且是依靠一个内在原因来的。这样说对不对？辛：

我认为这样说肯定是对的。

萨：但是到达中心之后，你相信炮弹会越过中心，还是在中心突然停止不动呢？辛：我想它还会继续走很长的一段路。萨：那末这种越过中心的运动是不是向上的运动呢，而且根据你刚才讲过的话，是不是一种异常的和强迫的运动呢？但是除掉那个使炮弹降落到地球中心的原因，而且是你刚才称做的内在和天然的原因之外，这种向上运动又依靠什么呢？我看你能不能找到一个外在的抛者重又追上炮弹把它朝上面扔出去。”

这种不可能做的巧妙实验把亚里士多德的天然运动（向下）和强迫运动（向上）的动力学解释彻底粉碎了，并且为建立惯性概念作了辅证。

数学简示：伽利略在观察、实验及模型、推理基础上建立概念与假设，然后在简化条件下进行数学推算，并在应用时进一步考虑附加条件。例如，伽利略在建立速度、加速度等概念与物理量的基础上，进而得出两个定理。定理 给出了从静止起做匀加速运动的物体，在任何空间通过时的平均速

率，写成公式就是 $\bar{v} = \frac{v_0 + v_t}{2}$ ；定理 给出了物体从静止点降落，做匀

加速运动，其所通过的空间距离，与通过各个距离所需时间的关系，写成公式就是 $s_1 \quad s_2 \quad s_3 = t_1^2 \quad t_2^2 \quad t_3^2$ 。这些公式不仅给验证落体定律提供了方便，而且反映了落体、斜面与单摆等在重力作用下的常见运动现象的共同规律——匀加速运动公式。在将此结论用于从斜面上滚下的球时，他注意到“当圆球冲击平面时，它的动量有些丧失”，“当阻力一经撤出”，球又会升到斜面原来的高度。这说明从抽象理论得出的结论，在具体应用时，有时要“避免媒质的阻力”，有时要考虑“仪器及其所涉及的距离，与距地球中心的巨大距离相比实在很小”等等，附加上各种具体补充条件。

实验验证：

对理论结果进行实验验证前，伽利略还注意有无实验验证的条件。他在《两大体系对话》中谈到验证往东和往西射击会不会因为地球转动而影响命中率时写下了以下一段对话：

“辛：做一个实验就可以弄清楚了。

萨：但是你认为有这样的神炮手，能瞄准诸如五百码距离的目标而百发百中吗？……必须看到，由于地球静止或运动所造成的这种差别是很小的，就不能不被经常发生的其他因素所造成的较大误差掩盖掉。……对那些实验的可靠性，我们必须步步留心……”

不掌握熟练而高超的实验技术的人，不可能提出对实验误差如此精辟的分析。伽利略说：“凡是对自然现象作数学证明的科学中……的原理，一旦经由适当选用的实验所证实，就成为整个体系的基础”。他在描述斜面实验时，详细谈到设备、尺寸、材料、程序、测量结果，并说明测时间

时要把这实验多做几次，时间误差控制在两次结果“相差不到一次脉搏的1/10的地步”，一再说明这一实验重复了整整一百次，“无论实验重复多少次，结果都没有显著的差异”；这当然要归功于“槽做得尽可能的直和光滑”，“里面垫上尽可能光滑的羊皮纸”以及“硬的，光滑的、极圆的铜球”。在时间测量方法上利用了当时的水钟。他叙述的实验，后人都能随时重复。他就是通过斜面实验得出匀加速运动的公式

$s_1 \quad s_2 \quad s_3 = t_1^2 \quad t_2^2 \quad t_3^2$ 的，并用它验证了落体运动；他还据此制作了用于指导实际弹道计算的详细表格（抛射角由 1° 到 90° ），得出“同 45° 相差（大于或小于）同一数量的仰角时射程相等”的结论。这使我们确信，只有经实验证实的理论才可能有预言事实的能力。

伽利略首创的这一套科学方法，它的威力已经在后来力学乃至物理学和自然科学的伟大成就中得到证明。

万有引力定律的建立

关于牛顿因见“苹果落地”而悟出万有引力定律的故事，来源于法国作家伏尔泰的回忆以及牛顿好友斯多克雷、密尔顿的叙述。大体上是：据说 1726 年 4 月的一天，牛顿在家乡花园的苹果树下喝茶时曾告诉过人们：他过去在同样情况下，由一个苹果落地引起了思考：苹果落地、行星绕日和月绕地球会不会是由同一宇宙规律支配的？牛顿在 1714 年间所写的备忘录中写出了他最初的思考过程：“这一年（1666）我开始想到重力是伸向月球的轨道的，同时在发现了如何来估计一个在天球（层）内运动着的天体对天球（层）表面的压力以后，我还从开普勒关于行星的周期是和行星轨道的中心距离的 $3/2$ 次方成比例的定律，推出了使行星保持在它们的轨道上的力必定要和它们与它们绕之而运行的中心之间的距离的平方成反比例；而后把使月球保持在它轨道上所需要的力和地球表面上的重力作了比较，并发现它们近似相等。所有这些发现都是在 1665 年和 1666 的鼠疫年代里作出来的……最后在 1676 和 1677 年间的冬季，我发现了一个命题 那就是在离心力和距离的平方成反比的情况下，一个行星必然要……绕力心作椭圆形运动，同时那画向这个中心的半径所掠过的面积，其大小和所用的时间成正比。在 1683 年和 1684 年之间的冬季，这个命题及其论证也写进了皇家学会的记事册。”1687 年，牛顿在《自然哲学的数学原理》一书中提出，抛物线向椭圆过渡（图 2-1-6）属于重力影响下的同类型运动，完善了关于万有引力与抛体向心运动的数学证明。

人们从注意天、地间的吸引现象到研究行星运动学规律，从引力思想到平方反比关

图 2-1-6 牛顿《原理》第三篇“宇宙体系”中关于抛体向心运动的曲线族（《十六十七世纪科学、技术和哲学史》，166 页）

系，从圆轨道到二次曲线的数学证明，从离心力到向心力到相互吸引，从相互吸引力与其质量乘积关系直到推广到一切物体的“万有”引力，从反作用定律到万有引力定律的建立及其表述等等，这是一个相当长期的历史过程，牛顿从 1665 到 1687 年发表《自然哲学的数学原理》经历了二十多年的艰苦探索和总结吸收他人成果的过程。这里我们将主要历史事实列表如后（见下页），供读者参阅，然后指出建立这一定律的困难所在。牛顿在 1665~1666 年开始形成万有引力思想，为甚么二十多年后才发表？这不但是由于他对科学问题的严肃态度，而且也因为当时还有一些较大的困难问题需要解决。困难主要来自三个方面：

(1) 理论上的困难：他不只是把月亮与苹果、重力与引力、天上与地下联系起来，处理引力问题，而是要从头系统地弄清力、惯性、质量、力与运动的关系、向心力等问题，找出的公式与定律不但要符合引力情况，还要符合已知的碰撞、落体、打击、抛射等规律。这里的困难从物理上来说主要是“向心力与离心力”的关系问题和能否把平方反比关系推广到一切物体之间的相互作用。注意在《原理》一书中，牛顿第三定律是在形成万有引力定律的最后关键时刻（1684~1685）才在原来五个运动定律（即一、二定律，相对性原理、物体系重心不变，介质阻力定律）之外加上的第六定律，这样就解决了“离心力”与“向心力”这一混乱的难题，在把向心力和物体的质量联系起来后，才能把向心力推广为普遍的万有引力定律，并把上述各规律、概念形成一个比较完整的物理概念体系，然后作为特例来解决引力问题。牛顿在《原理》第一版序中历数他在本书中研究的各种

表 1 . 万有引力定律的探索过程

猜测	亚里士多德	前 4 世纪	引力来源于物体的天然位置。
	托勒密	2 世纪	天体镶嵌在天球壳层上。
	哥白尼	1543	引力使物体聚为球体，天体结构是数学和谐。
定性假说	开普勒	1619	太阳与行星间有相互感应的磁力（当时认为是切线力），太阳发出“引力流”
	伽利略	1632	下落与重量无关，行星绕日做圆惯性运动。
	笛卡儿	1644	以太漩涡带动行星运动。
	惠更斯	1673	发现离心力公式，但用一碗水试验支持笛卡儿漩涡说。
定量研究	Bliardao (法)	1645	开普勒力 $\propto \frac{1}{r^2}$ 。
	英皇家学会	1661	成立专门委员会研究重力本质。
	胡克	1661	在地面、高山、矿井作实验找寻引力 F 与距离 r 关系，在 Winsterminster 教堂顶用单摆及弹簧秤做实验，“结果甚么也没有落实”。
		1664	与雷恩争论当年彗星近日时轨道是弯曲的还是直线，以判别有无引力。
	牛顿	1664 ~ 1666	胡克以太阳有引力及彗星轨道弯曲而取胜。在笔记本中已提出计算离心力方法。
	Borelli (意)	1666	惯性是直线运动，太阳对行星施重力 F (r)，F 与离心力平衡形成椭圆运动。
	牛顿	1666	开始研究重力与行星间力的统一问题，以地球圆弧 1 ° 为 60 英里计算月地引力。
	胡克	1666	在皇家学会作有关重力的实验报告（1661 年起在山顶与矿井下，作摆周期的测量）。
		1674	在《试证地球周年运动》中提出假设：“一切天体都有倾向其中心的吸引力并吸引其作用范围内其他天体”；“天体未受其他倾斜的作用力前保持直线运动不变”；“离吸引中心越近，吸引力越大”。
		1679	11 月 24 日给牛顿信中提出“行星的天体运动由一个依切线的直线运动与一个向着中心物体的吸引运动所合成”，牛顿 11 月 28 日回信承认这一分析他“过去没听过”。11 月 29 日胡克指出牛顿“地球自转使物体下落直线变为螺旋线”是不对的，“宁可是一种椭圆”。促使牛顿进一步研究。
	胡克、雷恩、哈雷	1679	都由惠更斯 1673 年的圆周运动离心力公式 $F \propto \frac{r}{T^2}$ 及开普勒定律 $T^2 \propto r^3$ 得出 $F \propto \frac{1}{r^2}$ 。已知力，求不出椭圆运动。
	胡克	1680	1 月 6 日寄信给牛顿：“困难在于太阳和行星都是体积很大的物体，在理论上能否把它们当质点处理。”
牛顿	1682	获悉法国 J.Picart 测出地球 1 经度长 69.1 英里，重新计算，确定计算值与观测值很好符合。	

定 量 研 究	胡克、哈雷、 雷恩	1684	从 1 月起讨论了两个月，胡克说他已通晓行星轨道问题但拿不出结果，8 月，哈雷向牛顿请教，牛顿答复是椭圆并早计算过。
	牛顿	1684	11 月牛顿公布《论运动》手稿，论证了引力平方反比定律及其计算，牛顿又写《论物体在均匀介质中的运动》等稿，这是以后《原理》的主要内容，包括运动五个定律及后来特别追加的作用及反作用定律。
		1685	用积分法解决了把球心作为整个球的质心问题，解决了万有引力定律建立中最后一个难题并推广到一切物体（1686 年 6 月 20 日给哈雷信中说 1685 年以前还怀疑这一结论。）
		1687	在哈雷资助下《自然哲学的数学原理》出版。

问题后说：“我把本书的出版推迟，直到我对这些事物都作了研究，并能把它们整个一起表达出来的时候”。

从哲学上说，当时对引力的本质问题还纠缠不休。牛顿说：“至今我还不能由现象发现那些重力的原因，并且我不妄作假说。”“对我们来说，重力实际上存在，并且按照我们已经阐述的定律作用，而且对我们说明天体和我们的海洋极其有用就足够了。”（2）数学上的困难：

从圆轨道容易求出平方反比力，对椭圆轨道就要难得多。若已知平方反比力，求轨道要用积分计算，只有牛顿在发明微积分后才能经过计算得出圆锥曲线（包括抛物线、行星椭圆轨道和彗星轨道）。是否可在任何情况下都把引力中心看作球心？如月地距离已不大，在地面上乃至地壳内部又如何？这是最困难的计算问题；直到 1685 年才解决。1687 年牛顿在《原理》第一编第十章用积分方法作出严格证明：球壳层对其内部点不起作用，对外部各点的作用和质量集中在球心一样。

（3）实验验证上的困难。牛顿 1666 年就计算过月地引力，但直到 1682 年利用当时新测出的地球 1° 经度数值才得到满意结果。他提出“万有”引力，即包括天上物体与地面物体在内，并推广到“一切物体”，含有惊人的预言成份，即使对于月亮运动，实际上也含有七种不规则因素（月地距离、倾角、远地点、黄白道交点等），而且是包含太阳在内的三体问题。牛顿因此对开普勒第三定律作出修正：

$$\frac{T_1^2}{T_2^2} = \frac{M + m_1}{M + m_2} \cdot \frac{R_1^3}{R_2^3}$$

其中 T_1, T_2, m_1, m_2 分别表示两个行星的周期与质量， M 为太阳质量。牛顿还由万有引力定律推论出地球的形状呈扁球形，对月球则按照定律计算后又加上摄动的改正。这些后来陆续得到实验和观测结果的证实。

1681 和 1682 年有彗星两度出现，牛顿原以为是彗星沿直线相反运动，Elamstead 观察后提醒牛顿重算，确认为抛物线。1695 年哈雷提出轨道为扁长椭圆，与牛顿重算后预言：“1682 年彗星 75 年绕地一周即 1758 或 1759 年再来”相符。经克雷洛作摄动改正后预言应推迟到 1759 年 4 月，后来彗星果然大体如期到来（只差 1 月），被称为哈雷彗星。此外，1781 年英人赫歇耳发现了天王星，1846 年英国青年大学生 J.C. 亚当斯和法天文台勒威耶各自独立计算出未知行星，由德天文台 J.G. 伽勒于 1846 年 9 月 18 日证实海王星的存在。1797 ~ 1798 年，卡文迪什测出万有引力常量 G ，从此这一定律就被完全证实。

牛顿力学体系的建立及其对物理学的影响

牛顿力学通常指以牛顿三大定律为核心的矢量力学，有时也泛指描述低速宏观物体机械运动的经典力学体系。

从亚里士多德和阿基米德的物理学发展到牛顿力学体系经历了约两千年，经历了以哥白尼、开普勒和伽利略为代表的科学革命。牛顿“站在巨人们的肩膀上”，进行了科学史上第一次伟大的综合，即天与地、实验归纳与理论演绎、时空观与方法论、数学与哲学、物理思维与技术应用等多方面的综合，形成了一个以实验为基础、以数学为表达形式的力学科学体系。他解决的不只是某些概念和定律，而且找出了大至星宇小至微粒分子和日常物体机械运动的共同数学规律，使力学成为可与欧氏几何相比美的严格的科学理论体系，成为物理学乃至整个自然科学和工程技术大发展的基础。

(1) 牛顿力学体系形成的社会条件爱因斯坦曾指出：“……命运使他（牛顿）处在人类理智的历史转折点上……”。所谓“命运”，就是社会历史条件，即把牛顿力学作为时代的社会历史成果加以分析。牛顿出生的1643年正逢英国资产阶级通过国会向国王反复夺取政权的战争与动乱年代（1640~1688）。新兴的英国资产阶级政权（以君主立宪制为特征）对科学技术的发展倍加重视，科学团体的出现特别是1660年伦敦皇家学会的诞生创造了科学研究的论坛，推动了科学活动有组织地发展。天文、航海、火炮等的发展要求比较精确地确定在大海上的时空位置，因而钟表、天文测量、火器精度、海流图等等热门问题引起了英、法、荷等国的激烈竞争。例如测量海船所在的纬度与经度，当时就需要一个博学的天文学家与熟练海员花上几十年功夫，16世纪时经度的测量误差大约500英里相当于在赤道上的误差约 8° 。为此，1672和1675年分别创立了巴黎皇家观象台和英国格林威治天文台。英国海军部曾悬赏两万英镑征求天文時計设计，如何通过准确的星表来预测月球位置以月球用作天文时钟，或者通过校正随身出海的钟表来换算。总之这已成为当时涉及天体运动学、地上物体动力学，力图准确确定时空位置的头号难题。由此可见，天上与地上力学规律的统一不能仅仅孤立地归之为苹果引起牛顿头脑的灵感。

(2) 牛顿的继承、综合与发展

牛顿的继承、综合与发展是全面的。他在1664年的一本《一些哲学问题》的笔记本中写道：“柏拉图是我的朋友，亚里士多德是我的朋友，但我最好的朋友是真理”。在数学与物理的结合上，他超越了伽利略所用的初等数学而发展为能够精确描述运动变化过程的微积分（《流数术》）。在物质观上，他继承了德谟克里特的原子论。在方法论上他把实验放在首

位，他在给奥尔登堡的信中说：“探求事物属性的准确方法是从实验中把它们推导出来”。“进行哲学研究最好和最可靠的方法，看来第一是，勤恳地去探索事物的属性、并用实验来证明这些属性，然后进而建立一些假说，用以解释这些事物本身。”这样，他就把培根的实验归纳法和笛卡儿的理性演绎法统一起来，开辟了一条物理学研究方法的康庄大道。《自然哲学的数学原理》简称《原理》一书集中反映了牛顿总结建立的力学体系，包括几个基本概念的定义，六条推论（即定理或法则），三条运动定律，万有引力定律及其几何形式和在有阻力介质（气、液体）中的运用，若干天象计算实例，最后讨论了“哲学中的推理方法”。这里值得特别注意的是牛顿对几个基本概念明确规定和三条运动定律的建立。《原理》的“总论”部分不仅对人们长期混淆的几个基本概念（主要是惯性、质量、动量和力）给出了定义，更重要的是把它们都定量地表述为可以测量与计算的物理量。另外又提出了绝对空间与绝对时间的概念。从而把物理学的若干基石从亚里士多德以来的经院哲学或神学的桎梏中完全夺取过来，成为建立新大厦的基础。

牛顿不是简单地把前人的研究成果移植为自己的定律。他把惯性定律提高到第一公理的地位，并在定律叙述和定义惯性时作了几点重要的补充：把“物体保持其原来的静止状态或者在一直线上等速运动的状态”作为两种等价状态。他在《原理》中解释说，因为“运动与静止其实只有相对的区别。那种通常被看作静止的物体，实际上并不总是真正静止的”。这就彻底改变了人们只把静止看作自然状态唯一形式的直觉观念。他认为“一个物体只有当别的力加于其上而迫使它改变其原来运动状态时，才显示出这种力”。这就明确地把运动状态和运动状态的改变区分开来并把后者与力联系起来。既然物体作惯性运动时并无其他外界影响，牛顿就把惯性这种性质认为是“物体所固有的”，而且与物体的其他性质（如热、化学成分）无关，只与物体所含“物质的量”成正比。“所谓惯性...，是每个物体按其一定的量而存在于其中的一种抵抗能力”，这就把惯性的量度与物体的“量”和“抵抗能力”联系起来，即把惯性质量作为惯性的定量量度。牛顿在推论5.实际上已提出了“惯性参考系”的思想：“一个给定空间，不问是否静止或者沿一直线等速运动，只要不作任何转动，那末其中所含的各个物体彼此之间的运动，总保持不变”，“不论船静止还是沿一直线等速前进，一切运动都按同样方式进行”。没有这几条重要的补充，形成明确的第一定律及整个牛顿力学体系是不可能的。惯性观念的改变，始于伽利略而完成于牛顿，是古代与中世纪自然哲学过渡到经典物理学最重要的分水岭，也是中学生跨入物理学大门区分直觉经验与科学概念的第一次分野，值得特别注意。

质量概念是牛顿首先引入的。以前，伽利略、笛卡儿、莱布尼兹、惠

更斯等都把质量、重量、物质、物体等混同使用，表示为“物体（或重量、质量）大小”。牛顿在《原理》中用“物体的密度与体积来量度”“物质的量”，他还把这一物质的量概念与第二定律和万有引力定律中的质量看作相同的量，牛顿在这里把质量与物重（物体所受的重力）完全区分开，并且反复做了许多精确的实验来证明质量与物重成正比。在《原理》第二编第七章中，曾描述了 14 种实验记录，其中包括用实验证明惠更斯摆锤公

式 $T = 2\pi\sqrt{\frac{m}{W}}\sqrt{i}$ （即 $T \propto \sqrt{m}$ ， $T \propto 1/\sqrt{W}$ ），当 $W = mg$ 成立时，即为

$T = 2\pi\sqrt{\frac{i}{g}}$ 。对同形状同阻力同地点同摆长但不同物质的摆（内装各种液

体、谷粒），证明所有摆的周期在实验误差范围内都相等，由此得出质量与物重成正比，误差小于 0.1%。他的实验做得如此认真，以致在《原理》中记载：一个摆锤实验的记录丢失后，他还能回忆起其中的主要数据。图 2-1-7 是他自己设计的摆、向心力实验的一些草图（约绘于 1685 年）。

《原理》的突出功绩是大大廓清了力的科学概念。从亚里士多德起，“动力”“力”“功效”“能力”“强度”（dynamics, force, power, ability, strength）等使用中一直含混不清，包括所谓“冲力”，直觉认为抛射体离开人手后还受到“力”的影响。牛顿在《原理》“定义 4”中提

出：外加力“是一种改变物体运动状态的力，”然后解释说：“这种力只存在于作用的过程中，当作用过去以后，它就不再留在物体之中。”这种作用“可以来自碰撞、压力、向心力等”外来物体。物体相互作用时作用与反作用大小相等方向相反。马赫评论说：这一原理的确立，“可能是牛顿最重要的贡献”。在相互作用的研究中，牛顿详细叙述了如何在已确定的“碰撞和弹回的规律”基础上，考虑空气阻力和物体弹性力（弹性系数），然后得到了“运动量永不会改变”的结论（这里的运动量已经包含了方向），这表明“第三定律已为一个与实验完全相符的理论所证明了。”这就更加明确了力是物体间相互作用这一普遍性质。牛顿大大扩展了力的范围。在《原理》第一版序言中他把古人（包括阿基米德到伽利略）与工艺有关的五种力（人手之力，重力，浮力，弹性力，流体阻力）扩大为“这些以外一切与吸引或排斥力有关”的“自然力”。推论 1, 2 中的平行四边形法则给出了力的矢量性与力的计算方法，使力学计算简便易行。

他给力的概念赋予了格外重要的意义，他说：“哲学的全部任务看来就在于从各种运动现象去研究各种自然之力，而后再用这些力去论证其他的现象”。马赫对此曾评论说：“这个新观念是令人惊奇的，因为它抓住了一

直是完全远不可及的对象，同时又是令人信服的，因为它所包含的是最为熟悉的东西……行星系统的千年之谜解决了，其他过程也可以了解了。”这是对牛顿力学体系的恰当评价。牛顿在上述若干基本概念和推论的基础上还引入六条推论，用今天的观点可分别称为：平行四边形法则，力的合成与分解，动量守恒，质心运动定理，相对性原理，力的等效原理。演算的数学工具（《流数术》）当时是用能为众人了解的几何方法表示的。具体演算与解决的问题包括物体在阻力介质中、在流体中、在摩擦力作用下的运动、有心力运动、天体运行、潮汐等问题，还包括了预言哈雷彗星、地球形状等等。当然，牛顿力学还包含它的哲学推理法则与绝对时空观、方法论，这里不再赘述（参见“牛顿”）

（3）牛顿力学对物理学的主要影响。

19世纪末对牛顿力学提出过严重挑战的E.马赫，承认“牛顿的功劳是双重的：第一，他发现的万有引力定律极大地扩展了力学的范围；第二，他把先前关于各种力学原理的阐述加以完善，成为目前普遍接受的原理。自牛顿以来，本质上再无任何新的力学原理出现，他以后的力学只是在牛顿定律基础上作出演绎的、形式的和数学上的发展。”这就是说，一方面，在实用的流体力学、天体力学、工程力学等方面开辟了广泛的发展道路，从而加速了工业革命的到来；另一方面，在理论体系上，牛顿的概念系统、逻辑方法与数学表述经过欧勒、伯努利、拉格朗日、哈密顿、马赫等人的完善与变换，矢量力学更加完备，分析力学形式逐步形成，建立了相当严整的经典力学体系。

经典力学成了经典物理学各科发展的典范，从18世纪20~30年代开始，力学的基本概念和科学方法扩展到了几乎所有的知识领域，首先是热学、电学、光学、分子与原子物理学等等。爱因斯坦曾说：“牛顿的成就……直到19世纪末，一直是理论物理学领域中每一工作者的纲领”。

在科学思想和哲学领域，牛顿用实验、物理思想与数学高度结合的科学方法照亮了所有自然科学工作者的前进道路。他用微分定律表达出的因果性规律，由初始条件看来可以决定以后任意时间的物体运动状态的机械决定论，将物理对象看作微粒式的机械模型然后进行实验和理论研究等方法，以及与物质运动无关的绝对时空观、是否有绝对参照系（以太）存在、宇宙万物初始运动的来源等等问题，都成为牛顿力学所引起的热烈论题，至今不衰。

关于运动的量度

在牛顿的《原理》中虽然包含了经典力学的所有核心问题，但牛顿时代的人们对许多概念还含混不清。经典力学现今形式的形成通过了无数实践和众多争论。例如 17~18 世纪物理学家们不是分析一个物体所受到的力及其效应，而是习惯于认为正在运动的物体“具有一种力”，它可以推、拉或阻碍另一物体，使后者的运动发生改变。这样，“力”、“动力”、“本领”、“能力”等就难以分清。在当时“能量”概念还未形成的情况下，如何来度量运动和力，就发生了很大的争论。笛卡儿认为：力是中世纪称为冲力的那个量，它是由物体的质量与速度的乘积决定的，笛卡儿称之为“运动”，偶尔也叫“动力”。而且笛卡儿的自然哲学的基本原则认为：“在物质中就会存在一定量的运动，它的总和在世界上永远不会增加也不会消失。”即 $mv = \text{常量}$ 。后来牛顿把笛卡儿所说的物体的质量与速度的乘积称之为“动量”（有时也叫运动），并把动量的变化称之为力。

莱布尼兹在 1686 年《学术纪事》上刊登了一篇文章：《对可纪念的笛卡儿和其他人关于使上帝希望永远保持运动的量守恒的自然定律的错误之简短证明》。他论证说：假定将 1 磅重的物体提升到 4 爱尔（ell，当时为 45 吋）高，其所需的力等于把 4 磅重的物体提升到 1 爱尔高，他还引用了伽利略的证明：前者降落时的速度等于后者降落时速度的两倍。这样，“前者的运动量只有后者的一半了”。“由此可以看出，力是应该从它所能发生的作用量来估计，例如，从它提升某一已知其量与质的物体所能达到的高度来估计，而非从它施加于某物的速度作估计的。”这就是说，应该用 mv^2 而不是用 mv 来量度物体的运动。守恒的应是 mv^2 而不是 mv 。1695 年他又把力分为死力（静力学的力）与活力（动力学的力），认为活力就是物体实际上具有一种类似生物机体的能力。

参加这场争论的有许多物理学家和哲学家。赞成莱布尼兹的有 J.B. 伯努利（1654~1705），J.J. 伯努利（1667~1748）和欧勒等。D. 伯努利还把“活力”用于《流体动力学》（1738）并得出著名的伯努利方程，也用于研究气体分子的无规运动。赞同笛卡儿、牛顿观点的有巴本（Papin，1647~1712）等。经过半个世纪的争论后，达兰贝尔（d'Alembert，1717~1783）在 1743 年《动力学论》一书的序中指出：“力”的量度可以分为两种情况，”用现在的话来说，就是力既可以表示为

$$f = \frac{\Delta mv}{\Delta t},$$

又可以表示为

$$f = \frac{\frac{1}{2}mv^2}{\Delta s}.$$

因此， $\frac{1}{2}mv^2$ 决定了在力 f 阻碍下物体运动能保持多远，而量值 mv 则决定

了在力 f 阻碍了物体运动能保持多长时间。因为在运动过程中

$\Delta s = \bar{v}(\Delta t) = \frac{1}{2}v(\Delta t)$ ，（末速为零，初速为 v ），所以上述两式完全等价。

因此达兰贝尔认为运动量度的争论是一场“咬文嚼字”的争论，“如果对平衡状态和减速运动这两种情况的力分别采用不同的度量标准就没有什么不方便了”。

随着对能量概念、多种运动形式及其相互转变的认识的深化，就逐渐显示出这场争论的积极意义：促进了机械能概念及整个能量概念的形成，也推动了经典力学体系的完善。与此同时，动量与动量守恒定律也同样显示出它的重要性。对此，恩格斯在《自然辩证法》中给出了明确的总结：

“机械运动确实有两种量度： mv 是以机械运动来量度的机械运动，而 $\frac{1}{2}mv^2$

是机械运动转化为一定量的其他形式的运动的能力”。在能量与功概念的基础上促进了分析力学的产生和发展。这一争论表明了物理思想的活跃与争论可以使人们的认识进一步深入，使原有的物理理论更加完善。

能的概念 机械能守恒定律

能(量)和力是物理学中最基本的概念,但它们的起源有些不同。“力”起源于肌肉的感觉与人力的效应这类经验事实,而“能”则产生于生产实践基础上的科学思维,因此“能”的概念直到19世纪才出现,比牛顿科学地定义“力”晚了100多年,它经历了萌芽、形成、扩大和发展等阶段。

(1) 萌芽阶段:——从“虚速度”到“黄金定则”

古希腊亚里士多德学派的《力学问题》一书在论证杠杆原理时已谈到杠杆长臂可有较大的“虚速度”。亚历山大的希洛(Heron)说过:在机械装置中要省力就得延缓时间。后来荷兰的斯蒂文(Stevin, Simon 1548~1620)总结为“得之力者失之速”,在相等时间内发生的“速”或“虚速”,实际上就是我们今天理解的“虚位移”。斯蒂文的说法实际上是“力学黄金定则”(功的原理的一种形式)。

(2) 形成阶段——从机械能守恒思想、活力、能量到机械能守恒定律。

机械能守恒的原始思想出现得比较早。伽利略在三个方面涉及到这个问题(均不计阻力影响)。在1632年《两大体系对话》中的第二天,他举了这样的例子:在一个不等臂天平上,如果一包羊毛比秤锤重一百倍,那包羊毛向下运动一时就使秤锤向上走动100时。写成现在的公式就是 $W_1 h_1 = W_2 h_2$ 。在1638年《两门新科学的对话》的第三日谈到(如图2-1-8):沿着斜面AB或EB从同一高处落

下的物体,用在B点得到的速度登上第二斜面BC或BD,则物体不受BC或BD倾斜的影响,将达到与开始时相同的高度,只是需要的时间不同。第三个有关的实验是在一面竖直的墙上钉上钉子E或F,用长约4~6英尺的细绳系上铅球,则悬于A点的摆球绕E或F后达到的G点或J点将与CD线同高(图2-1-9)。虽然伽利略引述这个实验时(《两门新科学的对话》)是为了证明匀加速度,但实际上已经明显包含了机械能守恒的思想。

惠更斯1669年研究碰撞时指出:在弹性碰撞中不仅 mv 守恒,而且 mv^2 守恒。这载于他死后于1703年发表的《物体在碰撞下的运动》一文中。

1686年莱布尼兹在挑起运动量度争论后,使“活力”观点及 $mv^2=$ 常数的思想日益得到广泛的传播。莱布尼兹认为,两物体作非弹性碰撞时,总的活力并没有损失,它只不过部分地被碰撞物体中的极小微粒所吸收,这些微粒的活力值因此而增加。不难看出,这时他已经走近“热的唯能论”这一理论的大门口了。

“能量”第一次被引入力学，是 1717 年 1 月 28 日 J. 伯努利(1667~1748)在写给法国一位力学家 P. 范立刚(Pierre Varignon, 1654~1722)的一封信中提出的：如果力相互平衡，则对可能的无穷小位移而言，力与力的方向上的虚速度的乘积之和必为零，这就是虚功原理的早期表述。J. 伯努利还说：力乘力的虚速度“就是我们所谓的能量”，这种能量可正可负。由此可见，能量的概念正是从虚位移和(虚)功的概念演变而来的。1807 年，托马斯·杨在《自然哲学讲义》中第一次把莱布尼兹称之为“活力”的量命名为“运动物体的能量”。他认为两物体对心碰撞时能量守恒(活力守恒)。1829 年，科里奥利(Coriolis Gustave-Gaspard, 1792~1843)把这种能量写为 $\frac{1}{2}mv^2$ ，这就形成了动能概念。

功的名称第一次出现在法国彭塞列(Poncelet, 1788~1867)的《应用力学引论》(1829)中，他定义功为力与距离的乘积，并定出其单位为千克力·米。后来 1844 年科里奥利在《论刚体力学及机器作用的计算》一文中又明确地把作用力与受力点沿力方向可能位移的乘积叫“运动的功”。

与位置、高度、运动潜在趋势、处于储存状态的能量(做功本领)相联系的势能(势)等概念，实际上也是与机械能守恒定律的建立同步形成的。伽利略在发挥他的下落物体可回到原来高度的思想时，曾论证过物体所含的某种运动能力只与高度有单值联系，否则，若可以达到另一更高的高度，就会导致永动机的产生。势能概念在活力(动能)概念形成后得到延伸，D. 伯努利在 1738 年的《流体力学、或关于流体的力与运动的札记》中，认为活力守恒准确地说是位势升高与实际下降之间的关系，他说：“用位势提高的说法代替活力，对某些哲学家更容易接受，”并同时引入了“势函数”。1847 年，亥姆霍兹在《论力的守恒》这一著名文章中把活力守恒推广为各种能量(当时他还叫“力”)之间的守恒，基于自由落体公式。

$mgh = \frac{1}{2}mv^2$ ，他把前者称为“张力”，后者 $\frac{1}{2}mv^2$ 命名为活力以代替原来的 mv^2 ，确立了机械能守恒定律的数学形式。可见机械能守恒定律是众多科学家的共同成果。

(3) 能量概念的扩大与发展阶段：

1853 年，兰金(W. J. Rankine, 1820~1872)对力学、化学、热、光、电磁等所有能量形式都给以能量名称，并论述了它们的转换关系，这就形成了现代能量守恒与转换定律。此后，各种物质运动形式之间的转换关系日益从实验和理论上与能量转换关系联系起来，热与功成了能量转换的度量形式，并扩展到原子、原子核领域。20 世纪初，爱因斯坦的质能公式 $E=mc^2$ 开辟了新的一页，他还在广义相对论中指出现有能量概念的局限性。总之，越是基础的概念越是需要长期的多方面探索。力、能量与质量概念都是如

此。

大气压强的发现与测量

17世纪实验科学的确立，除伽利略到牛顿这一条力学发展主线外，还有平行发展的另一条线，即从伽利略的学生托里拆利等开始的关于发现真空与大气压强测量的“真空实验”热。在一定意义上说，它奠定了近代真正的实验方法的基础，为后来亚原子粒子和化学的研究、白炽灯与电真空技术的发展开辟了道路。以实验研究为主的这条线，对加强初高中物理实验教学有重要意义，值得重视。从亚里士多德到笛卡儿，物质连续的思想以及教会支持的“土水火气”四元素中“气”元素的存在，使“自然厌恶真空”即认为真空在逻辑上是不可能的思想几成定论。伽利略曾用称量玻璃泡中空气和水、压缩与放出空气的办法证明空气不是“轻”的，空气重约为水的 $1/400$ ，他在《两门新科学的对话》中，记载了“18肘（约10.5米）的固定高度对于任何数量的水都是正确的，不管所用抽水机是大是小甚至细得像一根稻草一样”。伽利略在回答1630年巴里安尼（G.B.Baliani, 1582~1660）就此的疑问时也解释为“自然对真空的阻力”的大小有限。

1640年前后在罗马，天文数学家帕尔蒂（Gasparo Berti）等人做过下面的实验。在长约10米的铅管上端，安装一个带塞子的玻璃钟罩，把该管放在一个水桶内，待管子里装满水后，下端用塞子塞紧，又将上端的塞子塞紧。这时再打开下端的塞子，管内的水会倒悬着一整天也不会流动。托里拆利受这一实验的启发，把水改为水银，并在1644年6月11日把实验结果写信告诉给他的朋友里西（M.Ricci）：“我们制造了许多像A和B（图2-1-10）那样带有两肘（约1.1米）长管子的玻璃容器，将这种容器盛满水银，用手指将其敞开的一端封闭，然后将它们倒置于一个盛有水银的碗

C中，这样，我们看到，一个真空的空间形成了。”这就是托里拆利真空以及加上刻度而成的气压计。为了证明水银管封闭端确是真空，他还在水银槽C内上部装水，当他把管提升到进入水面后，水银全部跌落而水将管内充满；他还用粗细不同的玻璃管证明各水银面高度相等。这些实验传到法国的麦山尼（Mersienne）和德国的贝梯（Petit）等人后，他们纷纷重复。要注意的是，当时因为害怕教会的镇压，托里拆利等人的实验都是在保密的情况下进行并靠书信传递消息的。帕斯卡在1646年10月和1647年间进行了许多有关大气压强的实验研究和理论探讨，1647年10月出版了《关于真空的新实验》的小册子。例如他公开表演过对比葡萄酒与水柱在大气压下的高低，结果不含挥发性气体的水柱反而更低。他的内弟佩列（F.Périer）1648年9月19日受他委托进行了登山实验，发现多姆山

脚与山顶（相差约1000米）水银计高差 $3\frac{1}{8}$ 英寸（相当于今天的8.5厘米），

且在五种不同情况下（风、雨、晴、露天、暗室内）都是如此。帕斯卡在这一判决性实验中证明水银管确实反映了外部大气压的变化，进一步解释了托里拆利曾见过的同一地点由于外部天气冷热而引起大气压的敏感变化。他说：这一实验“使我亲眼看到了自然界中最轻的流体空气和最重的流体水银之间的平衡”。他通过力的平衡理论来对压强进行理论解释（1648年《关于流体平衡的大实验谈》，1653年《论流体的平衡及空气团的重量》），并提出压强向各个方向传递的帕斯卡定律和连通器、水压机原理等等。他认为在自然科学中，否定真空的种种论点，充其量是一种可疑的假说，实验才是唯一可以信赖的。

盖利克（Otto von Guericke, 1602~1686）是学法律的，数学物理只是他的业余爱好，1646年被选为马德堡市长。关于真空问题的争论使他决心寻求实验解答，他说：“雄辩术、优雅的语言或争论的技巧，在自然科学的领域是没有用处的”。为了在一个容器内真正造出真空来，在1635~1645年间他在制造抽气机方面作了多次艰苦的探索。盖利克发明的第一台抽气机是木桶式的（图2-1-11）。桶缝

用沥青填堵并用螺钉加固。盖利克描述了当时的实验情景：三个壮汉拉动有两个活门的活塞，将桶内水越来越艰难地抽空。这时“桶内各部分忽作沙沙声，好像水在沸腾”，这是空气穿过木桶微孔的声音。为了隔绝空气，他又将该木桶放入更大的盛满水的木桶内重新抽气，但这时“感到有一种时断时续的变化着的声音，就像唱歌的小鸟一样，这样持续三天之久。”最后发现较小的木桶“大部分装满空气和水……水在高压下穿过木头”。第二台抽气机他改用铜球作抽空器皿（图2-1-12）。正当两个壮汉大汗淋漓地“确信球内空气快要抽空时，突然一声巨响，金属球瘪下去了”，这是球不太圆的结果。第二次校正后“我们第

二次的尝试获得了真空”。开启龙头（位于球的上方），“空气立即涌入铜球，其力大得几乎要把站在它前面的人拉进铜球”。盖利克继续改进抽气装置并研究空气的各种性质如扩散作用、风力、潮湿空气形成云霞、物体表面吸附空气对真空的影响、光和声通过空气的情况（钟放入空气罩内抽气后声音消失，真空内烛火熄灭）等。为了使人看到真空威力，他制了一个大的铜圆筒，抽成真空后四五十人拉不开，但当他突然开启活门放入空气时，人们立即东跌西倒。接着他用铜做成“马德堡半球”：用浸入过溶腊松节油的垫圈使两个半球合在一起，直径3英寸的小半球要8匹马才能拉开，直径40英寸的大半球要24匹壮马向两边奔跑才行。1654年5月

8日他在雷根斯堡还做了公开表演。他的实验结果，1672年载于《马德堡半球真空的新实验》中。

对于大气压的精确测量及其原理的提出，要归结到气体定律的发现。玻意耳得知盖利克实验后进一步对大气压性质作了研究。他首先在助手胡克协助下改进了真空泵以获得较大的真空空间。其次他发现幼小动物在其中昏迷而死，气压计放入真空后水银面会下落到与杯中水银同高等等。1660年玻意耳发表这一结果后，列日大学的神学家里奴斯(F.Linus)声称水银柱上方空间中有一种不可见的“细绳”把水银“拉起”，“如果你的手指按住连接着真空泵的玻璃管一端，你将确实感到有细绳在扯你手指上的肌肉！”玻意耳定律1662年的发表从实验数据和理论上批驳了这种谬论。这一定律实际上是当时好几个科学家得出的结论。

大气压强的发现与测量这段史实说明：从生产中提出的问题经过科学实验的探索特别是社会上对科学的热烈讨论必然导致理论的进步。

主要参考资料

1. 戴念祖。中国力学史。第1版。石家庄：河北教育出版社。
2. 李约瑟。中国科学技术史。第1版。北京：科学出版社，1976。
3. 蔡宾牟，袁运开。物理学史讲义——中国古代部分。第1版。北京：高等教育出版社，1985。
4. 伽利略。关于托勒密和哥白尼两大世界体系的对话。上海：上海人民出版社，1974。
5. Galileo. Concerning the Two New Sciences, Encyclopedia Britannica Inc. 1952。
6. 爱因斯坦，英费尔德。物理学的进化。上海：上海科技出版社，1982。
7. 马吉。物理学原著选读。北京：商务印书馆，1986。
8. 阎康年。牛顿的科学发现与科学思想。长沙：湖南教育出版社，1989。
9. 丁世章等。普救寺塔蟾声的声学机制。自然科学史研究，1988年第2期。
10. 哥白尼。天体运行论。北京：科学出版社，1973。
11. G.Holton。物理科学的概念和理论导论（上、下册），戴念祖、张大卫等。北京：人民教育出版社，1983。
12. 塞耶。牛顿自然哲学著作选。上海：上海人民出版社，1974。
13. I.Cohen。牛顿对万有引力的发展。科学，1981年第7期。科技文献出版社重庆分社。
14. Unpublished Scientific Papers of Issac Newton, Cambridge Univ.Press,1962。

15 . E.Mach.TheScienceofMechanics,TheOpenCourtPub . Com . 3rded
ition , 1974 .

16 . [英] 沃尔夫。十六、十七世纪科学、技术与哲学史。北京：商
务印书馆，1985。

17 . [日] 广重彻。物理学史。第 1 版。上海：上海教育出版社，1986。

2. 热力学的建立和发展

中国古代的热学知识

我国古代的热学知识大部分是生活和生产经验的总结。至今所知的古籍中对热的研究记载较少，还有待于进一步发掘。

火的利用和控制，是人类第一次支配了自然力，使人类文明大大前进了一步，同时，它也是古人对热现象认识的开端。我国山西省芮城西侯度旧石器的遗址，说明大约 180 万年前人类已经开始使用火。

对冷热的认识。约在公元前 2000 年，我国已有气温反常的记载，在西周初期，人们开始掌握降温术和高温术。据《周礼》记载，当时已设专人司贮冰事，冬季凿冰加以贮藏，到春、夏季用以冷藏食物和保存尸体。说明当时已利用天然冰来降温。我国冶炼业的发展较早，高温技术也很早被人们掌握。江苏省曾出土春秋晚期的一块铁，经科学分析，它是一块生铁，生铁的冶炼温度比熟铁高，需达摄氏千度以上。生铁的出土，说明在那时的高温技术已达到一定水平。

温度计还没有发明以前，古人在冶炼金属的实践中，创造了通过观察火候和火色来判别温度高低的方法。据《考工记》记载，在铸铜与锡时，随温度的升高，火焰的颜色先后变为暗红色、橙色、黄色、白色、青色，然后才可以浇铸。这种方法同样也应用于制陶工业。从现代科学分析，不同物质有不同的汽化点，因此从火焰的颜色可以判断所汽化的物质，从而判断温度的高低。对同一种物质，随着温度的升高，其颜色也先后有所变化。“火候”（包括火色）成了我国古代热工艺中一个内容丰富的特有概念。

除制陶和冶炼金属之外，我国古代还在农业中采用了控温技术。据《汉书·召信臣传》记载，西汉末年，我国已利用冬季栽培蔬菜，其方法是“覆以屋庑，昼夜蕴火，待温气乃生。”北魏时期，还利用熏烟的方法防止霜冻。对冷热问题，东汉王充还曾从理论上加以探讨，在他的著作《论衡·寒温篇》中写道：“夫近水则寒，近火则温，远之渐微，何则？气之所加，远近有差也。”他把“气”作为物体之间进行“温”“寒”传递的物质承担者，还指出距离变远，“气”的作用渐小。这里已涉及热传递的理论问题，但它只是思辩性的，是我国“元气说”的一种应用。

对热是什么这一问题，我国古代也已注意到，南北朝成书的《关尹子》中认为：“外物”的来去是使瓦石一类物体发生寒热温凉之变的原因。而另一种说法见于据传可能为北齐刘昼著的《刘子·崇学篇》，则从“五行”观念出发，猜想物体寒、热、温、凉的变化是一种“内物”在起作用。这

种所谓的“外物”或“内物”都是把热设想为一种实体物质，它类似于18世纪“燃素”和“热素”的观念。热胀冷缩是重要的热现象之一，在我国古代对它已有所研究和利用。汉代《淮南万毕术》记述了这样一个现象：把盛水铜瓮加热，直到水沸腾时密闭其口，急沉入井中，铜瓮发出雷鸣般响声。这现象可能是发热物体在急速冷却时发生了内破裂，破裂声由井内传出，这是一个典型的热胀冷缩现象。元代陶宗仪曾亲自作热胀冷缩实验，他把带孔的物体加热以后，使另一个物体进入孔洞，从而这两个物体如“辘轳旋转，无分毫缝罅”，他明确指出，这是前一物体“煮之膨胀”的缘故。据《华阳国志》记载，李冰父子修建都江堰时，发现用火烧巨石，然后浇水其上，就容易凿开山石。这种利用岩石热胀冷缩不均从而易于崩裂的施工经验，在我国历代水利工程中不断为人们采用。

对水的物态变化，在我国古代也早有认识，例如对雨和雪形成的探讨，认为是由于“积水上腾”而造成。《论衡》中对此有明确的表述：“云雾，雨之微也，夏则为露，冬则为霜，温则为雨，寒则为雪。雨露冰凝者，皆由地发，不从天降也。”此文说明露、霜、雨、雪是因为不同的温度由水冻凝而成，它们都是水由地面蒸发而产生的。汉代以后的古籍中，对雨、露、雪、霜成因的讨论更多，说明当时对物态变化的知识有了新的认识。汉代董仲舒从“气”的观念出发，解释雨、露、雪、霜成因的道理是：水受日光照射，蒸发成水汽，再在不同条件下形成雨、霰、雪等。从现在看来，这些分析也基本上是正确的。

我国古代，在生产和生活实践中，创制了利用热的各种器具。如宋代曾发明一种“省油灯”，在“灯盏一端作小窍，注清冷水于其中”，据说这种灯能“省油几半”。现在分析，文中所说加入冷水，目的是降低温度，避免油被灯火加热后急速蒸发，其中包含了对油的汽化和温度的关系的认识；据《淮南子》记载：“取鸡子，去其汁，然（燃）艾火纳空卵中，疾风因举之飞”。这是关于“热气球”的最早设想，也是空气受热上升的具体应用。五代时期，据说还利用这一原理制成信号灯，所谓“孔明灯”也是应用了这一道理。关于走马灯我国古代有较多记载，有的古籍把它称作“马骑灯”、“影灯”。宋代《武林旧事》在记述各种元宵彩灯时写道：“若沙戏影灯、马骑人物、旋转如飞，……”。这表明当时已利用了冷热空气的对流制造出各种各样的走马灯。

在我国古代，很早就出现了热动力的认识和利用。唐代出现了烟火玩物，“烟火起轮，走绒流星”。宋代制成了用火药喷射推进的火箭、火球、火蒺藜。明代制成了“火龙出水”的火箭，这些都是利用燃烧时向后喷射产生反作用力使火箭前进的道理，属热动力的应用。它是近代火箭的始祖，被世界所公认。

历史上关于热本质的争论

历史上关于热本质的争论，归结到一点，就是热是物质还是分子运动的宏观表现。人类对于火以及与火密切相关的热的探索，可追溯到上古时代。古代人视火为神灵，例如，在我国就有火神祝融的传说。其后，随着人类文明的发展，对火的认识也在变化。公元前5世纪左右，古希腊的赫拉克利特(Heraclitus, 前540~前480)认为火是万物之源；古希腊的亚里士多德提出四元素(土、水、火、气)说；我国殷商时期出现了五行说。他们都把火视为构成世间万物的“基元”物质。然而，几乎就在上述同一时期，古希腊的柏拉图根据摩擦生热现象，认为火是一种运动的表现。我国东汉时期的王充的“元气”说，把热视为“气”的运动与变化。可见早在古代，人们对火和热的本质就存在两种对立的看法。

在欧洲，人们探索自然界的热情在文艺复兴后重新兴起。古希腊原子论者猜想热是一种特殊的、不可直接察觉的物质：当不同温度的物体接触时，温度总要趋于相同，这种现象被解释为一种物质从高温物体流向低温物体。这种物质类似于笛卡儿提出的那种无所不在的流体。不过，英国的F·培根(Francis Bacon, 1561~1626)、伽利略和玻意耳等人则认为热的流体理论是不可信的，他们试图把热解释为受热物体的微粒的机械振动。特别值得一提的是，F·培根在考察热的本质时，列举28个具有热的例证，32个缺乏热的例证，41个比较例证，运用归纳法，得出“热的精英和本质就是运动”。

不过，整个17世纪和18世纪初叶，无论是热的流体说，还是热的运动说，都因缺乏实验基础而未能牢固建立起来。

1741年，华伦海特(参见“华伦海特”)改良了温度计并定出华氏温标，建立起测温学；1756年，英国的布莱克(Joseph Black, 1728~1799)及其学生欧文提出比热和潜热概念，奠定了量热学的基础，从此，热学走上了实验科学的道路。人们对不同温度物体混合在一起进行量热实验时，发现热量守恒。若联想到当时已被公认的质量守恒，自然会想到热是某种热物质，这使热流体观点占了上风。

从18世纪60年代起，布莱克等人对热流体[1787年拉瓦锡称之为热质(Caloric)]理论作了深入探讨，他建立了一种热流体模型：热质是由自身彼此排斥而为普通物质粒子所吸引的、无重量的微粒所组成的流体，它不生不灭；热质能扩散到所有普通物质的“空隙”中，并在普通物质粒子周围形成一气层，这气层的密度随温度的升高而增加。这样，热质说得到了明确的理论表示。这一模型对于热传导、热膨胀和量热学的一些实验结果，都能给予相当成功的解释。于是，自18世纪80年代起，几

乎在整个欧洲，热质说占了统治地位。

与热质说相对立，一些科学家认为热不是什么热质，而是物质运动的一种表现。俄国科学家罗蒙诺索夫在 1744 年写的论文《论热与冷的原因》中认定热是物体内部物质的运动。1798 年，伦福德伯爵（参见“本杰明·汤普逊”）在炮筒镗孔实验过程中观察到钻头越钝产生的热越多，热几乎是取之不尽的。这么多热从哪里来的呢？他的结论是：“不消说，任何与外界隔绝的物体或物体系所能无限制地持续提供的某种东西不可能是实物性的物质，而且在我看来，除非它是运动。”次年，戴维（HumPhry Davy，1778~1829）通过将两块冰相互摩擦而使之全部融化的实验，也得出与伦福德同样的结论。这使得热质说主张的普遍的热量守恒定律遭到了失败，但它并未被彻底摧毁。因为一方面当时尚未建立起可替代热质说的可靠理论，另一方面，对热辐射现象，伦福德的热运动说无法给出解释，而热质说视热为一种特殊物质，倒能说明热可穿透虚无空间传播这一事实。因此，19 世纪 30 和 40 年代，热质说又在某些“以太论”中出现。

1842 年，德国医生迈尔（Julius RobertMayer，1814~1878）在“论无机界的力”的论文中认为热与机械能可以转换，并建立起量值上具有相当性的概念。其后，焦耳从 1840 年起花了近 40 年时间，用电的、机械的等各种方法精益求精地做实验，证明：要使一磅水的温度升高 1 华氏度，需做功 772 英尺磅。这个数值相当于 $1\text{cal} = 4.157\text{J}$ 。这与目前国际公认的热功当量的精确值 4.1868 焦非常接近。焦耳实验以雄辩的事实说明热和功是能量传递与转换的两种不同形式，并可以一定的当量关系相互转换，从而从实验上彻底推翻了热质说。在焦耳进行实验的同时，R·克劳修斯（Rudolf Clausius，1822~1888）进行了大量的理论性工作（参见“气体动理论的发展”），证明物体温度是组成该物体的分子无规则热运动的宏观表现，这就从理论上推翻了热质说，确立了热的分子运动论。

能量守恒定律的建立

和其他科学定律一样，能量守恒定律的建立，不但需要一定的历史条件，如生产前提和物理学基础知识的准备，而且需要经过若干物理学家长期的艰苦努力。

蒸汽技术的成就是建立能量守恒定律的生产前提条件。蒸汽机的发明是 18 世纪的一大创举，到 19 世纪，它已广泛应用于交通、运输、工厂和矿山。它的应用提出了诸多理论问题，如：热机的效率是否能提得更高？能否制造出永动机？热和功的转化的定量关系是什么？等等，这些问题促使人们深入进行探究。

在理论上，中国和西方古代已经提出了运动不灭的思想。笛卡儿和莱布尼兹也从不同的角度阐述过宇宙中运动量不灭的思想，这些思想对近代科学的发展产生了深远的影响。能量守恒定律的一个特殊形式——机械能守恒，已在早期出版的力学著作中，以不同的形式出现过（参见“能的概念机械能守恒定律”）。这些能量守恒思想的萌芽是后人总结和概括出普遍的能量守恒定律时依据的理论基础。

随着动力学的发展，“功”和“能”的概念逐渐确立起来。1686 年，莱布尼兹提出用 mv^2 表示活力，相当于后来的动能；1807 年，托马斯·杨（Thomas Young, 1773~1829）第一次提出了能量的概念；伽利略所用的“矩”的概念，已含有力和路程的乘积的意义；瓦特又定出功率的单位；1834~1835 年间，哈密顿（William Rowan Hamilton, 1805~1865）引入了“力函数”；1828 年，格林（George Green, 1793~1841）提出“势函数”。这样，建立能量守恒定律所需要的基本概念，在 19 世纪 40 年代以前已经基本具备了。

发现能量守恒定律的另一历史背景是：18~19 世纪之交，人们对热的本性的认识从观念上发生了改变。随着物理学的新发展，逐渐发现了与热质说相矛盾的事实，如热机的利用，说明不同的运动形式和不同形式的能量可以互相转化，它为能量守恒定律的建立扫清了思想上的障碍。

导致能量守恒定律最后确立的两个重要事实是：永动机不可能实现的确认和各种物理现象之间普遍联系的发现。17~18 世纪，永动机最为流行，人们曾提出各种设计方案，如企图利用阿基米德原理、毛细现象、重力的作用等制造出永动机，但无论哪种方案，都遭到了失败。18 世纪末，不少科学家开始怀疑制造永动机的可能性。1775 年，法国科学院决议不再受理永动机的设计方案。这些事实，使人们逐渐悟出一条道理：永动机不可能实现是由于某一普遍定律的限制，而这条定律至今还未被发现。由此，它启示人们不再为设计永动机而煞费苦心，转而致力于这一未发现定律的

挖掘工作。亥姆霍兹在《论自然力的相互作用》一文中，准确地描写了当时的情况：“……鉴于前人试验的失败，人们……不再询问，我如何能够利用各种自然力之间已知和未知的关系来创造一种永恒的运动，而是问道：如果永恒的运动（指永动机）是不可能的，在各种自然力之间应该存在什么样的关系”？

各种物理现象之间的普遍联系，是在 18 世纪末到 19 世纪才逐渐发现的。如戴维于 1801 年发现电流的化学效应；奥斯特于 1820 年发现电流的磁效应；塞贝克（ThomasJohann Seebeck， 1770 ~ 1831）于 1821 年发现温差电现象；法拉第于 1831 年发现电磁感应现象；焦耳于 1843 年发现电流的热效应，又测定了热功当量的值等等。这些现象的发现，启示物理学家用“自然力之统一”的观点考察各种现象。

到 19 世纪 40 年代，已到了把整个链条的各个分立的环节连成一体来建立能量守恒定律的时候了。在这种情况下，不同国家的十几位科学家以不同的方式，各自独立地提出了能量守恒定律。其中以 J . R . 迈尔、焦耳、亥姆霍兹的工作最有成效（参见各有关条目）。

J . K . 迈尔从对生理现象的分析入手，从“一切不能无中生有”和“原因等于结果”的哲学原则出发，表达了他对物理、化学过程的守恒问题的思想。1842 年，他第一个表述了能量守恒定律，并计算出热功当量的数值。焦耳的工作主要是巧妙地设计了实验装置，用它测定了热功当量的值（如图 2-1-13），用数值表示了机械功和热量之间的关系，为能量守恒定律的建立奠定了实验基础。亥姆霍兹对能量守恒定律的研究，也是从研究生理问题开始的，他的主要工作是给出了能量守恒定律在力学中的具体数学形式，并且还论述了它在电磁现象和电化学中的具体应用。除以上三位科学家外，另外还有不少科学家也作过相应的工作。例如：塞贝（SirEdward Sabine， 1788 ~ 1883）于 1839 年在《论铁路的影响》中，提出了热功等当的概念；L . A . 科耳丁（Ludwig AugustColding， 1815 ~ 1888）于 1843 年发表了测定热功当量的实验结果；值得提出的还有，卡诺曾在临死前，独立地发现了热功转化的定律，但是他的文章在他死后于 1878 年才由他的弟弟公开发表。能量守恒定律的发现，是人类认识自然及其变化和运动规律的一次重大飞跃。它以自然界的一个普遍规律展示在我们的面前。

热力学第二定律的建立

热力学第二定律是由德国物理学家克劳修斯和英国物理学家开尔文（威廉·汤姆孙）建立的，它和热力学第一定律及热力学第三定律一起，成为研究热的动力理论的基本规律。

（1）热力学第二定律建立的历史背景 19 世纪初，蒸汽机已有很大发展，并广泛应用于工厂、矿山、交通运输，但当时对蒸汽机的理论研究还很缺乏，法国工程师 S. 卡诺在这方面做出了突出的贡献。卡诺在 1824 年发表了《论火的动力》，他撇开一些次要的因素，由理想循环入手，研究了热机工作中的最基本因素，提出了以卡诺命名的有关热机效率的定理，定理明确指出：“凡是有温度差的地方，就能够发生动力”。“动力不依赖于提供它的工作物质，动力的大小唯一地由热质在其间转移的一些物体的温度决定”。在证明这一定理时，他采用了热质守恒的思想和永动机不可能的原理。其实卡诺定理已内涵了热力学第二定律的思想，但终究因为热质说的错误观点，没能作进一步的研究。不过可以说卡诺定理是建立热力学第二定律的先导。

1840 ~ 1847 年间，热力学第一定律建立起来了。它说明热机提供的动力只依靠热质在冷、热源之间重新分配的说法是不正确的。因此，非常需要对卡诺的理论作进一步审核，把他的原理建立在新的热学理论的基础上。1848 年，开尔文根据卡诺提出的一切理想热机在同样的热源与冷源之间工作时，其效率相等，与使用的工作物质无关的理论，建立了绝对温标的概念。这一温标具有一定的特点，例如：“这一温标系统中的每一度的间隔都有同样的数值”，“它完全不依赖于任何特殊物质的物理性质”，因此被称为绝对温标。这种热力学温标的建立，从理论上解决了各种经验温标不相一致的缺点，并为热力学第二定律的建立准备了条件。（2）热力学第二定律建立的过程在上述历史背景和前提条件下，克劳修斯集中大部分时间，精心研究了热力学问题，从不同角度发表了多篇文章，提出并完善了著名的热力学第二定律的克劳修斯表述。1850 年，克劳修斯发表了《论热的动力以及由此推出的关于热学本身的诸定律》的论文，他从“热并不是一种物质，而是存在于物体的最小粒子的一种运动”的观点出发，重新考察了卡诺所提出的理论后指出：卡诺得出热量由热体向冷体传递时产生当量的功是正确的，而在由热体向冷体传递时没有热量损失是错误的。克劳修斯认为在由热做功的过程中，一部分热做了机械功，另一部分热通过从热体向冷体传递而耗散掉。克劳修斯通过一个假想的实验，得出热力学第二定律的初次表述：“在没有任何力消耗或其他变化的情况下，把任意多的热量从冷体传到热体是和热的惯常行为矛盾的”。后在 1854 年发表《力

学的热理论的第二定律的另一形式》中，对热力学第二定律的表述改变为：“热不可能由冷体传到热体，如果不因而同时引起其他关系的变化”。

克劳修斯在取得一定成就后，仍继续自己的研究工作，1865年发表《力学的热理论的主要方程之便于应用的形式》一文，明确地提出了熵的概念，并进一步提出了热力学第二定律的普遍表示式：

$$\oint \frac{dQ}{T} \leq 0,$$

等号适用于可逆循环，不等号适用于不可逆过程。这个式子说明熵变具有方向性，对于绝热过程，系统的熵不可能减小，这就是所谓的熵增加原理。并规定熵增加的方向为正向，熵减少的方向为负向。

1867年，克劳修斯又发表了《关于热的动力理论的第二定律》一文，总结出一条原理：“负的转变只能在有补偿条件下发生，而正的转变即使没有补偿也能发生，或者简要地说，不需补偿的转变只能是正的转变”。

1875年，克劳修斯在《热的动力理论》一文中，对热力学第二定律提出了更精练的说法：“热不可能自动地从冷体传到热体。”或“热从一冷体转向一热体不可能无补偿地发生”。这就是大家所公认的热力学第二定律的克劳修斯表述。

同时，对热力学第二定律作出贡献的还有开尔文，他用焦耳的热功当量实验和雷诺（Osborne Reynolds, 1842~1912）对蒸汽性质的观察，重新审查了卡诺定理，从热是一种粒子的运动而不是物质的观念出发，来认识热与功相互转化的过程。1851年发表《论热的动力理论》，提出了两个命题，“当不论借助于什么方法，从纯粹的热源得到等量的机械效应，或等量的机械效应变成纯粹的热效应而消失时，则有等量的热因之消耗或由此产生。”“如果有这样一部机器，当它反过来运转时，它的每一部分的物理的和力学的动作全部倒过来：那末，它将像具有相同温度的热源和冷凝器的任何热机一样，由一定量的热产生同样多的机械效应”。接着又提出证明第二命题的一个公理：“借助无生命的物质机构，通过使物质的任何部分冷却到比周围最冷的物体的温度还要低的温度而得到机械效应，是不可能的”。他在对这一公理的注释中指出：如果公理在一切温度下都不成立，就必须承认可以有这样一种永动机存在，它借助于使海水或土壤冷却而无限制地得到机械功即第二类永动机。以上是开尔文对热力学第二定律的原始表述，后来才逐渐演变成现在教科书中出现的、更精练的说法：“不可能从单一热源取热使之完全变为有用的功，而不产生其他影响，”这就是公认的热力学第二定律的开尔文表述。在这一表述中，明确表示热机必须工作在两个热源之间，更指出了第二类永动机的不可能，所以具有理论意义和实践意义。

克劳修斯和开尔文虽然从不同的角度表述了热力学第二定律，但是二

者是等效的。因此通过他们的工作，反映热力学过程方向性的热力学第二定律建立起来了。

气体动理论的发展

气体动理[学理]论(kinetic theory of gases, 曾译“气体分子运动论”)认为物质由不停运动着的分子所组成,大量分子无规热运动的统计平均效果可说明物质的宏观热性质。它是理解宏观与微观世界的桥梁。人类关于我们周围大千世界的构成的探索,可追溯到古希腊时期。德谟克利特在前人关于物质构成的种种推测的基础上,提出物质是由原子构成的;我国墨家曾提出“端”学说,也可说是一种原子论思想的雏型。伽利略、伽桑迪(Pierre Gassendi, 1592~1655)、F. 培根和牛顿等人都接受并发展了原子论,特别是伽桑迪在原子论基础上,进一步假设物质中的原子可在各个方向上运动,从而解释了诸如物态变化等物理现象。

D. 伯努利发展了伽桑迪等人的思想,他在1738年发表的论文《关于空气的弹性与重量学说的答辩》中论述了气体压强的碰撞理论。基于气体是由许多激烈运动的粒子构成的假设,他对一圆筒内气体的压强与体积的关系进行计算,推导出玻意耳定律的数学表达式。大约过了近一个世纪,1821年,英国科学家赫拉帕司(John Herapath, 1790~1868)也独立地提出了类似理论,并大大向前推进了一步。他从坚硬球碰撞模型出发,得到了气体压强 P 和粒子速度 v 之间的基本关系式

$$p = \frac{1}{3} \rho v^2,$$

式中 ρ 是气体的密度。

伯努利和赫拉帕司的工作是早期气体动理论的重要成果,可惜由于当时热质说颇为流行,他们的工作未引起人们的重视而被搁置起来了。

1847年出版的赫拉帕司的《数学物理学》中所论述的气体动理论思想引起了焦耳的浓厚兴趣,他于1848年在曼彻斯特文学科学协会上发表的《关于热和弹性流体结构的若干评论》(1851年刊出)中论述了他的气体动理论。文中计算了氢分子的速度和多种气体的比热容。但当时焦耳的工作也未受到应有的重视。

1856年,德国化学家柯尼希(A. Krönig, 1822~1879)发表了一篇短文。《气体理论原理》,粗略提出分子运动的假设,并从气体分子是沿三个互相垂直方向、以同一速度 c 运动的完全弹性球这一最简单的假设出发,计算分子对器壁所产生的压强,表明压强与 nmc^2/V 成正比(n 为分子数, m 为分子质量, V 为气体体积)。设绝对温度正比于 mc^2 , 便可得出与玻意耳、盖·吕萨克定律等价的结论。虽然他的论文与伯努利和赫拉帕司的工作相比,在内容上没有什么进步,但由于他是当时学术界的权威,他的论文给气体动理论带来了转机。

19 世纪 50 年代，由于克劳修斯和麦克斯韦的出色工作，气体动理论的基本思想开始建立起来。

1857 年，克劳修斯在柯尼希的论文的激励下，把他以前关于气体运动论的所有设想整理成具体理论，并在一篇题为《论我们称之为热的运动的性质》的论文中加以论述。他在三个基本假设（气体分子本身体积与容器体积比可忽略、分子碰撞时间与连续两次碰撞的间隔时间比可忽略、分子间的作用力可忽略）下，计算分子对器壁碰撞的冲量，求出压强 $P = \frac{1}{3} n m \bar{u}^2 / V$ （ m 是分子质量； n 是分子数； \bar{u} 是分子的共同速度； V 是容器体积），并由此导出理想气体定律。此外，还计算了分子的速度，定性解释了物质三态变化。1858 年，克劳修斯为回答荷兰气象学家拜斯-巴洛特（C. H. D. Buys-Ballot, 1817 ~ 1890）关于分子速度快与扩散慢的诘难，引入平均自由程概念，在假定气体占有体积与分子自身体积之比为 1000 : 1 的情况下，计算出分子连续两次碰撞之间的平均自由程 $l = 62 \lambda$ （ λ 是分子间的平均距离）。

1859 年，麦克斯韦在《气体动理学理论的例证》一文中，假定分子是完全弹性球，导出了气体分子按速度的分布律。后来，麦克斯韦注意到推导分布律的方法不够完善，1867 年，在《论气体动理学理论》一文中，根据分子碰撞数的计算，重新导出平衡态下的分子速度分布律

$$dN_1 = \frac{N_1}{\alpha^3 \pi^{3/2}} e^{-(\xi^2 + \eta^2 + \zeta^2)} d\xi d\eta d\zeta .$$

式中 α 为一待定常数， ξ 、 η 、 ζ 分别为速度的 x 、 y 、 z 分量。

知道了气体分子的速度分布函数，就可求出有关物理量，了解多粒子系统的宏观行为。这正是统计力学的基本思想。这样，麦克斯韦把气体动理论推进到了一个新的重要阶段——经典统计力学。

1867 年，麦克斯韦为克服由其理论得出的粘滞系数对温度的依赖关系与实验不符的困难，假定分子间的作用力与分子间距离的四次方成反比，从这个模型出发，他提出了气体输运过程的数学理论，导出了输运系数。

麦克斯韦所开创的事业，由于玻耳兹曼和吉布斯（Josiah Willard Gibbs, 1839 ~ 1903）的工作，逐步建立起了完整的统计力学大厦。

麦克斯韦的工作吸引了年轻的玻耳兹曼。他发展了麦克斯韦的气体动理论学说，于 1868 年证明了在有势力场中处于热平衡态的分子速度分布定律（即现今所谓的麦克斯韦-玻耳兹曼分布律）。

1872 年，玻耳兹曼在《关于气体分子热平衡的进一步研究》一文中，把麦-玻统计法应用于实际气体，导出了著名的玻耳兹曼方程，给出一般情况下分布函数所遵循的规律，证明系统达到热平衡后的分布即麦克斯韦分布。玻耳兹曼还对热力学第二定律作出统计诠释，即著名的玻耳兹曼关系式： $S = k \ln W$ ，把熵 S 和微观态数 W （或称热力学概率）联系起来，把熵看

作是与系统的“无序度”或“混乱度”有关的量。系统的混乱度越高，即对应的微观态越多，熵就越大；反之系统越有序，熵就越小。熵的概念的这一重要拓展，为以后不可逆热力学乃至信息论等的发展开辟了道路。

如上所述，到 19 世纪末，气体动理论的理论体系已基本完善，但它是否正确，还有待实验检验。众所周知，早在 1827 年，英国植物学家布朗观察到，几乎任何一种悬浮在水中的微粒都作无规则的、永不停顿的运动，此即著名的布朗运动。1877 年，德耳索 (JosePhDeIsaulx, 1828~1891) 指出，布朗运动是由于微粒受到的液体分子碰撞不平衡所引起的。1908 年，皮兰 (J. B. Perrin, 1870~1942) 通过多种精密实验研究布朗运动，证实了爱因斯坦和斯莫卢霍夫斯基 (M. Smoluchowski, 1872~1917) 分别于 1905 年和 1906 年独自提出的布朗运动理论，使气体动理论为大家所公认。

1920 年，O. 施特恩 (Ottostern, 1888~1969) 在历史上第一次用实验测定分子速率分布。我国科学家葛正权于 1934 年测定过铯蒸气分子的速率分布。但由于技术条件等方面的限制，实验结果与理论还有某种程度的距离。1956 年，密勒 (Miller) 和库什 (Kusch) 用钽蒸气的原子射线做实验，精确测定了分子按速率的分布，结果与麦克斯韦分布符合得十分好。这样，以确凿的实验事实证实了气体动理论，从而确立了分子运动在自然科学中的地位。

主要参考资料

1. 蔡宾牟，袁运开。物理学史讲义：中国古代部分。第 1 版。北京：高等教育出版社，1985。
2. [美] G. Holton, S. G. Brush. 物理科学的概念和理论导论 (上册)。第 1 版。张大卫等。北京：人民教育出版社，1982。
3. [日] 广重徹。物理学史。第 1 版。李醒民。北京：求实出版社，1988。
4. [美] 威·弗·马吉。物理学原著选读。第 1 版。蔡宾牟。北京：商务印书馆，1986。
5. 陈毓芳，邹延肃。物理学史简明教程。第 1 版。北京：北京师范大学出版社，1986。
6. [美] G. Holton, S. G. Brush. 物理科学的概念和理论导论 (下册)。第 1 版。戴念祖等。北京：高等教育出版社，1987。
7. 范岱年。能量守恒和转化定律的发现。物理。北京：科学出版社，1975 (4)：227~234。
8. [英] 斯蒂芬·F·梅森。自然科学史。第 1 版。上海外国自然科

学哲学著作编译组。上海：上海人民出版社，1977。

9 . 申先甲等。物理学史教程。第 1 版。长沙：湖南教育出版社，1986。

10 . 阎康年。热力学史。第 1 版。济南：山东科学技术出版社，1990。

3. 静电学发展简史

中国古代对电现象的认识

我国古代对电的认识，是从雷电及摩擦起电现象开始的。早在 3000 多年前的殷商时期，甲骨文中就有了“雷”及“电”的形声字。西周初期，在青铜器上就已经出现加雨字偏旁的“電”字。

王充在《论衡·雷虚篇》中写道：“云雨至则雷电击”，明确地提出云与雷电之间的关系。在其后的古代典籍中，关于雷电及其灾害的记述十分丰富。其中尤以明代张居正（1525~1582）关于球形闪电的记载最为精彩，他在细致入微观察的基础上，详细地记述了闪电火球大小、形状、颜色、出现的时间等，留下了可靠而宝贵的文字资料。

在细致观察的同时，人们也在探讨雷电成因。《淮南子·坠形训》认为，“阴阳相薄为雷，激扬为电”，即雷电是阴阳两气对立的产物。王充也持类似看法。明代刘基（1311~1375）说得更为明确：“雷者，天气之郁而激而发也。阳气困于阴，必迫，迫极而进，进而声为雷，光为电”。可见，当时已有人认识到雷电是同一自然现象的不同表现。

尖端放电也是一种常见的电现象。古代兵器多为长矛、剑、戟，而矛、戟锋刃尖利，常常可导致尖端放电发生，因而这一现象多有记述。如《汉书·西域记》中就有“元始中（公元 3 年）……矛端生火”，晋代《搜神记》中也有相同记述：“戟锋皆有火光，遥望如悬烛”。避雷针是尖端放电的具体应用，我国古代巧妙地采用各种措施防雷。古塔的尖顶多涂金属膜或鎏金，高大建筑物的瓦饰制成动物形状且冲天装设，都起到了避雷作用。如武当山主峰峰顶矗立着一座金殿，至今已有 500 多年历史，虽高耸于峰巅却从没有受过雷击。金殿是一座全铜建筑，顶部设计十分精巧。除脊饰之外，曲率均不太大，这样的脊饰就起到了避雷针作用。每当雷雨时节，云层与金殿之间存在巨大电势差，通过脊饰放电产生电弧，电弧使空气急剧膨胀，电弧变形如硕大火球。其时雷声惊天动地，闪电激绕如金蛇狂舞，硕大火球在金殿顶部激跃翻滚，蔚为壮观。雷雨过后，金殿经过水与火的洗炼，变得更为金光灿灿。如此巧妙的避雷措施，令人叹为观止。

我国古人，还通过仔细观察，准确地记述了雷电对不同物质的作用。《南齐书》中有对雷击的详细记述：“雷震会稽山阴恒山保林寺，刹上四破，电火烧塔下佛面，而窗户不异也”。即强大的放电电流通过佛面的金属膜，金属被融化。而窗户为木制，仍保持原样。沈括在《梦溪笔谈》中对类似现象叙述更为详尽：“内侍李舜举家，曾为暴雷所震。其堂之西室，雷火自窗间出，赫然出檐。人以为堂屋已焚，皆出避之。及雷止，其舍宛

然，墙壁窗纸皆黔。有一木格，其中杂贮诸器，其漆器银钏者，银悉熔流在地，漆器曾不焦灼。有一宝刀，极坚钢（刚），就刀室中熔为汁，而室亦俨然。人必谓火当先焚草木，然后流金石。今乃金石皆铄，而草木无一毁者，非人情所测也。”其实，只因漆器、刀室是绝缘体，宝刀、银钏是导体，才有这一现象发生。

在我国，摩擦起电现象的记述颇丰，其常用材料早期多为琥珀及玳瑁。早在西汉，《春秋纬》中就载有“瑇瑁（玳瑁）吸（细小物体）”。《论衡》中也有“顿牟掇芥”，这里的顿牟也是指玳瑁。三国时的虞翻，少年时曾听说“虎魄不取腐芥”。腐芥因含水分，已成为导体，所以不被带电琥珀吸引。琥珀价格昂贵，常有人鱼目混珠。南朝陶弘景则知道“惟以手心摩热拾芥为真”，以此作为识别真假琥珀的标准。南北朝时的雷在《炮炙论》中有“琥珀如血色，以布拭热，吸得芥子者真也”。他一改别人以手摩擦为用布摩擦，静电吸引力大大增加。西晋张华（232~300）记述了梳子与丝绸摩擦起电引起的放电及发声现象：“今人梳头，脱著衣时，有随梳、解结有光者，亦有咤声”。唐代段成式描述了黑暗中摩擦黑猫皮起电：“猫黑者，暗中逆循其毛，即若火星”。摩擦起电也有具体应用：据宋代的张邦基《墨庄漫录》记载：孔雀毛扎成的翠羽帚可以吸引龙脑（可制香料的有机化合物碎屑）。“皇宫中每幸诸阁，掷龙脑以辟（避）秽。过则以翠羽扫之，皆聚，无有遗者”。关于摩擦起电的记载还很多。

近代电学正是在对雷电及摩擦起电的大量记载和认识的基础上发展起来的，我国古代学者对电的研究，大大地丰富了人们对电的认识。

摩擦起电 电荷

我国是最早认识摩擦起电现象的国家之一（参见“中国古代对电现象的认识”）。

在西方，相传是古希腊的泰勒斯(Thales of Miletus, 前 624 ~ 前 547) 最先掌握了摩擦起电的知识，知道摩擦琥珀可以吸引轻小物体。“电”这个词在西方是从希腊文 (琥珀) 一词转意而来的。在泰勒斯之后的一段漫长时期内，由于还没能看出电究竟有什么使用价值，所以对电的研究没有什么进展。到了 16 世纪，吉尔伯特(William Gilbert, 1544 ~ 1603) 才发现，原来有相当多的物体经摩擦后都能带电。他称这样的物体为“带电体”，而金属却不行，他称之为“非带电体”。显然，这样的分类方法是不准确的。他还认为“带电体”在被摩擦时可以向周围散发一种“电素”，电素把邻近的轻小物体与被摩擦物联系在一起，成为一个整体的两部分而相向运动，以此来解释静电吸引。1629 年卡贝乌斯(N. Cabeus, 1585 ~ 1650) 叙述了静电排斥现象，他看到铁屑被带电的琥珀吸引，接触之后又被排斥在几英寸之外。

第一台摩擦起电机是马德堡市市长盖利克制造的。他把熔化的硫磺灌入玻璃球，冷凝后将玻璃打碎制成硫磺球。把硫磺球装在竖直铁轴上，如同地球仪一样，可以转动。转动硫磺球并使之与干手摩擦，可以使硫磺球带电。他们所以用硫磺球，是由于按当时的理论，硫磺可以与“电素”很好地亲和，在摩擦时又很容易将“电素”放出。他利用这个起电机，观察到轻小物体被硫磺球吸引，接触后又被弹回，而后还可以被某些其他带电物体吸引。如果把一根羽毛放在球与地之间，羽毛会在两者之间上下跳动。盖利克的摩擦起电机经过不断改进，在静电实验中起着重要作用，直到 19 世纪霍耳茨(W. Holtz) 和推普勒(A. T. Pler) 分别发明感应起电机后才被取代。

1729 年格雷(S. Gray, 1670 ~ 1736) 发现了导体和绝缘体的区别：金属可导电，丝绸不导电。他还证明人体也是导体，并第一次使人体带电。迪费(C. F. Du-Fay, 1698 ~ 1739) 的研究更为引人注目。他认为任何物体经摩擦后均可带电，他曾把自己用丝绳吊起后带电，从而说明过去将物体分为“带电体”与“非带电体”是错误的。他发现并明确提出电的“同性相斥，异性相吸”。自格雷以来，人们普遍认为电是一种无重量的流体，可以在导体内流动，还可以从一个物体传给另一个物体。迪费认为存在着两种电流体，一种他称为玻璃电，另一种称为树脂电，当它们结合在一起时彼此中和。1746 年起，富兰克林开始了他的电学研究工作。1747 年他曾叙述过这样一个实验：让 A、B 两人站在绝缘台上，A 摩擦一根玻璃管，而

后 B 与玻璃管接触。站在地面上的 C 与 A、B 接触时都有电火花产生，可见 A、B 都带了电。重复上述过程，但让 A、B 与 C 接触前先自行接触，结果当他们分别与 C 接触时，不再有电火花产生，可见 A、B 已不再带电。为了解释这个现象，他提出了电的单一流质说。他认为只有一种电流质弥漫在整个空间，并且可以渗透在物体之中。当物体内部电流质密度与外界相同时，物体不带电。起电的实质是电流质从一些物体流向另一些物体。在上述实验中，电并不是因摩擦而创生，只是从摩擦者流向玻璃管，摩擦者失去的与玻璃管获得的相同。这就是通常所说的电荷守恒定律。他还指出，玻璃管得到了电流质，所以其密度大于外界，他称之为带正电；反之，摩擦者带了负电。“正电”和“负电”这样的术语的应用，为电学的定量研究创造了良好条件。

在早期电学实验中，莱顿瓶曾起过很大作用。在摩擦起电过程中，人们注意到电荷会很快失去。如何长期保存电荷成为人们关注的问题。1745 年克莱斯特 (Ewald Georg von Kleist, 1700~1748) 首先使用水银贮存，即把水银倒入玻璃瓶中，将摩擦起电机产生的电荷传入瓶内，电荷就能够长期保存。1746 年莱顿的穆申布鲁克 (pieter Musschenbroek, 1692~1761) 等人认为带电体会很快失去电性是因为周围空气与蒸汽的作用所致，如要长期保持带电状态，就要用绝缘体把带电体与周围空气隔开，他们用水充入玻璃瓶然后充电。多次实验证明，用这种方法可以长期保存电荷，且瓶子越薄，电击越强。他所发明的这种装置即被称为莱顿瓶。后经多人改进，或用瓶内外张贴金属薄膜，或在瓶内外镀金属膜代替装水或装水银。莱顿瓶与摩擦起电机遂成为贵族阶层的玩物，有关实验情况常常成为茶余饭后的话题。他们用莱顿瓶放电电击小鸟、老鼠等。其中最为著名的一次是由诺来特进行的，他邀请法国国王路易十五及皇室成员前来参观。他调来 700 名修道士，手拉手排成一排，全长 275 米。排头的修道士手拿莱顿瓶，排尾的手握莱顿瓶引线，在莱顿瓶放电时，700 名修道士因同时遭电击而跳起来，这一情况将在场观众惊得目瞪口呆。这次实验，显示出电的巨大威力，表明莱顿瓶的发现是电学的一大进展。

富兰克林的风筝实验与避雷针的发明

莱顿瓶放电时能够击死小鸟、老鼠等小动物，雷电时可以击死人、畜等。所以，有人推测放电电火花与天空中的闪电可能具有相同的性质。富兰克林对此作了深入的研究。在1749年11月7日的笔记中，他记下了放电与闪电的一致：“1，发光；2，光的颜色；3，弯曲的方向；4，快速运动；5，被金属传导；6，在爆发时发出霹雳声或噪声；7，在水中或冰里存在；8，劈裂所通过的物体；9，杀死动物；10，熔化金属；11，使易燃物着火；12，含硫磺气味。”摩擦产生的电与雷电竟然有这么多的特性是相同的！他开始酝酿一个大胆的实验，即制作一根长20英尺~30英尺顶端削尖的铁竿，把云中的电引下来。他认为，这项实验如能成功，那么采用相同的方法，就“可以给人类用于保护房屋、教堂、船舶等等免除闪电的轰击。”但是，这个想法没有得到英国皇家学会的支持。后来，富兰克林想，铁竿的高度总是有限的，怎样才能把铁竿伸入到云层中去呢？他想起了儿童时代玩过的风筝，于是，他用杉木搭成一个十字架，蒙上一块丝绸手帕，做成了一只风筝。它能够经受风吹雨打而不撕裂，他还在风筝上加了一根1英尺长的尖细的金属丝。在系风筝的粗麻线靠近手的一端，加上了一条丝带（非导体），接头处系上一把钥匙。1752年6月的一个雷雨天，他和儿子一起把这个负有特殊使命的风筝放了出去。麻线被雨淋湿后，纤维挺立起来。当他用手指节靠近钥匙时，打出了电火花，手感到了发麻。而后，他又用这把钥匙为莱顿瓶充了电。发现雷电与摩擦电具有相同的性质。这项实验破除了雷电是“上帝之火”的神话。一系列的实验表明，大多数云层带的是负电，所以雷击时“绝大多数是大地的电穿进云层，而不是云层的电落向大地”。到处都在重复雷电实验，彼得堡科学院院士利赫曼（L. L. Lichtenberg，1711~1753）在得知富兰克林的实验后也决心投入征服雷电的研究，他在自己家中建造一座“岗亭”，用其上的金属杆作“检雷器”，来测定云是否带电。他不放过每一次暴风雨，1753年7月26日，他在彼得堡科学院会议上听见一声巨雷后连忙赶回家去，因未检查接地设备是否有效，而献出了生命。他的牺牲提醒电学家们不能再这样死去。风筝实验的直接结果是避雷针的出现。早在1749年和1750年，富兰克林就提出过避雷针的设想，认为尖导体既能释放或吸收物体上的电，也能释放或吸收云层中的电。他建议将上端尖锐的防锈铁杆装在房屋高处直通地里，或装在船的桅杆顶再抛入水中，“在云层将要产生电击的千钧一发之际，静悄悄地把电从云中吸走，因而使我们免受最突然、最骇人的悲剧。”在风筝实验的那年夏天，他在铁棒与建筑物之间用绝缘体隔开，并称这种装置为“避雷针”，试用良好。捷克牧师狄维斯（P. Divisch）

在 1745 年首先设计出避雷针。费城一些高大建筑物因装上这种避雷针而安然无恙，在欧洲特别是法国也开始流行。

避雷针的广泛应用是早期电学研究中的一项重要成果。

库仑定律的建立

同种电荷之间存在斥力，异种电荷之间存在引力。这种力究竟多大，与哪些因素有关，这是早期电学研究中的一个颇具魅力的课题。在牛顿万有引力定律发现后，不少电学研究者对此进行了类比，但由于当时实验条件水平低下，难以得出定量的结果。18世纪50年代，德国物理学家埃皮努斯（F. U. T. Aepinus, 1724 ~ 1802）发现电荷间的相互作用力随距离减小而增加。1766年，富兰克林在给普里斯特利（J. Priestley, 1733 ~ 1804）的信中讲到：把一个软木球吊在带电的罐头盒中，软木球不受任何影响。普里斯特利在分析这个现象后，大胆猜测：“难道我们不能从这个实验推出这样的结论，即电吸引作用服从于与万有引力相同的定律，从而也就是服从距离反平方定律吗？”1769年罗宾孙（J. Robinson, 1739 ~ 1805）采用实验证明电荷间吸引力反比于间距的小于2次幂，斥力反比于间距的2.06次幂。被称作“最富有的学者，最有学问的富翁”的卡文迪什在早期电学研究中就包括电荷间相互作用力的研究。他在1772 ~ 1773年间设计了一个同心球壳电容器实验，实验表明在电荷间相互作用下，用导线把内球与外球连接起来，那么内球所带电荷全部传到外球上。由这个事实，卡文迪什得出结论：电荷之间的相互作用力反比于它们之间距离的平方，指数偏差不大于0.02。不过他一直没有公开发表他的研究成果。直到1879年麦克斯韦整理、出版了他的手稿，他的工作才为世人所知。富兰克林、普里斯特利、罗宾孙、卡文迪什等人的工作，为电学研究创造了良好条件。精确测定电荷间相互作用力，涉及到极小力的测量，库仑圆满地解决了这个难题，他区分了任意形状带电物体的“有质动力”（即含质量因素的力）与基元电荷之间的相互作用力，从而建立了以他的名字命名的定律。库仑早期曾进行扭力研究，1784年他向法国科学院提出了金属丝的扭力定律，得出扭力的大小与扭角、悬丝直径的四次方及悬丝长度倒数三者乘积成比例。由此，他可以根据这一扭力量度微小的力，并巧妙地设计了一台电秤，他欣喜地向科学院报告说：“无论物体带电如何微弱，该秤都能非常精确地量度一物体的状态和电力”。他用这台电秤首先测量了两个同种电荷的斥力，获得的数据如下：

实验次数	两球距离 刻度数	扭丝转动 刻度数
1	36	36
2	18	144
3	8.5	575.5

当两球间距比为 $1 : \frac{1}{2} : \frac{1}{4}$ 时，扭丝转角比为 $1 : 4 : 16$ 。最后一组数据略有出入，是因漏电所致。库仑由此得出：“两球带有同性电之后，其相互斥力与两球距离的平方成反比。”

由于两个带有异种电荷的球，会因相互吸引而靠在一起，使所带电荷相互中和，使测量无法进行。库仑在把电的吸引力与地球对物体的吸引力加以类比后，决定采用电摆的方法进行测量。在另一篇报告中他叙述了这一方法：“水平悬吊一针，但只使针端带电；然后将针置于距异性电球某一位置；于是，它就会因球所起的作用，而被吸引和摇摆；最后，根据某一已知时间内摆动的次数，计算各不同距离的吸力，恰如根据普通摆的摆动次数去测定引力一样。”实验装置如图 2-1-14 所示。实验结果如下

实验次数	针 I 与球 (G) 心距离 (英寸)	振动 15 次所需时间 (秒)
1	9	20
2	18	41
3	24	60

如果吸引力确与距离平方成反比，所需时间分别应为 20、40、54 秒。可见，前两次的结果与理论计算值符合得较好，而第三次存在的误差较大。库仑分析误差是由于实验时间过长（前后历时 4 分钟）及漏电引起的。对这个因素进行修正后，第三次振动 15 次需时应为 57 秒，误差就不是很大了。“这样，我们用了一个与原先绝对不同的方法而得出了同样的结果。因此，我们可以得出结论说，电流体的相互作用，正电与负电的相互吸引力，是与其距离的平方成反比的。这个结论与我们在第一次报告中所做的结论，即同种电流体的相互作用与其距离的平方成反比相同。”

这里应该说明的是，当时库仑只是证明了平方反比关系，而没有严格证明力与电荷之积成正比，库仑认为这是“无须加以证明的”，那时还没有电量的概念和单位。库仑巧妙地根据对称性采用两个相同的球平分其中一个球的带电量的办法得到同种等量电荷之间的作用。无论如何，库仑定律的建立，标志着人们对电现象的研究从定性转入定量阶段，从而使电学成为一门科学，数学由此进入电学领域，为其后的发展奠定了基础。

由于库仑定律处于电磁理论的基础地位，时至今日，库仑定律的验证性研究工作仍未停止。实验结果表明，两点电荷间距离的数量级在 $10^{-15} \sim 10^9$ 厘米范围内，库仑定律都是极精确的。

主要参考资料

1. 戴念祖。我国古代关于电的认识和发展。科技史文集(第12辑)。第1版。上海:上海科学技术出版社,1984。
2. 夏宗经,余官仿,陶宏义。武当山金顶奇观初探。自然科学史研究,1989(1):63~66。
3. [美]卡约里(Cajori, F.)。物理学史。戴念祖译。第1版。呼和浩特:内蒙古人民出版社,1981。
4. 申先甲等。物理学史简编。第1版。济南:山东教育出版社,1985。
5. 蔡宾牟,袁运开。物理学史讲义——中国古代部分。第1版:北京:高等教育出版社,1985。
6. 陈毓芳,邹延肃。物理学史简明教程。第1版。北京:北京师范大学出版社,1986。

4 . 电 流

伽伐尼电流的发现和伏打电池的发明

18 世纪末，意大利医学、物理和生理学家们热心于研究动物电问题。这一研究使人们从“静电”转向了“动电”。1780 年 11 月，意大利生理学教授伽伐尼在一次青蛙解剖实验时，他的一名助手使用的起电机产生了火花放电，这时他的另一名助手手中的解剖刀尖偶然碰到了青蛙的股神经，青蛙四腿突然猛烈痉挛起来。这使伽伐尼以极大的兴趣在各种不同条件下进行反复实验。在他的论文《肌肉运动中的电力》（1791）中，详细叙述了这些实验结果。例如：只用刀尖不引出火花，只引火花不用刀尖，都不会引起蛙腿痉挛。这些实验说明金属导体与电火花是青蛙痉挛的两个必要条件。他又在雷电时进行同样的实验，证明闪电与起电机火花作用相同。他还意外地发现：在天空晴朗时只要用钩住青蛙脊椎的铜钩与铁桌子

接触（图 2-1-15），青蛙也会痉挛。这又说明这种电流并非与电火花或闪电一定有关。在不同的时间、地点用不同的金属做实验，蛙腿都发生痉挛，只是用不同金属时，蛙腿收缩情况不同，有的较为活跃，有的较为缓慢。而用不导电或很少导电的玻璃、橡皮、树脂、石头和干木头等做实验，蛙腿全然不发生痉挛现象。在探索偶然事件发生的条件和原因的过程中，已经揭示出了现象的关键所在，即只要有两种金属夹以湿组织就可以产生电流。但由于受传统的生物电观念影响，他却得出错误结论：“我们以为动物本身就有电。我们认为这种看法是正确的。在紧缩现象发生时，有一种很细的神经流体从神经流到肌肉中去了，就像莱顿瓶中的电流一样。”伽伐尼电流现象的发现，在欧洲学术界引起巨大反响。许多人成功地重复了伽伐尼实验，有的还建立了“伽伐尼学会”；伽伐尼电流（动物电流）、电流计、电池、验电计等电学名词，都冠有“伽伐尼”（galvan）字头，有的甚至保留至今。

1792 年，意大利解剖学家柏林几尼（Berlingieri）做了这样一个实验，把蛙腿神经切断，使神经末梢与上部神经分离，用锡箔把神经末梢包好，再用弧形导线的一端与锡箔接触，另一端与肌肉接触，这时蛙腿仍能收缩。这次实验，与伽伐尼的神经电流体假说是相背的。

意大利物理学家伏打自 1791 年开始了伽伐尼电的研究工作。他曾用两种不同金属制成弧形导线，当一端与眼皮接触，一端含在嘴里，眼睛就产生光亮感觉。当用锡箔与银币夹住舌头，再用铜线把两者连接起来，“舌头会感到强烈的酸味”。他还曾用活青蛙进行过同样的实验，在用两种不

同金属制成的弧形导线一端触及蛙背，一端接触蛙腿，蛙腿肌肉竟然同样会收缩！显然，这也是不能用伽伐尼的神经电流体假说解释的。在用莱顿瓶放电刺激活蛙时，发生同样效应。这些实验，使伏打完全否定了蛙腿肌肉收缩起因于“动物电”的说法。1792年他提出“接触电”思想，“用两种不同的金属表面相互接触的方法产生非常微弱的人工电的作用”，这才是产生伽伐尼电的根本原因。1793年在他提交给皇家学会的论文中明确提出：“电的真正产生者是金属，而动物的器官只不过是电作用的对象”。伽伐尼完全把事实弄颠倒了。这以后，伏打对各种金属及其它材料相互接触时的接触电势差进行了全面研究。他发现，一种金属与某一金属接触后带正电，而同另一种金属接触后又可能带负电。究竟带哪一种，取决于该金属及与之相接触的金属。经过大量实验之后，在1796年他提出一个序列：锌、铅、锡、铁、铜、银、金、石墨、木炭。序列中的任意两种材料接触后，排在前面的带正电，后面的带负电。他还测定了序列中两两接触时的接触电势差之比，从而发现：任意两金属的电势差等于其间的相邻金属接触电势差之和。他测定出银-铜、铜-铁、铁-锡、锡-铅、铅-锌的接触电势差分别为1、2、3、1、5个单位，银-锌接触电势差为 $(1+2+3+1+5)=12$ 个单位。据此，他又有了另一项发现，不论多少种金属串联在一起，电势差仅由两端的金属决定，与中间金属无关。1794年，围绕伽伐尼电产生原因，发生了一场激烈争论。以伽伐尼的侄子阿尔迪尼(G. Aldini)等人为一方，坚持“动物电”观点。以伏打等人为另一方，坚持“接触电”观点。在激烈争论中，伏打仍在扎扎实实地进行实验。为了阐释伽伐尼电产生机制，他又于1795年提出，可以把导体分为两类：第一类为各种金属，第二类为浸过导电液体的物体。他提出：“不管将一种第二类导体放在两个不同的第一类导体之间，还是与此相反，……都会有一种电流……产生出来，这种电流的循环只是在电路被破坏时才会中断。”几年的辛勤劳动，结出了丰硕成果，他发现了增强这种效应的方法。1800年3月20日在他写给皇家学会会长班克斯(J. Banks)的信中，详细介绍了这种装置——“电堆”和“冕杯”的构造。“用30、40、60或更多的铜片，最好是银片，每片都与一块锡片（更好是锌片）接触，还有等数目的水层，……这种水层夹在每副由两种不同金属的耦合之间时（三种导体的交替必须按照同样次序）”，这就是“电堆”。这一装置，“在每次放电之后能自行充电，从而不断地作用着，提供无限的电荷，或对电液施加永恒的作用”。他用金属丝接通电堆的两端，再与皮肤接触，先是感到强烈刺激，而后接触部位感到剧烈疼痛。直到切断电路之后，痛感才消失。这种装置，后称为伏打电池。电堆的发明，为物理学界提供了一种能产生稳定、持续电流的装置。英国科学界得悉这一消息后，当即实验，从而发现了电解现象。电堆所具有的非凡魔力，给人们极深的印象。这个装置，为一大批学者，如戴维、

奥斯特、安培、法拉第等人提供了实验手段及研研课题，诞生了电化学、电磁学等新的学科领域，电学从此获得了长足进步。

电解定律的发现 蓄电池的发明

(1) 电解定律的发现

伏打电池发明后，1800年4月卡莱尔(A. Carlisle, 1768~1840)与尼科尔森(William Nicholson, 1753~1815)为了改善金属丝与极板间的接触，在接触处滴了少量水，结果产生了许多气泡。如果把电池两端的金属丝浸入装满水的管子里，一端产生出可燃气体，另一端的金属丝被氧化。如改用铂丝，另一端就放出氧气。同年9月里特(J. W. Ritter, 1776~1810)也成功地进行了电解实验，他还使硫酸盐溶液析出铜。于是，电解这门新技术引起了人们极大关注。在研究电解现象的同时，也产生了几种电解学说。其中较有影响的是格罗图斯(D. von Grothuss, 1785~1822)在1805年提出的。他认为电解水时，电池的负极吸引氢而排斥氧，正极的作用刚好相反，这种吸引与排斥作用离极越远就越弱。一旦通电，离极最近的分子分解，氢朝负极氧朝正极运动。被分解的氢与氧与邻近分子发生作用，与相邻的氧与氢结合。在沿电流的方向上，交替进行着分解与结合，在电路两端的两极上析出氢气与氧气。克劳修斯则认为，如按上述理论，分解必须在电解力大于氢氧间的吸引力时方能进行。实验表明，哪怕是微小的电势差，也可引起电解，而且电解的能力，取决于电流强度。为此，1857年他将上述学说加以修正，提出在电解质溶液中，电解质粒子不断地被分解为带正电部分与带负电部分，这两部分又重新不断地再结合。一旦接通电源，正电部分与负电部分将分别向相反方向运动。而后，1887年阿伦尼乌斯(S. A. Arrhenius, 1859~1927)提出在溶液中电解质自动离解成正、负离子，离子是带电的微粒的理论。

从1832年开始，法拉第对各种不同来源的电如“生物电”、摩擦产生的电、大气闪电、化学电池等进行了研究，弄清了不同来源的电并没有本质上的区别。在《电学实验研究》第三辑中他指出：“电学分解发生的时候，我们有充分理由相信，被分解的物质的量不是与强度成比例，而是与通过的电量成比例。”接着，他用不同浓度的硫酸实验，发现浓度、电极的大小和形状对电解物质的量都没有影响。他总结说：“我认为上述研究足以证明这样一条非常特殊而且十分重要的原理，即水受到电流影响时，它被分解的量与通过的电量刚好成正比。”这个结论，实际上是电解第一定律的一种表述。

他把电解物质由水推广到金属，测定了不少物质的化学当量(他当时把采用电解法测得的化学当量称为电化当量)，在与采用化学分析方法测定的化学当量一一进行比较后指出：“电化当量与普通的化学当量一致，甚至相同。”这实际上就包含了电解第二定律的内容。

1834年1月23日法拉第在皇家学会上提出他的论文《论电化分解(续)》，正式提出了他的电解定律。

在电解研究中，他还创造了一批关于电解的术语，如电极、阴极、阳极、电解质、离子、阴离子、阳离子等，这些术语，一直沿用至今。

(2) 蓄电池的发明

在使用伏打电池的过程中，人们发觉由于极化，电流会很快衰减，这导致人们探索如何防止极化的问题。这一时期，各种改进型电池不断出现，同时人们更希望有能够反复使用的电池。

早在1803年里特(J·W·Ritter, 1776~1810)曾作出了一个有益的发现：用两根铂丝通电进行电解水实验后，若把这两根铂丝与导体连接，这时两根铂丝的作用如同电池的两极，只不过电解前后两次的电流方向相反。有效地利用这个过程，就可以制作“取之不尽，用之不竭”的电源——蓄电池。1859年普朗忒(G·Plante, 1834~1889)率先获得成功。他把两块卷起的薄铅板浸入稀硫酸中，经过充电后就可以使用。但因充电过程复杂，限制了它的使用。1881年福尔(G·A·Faure 1840~1898)简化了充电过程，同时加大了电池的容量。蓄电池遂得到了越来越广泛的应用。

欧姆定律的建立

欧姆定律是在人们还缺乏“电流强度”、“电动势”（或“电势差”）概念，电阻概念还在摸索中，又缺乏电流计的情况下诞生的，作为一名中学教师创立这一重要定律的过程是来之不易的。

卡文迪什在研究莱顿瓶放电时已经发现，不同的导体在导电能力上存在差异。电池的发明为研究电路提供了方便的工具。戴维于 1821 年详尽地研究了不同金属的导电能力，发现导体的导电能力与它的横截面积成正比。与此同时，贝克勒尔（A . C . Becque-rel 1788 ~ 1878）发现，在长度比与横截面积比相等时，同一种金属制成的导线有相同的导电能力。在这些成果的影响下，欧姆开始了这方面的研究工作。1825 年 5 月，他发表第一篇研究论文《金属传导接触电的定律的初步表述》，通过磁针转角的大小来讨论电流电磁力的衰减与导线长度之间的关系即金属的相对传导率。7 月，他用不同的金属制成了同样直径的导线，比较它们的电导率。由这项实验他得出，如果以铜的电导率为 1000，各种金属的电导率：金为 574，银为 356，锌为 333，黄铜为 280，铁为 174，铂为 171，锡为 118，铅为 97。在后来复查时，他曾发现在拉制银导线时，其上面覆盖了油层，表面看起来直径是相同的，但实际却细得多，因而出现过银的电导率远比铜小的结果。通过这些实验他同样得出，同一材料制成的导线，当它们的长度与横截面积成正比时，它们的电导率相同。进一步的实验使他在次年得出了重要的有关电路的实验定律。在实验中，他注意到因电池的极化作用，使输出很不稳定。为了克服第一篇论文所反映的实验中的缺点，他听取了著名德国物理学家波根道夫（J . C . Poggen-dorff , 1796 ~ 1877）的建议，决定改用温差电池作为电源。好处在于 稳定，易于控制； 内电阻大为减小； 电流较小，减少了热效应的干扰。欧姆的温差电源及整个实验装置如图 2-1-16。铋铸框架 $abb a$ ，两脚分别铆上铜框架 $abcd$ 和 $a b c d$ 。铋铜腿 ab 与 $a b$ 分别插入盛沸水和冰水混合物的锡杯中形成 100 的温差。脚 d 与 d 分别插入水银杯 m 与 m 中，形成整个温差电源的两极。待试验的长度不同的 8 条镀铜铁丝两端也分别插入水银杯 m 与 m 中，与框架形成回

路，框架旁悬有磁针 tt 的扭力秤， uu 是刻度， VV 是玻璃罩， 是观察刻度的放大镜。插入的导线不会影响铋-铜的接触电动势，影响它的只是温度。在 1826 年 1 月，他在缜密分析五次实验数据后报告说：“我们已经得出的

数字，可以很满意地用下列方程予以表示： $X = \frac{a}{b+x}$ 。式中X是通电导体

对碳作用的强度，x是导体的长度，a和b是恒量，它们的量值按照激动力（后来称之为电动势）和电路其余部分的电阻而决定”。用上式计算得出的结果与用实验得出的结果只有很小的差别。进而，欧姆使温差电池的冷端保持在0，而热端保持在室温。这时仍取原先的b值，而把a值做相应的改变，计算所得数值与实验数据“至多只有半分度之差”。从而，他得出结论说，“该方程适用于激动力的任何值”，而a的值“只决定了激动力”，激动力又“恰与电路两端之间的温差成比例”。“b只决定于电路的未变部分”，用今天的术语说，就是温差电池的内阻。关于电路的实验定律就这样建立起来了。两个月后，欧姆在另一篇论文《由伽伐尼电

力产生的静电现象的理论尝试》中，将上式简化为 $X = \frac{A}{L}$ 。X是电流

的电磁力即现今的电流强度，A为某一电路上“所有电张力的总和”（即导体两端的电势差），L为该导体的“等效长度”（相当于电阻），这就是欧姆定律，这个公式是欧姆自己经常采用的形式。欧姆又进一步把电与热类比，提出了电量数学计算及关于电路的三条基本原理，建立和推导了电路的运动学方程，求解方程，就可以得出欧姆定律。1827年，他把这些成果以《用数学推导伽伐尼电路》为题发表，以便建立起他的电路理论。这本书的出版，不但没能给他带来应得的荣誉，反而使他陷入窘境，受到德国国内同行的许多非难。但国外的同行对他的工作高度赞扬，英国皇家学会把1841年科普利奖章授给他，以褒奖他引入电动势、电流强度和电阻等概念，褒奖他发现的重要定律。至此，电路的研究已发展到重要阶段，适当的基本量已经选出，且有了确定意义，因而为其后的发展奠定了坚实的基础。

低温物理与超导研究的发展

人类有意识地探索低温世界，只有 200 多年的历史。1755 年库隆 (W. Cullen) 为了满足冷冻食品的需要，制成了第一台制冷机。1823 年法拉第开始了大规模液化气体的实验，采用加压和降温两种基本方法，征服了越来越低的温度，自从获得液态氯后，又成功地液化了硫化氢、氯化氢、二氧化硫、乙炔、氨等。到了 1845 年，只有氢、氧、氮及后来发现的氦不能被液化，因此把它们叫作“永久气体”。1869 年安德鲁斯 (T. Andrews, 1813 ~ 1885) 提出，使气体液化，必须在一定温度下进行，这样就提出了临界温度的概念。“永久气体”，只因为它们的临界温度过低。只要获得足够低的温度，就没有不能液化的气体。这就促进了获得低温手段的研究。1877 年，凯莱特 (L. Cailletet, 1832 ~ 1913) 与皮克泰特 (R. Pictet, 1846 ~ 1929) 分别成功地使氧液化。凯莱特用的是类似绝热膨胀的方法，用汞把氧密封在玻璃管内，用水压机加 300 个大气压，再突然撤掉压力，使氧液化。

1895 年，林德 (K. Linde) 利用焦耳-汤姆孙效应使空气液化。他还制成了气体压缩式制冷机，为制冷技术从实验室进入工业生产做出贡献。1883 年 2 月，波兰科学家弗鲁布列夫斯基 (1845 ~ 1888) 与奥利舍夫斯基 (K. Olszewski, 1846 ~ 1915) 大量制得液体氧与氮。1898 年 5 月 10 日，杜瓦 (J. Dewar, 1842 ~ 1923) 采用焦耳-汤姆孙效应使氢液化，获得 20.4 K 的低温，进而他又用减压技术将氢固化，获得 12K 的低温。至此，永久气体中只剩下最后的堡垒——氦。1894 年荷兰物理学家昂内斯 (Kamerlingh Onnes, Heike 1853 ~ 1926) 在莱顿大学建立了第一个低温物理实验室，1904 年液化了氧，1906 年使氢液化。1908 年 7 月 10 日，他先用液氢预冷氦，再采用节流膨胀终于使氦液化。这时的温度是 4.3K，“永久气体”全部被征服。

以后，人们发现利用绝热去磁方法，可使温度降得更低。1950 年，利用铬钒和铝钒晶体绝热去磁，达到了 0.0014 K。以此为基点，以强磁场使金属原子的核磁矩沿磁场方向排列，再绝热去磁，温度可以降得更低。1956 年采用这一方法，得到 10^{-6} K 的极低温度。近年来更得到 3.3×10^{-8} K 的低温。当然，根据热力学第三定律，人们只能越来越接近绝对零度，但是不能达到。

极低温度的获得，为人们研究低温下物质特性创造了极好条件。杜瓦在他的研究中已经发现，金属电阻随温度降低而减小。昂内斯发现随温度降低，金属越纯，电阻越小。1911 年 2 月，他在液氦温区测量了金与铂的电阻，发现在 4.3K 以下，铂的电阻是一个常数值。经过仔细分析，他认为

这个常数电阻是由杂质引起的，如果金属很纯，它的电阻在氦的沸点温度时将消失。为了验证他的看法，他选择汞作为研究对象，发现在氢熔点至氦沸点之间汞的电阻逐渐减小，在 4.21K~4.19K 区间减小极快，在 4.19K 时完全消失。后来又发现铅、锡具有同样情况。1913 年他在论文中首次称这一性质为“超导性”。1914 年他以实验证明，电流在一个超导体内经过几个小时，强度仍无衰减。以后，因第一次世界大战的影响，超导研究没有什么进展。1933 年迈斯纳 (W.Meissner) 和奥克森费尔德 (R.Ochsenfeld) 发现，在进入超导态后，超导体把磁场排斥在体外，即超导体像一个理想的抗磁体，这称为迈斯纳效应。

超导机制的理论探索也在同时进行。1911 年举行的第一届索尔维会议上，昂内斯报告了超导性。朗之万 (P.Langevin, 1872~1946) 首先提出由正常态向超导态的转变，可以用两相之间的转变来描述。1924 年科梭姆 (W.H.Keesom) 第一次把热力学理论用于超导体，但没有引起人们注意。1933 年埃伦菲斯特 (P.Ehrenfest) 提出二级相变概念，在物质温度降低到转变温度时，就出现二级相变。1934 年戈特 (J.Gorier, 1907~1980) 和卡西米尔 (H.B.G.Casimir, 1909~) 提出二流体模型，这个理论虽然略显粗糙，却为以后的发展打下了基础。1935 年伦敦兄弟 (F.London, 1900~1954 和 H.London, 1907~1970) 借助于电动力学方法讨论超导，提出了伦敦方程，可以解释超导体电导无限大及迈斯纳效应。这些理论还只限于对超导现象的宏观解释。

1950 年弗勒利希 (H.Fröhlich, 1905~) 提出电子与晶格振动的相互作用是产生超导的原因，对超导微观理论的发展起了重要作用。1956 年库珀 (L.N.Cooper, 1930~) 提出电子对概念，使超导微观理论的建立迈出了关键性的一步。第二年，巴丁 (J.Bardeen, 1908~) 与库珀、施里弗 (J.R.Schrieffer, 1931~) 三人建立了完整的超导微观理论，简称 BCS 理论。不久之后，英国剑桥大学的一位 22 岁的大学生约瑟夫森 (B.D.Josephson, 1940~) 根据这一理论预言了超导隧道效应。1963 年 P.W.安德森和罗厄耳 (J.M.Rowell) 令人信服地用实验给予证实。超导技术在国民经济中有着广泛应用，但因转变温度极低，因而受到极大限制。探寻高转变温度的超导体，十分诱人。到 1986 年，米勒 (K.A.Muller, 1927~) 和柏德诺兹 (J.G.Berdnotz) 采用钡镧铜氧系陶瓷化合物，获得了高达 30K 的超导体，这一发现立即在世界范围内掀起一股超导热。他们两人因最先成功地发现了高温超导材料，荣获 1987 年度诺贝尔物理奖。1986 年 12 月 15 日，朱经武报告了他们发现 40.2K 的超导转变温度。12 月 26 日中国科学院物理所宣布获得 48.6K 的材料，少数样品在 70K 左右有超导迹象。1987 年 2 月 20 日，中科院物理所赵忠贤等获得新的钡基氧化物超导材料，起始超导转变温度高于 100K，零电阻温

度为 78.5K, 3 月 3 日日本金属材料技术研究所筑波分所又传出获得起始转变温度 123K、电阻为零的温度 93K 的超导材料。到 1992 年 5 月北京国际高温超导会议召开时, 钇钡钙铜氧化物超导体转变温度达 127.5K, 钇钡铜氧化物块状超导体在温度 77K, 磁场 7T 下临界电流密度已高达 10^4 A/cm^2 , 离大规模实际应用已为期不远。

主要参考资料

1. [美] 威·弗·马吉。物理学原著选读。第 1 版。蔡宾牟。北京：商务印书馆，1986。
2. 宋德生，李国栋。电磁学发展史。第 1 版。南宁：广西人民出版社，1987。
3. [日] 广重彻。物理学史。第 1 版。祁关泉等。上海：上海教育出版社，1986。
4. [美] 卡约里 (Cajori, F.)。物理学史。第 1 版。戴念祖。呼和浩特：内蒙古人民出版社，1981。
5. [英] W. C. 丹皮尔。科学史 (及其与宗教和哲学的关系)。第 1 版。李珩。北京：商务印书馆，1975。
6. 申先甲等。物理学史简编。第 1 版。济南：山东教育出版社，1985。
7. 刘兵，章立源。超导物理学发展简史。第 1 版。西安：陕西科学技术出版社，1988。
8. 张宝凤。低温世界的探索——超导之谜。第 1 版。北京：知识出版社，1988。
9. 陈锡光，刘国平。超导研究的简史及现状。物理学史，1989 (1)

5. 电磁联系的研究 电磁理论的建立

中国古代对磁的认识

(1) 磁石的吸铁性及其应用

我国是对磁现象认识最早的国家之一，公元前4世纪左右成书的《管子》中就有“上有慈石者，其下有铜金”的记载，这是关于磁的最早记载。公元前4世纪的《鬼谷子》中有“其察言者，若慈石之取”的话。类似的记载，在其后的《吕氏春秋》中也可以找到：“慈石召铁，或引之也”。东汉高诱在《吕氏春秋注》中谈到：“石，铁之母也。以有慈石，故能引其子。石之不慈者，亦不能引也”。在东汉以前的古籍中，一直将磁写作慈。相映成趣的是磁石在许多国家的语言中都含有慈爱之意。

我国古代典籍中也记载了一些磁石吸铁和同性相斥的应用事例。例如《史记·封禅书》说汉武帝命方士栾大用磁石做成的棋子“自相触击”；而《淮南万毕术》（西汉刘安）还有“取鸡血与针磨捣之，以和磁石，用涂棋头，曝干之，置局上则相拒不休”的详细记载。南北朝（512~518年）的《水经注》（酈道元）和另一本《三辅黄图》都有秦始皇用磁石建造阿房宫北阙门，“有隐甲怀刃入门”者就会被查出的记载。《晋书·马隆传》的故事可供参考：相传3世纪时智勇双全的马隆在一次战役中，他命士兵将大批磁石堆垒在一条狭窄的小路上。身穿铁甲的敌军个个都被磁石吸住，而马隆的兵将身穿犀甲，行动如常。敌军以为马隆的兵是神兵，故又大败（“夹道累磁石，贼负铁铠，行不得前，隆卒悉被犀甲，无所留碍”）。

古代，还常常将磁石用于医疗。《史记》中有用“五石散”内服治病的记载，磁石就是五石之一。晋代有用磁石吸出体内铁针的病案。到了宋代，有人把磁石放在耳内，口含铁块，因而治愈耳聋。

磁石只能吸铁，而不能吸金、银、铜等其他金属，也早为我国古人所知。《淮南子》中有“慈石能吸铁，及其于铜则不通矣”，“慈石之能连铁也，而求其引瓦，则难矣”。

(2) 磁石的指向性及其应用

在我国很早就发现了磁石的指向性，并制出了指向仪器——司南。《鬼谷子》中有“郑子取玉，必载司南，为其不惑也”的记载，稍后的《韩非子》中有“故先王立司南，以端朝夕”的记载。东汉王充在《论衡》中记有“司南之杓（勺子），投之于地（中央光滑的地盘），其柢（勺的长柄）指南”。

不言而喻，司南的指向性较差。北宋时曾公亮与丁度（990~1053）编撰的《武经总要》（1044年）在前集卷十五记载了指南鱼的使用及其制作

方法：“若遇天景噎（阴暗）霾，夜色暝黑，又不能辨方向……出指南车或指南鱼，以辨所向……鱼法，用薄铁叶剪裁，长二寸阔五分，首尾锐如鱼形，置炭中烧之，候通赤，以铁钤钤鱼首出火，以尾正对子位，蘸水盆中，没尾数分则止，以密器收之。用时置水碗于无风处，平放鱼在水面令浮，其首常南向午也”。需要特别指出的是，这里极为清晰地论述了热退磁现象的应用。当烧至通赤时，温度超过居里点，磁畴瓦解，这时成为顺磁体。再用水冷却，磁畴又重新恢复。这时鱼尾正对子位（北方），在地磁场作用下，磁畴排列具有方向性，因而被磁化。还应注意到，“钤鱼首出火”时“没尾数分”，鱼呈倾斜状，此举使鱼体更接近地磁场方向，磁化效果会更好。从司南到指南鱼，无疑是一个重大进步，但在使用上仍多有不便。

我国古籍中，关于指南针的最早记载，始见于沈括的《梦溪笔谈》。该书介绍了指南针的四种用法：水法，用指南针穿过灯芯草而浮于水面；指法，将指南针搁在指甲上；碗法，将指南针放在碗沿；丝悬法，将独股蚕丝用腊粘于针腰处，在无风处悬挂。磁针的制作，采用了人工磁化方法。正是由于指南针的出现，沈括最先发现了磁偏现象，“常微偏东，不全南也”。

南宋时，陈元靓在《事林广记》中记述了将指南龟支在钉尖上。由水浮改为支撑，对于指南仪器这是在结构上的一次较大改进，为将指南针用于航海提供了方便条件。指南针用于航海的记录，最早见于宋代朱彧（yù）的《萍洲可谈》：“舟师识地理，夜则观星，昼则观日，阴晦观指南针”。以后，关于指南针的记载极丰。到了明代，遂有郑和下西洋，远洋航行到非洲东海岸之壮举。西方关于指南针航海的记载，是在1207年英国纳肯（A. Neckam, 1157~1217）的《论器具》中。

（3）其他与磁有关的自然现象

极光源于宇宙中的高能荷电粒子，它们在地磁场作用下折向南北极地区，与高空中的气体分子、原子碰撞，使分子、原子激发而发光。我国研究人员在历代古籍中业已发现，自公元前2000年到公元1751年，有关极光记载达474次。在公元1~10世纪的180余次记载中，有确切日期的达140次之多。在西方最早记载极光的，当推亚里士多德，他称极光为“天上的裂缝”。“极光”这一名称，始于法国哲学家伽桑迪。

太阳黑子，也是一种磁现象。在欧洲人还一直认为太阳是完美无缺的天体时，我国先人早已发现了太阳黑子。根据我国研究人员搜集与整理，自前165年~1643年（明崇祯十六年）史书中观测黑子记录为127次。这些古代观测资料为今人研究太阳活动提供了极为珍贵、翔实可靠的资料。

遗憾的是，关于磁的认识尽管极为丰富，而关于磁现象的本质及解释，往往又是含糊的，缺乏深入细致的研究。就连被称作“中国科学史上的坐

标”的沈括，对磁现象也认为“莫可原其理”，“未深考耳”，致使在我国历史上，一直未能产生可与英国吉尔伯特《论磁》比美的著作。

西方古代对磁的认识

在西方民族的古代文献中，有大量关于磁铁性质的记载，传说为古希腊第一个哲学家的泰勒斯（Thales，约前 624 ~ 约前 547）被认为是西方最早记述了磁石吸铁性质的人。古罗马诗人卢克莱修（Lucretius，前 99 ~ 前 56）曾把一撮铁屑放在黄铜盆内，再把磁石放在盆下，看见了铁屑“在黄铜盆内狂欢”。4 世纪时的罗马大臣安比里库（Empiricus）描述过磁铁的吸引与排斥。著名的罗马帝国思想家奥古斯丁（Aurelius Augustinus，354 ~ 430）神父也曾记述过一些磁现象，如磁石可以吸引很多铁环形成链条，银不能阻断磁石的吸铁作用。在欧洲进入漫长、黑暗的中世纪之后，磁学没有什么进展。

生活在 13 世纪的帕雷格伦纳斯（P. Peregrinus）被认为是西方最早对磁现象进行系统研究的学者。1269 年他汇集了自然研究者、占星术士、航海者的知识，写出了《关于磁石的书简》。在该信中，他提出在磁石中有两个部位磁性最强，他称之为“磁极”。同性磁极相互排斥，异性磁极相互吸引。磁针并非指向正南、正北，而是略微偏向东、西。这样，在西方学者中，应是他最先认识了磁偏角。如果将一块磁石分成两块，会得到两个完整的磁体。如果强使两个相同的磁极合在一起，会使其中的一个极性反转。他还在作指向用的磁针上加了具有方位的刻度盘。他的研究工作在 300 年后，才由英国医生吉尔伯特继承和发展。由于航海的实际需要，人们十分重视磁针的指向性。在欧洲，最早记述这方面情况的是英国一位修道院院长纳肯（Neckam，1157 ~ 1217）。他曾记述，在云遮太阳或黑夜不辨方向时，以铁针摩擦磁石，可用以指向。在阿拉伯人中，也有同样的记载。在不能按星辰确定方位时，将磁针穿过稻草杆而浮于水面，用以确定方向。因而指南针在阿拉伯人中，被视作“商人之宝”。为了便于在航海中使用，水罗盘逐渐演变成旱罗盘。13 世纪时，出现了用轴支持磁针的方法。卡尔丹诺（G. Cardano，1501 ~ 1576）提出采用悬垂方法以代替支撑。

对磁偏角与磁倾角方面的研究。磁针，尤其是悬垂磁针的使用，使人们有了更多的新发现，并导致了对地磁现象做进一步研究。前述帕雷格伦纳斯虽早有磁偏现象的记载，但因其成果长期被埋没，遂有哥伦布（C. Columbus，约 1451 ~ 1506）在远洋航行时于 1492 年在亚速尔群岛以东发现磁偏角之说。

1544 年德国牧师哈特曼（G. Hartmann，1489 ~ 1564）发现了磁倾角。1576 年英国地质学家诺曼（R. Norman）也发现了磁倾角，并制出磁倾仪，从而测量了伦敦地区的磁倾角为 $71^{\circ} 50'$ 。他于 1581 年出版《新的吸引》一书，这本书被认为是最早的地磁学专著。地磁场强度的研究对地磁场强

度的实际测量开始得比磁倾角与磁偏角晚。1769年，马来（J. Mallet）率先进行了测量，由于仪器设备粗劣，没能发现不同地区的场强差别，致使有人提出地球上的磁场强度处处相等。直到1788年左右，才有了地磁场强因地而异的证据。1798~1804年洪堡（Humboldt, Alexander von, 1769~1859）在南美地区对地磁进行综合测量，并把赤道的磁场强度设定为1。19世纪以后，磁学测量开展了广泛的国际合作。

与此同时，人们也在探究磁的本源。吉尔伯特在总结各种磁的知识并制作磁球、磁针、磁石仪器的基础上写下了《论磁》（1600）一书，并把地球类比于磁球，以解释地磁极的存在和磁倾角与磁偏角的形成，他错误地认为地球自转也是由于磁力。他还提出过一些思辨性的见解，认为磁铁具有灵魂那样的东西。第一个科学的磁学理论是由笛卡儿在《哲学原理》一书中提出的。他提出了磁流体涡旋运动的假说，从而暗示了磁是物质的一种闭合的涡旋运动形式。哈雷为了解释地磁现象，于1683年提出地球是一个具有四个磁极的磁体，每半球有二个磁极，它们缓慢地作相对运动。

对磁的深入认识，见于后来奥斯特的发现。

电与磁联系的初步研究

静电、静磁的一些现象，早已为人们所知。有趣的是，在我国古代不少典籍中，常常把电与磁放在一起阐述。如东汉王充在《论衡》中就说：“顿牟掇芥，磁石引针”。三国时虞翻发现“琥珀不取腐芥，磁石不受曲针”。东晋时郭璞也有“磁石吸铁，玳瑁取芥”的记载。当然，上面的论述并不表明他们已经发现了电与磁的联系。

在西方，标志着磁学研究开始的吉尔伯特的《论磁》，认为电与磁两者截然无关。这种思想影响深远，就连库仑这样的科学家也曾错误断言，电与磁是完全不同的实体，托马斯·杨也持有类似的看法。到18世纪时，不时有些发现，表明电与磁存在某种联系。1731年，威克菲尔德的一位商人曾谈到，在一次雷闪中，他的刀、叉被磁化。1751年，富兰克林曾使用莱顿瓶放电，使焊条、钢刀磁化或退磁。1774年巴伐利亚研究院曾就这一课题，悬赏征集“电与磁是否存在着实际的、物理的类似性”的解答。

伏打电堆的发明，为电、磁联系的研究提供了有利的物质条件。当时人们普遍认为，这种联系应体现在电堆的两极与磁铁的两极之间具有某种静力作用。但没有人取得什么成果。后来丹麦物理学家奥斯特独辟蹊径于19世纪20年代初，发现了电流的磁效应，做出了在电磁学发展史上具有重大意义的发现。1812年，奥斯特在《关于化学力与电力的等价性研究》的论文中提出“我们应该检验电是否以最隐蔽的方式对磁体有所影响”。他想这种作用不应该是沿电流方向的，很可能是一种横向作用。因而，在实验过程中，他一直把导线垂直于磁针放置，实验毫无结果。1820年4月的一天晚上，他在讲课中讲述这些思考过程时，“灵机一动”，“如果磁针平行于导线会怎样”，结果他看到电流接通后磁针明显地摆向与导线垂直的方向。这正是他梦寐以求的！他随即反复作了60次实验，把磁针放在不同位置上，观察电流对其作用的强弱。他采用金、银、铂、铜和铁等各种导线，实验都很成功。他还把玻璃、木、水、树脂、陶器等置于导线与磁针之间，甚至把磁针放在一铜盆的水中，效应也无丝毫变化。最后他肯定“电流的磁效应是围绕电流呈圆环状的”。1820年7月21日，他将实验结果以《关于磁体周围电冲突的实验》为题发表。这篇仅有4页的论文，叙述了他的60个实验的结果，在科学界引起极大的反响，电磁学时代就这样开始了。被麦克斯韦誉为“电学中的牛顿”的法国数学家安培对奥斯的实验做出了异常迅速的反应。他在1820年的9月18日、9月25日、10月9日连续提交三篇论文。在9月18日的论文中，提出了磁针偏转方向与电流方向之间关系的安培右手定则。根据环形电流的磁作用相当于一根条形磁铁，他提出地球的磁性起源于从东向西绕地球做圆周运动的电

流。在 9 月 25 日的论文中绘出了两平行同向电流之间相互吸引，反向电流间相互排斥的结论。于是，他参照牛顿力学来解决电学问题。他认为电磁学中 与牛顿力学中质点概念相对应的概念是“电流元”，他试图把一切电磁作用都简化为电流元之间的相互作用。自 1820 年底开始，他通过实验研究两电流元之间的相互作用，以便实现他把电磁现象归结为电流元间的超距有心力作用的愿望。他把自己的理论取名为“电动力学”，以将它和静电学分开，并把磁相互作用看作圆电流的相互作用，从而把磁学作为电动力学的一部分。1820 年 9 月 25 日在安培提交第二篇论文的同一天，阿拉果提交了《关于钢和铁在电流作用下磁化的实验》一文。该论文介绍了将铜丝通电后，铜丝也像磁铁一样吸引铁屑而不是铜屑，断电后，被吸铁屑立刻自行脱落。戴维也独立地作出相同的发现。循着这一思路，斯特金（W. Sturgeon, 1783 ~ 1850）制成电磁铁，能够吸起自身重量 25 倍的铁块。亨利进行了改进，制成了更强大的电磁铁。1820 年 10 月 30 日及 12 月 18 日，毕奥（J.B. Biot, 1774 ~ 1862）和萨伐尔（F. Savart, 1791 ~ 1841）在法国科学院报告了长直通电导线对磁针的作用规律，后经数学家拉普拉斯概括，得出毕奥—萨伐尔—拉普拉斯公式，即电流元在空间产生的磁场强度公式。1821 年 9 月 3 日，法拉第发现小磁针有沿环绕导线的圆周转动的倾向。在同年，他成功地使通电铁丝绕磁铁旋转；使通电铁丝固定后，磁铁又绕铁丝转动。1831 年，他完成了“磁生电—电磁感应”的发现。人们对电与磁之间的联系，有了越来越深刻的认识。后来麦克斯韦通过电磁场理论的建立将电学磁学和光学统一起来。

法拉第电磁感应定律的建立

1821年，安培根据通电闭合回路的作用与磁铁相同，提出磁铁内存在一个大的环形电流，后经菲涅耳提示，提出分子电流假说。安培与菲涅耳分析了钢、铁中的分子电流能在外界磁力或电力作用下规则排列，接着想到磁铁中的分子电流能否使绕在磁铁上的线圈产生电流呢？他们分别进行了尝试性研究，不能否认，他们所做的一些实验中曾出现过感生电流，但由于期待的是由静止磁铁与稳定电流产生电流，他们都没能在研究中发现已经产生了的感生电流。

1822年，阿拉果和洪堡在格林尼治小山上测量地磁场强度时，发现了金属可以阻尼磁针的振荡但解释不了它。在1824年阿拉果又做了圆盘实验，发现在悬吊的磁针下置一圆盘，当转动圆盘时，磁针会随之转动，但稍有滞后。反之，转动磁针，铜盘也随之转动。这个实验在科学界引起震动，但也无法圆满解释。

奥斯特发现电流磁效应后，为了解释一系列电、磁现象（包括阿拉果圆盘实验）形成了激烈的争论。安培认为把磁约化为电的“电动力”是基本力，毕奥则认为电和磁不可分，即电磁力是基本力。这场争论使法拉第倾向于电和磁是一种和谐、对称的现象，都属于自然力的一种形式。

从1821年开始，法拉第做了许多实验，到1831年才获得成功。在这一年8月29日的日记中，记述了他首次获得的成功。如图2—1—17所示，用一根直径7/8英寸的软铁棒弯成一个外径为6英寸的圆环，环上的A边绕有三股

图2—1—17 法拉第发现感应电流的线圈示意图

各长24英尺的纱布绝缘铜线线圈，另一边B绕有两股总长60英尺的纱布绝缘铜线线圈。用10对4英寸见方的金属电极组成电堆。把B边的两线圈用一导线连通，在该导线下方放一小磁针。这时，把电堆接通A边的一个线圈，“立即对磁针产生了可以观察到的作用”。断开电堆时，“磁针又一次受到扰动”。把A侧的三个线圈接通当作一个线圈使用，通电后，磁针所受的作用显著增加。盼望已久的感生电流终于出现了。他认为这是由于电源开闭引起的感应，所以称之为“伏打感应”。但是，他认为自己“还只是抓住了一些好东西”，“还不能说明白”。后来，他将软铁棒去掉，发现电键通、断的瞬间也有感生电流出现；在接通以后，通电线圈变热，接电流计的线圈却没有电流。同年9月24日，他又做了一个如图2-1-18所示的电磁感应仪，在两个条形磁铁N、S极之间夹一绕有线圈的铁棒，

该线圈与电流计相连。在铁棒脱离或接触磁铁两极时，电流计均偏转。直到这时，他才领悟到感生电流的产生是一种暂态效应。10月17日他完成了一项新的实验，把一个线圈与电流计相连，再用一个直径为 $3/4$ 英寸，长 $8\frac{1}{2}$ 英寸的条形磁铁，迅速插入线圈，此时指针偏转。抽出磁铁

时，指针再次偏转，但方向相反。如将磁铁往复插入与抽出，指针就会不停地来回摆动。他发现磁铁运动也能激发出电流，他称之为“磁感应”。

11天

后，他完成了“旋转铜盘”实验（如图2-1-19）。一个直径12英寸厚 $1/5$ 英寸的铜盘，边缘伸入磁铁两极之间。电流计的两端分别连接圆盘的中心轴和边缘。转动铜盘时，指针偏转；加大转速，指针偏转角度加大。铜盘向相反方向旋转时，指针向相反方向偏转。由此获得了稳定的感生电流。他将导线端改为两个电刷，分别放在圆盘不同部位以测定感生电流的最佳方向。这是现代直流发电机的雏型。当他向朋友们演示这一实验时，在场的一个人以嘲笑的口吻问道：“先生，你发明的这个玩艺儿有什么用呢？”法拉第反问道：“夫人，新生的婴儿又有什么用呢？”

1831年11月24日，法拉第向皇家学会提交的论文中，将感生电流产生条件概括成五类：（1）变化的电流；（2）变化着的磁场；（3）运动的稳恒电流；（4）运动的磁铁；（5）磁场中运动的导体。他把这些现象统称为“电磁感应”。在这一现象的基础上，他提出“电紧张态”及力线的概念。他指出，当通过回路的磁力线数发生变化时，回路就会有电流产生，从而揭示出感生电动势产生的原因。1851年，他在《论磁力线》一文中总结说：“导线的运动不论是垂直的还是倾斜的，也不论是从哪一个方向跨过力线，它总是把所跨过的线所代表的总力加在一起”。因此：“普遍说来，被推入电流的电量直接与切割的磁力线的总数成正比”。这为电磁感应定律提供了鲜明的物理图象。

在瑞士、美国、俄国也都进行了同一内容的研究。瑞士物理学家科来顿（J. D. Colladon, 1802~1892）就曾做过类似实验。他把一个线圈接在电流计上，并把电流计放在另一个房间。他用磁铁在线圈中插入、拔出，然后再跑到另一个房间去观察电流计。当然，每次他都看不到电流计的偏转。

美国物理学家亨利于1830年8月，将一个线圈与40英尺外的电流计相连，线圈被置于一个电磁铁的两极之间。在电磁铁接通与断开的瞬间，都观察到了电流计指针的偏转。1832年，他从法拉第的工作认识到，自己在电磁铁实验中开关断开时产生大的电火花，是由于电流切断时发生了感应。因此，他获得了发现“自感”现象的荣誉。法拉第在1834年也独立地

发现了自感。

曾任彼得堡大学物理学教授的楞次在得知法拉第实验后，进行了一系列研究工作。1834年在《物理化学年鉴》上发表《论如何确定由电动力感应所引起的伽伐尼电流的方向》一文，提出了著名的“楞次定律”。在该文中，他这样叙述感生电流的方向：“如果金属导体接近一电流或磁体，那么在这导体中就会产生伽伐尼电流，这电流的方向是这样的：它倾向于使导体发生与实际位移方向相反的移动”。

电磁感应定律的数学表达式最后由诺埃曼（F. E. Neumann, 1798 ~ 1895）和韦伯完成。1845年，诺埃曼在引入矢势概念的基础上，首先绘出了定量表达式。次年，韦伯由安培公式出发，得出了同样形式，但他们都是站在超距作用的观点上。随着人们对电磁感应认识的深化，超距作用让位于媒递作用，诞生了麦克斯韦电磁场理论。作为电磁场理论的一个组成部分，人们对电磁感应定律的含义才有了真正的理解。

场的概念的提出与建立

19 世纪上半叶，电磁学得到迅速发展，并逐渐形成了两大派系。一派为安培开创，由韦伯、诺埃曼等人继承。他们认为电的或磁的相互作用是直接的，不需要中介，也不需要任何传递时间（后有人修改为延迟作用），这种观点称作超距作用观点。这种观点认为，两个质点或电荷（磁体）存在相互作用是因为它们双方都同时存在，只有单独一方时，似乎不存在这种作用能力。当对方出现时，便产生一个力，这个力接着消失在空间，进而又突然作用在对方。

被称作“正确理解电磁现象的带路人”的法拉第独树一帜，他提出：（1）电和磁的作用不可能没有中介地从一个物体传到另一个物体，而是通过处于中间的介质传送的。（2）为解释电磁感应现象的“电紧张态”概念，他认为正向的或反向的感生电流会在螺线管或导体移近或离开磁铁的所有那些情况中持续产生，因为在那段时间内，电紧张态升到较高或降到较低的程度。（3）因为只用一根磁棒和少量铁屑，就可以在硬纸板上把磁力线清晰地显示出来，他深信磁力线的真实性。（4）他认为电场中的介质被极化，极化粒子一个接一个地排列成感应力线，电的作用就是沿感应力线传递的。（5）电荷间的作用力除与电量及距离有关外，由于极化的影响，还与中间的介质有关。

力线的思想，经过 20 多年的思考、酝酿，法拉第于 1851 年在《关于磁力的物理线》中提出：“过去我曾将磁棒周围某些磁力线予以叙述和说明，并建议用这种线来准确表示磁棒内、外任何区域磁力的本性、情况、方向和数量”。“在磁体内外，物理力线确实存在。它们以曲线形式或直线形式存在着”。“电力……是沿着一条曲线而起到作用的。……物理的电力线是存在的”。说到电磁感应，他指出：“无论导线是垂直地还是倾斜地跨过力线，也无论它是沿某一方向或沿另一方向，它都把它所跨过的力线所表示的力汇总起来”，“形成电流的力正比于切割的力线数”。在《电学实验研究》中，他曾概述地提出“力线”的根据是：（1）数学家证实这种力线的大小方向正确；（2）很多事例证明运用力线成功；（3）能概括磁体、电源的动态与静态；（4）欧拉的证明；（5）牛顿概念的困难；（6）光的微粒论与波动论之间的斗争及实验事例。

对物质抗磁性的发现，使法拉第意识到磁力线并不为物质所固有，而属于空间，物质并不能产生磁力线，但却可以改变磁力线的分布。到了 1855 年，他在《论磁哲学的一些观点》一文中提出判别磁力线实体的四项标准：物质可以改变磁力线的分布；力线的存在与物体无关；具有传递力的能力；在时间中传播。由此可以看出，他的力线思想正在逐渐上升为场的思想。

法拉第把人们的注意力由电荷、磁体以及它们之间的相互作用引向空间，描写物理现象最重要的不是带电体，也不是粒子，而是带电体之间与粒子之间的空间中的场。他为我们描绘了这样一幅电磁作用图景：在带电体、磁体、电流周围的空间中，充满着一种介质，可以传递电、磁作用，这就是电场、磁场，而电磁场最直观的描述就是力线。对此，爱因斯坦给以高度评价：“法拉第的一些观念，……它们的伟大和大胆是难以估量的。……借助于这些新的场概念，法拉第就成功地对他和他的先辈所发现的全部电磁现象，形成了一个定性的概念。”麦克斯韦在研读法拉第著作时，为法拉第只用很少几个简洁的观点，就阐述了电磁学错综复杂的内容所吸引。他决定为法拉第的场概念提供数学基础，从而选准力线为主攻方向。1855~1856年，他提出了第一篇电磁学论文《论法拉第力线》，在这篇文章中，他将力线与不可压缩流体的流线相类比，而这种类比是几何的类比，即“是关系之间的相似性，而不是有关事物之间的相似性”。如把正、负电荷比作流体的源和壑，电力线比作流管，电场强度比作流速，并引入了一个新的矢量函数描述电磁场。这是麦克斯韦用数学工具表达法拉第学说的开端。1861~1862年的《论物理力线》一文中的思想已超过法拉第。他尝试以一种充满空间的介质来说明法拉第力线的应力性质，从而建立起能够说明电磁作用的力学模型。这一努力取得了丰硕的成果，不仅对各种电磁现象的联系，提供了统一的解释，而且挖掘出更深入的内在本质，即在该文中提出了“位移电流”和“电磁波”新概念。这是麦克斯韦为建立电磁场理论而迈出的关键性的一步，从而实现了重大突破。1865年发表的《电磁场的动力学理论》，则在实验事实及动力学基础上构筑了一座全新的电磁学理论大厦。他说：“我所提出的理论可以称为电磁场理论，因为它涉及电体或磁体邻近的空间”。而电磁场则是指“包括和环绕那处于电或磁情况的物体的一部分空间”。在这篇论文中，他列出了含有20个变量的20个方程，包含了全部已知的电磁学内容。从法拉第到麦克斯韦，场的概念经过一番奋斗终于在物理学中取得了它的地位。麦克斯韦在自己的理论中提出能量定域在电磁场中，从而赋予场以最为重要的实在性——能量。1899年俄国物理学家列别捷夫（С. П. Лёвенталь, 1866~1912）证明了电磁场理论所预言的光压的存在，这表明电磁场也具有动量。W·汤姆孙曾说过：“我与麦克斯韦争论了一辈子，不承认他的光压，而在这里……列别捷夫迫使我在他的实验面前认输了”。再联系汤姆孙提出的电磁质量的概念，那么场的物质性的重要属性——质量、动量、能量业已齐备。“在一个现代的物理学家看来，电磁场正和他所坐的椅子一样地实在。”（《物理学的进化》96页）。

麦克斯韦电磁场理论从超距作用过渡到以场为基本变量，是科学认识的一个革命性变革，因为电磁场可以独立于物质源而以波动形式存在，静

电的相互作用就不可再解释为超距作用了。引力也是如此。因此牛顿的超距作用就退让给了以有限速度传播着的场了。

电磁场波动方程证明电磁波是一种横波，它的传播速度是仅仅根据电磁学测量就能确定下来的恒量，这个数值又与真空中的光速十分接近，麦克斯韦大胆断言：“光本身，是一种电磁干扰，它是波的形式，并按照电磁定律通过电磁场传播”。这样电磁场理论就把电、磁、光学规律统一起来，完成了人类认识史上又一次“大综合”。电磁场理论又为狭义相对论提供了雏型。可以毫不夸张地说，它是物理学发展史上的一座里程碑。但它的思想太不平常了，只能逐渐地被物理学家们接受，一直到赫兹成功地实现电磁波——脱离了源而独立存在的电磁场以后，对电磁场理论的抵抗才被完全摧垮。难怪爱因斯坦赞扬说：“法拉第和麦克斯韦的电磁场理论，……是牛顿时代以来物理学的基础所经历的最深刻的变化。”

主要参考资料

1. 蔡宾牟，袁运开。物理学史讲义——中国古代部分。第1版。北京：高等教育出版社，1985。
2. 申先甲等。物理学史简编。第1版。济南：山东教育出版社，1985。
3. [英]李约瑟。李约瑟文集：李约瑟博士有关中国科学技术史的论文和演讲集，1944~1984。潘吉星。沈阳：辽宁科学技术出版社，1986。
4. 自然科学史研究所。中国古代科技成就。第1版。北京：中国青年出版社，1978。
5. [英]沃尔夫(Wolf, A.)。十六、十七世纪科学技术和哲学史。第1版。周昌忠等。北京：商务印书馆，1985。
6. 陈毓芳，邹延肃。物理学史简明教程。第1版。北京：北京师范大学出版社，1986。
7. 宋德生，李国栋。电磁学发展史。第1版。南宁：广西人民出版社，1987。
8. [日]广重彻。物理学史。第1版。祁关泉等。上海：上海教育出版社，1986。
9. 陈秉乾，王稼军。电磁感应定律的定量表达式是怎样得出的？大学物理，1987(3)：31~35。
10. A. 爱因斯坦，L. 英费尔德。物理学的进化。第1版。周肇威。上海：上海科学技术出版社，1962。
11. [美]威·弗·马吉。物理学原著选读。第1版。蔡宾牟。北京：商务印书馆，1986。
12. [苏]B. 瑞德尼克。常第1版。周昌忠。北京：科学普及出版

社，1981。

6. 对光和本性的认识

中国古代对光的认识

我国古代对光的认识是和生产、生活实践紧密相连的。它起源于火的获得和光源的利用，以光学器具的发明、制造及应用为前提条件。根据古籍记载，我国古代对光的认识大多集中在光的直线传播、光的反射、大气光学、成像理论等多个方面。

(1) 对光的直线传播的认识

早在春秋战国时《墨经》已记载了小孔成像的实验：“景，光之人，煦若射，下者之人也高；高者之人也下，足蔽下光，故成景于上，首蔽上光，故成景于下……”。指出小孔成倒像的根本原因是光的“煦若射”，以“射”来比喻光线径直向前、疾速似箭、远及他处的特性，生动而准确。

宋代，沈括在《梦溪笔谈》中描写了他做过的一个实验，在纸窗上开一个小孔，使窗外的飞鸢和塔的影子成像于室内的纸屏上，他发现：“若鸢飞空中，其影随鸢而移，或中间为窗所束，则影与鸢遂相违，鸢东则影西，鸢西则影东，又如窗隙中楼塔之影，中间为窗所束，亦皆倒垂”。进一步用物动影移说明因光线的直进“为窗所束”而形成倒像。

(2) 对视觉和颜色的认识

对视觉在《墨经》中已有记载：“目以火见”。已明确表示人眼依赖光照才能看见东西。稍后的《吕氏春秋·任数篇》明确地指出：“目之见也借于昭”。《礼记·仲尼燕居》中也记载：“譬如终夜有求于幽室之中，非烛何见？”东汉《潜夫论》中更进一步明确指出：“夫月之视，非能有光也，必因乎日月火炎而后光存焉”。以上记载均明确指出人眼能看到东西的条件必须是光照，尤其值得注意的是认为：光不是从眼睛里发出来的，而是从日、月、火焰等光源产生的。这种对视觉的认识是朴素、明确、比较深刻的。

颜色问题，在我国古代很少从科学的角度加以探索，而着重于文化礼节和应用。早在石器时代的彩陶就已有多种颜色工艺。《诗经》里就出现了数十种不同颜色的记载。周代把颜色分为“正色”和“间色”两类，其中“正色”是指“青、赤、黄、白、黑五色”。“间色”则由不同的“正色”以不同的比例混合而成。战国时期《孙子兵法·势篇》更指出：“色不过五，五色之变不可胜观也”。可见这“正色”和“间色”的说法，与现代光学中的“三原色”理论很类似，但缺乏实验基础。清初博明对颜色提出“五色相宣之理，以相反而相成。如白之与黑，朱之与绿，黄之与蓝，乃天地间自然之对，待深则俱深，浅则俱浅。相杂而间，色生矣”（《西

斋偶得三种》)。这里孕育了互补色的初步概念，虽未形成一定的颜色理论，但从半经验半思辨的角度看也实在是难能可贵的。

(3) 光的反射和镜的利用

我国古代由于金属冶炼技术的发展，铜镜在公元前 2000 年夏初的齐家文化时期已经出现。后来随着技术的发展，古镜制作技术逐渐提高，应用范围逐渐扩大，种类也逐渐增多，出现了各种平面镜、凹面镜和凸面镜，甚至还制造出被国外称为魔镜的“透光镜”。1956~1957 年河南陕县上村岭 1052 号虢国墓出土过春秋早期的一面阳燧（凹面镜），它直径 7.5 厘米，凹面呈银白色，打磨十分光洁，背面中心还有一高鼻纽以便携带，周围是虎、鸟花纹，图 2-1-20 是它的镜背及剖面图。镜的利用为光的反射的研究创造了良好的条件，使我国古代对光的反射现象和成像规律

有较早的认识。这方面的记载也较多。

关于平面镜反射成像，《墨经》中记载：“景迎日，说在转”。说明人像投在迎向太阳的一边，是因为日光经过镜子的反射而转变了方向。这是对光的反射现象的一种客观描写。

关于平面镜组合成像，《庄子·天下篇》中记载：“鉴以鉴影，而鉴以有影，两鉴相鉴，则重影无穷”。生动地描述了光线在两镜之间彼此往复反射，形成许许多多像的情景。《淮南万毕术》记载：“取大镜高悬，置水盆于其下，则见四邻矣”。其原理和现代的潜望镜很类似。对凸面镜成像的规律，在《墨经》中有所叙述：“鉴团，景一，说在刑之大”。经说中进一步解释说：“鉴，鉴者近，则所鉴大，景亦大，其远，所鉴小，景亦小，而必正”。它说明了凸面镜只成一种像，物体总成一种缩小而正立的像，对凸面镜成像规律作了细致描写。关于凹面镜，《墨经》记载：“鉴洼，景一小而易，一大而正，说在中之外、内”。说明当时已认识到凹面镜有一个“中”（指焦点和球心之间）。物在“中”之外，得到比物体小而倒立的像，物在“中”之内，得到的是比物体大而正立的像，这种观察是细致而周密的。《淮南子·天文训》记载：“阳燧见日则燃而为火”。这说明我国古代已认识到凹面镜对光线有会聚作用。《梦溪笔谈》中也有记载：“阳燧，面洼，以一指迫而照之则正，渐远则无所见，过此遂倒”。此处不仅表述了凹面镜成像的规律，还提出了测定凹面镜焦距的一种粗略方法，发现成正像和倒像之间有个分界点。《梦溪笔谈》又说：“阳燧面洼，向日照之，光皆聚向内，离镜一、二寸，光聚为一点，大如麻菽，着物则火发，此则腰鼓最细处也”。作者（沈括）把聚光点形容如芝麻和豆粒那么大小，又把它称作“碍”，用“腰鼓最细处”形象地比喻光束的会聚，十分贴切。

(4) 对大气光学现象的探讨

大气光学现象是我国古代光学最有成效的领域之一，早在周代由于占卜的需要，已建立了官方的观测机构，虽然他们的工作蒙上了一层神秘的色彩，但是对晕、虹、海市蜃楼、北极光等大气光学现象的观测与记载是长期、系统而又深入细致的，世所罕见。《周礼》中记载有“十”，指的是包括“”和“虹”等在内的十种大气光学现象。到唐代对它的认识更加细致、深入。《晋书·天文志》中明确指出：“日旁有气，圆而周布，内赤外青，名曰晕”。此处不仅为晕下了定义，而且把晕按其形态冠以各种形象的名称，如将太阳上的一小段晕弧叫做“冠”；太阳左右侧向内的晕弧叫做“抱”等等。另外在《魏书·天象志》中对晕也有记载。除此以外，在宋朝以后的许多地方志中也记载有大气光象，还出现了关于大气光象的专著及图谱，其中《天象灾瑞图解》一直流传至今。

殷商时期，就出现了有关虹的象形文字，对虹的形状和出现的季节、方位不少书也有所记载，如《礼记·月令》指出：“季春之月……虹始见”，“孟冬之月……虹藏不见”。东汉蔡邕（132~192）在《明堂月令》中写道：“虹见有青赤之色，常依阴云而昼见于日冲。无云不见，太阳亦不见，见辄与日相互，率以日西，见于东方……”。这些记载虽然是很粗浅的，经验性的，但它却是关于虹的确凿记录。魏、晋以后，对虹的本质和它的成因逐渐有所探讨，南朝江淹说自己对虹“迫而察之”，断定是因为“雨日阴阳之气”而成。唐初已认识到虹的成因，“若云薄漏日，日照雨滴则虹生”，明确指出“日照”和“雨滴”是产生虹的条件。后来，张志和在《玄真子·涛之灵》中明确指出：“背日喷乎水，成虹霓之状”。第一次用实验方法得出人工造虹。到南宋时，蔡卞在《毛诗名物解》中，对这一方法更有发展：“今以水喷日，自侧视之则晕为虹”。不仅重复了《玄真子》中的实验方法，而且更进一步指出了观察者所在的位置。在国外对虹的成因作出解释的是在13世纪，因此我们对虹成因的正确描述比西方早约600年。

关于海市蜃楼，我国古代也早有记载，如《史记·天官书》：“蜃气象楼台”。《汉书·天文志》：“海旁蜃气象楼台”。《晋书·天文志》：“凡海旁蜃气象楼台，广野气成宫阙，北夷之气如牛羊群畜穹庐，南夷之气类舟船幡旗”。这是对海市蜃楼的如实描写，但当时并不了解其成因和机理。到宋朝苏轼对它才有较正确的认识，他在《登州海市》中说：“东方云海空复空，群山出没月明中，荡摇浮世生万象，岂有贝阙藏珠宫”。此处明确地表示海市蜃楼都是幻景，蜃气并不能成宫殿的思想。到明、清之际，陈霆、方以智等人对海市蜃楼作了进一步探讨，陈霆认为海市蜃楼的成因是：“为阳焰和地气蒸郁，偶尔变幻”。方以智认为“海市或以为蜃气，非也”。张瑶星认为蓬莱岛上的蜃景是附近庙岛群岛所成的幻景，后来揭暄和游艺画了一幅如图2-1-21所示的“山城海市蜃气象楼台图”，

图上右方是左方楼台的倒

影。文中记载了登州（即蓬莱）海市，并说：“昔曾见海市中城楼，外植一管，乃本府东关所植者。因语以湿气为阳蒸出水上，竖则对映，横则反映，气盛则明，气微则隐，气移则物形渐改耳，在山为山城，在海为海市，言蜃气，非也。”这一“气映”说是对当时海市蜃楼知识的珍贵总结。

极光是一种瞬息变幻、绚丽多彩的大气光象，中国处在北半球，故观察到的只能是北极光。早在二千年前，我国就对北极光加以观察，并有所记载，《竹书纪年》中记载：“周昭王末年，夜清，五色光贯紫微。其年，王南巡不返”。此文虽如实地记录了北极光出现的时间、方位和颜色，但把王南巡不返（卒于江上）联系起来，说明当时对北极光还没有正确的认识。对北极光的形状、颜色不少书都有详细的描述，并绘有彩色极光图，这些都是研究北极光的极好史料。

（5）关于成影现象的认识

日常生活中，在光线照射下，影随时随地可以见到，它引起人们的注意，并探究其形成的规律。

立竿见影是我国古代最早被注意的问题，后来用此方法测影定向，并应用于确定墓穴和建筑物的方位上。这套方法在周代已发展很精密，据《考工记》记载，当时有“土方氏”使用圭表，“典瑞氏”管理土圭，“匠人”则使用土圭辨方位进行建筑，并指出在测表影之先，要使地面保持水平，使表竿保持垂直。这说明当时已认识到投影的长度和光源位置有关，而且也和物体的斜度有关。

《墨经》中对成影的讨论更加深入，通过实验明确指出：表杆在地面上投影的粗细长短，是随木离光源的远近、木的倾斜度以及光源的大小变化而变化的规律。

我国古代对光的认识除以上所述外，还有其他一些方面，如折射现象；天然晶体的色散；明清时期，光学从西方传入后，还有了光学仪器的制作等等，但这些认识是零散的，定性的，绝大多数都只停留在对光学现象的描写和记载上。值得提出的是宋末元初的赵友钦（13世纪中叶至14世纪初叶），在《革象新书》的“小罅光景”中，描写了一个大型光学实验（见图2-1-22），在地面下挖了两个圆阱，圆阶上可加放中心开有大小、形状不同孔的圆板盖。通过它可进行只有一个条件不同的对比实验，对小孔（大小和形状）、光源（形状和强度）、像（形状和亮度）、物距、像距之间的关系进行研究。将两块圆板上各插1000多支蜡烛，放在阱底或桌面上作为该实验的光源。通过实验确认了光直线行进的性质，定性地显示了像的明亮程度与光源强度之间的关系，并涉及光的照度和成像理论。他所采用的大型实验方法很有特色，是我国历史上记载的规模最大的实验。还

有值得提出的元代郭守敬（1231～1316）曾巧妙地利用针孔取像器[“景（影）符”]解决了历来圭表读数不准的问题。一般圭表（图 2—1—23）因太阳上下边沿投

影在影端生成半影，因此读数比较模糊。正如《元史卷 48》所说：“表短，……所谓分、秒、太、少、半之数，未易分别……表长，……影虚而淡，难得实影”。郭守敬在建河南登封观星台时除用水平沟使圭面保持水平外，在表上加一横梁，在圭上加一可移动的“景符”（图 2 - 1 - 24）即在约宽 2 寸的斜铜叶上扎一针孔，

以“檐（即斜）竿”调其倾斜度以迎日光。这样，太阳针孔像“仅如米许，隐然见横梁于其中”，细如发丝，误差可达 0.1 毫米。郭守敬的观测结果之精确令拉普拉斯为之惊叹。郭守敬的改进是在实际测量、反复试验中的创造，并且带有定量意义，可惜这种创造只是凤毛麟角，很少有人继承下来。

反射定律和折射定律

光学是最古老的物理学分支之一，而光的反射定律和折射定律又是光学中较早发现的两个定律。这两条定律是根据光的直线传播的概念建立起来的，是几何光学中最基本最常用的两个经验定律。

(1) 反射定律 反射定律的第一个发现者已无据可考，但历史上留下了某些线索，从中仍可探究其建立的过程。

在上古时期，人们已利用静止的水面反射光线来照影，后来发展为用盆盛水（称“监”）自照其像，“皿”者盆也，被称为“水镜”。又据考古研究，距今3600年以前的我国齐家文化后期，已经制造出相当水平的金属反射镜（或“鉴”），作为镜子使用。

约公元前300多年，古希腊哲学家柏拉图曾讲授过关于光的直线传播以及入射角和反射角相等的知识。欧几里德在《反射光学》一书中，明确提出了光的直进性，较深入地探讨了反射现象，提出“入射光和出射光分别与法线成相等的角”，并由此出发讨论了平面镜成像，凹、凸面镜成像，还论述了凹面镜焦点的概念。

公元8世纪，阿拉伯科学家阿尔哈曾（Alhazen，965？~1039？）在光学方面获得新的成就。在他著的《光学宝鉴》一书中指出：在反射现象中，除反射角等于入射角之外，反射光线必在入射光线与界面法线所确定的平面内。从而完善了反射定律。在反射定律的基础上，阿尔哈曾讨论了球面镜、柱面镜及锥面镜的成像规律，提出了著名的“阿尔哈曾几何难题”，即给定发光点和眼睛的位置后，如何求出球面镜、圆柱面镜或圆锥面镜上发生反射的点。他对此进行了精心的研究。

(2) 折射定律 最早研究折射现象的是古罗马科学家托勒密。他继承了古希腊的光学知识成就，并亲自进行实验研究，首次较精确地测量了折射现象中的入射角和折射角，得出折射角正比于入射角的结论。

阿拉伯科学家阿尔哈曾重复托勒密的折射实验，他根据自己的实验得出结论：托勒密的折射定律在入射角较大时是错误的。

托勒密的折射定律在欧洲流行了1400多年，直到1611年，开普勒发表《屈光学》以后，对折射定律才有新的认识。开普勒在《屈光学》中记载，他对折射现象进行了实验验证，并进一步指出：托勒密的折射定律在入射角小于 30° 时成立，大于 30° 时不成立。他认为折射角由两部分组成，一部分正比于入射角，另一部分正比于入射角的正割。

1615年，荷兰数学家斯涅耳（WillebrordVan Roijen Snell，1591~1626）精心地进行了折射实验，并用几何作图法结合数学推演，发现光线由空气射向某种介质时，对于任意入射角，它的余割与折射角的余割之比

保持相同的值。他的这一实验和表述是在 1626 年从斯涅耳的遗稿中发现的。为了纪念他，后人称折射定律为斯涅耳定律。

1637 年，法国科学家笛卡儿发表了《屈光学》，书中对折射定律进行了讨论。他以运动的小球比喻光，认为当光（小球）由一种媒质斜入射到另一媒质时，其切向速度分量（平行界面）不发生变化，而法向速度分量（垂直界面）发生变化。他又认为光线在光密媒质中比光疏媒质中容易传播，因此，光密媒质中的光速大于光疏媒质中的光速。基于以上假定，笛卡儿得出：在折射现象中，入射角的正弦与折射角正弦之比为一常数。这与折射定律的现代表述相同。

笛卡儿关于光在光密媒质中的速度大于在光疏媒质中的速度的假定是错误的，在当时就受到费马(Pierre de Fermat, 1601~1665)的批评，费马认为笛卡儿的假设是没有作任何证明的比喻，所以是错误的。1662 年，费马根据自己提出的原理——费马原理（光线在空间两点传播，经过其路径的时间必取最小值），结合几何作图法推导出折射定律。它的

形式和笛卡儿得出的定律基本一致。其形式为 $\frac{\sin i}{\sin r} = \frac{v_i}{v_r}$ 常数。这是折射

定律最确切的表达式。折射定律的确立和费马原理的提出，为解决光学系统的定量计算提供了理论依据。

牛顿的光学实验

牛顿除了对经典力学的建立有伟大的贡献外，对光学也进行了大量的研究，而且对光的研究先于对力学的研究。早在 1663 年，牛顿就开始了光学研究，并亲自研磨玻璃和制作望远镜。他关于光学研究的成果大多记载在《光学》一书中，此书出版于 1704 年，当时牛顿已 61 岁，此书比他的《自然哲学的数学原理》迟发表 17 年。有人说这是由于在

图 2—1—25 牛顿《光学》中的棱镜色散实验原图

1692 年牛顿家中发生了火灾，烧毁了他近 20 年关于光学的实验资料及研究成果的论文。还有人说是牛顿不愿意在反对他的胡克生前发表他的论点，《光学》是在胡克逝世后一年付印的。

牛顿对光学的研究涉及范围较广，包括折射、像差、色差、色散、颜色理论和牛顿环等，还提出了光的微粒说和光的振动理论。（1）色散实验及颜色理论。

光的颜色问题，很早就引起人们的注意，但那时只停留在各种猜测上。从亚里士多德到笛卡儿，人们都习惯于认为白光是“纯洁的、均匀的”、是“光的本性”，而色光只是光的“变种”，但这种观点没有什么实验依据。到了 17 世纪，牛顿才通过光的色散实验，提出了自己的颜色理论。

1666 年，牛顿购得一块玻璃三棱镜，对颜色现象进行研究。牛顿描写他的一个实验时说：“我将房间做成暗室，在窗户上钻一小孔，让适量的阳光进入，我在光的入口处放上我的棱镜，使光可以折射到对面墙上”。于是他在墙上看到了椭圆形鲜艳而强烈的色谱，这就是棱镜对白光的色散现象。牛顿分析色谱成因时猜想：“射线通过棱镜做曲线运动，并根据不同曲度到达墙壁的不同部分”。为了验证猜想的真伪，牛顿又进行了一次辨明真假的实验（如图 2 - 1 - 25，图中光线自右向左）。他说：“我拿两块板，将一块紧贴在窗上的棱镜后面，使光可以通过该板上所钻的小孔，而射到大约距离它 12 英尺的另一块板上，该板也有一小孔，将另一棱镜置于第二块板后，”（原图未画出两块板上的小孔）然后，将第一棱镜绕轴慢慢转动，使通过第一棱镜后得到的色带中的各种颜色分别经过二小孔射到第二棱镜上，在它后面的屏上发现：当转动第一棱镜时，屏上的像也发生移动。由此，牛顿察知各种颜色的光的折射度不同，蓝光的折射性最强，红光的折射性最弱。通过对以上实验的分析，牛顿提出了他的颜色理论：“色带是由不同的彩色光所组成的白色光经折射而形成的”，即“白光本身是由折射程度不同的各种彩色所组成的非均匀的混合体。”又指出“色不是自然物折射或反射出来的光的属性，而是因不同射线而不同的本来就

有的内在的性质”。“同一折射度总是属于同色”等。牛顿还用他的理论成功地解释了虹霓的成因和万花筒中出现的明显的色彩。

(2) 反射望远镜的发明

在牛顿之前，望远镜已经发明，伽利略已用自己改进的望远镜观测天空，但这种望远镜不能消除物镜的色散，因此出现了色差。牛顿注意了这一现象，又受到不同颜色的光线具有不同的折射率的启发，他意识到透镜成像存在缺点。为了证实他的想法，做了以下实验（如图 2—1—26）：用一张一半涂蓝、另一半

涂红的纸，在纸上画上横线，晚上，用蜡烛作光源，使半红半蓝的纸经透镜后在屏上成像，实验结果发现红半边和蓝半边不能在同一位置成像，蓝半边的像离透镜近，红半边的像离透镜远。由此，牛顿得出结论：用透镜制成的望远镜存在缺点。于是他根据光的反射与颜色无关的原理设计了反射望远镜，于 1672 年制造成功，并把它赠送给皇家学会，上边题有“伊萨克·牛顿爵士发明，并于 1671 年亲手制造”等字样，此望远镜存放在皇家学会的图书馆里。

其实，透镜成像的缺点，可以通过采用不同玻璃加以克服。在牛顿时代还不可能配制各种玻璃，致使他发明了由大型抛物面镜构成的反射望远镜，这种望远镜具有很多实用的优点，现在还普遍用在天文观测上。

(3) 牛顿环实验

牛顿注意到玻璃、水和空气介质形成的薄板，按厚度不同而显示出不同的颜色，对这类问题牛顿起初认为考虑起来比较困难，它对确认光的本质问题也不重要，因此在一段时间内曾尽量避免讨论这类问题。后来，为了完善光的理论，有利于进一步探讨与颜色或透明质有关的自然界物体的构造问题，牛顿做了牛顿环实验。

牛顿环装置主要由一个平凸透镜和另一个双凸透镜组成，把平凸透镜放在双凸透镜之上，使其平面向下，实验时慢慢把它们压紧，玻璃面上就出现圆形图案。后来，牛顿改进了实验，改用平凸透镜放在平板玻璃上的装置，又用单色光照射，则在上面出现明暗相间的圆环。他测量了前 6 个明环和暗环的半径，发现它们遵守一定的规律，按照这一规律，如果已知平凸透镜的曲率半径就很容易算出亮环和暗环出现处的空气隙的厚度。其实，牛顿环实验是光具有波动性的很好例证，因为一系列圆环的出现，是两束光在相隔不同距离的玻璃界面上反射时发生“干涉”的结果，通过实验也可测定入射光的波长。但是，牛顿在光的本性的争论中持微粒说的观点，怀疑和反对光的波动说，因此，在解释牛顿环实验时，他绕开了波动观点，而提出一个“一阵容易反射，一阵又容易透射”的所谓“猝发理论”，并在此提出“猝发的长度”，他推断对于红光来说它比较长，对蓝光比较

短，显然这相当于我们现在所说的波长。但是，他写道：“……至于这是一种什么作用或倾向，它是光线的圆周运动或振动，还是介质或别的什么东西的圆周运动或振动，我这里就不去探讨了。”可见，牛顿对这一问题没有作进一步的讨论。

牛顿还做过光的衍射的实验。衍射现象最早是由波洛尼亚的耶苏大学的数学教授格里马尔迪 (Francesco Maria Grimaldi , 1618 ~ 1663) 发现的，他的实验非常简单而精巧，但他对光学理论却没有任何实质性的贡献。牛顿改进了格氏的实验装置并重复实验，对出现的结果力图用微粒说加以解释。牛顿在《光学》一书的三篇中，分别详述了几何光学和棱镜光谱实验、薄膜干涉现象（牛顿环）、光的衍射等 33 个完整的实验，并用 19 个从实验中导出的“命题”表述其论点，又提出 31 个疑问为“他人作进一步研究”，包括对光学现象的各种解释。牛顿在《光学》开卷的第一句话说：“我的计划不是用假设来解释光的性质，而是用推理和实验来提出并证明它们。”把科学的光学奠立在观察和实验的牢固基础上，这正是牛顿光学实验的重要意义。

光速测定的发展

16 世纪上半叶对于光速无限还是有限的问题引起了广泛的讨论。这一问题对当时光学的发展有很大意义。一方面，它涉及对光的本性的探索，另一方面它将物理问题的讨论与定量的实验研究方法联系起来。例如光速的测量值成了判定微粒说与波动说正误的根据，并使费马的“光传播取时间最短的路径”原理得以成立。光速这一基本物理参量的测量方法也不断随社会生产而逐渐发展并日益精确。本世纪 60 年代以来激光的应用使测得的数值更接近真值。

首先打破光速无限论的是伽利略对闪电现象的观察和分析。1607 年，他设计了“掩灯法”，试图通过测量光往返两个山头之间的距离和所需的时间计算出光速。由于在实验中是用手启动开关，对光往返两个山头的的时间很难测准，实验没有成功。但他用“掩灯法”测量光速的基本思想，被后来的各种光速测定法所借鉴。

17 世纪中叶，由于哥白尼日心说的广泛传播和伽利略把望远镜指向天空，使天文学大大向前发展。广阔的宇宙空间为光速测定提供了如此大的距离，使测量光走过远距离所需的时间变得比较容易，因此，光速的测定首先在天文学中获得了成功。

第一个采用天文学方法进行光速测量的是丹麦的天文学家罗默（Ole Christensen Rømer, 1644 ~ 1710）。1676 年他在巴黎天文台工作时曾多次观察木星的卫星食现象，发现当地球背向木星运行时，连续两次卫星食相隔的时间比地球迎向木星运行时要大一些。通过整年的观察，都得到了同样的结果。罗默认为这是光速有限性的有力证明，并估计出光跨过地球绕太阳公转的轨道直径，需时 22 分钟（现在知道只需 16 分钟）。后来，有人利用这一结果计算出光速的第一个观测值，其值为 225 000km/s。虽然，它和光速的准确值相差甚远，但它却是人类有史以来光速的第一个测定值。

第二个用天文学方法测定光速的是英国的天文学家布拉得雷（James Bradley, 1693 ~ 1762）。1727 年，他通过对恒星的视位置在地球轨道运行速度方向上的位移的观测来测定光速。这种方法被称为光行差方法。当时用这一方法测算出的光速值为 $c=299930\text{km/s}$ ，这比用罗默方法测算出的值要精确得多。

19 世纪初，随着欧洲工业的发展，光学工业开始建立，光学实验技术也大有进步，在实验室测定光速的方法也应运而生。1849 年，法国物理学家菲佐（Armand Hippolyte Louis Fizeau, 1819 ~ 1896）采用旋转齿轮法首先在地面实验室中测定了光的速度。他沿用了伽利略的“掩灯法”的思

想，而把遮光装置由人手启动的开关改为旋转齿轮。实验过程中，齿轮以一定速度旋转，使光线时而通过，时而遮断，形成一系列的光脉冲。测量出每个光脉冲往返的距离和时间，即可算出光速，由此得出 $c=312\,000\text{ km/s}$ 。1850年，法国物理学家傅科（Jean Bernard Léon Foucault 1819~1868）继菲佐之后，又提出了实验室测定光速的另一种方法，即所谓旋转镜法，这是一种纯粹利用光学系统测定光速的方法。其1862年测得值为 $c=289\,000\text{ km/s} \pm 500\text{ km/s}$ ，此值比实际值稍小。

对光速的测定，从采用天文学的方法过渡到实验室的方法，无疑是一大进步，但无论是菲佐的方法，还是傅科的方法都存在各自的缺点。而问题的关键是采用什么样的装置才能准确地测出光经过一定距离所需的时间，这也就是后来的科学家们需要集中精力去解决的问题。

美国物理学家迈克耳孙（Albert Abraham Michelson, 1852~1931）首次采用正八面钢质棱镜代替傅科实验中的旋转镜，使光所走过的路径大大增加，从而改进了傅科实验。迈克耳孙对光速的测定进行了近50年的辛勤工作，于1926年测出光速值 $c=299\,796\text{ km/s} \pm 4\text{ km/s}$ ，它被世界公认为是当时光速测定值中最准确的数值。1931年迈克耳孙逝世后，他的合作者皮斯（F. G. Pease）和皮尔森（P. Pearson）继续用旋转镜法测定光速，于1935年发表了测得的结果为 $c=299\,774\text{ km/s}$ 。

在此期间，有人利用光电开关代替旋转齿轮，改进了菲佐实验，此实验称为克尔盒法。克尔盒是把一个盛满硝基苯并装有平板电容器的烧杯放在两个正交的尼科耳棱镜之间所组成的光学系统。硝基苯在电场作用下能呈现双折射现象，因此，在此系统中，只有当两极板加有电压时，光才能通过。如果两极板上加有交流电源，则此系统可以高速、周期地遮断光，因此用它可以作为高效能的遮光设备。安德孙（Anderson）于1941年利用克尔盒法测得光速为 $299\,776\text{ km/s}$ 。贝格斯特兰（E. K. Bergstrand）于1951年进一步改进实验装置，测得的结果为 $c=299\,793.1\text{ km/s}$ 。

19世纪末，光的电磁波理论已经确立，因此，如果能够准确地测定电磁波传播的速度，则光速的数值也将被校正。在第二次世界大战结束以后，无线电和微波技术得到迅速发展，测定电磁波速度的方法逐渐建立，并日趋精确，从而使光速的测定进入新的阶段。1947年，英国物理实验所的埃森（L. Essen, 1908~）首先提出用微波导管测定电磁波的传播速度。这个方法是利用测定一个已知大小的圆柱形波导管的谐振频率，从而求出电磁波的传播速度。1950年发表的测得值为 $299\,792.5\text{ km/s}$ 。

1952年，英国实验物理学家K. D. 弗罗姆（K. D. Froome）应用微波干涉仪的装置测定电磁波传播的速度，其测得值即光速为 $299\,792.6\text{ km/s}$ 。它被国际无线电科学协会、国际大地测量学和地球物理学协会（1957年）推荐为国际推荐值，一直沿用至1973年。1960年，由于激光器的发

明，使光速测定找到了更精确的方法。1972年，美国标准局的K.M.埃文森(K.M. Evenson)等人采用直接测量激光频率和真空中波长值的方法，用两者的乘积得出真空中的光速值获得成功，测得值为 $c = 299\,792\,458\text{m/s} \pm 1.2\text{m/s}$ 。这个数值被第五届米定义咨询委员会(1973年)和第15届国际计量大会(1975年)先后确认为国际推荐值。

光的电磁说的确立

光的电磁说也称“光的电磁理论”，是指光在本质上是一种电磁波。它是由英国物理学家麦克斯韦建立，由德国物理学家赫兹从实验上加以证明的。

光的电磁理论建于 19 世纪中叶，当时自然界力之统一的思想在科学界占统治地位。在这一思想指导下，相继由奥斯特发现了电流的磁效应；焦耳发现了电流的热效应；戴维和法拉第发现了电的化学效应，后来又引导法拉第进一步发现电和磁的关系，电磁和光的关系等。麦克斯韦在电磁学方面的工作，也受到这一思想的指导和启示。

在麦克斯韦开始电磁学研究以前，已经有不少物理学家试图为法拉第的电学实验研究提供数学表示，高斯就是其中之一，但最终他没有成功。数学家黎曼也曾局部地着手这项研究工作，他提议以具有反抗压缩及方向变化的弹性以太来解释重力、电、光和磁现象。韦伯提出了电流强度、电量和电动势的绝对单位和测量方法，他与科尔劳施(Rudolph Hermann Arndt Kohlrausch, 1809 ~ 1859) 合作测定了电量的电磁单位和静电单位的比值，其值为 $3 \cdot 107 \times 10^8 \text{ m/s}$ ，很接近于光速。W·汤姆孙(开尔文)以理论物理学家的身份走进了电磁学，成为英国电磁学数学研究领域的第一人。他类比了静电学和弹性体理论，用非压缩弹性体平衡的特殊解表示电磁状态，提出了三个表达式，为麦克斯韦电磁场理论奠定了数学研究的方法。麦克斯韦的工作就是在这些物理学家研究的基础上进行的。

英国物理学家麦克斯韦擅长于数学和理论。在同行们的影响尤其在开尔文的启示下，决心为法拉第的电学实验研究开辟数学研究的途径，使它提高到理论的高度。他从法拉第的力线入手，把静电场类比为不可压缩、无惯性、稳定流动的流体场，引入位移电流，从而建立了麦克斯韦电磁场理论。他在《论物理的力线》和《电磁场的动力学理论》两篇文章中，提出了光的电磁波学说。麦克斯韦假设电磁波是弹性介质的横波，并根据介质横波速度公式，经验地推导出电磁波的速度，发现在真空中电磁波速等于一个常数，而这一常数正好是科尔劳施和韦伯测得的电量的电磁单位对静电单位之比。由此麦克斯韦得出结论：“这一速度与光速如此接近，看来我们有强烈的理由断定，光本身乃是以波的形式在电磁场中按电磁规律传播的一种电磁振动”。但是，这个结论多少带有经验性的色彩。在论文《电磁场的动力学理论》中，麦克斯韦从他的方程组中直接推导出电磁波动方程，从而得出电磁波速度的一般表达式为 $v = \frac{c}{\sqrt{\epsilon\mu}}$ ，这就从数学上

证实了光的电磁理论的正确性。他还考察了物质的电磁性质与折射率之间

的关系，得出 $n = \sqrt{\epsilon \cdot \mu}$ 的关系，其中 ϵ 为电容率， μ 为磁导率。麦克斯韦的工作把长期以来彼此独立的电、磁和光结合起来了，实现了物理学中自牛顿以来的再一次大综合。但是，由于他的理论在数学上太复杂、太难懂，一般人难以理解，使人感到引入的新概念有些混乱，因此对它的深刻含义当时没有给予应有的重视。只有在 23 年后的 1888 年，当德国物理学家赫兹对电磁波和光波的同一体性作出实验证明时，光的电磁说才被世人公认。H. 赫兹是亥姆霍茨的学生和合作者，为了应召参加柏林科学院于 1879 年提出的“用实验建立电磁力和绝缘介质极化的关系”的科学评奖，他开始了电磁学方面的实验研究，他用一个发射器产生频率极高的电振荡，在它周围放一个接收器，发现接收到高频电振荡时在接收器的间隙中产生火花。他多次实验得出类似的结果。由此，使他获得了 1879 年的科学奖，同时证实了电磁波的存在。赫兹证明电磁波和光波同一体性的重要一步是通过实验证明了电磁波的速度等于光速。在这之前，虽然法拉第和亥姆霍茨都曾试图测量电磁波的速度，但由于对其数值是如此之大估计不足，因此都没有成功。赫兹于 1888 年先用驻波的方法测量出电磁波的波长，再用 W. 汤姆孙于 1853 年建立的频率计算公式，计算出电磁波源的振荡频率，最后算出电磁波的速度，其值恰好等于光速。完成电磁波和光波同一体性的全部证明，是赫兹于 1888 年采用脚踏实地的办法进行的，他对电磁波进行了反射、折射、聚焦、干涉、衍射等一系列实验，结果发现电磁波具有光所具有的一切特性，这就完全证明了光和电磁波的同一体性。

光的电磁说的确立，使光的波动说摆脱了机械观点的影响，从菲涅耳等人的弹性以太中的波动说走上了一个新的阶段——光的电磁波动说，同时，对以太的概念赋以新的含义。促使洛伦兹从光的电磁说的立场出发，去寻求物质的光学性质，从而完成了电磁光学基础领域的大部分工作，并开始把以太与普通的物质区别开来，为洛伦兹进一步提出电子论奠定了基础。

以太论思想的发展及“以太漂移”的研究

“以太”是人们为了解释某些自然现象而提出的一种假说。最早由古希腊的哲学家们提出，当时指的是构成天体的理想物质。17世纪“以太”被引入物理学，从此，以太像幽灵一样，吸引和困扰了许多代物理学家，历时约二百多年之久。爱因斯坦建立狭义相对论以后，“以太”的概念才被抛弃，但它的合理内涵，在现代物理学中仍有意义。17世纪，开普勒提出了行星运行规律的三定律。法国哲学家笛卡儿为了从理论上解释天体间的相互吸引和运转，把以太引进物理学，并提出“以太旋涡说”。他假设星际空间充满连续的以太粒子，这些以太粒子在天体周围互相推挤，产生圆周运动，形成旋涡，太阳是这个旋涡的中心，从而通过以太带动地球和其他行星。这种观点和人们从旋风、水流中获得的直觉印象相符合，因此成为当时英、法各国教科书的正统观点，后来，荷兰物理学家惠更斯，于1669年用水碗里的旋涡把卵石拉向碗底的实验支持笛卡儿的学说后，“以太旋涡说”更风行一时。1687年，惠更斯提出光的波动说，“以太”作为光波的荷载物被再一次提出。惠更斯认为宇宙空间及万物之中充塞了没有重量、非常稀薄的以太，它是传播光振动的媒质，好像传播声音的空气一样，光波和声波一样是纵波。

显然，在17世纪，“以太”被假定具有更多的力学性质，因此，这时的以太被称为“机械以太”。

18世纪，由于多方面的原因，“以太”遭到了冷落。牛顿创建的经典力学中无需“以太”的概念。尤其在推导万有引力定律时，以超距作用为思想指导，并不回答引力是如何传递和发生作用的。因此万有引力定律遭到笛卡儿派的反对。在二者的争论中，牛顿及其追随者把笛卡儿提出的以太论也一起加以反对。1875年，库仑定律建立，超距作用思想在电学中占了主导地位，作为力的传播媒质的“以太”也就无人问津。在光的本性的争论中，由于牛顿的威望及惠更斯提出的光的波动说不够完善，使光的微粒说在当时占了上风，因此，借以传播光波的媒质——“以太”当时也很少有人提起。

19世纪，英国物理学家托马斯·杨的双缝干涉实验和菲涅耳的工作使光的波动说取得了胜利和发展，作为传播光波的媒质——“以太”也得到了复兴。但是，随着光是横波的发现，以太理论又遇到了困难，因为横波只能在固体中传播，不能在气体中传播，因此要求以太是一种固体。而光在这固体中传播时速度又如此之大，要求“以太”必须具有比钢铁还强的刚性。于是，又出现了另一问题，即天体如何能在刚性固体中无阻力地运行？为了解决这一疑难，有人提出“以太”可能是一种蜡或沥青样的塑性

物质，对于光的传播，它有足够的弹性像是固体，而对于天体的运动，则像流体，因此，“以太”的这种模型已不能用纯粹的弹性力学说明，必须赋予一些特殊的非常的属性。这时期的以太被称为“光以太”。

法拉第和麦克斯韦的工作，也使“以太”在电磁学中获得一定地位。法拉第反对超距作用，认为电磁力需要依靠媒质进行传递，而这种媒质就是以太，换句话说，他把以太看作是力线的荷载物。麦克斯韦在引入位移电流时也应用了“以太”，认为当以太电荷粒子的位移随时间变化时，将形成位移电流，因此，冠以“电磁以太”。而麦克斯韦方程本身的推导及他的电磁场理论，只是空间变化的电场和变化磁场的关系，并不涉及“以太”。按理说，麦克斯韦可以放弃“以太”，但他受当时习惯的影响，认为：“为了行星可以浮游其中，为了构成电气和磁素，为了将感觉从人体的一部分传递到另一部分等，人们对每一个问题，都设想一种以太”。说明麦克斯韦理解以太的提出和承认以太的存在。当麦克斯韦提出光是一种电磁波后，使传播光波的媒质——“光以太”和传播电磁波的媒质——“电磁以太”得到了统一。

在那个时代，无法想象：振动是没有物质的振动；波是没有媒质传递的波。当时大部分物理学家认为“超距作用”的概念是荒谬的，一个物体对远处物体作用一个力，而没有媒质传递这个力，是不可思议的。因此，“以太”似乎得到了普遍的承认。门捷列夫甚至考虑到以太的结构，在他的元素周期表中，曾把以太列为原子序数等于零的物质，因此，可以说19世纪末是以太说的极盛时期。在以太理论的发展过程中，以太漂移的实验也广泛进行。所谓“以太漂移”就是观察以太是否被运动物体所拖曳，如果以太没有被运动物体所拖动，就会在地球上观察到以太漂移，说明存在绝对静止的以太，并可以找到一个绝对坐标固定在静止的以太上，这对牛顿的时空观非常有利。但是大量的实验却得出了以太漂移的零结果，这就为创建狭义相对论时空观奠定了基础，为抛弃以太的概念作了准备。

最早进行以太漂移实验的是英国天文学家布拉得雷，他于1727年用望远镜观察某一颗星体，发现在一个周年之内，望远镜筒将旋转一个顶角为41'的圆锥体，这是由于地球公转所产生的周年变化，称光行差现象。它说明以太没有被地球所曳引。如果以太全部被地球曳引，以太相对于地球静止，则不会出现光行差现象。

另外一个以太漂移实验是由法国物理学家菲佐做出的，1851年菲佐观察了光通过流水时速度的变化。发现光在流水中速度的变化，不是加上或减去流水的速度 v ，而是 v 乘以一个小于1的因子，这说明作为光的载体的以太，在浸入运动媒质时，被部分带动。德国物理学家赫兹和伦琴也先后通过电磁学实验，观察运动物体是否曳引电磁以太，但这些实验得出了互相矛盾的结果。

“以太漂移”的决定性实验是由美国物理学家迈克耳孙做出的。19世纪末，洛伦兹的电子论已经提出，并用该理论分析了以太。洛伦兹认为以太只是电磁波和光的载体，它和运动物体毫无关系，由此说明静止不动的以太是存在的。如果能设计一种仪器，通过实验观察出地球相对于静止以太有相对运动（即以太风），则洛伦兹的理论即被证明。迈克耳孙正是根据这一思想，以他精湛的技艺设计了灵敏度极高的干涉仪，用它测量光沿地球各方向速度的差别，以便探测地球相对于以太运动时出现的以太风。但经过多次实验，却得出了以太漂移的零结果（不出现以太风）。其后有不少物理学家改进了实验装置，在不同地点、不同时间进行大量的实验，都得出了同样的结果，这就说明或者是地球相对于以太的运动不存在，或者是以太本身并不存在。于是，以太进一步失去了它作为绝对参考系的性质，这一结果使相对性原理被普遍承认，并被推广到整个物理学领域，相对性原理成为狭义相对论两个基本公设之一。19世纪末和20世纪初，虽然为了拯救以太还进行了一些努力，但在狭义相对论建立以后，人们接受了电磁场本身就是物质存在的一种形式的概念，而场可以在真空中以波的形式传播，因此以太的概念终于被物理学家们所抛弃。量子力学的建立，使人们发现，物质的原子以及组成它们的电子、质子和中子等粒子的运动也具有波的属性，波动性已成为物质运动的基本属性的一个方面。因此仅仅把波动理解为某种媒介物质的力学振动的狭隘观点完全被冲破，由此更加强了对以太概念的否定。

以太在物理学中的地位，有人把它比喻作盖房子的“脚手架”，意思是说：以太在建立某些物理学概念和理论时曾起过积极的作用，但当物理学大厦已经建成后，以太已失去了存在的意义。但它的某些合理的内涵（如不存在超距作用，不存在绝对空虚的真空）仍被物理学家所承认。

狭义相对论的建立

19世纪末，在经典物理学完整的理论体系形成的同时，突破经典理论的许多新的实验事实接踵而至。在电动力学与光学方面有以下一些问题：

测定地球相对于“光媒质”（以太）运动的实验一再得到零结果。经典的麦克斯韦电磁场理论解释不了运动物体（例如运动导体和磁体）的电磁感应现象。以磁体和导体的相对运动为例：如果磁体运动而导体静止，人们认为磁体附近出现一个电场；如果磁体静止而导体运动，磁体附近没有电场，但导体却受一电力。这种不对称与相对运动引起的相同效果是矛盾的。真空中的麦克斯韦方程组在参考系变换时不能像伽利略变换所要求那样保持形式不变。这些问题说明经典物理学理论的“绝对时空”和“光媒质（以太）”等概念受到了严重冲击。

在爱因斯坦以前不少科学家为解释以上问题，特别是迈克耳孙-莫雷实验的零结果，提出过许多理论上的修补方案。例如爱尔兰人裴兹杰惹（G.F.Fitzgerald, 1851~1901）于1889年、荷兰物理学家H.A.洛伦兹于1892年提出了长度收缩假说，认为以太是静止不动的，物体在以太中运动时，在运动方向上的长度会发生收缩，这恰好抵消了地球在以太中运动所造成的时间差，所以观察不到干涉效应。1895年，洛伦兹作为辅助的数学手段进一步引入“局域时间”（即地球系统的时间）概念，以便证明地球系统与以太绝对系统中的电磁规律相同。但在他于1904年最终提出的这种变换中，以太坐标系的时间和物体相对于以太的收缩才是真实的，即以以太系统还是一个特殊优越的参考系。无论如何洛伦兹在某些方面已突破了经典物理学的框架。法国数学和物理学家庞加莱（J.H.Poincaré, 1854—1912）在1898年发表的《时间的变量》一文中已认定了光速是不变的，并讨论了用交换光信号来确定两地同时性的问题。1904年，他在美国圣路易斯艺术和科学大会上正式提出相对性原理这个名称。他还描绘说，在新的力学中，“惯性随速度而增加，光速会变成不可逾越的极限”。“原来比较简单的力学依然保持为一级近似，因为它对不太大的速度还是正确的”。后来，爱因斯坦曾赞誉他是“相对论的先驱”。但庞加莱没有找到同时性的相对性问题这一突破口去根本动摇时间的绝对性，只是分别地接触到了相对性原理和光速不变性这两条公设。1905年5月，德国《物理学杂志》发表了爱因斯坦《论动体的电动力学》一文，标志着狭义相对论的诞生。爱因斯坦创立狭义相对论的基本思想线索，可以大致从以下三个阶段来理解。

考察“追光”假想实验，萌发狭义相对论的思想，可看作第一阶段。爱因斯坦在《自述》中回忆，当他16岁（1895年）在瑞士阿劳中学补习

时，曾想到一个“追光”的假想实验：“如果我以真空中的光速 c 追随一条光线运动，究竟会看到什么现象呢？如果看到的仍然和在地面上看到的一样，即光仍然以 c 相对于我们运动，则显然与（经典的）速度相加定律相抵触；如果看到的是一个在空间里振荡着而停滞不前的电磁场，则麦克斯韦方程组就要失效”。这就出现了一个悖论，这个悖论已经包含着狭义相对论的萌芽。但在当时他无法发现悖论的矛盾所在，最初他与众人一样，并不怀疑以太的存在。在大学的第二年（1897），他试图从物理文献中寻找以太流动的明确的实验数据。结果却是徒劳。后来，他亲自设计了一个用热电偶测量两束方向相反的光携带的能量差的实验，希望以此证明以太相对于地球的流动。当时爱因斯坦并不知道他的打算与迈克耳孙的实验不谋而合，但该实验最后未能付诸实施。

爱因斯坦对于光、麦克斯韦方程、电磁波、以太、地球的运动等问题的深入思考，最初起源于要消除电磁学理论中的不统一性，这可以看作是他思想发展的第二阶段。他说：“开头使我烦恼的是电动力学必须挑选一种比别种运动状态优越的运动状态，而这种优先选择在实验上却没有任何根据。这样就出现了狭义相对论，而且，它还把电场和磁场融合成一个可理解的统一体，对于质量和能量，以及动量和能量也都如此”。__这种力图用统一性观点去考察各种客观现象和物理学基础的信念，是了解爱因斯坦创立相对论思路的一条红线。他正是从世纪之交物理学所遇基础问题中发现了处处存在的绝对时空观的阴影。他说：“绝对静止这概念，不仅在力学中，而且在电动力学中也不符合现象的特性，倒是应该认为，凡是对力学方程适用的一切坐标系，对于上述电动力学和光学的定律也一样适用。”__开始他是通过直觉确信了这一点。

关于爱因斯坦提出普遍的相对性原理和光速不变原理并把它们结合起来形成狭义相对论的过程，特别是这时正值迈克耳孙-莫雷实验零结果的各种理论解释成为讨论热点的时候，爱因斯坦本人的创造性思维是否受到过迈克耳孙实验的影响，对此问题他本人就存在一些矛盾的说法。爱因斯坦去世前一年（1954）给伊利诺斯州一位历史学家的信中有一段值得注意的话：“在我自己的思维发展过程中，迈克耳孙的结果并没有产生多大的影响。我甚至记不得，在我写有关于这个题目的第一篇论文时（1905年），究竟是否知道它。对此的解释是：根据一般的理由，我坚信绝对运动是不存在的，而我的问题仅仅是这种情况如何能够同我们的电动力学知识协调起来。因此人们可以理解，为什么在我本人的努力中，迈克耳孙实验没有起什么作用，至少是没有起决定性的作用。”__因此，从他1905年《论动体的电动力学》的文章出发来理解他的基本思想脉络更有意义。该文一开始就指出麦克斯韦电动力学应用到运动物体上的不对称，“而这种不对称似乎不是现象所固有的”，而是经典理论出了毛病。在导体与磁体的相对

运动中，从磁体参考系看来，没有电场，而从导体的参考系来看，有电场，因此电场的存在是相对的，依赖于所选参考系的运动状态。1950年爱因斯坦在给美因克利夫兰的信中说：“直接引导我提出狭义相对论的，是由于我深信：物体在磁场中所感受到的电动力，不过是一种电场力罢了”。这里“感生的电动力”，就是感生电动势。他还说：“唯一可以接受的客观事实，是完全与观察者或坐标系统的相对运动无关的联合在一起的电磁场。这个电磁感应现象迫使我假设狭义相对论原理。”这就是说，无论参考系如何变换或运动，电磁场及其运动是客观存在的，是绝对的，光即电磁场传播所形成的电磁波也是如此，无须任何人为的“以太”作为媒介。爱因斯坦还有一段话在致索洛文的信中说明了相对论的基本思想特别是否定以太存在的观点的形成：“相对论的实验基础虽然是多种多样的，但其内容和方法只要用几句话就可以概括，还在古代人们就懂得，运动只有作为相对运动才能被察觉到。与此相反，物理学实际上却建立在绝对运动概念之上，光学曾设想一种特殊的不同于其他运动状态的运动，这种运动被认为是光以太的运动。物质物体的所有运动都是相对于光以太的运动。因此，以太体现出同虚空相联系的绝对静止概念。如果静止的、充满全部空间的光以太真的存在着，那末就可以有相对于它的绝对意义上的运动……但是，发现这类在假想的以太中的特许运动的努力都失败了。于是以太中的运动问题就反过来加以考虑了，这就是相对论系统地作过的工作。”——这就是他提出的相对性原理：“物理定律（不只是力学定律）对所有惯性系都成立”（即不存在任何特殊优越的参考系）的思想基础。但这样一来，就得承认真空中的光速不变，关键是如何解决它与经典速度合成法则的矛盾。爱因斯坦为了修改洛伦兹收缩理论使其成为普遍理论，“白白花了一年的时间”，总是回到提出追光问题时的 Those 问题。

重申传统的时间观念，在同时性问题上的突破可看作第三阶段。爱因斯坦对自己如何放弃时间的绝对性问题，作了如下回忆：1905年4月的一天，天气很好，我带着两个概念（光速不变与速度合成法则）为什么互相矛盾的问题访问了贝索……我俩讨论了问题的各个方面。后来，我突然找到了问题的关键。第二天，我再次访问他，甚至没有问候一声就直接对他说：“谢谢你，我已经完满地把问题解决了”，”爱因斯坦经过十年的艰苦探索，放弃了许多无效的尝试，“终于醒悟到时间是可疑的！”时间和空间是和物质运动紧密相连的，有多少惯性参考系就可以有多少时间。“只要时间的绝对性或同时性的绝对性这条公理不知不觉地留在潜意识里，那么，任何想要满意地澄清这个悖论（“追光”）的尝试，都注定要失败的。只要清楚地认识到这条公理以及它的任意性，实际上就意味着问题的解决。对于发现这个中心点所需要的批判思想，就我的情况来说，特别是由于阅读了休谟和马赫的哲学著作而得到决定性的进展。”

于是，爱因斯坦在光速不变与速度合成法则之间作出果断的选择：放弃牛顿力学的速度合成法则。即大胆抛弃牛顿的绝对空间。此后，仅仅用了五周时间，爱因斯坦就完成了狭义相对论。事实上，突破同时性的绝对性，就得同时要求惯性参考系的建立与四维洛伦兹变换成立，要求“光速不变”含有真空中光速大小不变、各向同性、与频率无关、与光源运动状态无关、也与观察者运动状态无关等多层意思。光速 c 已以一个普适常数同时出现在电磁关系、洛伦兹变换、时空联系、质能关系、质点的能量质量与动量相互关系等公式中，成为物质若干基本性质之间的重要桥梁，成为信号传递不可逾越的界限。这样就揭开了人类认识史上新的一页，形成了本世纪物理学发展的重要支柱之一。

光的波粒二象性概念的形成和发展

光的波粒二象性是指光既具有波动性，又具有粒子性，它把两种本来就互相对立、矛盾的概念，通过光子的能量和动量的公式联系起来，统一于光的波粒二象性之中，这是矛盾的对立统一，也是当代人们对光的本性的认识。这种认识是经历了漫长的岁月，经过几个历史阶段，最后才形成和发展起来的。（1）光是波动还是微粒 在古代，已经提出了“光究竟是什么？”的问题，但对它的认识很模糊。到 17 世纪，对光的认识提出了两种理论，一种是由胡克和惠更斯提出的波动说，另一种是以牛顿为代表的微粒说。胡克认为光是一种振动，在均匀媒质中在各方向上以相等的速度传播，发光体的每一振动必须形成一个球面，像水波一样不断扩大。惠更斯的工作使光的波动说得到了重要的发展，在 1690 年出版的《论光》中，已注意到光在传播中相互交叉时并不彼此妨碍的事实，从而得出光的运动是媒质的运动，而不是可以和飞矢相比拟的运动。他还把光的传播方式和声音在空气中的传播加以比较，明确地提出“光是一种波动”的想法。他又根据光速的有限性论证了光是从媒质的一部分依次向其他部分传播的一种运动，它和声波、水波一样是球面波。

牛顿对惠更斯提出的光的波动说持怀疑和反对的态度，他说：“光线是否是发光物质发射出来的很小的物体？因为这样一些物体能够直线穿过均匀媒质而不弯曲到影子区域里去，这正是光线的本质。”可以看出牛顿是从光线在媒质中的直线传播这一性质出发而提出光的微粒说的。

以惠更斯为代表的光的波动说，不能解释光的偏振现象，牛顿却能根据微粒说解释光的偏振。主要由于这一原因，17、18 世纪人们接受了光的微粒说，而否定光的波动说。

（2）波动说的胜利和发展 1801 年，托

马斯·杨进行了双缝干涉实验，从而提出了光的干涉原理，使光的波动说复苏起来。17 年之后，菲涅耳证明了将杨氏干涉原理和惠更斯原理的基本假设结合起来，可以得到较完整的光的波动理论，用它解释光在传播中的各种现象，而牛顿的微粒说对此却是无能为力的。尤其当傅科和菲佐首创了在实验室测定光速的方法以后，可以测出光在空气和水中的速度，实验结果表明：由光的微粒说导出的光在水中的速度大于在空气中的速度是错误的。由此，光的波动说在光的本性的争论中，占了支配地位。

麦克斯韦 1864 年的工作使光的波动说达到了顶点，他用娴熟的数学技能揭示了电磁场的本质，总结出麦克斯韦电磁场方程组，又从这些方程组导出了波动方程，证明电磁波是一种横波，并得出电磁波的传播速度等于空气或真空中的光速，由此得出结论：“这一速度与光速如此接近，看来

我们有强烈的理由断定，光本身乃是以波的形式在电磁场中按电磁规律传播的一种电磁振动。”这就是麦克斯韦对光的电磁理论的精辟描述。这一理论大约在 20 多年之后，1888 年由 H. R. 赫兹用实验加以证明。

光的电磁理论使光的波动说摆脱了机械观点的影响，从菲涅耳等人的弹性以太的波动说进入了电磁以太的波动说，它为光的波动说奠定了牢固的基础。

(3) 光量子理论的提出光的波动说从托马斯·杨和菲涅耳的工作开始，大约盛行了 90 年。1900 年，普朗克为了解释黑体辐射的能量分布，他假设黑体内谐振子吸收和发射的能量是不连续的，每一变化只能是 $h\nu$ 的整数倍，他把这能量变化的单元 $h\nu$ 称为量子。到 1905 年，爱因斯坦对光的本性又提出了新的看法。他发表了一篇题为《关于光的产生和转化的一个具有启发性的观点》的文章。这篇文章从根本上说，是为了说明不仅辐射的发射和吸收过程是以离散的能量形式发生的，而且在一定条件下，辐射本身的性质也好像是由粒子组成的。为此提出了大量的例证，其中之一就是对光电效应的理论解释。光电效应是这样一种现象：当波长足够短的电磁辐射投射到金属表面时，从金属表面有电子逸出，1902 年，勒纳德 (P. Lenard, 1862—1947) 对它进行了实验研究，发现了一些令人不解的事实：逸出电子的能量分布与照射金属表面的光强度无关，却与光的频率有关。当光的强度增加时，发射电子的数目增加，而电子的能量并不增加。这一规律是经典的波动说无法解释的。

爱因斯坦对光电效应进行了研究，他认为勒纳德的观测结果是光的微粒本性的一个明显例证，并使他更加确信，光的波动说虽然有很大的成就，但是把它用于光的产生和转化现象，很可能导致与实验的矛盾。例如对于黑体辐射、光发射、由紫外线引起的阴极射线的产生、以及其他涉及到光的产生和转化等现象，如果假设能量在空间作不连续分布——即采用光量子假说更易于理解。他由光量子的概念进而得出了光电方程。爱因斯坦的工作，不仅从理论上解释了光电效应，更重要的是使人们对光本性的认识上升了一大步。他所提出的方程，约在 10 年后由原来持反对意见的密立根给出证明。

(4) 光的波粒二象性概念的确立 爱因斯坦的光量子理论，当时曾使人迷惑不解，因为一方面光具有干涉和衍射现象，说明辐射具有波动性，而另一方面光电效应又指出辐射具有粒子性。面对这一矛盾，爱因斯坦深入研究了辐射的本性，终于在 1909 年发表了《论辐射问题的现状》一文，用他特有的、典型的、简洁的手法，论证了辐射场不仅显示出波动性，而且显示出粒子性，第一次提出了光的波粒二象性的明确表述。

爱因斯坦是通过对黑体辐射的研究而得出光的波粒二象性的概念的。他考察了体积为 V 的绝热空腔中温度为 T 的黑体辐射问题，集中讨论体积

为 V 的子区域，研究这区域中的能量涨落，利用热力学和普朗克辐射定律进行运算，得出能量涨落由两部分组成，其中一部分可以看作不同平面波之间短时干涉效应的结果，另外一部分假定辐射由光量子组成，可以论证得出它是粒子辐射所引起的。由此，根据黑体辐射的统计性质，爱因斯坦证明了黑体辐射显示出波动性和粒子性这两个方面的特征，这个结果是波粒二象性的第一个例证。爱因斯坦不仅从能量角度讨论了辐射问题，还讨论了以压强形式表现出来的动量，他分析了黑体辐射的动量涨落，为波粒二象性提供了又一个证据。由此，爱因斯坦预言：“在理论物理发展的下一阶段，将会出现关于光的理论，根据这种理论，（光）可能被看作是波动和微粒说的一种融合体……”于是建立起了光的波粒二象性的概念。德布罗意的工作，使光的波粒二象性的概念得到了进一步阐述，并推广到一切实物粒子都具有波粒二象性的结论，它说明波动和粒子的二象性确实是微观物质世界的普遍性质，而光的波粒二象性只是这种普遍性质的特殊情况。

对于具有二重特性的光来说，描写它的运动规律只能运用量子电动力学。因为光子的传播速度为 c ，它不能用量子力学来讨论。在量子电动力学中，不同于牛顿和惠更斯时代的微粒说和波动说，而是以全新意义的微粒说和波动说来说明光的本性。在这里所谓粒子的意义，已不是牛顿时代所理解的刚球，而仅仅是光子所具备的一些固有属性；作为波动意义留给我们的，仅是波函数振幅的平方表示光子出现的概率，以及波函数满足的相干性叠加原理；总之，场和粒子是一个统一体。在不同的实验条件，例如在干涉、衍射的条件下，更多地表现出波动性，而在原子吸收或发射光子的情况下，更多地表现出粒子性。所以，量子电动力学是光的波粒二象性的理论基础。

到目前为止，光的波粒二象性的概念，虽已广为科学界接受，但仍有一些遗留问题尚待进一步研究，如光子是一种基本粒子吗？是否还有内部结构？光子的静止质量确实为零吗？这些问题正在激励科学家们作进一步的探索。

主要参考资料：

1. 王锦光等，中国光学史。第1版。长沙：湖南教育出版社，1986。
2. 袁运开等。物理学史讲义——中国古代部分。第1版。北京：高等教育出版社，1985。
3. [美]盖莫夫。物理学发展史。第1版。高士圻。北京：商务印书馆，1981。
4. [美]卡约里 (Cajori, F.)。物理学史。戴念祖。第1版。呼

和浩特：内蒙古人民出版社，1981。

5. 陈毓芳，邹延肃。物理学史简明教程。第1版。北京：北京师范大学出版社，1986。

6. 谢邦同。世界经典物理学简史。第1版。沈阳：辽宁出版社，1988。

7. [美] 威·弗·马吉。物理学原著选读。第1版。蔡宾牟。北京：商务印书馆，1986。

8. 中国大百科全书出版社编辑部。中国大百科全书。物理学卷。第1版。北京：中国大百科全书出版社，1987。

9. 李秉铎。以太假说的兴衰。物理教学，(5)：24~25。

10. [日] 广重彻。物理学史。第1版。祁关泉等。上海：上海教育出版社，1986。

11. 宋德生，李国栋。电磁学发展史。第1版。南宁：广西人民出版社，1987。

12. 汪世清。光速测定的演变。物理通报，1985(5)：266—270。

13. 钟鸣乾。人类对光本性的认识。物理，1975(5)：291~295。

14. 苏汝铿。光的本性的探索。物理教学，1983(1)：8—11。

7 . 对原子及物质结构的认识

X 射线的发现

对阴极射线本性的研究意外地导致了一项轰动世界的新发现。勒纳德关于阴极射线穿透金属的实验引起了维尔兹堡大学伦琴的兴趣，他首先使用勒纳德管重做该实验，确证阴极射线可以使放电管近旁几厘米远的荧光屏发光。1895年11月8日晚，伦琴改用克鲁克斯管继续实验，当他在检查暗室内已全部用锡箔与黑纸包好的管子是否漏光时，意外地发现1米外的荧光屏（涂有氰亚铂酸钡的纸片）上有闪光，因为阴极射线只能穿透几厘米空气，这现象显然无法用阴极射线的性质来解释。他将屏的背面朝着管子，或者移得更远些，荧光仍然存在。在管与屏之间放上几件东西，屏上仍有荧光。经过连续几个星期的反复实验，他确信这是一种具有强穿透力的新的神秘射线，它是由阴极射线打到玻璃管壁上所产生的。由于它的性质尚未为人所知，他称之为X射线（X射线的本性一直到1912年才弄清楚）。他发现X射线能穿透厚达1000页的书、2—3厘米厚的木板、15毫米厚的铝板；使用X射线照相，可照出木盒中的砝码、有绝缘包皮的金属线等。特别引人注意的是有一次他夫人到实验室时他请她把手放在黑纸包严的照相版上，经过15分钟，得到了一张引起轰动的伦琴夫人的手骨照片（图2-1-27），手骨和手指上的结婚戒指都清晰可见。伦琴于1895年12月28日发表了题为《论一种新射线》的论文，总结了她的发现，他在论文中主要总结了X射线的穿透性及它与阴极射线和可见光的区别。论文发表几天以后，这个消息就传播到全世界，其传播之迅速，反应之强烈，在科学史上是罕见的，论文在3个月内被印行五次，一年之内竟有1000多篇有关X射线的论文、48种专著和小册子问世。几乎所有的实验室都开动了仪器，重复伦琴的实验。X射线首先在医学上得到了应用，由于它可以隔着皮肉透视骨骼的特性，为透视人体、检查伤病提供了有力的新手段。各国医学家竞相研究，获得了丰硕成果。

X射线的发现，不仅为医疗事业带来了新希望，也揭开了物理学革命的序幕，展示了物理学还有亟待探索的未知领域。在这之后，一系列的新发现接踵而至。

关于阴极射线本质的争论

阴极射线的发现起源于真空放电现象。早在 19 世纪 30 年代，法拉第就曾研究过真空放电现象，他发现稀薄气体放电时会产生辉光，放电管中有后人称作的“法拉第暗区”，由于他无法得到高真空，所以没有更多的发现。

对真空放电进行深入研究是从德国数学家兼物理学家普吕克尔（J. P. L. Plücker, 1801—1868）开始的。他身边的技工盖斯勒（H. Geissler, 1814—1879）根据普吕克尔的意图于 1855 年制成简易水银泵，使放电管的真空度提高了一个数量级。1858 年普吕克尔利用“盖斯勒管”得到了新发现：随着真空度的提高，法拉第暗区在扩大，阴极的辉光也有所扩展，尤其是磁铁能使荧光光斑改变位置和分布状况。1869 年，普吕克尔的学生希托夫（J. W. Hittorf, 1824—1914）提高了真空度后进而发现，如果把物体放在点状的阴极和产生荧光的管壁之间，物体就会产生清晰的影子。由此他推断：阴极发出一种射线，以直线前进；而荧光则是射线撞击在玻璃管壁上产生的。1876 年，德国物理学家戈德斯坦（E. Goldstein, 1850—1930）证明这种射线沿直线传播，并把它称为“阴极射线”。至此，真空放电现象已引起物理学家的普遍注意，一方面，物理学家纷纷进行真空放电的各种实验，另一方面，人们试图对阴极射线的本质作出合理的解释。于是，出现了“以太波动说”和“粒子说”两种解释。希托夫和戈德斯坦从他们的实验结果推断阴极射线是与紫外线类似的以太波。那时，由于麦克斯韦光电理论的迅速传播，而他们看到阴极射线管出现辉光，便自然而然地把阴极射线和光联系起来。德国物理学家赫兹为了给“以太波动说”找到更有力的论据，于 1883 年进行了一系列实验，他“证明”了阴极射线的径迹不一定与真空中电流的走向一致；“证明”了电场对阴极射线无作用；证明了阴极射线能够穿透某些金属薄片。当时人们已知任何物质粒子都不可能穿过金属薄片，这似乎证明了阴极射线不是粒子流。尤其是 1894 年，赫兹的学生勒纳德（Philipp Lenard, 1862~1947）在其导师指导下，用铝箔代替石英板作为放电管的“窗口”，将阴极射线引出管外空间 8 厘米之远。这是粒子说无法解释的，由此断言阴极射线只能是以太波动。这些实验使德国大多数物理学家相信“以太波动说”的观点。

英国和法国的物理学家们设想阴极射线是带负电的粒子流，他们也做了不少实验。1871 年瓦利（C. F. Varley, 1828—1883）以阴极射线可以用磁铁加以偏转为根据，首先提出阴极射线是由带负电的粒子构成的假说。1879 年，英国物理学家克鲁克斯做了一系列有关阴极射线的实验。他亲自改进真空泵，取得了更高的真空。因此他发现了比法拉第暗区更靠

近阴极的地方还有一个暗区（克鲁克斯暗区），还发现用阴极射线照射金属箔，被照射部分可被加热至白热状态。此外，他还设计了一个有趣实验：当用阴极射线照射风轮时，风轮就滚动起来。这表明阴极射线具有动量。这些实验有力地支持了阴极射线的“粒子说”。1895年，法国年轻的物理学家佩兰（J. B. Perrin, 1870—1942）在他的博士论文中，谈到测量阴极射线电量的实验：他使阴极射线经过一个小孔进入阳极内的空间，打到收集电荷的法拉第筒上，静电计上显示出带了负电，若用磁场使阴极射线偏转时，静电计上的电性立即消失，从而证明电荷正是由阴极射线携带的。然而持“以太波动说”观点的人们提出，静电计所带的电荷不一定是由阴极射线传入的。英国物理学家 J. J. 汤姆孙也认为佩兰实验有不足之处，他将佩兰实验稍加改进。证明了阴极射线和带负电荷的粒子在磁场和电场的作用下遵循同样路径，用实验无可辩驳地说明阴极射线是由带负电荷的粒子组成，并且成功地利用磁场和电场综合偏转技术测得阴极射线的比荷（亦称荷质比）。另外，他还用旋镜法测量了阴极射线的速度，结果为 1.9×10^7 厘米 / 秒。这远远小于光速。从而否定了阴极射线的“以太波动说”。他还指出了赫兹当年实验失败的原因。

历时 20 多年关于阴极射线本质问题的论战，最终以粒子说告胜而结束。

电子的发现

电子的发现是历时 40 年研究阴极射线的直接结果。

在 19 世纪 80 年代初，J. J. 汤姆孙就在进行气体放电现象的研究，关于阴极射线本质的争论也是 J. J. 汤姆孙一直关注的问题。通过一系列的实验研究，1897 年 4 月 30 日他向皇家研究院作了题为《阴极射线》的报告，系统地阐述了他的实验和得到的结果。其中他介绍了一个关键性实验（图 2-1-28 甲）。当不用磁铁时，在射线末端的器壁上有荧光斑出现，这时没有电荷进入集电器（接静电计）；当用磁铁使射线发生偏转，才可能使阴极射线由一小孔进入金属集电筒（法拉第筒），筒内收集到的负电荷由静电计测出。实验结果完全说明阴极射线是带负电的粒子流。

但是，这些粒子是原子、分子、还是更小的物质微粒呢？为了搞清这一点，J. J. 汤姆孙进一步通过实验去测定这种粒子所带电荷 e 与其质量 m 之比 e/m 。他采用了两种独立的方法进行。其一是使阴极射线在磁场 H 作用下发生偏转（图甲），测出粒子偏转的曲率半径 r ；然后用装在管内的圆筒（接静电计）测出一定时间内进入筒内粒子的电量 $Q = ne$ ；再在筒内插入热电偶，测出相同时间内电

偶的温升值，换算出粒子传给电偶的动能 $W = \frac{1}{2}nmv^2$ 。由已知

的 H 和测得的 r 、 Q 、 W 值以及 $r = \frac{mv}{eH}$ 的关系，即可求得粒子的荷质比

$e/m = 2W/Q^2H^2$ 。其二是（图 2-1-28 乙）使阴极射线同时通过磁场和电场发生偏转（是他第一个在阴极射线中观察到电偏转，因为他获得了较好的真空）。通过偏转量互相抵消时的电场和磁场强度以及只有电场作用时粒子的偏转角，即可求出荷质比 e/m 。测定的结果得出这种粒子的 e/m 是 10^{-7} 数量级，比过去认为“电解中氢离子的值 10^{-4} 要小得多”。他还进一步用实验证明：气体成分的改变（如空气、氢、 CO_2 ），阴极材料的改变（如铝、铂），都不影响所测荷质比，这表明，来源于不同物质的“阴极射线粒子”都是一样的。他从勒纳德的实验中得知阴极射线粒子在常压下的空气中可以穿过半厘米以上的路程。便设想它的平均自由程要比普通分子大，而质量和大小要比普通分子小得多，因此这种粒子必定是“建造一切化学元素的物质”，也就是一切化学原子所共有的组成成分。

接着又进行了不少实验，如用紫外线照射与用热激发出的“粒子” e/m 值也相同。尽管以上结论已有充分证据，但毕竟是推论，可能电荷 e 很大或质量 m 很小，直接测定基本电荷 e 的绝对值，就成为当务之急。这个工作一直持续了一、二十年。1898 年，J. J. 汤姆孙和他的学生用云雾法测

定阴极射线粒子的电荷同电解中氢离子所带的电荷是同一数量级，从而直接证明了阴极射线粒子的质量只是氢离子的 $1/1000$ 。他当时把这种组成一切原子的粒子叫做“微粒”（Corpuscle），后来改称“电子”。电子这个名词是爱尔兰物理学家斯托尼（G. J. Stoney, 1826—1911）于 1891 年提出来的。对电子电荷最具有说服力的测定，是由美国物理学家密立根在 1906 年至 1917 年间通过实验得出的。密立根观测静电场中悬浮的液滴，在撤除电场后在重力作用下以不同速度下落，测得 e 等于 $(4.774 \pm 0.009) \times 10^{-10}$ 静电单位。密立根的工作表明：电是分为单个单元的，每个单元电荷都相等。两千多年来认为原子是组成一切物质的不可分的基元这一传统观念终于被否定了，因此，向原子内部进军，成为了世纪交替时期科学领域中最振奋人心的口号。

放射性的发现及放射现象的研究

X 射线发现后，4 个月内就导致了一种新的物理现象——放射性的发现。法国数学家庞加莱 (J. H. Poincare, 1854—1912) 收到了伦琴寄来的 X 射线第一篇论文的预印本和有关照片后，在 1896 年 1 月 20 日法国科学院的每周例会上，他展示了这些照片，并指出 X 射线是从阴极射线打到玻璃壁上的荧光点处发出的。这使当时在场的法国物理学家 H. 贝克勒耳想到 X 射线可能同他长期所研究的荧光有关，第二天，他就开始研究究竟有哪些荧光物质能发射 X 射线。贝克勒耳最初的一系列实验得到的是负结果：磷光或荧光物质并不发射 X 射线。后来他采用硫酸铀酰钾重新进行实验。以惯用的方法先把铀盐放在阳光下曝晒，让它发荧光，然后，把它放在用两张厚黑纸包严的照相底片上面，以便检验它能否像 X 射线那样使底片感光，实验的结果如愿以偿。1896 年 2 月 24 日他在科学院例会上报告了这一结果。2 月 26 日，因为天阴，他就把准备做实验的铀盐和密封的底片一起放进了暗室的抽屉。一连几个阴天，3 月 1 日天气晴朗，贝克勒耳取出底片，在做实验前的检查时，意外地发现底片已经曝光，上面有明显的铀盐的像。这表明底片感光与日晒和荧光都不相关。他推断，感光必定是由于铀盐自身发出的一种射线。第二天他就在科学院例会上报告了这一发现。随后，他又改用不发荧光的铀化合物和其他发光晶体进行实验，发现只有含铀的晶体才产生放射性射线，而且用纯铀时放射性强度要高三四倍。他还发现铀盐所发出的射线还能使气体电离，引起放电器放电，而且可被电场或磁场偏转，但温度变化对铀盐的射线并无影响等等。由此他明确提出，发射这种射线是铀的一种特殊性质。

贝克勒耳的发现虽然不如 X 射线发现那样轰动，但他吸引了一批杰出的物理学家在这个新领域中开展工作。一方面，以居里夫人为代表的一些物理学家致力于寻找新的放射性元素。1898 年居里夫人发现了放射性元素钋和镭，1899 年德比尔纳 (A. L. Debierne, 1874—1949) 又发现了钷。另一方面，探讨放射性的本质和规律已成为重要任务，这方面贡献最大的是英国物理学家卢瑟福。1898 年，他在重复贝克勒耳实验时发现了铀盐辐射被铝片吸收后有两种不同的吸收率，从而发现铀和铀的化合物发出的射线有两种不同的类型：一种极易被吸收，他称为 α 射线；另一种有较强的贯穿本领，他称之为 β 射线。两年后，法国化学家维拉尔 (P. U. Villard, 1860—1934) 又发现了具有更强穿透本领的第三种射线，即 γ 射线。1900 年贝克勒耳通过对荷质比 e/m 的测定，确认 β 射线就是电子流。但 α 射线仍然是个谜。为此，卢瑟福展开了对 α 射线的一系列研究，取得了许多重大成果。1903 年，他用强磁场和巧妙的装置，证明 α 粒子有弱的偏转并带

有正电荷。1908年，他利用其助手盖革(H. Geiger, 1882—1945)发明的气体放电计数管和当时的闪烁计数法，在年轻助手们的常年合作下直接测出 α 粒子带有两个正电荷，他还巧妙地证实了 α 粒子是双重电离的氦原子。由于 α 粒子带有巨大的能量和动量，卢瑟福用它轰击原子，发现原子的有核结构，并用于产生原子的人工蜕变，这成为后来打开原子奥秘的有力工具。至于中性的 γ 射线，1914年卢瑟福和恩特勒(E. N. de Andrade)用晶体使 γ 射线发生了衍射，最后确证是波长比X射线更短的电磁波。

放射性研究中最惊人的成果是元素衰变的发现，这也是卢瑟福早期最重要的贡献。1901年底，卢瑟福和英国青年化学家索迪(F. Soddy, 1877~1956)用化学方法提取钍，发现提出钍后原来的钍化物的放射性明显地降低了，而残渣却有极强的放射性。可是一个月后，残渣的放射性消失了，而钍化物却恢复了原有的放射性。为了解释这使人困惑的现象，他们反复进行实验研究，总结出镭、铀等变化规律，绘制了单种放射性物质的放射性强度随时间变化的曲线，在此基础上，他们于1902年提出了放射性元素的衰变理论：放射性物质是不稳定的，它们自发地放射出射线和能量，衰变成另一种放射性元素，直至成为一种稳定的原子为止。其放射性强度按指数关系随时间不断衰减，而与其他任何因素无关。这一理论轻而易举地解释了放射性元素为什么会放出巨大能量，引出了“原子能”的概念，并且还说明了地热的来源，解决了物理学家和地质学家之间的长期争论。元素衰变理论是一种革命性的理论，它打破了自古代希腊以来人们始终相信的原子永远不变的传统观念。

在提出衰变理论之后，卢瑟福、索迪等人又进一步研究放射性元素递次变化的线索，1913年1月由罗索、法扬斯和索迪三人同时独立提出了放射性元素的衰变位移定律，即放射性元素发生 α 衰变后，新元素在周期表上向左移两个位置，即原子序数减少2，原子量减少4；在发生 β 衰变后，则向右移一个位置，即原子序数增加1，而原子量保持不变。当时已发现的43种放射性元素分属三个谱系，它们的始祖分别是铀、钍和钍，最后的产物都是稳定的铅的同位素。

在放射性元素的同位素发现后，1912年J. J. 汤姆孙发现氖有两个同位素。这是第一次发现稳定的同位素，也解开了一般元素的原子量的非整数之谜。1919年，英国物理学家阿斯顿(F. W. Aston, 1877~1945)用自己发明的质谱仪先后在71种元素中发现了202种同位素。

至此，完全解决了天然放射性元素的谱系和元素的同位素问题。

对原子结构的认识过程

电子的发现使人们普遍认识到带负电荷的电子是一切原子的基本组成部分。在通常情况下原子呈现中性的事实，表明原子中还存在着与电子电荷等量的正电荷，人们对原子中正负电荷的分布前后提出了种种设想，建立了各种原子结构模型。

早在 1871 年，德国的 W. 韦伯为了解释安培分子电流假说曾提出正负粒子相对作椭圆运动的行星式模型。法国佩兰于 1901 年进而认为电子绕行频率即辐射光的频率。英国开尔文 1902 年从数学上设想电子在正电球中的运动，德国勒纳德根据阴极射线可穿透金属空隙，认为原子并非实心，主张中性微粒浮游模型，日本长冈半太郎（1865—1950）在 1903 年提出土星环模型，但解决不了稳定性问题。这些都是一些原始假设。

第一个比较有影响的原子模型是 J. J. 汤姆孙于 1904 年提出的“电子浸浮于均匀正电球中”的实心球模型，这是由开尔文的“面包葡萄干”模型发展而来的。他设想，在半径大约为 10^{-10} 米的原子中，正电荷以均匀的密度连续分布于整个球中，电子则在正电荷与电子间的有心力以及电子与电子间的斥力的共同作用下浮游在球内，并在平衡位置附近振动，从而达到某种稳定状态，这时电子在原子内部的分布并非完全任意，而是排列在各个同心圆上。当时，人们已经掌握了来自原子内部的两套信息：一是门捷列夫所揭示的化学元素的周期律；二是巴耳末所揭示的氢原子谱线的规律性。汤姆孙原子模型能够解释当时已知有关原子的各种性质，尤其是电子的同心圆排列可以解释门捷列夫的周期律。该模型尽管具有明显的人为性质，但在一段时间里还是被科学家们所接受。

粒子散射实验是揭开原子内部结构奥秘的真正开端，根据卢瑟福的说法，这是用“炮弹”打到原子内部去试探。1907 年，卢瑟福主持曼彻斯特大学实验室，主要研究有关粒子的本质和特性问题。1909 年，他的助手盖革和学生马斯登（E. Marsden, 1889~1970）观测粒子透过金属箔的散射分布，发现大多数粒子散射角度很小，但也有少数偏角很大。卢瑟福敏锐地认识到大角度粒子散射现象非常重要。它远远超出了汤姆孙模型所作的理论预测。于是，他立即催促重新进行那种哪怕是“愚蠢的实验”。他们用镭作放射源进行粒子穿射金属箔的实验，精心测量数量极少的大角度散射粒子，结果发现约有 $1/8000$ 的粒子偏转角超过 90° ，甚至有的反弹回来。后来卢瑟福回忆说：“它是如此难以令人置信，正好像你用 15 英寸的枪射击一张薄纸，而子弹居然反弹回来把你打中了一样。”卢瑟福把散射实验事实与原子模型联系起来。他设想，要使具有百万电子伏特能量的粒子产生这样大角度的散射，只能是由于受到极强的

电场力作用，即只能是原子的全部正电集中在很小范围内，才能使 α 粒子受到足够大的库仑力；另外，电子的质量大约只是氢原子质量的 $1/1840$ ，说明原子的绝大部分质量也集中于正电粒子上。他从哥白尼的学说得到启示，想到原子内部结构仿佛就是缩小了的太阳系。1911年2月他写了《 α 粒子物质散射效应和原子结构》一文，提出了自己的有核原子模型：原子的中心部分是一个半径约 10^{-14} 米的核，原子的全部正电荷和绝大部分质量都集中在核上，电子分布在核外半径约为 10^{-10} 米的区域内。并且他从理论上推导出 α 粒子散射公式。1912年7月，盖革和马斯登进行了一系列 α 粒子对金属箔的散射实验，计算了10万次以上的 α 粒子闪烁，结果完全证实了卢瑟福的预言。

不过，卢瑟福的有核原子模型一开始就遇到困难。按照经典理论，电子在绕核做加速运动时要向外发射电磁波，最终因丧失能量会落到核上。按这种观点估算原子的寿命约为 10^{-8} 秒。可实际上原子非常稳定，卢瑟福的原子模型也无法解释线状的原子光谱。这些困难后来由卢瑟福的学生丹麦物理学家 N. 玻尔所解决，通过玻尔的杰出工作，使得有核原子模型迅速得到科学界的公认。

玻尔 1911 年来到曼彻斯特在卢瑟福手下工作。面对卢瑟福模型所遇到的困难，玻尔意识到经典理论不适用于原子的内部结构，他认为“只有量子假说才是摆脱困境的唯一出路。”他把卢瑟福的有核原子模型和普朗克的量子论大胆而巧妙地结合起来，把爱因斯坦关于光子能量量子化的概念加以推广，并结合氢原子光谱不连续的事实，于 1913 年以《原子和分子的结构》为题，连续发表了三篇论文，抛弃了经典的辐射理论，提出了两条假设：（1）原子只能处在一系列不连续的稳定状态。处在这些稳定状态的原子不辐射。（2）原子吸收或发射光子的频率 ν 必须满足 $h\nu = E_2 - E_1$ ， E_2 和 E_1 分别是原子吸收或发射光子前后的两个不连续的能态的能量值。玻尔用自己的理论对最简单的氢原子结构作了详细的计算，从理论上导出了氢原子光谱的波长公式，所得结果与光谱实验数据相符合。尤其是里德伯常量的理论值其精确度达 $2/10\,000$ ，这在当时科学界实属罕见。从而证明了卢瑟福的有核原子模型和玻尔量子化假设的正确性。

玻尔提出的量子化的原子结构理论，初步揭示了光谱线与原子结构的内在联系，使有核原子模型稳定性问题及离散谱线问题迎刃而解，使长期以来无法说明的许多经验公式得到了统一的理论解释；同时也揭示出在微观体系中量子规律的重要作用，推动了量子理论和物质结构理论的发展。由于这一开拓性的贡献，玻尔理论成为原子结构理论发展史上的一个重要里程碑。

1915 年，德国物理学家索末菲 (A. J. W. Sommerfeld, 1868 ~ 1951)

把玻尔理论从两方面加以扩充。首先他将电子绕核运动的圆形轨道修正为椭圆形轨道；其次，他把相对论引入到玻尔理论之中，成功地解释了光谱线的“精细结构”现象。但玻尔理论无法解决复杂原子光谱的困难以及理论体系中既保留经典理论又引进量子理论的不协调性，在十几年后建立起来的量子力学中它们才得到了进一步的解决。

中子的发现

1911年，卢瑟福为解释 α 粒子的大角度散射，在《 α 和 β 粒子物质散射效应和原子结构》一文中，提出原子有核模型，认为原子的正电荷集中在 10^{-12} 厘米的范围（后来称为原子核）。1912年春，肯定了原子核的存在。这样，原子核的结构就成了物理学家进一步探索的课题。

1919年，卢瑟福用 α 粒子轰击氮，释放出氢原子核（1920年，他将它命名为质子），这样，自然认为原子核中包含质子，同时原子核中似乎也包含电子。然而，人们发现核的总角动量并非是质子和电子的角动量之和，即核不可能是质子和电子的组合。卢瑟福本人曾反复考虑可能存在一种质量等于质子质量的中性粒子，并于1920年的贝克讲座中谈到了关于这种假想粒子性质的推测。1928年，玻特（W. Bothe, 1891~1957）和他的学生贝克（H. Becker）用钋的 α 粒子轰击铍，观察到了一种贯穿辐射，当时他们误认为是 γ 射线。其后，约里奥-居里夫妇用玻特发现的辐射去轰击石蜡，1932年1月18日，观察到了奇特的现象：辐射能从石蜡层中打出质子流！他们认为这是 γ 粒子与质子碰撞时产生的反冲粒子。由于打出的质子在空气中的射程达26厘米，其能量相当于4.3 MeV，根据康普顿效应计算，入射光子的能量将近50 MeV。而 α 粒子轰击铍产生的中性辐射如果是 γ 射线，根据反应能的计算，其能量不会超过15.5 MeV，这就违反了能量守恒定律。实际上用 α 粒子轰击铍发出的中性辐射应该是中子（ ${}^9_4\text{Be} + {}^4_2\text{He} \rightarrow {}^{12}_6\text{C} + {}^1_0\text{n}$ ），而不是 γ 射线。由于约里奥-居里夫妇

没有正确认识这一现象，错过了发现中子的机会，真可谓失之交臂，十分可惜！卢瑟福的学生查德威克（J. Chadwick, 1891—1974）在卡文迪什实验室用这种射线去照射轻、重不同的物质（氢、氦及氮），结果发现射线的性质与通常的 γ 射线并不相同。他指出，由于 γ 射线的静止质量为零，因此根本就没有将质子从原子中打出去所需要的能量，甚至电子要做到这一点也嫌太轻。由此他断定：“这种辐射不是由迄今所认可的由光量子组成的，而是由不带电的粒子——中子组成的。”他测量了被打出来的氢核和氮核的速度，根据能量守恒和动量守恒定律估算出中子的质量与质子质量几乎相等。这正是人们寻找已久的卢瑟福所预言的中子！他于1932年2月17日发表了研究成果。由于他发现中子的巨大贡献而荣获1935年度诺贝尔物理学奖。

1932年以后，对中子性质以及中子和原子之间相互作用的研究，开创了物理学的一个新分支——中子物理学，进而导致了核裂变的发现。

对原子核结构的认识简史

早在 1815 年，英国医生兼化学家普劳特 (W. Proust, 1785—1850) 根据多数元素的原子量是氢原子量的整数倍，提出所有元素都由氢原子组成的假说。因为发现有些元素的原子量不是整数，特别是氯的原子量为 35.46 个单位，铜的原子量为 63.54 个单位，这个假说到 19 世纪末被放弃了。

19 世纪末 20 世纪初，发现了放射性现象和同位素，引起了对原子构造的新探索，也包括对原子核结构的探索。1919 年，卢瑟福发现一个 α 粒子能引起氮核的人工衰变，而衰变的产物之一是质子（即氢核）。1921~1924 年之间，卢瑟福和他的学生查德威克对硼、钠、铝等轻元素进行人工核反应，同样有质子分裂出来。以上事实显然说明原子核内存在质子。问题是原子核是否只有质子？当人们从元素周期表看到除氢以外，核的电荷数（原子序数）总是小于质量数时，曾假定原子核内除质子之外，还包含电子，它们的电荷量足以抵消额外质子的电荷，而电子的质量很小，不影响原子核的质量。即一个原子序数为 Z ，质量数为 A 的原子核，它就是由 A 个质子和 $(A-Z)$ 个电子所组成。这就是核结构的质子-电子假说。

质子-电子假说在某些方面能初步说明各种元素的性质，如解释原子核的 α 和 β 衰变现象、核质量近似为质子质量的整数倍等。但是这一假说与许多实验事实不符，理论上也存在困难，例如：随着测量的逐渐精确，核质量愈加偏离质子-电子假说所预言的质量；束缚在核内的电子，要有上百兆电子伏的能量，而 β 衰变的电子能量只有 1 兆电子伏的量级，靠电子-质子之间的微弱的电磁相互作用力根本不可能使电子保持在核内。另外，例如氮 ${}^{14}_7\text{N}$ 核的角动量，按照质子-电子假说应为 14 个质子与 7 个电子，

自旋值为 $14 \times \frac{1}{2} + 7 \times \frac{1}{2} = 21 \times \frac{1}{2}$ （奇数个半整数），即为费米子，而通

过原子光谱的超精细结构的实验测定却应为偶数个半整数即 ${}^{14}_7\text{N}$ 核应为

玻色子！最后，实验也测不出核内含有的电子磁矩，而只能成功地测出质子的磁矩，前者应为后者的 1840 倍（与质量成反比）。质子-电子假说所遇到的这些巨大困难，说明了人们对微观世界认识的曲折进程。也从反面说明了质子-中子说的来之不易。

1920 年，卢瑟福提出一种猜想，预言原子核内可能存在一种质量与质子相近的中性粒子。1921 年，美国化学家哈金斯 (W. D. Harkins, 1873—1951) 将它命名为“中子”。卢瑟福一直追寻这种粒子，但经历了 12 年后，才由他的学生查德威克找到。

中子的发现证实了卢瑟福预言的正确性，使得建立一种没有电子参与的核模型成为可能。1932 年，海森伯和苏联物理学家伊万年科 (1904~)

各自独立地提出了原子核由质子和中子组成的假说，根据这一假说，一个原子序数为 Z 和质量数为 A 的原子核，由 Z 个质子和 $A-Z$ 个中子组成。

核结构的质子-中子假说圆满地说明了元素的质量数和电荷数，解释了同位素以及放射性现象，使“质子-电子”假说面临的许多困难迎刃而解，因而立即被科学界普遍接受，很快成为原子核理论的基础，至今仍然是描述核的特性和结构的基础。这导致了对核作用力的研究，为粒子物理的发展开辟了道路。

人们在认识原子核结构的过程中，主要提出了五种具体的模型：气体模型、液滴模型、 α 粒子模型、壳层模型、综合模型，各种模型分别适用于核现象的一个特定方面，但迄今还没有哪一个模型能恰当地圆满地描述从放射性衰变到核反应和裂变的广阔范围里的一切现象。此外，还须进一步研究质子-质子、质子-中子、中子-中子这三种相互作用，以便说明原子核的主要性质。

有些实验表明，核内除有质子和中子外，还可能存在其他粒子，例如，当核被高能激发时出现 π 介子；1953 年发现了含有 Λ 超子的超核，近些年来又发现了含有超粒子的超核。这些问题还和迅速发展的“基本粒子”物理紧密相关。因此，探索原子核的结构及其内部运动规律，仍然是人类未来向知识深度进军的一个重要目标。

重核裂变的发现

自从卢瑟福实现原子核的人工衰变以后，人们用 α 粒子轰击原子核，所得到的都是元素的稳定同位素。1934 年约里奥-居里夫妇又发现了人工放射性。以此为起点，意大利物理学家费米的工作导致了原子核研究中重核裂变和链式反应的重大发现。费米在获悉人工放射性的发现以后，考虑到中子不带电荷，易于接近原子核，如果用中子代替 α 粒子，一定会出现更多的核反应。于是，他计划按照原子序数的顺序对已知的 92 种元素逐一用中子进行轰击。实验开始后，从氢到氧都一无所获，但到了氟，果然得到了放射性同位素。如此继续下去，在短短几个月内，他得到了 37 种不同元素的放射性同位素。当用中子轰击第 92 号元素铀时，得到了几种具有不同半衰期的放射性元素。其中有一种半衰期为 13 分钟。通过一系列化学分析，证明它不可能从铅到铀之间已知元素的同位素，费米认为很可能是一种原子序数大于 92（铀）的元素，当时称作超铀元素。在 1934—1938 年之间，许多物理学家都做了这种实验。当时著名的放射化学家哈恩（O. Hahn, 1879—1968）同他的合作者奥地利女物理学家迈特纳（L. Meitner, 1878—1968）及德国物理学家斯特拉斯曼（F. Strassman, 1902—1980）也一起在柏林研究中子轰击铀的产物，他们于 1937 年得到了至少 9 种具有不同半衰期的放射性元素。他们认为，其中 3 种是铀的同位素，另外 6 种是原子序数在 93—96 之间的所谓超铀元素。当时，科学界已公认发现了超铀元素。费米本人在 1938 年接受诺贝尔奖的演说中也对超铀元素的发现做了肯定。可是其后不久，就证明了发现超铀元素的说法是错误的。1938 年 11 月，哈恩和斯特拉斯曼在实验报告中宣布铀被中子轰击后的产物，至少有 3 种放射性物质的化学性质类似钡，它们应该都是镭的同位素，是铀 238 吸收中子后成为铀 239，然后连续放出两个 α 粒子衰变而成的。但在进一步研究中，他们始终找不到 α 粒子，而且，无论用怎样精密的化学方法，他们也无法把设想中的镭的新同位素从载体钡中分离出来。经过反复实验和慎重思考，他们最后断定：铀吸收中子后所产生的放射性物质，不是镭，而是钡的同位素。钡的原子序数为 56，接近铀原子序数的一半稍强。铀核受一个能量很低的慢中子轰击，怎么可能出现如此规模的崩裂，这对于当时的物理学家是不可思议的。其实，在此报告的前 3 个月，约里奥-居里夫妇也做出了类似实验结果，但他们没有抓住这个“不可思议”而穷追到底，又一次与重大发现失之交臂。

哈恩把自己的实验结果寄给逃亡在瑞典的迈特纳，以征求这位有敏锐批判眼光的同事的意见。迈特纳和自己的侄子奥地利物理学家弗里希（O. R. Frisch, 1904—1979）得知哈恩的实验结果也感到困惑。他们认

为实验事实是无可怀疑的。经过几天的热烈讨论，联想到玻尔前不久提出的原子核液滴模型，最后确信：铀核吸收中子后，并不形成超铀元素，而是分裂成大小相近的两个原子核。假如一个是原子序数为 56 的钡，另一个则是原子序数为 36 的氙。他们把这种现象类比为细胞的增殖分裂，因而就称为核的“裂变”。1939 年 1 月 27 日，玻尔在华盛顿理论物理学讨论会上宣布了哈恩和施特拉斯曼的发现以及迈特纳和弗里希的解释，立即引起轰动。当场有人回到自己实验室去检验这一发现和解释，几小时后获得肯定结果。当时有人猜测，如果铀核裂变后放出一个以上中子，这些中子又能引起邻近铀核的裂变，如此继续下去，就成了链式反应。一个多月后，法国的约里奥-居里夫妇、流亡在美国的匈牙利物理学家西拉德，以及费米等人分别证实了链式反应不仅可能，而且速率极快：两次反应的时间间隔只有五十万亿分之一秒。这表明，铀核裂变式反应一旦实现，极短时间内将有巨大能量释放出来。1940 年，彼德扎克等人观察到铀核会自行发生裂变，从而发现了一种新的放射性衰变方式——自发裂变。1946 年，当时在法国的中国物理学家钱三强和何泽慧夫妇发现，在中子轰击下，铀核还可以发生三分裂或四分裂。1946 年 12 月 9 日，钱三强领导的研究小组在法国科学院通报上公布了三分裂的研究结果，并附有 5 张有历史意义的核乳胶照片，其中 4 张显示出不同长度的第三条细长径迹。同年 12 月 23 日又公布了四分裂照片，并附有详细的测量计算。1947 年 2 月，钱三强、何泽慧在美国《物理评论》上发表论文，第一次对三分裂和四分裂作出明确结论：“三分裂对二分裂之比为 0.003 ± 0.001 ；四分裂对二分裂的比为 0.0003 ± 0.0002 。”

原子核裂变的这一系列发现具有划时代的意义，它为人类开辟了一种新的能源——核能，俗称原子能。

原子弹的研究（曼哈顿工程）

原子核裂变发现时正值第二次世界大战爆发的前夕。美国物理学家西拉德（L. Szilard, 1898~1964）等人已预感到制造原子武器的危险，特别在获悉纳粹德国正加紧链式反应的研究并采取了禁止所侵占的捷克的铀矿石出口等行动之后，更是焦虑万分。1939年7月，西拉德与维格纳（E. Wigner, 1902~）一起找到爱因斯坦，想借助他的名望给美国总统罗斯福写信，敦促美国赶在纳粹德国之前造出原子弹。爱因斯坦于1939年8月2日发出了著名的给罗斯福总统的信，罗斯福总统采纳了他们的建议，下令成立铀顾问委员会。当时这项工作还没有引起美国军界和政界的重视，直到1942年9月美国才成立了由三名军政官员和两名科学家组成的军事政策委员会，领导制造原子武器的庞大工程，代号叫“曼哈顿工程”。从此，研究工作由实验室的理论研究转向实际的工程建设。希特勒的法西斯暴行迫使欧洲一大批有才干的科学家流亡到美国，他们成为美国开发原子能的中坚力量。加上美国国内没有受到战争破坏，具有较优越的物质条件，因此，曼哈顿工程进展迅速。

为了研究链式反应实现的实际条件以及利用天然铀中的 ^{238}U 来制造钚，1942年10月在费米领导下，在芝加哥大学运动场建造了一个6米高的核反应装置。这种装置由石墨层和铀层相间堆砌而成，因此称为“反应堆”。堆中的石墨用来使快中子减速成为慢中子，称为慢化剂。堆的中间插有许多能吸收中子的镉棒，调节镉棒的深入尺寸，就可以控制链式反应的速率。这个堆的运行，为大型链式反应堆的建造提供了必要的数据。开创了可控核能释放的历史。

要制造原子弹还必须解决两个关键性问题：（1）用实际有效方法把可裂变物质（ ^{235}U 或 ^{239}Pu ）分离出来；（2）从理论上计算出各种可裂变物质实现核爆炸的临界体积。临界体积是指出现链式核裂变反应的最小体积。据计算，纯 ^{235}U 的临界质量为15千克，纯 ^{239}Pu 则为5千克。关于原子弹的设计和试制工作，由加利福尼亚大学的理论物理学教授奥本海默（J. R. Oppenheimer, 1904—1967）负责领导。1943年3月于新墨西哥州的洛斯阿拉莫斯建立了规模庞大的实验室。1945年7月16日，他们在新墨西哥州离阿拉莫斯96公里的荒漠上爆炸了第一颗原子弹。这是一颗铀弹，爆炸力相当于2万吨TNT炸药，在半径400米的范围内，砂石都熔化成黄绿色的玻璃状物。半径1600米范围内，所有的动植物都死亡。

原子弹的实验成功，与科学家的初衷相反，美国总统杜鲁门等将刚刚制造出来的两颗原子弹于1945年8月6日和9日先后投向日本的广岛和长崎上空。3年之后，苏联也制成了原子弹，英国和法国也相继于1952年

和 1960 年分别制成原子弹。我国科学技术人员经过 8 年努力，也于 1964 年 10 月成功地爆炸了原子弹。

原子能的释放，是 20 世纪最激动人心的科学成就。原子能的和平利用，正如原始人学会用火、古代人发明铜器和铁器以及 18 世纪人们发明蒸汽机那样，使整个人类的生活发生深刻变化，大大加速了社会的进步。

正电子的发现

1928年，年轻的理论物理学家狄拉克(P.A.M.Dirac, 1902~1984)，把相对论和量子力学原理结合起来描述电子的运动，得到了一个著名的狄拉克方程。这个方程也适用于描述电荷为正，其他方面与电子完全一样的粒子——正电子。那时，人们知道的唯一的带正电的粒子是质子，但是，质子的质量太大，不可能是狄拉克方程的解。究竟是否存在狄拉克方程中预言的正电子呢？

起初，人们认为狄拉克方程的第二个解纯粹是一种数学游戏，但是，想要消除这个解的一切企图都没有结果。这样，或者是狄拉克的理论不正确，或者是自然界中确实存在带正电的电子。

正当许多人怀疑、争论时，传来了宇宙射线中发现正电子的消息。

1932年，安德森(C.D.Anderson, 1905~)和他的助手，用一特制的威尔孙云室来研究宇宙射线。这个云室被放在强大的电磁铁两极之间，构成一个巨大的磁云室。利用这种装置，拍摄了1000多张照片，他们发现，在同一磁场中有的粒子向某一方向偏转，有的向其相反方向偏转。这说明记录的粒子当中，有的带着正电荷，有的带着负电荷。仔细辨认粒子的径迹，发现这两种径迹非常相似，如果说其中之一是电子产生的，另一个不可能是比电子重2000倍的质子产生的。为了弄清磁云室中粒子径迹向相反方向偏转的原因，安德森又做了多次实验，并对粒子径迹的长度、宽度进行仔细测量和计算，他惊诧地发现，那个带正电的粒子的质量与电子质量相差无几，就是说，他发现了一种带正电的电子。他反复校核，证明这种判断是没有错误的。一个神话般的粒子——正电子，就这样在宇宙射线中被捕获了。这时他还不知道狄拉克关于正电子的预言。他的论文发表后，许多物理学家也发现在过去的照片中有正电子踪迹，只是过去没有注意或作出了错误解释而已。正电子的发现，证实了狄拉克的理论，为物质世界大厦又增添了一块基石。为此，在诺贝尔奖金荣获者名单上又增添了两个名字——狄拉克和安德森。

μ 子和 π 介子的发现

在原子核是由质子和中子组成的假设提出后，有人提出这样的疑问：既然原子核是由质子和中子组成的，而质子间的电力是斥力，中子不带电，中子间以及中子-质子间没有显著的电力，为什么质子不因排斥而分散，反而能够拥挤在非常小的原子核内相安无事呢？为了回答这个疑问，科学家们只得假设，在原子核内，除了质子之间的静电斥力外，在各个核子之间一定还存在着一种巨大的引力，这种引力制服了质子间的斥力，从而使各个核子老老实实地呆在核内。在核内，存在于各个核子之间的巨大引力，就被叫做核力。1935 年，日本物理学家汤川秀树发表了核力的介子场理论，预言作为核力的媒介存在有新粒子（称为介子，其质量介于电子与核子之间，大约为电子质量的 200 倍），起着在核子与核子之间传递核力的作用。这种介子究竟是否存在？如果存在，又该如何去寻找它？这是摆在实验物理学家面前的重要课题。要产生介子，至少得有几百 MeV 的能量。当时，只有宇宙线可以提供足够高能量的粒子。果然，1937 年，C.D.安德森和尼德迈耶（S.H.Neddermeyer, 1907 ~ ）等人在宇宙线的研究中发现了质量约为电子质量 207 倍的“μ 介子”。意大利物理学家康弗西（M.Conversi, 1917 ~ ）等人很快在罗马一个地下室中发现：这种 μ 介子与核力无关，并不是汤川秀树预言的那种介子。1942 年，坂田昌一（1911 ~ 1972）等人提出两种介子产生的不同机理；μ 介子自旋为 $h/2$ ，不参与强相互作用，π 介子自旋为 h ，参与强相互作用。

此后，科学家们更加紧了寻找 π 介子的工作。1947 年，鲍威尔（C.F.Powell, 1903 ~ 1969）利用当时新出现的捕捉带电粒子的工具——原子核乳胶片，终于在宇宙射线中找到了这种 π 介子。而安德森发现的那种 μ 介子实际上是 π 介子的次级粒子。后来称为 μ 子。1949 年美国科学家首次用加速器人工产生 π 介子，60 年代建立了可以人工生产 μ 子和 π 介子的强流质子加速器，叫做“介子工厂”，成为原子核研究的利器。

中微子的发现

本世纪 30 年代以前，实验观察已经证明，衰变中发射的 β 粒子具有分立的能量，它等于母核与子核的能量差，这是符合能量守恒定律的；而在 β 衰变中，发射的 β 粒子能量却不是分立的，而是连续分布的：能量的最大值等于衰变前后母核与子核间的能量差，所有其他粒子的能量都小于这个数值，能量的最小值为零，这就产生了一个问题：衰变过程中释放的能量除电子带走的那部分外，另外一部分能量到哪里去了呢？这是 20 世纪前 30 年长期困扰着理论与实验物理学家们的难题。这里的根本困难是守恒定律在微观世界中是否成立？为了解决这个问题，有人假定 β 粒子与放射源本身和周围介质的轨道电子相互作用而损失了部分能量，有的损失的能量较多，有的损失的能量较少，因而出现了能量的连续分布。英国的埃里斯用放射源镭 E ($^{210}_{83}\text{Bi}$) 在厚铅壁量热器中测出了能量损耗，结果表明平均每次 β 衰变放出的电子能量与 β 能谱的平均值相符，而与最大能量相去甚远，仍然不能判定这些丢失的能量哪里去了。从角动量守恒定律也同样解释不了放射的电子出现的 $\frac{1}{2}$ 自旋量子数问题，因为实验表明，母核与子核的自旋之差总是整数。面临这种困境，有人认为在原子核内部，能量守恒定律，角动量守恒定律，甚至量子力学可能都不成立了，连玻尔也怀疑能量守恒定律可能只有统计平均意义。

为了摆脱这种困境，1930 年 12 月，泡利在写给一个学术会议的公开信中首次提出这样的可能性： β 粒子发射时伴随着某种轻中性“神秘粒子”的发射，它对物质有很大穿透性因而不容易探测，它以当时尚不能测量的方式“窃”走了这部分能量。1933 年~1934 年间，费米提出 β 衰变理论，并把泡利预言的粒子称为小的中性粒子 (neutrino) 即中微子，以便与大的中性粒子 (neutrone) 即中子相对照。中微子是费米子，自旋 $\frac{1}{2}$ ，衰变中角动量也就守恒了。

在宇宙中已知的粒子中，中微子与物质的作用最弱，即使贯穿地球，也只有 10^{-10} 的中微子与物质中的中子或质子发生反应。这样，从理论上预言它的存在到实验上的确认，经历了 1/4 世纪。

1941 年，我国物理学家王淦昌在其论文“探测中微子的建议”（1942 年在《物理评论》上发表）中，提出通过轻原子核（如 ^7_4Be ）的 K 电子俘获释放中微子时产生的原子核的反冲能量和动量来探测中微子。王淦昌建议的关键就在于把通常 β 衰变末态中的三体变为 K 俘获中的二体，使中微子的探测有了实际的可能。

从 1942 年到 50 年代初期，实验物理学家根据这个建议，进行了一系列实验。1952 年，罗德拜克 (Rodebeck) 和阿伦 (Allen) 作了 ^{17}Ar 的 K 电子俘获实验，第一次观察到单能反冲核 ^{37}Cl ，反冲能量的实验值与理论值完全符合。在他们的实验结果公布一个多月之后，戴维斯 (Davis) 作了 ^7Be 的 K 电子俘获实验，测得 ^7Li 的反冲能量与理论预言值完全一致。这样，终于在 1952 年确认中微子存在。

1956 年，美国物理学家科万 (C.L.Co-wan) 和莱因斯 (F.Reines, 1918 ~) 合作首次探测到质子对核反应堆中产生的反中微子的俘获： $p + \bar{\nu}_e \rightarrow n + e^+$ ，即用探测器探测到 e^+ 粒子和中子，也就证明了中微子的存在。

1962 年，美国布鲁克海文研究所从实验上确认存在两种中微子，即电子中微子 ν_e (ν_e) 和 μ 子中微子 ν_μ (ν_μ)，后者在与质子、中子反应时产生 μ 子，而不是电子。

反质子的发现

1928年，狄拉克提出相对论性电子理论，预言正电子的存在。1932年，安德森在宇宙射线中发现了正电子。这样，狄拉克理论导致反粒子的发现。只要把狄拉克理论应用到质子上，就可以预言反质子的存在。但是斯特恩发现，原子的磁矩不同于根据狄拉克理论推算出的结果。这就表明不应简单地作出这样的推论，用实验方法明确回答反质子是否存在，是十分必要的。

产生反质子的可能方式是

$$p+p \rightarrow p+p^{-}+p+p.$$

这就是说高能质子碰撞时要创生一对质子反质子，计算表明，这至少需要6GeV的能量（在质心系中约为2GeV）。

1953年，美国加州的伯克利建成了质子同步加速器。这在当时是庞然大物，其磁铁就几乎重约一万吨。能量达6.2 GeV。1955年，美籍意大利物理学家赛格雷(E.G.Segrè, 1905~)和他的同事张伯伦(O.Chamberlain, 1920~)等用这座加速器使加速达6.2 GeV的质子轰击铜靶，终于捕捉到了反质子。由于此项发现，他们荣获1959年度诺贝尔物理学奖。

1956年，赛格雷又发现了反中子。

反质子和反中子的发现，证明了反物质的存在是可能的。反物质的第一个实例于1965年出现在美国布鲁克海文国家实验室(高能同步稳相回旋加速器)。在那里用7GeV的质子轰击铍靶时产生了一种由反质子和反中子结合成的所谓“反氦”，后来又产生了“反氦3”。根据狄拉克理论，物质和反物质相遇会同时湮没。不过，在我们生存的宇宙空间内只存在极少的反粒子，例如，地球上只有极少数来自外层空间的反质子和正电子，因此地球上的物质是会被湮没掉的。

主要参考资料

1. [美] 赛格雷。从X射线到夸克：近代物理学家和他们的发现。夏孝勇等。第1版。上海：上海科学技术文献出版社，1984。
2. 谢谔成。粒子家族的功勋成员。第1版。北京：人民教育出版社，1984。
3. 陆琰，罗辽复。从电子到夸克：粒子物理。第1版。北京：科学出版社，1986。
4. 郭奕玲，沈慧君。近代物理实验史及其启示。第1版。北京：人民教育出版社，1986。

5. 中国科学院自然科学史研究所近现代科学史研究室。二十世纪科学技术简史。第1版。北京：科学出版社，1985。

6. 〔日〕広重彻。物理学史。第1版。李醒民。北京：求实出版社，1988。

7. 申先甲。物理学史简编。济南：山东教育出版社，1985。

8 . 现代中国物理学发展史

17 世纪以来物理学在中国的传播

16 世纪末叶，以意大利神父利玛窦 (Matteo Ricci, 1552 ~ 1610) 为代表的欧洲传教士陆续来华传教，他们带来了不少书籍和器物，其中包括一些科学书籍和天文仪器、自鸣钟、三棱镜等等。这样，在传教的同时也伴随着西方科学知识的传入，使近代科学在中国逐渐传播开来。

西方科学知识的传入，引起了中国学者的重视，中西学者陆续译著了许多书籍。在物理学方面，瑞士传教士邓玉函 (Joan Terrenz, 1576 ~ 1630) 口述、王徵 (1571 ~ 1644) 笔录写成《远西奇器图说》，于 1627 年刊行。该书主要描述一些器械，其中也包括地心引力、重心、比重、浮力等许多力学基本知识，其中不少内容引自伽利略的著述。自此近代力学知识开始传入中国，西方物理学知识在方以智 (1611 ~ 1671) 的《物理小识》中有所反映。

到 19 世纪上半叶，有更多的学者开始研究西方科学技术，物理学译著增多起来。清代物理学家郑复光在 1846 年出版了《镜镜詒痴》，融会了中西光学知识，详细讨论了几何光学基本原理和许多光学仪器的理论和制作方法，在我国近代物理学发展中是一部重要著作。李善兰 (1811 ~ 1882) 与英国人伟烈亚力 (Alexander Wylie, 1815 ~ 1887) 1859 年合译英国天文学家 F. 赫歇耳的天文学纲要，书名《谈天》，第一次把万有引力定律介绍到中国来。李善兰还与艾约瑟 (Joseph Edkin) 合译英国物理学家惠威尔 (W. Whewell) 的《初等力学教程》，定名为《重学》，1866 年出版。这是译成中文的第一部力学专著，在中国很有影响。

在 19 世纪 60 年代以后的洋务运动中，主张“中学为体，西学为用”的洋务派为了培养洋务人员，相继举办了一些机构以吸取西方科学知识，如 1862 年清政府在京师开办同文馆，既是教学机构，也编译西书，影响很大，各地纷起仿效，开办同文馆、方言馆、自强学堂等。洋务派为开办军事工业，还开设各种制造局。翻译的西方科技图书，由美华书馆、文明书局、商务印书馆等出版。据统计，自 1853 ~ 1911 年间，共出版了西方科学著作 468 种。其中理化类 98 种。1876 ~ 1892 年，由傅兰雅主持、格致书院发行了中国第一个专门介绍西方科学技术，特别是物理学知识的杂志《格致汇编》。中国出版的第一部物理学教科书是日本饭盛挺造编纂、藤田丰八翻译、王季烈重编的《物理学》，分上、中、下三篇，1900 ~ 1903 年由江南制造局先后印行。书中第一次提出“物理学者，专究物体外部之变化即形体变化”，使“物理学”这一名词在中国流行开来。中国第一个制造

科学仪器的科学仪器馆于 1901 年成立于上海。

19 世纪下半叶，传入中国的西方近代物理学知识日益增多，有些知识的传入还很及时，如德国物理学家伦琴于 1895 年发现了 X 射线，仅相隔四年江南出版局就出版了由傅兰雅口译、王季烈笔录的《通物电光》四卷（当时 X 射线译为“通物电光”）。这期间传入的物理学知识基本上是基础教科书和一些实用性知识，较新的理论介绍得还很少。从此中国有了第一批了解近代物理学基础知识的学者，使真正意义的物理学在中国很快得到发展。

20 世纪上半叶物理学在中国的兴起

1862~1900 年的 38 年间，中国虽有几百人官费自费出国留学，学习语言、驾船、电工、采掘、机织等，却几乎无人学习物理学。物理学在我国土地上还有待开垦。

1898 年戊戌变法以后，取消科举废除八股，开办京师大学堂，改各省书院祠堂为学堂。这时，包括物理学在内的自然科学开始成为学堂开设的课程。于是，本世纪头几年，我国开始有了何育杰等屈指可数的几人出国学习物理学，他们成为我国近代物理学的拓荒者。辛亥革命和五四运动以后，出国求学人数大增，其中专学物理的已不少。他们回国后一面坚持从事物理学的工作，一面开创物理教育事业（参见“近代我国物理教育的发展简况”）。如 1918 年北京大学首先设立物理学系。到 30 年代中期，设立物理学系或数理系的高等学校已超过 30 所。清华大学的物理系还建立了 5 个实验室。稍后，物理学术研究机构也相应而生。1928 年，中央研究院成立物理研究所，1929 年成立了北平研究院物理研究所，这是我国物理学最高研究机构。北平研究院此后还成立了镭学研究所。1925 年成立的大华科学仪器公司，是我国第一个专门制备教学实验物理仪器的机构。在物理教学、研究和仪器各方面初具规模的条件下，1932 年成立了中国物理学会。1931 年创办了《物理学报》，刊载国内研究成果。1930 年吴有训将他的论文《经单原子气体全散射的 X 射线强度》寄到英国《自然》杂志发表，开创了国内研究的先河。1930 到 1935 年间，在国内研究又在国内发表成果的有：吴有训关于康普顿线之间的强度分配、X 射线被气体散射的总散射强度等研究，周培源关于金属自由电子反磁性的研究；严济慈、钱临照、钟盛标关于照相过程的压力效应、光谱学等方面的研究；陆学善关于醛类化合物的拉曼效应、多原子气体等物质的 X 射线强度的研究等等。在国内作研究而在国外杂志上发表的还有：赵忠尧、龚祖同关于硬射线的研究；严济慈、钱临照关于照相压力效应以及水晶压电的研究；吴大猷关于光谱学、原子分子结构、大气物理等方面的研究等等。在中国物理学会成立后，一些物理学家在学术领域崭露头角，得到了世界的公认。在 1935 年一年中，先后有吴有训被德国哈莱(Halle)大学自然科学研究院洪堡学会推举为会员；严济慈被法国物理学会选为理事；萨本栋被聘请为美国俄亥俄州立大学客座教授，他的专著《双矢量电路分析》一书也在美国出版。1918~1936 年间物理学在中国处于一个蓬勃发展时期。

抗日战争爆发后，物理学工作者纷纷向大西南、大西北内迁。所有科学机构几乎与世隔绝，物理学工作者颠沛流离，艰苦异常。草创初期后的中国物理学遭到空前浩劫。昆明西南联合大学成了当时最大的教育中心。

两个研究院的物理研究所均迁到昆明，后来中央研究院物理研究所又迁到桂林和四川北碚。几经辗转，图书和仪器损失殆尽。在如此艰苦的环境里，中国物理工作者竭力坚持开展教学和研究工作。一部分物理学家从事和抗战有关的各种实际生产和应用研究，如北平研究院物理研究所转向战时需用品透镜的制造，叶企孙、汪德熙、葛庭燧、阎裕昌等协助冀中抗日根据地研制兵工器材。在理论研究方面，赵忠尧、张文裕研究了宇宙射线的分布及其性质；吴大猷等人研究了光谱学及原子物理；马大猷从事无线电物理的研究等等。

解放前，我国物理学家大部分成果是在国外取得的，其中尤其值得称道的是：吴有训于 1924 年~1926 年间在芝加哥大学以实验证实康普顿效应；周培源于 1927 年~1928 年在加利福尼亚理工学院从事广义相对论的研究；赵忠尧在 1929 年~1930 年间在加利福尼亚理工学院从事导致正负电子对产生与湮没的研究；王守竞于 1927 年~1928 年在哥伦比亚大学关于量子力学的研究；汪德昭在法国从事声学技术、气体、离子及放射性的研究；张文裕 40 年代在美国关于 μ 子原子的研究；朱洪元 40 年代在英国关于同步辐射理论的基础性研究；胡宁于 40 年代在美国等地从事基本粒子的研究；黄昆于 40 年代末在英国从事固体物理的研究；彭桓武于 40 年代中期在英国从事场论和人工产生介子理论的研究；钱三强、何泽慧于 40 年代在法国发现铀核三分裂、四分裂现象；钱伟长于 40 年代在加拿大和美国期间，用张量分析方法奠定了薄板平衡理论的数学基础，在国际上被称为“钱伟长方程”；钱学森 40 年代在美国关于非线性弹性力学和高速气动力学的研究；葛庭燧于 40 年代在美国从事金属物理学的研究等等。在国内，一些学者在抗日战争极其艰苦的条件下，取得了引人注目的研究成果。如王淦昌 1941 年关于应用 K 俘获释放中微子产生的反冲探测中微子的研究，就是一例。

据不完全统计，在解放前近半个世纪内，我国的物理学论文，包括在国内和国外发表的，大约有 700 余篇。这表明中国物理学在 20 世纪上半叶开始在自己的发展道路上取得了相当的成就。

近代我国物理教育的发展简况

20世纪初,清政府开始兴办学堂,系统的科学知识正式列为课程。1903年(光绪二十九年),规定在小学设理化课;高等学堂分政艺两科,艺科所设课程中有力学、物性、声学、热学、光学、电学和磁学等物理学内容。辛亥革命后,官办民办各级各类学校,都广泛开设了物理学课程。北京、南京、武昌、广州等地的高等师范学校还建立了一批物理实验室,用以培训师资。

20世纪初期,出国学生中专修物理学的,在清末有何育杰、李耀邦、夏元璠、张贻惠、胡刚复、梅贻琦、赵元任等;民国初年有叶企孙、颜任光、丁燮林、李书华、饶毓泰等;以后有吴有训、严济慈、周培源等。他们大都对当时物理学前沿的基础研究有所贡献。回国以后,限于解放前的民穷国贫,难以顺利开展研究工作,大部分都从事教学和研究工作,培养了一批人才,初步形成了我国物理学队伍。

北京大学、南京高等师范学校于1918年,清华大学于1925年,交通大学于1928年相继设立物理学系。颜任光、丁燮林、李书华、胡刚复、饶毓泰、叶企孙、吴有训等回国后,分别在这几所学校为组织好物理系的教学工作作出贡献。如充实了教学内容,增设了近代物理,建立了实验室等,使这些学校的物理教学久负盛名。

30年代中期,用中文编写的物理学教材陆续出现,如萨本栋的《普通物理学》和《普通物理实验》,严济慈和李晓舫合编的《理论力学》等。这些教材对物理学在中国的传播起了有益的作用。此外,一些大学如清华还设有研究院物理部,开始注意培养高级研究人员。

抗日战争期间,北大、清华、南开迁往昆明成立西南联合大学,中央大学和交通大学迁到重庆,浙江大学迁到贵州,在此期间教师仍然努力坚持教学和研究并保持了一定水平。培育出的学生中,后来成为优秀的物理学家的有李政道、杨振宁、黄昆、朱光亚、林家翘等。

中华人民共和国成立后,高等学校迅猛增加,其中各综合大学和师范院校均普遍设立物理系,教学质量不断提高。为了适应社会主义建设事业的需要,还广泛设立了与物理学相关的如应用物理、技术物理、工程物理、地球物理、无线电电子学等系。80年代以来,高等院校普遍设立了研究生院,用来培养攻读硕士和博士学位的研究生。“博士后”工作站也在建立中。我国自己独立培养物理学领域高科技人才的体系已经形成。我国高等学校基础物理的教育质量,已经达到了较高的水平。

近代我国物理学研究工作的发展简况

我国物理研究机构的建立是从 1928 年 11 月中央研究院在上海建立物理研究所开始的。第一任所长是丁燮林。研究人员有杨肇燦、胡刚复、陈茂康、康桂清和施汝为等。1933 年前后，该所设立了电磁研究室、物性研究室、光学研究室、恒温实验室、X 光及高压实验室、色谱分析研究室、大地物理研究室、无线电研究室、大气物理研究室、物理学检验室、放射实验室和通用实验室等等，并在南京紫金山建立了地磁台。此外还设立了一所设备较好的物理仪器工场，能够制造一些实验用的仪器设备以及中学用的物理教学仪器。当时主要开展磁学及地磁测量、光谱学和无线电等方面的专门实验研究工作。1929 年 9 月在北平建立了北平研究院，李书华创办了该院的物理研究所，由严济慈任所长。研究人员有严济慈、饶毓泰、朱广才、李书华、钟盛标、钱临照、鲁若愚和关学蔭等。下设显微光度计实验室、大号水晶分光摄谱仪实验室、分光镜实验室、地文实验室、高真空工作室、镭学实验室等。主要开展感光材料、光谱、水晶压电现象、水晶浸蚀图象、重力加速度与经纬度测量等研究工作。北平研究院与中法大学合作，建立了镭学研究所，由严济慈兼任所长，主要进行放射性和 X 射线学的研究。

抗日战争期间，中央研究院物理研究所先从上海迁到香港，后又迁到桂林，再迁四川。北平研究院物理研究所先迁上海，后大部分迁昆明，小部分留上海。在困境中，物理学家们在尽力进行理论研究的同时也注意到应用，如制造光学仪器、显微镜、在云南还进行物理探矿等。抗日战争胜利后，中央研究院物理所迁回上海，1948 年又迁往南京。镭学研究所在 1948 年改组，分为结晶学实验室（在上海）和原子能研究所（在北平）。前者由陆学善主持，主要用 X 射线研究物质结构和晶体结构。后者由钱三强担任所长，主要开展核物理和原子物理的研究。

中华人民共和国成立后，1949 年 11 月在中央研究院和北平研究院的基础上，成立了中国科学院。它的应用物理研究所设在上海，由严济慈担任所长，后改为物理研究所；近代物理研究所设在北京，由吴有训担任所长，后改为原子能研究所。随着科学事业的发展和国家建设的需要，到现在，中国科学院所属物理方面的研究所已增加到 12 个；在北京有物理研究所、高能物理研究所、理论物理研究所、声学研究所、低温技术实验中心，在上海有上海原子核研究所，在合肥有等离子体物理研究所、固体物理研究所，在长春有长春物理研究所，在武汉有武汉物理研究所，在兰州有近代物理研究所，在乌鲁木齐有新疆物理研究所。此外，还有侧重技术方面的电子学研究所、半导体物理研究所、应用物理研究所等。至于光学又另

成一个系统，在长春、上海、西安、四川等地建立了光学精密机械研究所。它们都担负着多种研究任务。在国家建立研究机构的同时，高等学校也设立研究机构，一面培养人才，一面开展科学研究工作。清华大学于 1929 年首先成立研究院，试办物理研究所。到 1935 年，该物理研究所扩建为理科研究所，所下面设研究部，物理学部由物理系负责，在短期内建立了 X 射线、无线电、光学、磁学等研究室。以后设立物理学研究部的学校还有燕京大学、北京大学、中山大学、武汉大学等。抗日战争期间，在西南联合大学恢复研究部时，1939 年清华大学也恢复物理学研究部，还新开办了五个特种研究所，包括无线电研究所和金属研究所，无线电研究所所长是任之恭，金属研究所所长是吴有训。中华人民共和国成立以来，高校的科学研究工作得到极大发展，陆续新建了许多研究所和研究室，其中有北京大学的固体物理研究所、理论物理研究所，南开大学的光学研究所，复旦大学的现代物理研究所、电光源研究所，吉林大学的原子物理与分子物理研究所，四川大学的原子核科学技术研究所等等。80 年代以来，高校普遍设立研究生院，培养包括物理学在内的攻读硕士和博士学位的研究生。在产业部门、国防系统以及各省、市、自治区的数以百计的科学技术研究机构中，也不乏涉及物理学方面的研究工作。

经过半个世纪的不懈努力，中国物理学家已跻身于现代物理学前沿并取得不少成就。在中国原子弹、氢弹、人造卫星和洲际导弹的研制中，物理学家起着举足轻重的作用。在理论方面，开辟了许多新的研究领域，如高能物理、半导体物理、激光物理、低温物理、高压物理、水声学、空间物理、等离子体物理、生物物理、非晶态物理、表面物理等。自己设计和制造出现代的实验设备，如反应堆、加速器、托克马克及正负电子对撞机等等。中国物理学在世界上已占有了不容忽视的地位。

中国物理学会的创立和发展

20 世纪初期，中国科学事业正处于草创阶段，当时在美国康奈尔大学留学的任鸿隽、杨铨、胡达（胡明复）、赵元任、秉志等人于 1914 年发起、于 1915 年成立了中国科学社，以“联络同志，研究学术、以共图中国科学之发达”为宗旨。经十几年的努力，中国科学社发展成为全国性的科学机构，开展学术活动，出版定期刊物《科学和科学画报》，还组建了明复图书馆和中国科学图书仪器公司，对中国科学事业的发展起了很大的促进作用。它的活动相当大部分是物理学方面的，如曾邀请 P·朗之万和 N·玻尔等著名物理学家来中国访问，在《科学》月刊中对相对论、量子论、量子力学新成果作过介绍。到 30 年代初，在国外研究物理的人回国渐多，在研究所、高等学校以及其他机构中物理工作者人数不断增加，中国科学社这样的综合性组织，已不能满足物理学专业的特殊要求。1931 年冬，法国物理学家朗之万负国际联盟的使命来中国调查科学文化事业。在朗之万的热情建议和促进下，中国物理学会于 1932 年 8 月 23 日在北平成立。

中国物理学会成立大会（第一届年会）在北平清华园召开。李书华、叶企孙分别当选为第一任正、副会长。国外著名物理学家朗之万、赖曼、密立根、康普顿、狄拉克等 10 人为该会的名誉会员。学会成立之初，即 1933 年 3 月有会员 88 人，1936 年发展到 200 余人，1948 年已有 541 人。学会下设有四个专业委员会：学报委员会；物理名词审查委员会；物理教学委员会；后添设的应用物理学汇刊委员会。中国物理学会于 1933 年创办了中国物理学报，由学报委员会主持编辑及出版，著作限于物理学上的创作，理论物理与实验物理兼收并蓄，用英、法、德三国文字发表。截至 1948 年，已出七卷三期。名词审查委员会的工作是：把物理学名词由西文译成中文，并加以标准化。物理教学委员会主要负责各级物理学教材、物理实验教材的编订和设备工作。物理学会当时每年举行一次年会。学会从成立到抗战前夕，开了五次年会。第一次于 1932 年在北平召开，有论文 10 篇；第二次于 1933 年在上海召开，有论文 33 篇；第三次于 1934 年在南京召开，有论文 41 篇；第四次于 1935 年在青岛召开，有论文 42 篇；第五次于 1936 年在北平召开，有论文近 50 篇。抗战期间，在极端艰苦条件下，物理学会的学术年会也坚持进行，到 1948 年为止，共召开了 15 次年会。会章规定：凡一城市有本会会员 25 人以上方得成立分会。1948 年以前，在北平、上海、西安三处已成立分会。中华人民共和国成立后，中国物理学会于 1951 年，1963 年，1982 年，1987 年，1991 年已分别召开过五次全国会员代表大会，代表的会员人数，1963 年为 5300 人，1982 年为 20000 人，1991 年为 27000 余人。下设有高能物理、核物理、液晶、电子显微镜、质谱、发

光、粒子加速器、引力等分科学会和静电、波谱、内耗与超声衰减、原子分子物理、电介质、光散射、相图、现代物理光学、X 射线衍射、表面与介质物理、非晶态物理、凝聚态理论、高压物理、磁学、固体缺陷、低温物理、量子光学等专业委员会。

目前，由学会主办的刊物有七个：《物理学报》，英文版《中国物理快报》，《物理》，《物理学进展》，《化学物理》，《物理教学》，《大学物理》。各分会、专业委员会还出版了多种刊物。这些都反映了我国物理学的繁荣。至于各种会议、国际会议与国际交往更是日益频繁。1984 年，中国物理学会重新加入了国际纯粹与应用物理联合会。建国 40 多年来，我国物理学工作者在教学、科研、生产和国防建设上，在中国物理学会的组织指导下，做出了很大成绩。

20 世纪中国物理学家的成就概述

20 世纪以来物理学和相关学科在中国迅速传播和发展，这是先后几代中国物理学家艰苦创业和不懈努力的结果。他们中大多数人既是优秀的教育家，又是勇于探索的科学工作者。有的研究工作在当时处于物理学的领先地位，为当代物理学的发展作出了贡献。下面就一些主要代表人物分别简述如后。

李耀邦（1884 ~ 1920 ?）

我国第一个获得物理博士学位的物理学家。1903 年留学于美国芝加哥大学，在该大学赖尔森实验室随密立根从事电子电荷的测定工作，1914 年在《物理评论》上发表了《以密立根方法利用固体球粒测定 e 值》的论文。1915 年获物理学博士。他所测得的电子电荷的值与现在公认的电子电荷的值十分接近，他对密立根的实验装置作过某些改进。

颜任光（1888 ~ 1968）

1918 年获美国芝加哥大学物理学博士。在该校赖尔森物理实验室从事气体离子的研究。1917 年月 1 日在美国物理学会芝加哥会议上发表研究报告，题目是《离子在空气、氢气和氮气中的迁移率》。他的研究除了证明气体离子的迁移率和压力的乘积是常数这一定律外，还发现了伴随离子迁移出现的自由电子数随电场强度的增高而增加的规律。他以油滴法测定了气体粘滞系数的绝对值，对当时通用理化常数的研究帮助极大。

饶毓泰（1891 ~ 1968）

早年在美国普林斯顿大学留学，年获物理学博士。1923 年发表论文《水银蒸汽的低压弧光和它对荧光的影响》，该文回答了当时人们亟待解决的问题。他的主要研究是原子和分子光谱。1929 ~ 1932 年在德国作关于斯塔克效应的研究，他发现在碱金属的基本线系中斯塔克效应可以方便而精确地在吸收作用中观测到；在弱场中，这谱线只有借助干涉方法才能观察到，而且谱线显示了超精细结构的效应。这些研究成果收集于《论铷和铯的基本线系的二次斯塔克效应》一文中。

胡刚复（1892 ~ 1966）

1909 年留学于美国哈佛大学，1913 年获理学士，1914 年获硕士，1918 年获物理学博士。他在哈佛大学杰斐逊物理实验室从事 X 射线的研究。1918 年 4 月 17 日在美国物理学会纽约会议宣读了题为《在 X 射线频谱中金属光电子的最大发射速度测定的一些初步结果》的论文，这一研究课题对 X 射线的发射机制以及对推测原子结构都有重要意义。他还在 11 所我国高校中筹建物理系并任教，是 1914 年创立的“中国科学社”的发起人之一。

吴有训（1897 ~ 1977），

于 1921 年在美国芝加哥大学留学，后任该大学物理研究室助手和讲师。与康普顿合作对康普顿效应进行系统研究。1924 年与康普顿一起发表论文《钨的 K_{α} 射线被轻元素散射的波长》，1925 年与康普顿、比尔登共同研究了《密封在盒子中的散射 X 射线光谱效应的实验》，同时他独立地研究了《X 射线被反冲电子散射的强度》，1930 年在英国《自然》杂志发表论文《经单原子气体全散射的 X 射线的强度》。这是中国物理学家在国内的研究成果载于国外科学学报的第一篇文章。他的关于 X 射线在多原子气体中散射的研究，在理论上发展了康普顿的 X 射线散射效应。1934 年任清华大学物理系主任，继续从事 X 射线对多原子气体的散射的研究，1950 年任中国科学院副院长。

叶企孙 (1898 ~ 1977)

于 1918 年在清华预备学堂毕业并被派送美国留学，1920 年获芝加哥大学理学学士，1923 年获哈佛大学物理学博士。在 1921 年 3、4 月间，他与人合作测出当时最精确的普朗克常数的数值，在物理界沿用了 16 年之久。1924 ~ 1925 年间，他又作了磁学的深入研究，测量了高压下磁导率的变化。他对于建设清华大学物理系及物理学史研究的提倡起了重要作用。

严济慈 (1901 ~ 1996)

1923 年赴法留学，1925 年获巴黎大学数理硕士学位，1927 年获法国科学博士学位。他在压电晶体和光谱学方面进行了卓有成效的工作。如对水晶在电场作用下的伸缩和光学性能的改变，水晶柱的被扭起电和振荡，氢、氖的连续光谱，氧和臭氧的紫外吸收光谱，铷分子光谱及其离解能等方面都有重要的研究成果。1927 ~ 1937 年间，他曾先后在法、美、英、德等国学术刊物上发表论文 50 余篇。1934 年，他与 F·约里奥-居里一同当选为法国物理学会理事。1945 年曾应邀赴美讲学，曾任中国科学院副院长，中国科技大学校长等。

萨本栋 (1902 ~ 1949)

于 1921 年在清华学校（即后来的清华大学）毕业后赴美国，先后在斯坦福大学和伍斯特工学院攻读电机工程和物理学，1927 年获理学博士学位。他的重要贡献是提出双矢量方法解决电路的计算和分析问题，开拓了电机工程的一个新研究领域，在国际上很受重视。他的《瞬变和推挽电路》一文发表后也很有影响。1935 年受聘为俄亥俄州立大学客座教授，用英文写成的专著《并矢电路分析》于 1939 年在美国出版。著有《普通物理学》《普通物理实验》，是解放前我国自编的第一本同类教材。

赵忠尧 (1902 ~)

1927 年赴美留学，在加利福尼亚理工学院从导师密立根攻读学位。1930 年获哲学博士学位。1929 ~ 1930 年间他探讨了硬 X 射线在物质中的吸

收及其散射问题，发现在重元素中散射时显示出一种“反常吸收”，继而发现除康普顿散射以外，从铅还放出一种“特殊辐射”。事实上他发现了后来称为正负电子的湮没辐射。他的研究使他成为发现正电子的先驱，直到1981年正电子的发现者安德森还在《物理学今日》杂志撰文肯定他的贡献。1950年回国后，任原子能研究所副所长，为开创我国核科技事业作出贡献。

周培源（1902~1993）

1926年毕业于美国芝加哥大学，获学士、硕士学位。~1928年在美国加利福尼亚理工学院从事广义相对论研究，获博士学位。1928年赴德国，到莱比锡大学在海森伯领导下从事科学研究，1929年在瑞士苏黎世高等工业学校在泡利领导下从事科学研究。1936~1937年在美国普林斯顿高级研究院参加爱因斯坦主持的讨论班。主要对广义相对论和流体力学、特别是湍流理论进行研究。早期对广义相对论的研究，主要是求爱因斯坦引力场方程的严格解，以及宇宙论；80年代又致力于广义相对论的基本问题的研究。1940~1948年间他发表了有关湍流场和边界条件关系的一系列论文，后来发展成为湍流的模式理论。1955年以后又发表了系列论文，提出了别开生面的先求解后平均的湍流理论，受到国际上的瞩目。他于1946年和1978年两次当选为国际理论与应用力学联合会理事。1980年和1985年两次荣获美国加利福尼亚理工学院“具有卓越贡献的校友”奖。1989年又获美国普林斯顿大学名誉法学博士学位。历任北京大学校长，中国科学院副院长，中国科协主席等。

王守竞（1904~1984）

于1924年在美国哈佛大学，后转哥伦比亚大学留学，1926年获哈佛大学理科硕士学位，年获哥伦比亚大学哲学博士学位。在年11月25~26日召开的美国物理学会147次年会上，他宣读了题为“论普通氢分子的问题”的论文，把新诞生的量子力学成功地应用于分子现象。这在当时是一个重要的贡献。他还经过相当复杂的计算，得到了多原子分子非对称转动的谱能级公式，并适用于大量常见的多原子分子，他的研究结果被后人直接采用。

汪德昭（1905~）

1933年赴比利时布鲁塞尔大学学习，1934年在巴黎大学朗之万实验室从事研究工作。1940年获巴黎大学博士学位。1938~1956年在法国国家科研中心任副研究员、研究员、研究主任。1945年以大气中离子平衡的研究成果获法国科学院“虞格”奖金。1948年由于成功地设计了超灵敏度静电计和超微量天平而被聘为法国原子能委员会顾问。1956年回国后主要从事大小离子平衡的研究。主要研究成果有：提出了测量悬浮质点大小的新方法、测量质点数量的新方法、测量大离子迁移率的新方法、大小离子平衡

时的新理论（被称为“朗之万-汪德昭-布里加理论”）等。此外，在放射线的性质、负光致现象、超声波在液体中的吸收与色散、水声学、同位素在科学及工业上的新应用等方面，也都有独创性成果。

钱临照（1906~）

1929年毕业于上海大同大学。1934~1937年就学于伦敦大学大学研究生院。早在伦敦时期，他即致力于晶体范性的研究。他首先发现体心立方结构的钠、钾单晶体中的X射线星芒现象是滑移面的转动，并从实验得出低熔点钠、钾及高熔点钼的滑移规律。同时，他还从事一项玻璃表面的研究工作，证明玻璃表面微裂缝的存在。他是物理学史领域的开拓者，特别是对《墨经》的研究有重要贡献，曾任中国科技大学副校长。

任之恭（1906~）

1926年赴美留学，1928年获麻省理工学院电机学士学位，1929年获宾夕法尼亚大学无线电硕士学位，1931年获哈佛大学物理哲学博士学位。1933年回国，以无线电和微波物理学的研究著称国内。1946年出国研究，后留居美国。他在外国科学杂志上发表了50余篇物理学研究论文。在20年代末期到30年代初期，主要是研究高空电离层、电子振荡器的理论与实验等；从40年代末期到70年代初期，主要研究微波波谱学，电子自旋磁共振、自由磁基共振、微波在生物系统的应用等。

吴大猷（1907~）

1931~1933年在美国密歇根大学获得硕士和博士。1933~1934年在美国作光谱学、原子和原子核物理学方面的研究，1933年获哲学博士学位。以后回国，在北京大学、西南联大任教。1946年赴美，先后在几所大学任教，1965年任纽约州立大学布法罗分校物理与天文系主任。从1984年开始任台北中央研究院院长。30年代，他研究了多种原子分子光谱，研究了苯及其衍生物的喇曼光谱，发现并证明了苯的同位素移动并对此作了正确的解释。30~40年代，在我国最早进行了原子多重激发态的研究，较早计算了氦原子双激发能态；计算慢中子与原子碰撞的散射截面；提出原子碰撞的理论模型和计算方法；研究了氯化乙烯的同分异构体的红外光谱及分子对称问题；讨论了由分子或电子激发的分子振动、分子振动与转动的交互作用、分子简正振动等问题，他有论文百余篇，专著十余本，如1975年出版的《理论物理》七卷本。它们涉及原子物理、分子物理、核物理、大气物理、等离子体物理、统计物理和相对论等多个领域，成绩卓著。

王淦昌（1907~）

于1929年毕业于清华大学，受学于叶企孙、吴有训。1930年赴德国，入柏林大学，在L.迈特纳指导下从事衰变能谱研究，1934年获博士学位。1930年他在柏林提出用云室来研究由 α 粒子轰击铍核时发现的一种高能射线，这一设想由于导师不支持而未能实现。一年多后，查德威克就

是通过这样的实验发现了中子。1941年他提出通过轻原子核（如 ${}^7_4\text{Be}$ ）俘获 K 壳层电子释放中微子时所产生的反冲探测中微子。一年后美国物理学家 J.S.阿伦按其方法进行实验，证实了他的预言。这被认为是 1942 年世界物理学的重要成就之一。他的另一重要成就就是 1959 年在苏联杜布纳联合核研究所发现反西格马负超子（ $\bar{\Sigma}^-$ ）。这一发现进一步证实了任何粒子都存在反粒子的理论预言。1960 年王淦昌回国，参加了原子弹和氢弹的研制并参与了领导工作，做出了重大贡献。

张文裕（1910~1992）

1933 年获燕京大学物理学硕士学位。1935 年赴英国剑桥大学，在卢瑟福指导下研究核物理。年获博士学位。他有很多重要发明和发现。在剑桥大学，先后与人合作，首先研究天然 α 射线引起 ${}^{30}\text{P}$ 、 ${}^{28}\text{Al}$ 和 ${}^{25}\text{Mg}$ 的共振效应，验证了 N.玻尔的液滴模型。1943 年在法国物理学家 S.罗森布拉姆设想基础上，发明多丝火花计数器。1948 年发现 μ 子系弱作用粒子和 μ^- 子原子，国际上称“张原子”和“张辐射”，开拓了奇特原子研究的新领域。1950~1955 年系统研究大气贯穿簇射 π^0 粒子。曾筹建云南高山宇宙线实验室及其三大云室，1972 年领导发现大于质子质量 10 倍的粒子。此外，1961 年在苏联期间，领导研究中子照射丙烷气泡室产生的粒子及其衰变性质，特别在 π^0 超子与核子散射方面作出了一定贡献。历任我国原子核研究所副所长及高能物理研究所所长。

王竹溪（1911~1983）

1935 年赴英国剑桥大学深造。1938 年获博士学位。他在理论物理的各领域，特别是热力学、统计物理学和数学物理等方面具有很深的造诣。在湍流尾流理论、吸附统计理论、超点阵统计理论、热力学平衡与稳定性、多元溶液、热力学绝对温标、热力学第三定律、物质内部有辐射的热传导问题以及基本物理常量等广泛领域发表过学术论文 30 余篇。其中最重要的，当推 1935 年发表的超点阵统计理论，另一重要工作是平衡与稳定性的热力学理论。曾任北京大学副校长，中国物理学会名词委员会主任等，对物理教育与教材建设起过很大作用。

杨澄中（1913~1987）

1945 年赴英国留学。1946~1950 年，先后在莱士特大学和利物浦大学学习静电加速器和回旋加速器技术。1950 年获利物浦大学博士学位。1951 年回国。主要从事静电加速器、高压倍加器和重离子加速器的研制、各种闪烁晶体的制备、氘轰击几种轻核所引起的核反应、快中子物理和低能轻核反应、重离子核物理等方面的研究。1949 年，与 J.R.霍尔特合作，发现氘的削裂反应和非弹性散射。曾任中国科学院近代物理研究所所长，为我国热核武器和加速器的研造及人才培养作出了重要贡献。

葛庭燧 (1913~)

1941 年赴美留学,入加利福尼亚大学物理系。1943 年获哲学博士学位。先后在麻省理工学院光谱实验室和辐射实验室、芝加哥大学金属研究所任研究员。他最突出的贡献是在低频内耗与晶体缺陷方面的研究,是内耗这一领域的创始人之一。历任中国科学院合肥分院副院长、固体物理研究所所长等。他还在金属物理方面做了大量工作。

钱三强 (1913~1992)

1937 年赴法国留学,在约里奥-居里夫妇指导下,在巴黎大学镭学研究所居里实验室和法兰西学院原子核化学实验室进行原子核物理的研究工作,1940 年获法国国家博士学位,曾先后担任法国国家科学研究中心研究员和研究导师,1946 年获法国科学院亨利·德巴微奖金。1948 年回国。在法国学习和从事研究工作期间,他在原子核物理学领域不断做出成果。1938~1939 年他与 I·约里奥-居里合作,用中子打击铀和钍得到放射性的镧同位素,这对解释当时发现不久的核裂变现象是有力的支持;1944 年他首先从理论和实验上确定了 50000 电子伏特以下的中低能电子的射程与能量关系;1946 年与人合作,首次测出了镆的射线的精细结构;1946~1948 年钱三强与何泽慧等人合作,发现铀的三分裂、四分裂现象,并对三分裂现象从实验与理论两方面作出了全面的论述,经过十几年的考验,已得到公认。他对核裂变现象的研究成果,为各国物理学界所重视。回国后历任原子能研究所所长,科学院副院长,为我国原子能事业的发展起了重要的组织领导作用。

卢鹤绂 (1914~)

于 1936 年在燕京大学物理系毕业,同年赴美国明尼苏达大学研究院留学。1938 年获硕士学位,1941 年获博士学位后回国。主要研究成果有:1938 年发现热离子发射的同位素效应。发明时间积分法,准确测定了锂 6 和锂 7 的丰度比。1941 年研制成 60 度聚焦高强度质谱仪。1946 年研究出估算原子弹和反应堆临界大小的简易方法。1949 年最先提出核半径公式应改为 $1.23 \times 10^{-13} A_{1/3}$ 厘米。1949 年~1956 年发展出可压缩流体的粘弹性理论。1959 年计算了片状柱型等离子体的稳定性等等。

何泽慧 (1914~)

1936 年清华大学毕业后到柏林高等工业学校攻读研究生,1940 年以精确测定子弹速度的新方法的论文获该校工程博士学位。1945 年在德国皇家学院从云室中首先发现正负电子几乎全部交换能量的弹性碰撞现象。1946 年底,在法国约里奥-居里实验室她与钱三强及另外两名法国研究生发现了核裂变的三分裂现象。她还首先观察到四分裂现象。1948 年回国后 50 年代多次研制出我国自制的分别对质子或电子灵敏的核乳胶,她还对中子物

理与裂变物理实验研究、固体径迹探测技术、空间科学、宇宙射线等作出不少贡献，并做了大量原子能研究所与高能研究所的组织领导工作，她和钱三强被赞誉为“中国的居里夫妇”。

张宗燧（1915~1969）

1936年赴英国留学。1938年获博士学位后去丹麦，随N.玻尔研究量子场论。1939年去瑞士，在W.泡利指导下工作，继续研究量子场论。1945年再次到剑桥大学工作。1947年同狄拉克一起到美国普林斯顿高级研究院进行研究工作。早在1936~1938年，在国外从事统计物理学方面的研究工作，在合作现象、特别是固溶体的统计物理理论等方面作出了有价值的贡献，受到国际上的重视。在量子场论的形式体系的建立，特别是在高阶微商、高自旋粒子的量子场论方面的研究，许多工作很有创见，达到了国际水平。

彭桓武（1915~）

1938年赴英国留学，入爱丁堡大学理论物理系随M.玻恩工作，1940年获哲学博士学位，1945年获科学博士学位。他是我国较早从事理论物理学研究工作的科学家。早年在英国进行固体理论、介子物理和量子场论的研究工作，回国之后，从轻原子核研究转入核物理研究，并同他人合作研究核子-核子散射问题。此外，对分子结构提出了以电子键波函数为基础的计算方法，提出了以寿命关联实验探讨量子力学隐参数问题。从1955年起，彭桓武又转入核工程领域，领导了我国核反应堆和核武器的理论设计工作。曾任中国科学院理论物理研究所所长、高能物理研究所副所长等。

胡宁（1916~）

1941年赴美国加利福尼亚理工学院物理学系深造。1943年获博士学位后到美国普林斯顿高级研究院在泡利指导下从事核力的分子理论和广义相对论等方面的研究。1945~1950年间，先后在爱尔兰都柏林高级研究院、丹麦哥本哈根大学理论物理研究所、美国康涅尔大学原子核研究所、美国威斯康辛大学物理系和加拿大国家研究院等处，从事理论物理学的多方面研究。1950年回国。50年代中期从事高能碰撞多重产生粒子理论的研究。60年代中期参与了建立和发展强子内部结构的屋子模型工作。此后主要致力于强子结构理论的研究。胡宁是北京大学物理系教授、中国科学院院士。

朱洪元（1917~1992）

1945年留学英国，1948年获曼彻斯特大学哲学博士学位。1950年回国。在英期间，1947年对高能电子在磁场中运动时放出的电磁辐射的性质进行研究，得到这种电磁辐射的能谱、角分布和极化状态的表达式，这种辐射后来称为同步辐射，现已有广泛的应用。1960年他对利用色散关系建立低能强作用理论的问题进行了深入的探讨，发现当时流行的角动量分波展开法引进了很大误差，指出这种方法所导出的方程包含了不应有的奇异

行为。1962~1964年，他从事包括光子、电子、中子和原子核在内的高温高密度系统的输运过程、反应过程和流体力学过程的研究，是中国这一研究领域的开端。1965年，他在建立和发展关于强子结构的“层子模型”工作中，作出了重要的贡献。他同其他人合作引进了强子内部波函数以及波函数的重叠积分，揭示了强子现象之间的内在有机联系。曾任高能物理研究所副所长。

黄昆（1919~）

1944年获北京大学硕士学位。1945年赴英国深造。1947年获博士学位。1947年他在研究稀固溶体理论中提出，固体中的杂质缺陷会导致X光漫散射，其强度集中在普通X光衍射斑点附近，20年后确认了这种现象，后来被称为“黄散射”。“黄散射”成为直接有效地研究晶体微观缺陷的手段。1950年他与里斯首次提出多声子辐射和无辐射跃迁的量子理论。国际上称此理论为黄-里斯理论。该理论是研究固体杂质缺陷光谱和半导体载流子复合的奠基性工作。同年，黄昆综合介质的电磁理论和晶格动力学理论对极性晶体提出了一对唯象方程，它被称为黄方程，是处理极性晶体光学振动的基础。1951年黄昆从黄方程出发又推导出晶体中的声子与电磁波的耦合振荡模式。他所预见的声子与电磁波的耦合振动模式于1963年被证实，命名为极化激元。现在极化激元成为分析固体光学性质的基础，国际上称黄昆的工作是极化激元领域的里程碑。1978年证明了无辐射跃迁的绝热近似和静态耦合在理论上完全等价，澄清和统一了二十年来国际上关于无辐射跃迁理论的争论问题。继而，他又提出了无辐射跃迁中声子统计规律性的理论。黄昆在固体物理学理论领域、特别是在晶格动力学方面作出的开拓性研究，使他于1980年当选为瑞典皇家科学院国外院士，1985年又当选为第三世界科学院院士。任半导体研究所所长，为我国半导体研究培养造就了大批人才。

周光召（1929~）

1951年在清华大学物理系毕业后，于1954年在北京大学研究院毕业。曾先后在苏联杜布纳联合核子研究所、美国弗吉尼亚理工学院和日内瓦欧洲核子中心长期工作和访问。1985年当选为第三世界科学院院士。他在理论物理学领域做出过许多重要贡献。在粒子物理学方面，严格证明CP破坏的一个重要定理，1960年推导出赝矢量流部分守恒定理（PCAC），这对弱相互作用理论起了重大推进作用，因此世界公认他是PCAC的奠基人之一；他第一次引入螺旋振幅的概念和相应的数学描述；他还用色散关系理论对非常重要的光核反应做了大量理论研究工作。近年来，他组织领导了许多中青年对相互作用统一、CP破坏、陪集规范场、非线性模型、有效拉氏量理论、超对称性破缺、量子场论的大范围拓扑性质及其与反常的联系等方面做了许多有意义的研究工作，其中许多结果已引起国内外学者的普

遍重视。在凝聚态物理方面，他领导的小组发展了非平衡态统一理论中的数学形式——闭路格林函数方法。他还参加并组织领导了中国核武器的理论研究、设计和试验工作，现任中国科学院院长。还有不少其他物理学家在物理学前沿完成了许多重要的奠基性工作。总之，经过几代人的不懈努力，中国物理学家对当代物理学发展所作出的贡献和取得的成就越来越引起国际上的瞩目。

主要参考资料

1. 中国大百科全书出版社编辑部。中国大百科全书。物理学。北京：中国大百科全书出版社。1987。
2. 中国大百科全书出版社编辑部。中国大百科全书。教育学。北京：中国大百科全书出版社。1985。
3. 戴念祖主编。20 世纪上半叶中国物理学论文集粹。长沙：湖南教育出版社。1993。
4. 杜石然等。中国科学技术史稿（上、下册）。北京：科学出版社。1983。
5. 王鸿生。中国历史中的技术与科学——从远古到 1990。北京：中国人民大学出版社，1991。
6. 张应吾。中华人民共和国科学技术大事记（1949—1988）。北京：科学技术文献出版社，1989。
7. 《科学家传记大辞典》编辑组。中国现代科学家传记，1—3 集。北京：科学出版社，1991，1992。
8. 董光壁。中国近现代科学技术史论纲。长沙：湖南教育出版社，1992。

9 . 技术发展简史

航空航天发展简史

(1) 飞机的诞生人类自古就幻想在空中自由飞翔,但直到 18 世纪发明了气球才实现了“航空”。1783 年 6 月 4 日法国蒙哥尔费兄弟(Mongolfier, J.M.和 J.E.1740~1810 和 1745~1799)首次用燃烧湿稻草和碎羊毛产生的热空气充入气球使之升空,6 月 19 日用一只更大的热气球载上羊、公鸡和鸭进行了公开表演,飞行 8 分钟。法国物理学家查理(J.A.C.Charles1746~1823)注意到氢气比热空气的升力更强,用绸涂以橡胶做成第一个氢气球并于同年 8 月 27 日在巴黎上空上升约 915 米,穿过暴风雨飘了约 25 公里才降落。这是人类飞行的开始。气球在 19 世纪曾多次用于体育、科学实验和军事侦察。1852 年法国吉法尔(Henri Giffard, 1815~1882)制成了第一艘飞艇,这是在蒸汽气球上吊着蒸汽机推进的三个螺旋桨作为动力的,也是人类实际征服天空的开始。其后有许多人制造各种飞艇,直到 20 世纪有了较好的内燃机后飞艇才得以进一步发展,在第一次世界大战前后,德国曾利用飞艇队对伦敦进行轰炸。1937 年德国“兴登堡”号豪华飞艇飞往美国时起火遇难,才结束了飞艇的商业飞行。19 世纪初,英国凯利(G.Keillie, 1773~1857)仔细研究了鸟类飞行,认识到鸟翼的功能可分解为升举与推进两部分。1849 年和 1853 年,曾先后制成载人滑翔机飞了几百米。同期内,德国李林达尔(O.Lilienthal, 1848~1896)和他的弟弟 G.李林达尔 1891 年制成一架蝙蝠状的弓形翼滑翔机,首次飞行 15 米。以后从 1891 到 1896 年进行过 3000 次滑翔飞行,滑翔距离曾达 300 米。李林达尔制造过 18 架单翼与双翼型飞机,并试图将小型发动机加在滑翔机上,没有成功。1896 年 8 月 9 日在一次飞行中坠毁受重伤,次日去世,他的最后一句话是:“总要有牺牲。”航空时代的新纪元始自 1903 年 12 月 17 日,美国的莱特兄弟(W.Wright, 1867~1912;O.Wright, 1871~1948)以内燃机为动力第一次成功地实现了载人飞机的受控飞行。这天共飞行了 4 次,最长的一次飞行了 260 米,在空中停留了 59 秒钟。这一成就是来之不易的。莱特兄弟自幼对飞行怀有浓厚兴趣,他们接受李林达尔的经验,自制小风洞进行机翼实验(仅 1901 年就用 200 多不同形状机翼做过上千次实验)。从 1900 年开始进行了近千次滑翔飞行,并不断改进,直到 1903 年自制的第三架滑翔机已能完全达到稳定操纵的要求。在此基础上加装自制 12×735.5W(12 马力)的内燃活塞发动机和木制螺旋桨,机重约 340 千克,称为“飞行者”1 号。人类最早的持续的动力飞行就是从“飞行者”1 号试飞成功开始的,飞机由此诞生。1909 年莱特兄弟又为美国制

成第一架军用飞机，装有当时空中侦察的一切装备。

(2) 从活塞式发动机飞机到喷气式飞机 20 世纪初，各种类型的飞机（如水上飞机、重型飞机等）得到很大发展，特别是在军事方面的应用，第一次世界大战期间，各种军用飞机如侦察机，驱逐机（后称为歼击机）、轰炸机、强歼机以及航空炸弹、航空瞄准具等相继出现。大战结束时，双方作战飞机由 1500 架增到 8000 架，飞行时速由 80 千米提高到 220 千米。

战后各国积极发展航空事业，飞机性能有新的飞跃。在动力装置方面采用了增压发动机、涡轮增压发动机等，机身采取流线型、全金属、下单翼、装有变距螺旋桨和收放式起落架等，飞行速度达 700 千米每时。洲际民航开始使用水陆两栖飞机。1939 年制成直升飞机，可以垂直起落或空中停留，操作性能灵活实用。

第二次大战期间，各交战国军用飞机生产空前发展，共生产 70 余万架，仅美国一国就生产各类飞机 40 万架，活塞式发动机飞机发展到鼎盛时期。同时，为某些特殊军事目的，德国、英国也使用过滑翔机。对航空事业有根本意义的，是出现了喷气式飞机。1939 年 8 月 27 日德国的喷气式飞机 He-178 首次飞行。1941、1942 年英、美先后试飞了喷气式飞机。德国到战争结束共生产了 1400 架 Me-262 型喷气式飞机。喷气式飞机的出现，使飞行速度突破音障，开辟了航空发展的新阶段。

喷气式飞机的迅速发展是在二次大战以后。1949 年英国研制成功第一架大型喷气式客机“彗星一号”，并于 1952 年投入航班使用。同一年美国采用加力燃烧室办法提高发动机功率，研制出时速高达 1220 千米的“F-100”战斗机，成功地突破了音障。至 60 年代初，大多数国家的军用飞机都已改为喷气式飞机，各主要国家的战斗机如美 F-16、苏米格 29、法“幻影”等都早已超过音速甚至达到 3 倍音速。后掠翼和三角翼代替了直机翼和梯形机翼。目前，在航空动力方面普遍应用了燃气轮机，有涡轮喷气发动机、涡轮风扇发动机和涡轮螺旋桨发动机等。70 年代，民用航空中有美波音 767，苏图 144，英三叉戟等出现，形成了世界航空网。

(3) 火箭和航天技术的诞生 1957 年 10 月 4 日苏联发射第一颗人造地球卫星，揭开了人类航天史的新篇章。而运载火箭是发展空间技术的关键，故而我们要回顾一下火箭的发展史。

古代火药火箭发源于中国。宋代（约 12 世纪左右）已经出现把火药筒绑在箭杆上利用喷火的反作用制成的火药火箭，后来又有“火龙出水”“神火飞鸦”等古代火箭，这就是最原始的固体燃料火箭。这种火箭经过印度、阿拉伯逐渐传入欧洲，18 世纪后期印度军曾多次使用这种火箭抗击英法军队。19 世纪初在欧洲各国军队中也使用了经改进后的这种火箭。

俄国齐奥尔科夫斯基（K. E. Tsiolkovsky, 1856 ~ 1935）1903 年起发表论文从理论上建立了火箭运动的基本方程并指出液体火箭

发动机是航天器的发展方向，奠定了航天事业的理论基础。

美国的“火箭先驱”戈达德（Goddard, R.H. 1882~1945）于1926年在美国马萨诸塞州成功地发射了世界第一枚液体燃料火箭，升高68米，飞行了56米。1935年，戈达德改进火箭的制导系统，飞行速度超过了音速，最大射程达20千米。在德国，1927年成立了“德国太空旅行协会”，包括后来成为著名火箭专家的冯布劳恩（W.vonBraun, 1912~1977）。德国政府1936年在波罗的海的海岸的佩内明德建立了秘密火箭实验场，1942年制成著名的V₂火箭。V₂火箭作为武器，技术还不够成熟，然而第一枚能将重物送上天的运载工具——弹道导弹。苏联于1957年8月21日成功地发射了超远程多级洲际弹道导弹苏联1号，并利用这种火箭于1957年10月4日把世界第一颗人造地球卫星“卫星1号”送入轨道，60年代，苏美两国先后制成威力强大的运载火箭。1961年4月12日苏联成功发射了“东方1号”载人宇宙飞船，它的运载火箭，起飞重量约300吨，起飞推力500吨。60年代后期，美国为“阿波罗”登月计划研制成“土星5号”巨型运载火箭，它的第一级推力达3400吨，后两级采用高能推进液氧和液氢，火箭三级全部结构重量只有推进剂的1/11~1/15。

到1971年，世界上有能力生产导弹的国家已扩大到14个。我国于1970年4月24日成功发射了第一颗人造地球卫星“东方红1号”（重173千克）。70年代陆续发射了8颗人造卫星，并掌握了回收技术。1980年我国成功地向南太平洋发射大型运载火箭。1981年我国首次用一枚运载火箭把三颗不同用途的空间物理探测卫星送入太空，标志着我国火箭技术的新水平。到1992年为止，我国已发射了39颗各类卫星。我国的长征2号等火箭还开展了国际商业服务。

（4）应用卫星与载人空间飞行 60年代后期，空间技术的重点已从发展运载火箭转向应用研究。在此期间，各国发射了大量应用卫星，包括科学卫星、侦察卫星、气象卫星、地球资源卫星、通信卫星等。此外，美苏两国还陆续对月球、行星际空间进行探测。首先对月球发射许多探测器。从60年代开始，到1984年底，各国先后发射了100多个载人星际飞行器和169个空间探测器，先后有14个国家的150余名宇航员进入太空，12人踏上月球。空间探测器对金星、火星、水星进行探测，取得了丰富成果。70年代开始对木星和土星乃至海王星等外行星进行了可贵的探测。

1961年4月12日苏联宇航员加加林（A. arap, 1934~1968）乘坐“东方1号”载人飞船在太空飞行了108分钟，绕地球一周后胜利返回。美国从1961年起施行“阿波罗”登月计划，经过30万人8年多努力于1969年7月20日，“阿波罗”11号首次把人安全送上月球，到1972年阿波罗11号先后6次将12人成功地送上月球，生活工作了十多天，获

得了大量科学资料。

(5) 空间站与航天飞机为了寻求一种可以重复使用的航天器，人们开始研制空间站与航天飞机。

1973年5月14日，美国发射了第一个试验性航天站“天空实验室”，重80多吨，它是利用阿波罗工程剩余的“土星5号”火箭发射到离地面435公里的近圆轨道的，发射时由于高速气流冲掉了轨道舱防护罩使太阳能电池发生故障，11天后“阿波罗”飞船与“天空实验室”对接，3名宇航员排除了电源故障，使空间站恢复了功能，工作了28天，后来又接待两批6人，分别工作了59天和84天，用58种仪器进行了270多项实验，拍摄了几十万张照片，该“天空实验室”工作了五年多，于1979年7月进入大气层烧毁。在此基础上，1983年11月28日由美国航天飞机把可重复使用的欧洲“空间实验室”航天站首次带到太空。

前苏联自1971年到1984年先后把7艘“礼炮”号航天站送入轨道，认为这比单个飞船更为经济有效，并用“联盟”号飞船作为接送航天员的工具，用“进步”号飞船作为运送物资的不回收工具。例如1979年上天的“礼炮”6号航天站已有19批航天员到站工作。该站有两个供加油、补给、轮换航天员的对接舱口。这一航天站完成了多项长期性科学研究课题（包括在太空条件下植物生长全过程的研究等）。目前，前苏联的“和平”号空间站还正在运行中，预计可工作到1996年。1972年美国全面开展研制航天飞机，从1977年第一架“企业号”航天飞机成功后，先后已制成“哥伦比亚号”、“挑战者号”、“发现号”、“亚特兰蒂斯号”等航天飞机，分别投入运行。这种航天飞机由于可以往返于地球与运行轨道之间，而且由于起落时加速度的变化只在 $3g \sim 1.5g$ 之间，因而降低了对乘客体质的要求。航天飞机还可发射通信卫星（从近地轨道送入远地球静止轨道），回收卫星，捕捉不能工作的卫星加以修理等。总之，航天飞机兼有运载火箭、载入航天器和高性能飞机的多重性能。

航天技术虽仅有短短30年历史，但成就是十分惊人的。从1957年到1984年底，各国已发射3022颗各式人造地球卫星和研制出80多种运载火箭。在它的累累硕果后面，我们不应忘掉更多的成千上万次各种不成功的实验、重大事故和人员伤亡。今后，随着航空航天事业蓬勃的发展，人类征服宇宙太空的壮丽事业将越来越从幻想变成科学实践的伟大活动。

热机发展简史

早在古代，人们就想利用蒸汽作为动力。公元 1 世纪时，亚历山大城的希罗（Hero）记述的汽转球（又名风神轮）是最早的反作用汽轮机械。我国南宋初出现的走马灯是涡轮机的雏形。但都是作玩具使用的。由于采矿工业的发展，英国人萨佛里（T.Savery, 1650~1715）于 1698 年制成用于矿井抽水的蒸汽水泵，被称为“矿工之友”。1705 年，英国人纽科门（T.Newcomen, 1663~1729）制成锅炉与汽缸分离的大气式蒸汽机，但结构庞大笨重。18 世纪中叶，瓦特（J.Watt, 1736~1819）在 J. 布莱克关于潜热与比热理论的启发下，于 1765 年在纽可门蒸汽机中加了一个与汽缸分离的冷凝器，从而避免了汽缸冷却时消耗许多蒸汽的热，大大提高了机器效率，节省了燃料与时间，在 1769 年取得专利。1776 年瓦特又制成两台蒸汽机开始运行，热机效率 2~4%，1784 年又取得具有旋转运动和飞轮的双向作用式蒸汽机的专利。经过瓦特改进后的蒸汽机被广泛应用，到 19 世纪初，蒸汽机已普遍在矿山和纺织工业中采用。

在交通工具方面，蒸汽机的应用得到了进一步发展。1769 年法国人居诺（N.T.Cugnot, 1728~1804）研制出三轮蒸汽汽车。1803 年英国人特里维希克（R.Trevithick, 1771~1833）制成轨道上移动的高压蒸汽机车。1814 年英国人斯蒂芬森（G.Stephenson, 1781~1848）制成煤矿用蒸汽机车“皮靴号”。以后他采用将废气从烟囱排出，使锅炉里形成负压来抽风的办法提高了燃烧效果，使机车节约燃料，并提高速度 2 倍~3 倍，从而制成实用的铁路蒸汽机车。该车能牵引 8 节矿车以每小时 4 英里速度从矿中运出煤。1825 年 9 月 27 日，他设计的“动力 1 号”机车牵引着载有 550 位乘客的列车在从惠灵顿到斯托克顿的铁路上行驶。1829 年，他又与其子共同设计制造“火箭号”蒸汽机车，并在比赛中以 58 公里每小时的优异成绩取胜，从而揭开了铁路蒸汽机车发展的广阔前景。1807 年，美国人富尔顿（R.Fulton, 1765~1815）建造蒸汽机船“克莱蒙脱号”，它以叶轮驱动，试航成功后成为首创的定期航线上的第一艘驳船。

蒸汽机的出现促使了热力学理论的发展。1824 年法国人卡诺（S.Carnot, 1796~1832）提出卡诺定理。经过迈尔（J.R.vonMayer, 1814~1878）、焦耳、亥姆霍茨、克劳修斯、开尔文等的努力，先后提出热力学第一、第二定律。热力学理论的建立和发展，为热机的进一步改进和发展以及新型热机的研制和设计提供了理论基础。

19 世纪中叶以后，出现了内燃机。1860 年法国人勒努瓦（E.Lenoir, 1844~1900）制出电点火的煤气机用于工厂中，其结构与当时的蒸汽机差不多，无压缩过程，热效率只有 4.2%。1862 年法国人罗莎

(A.E.B.deRoches, 1815~1891) 提出四冲程循环原理。1876年德人奥托(N.A.Otto, 1832~1891) 制成四冲程往复式单缸煤气机, 其热效率达14%左右。因此, 一般人公认他是现代内燃机的发明者。1878年英国人克拉克(D.Clerk, 1854~1932) 得到二冲程循环的内燃机专利, 制成二冲程内燃机。1883年德国人戴姆勒(G.Daimler, 1834~1900) 试制成第一台汽油机。1892年德国人狄塞尔(R.Diesel, 1858~1913) 提出压燃式内燃机原理, 1897年制造成功, 即所谓的柴油机。热效率为26.2%, 是当时效率最高的内燃机。内燃机出现以后, 即有人将之用于交通工具上。1886年德国人本茨(C.Benz, 1844~1929) 制造出三轮汽车, 德国人戴姆勒制造出四轮汽车。以后发展成现代的汽车。1903年第一艘柴油机船“万达尔”号下水。19世纪末, 随着电力工业的发展, 中心发电站迅速兴起。汽轮机因之产生和发展。1882年瑞典人拉瓦尔(C.G.P.deLaval, 1845~1913) 设计了40000转每分的汽轮机, 制成第一台单级冲动式汽轮机, 并解决了喷嘴和强度设计的问题。1884年英国人帕森斯(C.A.Parsons, 1854~1931) 制成多级反冲式汽轮机, 是第一台有实用意义的汽轮机。1896年法国人拉托(A.Rateau, 1863~1930) 把几个单级冲动式汽轮机串联在一起形成多级冲动式汽轮机。1897年帕森斯将汽轮机用于“透平尼亚”号船上, 开创了汽轮机船时代。20世纪初, 美国人柯蒂斯(C.G.Curtis, 1860~1953) 制成多个速度级的汽轮机, 改进了性能, 并一直使用到现在。

燃气轮机是发展较晚的热机。1905年法国人勒梅尔(C.Lemaire) 和阿芒戈(R.Armangand) 制成第一台燃气轮机。但热效率只有3%~4%, 因而未得实用。1920年德国人霍尔茨瓦兹(H.Holzwarth, 1877~1933) 制成第一台能实用的燃气轮机。热效率为13%。但因仍存在许多缺点而被放弃。1939年瑞士制成4兆瓦的燃气轮机发电机组, 效率达18%。同年, 在德国制造的喷气式飞机试飞成功, 使用He-S3B涡轮喷气发动机。从此燃气轮机步入实用阶段, 并开始迅速发展。1941年瑞士制造的第一辆燃气轮机机车交货。1947年英国制造的第一艘燃气轮机船“加特利克”号下水。1950年英国制成第一辆燃气轮机汽车(75kW), 但至今只作试验用。

目前, 在航空上普遍应用燃气轮机, 有涡轮喷气发动机、涡轮风扇发动机、涡轮轴发动机、涡轮螺旋桨发动机等。在工业、船舶、发电、机车等各领域中也使用燃气轮机, 并常作成柴油机-燃气轮机联合机组和燃气-蒸汽联合循环装置来使用。

电光源发展简史

电能用于照明是从 1801 年制成碳极弧光灯开始的。1845 年又制成弧光电灯，它们都不稳定，且耗电很大。直至 19 世纪 70 年代末，才有可供实用的电光源——白炽灯问世。本世纪初又研制出气体放电灯。

(1) 白炽灯

1879 年爱迪生把碳丝装在抽去空气的玻璃泡内，做成了第一批可供实用的碳丝白炽灯。这种灯通电后，碳丝温度超过 550 就开始发光。但灯的光效仍然很低。抽真空可以防止灯丝发生化学变化，但碳丝在高温真空中容易蒸发，影响使用寿命。1881 年制成的碳丝白炽灯设计寿命为 600 小时，光效小于 2 流明每瓦。

1906 年用金属钨拉制成钨丝代替碳丝制成钨丝白炽灯。这种灯通电后，钨丝温度达 2600K 左右，灯丝白炽发光。钨用于灯丝其优点是它在红外区的辐射比黑体辐射少，且容易加工成形。因此光效高于碳丝，约达 10 流明每瓦。目前仍普遍使用。跟抽空的灯泡相比，在充气的灯泡里可以降低钨的蒸发率，钨丝的工作温度可提高到 3000K，有利于提高光效，还有可能使蒸发的钨回到灯丝。研究发现，灯泡充入氩、氮等气体虽然可以抑制钨的蒸发，提高工作温度和光效，但所充气体的热传导损失很大。若将灯丝由直丝改为螺旋形，就可以减少热传导损失。1913 年单螺旋形灯丝的充气白炽灯开始出现，后来又发展为双螺旋形灯丝。

1959 年出现了充卤白炽灯。把碘充入装有钨螺旋形灯丝的石英灯泡内，蒸发的钨在池壁附近与碘化合，形成易挥发的碘化钨，当它扩散到接近灯丝时，由于高温又分解为钨与碘，于是围绕灯丝的钨又回到灯丝，碘则扩散到泡壁附近又进行与钨化合的循环。结果，钨的蒸发减到零。充卤的灯泡光效高，寿命增加，体积减小。现在已用其他卤化物（如溴和溴化物）代替碘。

普通白炽灯与充卤白炽灯的主要缺点是辐射大部分位于红外区，因而光效不高，光色发红（黄）。

(2) 气体放电灯

帕邢（F. Paschen, 1865 ~ 1947）早在 1889 年就发现，在某些气体中给定电极间的点火电压是压强与电极间距离的乘积的函数。以后，对稀薄气体中的放电现象进行了许多研究，知道在气体放电中自由电子碰撞使原子受激返回基态时会辐射出光子。1913 年利用气体放电制成了氖气灯，光色为桔红色，后来发展成一系列的霓虹灯，使全世界的大城市焕发出五光十色的异彩。

1939 年因曼（Inman）又制成日光灯，并在纽约世界博览会上使用，

日光灯实际上是一种低压汞荧光灯。灯内有少量水银。在稀薄气体中放电时，水银蒸气，能产生紫外辐射，照射在日光灯内壁涂有的荧光物质上，就发出可见辐射，这就是日光灯的发光原理。日光灯能将大部分紫外辐射转变为可见光，光效可达 80 流明/瓦，且光线比较柔和，用交流电源时光强闪烁的频率为交流电频率的二倍，但对一般照明影响不大，因此室内照明广泛采用日光灯。近年来开发出各种节能型、紧凑型日光灯，镇流器等附件装在灯头内，比较方便。

早在 1906 年就有人对高压水银蒸气放电进行探讨，1932 年，依靠在灯内充入惰性气体氙等方法，开始有了 400 瓦、40 流明每瓦的商品高压汞灯。当灯点亮后，水银蒸气压强约有 $1 \times 10^5 \text{Pa} \sim 3 \times 10^5 \text{Pa}$ ，这时汞蒸气放电的发光效率较高但光色很差，只有黄、绿色没有红色。亮度高，运用于室外及广场，现又有高压汞荧光灯等出现，使用方便，但光效只有 30 流明每瓦左右。

1923 年康普顿在实验室中制成了低压钠灯。低压钠灯的光效可达 200 流明/瓦左右，是高光效的人造光源，但由于它的显色性差，主要用在对光色要求不高的地方。60 年代利用耐高温抗腐蚀的半透明多晶氧化铝陶瓷管制成高压钠灯。

此外，还有在 60 年代初出现的金属卤化物加入高压汞灯后得到的碘化镝灯、超高压铟灯等，还有长弧氙灯和短弧氙灯等，发光体积小而亮度大，有“小太阳”之称。气体放电灯还可按其频率特性作为光学仪器用的光谱光源，如紫外光源（汞灯、氙灯）、红外光源（金色灯）等等。严格说来，激光、发光二极管（P-N 结光源）等也要依靠外供电压来形成光源，将电能转换为光能，但一般不属于照明用光源之列，这里不再介绍。

电机发展简史

电机的发展大体可分为三个阶段：直流电机的产生与形成；交流电机的产生与形成；电机理论、设计与制造工艺的改进与完善。

(1) 直流电机的产生与形成

1820年奥斯特发现了电流磁效应，随后安培通过总结电流在磁场中所受机械力的情况建立了安培定律，1831年法拉第提出电磁感应定律，并制出圆盘发电机。以后，各种各样的发电机和电动机雏形，纷纷出现。1833年，法国的皮克西(A.H.Pixii, 1808~1835)利用换向装置制成一台旋转磁极式直流发电机。同年，楞次证明发电机和电动机是可逆的，但1870年以前，直流发电机与电动机一直在独立发展着。1866年西门子(W.vonSiemens, 1816~1892)制成直流自激、并激式发电机。随着电报、电解、电镀等生产发展的需要，1833年~1870年之间直流发电机发展很快，这时磁铁开始利用电流来励磁。1870年格拉姆(Z.T.Gromme, 1826~1901)将T形电枢绕组改为环形电枢绕组，一直用到现在。

1880年，爱迪生观察到用叠片铁芯可以减少温升和能耗。1880年，霍普金森(J.Hopkinson, 1849~1898)确立了磁路的欧姆定律，1891年，阿诺尔德(Arnold)建立直流电枢绕组理论。这些从理论上进一步促进了直流电机的改进和发展。1882年，德国将米斯巴哈水电站发出的2千瓦直流电通过57千米电线输送到慕尼黑，证明直流远距离输电的可能性。这一方面成为直流发电机与电动机发展中的大事，促进了它们的广泛利用，另一方面暴露出直流在传输中的缺点：原来电压越高，电能的传输损失越小，但高压直流发电机困难较大，而且单机容量越大，换向也越困难，换向器上的火花使工作不稳定。因而人们就把目光转向交流电机。

(2) 交流电机的产生与形成

1824年，法国人阿拉果(D.F.J.Arago, 1786~1853)在转动悬挂着的磁针时发现其外围环上受到机械力。次年，他重复这一实验时，发现外围环的转动又使磁针偏转，这些实验导致了后来感应电动机的出现。年，出现了单相交流发电机。

1876年，雅布洛奇科夫(. . . , 1847~1894)用交流发电机和开磁路式串联变压器为其“电烛”供电，这是交流电用于照明的开始。

1879年英国人拜依莱(Bailey)用依次变动四个磁极上的励磁电流而得到旋转磁场。1883年，德普勒(M.Deprez, 1843~1918)在巴

黎科学院提出 $= \frac{1}{4}$ 周期的交流磁场公式，1885年费拉里斯(G.Ferraris,

1847 ~ 1897) 提出两相交流感应电动机的模型。1886 年特斯拉 (N. Tesla, 1856 ~ 1943) 也制成两相绕线式交流异步电动机模型, 1888 他又在意大利科学院提出《利用交流电产生旋转磁场》的论文。1889 年, 多利沃-多布罗沃利斯基

(, 1861 ~ 1919) 提出了三相制并制成鼠笼式交流异步电动机。1891 年, 建成了从劳芬到法兰克福的三相交流输电电路, 把劳芬的一架 $300 \times 735.5\text{W}$ (300 马力) 55 伏三相交流发电机的电流经三相变压器提高到了万伏, 输运 175 千米, 顺利通电, 从此三相交流电机很快代替了工业上的直流电机, 因为三相制的优点十分明显: 材料可靠, 结构简单, 性能好, 效率高, 用铜省, 在电力驱动方面又有重大效益。从此, 各种各样的电机迅速发展起来。

(3) 电机理论、设计与制造工艺的改进与完善

1893 年, 施泰因梅茨 (C. P. Steinmetz, 1865 ~ 1923) 创立用复数方法和矢量分析计算交流电路的方法——向量法。20 世纪以来, 一方面由于电力工业的大发展和科学技术的突飞猛进, 对电机的理论、内部结构、材料、性能提出更高的要求, 另一方面由于自动化、遥控、遥测等的发展要求生产新品种的电机, 如控制电机、交流测速发电机、硅整流器等相继出现。

三相电机本身的重量, 1889 年为 155 千克, 1930 年为 42 千克。单机容量, 本世纪初不足 1000 瓦, 现在已达 50 万千瓦, 最大的已高达 150 万千瓦。

在电机理论方面, 由不对称情况的研究发展为对称分量法, 1935 ~ 1938 年又提出用张量分析方法研究旋转电机的运动方程。1959 年开始用机电能量转换观点来研究整个电路体系, 把旋转电机作为机电系统中的一种元素, 从电磁场理论出发, 列出参数, 根据哈密顿原理和拉格朗日方程, 建立运动方程, 以使用统一方法研究电机的电势、转矩、能量转换条件, 所谓统一方法包括坐标变换、等效电路、方块图等, 可分析各种电机的稳态和动态性能。这样, 整个理论建立在严密的科学基础之上。最近由于计算机的发展, 许多复杂的电机理论计算都可以进一步得到解决。

无线电发展简史

无线电电子学是在早期电磁学和电工学基础上发展起来的，它是利用电磁波作为信息载体加以传播的一门科学技术。

(1) 准备条件

早在 1865 年，麦克斯韦 (Maxwell, J.C. 1831 ~ 1879) 从电磁理论研究中就预言电磁波能以波的形式向外传播，其速度与光速相同。1887 年德国物理学家赫兹 (Hertz, H.R. 1857 ~ 1894) 以著名的电火花放电实验证明了麦克斯韦的预言。他们的科学成果，为无线电通讯技术的兴起作了理论上和实验上的准备。

与此同时，爱迪生在研究如何延长碳丝白炽灯的寿命时，意外地发现了在灯丝与加有正电压的电极间有电流通过，而电极为负压时则无电流，这种热电子发射效应当时称作爱迪生效应。这一效应为后来电子管的发明准备了条件，在此以前，美国莫尔斯 (S.Morse, 1791 ~ 1872) 在 1837、1838 年发明电磁式电报机和点划组合的莫尔斯电码，1844 年建成了从华盛顿到巴尔的摩的电报线路；贝尔 (A.G.Bell, 1847 ~ 1922) 1876 年试验电话通话成功，1878 年发展为波士顿与纽约间的长途通话 (300 千米)。所有这些，都为无线电电子学的发展与广泛应用准备了充分条件。

(2) 马可尼与波波夫

1890 年法国物理学家布兰利 (E.Branley, 1844 ~ 1940) 改进了赫兹的电波接收装置，能在 140 米以外探测到赫兹电波。英国物理学家洛奇 (O.J.Lodge, 1851 ~ 1940) 发明粉末检波器，改进电路，在 800 米外成功地接收到用莫尔斯电码发送的信号。最有影响的要属意大利人马可尼 (G.Marconi, 1874 ~ 1937) 的工作。1895 年，他在大量成功的无线电发送接收实验中发明了天地线装置，改进了发射机与接收机，利用当时仅有的金属检波器，有效地把无线电传播距离增加到 2.8 千米。1896 年，电波已能飞越英吉利海峡 (45 英里)，1901 年又首次完成了横渡大西洋 (3200 千米) 的试验，由此诞生了无线电报。1899 年，德国人布劳恩 (C.F.Braun, 1850 ~ 1918) 还研制出一套能够调谐的接收系统，既能排除干扰，又大大提高了灵敏度，从根本上改进了马可尼的无线电系统。为此，马可尼和布劳恩共同获得 1909 年诺贝尔物理学奖金。

与此同时，俄国物理学家波波夫 (A.C.波波夫, 1859 ~ 1906) 也对无线电通讯作出重要贡献，1895 年他发表了论文，并公开表演了他制作的“雷电指示器”，实际上就是一台无线电接收机，1896 年又成功地表演了无线电电报，传播距离 250 米，传送的第一个电文就是“赫兹”。他长期致力于航海的无线电通讯，并在救援阿非利加号军舰触礁事件中发挥了实

际效用，到 1900 年通信距离已达 45 千米。

(3) 三极管的诞生与电子技术的突破早期的无线电通讯，由于缺乏相应的电子元件，只能限于短距离的符号通讯，发展受到限制。

1904 年英国工程师弗莱明 (J.A.Fleming, 1849~1945) 利用热电子发射效应，发明了热电子真空二极管，可用来检测无线电信号，有灵敏的检波整流作用。1906 年美国德福雷斯特 (L.deForest, 1873~1961) 制成真空三极管，具有放大与控制作用，并可用于发生高频振荡信号，从而代替了电火花发生器和高频交流发电机，成为无线电技术中最基本、最关键的电真空器件。并为无线电技术由长波向短波发展提供了条件。1906 年圣诞节前夕，美国费森登 (R.A.Fessenden, 1866~1932) 利用 50 千赫发电机作发射机，用微音器直接串入天线实现调制，首次完成用无线电波从波士顿传送语言和音乐的实验，使大西洋航船上的报务员能够听到，创立了现代意义的无线电广播。三极管的运用，大大促进了无线电波的发射和接收。第一次世界大战推动了通讯技术。1913 年美国电工学家阿姆斯特朗 (E.H.Armstrong, 1890~1954) 设计出再生式放大线路，1919 年又设计出超外差式接收机。同时，哈特莱 (R.V.L.Hartley) 等先后改进了振荡电路，无线电广播与收音机迅速发展。1919 年，第一个定时广播电台在英国建成。1920 年，美国匹茨堡建成了第一座商业电台 (KDKA)，第一天播音时把当天总统竞选结果立即告知人们，获得巨大成功。1926 年美国组成世界上第一个全国广播网。在此期间，加拿大、澳大利亚、丹麦、苏、法、英、德、意、日以及墨西哥也都相继建立了无线电台，到 1930 年已经形成全球性的无线电广播系统。

(4) 开发短波区段

早期无线电通讯使用的都是长波，这一方面限于发射设备的频率不太高，另一方面只知道电磁波传播中波的波长越长衰减越小。实际上沿地球表面传播的长波，受天线限制，无法再增大传播距离。而随着电子技术的发展，低频区段已感拥挤不堪，广播和军事的需要，都要求开发短波区段。早在 1900 年，已经有人偶而收到过直视距离之外的短波信号，英国的亥维赛 (O.Heaviside, 1850~1925) 和美国的肯涅利 (A.E.Kennelly, 1861~1939) 认为波长几十米的短波可被高空的电离层反射回来，经多次反射，即可增大传播距离。这一观点到 1924 年被英国物理学家阿普顿 (E.V.Appleton, 1892~1965) 的实验证实和补充。而三极管的产生，又提供了技术条件，于是无线电广播和通讯得以迅速向短波区域发展起来。

美国早在第一次世界大战就开始研究军用短波通讯技术，到 1918 年已研制成功波长为 70 米~150 米的发射接收设备。继之，出现了一代新的电子器件：1921 年美国的赫耳 (A.W.Hull, 1880~1966) 制成大功率微波器件磁控管，可产生几米波长的超短波。1923 年拉文德 (H.J.Rand) 发明

了比三极管更适用于高频的五极管。1933 年阿姆斯特朗发明了调频技术，1939 年发明了适用于超短波放大和振荡的速调管。美国从 1929 年开始采用超短波通讯。到 30 年代以后无线电通讯已进入 10 米以内波长的超短波波段。

(5) 电视与雷达

当实现了用无线电波传播听觉信号以后，人们又试图用来传播视觉信号，这就需要更高的频率，中短波广播一般为 500 千赫，而一般电视频率要几十至几百兆赫，而雷达定位、自动跟踪要求波长更短。光电管、阴极射线管和无线电短波通讯等发明为电视、雷达技术准备了条件。

早在 19 世纪中叶英人巴伊恩 (A. Bain, 1818 ~ 1903) 就发明了一种通过有线电信传递静止图象的机械装置，1913 年考恩 (A. Korn, 1870 ~ 1938) 第一次用无线电通讯从柏林向巴黎传递了画面，但还只是无线电传真的静止图像。1923 年兹沃雷金 (V. K. Zworykin, 1889 ~ 1982) 取得电子显像管专利，到 1933 年又研制成功光电摄像管，至此完成了电视摄像与显像的完全电子化过程，现代电视系统基本成型。至 1939 年 4 月美国无线电公司的全电子电视首先播映，获得巨大成功。

第二次世界大战暂时阻碍了电视的发展，但是超短波、微波技术特别是雷达技术的发展，也推动了电视技术，所以第二次世界大战结束后，电视就进入了大规模实用与普及阶段。广播电视成为有力的宣传教育工具，它使人类文明广泛传播，知识迅速普及，其意义相当于历史上印刷术的发明。

随着电磁波波长越来越短，方向性越好，遇到障碍物后的反射性越强。利用这一性质，通过短电磁波的发射与反射，可以测定障碍物的方位与距离。无线电探察与测距 (Radiodetection and Ranging) 装置，英文缩写为 Radar，简称雷达就是根据这一性质制作的。1935 年英国沃森-瓦特 (R. A. Watson-watt, 1892 ~ 1973) 研制成功 1.5 厘米波的飞机探测雷达——CH 系统，探测距离达 80 千米；于 1938 年建成英国东海岸的防空警戒雷达网，有效距离 200 千米，这一雷达网在 1940 年击败纳粹德国空袭中起了重要作用。接着，美国于 1938 ~ 1939 年先后制成火炮控制雷达、SCR-270 防空雷达，SCR-268 跟踪控制两用雷达，后者可以自动指挥高射炮射击。1941 年，第一部微波雷达研制成功。它们在太平洋对日作战中发挥了很大威力。早期雷达技术尚不成熟，主要是频率低、功率小、精度差。随着电子技术不断改进，例如大功率高频磁控管的发明，天线、微波技术的发展，雷达的作用距离不断增大，鉴别率、分辨率不断提高等等，雷达不仅应用于军事，也广泛应用于国民经济、科学研究和其他一些领域。

微电子技术发展简史

微电子技术是随着集成电路特别是超大规模集成电路发展起来的一门新的技术学科，是微电子学中各项工艺技术（包括系统和电路设计、器件物理、材料制备、工艺技术、自动测试及封装组装等一系列专门技术）的总和。目前，微电子技术与计算机、空间（电视）信息传输、自动控制等结合起来，应用范围十分广阔，它使许多高技术领域的复杂设备向着电子电路系统超小型化、微型化发展，例如，图像处理、遥感技术、语音合成技术、计算机断层扫描诊断、办公室自动化、人工智能、智能机器人、专家系统、知识库、第五代计算机、挂壁电视等等。微电子技术有着功耗低、使用方便、成本低廉、设备简化等优点，是高科技领域中一颗灿烂夺目的明珠。微电子技术的发展与半导体元件应用于电子计算机的过程是紧密相关的。早在 1833 年，法拉第通过实验发现亚硫酸银的电阻率与金属相反，随温度升高反而降低。以后随着固体整流器的发展（1920~1931 年）、金属-半导体接触型整流器及固体物理的发展（1933~1939 年），对半导体的认识与应用越来越深入。二次大战期间，1943 年英国哈福德郡的布列策雷公园建成了英国战时密码破译中心。1945 年底，美国工程师埃克脱（J.P.Eekert, 1919~）和莫奇利（J.W.Mauchly, 1907~1980）一起领导研制成功世界第一台通用电子计算机，该机重 30 吨，有 7 万电阻，18000 个真空管，每 7 分钟要损耗一只管子，机器开动时全城电灯转暗。1947 年，巴丁（J.Bardeen, 1908~）与布喇顿（W.H.Brattain, 1902~）肖克莱（W.B.Shockley, 1910~）三人发明了晶体三极管。用这种晶体管做出的第一台半导体收音机已初步显示了它的威力：它比起电子管来可使音量放大 40 倍，体积缩小到原来的 1/1000，寿命延长 100 倍。和电子管不同，晶体管不是把电子从金属中拉出来，而是让电子在 P-N 结内完成整流、检波、振荡、开关、放大等五大功能。它揭开了微电子技术发展的序幕，为许多电子设备的低功耗、高速度、高效率 and 微型化创造了可能。

第二次世界大战后期，出现了用电阻墨水和银浆按图形在陶瓷衬底上通过网印法制造出电阻阵列和连线，经过腐蚀成批制作成所谓“印刷电路板”，后来还曾设想将小型化的分立元件装在同一管壳内，形成“微模组件”或具有固定功能的电路组件“电子模块”。1958 年 8 月 28 日，美国基尔比（J.Kilby, 1923~）等人利用平面技术制成了第一块集成电路，其中包括 4 个晶体管，6 个阻容元件，这是利用外延、氧化、光刻、扩散、蒸发等工艺制成光敏电阻层，经过照相刻蚀冲洗将这些元件制在一块硅片上，形成微型的整体线路。这是一种混合组件的单元电路集成电路。

所谓外延，就是拉单晶时依次生长 N 区和 P 区，既可无杂质补偿，而

且可精确地控制渗杂和厚度及垂直于生长平面的杂质分布，它可以和扩散等其他工艺结合起来形成各种集成电路工艺。

60年代，由硅平面型晶体管、硅单片集成电路首先发展为硅双极型集成电路、电阻-晶体管逻辑电路，因为逻辑电路多是种类相同的电路，容易集成化。以后，陆续出现了MOS（金属-氧化物-半导体）场效应晶体管、MOS高密度集成电路、单片MOS1024位随机存储器。1970年美国科尔内大学微电子实验所所长沃尔弗（E.Wolf）利用刻蚀办法，在一个针尖上可以容纳一万个有各种功能的分立元件，他称为“小天使”（到1980年，已可容纳100万个“小天使”）。1971年，美国工程师霍夫（M.E.Hoff, 1937~）制成第一块大规模集成电路。他将2250个晶体管作为控制单元和运算单元微化在一粒米大小的硅片上，形成计算机的中央处理单元即微处理器。英特尔公司立即把这种芯片配上存储器等部件，推出了第一台MCS-4微型电子计算机，从而开始了计算机微型化的新阶段。70年代以来，微电子技术由大规模集成电路逐步发展为超大规模集成电路，这主要归功于工艺技术，如：

（1）微细加工技术：利用电子束制版、投影、曝光等。

（2）渗杂：包括扩散工艺，全部用离子注入技术。

（3）多晶硅技术，如化学气相淀积工艺，多层布线，低温加工等，以提高精度为目标。（4）改进硅片质量：芯片面积扩大到 $50\text{mm}^2 \sim 60\text{mm}^2$ ，直径可达 $120\text{mm} \sim 150\text{mm}$ 。每批同时可加工200片~300片。（5）利用计算机进行辅助设计与制造，其中包括器件模拟，电路、布局和布线以及校核、优化等过程，从而获得超大规模集成电路。

近年来超密度芯片发展很快，参见下表：

	1980	1985	1987	
芯片线度	$4 \mu\text{m}$	$2 \mu\text{m}$	$1 \mu\text{m}$	$0.5 \mu\text{m}$
元件数（ $\times 1000$ ）	64	256	1024	4076

随着微电子技术的发展，器件物理、材料科学、测试科学、计算机辅助测试、封装技术、超净室技术等也迅速成长，还有以金属掩蔽蒸发为主的薄膜电路技术、电阻激光修正技术（可使N、CO电阻网络十分精确）、薄膜混合集成、微波集成电路等也发展很快。磁泡、超导器件、光电集成也进展迅速。微细加工技术，目前已达每片 10^6 个~ 10^7 个元件水平，其线度接近于半导体内电子运动的平均波长和平均自由程长度的水平。

主要参考资料

1. 李少白。科学技术史。第1版。武昌：华中工学院出版社，1984。
2. 关士续。科学技术史简编。第1版。哈尔滨：黑龙江科学技术出版社，1984。
3. [美] 希夫勒。二十世纪科学史话。吴鹤年，马德林。北京：科学出版社，1982。
4. 清华大学自然辩证法教研组。科学技术史讲义。北京：清华大学出版社，1982。
5. 上海普陀区红专学院。电光源。上海人民出版社，1976。
6. 复旦大学电光源实验室。电光源原理。上海科学技术出版社，1979。
7. 章名涛。电机学。北京：科学出版社，1977。
8. 汤蕴珍。电机学——机电能量转换。北京：机械工业出版社，1982。
9. [英] 福莱斯特。高技术社会：信息技术革命史话。姚炳虞，郑九振。北京：新华出版社，1991。
10. 郝应其。航空200年。天津：天津科技出版社。1983。
11. 中国大百科全书出版社编辑部。中国大百科全书。航空航天、机械工程、电子学与计算机等卷。北京：中国大百科全书出版社。

二、对物理学发展有贡献的物理学家

墨翟（约前 468 ~ 前 376）

战国时代著名哲学家与科学家，相传墨翟原为宋国人，后长期住在鲁国。对其出身，他自称“翟上无君上之事，下无耕农之难”，表明他不属于王孙贵族，也不是农民、奴隶。他当过手艺人，技艺高明，善于制车、机械及兵器，据《墨子·鲁问》及《墨子·公输》等记载，他曾削木为飞鸢，并与著名的木工大师公输般（即鲁班）比攻守城的技术，在楚王面前九破鲁班的设计。鲁班最后称总有制胜之法。墨子揭穿说：“我知道你是让楚王杀我，但学生禽滑厘等三百人已持我造的武器守在宋城上，”从而止楚攻宋。这一著名故事表明墨子“兼爱”“非攻”“节约”“实用”，具有反映庶民阶层（小生产者）的政治立场及精湛的技艺与军事、政治谋略。墨子以“好学而博”著称。他曾学习儒家学说，因不满其烦琐的“礼”而创立与儒家抗衡的第二大学派，形成严密的墨家集团，穿粗衣草鞋，劳作不休，“量腹而食”，“有力相助”，“有财相分”，“有道相教”，因而“墨门多勇士”。弟子中分为“谈辩”、“说书”与“从事”（工艺）三类，“从事”的一派着重于技术、工艺和科学活动。《墨子》是墨家学派的主要著述，原有 71 篇，现存 53 篇。《墨经》是其重要部分，主要有《经上》《经下》《经说上》《经说下》四篇，其外观及书写形式均与其余各篇不同，据考证，《经上》《经下》共 179 条为墨翟本人的教义，《经说》（上、下）则每条首字都与《经》文之首字相同，是其弟子之说明。由于辗转传抄，文字颠倒错乱，义训难明，各种版本及注家争论甚多，近世形成所谓“墨学”。其中，涉及自然哲学、力学、光学及数学的约四十余条，涉及认识论、方法论、逻辑学的约六十余条。是我国最早比较完整的自然哲学和自然科学文献。

《墨经》中的自然哲学条文如：“端，体之无厚而最前者也”，“端，是无间也”（即认为端是物质无空隙的最小原始单位）；对宇宙、时空也有明确定义：“宇（空间），弥异所也，蒙东西南北”；“久（时间），弥异时也”；“久，合古今旦暮”；对运动与时空关系的认识有：“宇域徙，说在长宇久”（空间位置变动，发生在一定间隔的空间与时间内；“动，域徙也”（运动就是位置变动）；“偏，际徙”（物体边沿移动则为转动），等等。

关于光学八条和力学九条的科学阐释，首推钱临照先生在本世纪 40 年代初在《纪念李石曾先生六十寿辰文集》中发表的《释墨经中光学力学诸条》。光学八条（参见“中国古代对光的认识”），前五条论及光、物、影的关系，后三条为平面镜、凹球面镜及凸球面镜的物像关系。严谨有序，

浑然一体，实在难得。力学诸条中有很意义的是：把力定义为“力，刑（形）之所以奋也”，以及杠杆原理：“衡，加重于其一旁，必捶，权（秤砣）、重相若也。相衡，则本短标长，两加焉，重相若，则标必下，标得权也”等条。说明当时对力与运动的关系已有所认识，并能正确地描述不等臂秤。

此外，《墨经》中还有涉及数学的 17 条（如“倍，为二也”，“圆，一中同长也”等），《墨子·备穴》还载有城防空穴声学效应的条文。墨子的认识论以其“三表”（即三法）为代表：一是“上本乎古者圣王之事”，二是“下原察百姓耳目之实”（即以人民的生活实践为源），三是“有用”，即“观其中国家人民之利。”（《非命上》），但在《非命中》却把上述第二条删去，换为“天鬼之志”，这说明了墨家及其弟子的朴素唯物论中曾杂有某些宗教成分。

德谟克利特（Democritus，约前 460～前 370）

古希腊唯物主义的主要代表，原子论的创始人之一。马克思和恩格斯称他为“经验的自然科学家和希腊人中第一个百科全书式的学者”。生于希腊北部色雷斯（Thrace）的阿季拉（Abdera），可能受教于流浪在希腊本土讲学的留基伯（Leucippus），两人共同创立了原子论，而主要是由德谟克利特完成。他到过巴比伦、波斯、埃及、印度。他的著作据说涉及数学、天文学、医学、心理学、伦理学、哲学、音乐、技术等 50 多种，希腊人民为了纪念他，给他树了铜像。

他提出，“一切事物的始基是原子和虚空”。原子（atom）一词来源于希腊文，原意是不能再分割的微粒。他用原子的形状、次序、位置的区别来解释物的不同：“形态属于形状，相互关系属于次序，方向属于位置，比如 A 和 N 是形状不同，AN 和 NA 是次序不同，H 和 I 是位置不同。”不同的原子以不同的情况相结合就形成了千差万别的物。他还认为：“太阳是白热的铁或一块燃烧着的石头”，“月亮，当直接面对着太阳时，它就被照亮了，以致就像它自己在发光一样”，“月亮是有许多山脉和山谷的”，“银河的光是由无数很小的星所发出的，这些星因为紧紧挤在一堆而彼此照耀着”。他还有许多哲理性名言，如“靠嘴而丝毫不实干的人，是虚伪和假仁假义的”等。

亚里士多德（Aristotle，前 384～前 322）

古希腊著名的哲学家、思想家。他出生于希腊北部斯塔吉拉镇的世代医家，父亲是马其顿国王的御医。17 岁时进入雅典柏拉图学园潜心研习达 20 年之久。从 37 岁发起亚里士多德开始游学和考察，42 岁时受聘为太子亚历山大的教师。6 年后亚历山大大帝即位，拨巨款由亚里士多德在雅典

东北郊的吕克昂建立当时的文化中心吕克昂学园，常以和学生一起散步的形式进行教学，学生有时多达 2000 人，后世称为“逍遥学派”，学园中还设有自然历史博物馆，收藏各种书稿和地图的图书馆等。他还领导学生进行广泛的自然考察和社会调查（如希腊 158 个城邦调查）。他十分重视数学和辩证（辩证法），首先提出归纳、演绎两类方法。这些都反映了他的治学作风和方法。他的多种著作经其弟子传抄注释和整理而流传下来。

亚里士多德在自然哲学、逻辑学、科学分类学、天文学、生物学、历史、修辞学、伦理学、政治学等方面都有不少贡献。他生活在古希腊文化的鼎盛时期，他的著作集当时西方思想和文化的大成，对后世产生了重大影响。他最早从纷繁的自然现象中找寻普遍规律并把它们命名为“物理学”，对他在物理学发展史上的功、过应有一个客观的评价。他在物理学方面的著作有《物理学》、《天论》、《起源与衰灭》、《气象学》等。另有一本《力学问题》是后人伪作。他所命名的《物理学》原意是“自然哲学”，是以物质本原和物质（自然）运动及其与时、空、周围物体关系为研究对象的独立学科。这一对象的确定至今没有过时。

在物理学这一开创性的领域中，他还有以下一些贡献：

（1）他首先提出物质、空间、时间、运动等的定义及其相互关系等一系列基本理论问题。如认为“离开事物而独立存在的运动是没有的”。他的物质、运动、时、空紧密相联的观点很有价值，如认为空间位置要以存在两个物体为前提；“时间是运动的数目，或者本身是一种运动”，等等。

（2）他提出了空间、时间与物质的连续性即无限可分性问题，与原子论即断续性观点相对立，揭开了物质连续性与离散性的历史争论的序幕。例如他认为“没有孤立存在的真空。”

（3）他在研究方法上强调对近身事物的观察。他说：“通常的研究路线是从我们说来较为易知和明白的东西进到就自然来说较为明白和易知的东西”。同时强调思想逻辑和数学法则的作用，以确定“事物的本原”。他除了提出归纳、演绎形式的三段论法，还提出同一律、矛盾律和排中律等逻辑推理思维的基本规律，强调要在观察物质世界的基础上以数学为模型建立严格的逻辑证明体系即科学体系，并分别提出命题、定义、结论……等。他说“前提必须是真的，第一性的而且是可能论证的”。显然，建立在日常感觉经验上的普遍性哲学推理，恰恰忽视了生产经验与探索性实验这一物理学的根本认识途径，这是亚里士多德的历史局限，但作为第一个科学方法的倡导者是功不可没的。

（4）在数学运用方面，他提出运动之间可以相互比量即运动的比例问题，并建立了自由下落运动与强迫运动两个比例定律（见“亚里士多德关于运动的理论”条目），为定量研究物理现象提出了供后人讨论的论题。应该看到，错误的比例定量研究要比空谈哲理更能促进科学的发展。

此外，他还通过月食中的地影，通过旅行者观察到的星座出没规律等，证明地球是圆形。他还分析过虹霓及人的视觉问题，研究过管长与乐音的关系，等等。

亚里士多德物理学理论中最大的糟粕主要表现为，他提出了物质运动变化的四因说。即企图用质料因、形式因、目的因和动力因（推动者）这“四因”从形式上来概括解释万物的运动变化。同时他在总结过去自然科学的成果时抛弃了日心说和原子论；发展了地心说特别是水、火、气、土、以太诸元素及其“天然位置”说。这就为后来僧侣主义的吹捧埋下伏笔，成了后来近代科学发展的障碍。亚里士多德的多方面成就中物理学是他最不成功的一个方面，尽管在他的运动学说中存在许多缺欠，但他在物理学和哲学等方面的创造性贡献是功不可没的。他热爱真理。他曾对他的老师柏拉图的“理念论”提出批评，这是对“一般唯心主义的批评”（列宁）。柏拉图为此曾说过，他“就像一匹连自己的妈妈都要踢上几脚的小马驹。”而亚里士多德的回答是：“吾爱吾师，吾尤爱真理”这句名言。列宁在《哲学笔记》中说过：“僧侣主义扼杀了亚里士多德学说中活的东西，而使僵化的东西永存。”我们应对他本人的历史功过与局限，对他学说中的精华与糟粕，对他本人的缺点和宗教势力对他的吹捧与利用加以科学的分析。

阿基米德（Archimedes，约前 287 ~ 前 212）

古希腊著名的力学家、数学家和发明家。他第一个把精巧的技术实践和严密的数学（欧几里德几何学）推理结合起来，奠定了静力学和流体静力学的基础。

他出生于西西里岛的叙拉古，父亲是一个天文学家。他 11 岁时被送往埃及文化中心的亚历山大城，在欧几里德创办的数学学校学习，他的老师有欧几里德的弟子卡农等名师。他不但常常几天不离博物馆和图书馆，尽情地吸收着“几何的黄金时代”的各种成果，学习那些严格而抽象的思维方法，还自制了许多仪器和机械，包括螺旋提水器（长圆筒中的木螺杆被摇动时可用来灌溉）、天球仪等。在他学习天文学时，发明了用水力推动的星球仪，能模拟日月星辰的运行和日月食的产生。他的数学成果也很多。

公元前 240 年，他担任了国王亥厄洛的顾问。这时，他用数学方法研究了许多有关造船、机械、建筑和兵工技术的实际问题，并且从物理学上第一次引入了物体重心的概念，研究了各种形状物体重心的求法。严格证明了杠杆定律，引入了力矩的概念。他用数学广泛而严格地研究了各种形状物体的浮沉条件和稳定原理，在《论浮体》一书中严格证明了后来以他命名的阿基米德定律。关于这两个定律的证明，2000 年后的拉格朗日在他的《分析力学》一书中提到，许多大科学家如伽利略、斯蒂文、惠更斯等，都企图加以改进，但“要想破坏阿基米德证明的简洁，从准确的角度来说

他们几乎完全失败了”，包括他本人在内。

据有关历史资料记载，阿基米德还著有《屈光学》一书，该书涉及反射、折射及各种镜面反射现象与大气光学现象，可惜此书未流传下来。

关于阿基米德的传说很多。例如，根据 Vitruvius 在《De architectura》一书中的描述，亥厄洛国王为了显示自己的高贵，限期令工匠做一顶纯金的皇冠。面对金光灿灿、雕刻精巧、重量相符的皇冠，一位大臣建议加以检验。阿基米德为此日夜思考几天，不得要领。一天，当他偶然把身体浸入澡盆洗澡时，发现从盆中溢出的水量恰好等于自己身体浸入部分的水量，立时给他提示出一种解决问题的方法，于是他毫不迟疑，跃出澡盆，大声喊着：我知道了！就赤身露体地奔回了家。还有一份记载说到国王希望知道小力如何能搬动重物时，阿基米德“将皇家商船队的一支三桅大船系好，这支大船曾由许多人费力地拖上岸来。他让旅客们和货物照常上船，他在远处安然坐定，轻轻地拉动他的组合滑轮，将船拉向自己，平滑得像在水中行驶一样”。亚历山大城的 Pappus 文集中还引用了他的名言：“给我一个立足点，我可以移动地球。”

当罗马将军马塞努斯率大军进攻叙拉古时，70 多岁的阿基米德创造了许多兵工机械协助抗拒强敌 3 年之久，包括各种抛石机，钩船机等。据说他还设计和制造了由许多镜片组成的巨大无比的凹形金属镜（凹面镜），可以把远处的舰只利用聚集的太阳光烧掉。牛顿在进行了一系列凹镜试验后曾说，阿基米德的发明“并不是不可能的。”城堡的陷落据说是由于欢庆节日的疏忽而造成的。阿基米德正在深思数学问题时被罗马士兵杀死。这些众多的传奇性传说说明阿基米德不是一个书斋式的科学家，他的突出特点是严密的数学理论和娴熟巧妙的技术实践的结合。

王充（27～约 97）

东汉自然哲学家。会稽上虞（今属浙江）人，字仲任，《后汉书·王充传》说他年幼时“家贫无书，尝游洛阳市肆，阅所卖书，一见辄能诵忆，遂博通众流百家之言”。他曾从师班彪，作过一些幕僚式的小官，后自动辞职。终身仕途不通，是由于不计个人的穷、通、利、达，而锐意于追求真理：“居贫苦而志不倦”，“甘闻异言，考证虚实”。他对于当时的儒生、官府、讪谤之说等等均有与众不同的看法，坚持了许多唯物主义观点，这集中表现在他晚年的《论衡》一书中。他勇敢地写出《问孔》《刺孟》《非韩》等篇，嘲笑那些“好信师而是古，以为圣贤所言皆无非”的儒生。他客观地描述了许多自然现象，反对鬼神之说，在我国自然哲学史中留下许多充满鲜明物理思想的宝贵遗产。

在宇宙观方面，他认为“天地，含气之自然也”（《谈天篇》），“地固将自动，星固将自徙”，主张用“气”来描述宇宙现象，反对“造物主”的说法，认为“如谓天地为之，为之宜用乎，天地安得万万千千乎，并为

千千万万物乎”？（《自然篇》）。

在力学方面，他在《论衡·效力篇》将外力与轻重物运动的关系清楚地描写为：“金铁在地，焱（yán）风不能动，毛芥在其间，飞扬千里”，“车行于陆，船行于沟，其满而重者行迟，空而轻者行疾。”“任重，其取进疾速，难矣哉”。这后一句是含有难改变物体疾速（速度）的意思。又说“力重不能自称，须人乃举”，“古之多力者，身能负荷千钧，手能决角伸钩，使之自举，不能离地”。“小石附于山，山力能得持之；在沙丘之间，小石轻微，亦能自安。至于大石……山不能持，处危峭之际，则必崩坠……”这对于内力与外力的比较说得比较清楚。在力和功的论述上也有一些有启发的东西，但可惜后人未加发展。

对于声的形成与传播，王充在《论死篇》中用口、舌、喉之间“气”的运动与箫笙发声比较，在《变虚篇》中又把鱼在水中的振动及其传播（“水荡”）与人在天地之间活动引起的“气变”类比，包括振源大小与传播远近的关系（参见“中国古代在声学上的贡献”），其振动与波动的思想是宝贵的。

王充最早记载了静电、静磁现象和指南针。在《乱龙篇》中他对比两种现象并用“气”说明对他类物体不适用：“顿牟（玳瑁，海龟类动物的壳）掇芥、慈石引针，皆以为真是，不假他类。他类肖似，不能掇取者，何也？气性异殊，不能相感动也”。在《雷虚篇》中他用“气”“阴阳分争”，“引起激射”，“激射为毒，中人辄死，中木木折，中屋屋坏，人在木下屋间，偶中而死矣”，驳斥了天怒雷击的迷信。他还用斗水扑高温冶铸之火引起同样雷声的现象来证明。同时还用五种方法证明“雷者火也”：一是在“中雷而死”的尸体上可闻到“须发烧焦”与“皮肤灼烧”的“火气”；二是将雷击过的“雷烧石”（赤色）“投入井中，石焦井寒，激声大鸣，若雷之状”；三是人因受风寒引起腹中“温寒分争”，也“激气雷鸣”；四是“当雷之时，电光时见，大若火之耀”；五是雷击时引起房屋、草木燃烧。“夫论雷之为火有五验，言雷为天怒无一效”。可惜这种根据观察到的事物来验证与确立观点的科学方法，在中国当时社会条件下没能广泛流传。

在热学方面他的观点也比较明确：（1）用“气”来解释热“远近有差”现象（《寒温篇》）。（2）用大气热现象说明雨露云的成因，并驳斥“雨从天降”的经验或神秘观念（参见“中国古代的热学知识”），在《说日篇》《感虚篇》均有论述。如：“夏日则雨水，冬日天寒则雨凝而为雪，皆由云气发于丘山，不从天上降集于地。”他还解释带谷子的雨这种奇景是由于“疾风暴起，吹扬与之俱飞，风衰谷集，坠于中国，谓之雨谷”。（3）关于热量，他在《感虚篇》中举出了“一尺之冰”还不能使庖厨终夜得寒，因为只有“微小之感”。寒不积累到一定时候不会降霜，温不继续

若干日“冰不释”。有一个定性的比较观念。(4)关于热运动的方向性问题也有所论述,见《是应》篇驳所谓“不摇自扇,扇暑自凉”的说法,“若能如此,则能使五谷自生,不须人为之也……何不使饭自蒸于甑,火自燃于灶乎?”他还举出“不能使灭火复燃”“不能令死人复见”(《论死篇》),又说天也不能刮“反风以立大木”,“天能拔木,不能复起”(《感类篇》)。这种事物发展总有一定方向性,许多实际过程是不可逆的思想也是难能可贵,接触到热力学第二定律的思想。(5)关于热的产生,王充统一用“气”来解释:“日,气也”,“夫天亦远,使其为气,则与日月同,使其为体,则与金石同”(《感虚篇》),他还用阴阳气解释寒暑:“阳气温,故温气应之……阴气寒,故寒气应之”。

在光学上,他在《率性篇》中记有“消炼五石”,铸成阳燧以“取火于天”,这可能是我国制造玻璃透镜取火的最早记载,并且磨拭刀剑之“钩月”,“仰以向日,亦得火焉”,后者是用金属凹镜向日取火。

纵观上述,可见近两千年前,王充在《论衡》一书中对于物理学各种知识的记载是相当深入、明确和多方面的,但他这本书却被斥之为异端而不能为当时更多学者继续研究。他在书末《自纪篇》中叹曰:“仕路隔绝,志穷无为”,“发白齿落,日月逾迈”,“贫无供养,志不娱快。”“乃作养性之书”,“孰使留之?”

张衡(78~139)

东汉天文学家、机械学家、文学家。字平子,出生于东汉初年的南阳,祖父张堪曾任成都及渔阳太守。父早丧,家境衰落,生活较清贫。他读书不但刻苦认真,而且有自己的独立见解和方法,其友崔瑗赞他日夜苦读:“如

川之逝,不舍昼夜”。17岁时,他决定出外游历访师求学,从实际生活中求真知,而不是寻求功名,因此他不去京都洛阳,而去故都长安及其周围地区(当时叫“三辅”,最富庶的学术中心),调查民俗市情。入洛阳后五、六年,他不像一般儒生那样钻研经义,而是访问名家名师,多闻博学,个别求教,批判地接受各家学说,结果真正达到“通五经、贯六艺”的程度。他曾说过:“不患位之不尊,而患德之不崇,不耻禄之不伙,而耻智之不博”(《应闲》)。张衡年轻时以其优美的文才辞赋(如《温泉赋》,花了十年写成的《二京赋》《南都赋》等等)闻名,他不仅歌颂“阳春三月、百草萋萋”,颂扬东汉初期的国势兴隆,而且也鞭斥官僚地主贵族骄奢贪婪、昏庸腐朽,“忘民怨之为仇,好殫物以穷宠”,指出“夫水所以载舟,亦可以覆舟。”23岁时(公元100年),应故乡南阳太守鲍德再三邀请,他担任其助理“主簿”,(办理往来文件),协助兴修水利,

修建学舍。后又复归田园，34岁时汉安帝征诏天下名士，被荐为尚书台郎中（起草文书）。以后先后担任掌管历法、天象、祀辰的“太史令”、“公车司马令”（贡物、宫殿、往来诸事）、侍中、河间太守、尚书等职。但他忧国伤时，嫉世愤俗，请求解甲归田而不得，反对迷信图讖而被排挤。公元139年病逝于洛阳。

张衡从三十多岁起兴趣逐渐转到哲学与自然科学特别是天文、宇宙、历法、数学、机械方面来。其中扬雄（公元前53~公元18年）的《太玄经》给了他重大影响。《太玄经》与《易经》格式类似，涉及古代关于宇宙天算等诸多哲学观点。人们以为学习它是“空自苦”，张衡却由喜爱、精读、到写出《太玄经注解》。《灵宪》，画出《太玄图》，晚年还写了《太玄赋》。他主张“有循而体自然”，把宇宙自然作为客观存在的体而循之，他企图融儒、道、墨、阴阳各家之学说于“玄训”之中，这种观点在当时汉武帝“罢黜百家、独尊儒术”后的情况下是很难得的。

在天文学的理论与实践方面。他在当时盖天与浑天说之争中明确认为浑天说（“天浑然而圆，地在其中”）比盖天说（“天圆地方、天如盖笠，地如棋盘，日月星辰附盖而转动”）切合日月星辰的运行规律。他还把天球与宇宙分开；宇宙是无限的（“宇之表无极、宙之端无穷”），是日月众星以外“未知”或“知”的东西（“自此而往者，未知或知也，未知或知者，宇宙之谓也”）。这些都是《灵宪》中的看法。对于行星运动规律（包括周期、“留”、“逆行”），他认为“近天则迟，远天则速，行则屈，屈则留回，逆则迟，返于天也”即用行星离天（或地）之远近决定视运动的快慢停留或逆行，这一解释比托勒密体系自然得多。张衡对于月相与日、月食的成因也有比较系统的解释，认为日如火，且如水，“火则（对）外（发）光，水则含景（影），故月光生于日之所照，魄（月亏）生于日之所蔽。”向日则光盈，就日（被日挡住）则光尽，“当日之冲（满月时），光常不合者，蔽于地也，是谓暗虚……遇月则食”。

张衡根据他的浑天说观点，创制了能较准确地测定天象的浑天仪¹。他先用竹篾试编成仪器模型（“小浑”），然后用铜铸为正式浑天仪，直径0.465尺，刻28宿，“分赤道黄道为二十四气”。用漏壶滴出的水带动齿轮使浑象的转动与地球的周日运动相合，可以将天象准确地表示出来。当时的名学者蔡邕观后叹曰：“愿终生卧于浑天象中！”可惜这一仪器到魏晋后不知下落。这种水运浑天仪实际上是世界上最早的天文钟。它的制造反映了当时我国在冶金、机械、时间测量、水力学各方面的高度成就。

张衡精巧的机械设计和制造，特别是他利用物理原理测出地震方位的成就集中表现在公元132年制成的“地动仪”中，一般书上都有记载和插图，这里应指出几点：（1）历史背景：东汉期间地震频繁，《后汉书·五行志》记载公元92~125年三十多年就有26次较大地震，其中119年连续

两次，波及京师及 42 个郡，损失很大，人们以为神怒。“地动仪”的发明用事实证明地震可以测知。公元 138 年“尝一龙发觉而地不觉动，京都学者咸怪其无征，后数日驿至，果地震陇西，于是皆服其妙，自此以后，乃令史官记地动所方起。”（《后汉书·张衡传》）。（2）地动仪现今通行的复原模型是王振铎按《后汉书·张衡传》89 卷 1909 页模拟的。其中“以精铜制成，圆径八尺，含蓄隆起形似酒尊”，“外有八龙，首衔铜丸，下有蟾蜍，张口承之”“如有地动，尊则振，龙机发，吐丸而蟾蜍衔之”，“虽一龙发机而七首不动”，这些外观描写比较清楚，但内部机制如“中有都柱，傍行八道”“其牙巧机制，皆隐在尊中”却值得推敲。南北朝信都芳《器准》，隋初临孝恭《地动铜仪经》可惜都已失传。有人对都柱倒立倾侧，能否准确确定出震源方位提出质疑，看来还需进一步研究。

（3）张衡的地动仪是世界史料中最早的记载，据估算，它能记载烈度三级左右的地震，震源较远，有较大的精度。国外在公元 13 世纪古波斯才有类似仪器在马拉哈天文台出现，欧洲在 18 世纪才利用水银溢出法记录地震。

（4）“候风”是另一种预报风向与风力的仪器。《三辅黄图》在张衡浑仪后单讲了所谓“相风铜鸟，遇风乃动”，与地动仪一起设在观象的灵台上，而国外风信鸽出现在 12 世纪。张衡的伟大才能和正直在封建社会并不能顺利施展，甚至受到诽谤讥讽，他说：“时天下渐弊，郁郁不得志”（《四愁诗序》）“欲巧笑以千媚兮，非余心之所赏”（《思玄赋》）。曾写《归田赋》以辞官。解放后 1956 年重修了张衡在河南南阳的坟墓及后面的“平子读书台”，郭沫若在墓碑上题曰：“如此全面发展之人物，在世界史中亦所罕见。万祀千龄，令人景仰。”

托勒密 (Claudius Ptolemaeus, 约 90 ~ 168)

古希腊天文学家、地理学家和光学家，相传他生于埃及一个希腊化城市赫勒热斯蒂克。公元年至 151 年，他在亚历山大城进行天文观测。他总结了希腊古天文学的成就，写成《天文学大成》十三卷。其中确定了一年的持续时间，编制了星表，说明旋进、折射引起的修正，给出日月食的计算方法等。他利用希腊天文学家们特别是喜帕恰斯 (Hipparchus, 又译伊巴谷) 的大量观测与研究成果，把各种用偏心圆或小轮体系解释天体运动的地心学说给以系统化的论证，因而后世常称其为托勒密地心体系。这个体系中有偏心轮（地球偏离天体运行的圆轨道的几何中心时的圆周）、本轮、均轮（行星沿小圆圆周运动，小圆的圆心又绕地球作大圆运动，小圆圆周称为本轮，大圆圆周称为均轮）等附加圆。用这种方法解释太阳的速率变化、行星的逆行等由地面观测到的天文现象的体系，当时虽可用于指导航海及计算行星的未来位置，但十分复杂和牵强。托勒密的地心体系学

说，认为天体按照自己固有规律运动，否认上帝的自由意志，在当时是有进步意义的。但以地球为中心的思想符合基督教义的要求，后来被教会所利用，成为神学的理论支柱，在天文学上统治约 1300 多年。

他还著有《光学》五卷，其中第一卷讲述眼与光的关系，第二卷说明可见条件，双眼效应，第三卷讲平面镜与曲面镜的反射及太阳中午与早晚的视径大小问题，第五卷企图找出折射定律，并描述了他的实验（参见“反射定律和折射定律”），讨论了大气折射现象，另外还著有《地理学指南》八卷，是他绘制的世界地图说明书。

沈括（约 1031 ~ 1095）

中国古代科学技术鼎盛时期（北宋）最博学的科学家。字存中，钱塘（今浙江杭州）人。小时勤奋好学，14 岁就读完家中藏书，他随父母到过许多地方，广闻博见，知识丰富。历任沭阳县主簿（县令助理）、太史令，参与过整理盐政，考察水利及任司天监、翰林学士等技术性官职，几乎包办了当时朝廷中的科学事业，如修历法，改良观象仪器，兴水利，制地图，监造军器等。他十分虚心求教，勤于思考，能向一切内行学习，“历访镜工”，“问教坊老乐工”，“问老医”，“凡所到之处，莫不询究，或里巷，或小人，以至士大夫之家，山林隐者，无不求访，及一药一术，皆至诚恳切而得之”，“发明考证，洞悉源流”。例如他三十多岁开始研习数学天文时，就常请教当时的女数学家胡淑修。沈括比她及其丈夫年长十余岁，仍能如此虚心下问，并屡叹曰：“得为男子，吾益友也。”他在天文、历法、数学、物理、地学、生物、化学、医药、水利、兵工、冶金、建筑、文史、乐律等多学科领域，都有很高造诣。有《梦溪笔谈》、《长兴集》、《苏沈良方》等著作（据《宋史·艺文志》记载他的著述有 22 种 155 卷，但不少已散失）。研究中国科学技术史的专家李约瑟誉他为“中国整部科学史最卓越的人物”。沈括十分重视调查、观察、实测、实验，并且要“原其理”，“以理推之”，他说：“耳目能受而不能择，择之者，心也。”他提倡“见简即用，见繁即变，不胶一法”，这也是他取得天文、物理等方面独创性成就的原因之一。他的科学思想受儒、道、元气说和有机自然观等的影响，同时注意核查他人实测中的数据。例如在天文学方面，他详细观察五星运行轨迹（“如柳叶边缘”）和陨石坠落时的情景；为测量极星与北天极的真实距离设计了窥管，每夜 3 次，连续三月，得 200 余图，得出当时极星“离天极三度有余”的粗测结论；作晷漏实验十余年，首次推出冬至日昼夜“百刻有余”，夏至日“不及百刻”的结果。他还设计了“一弹丸，以粉涂其半，侧视之则粉处如钩，对视之则正圆”（《梦溪笔谈》卷七）的演示实验，证明了“月本无光”，“日耀之乃光耳”，以及月相变化的道理。对历代历法的积弊进行改进，推行了比较合理的“奉元

历”，在此基础上又提出了更科学的“十二气历”设想：即以节气定月份，大小月相间的纯阳历。

沈括对指南针进行了深入研究，他把“方家以磁石磨针锋”而得的人工磁化针用来作试验，提出四种装置方法（水浮法，碗沿法，指甲法和单丝悬挂法）并分别评论，指出悬丝法“最善”及具体办法（“独丝、”“粘蜡”），还记载与验证了磁针“常微偏东、不全南也”的磁偏角现象，比西欧记录早 400 年。

在光学方面，沈括对小孔成像、凹镜成像等成倒影（像）的诸种现象进行比较，得出“碍”（焦点）的概念（参见“中国古代对光的认识”），并具体描述了焦点处“大如麻菽，著物则火发”的现象，他称光通过“孔”“碍”成象为“本末相格”之术。他亲自查看了虹的成因而得出“虹两头都垂涧中”的记录，并说当时“自西望东则见”。通过“红光验尸”记录了民间利用新赤油伞滤光验出尸身上的青紫伤痕的方法。对透光镜将背面花纹字迹透现在镜面上的原因也从铸造工艺作了考察：“铸时薄处先冷，唯背文（纹）上差厚（厚度有差别），后冷而铜缩多，文虽在背，而鉴面隐然有迹”。在声学上沈括用纸人来放大琴弦上的共振，以便形象地观察（英国人诺布尔和皮戈特在 500 年后才有类似的琴弦上纸游码试验），还记录了兵士用皮革箭袋作枕时“虚能纳声”的空穴效应，并深入分析了各种乐器制作、制钟等音乐声学问题。

在《梦溪笔谈》中，他还记录了许多宝贵科技资料如《木经》（喻皓）、活字印刷（毕昇），水利施工（合龙方法）等等。

沈括在政治、军事、外交上亦展示了才能。他积极参与王安石变法运动，1075 年曾出使契丹，驳斥其争地要求，1080 年抗击西夏侵略时受连累遭贬，1087 年退居润州（镇江）梦溪园写出《笔谈》巨著。

哥白尼（Nicolaus Copernicus，1473~1543）

波兰天文学家，日心说的创立者，近代天文学的奠基人。“哥白尼”名字的原意表示“谦卑”，反映了他的性格。1473 年 2 月 19 日生于波兰维斯杜拉河畔的托伦。10 岁时父死于瘟疫，由舅父瓦琴洛德主教抚养。上中学时就对天文学发生兴趣，曾帮助老师做过日晷和随同观察星空。诗人卡里马赫对他说：“数学和观测是天文学家的两个法宝”，这话对他影响很深，这也反映了当时的学术传统。哥白尼从 18 岁到 33 岁，就读于波兰克拉科夫大学、意大利波伦亚和帕多瓦大学学习医学、教会法、绘画和天文学等。克拉科夫大学受文艺复兴运动影响最早，新兴资产阶级人文主义和经院哲学两派学生之间的斗争十分激烈，在进步的天文学教授勃鲁采夫斯基的影响下，哥白尼对天文、数学和观测技巧发生极大兴趣，学习越深入，发现托勒密体系存在的问题越多。在意大利时，他访问过手工业中心

纽伦堡的天文仪器工匠，搜读了一切能找到的天文学著作，并随波伦亚大学进步的天文学家诺法拉（Maria de Novara）进行天文观测。24岁时，他和诺法拉共同观测了1497年3月9日月掩星（金牛座 毕宿五），这种现象是托勒密的理论所不能解释的。为了改革陈腐的天文学体系，哥白尼一方面努力吸取古希腊学者们各种著作中的精华。继承前人的成果，另一方面在和同代人的讨论中探索新的真理。哥白尼选择的天文学课题，正好是当时科学要摆脱经院哲学统治的突破口。天文学这一最古老的学科，不仅积累了丰富的观测资料，而且提出了各种理论模型，这些模型直接涉及到人们的宇宙观和哲学思想。大学教授们所讲的托勒密地心体系，虽然建筑在人们的感官证据之上，又合乎《圣经》的古训，但哥白尼说：“人们总习惯于把自己看作是世界的中心，这是一种偏见”。1512年，他定居在弗龙堡作为教堂僧正，以箭楼为宿舍，以平台作为天文台，进行了三十年的潜心研究。1514年教皇里奥十世曾约请哥白尼及各国天文学家协助修历，哥白尼拒绝说：“必须先完成对月亮和太阳运动的研究才有可能修改历法”。为了使自己的新学说符合客观实际，他一方面制造了三弧仪（标出天体距离）、象限仪（测定太阳方位）等简陋仪器，坚持观测，甚至1519~1520战争期间也不例外。他在《天体运行论》中所用的27个实例中有25个是他自己的实测记录，如他测得地月平均距为地球半径的60.30倍（现代值为60.27倍）。同时，他用严密的数学运算来核实自己的理论。1509年、1511年的月食，1512和1518的火星位置，1520年的木星与土星位置等都与他的推算相符。1502~1514间他写了一个关于日心假说的拉丁文提纲。为了对付各种非难和困难，他谨慎地经过三次大修改（1512~1516，1525，1540），直到1543年临终前他才看到《天体运行论》的清样。他说，“罗马诗人霍拉斯第认为作品搁置九年才可问世”，而他的作品却搁置了差不多四个九年！这一巨著所提出的日心说，正如恩格斯所说，是“向神学发出的挑战书”，是“自然科学的独立宣言”。哥白尼开创了人类在宇宙观上的根本变革，揭开了近代自然科学革命的序幕。

朱载堉（1536~1611）

明代杰出的音律学家。明仁宗朱高炽第六代孙，父朱厚烷世袭为郑恭王。朱载堉字伯勤，号句曲山人，出生后被封为世子，青年时自号狂生，山阳酒狂仙客。受父亲影响从小喜爱音律，善于演习天文气象和算经，他制出的乐器，音协节和，“妙有神解”（《河南通志》）。15岁时，父因直言犯明世宗而坐牢削爵。这时载堉愤而“筑土室宫门外，席蒿独处者十九年”（《明史》）。他专心攻读，写成《瑟谱》（1560年）。1567年父复爵，次年才搬出土屋，以后整整20年分别写成《律历融通》《律学新说》《律吕精义》等等，大部分著作收于其近百卷的全集《乐律全书》中，1606

年即 70 岁时，经 15 年 7 次上疏恳辞王爵。“晚节务益著书”，又著《嘉量算经》三卷，《律吕正论》、《圆方勾股图解》、《醒世词》等。1611 年卒后谥端清。朱载堉在音律史上的重大贡献是发现了将音阶调谐成相等音程的数学方法——十二平均律法，他自称为“新法密律”。在朱之前，人们采用三分损益法作为算律调音的方法，但其结果总不能旋宫转调，为了解决这个难题，东西方作了上千年的探索，朱载堉于 1567~1581 年间完成了对“新法密律”的研究，即以 $\sqrt[12]{2}$ 为公比的等比级数形成十二音律，他还用珠算算出 $\sqrt{2}$ 的值：

$\sqrt{2} = 1.414\ 213\ 562\ 373\ 095\ 048801\ 689$ 共 25 位。除了在弦线上提出平均律，他还应用它于律管上。由于管端效应应加改正，他提出以 $\sqrt[24]{2}$ 依次除每一直径的方法来弥补，这是极难得的。因为当时缺乏相应的物理知识，而人的耳朵不易觉察出失真现象。

包含这两项发明在内的《乐律全书》朱载堉在 71 岁时呈献给明神宗，但结果只是“入史馆以备稽考”，被打入冷宫，连明史也无一句记载。但他的成就在传播到西方后受到 H.L.F. Helmholtz (1821~1894) 的称赞：“在中国人中，据说有一个王子叫载堉的，他在旧派音乐家的大反对中，倡导七声音阶，把八度分为十二个半音以及变调的方法，也是这个有天才的和技巧的国家发明的”。这种方法很快在欧洲流行。在我国，清朝乾隆御制《律吕正义后编·乐间》竟历数“新法密率”有“十大罪状”，

“古无此法”，因为他们不了解 $\sqrt[12]{2}$ ，就说他“好为新奇”，责备他“非有义理也，特借勾股之名以欺人耳”，不肯稍微实地试验加以判明，反而还毁弃了他给神宗的《进律书奏疏》。李约瑟认为十二平均律“可以被公正地看作是中国两千年来声学实验与研究的最高成就”，事实上也是我国古代学者在世界物理学史上少有的有定量计算的重大发明，对音乐及人类文明产生了重要影响。此外，他还因准确测定律管容积的需要，用水银代替水来校正量具，并算出水银密度。他还测出过磁偏角（北京，1567~1581），用了《律历融通》中记载的“正方案”（即“利用日影与指南针相较”，并将圆分为“百刻”，日规所指南北方向与指南针的方向之差即为磁偏角），结果是“果指午正之东一刻零三分刻之一。”

〔即 $\left(1\frac{1}{3}/100\right) \times 360^\circ = 4.8^\circ = 4^\circ 48'$ 〕。

此外，他还在乐器制造、天文历法、数学、计量学、舞蹈（舞谱）、绘画、文学等方面有许多贡献。

在科学方法上，他重视实践和实验，也重视数学计算。正当明代理学高谈“天理”“良知”“只在身心上做”之时，他亲手制造定音律的“准”器及多种铜、竹律管，设计大小不等的一套钢挫，种竹并上山采竹，做各

种音律实验，到民间采访收集古乐器，亲自种黍，作以斛量黍的度量衡实验，研究与律管的关系，“以手亲验之”，为判断汉代纬书中“十马尾为一分”是否正确，亲自“选马尾圆实粗大者用之”，“以麪糊涂竹蔑上”。“一一相挨，勿令露空”，证明“适与相合”，而取头发试之，“皆不合矣”。结论是“宁取《易纬》之马尾，不取《说文》之人发”，“信其所信，而疑其所疑”（均见《律学新说》卷三）。他还十分重视数学，认为：“天运无端，惟数可以测其机，天道至玄，因数可以见其妙，理由数显，数自理出，理数可以相倚而不可相违”（《进历书奏疏》），这里把物理与数学的关系说得多么深刻！可惜“千载积弊，一旦辨明，岂不难乎”（《进律书奏疏》）！他的事迹和这种科学精神，应该大大弘扬，也是对青少年进行教育的好教材。

吉伯（William Gilbert，1544~1603）

英国物理学家、医生，近代电学和磁学的先驱者。1544年5月24日生于科尔切斯特。1558年入剑桥圣约翰学院，年毕业，1561年获文学士学位，1564年获文学硕士学位，1569年获医学博士学位，同年成为圣约翰学院高级研究员。1573年定居伦敦行医。1601年成为英国女王伊丽莎白一世的御医，女王去世后，成为詹姆斯一世御医。1603年12月10日在伦敦逝世。

吉伯起先研究化学，1580年转向对磁与电的研究。他受到F·培根的影响蔑视经院哲学，重视实验，是实验科学研究的开拓者之一。他走访海员、魔术师等，以求得对磁石的知识。他采集磁石，并证实了将磁石分为两半后形成两块磁石，以及利用衔铁会使天然磁性加强的现象。他还把一块天然磁石加工成球形，用小铁丝制成带箭头的小磁针，在磁球表面附近进行观察（如图2-2-1），发现小磁针的行为与地球上的指南针的行为完全相同，他利用小磁针的排列方向画出了与地球上的经线很相似的子午线。他把画出的磁子午线在磁球上的两个汇交点叫做“磁极”，发现小磁针对磁球表面倾角的变化情况与地球上的磁倾角的变化情况也相同。因此得出了结论“地球是个大磁体”。他还把实验用的磁球称为“小地球”。

吉伯猜想，既然“磁的效能从一个磁体出发向四面八方涌向周围”，那么磁石、地球乃至天体（太阳、月亮等）也能将磁作用扩展到周围空间。他支持哥白尼的日心说，并认为“地球凭借地磁的原动力而转动”，即维持行星轨道运动和地球自转的都是由于磁性，这对后来的开普勒有很大启发。

吉伯进行了许多实验，发现许多物体经摩擦后都具有吸引轻小物体的作用。为把这种作用与磁作用加以区别，他借用希腊文“琥珀”词根，引入了“起电物体”“电力”“电吸引”等术语。他受指南针启发，用简单

的矢状指针自制了验电器，从而发现：琥珀、宝石、玻璃、硫磺、水晶石、树脂等被摩擦后能吸引轻物体，并使指针转动，而经摩擦后的金属不能使指针转动，他把金属叫做非电体；火焰可使电性消失，摩擦后又重新获得。他用带电体向周围发出电素的说法来解释电的吸引作用。在实验研究的基础上，他提出电现象与磁现象具有截然不同的性质：磁性质是磁体本身的性质，电来源于摩擦；磁力只对少数金属有作用，电力是普遍的，可吸引任何轻物体；磁既有吸引又有排斥作用，而电只有吸引作用（当时他是这么认为的）；磁有两个吸引区域，而电只有一个中心区；磁体作用不受中间纸片亚麻布等影响，而电的作用是受中间物影响的；磁力在水中不消失而电力消失等等。这些看法却又导致后来相当长时间人们把电与磁截然分开。他的主要著作作为1600年出版的《论磁性、磁体和巨大地磁体》。全书分为6篇，这是他大约17年的研究结晶，包括前述各项成果，记录了600余个实验，还叙述了磁的历史及五种磁运动。第二篇中有一章叙述了电的实验。伽利略称它“伟大到令人妒忌的程度”，这本书堪称物理学史上第一部系统阐述磁学的科学专著。

在CGS单位制中，曾规定以吉伯为磁通势单位，用以纪念这位磁学的先驱者。

第谷 (Tycho Brahe, 1546 ~ 1601)

丹麦天文学家。生于克努兹斯图普（今瑞典）。收养他的叔父1559、1562年送他去哥本哈根大学、莱比锡大学学习法律，律师在当时很有社会地位，但他却对于天文观测有强烈爱好。14岁时他就对于日食预报的实现（1560年8月21日）十分惊奇，1563年他作了第一次天文记录——木星合土星。1572年11月11日，他发现在仙后座中有一颗很亮的新星，从此他连续十几个月观察这颗星从明亮到消失的过程，并用仪器定位确证是恒星（后称第谷星，是银河系一颗超新星），这打破了历来“恒星不变”的学说。此后他游学于欧洲各国向天文学家请教。

1576年他接受了丹麦国王腓德烈二世的赠予和十万金币的资助，在赫芬岛建立了一座当时最大的天文堡，该天文堡由他领导进行系统观测20多年。他身心高度集中，每天晚上坚持观测，认真做好记录。他一生的奋斗目标就是提高观测的精确性，终身坚持准确细致的实地观测。他不断改进天文仪器，使其加大加重加稳，有的置于地平面之下以避免风的影响，从而增加了读数的长期可靠性与标度的精确性。他还仔细确定了大气折射等引起的误差改正量等等。他的观测结果一般误差不超过0.5角分（即0.5'），最多为2角分，比哥白尼的准确20倍，几乎达到望远镜出现前的肉眼观测极限。他曾说过：“我的看法是不必引用权威，而是靠清晰的判断和正确的结论，宁可建立在自己的经验上，而不是建立在某人的权威上。”

据说第谷对那些王公贵族游览式的参观常常拒而不见，导致后来继位的新国王不再支持他，甚至组织委员会污蔑他“观测结果错误，有损丹麦民族的道德和精神。”由于第谷的声望，1599年，奥地利国王鲁道夫二世请他另建一个邦拉基堡天文台。1600年，他邀请开普勒当助手，第二年去世前把毕生的观测材料（包括对700多颗恒星的观测）赠给开普勒，要他完成编制1000颗星表（鲁道夫星表）的任务。第谷的观测为开普勒发现行星运动定律作了准备。在西方，第谷是把彗星看作天体的第一人。在第谷以前，因受亚里士多德影响，把彗星看成是地球大气层内的燃烧现象。第谷根据对1577年大彗星的系列观测认为彗星这一天体比月球远得多，而且穿越金星、太阳和火星，从而明确否定了托勒密体系中那种“坚硬无球层”的概念。但他由于没有测出恒星周年视差而主张“行星绕日”而“日月绕地”的观点。这一观点在欧洲没有得到任何响应。但明末清初西方传教士帮助中国修历法时，带来的却是这一方案，而我国历法一般说来原来就比西欧要准确得多。这实在是一种历史的讽刺。

布鲁诺（Giordano Bruno, 1548~1600）

意大利思想家。他出生于那不勒斯附近的诺拉镇。17岁进入圣多米尼加修道院，但他非常拥护哥白尼的《天体运行论》。28岁时，因反对罗马教会的腐朽制度而离开修道院，流亡西欧，曾用讲演、讲课、文章等不同形式反对地心说，宣扬新思想。他认为：“为真理而斗争是人生最大的乐趣。”1592年，布鲁诺被骗回威尼斯并遭逮捕，在囚室八年中他英勇不屈，据1599年10月21日的档案记载，布鲁诺宣布无可招供，他没有做任何可以反悔的事情。他说：“在真理面前，我半步也不退让！”最后以“异端分子和异端分子的老师”的罪名，于1600年2月17日被烧死在罗马鲜花广场。后人为纪念这位坚强不屈的学者，于1889年在鲜花广场上树起布鲁诺铜像。他的主要著作有《论无限宇宙和世界》、《论原因、本原和同一》、《诺亚方舟》等。在《论无限宇宙和世界》一书中，他发展了哥白尼的宇宙结构，认为宇宙是无限的（“宇宙是无限大的，其中的各个世界是无数的”），太阳是众多的（“恒星并不是镶嵌在天穹上的金灯，而是跟太阳一样大、一样亮的太阳”）等等。

伽利略（Galileo Galilei, 1564~1642）

伟大的意大利物理学家和天文学家。他开创了以实验事实为基础并具有严密逻辑体系和数学表述形式的近代科学。他为推翻以亚里士多德为旗号的经院哲学对科学的禁锢、改变与加深人类对物质运动和宇宙的科学认识而奋斗了一生，因此被誉为“近代科学之父”。

（1）动手动脑、孜孜不倦

伽利略 1564 年 2 月 15 日生于比萨一个音乐师和数学家之家，从小爱好机械、数学和音乐、诗画，喜欢做水磨、风车、船舶模型。17 岁时虽遵父命入比萨大学学医，但却不顾教授们反对，独自钻研图书馆中的古籍和进行实验。1582 年冬，托斯卡纳公爵的年轻数学教师 O. 里奇 (O. Ricci 1540 ~ 1603) 允许伽利略旁听，使他进入一个新世界。里奇擅长的应用力学与应用数学及生动的讲课，引导他学习水力学、建筑学和工程技术及实验，伽利略在此期间如饥似渴地读了许多古代数学与哲学书籍，阿基米德的数学与实验相结合的方法使他深受感染，他深情地说：“阿基米德是我的老师。”

(2) 善于观察，勤于实验

伽利略对周围世界的多种多样运动特别感兴趣，但他发现“运动的问题这么古老，有意义的研究竟如此可怜。”他的学生维维安尼在《伽利略传》中记叙了 1583 年 19 岁的伽利略在比萨大教堂的情景：

“以特有的好奇心和敏锐性，注视悬挂在教堂最顶端的大吊灯的运动——它的摆动时间在沿大弧、中弧和小弧摆动时是否相同……当大吊灯有规律地摆动时，……他利用自己脉搏的跳动，和自己擅长并熟练运用的音乐节拍……测算，他清楚地得出结论：时间完全一样。他对此仍不满足，回家以后……用两根同样长的线绳各系上一个铅球作自由摆动……他把两个摆拉到偏离竖直线不同的角度，例如 30° 和 10° ，然后同时放手。在同伴的协助下，他看到无论沿长弧和短弧摆动，两个摆在同一时间间隔内的摆动次数准确相等。他又另外做了两个相似的摆，只是摆长不同。他发现，短摆摆动 300 次时，长摆摆动 40 次（均在大角度情况下），在其他摆动角度（如小角度）下它们各自的摆动次数在同一时间间隔内与大角度时完全相同，并且多次重复仍然如此。……他由此得出结论，看来无论对于重物体的快速摆动还是轻物体的慢摆动，空气的阻力几乎不起作用，摆长一定的单摆周期是相同的，与摆幅大小无关。他还看到，摆球的绝对重量或相对比重的大小都引不起周期的明显改变。……只要不专门挑选最轻的材料作摆球，否则它会因空气阻力太大而很快静止下来。”

伽利略对偶然机遇下的发现，不但做了多次实测，还考虑到振幅、周期、绳长、阻力、重量、材料等因素，他还利用绳长的调节和标度作成了第一件实用仪器——脉搏计。1585 年因家贫退学，回到佛罗伦萨，担任了家庭教师并努力自学。他从学习阿基米德《论浮体》及杠杆定律和称金冠的故事中得到启示。自己用简单的演示证明了一定质量的物体受到的浮力与物体的形状无关，只与比重有关。他利用纯金、银的重量与体积列表后刻在秤上，用待测合金制品去称量时就能快速读出金银的成色。这种“浮力天平”用于金银交易十分方便。1586 年他写了第一篇论文《小天平》记述这一小制作。1589 年他又结合数学计算和实验写了关于几种固体重心计

算法的论文。这些成就使他于 1589 年被聘为比萨大学教授，1592 年起移居到威尼斯任帕多瓦大学教授，开始了他一生的黄金时代。

在帕多瓦大学，他为了帮助医生测定病人的热度做成了第一个温度计（图 2-2-2），这是一种开放式的液体温度计，利用带色的水或酒精作为测温物质，这实际上是温度计与气压计的雏形，利用气体的热胀冷缩性质通过含液玻璃管把温度作为一种客观物理量来测量。

伽利略认为：“神奇的艺术蕴藏在琐细和幼稚的事物中，致力于伟大的发明要从最微贱的开始”，“我深深懂得，只要一次实验或确证，就足以推翻所有可能的理由”。伽利略不愧是实验科学的奠基人。

（3）破除迷信 闯出新路

伽利略认真读过亚里士多德的《物理学》等著作，认为其中许多是错误的。他反对屈从于亚里士多德的权威，嘲笑那些“坚持亚里士多德的一词一句”的书呆子。他认为那些只会背诵别人词句的人不能叫哲学家，而只能叫“记忆学家”或“背诵博士”。他认为：“世界乃是一本打开的活书，”“真正的哲学是写在那本经常在我们眼前打开着的最伟大的书里，这本书是用各种几何图形和数学文字写成的。”

他从小好问，好与师友争辩。他主张“不要靠老师的威望而是靠争辩”来满足自己理智的要求。他反对一些不合理的传统。例如他在比萨大学任教时就坚决反对教授必须穿长袍的旧规，并在学生中传播反对穿长袍的讽刺诗。他深信哥白尼学说的正确，他一针见血地嘲笑那些认为天体不变的人，“那些大捧特捧不灭不变等等的人，只是由于他们渴望永远活下去和害怕死亡。”

伽利略依靠工匠们的实践经验与数学理论的结合，依靠他自己敏锐的观察和大量的实验成果，通过雄辩和事实，粉碎了教会支持的亚里士多德和托勒密思想体系两千多年来对科学的禁锢，在运动理论方面奠定了科学力学的基石（如速度、加速度的引入，相对性原理、惯性定律、落体定律、摆的等时性、运动叠加原理等），而且闯出了一条实验、逻辑思维与数学理论相结合的新路（参见“伽利略的运动理论与科学方法”）。

（4）热爱科学，传播真理

伽利略在帕多瓦自己的家中开办了一个仪器作坊，成批生产多种科学仪器与工具，并利用它们亲自进行实验。1609 年 7 月，他听说荷兰有人发明了供人玩赏的望远镜后，8 月，就根据传闻及折射现象，找到铅管和平凸及平凹透镜，制成第一台 3 倍望远镜，20 天后改进为 9 倍，并在威尼斯的圣马克广场最高塔楼顶层展出数日，轰动一时。11 月，他又制成 20 倍望远镜并用来观察天象，看到“月明如镜”的月球上竟是凸凹不平，山峦迭起，他还系统观察木星的四颗卫星。1610 年他将望远镜放大倍数提高到 33（图 2-2-3），同年 3 月发表《星空信使》一书，总结了她的观察成果

并用来有力地驳斥地心说。伽利略发明望远镜可属偶然，但他不断改进设计，成批制造，逐步提高放大倍数，这不是一般学者、工匠或教师所能及的。

伽利略通过望远镜测得太阳黑子的周期性变化与金星的盈亏变化，看到银河中有无数恒星，有力地宣传了日心说。

(5) 时代局限 历史遗案

1615年伽利略受到敌对势力的控告，他虽几经努力，力图挽回局面，但1616年教皇还是下了禁令，禁止他以口头或文字的形式传授或宣传日心说。以后伽利略表面上在禁令下生活，实际上写出了《关于托勒密和哥白尼两大世界体系对话》一书来为哥白尼辩护。该书于1632年出版，当年秋伽利略就遭到严刑下的审讯。1633年6月22日伽利略被迫在悔过书上签字，随后被终身软禁。在软禁期间他又写了《关于两门新科学的对话与数学证明对话集》一书；该书于1638年在荷兰莱顿出版。

伽利略于1642年1月8日病逝。终年78岁。

伽利略坚持科学真理的宣传而又不得不在教廷面前“悔过”，这表明伽利略具有信仰上帝与相信科学真理这样两重性。但他并未放弃对真理的追求，表现在监禁中他系统地总结了一生在静力学平衡和位移运动问题上的研究成果（《两门新科学的对话》），该书奠定了物理学的第一块基石，而这是以焚毁本人其他著作不再涉及哥白尼体系为代价的。科学的蓬勃发展早已证实了伽利略的伟大和教会的谬误，1979年梵蒂冈教皇保罗二世宣布对这一历史判决平反，只是平反来得过迟了。

开普勒 (Johannes Kepler, 1571~1630)

德国天文学家、光学家。1571年月27日生于德国魏尔，父亲早年离家出走，母亲脾气极坏。他是七个月的早产儿，从小体弱多病，四岁时的天花在脸上留下疤痕，猩红热使眼睛受损，高度近视，一只手半残，又瘦又矮。但他勤奋努力，智力过人，一直靠奖学金求学。1587年进入蒂宾根大学学习神学与数学。他是热心宣传哥白尼学说的天文学教授M·麦斯特林的得意门生，1591年取得硕士学位。1594年，应奥地利南部格拉兹的路德派高校之聘讲授数学。1600年被聘请到布拉格近郊的邦拉基堡天文台，任第谷的助手。1601年第谷去世后，开普勒继承了宫廷数学家的职位和第谷未完成的工作。1612年移居到奥地利的林茨，继续研究天文学。晚年生活极度贫困，1630年11月15日，年近花甲的他在索薪途中病逝于雷根斯堡。开普勒在大学学习时就对托勒密和哥白尼体系进行了深入的对比研究，并力求进一步找出宇宙中当时已知的六大行星与太阳之间可以体现“数的和谐”的规律。1596年他的处女作《宇宙的神秘》出版，书中他利用正四面体、正方体、正八面体、正十二面体（12个五边形）、正二十面

体（20个三角形）及六个球体嵌套起来，解释各行星的哥白尼轨道，其误差不超过5%。这一纯粹几何型的宇宙构想虽然没有实际意义，但他的数学才能和丰富的想象力，引起了第谷和伽利略的赞许。开普勒对第谷交办的编制鲁道夫星表的任务，并不是机械地完成它，他自己在视力不强的条件下又做了不少观测工作，如1604年9月30日发现超新星爆发，并做了长达17个月的观测，他把这次观测结果写入了1606年发表的《蛇夫足下的新星》一文中。1607年观测到彗星即后来的哈雷彗星等，他将伽利略望远镜中的凹透镜目镜改为小凸透镜，后人称它为开普勒望远镜。1611年出版《屈光学》一书阐述望远镜理论，还清晰地引入了光线概念，研究了大气折射，提出了在小角度情况下折射角与入射角成正比，提出了光的照度定律、视觉理论等等，这些不仅有利于积累与核实观测资料，也是光学发展的重要收获，笛卡儿曾说：“开普勒是我主要的光学老师，胜过所有人”。

他在天文学研究中面对着如何从大量观测资料中确定行星的准确几何轨道并找出用数学描述行星运动规律的问题。为此，首先要确定地球的真实运动轨道。他从太阳、地球、火星在一条直线上的时刻开始，经过687天火星绕日运行一周回到原处时，根据从地球上看到的太阳和火星的方向（相对于恒星这是可以知道的），就可以确定地球轨道上的一点。处理几组每隔687天测得的数据，就可以准确地确定地球轨道的形状。在继续找寻火星的轨道时，他在一年半时间里经过70多次艰巨的思索、计算，按照“匀速”“圆运动”的传统思路反复比较了托勒密、哥白尼、第谷的理论路径与第谷的实测数据，提出各种偏心圆形轨道的设想方案，但是最好的结果误差仍达8角分之多。而第谷的最大观测误差只有2角分。他把这次艰苦的计算愉快地比喻为“征服与战胜火星的战斗”，他说“这个诡计多端的敌人出乎意料地扯断了我用方程式制成的锁链”，使“我那些由物理因素编成的部队倍受创伤”，它却“逃之夭夭。”这8角分之差便导致了天文学的革新。开普勒忠于实测数据，一丝不苟，以不屈不挠的精神，去找寻新的道路：只有放弃“圆形”“匀速”的传统观念，才能符合行星近日时快、远日时慢的观测事实。醒悟到这一点对开普勒是很不容易的，他用下面的话表达了他把数学定律引入物理学、天文学的艰辛过程：

“考虑和计算这件事差不多弄得我发疯。我实在不能明白为什么竟是椭圆？真是荒谬绝伦！难道解决直径的矛盾问题非得通过椭圆这条路不可吗？……通过推理得出的物理原则必须和经验相吻合，除了承认行星的轨道是完全椭圆之外别无它途。”

在上述工作的基础上，开普勒于1609年在《新天文学》一书中发表了他的第一、第二行星定律（椭圆轨道定律与等面积定律）。但他仍不满足于此而继续寻求各行星之间轨道参数的规律性，经过无数的试验——失败

——再试验 在 1619 年出版的《宇宙的和谐》中他终于发现了第三定律（“周期定律”）。这样，简明的数学结论终于代替了过去的复杂体系模型，使哥白尼日心说取得了彻底胜利。

开普勒通过数学规律和“鲁道夫星表”使宇宙体系获得了一个有序的图景。他还进一步寻求行星绕日体系的形成原因，提出磁力说。他在《哥白尼天文学概论》（1618~1621）一书中根据吉伯的地球是大磁体的观点，提出了自己的设想来解释行星绕日椭圆形轨道的物理原因：从太阳的“运动精灵”处发出轮辐式力线，由于太阳绕其轴自转，这些直的力线对各行星施加一种“推力”。每个行星犹如一块大磁体，其磁轴在空中运行时始终不变，即太阳排斥其中一极而又吸引另一极，这样就形成如图 2-2-4 所示的椭圆轨道。他认为“重力是趋于结合或合并的同类物体之间的相互作用，类似于磁。”这些对于万有引力与重力的物理性质的早期思考，推动了万有引力的研究。

开普勒的一生迭遭病魔、贫穷、宗教冲突和战争的困扰。他是在苦难坎坷中努力奋斗终获成功的。开普勒奋斗的动力是他对天文学真实规律的执著追求和坚韧不拔克服种种困难的献身精神。第谷遗留给他的准确丰富的观测资料和他自己从无数次的失败中找到的正确方法给他提供了成功的条件。

宋应星（1587~?）

明末科学家，字长庚，江西奉新县人，他收集与编纂的《天工开物》（1637）是世界第一部有关农业和手工业生产和科学技术的百科全书，因此中国科学技术史专家李约瑟称他为“中国的狄德罗__”。其他著作还有《论气》、《谈天》等等。

他 28 岁（1615 年）考中举人，但以后五次进京会试__均告失败。五次跋涉，见闻大增，他说：“为方万里中，何事何物不可闻”。他在田间、作坊调查到许多生产知识。他鄙弃那些“知其味而忘其源”的“纨绔子弟”与“经士之家”，在担任江西分宜县教谕（1634~1638）年间写成了这本《天工开物》。他在《序》中描写这段情况时说：“伤哉贫也！欲购奇考证，而乞洛下之资，欲招致同人，商略__真，而缺陈思之馆。”（想加以验证而无钱，想与同人们讨论真伪而无场馆），只得“炊灯具（备）草”，日夜写书，但“大业文人，弃掷案头，此书于功名进取毫不相关也。”

《天工开物》的书名取自《易·系辞》中“天工人其代之”及“开物成务”，作者说是“盖人巧造成异物也”（《五金》卷）。全书按“贵五谷而贱金玉之义”（《序》）分为《乃粒》（谷物）、《乃服》（纺织）、《彰施》（染色）、《粹精》（谷物加工）、《作咸》（制盐）、《甘嗜》（食糖）、《膏液》（食油）；《陶埏》（陶瓷）、《冶铸》、《舟车》、

《锤锻》、《燔石》（煤石烧制）、《杀青》（造纸）、《五金》、《佳兵》（兵器）、《丹青》（矿物颜料）、《曲蘖》（酒曲）和《珠玉》共 18 卷。包括当时许多工艺部门世代相传的各种技术，并附有大量插图，注明工艺关键，具体描述生产中各种实际数据（如重量准确到钱，长度准确到寸）。我国古代物理知识大部分分散体现在各种技术过程的书籍中。《天工开物》中也是如此。如在提水工具（筒车、水碓、风车）、船舵、灌钢、泥型铸釜、失蜡铸造、排除煤矿瓦斯方法、盐井中的吸卤器（唧筒）、熔融、提取法等中都有许多力学、热学等物理知识。此外，在《论气》中，宋应星深刻阐述了发声原因及波（参见“中国古代在声学上的贡献”），他还指出太阳也在不断变化，“以今日之月为昨日之日，刻舟求剑之义”（《谈天》）。

宋应星刊印《天工开物》后，还曾任福建汀州府推官（1638）、亳州知府（1643）。1644 年明亡，他挂冠回乡隐居。由于他的反清思想，《四库全书》没有收入他的《天工开物》，但却在日本、欧洲广泛传播，被译为日、法、英、德、意、俄文，三百多年来国内外也发行 16 版次（1637~1977），其中关于制墨、制铜、养蚕、用竹造纸、冶锌、农艺加工等等方法，都对西方产生了影响，代表了中国明代的技术水平。宋应星卒于清顺治年间，大约享年八十。

笛卡儿（Rene Descartes, 1596~1650）

法国哲学家、物理学家和数学家。1596 年 3 月 31 日生于法国小镇拉埃的一个贵族家庭。因家境富裕从小多病，学校特许他在床上早读，养成终生沉思的习惯和孤僻的性格。1606 年他在欧洲最有名的贵族学校，耶稣会的拉弗莱什学校上学，1616 年在普依托大学学习法律与医学，对各种知识特别是数学深感兴趣。在军队服役和周游欧洲中他继续注意“收集各种知识”，“随处对遇见的种种事物注意思考”，1629~1649 年在荷兰写成《方法谈》（1637）及其附录《几何学》《屈光学》《哲学原理》（1644）。1650 年 2 月 11 日卒于斯德哥尔摩，死后还出版有《论光》（1664）等。

笛卡儿在自然哲学、数学（主要是解析几何学）、力学、光学和宇宙结构等方面的思想和成果，促进了物理学的发展。科学史的发展也是在充满矛盾中曲折前进的，笛卡儿正是以其理性思维、近距作用、数学演绎法、直观模型、物质的连续性与无限可分性等鲜明的观点和某些正误兼备的物理成果起着特殊的历史作用。他是继伽利略与开普勒之后另一个新宇宙体系的探索者。在当时情况下，他的成就是和他独具一格的自学方法（学习——沉思——实践、游历、研究——建立新理论体系）有关的。他对于在修道院或学院里反复修补注释几本古籍的经院哲学方法及其学问越发怀疑，决心“在我们自身之内或世界这本大书里”去找学问。他曾说过：“即

使我们能背诵别人已经作出的所有证明，我们也不会成为数学家。即使我们掌握了柏拉图和亚里士多德的全部论证，我们也不会成为哲学家，如果我们没有能力形成对这些问题的可靠判断的话”（《心灵方向的规则》，1628）。“我对每一件可以使我怀疑的事……都特别加以思考，同时把以前潜入我的心灵的一切错误通通从我心中拔除干净”（《方法谈》，1636）。当时迫切需要在扩大实验成果的基础上找寻理论指导与概括，因此他的“新哲学”风靡一时。他的探求真理的创新精神和方法是有一定教育意义的。

笛卡儿主张有两个独立的世界，它们分别由物质实体和精神组成并受到上帝超自然的某些干预。他认为：物质由微粒构成，物质与空间广延性密不可分，物质世界没有真空；物体唯一可能的运动是位置变动，包括圆周运动与涡游运动；一切自然现象都可用物质粒子的相互机械作用（近距离作用）来说明；“给我广延和运动，我将造出这个世界”，“让自然依照他所建立的规律活动，勿须再由上帝照管”，这种机械宇宙观一直影响到17~18世纪的自然科学。

笛卡儿特别重视方法问题，尤其是数学方法。“我决心洗手不干的只是抽象的几何学，即不再考虑那种只能起到练习头脑作用的问题，为了要研究一种以解释自然现象为宗旨的几何学……我的物理学可以说跟几何学是没有甚么两样的”（给麦山尼的一封信）。他在古代演绎方法的基础上创立了数学演绎法：以唯理主义为根据，从简单自明的直观公理出发，运用数学的逻辑演绎推出结论。这种方法与F·培根的实验归纳法结合起来，成为后来物理学特别是理论物理学的重要方法。他首创的代数几何学即解析几何学，使变化的坐标即变数进入了数学，成了物理学与自然科学研究方法中的常用利器（如图解法、笛卡儿坐标系等）。此外，笛卡儿还善于运用“直观模型（如用“盲人手杖”比喻光信息传入大脑）和假说方法（如“以太漩涡”）。在力学方面，他发展了运动相对性思想，明确表述了惯性定律：只要物体开始运动，就将继续以同一速度并沿同一直线方向运动，直到遇到某种外来原因造成的阻碍或偏离为止（《哲学原理》37~39节），强调了惯性运动的直线性。他还在同书36节明确提出了动量守恒定律：“物质和运动的总量永远保持不变”。“既然运动不过是运动着的物质的条件，在物质中就会存在一定量的运动，它的总和在世界上永远不会增加也不会消失，尽管其各个分散部分将会改变。这就是说，假定一物体比另一物体小一倍但速度快一倍，二者的运动量是一样的。”

在光学方面他第一次在《屈光学》中提出折射定律的理论推导，认为光是一种在以太中传播的压力过程，并用网球模型计算两种媒质分界面上的反射与折射，得出 $\sin i / \sin r = \text{常数}$ 的形式，但这与光疏、光密媒质中光速度变化的事实恰好相反，引起了后来关于光的粒子性与波动性的长期争论。他还在1637年《方法谈》中“论虹”一文中成功地解释了虹的成因

(图 2-2-5)。

笛卡儿由于缺乏实验基础而导致不少具体物理结论的失误，例如碰撞问题、光的折射方向、用宇宙以太漩涡假说解释引力现象等。他的“怀疑一切”原则使他陷入“我思故我在”的唯心主义，削弱了他的理性主义方法论的力量。对笛卡儿的褒贬不一，但应从历史发展角度客观地考察。

盖利克 (Otto von Guericke, 1602 ~ 1686)

德国物理学家。1602年11月20日生于马德堡。1617~1623年间先后在莱比锡、亥姆什塔特、耶拿等大学学习法律、数学、建筑工程等。从1646年开始，长期担任马德堡市市长。1686年5月11日在汉堡逝世。

在他上大学期间，就对真空问题深感兴趣，并产生了获得“真空”的想法，这导致他于1650年发明了空气泵，并用此作了一系列有关真空的实验。证明了声音不能在真空中传播，蜡烛不能在真空中燃烧，鱼和鸟在真空中很快死去等等。其中最著名的当属1654年在雷根斯堡进行的“马德堡半球”实验，这一实验后来又在马德堡、柏林进行。实验所显示的空气的巨大压力，给人们留下了深刻的印象，引起社会对科学实验的广泛兴趣。他还用实验演示了空气具有重量，并粗略地估计了空气的密度。1657年，他装置了第一台水柱气压计，他将水面上升归因于大气压，大气压的变化引起了水面高度的变化。在长期研究了这种变化之后，他认为这种变化与天气变化相联系。据此，在1660年他根据气压的突然下降预报了一场大风暴。他还发明了湿度计，制作了空气温度计。他还曾预言彗星将有规律地从宇宙返回。

1672年左右，他制作了第一台静电起电机，这是一个装在轴上的硫磺球（约有小孩头大小），在球旋转时，用手压住球，就可以使球起电，比传统的摩擦方法有效得多。他用这台机器进行了电学研究，发现了电排斥、感应起电及电致发光现象（在黑暗中，带电硫磺球发光）；他还发现电荷行进到亚麻线的末端，因而成为发现电排斥及电传导现象的前驱。

值得指出的是，他并不认为这些有关大气压和电的实验只是一些兴之所至的个别实验，而是认为：这些实验说明了世界万物的多样性，并且与神的创造无关。这种观点在当时是相当勇敢的。

他的重要研究成果，收入在《关于虚空的新实验》（1672年）一书中。

托里拆利 (Evangelista Torricelli, 1608 ~ 1647)

意大利物理学家、数学家。1608年10月15日出生于贵族家庭，幼年时表现出数学才能。20岁时到罗马在伽利略早年的学生B·卡斯提利指导下学习数学，毕业后成为他的秘书。1641年写了第一篇论文《论自由坠

落物体的运动》，发展了伽利略关于运动的想法。经卡斯提利推荐做了伽利略的助手，伽利略去世后接替伽利略作了宫廷数学家，1647年10月25日（39岁）过早去世。

当时罗马、佛罗伦萨的学者们热烈讨论着自然的本性是否“厌恶真空”和如何解释矿井中的水泵只能把水提到18肘（10.5米）高的问题。伽利略虽做过称量空气的实验，证明空气有重量，但仍认为可能有一种“真空阻力”。意大利学者G.B.巴利安尼1630年写信给伽利略，提出可能存在大气压力的假设。1644年，托里拆利和伽利略的另一位学生维维安尼在一起进行实验研究，他们用汞代替水进行实验，认为比水重14倍的汞大约只能升起水柱的 $1/14$ 。将玻璃管装满汞后倒置于盛汞容器中，玻璃管上端就获得“托里拆利真空”；与此管对比的还有另一个上面带圆玻璃泡的玻璃管（参见图2-1-10），托里拆利原来猜想容积大的真空应有较大的“真空阻力”，但两管的水银柱却等高。在1644年他给罗马M.里奇的信中说：“我们是生活在大气组成的海底之下的。实验证明它的确有重量……”“我们看到：一个真空的空间形成了。……它是外在的并且是来自外界的”。“它们的设计不仅要造出真空，而且要造出可以指明气压变化的仪器。”这一实验之所以能率先在意大利做成功，还因为罗马和佛罗伦萨在当时的吹制玻璃器皿的技术最先进。这个实验传到西欧后随即引起了帕斯卡、盖利克等人对大气压的研究热潮。

托里拆利在流体力学方面的贡献是提出了关于液体从小孔射流的定理：在充水容器中，水面下小孔流出的水，其速度和小孔到液面的高度平方根以及重力加速度的2倍（ $2g$ ）的平方根成正比（托里拆利定理）。他还解释过风的成因起源于空气的密度与温度差。在静力学方面，托里拆利发现：一个物体系统，当其重心处在最低位置时，发生小位移时重心下降，系统才是稳定的。此外，他在磨制精良透镜和将伽利略气体温度计改为液体温度计方面也获得成功。

托里拆利特别强调处理力学问题时数学与实验的重要性。

马略特（Edme Mariotte, 1620~1684）

法国物理学家和植物生理学家。出生于法国的希尔戈尼的迪戎城，他一生的大部分时间是在这个城市度过的。他确切的出生日期及早年的学习、生活情况均已失传。曾任迪戎附近的圣马丁修道院的院长。他酷爱科学，对物理学有广泛的研究，进行过多种物理实验，从事力学、热学、光学等方面的研究。他有严谨的科学作风，制成过多种物理仪器，善于用实验证实和发展当时重大的科学成果，成为法国实验物理学的创始人之一。正如玻意耳是伦敦皇家学会创始人之一一样，马略特是法国科学院的创建者之一，并成为该院第一批院士（1666）。

马略特在物理学上最突出的贡献是1676年发表在《气体的本性》论文

中的定律：一定质量的气体在温度不变时其体积和压强成反比。这个定律是他独立确立的，在法国常称之为马略特定律。该定律 1661 年被英国科学家玻意耳首先发现，而称之为玻意耳定律。但马略特明确地指出了温度不变是该定律的适用条件，定律的表述也比玻意耳的完整，实验数据也更令人信服，因此这一定律后被称为玻意耳-马略特定律。下面是马略特在论文中叙述自己的实验和结论的一段节录：“用一根 40 英寸长的玻璃管，将水银注入到 $27\frac{1}{2}$ 英寸高，于是管内还有 $12\frac{1}{2}$ 英寸是空气。当我将该管浸入容器的水银中 1 英寸时，剩下 39 英寸的管中只有 14 英寸是水银，25 英寸是空气。它比原来空气膨胀了 1 倍。”根据重复实验得出结论：“空气的稠密程度与其负载的重量成比例是一种固定的规律或自然律。”他还预言了这个定律的各种应用，例如他指出可根据气压计的读数来计算地方的高度。他测量了很深的地下室中的水银柱高度，和坐落在巴黎高地的气象观测站中的水银柱高度，通过比较获得了用气压计估计高度的近似公式。

马略特对流体力学进行了深入的实验研究，并将结果写成题为《论水和其他流体的运动》的著作，于 1686 年发表。其中特别讨论了流体的摩擦问题。解决了当时流体研究中理论与实验结果之间存在的许多差异。他发现：流体要在一定压力下才能流动，并给出了计算管壁压强的公式。对于管中流体的运动、喷水的高度等问题，都从理论和具体技术上进行了研究，推进了流体力学的发展。他还研究了春潮时期的水源问题，根据对塞纳河流域的水量的粗略估计，得出了春潮来源于雨水和冰雪融化的结论。他还结合水力学研究了材料强度问题。

马略特在光学方面作出了卓越的贡献。他对光现象作了深入的研究，写出了《论颜色的本性》的论文，提出了角半径 23° 晕产生的理论，这基本上就是今天所公认的理论。解释了日晕、月晕、虹、幻日、幻月、衍射等现象，对大气光学作出了贡献。1666 年他向巴黎科学院报告了眼睛有“盲点”这一卓越发现。这一发现引起了很大的轰动。1668 年马略特在法国皇帝路易十四面前表演了关于盲点的实验：他让两个人相对站好，彼此相隔 2 米远，右手伸直，向上侧举。然后各自闭上左眼，各用右眼注视对方的右手掌，于是这两个人都惊奇地发现，对方的头没有了，只留下身子。马略特当即向在场的人讲述了人眼各部位的功能，及产生盲点的原因。

在热学方面，马略特 1679 年发现了火的热辐射和光线的区别。他指出，火的热辐射根本通不过玻璃，或者只通过很少一点，而火光却能通过玻璃。他还用一个冰透镜，将太阳光聚焦，点燃了放在焦点处的火药。他先把纯水煮沸半小时驱除水中的空气，然后将水凝固成二、三英寸厚的冰板。这样做出的冰板几乎没有气泡，非常透明。将做好的冰板放在一个球状凹陷的小容器里，并把容器放在火的近旁，不断翻动冰板，使表面的冰

融化，直到冰块的两面都呈球状。再戴上手套握住这块冰透镜的边沿，放在太阳光下面，在焦点附近放上火药，一会儿火药就被点着了。马略特从植物研究中推断出：植物通过化学过程合成各不相同的物质。这一理论在他死后很久才得到证实。他还通过观察把植物体内液汁的压力比作动物体内的血压。在《巴黎科学院的历史和学术论文》第一卷（1733）中收集了他的许多篇论文。诸如《流体的运动》、《论颜色的本性》、《小号的音调》、《气压计》、《物体的降落》、《枪的后坐力》以及《冰的冻结》。

1684年5月12日马略特在巴黎逝世。

帕斯卡（Blaise Pascal，1623~1662）

法国数学家、物理学家、哲学家，年6月19日生于克莱蒙费朗，后迁居巴黎。父亲是著名的数学家。他从小学习优异，善于思考，对数学和物理特别爱好，人称为神童。16岁时就参加了巴黎的数学与物理学界的学术活动，并发表第一篇论文《圆锥曲线论》，提出的定理成为后来投影几何的基本定理之一（“圆锥曲线内接六边形的三对边交点共线”）。在大家听了他的当面论述后，才相信该论文不是他父亲代劳的。18岁时他创制了第一架机械式计算器。曾发表过一些有关算术级数和二项式系数的论文，例如在《论算术三角形》的论文中提出二项式系数的三角形排列法（这一三角形已由我国杨辉早在1261年《详解九章算法》中得出）。他还是概率论的创始人之一。

他在物理学上的主要贡献是对大气压强和流体静力学的研究。当托里拆利1643年的真空实验传到法国后，帕斯卡在1646年重复其实验获得成功（需要有优质玻璃管）。他还把12米长的玻璃管固定在船的桅杆上用水和葡萄酒做托里拆利实验。人们原以为葡萄酒中含有“气”元素，因此酒柱会比水柱短。但因为酒的密度比水小，结果酒柱比水柱还要高。1647年他发表了《关于真空的新实验》一书。1646~1651年他还在巴黎、多姆山等地的多次试验中证实了大气压强随高度的增加而减小，并与当地气象条件有关（参见“大气压强的发现与测量”），从而预示了利用气压计预报气象的前景。

帕斯卡还从力的平衡的观点进一步研究了流体的平衡。他说山顶气压计实验“使我亲眼看到了自然界中最轻的流体空气和最重的流体水银之间的平衡。”

在他逝世后第二年（1663）出版的《论液体平衡和空气的重量》中，分别论述了流体静力学和气体力学，书中提出了帕斯卡定律。他把封闭容器中每一部分都比作一部机器，其中各力的平衡，就像杠杆和其他简单机械一样，遵循着同样规律。他在这本书中曾写道：“使一百磅水移动一英寸，与使一磅水移动一百英寸显然是一回事”，从而提出了水压机的原理。

他还详细证明了器壁上由于液重产生的压强仅与深度有关，从理论上解释了流体静力学佯谬。更可贵的是，他把实验作为科学推论的一个有机环节，强调在自然科学中实验才是唯一可以信赖的良师，用以批驳耶稣教会神父反对真空存在的论点。大气压强单位就是用帕斯卡命名的。他从 18 岁起身体开始衰弱，以后一直疾病缠身，又由于父丧和一次突发的马车事故，打断了他在科学事业中的创造性才华。31 岁时，他重新接受洗礼，后退隐于修道院，转而在神学、哲学（《思想录》，1670 发表）上写作，1662 年 8 月 19 日病逝于巴黎，终年 39 岁。

玻意耳（Robert Boyle，1627 ~ 1691）

英国物理学家、化学家。1627 年 1 月 25 日生于爱尔兰的利斯莫尔。幼年就聪慧过人，有超人的记忆力和非凡的语言才能。1635 年进伦敦西郊的伊顿公学学习。1639 年至 1644 年在瑞士、法国、意大利学习，1644 年继承了父亲的一笔财产，定居在 多尔塞特，博览了自然科学、哲学、神学等方面书籍。当时他还经常参加由他姐姐邀请的一些著名科学家的聚会，去听他们就一些科学问题的讨论，但他主张“实验决定一切”。1654 年玻意耳迁居牛津，在牛津大学创立了一个实验室，开始从事系统的物理和化学的研究工作。他是伦敦皇家学会创始人之一，1663 年被选为英国皇家学会会员，1680 年被选为皇家学会会长。在英国，玻意耳是最先开展气体力学研究的学者之一，并且由于研究气体性质而闻名。

在物理学方面，玻意耳从事分子物理、光和电现象、流体力学、声学、热学、力学多方面的研究，成果累累。

玻意耳最突出的贡献是 1661 年发现了玻意耳定律。1659 年，他在助手胡克的协助下，改进了盖利克发明的真空泵，利用它进行了一系列气体性质的开拓性实验。例如，他曾将真空泵放在屋顶，水管放在地面的大水罐内（图 2-2-6），发现当水银气压计指示为 29 英寸时，水不可能被提升到 33 英尺以上。1660 年他将实验结果汇编成册，出版了他的第一部著作《涉及空气弹性及其效果的新物理-力学实验》。他用实验论证了空气是有重量和弹性（当时玻意耳称之为弹力）的物质。论证了空气对于燃烧、呼吸和传声是必不可少的。论证了压强对水的沸点的影响，指出当使周围的空气稀薄时热水就能沸腾起来。论证了细管中液体的上升（即毛细现象）是和大气压力无关的，这与当时的观点截然相反。论证了真空中虹吸失效。还研究了空气的比重、折射率等等。这本书引起了耶稣教徒的诘难，认为其中有诈。玻意耳在助手 R. 汤利的协助下做了实验，通过实验不但证实了“空气的弹性有能力作出远远超过我们需要归之于它的事实”，而且发现了气体的体积与压强的反比关系，在历史上建立起力学运动以外的第一个定量的自然定律，即著名的玻意耳定律，现称为玻意耳-马略特定律（参

见“马略特”)。1662年他发表了论文——《关于空气的弹性和重量学说的答辩》，文中不但阐述了玻意耳定律，而且还描述了另一个实验：一定体积的封闭空气被加热时其压强增大。可惜他没有重视并定量地检测这一现象，而失去了进一步发现规律的机会。

玻意耳在物理学的其他方面也有许多贡献。他最先对固体的弹性进行了研究，在对钟摆长度变化所开展的固体膨胀研究中，发现了水在结冰时会膨胀。他主张热是分子的运动。他拥护原子论假说，认为一切物体都是由较小的、完全相同的粒子组成的。他于1663年首先提出色光是白光的变种，表述了白光的复杂性的思想，指出物体的颜色并不是物体本身的内在属性，而是由光线在被照射面上发生的变异引起的。1663年他还第一次记载了在肥皂泡和玻璃球中产生的彩色薄膜条纹。他观察到静电感应现象，指出化学发光现象是冷光等。他在实验过程中研制成气压计，并于1662~1663年引入“barometer”(气压计)这个名称。玻意耳特别重视和强调实验的重要意义。他自己从事实验的面非常广，在热学、声学、电学、光学、流体静力学、化学、医学、生物学、生理学多方面从事过许多实验，对以后实验物理学的发展有积极影响。

玻意耳还是个杰出的化学家。1661年出版了著名著作《怀疑的化学家》。他反对当时“点金术”派的“元素”观，提出了接近于近代的化学元素的概念，区分了化合物和混合物。他把实验方法引入化学研究之中，主张化学要建立在大量的实验观察基础上，对物质的化学变化要进行定量研究，从而开创了分析化学的研究。他最早引入了“分析化学”这个名称。恩格斯对他给予了高度评价，指出“玻意耳把化学确定为科学。”

在生理学方面，玻意耳研究了空气对生物的作用，发现了肺内血液颜色和摄取空气有关，1663年他还找出了毛细血管等。他的著作还有：《各种形式和性质的起源》、《关于颜色的实验和考虑》、《流体静力学奇谈》、《论矿泉水》、《关于自然哲学价值的某些考虑》等。

玻意耳虽终身致力于科学研究，却是个有神论者，晚年曾设置玻意耳讲座，专门反对无神论。

由于玻意耳科学上的卓越成就，被人们称为“英国科学界的明星”。1691年12月30日这颗明星殒落，终年64岁。他终身未娶。

惠更斯 (christtiaan Huygens, 1629~1695)

荷兰物理学家、天文学家、数学家，他是介于伽利略与牛顿之间的一位重要的物理学先驱。

惠更斯1629年4月14日出生于海牙，父亲是大臣、外交官和诗人，常与科学家往来。惠更斯自幼聪明好学，思想敏捷，多才多艺，13岁时就自制一架车床，并受到当时已成名人的笛卡儿的直接指导，父亲曾亲热地

叫他为“我的阿基米德”。16岁时进莱顿大学攻读法律和数学，两年后转入布雷达大学，1655年获法学博士学位，随即访问巴黎，在那里开始了他重要的科学生涯。1663年访问英国，并成为刚建不久的皇家学会会员。1666年，应路易十四邀请任刚建立的法国科学院院士。惠更斯体弱多病，全身心献给科学事业，终生未婚。1695年7月8日逝于海牙。惠更斯处于富裕宽松的家庭和社会条件中，没受过宗教迫害的干扰，能比较自由地发挥自己的才能。他善于把科学实践与理论研究结合起来，透彻地解决某些重要问题，形成了理论与实验结合的工作方法与明确的物理思想，他留给人们的科学论文与著作68种，《全集》有22卷，在碰撞、钟摆、离心力和光的波动说、光学仪器等多方面作出了贡献。他最早取得成果的是数学，他研究过包络线、二次曲线、曲线求长法，他发现悬链线（摆线）与抛物线的区别，他是概率论的创始人。

在1668~1669年英国皇家学会碰撞问题征文悬赏中，他是得奖者之一。他详尽地研究了完全弹性碰撞问题（当时叫“对心碰撞”）。死后综合发表于《论物体的碰撞运动》（1703）中，包括5个假设和13个命题。他纠正了笛卡儿不考虑动量方向性的错误，并首次提出完全弹性碰撞前后的 m^2 守恒。他还研究了岸上与船上两个人手中小球的碰撞情况并把相对性原理应用于碰撞现象的研究。惠更斯从实践和理论上研究了钟摆及其理论。1656年他首先将摆引入时钟成为摆钟以取代过去的重力齿轮式钟。在《摆钟》（1658）及《摆式时钟或用于时钟上的摆的运动的几何证明》（1673）中提出著名的单摆周期公式，研究了复摆及其振动中心的求法。通过对渐伸线、渐屈线的研究找到等时线、摆线。研究了三线摆、锥线摆、可倒摆及摆线状夹片等，图2-2-7是惠更斯的船用钟外形及其内部结构，结构中有摆锤、摆线状夹板、每隔半秒由驱动锤解锁的棘爪等。

在研究摆的重心升降问题时，惠更斯发现了物体系的重心与后来欧勒称之为转动惯量的量，还引入了反馈装置——“反馈”这一物理思想今天更显得意义重大。设计了船用钟和手表平衡发条，大大缩小了钟表的尺寸。他还用摆求出重力加速度的准确值，并建议用秒摆的长度作为自然长度标准。惠更斯提出了他的离心力定理，他还研究了圆周运动、摆、物体系转动时的离心力以及泥球和地球转动时变扁的问题等等。这些研究对于后来万有引力定律的建立起了促进作用。他提出过许多既有趣又有启发性的离心力问题。他设计制造的光学和天文仪器精巧超群，如磨制了透镜，改进了望远镜（用它发现了土星光环等）与显微镜，惠更斯目镜至今仍然采用，还有几十米长的“空中望远镜”（无管、长焦距、可消色差）、展示星空的“行星机器”（即今天文馆锥型）等。

惠更斯在1678年给巴黎科学院的信和1690年发表的《光论》一书中都阐述了他的光波动原理，即惠更斯原理。他认为每个发光体的微粒把脉

冲传给邻近一种弥漫媒质（“以太”）微粒，每个受激微粒都变成一个球形子波的中心。他从弹性碰撞理论出发，认为这样一群微粒虽然本身并不前进，但能同时传播向四面八方行进的脉冲，因而光束彼此交叉而不相互影响，并在此基础上用作图法解释了光的反射、折射等现象。《光论》中最精采部分是对双折射提出的模型，用球和椭球方式传播来解释寻常光和非常光所产生的奇异现象，书中有几十幅复杂的几何图，足以看出他的数学功底。

胡克（Robert Hooke，1635～1703）英国实验物理学家，仪器发明家。1635年出生于英格兰怀特岛清水村。从小体弱多病但却心灵手巧，酷爱摆弄机械，自制过木钟、可以开炮的小战舰等。1653年到牛津大学作工读生，1663年获文学硕士学位。1655年成为玻意耳的助手，由于他的实验才能，1662年被任命为皇家学会的实验主持人，为每次聚会安排三、四个实验，1663年获硕士学位，同年被选为皇家学会正式会员，又兼任了学会陈列室管理员和图书管理员。1665年任格雷姆学院几何学教授，1667～1683年任学会秘书并负责出版会刊。学会的工作条件使他在当时自然科学的前沿（如机械仪器改制、弹性、重力、光学，乃至生物、建筑、化学、地质等方面）作出了自己的贡献。1703年在伦敦逝世。

胡克的重要贡献主要是在仪器制造方面，如协助玻意耳改进抽气机，制造了复式显微镜、轮式气压计、摆钟、海洋测深仪、海水取样器等等。他还参与过伦敦大火后的城市重建设计等等。其次，对于晶体、化石、燃烧、测温学等也有不少研究。

胡克于1678年曾将自己发现的弹性定律发表在他的讲演集《态势的恢复》中，他举出螺旋弹簧、发条、悬线、（图2-2-8）木杆挠曲变形等四种情况。这一定律后来经过A.L.科西1822年引入“应力”“应变”及G.格林的改进后才具有现代形式。他和惠更斯（参见“惠更斯”）是各自独立地建议用发条（游丝）驱动摆轮的，胡克虽长于实验技术且物理思想活跃，但由于缺乏数学根基，最终并未能从理论和实验上根本解决问题。

在重力问题上也是如此。胡克从1661年开始积极参加皇家学会重力专门委员会的活动，进行了在教堂塔尖称量长绳与短绳上的铁块重量的比较。1671年发表《试论地球周年运动》的论文中提出所有天体有吸引力、惯性运动、引力大小与距离有关（后从圆轨道导出为平方反比关系）等三条假设。他还在1679年指出行星运动是由匀速直线的惯性运动和朝向中心天体的吸引这两部分运动合成的。牛顿自己也承认胡克的思想对他有启发（1679年12月13日致胡克信）。但对于非圆周情况胡克就无能为力了。

胡克1665年出版的《显微术或放大镜下微小物体的生理学描述》，描述了显微镜的光学结构和观察到的图画：如矿石、动植物标本、软木塞、昆虫、细胞等。这本书还讨论了云母、肥皂泡、油膜等透明薄膜的彩色干

涉图与周期性分布图。胡克还是光的波动说最早的倡导者之一，但对这些干涉图样缺乏定量分析研究。

牛顿 (Isaac Newton, 1643~1727)

伟大的物理学家、天文学家和数学家，经典力学体系的奠基人。

牛顿 1643 年月 4 日(儒略历年 12 月 25 日)出生于英格兰东部小镇乌尔斯索普一个自耕农家庭。出生前八九个月父死于肺炎。自小瘦弱，孤僻而倔强。3 岁时母亲改嫁，由外祖母抚养。11 岁时继父去世，母亲又带 3 个弟妹回家务农。在不幸的家庭生活中，牛顿小学时成绩较差，“除设计机械外没显出才华”。

牛顿自小热爱自然，喜欢动脑动手。8 岁时积攒零钱买了锤、锯来做手工，他特别喜欢刻制日晷，利用圆盘上小棍的投影显示时刻，传说他家里墙角、窗台上到处都有他刻划的日晷，他还做了一个日晷放在村中央，被人称为“牛顿钟”，一直用到牛顿死后好几年。他还做过带踏板的自行车；用小木桶做过滴漏水钟；放过自做的带小灯笼的风筝（人们以为是彗星出现）；用小老鼠当动力做了一架磨坊的模型，等等。他观察自然最生动的例子是 15 岁时做的第一次实验：为了计算风力和风速，他选择狂风时做顺风跳跃和逆风跳跃，再量出两次跳跃的距离差。牛顿在格兰瑟姆中学读书时，曾寄住在格兰瑟姆镇克拉克药店，这里更培养了他的科学实验习惯，因为当时的药店就是一所化学实验室。牛顿在自己的笔记中，将自然现象分类整理，包括颜色调配、时钟、天文、几何问题等等。这些灵活的学习方法，都为他后来的创造打下了良好基础。牛顿曾因家贫停学务农，在这段时间里，他利用一切时间自学。放羊、购物、农闲时，他都手不释卷，甚至羊吃了别人庄稼，他也不知道。他舅父是一个神父，有一次发现牛顿看的是数学，便支持他继续上学。1661 年 6 月考入剑桥大学三一学院。作为领取补助金的“减费生”，他必须担负侍候某些富家子弟的任务。三一学院的巴罗 (Isaac Barrow, 1630~1677) 教授是当时改革教育方式主持自然科学新讲座(卢卡斯讲座)的第一任教授，被称为“欧洲最优秀的学者”，对牛顿特别垂青，引导他读了许多前人的优秀著作。1664 年牛顿经考试被选为巴罗的助手，1665 年大学毕业。在 1665—1666 年，伦敦流行鼠疫的两年间，牛顿回到家乡。这两年牛顿才华横溢，作出了多项发明。1667 年重返剑桥大学，1668 年 7 月获硕士学位。1669 年巴罗推荐 26 岁的牛顿继任卢卡斯讲座教授，1672 年成为皇家学会会员，1703 年成为皇家学会终身会长。1699 年就任造币局局长，1701 年他辞去剑桥大学工作，因改革币制有功，1705 年被封为爵士。1727 年牛顿逝世于肯辛顿，遗体葬于威斯敏斯特教堂。

牛顿的伟大成就与他的刻苦和勤奋是分不开的。他的助手 H. 牛顿说

过，“他很少在两、三点前睡觉，有时一直工作到五、六点。春天和秋天经常五、六个星期住在实验室，直到完成实验。”他有一种长期坚持不懈集中精力透彻解决某一问题的习惯。他回答人们关于他洞察事物有何诀窍时说：“不断地沉思”，这正是他的主要特点。对此有许多故事流传：他年幼时，曾一面牵牛上山，一面看书，到家后才发觉手里只有一根绳；看书时定时煮鸡蛋，结果将表和鸡蛋一齐煮在锅里；有一次，他请朋友到家中吃饭，自己却在实验室废寝忘食地工作，再三催促仍不出来，当朋友把一只鸡吃完，留下一堆骨头在盘中走了以后，牛顿才想起这事，可他看到盘中的骨头后又恍然大悟地说：“我还以为没有吃饭，原来我早已吃过了”。

牛顿的成就，恩格斯在《英国状况·十八世纪》中概括得最为完整：“牛顿由于发明了万有引力定律而创立了科学的天文学，由于进行了光的分解而创立了科学的光学，由于创立了二项式定理和无限理论而创立了科学的数学，由于认识了力的本性而创立了科学的力学”。（牛顿在建立万有引力定律及经典力学方面的成就详见本手册相关条目），这里着重从数学、光学、哲学（方法论）等方面的成就作一些介绍。

（1）牛顿的数学成就

17世纪以来，原有的几何和代数已难以解决当时生产和自然科学所提出的许多新问题，例如：如何求出物体的瞬时速度与加速度？如何求曲线的切线及曲线长度（行星路程）、矢径扫过的面积、极大极小值（如近日点、远日点、最大射程等）、体积、重心、引力等等。尽管牛顿以前已有对数、解析几何、无穷级数等成就，但还不能圆满或普遍地解决这些问题。当时笛卡儿的《几何学》和瓦里斯的《无穷算术》对牛顿的影响最大。牛顿将古希腊以来求解无穷小问题的种种特殊方法统一为两类算法：正流数术（微分）和反流数术（积分），反映在1669年的《运用无限多项方程》、1671年的《流数术与无穷级数》、1676年的《曲线求积术》三篇论文和《原理》一书中，以及被保存下来的1666年10月他写的在朋友们中间传阅的一篇手稿《论流数》中。所谓“流量”就是随时间而变化的自变量如 x 、 y 、 s 、 u 等，“流数”就是流量的改变速度即变化率，写作

\dot{x} 、 \dot{y} 、 \dot{s} 、 \dot{u} 等。他说的“差率”“变率”就是微分，与此同时，他还在1676年首次公布了他发明的二项式展开定理。牛顿利用它还发现了其他无穷级数，并用来计算面积、积分、解方程等等。1684年莱布尼兹从对曲线的切线研究中引入了 $\frac{dy}{dx}$ 和拉长的S作为微积分符号，从此牛顿创立的

微积分学在大陆各国迅即推广。

微积分的出现，成了数学发展中除几何与代数以外的另一重要分支——数学分析（牛顿称之为“借助于无限多项方程的分析”），并进一步迅

速发展为微分几何、微分方程、变分法等等，这些又反过来促进了理论物理学的发展。例如瑞士 J. 伯努利曾征求最速降落曲线的解答，这是变分法的最初始问题，半年以后全欧数学家无人能解答。1697 年，一天牛顿偶然听说此事，当天晚上一举解出，并匿名刊登在《哲学学报》上。伯努利惊异地说：“从这锋利的爪中我认出了雄狮”。

(2) 牛顿在光学上的成就

牛顿的《光学》是他的另一本科学经典著作（1704 年）。该书副标题是“关于光的反射、折射、拐折和颜色的论文”，集中反映了他的光学成就。

第一篇是几何光学和颜色理论（棱镜光谱实验）。从 1663 年起，他开始磨制透镜和制作望远镜。在他送交皇家学会的信中报告说：“我在 1666 年初做了一个三角形的玻璃棱镜，以便试验那著名的颜色现象。为此，我弄暗我的房间……”接着详细叙述了他开小孔、引阳光进行的棱镜色散实验。关于光的颜色理论从亚里士多德到笛卡儿都认为白光纯洁均匀，乃是光的本色，色光乃是白光的变种。牛顿细致地注意到阳光不是像过去人们所说的五色而是在红、黄、绿、蓝、紫色之间还有橙、靛青等中间色共七色。奇怪的还有棱镜分光后形成的不是圆形而是长条椭圆形，接着他又试验“玻璃的不同厚度部分”、“不同大小的窗孔”、“将棱镜放在外边”再通过孔、“玻璃的不平或偶然不规则”等的影响；用两个棱镜正倒放置以“消除第一棱镜的效应”；取“来自太阳不同部分的光线，看其不同的入射方向会产生什么样的影响”；并“计算各色光线的折射率”，“观察光线经棱镜后会不会沿曲线运动”；最后才做了“判决性试验”：在棱镜所形成的彩色带中通过屏幕上的小孔取出单色光，再投射到第二棱镜后，得出该色光的折射率（当时叫“折射程度”）。这样就得出“白光本身是由折射程度不同的各种彩色光所组成的非均匀的混合体”。这个惊人的结论推翻了前人的学说，是牛顿细致观察和多项反复实验与思考的结果。

在研究这个问题的过程中，牛顿还肯定：不管是伽利略望远镜（凹、凸）还是开普勒望远镜（两个凸透镜），其结构本身都无法避免物镜色散引起的色差。他发现经过仔细研磨后的金属反射镜面作为物镜可放大 30 ~ 40 倍。1671 年他将此镜送皇家学会保存，至今的巨型天文望远镜仍用牛顿式的基本结构。牛顿磨制及抛光精密光学镜面的方法，至今仍是不少工厂光学加工的主要手段。《光学》第二篇描述了光照射到叠放的凸透镜和平面玻璃上的“牛顿环”现象的各种实验。除产生环的原因他没有涉及外，他作了现代实验所能想到的一切实验，并作了精确测量。他把干涉现象解释为光行进中的“突发”或“切合”，即周期性的时而突然“易于反射”，时而“易于透射”，他甚至测出这种等间隔的大小，如黄橙色之间有一种色光的突发间隔为 $1/89\,000$ 英寸（即现今 $2\,854 \times 10^{-10}$ 米），正好与现代

波长值 5.710×10^{-10} 米相差一半！

《光学》第三篇是“拐折”（他认为光线被吸收）即衍射、双折射实验和他的 31 个疑问。这些衍射实验包括头发丝、刀片、尖劈形单缝形成的单色窄光束“光带”（今称衍射图样）等 10 多个实验。牛顿已经走到了重大发现的大门口却失之交臂。他的 31 个疑问极具启发性，说明牛顿在实验事实和物理思想成熟前并不先作绝对的肯定。牛顿在《光学》一、二篇中视光为物质流，即由光源发出的速度、大小不同的一群粒子，在双折射中他假设这些光粒子有方向性且各向异性。由于当时波动说还解释不了光的直进，他是倾向于粒子说的，但他认为粒子与波都是假定。他甚至认为以太的存在也是没有根据的。在流体力学方面，牛顿指出流体粘性阻力与剪切率成正比，这种阻力与液体各部分之间的分离速度成正比，符合这种规律的（如空气与水）称为牛顿流体。

在热学方面，牛顿的冷却定律为：当物体表面与周围形成温差时，单位时间单位面积上散失的热量与这一温差成正比。在声学方面，他指出声速与大气压强平方根成正比，与密度平方根成反比。他原来把声传播作为等温过程对待，后来 P. S. 拉普拉斯纠正为绝热过程。

（3）牛顿的哲学思想和科学方法牛顿在科学上的巨大成就连同他的朴素的唯物主义哲学观点和一套初具规模的物理学方法论体系，给物理学及整个自然科学的发展，给 18 世纪的工业革命、社会经济变革及机械唯物论思潮的发展以巨大影响。这里只简略勾画一些轮廓。

牛顿的哲学观点与他在力学上的奠基性成就是分不开的，一切自然现象他都力图用力学观点加以解释，这就形成了牛顿哲学上的自发的唯物主义，同时也导致了机械论的盛行。事实上，牛顿把一切化学、热、电等现象都看作“与吸引或排斥力有关的事物”。例如他最早阐述了化学亲和力，把化学置换反应描述为两种吸引作用的相互竞争；认为“通过运动或发酵而发热”；火药爆炸也是硫磺、炭等粒子相互猛烈撞击、分解、放热、膨胀的过程，等等。

这种机械观，即把一切的物质运动形式都归为机械运动的观点，把解释机械运动问题所必需的绝对时空观、原子论、由初始条件可以决定以后任何时刻运动状态的机械决定论、事物发展的因果律等等，作为整个物理学的通用思考模式。可以认为，牛顿是开始比较完整地建立物理因果关系体系的第一人，而因果关系正是经典物理学的基石。牛顿在科学方法论上的贡献正如他在物理学特别是力学中的贡献一样，不只是创立了某一种或两种新方法，而是形成了一套研究事物的方法论体系，提出了几条方法论原理。在牛顿《原理》一书中集中体现了以下几种科学方法：

实验——理论——应用的方法。牛顿在《原理》序言中说：“哲学的全部任务看来就在于从各种运动现象来研究各种自然之力，而用这些

力去论证其他的现象。”科学史家 I. B. Cohen 正确地指出，牛顿“主要是将实际世界与其简化数学表示反复加以比较”。牛顿是从事实和归纳实际材料的巨匠，也是将其理论应用于天体、流体、引力等实际问题的能手。

分析——综合方法。分析是从整体到部分（如微分、原子观点），综合是从部分到整体（如积分，也包括天与地的综合、三条运动定律的建立等）。牛顿在《原理》中说过：“在自然科学里，应该像在数学里一样，在研究困难的事物时，总是应当先用分析的方法，然后才用综合的方法……。一般地说，从结果到原因，从特殊原因到普遍原因，一值论证到最普遍的原因为止，这就是分析的方法；而综合的方法则假定原因已找到，并且已经把它们定为原理，再用这些原理去解释由它们发生的现象，并证明这些解释的正确性”。归纳——演绎方法。上述分析-综合法与归纳-演绎法是相互结合的。牛顿从观察和实验出发“用归纳法去从中作出普遍的结论”，即得到概念和规律，然后用演绎法推演出种种结论，再通过实验加以检验、解释和预测，这些预言的大部分都在后来得到证实。当时牛顿表述的定律他称为公理，即表明由归纳法得出的普遍结论，又可用演绎法去推演出其他结论。

物理——数学方法。牛顿将物理学范围中的概念和定律都“尽量用数学演出”。爱因斯坦说：“牛顿才第一个成功地找到了一个用公式清楚表述的基础，从这个基础出发他用数学的思维，逻辑地、定量地演绎出范围很广的现象并且同经验相符合”，“只有微分定律的形式才能完全满足近代物理学家对因果性的要求，微分定律的明晰概念是牛顿最伟大的理智成就之一”。牛顿把他的书称为《自然哲学的数学原理》正好说明这一点。

牛顿的方法论原理集中表述在《原理》第三篇“哲学中的推理法则”中的四条法则中，此处不再转引，概括起来，可以称之为简单性原理（法则 1），因果性原理（法则 2），普遍性原理（法则 3），否认法原理（法则 4，无反例证明者即成立）。有人还主张把牛顿在下一段话的思想称之为结构性原理：“自然哲学的目的在于发现自然界的结构的作用，并且尽可能把它们归结为一些普遍的法规和一般的定律——用观察和实验来建立这些法则，从而导出事物的原因和结果”。

牛顿的哲学思想和方法论体系被爱因斯坦赞为“理论物理学领域中每一工作者的纲领”。这是一个指引着一代一代科学工作者前进的开放的纲领，但牛顿的哲学思想和方法论不可避免地有着明显的时代局限性和不彻底性。这是科学处于幼年时代的最高成就。牛顿当时只对物质最简单的机械运动作了初步系统研究，并且把时空、物质绝对化，企图把粒子说外推到一切领域（如连他自己也不能解释他所发现的“牛顿环”），这些都是他的致命伤。牛顿在看到事物的“第一原因”“不一定是机械的”时，提

出了“这些事情都是这样地井井有条……是否好像有一位……无所不在的上帝”的问题，（《光学》，疑问 29），并长期转到神学的“科学”研究中，费了大量精力。但是，牛顿的历史局限性和他的历史成就一样，都是启迪后人不断前进的教材。

罗默（oh Christensen Römer，1644～1710）

丹麦天文学家。1644 年 9 月 25 日生于丹麦奥尔胡斯。毕业于哥本哈根大学。1672 年，法国著名天文学家皮卡德在丹麦发现罗默的才能，劝告他移居法国。罗默随皮卡德到法国后，在皇家天文台工作，作为皮卡德的助手，共同观察木卫食。这期间罗默当选为法兰西科学院院士并兼任法国皇太子的私人教师。1679 年，因科学任务前往英国，与牛顿、哈雷等会过面。1681 年，克利斯汀五世把罗默召回丹麦，任哥本哈根大学天文学教授。他创制和改进了许多精密仪器和天文观测仪器，使天文台的装备大大改善，可以确定 1000 多颗星的位置，当时很负盛名（可惜其实验仪器毁于一次大火）。这为他的发现打下物质基础。1705 年任哥本哈根市市长，并参加了道路、港口建筑等工作。1710 年 9 月 19 日逝世于哥本哈根。

罗默的最重大贡献是：第一个用天文的实验方法证明了光以有限的速度传播。罗默最初为了编制海上经度测量表而进行了各种卫星食的观测。将食的始末时间与表格对照即可从地方时找出经度差。当他在地面上观察木星卫星的运动时，发现卫星在进入木星背影时（木卫食），接连两次消失之间的时间间隔有系统的变更。在大量的观测基础上，1676 年 9 月，罗默向巴黎科学院宣布，预期 11 月 9 日上午 5 点 25 分 45 秒发生的木卫食将推迟 10 分钟。巴黎皇家天文台的天文学家们对此虽然深表怀疑，但仍然对木卫食作了仔细的观测，观测结果完全证实了罗默预言的正确。11 月 22 日他又向科学院详细地解释了他的理论，认为这种变更是由于光从木星到达地球需要时间，而这时间的长短决定于木星和地球在它们各自的轨道上所处的位置。事实上，他估计光跨过地球绕太阳公转的轨道直径，需时 22 分钟（现在知道只需 16 分钟）。并明确指出：“……对于 3000 里格（League，长度名，约为 3 海里或 3 英里）的距离（非常接近地球的直径），光（的传播）还不到 1 秒钟”。罗默对木卫食的观测，以及对连续两次木卫食之间的时间间隔的变化的理论解释，受到当时天文台长卡西里的责难，但得到惠更斯、莱布尼兹、牛顿等人的支持，从而确立了光速有限的正确观念，并为光速的准确数值的获得奠定了基础。此后不久，惠更斯根据罗默的数据第一次计算出光速；布拉得雷在接受罗默的理论之后，用光行差的方法直接测出光速。光速作为一个物理常数，它的重要意义愈来愈被人们所公认。罗默还是子午环的创建人之一，他用一个分度圆盘对通过子午面的星体进行了观测。

莱布尼兹 (Gottfried Wilhelm, Leibniz 1646 ~ 1716)

德国科学家和哲学家。1646年6月出生于莱比锡。父为莱比锡大学哲学教授，他的丰富藏书有助于小莱布尼兹博学多才。15岁入莱比锡大学学习哲学与法律，18岁以逻辑学论文获哲学学士学位，20岁时以方法论的论文《论组合的艺术》获阿尔道夫大学哲学博士学位。同年获该大学教授席位。30岁起在汉诺威主持德卡图书馆数十年。1716年11月14日逝世。

他用相当多的时间从事外交活动和科学活动，曾建议普鲁士、俄、奥、波兰等国设立科学院（据说还包括致信中国的康熙皇帝）。他有一种不屈于传统观念的探索精神，有“什么都不相信的人”之称。他一贯关心科学的应用和应用数学的发展。他善于结识知名的科学家与数学家，例如惠更斯等人。他继帕斯卡1649年发明机械式计算机以后对机件进行改革，并把法国教士从中国传入的阴阳八卦观念创新为二进制并应用于计算机中，在1671年发明了一台新的机械式计算机，1673年在英国皇家学会演示后被选为皇家学会会员。他独立地发现了微积分学，并于1684—1686年正式发表。这些成果使他“业余”地成为数学家和物理学家。

在物理学方面，他从当时研究的热门问题——关于运动的量度中，看出了他人之不足，他认为运动应当用活力 (mv^2) 来量度。提出“活力”（指动能）守恒定律（1686），这是能量守恒定律的第一个表述。他反对牛顿的超距作用和绝对时空观。

由于在微积分发明的优先权问题上，莱布尼兹与牛顿有过争议，后来又受民族主义影响，英国和欧洲大陆之间优先权之争持续到他死后很长时期。

主要著作有：《新物理学假说》、《力学范本》等。

哈雷 (Edmund Halley, 1656—1742)

英国天文学家、数学家。1656年8月8日出生于伦敦附近的哈格斯顿。1676年在牛津大学四年级时放弃获得学位的机会去南太平洋圣赫勒纳岛建立南半球第一座天文台，在那里测编了第一个南天恒星表（341颗），并于1678年发表，当年被选为皇家学会会员。他还分析了1337—1698年观测到的24颗彗星轨道记录，指出1531年、1607年、1682年以近似轨道三次出现的彗星是同一颗，并预言1758年它会再度重现，并在后来得到证实，后世称它为哈雷慧星。1705年发表了《彗星天文学论说》。1720年任格林尼治天文台第二任台长。1742年1月14日在格林尼治去世。

在哈雷的工作中，引力问题是个关键。他和牛顿及胡克都对此感到兴趣，但每个人的着眼点和科学实力不同。哈雷已经知道开普勒的行星椭圆轨道定律，也想到了引力的平方反比关系，但还无法证明后者即是前者的

动力学原因，哈雷为此专程于 1684 年去剑桥向牛顿求教，并于当年年底得到牛顿的证明结果。哈雷非常高兴，鼓励并资助牛顿出版他的名著《自然哲学的数学原理》。哈雷有处理和归算大量数据的才能。他制成了第一个海上盛行风气象图，出版了《大西洋太平洋地磁图》（1701）等。在物理学中，他找到透镜共轭点之间的关系。

华伦海特（Daniel Gabriel Fahrenheit，1686—1736）

物理学家。1686 年 5 月 24 日生于但泽（现格但斯克，波兰）。曾在德国、英国、丹麦和瑞典旅行学习，拜访过许多科学家和仪器制造者，获得仪器制造者的职业。1717 年移居荷兰阿姆斯特丹，在这里被核准为仪器制造专家。他建立了一个机械车间，制造温度计、气压计、液体比重计和其他物理学和天文学仪器，并潜心于气象学、物理学方面的研究。

华伦海特 1709 年发明了第一只实用酒精温度计。1714 年又改用水银作测温物质制成水银温度计，定出了历史上第一个经验温标——华氏温标，使温度测量第一次有了统一的标准，从而使热学走上了实验科学的道路。最初华伦海特选用两个固定点：把水、冰和氯化铵或盐的混合物的温度作为一个固定点，定为零度，把健康人的体温作为另一个固定点，定为 96 度。后又把冰水的混合物作为第三个固定点，定为 32 度。后来华伦海特又扩展了他的温标，把水在标准大气压下的沸点作为一个固定点，定为 212 度。1724 年正式确立了以他名字命名的温标，同年华伦海特被选为英国皇家学会会员。华氏温标规定冰点（标准大气压下冰与被空气饱和的水之间的平衡温度）为 32 度，水的沸点（标准大气压下水和水蒸气之间的平衡温度）为 212 度。历史上以华氏温标所定义的温度叫华氏温度。随着科学技术的进步，人们早就不再使用华氏温标。现在一些国家（美国和加拿大等）在许多情况下仍继续使用华氏温度，但这已不是原来的华氏温标所定义的

温度，而是按下列数学公式所定义的温度： $t_F = 32 + \frac{9}{5}t$ 。 t_F 是华氏温度的值， t 是摄氏温度的值。华氏温度的单位为华氏度，常用符号是 °F。1 华氏度的大小恰好等于 5/9 摄氏度。

华伦海特还进行过一系列的实验研究。他发现了每一种液体都像水一样有一个固定的沸点，液体的沸点随气压的不同而变化，这一发现对精密的计温学是个很大的贡献。他研究了液体的沸点与压强和溶于其中的盐的含量关系，设计成功带气压表的温度计。1721 年他发现了水在冰点以下仍保持液态即水的过冷现象。他设计成功新型比重计，编制了物体的比重表。这些为物质热学性质的进一步研究奠定了基础。

华伦海特于 1736 年 9 月 16 日在荷兰逝世。

伯努利, D. (Daniel Bernoulli, 1700—1782)

瑞士物理学家、数学家、医学家。年 2 月 8 日生于荷兰格罗宁根, 1782 年月 17 日歿于巴塞尔。他是伯努利这个数学家族(4 代 10 人)中最杰出的代表, 16 岁时就在巴塞尔大学攻读哲学与逻辑, 后获得哲学硕士学位, 17~20 岁又学习医学, 并于 1721 年获医学硕士学位, 成为外科名医并担任过解剖学教授。但在父兄熏陶下最后仍转到数理科学。1725 年和 1727 年他和 L. 欧拉(1707—1783)先后被聘为圣彼得堡科学院的院士。他和欧拉都在 25 年内获得过 10 次法兰西科学院为当时迫切需要解决的理论与实际问题而悬赏的奖金, 例如船用发动机最佳方案等等。他们之间通信 40 年, 互通科学信息并切磋分析, 有助于许多重要问题的解决(包括弹性链、梁的力学问题、振动理论、流体动力理论等等), 成为科学史上受人称颂的科学通信。伯努利成功的领域很广, 除流体动力学这一主要领域外, 还有天文测量、引力、行星的不规则轨道、磁学、海洋、潮汐等等。

伯努利开辟并命名了流体动力学这一学科, 区分了流体静力学与动力学的不同概念。1738 年, 他发表了十年寒窗写成的《流体动力学》一书。他用流体的压强、密度和流速等作为描写流体运动的基本概念, 引入了“势函数”“势能”(“位势提高”)来代替单纯用“活力”讨论, 从而表述了关于理想流体稳定流动的伯努利方程, 这实质上是机械能守恒定律的另一形式。他还用分子与器壁的碰撞来解释气体压强, 并指出, 只要温度不变, 气体的压强总与密度成正比, 与体积成反比, 用此解释了玻意耳定律。

摄尔修斯 (Anders Celsius, 1701—1744)

瑞典物理学家、天文学家, 瑞典科学院院士, 1701 年 月 27 日生于乌普萨拉。他曾在乌普萨拉大学学习, 受父亲影响, 从事天文学、数学、地球物理和实验物理学研究。年仅 26 岁便担任了乌普萨拉科学协会会长, 并在大学任教。1730—1744 年任乌普萨拉大学教授, 1740 年兼任乌普萨拉天文台台长。

自 1732 年至 1736 年期间他离开瑞典到国外访问, 先后到柏林、纽伦堡、意大利和巴黎等地, 广泛地参观访问了天文台和著名科学家。1733 年他把在北极观察的极光的情况收集成册, 在纽伦堡出版了《极光观测资料汇编》一书。他在意大利、巴黎访问期间, 正赶上一场关于地球形状的大论战: 巴黎一方认为地球是一个纵长的白兰瓜型, 而伦敦一方则认为地球是两极扁平的横长型。为了确定地球的形状, 考证牛顿关于地球赤道附近半径大而两极扁平的理论, 法国巴黎科学院于 1735 年和 1736 年先后派出两支科技队伍, 到赤道和北极圈内进行大规模的地球纬度测量工作。摄尔修斯 1735 年去伦敦搞到了测量所需要的仪器, 1736 年便随队出发到

北极圈进行实测，1737 年顺利完成任务回国。这次论战和实地测量的结果，说明地球纬度 1 度的长度越接近北极越长，证实了牛顿力学理论的正确性，使牛顿力学在法国得到了广泛的传播。这里边也有摄尔修斯的一份功劳。

摄尔修斯在总结前人经验的基础上，1742 年创立了摄氏温标。这是摄尔修斯对热学不可磨灭的贡献。同年发表了论文《温度计中两个不动刻度的观察》。他把水银温度计插入正在熔解的雪中，定为冰点作为一个标准温度点；然后又把温度计插入沸腾的水中，定为沸点作为另一个标准温度点（这其中实际上暗含了正常大气压这个条件）。并把冰点和沸点之间等分成 100 度，所以摄氏温标又叫百分温标。为了避免测量低温时出现负值，他把水的沸点定为零度，而冰点定为 100 度。1750 年根据他的同事 M. 施勒默尔的建议，把这种标度倒转过来，以冰点为零度，沸点为 100 度。开始人们称它为“瑞典温度计”，大约在 1800 年人们才称它为摄氏温度计。1948 年在巴黎召开的第九届国际计量大会根据“名从主人”的惯例，把百分温标正式命名为“摄氏温标”，以纪念摄尔修斯。摄氏温标的单位是“摄氏度”，用 $^{\circ}\text{C}$ 表示。摄氏温度现在仍然是世界通用的温度数值表示方法。摄尔修斯对温度计的制作和改进，对促进热学的研究和发展做出了贡献。

摄尔修斯还研究了沸点和气压的关系，证明了气压不变，液体的沸点也不变化。他还研究了不同液体混合后体积减小的现象。例如他把 40 单位体积的水和 10 单位体积的硫酸混合，结果只有 48 单位体积。1744 年 4 月 25 日，摄尔修斯在乌普萨拉逝世。

富兰克林 (Benjamin Franklin, 1706—1790)

美国科学家、物理学家、发明家、政治家、社会活动家。年 1 月 17 日生于波士顿一个工人家庭。父母是英国移民，从事肥皂和蜡烛制造。由于家庭贫寒，从 8 岁起只上了两年学就辍学当了学徒，从 12 岁起到他大哥的印刷所里当学徒，以后长期从事印刷工作。他刻苦自学，他说：“读书是我唯一的娱乐。”他常常去找别人或书店借书，利用深夜读书，清晨就去归还。他曾以笔名 Richard Saunders 投稿，报纸编辑以为文章“出自名家手笔”。他不仅从书本上学习各种知识，还辗转到纽约、伦敦、费城等地流浪，在社会生活中学习。21 岁时，他在费城创办了北美第一个青年自学团体“共读社”，组织工人、技师、鞋匠、瓦匠、诗人等每周星期五来讨论哲学、科学、技术、文艺问题。这个团体后来发展为 1743 年创立的美利坚哲学会。1769 年他被选为该会的会长。25 岁时他又在费城创办了北美第一个公共图书馆，以后发展为北美公共图书馆。45 岁时，他又创办费城学院（即后来的宾夕法尼亚大学）。

作为政治家，在美国和世界历史上，有许多重要事件与富兰克林有关。

他在北美独立战争中起了重大作用，是美国的创建人之一，参与了起草《独立宣言》和美国宪法。1776~1785年他出使法国，他的科学声誉和广博的知识，十分有利于他的外交使命，在他的努力下，1778年缔结了美法联盟。1787年当选为制宪会议代表，担任宾夕法尼亚州最高行政议长。他积极反对压迫和奴役黑人，积极主张废除黑奴制度。

在他的一生中，获得过许多荣誉。1753年获得英国皇家学会颁发的科普利奖章，同年获得哈佛大学和耶鲁大学的荣誉学位。1756年当选为英国皇家学会会员，1772年当选为法兰西科学院的外国院士，1789年当选为彼得堡科学院的外国院士。

他的主要科学工作是在电学方面。这在他的一生中只占十年左右。1745—1744年间，富兰克林在费城和波士顿看到了来自苏格兰的斯宾塞（A. Spence）博士利用玻璃管和莱顿瓶所做的简单的电学实验时，心中激起强烈的探求欲望。他买下了全部展品，一位他在伦敦英国皇家学会结识的朋友柯林森（Peter Collinson）得知后，又给他寄来了大批书籍、电学著作和某些摩擦起电的设备。富兰克林和费城哲学会的朋友们一起进行了许多电学实验和理论探索。富兰克林在电学上有许多重要贡献。通过实验，他对当时许多混乱的电学知识（如电的产生、转移、感应、存储、充放电等）作了比较系统的清理。他曾把多个莱顿瓶联结起来，储存更多电荷。他用实验证明莱顿瓶内外金属箔所带电荷数量相等，电性相反。1747年5月25日他在给柯林森的信中，提出了电的单流质理论，并用数学上的正负来表示多余或缺少这种电流质。他还认为摩擦起电只是使电荷转移而不是创生，所生电荷的正负必须严格相等。这个思想后来发展为电学中的基本定律之一——电荷守恒定律。他利用这一理论说明了带介质的电容器原理。富兰克林的第二项重大贡献是统一了天电和地电，彻底破除了人们对雷电的恐惧。1749年，他的夫人丽达在观看莱顿瓶串联实验时，无意碰到莱顿瓶上的金属杆，被电火花击倒在地，卧病一周，使他更坚定了探讨雷电实质的决心。他一方面列举了12条静电火花与雷电火花的相同之处，一方面通过岗亭实验和风筝实验（1752年6月）（参见“富兰克林的风筝实验与避雷针的发明”）给予实验证明。他的一封封书信通过柯林森在英国皇家学会宣读，开始时受到的是嘲笑、怀疑，后来他的论文集《电学实验与研究》出版，特别是风筝实验的报告轰动了欧洲，使人们看到电学是一门有广大前景的科学，避雷针也成了人类破除迷信征服自然的一项重要技术成果，推动了电学、电工学的发展。富兰克林对大自然有着广泛的兴趣。他研究过物体（尤其是金属）的热传导、声音在水中的传播、利用蒸发取得低温的方法；他还研究过植物的移植、传染病的防治；在横渡大西洋时，他观察了海湾暖流对气候的影响，测量了海水的流速和温度等等。

作为发明家，他发明了高架取书器、老年人使用的双焦距眼镜、三轮

钟等。

1790年4月17日他在费城逝世，他为自己写的墓志铭只自称“印刷工富兰克林”而绝口不提后半生的重要职务。但法国经济学家杜尔哥（Anne-Robert Jacques Turgot）却为他写下了这样的赞语：“从苍天那里取得了雷电，从暴君那里取得了民权”。

卡文迪什（Henry Cavendish，1731—1810）英国物理学家和化学家。1731年10月10日生于法国尼斯。1749年考入剑桥大学，1753年尚未毕业就去巴黎留学。后回伦敦定居，在他父亲的实验室中做了许多电学和化学方面的研究工作。1760年被选为英国皇家学会会员。1803年当选为法国科学院的外国院士。卡文迪什毕生致力于科学研究，从事实验研究达年之久，性格孤癖，很少与外界来往，终身未娶。他在化学、热学、电学、万有引力等方面进行过许多成功的实验研究，但很少发表，过了一个世纪后，麦克斯韦整理了他的实验论文。并于1879年出版了名为《尊敬的亨利·卡文迪什的电学研究》一书，此后人们才知道卡文迪什做了许多电学实验。麦克斯韦说：“这些论文证明卡文迪什几乎预料到电学上所有的伟大事实，这些伟大的事实后来通过库仑和法国哲学家们的著作而闻名于科学界”。

早在库仑之前，卡文迪什已经研究了电荷在导体上的分布问题。1777年，他向皇家学会提出报告说：“电的吸引力和排斥力很可能反比于电荷间距离的平方，如果是这样的话，那么物体中多余的电几乎全部堆积在紧靠物体表面的地方，而且这些电紧紧地压在一起，物体的其余部分处于中性状态”。他还通过实验证明电荷之间的作用力 $f(r) = k \frac{1}{r^n}$ ，

其中 $n = 2 \pm \frac{1}{50}$ 。他还早于法拉第用实验证明电容器的电容取决于两极

板之间的物质。他最早建立电势概念，指出导体两端的电势与通过它的电流成正比（欧姆定律在1827年才确立）。当时还无法测量电流强度，据说他勇敢地用自己的身体当作测量仪器，以从手指到手臂何处感到电振动来估计电流的强弱。

卡文迪什的重大贡献之一是1798年完成了测量万有引力的扭秤实验，后世称为卡文迪什实验，他改进了英国机械师米歇尔（John Michell，1724—1793）设计的扭秤，在其悬线系统上附加小平面镜，利用望远镜在室外远距离操纵和测量，防止了空气的扰动（当时还没有真空设备）。他用一根39英寸的镀银铜丝吊一6英尺木杆，杆的两端各固定一个直径2英寸的小铅球，另用两颗直径12英寸的固定着的大铅球吸引它们，测出铅球间引力引起的摆动周期，由此计算出两个铅球的引力，由计算得到的引力再推算出地球的质量和密度。他算出的地球密度为水密度的5.481倍（地

球密度的现代数值为 5.517g/cm^3 ），由此可推算出万有引力常量 G 的数值为 $6.754 \times 10^{-11}\text{N} \cdot \text{m}^2/\text{kg}^2$ （现代值前四位数为 6.672 ）。这一实验的构思、设计与操作十分精巧，英国物理学家 $J.H.$ 坡印廷曾对这个实验下过这样的评语：“开创了弱力测量的新时代”。

卡文迪什在 1766 年发表了《论人工空气》的论文并获皇家学会柯普利奖章，他制出纯氧，并确定了空气中氧、氮的含量，证明水不是元素而是化合物。他被称为“化学中的牛顿”。

卡文迪什一生在自己的实验室中工作。被称为“最富有的学者，最有学问的富翁”。于 1810 年 2 月 24 日去世。

后来，他的后代亲属德文郡八世公爵 $S.C.$ 卡文迪什将自己的一笔财产捐赠剑桥大学于 1871 年建成实验室，它最初是以 $H.$ 卡文迪什命名的物理系教学实验室，后来实验室扩大为包括整个物理系在内的科研与教育中心，并以整个卡文迪什家族命名，该中心注重独立的、系统的、集团性的开拓性实验和理论探索，其中关键性设备都提倡自制，近百年来卡文迪什实验室培养出的诺贝尔奖金获得者已达 26 人。麦克斯韦、瑞利、 $J.J.$ 汤姆孙、卢瑟福等先后主持过该实验室。

瓦特 (James Watt, 1736—1819)

英国发明家、工程师。1736 年 1 月 日生于苏格兰的一个小镇格里诺克。他从小体弱多病，由父母进行了启蒙教育。父亲是个具有多种手艺的工匠，受其影响瓦特从小就有实验的兴趣和才能。传说他小的时候，曾用布把壶嘴堵死，看到蒸汽的力量把壶盖冲开。这一现象激发了他的探索精神。后来进了格里诺克文法学校学习，因身体不好，退学在家自学，并经常随父亲到工场学习制作机械模型、仪器的技术，进行化学和电学实验。靠着虚心求学、刻苦钻研的精神，15 岁学完了《物理学原理》并获得了丰富的木工、金属冶炼和加工等工艺技术。1753 年他在一家钟表店学手艺。1755 年又跟有名的机械师摩尔根当学徒。经过刻苦学习，努力实践，他已能制造难度较高的象限仪、罗盘、经纬仪等。1756 年在格拉斯哥大学当了仪器修理员，这是他一生的转折点。一方面该校具有较完善的仪器设备和先进技术，为他的工作创造了良好的技术条件。更重要的是他在这里结识了英国化学家、物理学家 $J.$ 布莱克等著名学者，他可以经常跟他们讨论改进蒸汽机的理论和技术问题，从他们那里学到许多科学理论知识。这对他后来的发明工作影响很大。

1764 年瓦特在修理纽科门蒸汽机时，精心研究了这种热机的工作原理和耗煤量大，效率低的症结。他受 $J.$ 布莱克的潜热学说的启示，找到了纽科门蒸汽机耗煤量大、效率低的原因，即汽缸在使气体膨胀和用水冷凝时一热一冷，损耗大量热量。瓦特于 1765 年发明了把冷凝过程从汽缸中分

离出来的分离式冷凝器。冷凝器的发明在蒸汽机的发展中起了关键性的作用。1768年他制成了一台单动作蒸汽机（活塞单方向推动做功），这台蒸汽机还采用了汽缸外设置绝热层、用油润滑活塞等各种新措施，大大降低了蒸汽消耗量，耗煤量只有纽科门机的1/4，动作也更迅速。1776年这种机器开始在厂矿使用。1781年，他发明了行星式齿轮，将蒸汽机活塞的往复运动变为旋转运动。1782年他发明了大动力的“双动作蒸汽机”并获得专利，并利用飞轮解决了蒸汽机运转的稳定性问题。1784年他发明了平行运动连杆机构，解决了双动作蒸汽机的结构问题。1788年他发明了离心式调速器和节气阀，用来自动控制蒸汽机的运转速度。1790年发明了蒸汽机配套用压力计。到此为止，瓦特完成了对蒸汽机的整套发明过程。经过他的一系列重大的发明和改进，使蒸汽机的效率提高到原来纽科门机的3倍多，而且配套齐全、性能优良、切合实用。瓦特由此博得了第一部现代蒸汽机——高效率瓦特蒸汽机的发明者称号。很快，瓦特蒸汽机在纺织、采矿、冶炼和交通运输等方面得到了广泛应用，极大地推动了英国和欧洲的第一次工业革命，使世界进入了所谓的“蒸汽机时代”。瓦特对蒸汽机的发明、改进及蒸汽机的广泛应用，直接推动了热力学理论的研究和发展。

瓦特还取得了其他一些成就。例如他引入了第一个功率单位：马力；他发明了压-容图，用图示的形式表明蒸汽压力如何随汽缸的有效容积而变动，后由于克拉珀龙的工作得以在热力学、热机效率研究中广泛应用；他还发明了复写墨水及其他一些仪器。由于他在科学技术上的贡献，1785年被选为伦敦皇家学会会员；1806年被授予格拉斯哥大学法学博士头衔；1814年被选为法国科学院外籍院士。

1819年8月19日瓦特在伯明翰附近的希斯菲德逝世。为了纪念这位伟大的发明家，国际单位制中功率以瓦特为单位，1832年在格拉斯哥市乔治广场还塑造了一座瓦特铜像。

库仑 (Charles Augustin de Coulomb, 1736~1806)

法国物理学家、军事工程师。1736年6月14日生于昂古莱姆。1761年毕业于军事工程学校，并作为军事工程师服役多年。后因健康日坏，被迫回家，因此有闲暇从事科学研究。由于他写的一篇题为《简单机械论》(Theorie des Machines Simples)的报告而获得法国科学院的奖励，并由此于1781年当选为法国科学院院士。法国大革命时期，他辞去公职，在布卢瓦附近乡村过隐居生活，拿破仑执政后，他返回巴黎，继续进行研究工作。1806年8月23日在巴黎逝世。

库仑的研究兴趣十分广泛，在结构力学、梁的断裂、材料力学、扭力、摩擦理论等方面都取得过成就。1773年法国科学院悬奖，征求改进船用指南针的方案。库仑在研究静磁力中，把磁针的支托改为用头发丝或蚕丝悬

挂，以消除摩擦引起的误差，从而获得 1777 年法国科学院的头等奖。他进而研究了金属丝的扭力，于 1784 年提出了金属丝的扭力定律。这一成果具有极为重要的意义，它给出了一种新的测量极小力的方法。同年他设计出一种新型测力仪器——扭秤，利用扭秤，他在 1785 年根据实验得出了电学中的基本定律——库仑定律。1788 年，他把同样的结果推广到两个磁极之间的相互作用，这项成果意义重大，它标志着电学和磁学研究从定性进入了定量研究。

早在 1781 年他还提出过关于摩擦及滑动定律。他在多种实验基础上研究了许多实际静摩擦现象及其相关因素，并提出了滑动摩擦力 $F_{\text{滑}} = \mu N_{\text{正压力}}$ 的著名公式。他还提出了在磁化过程中，分子被极化的假设。他还提出电荷沿表面分布及带电体因漏电而电量衰减的定律。

库仑著有《库仑论文集》（1884 年）。为纪念他对物理学的重要贡献，电量单位便以库仑命名。

伽伐尼（Luigi Galvani, 1737—1798）

意大利物理学家和生理学家。1737 年 9 月 9 日生于波伦亚。1759 年毕业于波伦亚大学，1762 年以《骨质的形成与发展》论文获医学博士学位。1772 年任波伦亚科学院院长。从 1775 年起任波伦亚大学解剖学教授。作为一名爱国者，他在晚年因拒绝效忠拿破仑支持的傀儡政权，被革去教职和其他职务。1798 年 12 月 4 日在波伦亚逝世。

从 1773 年起，伽伐尼开始了蛙腿肌肉运动的解剖学研究。1780 年他在青蛙肌肉上进行了第一组电生理实验，这项实验为电生理学确立了起点。他在这次实验中发现，在起电机放电的同时，如果用金属手术刀触动蛙腿神经，蛙腿肌肉立刻收缩。为了找出这一现象的原因，在他进一步的实验中意外地发现，若用两种金属分别接触蛙腿的筋腱和肌肉，当两种金属的另一端相碰时，蛙腿也会发生抽动。伽伐尼没有弄清其中的原因，他称之为动物电。他认为这种动物电可以使神经、肌肉活动，脑是分泌电液的重要器官。他的错误解释，后来被他的同胞伏打所修正。1792 年，伏打经过研究之后，认为蛙腿的抽动是一种对电流的灵敏反应，这个电流是由于两种金属插在了由肌肉提供的溶液中，并构成回路而产生的。伽伐尼的发现为伏打建立接触电动势理论奠定了基础。

赫歇耳（Friedrich Wilhelm Herschel, 1738—1822）

英国天文学家。1738 年 11 月 15 日生于德国汉诺威，后移居英国。赫歇耳早年是音乐师，利用业余时间钻研天文学。年起利用自己磨制的望远镜观测天空。1781 年 3 月在观测中首先发现天王星，并证明是一颗行星，

后又发现天王星还有两颗卫星，因而获皇家学会柯普莱奖章，并选他为会员。1821年成为英国皇家天文学会第一任会长。他通过对恒星自行的分析，认为太阳运动的方向指向武仙座。他还对双星、星团、星云和银河系进行了研究，创立了恒星天文学的研究方法。值得提出的是，他的妹妹C.L.赫歇耳和儿子J.F.赫歇耳长期协助他进行观测、资料整理和创建英国皇家天文学会的工作，成为有名的天文学家家族。

1800年，赫歇耳在观测太阳时，用灵敏温度计比较太阳光谱中不同部分的加热能力时，发现越向光谱的红端移动，温度升得越高，即使在红端之外，也测到了温度的升高。由此，他得出了太阳光谱中存在着一种不可见射线的结论，而且他还研究了各种颜色玻璃对光和热的透过程度，发现它们并不相同，以光谱的红外部分热作用最强。赫歇耳就是这样发现了红外线。

虽然发现红外线是他的天文学研究的副产品，但红外线的发现在物理学发展史上却有重要意义，拓宽了光学研究领域。

伏打 (Alessandro Volta, 1745—1827)

意大利物理学家。1745年2月出生于科莫。学生时代就对自然科学有浓厚兴趣。1774—1775年任科莫大学预科物理学教授。1779—1815年任帕维亚大学实验物理学教授。1815—1819年任帕多瓦大学哲学系主任。1819年退休后回到故乡科莫。1827年3月5日在该地逝世。伏打自1765年开始从事静电实验研究，1769年发表静电学著作《论电的吸引》。1775年发明树脂起电盘，1781年发明灵敏的麦秸验电器。1782年建立了导体电容C、电荷Q及其电势V之间的关系式。

伏打在科学上的主要贡献是发明伏打电堆。当他得悉伽伐尼“动物电”的实验消息后，于1791年着手研究这一现象，经过大量实验，他否定了“动物电”学说，提出了电的“接触”学说，指出伽伐尼电产生于两种不同金属的接触。在这项研究的基础上，他提出了著名的“伏打序列”。他称金属为第一类导体，湿物体为第二类导体，如果回路中同时存在两类导体，就能够产生电流。1800年初，他发现了能够十分明显地增强该效应的方法，从而发明了“伏打电堆”。1800年3月20日他宣布了这项发明，引起极大轰动。这是第一个可以产生稳定、持续电流的装置，为电学研究开创了新局面。1801年拿破仑一世召他到巴黎表演电堆实验，授予他金质奖章和伯爵称号；1803年当选为法国科学院外国院士。

他的其他研究成果还有：1776年发现甲烷，测定了空气的膨胀系数。为了纪念他在电学上的贡献，根据他的姓氏把电动势、电势差、电压的单位命名为伏特 (Volt)。

查理 (Jacques Alexandre Cesar Charles, 1746—1823)

法国物理学家、数学家和发明家。1746年11月12日生于法国的博让西。中学毕业后先在法国政府财政部当职员，由于对自然科学爱好，转而从事自然科学研究，自学成才。他被富兰克林勇敢探索雷电奥秘的精神所鼓舞，对科学实验产生了浓厚的兴趣。他大量收集并亲手制作各种物理仪器，从事电学、热力学、分子物理学等方面的研究和实验。他多次举办各种物理讲座，当众出色地进行物理实验演示，在学术界赢得了相当高的声誉。1795年被选为法国科学院院士，并担任巴黎工艺学院的物理学教授，此后一直从事自然科学研究和教学工作，1816年任巴黎科学院院长，成为18世纪世界著名科学家之一。

1783年在法国蒙戈尔费埃兄弟制成热空气气球后不久，他制成第一个充氢气的气球，在当年8月27日第一次实现了充氢气球升空，12月1日他和N·罗贝尔第一次乘这种充氢气球飞行了两小时，飞行了27英里即43公里。不久他又独自一人乘氢气球上升到3000米高空，作了一次35分钟的单独飞行。富兰克林目睹这一盛况后，曾给予了高度评价和热情宣传。

查理在物理学上的重要贡献是发现了查理定律。大约在1787年，查理研究气体的膨胀问题时，发现了这一定律。但是查理没有发表他发现的这个定律，而是由盖·吕萨克偶然地知道他的这一结果后于1802年发表的。后来，物理学上就把气体质量和体积不变时压强随温度正比变化的定律叫做查理定律，查理还预测了气体在恒压下的膨胀速率为一常数，从而为盖·吕萨克定律的发现创造了条件。在电学方面他坚持和发展了富兰克林的电的单流质理论，对电学的发展起了促进作用。他还发明和改进了一些仪器，发明了液体比重计、反射测向仪等。查理发表的论文大多数是数学方面的。物理方面的有《电学实验》、《温标比较》等。1823年4月7日查理在巴黎逝世。

本杰明·汤普森(伦福德) [Benjamin Thompson (Rumford), 1753—1814]

英籍物理学家。1753年3月26日生于美国马萨诸塞州，1776年移居英国，入英国国籍。到英国后，在乔治·塞克维尔勋爵帮助下，获得了科学研究的机会。1779年被选为伦敦皇家学会会员。1784年—1799年在德国巴伐利亚，备受巴伐利亚王室的礼遇，担任陆军大臣和其他要职，由于他的功勋，1790年被封为伯爵，此后就叫他伦福德伯爵。后退休到巴黎，直到1814年8月21日逝世。伦福德主要从事热学、光学、热辐射方面的研究。在1778~1781年研究火药性能时开始潜心研究热现象。1785年他试图用实验来发现热质的重量，当他确认无法做到时，便开始反对热质说。伦福德在慕尼黑指导军工生产时惊奇地发现，用钻头加工炮筒时，炮

筒在短时间内就会变得非常热。为了弄清热的来源，1796—1797年他做了一系列的炮筒钻孔实验。他精心设计了一套仪器，以保证在绝热条件下进行钻孔实验。发现只要钻孔不停，就会不断地产生出热，好像物体里含有的热是取之不尽的。有人认为这是由于铜屑比铜炮身比热大，铜屑脱落时把“热质”给了炮身。伦福德又认真测定了比热，证明钻孔前后金属与碎屑比热没有改变。他曾用数匹马带动一个钝钻头钻炮筒（这样钻下的

金属屑很少），并把炮筒浸在 $18\frac{3}{4}$ 磅温度为 60°F 的水中，发现经过

1 小时，水温升高了 47°F ，两个半小时后，水就沸腾了，在场的人无不感到惊异。伦福德看到不用火烧水就会沸腾时，也感到十分兴奋。伦福德将实验总结后，于 1798 年 1 月 25 日发表了题为《论摩擦激起的热源》的论文，指出：摩擦产生的热是无穷尽的，与外部绝热的物体不可能无穷尽地提供热物质。热不可能是一种物质，只能认为热是一种运动。伦福德否定了热质说，确立了热的运动学说。此后，1799 年英国化学家戴维也用实验论证了热质说是不成立的，支持了热的运动学说。1807 年英国物理学家托马斯·杨在《自然哲学》一书中也对热质说进行了驳斥。但是当时热质说仍占上风，伦福德对自己的理论一直充满信心，1804 年他曾说：“我相信，我将要活到足够长的时间，直到高兴地看到热素（即热质）跟燃素一起埋葬在同一个坟墓之中。”伦福德的研究为后来许多科学家如迈尔、焦耳、亥姆霍兹等确立能的转化与守恒定律开辟了道路。又经过许多科学家的努力，到 19 世纪中期热质说终于被热的分子运动论所取代。

伦福德在其他方面也做出了贡献。他确定了水的最大密度。发现了气体和液体的对流。研究了物体的导热性，指出液体是热的非导体。他与 J. 莱斯利各自独立地发现：一个表面反射热射线的性能越好，它发射的热就越少。他改进了比影光度计，还研制成一系列其他仪器。他的著作收集在《伦福德著作集》中（共 5 卷，1968~1970 年出版）。

托马斯·杨（Thomas Young，1773~1829）

英国物理学家、医生、波动光学的奠基人。1773 年 6 月 日生于英国萨默塞特郡的米尔弗顿。他出身于商人和教友会会员的家庭。自幼智力过人，有神童之称，岁学会阅读，4 岁能背诵英国诗人的佳作和拉丁文诗，9 岁掌握车工工艺，能自制一些物理仪器，9~14 岁自学并掌握了牛顿的微分法，学会多种语言（法、意、波斯、阿拉伯等）。尽管父母送他进过不少学校，但他主要把自学作为获得科学知识的主要手段。曾先后在伦敦大学、爱丁堡大学和格丁根大学学习医学，由于他对生理光学和声学的强烈兴趣（对声学的爱好与他的音乐和乐器演奏才能密切相关，他能弹奏当时的各种乐器），后来转而研究物理学。1801~1803 年任皇家研究院教授。

1811年起在伦敦行医。1818年起兼任经度局秘书，领导《海事历书》的出版工作，同时他还担任英国皇家学会国际联络秘书，为大英百科全书撰写过四十多种科学家传记。他的一生曾研究过多种学科（物理、数学、医学、天文、地球物理、语言学、动物学、考古学、科学史等），并精通绘画和音乐。在科学史上堪称百科全书式的学者，但更以物理学家著称于世。1829年5月10日在英国伦敦逝世，终年56岁。

托马斯·杨是波动光学的奠基人之一。他对光、声振动的实验研究，使他确信二者的相似性和波动说的正确性。在关于光的本性的争论中，1800年正是微粒说占上风的时期，他发表了《关于光和声的实验与研究提纲》的论文，文中他公开向牛顿提出挑战：“尽管我仰慕牛顿的大名，但是我并不因此而认为他是万无一失的。我……遗憾地看到，他也会弄错，而他的权威有时甚至可能阻碍科学的进步”。他从水波和声波的实验出发，大胆提出：在一定条件下，重叠的波可以互相减弱，甚至抵消。从1801年起，他担任皇家学院的教授期间，完成了干涉现象的一系列杰出的研究工作。他做了著名的杨氏干涉实验，先用双孔后来又用双缝获得两束相干光，在屏幕上得到干涉花样。这一实验为波动光学的复兴作出了开创性的工作，由于它的重大意义，已作为物理学的经典实验之一流传于世。他还发现利用透明物质薄片同样可以观察到干涉现象，进而引导他对牛顿环进行研究，他用自己创建的干涉原理解释牛顿环的成因和薄膜的彩色，并第一个近似地测定了七种颜色的光的波长，从而完全确认了光的周期性，为光的波动理论找到了又一个强有力的证据。

1803年，托马斯·杨发表了《物理光学的实验和计算》一文，力图用他自己发现的干涉现象解释衍射现象，以便把干涉和衍射联系起来，文中还提出当光由光密媒质反射时，光的相位将改变半个波长即所谓半波损失。1817年，他在得知阿拉果和菲涅耳共同进行偏振光干涉实验后，曾于同年1月12日给阿拉果的信上提出了光是横波的假设。在生理光学方面，他做出了一系列的贡献。早在1793年（20岁时），他向皇家学会提交第一篇论文，题为《视力的观察》，第一次发现人的眼睛晶状体的聚光作用，提出人眼是靠调节眼球的晶状体的曲率，达到观察不同距离的物体的观点。这一观点是他经过了大量的实验分析得出的。它结束了长期来对人眼为什么能看到物体的原因的争论。并因此于1794年被选为皇家学会会长。他提出了颜色的理论，即三原色原理，他认为一切色彩都可以从红、绿、蓝三种原色的不同比例混合而成，这一原理，已成为现代颜色理论的基础。

1807年，托马斯·杨出版了《自然哲学和机械技术讲义》2卷，在这本内容丰富的教材中，除了叙述他的双缝干涉实验，他还首先使用“能量”的概念代替“活力”，并第一个提出材料弹性模量的定义，引入一个表征弹性的量即杨氏模量。

他是一个热爱知识和追求真理的学者，有顽强的自修能力和自信心，曾因辨识了二块埃及古石碑上的象形文字而对考古学作出贡献，就在他逝世前仍致力于编写埃及字典的工作，他以一生中没有任何一天而感到最大的满足。

布朗 (Robert Brown, 1773~1858)

英国著名植物学家。1773年12月21日生于苏格兰的蒙特罗斯。从小就对植物有浓厚的兴趣。先入阿伯丁大学马里夏尔学院，后进爱丁堡大学学医。21岁时在英军中任助理外科医生，他一半时间为军队工作，一半时间进行自修，并收集各种植物制作标本。1801~1805年他作为专家在澳大利亚远洋勘察船“调查者号”上收集了大量的大洋洲植物标本。1805年返回伦敦，将他收集的近3900种标本进行分类，整理后写入《澳洲植物志》一书中，对植物分类学作出了贡献。布朗对物理学的贡献是发现了著名的布朗运动。1827年布朗用显微镜观察悬浮在水中的花粉颗粒时，发现花粉颗粒在水中不停地作无规则运动，颗粒越小越活跃。开始他怀疑是否是由于花粉有生命才出现这种运动的，于是他把花粉浸在酒精里将其杀死、晒干，再放入水中观察，他还用无机物玻璃碎片、小石块碾成的细粉末代替花粉放入水中作试验，同样观察到了这种现象，从而否定了这种运动是由于植物花粉有生命造成的想法。布朗把实验的详细经过、结果记录下来，写成《植物花粉的显微观察》一书，于1828年出版。书中写道：“在经过多次重复的观察以后，我确信这些运动既不是由于液体的流动也不是由于液体的逐渐蒸发所引起的，而是属于粒子本身的运动。”虽然布朗当时并不能解释这种运动的原因，但他精于观察和实验，肯定了这种运动的客观存在，发现了问题，并把问题详尽地记载下来，为后人的进一步研究做出了开拓性的贡献。这种运动后来被称为布朗运动。

布朗逝世后，随着分子动理论的发展，人们才清楚地知道，这种微小颗粒的奇妙运动是由于微粒受到作热运动的水分子从四面八方不均衡的碰撞所造成的。在布朗工作的基础上，1905年德国物理学家爱因斯坦和波兰物理学家斯莫卢霍夫斯基发表了他们对布朗运动的理论研究成果，得出了关于布朗运动的完整的统计理论，成功地用原子和分子的热运动解释了布朗运动。1908年法国物理学家让·佩兰用实验方法验证了爱因斯坦和斯莫卢霍夫斯基的理论。他们和布朗一起，间接地证实了分子的存在及其永不停息的无规则运动，这无疑是对原子-分子理论和分子动理论的正确性的有力支持，对分子物理学的发展作出了决定性的贡献。布朗运动还清楚地表明了统计力学中预言的涨落现象确实存在，使人们认识到热力学第二定律的统计规律性。布朗运动的发现的重要意义还在于，能把原来看不见的分子的微观运动和可以观察到的微粒的宏观运动联系起来，为物理学的研

究提供了一个重要的、科学的研究方法。

1858年6月10日布朗在伦敦逝世。

安培 (Andre-Marie Ampere, 1775—1836)

法国物理学家。1775年1月22日生于里昂一个富商家庭。从小受到良好的家庭教育。他父亲按照卢梭的教育思想，鼓励他走自学成才之路。12岁就自学了微分运算和各种数学书籍，显示出较高的数学天赋。为了到里昂图书馆去直接阅读欧勒、伯努利等人的拉丁文原著，他还花了几星期时间掌握了拉丁文。14岁时就钻研了当时狄德罗和达兰贝尔编的《百科全书》。没有上过任何学校，依靠自学，他掌握了各方面的知识。1793年（18岁）因其父在法国大革命时期被杀，为了糊口他做了家庭教师。在读了一本卢梭关于植物学的书以后，又重新燃起了他对科学的热情。1802年，在布尔让-布雷斯中央学校任物理学及化学教授，1808年被任命为新建的大学联合组织的总监事，此后一直担任此职。1814年被选为帝国学院数学部成员。1819年主持巴黎大学哲学讲座。1824年任法兰西学院实验物理学教授，1836年6月10日在马赛逝世。

他的兴趣十分广泛，早年是在数学方面，曾研究过概率论及偏微分方程，他的一篇关于博奕机遇的数学论文曾引起达朗贝尔的瞩目。后来又作了些化学研究，他只比阿伏加德罗晚三年导出阿伏加德罗定律。由于他高超的数学造诣，使他成为将数学分析应用于分子物理学方面的先驱。他的研究领域还涉及植物学、光学、心理学、伦理学、哲学、科学分类学等方面。他写出了《人类知识自然分类的分析说明》（1834、1843）这一涉及各科知识的综合性著作。

他的主要科学工作是在电磁学上。1820年奥斯特发现电流磁效应的消息由阿拉果带回巴黎，他作出迅速反应，在短短的一个多月时间内，提出了3篇论文，报告他的实验研究结果：通电螺线管与磁体相似；两个平行长直载流导线之间存在相互作用。进而他用实验证明，在地球磁场中，通电螺线管犹如小磁针一样取向。一系列实验结果，提供给他一个重大线索：磁铁的磁性，是由闭合电流产生的。起先，他认为磁体中存在着一个大的环形电流，后来经好友菲涅耳提醒（宏观圆形电流会引起磁体中发热），提出分子电流假说。他试图参照牛顿力学的方法，处理电磁学问题。他认为在电磁学中，与质点对应的是电流元，所以根本问题是找出电流元之间的相互作用力。为此，自1820年10月起，他潜心研究电流间的相互作用，这期间显示了他的高超实验技巧。依据四个典型实验，他终于得出了两个电流元间的作用力公式。他把自己的理论称作“电动力学”。安培在电磁学方面的主要著作是《电动力学现象的数学理论》，它是电磁学的重要经典著作之一。此外，他还提出，在螺线管中加软铁芯，可以增强磁

性。1820年他首先提出利用电磁现象传递电报讯号。

以他的姓氏安培命名的电流强度的单位，为国际单位制的基本单位之一。

阿伏加德罗 (Ameldeo Avogadro, 1776—1856)

意大利物理学家、化学家。1776年8月9日生于都灵的一个贵族家庭。年入都灵大学学习法学，1796年获法学博士，以后从事律师工专门攻读数学和物理学，尔后主要从事物理学、化学研究。1803年他发表了第一篇科学论文。1809年任韦尔切利学院自然哲学教授。1811年被选为都灵科学院院士。

阿伏加德罗毕生致力于原子-分子学说的研究。1811年，他发表了题为《原子相对质量的测定方法及原子进入化合物时数目之比的测定》的论文。他以盖·吕萨克气体化合体积比实验为基础，进行了合理的假设和推理，首先引入了“分子”概念，并把它与原子概念相区别，指出原子是参加化学反应的最小粒子，分子是能独立存在的最小粒子。单质的分子是由相同元素的原子组成的，化合物的分子则由不同元素的原子所组成。文中明确指出：“必须承认，气态物质的体积和组成气态物质的简单分子或复合分子的数目之间也存在着非常简单的关系。把它们联系起来的一个、甚至是唯一容许的假设，是相同体积中所有气体的分子数目相等”。这样就可以使气体的原子量、分子量以及分子组成的测定与物理上、化学上已获得的定律完全一致。阿伏加德罗的这一假说，后来被称为阿伏加德罗定律。

阿伏加德罗还根据他的这条定律详细研究了测定分子量和原子量的方法，但他的方法长期不为人们所接受，这是由于当时科学界还不能区分分子和原子，分子假说很难被人理解，再加上当时的化学权威们拒绝接受分子假说的观点，致使他的假说默默无闻地被搁置了半个世纪之久，这无疑科学史上的一大遗憾。直到1860年，意大利化学家坎尼扎罗在一次国际化学会议上慷慨陈词，声言他的本国人阿伏加德罗在半个世纪以前已经解决了确定原子量的问题。坎尼扎罗以充分的论据、清晰的条理、易懂的方法，很快使大多数化学家相信阿伏加德罗的学说是普遍正确的。但这时阿伏加德罗已经在几年前默默地死去了，没能亲眼看到自己学说的胜利。

阿伏加德罗是第一个认识到物质由分子组成、分子由原子组成的人。他的分子假说奠定了原子-分子论的基础，推动了物理学、化学的发展，对近代科学产生了深远的影响。他的四卷著作《有重量的物体的物理学》(1837—1841年)是第一本关于分子物理学的教程。

1856年7月9日阿伏加德罗在都灵逝世。

里特 (Johann Wilhelm Ritter, 1776~1810)

德国物理学家、化学家。1776年12月16日生于萨姆尼茨。1791—1795年在耶拿大学学医，1803—1804年任该校讲师，1804年起在慕尼黑工作，1810年1月23日在慕尼黑逝世。

他从事电学和电化学方面的研究工作。在德国作为伽伐尼电研究的先驱者，自1797年开始进行这方面的研究。1800年9月提出报告，在电解水实验中，他成功地收集到两种气体，并从胆矾中电解出铜。他反对伏打的接触说，认为电流的真正来源是化学作用。

1801年在研究光谱的不同部分对氯化银的作用时发现，随着向紫光方向移动，化学活性增加，在紫外部分，仍存在着一种不可见射线，使氯化银变黑，从而发现了紫外线。同年他观察到温差电现象。

1803年，他发现当用两根铂丝放入水中通电时，在两根铂丝上分别出现氢和氧两种气体。把铂丝与电源断开后，用导线彼此连接起来，两根铂丝犹如电源的两极，在短暂时间内，电路有电流通过，但方向与原电流相反。这样，是他最早发明了蓄电池。1805年，他用由400对直径为4英寸的金属片组成的电堆，向一根长2英寸的铁丝供电，不久铁丝灼热。改用100对直径为8英寸的金属片组成电堆，可以使32英寸长同样粗细的铁丝灼热，这表明加大面积可提高电堆的功效。这项研究使他得出：“在电动力相等情况下，电池的效果依赖于电池本身和回路的总的抵抗”，先于欧姆得出了类似关系。

高斯 (Car Friedrich Gauss, 1777—1855)

德国数学家、天文学家、物理学家。1777年4月30日生于布伦瑞克。童年时就聪颖非凡，10岁时发现等差数列公式而令教师惊叹。因家境贫寒，父亲靠短工为生，靠一位贵族资助在1795~1798年入格丁根大学学习。一年级(19岁)时就解决了几何难题：用直尺与圆规作正十七边形图。1799年以论文《所有单变数的有理函数都可以解成一次或二次的因式这一定理的新证明》获得博士学位。1807年起任格丁根大学数学教授和天文台台长，一直到逝世。1838年因提出地球表面任一点磁势均可以表示为一个无穷级数，并进行了计算，从而获得英国皇家学会颁发的科普利奖章。1855年2月23日在格丁根逝世。

高斯早年从事数学研究，取得众多成果。“数学，科学的皇后；算术，数学的皇后”，十分贴切地表达了他对数学在科学中起关键作用的观点。在他的博士论文中就提出了代数学中的一个基本定理；1818年提出存在着一种不同于欧几里得的非欧几何的想法，生前虽未发表，但事实上他也是非欧几何创始人之一。另外，对超几何级数、复变函数、概率统计、微分几何等方面也颇多建树，卓有贡献，被誉为“数学王子”。

在物理学的工作，他涉及诸多方面。1832年提出利用三个力学

量：长度、质量、时间（长度用毫米，质量用毫克，时间用秒）量度非力学量，建立了绝对单位制，最早在磁学领域提出绝对测量原理。1833年发明有线电报，与韦伯一起在格丁根大学架设电报线，用于物理实验室和天文台之间的联络。1835年在《量纲原理》中给出磁场强度的量纲。1839年在《距离平方反比的作用引力与斥力的一般理论》中阐述势理论的原则，证明了一系列定理，如高斯定理，并研究了将其用于电磁现象的可能性。1840年在《屈光研究》中，详尽讨论了近轴光线在复杂的光学系统中的成像，建立高斯光学。1845年提出电磁相互作用以有限速度传播的思想。

在地磁研究中，他与韦伯一起建立地磁观测台，与洪堡（A. von Humboldt, 1769~1859）一起组织德国磁学联合会。他的一系列研究工作，向着精确研究地磁迈出了重要一步。

在天文学与大地测量学中，他依据自己的行星算法及最小二乘法计算了皮阿齐（G. Piazzi, 1746~1826）发现的谷神星轨道；进行了地球大小及形状的理论研究。在多年的研究生涯中，他为自己规定了三条原则：“少些，但是要成熟”，“不留下进一步要做的事情”，“极度严格的要求”。尽管如此，他一生共发表著作323篇，提出科学创见404项，完成重大发明4项。丰硕的科研成果，植根于刻苦、顽强的精神。一次，他的妻子得了重病，这时他正在钻研一个问题。家里人告诉他夫人病得愈来愈重了。他听到后，仍在继续工作。不一会儿，又来人通知他：“夫人的病很重，请你立即回去。”他回答说：“我就去”，说罢，仍坐在那里继续工作。家里又再次来人：“夫人快要断气了！”他这才抬起头，但仍没离开他的座椅：“叫她等一下，我一定去。”

为纪念他在电磁学领域的卓越贡献，在电磁学量的CGS单位制中，磁感应强度单位命名为高斯。

奥斯特（Hans Christian Oersted, 1777~1851）

丹麦物理学家。1777年8月14日生于兰格朗岛鲁德乔宾的一个药剂师家庭。1794年考入哥本哈根大学，1799年获博士学位。1801~1803年去德、法等国访问，结识了许多物理学家及化学家。1806年起任哥本哈根大学物理学教授，1815年起任丹麦皇家学会常务秘书。1820年因电流磁效应这一杰出发现获英国皇家学会科普利奖章。1829年起任哥本哈根工学院院长。1851年3月9日在哥本哈根逝世。

他曾对物理学、化学和哲学进行过多方面的研究。由于受康德哲学与谢林的自然哲学的影响，坚信自然力是可以相互转化的，长期探索电与磁之间的联系。1820年4月终于发现了电流对磁针的作用，即电流的磁效应。同年7月21日以《关于磁针上电冲突作用的实验》为题发表了发现。这篇短短的论文使欧洲物理学界产生了极大震动，导致了大批实验成果的

出现，由此开辟了物理学的新领域——电磁学。

1812年他最先提出了光与电磁之间联系的思想。1822年他对液体和气体的压缩性进行了实验研究。1825年提炼出铝，但纯度不高。在声学研究中，他试图发现声所引起的电现象。他的最后一次研究工作是抗磁性。

他是一位热情洋溢重视科研和实验的教师，他说：“我不喜欢那种没有实验的枯燥的讲课，所有的科学研究都是从实验开始的”。因此受到学生欢迎。他还是卓越的讲演家和自然科学普及工作者，1824年倡议成立丹麦科学促进协会，创建了丹麦第一个物理实验室。

1908年丹麦自然科学促进协会建立“奥斯特奖章”，以表彰做出重大贡献的物理学家。1934年以“奥斯特”命名CGS单位制中的磁场强度单位。1937年美国物理教师协会设立“奥斯特奖章”，奖励在物理教学上做出贡献的物理教师。

盖·吕萨克 (Joseph Louis Gay-Lussac, 1778~1850)

法国物理学家、化学家。1778年月6日生于法国上维埃纳省的圣莱奥纳尔。1800年毕业于巴黎工艺学院。1802年起在该校任实验员。他的老师高度赞赏他的敏捷思维、高超的实验技巧和强烈的事业心，特将自己的实验室让给他进行工作，这对盖·吕萨克的早期研究工作起了很大作用。1809年升任该校化学教授。1808~1832年兼任巴黎大学物理学教授，1832~1850年任巴黎国立自然史博物馆化学讲座教授。盖·吕萨克在物理学、化学方面都做出了卓越的贡献。

盖·吕萨克在物理学方面主要从事分子物理和热学研究，在气体性质、蒸汽压、温度和毛细现象等问题的研究中都作出了出色的贡献，对于气体热膨胀性质的研究成果尤为突出。1801年他与J·道尔顿各自独立地发现了气体体积随温度改变的规律，发现了一切气体在压强不变时的热膨胀系数都相同。这个热膨胀系数经历半世纪后由英国物理学家开尔文确定了它的热力学意义，建立了热力学温标。盖·吕萨克研究了前人测定不同气体热膨胀系数很不一致的原因后指出：必须使实验气体充分干燥。他通过多种不同气体的反复实验，精确地计算后得出气体膨胀系数的数值是0.00375或 $1/266.6$ ，现代理想值为 $1/273.15$ 。盖·吕萨克于1802年发表了有关的论文：《气体热膨胀》。文中记叙道：“我的实验都是以极大的细心进行的。它们无可争辩地证明，空气、氧气、氢气、氮气、一氧化氮、蒸汽、氨气，粗盐酸、亚硫酸、碳酸的气体，都在相同的温度升高下有着同样的膨胀……我能够得出这个结论：一切普通气体，只要置于同样条件下，就可以在同样温度下进行同样的膨胀……各气体在冰点与沸点之间所增加的体积，根据一百分度的温度计，是等于原体积的 $100/26666$ 。”后来把气体质量和压强不变时体积随温度作线性变化的定律叫

盖·吕萨克定律。1807年盖·吕萨克还率先测出气体的比定压热容 c_p 和比定容热容 c_v 的比值 $=c_p / c_v=1.372$ 。同年他发现了空气膨胀时温度降低，压缩时（无热交换）温度升高。

盖·吕萨克还为探明高空与地面的空气成分及磁现象的差别做出了开拓性贡献。1804年8月23日他和好友毕奥携带实验器具乘气球上升，在6500英尺（约2000米）的高度开始实验，并继续实验直到13000英尺（约4000米）的高度。同年他又单独乘气球上升到7016米高空进行实验。实验结果表明，6300米高处的空气和地球表面附近的空气组成成份相同，地磁强度几乎也没有变化。1805年3月他与亚历山大·冯·洪堡一起为准确地测定地球磁极位置进行了历时一年的考察工作。两人在一起还利用各种方法计算了空气中氧的比例。盖·吕萨克对原子论的发展也作出了贡献。1808年他总结提出在相同温度和相同压强下相同体积的不同气体的原子数目相同的假说，后来经过阿伏加德罗的修正，这个假说更为完善，成为阿伏加德罗定律。

在化学方面，盖·吕萨克研究范围很广，取得不少成果。1808年发表了今天以他名字命名的盖·吕萨克气体反应体积比定律，这对以后化学发展影响很大。此时他被选入法国研究院。他还发现了硼，还有其他多种贡献。特别值得一提的是他的爱国主义精神。他总是把自己的研究工作和祖国荣誉联系在一起。1813年法国两位化学家在海草灰里发现了一种新元素，但在尚未分离出来时无意地把原料都给了戴维，盖·吕萨克知道后十分激动地说：“不可原谅的错误！空前严重的错误！居然倾其所有，拱手送给了外国人。戴维会发现这种元素，并把研究成果公之于世。这样，发现新元素的光荣就会属于英国，而不属于法国了。”于是他和两位化学家一起立即动手，从头做起，昼夜不停，终于与戴维同时确证了新元素——碘，为祖国争得了荣誉。1850年5月9日盖·吕萨克在巴黎逝世。

欧姆（Georg Simon Ohm, 1787~1854）

德国物理学家。1787年3月16日生于巴伐利亚州的埃朗根。他的父亲是一位对科学感兴趣的熟练锁匠，爱好哲学和数学。在其父影响、教育下，他对数学很感兴趣，并掌握了一些金属加工技能，为他后来的学习和研究创造了良好条件。1811年毕业于埃朗根大学并取得哲学博士学位，先后在埃朗根和班堡等地中学任教；1817年出版第一本著作《几何教科书》；1817~1826年在科隆大学预科讲授数学和物理；1826~1833年在柏林军事学院任职；1833年起被聘为纽伦堡工艺学校物理教授；1841年英国皇家学会授予科普利奖章，1842年被接纳为英国皇家学会国外会员；1845年为巴伐利亚科学院院士；1849年任慕尼黑大学非常任教授，1852年为该校正式

教授；1854年7月6日在慕尼黑逝世。

欧姆最重要的贡献是建立电路定律。（参见“欧姆定律的建立”）。他是受到傅里叶热传导理论（导热杆中两点间热流量与两点温度差成正比）影响来研究他的定律的。当时还缺乏明确的电动势、电流强度乃至电阻概念，适用的电流计也正在探索中。他使用了温差电池和扭秤，经过多次试验和归纳计算，才获得成功。1825年发表第一篇论文《涉及金属传导接触电的定律的初步表述》，论述了电流的电磁力的衰减与导线长度的关系。进而，他通过实验测定了不同金属的电导率。在制作导线过程中，他直接受惠于父亲的精湛技艺。英国学者巴劳（P. Barlow）发现了电流在整个电路的各部分都是一样的，这个结果启发了欧姆，这使他想到可以把电流强度（当时他称为“电磁力”、“力”）作为电路中的一个基本量。进一步的实验，导致得出了以他的名字命名的定律。以后，他又对自己的实验工作进行了数学处理与理论加工，写成了《伽伐尼电路——数学研究》一书（1827年出版）。欧姆定律刚发表时，并没有受到德国学术界的重视，反而遭到各种非议与攻击。欧姆给当时普鲁士教育部长苏尔兹赠送一本他的著作，请求安排到大学工作。但这位部长对科学不感兴趣，只把他安排到军事学校。这时，一位在德国物理学界颇有地位的物理学家鲍耳（G. E. Pohl）首先撰文攻击欧姆的《伽伐尼电路——数学研究》一书，说这本书是“不可置信的欺骗”，“它的唯一目的是要亵渎自然的尊严”。在强大的压力下，欧姆寄希望国王出面，解决事端。他给国王路德维希一世写信，并因此组成巴伐利亚科学院专门委员会进行审议，结果因意见不一，不了了之。在他给朋友的信中，流露出这一时期的痛苦心情：“《伽伐尼电路》的诞生已经给我带来了巨大的痛苦，我真抱怨它生不逢时，因为深居朝廷的人学识浅薄，他们不能理解它的母亲的真实感情”。只是当欧姆的工作后来在国外获得巨大声誉后，才在国内科学界得到关注。经过埃尔曼（P. Ermann, 1764~1851）、多佛（H. W. Dove, 1803~1879）和海尔曼（Hermann）等人多方努力，欧姆这才实现了他的多年愿望，担任慕尼黑大学物理学教授。为了纪念他在电路理论方面的贡献，电阻单位命名为欧姆。

他的研究工作还包括声学、光学等方面。

菲涅耳（Augustin-Jean Fresnel, 1788~1827）

法国土木工程师，物理学家，波动光学的奠基人之一。1788年5月10日生于诺曼底的布罗利耶城，1827年7月日卒于巴黎附近的阿夫赖城。

菲涅耳生长在建筑师的家庭，从小体弱多病。开始，学习进程较慢，转学到巴黎工艺学院以后，他的数学才能逐渐被教师所重视。后又转学到桥梁道路工程学院，在该校毕业并获得工程师称号，此后即在法国的各部

门担任道路修建工作。大约从 1814 年开始，对光学产生了兴趣，并对它进行了研究。他的科学研究是用业余时间自费进行的，因此，花费了他有限的收入。在菲涅耳的晚年，他的科学研究成果受到普遍的承认。1823 年被选为巴黎科学院院士，1825 年被批准为英国伦敦皇家学会会员，1827 年获伦敦皇家学会授予的伦福德奖章。

菲涅耳的一生只活了 39 岁，但在这短暂的一生中，他却为物理学做出了多方面的贡献。他的主要成就大多集中在光学的衍射和偏振方面。他的研究工作的特点是：精心设计实验，并将实验结果和波动说理论进行比较，进而建立完善的理论，再由实验和计算加以验证。可以说他的一生，为波动光学从实验到理论的建立起了不可磨灭的作用。由于不懂英文，菲涅耳开始时并不知道托马斯·杨的工作。他从实验和数学两方面对干涉和衍射现象进行了广泛而深入的研究。例如用菲涅耳双面镜等实验阐述干涉原理：“以极小的角度相交的两束光线的振动，在一方的节与另一方的腹相合时就相互削弱。”他对圆孔、圆屏、直边等各种情况进行了衍射实验研究和理论计算。后人称为菲涅耳衍射。1815 年他向巴黎科学院提出了第一篇论文《光的衍射》。这篇论文一开头他就批评了微粒说。认为它引进的种种假设如微粒因色而异、突变等等说明不了光为什么具有一定速度，而波动说全不需要任何假设。论文中提出了他的衍射理论及其实验根据。1816 年，他又陆续提交了关于反射光栅和半波带法的论文。

1817 年 3 月，巴黎科学院决定将衍射理论作为 1819 年数理科学的悬赏项目。5 人评审委员会中拉普拉斯、比奥和泊松是微粒说的支持者，盖·吕萨克中立，只阿拉果一人支持波动说。在安培和阿拉果的鼓励下，菲涅耳改变了对悬赏不感兴趣的态度，于 1818 年 4 月提交了论文。论文用严格的数学证明将惠更斯原理发展为后来所谓惠更斯-菲涅耳原理，即进一步考虑了各个次波叠加时的相位关系。这就圆满地解释了光的反射、折射、干涉、衍射等现象，消除了波动说的最大困难——对光的直进现象的解释。此外，论文中还用半波带法给出各种实验结果的积分计算。支持微粒说的泊松发现了菲涅耳未注意的推论：圆板阴影的中心应该有一亮点。阿拉果立即用实验得到了验证。菲涅耳本人也根据泊松提出对圆孔的其他补充问题顺利地用实验给出了回答，科学院一反初衷，决定将奖金授予菲涅耳。由此，波动说得到了巨大胜利。

但还需要用波动说进一步解释偏振现象。在这方面，菲涅耳受杨氏双光干涉实验的启发，和阿拉果合作进行了各种实验，发现了偏振光的干涉现象，从而进一步论证了光的横波性（1821）；发现了光的圆偏振和椭圆偏振现象，并从波动观点加以解释；用波动说解释了光的偏振面的旋转（1823）；他还用光的横波性及弹性理论导出了关于反射光和折射光振幅的著名公式即菲涅耳公式，从而解释了法国物理学家马吕斯（Etienne

Louis Malus, 1775 ~ 1812) 所发现的光在反射时的偏振现象和双折射现象, 为晶体光学奠定了基础。另外, 他对地球是否拖曳以太的问题进行过研究; 利用多级透镜的仪器, 对灯塔照明系统作了改进。

法拉第 (Michael Faraday, 1791 ~ 1867)

英国著名物理学家、化学家。在化学、电化学、电磁学等领域都做出过杰出贡献。他家境贫寒, 未受过系统的正规教育, 但却在众多领域中作出惊人成就, 堪称刻苦勤奋、探索真理、不计个人名利的典范, 对于青少年富有教育意义。

(1) 刻苦认真自学成才

1791年9月22日生于萨里郡纽因顿的一个铁匠家庭。13岁就在一家书店当送报和装订书籍的学徒。他有强烈的求知欲, 挤出一切休息时间贪婪地力图把他装订的一切。书籍内容都从头读一遍, 读后还临摹插图, 工工整整地作读书笔记; 用一些简单器皿照着书上进行实验, 仔细观察和分析实验结果, 把自己的阁楼变成了小实验室。在这家书店呆了8年, 他废寝忘食、如饥似渴地学习。他后来回忆这段生活时说: “我就是在工作之余, 从这些书里开始找到我的哲学。这些书中有两种对我特别有帮助, 一是《大英百科全书》, 我从它第一次得到电的概念; 另一是马塞夫人的《化学对话》, 它给了我这门课的科学基础。”

在哥哥赞助下, 1810年2月至1811年9月听了十几次自然哲学的通俗讲演, 每次听后都重新誊抄笔记, 并画下仪器设备图。1812年2月至4月又连续听了戴维4次讲座, 从此燃起了进行科学研究的愿望。他曾致信皇家学院院长求助。失败后, 他写信给戴维: “不管干什么都行, 只要是为科学服务”。他还把他的装帧精美的听课笔记整理成《亨·戴维爵士讲演录》寄上。他对讲演内容还作了补充, 书法娟秀, 插图精美, 显示出法拉第一丝不苟和对科学的热爱。经过戴维的推荐, 1813年3月, 24岁的法拉第担任了皇家学院助理实验员。后来戴维曾把他“发现法拉第”作为自己最重要的功绩而引以为荣。

法拉第1813年随同戴维赴欧洲大陆作科学考察旅行, 1815年回国后继续在皇家学院工作, 长达50余年。1816年发表第一篇科学论文。他最初从事化学研究工作, 也涉足合金钢、重玻璃的研制。在电磁学领域, 倾注了大量心血, 取得出色成绩。1824年被选为皇家学会会员, 1825年接替戴维任皇家学院实验室主任, 1833年任皇家学院化学教授。

(2) 长期实验 大胆探索

他的工作异常勤奋, 研究领域十分广泛。1818~1823年研制合金钢期间, 首创金相分析方法。1823年从事气体液化工作, 标志着人类系统进行气体液化工作的开始。采用低温加压方法, 液化了氯化氢、硫化氢、二氧

化硫、氨等。1824年起研制光学玻璃，这次研究导致在1845年利用自己研制出的一种重玻璃（硅酸硼铅），发现磁致旋光效应。1825年在把鲸油和鳕油制成的燃气分馏中发现苯。

他最出色的工作是电磁感应的发现和场的概念的提出。1821年在读过奥斯特关于电流磁效应的论文后，为这一新的学科领域深深吸引。他刚刚迈入这个领域，就取得重大成果——发现通电流的导线能绕磁铁旋转，从而跻身著名电学家的行列。因受苏格兰传统科学研究方法影响，通过奥斯特实验，他认为电与磁是一对和谐的对称现象。既然电能生磁，他坚信磁亦能生电。经过10年探索，历经多次失败后，1831年8月26日终于获得成功。这次实验因为是用伏打电池在给一组线圈通电（或断电）的瞬间，在另一组线圈获得的感生电流，他称之为“伏打电感应”。而后，同年10月17日完成了在磁体与闭合线圈相对运动时在闭合线圈中激发电流的实验，他称之为“磁电感应”。经过大量实验后，他终于实现了“磁生电”夙愿，宣告了电气时代的到来。

作为19世纪伟大实验物理学家的法拉第，他并不满足于现象的发现，还力求探索现象后面隐藏着的本质；他既十分重视实验研究，又格外重视理论思维的作用。1832年3月12日他写给皇家学会一封信，信封上写有“现在应当收藏在皇家学会档案馆里的一些新观点”，那时的法拉第已经孕育着电磁波的存在以及光是一种电磁振动的杰出思想，尽管还带有一定的模糊性。为解释电磁感应现象，他提出“电致紧张态”与“磁力线”等新概念，同时对当时盛行的超距作用说产生了强烈的怀疑：“一个物体可以穿过真空超距地作用于另一个物体，不要任何一种东西的中间参予，就把作用和力从一个物体传递到另一个物体，这种说法对我来说，尤其荒谬。凡是在哲学方面有思考能力的人，决不会陷入这种谬论之中”。他开始向长期盘踞在物理学阵地的超距说宣战。与此同时，他还向另一种形而上学观点——流体说进行挑战。1833年，他总结了前人与自己的大量研究成果，证实当时所知摩擦电、伏打电、电磁感应电、温差电和动物电等五种不同来源的电的同一性。他力图解释电流的本质，导致他研究电流通过酸、碱、盐溶液，结果在1833~1834年发现电解定律，开创了电化学这一新的学科领域。他所创造的大量术语，沿用至今。电解定律除本身的意义外，也是电的分立性的重要论据。

1837年他发现电介质对静电过程的影响，提出了以近距“邻接”作用为基础的静电感应理论。不久以后，他又发现了抗磁性，在这些研究工作的基础上，他形成了电和磁作用通过中间介质、从一个物体传到另一个物体的思想。于是，介质成了“场”的场所，场这个概念正是来源于法拉第。正如爱因斯坦所说，引入场的概念，是法拉第的最富有独创性的思想，是牛顿以来最重要的发现。牛顿及其他学者的空间，被视作物体与电荷的容

器；而法拉第的空间，是现象的容器，它参与了现象。所以说法拉第是电磁场学说的创始人。他的深邃的物理思想，强烈地吸引了年轻的麦克斯韦。麦克斯韦认为，法拉第的电磁场理论比当时流行的超距作用电动力学更为合理；他正是抱着用严格的数学语言来表述法拉第理论的决心闯入电磁学领域的。法拉第坚信：“物质的力借以表现出的各种形式，都有一个共同的起源”，这一思想指导着法拉第探寻光与电磁之间的联系。1822年，他曾使光沿电流方向通过电解液，试图发现偏振面的变化，没有成功。这种思想是如此强烈，执着的追求使他终于在1845年发现强磁场使偏振光的偏振面发生旋转。他的晚年，尽管健康状况恶化，仍从事广泛的研究。他曾分析研究电缆中电报信号迟滞的原因，研制照明灯与航标灯。他的成就来源于勤奋，他的主要著作《日记》由16041则汇编而成；《电学实验研究》竟有3362节之多。

(3) 治学谨严刚正真诚

法拉第一生热爱真理，热爱人民，真诚质朴，作风严谨，这样的感人事迹很多。他说：“一事实，除非亲眼目睹，我决不能认为自己已经掌握。”“我必须使我的研究具有真正的实验性。”在1855年给化学家申拜因的信中说：“我总是首先对自己采取严厉的批判态度，然后才给别人以这样的机会”，在一次市哲学会的讲演中他指出：“自然哲学家应当是这样一些人，他愿意倾听每一种意见，却下定决心要自己作判断。他应当不被表面现象所迷惑，不对某一种假设有偏爱，不属于任何学派。在学术上不盲从大师。他应当重事不重人。真理应当是他的首要目标。如果有了这些品质，再加上勤勉，那么他确实可以有希望走进自然的圣殿”。他是这样说的，也确实是这样做的。

他在艰难困苦中选择科学为目标，就决心为追求真理而百折不回，义无反顾，不计名利，刚正不阿。他热爱人民，把纷至沓来的各种荣誉、奖状、证书藏之高阁，却经常走访贫苦教友的家庭，为穷人只有纸写的墓碑而浩然兴叹。他关心科学普及事业，愿更多的青少年奔向科学的殿堂。1826年他提议开设周五科普讲座，直到1862年退休他共主持过100多次讲座，并积极参与皇家学院每年“圣诞节讲座”凡19年。根据他的讲稿汇编出版了《蜡烛的故事》一书，被译为多种文字出版，是科普读物的典范。

他生活简朴，不尚华贵，以致有人到皇家学院实验室作实验时错把他当作守门的老头。1857年，皇家学会学术委员会一致决议聘请他担任皇家学会会长，对这一荣誉职务他再三拒绝，他说：“我是一个普通人……如果我接受皇家学会希望加在我身上的荣誉，那么我就不能保证自己的诚实和正直，连一年也保证不了”。同样的理由，他谢绝了皇家学院的院长职务。当英王室准备授予他爵士称号时，他多次婉言谢绝说：“法拉第出身平民，不想变成贵族”。他的好友丁铎尔(J. Tyndall, 1820~1893)对

此作了很好的解释：“在他的眼中看去，宫廷的华丽，和布莱屯(Brighton)高原上面的雷雨比较起来，算得什么？皇家的一切器具，和落日比较起来，又算得什么？其所以说雷雨和落日，是因为这些现象在他的心里，都可以挑起一种狂喜，在他这种人的心胸中，那些世俗的荣华快乐，当然没有价值了”。“一方面可以得到十五万镑的财产，一方面是完全没有报酬的学问，要在这两者之间去选择一种。他却选定了第二种，遂穷困以终”。这就是这位铁匠的儿子、订书匠学徒的郑重选择。1867年8月25日逝世，墓碑上照他的遗愿只刻有他的名字和生卒年月。后世的人们，选择了法拉作为电容的国际单位，以纪念这位物理学大师。

卡诺(Nicolas Leonard Sadi Carnot, 1796~1832)

法国物理学家、军事工程师。1796年6月1日生于巴黎。其父L.卡诺是法国有名的数学家、将军和政治活动家，学术上很有造诣；1807年退出政界、军界后，把自己的全部精力都倾注在儿子的学业上，对卡诺的影响很大。卡诺1812年考入巴黎工艺学院，从师于泊松、盖·吕萨克、安培等人。1814年以优异成绩毕业。同年入梅斯工兵学校深造，1816年成为一名军事工程师，并任少尉军官。1820年离开部队回到巴黎，继续从事他所酷爱的自然科学的学习和研究。先后在巴黎大学、法兰西学院、矿业学院和巴黎国立工艺博物馆攻读物理学、数学和政治经济学，打下了雄厚的理论基础。

卡诺正处在蒸汽机迅速发展、广泛应用的时代。他看到从国外进口的尤其是英国制造的蒸汽机，性能远远超过自己国家生产的，便决心从事热机效率问题的研究。他不像许多人那样着眼于局部的、机械的细节的改良，而是独辟蹊径，从理论的高度上对热机的工作原理进行研究，以期得到普遍性的规律。1824年他发表了名著《谈谈火的动力和能发动这种动力的机器》，书中写道：“为了以最普遍的形式来考虑热产生运动的原理，就必须撇开任何的机构或任何特殊的工作介质来进行考虑，就必须不仅建立蒸汽机原理，而且建立所有假想的热机的原理，不论在这种热机里用的是什么工作介质，也不论以什么方法来运转它们。”恩格斯对卡诺的这种研究方法给予了高度评价，在《自然辩证法》中称赞卡诺“撇开了这些对主要过程无关重要的次要情况而设计了一部理想的蒸汽机(或煤油机)，的确，这样一部机器就像几何学上的线或面一样是决不可能制造出来的，但是它按照自己的方式起了像这些数学抽象所起的同样的作用：它表现纯粹的、独立的、真正的过程。”卡诺出色地运用了理想模型的研究方法，以他富于创造性的想象力，精心构思了理想化的热机——后称卡诺可逆热机(卡诺热机)，提出了作为热力学重要理论基础的卡诺循环和卡诺定理，从理论上解决了提高热机效率的根本途径。在这篇论文中卡诺指出了热机工作

过程中最本质的东西：热机必须工作于两个热源之间，才能将高温热源的热量不断地转化为有用的机械功。明确了“热的动力与用来实现动力的介质无关，动力的量仅由最终影响热质传递的物体之间的温度来确定”，指明了循环工作热机的效率有一极限值。而按可逆卡诺循环工作的热机所产生的效率最高。顺便指出，这些结论卡诺是根据热质守恒的思想和永动机不可能原理得出的，显然热质守恒思想是错误的。实际上卡诺的理论已经深含了热力学第二定律的基本思想，但由于受到热质说的束缚，使他当时未能完全探究到问题的底蕴。可惜卡诺英年早逝，他的理论是由后人克拉珀龙赋予易懂的数学形式后才获得盛名的，是经过克劳修斯、开尔文等人的研究才得到发展，并具有重要的实践意义。

1832年8月24日卡诺因染霍乱症在巴黎逝世，年仅36岁。按当时处理霍乱死者的办法，死者所有的资料及个人物品必须全部埋葬掉。这无疑给科学事业带来不可弥补的损失。根据1878年他弟弟公布的卡诺去世时幸免被毁的一束笔记残页中发现，卡诺已经意识到热质说的错误而转向热的动力学理论，并且发现了能的转化与守恒定律。1830年卡诺在笔记中指出：“热不是别的什么东西，而是动力（能量），或者说，它是改变了形式的运动。它是（物体中粒子的）一种运动（的形式）。如果物体的粒子的动力被摧毁了，必定同时有力产生，其量正好准确地同被摧毁的动力的量成正比，反过来说，如果热损失了，必定有动力产生”。“动力（能量）是自然界的一个不变量，准确地说，它既不能产生也不能消灭，实际上它只改变它的形式。这就是说，它有时引起一种运动，有时引起另一种运动，但它决不消失”。这就是能量守恒转换定律的明确的最早表述，可惜1878年文稿公布时该定律已经确立，卡诺的这些思想在历史上没能起到应有的作用。

亨利（Joseph Henry，1797～1878）

美国物理学家。1797年12月17日生于奥尔巴尼的一个工人家庭。13岁时，因家境贫寒被迫辍学去做钟表店学徒。一次在乡间玩耍时，看见一只野兔，他拚命追过去。野兔钻入了一个洞口，他也循着这个洞口爬进去，结果他钻到了一所教堂的藏书室。他有生以来第一次看到这么多书，他翻到一本《实验哲学讲义》就贪婪地读起来，这本书激发起他对自然科学的浓厚兴趣，他决心重返学校继续读书。1819～1822年在奥尔巴尼学院学习。毕业后当过家庭教师、道路测量员和图书管理员。1826～1832年回母校任该院数学和自然哲学教授；1832年起被聘为新泽西学院（现今普林斯顿大学）教授；任教期间致力于电磁学研究，成为美国继富兰克林之后的著名电学家。1846年起被任命为史密森学会的第一任秘书；他是美国科学促进协会的组织者之一，1849年任该协会主席；他还是美国国家科学院的

创始者之一，1866 年被选为副院长，1867 年被选为院长；1871 年创立华盛顿哲学学会，任学会主席。1878 年 5 月 13 日在华盛顿逝世。

他的主要研究领域在电磁学，1827 年开始研究电磁现象。他在研究电磁铁时，知道要制作强力电磁铁，需增加绕组圈数，但绝缘是个大问题。当时他很简单地解决了这个问题：他将自己妻子的一条精美的裙子撕成条缠在裸导线外做成绝缘导线，再绕成多层绕组。1828 年他组装成第一个强电磁铁，1831 年起重量可高达 1 吨，把 1825 年 W. 斯特金裸线电磁铁提起 4 公斤重物的纪录提高了数百倍！并为传送电信号提供足够的感应电流。在继续改进电磁铁时，发明模型电报机，1831 年在 1.6 公里的距离上建起并成功地操作了自己设计的电报。

1831 年制成电动机。1832 年研究并发现了自感现象，并能定性确定各种形状导体的自感的相对大小，其结果分别于 1832 年及 1835 年发表。1835 年发明电磁继电器。1842 年确立了电容器放电的振荡性质。为了纪念他在电磁学方面的一系列成就，以他的名字命名电感单位。

他的研究工作还涉及毛细现象、磷光现象、太阳黑子及辐射等方面。在史密森学会工作期间，主管气象研究，大力提倡采用发明不久的电报来传送气象报告，进行科学的大气预报。

他还积极提倡科技情报的国际交流。亨利虽然不反对社会应有专利制度，但他从不拿自己的多项发明申请专利，而是无偿地向社会公布。他对奉劝他的人说：“允许一个人独享科学带来的好处，和科学的尊严不相容”。

克拉珀龙 (Benoit Pierre Emile Clapeyron, 1799 ~ 1864)

法国物理学家和土木工程师。1799 年 1 月 26 日生于巴黎。1818 年毕业于巴黎工艺学院。1820 ~ 年在俄国彼得堡交通工程部门担任工程师，在铁路部门有较大贡献。回到法国后，1844 年起任巴黎桥梁道路学校教授。1848 年被选为巴黎科学院院士。

克拉珀龙主要从事热学、蒸汽机设计和理论、铁路工程技术方面研究。他设计了法国第一条铁路线。法国第一座铁路桥也是以他的计算为基础的，他在设计计算中发明了以他命名的支撑力矩计算法。克拉珀龙在物理上的贡献主要是热学方面。在他发表的《关于热的动力》的论文中，克拉珀龙重新研究和发展的卡诺的热机理论，1834 年赋予卡诺理论以易懂的数学形式，使卡诺理论显出巨大意义。

他利用瓦特发明汽缸蒸汽的压容图示法（即现在的 p-V 图）将由两个等温过程和两个绝热过程组成的卡诺循环表示出来（图 2

-2-9）。并且用数学形式证明了，卡诺热机在一次循环过程中所做的功在数值上正好等于循环曲线所围成的面积。他还提出由蒸汽机所作的功和在

这一循环中所供应的热量之比，可定出蒸汽机的效率。这种图示法直观地显示出热机在一个循环过程中所作的功。瓦特发明的压-容图埋没多年由于克拉珀龙的重新发现，在热力学、热机效率研究中得到广泛的应用。他在卡诺定理的基础上研究了汽-液平衡问题。按照热质说，利用一个无限小的可逆卡诺循环得出了著名的克拉珀龙方程。后来 1851 年克劳修斯从热力学理论也导出了这个方程。因而称之为克拉珀龙-克劳修斯方程。它是研究物质相变的基本方程。1834 年克拉珀龙还由气体的实验定律归纳出了理想气体的状态方程，这个方程 1874 年被门捷列夫推广，故称为克拉珀龙-门捷列夫方程。

1864 年 1 月 28 日克拉珀龙在巴黎逝世

惠斯通 (Charles Wheatstone , 1802 ~ 1875)

英国物理学家、发明家。1802 年 2 月 6 日生于格洛斯特。1834 年起任皇家学院实验哲学教授；1836 年被选为皇家学会会员；1862 年获牛津大学民法博士学位；1864 年获剑桥大学法学博士学位。1875 年 10 月 19 日在巴黎逝世。

他是一名具有非凡技巧的实验家。1834 年他借助旋转镜观测电火花，测定导体中电流流过的速度。1835 年研究电火花的光谱，得出该光谱只取决于金属电极材料，而与电火花通过的气体无关。1837 年发明五针电报机并获得专利，两年后，在派丁顿与西德累顿之间架设了第一条商用电报线。1858 年研制出第一个具有实用价值的自动发报装置。

欧姆定律传入英国较晚，但传入后很快受到惠斯通的重视。1843 年他发表了欧姆定律的实验证明，进而发展了电阻的测量方法，发明了变阻器和惠斯通电桥。在贝卡利亚讲座中，他对欧姆的研究工作表示赞扬和钦佩，此举引起德国科学界及政府对欧姆研究工作的关注。

他首先在发电机中采用电磁铁。1867 年与西门子 (W . von Siemens , 1816 ~ 1892) 独立地提出自激发电机原理，为制造大容量发电机开辟了美好前景。

在其他方面，惠斯通于 1829 年发明六角手风琴，1837 年查明了音色决定于泛音的相对强度。他还发明了观察立体图象的体视镜，现在仍用于观察 X 射线和航空照相。

楞次 (М Xp cT BaHOB eH , 1804 ~ 1865)

俄国物理学家。1804 年 2 月 24 日生于德尔帕特 (今爱沙尼亚共和国的塔尔都)。1820 年入德尔帕特大学；在大学二年级时由校长推荐参加 1823 ~ 1826 年“企业号”单桅炮舰的全球考察旅行；他设计了海水测深仪等仪器并卓越地完成了海上物理考察，1834 年起当选为科学院院士；1836

—1865 年任彼得堡大学教授，1840 年任数理系主任，1863 年任校长。其间还在海军和师范学院任教。1865 年 2 月 10 日在罗马逝世。

楞次从青年时代就开始研究电磁感应现象。1831 年法拉第发现了电磁感应现象后，当时已有许多便于记忆的“左手定则”、“右手定则”、“右手螺旋法则”等经验性规则，但是并没有给出确定感生电流方向的一般法则。1833 年楞次在总结了安培的电动力学与法拉第的电磁感应现象后，发现了确定感生电流方向的定律——楞次定律。这一结果于 1834 年在《物理学和化学年鉴》上发表。楞次定律说明电磁现象也遵循能量守恒定律。

1842 年楞次独立于焦耳并更为精确地建立了电流与其所产生的热量的关系，后被称为焦耳定律或焦耳-楞次定律。他还研究并定量地比较了不同金属的电阻率及电阻率与温度间的关系。

在电工技术、地球物理与电化学方面他也作了大量工作。

1845 年在他的倡导与协助下成立了俄国地理学会。

作为一名优秀教师，他还培养出一批著名的俄国物理学家。

韦伯 (Wilhelm Eduard Weber, 1804 ~ 1891)

德国物理学家。1804 年 10 月 24 日生于维腾堡；1826 年毕业于哈雷大学；~1831 年任哈雷大学教授；1831 年 4 月经洪堡与高斯推荐任格丁根大学教授；年奥古斯特掌管汉诺威公国大权后，废除自由宪法，引起公愤，韦伯等 7 名教授发表声明提出抗议，因而被解除教授职务；在短暂引退后，1843 年起任莱比锡大学教授；1849 年又重回格丁根大学执教。1891 年 6 月 23 日在格丁根逝世。

他早期曾研究波的传播问题，1825 年曾写过关于波动的论文，因而受到物理界的重视。1832 年协助高斯提出磁学量的绝对单位。1833 年又与高斯合作在格丁根大学校园内物理实验馆与天文台之间架设起一条长 9000 英尺的电报线传输信号，这是世界上第一台有线电报。

他根据电磁感应定律、电解定律、欧姆定律建立了电动势、电流强度、电阻、电量的绝对单位并提出了电流强度、电阻绝对单位的测量方法。为适应这些测量，还发明了一系列的测量仪器，如双线电流计等。在理论方面，于 1846 年在安培定律的基础上提出韦伯电作用定律。他的理论保持了安培的电动力学思想，又使安培定律、库仑定律、电磁感应定律能够统一在一个公式中。但因他的公式中包含速度项，因而被认为违背能量守恒定律，这就引起一场与亥姆霍兹旷日持久的争论。这场论战，为接受麦克斯韦电磁场理论作了准备。韦伯引入了带电粒子的概念，并提出光是由物质中电粒子的振动所产生的，其频率等于电粒子振动频率。他设想同一种符号的电粒子与分子固定在一起，另一种符号的电粒子绕分子旋转，因而能在确定方向上发出光辐射。这是一种原始的物质结构的电粒子模型。他认

为物质的电磁和光学效应是由组成物质的电粒子间相互作用引起的，这种物理思想对后来德鲁德（P. K. L. Drude, 1863~1906）和洛伦兹建立电子论有相当大的影响。

1855年他与柯尔劳施（R. Kohlrausch, 1809~1858）合作测量了电量的电磁单位与静电单位的比值，其值与真空中的光速相近，这一结果为麦克斯韦创立光的电磁理论提供了重要依据。

他的研究工作还涉及声、分子物理、地磁等方面。

他的名字被命名为磁通量的国际单位。

勒威耶（Urbain Jean Joseph Le Verrier, 1811~1877）

法国天文学家。1811年3月11日生于诺曼底的圣洛。1831年在巴黎工艺学院毕业后在著名物理学家盖-吕萨克指导下从事化学实验工作。1837年任母校天文教师，开始研究天体力学。1845年，勒威耶正在从事天王星轨道理论工作，当时的巴黎天文台台长阿喇果建议他研究天王星运动的反常问题。勒威耶利用有关天王星的18次观测资料，运用万有引力定律，通过求解33个方程，于1846年8月31日计算出对天王星起摄动作用的未知行星的轨道和质量。并且预测了它的位置。他将计算结果呈送给法国科学院，与此同时他还写信给当时拥有较大望远镜的几个天文学家，请求帮助观测。他的工作在法国同行中受到了冷遇，但是却引起了柏林天文台副台长、天文学家J. G. 伽勒的注意。1846年9月18日伽勒收到勒威耶信的当天晚上，就观测搜寻，仅用一个半小时就在偏离勒威耶预言的位置52处观测到了这颗当时星图上没有的星。当时人们把这颗星称为勒威耶星，而勒威耶建议称为海王星。由于海王星的发现，英国皇家学会授予他柯普利奖章。海王星的发现肯定了牛顿万有引力定律的正确性。

他还研究过太阳系的稳定性问题和行星理论，编制了行星星历表，发现了水星近日点的旋进；他预言是一颗未知的水内行星存在造成的，但至今无人能证实这个预言。关于水星近日点的旋进，后来由爱因斯坦的广义相对论得到解释。勒威耶的气象学造诣也很深，是现代气象学的先驱者之一。勒威耶于1854~1870及1873~1877年两度出任巴黎天文台台长，还两次（1867、1868）荣获英国皇家天文学会金质奖章，担任过欧洲许多国家的科学院院士。1877年9月23日卒于巴黎。

伽勒（Galle Johann Gottfried, 1812~1910）

德国天文学家。1812年6月9日生于萨克森。1830年进入柏林大学学习天文学。1845年获得博士学位。曾任柏林天文台台长、布雷斯劳大学天文学教授。

使伽勒享有盛名的主要成就是他首先实地观测到了海王星，并且证实

了它是一颗新行星。他曾将自己的博士论文送给许多人，其中也包括勒威耶。当勒威耶将自己预言的新行星位置写信告诉许多天文学家时，许多人对搜索假想中的行星是否有价值都表示怀疑，只有加勒以极大的热情在收信的当晚就发现了勒威耶所预言的未知行星——海王星。他在给勒威耶的回信中有这样一段话：“在您所指出的位置上确实存在着一颗行星。在我收到您的来信当天，我就发现了这颗星等是8等星……第二天的观测证实它就是那颗所要寻找的行星”。由于加勒的工作，使人们进一步认识到科学理论的预言价值，也显示了牛顿万有引力定律的威力。安德鲁斯(Thomas Andrews, 1813~1885)爱尔兰物理化学家。1813年12月19日生于贝尔法斯特。曾在英国和法国巴黎学习化学和医学。1835年获爱丁堡大学医学博士学位。早年行医。1845年被任命为贝尔法斯特女王学院副院长。1849年任该校化学教授。他还是伦敦皇家学会会员(1849)，爱丁堡皇家学会会员。1885年11月26日于贝尔法斯特逝世。终年72岁。

安德鲁斯主要从事物质临界状态的研究。他是在1861年开始这一工作的。当时D.L.凯纳已经发现“乙醚、酒精和水能在相当于该液体原有2—4倍的空间内全部化成汽”；法拉第已单凭压强之助，把过去只认为是气体的氯及其他几种气体，成功地化为“液体”。他们的这些工作，成为安德鲁斯研究的基础。他选用碳酸作为研究对象，使它加压和降温，到一定数值时发现：“液体与气体之间的分界线就变得越来越模糊……最后分界线也消逝了。后来这个空间完全被一种均匀的流体占有”。他又对氨、一氧化二氮、盐酸等进行研究，发现无论当它们由液态变为气态，或由气态变为液态，都得出同样的结论：“物质的气态与液态可以通过一系列连续不断的变化而相互转化”。并对它作出理论上的解释，进而建立了物质的临界点、临界温度和临界压强的概念。他的研究成果，以《论物质气态与液态的连续性》为题，发表在1869年的《哲学学报》上。

同时，安德鲁斯指出了当时所谓的“永久气体”不能液化的原因：是因为它们的临界温度，比迄今所能得到的温度要低得多。这给以后的研究者以很大的启示。安德鲁斯还提出了固态和液态之间互相转化的问题，这为以后的研究者提出了一个有意义的课题，对物态方程和相平衡理论的发展有很大的影响。

迈尔(Julius Robert Mayer, 1814~1878)

德国医生，物理学家，热力学与生物物理学的先驱，能量守恒定律的发现者之一。迈尔1814年月25日生于符腾堡(今巴登—符腾堡)的海尔布隆。曾就学于蒂宾根大学医学系，1838年获医学博士学位，毕业后在巴黎行医。18世纪末到19世纪前半叶，自然科学上完成的一系列重大发现，广泛地揭示出自然界的各种运动之间的普遍联系和转化，使得这一时期的

科学家们力图在“自然力的统一”的哲学思想指导下研究各种运动。而且由于工业革命伴随生产技术的进步和发展，为能量守恒定律的发现创造了物质条件。在这种背景下，从1837年开始的10年内，西欧的四、五个国家，从事七、八种专业的10多位科学家分别通过不同的途径各自独立地发现了能量守恒定律。其中最突出的是迈尔、焦耳和亥姆霍兹三人。迈尔作为一个医生，受当时自然科学和生产技术发展的影响，在自然哲学思想的指导下，从动物的新陈代谢活动和能量的关系开始研究能量守恒定律。1840年2月到1841年2月，迈尔作为船医远航到印度尼西亚。在航行中他从考察人体消耗食物化学能与热能的等价性受到启发，去探索热和机械功的关系。航行结束后，他将自己的发现写成《论力的量和质的测定》一文，文中指出“力”（即能）是自然界运动变化的原因，而因等于果，所以“力”在量上是不灭的，只是质（即形式）发生变化。由于他的观点新颖又缺少精确的实验论证，不易被人接受，并且存在用质量和速度的积来表示“运动力”（即动能）的缺陷，论文没能发表（直到1881年他逝世后才发表）。迈尔很快觉察到了这篇论文的缺陷，并且发奋进一步学习数学和物理学。在此基础上于1842年发表了《论无机性质的力》的论文。他从“无不生有，有不变无”和“原因等于结果”的观念出发，表述了物理、化学过程中各种力（能）的转化和守恒的思想。论证了“力（能）是不可灭的、可转化的、无重量的客体”。他指出，落体力（重力势能）可转化为运动，运动一消失就转化为热，而蒸汽机则把热转化为功。他利用比定压热容与比定容热容之差计算出了不同力（能）之间的当量关系，他的热功当量的计算方法实际上就是公式 $C_p - C_v = R$ ，因而称之为迈尔公式。由上可见，迈尔是历史上第一个提出能量守恒定律并计算出热功当量的人。但1842年发表的这篇科学杰作当时未受到重视。以后焦耳、亥姆霍兹等人又各自独立地发现了能量守恒定律。

1845年迈尔自费出版了《论有机体的运动与物质代谢关系》的论文，进一步地发展了他的学说。他首先肯定，力（能）的转化与守恒定律是支配宇宙的普遍规律。然后具体地考察了几种不同形式的力（能），运动力（动能）、落体力（重力势能）、热、磁和电、化学力（某些物质的化合与分解）的相互转化，并把他所考察的全部力（能）画成一个表，描绘了能量相互转化的25种情况。从这个表作出了否认热质和其他无重量的流质的结论。文章第二部分指出太阳能是地球上能量的来源，并论证了有机界和无机界力（能）的统一性：植物吸收了太阳能，把它转化为化学能。动物摄取植物，通过氧化把化学能转化为热和机械能。肌肉只是转化能量的工具，它本身在运动中并没有消耗。所以迈尔也是第一个把能量转化概念应用于生物学现象的人，是生物物理学的前驱。他还用类比方法分析了人

体肌肉活动，指出运动神经犹如轮船中的舵手，起着控制的作用；新陈代谢提供了能量，犹如轮船中煤的燃烧。这接近于生物学研究中控制论思想的萌芽。可惜这篇论文当时并未得到科学界的重视。

1848年迈尔又出版了《通俗天体力学》一书，将他的热功理论运用到宇宙，讨论了宇宙中的能量循环，解释了陨石发光是由于它们在大气中损失了动能，并运用能量守恒定律解释了潮汐的涨落。

迈尔注重科学以理服人。马赫回忆说：“有一次在海德尔堡和迈尔仓促相遇时，约利稍带嘲讽地说，如果迈尔的理论是正确的话，水就能够被晃动而加热。迈尔没有答一句话就走了。几个星期以后，……他跑到约利那里喊道：‘正是那样！正是那样！’只有在经过很多的说明以后，约利才明白迈尔说话的意思。”

迈尔一生屡遭挫折。他从行医开始转而研究物理学，通过无数的艰辛取得的杰出成果，却长期被埋没，得不到应有的承认，甚至受到粗暴的、侮辱性的攻击。这使他精神上受到很大刺激，加上1846~1848年间他的3个孩子相继夭亡，他于1849年5月28日跳楼自杀，幸免于死。康复后成了一个跛子，留下终生残疾。但他仍以顽强的精神坚持能量守恒问题的研究，于1851年出版了《论热的机械当量》一书，详细地总结了的工作，并且很有分寸地保护自己发现能量守恒定律的优先权：“我深信焦耳发现了热和力。但并不知道我的发现；我承认，这位著名物理学家贡献很多，令我非常尊敬；但我仍然认为我有充分理由重申，热能和动力的当量定律及其数量表述是我首先宣布的（1842年）。”七、八年后迈尔的科学成就逐渐为社会公认。1858年瑞士巴塞尔自然科学院接受他为荣誉院士。1871年他晚于焦耳一年获得英国皇家学会的科普利奖章。以后他还获得蒂宾根大学的荣誉哲学博士、巴伐利亚和意大利都灵科学院院士等称号。恩格斯在《自然辩证法》中高度评价了迈尔的工作：“运动的量的不变性已经被笛卡儿指出了，……而运动形式的转化却直到1842年才发现，而且新的东西正是这一点，而不是量方面不变的定律。”恩格斯所指的1842年的发现即是迈尔的工作。

1878年3月20日迈尔因右臂结核感染在海尔布隆逝世。

焦耳（James Prescott Joule，1818~1889）

英国杰出的物理学家。1818年12月24日生于曼彻斯特附近的索尔福德。父亲是个富有的啤酒厂厂主。焦耳从小就跟父亲参加酿酒劳动，学习酿酒技术，没上过正规学校。16岁时和兄弟一起在著名化学家道尔顿门下学习，然而由于老师有病，学习时间并不长，但是道尔顿对他的影响极大，使他对科学研究产生了强烈的兴趣。1838年他拿出一间住房开始了自己的实验研究。他经常利用酿酒后的业余时间，亲手设计制作实验仪器，进行

实验。焦耳一生都在从事实验研究工作，在电磁学、热学、气体分子动理论等方面均作出了卓越的贡献。他是靠自学成为物理学家的。

焦耳是从磁效应和电动机效率的测定开始实验研究的。他曾以为电磁铁将会成为机械功的无穷无尽的源泉，很快他发现蒸汽机的效率要比刚发明不久的电动机效率高得多。正是这些实验探索导致了他对热功转换的定量研究。

从 1840 年起，焦耳开始研究电流的热效应，写成了《论伏打电所生的热》、《电解时在金属导体和电池组中放出的热》等论文，指出：导体中一定时间内所生成的热量与导体的电流的二次方和电阻之积成正比。此后不久的 1842 年，俄国著名物理学家楞次也独立地发现了同样的规律，所以被称为焦耳-楞次定律。这一发现为揭示电能、化学能、热能的等价性打下了基础，敲开了通向能量守恒定律的大门。焦耳也注意探讨各种生热的自然“力”之间存在的定量关系。他做了许多实验。例如，他把带铁芯的线圈放入封闭的水容器中，将线圈与灵敏电流计相连，线圈可在强电磁铁的磁场间旋转。电磁铁由蓄电池供电。实验时电磁铁交替通断电流各 15 分钟，线圈转速达每分钟 600 次。这样，就可将摩擦生热与电流生热两种情况进行比较，焦耳由此证明热量与电流二次方成正比，他还用手摇、砝码下落等共 13 种方法进行实验，最后得出：“使 1 磅水升高 1°F 的热量，等于且可能转化为把 838 磅重物举高 1 英尺的机械力（功）”（合 460 千克重米每千卡）。总结这些结果，他写出《论磁电的热效应及热的机械值》论文，并在 1843 年 8 月 21 日英国科学协会数理组会议上宣读。他强调了自然界的能是等量转换、不会消灭的，哪里消耗了机械能或电磁能，总在某些地方能得到相当的热。这对于热的动力说是极好的证明与支持。因此引起轰动和热烈的争议。

为了进一步说服那些受热质说影响的科学家，他表示：“我打算利用更有效和更精确的装置重做这些实验。”以后他改变测量方法，例如，将压缩一定量空气所需的功与压缩产生的热量作比较确定热功当量；利用水通过细管运动放出的热量来确定热功当量；其中特别著名的也是今天仍可认为是最准确的桨叶轮实验（参见“能量守恒定律的建立”中图 2-1-13）。通过下降重物带动量热器中的叶片旋转，叶片与水的摩擦所生的热量由水的温升可准确测出。他还用其他液体（如鲸油、水银）代替水。不同的方法和材料得出的热功当量都是 423.9 千克重米每千卡或趋近于 423.85 千克重米每千卡。

在 1840 ~ 1879 年焦耳用了近 40 年的时间，不懈地钻研和测定了热功当量。他先后用不同的方法做了 400 多次实验，得出结论：热功当量是一个普适量，与做功方式无关。他自己 1878 年与 1849 年的测验结果相同。后来公认值是 427 千克重·米每千卡。这说明了焦耳不愧为真正的实验大

师。他的这一实验常数，为能量守恒与转换定律提供了无可置疑的证据。

1847年，当29岁的焦耳在牛津召开的英国科学协会会议上再次报告他的成果时，本来想听完后起来反驳的开尔文勋爵竟然也被焦耳完全说服了，后来两人合作得很好，共同进行了多孔塞实验（1852），发现气体经多孔塞膨胀后温度下降，称为焦耳-汤姆孙效应，这个效应在低温技术和气体液化方面有广泛的应用。焦耳的这些实验结果，在1850年总结在他出版的《论热功当量》的重要著作中。他的实验，经多人从不同角度不同方法重复得出的结论是相同的。1850年焦耳被选为英国皇家学会会员。此后他仍不断改进自己的实验。恩格斯把“由热的机械当量的发现（迈尔、焦耳和柯尔丁）所导致的能量转化的证明”列为19世纪下半叶自然科学三大发现的第一项。

焦耳还在气体动理论的其他方面取得一些成果。例如1845年做了气体自由膨胀实验，发现一般气体的内能是温度与体积的函数，而理想气体的内能只是温度的函数，与体积无关。1848年10月，焦耳提出：根据热与机械功的相互转化而把热归结为物体内部粒子的动能以及粒子间的势能；根据赫拉帕司关于气体粒子直线运动的假设，他第一次计算了在0和101 kPa下氢粒子的速度，并得出粒子的速度与温度的二次方根成比例的结论。焦耳对蒸汽机的发展也作了不少有价值的工作。

焦耳科学研究的道路是不平坦的。他在1843年8月21日宣读论文，证实热是一种能量交换的形式时，一些大科学家都表示怀疑和不信任，多次受到科学界的冷遇。但他以百折不挠的精神，终于在1850年使自己的科学成果获得了科学界的公认。为了纪念他对科学发展的贡献，国际计量大会将能量、功、热量的单位命名为焦耳。此外与焦耳名字相联系的有：焦耳-楞次定律，焦耳气体自由膨胀实验、焦耳-汤姆孙效应、焦耳热功当量实验、焦耳热等。

1889年10月11日焦耳在塞尔逝世，终年71岁。

亚当斯（John Couch Adams, 1819~1892）

英国天文学家。1819年6月5日生于康沃尔郡，1892年月21日去世。年在剑桥圣约翰学院毕业，后在剑桥大学任教。曾两次被选为英国皇家天文学会会长（1851~1853年，1874~1876年），1861年起任剑桥大学天文台台长。

亚当斯一生在天文学和数学领域做出了不少成就，最为出色的是他根据天王星运动的反常现象预言并推算出一颗未知行星的轨道和位置。早在剑桥大学学习时，亚当斯就注意到有关天王星运动出现反常现象的问题，1842年，德国哥丁根皇家科学院为此问题设立了奖金。亚当斯大学毕业后就以此作为研究课题。当时的观测资料是可靠的，1844年以后，亚当斯研

究了这些观测资料，计算了影响天王星运动的一颗未知行星的轨道要素、质量和日心黄经，并预言未知行星的位置。1845年10月到1846年9月2日他分别向剑桥大学天文台台长查理士、格林尼治天文台台长艾里共六次报告了他的计算结果，但未受重视，这样将发现海王星的机会就让给了德国天文学家加勒和勒威耶。亚当斯是一位十分谦虚的人，他本人在对待海王星发现的优先权问题上没有进行声辩。这样他虽然暂时失去了某些荣誉，但他始终受到同行的赞赏和尊重。最终被公认为是海王星的共同发现者。1847年亚当斯和勒威耶相见于牛津并成为好友。

亚当斯还研究了月球运动的长期加速现象，成功地预言了狮子座流星雨1866年11月12—14日会重现。为表彰其功绩，英国皇家天文学会授予他金质奖章。

傅科（Jean Bernard Léon Foucault，1819~1868）

法国实验物理学家，1819年9月18日生于巴黎。幼年时即喜欢精巧手工的创制活动。为此，他早年学习外科和显微医学，后转向照相术和物理学方面的实验研究。1853年由于光速的测定获物理学博士学位，并被拿破仑三世委任为巴黎天文台物理学教授。因为他博学多才，有多项发明创造，因此受各国科学界垂青，1864年当选为英国皇家学会会员，以及柏林科学院、圣彼得堡科学院院士。1868年被选为巴黎科学院院士。1868年2月11日逝世于巴黎，终年49岁。

傅科的一生对物理学有多方面的重要贡献，尤其在力学、光学、电学方面更为突出。他的研究工作偏重于仪器的制备、新实验方法的设计、以及对物理量的精确测量。他的最出色的工作是光速的测定、“傅科摆”实验以及提出涡电流理论。

1850年，傅科采用旋转镜法，测量了光在空气和在水中的速度，差不多和菲佐在同一时期首创了在实验室测定光速的方法。1862年傅科改进了原有的实验装置，加装了一套推动圆周屏的轮系统，以便准确量度旋转镜的旋转速度，又使光经过几次反射，加长了光经过的路程，以便准确量度光经过此路程的时间。由此测得光在空气中的速度为289000千米每秒。后来，他把自己的工作写成题为《光速的实验测定：太阳的视差》的文章，于1862年发表在《法兰西科学院周报》第55卷上。傅科对光速的测量为光的波动理论的胜利提供了有力的证据。同年他被授予荣誉骑士二级勋章，并被聘为经度局成员。

1851年，傅科进行了著名的傅科摆实验。他根据地球自转的理论，提出除地球赤道以外的其他地方，单摆的振动面会发生旋转的现象，并付诸实验。他选用直径为30厘米、重28千克的摆锤，摆长为67米，将它悬挂在巴黎万神殿圆屋顶的中央，使它可以在任何方向自由摆动。下面放有直

径 6 米的沙盘和启动柱。如果地球没有自转，则摆的振动面将保持不变，如果地球在不停地自转，则摆的振动面在地球上的人看来将发生转动。当人们亲眼看到摆每振动一次（周期为 16.5 秒），摆尖在沙盘边沿画出的路线移动约 3 毫米，每小时偏转 $11^{\circ} 20'$ （即 31 小时 47 分回到原处）时，许多教徒目瞪口呆，有人甚至在久久凝视以后说：“确实觉得自己脚下的地球在转动！”这一实验又曾移到巴黎天文台重做，结论相同（图 2-2-10）。后又在不同地点进行实验，发现摆的振动面的旋转周期随地点而异，其周期正比于单摆所处地点的纬度的正弦，在两极的旋转周期为 24 小时。振动面旋转方向，北半球为顺时针，南半球为逆时针。以上实验就是著名的傅科摆实验，它是地球自转的最好证明。由此，傅科被授予荣誉骑士五级勋章。

1855 年，傅科发现在磁场中的运动圆盘因电磁感应而产生涡电流，被称为“傅科电流”。这是傅科在电磁学方面的重要发现。同年，他被英国皇家学会授予科普利奖章。傅科在其他方面的贡献还有：1845~1847 年间，傅科和菲佐合作，改进了达盖尔的照相技术，并把它应用于天文摄影；1847 年，改进了惠更斯的锥摆钟，而制成了傅科钟，后来用它测定地球的转动；1848 年，发现当日光通过含钠盐的碳弧焰时，在其光谱的钠 D 线处，出现两条黑线，后来知道，这就是钠的吸收光谱；1852 年发明了回转仪，并发现了回转罗盘效应；1855 年设计了光度计；1857 年创制了“傅科棱镜”，用于偏振光的研究并提出用镀银玻璃反射镜代替金属反射镜；1858 年，又设计了反射式望远镜的椭球面镜；1860 年发明了定日镜的跟踪系统。傅科对物理实验有着特殊的兴趣和爱好，他思路巧妙，工艺精湛，动手能力极强，再加上他的勤奋努力，致使在短暂的一生中，有多方面的发明创造，为实验物理学做出了重大的贡献。

菲佐 (Armand Hippolyte Louis Fizeau 1819~1896)

法国物理学家。1819 年 9 月 23 日生于巴黎。早年攻读医学，后转入法兰西学院学习光学，并在阿拉果指导下在天文台学习。1860 年成为巴黎科学院院士。曾长期担任巴黎工业大学教授。1856 年获得特里埃尼亚尔奖。1866 年英国皇家学会授予他伦福德奖章。1896 年 9 月 18 日于梵都尔逝世。

菲佐早年的研究工作大部分是和傅科合作进行的，这些研究大多与改进照相方法有关，他们用溴代替达盖尔照相术中的碘，从而改善了达盖尔照相术，并于 1845 年第一次摄得清晰的太阳表面像，开创了天文照相技术的新纪元。1848 年，还用分光仪观察了天体光谱，又使用起偏振器独立地发现光谱的多普勒效应，应用这一效应可测定天体的视向速度，因此被称为多普勒-菲佐效应。

1845 ~ 1849 年间，菲佐又和傅科合作研究了光的干涉，发明了一种干涉仪，并用此干涉仪发现了太阳光红外一端的不可见辐射和可见光服从同一规律，并曾测定过星体的运动速度和星体的直径。

使菲佐闻名于世的是他首创了在实验室的条件下进行光速测定的方法。1849 年 9 月，菲佐利用旋转齿轮机构将通过两齿轮隙的光束用远处的反射镜“劈开”，从时间和拉长了的距离可在实验室测出光速，这样测得光的速度为 $3.15 \times 10^8 \text{m/s}$ 。对他的实验他自己评价说：“我最近用了一个新方法来看光传递的速度，结果颇为成功。在我看来，它为准确研究这一重要现象提供了一个新途径”。在谈到他测得的光速值的误差时，他说：“初次实验提供的光速值，与天文学家们公认的光速值只有很小的差别”。1850 年 5 月，他又利用这一方法测定了光在水中的速度，并与空气中的光速值进行比较，得出水中的光速小于空气中光速的结论。这一结论有利于光的本性的争论中波动说一派的观点，因此历史上它被认为是光的微粒说还是波动说正确的判决性实验，但这已是一个迟到的判决。

1851 年，菲佐做了另一个有名的实验，即现在所谓的菲佐实验。使光在流动的水中传播，用光干涉的方法测出光在流水中的速度，在当时被认为是证实了菲涅耳关于光以太被运动媒质部分拖曳的公式，但是菲佐本人对此实验结果曾长期思索，1859 年才发表，并预感到其基本假定可能有问题。现在该实验已成为狭义相对论速度合成法则的根据。

菲佐在其他方面的研究工作还有：首先在感应圈内引进电容器，还研究过热使物体膨胀的问题。

亥姆霍兹 (Hermann von Helmholtz, 1821—1894)

德国物理学家、生理学家。使他在科学界最负盛名的是能量守恒定律的提出。1821 年 10 月 日生于柏林波茨坦的一个中学教师家庭。中学毕业后由于经济困难不能进入柏林大学学习物理，以毕业后在军队服役 8 年为条件换取公费进入柏林皇家军事医学院。但他在学习期间仍努力在柏林大学旁听，并自学了伯努利、康德、拉普拉斯、毕奥等人的著作。1842 年获医学博士学位，被任命为波茨坦驻军军医。这期间他开始研究生理学特别是感觉生理学。他提倡以物理学、化学为基础来研究生物学：受李比希的《动物化学》的影响，提出体温和肌肉的作用来源于食物的燃烧热。通过对动物的大量实验，总结出“一种自然力如果由另一种自然力产生时，其中当量不变。”这最终导致他明确地提出能量守恒定律。1847 年他在新成立的德国物理学会发表了著名的“关于力的守恒”讲演。从而第二年被特许从军队退役，担任柯尼斯堡大学的生理学副教授。

亥姆霍兹在这次著名的讲演中，从当时已有的科学成果第一次用数学方式详细地提出今天大家所理解的能量守恒定律。主要论点是：一切科

学都可以归结到力学（这导致了他的机械唯物主义观点）；证明了牛顿力学和拉格朗日力学在数学上是等价的，因而可以用拉格朗日的方法以力所传递的能量或它所作的功来量度力；所有这种能量是守恒的。他讨论了当时已知的力学的、热学的、电学的、化学的各种科学成果，严谨地论证了各种运动中能量的守恒定律。他还进一步明确了力学中的“势能”概念，给出了万有引力场和电场的势能表示式。这次讲演内容后来写成专著《力之守恒》，于1853年发表。德国医生迈尔于1842年偏重于从一般哲学方面即自然力的相互联系方面提出能量守恒的概念，英国物理学家焦耳从实验方面1843年测定了热功当量值，而亥姆霍兹则是从物理理论方面论证了能量转换的规律性。所以，提出能量守恒定律的荣誉通常归之于亥姆霍兹、迈尔和焦耳三人。

从1871年开始，亥姆霍兹的研究方向转向物理学。在电磁理论方面，他测出电磁感应的传播速度为314 000 km/s，由法拉第电解定律推导出电可能是粒子。由于他的一系列讲演，麦克斯韦的电磁理论才真正引起欧洲大陆物理学家的注意，并且导致他的学生赫兹于1887年用实验证实电磁波的存在以及取得一系列重大成果。在热力学研究方面，于1882年发表论文《化学过程的热力学》，他把化学反应中的“束缚能”和“自由能”区别开来，指出前者只能转化为热，后者却可以转化为其他形式的能量，他从克劳修斯的方程，导出了后来称作的吉布斯-亥姆霍兹方程。他还研究了流体力学中的涡流、海浪形成机理和若干气象问题。

亥姆霍兹的一生，研究领域十分广泛，除物理学外，在生理光学和声学、数学、哲学诸方面都作出了重大贡献。他测定了神经脉冲的速度，重新提出托马斯·杨的三原色视觉说研究了音色、听觉和共鸣理论，发明了验目镜、角膜计、立体望远镜。他对黎曼创立的非欧几何学也有研究。曾荣任柏林大学校长（1877）和国家物理工程研究所所长（1888），主张基础理论与应用研究并重。他的成就被国际学术界所承认，1860年被选为伦敦皇家学会会员。并获该会1873年度科普利奖章。1894年9月8日，这位多才多艺的科学家于柏林附近的夏洛腾堡逝世。

克劳修斯（Rudolph Clausius, 1822~1888）

德国物理学家。是气体动理论和热力学的主要奠基人之一。1822年1月2日生于普鲁士的克斯林（今波兰科沙林）的一个知识分子家庭。曾就学于柏林大学，1847年在哈雷大学得主修数学和物理学的哲学博士学位。从1850年起，曾先后任柏林炮兵工程学院、苏黎世工业大学、维尔茨堡大学、波恩大学物理学教授。他曾被法国科学院、英国皇家学会和彼得堡科学院选为院士或会员。

克劳修斯主要从事分子物理、热力学、蒸汽机理论、理论力学、数学

等方面的研究，特别是在热力学理论、气体动理论方面建树卓著。他是历史上第一个精确表示热力学定律的科学家。1850年与兰金(William John Macquorn Rankine, 1820—1872)各自独立地表述了热与机械功的普遍关系——热力学第一定律。并且提出蒸汽机的理想的热力学循环(兰金-克劳修斯循环)。1850年克劳修斯发表《论热的动力以及由此推出的关于热学本身的诸定律》的论文，他从热是运动的观点对热机的工作过程进行了新的研究。论文首先从焦耳确立的热功当量出发，将热力学过程遵守的能量守恒定律归结为热力学第一定律，指出在热机做功的过程中一部分热量被消耗了，另一部分热量从热物体传到了冷物体。这两部分热量和所产生的功之间存在关系： $dQ = dU + dW$ 。式中 dQ 是传递给物体的热量， dW 表示所作的功， U 是克劳修斯第一次引入热力学的一个新函数，是体积和温度的函数。后来开尔文把 U 称为物体的能量，即热力学系统的内能。论文的第二部分，在卡诺定理的基础上研究了能量的转换和传递方向问题，提出了热力学第二定律的最著名的表述形式(克劳修斯表述)：热不能自发地从较冷的物体传到较热的物体。因此克劳修斯是热力学第二定律的两个主要奠基人(另一个是开尔文)之一。

在发现热力学第二定律的基础上，人们期望找到一个物理量，以建立一个普适的判据来判断自发过程的进行方向。克劳修斯首先找到了这样的物理量。1854年他发表《力学的热理论的第二定律的另一种形式》的论文，给出了可逆循环过程中热力学第二定律的数学表示形式： $\oint \frac{dQ}{T} = 0$ 。从

而引入了一个新的后来定名为熵的态参量。1865年他发表《力学的热理论的主要方程之便于应用的形式》的论文，把这一新的态参量正式定名为熵。并将上述积分推广到更一般的循环过程，得出热力学第二定律的数学表示形式： $\oint \frac{dQ}{T} \leq 0$ 。等号对应于可逆过程，不等号对应于不可逆过程。这

就是著名的克劳修斯不等式。利用熵这个新函数，克劳修斯证明了，任何孤立系统中，系统的熵的总和永远不会减少，或者说自然界的自发过程是朝着熵增加的方向进行的。这就是“熵增加原理”，它是利用熵的概念所表述的热力学第二定律。后来克劳修斯不恰当地把热力学第二定律推广到整个宇宙，提出所谓“热寂说”。

在气体动理论方面克劳修斯作出了突出的贡献。克劳修斯、麦克斯韦、玻耳兹曼被称为气体动理论的两个主要奠基人。由于他们的一系列工作使气体动理论最终成为定量的系统理论。1857年克劳修斯发表《论热运动形式》的论文，以十分明晰的方式发展了气体动理论的基本思想。他假定气体中分子以同样大小的速度向各个方向随机地运动，气体分子同器壁的碰撞产生了气体的压强，第一次推导出著名的理想气体压强公式，并由此推

证了玻意耳-马略特定律和盖·吕萨克定律，初步显示了气体动理论的成功。而且第一次明确提出了物理学中的统计概念，这个新概念对统计力学的发展起了开拓性的作用。1858年发表《关于气体分子的平均自由程》论文，从分析气体分子间的相互碰撞入手，引入单位时间内所发生的碰撞次数和气体分子的平均自由程的重要概念，解决了根据理论计算气体分子运动速度很大而气体扩散的传播速度很慢的矛盾，开辟了研究气体的输运过程的道路。

克劳修斯在其他方面贡献也很多。他从理论上论证了焦耳-楞次定律。1851年从热力学理论论证了克拉珀龙方程，故这个方程又称克拉珀龙-克劳修斯方程。1853年他发展了温差电现象的热力学理论。1857年他提出电解除理论。1870年他创立了统计物理中的重要定理之一——位力定理。1879年他提出了电介质极化的理论，由此与O. 莫索提各自独立地导出电介质的介电常数与其极化率之间的关系——克劳修斯-莫索提公式。主要著作有《力学的热理论》、《势函数与势》、《热理论的第二提议》等。1888年8月24日克劳修斯在波恩逝世。

开尔文 (Lord Kelvin, 1824~1907)

英国著名物理学家、发明家，原名W. 汤姆孙 (William Thomson)。1824年6月26日生于爱尔兰的贝尔法斯特。他从小聪慧好学，10岁时就进格拉斯哥大学预科学习。17岁时，曾赋诗言志：“科学领路到哪里，就在哪里攀登不息”。1845年毕业于剑桥大学，在大学学习期间曾获兰格勒奖金第二名，史密斯奖金第一名。毕业后他赴巴黎跟随物理学家和化学家V. 勒尼奥从事实验工作一年，1846年受聘为格拉斯哥大学自然哲学(物理学当时的别名)教授，任职达53年之久。由于装设第一条大西洋海底电缆有功，英政府于1866年封他为爵士，并于1892年晋升为开尔文勋爵，开尔文这个名字就是从此开始的。1851年被选为伦敦皇家学会会员，1890~1895年任该会会长。1877年被选为法国科学院院士。1904年任格拉斯哥大学校长，直到1907年12月17日在苏格兰的内瑟霍尔逝世为止。

开尔文研究范围广泛，在热学、电磁学、流体力学、光学、地球物理、数学、工程应用等方面都做出了贡献。他一生发表论文多达600余篇，取得70种发明专利，他在当时科学界享有极高的名望，受到英国本国和欧美各国科学家、科学团体的推崇。他在热学、电磁学及它们的工程应用方面的研究最为出色。开尔文是热力学的主要奠基人之一，在热力学的发展中作出了一系列的重大贡献。他根据盖·吕萨克、卡诺和克拉珀龙的理论于1848年创立了热力学温标。他指出：“这个温标的特点是它完全不依赖于任何特殊物质的物理性质。”这是现代科学上的标准温标。他是热力学第二定律的两个主要奠基人之一(另一个是克劳修斯)，1851年他提出热力

学第二定律：“不可能从单一热源吸热使之完全变为有用功而不产生其他影响。”这是公认的热力学第二定律的标准说法。并且指出，如果此定律不成立，就必须承认可以有一种永动机，它借助于使海水或土壤冷却而无限制地得到机械功，即所谓的第二种永动机。他从热力学第二定律断言，能量耗散是普遍的趋势。1852年他与焦耳合作进一步研究气体的内能，对焦耳气体自由膨胀实验作了改进，进行气体膨胀的多孔塞实验，发现了焦耳-汤姆孙效应，即气体经多孔塞绝热膨胀后所引起的温度的变化现象。这一发现成为获得低温的主要方法之一，广泛地应用到低温技术中。1856年他从理论研究上预言了一种新的温差电效应，即当电流在温度不均匀的导体中流过时，导体除产生不可逆的焦耳热之外，还要吸收或放出一定的热量（称为汤姆孙热）。这一现象后叫汤姆孙效应。开尔文在电磁学理论和工程应用上研究成果卓著。1848年他发明了电像法，这是计算一定形状导体电荷分布所产生的静电场问题的有效方法。他深入研究了莱顿瓶的放电振荡特性，于1853年发表了《莱顿瓶的振荡放电》的论文，推算了振荡的频率，为电磁振荡理论研究作出了开拓性的贡献。他曾用数学方法对电磁场的性质作了有益的探讨，试图用数学公式把电力和磁力统一起来。1846年便成功地完成了电力、磁力和电流的“力的活动影像法”，这已经是电磁场理论的雏形了（如果再前进一步，就会深入到电磁波问题）。他曾在日记中写道：“假使我能把物体对于电磁和电流有关的状态重新作一番更特殊的考察，我肯定会超出我现在所知道的范围，不过那当然是以后的事了。”他的伟大之处，在于能把自己的全部研究成果，毫无保留地介绍给了麦克斯韦，并鼓励麦克斯韦建立电磁现象的统一理论，为麦克斯韦最后完成电磁场理论奠定了基础。

他十分重视理论联系实际，1875年预言了城市将采用电力照明，1879年又提出了远距离输电的可能性。他的这些设想以后都得以实现。1881年他对电动机进行了改造，大大提高了电动机的实用价值。在电工仪器方面，他的主要贡献是建立电磁量的精确单位标准和设计各种精密的测量仪器。他发明了镜式电流计（大大提高了测量灵敏度）、双臂电桥、虹吸记录器（可自动记录电报信号）等等，大大促进了电测量仪器的发展。根据他的建议，1861年英国科学协会设立了一个电学标准委员会，为近代电学量的单位标准奠定了基础。在工程技术中，1855年他研究了电缆中信号传播情况，解决了长距离海底电缆通讯的一系列理论和技术问题，经过三次失败，历经两年的多方研究与试验，终于在1858年协助装设了第一条大西洋海底电缆，这是开尔文相当出名的一项工作。他善于把教学、科研、工业应用结合在一起，在教学上注意培养学生的实际工作能力。在格拉斯哥大学他组建了英国第一个为学生用的课外实验室。开尔文一生谦虚勤奋，意志坚强，不怕失败，百折不挠。在对待困难问题上他讲：“我们都感到，

对困难必须正视，不能回避；应当把它放在心里，希望能够解决它。无论如何，每个困难一定有解决的办法，虽然我们可能一生没有找到。”他这种终生不懈地为科学事业奋斗的精神，永远为后人敬仰。1896年在格拉斯哥大学庆祝他50周年教授生涯大会上，他说：“有两个字最能代表我50年内科学研究上的奋斗，就是‘失败’两字。”这足以说明他的谦虚品德。为了纪念他在科学上的功绩，国际计量大会把热力学温标（即绝对温标）称为开尔文（开氏）温标，热力学温度以开尔文为单位，是现在国际单位制中七个基本单位之一。

基尔霍夫 (Gustav Robert Kirchhoff, 1824—1887)

德国物理学家。1824年3月12日生于柯尼斯堡；1847年毕业于柯尼斯堡大学；1848年起在柏林大学任教；1850—51年任临时教授；1854~1875年任海德堡大学教授；1874年起为柏林科学院院士；1875年重回柏林大学任理论物理学教授直到1887年10月17日在柏林逝世。

当他21岁在柯尼斯堡就读期间，就根据欧姆定律总结出网络电路的两个定律（基尔霍夫电路定律），发展了欧姆定律，对电路理论作出了显著成绩。大学毕业后，他又着手把电势概念推广到稳恒电路。长期以来，电势与电压这两个概念常常被混为一谈，当时都称为“电张力”。基尔霍夫明确区分了这两个概念，同时又指出了它们之间的联系。在光谱研究中，他与本生合作，开拓出一个新的学科领域——光谱分析，采用这一新方法，发现了两种新元素铯（1860年）和铷（1861年）。

1859年，他把食盐投入火焰，得到了强烈的钠亮线。如果再让阳光通过这一火焰投射到棱镜上，当阳光较弱时钠亮线依然存在，当太阳光强超过某一强度时，亮线消失，在同一位置出现暗线。他从热力学角度对光的辐射与吸收进行了深入研究，为了能够从理论上阐明这个问题，他引入辐射本领、吸收本领、黑体等概念，从而建立了热辐射定律。这项工作成为量子论诞生的契机。他大胆提出假设：太阳光谱中的暗线，是元素吸收的结果，该元素能够辐射与暗线同一波长的亮线。应用这一原理于天体，就能确定外层空间的化学元素含量与分布。他用这一方法研究了太阳的组成，发现太阳所含元素与地球上的若干元素相同，促使天体物理学得到发展。他还讨论了电报信号沿圆形截面导线的扰动；对惠更斯-菲涅耳原理给出更严格的数学证明。

巴耳末 (Johann Jakob Balmer, 1825 - 1898)

瑞士数学兼物理学家。1825年5月1日生于瑞士洛桑。1849年在巴塞尔由于摆线的论文获博士学位。从1859年起一直在巴塞尔女子中学任数学教师，1865~1890年兼任巴塞尔大学讲师。1898年3月12日在巴塞尔逝

世，终年 73 岁。

巴耳末在巴塞尔大学兼课时，受到该校一位对光谱很有研究的物理教授哈根拜希的鼓励，试图寻找氢光谱的规律，终于在 1884 年 6 月 25 日在巴塞尔公开发表了氢光谱波长的公式(巴耳末公式)，后刊载在 1885 年《物理、化学纪要》杂志上。

巴耳末开始研究工作时，可见光区域的 4 条氢谱线已经过埃姆斯特朗等人大量较精确的测定，紫外区的 10 条谱线也在恒星光谱中发现。但是，当时这些数据是零散的，没有规律的。巴耳末首先否定了把谱线类比声音的做法，而从寻找可见光区域 4 条氢谱线的波长的公共因子和比例系数入手。他说：“看到前面叙述的三个波长（指 H_{α} ， H_{β} ， H_{γ} ）的数字以后，就可以看出它们之间存在着一定的数字比例，就是说这些数字包含有一个公共因子”。为寻找这一公共因子，他走过了一段曲折的道路。最初，他用数字试探的方法寻找谱线之间的谐和关系，曾顺利地找到了巴耳末认为不十分小的一个因子（ $30.38\text{mm}/10^7$ ），但是，这一因子反映不出各波长之间的实际规律，只好放弃。巴耳末擅长投影几何，对建筑结构、几何素描有浓厚兴趣，受透视图圆柱排列的启示，他改用几何方法。巧妙地利用几何图形为这些谱线的波长确定了另一个公共因子，其值为 $3645.6 \times 10^{-7}\text{mm}$ ，然后用最简便的方法表示这些波长的数量关系。公式算出的波长和当时测得值的偏差最大不超过波长的 $1/40000$ 。后来巴耳末又用公式推算出氢原子光谱的其他谱线，总共推算出 14 条谱线的波长值，其结果和实验测定值完全符合。公式得到了实验的验证。

巴耳末公式是一个经验公式。它对原子光谱理论和量子物理的发展有很大的影响，为所有后来把光谱分成线系，找出红外和紫外区域的氢光谱线系（如莱曼系、帕邢系、布拉开系等）作出了楷模，对 N·玻尔建立氢原子理论也起了重要的作用。

麦克斯韦 (James Clerk Maxwell, 1831 ~ 1879)

英国物理学家，经典电磁理论的奠基人 1831 年 6 月 13 日出生于爱丁堡。父亲受的是法学教育，但思想活跃，爱好科学技术，使他从小就受到科学的熏陶。10 岁那年进了爱丁堡中学，由于讲话带有很重的乡音和衣着不入时，在班上经常被排挤、受讥笑。但在一次全校举行的数学和诗歌的比赛中，麦克斯韦一人独得两个科目的一等奖。他以自己的勤奋和聪颖获得了同学们的尊敬。他的学习内容逐渐地突破了课本和课堂教学的局限。他的关于卵形曲线画法的第一篇科学论文发表在《爱丁堡皇家学会会刊》上，他采用的方法比笛卡儿的方法还简便。那时他仅仅 15 岁。1847 年入爱丁堡大学听课，专攻数学。但他很重视参加实验，广泛涉猎电化学、

光学、分子物理学以及机械工程等等。他说：“把数学分析和实验研究联合使用得到的物理科学知识，比之一个单纯的实验人员或单纯的数学家所具有的知识更加坚实、有益而牢固。”1850年考入剑桥大学，1854年以优异成绩毕业并获得了学位，留校工作。1856年起任苏格兰阿伯丁的马里沙耳学院的自然哲学讲座教授，直到1874年。经法拉第举荐，自1860年起任伦敦皇家学院的物理学和天文学教授。1871年起负责筹划卡文迪什实验室，随后被任命在剑桥大学创办卡文迪什实验室并担任第一任负责人。1879年11月5日麦克斯韦因患癌症在剑桥逝世，终年仅48岁。

麦克斯韦一生从事过多方面的物理学研究工作，他最杰出的贡献是在经典电磁理论方面。在剑桥读书期间，当麦克斯韦读过法拉第的《电学实验研究》之后，立刻被书中的新颖见解所吸引，他敏锐地领会到了法拉第的“力线”和“场”的概念的重要性。但是，他注意到全书竟然无一数学公式，这说明法拉第的学说还缺乏严密的理论形式。在其老师威廉·汤姆孙的启发和帮助下，决心用自己的数学才能来弥补法拉第工作的这一缺陷。1855年他发表了第一篇论文《论法拉第的力线》。把法拉第的直观力学图象用数学形式表达了出来，文中给出了电流和磁场之间的微分关系式。不久，收到法拉第的来信，赞扬说：“我惊异地发现，这个数学加得很妙！”1860年，29岁的麦克斯韦去拜访年近70的法拉第，法拉第勉励麦克斯韦：“不要局限于用数学来解释已有的见解，而应该突破它。”1861年，麦克斯韦深入分析了变化磁场产生感应电动势的现象，独创性地提出了“分子涡旋”和“位移电流”两个著名假设。这些内容发表在1862年的第二篇论文《论物理力线》中。这两个假设已不仅仅是法拉第成果的数学反映，而是对法拉第电磁学作出了实质性的增补。1864年12月8日，麦克斯韦在英国皇家学会的集会上宣读了题为《电磁场的动力学理论》的重要论文。对以前有关电磁现象和理论进行了系统的概括和总结，提出了联系着电荷、电流和电场、磁场的基本微分方程组。该方程组后来经H.R.赫兹，O.亥维赛和H.A.洛伦兹等人整理和改写，就成了作为经典电动力学主要基础的麦克斯韦方程组。这理论所宣告的一个直接的推论在科学史上具有重要意义，即预言了电磁波的存在。交变的电磁场以光速和横波的形式在空间传播，这就是电磁波；光就是一种可见的电磁波。电、磁、光的统一，被认为是19世纪科学史上最伟大的综合之一。1888年，麦克斯韦的预言被H.赫兹所证实。1865年以后，麦克斯韦利用因病离职休养的时间，系统地总结了近百年来电磁学研究的成果，于1873年出版了他的巨著《电磁理论》。这部科学名著，内容丰富、形式完备，体现出理论和实验的一致性，被认为可以和牛顿的《自然哲学的数学原理》交相辉映。麦克斯韦的电磁理论成为经典物理学的重要支柱之一。

麦克斯韦兴趣广泛，才智过人，他不但是建立各种模型来类比不同物

理现象的能手，更是运用数学工具来分析物理问题的大师。他在其他领域中也做出了不少贡献。1859年他用统计方法导出了处于热平衡态中的气体分子的“麦克斯韦速率分布律”。他用数学方法证明了土星环是由一群离散的卫星聚集而成的。这项研究的论文获得亚当斯奖；在论文中他运用了200多个方程，由此可见他驾驭数学的高超能力！在色视觉方面他提出了三原色理论。他首先提出了实现彩色摄影的具体方案。他设计的“色陀螺”获得皇家学会的奖章。麦克斯韦在他生命的最后几年里，花费了很大气力整理和出版卡文迪什的遗稿以及创建卡文迪什实验室，为人类留下又一笔珍贵的科学遗产。

马赫 (Ernst Mach, 1838 ~ 1916)

奥地利物理学家、生理学家、心理学家、哲学家。1838年2月18日生于奇尔利茨。父亲是家庭教师。童年时代在大自然的魅力下善于用听觉、触觉观察事物的因果关系。初中时，他对教会学校的课程不感兴趣而被视为不适宜研究学问、成绩不佳的孩子。父亲的藏书成了他自学的宝库。在维也纳大学学习数学、物理学和哲学，1860年毕业，并获博士学位。1864—1867年在格拉茨大学先后任数学教授和实验物理学教授，1867—1895年在布拉格大学任实验物理学教授，两度被选为校长。1901年退休，但仍在家继续从事科学著述。1916年2月19日在德国特斯特腾逝世。

马赫一生主要致力于实验物理学和哲学的研究。发表过100多篇关于力学、声学 and 光学的研究论文和报告。他研究物体在气体中高速运动时，发现了激波。确定了以物速与声速的比值（即马赫数）为标准，来描述物体的超声速运动。马赫效应、马赫波、马赫角等这些以马赫命名的术语，在空气动力学中广泛使用，这是马赫在力学上的历史性贡献。他首先用仪器演示声学多普勒效应，提出过n维原子理论等。

马赫是一位具有批判精神的理论物理学家。他通过对科学的历史考察和科学方法论的分析，写过几本富有浓厚认识论色彩和历史观点的著作，其中以1883年《力学及其发展的批判历史概论》（简称《力学史评》）这部著作影响最大，对物理学的发展产生了深刻的影响。他在书中对牛顿的绝对时间、绝对空间的批判以及对惯性的理解，对爱因斯坦建立广义相对论起过积极的作用，成为后者写出引力场方程的依据。后来爱因斯坦把他的这一思想称为马赫原理。马赫的科学认识论曾在自然科学家中产生过强烈的反响，受其影响的科学家最著名的是爱因斯坦和布里奇曼以及量子力学哥本哈根学派的一些物理学家。

马赫还写过再版20次使用40年的《大学生物理学教程》（1891）和《中学生低年级自然科学课本》（1886），是有名的物理学教育家。

马赫在哲学上是唯心主义的逻辑实证论者。他否认气体动理论和原

子、分子的真实性的。对此，玻耳兹曼有过尖锐的批评。列宁在《唯物主义与经验批判主义》一书中，也批判了马赫的唯心主义观点。

玻耳兹曼 (Ludwig Boltzmann, 1844—1906)

奥地利物理学家。1844年2月20日诞生于维也纳，从小受到很好的家庭教育，勤奋好学，读小学、中学时一直是班上的优等生。1863年以优异成绩考入著名的维也纳大学，受到J. 斯忒藩、J. 洛喜密脱等著名学者的赞赏和栽培。1866年获博士学位后，在维也纳的物理学研究所任助理教授。此后他历任拉茨大学(1869~1873, 1876—1889)、维也纳大学(1873—1876, 1894—1900, 1902~1906)、慕尼黑大学(1880~1894)和莱比锡大学(1900~1902)的教授。1899年被选为英国皇家学会会员。他还是维也纳、柏林、斯德哥尔摩、罗马、伦敦、巴黎、彼得堡等科学院院士。

玻耳兹曼主要从事气体动理论、热力学、统计物理学、电磁理论的研究。在这些方面他都作出了重大的贡献。他是气体动理论的三个主要奠基人之一(还有克劳修斯和麦克斯韦)，由于他们三人的工作使气体动理论最终成为定量的系统理论。1868至1871年间，玻耳兹曼把麦克斯韦的气体速率分布律推广到有势力场作用的情况，得出了有势力场中处于热平衡态的分子按能量大小分布的规律。在推导过程中，他提出的假说后被称为“各态历经假说”，这样他就得到了经典统计的分布规律——玻耳兹曼分布律，又称麦克斯韦-玻耳兹曼分布律。并进而得出气体分子在重力场中按高度分布的规律，有效地说明了大气的密度和压强随高度的变化的情况。玻耳兹曼分布律只反映气体平衡态的情况，他并不满足，进一步研究气体从非平衡态过渡到平衡态的过程，于1872年建立了著名的玻耳兹曼微积分方程。他引进了由分子分布函数定义的一个函数H，进一步证明得出分子相互碰撞下H随时间单调地减小——这就是著名的H定理，从而把H函数和熵函数紧密联系起来。H定理与熵增加原理相当，都表征着热力学过程由非平衡态向平衡态转化的不可逆性。H定理从微观粒子的运动上表征了自然过程的不可逆性，为当时科学家们所难于接受。1874年开尔文首先提出所谓“可逆性佯谬”：系统中单个微观粒子运动的可逆性与由大量微观粒子在相互作用中所表现出来的宏观热力学过程的不可逆性这两者是矛盾的，由单个粒子运动的可逆性如何会得出宏观过程的不可逆性这样的结论？玻耳兹曼继续潜心研究，1877年圆满地解决了这一佯谬，从而使自己的研究工作推向了一个新的高峰。他建立了熵S和系统宏观态所对应的可能的微观态数目W(即热力学几率)的联系： $S = k \ln W$ 。1900年普朗克引进了比例系数k——称为玻耳兹曼常量，写出了玻耳兹曼-普朗克公式： $S = k \ln W$ 。这样玻耳兹曼表明了函数H和S都是同热力学几率W相联系的，揭示了宏观态与微观态之间的联系，指出了热力学第二定律的统计本质：H

定理或熵增加原理所表示的孤立系统中热力学过程的方向性，正相应于系统从热力学几率小的状态向热力学几率大的状态过渡，平衡态热力学几率最大，对应于 S 取极大值或 H 取极小值的状态；熵自发地减小或 H 函数自发增加的过程不是绝对不可能的，不过几率非常小而已。

玻耳兹曼的工作是标志着气体动理论成熟和完善的里程碑，同时也为统计力学的建立奠定了坚实的基础，从而导致了热现象理论的长足进展。美国著名理论物理学家吉布斯 (Josiah Willard Gibbs, 1839—1903) 正是在玻耳兹曼和麦克斯韦工作的基础上建立起统计力学大厦。玻耳兹曼开创了非平衡态统计理论的研究，玻耳兹曼积分-微分方程对非平衡态统计物理起着奠基性的作用，无论从基础理论或实际应用上，都显示出相当重要的作用。因此人们将公式 $S = k \ln W$ 铭刻在他的墓碑上，以纪念他科学上的不朽功绩。玻耳兹曼把热力学理论和麦克斯韦电磁场理论相结合，运用于黑体辐射研究。1870 年斯忒藩在总结实验观测的基础上提出热物体发射的总能量同物体绝对温度 T 的 4 次方成正比。1884 年玻耳兹曼从理论上严格证明了空腔辐射的辐射密度 u 和绝对温度 T 的关系： $u = \sigma T^4$ ，式中 σ 是个普适量，后来称为斯忒藩-玻耳兹曼常量，这个关系被称为斯忒藩-玻耳兹曼定律。它对后来普朗克的黑体辐射理论有很大的启示。在当时，科学家对麦克斯韦电磁场理论大多持不同看法，而玻耳兹曼最早认识到麦克斯韦电磁场理论的重要性。他通过实验研究，测定了许多物质的折射率，用实验证实了麦克斯韦的预言：媒质的光折射率等于其相对介电常数和磁导率乘积的算术平方根，并从实验证明在各向异性媒质中不同方向的光速是不同的。他用《浮士德》中的一句话“写出这些符号的是一个神吗？”来赞美麦克斯韦方程组。这些无疑是对麦克斯韦电磁理论的有力支持。

玻耳兹曼是位很好的老师，经常被邀请到国外去讲学。他学识渊博，对学生要求严格而从不以权威自居。他讲课深入浅出、旁征博引、生动有趣，深受学生欢迎。他常常主持以科学最新成就为题的讨论班，带动学生进行研究。他对青年严格要求、热情帮助，培养了一大批物理学者。

玻耳兹曼是个唯物论者，是维护原子论的积极斗士。他一生同马赫的经验主义和奥斯特瓦尔德为首唯能论者进行了不懈的斗争。他的统计力学的理论受到唯能论者们的猛烈攻击，长期被误解。这些损害了他的身心健康。可能由于在与马赫等人的论战中一时感到孤立而又疾病缠身，于 1906 年 9 月 5 日不幸自杀身亡。不过分子、原子的存在，分子、原子作热运动的真实性以及玻耳兹曼统计理论的正确性，则由原子物理学的实验观测以及爱因斯坦于 1905 年、佩兰于 1908 年对布朗运动的理论和实验研究成果直接证实了。

伦琴 (Wilhelm Konrad Röntgen, 1845—1923)

德国实验物理学家 1845 年 3 月 27 日生于莱因兰州的伦内普镇。3 岁时全家迁居荷兰并入荷兰籍。1865 年进入苏黎世联邦工业大学机械工程系，1868 年毕业。1869 年获苏黎世大学博士学位，并担任了声学家 A·孔脱 (A·Kundt) 的助手；1870 年随孔脱返回德国，并先后到维尔茨堡大学及斯特拉斯堡大学工作。1894 年任维尔茨堡大学校长。1900 年任慕尼黑大学物理学教授和物理研究所主任，1923 年 2 月 10 日因患癌症在慕尼黑逝世。

伦琴一生在物理学许多领域中进行过实验研究工作，如对电介质在充电的电容器中运动时的磁效应、气体的比热容、晶体的导热性、热电和压电现象、光的偏振面在气体中的旋转、光与电的关系、物质的弹性、毛细现象等。他一生中最重要的贡献是 X 射线的发现。1895 年 11 月 8 日，伦琴在进行阴极射线的实验时将管子密封起来，以避免干扰，第一次观察到放在射线管附近涂有氰亚铂酸钡的屏上发出的微光。他以严谨慎重的态度，连续六星期在实验室里废寝忘食地进行研究，最后他确信这是一种尚未为人们所知的新射线。1895 年 12 月 28 日伦琴报告了这一重大发现。1901 年诺贝尔奖第一次颁发，伦琴由于这一发现而获得了这一年的物理学奖。

伦琴年轻时受到过成为一个工程师的训练，培养出非凡的动手能力和熟练的操作技能，养成了自己动手制造实验设备和仪器的习惯。在研究上的精确实验方法使他成为物理测量技术上的权威。他的一生自始至终献身于实验和研究事业。在 1894 年出任大学校长的演说中，他指出：“实验是使我们揭开自然界奥秘的最有力最可靠的手段，也是判断假说应当保留还是放弃的最后鉴定”。顽强的追求、广博的学识、严谨的工作作风、敏锐的观察能力，使他能高瞻远瞩地揭示出前人所未予注视的新现象。正如柏林科学院在致伦琴的贺信中所说：“许多外行人也许认为幸运是主要的因素。但是，了解您的创作个性特点的人将会懂得，正是您，一位摆脱了一切成见的、把完善的实验艺术同最高的科学诚意和注意力结合起来的研究者，应当得到作出这一伟大发现的幸福。”

伦琴是一位谦虚和高尚的人。最初有人提议将他发现的新射线定名为“伦琴射线”，伦琴却坚持“X 射线”这一名称。当柏林通用电气协会建议以高价换取新发现的专利权时，遭到伦琴的坚决拒绝。伦琴得到的诺贝尔奖金也遵照他的遗嘱，交给维尔茨堡大学作为科研经费使用。当他的发现引起全球轰动时，他在一封信中懊恼地说：“整整四个星期，我没有可能做一个实验！”“我再也认不出我的工作了”。

爱迪生 (Thomas Alva Edison, 1847~1931)

美国著名发明家。1847 年 2 月 11 日生于俄亥俄州米兰镇。8 岁上学只读了 3 个月。老师骂他“小笨蛋”，因为他经常爱问为甚么而让老师下不

了台。他辍学后随母亲学习。他对大自然非常好奇。他可以专心致志地注视榆树叶芽怎么生长，秋风如何使枫叶变色。为了试验孵小鸡，他可以长时间趴在鸡窝里；为了探索蜂巢的奥秘，他愿意被蛰得鼻青脸肿；为了试验摩擦生电，他在雄猫身上狠命搓揉直到双手伤痕累累。9岁那年，他得到一本帕克著《自然与实验哲学》，如获至宝，逐页研读，逐项实验。他在家中地窖里建起一座小实验室。从12岁起，在底特律—休伦间铁路列车上卖报，把自己的实验室搬到火车上，利用一切机会学习和实验。他还在列车上自己编印《先锋周报》，从而认识到刚问世不久的电报的作用。1862年他奋不顾身地从火车轮下救出一幼童，幼童的父亲为答谢他，教他掌握了电报技术。

1873年（26岁）—1874年，他发明了同时发送二条和四条消息的发报机。1876年在纽约附近的门罗公园建立起他的“发明工厂”，一座大型实验室。许多发明就是在这里完成的。第一次世界大战时他任美国海军技术顾问委员会主席，完成多项军事产品的发明研制。1931年10月18日在新泽西州西奥兰治逝世。

他以罕见的热情及惊人的精力，在一生中完成发明2000多项，其中申请专利登记的达1328项。人们颂扬他：“他虽不发明历史，却为历史锦上添花”。这位传奇式人物取得杰出成就的奥秘在于刻苦、勤奋、坚持不懈地学习。他自己曾多次表示：“停止就意味着生锈”，“必须时常收获，而不能一生只收一次”，“我要做的事如此之多，而生命又如此短促，我不得不挤出时间”。美国著名物理学家、诺贝尔奖获得者密立根赞誉他：“他差不多已经70高龄了，还在阅读科学领域出现的新书，而且不断地提出问题。”

他的主要研究领域在电学方面。在他掌握电报技术后，就日夜苦心钻研，完成了双路及四路电报装置及自动发报机。1877年改进贝尔电话装置，使电话从传送2~3英里扩大到107英里，同年发明留声机。在这期间，他付出巨大精力，研制白炽电灯。除电弧灯外，过去的“电灯”往往亮一下就烧毁了，为寻找合适的灯丝，曾对1600多种耐热材料及6000多种植物纤维进行实验。终于在1879年10月21日用碳丝做成可燃40小时的白炽电灯。其后又不断反复改进、完善，又完成了螺纹灯座、保险丝、开关、电表等一系列发明，在此基础上完成了照明电路系统的研制。在实践中提出电灯的并联连接，直流输电的三线系统，建成了当时功率最大的发电机。1888年起研制电影，1893年建立第一座电影摄影棚。是他最先提出将电影手段用于教育，并用两个班进行试验。他的其它重大发明还有铁镍蓄电池等。

他虽然精于实验研究，对理论却缺乏足够的重视。尽管他于1885年发现热电子发射的“爱迪生效应”，但未能作出相应解释。

1931年10月21日在为他举行葬礼时，人们采用了一种独特而又恰当的方式——停电1分钟，以悼念这位伟大的发明家。这“1分钟”使人们想起他的发明给电气时代和社会生活带来的光明，以及他的可贵的学习创造精神。

罗兰 (Henry Augustus Rowland, 1848—1901)

美国物理学家。1848年11月27日生于洪斯代尔，1870年毕业于伦塞勒大学，1872—1875年任该校讲师，1875年起任约翰·霍普金斯大学物理学教授，一直到逝世。他是美国科学院院士，皇家学会会员（1889年），法国科学院院士（1893），1899~1901年任美国物理学会第一任会长。1901年4月16日在巴尔的摩逝世。按照他生前的愿望，他的骨灰安葬在约翰·霍普金斯大学物理实验室的地下室。

他主要从事电动力学、光谱学、光学方面的研究工作。1873年，年仅25岁的罗兰推翻了磁导率为常量的观点，并证明磁导率不是随磁场强度变化，而是随磁感应强度变化，这项成果受到麦克斯韦高度评价。三年后，他以精湛的实验技巧，完成了静电带电层旋转时产生磁效应的实验，实现了他还在上学时就已产生的愿望，第一次揭示了运动电荷和导体中的传导电流一样，也同样能够产生磁场，在证实运动介质的麦克斯韦方程方面起了重要作用。这项实验所检测的磁场十分微弱，仅为地磁场水平分量的 10^{-5} 数量级，显示出他慎密的构思和高超的技巧。爱因斯坦指出：“带电体在静止时，只有静电场；而带电体一旦运动，磁场就出现了。更进一步说，假设带电体更大，或运动得更快，则由带电体运动所产生的磁场也更强。这也是罗兰实验的一个结果。”这对生物物理也有重要意义。

1880年他以很高的精确度测定热功当量，得出其值为426.2千卡每千卡（合4.179J/cal）。1881年他根据霍耳（E.H.Hall 1855~1938）效应解释磁致旋光现象，推导出罗兰磁致旋光方程与麦克斯韦旋光方程等价。1882年研制衍射光栅，他研制的光栅刻线机，可在25平方英寸的金属片上刻出每英寸43000条线的光栅，摄得的太阳光谱极为精细，光谱底片展开可达50英尺，波长范围2152.91埃—7714.68埃，精确度小于0.01埃。他还发明凹球面衍射光栅，编制出太阳光谱照相图册，在1890年巴黎博览会获金质奖章。1876年他自欧洲访问回国时，购回大批仪器设备，在约翰·霍普金斯大学装备起当时美国最好的实验室，他十分重视基础研究工作，为美国物理学发展作出重大贡献。

贝克勒耳 (Antoine Henri Becquerel, 1852—1908)

法国物理学家，放射性的发现者。1852年12月15日生于巴黎的一个科学世家。1872年进巴黎综合工科大学，1874年进桥梁公路学院，1877

年毕业于桥梁工程师。1892年继其祖父A.C.贝克勒耳和父亲A.E.贝克勒耳担任法国自然史博物馆物理学教授。1908年担任法国科学院院长，同年7月又被选为科学院两个常务秘书之一。

H.贝克勒耳早年研究光学。1875年起研究兴趣转向法拉第发现的平面偏振光的偏振面在磁场中旋转问题。1883年开始研究红外光谱。1886年转而研究晶体对光的吸收，并由此于1888年获博士学位。H.贝克勒耳对放射性的发现与当时伦琴发现的X射线有关。在研究不同荧光物质对照相底版的作用时，他意外地发现了一种不可见的辐射。他用实验证明，这种射线，像X射线一样能使周围的气体电离；但又与X射线不同，它可以被电场或磁场偏转。他于1896年3月2日在法国科学院的例会上报告了这一重大发现。当时称这种射线为贝克勒耳射线，后经居里夫妇等人的努力，发现钍、钋、镭都放射这种射线，从而把这种现象定名为放射性。

此后，贝克勒耳又作了两项重要工作。1900年3月26日他从镭射线在电场和磁场中的偏转角度，测出射线中含有带负电的粒子，后称为β射线。第二项是1904年最先发现了放射性衰变。

贝克勒耳发现天然放射性，标志着原子核物理学的开端。由此他和居里夫妇共同获得1903年的诺贝尔物理学奖。然而，由于在长期的研究中受到放射性的伤害，贝克勒耳成为第一位被放射性物质夺去生命的科学家。于1908年8月25日逝世于勒克鲁瓦西克，享年仅56岁。

迈克耳孙 (Albert Abraham Michelson, 1852—1931)

美国物理学家。1852年12月19日生于普鲁士的斯特雷诺。童年随父母移居美国。受旧金山男子中学校长的引导，迈克耳孙对科学特别是光学和声学发生了兴趣，并展示了自己的实验才能。1869年被选拔到美国安纳波利斯海军学院学习。毕业后曾任该校物理和化学讲师。1880—1882年被批准到欧洲攻读研究生，先后到柏林大学、海德堡大学、法兰西学院学习。1883年任俄亥俄州克利夫兰市开斯应用科学学院物理学教授。1889年成为麻省伍斯特的克拉克大学的物理学教授，在这里着手进行计量学的一项宏伟计划。1892年改任芝加哥大学物理学教授，后任该校第一任物理系主任，在这里他培养了对天文光谱学的兴趣。1910~1911年担任美国科学促进会主席。1923~1927年担任美国科学院院长。1931年5月9日因脑溢血于加利福尼亚州的帕萨迪纳逝世，终年79岁。

迈克耳孙的名字是和迈克耳孙干涉仪及迈克耳孙-莫雷实验联系在一起的，实际上这也是迈克耳孙一生中最重要的贡献。在迈克耳孙的时代，人们认为光和一切电磁波必须借助绝对静止的“以太”进行传播，而“以太”是否存在以及是否具有静止的特性，在当时还是一个谜。有人试图测量地球对静止“以太”的运动所引起的“以太风”，来证明以太的存在和

具有静止的特性，但由于仪器精度所限，遇到了困难。麦克斯韦曾建议用罗默的天文学方法研究这一问题，1879年写信给美国航海年历局的D.P.托德，迈克耳孙知道这一情况后，决心设计出一种灵敏度提高到

亿分之一的办法，测出与 $\left(\frac{v}{c}\right)^2$ 有关的效应。1881年他在柏林大学亥姆霍

兹实验室工作，为此他发明了高精度的迈克耳孙干涉仪，进行了著名的以太漂移实验。他认为若地球绕太阳公转相对于以太运动时，其平行于地球运动方向和垂直地球运动方向上，光通过相等距离所需时间不同，因此在仪器转动90°时，前后两次所产生的干涉必有0.04条条纹移动。1881年迈克耳孙用最初建造的干涉仪进行实验，这台仪器的光学部分用蜡封在平台上，调节很不方便，测量一个数据往往要好几个小时。实验得出了否定结果。1884年在访美的瑞利、开尔文等的鼓励下，他和化学家莫雷（Morley, Edward Williams, 1838—1923合作，提高干涉仪的灵敏度，得到的结果仍然是否定的。1887年他们继续改进仪器，光路增加到11米，花了整整5天时间，仔细地观察地球沿轨道与静止以太之间的相对运动，结果仍然是否定的。这一实验引起科学家的震惊和关注，与热辐射中的“紫外灾难”并称为“科学史上的两朵乌云”。随后有10多人前后重复这一实验，历时50年之久。对它的进一步研究，导致了物理学的新发展。

迈克耳孙的另一项重要贡献是对光速的测定。早在海军学院工作时，由于航海的实际需要，他对光速的测定开始感兴趣，1879年开始光速的测定工作。他是继菲佐、傅科、科纽之后，第四个在地面测定光速的。他得到了岳父的赠款和政府的资助，使他能够有条件改进实验装置。他用正八角钢质棱镜代替傅科实验中的旋转镜，由此使光路延长600米，返回光的位移达133毫米，提高了精度，改进了傅科的方法。他多次并持续进行光速的测定工作，其中最精确的测定值是在1924—1926年，在南加利福尼亚山间22英里长的光路上进行的，其值为 (299796 ± 4) km/s。迈克耳孙从不满足已达到的精度，总是不断改进，反复实验，孜孜不倦。精益求精，整整花了半个世纪的时间，最后在一次精心设计的光速测定过程中，不幸因中风而去世，后来由他的同事发表了这次测量结果。他确实是用毕生的精力献身于光速的测定工作。

迈克耳孙在基本度量方面也作出了贡献。1893年，他用自己设计的干涉仪测定了红镉线的波长，实验说明当温度为15℃气压在760毫米汞柱产生的压强时，红镉线在干燥空气中的波长为6438.4696埃，于是，他提出用此波长为标准长度，来核准基准米尺，用这一方法订出的基准长度经久不变。因此它被世界所公认，一直沿用到1960年。

1920年迈克耳孙和天文学家F.G.皮斯合作，把一台20英尺的干涉

仪放在 100 英寸反射望远镜后面，构成了恒星干涉仪，用它测量了恒星参宿四（即猎户座一等变光星）的直径，它的直径相当大，线直径为 2.50×10^8 英里，约为太阳直径的 300 倍。此方法后被用来测定其他恒星的直径。

迈克耳孙的一生以制作精密的光学仪器和具有精湛的实验技术而著称于世，由此他获得了许多荣誉，他是许多科学院和学术团体的成员，曾得到许多大学的荣誉博士学位。1889 年获得伦福德奖章；1900 年获得巴黎世界奖学金的巨额奖金；1904 年获得罗马的马特细奖章；1907 年获得伦敦皇家学会授予的科普利奖章；1907 年因创制精密的光学仪器并用于一系列光谱学及基本度量学研究中的卓越贡献，获得诺贝尔物理学奖，成为获此奖的第一个美国人。迈克耳孙的一生，被 25 个学会选为荣誉会员，被授予 11 个荣誉学位，共获得 17 枚奖章。他的著作有《光的速度》（1902）、《光波及其用途》（1903）、《光学研究》（1927）。

洛伦兹（Hendrik Antoon Lorentz, 1853 ~ 1928）

荷兰物理学家。1853 年 7 月 18 日生于阿纳姆。1870 年考入莱顿大学。1875 年获博士学位。1878 年起在母校任教授，长达 35 年之久。1912 年洛伦兹辞去莱顿大学教授职务，到哈勒姆担任一个博物馆的顾问，同时兼任莱顿大学的名誉教授。1919—1926 年在荷兰教育部门工作，其间 1921 年起担任高等教育部部长。洛伦兹是一位世界闻名的物理学家。1911—1927 年担任索尔维物理学会议的固定主席。索尔维会议是讨论物理学发展中有待解决的关键问题的国际会议，参加会议的都是各国最杰出的专家。在国际物理学界的各种集会上，洛伦兹经常是一位颇受欢迎的主持人之一。

洛伦兹的重要贡献之一，是把麦克斯韦的电磁理论与电子相结合，创立了经典电子论，从而完成了经典电磁学的理论发展。1875 年他致力于电子理论的研究，1896 年确立了电子论，1900 年出版了《电子论》一书。该理论的要点是从物质的电结构出发，认为物质内部有着大量的电子，如同气体分子一样服从麦克斯韦-玻耳兹曼分布律，外场将给电子以力的作用。电子论可以从微观机制上解释金属的导电、介质的极化和磁化，对物质的辐射、吸收、色散也可作出适当的说明。尤其是电子论成功地解释了在 1896 年塞曼发现的光谱线在强磁场中分裂成几支的现象，即塞曼效应。为此，洛伦兹与塞曼共获 1902 年诺贝尔物理学奖。洛伦兹最早确定了电子在电场中和磁场中所受作用力的大小和方向——即洛伦兹力，至今是物理教材中的重要内容，而且是加速器和电子显微镜等应用的理论基础。

如何解释 1887 年完成的迈克耳孙-莫雷实验，是当时摆在物理学家面前的一大难题。为了解释事实，洛伦兹大胆提出高速运动物体沿运动方向会发生收缩的假设，即洛伦兹-斐兹杰惹收缩。3 年后，作为辅助的数学

手段又引入“地方时间”的假设，实质上洛伦兹已经建立了相对运动的两坐标系间的时空变化关系。1904年他发表了著名的变换公式（洛伦兹变换）和质量与速度的关系式，并指出光速是物体相对于以太运动的极限速度。可以说，洛伦兹已经接近相对论的边缘，遗憾的是未能迈出最后的一步。然而，这对于后来的爱因斯坦创立狭义相对论提供了一定的启示。

此外，洛伦兹在当时物理学各个领域里都有很深的造诣，他在热力学、分子动理论和引力理论等方面都有贡献。洛伦兹还是一位优秀的教育家。在任教期间，他工作认真，治学严谨，讲授深刻，深受学生们的爱戴，培养出包括塞曼在内的一大批优秀人才。洛伦兹于1928年2月4日在哈勒姆逝世。在举行葬礼那天，荷兰全国的电讯、电话中止3分钟，以示哀悼。当时，爱因斯坦作为新一代理论物理学家的领袖和普鲁士科学院的代表在悼词中称他是“我们时代最伟大、最高尚的人。”

开默林-昂内斯 (Heike Kamerlingh-Onnes, 1853~1926)

荷兰物理学家。1853年9月21日生于格罗宁根。1870年进入格罗宁根大学，第二年去德国海德堡，从师于本生和基尔霍夫门下，得到迅速提高。1876年毕业于格罗宁根大学；1879年在格罗宁根大学以《地球转动的新证明》这篇出色的论文获博士学位。1882年起任莱顿大学实验物理学教授。1894年在莱顿大学创建低温物理实验室，这是著名的低温研究中心。1923年退休。1926年2月21日在莱顿逝世。为纪念他对低温物理学的巨大贡献，1932年莱顿大学物理实验室被命名为“开默林-昂内斯实验室。”

他的研究领域为低温物理。在低温实验室建成之后，他攻克了越来越低的温度，其成绩是：1904年液化了氧，1906年液化了氢，1908年首次使最后一个“永久气体”——氦液化。其后，使用液氦获得0.9K以下的超低温。如果说地球上的最冷地点在莱顿，这句话一点儿也不过份，他本人也当之无愧地被人称作“绝对零度先生”。

他十分重视测量在物理学中的重要作用，他有一句名言：“知识来自测量”，重视测量的价值贯穿在他的整个科学生涯。利用所能达到的低温条件，他研究了多种物质在低温时的特性。这导致他1911年发现汞（其后发现锡和铅）在低温时，电阻突然消失。1913年他称这一现象为“超导电性”。同年发现强磁场会破坏超导电性。1914年证明，在超导环中，即使没有电动势，哪怕经过了好几天，电流强度也无衰减。他的这些发现，开辟了对于物理学有着重大意义的领域。

由于对低温下物质性质研究及使氦液化，荣获1913年诺贝尔物理奖。他同时还获得过多种荣誉奖章，成为许多国家研究机构的外籍院士。

里德伯 (Johannes Robert Rydberg, 1854~1919)

瑞典物理学家，光谱学的奠基人之一。1854年11月8日生于瑞典的哈姆斯塔德。1873年进入隆德大学。1875年获哲学学士学位。1879年通过答辩学位论文《论圆锥面的结构》而获得数学博士学位。1880年任隆德大学数学讲师。1882年任物理学讲师。1897年成为助理教授。1901年被任命为终身教授。1919年当选为英国皇家学会的外国会员。1919年12月28日于瑞典隆德逝世，终年65岁。

19世纪末，原子光谱和原子结构问题引起了不少科学家的关注，里德伯就是其中之一。他对光谱的研究起源于对元素周期表的兴趣，从1890年开始，从事元素的物理性质、化学性质和结构的研究，并发表了题为《化学元素发射光谱结构的研究》的论文。他设想一个元素的光谱线由三种不同类型系列叠加而成，一个是位于可见光区域，谱线比较尖锐的锐线系，另一个是位于近红外区，谱线比较扩散的漫线系，第三个是里德伯认为最重要的大部分由紫外线组成的线系。同时里德伯亲自观测了一些元素的光谱线，并从他的同辈那里搜集了大量光谱方面的资料，尤其是锂、钠、钾和镁、锌、镉、汞、铝等元素的谱线波长，这些对他总结光谱公式提供了重要依据。面对纷乱复杂的光谱数据，他致力于寻求各种元素发出的各种光谱线的意义。而里德伯成功的关键是：采用了前人（如1871年斯坦尼等）已提出的用波长的倒数（波数）来表示谱线的方法。用这一尺度的好处在于可以把光谱线系表示成等距的、更接近于从光谱仪直接看到的情景，因此他对光谱规律作出总结：“谱系的各项是相继整数的函数，各谱系可近似用下式表示， $n = n_0 - \frac{N_0}{(m - \mu)^2}$ ，其中n是波数，m是正整数， $N_0 = 109\,721.6$ ，对所有谱系均为一共同常数， n_0 与 μ 是某谱系特有的常数。由公式可以看到， n_0 表示当m变为无穷大时波数n趋向的极值”。这就是里德伯的光谱学公式。

里德伯的工作在巴耳末之后，但他当时并不知道巴耳末公式，到1890年当获知巴耳末公式以后，用波数表示巴耳末公式，才发现得出的结果正好是自己所得公式的一个特例，这就更增加了他对自己工作的信心。显然这也说明里德伯公式具有更深刻的物理意义，是更普遍的光谱学公式。

里德伯公式和巴耳末公式一样纯属经验公式，他未能探究这一公式的所以然，但是这个公式在玻尔建立原子结构理论中，却起到了重要的作用，随即该公式也得到了合理的解释。

汤姆孙，J. J. (Joseph John Thomson, 1856—1940)

英国物理学家，电子的发现者。年12月18日生于曼彻斯特郊区齐山姆的一个出版商家庭。岁进欧文学院学习。他原想成为工程师，在一位物

理教师影响下决心转攻物理学。1876 年成为剑桥大学三一学院的数学研究生。1880 年，他通过了一项艰难而荣誉的考试，继 1854 年麦克斯韦以后第二位取得数学优等荣誉学位。次年，成为三一学院研究员。1884 年春被选为英国皇家学会会员，随后转入卡文迪什实验室工作。1884 年 2 月他完成精确测定电量绝对单位与电磁单位比值等实验研究，即被评选为卡文迪什实验室教授，接替瑞利的主任职位，这时他年仅 27 岁。1905 年接替瑞利担任皇家学院自然哲学教授。1911—1913 年任英国皇家学会副会长，1915—1920 年任会长。1918 年起担任三一学院院长。1919 年他辞去长达 34 年的卡文迪什实验室教授职位，推荐他的学生卢瑟福继任，而自己留在实验室继续进行研究工作又长达 21 年。1940 年 8 月 30 日在剑桥逝世。

汤姆孙最重要的贡献是发现了电子（参见“电子的发现”）。最初，由于对麦克斯韦的电磁辐射理论感兴趣，他进行了阴极射线的研究。x 射线的发现使人们对气体电离行为的考察更加深入，在阴极射线本质的争论中他明确支持粒子说。接着他用一个巧妙的实验成功地证实了阴极射线在电场和磁场中发生偏转——这是判定阴极射线确实是带电粒子的决定性证据。继而，他采用静电偏转力和磁场偏转力相抵消等方法确定阴极射线粒子的速度，测量出这些粒子的荷质比，并进一步测出它们的质量约为氢原子质量的 $1/1837$ 。由此推断，阴极射线粒子比原子要小得多，可见这种粒子是组成一切原子的基本材料。汤姆孙于 1897 年 4 月 30 日宣布了他的发现。后来人们命名这种粒子为电子。电子是人类所认识的第一种基本粒子。此后，他又提出了“电子浸浮于均匀正电球”的原子结构模型（汤姆孙模型）。该模型虽然在后来被卢瑟福的核原子模型所替代，但它是建立原子结构模型的开端。1906 年，由于汤姆孙对电子研究的重要贡献而被授予诺贝尔物理奖。1908 年又被册封为爵士。

汤姆孙的另一个重要贡献是在研究极隧射线（穿过阳极细孔的带正电的粒子流）时发展了质谱方法。他的方法经过同事 F. 阿斯顿（F. W. Aston, 1877—1945）的改进和完善，发展为今天的质谱仪。在极隧射线的研究中，他根据实验现象最先指出，普通元素也可能有同位素。1913 年首次用物理方法成功地分离出了稳定元素的同位素，从而确立了这一事实。他也是经典金属电子论的创始人之一。

此外，汤姆孙还是一位卓越的教师和科研事业领导人，他在担任卡文迪什实验室教授期间，创建了完整的研究生培养制度和培育了良好的学术风气。他理论与实验并重，特别提倡自制仪器，又善于抓住要害，进行精确的理论分析。他的博学、敏捷、科学直觉、想象力与创造力带领着一大批学者前进在科学前沿上，使卡文迪什实验室成为国际物理前沿研究中心之一。他的学生有 7 人获诺贝尔奖，27 人取得英国皇家学会会员资格。他还努力促进大学与中学物理教学的提高，写出了几本出色的教材。英国能

够在 20 世纪前 30 年在原子物理学领域保持重要的领先地位，汤姆孙的有力指导和优秀教学能力起了相当作用。

特斯拉 (Nicola Tesla, 1856 ~ 1943)

南斯拉夫血统的美国电工学家、发明家。1856 年 7 月 10 日生于克罗地亚的里卡省史密里安村。~ 1879 年就读于奥地利格拉茨综合技术学院，后去布拉格大学学习二年。1884 年移居美国，曾获耶鲁大学、哥伦比亚大学名誉博士学位。1943 年 1 月 7 日在纽约逝世。被誉为“迎来电力时代的天才”。

特斯拉在电气与无线电技术方面的发明很多。当他在格拉茨综合技术学院上学时，看到教师在作电动机演示实验时，滑环与电刷接触时打出电火花，这启发了他，于 1881 年发现了旋转磁场原理，并用于制造感应电动机，1882 年进行试制且运转成功。1888 年发明多相交流传输及配电系统；1889 ~ 1900 年制成 5×10^3 赫兹— 2×10^4 赫兹振荡器；1891 年发明高频变压器（特斯拉线圈），现仍广泛用于无线电、电视机及其他电子设备中。曾致力于研究无线传输信号及能量的可能性，并在 1899 年演示了不用导线采用高频电流的电动机。发现并研究高频电流对人体的生理及治疗作用。1899 年在科罗拉多建成 200 千瓦无线电台，在长岛架设 57.6 米高的无线电天线。根据 1900 年的发现，证明大地是导体，他曾实验不用导线点亮 40 公里外的 200 盏灯。他一生所获发明专利甚多，他将全身心贡献给科学事业，终身不娶，最后遁世隐居，穷困潦倒，孑然一身，孤独死去，有 3 位诺贝尔奖获得者在祭文中说：“……这位世上显赫的智者之一为现代技术发展的许多方面铺平了道路。”

美国尼亚加拉大瀑布旁的尼亚加拉公园中竖立着特斯拉的铜像，以纪念他在修建尼亚加拉水电站时的杰出贡献。为纪念他在电工学方面的诸多成就，磁感应强度单位被命名为特斯拉。

赫兹 (Heinrich Rudolf Hertz, 1857—1894)

德国物理学家。1857 年 2 月 22 日生于汉堡。青少年时期，勤奋好学，在数学、物理实验等方面显示了出众的才华与能力。年进入德累斯顿理工学院学习工程，但在那里只学了一个短暂时期，就去铁路军团服役一年。1877 年考入慕尼黑大学，学习数理科学。1878 年又转入柏林大学成为亥姆霍兹的学生并做研究工作。他对于理论和实验都很重视，学习比较全面。1879 年因解决亥姆霍兹提出的导体中的运动电荷有无惯性质量这一问题获金质奖章而初露锋芒。1880 年以《旋转导体的电磁感应》一文获博士学位，成为亥姆霍兹的助手。1883 年任基尔大学物理学讲师；1885 ~ 1889 年任卡尔斯鲁厄高等工业大学物理学教授；1889 年起接替克劳修斯任波恩

大学物理学教授。1894年1月1日因血液中毒在波恩逝世，年仅36岁。

赫兹在物理学上的主要贡献是发现电磁波。

当时人们对电磁理论的认识还很不一致。1879年，亥姆霍兹为柏林科学院设计的重金悬赏中，提出了用实验证明以下课题：变化磁力必然使绝缘体介质极化（产生位移电流），而位移电流又必然产生磁效应，这两个假设在空气或真空中也同样成立。如果成功，电磁学就能“从无路的荒原”中走出来，验证麦克斯韦电磁波的理论 and 预言。

赫兹首先在1884年他的一篇理论性论文中提出源和场统一的思想，通过引入磁流矢势把麦克斯韦方程改写为四个矢量方程。这为他后来的重要实验奠定了思想基础。但当时还缺乏产生和检验快速振荡的仪器，因此他还不肯接受亥姆霍兹要求他研究上述课题的要求。

1886年10月，赫兹在物理实验室仓库发现两个演示用的大线圈，他还发现，当初级线圈有脉动电流时，近旁未闭合的次级线圈打出了火花。而且次级线圈在某些位置上没有火花发生（“中性点”）。赫兹敏锐地抓住这一偶然现象，相信柏林科学院的问题能够解决了。接着他进行了一系列实验：设计出直线型开放振荡器以产生频率极高的电振荡；设计出带火花隙的单线圈作为检验器（火花的距离可以调节）。接着，于1887年11月5日，他在《论绝缘体中电扰动产生的电磁效应》一文中叙述了他利用上述高频发射器AA'（图2-2-11）与检测器B，检验出置于C处的金属与绝缘板（如沥青、纸、干木、石蜡、汽油槽）对周围电磁场（包括各中性点）的影响。从而证明了绝缘介质中产生的迅速交替极化即位移电流的存在，获得柏林科学院奖。

为了证明这种位移电流也存在于空气或真空中，他在1888年1月通过驻波方法测出电磁波的速度。办法是在一间空间为 $15 \times 8.6 \times 6\text{m}^3$ 的暗教室中的墙上钉一块 $4 \times 2\text{m}^2$ 的锌板，用来反射电磁波并与发射波叠加形成驻波。利用小车上的检验器测出波节（无火花）与波腹（火花最强），由此可根据测出的驻波波长与波源频率算出电磁波速度，证明与光波速度一致。赫兹还进一步在1888年夏季证明了电磁波与光波有同样的性质：直线传播（通过垂直方向的锌板有阴影区），反射（高2m孔径为1.2m的抛物面反射镜使电磁波聚焦），折射（高1.2m顶角为 30° 的沥青棱镜使电磁波偏折，折射率为1.69），偏振（通过铜丝屏做成的金属栅）等等。1888年1月21日赫兹完成他的著名论文《论电动力学作用的传播速度》，成了人们规定电磁波发现的日期。这些实验对于确立麦克斯韦理论的地位具有十分重大的意义。爱因斯坦评价说：“只是等到赫兹以实验证实了麦克斯韦电磁波的存在以后，对新理论的抵抗才被打垮。”可以说，赫兹的卓越实验，为麦克斯韦的理论添上了至关重要的一笔。其后迅速发展起来

的无线通讯技术，则是直接受惠于赫兹的无与伦比的实验。

他的研究工作，还包括气象、材料硬度等方面，尤其在光电效应与阴极射线等方面，成果更为突出。1891年开始撰写《力学原理》一书，试图通过力学把物理学各领域统一起来。

物理学大师们对赫兹的工作给予高度评价。爱因斯坦指出：“伟大的变革是由法拉第、麦克斯韦和赫兹带来的”，说明了赫兹的工作对物理学发展所起的不可磨灭的作用。普朗克在一封信中赞扬他：“在人们关注电波的时候，赫兹是这一代的冠军。我们物理学会的成员沐浴着他的光辉，也将分享他的荣耀。”他英年早逝，在他的能力和经历正要把他推向对物理学做更大贡献的关头，他的生命结束了。

为了纪念他的卓越贡献，将频率的单位命名为赫兹。

普朗克 (Max Karl Ernst Ludwig Planck, 1858 ~ 1947)

德国理论物理学家。量子论的奠基人之一。1858年4月日生于基尔，少年时代在慕尼黑度过。在中学时他热爱劳动，责任心强，聪慧勤奋。成绩单上的评语是：“尽管在班里年龄最小，但头脑非常清醒而又逻辑性强”。有条不紊一丝不苟是他的作风。1874年入慕尼黑大学，1878年毕业，次年获该校哲学博士学位。1880~1885年在慕尼黑大学任教。1885~1888年任基尔大学理论物理教授。1888年基尔霍夫逝世后，柏林大学任命他为基尔霍夫的继任人，先任副教授，1892年后任教授。由于1900年他在黑体辐射研究中引入能量量子，荣获1918年诺贝尔物理学奖。

普朗克早年的科学研究领域主要是热力学。他以热力学的观点对物质聚集态的变化、气体和溶液理论等进行了研究。可是不久，他了解到美国物理学家吉布斯早已做过这方面工作。于是，便把注意力转向黑体辐射问题。1893~1896年维恩发表了他的对黑体辐射的研究成果，提出一个辐射密度的分布公式，即维恩公式。这结果为当时实验所证实，但只有波长较短、温度较低时才适合，而且立论的根据是通过与麦克斯韦分子速率几率分布律类比而得的，不能完全令人信服。普朗克从1896年开始研究热辐射的能量分布问题。

普朗克想到一个特别有意义的问题：为什么理想黑体的光谱竟像万有引力一样与物质成份的化学性质无关？这里是否隐藏着更普遍的规律？他说：“这个所谓的正常能量分布代表着某种绝对的东西，既然在我看来，对绝对的东西所作的探求是研究的最高形式，因此我就劲头十足地致力于解决这个问题了。”他独创性地将熵这个基本概念引入振子、电磁波能量分布等问题中，认为黑体辐射的能量分布是最稳定即熵值最大的分布。1900年6月，瑞利根据黑体空腔内形成驻波及能量均分原理导出另一黑体辐射公式，其中的系数经金斯修正，在长波部分与实验很符合，即瑞利—金斯

公式。普朗克由此受到启发，利用内插法得出他的新公式，并于 1900 年 10 月 19 日在柏林德国物理学会提出报告《维恩辐射定律的改进》，第二天一早鲁本斯 (H. Rubens, 1865 ~ 1922) 就告诉他，这一公式与自己已作的实验数据十分相符。普朗克没有满足于“侥幸揣测出来的内插公式”，而是“致力于找出这个等式的真正的物理意义”。最后他终于接受了玻耳兹曼关于熵的统计诠释，找到了 $S = k \ln \Omega$ 这一重要的普适公式，它代表了宏观态与微观态的结合，即所有微观态的总组合是分立的集合，即必须假定物质辐射的能量 E 是不连续的，是一份份出现的，只能是某一最小能量单位的整数倍。这样就可以解释他推导出来的绝对黑体辐射的能量分布公式。而且他首先推出 $\epsilon = h\nu$ ，其中 h 是普朗克常量并首先给出 h 和 k 的数值 $h = 6.385 \times 10^{-27} \text{erg} \cdot \text{s}$ 。只比近代值约高 3.5%。他认为 h 、光速 c 和万有引力常量 G 是三个重要的普通常量，作为定义质量、长度、时间的自然单位制的基本量。1900 年 12 月 14 日，他在德国物理学会宣读了《关于正常光谱的能量分布定律的理论》，总结了上述理论。这一天成了量子论的誕生日。

当时普朗克对能量子 $\epsilon = h\nu$ 的作用还重视不够，他后来谈到“企图使基本作用量子与经典理论调和起来的这种徒劳无功的打算，我持续了很多年（直到 1915 年）”。普朗克关于辐射系统与辐射场间不连续的量子交换概念，打破了经典物理学的框架，掀起了本世纪物理学革命的风暴，从而开辟了一个新纪元。在相对论方面，普朗克也作出了贡献，他是最先理解和支持相对论的物理学家之一。1906 年，他导出了相对论动力学方程。得出电子能量和动量的表达式，从而完成了经典力学的相对论化。1906 年他引入了“相对论”这个术语。1907 年在狭义相对论的框架内推广了热力学。

1887 年他还给出气体和稀薄溶液中化学平衡定律的普遍推导。

自 20 世纪 20 年代以来，普朗克成了德国科学界的中心人物，与当时国际上的知名物理学家都有着密切联系。1894 年当选为柏林科学院院士。1912 ~ 1938 年任常任秘书。1918 年当选为英国皇家学会会员。1926 年当选为苏联科学院外籍院士。1930 ~ 1935 年任威廉皇帝科学促进协会会长。为了表示对普朗克的崇敬，1945 年以后，协会改名为马克斯·普朗克科学促进协会。

普朗克一生著述甚多，有《普通热化学概论》(1893)、《热力学讲义》(1897)、《能量守恒原理》(第二版 1908)、《热辐射理论》(1914)、《理论物理学导论》(共 5 卷 1916 ~ 1930)、《热学理论》(1932)、《物理学论文与讲演集》(共 3 卷, 1958)、《物理学的哲学》(1959) 等。普朗克一生除物理学外还喜好音乐和爬山运动。80 岁和 84 岁高龄时还登上过 3 000 多米的高山大威尼迭格峰。二次大战期间他为受迫害的犹太籍科学家提供过尽可能的支持与帮助。

居里，P. (Pierre Curie, 1859 ~ 1906)

法国物理学家。1859年5月15日生于巴黎。他的启蒙教育是在家庭里完成的，一度显得智力迟钝，但在他的父亲（医生）及私人教师启发下很快显出对数学的机敏，16岁就获巴黎大学理学士，18岁获硕士学位。1878年毕业后任该校物理实验室助理。1883年任巴黎市立理化学院物理实验室主任。1904年任巴黎大学教授。1905年被选为法国科学院院士。

1880年P.居里与其兄J.居里一起发现晶体的压电现象，即石英晶体在机械压力作用下，在两端面之间会出现电势差。这性质后来用于声电装置。1895年，P.居里在研究磁性时设计制造了一台十分精密的扭秤，现称为居里—谢诺佛秤。同时，他发现了顺磁体的磁化率正比于绝对温度，即居里定律。后人称铁磁性转变为顺磁性的临界温度为居里温度或居里点。

1895年，P.居里和玛丽·斯克罗多夫斯卡结婚。从此，他便与妻子的科学生涯融合在一起，于1898年发现了放射性元素钋和镭。由于这一贡献，他们夫妇和贝克勒耳共同获得1903年度诺贝尔物理学奖。居里还独自进行过一项危险的实验。1901年居里故意在自己的胳膊上用镭做灼伤实验，测量出镭的放射热为140卡每克小时。这是表明原子内部蕴藏巨大能量的第一个迹象。

1906年4月19日，P.居里在一次马车车祸中不幸去世。

帕邢 (Friedrich Paschen, 1865 ~ 1947)

德国物理学家。1865年1月22日生于德国什未林。1884年考入斯特拉斯堡大学。1888年在柏林大学由于发现火花放电的电压只决定于气压和两极之间距离的乘积而获博士学位。1901年任蒂宾根大学教授和物理研究所所长。1924~1933年任帝国物理技术研究所（柏林—夏洛滕堡）所长，1925~1927年任德国物理学会会长。1947年2月25日在德国波茨坦去世，终年82岁。帕邢在物理学方面的主要贡献是对光谱学进行了一系列实验研究。从1890年起，帕邢系统地用测量热辐射方法对光谱的红外区进行了大量的研究。1894年通过对太阳光谱的研究，把红外线的波长从 $5\mu\text{m}$ 拓宽到 $9.3\mu\text{m}$ 。1897年通过改进仪器和采用新的测量方法，又把红外线的波长推至 $23\mu\text{m}$ 。1908年，帕邢应用光栅摄谱仪对元素的红外区发射光谱进行了研究，发现氢原子光谱的近红外区存在附加的谱线，它恰好是氢光谱的H和H_γ之差得出的一个新谱线，从而证明了里兹 (Walther Ritz, 1878~1909) 提出的“从任何两条谱线之和与差往往可以找到另一谱线”的预言，并进一步发现了“帕邢线系”。此外，帕邢还研究过光谱线在强磁场的分裂效应、氦谱线的精细结构、氦的复杂光谱等，在这些方面都取得了一定

的成功。

居里，M. (MarieSkłodowskaCurie, 1867 ~ 1934)

M.居里是法籍波兰人，原名玛丽·斯克罗多夫斯卡，世称居里夫人。1867年11月7日生于波兰华沙。其父是中学的数学和物理教师。她从小酷爱学习，深受父母和老师的喜爱，以金质奖章在中学毕业。由于家境困难，只得辍学。

为了从经济上支持二姐去法国学医，玛丽到华沙及偏僻地区当家庭教师。待到二姐毕业工作后，才于1891年考进巴黎大学理学院开始深造。求学的不易使得玛丽能够克服学习和生活上的一切困难，于1893年和1894年先后以第一名的成绩通过了物理学和数学证书考试，获得了物理学和数学硕士学位。她在1893年接受过一笔波兰奖学金600卢布，但几年后她就用工资付还。显示了她刚毅的性格。1894年，为了解决关于钢的特性研究中的困难，她结识了P.居里。科学研究的共同理想，把他们连在一起，1895年7月26日，他们结为对后来非常著名的科学伴侣。

1897年，她为了获得博士学位，选定了不久前贝克勒耳发现的射线这个尚不完全清楚的问题做为研究课题。她利用居里兄弟发明的灵敏石英静电计测量放射性引起的电离强度，系统地研究了当时已知的各种元素和化合物，于1898年和德国的施密特(G.C.N.Schmidt, 1856 ~ 1949)同时发现了“钷”也具有放射性。

在对铀和钷的混合物以及各种自然矿石进行测量时，她观察到有些铀钷混合物的辐射强度比其中铀和钷的含量所应发射的强度要大得多，她推测这些矿石中一定存在着某种未知的、放射性很强的元素，并设计了放射化学的基本分析方法来找寻它，她的丈夫P.居里立即意识到这一研究的重要性，直接参与了此项工作。在实验室里，居里夫妇用化学方法和测定放射性的手段，在成吨的沥青铀矿中艰辛地寻找这种微量的未知元素。他们的工作进展很快，于1898年7月发现了新元素，这种新元素的放射性比纯铀强几百倍。居里夫妇命名它为“钷”(Polonium)，以纪念玛丽的祖国波兰。

他们认为钷的放射性还不够强，又继续在钷族化合物中寻找。通过部分结晶方法，同年12月，居里夫妇又发现了放射性比纯铀强900倍以上的另一种常常与钷伴生的新元素镭。但有人提出诘问：“没有原子量，就没有镭！”居里夫妇接受了这一挑战，决定设法把镭分离出来。工作在极端困难的条件下开始了，他们无钱购买大量的含镭的沥青铀矿，只得改用仅需支付运费的沥青铀矿矿渣，没有实验室，他们就在学校借给他们的一个木棚里工作，这个木棚下面是泥地，上面是透风的玻璃顶盖，室内充满烟气，夏天炎热难忍，冬天寒风刺骨；没有任何防护设备（当时还不知道放

射性的危险)，没有助手，两位研究者既是物理学家、化学家，又兼任技师、实验员和“水泥工人”。特别值得一提的是，由于 P.居里身体较差，搅拌溶剂和原始加热方法带来的重体力劳动，都要靠 M.居里。研究在难以想象的艰苦条件下进行了 4 年。他们使矿渣熔解、沉淀和结晶，在几次提炼之后终于在 1902 年从数吨沥青铀矿渣中提炼出了 0.12 克的氯化镭，初步测定了镭的原子量为 226，其放射性比铀强 200 多万倍，从而确凿无疑地证明了镭元素的存在！1903 年 M.居里以《放射性物质的研究》论文获得了博士学位，她所开创的用放射性进行化学分离与分析的方法奠定了放射化学的基础。同年，居里夫妇和贝克勒耳共同获得了诺贝尔物理学奖。

1906 年 p.居里逝世后，她接替其职位成为巴黎大学第一位女教授。1910 年她最重要的著作《放射性》一书出版。同年，她又成功地提炼出了纯镭元素。正是由于这些杰出的贡献，1911 年，她再次荣获诺贝尔化学奖。1914 年，巴黎建立了镭研究所，物理部由她领导。不久，第一次世界大战爆发。她和她的女儿 I.居里一起，利用 X 射线为伤兵进行野战医疗服务。战争结束后，她立即恢复了镭研究所的工作，使该所逐渐成为当时世界上核物理和放射化学的一个主要研究中心。1921 年美国总统 W.G. 哈定代表美国妇女界赠送 M.居里 1 克镭，她被选为国际联盟文化合作国际委员会委员。1922 年由于她在放射性物质的化学及其医学上应用的贡献，被选为法国医学科学院院士。M.居里由于长期从事放射性工作，因患恶性障碍性贫血白血病于 1934 年 7 月 4 日在萨拉西沃附近逝世，享年 67 岁。正是由于居里夫人的忘我献身精神和严格的科学态度以及她所取得的巨大成就，使她受到了国际科学技术界的广泛崇敬。她一生中接受了 7 个国家 24 次奖金和奖章，获得了 25 个国家的科学团体的荣誉称号。一个人一生中两次荣获诺贝尔奖，这无论在当时，还是现在，都是少有的。在巨大的荣誉面前，她仍每天工作 15 小时，直到去世。她虽获 7 万法郎的诺贝尔奖，生活仍十分俭朴，常年穿着一套黑衣服，被放射性灼伤的手缠着绷带，把奖金分送给了科学团体、实验室和穷苦学生，她更没有申请过专利，她说：“这些成果不属于我而属于全人类。”她的事迹鼓舞和教育着千千万万后来人。

密立根 (Robert Andrews Millikan, 1868 ~ 1953)

美国实验物理学家。1868 年 3 月 22 日生于伊利诺斯州的莫里森。1887 年入奥柏林大学后，从二年级起就被聘在初等物理班担任教员，他很喜爱这个工作，这使他更深入地钻研物理学，甚至在 1891 年大学毕业后，仍继续在初等物理班讲课，由此写成了广泛流传的教材。1893 年取得硕士学位，同年得到哥伦比亚大学物理系攻读博士学位的奖金，成为该校造就出来的第一位物理学博士。1895 年获得博士学位后留学欧洲。1896 年回国任教于芝加哥大学。由于教学成绩优异，第二年就升任副教授。

密立根以其实验的精确著名。从 1907 年开始，他致力于改进威耳孙云室中对 α 粒子电荷的测量甚有成效，得到卢瑟福的肯定。卢瑟福建议他努力防止水滴蒸发。1909 年，当他准备好条件使带电云雾在重力与电场力平衡下把电压加到 10000 伏时，他发现的是云层消散后“有几颗水滴留在视场中”，从而创造出测量电子电荷的平衡水珠法、平衡油滴法，但有人攻击他得到的只是平均值而不是元电荷。1910 年，他第三次作了改进，使油滴可以在电场力与重力平衡时上上下下地运动，而且在受到照射时还可看到因电量改变而致的油滴突然变化，从而求出电荷量改变的差值。1913 年，他得到电子电荷的数值 $e=(4.774 \pm 0.009) \times 10^{-10} \text{esu}$ 。这样，就从实验上确证了元电荷的存在。他测的精确值最终结束了关于对电子离散性的争论，并使许多物理常数的计算获得较高的精度。他的求实、严谨、细致、富有创造性的实验作风也成为物理界的楷模，与此同时，他还致力于光电效应的研究。经过细心认真的观测，1916 年，他的实验结果完全肯定了爱因斯坦光电效应方程，并且测出了当时最精确的普朗克常量 h 的值。由于上述工作，密立根赢得了 1923 年度诺贝尔物理学奖。

他还对电子在强电场作用下逸出金属表面进行了实验研究。他还从事元素火花光谱学的研究工作，测量了紫外线与 X 射线之间的光谱区，发现了近 1000 条谱线，波长直到 13.66nm，使紫外光谱远超出了当时已知的范围。他对 X 射线谱的分析工作，导致了乌伦贝克 (G.E.Uhlenbeck 1900 ~ 1974) 等人在 1925 年提出电子自旋理论。

他在宇宙线方面也做过大量的研究。他提出了“宇宙线”这个名称。研究了宇宙粒子的轨道及其曲率，发现了宇宙线中的 α 粒子、高速电子、质子、中子、正电子和 ν 量子。改变了过去“宇宙线是光子”的观念。尤其是他用强磁场中的云室对宇宙线进行实验研究，导致他的学生安德森在 1932 年发现正电子。从 1921 年起，密立根任教于加利福尼亚理工学院，他的努力有助于使该校成为世界上最著名的科学中心之一。1953 年 12 月 19 日在加利福尼亚的帕萨迪纳逝世。

威耳孙 (Charles Thomson Rees Wilson, 1869 ~ 1959)

英国物理学家。1869 年 2 月 14 日生于苏格兰的中洛锡安郡一个农民家庭。1888 年入剑桥大学，1892 年毕业后进入卡文迪什实验室，1896 年获博士学位。1900 年担任剑桥大学物理学讲师。1925 年任剑桥大学杰克逊讲座自然哲学教授。

年退休，曾被选为英国皇家学会会员，并被授予科普利奖章。1959 年 11 月 15 日在皮布尔斯郡逝世。

他一生从事分子物理、原子物理和核物理方面的研究。主要成就是发明了观察和拍摄带电粒子径迹用的仪器——威耳孙云室。他早年就酷爱在

大自然中进行科学观测，曾连续三年对云雾成因和大气电进行研究。1894年9月，他有几周在苏格兰最高的山顶上的 BenNevis 天文观测站观察云霞、日冕、云雾、辉光等奇异的光学现象，使他想到“要在实验室中模拟这些现象”。卡文迪什实验室主任 J.J. 汤姆孙对他很支持，并提出需要一种能显示电子经过空气时路径的仪器。1895年初，他用湿空气膨胀制造人工云雾时，发现空气中没有尘埃时还有某种凝结核心，他猜测这可能是“带电的原子”即离子，这些离子使过饱和蒸汽凝结成小水滴。1896年，当他用 X 射线照射时，发现“产生的雾要好几分钟才沉降下来”，而汤姆孙那时刚得出 X 射线可导致气体电离的结论。这说明 X 射线通过云室中的气体时的确形成大量离子。他观察到的现象证实了离子是水蒸气凝聚的核心。因此，这种云室可以用来探测带电粒子，并可以用照相记录。他的绝大部分有关“离子的凝聚核心作用”的工作是在 1895~1900 年间进行的。1911 年他首先观察到并照相记录了 X 射线辐照范围内形成的 α 和 β 粒子的径迹。到 1928 年，威耳孙已把云室装备得相当完善，并使这一技术在各国实验室得到推广，成为原子核物理研究中有力的工具之一。由于云室的工作，威耳孙与 A. H. 康普顿的散射工作共同获得 1927 年诺贝尔物理学奖。

卢瑟福 (Ernest Rutherford, 1871~1937)

英籍新西兰物理学家。1871 年 8 月日出生于新西兰南岛纳尔逊城南明水村一个农民（苏格兰移民）家庭。小时就聪慧好学，勤于动手。12 岁就对大学教授 B. 斯图瓦特写的教材《物理学入门》写下批语：“信息并不太多……竭力锤炼人的心智”。他喜好数学和巧于实验，设计过测量快速交变电磁效应的仪器。各科成绩优秀，得过多次数学金。18 岁进入新西兰大学坎特伯雷学院，后在该学院获得硕士学位。大学时代就在地窖内开展无线电信号收发的实验研究。1895 年获剑桥大学首批研究生奖学金，同年进入卡文迪什实验室，成为 J.J. 汤姆孙的研究生。1898 年加拿大蒙特利尔的麦吉尔大学聘任 27 岁的卢瑟福为物理学教授。1907 年他回英国担任曼彻斯特大学实验物理学教授。1919 年应邀到剑桥接替 J.J. 汤姆孙担任卡文迪什实验室主任。1925 年当选为英国皇家学会主席。1931 年受封为纳尔逊男爵。1937 年 10 月 19 日在剑桥逝世。

卢瑟福对科学的重要贡献主要有三方面。第一方面是关于放射性的研究。继 1898 年贝克勒耳发现放射性现象后不久，卢瑟福发现了铀放射性辐射的不同成份—— α 辐射和 β 辐射。1900 年提出了重元素自发衰变理论。1904 年总结出放射性产物链式衰变理论，奠定了重元素放射系元素移位的基本原理。他的发现打破了元素不会改变的传统观念，使人们对物质结构的研究进行进入了原子内部的深层次，为开辟一个新的学科领域——原子核物理做了开创性工作。由于他“在元素蜕变及其放射化学方面的研究”

而荣获 1908 年度诺贝尔化学奖。第二方面是 1911 年提出了原子的有核结构模型。1908 年卢瑟福用实验证明了 α 粒子就是氦离子。此后，他通过 α 粒子被物质散射的研究，从理论和实验验证上无可辩驳地论证了原子的有核结构模型，从而把原子结构的研究引向正确的轨道。因此，他被誉为“原子物理学之父”。以上两条详见“放射性的发现及放射现象的研究”、“对原子结构的认识过程”条目。1919 年人工核反应的实现是卢瑟福的第三项重大发现。这一发现过程可以作为卢瑟福科学方法与作风的典型例证之一。1915 年，他的学生马斯登 (E. Marsden, 1889 ~ 1970) 发现用 α 粒子轰击空气时出现一些粒子，它们具有不寻常的长射程。卢瑟福决心利用业余时间长期而耐心地搞清楚这些粒子到底是 N、He、还是 H 原子、Li 原子？他设计了图 2 - 2 - 12 所示的装置，为了使他的结果绝对可靠，花了

图 2 - 2 - 卢瑟福观察首次人工核蜕变的装置。在密闭的充氮容器中 D 为 α 粒子源，F 为荧光屏，DS 为 α 粒子射程。M 为显微镜，可观察到 α 粒子轰击 N 核后衰变产生的粒子闪烁。

3 年时间他于 1919 年证明：这是 α 粒子轰击氮核后使之衰变放出了氢原子核即质子： ${}_{7}^{14}\text{H} + {}_{2}^{4}\text{He} \rightarrow {}_{8}^{17}\text{O} + {}_{1}^{1}\text{H}$ 。这一装置的成本极为低廉，但用显微镜观察屏上闪烁的工作极为艰苦！这一实验的成功引起了一场热烈争论，最后以云室照片证明了卢瑟福的正确而告终。这标志着人类第一次实现了改变化学元素的人工核反应。古代炼金术士转化元素的梦想终于变成了现实！

此外，他还预言了重氢和中子的存在，这在后来都得到了证实。他同查德威克和艾利斯合作，于 1930 年出版了巨著《从放射性物质发出的辐射》，这部著作是早期核物理学的总结并具有当代水平。

在 20 世纪初叶物理学革命迅速发展时期，为什么卢瑟福能取得其他人难以取得的一连串巨大成功，成为第一个深入原子宇宙的成功探索者？大体可以从以下几方面来考察：

(1) 紧紧抓住关键问题扎扎实实地进行一系列准确而简单的实验。卢瑟福一生的许多重大成就贯穿着一条红线：透彻地研究 α 粒子的本质，并利用其巨大的能量与动量作为“炮弹”去轰击原子和原子核，揭开原子组成与变化的奥秘。他极其热爱实验，允许助手和学生们大胆提出设想，但实验时必须一丝不苟，提倡自制和利用最简单的仪器，实验结果必须绝对可靠。在 1908 年诺贝尔化学奖获奖演说中，他描述了他和盖革长时间利用低倍显微镜在暗室中“枯燥地”计数 α 粒子击中硫化锌屏上的闪烁次数，并与其他方法比较。结果使最顽固的怀疑者不得不心悦诚服。这样的工作精神也导致大角度散射即原子有核结构的发现。正是在这些目的明确、烦

琐、单调的常规工作中，实验者的耐心和毅力导致了辉煌的成就。

(2) 理论与实验的紧密结合。卢瑟福在 1929 年皇家学会曾以“理论与实验”为题说过：“每一个新的实验观察立即被抓住，以检验它是否能被现有的理论所解释。如果不能，就要寻求理论图式中的改正……过去十年中物理学明显的迅速发展，主要是由于理论与实验的密切结合”。卢瑟福的 α 粒子散射公式的推导及有核模型的提出，就是一个光辉例证。

(3) 特殊的勤奋、敏锐的洞察力和丰富的科学直觉。他能在最易于被人们忽视的新现象出现时洞察它的本质，分辨某些假说的正误。例如 α 粒子大角度散射现象出现未引起其学生盖革等的注意时，他就意识到原子内部可能存在造成这种现象的核。马斯登偶然发现 α 粒子轰击氢原子产生类氢光谱的带正电粒子，他意识到这可能是从氢原子内打出的氢核……等等。卢瑟福惊人的工作毅力与极度勤奋，从他几十年两百多篇论文和三本专著中可以看出，他的学生前苏联卡皮查回忆说：“卢瑟福无休止地工作，总是在研究新的课题……他发表的只是占他整个工作的百分之几，其余有的甚至他的学生也不知道”。天才来源于勤奋，卢瑟福也证明了这一点。

(4) 卢瑟福善于识别、选择和培养人才，并能团结一大批卓越的物理、化学和技术人才一起工作，他平易近人，知人善任，热情关怀，精心培育。在 J.J. 汤姆孙和他两代领导下，卡文迪什实验室英杰辈出，成为世界物理学研究的重要中心之一。这是他对科学事业的又一项贡献。他的学生在剑桥皇家学会蒙得实验室的大门右侧墙上，刻了一条鳄鱼（这是卢瑟福的绰号），以此来赞誉他勇往直前的坚毅性格和勉励来者。

卢瑟福曾大声疾呼，组织国际声援抗议法西斯德国对爱因斯坦等的迫害，站在科学家反法西斯斗争的前列。

赖曼 (Theodore Lyman, 1874 ~ 1954)

美国物理学家。1874 年 11 月 23 日生于美国马萨诸塞州的波士顿。1897 年毕业于哈佛大学，1902 年在该校任教。1919 年前往英国剑桥大学，在卡文迪什实验室工作两年。1921 年回美国，任数学和自然哲学教授。从 1926 年起任杰菲逊物理实验室主任，是美国科学院院士。1954 年 10 月 11 日在波士顿逝世，终年 80 岁。

赖曼在物理学中的主要贡献是对远紫外光谱的研究。他心灵手巧，实验技术很高，曾亲自研制成用以测量短波的真空摄谱仪，用它可以测量波长比 2000 \AA 还短的光谱。1906 年赖曼和密立根合作，受里兹光谱组合原则的启示，对氢光谱进行观测，在紫外区观察到赖曼线系，从而更完善了对氢原子光谱各谱线的研究，也再一次证明里兹组合原则的正确性，使光谱线的研究进一步转向光谱项。此外，赖曼对太阳光谱的短波成份作了

研究；对氦、氖、铝、镁的光谱进行了观测；还对紫外线的灭菌作用作过研究，对照相医学的发展起了一定的作用。

迈特纳 (Lise Meitner, 1878~1968)

犹太血统的奥地利和瑞典物理学家、放射化学家。1878年11月7日生于维也纳，于1906年取得维也纳大学物理学博士学位。1907年在柏林大学随普朗克进修理论物理学，并开始同哈恩合作。1912~1938年间在柏林大学历任助教、讲师和教授，同时又在威廉皇帝协会主办的化学研究所放射性研究室工作，并在后来担任室主任。由于纳粹迫害，她于1938年7月秘密流亡到瑞典，在斯德哥尔摩诺贝尔研究所任教授。1947年退休后，在瑞典皇家技术研究所和皇家工程科学院继续工作直到1960年(82岁)。1968年10月27日病逝于剑桥。

她的主要贡献多半是同哈恩合作完成的：1917年发现元素镤，20年代初研究核的同质异能现象，30年代中期用中子轰击铀发现4种放射性同位素。20年代末在长期研究衰变问题后，对射线连续能谱作出精确测定，导致泡利1930年提出中微子假说。她的最大成就是发现了铀核的裂变。哈恩及其助手斯特拉斯曼1938年12月发现铀经中子轰击后竟出现钡，大为困惑，将其告诉了流亡在斯德哥尔摩的迈特纳，迈特纳于1939年1月提出核裂变概念，解释了哈恩和斯特拉斯曼的实验结果。她还根据爱因斯坦的质能公式作出预言：1个铀核裂变成1个钡核和1个氪核时，会释放出200兆电子伏的巨大能量，这个能量是通常物质燃烧释放的化学能的几百万倍。核裂变概念为链式反应和原子能的发现与应用开辟了道路。

哈恩 (Otto Hahn, 1879~1968)

德国放射化学家和物理学家。1879年3月8日出生于法兰克福。1897年入马尔堡大学，1901年获博士学位。1904~年，曾先后在W.拉姆塞和E.卢瑟福指导下进修。1907~1933年，在柏林大学工作，1910年起任教授。1912年任威廉皇帝化学研究所放射性研究室主任。1928年起任该所所长，直到1945年。自1907年开始，他同奥地利物理学家迈特纳进行了历时30年的富有成效的合作。

一生从事放射性、核化学和核物理方面的研究，发现了一系列放射性元素和核裂变现象。

他早期的主要贡献是发现一系列天然放射性同位素(有些是同迈特纳一道发现的)，包括1917年发现放射性元素镤。1921年发现了天然放射性元素钋的同质异能现象。20年代初到30年代，他的研究重点转向把放射化学方法应用于各种化学问题。1934年，约里奥—居里夫妇发现人工放射性，费米宣布发现“铀后元素”(即超铀元素)，哈恩和迈特纳便集中全

力研究中子轰击铀的各种产物的物理和化学性质。1938 年秋，哈恩和斯特拉斯曼获悉约里奥—居里发现产物中有元素镧，于是重做以前的实验，他们在报告中说：“我们必须更改在以前的衰变方式中所提到的物质名字，把以往叫做镭、钋、钷的元素称为钡、镧和铯……这和所有以前原子核物理学的经验相抵触”。最后由迈特纳同弗里希 (Otto Robert Frisch, 1904 ~ 1979) 借助玻尔的液滴模型，提出了核的分裂即裂变概念来代替“超铀元素”，从而解决了这一矛盾，并经许多人的实验立即得到证实。随后，哈恩和斯特拉斯曼又发现钚核受快中子轰击也会发生裂变，由于发现核裂变，哈恩获得 1944 年诺贝尔化学奖。

核裂变的发现使世界开始进入原子能时代。哈恩不愿让纳粹政权掌握原子能技术，拒绝参与任何研究。1945 年春他和海森伯等几位原子科学家被送往英国拘禁。1946 年初获释回德国后，担任威廉皇帝协会 (1948 年改名为马克斯·普朗克协会) 会长，1960 年后任荣誉会长。1968 年 7 月 28 日病逝于哥丁根。

爱因斯坦 (Albert Einstein, 1879 ~ 1955)

20 世纪最伟大的物理学家，科学革命的旗手。1879 年 3 月 14 日生于德国乌尔姆一个犹太人家庭。父亲和叔父开的电气小工厂和家庭的自由派思想，使他童年就受到科学和哲学的启蒙加上音乐熏陶。他从小脑中就充满许多奇思遐想，例如 4 岁时就奇怪为什么罗盘针总是转向南方？它周围有什么东西推动它？小学时排犹浪潮、军国主义教育方式和宗教礼仪等使他厌恶权威，他说：“我这个教徒在 12 岁时突然终结了，通过阅读科普书籍，我很快领悟到圣经里的许多故事不是真的。我认为青年被政府用谎言故意地欺骗了”。12 岁时他一口气读完《几何学原本》，并练习用自己的方法证明定理。他特别喜欢读《自然科学通俗丛书》中如《力与物质》等书。13 岁时读了康德的《纯粹理性批判》，使他的思考转向宇宙、哲学和自然现象中的逻辑。他的数学物理很出色，但其余学业成绩不佳。15 岁时，即他中学毕业前一年本已准备“因神经系统状况不佳”休学，学校却以其自由主义思想令其退学。他在辗转意大利和瑞士的高校入学考试中曾因无中学文凭和外语、生物课成绩不佳而落榜。1895 年在阿劳入大学预科班，过了一年愉快的学习生活。他随时将思考记入身边的小本，例如“追光问题”：观察者随光前进时，会不会看见电磁波形成停止的驻波？1896 年，他进入瑞士苏黎世工业大学师范系（实即数理系）。他喜欢在物理实验室观察实际现象、读科学原著和思考现代物理学中的重大问题。1900 年毕业后失业两年才到瑞士专利局任三级鉴定员，在这里的七年是他辉煌的科学创造时期。1902 ~ 1905 年，他和两个青年朋友每晚阅读和讨论哲学与自然科学著作，戏称为“奥林比亚科学院”。1908 年兼任伯尔尼大学编外讲师。

1909年离开专利局任苏黎世大学理论物理学副教授。1911年任布拉格德国大学理论物理学教授。1912年任母校苏黎世联邦工业大学教授。1914年任柏林大学教授和威廉皇帝物理研究所所长。法西斯政权建立后，爱因斯坦受到迫害，被迫离开德国。1933年移居美国任普林斯顿高级研究院教授，直至1945年退休。在美期间，1940年取得美国国籍。爱因斯坦是人类历史中最具创造性才智的人物之一。他一生中开创了物理学的四个领域：狭义相对论、广义相对论、宇宙学和统一场论。他是量子理论的主要创建者之一。他在分子运动论和量子统计理论等方面也作出重大贡献。

1905年，爱因斯坦利用在专利局的业余时间写了6篇论文。其中4月、5月、12月的3篇是关于液体中悬浮粒子布朗运动的理论。他设想通过观测由分子运动的涨落现象所产生的悬浮粒子的无规则运动，来测定分子的实际大小，试图解决科学界和哲学界长期争论不休的原子是否存在的问题。3年后由法国物理学家佩兰的精密实验证实。3月的论文《关于光的产生和转化的一个推测性的观点》，把普朗克的量子概念应用到光的传播，认为光是由光量子组成的，它们既具有波动性又有粒子性，从而圆满地解释了光电效应（10年后由密立根实验证实）。因此，爱因斯坦获得了1921年度诺贝尔物理学奖。6月的论文《论运动物体的电动力学》中，完整地提出了狭义相对性理论。由于这三个不同领域中取得的历史性成就，才使他在1908年有缘进入学术机构工作。狭义相对论建立以后，爱因斯坦并不满足，力图把相对性原理推广到非惯性系。他从惯性质量同引力质量相等这一事实出发，经过10年艰苦探索，于1915~1916年创立了广义相对论。随后，爱因斯坦用广义相对论的结果来研究整个宇宙的时空结构。1917年发表论文《根据广义相对论对宇宙学所作的考查》，他以科学论据推论宇宙在空间上是有限无界的，这是宇宙观的一次革命。1924年与印度物理学家玻色提出单原子气体的量子统计理论，即玻色—爱因斯坦统计。1925年至1955年间，爱因斯坦几乎全力以赴地去探索统一场论。他力图把广义相对论再加以推广，使它不仅包括引力场，也包括电磁场，即寻求一种统一场理论。遗憾的是他始终没有成功。然而，从70年代开始，统一场论的思想以新形式重新显示出生命力，为物理学未来的发展指出了方向。

爱因斯坦的科学成就与他的哲学思想密切相关，他坚持了一个自然科学家必然具有的自然科学唯物论的传统，吸收了斯宾诺莎等的唯理论思想以及休谟和马赫的经验论的批判精神，经过毕生对真理的追求和科学实践，形成了自己独特的科学思想和科学研究方法。坚信自然界的统一性和合理性，相信人的理性思维能力，求得对自然界的统一性和规律性的理解，是他生活的最高目标。统一性思想、简单性思想、相对性思想、对称性思想作为科学活动的指导思想始终贯穿和广泛应用于他的科学探索之中。他也是一位纯熟地运用思辨与实证、想象与逻辑、直觉与数学等科学方法的

大师。

爱因斯坦在科学思想上的贡献，在历史上也许只有牛顿和达尔文可以媲美。爱因斯坦同时还以极大的热忱关心社会进步，关心人类命运。他一贯为反对侵略战争，反对军国主义和法西斯主义，反对民族压迫和种族歧视，进行了不屈不挠的斗争。1914年第一次世界大战爆发时，爱因斯坦在一份仅有4人赞同的反战宣言上签了名，后又积极参加地下反战组织的活动。战争结束后，他致力于恢复各国人民相互谅解的活动，为此到法、英、荷等地奔走呐喊。在匈牙利物理学家西拉德促动下，爱因斯坦于1939年建议罗斯福抢在德国之前研制原子弹。第二次世界大战结束前夕，当他获悉美国的原子弹轰炸人口稠密的日本城市时，大为震惊，义愤填膺。对于自己曾给罗斯福写信一事感到无比懊悔。战后，他为开展反对核战争的和平运动和反对美国国内法西斯恐怖，进行了不懈的斗争。他对水深火热、饥寒交迫的旧中国劳动人民寄予深切同情。“九一八”事变后，他一再向各国呼吁采用联合的经济制裁制止日本对华侵略。1936年沈钧儒等“七君子”因抗日被捕，他热情参与营救和声援。像爱因斯坦这样在自然科学创造上有划时代贡献，在对待社会政治问题上又如此严肃、热情，是很难能可贵的。

综观爱因斯坦的一生，可以说他不仅是一个伟大的科学家，又是一个富有哲学探索精神的杰出的思想家，同时也是一个有强烈正义感和社会责任感的世界公民。他的一生崇尚理性，相信人类进步，努力使科学造福于人类，把真、善、美融为一体。他认为“人只有献身于社会，才能找出那实际上是短暂而有风险的生命的意义。”“一个人的真正价值首先取决于他在什么程度上和在什么意义上自我解放出来。”这正是爱因斯坦一生的真实写照和完美体现。

1955年4月18日爱因斯坦逝世于普林斯顿。遵照他的遗嘱，不举行任何活动。不立纪念碑，骨灰撒在永远对人保密的地方，为的是不使任何地方成为圣地。

夫兰克 (James Franck, 1882 ~ 1964)

德国物理学家。1882年8月26日生于汉堡。1906年获柏林大学博士学位。1917年起任威廉皇帝物理化学研究所物理部主任。1921年受聘为格丁根大学教授。1934年移民美国，1935及1938年先后任约翰·霍布金斯大学和芝加哥大学教授。1955年因光合作用方面研究的贡献获得美国科学院勋章。他还是英国皇家学会会员。第二次世界大战后获得德国物理学会马克斯·普朗克奖章以及格丁根荣誉公民称号。1964年在访问格丁根时于5月21日逝世。

一生从事原子物理、核物理、分子光谱学及其在化学上的应用和光合

作用等研究。夫兰克在物理学中的主要贡献是最早通过电子和原子碰撞实验直接证实了 N.玻尔 1913 年有关原子定态假设的正确性。1912 ~ 1914 年他和 G.L.赫兹 (1887 ~ 1975) 进行了一系列实验,利用电场使热阴极电子加速,获得能量并与管中汞蒸气原子发生碰撞,实验发现电子能量未达到某一临界值时,电子与汞原子发生弹性碰撞,电子不损失能量;当电子能量达到某一临界值时,发生非弹性碰撞,把电子的一定能量传递给汞原子,使后者激发,可以观察到汞原子跃迁的发射谱线。夫兰克-赫兹实验的结果,表明电子的能量只能是一系列离散值。这说明原子的能级是分立的。这是量子理论的直接证明。这一研究成果使夫兰克和赫兹同获 1925 年诺贝尔物理学奖。他还研究了电子和原子与分子的碰撞、原子跃迁和原子中的能级、原子系统中的能量在荧光情况下的转移等问题,阐明分子间力与分子光谱的关系。提出分子中的电子跃迁远比分子振动迅速;由此导出夫兰克—康登原理,作为分子电子光谱带振动结构强度分布的基本原理。

盖革 (Hans Wilhelm Geiger, 1882 ~ 1945)

德国实验物理学家。1882 年 9 月 30 日出生于诺伊施塔特。1906 年毕业于埃朗根大学。1906 年起在曼彻斯特大学随卢瑟福工作。1912 年到柏林物理技术研究所工作。1925 年起任基尔大学物理研究所教授和所长。1929 ~ 1936 年任蒂宾根大学教授。1936 年任柏林工业大学教授。

一生从事原子和核以及宇宙线方面的研究。主要成就是:1908 年与卢瑟福合作,发明了逐个记录荷电粒子的计数管,这是探测放射性最有用的仪器之一。1928 年又与 W.弥勒合作加以改进,人称盖革—弥勒计数器。1909 ~ 1910 年,他和马斯登合作进行了一系列 α 粒子通过薄金属膜后发生偏射甚至大角度偏折(散射)的实验,对卢瑟福建立原子的有核模型起了决定性作用。1911 年,与努塔耳(J.M.Nuttal, 1890 ~ 1958)合作,确立了放射性衰变常量(或放射性原子核半衰期)与衰变能量(α 粒子能量等)之间的经验定律(盖革-努塔耳定律)。1925 年,与玻特(W.Bothe, 1891 ~ 1957)合作,研究硬 γ 射线在电子上的散射(康普顿效应),第一次从实验上证明:对于单次散射,能量和动量守恒定律成立。

玻恩 (Max Born, 1882 ~ 1970)

德国物理学家。量子力学的创建者之一,晶格动力学的奠基人。1882 年 12 月 11 日生于普鲁士布雷斯劳一个犹太知识分子家庭。小时受父亲(医学教授)影响喜欢摆弄仪器和参加科学讨论。1901 年进入布雷斯劳大学。1905 年慕名入格丁根大学以便听希耳伯特、闵可夫斯基等数学、物理学大师讲学。于 1907 年获博士学位。1912 年受聘为格丁根大学讲师。1921 年成为格丁根大学物理系主任和理论物理学教授。从 1923 年开始,他致力于

发展量子理论，年轻的海森伯当时是他的助教和合作者，1925年海森伯提出他的“关于运动学和力学关系的量子理论”后，玻恩当即支持海森伯理论，认为其表达形式与矩阵代数一致，他和海森伯等人合作发表了长篇论文，用严整的数学形式全面系统地阐明海森伯理论。1926年薛定谔以波函数为基础，提出与海森伯的矩阵力学等价的波动力学，并把波函数看作是对实在的物质波的连续描述。玻恩从具体的碰撞问题的分析出发，提出了波函数的统计诠释——波函数的二次方代表粒子出现的概率。由于这一贡献，他获得了1954年诺贝尔物理学奖。量子力学的提出使格丁根大学成为当时举世瞩目的物理中心之一。在玻恩的领导下，格丁根群英荟萃，自由讨论空气活跃。形成了可以和玻尔的哥本哈根学派相媲美的格丁根物理学派。

玻恩是一位杰出的教育工作者，他讲课出色，常组织名家讲学，他热诚待人，诲人不倦，奖励后起之秀，对年轻人的成就给予很高评价。他还善于向晚辈学习，如他认为他从其助手泡利那里学到的，比泡利从他那里学到的要多。

1933年希特勒上台，玻恩由于犹太血统，教授职位被剥夺，财产被没收，流亡到了英国。1936~1953年任爱丁堡大学教授。退休后回德国居住，仍继续进行科学与写作活动。在60余年的学术生涯中发表论文300余篇，出版了近30本著作。于1970年1月5日在格丁根逝世。墓碑上刻着他发现的著名公式：
$$pq - qp = \frac{h}{2\pi i} .$$

玻尔 (Niels Hendrid David Bohr, 1885~1962)

丹麦物理学家。1885年10月7日生于哥本哈根。7岁入小学后成绩一贯优异，敢于公开指出教材或教师讲课中的差错。从小爱好足球，身体很好，也擅长手工，他说过：“我是像一个哲学家和一个工匠那样地对物理学发生兴趣的。”父亲是哥本哈根大学生理学教授，玻尔少年时经常随父亲参加每周五丹麦科学家的家庭学术性聚会，受到了许多潜移默化的科学熏陶。18岁时进入哥本哈根大学的数学和自然科学系，主修物理学。大学低年级时参加哲学课外小组“黄道社”，积极地参加各种问题的讨论。大学二年级时他热中于研究水的表面张力问题，他自己设计与制造仪器，吹制玻璃管，做完一次实验往往需要若干小时。在精确测定的基础上，他参加了丹麦皇家科学院的有奖征文，他用振动射流法对水的表面张力进行实验和理论方面的研究，获得金质奖章。1909年获该校硕士学位。1911年，以论文《金属电子论的研究》获博士学位。同年9月，他到英国剑桥卡文迪什实验室进修。据说他第一次与导师J.J.汤姆孙见面时，就操着不熟练的英语把他论文中批评汤姆孙的段落当面指出，使导师大为光火，因

而给以冷遇。在一次实验室年度聚餐会上他聆听了来访的卢瑟福的长篇演说，为他的性格和成就所折服，随即于 1912 年 3 月转到了曼彻斯特随卢瑟福工作，这成了他一生的重要转折点。

他从研究不同的铝片对 α 射线的吸收问题开始，思考原子结构问题，并超负荷地全力工作。在这里他参加了卢瑟福的科学集体，并和卢瑟福建立了长期的亲密关系。当时人们对原子内部结构知之极少，只停留在光谱学和化学元素周期表的经验水平上。同时，按照卢瑟福的有核模型，明显地出现了正常状态下原子和分子的稳定性问题。不突破经典理论的框架，这一矛盾是难以解决的。1912 年 7 月，他尝试着把量子概念和有核模型结合起来，写了一份论文提纲给卢瑟福。这一提纲后来被史学界称为《卢瑟福备忘录》。1912 年 9 月，他受聘在哥本哈根大学任教。他利用业余时间奋发努力，形成了自己的理论。1913 年 7 月起，他以《论原子构造和分子构造》为题，连续三次在英国《哲学杂志》上发表论文，后来被称为“伟大的三部曲”。这篇论文的三大部分是：“正核对电子的束缚”，“只包含单独一个原子核的体系”，“包含多个原子核的体系”。论文提出了五条公设（后来一般教材中归纳为三条）。在玻尔的原子理论中，最重要的是引入了“定态”和“跃迁”这两个全新的概念。“定态”概念把经典物理学在一定边界条件和初始条件下所允许的各种连续状态进行筛选，只允许某些分立状态存在，从而排除了定态之间的其他状态，形成若干鸿沟。“跃迁”（最初叫“过渡”）则把一个定态到另一定态的变化看作一种突然的、整体的、不需时间的行为，不允许经典物理那种逐渐的、连续的、分阶段动作。两个状态之间的能量差形成了原子发射和吸收光的机制。这两个新概念解释了原子世界中原来互不关联的许多实验事实，如 α 粒子大角度散射，氢原子线光谱的各种公式，不同元素的 X 射线谱等。玻尔理论促进了新谱线系（如赖曼系）的寻求和概括，核算了里德伯常量。天文学上发现的星体上的某些谱线（皮克林系）原来人们认为是属于氢原子，玻尔理论指出应属于氢原子并得到了实验验证。J. 弗兰克和 G. 赫兹通过碰撞测出原子的“电离能”，玻尔指出这是原子的“激发能”，由此可以肯定地证明原子定态的存在。玻尔的成功使他 1916 年（31 岁）担任了哥本哈根大学教授，1917 年被选为丹麦科学院院士。

为了克服说明其他元素光谱时遇到的困难，并且进一步解释光谱线的强度、偏振以及原子其他诸多性质，说明元素周期表的构成等，1918 年玻尔提出了对应原理，它的大意是说：在同一问题的经典理论与量子理论之间，总可以从形式上找到相对应的类比关系。他认为：对一个周期性体系来说，用经典理论（如用经典广义坐标中的傅立叶系数）来描述周期性体系的运动，和用量子理论（如体系的跃迁概率）来描述时，两者存在着简单的对应关系。这一理论后来导致了海森伯矩阵力学的发展。玻尔利用这

一原理，合理地解释了众多的现象，如各元素的光谱与 X 射线谱、原子中电子的组态和元素周期表等。1922 年 12 月，玻尔由于上述这些成就荣获诺贝尔物理学奖。

1921 年，玻尔倡议并建立了哥本哈根大学理论物理学研究所，并领导这一世界性的科学中心 40 年，形成著名的哥本哈根学派，在量子力学的发展中起着独特的作用，取得了许多重大的成果，并培养出大批优秀的学者。例如，玻尔的对应原理导致了海森伯矩阵力学的形成；在相互的启发鼓励下涌现了玻恩对波函数的概率诠释；海森伯的不确定原理；以及后来玻尔提出的互补原理等。30 年代中期，玻尔还提出了关于原子核构成的“液滴模型”、复合核概念等，促进了重核裂变的发现和原子核能的研究。

玻尔待人诚恳，善于激发年轻科学家们的科学热情。1961 年访苏时，他的学生之一朗道问他有什么秘诀把许多才华横溢的青年团结在自己周围？他说：“没有什么秘诀，只是我不怕在他们面前显露我的愚蠢。”他在丹麦被纳粹占领期间，坚决不参加傀儡政府组织的活动，而和地下爱国组织密切合作，组织专门机构营救被希特勒迫害的德、意等国大批知识分子。1943 年，他逃脱了德军的逮捕，经瑞典转赴英、美，参加了英美联合研制原子弹的工作。他担心核武器出现后如何保卫世界和平问题，为此而奔走呼号。1950 年他为此发表了《致联合国的公开信》。在他倡议下玻尔建立并领导了欧洲核子研究中心和北欧原子物理研究所。

1937 年夏季，玻尔及其子 A·玻尔（1922~）曾到中国上海、杭州、南京和北平等地访问，表达了对中国人民的友谊。1947 年他亲自设计了自己的族徽，其中心图案是中国的古代八卦“太极图”，形象地表示了他的互补思想。

1962 年 11 月 18 日，他逝于哥本哈根。

薛定谔（Erwin Schrödinger, 1887~1961）

奥地利理论物理学家，波动力学的创始人。1887 年 8 月日生于维也纳。他的父亲是一位生产漆布的手工业主。他的才华在家庭教师开始教他小学课程时就显露出来了。11 岁入中学，总名列前茅。他特别喜爱数学、物理，也喜爱古老语法的严谨逻辑，还十分擅长写作诗歌。1906 年进维也纳大学物理系，在学习之余，他是一位出色的登山运动员，又是剧院里的热心观众。1910 年，薛定谔获得了哲学博士学位。毕业后在维也纳大学第二物理研究所工作。曾与人合作测大气中镭 A（即 ^{218}Po ）含量而得到科学院奖。

第一次世界大战期间，薛定谔服役于一个偏僻的炮兵要塞，在那里利用闲暇，研究理论物理学。战后，他恢复了科学活动，起初是在维也纳研究所，以后转到了德国斯图加特工学院和布雷斯劳大学教书。从 1921 年起，他在瑞士苏黎士大学任数学物理学教授，在那里，创立了波动力学，

提出了薛定谔方程，确定了波函数的变化规律。这是量子力学中描述微观粒子运动状态的基本定律，在粒子速度远小于光速的条件下适用。这一定律在量子力学中的地位，可与牛顿运动定律在经典力学中的地位相比拟。1926年，薛定谔证明自己的波动力学与W.海森伯、M.玻恩和P.约当所建立的矩阵力学在数学上是等价的，这一证明成了整个物理学进一步发展的里程碑。

1927年，薛定谔接替M.普朗克到柏林大学担任理论物理学教授，并成为普鲁士科学院院士，与普朗克和爱因斯坦建立了亲密的友谊。同年在莱比锡出版了他的《波动力学论文集》。1933年，薛定谔对于纳粹政权迫害杰出科学家的倒行逆施深为愤慨，辞职移居英国牛津，在马格达伦学院任访问教授。就在这一年他与P.A.M.狄拉克共同获得诺贝尔物理学奖。

1936年冬，薛定谔回到奥地利的格拉茨。奥地利被纳粹德国吞并后，他陷入了十分不利的处境。1938年9月，在友人的帮助下，又流亡到英国牛津。1939年10月转到爱尔兰。爱尔兰为薛定谔建立了一个高级研究所，他专心致志地在那里从事了17年研究工作，不仅进一步研究了波动力学，还长期探索了统一场论、宇宙论等问题。薛定谔每年在都柏林主持“夏季讲座”，与各国同行讨论交流，在这里他发表的《生命是甚么》（1948年出版），用热力学、量子力学、化学理论解释生命现象的本质，引进了负熵、遗传密码、量子跃迁式突变等概念，成为今天蓬勃发展的分子生物学的先驱。

1956年70岁时返回维也纳大学物理研究所，获得奥地利政府颁发的第一届薛定谔奖。1961年1月4日病逝于阿尔卑巴赫山村。

查德威克 (James Chadwick, 1891 ~ 1974)

英国实验物理学家。1891年10月日生于曼彻斯特，1908年由曼彻斯特中学毕业进入曼彻斯特大学理学院，年毕业时成绩优异，随即留校在卢瑟福指导下进行放射性研究并得硕士学位。1913年到德国柏林在盖革指引下继续研究放射性。第一次世界大战开始后作为“敌侨”被关入德国战俘营，在这里他仍在继续搞“在光照射下光气的生成”等物理实验。1919年，入英国剑桥大学从事α粒子人工轰击各种元素的试验。1923年被任命为剑桥大学卡文迪什实验室主任助理。1935~1948年任利物浦大学教授。1939~1943年参加英国及美国曼哈顿工程的原子弹研究，获得多种荣誉。1935年获诺贝尔物理学奖。1974年7月24日去世。

1914年，他就首先发现β射线具有连续能谱。1920年，他通过铂、银、铜核与α粒子的散射直接测出了原子核的电荷，从而证实了卢瑟福的原子理论。1921~1924年，他协助卢瑟福做了大量实验：从硼到钾的α粒子轰击试验。证明除C与O外，其他元素的核俘获一个α粒子后都能放出一个

质子并转变为下一号元素。查德威克的最大贡献是发现中子。当时，人们正在研究金属铍在 α 粒子轰击下产生的贯穿性极强的次级辐射，以为这是一种硬 γ 射线。例如约里奥—居里夫妇用这种次级辐射去轰击石蜡，打出的竟是能量约为 5MeV 的质子。按照康普顿散射公式计算，入射的次级辐射流（他们以为是 γ 光子）能量至少要有 50MeV。查德威克打破了前人的思路，根据卢瑟福 1920 年提出的原子中可能存在中性粒子的假设，轻易地解释了约里奥—居里的实验，即铍次级辐射是能量为 5MeV 的中子。他还把实验的轰击对象由石蜡推广到氢、氦、氮、氩等气体，并计算出从这些气体打出的反冲核的能量，与实验数据符合得很好。1932 年，他在《皇家学会学报》上以《中子的存在》为题写成了论文。

中子的发现既从实验方面导致了中子核反应、核裂变等现象的研究、导致了核能利用的新时代，同时又从理论上导致了核结构与核力的研究，并且解释了为什么许多化学元素会有不同原子质量的许多“同位素”存在。由此逐渐建立与发展了中子物理学这一分支。

德布罗意 (Louis Victor de Broglie, 1892 ~ 1989)

法国物理学家。1892 年 8 月 15 日生于下塞纳的迪耶普。出身贵族，父母早逝，从小就酷爱读书。中学时代显示出文学才华，在大学里受的是文科教育，1910 年获巴黎大学文学学士学位。1911 年，他听到作为第一届索尔维物理讨论会秘书的莫里斯谈到关于光、辐射、量子性质等问题的讨论后，激起了强烈兴趣，特别是他读了庞加莱的《科学的价值》等书，他转向研究理论物理学。1913 年，他获理学硕士学位。第一次世界大战期间，在埃菲尔铁塔上的军用无线电报站服役。他的哥哥是 X 射线方面的专家，战后他一方面参与他哥哥的物理实验工作，一方面拜朗之万为师，研究与量子有关的理论物理问题，攻读博士学位。

光的波动和粒子两重性被发现后，许多著名的物理学家感到困扰。年轻的德布罗意却由此得到启发，大胆地把这两重性推广到物质客体上去。他在 1923 年 9 ~ 10 月间，连续在《法国科学院通报》上发表三篇短文：《辐射——波和量子》、《光学——光量子、衍射和干涉》、《物理学——量子、气体动理论及费马原理》，在 1924 年通过的博士论文《量子论研究》中他作了系统阐述，提出了德布罗意波（相波）理论。这一理论以后为薛定谔接受而导致了波动力学的建立，并且把爱因斯坦关于光的波粒二象性的思想加以扩展。他认为实物粒子如电子也具有物质周期过程的频率，伴随物体的运动也有由相位来定义的相波即德布罗意波，后来薛定谔解释波函数的物理意义时称为“物质波”。

德布罗意的新理论在物理学界掀起了轩然大波。这种在并无实验证据的条件下提出的新理论使得人们很难接受。就连德布罗意的导师朗之万也

根本不相信这种观念，只不过觉得这篇论文写得很有才华，才让他得到博士学位。

1927年，美国贝尔实验室的戴维孙（C.J. Davisson, 1881~1958）、革末（L.H. Germer, 1896~1971）及英国的汤姆孙（G.P. Thomson, 1892~1975）通过电子衍射实验，都证实了电子确实具有波动性。至此，德布罗意的理论作为大胆假设而成功的例子获得了普遍的赞赏，他荣获了1929年诺贝尔物理学奖。

后来，德布罗意主要从事的仍是波动力学方面的研究。他还始终对现代物理学的哲学问题感兴趣，喜欢将理论物理学、科学史和自然哲学结合起来考虑，写过一些有关的论文。1989年4月去世。

主要著作有：《波动力学导论》（1929），《物质和光：新物理学》（1939），《物理学中的革命》（1953），《海森伯不确定关系和波动力学的概率诠释》（1982）等。

康普顿（Arthur Holly Compton, 1892~1962）

美国物理学家，1892年9月10日生于俄亥俄州伍斯特。1913年在伍斯特学院以最优异的成绩毕业并成为普林斯顿大学的研究生，1914年获硕士学位，1916年获博士学位，后在明尼苏达大学任教。1920年起任圣路易斯华盛顿大学物理系主任，1923年起任芝加哥大学物理系教授，1945年返回华盛顿大学任校长，1953年起改任自然科学史教授，直到1961年退休。

在明尼苏达大学任教的两年多时间里，康普顿完成了两项很有意义的工作，一项是提出电子半径为 1.85×10^{-10} 厘米的假设，用以解释他用实验所确定的X射线强度与散射角伪关系；另一项是确定了磁性晶体的磁化效应，并科学地预言了铁磁性起源于电子的内禀磁矩，后为他的学生于1930年证实。康普顿最重大的贡献是康普顿效应及解释。1919~1920年间，康普顿去英国在J.J.汤姆孙和E.卢瑟福的指导下以访问学者的身份在卡文迪什实验室工作，他进行了射线的散射实验，发现用经典理论无法解释实验结果。回国后他用单色X射线和布喇格晶体光谱仪作实验，通过从不同角度在靶周围测量散射X射线波长，发现散射波中含有波长增大的波，该现象就是著名的康普顿效应。康普顿指出：散射应遵从能量守恒和动量守恒定律，出射X射线波长变长证明了X射线光子带有量子化动量。1922年，他采用单个光子和自由电子的简单碰撞理论，对这个效应做出了满意的理论解释。康普顿效应是近代物理学的一大发现，它进一步证实了爱因斯坦的光子理论，揭示出光的二象性，从而导致了近代量子物理学的诞生和发展；另一方面康普顿效应也阐明了电磁辐射与物质相互作用的基本规律。因此，无论从理论或实验上，它都具有极其深远的意义。康普顿因此获得1927年度诺贝尔物理学奖。中国物理学家吴有训在康普顿实验室做了

大量实验，取得了令人信服的实验根据，排除了学术界对康普顿理论的异议，为康普顿的工作做出了宝贵的、不可多得的贡献。

1930~1940年这10年中，康普顿致力于宇宙线的研究，发现了逆康普顿效应。该效应在天体物理中有重要意义。康普顿的主要著作有：《X射线和电子》和《X射线的理论和实验》。

康普顿曾任美国物理学会主席（1934）、美国科学工作者协会主席（1939~1940）、美国科学发展协会主席（1942）。1962年3月15日因患脑溢血在加利福尼亚州伯克利逝世。

约里奥—居里夫妇

指F.约里奥—居里（Frederic Joliot-Curie, 1900~1958）和他的夫人I.约里奥—居里（Irene Joliot-Curie, 1897~1956）。

I.约里奥—居里于1897年9月12日生于巴黎，是居里夫人的长女，在母亲的精心培育下，1920年在巴黎大学毕业后就成为母亲最心爱的实验助手。F.约里奥—居里于1900年3月19日生于巴黎，从小爱好体育和音乐，1923年以优异成绩在巴黎理学院毕业，他的老师朗之万发现他很有培养前途，就推荐他到居里夫人的实验室工作。二人由于志趣相投，于1926年10月9日结婚，决心合力开拓崭新领域——放射性。

1931年底，二人开始研究德国物理学家W.玻特的实验，即用 α 粒子轰击铍，这时放出的不是通常实验所出现的质子，而是一种穿透力极强的射线，玻特认为是一种 γ 辐射，当时即称为铍辐射。不久，约里奥—居里夫妇凭借高超的实验技能和良好的设备，不但很容易地重复了玻特的实验结果，而且进一步观测石蜡是否会吸收这种铍辐射。他们惊奇地发现辐射未被吸收，反而加强了。经过对从石蜡里飞出的粒子鉴别，认定从石蜡里飞出的是质子！这是不可思议的，如果铍辐射是质量近于零的光子，怎么能够把质量是电子的1840倍的质子撞击出来呢？伟大发现就在眼前，但他们仍沿玻特的错误思路想下去，认为铍辐射是一种康普顿效应。1932年1月18日，他们把这一实验结果和自己的见解发表了。刚好一个月后，卢瑟福的学生、对中子概念早有精神准备的英国物理学家查德威克重新解释了约里奥—居里夫妇的实验，认为铍辐射是一种中性粒子流，这种粒子的质量近似于质子质量。这样，卢瑟福12年前关于存在中子的预言被证实了，查德威克也因此获得了1935年度的诺贝尔物理学奖。客观地评价这件事，应该说约里奥—居里夫妇对中子的发现做了真正重要的工作，查德威克本人也完全承认这一点。但在伟大发现边缘而使机遇从面前溜走，原因仍在他们本身。他们自己事后承认，他们根本不知道卢瑟福关于存在中子的假设，缺乏作出这一重大发现的敏感性和想象力，而教训在于他们作为实验物理学家只埋头于自己的实验，没有同时注意学术思想的广泛交流。如不随时

吸取他人创造性的新思想，机遇还会一失再失！事实正是如此，1932年，在美国物理学家安德森发现正电子以前，约里奥—居里夫妇就曾经在云室中清楚地观察到了正电子径迹，但他们没有认真研究出现的奇特现象，误认为只是向放射源移动的电子。直到安德森提出正电子实验报告后，他们才明白又一次重大发现的机会失去了。

经过连续两次失误之后，约里奥—居里夫妇并没有灰心丧气，他们总结了经验教训，在1933年5月23日，通过开创性的工作证实：从钷加铍源中发出的硬射线，通过物质后产生了正负电子对。两个月后，又记录到了单个正电子及其连续谱。他们一直坚持研究这种现象，在1934年1月19日，发现用钷产生的 α 粒子轰击铝箔时，若将放射源拿走，“正电子的发射也不立即停止。铝箔保持放射性，辐射像一般放射性元素那样以指数律衰减。”它们发射出中子和正电子，最终生成放射性磷。用同样的方法他们还发现了其他一些人工生成的放射性物质，此即人工放射性。这是20世纪最重要的发现之一，是人类变革微观世界的一个突破，为同位素和原子能的利用提供了可能，他们因此获得了1935年度的诺贝尔化学奖。

1938年奥托·哈恩作出了震撼世界的伟大发现——核裂变，正像查德威克能发现中子一样，也完全得力于约里奥—居里夫妇的实验发现。其后，约里奥—居里夫妇证明了裂变产生的中子能够引起链式反应。核裂变和链式反应的发现，是实际利用原子能的依据，它为人类开发新的能源开辟了广阔的前景。约里奥—居里夫妇对科学研究的献身精神、执着的追求、精湛的实验技术，堪称实验物理学家的典范。他们多次为别人获得诺贝尔奖做铺路石，对后人也有教育意义。约里奥—居里夫妇作为知名科学家，在第二次世界大战期间，与纳粹进行了坚决的斗争，是著名的反法西斯战士。

约里奥—居里夫妇由于常年累月使用放射性制剂进行工作，健康受到损害。I.约里奥—居里由于白血病于1956年逝世，终年59岁。F.约里奥—居里因肝病于1958年逝世，终年58岁。

布莱克特 (Patrick Maynard Stuart Blackett, 1897 ~ 1974)。

英国物理学家和社会活动家。1897年11月18日生于伦敦。1919年进入剑桥大学卡文迪什实验室在卢瑟福指导下学习物理学。1921年毕业后留在该实验室工作10年。他在这段时间内重要的研究工作是改进威耳孙云室照相技术以研究原子核的人工转变。1924年他用云室照片首次成功地验证了人工轻核转变，即氮-核俘获 α 粒子变为氧-17。1925年，他创制了云室照相受自动计数器控制的装置，对威耳孙云室进行了成功的改进，为云室在近代物理研究中的应用翻开了崭新的一页。

1932年，在C. D.安德森发现正电子后的短短几个月，布莱克特就用

他拍摄的正负电子成对产生过程的宇宙线径迹照片有力地证实了正电子的存在。

布莱克特 1933 年任伦敦大学物理学教授。在此期间，他领导一批外籍学者创立了别具风格的宇宙线研究学派，促进了该学科和其他一些物理学领域的发展。这些发展导致曼彻斯特大学设置第一个射电天文学教授职位和建立一个射电天文学实验站。该实验站对第二次世界大战中雷达技术的发展和运用发挥了重要作用。

由于布莱克特改进威尔逊云室方法及在核物理和宇宙线领域的发现，获得 1948 年诺贝尔物理学奖。

布莱克特另一个富有成果的研究领域是岩石磁性研究，确立了古磁学，为地质学上的大陆漂移理论提供了新的证据。第二次世界大战期间到 60 年代末，布莱克特对管理科学、战略与战术、科学技术与工业、军事的关系等问题有深入研究，对战时与战后科技与若干国际事务产生了不少影响。他积极反对帝国主义核讹诈，主张对核武器进行国际管制和监督，在保卫世界和平事业中发挥了重要作用。

布莱克特在 1943 年曾被中国物理学会选为名誉会员。1953 年就任伦敦大学帝国理工学院物理教授和物理系主任。1956 年任该院高级研究员并获科普利奖章。1956 ~ 1970 年担任英国皇家学会主席，1969 年被封为终身贵族。1974 年 7 月 3 日逝世。

泡利 (Wolfgang Ernst Pauli, 1900 ~ 1958)

瑞士籍奥地利理论物理学家。1900 年 4 月 25 日生于奥地利维也纳。泡利在高中上学期间酷爱读书，那时就自学了爱因斯坦的广义相对论。高中毕业后，泡利去慕尼黑大学攻读理论物理学，他的导师是理论物理学家索末菲 (A. Sommerfeld, 1868 ~ 1951)。泡利在大学第四学期应导师之邀为《数学科学百科全书》写了一篇关于相对论的文章，该文长达 250 页，精辟地论述了相对论的物理意义和数学基础，在透彻地介绍有关相对论已有重要文献的同时，还提出了自己的独到见解。该文至今仍为相对论的权威著作。爱因斯坦读后对泡利的才智和能力给予了高度评价。

1922 ~ 1923 年间，泡利在哥本哈根理论物理研究所在 N. 玻尔指导下进行氢分子模型和反常塞曼效应的研究工作。这段工作导致了他对不相容原理的发现。

1923 ~ 1928 年，泡利在汉堡大学担任教师，著名的泡利不相容原理于 1924 年发表在《关于原子中电子群闭合与光谱复杂结构的联系》一文中，该原理指出：原子中不可能有两个或两个以上的电子处于同一量子态。这一原理使当时许多有关原子结构的问题得以圆满解决，对于正确理解反常塞曼效应、原子中电子壳层的形成、以及元素周期律都是必不可少的。泡

利因此荣获 1945 年诺贝尔物理学奖。

从 1928 年起泡利就接替了德拜的工作，任瑞士苏黎世联邦工业大学的理论物理教授，直到他 1958 年去世。除第二次世界大战期间曾在美国普林斯顿高级研究院工作约 5 年外，在苏黎世工作长达 25 年之久。这段时间泡利在理论物理学上的成就很多，其中最有意义的是 1931 年提出假设：原子核的衰变中不仅放出电子，而且放出一种质量很小、穿透力很强的中性粒子，当时泡利称为“中子”。该假设正确地解释了能谱的连续性，解决了衰变中角动量及能量守恒的问题。中微子存在的直接证据是在泡利假设提出 25 年之后，即 1956 年观察到的。泡利有成就的研究还涉及以下几个方面：相对论量子电动力学、基本粒子的自旋与统计分布律的关系、气体和金属的顺磁性（导致了金属中的电子量子论）、把单粒子的波动理论推广到多粒子、介子的解释及核力等等。在理论物理学的每个领域里，泡利几乎都做出过重要贡献。

1958 年 12 月 14 日，泡利在瑞士苏黎世逝世。在他的葬礼上，人们赞誉他是“理论物理学的良心”。

劳伦斯 (Ernest Orlando Lawrence, 1901 ~ 1958)

美国物理学家。1901 年 8 月 8 日出生于美国北达科他州南部的坎顿。1922 年毕业于南达科他大学，后来继续在明尼苏达大学、芝加哥大学和耶鲁大学深造。1925 年在耶鲁大学获哲学博士学位，次年又获南达科他大学科学博士学位。1925 ~ 1927 年在耶鲁大学工作。年起在伯克利加利福尼亚大学工作，1930 年起任教授。1936 年起任辐射实验室（现名劳伦斯辐射实验室）主任。

一生从事加速器技术、核物理及其在生物学和医学上应用方面的研究。1928 年美国物理学家伽莫夫 (G. Gamow) 提出，可以用质子代替粒子作为轰击物来实现人工核反应。由氢原子电离而得到的质子能量很小，需要通过电场或磁场进行加速，以保证作为“炮弹”的质子获得足够高的能量。于是，各种类型的粒子加速器逐步发展起来。1929 年劳伦斯提出磁共振加速器（即回旋加速器）的构造原理。即利用一个均匀磁场，使加速粒子沿螺旋形路径运动。在运动平面内，粒子将越过一个加速间隙，间隙里有一外加射频电场，其变化频率与离子旋转频率同相，以保证粒子每一次通过加速区时都能得到加速。1932 年，劳伦斯和他的学生埃德尔森 (N. E. Edlefsen) 和利文斯顿 (M. S. Livingston) 建成了第一台回旋加速器（直径只有 27 厘米，可以拿在手中，能量可达 1MeV）并开始运行。后来，在劳伦斯的领导下，在美国建成了一系列不同的回旋加速器。40 年代初，这类加速器的能量达到 40MeV，远远超过了天然放射源的能量。可以用于加速质子、粒子和氘核，由此发现了许多新的核反应，产生了几

百种稳定的和放射性的同位素。回旋加速器对核裂变及核力的研究起着特别重要的作用。劳伦斯由于发明了回旋加速器以及借此取得的成果而于1939年获得诺贝尔物理学奖。

费米 (Enrico Fermi, 1901 ~ 1954)

美籍意大利物理学家。他在理论和实验方面都有第一流建树，这在现代物理学家中是屈指可数的。1901年9月29日生于罗马，父亲是铁路职工，母亲是中学教师。中学时是模范学生，各方面名列前茅。从小对机械着迷，曾和哥哥一起设计与制造电动机，设计飞机引擎等。他酷爱数学和物理，10岁时听大人们谈论 $x^2+y^2=r^2$ 表示圆，就独自弄懂了这一表示式。独自钻研了大量代数、几何、分析题目。17岁时以第一名考入比萨大学师范学院。他的入学试卷“声音的特性”详细探讨了振动杆的实例，写出了振动杆偏微分方程，求得其本征值与本征函数并对杆的运动作傅里叶展开，主考教授对这一通篇无错的答卷惊讶万分，交口称赞，认为是意大利科学复兴的希望。图书馆里的书籍是他最好的老师。在比萨大学，他被认为是相对论和量子理论的最高权威。大学三年级就发表了两篇研究论文。

1922年获博士学位。1923年去格丁根大学随M. 玻恩工作，1924年到荷兰的莱顿大学，随厄任费斯脱 (Paul Ehrenfest, 1880 ~ 1933) 工作。同年回意大利，在罗马大学任教，1925年到佛罗伦萨大学任讲师。1926年起任罗马大学教授。此后10年，是他创造的黄金时代，并在他周围形成著名的罗马学派，1938年获诺贝尔物理学奖后移居美国。1939 ~ 1942年任哥伦比亚大学教授。1942 ~ 1945年任芝加哥大学教授，1944 ~ 1945年任洛斯阿拉莫斯实验室主任。1946年起任芝加哥大学核物理研究所教授。

他主要从事统计物理、原子物理、原子核物理、粒子物理、天体物理和技术物理等方面的研究。1925年12月，与狄拉克各自独立地提出具有半整数自旋粒子的统计法 (费米-狄拉克统计法)。1928年给出描述和计算多电子原子基态的近似方案 (托马斯-费米原子模型)。

1934年，建立 衰变理论，从而奠定了弱相互作用的理论基础。

在实验物理方面，费米同样作出了重要贡献。1934年用中子代替 粒子对周期表上的元素逐一轰击直到铀，发现了中子引起的人工放射性，还观察到中子慢化现象，并给出它的理论，为后来重核裂变的理论与实践打下基础。为此，于1938年获诺贝尔物理学奖。

1936年发现中子的选择吸收，他与他的同事们在这方面的的工作，奠定了中子物理学的基础。

1939年，费米着手探索核裂变链式反应的可能性，并于1942年12月2日在芝加哥大学建成世界上第一座可控原子核裂变链式反应堆，使它达到临界状态，产生可控的核裂变链式反应。这一成就是原子能时代的一个

重要里程碑。其后他参加了原子弹的研制工作。

费米一生的最后几年，主要从事高能物理的研究。1949年，揭示宇宙线中原粒子的加速机制，研究了 π 介子、 μ 子和核子的相互作用，提出宇宙线起源理论。1952年，发现了第一个强子共振——同位旋四重态。1949年，与杨振宁合作，提出基本粒子的第一个复合模型（费米-杨振宁模型）。费米于1954年11月29日因癌症去世。

海森伯（Werner Karl Heisenberg, 1901~1976）

海森伯是德国理学的创建者。1901年12月5日生于维尔兹堡的一位中学教师家庭。1920年进慕尼黑大学，在名师A·索末菲指导下学习理论物理学。1923年以《关于流体流动的稳定性和湍流》一文取得博士学位。然后，到格丁根大学，当上了玻恩的助手。

海森伯主要从事原子物理的研究，对量子力学的建立作出了重大贡献。1925年，他鉴于玻尔原子模型所存在的问题，抛弃了所有的原子模型，而着眼于观察发射光谱线的频率、强度和极化，利用矩阵数学，将这三者从数学上联系起来，从而提出微观粒子的不可观察的力学量，如位置、动量应由其所发光谱的可观察的频率、强度经过一定运算（矩阵法则）来表示。随后他与玻恩、约当合作，建立了矩阵力学。1927年，他阐述了著名的不确定关系，即亚原子粒子的位置和动量不可能同时准确测量，成为量子力学的一个基本原理。

1927年，海森伯被莱比锡大学聘为理论物理学教授，研究量子力学如何应用于具体问题，如用它解释许多原子和分子光谱、铁磁现象等，他总是站在物理学的前沿。为了表彰他在科学上的重大贡献——建立量子力学，海森伯获得1932年诺贝尔物理学奖，并获得马克斯·普朗克奖章。海森伯的著作主要有：《量子论的物理学原理》、《自然科学基础的变化》、《原子核物理》、《物理学与哲学》等。

1976年2月1日海森伯逝世于慕尼黑，终年75岁。

狄拉克（Paul Adrien Maurice Dirac, 1902~1984）

英国理论物理学家，量子力学的创始人之一。1902年8月8日生于英国布里斯托尔城。他跳级读完中学，在中学自学了相当高深的数学。1918年进入布里斯托尔大学学习电机工程，1921年大学毕业，又进剑桥大学学习物理。1923年成为剑桥大学圣约翰学院数学系的研究生。1926年获博士学位。1932~1969年任剑桥大学教授，1969年退休。1971年起任美国佛罗里达州立大学教授，进行科学研究。

狄拉克青年时代正好是原子物理学实验积累了大量材料、量子理论处于急剧变革的时代。由于深受以爱因斯坦为代表的20世纪物理学中理性论

思潮的影响，加之个人的勤奋和思想方法的正确，狄拉克在量子力学的理论基础特别是普遍变换理论的建立方面，在相对论性电子理论的创立方面，以及在量子电动力学和量子场论的建立方面，都作出了重大的贡献。1926~1927年，研究出量子力学的数学工具——变换理论。与费米各自独立地提出具有半整数自旋粒子的统计法（费米-狄拉克统计法）。1927年提出二次量子化方法。把量子论应用于电磁场，并得到第一个量子化场的模型，奠定了量子电动力学的基础。1928年与海森伯合作，发现交换相互作用，引入交换力。同年，建立了相对论性电子理论，提出描写电子运动并且满足相对论不变性的波动方程（相对论量子力学）。在这个理论中，把相对论、量子数和自旋这些在此以前看来似乎无关的概念和谐地结合起来，并得出一个重要结论：电子可以有负能值。由此出发，于1930年提出“空穴”理论，预言了带正电的电子（即正电子）的存在。

1931年预言了反粒子的存在，电子-正电子对的产生和湮没。1932年，安德森在宇宙射线中果然发现了正电子。不久，布莱克特在用云室观察宇宙射线时又发现了电子-正电子对成对产生和湮没的现象。1931年提出关于“磁单极”存在的假设。论证了以磁单极为基础的对称量子电动力学存在的可能性。1932年与福克和波多利斯基共同提出多时理论。1933年提出反物质存在的假设。假定了真空极化效应的存在。1936年建立了主要是关于自由粒子的经典场的普遍理论。1937年提出了引力随时间变化的假设。1942年为消除电子固有能量的无限大值而引入不定度规的概念。1962年提出 μ 子的理论，在这个理论中 μ 子被描写为电子的振动状态。此后，主要研究引力理论的哈密顿表述形式问题，以进一步把引力场量子化。狄拉克对物理学的发展充满信心，把自己毕生的精力、兴趣、热情全部投入追求科学真理的事业。他为当代物理学提供了丰富的物理思想，如正则量子化、变换理论、含时微扰、二次量子化、粒子数表象、空穴理论和反粒子概念、电荷共轭对称性、路径积分、多时理论、重正化方法、磁单极、弦模型、不定度规、引力场量子化等等。这些创造性的新思想为当代物理理论的发展开拓出新路。一大批获得诺贝尔奖金的杰出物理学家都是在狄拉克思想的引导下，或在狄拉克开辟的道路上继续前进而取得丰硕成果的。他对物理学的杰出的贡献也给他带来了崇高的声誉，他因建立了量子力学而和薛定谔共获1933年度诺贝尔物理学奖，1939年获英国皇家奖章，1952年获英国皇家学会科普利奖章，1968年获奥本海默奖章。他除了是英国皇家学会的成员以外，还是前苏联科学院通讯院士和美国普林斯顿高级研究院、罗马教皇科学院的成员。狄拉克曾应邀到德国、美国、日本等许多国家作访问讲学。1935年7月应我国清华大学的邀请，在清华大学作了关于正电子的演讲，并会见了我国的物理学界人士。1984年10月20日，狄拉克在美国佛罗里达逝世，为悼念这位伟大的理论物理学家，英国剑桥大学圣约

翰学院举行了隆重的纪念报告会。

狄拉克一生著作甚丰。他的名著《量子力学原理》（1930）以深刻而简洁的方式表述了量子力学，半个多世纪以来一直是这个领域的一本基本教科书。还著有《量子力学讲义》（1964）、《量子场论讲义》（1966）、《量子论的发展》（1971）、《希耳伯特空间中的旋量》（1974）、《广义相对论》（1975）、《物理学的方向》（1978）等。

安德森（Carl David Anderson, 1905~）

美国物理学家，科学院院士，父母是瑞士人。1905年生于纽约，1927年以杰出成绩毕业于加州理工学院。1939年起任该校教授。

他从事的是X射线、 γ 射线、宇宙射线和基本粒子物理学方面的研究工作。1932年他利用云室在宇宙射线中发现了正电子（参见“正电子的发现”），并因此荣获1936年诺贝尔物理学奖。1933年，他又独立地从光子中发现了产生电子-正电子对的现象，1937年，安德森和他的合作者尼德梅耶（S. H. Neddermeyer）发现了 μ 子并测量了它的质量。

汤川秀树（Yukawa Hideki, 1907~1981）

日本核物理学家。父小川琢治是京都大学地学教授。秀树1907年1月23日生于东京。1932年因入赘汤川家改姓汤川。1913年入小学，成绩优良，喜欢数学、科学哲学，受中国儒、老、庄典籍不少影响。1926年考入京都大学物理系，这时新量子力学刚刚建立，他和同学们依靠自学来熟悉薛定谔、狄拉克等人的著作，并以此作为毕业论文的主题。1938年，获大阪大学科学博士学位。1932年起，先后在京科大学、大阪大学、东京大学担任讲师、教授等。1948年受聘为美国普林斯顿高级研究院客座教授，1949~1951年任哥伦比亚大学教授。1953~1970年任京都大学基础物理学研究所首任所长。1949年由于其核力理论荣获诺贝尔物理学奖。1981年9月8日逝于京都。

1935年，汤川提出了核力的介子场理论。当时，量子电动力学正处于草创阶段，人们已逐渐认识到，电磁相互作用可以看作是在荷电粒子之间交换光子，光子是电磁场的“量子”，它以光速运动因而静质量为零。参照这一理论，汤川把核力设想为带有势函数 $U(x, y, z, t)$ 的特定场中的相互作用，这种场导致所谓 U 量子， U 量子是核强相互作用时交换的粒子，其静质量约为电子的200倍（后来命名为“介子”），即质子和中子通过交换介子而相互转化（《论基本粒子的相互作用》）。他还预言，在宇宙射线的高能粒子中有可能找到介子。介子可以带正、负电荷或者是中性的，一个介子可以转化为一个电子和不带电的轻子（即中微子）。后来这些预言先后被证实。（参见“ μ 子和介子的发现”）。从1947年起，

他进一步研究与“非定域场”有关的普遍性理论。

汤川喜欢沉思，不好交际，但思想上勇于探索，敢于提出创见。他的预言，正如狄拉克正电子预言一样，显示了理论的巨大威力。汤川理论推动了介子物理学的发展。他的成就促成了日本物理学的发展。例如他 1942 年“论场论的基础”一文启发了朝永振一郎提出重正化理论。他领导的研究所成了生物物理学和宇宙学等新学科的中心。他还积极参加了反对核武器的世界和平运动。

吴健雄 (1912 ~ 1997)

美籍中国物理学家。1912 年 5 月 31 日生于江苏省上海县(今上海市)。1934 年毕业于南京中央大学。1936 年赴美加利福尼亚大学留学，1940 年获博士学位。1942 年与著名物理学家袁家骝在美结婚。1952 年任哥伦比亚大学副教授，年升为教授，同年当选为美国科学院院士。1972 年起担任普宾讲座教授，1980 年退休。1975 年曾任美国物理学会第一任女会长。

主要从事核物理和弱相互作用等方面的实验研究。最主要的贡献是，1957 年用 β 衰变实验证明了在弱相互作用中的宇称不守恒。1956 年之前，吴健雄在 β 衰变方面作过一些出色实验。1956 年李政道、杨振宁提出在 β 衰变过程中宇称可能不守恒之后，吴健雄立即领导她的小组进行了一个实验：在极低温 (0.01K) 下用强磁场把钴-60 原子核自旋方向极化 (使自旋几乎都在同一方向)，然后观察钴-60 原子核 β 衰变放出的电子的出射方向。她发现绝大多数电子的出射方向都和钴-60 原子核的自旋方向相反。就是说，钴-60 原子核的自旋方向和它的 β 衰变的电子出射方向形成左手螺旋，而不形成右手螺旋。如果宇称守恒，两种方向应该机会均等，即必须左右对称，现在左右手螺旋两种情况明显地机会不相等。因此，这个实验结果证实了弱相互作用中的宇称不守恒。这在整个物理学界产生了极为深远的影响。当代物理学发展中的其他一些重要理论问题或争论，通过吴健雄的一系列实验工作，也得到了解决和证明或一定程度上的澄清。1963 年对 β 衰变的系列实验工作证明了核 β 衰变中矢量流守恒定律，是物理学史上第一次由实验证实电磁相互作用与弱相互作用有密切关系，对后来电弱统一理论的提出起了重要作用。在 1959 年穆斯堡尔效应发现之后，吴健雄对它进行了深入的研究，将穆斯堡尔光谱法用于生物学中大分子的结构研究。为了证实轻子数在弱作用中守恒律的有效性，吴健雄等在深达 2000 余英尺的纯盐矿中安置了测量双 β 衰变仪器。证明了轻子数守恒到 10 以上。早在 1950 年以前，她已经做了一个关于量子力学的基本哲学的实验，结果表明正电子与负电子的宇称相反。1970 年她的实验组对此作了进一步实验，在更高程度上支持了量子力学的正统法则，再次否定隐变量理论。此外，她对粒子或辐射探测器的研制也有不少贡献。

吴健雄以其为数众多的贡献赢得了崇高的荣誉。1958年普林斯顿大学授予她名誉科学博士称号。这是该大学首次把这个荣誉学位授予一位女性。她还获得其他15所大学的名誉学位。美国总统授予她1975年国家科学勋章。1978年她获得国际性的沃尔夫基金会首次颁发的奖金。她受聘为南京大学、北京大学、中国科学技术大学等校的名誉教授，中国科学院高能物理研究所学术委员会委员。

已发表过100余篇科学论文，著有《衰变》（1965，与S.A.莫斯科夫斯基合著）、《弱相互作用》（与李政道合著）、《介子物理学》（共3卷1976~1977）。主编《实验物理学方法：核物理》（1961，与袁家骝合作）。

杨振宁：（1922~）

美籍中国理论物理学家。1922年9月22日生于安徽省合肥县（今合肥市）。1942年毕业于西南联合大学。1945年去美国留学，在芝加哥大学费米的指导下研究理论物理，1948年获哲学博士学位。1948~1949年在芝加哥大学工作。1949~1965年在普林斯顿高级研究院工作，1955年起任教授。1966年起任纽约州立大学（石溪分校）教授和理论物理研究所所长。美国总统授予他1985年国家科学技术奖章。

从事统计力学、量子场论、凝聚态物理、基本粒子物理方面的研究。他对理论物理学的贡献范围很广。在粒子物理学方面，他最杰出的贡献是1954年与密耳斯（L. Mills）共同提出杨-密耳斯场理论，开辟了非阿贝耳规范场的新研究领域，为现代规范场理论打下了基础。杨-密耳斯场方程最近被数学家唐纳森引用，获得了拓扑学上的重大突破。另一项杰出贡献是：1956年和李政道合作，深入研究了当时令人困惑的 $\pi^0 \rightarrow \gamma\gamma$ 之谜。提出很可能在弱相互作用中宇称不守恒（参见“李政道”）。次年，这一理论预见得到吴健雄小组的实验证实。为此，杨振宁和李政道共获1957年诺贝尔物理学奖。此外，1949年提出了基本粒子的第一个复合模型——费米-杨模型。1957年与李政道合作提出二分量中微子理论；与李政道和奥赫梅合作提出在 β 衰变中不仅宇称不守恒，而且电荷共轭也不守恒；与李政道合作、与朗道和萨拉姆各自独立地提出在弱相互作用中组合宇称（CP）守恒的假设。1959~1962年，与李政道合作实验分析高能中微子和W粒子的研究。1974年~1975年与吴大峻合作提出规范场的积分形式理论以及规范场与纤维丛的关系。1967~1985年与邹祖德合作提出高能碰撞理论等。在统计力学方面，1952年与李政道合作提出关于相变的理论。1966~1969年间与杨振平合作得到关于数种模型的严格解。对凝聚态物理方面的贡献有：1961年与拜尔斯合作对磁通量量子化的解释，1962年提出非对角长程序观念等。

杨振宁于 1971 年夏回国访问，是美籍知名学者访问新中国的第一人。他对促进中美建交、中美科学技术教育交流都做了大量工作。他受聘为北京大学、复旦大学、中国科学技术大学、中山大学、南开大学等校的名誉教授，中国科学院高能物理研究所学术委员会委员。

发表过约 200 篇科学论文和报告，著有《基本粒子》（1962）等。

李政道（1926~）

美籍华裔理论物理学家。1926 年 11 月 25 日生于上海。曾在国立浙江大学（当时在贵州省）和国立西南联合大学学习。1946 年赴美芝加哥大学深造，1950 年获哲学博士学位。1950~1951 年在加利福尼亚大学（伯克利分校）任教。1951~1953 年在普林斯顿高级研究院工作。1953~1960 年在哥伦比亚大学工作（1955 年任副教授，1956 年任教授）。1960~1963 年任普林斯顿高级研究院理论物理学教授。1963 年起任哥伦比亚大学教授。他还是美国科学院院士。李政道对近代物理学的杰出贡献是：1956 年和杨振宁合作，解决了当时的 θ - τ 之谜——就是后来称为的 K 介子有两种不同的衰变方式：一种衰变成偶宇称态，一种衰变成奇宇称态。如果弱衰变过程中宇称守恒，那么它们必定是两种宇称状态不同的 K 介子。但是从质量和寿命来看，它们又应该是同一种介子。他们通过分析，认识到很可能在弱相互作用中宇称不守恒，并提出了几种检验弱相互作用中宇称是不是守恒的实验途径。次年，这一理论预见得到吴健雄小组的实验证实。因此，李政道和杨振宁的工作迅速得到了学术界的公认，并共同获得了 1957 年诺贝尔物理学奖。

李政道的研究领域很宽，在量子场论、基本粒子理论、核物理、统计力学、流体力学、天体物理方面的工作也卓有成效。1949 年与罗森布拉斯和杨振宁合作提出普适费米弱作用和中间玻色子的存在。1951 年提出水力学中二维空间没有湍流。1952 年与派尼斯合作研究固体物理中极化子的构造。1954 年发表了量子场论中的著名的“李模型”理论。1957 年与奥赫梅和杨振宁合作提出电荷共轭不守恒和时间不反演的可能性。1959 年与杨振宁合作，研究了硬球玻色气体的分子动理论，对研究氦的超流动性作出了贡献。1962 年与杨振宁合作，研究了带电矢量介子电磁相互作用的不可重整化性。1964 年与璠恩伯合作，研究了无（静止）质量的粒子所参与的过程中，红外发散可以全部抵消问题。这项工作又称李-璠恩伯定理。60 年代后期提出了场代数理论。70 年代初期研究了 CP 自发破缺的问题。又发现和研究了非拓扑性孤立子，并建立了强子结构的孤立子袋模型理论。70 年代后期和 80 年代初，继续在路径积分问题、格点规范问题和时间为动力学变量等方面开展工作；后来又建立了离散力学的基础。李政道关心中国物理学的发展，自 1972 年起多次回中国访问讲学；1980 年以来，他

发起组织美国几十所主要大学在中国联合招收物理学研究生，为培养中国青年物理学家作出了贡献。他受聘为暨南大学、中国科技大学、复旦大学、清华大学等校的名誉教授，中国科学院高能物理研究所学术委员会委员。

李政道已发表约 200 多篇科学论文和报告。著有《物理学中的数学方法》（1965）。与吴健雄合著《弱相互作用》（1968）。《场论与粒子物理学》（上册 1980，下册 1982）和《粒子物理学与场论导论》（1981）。

丁肇中（1936 ~ ）

美籍华裔物理学家。1936 年 1 月 27 日生于美国密歇根州安阿伯，3 个月后随父母回中国。1956 年入美国密执安大学学习。1960 年获硕士学位，1962 年获物理学博士学位。1963 ~ 1964 年在欧洲核研究中心（日内瓦）工作。1964 ~ 1967 年在哥伦比亚大学工作。1966 年兼任汉堡联邦德国电子同步加速器研究中心（DFSY）一个小组的领导人。他所领导的实验组先后在几个国际实验中心工作。1967 年起任麻省理工学院物理系教授。1977 年当选为美国科学院院士。

从事高能实验物理、基本粒子物理、量子电动力学、辐射与物质的相互作用等方面的研究。他最杰出的贡献是在 1974 年，与 B 里希特（Burton Richter，1931 ~ ）各自独立地发现了 J/ψ 粒子。为此，他们共获 1976 年诺贝尔物理学奖。

1972 年夏，丁肇中实验组利用美国布鲁克海文国家实验室的质子加速器寻找质量在 $1.5 \times 10^9 \text{eV} \sim 5.5 \times 10^9 \text{eV}$ 之间的长寿命中性粒子。1974 年，他们发现了一个质量约为质子质量 3 倍（能量为 $3.1 \times 10^9 \text{eV}$ ）的长寿命中性粒子。在公开发表这个发现时，丁肇中把这个新粒子取名为 J 粒子，“J”和汉字“丁”字形相近，寓意是中国人发现的粒子。与此同时，美国人 B 里希特也发现了这种粒子，并取名为 ψ 粒子。后来人们就把这种粒子叫做 J/ψ 粒子。J/ψ 粒子具有奇特的性质，其寿命值比预料值大 5000 倍；这表明它有新的内部结构，不能用当时已知的 3 种味夸克来解释，而需要引进第四种夸克即粲夸克来解释。J/ψ 粒子的发现大大推动了粒子物理学的发展。

此外，通过高能正负电子对撞的物理实验，在 1979 年夏发现了三喷注现象，为胶子的存在和量子色动力学提供了实验依据。高能下电磁作用与弱作用干涉效应的实验，为弱电统一理论提供了实验证据。1981 年起，他组织和领导了一个国际小组——包括中国在内的约 13 个国家近 400 名物理学家参加的 L₃ 组。在欧洲核子中心高能正负电子对撞机 LEP 上进行高能物理实验，寻找新的基本粒子及其粒子物理的新现象。

丁肇中热心培养中国高能物理学人才，经常选拔青年科学工作者去他

所领导的小组工作。他是中国科学技术大学的名誉教授，中国科学院高能物理研究所学术委员会委员。

主要参考资料

1. 唐剑峰。墨子的哲学与科学。第1版。北京人民出版社，1981。
2. 周继旨。中国古代著名哲学家评传 第一卷。第1版。齐鲁书社，1980。
3. 方孝博。墨经中的数学与物理学。第1版北京：中国社会科学出版社，1983。
4. [东汉]王充。论衡。上海：上海人民出版社，1974。
5. 申先甲。《论衡》中关于冷不自生的论述。物理学史，1987(1)。
6. 曹增祥。张衡。北京：中华书局，1961。
7. 杭州大学宋史研究室。沈括研究。杭州：浙江人民出版社，1985。
8. 杜石然等。中国科学技术史稿(上、下册)。北京：科学出版社，1982。
9. [宋]沈括。梦溪笔谈。载《四部丛刊》续编第53册。张元济辑。上海：上海书店，1984。
10. 张家驹。沈括。上海人民出版社，1962。
11. 潘吉星。明代科学家宋应星。北京：科学出版社，1981。
12. [古希腊]亚里士多德。物理学。张竹明。北京：商务印书馆，1982。
13. The works of Aristotle Encyclopaedia Britannica (1), Inc. 1952。
14. Аристотель, Сочинения, Москва, 1962。
15. 哥白尼。天体运行论。李启斌。北京：科学出版社，1973。
16. [意]伽利略。关于托勒密和哥白尼两大世界体系的对话。上海外国自然哲学著作编译组。上海人民出版社，1974。
17. "Discoveries and Opinions of Galileo" ed. and tr. by S. Drake, 1957, Doubleday & Co. N.Y. U.S.A.
18. 《Studies on Christiaan Huygens》, ed. by H. J. Mos, Swet & Zeitlinger B.V., Lisse, 1980。
19. 牛顿。光学。周岳明等。北京：科学普及出版社，1988。
20. [美]塞耶。牛顿自然哲学著作选。本书编辑组。上海：上海人民出版社，1974。
21. I.B.Cohen。牛顿对万有引力定律的发现。《科学》，1981(7)。
22. 查有梁。牛顿力学的方法。牛顿——时代的巨著。北京：科学出

版社，1988。

23. 爱因斯坦文集。许良英等。北京：商务印书馆，1979。

24. [英]麦克唐纳·罗斯。莱布尼兹。张传友。北京：中国社会科学出版社，1987。

25. 宋德生，李国栋。电磁学发展史。南宁：广西人民出版社，1987。

26. 秦关根。法拉第。北京：中国青年出版社 1982。

27. 孙小礼。“海王星是怎样发现的”。（选自《来自历史的启示》）。北京：北京大学出版社，1989。

28. 缪克成。近代四大物理学家。上海：华东师范大学出版社，1986。

29. [美]切尼。被埋没的天才：科学发明家特斯拉传记。唐建文。北京：科学普及出版社，1985。

30. 阎康年。卢瑟福与现代科学的发展。北京：科技文献出版社，1987。

31. 秦关根。爱因斯坦。北京：中国青年出版社，1979。

32. [苏] . . . 库兹涅佐夫。爱因斯坦——生·死·不朽。刘盛际。北京：商务印书馆，1988。

33. [美]赛格雷。从X射线到夸克：近代物理学家和他们的发现。夏孝勇等。上海：上海科学技术文献出版社，1984。

34. 弗里德里希·赫尔内克。原子时代的先驱者。徐新民，贡光禹，郑慕琦。北京：科学技术文献出版社，1981。

35. 中国大百科全书出版社编辑部。中国大百科全书，物理卷。北京，上海：中国大百科全书出版社，1987。

36. 中国大百科全书出版社编辑部。中国大百科全书，天文学卷。北京，上海：中国大百科全书出版社，1980。

37. 中国大百科全书出版社《简明不列颠百科全书》编辑部。简明不列颠百科全书。中国大百科全书出版社，1986。

38. 钱临照，许良英。世界著名科学家传记。物理学家北京：科学出版社，1990~1995。

39. 古希腊罗马哲学。三联书店。1957。

40. [英]沃尔夫。十六、十七世纪科学技术和哲学史。周昌忠等。北京：商务印书馆，1985。

41. A . . . A y

42. M . o . . . K acc c o Hay . . . Moc
a : H . . . 《B 》 , 1989. p. 117 ~ 118.

43. oK acc ec o Hayk .《B
a 》 , 1989.

44. .C.Ky P . . . e : c op () 1956.

- e
45. .A. 赫拉莫夫。世界物理学家词典。梁宝洪。长沙：湖南教育出版社，1988。
 46. [美]威·弗·马吉。物理学原著选读。蔡宾牟。北京：商务印书馆，1986。
 47. 《中学物理教师手册》编写组。中学物理教师手册。上海：上海教育出版社，1982。
 48. [美]卡约里。物理学史。戴念祖。呼和浩特：内蒙古人民出版社，1981。
 49. [日]广重彻。物理学史。祁关泉等。上海教育出版社，1986。
 50. 陈毓芳，邹延肃。物理学史简明教程。北京：北京师范大学出版社，1986。
 51. 林德宏。科学思想史。南京：江苏科技出版社，1985。
 52. 解恩泽。科学蒙难集。长沙：湖南科学技术出版社，1986。
 53. 仓孝和。自然科学史简编。北京：北京出版社。
 54. 杨建邺等。杰出物理学家的失误。武汉：华中师大出版社，1986。
 55. 董鹰。世界近代科学技术发展史。上海：上海人民出版社，1990。
 56. 申先甲。基础物理学的辩证法。北京：科学出版社，1983。
 57. 吴景彦。物理学史上的科学家。北京：劳动人事出版社，1988。
 58. 束炳如，倪汉彬，杜正国。物理学家传。长沙：湖南教育出版社，1985。
 59. 郭奕玲，沙振舜等。著名物理实验及其在物理学发展中的作用。济南：山东教育出版社，1985。
 60. [苏]戈林。著名物理学家略传。朱行素。合肥：安徽科学技术出版社，1984。
 61. [英]Martin J. Klein等。近代物理学家传记。欧阳鸪等。北京：科学普及出版社，1985。
 62. 宣焕灿。天文学名著选译。北京：知识出版社，1989。
 63. 杨再石等。中学物理课本中的科学家。北京：中国青年出版社，1984。
 64. 谭树杰，王华。物理学上的重大实验。北京：科技文献出版社，1987。
 65. 葛能全。科学技术发现发明纵览。北京：科学出版社，1986。
 66. 马德录。物理群星。沈阳：辽宁教育出版社，1985。
 67. 曾少潜。科技名人辞典。北京：中国青年出版社，1988。
 68. [美]I. 阿西摩夫。古今科技名人辞典。北京：科学出版社。
 69. [日]伊东俊太郎等。科学技术词典。樊洪业等。北京：光明日报

出版社，1986。

70 . [英]W . F . 拜纳姆等。科学史词典。湖北科学技术出版社，1988。

三、科学家名言录

亚里士多德（前 384 ~ 前 322）：

求知是人类的本性。
吾爱吾师，吾尤爱真理。

钱福（字与谦，号鹤滩，明代学者，生卒年月不详）：

明日复明日，明日何其多。我生待明日，万事成磋砣。

达·芬奇（Leonardo daVinci，1452 ~ 1519），意大利文艺复兴时期的伟大画家和科学家：

热爱实践而又不讲科学的人，就像一个水手走进了一只没有舵或罗盘的船，他从来不能肯定他在往哪里走。
科学是指挥员，实践是战士。

哥白尼（1473 ~ 1543）：

人的天职在勇于探索真理。

布鲁诺，G．（1548 ~ 1600）：

火并不能把我征服，未来的世纪会了解我，知道我的价值的。

培根，F．（Francis Bacon，1561 ~ 1626），英国哲学家，科学家：

真正的敏捷是一件很有价值的事。因为时间是衡量事业的标准，一如金钱是衡量货物的标准；所以在做事不敏捷的时候，那事业的代价一定是很高的。

知识就是力量。

多诈的人藐视学问，愚鲁的人羡慕学问，聪明人运用学问；因为学问的本身并不教人如何用它们；这种运用之道乃是学问以外学问以上的一种

智能，是由观察体会才能得到的。

书有可浅尝者，有可吞食者，少数则须咀嚼消化。换言之，有只需读其部分者。有只需大体涉猎者，少数则需全读，读时须全神贯注，孜孜不倦。

我们不应该像蚂蚁，单只收集；也不可像蜘蛛，只从自己肚中抽丝；而应该像蜜蜂，既采集，又整理，这样才能酿出香甜的蜂蜜来。跛足而不迷路，能赶过虽健步如飞但误入歧途的人。

知识是一种快乐，而好奇则是知识的萌芽。

伽利略，G . (1564 ~ 1642) :

科学的真理不应该在古代圣人的蒙着灰尘的书中去寻找，而应该在实验中和以实验为基础的理论中寻找。

真正的哲学是写在那本经常在我们眼前打开着的最伟大的书里面，这本书就是宇宙，就是自然界本身，人们必须去读它。

那本永远在我们眼前展开的伟大的书——宇宙，是用数学语言写出的。

真理就是具备这样的力量，你越是想要攻击它，你的攻击就愈加充实和证明了它。

与其夸大胡说，不如宣布那个聪明的、智巧的、谦逊的警句：“我不知道”。

笛卡儿，R . (1596 ~ 1650) :

读一切好的书，就是和许多高尚的人谈话。

我的努力求学并没有得到别的好处，只不过是愈来愈发觉自己的无知。

没有知识的人总爱议论别人的无知，知识丰富的人却时时发现自己的

无知。

实验给我们提供了原始前提的必要素材，它还能检验我们所引出的结论的正确性。

牛顿，I. (1643 ~ 1727)：

天才就是长期劳动的结果。

假如我比笛卡儿看得远些，那是因为我站在巨人肩上的缘故。

思索，继续不断的思索，以待天曙，渐渐的见及光明……如果说我对世界有些微贡献的话，那不是由于别的，却只是由于我辛勤耐久的思索。

没有大胆的猜测就作不出伟大的贡献。

无知识的热心，犹如在黑暗中远征。

我不知道世上的人对我怎样评价，我却这样认为：我好像是一个在海边玩耍的孩子，时而为发现一块光滑的卵石或美丽的贝壳而欣喜雀跃。尽管如此，那广阔的真理的海洋在我面前仍然没有发现。

胜利者往往是从坚持最后五分钟的时间中得来成功。

富兰克林，B. (1706 ~ 1790)：

你热爱生命吗？那么别浪费时间，因为时间是组成生命的材料。

懒惰像生锈一样，比操劳更能消耗体力。经常使用的钥匙总是亮的。

罗蒙诺索夫，С. П. (Семён Иванович М. а
, 1711 ~ 1765)，俄国自然科学家、哲学家：

为了能做真实和正确的评价，必须把自己的思想摆脱任何成见和偏执的束缚。

拉普拉斯，P. S. M. (Pierre Simon M. deLaPlace, 1749 ~ 1827)，

法国天文学家、数学家：

我们知道的東西是有限的，我們不知道的東西則是無窮的。

認識一位巨人的研究方法，對於科學的進步，……並不比發現本身更少用處。科學研究的方法經常是極富興趣的部分。

托馬斯·楊 (Thomas Young 1773 ~ 1829)：

儘管我仰慕牛頓的大名，但我並不因此非得認為他是百無一失的，我……遺憾地看到他也會弄錯，而他的權威也許有時甚至阻礙了科學的進步。

高斯，C. F. (1777 ~ 1855)：

沒有某種大胆放肆的猜測，一般就不可能有知識的進展。

柏濟力阿斯 (Berzelius Jöns Jacob Baron, 1779 ~ 1848)，瑞典化學家：

習慣於一定的見解，經常會使我們深信它的正確性。習慣能掩飾這個見解的最大弱點，並會使我們失去運用反駁它的論證的能力。

法拉第，M. (1791 ~ 1867)：

希望你們年輕的一代，也能像蠟燭為人照明那樣有一分熱，發一分光，忠誠而踏實地為人類偉大的事業貢獻自己的力量。

世人何嘗知道：在那些通過科學研究工作頭腦的思想和理論當中，有多少被他自己嚴格的批判，非難的考察，而默默地、隱蔽地扼殺了。就是最有成就的科學家，他們得以實現的建議、希望、願望以及初步結論，也只不到十分之一。

科學家必須善於傾聽各種不同的意見，但又必須做出判斷。科學家不應由於表面現象而採取偏頗的立場。他不應有先入為主的假說，他不應屬於任何宗派，不崇拜任何權威。他不是個人的崇拜者，而應該是事物的崇拜者。真理的探求應是他唯一的目标。如果在這些品質之上再加上刻苦勤勞精神，他就有可能揭開自然界殿堂的奧秘，而達到自己的欲望。

达尔文，C. G. (Charles Galton Darwin, 1809 ~ 1882)，英国生物学家：

所以我能够成为一个科学工作者……最重要的是：爱好科学——不厌深思——勤勉观察和收集资料——相当的发明能力和常识。

我始终努力保持自己思想的自由，我可以放弃任何假说，无论是何心爱，只要证明它是不符合事实的。

贝尔纳，C. (Claude Bernard 1813 ~ 1878)，法国生理学家：

构成我们学习最大障碍的是已知的东西，而不是未知的东西。

廷德尔，J. (John Tyndall, 1820 ~ 1893)，英国物理学家：

任何伟大的科学原理，在由个别人明确阐述之前，一般的科学家已大抵有所了解。知识的高原本已高峻，而我们的发明家则像高原上的山峰，又略微耸峙在当时一般的思想水平之上。

有了精确的实验和观测作为研究的依据，想象力便成为自然科学理论的设计师。

作为一个发明家，他的力量和多产，在很大程度上应归功于想象力给他的激励。

亥姆霍兹，H. (1821 ~ 1894)：

我欣然把自己比做山间的漫游者，他不谙山路，缓慢吃力地攀登，不时要止步回身，因为前面已是绝境。突然，或是由于念头一闪，或是由于幸运，他发现一条新的向前方的蹊径。等到他最后登上顶峰时，他羞愧地发现，如果当初他具有找到正确道路的智慧，本有一条阳关大道可以直达顶峰。

巴斯德 (Pasteur Louis, 1822 ~ 1895)，法国化学家，微生物学家：

科学是没有国界的，因为她是属于全人类的财富，是照亮世界的火把，

但学者是属于祖国的。

在观察的领域中，机遇只偏爱有准备的头脑。

告诉你使我达到目标的奥秘吧！我唯一的力量就是我的坚持精神。

开尔文（1824～1907）：

我曾经说，当你能够量度你所谈到的东西，并且能够用数来表示它的时候，那你就对于它有所了解；如果你不能直接量度而且不能用数来表示它，那你的知识便是贫乏的和不能令人满意的，它可能是知识的开始；但无论如何，在你的思想上很难进入科学的阶段。

我坚持奋战 55 年，致力于科学的发展。用一个字可以道出我最艰辛的工作特点，这个字就是失败。

赫胥黎，（Thomas Henry Huxley，1825～1895），英国生物学家，博物学家：

人们普遍有种错觉，以为科学研究者做结论和概括不应当超出观察到的事实……但是，大凡实际接触过科学研究的人都知道，不肯超越事实的人很少会有成就。

门捷列夫， . . .（
，1834～1907），俄国化学家：

终身努力，便成天才。

假说对于科学，特别是对于科学研究是必需的。假说提供条理性 and 简易性；没有假说，达到这两点是困难的。……假说使科学工作——寻找真理的工作变得容易并使它正确。

确定一个定律的正确性，只有借助于由它推导所得的结论，以及这些结论在实际考验中的证实；当还没有这个定律时，这些结论是不可能有的和不可设想的。

伦琴，W . K .（1845～1923）：

实验是最强有力的杠杆，我们可以利用这个杠杆去撬开自然界的秘密。在解决对某一假说是保留还是摒弃这样一个问题时，这个杠杆应当成为“最高一级的审理法院”。

爱迪生，T. A. (1847 ~ 1931)：

我的人生哲学是工作，我要揭示大自然的奥秘，并以此为人类造福。我们在世的短暂一生中，我不知道还有什么比这种服务更好的了。

我平生从来没有做出过一次偶然的发明。我的一切发明，都是经过深思熟虑、严格试验的结果。所谓“天才”，灵感只是十分之一，而百分之九十是艰苦的工作。

失败也是我所需要的，它和成功对我一样有价值。只有在我知道一切做不好的方法以后，我才知道做好一件工作的方法是什么。

伟大人物的最明显的标志，就是他坚强的意志，不管环境变换到何种地步，他的初衷与希望仍不会有丝毫的改变，而终于克服障碍，以达到期望的目的。

巴甫洛夫，I. P. (1849 ~ 1936) 前苏联生理学家：

实验上的失败，可能会成为发现的开端。

无论鸟的翅膀多么完善，如果不凭借空气，它是永远不会飞向高空的。事实就是科学家的空气。

科学的跃进往往取决于研究方法上的成就。研究方法每前进一步，我们也仿佛随之升高一层，从那高处我们就可以望见更加广阔的远景，望见许多先前望不见的事物。正因为如此，拟定方法是我们首要的任务。

循序渐进，循序渐进，你们从一开始工作起，就要在积累知识方面养成严格的循序渐进的习惯。

真理并不躲避人，它在我们中间，散布全世界，到处都可以找到它。

科学需要人的全部生命

普朗克，M．（1858～1947）：

思考可以构成一座桥，让我们通向新知识。

物理规律的性质和内容，都不可能单纯依靠思维来获得；唯一可能的途径就是致力于对自然的观察，尽可能搜集大量的各种经验事实，并把这些事实加以比较，然后以最简单最全面的命题总结出来。

物理学是一门精密的科学，所以必须依靠测量……测量的精确化本身，引起了新事物的发现，因而也就引起了理论的修正和改进。

理论和实验是相互联系、缺一不可的。没有实验的理论是空洞的理论，没有理论的实验是盲目的实验。因此，需要同样迫切地对两者——理论和实验——给予应有的重视。每一种假说都是想象力发挥作用的产物，而想象力又是通过直觉发挥作用的。……但直觉常常变成一个很不可靠的同盟者，不管它在构成假说时是如何不可缺少。只要科学在前进，它就难免有时候会犯错误。谁要是有一天做到了不再犯错误，他也就停止工作了。

居里，P．（1859～1906）：

对于某种新奇的现象，给它一种解释之后，许多人便接受了，但有思想的人却不满足，他们说一定还有可研究的地方。

詹天佑（1861～1919），中国铁路工程专家：

各出所学，各尽所知，使国家富强而不受外侮，足以自立于地球之上。勿屈己而从人，勿沽名而钓誉。

列别捷夫，Л．Л．（Левко́вич，1866～1912），俄国物理学家：

你要勇往直前，在斗争中锻炼自己的智慧、自己的体力，不要被所谓的感伤所征服。把你的全部心灵、全部意志、全部精力，都献给你终身的事业。坚强地战斗，直到老死。

居里，M.（1867～1934）：

为公众的幸福而工作的人，不论在哪个部门都不能被国界所隔断，他们的劳动成果并不止属于一个国家，而是属于整个人类。

我发现了镭，但不是创造了它，因为它不属于我个人，它是全人类的财产。

科学的探讨研究，其本身就含有至美，其本身给人的愉快就是酬报；所以我在我的工作里面寻得了快乐。

我很难具体地描述我的生活，它是这样的单调和没多大的意思……但我丝毫不为自己的生活简陋而难过。唯一使我感到遗憾的是天太短了，而且流逝得如此之快，看不到什么工作已经完成，只看到尚待去做的事情。如果不是这样地爱上了自己的工作，那早就气馁了。

好奇心是学者的第一美德。

我们应该有信心，尤其要有自信力！我们必须相信，我们的天赋是要用来作某种事情的，无论代价多么大，这种事情必须做到。我从来不曾有过幸运，将来也永远不指望幸运……我激励自己，我用尽了所有的力量应付一切……我的毅力终于占了上风。我的最高原则是：不论对任何困难，都决不屈服。

弱者坐待良机，强者制造时机

卢瑟福，E.（1871～1937）：

科学家不是依赖于个人的思想，而是综合了几千人的智慧。

郎之万，P.（Langevin Paul，1872～1946），法国物理学家：

如果记忆力不与智慧和明智的勇敢结合起来，任何天才都很难发展。

爱因斯坦，A.（1879～1955）：

一个人对于时代和历史进程的意义，在其道德品质方面，也许比单纯

的才智、成就方面更为重要。

我从来不把安逸和快乐看作生活目的本身——如此生活的伦理基础，我叫它猪栏的理想。

推动我进行科学工作的是一种想了解自然奥秘的抑制不住的渴望，而不是别的感觉。我热爱正义，也力求对改善人类的处境作出贡献，但这不同于我的科学兴趣。在一个崇高的目的支持下，不停地工作，即使慢，也一定会获得成功。

请记住，人是为别人而生存的，……我每天上百次地提醒自己，我的精神生活和物质生活都有赖于别人的劳动，其中既有活着的人，也有已死去的人。我必须尽自己的努力，以同样的分量来偿还我所领受了的和至今还在领受着的东西。

人只有献身于社会，才能找到那实际上是短暂而有风险的生命的意义。热爱是最好的老师，它远远超过责任感。学校的目标应当是培养有独立行动和独立思考能力的人。

要是没有能独立思考和独立判断的有创造能力的个人，社会的向上发展就不可想象。发展独立思考和独立判断的一般能力，应当始终放在首位，而不应当把获得专业知识放在首位。

我没有什么特别的才能，不过喜欢寻根刨底地研究问题罢了。

每当我脑子中没有什么特别问题需要思考，我就喜欢重新验证我早已知道的数学和物理定理。这样做并没有什么目的，只是为了让自己有机会充分享受一下专心思考的愉快。

提出一个问题往往比解决一个问题更重要，因为解决问题也许仅是一个数学上或实验上的技能而已，而提出新的问题，新的可能性，从新的角度去看旧的问题，却需要有创造性的想象力，而且标志着科学的真正进步。

科学研究能破除迷信，因为它鼓励人们根据因果关系来思考和观察事物。

建立一种新理论不是像毁掉一个旧的仓库，在那里建立起一个摩天大

楼。它倒是像在爬山一样，愈是往上爬愈能得到新的更宽广的视野，并且愈显示出我们的出发点与其周围广大地域之间的出乎意外的联系。但是我们出发的地点还是在那里，还是可以看得见，不过显得更小了，只成为我们克服种种阻碍后爬上山巅所得到的广大视野中的一个极小的部分而已。

科学没有永恒的理论。一个理论所预言的论据常常被实验所推翻。任何一个理论都有它的逐渐发展和成功的时期，经过这个时期以后，它就很快地衰落。

只有大胆的思辨而不是经验的堆积，才能使我们进步。

想象力比知识更重要，因为知识是有限的，而想象力概括着世界上的一切，推动着进步，并且是知识进化的源泉。严格地说，想象力是科学研究中的实在因素。

从我自己痛苦的探索中，我了解前面有许多死胡同，要朝着理解真正有重大意义的事物迈出有把握的一步，即使是很小的一步也是很艰巨的。

$$A=X+Y+Z$$

A——代表成功，X——代表艰苦的劳动，Y——代表正确的方法，Z——代表少说空话。

我不能容忍这样的科学家，他拿出一块木板来，寻找最薄的地方，然后在容易钻透的地方钻许多孔。

我要做的只是以我微薄的绵力来为真理和正义服务，即使不为人喜欢也在所不惜。对真理的追求比对真理的占有更为可贵。

在所阅读的书本中找出可以把自己引到深处的东西，把其他一切统统抛掉，就是抛掉使头脑负担过重和会把自己诱离要点的一切。

夫兰克，J.（1882~1964）：

为了达到最伟大的科学成就，不仅需要出众的天赋，而且需要出众的毅力、耐心、勇敢、非凡的诚实，以及认清真正本质并全神贯注于本质问题的能力。

玻尔，N．（1885～1962）：

一个自然科学家实际上不能，也不应相信奇迹。承认奇迹，他便取消了自然规律。其实自然科学家的任务正是在奇迹中去发现自然界的规律。

李四光（1889～1971），中国地质学家：

科学尊重事实，不能胡乱编造理由来附会一个学说。

不怀疑不能见真理。所以我希望大家都取怀疑的态度，不要为已成的学说所压倒。

郭沫若（1892～1978），中国现代学者、作家、社会活动家：

既异想天开，又实事求是，这是科学工作者特有的风格。

科学是讲求实际的。科学是老老实实的学问，来不得半点虚假，需要付出艰巨的劳动。同时，科学也需要创造，需要幻想，有幻想才能打破传统的束缚，才能发展科学。

德布罗意，L．V．（1892～1989）：

我们任何时候都不应忘记（科学史证明了这一点），科学认识的每一成果所提出的问题，比解决的问题还多；在认识的领域内，新发现的每一片土地都可使我们推测到，还存在着我们尚未知晓的无边无际的大陆。

卡皮察，С．П．（,1894～
1984），前苏联物理学家：

优秀的科学家必定是某种程度的狂人。

海森伯，W．K．（1901～1976）：

正确地提出问题，意味着问题的一大半得到了解决。

实验的发展可以渗透到完全新的领域，引起大量的新的和出人意料的现象及其实际应用。理论物理学的发展则对老的以及基本的概念赋予新的

意义。

一部物理学发展的历史，不只是一本单纯的实验发现的流水帐，它同时还伴随着概念的发展，或者概念的引进。

自然科学中的每一个进展，几乎都是通过对某种问题或概念的放弃而取得的；对于每一种新的认识，几乎都必须以牺牲先前所提出的问题和所形成的概念为代价。

周培源（1902~1993），中国物理学家：

要在科学上有所建树，就应该解放思想破除迷信，敢于实践，大胆探索。

狄拉克，P. A. M.（1902~1984）：

在物理学每个被了解得很少的领域中，如果人们不想沉湎于几乎肯定是错误的荒唐的推测的话，就必须固守实验基础。

物理学的发展可以描绘为一个由许多小的进展所组成的相当稳定的发展过程，再叠加几个巨大的飞跃。当然，正是这些飞跃构成了物理学发展中最有意义的特征，作为背景的稳定发展大都是逻辑性的；这时人们得出的一些思想都是按照标准的方法从以往的结果推导出来的。但是一旦有一个大飞跃时，这就意味着必须引入某种全新的观念。

数学是特别适合于处理任何种类的抽象概念的工具，在这个领域内，它的力量是没有限制的，正因为这个缘故，关于新物理学的书如果不是纯粹描述实验工作的，就必须基本上是数学性的，虽然如此，数学毕竟只是工具，人们应当学会在自己的思想中能不参考数学形式而掌握住物理概念。

高士其（1905~1988），中国科普作家，诗人，科学家：

我每天都在斗争，而斗争是有无穷乐趣的。只有无所事事，碌碌无为，那才是最痛苦的啊！

贝弗里奇，W. I. B.（Williamlam BeardmoreBeveridge，1908~），

澳大利亚动物病理学家：

成功的科学家往往是兴趣广泛的人。他们的独创精神可能来自他们的博学。……多样化会使人观点新鲜，而过于长时间钻研一个狭窄的领域则易使人愚钝。

在知识高度专门化的今天，每个人的知识都是有限的。自觉无知和学术上的诚实，对研究人员来说，是两个重要的品格。

人们最出色的工作往往在处于逆境的情况下做出。思想上的压力，甚至肉体上的痛苦都可能成为精神上的兴奋剂。

新发现必定会受到人们出于怀疑、并常常是反对态度的严厉批评。这可能是最难过的一关。正是由于此，科学家有时必须进行战斗。在过去，有时甚至要付出生命。

华罗庚（1910~1985），中国数学家：

我们最好把自己的生命看作前人生命的延续，是现在共同生命的一部分，同时也是后人生命的开端。如此继续下去，科学就会一天比一天更加灿烂。社会就会一天比一天更美好。

勤能补拙是良训，一分辛苦一分才。

在寻求真理的长征中，唯有学习，不断地学习，勤奋地学习，有创造性地学习，才能越重山、跨峻岭。

许多科学家和作家，都是经过很多次失败，走过很多弯路才成功的。成功的论文和作品只不过是作者们整个创造和研究中的极小部分，甚至这些作品还不及失败的作品的1/10。

我们每个人手中都有一把自学成才的钥匙，这就是：理想、勤奋、毅力、虚心和科学方法。

钱学森（1911~），中国力学家：

我们所说的灵感，实际上是人的观察、体验在头脑中的飞跃……是从

感性认识到理性认识的飞跃。这仍是一个实践和认识的问题，所以我们说它是唯物的。

正确的结果，是从大量错误中得出来的；没有大量错误作台阶，也就登不上最后正确结果的宝座。

钱三强（1913~1992），中国核物理学家：

光明的中国，让我的生命为你燃烧吧。古往今来，凡成就事业、对人类有作为的，无一不是脚踏实地、艰苦登攀的结果。

费因曼，R. P.（Feynman Richard Phillips, 1918~）美国物理学家：

我们要尽快地证明我们错了，只有这样我们才能进步。

库恩，T. S.（Thoma Samuel Kuhn, 1922~），美国科学史家：

每一次革命都迫使科学界推翻一种盛极一时的科学理论，以支持另一种与之不相容的理论。……每一次革命都彻底改变了科学的想象力，以至于最后我们不得不说，那人们在里面从事研究的世界也根本改变了。

杨振宁（1922~）：

成功的真正秘诀是兴趣除非有定量的实验证据，没有任何一种暂时性的讨论能够作为科学的真理来加以接受。

李政道（1926~）：

你不能计较早晨和黄昏，一天二十四小时都是你的工作时间！

遇到问题，要敢于问个为什么。然后，从最简单的方面去找答案，错了也没有关系，不要怕错，错了马上就改。可怕的倒是提不出问题，迈不开第一步。

向还没有开辟的领域进军，才能创造新天地。

丁肇中（1936~）：

.....自然科学理论不能离开实验的基础，特别是物理学，它是从实验中产生的一个好的物理学家一定要深刻了解理论，.....认为会动手的人就会做实验是错误的。

主要参考资料

1. 黄志询。科海浪花集。北京：中国计量出版社，1988。
2. 王涵等。名人名言录。上海：上海人民出版社，1984。
3. 谢德铤。名人格言。济南：山东人民出版社，
4. 王通讯，宋彤。科学家名言。河北人民出版社，1980。
5. 弗里德里希，赫尔内克。原子时代的先驱者。科学技术文献出版社，1981。
6. 殷正坤。探幽入微之路。人民出版社，1987。
7. 杜文勇。名人名言。中国广播出版社，1988。
8. 贝弗里奇。科学研究的艺术。科学出版社，1984。
9. 周林等。科学家论方法。内蒙古人民出版社，1983。
10. 曹一凡。古今中外名言集。河南人民出版社，1982。
11. 杨栩。外国名人名言录。新华出版社，1983。
12. 刘武，黄太茂。中外名言锦语选。广西人民出版社，1981。

一、量和单位

物理量、单位和数值

物理量是用来定量描述物理现象的，它可以分为很多类，凡是互相比较的量，如距离、高度、波长等，都是同类的量。在同类的量中，选出某一特定的量做单位，这类量中任何其他的量，都可以用这个单位与一个数的乘积表示出来，这个数就称为该量的数值。量、单位和数值的关系可写成：

$$A = \{A\} \cdot [A]$$

式中 A 为某一物理量的符号，[A] 为某一单位的符号，{A} 则是以单位 [A] 表示的量 A 的数值。

基本量与导出量

物理量是通过描述自然规律的方程或定义新的物理量的方程而相互联系的。因此，可以把少数几个物理量作为相互独立的，其他的物理量可以根据这几个量来定义，或借方程表示出来。这少数几个看作相互独立的物理量，就叫做基本物理量，简称为基本量。其余的可由基本量导出的物理量，叫做导出物理量，简称为导出量。在国际单位制中共有七个

基本量：长度、质量、时间、电流、热力学温度、物质的量和发光强度。物理学各个领域中的其他的量，都可以由这七个基本量通过乘、除、微分或积分等数学运算导出。

量纲(dimension)

任一量 Q 可以用其他量以方程的形式来表示，这一表达形式可以是若干项的和，每一项又可表示为选定的一组基本量 A, B, C, \dots 的乘方之积，有时还乘以数字因数，即

$$A^a B^b C^c \dots$$

每一项中基本量的指数分别相同。

某一物理量 Q 的量纲可以表示为量纲积

$$\dim Q = A^a B^b C^c \dots$$

其中 A, B, C, \dots 表示基本量 A, B, C, \dots 的量纲， a, b, c, \dots 称为量纲指数。

所有量纲指数都等于零的量，其量纲积或量纲为 $A^0 B^0 C^0 \dots = 1$ 。这样的量往往称为无量纲量。这种量纲一的量表示为数。

在七个基本量长度、质量、时间、电流、热力学温度、物质的量和发光强度的量制中，基本量的量纲分别用 L, M, T, I, Θ, N 和 J 表示，量 Q 的量纲的一般形为：

$$\dim Q = L^a M^b T^c I^d \Theta^e N^f J^g$$

例如：

量	量纲
力	LMT^{-2}
熵	$L^2MT^{-2}\Theta^{-1}$
磁通量	$L^2MT^{-2}I^{-1}$
照度	$L^{-2}J$
法拉第常量	TIN^{-1}
相对密度	1

量方程和数值方程

科学技术中使用的方程有两类：一类是量方程，即以量的符号代表量值组成的方程。例如，

$$v = l / t$$

就是匀速运动中速度的量方程。另一类是数值方程。例如

$$\{v\}_{\text{km/h}} = 3.6 \{l\}_m / \{t\}_s$$

就是以千米每小时、米和秒分别作为速度、长度和时间单位时，做匀速运动物体的速度的数值方程。方程中出现的数字“3.6”是选用上述特定单位的结要。如果选用另外的单位，这一数字也就随之改变。

由上述例子可以知道，数值方程与选用的单位有关，而量方程的优点是与选用的单位无关。因此，在物理学中，通常都采用量方程。

量方程中，有时也包含数字因数，这些数字因数与方程中量的定义有关。例如，质量为 m ，速度为 v 的质点的动能为

$$E_k = \frac{1}{2}mv^2$$

方程中的数字 $\frac{1}{2}$ ，是由动能的定义决定的。

一贯单位制(coherent system of units)

单位本来是可以任意选择的。但是，如果对每一个量，都独立地选择一个单位，则会导致在数值方程中出现一些附加的数字因数。

不过，可以选择一种单位制，使包含数字因数的数值方程同相应的量方程，具有完全相同的形式，这样在实用中是十分方便的，按照这一原则构成的单位制叫做一贯单位制，简称一贯制。

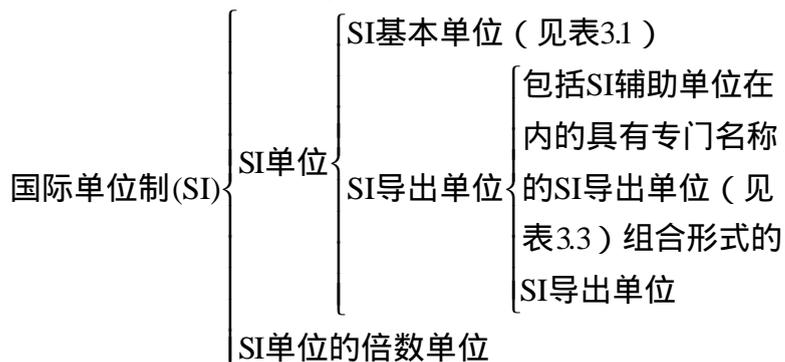
对于特定的量制和方程，要得到一贯单位制，可先定义出基本量的单位，再对每个导出量通过一个代数表示式用基本单位定义相应的导出单位，这个代数表示式是由该导出量的量纲积，以基本单位的符号代替基本量纲的符号而得到的，在这样的一贯单位制中，导出单位表示式中的数字因数只能是 1。

国际单位制和理论物理学中常用的厘米克秒单位制(CGS)，都是一贯单位制。

二、国际单位制

国际单位制的组成

国际单位制(Le Sytème Internationald' Unitès)及其国际简称 SI 是在第 11 届国际计量大会 (1960) 上通过的。



SI 单位是国际单位制中由基本单位和导出单位构成一贯单位制的那些单位。除质量外，均不带 SI 词头（质量的 SI 单位为千克）。

国际单位制的单位包括 SI 单位及 SI 单位的倍数单位。

SI 单位的倍数单位包括 SI 单位的十进倍数单位和分数单位。

SI 基本单位

国际单位制以表 3.1 中的七个单位为基础，这七个单位称为 SI 基本单位，又称为国际单位制的基本单位。

表中无方括号的单位名称为全称。圆括号里的名称，是它前面的名称的同义词（下同）。方括号中的字，在不致引志混淆、误解的情况下，可以省略（下同）。去掉方括号中的字即为其简称。

表 3.1 SI 基本单位

量的名称	单位名称	单位符号
长度	米	m
质量	千克(公斤)	kg
时间	秒	s
电流	安[培]	A
热力学温度	开[尔文]	K
物质的量	摩[尔]	mol
发光强度	坎[德拉]	cd

SI 基本单位的定义

米：米等于光在真空中($1/299\,792\,458$)s 时间间隔内所经路径的长度。[第 17 届国际计量大会(1983)]

千克：千克是质量单位，等于国际千克原器的质量。[第 1 届国际计量大会(1889)和第 3 届国际计量大会(1901)]

秒：秒是铯-133 原子基态的两个超精细能级之间跃迁所对应的辐射的 9192631770 个周期的持续时间。[第 13 届国际计量大会(1967)，决议 1]

安培：安培是电流的单位。在真空中，截面积可忽略的两根相距 1m 的无限长平行圆直导线内通以等量恒电流时，若导线间相互作用力在每米长度上为 $2 \times 10^{-7}\text{N}$ ，则每根导线中的电流为 1A 。[国际计量委员会(1946)，决议 2。第 9 届国际计量大会(1848)批准]

开尔文：热力学温度开尔文是水三相点热力学温度的 $1/273.16$ 。[第 13 届国际计量大会(1967)，决议 4]

注：第 13 届国际计量大会(1967，决议 3) 还决定单位开尔文与符号 K 用于表示温度间隔或温度差。

除以开尔文表示的热力学温度(符号 T) 外，也使用按式 $t=T-T_0$ 所定义的摄氏温度(符号 t)，式中 $T_0=273.15\text{K}$ 。单位“摄氏度”是表示摄氏温度时，用来代替“开尔文”的一个专门名称。但是摄氏温度间隔或摄氏温度差可以用摄氏度表示，也可以用开尔文表示。

摩尔：摩尔是一系统的物质的量，该系统中所包含的基本单元数与 0.012kg 碳-12 的原子数目相等。在使用摩尔时，基本单元应予指明，可以是原子、分子、离子、电子及其他粒子，或是这些粒子的特定组合。[第 14 届国际计量大会(1971)，决议 3]

坎德拉：坎德拉是一光源在给定方向上的发光强度，该光源发出频率为 $540 \times 10^{12}\text{Hz}$ 的单色辐射，且在此方向上的幅射强度为 $(1/683)\text{W/sr}$ 。[第 16 届国际计量大会(1979)，决议 3]

SI 导出单位

导出单位是用基本单位以代数形式表示的单位。这种单位符号中的乘和除采用数学符号。如速度的 SI 单位为米每秒(m/s)。属于这种形式的单位称为组合单位。

对某些 SI 导出单位，国际计量大会通过了专门的名称和符号，见表 3.2 和表 3.3。使用这些专门名称以及用它们表示其他导出单位，往往更为方便、明确。如热和能量的单位通常用焦耳(J)代替牛顿米($\text{N} \cdot \text{m}$)，电阻率的单位通常用欧姆米($\Omega \cdot \text{m}$)代替伏特米每安培($\text{V} \cdot \text{m/A}$)。

SI 单位弧度和球面度称为 SI 辅助单位,它们是具有专门名称和符号的量纲一的量的导出单位。在许多实际情况中,用专门名称弧度(rad)和球面度(sr)分别代替数字 1 是方便的。例如角速度的 SI 单位可写成弧度每秒(rad/s)。

单位的名称

表 3.1 至表 3.3 确定了单位的名称及其简称,它们用于口述,也可用于叙述性文字中。

组合单位的名称与其符号表示的顺序一致,符号中的乘号没有对应的名称,除号的对应名称为“每”字,无论分母中有几个单位,“每”字都只出现一次。

例如,比热容的单位符号是 $J/(kg \cdot K)$,其名称是“焦耳每千克开尔文”,而不是“每千克开尔文焦耳”或“焦耳每千克每开尔文”。

乘方形式的单位名称,其顺序应是指数名称在前,单位名称在后,指数名称由相应的数字加“次方”二字构成。

例如,截面二次矩单位符号 m^4 ,其名称为“四次方米”。

如果长度的二次和三次幂分别表示面积和体积,则相应的指数名称为“平方”和“立方”,其他情况均应分别为“二次方”和“三次方”。

例如,体积单位符号是 m^3 ,其名称为“立方米”,而截面系数单位符号是 m^3 ,其名称为“三次方米”。

表 3.2 包括 SI 辅助单位在内的具有专门名称的 SI 导出单位

量的名称	SI 导出单位		
	名称	符号	用 SI 基本单位和 SI 导出单位表示
[平面]角	弧度	rad	1 rad=1m/m=1
立体角	球面度	sr	1sr=1m ² /m ² =1
频率	赫[兹]	Hz	1Hz=1s ⁻¹
力	牛[顿]	N	1N=1kg · m/s ²
压力, 压强, 应力	帕[斯卡]	Pa	1Pa=1N/m ²
能[量], 功, 热量	焦[耳]	J	1J=1N · m
功率, 辐[射能]通量	瓦[特]	W	1W=1J/s
电荷[量]	库[仑]	C	1C=1A · s
电压, 电动势, 电位(电势)	伏[特]	V	1V=1W/A
电容	法[拉]	F	1F=1C/V
电阻	欧[姆]	Ω	1 Ω =1V/A
电导	西[门子]	S	1S=1 Ω ⁻¹
磁通[量]	韦[伯]	Wb	1Wb=1V · s
磁通[量]密度, 磁感应强度	特[斯拉]	T	1T=1Wb/m ²
电感	亨[利]	H	1H=1Wb/A
摄氏温度	摄氏度	$^{\circ}\text{C}$	1 $^{\circ}\text{C}$ =1K
光通量	流[明]	lm	1lm=1cd · sr
[光]照度	勒[克斯]	lx	1lx=1lm/m ²

表 3.3 由于人类健康安全防护上的需要而确定的具有专门名称的 SI 导出单位

量的名称	SI 导出单位		
	名称	符号	用 SI 基本单位和 SI 导出单位表示
[放射性]活度	贝可[勒尔]	Bq	1Bq=1s ⁻¹
吸收剂量	戈[瑞]	Gy	1Gy=1J/kg
比授[予]能			
比释动能			
吸收剂量指数			
剂量当量	希[沃特]	Sv	1Sv=1J/kg

书写组合单位名称时，不加任何表示乘或（和）除的符号或（和）其他符号。

例如，电阻率单位的符号是 $\Omega \cdot m$ ，其名称为“欧姆米”，而不是“欧姆·米”、“欧姆-米”、“[欧姆][米]”等。

SI 单位的倍数单位

表 3.4 给出 SI 词头的名称、简称及符号。词头用于构成倍数单位（十进倍数单位与分数单位），但不得单独使用。

词头符号与所紧接的单位符号（指 SI 基本单位，SI 辅助单位和具有专门名称的 SI 导出单位，而不是指组合单位整体），应作为一个整体对待，它们一起组成一个新单位（十进倍数单位或分数单位），并具有相同的幂次，

因数	词头名称		符号
	英文	中文	
10^{24}	yotta	尧[它]	Y
10^{21}	zetta	泽[它]	Z
10^{18}	exa	艾[可萨]	E
10^{15}	peta	拍[它]	P
10^{12}	tera	太[拉]	T
10^9	giga	吉[咖]	G
10^6	mega	兆	M
10^3	kilo	千	k
10^2	hecto	百	h
10^1	deca	十	da
10^{-1}	deci	分	d
10^{-2}	centi	厘	c
10^{-3}	milli	毫	m
10^{-6}	micro	微	μ
10^{-9}	nano	纳[诺]	n
10^{-12}	pico	皮[可]	p
10^{-15}	femto	飞[母托]	f
10^{-18}	atto	阿[托]	a
10^{-21}	zepto	仄[普托]	z
10^{-24}	yocto	幺[科托]	y

而且还可以和其他单位构成组合单位，例如，

$$\begin{aligned}1\text{cm}^3 &= (10^{-2}\text{m})^3 = 10^{-6}\text{m}^3, \\1\mu\text{s}^{-1} &= (10^{-6}\text{s})^{-1} = 10^6\text{s}^{-1}, \\1\text{mm}^2/\text{s} &= (10^{-3}\text{m})^2/\text{s} = 10^{-6}\text{m}^2/\text{s}, \\10^{-3}\text{tex} &\text{可写为 m}\mu\text{m}.\end{aligned}$$

不得使用重叠词头，如只能写 nm，而不能写 m μ m。

由于历史原因，质量的 SI 单位名称“千克”中，已包含 SI 词头“千”，所以质量的十进倍数单位由词头加在“克”前构成。如用 mg 而不得用 μ kg。

SI 单位及其倍数单位的应用

SI 单位的倍数单位根据使用方便的原则选取。通过适当的选择，可使数值处于实用范围内。

选用的 SI 单位的倍数单位，一般应使量的数值处于 0.1 ~ 1000 范围内。例如

$$\begin{aligned}1.2 \times 10^4\text{N} &\text{可写成 } 12\text{kN}, \\0.00394\text{m} &\text{可写成 } 3.94\text{mm}, \\11401\text{Pa} &\text{可写成 } 11.401\text{kPa}, \\3.1 \times 10^{-8}\text{s} &\text{可写成 } 31\text{ns}.\end{aligned}$$

在某些情况下，习惯使用的单位可以不受上述限制。

如大部分机械制图使用的单位用毫米，导线截面积使用的单位用平方毫米，领土面积用平方千米。

词头 h、da、d、c（百、十、分、厘），一般用于某些长度、面积和体积。

对于组合单位，其倍数单位的构成，一般只使用一个词头，而且尽可能用于组合单位中的第一个单位。

通过相乘构成的组合单位的词头通常加在第一个单位之前。例如力矩的单位 kN·m 不宜写成 N·km。

通过相除构成的组合单位，或通过乘和除构成的组合单位，其词头一般都应加在分子的第一个单位之前，分母中一般不用词头，但质量单位 kg 在分母中时例外，例如摩尔内能单位 kJ/mol 不宜写成 J/mmol，质量能（比能）单位可以是 kJ/kg。

当组合单位分母是长度、面积和体积单位时，分母中可以选用某些词头构成倍数单位。例如密度的单位可以选用 g/cm³。

一般不在组合单位的分子分母中同时采用词头。

在计算中，为了方便，所有量均可用 SI 单位表示，将词头用 10 的

幂代替。

有些国际单位制以外的单位，可以按习惯用 SI 词头构成倍数单位，但它们不属于国际单位制，如 MeV、Mci，mL 等。

摄氏温度单位摄氏度，角度单位度、分、秒与时间单位日、时、分等不得用 SI 词头构成倍数单位。

单位符号

单位和词头的符号，在公式、数据表、曲线图、刻度盘和产品铭牌等需要简明了的地方使用，也用于叙述性文字中。

单位名称和单位符号都必须各作为一个整体使用，不得拆开。如摄氏度的单位符号为 $^{\circ}\text{C}$ ，20 摄氏度不得写成或读成摄氏 20 度，也不得写成 20 $^{\circ}$ ，只能写成 20 $^{\circ}\text{C}$ 。

单位符号后不得附加任何其他标记或符号，也无复数形式。

当组合单位是由两个或两个以上的单位相乘时，其组合单位的写法可采用下列形式之一： $\text{N} \cdot \text{m}$ 或 Nm 。第二种形式也可以在单位符号之间不留空隙，但应注意，当单位符号同时又是词头符号时，应尽量将它置于右侧，以免引起混淆。如 mN 表示毫牛顿而非指米牛顿。

当用单位相除的方法构成组合单位时，其符号可采用下列形式之

一： m/s ； $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ 或 $\frac{\text{m}}{\text{s}}$ 。

除加括号避免混淆外，单位符号中的斜线(/)不得超过一条。在复杂的情况下，也可以使用负指数。

单位的中文符号

表 3.1 至表 3.3 所确定的单位名称的简称，可作为单位的中文符号。不应在组合单位中同时使用单位符号和中文符号。

由两个或两个以上单位相乘所构成的组合单位，其符号形式为两个单位符号之间加居中圆点，如 $\text{牛} \cdot \text{米}$ 。

单位相除构成的组合单位，其形式可采用下列形式之一： $\text{米}/\text{秒}$ ；

$\text{米} \cdot \text{秒}^{-1}$ ； $\frac{\text{米}}{\text{秒}}$ 。

摄氏度的符号 $^{\circ}\text{C}$ 可以作为中文符号使用。

单位与词头符号的书写规则

单位符号一律用正体字母。除来源于人名的单位符号第一个字母要大写外，其余均为小写字母（升的符号 L 例外）。

单位符号应写在全部数值之后，并与数值间留适当的空隙。

SI 词头符号一律用正体字母。
SI 词头符号与单位符号间不得留空隙。

三、可与国际单位制单位并用的 我国法定计量单位

中华人民共和国法定计量单位（简称法定单位）是以国际单位制单位为基础，同时选用了一些非国际单位制的单位构成的。

国家选定的非国际单位制的单位，见表 3.5。这些单位，都是由于实用中的重要性和专门领域的需要，而得到国际计量委员会承认可以与国际单位制单位并用的。

表 3.5 可与国际单位制单位并用的我国法定计量单位

量的名称	单位名称	单位符号	与 SI 单位的关系
时间	分	min	1min=60s
	[小]时	h	1h=60min=3600s
	日，(天)	d	1d=24h=86400s
[平面]角	度	°	1°=(π /180)rad
	[角]分		1'=(1/60)°=(π /10800)rad
	[角]秒		1''=(1/60)'=(π /648000)rad
体积，容积	升	L(l)	1L=1dm ³ =10 ⁻³ m ³
质量	吨	t	1t=10 ³ kg
	原子质量单位	u	1u=1.660 540 × 10 ⁻²⁷ kg
旋转速度	转每分	r/min	1r/min=(1/60)s ⁻¹
长度	海里	n mile	1n mile=1852m (只用于航行)
速度	节	kn	1kn=1n mile/h=(1852/3600)m/s (只用于航行)
能	电子伏	eV	1eV=1.602177 × 10 ⁻¹⁹ J
级差	分贝	dB	
线密度	特[克斯]	tex	1tex=10 ⁻⁶ kg/m
面积	公顷	hm ²	1hm ² =10 ⁴ m ²

注：平面角单位度、分、秒的符号，在组合单位中应采用(°)(′)(″)的形式。例如，不用°/s而用(°)/s。

升的符号中，小写字母l为备用符号。

公顷的国际通用符号为ha。

表3.5中的单位，在某些情况下，也可与国际单位制的单位构成组合单位，如kg/h，km/h。

四、其他可与国际单位制单位并用的单位

除我国法定计量单位中选用的非国际单位制单位外，还有一些由于实用中的重要性或专门领域的需要，得到国际计量委员会(CIPM)和国际标准化组织(ISO)承认的可与SI单位并用或暂时可与SI单位并用的非SI单位。表3.6根据中华人民共和国国家标准(GB3100~3102-93)《量和单位》，列出了一些这样的单位。

表3.6 可与SI单位并用或暂时可与SI单位并用的非SI单位

量的名称	单位名称	单位符号	换算关系	备注
速度	千米每[小]时	km/h	$1\text{km/h} = \frac{1}{36}\text{m/s}$	
[有功]电能[量]	瓦[特][小]时	w · h	$1\text{w} \cdot \text{h} = 3.6 \times 10^3\text{J}$ $1\text{kW} \cdot \text{h} = 3.6\text{MJ}$	
体积质量 [质量]密度	吨每立方米 千克每升	t/m ³ kg/L	$1\text{t/m}^3 = 10^3\text{kg/m}^3$ $= 1\text{g/cm}^3$ $1\text{kg/L} = 10^3\text{kg/m}^3$ $= 1\text{g/cm}^3$	
光量	流[明][小]时	lm · h	$1\text{lm} \cdot \text{h} = 3600\text{lm} \cdot \text{s}$ (准确值)	
场[量]级 功率[量]级 能数衰减率	奈培	Np	$1\text{dB} = \frac{\ln 10}{20}\text{Np}$ $= 0.115129\text{Np}$	
阻尼系数	奈培每秒	Np/s	$1\text{dB/s} = 0.115$ 129Np/s	
频段	倍频段	(oct)		当 $f_2/f_1=2$ 时, f_1 和 f_2 间的 频段为 1oct
响度级(L_N)	方	(phon)	对于频率 1kHz 的纯音, 其响度级 $1\text{phon} \equiv 1\text{dB}$	$L_N = 20\lg(p/p_0)_{1\text{kHz}}$. 式中 p 为在正常测听条件下, 正常听者判断一个声音与 1kHz 纯音等响的有效声压; p_0 为基准声压, 等于 $20 \mu\text{Pa}$
响度(N)	宋	(sone)		1sone 是响度级为 40phon 的声音的响度

量的名称	单位名称	单位符号	换算关系	备注
音程	八度	(oct)		1oct 等于高音与低音的音调比的以 2 为底的对数等于 1 时的音程
感觉噪声级 L_{PN}	贝[尔]	B	1dB=0.1B	不是纯物理量，而是主观评价量
噪声度 N_a	呐	(noy)	1 呐是感觉噪声级为 40dB 的噪声的噪声度	不是纯物理量，而是主观评价量
电荷[量]	安[培][小]时	A · h	1A · h=3.6kC	用于蓄电池
B 的浓度		mol/L		
B 的物质的量浓度	摩[尔]每升	mol/L	1mol/l=10 ³ mol/m ³ =1mol/dm ³	

五、一些专门领域中使用的非 SI 单位

中华人民共和国国家标准《量和单位》(GB 3100~3102-93)在备注和附录中介绍了一些专门领域中使用的非 SI 单位，其中一些较常见的列于下表。表中打星号*的是不赞成使用的单位。

非 3.7 一些专门领域中使用的非 SI 单位

量的名称	单位名称	单位符号	换算关系	备注
[平面]角	冈	gon	$1 \text{ gon} = \frac{1}{200} \text{ rad}$	当弧度不适用时，推荐使用冈(gon=grade)及其分数单位。
长度	埃	Å	$1 \text{ Å} = 10^{-10} \text{ m}$ (准确值)	
	光年	l . y .	$1 \text{ l . y .} = 9.460730 \times 10^{15} \text{ m}$	
	天文单位	AU	$1 \text{ AU} = 1.4959787 \times 10^{11} \text{ m}$	
	秒差距	pc	$1 \text{ pc} = 206264.8 \text{ AU} = 30.85678 \times 10^{15} \text{ m}$	1pc 为 1AU 的距离所张的角度为 1 角秒时的距离。
质量	[米制]克拉*		1 米制克拉=200mg (准确值)	
时间	年	a		回归年是太阳连续两次通过平均春分点所经历的时间。 a_{trop} 并非常数，而是以大约每世纪 0.53s 的速度减小
	回归年	a_{trop}	1 回归年近似等于 365.24220d =31556926s	毫伽常用于大地测量学中
自由落体加速度	伽	Gal	$1 \text{ Gal} = 0.01 \text{ m/s}^2$	本单位应与具有 1kg 质量的物体的当地重量区分开。
力	千克力*	kgf	$1 \text{ kgf} = 9.80665 \text{ N}$ (准确值)	

量的名称	单位名称	单位符号	换算关系	备注
压力, 压强	标准大气压*	atm	1atm=101 325Pa (准确值)	
	千克力每平方米*	kgf/m ²	1kgf/m ² =9.806 65Pa (准确值)	
	巴	bar	1bar=10 ⁵ Pa 1mbar=1hPa	
	托*	Torr Torr	1Torr = $\frac{1}{760}$ atm (准确值)	
	工程大气压*	at	=133.3224Pa 1at=1kgf/cm ² =98 066.5Pa (准确值)	
	约定毫米水柱*	mmH ₂ O	1mmH ₂ O=10 ⁻⁴ at =9.80665Pa (准确值)	
	约定毫米汞柱*	mmHg	1mmHg =13.5951mmH ₂ O =133.3224Pa	
力矩	千克力米*	kgf · m	1kgf · m=9.806 65N · m (准确值)	
能[量]	千克力米*	kgf · m	1kgf · m=9.806 65J (准确值)	
热, 热量	15 卡	cal ₁₅	1cal ₁₅ =4.1855J	该值的不确定度 为 0.0005J
	国际蒸汽表卡	cal _{IT}	1cal _{IT} =4.1868J 1Mcal _{IT} =1.163kw · h (准确值)	
	热化学卡	cal _{th}	1cal _{th} =4.184J (准确值)	
功率	千克力米每秒*	kgf · m/s	1kgf · m/s=9.806 65W (准确值)	
	[米制]马力*		1 米制马力=75kgf · m/s (准确值) =735.498 75W (准确值)	
[动力]粘度	泊	P	1cP=1mPa · s	属于 CGS 制位, 不 应与 SI 单位并 用。

量的名称	单位名称	单位符号	换算关系	备注
运动粘度	斯[托克斯]	S_t	$1cS_t=1\text{mm}^2/\text{s}$	属于 CGS 制单位， 不应与 SI 单位并用。
电阻率		$\frac{\cdot \text{mm}^2}{\text{m}}$	$1\frac{\cdot \text{mm}^2}{\text{m}}=1\mu \cdot \text{m}$	
视在功率	伏[特]安[培]	$V \cdot A$		
无功功率	乏	var		
透镜焦度(光焦度)	屈光度	D	$1D=1\text{m}^{-1}$	不是法定计量单位
放射性活度	居里	Ci	$1\text{Ci}=3.7 \times 10^{10}\text{Bg}$ (准确值)	
吸收剂量	拉德	rad	$1\text{rad}=10^{-2}\text{Gy}$	
剂量当量	雷姆	rem	$1\text{rem}=10^{-2}\text{Sv}$	
照射量	伦琴	R	$1\text{R}=2.58 \times 10^{-4}\text{C/kg}$ (准确值)	
截面	靶恩	b	$1\text{b}=10^{-28}\text{m}^2$	

六、常用物理量的符号及其单位

表 3.8 至表 3.14 列出了一些常见的物理量及其单位。

表 3.8 有关空间、时间和周期现象的量和单位

量的名称	量的符号	单位名称	单位符号	备注
[平面]角	, , ,)	弧度 度 [角]分 [角]秒	rad °	度最好按十进制细分；因此，单位符号应置于数字之后，例如 17 ° 15 最好写成 17.25 °
立体角		球面度	sr	
长度	l , L	米	m	千米俗称公里
宽度	b			
高度	h			
厚度	d,			
半径	r,R			
直径	d,D			
程长	s			
距离	d,r	海里	n mile	只用于航程
面积	A , (s)	平方米	m ²	
体积	V	立方米 升	m ³ L(l)	
时间	t	秒 分 [小]时 日(天)	s min h d	其他单位如年、月、周(星期)是一般常用单位，年的符号为 a。
角速度		弧度每秒	rad/s	角度也可用度、分、秒
角加速度		弧度每二次方秒	rad/s ²	角度也可用度、分、秒

量的名称	量的符号	单位名称	单位符号	备注
速度	v	米每秒	m/s	v 是广义的标志, c 用作波的传播速度。当不用矢量标志时, 建议用 u, v, w 作速度 c 的分量 节用于航行
	c	千米每[小]时	km/h	
	u, v, w	节	kn	
加速度	a	米每二次方秒	m/s ²	标准自由落体加速度 $g_0=9.80665\text{m/s}^2$ (准确值)
自由落体加速度	g			
重力加速度				
周期	T	秒	s	
频率	f,	赫[兹]	Hz	“转每分”(r/min)和“转每秒”(r/s) 广泛用作旋转机械转速的单位
旋转频率	n	每秒	s ⁻¹	
角频率, 圆频率		弧度每秒	rad/s	
		每秒	s ⁻¹	
波长		米	m	
波数		每米	m ⁻¹	
角波数	k	弧度每米	rad/m	
		每米	m ⁻¹	

表 3.9 力学的量和单位

量的名称	量的符号	单位名称	单位符号	备注
质量	m	千克(公斤)	kg	
		吨	t	
体积质量 [质量]密度		千克每立方米	kg/m ³	
		吨每立方米	t/m ³	
		千克每升	kg/L	
相对体积质量 相对[质量]密度	d	—	1	
质量体积, 比体积	v	立方米每千克	m ³ /kg	
线质量	l	千克每米	kg/m	用于纤维纺织业。
线密度		特[克斯]	tex	1tex=10 ⁻⁶ kg/m=1g/km
面质量 面密度	A, (s)	千克每平方米	kg/m ²	

量的名称	量的符号	单位名称	单位符号	备注
冲量	I	牛[顿]秒	$N \cdot s$	
动量	p	千克米每秒	$kg \cdot m/s$	
动量矩, 角动量	L	千克二次方米每秒	$kg \cdot m^2/s$	
转动惯量, (惯性矩)	J, (I)	千克二次方米	$kg \cdot m^2$	
力	F	牛[顿]	N	物体在特定参考系中的重量为使该物体在此参考系中获得其加速等于当地自由落体加速度时的力。当此参考系为地球时, 此量常称为物体所在地的重力。由于浮力的作用被排除, 所定义的重量是真空中重量
重量	W, (P, G)			
引力常量	G, (f)	牛[顿]二次方米 每二次方千克	$N \cdot m^2/kg^2$	
力矩	M	牛[顿]米	$N \cdot m$	
力偶矩	M			
转矩	M, T			
压力, 压强	p	帕[斯卡]	Pa	
正应力				
切应力				
线应变	ϵ			
切应变		—	1	
体应变				
泊松比	μ	—	1	
弹性模量	E	帕[斯卡]	Pa	
切变模量	G			
体积模量	K			
[体积]压缩率	k	每帕[斯卡]	Pa^{-1}	
动摩擦因数	$\mu_s, (f)$	—	1	
静摩擦因数	$\mu_s, (f_s)$			
[动力]粘度	$\eta, (\mu)$	帕[斯卡]秒	$Pa \cdot s$	
运动粘度		二次方米每秒	m^2/s	
表面张力	σ	牛[顿]每米	N/m	$1N/m=1J/m^2$

量的名称	量的符号	单位名称	单位符号	备注
功	$W, (A)$	焦[耳]	J	
能[量]	E			
势能, 位能	$E_p, (V)$			
动能	$E_k, (T)$			
功率	P	瓦[特]	W	
质量流量	q_m	千克每秒	kg/s	
体积流量	q_v	立方米每秒	m^3/s	

表 3.10 声学的量和单位

量的名称	量的符号	单位名称	单位符号	备注
(瞬时) 声压	p	帕[斯卡]	Pa	有声波时媒质中的瞬时总压力与静压之差。有效声压(简称声压)也用此符号 p
声速, (相速)	c	米每秒/	m/s	
声能密度	$W, (e), (D)$	焦[耳]每立方米	J/m^3	
声功率	W, P	瓦[特]	W	
声强[度]	I, J	瓦[特]每平方米	W/m^2	
声压级	L_p	贝[尔]	B	常用 dB 作单位
声强级	L_I			1dB=0.1B
声功率级	L_w			
损耗因数	,			+ + =1
反射因数	, ()	—	1	= +
透射因数				
吸声因数				
混响时间	$T, (T_{00})T$	秒	s	
隔声量	R	贝[尔]	B	常用 dB 作单位, 1dB=0.1B
响度级	L_N	方	(phon)	
响度	N	宋	(sone)	
噪度	N_n	呐	(noy)	
感觉噪声级	L_{PN}	贝[尔]	B	常用 dB 作单位, 1dB=0.1B

表 3.11 热学和分子物理学的量和单位

量的名称	量的符号	单位名称	单位符号	备注
热力学温度	$T, (\Theta)$	开[尔文]	K	
摄氏温度	$t, (t)$	摄氏度		
线[膨]胀系数	α_l	每开[尔文]	K^{-1}	
体[膨]胀系数	$\alpha_v, (\alpha_v)$			
相对压力系数	β_p			
压力系数		帕[斯卡]每开[尔文]	Pa/K	
等温压缩率	κ_T	每帕[斯卡]	Pa^{-1}	
热, 热量	Q	焦[耳]	J	
热流量		瓦[特]	W	
热流[量]密度	q	瓦[特]每平方米	W/m^2	
热导率, (导热系数)	$\lambda, (k)$	瓦[特]每米开[尔文]	$W/(m \cdot K)$	
传热系数	$K(k)$	瓦[特]每平方米开[尔文]	$W/(m^2 \cdot K)$	
热容	C	焦[耳]每开[尔文]	J/K	除非规定变化过程, 这个量是不完全确定的
质量热容, 比热容	c	焦[耳]每千克开[尔文]	$J/(kg \cdot K)$	
质量定压热容	c_p			
质量定容热容	c_v			
质量热容比 比热[容]比		—	1	
熵	S	焦[耳]每开[尔文]	J/K	
质量熵 比熵	s	焦[耳]每千克开[尔文]	$J/(kg \cdot K)$	
热力学能	U	焦[耳]	J	热力学能也称内能
质量热力学能 比热力学能	u	焦[耳]每千克	J/kg	
物质的量	$n, (n)$	摩[尔]	mol	
阿伏加德罗常数	L, N_A	每摩[尔]	mol^{-1}	
摩尔质量	M	千克每摩[尔]	kg/mol	
摩尔体积	V_m	立方米每摩[尔]	m^3/mol	
摩尔热力学能	U_m	焦[耳]每摩[尔]	J/mol	此量也称摩尔内能

续表

量的名称	量的符号	单位名称	单位符号	备注
摩尔热容	C_m	焦[耳]每摩[尔]开	$J / (\text{mol} \cdot \text{K})$	
摩尔定压热容	$C_{p,m}$	[尔文]		
摩尔定容热容	$C_{v,m}$			
摩尔熵	S_m	焦[耳]每摩[尔]开	$J / (\text{mol} \cdot \text{K})$	
		[尔文]		
体积分子(或粒子)数	n	每立方米	m^{-3}	
分子或(粒子)数密度				
摩尔气体常数	R	焦[耳]每摩[尔]开	$J / (\text{mol} \cdot \text{K})$	
		[尔文]		
玻耳兹曼常数	K	焦[耳]每开[尔文]	J/K	
平均自由程	l	米	m	
扩散系数	D	二次方米每秒	m^2/S	

表 3.12 电学和磁学的量和单位

量的名称	量的符号	单位名称	单位符号	备注
电流	I	安[培]	A	在交流电技术中，用 i 表示电流的瞬时值，I 表示有效值
电荷[量]	Q	库[仑] 安[培][小]时	C A · h	该量的符号也可用 q。 单位安[培][小]时用于 蓄电池 1A · h=3.6kC
体积电荷 电荷[体]密度	,	库[仑]每立方米	C/m ³	
面积电荷 电荷面密度		库[仑]每平方米	C/m ²	
电场强度	E	伏[特]每米	V/m	1V/m=1N/C
电位，(电势)	V，	伏[特]	V	
电位差，(电势 差)，电压 电动势	U，(V) E			
电通[量]密度	D	库[仑]每平方米	C/m ²	也使用名称“电移”
电通[量]，		库[仑]	C	也使用名称“电位移通 量”
电容	C	法[拉]	F	1F=1C/V

量的名称	量的符号	单位名称	单位符号	备注
介电常数, (电容率)		法[拉]每米	F/m	该量也称为“绝对介电常数(绝对电容率)”, 另一名称为“电常数”
真空介电常数, (真空电容率)	ϵ_0			
相对介电常数	ϵ_r	—	1	
电极化率	X, X_e	—	1	
电极化强度	P	库[仑]每平方米	C/m^2	
电偶极矩	$p, (p_e)$	库[仑]米	$C \cdot m$	
面积电流	$J, (S)$	安[培]每平方米	A/m^2	
电流密度				
磁场强度	H	安[培]每米	A/m	
磁通[量]密度	B	特[斯拉]	T	$1T=1Wb/m^2=$ $1N/(A \cdot m)=$ $1V \cdot s/m^2$
磁感应强度				
磁通[量]		韦[伯]	Wb	$1Wb=1V \cdot s$
自感	L	亨[利]	H	$1H=1Wb/A=1V \cdot s/A$
互感	M, L_{12}			
磁导率	μ	亨[利]每米	H/m	此量也称“绝对磁导率”, 另一名称为“磁常数”
真空磁导率	μ_0			
相对磁导率	μ_r		1	
磁化率	$K, (X_m, X)$		1	
磁化强度	$M, (H_i)$	安[培]每米	A/m	
体积电磁能				
磁极化强度	$J, (B_i)$	特[斯拉]	T	
体积电磁能				
电磁能密度		焦[耳]每立方米	J/m^3	
坡印廷矢量	S	瓦[特]每平方米	W/m^2	
电磁波在真空中的传播速度	c, c_0	米每秒	m/s	如果介质中的速度用符号 c , 则真空中的速度用符号 c_0
[直流]电阻	R	欧[姆]		

量的名称	量的符号	单位名称	单位符号	备注
[直流]电导	G	西[门子]	S	
电阻率		欧[姆]米	· m	
电导率	ν, σ	西[门子]每米	S/m	
相[位]差, 相[位]移		弧度 [角]秒 [角]分 度	rad " °	
阻抗, 复[数]阻抗 阻抗模, (阻抗) 电抗 [交流]电阻	Z Z X R	欧[姆]		
品质因数	Q	—	1	
导纳, (复[数]导纳) 导纳模, (导纳) 电纳 [交流]电导	Y Y B G	西[门子]	S	
[直流]功率 [有功]功率	P	瓦[特]	W	
视在功率(表观功率) 无功功率	S, P_s Q, P_Q	伏安	V · A	
功率因数		—	1	
[有功]电能[量]	W	焦[耳] 瓦[特][小]时	J W · h	1kW · h=3.6MJ

表 3.13 光和电磁辐射的量和单位

量的名称	量的符号	单位名称	单位符号	备注
辐[射]能	$Q, W (U, Q_e)$	焦[耳]	J	
辐[射]能密度	$w, (u)$	焦[耳]每立方米	J/m^3	
辐[射]能密度的光谱密集度		焦[耳]每四次方米	J/m^4	在无穷小波长范围内的辐射能密度除以该波长范围
辐[射]功率	$P, (P_e)$	瓦[特]	W	
辐[射]能流率		瓦[特]每平方米	W/m^2	

量的名称	量的符号	单位名称	单位符号	备注
辐[射]强度	$I, (I_e)$	瓦[特]每球面度	W/sr	
辐[射]亮度, 辐射度	$L, (L_e)$	瓦[特]每球面度平方米	$W/(sr \cdot m^2)$	
辐[射]出[射]度	$M, (M_e)$	瓦[特]每平方米	W/m^2	
辐[射]照度	$E, (E_e)$	瓦[特]每平方米	W/m^2	
发光强度	$I, (I_v)$	坎[德拉]	cd	
光通量	$\Phi, (\Phi_v)$	流[明]	lm	$1lm=1cd \cdot sr$
光量	$Q, (Q_v)$	流[明]秒 流[明][小时]	lm · s lm · h	
[光]亮度	$L, (L_v)$	坎[德拉]每平方米	cd/m^2	
光出射度	$M, (M_v)$	流[明]每平方米	lm/m^2	
[光]照度	$E, (E_v)$	勒[克斯]	lx	$1lx=1lm/m^2$
曝光量	H	勒[克斯]秒 勒[克斯][小时]	lx · s lx · h	
折射率	n	—	1	

表 3.14 原子物理学和核物理学的量和单位

量的名称	量的符号	单位名称	单位符号	备注
质子数, 原子序数	Z	—	1	
中子数	N	—	1	
核子数, 质量数	A	—	1	
[核素 X] 原子质量	$m_a m(X)$	千克、	kg	
原子质量常量	$m(Z, A)$ m_u	原子质量单位	u	
电子[静]质量	m_e	千克	kg	
质子[静]质量	m_p	原子质量单位	u	
中子[静]质量	m_n			
元电荷	e	库[仑]	C	一个质子的电荷, 一个电子的电荷等于 -e

量的名称	量的符号	单位名称	单位符号	备注
普朗克常量	h	焦[耳]秒	$J \cdot s$	
玻尔半径	a_0	米	m	$a=4 \quad \eta^2/m_e e^2$
里德伯常量	R	每米	m^{-1}	$R_\infty = \frac{e^2}{8 \quad {}_0 a_0 h c}$
粒子或原子核的 磁矩	μ	安[培]平方米	$A \cdot m^2$	
玻尔磁子	μ_B			
核磁子	μ_N			
核半径	R	米	m	
轨道角动量量子数	l_i, L	—	1	
自旋角动量量子数	s_i, S	—	1	
总角动量量子数	j_i, J	—	1	
核自旋量子数	I	—	1	
主量子数	n	—	1	
磁量子数	m_i, M	—	1	
精细结构常数	a	—	1	$a = \lambda^2 / 4 \quad {}_0 \eta c$
[经典]电子半径	r_e	米	m	
康普顿波长	λ_c	米	m	$\lambda_c = h/mc$
质量过剩		千克	kg	
质量亏损	B	原子质量单位	u	$=m_a - Am_u$
核的结合能	E_B	焦[耳] 电子伏	J eV	通常以电子伏为单位
比结合能		焦[耳] 电子伏	J eV	通常以电子伏为单位
反应能	Q	焦[耳] 电子伏	J eV	通常以电子伏为单位
截面	σ	平方米	m^2	

量的名称	量的符号	单位名称	单位符号	备注
平均寿命	T	秒 分 [小]时 日, (天)	s min h d	也可用年(符号 a)
能级宽度		焦[耳] 电子伏	J eV	通常以电子伏为单位
[放射性]活度	A	贝可[勒尔]	Bq	
质量活度 比活度	a	贝可[勒尔]每千克	Bq/kg	
衰变常量		每秒	s ⁻¹	
半衰期	T _{1/2}	秒 分 [小]时 日, (天)	s min h d	也可用年(符号 a)
比授[予]能 吸收剂量	z D	戈[瑞]	Gy	1Gy=1J/kg
剂量当量	H	希[沃特]	Sv	1Sv=1J/kg
比释动能	K	戈[瑞]	Gy	
照射量	X	库[仑]每千克	C/kg	

七、其他单位制

厘米克秒 (CGS) 制单位

力学中的 CGS 单位是一贯制的, 表 3.15 列出了 CGS 制的基本量和基本单位, 表 3.16 有列出具专门名称的 CGS 制导出单位。

把 CGS 单位制扩大应用到其他科技领域中时, 需要引进相应的基本单位, 借助于一定换算关系与力学的三个基本单位联系起来。例如, 引入温度(热力学温度或摄氏温度)的基本单位, 就可把 CGS 制扩大应用于热力学, 引入发光强度坎德拉, 就可把 CGS 制扩大应用于光学。把 CGS 制应用于电学时, 情况比较复杂, 下面还要专门讲到。在光度学领域中, 有两个具有专门名称和符号的 CGS 制导出单位, 列出表 3.17。

国际计量委员会认为, 在某些专门的科研领域内, 特别是在理论物理学中, 有时有充足的理由使用其他的单位制或单位, 例如 CGS 制单位——但在这种情况下不得与国际单位制具有专门名称的单位一起使用或

混用。

表 3.15 CGS 制基本单位

基本量	基本单位		
	名称	符号	与 SI 单位的换算关系
长度	厘米	cm	10^{-2}m
质量	克	g	10^{-3}kg
时间	秒	s	1s

表 3.16 具有专门名称的 CGS 制导出单位

量	导出单位			
	名称	符号	用基本单位表示的关系式	与 SI 单位的换算关系
力	达因	dyn	$\text{cm} \cdot \text{g} \cdot \text{s}^{-2}$	10^{-5}N
能量	尔格	erg	$\text{cm}^2 \cdot \text{g} \cdot \text{s}^{-2}$	10^{-7}J
[动力]粘度	泊	P	$\text{cm}^{-1} \cdot \text{g} \cdot \text{s}^{-1}$	$0.1\text{Pa} \cdot \text{s}$
运动粘度	斯[托克斯]	St	$\text{cm}^2 \cdot \text{s}^{-1}$	$10^{-4}\text{m}^2/\text{s}$
自由落体加速度	伽	Gal	$\text{cm} \cdot \text{s}^{-2}$	$10^{-2}\text{m}/\text{s}^2$

表 3.17 光度学中具有专门名称的 CGS 制导出单位

量	导出单位			
	名称	符号	用基本单位表示的关系式	与 SI 单位的换算关系
[光]亮度	熙提	sb	$\text{cm}^{-2} \cdot \text{cd}$	$10^4\text{m}^{-2} \cdot \text{cd}$
[光]照度	辐透	ph	$\text{cm}^{-2} \cdot \text{cd} \cdot \text{sr}$	$10^4\text{m}^{-2} \cdot \text{cd} \cdot \text{sr}=10^4\text{lx}/\text{m}^2$

力学中的米千克力秒 ($\text{m} \cdot \text{kgf} \cdot \text{s}$) 制单位

力学中的 $\text{m} \cdot \text{kgf} \cdot \text{s}$ 制，取长度、力和时间为基本量，相应的基本单位为米、千克力和秒。在 SI 和 CGS 制中作为导出量的力或重力，在

$m \cdot \text{kgf} \cdot \text{s}$ 制中成了基本量，因此，这种单位制又称为重力制，习惯上也称为工程单位制。表 3.18 列出了工程单位制的基本量和几个重要的导出量，以及它们的单位和符号。

电磁学中的高斯 (Gauss) 单位制

在电磁学中，存在着不同形式的 CGS 单位制。理论物理学中经常使用的是高斯制，它是在另外两种 CGS 制——绝对静电制和绝对电磁制的基础上发展起来的。

(1) 绝对静电单位制 (CGSE 单位制或 $e \cdot s \cdot u$)，选取长度、质量和时间三个量为基本量，相应的基本单位分别为厘米、克、秒。在这种单位制中，电量的单位是第一个导出单位，它是以真空中的库仑定律

$$F = k \frac{q_1 q_2}{r^2}$$

为定义方程的。在这个方程中，令 $K=1$ ， $q_1=q_2$ ，由此可以确定电量的单位，即两个相等的点电荷在真空中相距 1 厘米、相互作用的静电力为 1 达因时，每个点电荷的电量都是 1CGSE (或 $1e \cdot s \cdot u$)。

在 CGSE 单位制中，电量的量纲式为

$$\begin{aligned} \dim q &= \sqrt{\dim F [\dim r]^2} = \sqrt{(LMT^{-2})(L)^2} \\ &= L^{\frac{3}{2}} M^{\frac{1}{2}} T^{-1}, \end{aligned}$$

电流的量纲式为

$$\dim I = \frac{\dim q}{\dim t} = L^{\frac{3}{2}} M^{\frac{1}{2}} T^{-2}.$$

表 3.18 $m \cdot \text{kgf} \cdot \text{s}$ 制单位

量		单位	与 SI 单位的换算关系
基 本 量	长度	m	1m
	力	kgf	9.80665N
	时间	s	1s
导 出 量	速度	m/s	1m/s
	加速度	m/s ²	1m/s ²
	质量	m ⁻¹ · kgf · s ²	9.80665kg
	力矩	m · kgf	9.80665N · m
	压强	m ⁻² · kgf	9.80665Pa
	[体积]压缩率	m ² · kgf ⁻¹	0.10972Pa ⁻¹
	力, 能	m · kgf	9.80665J
	功率	m · kgf · s ⁻¹	9.80665W
	[动力]粘度	m ⁻² · kgf · s	9.80665Pa · s
	运动粘度	m ² /s	1m ² /s

在 CGSE 制中, 所有电磁学量的单位都没有特别的名称, 一律用 CGSE (或 e . s . u) 来标记。

(2) 绝对电磁单位制 (CGSM 单位制或 e . m . u) 也选取长度、质量、时间三个量为基本量, 相应的基本单位也是厘米、克、秒, 与 CGSE 单位制不同的是它的第一个导出单位是电流的单位, 它的定义方程为真空中两根无限长平行载流导线的相互作用力公式

$$F = k \frac{2I_1 I_2}{a}$$

在方程中令 $k=1$, $I_1=I_2$, 就可以确定电流的单位, 即两根相距 2 厘米的无限长平行细导线通过相等的电流时, 如果每 1 厘米导线长度上受到的力为 1 达因, 则每根导线中通过的电流强度为 1CGSM (或 1e . m . u)。

在 CGSM 单位制中, 电流的量纲为

$$\dim I = \sqrt{\frac{\dim F \cdot \dim a}{\dim l}} = L^{\frac{1}{2}} M^{\frac{1}{2}} T^{-1}.$$

在 CGSM 单位制中电磁学量的单位名称一般都用 CGSM (或 e . m . u), 只有下列几个量的单位具有专门的名称:

磁感应强度 B 的单位——高斯 (Gs 或 G)

磁通量 的单位——麦克斯韦 (Mx)

磁场强度 H 的单位——奥斯特 (Oe)

实验表明, 电流强度的 CGSM 单位在数值上比 CGSE 单位大 2.997925×10^{10} 倍, 换句话说, 对于同一电流, 用 CGSM 单位来量度的数值 I_{CGSM}

只有用CGSE单位来量度的数值 I_{CGSE} 的 $\frac{1}{2.997925 \times 10^{10}}$ 。比较电流在

两种不同单位制中的量纲式可看出，上述关系可以写作

$$I_{CGSM} = \frac{1}{c} I_{CGSE} ,$$

换算关系里的 $c=2.997925 \times 10^{10}$ cm/s，正是真空中电磁波的传播速度。

(3) 在实际应用中，CGSE 制单位只用来量度电学量，CGSM 制单位主要用来量度磁学量。高斯单位制则是在这两种单位制基础上构成的一种混合单位制，它的主要特点如下：

所有的电学量都用 CGSE 制单位量度，所有的磁学量和 CGSM 制单位量度。因此，反映纯粹电现象的公式与它们在 CGSE 单位制中的形式相同，反映纯粹磁现象的公式与它们在 CGSM 单位制中的形式相同。

电容率 和磁导率 μ 都是量纲一的量，真空中的电容率 ϵ_0 和真空中的导率 μ_0 都等于 1。电容率和磁导率没有“相对”、“绝对”之分。高斯单位制中的 ϵ 与 μ 分别和 SI 中的相对电容率 ϵ_r 和相对磁导率 μ_r 数值相同。

由于分别用 CGSE 单位和 CGSM 单位来量度电学量和磁学量，在联系电学量和磁学量的方程中，就会出现两种不同单位制单位之间的换算系数。也就是说，采用高斯单位制，就要将相应单位的换算系数作为公式的固定组成部分保留在公式中。例如，真空中的毕奥-萨伐尔定律在 CGSM 单位制中的形式是

$$dB_{CGSM} = \frac{I_{CGSM} dl \sin \theta}{r^2}$$

但在高斯单位制中，上式中的电流要用 CGSE 单位来量度，因而毕奥-萨伐尔定律的形式就变为

$$dB_{CGSM} = \frac{1}{c} \frac{I_{CGSE} dl \sin \theta}{r^2}$$

电磁学中的三量纲方程系和四量纲方程系

有三个基本量的高斯单位制和有四个基本量的 MKSA 制(是国际单位制的分单位制) 分别与电磁学领域中的两个不同的方程系相对应。这两个方程系分别称为三量纲方程系和四量纲方程系。表 3.20 列出了两个方程系中一些常用方程的对照表3.21 列出了由一个方程系变换到另一方程系时方程中各个量的变换关系。

表 3.19 高斯单位制中电磁学量的量纲、单位及其与 SI 的比较

物理量	SI		高斯制		
	量纲	单位	量纲	单位	与 SI 单位和换算关系
电流 I	I	A	$L^{\frac{3}{2}}M^{\frac{1}{2}}T^{-2}$	CGSE	$3.33564 \times 10^{-1}A$
电荷 Q	TI	C	$L^{\frac{3}{2}}M^{\frac{1}{2}}T^{-1}$	CGSE	$3.33564 \times 10^{-10}C$
电场强度 E	$LMT^{-3}T^{-1}$	V/m	$L^{-\frac{1}{2}}M^{\frac{1}{2}}T^{-1}$	CGSE	$2.997925 \times 10^4 V/m$
电势 U	$L^2MT^{-3}I^{-1}$	V	$L^{\frac{1}{2}}M^{\frac{1}{2}}T^{-1}$	CGSE	$2.997925 \times 10^2 V$
电通密度 D	$L^{-2}TI$	C/m ²	$L^{-\frac{1}{2}}M^{\frac{1}{2}}T^{-1}$	CGSE	$2.65442 \times 10^{-7}/m^2$
电通量	TI	C	$L^{\frac{3}{2}}M^{\frac{1}{2}}T^{-1}$	CGSE	$2.65442 \times 10^{-11}C$
电容 C	$L^{-2}M^{-1}T^4I^2$	F	L	CGSE	$1.11265 \times 10^{-12}F$
介电常数	$L^{-3}M^{-1}T^4I^2$	F/m	1	1	
相对介电常数 ϵ_r	1	1			
电极化强度 P	$L^{-2}TI$	C/m ²	$L^{-\frac{1}{2}}M^{\frac{1}{2}}T^{-1}$	CGSE	$3.33564 \times 10^{-6}C/m^2$
磁场强度 H	$L^{-4}I$	A/m	$L^{-\frac{1}{2}}M^{\frac{1}{2}}T^{-1}$	Oe	$79.5775A/m$
磁通密度 B	$MT^{-2}I^{-1}$	T	$L^{-\frac{1}{2}}M^{\frac{1}{2}}T^{-1}$	Gs	$10^{-4}T$
磁通	$L^2MT^{-2}I^{-1}$	Wb	$L^{\frac{3}{2}}M^{\frac{1}{2}}T^{-1}$	Mx	$10^{-8}Wb$
自感 L , 互感 M	$L^2MT^{-2}I^{-2}$	H	$L^{-1}T^2$	CGSE1 (Gauss 制)	$8.98755 \times 10^{11}H$
磁化强度 M	$L^{-1}I$	A/m	$L^{-\frac{1}{2}}M^{\frac{1}{2}}T^{-1}$	$\frac{1}{4\pi}Gs$	$10^3A/m$
磁导率 μ	$LMT^{-2}I^{-2}$	H/m	1	1	
相对磁导率 μ_r	1	1			
电阻 R	$L^2MT^{-3}I^{-2}$		$L^{-1}T$	CGSE	8.98755×10^{11}

由于电感是通过感生电压 $V = L \frac{dI}{dt}$ 或能量 $W = \frac{1}{2} LI^2$ 来定义的，高

斯制电感单位在数值上和量纲 ($L^{-1}T^2$) 上都等于静电制电感单位。但是,有些书籍采用修正的高斯单位制,在这种单位制中,电流是用电磁单位来量度的。如果用电磁制单位量度的电流值用 I_m 表示,用高斯制单位量度的电流值用 I 表示,通过用能量定义的电感可以看出,电磁制电感 L_m 与高斯制电感 L 之间有 $L_m=c^2L$ 的关系。所以 L_m 具有长度的量纲 (L)。修正的高斯制通常采用电磁制电感单位和电流单位,因此电压

的关系式为 $V = \frac{L_m}{c} \frac{dI_m}{dt}$ 。电感单位之间的数值关系为

$$1H = \frac{1}{8.98755 \times 10^{11}} \text{CGSE单位 (高斯制)} = 10^9 \text{GSCM单位}$$

要想把高斯制中的任何方程换成 MKSA 制的对应方程,只须把方程中各量的符号换成表 3.21 中对应的 MKSA 制的对应符号即可。这个表也可以反过来使用。因为在方程变换中长度和时间的符号是不变的,表中把那些在量纲上只相差长度和 (或) 时间的乘幂的量放在一起。

表 3.20 三量纲方程系和四量纲方程系的对照

三量纲方程系	四量纲方程系
$\text{rot}E^* = -\partial B^*/\partial t$	$\text{rot}E = \partial B/\partial t$
$\text{div}D^* = 4 \quad *$	$\text{div}D =$
$\text{div}B^* = 0$	$\text{div}B = 0$
$\text{rot}H^* = 4 \quad J^* + \partial D^*/\partial t$	$\text{rot}H = J + \partial D/\partial t$
$F = Q^*E^* + Q^* \times B^*/c$	$F = QE + Q \times B$
$= (E^* \cdot D^* + B^* \cdot H^*)/8$	$= (E \cdot D + B \cdot H)/2$
$S = c(E^* \times H^*)/4$	$S = E \times H$
${}_rE^* = D^*$	${}_0{}_rE = E = D$
$E^* = D^* - 4 \quad P^*$	$E = D - P$
$B^* = \mu {}_rH^*$	$B = \mu H = \mu_0 \mu {}_rH$
$B^* = H^* + 4 \quad M^*$	$B = \mu_0(H+M)$

表 3.21 方程变换时各对应量的变换关系

物理量	高斯制	MKSA 制
光速	c	$(\mu_0 \epsilon_0)^{-\frac{1}{2}}$
电场强度(电势, 电压)	$E^* (\text{ * }, V^*)$	$(4\pi \epsilon_0)^{\frac{1}{2}} E (\text{ * }, V)$
电位移矢量	D^*	$(\frac{4\pi}{\epsilon_0})^{\frac{1}{2}} D$
电极化率	X^*	$(4\pi)^{-1} X$
电荷密度 (电荷, 电流密度, 电流, 电极化强度)	$* (q^*, J^*, I^*, p)$	$(4\pi \epsilon_0)^{\frac{1}{2}} (q, j, I, p)$
磁感应强度	$B^* (\text{ * })$	$(4\pi / \mu_0)^{\frac{1}{2}} B (\text{ * })$
磁场强度	H^*	$(4\pi \mu_0)^{\frac{1}{2}} H$
磁化率	k^*	$(4\pi)^{-1} k$
磁化强度	M^*	$(\mu_0 / 4\pi)^{\frac{1}{2}} M$
电导率(电容)	$*(C^*)$	$(4\pi \epsilon_0)^{-1} (C)$
介电常数	$*$	ϵ / ϵ_0
磁导率	μ^*	μ / μ_0
电阻(阻抗)	$R^*(Z^*)$	$4\pi \epsilon_0 R(Z)$
电感	L^*	$4\pi \epsilon_0 L$

自然单位制

在粒子物理学中常用的一种单位制，由于粒子物理理论是相对论性的量子理论，真空中的光速 c 和朗克常量 \hbar 是两个经常出现的常量，如果选用一种单位制，使

$$c = \hbar = 1,$$

将使粒子物理学中的公式大为简化，而且长度和时间都具有质量倒的数量纲，能量和动量具有质量的量纲，角动量和电荷则成为量纲一的量。在这样的单位制里，只有一种独立的基本量，相应地也只有一种基本单位，这就叫自然单位制。

英制单位

当然，在满足 $c = \hbar = 1$ 的条件下，还须选定基本量和基本单位，单位制才能完全确定。在粒子物理学中，根据实际需要，常选择能量为基本

量, MeV 或 GeV 为基本单位, 也可以选用某种粒子(如质子)的质量为基本单位, 这时相应的长度单位就是该种粒子的康普顿波长, 相应的时间单位就是光通过上述单位长度所需的时间。

在自然单位制中, 并不失去任何关于量的纲的信息。只要把 c , \hbar 的适当组合放进去, 就可以化成通常的单位制; 在通常的单位制中取 $c = \hbar = 1$, 就可以得到自然单位制。

还可以采用一种普遍的自然单位制, 其中规定真空中的光速 c 、普朗克常量 \hbar 、玻耳兹曼常量 k 和牛顿引力常量 G 都等于 1, 这时, 所有的物理量都成为量纲一的量了。

表 3.22 英制单位与 SI 单位的换算关系

物理量名称	单位名称	单位符号	与 SI 单位的换算关系
长度	码	yd	0.9144m
	英尺	ft	0.3048m
	英寸	in	0.0254m
	英里	mile	1609.344m
面积	平方码	yd ²	0.836127m ²
	平方英尺	ft ²	0.092903m ²
	平方英寸	in ²	6.4516cm ²
容积	立方码	yd ³	0.764555m ³
	立方英尺	ft ³	28.31685dm ³
	立方英寸	in ³	16.3871cm ³
	蒲式耳(英)	bu(UK)	36.3687dm ³
	加仑(英)	gal(UK)	4.54609dm ³
	品脱(英)	Pt(UK)	0.568261dm ³
	液盎司(英)	fl . oz(UK)	28.4131cm ³
	加仑(美)	gal(US)	3.78541dm ³
	液品脱(美)	liq Pt(US)	0473176dm ³

物理量名称	单位名称	单位符号	与 SI 单位的换算关系
	液盎司(美)	floz(US)	29.5735cm ³
	(石油)桶(美)	—	158.987dm ³
	蒲式耳(美)	bu(US)	35.2390dm ³
	干品脱(美)	drypt(US)	0.550610dm ³
	干桶(美)	bbl(US)	115.627dm ³
速度	英尺每秒	ft/s	0.3048m/s
	英里每小时	mile/h	0.44704m/s
加速度	英尺每二次方秒	ft/s ²	0.3048m/s ²
质量	磅	lb	0.45359237kg
	盎司	oz	28.3495g
	格令	gr	64.79891mg
	英担(英国)	cwt	50.80235kg
	英担(美国)	cwt	45.359237kg
	英吨(英国)		1016.05kg
	英吨(美国)		907.185kg
	金衡盎司 (脱来盎司)		31.1035g
密度	磅每立方英尺	lb/ft ³	16.0185kg/m ³
力	磅力	lbf	4.44822N
力矩	英尺磅力	ft · lbf	1.35582N · m
压力	磅力每平方英寸	lbf/in ²	6894.76Pa
运动粘度	二次方英尺每秒	ft ² /s	0.0929030m ² /s
能[量]	英尺磅力	ft · lbf	1.35582J
功率	英尺磅力每秒	ft · lbf/s	1.35582W
	马力(英)	hp	745.700W
温度	兰氏度(绝对温度)	° R	$\frac{5}{9}K$
	华氏度	° F	$\frac{5}{9}K$ $\frac{5}{9}$
热	英制热单位	Btu	0.293071W
热导率(导热系数)	英制热单位每秒英尺兰氏度	Btu/(s · ft · ° R)	6230.64W/(m · K)
传热系数	英制热单位每秒平方英尺兰氏度	Btu/s · ft · ° R)	20441.7W/(m ² · K)

物理量名称	单位名称	单位符号	与 SI 单位的换算关系
扩散系数	平方英尺每秒	ft ² /s	0.092903m ² /s
比热容	英制热单位每磅兰氏度	Btu/(lb · ° R)	4186.8J/(kg · K)
比熵	英制热单位每磅兰氏度	Btu/(lb · ° R)	4186.8J/(kg · K)
比能	英制热单位每磅	Btu/lb	2326J/lg

市制单位

我国民间习用的计量单位制，现已废止不用。市制单位及其与 SI 单位间的换算关系如下表：

表 3.23 市制单位及其与 SI 单位的换算关系

量	单位名称	与 SI 单位的换算关系
长度	[市]里 (=15 引)	1 里=500m
	引 (=10 丈)	$1 \text{引} = \frac{100}{3} \text{m} = 33.3 \text{m}$
	丈 (=10 尺)	$1 \text{丈} = \frac{10}{3} \text{m} = 3. \dot{3} \text{m}$
	尺 (=10 寸)	$1 \text{尺} = \frac{1}{3} \text{m} = 0. \dot{3} \text{m}$
	寸 (=10 分)	$1 \text{寸} = \frac{1}{30} \text{m} = 0.0 \dot{3} \text{m} = 3. \dot{3} \text{cm}$
	分 (=10 厘)	$1 \text{分} = \frac{1}{300} \text{m} = 0.00 \dot{3} \text{m} = 0. \dot{3} \text{cm}$
	厘 (=10 毫)	$1 \text{厘} = \frac{1}{3000} \text{m} = 0.000 \dot{3} \text{m} = 0.0 \dot{3} \text{cm}$
	毫	$1 \text{毫} = \frac{1}{30000} \text{m} = 0.0000 \dot{3} \text{m} = 0.00 \dot{3} \text{cm}$
面 (地) 积	顷 (=100 亩)	$1 \text{顷} = 1000000 / 15 \text{m}^2 = 666666. \dot{6} \text{m}^2$
	亩 (=10 分)	$1 \text{亩} = 10000 / 15 \text{m}^2 = 666. \dot{6} \text{m}^2$
	分 (=10 厘)	$1 \text{分} = 1000 / 15 \text{m}^2 = 66. \dot{6} \text{m}^2$
	厘 (=10 毫)	$1 \text{厘} = 100 / 15 \text{m}^2 = 6. \dot{6} \text{m}^2$
容积	石 (=10 斗)	1 石=100L
	斗 (=10 升)	1 斗=10L
	升 (=10 合)	1 升=1L
	合	1 合=0.1L

量	单位名称	与 SI 单位的换算关系
质量	担 (=100 斤)	1 担=50kg
	斤 (=10 两)	1 斤=0.5kg
	两 (=10 钱)	1 两=0.05kg
	钱 (= 10 分)	1 钱=0.005kg=5g
	分 (=10 厘)	1 分=0.0005kg=0.5g
	厘 (=10 毫)	1 厘=0.00005kg=0.05g
	毫 (= 10 丝)	1 毫=0.000005kg=0.005g=5mg
	丝	1 丝=0.0000005kg=0.0005g=0.5mg

注：1. 市制面积单位也可用平方寸、平方尺、平方丈、平方里等。
市制体积单位也可用立方寸、立方尺、立方丈等。

2. 市制容积单位中还有勺和撮，用于计量液体和散粒。

$$1 \text{ 勺} = \frac{1}{100} \text{ 升}, \quad 1 \text{ 撮} = \frac{1}{1000} \text{ 升}$$

八、常用单位的换算

表 3.24 角单位换算关系

	rad	(°)	(′)	(″)	gon
1rad=	1	57.3	3.44×10^3	2.06×10^5	63.7
1°=	1.75×10^{-2}	1	60	3.6×10^3	1.11
1′=	2.91×10^{-4}	1.67×10^{-2}	1	60	1.85×10^{-2}
1″=	4.848×10^{-6}	2.78×10^{-4}	1.67×10^{-2}	1	3.09×10^{-4}
1gon=	1.57×10^{-2}	0.9	54	3.24×10^3	1

表 3.25 力的单位换算关系

	N	dyn	kgf	blf
1N=	1	10^5	0.101972	0.224809
1dyn=	10^{-5}	1	1.01972×10^{-6}	2.24809×10^{-6}
1kgf=	9.80665	9.80661×10^5	1	2.20462
1blf=	4.44822	4.44822×10^5	0.453592	1

表 3.26 压强单位换算关系

	Pa	dyn/cm ²	bar	atm	kgf/cm ²	mmHg	1bf/in ²
帕斯卡	1	10	1×10^{-5}	9.86923×10^{-6}	1.01972×10^{-5}	7.50062×10^{-3}	1.45038×10^{-4}
达因每平方厘米	0.1	1	1×10^{-6}	9.86923×10^{-7}	1.01972×10^{-6}	7.50062×10^{-4}	1.45038×10^{-5}
巴	1×10^5	1×10^6	1	0.986923	1.01972	750.062	14.5038
标准大气压	101325.0	1013250	1.0325	1	1.03323	760	14.6959
千克力每平方厘米	98066.5	980665	0.980665	0.967841	1	735.559	14.2233
毫米汞柱(托)	133.322	1333.32	0.00133332	1.31579×10^{-3}	1.35951×10^{-3}	1	0.0193368
磅力每平方英寸	6894.76	68947.6	0.0689476	0.0680460	0.0703070	51.7149	1

表 3.27 功、能、热量单位换算关系

	J	kW · h	erg	kfg · m	米制马力小时
焦耳	1	2.77778×10^{-7}	10^7	0.101972	3.7767×10^{-7}
千瓦小时	3.6×10^6	1	3.6×10^{13}	3.67098×10^5	1.3597
尔格	10^{-7}	2.7778×10^{14}	1	1.0197×10^{-8}	3.7767×10^{14}
千克力米	9.80665	2.72407×10^{-6}	9.80665×10^7	1	3.7040×10^6
米制马力小时	2.64779×10^6	0.73550	2.64779×10^{13}	2.70000×10^5	1
英尺磅力	1.35582	3.76616×10^{-7}	1.35582×10^7	0.138255	5.1205×10^{-7}
升大气压	101.325	2.81458×10^{-5}	101325×10^9	10.3324	3.8267×10^{-7}
卡	4.1868	1.1630×10^{-6}	4.1868×10^7	0.42694	1.5812×10^{-6}
英热单位	1055.06	2.93071×10^{-4}	1.0506×10^{10}	107.587	3.9846×10^{-4}

	ft · lbf	L · atm	cal	Btu
焦耳	0.737562	9.86923×10^{-3}	0.238846	9.47817×10^{-4}
千瓦小时	2.65522×10^6	3.55292×10^4	859845	3412.14
尔格	7.37562×10^{-8}	0.9869×10^{-9}	2.3884×10^{-8}	9.47817×10^{-11}
千克力米	7.23301	0.0967841	2.34228	9.29491×10^{-3}
米制马力小时	1.95291×10^6	2.6131×10^4	6.3241×10^5	2.50962×10^3
英尺磅力	1	1.33809×10^{-2}	0.323832	1.28507×10^{-3}
升大气压	74.7335	1	24.201	9.60376×10^{-2}
卡	3.08802	0.041321	1	3.96832×10^{-3}
英热单位	778.169	10.4126	251.996	1

表 3.28 功率单位换算关系

	W	erg/s	kfg · m/s	米制马力	ft · lbf/s
瓦特	1	10^7	0.101972	1.35962×10^{-3}	0.737562
尔格每秒	10^{-7}	1	1.01972×10^{-8}	1.35962×10^{-10}	7.37562×10^{-8}
千克力米每秒	9.80665	9.80665×10^7	1	0.0133333	7.23301
米制马力	735.499	7.35499×10^9	75	1	542.476

	W	erg/s	kfg · m/s	米制马力	ft · lbf/s
英尺磅力每秒	1.35582	1.35582×10^7	0.138255	1.84340×10^{-3}	1
升大气压每小时	2.81458×10^{-2}	2.81458×10^5	2.8701×10^{-3}	3.8267×10^{-5}	0.20760
卡每秒	4.1868	4.1868×10^7	0.426935	5.69246×10^{-3}	3.08803
千卡每小时	1.163	1.163×10^7	0.118593	1.58124×10^{-3}	0.857185
英热单位每小时	0.293071	2.93071×10^6	2.98849×10^{-2}	3.98466×10^{-4}	0.216158

	L · atm/h	cal/s	kcal/h	Btu/h
瓦特	35.529	0.238846	0.859846	3.41214
尔格每秒	3.5529×10^{-6}	2.38846×10^{-8}	8.59845×10^{-8}	3.41214×10^{-7}
千克米每秒	348.42	2.34228	8.43220	33.4617
米制马力	2.613×10^4	175.671	632.415	2509.63
英尺磅力每秒	48.172	0.323832	1.16579	4.62624
升大气压每小时	1	6.7225×10^{-3}	2.4201×10^{-2}	9.60376×10^{-2}
卡每秒	148.7556	1	3.6	14.2860
千卡每小时	41.321	0.277778	1	3.96832
英热单位每小时	10.4126	6.99988×10^{-2}	0.251996	1

表 3.29 不同温标间的换算关系

单位	K		t _R	° F	° R
开尔文 T _K	T _K	T _K -273.15	0.8 (T _K -273.15)	1.80 (T _K -273.15) +32	1.80T _K
摄氏度 t _C	t _C +273.15	t _C	0.8t _C	1.80t _C +32	1.80t _C +491.67
列氏度 t _R	1.25t _R +273.15	1.25t _R	t _R	2.25t _R +32	2.25t _R +491.67
华氏度 t _F	0.5556(t _F -32)+273.15	0.5556(t _F -32)	0.444(t _F -32)	t _F	t _F +459.67
兰氏度 T _R	0.5556T _R	0.5556(T _R -491.67)	0.444T _R -491.67	T _R -459.67	T _R

主要参考资料

1. 中华人民共和国国家标准 量和单位 (GB3100~3102—93)。第 1 版。北京：中国标准出版社，1994。

2. 伊里奇·萨依然。国际单位制简介。第1版。北京：计量出版社，1983。
3. 杜荷聪、王启尧。国际单位制的实际应用。第1版。北京：计量出版社，1983。
4. 杜荷聪，陈维新，张振威。计量单位及其换算。第1版，北京：计量出版社，1983。
5. 国际纯粹和应用物理学协会符号、单位和术语委员分。物理学中的符号单位和术语。邓熙存，第1版。北京：科学出版社，1982。
6. 赵凯华，陈熙谋，电磁学（下册），第357~379页。第1版。北京：人民教育出版社，1978。
7. [美] J. O. 杰克逊。经典动力学（下册）第410~421页。朱培豫。第1版。北京：人民教育出版社，1980。
8. 李慎安，陈维新。法定计量单位实用指南。第1版。北京：中国计量出版社，1986。
9. 李政道，场论与粒子物理学（上册），第3页。第1版，北京：科学出版社，1980。
10. 高崇寿、曾谨言，粒子物理与核物理讲座，第6~8页。第1版，北京：高等教育出版社，1990。
11. 科学出版社名词室，物理学词典（下册），第1版。北京：科学出版社，1988。
12. 中国大百科全书出版社：《中国大百科全书·物理学·II》第1276~1277页。
13. 黄文照。中外计量换算手册第1~22页。第1版。北京：中国对外经济贸易出版社，1986。
14. 李慎安，科技计量单位新词典。第1版。北京：机械工业出版社，1990。

第四编

常用与数据

目录

一、基本物理常量	835
常用基本物理常量的 1986 年推荐值	853
二、力学	854
一些物体的质量	854
一些物体的直径	854

有关厚度和长度或距离的数据	854
有关高度和深度的数据	855
一些过程所需时间的数量级	855
一些元素的密度	856
一些固体的密度	856
一些液体的密度	856
在 101KPa 下，不同温度时水的密度	858
不同温度时水银的密度	859
一些气体及其液体和固体的密度	859
一些城市的重力加速度	859
不同纬度海平面的重力加速度和秒摆的长度	860
有关压强的一些数据	861
大气压强、温度与海拔高度的关系	861
几种液压泵的压强	862
一些物体的运动速率	863
一些交通工具的速率	863
风力等级表	863
一些物体和机械的转速	865
常用材料的极限强度	865
常用材料的弹性模量	865
一些材料的摩擦因数	867
零件的摩擦因数	867
材料的滚动摩擦因数	867
滚动阻力因数	867
拖拉机在道路上的滚动阻力因数	867
各种汽车的空气阻力因数	867
常用润滑油的主要性质和用途	868
常用润滑脂的主要性质和用途	868
一些自然现象和技术装置的功率	869
一些机械设备的功率	869
某些过程、装置、机器、电站的效率	870
机械传动的效率概略值	870
有关载货汽车的数据	871
各类汽车的类别代号	871
有关越野汽车的数据	872
有关客车的数据	872
有关轿车的数据	872

我国主型蒸汽机车的主要技术数据	873
几种国产内燃机车的概况	873
大功率硅整流器电力机车主要参数	873
一些运载工具的重量	874
国产普通货船的主要数据	874
国产散装货船的主要数据	874
国产拖船的主要数据	875
国产集装箱船主要数据	875
国产客船的主要数据	876
有关能量的一些数据	876
太阳的一些基本数据	876
太阳系行星的物理参数	877
太阳系行星轨道要素	877
月球的一些基本数据	877
地球的一些基本数据	878
二十四节气表	878
震级与所释放的地震波能量的关系	879
震中烈度与震级和震源深度的关系	879
地震烈度及标志	879
1970 年以来我国发射入轨的 39 颗人造卫星	880
航天器的分类	882
通信卫星的种类和用途	883
1957 ~ 1993 宇航大事记	883
三、声学	888
固体和液体中的声速	888
在 0 气体和蒸汽中的声速	888
人和一些动物的发声频率范围和听觉频率范围	889
纯音听阈	889
现代生活中的声强和声压级的范围	889
由于年龄引起的听力损失	890
噪声性耳聋发病率	890
住宅区噪声容许标准 (A 声级)	891
不同地区噪声容许标准 (A 声级)	891
非住宅区的室内噪声 A 声级容许标准	891
北京部分剧院、礼堂、播音室的声学特性	891
常用建筑材料和用具类吸声系数表 (混响室值)	892
某些材料的吸声系数表 (驻波管值)	892

各种构件的隔声量	892
四、分子物理学和热学	894
常用工业温度计的测温范围	894
玻璃温度计不同感温液体的测量范围	894
玻璃温度计示值误差 ()	894
常用热塑性塑料的热变形温度	895
常用橡胶的热性能	895
一些物质的自燃点	896
固体的比热容 (300K)	896
液体的比热容 (300K)	897
气体的质量定压热容和质量定容热容	897
一些燃料的燃烧值	898
在 101KPa 下, 一些物质的熔点和沸点	898
在 101KPa 下, 一些物质的熔化热	899
在 101PPa 下, 一些物质的汽化热	899
水在不同压强下的沸点	900
水在不同温度下的汽化热	900
1987 年我国规定的电冰箱指标	900
某些国产电冰箱技术参数	901
一些物质的临界温度和临界压强	901
不同温度下饱和水蒸气的压强和密度	901
几种物质三相点的温度与压强	902
空气的相对湿度	902
某些国产空调器的技术参数	903
几种制冷剂的物理性质	904
物质的热导率 (常温下)	905
固体的线胀系数 (0 ~ 100 范围内的平均值)	906
水和冰的体胀系数和温度的关系	906
气体的体胀系数和相对压力系数 (0 , 101KPa)	906
晶系与布喇菲格子	907
气体和蒸气分子的一些数据	908
0 时氧气分子的速率分布 (根据麦克斯韦速率分布律) ..	908
液体的等温压缩率	909
气体压强与体积的系	909
一些物质的粘度 (101KPa, 20)	909
水在不同温度下的粘度	910
空气在不同温度下的粘度 (101KPa)	910

液体的表面张力 (20)	910
不同温度下水和酒精的表面张力	910
五、电磁学	912
静电的摩擦次序	912
有关雷电的参考数据	912
有关电压的一些数据	913
有关电流的一些数据	913
某些电器设备的功率	913
由某些元素、合金与铅组成的温差电偶的温差电动势	913
几种常用温差电偶	914
金属元素的电势序	914
几种伽伐尼电池的材料及电动势	915
国产干电池特性	916
国产钮扣电池的常见规格	916
几种国产密封圆柱镉—镍电池 (电动势为 1.2V)	917
硅太阳电池	917
氧化银电池 (平均工作电压 1.4V ~ 1.5V)	918
锂电池	918
金属电阻率及其温度系数	919
合金的电阻率及其温度系数	919
绝缘体的电阻率	920
金属超导体的临界温度	921
几种常用电器的电阻	921
电解液的电导率	921
常用国产半导体热敏电阻器型号、规格表 (一)	922
常用国产半导体热敏电阻器型号、规格表 (二)	922
常用国产半导体热敏电阻器型号、规格表 (三)	922
电介质的击穿场强	923
绝缘材料的耐热等级	923
铁磁质的相对磁导率	923
某些磁场的磁感应强度	924
常用永磁材料部分品种的磁性能	924
几种铁磁质的居里温度	925
国产汽轮发电机	925
我国一些大的火电站数据	926
各种电站的效率	926
生产 1KW · h 电能平均消耗的能量	926

我国一些大的水电站数据	926
几种 J 系列异步电动机的技术数据	926
几种 JQ2 系列电动机的技术数据	927
电风扇的风量与输入功率	927
圆型保险丝的规格	927
绝缘导线明设时的安全载流量	928
电烙铁电热元件技术数据	928
日用电炉电热丝技术数据	929
普通照明灯泡及局部照明灯泡的技术参数	930
直管形荧光灯的技术参数	930
常用荧光粉的性质	930
碘钨灯的技术参数	931
管型氙灯灯管的技术参数	931
紫外线杀菌灯的技术参数	932
黑光灯的技术参数	932
霓虹灯的颜色	932
电阻器、电位器和电容器型号组成、符号及意义	933
电阻阻值的色圈表示法	933
半导体器件型号组成部分的符号及其意义	936
常用硅稳压二极管主要参数	937
常用检波二极管的主要参数	937
常用整流二极管的主要参数	938
3AX 型低频小功率锗管部分型号和主要参数	938
3DX 型低频小功率硅管部分型号和主要参数	939
3AG 型高频小功率锗管部分型号和主要参数	940
半导体集成电路型号的组成及其意义	940
半导体集成电路管脚排列次序	941
收音机六项主要技术指标	941
国产常用电动式扬声器主要参数	942
国产大口径电动式纸盆扬声器主要参数	943
常用组合扬声器主要参数	943
扬声器额定功率时所承受的电压	944
常用输入变压器型号及参数	944
常用晶体管收音机输出变压器型号及参数	945
电动式耳机特性	945
全国主要中波电台频率	946
波段频率分配表	947

我国电视频道的划分	947
国产黑白电视机显像管的主要性能	949
常用彩色显像管的主要参数	950
部分国产示波管参数	951
常用示波管的特性	951
微波加热和干燥的微波频段	951
微波对生物体的主要效应	952
微波辐射对人体各器官的影响	952
人体对微波辐射的耐受能力	953
国产大型电子显微镜的技术数据	954
六、光学	956
不同色光波长和频率的范围	956
某些光源的光亮度近似值	956
某些场合下光照度的值	956
金属的反射率	957
金属薄膜的反射率	958
合金的反射率	958
一些物质表面的反射率	959
透明固体的折射率和临界角	960
熔凝石英的折射率 (20)	960
硅的折射率 (26)	960
几种常用无色光学玻璃的折射率	961
某些单轴双折射晶体的折射率 (钠光, $\lambda=589.3\text{nm}$)	961
纯水、乙醇和二硫化碳的折射率 (相对于空气)	
(钠光, $\lambda=589.3\text{nm}$)	962
液体的折射率 (20)	963
水溶液的折射率 ($\lambda=589.3\text{nm}$)	963
空气的折射率 (0 , 101325Pa)	963
各种气体的折射率 ($t=0$, $p=101325\text{Pa}$, $\lambda=589.3\text{nm}$)	964
玻璃的透射率 (厚度 1cm)	964
石英对紫外线的透射率 (厚度 1mm)	964
岩盐、钾盐、萤石对红外线的透射率 (厚度 1cm)	965
气体的吸收系数 (0 1.01325 $\times 10^5\text{Pa}$)	965
功函数	966
常用光阴极材料特性	966
各种光敏电阻的特性	967
三种光纤的主要区别	967

几种光纤的脉冲展宽	968
光纤通信系统分类	968
常用波长表 (夫琅和费线)	969
七、原子和原子核	970
基态原子的电子组态	970
原子半径	973
常用激光器波长	974
染料激光器波长	974
人工放射性镧系的衰变历程	976
天然放射性钍系的衰变历程	976
天然放射性铀系的衰变历程	976
天然放射性锕系的衰变历程	978
不成系列的天然长寿命放射性核素	979
各种电阻器的性能比较和适应范围	934
根据用途来选择固定电容器参考表	934
宇宙射线产生的放射性核素	979
可用作电池燃料的放射性核素及其特性	980
粒子在空气、生物组织和铝中的射程	980
料子在空气、生物组织和铝中的射程	980
几种常材料对射线的线吸收系数	980
按入射粒子分类的核反应	981
中子能量、速度、温度和波长的关系	982
热中子的能量和速度	983
^{235}U 的某些裂变产物的裂变产额 (热中子裂变)	983
某些重核裂变时释放的能量及其分配	983
裂变的临界能量	984
天然铀的同位素成分	984
不同核炸药在不 ^{238}U 中子反射层时的临界半径和临界质量	984
电功率 1000MW 的几种动力反应堆特性	984
某些核反应的反应能	985
恒星内部主要的核聚变反应阶段	986
超铀元素的发现	986
世界上主要的高能质子加速器	987
世界上主要的高能电子加速器	988
世界上已有的和正建设中的一些对撞机	988
八十年代我国建成的三台大型加速器	988
核素表	989

稳定粒子性质表	996
辐射全身急性照射可能产生的效应	1000
来自天然辐射的年平均全身剂量（美国）	1000
我国辐射防护规定对个人剂量的限制	1000
八、其他	1002
太阳分层结构	1002
地球内部分层结构	1002
1995 ~ 2020 年我国能见到的日食（23 次）	1003
1995 ~ 2020 年我国能见到的月食	1004
化学元素名称及相对原子质量	1005
大气成分	1008
地壳成分	1009
气象数据随纬度的变化	1009
一些液体的 PH 近似值	1011
合金钢	1011
钴和镍的合金	1011
锡和铅的合金	1012
金、银、铜的合金	1012
某些化学药品、高分子聚合物的俗名、学名对照表	1012
名对照表	1012
莫氏（F.Mohs）硬度计	1013
附录常用数学公式	1014

一、基本物理常用量

常用基本物理常量的 1986 年推荐值

物理量和符号	数值	单位
真空中光速 c	299 792 458	$\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$
真空磁导率 μ_0	4×10^{-7}	$\text{N} \cdot \text{A}^{-2}$
真空电容率 ϵ_0	$=12.566\ 370\ 614 \dots$	$\times 10^7 \text{N} \cdot \text{A}^{-2}$
引力常量 G	8.854 187 817 ...	$10^{-12} \text{F} \cdot \text{m}^{-1}$
普朗克常量 h	6.672 59(85)	$10^{-11} \text{m}^3 \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{s}^{-2}$
[基]元电荷 e	6.626 0755(40)	$10^{-24} \text{J} \cdot \text{T}^{-1}$
玻尔磁子 μ_B	1.602 77 33(49)	m^{-1}
里德伯常量 R	9.274 015 4(31)	10^{-10}m
玻尔半径 a_0	10 973 731 .534(13)	10^{-31}kg
电子质量 m_e	0.529 177 249(24)	10^{-4}u
电子比荷 $\{ e \} / m_e$	9.109 3897(54)	$10^{11} \text{C} \cdot \text{kg}^{-1}$
经典电子半径 r_e	$=5.485799\ 03(13)$	10^{-15}m
质子质量 m_p	-1.758 819 62(53)	10^{-27}kg
阿伏伽德罗常量 N_A, L	2.817 940 92(38)	u
原子质量常量 m_u	1.672 623 1(10)	10^{-27}kg
气体常量 R	1.007 276 470(12)	u
玻尔兹曼常量 k	1.674 928 6(10)	10^{23}mol^{-1}
摩尔体积 (理相气体) V_m	1.008 664 904(14)	10^{-27}kg
$T=273.15\text{K}; p=101325\text{Pa}$	6.022 1367(36)	$\text{J} \cdot \text{mol}^{-1} \text{K}^{-2}$
洛施特常量 n_0	1.660 5402(10)	$10^{-23} \text{J} \cdot \text{K}^{-1}$
	8.314510(70)	$\text{l} \cdot \text{mol}^{-1}$
	1.380 658(12)	10^{25}m^{-3}
	22.41410(19)	
	2.686763(23)	

注：表中括号内的数字是给定值最后几位数的一个标准偏差的不确定度。

二、力 学

一些物体的质量 m/kg

电子	9.109×10^{-31}
质子	1.672×10^{-27}
尘埃微粒	6.7×10^{-27}
蜜蜂翅膀	10^{-7}
大头针	8.0×10^{-5}
乒乓球	$(2.40 \sim 2.53) \times 10^{-3}$
53 式步枪子弹弹头 :曳光弹	9.5×10^{-3}
尖弹	11.8×10^{-3}
足球	$(396 \sim 453) \times 10^{-3}$
排球	$(260 \sim 280) \times 10^{-3}$
篮球	$(567 \sim 650) \times 10^{-3}$
铅球 (男子)	7.26
(女子)	4
降落伞	16
象	6.0×10^3
大型机动艇	10^4
人民英雄纪念碑的碑心石	1.1151×10^5
鲸	可达 1.5×10^5
银河系	10^{41}

一些物体的直径 d/m

原子核	$< 10^{-14}$
原子	$(1 \sim 6) \times 10^{-10}$
悬浮在空气中的尘埃	$< 10 \times 10^{-6}$
光学纤维	$10^{-6} \sim 10^{-4}$
人的头发	7.0×10^{-5}
中国科学院仪器厂研制成的 LT-1 型离子探针离子束斑点	$(2 \sim 200) \times 10^{-6}$
雨滴：毛毛雨	$(0.1 \sim 0.5) \times 10^{-3}$

续表

小雨	$(0.64 \sim 4) \times 10^{-3}$
大雨	$(3 \sim 7) \times 10^{-3}$
冰雹	$(2 \sim 100) \times 10^{-3}$
乒乓球	$(3.72 \sim 3.82) \times 10^{-2}$
唱片	0.17、0.25、0.30
我国第一颗人造地球卫星	1
银河系	约 7.7×10^{20}

有关厚度和长度或距离的数据 d/m

电子显微镜分辨本领	$(2 \sim 3) \times 10^{-10}$
在听觉范围内入耳鼓膜的 振动距离	$< 10^{-10}$
金箔厚度可达	9.1×10^{-8}
电容器用纸	$(1 \sim 10) \times 10^{-8}$
硫砷玻璃薄膜激(光全息感光 材料)	$(1.0 \sim 1.5) \times 10^{-5}$
照相胶片上干燥的感光层	2.5×10^{-5}
硬片感光层	1.5×10^{-5}
相纸感光层	0.8×10^{-5}
一般塑料薄膜	2.5×10^{-5}
一张纸的厚度	$(0.7 \sim 1) \times 10^{-4}$
一般装饰电镀铬层厚度	0.2×10^{-4}
制作晶体管的硅片厚度	$(0.2 \sim 0.3) \times 10^{-3}$
制作变压器的硅钢片厚度	$(0.35 \sim 0.5) \times 10^{-3}$
窗用平板玻璃	$(1 \sim 3) \times 10^{-3}$
正常眼的明视距离	0.25
我国铁道标准轨距	1.435
一节货车长	10
火车钢轨：长轨长度	25
短轨长度	12.5

续表

16毫米放映机放映半小时 影片长	3.3×10^2
葛州坝水电站坝长	2.561×10^3
我国最长的公路桥——黄 河公路桥长	3.4289×10^3
重机枪最大射程	5.0×10^3
103毫米火炮最大射程	2.6×10^4
地球纬度 $0^\circ \sim 1^\circ$ 间经线 1° 的弧长	1.106×10^5
北京到上海的距离	1.462×10^6
黄河干流全长	5.400×10^6
长江干流全长	6.300×10^6
万里长城全长	6.320×10^6
我国大陆海岸线长达	1.8000×10^7
地球赤道周长	4.0076×10^7
导弹射程：	
远程导弹	$(0.6000 \sim 1.0000) \times 10^7$
中远程导弹	$(2.500 \sim 6.000) \times 10^6$
中近程导弹	$(1.000 \sim 2.500) \times 10^6$

有关高度和深度的数据 h/m

天安门人民英雄纪念碑高	37.94
大沽海上灯塔高	35.6
我国现有跳伞塔高	25 ~ 85
意大利比萨斜塔高	54.5
潜水员通常水下作业深度	120
埃及最大的金字塔高	146.5
氢气球跳伞	> 400
亚洲第一高塔——上海东方明珠广播电视塔	468
现代核潜艇潜航深度	500 ~ 750
目前世界上最高的电视塔 (加拿大多伦多市)	553
飞机跳伞	> 600

续表

珠穆朗玛峰高	8848.13
臭氧层离地表	$(10 \sim 50) \times 10^3$
电离层离地面	$(50 \sim 1000) \times 10^3$
直升飞机最大飞行高度	1.244×10^4
战斗轰炸机飞行高度	2.4×10^4
同步卫星在赤道上空	3.6×10^7

一些过程所需时间的数量级 t/s

光穿过原子核	10^{-23}
某些粒子寿命	$10^{-22} \sim 10^{-21}$
在最重的原子中，最内层 电子绕核旋转一周	10^{-20}
氢原子中电子绕质子旋转 一周	10^{-15}
铀-235 在中子轰击下裂变 反应时间	10^{-12}
光穿过一块窗玻璃	10^{-11}
原子发射可见光	10^{-9}
电子束飞过电视显像管长度	10^{-7}
核爆炸	10^{-7}
冲击波压缩产生的高压持 续时间	10^{-6}
1kg 炸药爆炸释放全部 能量的时间	10^{-5}
闪电一次持续时间	10^{-4}
人的大脑从发出信号到手 指实际运动	$(50 \sim 80) \times 10^{-3}$
苍蝇拍打翅膀一次	10^{-3}
电风扇的叶片旋转一周	10^{-2}
光线射到视网膜引起神经 冲动并传到大脑皮层	10^{-1}
飞机上的自动弹射座椅， 把驾驶员连同座椅一起弹 离飞机	0.2
两次心跳间隔时间	1
秒摆周期	2
世界上跑得最快的短跑运 动员，跑完 100 米	9.8
太阳光射到地球	4.99×10^2
洲际导弹全程飞行时间约	1.8×10^3
最古老岩石年龄	10^{17}

一些元素的密度

$/\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$

名称和符号	密度值	名称和符号	密度值	名称和符号	密度值	名称和符号	密度值
		铝 Al	2.70	锌 Zn	7.14	铅 Pb	11.3 ¹⁶
锂 Li	0.53 ²⁰	钡 Ba	3.51 ²⁰	锰 Mn	7.20	钍 Th	11.7
钾 K	0.86 ²⁰	铀 Y	4.47	铬 Cr	7.20 ²⁸	铊 Tl	11.9
钠 Na	0.97	钛 Ti	4.5 ²⁰	锡 Sn		钯 Pd	12.0 ²⁰
铷 Rb	1.53	硒 Se	4.81 ²⁰	白锡	7.28	钌 Ru	12.3
钙 Ca	1.54	碘 I ₂	4.93	脆锡	6.52 ~ 6.56	铑 Rh	12.4
镁 Mg	1.74 ⁵	镭 Ra	5(?)	灰锡	5.75	铪 Hf	13.3 ²⁰
磷 p		铕 Eu	5.24	铟 In	7.30 ²⁰	汞 Hg	13.6 ²⁰
黄磷	1.82 ²⁰	锗 Ge	5.34 ²⁰	钐 Sm	7.52	钽 Ta	16.6
红磷	2.34	砷 As	5.72 ¹⁴	铁 Fe	7.86	铀 U	19.1 ²⁵
紫磷	2.36	镓 Ga		铽 Tb	8.23	钨 W	19.4 ²⁰
黑磷	2.70	固体	5.90 ^{29.6}	铌 Nb	8.57	金 Au	19.9 ²⁰
铍 Be	1.85 ²⁰	液体	6.10 ^{29.8}	镉 Cd	8.64	铼 Re	20.5
铯 Cs	1.88 ¹⁵	钒 V	5.96	钴 Co	8.9	铂 Pt	21.5 ²⁰
硫 S(a)	2.07 ²⁰	镧 La		镍 Ni	8.90	铱 Ir	22.4
()	1.96		6.15	铜 Cu	8.92	锇 Os	22.5 ²⁰
()	1.92		6.17	铪 Er	9.01		
硅 Si	2.32 ~ 2.34	碲 Te	6.25	铥 Tm	9.32		
硼 B		锆 Zr	6.49	铋 Bi	9.80		
单斜	2.34	锑 Sb	6.68 ²⁵	镱 Lu	9.84		
无定形粉未	2.37	镨 Pr	6.77	钼 Mo	10.2		
			6.97				
			(789)				
锶 Sr	2.6 ²⁰	镱 Yb	6.54	银 Ag	10.5 ²⁰		
			(>789)				

注：1. 无任何小字附注的数值是物质在室温下的密度
2. 0.86²⁰表示该物质在 20 时的密度值是 0.86
3. 数值后面有 (?) 者，表示数值不可靠
4. 注 1、2、3 适用于以下几个有关密度的表

一些固体的密度（常温常压下） /g · cm⁻³

名 称	密 度
加压纸浆板	0.19
软 木	0.22-0.26
竹	0.31-0.40
椴 木	0.32-0.59
美洲五针松	0.35-0.50

续表

名 称	密 度
白 杨	0.35-0.5
黄 松	0.37-0.60
柳 木	0.40-0.60
赤 杨	0.42-0.68
云 杉	0.48-0.70
杉 木	0.49-0.57

续表

名 称	密 度
落叶松	0.50-0.56
桦 木	0.51-0.77
榆 木	0.54-0.60
橡 树	0.60-0.90
山核桃	0.60-0.93
梨 木	0.61-0.73
枫 木	0.62-0.75
胡 桃	0.64-0.70
李 子	0.66-0.78
苹 果	0.66-0.84
槐	0.67-0.71
樱 桃	0.70-0.90
油 松	0.83-0.85
黑檀木	1.11-1.33
松木炭	0.28-0.44
橡木炭	0.57
纸 板	0.69
纸	0.7-1.15
石 蜡	0.87-0.91
泥煤块	0.84
皮革(干)	0.86
纯橡胶	0.91-0.93
冰	0.917
蜂 蜡	0.96-0.97
焦(煤)	1.0-1.7
琥 珀	1.06-1.11
硬沥青	1.07
松 香	1.07
工业(用)橡胶	1.1
沥 青	1.1-1.5
胶 木	1.15
硬橡胶	1.19
烟 煤	1.2-1.5
熟石灰	1.3-1.4
电影胶片	1.4
无烟煤	1.4-1.8
淀 粉	1.53
糖	1.59
石 棉	1.8

续表

名 称	密 度
象 牙	1.83-1.92
碳(烟)黑	1.88
粘 土	1.8-2.6
粉 笔	1.9-2.8
矿 渣	2.0-3.9
蛋白(猫眼)石	2.2
石 墨	2.30-2.72
瓷	2.3-2.5
石 膏	2.31-2.33
普通玻璃	2.4-2.8
方解石	2.6-2.8
大理石	2.6-2.84
云 母	2.6-3.2
电石(打火机用)	2.63
石板(瓦)	2.6-3.3
花 岗 岩	2.64-2.76
水 晶	2.65
水泥(制品)	2.7-3.0
白(优质)云母	2.76-3.00
金 刚 石	3.01-3.52
菱 锌 矿	4.1-4.5
磁 铁 矿	4.9-5.2
赤 铁 矿	4.9-5.3
黄 铁 矿	4.95-5.1
方 铅 矿	7.3-7.6

注：对于带有空隙的纸或皮革等，这里给出的不是固体部分的密度，而是体积质量

一些液体的密度

液 体	/g · cm ⁻³	t/
丙 酮	0.792	20
已 醇	0.791	20
甲 醇	0.810	0
苯	0.899	0
已 醚	0.736	0
天然气液化汽油	0.66 ~ 0.69	
甘 油	1.260	0

续表

液 体	/g · cm ⁻³	t/
煤 油	0.82	
水 银	13.6	
牛 奶	1.028 ~ 1.035	
石油 (产品)	0.665	15
蓖 麻 油	0.969	15
棉 籽 油	0.926	16

续表

液 体	/g · cm ⁻³	t/
亚麻油	0.924	15
橄榄油	0.918	15
海 水	1.025	15
松节油	0.87	
水	1.00	4

在 101 K Pa 下 , 不同温度时水的密度 /kg · m⁻³

密度	0	1	2	3	4	5	6	7	8
0	999.8425	999.9015	999.9429	999.9672	999.9750	999.9668	999.9432	999.9045	999.8512
10	999.7026	999.6081	999.5004	999.3801	999.2464	999.2474	998.9460	998.7779	998.5986
20	998.2071	997.9955	997.7735	997.5415	997.2995	997.0479	996.7867	996.5162	996.2365
30	995.6502	995.3440	995.0292	994.7060	994.3745	994.0349	993.6872	993.3316	992.9683
40	992.2187	991.8327	991.4394	991.0388	990.6310	990.2162	989.7944	989.3657	988.9303
50	998.0393	987.5839	987.1220	986.6537	986.1791	985.6982	985.2111	984.7178	984.2185
60	983.2018	982.6846	982.1615	981.6327	981.0981	980.5578	980.0118	979.4603	978.9032
70	977.7726	977.1991	976.6203	976.0361	975.4466	974.8519	974.2520	973.6468	973.0366
80	971.8007	971.1752	970.5446	969.9091	969.2686	968.6232	967.9729	967.3177	966.6576
90	965.3230	964.6486	963.9693	963.2854	962.5967	961.9033	961.2052	960.5025	959.7951
100	958.3665								

不同温度时水银的密度

t/	/g · cm ⁻³	t/	/g · cm^{-3}	t/	/g · cm^{-3}	t/	/g · cm^{-3}
-10	13.6202	50	13.4729	160	13.2093	270	12.9507
-5	13.6078	60	13.4486	170	13.1856	280	12.9273
0	13.5955	70	13.4244	180	13.1620	290	12.9039
5	13.5832	80	13.4003	190	13.1384	300	12.8806
10	13.5708	90	13.3762	200	13.1148	310	12.8572
15	13.5585	100	13.3522	210	13.0913	320	12.8339
20	13.5462	110	13.3283	220	13.0678	330	12.8105
25	13.5340	120	13.3044	230	13.0443	340	12.7872
30	13.5217	130	13.2805	240	13.0209	350	12.7638
35	13.5095	140	13.2567	250	12.9975		
40	13.4973	150	13.2330	260	12.9741		

在 101 Kpa 下，一些气体及其液体和固体的密度

名称和符号	气体：	熔点 t/	沸点 t/
	/kg · m ³		
	液体或固体：		
	/g · cm ⁻³		
氢 H ₂	气体：0.0899 液体：0.070	-259.14	-252.8
氦 He	气体：0.1785 ⁰ 液体：0.147 ^{-270.3}	-272.2(26KPa)	-268.9
氮 N ₂	气体：1.2506 液体：0.8081 ^{-195.8} 固体：1.026 ^{-252.5}	-209.86	-195.8
氧 O ₂	气体：1.429 ⁰ 液体：1.149 ⁻¹⁸³ 固体：1.426 ^{-252.5}	-218.4	-182.962
臭氧 O ₃	气体：2.144 ⁰ 气体：1.69 ¹⁵	-192.7 ± 2	-111.9
氟 F	气体：1.51 ⁻¹⁸⁸	-219.62	-188.14
氖 Ne	气体：0.9002 ⁰ 液体：1.204 ^{-245.9}	-248.67	-245.9
氯 Cl ₂	3.214 ⁰	-100.98	-34.6
氩 Ar	气体：1.784 ⁰ 液体：1.40 ⁻¹⁸⁶ 晶体：1.65 ⁻²³³	-198.2	-185.7
氪 Kr	气体：3.736 液体：2.155 ^{-152.9}	-156.6	-152.30 ± 0.10
氙 Xe	气体：5.887 ± 0.009 固体：2.7 ⁻¹⁴⁰	-111.9	-107.1 ± 3
氡 Rn	气体：9.73 液体：4.4 ⁻⁰² 固体：4.0	-71	-61.8

一些城市的重力加速度

地名	北纬	东经	高出地面 h/m	$g/cm \cdot s^{-2}$
北 极	90 ° 00	30 ° 18.1	0	983.22
圣彼得堡	59 ° 56.5		6	981.93
莫 斯 科	55 ° 45.3	37 ° 34.3	139	981.56
柏 林	52 ° 31	13 ° 19	30	981.28
伦 敦	51 ° 31.1	-0 ° 06	30	981.20

续表

地名	北纬	东经	高出地面 h/m	$g/cm \cdot s^{-2}$
巴 黎	48 ° 50.2	2 ° 20.2	61	980.94
波士顿	42 ° 21.5	-71 ° 03.8	22	980.40
罗 马	41 ° 54.0	12 ° 29.5	59	980.35
芝加哥	41 ° 50.0	-87 ° 36.8	182	980.28
纽 约	40 ° 48.5	-73 ° 57.5	38	980.25
北 京	39 ° 55.8	116 ° 23.7	46	980.12
旧金山	37 ° 47.5	-112 ° 25.7	114	979.25
东 京	35 ° 42.0	139 ° 46.0	18	979.80
南 京	32 ° 03.6	118 ° 45	270	979.44
上 海	31 ° 11.5	121 ° 25.7	7	979.44
广 州	23 ° 00	112 ° 19	13	978.83
马尼拉	14 ° 35.4	120 ° 57.5	3	978.36
新加坡	1 ° 17.3	103 ° 51.2	8	978.07
赤 道	00 ° 00	...	0	978.04
墨尔本	-37 ° 49.9	144 ° 58.5	26	979.99
南 极	-90 ° 00	...	0	983.22

T
不同纬度海平面的重力加速度和秒摆的长度

纬 度	重力加速度 g/cm · s ⁻²	秒摆长度 l/cm
0	978.039	99.0961
5	978.078	99.1000
10	978.195	99.1119
15	978.384	99.1310
20	978.641	99.1571
25	978.960	99.1894
30	979.329	99.2268
31	979.407	
32	979.487	
33	979.569	
34	979.652	
35	979.737	99.2681
36	979.822	
37	979.908	
38	979.995	
39	980.083	
40	980.171	99.3121

纬 度	重力加速度 g/cm · s ⁻²	秒摆长度 l/cm
41	980.261	
42	980.350	
43	980.440	
44	980.531	
45	980.621	99.3577
46	980.711	
47	980.802	
48	980.892	
49	980.981	
50	981.071	99.4033
51	981.159	
52	981.247	
53	981.336	
54	981.422	
55	981.507	99.4475
56	981.592	
57	981.675	
58	981.757	

续表

纬 度	重力加速度 g/cm · s ⁻²	秒摆长度 l/cm
59	981.839	
60	981.918	99.4891
65	982.288	99.5266
70	982.608	99.5590
75	982.868	99.5854
80	983.059	99.6047
85	983.178	99.6168
90	983.217	99.6207

续表

原子弹爆炸	10^{14}
太阳中心	3.4×10^{16}
白矮星	10^{22}

有关压强的一些数据 p/Pa

星际空间（星际云间）	10^{-16}
高空处的压强（离地面）：	
2100km 处	10^{-9}
800km 处	10^{-7}
20km 处	5332
10km 处	2.6×10^4
太阳辐射（垂直于地面）	4×10^{-6}
听 声压	2×10^{-5}
核聚变堆中气态核燃料	10^{-2}
日光灯管中汞蒸汽	0.533 ~ 1.333
气垫运输装置气垫的计示压强：	
低 压	1.3×10^4
中 压	$(1.7 \sim 4.8) \times 10^4$
沼泽地履带式行走装置接地压强	$(1.96 \sim 2.45) \times 10^4$
人的心脏收缩时	>101325
炊事用高压锅：	
安全塞熔化时	$(1.2 \sim 1.3) \times 10^5$
爆炸时	$>3.92 \times 10^5$
水垫运输装置工作压强	$(5.5 \sim 6.89) \times 10^5$
风镐工作气压	$<5.88 \times 10^5$
防爆灯玻璃罩能承受的压强	9.8×10^5
载重汽车轮胎内压强	$<10^6$
汽水瓶内压强	$>10^6$
液压系统工作压强最高达	3.43×10^7
水力采煤机的工作压强	1.2×10^7
地球中心	3.7×10^{11}

大气压强、温度与海拔高度的关系

海拔高度	大气压强	温 度
h/m	p/Pa	t/
-300	105 248	16.95
-260	104 488	16.69
-200	103 730	16.30
-160	103 260	16.04
-100	102 531	15.65
-60	102 047	15.39
0	101 325	15.00
500	95 457.1	11.75
600	94 317.2	11.10
700	93 189.3	10.45
800	92 070.8	9.8
900	90 990.9	9.15
1000	89 868.3	8.50
1100	88 783.1	7.85
1200	87 708.6	7.20
1300	86 644.7	6.55
1400	85 591.4	5.90
1500	84 547.5	5.25
1600	83 249.0	4.60
1700	82 493.1	3.95
1800	81 481.2	3.30
1900	80 465.3	2.65
2000	79 485.4	2.00
2100	78 502.8	1.35
2200	77 530.9	0.70

续表

海拔高度	大气压强	温 度
h/m	p/Pa	t/
2300	76 568.3	-0.05
2400	75 615.1	-0.60
2500	74 671.2	-1.25
2600	73 738.0	-1.90
2700	72 814.1	-2.55
2800	71 898.1	-3.20
2900	70 992.9	-3.85
3000	70 095.7	-4.50
3100	69 209.1	-5.15
3200	68 330.5	-5.80
3300	67 461.3	-6.45
3400	66 601.3	-7.10
3500	65 750.8	-7.75
3600	64 908.2	-8.40
3700	64 074.9	-9.05
3800	63 249.7	-9.70
3900	62 433.8	-10.35
4000	61 625.8	-11.00
4100	60 825.9	-11.65
4200	60 035.3	-12.30
4300	59 252.7	-12.95
4400	58 479.5	-13.60
4500	57 712.9	-14.25
4600	56 955.6	-14.90
4700	56 205.5	-15.55
4800	55 463.8	-16.20
4900	54 729.2	-16.85
5000	54 003.9	-17.50
5500	50 489.6	-20.75
6000	47 163.3	-24.00
6500	44 016.9	-27.25
7000	41 042.6	-30.50
7500	38 233.5	-33.75
8000	35 581.8	-37.00
8500	33 080.7	-40.25
9000	30 724.9	-43.50
9500	28 505.1	-46.75
10000	26 418.7	-50.00

几种液压泵的压强 p/Pa

CB-B 型齿轮油泵	2.5×10^6
HY01 型齿轮油泵	$(0.5 \sim 2.5) \times 10^6$
YBC 型齿轮油泵	$(7.8 \sim 12) \times 10^6$
CB 型齿轮油泵	$(9.8 \sim 14) \times 10^6$
YB 型单级叶子油泵	$(0.4 \sim 9.8) \times 10^6$
HY02 型单级叶片油泵	6.4×10^6
车辆用单级叶片油泵	1.0×10^7
YB 型双联叶片油泵	6.2×10^6
YB 型变量叶片油泵	$(2.5 \sim 6.2) \times 10^6$
径向柱塞油泵	$(7.4 \sim 40) \times 10^6$
LB 型螺杆油泵	2.5×10^6

一些物体的运动速率 $v/\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$

蜗牛爬行	$(1.5 \sim 5) \times 10^{-2}$
乌龟爬行	2×10^{-2}
树懒(南美大陆的一种哺乳动物)	0.2
人步行	1 ~ 1.5
蝴蝶飞行	5
高速电梯	9
1988年奥运会男子百米世界纪录	10.08
坦克	15
野兔	18
旗鱼	28
鹰(捕捉猎物时)	45
雨燕	48
地球自转速率(赤道上的点)	465
步枪子弹出膛速率	900
普通炮弹	1 000
月球绕地球运转平均速率	1 000
远程炮弹	2 000
同步卫星在赤道上空运转速率	3.07×10^3
第一宇宙速度	7.9×10^3
第二宇宙速度	11.2×10^3
第三宇宙速度	16.7×10^3

一些交通工具的速率

	$v/\text{km} \cdot \text{h}^{-1}$
船艇：	
机帆船	8.5 ~ 9
内河和沿海客货轮	18.5
海运货船	27.8 ~ 31
万吨级远洋轮	28 ~ 56
集装箱船	61.1
快速客轮	64.8
快艇	75 ~ 90
气垫船：侧壁气垫船	75 ~ 148
全垫升气垫船	130 ~ 185
水翼艇	110
飞翼艇(即冲翼艇)	85 ~ 462.5
车辆：	
自行车(一般)	15
公共汽车(快速)	60
载货汽车	85
吉普车	100
小轿车	160

续表

	v/km · h ⁻¹
摩 托 车	100
火车：最快货车已达	100 ~ 120
依靠轮子在轨道上运转极限速度	300
未来火车速度：	
滑轮火车	300
磁力悬浮列车	517
气垫火车	500
真空管道火车	600
真空磁垫火车	22500
飞 机：	
人力飞机(一般巡航速度)	24 ~ 32
直升机	370
活塞式飞机(1939年纪录)	755.1
一般喷气式飞机	1 800
SR-71 战略侦察机(1976年)	3 523
X-15A 研究机	7 292

风力等级表

等级及 名称	风 速 v/m · s ⁻¹	陆上状况	海上状况	自由海 面浪高 h / m	
				一般	最高
0 无风	0 ~ 0.2	静，烟直上	海面平静	—	—
1 软风	0.3 ~ 1.5	烟随风飘动	海面起微浪，渔船略觉摇动	0.1	0.1
2 轻风	1.6 ~ 3.3	人面感觉有风，树叶微响	小波，波峰平滑	0.2	0.3
3 微风	3.4 ~ 5.4	树叶及微枝摇动不止，旌旗展开	小波加大，处处起白浪花，渔船渐觉簸动	0.6	1.0
4 和风	5.5 ~ 7.9	尘土风起，小树枝摇动	小白浪颇多；渔船满帆时，可使船身倾向一侧	1.0	1.5
5 清劲风	8.0 ~ 10.7	小树摇晃，内陆水面有小波	中浪，很多白浪；渔船缩帆(即收去帆的一部分)	2.0	2.5

续表

等级及 名称	风 速 $v/m \cdot s^{-1}$	陆上状况	海上状况	自由海 面浪高	
				一般	最高
6 强风	10.8~13.8	大树枝摇动,举伞困难,电线呼呼有声	大波浪开始形成,水花飞溅;渔船加倍缩帆,捕鱼须注意风险	3.0	4.0
7 疾风	13.9~17.1	全树摇动,顶风行走困难	轻度大浪,碎浪或白沫沿风向呈条状,渔船停泊港中,在海者下锚	4.0	5.5
8 大风	17.2~20.7	小树枝折断,顶风不能行走	中度大浪,浪头破碎,形成水烟,所有近海渔船都要靠港,停留不出	5.5	7.5
9 烈风	20.8~24.4	风掀开屋瓦,吹倒烟囱	狂浪,浪头崩溃坠落;汽船航行困难	7.0	10.0
10 狂风	24.5~28.4	树木连根拔起,房屋损坏严重	狂涛,海面一片白;汽船航行颇危险	9.0	12.5
11 暴风	28.5~32.6	陆上少见,有广泛损坏	异常狂涛,很少见水烟;汽船遇之极危险	11.5	16.0
12 飓风	32.7~	陆上绝少见,摧毁力极大		14.0	—

一些物体和机械的转速 $n/r \cdot \text{min}^{-1}$

电唱机：密纹	16、 $33\frac{1}{3}$ 、45
粗纹	78
轮船螺旋桨	约 180
直升机飞行时：旋翼	178
尾桨	1 042
主轴	2 400
三相异步电动机同步转速：12 极	500
10 极	600
8 极	750
6 极	1 000
4 极	1 500
2 极	3 000
水轮机已达	1 000
开足马力时汽车轮	1 000
大型鼓风机	1 000~1 500
柴油机：低速	<250
中速	250~1 000

续表

高速	>1 000
3 马力汽油机 (单缸、四冲程)	1 500
30 万千瓦双水内冷发电机	3 000
我国第一台高压力、大流量给水泵	5 300
汽车用三角活塞转子发动机	6 500
超低量电动喷雾器	7 000
回转罗盘	2×10^4
炮弹从炮膛射出时	1.2×10^4
离心机：分离血球和血清	10^3
分离植物组织内病毒	$(2\sim4) \times 10^4$
分离蛋白质	$>6 \times 10^4$
中国科学院生物物理所研制成的 CL-60 制备超速离心机	6×10^4
空气轴承	10^5
国产高速牙钻微型轴承	4×10^5

常用材料的极限强度

材料名称牌号		屈服极限 $s/\times 10^6 \text{ Pa}$	抗剪极限 $m/10^6 \text{ Pa}$	强度极限 $b/\times 10^6 \text{ Pa}$
普通碳素钢	A ₃	240	160	380~470
	A ₅	280	190	500~620
优质碳素钢	45	360	220	610
	50	390		660
合金钢	40Cr	800		1 000
	16Mn	280~350		480~520
铸 钢		>200		>400
铸铁	HT15-33			{ 150(拉)
	HT20-40			{ 650(压)
				{ 240(拉)
				{ 850(压)
球墨铸铁		320		400(拉)
				1 500(压)
黄 铜				300
铝 合 金		50~250		180~420
木材(顺纹)	红松			{ 98(拉)
				{ 33(压)
	杉木			{ 77 ~ 97(拉)
				{ 36 ~ 41(压)
混 凝 土				0.3~1(拉)
				25~800(压)

注：极限强度又叫极限应力，材料受力破坏时，截面上的最大应力。
有受拉、受压、受剪等不同种类的极限强度

常用材料的弹性模量

材 料	弹性模量 $E/\times 10^9\text{Pa}$	材 料	弹性模量 $E/\times 10^9\text{Pa}$
碳 钢	210	橡 胶	0.008
铸 钢	210	混凝土(100号)	14~20
镍 铬 钢	210	(150号)	16~25
黄 铜	100	(200号)	18~29
铸 铁	120	球墨铸铁	160
铝 合 金	70	木 材	10
铅	66		

一些材料的摩擦因数

材料名称	摩 擦 因 数			
	静 摩 擦		滑 动 摩 擦	
	无润滑剂	有润滑剂	无润滑剂	有润滑剂
钢-钢	0.15	0.1~0.12	0.15	0.05~0.1
钢-软钢			0.2	0.1~0.2
钢-铸铁	0.3		0.18	0.05~0.15
钢-青铜	0.15	0.1~0.15	0.15	0.05~0.15
软钢-铸铁	0.2		0.18	0.05~0.15
软钢-青铜	0.2		0.18	0.07~0.15
铸铁-铸铁		0.18	0.15	0.07~0.12
铸铁-青铜			0.15~0.2	0.07~0.15
青铜-青铜		0.1	0.2	0.07~0.1
皮革-铸铁	0.3~0.5	0.15		
硬橡胶-钢	0.1			0.01
木材-铸铁			0.2~0.5	
木材-木材	0.4~0.6	0.1	0.2~0.5	0.07~0.15
钢-夹布胶木			0.22	
青铜-夹布胶木			0.23	
纯铝-钢			0.17	0.02
青铜-酚醛塑料			0.24	
纯铝-黄铜			0.27	0.02
淬火钢-尼龙9			0.43	0.023
淬火钢-尼龙1010				0.0395
淬火钢-聚碳酸酯			0.30	0.031
淬火钢-聚甲醛			0.46	0.016
粉末冶金-钢			0.4	0.1
粉末冶金-铸铁			0.4	0.1
压制石棉-钢			0.15~0.2	
压制石棉-铸铁			0.15~0.2	
钢-硬地			0.2~0.4	
木材-皮带			0.4	
苕麻绳-铁			0.25	
苕麻绳-木材			0.33	

零件的摩擦因数

名 称	摩擦因数	名 称	摩擦因数	
滑动轴承	液体摩擦	0.001~0.01	密封软填料盒中填料与轴的摩擦	0.2
	半液体摩擦	0.01~0.1	制动器普通石棉制动带(无润滑)	0.35~0.46
	半干摩擦	0.1~0.5	p=0.2~0.6MPa	
滚 动 轴 承	0.0015~0.008	离合器装有黄铜丝的压制石棉	0.40~0.43	
		p=(0.2~1.2)MPa		

材料的滚动摩擦因数

材 料	滚动摩擦因数 μ /cm
软钢-软钢	0.005
淬火钢-淬火钢	0.001
铸铁-铸铁	0.005
木材-钢	0.03~0.04
木材-木材	0.05~0.08

滚动阻力因数

实验表明，滚动阻力 W_r 主要是和车轮载荷 P 有关。它们的关系，用公式表示为

$$W_r = f_r P,$$

式中 f_r 叫做滚动阻力因数，下表给出的是用斜线轮胎（又称斜交轮胎）测得的滚动阻力因数，它们是在指定的路面上，对气压与其载荷相适应的一定的结构的轮胎测得的。

路面	f_r	备注
光柏油路	0.010	路面坚硬
光混凝土路	0.011	
粗糙的好混凝土路	0.014	
优等石块路	0.015	
廉价石块路	0.033	
坏的多坑洼路	0.035	
良好的土路	0.045	除了轮胎侧
一般的土路	0.080	面的摩擦外，
坏土路	0.160	路面本身也变
松沙	0.15~0.30	形

滚动阻力因数随轮胎内气压的大小而变化，图 4-2-1 是一种车轮轮胎，在行驶速度为 160km/h 情况下的滚动阻力因数与轮胎内气压大小的关系曲线，其中 $f_{r,0}$ 为轮胎内气压为 $3 \times 10^5 \text{Pa}$ 时的滚动阻力因数。

拖拉机在道路上的滚动阻力因数

轮式拖拉机在	泥路上	0.05~0.15
	荒地上	0.10~0.12
	有植物残根的地上	0.14~0.16
	熟地上	0.18~0.20
履带式拖拉机在	泥路上	0.05~0.07
	荒地上	0.065
	有植物残根的地上	0.08
	熟地上	0.07~0.09

各种汽车的空气阻力因数

在汽车行驶中，地面附近的一部分空气必须从车身底部和路面之间强制通过，气流流线在汽车后面并不终止，而是形成涡流，从而产生阻力。在我们所感兴趣的速度范围内，气流形成了紊流。所产生的阻力 W_L 和空气密度 Q 的一半、空气-汽车的相对速度 v 的二次方成正比，用公式表示为：

$$W_L = C_w F \frac{Q}{2} v^2.$$

其中 C_w 和 F 是比例系数, C_w 是汽车的空气阻力因数, 它与汽车的形状有关, 与汽车的尺寸无关; F 是汽车上通常采用的横向正面面积。

汽车种类	空气阻力因数
小轿车	0.29~0.45
大客车	0.43~0.47
载货汽车	0.40~1.10
运动车、赛车	0.30~0.60

常用润滑油的主要性质和用途

名 称	代 号	凝点 t/	主 要 用 途
高速机械油	HJ-5	-10	用于各种高速低负荷机械轴承的润滑和冷却
(GB486-77)	HJ-7		(循环式或油箱式), 如转速在 1000r/min 以上的精密机械、机床的润滑和冷却
机 械 油	HJ-20	-15	主要用在中小型电机及机床液压系统上
(GB443-64)	HJ-30	-10	主要用在一般机床齿轮变速箱, 中、小型机床导轨及 100kW 以上电机轴承
饱和气缸油	HG-11	5	多用于柴油机的润滑
(GB448-64)	HG-24	15	多用于蒸汽机及各种低速高负荷机械的润滑
汽油机润滑油	HQ-6	-20	用于汽车、拖拉机汽化器发动机汽缸活塞的
(GB485-77)	HQ-10	-15	润滑, 以及各种中、小型柴油机动力设备的
	HQ-15	-5	润滑
1 号真空泵油	KK-1	-15	用于各种大、中型真空泵的润滑和密封, 以及
(SY1634-70)			各类对腐蚀性有较高要求的机械的润滑
双曲线齿轮油	HL-22	-20	适用于汽车双曲线齿轮等机械润滑, 不适于一
(SY1102-77)	HL-28	-5	般齿轮润滑

常用润滑脂的主要性质和用途

名 称	代 号	滴点 t/	主 要 用 途
钙基润滑脂 (GB491-65)	ZG-2	80	有耐水性能。用于工作温度低于 55 ~60 的各种工农业、交通运输机械设备的轴承润滑，特别是有水或潮湿处
	ZG-3	85	
	ZG-4	90	
	ZG-5	95	
钠基润滑脂 (GB492-77)	ZN-2	140	不耐水(或潮湿)。用于工作温度低于 (115~145) 的各种机械设备的轴承润滑，其分别适用的工作温度为：ZN-2 和 ZN-3，不高于 118 ； ZN-4，不高于 120
	ZN-3	140	
	ZN-4	150	
钙钠基润滑脂 (SYB1403-77)	ZGN-1	120	用于工作温度在(80~100) ，有水分或较潮湿环境中工作的机械润滑，多用于铁路机车、列车、小电动机、发电机滚动轴承(温度较高者)润滑，不适于低温工作
	ZGN-2	135	
滚珠轴承脂 (SY1514-65)	ZGN69-2	120	用于机车、汽车、电机及其他机械的滚动轴承润滑
工业用凡士林 (SYB1607-59)		54	用作机械及其零件的防腐蚀剂

注：各种润滑脂的最高工作温度比其滴点低(20~30)

一些自然现象和技术装置的功率 P/W

液晶显示数字电子手表耗电	小于 1.0×10^{-5}
苍蝇在飞行中	2.0×10^{-5} 左右
液晶显示小型电子计算器耗电	$(0.2\sim 0.5) \times 10^{-3}$
荧光管显示小型电子计算器耗电	0.1~0.5
5~7 管小型半导体收音机耗电	0.1~0.5
普通盒式录音机耗电	2.5
扬声器	0.1~25
电风扇(230~400mm)	38~65
家用电熨斗	300~1000
笼养鸡舍行车式喂食车的驱动功率	$(1\sim 2) \times 10^3$
国产手扶拖拉机	$(2.2\sim 8.8) \times 10^3$
中小型猪场饲料配料粉碎机	7×10^3
国产小轿车	$(3.8\sim 16.2) \times 10^4$
国产大客车	$(6.3\sim 16.2) \times 10^4$
国产 300 吨大平板车	2.94×10^5
同步稳相加速器	1×10^6
大型轧钢机	3.7×10^7
大型水电站	10^9
运载火箭	10^{10}
脉冲激光器	10^{12}
新星爆发	10^{32}
超新星爆发	10^{36}

一些机械设备的功率

机械	P/kW
蒸汽机： 单缸非凝气式 单缸凝气式 二级膨胀式 三级膨胀式 机车蒸汽机	7.35~1103
蒸汽轮机	6000 12 000~25 000 50 000 及以上
机车用柴油机： 单缸 整机	8~26 1 500~4 600
发电机	6 000 12 000 50 000 100 000 以上
JO ₃ 型三相异步电动机	1.1~7.5 11~18.5 22~100

某些过程、装置、机器、电站的效率

名 称	效 率
固定的蒸汽机	15%
固定的柴油机	36%
拖拉机用柴油机	28~32%
汽车用汽油机	25%
飞机用活塞式汽油机	25~27%
涡轮发动机	约 30%
飞机用涡轮发动机	20~30%
蒸汽机车	约 8%
内燃机车	28~30%
热电站	80.6%
原子能电站	25~35%
水轮机	95~98%

机械传动的效率概略值

种 类	效 率
圆柱齿轮传动	0.90~0.99
圆锥齿轮传动	0.88~0.98
蜗杆传动 自锁蜗杆	0.40~0.45
(油润滑) 单头蜗杆	0.70~0.75
圆弧面蜗杆	0.85~0.95
带传动	0.90~0.98
链传动	0.95~0.97
滑动轴承	0.94~0.99
滚动轴承	0.98~0.99
摩擦传动	0.85~0.95
联轴器	0.95~0.99
复滑 滑动轴承	0.90~0.98
轮组 滚动轴承	0.95~0.99
减(变)速器	0.90~0.98
丝杠 滑动丝杠	0.30~0.60
传动 滚动丝杠	0.85~0.95
电气传动	0.70~0.95
气压传动	0.90~0.96
液压传动	0.80~0.90

有关载货汽车的数据

型 号	最大装载 m/kg	最大 总质量 m/kg	最小 转弯直径 d/m	最大 爬坡度 (%)	最高车速 $v/\text{km} \cdot \text{h}^{-1}$	油耗 $Q/L \cdot \text{h}^{-1}$ km^{-1}	最大功率 P/kW $(\text{n/r} \cdot \text{min}^{-1})$
北京 BJ1040C3DG	2 000	4 220	12	36	90	9.5	55(3 200)
北京 BJ1040Q5SG	2 000	4 235	14.2	30	85	15.5	57.4(3 800)
长征 CZ1260	15 000	25 520	20	43	88	32.5	206(2 400)
红星 HX1030	1 550	3 130	13	24	100	13	62.5(3 800)
山西 SXQ1141G	8 000	14 200	16	24	85	24	118(2 600)
京太 DFQ1021SP1	825	2 459			95	13	64 (3 800)
北方-奔驰 ND1926	10 000	19 000	20.4	65	86	20.7	188(2 500)
金环 SY1041DBS1	1 500	4 050	14.23	28	90	13.5	64(3 800)
凌河 LH1101	5 000	9 760	15	28	80	19	333(2 000)
解放 CA1091E2	5 000	9 895	16.4	28	90	26.5	99(3 000)
吉林 JL1010B	630	1 255	8.2	30	92	6.2	27.2
松花江 HFJ1010	600	1 410	9	12	95	5.8	25.74(5 500)
三力 CGJ1030	500	2 500			98	13	85(3 500)
江淮 HFF1150A01	8 260	14 660	16.5	18	80	24	118(2 000)
黄河 JN1171/127	10 260	17 510	17.6	25	80	26.5	154.5(2 100)
东风 EQ1118G6D1	6 000	11 000	18	23	105	16	114(2 600)

注：汽车型号由企业名称代号、车辆类别代号、主参数代号、产品序号组成，必要时附加企业自定代号、企业名称代号用代表企业名称的汉语拼音字母表示。车辆类别代号用一位阿拉伯数字表示(见下表)。主参数代号用两位阿拉伯数字表示，载货汽车、越野汽车等的主参数为车辆的总质量(m/t)；客车的主参数为车辆长度(l/m)；当车辆长度小于10m时，精确到小数点后一位，并以长度(m)值的十倍数值表示；轿车的主参数为发动机排量(V/L)，应精确到小数点后一位，并以其值的十倍数值表示；主参数不是规定位时，在参数前以“0”占位，产品序号用阿拉伯数字表示，数字由0、1、2……依次使用

各类汽车的类别代号

类别代号	车辆种类	类别代号	车辆种类	类别代号	车辆类别
1	载货汽车	4	牵引汽车	7	轿 车
2	越野汽车	5	专用汽车	8	
3	自卸汽车	6	客 车	9	半 挂 车

有关越野汽车的数据

型 号	最大装载	最大	最小	最大	最高车速	油耗	最大功率
	质量	总质量	转弯直径	爬坡度	$v/\text{km} \cdot \text{h}^{-1}$	$Q/L \cdot 10^{-2}$	P/kW
	m/kg	m/kg	d/m	(%)		km^{-1}	$(\text{n/r} \cdot \text{min}^{-1})$
切诺基 BJ2021	197	2 010	12	58	134	9.5	73.5(4 800)
大桥 DQ2022	425	1 955	12	27	98	13	62.5(3 800)
跃进 NJ2041	1 000	3 550	13.8	57	94	17	69.9(4 000)
凌空 KJ2020	530	2 500			95	13	62.5(3 800)
铁马 XC2200B	10 000	22 000	22	57.7	85	37	188(2 500)
西京 XJQ2030	5 人+50	1 995			98	13	63(3 800)
东风 EQ2060E	1 500	6 250	18	57.7	88	18	88(2 800)

有关客车的数据

型 号	最大总质量	最高车速	油 耗	最大功率	乘员定额
	m/kg	$v/\text{km} \cdot \text{h}^{-1}$	$Q/L \cdot 100\text{km}^{-1}$	$P/\text{kW}(\text{n/r} \cdot \text{min}^{-1})$	
凯特 BKC6461	2 170	105	13	62(3 800)	8
京通 BJK6900A	10 200	80	28	99(3 000)	43
飞翼 SF6125	15 225	95	23	157(2 400)	51
沪陵 HL6601	4 110	90	15	62.5(3 800)	19
金马 TJK6996E	10 080	86	24	99(3 000)	50
三峰 TJ6481A	2 420	110	10	62.5	11
莱福 ZF6430	1 980	120	8.5	63(4 600)	8
广州 GZK6100E	10 010	88	27	99.3(3 000)	45
浙江 NE6601	4 212	92	13	62.5(3 800)	19

有关轿车的

型 号	最大	最小转	最大	最高车速	油耗	最大功率	乘员 定额
	总质量	变直径	爬坡度	$v/\text{km} \cdot \text{h}^{-1}$	$Q/L \cdot 10^{-2}$	P/kW	
	m/kg	d/m	%		km^{-1}	($\text{n/r} \cdot \text{min}^{-1}$)	
夏利 TJ7100U	1 135	9.4	30	135	5	38(5 600)	5
美鹿 JJ7090	910	9.6	30.57	125	4.8	30(5 500)	4
江北-奥拓 JT7080	1 000	9.6	26.79	115	5	25.3(5 500)	4
捷达 JETTA	1 470	10.5		160	6.9	53	5
红旗 CA7560	3 290	15	20	160	17	162(4 400)	7
奥迪 AUDI100	1 710	11.45	40	176	9.8	66(5 200)	5
上海桑塔纳	1 460	10.29		161	7.9	66(5 200)	5
江南 JNJ7050	750	7.6	22	70	5	25.37(5 500)	4
标致 GP7200SW8	2 010	11.6	22	150	9	70(5 000)	8
长安-奥拓 SC7080	1 000	9.6	28.7	125	4.4	29.4(5 500)	4
贵航-云雀 GHK7070	1 110	9.6	30	130	4	29(7 000)	4
秦川-奥拓 QCJ7080	1 000	9.6	26	110	5	25.37(5 500)	4

我国主型蒸汽机车的主要技术数据

类 型	前进型	建设型	人民型	胜利型	解放型	上游型
型 号	QJ	JS	RM	SL	JF	SY
构造速度 $v/\text{km} \cdot \text{h}^{-1}$	80	85	110	110	80	80
功率 $P \times 735.5W$	2 980	2 270	1 900	1 900	1 545	1 475
运转整备质量 m/t	248.30	187.32	183.54	172.57	174.85	140.00
装煤量 m/t	21.50	17.00	15.00	14.00	14.00	9.50
装水量 m/t	50.00	35.00	35.00	30.00	30.00	25.00
用 途	货运	货运	客运	客运	货运调车	

注：由于干线旅客列车已改用内燃机车牵引，目前客运蒸汽机车仅用于牵引支线的旅客列车

几种国产内燃机车的概况

机车型号	东风、东风 ₃	东风 ₂	东风 ₄	东方红<1>	东方红<3>	北 京
用途	货 运	调 车	货 运	客 运	客 运	客 运
传动方式	电 力	电 力	电 力	液 力	液 力	液 力
构造速度 v/km · h ⁻¹	100	95.3	100	140	120	120
功率 P/kW	1 324	735	2 648	1 471	1 839	1 986
机车质量 m/t	126	113	138	84	84	92
柴油机型式及台数	10L207E1 台		16240Z1 台		12180Z2 台	12240Z1 台

调车机车主要在编组场用以进行列车编组、解体作业，及在站段内调车或兼做短途小运转牵引作业，此外还可用在工矿企业内部担任厂内运输

由于柴油机只能朝一个方向转动，不能倒转，而机车在运行中需要“前进”和“后退”；同时柴油机在启动时必须将外负荷去掉，并且柴油机的特性不能满足机车牵引特性的要求，此外，机车在启动和运行中还需要调整速度，所以必须在柴油机和机车运轴之间加设一套传动装置

电力传动是以柴油机带动牵引发电机向牵引电动机供电，再由牵引电动机驱动机车轮对转动的一种传动方式

液力传动是采用变扭器及偶合器等液力元件，先将发动机输出的机械能转换为工作液体的动能和压力能，再利用液体能推动机车的动轮旋转

大功率硅整流器电力机车主要参数

机车型号		韶山 1 型	韶山 3 型
机车质量 m/t		138	
功率 P/kW		4 000	4800
牵引力	持续	290 080	
	F/N 最大	499 800	
速度	持续	46	100(货运)
v/km · h ⁻¹	最大	95	120(客运)

注：电力机车就构造而言，相当于不带柴油发电机组的电传动内燃机车。所不同的，就是电力机车的电源来自沿线的接触网

一些运载工具的载重量

自行车	0.08	自卸汽车可达	40
载重自行车	0.170	一节货车	50
中型运输机	<5	火箭(发射低轨道卫星)	>100
大型运输机	20~100	大型平板车	400
超重型直升机	40	万吨级杂货船	7 500

国产普通货船 的主要数据

船 名	总长	总吨位	净吨位	载重量	吃水	集装 箱数		主机(柴油机)	航速
	l/m	m/t	m/t	m/t	l/m	甲板上	货舱内	P/× 735.5W	v/kn
毕升	150.06	9 784	6 798	16 270	9.25	24	36	8 690	16
安新江	149.70	11 115	6 259	19 413	9.05	124	108	9 000	15.2
春江 101	41.00	262	147	350	2.70			185	8.5
登云	124.00	5 860	2 931	6 320	7.35			6 000	15
南京	121.61	5 008	2 906	7 670	7.80			5 600	16
五莲泉	126.29	5 196	2 937	7 375	7.87			8 400	16
罗江	87.60	999	716	2 393	5.30	39	162	4 000	14.5
鲁班	155.15	14 125	8 422	16 152	9.00	116	204	10 800	16

普通货船即为杂货船，能装多种类型的货物，也可附载少量旅客，但不得超过 12 人

总吨位是民用船按一定规则丈量的船舶总容积。其丈量空间包括船上所有固定围蔽处所的容积，但须扣除航海设备、安全设备、通风采光处所、压载水舱与多种处所的容积空间，之后按一定规则换算出总吨位，单位为吨

净吨位是从总吨位中扣除非赢利场所容积所得的吨位

载重量是指民用船所允许装载的最大质量。包括载货量、人员及其行李、粮食、淡水、燃料、润滑油、炉水、备品和供应品等的质量。其值等于满载排水量与空船质量之差

吃水泛指船体在水面以下的深度

国产散装货船的主要数据

船名	总长 l/m	总吨位 m/t	净吨位 m/t	载重量 m/t	吃水 l/m	主机(柴油机)功率 P/× 735.5w	航速 v/kn
八达岭	164.00	12 863	7 009	20 330	9.80	9 000	15
白玉海	200.30	21 132	15 224	38 140	11.16	12 050	14
北极星	175.00	20 550	6 165	27 526	9.47	6 600	14.3
陵海 04	44.25	299	167	470	3.20	400	10.2

船名	总长 l/m	总吨位 m/t	净吨位 m/t	载重量 m/t	吃水 l/m	主机(柴油机)功 率 P/× 735.5W	航速 v/kn
柳州	184.72	16436	8505	25531	10.23	12000	15
四明山	143.40	9792	5931	15115	9.05	6000	13
金山海	176.00	20582	12801	34991	11.33	10500	14
远大	147.20	9827	6293	15964	9.11	7500	14

注：散装货船是运载散装货的干货船，是散粮船、矿砂船、运煤船等的统称

国产拖船的主要数据

航名	总长 l/m	总吨位 m/t	吃水 l/m	主机(柴油机)功 率 P/× 735.5W	航速 v/kn
渡船拖 1	27.03	132	2.30	400	10
三航拖 908	29.50	190	2.80	980	11
胜利 201	41.80	436	3.50	1960	13
穗救 208	60.08	980	4.61	2640	14
烟救 12	59.61	980	4.44	2640	13
云航交 1	40.30	352	3.50	1080	13
津航拖 33	60.11	1069	4.44	2640	13

国产集装箱船的主要数据

船名	总长 l/m	总吨位 m/t	净吨位 m/t	载重量 m/t	吃水 l/m	集装箱数		主机（柴油机） 功率 P/× 735.5W	航速 v/kn
						甲板数	货舱内		
北戴河	117.63	5731	3275	8349	8.02	253	190	7385	14.5
东 河	236.00	37143	16740	47625	12.00	1355	14066	23820	19
高 城	147.50	9683	4637	12739	7.90		724	7480	15.6
汉江河	126.00	8282	3685	9509	7.66	210	210	6700	17.5
华 昌	62.50	786	472	1253	4.42	27	13	1600	
华清河	190.42	14040	10061	21465	9.42	604	496	9600	19
华 盈	124.50	5578	3770	7245	7.58	110	139	6400	16
开 元	76.60	1804	962	2095	4.65	18	36	2500	

国产客船的主要数据

船名	总长 l/m	总吨位 m/t	净吨位 m/t	吃水 l/m	主机（柴油机） 功率 P/× 735.5W	航速 v/kn
东 湖	66.92	1199	562	3.75	2000	14
海 州	40.00	269	163	1.50	518	12.8
红 菊	143.43	4929	2672	6.52	16000	22.5
集 美	70.76	2145	1098	4.00	3000	14
锦 江	140.81	5990	2724		13500	
马 兰	171.80	14812	7443	8.94	28800	16
蓬 莱	107.60	4083	1773	4.20	9000	16
天 封	69.62	2239	1120	3.40	1200	12
天 妃	77.30	184	882	3.15	1320	10
天 湖	30.30	187	111	1.90	350	16
天 童	88.18	3899	2027	4.09	6400	10
迎宾 3	45.11	685	356	2.95	700	26
甬 兴	26.46	191	111	1.18	1125	
	38.80	399	140	2.40	975	

有关能量的一些数据

1 千吨 TNT 炸药爆炸时释放的能量约	4.18×10^{12}
1 克碳水化合物完全燃烧产生的能量	1.78×10^4
1 克汽油完全燃烧产生的能量	4.6×10^4
一个人每天维持生活需要的能量	1.26×10^7
1 克物质按质能关系计算所蕴藏的能量	8.99×10^{13}
我国 1989 年能源消耗量	9.7 亿吨标准煤 完全燃烧放出的能量
全世界 1987 年能源消耗量	110 多亿吨标准煤完全燃烧放出的能量
1 千克铀中的铀核(U^{235})如果全部发生裂变释放出的能量	2500 吨无烟煤 完全燃烧时放出的能量

标准煤的燃烧值为 $2.93 \times 10^7 \text{J/kg}$

无烟煤的燃烧值为 $3.35 \times 10^7 \text{J/kg}$

太阳的一些基本数据

目地平均距离	149598000km	目视星等	- 26.74 等
半径	$6.95 \times 10^8 \text{m}$	绝对目视星等	4.83 等
质量	$1.989 \times 10^{30} \text{kg}$	表面自由落体加速度	$2.74 \times 10^2 \text{m/s}^2$
平均密度	$1.409 \times 10^3 \text{kg/m}^3$	表面逃逸速度	$617.7 \times 10^3 \text{m/s}$
总辐射功率	$3.83 \times 10^{26} \text{W}$	中心温度	约 $1.5 \times 10^7 \text{K}$
有效温度	5770K	中心密度	约 $1.60 \times 10^5 \text{kg/m}^3$
自转会合周期	26.9d (赤道)	年龄	$5 \times 10^9 \text{a}$
	31.1d (极区)		

太阳系行星的物理参数

行星	符号	质 m / g	量 ($\oplus = 1$)	赤道半径		扁率	体积 ($\oplus=1$)	平均密度 /g · cm ⁻³	表面自由落	
				r / km($\oplus = 1$)					体加速度 ($\oplus=1$)	逃逸速度 v/km · s ⁻¹
水星	♿	3.330×10^{26}	0.0554	2440	0.383	0.0	0.056	5.46	0.37	4.3
金星		4.870×10^{27}	0.815	6050	0.949	0.0	0.856	5.26	0.88	10.3
地球	\oplus	5.976×10^{27}	1.000	6378	1.000	0.0034	1.000	5.52	1	11.2
火星	♂	6.421×10^{26}	0.1075	3395	0.532	0.009	0.150	3.96	0.38	5.0
木星	♃	1.900×10^{30}	317.94	71400	11.20	0.0648	1316	1.33	2.64	59.5
土星	♄	5.688×10^{29}	95.18	60000	9.41	0.108	745	0.70	1.15	35.6
天王星	♅(或♁)	8.742×10^{28}	14.63	25900	4.06	0.0303	65.2	1.24	1.17	21.4
海王星	♆	1.029×10^{29}	17.22	24750	3.88	0.0259	57.1	1.66	1.18	23.6
冥王星	♇	1.40×10^{25}	0.0024	1350	0.212	?	0.009	1.5	0.05	1.2

注：扁率 = $\frac{\text{赤道半径} - \text{极半径}}{\text{赤道半径}}$

太阳系行星轨道要素

行星	行星公转轨道要素(历元: 1980年12月27.0日)						行星公转 的恒星周 期 T/d	会合 周期 ^③ T/d	转道运动 平均速度 v/km · s ⁻¹
	轨道半长 径 a (A)	偏心率 e	倾角 i	升高点 ^① 黄经 ^② Ω	近日黄 经II	1980 年底以前 过近日点日期			
水星	0.387	0.206	7.0 °	48.1 °	77.2 °	1980.11.9	87.969	115.88	47.89
金星	0.723	0.007	3.4 °	76.5 °	131.3 °	1980.11.6	224.701	583.92	35.03
地球	1.000	0.017	0 °	—	102.6 °	1980.1.3	365.256	—	29.79
火星	1.524	0.093	1.9 °	49.4 °	335.7 °	1979.3.18	686.980	779.94	24.13
木星	5.205	0.048	1.3 °	100.3 °	14.7 °	1975.8.7	4332.589	398.88	13.06
土星	9.576	0.055	2.5 °	113.5 °	95.4 °	1974.1.8	10759.2	378.09	9.64
天王星	19.28	0.051	0.8 °	74.0 °	174.0 °	1966.5.20	30685.4	369.66	6.81
海王星	30.13	0.006	1.8 °	131.5 °	52.7 °	1876.9.2	60189	367.49	5.43
冥王星	39.87	0.256	17.1 °	110.0 °	223.1 °	1741.10.24	90465	366.73	4.74

升交点是行星或月球从黄道南侧向北侧运行时和黄道面的交点
 黄经是指春分点的黄经圈与通过某一天体的黄经圈在黄极所成的
 角度，或在黄道上所夹的弧长
 会合周期是太阳、地球和一颗行星或月球的相对位置循环一次所需
 的时间

月球的一些基本数据

半径	$1.720 \times 10^6 \text{m}$	自转周期	27.32d
表面积	$3.8 \times 10^{13} \text{m}^2$	轨道半径长度	$3.84 \times 10^8 \text{m}$
体积	$2.200 \times 10^{19} \text{m}^3$	轨道平均速率	$1.011 \times 10^3 \text{m/s}$
质量	$7.349 \times 10^{22} \text{kg}$	轨道偏心率	0.0549
平均密度	$3.3 \times 10^3 \text{kg/m}^3$	公转周期	27.32d
表面自由落体加速度	1.62m/s^2	表面温度	370K (白天)
逃逸速度	$2.38 \times 10^3 \text{m/s}$		102K (夜间)

地球的一些基本数据

赤道半径	$6.378 \times 10^6 \text{m}$	海洋质量	$1.4 \times 10^{21} \text{kg}$
极半径	$6.356755 \times 10^6 \text{m}$	地壳质量	$2.6 \times 10^{22} \text{kg}$
体积	$1.083 \times 10^{21} \text{m}^3$	地幔质量	$4.0 \times 10^{24} \text{kg}$
扁率	3.35282×10^{-3}	外核质量	$1.85 \times 10^{24} \text{kg}$
总面积	$5.100 \times 10^{14} \text{m}^2$	内核质量	$9.7 \times 10^{22} \text{kg}$
陆地面积	$1.48 \times 10^{14} \text{m}^2$	自转角速度	$7.292115 \times 10^{-5} \text{s}^{-1}$
海洋面积	$3.62 \times 10^{14} \text{m}^2$	赤道重力加速度	9.780318m/s^2
平均密度	$5.520 \times 10^3 \text{kg/m}^3$	极重力加速度	9.832177m/s^2
质量	$5.976 \times 10^{24} \text{kg}$	日地平均距离	$1 \text{AU} = 1.4960 \times 10^8 \text{km}$
大气质量	$5.1 \times 10^{13} \text{kg}$	月地平均距离	$384401 \text{km} = 0.00257 \text{AU}$ $= 60.2682 \text{地球赤道半径}$

二十四节气 表

季	月份	节气	阳历日期	太阳到达黄经	中气	阳历日期	太阳到达黄经
	二月	立春	2月4(5)日	315°	雨水	2月19(20)日	330°
春季	三月	惊蛰	3月5(6)日	345°	春分	3月20(21)日	0°
	四月	清明	4月4(5)日	15°	谷雨	4月20(21)日	30°
	五月	立夏	5月5(6)日	45°	小满	5月21(22)日	60°
夏季	六月	芒种	6月5(6)日	75°	夏至	6月21(22)日	90°
	七月	小暑	7月7(8)日	105°	大暑	7月23(24)日	120°
	八月	立秋	8月7(8)日	135°	处暑	8月23(24)日	150°
秋季	九月	白露	9月7(8)日	165°	秋分	9月23(24)日	180°
	十月	寒露	10月8(9)日	195°	霜降	10月23(24)日	210°
	十一月	立冬	11月7(8)日	225°	小雪	11月22(23)日	240°
冬季	十二月	大雪	12月7(8)日	255°	冬至	12月21(22)日	270°
	一月	小寒	1月5(6)日	285°	大寒	1月20(21)日	300°

十二个节气与十二个中气总称为二十四节气

从小寒起，太阳黄经每增加 30°，便是另一个节气。计有小寒、立春、惊蛰、清明、立夏、芒种、小暑、立秋、白露、寒露、立冬、大雪十二个节气

从冬至起，太阳黄经每增加 30°，便开始另一个中气。计有冬至、大寒、雨水、春分、谷雨、小满、夏至、大暑、处暑、秋分、霜降、小雪十二个中气

震级与所释放的地震波能量的关系

震级	能量 EJ
1	2.0×10^6
2	6.3×10^7
3	2.0×10^9
4	6.3×10^{10}
5	2.0×10^{12}
6	6.3×10^{13}
7	2.0×10^{15}
8	6.3×10^{16}
8.5	2.0×10^{17}
8.9	1.0×10^{18}

注：震级是表示地震本身大小的等级。它与震源释放出来的能量多少

有关，能量越大，震级就越大。震级是根据地震仪记录的地震波最大振幅经过计算求出的。一次地震只有一个震级。世界上记录到的最大地震，是1960年5月22日在智利发生的8.9级地震

震中烈度与震级和震源深度的关系

震源深度 h/km		5	10	15	20	25
震 级	2	3.5	2.5	2	1.5	1
	3	5	4	3.5	3	2.5
	4	6.5	5.5	5	4.5	4
	5	8	7	6.5	6	5.5
	6	9.5	8.5	8	7.5	7
	7	11	10	9.5	9	8.5
	8	12	11.5	11	10.5	10

注：地下发生地震的地方叫震源。震源在地面上的垂直投影叫震中。从震源至震中的距离叫震源深度

地震烈度及标志

烈度	人的感觉	一般房屋	其他现象
一度	无感		仪器能够记出
二度	室内个别静止中的人感觉		
三度	室内少数静止中的人感觉	门、窗轻微作响	悬挂物微动
四度	室内多数人感觉，室外少数人感觉。少数人梦中惊醒	门、窗作响	悬挂物明显摆动，器皿作响

烈度	人的感觉	一般房屋	其他现象
五度	室内普遍感觉，室外多数人感觉。多数人梦中惊醒	门窗、房屋、屋架颤动作响，灰土掉落，抹灰出现微细裂缝	不稳定器物翻倒
六度	惊慌失措，仓皇逃出	损坏——个别砖瓦掉落、墙体微细裂缝	河岸和松软土上出现裂缝。饱和沙层出现喷砂冒水。地面上有的砖烟囱轻度裂缝、掉头
七度	大多数人仓皇逃出	轻度破坏——局部破坏、开裂，但不妨碍使用	河岸出现坍方。饱和砂层常见喷砂冒水。松软土地裂缝较多。大多数砖烟囱中等破坏
八度	摇晃颠簸，行走困难	中等破坏——墙体龟裂，局部倒塌，修复困难	干硬土上也有裂缝。大多数砖烟囱严重破坏
九度	坐立不稳，行动的人可能摔跤	倒塌——大部倒塌，不堪修复	干硬土上有许多地方出现裂缝，基岩上可能出现裂缝。滑坡、坍方常见。砖烟囱出现倒塌
十度	骑自行车的人会摔倒。处不稳状态的人会摔出几尺远。有抛起感	毁灭	山崩和地震断裂出现。基岩上的拱桥破坏。大多数砖烟囱从根部破坏或倒毁
十一度			地震断裂延续很长。山崩常见。基岩上拱桥毁坏
十二度			地面剧烈变化，山河改观

注：地震发生时，在波及范围内一定地点地面震动的激烈程度，它与地震震级不同，对于某次地震，震级是个一定的数值，是指地震所释放的能量的级别而言，代表这次地震的大小；而烈度在同一次地震中因地而异，而且它与地震烈度的编订联系在一起。此表的内容是根据 1980 年我国编订的《中国地震烈度表》列出的

1970 年以来我国发射入轨的 39 颗人造卫星

序号	卫星名称	发射时间	运载火箭	发射地点	近地点	远地点	倾角	周期	备注
					r/km	r/km	/°	T/min	
1	“东方红”1号	1970.4.24	“长征”1号	酒泉卫星发射中心	439	384	68.5	114	科学实验
2	“实践”1号	1971.3.3	“长征”1号	酒泉卫星发射中心	226	1826	69.9	106	科学试验
3	“技术试验卫星”1号	1975.7.26	“风暴”1号	酒泉卫星发射中心	186	464	69	91	工作正常
4	“返回式遥感卫星”1号	1975.11.26	“长征”2号	酒泉卫星发射中心	173	483	63	91	3天返回
5	“技术试验卫星”2号	1975.12.16	“风暴”1号	酒泉卫星发射中心	184	387	69	90	工作正常
6	“技术试验卫星”3号	1976.8.30	“风暴”1号	酒泉卫星发射中心	191	2145	70	109	工作正常
7	“返回式遥感卫星”2号	1976.12.7	“长征”2号	酒泉卫星发射中心	167	489	59	91	按时返回
8	“返回式遥感卫星”3号	1978.1.26	“长征”2号	酒泉卫星发射中心	159	509	57	91	按时返回
9	“实践”2号	1981.9.20	“风暴”1号	酒泉卫星发射中心	237	1622	60	103	一箭三星
10	“实践”2号甲								科学试验
11	“实践”2号乙								工作正常

12	“返回式遥感卫星”4号	1982.9.9	“长征”2号丙	酒泉卫星发射中心	169 395 63 90	5天返回
13	“返回式遥感卫星”5号	1983.8.19	“长征”2号丙	酒泉卫星发射中心	175 404 63 90	按时返回
14	“试验卫星”1号	1984.1.29	“长征”3号	西昌卫星发射中心	360 6480 36 163	工作正常
15	试验通信卫星	1984.4.8	“长征”3号	西昌卫星发射中心	定点于东经125度赤道上空	工作正常
16	“返回式遥感卫星”6号	1984.9.12	“长征”2号丙	酒泉卫星发射中心	174 408 68 90	按时返回
17	“返回式遥感卫星”7号	1985.10.12	“长征”2号丙	酒泉卫星发射中心	近地轨道	按时返回
18	实用通信广播卫星	1986.2.1	“长征”3号	西昌卫星发射中心	定点于东经103度赤道上空	工作正常
19	“返回式遥感卫星”8号	1986.10.6	“长征”2号丙	酒泉卫星发射中心	180 400 57 90	按时返回
20	“返回式遥感卫星”9号	1987.8.5	“长征”2号丙	酒泉卫星发射中心	近地轨道	载法国装置

21	“返回式遥感卫星”10号	1987.9.9	“长征”2号丙	酒泉卫星发射中心	近地轨道	按时返回
22	“东方红”2号甲	1988.3.7	“长征”3号	西昌卫星发射中心	定点于东经87.5度赤道上空	通信卫星
23	“返回式遥感卫星”11号	1988.8.5	“长征”2号丙	酒泉卫星发射中心	近地轨道	载西德装置
24	“风云”1号	1988.9.7	“长征”4号	太原卫星发射中心	900km、98.9°太阳同步轨道	气象卫星
25	“东方红”2号甲	1988.12.22	“长征”3号	西昌卫星发射中心	定点于东经110.5度赤道上空	通信卫星
26	“东方红”2号甲	1990.2.4	“长征”3号	西昌卫星发射中心	定点于东经98度赤道上空	通信卫星
27	“亚洲1号”通信卫星	1990.4.7	“长征”3号	西昌卫星发射中心	定点于东经105度赤道上空	亚星公司
28	“澳塞特”B模拟星	1990.7.16	“长征”2号E	西昌卫星发射中心	进入预定轨道	澳大利亚
29	“巴达雷—1”科学试验卫星					巴基斯坦
30	“风云”1号			太原卫星发射中心	准确进入预定太阳同步轨道	气象卫星
31	“大气”1号A	1990.9.3	“长征”4号			气球卫星
32	“大气”1号B					气球卫星

33	“返回式遥感卫星”12号	1990.10.5	“长征”2号丙	酒泉卫星发射中心	210 373 89	按时返回
34	通信卫星	1991.12.28	“长征”3号	西昌卫星发射中心	未进入预定同步轨道	
35	“返回式遥感卫星”13号	1992.8.9	“长征”2号丁	酒泉卫星发射中心	未进入预定近地轨道	16天返回
36	“澳赛特”B1通信卫星	1992.8.14	“长征”2号E	西昌卫星发射中心	送入预定轨道	澳大利亚
37	“返回式遥感卫星”14号	1992.10.6	“长征”2号丁	酒泉卫星发射中心	进入预定近地轨道	7天返回
38	“弗利亚”科学试验卫星					瑞典
39	“澳赛特”B2通信卫星	1992.12.21	“长征”2号E	西昌卫星发射中心	送澳星进入预定轨道	澳大利亚

注：这些卫星中有中国的33颗，其中包括：10颗科学技术试验卫星、14颗返回式遥感卫星、5颗通信卫星、2颗气象卫星和2颗气球探测卫星；

有外国的 6 颗，它们是：亚洲卫星通信组织的“亚洲 1 号”通信卫星、巴基斯坦的“巴达雷—1”科学试验卫星、澳大利亚的“澳赛特”B 模拟星、“澳赛特”B1 通信卫星、“澳赛特”B2 通信卫星和瑞典的“弗利亚”科学试验卫星

航天器的分类



注：航天器：在地球大气层以外的宇宙空间，基本上按照天体力学的规律运行的各类飞行器，又称空间飞行器。世界上第一个航天器是苏联 1957 年 10 月 4 日发射的“人造地球卫星”1 号，第一个载人航天器是苏联航天员 .A.加加林乘坐的“东方”1 号飞船，第一个把人送到月球上的航天器是美国“阿波罗”11 号飞船，第一个兼有运载火箭、航天器和飞机特征的航天飞机是美国“哥伦比亚”号航天飞机

通信卫星的种类和用途

种类	用途	特点	举例
国际通信卫星	用于国际间商用通信	发展最早应用最广	“国际通信卫星”系列 “闪电号”通信卫星 “虹”号通信卫星 “地平线”号通信卫星 } (苏)
军用通信卫星	用于军事通信	保密性好, 机动性高, 抗干扰能力强	国防通信卫星 战术通信卫星 舰队通信卫星 } (美)
国内或区域信卫星	专用于国内或区域通信		“兄弟”号通信卫星 (加) “樱花”号通信卫星 (日) “西联星”号通信卫星 “通信星”号通信卫星 } (美) “卫星通信”号通信卫星 “统一”号卫星 (印度尼西亚) “欧洲通信卫星” (欧洲) “阿拉伯卫星” (阿拉伯国家) 中国发射的五颗衫和通信卫星
海事卫星	用于海上和陆地间通信, 兼有为遇难船只提供救援和导航的任务		“海事卫星” (美) “欧洲海事通信卫星” (欧洲空间局)
广播卫星(电视直播卫星)	向公众直接转播电视或声音广播		
跟踪和数据中继卫星	用于航天器与地球站之间的测控和数据信息中继传输	具有对中、低轨道航天器跟踪、测轨的能力	1983年美国发射了世界上第一颗跟踪和数据中继卫星

注：通信卫星：作为无线电通信中继站的人造地球卫星。通信卫星反射或转发无线电信号, 实现卫星通信地球站之间或地球站与航天器之间的通信。一颗静止通信卫星大约能够覆盖地球表面的 40%，在赤道上空等间隔分布的 3 颗静止通信卫星可以实现除两极部分地区外的全球通信

1957~1993 宇航大事记

- 1957 年 8 月 21 日 苏联 P-7 洲际弹道导弹发射成功
- 10 月 4 日 世界第一颗人造地球卫星由苏联发射成功
- 1958 年 2 月 1 日 美国第一颗人造卫星“探险者”1 号发射成功
- 11 月 3 日 苏联“人造地球卫星”2 号载小狗莱伊卡入轨
- 12 月 18 日 美国发射“斯科尔”号, 为世界第一颗通信卫星

1959年9月12日 苏联发射“月球”2号探测器，为世界第一个撞击月球表面的航天器

10月4日 苏联发射“月球”3号探测器，首次拍摄月球背面照片，并向地球发回图像

1960年2月19日 中国发射成功第一枚试验探空火箭

4月1日 美国发射“泰罗斯”1号，为世界第一颗气象卫星

4月13日 美国发射“子午仪”1B号，为世界第一颗导航卫星

5月24日 美国发射第一颗预警卫星“米达斯”2号

8月11日 美国第一次成功回收照相侦察卫星“发现者”13号

1961年4月12日 苏联“东方”1号载人飞船发射成功，尤里·加加林成为世界第一位飞入太空的航天员

20月20日 J.H.格伦成为美国第一位环绕地球飞行的航天员

1962年7月10日 美国发射的“电星”1号卫星首次跨越大西洋转播电视

8月11~12日 苏联连续发射两艘“东方”号飞船，首次在太空实现编队飞行，最近相距5km

8月27日 美国发射“水手”2号探测器，12月14日在金星附近飞过，为航天器首次飞越行星

11月1日 苏联发射“火星”1号探测器，并于1963年6月19日首次在火星附近飞过

1963年6月16日 苏联B.B.尼古拉耶娃—捷列什科娃乘坐“东方”6号飞船进入太空，成为世界第一位女航天员

7月26日 美国发射“辛康”2号，为世界第一颗地球同步轨道通信卫星

1964年8月19日 美国发射“辛康”3号，为世界第一颗地球静止轨道通信卫星

10月12日 苏联发射“上升”1号，为世界第一艘3人载人飞船

1965年3月18日 苏联航天员A.A.列昂诺夫走出“上升”2号载人飞船进行航天史上首次太空行走

4月6日 世界第一颗商用通信卫星“国际通信卫星”1号(“晨鸟”号)进入地球静止轨道

7月14日 美国“水手”4号探测器首次在火星附近飞过

1966年1月31日 苏联发射“月球”9号探测器，2月3日首次在月面软着陆成功

3月31日 苏联发射“月球”10号探测器，4月3日成为第一颗人造月球卫星

1969年1月14~17日 苏联“联盟”4号和5号在太空首次实现两艘载人

飞船对接

7月21日 美国航天员N.A.阿姆斯特朗走出“阿波罗”11号飞船，成为踏上月球表面的第一个人

1970年4月24日 中国发射第一颗人造地球卫星“东方红”1号成功

9月12~24日 苏联“月球”16号探测器降落月面，采集土壤样品后按遥控指令返回地球

12月15日 苏联“金星”7号探测器首次在金星上软着陆

1971年4月19日 苏联“礼炮”1号航天站进入太空，为世界最早的航天站

12月2日 苏联“火星”3号探测器首次在火星表面软着陆

1972年3月3日 美国发射“先驱者”10号探测器

7月23日 美国发射“陆地卫星”1号，为世界第一颗地球资源卫星

1973年5月14日 美国将“天空实验室”航天站发射到近地轨道上

1975年7月15~24日 苏联和美国进行“阿波罗-联盟”号飞船联合飞行，为航天首次国际合作

11月26日 中国发射一颗返回式遥感卫星，在正常运行3天后按预定计划返回地面，成为世界第三个掌握卫星返回技术的国家

1976年7月20日 美国“海盗”1号探测器在火星表面软着陆成功

1977年8月20日 美国发射“旅行者”2号探测器，飞往天王星、海王星探测

1980年5月18日 中国首次向南太平洋预定海域成功地发射大型运载火箭

1981年4月12日 美国“哥伦比亚”号航天飞机(世界第一架航天飞机)首次发射成功，14日从太空安全返回

9月20日 中国首次用一枚运载火箭把三颗不同用途的空间物理探测卫星送入太空

1982年10月7~16日 中国用潜艇从水下向预定海域发射运载火箭获得成功

1983年1月25日 荷兰、美国和英国联合研制的世界第一颗红外天文卫星发射成功

4月4日 美国发射世界第一颗跟踪和数据中继卫星

6月 美国“先驱者”10号探测器经过11年飞行，越过海王星轨道，美国制定“战略防御倡议”计划，俗称“星球大战”计划

11月28日 可重复使用的欧洲“空间实验室”航天站由美国航天飞机首次带到太空进行试验

1984年2月7日 美国航天员B.麦坎德利斯和R.L.斯图尔特在太空靠载人机动装置离开“挑战者”号航天飞机，成为第一批“人体地球卫星”

2月8日~10月2日 苏联航天员 . .基济姆、B.A.索洛维约夫和O. .阿季科夫在“礼炮”7号航天站上创造载人航天236天22小时50分的世界纪录

4月8日 中国用“长征”3号运载火箭发射一颗地球静止轨道的通信卫星，16日定点于东经125°赤道上空

8月4日 欧洲空间局研制的“阿里安”3型运载火箭成功地将2颗通信卫星送入静止轨道

1985年1月24日 美国发射“发现”号航天飞机，为航天飞机首次执行军事任务

4月29日 美籍物理学家王赣骏乘“挑战者”号航天飞机进入太空进行液滴实验，成为第一位华人航天员

9月 美国从F-15型战斗机发射反卫星武器首次摧毁在太空运行的靶星

1986年1月 美国“挑战者”号航天飞机从肯尼迪空间中心升空不久发生爆炸，七名宇航员遇难

6月 苏联新一代空间站“和平”号发射成功，宇航员基齐姆和索洛维约夫乘“联盟-15号”飞船首次在航天史上完成在“礼炮-7号”和“和平”号两个轨道站不同轨道之间的过渡飞行

1987年5月15日 世界上功率最大的运载火箭“能源”号在苏联首次发射成功

1988年11月15日 苏联第一架航天飞机“暴风雪”号从拜克努尔发射场用“能源号”大型运载火箭发射成功，无人驾驶，在环绕地球两圈后，于当天按预定时间返回地面

12月21日 苏联宇航员季托夫和马纳罗夫在“和平”号轨道上连续飞行366天后返回地面，创造了人在太空生活时间最长的纪录

1989年8月24日 美国“旅行者”2号星际探测器从海王星附近4800km处飞过，实现了对该星首次近距离探测

1990年4月7日 我国用“长征”3号运载火箭将美国休斯公司制造的，由总部设在香港的亚洲卫星公司购买和经营的“亚洲”1号通信卫星成功地送入太空。这是我国首次承担国际商用卫星的发射服务

4月25日 美国“发现”号航天飞机于24日载着一个价值15亿美元的“哈勃”太空望远镜 进入太空，宇宙航员在25日将其施放到距地面613km的空间轨道上，“哈勃”望远镜从此开始了它为期15年的宇宙探索

1991年1月22日 我国一枚120km高空低纬度首次实验成功，这是我国首次采用二级火箭发射，它可对60km至120km的高空电离层、高层大气等进行探测，为运载火箭、弹道导弹、人造卫星、载人飞船等的研制提供

必要的环境参数

3月14日 欧洲航天局发射一枚“阿丽亚娜”44L型火箭，把国际通信卫星K(ITS0)的一颗“国际通信卫星VIF5”型通信卫星送上太空

9月12日 美国航天飞机“发现”号搭载着5名飞行员从肯尼迪航天中心发射上天，此次飞行使命是释放一颗地球大气层探测卫星。这颗平流层卫星是美国宇航局为执行“行星地球计划”而发射的第一颗探测器

1992年5月7日 美国“奋进”号航天飞机首次升空

1993年2月9日 经过改装的一架美国B-52型轰炸机飞抵大西洋上空，在空中发射“飞马座”运载火箭，把巴西第一颗人造卫星送入接近赤道的预定轨道

12月2日 美国“奋进”号航天飞机发射升空，7名宇航员乘“奋进”号进入太空，开始为期11天的飞行。这次飞行的主要任务是修复“哈勃”太空望远镜

实质上是一颗大型天文卫星，就像一座空间天文台。由于消除了地面天文观测的障碍，避开了大气层对天体光谱的吸收和大气层湍流对天体观测的影响，它能观测到比现在所能观察到的最暗的还要暗50倍的天体，其视距最大值能由地基天文望远镜20亿光年扩展到140亿光年，这就为天文学工作者进一步更深入地观测和研究天体的起源、演变和星系结构等问题创造了极好条件。

它高58米，起飞点总推力达570吨，起飞重量480.363吨，是欧洲空间局当时研制成功的推力最大的运载工具。

它直径3.6米，高11.8米，重量达4.296吨，是被送上天的最大民用通信卫星。投入工作后，其覆盖面可达到北美、南美、欧洲和非洲，拥有12万条电话线路供用户同时通话，另外它可转播电视和数据等。

主要参考资料

1. 中国大百科全书出版社编辑部. 中国大百科全书, 物理学. 第1版. 北京: 中国大百科全书出版社, 1987.

2. 徐日新, 章逸民. 中学物理简明手册. 第1版. 杭州: 浙江人民出版社, 1982.

3. 乔际平, 张宪魁, 张光化等. 初中物理备课手册. 第1版. 北京: 人民教育出版社, 1982.

4. CRC. Handbook of chemistry and Physics. 69th, Ed.

5. 人文出版社有限公司编委会. 物理大辞典. 第1版. 台湾: 人文出版社有限公司, 1979.

6. 机修手册第一编修订小组. 机修手册(修订第1版) 北京: 机械工业出版社, 1977.

7. (日)气象手册编委会. 气象手册. 郭殿福等. 第1版. 贵阳:

贵州人民出版社，1985。

8. 陆忠汉等. 实用气象手册. 第 1 版. 上海: 上海辞书出版社, 1984.

9. 清华大学材料力学教研室. 材料力学解题指导及习题集. 第 1 版. 北京: 高等教育出版社, 1984.

10. 周开勤. 机械零件手册. 第 1 版. 北京: 高等教育出版社, 1989.

11. 中国汽车工业总公司公共部编. 汽车参数手册, 上, 下. 1994.

12. 摩托车构造与使用编写组. 摩托车构造与使用. 第 1 版. 北京: 国防工业出版社, 1988.

13. 大连热力机车研究所, 西南交通大学内燃机教研组. 内燃机车基本知识. 第 1 版. 北京: 人民铁道出版社, 1977.

14. 交通部编审组. 汽机车牵引及操纵. 第 1 版. 北京: 人民交通出版社, 1973.

15. 武汉水运工程学院. 船舶概论. 第 1 版. 北京: 人民交通出版社, 1979.

16. [西德] M. 米奇克. 汽车动力学. 桑杰. 第 1 版. 北京: 机械工业出版社, 1980.

17. 宋春青, 张振春. 地质学基础. 第 1 版. 北京: 人民教育出版社, 1978.

18. 中国大百科全书出版社编辑部. 中国大百科全书: 航空 航天; 天文学; 固体地球物理学 测绘学 空间科学. 第 1 版. 北京: 中国大百科全书出版社, 1987.

19. 白克敏. 航海辞典. 北京知识出版社, 1989.

20. 中国造船工程学会, 上海交通大学. 船舶工程辞典. 国防工业出版社, 1988.

21. 船舶录. 中国船级社, 1989~1990.

22. 吉林工业大学内燃机教研室. 内燃机构造. 长春: 吉林人民出版社, 1982.

23. 黄克毅, 吴培德. 铁道概论. 北京: 中国铁道出版社, 1983.

24. 艾迪拓. 铁路基本知识. 中国铁道出版社. 1993.

25. 航空空间消息. 航空知识, 1985~1993

三、声学

固体和液体中的声速

$v/m \cdot s^{-1}$

物 质	声 速	物 质	声 速
铍	12890	铅	2160
铝	6420	石 英	5968
钼	6250	玻 璃	3980~5640
钛	6070	树 脂	2680
镍	6040	尼 龙	2620
铁	5960	聚乙烯	1950
镁	5770	橡 胶	1550~1830
钨	5410	榆 木	4120
铜	5010	甘 油	1904
锌	4210	海 水	1531
银	3650	水	1496.7
铂	3260	煤 油	1324
锡	3320	蓖麻油	1477
金	3240	松节油	1255

在 0 气体和蒸汽中的声速

$v/m \cdot s^{-1}$					
物 质	声 速	v/ t	物 质	声 速	v/ t
氢	1284	2.2	一氧化碳	338	0.6
氦	965	0.8	二氧化碳	259	0.4
氖	890	1.6	氮	334	0.6
煤气	453		空 气	331.45	0.59
沼汽	430		氧	316	0.56
氩	435	0.8	二氧化碳	213	0.47
氨	415		水蒸气(134)	494	

注： v/ t 表示声速随温度的变化。

人和一些动物的发频率范围和听觉频率范围

名称	发声频率范围 f/Hz	听觉频率范围 f/Hz
人	65 ~ 1100	20 ~ 20000
狗	450 ~ 1800	15 ~ 50000
猫	760 ~ 1500	60 ~ 65000
蝙蝠	10000 ~ 150000	1000 ~ 200000
海豚	7000 ~ 120000	150 ~ 150000
知更鸟	2000 ~ 13000	250 ~ 20000
鱼	—	40 ~ 2000

纯音阈 $L_p/dB_0dB=20 \mu Pa$

名称	纯音频率 f/Hz													
	20	40	60	120	250	500	1000	2000	2000	4000	8000	12000	15000	
自由场听阈	74.3	48.3	36.8	21.4	11.2	6.0	4.2	4.2	1.0	-3.9	15.3	12.0	24.1	
不同情况另加数：														
混响场听阈	0	0	0	0	-0.6	-1.6	-3	1.4	1.4	1	4			
外耳道口声压听阈				-1.0	-0.5	2.0	4.0	11.0	11.0	12.5	3.0			
鼓膜声压听阈				-1.0	-0.5	1.5	3.0	6.5	6.5	2	0.5			

注：自由场听阈，代表平面行波在人进入声场前的最低而使人进入声场后刚开始能听到声的压级，听者是 18 到 25 岁青年，听力正常，面对声源，用双耳听，声压听阈是在外耳道口或鼓膜上纯音声压的可听下限。开始听到或刚能听到都是指在多次试验中有一半时间听到。自由场听阈是国际标准值，声压听阈是测得的平均值

现代生活中的声强和声压级的范围

声音	声压级 L_p /dB	声强 $I/W \cdot M^{-2}$
15 ~ 18 岁青年入听阈 (100Hz 纯音)	0	10^{-12}
设计良好的消声室内背景噪声	10	10^{-11}
幽静的疗养院、乡间别墅	20	10^{-10}
居民区卧室	30	10^{-9}
图书馆、高级办公室、客厅	40	10^{-8}
通常办公室	50	10^{-7}
正常在客厅内交谈	60	10^{-6}
商业办公室、工厂办公室、教室内讲课	70	10^{-5}

续表

声音	声压级 L_p /dB	声强 $I/W \cdot m^{-2}$
小城市街道交通噪声	80	10^{-4}
大车间、高声叫喊	90	10^{-3}
织布车间、拖拉机噪声	100	10^{-2}
风铲、铆钉枪	110	10^{-1}
喷气发动机 (100m 外)	120	1
喷气发动机 (25m 外)	130	10
火箭发射 (50m)、痛阈	140	10^2

由于年龄引起的听力损失 L_p /dB

年龄	纯音频率 f /kHz							
	1	2	3	4	6	8	12	15
30	0	0.4	1.2	1.9	2.4	2.5	5.0	10.2
35	0	0.7	2.2	3.5	4.5	4.7	9.3	18.9
40	0	1.2	4.0	6.4	8.2	8.6	17.0	34.2
45	0	1.7	5.6	9.0	11.5	12.1	23.9	48.5
50	0	2.0	6.5	10.5	13.4	14.1	27.8	56.2
55	0	2.2	7.2	11.5	14.7	15.4	30.5	61.9
60	0	2.3	7.7	12.2	15.7	16.7	32.6	65.9

注：人的听阈提高，称为听阈上移或听力损失。国际标准化组织

(ISO) 规定在 500、1000、2000Hz 三个频率上的听力损失平均在 25dB 以上为耳聋标准

噪声性耳聋发病率 (%)

声级 L_{eq}/dB	年龄									
	18	23	28	33	38	43	48	53	58	63
$L_{eq} = 80$	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
$L_{eq} = 85$	0	1	3	5	6	7	8	9	10	7
90	0	4	10	14	16	16	18	20	21	15
95	0	7	17	24	28	29	31	32	29	23
100	0	12	29	37	42	43	44	44	41	33
105	0	18	42	53	58	60	62	61	54	41
110	0	26	55	71	78	78	77	72	62	45
115	0	36	71	83	87	84	81	75	64	47

注： L_{eq} 是等效声级，是 A 声级按能量的时间平均值（一周中的）

在声音测量仪器中加一个滤波网络，根据倒转的 40 方等响曲线的特性，对不同频率的信号给以不同的衰减，使听觉最灵敏的 1000Hz ~ 3000Hz 频段的信号衰减最少，这样测得的读数称为 A 声级。它可以相当好地评价声音的主观感觉和对人的影响，而且是一个易于测量和比较的量

住宅区噪声容标准 (A 声级)

住宅区室外噪声 A 声级容许标准的基本值为 35dB ~ 45dB。不同时间的容许标准可按下表所列值修正：

时间	修正值
白天	0dB
晚上	-5dB
深夜	-10dB ~ -15dB

非住宅区的室内噪声 A 声级容许标准

办公室、商店、小餐厅、会议室	35dB
大餐厅、带打字机秘书室,体育馆	45dB
大型打字机室	55dB
车间(根据不同用途)	45dB ~ 75dB

不同地区噪声容许标准(A声级)

不同地区噪声容许标准,可按住宅区容许标准基本值(35dB~45dB)按下表所列值修正:

地区	修正值
乡村地区, 医疗地区	0dB
效区住宅, 小马路	+5dB
城区住宅	+10dB
附近有工厂或主要大街上	+15dB
城市中心	+20dB
工业地区	+25dB

北京部分剧院、礼堂、播音室的声学特性

名称	用途	体积 V/M ³	人数	各频率混响时间 t/s					注
				250	500	1000	2000	4000	
天桥剧场	歌剧	8200	1560	1.58	1.76	1.85	1.64	1.16	(空场)
				0.90	1.07	1.28	1.09	0.78	(满场)
首都剧场	话剧	6000	1200	1.23	1.14	1.20	1.28	1.18	(空场)
				0.69	0.74	0.80	0.79	0.72	(满场)
人民剧场	京剧	6800	1400	2.10	1.90	1.70	1.55	1.10	(空场)
民族宫剧场	多功能		1150	2.75	2.70	2.65	2.45	1.80	(空场)
科学会堂学术报告厅				1.00	1.30	1.50	1.80	1.60	(空场)
人民大会堂		91000	1000	2.4	2.4	3.1	3.5	3.1	(空场)
			0						
首都体育馆	多功能	16850	1800	2.5	2.6	2.6	2.4	2.0	(空场)
				0	0				
首都影院	宽银幕	6000		1.2	1.1	1.1	1.3	1.25	(空场)
八一厂录音棚		480		0.67	0.63	0.66	0.70	0.65	
戏曲录音室		50		0.45	0.45	0.45	0.45	0.45	
语言录音室		20		0.30	0.30	0.30	0.30	0.30	

常用建筑材料和用具类吸声系数表（混响室值）

常用建筑材料和用具	频率 f/Hz				
	250	500	1000	2000	4000
砖墙抹光	0.3	0.3	0.4	0.5	0.7
砖墙未抹光，涂漆	0.1	0.2	0.2	0.2	0.3
厚地毯铺在混凝土地上	0.06	0.14	0.37	0.6	0.65
混凝土墙、粗糙	0.44	0.31	0.29	0.39	0.25
混凝土墙、涂漆	0.05	0.06	0.07	0.09	0.08
混凝土地板	0.01	0.015	0.02	0.02	0.02
木板地	0.11	0.10	0.07	0.06	0.07
普通玻璃	0.25	0.18	0.12	0.07	0.04

注：入射声能被表面或介质吸收的百分数称为吸声系数，它和声波的入射方向和测量方法有关。声波的入射条件有垂直入射、斜入射和无规入射三种，相应的也有三种吸声系数。混响室法中，声波是无规入射的。驻波管法则可对材料的垂直入射吸声系数作精确测量

某些材料的吸声系数表（驻波管值）

材料	厚度 d/cm	体积质量 /g · cm ⁻³	f/Hz				
			250	500	1000	2000	4000
玻璃纤维	5	0.10	0.38	0.81	0.83	0.79	0.74
石棉	2.5	0.21	0.35	0.50	0.46	0.52	0.65
工业毛毡	2	0.37	0.26	0.42	0.40	0.55	0.56
酚醛泡沫塑料	2	0.16	0.15	0.30	0.52	0.56	0.60
聚氯乙烯塑料	0.41	0.29	0.02	0.06	0.29	0.13	0.13
微孔吸声砖	5	0.34	0.38	0.84	0.75	—	—
粘土砖	6	1.84	0.07	0.13	0.07	0.07	0.11

各种构件的隔声量

构件名称	平均隔声量 L _w /dB	构件名称	平均隔声量 L _w /
两面嵌0.70mm厚铁皮的10mm木板墙	45.25	1mm铝板	29.00
24cm的空斗隔墙	45.50	25mm木板	34.66
12cm的砖墙	44.45	轻结构隔声门	36.70
10cm煤屑混凝土墙	33.73	双层混凝土墙	49.33
双层玻璃窗	44.33	单层混凝土墙	39.50
5mm蜂窝板	24.33	轻质水渣墙	50.83

注：隔声量等于入射声功率与透射声功率之比的对数值乘以 10

主要参考资料

1. CRC. Handbook of chemistry and physics. 69th, Ed.
2. 马大猷, 沈嶷。声学手册。第1版。北京：科学出版社, 1987。
3. [日]新学习大百科(16)。东京：晓教育图书株式会社, 1978。
4. [美]Heath Physical Science. Massachusetts: D.C. Heath and Company, 1987.
5. 吕如榆, 高彦良。现代生活中的声音。第1版。北京：人民教育出版社, 1990。

四、分子物理学和热学

常用工业温度计的测温范围

名称	常用范围 t/	可能范围 t/
玻璃温度计	-100 ~ 500	-200 ~ 600
双金属温度计	-80 ~ 350	-185 ~ 620
压力式温度计	-80 ~ 400	-120 ~ 620
电阻温度计	-200 ~ 620	-258 ~ 900
热电偶温度计	-200-1500	-200 ~ 1800
辐射温度计	100 ~ 2000	—
光学高温计	700 ~ 2000	—
比色温度计	50 ~ 2000	—

玻璃温度计不同感温液体的测量范围

液 体	温度测量范围 t/
水 银	-30 ~ 600
甲 苯	-80 ~ 110
乙 醇	-80 ~ 80
煤 油	0 ~ 300
石油醚	-120 ~ 20
戊 烷	-200 ~ 20

玻璃温度计示值误差 t/

感 温 液 体	温度计上限所 在的温度间隔	分 度 值						
		0.1	0.2	0.5	1	2	5	10
有 机 液 体	-100 ~ < -60	1	1	1.5	2	—	—	—
	-60 ~ < -30	0.6	0.8	1	2	—	—	—
	-30 ~ < 0	0.4	0.6	1	1	—	—	—
	0 ~ 100	—	—	1	1	—	—	—

续表

感温液体	温度计上限所在温度间隔	分 度 值						
		0.1	0.2	0.5	1	2	5	10
		允 许 示 值 误 差						
	-30 ~ < 0	0.2	0.4	0.5	1	2	—	—
	0 ~ 100	0.2	0.3	0.5	1	2	—	—
水	> 100 ~ 200	0.4	0.5	1	1.5	3	—	—
	> 200 ~ 300	0.6	0.7	1	2	3	5	—
银	> 300 ~ 400	—	1	1.5	3	4	10	—
	> 400 ~ 500	—	1.2	2	3	4	10	—
	> 500 ~ 600	—	—	—	—	6	10	10

注：表中粗黑线左方是指精密玻璃的温度计，右方是指普通工业用的玻璃温度计

常用热塑性塑料的热变形温度

名称	热变形温度 t/ (1.72MP _a)	名称	热变形温度 t/ (1.72MP _a)
聚乙烯，低压及高压法	30 ~ 55	聚甲醛	110 ~ 125
聚乙烯，超高分子量	40 ~ 50	聚碳酸酯	130 ~ 140
聚丙烯	55 ~ 65	聚氯醚	100
聚氯乙烯，硬质	55 ~ 75	聚酚氧	80 ~ 85
聚苯乙烯	90 ~ 105	氟塑料，F-4	55
ABS	90 ~ 105	氟塑料，F-3	75
聚甲基丙烯酸甲酯	85 ~ 100	氟塑料，F-46	50
聚酰胺，铸型	150	聚苯醚	110 ~ 130
聚酰胺，芳型	125	聚砒	175 ~ 205

常用橡胶的热性能

橡胶名称	最高使用温度 t/	常用时的温度上限 t/	脆性温度 t/
天然橡胶	120	70 ~ 80	-50 ~ -70
丁苯橡胶	120	80 ~ 100	-30 ~ -60
异戊橡胶	120	70 ~ 80	-50 ~ -70
顺丁橡胶	120	—	-73
丁基橡胶	170	150	-30 ~ -55
氯丁橡胶	150	120	-35 ~ -42
丁腈橡胶	170	120	-10 ~ -20

些物质的自燃点

物质	自燃点 t/	物质	自燃点 t/
白磷	40 ~ 60	乙醇	400
磷化氢 (气体)	100	煤	400
二硫化碳	112	丁烷	429
干草	172	蓖麻子油	449
烟草	172	硝基苯	482
乙醚	180	醋酸	500
纸	184	丙酮	570
煤油	380 ~ 425	氢	510
汽油	415 ~ 530	丙烷	466
赤磷	240	己烷	510 ~ 522
重油	240	甲苯	522
硫化氢	415 ~ 530	天然气	650 ~ 750
硫	250	苯	580 ~ 659
松节油	250	苯胺	600
石油	> 300	家用煤气	600
石蜡	> 300	一氧化碳	651
润滑油	> 300	甲炭	650 ~ 750
乙炔	480	焦炭	700
丁醇	337	糖尘	540
亚麻仁油	343	面粉尘	600
棉子油	343	木尘	610
一般植物油	(约) 350	淀粉尘	630
木炭	350	储藏谷物 尘	630

表中所列数据是指通常气压下自燃点的近似值
尘是指固体物质在空气中的悬浮体
固体的比热容 (300K)

物质	比热容 $c/\text{KJ} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$	物质	比热容 $c/\text{KJ} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$
铝	0.90	铅	0.13
铈	0.21	钙	0.66
金	0.13	碳	0.51
银	0.24	铬	0.45
铜	0.39	钴	0.43
铁	0.45	锂	3.6
铸铁	0.50	镁	1.0
钢	0.46	锰	0.48
镍	0.46	铀	0.14
锡	0.23	钠	1.3

续表

物质	比热容 $c/\text{KJ} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$	物质	比热容 $c/\text{KJ} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$
钾	0.76	硬橡胶	1.67
锌	0.39	玻璃	0.84
钨	0.13	花岗岩	0.80
铀	0.12	石膏	1.1
钛	0.52	冰(-4)	2.2
锆	0.28	大理石	0.9
黄铜	0.38	云母	0.88
康铜	0.41	石蜡	2.1 ~ 2.9
伍德合金	0.15	尼龙	1.8
石棉	0.84	聚乙烯	2.1
砖	0.80	瓷器	0.8
混凝土	0.92	石英	0.8
软木	1.7 ~ 2.1	木材(松)	0.4

液体的比热容 (300K)

物质	比热容 $c/\text{KJ} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$	物质	比热容 $c/\text{KJ} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$
丙酮	2.20	甲醇	2.50
苯	2.05	橄榄油	1.65
二硫化碳	1.00	硫酸	1.38
四氯化碳	0.85	甲苯	1.70
蓖麻油	1.80	变压器油	1.92
乙醇	2.43	水	4.19
甘油	2.40	乙醚	2.35
润滑油	1.87	溴	0.53
汞	0.14		

气体的质量定压热容和质量定容热容

物质	($273c_p/\text{KJ} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$)	c_p/c_v	物质	($273c_p/\text{KJ} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$)	c_p/c_v
空气	1.01	1.40	氦	5.2	1.66
氩	2.05	1.31	氛	1.03	1.64
二氧化碳	0.82	1.30	氙	0.52	1.67
一氧化碳	1.04	1.40	氡	0.81	1.41
氯	0.50	1.35	甲烷	2.21	1.30
氮	1.04	1.40	乙烷	1.73	1.21
氧	0.92	1.40	乙烯	1.51	1.18
氢	14.2	1.41	乙炔	1.68	1.23

一些燃料的燃烧值

燃料名称	燃烧值 $e/10^6\text{J} \cdot \text{kg}^{-1}$	燃料名称	燃烧值 $e/10^6\text{J} \cdot \text{kg}^{-1}$
石煤	8.2	煤气	42.0
褐煤	16.8	柴油	42.8
烟煤	29.4	石油	44.1
无烟煤	33.6	煤油	46.2
干木柴	12.6	汽油	46.2
焦炭	29.8	氢气	142.8
木炭 (完全燃烧)	33.6	硝棉火药	3.8
木炭 (不完全燃烧)	约 10.5	硝化甘油	6.3
酒精	30.2	三硝基甲苯	3.1

在 101Kpa 下，一些物质的熔点和沸点

物质	熔点 t/	沸点 t/	物质	熔点 t/	沸点 t/
铝	660.37	2467	镍	1453	2732
钡	725	1640	铌	2468 ± 10	4742
铍	1278 ± 5	2970	钨	3045 ± 30	5027 ± 100
铋	271.3	1560 ± 5	铂	1772	3827 ± 100
硼	2079	2550	钾	63.25	760
镉	320.9	765	硒	217	684.9
钙	839 ± 2	1484	硅	1410	2355
铯	28.4	669.3	钽	1541	2836
铬	1857 ± 20	2672	钠	97.81	882.9
钴	1495	2870	硫	112.8	444.674
铜	1083.4	2567	钽	2996	5425 ± 100
镓	29.78	2403	锡	231.9681	2270
锗	973.4	2830	钛	1660 ± 10	3287
银	961.93	2212	钨	3410 ± 20	5660
金	1064.43	2808	铀	1132.3	3818
铁	1535	2750	锌	419.58	907
铅	327.502	1740	铋	630.74	1950
锂	180.54	1342	汞	-38.842	356.68
镁	648.8	1090	溴	-7.2	58.78
锰	1244 ± 3	1962	氧	-218.4	-182.96
钨	1021	3074	氮	-209.86	-195.8

在 101Kpa 下，一些物质的熔化热

物质	熔化热 $L_m/\text{KJ} \cdot \text{kg}^{-1}$	物质	熔化热 $L_m/\text{KJ} \cdot \text{kg}^{-1}$
铝	395.7	硫酸铅	132.3 (熔点: 1087)
三氧化二铝	1071.8 (熔点: 2072)	镁	372.2
铋	163.7	氧化镁	1921.7 (熔点: 2642)
钡	55.7	硫酸镁	121.0 (熔点: 1327)
氧化钡	390.2 (熔点: 1922.8)	汞	11.3
硫酸钡	174.2 (熔点: 1350)	钾	61.1
铍	1088.6	碳酸钾	236.1 (熔点: 897)
氧化硼	330.3 (熔点: 448.8)	氯化钾	359.6 (熔点: 770)
铊	50.2	氢氧化钾	147.8 (熔点: 360)
镉	54.0	银	104.7
碳酸钙	527.5 (熔点: 1282)	氯化银	92.1 (熔点: 455)
氧化钙	913.1 (燃点: 2707)	硝酸银	67.8 (熔点: 209)
硫酸钙	206.0 (熔点: 1297)	钠	114.7
二氧化碳	180.9 (熔点: -57.6)	碳酸钠	276.3 (熔点: 854)
铜	205.2	氯化钠	517.1 (熔点: 800)
氯化铜	103.4 (熔点: 430)	氢氧化钠	209.3 (熔点: 322)
一氧化铜	148.2 (熔点: 1446)	硝酸钠	185.1 (熔点: 310)
水	333.8	硫酸钠	171.7 (熔点: 884)
氧化铁	448.8 (熔点: 1380)	镓	80.0
四氧化三铁	596.6 (熔点: 1596)	铋	50.2
铅	24.7	锡	60.3

在 101Kpa 下，一些物质的汽化热

物质	汽化热 $L_n/\text{KJ} \cdot \text{Kg}^{-1}$	物质	汽化热 $L_n/\text{KJ} \cdot \text{Kg}^{-1}$
铋	1.56×10^3	锌	1.76×10^3
铬	6.15×10^3	二氧化碳	543 (沸点: 194.7K)
钴	6.4×10^3	一氧化碳	215 (沸点: 81K)
碘	0.173×10^3 (沸点: 457.5K)	氯	282 (沸点: 239K)
铈	3.90×10^3 (沸点: 4400K)	氢	446 (沸点: 20.26K)
磷	0.40×10^3 (沸点: 553K)	氯化氢	443 (沸点: 188K)
铂	2.67×10^3	汞	296
钾	2.15×10^3	水	2260 (沸点: 373.15K)
硒	0.76×10^3	氧	123
硅	10.6×10^3	氮	200
钠	3.9×10^3		

水在不同压强下的沸点

p/x	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
133.3Pa										
680	96.92	96.96	96.00	97.04	97.08	97.12	97.16	97.20	97.24	97.28
690	97.32	97.36	97.40	97.44	97.48	97.52	97.56	97.60	97.64	97.68
700	97.72	97.75	97.79	97.83	97.87	97.91	97.95	97.99	98.03	98.07
710	98.11	98.15	98.19	98.22	98.26	98.30	98.34	98.38	98.42	98.46
720	98.50	98.53	98.57	98.61	98.65	98.69	98.73	98.76	98.80	98.84
730	98.88	98.92	98.95	98.99	99.03	99.07	99.11	99.14	99.18	99.22
740	99.26	99.29	99.33	99.37	99.41	99.44	99.48	99.52	99.56	99.59
750	99.63	99.67	99.70	99.74	99.78	99.82	99.85	99.89	99.93	99.96
760	100.0	100.0	100.0	100.1	100.1	100.1	100.2	100.2	100.29	100.33
	0	4	7	1	5	8	2	6		
770	100.3	100.4	100.4	100.4	100.5	100.5	100.5	100.6	100.65	100.69
	6	0	4	7	1	5	8	2		

水在不同温度下的汽化热

温度 t/	汽化热 $L_n/J \cdot g^{-1}$
0	2493
50	2380
100	2258
150	2120
200	1961
250	1710
300	1383
370	415
374	0

1987 年我国规定的电冰箱指标

产品气候类型	气候环境温度 t/	使用环境温度 t/	箱内温度 t/			
			冷藏室	冷冻室		
亚温带型 (SN)	10 ~ 32	10 ~ 32	-10 ~ 10	一星	二星	三星
温带型 (N)	16 ~ 32	10 ~ 32	0 ~ 10	级室	级室	级室
亚热带型 (ST)	18 ~ 38	10 ~ 38	0 ~ 12	不高	不高	不高
热带型 (T)	18 ~ 43	10 ~ 43	0 ~ 12	于-6	于-12	不-18

某些国产电冰箱技术参数

型号	冷冻室容积 V/L	冷藏室温度 t/	冷冻室温度 t/	输入功率 P/W
BYD-185	40	0 ~ 7	< -18	135
BYD-160	30	0 ~ 5	< -18	90
BCD-220	78	0 ~ 10	< -18	100
BCD-160	50	0 ~ 10	< -18	120
BCD-170	35	0 ~ 10	< -18	93
BCD-185A	40	0 ~ 10	< -18	128
BCD-230	45	0 ~ 10	< -18	138

一些物质的临界温度和临界压强

物质	临界温度 t/	临界压强 p/MPa	物质	临界温度 t/	临界压强 p/MPa
氮	-147.1	3.39	丙酮	235	4.76
氢	-239.9	1.3	甲醇	240	7.97
氧	-118.8	5.03	乙醇	243.1	6.38
氨	-267.9	0.2	丙醇	263.7	5.07
二氧化碳	31.1	7.39	甲苯	320.6	4.21
水	374.15	22.11	醋酸	321.6	5.79
甲烷	-82.5	4.64	氨	132.35	11.3
苯	288.6	4.83			

不同温度下饱和水汽的压强和密度

温度	压强	密度	温度	压强	密度
t/	p/KPa	/g · m ⁻³	t/	p/KPa	/g · m ⁻³
-35	0.023	0.22	24	2.983	21.81
-30	0.037	0.35	28	3.779	27.26
-25	0.063	0.57	32	4.755	33.85
-20	0.103	0.91	36	5.941	41.74
-15	0.165	1.39	40	7.377	50.17
-10	0.260	2.15	44	9.102	62.38
-6	0.368	2.99	48	11.164	75.00
-2	0.517	4.14	50	12.34	83.0
0	0.611	4.85	54	15.00	99.5
4	0.813	6.37	58	18.14	119.2
8	1.072	8.28	62	21.83	141.8
12	1.401	10.67	66	26.14	168
16	1.817	13.65	70	31.15	198
20	2.337	17.32	74	36.95	232.4

续表

温度 t /	压强 p/KPa	密度 /g · m ⁻³	温度 t /	压强 p/KPa	密度 /g · m ⁻³
78	43.63	271.7	110	143.3	824
82	51.31	316.2	115	169.0	962
86	60.11	366.7	120	198.5	1120
90	70.09	423.5	130	270.1	1494
94	81.43	486.9	140	361.2	1970
98	94.28	558.7	160	618.0	3260
100	101.31	598	200	1554.0	7850
105	120.8	703	300	8580.0	46300

几种物质三相点的温度与压强

物质	温度 T/K	压强 p/KPa	物质	温度 T/K	压强 p/KPa
氮	63.14	12.53	氨	195.5	6.06
氧	54.36	0.15	二氧化碳	216.56	518
氛	24.56	43.1	水	273.16	0.61
氢	13.81	7.04			

空气的相对湿度

		干球温度计与湿球温度计的温度差 t/										
干球温度计读数	t/	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
	t/	相 对 湿 度 (%)										
	0	100	81	63	45	28	11					
	1	100	83	65	48	32	16					
	2	100	84	68	51	35	20					
	3	100	84	69	54	39	24	10				
	4	100	85	70	56	42	28	14				
	5	100	86	72	58	45	32	19	6			
	6	100	86	73	60	47	35	23	10			
	7	100	87	74	61	49	37	25	14			
	8	100	87	75	63	51	40	28	18	7		
	9	100	88	76	64	53	42	31	21	11		
	10	100	88	76	65	54	44	34	24	14	4	
	11	100	88	77	66	56	46	36	26	17	8	
	12	100	89	78	68	57	48	38	29	20	11	
	13	100	89	79	69	59	49	40	31	23	14	6
	14	100	89	79	70	60	51	42	33	25	17	9
	15	100	90	80	71	61	52	44	36	27	20	12

续表

干泡温度计读数 t/	干泡温度计与湿泡温度计的温度差 t/										
	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
	相 对 湿 度 (%)										
16	100	90	81	71	62	54	45	37	30	22	15
17	100	90	81	72	64	55	47	39	32	24	17
18	100	91	82	73	64	56	48	41	34	26	20
19	100	91	82	74	65	58	50	43	35	29	22
20	100	91	83	74	66	59	51	44	37	30	24
21	100	91	83	75	67	60	52	46	39	32	26
22	100	92	83	76	68	61	54	47	40	34	28
23	100	92	84	76	69	61	55	48	42	36	30
24	100	92	84	77	69	62	56	49	43	37	31
25	100	92	84	77	70	63	57	50	44	38	33
26	100	92	85	78	71	64	58	51	45	40	34
27	100	92	85	78	71	65	59	52	47	41	36
28	100	93	85	78	72	65	59	53	48	42	37
29	100	93	86	79	72	66	60	54	49	43	38
30	100	93	86	79	73	67	61	55	50	44	39
32	100	93	86	80	74	68	62	57	51	46	41
34	100	93	87	81	75	69	63	58	53	48	43
36	100	94	87	81	75	70	64	59	54	50	45
38	100	94	88	82	76	71	66	61	56	51	47
40	100	94	88	82	77	72	67	62	57	53	48

某些国产空调器的技术参数

类别	型号规格	形式	制冷量 P/W	制热量 P/W	电源	功率 P/W
窗式空调器	KCS-12	竖窗式	1400		单相	685
	KCS-18	竖窗式	2093			1000
	KC-16	窗式单冷	1860			900
	KC-18	窗式单冷	1800			800
	KC-25	窗式单冷	2500			1080
	KC-28D	窗式电热	3250			3100
	KC-30	窗式单冷	3488			1530
	KC-30D	窗式电热	3488	3488		3020

续表

类别	型号规格	形式	制冷量 P/W	制热量 P/W	电源	功率 P/W
壁挂式空调器	KGW-45R	分体壁挂	5035	5035		2280
	KFG-40	分体壁挂	4680			1750
	FCT-400	分体落地	3837			1400
	KLW-45R	分体落地	6244	6244		2280
	FCT-600	分体落地	4880			2000
	KFL-70D	分体落地	8300	2580		2600
	KFL-112D	分体落地	1295	4300	三相	4500
柜式空调器	TGC-012	分体柜式	10000		单相	3600
	TGC-020	分体柜式	16800		三相	5600

几种制冷剂的物理性质

名称	化学式	相对分子质量	沸点 t/ (101KPa)	临界温度 t/	临界压强 p/MPa	冰点 t/ (101KPa)
水	H ₂ O	18.016	100.00	374.15	22.11	0.00
氨	NH ₃	17.031	-33.4	132.35	11.3	-77.7
氟里昂 11	CFCl ₃	137.382	-23.7	198.0	4.196	-111
氟里昂 12	CF ₂ Cl ₂	120.925	-29.8	112.04	3.96	-155
氟里昂 13	CF ₃ Cl	104.468	-81.50	28.78	3.936	-180.0
氟里昂 22	CHF ₂ Cl	86.48	-40.80	96.00	—	-160.0
氟里昂 113	C ₂ F ₃ Cl ₃	187.39	47.6	214.10	—	-36.5
氟里昂 142	C ₂ H ₃ F ₂ Cl	100.48	-9.21	137.10	—	-130.8
二氧化碳	CO ₂	44.011	-78.48	31.1	7.39	-56.6
二氧化硫	SO ₂	64.06	-10.00	157.3	7.78	-75.3
氯甲烷	CH ₃ Cl	50.49	-23.74	143.1	6.59	-97.6

物质的热导率（常温下）

物质	热导率 $/\text{w} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$	物质	热导率 $/\text{w} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$
铝	209.3	花岗岩	3.14
铁	74.4	粘土	0.7 ~ 0.93
金	312.8	钢筋混凝土	1.55
黄铜	85.5	纸板	0.14 ~ 0.35
铜	389.6	砖垛	0.67 ~ 0.87
汞	29.1	皮革	0.14 ~ 0.16
钢	45.4	冰(-4)	2.21
铸铁	62.8	软木板	0.042 ~ 0.054
石棉纸	0.134 ~ 0.177	新下的雪	0.105
石棉纸板	0.157	压紧的雪	0.35
石棉毡	0.052 ~ 0.093	开始熔化的雪	0.64
毛毡	0.047 ~ 0.058	松木(顺纤维)	0.35 ~ 0.41
玻璃棉	0.035 ~ 0.081	松木(横纤维)	0.14 ~ 0.16
泡沫玻璃	0.073 ~ 0.107	炉渣混凝土	0.233
芦苇根	0.105	抹灰	0.698
(薄板)		玻璃	0.90
泡沫板	0.038	空气	0.026
泡沫混凝土	0.07 ~ 0.32		
土		氢	0.19
炉渣	0.233 ~ 0.372	水	0.60
碎石混凝土	1.28		
土		变压器油	0.135
普通纸	0.14	润滑油	0.133
乙烯板	0.13	蓖麻油	0.181
砾石	0.36		

固体的线胀系数(0 ~ 100 范围内的平均值)

物质	线胀系数 $a_t / \times 10^{-6} K^{-1}$	物质	线胀系数 $a_t / \times 10^{-6} K^{-1}$	物质	线胀系数 $a_t / \times 10^{-6} K^{-1}$	物质	线胀系数 $a_t / \times 10^{-6} K^{-1}$
铝	23.2	镁	25.6	硫	61	硬橡胶	85
铋	11.0	锰	22.8	锡	21.2	花岗岩	8
铍	11.5	钼	5.0	钛	8.5	石膏	25
钡	16.4	镍	12.7	钨	4.5	冰 (-4)	50
钙	22.3	铌	7.1	铀	13.5	大理石	5 ~ 16
金刚石	1.1	钽	4.7	锌	29.7	云母	3
石墨	8.8	铂	8.9	锆	5.4	石蜡	100 ~ 200
铬	8.5	磷	127	铸铁	11	尼龙	100 ~ 140
钴	13.7	钐	57	康铜	15	聚乙烯	100 ~ 200
铜	16.8	钾	83	因瓦	2.0	聚苯乙烯	60 ~ 80
				钢			
金	14.1	铯	8.3	(FE6		聚氯乙烯	150 ~ 200
				4,Ni			
				36)			
碘	87	硒	26	钢	11.5	瓷器	2 ~ 5
铱	6.5	硅	2.5	砖	8 ~ 10	石英	0.4
铁	11.7	银	19.2	混凝土	12	木材 (松)	5 ~ 30
				土			
铅	28.9	钠	69.6	玻璃	8		

液体的体胀系数 (20 ~ 100 范围内的平均值)

物质	体胀系数 $/ \times 10^{-3} \text{ }^{-1}$	物质	体胀系数 $/ \times 10^{-3} \text{ }^{-1}$
丙酮	1.43	甘油	0.505
苯胺	0.85	润滑油	0.96
苯	1.15	汞	0.182
溴	1.12	甲醇	1.20
二硫化碳	1.22	橄榄油	0.72
四氯化碳	1.22	硫酸	0.56
蓖麻油	0.69	甲苯	1.09
二乙醚	1.62	变压器油	1.00
乙醇	1.10	水	0.18

气体的体胀系数和相对压力系数 (0 , 101Kpa)

气体	体胀系数 / $^{-1}$	相对压力系数 $a_p / ^{-1}$
氢	3.658×10^{-3}	3.660×10^{-3}
氦	3.660×10^{-3}	3.661×10^{-3}
氮	3.673×10^{-3}	3.674×10^{-3}
空气	3.676×10^{-3}	3.675×10^{-3}
二氧化碳	3.741×10^{-3}	3.726×10^{-3}
氧	3.67×10^{-3}	3.67×10^{-3}
氨	3.80×10^{-3}	3.80×10^{-3}
二氧化硫	3.85×10^{-3}	3.661×10^{-3}
氟		3.671×10^{-3}
氯		3.833×10^{-3}
各种气体 (近似值)	$\frac{1}{273}$	$\frac{1}{273}$

晶系与布喇菲格子

晶系	单胞基矢的特性	布喇菲格子	晶系	单胞基矢的特性	布喇菲格子
三斜晶系	$a_1 \ a_2 \ a_3$ 夹角不等	简单三斜	四方晶系	$a_1=a_2 \ a_3$ $a= \ =90^\circ$	简单四方 体心四方
单斜晶系	$a_1 \ a_2 \ a_3$ $a_2 \ a_1, a_3$	简单单斜 底心单斜	六角晶系	$a_3 \ a_1, a_2$ a_1, a_2 夹角 120°	六角
正交晶系	$a_1 \ a_2 \ a_3$ 互相垂直	简单正交 底心正交 面心正交	立方晶系	$a_1=a_2=a_3$ $a= \ =90^\circ$	简单立方 体心正方 面心立方
三角晶系	$a_1=a_2=a_3$ $a= \ = < 120^\circ, 90^\circ$	三角			

气体和蒸气分子的一些数据

在 0 和 101KPa 下							
气体或 蒸气 名称	分子式	相对分 子质量	分子质量 $m/10^{-27}\text{kg}$	分子直径 $d/10^{-10}\text{m}$	分子平均 速度 $v/\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$	平均自 由程 $S/10^{-10}\text{m}$	每个分子 每秒平均 碰撞次数
氢	H ₂	2.0158	3.35	2.3	1692.0	1123	15.1×10^9
氦	He	4.0026	6.65	1.9	1204.0	1798	6.9×10^9
甲烷	CH ₄	16.043	26.64		600.6	493	
氨	NH ₃	17.030	28.28		582.7	441	
水蒸气	H ₂ O	18.016	29.92	2.6	566.5	404	14.1×10^9
氖(20)	Ne	20.179	33.51		555.2	1238	4.48×10^9
一氧化碳	CO	28.010	46.51	3.2	454.5	584	7.8×10^9
氮	N ₂	28.013	46.52	3.1	454.3	599	7.55×10^9
一氧化氮	NO	30.006	49.83	2.9	439.0	570	
氧	O ₂	31.998	53.14	2.9	425.1	647	6.55×10^9
		8					
甲醇蒸气	CH ₃ OH	32.042	53.21		424.9	327	
氯化氢(20)	HCl	36.461	60.55		412.6	426	9.69×10^9
氩	Ar	39.948	66.34	2.8	381.0	635	6.02×10^9
二氧化碳	CO ₂	44.011	73.08	3.2	362.5	397	9.05×10^9
乙醇蒸气	CH ₃ · C H ₂ OH	46.069	76.50		354.4	215	
醋酸蒸气	CH ₃ · C OOH	60.052	99.72		310.4	152	
乙醚蒸气	(C ₂ H ₅) ₂ O	74.122	123.09	4.2	279.4	152	
二硫化碳蒸 气	CS ₂	76.13	126.42		275.6	201	
苯蒸气	C ₆ H ₆	78.113	129.71	4.1	272.2	138	
氪(20)	Kr	83.80	139.16		272.6	472	5.78×10^9
氙(20)	Xe	131.30	218.04		217.7	345	6.31×10^9
四氯化碳蒸 气	CCl ₄	153.82	255.43		193.9	206	
汞蒸气	Hg	200.59	333.10		170.0	217	
空气			47.98	3.1	446.9	608	

0 时氧气分子的速率分布（根据麦克斯韦速率分布律）

按速率大小而划分的区间 $v/m \cdot s^{-1}$	$\frac{N}{N}$ % 分子数的百分率 ^N
100 以下	1.4
100 ~ 200	8.1
200 ~ 300	16.5
300 ~ 400	21.4
400 ~ 500	20.6
500 ~ 600	15.1
600 ~ 700	9.2
700 ~ 800	4.8
800 ~ 900	2.0
900 以上	0.9

液体的等温压缩率

液体	等温压缩率 $K_r/10^{-5}Pa^{-1}$	液体	等温压缩率 $K_r/10^{-5}Pa^{-1}$
水银	3.9×10^{-6}	煤油	7.7×10^{-5}
甘油	2.5×10^{-5}	松节油	7.9×10^{-5}
水	4.6×10^{-5}	二硫化碳	8.9×10^{-5}
蓖麻子油	4.7×10^{-5}	酒精	1.10×10^{-4}
橄榄油	6.3×10^{-5}	乙醚	1.83×10^{-4}

注：液体的等温压缩率表示每增加 10^5Pa 时，液体所减少的体积跟原体积的比。等温压缩率的数值跟温度、压强也有关系，本表列示的是在常温和不很高的压强下的等温压缩率

气体压强与体积的关系

压强 (101KPa)	pV 值 (0 时)			
	氢	氮	氧	空气
1	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000
2	1.0003			0.9998
100	1.0690	0.9941	0.9265	0.9730
200	1.1380	1.0483	0.9140	1.0100
500	1.3565	1.3900	1.1560	1.3400
1000	1.7200	2.0685	1.7355	1.9920

一些物质的粘度 (101KPa , 20)

物质	粘度 / $\times 10^{-4} \text{Pa} \cdot \text{s}$	物质	粘度 / $\times 10^{-5} \text{Pa} \cdot \text{s}$
水	10.02	空气	1.81
苯	6.5	氮	1.76
四氯化碳	9.7	氧	2.00
原油	72	氢	0.90
汽油	2.9	氦	1.97
甘油	14900	二氧化碳	1.48
煤油	19.2	一氧化碳	1.82
汞	15.6	甲烷	1.34
SAE10 油	820	水蒸气	1.01
SAE30 油	4400		

水在不同温度下的粘度

温度 t/	粘度 / $\times 10^{-5} \text{Pa} \cdot \text{s}$	温度 t/	粘度 / $\times 10^{-5} \text{Pa} \cdot \text{s}$
-40	1.49	40	1.90
-20	1.61	60	2.00
0	1.71	80	2.09
10	1.76	100	2.18
20	1.81	200	2.58
30	1.86		

液体的表面张力 (20)

物质	表面张力 $/ \times 10^{-3} \text{N} \cdot \text{m}^{-1}$	物质	表面张力 $/ \times 10^{-3} \text{N} \cdot \text{m}^{-1}$
水	72.8	硫酸	57.4
甘油	59.4	甲醇	22.6
煤油	28.9(0)	乙醇	22.8
蓖麻油	36.4(18)	丙醇	23.8
橄榄油	33.06(18)	甲苯	28.5
石油	26.0	醋酸	27.8
硝酸	59.4	乙醚	16.9
丙酮	23.7	安尼林	42.9
苯	29.0	汞	465
硝基苯	43.9		

不同温度下水和酒精的表面张力 $/ \times 10^{-3} \text{N} \cdot \text{m}^{-1}$

物质	温度 $t/$											
	0	30	60	90	120	150	180	210	240	300	370	
水	75.6	74.18	66.18	60.75	54.9	48.63	42.25	35.4	28.57	14.40	0.47	
酒精	24.4	21.9	19.2	16.4	13.4	10.1	6.7	3.3	0.1	—	—	

主要参考资料

1. 游伯坤, 詹宝琦. 温度测量仪表. 第1版. 北京: 机械工业出版社, 1982.
2. 辽宁省工人技术培训教材编委会. 机械工程材料. 第1版. 沈阳: 辽宁科技出版社, 1983.
3. 辽宁省计量局科教处. 温度计量. 第1版. 北京: 中国计量出版社, 1984.
4. [瑞典] 卡尔·诺林(Nordling, C.), 奥斯特曼(österman, J.) 物理学手册. 胡兴中, 胡淑敏. 第1版, 郑州: 河南科学技术出版社, 1986.
5. [苏] 科什金, 什尔克维奇. 基础物理学手册. 张禄荪. 第1版, 北京: 教育科学出版社, 1990.
6. CRC. Handbook of chemistry and Physics. 69th, Ed.
7. [美] 沃克(Wark, K.). 热力学, 上册. 马元. 第1版, . 北京: 人民教育出版社, 1981.

8. 中学物理教师手册编写组. 中学物理教师手册. 第1版, 上海: 上海教育出版社, 1983.

9. 华自强等. 工程热力学. 第2版. 北京: 高等教育出版社, 1986.

10. 黄昆. 固体物理学. 第1版. 北京: 人民教育出版社, 1979.

11. 江宏俊. 西安交通大学流体力学教研室. 流体力学, 下册. 北京: 高等教育出版社, 1985.

12. 胜利炼油厂, 华东石油学院编. 炼油工艺基础. 第1版. 北京: 燃料化学工业出版社, 1973.

13. 冯玉琪、卢道卿. 实用空调、制冷设备维修大全——电冰箱、冷藏箱(冷藏库)、空调机……第1版. 北京: 电子工业出版社.

五、电磁学 静电的摩擦次序

次序	根据西耳斯比	根据金斯	根据莱密开	根据赫西和蒙哥马利
1	石棉	猫皮	玻璃	羊毛
2	玻璃	玻璃	人发	尼龙
3	云母	象牙	尼龙丝	粘胶丝
4	羊毛	绢	尼龙聚合物	木棉
5	猫皮	水晶	羊毛	绢
6	铅	手	绢	醋酸盐
7	绢	木材	粘胶人造丝	丙烯树脂
8	铝	硫磺	木棉	聚乙烯醇
9	纸	法兰绒	纸	达奈耳 (Dinell, 一种合成纤维)
10	木棉	木棉	苧麻	维纶
11	封口蜡	虫胶	钢	聚乙烯
12	硬橡胶	弹性橡胶	硬橡胶	聚四氟乙烯
13	黄铜	树脂	醋酸盐人造丝	
14	硫磺	硬橡胶	合成橡胶	
15	白金	金属	聚丙烯腈	
16	生橡胶	火药棉	奥纶 (的一种) 聚 乙烯	

注: 表中两种物质摩擦时序号在前面的带正电, 序号相隔越远, 效果越好.

因物体表面情况等因素的不同, 实验结果会有出入, 表中次序仅供参考

有关雷电的参考数据

地球平均每年发生雷电次数	16×10^6 次	闪电中的电压	几万伏 ~ 十亿伏
每次放电时间	几万分之一秒 ~ 0.13 秒	每次闪电消耗的电能	2×10^8 焦 ~ 10^{13} 焦
平均每次放电时间 雷电云的厚度 (约)	0.03 秒 ($2 \sim 5$) $\times 10^3$ 米	线状闪电的火花长度 球状闪电的火花直径	几千米 ~ 几十千米 10 厘米 ~ 20 厘米 (大的有 10 米, 但很少)
雷电云的底离地面高度	几百米 ~ 几千米	落地雷占雷电的次数	约十之一
闪电中的电流	($2 \sim 20$) $\times 10^4$ 安		

有关电压的一些数据

名称	电压 U/V
日光灯	220
电风扇	220
无轨电车	550~600
列车上的电灯 (直流)	110
电弧	40
实验室用感应圈	1×10^4
电视机中高压	($1\sim 3$) $\times 10^4$
炼钢电炉	120~150
直流电力机车	3300
汽车发电机	12~24
一般交流电动机	220,380
发生闪电的云层间	可达 10^9
超高压输电已达	5.00×10^5

有关电流的一些数据

名称	电流 I/A
电子手表	$(1.5\sim 2) \times 10^{-6}$
晶体管收音机	$(1\sim 10) \times 10^{-2}$
彩色电视机	$(2.5\sim 9) \times 10^{-1}$
普通家用白炽电灯	约 $(1\sim 3) \times 10^{-1}$
汽车发电机	约 20
220V,1000W 电炉	5
闪电	$(2\sim 20) \times 10^4$

某些电器设备的功率

名称	功率 P/W
白炽灯泡	15~100
日光灯	3~40
电风扇	30~70
常用的电烙铁	20~100
54cm 彩色电视机	约 70
农村常用电动机	$(2.8\sim 10) \times 10^3$
半导体收音机 (六管)	0.06~0.4
家用电冰箱	100~140
洗衣机	约 200
吸尘器	800
电饭锅	350~1350
微波炉	约 600~1000
空调器	约 700~1500
大型发电机	$(0.5\sim 100) \times 10^7$

由某些元素、合金与铅组成的温差电偶的温差电动势

温差电偶的冷端温度为 0 ，则

温差电动势 $(\mu V) = At + Bt^2$ ，

式中 A、B 的数值见下表，它受纯度和结构等因素的影响，是近似值。t 为热端温度。

应用该式计算出的温差电动势若为正值，表明在热端结点处电流由铅流出。

金属	A	B	温度范围 t/
铝	-0.50	0.00086	0~200
铋	-75	-	0~100
钨	1.59	0.017	0~100
铁	16.7	-0.015	-230~100
金	2.9	0.0046	0~200
黄铜	0.14	0.0026	0~200
铜	2.76	0.006	0~100
德银	-10.9	-0.016	-200~100
镍	-16.3	-0.027	-200~100
镍铜合金	-38.1	-0.045	0~400
镍铬合金	25	-	0~420

续表

金属	A	B	温度范围 t/
锡	-0.17	0.009	0~200
铂	-3.0	-0.016	-200~300
汞	-8.8	-0.016	0~200
银	3.0	0.0034	-200~100
锌	3.05	-0.01	0~100
铱	2.4	-0.0014	-80~100

几种常用温差电偶

电偶名称	冷端 0 热端 100 时的电动势 E/mV	使用温度 t/
铜 - 康铜 $\left(\begin{array}{l} \text{Cu}55\% \\ \text{Ni}45\% \end{array} \right)$	4.26	-200~300
镍铬 $\left(\begin{array}{l} \text{Cr}9-10\% \\ \text{Si}0.4\% \\ \text{Ni}90\% \end{array} \right)$ - 考铜 $\left(\begin{array}{l} \text{Cu}56-57\% \\ \text{Ni}43-44\% \end{array} \right)$	6.95	-200~800
镍铬 $\left(\begin{array}{l} \text{Cr}9-10\% \\ \text{Si}0.4\% \\ \text{Ni}90\% \end{array} \right)$ - 镍硅 $\left(\begin{array}{l} \text{Si}2.5-3.0\% \\ \text{Co} < 0.6\% \\ \text{Ni}97\% \end{array} \right)$	4.10	1200
铂铑 $\left(\begin{array}{l} \text{Pt}70\% \\ \text{Rh}30\% \end{array} \right)$ - 铂铑 $\left(\begin{array}{l} \text{Pt}94\% \\ \text{Rh}6\% \end{array} \right)$	0.034	1800
铂铑 $\left(\begin{array}{l} \text{Pt}90\% \\ \text{Rh}10\% \end{array} \right)$ - 铂(Pt100%)	0.643	1600
镍铬 $\left(\begin{array}{l} \text{Ni}90\% \\ \text{Cr}10\% \end{array} \right)$ - 镍铝 $\left(\begin{array}{l} \text{Ni}95\% \\ \text{Al, Si, Mn}5\% \end{array} \right)$	4.15	0~1300

金属元素的电势序

元素名称	元素符号	化合价	标准电势 U/V	元素名称	元素符号	化合价	标准电势 U/V
锂	Li	1	-3.02	铅	Pb	2	-0.130
钾	K	1	-2.92	锡	Sn	2	-0.1
钡	Ba	2	-2.96	铁	Fe	3	-0.04
钠	Na	1	-2.71	氢	H	1	0
锶	Sr	2	-2.95	锑	Sb	3	+0.2
钙	Ca	2	-2.8	铋	Bi	3	+0.28

续表

元素名称	元素符号	化合价	标准电势 U/V	元素名称	元素符号	化合价	标准电势 U/V
铝	Al	3	-2.35	砷	As	3	+0.3
镁	Mg	2	-1.28	铜	Cu	2	+0.345
锰	Mn	2	-1.1	钴	Co	3	+0.4
锌	Zn	2	-0.76	铜	Cu	1	+0.522
铬	Cr	2	-0.557	铊	Tl	3	+0.72
铬	Cr	3	-0.509	银	Ag	1	+0.8
铁	Fe	2	-0.4	钯	Pd	2	+0.82
镉	Cd	2	-0.4	汞	Hg	2	+0.86
铊	Tl	1	-0.336	金	Au	3	+1.38
钴	Co	2	-0.255	金	Au	1	+1.5
镍	Ni	2	-0.250	硫	S	2	

注：表中所列金属元素的标准电势，是以该元素所构成的电极与氢电极组成电池时电极间的电势差。标准电势的测定，是以室温下标准氢电极的电势为零而作的。

几种伽伐尼电池的材料及电动势

电池名称	电极和电解液材料	电动势 E/V
丹聂耳电池	锌在浓度 5~10% 的硫酸溶液中，铜在饱和的硫酸铜溶液中；多孔筒	1.1
本生电池	锌在硫酸溶液中，碳在浓硝酸溶液中；多孔筒	1.8
麦丁根电池	锌浸在硫酸镁溶液中，铜在饱和的硫酸铜溶液中	1
克留亥尔电池	锌在硫酸溶液中，用铅皮包铜放在硫酸铜的饱和溶液中	1
铬电池	锌和碳浸在铬酸钾及硫酸溶液中	2
铅蓄电池	铅及二氧化铅浸于硫酸溶液中	2
爱迪生蓄电池	粉状及二氧化镍浸于 21% 的氢氧化钾溶液中	1.3~1.4
银锌蓄电池	正极为氧化银、负极为锌，电解液为氢氧化钾	约 1.5

国产干电池特性

型号	名称	标称电压 U/V	放电时间	放电规则			保存期限	主要用途
				终止电压 U/V	放电电阻 R/ Ω	放电方法		
R ₂₀	一号电池	1.5	850min	0.75	5	每天 30min 每周 6d	1 年	收音机、照明 一般试验
			40h	0.90	40	每天 4h 每周 6d		
R ₁₄	二号电池	1.5	300min	0.75	5	每天 10min 每周 6d	9 个月	同上
R ₁₀	四号电池	1.5	110min	0.75	5	每天 5min 每周 6d	9 个月	同上
R ₆	五号电池	1.5	85min	0.75	5	每天 5min 每周 6d	9 个月	同上
R ₄₀	一号甲电池 (圆甲电池)	1.5	180h	1.00	10	连 续	1 年	收音机、照明、试验
S ₃	二号甲电池 (小方甲电池)	1.5	110h	0.70	10	连 续	9 个月	同上
S ₄	三号甲电池 (大方甲电池)	1.5	320h	0.70	10	连 续	1 年	同上
30R ₂₀	乙电池	45	165h	30	2500	连 续	1 年	扩音机
3R ₁₂	丙电池 (扁电池)	4.5	150 min	2.0	10	连 续	6 个月	收音机、仪表、照明
4F ₂₂	6 伏 叠层电池	6	35h	3.6	600	每天 4h 每周 6d	9 个月	收音机
6F ₂₂	9 伏 叠层电池	9	32h	5.4	900	每天 4h 每周 6d	9 个月	收音机
4F ₄₅₋₂	方 6 伏 叠层电池	6	68h	3.6	300	每天 4h 每周 6d	9 个月	收音机
10F ₂₀	15 伏 叠层电池	15	90h	10	15000	连 续	9 个月	仪表、医用
10F ₂₀	22.5 伏 叠层电池	22.5	70h	15	22500	连 续	9 个月	仪表、医用
30F ₁₀₀	45 伏 叠层电池	45	100h	30	2.5K	连 续		仪表、仪器

国产钮扣电池的常见规格

品种	外形尺寸		开路电压 U/V	标称电压 U/V	容量 Q/10 ⁻³ A · h	质量 m/g	用途
	直径 d/mm	高度 h/mm					
锌-空气 电池	7.9	5.4	1.4		100	1.0	可供电子手表、微型 电子计算器 等用
	11.6	4.2	1.4		240	1.3	
碱锰电池	11.6	5.4		1.5	60	2.0	可供电子手表、微型 电子计算器 等用
	11.6	4.2		1.5	40	1.5	
	11.6	3.0		1.5	25	1.2	

续表

品 种	外形尺寸		开路电压 U/V	标称电压 U/V	容量 Q/10 ⁻³ A · h	质量 m/g	用途
	直径 d/mm	高度 h/mm					
锂-锰 电池	12.5	2.0		3	30	0.8	可供电子手表 微型电子计算 器等用
	13.0	2.0		3	50	1.2	
	20.0	1.6		3	50	2.0	
	20.0	2.5		3	120	2.5	
	20.0	3.2		3	170	3.0	
	24.5	2.0		3	120	3.0	
	24.5	3.0		3	200	4.0	

几种国产密封圆柱镉-镍电池(电动势为 1.2V)

国家标准 命名	IEC 标准命名*	容量 Q/A · h	直径 d/mm	高 h/mm	应 用
GN Y0.2	KR12/30	0.2	12	30	
GN Y0.5	KR15/51	0.5	14.5	50	收音机、照明
GN Y1.5	KR27/51	1.5	26	50	收音机、照明
GN Y2.5	KR35/44	2.5	34	44	
GN Y3.5	KR35/62	3.5	34	61.5	收音机、照明

注：IEC 标准命名是指国际电工委员会的命名

硅太阳能电池

型号	电性能 光强 · 100mW/cm ² 温度：30		光电池面积 S/mm ²	备注
	开路电压 U/mV	短路电流 I/mA		
2DR2	>480	>1.8	2 × 5	
2DR3	>480	>3	3.5 × 5	
2DR4	>480	>4	2 × 10	
2DR5	>480	>3	4 × 4	
2DR6	>480	>6	5 × 5	

续表

型号	电性能 光强 · 100mW/cm ² 温度：30		光电池面积 S/mm ²	备注
	开路电压 U/mV	短路电流 I/mA		
2DR6-1	>480	>6	5 × 5	胶本底板
2DR10	>500	>10	5 × 10	
2DR10-1	>500	>10	5 × 10	有保护装置
2DR10-2	>500	>10	6 × 10	有保护装置
2DR15	>500	>15	10 × 10	有聚光、保护
2DR20	>500	>20	10 × 20	装置
2DR50	>500	>50		
2DR65	>500	31~55		φ15mm
2DR75	>500	50~95		φ20mm
2DR85	>500	85~145		φ25mm

氧化银电池（平均工作电压 1.4V~1.5V）

尺寸		容量 Q/10 ⁻³ A · h	用途	尺寸		容量 Q/10 ⁻³ A · h	用途
直径 d/mm	高度 h/mm			直径 d/mm	高度 h/mm		
11.6	5.4	150	可供电子手表、 电子计算器、助 听器等等用	9.5	1.0	4.5	可供电子手表、电 子计算器、助听器 等等用
11.6	4.2	100		9.5	1.65	18	
11.6	3.6	80		7.9	5.4	70	
11.6	3.0	60		7.9	3.6	40	
11.6	2.0	40		7.9	2.0	18	
11.6	1.6	26		6.8	2.15	15	

锂电池

分类	名称	电解液组成	正极材料	开路电压 U/V	工作电压 U/V
3V 锂电池	锂-二氧化硫	LiBr-PC,AN,SO ₂	碳黑,石棉	2.9	2.8
	锂-亚硫酸酐	LiAlCl ₄ -SOCl ₂	碳黑	3.6	3.3
	锂-二氧化锰	LiClO ₄ -PC,DME	电解锰粉	3.5	2.8
	锂-氟化碳	LiBF ₄ -BL	氟化碳	3.2	2.6
	锂-铬酸银	LiClO ₄ -PC	铬酸银	3.4	3.0
	锂-硫化铜	LiClO ₄	硫化铜	3.5	2.1
1.5V 锂电池	锂-氧化铋	LiClO ₄ -PC	氧化铋		1.6
	锂-氧化铅	LiClO ₄ -PC	氧化铅		1.5
	锂-氧化铜	LiClO ₄ -PC,DME	掺锂氧化铜		1.6
	锂-硫化铁	LiClO ₄ -PC	硫化铁	1.72	1.6

金属电阻率及其温度系数

物质	温度 t/	电阻率 $\rho / \times 10^{-8} \Omega \cdot m$	电阻温度系数 $\alpha_R / ^{-1}$
银	20	1.586	0.0038(20)
铜	20	1.678	0.00393(20)
金	20	2.40	0.0034(20)
铝	20	2.6548	0.00429(20)
钙	0	3.91	0.00416(0)
铍	20	4.0	0.025(20)
镁	20	4.45	0.0165(20)
钼	0	5.2	
铌	20	5.3	0.003925(0 ~100)
钨	27	5.65	
锌	20	5.916	0.00419(0 ~100)
钴	20	6.64	0.00604(0 ~100)
镍	20	6.84	0.0069(0 ~100)
镉	0	6.83	0.004(0)
铟	20	8.37	
铁	20	9.71	0.00651(20)
铂	20	10.6	0.00374(0 ~60)
锡	0	11.0	0.0047(0 ~100)
铷	20	12.5	
铬	0	12.9	0.003(0 ~100)
镓	20	17.4	
铊	0	18.0	
铯	20	20	
铅	20	20.684	0.00376(20 ~40)
铋	0	39.0	
钛	20	42.0	
汞	50	98.4	
锰	23~100	185.0	

合金的电阻率及其温度系数

名称	主要成分%	电阻率 (20) $\rho / \times 10^{-6} \Omega \cdot m$	电阻温 度系数 $\alpha_R / \times 10^{-6}^{-1}$	最高工 作温度 t/	特 点
康铜	Ni39~41 Mn1~2 Cu 余量	0.48	50	500	抗氧化性能良好

续表

名称	主要成分%	电阻率 (20) $\rho / \times 10^{-6} \Omega \cdot m$	电阻温 度系数 $\alpha_R / \times 10^{-6}^{-1}$	最高工 作温度 t/	特 点
新康铜	Mn10.8~12.5 Al 2.5~4.5 Fe 1.0~1.6 Cu 余量	0.48	50	500	抗氧化性能 比康铜差， 价较廉
镍铬	Cr20~23 Ni 余量	1.09	70	500	焊接性能较差
镍铬铁	Cr15~18 Ni55~61 Fe 余量	1.12	150	500	焊接性能较差
铁铬铝	Cr 12~15 Al 3.5~5.5 Fe 余量	1.26	120	500	焊接性能较差

绝缘体的电阻率

名称	电阻率 $\rho/\Omega \cdot m$	名称	电阻率 $\rho/\Omega \cdot m$
云母	$10^{13} \sim 10^{15}$	羊毛	$10^9 \sim 10^{11}$
钠玻璃	$10^8 \sim 10^{15}$	丙烯纤维	$10^{10} \sim 10^{12}$
硬橡胶	2.7×10^9	木棉	10^9
酚醛树脂	1.3×10^{13}	汽油	2.5×10^{13}
天然橡胶	2×10^{15}	苯	4.2×10^{12}
聚氯乙烯	2.5×10^{12}	煤油	7.3×10^{14}
聚乙烯	4.5×10^{15}	轻油	1.3×10^{14}
尿素树脂	1.5×10^{13}	航空汽油	2.1×10^{14}
聚苯乙烯	3.3×10^{16}	二甲苯	2.4×10^{12}
木材	2.5×10^{10}	甲苯	1.1×10^{12}
尼龙布	$10^{11} \sim 10^{13}$	庚烷	4.9×10^{13}
纸	$10^5 \sim 10^{10}$	石油醚	8.4×10^{14}

金属超导体的临界温度

物质	临界温度 t/K	物质	临界温度 t/K
钨(W)	0.012	铊(Tl)	2.39
铪(Hf)	0.134	铟(In)	3.4035
铱(Ir)	0.140	锡(Sn)	3.722
钛(Ti)	0.39	汞(Hg)	4.153
钌(Ru)	0.49	钽(Ta)	4.4831
锆(Zr)	0.546	镧(La)	4.92
镉(Cd)	0.56	钒(V)	5.30
锇(Os)	0.655	铅(Pb)	7.193
铀(U)	0.68	铊(Tc)	8.22
锌(Zn)	0.75	铌(Nb)	9.25
钼(Mo)	0.92	铌三铝(Nb_3Al)	17.2
镓(Ga)	1.091	铌三锗(Nb_3Ge)	22.5
铝(Al)	1.196	铌三锡(Nb_3Sn)	18
钍(Th)	1.368		
镭(Pa)	1.4		
铼(Re)	1.698		

几种常用电器的电阻

名 称	电阻 R/ Ω
普通干电池	0.7
铅蓄电池	0.005~0.1
15~40W 日光灯丝冷态直流电阻	3.5~5
15~20W 日光灯镇流冷态直流电阻	28~32
220V40W 白炽灯泡 (冷态)	100
(热态)	1210

电解液的电导率

无水电解质的含 量百分比	氯化钾	氯化钠	氯化铵	氢氯化钠	硫酸	盐酸
5	6.90	6.72	9.18	19.69	20.85	39.48
10	13.59	12.11	17.76	31.24	39.15	63.02
15	20.20	16.42	25.86	—	54.35	—
20	26.77	19.57	33.65	32.70	65.27	76.15
30	—	—	—	20.22	73.88	66.20
40	—	—	—	11.64	68.00	51.52
50	—	—	—	—	54.05	—
70	—	—	—	—	21.57	—
90	—	—	—	—	10.75	—
99.4	—	—	—	—	0.85	—

常用国产半导体热敏电阻器型号、规格表 (一)

型 号	主要用途	主要电参数				
		标称阻值	额定功率 P/W	测量功率 P/mW	时间常数 t/s	耗散系数 /mW · °C ⁻¹
MF11	温度补偿	10Ω~15Ω	0.5	0.13	60	5
MF12-0.25	温度补偿	1kΩ~1MΩ	0.25	0.04	15	3~4
MF12-0.5	温度补偿	0.1kΩ~1.2MΩ	0.5	0.47	35	5~6
MF12-1	温度补偿	56Ω~5.6kΩ	1	0.2	80	12~14
MF13	测温和控制	820Ω~300kΩ	0.25	0.1	85	4
MF14	测温和控制	880Ω~330kΩ	0.5	0.2	115	7~7.6
MF15	温度补偿	10kΩ~1000kΩ	0.5	0.1	85	7
MF16	温度补偿	10kΩ~1000Ω	0.5	0.1	115	7~7.6
RRC2	测温和控制	6.8kΩ~1000kΩ	0.4	0.1	20	7~7.6
RRC5	测温和控制	8.2kΩ~100kΩ	0.6	0.05	20	
RRC7 _B	测温和控制	3kΩ~100kΩ	0.03		0.5	
RRW2	稳定振幅	6.8kΩ~500kΩ	0.03		0.5	0.2

常用国产半导体热敏电阻器型号、规格表（二）

型 号	主要用途	主要电参数						
		时间常数 t/s	标称电压 U/V	稳压范围 U/V	标称电流 I/mA	工作电流范围 I/mA	最大允许电压变化 U/V	最大允许瞬时过负电流 I/mA
MF21-2-2	稳定输出	35	2	1.6~3	2	0.4~6	0.4	62
MF22-2-0.5	电压和振幅的自动增益调节	35	2	1.6~3	0.5	0.2~2	0.4	22
MF22-2-2		40	2	1.6~3	2	0.4~6	0.4	62
RRW1-2A		10	2	1.5~2.5	0.6~6	2	0.4	12

常用国产半导体热敏电阻器型号、规格表（三）

型号	主要用途	主要电参数						
		标称阻值 R/KΩ	时间常数 t/s	耗散系数 (Δ/mW · °C ⁻¹)	加热器电阻值 R/Ω	最大加热电流下阻体阻值 R/Ω	最大加热电流 I/mA	绝缘电阻 R/Ω
MF41	在自动控制和遥控电路中用作无滑动接点的可变电阻器稳定高低频振荡的振幅,自动调节放大器的放大率	20~35	40 ± 10	0.25	90~110	100	22	10 ⁷
RRP3		20~40	15 ± 5	0.25	200~300	100	13	10 ⁷
RRP7		30~50	80 ± 20	0.25	350~420	100	12	10 ⁷
RRP8		40~60	40 ± 10	0.25	180~240	100	13	10 ⁷
RRP9		25	15 ± 5	0.25	360~440	100	10	10 ⁷

电介质的击穿场强 (1 × 10⁵Pa)

电介质	击穿场强 E/kV · mm ⁻¹	电介质	击穿场强 E/kV · mm ⁻¹
空气	3~4	橡胶	20~25
云母	60~80	聚乙烯	50
玻璃	10~25	聚氯乙烯	40~90
纸	5~7	电木	8~30
纤维板	5~10	瓷	30~35
石蜡	16~30	变压器油	12~20

绝缘材料的耐热等级

耐热等级	最高工作温度 t/	绝 缘 材 料
Y	90	木材、棉纱、纸、天然丝等纺织品（如纱、丝带、胶布带）和以这些材料作为覆盖物的制品，以及易于热分解和熔点较低的塑料及其制品（如塑料管、带）
A	105	工作于矿物油或浸渍过的 Y 级材料及其制品、油性漆等
E	120	聚脂薄膜和 A 级材料复合
B	130	经过树脂粘合或浸渍涂复的云母、玻璃纤维、石棉、聚酯漆等
F	155	以有机纤维补强和石棉补强的云母制品、玻璃丝和石棉、玻璃漆布，以玻璃丝布和石棉纤维为基础的层压制品，复合硅有机聚酯漆，芳香族聚酰胺薄膜等
H	180	无补强或以无机材料为补强的云母制品、加厚的 F 级材料、复合云母、有机硅云母制品、硅有机漆、聚酰亚胺薄膜等
C	>180	不用任何有机粘合剂及浸渍剂的无机物如石英、石棉、云母、玻璃和陶瓷材料等

铁磁质的相对磁导率

物质	相对磁导率 μ_r
铸铁	200~400
铸钢	500~2200
硅钢	7000(最大)
镍锌铁氧体（用于 1Mhz 以上）	10~1000
锰锌铁氧体（用于 1Mhz 以下）	3000~5000
纯铁（99.95%）	18000(最)
坡莫合金大	100000(最大)
铅锌铁粉芯	2.5~7

某些磁场的磁感应强度

物体	磁感应强度 B/T
地磁场的水平分量 (在磁赤道处)	$(3\sim 4) \times 10^{-5}$
地磁场的垂直分量 (在南、北磁极处)	$(6\sim 7) \times 10^{-5}$
在磁场在地面附近的平均值	5×10^{-5}
普通永久磁铁	0.4~0.8
电动机或变压器铁芯中的磁场	0.8~1.7
回旋加速器的磁场	>1
磁流体发电机磁场	4~6
实验室使用的最强磁场	30
磁疗用磁片的磁场	0.15~0.18

常用永磁材料部分品种的磁性能

种类	品种名称	剩磁 B/Wb · m ⁻²	矫顽力 Hs/kJ · m ⁻³	最大磁 能密度 w/kJ · m ⁻³	居里点 t/	主要用途
铸 造 铝 镍 系 永 磁 材 料	铝镍 10	0.60	36	10	760	一般磁电式仪表、永磁电机、磁分离器、微电机、里程表
	铝镍钴 13	0.68	48	13	810	
	铝镍钴 32	1.20	44	32	890	精密磁电式仪表、永磁电机、流量计、微电机, 磁性支座、传感器、扬声器、微波器件
	铝镍钴钛 32	0.80	100	32	850	
	铝镍钴钛 40	0.72	140	40		精密磁电式仪表、永磁电机、微电机、检地震波器、磁性支座、扬声器、微波器件
	铝镍钴 52	1.30	56	52	890	
	铝镍钴钛 56	0.95	104	56	850	
	铝镍钴钛 70	0.90	145	70		
铝镍钴钛 72	1.05	111	72	850		
粉末烧结 铝镍钴系 永磁材料	烧结铝镍 9	0.5	35	9	760	微电机、永磁电机、继电器、小型仪表
	烧结铝镍钴 25	1.05	46	25	890	
	烧结铝镍钴钛 28	0.70	95	28	850	
铁氧体 永磁材 料	铁氧体 15	0.28~0.36	128~190	14.3~17.5	450	永磁点火电机、永磁电机、永磁选矿机、永磁吊头、磁推轴承、磁分离器、扬声器、微波器件、磁医疗片
	铁氧体 25	0.35~0.39	152~208	22.3~25.5	450	
	铁氧体 35	0.40~0.44	176~224	30.3~33.4	450	

续表

种类	品种名称	剩磁 B/Wb · m ⁻²	矫顽力 Hs/kJ · m ⁻³	最大磁 能密度 w/kJ · m ⁻³	居里点 t/	主要用途
稀土钴 永磁材 料	钕钴铜 60	0.55~0.70	270~400	60.0~80.0	500	低速转矩马达、启动马达、力矩马达、传感器、磁推轴承、助听器、电子聚焦装置
	混合稀土钴 110	0.80~0.95	400~550	110~130	525	
	钐钴 125	0.82~0.95	500~660	125~160	725	
塑性变形 永磁材料	铁铬钴 15	0.85	44	13.5~16.0		里程表、罗盘仪
	铁铬钴 30	1.10	48	27.0~35		

几种铁磁质的居里温度

物 质	居里温度 t/	物 质	居里温度 t/
铁	770	坡莫合金： 22%Fe+78%Ni 70%Fe+30%Ni	550 70
钴	1131		
镍	358		
钆	16		

国产汽轮发电机

型号	视在功率 P/kW	额定电压 U/V	额定电流 I/A	转速 n/rmin ⁻¹	功率 因数	效率(%)	冷却方式	产地
QFQS-60-2	75000	10500	4125	3000	00.8	98.2	氢外冷/水内冷	上海
QFSS-60-2	75000	6300	6873	3600	0.8	98.07	双水内冷	哈尔滨
QFQS-125-2	147000	13800	6150	3000	0.85	98.4	氢外冷/水内冷	上海
QFSS-200-2	235000	15750	8625	3000	0.85	98.32	双水内冷	哈尔滨
QFQS-300-2	353000	18000	11320	3000	0.85	98.6	氢外冷/水内冷	上海
QFQ-50-2	62500	10500	3440	3000	0.8	98.5	氢外冷	哈尔滨
TQQ-50-2	62500	10500	3440	3000	0.8	98.56	氢外冷	哈尔滨
TQN-100-2	112800	10500	6475	3000	0.85	98.705	氢内冷	哈尔滨
QFQS-200-2	235300	15750	8625	3000	0.85	98.62	氢外冷/水内冷	四川
QFQS-300-2	353000	18000	11320	3000	0.85	98.646	氢外冷/水内冷	四川

注：型号中的汉语拼音，第一、二位字母中的 Q 表示汽轮机，F 表示发电机，T 表示同步电机；第三、四位字母中的 Q 表示氢外冷，N 表示氢内冷，S 表示水冷。型号中的第一组数字表示发电机的额定功率（以兆瓦为单位）；第二组数字表示发电机的磁极数

我国一些大的火电站数据

电站名称	发电设备容量 P/kW	年发电量 W/× 10 ⁴ kW · h
清河发电厂（辽宁）	1300000	862692
徐州电厂	1300000	838551
神头发电厂（山西）	1300000	690332
姚孟电厂（河南）	1200000	721469
合山火电厂（广西）	505000	261420

各种电站的效率

燃料名称	消耗的能量 E/J
原煤	117 × 10 ⁵
天然气	115 × 10 ⁵
石油	101 × 10 ⁵

我国一些大的水电站数据

电站名称	发电设备容量 P/kW	年发电量 W/× 10 ⁴ kW · h	坝高 h/m	第一台机发电时间
葛洲坝水电站(湖北)	2715000	1631754	47	1981 年
丹江口水电站(湖北)	900000	517147	97	1968 年
刘家峡水电站(甘肃)	1225000	541697	147	1969 年
龙羊峡水电厂(青海)	1280000	418848	175	1987 年

几种 J 系列异步电动机的技术数据

型号	额定功率 P/kW	满载时					启动电流	启动转矩	最大转矩
		转速 n/r · m in ⁻¹	电 压 U/V	电 流 I/A	效率 (%)	功率因数 (cosφ)	额定电流	额定转矩	额定转矩
J31-2	1.0	2850	220/330	4.0/2.3	78.6	0.86	6.0	1.6	2.2
J41-2	2.8	2870	220/380	10/5.8	83.5	0.88	6.0	1.4	2.2
J42-2	4.5	2870	220/380	15.8/9.15	85	0.88	7.0	1.6	2.4
J52-2	10	2890	220/380	33.6/19.4	87	0.90	7.0	1.3	2.4
J62-2	20	2910	220/380	66/38	88.3	0.91	6.0	1.3	2.7
J72-2	40	2920	220/380	129/74.5	89.6	0.91	5.5	1.1	2.3
J81-2	55	2930	220/380	177/102	90.1	0.91	5.0	0.95	2.4
J91-2	100	2950	220/380	315/182	91.5	0.91	6.0	0.95	2.8

几种 JQ2 系列电动机的技术数据

电机 型号	额定 功率 P/kW	满载时				起动电流	起动转矩	最大转矩
		电流 I/A	转速 n/r.min ⁻¹	功率因数 (cosφ)	效率 (%)	额定电流	额定转矩	额定转矩
JQ2-61-4	13	26.1	1460	0.86	87.5	7.0	2.0	2.0
JQ2-62-4	17	33.3	1460	0.87	88.0	7.0	2.0	2.0
JQ2-71-4	22	43.4	1460	—	—	7.5	2.0	2.0
JQ2-72-4	30	59.5	1460	—	—	7.5	2.0	2.0
JQ2-61-6	10	22.4	970	0.82	86	6.5	2.0	2.0
JQ2-62-6	13	28.5	970	0.83	86.5	6.5	2.0	2.0
JQ2-71-6	7	36.4	970	—	—	7.0	2.0	2.0
JQ2-72-6	22	46	970	—	—	7.0	2.0	2.0

注：额定电压都为 380V。

电风扇的风量与输入功率

类别	规格 d/mm	风量 Q/m ³ · min ⁻¹	输入功率 P/W	
			电容式	罩极式
台扇 (包括落地扇和壁扇)	200	16	28	32
	250	24	30	45
	300	34	44	50
	350	46	54	—
	400	60	66	—
吊扇	900	140	50	70
	1200	215	70	—
	1400	270	80	—
	1500	300	85	—

圆型保险丝的规格

额定电流 I/A	熔断电流 I/A	近似直径 d/mm	额定电流 I/A	熔断电流 I/A	近似直径 d/mm
0.25	0.5	0.08	5.00	10.0	0.98
0.50	1.0	0.15	6.00	10.2	1.02
0.75	1.5	0.20	7.50	15.0	1.25
0.80	1.6	0.22	10.0	20.0	1.51
0.90	1.8	0.25	11.0	22.0	1.67
1.00	2.0	0.28	12.5	25.0	1.75
1.05	2.1	0.29	15.0	30.0	1.93
1.10	2.2	0.32	20.0	40.0	2.40
1.25	2.5	0.35	25.0	50.0	2.78
1.35	2.7	0.36	27.5	55.0	2.95
1.50	3.0	0.40	30.0	60.0	3.14
1.85	3.7	0.46	40.0	80.0	3.81
2.00	4.0	0.52	45.0	90.0	4.2
2.25	4.5	0.54	50.0	100.0	4.44
2.50	5.0	0.60	60.0	120.0	4.91
3.00	6.0	0.71	70.0	140.0	5.24
3.75	7.5	0.81			

注：保险丝适用于交流 500 伏以下或直流 440 伏以下的各种熔断器

和电器内作熔体用。其化学成分是：铅不少于 98%，锑 0.3%~1.5%，杂质应不大于 15.%

绝缘导线明设时的安全载流量 I / A

导线截面 S/mm ²	铝芯橡皮绝缘线				铜芯橡皮绝缘线				铝芯塑料绝缘线				铜芯塑料绝缘线			
	25	30	35	40	25	30	35	40	25	30	35	40	25	30	35	40
1	—	—	—	—	20	19	17	15	—	—	—	—	18	17	15	14
1.5	—	—	—	—	25	23	21	19	—	—	—	—	22	20	19	17
2.5	25	23	21	19	33	31	28	25	23	21	20	17	30	28	25	23
4	33	31	28	25	43	40	37	33	30	28	25	23	40	37	33	30
6	42	39	36	32	55	51	47	42	39	36	33	30	50	47	43	38
10	60	56	51	46	80	74	68	61	55	51	47	42	75	70	64	57
16	80	74	68	61	105	98	89	80	75	70	64	57	100	93	85	76
25	105	98	89	80	140	130	119	106	100	93	85	76	130	121	110	99
35	130	121	110	99	170	158	144	124	125	116	106	95	160	149	136	122
50	165	153	140	125	215	200	183	163	155	144	132	118	200	186	170	152
75	205	191	174	156	265	246	225	201	500	186	170	152	255	237	216	194
95	250	233	213	190	325	302	276	247	240	233	204	182	310	288	263	236
120	295	274	251	224	385	358	326	292	—	—	—	—	—	—	—	—

电烙铁电热元件技术数据

	功率 P/W	冷态电阻 R/ Ω	电热丝(Cr20Ni80)线径 d/mm	节距 d/mm
外 热 式	30	1586	0.05~0.06	0.3~0.4
	50	952	0.08~0.10	0.3~0.4
	75	635	0.11~0.13	0.4~0.5
	100	476	0.13~0.17	0.5~0.6
	150	318	0.19~0.21	0.5~0.6
	200	238	0.22~0.25	0.6~0.7
	300	159	0.28~0.38	0.7~0.8
	500	95	0.30~0.42	0.8~1.0
内 热 式	20	2379	0.04	0.11~0.12
	35	1360	0.05	0.18~0.20
	50	952	0.06	0.25~0.28
	70	680	0.08	0.26~0.30
	100	476	0.10	0.29~0.32
	150	318	0.13	0.32~0.35
	200	238	0.19	0.40~0.44
	300	159	0.23	0.46~0.50

日用电炉电热丝技术数据 (电压 U/220V)

型式	功率 P/W	线径 d/mm	螺旋外径 d/mm	密绕螺旋长度 l/mm	单线长度	冷态电阻 R/ Ω
开 启 式	300	0.35	3.7	346	10.4	150
	600	0.50	4.5	422	10.6	75
	800	0.60	5.2	470	11.4	56.3
	1000	0.65	5.3	476	10.7	45
	1200	0.7	5.4	492	10.4	37.5
	1500	0.8	5.6	570	10.75	30
	2000	0.9	5.8	602	10.3	22.5
	3000	1.2	6.9	812	12.12	15
半 封 闭 式	300	0.13	1.26	66	1.83	157
	600	0.25	2.00	193	4.04	78.5
	1000	0.5	2.5	657	8.28	47.1
	1500	0.6	2.7	695	7.65	31.4
	2000	0.7	2.9	848	8.21	23.5

普通照明灯泡及局部照明灯的技术参数

序号	灯泡型号	额定值			序号	灯泡型号	额定值		
		电压 U/V	功率 P/W	光通量 φ/lm			电压 U/V	功率 P/W	光通量 φ/lm
1	PZ220-15	220	15	110	11	JZ6-10	6	10	120
2	PZ220-25		25	220	12	JZ6-20		20	260
3	PZ220-40		40	350	13	JZ12-15	12	15	180
4	PZ220-60		60	630	14	JZ12-25		25	325
5	PZ220-100		100	1250	15	JZ12-40		40	550
6	PZ220-150		150	2090	16	JZ12-60		60	850
7	PZ220-200		200	2920	17	JZ36-15	36	15	135
8	PZ220-300		300	4610	18	JZ36-25		25	250
9	PZ220-500		500	8300	19	JZ36-40		40	500
10	PZ220-1000		1000	18600	20	JZ36-60		60	800
				21	JZ36-100	100		1500	

注：PZ 型为普通照明灯泡，JZ 型局部照明灯泡

直管形荧光灯的技术参数

序号	灯管额定技术参数												灯头 型号
	灯管 型号	功率 P/W	电源 电压 U/V	工作 电压 U/V	工作 电流 I/mA	启动 电压 U/V	预热 电流 I/mA	光通 量 φlm	寿命 t/h	外形尺寸 l/mm (最大值)			
										D	L	L ₁	
1	YZ6RR	6	~220	50	140	190	180	160	1500	16	226.7	211.9	G5
2	YZ8RR	8		60	150		200	250					
3	YZ15RR	15		51	330		500	450	3000	40.5	451.6	437.4	G13
4	YZ20RR	20		57	370		550	775					
5	YZ30RR	30		81	405		620	1295	5000		908.8	894.6	
6	YZ40RR	40		103	430		650	2000	1213.6		1199.4		
7	YZ100R	100		92	1500		1800	4400	2000				
灯管 外形 图													

注：除表列规格外，尚有额定功率为 12W、65W、125W 及 200W 等产品。

常用荧光粉的性质

荧光粉名称	发光颜色	辐射波长范围λ/nm	辐射峰波长λ/nm
钨酸钙(锰)	蓝	310~700	400
钨酸镁	蓝、白	360~720	480
硅酸锌(锰)	绿	460~640	525
硅酸锌铍(锰)	黄、白	480~750	595
硅酸镉(锰)	黄、淡红	480~740	595
硼酸镉(锰)	粉红	520~750	615
卤磷酸钙	白	350~750	580
硫化锌(铜)	绿	470~620	540
硫化锌镉(铜)	黄、绿	510~670	580~590
磷酸钙(钛)	紫外	280~400	330
氟硅酸钡(铅)	紫外	280~400	350
氟硅酸钙(铅、钛)	紫外	280~400	340
磷酸钙(铈)	紫外	280~400	340
卤磷酸钙(锰、铈)	黄	450~690	570
铝酸镁(钡、铈)	蓝	420~470	450
铝酸镁(铈)	绿	500~580	545
氧化钇(铈)	红	600~620	611

碘钨灯的技术参数

型号	规格	光视效能 K/lm · W-1	平均寿命 t/h	全长 l/mm
DW6-50	6V,50W	18	1000	58 ± 2
DW12-100	12V,100W	22	600	62 ± 2
DW24-200	24V,200W	22	600	68 ± 2
DW36-300	36V,300W	22	600	78 ± 2
110-500	110V,500W	20.5	1500	123 ± 2
DW220-300	220V,300W		1500	
DW220-500	220V,500W	19.5	1500	155 ± 2
DW220-1000	220V,1000W	21	1500	208 ± 2
DW220-2000	220V,2000W	21	1500	293 ± 2

管形氙灯灯管的技术参数

序号	灯管型号	额定功率	电源电压	工作电压	工作电流	光通量 ϕ /lm	平均寿命 t/h
		P/W	U/V	U/V	I/A		
1	XG1500	1500	~220	60	20	30000	1000
2	XG3000	3000		220	13~18	72000	
3	XG6000	6000		24.5~30	144000		
4	XG10000	10000		41~50	270000		
5	XG20000	20000		84~100	580000		
6	XG20000	20000	~380	380	47.5~58	580000	1000
7	XG50000	50000		118~145	1550000		
8	XSG4000	4000	~220	220	15~20	140000	500
9	XSG6000	6000			23~31	220000	
外形图							

紫外线杀菌灯的技术参数

型号	电源电压 U/V	额定功率 P/W	工作电压 U/V	启动电流 I/mA	工作电流 I/mA	平均寿命 t/h
TZW15	220	15	52 ± 4	440 ± 30	320 ± 25	1000
TZW20		20	60 ± 5	500 ± 30	350 ± 30	
TZW30		30	89 ± 8	560 ± 30	350 ± 30	
GW8		8	60	220	160	
GW15		15	62	500	300	
GW30		30	140	560	250	

黑光灯的技术参数

型号		额定功率	工作电压	启动电流	工作电流	平均寿命	灯头型号
统一	工厂	P/W	U/V	I/mA	I/mA	t/h	
型号	型号						
YA3		3~5	220	—	—	2000	2C22/22-1
YA8		8	65	220	145 ± 5	1000	2RC-14
YA20	RA20	20	60	500	350		
YA40	RA40	40	108	650	410	200	2RC-35

注：黑光灯能辐射出人眼看不见的波长为 360nm 的紫外线，许多农业害虫的视觉神经对波长 330nm~400nm 的紫外线很敏感，故黑光灯通常用于夜间诱虫除害和预测虫害情报

霓虹灯的颜色

灯的颜色	充气种类	玻璃管颜色	灯的颜色	充气种类	玻璃管颜色
红	氖	透 明	淡 蓝	氖及少量汞	透 明
粉 红	氦及氖	透 明	纯 蓝	氦及少量汞	透 明
桔 黄	氖	黄 色	淡 紫	氖	透 明
黄	氦	黄 色	紫	氖	蓝 色
绿	氖或氦及少量汞	黄 色	日光、白	氦或氦及汞	白 色

电阻器、电位器和电容器型号组成、符号及意义

第一部分： 主称		第二部分： 材料		第三部分： 特征		第四部分
符号	意义	符号	意义	符号	意义	序号
R	电阻器	T	碳膜			用数字 1、2、3.....表示说明：对主称、材料、特征相同，仅尺寸、性能指标略有差别，但基本上不影响互换的产品，则标同一序号
		P	硼碳膜			
		U	硅碳膜			
		H	合成膜			
		J	金属膜			
		Y	氧化膜			
		X	线绕			
		S	实心(包括有机和无机)			
		M	压敏			
		G	光敏	B	温度补偿用	
		C	温度测量用			
		G	功率测量用			
		P	旁热式			
		W	稳压用			
		Z	正温度系数			
C	电容器	C	瓷介	T	铁电	表示说明：对主称、材料、特征相同，仅尺寸、性能指标略有差别，但基本上不影响互换的产品，则标同一序号
				W	微调	
		Y	云母	W	微调	
		I	玻璃釉			
		IO	玻璃(膜)	W	微调	
		B	聚苯乙烯	J	金属化	
		F	聚四氟乙烯			
		L	涤纶	M	密封	
		S	聚碳酸酯	X	小型、微调	
		Q	漆膜	G	管型	
		Z	纸质	T	筒型	
		H	混合介质	L	立式矩型	
		D	(铝)电解	W	卧式矩型	
A	钽	Y	圆型			
N	铌					
T	钛					
M	压敏					
W	电位器	H	合成碳膜			
		J	金属膜	W	微调	
		Y	氧化膜			
		X	线绕	W	微调	
		S	实心(包括有机和无机)			
D	导电塑料					

电阻阻值的色圈表示法

颜色	第一色圈	第二色圈	第三色圈	第四色圈	颜色	第一色圈	第二色圈	第三色圈	第四色圈
	第一位数	第二位数	第三位数	偏差		第一位数	第二位数	第三位数	偏差
黑	0	0	10 ⁰	—	紫	7	7	10 ⁷	—
棕	1	1	10 ¹	—	灰	8	8	10 ⁸	—
红	2	2	10 ²	—	白	9	9	10 ⁹	—
橙	3	3	10 ³	—	金	—	—	10 ⁻¹	± 5%
黄	4	4	10 ⁴	—	银	—	—	10 ⁻²	± 10%
绿	5	5	10 ⁵	—	无色	—	—	—	± 20%
蓝	6	6	10 ⁶	—					

各种电阻器的性能比较和适应范围

性能及适应性		电阻器品种	合成碳膜	合成碳实芯	热分解碳膜	金属氧化膜	金属膜	金属玻璃釉	块金属膜	电阻合金线
		性能	阻值范围 电阻温度系数 非线性、噪声 高频、快速响应 比功率 脉冲负荷 储存稳定性 工作稳定性 耐潮性 可靠性	中~很高 尚可 尚可 良 低 良 中 中 中	中~高 尚可 尚可 尚可 中 优 中 良 中 优	中~高 中 良 优 中 良 良 良 良 中	低~中 良 良~优 优 中~高 优 良 良 良 良~优	低~高 优 优 极优 中~高 中 良~优 优 良~优 良~优	中~很高 良~优 中 良 良 良~优 良~优 良~优	低~中 极优 极优 极优 中 良 优极 优 良~优 良~优	低~高 优~极优 极优 差~尚可 中~高 良~优 优极 优 良~优
适应性	通用 高可靠 半精密 精密 高精密 中功率 大功率 高频、快速响应 高频大功率 高压、高阻 小片式 电阻网络		V V	V V	V V V V V V	V V V V V V V	V V V V V V V	V V V V V V V	V V V V V V V	V V V V V V 几兆赫
		印刷电阻								

根据用途来选择固定电容器参考表

用途	电容器种类	电容器型式	电容量	工作电压 U/V
高频旁路	陶瓷(I型)	圆片、穿心	8.2pF~1000pF	500
	云母	钮式、热压	51pF~4700pF	500
	玻璃膜	矩形	100pF~3300pF	500
	涤纶	叠片	100pF~3300pF	400
	玻璃釉	矩形	10pF~3300pF	100
低频旁路	纸介	卷绕	0.001 μ F~0.5 μ F	500
	陶瓷(II型)	片型、穿心型	0.001 μ F~0.047 μ F	<500
	铝电解	密封	10 μ F~1000 μ F	25~450
	涤纶	卷绕	0.001 μ F~0.047 μ F	400

(续)

用途	电容器种类	电容器型式	电容量	工作电压 U/V
滤波	铝电解	密封	10 μ F~3300 μ F	25~450
	纸介	密封	0.01 μ F~10 μ F	1000
	复合纸介	密封	0.01 μ F~10 μ F	2000
	液体钽	密封	220 μ F~3300 μ F	16~125
滤波器	陶瓷	片型、管型	100pF~4700pF	500
	聚苯乙烯	热塑无感	100pF~4700pF	500
	云母	钮式热塑压	51pF~4700pF	
调谐	陶瓷(I型)	片型、管型	1pF~1000pF	500
	云母	钮式、热压塑	51pF~1000pF	500
	玻璃膜	矩形、叠片	51pF~1000pF	500
	聚苯乙烯	热塑	51pF~1000pF	<1600
高频耦合	云母	钮式、塑压	470pF~6800pF	500
	聚苯乙烯	无感热塑	470pF~6800pF	400
	陶瓷(I型)	片型、管型	10pF~6800pF	500
低频耦合	纸介	密封	0.001 μ F~0.1 μ F	630
	铝电解	密封	1 μ F~47 μ F	<450
	陶瓷(II型)	圆片、叠片	0.001 μ F~0.047 μ F	<500
	涤纶	密封	0.001 μ F~0.1 μ F	<400
电源输入 抗高频 干扰	固体钽电解	密封	0.33 μ F~470 μ F	<63
	纸介	密封、穿心式	0.001 μ F~0.22 μ F	<1000
	陶瓷(II型)	圆片、穿心式	0.001 μ F~0.047 μ F	<500
储能	云母	压塑	0.001 μ F~0.047 μ F	500
	涤纶	密封或穿心式	0.001 μ F~0.1 μ F	<1000
	纸介	密封	10 μ F~50 μ F	1~30 $\times 10^3$
	复合纸介	密封	10 μ F~50 μ F	1~30 $\times 10^3$
计算机电源	铝电解	串、并联式	100 μ F~3300 μ F	1~5 $\times 10^3$
	铝电解	密封	10 ³ μ F~10 ⁵ μ F	25~100
高频电压	陶瓷(I型)	瓶、筒、鼓、片	470pF~6800pF	<12 $\times 10^3$
	聚苯乙烯	叠片、压塑	180pF~4000pF	<30 $\times 10^3$
	云母		330pF~2 $\times 10^4$ pF	<10 $\times 10^3$
晶体管电路 小型电容器	金属化纸介	小型密封	0.001 μ F~10 μ F	<160
	陶瓷(I型)	片型	1 μ F~500 μ F	<160
	陶瓷(II型)	片型	680pF~0.047 μ F	63
	云母	被银小型	4.7pF~10 ⁴ pF	100
	铝电解	小型密封	1 μ F~3300 μ F	6.3~50
	钽电解	烧结	1 μ F~3300 μ F	6.3~63
	聚苯乙烯	热塑	470pF~0.47 μ F	<50~100
	玻璃釉	矩形	10pF~3300pF	<63
	金属化涤纶	密封	0.1 μ F~1 μ F	63
聚丙烯	包封	0.01 μ F~0.47 μ F	63~160	

半导体器件型号组成部分的符号及其意义

第一部分		第二部分		第三部分		第四部分	第五部分
用数字表示器件的电极数目		用汉语拼音字母表示器件的材料和极性		用汉语拼音字母表示器件的类别		用数字表示器件序号	用汉语拼音字母表示规格号
符号	意义	符号	意义	符号	意义		
2	二极管	A	N型, 锗材料	P	普通管		
		B	P型, 锗材料	V	微波管		
		C	N型, 硅材料	W	稳压管		
		D	P型, 硅材料	C	参量管		
3	三极管	A	PNP型, 锗材料	Z	整流器		
		B	NPN型, 锗材料	L	整流堆		
		C	PNP型, 硅材料	S	隧道管		
		D	NPN型, 硅材料	N	阻尼管		
		E	化合物材料	U	光电器件		
				K	开关管		
				X	低频小功率管 ($f_a < 3\text{MHz}, P_c < 1\text{W}$)		
				G	高频小功率管 ($f_a > 3\text{MHz}, P_c < 1\text{W}$)		
				D	低频大功率管 ($f_a < 3\text{MHz}, P_c > 1\text{W}$)		
				A	高频大功率管 ($f_a > 3\text{MHz}, P_c > 1\text{W}$)		
				T	半导体闸流管(可控整流器)		
		Y	场效应器件				
		B	雪崩管				
		J	阶跃恢复管				
				CS	场效应器件		
				BT	半导体特殊器件		
				FH	复合管		
				PIN	PIN型管		
				JG	激光器件		

注：半导体器件的型号由五部分组成，如锗PNP型高频小功率三极管的型号写作3AG11C，但场效应器件、半导体特殊器件、复合管，激光器件的型号命名只有第三、四、五部分。

常用硅稳压二极管主要参数

新型号	最大耗散功率 P/W	最大工作电流 I/mA	稳定电压 U/V	正向压降 U/V
2CW50	0.25	83	1 ~ 2.8	1
2CW51		71	2.5 ~ 3.5	
2CW52		55	3.2 ~ 4.5	
2CW53		41	4 ~ 5.8	
2CW54		38	5.5 ~ 6.5	
2CW55		33	6.2 ~ 7.5	
2CW56		27	7 ~ 8.8	
2CW57		26	8.5 ~ 9.5	
2CW58		23	9.2 ~ 10.5	
2CW59		20	10 ~ 11.8	
2CW60		19	11.5 ~ 12.5	
2CW61		16	12.5 ~ 14	
2CW62		14	13.5 ~ 17	
2CW72		29	7 ~ 8.8	
2CW73		25	8.5 ~ 9.5	
2CW74		23	9.2 ~ 10.5	
2CW75		21	10 ~ 12	
2CW76		20	11.5 ~ 12.5	
2CW77		18	12 ~ 14	

常用检波二极管的主要参数

型号	最大整流电流 I/mA	最高反向工作电压 U/V	反向击穿电压 U/V	主要用途
2AP1	16	20	40	在频率 150 MHz 的电子设 备中作检波用
2AP2	16	30	45	
2AP3	25	30	45	
2AP4	16	50	75	
2AP5	16	75	110	
2AP6	12	100	150	在频率 150MHz 的电子设备 中作检波用
2AP7	12	100	150	
2AP9	5	15	20	在频率 100MHz 以下的电子设备 中作检波用
2AP10	5	30	40	

常用整流二极管的主要参数

型号	正向电流(平均) I/A	反向耐压(峰值) U/V	正向压降 U/V	反向电流 I/μ A	
				25	100
2CZ82A ~ K	0.1	25 ~ 800	1	5	100
2CZ83B ~ H	0.3	50 ~ 800	1	5	100
2CZ84B ~ G	0.5	50 ~ 800	1	10	500
2CZ85B ~ K	1 ~ 5	50 ~ 800	0.8 ~ 1.0	10 ~ 50	500 ~ 100
2DZ13 ~ 15	0.3 ~ 1.0	200 ~ 200	1	5	100 ~ 500
2CZ20(高频)	1.0	200 ~ 1200	1	10	

3AX 型低频小功率锗管部分型号和主要参数

型号	集电极 最大耗 散功率 P/mW	集电极 最大允 许电流 I/mA	反向击穿电压			反向饱和电流		共发射 极电流 放 大 系 数 $h_{fe}(\beta)$	用途	管脚
			集-基 U/V	集-射 U/V	射-基 U/V	集-基 I/mA	集-射 I/mA			
3AX1	150	10	30	10		30	250	10	用于低 频放大 电路	
3AX2	150	10	30	10		15	250	10		
3AX3	150	10	30	10		15	300			
3AX4	150	10	30	10		15	500			
3AX5	150	10	30	10		15	350	10		
3AX6	150	10	30			15				
3AX7	150	10	30			15				
3AX8	150	10	30			10				
3AX9	150	10	30			15				
3AX10	150	10	30			15				
3AX21	100	30	30	12	12	12	325	30 ~ 85	用于低 频放大 或功放 电路	
3AX21A	100	30	30	9	10	20		20 ~ 200		
3AX22	125	100	30	18	18	12	300	40 ~ 150		
3AX22A	125	100	30	10	12	15		20 ~ 120		
3AX23	100	30	30	12	12	12	550	30 ~ 150		
3AX24	100	30	30	12	12	12	550	65 ~ 150		
3AX24A	100	30	30	12	12	12	550	35 ~ 150		

3DX 型低频小功率硅管部分型号和主要参数

型号	集电极 最大耗 散功率 P/mW	集电极 最大允 许电流 I/mA	反向击穿电压		反向饱和电流		共发射 极电流 放 大 系 数 $h_{fe}(\beta)$	用途	管脚
			集-基 U/V	集-射 U/V	集-基 I/mA	集-射 I/mA			
3DX1	250	40		10	50		9	用于低 频功率 放大及 低速开 关电路	
3DX1A	250	40		20	30		9		
3DX1B	250	40		10	30		14		
3DX1C	250	40		10	30		9		
3DX1D	250	40		30	30		15		
3DX1E	250	40		30	30		20		
3DX1F	250	40		30	30		30		
3DX2A	500	100	30	15	5	25	10 ~ 20		
3DX2B	500	100	40	30	5	25	10 ~ 20		
3DX2C	500	100	30	15	5	25	20 ~ 30		
3DX2D	500	100	40	30	5	25	20 ~ 30		
3DX2E	500	100	30	15	5	25	30		
3DX2F	500	100	40	30	5	25	30		
3DX3A	200	30	30	15	3	10	9 ~ 20		
3DX3B	200	30	40	30	3	10	9 ~ 20		
3DX3C	200	30	30	15	3	10	20 ~ 30		
3DX3D			40	30	3	10	20 ~ 30		
3DX3C			30	15	3	10	30		
3DX2E			40	30	3	10	30		

3AG 型高频小功率锗管部分型号和主要参数

型号	集电极 最大耗 散功率 P/mW	集电极 最大允 许电流 I/mA	反向击穿电压			集-射 反向饱 和电流 I/mA	共发射极 电流放大 系 数 $h_{fe}(\beta)$	用 途	管 脚		
			集-基 U/V	集-射 U/V	射-基 U/V						
3AG1B	50	10	20	10	0.8	7	20 ~ 200	用于中 频、高 频 放 大、振 荡及混 频电路			
3AG1C	50	10	20	10	0.8	7	30 ~ 200				
3AG1D	50	10	20	10	0.8	7	30 ~ 200				
3AG1E	50	10	20	10	0.8	7	30 ~ 200				
3AG1	50	10	20	10		10	20 ~ 230				
3AG2	50	10	20	10		10	30 ~ 220				
3AG3	50	10	20	10		10	30 ~ 220				
3AG4	50	10	20	10		10	30 ~ 220				
3AG6A	50	10	15	6	0.5	15	20			用于高 频放大 电路	
3AG6B	50	10	20	10	0.5	10	30 ~ 250				
3AG6C	50	10	20	10	0.5	10	30 ~ 250				
3AG6D	50	10	20	10	0.5	10	30 ~ 250				
3AG6E	50	10	20	10	0.5	10	30 ~ 250				
3AG7	50	10	20	10	1.5	10	20 ~ 250				
3AG8	50	10	20	10	1.5	5	30 ~ 250				
3AG9	50	10	20	10	1.5	5	30 ~ 250				
3AG10	50	10	20	10	1.5	5	30 ~ 250				

半导体集成电路型号的组成及其意义

第 部分		第一部分		第二部分	第三部分		第四部分	
用字母表示器件符合国家标准		用字母表示器件的类型		用阿拉伯数字表示器件的系列和品种代号	用字母表示器件的工作温度范围		用字母表示器件的封装	
符号	意义	符号	意义		符号	意义	符号	意义
C	中国制造	T	TTL		C	0 ~ 70	W	陶瓷扁平
		H	HTL		E	-40 ~ 85	B	塑料扁平
		E	ECL		R	-55 ~ 85	F	全密封扁平
		C	CMOS		M	-55 ~ 125	D	陶瓷直插
		F	线性放大器		.....	.....	P	塑料直插
		D	音响、电视电路				J	黑陶瓷直插
		W	路稳压器				K	金属菱形
		J	接口电路				T	金属圆形
		B	非线性电路				.....	.....
		M	存储器					
		μ	微型机电路					
						

注：半导体集成电路器件的型号由五部分组成，如肖特基 TTL 双 4 输入与非门的型号 CT3020ED

半导体集成电路管脚排列次序

我国生产的半导体集成电路管脚排列次序（参见图 4? 5? 1）规定如下：

（1）扁平型与双列直插型集成电路，根据印章标记正放，由左下角按逆时针方向数起，依次为 1, 2, 3.....图 4? 5? 1 的左图和中图分别是在 14 根引线的扁平型与双列直插型集成电路的管脚排列次序

（2）圆筒型集成电路，面向管脚正视，由锁口处按顺时针方向数起，依次为 1, 2, 3.....图 4? 5? 1 的右图为 10 根引线的圆筒型集成电路的管脚排列次序

收音机六项主要技术指标

主要指标	定 义	技 术 规 范										
高 、 中 频 部 分	频率范围	收音机调谐回路所能覆盖的频率区段，又称 为波段覆盖 中波：526 ~ 1625kHz 短波：1.6 ~ 26.1MHz(用于调幅广播) 超短波：88 ~ 108MHz(用于调频广播)										
	灵敏度	最大灵敏度：当收音机输出功率为标准输出 功率、且噪声输出功率不大于标准输出功率时， 加至天线输入端所需的高频信号电势值(mV 或 μ V)，或者能在其机内天线中激励起所需电势的 场强值(mV/m 或 μ V/m) 有限噪声灵敏度：对输出信号的信噪比有具 体规定条件下，达到标准输出功率时所需的高频 输入信号值 标准输出功率的具体规定： <table border="1" style="margin-left: auto; margin-right: auto; border-collapse: collapse;"> <tr> <td style="text-align: center;">标称有用功率 P/mW</td> <td style="text-align: center;">标准输出功率 P/mW</td> </tr> <tr> <td style="text-align: center;">50 ~ 100</td> <td style="text-align: center;">5</td> </tr> <tr> <td style="text-align: center;">150 ~ 250</td> <td style="text-align: center;">10</td> </tr> <tr> <td style="text-align: center;">500 ~ 5000</td> <td style="text-align: center;">50</td> </tr> <tr> <td style="text-align: center;">> 5000</td> <td style="text-align: center;">500</td> </tr> </table> 信噪比 S/N=20dB	标称有用功率 P/mW	标准输出功率 P/mW	50 ~ 100	5	150 ~ 250	10	500 ~ 5000	50	> 5000	500
	标称有用功率 P/mW	标准输出功率 P/mW										
	50 ~ 100	5										
	150 ~ 250	10										
	500 ~ 5000	50										
	> 5000	500										
选择性	调谐中心频率偏离信号载频规定值后，收音 机有限噪声灵敏度跌落的程度，以 dB 值表示 规定离谐值： ± 9 kHz 测试频率：1MHz $\text{选择性} = 20 \lg \frac{\text{调谐灵敏度}}{\text{离谐灵敏度}}$											
标称有用 功 率	在输入规定的标准测量频率（高频）信号时 收音机的输出功率；此时谐波失真系数也应符 合要求 标准测量频率信号具体规定： 频率：1MHz 电平：1mV 或 10mV/m											
谐波失真 系 数	在输入规定的标准测量频率信号时，输出功 率为标称有用功率时的谐波失真系数 调制度：80%(电源电压 3V 为 60%) 测量时音调控制器在最大抬升位置											
频率特性	在规定的电压（或声压）不均匀度前提下， 声频频率响应范围。测量时采用标准测量频率 （1MHz；1mV 或 10mV/m），调制度为 30% 电压不均匀度具体规定： 标准测量频率以上为 16dB 标准测量频率及其以下，下降不超过 6dB 声压不均匀度规定为 16dB											

国产常用电动式扬声器主要参数

形式	口径 d/mm	标称功率 P/V · A	阻抗 Z/Q	频率范围 f/Hz	谐振频率 f/Hz	谐波失真 (%)
圆形 纸盆	40	0.05	4、8、16	650 ~ 3000	650	< 10
	50	0.1		550 ~ 3000	550	
	55	0.1		460 ~ 3500	460	
	65	0.25		330 ~ 3500	330	
	80	0.4		280 ~ 3500	280	
	90	0.5		220 ~ 3500	220	< 5
	100	0.5		200 ~ 4000	200	
	130	1		160 ~ 5500	160	
	165	2		110 ~ 7000	110	
	200	3		85 ~ 7000	85	
椭圆形 纸盒	40 × 60	0.1	4、8、16	550 ~ 3000	550	< 10
	50 × 80	0.25		330 ~ 3500	330	
	65 × 100	0.4		280 ~ 3500	280	
	80 × 130	0.5		200 ~ 4000	200	
	100 × 160	1		180 ~ 5500	180	
	120 × 190	2		160 ~ 5500	160	< 5
	160 × 240	3		150 ~ 7000	150	
				120 ~ 7000	120	
				85 ~ 7000	85	
				85 ~ 12000	8.5	

注：阻抗的误差范围在 10% 以内

国产大口径电动式纸盆扬声器主要参数

型号	标称口径 d/mm	标称功率 P/V · A	阻 抗 Z/Q	频率范围 f/Hz	谐振频率 f/Hz	生产厂	备注
YD3-2001	200	3	8	80 ~ 7000	$80 \pm \begin{matrix} 10 \\ 25 \end{matrix}$	上海无线电十一厂	
YD3-2003	200	3	8	80 ~ 12000	$80 \pm \begin{matrix} 10 \\ 25 \end{matrix}$	"	双纸盒
YD5-2501	250	5	8	55 ~ 5000	55 ± 10	"	
YD5-2502	250	5	8	55 ~ 12000	55 ± 10	"	双纸盒
YD20-2503	250	20	16	100 ~ 7000	70 ± 20	"	
YD10-3003	300	10	16	55 ~ 5500	55 ± 10	"	
YD10-3004	300	10	16	55 ~ 10000	55 ± 10	"	双纸盒
YD300-1	308	10	8	70 ~ 8000	70	天津市电声器材厂	
YD300-2	305	10	8	70 ~ 8000	70	"	
YD10-12B	300	10	15	100 ~ 6500	60 ± 10	南京无线电元件二厂	

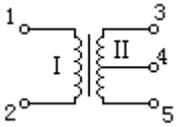
常用组合扬声器主要参数

型号	标称口径 d/mm	标称功率 P/V · A	阻 抗 Z/Q	频率范围 f/Hz	谐振频率 f/Hz	生产厂	备注
YG80-1	80	2	8	1000 ~ 12000		北京第一无线电器材厂	
YH10-1A	250	10	16	1000 ~ 10000			号筒式
YH10-1B	250	10	16	1000 ~ 15000			"
YHG800-1	634 × 234	10	8 , 16	500 ~ 10000		北京第一无线电器材厂	"
YHG1200-1	320 × 134	10	8 , 16	1000 ~ 15000		"	"
YD3-655	65	3	8	2000 ~ 15000		上海无线电十一厂	
YD5-1309	130	5	8	80 ~ 5000	38 ± 5	上海无线电十一厂	
YD3-1655	165	3	8	70 ~ 3800	70	"	
YD5-1656	165	5	8	70 ~ 4	28 ± 5	"	橡皮边
YD5-2004	200	5	8	60 ~ 2500	30 ± ¹⁰ / ₅	"	"
YD10-2504	250	10	8	55 ~ 2500	25 ± 5	"	"
YD10-3005	300	10	8	50 ~ 5000	50 ± 10	"	监听配套
YD10-3006	300	10	16	50 ~ 2000	20 ± 5	"	橡皮边
YD15-3801	380	15	16	45 ~ 2000	45 ± 10	"	
YD130-1	130	3	8	100 ~ 6000	80	北京第一无线电器材厂	橡皮边
YD200-1	200	3	8	80 ~ 7000	80	"	
YD300-1	300	12.5	8 , 16	60 ~ 6000	70	"	
YD300-2	300	15	8	60 ~ 4000	60	"	
YD300-3	300	15	8	50 ~ 3000	35	"	橡皮边
YD400-2	400	20	8 , 16	40 ~ 2000	40	"	

扬声器额定功率时所承受的电压

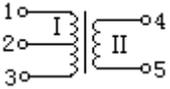
扬声器	25W	15W	12.5W	10W	10W	8W	5W	3W	3W	2W	1W
	16Ω	16Ω	8Ω	15Ω	8Ω	8Ω	4Ω	8Ω	6Ω	4Ω	3.5Ω
额定电压	20V	15.5V	10V	12.25V	8.95V	8.0V	4.47V	4.9V	4.24V	2.8V	1.87V

常用输入变压器型号及参数

型号	初级阻抗 Z/Q	次级阻抗 Z/Q	频率响应 (± 2dB 时) f/Hz	绕 组		用途	接线图号
				圈数	线径 d/mm		
RB—3	()2000	()57CT	200—3000	()1320 ()2 × 420	0.13	晶体管收音机用	
RB—36	()7000	()2 × 330	300—3000	()1800 ()2 × 450	0.09		
E141	()2000	()2000		()1080 ()2 × 540	0.06		
E143	()3000	()2000		()1187 ()2 × 450	0.06		
E192	()1400	()1000		()1800 ()2 × 1000	0.06		
E193	()8000	()4000		()2390 ()2 × 850	0.06		
JB-201	()4500	()500		()2400 ()2 × 800	0.07 0.06		

注：CT 表示线圈中心抽头

常用晶体管收音机输出变压器型号及参数

型号	输出功率 P/mW	初级阻抗 Z/Q	次级阻抗 Z/Q	初级电 感 量 M/mH	绕 组		接线图号
					圈 数	线 径 d/mm	
E141	100	()200CT	()8	70	()2 × 180 ()75	0.11 0.27	
E143	100	()120CT	()8	50	()2 × 140 ()80	0.11 0.27	
E192	200	()220CT	()8	260	()2 × 310 ()129	0.12 0.29	
E193	250	()140CT	()8	65	()2 × 173 ()88	0.17 0.31	
JB-202	100	()300CT	()8	250	()2 × 300 ()100	0.12 0.29	

注：CT 表示线圈中心抽头

电动式耳机特性

国 别	型号	频率范围 f/Hz	阻 抗 Z/Q	灵敏度 S/dB · mW ⁻¹	谐波失真 (%)
日 本	EAH-T805	20 ~ 20000	125	100	
	EAG-830	15 ~ 35000	125	96	
	MDR-7	16 ~ 22000	55	101	
	MDR-80T	16 ~ 24000	45	106	
	MDR-E252	20 ~ 20000	18	108	
德 国	DT320	20 ~ 20000	600	97	< 1(95 dB)
	DT480	20 ~ 20000	8.25	115	0.2(120 dB)
	DT880	5 ~ 25000	600	94	0.5(95 dB)
	HD40	22 ~ 18000	600	92	< 1(95 dB)
	HD44	40 ~ 10000	640	94	
中 国	EDL-1C	20 ~ 20000	8; 20; 200	> 108	< 1(1000Hz)
	EDL-1D	20 ~ 20000	20	> 108	< 1(1000Hz)
	ELD-1E	20 ~ 20000	20	> 105	< 1(1000Hz)
	EDL-903	20 ~ 20000	8; 40; 200	108	< 1(1000Hz)
	ED1-25	20 ~ 18000	50	116	< 1(125 dB)
	E7-50	30 ~ 16000	50	112	< 1

全国主要中波电台频率

f/kHz

台名	使用频率	台名	使用频率	台名	使用频率		
中央(1)	540 639 756	哈尔滨	972	广州	999		
	981 1035	牡丹江	684	海南	954		
	(2) 630 720 855	山东	954 918 1548	广西(1)	792 1071 1440		
北京(1)	828	济南	1053 1314	(2)	846 1161 1224		
(2)	927	青岛	1377	陕西	693 1008 1521		
(3)	1026	上海(1)	990	西安	792 1296		
(4)	1476			(2)	792	甘肃	873 684 1575
天津(1)	909			(3)	1422	宁夏	891 1206 1287
	(2) 1071			(4)	1296	青海(汉)	666 621 711
	(3) 1386	江苏	702 1314 1413	(藏)	1251 1017		
	(4) 954	常州	1044	新疆(维)	558 1044 1413		
河北	783 1125 1278	安徽	864 936 1395	(哈)	909 1107 1233		
唐山	684	浙江	810 1503	(汉)	738 999 1494		
山西	819 846 1269	福建(1)	558 882 612	(蒙)	1449		
内蒙(汉)	675 765 1188	(2)	1467	四川	1116 11161		
(蒙)	1458 1098 1368	福州	765	重庆(1)	1314 1368		
辽宁	963 1089 1260	江西	729 1350 1449	(2)	1080		
沈阳	792	河南(1)	657 1332	贵州	765 1026 927		
吉林	738 1107 1530	(2)	972	云南(1)	990 576		
长春	1449 1323	湖北	774 1404	(2)	1242		
吉林市	927	湖南	1152 1233	昆明	1350 1206		
延边	1206	广东(1)	648 828 801	西双版纳	747		
黑龙江	621 900 1341	(2)	1062	西藏	594 783		
	612				1062 1278		

波段频率分配表

波段名称缩写	名称	频率范围 f/Hz	以波长划分的名称	传播方式	目前频率分配情况
VLF	甚低频	30k 以下	万米波 (甚长波)	天波、地波，以地波传播为主	(10 ~ 20)kHz，主要用于无线电导航、海上移动通信和广播
LF	低频	30k ~ 300k	千米波 (长波)	天波、地波，以地波传播为主	(2000 ~ 3000)kHz，主要用于广播、无线电导航、海上移动通信、地对空通信
MF	中频	300k ~ 3000k	百米波 (中波)	主要以地波传播，夜间天波亦可传播	
HF	高频	3M ~ 30M	十米波 (短波)	地波传播较近，以天波传播为主	主要用于定点通信、航海和航空移动通信、广播、热带广播及业余无线电等
VHF	甚高频	30M ~ 300M	米波 (超短波)	地波传播距离极近，以视距内直线传播为主	(30 ~ 1000)MHz，主要用于电视广播，陆上移动通信、航空移动通信、海上移动通信、定点通信、空间通信和雷达等
UHF	特高频	300M ~ 3000M	分米波 (微波)	视距内直线传播	1GHz ~ 10GHz，主要用于无线电微波接力系统，其次是定点通信和移动通信业务
SHF	超高频	3G ~ 30G	厘米波 (微波)	视距内直线传播	
EHF	极高频	30G ~ 300G	毫米波 (微波)	与光的传播特性基本相同	10GHz 以上，主要用于无线电中继接力通信、空间通信、雷达、导航、无线电天文学等

我国电视频道的划分

频率划分	波段	频道	频率范围 f/MHz	图像载频 f/MHz	伴音载频 f/MHz	本振频率 f/MHz
VHF	波段 (米波)	1	48.5 ~ 56.5	49.75	56.25	86.75
		2	56.6 ~ 64.5	57.75	64.25	94.75
		3	64.5 ~ 72.5	65.75	72.25	102.75
		4	76 ~ 84	77.25	83.75	114.25
		5	84 ~ 92	85.25	91.75	122.25

续表

频率划分	波段	频道	频率范围 f/MHz	图像载频 f/MHz	伴音载频 f/MHz	本振频率 f/MHz	
VHE	波段 (米波)	6	167 ~ 175	168.25	174.75	205.25	
		7	175 ~ 183	176.25	182.75	213.25	
		8	183 ~ 191	184.25	190.75	221.25	
		9	191 ~ 199	192.25	198.75	229.25	
		10	199 ~ 207	200.25	206.75	237.25	
		11	207 ~ 215	208.25	214.75	245.25	
		12	215 ~ 223	216.25	222.75	253.25	
UHF	波段 (分米波)	13	470 ~ 478	471.25	477.75	508.25	
		14	478 ~ 486	479.25	485.75	516.25	
		15	486 ~ 494	487.25	493.75	524.25	
		16	494 ~ 502	495.25	501.75	532.25	
		17	502 ~ 510	503.25	509.75	540.25	
		18	510 ~ 518	511.25	517.75	548.25	
		19	518 ~ 526	519.25	525.75	556.25	
		20	526 ~ 534	527.25	533.75	564.25	
		21	534 ~ 542	535.25	541.75	572.25	
		22	542 ~ 550	543.25	549.75	580.25	
		23	550 ~ 558	551.25	557.75	588.25	
		24	558 ~ 566	559.25	565.75	596.25	
		波段 (分米波)	25	606 ~ 614	607.25	613.75	644.25
			26	614 ~ 622	615.25	621.75	652.25
			27	622 ~ 630	623.25	629.75	660.25
			28	630 ~ 638	631.25	637.75	668.25
			29	638 ~ 646	639.25	645.75	676.25
			30	646 ~ 654	647.25	653.75	684.25
			31	654 ~ 662	655.25	661.75	692.25
			32	662 ~ 670	663.25	669.75	700.25
			33	670 ~ 678	671.25	677.75	708.25
			34	378 ~ 686	679.25	685.75	716.25
			35	686 ~ 694	687.25	693.75	724.25
			36	694 ~ 702	695.25	701.75	732.25
37			702 ~ 710	703.25	709.75	740.25	
38			710 ~ 718	711.25	717.75	748.25	
39			718 ~ 726	719.25	725.75	756.25	
40			726 ~ 734	727.25	733.75	764.25	
41			734 ~ 742	735.25	741.75	772.25	
42			742 ~ 750	743.25	749.75	780.25	

续表

频率 划分	波段	频道	频率范围 f/MHz	图像载频 f/MHz	伴音载频 f/MHz	本振频率 f/MHz
UHF	波段 (分米波)	43	750 ~ 758	751.25	757.75	788.25
		44	758 ~ 766	759.25	765.75	796.25
		45	766 ~ 774	767.25	773.75	804.25
		46	774 ~ 782	775.25	781.75	812.25
		47	782 ~ 790	783.25	789.75	820.25
		48	790 ~ 798	791.25	797.75	828.25
		49	798 ~ 806	799.25	805.75	836.25
		50	806 ~ 814	807.25	813.75	844.25
		51	814 ~ 822	815.25	821.75	852.25
		52	822 ~ 830	823.25	829.75	860.25
		53	830 ~ 838	831.25	837.75	868.25
		54	838 ~ 846	839.25	845.75	876.25
		55	846 ~ 854	847.25	853.75	884.25
		56	854 ~ 862	855.25	861.75	892.25
		57	862 ~ 870	863.25	869.75	900.25
		58	870 ~ 878	871.25	877.75	908.25
		59	878 ~ 886	879.25	885.75	916.25
		60	886 ~ 894	887.25	893.75	924.25
		61	894 ~ 902	895.25	901.75	932.25
		62	902 ~ 910	903.25	909.75	940.25
		63	910 ~ 918	911.25	917.75	948.25
		64	918 ~ 926	919.25	925.75	956.25
		65	926 ~ 934	927.25	933.75	964.25
		66	934 ~ 942	935.25	941.75	972.25
		67	942 ~ 950	943.25	949.75	980.25
		68	950 ~ 958	951.25	957.75	988.25

国产黑白电视机显像管的主要性能

参数名称	单位	23SX5B	21SX2B	40SX12B	47SX13B	35SX2B	43SX3B	
偏转角		90 °	90 °	114 °	110 °	70 °	70 °	
荧光屏尺寸	mm	200 × 158	216 × 276	248 × 282	416 × 339			
荧光屏对角线尺寸	mm	226 (9 in)	313 (12 in)	379 (16 in)	473 (19 in)	350 (14 in)	425 (17 in)	
管身最大长度	mm	198	280	270	312	460	522	
质量	kg	1.5	3.5		9.5	5	8	
最大管颈直径	mm	20.9	20.9	29.4	29.4	38	38	
热丝电压	V	12	12	6.3	6.3	6.3	6.3	
热丝电流	A	0.085	0.085	0.6	0.6	0.6	0.6	
典型 工作 条件	第一阳极电压	V	400	120	400	400	300	300
	第二阳极电压	V	0 ~ 300	12000	14000	16000	12000	14000
	第三阳极电压	V	9000	400	-100 ~ 450	-100 ~ 450	-100 ~ 425	-100 ~ 425
	第四阳极电压	V		12000	14000	16000	12000	14000
	截止电压	V	-20 ~ -60	-25 ~ -65	-30 ~ -90	-20 ~ -80	-30 ~ -90	-30 ~ -90
	最大调制量 (正弦波有效值)	V	19	25	25	25	25	25
中心分辨能力	行	550	500	600	600	600	600	
边缘分辨能力	行	450	400	500	500	500	500	

常用彩色显像管的主要参数

尺寸	型号	偏转角 $\alpha/(\text{°})$	管长 l/mm	管颈 直径 d/mm	高压 U/kV	灯丝 电压 U/V	灯丝 电流 I/mA	备注
410mm(16in)	420UB22	110	319.6	29.1	26.0	6.3	750	黑底管
410mm(16in)	420WB22	90	404.5	36.5	24.0	6.3	900	
470mm(18in)	470DKB22	90	432.3	36.5	26.0	6.3	900	
470mm(18in)	470EHB22	110	340.3	29.1	27.5	6.3	750	黑底管
510mm(20in)	510BLB22	110	361.9	29.1	27.5	6.3	750	黑底管
510mm(20in)	510CLB22	90	460.9	36.5	27.5	6.3	900	
540mm(21in)	560AB22	110	384.8	29.1	27.5	6.3	750	黑底管

常用示波管的特性

型号	屏幕特性		灯丝		典型工作状态							极限使用条件 (最大值)				最大质量 m/g	
	发光颜色	余辉	电压 U/V	电流 I/A	第一阳极电压 U/V	第二阳极电压 U/V	第三阳极电压 U/V	第四阳极电压 U/V	截止电压 U/V	最大调制量 U/V	水平偏转灵敏度 S/V · cm ⁻¹	垂直偏转灵敏度 S/V · cm ⁻¹	第一阳极电压 U/V	第二阳极电压 U/V	第三阳极电压 U/V		第四阳极电压 U/V
13SJ38A	蓝	中短	6.3	0.6	1500	300 ~ 515 (聚焦)	1500	3000	-35 ~ -65	40	16 ~ 22	10 ~ 15	2600	1000	2600	6000	1000
13SJ38J1	绿	中短															
5SJ38J	绿	中	6.3	0.6	1000	138 ~ 300 (聚焦)	1000		-30 ~ -90	50	70 ~ 110	60 ~ 90	1100	550	1100		250
88SJ29J	绿	中	6.3	0.6	1500	280 ~ 516 (聚焦)	1500		-22 ~ -68	40	47 ~ 72	35 ~ 50	2200	1100	2200		450
13SJ39J1	绿	中短	6.3	0.6	1500	170 ~ 350 (聚焦)	1500	10000	-40 ~ -85	40	33 ~ 40	10 ~ 12.5	2000	400	2000	12000	1500
13SJ52J1	绿	中短	6.3	0.15	1000	200 ~ 400	1000	3000	-20 ~ -60	35	12 ~ 15	8 ~ 13	2500	1000	2500	7000	1500

注：示波管的型号由四部分组成：第一部分用数字表示屏幕直径的大小，单位是 cm；第二部分用汉语拼音字母“SJ”表示静电偏转式示波管（用“SS”表示磁偏转式示波管；第三部分用数字表示类型的序号；第四部分用字母 A、M、J、D 等表示屏幕上荧光体的类型（包括发光颜色和余辉时间等）

常用示波管的特性

型号	屏幕特性		灯丝		典型工作状态									
	发光颜色	余辉	电压 U/V	电流 I/A	第一阳极 电压 U/V	第二阳极 电压 U/V	第三阳极 电压 U/V	第四阳极 电压 U/V	其他电极 电压 U/V	截止电压 U/V	最大调制量 U/V	水平偏转灵敏度 S/V · cm ⁻¹	垂直偏转灵敏度 S/V · cm ⁻¹	
7SJ32J	绿	中	6.3	0.6	500	0 ~ 120 (聚焦)	500				-40 ~ -90	50	35 ~ 45	22 ~ 29
13SJ38J	绿	中	6.3	0.6	1500	300 ~ 515 (聚焦)	1500	3000			-35 ~ -65	40	16 ~ 22	10 ~ 15
13SJ50J	绿	中	6.3	0.6	1500	220 ~ 550 (聚焦)	1500	1500	1500		-40 ~ -100	40	10 ~ 12.5	2.1 ~ 3.6
16SJ44J	绿	中	6.3	0.6	1500	400 ~ 600 (聚焦)	1500	3000	1500		-30 ~ -90	40	12 ~ 14	5.9 ~ 8.3

最大控制电压与截止电压之差
 第五阳极与第六阳极间电压
 偏转板间屏蔽极电压

微波加热和干燥用的微波频段

频 率	用 途
915MHz	多用于工业部门中的烘烤、干燥和消毒
2450MHz	多用于家庭微波炉

微波对生物体的主要效应

频率 f/MHz	波长 λ/cm	受影响的主要器官	主要生物效应
150 以下	200 以上		通过人体，影响不大
150 ~ 1000	200 ~ 30	体内各器官	由于体内组织过热，而损害各器官
1000 ~ 3000	30 ~ 10	眼的晶状体、睾丸	组织加热显著，眼的晶状体容易受伤
3000 ~ 10000	10 ~ 3	皮肤、眼的晶状体	伴有温感的皮肤加热
10000 以上	3 以下	表 皮	皮肤表面一方面反射，另一方面吸收而发热

微波辐射对人体各器官的影响

器 官	敏感性	主 要 影 响
神经系统	很敏感	机能紊乱，出现神经衰弱症候群
眼 睛	很敏感	轻则眼睛疲劳、不适、晶状体混浊；重则患“微波白内障”
辜 丸	很敏感	抑制精子的生成过程，影响生育
心血管系统	敏 感	血液动力失调；高强度使心跳加速，低强度使心动过缓，血压下降，心电图改变
血液系统	敏 感	血小板减少，凝血时间缩短，白细胞数下降
免疫系统	敏 感	机体免疫能力降低
甲 状 腺	敏 感	稍肿大
消化系统	一 般	高强度可引起胃肠粘膜充血，甚至溃疡；低强度可引起恶心等不适
呼吸系统	一 般	呼吸频率加快，高强度可引起呼吸障碍并损伤呼吸道
皮 肤	一 般	热感，高强度可灼伤
听 觉	一 般	听力下降，产生微波听觉效应
内脏器官	一 般	血管扩张，组织充血，高强度可引起器官出血，甚至坏死

几个国家的微波安全标准

国 名	频率 f/MHz	最大允许功率密度 $P_d/mW \cdot cm^{-2}$	备 注
美 国 (1966 年)	10 ~ 100000	10	
前 苏 联 (1958 年)	300 ~ 300000	0.01 0.10 1.00	整 天 2 小时每天 ~ 3 小时每天 15 分每天 ~ 20 分每天
波 兰 (1971 年)	300 ~ 300000	0.01 0.10 1.00	整 天 8 小时每天 考虑时间因素
英 国 (1965 年)	30 ~ 300000	10	整 天
法 国 (1965 年)		10 10 ~ 100	1 小时以上 1 小时以下

人体对微波辐射的耐受能力

照射部位	频率 f/MHz	功率密度 $P_d/mW \cdot cm^{-2}$	效 应
头 部	2450	2	脑电图变化的阈值
	—	5 ~ 10	可能引起条件反射变化的阈值
	100 ~ 3000	0.4 0.12	大白鼠轻度神经组织伤害
耳	1310	0.4	微波听阈（刚能听见）
	2450	0.12	微波听阈（背景噪声水平 45dB）
生殖器官	—	5 ~ 10	狗、兔、大白鼠的睾丸伤害阈
局部皮肤	10000	4 ~ 6	暴露时间 5s，皮肤温热感觉阈（刚能被人感到热）
	10000	10	暴露时间 0.5s，皮肤温热感觉阈（刚能被人感到热）
	3000	74	暴露时间 15s ~ 73s，皮肤温热感觉阈（刚能被人感到热）
	2450	110	长时间暴露，皮肤不可耐痛阈
	900	220	长时间暴露，皮肤不可耐痛阈
	3000	830	暴露时间 3min 以上，达皮肤不可耐痛阈
	3000	1000	暴露时间 2min，不可耐痛阈
	3000	3100	暴露时间 20s，不可耐痛阈
	2500	30	照射面积大于半身，人不可耐受
	2500	300	照射面积大于 100cm ² ，人不可耐受
	2500	1000	照射面积小于或等于 100cm ² ，人不可耐受

续表

照射部位	频率 f/MHz	功率密度 $P_d/\text{mW} \cdot \text{cm}^{-2}$	效 应
眼 睛	—	10 ~ 24	无限长时间暴露，不产生晶状体伤害
	—	20 ~ 30	可造成轻度的可逆的晶状体伤害
	1000 ~ 24000	100	晶状体伤害阈值
	—	100	暴露几小时以上有可能产生白内障
全身(不直 接照射眼)	< 500	< 30	无不可逆的伤害
	1000 ~ 3000	< 20	
	> 3000	< 10	
	30000	20	长时间连续暴露产生不可耐受的体温升高
	—	500	职业性暴露数月，可形成晶状体浑浊 职业性暴露几年，可形成白内障

注：上表为美国的微波辐射卫生标准，英国、加拿大、法国、荷兰、瑞典等西方国家基本采用与美国类似的卫生标准

国产大型电子显微镜的技术数据

型 号	分辨本领 $\alpha/\times 10^{-10}\text{m}$	放大倍数	加速电压 U/kV
DX-10 型	50	300 ~ 100000	100
XDT-10 型	10	1500 ~ 100000	100
DXA3-8 型	7	300 ~ 200000	80
DX-3 型	100	20 ~ 100000	30
DXA4-10 型	7	300 ~ 200000	100
DXB ₁ -12 型	5	1000 ~ 400000	120
DXB ₂ -12 型	3	1000 ~ 800000	120

主要参考资料

1. [日]饭田修一等. 物理学常用数表. 张质贤等. 第1版. 北京: 科学出版社, 1979.
2. 乔际平等. 初中物理备课手册. 第1版. 北京: 人民教育出版社, 1990.
3. 徐日新, 章逸民. 中学物理简明手册. 第1版. 杭州: 浙江人民出版社, 1980.
4. 里天等. 常用物理常数手册. 第1版. 昆明: 云南人民出版社, 1983.
5. [苏]A. . 巴钦斯基等. 物理学手册. 阎喜傑. 第1版. 上海: 商务印书馆, 1955.
6. 钟兆娴, 罗里熊. 基础物理学手册. 第1版. 南宁: 广西人民出版社,

1983 .

7. 王知人. 微型电池. 第 1 版. 北京: 人民邮电出版社, 1981 .
8. 李金章. 镉? 镍电池. 第 1 版. 北京: 人民邮电出版社, 1985 .
9. 工业电气设备机械工程手册, 电机工程手册编辑委员会. 电机工程手册第 2 卷, 第 6 卷. 第 1 版. 北京: 机械工业出版社, 1982 .
10. 中学物理教师手册编写组. 中学物理教师手册. 第 1 版. 上海: 上海教育出版社, 1983 .
11. 徐开先, 叶济民. 热敏电阻器. 第 1 版. 北京: 机械工业出版社, 1981 .
12. 上海交电采购供应站等. 常用电工器材商品手册. 第 1 版. 北京: 中国财政经济出版社, 1977 .
13. 张鸿玲等. 中学实用物理词典. 第 1 版. 北京: 北京科学技术出版社, 1987 .
14. 包魁武. 常用电动机修理. 第 2 版. 呼和浩特: 内蒙古人民出版社, 1984 .
15. 实用电工技术问答 2500 题编写组. 实用电工技术问答 2500 题. 第 1 版. 呼和浩特: 内蒙古人民出版社, 1988 .
16. 电工手册编写组. 电工手册. 第 1 版. 上海: 科学技术出版社, 1978 .
17. 李龙. 无线电广播技术手册. 第 2 版. 呼和浩特: 内蒙古人民出版社, 1980 .
18. 王文秀, 龙开源. 电子元器件. 第 1 版. 北京: 人民邮电出版社, 1985 .
19. 赵伟坤. 日用电器技术知识手册. 第 1 版. 北京: 机械工业出版社, 1985 .
20. 李炳炎, 鲍克. 实用无线电手册. 第 1 版. 济南: 山东科学技术出版社, 1982 .
21. 赵克勤. 常用电声器件原理与应用. 第 1 版. 北京: 人民邮电出版社, 1990 .
22. 甘为众等. 实用无线电技术手册. 第 1 版. 北京: 北京出版社, 1983 .
23. 吴大伟. 微波卫生学原理. 第 1 版. 北京: 劳动人事出版社, 1984 .
24. 鲍家善. 微波原理. 第 2 版. 北京: 高等教育出版社, 1985 .

六、光 学

某些光源的光亮度近似值

L/cd · m⁻²

与人眼最小灵敏度对应的物体	10 ⁻⁶
无月的夜空	10 ⁻⁴
地球上看到的满月表面	2.5 × 10 ³
煤油灯焰	1.5 × 10 ⁴
阳光照明的洁净雪面	3 × 10 ⁴
乙炔焰	8 × 10 ⁴
钨丝白炽灯	(5 ~ 15) × 10 ⁶
普通碳弧的喷火口	13 × 10 ⁷
超高压汞灯	12 × 10 ⁸
在地面上看到的太阳	1510 ⁸
在地球大气层外看到的太阳	19 × 10 ⁸

不同色光波长和频率的范围

颜 色	波 长 λ/μm	频率 f/ × 10 ¹⁴ Hz
红	0.63 ~ 0.76	4.8 ~ 3.9
橙	0.60 ~ 0.63	5.0 ~ 4.8
黄	0.57 ~ 0.60	5.3 ~ 5.0
绿	0.50 ~ 0.57	6.0 ~ 5.3
青	0.45 ~ 0.50	6.7 ~ 6.0
蓝	0.43 ~ 0.45	7.0 ~ 6.7
紫	0.40 ~ 0.43	7.5 ~ 7.0

注：可见光波长的极限不是很明确。光视效率最大值位于 $\lambda=0.5550\mu\text{m}$ 处，如果在光视效率降低到最大值的千分之一时确定可见光波长的极限，波长的两个极限值分别为 $0.410\mu\text{m}$ 和 $0.720\mu\text{m}$ 。但是，只要辐射足够强，眼睛还可以看到上面讲的两个波长极限以外的光。

某些场合下光照度的值		E/1x
无月夜天光在地面上		3×10^{-4}
接近天顶的满月在地面上		0.2
电影院的银幕上		20 ~ 80
阅读		50
书写工作、缝纫		75
制图、修理钟表，雕刻制版		100
晴朗的夏日在采光良好的室内		100 ~ 500
太阳不直接照到的露天地面		$10^3 \sim 10^4$
正午露天地面（中纬度地区）		10^5

金属的反射率(%)

金属 波长 /nm	铝 Al	铟 Sb	铜 Cu	金 Au	铁 Fe	镁 Mg	锰 Mn	镍 Ni	铂 Pt	钾 K	铑 Rh	银 Ag
250			29 231nm				46 254nm	44.9 254nm				25.0
300							52.5 313nm	43.5 313nm				12.6 303nm
350			31.5 347nm									67.5 346nm
400				36			54.3 406nm	53 406nm				87.1 395nm
450	72.3 431nm	66 431nm		36.2 440nm					58.3 431nm	86.9 472nm		91.7
500	72.8 486nm		55.1	41.5		72	60.4 507nm	59.7	58.6 486nm			93.2
550	72.4 527nm			71 540nm					64.7 527nm			94.2
600	77.6 589nm			82.7 580nm	56.1 589nm	92.9 589nm	64.0 589nm	63.4 589nm	71.3 579nm	91.4 589nm	78.3 579nm	
650	82.4 630nm	70 630nm	84.6 640nm	91 660nm		93.5 630nm	64.5 668nm		69.1 656nm	93.8 665nm	79.7 660nm	
700				93				67.6	67.6 680nm		79	96.1
800												
1000	73.3 1.06 μ m	55	90.1		65.0	740		74.1			84	96.4
2000			95.5					84.4				97.3
5000	93.8 5.24 μ m		97.9									97.3
9000					93.8				96.6 8.85 μ m			
11000	96.9 10.49 μ m		98.4									

金属薄膜的反射率(%)

/um	Ag	Al	Au	Cd	Cu	Ni	Pt	Rh	Sn
0.200				23		44	38		9
0.251				36		37.8	33.8		17
0.280	25.2	92.3	37.8		33.0	37.6(=0.275)	43.1(=0.275)	68.5	
0.305				49					21
0.360	88.2	92.5	36.3	60(=0.357)	41.5	41.2(=0.361)	52.4(=0.361)	77.0	27(=0.357)
0.400	94.8	92.4	38.7		47.5			77.6	
0.450	96.6	92.2	38.7		55.2	56.1(=0.441)	58.4(=0.441)	77.2	
0.500	97.7	91.8	47.7		60.0			77.4	
0.550	97.9	91.6	81.7		66.9	54.9(=0.546)	67.9(=0.546)	78.0	
0.600	98.1	91.1	91.9		93.3			79.1	
0.700	98.5	89.9	97.0		97.5	68.8	69.0	80.4	
1.0	98.9	93.9	98.2		98.5	72.0	77	85.0	
2.0	98.9	97.2	98.2		98.6	83.5		90.5	
3.0	98.9	97.5	98.3		98.6	88.7		92.5	
5.0	98.9	97.7	98.3		98.7	94.4		94.5	
7.0	98.9	97.8	98.4		98.7	94.3	95.5	95.2	
10.0	98.9	98.0	98.4		98.8		95.5	96.0	

注：金属薄膜的反射率与纯金属的反射率有些不同，原因在于薄膜严重偏离完整的晶格，有许多大的缺陷

合金的反射率(%)

/μ m	青铜	康铜	莫涅耳合金	德银	硬铝	钨铬钴合金	钢铁
0.251					25		32.9
0.288					29		35.0
0.357					37		45.0
0.500	63		57.8		48	65.8	54.8
0.600	64		60.2			70.1	55.4
0.700		71.2	63.7			71.8	57.6
0.800			67.2	71.1		73.0	58.0
1.00	70	72.4	73.2	74.3		74.0	63.1
2.00	80	82.3	83.8	87.0		76.8	87.7
3.00	86	85.6	88.7	90.1		80.0	83.0
4.00	88	88.3	91.0	91.9		82.8	87.8
5.00		89.5		92.6			
7.00		92.7		93.6			
9.00	93	93.0					92.8
11.00		93.4					
14.00		94.2					96

一些物质表面的反射率(%)

物质 \ 波长 /nm	400	500	600	700
加入碳粉的油	0.003	0.003	0.003	0.003
吸墨纸	0.64	0.72	0.79	0.79
有光纸	0.64	0.69	0.73	0.76
绿绉纸	0.23	0.49	0.19	0.48
红绉纸	0.03	0.02	0.21	0.68
黄绉纸	0.17	0.44	0.75	0.79
报纸	0.38	0.61	0.63	0.78
粘土：				
高岭土（处理过的）	0.82	0.81	0.82	0.82
高岭土（未处理的）	0.75	0.79	0.85	0.86
油漆				
锌钡白	0.95	0.98	0.98	0.98
氧化锌乳状液	0.74	0.84	0.85	0.86
搪瓷：				
蓝色	0.44	0.10	0.05	0.23
橙色	0.09	0.09	0.59	0.69
红色	0.05	0.03	0.08	0.62
白色	0.77	0.73	0.72	0.70
黄色	0.11	0.46	0.62	0.62
面粉	0.75	0.87	0.94	0.97
滑石粉	0.94	0.89	0.88	0.88

透明固体的折射率和临界角($\lambda=589.3\text{nm}$)

物质	折射率	临界角 i_c (°)
氯化钠 NaCl	1.54427	40.3575
氯化钾 KCl	1.49044	42.1399
萤石 CaF_2	1.43381	44.2222
熔凝石英 SiO_2	1.45840	43.2893
金刚石	2.417	24.44

熔凝石英的折射率(20)

波长 / μ m	折射率	波长 / μ m	折射率 m	波长 / μ m	折射率
0.213856]	1.534307	0.508582	1.461863	1.3622	1.446212
0.237833	1.514729	0.546074	1.460078	1.681	1.442414
0.275278	1.495913	0.589262	1.458404	2.0581	1.437224
0.330259	1.480539	0.643847	1.456704	2.4374	1.430954
0.361051	1.475129	0.706519	1.455145	3.2668	1.412505
0.435835	1.466693	1.01398	1.450242	3.7067	1.399389

硅的折射率(26)

波长 / μ m	折射率	波长 / μ m	折射率	波长 / μ m	折射率
1.3570	3.4975	3.00	3.4320	6.50	3.4195
1.3951	3.4929	3.4188	3.4286	7.50	3.4186
1.6606	3.4696	3.50	3.4284	8.50	3.4182
1.8131	3.4608	4.00	3.4255	10.50	3.4178
2.1526	3.4476	4.50	3.4236		
2.4373	3.4408	5.50	3.4213		

几种常用无色光学玻璃的折射率

名称	型号	折射率				
		0.6563 μm	0.5893 μm	0.5461 μm	0.4861 μm	0.4358 μm
轻冕玻璃	QK3	1.48531	1.48740	1.48912	1.49227	1.49596
冕玻璃	K5	1.50760	1.51000	1.51199	1.51565	1.51998
	K7	1.51218	1.51470	1.51681	1.52067	1.52526
	K9	1.51390	1.51630	1.51829	1.52196	1.52627
钡冕玻璃	BaK2	1.53723	1.53990	1.54214	1.54628	1.55120
	BaK7	1.56582	1.56880	1.57131	1.57597	1.58154
	BaK8	1.56947	1.57240	1.57486	1.57943	1.58487
重冕玻璃	ZK3	1.58624	1.58910	1.59148	1.59586	1.60105
	ZK9	1.61728	1.62030	1.62287	1.62757	1.63314
	ZK19	1.61046	1.61365	1.61634	1.62134	1.62731
镧冕玻璃	LaK1	1.65600	1.65940	1.66224	1.66750	1.67377
冕火石玻璃	KF3	1.52319	1.52620	1.52875	1.53351	1.53925
轻火石玻璃	QF1	1.54454	1.54800	1.55094	1.55649	1.56328
	QF3	1.57090	1.57490	1.57833	1.58482	1.59281
钡火石玻璃	BaF1	1.54502	1.54800	1.55051	1.55518	1.56081
	BaF8	1.62133	1.62590	1.62984	1.63734	1.64660
火石玻璃	F1	1.58956	1.60310	1.60702	1.61446	1.62367
	F4	1.61504	1.61990	1.62408	1.63210	1.64205
重钡火石玻璃	ZBaF3	1.65306	1.65680	1.65996	1.66591	1.67306
重火石玻璃	ZF1	1.64208	1.64750	1.65219	1.66120	1.67245
	ZF6	1.74733	1.75500	1.76171	1.77476	1.79135
镧火石玻璃	LaF1	1.71248	1.71687	1.72056	1.72745	1.73578
	LaF7	1.78330	1.78816	1.79227	1.79994	1.80917

某些单轴双折射晶体的折射率（钠光， $\lambda=589.3\text{nm}$ ）

物质	分子式	n_o	n_e
冰	H_2O	1.309	1.313
氟化镁	MgF_2	1.378	1.390
石英	SiO_2	1.544	1.553
氧化镁	$MgO \cdot H_2O$	1.559	1.580
锆石	$ZrO_2 \cdot SiO_2$	1.923	1.968
硫化锌	ZnS	2.356	2.378
方解石	$CaO \cdot CO_2$	1.658	1.486
钙黄长石	$2CaO \cdot Al_2O_3 \cdot SiO_2$	1.669	1.658
菱镁矿	$ZnO \cdot CO_3$	1.700	1.509
刚玉	Al_2O_3	1.768	1.760
淡红银矿	$3Ag_2S \cdot As_2S_3$	2.979	2.711
硝酸钠	$NaNO_3$	1.587	1.336
电石	CaC_2	1.669	1.638
金红石	TiO_3	2.616	2.903

纯水、乙醇和二硫化碳的折射率（相对于空气）
（钠光， $\lambda = 589.3\text{nm}$ ）

温度 t/	纯水	乙醇 99.8	二硫化碳	温度 t/	纯水	乙醇 99.8	二硫化碳
14	1.33348			58	1.32755	1.34456	
15	1.33341		1.62935	60	1.32718	1.34368	
16	1.33333	1.36210	1.62858	62	1.32678	1.34279	
18	1.33317	1.36129	1.62704	64	1.32636	1.34189	
20	1.33299	1.36048	1.62546	66	1.32596	1.34096	
22	1.33281	1.35967	1.62387	68	1.32555	1.34004	
24	1.33262	1.35885	1.62226	70	1.32511	1.33912	
26	1.33241	1.35803	1.62064	72	1.32466	1.33820	
28	1.33219	1.35721	1.61902	74	1.32421	1.33728	
30	1.33192	1.35639	1.61740	76	1.32376	1.33626	
32	1.33164	1.35557	1.61577	78	1.32332		
34	1.33136	1.35474	1.61413	80	1.32287		
36	1.33107	1.35390	1.61247	82	1.32241		
38	1.33079	1.35306	1.61080	84	1.32195		
40	1.33051	1.35222	1.60914	86	1.32148		
42	1.33023	1.35138	1.60748	88	1.32100		
44	1.32992	1.35054	1.60582	90	1.32050		
46	1.32959	1.34969		92	1.32000		
48	1.32927	1.34885		94	1.31949		
50	1.32894	1.34800		96	1.31897		
52	1.32860	1.34715		98	1.31842		
54	1.32827	1.34629		100	1.31783		
56	1.32792	1.34543					

液体的折射率(20)

物质 \ 波长 / μm	397	434	486	589	696
四氯化碳 CCl_4	...	1.4729	1.4676	1.4607	1.4579
丙酮 $\text{CH}_3 \cdot \text{CO} \cdot \text{CH}_3$	...	1.3678	1.3639	1.3593	1.3573
乙醇 $\text{C}_2\text{H}_5\text{OH}$	...	1.3700	1.3666	1.3618	1.3605
甲醇 CH_3OH	1.3399	1.3362	1.3331	1.3290	1.3277
苯 C_6H_6	...	1.5236	1.5132	1.5012	1.4965
氯仿 CHCl_3	1.463	1.458	1.4530	1.4467	1.4443
甘油 $\text{CH}_2\text{OH} \cdot \text{CHOH} \cdot \text{CH}_2\text{OH}$	...	1.4828	1.4784	1.4730	1.4706
甲苯 $\text{C}_6\text{H}_5 \cdot \text{CH}_3$	...	1.5170	1.5070	1.4955	1.4911
水	1.3435	1.3404	1.3372	1.3330	1.3312

水溶液的折射率 ($\lambda = 589.3\text{nm}$)

物质	密度 $/\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$	温度 $t/$	折射率	物质	密度 $/\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$	温度 $t/$	折射率
氯化氨	1.067	27.05	1.379	苏打	1.376	21.6	1.413
氯化氨	1.025	29.75	1.351	氯化钠	1.189	18.07	1.378
氯化钙	1.398	25.65	1.443	氯化钠	1.109	18.07	1.360
氯化钙	1.215	22.9	1.397	氯化钠	1.035	18.07	1.342
氯化钙	1.143	25.8	1.374	亚硝酸钠	1.358	22.8	1.385
盐酸	1.166	20.75	1.411	硫酸	1.811	18.3	1.437
硝酸	1.359	18.75	1.402	硫酸	1.632	18.3	1.425
苛性钾	1.416	11.0	1.403	硫酸	1.221	18.3	1.370
氯化钾				硫酸	1.028	18.3	1.339
当量溶液			1.343	氯化锌	1.359	26.6	1.402
二倍当量溶液			1.352	氯化锌	1.209	26.4	1.375
三倍当量溶液			1.360				

空气的折射率 (0°C , 101325Pa)

	/nm	$(n - 1) \times 10^6$			/nm	$(n-1) \times 10^6$	
		15	20			15	20
Cd (红)	634.84696	276.38	271.63	Cd (蓝)	479.99104	279.50	274.70
He (黄)	587.5623	277.15	272.39	Cd (蓝)	467.81493	279.88	275.07
Hg (绿)	546.07430	277.88	273.11	He (紫)	447.1477	280.60	275.79
Cd (绿)	508.58212	278.72	273.93	Hg (紫)	835.8325	281.05	276.22

注：指不含 CO₂ 的干燥空气

各种气体的折射率

($t=0$, $p=101325\text{Pa}$, $\lambda=589.3\text{nm}$)

气体	$(n - 1) \times 10^4$	气体	$(n - 1) \times 10^4$	气体	$(n - 1) \times 10^4$
氩(Ar)	2.837	氢(H ₂)	1.40	一氧化二氮(N ₂ O)	5.16
溴(Br ₂)	11.32	氯化氢(HCl)	4.47	氖	0.69
乙炔(C ₂ H ₂)	5.10	氦(He)	0.36	氧	2.72
甲烷(CH ₄)	4.44	硫化氢(H ₂ S)	6.23	氙	7.02
一氧化碳(CO)	3.35	氪(Kr)	4.27	空气	2.926
二氧化碳(CO ₂)	4.50	氮(N ₂)	2.97	水蒸气	2.54
氯(Cl ₂)	7.73	氨(NH ₃)	3.79		

玻璃的透射率 (厚度 1cm)

玻璃品种 波长 /nm	冕玻璃	硼硅酸盐冕玻璃	火石玻璃	重火石玻璃
309	—	0.08	—	—
330	—	0.65	—	—
347	—	0.88	—	0.01
357	—	—	0.72	—
361	—	0.95	—	0.16
375	0.947	—	—	—
384	—	0.972	—	0.58
388	—	0.975	0.904	—
396	—	0.986	—	—
400	0.964	—	—	—
415	—	0.985	0.959	—
419	0.952	—	—	—
425	—	0.993	—	0.905
434	0.960	—	—	—
455	0.981	—	—	—
500	—	0.993	1.00	—
580	0.986	—	—	—
677	0.990	—	—	—

石英对紫外线的透射率 (厚度 1mm)

波长 /nm	190	200	210	220
透射率	0.67	0.84	0.92	0.94

注：石英对紫外线可见光都是透明的，对波长超过 7.0 μm 的红外线则是不透明的

岩盐、钾盐、萤石对红外线的透射率 (厚度 1cm)

波长 / μ m	岩盐(NaCl)	钾盐(KCl)	萤石
8	—	—	0.844
9	0.995	1.000	0.543
10	0.995	0.998	0.164
12	0.993	0.995	0.010
14	0.931	0.975	0.000
16	0.661	0.936	—
18	0.275	0.862	—
19	0.096	0.758	—
20.7	0.006	0.585	—
23.7	0.000	0.155	—

气体的吸收系数(0 , 1.01325×10^5 Pa)

/nm	/nm ⁻¹
F ₂	
220	0.057
230	0.088
240	0.13
250	0.17
260	0.20
270	0.22
280	0.22
290	0.22
300	0.21
310	0.19
320	0.16
330	0.13
340	0.090
350	0.057
Cl ₂	
254	0.01085
265	0.0556
280	0.335
289	0.759
297	1.206
303	1.595
313	2.43
334	2.97
366	1.233
405	0.1808
436	0.0744
472	0.0182
480	0.0106
496	0.00455
509	0.00205
546	0.000077
579	0.000014
614	0.0022
643	0.0018
Br ₂ (66)	

/nm	/cm ⁻¹
356	0.560
364.1	1.19
371.3	2.06
383.8	3.99
390.0	5.20
400.9	6.80
407.0	7.20
421	7.18
433	6.79
449	5.93
487	4.04
510	3.00
526	2.02
546	1.22
572	0.64
608	0.164
N ₂	
186	0.000478
O ₂	
186	0.0089
193	0.00146
O ₃	
230	50
240	95
250	120
260	120
270	91
280	46
290	16.6
300	4.6
310	1.23
320	0.35
330	0.095
340	0.025
CO ₂	
186	0.00249
193	0.00093
200	0.000343
空气	
186	0.00194

液体的吸收系数(0, $1.01325 \times 10^5 \text{Pa}$)

$\lambda / \mu\text{m}$	α / cm^{-1}	$\lambda / \mu\text{m}$	α / cm^{-1}
H ₂ O		Br ₂ (液体)	
186	0.0299	380	350
193	0.0072	390	470
200	0.0039	400	580
210	0.00265	405	620
220	0.00246	411	658
230	0.00147	417	673
240	0.00137	420	671
260	0.00110	425	660
300	0.00066	436	595
HBr		460	425
		480	303
207	0.0193	490	257
253	0.00139	500	210
		520	146
		540	96

功函数 W/eV

元素	由电子发射得出的数据	由光电效应得出的数据	由接触势垒得出的数据
Ag	4.31	4.73	4.21
Al		4.20	4.25
Au	4.25	4.82	4.46
C	4.60	4.81	
Cd		4.07	4.49
Cu	4.55	4.18	4.46
Fe	4.76	4.60	4.40
Hg		4.53	4.50
K		2.24	1.60
Li		2.28	2.49
Mg		3.68	3.78
Mo	4.20	4.15	4.08
Na		2.28	2.26
Ni	5.03	5.01	4.96
Pb		4.14	3.94
Pt	4.72	6.35	5.36
Sb		4.60	4.14
Si	4.02	4.40	4.2
Sn		4.40	4.64
Ti	3.95	3.47	3.46
W	4.39(111) 4.56(001)	4.49	4.38
Zn		4.24	

常用光阴极材料特性

光谱灵敏性 代号	光阴极材料和 泡壳材料	峰值波长 /nm	波长极根 /nm	灵敏度 S/ μ A · 1m ⁻¹	峰值量子效率 (%)	暗电流 J/ μ A · cm ⁻² 25 °
S - 1	Ag-O-Cs 玻璃	800	1200	25	0.4	10 ⁻⁶
S - 4	不透明 Cs ₃ Sb 玻璃	400	600	40	12	2 × 10 ⁻¹⁰
S - 10	半透明 Bi-Ag-O-Cs 玻璃	450	730	40	5.6	7 × 10 ⁻⁸
S - 11	半透明 Cs ₃ Sb 玻璃	440	670	60	14	3 × 10 ⁻⁹
S - 19	Cs ₃ Sb 石英	440	700		20	
S - 20	半透明 KNa ₂ Sb[Cs] 玻璃	420	850	150	18	3 × 10 ⁻¹⁰
-	Na ₂ KSb 玻璃	360	650	30	21	10 ⁻¹³
-	K ₂ CsSb 石英	385	650	75	30	10 ⁻¹²

各种光敏电阻的特性

光敏面材料	光敏面的工作温度 T/K	最大灵敏波长 / μ m	长波限 /μ m	时间常数 t/μ s	暗电阻 R/M
PbS	295	2.1	3	50~500	0.5~10
PbS	195	2.6	3.3	800~4000	0.5~5
PbS	77	2.9	3.8	500~3000	1~10
PbSe	295	3.8	4.0	2	1~10
PbSe	195	4.2	5.1	30	10
PbSe	77	5.1	6.0	40	5~10
PbTe	77	4	6.6	5	0.5~5
InAs	295	3.2	3.7	1	20×10^{-6}
InAs	195	3.2	3.5	1	—
InAs	77	2.9	3.2	2	0.1
InSb	295	6.5	7.3	0.2	20×10^{-6}
InSb	195	5.1	6.5	1	20×10^{-6}
InSb	77	5.3	5.9	1~10	$(2\sim 10) \times 10^{-3}$
InSb	77	5.1	5.6	1	$(1\sim 15) \times 10^{-3}$
Ge 掺入 Au	77	5.4	9	1	0.1~10
Ge 掺入 Au	77	1.5	5.5	50	—
HgCdTe	77	10.6	15	100	$(5\sim 50) \times 10^{-6}$
Ge-Si 掺 Zn	48	10.5	15	1	0.1
Ge 掺 Hg	30	11	14	1	0.002~0.1
Ge 掺 Cd	28	17	24	1	0.02
Ge 掺 Cu	4.2	23	29	1	0.5~1
Ge 掺 Zn	4.2	37	40	0.01	0.3

三种光纤的主要区别

光纤类型	折射率分布	芯径 $a/\mu\text{m}$	相对折射率差 $\Delta(\%)$
突变型多模光纤(SIF)	$n(r) = \begin{cases} n_1 (r \leq a) \\ n_2 (a < r \leq d) \end{cases}$	50~100	1~3
渐变型多模光纤(GIF)	$n(r) = \begin{cases} n_1 [1 - 2\Delta(\frac{r}{a})^2]^{\frac{1}{2}} & (r \leq a) \\ n_1 (1 - 2\Delta)^{\frac{1}{2}} & (a < r \leq d) \end{cases}$	50~100	1~3
单模光纤(SMF)	$n(r) = \begin{cases} n_1 (r \leq a) \\ n_2 (a < r \leq d) \end{cases}$	3~10	0.1~0.5

注：a为纤芯半径，d为光纤半径，相对折射率差 $= \frac{n_1 - n_2}{n_1}$ ，a的折射率分布指数

几种光纤的脉冲展宽

光纤类型	波长 / μm	光纤材料	光源谱线宽度 d/nm	脉冲展宽 / $\text{ps} \cdot \text{km}^{-1}$
SMF	0.9	SiO ₂ 芯	3	270
		=0.004	0.3	28
GIF	0.9	A 和 C	3	360
			0.3	36
GIF	0.9	A 和 F	3	300
			0.3	30
SMF	1.27	SiO ₂ 芯	3	< 1
		=0.004	0.3	< 1
GIF	1.2	A 和 F	3	1.5
			0.3	1.2

注：单模光纤芯半径 $a=5\mu\text{m}$ 。A：100%SO₂

$= \frac{n_1 - n_2}{n_1}$ (相对折射率差)。C：93%SiO₂,7%GeO₂

F：86.27%SiO₂,9.7%B₂O₃,4.03%GeO₂

光纤通信系统分类

	类别	特点
按光 波长 划分	短波长光纤通信系统	系统工作波长为 0.8 μ m~0.9 μ m 中断距离短, 10km 以内
	长波长光纤通信系统	系统工作波长为: 1.0 μ m~1.6 μ m ; 中断距离长, 可达 100km 以上
	超长波长光纤通信系统	系统工作波长为 2 μ m 以上, 中继距离很长, 可达 1000km 以上, 非石英系光纤
按光纤 特点 划分	多模光纤通信系统	石英多模光纤; 传输容量较小, 一般在 140Mb/s 以下
	单模光纤通信系统	石英单模光纤; 传输容量大, 一般在 140Mb/s 以上
按传输 信号形 式划分	光纤数字通信系统	传输数字信号, 抗干扰能力强
	光纤模拟通信系统	传输模拟信号, 适于短距离传输; 成本低
其 他	外差光纤通信系统	光接收机灵敏度高; 中继距离长; 通信容量大, 设备复杂
	全光通信系统	不需要光电转换, 通信质量高
	波分复用系统(WDM)	在一根光纤上可传输多个载波信号, 通信容量大, 成本低

常用波长表 (夫琅禾费线)

谱线名称	元素	波长 /nm	谱线	元素	波长 /nm
Y	O	898.765		Ca	430.7747
x ₄	Mg	880.6775		Ca	422.6740
x ₃	Ca ⁺	866.2170	h,H	H	410.1748
x ₂	Ca ⁺	854.2144	H	Ca ⁺	396.8492
x ₁	Ca ⁺	849.8062	K	Ca ⁺	393.3682
Z	O	822.6962	L	Fe	382.0436
A	O	759.3695	M	Fe	372.7634
a	O	718.4526	N	Fe	358.1209
B	O	686.7187	O	Fe	344.1019
C,H _a	H	656.2808	p	Ti ⁺	336.1193
D ₁	Na	589.5940	Q	Fe	328.6772
D ₂	Na	588.9973	R	Ca ⁺	318.1276
D ₃	He	587.5650		Ca ⁺	317.9342
	He	587.5618	r	Fe	314.3996
E	Fe	527.0388		Ti ⁺	314.3764
	Ca	527.0268	S ₁	Ni	310.1895
	Fe	526.9550		Ni	310.1574
b ₁	Mg	518.3619	S ₂	Fe	310.0682
b ₂	Mg	517.2698		Fe	310.0325
b ₃	Fe ⁺	516.9050		Fe	309.9987
	Fe	516.8908		Fe	309.9896
b ₄	Fe	516.7580	s	Fe	304.7614
	Mg	516.7328	T	Fe	302.1077
F,H	H	486.1342		Fe	302.0656
g,H	H	434.0475		Fe	302.0490
G	Fe,TI	430.7912	t	Fe,Ni	299.4436

主要参考资料

1. 程守洙, 江之永。普通物理学(第三卷)。第3版。北京:人民教育出版社, 1979。
2. 中华人民共和国国家标准 量和单位。第1版。北京:中国标准出版社, 1987。
3. 伊里奇·萨依然。国际单位制简介。第1版。北京:计量出版社, 1983。
4. 母国光, 战元令。光学。第1版。北京:人民教育出版社, 1979。

5. [日]饭田修一等。物理学常用数表。第2版。北京：科学出版社，1987。
6. CRC. Handbook of chemistry and Physics. 69th, Ed.
7. 姚启钧。光学教程。华东师大《光学》教材编写组。第1版。北京：人民教育出版社，1981。
8. 复旦大学电光源实验室。电光源原理。第1版。上海：上海科学技术出版社，1979。
9. [苏]И. В. 巴伊鲍罗金等。激光技术手册。尚惠春等。第1版。北京：机械工业出版社，1986。
10. 杨同友。光纤通信技术。第1版。北京：人民邮电出版社，1986。

七、原子和原子核

基态原子的电子组态

元 素	电子壳层													原子 基态	电离 能 Ei/eV						
	K	L		M			N		O		P		Q								
	1s	2s	2p	3s	3p	3d	4s	4p	4d	4f	5s	5p	5d			5f	6s	6p	6d	7s	uP
1H	1																			$2S_{1/2}$	13.599
2He	2																			$1S_0$	24.588
3Li	2	1																		$2S_{1/2}$	5.392
4Be	2	2																		$1S_0$	9.323
5B	2	2	1																	$2S_{1/2}$	8.298
6C	2	2	2																	$3P_0$	11.260
7N	2	2	3																	$4S_{3/2}$	14.53
8O	2	2	4																	$3P_2$	13.618
9F	2	2	5																	$2P_{s/2}$	17.423
10Ne	2	2	6																	$1S_0$	21.565
11Na	2	2	6	1																$2S_{1/2}$	5.139
12Mg	2	2	6	2																$1S_0$	7.646
13Al	2	2	6	2	1															$2P_{1/2}$	5.986
14Si	2	2	6	2	2															$3P_0$	8.152
15P	2	2	6	2	3															$4S_{3/2}$	10.487
16S	2	2	6	2	4															$3P_2$	10.360
17Cl	2	2	6	2	5															$2P_{3/2}$	12.967
18Ar	2	2	6	2	6															$1S_0$	15.760
19K	2	2	6	2	6	1														$2S_{1/2}$	4.341
20Ca	2	2	6	2	6	2														$1S_0$	6.113
21Sc	2	2	6	2	6	1	2													$2D_{3/2}$	6.54
22Ti						2	2													$3F_2$	6.82
23V						3	2													$4F_{3/2}$	6.74
24Cr						5	1													$7S_s$	6.765
25Mn						5	2													$6S_{5/2}$	7.435
26Fe						6	2													$5D_4$	7.87

续表

元 素	电子壳层														原子 基态	电离 能 Ei/eV		
	K		L		M			N		O		P					Q	
	1s	2s 2p	3s 3p 3d	4s 4p 4d 4f	5s 5p 5d 5f	6s 6p 6d	7s uP											
27Co				7	2											$4F_{9/2}$	7.864	
28Ni				8	2											$3F_4$	7.633	
29Cu	2	2 6	2 6 10	1												$2S_{1/2}$	7.726	
30Zn			10	2												$1S_0$	9.394	
31Ga	2	2 6	2 6 10	2 1												$2P_{1/2}$	5.999	
32Ge			10	2 2												$3P_0$	8.126	
33As			10	2 3												$4S_{3/2}$	9.81	
34Se			10	2 4												$3P_2$	9.750	
35Br			10	2 5												$2P_{3/2}$	11.814	
36Kr			10	2 6												$1S_0$	14.000	
37Rb	2	2 6	2 6 10	2 6	1											$2S_{1/2}$	4.177	
38Sr				2 6	2											$1S_0$	5.696	
39Y	2	2 6	2 6 10	2 6 1	2											$2D_{3/2}$	6.370	
40Zr					2 2											$3F_2$	6.837	
41Nb					4 1											$6D_{1/2}$	6.883	
42Mo					5 1											$7S_3$	7.10	
43Tc					5 2											$6D_{5/2}$	7.28	
44Ru	2	2 6	2 6 10	2 6 7	1											$5F_5$	7.346	
45Rh					8 1											$4F_{9/2}$	7.464	
46Pd					10											$1S_0$	8.330	
47Ag	2	2 6	2 6 10	2 6 10	1											$2S_{1/2}$	7.576	
48Cd					10 2											$1S_0$	8.994	
49In	2	2 6	2 6 10	2 6 10	2 1											$2P_{1/2}$	5.786	
50Sn					2 2											$3P_0$	7.344	
51Sb					2 3											$4S_{3/2}$	8.642	
52Te					2 4											$3P_2$	9.01	
53I					2 5											$2P_{3/2}$	10.451	
54Xe					2 6											$1S_0$	12.130	
55Cs	2	2 6	2 6 10	2 6 10	2 6	1										$2S_{1/2}$	3.894	
56Ba					2 6	2										$1S_0$	5.212	

元 素	电子壳层													原子 基态	电离 能 Ei/eV
	K		L		M		N		O		P		Q		
	1s	2s 2p	3s 3p 3d	4s 4p 4d 4f	5s 5p 5d 5f	6s 6p 6d	7s 7p								
57La	2	2 6	2 6 10	2 6 10	2 6 1	2								$^2D_{3/2}$	5.614
58Ce				1	2 6 1	2								1G_4	5.65
59Pr				3	2 6	2								$^4I_{9/2}$	5.42
60Nd				4	2 6	2								5I_4	5.49
61Pm				5	2 6	2								$^6H_{5/2}$	5.55
62Sm				6	2 6	2								7F_0	5.63
63Eu				7	2 6	2								$^8S_{7/2}$	5.68
64Gd				7	2 6 1	2								9D_2	6.16
65Tb				9	2 6	2								$^6H_{15/2}$	5.98
66Dy	2	2 6	2 6 10		2 6	2								5I_s	5.93
67Ho					2 6	2								$^4I_{15/2}$	6.02
68Er					2 6	2								3H_6	6.10
69Tm					2 6	2								$^2F_{7/2}$	6.18
70Yb					2 6	2								1S_0	6.25
71Lu					2 6 1	2								$^2D_{3/2}$	6.15
72Hf						2	2							3F_2	7.0
73Ta						3	2							$^4F_{3/2}$	7.88
74W						4	2							5D_0	7.98
75Re						5	2							$^6S_{5/2}$	7.87
76Os						6	2							5D_4	8.7
77Ir						7	2							$^4F_{9/2}$	9.2
78Pt							9	1						3D_3	9.0
79Au	2	2 6	2 6 10	2 6	2 6	1 2								$^2S_{1/2}$	9.22
80Hg				10 14	10 10									1S_0	10.437
81Tl	2	2 6	2 6 10	2 6	2 6 10	2 1								$^2P_{1/2}$	6.108
82Pb				10 14		2 2								3P_0	7.415
83Bi						2 3								$^4S_{3/2}$	7.287
84Po						2 4								3P_2	8.43
85At						2 5								$^2P_{3/2}$	9.4
86Rn						2 6								1S_0	10.746
87Fr	2	2 6	2 6 10	2 6 10	2 6 10	2 6								$^2S_{1/2}$	4.0
88Ra				14										1S_0	5.278

续表

元 素	电子壳层												原子 基态	电离 能 Ei/eV	
	K		L		M		N		O		P				Q
	1s	2s 2p	3s 3d	3p	4s 4d	4p 4f	5s 5d	5p 5f	6s 6d	6p	7s	7p			
89Ac	2	2 6	2 6 10		2 6 10 14		2 6 10		2 6 1 2				$2D_{3/2}$	6.09	
90Th									2 6 2 2				$3F_2$...	
91Pa									2 2 6 1 2				$4K_{11/2}$	5.7	
92U									3 2 6 1 2				$5L_6$	6.08	
93Np									4 2 6 1 2				$6L_{11/2}$	5.8	
94Pu									6 2 6 2				$7F_0$	5.8	
95Am									7 2 6 2				$8S_{7/2}$	6.05	
96Cm									7 2 6 1 2				$9D_2$		
97Bk									9 2 6 2				$8H_{17/2}$		
98Cf									10 2 6 2				$5I_8$		
99Es									11 2 6 2				$4I_{15/2}$		
100Fm									12 2 6 2				$3H_6$		
101Md									13 2 6 2				$2F_{7/2}$		
102No									14 2 6 2				$1S_0$		
103Lw									14 2 6 1 2				$2D_{5/2}$		

原子半径

原子	$r/10^{-10}\text{m}$	原子	$r/10^{-10}\text{m}$	原子	$r/10^{-10}\text{m}$	原子	$r/10^{-10}\text{m}$
H	0.53	Ar	1.54	Br	1.14	Te	1.37
He	0.93	K	2.31	Kr	1.69	I	1.33
Li	1.52	Ca	1.97	Rb	2.44	Xe	1.9
Be	1.12	Sc	1.60	Sr	2.15	Cs	2.62
B	0.80	Ti	1.46	Y	1.80	Ba	2.17
C	0.77	V	1.31	Zr	1.57	La	1.88
N	0.74	Cr	1.25	Nb	1.41	Ce	1.65
O	0.74	Mn	1.29	Mo	1.36	Pr	1.65
F	0.72	Fe	1.26	Tc	1.31	Nd	1.64
Ne	1.12	Co	1.25	Ru	1.33	Pm	—
Na	1.86	Ni	1.24	Rh	1.34	Sm	1.66
Mg	1.60	Cu	1.28	Pd	1.38	Eu	1.65
Al	1.43	Zn	1.33	Ag	1.44	Gd	1.61
Si	1.17	Ga	1.22	Cd	1.49	Tb	1.59
P	1.10	Ge	1.22	In	1.62	Dy	1.59
S	1.06	As	1.21	Sn	1.4	Ho	1.58
Cl	0.97	Se	1.17	Sb	1.41	Er	1.57
Tm	1.56	Re	1.37	Tl	1.71	Fr	2.7
Yb	1.70	Os	1.34	Pb	1.75	Ra	2.20
Lu	1.56	Ir	1.35	Bi	1.48	Ac	2.0
Hf	1.57	Pt	1.38	Po	1.4	Th	1.65
Ta	1.43	Au	1.44	At	1.4	Pa	—
w	1.37	Hg	1.52	Rn	2.2	U	1.42

常用激光器波长

激光器名称	主要谱线波长 / μm	输出功率	能量转换效率(%)	脉冲或连续
红宝石, Cr^{3+}	0.6943	10kW	0.1	脉冲
钕玻璃, Nd^{3+}	1.06	50kW	1	脉冲
钕铝石榴石, Nd^{3+}	1.06	5W	1	连续
	1.08			
砷化镓(GaAs)	0.9	5W		脉冲
镓铝砷(GaAlAs)	0.85	~10mW	10	连续
铟镓砷磷(InGaAsP)	1.3	~10mW		连续
氩氛	0.6328	2mW	0.1	连续
	1.1523	1mW		连续
	3.3913	1mW		连续
氪离子	0.4880	1W	0.05	连续
	0.5145	1W		连续
氪离子	0.5309	200mW		连续
	0.6471	500mW		连续
氪镉离子	0.3250	4mW		连续
	0.4416	20mW		连续
二氧化碳	10.6	100W	20	连续
二氧化碳, 横向激励	10.6	1kW	20	连续
二氧化碳, 横向激励	10.6	50kW	20	脉冲
氮分子	0.3371	500kW	~0.1	脉冲

染料激光器波长

染料	溶剂	波长 /nm
开尔兰	乙醇	449~490
二苯基苯并咪	乙醇	484~518
荧光钠	甲醇, 乙醇, 水	525~550
若丹明 6G	甲醇, 乙醇, 水	560~640
若丹明 B	甲醇, 乙醇, 水	595~650
甲酚紫	乙醇	645~709
碘化 3, 3' - 二乙基噻二羰花青	甲醇, 丙酮	710~735
碘化 1, 1' - 二甲基 - 2, 2' - 二羰花青	甘油	750~790

人工放射性镎系的衰变历程

核素	名称	半衰期	主要辐射能量 E/MeV		
	钚	14.4a	4.85(0.0003%) 4.90(0.0019%)	0.021(~100%)	0.145
	镅	432.2a	5.44(13%) 5.49(85%)	—	0.060 0.101
	镎	6.75d	—	0.248(96%)	0.060
	镤	2.14×10^6 a	4.65(12%)	—	0.208
	镨	27.0d	4.78(75)	—	0.686
	铀	1.59×10^5 a	—	0.145(37%) 0.257(58%) 0.568(5%)	0.145 0.31
	钍	1.59×10^5 a	4.78(15%) 4.82(83%)	—	0.042 0.097
	镭	7.3×10^3 a	4.84(58%) 4.90(11%)	—	0.137
	锕	14.8d	5.05(7%)	0.32(100%)	0.20 0.040
	镭	10.0d	5.73(10%) 5.79(28%)	—	0.099 0.150
	砹	4.9min	5.83(54%) 6.12(15%)	—	0.187 0.238
	铋	0.032s	6.34(82%) 7.07(100%)	—	—
	钋	47min	5.87(~2.2%)	1.39(~97%)	0.437
	钋	4.2×10^{-6} s	8.38(~100%)	—	—
	铊	2.2min	—	1.99(100%)	0.12 0.45
	铅	3.25h	—	0.637(100%)	—
	铋	稳定($> 2 \times 10^{18}$ a)	—	—	—

天然放射性钍系的衰变历程

核素	名称	半衰期	主要辐射能量 E/MeV		
${}_{90}^{232}\text{Th}$	钍	$1.40 \times 10^{10}\text{a}$	3.95(24%) 4.01(76%)	—	—
${}_{88}^{228}\text{Ra}$	新钍 I	5.57a	—	0.055(100%)	—
${}_{89}^{228}\text{Ac}$	新钍 II	6.13h	—	1.18(35%) 1.75(12%)	0.34 0.908
${}_{90}^{228}\text{Th}$	射钍	1.913a	5.34(28%) 5.43(71%)	—	0.084 0.214
${}_{88}^{224}\text{Ra}$	钍 X	3.66d	5.45(6%) 5.68(94%)	—	0.241
${}_{86}^{220}\text{Rn}$	钍射气	55.6s	6.29(100%)	—	0.55
${}_{84}^{216}\text{Po}$	钍 A	0.15s	6.78(100%)	—	—
${}_{82}^{212}\text{Pb}$	钍 B	10.64h	—	0.346(81%) 0.586(14%)	0.239 0.300
${}_{82}^{212}\text{Bi}$	钍 C	1.009h	6.05(25%) 6.09(10%)	1.55(5%) 2.26(55%)	0.727 1.620
${}_{84}^{212}\text{Po}$	钍 C'	$3.04 \times 10^{-7}\text{s}$	8.78(100%)	—	—
${}_{81}^{208}\text{Tl}$	钍 C''	3.052min	—	1.28(25%) 1.52(21%) 1.80(50%)	0.511 0.583 0.860
${}_{82}^{208}\text{Pb}$	钍 D	稳定	—	—	2.614

天然放射性铀系的衰变历程

核素	名称	半衰期	主要辐射能量 E/MeV		
			α	β	γ
	铀1	$4.46 \times 10^9 \text{a}$	4.15(25%) 4.20(75%)	—	—
	铀X ₁	24.1d	—	0.103(21%) 0.193(79%)	0.063 1.093
	铀X ₂	1.17min	—	2.29(98%)	0.765
	铀Z	6.70h	—	0.53(66%) 1.13(13%)	1.001
					0.100 0.70 0.90

续表

核素	名称	半衰期	主要辐射能量 E/MeV		
<p> $^{234}_{92}\text{U}$ \downarrow $^{230}_{90}\text{Th}$ \downarrow $^{222}_{86}\text{Ra}$ \downarrow $^{222}_{86}\text{Rn}$ \downarrow $^{218}_{84}\text{Po}$ \downarrow 99.98% \downarrow $^{214}_{82}\text{Pb}$ 0.02% \downarrow $^{215}_{85}\text{At}$ \downarrow $^{214}_{83}\text{Bi}$ \downarrow 99.98% \downarrow $^{214}_{84}\text{Po}$ 0.02% \downarrow $^{215}_{85}\text{Tl}$ \downarrow $^{210}_{82}\text{Pb}$ \downarrow $^{210}_{83}\text{Bi}$ \downarrow $^{210}_{84}\text{Po}$ \downarrow $^{206}_{82}\text{Pb}$ </p>	铀 II	$2.45 \times 10^5 \text{a}$	4.72(28%) 4.77(72%)	—	0.053 0.068
	镭	$7.54 \times 10^4 \text{a}$	4.62(24%) 4.68(76%)	—	0.142
	镭	$1.6 \times 10^3 \text{a}$	4.60(6%) 4.78(94%)	—	0.189
	氡	3.82d	5.49(100%)	—	0.510
	镭 A	3.11min	6.00(~100%)	0.33(~0.019%)	—
	镭 B	26.8min	—	0.65(50%) 0.71(40%) 0.98(6%)	0.295 0.352
	铋	—	—	—	—
	镭 C	1.6s	6.69(6%) 6.70(94%)	—	—
	镭 C'	19.9min	5.45(0.012%) 5.51(0.008%)	1.0(23%) 1.51(40%) 3.26(19%)	—
	镭 C''	$1.63 \times 10^{-4} \text{s}$	7.69(100%)	—	0.690 1.120 1.764
	镭 D	1.3min	—	1.3(25%) 1.9(25%) 2.3(19%)	0.296 0.795 1.31
	镭 E	22.3a	—	0.016(85%) (0.061(15%))	0.047
	镭 F	5.01d	—	1.161(~100%)	—
	镭 G	138.4d	—	—	0.803
	稳定	—	—	—	—

天然放射性铀系的衰变历程

核素	习用名称	半衰期	主要辐射能量 E/MeV			
<p>Decay chain diagram showing the following isotopes and transitions:</p> <ul style="list-style-type: none"> $^{235}_{92}\text{U}$ decays to $^{231}_{90}\text{Th}$ $^{231}_{90}\text{Th}$ decays to $^{231}_{91}\text{Pa}$ $^{231}_{91}\text{Pa}$ decays to $^{227}_{89}\text{Ac}$ $^{227}_{89}\text{Ac}$ decays to $^{227}_{90}\text{Th}$ (98.6%) and $^{223}_{87}\text{Fr}$ (1.4%) $^{227}_{90}\text{Th}$ decays to $^{223}_{88}\text{Ra}$ $^{223}_{88}\text{Ra}$ decays to $^{219}_{86}\text{Rn}$ $^{219}_{86}\text{Rn}$ decays to $^{215}_{84}\text{Po}$ $^{215}_{84}\text{Po}$ decays to $^{211}_{82}\text{Pb}$ (~100%) and $^{215}_{85}\text{At}$ (0.00023%) $^{211}_{82}\text{Pb}$ decays to $^{211}_{83}\text{Bi}$ $^{211}_{83}\text{Bi}$ decays to $^{211}_{84}\text{Po}$ (0.28%) and $^{207}_{82}\text{Tl}$ (99.7%) $^{211}_{84}\text{Po}$ decays to $^{207}_{82}\text{Pb}$ $^{207}_{82}\text{Tl}$ decays to $^{207}_{82}\text{Pb}$ 	铀	$7.04 \times 10^8 \text{a}$	4.37(18%)	—	0.143	
				4.40(57%)		0.185
				4.58(8%)		0.204
	铀 Y	25.2h	—		0.140(45%)	0.026
					0.220(15%)	0.084
					0.305(40%)	
	镤	$3.27 \times 10^4 \text{a}$	4.95(22%)	—		0.027
				5.01(24%)		0.29
				5.02(23%)		
	铀	21.77a	4.86(0.18%)	0.043(~99%)		0.070
				4.95(1.2%)		
	射铀	18.72d	5.76(21%)	—		0.050
				5.98(24%)		0.287
				6.04(23%)		0.31
	铀 K	21.8min	—		1.15(~100%)	0.050
						0.080
						0.234
	铀 K	11.43d	5.61(26%)	—		0.149
						0.270
						0.33
铀射气	3.96s	6.42(8%)	—		0.272	
					0.401	
				0.74	—	
铀 A	$1.78 \times 10^{-3} \text{s}$	7.38(~100%)	(~0.00023%)			
铀 B	36.1min	—		0.29(1.4%)	0.405	
				0.56(9.4%)	0.427	
				1.39(87.5%)	0.832	
碲	$\sim 10^{-4} \text{s}$	8.01(~100%)	—		—	
铀 C	2.14min	6.28(16%)	0.60(0.28%)		0.351	
铀 C'	0.52s	7.45(99%)	—		0.570	
					0.90	
铀 C''	4.77min	—		1.44(99.8%)	0.897	
铀 D	稳定	—	—	—	—	

不成系列的天然长寿命放射性核素

核素	半衰期 t/a	衰变类型
$^{40}_{19}\text{K}$	1.25×10^9	β^- 89.3%，轨道电子俘获 10.67%
$^{50}_{23}\text{V}$	73.9×10^{17}	-，轨道电子俘获
$^{87}_{37}\text{Rb}$	4.9×10^{10}	-
$^{115}_{49}\text{In}$	4.4×10^{14}	-
$^{123}_{52}\text{Te}$	1.5×10^{24}	轨道电子俘获
$^{138}_{57}\text{La}$	1.3×10^{13}	轨道电子俘获 66%， β^- 34%
$^{144}_{60}\text{Nd}$	2.1×10^{15}	轨道电子俘获 68%， β^- 32%
$^{147}_{62}\text{Sm}$	1.08×10^{11}	
$^{148}_{62}\text{Sm}$	7×10^{15}	
$^{176}_{71}\text{Lu}$	3.6×10^{10}	
$^{187}_{75}\text{Re}$	4.5×10^{10}	-
$^{186}_{76}\text{Os}$	2×10^{15}	
$^{40}_{19}\text{K}$		

宇宙射线产生的放射性核素

核素	半衰期	衰变类型
^3_1H	12.26	-
^7_4Be	53.29	轨道电子俘获
$^{10}_4\text{Be}$	$1.6 \times 10^6\text{a}$	-
$^{14}_6\text{C}$	5730a	-
$^{22}_{11}\text{Na}$	2.605a	β^+ 90%，轨道电子俘获 10%
$^{32}_{15}\text{P}$	14.28d	-
$^{33}_{15}\text{P}$	25.3d	-
$^{35}_{16}\text{S}$	87.2d	-
$^{39}_{17}\text{Cl}$	36.7min	-

可用作电池燃料的放射性核素及其特性

核素	主要射线	半衰期	比功率 P/W · g ⁻¹	化学形式	功率密度 Pv/W · cm ⁻³	毒性(空气中最大 允许体积活度) a _v /Bq · cm ⁻³	屏蔽要求
⁹⁰ Sr	-	28.5a	0.95	SrTiO ₃	1.0	3.7 × 10 ⁻⁵	重
²³⁸ Pu	-	87.75a	0.55	PuO ₂	2.8	7.4 × 10 ⁻⁸	轻
²¹⁰ Po	-	138.8d	141.3	GaPo	824	7.4 × 10 ⁻⁶	轻
²⁴² Cm	-	162.5d	120	Cm ₂ O ₃	882	3.7 × 10 ⁻⁶	轻
²⁴⁴ Cm	-	18.1a	2.8	Cm ₂ O ₃	28.4	3.3 × 10 ⁻⁹	中等
¹³⁷ Cs	- ,	30.2a	0.42	铯玻璃	0.42	3.7 × 10 ⁻⁴	重
¹⁴⁴ Ce	- ,	284.4d	25.6	GeO ₂	25.3	2.2 × 10 ⁻⁷	重
¹⁴⁷ Pm	-	2.62a	0.33	Pm ₂ O ₃	1.8	2.2 × 10 ⁻³	轻
¹⁷⁰ Tm	-	129d	12.1	Tm ₂ O ₃	8.2	1.1 × 10 ⁻³	中等

注：应用较多的有两种。一种是经济易得的⁹⁰Sr，主要用于海下和地面应用的电池燃料；另一种是半衰期长、易于防护的²³⁸Pu，主要用于空间任务和心脏起搏器

粒子在空气、生物组织和铝中的射程

Ea/MeV	4.0	4.5	5.0	5.5	6.0	6.5	7.0	7.5	8.0	8.5	9.0	10.0
空气 R/cm	2.5	3.0	3.5	4.0	4.6	5.2	5.9	6.6	7.4	8.1	8.9	10.6
生物组织 R/μ m	31	37	43	49	56	64	72	81	91	100	110	130
铝 R/μ m	16	20	23	26	30	34	38	43	48	53	58	69

粒子在空气、生物组织和铝中的射程

E /MeV	0.1	0.2	0.3	0.4	0.5	1.0	3.0	5.0	10.0
空气 R/m	0.101	0.313	0.567	0.857	1.19	3.06	11.0	19.0	39.0
生物组织 R/mm	0.158	0.491	0.889	1.35	1.87	4.80	17.4	29.8	60.8
铝 R/mm	0.050	0.155	0.281	0.426	0.593	1.52	5.50	9.42	19.2

几种常见材料对 射线的线吸收系数 a/m⁻¹

能量 E/MeV	水	混凝土	铝	铁	铅
0.5	9.66	20.4	22.7	65.1	164
1.0	7.06	14.0	16.6	46.8	77.6
1.5	5.75	12.1	13.5	38.1	58.1
2.0	4.93	10.5	11.7	33.3	51.8
3.0	3.96	8.53	9.53	28.4	47.7
4.0	3.39	7.45	8.37	25.9	47.6
5.0	3.01	6.74	7.61	24.6	48.3
8.0	2.40	5.71	6.51	23.2	52.0
10.0	2.19	5.38	6.18	23.1	55.4

按入射粒子分类的核反应

入射粒子

核反

实例

中子

(n,

${}^1_1\text{H}(n,\gamma){}^2_1\text{H}$, ${}^{13}_7\text{N}(n,\gamma){}^{14}_7\text{N}$, ${}^{23}_{11}\text{Na}(n,\gamma){}^{24}_{11}\text{Na}$, ${}^{112}_{50}\text{Sn}(n,\gamma){}^{113}_{50}\text{Sn}$

)

(n,p)

${}^3_2\text{He}(n,p){}^3_1\text{H}$, ${}^{14}_6\text{N}(n,p){}^{14}_5\text{B}$, ${}^{32}_{16}\text{S}(n,p){}^{32}_{15}\text{P}$, ${}^{45}_{21}\text{Sc}(n,p){}^{45}_{20}\text{Ca}$

(n,d)

${}^6_3\text{Li}(n,\alpha){}^5_2\text{He}$, ${}^{10}_4\text{B}(n,d){}^9_4\text{Be}$, ${}^{13}_7\text{N}(n,d){}^{12}_6\text{C}$

(n,

${}^{10}_5\text{B}(n,\alpha){}^7_3\text{Li}$, ${}^{13}_5\text{B}(n,\alpha){}^{10}_4\text{Be}$, ${}^{34}_{16}\text{S}(n,\alpha){}^{31}_{14}\text{Si}$, ${}^{35}_{17}\text{Cl}(n,\alpha){}^{32}_{15}\text{P}$

)

(n,t)

${}^6_3\text{Li}(n,t){}^4_2\text{He}$, ${}^{14}_7\text{N}(n,t){}^{12}_6\text{C}$

(n,2n

${}^9_4\text{Be}(n,2n){}^8_4\text{Be}$, ${}^{16}_8\text{O}(n,2n){}^{15}_8\text{O}$, ${}^{27}_{13}\text{Al}(n,2n){}^{26}_{13}\text{Al}$, ${}^{63}_{29}\text{Cu}(n,2n){}^{62}_{29}\text{Cu}$

)

带电粒

子

质子

(p,

${}^3_1\text{H}(p,\gamma){}^4_2\text{He}$, ${}^{12}_6\text{C}(p,\gamma){}^{13}_7\text{N}$, ${}^{26}_{12}\text{Mg}(p,\gamma){}^{27}_{13}\text{Al}$, ${}^{27}_{13}\text{Al}(p,\gamma){}^{28}_{14}\text{Si}$

)

(p,n)

${}^3_1\text{H}(p,n){}^3_2\text{He}$, ${}^{53}_{24}\text{Cr}(p,n){}^{53}_{25}\text{Mn}$, ${}^{197}_{79}\text{Au}(p,n){}^{197}_{80}\text{Hg}$, ${}^{201}_{80}\text{Hg}(p,n){}^{201}_{81}\text{Tl}$

(p,d)

${}^7_3\text{Li}(p,d){}^6_3\text{Li}$, ${}^{16}_8\text{O}(p,d){}^{15}_8\text{O}$, ${}^{93}_{41}\text{Nb}(p,d){}^{92}_{41}\text{Nb}$, ${}^{209}_{83}\text{Bi}(p,d){}^{208}_{83}\text{Bi}$

(p,

${}^{14}_7\text{N}(p,\alpha){}^{11}_6\text{C}$, ${}^{15}_8\text{O}(p,\alpha){}^{13}_7\text{N}$, ${}^{25}_{12}\text{Mg}(p,\alpha){}^{22}_{11}\text{Na}$, ${}^{60}_{28}\text{Ni}(p,\alpha){}^{57}_{27}\text{Co}$

)

(p,pn

${}^{16}_8\text{O}(p,pn){}^{15}_8\text{O}$, ${}^{63}_{29}\text{Cu}(p,pn){}^{62}_{29}\text{Cu}$

)

(p, 2n) $^{63}_{29}\text{Cu}(p, 2n)^{62}_{30}\text{Zn}$, $^{112}_{48}\text{Cd}(p, 2n)^{111}_{49}\text{In}$, $^{124}_{52}\text{Te}(p, 2n)^{123}_{53}\text{I}$, $^{207}_{82}\text{Pb}(p, 2n)^{206}_{83}\text{Bi}$
)
 (p, p2n) $^{10}_5\text{B}(p, p2n)^8_5\text{B}$, $^{63}_{29}\text{Cu}(p, p2n)^{61}_{29}\text{Cu}$
 n)
 (p, 3n) $^{159}_{62}\text{Tb}(p, 3n)^{157}_{66}\text{Dy}$, $^{55}_{25}\text{Mn}(p, 4n)^{52}_{26}\text{Fe}$, $^{127}_{53}\text{I}(p, 5n)^{123}_{54}\text{Xe}$
)等
 氘核 (d, $^{12}_6\text{C}(d, \gamma)^{14}_7\text{N}$, $^{25}_{12}\text{Mg}(d, \gamma)^{27}_{13}\text{Al}$, $^{39}_{19}\text{K}(d, \gamma)^{41}_{20}\text{Ca}$, $^{63}_{29}\text{Cu}(d, \gamma)^{65}_{30}\text{Zn}$
)
 (d, n) $^{12}_6\text{C}(d, n)^{13}_7\text{N}$, $^{17}_8\text{O}(d, n)^{18}_9\text{F}$, $^{110}_{48}\text{Cd}(d, n)^{111}_{49}\text{In}$, $^{122}_{52}\text{Te}(d, n)^{123}_{53}\text{I}$
 (d, p) $^{12}_6\text{C}(d, p)^{13}_6\text{C}$, $^{23}_{11}\text{Na}(d, p)^{24}_{11}\text{Na}$, $^{76}_{34}\text{Se}(d, p)^{77}_{34}\text{Se}$, $^{84}_{36}\text{Kr}(d, p)^{85}_{36}\text{Kr}$
 (d, t) $^9_4\text{Be}(d, t)^8_4\text{Be}$
 (d, ^3He) $^{39}_{19}\text{K}(d, ^3\text{He})^{38}_{18}\text{Ar}$
)
 (d, $^{16}_8\text{O}(d, \alpha)^{14}_7\text{N}$, $^{20}_{10}\text{Ne}(d, \alpha)^{18}_9\text{F}$, $^{25}_{12}\text{Mg}(d, \alpha)^{23}_{11}\text{Na}$, $^{39}_{19}\text{K}(d, \alpha)^{37}_{18}\text{Ar}$
)
 (d, $^{10}_5\text{B}(d, \alpha)^7_4\text{Be}$
 n)
 (d, 2n) $^{55}_{25}\text{Mn}(d, 2n)^{55}_{26}\text{Fe}$, $^{85}_{37}\text{Rb}(d, 2n)^{85}_{38}\text{Sr}$, $^{109}_{47}\text{Ag}(d, 2n)^{109}_{48}\text{Cd}$, $^{203}_{81}\text{Tl}(d, 2n)^{203}_{82}\text{Pb}$
)
 氚核 (t, n) $^{18}_8\text{O}(t, n)^{20}_9\text{F}$, $^{20}_{10}\text{Ne}(t, n)^{22}_{11}\text{Na}$, $^{30}_{14}\text{Si}(t, n)^{32}_{15}\text{P}$, $^{32}_{16}\text{S}(t, n)^{34}_{17}\text{Cl}$
 (t, p) $^{15}_7\text{N}(t, p)^{17}_7\text{N}$, $^{17}_8\text{O}(t, p)^{19}_8\text{O}$, $^{26}_{12}\text{Mg}(t, p)^{29}_{12}\text{Mg}$, $^{30}_{14}\text{Si}(t, p)^{32}_{14}\text{Si}$
 (t, $^{18}_8\text{O}(t, \alpha)^{17}_7\text{N}$
)
 (t, 2n) $^6_3\text{Li}(t, 2n)^7_4\text{Be}$, $^{10}_5\text{B}(t, 2n)^{11}_6\text{C}$
)
 ^3_2He 核 ($^3\text{He}, n$) $^{121}_{51}\text{Sb}(^3\text{He}, n)^{123}_{53}\text{I}$
)
 ($^3\text{He}, p$) $^{16}_8\text{O}(^3\text{He}, p)^{18}_9\text{F}$
)
 ($^3\text{He}, d$) $^{14}_7\text{N}(^3\text{He}, d)^{15}_8\text{O}$
)
 ($^3\text{He},$ $^{19}_9\text{F}(^3\text{He}, \alpha)^{18}_9\text{F}$
)
 ($^3\text{He}, 2$ $^{81}_{35}\text{Br}(^3\text{He}, 2n)^{82}_{37}\text{Rb}$, $^{52}_{24}\text{Cr}(^3\text{He}, 3n)^{52}_{26}\text{Fe}$, $^{124}_{52}\text{Te}(^3\text{He}, 4n)^{123}_{54}\text{Xe}$
 n)等
 粒子 ($^7_3\text{Li}(\alpha, \gamma)^{11}_5\text{B}$, $^9_4\text{Be}(\alpha, \gamma)^{13}_6\text{C}$, $^{10}_5\text{B}(\alpha, \gamma)^{14}_7\text{N}$, $^{23}_{11}\text{Na}(\alpha, \gamma)^{27}_{13}\text{Al}$

)
 (, n ${}^{14}_7\text{N}(\alpha, n){}^{17}_9\text{F}$, ${}^{27}_{13}\text{Al}(\alpha, n){}^{30}_{15}\text{P}$, ${}^{60}_{28}\text{Ni}(\alpha, n){}^{63}_{30}\text{Zn}$, ${}^{115}_{19}\text{In}(\alpha, n){}^{118}_{51}\text{Sb}$
)
 (, p ${}^6_3\text{Li}(\alpha, p){}^9_4\text{Be}$, ${}^{14}_7\text{N}(\alpha, p){}^{17}_8\text{O}$, ${}^{25}_{12}\text{Mg}(\alpha, p){}^{28}_{13}\text{Al}$, ${}^{40}_{18}\text{Ar}(\alpha, p){}^{43}_{19}\text{K}$
)
 (, d ${}^{10}_5\text{B}(\alpha, d){}^{12}_6\text{C}$, ${}^{12}_6\text{C}(\alpha, d){}^{14}_7\text{N}$, ${}^{23}_{11}\text{Na}(\alpha, d){}^{25}_{12}\text{Mg}$, ${}^{32}_{16}\text{S}(\alpha, d){}^{34}_{17}\text{Cl}$
)
 (, p ${}^{16}_8\text{O}(\alpha, pn){}^{18}_9\text{F}$, ${}^{60}_{28}\text{Ni}(\alpha, pn){}^{62}_{29}\text{Cu}$
 n)
 (, 2 ${}^{31}_{13}\text{Al}(\alpha, 2p){}^{29}_{13}\text{Al}$
 p)
 (, 2 ${}^{65}_{29}\text{Cu}(\alpha, 2n){}^{67}_{31}\text{Ga}$, ${}^{75}_{33}\text{As}(\alpha, 2n){}^{77}_{35}\text{Br}$, ${}^{85}_{37}\text{Rb}(\alpha, 2n){}^{87}_{39}\text{Y}$, ${}^{127}_{53}\text{I}(\alpha, 2n){}^{129}_{55}\text{Cs}$
 n)
 (, 3 ${}^{27}_{13}\text{Al}(\alpha, 3p){}^{28}_{12}\text{Mg}$
 p)
 (, 3 ${}^{115}_{49}\text{In}(\alpha, 3n){}^{111}_{51}\text{Sb}$, ${}^{122}_{52}\text{Te}(\alpha, 3n){}^{123}_{54}\text{Xe}$, ${}^{52}_{24}\text{Cr}(\alpha, 4n){}^{52}_{26}\text{Fe}$
 n)等
 重离子 (${}^{12}\text{C}$, 4 ${}^{246}_{96}\text{Cm}({}^{12}\text{C}, 4n){}^{254}_{102}\text{No}$, ${}^{244}_{96}\text{Cm}({}^{12}\text{C}, 5n){}^{251}_{102}\text{No}$
 n)等
 (${}^{14}\text{N}$, 5 ${}^{238}_{92}\text{U}({}^{14}\text{N}, 5n){}^{247}_{99}\text{Es}$
 n)
 (${}^{16}\text{O}$, 4 ${}^{238}_{92}\text{U}({}^{16}\text{O}, 4n){}^{250}_{100}\text{Fm}$
 n)
 (${}^{22}\text{Ne}$, ${}^{238}_{92}\text{U}({}^{22}\text{Ne}, p3n){}^{256}_{101}\text{Md}$
 p3n)
 其他 ${}^{249}_{98}\text{Cf}({}^{18}\text{O}, 4n){}^{263}_{106}\text{Unh}$, ${}^{208}_{82}\text{Pb}({}^{54}\text{Cr}, 3n){}^{259}_{106}\text{unh}$, ${}^{209}_{83}\text{Bi}({}^{58}\text{Fe}, n){}^{266}_{109}\text{Une}$
 光子 (, n ${}^2_1\text{H}(\gamma, n){}^1_1\text{H}$, ${}^{31}_{15}\text{P}(\gamma, n){}^{30}_{15}\text{P}$, ${}^{109}_{47}\text{Ag}(\gamma, n){}^{108}_{47}\text{Ag}$, ${}^{181}_{73}\text{Ta}(\gamma, n){}^{180}_{73}\text{Ta}$
)
 (, p ${}^9_4\text{Be}(\gamma, p){}^8_3\text{Li}$, ${}^{27}_{13}\text{Al}(\gamma, p){}^{26}_{12}\text{Mg}$
)
 (, d ${}^{10}_5\text{B}(\gamma, d){}^8_4\text{Be}$, ${}^{14}_7\text{N}(\gamma, d){}^{12}_6\text{C}$, ${}^{27}_{13}\text{Al}(\gamma, d){}^{52}_{12}\text{Mg}$
)
 (, ${}^{12}_6\text{C}(\gamma, \alpha){}^8_4\text{Be}$, ${}^{14}_7\text{N}(\gamma, \alpha){}^{10}_5\text{B}$, ${}^{27}_{13}\text{Al}(\gamma, \alpha){}^{23}_{11}\text{Na}$
)

中子能量、速度、温度和波长的关系

能量 E_n/eV	$v/m \cdot s^{-1}$	T/K	λ/nm	备注
10^7	4.375×10^7	1.16×10^{11}	9.05×10^{-6}	$E_n > 10MeV$ 高能中子
10^6	1.383×10^7	1.16×10^{10}	2.86×10^{-5}	$10^2 keV < E_n < 10MeV$ 快中子
10^4	1.383×10^6	1.16×10^8	2.86×10^{-4}	$1KeV < E_n < 10^2 keV$ 中能中子
10^3	4.375×10^5	1.16×10^7	9.05×10^{-4}	$E < 1keV$ 慢中子
10^2	1.383×10^5	1.16×10^6	2.86×10^{-3}	
10^1	4.375×10^4	1.16×10^5	9.05×10^{-3}	
1	1.383×10^4	1.16×10^4	2.86×10^{-2}	
0.4	8.73×10^3	4.64×10^3	4.52×10^{-2}	
10^{-1}	4.375×10^3	1.16×10^3	9.05×10^{-2}	
0.0253	2.20×10^3	2.932×10^2	1.80×10^{-1}	$E_n = 0.025eV$ 热中子
10^{-2}	1.383×10^3	1.16×10^2	2.86×10^{-1}	
0.005	9.76×10^2	5.80×10^1	4.04×10^{-1}	$E_n < 0.005eV$ 冷中子
10^{-3}	4.375×10^2	1.16×10	9.05×10^{-1}	
10^{-4}	1.383×10^2	1.16	2.86	
10^{-7}	4.375	1.16×10^{-3}	9.05×10	

热中子的能量和速度

温度		能量 E/eV	$v/m \cdot s^{-1}$
t/	T/K		
20	293	0.025 3	2 200
200	473	0.040 8	2 800
400	673	0.058 0	3 330
600	573	0.075 3	3 800
800	1073	0.092 5	4 200

^{235}U 的某些裂变产物的裂变产额
(热中子裂变)

放射性核素	半衰期	裂变产额%	放射性核素	半衰期	裂变产额%
⁸⁵ Kr	10.73 a	0.280 26	¹³³ Xe	5.29d	6.703 1
⁸⁵ Kr ^m	4.48 h	1.301 3	¹³⁷ Cs	30.174a	6.210 9
⁸⁹ Sr	50.75d	4.849 7	¹⁴⁰ BA	12.8d	6.296 3
⁹⁰ Sr	28.5 a	5.877 1	¹⁴⁰ La	40.27h	6.301 7
⁹⁰ Y	64.1 h	5.877 1	¹⁴¹ Ce	32.51d	5.839 2
⁹⁵ Zr	63.98 d	6.494 6	¹⁴³ Ce	33h	5.947 7
⁹⁵ Nb	35.1 d	6.493 3	¹⁴³ Pr	13.6d	5.947 7
⁹⁹ Mo	66.2 h	6.113 5	¹⁴⁴ Ce	284.4d	5.482 4
⁹⁹ Tc	2.13 × 10 ⁵ a	6.113 5	¹⁴⁴ Pr	17.3min	5.482 5
¹⁰³ Rh	39.35 d	3.040 4	¹⁴⁷ Nd	11.02d	2.229 6
^{103m} Rh	56.116 min	3.032 8	¹⁴⁷ Pm	2.623a	2.229 6
¹³¹ I	8.03 d	2.886 6	¹⁵¹ Sm	93a	0.416 48
¹³² I	2.284 6 h	4.301 1			

注：裂变产物包括近 50 种元素(Z=24~70, A=66~172)的约 400 种核素，其中产额较大，半衰期较长而具有实际应用价值的核素，主要有 ⁵⁵Kr, ⁹⁰Sr, ⁹⁹Mo, ¹³³Xe, ¹³⁷Cs, ¹⁴⁴Ce, ¹⁴⁷Pm 等

某些重核裂变时释放的能量及其分配							E/MeV	
裂变核	诱发裂变的 中子能量	碎片总动能	瞬发和缓发 中子总动能	瞬发 射线 总能量	缓发 射 线总能量	射线能 量	中子微子 能量	总能量
²³² Th	3.0	160.0 ± 2.0	4.49 ± 0.17	7.6 ± 1.5	9.0 ± 1.5	9.5 ± 1.5	13.3 ± 0.8	200.9
²³³ U	0	167.5 ± 2.0	4.90 ± 0.15	7.6 ± 1.5	5.6 ± 0.3	5.6 ± 0.3	7.8 ± 0.5	199.3
²³⁵ U	0	167.9 ± 2.0	4.69 ± 0.11	7.64 ± 0.75	7.4 ± 0.4	7.4 ± 0.4	10.3 ± 0.6	205.0
²³⁸ U	2.8	165.9 ± 2.0	5.60 ± 0.16	7.6 ± 1.5	10.5 ± 0.6	10.5 ± 0.6	14.7 ± 0.9	215.5
²³⁹ Pu	0	174.0 ± 2.0	5.87 ± 0.11	8.01 ± 0.94	6.3 ± 0.3	6.3 ± 0.3	8.8 ± 0.5	209.8
²⁴¹ Pu	0	175.6 ± 2.0	5.85 ± 0.15	7.6 ± 1.5	8.2 ± 0.4	8.2 ± 0.4	11.5 ± 0.7	216.6

裂变的临界能量

靶核	临界能量 E/MeV	附加中子的结合能 E/MeV
^{232}T	5.9	5.1
^{238}U	5.9	4.9
^{235}U	5.8	6.4
^{233}U	5.5	6.6
^{239}Pu	5.5	6.4

天然铀的同位素成分

质量数	原子百分比	同位素质量 m/u
234	0.005 5	234.041 0
235	0.720	235.043 9
238	99.274	238.050 8

不同核炸药在不同 ^{238}U 中子反射层时的临界半径和临界质量

核炸药材料	核炸药材料密度 /g · cm ⁻³	中子反射层			临界半径 /cm	临界质量 m/kg
		材料	密度 /g · cm ⁻³	厚度 d/cm		
^{235}U	18.75	没有	—	—	8.74	52.00
^{233}U	18.60	没有	—	—	6.07	17.42
^{239}Pu	18.97	没有	—	—	5.35	11.93
^{235}U	18.75	^{238}U	18.97	20	6.19	18.48
^{233}U	18.60	^{238}U	18.97	20	4.36	6.46
^{239}Pu	18.97	^{238}U	18.97	20	3.99	4.95
^{233}U	18.60	^{238}U	18.97	10	4.48	7.145

注：表中 ^{235}U 、 ^{233}U 、 ^{238}U 的浓度都是 94%。

电功率 1 000MW 的几种动力反应堆特性

	压水堆	沸水堆	加拿大天然铀 重水堆	高温气冷堆
冷却剂	普通水	普通水	重水	氦气
慢化剂	普通水	普通水	重水	石墨
²³⁵ U 浓缩度(%)	2~4	2~4	0.7(未浓缩)	93(初始装料)
可转换核	²³⁸ U	²³⁸ U	²³⁸ U	²³² Th
使用期间所需的 铀 (天然 U ₃ O ₈ 的吨数)	4100(3500 或更低)	4020 (3 500 或更低)	4 160(1 440)	2 980(1 920)
热效率(%)	32	33	28	39
一次通过式的外部冷却水升温 8.3 时的体积 流量 qv/m ³ · s ⁻¹	63.1	60.6	77.0	46.7
堆芯类型	燃料棒(装 成组件)	燃料棒组件	燃料棒组件(装 在单独的压力 管中)	燃料颗粒(散布 在石墨块中)
冷却剂压力 p/MPa	15.5	7.03	10.3	4.82
堆芯出口处冷却 剂的温度 t/	327	285	310	743

重水慢化剂系统是单独的，该系统压力基本上是 101kPa

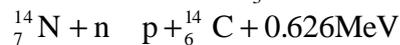
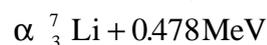
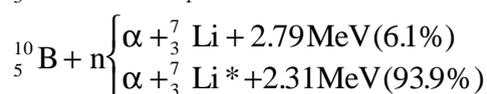
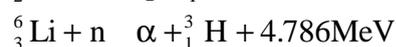
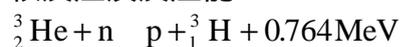
根据实际运行情况估算的，括号内的数字表示反应堆在理想的条件下同时使用钚循环时所需的铀，无论哪一种情况，都假定有完整的核燃料循环(使用 4 160 t 天然铀的重水堆情况例外)

某些核反应的反应能

分类

慢中子引起带电粒子发射

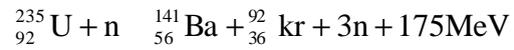
核反应及反应能



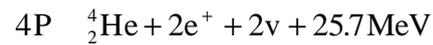
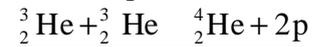
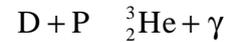
^{235}U 裂变

核聚变

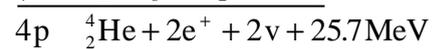
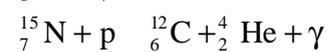
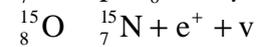
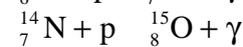
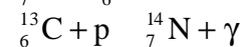
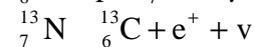
恒星上的



质子-质子反应链



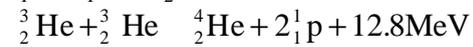
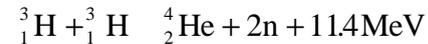
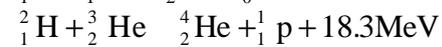
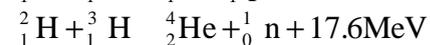
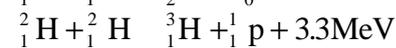
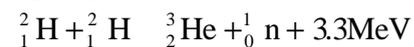
碳-氮反应链



核聚变

恒星上的

人工的



恒星内部主要核聚变反应阶段

反应阶级	燃料	主要产物	核心温度 T/K	最小的恒星质量(太阳质量)
氢燃烧	氢	氦	$1\sim 3 \times 10^7$	0.1
氦燃烧	氦	碳 氧	2×10^8	1
碳燃烧	碳	氧 氖 钠 镁	8×10^8	1.4
氖燃烧	氖	氧 镁	1.5×10^9	5
氧燃烧	氧	镁至硫	2×10^9	10
硅燃烧	镁至硫	邻近铁 的元素	3×10^9	20

超铀元素的发现

原子序数	元素名称	元素符号	发现年代	合成时的核反应	发现人
93	镎	Np	1940	$^{238}\text{U}(n, \gamma)^{239}\text{U} \xrightarrow{\beta^-} ^{239}\text{Np}$	麦克米伦(Mc)
94	钚	Pu	1940	$^{238}\text{U}(d, 2n)^{238}\text{Np} \xrightarrow{\beta^-} ^{238}\text{Pu}$	西博格(Seaborg)
95	镅	Am	1944	$^{239}\text{Pu}(n, \gamma)^{240}\text{Pu}(n, \gamma)^{241}\text{Pu} \xrightarrow{\beta^-} ^{241}\text{Am}$	西博格等
96	锔	Cm	1944	$^{239}\text{Pu}(\alpha, n)^{242}\text{Cm}$	西博格等
97	锫	Bk	1949	$^{241}\text{Am}(\alpha, 2n)^{243}\text{Bk}$	汤普森(S.G.)
98	锎	Cf	1950	$^{242}\text{Cm}(\alpha, n)^{245}\text{Cf}$	汤普森等
99	镱	Es	1952	$^{238}\text{U}(15n, \gamma)^{253}\text{U} \xrightarrow{7\beta^-} ^{253}\text{Es}^*$	吉奥索(Giorgio)
100	镱	Fm	1953	$^{238}\text{U}(17n, \gamma)^{255}\text{U} \xrightarrow{8\beta^-} ^{255}\text{Fm}^*$	派尔(Pyle)等
101	钔	Md	1955	$^{253}\text{Es}(a, n)^{256}\text{Md}$	吉奥索等
102	镎	No	1958	$^{246}\text{Cm}(^{12}\text{C}, 4n)^{254}\text{No}$	吉奥索等
			1958	$^{241}\text{Pu}(^{16}\text{O}, 5n)^{252}\text{No}$	弗廖洛夫(Г.Ф.)
103	铪	Lr	1961	$^{252}\text{Cf}(^{11}\text{B}, 5n)^{258}\text{Lr}$	吉奥索等
104**			1964	$^{242}\text{Pu}(^{22}\text{Ne}, 4n)^{260}104$	弗廖洛夫等
			1969	$^{249}\text{Cf}(^{12}\text{C}, 4n)^{257}104$	吉奥索等
105**			1970	$^{249}\text{Cf}(^{15}\text{N}, 4n)^{260}105$	吉奥索等
			1970	$^{243}\text{Am}(^{22}\text{Ne}, 4n)^{261}105$	弗廖洛夫等
106**			1974	$^{249}\text{Cf}(^{18}\text{O}, 4n)^{263}106$	吉奥索等
			1974	$^{208}\text{Pb}(^{54}\text{Cr}, 3n)^{259}106$	奥格涅香(Oganessian)
			1974	$^{207}\text{Pb}(^{54}\text{Cr}, 2n)^{259}106$	
107**			1976	$^{209}\text{Bi}(^{54}\text{Cr}, 2n)^{261}107$	奥格涅香等

	1981	$^{209}\text{Bi} (^{54}\text{Cr}, n)^{262}107$	明岑贝格(G
108***	1984	$^{208}\text{Pb} (^{58}\text{Fe}, n)^{265}108$	明岑贝格等
109***	1982	$^{209}\text{Bi} (^{58}\text{Fe}, n)^{266}109$	明岑贝格等

注：表中标*的均从1952年比基尼岛热核实验中获取；标**的命名尚未确定；标***的有待进一步证实

世界上主要的高能质子加速器

国家	实验室	代号	建成时间	能量 E/GeV	平均直径 d/m	循环周期 T/s
日本	KEK	KEKPS	1975	12	108	2
欧洲	CERN	PS	1959	28	200	2
美国	BNL	AGS	1960	33	256.9	1.25
俄罗斯	Serpukhov		1967	76	472	8
欧洲	CERN	SPS	1976	400	1.9×10^3	10
美国	FNAL		1972	1 000	2×10^3	10
欧洲	CERN	AA	1980	2.7	50	

注：KEK 国立高能物理实验室(日本)
 BNL 布鲁克海文国立实验室(美国)
 FNAL 费米国立加速器实验室(美国)
 CERN 欧洲核子研究中心

世界上主要的高能电子加速器

国家	实验室	类别	建成时间	能量 E/GeV	长度或平均直径 d/m	每秒脉冲次数
法国	Orsay	直线	1959	2.3	230	
日本	KEK	直线	1981	2.5	320	
美国	SLAC	直线	1966	24	3050	
日本		同步	1961	1.3	$\Phi 11.06$	21.5
德国	Born	同步	1967	2.5	$\Phi 22.15$	50
德国		同步	1964	7.5	$\Phi 100.84$	50
美国	Cornell	同步	1967	12	$\Phi 240$	60

注：SLAC 斯坦福直线加速器
 Cornell 康奈尔同步加速器

世界上已有的和正在建设中的一些对撞机

对撞粒子的种类	加速器名称	束流能量 E/GeV	周长或长度 l/m	首次出束时间
电子-正电子	PEP(美国)	16+16	2 200	1980
	SLC(美国)	50+50	3 050	1987
	CESR(美国)	5.3+5.3	768	1979
	VEPP-2M(俄罗斯)	0.7+0.7		1975
	VEPP-4M(俄罗斯)	5.5+5.5	365	1990
	DORISIII(德国)	5.3+5.3	288	1973
	LEP(西欧核子研究中心)	46+46	26 659	1989
	BEPC(中国)	2.8+2.8	240	1988
	TRISTAN(日本)	30+30	3 018	1986
电子-质子	HERA(德国)	30(e)+820(p)	6 336	1991
质子-反质子	TEVATRON(美国)	900+900	6 283	1985
	SPPS(西欧核子研究中心)	315+315	6 911	1981
	LHC*(西欧核子研究中心)	8 000+8 000	26 659	

*LHC 大型强子对撞机还可进行电子-质子对撞。预计可于 1999 年开始进行实验

八十年代我国建成的三台大型加速器

工程名称	加速器名称	束流能量	建设时间
北京正负电子对撞机	注入器(e ⁺ , e ⁻ 直线加速器)	1.4GeV	1984~1987
	储存环	2.8GeV	1984~1988
合肥同步辐射光源	注入器(e ⁻ 直线加速器)	200MeV	1983~1987
	储存环	800MeV	1983~1989
兰州重离子加速器	注入器(SFC)		
	扇形加速器(SSC)	(碳)100MeV/u	1976~1988

核素表

Z	符号	A	质量 m/u	自旋 J	半衰期 T	丰度(%)或衰变方式
0	n	1	1.008665	1/2	10.3min	-
1	H	1	1.007825	1/2	12.36a	99.985
		2	2.014102	1		0.0118
		3	3.016050	1/2		-
2	He	3	3.016029	1/2		1.38×10^{-4}
		4	4.002603	0		99.99986
3	Li	6	6.015121	1		7.5
		7	7.016003	3/2		92.5
4	Be	7	7.0169	3/2	53.3d	Ec
		8	8.0053	0	10^{-15} s	2a
		9	9.01218	3/2	1.6×10^6 a	100
		10	10.0135	0		-
		11	11.0216	1/2		13.8s	$\beta^-$, $\beta^+$a(3%)
5	B	10	10.0129	3		19.8
		11	11.00931	3/2		80.2
6	C	12	12.00000	0	5730a	98.89
		13	13.00335	1/2		1.11
		14	14.00324	0		-
7	N	13	13.00574	1/2	9.97min	β^+
		14	14.00307	1		99.63
		15	15.00011	1/2		0.366
8	O	16	15.99492	0		99.76
		17	16.99913	5/2		0.038
9	F	18	18.00094	1	109.8min	β^+ (96.9%),EC(3.1%)
		19	18.98840	1/2		100
10	Ne	20	19.99244	0		90.51
11	Na	21	20.99765	3/2	22.47s	β^+
		23	22.98977	3/2		100
12	Mg	23	22.994129	3/2	11.3s	β^+
		24	23.985042	0		78.99
		25	24.985837	5/2		10.00
13	Al	27	26.98154	5/2		100

续表

Z	符号	A	质量 m/u	自旋 J	半衰期 T	丰度(%)或衰变方式
14	Si	28	27.97693	0		92.23
		29	28.97649	1/2		4.67
		30	29.97377	0		3.10
15	P	29	28.98180	1/2	4.1s	+
		30	29.97831	1	2.5min	⁺ EC
		31	30.97376	1/2		100
16	S	32	31.97207	0		95.02
		33	32.97146	3/2		0.75
		34	33.96786	0		4.21
		36	35.96709	0		0.017
17	Cl	35	34.96885	3/2		75.77
		37	36.965903	3/2		24.23
18	Ar	36	35.96755	0		0.337
		38	37.96273	0		0.063
		40	39.962384	0		99.60
19	K	39	38.96371	3/2	1.25 × 10 ⁹ a	93.26
		40	39.963999	4		0.0117、 ⁻ (89.3%)、 ⁺ (1.03 × 10 ⁻³ %)、 EC(10.67%)
		41	10.961825	3/2		6.73
20	Ca	40	39.96259	0		96.941
		41	40.96228	7/2	1.0 × 10 ⁵ a	EC
		43	42.95877	7/2		0.135
21	Sc	43	42.96115	7/2	3.89h	⁺ EC
		45	44.95591	7/2		100
22	Ti	48	47.94795	0		73.7
23	V	51	50.9440	7/2		99.750
24	Cr	51	50.9448	7/2	27.7d	EC
		52	51.9405	0		83.79
25	Mn	54	53.9404	3	312d	EC
		55	54.9380	5/2		100
26	Fe	56	55.9349	0		91.8
		57	56.9354	1/2		2.15

续表

Z	符号	A	质量 m/u	自旋 J	半衰期 T	丰度(%)或衰变方式
27	Co	59	58.9332	7/2	5.272a	100
		60	59.9338	5		-
28	Ni	59	57.9353	0	100a	68.3
		60	59.9308	0		26.1
		63	62.9297	1/2		-
29	Cu	63	62.9396	3/2	12.7h	69.2
		64	63.9298	1		EC(41.1%), β^{-} (39.6%), β^{+} (19.3%)
		65	64.9278	3/2		30.8
30	Zn	64	63.9291	0		48.6
		66	65.9260	0		27.9
31	Ga	64	63.9368	0	2.62min	β^{+} EC
		69	68.9256	3/2		60.1
32	Ge	71	70.9250	1/2	11.2d	EC
		74	73.9212	0		36.5
33	As	75	74.9216	3/2		100
34	Se	78	77.9193	0		23.5
		80	79.9165	0		49.8
35	Br	79	78.9183	3/2		50.69
		81	80.9163	3/2		49.31
36	Kr	81	80.9166	7/2	2.1×10^5 a	EC
		84	83.9115	0		57.0
		85	84.9125	9/2	10.7a	-
37	Rb	85	84.9118	5/2	4.9×10^{10} a	72.17
		87	86.9092	3/2		β^{-} , 27.83
38	Sr	88	87.9056	0	28.8a	82.6
		90	89.9077	0		-
39	Y	89	88.9059	1/2		100
40	Zr	90	89.9047	0	1.5×10^6 a	51.45
		93	92.9065	5/2		-
41	Nb	93	92.9064	9/2		100

续表

Z	符号	A	质量 m/u	自旋 J	半衰期 T	丰度(%)或衰变方式	
42	Mo	92	91.9068	0		14.8	
		95	94.9058	5/2		18.9	
		96	95.9047	0		16.7	
		98	97.9054	0		24.1	
		99	98.9077	1/2		65.94h	-
43	Tc	99	98.9063	9/2	2.13 × 10 ⁵ a	-	
		100	99.9077	1	15.8s	-	
44	Ru	102	101.9043	0		31.6	
		104	103.9054	0		18.7	
45	Rh	103	102.9055	1/2		100	
		105	104.9057	7/2		35.4h	-
46	Pd	105	104.9051	5/2		22.2	
		106	105.9035	0		27.3	
		108	107.9039	0		26.7	
		109	108.9059	5/2		13.43h	-
47	Ag	107	106.9051	1/2		51.83	
		109	108.9048	1/2		48.17	
48	Cd	112	111.9028	0		24.1	
		113	112.9044	1/2		9 × 10 ¹⁵ a	12.2
		114	113.9034	0		28.7	
49	In	113	112.9041	9/2		4.3	
		115	114.9039	9/2		4.4 × 10 ¹⁴ a	95.7,
50	Sn	118	117.9016	0		24.3	
		120	119.9022	0		32.4	
		121	120.9042	3/2		27.0h	-
51	Sb	121	120.9038	5/2		57.3	
		123	122.9042	7/2		42.7	
52	Te	126	125.9033	0		18.95	
		128	127.9045	0		1.5 × 10 ²⁴ a	31.7, -
53	I	123	122.9056	5/2	13.1h	EC	
		127	126.9046	5/2		100	
		131	130.9061	7/2	8.040d	-	
54	Xe	129		1/2		26.4	
		132		0		26.9	

续表

Z	符号	A	质量 m/u	自旋 J	半衰期 T	丰度(%)或衰变方式
55	Cs	133	132.9054	7/2	30.17a	100
		137	136.9071	7/2		-
56	Ba	138	137.9052	0		71.7
57	La	139	138.9063	7/2		99.911
58	Ce	140	139.9054	0	32.5d	88.5
		141	140.9083	7/2		-
59	Pr	141	140.9077	5/2		100
60	Nd	142	141.9077	0	2.1×10^{15} a	27.2
		144	143.9101	0		23.8,a
		145	144.9126	7/2		8.3
61	Pm	148	147.9175	1	5.37d	-
62	Sm	147	146.9149	7/2	1.06×10^{11} a	15.1a
		152	151.9197	0		26.6
		154	153.9222	0		22.6
63	Eu	151	150.9198	5/2		47.9
		153	152.9212	5/2		52.1
64	Gd	156	155.9221	0		20.6
		158	157.9241	0		24.8
		160	159.9270	0		21.8
65	Tb	159	158.9253	3/2	6.91d	100
		161	160.9276	3/2		-
66	Dy	162	161.9269	0		25.5
		163	162.9287	5/2		24.9
		164	163.9292	0		28.1
67	Ho	165	164.9303	7/2	1.117d	100
		166	165.9323	0		-
68	Er	166	165.9303	0		33.4
		167	166.9320	7/2		22.9
		168	167.9324	0		26.8
		170	169.9355	0		14.9
69	Tm	169	168.9342	1/2		100

续表

Z	符号	A	质量 m/u	自旋 J	半衰期 T	丰度(%)或衰变方式
70	Yb	172	171.9364	0		21.9
		174	173.9389	0		31.6
		176	175.9426	0		12.6
71	Lu	175	174.9408	7/2	3.6×10^{10} a	97.39
		176	175.9427	7	6.71d	2.61, -
		177	176.9438	7/2		-
72	Hf	178	177.9437	0		27.1
		180	179.9465	0		35.2
73	Ta	181	180.9480	7/2		99.998
74	W	184	183.9509	0		30.7
		186	185.9544	0		28.6
75	Re	185	184.9530	5/2		37.40
		187	186.9557	5/2	4.5×10^{10} a	62.60, -
76	Os	190	189.9584	0		26.4
		192	191.9615	0		41.0
77	Ir	191	190.9606	3/2		37.3
		193	192.9629	3/2		62.7
78	Pt	194	193.9630	0		32.9
		195	194.9648	1/2		33.8
		196	195.9649	0		25.3
79	Au	197	196.9665	3/2		100
		198	197.9682	2	2.693d	-
80	Hg	200	199.9683	0		23.1
		202	201.9706	0		29.65
81	Tl	203	202.9723	1/2		29.52
		205	204.9744	1/2		70.48
82	Pb	206	205.9744	0		24.1
		207	206.9759	1/2		22.1
		208	207.9766	0		52.4
83	Bi	209	208.9804	9/2		100
84	Po	210	209.9828	0	138.38d	a
		212	211.9888	0	0.3×10^{-6} s	a
		218	218.0089	0	3.11min	a(99%), (0.018%)

Z	符号	A	质量 m/u	自旋 J	半衰期 T	丰度 (%) 或衰变方式
85	At	216	216.0024	1	$0.3 \times 10^{-3}\text{s}$	α
86	Rn	222	222.0176	0	3.8235d	α
87	Fr	222	222.0175	2	14.4min	β^- (99%) ; α (0.01—0.1%)
88	Ra	226	226.0254	0	$1.6 \times 10^3\text{a}$	α
89	Ac	227	227.0278	3/2	21.773a	β^- (98.62%) ; α (1.38%)
90	Th	232	232.0381	0	$1.41 \times 10^{10}\text{a}$	100, a
91	Pa	233	233.0402	3/2	27.0d	β^-
		233	233.0396	5/2	$1.592 \times 10^5\text{a}$	α
92	U	235	235.0439	7/2	$7.038 \times 10^8\text{a}$	0.720 ; α
		238	238.0508	0	$4.468 \times 10^9\text{a}$	99.275 ; α
93	Np	239	239.0529	5/2	2.35d	β^-
94	Pu	239	239.0522	1/2	$2.41 \times 10^4\text{a}$	α
		241	241.0568	5/2	14.4a	β (99%) ; α (0.0024%)
95	Am	243	243.0614	5/2	$7.37 \times 10^3\text{a}$	α
96	Cm	245	245.0655	7/2	$8.5 \times 10^3\text{a}$	α
97	Bk	247	247.0703	3/2	$1.4 \times 10^3\text{a}$	α
98	Cf	249	249.0748	9/2	351a	α
		252	252.0816	0	2.64a	α (96.91%) ; SF (3.09%, 85.5年)
99	Es	253	253.0848	7/2	20.47d	α
100	Fm	255	255.0899	7/2	20.1h	α
101	Md	255	255.0911	7/2	27min	EC (92%) ; α (8%)
102	No	257	257.0969	7/2	25s	α
103	Lr	256	256.0985		28s	α (99.7%) ; SF (0.3%)
104	Unq	260	260.1063		29ms	SF
105	Unp	262	262.1138		34s	SF

注：衰变方式栏中所列的 β^- 为负 β 衰变， β^+ 为正 β 衰变，EC 为轨道电子俘获， α 为 α 衰变， $\beta^-\beta^-$ 为双 β^- 衰变，SF 为自发裂变。自发裂变分支比后面的数字为 SF 的半衰期

粒子类别	粒子	自旋 J	宇称 P	同位旋 I	静止质量 mc^2/MeV	平均寿命 τ/s	主要衰变方式
规范玻色子	γ	1	-1		$< 3 \times 10^{-33}$	稳定	稳定
	w^\pm	1			$(81.0 \pm 1.3) \times 10^3$	$< 6.5\text{GeV}$	$e\nu, \mu\nu, \tau\nu$
	z^0	1			$\pm 1.3\text{GeV}$ $(92.4 \pm 1.8) \times 10^3$ $m_z - m_w$ $= (11.4 \pm 1.4) \times 10^3$	$< 5.6\text{GeV}$	$e^+e^-, \mu^+\mu^-$
	ν_e	$\frac{1}{2}$			$< 1.8 \times 10^{-5}$	稳定	稳定
	ν_μ	$\frac{1}{2}$			< 0.25	稳定	稳定
	ν_τ	$\frac{1}{2}$			< 35		
	e	$\frac{1}{2}$			$0.51099906 \pm 0.00000015$	$> 2 \times 10^{22} \text{a}$	稳定
	μ	$\frac{1}{2}$			105.65839 ± 0.00006	$(2.19703 \pm 0.00004) \times 10^{-6}$	$e^-\bar{\nu}_\nu$
	τ	$\frac{1}{2}$			1776.9 ± 0.5	$(2.93 \pm 0.035) \times 10^{-13}$	$\mu^-\bar{\nu}_\nu$ $e^-\bar{\nu}_\nu$ $\pi^-\bar{\nu}$ $K^-\bar{\nu}$ $\rho^-\bar{\nu}$ $\pi^-\pi^0\pi^0\nu$ $\pi^-\pi^0\pi^0\pi^0\nu$ $\pi^-\pi^-\pi^+\pi^0\nu$ $\pi^?\pi^?\pi^?\nu$ $\pi^-\rho^0\nu$
轻子	π^\pm	0	-1	1	139.56755 ± 0.00033	$(2.6029 \pm 0.0023) \times 10^{-8}$	$\mu+\nu$
	π^0	0	-1	1	134.9734 ± 0.0025	$(8.4 \pm 0.6) \times 10^{-17}$	$\gamma\gamma$ γe^+e^- $e^+e^-e^+e^-$
非奇异介	η	0	-1	0	548.8 ± 0.6	$= (1.08 \pm 0.19)\text{keV}$	$\gamma\gamma$ $3\pi^0$

子

$\pi^+\pi^-\pi^0$
 $\pi^+\pi^-\gamma$
 $e^+e^-\gamma$
 $\mu^+\mu^-\gamma$
 $\mu^+\mu^-$
 $\pi^+\pi^-e^+e^-$

粒子类别	粒子	自旋 J	宇称 P	同位旋 I	静止质量 mc^2/MeV	平均寿命 τ/s	主要衰变方式
奇 异 介 子	K^\pm	0	-1	$\frac{1}{2}$	493.646 ± 0.009 $m_{K^0} - m_{K^\pm}$ $= 4.024 \pm 0.031$	(1.2371 ± 0.0028) $\times 10^{-8}$	$K^+ \mu^+\nu$ $\pi^+\pi^0$ $\pi^+\pi^+\pi^-$ $\pi^+\pi^0\pi^0$ $\pi^0\mu^+\nu$ $\pi^0e^+\nu$ 50% K_S ,
	K_S^0				97.671 ± 0.030		50% K_L
	\bar{K}_S^0						
	K^0	0	-1	$\frac{1}{2}$	$m_{K_L} - m_{K_S}$ $= (3.521 \pm 0.014)$ $\times 10^{-12} \text{MeV}$	(0.8922 ± 0.0020) $\times 10^{-10}$	$\pi^+\pi^-$ $\pi^0\pi^0$
粲 介 子	K_L^0	0	-1	$\frac{1}{2}$		(5.18 ± 0.04) $\times 10^{-3}$	$\pi^0\pi^0\pi^0$ $\pi^+\pi^-\pi^0$ $\pi^\pm\mu^\pm\nu$ $\pi^\pm e^\pm\nu$
	D^\pm	0	-1	$\frac{1}{2}$	1869.3 ± 0.6 $m_D^\pm - m_D^0$ $= 4.74 \pm 0.28$	$(10.69^{+0.34}_{-0.32}) \times 10^{-13}$	$D^+ e^+\nu$ 其它粒子 K^- 或 K^+ 其它粒子 K^0 或 \bar{K}^+
	D^0	0	-1	$\frac{1}{2}$	1864.5 ± 0.6	$(4.28 \pm 0.11) \times 10^{-13}$	其它粒子 $D^0 e^+\nu$ 其它粒子 K^- 或 K^+ 其它粒子 K^0 或 \bar{K}^+
介	\bar{D}^0						其它粒子

子	D_S^\pm	0	-1	0	1969.3 ± 1.1	$(4.36_{-3.2}^{+3.8}) \times 10^{-13}$	$D_S^+ \rightarrow \phi \pi^+$ $\phi \pi^+ \pi^+ \pi^-$ $\bar{K}^*(892)^0 K^+$
	\bar{D}_S^{**}	0	-1	0	2112.7 ± 2.3 $m_{D_S^*}^* - m_{D_S^*}$ $= 141.6 \pm 1.9$	$> 3.0 \times 10^{-23}$	$D_S^{*+} \rightarrow D_S^+ \gamma$

粒子类别	粒子	自旋 J	宇称 P	同位旋 I	静止质量 mc ² /MeV	平均寿命τ/s	主要衰变方式
底介子	B [±]	0	-1	$\frac{1}{2}$	5277.6 ± 1.4 m _{B⁰} -m _{B[±]} =1.9 ± 1.1	$(13.1^{+1.4}_{-1.3}) \times 10^{-13}$	B ⁺ → $\bar{D}^0\pi^+$, D*(2010) ⁻ π ⁺ π ⁺ , D*(2010) ⁻ π ⁺ π ⁺ π ⁰ , D ⁻ π ⁺ π ⁺ $\bar{D}^*(2010)^0\pi^+$ J/ψ(1S)K ⁺ π ⁺ π ⁻ ψ(2S)K ⁺ B ⁰ → $\bar{D}^0\pi^+\pi^-$
	B ⁰	0	-1	$\frac{1}{2}$	5279.4 ± 1.5		D*(2010) ⁻ π ⁺ D*(2010) ⁻ ρ ⁺ D*(2010) ⁻ π ⁺ π ⁰ D*(2010) ⁻ π ⁺ π ⁺ π ⁻ D*(2010) ⁻ e ⁺ (或μ ⁺)ν
	\bar{B}^0						J/ψ(1s)K*(892) ⁰ e [±] ν+强子
介子	B [±]	0	-1	$\frac{1}{2}$		$(13.1^{+1.4}_{-1.3}) \times 10^{-13}$	μ [±] ν+强子
	B ⁰ , \bar{B}^0						D ⁰ 或 \bar{D}^0 + 其它粒子 K [±] +其它粒子 K ⁰ 或 \bar{K}^0 + 其它粒子 D [±] +其它粒子
	未区分						D*(2010) [±] +其它粒子 D _S [±] + 其它粒子 φ+其它粒子 J/ψ(1S)+其它粒子 ψ(2S)+其它粒子 ρ+其它粒子 Λ + 其它粒子
核子	p	$\frac{1}{2}$	1	$\frac{1}{2}$	938.27231 ± 0.00028	稳定 > 10 ³¹ ~ 3 × 10 ³² a	稳定
	n	$\frac{1}{2}$	1	$\frac{1}{2}$	939.56563 ± 0.00028	896 ± 10	pe-r

$$m_n - m_p = 1.293318 \pm 0.000009$$

粒子类别	粒子	自旋 J	宇称 P	同位旋 I	静止质量 mc ² /MeV	平均寿命τ/s	主要衰变方式
奇异数-1	Λ	$\frac{1}{2}$	1	0	1115.63 ± 0.05	(2.631 ± 0.020) × 10 ⁻¹⁰	× pπ ⁻ nπ ⁰
	Σ ⁻	$\frac{1}{2}$	1	1	1189.37 ± 0.06 m ⁻ -m ⁺ =8.07 ± 0.08	(0.799 ± 0.004) × 10 ⁻¹⁰	× pπ ⁰ nπ ⁺
的重子	Σ ⁰	$\frac{1}{2}$	1	1	1192.55 ± 0.09 m ⁰ -m =76.92	(7.4 ± 0.7) × 10 ⁻²⁰	γ
	Σ ⁻	$\frac{1}{2}$	1	1	1197.43 ± 0.06 m ⁻ -m ⁰ =4.89 ± 0.08	(1.479 ± 0.011) × 10 ⁻¹⁰	× nπ ⁻ ne ⁻ ν̄
奇异数-2	Σ ⁰	$\frac{1}{2}$	1	$\frac{1}{2}$	1314.6 ± 0.6 m ⁻ -m ⁰ =6.4 ± 0.6	(2.90 ± 0.10) × 10 ⁻¹⁰	π ⁰
	Σ ⁻	$\frac{1}{2}$	1	$\frac{1}{2}$	1321.32 ± 0.13	(1.639 ± 0.015) × 10 ⁻¹⁰	× π ⁻
奇异数-3	Σ ⁻	$\frac{3}{2}$	1	0	1672.43 ± 0.32	(0.822 ± 0.012) × 10 ⁻¹⁰	× K ⁻ 0p ⁻ -p ⁰
	Λ _c ⁺	$\frac{1}{2}$	1	0	2284.9 ± 1.5	(1.79 ^{+0.23} _{-0.17}) × 10 ⁻¹³	pK ⁰ pK ⁻ π ⁺ pK ⁰ π ⁺ π ⁻ pK ⁻ π ⁺ π ⁰ +其它粒子 +p ⁺ p ⁻
重子	Ξ _c ⁺	$\frac{1}{2}$	1	0	2460 ± 19	(4.3 ^{+1.7} _{-1.2}) × 10 ⁻¹³	e ⁺ +其它粒子 K ⁻ π ⁺ π ⁺ 0K ⁻ π ⁺ π ⁺

辐射全身性照射可能产生的效应

受照剂量 D/Gy	临床症状
0 ~ 0.25	无可检出的临床症状，可能无迟发效应
0.5	血象有轻度暂时性变化，但可能有迟发性效应。无其他临床症状
1	可产生恶心、疲劳。剂量达 1.25Gy 以上时，有 20 ~ 25% 的人可能发生呕吐，血象有显著变化
2	受照后 24 小时内出现恶心和呕吐，经一周潜伏期后，出现毛发脱落、厌食、全身虚弱及其他症状如喉炎、腹泻等。
4 (半致死剂量)	受照后几小时内发生恶心、呕吐，两周内可见毛发脱落、厌食、全身虚弱、体温升高。第三周出现紫斑，口腔及咽部感染。第四周出现苍白、鼻血、腹泻、迅速消瘦。50% 个体可能死亡。
> 6 (致死剂量)	1 ~ 2 小时出现恶心、腹泻，潜伏期短，一周未出现呕吐等症状。体温升高，迅速消瘦。第二周出现死亡。死亡率可能达 100%

来自天然辐射的年平均全身剂量（美国）

外部源	D/10 ⁻⁵ Sv
宇宙射线	44
空气、土壤和建筑材料中的铀、钍（及其衰变产物）和 ⁴⁰ K	40
内部源	
体内的 ⁴⁰ K	14（估计）
¹⁴ C，Rn 的同位素等	4（估计）
合计	102

我国辐射防护规定对个人剂量的限制

		辐射工作人员 年有效剂量当量限值 H/mSv	公众人员 年有效剂量当量限值 H/mSv	
限制随机效应	全身	50	1	
防止非随机效应	眼睛体	150	皮肤和眼睛体	50
	其他器官	500		

剂量限值为不允许接受的剂量范围的下限，而不是允许接受剂量的上限。剂量限值不包括

医疗照射和天然本底照射

随机效应无剂量阈值，效应发生的概率随剂量增加而增加

非随机效应存在剂量域值，只要控制在剂量阈值以下，可以防止效应的发生

主要参考资料

1. 褚圣麟。原子物理学。第1版。北京：人民教育出版社，1979。
2. [英] C.W. 艾伦。物理量和天体物理量。第1版。上海人民出版社，1976。
3. 母国光，战元令。光学。第1版。北京：人民教育出版社，1979。
4. 杨同友。光纤通信技术。第1版。北京：人民邮电出版社，1986。
5. [日] 岛田禎晋。光通信技术读本。赵灵基等。第1版。北京：人民邮电出版社，1982。
6. F.T. 阿雷克，E.O. 舒尔茨-杜波依斯。激光器（激光手册第二分册）。《激光手册》翻译组。第1版。北京：科学出版社，1980。
7. 卢希庭等。核素数据手册。第1版。北京：原子能出版社，1981。
8. 于孝忠等。核辐射物理学。第2版。北京：原子能出版社，1986。
9. 卢玉楷等。放射性核素概论。第1版。北京：科学出版社，1987。
10. [美] S. 格拉斯登等。核反应堆工程。吕应中等。第1版。北京：原子能出版社，1986。
11. 卢希庭。原子核物理。第1版。北京：原子能出版社，1981。
12. 王永芬。原子核物理学基础。第1版。北京：清华大学出版社，1986。
13. 褚圣麟。原子核物理学导论。第2版。北京：高等教育出版社，1987。
14. 蒋明。原子核物理导论。第1版。北京：原子能出版社，1983。
15. 吴知非。原子核物理学。第1版。北京：高等教育出版社，1983。
16. 杨福家。原子物理学。第2版。北京：高等教育出版社，1990。
17. 李德平，潘自强。辐射防护手册 第一分册。第1版。北京：原子能出版社，1987。
18. [美] A.V. 尼罗。核反应堆知识入门。张士贯，杨宇。第1版。北京：原子能出版社，1984。
19. 朱慈盛。天文学教程（中册）。第1版。北京：高等教育出版社，1987。
20. 中国大百科全书。物理学。
21. 章乃森。粒子物理学（上册）。第1版。北京：科学出版社，1986。

22. 方守贤, 梁岫如。我国粒子加速器的发展和展望。物理, 1991 (8): 476。

23. 高崇寿, 曾谨言。粒子物理与核物理讲座。第 1 版。北京: 高等教育出版社, 1990。

24. 郑志鹏。 τ 粒子质量的最新数据。物理, 1993 (1): 3

25. 杨长根, 陈和生, 唐孝威。LEP 对撞机上 τ 粒子寿命的最新测量结果。物理, 1994 (4): 196

26. CRC Handbook of Chemistry and Physics. 69th, Ed.

27. 环境保护国家标准汇编。第 1 版, 北京: 中国标准出版社, 1990。

八、其他

太阳分层结构

分层	范围 (R_s)	质量 (M_s)	温度 (T/K)	压强 $p/10^5 Pa$	密度 $\rho/g \cdot cm^{-3}$	产能 (L_s)	
核反应区	$0 \sim \frac{1}{4}$	50%	$1.5 \times 10^7 \sim 8 \times 10^6$	$3.4 \times 10^{11} \sim 2.6 \times 10^{10}$	160 ~ 20	99%	
辐射区	$\frac{1}{4} \sim \frac{4}{5}$	49.9%	$8 \times 10^6 \sim 7 \times 10^5$	$2.6 \times 10^{10} \sim 1.5 \times 10^6$	$20 \sim 10^{-2}$	1%	
对流区	$\frac{4}{5} \sim 1$	0.1%	$7 \times 10^5 \sim 6.6 \times 10^3$	$1.5 \times 10^6 \sim 1.4$	$10^{-2} \sim 4 \times 10^{-7}$	~ 0%	
大	光球	约 500km	~ 0%	$6.6 \times 10^3 \sim 4560$	1.4 ~ 0	$4 \times 10^{-7} \sim 8 \times 10^{-8}$	~ 0%
	色球	约 2000km	~ 0%	$4560 \sim 1 \times 10^5$	~ 0	$8 \times 10^{-8} \sim 1 \times 10^{-14}$	~ 0%
气	日冕	约几个 R_s	~ 0%	$1 \times 10^5 \sim 2 \times 10^6$	~ 0	$1 \times 10^{-14} \sim 1 \times 10^{-22}$	~ 0%

注: L_s 是太阳辐射总功率, 等于 $3.86 \times 10^{20} W$

地球内部分层结构

分 层	深度 d/km	纵波速度 v/km · s ⁻¹	横波速度 v/km · s ⁻¹	密度 r/g · cm ⁻³	压强 p/× 10 ⁵ Pa	温度 t/	
地壳	地面	5.5	3.2	2.7			
	10 ~ 15	5.6	3.2				
	20	6.4	3.7	2.8			
		7.6	4.2	2.9			
地幔	33				9000		
	上地幔	80	8.1	4.6	3.32		1300
		150	7.8	4.5	3.37		
		190	7.9	4.4	3.42		
		270	8.1	4.4	3.47		2000
		413	8.4	4.6	3.53		
	下地幔	413	8.97	5.0	3.64	140000	
		900	11.3	6.3	4.60	270000	
		984	11.42	6.3	4.64	382000	
		1800	12.5	6.8	5.13		
2700		13.6	7.3	5.60			
		13.64	7.3	5.66			
地核	2900				1368000		
	外核		8.1	—	9.71		4000
		4703			11.7	3180000	
	过渡层	4980	10.4	—	12.0		
		5120	11.2	—	15.0		
内核	5154			约 16	约 3300000		
	5200	9.6	—				
	6371 (中心)	11.3	—	17.6	约 3600000	5500 ~ 6000	

1995 ~ 2020 年我国能见到的日食 (23 次)

日期	食型	主要地区的食分及食甚时间 (北京时间)
1995 年 10 月 24 日	全	乌鲁木齐 0.45 (11 时 25 分) ; 拉萨 0.77 (11 时 25 分) ; 兰州 0.45 (11 时 49 分) ; 昆明 0.73 (11 时 49 分) ; 北京 0.23 (12 时 17 分) ; 广州 0.62 (12 时 17 分) ; 武汉 0.43 (12 时 21 分) ; 上海 0.38 (12 时 37 分)
1997 年 3 月 9 日	全	广州 0.50 (8 时 09 分) ; 昆明 0.56 (8 时 09 分) ; 拉萨 0.67 (8 时 09 分) ; 武汉 0.67 (8 时 21 分) ; 兰州 0.82 (8 时 21 分) ; 上海 0.65 (8 时 29 分) ; 乌鲁木齐 0.93 (8 时 33 分) ; 北京 0.85 (8 时 41 分) ; 哈尔滨 0.88 (9 时 05 分)
1998 年 8 月 22 日	环	昆明 0.28 (8 时 27 分) ; 广州 0.38 (8 时 35 分) ; 武汉 0.15 (8 时 39 分) ; 上海 0.13 (8 时 46 分)
1999 年 8 月 11 日	全	乌鲁木齐 0.47 (20 时 03 分) ; 拉萨 0.69 (20 时 23 分)
2002 年 6 月 11 日	环	广州 0.40 (6 时 13 分) ; 昆明 0.25 (6 时 17 分) ; 武汉 0.25 (6 时 21 分) ; 上海 0.33 (6 时 21 分) ; 北京 0.13 (6 时 33 分) ; 哈尔滨 0.14 (6 时 41 分)
2003 年 5 月 31 日	环	乌鲁木齐 0.15 (11 时 33 分)
2004 年 10 月 14 日	偏	哈尔滨 0.18 (9 时 51 分)
2005 年 10 月 3 日	环	拉萨 0.05 (19 时 28 分)
2006 年 3 月 29 日	全	拉萨 0.30 (20 时 00 分) ; 乌鲁木齐 0.75 (20 时 00 分)
2007 年 3 月 19 日	偏	拉萨 0.54 (9 时 44 分) ; 昆明 0.38 (9 时 48 分) ; 广州 0.21 (10 时 00 分) ; 乌鲁木齐 0.72 (10 时 08 分) ; 武汉 0.30 (10 时 12 分) ; 上海 0.18 (10 时 24 分) ; 北京 0.40 (10 时 32 分) ; 哈尔滨 0.32 (10 时 56 分)
2008 年 8 月 1 日	全	哈尔滨 0.83 (18 时 57 分) ; 乌鲁木齐 0.98 (19 时 05 分) ; 北京 0.90 (19 时 14 分) ; 兰州 1.00 (19 时 22 分) ; 武汉 0.96 (19 时 26 分) ; 拉萨 0.82 (19 时 33 分) ; 昆明 0.83 (19 时 33 分)
2009 年 1 月 26 日	环	昆明 0.12 (17 时 43 分) ; 武汉 0.10 (17 时 47 分) ; 上海 0.15 (17 时 47 分) ; 广州 0.30 (17 时 47 分)

续 表

日 期	食型	主要地区的食分及食甚时间(北京时间)
2009年7月22日	全	拉萨 0.93 (8时 55分) ; 昆明 0.88 (9时 03分) ; 兰州 0.83 (9时 07分) ; 广州 0.77 (9时 15分) ; 武汉 1.00 (9时 19分) ; 北京 0.75 (9时 23分) ; 上海 1.00 (9时 31分) ; 哈尔滨 0.50 (9时 47分)
2010年1月15日	环	乌鲁木齐 0.39 (16时 11分) ; 拉萨 0.68 (16时 23分) ; 兰州 0.75 (16时 35分) ; 昆明 0.93 (16时 39分) ; 北京 0.80 (16时 44分) ; 广州 0.73 (16时 51分) ; 武汉 0.90 (16时 51分) ; 上海 0.83 (16时 55分)
2011年1月4日	偏	乌鲁木齐 0.21
2011年6月2日	偏	哈尔滨 0.21 (4时 08分)
2012年5月21日	环	广州 0.95 (6时 17分) ; 昆明 0.85 (6时 21分) ; 武汉 0.83 (6时 25分) ; 上海 0.88 (6时 25分) ; 兰州 0.65 (6时 33分) ; 拉萨 0.67 (6时 33分) ; 北京 0.69 (6时 37分) ; 乌鲁木齐 0.42 (6时 49分) ; 哈尔滨 0.67 (6时 49分)
2015年3月20日	全	乌鲁木齐 0.06 (19时 23分)
2016年3月9日	全	拉萨 0.12 (8时 46分) ; 昆明 0.23 (8时 46分) ; 广州 0.32 (8时 50分) ; 武汉 0.13 (9时 02分) ; 上海 0.18 (9时 13分)
2018年8月11日	偏	乌鲁木齐 0.17 (18时 38分) ; 北京 0.35 (18时 54分) ; 兰州 0.19 (18时 59分) ; 武汉 0.17 (19时 06分)
2019年1月6日	偏	武汉 0.08 (8时 21分) ; 上海 0.17 (8时 33分) ; 北京 0.30 (8时 31分) ; 哈尔滨 0.15 (8时 53分)
2019年12月26日	环	乌鲁木齐 0.18 (12时 12分) ; 拉萨 0.40 (12时 42分) ; 兰州 0.23 (13时 14分) ; 昆明 0.42 (13时 14分) ; 武汉 0.32 (13时 46分) ; 广州 0.47 (13时 46分) ; 北京 0.18 (13时 42分) ; 哈尔滨 0.13 (13时 54分) ; 上海 0.35 (14时 02分)
2020年6月21日	环	乌鲁木齐 0.62 (14时 59分) ; 拉萨 0.93 (15时 07分) ; 昆明 0.87 (15时 35分) ; 兰州 0.80 (15时 36分) ; 哈尔滨 0.37 (15时 51分) ; 北京 0.58 (15时 52分) ; 广州 0.90 (15时 59分) ; 武汉 0.87 (16时 00分) ; 上海 0.77 (16时 07分)

1995年~2020年我国能见到的月食

日期	食型	交食时间(北京时间)	
		初 亏	复 圆
1995年4月15日	偏	19时38分	20时56分
1997年9月17日	全	1时02分	4时32分
1999年7月28日	偏	18时25分	20时17分
2000年7月16日	全	20时03分	23时47分
2001年1月10日	全	2时36分	6时06分
2001年7月5日	偏	21时41分	(6日)0时15分
2004年5月5日	全	2时43分	6时17分
2005年10月17日	偏	19时29分	20时35分
2006年9月8日	偏	2时04分	3时42分
2007年3月4日	全	5时36分	9时06分
2007年8月28日	全	16时45分	20时25分
2008年8月17日	偏	3时34分	6时40分
2010年1月1日	偏	2时52分	3时58分
2010年6月26日	偏	18时18分	20时54分
2011年6月16日	全	2时19分	6时03分
2011年12月10日	全	20时48分	(11日)0时14分
2012年6月4日	偏	17时53分	20时13分
2013年4月26日	偏	3时52分	4时28分
2014年10月8日	全	17时08分	20时36分
2015年4月4日	全	18时23分	21时43分
2017年8月8日	偏	1时21分	3时15分
2018年1月31日	全	19时45分	23时19分
2018年7月28日	全	2时33分	6时13分
2019年7月17日	偏	4时06分	6时58分

化学元素名称及相对质量原子

原子序	符号	相对原子质量 (1989 年)	名 称		发现年份
			中文	英文	
1	H	1.00794(7)	氢	Hydrogen	1766
2	He	4.002602(2)	氦	Helium	1895
3	Li	6.941(2)	锂	Lithium	1817
4	Be	9.012182(3)	铍	Beryllium	1798
5	B	10.811(5)	硼	Boron	1808
6	C	12.011(1)	碳	Carbon	古代
7	N	14.00674(7)	氮	Nitrogen	1772
8	O	15.9994(3)	氧	Oxygen	1774
9	F	18.9984032(9)	氟	Fluorine	1771
10	Ne	20.1797(6)	氖	Neon	1898
11	Na	22.989768(6)	钠	Sodium	1807
12	Mg	24.3050(6)	镁	Magnesium	1755
13	Al	26.981539(5)	铝	Aluminium	1827
14	Si	28.0855(3)	硅	Silicon	1823
15	P	30.973762(4)	磷	Phosphorus	1669
16	S	32.066(6)	硫	Sulfur	古代
17	Cl	35.4527(9)	氯	Chlorine	1774
18	Ar	39.948(1)	氩	Argon	1894
19	K	39.0983(1)	钾	Potassium	1807
20	Ca	40.078(4)	钙	Calcium	1808
21	Sc	44.955910(9)	钪 (k4ng)	Scandium	1879
22	Ti	47.88(3)	钛	Titanium	1791
23	V	50.9415(1)	钒	Vanadium	1830
24	Cr	51.9961(6)	铬	Chromium	1797
25	Mn	54.93305(1)	锰	Manganese	1774
26	Fe	55.847(3)	铁	Iron	古代
27	Co	58.93320(1)	钴	Cobalt	1735
28	Ni	58.6934(2)	镍	Nickel	1751
29	Cu	63.546(3)	铜	Copper	古代
30	Zn	65.39(2)	锌	Zinc	1746

续 表

原子序	符号	相对原子质量 (1989 年)	名 称		发现年份
			中文	英文	
31	Ga	69.723(1)	镓	Callium	1875
32	Ge	72.61(2)	锗	Germanium	1886
33	As	74.92159(2)	砷	Arsenic	古代
34	Se	78.96(3)	硒	Selenium	1817
35	Br	79.904(1)	溴	Bromine	1826
36	Kr	83.80(1)	氪	Krypton	1898
37	Rb	85.4678(3)	铷	Rubidium	1861
38	Sr	87.62(1)	锶	Strontium	1790
39	Y	88.90585(2)	钇	Yttrium	1794
40	Zr	91.224(2)	锆	Zirconium	1789
41	Nb	92.90638(2)	铌	Niobium	1801
42	Mo	95.94(1)	钼	Molybdenum	1778
43	Tc	(98)	锝	Technetium	1937
44	Ru	101.07(2)	钌	Ruthenium	1844
45	Rh	102.90550(3)	铑	Rhodium	1803
46	Pd	106.42(1)	钯	Palladium	1803
47	Ag	107.8682(2)	银	Silver	古代
48	Cd	112.411(8)	镉	Cadmium	1817
49	In	114.82(1)	铟	Indium	1863
50	Sn	118.710(7)	锡	Tin	古代
51	Sb	121.757(3)	锑 (t9)	Antimony	古代
52	Te	127.60(3)	碲	Tellurium	1782
53	I	126.90447(3)	碘	Iodine	1811
54	Xe	131.29(2)	氙 (xi1n)	Xenon	1808
55	Cs	132.90543(5)	铯	Caesium	1860
56	Ba	137.327(7)	钡	Barium	1808
57	La	138.9055(2)	镧	Lanthanum	1839
58	Ce	140.115(4)	铈	Cerium	1803
59	Pr	140.90765(3)	镨	Praseodymium	1879
60	Nd	144.24(3)	钕	Neodymium	1885
61	Pm	(145)	钷	Promethium	1947
62	Sm	150.36(3)	钐 (sh1n)	Samarium	1879
63	Eu	151.965(9)	铕	Europium	1896
64	Gd	157.25(3)	钆 (g2)	Gadolinium	1880
65	Tb	158.92534(3)	铽	Terbium	1843
66	Dy	162.50(3)	镝	Dysprosium	1886

续 表

原子序	符号	相对原子质量 (1989 年)	名 称		发现年份
			中文	英文	
67	Ho	164.93032(3)	铥	Holmium	1879
68	Er	167.26(3)	铒	Erbium	1843
69	Tm	168.93421(3)	铥	Thulium	1879
70	Yb	173.04(3)	镱	Ytterbium	1878
71	Lu	174.967(1)	镱	Lutetium	1907
72	Hf	178.49(2)	铪 (h1)	Hafnium	1923
73	Ta	180.9479(1)	钽 (t3n)	Tantalum	1802
74	W	183.85(3)	钨	Wolfram (Tungsten)	1781
75	Re	186.207(1)	铼	Rhenium	1925
76	Os	190.2(1)	锇	Osmium	1803
77	Ir	192.22(3)	铱	Iridium	1803
78	Pt	195.08(3)	铂	Platinum	1735
79	Au	196.96654(3)	金	Gold	古代
80	Hg	200.59(2)	汞	Mercury	古代
81	Tl	204.3833(2)	铊	Thallium	1861
82	Pb	207.2(1)	铅	Lead	古代
83	Bi	208.98037(3)	铋	Bismuth	1753
84	Po	(209)	钋 (p#)	Polonium	1898
85	At	(210)	砹	Astatine	1940
86	Rn	(222)	氡	Radon	1900
87	Fr	(223)	钫	Francium	1939
88	Ra	(226)	镭	Radium	1898
89	Ac	(227)	锕	Actinium	1899
90	Th	232.0381(1)	钍	Thorium	1828
91	Pa	231.03588(2)	镤	Protactinium	1917
92	U	238.0289(1)	铀	Uranium	1789
93	Np	(237)	镎	Neptunium	1940
94	Pu	(244)	钚	Plutonium	1940
95	Am	(243)	镅	Americium	1945
96	Cm	(247)	锔	Curium	1944
97	Bk	(247)	锫	Berkelium	1950
98	Cf	(251)	锿	Californium	1950
99	Es	(252)	镱	Einsteinium	1955
100	Fm	(257)	镆	Fermium	1955
101	Md	(258)	钔	Mendelevium	1955
102	No	(259)	镎	Nobelium	1958
103	Lr	(260)	铹	Lawrencium	1961

注：括弧中的数值用于某些放射性元素，表示该元素已知半衰期最长的同位素的原子质量数

大气成分				
气 体	相对分子质量	干燥空气的含量比		备 注
		按体积计算 ($\times 10^{-6}$)	按质量计算 ($\times 10^{-6}$)	
N ₂	28.013	780840	755230	
O ₂	31.999	209470	231420	
H ₂ O	18.015	1000 ~ 28000	600 ~ 17000	bd
Ar	39.948	9340	12900	
CO ₂	44.010	320	500	a
Ne	20.179	18.2	12.7	
He	4.003	5.24	0.72	
CH ₄	16.043	1.8	1.0	
Kr	83.80	1.14	3.3	
Co	28.010	0.06 ~ 1	0.06 ~ 1	a
SO ₂	64.06	1	2	a
H ₂	2.016	0.5	0.04	
H ₂ O	44.012	0.27	0.5	
O ₃	47.998	0.01 ~ 0.1	0.02 ~ 0.2	bc
Xe	131.30	0.087	0.39	
NO ₂	46.006	0.0005 ~ 0.02	0.0008 ~ 0.03	a
Rn	222	6×10^{-14}	5×10^{-13}	
NO	30.006	微量	微量	a

注：a. 在工业区较多

b. 随气象或地理情况而变

c. 在臭氧层中较多

d. 随高度增加而减少

地壳成分

元素	含量 k/mg . kg^{-1}	元素	含量 k/mg . kg^{-1}	元素	含量 k/mg . kg^{-1}	元素	含量 k/mg . kg ⁻¹
O	4.64×10^5	Ni	7.5×10^1	Be	2.8×10^0	Ag	7×10^{-2}
Si	2.82×10^5	Zn	7.0×10^1	Er	2.8×10^0	Se	5×10^{-2}
Al	8.32×10^4	Ce	6.0×10^1	U	2.7×10^0	Pd	1×10^{-2}
Fe	5.63×10^4	Cu	5.5×10^1	Br	2.5×10^0	He	8×10^{-3}
Ca	4.15×10^4	Y	3.3×10^1	Ta	2.0×10^0	Ne	5×10^{-3}
Na	2.36×10^4	La	3.0×10^1	Sn	2.0×10^0	Pt	5×10^{-3}
Mg	2.33×10^4	Nd	2.8×10^1	As	1.8×10^0	Re	5×10^{-3}
K	2.09×10^4	Co	2.5×10^1	Mo	1.5×10^0	Au	4×10^{-3}
Ti	5.70×10^3	Sc	2.2×10^1	W	1.5×10^0	Os	1.5×10^{-3}
H	1.40×10^3	Li	2.0×10^1	Eu	1.2×10^0	Ir	1×10^{-3}
P	1.05×10^3	Nb	2.0×10^1	Ho	1.2×10^0	Rh	1×10^{-3}
Mn	9.50×10^2	Ga	1.5×10^1	Cs	1.0×10^0	Ru	1×10^{-3}
F	6.25×10^2	Pb	1.2×10^1	Tb	9×10^{-1}	Te	1×10^{-3}
Ba	4.25×10^2	B	1.0×10^1	I	5×10^{-1}	Kr	1×10^{-3}
Sr	3.75×10^2	Th	9.6×10^0	Lu	5×10^{-1}	Xe	3×10^{-5}
S	2.60×10^2	Pr	8.2×10^0	Tm	4.8×10^{-1}	Pa	1.4×10^{-6}
C	2.00×10^2	Sm	6.0×10^0	Tl	4.5×10^{-1}	Ra	9×10^{-7}
Zr	1.65×10^2	Gd	5.4×10^0	Sb	2×10^{-1}	Ac	5.5×10^{-10}
V	1.35×10^2	Ge	5.4×10^0	Cd	2×10^{-1}	Po	2×10^{-10}
C	1.30×10^2	Ar	3.5×10^0	Bi	1.7×10^{-1}	Rn	4×10^{-13}
Cr	1.00×10^2	Dy	3.0×10^0	In	1×10^{-1}		
Rb	9.0×10^1	Yb	3.0×10^0	Hg	8×10^{-2}		

气象数据随纬度的变化

纬度	平均气温 (海平面) t/	季节温度 范围(在陆 上) t/	海洋温度 t/	大气压强 (海平面) p/× 10 ⁵ Pa	水汽压强 (海平面) p/× 10 ⁵ Pa	对流层顶		
						温度 t/	高度 h/km	大气压强 p/× 10 ⁵ Pa
0 °	27	1	27	1.011	0.028	-86	17.0	0.080
10 °	26	3	26	1.012	0.027	-81	16.6	0.099
20 °	24	6	24	1.015	0.024	-74	15.5	0.129
30 °	20	9	20	1.017	0.019	-66	13.7	0.169
40 °	13	13	14	1.015	0.012	-61	11.8	0.213
50 °	6	17	7	1.008	0.007	-58	9.8	0.264
60 °	-2	21	2	1.001	0.003	-55	8.0	0.311
70 °	-10	26	0		0.001	-54	8.1	0.344
80 °	-18	29	-2			-53	7.8	0.380
90 °	-25							

注：由于南北两半球的陆地分布不同，各项数据在相同纬度也是有差异的。上表给出的是两半球的平均值。

常见的正离子

电荷为 1+ 的离子		电荷为 2+ 的离子		电荷为 3+ 的离子		电荷为 4+ 的离子	
符号	名称	符号	名称	符号	名称	符号	名称
NH_4^+	铵	Ba^{2+}	钡	Al^{3+}	铝	Ce^{4+}	铈(IV)
Cs^+	铯	Cd^{2+}	镉	Sb^{3+}	锑(III)或亚锑	Sn^{4+}	锡(IV)或锡
Cu^+	铜(I)或亚铜	Ca^{2+}	钙	As^{3+}	砷(III)或亚砷	Ti^{4+}	钛(IV)或钛
H^+	氢	Cr^{2+}	铬(II)或亚铬	Bi^{3+}	铋		
Li^+	锂	Co^{2+}	钴(II)或亚钴	Ce^{3+}	铈(III)或亚铈		
Hg^+	汞(I)或亚汞	Cu^{2+}	铜(II)或铜	Cr^{3+}	铬(III)或铬		
K^+	钾	Fe^{2+}	铁(II)或亚铁	Co^{3+}	钴(III)或钴		
Rb^+	铷	Pb^{2+}	铅(II)或亚铅	Fe^{3+}	铁(III)或铁		
Na^+	钠	Mg^{2+}	镁	Ga^{3+}	镓		
Ag^+	银	Hg^{2+}	汞(II)或汞	Tl^{3+}	铊(III)或铊		
Tl^+	铊(I)或亚铊	Ni^{2+}	镍(II)	Ti^{3+}	钛(III)或亚钛		
Au^+	金(I)或亚金	Sr^{2+}	锶	V^{3+}	钒		
		Sn^{2+}	锡(II)或亚锡	Au^{3+}	金(III)或金		
		Zn^{2+}	锌				

常见的负离子

r 电荷为 1- 的离子		电荷为 2- 的离子		电荷为 3- 的离子		电荷为 4- 的离子	
符号	名称	符号	名称	符号	名称	符号	名称
$\text{C}_2\text{H}_3\text{O}_2^-$	醋酸根	CO_3^{2-}	碳酸根:	AsO_4^{3-}	砷酸根	$\text{Fe}(\text{CN})_6^{4-}$	亚铁氰酸根
HCO_3^-	碳酸氢根	CrO_4^{2-}	铬酸根	AsO_3^{3-}	亚砷酸根	$\text{P}_2\text{O}_7^{4-}$	焦磷酸根
HC_2O_4^-	草酸氢根	$\text{Cr}_2\text{O}_7^{2-}$	重铬酸根	BO_3^{3-}	硼酸根	SiO_4^{4-}	正硅酸根
$\text{HC}_8\text{H}_4\text{O}_4^-$	酞酸氢根	HPO_4^{2-}	磷酸—氢根	PO_4^{3-}	磷酸根		
HSO_4^-	硫酸氢根	$\text{C}_2\text{O}_4^{2-}$	草酸根	$\text{Fe}(\text{CN})_6^{3-}$	高铁氰酸根		
HS^-	氢硫酸根	O^{2-}	氧				

续 表

电荷为 1-的离子		电荷为 2-的离子	
BrO_3^-	溴酸根	SO_4^{2-}	硫酸根
Br^-	溴	S^{2-}	硫
ClO_3^-	氯酸根	SO_3^{2-}	亚硫酸根
Cl^-	氯	$\text{S}_2\text{O}_3^{2-}$	硫代硫酸根
ClO_2^-	亚氯酸根		
CN^-	氰		
H_2PO_4^-	磷酸二氢根		
F^-	氟		
OH^-	氢氧根		
IO_3^-	碘酸根		
I^-	碘		
NO_3^-	硝酸根		
NO_2^-	亚硝酸根		
ClO_4^-	高氯酸根		
MnO_4^-	高锰酸根		
SCN^-	硫氰酸根		

一些液体的 pH 近似值

液 体	pH	液 体	pH
HCl (0.1mol/L)	0.1	香蕉 (流体)	4.6
HCl (1.0mol/L)	1.0	雨水/6.2	
胃液	2.0	牛奶	6.5
柠檬汁	2.3	纯水	7.0
食醋	2.8	鸡蛋	7.8
H · C ₂ H ₃ O ₂ (0.1mol/L)	2.9	NaHCO ₃ (小苏打 0.1mol/L)	8.4
苹果汁	3.1	海水	8.5
桔子汁	3.5	氢氧化镁乳剂[Mg(OH) ₂]	10.5
番茄汁	4.2	NH ₃ 水溶液 (0.1mol/L)	11.1
		NaOH (0.1mol/L)	13.0
		NaOH (0.0mol/L)	14.0

合 金 钢

名 称	组 成 (%)	性 质	用 途
不锈钢	Fe , Cr (10 ~ 20) , Ni (8) C (0.1 ~ 0.3)	耐腐蚀	餐具, 食品及化工机械
铬钢	Fe , Cr (2 ~ 5) , C (0.5 ~ 0.7)	极硬、韧	装甲、汽车零件(齿轮、轮轴、轴承)
铬钒钢	Fe , Cr (3 ~ 10) , V (0.5 ~ 5) , C (0.7)	高度抗张	汽车零件、弹簧
高速工具钢	Fe , W (12 ~ 20) , Cr (2 ~ 5) , V (1 ~ 3) , C (0.7)	高温时硬度不变	切削、研磨工具
钼钢	Fe , Mo (5)	硬而韧	汽车零件, 主轴和齿轮
锰钢	Fe , Mn (12 ~ 14) , C (1)	特硬	保险柜, 动力铲, 破碎和研磨机器
硅铁	Fe , Si (12 ~ 15) , Mn (0.35) , C (0.85)	耐酸	实验室下水道和管道
因钢	Fe , Ni (36)	低胀率	器具、钟摆, 测量带尺
硅钢	Fe , Si (2) , C (0.4)	易磁化和去磁	电动机和变压器铁芯

注：只列铁以外成分的百分比

钴和镍的合金

名 称	组 成 (%)	性 质	用 途
阿尔尼科铁镍铝钴系合金	Co, Ni, Fe, Al*	高磁性	体积小的强磁体
斯特莱特耐热耐磨硬质合金	Co, Cr, W*	高温时仍保持切削刃	高速切削和研磨工具
卡波洛伊硬质合金	嵌在钴中的碳化钨	极硬	高速切削工具
硬币镍	Ni (25), Cu (75)	耐磨损	镍币
蒙奈尔合金	Ni (约 67), Cu (约 28) 少量 Fe 和 Mn	强度高、韧性、耐腐 蚀	食品店设备、洗槽
尼克洛姆镍铬耐热合金	Ni (60 ~ 80) Cr (15 ~ 20) Fe (12 ~ 15)	高电阻	烤箱和电热器的电阻 丝
坡莫合金	Ni (78), Fe (22)	保持磁性	永磁体

注：标有*的百分比不固定

锡和铅的合金

名 称	组 成 (%)	性 质	用 途
焊锡 (管子工用)	Pb (67), Sn (33)	低熔点, 在完全固化前 保持可塑性	在焊接时擦在接头处
焊锡 (软)	Pb (50), Sn (50)	低熔点, 能粘着于金属	在无线电和电子设备 上作通电接头
白	Sn (85), Cu (7) Bi (6), Sb (2) 这个比可以改变, 也可加入铅和 锌	软, 没有光泽	餐具——盘、水壶、盆 等
巴比合金	Sn (90), Sb (7), Cu (3)	摩擦因数小	在不能使用辊轴的地 方作轴承
活字金	Pb (50 ~ 60) Sn (10 ~ 40) Sb (15 ~ 30) Cu (1)	固化时膨胀	活字印刷
易熔合金	组成不同, 可以用 Bi (50), Pb (25), 其余为单一的锡或锡 和锑; 也可以用铅、锑合金	低熔点	熔丝等
蓄电池板栅	Pb (94), Sb (6)	不太受酸影响	铅蓄电池板栅

金、银、铜的合金

合 金	成 分 (%)
青铜	Cu (70 ~ 95) , Zn (1 ~ 25) , Sn (1 ~ 18)
黄铜	Cu (67) , Zn (33)
标准纯银	Ag (92.5) , Cu (7.5)
18 开黄金	Au (75) , Ag (12.5) , Cu (12.5)
18 开白金	Au (75) , Cu (3.5) , Ni (16.5) , Zn (5)
14 开金	Au (58) , Ag (4 ~ 28) , Cu (14 ~ 28)

某些化学药品、高分子聚合物的俗名、学名对照表

俗名	化学名称	分子式
明矾	硫酸铝钾	$\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3 \cdot \text{K}_2\text{SO}_4 \cdot 24\text{H}_2\text{O}$
砒霜(白砒)	三氧化二砷(三氧化砷)	As_2O_3
甘油	丙三醇	$\text{C}_3\text{H}_5(\text{OH})_3$
电石	碳化钙(二碳化钙)	CaC_2
大理石	碳酸钙	CaCO_3
石灰(生石灰)	氧化钙	CaO
石膏	硫酸钙	$\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$
沼气	甲烷	CH_4
电石气	乙炔	C_2H_2
醋	稀醋酸(乙酸)	$\text{CH}_3 \cdot \text{COOH}$
木精	甲醇	$\text{CH}_3 \cdot \text{OH}$
酒精(火酒)	乙醇	$\text{C}_2\text{H}_5 \cdot \text{OH}$
氯仿(哥罗仿)	三氯甲烷	CHCl_3
石碳酸	苯酚	$\text{C}_6\text{H}_5\text{OH}$
六六六	六氯化苯	$\text{C}_6\text{H}_6\text{Cl}_6$
二二三(D.D.T)	双对氯苯基三氯乙烷	$(\text{ClC}_6\text{H}_4)_2\text{CHCCl}_2$
绿矾	硫酸亚铁	$\text{FeSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$
甘汞	氯化亚汞(一氯化汞)	HgCl (或 Hg_2Cl_2)
升汞	氯化汞(二氯化汞)	HgCl_2
硼砂	四硼酸钠	$\text{Na}_2\text{B}_4\text{O}_7 \cdot 10\text{H}_2\text{O}$
食盐	氯化钠	NaCl
洗涤碱(纯碱)	碳酸钠	$\text{Na}_2\text{CO}_3 \cdot 10\text{H}_2\text{O}$
小苏打	碳酸氢钠(重碳酸钠)	NaHCO_3
大苏打	硫代硫酸钠	$\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_3 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$
烧碱(苛性钠)	氢氧化钠	NaOH
氨水	氢氧化铵	NH_4OH
石英(硅土)	二氧化硅	SiO_2
		国外商品名称
涤纶(的确良)	聚对苯二甲酸乙二醇酯纤维	达柯纶、帝特纶、特丽纶
维纶	聚乙烯醇缩甲醛纤维	维尼纶、妙纶、库拉纶
腈纶(晴纶)	聚丙烯腈纤维	奥纶、开司米
氯纶	聚氯乙烯纤维	利维尔、罗维尔、特莫维尔
锦纶-6	聚己内酰胺纤维	卡普纶、尼龙、耐纶
电玉	脲醛塑料	
电木(胶木)	(以木粉为填料的酚醛塑料)	
有机玻璃	聚甲基丙烯酸甲酯	
赛璐珞	(由硝酸纤维素等加工而成的塑料)	

莫氏 (F. Mohs) 硬度计

矿物名称	化学组成	硬度	矿物名称	化学组成	硬度
滑石	$Mg_3[Si_4O_{10}][OH]_2$	1	正长石	$K[AlSi_3O_8]$	6
石膏	$CaSO_4 \cdot 2H_2O$	2	石英	SiO_2	7
方解石	$CaCO_3$	3	黄玉	$Al_2[SiO_4][F, OH]_2$	8
萤石	CaF_2	4	刚玉	Al_2O_3	9
磷灰石	$Ca_5[PO_4]_3[F, Cl, OH]$	5	金刚石	C	10

主要参考资料

1. 张明昌, 肖耐园。天文学教程(上册)。第1版。北京: 高等教育出版社, 1987。
2. 宋春青, 张振春。地质学基础。第1版。北京: 人民教育出版社, 1978。
3. [英]C. W. 艾伦。物理量和天体物理量。杨建。第1版。上海人民出版社, 1976。
4. 尹敬执等。基础无机化学(下册)。第1版。北京: 人民教育出版社, 1980。
5. CRC. Handbook of Chemistry and Physics 69th. ED.
6. [日]饭田修一等。物理学常用数表。张质贤等。第1版。北京: 科学出版社, 1979。
7. [美]E. R. 图思, G. L. 埃立斯。化学基础(第一、二分册)。罗伯儒等。第1版。北京: 文化教育出版社, 1982。
8. [美]A. W. 格林斯通, S. P. 哈利斯, 化学概要(第三分册)。陈光旭等。第1版。北京: 文化教育出版社, 1981。
9. [美]W. H. 内博盖尔等。普通化学(第四分册)。朱仲涛等。第1版。北京: 人民教育出版社, 1979。
10. 中学物理教师手册编写组。中学物理教师手册。第1版。上海: 上海教育出版社, 1982。

