

学校的理想装备

电子图书·学校专集

校园网上的最佳资源

高级中学课本 物理 二年級 (试用本)



序言

自然科学的形成

远古时代，人类慑于自然的力量，对雷电、风暴、地震、日食、月食、彗星等自然现象，怀着畏惧和崇敬的心情，以为雷电是上天惩罚恶人的神火，出现彗星预示着战祸、饥荒等灾难的来临。这种神话和迷信的产生，反映了当时人们对自然的无知。

但是人们在长期的生存斗争中，逐步积累了对自然现象的点滴认识，经过许多代人认真地观察、记录、研究和校正，整理概括出一些线索，终于发现了某些现象之间的因果关系和规律，根据这些规律再去推断其他的现象。这样，人们对各种自然现象的认识，就逐渐深入和丰富起来，发展形成系统的认识。这些建立在实践和事实基础上的对自然现象及其规律的系统认识，就形成了自然科学。人们掌握了科学知识，在与自然的斗争中便获得了主动，推进了物质文明和精神文明的建设。从此，对风暴、地震等自然现象，不仅能够解释，而且在一定范围内还可以作出预报和防范，将它们造成的损害减小到最低限度。

物理学和人类文明

物理学(physics)是自然科学中的一个基础学科，它研究物质运动最一般的规律和物质的基本结构，它已成为现代科学技术的重要基础。

物理学的发展经历了三次重大的突破。17—18世纪，牛顿力学的建立和热力学的发展，导致了蒸汽机的发明，机械工业和交通运输有了突破性的进展，引起了第一次工业革命；19世纪，从法拉第发现电磁感应现象到麦克斯韦电磁理论的诞生，推动了电机、电器和电信设备的设计与制造，引起了工业电气化，人类社会由蒸汽时代进入了电气时代；20世纪以来，相对论和量子力学的创立，极大地拓宽了人们认识物质基本结构和基本性质的视野，并深入到研究自然界一切相互作用的统一性。人类社会正进入以微电子、新材料、新能源为主要内容的新技术革命时期。这三次突破，在人类文明发展进程中起着里程碑的作用(图0-1)。

近20年来，物理学的新发展，对微电子技术的开发、新材料的研制和新能源的利用进一步起着重要的指导作用；各种新型监测系统和精密测量手段的日益完善，有可能使人们对宏观世界和微观世界认识的深度和广度，达到更为深入的层次，更接近事物本来的面貌(图0-2)。由此而产生的新思想、新观念，又必将对科学技术、工农业生产和社会文明的进一步发展产生巨大的影响。

怎样学好高中物理学

高中阶段学习物理学的目的，不仅是为了认识自然界的规律，更重要的还在于将这些知识运用于实际，改善周围的环境和生活条件，更好地为我国四化建设服务。学好物理知识必须提高运用知识解释现象、解决实际问题的能力，并为今后学习打好必要的基础。与初中物理学相比较，高中物理学有以下一些特点：

1. 扩大了知识面，丰富了知识内容，对思维能力有较高的要求；
2. 较多地通过实验定量研究物理定律；
3. 较多地用数学公式和图象描述物理规律；
4. 有较高的数学计算要求。

因此，学习高中物理课程时，要注意以下几方面：

主动学习，认真阅读课本。要理解为什么需要和怎样正确建立有关的物理概念；要重视理解物理定律的意义和适用范围；要知道所学知识和技能在生活和生产中的实际应用。

实验是学习物理的基础。在实验中要重视培养观察能力和动手能力。对每个实验要弄清楚研究的是什么问题，为什么要研究这个问题，用什么方法来研究。要学会按照合理的步骤正确使用仪器进行操作，记录数据，并对实验结果进行分析和讨论，得出结论，以提高实验能力和思维能力。

做练习是学好物理的重要环节，要在复习课本内容的基础上独立完成各类练习。在习题演算中，一旦发现做错，应分析发生错误的原因，认真订正。对课文中的思考题，虽不是书面作业，但也要积极思考，认真讨论。

本书课文中的“问题探讨”专栏，是以师生对话的形式，帮助同学们理解概念和提高思维能力的，希望同学们能有所领会，受到启发。课文中安排在“花纹框”里的内容以及章末的“阅读材料”，是属于扩大知识面内容；节次标有“*”号的是选学内容，有兴趣的同学可以阅读和选学。此外，还可以留意阅读书刊杂志上有关物理知识及科技新成就的科普文章，热心参加科学讲座和参观等课外活动，关心周围发生的物理现象，并试着用学过的知识进行解释，以提高自学能力和理论联系实际的能力。

为了帮助同学们自己评价学习效果，本书在每章的最后，都具体提出了这一章有关知识、技能和情意领域的学习要求，并提供相应的复习题。

物理是一门有趣的课程，入门并不难，相信你一定会根据高中物理的特点和要求，逐步掌握有效的学习方法，努力学习物理的。

8 . 电场和磁场

Electric Fields and Magnetic Fields

1. 条形磁铁周围磁感线的分布
2. 蹄形磁铁两极间磁感线的分布
3. 直线电流周围磁感线的分布
4. 产生强磁场的铌-钛超导线圈

一、场的初步知识

场

我们知道力是物体间的相互作用。用球拍击球，球和球拍都发生了形变，由于它们都要恢复原来形状，所以球和球拍都受到了弹力作用；人们走路时，鞋底总和路面接触发生摩擦，时间久了，鞋底磨破了，路面也磨平了。弹力和摩擦力必定都发生在直接接触的物体之间。同时，我们还注意到重力、电力、磁力这些力的作用，跟弹力和摩擦力不同，它们不需要物体直接接触，如脱离地球表面的物体仍受到重力作用，即使是远离地球的月球也受到地球引力作用。历史上曾经误认为重力、电力、磁力是一种“超距力”，实际上，所谓的“超距力”是不存在的，重力、电力、磁力都是场力。物质存在的基本形态有两种：一种是由分子、原子等微粒组成的实物；另一种叫做场（field）。实物由于看得见、摸得着，易为人们所熟悉；而场则是看不见、摸不着的，然而它却是客观存在着的，如引力场、电场、磁场。场能够对放入其中的实物施加力的作用是场的最基本的特性之一。物体间万有引力的作用是通过引力场来实现的，电荷间、磁体间的相互作用则是分别通过电场和磁场来实现的。场跟人们熟知的物质——实物一样，也具有能量等表征物质特性的量。根据实验事实和理论研究，现代物理学的新观念之一认为在一定条件下，场和实物可以相互转化，这更证实了场是物质的一种基本形态。

二、静电场

把一根玻璃棒靠近用丝线悬挂起来带有极少量正电荷的泡沫塑料小球，小球仍保持静止[图 8 - 1(a)]。把这根玻璃棒用丝绸摩擦，然后再靠近泡沫塑料小球，发现小球被排斥[图 8 - 1(b)]。

我们知道摩擦可使物体带电。从场的观点来看，玻璃棒带电后，它周围空间里就存在了电场（electric field）。带有正电荷的泡沫塑料小球，处在带电玻璃棒周围的电场中，受到电场力的作用而被排斥。

只要有电荷存在，在电荷的周围就存在着电场。

一个相对于观察者是静止的电荷，它周围的空間里存在的电场叫做静电场。在日常生活和生产中随时可见由于存在静电场而产生的各种现象。例如在空气干燥的室内，脱下带有化纤成分的衣服时，会听到轻微的“噼叭”声；若在暗室中还可看到静电放电时产生的火光。静电在除尘、喷涂、植绒、复印、分选种子以及喷撒农药等方面都可加以利用，但在纺织、造纸、碾米等工厂的生产过程中，必须注意设法消除静电，

否则会带来很多不便，甚至会酿成灾害。

在中学阶段，我们将研究静电场的两个基本特性。一个是放在静电场中的电荷会受到电场力的作用；另一个是放在静电场中的电荷具有电势能。

点电荷 基元电荷

为了简化问题，只要带电体间的距离足够远，带电体本身的大小、形状及电荷分布情况，跟它对另一带电体的作用无关，这样的带电体就叫做点电荷。点电荷也是一种理想化的物理模型。

带电体所带电荷的多少叫做电量。精确的实验表明，任何带电体所带电量总是等于某一个最小电量的整数倍，这个最小电量叫做基元电荷（basis electric charge），亦称基本电荷，用符号 e 表示。它等于一个电子所带电量的多少，也等于一个质子所带电量的多少。在我国法定计量单位中电量单位是库仑，简称库， C 表示。比库小的电量单位，常用的还有微库（ μC ），

$$1 \text{ 微库} = 10^{-6} \text{ 库。}$$

理论研究指出，1 库电量等于 6.25×10^{18} 个电子电量，所以基元电荷 $e = 1.60 \times 10^{-19}$ 库。

库仑定律

英国科学家卡文迪许首先研究了电荷间作用力的大小跟它们之间的距离的定量关系。1785 年，法国物理学家库仑（1736—1806）利用扭秤测量点电荷间的静电力，在大量实验观察的基础上，独自发表了静止的点电荷间相互作用所遵循规律的研究报告，指出：

在真空中两个点电荷间的作用力跟它们的电量的乘积成正比，跟它们间的距离的平方成反比，作用力的方向在它们的连线上。这就是库仑定律。

电荷间的这种作用力叫做静电力，又叫做库仑力。当它们是同种电荷时，静电力是斥力[图 8-2(a)]；当它们是异种电荷时，静电力是引力[图 8-2(b)]。

真空中的库仑定律可用下式表示：

$$F = k \frac{Q_1 Q_2}{r^2}$$

式中 Q_1 、 Q_2 分别表示两个点电荷的电量， r 表示它们间的距离， F 表示它们相互作用的静电力，比例常数 k 叫做静电力恒量。 k 的数值决定于式中各量所用的单位。若力 F 的单位用牛，距离 r 的单位用米，电量 Q 的单位用库，根据实验得出 $k = 9 \times 10^9$ 牛·米²/库²。它表示两个电量均为 1 库的点电荷，在真空中相距 1 米时，它们之间的静电力的大小等于 9×10^9 牛。

可以看出，库仑定律和万有引力定律很相似，它们都遵循平方反比律。这使我们可以用力学的有关规律，通过类比来理解静电学的问题。但要注意，库仑力的方向决定于电荷的性质，它可以是斥力，也可以是引力，而万有引力只是引力。理论研究指出，真空中的库仑定律在空气中也可近似适用。

[例题 1]

试计算原子核中相距 10^{-14} 米的两个质子间的静电力和万有引力的

大小。已知质子所带电量为 $+1.60 \times 10^{-19}$ 库，质量为 1.67×10^{-27} 千克。

$$\text{解：静电力 } F = k \frac{Q_1 Q_2}{r^2} = 9 \times 10^9 \times \frac{(1.6 \times 10^{-19})^2}{(10^{-14})^2} \text{ 牛} = 2.3 \text{ 牛。}$$

$$\begin{aligned} \text{万有引力 } F &= G \frac{m_1 m_2}{r^2} \\ &= 6.67 \times 10^{-11} \times \frac{(1.67 \times 10^{-27})^2}{(10^{-14})^2} \text{ 牛} \\ &= 1.86 \times 10^{-36} \text{ 牛。} \end{aligned}$$

由计算可知，原子核中这两个质子间的静电力，约是万有引力的 1.2×10^{36} 倍，静电斥力远远大于万有引力，万有引力完全可以忽略。

[例题 2]

在空气中有两个相距 0.5 米的点电荷，带的电量分别为+100 微库和 -50 微库，试求它们间的库仑力。

解：空气可近似地当作真空处理。题中用“+”、“-”号表示电荷的正、负，但在用库仑定律计算电荷间的库仑力的大小时，只需用电量的绝对值代入公式进行计算。

$$\begin{aligned} \text{库仑力 } F &= k \frac{Q_1 Q_2}{r^2} = 9 \times \frac{100 \times 10^{-6} \times 50 \times 10^{-6}}{(0.5)^2} \text{ 牛} \\ &= 180 \text{ 牛。} \end{aligned}$$

由于这是两个异种电荷，所以它们间的库仑力是引力。

思考

1. 两个点电荷的电量不相等，它们相互作用的静电力大小是否相等？为什么？

2. 把两个点电荷间的距离增大为原来的 2 倍，且把其中一个电荷的电量增大为原来的 4 倍时，电荷间的静电力大小跟原来相比较有怎样的变化？

3. 根据氢原子结构模型，核外电子绕核的运动可看作匀速圆周运动。已知氢核带正电，核外电子带负电，电子绕核运动所需的向心力是由什么力提供的？

练习一

1. 两个点电荷在真空中相距 10 厘米，它们的电量分别是 -4 微库和 -6 微库，求它们之间的静电力。

2. 在真空中，两个点电荷间的距离为 1 米时，相互排斥的力为 1×10^{-3} 牛。当它们相距 10 厘米时，相互排斥的力将是多大？

3. 两个点电荷所带电量分别为 1 微库和 4 微库，在真空中相距多远时，它们之间的静电力恰等于 2.25×10^{-3} 牛？

电场强度

我们知道，在带电体周围空间里存在着电场，把一个带电的小球放在离该带电体的不同距离的位置上，它受到的静电力的大小和方向都是

不同的(图 8-3)。这表明在电场中的不同点,电场的强弱和方向是不同的。现在我们来研究这一问题。

假定在真空中,有一个由电量为+Q 的点电荷产生的电场(图 8-4)。现将另一个电量为+q 的点电荷引入电场。这一电荷的电量 q 很小,它的引入不会影响原来电场的分布。

如果把电荷 q 放在电场中的 A 点,A 点离 Q 的距离为 r_A ,q 在 A 点受到的静电力

$$F_A = k \frac{Qq}{r_A^2}$$

将上式变形,写成 $\frac{F_A}{q} = \frac{kQ}{r_A^2}$, 则比值 $\frac{F_A}{q}$ 表示单位电荷在 A 点受到的电场力的大小,它只决定于 A 点在电场中的位置。同理,如果把 q 放在电场中的位置。由于 $r_A < r_B$, $\frac{kQ}{r_A^2} > \frac{kQ}{r_B^2}$, 即 $\frac{F_A}{q} > \frac{F_B}{q}$, 所以以比值 $\frac{F}{q}$ 的大小来表示电场中各点的电场的强弱。

放在电场中某点的电荷,受到的电场力跟它的电量的比值,叫做这一点的电场强度(electric field intensity),简称场强。

如果用 E 表示电场强度,F 表示电荷 q 受到的电场力,则场强可用下式表示:

$$E = \frac{F}{q}。$$

电场强度的单位是牛/库。将电量为 1 库的电荷放在电场中某点,如果受到的电场力等于 1 牛,那么,电场中这一点的场强等于 1 牛/库。

电场强度是矢量。规定电场中某点的场强方向,跟放在这点的正电荷所受电场力的方向相同。

电场强度表示电场具有的对放入其中的电荷施加作用力的基本特性。电场中任一点的场强的大小和方向只跟这一点在电场中的位置有关,而跟在这点是否存在电荷无关。如图 8 - 5 所示的由点电荷 Q 产生的电场中,

$$\text{A点的场强} \quad F_A = \frac{F_A}{q} = \frac{kQq}{qr_A^2} = \frac{kQ}{r_A^2},$$

$$\text{B点的场强} \quad F_B = \frac{F_B}{q} = \frac{kQq}{qr_B^2} = \frac{kQ}{r_B^2}。$$

场强 E_A 、 E_B 的大小和方向都可用图示表示。

由以上讨论可知,在点电荷 Q 产生的电场中,场强

$$E = \frac{kQ}{r^2}。$$

上式表示在点电荷产生的电场中,某点场强的大小跟产生电场的点电荷的电量 Q 成正比,跟这一点到点电荷的距离 r 的平方成反比。场强的方向在这一点与 Q 的连线上,在点电荷+Q 产生的电场中,各点的场强方向都是以+Q 为球心,沿着球半径辐射向外的[图 8 - 6(a)]。在点电荷 -Q 产生的电场中,各点的场强方向都是以 -Q 为球心,沿着球半径指向球心的[图 8 - 6(b)]。

知道了电场中某点的电场强度 E 就可以知道任何已知电量为 q 的电荷在这一点所受的电场力 F 的大小和方向，

$$F=qE。$$

应注意，负电荷在这一点受到的电场力的方向跟这一点的场强 E 的方向是相反的。

S：根据公式 $E = \frac{F}{q}$ ，可知场强跟电场力成正比，跟放入电场中的电荷的电量成反比，这样理解对吗？

T：这是不对的。场强是电场的属性，跟放入电场的电荷无关。电场中某点场强的大小是用单位正电荷在这一点时所受电场力的大小来定义的。对点电荷产生的电场来说，电场中某点场强的大小只决定于产生电场的电荷 Q 和这一点到 Q 的距离 r ，即 $E = k \frac{Q}{r^2}$ 。把电荷 q 放在电场中这一点时，由于这一点的场强 E 有一个确定值，电荷受到的电场力 F 的大小就只与它所带电量 q 成正比。场强 E 不会因电荷 q 的不同、电荷受力大小与方向的不同而改变。

*电场的叠加

如果在某一空间有两个或两个以上的点电荷同时存在，它们各自产生的电场就互相叠加，形成合电场。在这种情况下，合电场中某点的场强就等于各个点电荷在这一点产生场强的矢量和。图 8 - 7 表示两个异种电荷 $+Q_1$ 和 $-Q_2$ 产生的电场中 A 点的场强 E_A 等于 Q_1 在 A 点产生的场强 E_1 和 Q_2 在 A 点产生的场强 E_2 的矢量和。场在空间同一位置能叠加，而两个实物却不能同时占据同一空间，这是场和实物的不同处之一。

思考

1. $E = \frac{F}{q}$ 和 $E = \frac{kQ}{r^2}$ 这两式有什么区别和联系？

2. 某同学认为“电场中某点场强的方向总是跟电荷放在这点时受到的电场力方向一致的”。这一看法正确吗？

3. 已知电场中某点场强大小为 5.8×10^3 牛/库，方向水平向右。现将一个电量为 2×10^{-6} 库的负电荷放在这一点，求该点场强的大小和方向。

练习二

1. 真空中，在长 0.2 米的丝线一端拴一带电小球，丝线另一端固定在悬点 O (图 8 - 8)。已知小球所带电量为 4×10^{-8} 库，试求悬点 O 处的场强。

2. 氢原子核所带电量为 1.60×10^{-19} 库，核外电子绕核运动的轨道半径是 0.53×10^{-10} 米，试求氢原子核在这一轨道上各点产生的场强的大小。

3. 在真空中，离点电荷 Q 5 厘米处有一 P 点。已知 P 点的场强是 3.0×10^5 牛/库，试求点电荷 Q 的电量。若在 P 点放一个电量为 2×10^{-9} 库的

电荷，它将受到多大的电场力？

4. 两个绝缘的小球带有等量同种电荷，相隔一定距离放置（图 8 - 9）。在这两个带电小球周围空间里是否存在场强为零的点？如果有，这一点的位置在哪里？如果这两个小球带上等量异种电荷，那一点的场强还等于零吗？

5. A、B 两个点电荷，电量分别为 $Q_A=2$ 微库， $Q_B=4$ 微库，相距 6 厘米。试求它们连线中点处场强的大小和方向。

电场线

带电体周围的电场虽然看不见、摸不着，然而它确实是存在着的。为了形象地了解电场的分布，可用电场线（旧称电力线）来显示。

电场线实际上并不存在，是假想的曲线，电场线上每一点的切线方向都跟电场中这一点场强的方向一致。图 8 - 10 所示的是一条电场线，这条曲线上的 A、B 两点的切线方向，就是 A、B 点的场强 E_A 和 E_B 的方向，也就是正电荷在 A、B 点时所受到的电场力的方向。

图 8—10

用电场线可以形象地表示电场中各点场强的分布。我们可以用实验方法模拟出各种不同电场中电场线的形状。把剪成 2 毫米 ~ 3 毫米长的短发丝均匀地拌在蓖麻油里，在蓖麻油里放上电极，当电极带电后在它周围就有了电场，由于受电场的作用，蓖麻油里的许多短发丝排成一条的线，这就形象地显示了电场的分布。图 8—11 表示几种典型的电场中的电场线形状。

(a) 正电荷

(b) 负电荷

(c) 等量异种电荷

(d) 等量同种电荷

图 8—11

因为电场线上每一点的切线方向都跟电场中该点的场强方向一致，所以电场线总是从正电荷出发，终止在负电荷上。电场中任何两条电场线都不相交。

匀强电场

如果电场的某区域中各点场强的大小和方向都相同，这个区域的电场叫做匀强电场。在匀强电场中，电荷各处受到的电场力的大小和方向都是相同的。匀强电场中的电场线，是一些在空间分布均匀、互相平行的直线。在模拟电场线的实验中，如果所用的电极是两块靠得很近的平行金属板，当这两块金属板带有等量异种电荷时，两板间就会出现分布均匀、且互相平行的电场线，除边缘部分外，两板间的电场可看成是匀强电场（图 8 - 12）。

密立根油滴实验

美国物理学家密立根于 1910 年利用图 8 - 13 所示的实验装置，确定了电荷的不连续性，并测定了基元电荷的数值。

图 8—13

图中雾状小油滴被喷到水平放置的两块平行金属板上面的空间。上板有一个小孔，当油滴穿过小孔进入两板间的空间后，通过显微镜可测出在两板间不加电压时，油滴下降的速率，从而算出油滴质量 m 。再用 X 射线照射两板间的空气使之电离，从而使油滴带上微小的电量 q 。在两金属板上加电压并进行调节，使油滴受到的电场力等于它所受的重力，油滴达到平衡。根据 $qE=mg$ ，就能求出油滴所带电量 q 。用上述方法对许多油滴进行测定，发现各个油滴所带电量都是某一最小电量的整数倍。密立根断定这一最小电量就是电子的电量，经过计算得出其数值为 1.1602×10^{-19} 库。

思考

如图 8—14 所示，两块水平放置的、靠得很近的平行金属板，带有等量异种电荷，板间有一匀强电场。如果有一带电微粒 D 恰能悬浮在板间保持平衡，则该微粒带何种电荷？若已知微粒所带电量为 q 、质量为 m ，试写出该匀强电场的场强表达式。

电势能

我们知道由相互作用的物体间的相对位置决定的能叫做势能。地球和物体之间存在相互作用的引力，由物体和地面间的相对位置决定的势能，叫做重力势能，当物体离地面的高度发生改变时，就有势能的变化[图 8 - 15(a)]；两个电荷间存在相互作用的力，由电荷间的相对位置决定的势能，叫做电势能，当电荷间的距离发生改变时，电荷间也有势能的变化[图 8 - 15(b)]。

8 - 15

从做功和物体重力势能改变的关系来看，物体在下落过程中，重力对物体做功，重力势能减少；物体在上升过程中，物体克服重力做功，重力势能增加。物体重力势能改变的多少总是等于重力所做功的大小。在电场中，电荷在电场力作用下移动一段距离的过程中，电势能的变化和在重力作用下物体重力势能的变化相类似，只是因为电荷有正、负，情况比较复杂。下面以匀强电场中移动正电荷为例进行分析。

设匀强电场的场强为 E ，电场中 A、B 两点间沿电场方向的距离为 d （图 8 - 16）。电量为 q 的正电荷在电场力作用下，从 A 点移到 B 点的过程中，电场力对电荷做正功 $W=Fs=qEd$ ，电荷的电势能就减少 qEd 。如果正电荷从 B 点移到 A 点，电荷克服电场力做功 qEd ，电荷的电势能就增加 qEd 。可见，电荷电势能改变的多少总是等于电场力所做的功，而同一电荷在电场中的不同位置具有的电势能大小是不同的。

电势

我们已经知道，同一物体在不同高度处的重力势能大小是不同的，但在任一高度处，重力势能 E_p 的大小跟物体的质量 m 成正比，即 $E_p \propto m$ 。与此相类似，电荷在电场中的不同点有不同的电势能，但在电场中的任一点，电势能的大小跟电荷的电量 q 成正比，即 $E_p \propto q$ 。

放在电场中某点的正电荷具有的电势能跟它的电量的比值，叫做电场中这一点的电势 (electric potential)。如果用 U 表示电场中某点的电势， E_p 表示电量为 q 的电荷在该点具有的电势能，则该点电势可用下式表示：

$$U = \frac{E_p}{q}。$$

在我国法定计量单位中，电势 U 的单位是伏特，简称伏，用符号 V 表示。电量为 1 库的电荷在某点具有的电势能是 1 焦，这一点的电势就是 1 伏。

知道了电场中某点的电势，就可知道任意电量的电荷在这一点具有的电势能，即

$$E_p = qU。$$

电势表示电场具有能的基本特性。电场中各点电势的大小只跟这一点在电场中的位置有关，而跟在这一点是否存在电荷无关。

电势是标量。电场中电势为零的点的选择可以是任意的，通常把地球的电势作为零电势。电场中任何接地点的电势都等于零。

我们已经知道，在电场中沿电场方向移动正电荷时，电场力对正电荷做正功的结果，将使正电荷的电势能逐渐减小，所以，电场中各点电势是沿着电场线方向逐点降低的。

思考

1. 电场中一条电场线上有 A、B 两点，电量为 q 的正电荷在 A 点时的电势能比它在 B 点时的电势能大，则 A、B 两点，哪点电势较高？电场线的方向由 A 指向 B，还是由 B 指向 A？

2. 已知电场中 A、B 两点的电势 $U_A > U_B$ ，负电荷放在 A、B 哪点时具有的电势能较大？

3. 电量为 40 微库的正电荷，放在电势为零的点上具有的电势能等于多大？电量为 30 微库的负电荷，放在电势为零的点上具有的电势能等于多大？

电势差

电场中某两点间的电势的差，叫做这两点间的电势差，又称电压。电势差的单位是伏特。

我们已经知道，在电场中把电量为 q 的正电荷，从 A 点移到 B 点的过程中，电场力做的功等于电荷电势能的改变。即

$$W_{AB} = E_{pA} - E_{pB} = q(U_A - U_B)，$$

把上式改写成
$$U_A - U_B = \frac{W_{AB}}{q}。$$

可见，电场中某两点间的电势差 U ，在数值上等于在该两点间移动单位电

荷电场力所做的功。即

$$U = \frac{W}{q}。$$

电场中各点电势的值可因零电势的选择不同而有所不同，电势的值是相对的。但对电场中确定的两点来说，电势差的值是不变的，不因零电势的选择不同而发生改变，在这两点间移动单位电荷，电场力所做的功是确定不变的。

[例题]

图 8—17

在平面上有两个分别带有等量正、负电荷的点电极 A 和 D，它们周围电场中的电场线分布如图 8 - 17 所示。已知 B、C 为一条电场线上的两个点，电势差 $U_{AB}=U_{BC}=U_{CD}=100$ 伏。若电极 D 是接地的，求 A、B、C、D 各点的电势。

解：因 D 接地，D 点电势 $U_D=0$ 。

根据 $U_{CD}=U_C-U_D$ ，

$$\begin{aligned} \text{C 点电势} \quad U_C &= U_{CD} + U_D \\ &= 100 \text{ 伏} + 0 \text{ 伏} = 100 \text{ 伏}； \end{aligned}$$

同理，

B 点电势 $U_B = U_{BD} + U_D = U_{BC} + U_{CD} + U_D = 100 \text{ 伏} + 100 \text{ 伏} + 0 \text{ 伏} = 200 \text{ 伏}$ 。

A 点电势 $U_A = U_{AD} + U_D = U_{AB} + U_{BC} + U_{CD} + U_D$
 $= 100 \text{ 伏} + 100 \text{ 伏} + 100 \text{ 伏} + 0 \text{ 伏} = 300 \text{ 伏}$ 。

由上例计算可知，A、B、C、D 各点电势是逐点递减的。

思考

1. 干电池两极间的电压是 1.5 伏，这一数值表示了什么？能不能知道干电池正、负极的电势数值？

2. 匀强电场中各处的电场强度的大小都相等，方向都相同，那么匀强电场中各点的电势是否也都相等呢？

3. 科学测试表明，地球表面附近空间有一个垂直于地面的电场，从地面开始，每升高 10 米，电势约增高 1000 伏。根据这些资料你能判断地球表面附近该电场的方向吗？

类比是一种科学研究方法

在科学研究中常用类比法寻找不同的事物变化中所具有的共性，同时也可了解事物变化的个性，以便更好地掌握事物变化的规律。

以下对匀强电场和重力场中的局部区域进行类比。

	匀强电场	重力场(局部)
场具有的力的性质(场强特点与场线)	各点场强相等 $E = \frac{F}{q}$ 电场线分布均匀,互相平行	各点重力加速度(重力场强度)相等 $g = \frac{F}{m}$ 场线分布均匀,互相平行
受力情况	电荷所受电场力的大小 $F=qE$ 电场力方向: 正电荷所受电场力方向与E方向相同,负电荷所受电场力方向与E方向相反	物体所受重力的大小 $F=mg$ 重力方向: 竖直向下,与g方向相同
场具有的能的性质	电场中单位正电荷具有的电势能U,沿着电场线方向逐点减小。电场中接地点的电势等于零,在零电势点的任何电荷的电势能等于零	重力场中单位质量的物体具有的重力势能gh,随着离地面高度的降低而减小。地面被选作势能为零的标准位置,任何物体在地面时的势能等于零

一个点电荷产生的辐射状的非匀强电场,可跟地球产生的引力场相类比。

练习三

- 如图 8 - 18 所示的电场中,
 - (1)A、B 两点的电势哪点高?
 - (2)把一个正电荷先后放在 A 点和 B 点,它在哪一点时具有的电势能较大?
 - (3)若已知 A、B 两点间的电势差是 500 伏, A、C 两点间的电势差是 300 伏,求 C、B 两点间的电势差。
- 如图 8 - 19 所示的两块平行金属板 A、B 间有一匀强电场,如果 A 板接地, M、N 两点哪点电势较高?电势是正值还是负值?如果将 B 板接地,结果又怎样?
- 将正电荷放在电场中某处,自静止释放,如果电荷只受电场力作用,它将向电势高的方向运动,还是向电势低的方向运动?它的电势能将怎样变化?如果换以负电荷,结果又怎样?
- 电场中 A、B 两点之间的电势差 $U_{AB}=6000$ 伏。有一电子在电场力作用下从 B 点运动到 A 点的过程中,电场力做了多少功?电子的动能增大了多少?已知电子电量 $e=1.60 \times 10^{-19}$ 库。

三、磁场

在一根南北放置的、未通电流的长直导线的正下方放置一枚磁针,

当磁针平衡时，N 极指向北方。当直导线中通以直流电流时，磁针就发生偏转，这便是著名的奥斯特实验（图 8 - 20）。

从场的观点来看，直导线中通以电流，它周围空间就存在磁场（magnetic field），处在这一磁场中的磁针便发生偏转。而当直导线未通电流时，它周围空间不存在由于电流产生的磁场，小磁针就不发生偏转。在初中时我们已经学习过磁体周围存在着磁场，由此可以得出这样的结论：

在磁体或电流周围存在着磁场。

磁感线

磁场是有方向的，磁场的方向可以用放在磁场中的小磁针来确定。规定磁针平衡时 N 极的指向就是该处磁场的方向。

英国物理学家法拉第（1791—1867）于 1852 年首先引进磁感线（旧称磁力线）概念。他把一块硬纸放在磁铁上，并均匀撒上一薄层细铁粉，轻轻拍动硬纸，铁粉就在磁铁周围呈辐射状地整齐排列起来（本章导图 1）。这样，磁场在磁体周围空间的分布就能得到形象的显示。磁感线实际上并不存在，只是为了研究磁场的方向和强弱而假想的。图 8 - 21 所示的是条形磁铁在一个平面上的磁感线的分布情况。磁体外部的磁感线都是从 N 极出来，进入磁体 S 极；在磁体内部，磁感线是从 S 极到 N 极的。磁感线是封闭的曲线。

直线电流的磁场中，磁感线的形状可用同样的实验方法模拟（本章导图 3）。实验表明，磁感线是分布在垂直于直线电流的平面上、以直线电流为圆心的一系列同心圆，越靠近直线电流，磁感线分布越密。

要注意，直线电流的磁场中，磁感线没有确定的出来和进入的地方，也就是说，没有 N 极和 S 极。为了判断磁感线的走向，可以把若干小磁针放在垂直于直线电流周围的平面上（图 8 - 22）。如果改变电流方向，放在电流周围的小磁针的指向将发生 180° 偏转，这表明直线电流的磁场方向跟电流方向有关。电流方向和它周围磁场方向间的关系可用右手螺旋定则来判定：用右手握住导线，让伸直的大拇指所指方向跟电流方向一致，那么自然弯曲的四指所指的方向就是磁感线的环绕方向（图 8 - 23）。

环形电流可看成是由若干段很短的直线电流组成的（图 8 - 24），它的磁感线分布如图 8 - 25 所示。可见，环形电流相当于一个磁体，磁感线从环形电流所在平面的一个侧面出来，另一个侧面进入。通电螺线管是由若干圈环形电流串联组成的，从磁感线的分布（图 8 - 26）可以看出，通电螺线管对外的作用效果相当于一个条形磁铁。环形电流和通电螺线管的磁场方向跟它们的电流方向的关系，可用初中学过的安培定则判定。

思考

1. 一个只能在水平面里转动的小磁针，平衡时它的 N 极指向北方。若在小磁针上方沿着东西方向放置一根直导线，导线中有如图 8 - 27 所示的电流通过时，磁针是否发生偏转？

2. 试判定图 8 - 28 的通电螺线管内部的磁场方向。

磁感强度

磁场的基本特性之一，是对放入其中的其他磁体或电流有力的作用。

利用图 8 - 29 的实验装置，可以研究电流在磁场中受力的大小。用磁性强弱不同的磁铁来做实验，发现相同大小的电流受力的大小是不同的。正如电场的强弱可用电荷受力的大小来描述的那样，磁场的强弱也可以用电流受力的大小来描述。

实验表明，垂直于磁场方向的一段通电导线，在磁场中某处受到的磁场力 F 的大小跟电流 I 、导线的长度 l 成正比。也就是说，这段导线所受的磁场力跟电流和导线长度的乘积比值 $\frac{F}{Il}$ ，反映了该处磁场的强弱。

在磁场中某处，垂直于磁场方向的通电导线，受到的磁场力 F 跟电流 I 和导线长度 l 的乘积 Il 的比值，叫做磁场中该处的磁感强度。

如果用 B 表示磁感强度，那么，

$$B = \frac{F}{Il}。$$

磁感强度 B 的单位由 F 、 I 和 l 各量的单位决定。在我国法定计量单位中，磁感强度 B 的单位是特斯拉，简称特，用符号 T 表示。

$$1\text{特} = 1 \frac{\text{牛}}{\text{安} \cdot \text{米}}。$$

磁场中某处的磁感强度 $B=1$ 特，表示垂直于磁场方向、长度为 1 米、通过 1 安培电流的导线，在磁场中该处所受的磁场力为 1 牛。

磁感强度是表示磁场强弱的物理量。地磁场的磁感强度一般很小，在地面附近的平均值约是 5×10^{-5} 特；磁疗用的磁片产生的磁场中，磁感强度约为 0.15 特 ~ 0.18 特；普通永磁体附近磁场的磁感强度约是 0.4 特 ~ 0.8 特，电动机或变压器工作时，铁心中的磁感强度可达 0.8 特 ~ 1.7 特；通过超导材料的强电流（本章导图 4）产生的磁场中，磁感强度可高达 20 特。

磁感强度 B 是矢量。磁场中某点的磁感强度的方向就是该点的磁场方向，也就是通过该点的磁感线的切线方向。物理学中作了这样的规定：在垂直于磁场方向的单位面积上，磁感线的条数跟那里的磁感强度成正比。这样，不仅从磁感线的分布可以形象地了解磁场中各处磁感强度的方向，还可以根据它的疏密程度比较磁场中各处磁感强度的大小。

在磁场的某一区域中，如果各点的磁感强度的大小和方向都相同，这部分磁场就是匀强磁场。匀强磁场中的磁感线是一些均匀分布在空间的、互相平行的直线。在蹄形磁铁两极间的局部区域中（本章导图 2）以及通电螺线管内部的磁场（图 8 - 26）都可看作是匀强磁场。

思考

图 8 - 30 是两个同名磁极间的磁感线分布图。根据这幅图片，你能估计出什么地方磁感强度最大？什么区域的磁感强度最小？在这个磁场中是否存在匀强磁场的区域？

磁场对电流的作用力

磁场对电流的作用力又叫做安培力。根据磁感强度的定义式

$$B = \frac{F}{Il}$$

可知，安培力的大小

$$F = IlB。$$

上式表示一段长度为 l 、通过电流为 I 的导线，垂直放置在磁感强度为 B 的磁场中所受到的安培力。在磁场中的确定位置，磁感强度 B 为定值，若垂直于磁场方向的通电导线的长度 l 越大、通过的电流 I 越大，则导线受到的安培力 F 也越大。

在图 8—31 的实验中，如果改变电流方向或磁场方向，通电导线的受力方向都会发生改变。

实验表明，通电导线所受安培力的方向既跟磁场方向垂直，又跟电流方向垂直。也就是说，安培力的方向总是垂直于磁感线和通电导线所在的平面。

通电导线所受安培力的方向和磁场方向、电流方向之间的关系，可用左手定则判定：伸开左手，使大拇指跟其他四个手指垂直，并且都跟手掌在一个平面内，假想将左手放入磁场，让磁感线垂直进入手心，并使四指指向电流方向，则大拇指所指的方向就是通电导线在磁场中所受安培力的方向（图 8 - 31）。

实验和理论研究表明：如果电流方向不跟磁场方向垂直，则安培力将变小；当电流方向跟磁场方向平行时，安培力等于零。

一个通电线圈放在磁场中，线圈平面与磁场平行，由于线圈框边 ab 和 cd 上的电流方向相反，两个框边受到的安培力 F 的方向也相反（图 8 - 32），因此对转动轴 OO 产生了使线圈转动的作用，这也就是电动机通电后会转动的道理。

练习四

1. 如图 8-33 所示，有一段水平悬挂着的、东西向放置的导线。由于地磁场的存在（地磁场中的磁感线大致取从南到北的走向），在导线通电（电流方向如图）和不通电的情况下，悬线对悬点 O 的作用力的大小有什么不同？

2. 图 8-34 是通电导线在磁场中的受力图，小圆圈表示导线的横截面，用“ \cdot ”和“ \otimes ”分别表示导线横截面正对读者时，导线中的电流流向读者和背离读者流去；同样，用“ \cdot ”和“ \times ”分别表示磁感线方向指向读者和背离读者。试将图中所缺画的电流或受力方向标画出来。

阅读材料 磁电式电表

在电学实验中经常使用的电流表和电压表，都是利用磁场对电流的作用制成的，所以叫做磁电式电表。这种电表的构造如图 8-35 所示。永磁铁的两个磁极的极靴制成圆弧形，其间固定放置一圆柱体形状的铁心。在铁心和磁极间的气隙内形成一个均匀的沿着圆柱体半径方向的磁

场（辐向磁场）。在这气隙间有一个可以绕轴转动的线圈，线圈中通过电流时，它的框边将受安培力作用而使线圈转动。线圈的转轴上装有一对游丝弹簧，当线圈转动时，与轴相连接的游丝发生形变产生弹力，它将阻碍线圈转动。达到平衡时，线圈就停止在某一偏转角度上。如果通过线圈的电流增大，线圈框边所受安培力增大，线圈将转过更大的角度，游丝也随着发生更大的形变，这样，游丝产生的弹力才能与安培力平衡，线圈就在更大的偏转角度上停止下来。理论研究指出，在磁电式电表中，线圈的偏转角度跟通过线圈的电流强度成正比，所以可用线圈偏转角度的大小来量度电流强度。

这类磁电式电表，气隙间的磁场方向始终与线圈中的电流方向垂直，不论线圈转到什么位置，磁感强度 B 的大小和框边的长度 l 是不变的，线圈框边上所受安培力都与电流 I 的大小成正比，所以磁电式电表的刻度盘上的刻度是均匀的。这种电表只能用来测量直流电流和直流电压。

本章学习要求

1. 知道电荷周围存在电场；知道电流周围存在磁场。
2. 知道场是物质的一种基本形态。
3. 知道点电荷。知道电量。
4. 理解真空中的库仑定律。
5. 知道基元电荷。
6. 理解电场强度。知道电场可以叠加。
7. 理解电场线。知道匀强电场的特点。
8. 知道电势能。
9. 知道电势。
10. 知道沿电场线方向电势逐点降低。
11. 知道电势差。
12. 知道直线电流的磁场分布。会用右手螺旋定则。
13. 理解磁感线。
14. 知道磁感强度。
15. 知道匀强磁场的特点。
16. 知道磁场对电流有作用力。会用左手定则。

复习题

1. 单选题

(1) 把某点电荷先后放在电场中的某些位置上，若该点电荷所受到的电场力的大小相等，则这一电场可以判断为 []

- A. 一定是匀强电场；
- B. 一定不是匀强电场；
- C. 可能是匀强电场，也可能不是匀强电场；
- D. 一定是点电荷产生的电场。

(2) 匀强电场中，有 A、B 两点（图 8-36）。设正电荷放在 A、B 两点时，受到的电场力分别是 F_A 、 F_B ，具有的电势能分别是 ϵ_A 、 ϵ_B ，则

[]

- A. $F_A = F_B$, $U_A = U_B$;
- B. $F_A > F_B$, $U_A > U_B$;
- C. $F_A = F_B$, $U_A > U_B$;
- D. $F_A > F_B$, $U_A = U_B$.

(3) 若电荷在只受电场力作用的情况下由静止开始运动, 则它一定是 []

- A. 顺着电场线方向运动;
- B. 逆着电场线方向运动;
- C. 从电势较高的点向电势较低的点运动;
- D. 向电势能减少的方向运动。

(4) 把电量为 40 微库的正电荷从电场中的 A 点移到 B 点, 电场力做功为 1.2×10^{-2} 焦。以下说法中不正确的是 []

- A. 正电荷在 A 点时的电势能比它在 B 点时的电势能大 1.2×10^{-2} 焦;
- B. A 点的电势等于 300 伏;
- C. A 点的电势比 B 点高;
- D. A、B 两点间的电势差等于 300 伏。

(5) 关于磁场对电流的作用, 以下说法中正确的是 []

- A. 放在磁场中某处的一小段通电导线不受到安培力的作用, 则该处的磁感强度一定等于零;
- B. 一小段通电导线在磁场中某处受到的安培力的方向跟该处的磁感强度方向相同;
- C. 一小段通电导线放在磁感强度为零的位置上, 它受到的安培力一定等于零;
- D. 一小段通电导线所受安培力的方向可用右手螺旋定则判定。

2. 把一个质量为 50 克、电量 $q_1 = 40$ 微库的小球用丝线悬挂起来(图 8-37), 用另一个电量 $q_2 = 0.2$ 微库的绝缘小球从正下方靠近悬挂着的小球。要使悬线中的拉力等于零(假定绳的方向不发生偏移), 两个小球之间的距离多大?

3. 如图 8-38 所示, 两个质量均为 1 克的金属小球, 用等长的丝线悬挂在同一点上, 它们带上等量同种电荷后相互推斥。当它们之间的距离等于悬线长度时, 两球恰好保持平衡。若已知悬线长度为 0.3 米, 试求每一个小球所带的电量。

4. 有一带电液滴漂浮在竖直向下的匀强电场中恰能保持平衡。已知液滴质量为 2.5×10^{-7} 千克, 匀强电场的场强为 5×10^3 牛/库, 该液滴带何种电? 液滴所带电量相当于多少个电子电量?

5. 在氢原子模型中, 原子核由一个带正电的质子组成, 核外的一个电子带负电。若把电子的绕核运动看成匀速圆周运动, 试求电子的轨道速率和运行周期。已知电子的轨道半径为 r_0 , 电子和质子的电量均为 e , 电子的质量为 m_e 。

9 . 电流和电路

Electric current and Electric circuit

- 1 . 高压输电导线与绝缘瓷瓶
- 2 . 热敏电阻温度计
- 3 . 电子计算器的印刷电路
- 4 . 高压电缆
- 5 . 太阳能电池

大规模使用电能，对人类社会的发展起了巨大的推动作用，科学技术也由此得到进一步发展和提高，利用电能更是现代社会生产和日常生活所不可缺少的。人类对电的认识，从现象到规律，进而探讨其本质，都是在理论和实践相联系的发展过程中逐步深入的。电学作为物理学的一个重要分支，是一门应用十分广泛的学科，也是发展工农业生产和高科技的重要基础。

电路一般是由电源、用电器、电键和连接电路的导线所组成。电路的主要作用是进行电能的传输与转化，而电能的转化是通过电流做功来实现的。这一章是在初中的基础上，进一步学习电流和电路的有关规律及其应用。

一、 欧姆定律

我们在初中已学习过欧姆定律，知道电流强度跟电压和电阻的关系。这个定律是德国物理学家欧姆（1789—1854）经过多年研究，克服不少困难才发现的。当时，还没有测量电流强度的仪器，欧姆制作了一台电流扭秤，用它来测量导线中的电流强度。他用许多粗细相同、长度不同的铜导线依次接入电路，仔细测量电路中的电流强度，得到了大量的实验数据，才找到电路中电流强弱变化的规律，总结出欧姆定律。欧姆定律是电流的基本定律，是直流电路计算的理论基础。欧姆定律应用广泛，利用它可研究导体中导电理论，设计输电电路、各种电器和仪表（如电流表、电压表）等。

电流

电荷的定向移动形成电流。形成电流的条件是，既要有能自由移动的电荷——自由电荷，又要存在电场。若导体两端存在电压，导体内部就存在了电场，导体中的自由电荷在电场力作用下作定向移动，导体中就得到持续电流。

历史上，人们把电流看作是正电荷的定向移动而形成的，因此习惯上规定正电荷定向移动的方向为电流的方向。实际上，导体中的电流可能是正电荷的定向移动，也可能是负电荷的定向移动，还可能是正、负电荷同时相向移动。

方向不随时间改变的电流叫做直流电。方向和强弱都不随时间而改变的电流叫做稳恒电流。通常所说的直流电是指稳恒电流。

将同一个灯泡，用导线连接在不同的电池两端，灯泡亮暗不同，这是因为通过灯丝的电流强弱不同。物理学中是用电流强度来描述电流的强弱的。通过导体任一截面的电量跟通过这些电量所用时间的比值，叫做电流强度（electric current intensity）。电流强度简称电流，符

号是 I。如果时间 t 内通过导体任一截面的电量为 q，那么，电流可用下式表示

$$I = \frac{q}{t}。$$

我国法定计量单位规定，电流的单位是安培，简称安，符号是 A。

欧姆定律

导体两端有电压，导体中就有电流。导体中电流跟导体两端所加的电压和导体的电阻的关系，可用欧姆定律来描述，即导体中的电流跟它两端的电压成正比，跟它的电阻成反比。如果用 U 表示某段导体两端的电压，I 表示导体中的电流，R 表示这段导体的电阻，欧姆定律可以写成如下的公式

$$I = \frac{U}{R}。$$

我国法定计量单位规定，电阻的单位是欧姆，简称欧，符号是 Ω 。它可以根据欧姆定律来规定，如果导体两端的电压是 1 伏，通过导体的电流是 1 安，那么导体的电阻是 1 欧。

一段导体中的电流跟导体两端电压的关系可用 (I-U) 图象表示。在直角坐标中，用纵轴表示电流 I，横轴表示电压 U，根据欧姆定律可以作出电流随电压变化的图象(图 9-1)，即 I-U 曲线，通常称之为伏安特性曲线，它是一条通过坐标轴原点的直线。根据图象可以求得导体的电阻。

实验表明，欧姆定律对金属导电、电解液导电都是适用的，但一般不适用于气体导电的情况。

[例题]

一个镍铬线制成的电阻器，测得通过它的电流 I 和相对应的电压 U 的数据如下表所示。

I(A)	0	0.52	0.68	0.88	1.42	1.56
U(A)	0	1.50	2.10	2.70	4.20	4.80

(1) 试根据表中所列数据作出表示 I-U 关系的图象，并根据这一图象判断这个电阻器的 I-U 变化关系是否符合欧姆定律？

(2) 从图象计算这个电阻器的电阻。解：(1) 作出的 I-U 图象(图 9-2) 是一条通过坐标轴原点的直线，可见，通过该电阻器的电流跟电压的关系是符合欧姆定律的。

(2) 在图线上取一点 P，过 P 点分别向纵轴和横轴作垂线，得出 P 点的电压值和电流值分别为 3 伏和 1 安，则可算出电阻器的电阻

$$R = \frac{U}{I} = \frac{3\text{伏}}{1\text{安}} = 3\text{欧}。$$

阅读材料 木材含水率测定仪

应用欧姆定律可以测定木材的含水率。因为干木材是绝缘体，当它含有一定水分时，木材的电阻就会随含水量的增大而变小，因此，在木材上加一定的电压后，测定通过的电流，根据电流的大小就能知道木材所含水分的多少。根据这个原理制造了木材含水率测定仪(图 9-3)。该仪器中用电压为 15 伏的叠层电池作电源，使用时将仪器上固定距离的四个探针插入木材 6 毫米深处，然后按下键 (或键)，仪器面板上的

指示灯便发出红光，根据发光指示灯的不同位置，就可知道木材的含水率。含水率与探针间木材的电阻大小有一定关系，如电阻为 150 千欧时，含水率为 24%；电阻为 500 千欧时，含水率为 23%。

思考

1. 根据 $R = \frac{U}{I}$ ，能不能说“电阻与电压成正比，与电流成反比”

”，为什么？

2. 一个无线电元件，测得通过它的电流 I 和相对应的电压 U 的数据如下表，试判断通过该元件的电流和电压的关系是否符合欧姆定律？

$I(A)$	0	0.5	1.0	2.0	4.0
$U(V)$	0	4.76	5.80	7.06	8.56

练习五

1. 一个灯泡的灯丝电阻是 1210 欧，要使通过灯丝的电流是 0.18 安，应该给灯泡两端加多大的电压？

2. 一个标有“2.2V, 0.28A”字样的小灯泡，把它接在电压为 1.5 伏的干电池上，通过的电流是多大？

3. 有一根电阻丝，两端的电压为 U 时，通过的电流为 I 。若两端的电压增加 0.1 伏时，通过的电流增加 0.02 安。这根电阻丝的阻值多大？

4. 一个工作电压为 220 伏的电热杯，要调换一根电热丝。现在有两根电热丝，电阻值分别为 300 欧和 500 欧，允许通过它们的最大电流都是 0.6 安，应该选择哪一根电热丝。

5. 图 9-4 中图线 A、B 分别表示两个导体中的电流跟导体两端的电压的关系，问哪一条图线表明导体有较大的电阻。为什么？

二、电阻定律 电阻率

导体具有导电的性质，又有阻碍电流的作用。导体具有的对电流的阻碍作用，叫电阻。不仅金属具有电阻，电解质溶液等其他导体也有电阻。电阻的大小是由不同导体的导电特性所决定的。

电阻定律

我们在初中已学过导体的电阻跟导体的长度、横截面积和组成导体的材料性质有关，现在我们进一步研究导体的电阻 R 跟它的长度 l 和横截面积 S 的关系。

图 9-5 是一个多用表，用多用表可直接测出导体电阻的大小。使用前先把选择开关扳到欧姆档上，选好量程后，把两根表笔直接相接，调整调零旋钮，使指针指在电阻刻度的零位[图 9-5(a)]，然后把两根表笔与待测电阻 R 两端相连接，根据指针所指示的刻度，即可读出电阻的大小[图 9-5(b)]。

先用多用表测出同种材料、粗细相同而长度不同的导体的电阻，得

出电阻 R 与长度 l 的关系，如图 9-6 所示。这表明材料和粗细一定时，导体的电阻 R 跟它的长度 l 成正比，即 $R \propto l$ 。

再用多用表测出同种材料、长度相同而粗细不同的导体的电阻，得出电阻 R 与横截面积 S 的关系，如图 9-7 所示。这表明材料和长度一定时，导体的电阻 R 跟它的横截面积 S 成反比，即 $R \propto \frac{1}{S}$ 。

大量实验结果表明：在温度不变时，导体的电阻跟它的长度成正比，跟它的横截面积成反比。这就是电阻定律。电阻定律的公式是

$$R = \rho \frac{l}{S}。$$

式中 ρ 是比例常数，它的数值是由导体的材料性质所决定的，叫做电阻率。

电阻率

不同材料组成的导体，即使长度和横截面积都相同，它们的电阻也是不相同的，这是由于不同导体的电阻率 ρ 是不相同的。电阻率 ρ 反映了各种材料导电性能的强弱。

根据公式 $R = \rho \frac{l}{S}$ ，得电阻率

$$\rho = \frac{RS}{l}。$$

式中 R 的单位是欧， l 的单位是米， S 的单位是米²，则电阻率 ρ 的单位是欧·米，符号是 $\Omega \cdot m$ 。

下表是几种金属导体在 20℃ 时的电阻率。

材料	电阻率($\Omega \cdot m$)	材料	电阻率($\Omega \cdot m$)	材料	电阻率($\Omega \cdot m$)
银	1.6×10^{-8}	铂	1.0×10^{-7}	康铜	5.0×10^{-7}
铜	1.7×10^{-8}	铁	1.0×10^{-7}	镍铬合金	1.0×10^{-6}
铝	2.9×10^{-8}	汞	9.6×10^{-7}	铁铬铝合金	1.4×10^{-6}
钨	5.3×10^{-8}	锰铜	4.4×10^{-7}	铝镍铁合金	1.6×10^{-6}

金属导体的电阻率跟温度的关系

电阻率跟温度有关。实验指出，绝大多数金属的电阻率随着温度升高而增大。例如一个“220V，25W”的白炽灯泡的灯丝电阻，在灯泡不发光时，阻值是 150 欧；在灯泡正常发光时，阻值是 1936 欧，相差很多。这是由于金属导体的电阻率在不同温度时不相同而引起的。

实验结果表明，金属导体在 0℃ 附近、温度变化不大的情况下，金属导体的电阻率 ρ 跟温度 t 的关系是：

$$\rho = \rho_0(1+at)。$$

式中 ρ_0 是金属在 0℃ 时的电阻率， ρ 是 t ℃ 时的电阻率， a 叫做电阻温度系数，单位是 1/℃。如果忽略导体的长度和横截面积随温度的变化，则电阻跟温度的关系为：

$$R=R_0(1+at)。$$

利用金属的电阻跟温度的关系，可制成电阻温度计。通常用铂做成电阻丝的温度计叫做铂温度计，它比水银温度计精确，而且测量范围可从-263 到 1000 。有些合金的电阻率几乎不受温度变化的影响，如康铜、锰铜，因此常用来制作标准电阻。在中学物理中一般不要求考虑导体电阻率跟温度的关系。

*半导体

把各种材料的电阻率由小到大排列起来，组成电阻率表如下所示：

从上表中，可以看出金属的电阻率较小，合金的电阻率较大，非金属和一些金属氧化物更大，而绝缘体的电阻率极大。锗、硅、硒、氧化铜、硼等的电阻率比绝缘体小而比金属大，我们把这类材料叫做半导体(semiconductors)。

半导体的电阻率常随周围环境条件的改变而变化，利用半导体的电阻率随温度升高而减小的这一特性，可以制成热敏电阻。如图 9-8 的实验中，使热敏电阻温度升高，电路中电流增大[图 9-8(a)]；温度降低，电流减小[图 9-8(b)]。本章导图 2 是一个用热敏电阻制成的半导体温度计，它的灵敏度、精确度都比较高。图 9-9 是一个用热敏电阻制成的体温计。热敏电阻还广泛应用于电子器件的自动调节和控制等方面，是自动化设备的一种重要元件。

半导体在光照射下，电阻率会改变，这类半导体可制成光敏电阻。如图 9-10 的实验中，用光照射光敏电阻，电路中电流将增大[图 9-10(a)]；停止照射，电流又变小[图 9-10(b)]。光敏电阻可察觉光强度的变化，因而，它同样是自动控制、遥测技术中的重要元件。例如，机器上装有用光敏电阻控制的制动装置，一束光照射在光敏电阻上，操作时，若手伸入了危险区，光就被截断，光敏电阻阻值迅速增大，通过控制电路，机器就自动停止运转，保证了操作工人的安全。在货物传送带旁安装了用光敏电阻控制的计数器，就可对货物进行自动计数。

用半导体制成的晶体二极管，具有单向导电的特性。晶体二极管有正、负两极，它的符号是 $\begin{matrix} + \\ \text{—} \\ \text{—} \end{matrix}$ 。如图 9-11 的实验中，当晶体二极管的正极接电池的正极、负极接电池的负极时，二极管的电阻很小，电路中有电流通过[图 9-11(a)]，叫做导通，小灯泡发光。当晶体二极管的正极接电池的负极、负极接电池的正极时，二极管电阻变得十分大，电路中几乎没有电流通过，叫做截止，小灯泡不发光[图 9-11(b)]。晶体二极管的单向导电性，在电子线路中有着十分广泛的应用。为了缩小电路体积，电子线路都采用印刷电路，本章导图 3 是一个电子计算器的印刷电路。现代复杂的电子设备的元件多达几百个，为了尽可能缩小体积，就产生了集成电路。课本彩图 4 是一个在显微镜下显示的集成电路，集成电路中有些部件起到二极管的作用。

超导现象

1911 年科学家发现，当温度降到接近绝对零度时某些金属材料的电阻会突然减小到零，这种现象叫做超导现象，处于这种状态的物体叫做超导体。把电阻突然变为零的温度叫做超导体的临界温度，也叫超导体

的转变温度。各种不同超导体的临界温度是不同的，但都很低。目前，世界各国科学家都在寻找临界温度更高的超导体。自 1986 年以来，对氧化物高温超导体的研究，有了突破性的进展，目前各国实验室公布的铋、锶、钙、铜、氧超导体的比较稳定的临界温度已达 125K。制备临界温度很高的超体会给超导体的广泛应用带来诱人的前景，如把超导体用于远距离输电，可以大大减少电能损耗和节省材料。因为电能输送过程中，除了发电机线圈发热损耗一部分电能外，还有相当部分的电能损耗在输电线路路上，如果采用超导材料制成发电机线圈和输电导线，发热现象将大大减少，每年可节省上万亿千瓦时的电能。利用超导现象可以制成磁悬浮列车，目前火车的最高速度不超过 300 千米/时，要再进一步提高火车运行的速度，就必须减小轮子和铁轨间的摩擦力，最好是让火车离开铁轨悬浮起来行驶，以进一步减小阻力，磁悬浮列车就解决了这个问题。1995 年 5 月，我国制成的超导磁悬浮列车已进入试验阶段，速度可达 500 千米/时以上。有关超导的理论及其应用，正在深入研究中。

[例题]

一根长 100 米的铁丝，质量为 1.56 千克，它的电阻是多大？（铁的密度是 7.8×10^3 千克/米³）

解：由公式 $R = \frac{l}{S}$ 可知，要求铁丝的电阻 R ，必须知道 ρ 、 l 、 S 。

其中 ρ 可以查表、 l 是已知的，所以应从铁丝的质量 m 、密度 D 和长度 l ，求得铁丝的横截面积 S 。

由 $m = DV = DS l$ ，
得

$$S = \frac{m}{Dl}$$

再代入电阻率公式

$$R = \frac{\rho l^2}{m}$$

由查表知道

$$\rho = 1 \times 10^{-7} \text{ 欧} \cdot \text{米}。$$

则铁丝的电阻

$$R = \frac{\rho l^2}{m} = \frac{1 \times 10^{-7} \times 7.8 \times 10^3 \times (10^2)^2}{1.56} \text{ 欧} = 5 \text{ 欧}。$$

思考

1. 把一根导线剪成相等的两段，再并在一起使用时，它的电阻将怎样变化？

2. 滑动变阻器的构造如图 9-12 所示。在使用时，滑片 P 起什么作用？一般使用时为什么不可把 C 、 D 两接线柱直接连到电路中？若滑片 P 向右滑动时能使电路中电阻变大，应怎样连接变阻器的接线柱？

练习六

1. 一根长 120 米的铜线的电阻是 0.51 欧, 这根导线的横截面积是多大?

2. 有铜线和铁线各一根, 它们的质量和横截面积都相等, 求它们的电阻之比。

3. 用图 9-13 的实验装置来测定材料的电阻率。已测得这种材料制成的导线长为 0.5 米、横截面积为 2 毫米²时, 电流表的读数是 0.4 安, 电压表的读数是 0.1 伏, 那么, 这种材料的电阻率是多大? 是什么材料?

4. 一卷长 1 千米的铜电线, 测得它的电阻等于 10 欧, 这卷电线的质量是多大? (铜的密度为 8.9×10^3 千克/米³)

5. 要绕制一个阻值是 1000 欧的电烙铁心子, 需要用多长的横截面积是 0.02 毫米²的镍铬线?

6. 某段导线的电阻是 2 欧, 如果把它均匀拉长到原来的 5 倍, 这段导线的电阻将变为多大?

三、电功电功率

电功

电路中有电流通过时, 总是存在着电能与其他形式能的转化, 例如电流通过白炽灯泡, 灯丝发热发光, 电能转化成内能和光能; 电流通过电动机, 电动机转动时, 电能转化成机械能。电能转化了多少可以用电流做了多少功来量度, 电流做的功简称电功, 电功的表示式如下

$$W=UIt。$$

上式表明一段电路上电流做的功跟这段电路两端的电压、通过的电流和通电时间成正比。

我国法定计量单位规定, 电功 W 的单位是焦耳, 简称焦, 符号是 J。

电功率

电流所做的功跟完成这些功所用的时间的比值, 叫做电功率。电功率可用下式表示

$$P = \frac{W}{t} = UI。$$

上式表明, 一段电路上的电功率跟这段电路两端的电压和通过的电流成正比。

电功率 P 的单位是瓦特, 简称瓦, 符号是 W。

额定功率 实际功率

白炽灯泡、电烙铁、电熨斗等用电器, 都标有电压和电功率的数值, 这是用电器的额定电压和额定功率。

用电器的额定功率和实际功率是有区别的。我们可通过以下的实验来研究。如图 9-14 的电路中, L 是标有“6V, 0.3A”字样的小灯泡, 它表明小灯泡的额定电压是 6 伏, 额定电流是 0.3 安。所以额定功率 $P=UI=6 \times 0.3$ 瓦=1.8 瓦。如果 L 两端的电压小于 6 伏, 可调节滑动变阻器, 使电压由小逐渐增大, 从电流表和电压表的读数, 可看出 L 两端的电压 U 和通过它的电流 I 的变化。在这过程中, U 和 I 的乘积, 即小灯泡的实际功率在逐渐增大, 但仍小于它的额定功率。当电压调到 6 伏 (即额定电压) 时, L 的实际功率达到额定功率, 小灯泡正常发光。如果继续调节滑

动变阻器，使小灯泡两端电压大于 6 伏，这时小灯泡的实际功率将大于额定功率。若小灯泡两端电压超过 6 伏较多，小灯泡的实际功率大大超过它的额定功率，则小灯泡很快就会烧坏。另外，如果加在电动机两端的电压过高或过低于它的额定电压，电动机都会烧坏。这说明只有加在用电器上的电压等于额定电压时，它的实际功率才等于额定功率，这时用电器才能正常工作。所以使用电器时，要注意电压不要高于和低于额定电压。

S：使用电器时，当用电器两端电压超过额定电压，只要设法使通过用电器的电流小于额定电流，不是仍旧可以使用吗？

T：你的想法是错误的。用电器的电阻一般可以看作是不变的，当用电器两端电压为额定电压时，通过它的电流就是额定电流；若用电器两端电压超过额定电压，通过它的电流也一定超过额定电流，用电器的实际功率就超过了额定功率，所以是不允许的。

[例题]

一个标有“220V，100W”字样的白炽灯泡，它的灯丝电阻是多大？若把它接到 110 伏的电压上，灯泡的实际功率是多大？

解(1)：灯泡的额定电压 $U_{\text{额}}=220$ 伏，额定功率 $P_{\text{额}}=100$ 瓦，灯泡正常发光时，通过灯丝的电流 $I = \frac{P_{\text{额}}}{U_{\text{额}}} = \frac{100}{220}$ 安 = 0.455 安。

灯丝的电阻

$$R = \frac{U_{\text{额}}}{I} = \frac{220}{0.455} \text{ 欧} = 484 \text{ 欧。}$$

当灯泡的两端电压为 110 伏时，通过灯丝的电流

$$I_{\text{实}} = \frac{U_{\text{实}}}{R} = \frac{110}{484} \text{ 安} = 0.227 \text{ 瓦，}$$

灯泡的实际功率

$$P_{\text{实}} = U_{\text{实}} I_{\text{实}} = 110 \times 0.227 \text{ 瓦} = 25 \text{ 瓦。}$$

解(2)：设灯丝电阻为 R ，灯泡的额定功率 $P_{\text{额}} = U_{\text{额}} I = \frac{U_{\text{额}}^2}{R}$ ，灯泡

的实际功率 $P_{\text{实}} = \frac{U_{\text{实}}^2}{R}$ ，因为灯丝电阻 R 不变，则

$$\frac{U_{\text{额}}^2}{P_{\text{额}}} = \frac{U_{\text{实}}^2}{P_{\text{实}}}$$

所以灯泡的实际功率

$$P_{\text{实}} = \frac{U_{\text{实}}^2}{U_{\text{额}}^2} P_{\text{额}} = \frac{110^2}{220^2} \times 100 \text{ 瓦} = 25 \text{ 瓦。}$$

思考

1. 白炽灯泡的灯丝断了以后，如果把灯丝再搭上，使用时会比原来的更亮，为什么？

2. 一个音响设备，使用的电压有 110 伏和 220 伏两档，以便根据供

电电压调整使用。一个学生使用时，没有仔细观察，就把插头插入插座中，结果音响设备被烧坏，这是什么缘故？

练习七

1. 一盏电灯接到电压是 220 伏的电路中，通过电灯的电流为 0.27 安，在 10 分钟内电流做了多少功？

2. 日常使用的电功单位是千瓦时，俗称“度”。1“度”等于多少焦？一只功率为 200 瓦的电冰箱，每天累计工作 6 小时，1 个月耗电多少？

3. 一个标有“220V，60W”字样的灯泡，当电压降低为 200 伏时，灯泡消耗的功率是多大？当灯泡两端电压升高到 230 伏时，流过灯泡的电流是多大？

4. 一个标有“1k Ω ，10W”字样的电阻，当这个电阻的两端电压为 40 伏时，能否使用？这时电阻消耗的功率是多大？

四、焦耳定律

电流通过导体，导体会发热的现象，叫做电流的热效应。电炉工作时在相同时间内，通过电炉的电流越大，放出的热量越多；通电时间越长，放出热量越多；但是连接电炉的导线并不发烫，这些现象说明了电流通过导体放出的热量 Q 跟电流 I 、通电时间 t 和导体的电阻 R 都有关。它们之间究竟存在怎样的关系呢？下面通过实验来研究。

如图 9-15 所示的电路中，把两段阻值不同的电阻丝串联后放在一个装满酒精的烧瓶里，瓶中插一根细长的玻璃管，电流通过电阻丝产生热量，使酒精因热膨胀在玻璃管内上升，根据酒精在玻璃管内上升的情况，就可以比较在不同的情况下电阻丝放出热量的多少。在实验中分别控制电阻 R 、时间 t 不变，可以看到电阻丝放出的热量 Q 随着电流 I 的增大而增大；控制电流 I 、时间 t 不变，可以看到电阻丝放出的热量 Q 随着电阻 R 的增大而增大；以及控制电流 I 、电阻 R 不变，可以看到电阻丝放出的热量 Q 随着时间 t 的增大而增大。电流通过导体产生的热量 Q 与电流 I 、电阻 R 和通电时间 t 的定量关系，是英国物理学家焦耳从实验研究得出的：电流通过导体所产生的热量跟电流的平方、导体的电阻和通电时间成正比。这就是焦耳定律。焦耳定律的公式是

$$Q=I^2Rt。$$

式中电流 I 的单位是安，电阻 R 的单位是欧，时间 t 的单位是秒，热量 Q 的单位是焦。

各类电热器，如电热水器、电烙铁、电熨斗、恒温箱，都是根据焦耳定律的原理设计的，电热器的发热部分都是采用电阻率很大、熔点很高的电阻丝制成的。

为了安全，电路中一般都装有熔丝，熔丝是用铅锡合金制成的，熔点很低。当电路中通过的电流超过允许值时，所产生的热量足以使它升温熔化，从而自动切断电路。

每种不同截面的熔丝都有一定的使它熔断的电流值，熔丝的截面积越大，熔断电流就越大。应根据需要选用熔丝，千万不可用粗铜丝来代

替，因为电流过大时，它不会切断电路，但导线可能因电流过大而发热，使绝缘层燃烧引起火灾。

[例题]

一台标有“220V，1000W”字样的电热水器，在额定电压下使用，每分钟放出热量多少？若把这台热水器接到110伏电路上，每分钟放出热量又是多少？解：热水器的发热部分是电阻，它的电功率 $P=UI=I^2R$ 。所以每分钟放出热量

$$Q=I^2Rt=Pt=1000 \times 60 \text{ 焦} = 6 \times 10^4 \text{ 焦}。$$

当电压变为110伏时，热水器的功率就不是1000瓦，要先求出热水器的电阻，再计算它放出的热量。

根据热水器的额定电压和额定功率可求出电阻，即

$$P = UI = U \times \frac{U}{R} = \frac{U^2}{R}，$$

$$R = \frac{U^2}{P} = \frac{220^2}{1000} \text{ 欧} = 48.4 \text{ 欧}。$$

每分钟放出的热量

$$Q' = I'^2 R t = \left(\frac{U'}{R}\right)^2 \times R \times t = \frac{U'^2}{R} t = \frac{110^2}{48.4} \times 60 \text{ 焦} = 1.5 \times 10^4 \text{ 焦}。$$

电功和电热

我们已经知道电路中有电流通过时，存在着能量转化的过程。如果电路是只有电阻的纯电阻电路，电能都转化为内能，这时电功跟电流所产生的热量（简称电热）相等，即 $W=Q$ 。

如果电路中有电动机或电解槽等用电器，那么，在这类非纯电阻电路中，电能就不都转化为内能，而有部分电能转化为机械能或化学能。这时，电功 $W=UIt$ ，电热 $Q=I^2Rt$ ，电功 W 大于电热 Q ，它们的差就是转化的机械能或化学能的量值。因为这类电路中，加在电路两端的电压 U 大于 IR ，因而电功就只能用 UIt 来计算。

思考

按照供电局的规定，安装大功率的空调器，要调换原有的电线，这是为什么？

练习八

1. 如果某发电厂的输出电压是3300伏，输送的电功率为3300千瓦，输电导线的电阻是2欧。每秒钟导线上放出多少热量？

2. 有阻值分别为 R_1 和 R_2 的两个电阻，将它们分别接到同一电压上，求相等时间内它们放出的热量之比。若让它们通过相等的电流，求相等时间内它们放出的热量之比。

3. 把一台电热水器接在电压是220伏的电路上，半小时内放出的热量为 1.584×10^6 焦。求这台热水器的电阻。

五、串联电路

节日夜晚，在商店、宾馆门口，可以看到成串的小灯泡，如同闪闪发光的帷幕，这许多小灯泡是串联后接在电源上的。串联是电路连接的基本方式之一，家用电器的开关和电器是串联的，测量电流的电流表也是串联在电路里的。

串联电路的基本特点和分压作用

把电阻 R_1 、 R_2 、 R_3 ...依次连接起来，就组成串联电路。串联电路的基本特点是：

(1) 电路中各处的电流相等，即 $I=I_1=I_2=\dots$ ；

(2) 总电压等于各部分电压之和，即 $U=U_1+U_2+\dots$ ；

(3) 总电阻等于各个电阻之和，即 $R=R_1+R_2+\dots$ 。导体的串联，相当于增加了导体的长度，总电阻大于任一个分电阻。

因为串联电路各处的电流相等，由 $I = \frac{U_1}{R_1} = \frac{U_2}{R_2} = \dots$ 可知，串联电

路中各个电阻两端的电压跟电阻的大小成正比，这就是说，串联电路的总电压不仅等于各部分电压之和，而且各部分的电压是根据各电阻大小按比例分配的，阻值越大的电阻，它两端分配的电压也越大。因此，串联电路具有分压作用。只要任何一部分电阻发生改变，整个串联电路中各部分的电压分配也会发生相应的变化。

在电路电压大于用电器额定电压的情况下，往往可以选用一个适当阻值的电阻跟用电器串联，由于这个电阻分担了一部分电压，电路中的电压重新分配，用电器就能在额定电压下正常工作。

[例题 1]

如图 9-16 所示，电阻 $R_1=3$ 欧， $R_2=9$ 欧， $R_3=8$ 欧，把它们串联后接到电压 $U=20$ 伏的电路。经过一定时间，电阻 R_2 由于内部局部短路，阻值降为 5 欧，则三个电阻上通过的电流改变了多少？每个电阻两端的电压改变了多少？

解：设开始时，通过三个电阻的电流为 I ，电阻 R_1 、 R_2 、 R_3 的电压分别为 U_1 、 U_2 、 U_3 。后来通过这三个电阻的电流为 I' ，

电阻 R_1 、 R_2 、 R_3 的电压分别为 U_1' 、 U_2' 、 U_3' 。

根据串联电路的特点，得

$$I = \frac{U}{R_1 + R_2 + R_3} = \frac{20}{3 + 9 + 8} \text{ 安} = 1 \text{ 安。}$$

$$U_1 = IR_1 = 1 \times 3 \text{ 伏} = 3 \text{ 伏；}$$

$$U_2 = IR_2 = 1 \times 9 \text{ 伏} = 9 \text{ 伏；}$$

$$U_3 = IR_3 = 1 \times 8 \text{ 伏} = 8 \text{ 伏。}$$

由于电路的电压 U 不变， R_2 的阻值改变后，通过三个电阻的电流将发生变化，由串联电路的分压作用可知，每个电阻的电压也会发生相应的变化。

$$I' = \frac{U}{R_1 + R_2' + R_3} = \frac{20}{3 + 5 + 8} \text{ 安} = 1.25 \text{ 安。}$$

$$U'_1 = I \times R_1 = 1.25 \times 3 \text{伏} = 3.75 \text{伏};$$

$$U'_2 = I \times R'_2 = 1.25 \times 5 \text{伏} = 6.25 \text{伏};$$

$$U'_3 = I \times R_3 = 1.25 \times 8 \text{伏} = 10 \text{伏}。$$

电流改变了

$$I = I' - I = (1.25 - 1 \text{安}) = 0.25 \text{安}。$$

每个电阻两端的电压改变了

$$U_1 = U'_1 - U_1 = (3.75 - 3) \text{伏} = 0.75 \text{伏};$$

$$U_2 = U'_2 - U_2 = (6.25 - 9) \text{伏} = -2.75 \text{伏};$$

$$U_3 = U'_3 - U_3 = (10 - 8) \text{伏} = 2 \text{伏}。$$

[例题 2]

如图 9-17 所示的电路中，滑动变阻器 R 跟固定电阻 R_0 串联， $R_0=50$ 欧，假如要求通过 R_0 的电流在 50 毫安 ~ 500 毫安的范围内变化，那么，所加的电压 U 应多大？滑动变阻器的总阻值多大？

解(1)：通过固定电阻 R 的最大电流为 500 毫安，这时滑动变阻器 R 的阻值应为零，电压 U 的大小是

$$U = I_{\max} \times R_0 = 500 \times 10^{-3} \times 50 \text{伏} = 2.5 \text{伏}。$$

通过固定电阻 R_0 的最小电流为 50 毫安，这时滑动变阻器的阻值应为最大（即总阻值）。因

$$I_{\min} = \frac{U}{R_0 + R}，$$

$$\text{则 } R = \frac{U}{I_{\min}} - R_0 = \left(\frac{25}{50 \times 10^{-3}} - 50 \right) \text{欧} = 450 \text{欧}。$$

电压 U 应选 25 伏。滑动变阻器的总阻值为 450 欧。

解(2)：电压 U 的大小跟解(1)相同为 25 伏。

根据串联电路的分压作用， $U_R = U_{R_0} = R = R_0$ ，这时通过 R 和 R_0 的电流

$$I_{\min} = 50 \text{毫安}，$$

$$U_{R_0} = I_{\min} \times R_0 = 50 \times 10^{-3} \times 50 \text{伏} = 2.5 \text{伏}，$$

$$U_R = U - U_{R_0} = (25 - 2.5) \text{伏} = 22.5 \text{伏}。$$

由上面比例式可得

$$R = \frac{U_R}{U_{R_0}} \times R_0 = \frac{22.5}{2.5} \times 50 \text{欧} = 450 \text{欧}。$$

串联电路的功率分配

串联电路中，各个电阻的功率可用公式 $P=I^2R$ 来计算，因通过各个电阻的电流是相等的，所以串联电路中各个电阻消耗的功率跟它的阻值成正比。

我们还可以从实验来观察，把标有“220V，40W”字样和标有“220V，100W”字样的灯泡 L_1 和 L_2 串联后接到电压为 220 伏的电路中（图 9-18）。可以看到 L_2 的亮度反而比 L_1 的亮度要暗，这是因为 L_2 的电阻比 L_1 的电阻小，根据串联电路的分压作用， L_2 两端的电压比 L_1 两端的电压小，通过 L_2 和 L_1 的电流相等，由 $P=UI$ 可知， L_2 的实际功率比 L_1 的实际功率小。

这表明了在串联电路中，阻值小的电阻消耗的功率小，阻值大的电阻消耗的功率大。

[例题]

如图 9-18 所示的电路中，一个标有“220V，40W”字样的灯泡 L_1 和另一个标有“220V，100W”字样的灯泡 L_2 串联后，接到电压为 220 伏的电路中，求 L_1 和 L_2 的两端电压之比和 L_1 、 L_2 的实际功率之比。

解：设灯泡 L_1 的电阻为 R_1 ，灯泡 L_2 的电阻为 R_2 。由电功率公式

$$P = UI = \frac{U^2}{R},$$

可得 $R = \frac{U^2}{P}$ 。

根据灯泡上所标字样，可知它们的电阻

$$R_1 = \frac{U^2}{P_1} = \frac{220^2}{40} \text{ 欧} = 1210 \text{ 欧},$$

$$R_2 = \frac{U^2}{P_2} = \frac{220^2}{100} \text{ 欧} = 484 \text{ 欧}。$$

设 L_1 、 L_2 串联后的电压为 U_1 、 U_2 ，根据分压作用，得 $U_1 : U_2 = R_1 : R_2 = 1210 : 484 = 10 : 4$ 。

设 L_1 、 L_2 串联后的实际功率为 P_1 、 P_2 ，根据串联电路功率跟电阻成正比，得 $P_1 : P_2 = R_1 : R_2 = 10 : 4$ 。

思考

1. 如图 9-19 所示的电路中，为什么当变阻器接入电路的电阻增大时，原来正常发光的灯泡会变暗？

2. 一个标有“110V，20W”字样的用电器和另一个标有“110V，40W”字样的用电器，串联后接到电压为 220V 的电路中，这两个用电器是否都能正常工作？为什么？

练习九

1. 三个电阻 R_1 、 R_2 、 R_3 串联后，接到电压为 U 的电路中。已知 $R_1 : R_2 : R_3 = 3 : 2 : 1$ ，求通过三个电阻的电流之比（即 $I_1 : I_2 : I_3 = ?$ ）和每个电阻两端的电压之比（即 $U_1 : U_2 : U_3 = ?$ ）。

2. 三个电阻 $R_1 = 3$ 欧， $R_2 = 5$ 欧， $R_3 = 4$ 欧，将它们串联后接入电路中。已知电阻 R_2 两端的电压是 10 伏，求电阻 R_1 、 R_3 两端的电压。

3. 如图 9-20 所示，电阻 $R_1 = 25$ 欧与 R_2 串联后接到电路上，把电压表接到 A、C 两端，测得读数为 6 伏；把电压表改接到 B、C 两端，测得读数为 2 伏，求电阻 R_2 的阻值。

4. 欲把一个标有“110V，20W”字样的用电器接入电压为 220 伏的电路中，为了使用电器能正常工作，应接入多大的电阻？电路又该怎样

连接？

5. 有两根材料相同的金属丝，第一根的长度是第二根的 2 倍，第一根的横截面积也是第二根的 2 倍，把它们串联后接在电路中，求它们放出的热量之比。

6. 图 9-21 的电路中，已知 $R_2=R_4$ ，电压 $U_{AD}=150$ 伏， $U_{CE}=70$ 伏，求 U_{AB} 。

六、并联电路

在生产和生活中使用的许多用电器都是并联的。并联也是电路连接的基本方式之一，家用电器，如电灯、电冰箱、电视机都是并联在电路中的，这样才能分别使用它们，测量电压的电压表也是并联在待测电路两端的。

并联电路的基本特点和分流作用

把电阻 R_1 、 R_2 、 R_3 ... 的一端都连接在一点，另一端都连接在另一点，就组成了并联电路。并联电路的基本特点是：

(1) 电路的总电流等于各支路的电流之和，即 $I=I_1+I_2+\dots$ ；

(2) 并联各支路两端的电压相等，即 $U=U_1=U_2=\dots$ ；

(3) 并联电路总电阻的倒数等于各个支路电阻的倒数之和，即

$$\frac{1}{R} = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} + \dots$$

导体并联相当于导体的横截面积增大，所以总电阻比并联的任一导体的电阻都小。

因为并联支路两端电压相等，由 $U=I_1R_1=I_2R_2=\dots$ 可知，并联电路中各支路的电流跟支路的电阻成反比，这就是说，并联电路中的总电流不仅等于各支路的电流之和，而且各支路中的电流是根据各支路电阻的大小按反比例分配的，阻值越大的支路中，电流越小，因此，并联电路具有分流作用。只要任何支路上的电阻值发生改变，各支路中的电流分配也会发生相应的变化。

家用电器（如电冰箱、洗衣机）的金属外壳都要用导线接地，且接地要良好。这样，万一用电器因绝缘失效而使外壳带电，操作人员接触外壳时，由于人体与接地导线是并联的，而导线电阻远远小于人体电阻，用电器漏电电流几乎全部从接地导线中通过，由此保障了操作人员的安全。

[例题 1]

如图 9-22 所示，一阻值为 20 欧的电阻 R_0 与滑动变阻器 R 并联后，接到电压 $U=30$ 伏的电路两端，干路电流 $I=2.5$ 安，求滑动变阻器 R 的阻值。

解(1)：通过电阻 R_0 的电流为

$$I_{R_0} = \frac{U}{R_0} = \frac{30}{20} \text{安} = 1.5 \text{安}。$$

通过滑动变阻器的电流为

$$I_R = I - I_{R_0} = (2.5 - 1.5) \text{ 安} = 1 \text{ 安},$$

$$\text{滑动变阻器的阻值} \quad R = \frac{U}{I_R} \text{ 欧} = \frac{30}{1} \text{ 欧} = 30 \text{ 欧}。$$

解(2)：根据并联电路的分流作用

$$I_{R_0} \quad I_R = R \quad R_0,$$

$$R = \frac{I_{R_0}}{I_R} \times R_0 = \frac{1.5}{1} \times 20 \text{ 欧} = 30 \text{ 欧}。$$

[例题 2]

如图 9-23 所示，甲、乙两电阻箱并联后接到电路中。开始时，甲电阻箱的电阻 $R_1=20$ 欧，乙电阻箱的电阻 $R_2=30$ 欧。现将甲电阻箱的电阻改为 $R'_1=24$ 欧，且要求通过甲、乙电阻箱的电流大小的比例保持不变，则乙电阻箱的电阻变为多大？

解：设开始时通过甲、乙电阻箱的电流分别为 I_1 、 I_2 ，则

$$I_1 R_1 = I_2 R_2,$$

$$\frac{I_1}{I_2} = \frac{R_2}{R_1} = \frac{30}{20} = \frac{3}{2}。$$

设甲电阻箱的电阻变为 R'_1 时，乙电阻箱的电阻

为 R'_2 ，通过的电流分别为 I'_1 、 I'_2 ，而电流比例不变，则

$$I'_1 R'_1 = I'_2 R'_2,$$

$$R'_2 = \frac{I'_1}{I'_2} R'_1 = \frac{3}{2} \times 24 \text{ 欧} = 36 \text{ 欧}。$$

并联电路的功率分配

并联电路中，因为电阻两端的电压都相同，每个电阻的功率可用公式 $P = \frac{U^2}{R}$ 来计算，所以并联电路中各个电阻消耗的功率跟它的阻值成反比。

一个标有“110V，40W”字样的灯泡 L_1 和另一个标有“220V，100W”字样的灯泡 L_2 ，它们的电阻分别是

$$R_1 = \frac{U_1^2}{P_1} \text{ 欧} = \frac{110^2}{40} \text{ 欧} = 302.5 \text{ 欧},$$

$$R_2 = \frac{U_2^2}{P_2} = \frac{220^2}{100} \text{ 欧} = 484 \text{ 欧}。$$

把这两个灯泡并联起来接入某一低压电路中，根据并联电路的分流作用可知，通过灯泡 L_1 的电流比通过灯泡 L_2 的电流大，由公式 $P=UI$ 知道，灯泡 L_1 的实际功率比灯泡 L_2 的实际功率大。这表明了在并联电路中，阻值大的电阻消耗的功率小，阻值小的电阻消耗的功率大。

[例题]

一用电器的电阻 $R_0=300$ 欧，正常工作时通过的电流 $I_0=1$ 安，把它接到电路中（图 9-24）。当单刀双掷开关 K 与电阻 R_1 相接时，电路中的电流 $I=2.5$ 安；当 K 与电阻 R_2 相接时，电路中的电流 $I'=5$ 安。 K 与 R_1 或 R_2 相接时，用电器都能正常工作。求 R_1 和 R_2 各自的阻值和消耗的功率。

解：当 K 与 R_1 相接时，通过 R_1 的电流

$$I_1 = I - I_0 = (2.5 - 1) \text{安} = 1.5 \text{安}。$$

根据并联电路的分流作用

$$I_0 \quad I_1 = R_1 \quad R_0 ,$$
$$R_1 = \frac{I_0 R_0}{I_1} = \frac{1 \times 300}{1.5} \text{欧} = 200 \text{欧}。$$

R_1 消耗的功率

$$P_1 = I_1^2 R_1 = 1.5^2 \times 200 \text{瓦} = 450 \text{瓦}。$$

当 K 与 R_2 相接时，通过 R_2 的电流

$$I_2 = I - I_0 = 4 \text{安}，$$
$$I_0 \quad I_2 = R_2 \quad R_0 ,$$
$$R_2 = \frac{I_0 R_0}{I_2} = \frac{1 \times 300}{4} \text{欧} = 75 \text{欧}。$$

R_2 消耗的功率

$$P_2 = I_2^2 R_2 = 4^2 \times 75 \text{瓦} = 1200 \text{瓦}。$$

S：我认为并联电路中，并联电阻支路的数目增多或并联电阻的一个电阻的阻值增大，它们的效果是一样的，都是使并联电路的总电阻变小。这样考虑对吗？

T：不对。这两种情况是不一样的。并联电阻支路的数目增多，相当于导体的横截面积增大，总电阻是减小的。并联电阻中一个电阻的阻值变大，相当于这个电阻的横截面积变小，并联部分总的横截面积也随着变小，总电阻要增大而不是减小。这两种情况，你还可以用并联电阻的关系式去验证。

思考

1. 如图 9-25 所示，教室里有 6 盏日光灯，墙上有 3 个电灯开关，每个开关接通时，有 2 盏日光灯发光。有的同学认为，这 6 盏日光灯的接法是，2 盏日光灯（横向一排）串联，然后 3 组并联接到电源上。你认为是这样连接的吗？为什么？

2. 有两个电阻 R_1 和 R_2 ，试证明： R_1 和 R_2 并联后的总电阻比 R_1 、 R_2 都小。

3. 如图 9-26 所示，电阻 R_1 和 R_2 并联后，接入电路中，已知 R_1 的阻值。给你一个电流表，如何求 R_2 的阻值和电压 U 。

练习十

1. 三个电阻 R_1 、 R_2 、 R_3 并联后接入电路中，已知 $R_1 \quad R_2 \quad R_3 = 3 \quad 2 \quad 1$ ，求通过各个电阻的电流之比和各个电阻消耗的功率之比（即 $I_1 \quad I_2 \quad I_3 = ?$ ， $P_1 \quad P_2 \quad P_3 = ?$ ）。

2. 有阻值为 200 欧、300 欧和 600 欧的三个电阻，求它们并联后的

总电阻。

3. 如图 9-27 所示的并联电路中, R_1 、 R_2 为已知电阻。若已知干路电流为 I , 求通过 R_1 、 R_2 的电流。

4. 电阻 $R_1=20$ 欧、 $R_2=30$ 欧和 R_3 并联后 (图 9-28), 接到电压 $U=12$ 伏的电路两端, 干路电流 $I=1.8$ 安, 求电阻 R_3 的阻值。

5. 两个用电器的电阻分别为 1210 欧和 484 欧, 把它们并联后接到电压为 220 伏的电路中, 求通过每个用电器的电流及其消耗的功率。

6. 在图 9-29 的电路中, 电压 $U=6$ 伏。当电键 K 断开时, 电流表的读数是 1.5 安; K 闭合时, 电流表的读数是 2 安。求 A 灯和 B 灯各自的电阻和总电阻。

7. 将长为 l 的电阻丝放入水中, 通电 10 分钟, 水开始沸腾。把电阻丝剪成 $l/2$ 长的两根, 并联起来再放入温度、质量都和第一次相同的水中, 电源电压也和第一次相同, 那么要经多长时间水才沸腾?

七、电路计算

在一般电路中, 往往同时用到串联和并联两种连接方法。家庭电路中的电灯、电扇、电冰箱、电视机、洗衣机等用电器都是并联后接在干路上的, 但在各支路中, 例如日光灯和镇流器串联着, 电扇跟调速器串联着, 有的用电器还串联着指示灯。对于这种既有串联又有并联的电路, 我们也可以利用串联电路和并联电路的特点来进行计算。

[例题 1]

在图 9-30 的电路中, $R_1=110$ 欧, $R_2=100$ 欧, $R_3=900$ 欧, AB 间电压 $U=12$ 伏, 求通过每一个电阻的电流和电压表的示数。

解: 先求得总电阻, 再算出干路的电流和电阻 R_1 的电压, 就可算出通过每一个电阻的电流和电阻 R_2 、 R_3 并联电路两端的电压。

并联部分电路的电阻

$$R_{\text{并}} = \frac{R_2 R_3}{R_2 + R_3} = \frac{100 \times 900}{100 + 900} \text{ 欧} = 90 \text{ 欧},$$

电路的总电阻 $R=R_{\text{并}}+R_1=(90+110) \text{ 欧}=200 \text{ 欧}$ 。

干路电流

$$I = \frac{U}{R} = \frac{12}{200} \text{ 安} = 0.06 \text{ 安},$$

R_1 两端的电压 $U_1=IR_1=0.06 \times 110 \text{ 伏}=6.6 \text{ 伏}$,

电压表的示数 $U_{\text{并}}=U-U_1=(12-6.6) \text{ 伏}=5.4 \text{ 伏}$ 。

通过 R_3 的电流

$$I_3 = \frac{U_{\text{并}}}{R_3} = \frac{5.4}{900} \text{ 安} = 0.006 \text{ 安}。$$

通过 R_2 的电流

$$I_2=I-I_3=(0.06-0.006) \text{ 安}=0.054 \text{ 安}。$$

通过 R_3 、 R_2 的电流, 也可根据并联电路的分流作用来计算:

$$I_3 \quad I_2 = R_2 \quad R_3, \text{ 即 } I_3 \quad (I - I_3) = R_2 \quad R_3,$$

$$I_3 = \frac{IR_2}{R_2 + R_3} = \frac{0.06 \times 100}{100 + 900} \text{ 安} = 0.006 \text{ 安},$$

$$I_2 = I - I_3 = 0.054 \text{ 安}.$$

$$I_2 = I - I_3 = 0.054 \text{ 安}.$$

[例题 2]

图 9-31 的电路中，干路导线的电阻 $R=2$ 欧，电灯 C 的电阻 $R_C=400$ 欧，电炉 D 的电阻 $R_D=40$ 欧，AB 间电压 $U=220$ 伏保持不变。求：(1) 电键 K_1 闭合、 K_2 断开时，电灯 C 的功率；(2) 再闭合电键 K_2 ，电灯 C 和电炉 D 的功率。

解：(1) 电键 K_1 闭合、 K_2 断开时，电灯 C 与 R 串联。应先求得总电阻，然后算出干路电流、电灯两端电压和电灯的功率。

$$R_{\text{总}} = R_C + R = (400 + 2) \text{ 欧} = 402 \text{ 欧}.$$

干路电流

$$I = \frac{U}{R_{\text{总}}} = \frac{220}{402} \text{ 安},$$

电灯两端电压

$$U_{\text{灯}} = IR_C = \frac{220}{402} \times 400 \text{ 伏} = 218.9 \text{ 伏},$$

电灯 C 的功率

$$P_C = \frac{U_{\text{灯}}^2}{R_C} = \frac{(218.9)^2}{400} \text{ 瓦} = 119.8 \text{ 瓦}.$$

(2) 再闭合电键 K_2 ，这样，电炉 D 和电灯 C 并联，再与 R 串联，总电阻改变了，因而灯泡两端的电压和功率也都要改变。

并联电路电阻

$$R_{\text{并}} = \frac{R_C R_D}{R_C + R_D} = \frac{400 \times 40}{400 + 40} \text{ 欧} = \frac{400}{11} \text{ 欧},$$

总电阻

$$R_{\text{总}} = R_{\text{并}} + R = \left(\frac{400}{11} + 2 \right) \text{ 欧} = 38.4 \text{ 欧}.$$

干路电流

$$I_{\text{总}} = \frac{U}{R_{\text{总}}} = \frac{220}{38.4} \text{ 安} = 5.73 \text{ 安},$$

并联电路两端电压

$$U_{\text{并}} = I_{\text{总}} R_{\text{并}} = 5.73 \times \frac{400}{11} \text{ 伏} = 208.4 \text{ 伏},$$

电灯 C 的功率

$$P_{C'} = \frac{(U_{\text{并}})^2}{R_C} = \frac{(208.4)^2}{400} \text{ 瓦} = 108.5 \text{ 瓦},$$

电炉 D 的功率

$$PD = \frac{U_{\text{并}}^2}{R_D} = \frac{(208.4)^2}{40} \text{瓦} = 1085 \text{瓦}。$$

可见并联支路增多，并联总电阻减小，干路中电流增大，输电导线上电压增大，用电器两端的电压就要降低，实际功率减小。

在生活中我们都知道，晚上七、八点钟电灯的亮度要比深夜时暗一些，这就是因为晚上七八点钟时，家家户户都“用电”（课本彩图 8 就是万家灯火的景象），电路里用电器并联得多，负载增大，并联部分总电阻减小，电路中电流增大，输电线上电压增大，灯的两端电压就要变小，所以灯就比深夜时暗一些。

*分压器

把滑动变阻器接成图 9-32 的电路，就成为一个分压器。在图 9-32 的电路中，当滑动变阻器的滑片 P 从 A 移到 B，负载电阻 R' 的两端电压就从 U 逐渐减小到零。所以可以根据需要调整分压器，使负载电阻上得到连续变化的电压。电位器就是把滑动变阻器接成分压器的元件，在收音机、电视机等电路中，它可以用来控制音量、调节亮度等。

图 9-33 和课本彩图 1 是几种常用的电位器。

思考

图 9-34 所示的电路中，已知电阻 R_1 的阻值较大为 1 千欧，电阻 R_2 的阻值较小为 10 欧。当 R_1 的阻值由 1 千欧变为 900 欧时， R_2 保持不变；当 R_2 的阻值由 10 欧变为 9 欧时， R_1 保持不变。这两种情况，总电阻的变化哪种明显？

练习十一

1. 把 6 盏阻值都是 480 欧的电灯并联起来，做成一个电灯变阻器，这个变阻器的最小阻值和最大阻值各是多少？如果要使这个变阻器的阻值为 120 欧，应接通几盏灯？

2. 在图 9-35 的电路中，已知 $U_{AB}=100$ 伏， $R_1=R_2=30$ 欧， $R_3=10$ 欧。求下列三种情况中 C、D 间的电压：(1) K_1 、 K_2 都断开时；(2) K_1 断开、 K_2 闭合时；(3) K_1 、 K_2 都闭合时。

3. 给你 3 个阻值都等于 R 的电阻，你有几种不同的连接法？试作图表示，并分别求出它们的总电阻。

4. 在图 9-36 的电路中，A、B 间的电压 U 恒定不变，电键 K 原来断开，闭合 K 后两个电流表的示数各有什么变化？并说明你是怎样分析的。

5. 在图 9-37 的电路中，导线 AC, CD, EF, FB 的电阻都是 0.5 欧（导线 CF、DE 的电阻忽略不计），A、B 间电压为 4 伏，灯泡 L_1 、 L_2 的电阻都是 12 欧。那么灯泡 L_1 和 L_2 两端的电压及其功率各是多少？

八、闭合电路的欧姆定律

电源电动势

我们通常说干电池的电压是 1.5 伏，蓄电池的电压是 2 伏，这是指电池没有接入电路时，电池两极间的电压。这一电压可以近似地用电压表来测量，如图 9-38 所示。测量结果表明，同类型的干电池两极间的电压都相同，同类型的蓄电池两极间的电压也都相同。干电池和蓄电池都是电源，它们都是把化学能转化为电能的装置，但两种电源两极间的电压是不同的，这是组成电源的材料、结构不同的缘故，这表明干电池和蓄电池把化学能转化为电能的本领大小是不同的。在物理学上用电动势来描述电源的这一特性。电源的电动势，在数值上等于电源没有接入电路时两极间的电压。电动势的符号是 \mathcal{E} ，单位是伏。

不同的电源具有不同的电动势，电源电动势的大小表征了电源把其他形式的能转化为电能的本领的大小。

内电压和端电压

闭合电路是由两部分组成的，一部分是电源外部的电路叫做外电路，另一部分是电源内部的电路叫做内电路。内电路也有电阻，叫做内电阻，简称内阻。如发电机的电枢电阻，电池内部的溶液电阻。当电路中有电流时，内、外电路的两端都有电压，内电路两端的电压叫做内电压，外电路两端的电压叫做端电压，简称端压，也叫外电压。

闭合电路的内电压和端电压跟电源电动势有一定的关系，下面用实验来进行研究。图 9-39 所示的是一个可以改变内阻的伏打电池，电压表 V_1 接在电池的正极 A 和负极 B 上，是测量端电压的。电压表 V_2 接在 a、b 上，a、b 是位于两极内侧的探针，是测量内电压的。调节滑动变阻器 R，可以改变外电阻的大小；调节挡板的位置，可以改变内电阻的大小。根据电压表 V_1 、 V_2 的示数，可以找到闭合电路的电阻改变时内电压和端电压变化的规律。从实验中知道，当端电压 U 增大时，内电压 $U_{内}$ 减小；当内电压 $U_{内}$ 增大时，端电压 U 减小，而内电压和端电压之和对给定的电源来说是一个定值，它跟电池没有接入电路时，直接用电压表近似地测得的电池两极间电压的大小是相等的。这表明，在闭合电路里，内电压和端电压之和等于电源的电动势。即

$$U + U_{内} = \mathcal{E}。$$

闭合电路的欧姆定律

设外电路的电阻为 R ，内电路的电阻为 r ，通过电路的电流为 I 。根据欧姆定律，端电压 $U = IR$ ，内电压 $U_{内} = Ir$ ，而 $\mathcal{E} = U + U_{内}$ ，可得出

$$\begin{aligned} \mathcal{E} &= IR + Ir, \\ I &= \frac{\mathcal{E}}{R + r}。 \end{aligned}$$

这表明，闭合电路里的电流跟电源的电动势成正比，跟整个电路的电阻成反比。这就是闭合电路的欧姆定律。

闭合电路中的能量转化

电源是把其他形式能（如化学能、机械能）转化为电能的装置，电源电动势的大小表征电源把其他形式能转化为电能的本领的大小，如电动势为 1.5 伏的干电池，表示使用这种电池时，电路中每通过 1 库电量时，电源所转化的能量为 1.5 焦，也就是在 t 时间内转化的电能为 q 或 It ，电流通过外电阻 R 和内电阻 r 时，电能转化为内能的大小为

$I^2(R+r)t$ 。根据能量守恒定律，

$$I t = I^2(R+r)t,$$

$$I = \frac{\varepsilon}{R+r}。$$

这就是闭合电路的欧姆定律。

[例题 1]

在图 9-40 的电路中，电阻 $R=3.5$ 欧，电源的电动势 $\varepsilon=1.5$ 伏，内阻 $r=0.25$ 欧，求电压表的示数。

解：根据闭合电路的欧姆定律，得

$$I = \frac{\varepsilon}{R+r} = \frac{1.5}{3.5+0.25} \text{安} = 0.4 \text{安}。$$

电压表的示数表示端电压的大小

$$U=IR=0.4 \times 3.5 \text{伏}=1.4 \text{伏}。$$

[例题 2]

在图 9-41 的电路中，电池的电动势 $\varepsilon=1.5$ 伏，内阻 $r=1$ 欧，电阻 $R_1=6$ 欧，电流表的示数为 0.3 安，求电阻 R_2 的大小。

解：根据 $I = \frac{\varepsilon}{R+r}$ ，可得

$$R = \frac{\varepsilon}{I} - r = \left(\frac{1.5}{0.3} - 1 \right) \text{欧} = 4 \text{欧}。$$

根据并联电阻关系

$$\frac{1}{R} = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2}$$
$$R_2 = \frac{R_1 R}{R_1 - R} = \frac{6 \times 4}{6 - 4} \text{欧} = 12 \text{欧}。$$

思考

描述闭合电路的物理量共有 6 个：电动势 ε 、端电压 U 、内电压 U_r 、外电阻 R 、内阻 r 和电流 I 。如果已知 U 、 I 、 r ，能否求出其他几个物理量？怎样求？是不是知道任意 3 个量，就可求出其余 3 个量？

练习十二

1. 一个电池的电动势为 3 伏，当外电阻为 5.8 欧时，电路中的电流为 0.5 安，求电池的内阻。

2. 在图 9-42 的电路中，电阻 $R_1=3$ 欧， $R_2=3.5$ 欧，电压表的示数为 9 伏，电池的内阻为 1.5 欧，求电池的电动势。

3. 一个电池的电动势为 4.5 伏，内阻为 0.5 欧，把它接在电阻 $R=4$ 欧的电路中，端电压是多大？如果在 R 上再并联一个 6 欧的电阻，端电压是多大？

4. 外电路的电阻为 R ，将它接到内阻是 1 欧的蓄电池上，这时端电压为 3 伏；如果在 R 上再串联一个 6 欧的电阻，这时端电压为 4 伏。求

电阻 R 的阻值。

端电压与外电路电阻的关系

电源的电动势是由电源本身决定的，跟电路的组成没有关系。而闭合电路中端电压却与外电路的组成有关。电源的内阻可以看成是不变的。在图 9-39 的实验中，调节滑动变阻器 R ，使外电路电阻由小逐渐增大，电压表 V_1 的示数也由小逐渐增大；外电路电阻由大逐渐减小， V_1 的示数也由大逐渐减小。这说明闭合电路中端电压 U 随着外电阻 R 的增大而增大，随着 R 的减小而减小。为什么端电压 U 与外电阻 R 有这样的关系呢？

根据闭合电路的欧姆定律 $I = \frac{\mathcal{E}}{R+r}$ 和 $\mathcal{E} = U + U_{\text{内}} = U + Ir$ ，可以得出端电压 $U = \mathcal{E} - Ir$ ，从式中可以看出，由于电源电动势 \mathcal{E} 和内阻 r 均不变，当外电阻 R 变大时，电流 I 要减小，内电压 Ir 也减小，端电压 U 就增大；当外电阻 R 变小时，电流 I 要增大， Ir 也增大，端电压 U 就会变小。

当外电路断开，即发生开路时，外电阻 R 变成无限大， I 变为零， Ir 也变为零，端电压 U 等于 \mathcal{E} ，即外电路断开时的端电压等于电源的电动势。在电源没有接入电路时，可以用电压表直接接在电源两极间，近似测量电源的电动势就是根据这个道理。

当外电路发生短路（又称捷路）时，外电阻 R 趋近于零，端电压 $U = IR$ 也趋近于零，电流 $I_{\text{短}} = \frac{\mathcal{E}}{r}$ 。可见，外电路短路时的电流取决于电源的电动势和内阻。电池的内阻一般都很小，若形成短路，则电流很大，会损坏电源，因此要避免短路。外电路连接在电动势很大的发电机上时，更要防止短路，因为短路电流很大，很容易引起火灾。

S：根据欧姆定律，当导体两端电压 U 保持不变时，通过导体的电流 I 随着电阻 R 的增大而减小，闭合电路的端电压 U 却随着外电阻 R 的增大而增大，这是为什么？

T：部分电路欧姆定律所描述的是，在电压 U 保持一定的情况下，电阻 R 增大，电流 I 要减小，电流跟电阻成反比；而闭合电路欧姆定律则描述了整个闭合电路中，当外电路电阻 R 增大时，电路中电流 I 要减小，内电压 $U_{\text{内}}$ 变小，由于电源电动势 \mathcal{E} 是不变的，端电压 U 就会增大。这里已不存在电压 U 不变这个前提了，因此，不能把部分电路欧姆定律对 U 、 I 、 R 中的两个变量 I 、 R 的讨论，跟闭合电路的欧姆定律中关于端电压 U 、电流 I 、外电阻 R 这三个变量的讨论混同起来。

[例题 1]

用一个电流表和一个电阻箱来测量电源的电动势和内阻，电路如图 9-43 所示。当电阻箱的电阻是 4.7 欧时，电流表的示数是 1.2 安；电阻箱的电阻是 2.7 欧时，电流表的示数是 2.0 安。求电源的电动势和内阻。

解：第一种情况： $R_1 = 4.7$ 欧， $I_1 = 1.2$ 安；

第二种情况： $R_2 = 2.7$ 欧， $I_2 = 2.0$ 安。

根据闭合电路的欧姆定律

$$= I_1(R_1 + r) = 1.2 \times (4.7 + r),$$

$$= I_2(R_2 + r) = 2.0 \times (2.7 + r),$$

从上面两个式中消去 ϵ ，可求得内阻 r ，

$$r = \frac{I_1 R_1 - I_2 R_2}{I_2 - I_1} = \frac{1.2 \times 4.7 - 2.0 \times 2.7}{2.0 - 1.2} \text{ 欧} = 0.3 \text{ 欧}。$$

$$\text{电动势} \quad \epsilon = I_2 (R_2 + r) = 2.0 \times (2.7 + 0.3) \text{ 伏} = 6 \text{ 伏}。$$

[例题 2]

在图 9-44 的电路中，当电键 K 断开时，电压表的示数为 1.5 伏；当电键 K 闭合时，电压表的示数为 1.2 伏，电流表的示数为 1.5 安。求电池的内阻 r 和外电阻 R 。

解：电键 K 断开时，电压表的示数就是电池的电动势；K 闭合时，电压表的示数是端电压。即 $\epsilon = 1.5$ 伏， $U = 1.2$ 伏， $I = 1.5$ 安。

根据 $\epsilon = U + Ir$ ，得内阻

$$r = \frac{\epsilon - U}{I} = \frac{1.5 - 1.2}{1.5} \text{ 欧} = 0.2 \text{ 欧}。$$

又因 $U = IR$ ，则外电阻

$$R = \frac{U}{I} = \frac{1.2}{1.5} \text{ 欧} = 0.8 \text{ 欧}。$$

[例题 3]

在图 9-45 的电路中，电源的电动势为 ϵ ，内阻为 r ，外电路 R 为定值电阻。当滑动变阻器的滑动片 P 向右移动时，三个电表的示数将怎样变化？

解：当 P 向右移动时，滑动变阻器使用部分的电阻 R 增大，外电路的电阻 $R_{\text{外}} = R + R$ 也增大。根据 $I = \frac{\epsilon}{R_{\text{外}} + r}$ ， I 将减小，即电流表 A 的示数减小。由 $U = \epsilon - Ir$ 可知， Ir 减小，端电压 U 将增大，即电压表 V_1 的示数增大。又因 R 两端的电压 $U_R = IR$ 减小，故 R 两端的电压 $U - U_R = U - U_R$ 应增大，即电压表 V_2 的示数将增大。

思考

在闭合电路中，如果端电压升高，表明外电路的电阻发生了怎样的变化？如果端电压突然下降为零，又表明外电路发生了什么情况？

练习十三

1. 关于闭合电路的性质，下面说法中正确的是 []

- A. 电源被短路时，电流为无限大；
- B. 电源被短路时，端电压最大；
- C. 外电路断路时，端电压为零；
- D. 外电路电阻增大时，端电压也增大。

2. 在图 9-46 的电路中，当电键 K 闭合后，电流表和电压表的示数分别为 I_1 和 U_1 ；当可变电阻 R 的滑动片向右移动后，电流表和电压表的示数分别变为 I_2 和 U_2 。则有 []

- A. $I_1 < I_2$ ， $U_1 < U_2$ ；

B. $I_1 < I_2, U_1 < U_2$;

C. $I_1 > I_2, U_1 > U_2$;

D. $I_1 > I_2, U_1 < U_2$ 。

3. 在图 9-47 的电路中, $R_1=6$ 欧, $R_2=4$ 欧, 电压表的示数为 3.6 伏, 电池的内阻 $r=0.4$ 欧。求: (1) 电流表的示数; (2) 电池的电动势。

4. 蓄电池的电动势是 2 伏, 内阻是 0.04 欧, 用它来点亮小灯泡。如果连接蓄电池和小灯泡的铜导线共长 4 米, 横截面积为 0.5 毫米², 端电压是 1.98 伏, 小灯泡的电阻是多大?

5. 用一个电压表和一个电阻箱来测量电源的电动势和内阻, 电路如图 9-48 所示。当电阻箱的电阻为 9.8 欧时, 电压表的示数为 1.96 伏; 当电阻箱的电阻为 4.9 欧时, 电压表的示数为 1.92 伏。求电池的电动势和内阻。

6. 在图 9-49 的电路中, 电池的电动势为 2 伏。现在知道电路中有一部分断开, 用电压表检查结果是: $U_{AE}=2$ 伏, $U_{BC}=0$, $U_{CD}=0$, $U_{DE}=2$ 伏, 则此电路中 []

A. 电阻 R 处断开;

B. 电灯 L 处断开;

C. R、L 处都断开;

D. 变阻器 R 处断开。

7. 如图 9-50 所示的电路中, 当电键 K 闭合后, 把滑动变阻器的滑动片向右移动时, 电流表和两个电压表的示数将如何变化?

九、电池组

手电筒内通常用两节干电池作为电源, 晶体管收音机内用三节或四节干电池作为电源, 工厂内搬运货物的电瓶车是用多个蓄电池作为电源, 火车上照明用的电源, 汽车发动机启动用的电源都是用多个电池组成的。每一个电池有一定大小的电动势和允许通过的最大电流, 当用电器需要比较高的电压和比较大的电流时, 往往要把几个电池连接起来组成电池组, 才能满足需要。电池组一般都是用相同的电池组成的。

串联电池组

如图 9-51 所示, 把第一个电池的负极和第二个电池的正极相连接, 再把第二个电池的负极和第三个电池的正极相连接, 像这样依次连接起来, 就组成了串联电池组。

由 n 个相同电池组成的串联电池组中, 如果每一个电池的电动势都是 E , 内阻都是 r , 则串联电池组的电动势等于各个电池电动势之和, 串联电池组的内阻等于各个电池内阻之和。即 $E_{串}=nE$, $r_{串}=nr$ 。

当用电器的额定电压比单个电池的电动势高时, 可用串联电池组作为电源。但用电器的最大工作电流必须小于每个电池允许通过的最大电流。使用串联电池组时, 应注意不要把电池接反, 这样会使电池组的电动势减小。

[例题]

4 个相同的电池, 每个电池的电动势为 1.5 伏, 内阻为 1 欧, 把它们

接成串联电池组对电阻为 6 欧的电路供电，求电池组的端电压。

解：接成串联电池组，根据 $\varepsilon_{\text{串}} = n \varepsilon = 4 \times 1.5 \text{ 伏} = 6 \text{ 伏}$ ， $r_{\text{串}} = nr = 4 \times 1 \text{ 欧} = 4 \text{ 欧}$ ，已知 $R = 6 \text{ 欧}$ 。

由闭合电路的欧姆定律可知，

$$I = \frac{\varepsilon_{\text{串}}}{R + r_{\text{串}}} = \frac{6}{6 + 4} \text{ 安} = 0.6 \text{ 安}，$$

端电压 $U = IR = 0.6 \times 6 \text{ 伏} = 3.6 \text{ 伏}$ 。

并联电池组

如图 9-52 所示，把所有的电池的正极连接在一起，成为电池组的正极，把所有电池的负极连接在一起，成为电池组的负极，就组成并联电池组。

由 n 个相同的电池组成的并联电池组中，如果每一个电池的电动势为 ε ，内阻为 r ，则并联电池组的电动势等于一个电池的电动势，它的内阻等于一个电池内阻的 n 分之一。即 $\varepsilon_{\text{并}} = \varepsilon$ ， $r_{\text{并}} = \frac{r}{n}$ 。

并联电池组能提供较大的电流，因为每个电池中通过的电流只是总电流的一部分。所以当用电器的最大工作电流大于单个电池允许通过的最大电流时，可以用并联电池组作为电源。

思考

找一找家中有没有用于电池做电源的用电器，它用几节干电池？电池是怎样连接的？

练习十四

1. 由三个相同的电池连接成串联电池组，当外电阻是 2.5 欧时，电流为 1.65 安；外电阻为 3.5 欧时，电流为 1.32 安。求每个电池的电动势和内阻。

2. 在图 9-53 的电路中， $R_1 = 12 \text{ 欧}$ ， $R_2 = 60 \text{ 欧}$ ， $R_L = 30 \text{ 欧}$ ，电源由串联电池组成，已知每节电池的电动势为 1.5 伏，内阻为 1 欧。要使通过 R_L 的电流为 0.2 安，需串联几节电池？

阅读材料 新型电池

随着工业生产的发展，科学研究、空间技术和军事上的需要，最近几十年内已制成了很多新型电池，如在第二次世界大战时使用的锌汞电池，20 世纪 40 年代供导弹使用的锌银电池，50 年代供卫星使用的硅光电池和 60 年代供载人飞船用的各种燃料电池（课本彩图 5 是各种化学电池）。

镍镉电池 镍氢电池

镍镉电池是一种新型的蓄电池，它的正极为氧化镍，负极为镉。两极用隔膜分开，以氢氧化钾溶液为电解液。放电时，电动势为 1.2 伏。由于镍电极和镉电极有良好的充、放电可逆性，镍镉电池充放寿命大于 500 次，但镉对人和环境有污染，所以镍镉电池都是密封的。随着科学技

术的进步，电子产品朝着便携化、无线化方向发展，人们期望能开发出性能更优越的小型化、单位质量的能量高、无污染的密封电池。镍氢电池就是这种新型电池，它以储氢材料作为负极替代镍镉电池中的镉电极。镍氢电池的电动势为 1.2 伏，但单位质量的能量比镍镉电池高，且无污染。预计今后镍氢电池将在很大程度上替代镍镉电池。

锌汞电池

锌汞电池的电解液是氢氧化钾溶液，负极是锌膏（锌粒与电解液相混合），正极是氧化汞。它的体积很小，最初产品是钮扣式，后来为圆筒形。这种电池的电压非常稳定，可用作不附加稳压装置而要求稳压供电的电源，它能在较高温度（70℃）下使用，通常用作电子手表、宇宙飞船中仪表和心脏起搏器的电源等。这种电池的缺点是汞有毒，容易造成环境污染，低温性能不良，价格贵。

锌银蓄电池

锌银蓄电池的正极为银片，负极为锌片，电解液是氢氧化钾溶液。放电时的电动势在 1.5 伏附近，可维持比较长的时间。在相同容量的情况

下，这种蓄电池的体积和质量只有铅蓄电池的 $\frac{1}{3} \sim \frac{1}{4}$ ，便于携带，一般用在人造卫星和导弹上。缺点是寿命短，价格贵。

太阳能电池

太阳能电池是利用某些半导体材料在光的照射下能直接将光能转化为电能的一种装置。具有这种性质的半导体材料有硅、锗、硒、硫化镉和砷化镓等，目前实际应用的只有硅光电池。1958 年在人造卫星上首次使用硅光电池，可靠地工作了 6 年之久，目前已是人造卫星、宇宙飞船和星际站的主要能源之一。由于太阳能电池价格昂贵，比用煤或石油发电的成本约高 1000 倍，因此它在地面上的大规模应用受到一定限制。目前，已将硅光电池应用于无人灯塔、浮标、山地气象站和地震观测站等，也有将硅光电池作为轻型飞机和汽车的动力。

燃料电池

燃料电池是燃料与氧发生化学反应时释放化学能，化学能又直接转化为电能的一种原电池。主要由燃料、氧化剂、电极、电解液和隔膜等组成，作为燃料的物质有氢、甲醇、煤气、丙烷等。将燃料和氧（或空气）分别通入负极和正极，在电极的催化作用下进行电化学反应，从而产生电流，燃料电池在不断补充燃料和氧气的条件下，可连续发电。燃料电池具有效率高、噪声低、污染少、适应性强等特点。由于辅助系统的结构复杂，并且要用价格昂贵的金属作催化剂，成本较高，因而燃料电池仅限于一些特殊场合，如为载人飞船、无人气象站、灯塔作电源用。

十、多用表

多用表（旧称万用表）是一种可以测量电流、电压和电阻的多用途电表，也是装制和修理各种收音机、录音机、电视机和电子仪器等必备的一种检测工具。

多用表是由一个灵敏电流计（俗称表头）加上若干其他电路元件所

组成的，

它的外形如图 9-54 所示。上半部是表头，表头上有表盘、指针和调整定位螺丝。表盘上刻有电流、电压、电阻等各种测量项目的多量程的刻度。有的刻度是均匀的，可以合用；有的刻度是不均匀的，只能专用。下半部是选择开关，它的四周刻着各种测量项目和不同量程，其中电压档还分直流（用符号“—”表示）和交流（用符号“~”表示）两种，电流档只有直流毫安档，在测量时不要接错。面板上还有欧姆档的调零旋钮（T）和测试笔插孔。

测量前，应先检查表针是否停在左端的“0”位置。如果没有停在“0”位置，要用螺丝刀轻轻地转动表盘下方的调整定位螺丝（P），使指针指零。然后将红表笔和黑表笔分别插入正（+）、负（—）测试笔插孔。

测量时，应把选择开关旋到相应的测量项目和量程上，读数时，要用跟选择开关的档位相应的刻度。

直流电压的测量如图 9-55 所示，将选择开关旋到直流电压的 5 档范围内。如果不能确定被测电压的大约数值时，应先将选择开关旋到最大量程上，根据指示的数据，再选择适宜的量程，使指针的偏转角度能适当大些。测量时，将红、黑表笔与被测电源或电阻器等接成并联，同时要使电流从红表笔流入电表，根据指针所指的刻度和量程，读出数值。

图 9-56 图 9-57

交流电压的测量方法与直流电压的测量相似，只要将选择开关旋到交流电压范围即可。

直流电流的测量 要注意多用表上直流电流档是毫安档（图 9-56），不能测量比较大的电流。测量时，将选择开关旋到直流电流档的范围内。在选择好量程后，断开被测电路，将红、黑表笔串联在被测电路中，同时要使电流从红表笔流入电表，根据指针所指的刻度和量程，读出数值。

电阻的测量如图 9-57 所示，将选择开关旋到欧姆档范围内。在选择好量程后，先要把两根表笔的金属杆相接触，并调整欧姆档的调零旋钮，使指针指在电阻刻度的零位上（注意电阻档刻度的零位在刻度表盘的右端）。然后再把两表笔分别与待测电阻的两端相接并进行测量。换用欧姆档的另一量程时，需要重新调整调零旋钮，才可进行测量。在测量时，待测电阻要与别的元件和电源断开，并应注意不要用手接触表笔的金属杆。测量后，不要把选择开关放在欧姆档，以防表头内电池漏电，应将它旋到交流电压档的最大量程处或“off”处，以保护电表。

本章学习要求

1. 掌握欧姆定律。
2. 理解电阻定律。
3. 知道电阻率。
4. 知道超导现象及其应用。
5. 理解电功的概念。
6. 掌握电功率的概念。
7. 理解焦耳定律。

8. 理解串联电路的特点和分压作用。
9. 理解串联电路中的功率分配。
10. 理解并联电路的特点和分流作用。
11. 理解并联电路中的功率分配。
12. 知道电动势的初步概念。
13. 知道闭合电路的内、外电路。
14. 知道电源存在内电阻。
15. 知道电源电动势等于内、外电路上电压之和。
16. 掌握闭合电路的欧姆定律。
17. 理解闭合电路中的能量转化。
18. 学会“用电流表、电压表测电源的电动势和内阻”实验中的有关技能。
19. 理解端电压跟外电路的电阻的关系。
20. 理解断路和短路时的端压和电流。
21. 理解串联电池组的总电动势和总内阻。
22. 会用多用表测电流、电压和电阻。

复习题

1. 单选题

- (1) 标有“6V, 12W”字样的小灯泡，正常工作 4 分钟，通过灯泡灯丝横截面的电量是 []
- A. 2 库； B. 8 库；
C. 480 库； D. 20080 库。
- (2) 一根电阻丝的电阻是 1 欧，将它截成等长的 10 段，再把这 10 段并联起来，则它的阻为 []
- A. 0.01 欧； B. 0.1 欧；
C. 1 欧； D. 10 欧。
- (3) 如图 9-58 所示，A、B、C 为 3 个规格相同的小灯泡，DE 间的电压为 U，且保持不变。电键 K 断开时和闭合时，A 灯功率之比是 []
- A. 4 : 1； B. 3 : 2；
C. 9 : 4； D. 2 : 3。

图 9-58 图 9-59

- (4) 在图 9-59 的电路中，要使通过 R_1 的电流只有总电流的 $\frac{1}{n}$ ，则 R_1 和 R_2 的关系是 []

(A) $R_1 = nR_2$ ； (B) $R_1 = \frac{R_2}{n}$ ；

C. $R_1 = (n-1)R_2$ ； D. $R_1 = n^2R_2$ 。

- (5) 把三个阻值都是 12 欧的电阻，采用串联、并联或混联都不可能获得的总阻值是 []

A. 36 欧； B. 24 欧；

C. 18 欧； D. 8 欧。

- (6) 在图 9-60 的电路中， $R_1=10$ 欧， $R_2=20$ 欧， $R_3=30$ 欧，接在电源

上时，它们的电功率分别为 P_1 、 P_2 、 P_3 ，则 []

- A. $P_1 > P_2 > P_3$; B. $P_1 = P_2 = P_3$;
C. $P_1 < P_2 < P_3$; D. $P_1 < P_2 < P_3$ 。

图 9-60 图 9-61

(7)在图 9-61 的电路中，滑动变阻器的最大阻值为 R ，电源的电动势为 ϵ ，内阻为 r 。当滑动变阻器的滑动片 P 由左向右滑动时，电压表的示数最大值和最小值分别是 []

- (A) $\frac{\epsilon}{r^2}$ ，0； (B) ϵ ，0；
(C) $\frac{\epsilon R}{R+r}$ ，0； (D) $\frac{\epsilon R}{R+r}$ ， $\frac{\epsilon r}{R+r}$ 。

(8)在室内照明电路上接用一个电炉后，发现电灯变暗了。这是因为 []

- A. 电炉从电灯上分出了一部分电流；
B. 输电线上电压增大，电灯两端的电压下降；
C. 电炉的额定电压大于电灯的额定电压；
D. 原来电灯上的电压有一部分分给了电炉。

2. 用某种材料做成的两根长度相等的电阻线，它们的阻值分别是 10 欧和 2.5 欧。如果前一根电阻线的直径为 1 毫米，求后一根电阻线的直径。

3. 在图 9-62 的电路中， $R=4$ 欧。当电键 K 与接线柱 1 相接时，电压表的读数为 1.5 伏；电键 K 与接线柱 2 相接时，电压表的读数为 1 伏。求电源的电动势和内阻。

4. 在图 9-63 的电路中， A 、 B 两点间的电压保持 120 伏，电阻 $R_0=30$ 欧。当转柄变阻器的转柄 K 从一个接触点转到相邻的另一个接触点时，通过 R_0 的电流改变 1 安，那么变阻器上 3 段电阻线的电阻 R_1 、 R_2 、 R_3 各是多少？

5. 在图 9-64 的电路中， A 、 B 间的电压 $U_{AB}=18$ 伏，电阻 $R_1=4$ 欧， $R_2=6$ 欧，通过电阻 R_2 的电流为 1 安，求 R_3 。

6. 在图 9-65 的电路中， $R_1=110$ 欧， $R_2=100$ 欧， $R_3=900$ 欧。当 AB 间电压为 12 伏时， CD 间的电压是多少？ R_2 上的电流是 R_3 上电流的几倍？通过 R_1 的电流多大？ R_1 两端的电压是多少？

7. A 、 B 两根铜导线质量之比为 2 : 1，长度之比为 2 : 3。分别求两导线串联和并联时，电流通过导线所放出的热量之比。

8. 有一金属丝长 1 米，电阻为 15 欧。现将金属丝两端连接成一闭合线圈，使电流从 P 点流入， Q 点流出，如图 9-66 所示。已知 PQ 间短弧线长 20 厘米， PQ 间的电压为 6 伏，求流过长弧线的电流 I_1 ，流过短弧线的电流 I_2 和 PQ 间的总电阻。

9. 在图 9-67 的电路中， L_1 、 L_2 、 L_3 都是“6V，3W”的小灯泡，接在电压 $U=9$ 伏的电路上，当电键 K 断开或闭合时，3 个灯泡消耗的电功率各是多少？

10. 一个电阻 R ，将它接到内阻是 2 欧的电池的两极，这时通过 R 的电流为 1 安。如果在 R 上串联一个 6 欧的电阻，再接到这个电池的两极，通过 R 的电流变为 0.5 安。求电池的电动势。

11. 在图 9-68 的电路中，电池组由 6 个蓄电池串联而成，每个电池的电动势 $\mathcal{E}=2$ 伏，内阻 $r=0.2$ 欧，电阻 $R_1=5$ 欧， $R_2=12$ 欧， $R_3=30$ 欧，并知道通过 R_2 的电流为 0.3 安。

- 求：
- (1) 干路电流；
 - (2) 电池组的端电压；
 - (3) 此时滑动变阻器使用部分的电阻；
 - (4) 内、外电路上消耗的电功率。

10 . 电磁感应

Electromagnetic induction

- 1 . 发电机的电枢线圈
- 2 . 电磁灶
- 3 . 油开关

1820 年，丹麦物理学家奥斯特发现电流产生磁场的现象以后，科学家们就进一步研究能否利用磁场来产生电流。1831 年，英国物理学家法拉第发现了磁铁和线圈有相对运动时，线圈中产生电流的现象，这种现象就是电磁感应现象。这一发现不仅进一步揭示了电现象与磁现象之间的联系，而且对科学和技术的发展具有重大意义。现代生产技术中，电能的大规模生产和输送，发电机（本章导图 1）和变压器的制造，就是在这—理论基础上实现的。

一、电磁感应

磁通量

在第 8 章中学习了磁场的知识后，我们已经知道磁感强度是表示磁场强弱的量，并可以用磁感线在磁场中分布的疏密程度来表示磁感强度的大小。怎样用磁感线分布的疏密程度定量地表示磁感强度的大小呢？为此，要建立磁通量的概念。穿过磁场中某一个面的磁感线的条数，叫做穿过这个面的磁通量。磁通量简称磁通，符号是 Φ 。我国法定计量单位规定磁通量的单位是韦伯，简称韦，符号是 Wb。并规定在磁场中某处，穿过垂直于磁场方向的单位面积上的磁感线的条数和该处的磁感强度大小相等。如果某个面的面积为 S （图 10-1），垂直穿过这个面的磁通量为 Φ ，则磁感强度

$$B = \frac{\Phi}{S}。$$

于是，磁通量 Φ 可写成

$$\Phi = BS。$$

图 10-1 图 10-2

如果某个面不跟磁场方向垂直（图 10-2），可以作出该面垂直于磁场方向上的投影面积 S_0 ，则穿过这个面的磁通量 $\Phi = BS_0$ 。当该面法线与磁场夹角 $\theta = 0^\circ$ 时， $\Phi = BS$ ； $\theta = 90^\circ$ 时，这个面与磁场方向平行，穿过这个面的磁通量 $\Phi = 0$ 。

电磁感应现象

我们在初中已经学习过，闭合电路的一部分导体做切割磁感线运动时，电路中会产生感应电流的现象，现在再来观察几个现象：将磁铁在闭合线圈中插入或拔出时，可以看到电路中会产生感应电流（图 10-3）；将通电线圈在闭合线圈中插入或拔出时，可以看到电路中会产生感应电流（图 10-4）；当通电线圈电路中的电键闭合或断开时，或电键闭合后，用滑动变阻器改变通电线圈中的电流时，可以看到闭合电路中也都会产

生感应电流(图 10-5)。

图 10-3

图 10-4

图 10-5

以上这些产生感应电流的情况虽然不同,但却有着一个共同之处,那就是穿过闭合电路的磁通量都发生了变化。我们把这种由于穿过闭合电路的磁通量变化而产生感应电流的现象叫做电磁感应现象。

产生感应电流的条件

只要穿过闭合电路的磁通量发生变化,闭合电路中就会产生感应电流,这就是产生感应电流的条件。这里要注意两点:一是穿过电路的磁通量必须发生变化,二是电路必须闭合。

问题探讨

S:在初中学习电磁感应现象时,是讲“闭合电路的一部分导体在磁场中做切割磁感线运动时,电路中就会产生感应电流。”这与现在所讲的结论不是不相同了吗?

图 10-6 图 10-7

T:初中所讲的结论与我们现在所讲的结论是一致的。如图 10-6 和图 10-7 所示,当闭合电路的一部分导体 AB 在匀强磁场中向右做切割磁感线运动时,闭合电路的面积变小了,而磁感强度不变,所以穿过闭合电路的磁通量也变小了。可见,现在所讲的由于磁通量变化产生感应电流的情况,包含了初中所讲的、导体做切割磁感线运动产生感应电流的情况。

思考

如图 10-8 所示,闭合线圈 CDEF 在匀强磁场中运动时,会产生感应电流的是哪种情况?

图 10-8

练习十五

1. 图 10-9 中,闭合线框 abcd 在匀强磁场中平行移动时,线框中有没有感应电流?为什么?

2. 图 10-10 中,一个闭合铜环从高处落下,穿过一条形磁铁,在接近和离开磁铁的过程中,穿过铜环的磁通量如何变化?

3. 一个不闭合的铝环,用一根绝缘线系住固定在 O 点(图 10-11)。在铝环静止的情况下,把磁铁的 N 极插入铝环。这时穿过铝环的磁通量有没有变化?铝环里有没有感应电流?

图 10-9 图 10-10 图 10-11

二、楞次定律

楞次定律

从上一节的实验中可以看到，如果穿过闭合电路的磁通量的变化情况不同，闭合电路中产生的感应电流的方向也是不同的，那么，感应电流的方向跟磁通量的变化有什么关系呢？下面我们再通过实验来研究。

把一个条形磁铁的 N 极移近（或插入）和离开（或拔出）线圈时，可以看到灵敏电流计指针偏转方向是不同的。同样把磁铁的 S 极移近（或插入）和离开（或拔出）线圈时，可以看到灵敏电流计指针的偏转方向也是不同的[图 10-12(a)、(b)、(c)、(d)]。分别把条形磁铁的 N 极、S 极移近（或插入）线圈时，可以看到电流计指针偏转方向也是不同的，也就是线圈中产生的感应电流方向是相反的[图 10-12(a)和(c)]。如果我们把感应电流产生的磁感线方向标出，就会发现线圈中感应电流的磁感线方向跟磁铁在线圈中的磁感线方向是相反的。

图 10-12

当磁铁的 N 极或 S 极分别离开线圈（或拔出）时，会发现线圈中感应电流的方向也是相反的[图 10-12(b)和(d)]。如果我们把感应电流产生的磁感线方向标出，就会发现线圈中感应电流的磁感线方向跟磁铁在线圈中的磁感线方向是相同的。

当磁铁移近闭合线圈时，穿过线圈的磁通量增加，这时产生的感应电流的磁感线方向与磁铁在线圈中的磁感线方向相反，以阻碍穿过线圈的磁通量的增加；当磁铁离开线圈时，穿过线圈的磁通量减少，这时产生的感应电流的磁感线方向与磁铁在线圈中的磁感线方向相同，以阻碍穿过线圈的磁通量的减少。

可见，感应电流的磁场总要阻碍引起感应电流的磁通量的变化。这是德国物理学家楞次（1804—1864）在 1834 年首先发现的，这个规律叫做楞次定律。根据楞次定律可以判定感应电流的方向。

[例题]

如图 10-13 所示，一个电磁铁向一个闭合线圈靠近时，试判定感应电流的方向。

解：先根据电磁铁中的电流方向，确定线圈两端磁极的极性，再画出在线圈中的磁感线的方向（图 10-13 中的实线）。因为电磁铁靠近线圈时，穿过闭合线圈的磁通量增加，根据楞次定律可知，感应电流的磁感线方向（图 10 - 13 中的虚线）与电磁铁的磁感线方向相反。再用右手螺旋定则就可以确定感应电流的方向。

应用楞次定律判定感应电流方向时，一般的步骤是：先确定引起感应电流的磁感线方向，再明确穿过闭合电路的磁通量是增大还是减小，然后从楞次定律得出感应电流的磁感线方向，最后用右手螺旋定则判定感应电流的方向。

右手定则

闭合电路的一部分导体在磁场中做切割磁感线运动时，电路中产生的感应电流的方向跟磁感线的方向、导体运动的方向有关，这三个方向之间的关系，可以用右手定则表示：伸开右手，使大拇指跟其余四个手指垂直，并且跟手掌都在同一个平面里，把右手放入磁场中，让磁感线垂直穿入掌心，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导体中产生的感应电流的方向（图 10 - 14）。

图 10-14 图 10-15

用右手定则跟用楞次定律判定感应电流方向的结果是一致的。图 10 - 15 是图 10 - 14 的俯视图，当导体 ab 向右运动时，穿过闭合电路的磁通量减少，根据楞次定律可知，感应电流的磁场要阻碍磁通量的减少，所以感应电流的磁感线方向跟原来磁感线方向相同，用右手螺旋定则判定 ab 中电流方向是 b → a，这跟用右手定则判定的结果完全一致。在判定导体做切割磁感线运动而产生感应电流的方向时，用右手定则比用楞次定律简便。

思考

1. 关于电磁感应现象，下面的说法是否正确。

(1) 感应电流的磁场总是阻碍引起感应电流的磁通量的变化，因此感应电流的磁场总是跟原磁场方向相反。

(2) 感应电流的方向总是要使感应电流的磁场阻止引起感应电流的磁通量的变化。

2. 如果图 10 - 15 中电流计接在导体 ab 的左边 (图 10 - 16)，当导体 ab 向右运动时，ab 中产生的感应电流方向与图 10 - 15 中是否一致？为什么？

练习十六

1. 图 10 - 17 中，闭合电路中的一部分导体 (图中的圆表示导线的截面) 在磁场中运动，试确定导体中感应电流的方向。

2. 图 10 - 18 中，A 是一个用细线悬挂起来的铜环，一个线圈与电池组相连。当闭合电键 K 的瞬间，铜环将会跟线圈相吸还是相斥？

图 10-17 图 10-18

3. 如图 10 - 19 所示，指出下述情况中小磁针 N 极的偏转方向：

(1) 电键 K 闭合时；

(2) 电键 K 闭合后；

(3) 电键 K 闭合后，调节变阻器使电流增强时；

(4) 电键 K 断开时。

4. 图 10 - 20 中，导线 AB 和 CD 互相平行，CD 和电池相连。试确定电键 K 闭合和断开瞬间，导线 AB 中感应电流的方向。

图 10-19

5. A 和 B 是两个导体圆环，为了使 B 环中产生如图 10 - 21 所示方向的感应电流，那么，A 环中的电流方向是顺时针或逆时针时，电流分别是增大还是减小？

图 10-20 图 10-21

6. 有一条形磁铁从高处自由落下，在下落途中穿过一个固定着的闭合线圈。试说明磁铁从接近到离开线圈的过程中，它的整个运动过程是

不是自由落体运动？为什么？

三、法拉第电磁感应定律

法拉第电磁感应定律

我们知道闭合电路里必须有电源才有电流，电流是由电源的电动势产生的。在电磁感应现象中，闭合电路中有感应电流，所以必有电动势。在电磁感应现象中产生的电动势叫做感应电动势，产生感应电动势的那部分导体就相当于电源。当电路中有磁通量变化时，电路里就有感应电动势，如果电路是闭合的，电路中就有感应电流；如果电路是断开的，电路中虽然没有感应电流，但感应电动势还是存在的。感应电动势的大小跟哪些因素有关呢？

我们在电磁感应现象的实验（图 10 - 3）中可以看到，将磁铁在线圈中插入或拔出得快一些，感应电流就大；插入或拔出得慢一些，感应电流就小。这说明穿过线圈的磁通量变化得快，感应电动势就大；穿过线圈的磁通量变化得慢，感应电动势就小。可见感应电动势的大小跟穿过电路的磁通量变化的快慢有关。我们把单位时间内穿过电路的磁通量的变化量叫做磁通量的变化率。

法拉第通过精确的实验发现，电路中感应电动势的大小，跟穿过这一电路的磁通量的变化率成正比。这就是法拉第电磁感应定律。法拉第电磁感应定律的公式为

$$\varepsilon = k \frac{\Delta\phi}{\Delta t} \quad (\text{单匝线圈的感应电动势})。$$

式中 $\frac{\Delta\phi}{\Delta t}$ 是穿过线圈的磁通量的变化率，也就是在时间 t 内，磁通量的变化量是 $\Delta\phi$ 。k 是比例常数，它的数值跟式中各量单位的选择有关， ϕ 用韦伯作单位， t 用秒作单位， ε 用伏作单位，这时 $k=1$ ，上式就可写成

$$\varepsilon = \frac{\Delta\phi}{\Delta t}。$$

一个线圈实际上是由许多单匝线圈串联组成的，所以线圈中感应电动势是各个单匝线圈中感应电动势的总和， n 匝线圈的感应电动势是单匝线圈感应电动势的 n 倍，即

$$\varepsilon = n \frac{\Delta\phi}{\Delta t}。$$

[例题]

一个 200 匝的线圈，在 0.02 秒时间内线圈中的磁通量的变化量为 6×10^{-5} 韦，求线圈中的感应电动势的大小。

解：已知 $t=0.02$ 秒， $\Delta\phi=6 \times 10^{-5}$ 韦， $n=200$ 匝，根据法拉第电磁感应定律公式，线圈中感应电动势的大小为

$$\begin{aligned} \varepsilon &= n \frac{\Delta\phi}{\Delta t} = 200 \times \frac{6 \times 10^{-5}}{0.02} \text{ 伏} \\ &= 0.6 \text{ 伏。} \end{aligned}$$

导体作切割磁感线运动时的感应电动势的大小

如图 10 - 22 所示，在磁感强度为 B 的匀强磁场中，有一矩形线框 $abcd$ ，线框的平面跟磁感线垂直，可移动的导线 dc 的长度为 l ，它在跟磁感线垂直的方向上以速度 v 向右运动。在时间 t 内， dc 从原来位置移到 $d'c'$ ，移动的距离为 vt ，线框 $abcd$ 的面积变为 $abc'd'$ ，面积的变化量为 $lv t$ ，则穿过闭合电路的磁通量变化量 $\Delta\Phi = B \Delta S = Blv t$ 。

根据法拉第电磁感应定律，电路中感应电动势的大小为

$$\varepsilon = \frac{\Delta\Phi}{\Delta t} = blv。$$

可见，在磁场中导体做切割磁感线运动时，导体中产生的感应电动势的大小，跟磁感强度 B 、导体的长度 l 和速度 v 成正比。当 B 、 l 、 v 三者方向互相垂直时（图 10 - 23），感应电动势的大小为

$$\varepsilon = Blv。$$

式中 B 的单位是特， l 的单位是米， v 的单位是米/秒， ε 的单位是伏。如果导体的运动方向跟磁感线方向平行（图 10 - 24），导体不切割磁感线，不产生感应电动势，即 $\varepsilon = 0$ 。如果导体的运动方向跟磁感线方向有一夹角 θ （图 10 - 25），导体产生的感应电动势与它以速度 v' 作垂直切割磁感线运动时产生的感应电动势相同，这里 $v' = v \sin \theta$ ，所以感应电动势的大小的一般表达式为

$$\varepsilon = Blv \sin \theta。$$

[例题]

图 10 - 26 中，匀强磁场磁感强度 $B=0.1$ 特，方向垂直纸面向外，导线 ab 有效长度 $l=50$ 厘米，以 $v=6$ 米/秒的速度沿金属框向左匀速运动，导线 ab 的电阻 $r=0.4$ 欧，金属框电阻不计，电阻 $R=0.6$ 欧。求：(1) 感应电动势的大小；(2) 感应电流的大小和方向。

解：导线 ab 在磁场中做切割磁感线运动，产生感应电动势。导线 ab 相当于电源，它的电阻就是电源的内阻，由闭合电路的欧姆定律可求得感应电流。

(1) 感应电动势大小

$$\varepsilon = Blv = 0.1 \times 0.5 \times 6 \text{ 伏} = 0.3 \text{ 伏}。$$

(2) 感应电流大小

$$I = \frac{\varepsilon}{R + r} = \frac{0.3}{0.6 + 0.4} \text{ 安} = 0.3 \text{ 安}。$$

感应电流的方向可用右手定则判定，在导线 ab 内是由 b 流向 a 。

思考

1. 如图 10 - 27 所示，一个闭合线框 $abcd$ ，在磁感强度为 B 的匀强磁场中转动时，在什么位置线圈中的感应电动势最大？在什么位置感应电动势等于零？

2. 只要导线在磁场中运动，导线中就一定产生感应电动势。这种说法是否正确？为什么？

这是根据速度矢量的分解以及分矢量和合矢量的等效替代关系得出的结论。

练习十七

1. 长 20 厘米的导线，在磁感强度为 1 特的匀强磁场中运动，导线和它的运动方向都跟磁感线方向垂直，要使导线中产生 1 伏的感应电动势，导线运动的速度多大？

2. 飞机两机翼的尖端相距 20 米，飞机以 200 米/秒的速度水平飞行。如果地磁场垂直于地面方向的磁感强度为 5×10^{-4} 特，求机翼两端的电压。

3. 如图 10 - 28 所示，匀强磁场的磁感强度 $B=0.2$ 特，矩形线圈的边长 $ab=cd=20$ 厘米， $bc=ad=15$ 厘米，若线圈的电阻不计，固定电阻 $R=0.5$ 欧，线圈以 cd 边为轴匀速转动， ab 边的线速度大小为 2 米/秒。如图所示时，线圈平面与磁场垂直，求线圈转到跟图示位置成 90° （即 ab 边转到纸面外）时，通过 R 的感应电流的大小和方向。

4. 如图 10 - 29 所示，在磁感强度为 B 的匀强磁场中，有一金属框，金属杆 OO' 可以沿框无摩擦地滑动， OO' 长 l ，电阻为 R ，金属框的电阻不计，在框上固定着两个阻值都是 $2R$ 的电阻。当 OO' 以速度 v 向右匀速滑动时， OO' 两端的电压多大？

四、自感

电车的导电弓经过两段电源线的断开处时，会跳出电火花（图 10 - 30）；正在工作的电风扇，在调换转速档时，开关盒中也有电火花产生。这种电火花的产生，都是由于自感现象引起的。

自感现象

自感现象也是一种电磁感应现象，它在无线电技术和各种电器设备中，有着广泛的应用，如日光灯中的镇流器。下面我们用实验来观察自感现象。

在图 10 - 31 所示电路中， A_1 和 A_2 是两个同样规格的灯泡， A_1 和线圈 L 串联， A_2 和变阻器 R 串联，这两部分电路并联。合上电键 K ，调节变阻器 R ，使灯泡 A_1 和 A_2 同样明亮，再调节变阻器 R' ，使两个灯泡正常发光，然后断开电键 K 。当再接通电路时，可以看到跟变阻器 R 串联的灯泡 A_2 立即正常发光，而跟有铁心的线圈 L 串联的灯泡 A_1 却是逐渐亮起来的。

图 10-30 图 10-31

这是因为电路接通时，通过线圈 L 的电流增大，穿过线圈 L 的磁通量就增大，根据楞次定律可知，线圈中会产生感应电动势，以阻碍线圈中电流的增大，所以通过灯泡 A_1 的电流只能逐渐增大，灯泡只能逐渐亮起来。我们再来观察图 10 - 32 的实验。灯泡 A 跟带有铁心、电阻较小的线圈 L 并联。接通电路，灯泡 A 正常发光；断开电路时，灯泡 A 的亮度瞬间增大，然后才熄灭。

这是因为电路断开时，流过线圈 L 的电流减弱，穿过线圈的磁通量

也减少，线圈中会产生感应电动势，以阻碍线圈中电流的减小。这时线圈 L 起了电源作用，通过 L 和 A 组成闭合回路，线圈产生的瞬时高电压直接加在灯泡两端，使灯泡突然亮一下然后熄灭。

由于导体本身的电流发生变化而产生的电磁感应现象，叫做自感现象，在自感现象中产生的感应电动势叫做自感电动势。

实验表明，自感电动势的大小，跟通过线圈的电流变化率 $\frac{\Delta I}{\Delta t}$ 成正比，即

$$\varepsilon_{\text{自}} = L \frac{\Delta I}{\Delta t}。$$

式中比例常数 L 叫做线圈的自感系数，简称自感或电感。我国法定计量单位规定，自感系数的单位是亨利，简称亨，符号是 H。实验证明，线圈的自感系数由线圈本身的特性所决定，跟线圈的匝数、长度、面积以及线圈中有无铁心等因素有关。一个线圈的自感系数越大，表示这个线圈在同一电流变化率时，对电流变化的阻碍作用越大。

自感现象的应用

图 10 - 33 是日光灯的电路图，它主要是由灯管、镇流器 L 和起动机 S 组成。灯管内充有稀薄的水银蒸汽，当水银蒸汽导电时就发出紫外线，使涂在灯管内壁上的荧光粉发出柔和的光。激发水银蒸汽导电所需的电压比 220 伏电源电压高得多，因此，日光灯在开始点燃时，需要一个高出电源电压很多倍的瞬时电压；而在日光灯正常工作时，又只允许通过不大的电流，电流过强会烧坏灯管。这两个要求都是由镇流器来完成的。镇流器是一个带有铁心的线圈，外观如图 10-34 所示。

日光灯的起动机(图 10-35)是一个抽去空气再充有少量氖气的小玻璃泡，里面装有两个电极，一个是固定不动的静触片，另一个是用双金属片制成的倒 U 形动触片。电路未接通时，起动机里的静触片与动触片是断开的。由于日光灯电路中的镇流器、起动机和灯管两端的灯丝是串联在一起的，闭合电键后，电源电压(220 伏)就加在起动器的两端，使玻璃泡内的氖气发生辉光放电，这时产生的热量使动触片膨胀伸展，跟静触片接触而接通电路，镇流器的线圈和灯管的灯丝中就有较大电流通过。由于起动机被短路，它两端的电压就降低，氖气便停止放电，动触片冷却收缩，当两触片分离时，电路自动断开。这时，镇流器由于自感作用而产生的瞬时高电压加在灯管两端，使灯管成为电流通路而发光。发光后灯管两端电压降到 100 伏左右，起动机不再工作。日光灯正常工作时，通过灯管的电流时刻在变化，镇流器线圈中的自感电动势总是阻碍电流变化的，镇流器又起着限流作用。

在有些情况下，自感现象是不利的，要加以防止。如在自感系数很大、电流又很强的电路中，在切断电路的瞬间，由于电流在很短时间内减小为零，产生的自感电动势很大，开关的闸刀跟固定夹片间的空气电离而成为导体，形成强大的电火花，烧坏开关，甚至伤害工作人员。因此，这类开关要浸放在绝缘性能良好的油中(通常也叫油开关)，防止电火花的产生，以保障安全。本章导图 3 所示的就是几种不同规格的油开关。

思考

在绕制精密的定值电阻时，为了消除使用过程中，由于电流变化引起的自感现象，往往采用双线绕法，如图 10-36 所示。为什么双线绕法可以消除自感现象？

*五、涡流及其在技术上的意义

一般家庭中都装有电能表，用电时，电能表中的铝盘转动带动计数装置，能够自动记录消耗的电能。当不用电时，铝盘就立即停止转动，这是什么原因？电机和变压器的铁心不是用整块金属制成，而是用硅钢片叠合而成，这是为什么？原来这些问题，都与涡流有关。

涡流

涡流是由于电磁感应现象而产生的。在生产技术中，有些情况要设法减弱涡流，有些情况则要利用涡流。

下面我们用实验来观察涡流的产生。

如图 10-37 所示，用整块金属做成一个摆，让它在电磁铁两极中间摆动。当电磁铁没有通电时，摆可以摆动较长时间才停下；当电磁铁通电后，两极间存在磁场，摆很快就停下[图 10-37(a)]。

金属摆在磁极间摆动时，总有部分切割磁感线，使金属块里产生感应电流，并且很容易在金属块内就近形成回路，像旋涡似的，因此叫做涡电流，简称涡流。由于整块金属的电阻一般很小，涡电流一般都很强，涡电流受到磁场对它的作用力很大，根据楞次定律可以推知，这力是阻碍摆的运动的，使摆迅速停下来。如果换成齿形的金属摆[图 10-37(b)]，情况就不一样了，涡流只能在每个齿的狭小范围内形成，因此，涡流以及磁场对涡流的作用都大大削弱了，这就说明了齿形摆比整块金属摆在磁极间能够摆动较长时间的原因。

涡流在技术上的意义

在很多情况下，涡流会引起导体发热，既大量浪费了电能，又破坏电气设备的绝缘等。如图 10-38(a)所示，在块状铁心上绕绝缘导线，当导线中通过交流电时，铁心中会产生很强的涡流，所以电机和变压器如果采用整块的铁心，由于涡流造成的能量损失很大，效率就很低。为了减少涡流损失，电机和变压器的铁心都采用表面绝缘的硅钢片叠合而成，如图 10-38(b)所示。

涡流也有可以利用的一面。本章导图 2 是一个电磁灶，它的结构示意图如图 10-39 所示。灶的台面是块平整度高、耐冲击的非金属板，下面有励磁线圈、电力转换装置、控制系统等。交流电通过电力转换装置，使励磁线圈产生交变的磁场，金属烹饪锅体内，由于电磁感应而产生强大的涡电流，放出大量的热用于烹饪。

电能表俗称火表，在初中已经学过，电能表可以记录用电户所消耗的电能。电能表的部分结构示意图如图 10-40 所示，电流线圈是跟负载串联的，电压线圈是跟负载并联的，当负载电流通过电流线圈产生交变磁通量时，便在铝盘上产生涡电流；这时电压线圈的磁场对涡电流的作

用力，推动铝盘转动起来，这两者（负载中的电流 I 与负载上的电压 U ）既决定了铝盘转动的快慢，也反映了负载所消耗的功率（ $P=UI$ ）。电表中的永久磁铁也在铝盘中产生涡流，永久磁铁的磁场对涡流的作用，是阻碍铝盘转动的，这样便使负载一定时，铝盘的转速得以保持恒定；而当负载停止时，永久磁铁对涡流的作用，使转动着的铝盘迅速停止转动。

利用涡流还可使金属导体加热熔化。如高频感应炉可以冶炼金属，可以在提炼硅单晶时去除杂质。在真空技术方面，可用感应加热方法，加热待抽空仪器的金属部分，去除吸附在金属面上的气体。

阅读材料 电磁感应现象的发现

1820年，丹麦物理学家奥斯特发现电流能使其周围的磁针偏转以后，引起了研究电和磁的关系的热潮。法国物理学家安培积极地研究了这一问题，可惜他一直着眼于观察放在磁铁近旁的导线中是否有电流的稳态现象，没有考虑暂态现象，结果失败了。1825年另一位科学家科拉顿，他把一块磁铁插入螺旋线圈内，想观察线圈中是否产生电流。为了排除磁铁移动时对电流计的影响，他用很长的导线把连接线圈的电流计放到另一间房间里。他把磁铁插入螺旋线圈后，飞快地奔到放电流计的房间里去观察电流计指针是不是偏转，结果也失败了。实际上科拉顿的实验装置，设计是完全正确、合理的，他同样是没有考虑暂态效应。英国物理学家法拉第在1821年9月，发现通电的导线能绕磁铁旋转，他想电力可以转变为机械力，那么机械力能不能转变为电力呢？他下决心要解决这一问题，并在日记中写下“转磁为电”。他开始也从稳态现象去考虑，实验一直没有成功。他整整花了10年时间，千方百计设计各种实验，经历了无数次失败，终于在1831年8月获得成功。

法拉第在一个圆形软铁环两边绕上A、B两组线圈（图10-41），并把B组线圈与电流计相连接。当A组线圈接上电池时，他看到电流计的指针突然晃动一下就停止不动。当他拆掉电池的瞬时，指针又偏转了一下，可是偏转方向相反。法拉第把这叫做“伏打电感应”。

法拉第并不满足已经取得的成就，他坚信磁能够转化为电。同年10月，他在一个纸做的空心圆筒上，用铜线绕了一个大线圈，把它接到电流计上，当一块条形磁铁插进空心圆筒时，电流计指针摆动，“转磁为电”的理想终于实现，法拉第称之为“磁电感应”。实际上，“伏打电感应”是变压器的原始模型，“磁电感应”则预告了发电机的诞生。这两种电磁感应现象的发现，为电能的大规模生产与应用奠定了基础。

在法拉第发现电磁感应现象不久，德国物理学家楞次公布了他的发现（后被称为楞次定律），这样对电磁感应现象的研究得到更进一步完善。

本章学习要求

1. 知道磁通量。
2. 知道电磁感应现象。
3. 理解产生感应电流的条件。
4. 理解楞次定律。
5. 会用灵敏电流计。

6. 学会“研究电磁感应现象”实验中的有关技能。
7. 会用右手定则。
8. 知道法拉第电磁感应定律。
9. 知道感应电动势。
10. 理解导体作切割磁感线运动时感应电动势的大小。
11. 知道自感现象。
12. 知道自感系数。

复习题

1. 单选题

- (1)关于感应电流的磁场方向和引起感应电流的磁场方向关系的说法中，正确的是 []
- A. 感应电流的磁场方向总是与引起感应电流的磁场方向相反；
 - B. 感应电流的磁场方向总是与引起感应电流的磁场方向相同；
- C. 引起感应电流的磁通量增加时，感应电流的磁场总是与原磁场的方向相反；
- D. 引起感应电流的磁通量减少时，感应电流的磁场总是与原磁场的方向相反。
- (2)如图 10-42 所示，当条形磁铁向闭合螺线管靠近从实线位置移到虚线位置的过程中，螺线管内将 []
- A. 不产生感应电流；
 - B. 产生的感应电流的方向如图所示；
 - C. 产生的感应电流的方向与图中所示相反；
 - D. 有无感应电流不能肯定，因条件不够。
- (3)如图 10-43 所示，一位同学自右向左看导体圆环时，要使圆环中产生逆时针方向的感应电流，下列采用的方法中，不正确的是 []
- A. 使通电螺线管远离圆环；
 - B. 使螺线管中电流（方向如图）增大；
 - C. 使螺线管中电流（方向如图）减小；
 - D. 将螺线管中铁心向左抽出。
- (4)如图 10-44 所示，有一固定的超导体圆环，在其右侧放着一条形磁铁，此时圆环中没有电流；当把磁铁向右方移走时，由于电磁感应，在超导体圆环中产生了电流，那么下列说法中正确的是 []
- A. 电流的方向如图中箭头所示，磁铁移走后，电流很快消失；
 - B. 电流的方向如图中箭头所示，磁铁移走后，电流继续维持；
 - C. 电流的方向与图中箭头方向相反，磁铁移走后，电流很快消失；
 - D. 电流的方向与图中箭头方向相反，磁铁移走后，电流继续维持。
- (5)如图 10-45 所示，一条形磁铁下落，穿过闭合线圈 abcd 时，线圈中感应电流方向是沿 []
- A. abcda；
 - B. adcba；
 - C. 先沿 abcda，后沿 adcba；

D. 先沿 $adcba$, 后沿 $abcda$ 。

(6)如图 10-46 所示, 在软铁棒 F 插入通电线圈的过程中, 电阻 R 上的电流方向是 []

- A. 从 A 经 R 流向 B ;
- B. 从 B 经 R 流向 A ;
- C. 先从 A 经 R 流向 B , 再从 B 经 R 流向 A ;
- D. 没有电流。

(7)如图 10-47 所示, 当滑动变阻器的滑动片 P 向左移动时, 线圈、中感应电流的方向是 []

- A. 从 a 经电流计到 b , 从 c 经电流计到 d ;
- B. 从 a 经电流计到 b , 从 d 经电流计到 c ;
- C. 从 b 经电流计到 a , 从 c 经电流计到 d ;
- D. 从 b 经电流计到 a , 从 d 经电流计到 c 。

(8)如图 10-48 所示, 一个水平放置的矩形线圈 $abcd$, 在细长磁铁的 S 极附近保持水平下落, 由位置 经过位置 到位置 , 在下落过程中, 线圈中感应电流方向为 []

- A. $abcda$;
- B. $adcba$;
- C. 从 到 为 $abcda$, 从 到 为 $adcba$;
- D. 从 到 为 $adcba$, 从 到 为 $abcda$ 。

2. 如图 10-49 所示, 闭合矩形线圈 $abcd$ 从静止开始竖直下落, 穿过一个匀强磁场区域。此磁场区域竖直方向的长度大于线圈 bc 边的长度。不计空气阻力, 线圈从静止开始下落到穿出磁场的过程中, 穿过线圈的磁通量怎样变化? 线圈中感应电流的方向如何变化?

3. 如图 10-50 所示, 一水平放置的导体框架, 宽度 $l=0.5$ 米, 框架电阻不计。固定电阻 $R=2$ 欧, 导体 ab 在框架上无摩擦滑动, 当 ab 以 $v=4$ 米/秒匀速运动时, 电路中产生的感应电流为 0.4 安, 求匀强磁场的磁感强度。

4. 如图 10-51 所示, 有一长 2 米、宽 0.5 米的长方形金属框架 $cdef$, 在它上面搁置一根直导线 ab , 导线可在框架上无摩擦地滑动, 框架和导线都是用每米电阻为 0.1 欧的材料制成。整个框架置于磁感强度 $B=1.04$ 特的匀强磁场中, 磁场方向垂直纸面向里。导线 ab 从中央位置开始以 $v=0.25$ 米/秒的速度向右匀速滑动, 经 3 秒后到位置 $a'b'$, 求这时通过 ab 、 cd 和 ef 中感应电流的大小和方向。

5. 如图 10-52 所示, 匀强磁场的宽度是 20 厘米, 磁感强度是 0.05 特。有一金属杆 ab 长为 40 厘米, 以 2 米/秒的速度向纸内作匀速运动; 金属杆和连接的导线电阻不计, 电阻 R 为 0.2 欧, 求通过电阻的感应电流的大小和方向。

6. 如图 10-53 所示, 有一磁感强度是 0.1 特的匀强磁场, 方向水平垂直纸面向外。在垂直于磁场的竖直面内放有金属导轨, 金属杆 ab 长 10 厘米, 可在导轨上无摩擦运动, 导轨电阻不计, 电阻 R 为 0.2 欧。当 ab 杆下落后作匀速运动时, 电阻 R 上消耗的电功率为 0.008 瓦, 求 ab 杆作匀速运动的速度。

11 . 交流电 Alternating current 振荡电路 Oscillating circuit

1. 新安江水电站
2. 正在组装的大型发电机转子
3. 超高压大型变压器
4. 莱顿瓶
5. 几种电容器

工农业生产和日常生活中的许多用电器都使用交流电，交流电不同于直流电，交流电的大小和方向都随时间而变化。交流电具有便于输送的优点，可以通过电网连接，进行合理调配，输送到需要用电的各个地区（课本彩图 2 和 3 分别是发电厂和发电机，彩图 9 是输电线路）。本章我们将学习有关交流电的产生、交流电的规律和振荡电路的知识。

一、交流电的产生

法拉第发现电磁感应现象的一个重大应用是导致发电机的制造成功。交流电就是从交流发电机中产生出来的。图 11-1 是最简单的交流发电机模型。

交流电的产生

现在我们来观察交流电是怎样产生的。在图 11-1 所示的实验装置中，有一个放在匀强磁场中的矩形线圈 $abcd$ ，线圈两端分别通过滑环 K 、 L ，电刷 P 、 Q 与灵敏电流计相连。当线圈以 OO' 为轴缓慢匀速转动时，可以观察到与线圈两端相连的灵敏电流计指针的偏转角度时大时小，偏转方向时左时右，线圈每转一周，指针就左右摆动一次。这表明线圈中产生的感应电流的大小和方向都在发生周期性变化，这种大小和方向都随时间作周期性变化的电流叫做交流电（alternating current）。

图 11—1

在磁场中作匀速转动的线圈为什么会产生周期性变化的电流呢？这是因为矩形线圈绕 OO' 轴转动的过程中，线圈的 ab 边和 cd 边做切割磁感线运动时，它们的速度方向是时刻变化的（ bc 边和 da 边始终不切割磁感线）。现在我们取线圈转动一周过程中的四个特殊位置来进行分析。

当线圈平面跟磁感线垂直时[图 11-2(a)]，由于 ab 边和 cd 边的速度方向跟磁感线平行，不切割磁感线，所以线圈中不产生感应电动势，也没有感应电流，我们把线圈所处的这个位置叫做中性面。

当线圈从中性面按逆时针方向转过 90° ，处在图 11-2(b)的位置时， ab 边和 cd 边的速度方向跟磁感线垂直，由右手定则可以判定，线圈中的感应电流是沿 $dcbad$ 方向流动的。

再转过 90° 时，线圈又转到中性面[图 11-2(c)]，这时线圈中感应电流等于零。

当线圈再转过 90° ，处在图 11-2(d)位置时， ab 边和 cd 边的速度方

向跟磁感线又成垂直，但由于 ab 边和 cd 边的速度方向跟线圈经过图(b)所示位置时相反，所以线圈中的感应电流是沿 abcda 方向流动的。

再转过 90°，线圈又处在中性面[图 11-2(e)]，感应电流又等于零。接着在以后的转动中，将重复上述过程。所以，线圈在转动过程中产生的感应电流的方向就发生周期性改变。

闭合线圈中的感应电流是由感应电动势产生的，那么，线圈中的感应电动势又是怎样变化的呢？如图 11-3 所示，设匀强磁场的磁感强度为 B，作匀速转动的矩形线圈的 ab、cd 边长均为 l，选取线圈经过中性面时开始计时，经过一段时间，若线圈平面与中性面夹角为 θ ，这时，cd 边线速度 v 跟磁感线方向的夹角也为 θ ，cd 边中产生的感应电动势的大小 $e_{cd}=Blv\sin\theta$ 。同理，ab 边中也产生相同大小的感应电动势， $e_{ab}=Blv\sin\theta$ 。所以，整个线圈中产生的感应电动势可用下式表示。

图 11—3

$$e=2Blv\sin\theta。$$

当线圈平面转到跟磁感线平行时，ab 边和 cd 边的速度方向跟磁感线的方向垂直，即当 $\theta = \frac{\pi}{2}$ 时，线圈中的感应电动势达到最大值。如果用 e_m 表示感应电动势的最大值，则 $e_m=2Blv$ 。所以，在任意位置时，线圈中产生的感应电动势的瞬时值可用下式表示

$$e= e_m \sin\theta \quad (1)$$

上式表明，在匀强磁场中，匀速转动的线圈内产生的感应电动势是按正弦规律变化的。

如果线圈与外电路组成闭合电路，用 R 表示整个闭合电路中的电阻，则电路中感应电流的瞬时值可用下式表示

$$i = \frac{e}{R} = \frac{e_m}{R} \sin\theta。$$

式中的 $\frac{e_m}{R}$ 是电流的最大值，如果用 I_m 表示，则电流的瞬时值也可用下式表示

$$i=I_m \sin\theta \quad (2)$$

可见，电路中的感应电流也是按正弦规律变化的。这种按正弦规律变化的交流电叫做正弦交流电。

交流电的图象

交流电的变化规律还可以用图象形象地表示出来。

图 11—4 图 11—5

以直角坐标系的横轴表示线圈平面跟中性面之间的夹角 θ ，纵轴表示正弦交流电动势 e，可以画出电动势 e 与 θ 之间的关系图象[图 11-4(a)]，e- θ 图象是一条正弦曲线。由于线圈作匀速转动，线圈平面转过的角度 θ 是跟时间 t 成正比的 ($\theta = \omega t$)，这样也就可以画出 e-t 图象，图 11-4(b)所示的 e-t 图象是以线圈经过中性面时开始计时的，e-t 图象也是一条正弦曲线。

同理，可以画出正弦交流电流的 i- θ 图象[图 11-5(a)]和 i-t 图象

[图 11-5(b)]。

从以上图象中可以看出：线圈中的感应电动势、电流都是随着线圈平面跟中性面之间的夹角的变化作周期性变化的；在线圈转动一周（2 弧度）的过程中，出现两次最大值，一次是正值，一次是负值。线圈平面每经过中性面一次，电流的方向就要改变一次。

如图 11-6 所示，将交流信号发生器（一种能产生正弦交流信号的仪器）和示波器连接起来，可以观察交流电压按正弦规律（ $u=U_m \sin \omega t$ ，式中 U_m 是交流电压的最大值）变化的图象。

图 11—6

交流发电机

实际的交流发电机虽然比图 11-1 所示的要复杂，但它的基本组成部分仍然是线圈（通常叫电枢）和磁极。磁极不动，电枢转动的发电机叫做旋转电枢式发电机。电枢不动，磁极转动的发电机叫做旋转磁极式发电机。旋转磁极式发电机的磁极在中央，电枢嵌在外壳内，电枢占有的空间可以很大，它能提供几千伏到几万伏的输出电压，输出功率可达几十万千瓦，大型发电机都是旋转磁极式的（本章导图 2 是正在组装的大型发电机转子）。发电机是把机械能转变成电能的装置。例如，水电站中的发电机就是把水流的机械能转变成电能的（本章导图 1 是新安江水电站）。

练习十八

1. 某交流电流的 $i-t$ 图象如图 11-7 所示，试根据图象回答：

(1) 哪些时刻电流等于零？这些时刻线圈平面与中性面的夹角多大？

(2) 哪些时刻电流最大？这些时刻线圈平面与中性面的夹角多大？

(3) 试写出当时刻 $t=t'$ 时，线圈平面与中性面的夹角的表达式。

2. 矩形线圈的 ab 边长为 50 厘米， bc 边长为 20 厘米，在磁感强度是 0.1 特的匀强磁场中绕 OO' 轴匀速转动，如图 11-8 所示。 ab 边和 cd 边的线速度均为 4 米/秒。试求线圈平面跟磁感线平行时，线圈中产生的感应电动势。若线圈的电阻为 0.2 欧，则线圈中电流的瞬时值为多大？

3. 阻值为 2 欧的矩形线圈，在匀强磁场中匀速转动，产生正弦交流电。已知从中性面转过 30° 角时的感应电动势是 10 伏，求线圈中电流的最大值。

二、描述交流电的物理量

交流电的周期和频率

交流电是周期性变化的电流，跟所有的周期性运动一样，它变化的快慢可以用周期或频率来表示。我们把交流电完成一次周期性变化所需要的时间，叫做交流电的周期。交流电在每秒钟内完成周期性变化的次数，叫做交流电的频率。周期 T 和频率 f 的关系是

$$T = \frac{1}{f} \text{ 或 } f = \frac{1}{T}。$$

我国工农业生产和日常生活中使用的交流电，周期是 0.02 秒，频率是 50 赫。

交流电的有效值

交流电的电压和电流的瞬时值是时刻在变化着的，为了使交流电跟直流电的实际效果可以比较，一般用有效值来表示交流电的大小。

交流电的有效值是根据热效应来规定的。让交流电和直流电分别通过阻值相同的电阻，在相同时间内，如果产生的热量相同，那么，这个直流电的数值就叫做该交流电的有效值。交流电动势、交流电压和交流电流的有效值分别用 E 、 U 和 I 表示。

实验和理论表明，正弦交流电的有效值与最大值之间存在着如下的关系：

$$E = \frac{E_m}{\sqrt{2}}, U = \frac{U_m}{\sqrt{2}}, I = \frac{I_m}{\sqrt{2}}。$$

我国照明电路的电压为 220 伏，工农业生产中使用的动力电路的电压为 380 伏，就是指交流电的电压有效值分别是 220 伏、380 伏。测量交流电压和电流的交流电压表和交流电流表的示数都是有效值。交流用电器上标明的额定电压或额定电流值，也是指有效值。我们以后讲到的交流电的数值，凡是没有特别说明的，都是指有效值。

[例题]

一矩形线圈在匀强磁场中匀速转动，从中性面开始计时，每转一周需时 0.02 秒，线圈中产生的感应电动势 e 与时间 t 的关系图象如图 11-9 所示。(1) 试求这一感应电动势的最大值、有效值、周期和频率；(2) 写出这一感应电动势随时间变化的关系式。

图 11—9

解：(1) 从图中可以读出感应电动势的最大值 $E_m=10$ 伏。根据有效值与最大值的关系式，可知电动势的有效值

$$E = \frac{E_m}{\sqrt{2}} = \frac{10}{\sqrt{2}} \text{ 伏} = 7.07 \text{ 伏。}$$

从图象可知交流电的周期 $T=0.02$ 秒，频率

$$f = \frac{1}{T} = \frac{1}{0.02} \text{ 赫} = 50 \text{ 赫。}$$

(2) 因为线圈匀速转动，线圈平面与中性面之间的夹角 θ 跟时间 t 成正比，即

$$\frac{\theta}{t} = \frac{2\pi}{T},$$

$$\theta = \frac{2\pi}{T} t,$$

或 $\theta = 2\pi f t = 100\pi t。$

所以这一感应电动势随时间变化的关系式为

$$e = 10 \sin 100\pi t \text{ 伏。}$$

问题探讨

S：我认为一个只允许在直流电压为 220 伏电路中工作的电阻，一定

不允许在 220 伏交流电路中工作，因为这一交流电压的最大值为 311 伏，超过了 220 伏。这个想法对吗？

T：这个想法不对，220 伏交流电压是指电压的有效值。从电流通过电阻时产生的热效应来说，这个电阻在 220 伏直流电压下产生的热量，与在相同时间内，在 220 伏交流电压下产生的热量是相等的。所以这个电阻可以在 220 伏交流电路中工作。

思考

1. 频率为 50 赫的交流电，每秒钟内电流方向改变几次？
2. 如图 11-10 所示，把电压最大值为 100 伏的交流电、电压为 100 伏的直流电分别加在两个完全相同的灯泡上，若后者的灯泡正常发光，则前者的灯泡是否能正常发光？怎样才能使两个灯泡的亮度相同？

练习十九

1. 某电路可提供的交流电压分别为 110 伏、220 伏和 380 伏，它们的最大值各是多大？
2. 频率为 50 赫的交流电，它的电压有效值为 10 伏，电压随时间变化的图象如图 11-11 所示。试在图中填入纵坐标和横坐标相应的单位，并指出纵轴上 A、B 点和横轴上 C、D、E 和 F 点的数值。
3. 已知电阻的阻值为 10 欧，交流电流的最大值为 100 毫安，那么，在这个电阻上消耗的电功率是多大？10 秒钟内产生的热量是多少？

三、变压器

我国供电系统中，照明电路的电压为 220 伏，动力电路的电压为 380 伏。但实际上，在各种用电器中，需要的电压是多种多样的。例如，电视机内部的电子线路，有的需要 12 伏的工作电压，而显像管却需要数万伏的工作电压；电子计算机中的电子线路需要 5 伏的工作电压，而终端显示屏却需要上万伏或几万伏的工作电压；工厂中机床上的照明灯需要 24 伏的安全电压，但电动机却需要 380 伏的工作电压。

为了适应各种不同的需要，就要有一种改变交流电压的设备，这就是变压器(transformer)。

变压器的构造

图 11-12(a)所示是最简单的变压器结构示意图。图 11-12(b)是电路图中变压器的符号。

变压器是由一个闭合铁心和绕制在铁心上的两个线圈组成的。使用时，一个线圈跟交流电源连接，这个线圈叫做原线圈，也叫做初级线圈。另一个线圈跟用电器（负载）连接，这个线圈叫做副线圈，也叫做次级线圈。原、副线圈都是用表面有绝缘层的导线绕制的，铁心由表面有氧化膜的彼此绝缘的硅钢片叠合而成。

变压器的工作原理

利用变压器可以改变交流电的电压。在图 11-13 所示的实验中，图

(a)将交流电电压升高；图(b)将交流电电压降低。

变压器为什么能升高或降低电压呢？当在变压器原线圈两端加上交流电压 U_1 后，原线圈中就有交流电流通过，在铁心中就产生交变磁通量。由于铁心是闭合的，这一交变磁通量同时穿过副线圈，副线圈中就产生了感应电动势，在副线圈两端就有交流电压 U_2 。当副线圈与负载组成闭合电路时，副线圈中就有交流电流通过。由于副线圈的每一圈中产生的感应电动势的大小是一定的，副线圈匝数越多，它两端的电压就越高，匝数越少，电压就越低。进一步研究知道，在不考虑线圈内阻的情况下，变压器原线圈两端电压和副线圈两端电压之比等于原、副线圈匝数之比，即

$$\frac{U_1}{U_2} = \frac{n_1}{n_2}。$$

式中 n_1 、 n_2 分别表示变压器原、副线圈的匝数。如果 n_2 大于 n_1 ， U_2 就大于 U_1 ，这种变压器叫做升压变压器[图 11-13(a)]。如果 n_2 小于 n_1 ， U_2 就小于 U_1 ，这种变压器叫做降压变压器[图 11-13(b)]。改变原、副线圈的匝数比，就可以把电源电压改变成所需的电压。

原、副线圈中电流 I_1 、 I_2 之间又有怎样的关系呢？

变压器在改变交流电的电压、电流传输电能的同时，由于铁心和线圈发热，总要损失一部分能量，实际变压器的输出功率总比输入功率小一些。但是，通常变压器的效率还是很高的，可达 94%~95%，大型变压器（本章导图 3）可高达 97%~99.5%。我们把不考虑能量损耗的变压器，叫做理想变压器。对于理想变压器来说，变压器的输出功率 $U_2 I_2$ 等于它的输入功率 $U_1 I_1$ ，即

$$U_2 I_2 = U_1 I_1。$$

由
$$\frac{U_1}{U_2} = \frac{n_1}{n_2}，$$

可得
$$\frac{I_1}{I_2} = \frac{n_2}{n_1}。$$

可见，变压器工作时，原线圈和副线圈中的电流跟它们的匝数成反比。

变压器的输入功率决定于输出功率

利用变压器传输电能，当负载增加，需要增大输出功率时，输入功率是否也会发生相应变化呢？我们知道，当变压器已经选定并接入电路中工作时，它的输入电压、输出电压也就确定，但副线圈接入的负载发生变化时，功率也会随着变化。对理想变压器来说，当副线圈断开时，副线圈中电流等于零，输出功率也等于零，所以原线圈也不输入功率；而当副线圈负载增大时，输出电流 I_2 增大，输入电流 I_1 也随着增大，这就是说，输出功率增大时，输入功率也随着增大。所以，变压器的输入功率是由它的输出功率决定的。当然，变压器使用时，输出功率最大不可超过它的容量。

思考

1. 变压器可以改变稳恒的电压吗？为什么？
2. 在降压变压器中，绕制原、副线圈的导线相比较，哪个线圈导线较粗？为什么？

练习二十

1. 变压器的原线圈为 1140 匝，副线圈为 570 匝，把原线圈接在 220 伏的交流电源上。变压器工作时，如果副线圈中的电流为 2.2 安，试求副线圈两端的电压和原线圈中的电流。

2. 某变压器的副线圈为 24 匝，输入电压为 220 伏时，输出电压为 6 伏。当它工作时，通过副线圈的电流为 2 安，试求这台变压器的原线圈匝数和通过原线圈的电流。

3. 如图 11-14 所示，变压器原、副线圈的匝数比为 2 : 1，输入交流电压为 220 伏。A 是熔断电流为 1 安的熔丝，灯 L 的电阻值最小为多大时，变压器仍能正常工作？

4. 如图 11-15 所示，组成变压器副线圈的金属环槽内，放满了准备熔化的金属碎屑。变压器的原线圈为 1400 匝，加上 220 伏交流电压时，测得原线圈中的电流为 1 安，试求通过金属环中的电流。

四、电能的输送

工商业发达、人口众多的城市，需要大量的电能。这些电能除由附近的发电厂提供外，有时还需要由较远的发电厂供给。为此，需要架设较长的输电线路，把电能从发电厂输送给用户（彩图 6 是架设中的高压输电线）。然而输电导线本身有电阻，电流通过输电导线时，一部分电能将转化成内能，这样的电能损失是不可避免的。怎样才能减少这种损失呢？根据焦耳定律 $Q=I^2Rt$ 可知，要减少输电导线上的电能损失，有两种办法：减小输电导线的电阻和减小输电导线上的电流。

从电阻定律 $R = \frac{l}{S}$ 可知，在发电厂与用户之间距离已经确定，输电导线的长度 l 无法减小的情况下，要减小电阻应选用电阻率小、截面积大的导线。所以输电导线都是采用电阻率较小的材料，如铜或铝，但要增大导线的横截面积，必然要耗用很多金属材料，同时因为输电导线的自重增大，将给架设输电线带来很大困难，所以用减小电阻的办法来减少输电线路上电能的损失是很有限的。

由于输电导线中产生的热跟电流的平方成正比，所以通过减小输电导线中的电流来减少电能损失，将是一个有效的途径。若电流减小为原来的十分之一，电能的损失就可减小为原来的百分之一。在保证输送电功率不变的条件下，利用升压变压器升高输电电压，就能减小电流，所以远距离输电中一般都采用高压输电。在图 11-16 的实验中，在输电导线 AB、CD 电阻不变的情况下，用变压器 B_1 升高电压，采用高电压输电[图

11-6(b)]就可以减少输电线路上的电压损失 ($U_{\text{线}}=IR_{\text{线}}$) 和电能损失, 可以观察到图(b)中的小灯比图(a)中的小灯亮。

发电厂中的大型发电机, 机端电压最高不超过 18 千伏, 但这样高的电压还不符合远距离输电的要求, 所以还必须通过升压变压器, 把电压升高到所要求的数值, 如华东地区超高压输电电压为 500 千伏 (彩图 9 是 500 千伏变电所)。为了便于用户使用, 在用电地区必须再把电压降低, 图 11-17 是发电、输电和配电的示意图。

图 11-17

S: 在远距离输电过程中, 由于输电导线的电阻 R 为定值, 电压 U 升高, 电流 $I = \frac{U}{R}$ 将增大, 采用高压输电后, 输电导线上损耗的功率 $P = I^2R$ 不就更大了吗?

T: 这个想法是不对的。如果你认为 U 表示输送的电压, R 表示输电导线的电阻, 把输电导线中的电流写成 $I = \frac{U}{R}$, 显然是错误的。你混淆了

输电电压 U 和输电导线上损失的电压 $U_{\text{线}}$ 这两个不同概念。你将升压变压器输出的、加在输电导线两端的电压, 误认为是全部损失在输电导线上的电压。事实上, 输电导线在输送一定的电功率 P 时, 变压器输

出电压 U 越高, 则输电导线上的电流 $I = \frac{P}{U}$ 越小, 因此它的电压损耗 $U_{\text{线}} = IR_{\text{线}}$ 和功率损耗 $P_{\text{线}} = I^2R_{\text{线}}$ 必然都减小

*五、三相交流电 感应电动机

我们只要留意观察, 就会发现马路旁电线杆上的电线共有 4 根 [图 11-18(a)], 而进入居民家庭的进户线只有两根 [图 11-18(b)]。这是因为电线杆上架设的是三相交流电的输电线, 进入居民家庭的是单相交流电的输电线。

三相交流电的产生

什么是三相交流电? 它是怎样产生的呢? 我们可以利用图 11-19 的实验装置来说明。处在匀强磁场中的三个相同线圈固定在同一转动轴上, 每个线圈的平面互成 120° 角 (图 11-20), 每个线圈又分别跟一个灵敏电流计连接, 组成三个独立回路。实验时, 使线圈匀速转动, 就可以观察到三个灵敏电流计的指针都有偏转, 但它们达到最大值的时刻有先有后。这个装置就是最简单的三相交流发电机模型。从三相交流发电机中产生的电流, 叫做 b 。设每个线圈转动一周的时间为 T , 由于三个线圈互成 120° 角, 它们各自产生的感应电动势达到最大值的时刻都相差 $\frac{T}{3}$ 。若以图 11-20 中线圈 AX 经过中性面时开始计时, 则三个线圈中产

生的感应电动势 e 跟时间 t 的关系图象就如图 11-21 所示。如果把三个线圈分别与负载连接起来, 三相发电机就相当于三个独立的交流电源同时对外供电, 如图 11-22 所示。

在实际应用中，三相发电机内部的线圈和负载都不是如图 11-22 那样连接的。一种是把发电机的三组线圈的末端 X、Y、Z 连在一起，从每组线圈的始端 A、B、C 引出导线(图 11-23)，这叫做电源的星形连接(符号是 Y)，接线 00' 叫做中性线。中性线通常是跟大地相连的，所以又叫做零线。从每组线圈的始端引出的导线，叫做端线，也叫做相线。马路旁电线杆上的 4 根电线，其中 3 根是相线，1 根是零线。居民家庭中的进户线，一根是相线，另一根是零线。

三相交流电的电压

在三相电源作星形连接时，电源提供两种电压，一种是相线跟中性线之间的电压，叫做相电压，用 $U_{\text{相}}$ 表示；另一种是每两根相线之间的电压，叫做线电压，用 $U_{\text{线}}$ 表示，如图 11-24 所示。理论计算和实际测量都表明，在三相电源的星形连接中，线电压是相电压的 $\sqrt{3}$ 倍，即

$$U_{\text{线}} = \sqrt{3}U_{\text{相}}。$$

如果把发电机内部三个线圈的始端、末端依次连接(图 11-25)，这种连接方式叫做三角形连接(符号是 Δ)。在电源作三角形连接时，线电压就等于相电压，即

$$U_{\text{线}} = U_{\text{相}}。$$

感应电动机

在初中我们已经学习了直流电动机，直流电动机常应用于电力交通工具中。在工农业生产中，还有一种广泛使用的电动机，叫感应电动机。只要将三相交流电接入感应电动机，感应电动机就会转动起来。

在图 11-26 所示的实验装置中，有三组固定着的线圈，它们的平面互成 120° 角。线圈中央放一个小磁针，接入三相交流电后，小磁针就旋转起来，这表明三相交流电可以产生一个旋转磁场。

如果将小磁针换成一个日光灯起动器的铝质圆柱形外壳，在铝壳上刻有若干条直槽，当接入三相交流电后，可以观察到铝壳同样会旋转起来(图 11-27)。

感应电动机的结构类似于图 11-27 的实验装置，它由一个定子(固定不动部分)和一个转子(旋转部分)组成(图 11-28)。在定子的内侧凹槽内，嵌有互成 120° 角的三组线圈(叫定子绕组)，输入的三相交流电就是进入这三组线圈的。转子是由互相绝缘的硅钢片叠合而成的铁心和嵌在铁心周围凹槽中的闭合导体组成的[图 11-29(a)]。组成闭合导体的铜条(或铝条)和两端的铜环(或铝环)连在一起，形状像个鼠笼[图 11-29(b)]，所以这种电动机也叫做鼠笼式感应电动机。鼠笼式闭合导体，相当于图 11-27 中的中空铝质圆柱形外壳，在旋转磁场的作用下，转子导体中产生了感应电流，这一电流受到磁场力的作用，就使转子转动起来。

六、电容器电容

在交流电路中常用的元件，除了电阻器、电感线圈外，还有一种叫做电容器的元件。

电容器

两个靠得很近而又相互绝缘的导体就组成了电容器。常用的电容器是平行板电容器。最早出现的电容器是莱顿瓶电容器(本章导图4),它可以看成是一种变了形的平行板电容器。实际应用中,平行板电容器的种类很多,图11-30是几种常用的电容器。图11-31是它们在电路图中的符号。

平行板电容器在使用时,总是使它的一块板带正电荷,另一块板带等量的负电荷。由于异种电荷相互吸引,平行板电容器两板上的电荷,几乎全部集中在两板相对的内表面上(图11-32)。我们通常说的电容器所带的电量,是指它的一块板上所带的电量。电容器带电时,它的两板间就一定有电压。

电容

实验表明,对任何一个电容器来说,带的电量越多,两板间的电压就越高,电量跟电压的比是一个定值。不同的电容器,这个比值一般是不相同的。在电压相同的条件下,该比值越大的电容器所带的电量就越多,所以这个比值表示了电容器贮存电荷的本领的大小。我们把这个比值叫做电容器的电容(capacitance)。

如果用 Q 表示电容器所带电量, U 表示电容器两板间的电压,则电容 C 可以用下式表示

$$C = \frac{Q}{U}。$$

在法定计量单位中,电容的单位是法拉,简称法,符号是 F 。一个电容器,如果带1库的电量时,两板间的电压是1伏,这个电容器的电容就是1法。

$$1\text{法} = \frac{1\text{库}}{1\text{伏}}。$$

电容的常用单位还有微法(μF)、皮法(pF)等,它们之间的换算关系是

$$\begin{aligned} 1\mu F &= 10^{-6}F, \\ 1pF &= 10^{-12}F. \end{aligned}$$

平行板电容器电容的大小跟什么因素有关呢?我们可以做下面的实验。

在图11-33中, A 、 B 是平行板电容器的两块金属板。 A 板的上部装有绝缘手柄 E , B 板固定在静电计的金属杆上,用导线将 A 板与静电计的金属外壳连接。实验时,先使电容器带电,并始终保持所带的电量不变。

增大电容器两板间的距离[图11-33(a)],可以观察到静电计的指针偏转角度增大,即电容器两板间的电压变大。这表明平行板电容器的电容随两板间的距离增大而减小。

保持电容器两板间的距离,减小两板的正对面积[图11-33(b)],可以观察到静电计的指针偏转角度增大,即电容器两板间的电压变大。这表明平行板电容器的电容随两板的正对面积的减小而减小。

静电计是用来比较两个带电导体间电势差的仪器。使用时把它的金属球跟一个导体连接,金属外壳跟另一个导体连接(图11-34),静电计指针偏转角度越大,表示这两个导体间的电势差越大。

保持平行板电容器两板间的距离和两板的正对面积，在两板间插入绝缘体——电介质[图 11-33(c)]，可以观察到静电计的指针偏转角度减小，即电容器两板间的电压变小。这表明平行板电容器的电容由于在两板间插入电介质而增大。如果插入不同的介质，电容的增大也不相同。

实验研究表明：平行板电容器的电容，跟两板正对面积成正比，跟两板间的距离成反比，跟两板间的介质有关。

理论研究指出，对任何电容器来说，电容的大小只决定于电容器的大小、形状以及板间的介质等因素。电容是电容器自身的属性，跟电容器是否带电无关。电容器(本章导图 5)是电子电路和电器设备中的重要元件之一。

电容器的充电和放电

把电容器的两板分别接到电池的正、负极上，跟电池正极相连的金属板就带正电，跟电池负极相连的金属板就带负电，这一过程就是对电容器充电。充电结束时，两板之间的电压跟电池正负极的电压相等[图 11-35(a)]，充了电的电容器的两板之间有电场。

如果用导线把电容器带电的两板连接起来，两板上的电荷就互相中和，这一过程就是电容器放电。放电结束时，电容器两板都不带电[图 11-35(b)]，两板之间不再存在电压和电场。

练习二十一

1. 一个电容器，当它的电量加倍时，电容是不是也加倍？当它的电量等于零时，电容是不是也等于零？为什么？

2. 电容为 4.7 皮法、带电量为 9.4×10^{-5} 微库的电容器，两板间的电压是多少？

3. 某电容器，带电量减少 5.4×10^{-8} 库时，两板间的电压相应降低 200 伏，该电容器的电容是多大？

七、振荡电路

我们在初中已经初步知道电磁波的知识，知道电台和电视台播放的节目，都是通过电磁波发送出来的。要了解什么是电磁波，我们首先要学习振荡电路、振荡电流和电磁振荡的知识。振荡电流可以利用由电容器和线圈组成的电路来获得。产生振荡电流的电路叫做振荡电路。

振荡电流的产生

把电容器 C、电感线圈 L、电流计 G、电池组和单刀双掷开关 K 接成如图 11-36 所示的电路。先把 K 接触到点“1”，电池组对电容器充电。然后把 K 拨向触点“2”，使电容器 C 和线圈 L 组成闭合电路。这时可以观察到电流计的指针左右来回摆动，这表明电路中产生了大小和方向都作周期性变化的电流。由电感线圈 L 和电容器 C 组成的上述电路就是一种简单的振荡电路，叫 LC 电路。LC 电路中产生的大小和方向都作周期性变化的电流叫做振荡电流。

也可将电流计 G 的两端用两根导线与示波器的 Y 输入端连接，可同时观察振荡电流的波形。

下面我们来分析 LC 电路中产生振荡电流的过程。

当开关 K 与触点“1”接通，电池组对电容器充电，使电容器上板电势高于下板电势，两板间的电场方向向下，这时从电池组获得的能量全部集中在电容器的两板间的电场中。当开关 K 刚拨向触点“2”时，由于电容器还没有放电，LC 电路中电流为零[图 11-37(a)]。

接着，电容器通过电感线圈开始放电，由于电感线圈的自感作用，阻碍放电电流的增大，电流就不能立即达到最大值，而是逐渐增大。在放电过程中，电容器两板上的电荷逐渐减少，电压逐渐减小，两板间的电场逐渐减弱。同时，通过电感线圈的电流逐渐增大，电感线圈中的磁场逐渐增强。电路中的电场能逐渐转化成磁场能。当电容器放电完毕的瞬间，电流达到最大值。这时，电场消失，磁场最强，电场能全部转化为磁场能[图 11-37(b)]。

当电流达到最大值，电容器两板上已没有电荷，但电路中的电流并不立即停止。这是由于电感线圈的自感作用，阻碍电流的减小，而保持原来方向的电流继续流动。这样，使电容器在反方向上重新充电。在反方向充电过程中，随着电流的逐渐减小，电感线圈中的磁场也逐渐减弱，电容器两极所带的电荷逐渐增多，两板间的电场也逐渐增强。电路中的磁场能逐渐转化成电场能。当磁场消失的瞬间，电流为零，这时电场最强，磁场能全部转化为电场能[图 11-37(c)]。

随后，电容器又开始放电，两板上的电荷逐渐减少，电路中电流逐渐增大，但电流方向跟图 11-37(b)中的电流方向相反，电场能逐渐转化为磁场能。放电完毕的瞬间，电场能又全部转化为磁场能[图 11-37(d)]。

此后，在电感线圈的自感作用下，电流继续流动，再次使电容器充电，充电完毕，磁场能又全部转化成电场能，又回复到初始状态[图 11-37(e)]。

以后，电路就重复上述过程产生振荡电流。电容器两板上的电荷和电感线圈中的电流以及跟它们相联系的电场和磁场都在作周期性变化，这种现象叫做电磁振荡。

电磁振荡与简谐振动中能量转化的比较

电磁振荡是电磁运动，简谐振动是机械运动，它们在本质上是完全不同的。但它们都具有周期性变化的共性，在变化过程中，与电磁振荡相联系的电场能和磁场能，与简谐振动相联系的势能和动能都作周期性的转化。下面把 LC 电路中产生电磁振荡和单摆作简谐振动过程中的能量转化作一比较（图 11-38）。

电磁振荡的周期和频率

电磁振荡完成一次周期性变化需要的时间叫做周期，一秒钟内完成周期性变化的次数叫做频率。

如果改变图 11-36 中的线圈的自感系数 L 或电容器的电容 C，则电磁振荡的周期和频率都将发生变化。理论研究得出电磁振荡的周期 T，跟自感系数 L、电容 C 的关系是

$$T = 2\pi\sqrt{LC},$$

$$\text{频率} f = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}},$$

式中 T 、 f 、 L 和 C 的单位分别是秒、赫、亨和法。

电台、电视台工作时，产生电磁波的振荡电流的频率很高。例如，中央人民广播电台第一套节目以 540 千赫的频率播出；上海人民广播电台工作时用几种不同频率，如 990 千赫播出节目；调频台则以 101.7 兆赫、103.7 兆赫的频率播出节目；上海电视一台工作时以 184.25 兆赫的频率播送图象。这种高频振荡电流都由振荡电路来产生。

练习二十二

1. 要增大 LC 振荡电路中振荡电流的频率，你认为可以有几种途径？为什么？
2. 一个 LC 振荡电路，如果电感线圈的自感系数为 300 微亨、电容器的电容为 300 皮法，则该电路产生振荡电流的周期和频率各是多大？
3. 某 LC 电路产生的振荡电流的频率为 1260 千赫，当自感系数不变，而电容的增加量是原来的 3 倍时，振荡电流的频率将变为多大？

阅读材料 直流输电

在输送电能的 100 多年历史中，最早是采用直流输电的。三相交流发电机、变压器和感应电动机出现后，尤其在输电距离增大的情况下，交流输电就完全取代了直流输电。随着电力工业的发展，要求输电线路的长度增加，这样，对频率为 50 赫的交流电来说，导线的电感、电容的作用已不能忽略，尤其在跨过海峡给海岛输电或者需要穿过人口稠密的城市时，必须采用水下电缆或地下电缆，电缆的金属心线隔着电缆外层包皮与水（或大地）构成的电容，将使电能散失到大地或海水中去。理论和实验都指出，在这种情况下，当电缆的长度超过 50 千米时，交流输电已没有实际意义了。此外，现代的供电系统是把方圆数百千米（甚至更远）内的电厂（或电站）连成一个电力网，要求这样大范围内的许许多多的发电机都同步运行，送出的电流步调都要严格一致，这在技术上难度是很高的。所以直流输电重新得到人们的重视。近代大功率电子器件的制成，以及附属设备的问世，使高压直流输电冲破了技术上的障碍。1954 年，瑞典建成了世界上第一条高压直流输电线路，至今，全世界已有 40 多个直流输电工程投入运行。葛洲坝-上海高压直流输电工程的正常运行，展示着远距离、大功率的直流输电在我国正获得发展。

图 11-39 是现代高压直流输电线路的示意图。它是将交流系统 A 中的功率通过直流输电输送到交流系统 B 中去。在 A 处设一整流站，通过三相变压器 T_1 、 T_2 升压后，变换成所需要的高电压，再经整流器 H_1 、 H_2 ，将交流电转变成直流电，然后通过输电导线（或水下、地下电缆）输送到 B 处。在 B 处通过 H_3 、 H_4 ，将直流电转换成三相交流电，再经过变压器 T_3 、 T_4 ，变换为交流系统 B 中的电压，这样就完成了直流远距离高压输电的过程。

跟交流输电相比，直流输电明显的优点是：

1. 三相三线制的交流输电线路被两线制的两极直流输电线路所代替，节省了输电导线的材料，减少了线路中电能的损耗；用来架设输电导线的杆塔结构轻而简单；减小了架空的输电导线对通信设备的干扰。

2. 利用高压直流电缆远距离输电时，电缆的心线与大地、海水等构成的电容，对直流电无旁路作用，减少了能量损耗。

3. 直流输电的两端交流系统（例如图 11-39 中的交流系统 A 与交流系统 B），无需同步运行，两侧的交流电网，能以各自的频率和步调运行，例如有的国家就用直流线路来连结 50 赫与 60 赫的电力系统。

目前，直流输电还存在着一些缺点和技术难题。例如，直流输电中的换流设备，结构复杂、造价昂贵。除换流设备外，还需要加装滤波器等辅助设备。因此，只有在很远的距离输电时，才充分显示出直流输电的优势。

本章学习要求

1. 知道交流电的产生。
2. 知道中性面。
3. 知道交流电的瞬时值、最大值和有效值。
4. 知道交流电图象。
5. 理解交流电的周期和频率。
6. 理解交流电的有效值和最大值的关系。
7. 知道变压器的构造。
8. 理解理想变压器原、副线圈的电压、电流跟匝数的关系。
9. 知道远距离输电过程中采用高压输送，可以减少能量损失。
10. 知道电容器。
11. 理解电容的概念及其定义式。
12. 知道决定平行板电容器电容大小的因素。
13. 知道电容器的充电和放电。
14. 知道电磁振荡。
15. 知道振荡电路中产生振荡电流的过程。
16. 知道振荡电路中电场能和磁场能的相互转化。
17. 知道电磁振荡的周期和频率。
18. 知道电磁振荡的周期公式。

复习题

1. 单选题

(1) 以下几幅电流随时间变化的图象（图 11-40）中，属于交流电的图象是 []

- A. a, b; B. a, c;
C. b, d; D. b.

(2) 图 11-41 中，四个灯泡的规格均相同，变压器原、副线圈的匝数比 $n_1 : n_2 = 3 : 1$ ，当 L_2 、 L_3 、 L_4 都正常发光时，则关于灯泡 L_1 的下列说法中正确的是 []

- A. 一定正常发光；
B. 可能正常发光；
C. 实际功率小于额定功率；

D. 实际功率大于额定功率。

(3) 对于一个电容器来说, 下列说法中正确的是 []

- A. 如果电量增加, 则两板间电压减小, 电容变大;
- B. 如果电量增加, 则两板间电压不变, 电容不变;
- C. 如果电量减少, 则两板间电压变大, 电容变小;
- D. 如果电量增加, 则两板间电压变大, 电容不变。

(4) 在 LC 振荡电路中, 下列说法中正确的是 []

- A. 电容器开始放电时, 电路中磁场能最大, 电场能为零;
- B. 电容器开始放电时, 电路中电场能、磁场能各占一半;
- C. 电容器放电完毕时, 电路中磁场能最大, 电场能为零;
- D. 电容器放电完毕时, 电路中电场能最大, 磁场能为零。

(5) 一个 LC 振荡电路, 在电磁振荡过程中, 电容器每完成一次放电所需要的时间是 []

(A) $\frac{\pi}{4}\sqrt{LC}$;

(B) $\frac{\pi}{2}\sqrt{LC}$;

(C) $\pi\sqrt{LC}$;

(D) $2\pi\sqrt{LC}$ 。

2. 图 11-42 是某正弦交流电的电流-时间图象, 试根据图象回答:

- (1) 这个交流电的有效值;
- (2) 它的周期和频率。

3. 如图 11-43 所示, 矩形线圈的匝数为 10 匝, 电阻为 0.2 欧, 线圈的边长分别为 $l_1=4$ 厘米, $l_2=10$ 厘米。在磁感强度 $B=0.75$ 特的匀强磁场中, 以每秒 50 转的转速绕 OO' 轴匀速转动。求线圈中产生的感应电动势的有效值。若将线圈与电阻 $R=1.8$ 欧相连接组成闭合电路, 则通过电阻 R 中的电流的有效值是多大?

4. 一个标有“220V, 100W”字样的灯泡, 接在交流电源上。正常发光时, 灯丝中通过的电流最大值和有效值各是多大?

5. 某直流电通过阻值是 500 欧的电阻时, 电阻上消耗的功率为 24.2 瓦; 若改用交流电, 要使这个电阻上消耗的功率是上述的 2 倍, 则这一交流电的电压最大值是多少?

6. 一变压器, 原线圈的匝数是副线圈匝数的 10 倍, 原线圈接在电压为 100 伏的交流电源上, 这个电源装有过载保护装置, 允许通过的最大电流为 1.5 安, 那么,

(1) 当副线圈接入一个标有“12V, 10W”字样的灯泡时, 求原、副线圈中的电流。

(2) 副线圈中最多能够接入多少个上述规格的灯泡?

(3) 若所有灯泡均断开, 原、副线圈中的电流又各是多少?

7. 变压器原线圈电压为 220 伏时, 副线圈的电压为 22 伏; 若将副线圈增加 100 匝后, 它的两端电压将增加为 33 伏。求该变压器原、副线圈原来的匝数。

8. 将最大值为 $10\sqrt{2}$ 伏的正弦交流电压, 分别加在图 11-44(a) 中的

P、Q 两点和图 11-44(b)中的 M、N 两点。若已知电阻之比为 $R_1 : R_2 = 1 : 4$ ，图 11-44(b)中变压器原、副线圈匝数比为 $n_1 : n_2 = 1 : 2$ 。试求两个电流表的读数之比。

9. 一电容为 20 微法的电容器，当它所带的电量增加 6.0×10^{-5} 库时，电容器的两个极板间的电压将增加多少？

10. LC 振荡电路中，如果 $L=800$ 微亨， $C=200$ 皮法，则此电路中振荡电流的频率和周期各是多大？

11. 某 LC 振荡电路，电容器的电容为 30 微法，若振荡电流的频率为 500 千赫，则电感线圈的自感系数应多大？

12. 电容为 270 皮法的电容器与电感线圈组成振荡电路时，振荡电流的频率为 535 千赫；若要使振荡电流的频率增大为 1605 千赫，则应使用多大的电容与该电感线圈组成振荡电路？

12 . 波动

Waves

- 1 . 水波
- 2 . 水波的反射
- 3 . 波长不同的水波通过宽度相等的孔产生的衍射

人们交流思想感情相互交谈时，信息是通过空气中形成的声波来传递的；电台播送的语言、音乐等声音信号和电视台播送的图象信号、伴音信号是通过发射天线发送的无线电波来传递的；光纤通信则是利用光波来实现信息传递的。各种波之间虽然存在着差异，但它们在传播过程中都具有共同的特征，例如都存在着反射现象(本章导图 2)、折射现象。波是物质运动的一种形式，波既传递信息，也传递能量。这一章我们将学习有关波的基础知识以及它们在实际中的一些应用。

一、机械波

一颗石子落入湖水中，在平静的湖面上就会激起一圈圈不断向外扩展的同心圆，这就是水波(本章导图 1)。我们可以利用图 12-1 所示的发波水槽观察水波的产生。拨动弹簧片 BC 使它上下振动时，悬挂在弹簧片端点的小球 A 就会周期性地与槽内水面接触，产生一系列以 A 为圆心的水波。海水在大风等外界因素的扰动下形成的海浪，也是水波。地壳由于运动和挤压，常会释放出巨大的能量，一定范围内的地面便发生振动，这种振动在地壳内部和地球表面的传播就形成地震波。

从以上现象可知，由于外来的扰动，水面、地球表面上的某一质点或某一部分质点引起的机械振动，会沿着这些物体传播开去。水面、地球表面就成为传播振动的媒介物，我们把这种传播振动的媒介物叫做介质。介质中某一点发生的机械振动能够向各个方向传播，机械振动在介质中的传播过程，叫做机械波。

机械波的形成

我们可以利用图 12-2 所示的实验来观察波的形成。在投影仪上水平放置一玻璃板，玻璃板上放一金属细链 AB，B 端固定，让 A 端在玻璃板上沿着垂直于细链的方向振动，便可在屏幕上观察到细链上出现凸凹相间的波形，表明振动从 A 端传到 B 端。

振动为什么会沿着细链传播呢？我们可以把介质看成是由大量质点组成的物质，当介质中某一个质点发生振动时，由于相邻质点之间都存在着相互作用力，就会带动它周围的质点跟着振动起来，这些振动的质点又会带动各自周围的质点发生振动，这样，振动就在介质中逐渐传播开去。

以细链为例，把它的每一个环简化成一个质点，如质点 1、2、3...(图 12-3)。各个质点之间是相互联系着的，所以当质点 1 开始振动后，就会带动邻近的各个质点依次振动，并且由于它们开始振动的时刻依次滞后，因此，从任一时刻来看，这些相邻质点所处的位置就不完全相同，但各个质点振动的周期、振幅都和质点 1 相同，于是就形成了波形。图 12-3 表示质点 1 开始振动后，每隔四分之一周期，细链上波形变化的情

形。可以看出，在细链上所形成的凸凹相间的波形沿着波的传播方向传播开去。

我们还可利用图 12-4(a)所示的实验，观察螺旋弹簧中波的形成。螺旋弹簧每一圈的间距是均匀的，把这样的螺旋弹簧 CD 套在水平放置的日光灯管上，D 端固定，C 端与固定在弹簧片 M 上端的振动球 P 相连。当 P 球沿水平方向左右振动时，C 端就按图 12-4(a)中箭头方向左右振动。可观察到弹簧上出现疏密相间的波形，并从 C 端沿弹簧传播到 D 端。图 12-4(b)上画出了每隔四分之一周期时，螺旋弹簧上波形变化的情形。

上述两个实验表明，要在介质中产生波，必须要有波源的振动和传播振动的介质。机械波传播的只是振动这种运动形式，而介质本身并没有随着波发生迁移。

远离波源的质点能够振动，表明它们获得了能量。这是由于波源在振动时，首先将能量传递给邻近的质点，而邻近的质点在引起较远质点振动时，又把能量传递过去。这样，能量就由近及远地传递给远离波源的质点。所以波动也是能量传递的一种方式。

问题探讨

S：我看到河水中浮着的木块，随着水波上下振动的同时又向前运动，这是不是说明介质随着水波一起发生了迁移？

T：观察水面发生的波动时，要排除河水流动或风的吹动等因素。你不妨观察游泳池水面上的漂浮物（如救生圈），记下水面平静时它所在的位置，再观察发生水波时它的位置，你一定可以发现漂浮物只在原来位置发生上下振动，并没有随着水波一起漂浮开去。所以，在波的传播过程中，介质并没有发生迁移。

横波和纵波

在波的传播过程中，质点的振动方向跟波的传播方向并不一定相同。在图 12-3 所示的凸凹波中，质点上下振动，波向右传播，质点振动方向与波的传播方向垂直，这种波叫做横波。在横波中，通常把凸起的部分叫做波峰，凹下的部分叫做波谷。

在图 12-4 所示的螺旋弹簧上形成的疏密波中，质点左右振动，波向右传播，质点振动方向与波的传播方向在同一直线上，这种波叫做纵波。在纵波中，通常把质点分布较密的部分叫做密部，质点分布较稀的部分叫做疏部。

地震波在地壳中传播的是纵波，沿地面传播的是横波。

练习二十三

1. 有了振动一定能够产生波吗？试举例说明。

2. 试指出图 12-3 中，再经过 $\frac{1}{4}T$ ，即 $t = 1\frac{1}{2}T$ 时，质点 17、18、19 的振动情形。

3. 试根据图 12-5 中波的传播方向，在图中画出质点 A、B、C 和 D 在这一时刻振动的速度方向。

4. 试根据图 12-6 中给出的质点 P 的振动速度方向，在图中画出这列波的传播方向。

5. 一列从右向左传播的横波, 如图 12 - 7 所示。质点 A、B 将向什么方向开始振动? 哪一个质点先开始振动?

图 12—5 图 12—6 图 12—7

二、波的描述

不论是水波、声波还是其他种类的波, 它们的形式虽然不同, 但都具有共同的传播特征, 可以用相同的物理量来描述。

波长、频率和波速

我们进一步观察图 12 - 3 的横波传播情况, 可以看出质点都在自己的平衡位置附近做周期性的振动。介质中质点完成一次全振动所经历的时间叫做周期, 用符号 T 表示。在波传播过程中, 各个质点振动的周期都相同, 都等于波源的振动周期。介质中的质点每秒完成全振动的次数叫做频率, 用符号 f 表示。周期和频率互为倒数, 即

$$T = \frac{1}{f}。$$

在图 12 - 3 中, 从质点 1 开始振动, 到振动传播到质点 13, 正好出现一个完整的波形, 随着振动的继续传播, 质点 13 跟质点 1 的振动步调是完全一致的, 这两个质点在振动过程中的任何时刻, 对平衡位置的位移总是相同的。同样, 质点 14 和质点 2, 质点 15 和质点 3, 等等, 它们在振动过程中的任何时刻对平衡位置的位移也总是相同的。

沿着波的传播方向, 两个相邻的、在振动过程中对平衡位置的位移总是相同的质点间的距离, 叫做波长(wavelength)。波长用符号表示。

图 12—8 图 12—9

在横波中, 两个相邻的波峰中央的距离或两个相邻的波谷中央的距离, 都等于波长, 如图 12 - 8 所示。在纵波中, 两个相邻的密部中央的距离或两个相邻的疏部中央的距离也都等于波长, 如图 12 - 9 所示。

问题探讨

S: 根据波长的定义, 我认为在图 12 - 10 中金属细链上的 M 点和 N 点, 它们是位移相同的两个相邻质点, 所以它们之间的距离 l 是一个波长。这样理解对吗?

T: 不对, 你没有理解“位移总是相同”的含义。波长是指在波的传播过程中位移总是相同的两个相邻质点间的距离。图中质点 M、N 在这一时刻它们的位移虽然相同, 但下一时刻它们的位移就不相同了。在图中, 跟 M 点相邻、并且任何时刻位移总是相同的点是 P 点, 所以 M 点跟 P 点之间的距离 L 等于一个波长。

从图 12 - 3 中还可以看到, 质点 1 振动一个周期后, 质点 13 开始振动, 即在一个周期里, 波在介质中传播的距离是一个波长。所以, 波传播的速度 v 跟波长 λ 和周期 T 的关系, 可用下式表示

$$v = \frac{\lambda}{T}。$$

因为 $T = \frac{1}{f}$, 所以上式又可写成

$$v = \lambda f。$$

即波速等于波长和频率的乘积。这个关系，虽然是从机械波得到的，但是它对其他种类的波也是适用的。

思考

1. 波长是 3 米的波，在波源完成 20 次全振动的时间内，这列波传播了多少距离？

2. 有人说：“波在某一介质中传播时，频率越高，传播的速度就越大。”也有人说：“波在某一介质中传播时，波长越长，传播的速度就越大。”他们的说法对吗？为什么？

问题探讨

S：波从一种介质进入另一种介质传播时，波速、波长和频率都要发生改变，对吗？

T：不对。无论机械波还是其他种类的波，所有的波的频率都是由各自的波源决定的，即波的频率不随介质的不同而改变，而波长和波速则与介质有关。波从一种介质进入另一种介质传播时，波速 v 发生了变

化，由公式 $v = \lambda f$ 可知，波长 λ 也会发生相应的变化。图 12 - 11 所示是一列波从介质 1 进入介质 2，波速、波长都发生了变化，波在介质 2 中的速度 v_2 小于在介质 1 中的速度 v_1 ，波长 λ_2 也相应地小于 λ_1 ，但波的频率并没有变化。

图 12—11

[例题] 停泊在海中的甲、乙两艘渔船，在海浪冲击下每分钟作 100 次全振动，两船相距 12 米（两船连线跟波的传播方向一致）。当甲、乙两船同时都处在海浪的波峰时，在两船之间还有一个波峰。试求：(1) 渔船振动的周期；(2) 海浪的波长；(3) 海浪传播速度的大小。

解：(1) 根据已知条件，渔船每分钟作 100 次全振动，则渔船每作一次全振动所需的时间，即周期是

$$T = \frac{60}{100} \text{ 秒} = 0.6 \text{ 秒}。$$

(2) 已知两船同时都处在海浪的波峰时，它们之间还有一个波峰，也就是两船之间的距离为 2 倍波长，即 $2\lambda = 12$ 米，所以海浪的波长

$$\lambda = \frac{12}{2} \text{ 米} = 6 \text{ 米}。$$

(3) 根据波速、波长和周期之间的关系，可以求得海浪传播速度的大小是

$$v = \frac{\lambda}{T} = \frac{6}{0.6} \text{ 米 / 秒} = 10 \text{ 米 / 秒}。$$

横波图象

为了形象地表示波动，可以建立一个平面直角坐标系，用横坐标表示介质中连续的几个质点的平衡位置，用纵坐标表示各个质点偏离平衡位置的位移，这样就可以画出某一时刻的波的图象。该图象是一条正弦（或余弦）曲线，由此表明了波动的周期性。它与过去学过的简谐振动

图象相比，两者很相似。这是由于简谐振动在介质中传播形成的波是简谐波，它的图象也是正弦或余弦曲线。但是它们的物理意义是不同的。

图 12—12

图 12 - 12(a)表示某一时刻细链上形成的波形，图 12 - 12(b)是这一时刻的波的图象。波的图象表示各个质点在这一时刻的位移。根据波的图象就可以知道质点的振幅和这列波的波长，以及在已知波的传播方向的情况下，任一质点在该时刻的振动方向。

波形是随时间而改变的，同一列波，在传播过程中，不同的时刻有不同的波的图象。

思考

在横波图象中，是不是任何两个波峰间的距离都等于一个波长？

练习二十四

1. 一列波的波长是 0.17 米，波速是 340 米 / 秒，试求这列波的频率。

2. 频率为 4.0×10^{14} 赫的波，在某介质中的传播速度是 2.25×10^8 米 / 秒，求这列波在该介质中的波长。

3. A、B 两列波的传播速度都是 3.0×10^8 米 / 秒，已知波 A 的频率为 184.25 兆赫，波 B 的频率比 A 高 6.5 兆赫，试分别计算 A、B 两列波的波长。

4. 一波源在 2 分钟内作 96 次全振动，它的频率、周期各是多少？如果该波源产生的波在某介质中传播的速度是 16 米 / 秒，那么，这列波的波长是多少？

5. 地震引起的纵波和横波在地表附近的传播速度分别等于 9.1×10^3 米 / 秒和 3.7×10^3 米 / 秒。某观测站记录了一次地震时纵波和横波到达的时刻，发现两者相差 4.0 秒，试求地震的震源与这个观测站间的距离。

6. 某列波的图象如图 12 - 13 所示，那么，这列波的波长是多少？介质中各质点的振幅是多大？

图 12—13 图 12—14

7. 图 12 - 14 所示是某一时刻的波形，如这列波沿 x 轴正方向传播，那么，A、B、C、D 各质点在这一时刻的速度方向如何？如果波沿 x 轴的反方向传播，以上各质点的速度方向又如何？这 4 个质点中，可以知道这一时刻位移准确值的是哪几个质点？对应的位移值各是多少？8 图 12 - 15 所示是一列沿 x 轴正方向传播的波在某一时刻的图象。试回答：(1) 这列波的波长是多少？(2) 这一时刻质点 P、Q、R 的位移各是多大？(3) 以后这 3 个质点中哪一个质点最先回到平衡位置？(4) 如果要求这列波的波速，还需要知道什么物理量？

图 12—15

三、波的干涉

前面研究的是从波源发出的一列波的传播特性。在实际情况中，常可看到几列波同时在介质中传播。那么，两列或几列波在介质中相遇时，将会发生什么现象呢？

波的叠加

将两块石子投到水面上的两个不同地方，会激起两列圆形水波。它们相遇时会互相穿过，各自保持圆形波继续前进，与一列水波单独传播时的情形完全一样，这两列水波互不干扰。

观察其他波动现象，同样可以发现在同一介质中传播的几列波相遇时，每一列波都能保持自身的频率、波长、振动方向和传播方向不发生变化，这叫做波的独立传播原理。

两个或几个运动着的物体相遇时，发生碰撞，结果它们原来的运动状态一定会发生改变。只有波相遇时会互相穿过，相遇后跟没有遇到其他波一样，能保持本身特性继续传播。

两列波相遇时是怎样互相穿过的呢？我们可以仔细观察下述实验。

图 12—16

将橡皮绳 AB 平放在光滑地板上，在 A 端发出波 1，在 B 端发出波 2，如果 A、B 处的两个波源经过 $\frac{1}{2}$ 周期后都停止振动，就会有两列波分别从橡皮绳的两端出发相向传播（图 12 - 16）。可以看到，这两列波相遇时，绳上该处质点的位移等于两列波单独传播时引起的位移的矢量和（图 12 - 17）。

在两列波重叠的区域里，任一时刻某一质点的位移，等于这两列波单独传播到该点时引起的位移的矢量和，这叫做波的叠加原理。这一原理对于一切波都是适用的。

图 12—17

波的干涉

一般地说，振动频率、振动方向都不相同的几列波在介质中叠加时，情形是很复杂的。我们只讨论一种最简单的但却是最重要的情形，就是两个振动方向、振动频率都相同的波源所发出的波的叠加。

在图 12 - 18 所示的发波水槽实验装置中，振动着的金属薄片 AB，使两个小球 S_1 、 S_2 同步地上下振动，由于小球 S_1 、 S_2 与槽中的水面保持接触，构成两个波源，水面就产生两列振动方向相同、频率也相同的波，这样的两列波相遇时产生的现象如图 12 - 19 所示。图 12 - 19(a) 是从发波水槽上方拍摄的照片，从照片中可以清晰地看到，在振动着的水面上，出现了振动加强和振动减弱区域相互间隔分布的情况。

为什么会产生这种现象呢？我们可以用波的叠加原理来解释。

图 12 - 19(b) 是产生上述现象的示意图。 S_1 和 S_2 表示两列波的波源，它们所产生的波分别用两组同心圆表示，实线圆弧表示波峰中央，虚线圆弧表示波谷中央。某一时刻，如果介质中某点正处在这两列波的波峰中央相遇处[图 12 - 19(b) 中的 a 点]，则该点(a 点)的位移是正向最大值，等于两列波的振幅之和。经过半个周期，两列波各前进了半个波长的距离，a 点就处在这两列波的波谷中央相遇处，该点(a 点)的位移就是负向最大值。再经过半个周期，a 点又处在两列波的波峰中央相遇处。这样，a 点的振幅就等于两列波的振幅之和，所以 a 点的振动总是最强

的。这些振动最强的点都分布在图 12 - 19(b)中画出的粗实线上。某一时刻，介质中另一点如果正处在一系列波的波峰中央和另一系列波的波谷中央相遇处[图 12 - 19(b)中的 b 点]，该点位移等于两列波的振幅之差。经过半个周期，该点就处在一系列波的波谷中央和另一系列波的波峰中央相遇处，再经过半个周期，该点又处在一系列波的波峰中央和另一系列波的波峰中央相遇处。这样，该点振动的振幅就等于两列波的振幅之差，所以该点的振动总是最弱的。如果两列波的振幅相等，这一点的振幅就等于零。这就是为什么在某些区域水面呈现平静的原因。这些振动最弱的点都分布在图 12 - 19(b)中画出的粗虚线上。可以看出，振动最强的区域和振动最弱的区域是相互间隔开的。

频率相同的波，叠加时形成某些区域的振动始终加强，另一些区域的振动始终减弱，并且振动加强和振动减弱的区域相互间隔，这种现象叫做波的干涉(interference)。形成的图样叫做干涉图样。

只有两个频率相同、振动方向相同的波源发出的波，叠加时才会获得稳定的干涉图样，这样的波源叫做相干波源，它们发出的波叫做相干波。

不仅水波，一切波都能发生干涉，干涉现象是一切波都具有的重要特征之一。

思考

图 12—20

1. 甲、乙两同学分别用竹竿击打湖面，湖面上就产生两列水波，那么，在两列水波相遇处，会获得稳定的干涉图样吗？为什么？

2. 如图 12 - 20 所示，相干波源 S_1 、 S_2 发出的两列波，在介质中相遇叠加，实线表示这两列波的波峰中央，虚线表示这两列波的波谷中央。问图中 a、b、c、d 四个质点，哪些点振动最强。哪些点振动最弱。

四、波的衍射

波在传播过程中，遇到障碍物时，在障碍物的边缘会产生什么现象呢？遇到孔隙时，在孔隙的边缘又会出现什么现象呢？

池塘中的水波遇到木桩时，水波能够绕过木桩继续传播；海中的波涛，也能绕过设置在海中的灯塔继续前进，好像木桩、灯塔并不存在一样。

波能够绕过障碍物或孔隙继续前进的现象，叫做波的衍射(diffraction)。

不仅水波有衍射现象，一切波都能发生衍射，通过衍射把能量传送到“阴影”区域。波的衍射也是一切波都具有的重要特征之一。

然而，并不是在任何情况下，波都会产生明显的衍射现象的，让我们来观察下面的实验。

在图 12 - 21 所示的发波水槽中，让金属弹簧片 AB 带动板条 CD 一起上下振动，在水槽中产生平面波且向前方传播。如果在波前进的方向上放一块较长的挡板 PQ 作为障碍物[图 12 - 21(a)]，可以观察到在 PQ 后面的水面是平静的，即水波的衍射现象并不明显。如果换用一块较短的挡

板 P'Q'，则水波能绕过障碍物 P'Q' 继续传播[图 12 - 21(b)]，这时就好像 P'Q' 不存在一样。

图 12—21 图 12—22 图 12—23

如果在水波前进的方向上放置左右两块挡板 M、N，并在两者之间留有一定的距离，形成孔隙（图 12 - 22），改变 M、N 之间的孔隙宽度，可以观察到水波通过孔隙的情形是不同的。当孔隙宽度远大于水波的波长时，水波通过孔隙后差不多与原来的相同，没有明显的衍射现象[图 12 - 23(a)]；减小孔隙的宽度，使它与水波的波长接近，这时水波通过孔隙，在靠近孔的边缘处发生了弯曲[图 12 - 23(b)]；继续减小孔隙宽度，使它更接近水波的波长时，水波通过这一狭缝后便成为近似于点波源发出的圆形波，衍射现象更加显著。

可见，能够发生明显的衍射现象的条件是：障碍物或孔隙的尺寸比波长小，或者接近波长。

图 12—24

思考

在图 12 - 24 中，从波源 S 发出的一列波可以传播到小孔 A。已知小孔的大小与波长接近，那么，这列波经过小孔后将如何传播？

*五、声波

在初中我们已经学习过有关声音的一些知识。知道发声物体——声源都是振动着的。位于空气中的声源振动时，将引起周围空气周期性的压缩和松弛，产生相应的疏密变化，并不断向外传播，就形成了声波。空气分子的振动方向跟波的传播方向在一直线上，在空气中传播的声波是纵波。

声源的振动由声波传送到人耳，使鼓膜作受迫振动，于是就产生了声音的感觉。能引起人耳听觉的振动频率范围约在 20 赫到 20000 赫之间，低于 20 赫和高于 20000 赫的声振动，就不能引起人的声音感觉。

传播声音的介质，可以是空气，也可以是别的物体。把耳朵贴在铁轨上，就能听到远处的火车行驶的声音，这是固体传声。岸上的脚步声和说话声可以把水中的游鱼惊走，这是由于水把声音传给了鱼。实验表明，气体、液体、固体都是传播声音的介质，只是在不同介质中，声波传播的速度不同。气体中声波的传播速度与温度有关。声波在空气中的传播速度 0 时是 330 米/秒，20 时是 344 米/秒，30 时是 349 米/秒。下表是几种介质中的声速。

介质	声速(米/秒)	介质	声速(米/秒)
氧气(0)	316	硬橡胶	1570
空气(0)	330	铜	3800
酒精	1275	钢、铁	4900 ~ 5000
水	1450	玻璃	5000 ~ 6000

[例题]在室温下，某一频率的声波在空气中传播时，波速是 340 米/

秒，波长是 0.34 米；当它进入另一介质中传播时，波长是 1.45 米。求这列声波在另一介质中的传播速度。

解：波从一种介质进入另一种介质传播时，频率 f 不变。

已知 $\lambda_1=0.34$ 米， $v_1=340$ 米/秒， $\lambda_2=1.45$ 米。由波速、波长和频率的关系式，可以写成

$$f = \frac{v_1}{\lambda_1} = \frac{v_2}{\lambda_2} ,$$

所以
$$v_2 = \frac{\lambda_2}{\lambda_1} v_1 = \frac{1.45}{0.34} \times 340 \text{米/秒} = 1450 \text{米/秒}。$$

这列声波在另一介质中的传播速度是 1450 米/秒。

声波的反射和折射

对着远处山崖发出呼喊，不一会儿就能听到回声，这就是声波的反射现象。声波的反射现象是很常见的。夏季雷雨时，在一次闪电后，常会有“雷声隆隆”的感觉。这是由于闪电引起的空气振动在各个距离不同的云层界面发生多次反射的结果。在会议厅里讲话、音乐厅里演奏时，为了避免声波在墙壁、天花板上多次反射而产生回声的干扰，可采用帐幔等各种吸音装置。高架道路两侧装置的隔音挡板，是利用声波反射以减少车辆行驶时发出的噪声对环境的污染。

频率高于 20000 赫的声波叫做超声波。超声波虽然与一般声波的基本性质相同，但它还有许多特点，从而得到广泛的应用。如利用超声波方向性强的特点，常在海洋作业中用来确定目标的位置。超声波从舰船底部发出后，如果遇到潜艇、鱼群或海底，就会被反射回来，根据发出的超声波脉冲和接收到的反射波脉冲两者的时间间隔和波速，就可以确定潜艇、鱼群的位置或海底的深度。在医学上超声波常用来诊断病人体内某些内脏的病变情况。超声波探伤是超声波在工业方面的应用之一。用超声波探头对金属铸件扫描（图 12 - 25），根据接收到的从铸件内部反射回来的超声波的强弱和反射时间的不同，就可知道铸件内部是否有伤痕、气孔并可确定伤痕、气孔的大小和位置。

图 12—25

(a)晴朗的白天地面声速 v 大于高空声速 v' (b)晴朗的白天声波折向高空 图 12—26

在通常情况下，声波是沿着直线传播的，由于温度不同，声波的传播方向会发生偏折。如前所述，声波在温度高的空气中的传播速度大，反之，声速就较小[图 12 - 26(a)]。在晴朗的白天，地面气温高于高空气温，声波向高空偏折[图 12 - 26(b)]。在夜晚，靠近地面的空气温度降低较快，声波向地面偏折。所以，在同样宁静的情况下，夜晚听远处传来的声音较白天清晰。

声波的干涉和衍射

几列声波在空中相遇时，同样遵循波的独立传播原理。歌唱家在音乐厅演唱时，她发出的声波和伴奏乐器发出的声波在大厅中相遇，它们互相穿过，互不干扰，台下的听众，不论座位在什么地方，都能听到歌声和乐器声，并不因声波相遇而有所影响。但是，从相干波源（声源）发出的两列声波相遇时，也同样会产生干涉现象。

我们可用图 12 - 27 所示的实验来观察两列频率相同、振动方向相同的声波在空气中相遇时所产生的干涉现象。把两个相同的扬声器 A 和 B 接在音频信号发生器上，观察者在离扬声器几米远的地方移动自己的位置，可以发现听到声音最响和最轻的位置是互相间隔开的，这就是声波的干涉现象。这时扬声器 A 和 B 是两个相干波源，在两列声波的叠加区域内，两列声波的密部中央相遇处（疏部中央相遇处），听到的声音最响；一列声波的密部中央与另一列声波的疏部中央相遇处，听到的声音最轻。

图 12—37

思考

两人谈话，会不会产生声波的干涉现象？为什么？

练习二十五

1. 超声波在空气中的传播速度为 340 米/秒，求超声波的最长波长。
2. 拍手后 0.6 秒听到对面高墙反射回来的回声，那么人与墙之间的距离（设声速为 340 米/秒）是多少？
3. 如果回声到达人耳比原来发出的声音滞后 0.1 秒以上，人们就能够区分回声跟原来的声音。为了听到回声，反射声波的障碍物至少应离开我们多远？猎人与障碍物相距 1020 米，猎人在射击后几秒钟才听到回声？设声速为 340 米/秒。
4. 一小艇向着悬崖航行，在距陡峭崖壁 650 米处鸣笛，经 4 秒听到回声，试问小艇航行的速度多大（设声速为 340 米/秒）。
5. 利用超声波可探测确定鱼群的位置。在一条装有超声波发射和接收装置——声呐的渔船上，当它向选定方向发射频率为 5.8×10^4 赫的超声波后，经过 0.64 秒接收到从鱼群反射回来的反射波。已知超声波在水中的波长为 2.5 厘米，试求鱼群跟渔船之间的距离。

阅读材料 惠更斯原理

在波动中，波源的振动是通过介质中的质点依次传播出去的，因此每个质点都可以看作是新的波源。例如图 12 - 28 中，水面波在传播时，遇到一障碍物，当障碍物上小孔的大小与波长相差不多时，就可以观察到穿过小孔的波是圆形的，与原来波的形状无关。这说明小孔可以看作是新的波源。

图 12—28

1. 波线 2. 波前 3. 波面

图 12—29

从波源发出的波经过同一传播时间而达到的各点所组成的面，叫做波面。最前面的波面叫做波前或波阵面。波面是平面的波称为平面波，如图 12 - 29(a)所示。波面是球面的波称为球面波，如图 12 - 29(b)所示。从波源沿着传播方向画出的带箭头的线称为波线，它表示波动的传播方向。在各向同性的介质中，波线是与波面垂直的。平面波的波线是垂直于波面的平行线；球面波的波线沿着以波源为中心的半径方向。

在总结许多实验现象的基础上，荷兰物理学家惠更斯（1629—1695）在 1690 年提出：介质中波动传播到的各点，都可以看作是新的波源（称为子波源）。在其后的任意时刻，从同一波面上每一点各自发出的波（称为子波），在波的传播方向上所形成的包面，就是下一时刻的新的波面，这就是惠更斯原理。

惠更斯原理对任何波动过程都是适用的。而且波动经过的介质，不论是均匀的或非均匀的，是各向同性的还是各向异性的，都可以根据这一原理，用几何作图的方法，由已知的某一时刻波面的位置，确定下一时刻波面的位置，从而确定波的传播方向。因而惠更斯原理在很广泛的范围内，解决了波的传播问题。

下面，分别以球面波和平面波为例，说明惠更斯原理的应用。设有一列波从波源 O 以速度 v 在各向同性的均匀介质中向四周传播。已知在 t 时刻的波面是以波源 O 为球心、以 R_1 为半径的球面 S_1 ，如图 12 - 30 所示。根据惠更斯原理，波面 S_1 上的各点都可以看成子波的波源。为了作出这一列波在 $t + \Delta t$ 时刻的新的波面，我们以 S_1 面上的各点（子波源）为球心， $r = v \Delta t$ 为半径，分别作出许多半球面，这些半球面的包面，就是 $t + \Delta t$ 时刻的新的波面 S_2 。显然， S_2 是以波源 O 为球心、 $R_2 = R_1 + v \Delta t$ 为半径的球面，如图 12 - 30 所示。由此可知，在各向同性的介质中，球面波的新的波前，仍然是与原球面同心的球面。

图 12—30

如果已知某平面波在某一时刻的波面为 S_1 ，用惠更斯原理也可以求出下一时刻的波面 S_2 ，如图 12 - 31 所示。从图中可知，在各向同性的介质中，平面波的新的波前仍然是平面波。

当一列波在不均匀的各向异性的介质中传播时，同样可以用上述的几何作图法求出新的波面，但新的波面的几何形状和传播方向都有可能发生变化。

惠更斯研究得出的波动理论能很好解释波的衍射等现象，并能导出波的反射定律和折射定律，由此，奠定了光的波动理论基础。

图 12—31

本章学习要求

1. 知道波是振动的传播。
2. 知道机械波及其产生的条件。
3. 知道波是传递能量的一种方式。
4. 理解横波，知道纵波。
5. 知道横波的图象。
6. 知道波长。理解波长、频率和波速的关系。
7. 知道波的叠加。
8. 知道波的干涉现象及其产生条件。
9. 知道波的衍射现象以及能够发生明显衍射的条件。

复习题

1. 单选题

(1)关于机械波，下列说法中正确的是 []

- A. 作机械振动的物体，周围一定有机波存在；
- B. 机械波的传播过程是介质中各质点迁移的过程；
- C. 机械波的传播过程是振动形式与能量的传播过程；
- D. 机械波的传播方向一定跟振动方向一致。

(2)图 12—32 所示是某一时刻一列向右传播的横波波形，这一时刻质点P正好位于平衡位置B。则经 $\frac{T}{2}$ ，质点P将 []

- A. 到达 O 点向左运动；
- B. 到达 D 点向右运动；
- C. 回到 B 点向上运动；
- D. 回到 B 点向下运动。

(3)在波的传播方向上，任意时刻位移总是相同的两个质点间的距离是 []

- A. 四分之一波长；
- B. 半波长；
- C. 半波长的偶数倍；
- D. 半波长的奇数倍。

(4)关于波长，下列说法中正确的是 []

- A. 两个振动情况完全相反的质点之间的距离是一个波长；
- B. 两个振动情况完全相同的质点之间的距离是一个波长；
- C. 只要介质不变，任何频率的机械波的波长都不变；
- D. 波源振动一个周期，波就向前推移一个波长的距离。

(5)不同频率的声波在同一介质中传播，下列说法中正确的是 []

- A. 波速不同，波长相同；
- B. 波速相同，波长不同；
- C. 波速、波长都不同；
- D. 波速、波长都相同。

(6)同一频率的波进入不同介质中传播时，下列说法中正确 []

- A. 频率不变，波速改变，波长改变；
- B. 频率改变，波速不变，波长改变；
- C. 频率不变，波速改变，波长不变；
- D. 频率改变，波速改变，波长改变。

(7)如图 12 - 33 所示，为一列向左传播的简谐波在某一时刻的图象。从图象中可以看出 []

- A. 该时刻质点 F 的运动方向向上；
- B. P、Q 两质点的运动方向始终相反；
- C. A、C 两质点的运动方向始终相同；
- D. 从图示时刻起，质点 E 比 Q 早回到平衡位置。

(8)如图 12 - 34 所示， S_1 、 S_2 是两个相同频率的波源，它们发出的

两列波在同一介质中相遇发生干涉，图中用实线表示这两列波的波峰中央，虚线表示波谷中央。那么，再经过半个周期后，下列叙述中正确的是 []

- A. a 点将变成振动加强点，b 点将变成振动减弱点；
- B. b 点仍为振动加强点，c 点仍为振动加强点；
- C. c 点将变成振动减弱点，d 点将变成振动减弱点；
- D. d 点仍为振动减弱点，a 点仍为振动加强点。

图 12—34

(9)图 12 - 35 中，(a)、(b)、(c)、(d)所示的都表示水面波遇到孔或障碍物后的传播情况，图中每相邻两条实线间的距离为一个波长，则其中最符合实际情况的图是 []

- A. 图(a)；
- B. 图(b)；
- C. 图(c)；
- D. 图(d)。

图 12—35

(10)在波的传播方向上相距为 S 的两点 a、b 之间只有一个波谷，其波的图象如图 12 - 36 所示。设四种情况下波速均为 v ，且均向右传播，则从图中所示时刻起，a 点首先出现波谷的图象是 []

- A. 图象(a)；
- B. 图象(b)；
- C. 图象(c)；
- D. 图象(d)。

图 12—36

(11)图 12 - 37 所示是一列横波的图象。此时刻质点 P 的振动速度为 v ；经 0.2 秒，质点 P 的振动速度又为 v ；再经 0.2 秒，质点 P 的振动速度的大小为 v ，但方向相反。则下列说法中正确的是 []

- A. 波向右传播，波速为 10 米/秒；
- B. 波向右传播，波速为 5 米/秒；
- C. 波向左传播，波速为 10 米/秒；
- D. 波向左传播，波速为 5 米/秒。

图 12—37 图 12—38

2. 取橡皮绳上均匀分布的 15 个质点，它们的平衡位置均在同一直线上，如图 12 - 38(a)所示。每相邻两质点间的距离均为 a 。质点 1 开始振动，经时间 t ，振动刚好传到质点 13。这时刻的波形如图 12 - 38(b)所示。试用已知量 a 、 t 表示这列波的波长、周期和波速。

3. 声波在空气中的传播速度是 340 米/秒，在水中的传播速度为 1530 米/秒。某声源发出频率为 680 赫的声波，试求这一频率的声波分别在空气和水中的波长。

4. 某声波在甲、乙两种介质中传播时，波长之比为 1 : 2，那么，这列声波在该两种介质中的传播速度之比是多少？

5. 发生地震的同时产生纵波和横波，若已知纵波的传播速度为 9.1×10^3 米/秒，在距震源 31.2×10^3 米的地震测报站，记录了这两种波到达的时间差为 5 秒，则横波的传播速度是多少？

6. 蝙蝠有完善的发射和接收超声波的器官，一只蝙蝠以 6 米/秒的速度垂直于墙面飞行，并同时发射频率为 4.5×10^4 赫的超声波。若经过 0.01 秒接收到回声，求蝙蝠接收到反射波时与墙面的距离以及蝙蝠所发出的超声波的波长（已知超声波在空气中的传播速度是 340 米/秒）。

7. 在广阔的湖面上, A、B 两浮标相距 27 米。一列波沿 A、B 连线的方向传播, 测得两个浮标每分钟上、下振动 20 次。又观察到当 A 浮标处在波峰时, B 浮标正好处在波谷, 且 A、B 之间有一个波峰, 试求:

- (1) 该水波的波长;
- (2) 该水波的传播速度。

8. A、B 为两个振动完全相同的振源, 振幅均为 5 厘米, 周期均为 0.2 秒, 它们在某种介质中的波速为 50 米/秒。在该介质中有一点 C, 距离 A 100 米, 距离 B 80 米, 试求:

- (1) 该波的波长;
- (2) 若 $t=0$ 时刻开始计时, 当 $t=6$ 秒时 C 点的位移;
- (3) C 点的振幅。

13 . 光的本性

The Nature of Light

- 1 . 射电天文望远镜
- 2 . 圆孔衍射图样
- 3 . 单色光的双缝干涉和单缝衍射的比较

从古代起，人们就十分注意对光现象的观察，并积累了大量资料，但是，光的本性究竟是什么，却是一个不容易回答的问题。人们对光的本性的探索，经历了一个漫长而又曲折的发展过程。本章我们将学习有关光的本性的知识。

一、光的微粒说和光的波动说

“什么是光”这个问题很早就引起了许多学者的关注，直到 17 世纪，基本上形成了两种学说。一种是牛顿支持的微粒说，认为光是从光源发出的一种物质微粒，在均匀介质中以一定的速度传播。另一种是荷兰物理学家惠更斯（1629—1695）提出的波动说，认为光是某种振动，在弹性介质中以波的形式向周围传播。

微粒说很容易解释光的直进现象和光的反射。光射到镜面上，光微粒受到镜面的推斥，就好像弹性小球跟光滑平面发生碰撞一样，被反弹回去。然而，微粒说在解释一束光射到两种介质分界面处会同时发生反射和折射，以及几束光相遇后会彼此毫无妨碍地继续向前传播等现象时，遇到了很大困难。而波动说在解释这些现象时却轻而易举，因为这些现象都是波具有的特征。利用发波水槽做实验，可以看到水波同时有反射和折射现象；几列水波相遇时，能够互不干扰地互相穿过。然而，波动说在解释光的直进现象时，却遇到了困难，因为人们都知道各种波都不会像光那样在物体的后面留下轮廓清晰的影子。

光的微粒说和波动说各有成功的一面，但都不能完满地解释人们已经知道的一些光现象，只是牛顿在学术界的声望，致使微粒说统治了 100 多年。波动说发展很缓慢，一直到 19 世纪初期，人们成功地在实验中观察到了光的干涉和衍射现象，而干涉和衍射是波的特征，这是微粒说无法解释的，于是波动说得到了公认，光的波动理论也就迅速地发展起来。

二、光的反射与折射

我们在初中已经学习过光的反射现象、光的反射定律和光的折射现象等光学知识。知道发生折射现象时，折射光线跟入射光线和法线在同一平面内，折射光线和入射光线分居在法线的两侧（图 13-1）。现在我们将进一步学习折射角 r 与入射角 i 之间的关系。

光的折射定律

公元 2 世纪，希腊天文学家托勒密（100—170），测量了折射角与入射角的大量数据，但由于他所测量的角度都较小，结果便误认为折射

角与入射角成正比。事实上，当入射角大于 20° 时，这个结论就不成立了。下表是实验测得的光从空气射入玻璃时，入射角和相应的折射角的数据。

入射角 i (度)	折射角 r (度)	比值 i/r	比值 sin i/sin r
0	0	不确定	
10	6.7	1.50	0.174/0.117 1.49
20	13.3	1.50	0.342/0.230 1.49
30	19.6	1.53	0.500/0.336 1.49
40	25.2	1.59	0.643/0.426 1.51
50	30.7	1.63	0.766/0.511 1.50
60	35.1	1.71	0.866/0.575 1.51
70	38.6	1.81	0.940/0.624 1.50
80	40.6	1.97	0.985/0.651 1.51

1621 年，荷兰科学家斯涅耳（1580—1626），根据实验测得的入射角的正弦值和相应的折射角的正弦值，画出它们的关系图象（图 13-2），终于找到了折射角和入射角之间的定量关系：当光从真空（或空气）射入介质时，入射角的正弦跟折射角的正弦成正比。如果用 n 表示比例常数，就可写成

$$\frac{\sin i}{\sin r} = n,$$

这就是光的折射定律，也叫做斯涅耳定律。

折射率

光从真空进入某种介质时，入射角的正弦跟折射角的正弦之比总是一个常数，但光从真空进入不同介质时，这个常数是不同的。它表明这个常数是反映介质光学性质的物理量，我们把它叫做介质的绝对折射率，简称折射率。

理论研究和实验结果都表明：某种介质的折射率，等于光在真空中的速度 c 跟光在这种介质中的速度 v 之比，可表示为

$$n = \frac{c}{v}。$$

空气中的光速跟真空中的光速相差很小，可以认为空气中的光速等于真空中的光速。因此，光从空气进入某种介质时的折射率就近似等于这种介质的折射率。下表列出几种介质的折射率。

金刚石	2.42	甘油	1.47
二硫化碳	1.62	萤石	1.43
各种玻璃	1.4 ~ 2.0	酒精	1.36
水晶	1.54	水	1.33
岩盐	1.54	空气	1.00029

如果光线 AO 在真空中以入射角 i 射入某种介质，折射角为 r [图 13-3(a)]。实验表明，当光线从介质射入真空时，如果入射角 i' 等于原来的折射角 r ，则折射角 r' 等于原来的入射角 i [图 13-3(b)]，也就是

说折射现象中光路是可逆的。

所以，当光从介质射入真空时，折射定律的表达式

$$\frac{\sin i'}{\sin r'} = \frac{\sin r}{\sin i} = \frac{1}{n}。$$

式中 n 为该介质的绝对折射率。

全反射 临界角

光从介质进入真空（或空气）时，折射角大于入射角，当入射角增大时，折射光线偏离法线越来越远，并且折射光线越来越弱，反射光线越来越强。当入射角增大到某一数值时，折射角等于 90° ，折射光线消失，只有反射光线，光全部反射回原来介质中传播，这种现象叫做全反射。

折射角等于 90° 时（图 13-4）的入射角叫做临界角。光从介质射向真空（或空气），并且入射角大于临界角时，就会发生全反射现象。

根据折射定律，可以求出各种介质对真空（或空气）的临界角。如果用 C 表示临界角， n 表示介质的折射率，则有

$$\frac{\sin C}{\sin 90^\circ} = \frac{1}{n}$$

由此可得

$$\sin C = \frac{1}{n}。$$

从介质的折射率可以计算出各种介质对真空（或空气）的临界角。例如水的临界角为 48.5° ，玻璃的临界角为 $30^\circ \sim 42^\circ$ ，金刚石的临界角为 24.5° 。

两种介质相比较，光在其中传播速度较小的，它的折射率就较大，这种介质叫做光密介质；光在其中传播速度较大的，它的折射率就较小，这种介质叫做光疏介质。金刚石和水相比较，金刚石是光密介质，水是光疏介质。若光线以某一入射角从金刚石射向真空（或空气）可以发生全反射，那么，以相同的入射角，光从水中射向真空（或空气）时，就不一定能发生全反射。金刚石看起来特别明亮，就是因为射入的光在金刚石内发生全反射。

思考

1. 在游泳池水中的人，可以看见池边的人，池边的人同时也一定会看见水中的这个人（图 13-5），怎样解释这个现象呢？

2. 光从真空射入水中时的入射角等于 0° ，这时的折射角是多大？在这种情况下，光进入水中传播的速度，是否仍等于在真空中的传播速度？

光的色散

太阳光经由小水珠、水晶等透明物质折射后，射出的光呈现许多色光的现象，早在公元 11 世纪，我国已有记载。北宋初年杨亿（974—1020）

所著《杨文公谈苑》一书中就记载着“嘉州峨嵋山有菩萨石，人多收之，色莹如白玉，如上饶水晶之类，日射之有五色……”。

我们可以做这样的实验，将一束红光 SO_1 从空气射入玻璃棱镜的 AB 侧面（图 13-6），就会观察到从棱镜射出的光线 O_2P 偏离原来入射光线的方向，向着棱镜的底面 BC 偏折，这是光先后通过棱镜的两个侧面，发生了两次折射所造成的。从棱镜射出的光线 O_2P 和入射光线 SO_1 之间的夹角叫做偏向角。偏向角的大小既跟入射角的大小有关，也跟棱镜的折射率、棱镜的顶角的大小有关。

如果实验中入射光不是红光而是太阳光，那么，光线经棱镜折射后，将形成由各种色光按一定次序排列的彩色光带。这就是光的色散现象。

1665 年，牛顿用棱镜研究了太阳光产生色光的现象，证实了太阳光（白光）由七种颜色的光组成。

白光通过棱镜后出现的七种色光如图 13-7 所示，这七种色光依次排列的顺序是：红、橙、黄、绿、蓝、靛、紫，它们排列后形成的光带叫光谱。光的色散现象表明各种色光经过棱镜后发生偏折的程度是不同的，其中红光偏折最小，紫光偏折最大。这是介质对各种色光的折射率不同而引起的。红光偏折程度最小，说明介质对红光的折射率最小；紫光偏折程度最大，说明介质对紫光的折射率最大。同一介质对各种色光的折射率是不同的，以冕牌玻璃为例，它对红光的折射率为 1.513，对橙光的折射率为 1.514，对黄光的折射率为 1.517，对绿光的折射率为 1.519，对蓝光的折射率为 1.528，对紫光的折射率为 1.532。

我们已经知道，介质的折射率等于光在真空中的速度跟光在这种介质中的速度之比。各种色光在真空中的速度是相同的，都等于 c ，而同一介质（例如玻璃）对各种色光的折射率是不同的，这是因各种色光在同一介质中的传播速度是不同的。红光的折射率比其他色光小，说明红光在介质中的速度比其他色光大；紫光的折射率最大，说明紫光在介质中的速度比其他色光小。

思考

1. 一束单色光，从空气射入水中，它的传播速度将怎样改变？
2. 分别用红光和紫光测定同一凸透镜的焦距，实验结果相同吗？哪一次测得的焦距大一些？为什么？

练习二十六

1. 如图 13-8 所示，光线 SO 以入射角 i 从水中射向空气，那么，折射光线可能经过的点是 []

A. a 点； B. b 点； C. c 点； D. d 点。

2. 甲、乙两种介质与空气的界面在同一平面上。某光线分别以入射角 $i_{甲}$ 、 $i_{乙}$ 从空气射入到甲、乙两介质中，观察到两次折射光线互相平行，即 O_1P_1 、 O_2P_2 ，如图 13-9 所示。若已知甲介质的折射率大于乙介质

的折射率，那么，下列说法中正确的是 []

- A. 入射角 $i_{甲}$ 一定大于 $i_{乙}$ ；
- B. 入射角 $i_{甲}$ 一定等于 $i_{乙}$ ；
- C. 入射角 $i_{甲}$ 一定小于 $i_{乙}$ ；
- D. 入射角 $i_{甲}$ 一定小于或等于 $i_{乙}$ 。

3. 将折射率 $n=1.33$ 的透明实心塑料块 P 放置在盛有水的烧杯中(图 13-10)。一束单色光 S_0 经水、塑料块 P 后，传播方向会发生改变吗？为什么？（不考虑烧杯玻璃的折射）

4. 光在某介质中的速度是在空气中速度的 $\frac{2}{5}$ ，试求该介质的折射率。

5. 光线从某种介质射到空气中，测得入射角是 45° ，折射角是 60° ，求这种介质的折射率和光在这种介质中的传播速度。

6. 一束光线以 45° 的入射角从真空射入某介质，观察到折射光线的方向偏离入射光线 15° ，试求：(1) 该介质的折射率；(2) 光在该介质中的传播速度。

7. 一束光线以 60° 的入射角，从空气射入折射率为 1.60 的玻璃，那么折射角多大？并画出示意光路图。

8. 一束单色光以 45° 的入射角从空气射入一块两面平行的玻璃砖，然后从玻璃砖再射到空气中(图 13-11)。如果玻璃的折射率是 1.50，玻璃砖的厚度是 2 厘米，求光线的侧向位移。

9. 如图 13-12 所示，一束在空气中波长为 λ_0 的超声波，以入射角 i 从空气射入水中，若折射角为 r ，这束超声波在水中的波长为 λ ，则下列能正确反映这几个量之间的关系的是 []

- A. $r > i$, $\lambda > \lambda_0$;
- B. $r < i$, $\lambda < \lambda_0$;
- C. $r > i$, $\lambda < \lambda_0$;
- D. $r < i$, $\lambda > \lambda_0$ 。

三、光的干涉

几束光在空中相遇，可以互相交叉穿过，互不干扰。例如射向舞台的追光灯，互相交叉的光柱虽然在空中相遇，但并不影响它们各自的光的颜色，也不影响它们各自的亮度，好像在空中没有相遇一样(图 13-13)，所以光波也是遵循波的独立传播和叠加原理的。现在，我们进一步来研究两列光波相互叠加，会不会产生干涉现象呢？

光的干涉

人们围绕这一问题做了许多实验，如将两个独立光源发出的光同时照射到光屏上，虽然光屏上被照射的部分更加明亮，但并没有出现干涉现象。我们知道，要使两列波叠加后产生干涉现象是有条件的，它们的波源必须是相干波源。但是通常两个光源或同一光源的两个发光部分都是独立发光的，它们的频率等都互不相同，不能满足相干条件，所以两支蜡烛或两盏电灯发出的光，叠加以后都不能出现干涉现象。直到 1801 年，英国物理学家托马斯·杨(1773—1829)让通过一个狭缝 S 的一束光，再通过两个平行的狭缝 S_1 和 S_2 变成两束光，由此巧妙地解决了相干

光源的问题，在实验室里才观察到了光的干涉现象，从而证实了光具有波动性。

我们可以利用图 13-14 所示的双缝干涉仪来观察光的干涉现象。图中 L 是一个线光源——有长直灯丝的钠灯，灯丝与不透明的遮光屏上的狭缝 S 平行。钠灯发出的光从 S 射出后，照射到不透明的遮光屏的两个狭缝， S_1 、 S_2 上，这两个狭缝离得很近，彼此平行，同时也与 S 平行，并且 S_1 、 S_2 到 S 的距离相等。这样，任何时刻从狭缝 S 射出的光波，都会同时传播到 S_1 、 S_2 处，狭缝 S_1 、 S_2 就可以看成是两个频率相同的相干光源。从这两个狭缝射出的光波在空间相遇叠加，在像屏上就出现了明暗相间的干涉条纹。图 13-15 是双缝干涉实验中两列光波在空间相遇叠加时的示意图，可以看出，它和水波干涉时产生的干涉图样是相似的。光波干涉时振动加强处表现为明条纹，振动减弱处表现为暗条纹，明条纹与暗条纹总是相互间隔着，而且明、暗条纹的间隔距离是相等的（见本章导图 3）。

如果光源发出的光是白光，在像屏上观察到的则是彩色干涉条纹。

我们还可以从图 13-16 的实验中，观察光的干涉现象。在暗室中，将附着一层肥皂液薄膜的金属框竖直放置在酒精灯后[图 13-16(a)]，在酒精灯的灯芯上放些食盐，点燃酒精灯，火焰发出黄光。对着液膜看去，可看到以火焰的虚像为背景的液膜上，出现水平排列的黄黑相间的条纹。这是薄膜干涉现象。因为皂液薄膜在重力作用下，形成上端薄下端厚的尖劈状[图 13-16(b)]，在液膜的某些部位，从液膜的前表面和液膜的后表面反射出来的两列光波，叠加后使振动得到加强，在这些地方看到的就是黄光的明条纹。而在液膜的另一一些部位，反射出来的两列光波，叠加后使振动相互抵消，那么在这些部位看到的就是黑色条纹。在日光下吹肥皂泡时，肥皂泡表面呈现彩色花纹，也是在皂液膜的外表面和内表面上反射的两列光波所产生的干涉现象。

平时我们看到飘浮在水面上的油膜呈现彩色花纹，同样是日光在油膜的上、下两个表面所反射的两列光波（图 13-17）产生了干涉的结果。在油膜的某些地方，这两列反射光波叠加的结果使红光得到加强，该处油膜就呈现红色；而在另一些地方，两列反射光波叠加的结果使其他色光得到加强，那里就呈现其他颜色。在透明薄膜上由于上、下两个表面的反射发生光的干涉现象是常见的。如蚌壳的内表面有的地方常呈彩色，有些昆虫很薄的透明翅膀呈现彩色，有透明薄膜保护层的激光唱片也呈彩色。课本彩图 10 就是半球形薄膜在白光照射下产生干涉时的照片。

光的干涉现象在技术上有很多应用。利用图 13-18(a)所示的装置，可以检查被磨制的镜面或其他精密部件的平面是否平整。在待检查的表面 AB 上放一块两面平行且非常平整的平板玻璃——平晶 CD，在 AB、CD 的一端垫一薄片，使平晶与待检查的平面间形成一空气楔。用单色光垂直照射时，在空气楔上下界面处反射出两列相干光波，若待检查表面平整，则干涉条纹是一组相互平行的直条纹，如图 13-18(b)所示；若待检查表面有缺陷，则干涉条纹会发生扭曲，如图 13-18(c)所示。应用干涉

原理还可以制成精密的测量仪器，用于测量物体长度的微小差异、薄膜的厚度以及光波的波长等。我们在学习力学时，曾介绍的用光学方法（光弹法）显示吊钩等物件模型内部所受应力的分布情况，就是利用光的干涉来实现的。

练习二十七

1. 光的干涉现象在什么条件下才能产生？为什么两盏相同的电灯发出的光不能产生干涉现象？

2. 举一两个日常生活中见到的光的干涉现象的实例，并简单解释产生干涉的原因。

3. 取两块载玻片，用手指把它们紧紧压在一起。白天，在玻片上人们会看到许多彩色带状花纹。改变手指用力的大小，花纹的形状、位置也随着改变。做这个实验，并解释所观察到的现象。

四、光的衍射

既然光是一种波，也应该有衍射现象。但通常见到的物体的影及小孔成像等现象，都说明光是沿直线传播的。那么，光能够发生衍射吗？

光是可以发生衍射的。但由于光波的波长很短，可见光的波长只在 0.40 微米~0.77 微米之间，所以只有当光通过很小的孔或很狭的缝时，才会发生明显的衍射现象。

我们可以利用图 13-19 所示的实验装置，来观察光的衍射现象。让一束平行的单色光照射到不透光的有一狭缝的屏上，狭缝的宽度可以调节，在屏的后面放一像屏。当缝的宽度比较大时，光沿直线方向通过狭缝，在像屏上出现的是一条跟缝的宽度相对应的亮线；使缝变窄，光通过狭缝后，像屏上被照亮的范围远远超过了根据光的直线传播所能照明的范围，并且出现了明暗相间的条纹，这就是光的单缝衍射现象。如果缝变得更窄，则条纹间距变得更大。像屏上出现的衍射条纹的特点是：中央为一较宽的明条纹，在它的两侧对称地分布着若干条明暗相间的直条纹，并且明条纹的亮度依次减弱（见本章导图 3）。

如果把很多条狭缝以极小的相等的间距平行排列，就组成了光栅（图 13-20）。有的光栅在每毫米内刻有上千条狭缝。最简单的光栅是用金刚石在平板玻璃片上刻划出一系列平行的细痕，细痕部分相当于毛玻璃不容易透光，细痕与细痕间的狭窄部分是透明的，起着狭缝作用，光通过光栅时，便会发生衍射（见课本彩图 11）。让单色光通过光栅，可以在光屏上看到一些细窄而明亮的条纹，在相邻两条纹之间是比较宽阔的暗区，这就是光栅的衍射条纹。利用光栅可以测量光波的波长。

我们还可以用图 13-21(a) 的实验装置，来观察光通过小孔发生的衍射现象。让点光源 S 发出的光照射到不透光的有一圆孔 a 的屏上，在屏的后面放置一像屏。当圆孔比较大时，像屏上出现的是一个光亮的圆[图 13-21(b)]，光亮圆的大小与圆孔 a 的大小相对应。当换用孔径较小的圆孔时，像屏上出现的光亮的圆也随着缩小。但当圆孔缩小到一定程度时，像屏上会出现一些明暗相间的圆环，这些圆环的分布范围

远远超出了根据光的直线传播所能照明的面积[图 13-21(c)], 这就是光的圆孔衍射现象(见本章导图 2)。衍射时产生的明暗条纹或光环, 叫做衍射图样。

不只是狭缝和圆孔能使光产生衍射, 各种不同形状的障碍物都能够使光产生衍射, 在它的边缘出现明暗相间的条纹, 从而使障碍物的影的轮廓变得模糊不清。图 13-22 是双面剃须刀片的阴影和周围的衍射图样。

平时我们还是比较容易观察到光的衍射现象的。取一片鸡毛, 对着点亮的白炽灯的灯丝观察, 就可以看到发光的灯丝周围呈现出彩色图样, 这就是光通过鸡毛的细小缝隙发生的衍射图样。将两支铅笔并拢成一狭缝, 通过狭缝观看点亮的日光灯管或白炽灯的灯丝, 就可以看到彩色的单缝衍射花样。眼睛眯起来时, 人的眼睫毛也起到狭缝作用, 在夜间看远处的路灯, 就能观察到路灯周围呈现的彩色衍射图样。

光的衍射现象和光的干涉现象都证明了光具有波动性。

思考

通常我们说光是直线前进的, 这和光的衍射现象有矛盾吗?

练习二十八

1. 光的衍射现象在什么条件下才能产生? 小孔成像与圆孔衍射相矛盾吗?
2. 举一两个日常生活中见到的光的衍射现象的实例。

五、电磁波

我们知道广播电台是利用发射无线电波传播节目信号的, 电视台也是利用无线电波把图象信号和伴音信号传递给千家万户的。那么, 无线电波是什么样的波? 它是怎样产生的?

电磁波的形成

19 世纪 60 年代, 英国物理学家麦克斯韦(1831—1879) 在总结前人研究电磁现象成果的基础上, 建立了完整的电磁场理论。

麦克斯韦理论指出: 变化着的磁场产生电场, 变化着的电场产生磁场。按照麦克斯韦电磁场理论, 如果电场(或磁场)的变化是均匀的(即电场强度或磁感强度的变化率是恒定的), 则所产生的磁场(或电场)是稳定的(即不随时间而变化)。如果电场(或磁场)的变化是不均匀的, 它所产生的磁场(或电场)就是变化的。所以变化的电场和变化的磁场总是相互依存、紧密联系组成一个统一体, 叫做电磁场(electromagnetic fields)。

根据以上理论可以知道, 如果空间某一区域中有不均匀变化的电场, 那么在它邻近的空间可以产生变化的磁场, 这变化的磁场又可以在较远的空间产生新的变化的电场, 新的变化的电场又会在更远的空间产生变化的磁场……。这样, 变化的电场和变化的磁场就在空间不断传播开去(图 13-23)。这种变化的电场和变化的磁场相互交替产生, 由近及

远地向周围空间传播，就形成电磁波。

在必修课中，我们曾经学习过振荡电流，知道 LC 电路中振荡电流是周期性变化的，电容器两极板间的电场和电感线圈中的磁场也是周期性变化的，所以 LC 振荡电路可以产生电磁波。

麦克斯韦电磁理论预言的电磁波，于 1887 年为德国物理学家赫兹 (1857—1894) 的实验 (课本彩图 17) 所证实。

现在我们用图 13-24(a) 所示的实验装置模仿赫兹实验来观察电磁波的发射与接收。图中感应圈 L 的输出端与两根长度相等的金属杆 A、B 连接，A、B 杆互相靠近的一端均固定着一个金属小球，感应圈与电源接通后，可以观察到两金属小球之间不停地有火花跳过，这时 A、B 杆向外发射电磁波。为了接收所发射的电磁波，可以在它的近旁，另外放置两根长度与 A、B 杆相等的金属杆 C、D，并在 C、D 之间接入一个小氖管 [图 13-24(b)]。当 A、B 杆的金属球间有火花跳过时，可以观察到氖管发光。这表明 C、D 杆接收到了从 A、B 杆发射出的电磁波，氖管发光的能量就是由电磁波传递的，所以电磁波的发射传播过程，也就是能量辐射的过程。

电磁波的速度

麦克斯韦还从理论研究中得出在真空中电磁波的传播速度跟光速相等的结论，即任何电磁波在真空中传播的速度都是

$$c=3.00 \times 10^8 \text{ 米/秒。}$$

我们在上一章第二节中讨论的波长、频率和波速的关系，对于电磁波也是适用的。各种电磁波在真空中传播的速度都是 c ，因此频率不同的电磁波的波长不同。例如上海人民广播电台发射的频率为 1197 千赫的电磁波，它的波长

$$\lambda = \frac{c}{f} = \frac{3.00 \times 10^8}{1197 \times 10^3} \text{ 米} = 250 \text{ 米。}$$

无线电技术中使用的电磁波叫无线电波，各种不同频率的无线电波的波长可从几毫米到几十千米。根据波长的长短或频率的高低，无线电波可分成几个波段，如下表所示。

波段	波长	频率	主要用途	
长波	30000 米 ~ 3000 米	10 千赫 ~ 100 千赫	超远程无线电通信和导航	
中波	3000 米 ~ 200 米	100 千赫 ~ 1500 千赫	无线电广播和电报通信	
中短波	200 米 ~ 50 米	1500 千赫 ~ 6000 千赫		
短波	50 米 ~ 10 米	6 兆赫 ~ 30 兆赫		
微波	米波	10 米 ~ 1 米	30 兆赫 ~ 300 兆赫	无线电广播 电视、导航
	分米波	1.0 米 ~ 0.1 米	300 兆赫 ~ 3000 兆赫	电视、雷达、 导航
	厘米波	0.1 米 ~ 0.01 米	3000 兆赫 ~ 30000 兆赫	
	毫米波	0.01 米 ~ 0.001 米	30000 兆赫 ~ 300000 兆赫	

电磁波传播不需要介质。月球表面没有空气，因此在月球表面的空间里不可能产生声波。宇航员登月进行科学考察活动时，相互之间就是通过无线电波来传递信息保持联系的。

电磁波的反射

电磁波也有反射现象。在高楼林立的城市中收看电视时，电视机屏幕的画面上常会出现“叠影”，这是载有电视信号的电磁波，被高楼大厦反射后与从电视发射塔直接发射来的电磁波，一同进入电视机的接收天线的缘故。利用地球电离层对电磁波的反射，可使短波

信号传送得很远。这是因为距地球表面大约 60 千米 ~ 400 千米的范围内的地球大气层中的气体分子，在阳光照射下发生了电离，成为带正电的离子和自由电子，所以这一层大气叫做电离层。电离层能够反射无线电波中的短波和中短波。广播电台就是利用电离层的这一特性，将电台发射的短波信号传送到地球的另一侧去（图 13-25）。

电离层是受太阳的辐射产生的，所以电离层的厚度、高度等都跟太阳的活动情况有关。当太阳活动异常，从表面喷射出比通常时期更多的带电粒子时，将会引起电离层的变化，从而影响短波的反射，甚至暂时中断短波通信。

雷达（radar）就是利用电磁波的反射来探测目标的。雷达有一个可以移动的天线（图 13-26），用以发射电磁波和接收电磁波。雷达天线向某一方向发出不连续的电磁波，每次发射的时间约为 10^{-6} 秒，两次发射的时间间隔大约为发射时间的 100 倍。发射出去的电磁波在这一方向上遇到障碍物时，可以在这个时间间隔内反射回来并被天线接收，测出从发射电磁波至接收到反射回来的电磁波的时间，就可以确定障碍物与雷达天线之间的距离。再根据发射电磁波的方向和仰角，通过电脑系统计算，可以迅速确定障碍物的位置和运动情况。与此同时，雷达显示屏上能将障碍物——目标直接显示出来。在国防上，雷达能侦察敌方动向，为制定作战方案提供重要依据；在交通运输部门，利用雷达为飞机、舰艇导航，测定公路车辆行驶速率等；在气象部门，雷达能探测云层的变

化，以预报天气情况。

电磁波和其他波一样，具有波动的共同特征。某些频率的无线电波，在穿过电离层时，传播方向会发生偏折，这就是电磁波的折射现象。对于中波无线电广播，世界各国间以及每个国家内，都必须共同遵守一个原则，即相邻地区广播电台的无线电波的频率不可以相同，这样就能避免产生电磁波的干涉现象。都市里高楼林立，但收音机在室内的任何地方，都可以接收到广播电台发送出来的无线电广播信号，这些都是电磁波衍射的结果。

思考

射电天文望远镜有巨大的凹形天线（见本章导图 1），可用来接收来自宇宙深处类星体发射的微弱的电磁波。图 13-27 是这种天线的示意图，图中 F 是抛物面天线的焦点。这种天线的口径为什么做得很大？电磁波是怎样被天线聚集到 F 处的？

S：既然电磁波和机械波都有反射现象、折射现象等等，那么它们的本质是相同的吗？

T：不相同。尽管人们对电磁波和机械波在传播过程中的描述是相同的，尽管它们在传播过程中都会有反射、折射、干涉、衍射等现象，但它们之间有着本质的差异。如电磁波是电磁运动的一种形式，而机械波则是机械运动的一种形式；电磁波传递的能量是电磁辐射能，而机械波传递的则是机械能；电磁波传播时不需要介质，即使在真空中也可以传播，而机械波传播时一定要要有介质，它不能在真空中传播。

练习二十九

1. 雷达站发射电磁波后，经 2.0 毫秒接收到来自障碍物的反射波，那么障碍物与雷达站之间的距离是多远？

2. 从地球向月球发射电磁波，经过多长时间才能在地球上接收到反射回来的电磁波（地球到月球的距离为 3.84×10^5 千米）？

3. 收音机在某一短波段接收无线电波的波长范围是 120 米到 2.5 米，那么，它接收的频率范围是多大？

4. 上海人民广播电台播音时，同时用 792 千赫、990 千赫、1197 千赫三种频率的无线电波播送节目，这些无线电波在空间相遇时，会不会产生干涉现象？为什么？

阅读材料 隐形飞机

军事上常设法采用“隐身技术”，以躲过雷达系统的监视，达到军事行动的目的。目前隐身技术已被应用在飞机和巡航导弹上。隐形战斗机之所以能够隐身，概括起来主要有以下几方面的原因：首先，这种飞机有独特的外形，它采用多面体结构（图 13-28）。整体结构扁平，表面光滑，能把射来的雷达波向各个方向散射掉，使敌方雷达接收不到足以判断目标特征所需要的反射波。其次，这种飞机的机身上涂有一种能够吸收电磁波的物质，所以，飞机表面不像一般飞机那样呈银灰色，而是

周身呈灰黑色。就是这种灰黑色物质，能有效地吸收掉一部分雷达波。飞机尾部采取严格的屏蔽措施，并加大进气口的尺寸，大大降低发动机的排气温，有效地减弱了飞机尾部的热辐射源，这样，就可以防止敌方红外装置的搜索，躲避敌方红外跟踪导弹的攻击。此外，飞机的一些部件也采用了特殊设计，如埋入式武器舱、可伸缩的天线以及V形尾翼，这些都能有效地减小飞机对雷达波反射的有效截面积。这种飞机无论哪个方向被电磁波“照射”，其反射波的截面积仅相当于一位飞行员头盔的反射面，因此它的隐身效果相当良好。

移动通信

科学技术的日新月异，各种信息的迅猛增长，人类社会活动的日益频繁，传统的固定通信方式已经远远不能满足需要，人们希望能够在任何地点、任何时间与对方联系，移动通信恰好能实现这一愿望。

无线电报的问世，使人们很快意识到利用电磁波进行移动通信具有广阔的前景。但是，移动通信与公用电话网连接进入实用阶段，还是近半个多世纪以来的事情。目前的移动通信系统已随着微电子技术、自动控制技术、计算机技术和数字技术的发展而日臻完善。移动通信设备的集成化、小型化，使它具有轻、小、可靠和省电等特点，这就为实现移动通信创造了重要的条件。移动通信不仅可以传送声音信息，而且还具有像公用电话网中一样的数据终端功能，满足用户随时、随地、快速、可靠地进行包括图象传送在内的多种信息的交换。

移动通信的应用范围相当广泛，海洋中航行的船只，天空中飞行的飞机，乃至陆地上行驶的车辆、行人等等，都可用它来进行通信联络。陆地民用移动通信系统中，公用移动电话系统、调度系统、无线电寻呼系统和无绳电话系统更为多见。

公用移动电话系统是公用电话网的一个组成部分。公用电话网的用户与无线用户、无线用户与无线用户之间的通话，是经过基站与无线用户移动台之间的无线电波来实现的（图 13-29）。基站设有固定天线，它向本基站业务范围内发送并同时接收无线电波，以实现用户与用户之间的通话。一般来说城市中要设立好几个基站，城市越大，基站的数目也就越多。

调度系统是在给定的业务范围内，为本单位或本系统服务的无线通信系统。在一般情况下，该系统不接入公用电话网。调度系统由调度站和外围用户台组成（图 13-30），调度站可以由调度员直接控制，也可以遥控。调度站与外围用户台之间由特定频率的无线电波沟通。通信范围一般在 20 千米~50 千米。比较先进的调度系统除了建立电话通信外，还有遥控、遥测等功能。调度系统常用来控制运货车、消防车、救护车、出租车等等。

无线电寻呼系统是一种单向通信系统，与公用电话网相连。它由无线电寻呼控制中心、若干个卫星发射台和用户寻呼接收机（BP 机）组成（图 13-31）。寻呼者通过公用电话网打电话到无线电寻呼中心，告知被寻呼者的号码等内容；寻呼中心通过卫星发射台，发射出相应的被寻呼者的无线电信号；被寻呼者身边的无线电寻呼接收机就发出鸣叫声音信号，并同时显示出寻呼者的电话号码等内容，从而寻呼者和被寻呼者之间就可取得联系。无线电寻呼接收机的优点是体积小，质量小，便于携

带，使用方便；缺点是不能直接向寻呼者发回信号。

无绳电话系统是实现便携式电话的一种方式。它用无线电波代替用户室内的部分电线，使得电话机可随身携带，在一定范围内的任何地方与公用电话网连接。无绳电话系统由基站跟相对应的携带机（即无绳电话机）组成（图 13-32）。

移动通信之所以发展迅速，是因为它具有广泛的实用价值，取得令人瞩目的社会效益。例如，移动通信在新闻报导方面，可以迅速将现场采访的信息（声音、图象等等）传送出去；在公安消防、抢险救灾等方面也显示了极大的优越性。所以，移动通信、卫星通信、光缆通信一起被作为现代通信领域中的三大新兴通信手段。

六、光的电磁说电磁波谱

光的干涉、衍射现象，充分证实了光的波动性，但是光究竟是一种什么样的波呢？

光的电磁说

1865 年，英国物理学家麦克斯韦提出了电磁波的理论，认为变化的电场和变化的磁场联系在一起，形成统一的电磁场，以波的形式从它产生的区域向四周传播，并且从理论上得出了电磁波的传播速度跟光的速度相同。在这基础上，麦克斯韦提出光是一种电磁波，这就是光的电磁说。

1888 年，德国物理学家赫兹，用实验证实了电磁波的存在，并且证明了电磁波也跟光波一样，具有反射、折射、干涉、衍射等性质。他还通过干涉实验，测出了一定频率的电磁波的波长，计算出了电磁波的波速，结果跟麦克斯韦关于电磁波的波速等于光速的预言符合得相当好。这就证明了麦克斯韦的电磁理论是正确的。

红外线和紫外线

1800 年，英国物理学家赫谢耳（1738—1822）发现了红外线。他用灵敏温度计研究可见光波中各种色光的热作用时，把温度计移到红光的外侧（图 13-33），发现温度上升得更高，说明在那里存在着某种看不见的射线，这种射线后来被称为红外线（infrared ray）。红外线的波长比红光波长更长，它的范围在 0.75 微米 ~ 400 微米之间。

除太阳外，火焰、电灯、热熨斗、盛着热水的杯子、发动着的汽车、飞行中的喷气飞机、升空时的火箭以及大地、建筑物等都会发射出红外线。人体温度虽然只有 37℃ 左右，也能够发射红外线。可以说，一切物体都在发射红外线，只是发射的红外线的波长、强度不同而已。

红外线最显著的特性是它的热作用。现代家用电器中使用的各种红外线取暖器就是利用它的热作用。物体吸收了红外线会发热，所以可以利用红外线来加热物体，烘干油漆、谷物以及治疗某些疾病等。红外线的波长比红光还长，衍射现象比较显著，容易透过云雾、烟尘等，所以利用对红外线敏感的特殊感光底片可以拍摄远景或暗景。照片上越白的地方表示温度越高，越黑的地方表示温度越低。利用灵敏的红外线探测器吸收物体发出的红外线，然后用电子仪器对接收到的信号进行处理，

就可以知道被探测物体的特征，例如在飞机或卫星上勘测地热、寻找水源、监测森林火情、估计农作物的长势和收成、预报热带风暴、寒潮。这种技术统称红外线遥感。红外线遥感技术的应用正在迅速发展。彩电、录像机、空调机等许多家用电器所用的控制器，就是一种红外线遥感控制器。

1801年德国物理学家里特发现，如果在色散后的紫光的外侧区域放一照相底片，底片就会感光。这种不可见的射线，叫做紫外线 (ultraviolet ray)。紫外线的波长比紫光的波长还短，它的范围在 0.001 微米 ~ 0.4 微米之间。

一切高温物体，如太阳、弧光灯，发出的光中都含有紫外线，在实验室里常用的紫外光源是各种电火花或石英管汞弧灯 (图 13-34)。紫外线具有较强的化学作用，能使许多物质发生化学反应，能使许多物质发出荧光。紫外线常用来杀菌，治疗皮肤病、软骨病等。经常在矿井下劳动的工人，适当地照射紫外线，能促进身体健康，但过强的紫外线能伤害人的眼睛和皮肤。电焊时产生的弧光中有强烈的紫外线，因此电焊工在操作时，必须穿好工作服，并戴上防护面罩。

太阳辐射到地球上的紫外线，其中大部分被地球外围的臭氧层所吸收，过强的紫外线会使植物枯萎、动物死亡，所以保护地球臭氧层也就是从一个侧面保护了生态环境。

伦琴射线

1895年，德国物理学家伦琴 (1845—1923) 在研究阴极射线性质时，发现一种看不见的射线能使荧光物质发光，这种射线的穿透本领较强，能穿过包在胶卷外面的黑纸使照相底片感光。因为当时人们还不了解它的性质，所以叫它为“X射线”。后来人们做了大量的实验，发现高速电子流射到某些固体上，都会产生这种射线，并且知道了它是波长很短 (10^{-8} 米 ~ 10^{-12} 米) 的电磁波。为了纪念伦琴，后来人们就把这种射线叫做伦琴射线。

伦琴射线管是用来产生伦琴射线的一种装置，构造如图 13-35 所示。
真空度

很高 (约为 10^{-4} 帕) 的玻璃泡内，有一个阴极 K 和一个阳极 A，阳极也叫对阴极。阴极被加热后能向周围发射电子，在阳极和阴极之间加上几万伏的电压，从阴极发射出来的电子受强电场的作用，以很大的速度冲击阳极，阳极就激发出伦琴射线。

伦琴射线穿透物质的本领较强，在工业上可以用来检查金属部件内部有没有砂眼、裂纹等缺陷，在医学上可以用来透视，检查人体内的病变。图 13-36 是航空港用以检查旅客行李所用的 X 射线检测装置，从荧光屏上可直接看出行李包内是否携带违禁物品。

CT (computed tomography) 是对被检查部位进行伦琴射线横断层扫描，利用电子计算机处理显示的一种新技术。伦琴射线对人体的正常组织和病变组织的穿透能力存在微小的差异，CT 扫描能够将这种差异通过电子计算机处理后以图象形式显示出来。目前，CT 的应用已从医学发展到林业、农业等行业和部门，如观察树木的年轮。

电磁波谱

麦克斯韦的电磁理论告诉我们，电磁波的频率范围相当宽广，它包

括无线电波（长波、调幅广播波带、调频电视波带、短波）、微波、红外线、可见光、紫外线、伦琴射线以及比伦琴射线波长还要短的射线，按它们的频率从高到低（波长从小到大）的顺序依次排列起来，就可得到电磁波谱（图 13-37），其中最高频率是最低频率的 10^{22} 倍以上。

从无线电波到射线，都是本质上相同的电磁波，它们传播时都服从共同的规律。但另一方面，由于它们的频率（或波长）不同，又表现出不同的个性。例如，波长较长的无线电波很容易出现干涉、衍射等现象，但对波长越来越短的可见光、紫外线、伦琴射线、射线，要观察到它们的干涉、衍射现象就越来越困难了。

各种电磁波产生的机理

不同频率范围的电磁波产生的机理是不同的。无线电波是振荡电路中自由电子的周期性运动所产生的；红外线、可见光、紫外线是原子的外层电子受到激发后产生的；伦琴射线是原子的内层电子受到激发后产生的；射线是原子核受到激发后产生的。从图 13-37 中可以看出，长波的红外线和无线电短波已经重叠，这表明同一波长的电磁波可以有两种来源。

思考

对于同一个障碍物来说，电磁波中的伦琴射线、紫外线、红外线和无线电波，最能产生明显的衍射现象的是哪一种？为什么？

七、光谱

分光镜

研究物质的发光特征和规律，需要应用分光镜。它的构造如图 13-38(a)所示，由平行光管 A、三棱镜 P、望远镜筒 B 和标度管 C 组成。平行光管 A 的前方有一宽度可调节的狭缝 S，S 位于透镜 L_1 的焦平面处。从 S 射入的白光经 L_1 折射后，变成平行光射到三棱镜 P 上，白光中不同频率的光经过棱镜沿不同的折射方向射出，并在透镜 L_2 后方的焦平面 MN[图 13-38(b)]上形成按频率大小依次排列的彩色光带，也就是光谱。通过望远镜筒的目镜，就可看到放大的光谱的像。如果在 MN 处放上照相底片，就可摄下光谱的像。具有这种装置的光谱仪器叫做摄谱仪。标度管 C 被照亮后，可在 MN 处形成标度的像，用以测量光谱中各波段的位置。

根据光谱的形成条件，光谱可分为发射光谱和吸收光谱两类。

发射光谱

由物体发光直接产生的光谱叫做发射光谱。发射光谱又有两种类型：连续光谱和明线光谱。

炽热的固体、液体以及高压气体的光谱，是由连续分布的包含有一切波长的光组成的，这种光谱叫做连续光谱（见彩图 12），例如白炽灯丝、烛焰、炽热的钢水发出的光都形成连续光谱。

稀薄气体的光谱，是由一些不连续的亮线组成，这种光谱叫做明线光谱（见彩图 13）。观察稀薄气体的光谱，可以使用光谱管。它是一支中间较细的封闭玻璃管，里面装有低压气体，管的两端有两个电极，接在高压电源上。气体放电时，用分光镜可以观察这种气体的明线光谱（图 13-39）。

把固态或液态物质放到煤气灯的火焰或电弧中加热，它们汽化后发光，也可用分光镜观察它们的明线光谱。

从实验知道，每种元素的原子都有一定的明线光谱，因为每种元素的原子只能发出一系列不连续的具有特定波长的光谱线，所以我们把这种谱线叫做元素的特征谱线。例如钠的特征谱线是在黄光区域的波长为 0.5890 微米和 0.5896 微米的两条谱线，氢的特征谱线在可见光范围内是分别出现在红光、蓝光和紫光区域的波长为 0.6562 微米、0.4861 微米、0.4340 微米及 0.4101 微米的四条谱线，分别被称为 H_α、H_β、H_γ 和 H_δ。

吸收光谱

高温物体发出的白光，通过温度较低的物质时，某些波长的光被物质吸收后形成的光谱叫做吸收光谱，用分光镜可观察到在连续光谱的背景上出现若干条暗线。例如让炽热固体发出的白光通过温度较低的钠蒸汽，用分光镜来观察，就会在连续光谱的背景上出现靠得很近的两条暗线（见课本彩图 14），这两条暗线的波长恰好跟钠蒸汽的发射光谱中两条黄色亮线的波长相同。实验表明，各种原子的吸收光谱中的每一条暗线都跟这种原子的发射光谱中的一条亮线相对应。

光谱分析

由于每种元素都有它的特征谱线，各种元素的特征谱线中亮线（或暗线）的条数、位置都因元素的不同而不同，因此可以根据光谱来鉴别物质和确定它的化学组成。这种方法叫做光谱分析。用光谱分析的方法能非常灵敏地鉴别物质，某种元素在物质中的含量只要有 10^{-13} 千克，就能把它鉴别出来。光谱分析在科学技术上有着广泛的应用。

太阳光谱中有许多条暗线，就是因为太阳发出的白光在穿过温度比太阳表面低得多的太阳大气层时，其中某些波长的光被吸收掉而形成的吸收光谱（见课本彩图 15）。通过对太阳光谱的分析，知道太阳大气层里至少含有氢、氧、钠、钾、钙、铁、镍、钴等 66 种元素。我国南京紫金山天文台就有太阳光摄谱仪，专门用来研究太阳光谱。其他恒星天体及其表面大气层的成份也可用光谱分析来测定，这就大大开阔了人们对各类天体的认识。

练习三十

1. 氢光谱管产生的光谱是 []
A. 明线光谱； B. 连续光谱；
C. 发射光谱； D. 吸收光谱。
2. 可用于光谱分析的是 []
A. 明线光谱； B. 连续光谱；
C. 发射光谱； D. 吸收光谱。

八、光电效应

麦克斯韦提出的光的电磁说，把光波和电磁波统一起来，使光的波动理论得到进一步的完善，但是光的本性是复杂的，19世纪末发现的一些新现象，例如光电效应现象，就无法用光的波动理论进行解释。

1887年，赫兹首先发现，让紫外线照射在电压很高的极板上，就能使极板间发生火花放电现象。1888年，俄国物理学家斯托列托夫（1839—1896）重复赫兹的实验，进一步发现，用紫外线照射带负电的极板时，能使极板失去电子。

如图 13-40 的装置中，一块表面洁净的锌板和验电器连接，用紫外线照射锌板，验电器的指针发生偏转，由此可知锌板带了电。经过验证知道锌板带的是正电，这表明锌板在紫外线的照射下释放了电子。

金属及其化合物在光（包括不可见光）的照射下，释放电子的现象，叫做光电效应(Photoelectric effect)。释放出的电子叫做光电子。光电子在外电路中运动形成的电流叫做光电流。

斯托列托夫研究了光电效应，总结出光电效应的规律：

1. 任何一种金属，都有一个极限频率（又叫红限），入射光的频率低于这个频率就不能发生光电效应。下面表中是几种金属的极限频率 ν_0 和极限波长。

金属	铯	钠	锌	银	铂
极限频率 ν_0 (赫)	4.545×10^{14}	6.000×10^{14}	8.065×10^{14}	1.153×10^{15}	1.529×10^{15}
极限波长 (微米)	0.6600	0.5000	0.3720	0.2600	0.1962

2. 光电子的最大初动能跟入射光的强度无关，只随入射光频率的增大而增大。

3. 从光开始照射到释放出光电子，整个过程所需时间小于 3×10^{-9} 秒。

4. 当入射光的频率大于极限频率时，单位时间、单位面积上发射出的光电子数跟入射光频率无关，跟入射光强度成正比。

光电效应的规律无法用光的波动理论来解释。按照波动理论，波的能量只跟振幅有关而跟频率无关，只要光足够强，照射时间足够长，都能使电子获得能量逸出金属表面，发生光电效应。而实验结果告诉我们，对某种金属，当入射光的频率低于它的极限频率时，不论光多么强，照射时间多么长，都不可能发生光电效应。光电子的最大初动能只跟光的频率有关，而跟光的强度无关，这也跟波动理论相矛盾。此外，根据光的波动理论，入射光的辐射能是连续分布的，电子吸收光能需要一定时间，但实验结果是极板一受到入射光照射，几乎立即有电子释放出来。

光的电磁说无法解释光电效应现象，这告诉我们对光的本性的认识不能停留在光具有波动性的一个方面，必须对它作进一步的研究。

光子说

为了解释光电效应的实验结果，1905年，爱因斯坦(1879—1955)在德国物理学家普朗克研究电磁辐射的基础上提出了光子说。他指出，在空间传播的光的辐射能不是像波动理论认为是连续分布的，而是不连续的，是一份一份的，每一份叫做一个光子(photon)。每个光子所具有的能量跟光的频率成正比，即

$$E=h\nu。$$

式中 ν 为光的频率，比例常数 h 是一个普适恒量，叫做普朗克恒量，实验测出 $h=6.63 \times 10^{-34}$ 焦·秒。

光子说可以很好地解释光电效应。当光照射到金属表面时，金属中电子吸收了一个光子就获得能量，不需要任何积累能量的时间。电子获得的能量如果足以克服原子核对它的束缚，就可以离开金属表面逸出成为光电子，电子克服金属原子核的引力所做的功，叫做逸出功。不同金属的逸出功不同，所以它们的极限频率也不同。由于光子能量跟频率成正比，入射光的频率越大，光子的能量越大，超过逸出功的部分越多，从金属表面逸出的光电子的初动能也就越大。

思考

某种金属在黄光照射下恰好能产生光电效应，如果改用红光或紫光照射，是否还能产生光电效应？

爱因斯坦的光电方程

爱因斯坦的光子说指出，电子从入射光中吸收一个光子的能量 $h\nu$ 之后，一

部分消耗于逸出功 W ，另一部分转变为电子的最大初动能 $\frac{1}{2}mv^2$ 。根据能量转

化和守恒定律可以得出：

$$h\nu = \frac{1}{2}mv^2 + W。$$

这个方程叫做爱因斯坦的光电方程。从方程中可知，当入射光子的能量小于金属的逸出功时，即 $h\nu < W$ ，不会产生光电效应；只有 $h\nu \geq W$ 时，才会产生光电效应。当光子能量 $h\nu=W$ 时，入射光的频率 ν 就等于金属的极限频率 ν_0 ，因此，极限频率 ν_0 可由下式求得

$$\nu_0 = \frac{W}{h}。$$

对于一定的金属来说，逸出功 W 的值是一定的，所以电子的最大初动能跟入射光的频率有关，频率越高，电子的最大初动能越大，电子逸出速度也越大。入射光频率一定，光强度的变化不会影响电子逸出的速度。

光电管

光电管是光电效应在技术上的一种应用。图 13-41 是一种光电管。玻璃泡里的空气已经抽去，同时充有少量的惰性气体（如氩、氖、氦）。

泡内有一个涂有碱金属（如钠、锂、铯）的金属柱面 K，作为发射电子的阴极，金属棒 A 是收集光电子的阳极。

把光电管接在电路中，阳极 A 接在电池组的正极，阴极 K 接在电池组的负极。当光不照射时，电路中没有电流。当光照射到光电管的阴极 K 上，阴极表面就有电子逸出，在 K、A 间的电场中，电子向阳极 A 运动，在电路中形成电流（图 13-42）。电流的大小决定于入射光的强度。光电管产生的电流一般很小，应用时要经过放大器放大。

光电管可以把光信号转变为电信号，它的应用很广泛，如各种光电自动化装置、电影、无线电传真和光纤通信。图 13-43 是光电管在自动控制中的工作原理图。当光照射到光电管的阴极 K 后，产生很微弱的光电流，经放大器放大，使电磁铁 M 磁化，把衔铁 N 吸住，于是接触片接通，工作电路通电，被控制的机器就开动起来。而当照射到光电管阴极上的光线被遮挡时，电路中没有电流，衔铁 N 在弹簧作用下与 M 脱离，接触片断开，工作电路断路，机器就停止工作。

思考

根据光电管工作原理，请设计一个“光电计数装置”，用于统计进入展览会的参观者人数，并画出简要的电路图。

练习三十一

1. 当光照射到某种金属表面时，金属表面有电子逸出。如果这束照射光的强度减弱到某一最低值时，以下可能发生的现象是 []

- A. 没有电子逸出金属表面；
- B. 单位时间逸出金属表面的电子数减少；
- C. 逸出金属表面的电子的最大初动能减小。

2. 波长为 2.4×10^{-7} 米的紫外线和波长为 6×10^{-7} 米的橙光，它们光子的能量之比是多少？

九、光的波粒二象性

我们已经学过力学、热学、电磁学等知识，这些知识都是经典物理学的主要内容。经典物理学所研究的物质包括实物和场两种。实物和场在许多方面是不同的，但也有共同的地方，例如，它们的运动变化过程和描述这些过程的物理量都是连续的。

经典物理学的基本概念和规律，是以人们日常生活和生产的经验为基础，以及从一定条件下的实验结果归纳得出的。这就是：被观察物体的速度远远小于光速；它们本身的大小比原子、分子大得多。现在我们学习的知识领域将从宏观世界逐步深入到微观世界，例如光子、原子的性质。在微观世界中，我们将认识物质存在的两种形式——实物和场是统一的，物理量不一定是连续变化的。

人们对光的本性的认识

关于光的本性的认识，早在 17 世纪就存在两种对立的学说——牛顿

的微粒说和惠更斯的波动说。19 世纪初，人们在实验中观察到光的干涉、衍射现象后，波动说才逐渐为人们所公认。到麦克斯韦从理论上指出光是一种电磁波，赫兹又从实验证实了电磁波的存在，并测出了它的传播速度等于光速以后，似乎光的波动理论就相当完善了。然而光电效应等现象，不仅无法用波动理论来解释，而且这些现象所服从的规律与波动学说的结果发生严重的矛盾。为了解释光电效应的规律，爱因斯坦提出了光子说。爱因斯坦的理论经密立根（1868—1953）用实验完全证实，这就肯定了光具有粒子性。这是人们对微观粒子本质认识的一个飞跃。

光的波粒二象性

光既具有粒子性又具有波动性，也就是光具有波粒二象性。这里所说的粒子性和波动性，已经不是牛顿的微粒说和惠更斯的波动说了。牛顿把光看做实物粒子，惠更斯把光看成机械波，他们都想用一种观点去说明光的本性，这主要是历史的局限，是受了宏观世界实践中所形成的观念的影响，因为宏观现象中的波动性和粒子性是完全对立的，无法统一的，在宏观世界中我们不可能找到具有与光子完全相同的实物。

光子是一种微观粒子，是人们以往实践中未曾接触过的，因此，不可能用宏观世界实践中所形成的概念，完美地说明微观世界。对于光子，只有用波粒二象性才能说明它的本性。光子所具有的波动性和粒子性不是对立的，而是统一的，光子说指出光子的能量 $E=h\nu$ ，式中频率 ν 就是波动的特征。

理论和实验告诉我们，光在传播过程中，主要表现为波动性；当光与物质相互作用时，主要表现为粒子性。大量光子表现出来的是波动性，少量光子表现出来的是粒子性。我们了解光的波粒二象性，是认识微观粒子特殊规律的开始。进一步研究指出，不仅光具有波粒二象性，电子、质子、中子等一切微观粒子也都具有波粒二象性。

德布罗意波

法国物理学家德布罗意（1892—），在光的波粒二象性启发下大胆设想，在通常情况下表现为波动的光具有粒子性，那么在通常情况下表现为粒子的物质是否具有波动性？德布罗意在 1924 年提出一个假说，认为一切微观粒子，包括电子、质子、中子，都有波粒二象性。德布罗意从理论上建立了粒子与波动的联系，对于波动，我们用频率 ν 和波长 λ 描述；对于运动粒子，我们用能量 E 和动量 P 表征。他指出：具有质量 m 和速度 v 的运动粒子的波长 λ 等于普朗克恒量 h

跟粒子动量 mv 的比，即 $\lambda = \frac{h}{mv}$ 。这个公式叫做德布罗意公式。

既然任何粒子都具有波动性，那末长期以来，人们为什么会忽略它的波动性呢？这是由于一般运动粒子的波长太短了，没有足够精密的仪器能够觉察它的波动性，我们知道狭缝的宽度远大于光波的波长时是观察不到衍射现象的。但当我们深入到微观世界中时，情况就不同了。科学家们设计了用电子射线通过氯化钠晶体产生衍射的实验，得到了电子射线的衍射图样[图 13-44(a)]，这图样与伦琴射线通过同一晶体时产生的衍射图样[图 13-44(b)]完全相似。这就证明了电子具有波动性。后来

又完成许多实验，证实了其他微观粒子，如质子、中子、中性原子、分子，也同样具有波动性，其波长与动量的关系都符合德布罗意公式。这种跟物质相联系的波动，叫做德布罗意波，也叫物质波。

本章学习要求

1. 知道人们对光的本性认识的发展。
2. 理解光的折射定律。理解介质的折射率。
3. 会用插针法测定玻璃的折射率。
4. 知道光的色散。
5. 知道光的干涉及其产生的条件。
6. 知道光的衍射及其能够发生明显衍射现象的条件。
7. 知道电磁场。
8. 知道电磁波，记住电磁波在真空中的传播速度。
9. 理解电磁波的波长、频率和波速的关系。
10. 知道红外线、紫外线、X射线、 γ 射线及其主要作用。
11. 知道光的电磁本性。知道电磁波谱。
12. 知道光谱和光谱分析。知道连续光谱、明线光谱和吸收光谱。
13. 知道光电效应现象的基本规律。
14. 初步学会用光电元件控制电路。
15. 知道光子说。
16. 知道光子的能量跟频率有关。
17. 知道光的波粒二象性。
18. 知道一切微观粒子都具有波粒二象性。

复习题

1. 单选题

(1) 平面镜 CD 与水面 AB 间的夹角为 60° ，一束红光从水中竖直向上入射到 O 点（图 13 - 45），则该束光传播的方向可能是 []

- A. 沿 OA 方向；
- B. 沿 OC 方向；
- C. 沿 AOD 的角平分线方向；
- D. 沿 AOC 的角平分线方向。

2. 关于光的干涉，下列叙述中正确的是 []

- A. 光的干涉现象是光直线传播的结果；
- B. 光有干涉现象，证明了光具有波动性；
- C. 在光的干涉现象中，明条纹是光波正常照射到的地方，暗条纹是光波能量消失的地方；
- D. 两支相同的烛焰发出的光也可能产生干涉现象。

3. 在观察薄膜干涉时，用两块玻璃片叠在一起，在它们的一端夹一小薄片，使玻璃片间形成如图 13 - 46 所示的楔形缝隙，因而可以看到干涉图样。这是光从两块玻璃片的 a、b、c、d 四个面中，某两个面上反射的光线发生干涉的结果，这两个面是 []

- A . a 和 b ; B . b 和 d ;
C . b 和 c ; D . a 和 d 。

4 . 关于电磁波 , 下列叙述中正确的是 []

- A . 电磁波、机械波都是本质相同的波 ;
B . 电磁波就是无线电波 ;
C . 电磁波的传播不需要介质 , 所以电磁波在真空中以及任何介质中的传播速度都相同 ;
D . 无线电波、红外线、可见光线、紫外线、伦琴射线和 γ 射线都是电磁波。

5 . 用单色平行光照射一个狭缝后 , 在屏上得到明暗相间的条纹 , 这是由于 []

- A . 光的全反射 ; B . 光的色散 ;
C . 光的干涉 ; D . 光的衍射。

6 . 以下可以形成明线光谱的情况是 []

- A . 白炽灯丝发光 ; B . 低压金属蒸汽发光 ;
C . 稀薄气体发光 ; D . 高压气体发光。

7 . 用某一频率的单色光照射金属表面时 , 恰好不能发生光电效应。为了产生光电效应 , 则应该采取的方法是 []

- A . 光的强度增大 ; B . 照射时间增加 ;
C . 光的频率变小 ; D . 光的频率变大。

8 . 在下列各单色光中 , 光子能量最大的是 []

- A . 红光 ; B . 紫光 ; C . 蓝光 ; D . 黄光。

9 . 关于光的本性 , 下列说法中正确的是 []

- A . 的波粒二象性综合了牛顿的微粒说和惠更斯的波动说 ;
B . 光的波粒二象性反映了光的电磁本性的局限性 ;
C . 光子说只是说明光具有粒子性 ;
D . 大量光子产生的效果往往显示出粒子性 , 个别光子产生的效果往往显示出波动性。

2 . 某单色光从空气射到玻璃的表面 , 反射光线与折射光线的夹角为 90° , 若已知玻璃对这一单色光的折射率为 1.50 , 试分别求入射角和折射角的大小。

3 . 一束光线从空气射入某介质时 , 入射光线与反射光线恰好垂直 , 折射光线与入射光线之间的夹角为 160° , 试求 : (1) 介质的折射率 ; (2) 光在这种介质中传播的速度。

4 . 如图 13-47 所示 , 棱镜的顶角为 30° , 一束单色光垂直 AB 面射入 , 由 AC 面射出。测得从棱镜射出的光线与原来入射光线之间的夹角为 30° , 试求组成棱镜材料的折射率。

5 . 有一圆柱形空筒 , 筒的直径和筒高均为 d 。观察者在筒的边缘外侧 A 点恰好看到筒底边缘的 B 点 (图 13-48) 。观察者位置不变 , 将筒内注满某种液体 , 这时恰好看到筒底中央的圆心 O 点。试求 : (1) 液体的折射率 ; (2) 光在这种液体中的传播速度。

6 . 红光在真空中的波长是 7.5×10^{14} 米 , 它以 60° 的入射角从空气射入某介质 , 折射角为 30° , 试求红光在这种介质中传播时的频率、速度和波长。

7. 频率为 3.9×10^{14} 赫的某单色光, 从空气射入水中, 已知水对这一单色光的折射率为 1.33, 试求它在水中传播时的波长和速度。

8. 频率为 6.0×10^{14} 赫的光波在某种液体中传播时的波长是 3.0×10^{-7} 米。求: (1) 这列光波在这种液体中的传播速度; (2) 这列光波在空气中的波长。

9. 紫光在空气中的波长为 4.0×10^{-7} 米, 红光在空气中的波长为 7.0×10^{-7} 米, 玻璃对紫光的折射率为 1.54, 对红光的折射率为 1.50。求: (1) 这两种色光的频率; (2) 它们在玻璃中的传播速度; (3) 它们在玻璃中传播时的波长。

10. 黄光在玻璃中传播时的波长为 4.2×10^{-7} 米。这样的一束黄光从玻璃射向空气, 入射角为 30° , 折射角为 45° , 试计算黄光的频率和它在空气中传播时的波长。

11. 如果某红光在水中的波长恰好跟某绿光在真空中的波长相等, 已知水

对红光的折射率为 $\frac{4}{3}$ 。求红光与绿光在真空中的波长之比及其频率之比。

14 . 原子 原子核

Atom Nucleus

人们对物质结构的认识是逐步深化的。长期以来，人们一直认为原子是组成物质的最小微粒，是不可分割的。直到 19 世纪末、20 世纪初，科学家们在物理学研究中先后发现了 X 射线、电子以及天然放射现象后，人们才认识到原子也是可分的，且具有复杂的内在结构。研究原子的结构，是本世纪初物理学发展的重要方面，它推进了量子论的发展，导致量子力学的创立，使人们对物质结构的认识进入到一个更深的层次。

原子和原子核物理是近代研究物质微观结构、研究原子和原子核的内部结构和运动规律的学科，它是近代物理学的基础，也是固体、半导体、超导体、磁性材料、激光、核能利用等近代应用技术的基础。

这一章我们将学习原子和原子核物理中的一些基本原理，了解原子和原子核的性质、结构、运动规律及其应用。

一、原子结构的发现

电子的发现

1895 年，德国物理学家伦琴发现 X 射线之后，英国物理学家汤姆孙 (1856—1940) 对阴极射线进行了更深入的实验研究，确认阴极射线是带负电的粒子流。1897 年，他测定了组成阴极射线粒子的比荷 (旧称荷质比) e/m ，并发现用不同物质做成的阴极发出的阴极射线粒子都有相同的 e/m 值，这表明不同物质都能发射这种带负电的粒子，它是构成各种物质的共有成分。

汤姆孙测得的阴极射线粒子的比荷，大约是当时已知的氢离子比荷的 1840 倍。汤姆孙认为这不外乎两种可能，不是阴极射线粒子的电荷很大，就是它的质量很小，后来汤姆孙测量了氢离子和阴极射线粒子的电荷，虽然测量不很准确，但可以肯定组成阴极射线粒子的电荷与氢离子的电荷大小是基本相等的，由此得出阴极射线粒子的质量比氢离子的质量小得多的结论，人们把这种粒子叫做电子 (electron)。以后，美国物理学家密立根于 1917 年测定了基元电荷 (大小等于电子的电量)，这样，由电子的比荷和电量就可算出电子的质量。

现在测得电子比荷

$$e/m=1.75880 \times 10^{11} \text{ 库/千克,}$$

电子电量

$$e=1.60219 \times 10^{-19} \text{ 库}$$

从而算出电子质量是 9.10953×10^{-31} 千克。电子质量很小，约为氢原子质量的 $1/1837$ 。

汤姆孙的原子模型

既然原子中存在带负电的电子，而原子通常是电中性的，那么原子中一定还有带正电的部分。电子的质量很小，因此，原子的质量主要集中在带正电的部分，原子中带正电的部分和带负电的电子是怎样分布的呢？很自然的便提出了原子的结构问题。

在本世纪的前 10 年里，科学家们提出了几种原子模型，其中最具有影

响的是 1903 年汤姆孙提出的原子模型。他认为原子是一个直径约为 10^{-10} 米的球体，正电荷均匀分布在整个球体中，带负电的电子就嵌在其中，好像蛋糕中嵌着一粒粒葡萄干一样。利用这一模型，能够解释一些实验事实，但是几年后就被英国物理学家卢瑟福(1871—1937)发现的新的实验事实否定了。

粒子散射实验 卢瑟福的原子核式结构模型

卢瑟福从 1909 年起做了著名的 粒子散射实验，实验的目的是想证实汤姆孙原子模型的正确性，实验结果却成了否定汤姆孙原子模型的有力证据。在此基础上，卢瑟福提出了原子核式结构模型。

为了要考察原子内部的结构，必须寻找一种能射到原子内部的试探粒子，这种粒子就是从天然放射性物质中放射出的 粒子。卢瑟福和他的助手用 粒子轰击金箔来进行实验，图 14-1 是这个实验装置的示意图。

在一个铅盒里放有少量的放射性元素钋(Po)，它发出的 射线从铅盒的小孔射出，形成一束很细的射线射到金箔上。当 粒子穿过金箔后，射到荧光屏上产生一个个的闪光点，这些闪光点可用显微镜来观察。为了避免 粒子和空气中的原子碰撞而影响实验结果，整个装置放在一个抽成真空的容器内，带有荧光屏的显微镜能够围绕金箔在一个圆周上移动。

实验结果表明，绝大多数 粒子穿过金箔后仍沿原来的方向前进，但有少数 粒子发生了较大的偏转，并有极少数 粒子的偏转超过 90° ，有的甚至几乎达到 180° 而被反弹回来，这就是 粒子的散射现象。

发生极少数 粒子的大角度偏转现象是出乎意料的。根据汤姆孙模型的计算， 粒子穿过金箔后偏离原来方向的角度是很小的，因为电子的质量不到 粒子的 $1/7400$ ， 粒子碰到它，就像飞行着的子弹碰到一粒尘埃一样，运动方向不会发生明显的改变。正电荷又是均匀分布的，

粒子穿过原子时，它受到原子内部两侧正电荷的斥力大部分相互抵消， 粒子偏转的力就不会很大[图 14-2(a)]。然而事实却出现了极少数

粒子大角度偏转的现象。卢瑟福后来回忆说：“这是我一生中从未有的最难以置信的事，它好比你对一张纸发射出一发炮弹，结果被反弹回来而打到自己身上……”卢瑟福对实验的结果进行了分析，认为只有原子的几乎全部质量和正电荷都集中在原子中心的一个很小的区域，才有可能出现 粒子的大角度散射。由此，卢瑟福在 1911 年提出了原子的核式结构模型，认为在原子的中心有一个很小的核，叫做原子核(nucleus)，原子的全部正电荷和几乎全部质量都集中在原子核里，带负电的电子在核外空间里绕着核旋转。

按照这一模型， 粒子穿过原子时，电子对 粒子运动的影响很小，影响 粒子运动的主要是带正电的原子核。而绝大多数的 粒子穿过原子时离核较远，受到的库仑斥力很小，运动方向几乎没有改变，如图 14-2(b)中的 1、3、4、6、7、9，只有极少数 粒子可能与核十分接近，受到较大的库仑斥力，才会发生大角度的偏转，如图 14-2(b)中的 2、5、8。

根据 粒子散射实验，可以估算出原子核的直径约为 10^{-15} 米 \sim 10^{-14} 米，原子直径大约是 10^{-10} 米，所以原子核的直径大约是原子直径的万分

之一，原子核的体积只相当于原子体积的万亿分之一。

思考

为什么说 粒子散射实验能够否定汤姆孙的原子模型？

练习三十二

1. 卢瑟福的原子模型与汤姆孙的原子模型的主要区别是什么？通过什么实验知道原子的核式结构模型更接近事实？

2. 氢原子的直径约为 10^{-10} 米，氢原子核的直径约为 3×10^{-15} 米，若把氢原子放大，使核的直径为 1 毫米，电子离核的距离为多大？

3. 试估计氢原子核的密度大小（两位有效数字）。

二、玻尔模型

卢瑟福模型的困难

卢瑟福的原子核式结构模型很好地解释了 粒子的散射实验，初步建立了原子结构的正确图景，然而这跟电磁理论发生了矛盾。根据经典理论，作加速运动的电子会不断向外辐射电磁波，电磁波的频率应等于电子绕核旋转的频率。由于原子不断向外辐射能量，随着能量的减少，电子绕核旋转的频率也要减小，因此原子发射的光谱应该是连续光谱。同时由于能量的减少，电子绕核运行轨道的半径也要减小，电子将很快地沿螺旋线轨道接近原子核而最后落到核上。但事实告诉我们，原子是稳定的，原子发射的光谱是具有一定规律的明线光谱。这表明经典理论与原子的稳定性和原子光谱规律性有着深刻的矛盾，在这里，经典物理显然遇到了困难。

玻尔的原子模型

1913 年丹麦物理学家玻尔(1885—1962)运用普朗克提出的量子理论改造了卢瑟福模型，在卢瑟福模型的基础上把量子假说用到原子系统上，建立了玻尔原子理论，玻尔理论主要是下面三条假设：

(1)原子只能处于一系列不连续能量状态中，在这些状态中原子是稳定的，电子虽然做加速运动，但并不对外辐射能量，这些状态叫做定态。

(2)原子的不同能量状态跟电子沿不同半径的圆形轨道绕核运动相对应。电子绕核运动时，只有电子的动量（质量和速度的乘积）和轨道半径的乘积等于 $h/2\pi$ 的整数倍的那些轨道才是稳定的，即

$$mvr = n \frac{h}{2\pi} \quad (n = 1, 2, 3, \dots)$$

式中 h 为普朗克常数， n 叫做量子数。

(3)原子从能量为 E_i 的定态跃迁到能量为 E_f 的定态时，它辐射（或吸收）一定频率的光子，光子的能量由两个定态的能量差决定，即

$$h\nu = E_i - E_f$$

玻尔在上述假设的基础上，利用经典电磁理论和牛顿力学计算出氢原子的电子轨道半径和电子在各条轨道上运动时原子的能量分别为 2

$$r_n = n^2 r_1, E_n = \frac{1}{n^2} E_1 (n = 1, 2, 3, \dots).$$

式中 r_1 表示第一条 (即离核最近的) 可能轨道的半径, E_1 表示电子在这一轨道上运动时原子的能量; r_n 表示第 n 条可能轨道的半径, E_n 表示电子在这一轨道上运动时原子的能量。

玻尔计算出了 r_1 和 E_1 的数值: $r_1 = 0.53 \times 10^{-10}$ 米, $E_1 = -13.6$ 电子伏 (eV)。

玻尔理论对氢原子光谱规律的解释

我们把由量子数 n 决定的氢原子的各个定态的能量值, 叫做氢原子的能级。

$E_n = \frac{1}{n^2} E_1$ 就是氢原子的能级公式, 通常把上式计算出的氢原子的各个能级表

示为图 14-3 的能级图。

在正常状态下, 原子处于最低能级, 这时电子在离核最近的轨道上运动, 这一定态叫做基态。电子在其他轨道上运动, 这些定态叫做激发态。原子从基态向激发态跃迁的过程, 是吸收能量的过程。给物体加热或有光照射物体时, 物体中某些原子能够从相互碰撞或从入射光子中吸收一定的能量, 从基态跃迁到激发态。原子从能量较高的激发态向能量较低的激发态或基态跃迁的过程, 是辐射能量的过程, 能量以光子的形式辐射出去, 这就是原子的发光现象。原子无论吸收能量或辐射能量, 这个能量都等于原子发生跃迁的两个能级的能量差。

按照玻尔原子理论, 氢原子的核外电子从能量较高的轨道 n 跃迁到能量较低的轨道 2 时, 辐射出的光子能量为

$$h\nu = E_n - E_2.$$

因

$$\nu = \frac{c}{\lambda},$$

$$E_n = \frac{E_1}{n^2}, E_2 = \frac{E_1}{2^2},$$

可得

$$h \frac{c}{\lambda} = -E_1 \left(\frac{1}{2^2} - \frac{1}{n^2} \right),$$

也可写成

$$\frac{1}{\lambda} = -\frac{E_1}{hc} \left(\frac{1}{2^2} - \frac{1}{n^2} \right).$$

将 E_1 、 h 、 c 代入上式, 可以算出氢原子光谱中各条谱线相应的波长, 并知道谱线 H_γ、H_β、H_α、H 是电子分别从 $n=3$ 、4、5、6 等能级跃迁到 $n=2$ 的能级时辐射出光子能量所形成的。图 14-4 是用氢原子的轨道图表示氢原子光谱的形成。

玻尔理论的局限性

玻尔理论在解释氢原子光谱上获得了明显的成功，但用来解释比较复杂的其他原子的原子光谱时却遇到了困难。例如氦原子只比氢原子多一个电子，但是玻尔模型竟不能用来计算氦原子的能级，也不能解释氦原子的光谱规律，即使对氢原子光谱来说，它也只能算得谱线的波长，而不能算出光谱线的强度大小分布。

玻尔和其他物理学家研究了这些问题，终于明白了这个理论的成功之处在于它引入了量子理论，失败之处在于保留了过多的经典物理理论。

本世纪 20 年代，大约在玻尔理论建立 10 年之后，德国物理学家海森堡(1901—1976)、奥地利物理学家薛定谔(1887—1961)等物理学家在量子观念的基础上建立了量子力学。量子力学不但成功地解释了玻尔理论所能解释的现象，而且还能解释大量玻尔理论所不能解释的现象。原来作为玻尔理论假设的，在量子力学理论中已成为它所推导出的必然结果。量子力学认为，对于像电子这样的微观粒子，它的运动不能像描述宏观物体那样用一定的位置和速度来描述，而要用概率波来描述，电子在原子核外出现的概率可以根据概率波计算出来，而不是在核外某些确定的轨道上运动，电子频繁地出现在那些概率大的地方。我们可以想象原子核的外围有一团“电子云”，云雾浓度大的地方，电子出现的概率就大。量子力学完全摒弃了经典理论中那些轨道、确定半径和速度等观念，它已成为研究微观世界的指导理论。

思考

玻尔理论的成功之处及其局限性是什么？

练习三十三

1. 氢原子的核外电子分别在第 1、第 2 可能轨道上运行时，它们的轨道半径之比 r_1 、 r_2 和原子能量之比 E_1 、 E_2 各为多大？

2. 为了使基态 ($n=1$) 氢原子电离，要用波长多大的电磁波照射氢原子？这个波长的电磁波属于可见光、紫外线还是 X 射线？

3. 氢原子基态能量是 -13.6 电子伏，至少要吸收多大的能量才能发射出光子？所发射光子的能量为多大？

阅读材料 激光

原子在没有外界影响的情况下，处在高能级的电子会自发地向低能级跃迁而辐射光子，这种发光叫做自发辐射。在自发辐射中，发光体的大量原子跃迁的情况各不相同，各自辐射出的光子的频率、振动方向、位相都不相同，这些光叠加在一起也不会发生干涉。

原子还可以在另一种特定的条件下发光，那就是当原子处于激发态 E_n 时，如果恰好有一个能量 $h\nu = E_n - E_k$ 的光子从附近通过，在这一入射光子的电磁场影响下，原子便走向地向着低能级跃迁（在自发辐射的情况下，原子不一定跃迁到 E_k 能级上去），同时发射出一个跟入射光完全相

同的新光子，这种辐射叫做受激辐射。图 14-5(a)、(b)分别是自发辐射和受激辐射的示意图。在受激辐射时，一个光子能使处于激发态的原子激发出另一个光子，成为两个特性完全相同的光子。这是一种光放大作用。如果这两个光子又能引起其他原子的受激辐射，又激发出另外两个特征相同的新的光子，这样就会像雪崩似的产生越来越多的相同的光子使光得到加强，这种由于受激辐射而得到加强的光就是激光(laser)。

激光的主要特点是亮度极高、方向性好、单色性好(相干性好)。由于上述这些特点，激光在生产、科学技术中得到了广泛应用，如用于通信、精密测量、精密加工(激光打孔的直径可小到 0.13 毫米)、医疗手术(激光手术刀能利用其 1000 ~ 1500 的高温，在切开身体组织的同时，使周围组织在瞬间凝成一烧结凝固薄层，微血管和淋巴管便被堵塞而不会出血，如本章导图 1 利用二氧化碳激光手术刀解剖大白鼠)。

激光的应用正在不断扩大，如光纤通信、激光测距、激光定位、激光印刷、激光唱盘、全息图象信用卡和超级市场内的激光价格标签扫描器。

三、放射性元素的衰变

天然放射现象

1896 年，法国物理学家贝克勒耳(1852—1908)在研究各种物质产生荧光现象时，发现铀(U)和含铀的矿物能发出人眼看不见的某种射线。这种射线可以穿透黑纸，使照相底片感光。能够发出这种射线的元素叫做放射性元素。

在贝克勒耳的建议下，法国物理学家皮埃尔·居里(1859—1906)和他的妻子玛丽·居里(1867—1934)对铀和钍的各种矿石进行了长期研究。他们发现所有的铀矿石都能发出射线，但其中一种沥青铀矿石发出的射线，比根据它的含铀量所能发出的射线强得多。进一步研究后，发现这种沥青铀矿石中存在着两种放射性更强的新元素。玛丽·居里为了纪念她的祖国波兰，把其中一种元素命名为钋(Po)，另一种元素命名为镭(Ra)。

放射性元素这种自发地放出射线的现象叫做天然放射现象。

放射性元素发出的射线的本质是什么？它们的组成是否一样呢？卢瑟福利用磁场研究了射线的性质。他把放射源放在有一小孔的铅室底部，由于射线不能穿透厚的铅块，只能从小孔上方射出。在铅室上方放照相底片，在铅室和底片之间加上一个跟射线射出方向垂直的磁场，如图 14-6 所示。照相底片显影后，发现底片上有三条黑影。这说明在磁场的作用下，射线分成了三部分：一部分稍向右偏转，表明带正电，叫做 α 射线；一部分向左作较大的偏转，表明带负电，叫做 β 射线；还有一部分不发生偏转，表明不带电，叫做 γ 射线。

进一步研究知道，有的放射性元素放射 α 射线，有的放射性元素放射 β 射线， γ 射线一般是伴随 α 射线或 β 射线的发出而产生的。

、 、 α 射线的性质和探测

后来的实验证实， α 射线是高速运动的 He^{2+} 粒子流，它的速度约是光速的 $\frac{1}{10}$ 。

粒子的电量是基元电荷的 2 倍，它的质量是氢原子核质量的 4 倍，所以 α 粒子就是氦原子核。 β 射线的贯穿本领很小，连一张薄纸也穿不过，但它的电离作用很强，使照相底片的感光作用也很强。

γ 射线是高速运动的电子流，它的速度接近光速。 γ 射线的贯穿本领较强，可以穿透几毫米厚的铝板，它的电离作用比较弱。

γ 射线是频率很高的光子。 γ 射线的贯穿本领最强，甚至能穿透几厘米厚的铅板，它的电离作用最弱。

α 射线是看不见、摸不着的，怎样知道它的存在呢？可以根据它跟物质的相互作用来探测它的存在，并判别它的性质。用来探测各种放射粒子的存在，并分辨、测量它们的各种物理性质的仪器，叫做探测器。目前，常用的探测器有云室、电离室、计数器、气泡室和乳胶照相。

云室 计数器

云室是利用射线使气体电离的性质，来探测射线粒子并显示它们的径迹的仪器。云室是英国物理学家威尔逊(1869—1959)于 1911 年发明的，人们通常称它为威尔逊云室。

云室的主要结构如图 14 - 7 所示，在一个金属圆筒的上面连接一个塑料或玻璃制的容器，它的下面装有一个可在小范围内上下移动的活塞，上盖是透明的，可以观察室内发生的现象和进行照相。实验时，先在云室里加一些酒精（或乙醚），使室内充满酒精的饱和蒸汽。然后，使活塞迅速向下移动，由于云室内酒精饱和汽迅速膨胀而降低温度，成为过饱和汽。这时，如果有射线粒子在室内飞过，在它经过的路径上的气体分子被电离，每厘米长度上可产生数百到上万对离子，过饱和汽就会以这些离子为中心凝结成一条雾迹。

利用云室可以清晰地看到 α 粒子和 β 粒子的径迹。 α 粒子的电离本领大，它的质量也比较大，在气体中运动时不易改变方向，所以它的径迹粗而直。 β 粒子的电离本领较小，它的质量又很小，在运动中跟气体分子的电子碰撞时容易改变方向，所以它的径迹比较细，有弯曲。 γ 粒子的电离本领更小，只能产生一些细碎的雾迹。在历史上云室第一次把微观粒子的径迹呈现在人们眼前，所以曾被卢瑟福赞为“科学史上最妙不可言的新颖仪器”。

盖革·缪勒计数器简称 G-M 计数器，它是利用射线进入探测器时，在电子线路中引起脉冲电流来记录进入的粒子数量的仪器。计数器的主要部分是计数管（图 14-8），它是一根玻璃管，里面有一个导电的圆筒作为阴极，管的轴线上有一根细的金属丝作为阳极。管内充有惰性气体（如氩、氖）和少量的乙醇蒸汽和溴蒸汽。在两极间加上 1000V 以上的电压，这个电压略低于管内气体的击穿电压。当射线粒子飞进管内，气体电离产生了电子。电子在强电场作用下向阳极加速运动，碰到气体分子又可使气体电离再产生电子，在很短时间内就会产生大量电子。这些电子到达阳极，正离子到达阴极（正离子质量大，运动速度小，不会使气体分子电离），使计数管中发生一次短暂放电，从而产生一个脉冲电流，并通过电子设备记录下来。记录的脉冲电流的次数，就是进入探测

器的带电粒子数目。计数器不能分辨射线的种类，只能测出进入探测器射线粒子的数量。

思考

射线、射线、射线有哪些不同的性质？

放射性元素的衰变

铀、镭、钋都是放射性元素，但并不是只有这三种元素具有放射性。实验告诉我们，原子序数大于 83 的天然存在的元素都具有放射性，它们的原子核都不稳定，会自发地放出射线变为另一种元素的原子核。原子序数小于 83 的天然存在的元素，也有一些具有放射性。

某种元素的原子核，放出一个 α 粒子或 β 粒子后，就变成了新的原子核。我们把原子核由于放出某种粒子而转变成新核的变化叫做原子核的衰变(disinte-grate)。

在原子核物理中，又怎样来表示各种元素的原子核以及它们的转变呢？通常把基元电荷取作电荷的单位，用来表示原子核的电荷数；把原子量为 12 的碳原

子质量的 $\frac{1}{12}$ 取作为一个原子质量单位（用符号u表示， $1u = 1.660565 \times 10^{-27}$ 千

克），并用原子质量单位表示各种原子核的质量（由于都非常接近于整数，习惯上常用整数表示）。

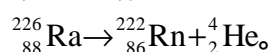
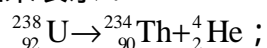
假设 X 为某一元素的符号，在其左上角标以原子核的质量数(A)，左下角标

以原子核的电荷数(Z)，那么 A_ZX 就是元素 X 的原子核的符号。例如 ${}^{16}_8O$ 就是氧核的符号， ${}^{238}_{92}U$ 是铀核的符号， 4_2He 是氦核的符号。用 ${}^0_{-1}e$ 来表示电子（即

粒子）的符号。因为电子的质量比原子核的质量小得多，一个原子核放出一个 β 粒子，它的质量几乎不变，所以在衰变过程中可以认为电子的质量数为零，电荷数是 -1。

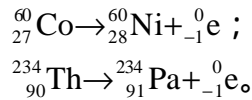
原子核自发地放出 α 粒子的衰变叫做 α 衰变。例如 ${}^{238}_{92}U$ （铀核）发生 α 衰变转变成 ${}^{234}_{90}Th$ （钍核）； ${}^{226}_{88}Ra$ （镭核）发生 α 衰变转变成 ${}^{222}_{86}Rn$ （氡核）。上

述 α 衰变可用下面的方程来表示：



原子核自发地放出 β 粒子的衰变叫做 β 衰变。例如 ${}^{60}_{27}Co$ （钴核）发生 β 衰变转变成 ${}^{60}_{28}Ni$ （镍核）； ${}^{234}_{90}Th$ （钍核）发生 β 衰变转变为 ${}^{234}_{91}Pa$ （镤核）。上

述 β 衰变可用下面的方程表示：



从上面的 β 衰变和 α 衰变的方程可以看出，在衰变前，原子核的质量数和电荷数与衰变后生成的新核及放出的粒子的质量数与电荷数是守恒的。

放射性元素的原子核在发生 α 衰变或 β 衰变生成新原子核时，常常同时会辐射出 γ 光子，所以 γ 光子是伴随 α 粒子或 β 粒子产生的。例如 ${}_{92}^{235}\text{U}$ 在放射 α 粒子的同时还伴随 γ 光子的辐射； ${}_{27}^{60}\text{Co}$ 在放射 β 粒子的同时也伴随 γ 光子的辐

射。当放射性物质连续发生衰变时，各种原子核有的发生 α 衰变，有的发生 β 衰变，同时伴随 γ 辐射，这时在放射线中就会有 α 、 β 、 γ 三种射线。

思考

放射性元素经过一次 α 衰变或一次 β 衰变后生成新元素，它在元素周期表中的位置的移动有什么规律？

α 衰变是不稳定的原子核自发转变为另一种原子核的过程，对同一种放射性元素的大量原子核来说，它们的衰变不可能同时发生，而是有先有后。但是对任何放射性元素，它原来的原子核数将随时间的增长变得越来越少。为了研究放射性

元素的衰变规律，人们用 ${}_{86}^{222}\text{Rn}$ （氡核）的 α 衰变做实验，发现大约每经过 3.8 天，就有一半氡核发生了衰变。也就是说经过 3.8 天，氡的数量减少到原来的 $\frac{1}{2}$ ；再经过 3.8 天，氡的数量减少到原来的 $\frac{1}{4}$ ；经过第三个 3.8 天后，氡的数量减少到原来的 $\frac{1}{8}$ 。图 14-9 就是氡的相对含量随时间变化的图象，这是一条按指数规

律衰减的曲线。

不同放射性元素的原子核减少一半所需时间是不相同的，我们用半衰期 (half-life) 来表示放射性元素衰变的快慢。半衰期是放射性元素的原子核有半数发生衰变所需要的时间。每一种放射性元素都有一定的半衰期，各种放射性元素的半衰期差别很大。例如镭 226 变为氡 222 的半衰期是 1620 年，而铀 238 变为钍 234 的半衰期长达 4.5×10^9 年，跟地球的年龄相当。有的放射性元素的半衰期则很短，例如钍 234 变为镤 234 的半衰期是 1.2 分，而钋 212 变为铅 208 的半衰期竟短到 3×10^{-7} 秒。

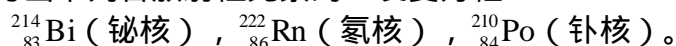
各种放射性元素的半衰期是由这种元素的原子核内部本身的因素决定的，也就是说半衰期是不因原子所处的物理状态或化学状态的不同而发生变化。

思考

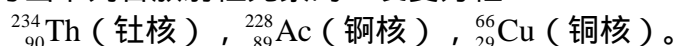
某实验室贮有某种放射性元素 100 克,现将该元素取走 50 克,那么,剩余的 50 克的放射性元素的半衰期将变为原来质量为 100 克时的半衰期的 $\frac{1}{2}$ 。你认为这个结论正确吗?为什么?

练习三十四

1. 写出下列各放射性元素的衰变方程:



2. 写出下列各放射性元素的衰变方程:



3. ${}_{92}^{238}\text{U}$ (铀核) 衰变为 ${}_{86}^{222}\text{Rn}$ (氡核) 要经过几次 α 衰变和几次 β 衰变?

4. 铋 210 的半衰期是 5 天, 经过多少天后, 20 克铋 210 剩下 0.625 克?

四、原子核的人工转变

原子核的人工转变

天然放射性元素的衰变事实告诉我们, 原子核的结构是复杂的, 而且内部结构可以变化。为了进一步研究原子核的结构及其变化规律, 单靠天然放射性元素的衰变是不够的, 因为天然存在的放射性元素的数量有限, 所以有必要用人工的方法使原子核发生转变。为此, 物理学家们利用天然放射性元素所放出的高速粒子去轰击其他元素的原子核, 使它们发生剧烈的相互作用, 从而去探索原子核的结构。

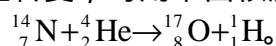
质子的发现

1919 年, 卢瑟福用 α 粒子轰击氮核的实验, 是第一次实现原子核的人工转变, 并发现了质子。他所用的实验装置如图 14-10 所示, A 是放射性物质, F 是银箔, 选择银箔的厚度使从 A 射出的 α 粒子恰好能被完全吸收, 而不能穿过。S 是荧光屏, M 为显微镜, 可以观察荧光屏上是否出现闪光。当容器通过阀门 T 通入纯净的氧气或二氧化碳时, 荧光屏 S 上没有闪光, 说明这时 α 粒子已全部被银箔 F 吸收。当容器内通入纯净的氮气时, 荧光屏 S 上出现闪光。卢瑟福认为, 这闪光一定是 α 粒子击中氮核后, 产生的能量较大的新粒子透过银箔引起的。

后来, 测出这种粒子的质量和电量, 才知道它就是氢原子核, 又叫做质子

(Proton), 符号为 ${}^1_1\text{H}$ 或 ${}^1_1\text{P}$ 。

这种用人工的方法使原子核发生转变的过程叫做原子核的人工转变。以上实验中的人工转变, 可用下面核反应方程表示:



从上面核反应方程可以看出, 原子核的人工转变过程中的电荷数和

质量数也是守恒的。

图 14-11 是 α 粒子穿过充满氮气的云室中拍摄的照片。在许多 α 粒子的径迹中有一条径迹发生了分叉，分叉后细而长的是质子的径迹，粗而短的是一新生的氧核的径迹，分叉处就是氮核俘获 α 粒子发生人工转变的地方。 α 粒子轰击氮核的命中率极小，因此要拍摄成千上万张照片才能得到像图 14-11 所示的照片。英国物理学家希拉凯特拍摄了 2 万多张照片，在 40 多万条 α 粒子径迹中，才发现有 8 条产生分叉。

后来科学家们发现，除了氧和碳以外，原子序数在 21 以下的较轻元素的原子核，在 α 粒子轰击下都能发生类似的转变，都放出质子。由于多种原子核里都能打出质子来，这就表明质子是原子核的组成部分。

中子的发现

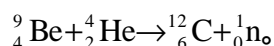
在原子核中，除了质子以外，还有什么呢？卢瑟福曾预想到原子核内可能还存在着质量跟质子相等的不带电的中性粒子，他把这种粒子叫做中子(neutron)。

1930 年，科学家们发现放射性元素钋(Po)发出的 α 粒子轰击铍(Be)时，会产生一种看不见的射线，这种射线的贯穿本领极大，在电场和磁场中都不会偏转，当时认为这种不带电粒子可能是能量很高的 γ 射线。

1932 年，约里奥·居里夫妇发现用这种射线轰击石蜡时，会从石蜡中打出高速的质子(实验装置示意图如图 14-12 所示)。经过测量和计算，发现石蜡放出的质子的能量是巨大的，能使质子获得这样巨大能量的 γ 光子，本身必须具有 55 兆电子伏(MeV)的能量，而实际测定 α 粒子打击铍后产生的粒子的能量仅为 7 兆电子伏(MeV)。由此可见，这种不带电的粒子不可能是 γ 光子。卢瑟福的学生查得威克(1891—1974)经过实验和研究，证实了这种不带电的粒子，质量差不多与质子相等。卢瑟福预想的中子终于被证实了。

中子的质量数是 1，电荷数是零，用符号 ${}^1_0\text{n}$ 表示。 α 粒子轰击铍产生中子

的核反应方程是：



后来的研究证明，很多种原子核在高速粒子轰击下都能放出中子来，可见中子也是原子核的组成部分。

思考

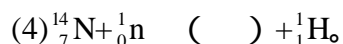
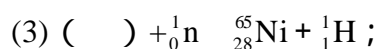
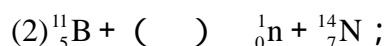
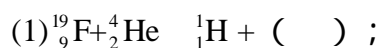
人工转变和放射性元素的衰变有什么区别？

练习三十五

1. 写出下列各人工转变的核反应方程。

- (1) ${}^{23}_{11}\text{Na}$ (钠核) 俘获 1 个 α 粒子后放出 1 个质子；
- (2) ${}^{27}_{13}\text{Al}$ (铝核) 俘获 1 个 α 粒子后放出 1 个中子；
- (3) ${}^{16}_8\text{O}$ (氧核) 俘获 1 个中子后放出 1 个质子；
- (4) ${}^{30}_{14}\text{Si}$ (硅核) 俘获 1 个质子后放出 1 个中子。

2. 完成下列各个核反应方程。



3. 从云室中拍摄的照片(图14-13)上发现, ${}^{11}_5\text{B}$ (硼核) 在俘获1个质

子后, 生成的新核的轨迹是三条完全相同的径迹。这表明硼核在人工转变后生成三个相同的新核, 新生成的是什么核? 写出核反应方程。

五、原子核的组成

天然放射现象的发现, 揭示了原子核也是可变的、可分的, 这就促使人们进一步去探索原子核的组成。早在19世纪初, 人们根据元素的原子量都接近于整数的事实, 以为所有元素都是由氢原子组成的。1919年发现了质子, 1932年发现了中子后, 苏联物理学家伊凡宁柯提出了原子核组成的假说: 原子核是由质子和中子组成的, 原子核中质子的数目等于它的原子序数, 中子的数目等于它的质量数减去原子序数的差。这个假说与大量实验相符合, 因而获得普遍的承认。质子和中子统称为核子。

原子核的体积很小, 核子在原子核里紧密地聚集在一起。例如 ${}^{207}_{82}\text{Pb}$ (铅核) 的体积约为 4×10^{-36} 厘米³, 其中却有82个质子和125个中子。我们知道质子带正电, 它们之间的距离又这样小, 质子之间的库仑斥力必定很大, 而通常原子核是很稳定的。可见, 在原子核里, 各个核子之间一定存在另一种力, 它把各核子紧密地聚集在一起, 这种力叫做核力。实验指出, 核子只有在聚集得非常紧密的情况下, 才有强大的核力, 或者说, 两个核子间距离在 2×10^{-15} 米以内, 核力才起作用, 超过这个距离, 核力就迅速减小到零, 所以核力是一种短程力。质子和中子的半径大约是 0.8×10^{-15} 米, 每个核子只跟它周围邻近的核子才有核力作用。关于核力的本质问题还在研究中。

S: 既然原子核中没有电子, 为什么放射性元素的原子核会发生衰变放出电子来呢?

T: 以前人们看到许多天然放射性元素会发出β射线, 曾以为电子也是原子核的组成部分之一, 但是这个假说跟许多实验结果相矛盾而被否定。现在我们知道原子核是由质子和中子组成的。科学研究表明, 在一定条件下, 质子和中子是可以互相转变的, 当核内的一个中子转变成质子时, 原子核就放出电子, 这就是β衰变; 当核内的一个质子转变为中子时, 原子核就放出正电子(正电子的质量跟电子的质量相同, 带一个单位正电荷), 这叫做正β衰变。

同位素

原子核由质子和中子组成, 中子不带电, 质子带一个单位正电荷, 所以原子核的电荷数就等于它的质子数。具有相同质子数的原子, 它的核外电子数也相同, 因而化学性质也相同, 属于同一种元素, 但它们的中子数可以是不相同的, 这些具有相同的核电荷数和不同中子数的核素

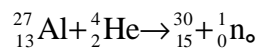
叫做同位素。如铀的同位素中：

${}_{92}^{234}\text{U}$ 是由92个质子和142个中子组成的， ${}_{92}^{235}\text{U}$ 是由92个质子和143个中子组成的， ${}_{92}^{238}\text{U}$ 是由92个质子和146个中子组成的。天然的铀就是由99.28%的铀238、

0.71%的铀 235 和 0.006%的铀 234 等组成的。

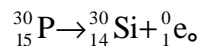
1934年，约里奥·居里和伊丽芙·居里夫妇用 α 粒子轰击铝箔时，除探测到中子外，还探测到正电子（正电子的符号是 ${}^0_1\text{e}$ ）。意外的是，把 α 粒子源移

开以后，铝箔虽不再发射中子，但仍继续发射正电子。经过研究才知道正电子是从新生成的磷核中放射出来的。铝核被 α 粒子击中后的核反应方程是：



新生成的 ${}_{15}^{30}\text{P}$ 是磷的一种同位素，它具有放射性，像天然放射性元素一样

会发生衰变，并且也有一定的半衰期。它衰变时放出正电子，核反应方程是：



像 ${}_{15}^{30}\text{P}$ 这种具有放射性的同位素叫做放射性同位素。用人工方法得到放射性同位素是一个重要的发现，后来人们用质子、氦核（ ${}^2_1\text{H}$ ）、中子等轰击原子

核，也得到了放射性同位素。目前已发现的人工制造的放射性同位素有1000多种；包括自然界存在的元素在内，每种元素都有放射性同位素。放射性同位素在工业、农业、医疗卫生和科学研究等方面得到了广泛的应用。

*放射性同位素的应用

根据放射性同位素的性质和特点，放射性同位素的应用，主要可分为射线的应用和示踪原子的应用。

利用放射性同位素放出的 γ 射线，检查金属内部的裂缝和砂眼，叫做 γ 射线探伤。例如放射性同位素钴 60，它放出的 γ 射线能够贯穿 30 厘米厚的钢板，而 X 射线只能贯穿 2 厘米 ~ 3 厘米厚的钢板。图 14-14 是利用 γ 射线探伤的示意图，让 γ 射线贯穿金属制品后，照相底片便感光，从而可检查出金属制品内部的缺陷。

导电性能不良的物体在快速运转的生产过程中，常因摩擦而带有很强的静电。带电物体的相互排斥或吸引，会使原料或半成品在自动化的机器中脱出导轨；带着静电的原料或成品能吸引灰尘或自相纠结，这在纺织厂生产化纤及整理产品的过程中都有明显的不良作用；在塑料、胶片、橡胶的生产中，静电所产生的火花有引起火灾的危险。利用放射性同位素放出的 γ 、 β 射线可使空气电离，产生离子而导电，消除静电的积累现象。

目前，被用作能源的放射性同位素已有多种。同位素电池是将放射性同位素衰变时产生的热转变为电能的一种装置。这种电池体积小，寿

命长，不受环境影响，主要用作卫星、飞船、行星星际站的能源，但成本较高。

近些年来，放射性同位素在农业上的应用发展很快。如辐射育种：用强度适当的放射性同位素照射种子，可以使作物早熟和增产，小麦和燕麦的种子经过中子射线照射后，可获得抗锈菌能力很强的优良品种。又如辐射灭虫：用适当强度的射线照射田间，可直接杀死害虫，或使成虫失去生殖能力，幼虫失去发育能力。还有辐射保藏食品：经放射性同位素照射的食品可长期保存，它不破坏外形，不影响品质，不带药物残余。课本彩图 9 就是辐射保鲜。

放射性同位素的射线在医疗方面可以用来抑制或治疗恶性肿瘤，目前用作治疗的同位素有钴 60、碘 131、磷 32 等，特别是钴 60 能作为很强的放射源，而价格又较低廉。放射性同位素还可用于临床诊断（图 14-15），它灵敏度高，方便安全，可对人体进行动态观察，并提供定量、准确的资料。

把放射性同位素的原子掺到其他物质中去，让它们一起运动、迁移，由于放射性原子的放射作用，可用放射性探测器进行跟踪，就可以通过放射性原子了解某些不容易观察到的过程或状态，这种用途的放射性同位素叫做示踪原子。

利用示踪原子可以了解农作物吸收肥料情况，如棉桃快要成熟时，若向根部施加带有放射性磷 32 的磷肥，通过探测器会发现根部已不大能吸收肥料，若这时把磷肥施在叶子上，证实棉花仍能吸收，所以要使棉花增产就要向叶子施肥。在炼钢时，为了不让磷的含量过高，并能及时作出鉴定，便在钢中掺入一定比例的放射性磷，取试样用探测器测出射线强度，再用化学分析方法就可知磷的含量。在医学上，利用示踪原子来作诊断和研究，如在皮下注入含有放射性钠的生理食盐水，就可研究人体血液循环情况。在生物科学研究上，利用示踪原子可以研究生物分子结构及其功能。我国在 1965 年 9 月首先用人工方法合成牛胰岛素，为了证明人工合成的牛胰岛素结晶跟天然牛胰岛素结晶是同一种物质，就在合成牛胰岛素中掺入碳 14，再把它与天然牛胰岛素混合，经过多次重新结晶，测得碳 14 在结晶内分布是均匀的，从而证明人工合成的牛胰岛素跟天然牛胰岛素没有区别。

因为过强的放射性射线对人体有害，所以在使用时应注意安全防护。也要注意防止放射性物质对水源、空气、工作场所的污染。

碳 14 鉴年法

碳 14 鉴年法是美国化学家利比在 1952 年提出的。大气中的 $^{14}_7\text{N}$ （氮核）不断地受到外层空间的射线的轰击，而变为放射性同位素 $^{14}_6\text{C}$ 。在光合作用过程中，活的植物在吸收无放射性的 $^{12}_6\text{C}$ 同时也吸收 $^{14}_6\text{C}$ 。植物枯死后，对 $^{14}_6\text{C}$ 的吸收也停止了。由于 $^{14}_6\text{C}$ 的半衰期是 5600 年，植物中的放射性总量便不断减少。实验证明，活的植物中，每克碳 1 分钟内有 16 个碳核发生衰变；在枯死的植物中，如果每克碳分钟内有 8 个碳核发生衰变，就可知这个植物已有 5600 年之久了；如果植物中每克碳 1 分钟内有 4 个碳核发生衰变，则

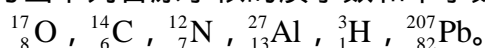
这个植物已有 11200 年之久了。利用碳 14 鉴年法可鉴定古代遗物的年代，如 1972 年，我国长沙发掘出的马王堆一号墓，通过测定陪葬果品中梅子的核，算出它的年代是公元前 165 年前后，这和利用其他旁证计算的年代是一致的。用类似的方法可测定地球和月球上岩石的年龄，用铷-锶鉴年法和铀-铅鉴年法已测出月球上岩石的年龄大于 45 亿年。

思考

一个原子序数是 Z 、质量数是 M 的原子核，分别由多少个质子、中子组成？是由多少个核子组成？

练习三十六

1. 写出下列各原子核的质子数和中子数：



2. ${}_{15}^{30}\text{P}$ (磷核) 发生正 β 衰变，生成的新原子核的质子数和中子数分别

是 []

A. 15, 15; B. 14, 15;

C. 14, 16; D. 16, 14。

3. 一个原子核经过 2 次 α 衰变，6 次 β 衰变，它的质子数和中子数的变化情况分别是 []

A. 减少 4, 减少 4; B. 增加 2, 减少 8;

C. 减少 10, 增加 2; D. 减少 4, 增加 2。

4. ${}_{27}^{59}\text{Co}$ (钴核) 俘获什么粒子后变成放射性同位素 ${}_{27}^{60}\text{Co}$ 粒子，而 ${}_{27}^{60}\text{Co}$

放出 β 粒子后又变成什么原子核？分别写出核反应方程。

*六、核能

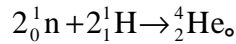
20 世纪中叶，核能作为一种新能源，已越来越引起人们的普遍重视，如核反应堆释放的核能作为核电站和大型舰船的动力，军事上主要用来制造核武器。

核能

原子核由质子和中子组成，原子序数越大的元素，核内的核子数越多。原子核的体积很小，直径一般在 10^{-15} 米 \sim 10^{-14} 米左右，核内质子相互排斥，由于核子间存在强大的核力，核子才能紧密结合成为稳定的原子核。正是由于核子间存在强大的核力，核子结合成原子核时要放出一定的能量。核子结合成原子核时放出的能量叫做原子核能，简称核能 (nuclear energy)。例如 2 个中子和 2 个质子结合成氦核时要放出 28.37 兆电子伏 (MeV) 的能量。

质量亏损

当 2 个中子和 2 个质子结合成氦核时，这一核反应方程可写成



从方程来看，反应前后核子的总质量是不变的。但实验研究和精确计算表明，生成的氦核的质量比 2 个中子、2 个质子的质量之和要小一些。

中子的质量为 $m_n=1.008665\text{u}$ ，质子的质量为 $m_H=1.007825\text{u}$ ，氦核的质量为 $m_{\text{He}}=4.00260\text{u}$ 。

$$2(m_n+m_H)=2 \times (1.008665+1.007825)\text{u}=4.032980\text{u}$$

质量差 $m=4.032980\text{u}-4.00260\text{u}=0.03038\text{u}$ 。

当核子组成原子核时，核子的质量跟原子核质量的差叫做核的质量亏损。

质能方程

核子结合成原子核时要放出能量，而又存在质量亏损。放出的能量跟质量亏损有没有关系呢？爱因斯坦在相对论中得出了物体的质量 m 跟能量 E 之间的关系

$$E=mc^2$$

式中 c 是光速，这个关系式叫做爱因斯坦质能方程。这个方程告诉我们，物体的能量跟它的质量成正比。核子在结合成原子核时出现的质量亏损 m ，表明核子在互相结合过程中放出了能量

$$E= m \cdot c^2$$

2 个中子、2 个质子结合成氦核时，质量亏损 $m=0.03038\text{u}$ ，根据质能方程，应放出能量

$$\begin{aligned} E &= m \cdot c^2 = 0.03038 \times 1.66 \times 10^{-27} \times (3.00 \times 10^8)^2 \text{焦} \\ &= 4.538 \times 10^{-12} \text{焦} = 28.37 \text{兆电子伏。} \end{aligned}$$

从上述计算可推出，当核子结合成 1 摩尔氦核（即 4 克）时，大约要放出 2.73×10^{12} 焦的能量，相当于燃烧 100 吨煤所释放的能量。由此可知，核反应能释放出巨大的能量。

[例题] 根据 $E= m \cdot c^2$ ，证明 1 原子质量单位 u 相当于 931 兆电子伏。

证明：已知 $1u=1.66 \times 10^{-27}$ 千克， $c=2.997 \times 10^8$ 米/秒， $e=1.60 \times 10^{-19}$ 库，

$$\begin{aligned} \Delta E &= \Delta m \cdot c^2 = \frac{1.66 \times 10^{-27} \times (2.997 \times 10^8)^2}{1.60 \times 10^{-19}} \text{电子伏} \\ &= 9.31 \times 10^8 \text{eV} \\ &= 931 \text{兆电子伏。} \end{aligned}$$

练习三十七

1. 通常我们看到物体的能量发生变化时，为什么觉察不到物体的质量发生变化？

2. ${}_4^9\text{Be}$ （铍核）的质量为 9.012182u ，它是由多少个中子和质子组成？并

计算这些核子结合成铍核时的质量亏损。

*七、重核裂变

天然放射现象发现以后，人们就已知道衰变过程中有大量的能量伴随释放，如 1 克镭完全衰变成为铅可放出 8.16×10^8 焦的能量，但因为半衰期太长，所以释放出的能量不能集中起来加以利用。用人工加速的带电微粒所引起的核反应也能释放核能，如 1 克质子完全打中锂核，理论计算可产生 9.36×10^{12} 焦的能量，但要使 1 克质子全部打中锂核是太困难了， 10^6 个质子中可能只有 1 个质子能打中锂核，为了使 1 克质子能打中锂核就需要加速 10^6 克的质子，消耗的能量比获得的能量要大几千倍，所以无实用意义。在相当长时间里，科学家们找不到释放大量核能的实际有效方法，直到 1938 年发现了重核的裂变现象，才找到了利用核能的途径。

铀核的裂变

1938 年，德国化学家哈恩和斯特拉曼在用中子轰击铀核时，期望获得新元素，但经化学分析，发现产物中有钡的放射性同位素。以后证实这是铀核俘获了一个中子后，裂变成为两个中等质量的核形成的，并释放出核能。

铀核裂变后的产物，可能是钡(Ba)和氪(Kr)，可能是锑(Sb)和铈(Nb)，也可能是氙(Xe)和锶(Sr)，同时还放出 2 个~3 个中子。1946 年我国物理学家钱三强、何泽慧夫妇发现，铀核还可能分裂成 3 块或 4 块，不过这种情况比较少见。

实验发现铀 235 和铀 238 的裂变情况不同：能量较小（约为 $\frac{1}{40}$ 电子伏）的

慢中子被铀 235 俘获产生裂变的可能性特别大；如果被铀 238 俘获却不能产生裂变，即使能量大于 1.1 兆电子伏的中子被铀 238 俘获，也只有极小可能产生裂变。

重核裂变的最大特点是能释放巨大的能量。下面的核反应（图 14-16）是铀

核裂变的可能情况之一，即 ${}_{92}^{235}\text{U} + {}_0^1\text{n} \rightarrow {}_{56}^{138}\text{Ba} + {}_{36}^{95}\text{Kr} + 3{}_0^1\text{n}$ 。

在这个核反应中释放的能量，可根据质量亏损来计算。

铀 235 的质量为 235.0439u，中子的质量为 1.008665u，裂变前质量之和为 236.05254u。

钡的质量为 137.9050u，氪的质量为 94.90u，3 个中子的质量为 3.025995u，裂变后质量之和为 235.83099u。

核反应过程中质量亏损 $m=0.2216\text{u}$ ，反应中释放的能量 $E=206.28$ 兆电子伏。

不同的核反应释放的能量是不相等的。铀核裂变时，平均每个核子释放的能量约为 1 兆电子伏。如果 1 千克铀 235 全部裂变，它放出的能量相当于 2500 吨优质煤完全燃烧时放出的能量。

链式反应

用中子轰击铀核产生裂变时，一个重要特点是每次裂变都放出 2 个~3 个中子，如果这些中子又跟其他铀核作用，引起新的裂变并产生第二代中子，这样裂变反应就像链条一样，一环扣一环地持续不断地进行下去，这种反应叫做链式反应（图 14-17）。

要产生链式反应，还有一些问题需要解决。首先是天然铀是由 99% 以上的铀 238、0.71% 的铀 235 和极微量的铀 234 组成，其中铀 238 会吸收大部分能量较大的快中子而不发生裂变，所以要产生链式反应，必须对天然铀进行提炼，以提高铀 235 的相对浓度，即制取浓缩铀。其次，容易被铀 235 俘获的是慢中子，而铀 235 裂变中放出的是快中子，所以要使链式反应持续下去，必须使快中子迅速减速变为慢中子。第三是铀块的体积必须足够大，只有铀块的体积足够大，其中所包含的铀核多到使新生的中子数大于被铀核吸收和从铀块表面逸出的中子数，才能使链式反应持续下去。能够发生链式反应的铀块的最小体积叫做它的临界体积。

如果铀 235 的体积超过它的临界体积，只要有中子进入铀块，就立即引起链式反应，在极短时间内会释放大量的核能，发生猛烈爆炸，这就是原子弹的原理。图 14-18 是原子弹的结构示意图，把浓缩铀分成两块，并互相分隔开，每块体积都小于它的临界体积。当需要爆炸时，利用引爆装置使两块铀合并，总体积就超过临界体积，在极短时间内引起强烈爆炸。本章导图 3 就是一幅原子弹爆炸时所升起的蘑菇云的照片。

核反应堆 核电站

核反应堆是可控的链式反应装置，它能使核能平稳释放。核反应堆主要由核燃料、减速剂、控制调节系统、冷却系统和防护层组成，图 14-19 是核反应堆的结构示意图。核燃料是由天然铀或浓缩铀制成的铀棒。铀核裂变产生的是速度很大的快中子，为了使链式反应持续下去，要设法使快中子变成慢中子，为此，必须在铀棒周围放上使中子减速的减速剂。减速剂通常用石墨、重水或普通水。快中子跟这些减速剂物质的原子核碰撞后能量减小，变为慢中子。为了控制反应速度，要在铀棒之间插进一些镉棒，镉棒吸收中子的能力很强，通过电子仪器自动调节镉棒，使镉棒插入或抽出一些以调节中子的数量，从而控制反应速度，使反应堆保持一定功率安全地运行。这种镉棒叫做控制棒。由于裂变反应所释放的巨大能量，最终大部分都转变为热，反应区温度便升高。为了保证反应堆在一定温度下运行，通常用水、液态金属钠、空气等流体做冷却剂，在反应堆内外流动，通过热交换器把产生的热能传输出去并加以利用。为了防止裂变时和裂变产物放出的射线对人体的危害，在反应堆外要修建很厚的水泥防护层，用来屏蔽射线。

核反应堆的用途非常广泛，可以作为核动力，例如核电站、核舰艇、核潜艇的动力源。核反应堆还可以用来生产各种放射性同位素，提供中子源和生产裂变材料等。课本彩图 16 就是一座研究性重水核反应堆。

核反应堆里所产生的大量的热量能将水变成蒸汽，推动汽轮机发电，这就是核电站。图 14-20 是火力发电站和核电站的示意图，由图可见，核电站与其他动力工厂的不同点仅在于汽轮机所用的蒸汽产生的方法。核电站消耗燃料少，放出能量大。图 14-21 所示的核燃料为二氧化铀，图中每根小棒所释放的核能相当于 10 吨煤完全燃烧所放出的能量。一个功率为 10^5 千瓦的核电站，每天只要消耗几百克铀，而产生同样功率的火力发电站，每天就要消耗几百吨煤。核电站的投资虽比火力发电站略高，但使用燃料比较经济，生产出来的每千瓦时电能的价格比火力发电站的低，且对环境的污染比火力发电站要小。目前查明，我国拥有相

当丰富的核资源，在我国广东、浙江、江苏、辽宁和台湾等地都在建造和即将建造核电站，我国自行设计的核电站——浙江秦山核电站（见本章导图 2）和广东大亚湾核电站都已投入使用并网发电，1996 年，我国电力结构中核电已占 1%。

*八、轻核聚变

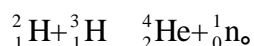
我们知道太阳不断地发出巨大的能量，平均每秒达 4×10^{26} 焦。地球接受其中的二十亿分之一，已足使地面温暖，产生风云雨露，促使河川流动，万物生长。太阳的巨大能量是怎样产生的呢？这是太阳内部不断地在进行热核反应的缘故。

聚变

重核裂变时可放出巨大的能量，而某些轻核结合成质量较大的核时，也能释放出巨大的能量。例如 2 个氘核结合成 1 个氦核时，释放出 4 兆电子伏的能量，核反应方程是：



又如 1 个氘核和 1 个氚核结合成 1 个氦核时，释放出 17.6 兆电子伏的能量，核反应方程是：



轻核结合成质量较大的核叫做聚变。按平均每个核子放出能量多少来比较，聚变时比裂变时要大好几倍，如氘核、氚核结合成氦核时，平均每个核子放出 3 兆电子伏的能量，而铀核裂变时，平均每个核子放出能量是 1 兆电子伏。

热核反应

轻核要接近到核力能够发生作用的范围（在 10^{-15} 米之内）才能发生聚变，而要彼此接近到这种程度，轻核必须具有足够大的动能。理论研究指出，只有在几百万度高温情况下，原子将完全离子化，也就是原子的核外电子已全部和原子脱离，成为等离子体，这时部分原子核就具有足够大的动能，能够克服相互间的库仑斥力，在相互碰撞中接近到能发生聚变，所以这种反应叫做热核反应。目前热核反应主要用在核武器氢弹上，氢弹是由原子弹和热核燃料组成的，原子弹爆炸可以产生足够的高温而引起热核反应。热核反应在宇宙中很普遍，太阳内部和许多恒星内部，温度高达 10^8 以上。就能发生热核反应。

人们要想利用热核反应所释放的能量作为动力，那就必须实现可控的热核反应。热核反应如能控制，它就是一种理想的能源。它释放的能量，就每个核子平均来说比裂变大好几倍；它对环境造成的污染比裂变小；而且聚变的原料氘，在世界上储藏量很丰富。1 升海水中约有 0.03 克的氘，它发生热核反应产生的能量相当于 300 升汽油燃烧时放出的能量。目前世界上许多国家都在研究可控热核反应，我国在四川省乐山地区建成了自行设计的可控核聚变实验装置。1991 年 11 月，设在英国的欧洲联合环形聚变反应堆进行受控聚变实验，第一次产生大约 1.7×10^6 瓦的电力，持续时间为 2 秒，反应是在比太阳中心温度高 20 倍的环形反应堆中进行的。

核武器的防御

原子弹、氢弹等核武器具有很强的杀伤作用，一般形成杀伤作用的有：冲击波、光热辐射、贯穿辐射和放射性污染等，我们只要了解这些杀伤作用产生的原理，核武器所造成的危害就可以防御。

核武器爆炸时，由于爆炸时间短，释放的能量巨大，爆炸中心的温度就升高到几百万度，压强高达几万亿千帕，强烈压缩周围空气层，形成了冲击波。冲击波不仅能摧毁建筑物，还能杀伤暴露着的人员。各种坚固的物体、建筑物都能减弱冲击波，因此，战壕、山洞、坚固的地下室、隐蔽所都能防御冲击波。

核武器爆炸后，周围空气受热，能达到几十万度的高温，形成一个表面比太阳表面温度还要高的大火球，这个大火球能发出强烈的光和热，向四周辐射，在一定距离内使易燃物体起火，直接伤害人，对眼睛的伤害尤其严重。防止光、热辐射的办法是把易燃物体和人隐蔽起来。

核武器爆炸后，放射出大量中子和射线，中子和射线的贯穿本领很强，叫做贯穿辐射。这些射线对人体危害很大。防御贯穿辐射，只要在人和爆炸中心之间隔上一层很厚的障碍物就可以了。以上三种破坏和杀伤作用，强度随着距离的增加而迅速减弱，只要及时采取防护措施，就可以减轻甚至避免对人体的伤害。

核武器爆炸时，产生的高温高压蒸汽，具有极强烈的放射性，这种蒸汽冷却凝结后就成为放射性尘埃，尘埃在风吹动下会散布在相当广阔的地区。另外，爆炸时射出的中子打击到物质上，会使物质也具有放射性。放射性污染时间较长，范围较广。对放射污染区，要迅速撤离人员，冲洗或掩埋受污染的物体，就可以减轻甚至避免放射性污染的危害。

对于核武器，我国一贯的立场是禁止使用核武器，不首先使用核武器。

*九、我国核工业的发展

早在 1955 年，我国就确定要发展核能事业。经过 8 年的努力，在自力更生的情况下，终于在 1964 年 10 月首次原子弹爆炸成功，1967 年 6 月首次氢弹爆炸成功。从第一颗原子弹爆炸到第一颗氢弹爆炸成功经历的时间，美国是 7 年 4 个月，苏联是 4 年，英国是 4 年 7 个月，法国是 8 年 6 个月，而我国仅用了 2 年 8 个月，充分表明了我国国防核工业的先进水平。

目前世界上用于发电的核反应堆有轻水堆、重水堆、高温气冷堆和快中子堆等多种型式，轻水堆用得最多。轻水堆就是用高度纯化的水做冷却剂，轻水堆又分压水堆和沸水堆两类。我国秦山核电站（功率为 3×10^5 千瓦）采用压水堆作动力，所用的核燃料为高 10 毫米、直径 8 毫米的小圆柱体的二氧化铀，把 200 多个小圆柱体放在锆合金管内。核燃料裂变时产生的大量的热，被冷却剂不断带走。冷却剂密闭在 1.5×10^7 帕的高压系统内，即使加热到 300℃，冷却剂也不会沸腾，所以叫压水堆。反应堆一次装核燃料几十吨，以后就自动更换

其中的

$\frac{1}{3}$ 。如果烧煤，一年要烧 7×10^6 吨。因此，对缺煤、人口众多的我国东南各

省，核电站是最合适的发电站。秦山核电站的设计是极其周密、审慎的。根据“不污染国土，不危害人民”的原则，在设计中留有较大的安全系数，把发生事故的可能性减到最低限度，还设置了多重独立的安全保护及控制系统，在运行出现异常时，能及时迅速降低功率甚至紧急停止工作。

阅读材料 宇宙射线和基本粒子

本世纪初，人们发现不管怎样注意绝缘问题，验电器总有漏电现象发生。当时以为这是地壳中的放射性射线电离空气引起的。为了证明这种假设，在 1909 年~1919 年间，科学家们把装有探测仪器的气球升到高空，测定空气电离情况。测定结果表明 1000 米以上空气电离程度越来越强，5000 米高空几乎比地面增加了 10 倍，这说明使大气微弱电离不是地壳内存在的放射性元素所引起，而是来自地球以外的某些射线引起的。人们又往水下和地下深井测量，发现随深度增加电离程度逐渐减弱，这就进一步肯定了这种射线来自地球以外的宇宙空间。人们把这种射线叫做宇宙射线(cosmicrays)。

研究表明，宇宙射线主要是由带正电的高能量的粒子组成，其中约有 83%~89%是质子，10%~15%是 α 粒子，还有 1%~2%是电子以及极少量的多电荷粒子，包括从锂到铁的各种原子核。这些粒子的能量很高，通常是在 10^3 兆电子伏~ 10^5 兆电子伏范围，最高的达到 10^{15} 兆电子伏。1972 年，我国科学家在云南乌蒙山上的宇宙线实验站发现了一个质量比质子大 10 多倍的新粒子，1977 年，在西藏拉萨附近海拔 5500 米的甘巴拉山上的实验站(课本彩图 18)中，又发现了能量超过 4×10^8 兆电子伏的一些高能粒子。

宇宙射线的起源问题，至今还是一个有待进一步研究的课题。过去科学家们曾认为宇宙射线来源于太阳，可是实际上宇宙射线的强度昼夜变化不大，这说明宇宙射线主要不是从太阳中射来的。目前有两种观点：一是认为宇宙射线来自超新星的爆炸；二是认为由星际空间某种高速运动着的稀薄电离物质发射出的。对这两种观点，目前还没有定论。

随着科学技术的发展，自 20 世纪 30 年代以来，人们不断从宇宙射线中发现了大量的新粒子，这对人们研究基本粒子起了很大的作用。

电子、质子和中子是组成物质的最基本的粒子，人们把它们叫做基本粒子。随着科学发展，不断从宇宙射线中和其他实验中发现不少新粒子，它们也都是基本粒子。例如 1932 年发现的正电子，1937 年发现的 μ 介子，1947 年发现的 K 介子和 π 介子，这些粒子的质量介于质子和电子之间，因此叫做介子。后来又发现质量比质子大的粒子，叫做超子。

自从加速器发明以后，在利用加速器对粒子加速的各类实验中，又发现了许多新的基本粒子，还发现其中许多粒子都有跟它的质量相同而电荷相反的粒子，叫做反粒子。例如电子的反粒子就是正电子，质子的反粒子就是反质子，正 π 介子的反粒子就是负 π 介子。

现在已发现的基本粒子有 300 多种。绝大多数基本粒子都是不稳定

的，寿命都很短，在不到 1 微秒甚至更短时间内，就会衰变为其他粒子。例如正、负 π 介子的平均寿命约为 2×10^{-8} 秒，它衰变为 μ 介子，同时产生一个中微子（符号为 $\bar{\nu}_\mu$ ）。 μ 介子也不稳定，平均寿命约为 2.2×10^{-6} 秒，衰变后成为电子和正反两个中微子。

根据基本粒子之间的相互作用，可以把它们分为强子、轻子和媒介子三大类。强子类包含的粒子最多，它们的主要特征是参与强相互作用。核子间的核力，是一种比电磁作用大得多的相互作用，叫做强相互作用。质子是最早发现的强子。强子又分重子（中子、质子、超子）和介子两类。轻子类粒子都不参与强相互作用，一般来说它们的质量都比较轻，所以统称为轻子。电子是最早发现的轻子。 μ 介子从它的许多性质来看也属于轻子。1975 年，又发现一种质量很大的轻子，叫做 τ 子。由于它不参与强相互作用，所以归到轻子类，也把它叫做重轻子。还有三种中微子也属于轻子。媒介子是传递粒子间电磁相互作用的粒子，例如光子。

目前发现的基本粒子是不是都是基本的呢？它们有没有内部结构？近 20 年来大量实验结果和理论研究，都认为基本粒子并不基本，是有内部结构的。为了探索强子的内部结构，科学家提出了许多模型。这些模型中比较成功的、能与大量实验事实相符合的是 1963 年美国物理学家盖尔曼等人提出的夸克模型。这个模型共有 6 类 18 种夸克（我国称层子），还有同样数目的反夸克，它们所带电

荷是基本电荷的 $\pm \frac{1}{3}$ 或 $\pm \frac{2}{3}$ 。一切强子都是由夸克组成的，重子是由 3 个夸克

组成，介子是由 1 个夸克和 1 个反夸克组成。到目前为止，在实验中还没有发现自由夸克，因此，夸克模型的理论还需进一步发展和完善。

本章学习要求

1. 知道 α 粒子散射实验和原子的核式结构模型。
2. 知道玻尔模型及其局限性。
3. 知道氢原子光谱及玻尔理论对氢光谱的解释。
4. 知道光子的发射和吸收。
5. 知道天然放射现象，知道 α 、 β 、 γ 射线的本质和性质。
6. 知道放射性元素的 α 衰变和 β 衰变及其衰变方程。
7. 知道放射性元素的半衰期。
8. 知道原子核的人工转变及核反应方程。
9. 知道质子、中子的发现。
10. 知道原子核的组成。
11. 知道同位素。

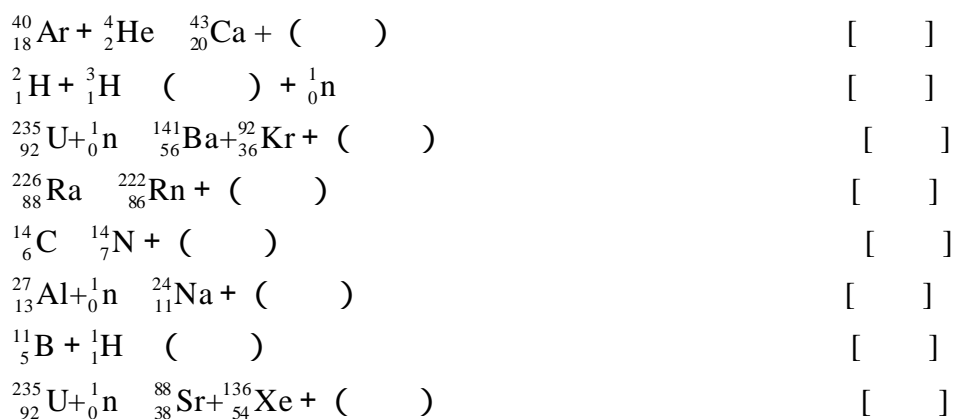
复习题

1. 单选题

1. 关于卢瑟福的 α 粒子散射实验，以下说法中不符合事实的是

[]

- A. 是提出原子核式结构模型的实验基础；
 B. 观察到绝大多数的 α 粒子穿过金箔后仍沿原来方向前进；
 C. 大多数 α 粒子穿过金箔后，发生了超过 90° 的大角度偏转；
 D. 极少数 α 粒子被金箔反弹回来，偏转角度几乎达到 180° 。
2. 氢原子从 $n=3$ 的能级跃迁到基态时，辐射的光子能量可能为 []
 A. 13.6eV ； B. 1.89eV ；
 C. 12.09eV ； D. 10.2eV 。
3. 在 α 、 β 、 γ 射线中，贯穿本领最强的一种，电离本领最大的一种，依次是 []
 A. α 射线， β 射线； B. β 射线， α 射线；
 C. β 射线， α 射线； D. α 射线， β 射线。
4. ${}_{92}^{238}\text{U}$ 铀核衰变为 ${}_{86}^{222}\text{Rn}$ 氡核，经过 α 衰变和 β 衰变的次数分别为 []
 A. 3 次，4 次； B. 4 次，2 次；
 C. 2 次，2 次； D. 4 次，4 次。
5. 某放射性元素在 9 天内衰变了 $\frac{3}{4}$ ，其半衰期为 []
 A. 6 天； B. 3 天； C. 4.5 天； D. 1.5 天。
6. 同一元素的同位素的原子核里有 []
 A. 不同的质子数、相同的中子数；
 B. 相同的质子数、相同的中子数；
 C. 相同的电子数、不同的质子数；
 D. 相同的质子数、不同的中子数。
- *7. 在核子结合成原子核的过程中，会释放出核能，这是由于 []
 A. 原子核的质量大于核子的总质量；
 B. 原子核的质量小于核子的总质量；
 C. 原子核的质量等于核子的总质量；
 D. 原子核的质量大于每个核子的质量。
2. 光子能量为 E 的一束单色光，照射容器中的氢气，氢原子吸收光子后，能发出频率分别为 ν_1 、 ν_2 、 ν_3 的三种光，且 $\nu_1 < \nu_2 < \nu_3$ ，则入射光束的光子能量为多大？
3. 氢原子基态能量 $E_1 = -13.6\text{eV}$ ，相应电子轨道半径 $r_1 = 0.53 \times 10^{-10}$ 米，则氢原子处于量子数 $n=3$ 的能级时，能量和电子运动轨道半径分别为多大？
4. 有一群处在量子数 $n=4$ 的激发态中的氢原子，在它们跃迁到低能态的过程中发出的光谱线可能有几条？
5. 完成下列核反应方程，并在方程的后边括号内，注明这一核反应是属于 α 衰变、 β 衰变、人工转变、裂变、聚变哪一种变化：



6. 用 α 粒子轰击硼 10, 产生 1 个中子和 1 个具有放射性的核, 这个新的核能放出正电子, 衰变成另一新核, 写出这两个核反应方程。

7. 下列各原子核: ${}_{6}^{12}\text{C}$, ${}_{6}^{13}\text{C}$, ${}_{6}^{14}\text{C}$, ${}_{7}^{12}\text{N}$, ${}_{7}^{13}\text{N}$, ${}_{7}^{14}\text{N}$, ${}_{7}^{15}\text{N}$, ${}_{8}^{16}\text{N}$, ${}_{8}^{17}\text{O}$ 中有

相同质子数的核是哪些? 有相同中子数的核是哪些? 有相同核子数的核是哪些?

8. 镭 ${}_{88}^{223}\text{Ra}$ 的半衰期是 11.2 天, 原有镭 100 克, 经过多少天, 剩下的镭为

3.125 克?

中学物理基本常数

物理量	符号	数值及其单位
重力加速度	g	9.80665 米/秒 ²
万有引力恒量	G	6.6720×10^{-11} 米 ² /千克 ²
阿伏伽德罗常数	N_A	6.022045×10^{23} /摩
摩尔气体常数	R	8.31441 焦/(摩·开)
理想气体摩尔体积 (标准状态下)	V_m	22.41383×10^{-3} 米 ³ /摩
静电力恒量	k_e	8.9880×10^9 米 ² /库 ²
真空中的光速	c	2.99792458×10^8 米/秒
基本电荷	e	$1.6021892 \times 10^{-19}$ 库
电子伏特	eV	1eV= $1.6021892 \times 10^{-19}$ 焦
电子的静止质量	m_e	9.109534×10^{-31} 千克= 5.4858026×10^{-4} u
质子的静止质量	m_p	$1.6726485 \times 10^{-27}$ 千克= 1.007276470 u
中子的静止质量	m_n	$1.6749543 \times 10^{-27}$ 千克= 1.008665012 u
普朗克常数	h	6.626176×10^{-34} 焦·秒
电子的比荷 (荷质比)	e/m_e	1.7588047×10^{11} 库/千克
质能关系	$E=mc^2$	8.98755×10^{16} 焦/千克 931Mev/u

