

学校的理想装备

电子图书·学校专集

校园网上的最佳资源

高级中学试验课本 物理 第二册



电磁学

人类很早就认识了磁现象和电现象。我国在战国末期就发现了磁铁矿吸引铁的现象，在东汉初年就有带电的琥珀吸引轻小物体的文字记载。但是，人类对电磁现象的系统研究却是在欧洲文艺复兴之后逐渐开展起来的，到 19 世纪才建立了完整的电磁学理论。

电磁学及其应用对人类的影响十分巨大。在电磁学研究的基础上发展起来的电能的生产 and 利用，开辟了电气化的时代，是历史上的一次技术革命。在当前出现的新技术中，起带头作用的是在电磁学研究的基础上发展起来的微电子技术和电子计算机。它们被广泛应用于各种新技术领域，给人类的生产和生活带来了深刻的变化。

从这一章开始，我们学习电磁学知识。

第一章 电场

一、两种电荷 电荷守恒定律

两种电荷 在初中已经学过，用毛皮摩擦过的硬橡胶棒，用丝绸摩擦过的玻璃棒，能吸引轻小物体，它们都带上了电荷。玻璃棒上带的电荷叫正电荷，硬橡胶棒上带的电荷叫负电荷。自然界只存在两种电荷，而且同种电荷互相排斥，异种电荷互相吸引。

如图 1-1 甲所示，让验电器带上适量正电荷，这时验电器的金属箔张开。如果用带正电的玻璃棒接触验电器的金属球，把正电荷传给验电器，金属箔张开的角度就变大(图 1-1 乙)；如果用带负电的硬橡胶棒接触验电器的金属球，把负电荷传给验电器，金属箔张开的角度就变小(图 1-1 丙)。可见，同种电荷放在一起互相增强，异种电荷放在一起互相减弱或抵消。等量的异种电荷完全互相抵消的现象叫做中和。通常，正电荷的电量用正数来表示，负电荷的电量用负数来表示。

静电感应 电荷守恒 在摩擦起电中，一个物体失去一些电子而带正电，同时另一个物体得到这些电子而带等

量的负电。摩擦起电并不是创造了电荷，只是电荷从一个物体转移到另一个物体。摩擦可以使物体带电，感应也可以使物体带电。

取一对用绝缘柱支持的金属导体 A 和 B，A 和 B 彼此接触。起初 A 和 B 上贴的金属箔是闭合的，表示它们没有带电。把另一个带正电的金属球 C 移近导体 A，这时 A、B 上的金属箔都张开了，表示它们都带了电(图 1-2 甲)。实验表明，靠近 C 的导体 A 带的电荷与 C 异号，远离 C 的导体 B 带的电荷与 C 同号。这种现象叫做静电感应。

静电感应也是使物体中的电荷分开。当我们把带正电的导体 C 移近导体时，导体里的自由电子被吸引过来，因此导体 A 和 B 分别带上异种电荷。如果先把 A 和 B 分开，然后移去 C，则发现 A 和 B 仍带有电荷(图 1-2 乙)。如果让 A 和 B 重新接触，则发生中和，A 和 B 呈现不带电的状态，说明 A 和 B 所带的异种电荷是等量的。静电感应也不是创造了电荷，只是电荷从物体的一部分转移到另一部分。

大量事实说明：电荷既不能创造，也不能被消灭，它们只能从一个物体转移到另一个物体，或者从物体的一部分转移到另一部分。这个结论叫做电荷守恒定律。它是物理学中重要的基本定律之一。

二、库仑定律

电荷之间有相互作用，同种电荷互相排斥，异种电荷互相吸引。电荷间作用力的大小跟什么有关系呢？

把一个带正电的物体放在 A 处，然后把一个挂在丝线下端的带正电的小球先后挂在 P₁、P₂、P₃ 等位置(图 1-3)。带电小球受到电力的大小，可以通过丝线对竖直方向的偏角大小显示出来。偏角越大，表示小球受的电力越大。实验表明，带电小球在 P₁、P₂、P₃ 各点受到的电力依次减小。可见电荷之间的作用力随着距离的增大而减小。

增大丝线下端带电小球的电量，在同一个位置，小球受到的电力也增大。可见电荷之间的作用力随着电量的增大而增大。

法国物理学家库仑(1736 ~ 1806)用实验研究了电荷间相互作用的电力，于 1785 年发现了后来用他的名字命名的定律。这个定律表述如下：

在真空中两个点电荷间相互作用的电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。电荷间这种相互作用的电力叫做静电力或库仑力。

点电荷是指这样一些电荷，其带电体间的距离比它们的大小大得多，以致带电体的形状和大小对相互作用力的影响可忽略不计，这样的带电体就可以看成点电荷。

如果用 Q₁、Q₂ 表示两个点电荷的电量，用 r 表示它们间的距离，用 F 表示它们间的静电力，库仑定律就可以写成下面的公式：

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

式中 k 是比例恒量，叫做静电力常量。

在国际单位制中，电量的单位是我们在初中学过的库仑，简称库，国际符号是 C。如果上面公式中的物理量都用国际单位制的单位，即力的单位用牛，距离的单位用米，电量的单位用库，由实验得出 $k = 9.0 \times 10^9$ 牛·米²/库²。

库仑定律不仅在真空中适用，在其他介质(如空气、油、玻璃等)中也同样适用，只是在不同的介质中 k 值不同。空气中的 k 值与真空中的 k 值相差不多，因此计算空气中的点电荷间的静电力时，一般可按在真空中处理。

库仑定律是电磁学的基本定律之一。库仑定律给出的虽然只是两个点电荷间的静电力，但是任意一个带电体都可以看成是由许多点电荷组成的，所以，如果知道电荷在带电体上的分布，就可以求出带电体间的静电力的大小和方向。

· 小实验 ·

自制验电器

如图 1-4 所示。将曲别针弯成图甲的形状。将锡箔(可用包香烟、糖果的锡纸)剪成图乙所示的两片，每片上端穿一小孔，准备一个玻璃瓶，用泡

沫塑料按瓶口的大小做一合适的瓶塞，将弯好的曲别针穿过瓶塞并把锡箔片挂在上边，如图丙所示。然后将瓶塞塞在瓶口上，如图丁所示。这样就做成一个简易的验电器。

你可以用这一验电器检验一下相互摩擦的物体是否带电，它们所带的电是同种的还是异种的。

做好的验电器要妥善保存，后面的小实验还要用到。

· 阅读 · 库仑扭秤实验

库仑是用图 1-5 所示的扭秤来做实验的。在细金属丝下面悬挂一根玻璃棒，棒的一端有一个金属小球 A，另一端有一个平衡小球 B。在离 A 球某一距离的地方放一个同样的金属小球 C。如果 A 球和 C 球带同种电荷，它们间的斥力将使玻璃棒转过一个角度。然后向相反方向扭转旋钮 M，使玻璃棒回到原来的位置并保持静止，这时金属丝的弹力产生的转动效果跟电荷间斥力产生的转动效果相抵消，从旋钮 M 转过的角度可以计算出电荷间作用力的大小。

库仑早就猜测电荷之间的作用力跟它们之间的距离的平方成反比。保持 A、C 两球电量不变，库仑利用扭秤测量了两个小球在不同距离下的静电力，发现这个力确实跟距离的平方成反比，从而证实了自己的猜测。

在库仑做扭秤实验的时候，还不知道怎么来测量电量，电量的单位也还没有确定。库仑用一个简单的办法巧妙地解决了这个困难。他为了改变带电小球的电量，将一个带电小球跟另一个同样的但不带电的金属小球相接触，由于两个小球完全相同，接触后它们带的电量一定相等，从而使带电小球的电量减小到原来的 $\frac{1}{2}$ （图 1-6）。再用同样的方法可以使带电小球的电量减小到原来的 $\frac{1}{4}$ 、 $\frac{1}{8}$ 等等。库仑用这种方法来改变带电小球的电量，但保持两球之间的距离不变，利用扭秤测量了带电小球之间的作用力，发现作用力跟它们所带电量的乘积成正比。

练习一

(1)真空中有两个点电荷，它们间的静电力为 F。保持它们间的距离不变，把其中一个的电量增大为原来的 2 倍，它们间的静电力将等于

A. F B. 2F

C. $\frac{F}{2}$ D. $\frac{F}{4}$

(2)真空中有两个点电荷，电量分别是 $+4.0 \times 10^{-9}$ 库和 -2.0×10^{-9} 库，相距 10 厘米。每个电荷受到的静电力有多大，是引力还是斥力？

(3)原子核的半径大约为 10^{-15} 米，假定核中两个质子相距这么远，其间的静电力大约有多大？质子所带的电量为 1.6×10^{-19} 库。

(4)真空中三个同种点电荷固定在同一条直线上(图 1-7)，三个点电荷的电量均为 4.0×10^{-12} 库。求 Q_1 所受的静电力的大小和方向。

(5)两个相同的金属小球，一个带的电量为 $+4.0 \times 10^{-11}$ 库，另一个带

的电量为 -6.0×10^{-11} 库，求

a . 两球相距 50 厘米时静电力的大小。

b . 把两球接触后，再使它们相距 50 厘米时的静电力的大小(图 1-8)。

三、电场 电场强度

电场 电荷间的相互作用是怎样发生的呢？

经过长期的研究，人们认识到：电荷之间的相互作用是通过电场发生的。只要有电荷存在，电荷周围就存在着电场。电场的基本性质是它对放入其中的电荷有力的作用，这种力叫做电场力。两个电荷 A 和 B，电荷 B 对电荷 A 的作用，实际上是电荷 B 的电场对电荷 A 的作用；电荷 A 对电荷 B 的作用，实际上是电荷 A 的电场对电荷 B 的作用。

电场强度 把一电量为 q 的正电荷放在电量为 Q 的正电荷产生的电场中(图 1-9)，电荷 q 在电场中的不同点受到的电场力一般并不相同。电荷 q 在距 Q 近的 A 点受到的电场力大，表示这点的电场强；在距 Q 远的 B 点受到的电场力小，表示这点的电场弱。但是，我们不能直接用电场力的大小表示电场的强弱，因为不同的电荷 q 在电场的同一点受到的电场力 F 是不同的。不过，不同的电荷在电场中的同一点所受的电场力 F 却与电荷的电量 q 成正比，这样二者的比值就可以用来反映该点电场的强弱。比值大的点电场强，比值小的点电场弱。在物理学中，用比值 F/q ，也就是单位电荷受到的电场力的大小，来表示电场的强弱。

放入电场中某一点的电荷受到的电场力 F 跟它的电量 q 的比值叫做该点的电场强度，简称场强。用符号 E 表示电场强度，则有

$$E = \frac{F}{q}. \quad (1)$$

由场强的定义可知，电场中某一点的电场强度在数值上等于单位电荷在那一点所受的电场力。如果事先知道电场中某一点的场强 E ，就可以求出任意电量 q 的电荷在该点所受的电场力 $F = qE$ 。

电场强度的单位是牛/库。如果 1 库的电荷在电场中的某一点受到的电场力是 1 牛，这一点的电场强度就是 1 牛/库。

电场强度跟力一样，也是矢量。正负电荷在电场中某点所受电场力的方向相反，我们规定电场中某点的场强方向跟正电荷在该点所受电场力的方向相同。

由电场强度的定义和库仑定律可以得出，在点电荷 Q 形成的电场中，距 Q 为 r 的 P 点场强 E 的大小为

$$E = \frac{kQ}{r^2} \quad (2)$$

如果 Q 是正电荷， E 的方向就是沿着 QP 连线并背离 Q ；如果 Q 是负电荷， E 的方向就是沿着 QP 连线并指向 Q (图 1-10)。

对于概念和规律的公式表达，应该注意公式的含义。

(1)式是电场强度的定义式，式中的 E 是某一电荷的分布在电场某点产生的场强，而限于点电荷产生的电场。

(2)式是点电荷在真空中各点场强的计算式，式中的 E 表示点电荷 Q 产生的电场在距 Q 为 r 处的场强。

电场的叠加 如果有几个点电荷同时存在，它们的电场就互相叠加，

形成合电场。这时某点的场强等于各个点电荷在该点产生的场强的矢量和。例如图 1-11 中，P 点的场强 E 等于 Q_1 在该点产生的场强 E_1 和 Q_2 在该点产生的场强 E_2 的矢量和。

知道了点电荷的场强公式和场强的叠加性，原则上可以求出任一已知电荷分布所形成的电场中任一点的场强。

电场线 如果能够用图形把电场中各点场强的大小和方向形象地表示出来，这对我们认识电场是很有好处的。首先提出电场概念的英国物理学家法拉第(1791 ~ 1867)提出了用电场线表示电场的方法，现在被普遍地采用。

在任何电场中，每一点的场强 E 都有一定的方向，我们可以在电场中画出一系列的从正电荷出发到负电荷终止的曲线，使曲线上每一点的场强方向都在各该点的切线上，这些曲线就叫做电场线。图 1-12 是一条电场线，它上面的 A、B 点的场强 E_A 、 E_B 在各该点的切线上，方向如图中箭头所示。

电场线的形状可以用实验来模拟，把奎宁的针状结晶或头发屑悬浮在蓖麻油里，放入电场中，微屑按照场强的方向排列起来，显示出电场线的分布情景。应该注意，虽然我们可以用实验来模拟电场线，但电场线并不是电场里实际存在的线，而是使电场形象化而假想的线。

图 1-13 点电荷的电场线分布。从图中可以看出，在离产生电场的电荷越近的地方，场强越大，电场线越密。所以，用电场线不但可以形象地表示电场强度的方向，而且在同一个电场线分布图上可以大致表示出场强的大小：场强越大的地方电场线越密，场强越小的地方电场线越稀。

在电场的某一区域里，如果各点场强的大小和方向都相同，这个区域的电场就叫做匀强电场。匀强电场是最简单的同时也是很重要的电场，在实验研究中常要用到。两块靠近的平行金属板，它们的大小相等，互相正对，且分别带等量的正负电荷，它们间的电场，除边缘附近外，就是匀强电场。图 1-15 是匀强电场的电场线分布。

从所给几幅电场线分布图中可以看出，电场线始于正电荷或无穷远处，止于负电荷或无穷远处。

在图 1-13 到图 1-15 中，所有的电场线都不相交。我们能否断言，电场中任何两条电场线都不相交。为什么？

练习二

(1) 在电场中的某一点放入电量为 5.0×10^{-9} 库的点电荷，它受到的电场力为 3.0×10^{-4} 牛，求这一点的电场强度的大小

(2) 电场中某点的场强是 0.4×10^5 牛/库，电量为 $+5 \times 10^{-8}$ 库的点电荷在该点受到的电场力是多大？电场力的方向与场强的方向相同还是相反？电量为 -5×10^{-8} 库的点电荷在该点受到的电场力是多大？电场力的方

向是怎样的？

(3) 一点电荷 $q = 2 \times 10^{-8}$ 库，距此点电荷 30 厘米的一点的场强有多大？

(4) 在氢原子中，电子和质子的平均距离是 5.3×10^{-11} 米。质子在这个距离处产生的场强是多大？方向如何？电子受到的力是多大？方向如何？

图 1-15 匀强电的电场线分布。匀强电场各点场强的方向相同，电场线一定是平行的直线。匀强电场各点场强的大小相同，电场线的疏密程度应该各处相同。因此，匀强电场的电场线是距离相等的平行直线。

(5) 图 1-16 是某电场区域的电场线分布，A、B、C 是电场中的三点。

图 1-16

a. 哪一点的场强最大？哪一点的场强最小？

b. 画出各点场强的方向。

c. 把带负电的点电荷分别放在这三点，画出点电荷在各点所受电场力的方向。

(6) 有位同学认为，电场线一定是带电粒子在电场中运动的轨迹。这种认识对不对？为什么？举例具体说明。

(7) 如图 1-17 所示，有两个固定的点电荷， $Q_1 = +4 \times 10^{-8}$ 库， $Q_2 = +8 \times 10^{-8}$ 库，求它们连线上 P 点的场强的大小和方向。

图 1-17

(8) 物理学上常把重力作用的空间叫做重力场。如果把单位质量的物体受到的重力叫做重力场强度，试写出重力场强度的定义式。如果重力场强度的方向定义为与物体所受重力的方向相同，那么从重力场强度的方向来看，重力场是跟正电荷形成的电场相似，还是跟负电荷形成的电场相似？

四、电场中的导体

静电平衡状态 把一个不带电的金属导体 ABCD 放到场强为 E_0 的电场中，导体内部的自由电子受到电场力的作用，将向电场的反方向做定向移动(图 1-18 甲)。这样，在金属的 AB 面上将出现负电荷，在 CD 面上将出现正电荷。这种导体里的自由电荷由于受到外电场的作用而重新分布的现象，就是前面讲过的静电感应。导体两端出现的正负电荷在导体内部形成反方向的电场 E' ，它的电力线用虚线表示(图 1-18 乙)。这个电场与外电场叠加，使导体内部的场强减小。但是，只要导体内部的场强不等于零，自由电子就继续移动，两端的正负电荷就继续增加，导体内部的电场就进一步削弱，直到导体内部各点的场强都等于零时为止。这时自由电子的定向移动停止(图 1-18 丙)。

图 1-18

导体中(包括表面)没有电荷定向移动的状态叫做静电平衡状态。处于静电平衡状态的导体，内部的场强处处为零。

静电平衡下的导体有一个很重要的特性，即导体内部没有净电荷。这是因为，假如在导体内部某处有净电荷，它附近的场强就不可能为零。所以，处于静电平衡状态的带电导体，电荷只分布在导体的外表面上，导体内部没有净电荷。这一点可以用下述的法拉第圆筒实验来验证。

如图 1-19 所示，取两个验电器 A 和 B，在 B 上装一个几乎封闭的空心金属圆筒 C(叫做法拉第圆筒)。使 B 和 C 带电，B 的箔片张开。用有绝缘柄的金属小球 d 先跟 C 的外部接触，再把 d 移到 A 并跟 A 的金属球接触(图 1-19 甲)。经过若干次以后，可以看到 A 的箔片张开，同时 B 的箔片张开的角度减小。这表明小球 d 把 C 的一部分电荷搬运给了 A。可见法拉第圆筒的表面是带有电荷的。如果小球 d 不接触 C 的表面，而接触 C 的内部，重做上述实验(图 1-19 乙)，不论重复多少次，A 的箔片都不张开，B 的箔片张开的角度也不减小。这表明小球 d 并没有把 C 的电荷搬运给 A，可见法拉第圆筒的内部不带电。

静电屏蔽 静电平衡时导体内部的场强为零这一现象，在技术上可用来实现静电屏蔽。

如图 1-20 甲所示，使带正电的金属球靠近验电器，由于静电感应，验电器的箔片张开，这表示验电器受到了附近的带电体的影响。如果事先用一个金属网罩把验电器罩住(图 1-20 乙)，再让带电金属球靠近，验电器的箔片就不张开了。即使用导线把验电器和金属网罩连接上，箔片也不张开。可见，金属网罩(或金属包皮)能把外电场遮住，使内部不受外电场的影响，这就是静电屏蔽。有的电学仪器和电子设备的外面套有金属罩，通讯电缆的外面包一层铅皮，都是用来防止外界电场的干扰，起屏蔽作用的。

图 1-20

思考与讨论

长为 l 的导体棒原来不带电，现将一电量为 q 的点电荷放在距棒左端

R 处，如图 1-21 所示。当达到静电平衡后，棒上感应的电荷在棒内中点 O 处产生的场强有多大？方向如何？

图 1-21

· 小实验 ·

摩擦起电产生等量异种电荷

将金属容器放在泡沫塑料上，用导线把金属容器与自制的验电器相接(图 1-22 甲)。用橡皮筋把锦纶布和泡沫塑料分别套在两把有机玻璃尺上(图 1-22 乙)。

图 1-22

用手握住尺，使尺上的锦纶和泡沫塑料互相摩擦而带电。把带电的锦纶放入容器中(不要与器壁接触，下同)，可以看到验电器的锡箔片张开一定的角度。把带电的锦纶拿出，把带电的泡沫塑料放入容器中，可以看到同样的现象。把两块带电的锦纶和泡沫塑料同时放入容器中(它们互相不接触)，锡箔片将不再张开，说明摩擦起电产生等量异种电荷。

五、电势和电势差

前面我们从电荷在电场中受到力的作用出发，研究了电场的性质。下面我们我们从电场力做功和能量的角度来研究电场的性质。

电势差 设电荷 q 在某一电场中由一点 A 移到另一点 B 时，电场力所做的功为 W_{AB} 。在一般的电场中，由于电场强度 E 处处不同，电荷 q 在移动中所受的电场力 $F = qE$ 也处处不同。但是，电场力 F 处处与 q 成正比，因而 W_{AB} 与 q 成正比。不论电量 q 是多少，比值 W_{AB}/q 都相同，是一个跟电量 q 无关的量。与重力做功的情况类似，可以证明电场力所做的功跟电荷移动的路径无关(图 1-23)。这就是说，比值 W_{AB}/q 只跟 A 、 B 两点的位置有关。

图 1-23

电荷在电场中由一点 A 移动到另一点 B 时，电场力所做的功 W_{AB} 与电荷量 q 的比值 W_{AB}/q ，叫做 A 、 B 两点间的电势差。用 U_{AB} 表示电势差，则有

$$U_{AB} = \frac{W_{AB}}{q} \quad (1)$$

如果取 q 为单位正电荷，上式中 U_{AB} 在数值上等于 W_{AB} 。可见， A 、 B 两点间的电势差 U_{AB} 在数值上等于单位正电荷由 A 点移动到 B 点时电场力所做的功 W_{AB} 。

在国际单位制中，电势差的单位是伏特，简称伏，国际符号是 V 。如果 1 库的正电荷在电场中由一点移到另一点，电场力所做的功为 1 焦，这两点间的电势差就是 1 伏。即，1 伏 = 1 焦 / 库。

在图 1-24 所示的电场中，单位正电荷由 A 点移到 B 点，电场力做正功还是做负功？设单位正电荷由 A 点移到 B 点电场力所做的功 $W_{AB} = 0.2$ 焦， A 、 B 两点间的电势差 U_{AB} 等于多少伏？单位正电荷由 B 点移到 A 点电场力所做的功 W_{BA} 是多少焦？ B 、 A 两点间的电势差 U_{BA} 等于多少伏？

图 1-24

注意：电场力所做的功可以是正值，也可以是负值。因此，两点间的电势差可以是正值，也可以是负值。

电势 我们通常说室内吊灯的高度为 2 米，是选择室内地面作为参考平面，取参考平面的高度为零，把室内吊灯与室内地面的高度差作为吊灯的高度。类似地，如果在电场中选择某一参考点，也可以由电势差定义电场中各点的电势。

如图 1-25 所示 选择电场中的 O 点作为参考点 取参考点的电势为零。设 A 、 O 两点的电势差为 U_{AO} ，我们定义 A 点的电势 U_A 为

$$U_A = U_{AO} \quad (2)$$

图 1-25

这就是说，电场中某点的电势在数值上等于单位正电荷由该点移至参考点(零电势点)时电场力所做的功。电势的单位与电势差的单位相同，也是伏特。例如在图 1-26 中单位正电荷由 A 点移至参考点 O 时电场力所做的功为 5 焦，则 A 点的电势 $U_A = 5$ 伏，A 点的电势高于 O 点的电势。单位正电荷由 B 点移至参考点 O 时电场力所做的功为 -3 焦，则 B 点的电势 $U_B = -3$ 伏，B 点的电势低于 O 点的电势。

单位正电荷由图 1-26 中的 A 点移至 B 点时电场力所做的功 W_{AB} 是多少焦？A、B 两点的电势差 U_{AB} 是多少伏？

有了电势的概念，就可以由电势的差值表示电势差。在图 1-26 中，单位正电荷由 A 点经 O 点移至 B 点电场力所做的功 $W_{AB} = W_{AO} + W_{BO}$ ，而 $W_{BO} = -W_{BO}$ ，所以 $W_{AB} = W_{AO} - W_{BO}$ 。由此可得

$$U_{AB} = U_{AO} - U_{BO} = U_A - U_B \quad (3)$$

零电势的选取是任意的，原则是便于研究问题。在实际应用中，通常取大地的电势为零。

电场中某点电势的大小与零电势点的选取有关，但两点间的电势差却与零电势点的选取无关。这就像物体的高度差与零高度位置的选取无关一样(图 1-27)。所以实际中人们更关心的是电势差。

图 1-27

有时人们只关心两点间电势差的大小，不区别 U_{AB} 和 U_{BA} ，这时电势差取正值， U_{AB} 或 U_{BA} 都简写成 U 。电势差也叫电压。在电路中提到两点间的电压，通常就是这样处理的。

在电场中，我们可以根据电场线的方向判断电势的高低。沿着电场线的方向将单位正电荷由 A 点移至 B 点，电场力做正功， $U_{AB} > 0$ ，由(3)式可知 $U_A > U_B$ 。这就是说，沿着电场线的方向，电势越来越低。

在图 1-26 中，如果取 A 点为电势参考点，A、B、O 三点的电势各是多少伏？A、B 两点间的电势差 U_{AB} 是多少伏？如果取 B 点为电势参考点，A、B、O 三点的电势各是多少伏？A、B 两点间的电势差 U_{AB} 是多少伏？

电场力做功和电势能 地球上的物体具有重力势能。物体在重力的作用下，从一点移动到另一点时，重力对物体做功，物体的重力势能发生改变。重力对物体做了多少功，物体的重力势能就改变多少。与此相似，电场中的电荷也具有势能，叫做电势能，通常简称为电能。电荷在电场力的作用下，从一点移动到另一点时，电场力对电荷做功，电荷的电势能发生改变。电场力对电荷做了多少功，电荷的电势能就改变多少。

设电场中 A 点的电势为 U_A ，B 点的电势为 U_B ，A、B 两点间的电势差为 U_{AB} 。由(1)式和(3)式可知，电荷 q 由 A 点移至 B 点时电场力所做的功为

$$W_{AB} = qU_{AB} = q(U_A - U_B) \quad (4)$$

上式中的 qU_A 和 qU_B 分别表示电荷 q 在 A 点和 B 点的电势能。式中各量

都有正负，算出的 W_{AB} 为正值时，表示电场力做正功，电势能减少；算出的 W_{AB} 为负值时，表示电场力做负功，电势能增加。设 A 点的电势 U_A 高于 B 点的电势 U_B ，A、B 两点间的电势差 $U_{AB}=5$ 伏， $q=0.2$ 库，则此正电荷由 A 移至 B 时电场力所做功为 $W_{AB}=qU_{AB}=1$ 焦，电荷的电势能减少 1 焦。

上式中的 W_{AB} 、 q 和 U_{AB} 有时取绝对值，上式简写成

$$W=qU. \quad (4')$$

至于功 W 的正负可由电荷所受电场力的方向和移动方向来判断。

就功和能之间的关系来讲，重力做功与重力势能改变的关系，电场力做功与电势能改变的关系，二者完全相似。但电荷有正负，要注意二者的不同。负电荷由高电势的 A 点移至低电势的 B 点时，电势能是增加还是减少？

练习三

(1) 一电量为 $+2.0 \times 10^{-9}$ 库的电荷，在某电场中从 A 点移动到 B 点，电场力做的功为 4.0×10^{-7} 焦。A、B 两点间的电势差 U_{AB} 为多少伏？

(2) 电场某部分的电力线分布如图 1-28 所示。试判断 A、B 两点的场强哪一点强？电势哪一点高？

图 1-28

(3) 在图 1-29 所示的匀强电场中，如果 A 板是接地的，M、N 两点哪点电势高？电势是正值还是负值？如果 B 板是接地的，结果又怎样？取大地的电势为零，与大地相连的导体的电势也为零。

图 1-29

(4) 在如图 1-30 所示的电场中，已知 A、B 两点间的电势差 $U=10$ 伏，一电量 $q=+4.0 \times 10^{-9}$ 库的电荷从 A 点移动到 B 点，电场力做的功为多少？正功还是负功？电势能改变了多少？是增加还是减少？

图 1-30

(5) 电场中 M、N 两点的电势 $U_M=800$ 伏、 $U_N=-200$ 伏，把电量是 1.5×10^{-8} 库的负电荷从 M 点移到 N 点，电场力做了多少功？做正功还是负功？电势能改变了多少？是增加还是减少？

(6) 在研究原子、原子核等微观世界时，常用电子伏特(简称电子伏，国际符号为 eV)作能量的单位。在电压为 1 伏的两点间移动电子时电场力所做的功，等于 1 电子伏。已知电子电量 $e=1.6 \times 10^{-19}$ 库，试证明：

$$1 \text{ 电子伏} = 1.6 \times 10^{-19} \text{ 焦}$$

(7) 一个初速度为零的正电荷放在电场中，只在电场力作用下，它向电势高的地方还是向电势低的地方运动？一个初速度为零的电子放在电场中，它向电势高的地方还是向电势低的地方运动？说明理由。

(8) 一个原来静止的电子，在电场力作用下从电场中的 A 点被加速移到 B 点。A、B 两点间的电势差 $U=2000$ 伏。电场力所做的功是多少电子伏？电

势能的变化是多少电子伏？设电子是在真空中移动的，电子在 B 点获得的动能是多少电子伏？

六、等势面

在地图上常用等高线来表示地形的高低，与此相似，在电场中常用等势面来表示电势的高低。电场中电势相同的各点构成的面叫做等势面。

在同一等势面上任何两点间的电势差为零，所以在同一等势面上移动电荷时电场力不做功。

等势面一定跟电力线垂直，即跟场强的方向垂直。假如不是这样，场强就有一个沿着等势面的分量，在等势面上移动电荷时电场力就要做功，而这是不可能的。

沿着电场线的方向电势越来越低，所以电场线不但跟等势面垂直，而且总是由电势高的等势面指向电势低的等势面。

图 1-31 至图 1-34 是几种常见的电场中的等势面(图中用实线表示等势面，虚线表示电场线)。图中任何两个相邻的等势面间的电势差都相等。

处于静电平衡状态的导体，内部的场强为零，在任意两点间移动电荷都不做功，所以任意两点间的电势差为零，整个导体是个等势体，导体表面是个等势面。图 1-35 给出的是不规则形状的带电导体周围的电场线和等势面的分布情况(实线为等势面，虚线为电场线)。

地球是个大导体，在静电平衡状态的地球以及跟它相连的导体都是等势体。实际中常取地球或跟地球相连的导体作为参考位置，认为它们的电势为零。

实际中测量电势比较容易，所以常用等势面来研究电场。先测绘出等势面的形状和分布，再根据电场线和等势面处处垂直这一特点，绘出电场线的形状和分布，就可以知道整个电场的分布。设计许多电子仪器(如电子显微镜、示波管等)中的电极的形状、大小及相互位置时，都需事先经过实验，测绘出等势面的形状和分布，推知带电电极所产生的电场的分布，以便找出符合实际要求的设计方案。

思考与讨论

在图 1-35 中，离导体表面越近，等势面的形状与导体表面的形状越相似。离导体表面越远，等势面的形状会怎样？你能否推断：离导体表面越远，等势面越接近球面。你推断的依据是什么？

如图 1-36 所示，K 为平板电极，G 为中央带圆孔的另一平行金属板。现分别将它们的电势控制在一定数值(图中 K 板的电势为 120 伏，G 板的电势为 30 伏)。根据由实验测得的数据，图中画出了一些等势面。圆孔附近的等势面不再是平面，而向圆孔的右侧凸出来，圆孔附近的电场不再是匀强电场。你能大致画出电场线的分布吗？

图 1-36

现在设想由电极 K 水平向右发射出一束电子，这束电子经过圆孔射出时将怎样运动？我们来看电子运动到 A 点或 B 点时的受力情况。A 点或 B 点场强 E 的方向如图 1-37 中所示。E 可以分解为水平分量 E_x 和竖直分量

E_y 。电子在水平方向所受的电场力 F_x 与 E_x 方向相反，在水平方向做减速运动。电子在竖直方向所受的电场力 F_y 与 E_y 的方向相反，在 A 点或 B 点都受到指向中心轴的横向力。电子束在横向力作用下向着中心轴会聚，并可以聚焦在中心轴上的一点 F。

图 1-37

带圆孔的金属板 G 对电子束的作用，就像凸透镜对光束的作用一样，可以把电子束聚焦，通常叫做静电透镜。静电透镜不限于这里介绍的带孔的金属板，实际中可以有各种各样的结构，它们都是通过控制电场来实现聚焦的目的。静电透镜应用于示波管、电视显像管、电子显微镜等电子仪器中。

练习四

(1) 某电场的等势面如图 1-38 所示，试粗略地画出电场线的大致分布。

图 1-38

(2) 把同一正电荷从图 1-31 的 A 点移到 C 点，跟从 B 点移到 C 点比较，电场力做的功是否相等？说明理由。

(3) 电场中两个电势不同的等势面能不能相交？为什么？

七、电势差跟电场强度的关系

场强是跟电场对电荷的作用力相联系的，电势差是跟电场力移动电荷做功相联系的。正像力和功有联系一样，场强和电势差也是有联系的。我们以匀强电场为例来研究它们的关系。

图 1-39 表示某一匀强电场的等势面和电场线。设 A、B 间的距离为 d ，电势差为 U ，场强为 E 。把正电荷 q 从 A 移到 B，电场力做的功 $W=Fd=qEd$ ，而 $W=qU$ ，可见，

$$U=Ed$$

这就是说，在匀强电场中，沿场强方向的两点间的电势差等于场强和这两点间距离的乘积。

把上式改写成

$$E = \frac{U}{d}$$

这个等式说明，在匀强电场中，场强在数值上等于沿场强方向每单位距离上的电势差。

由上式可以得到场强的另一个单位：伏特/米。由于

$$1 \frac{\text{伏}}{\text{米}} = 1 \frac{\text{焦/库}}{\text{米}} = 1 \frac{\text{牛} \cdot \text{米}}{\text{库} \cdot \text{米}} = 1 \frac{\text{牛}}{\text{库}}$$

所以场强的两个单位伏/米和牛/库是相等的。

如图 1-40 所示，把两个平行金属板 A 和 B 分别接在电源的两极上，两极间的电势差为 60 伏，两板间的距离为 3 厘米，两极间匀强电场的场强是多大？方向如何？增大两极间的距离，场强是增大还是减小？

· 阅读 · 密立根实验

电子和质子带有等量异种电荷，它们所带的电量都是 $e=1.60 \times 10^{-19}$ 库。实验指出，所有电量或者等于电子或质子的电量，或者是它们的电量的整数倍。因此，人们把 1.60×10^{-19} 库的电量叫做基元电荷，简称元电荷。

电子电荷的数值最早是美国科学家密立根(1868~1953)于 1917 年用实验测得的。密立根实验是物理学的经典实验之一，图 1-41 是密立根实验的原理示意图。

设两板间的电势差为 U ，板间距离为 d ，则板间匀强电场的场强 $E=U/d$ 。带有负电荷且电量为 q (绝对值)的小油滴所受竖直向上的电场力 $F=qE=qU/d$ 。设小油滴的质量为 m ，所受重力 $G=mg$ 。小油滴悬浮不动时， $F=G$ ，由此可求出电量

$$q = \frac{mgd}{U}$$

上式中的 U 和 d 可以直接测得。但是油滴太小， m 很难直接测量。密

立根设法通过实验测出油滴的半径 r ，然后用体积公式 $V = \frac{4}{3} r^3$ 算出油滴的体积，再用油滴的体积乘以油滴的密度算出油滴的质量 m 。这样，用上式即可得出油滴所带电量 q 。

实际做的密立根实验是比较复杂的，因为很难做到保持油滴静止。通常是油滴在重力、浮力、静电力、沾滞阻力等各力的作用下做加速运动，沾滞阻力逐渐增大，很快油滴将做匀速直线运动。

密立根测定了数千个带电油滴的电量。他对测得的数据进行分析研究，发现这些电量都等于某个最小电荷的整数倍，这个最小电荷就是电子或质子所带的电量 e 。在密立根实验之后，人们还做了许多其他实验，进一步精确地测定电子的电量。现在测得的元电荷的精确值是

$$e = 1.6021892 \times 10^{-19} \text{ 库,}$$

通常可取作 $e = 1.60 \times 10^{-19} \text{ 库}。$

元电荷是物理基本常数之一，测定它在理论上和实际上都有重大意义。

密立根实验进一步证实了电子的存在，揭示了电荷的非连续性，即自然界中的任何电量都只能是某一基本单位的整数倍，而不能连续变化。

· 阅读 · 尖端放电和避雷针

电荷在导体表面的分布与导体表面的曲率有关系。导体表面突出和尖锐的地方(曲率较大)，电荷分布得比较密集，导体表面附近的电场比较强；表面比较平坦的地方(曲率较小)，电荷分布得比较稀疏，附近的电场比较弱。这一点从图 1 - 35 可以大致分析得出。图中各相邻等势面间的电势差是相等的。导体左右两端的曲率较大，附近的等势面比较密集；中部比较平坦，附近的等势面比较稀疏。如果我们把电场的各个小区域看作匀强电场，从公式 $U = Ed$ 可知，等势面比较密集的地方，场强比较大，导体上电荷的分布也比较密集。

导体尖端上的电荷特别密集，尖端附近的电场特别强，会发生尖端放电现象。如图 1 - 42 所示，不断地给带有尖端的导体充电，放在尖端附近的蜡烛的烛焰会像被风吹动一样，发生偏斜。原来，空气中残留的离子在尖端附近强电场作用下发生激烈运动，与空气分子相碰撞，使空气分子发生电离，因而产生大量新的离子。与尖端上同种电荷的离子受到排斥而远离尖端，形成“电风”，使烛焰偏斜。与尖端上异种电荷的离子受到吸引而趋向尖端，并与尖端上的电荷中和，效果上相当于导体从尖端失去电荷，所以叫做尖端放电。

高压输电的导线，表面要很光滑，半径不能过小(即曲率不能过大)，以避免因放电而损失电能。高压设备的金属元件要做成光滑的球面，防上尖端放电，以保持高电压。

近年来在高能物理的研究中提出了一个设想，认为质子、中子等粒子是由更基本的夸克(又叫层子)组成的，夸克所带电量是元电荷的 $1/3$ 或 $2/3$ 。但是，人们一直还没有在实验中观察到夸克。

避雷针就是利用尖端放电的原理制成的。带电的云层接近地面时，由于静电感应，地面上的物体出现异种电荷，并且密集在突出的物体上，如大树、烟囱、铁塔、高层建筑物等。感应出的电荷积累到一定程度，带电云层和这些物体之间会发生强烈的放电，这就是雷击。避雷针是一个金属的尖端导体，安在建筑物的顶端，用粗导线与埋在地下的金属板连接，以保持与大地接触良好(图 1 - 43)。通过避雷针可以不断地放电，避免电荷的大量积累，从而达到避雷的目的。

· 阅读 · 范德格拉夫起电机

空腔导体上的电荷只分布在外表面上，利用这个性质可以把电荷不断地传给空腔导体，使空腔导体获得很高的电势。范德格拉夫设计了一种用传送带不断给空腔导体传送电荷从而获得高压的设备，叫做范德格拉夫起电机，其原理示意图如图 1 - 44 所示。

喷电针尖是尖端导体，它跟高压电源的正极相连，利用尖端放电的原理，不断地把正电荷喷到由绝缘材料制成的传送带上。传送带由一对转轮带动。刮电针尖也是尖端导体，它与支在两根绝缘支柱上的大金属壳相连。当带电的传送带运动到刮电针尖近傍时，利用尖端放电的原理将电荷传给大金属壳。如此不断继续，可使大金属壳获得很高的电势，与大地之间保持很高的电压。

范德格拉夫起电机主要用于加速带电粒子，使它们获得很大的动能，可以供原子核反应的实验使用。

练习五

(1) 两块相距 0.05 米的带电平行板之间的电场是匀强电场，两板的电势差为 10^4 伏。求作用在两板之间的一个电子上的电场力。

(2) 平行的带电金属板 A、B 间是匀强电场(图 1 - 45)，场强为 1.2×10^3 牛/库。两板间的距离为 5 厘米。两板间的电势差有多大？电场中有两点 P_1 和 P_2 ， P_1 点离 A 板的距离是 0.5 厘米， P_2 点离 B 板的距离也是 0.5 厘米。 P_1 和 P_2 两点间的电势差有多大？

(3) 在匀强电场中，沿电场强度的方向依次排列着 A、B、C 三点，A、B 间的距离是 4.0 厘米，B、C 间的距离是 6.0 厘米。A 点的电势最高。设电场强度是 1.5×10^4 伏/米，试求 A 与 B、B 与 C、A 与 C 间的电势差。

(4) 有两块相距 10 厘米的平行的金属板，两板间的电压为 9000 伏。求两板间的电场强度。若在两板间与两板等距离的一点上有一粒带着 -1.6×10^{-17} 库电量的尘埃，求这粒尘埃受到的电场力。当它移动到带正电的那块金属板时，电场力做了多少功？

八、电容器电容

电容器 电容器是电气设备中的一种重要元件，在电子技术和电工技术中有很重要的应用。在两个平行金属板中间夹上一层绝缘物质(也叫电介质)，就组成一个最简单的电容器，叫做平行板电容器。这两个金属板叫做电容器的两个极。

电容器可以容纳电荷。使电容器带电叫做充电。充电时，把电容器的一个极板与电池组的正极相连，另一个极板与电池组的负极相连，两个极板就分别带上了等量的异种电荷(图 1 - 46 甲)。电容器的一个极板上所带电量的绝对值，叫做电容器所带的电量。充了电的电容器的两极板之间有电场。

使充电后的电容器失去电荷叫做放电。用一根导线把电容器的两极接通，两极上的电荷互相中和，电容器就不再带电，两极之间不再存在电场(图 1 - 46 乙)。

电容 电容器带电的时候，它的两极之间产生电势差。实验表明，对任何一个电容器来说，两极间的电势差都随所带电量的增加而增加，且电量与电势差成正比，它们的比值是一个恒量。不同的电容器，这个比值一般是不同的。可见，这个比值表征了电容器的特性。电容器所带的电量 Q 跟它的两极间的电势差 U 的比值，叫做电容器的电容。如果用 C 表示电容，则有

$$C = \frac{Q}{U}$$

上式表示，电容在数值上等于使电容器两极间的电势差为 1 伏时，电容器需要带的电量。这个电量大，电容器的电容大。这种情形类似于图 1 - 47 所示的两个容器装水的情形，使容器中的水为 1 厘米深时，容量大的容器需要的水量多。可见，电容是表示电容器容纳电荷本领的物理量。

在国际单位制里，电容的单位是法拉，简称法，国际符号是 F。一个电容器，如果带 1 库的电量时两极间的电势差是 1 伏，这个电容器的电容就是 1 法。法这个单位太大，实际上常用较小的单位：微法(μF)和皮法(pF)。它们间的换算关系是：

$$1 \text{ 法} = 10^6 \text{ 微法} = 10^{12} \text{ 皮法}。$$

平行板电容器的电容 平行板电容器的电容跟两极板的正对面积 S 以及两极板间的距离 d 有关。如图 1 - 48 所示，平行板电容器充电后，保持电容器所带的电量 Q 不变，改变 S 或 d ，用静电计测出两极板间的电势差 U ，就可以知道电容 C 如何随 S 和 d 而改变。实验表明：正对面积 S 越大，极板间的距离 d 越小，平行板电容器的电容 C 越大。

平行板电容器的电容还跟极板间的电介质有关。在图 1 - 48 所示的实

静电计是在验电器的基础上制成的，用来测量导体间的电势差，使用时把它的金属球跟一个导体连接，把它的金属外壳跟另一个导体连接或同时接地，从指针的偏转角度就可以知道两个导体间的电势差。

验中，保持两极板所带电量、它们的距离、它们的正对面积都不改变，在极板间插入电介质，静电计指出的电势差减小，表示电容增大。电容器极板间充满某种电介质时电容增大到的倍数叫做这种电介质的介电常量。下表列出了几种电介质的介电常量的值。

几种电介质的介电常量

电介质	空气	石蜡	陶瓷	玻璃	云母
介电常量	1.0005	2.0 ~ 2.1	6	4 ~ 11	6 ~ 8

理论和实验都表明，平行板电容器的电容 C ，跟介电常量成正比，跟正对面积 S 成正比，跟极板的距离 d 成反比。写成公式，有

$$C = \frac{\epsilon_0 \epsilon_r S}{4\pi kd}$$

上式中的 k 为静电力恒量。

一般说来，电容器的电容是由两个导体的大小和形状、两个导体的相对位置以及它们间的电介质决定的。

思考与讨论

平行板电容器充电后，继续保持电容器的两极板与电池的两极相连接。在这种情况下，如果增大两极板间的距离 d ，两极板间的电势差 U 、电容器所带的电量 Q 以及两极板间匀强电场的场强 E 各如何改变？

平行板电容器充电后，切断与电池的连接，如果增大 d ，则 U 、 Q 、 E 各如何改变？

常用电容器 知道了决定电容大小的因素，就可以利用这些知识来改变电容器的电容。实际上，人们正是这样制成各种电容器，来满足不同需要的。从构造上看，常用的电容器可分为固定电容器和可变电容器两类。

固定电容器的电密是固定不变的，常用的有纸介电容器和电解电容器(图 1 - 49 甲和乙)。

可变电容器的电容是可以改变的，它由两组铝片组成(图 1 - 49 丙)，固定不动的一组铝片叫定片，可以转动的一组铝片叫动片。转动动片，两组铝片的正对面积发生变化，电容就随着改变。

加在电容器两极上的电压不能超过某一限度。超过这个限度，电介质将被击穿，电容器被损坏，这个极限电压叫做击穿电压。电容器工作时的电压应低于击穿电压。电容器上一般都标明了电容和额定电压的数值。电容器的额定电压是指电容器长期工作所能承受的电压，它比击穿电压要低。

· 阅读 · 电容式传感器

电容器的电容决定于极板面积、极板间距离以及极板间的电介质这几个因素。如果某一物理量的变化(如角度、位移 S 、深度 h 等的变化)能

够引起上述某个因素的变化，从而引起电容的变化，那么，通过测定电容器的电容就可以确定上述物理量的变化。作这种用途的电容器则做电容式传感器。

图 1 - 50 是用来测定角度 θ 的电容式传感器。当动片与定片之间的角度 θ 发生变化时，引起正对面积 S 发生变化，因而电容 C 发生变化。测出 C ，就间接测出 θ 。知道 C 的变化，就可以知道 θ 的变化情况。

图 1 - 51 是测定液面高度 h 的电容式传感器。在导线外面涂上一层电介质，放入导电液体中，导线芯和液体构成电容器的两个极，芯线外的绝缘层就是极间的电介质。液面高度 h 发生变化时，引起正对面积 S 发生变化，从而使电容 C 发生变化。知道 C 的变化，就可以知道 h 的变化。

图 1 - 52 是测定压力的电容式传感器。当待测压力 F 作用于可动膜片电极上时，膜片产生形变，使极间距离 d 发生改变，引起电容 C 的变化。知道 C 的变化，就可以知道 F 的变化。

图 1 - 53 是测定位移 x 的电容式传感器。随着电介质进入极板间的长度变化，电容 C 发生变化。知道 C 的变化，可以知道位移 x 的变化。

有各种各样的传感器，绝大多数是依据各种物理原理和物理效应设计而成。我们在初中学过，导线的电阻决定于导线的横截面积、长度和温度等因素，由此可以制成电阻式传感器，用来测定压力、温度等物理量，可以说传感器是把非电物理量(如位移、速度、压力、温度、湿度、流量、声强、光照度等)转换成电学量(如电压、电流等)的一种装置和元件。对传感器来说，输入的是非电物理量 x ，输出的是电学量 y (图 1-54)。

将非电物理量转换成电学量之后，测量起来比较方便，而且能输入给电子计算机对电学量所载的信息进行计算和处理，各种传感器是自动控制设备中不可缺少的元件，而且已经渗透到宇宙开发、环境保护、交通运输以至家庭生活等多种领域。

学习物理要有应用意识，善于把所学知识运用于实际中。希望同学们在这方面作出努力！

信息的采集依赖于传感器，信息的处理依赖于电子计算机，如果把电子计算机称为“电脑”，传感器则可称为“电五官”。

练习六

(1) 一个电容器的电容是 1.50×10^{-2} 微法，把它的两个极板接在 90 伏的电源上，求每个极板上的电量。

(2) 有一个电容器，在带了电量 Q 以后，两导体间的电势差是 U 。如果使它带的电量增加 4.0×10^{-8} 库，两导体间的电势差就增大 20 伏。这个电容器的电容是多少微法？

(3) 有一个平行板电容器，要使它两极板间的电势差加倍，而板间匀强电场的场强减半，下述四种办法中，应采取哪种办法？

- A . 两极板的电量加倍，板间距离为原来的 4 倍。
- B . 两极板的电量减半，板间距离为原来的 4 倍。
- C . 两极板的电量加倍，板间距离为原来的 2 倍。
- D . 两极板的电量减半，板间距离为原来的 2 倍。

*九、电容器的连接

实际使用电容器时，有时会遇到电容器的电容不够或耐压能力不够，这就需把几个电容器连接起来使用，连接的基本方法有串联和并联两种。

电容器的串联 把几个电容器的极板首尾相接，连成一串，这就是电容器的串联。图 1 - 55 是三个电容器的串联。接上电压为 U 的电源后，两端极分别带电 $+Q$ 和 $-Q$ ，由于静电感应，中间各极所带的电量也等于 $+Q$ 或 $-Q$ ，所以串联时每个电容器带的电量都是 Q 。如果各个电容器的电容分别为 C_1 、 C_2 、 C_3 ，电压分别为 U_1 、 U_2 、 U_3 ，那么，

$$U_1 = \frac{Q}{C_1}, U_2 = \frac{Q}{C_2}, U_3 = \frac{Q}{C_3}$$

总电压 U 等于各个电容器上的电压之和，所以，

$$U = U_1 + U_2 + U_3 = Q \left(\frac{1}{C_1} + \frac{1}{C_2} + \frac{1}{C_3} \right)$$

设串联电容器的总电容为 C ，则 $U = \frac{Q}{C}$ ，所以，

$$\frac{1}{C} = \frac{1}{C_1} + \frac{1}{C_2} + \frac{1}{C_3}$$

这就是说，串联电容器的总电容的倒数等于各个电容器的电容的倒数之和。电容器串联之后，相当于增大了两极的距离，因此总电容小于每个电容器的电容。

电容器的并联 把几个电容器的正极连在一起，负极也连在一起，这就是电容器的并联。图 1 - 56 是三个电容器的并联。接上电压为 U 的电源后，每个电容器的电压都是 U 。如果各个电容器的电容分别为 C_1 、 C_2 、 C_3 ，所带电量分别为 Q_1 、 Q_2 、 Q_3 ，那么

$$Q_1 = C_1 U, Q_2 = C_2 U, Q_3 = C_3 U$$

电容器组贮存的总电量 Q 等于各个电容器所带电量之和，所以，

$$Q = Q_1 + Q_2 + Q_3 = (C_1 + C_2 + C_3) U$$

设并联电容器的总电容为 C ，则 $Q = CU$ ，所以，

$$C = C_1 + C_2 + C_3。$$

这就是说，并联电容器的总电容等于各个电容器的电容之和。电容器并联之后，相当于增大了两极的面积，因此总电容大于每个电容器的电容。

电容器串联后，电容减小了，但耐压能力提高了，所以要承受较高的电压，可以把电容器串联起来；电容器并联后，电容增大了，耐压能力没有提高，所以在需要大电容时，可以把电容器并联起来。

十、静电的防止和应用

静电的防止 摩擦产生的静电，在生产、生活上会给人们带来很多麻烦，甚至造成危害。

印刷厂里，纸页之间的摩擦起电，会使纸页粘在一起，难于分开，给印刷带来麻烦。

印染厂里，棉纱、毛线、人造纤维上的静电，会吸引空气中的尘埃，使印染质量下降。

在制药生产中，由于静电吸引尘埃，会使药品达不到标准的纯度。

在电子计算机的机房中，人体带电可能妨碍电子计算机正常运行。

在家庭中，带静电很多人从电视机旁走过，会给电视的图像和声音带来干扰。

静电荷积累到一定程度，会产生火花放电。在地毯上行走的人，与地毯摩擦而带的电如果足够多，他伸手去拉金属门把手时，手与金属把手间会产生火花放电，严重时会使他痉挛。

在空中飞行的飞机，与空气摩擦而带的电在着陆过程中如果没有导走，地勤人员接近机身时，人与飞机间会产生火花放电，严重时能将人击倒。

静电对现代高精密度、高灵敏度的电子设备颇有影响。带静电很多人甚至可以使那些灵敏、脆弱、小巧玲珑的电子器件因火花放电而被击穿，毁坏一部电子仪器。

静电的最大危害是电火花点燃某些易燃物质而引起爆炸。专门用来装汽油或柴油等液体燃料的卡车，在灌油、运输过程中，燃油与油罐摩擦、撞击而带的电如果没有及时导走，积累到一定程度会产生电火花，引起爆炸。

防止静电危害的基本办法，是尽快把产生的静电导走，避免越积越多。具体措施则多种多样。油罐车靠一条拖在地上的铁链把静电导走。飞机机轮上通常装有搭地线，也有用导电橡胶做机轮轮胎的，着陆时它们可将机身的静电导入地下。在地毯中夹杂 0.05 ~ 0.07 毫米的不锈钢丝导电纤维，消除静电的效果很好。在印染厂中保持适当的湿度，潮湿的空气可使静电荷很快消失。

静电的应用 静电也可以被人们利用。目前，静电的应用已有多种，但依据的物理原理几乎都是让带电的物质微粒在电场力作用下奔向并吸附到电极上。下面介绍静电除尘的原理。

以煤为燃料的工厂、电站，每天排出的烟带走大量的煤粉，不仅浪费燃料，而且造成严重的环境污染。可以利用图 1 - 57 所示的静电除尘器消除烟气中的煤粉。除尘器由金属管 A 和悬在管中的金属丝 B 组成，A 接到高压电源正极，B 接到高压电源负极。A、B 之间有很强的电场，而且距 B 越近电场越强。B 附近的空气分子被强电场电离为电子和正离子，正离子吸到 B 上得到电子又变成空气分子。电子奔向正极 A 的过程中，遇到烟气中的煤粉，使煤粉带负电，吸附到正极 A 上，排出的烟就成为清洁的了。

静电还广泛地应用于静电喷涂、静电植绒、静电复印等方面。设法使油漆的微粒带电，在电力的作用下，油漆微粒飞向作为电极的工件，并沉

积在工件表面上，完成油漆工件的任务。这就是静电喷涂。使绒毛带电，可以把绒毛植在涂有粘着剂的纺织物上，形成象刺绣似的纺织品。这就是静电植绒。

· 阅读 · 静电复印

静电复印可以迅速、方便地把图书、资料、文件复印到纸上。静电复印机的中心部件是一个可以旋转的接地的铝辊，表面镀着一层半导体硒，叫做硒鼓。半导体硒有特殊的光电性质，没有光线照射时是很好的绝缘体，能保持电荷，受到光的照射就立刻变成导体，将所带的电荷导走。

复印每一页书稿都要经过充电、曝光、显影、转印等几个步骤，这些步骤是在硒鼓转动一周的过程中依次完成的。

充电：由电源使硒鼓表面带上正电荷。

曝光：利用光学系统将原稿上字迹的像成在硒鼓上(图 1 - 58)。硒鼓上字迹的像实际是没有光照射的地方，保持着正电荷，而其他地方受到了光线照射，正电荷被导走。这样，硒鼓上就留下了字迹的“静电潜像”。

显影：带负电的墨粉被带正电的“静电潜像”吸引，并吸附在潜像上(图 1 - 59)，显出墨粉组成的字迹。

转印：带正电的转印电极使输纸机构送来的白纸带正电。带正电的白纸与硒鼓表面墨粉组成的字迹接触，将带负电的墨粉吸到白纸上(图 1 - 60)。

此后，吸附了墨粉的纸被送入定影区，墨粉在高温下熔化，浸入纸中，形成牢固的字迹；硒鼓则经过清除表面残留的墨粉、电荷，准备迎接下一页书稿的复印。

图 1 - 61 表示出了复印的全过程。

十一、专题 带电粒子在匀强电场中的运动

(一)原理和应用

带电粒子在电场中要受到电场力的作用，产生加速度，速度的大小和方向都可以发生变化。在现代科学实验和技术设备中，常常根据这个道理，利用电场来改变或控制带电粒子的运动。这种应用大致可以分成两种情况：一是利用电场使带电粒子加速，一是利用电场使带电粒子偏转。下面结合示波管的原理讲述带电粒子在电场中的加速和偏转。

带电粒子的加速 如图 1 - 62 所示，在真空中有一对平行金属板，两板间加以电压 U 。有一个带正电荷 q 的带电粒子，在电场力的作用下，由静止开始从正极板向负极板运动，到达负极板时的速度 v 有多大？根据我们学过的力学和电学知识就可以解决这个问题。带电粒子由正极板移向负极板的过程中，电场力所做的功 $W=qU$ 。带电粒子到达负极板时的动能

$E_k = \frac{1}{2}mv^2$ 。由动能定理可知 $qU = \frac{1}{2}mv^2$ ，由此即可求出

$$v = \sqrt{\frac{2qU}{m}} \quad (1)$$

我们知道，两平行金属板间的电场是匀强电场。如果两极板不是平行金属板，而是其他形状，中间的电场将是非匀强电场。这时(1)式是否成立？说明理由。

[例题 1] 实验表明，赤热的金属丝可以发射电子。如图 1 - 63 所示，在赤热金属丝和金属板间所加的电压 $U=2500$ 伏，以赤热金属丝发射出的电子流在真空中被加速后，从金属板的小孔穿出。穿出后的速度 v 有多大？设电子刚从金属丝发出时速度为零。已知电子的质量 $m=0.9 \times 10^{-30}$ 千克，电子的电量 $e=1.6 \times 10^{-19}$ 库。

金属丝和金属板间的电场虽然不是匀强电场，但仍可用公式 $v =$

$\sqrt{2qU/m}$ 求出

$$\begin{aligned} v &= \sqrt{\frac{2qU}{m}} = \sqrt{\frac{2 \times 1.6 \times 10^{-19} \times 2500}{0.9 \times 10^{-30}}} \text{米/秒} \\ &= 3.0 \times 10^7 \text{米/秒} \end{aligned}$$

有一种电子仪器叫做示波器，下面我们要练习使用它。示波器的核心部件是示波管(图 1 - 64)，它由电子枪、偏转电极和荧光屏组成，管内抽成真空。图 1 - 64 其实就是电子枪的原理图。如果偏转电极没有加电压，电子束从金属板小孔穿出后将沿直线前进，打在荧光屏上，在那里产生一个小的亮斑。

带电粒子的偏转 如图 1 - 65 所示，在真空中水平放置一对金属板 Y 和 Y' ，板间距离为 d 。在两板间加电压 U ，则板间匀强电场的强度 $E=U/d$ 。

现有一电量为 q 的带电粒子以水平速度 v_0 射入电场中，由于受到竖直方向的电场力 $F=qE$ ，带电粒子将发生偏转。金属板 Y 和 Y' 叫做偏转电极。下面通过例题研究带电粒子的偏转。

[例题 2] 一电子水平射入偏转电极 Y 和 Y' 的电场中(图 1 - 65)，射入时的速度 $v_0 = 3.0 \times 10^7$ 米 / 秒。偏转电极长 $l = 6.0$ 厘米，相距 $d = 0.2$ 厘米，两极间的电压 $U = 2.0$ 伏。求射出电场时竖直偏移的距离 y 和偏转的角度？。

电子在竖直方向做匀加速运动，加速度 $a = F / m = qE / m = qU / md$ 。射出电场时竖直偏移的距离 $y = at^2 / 2$ ，其中 t 为飞行时间。电子在水平方向做匀速运动，由 $l = v_0 t$ 可求得 $t = l / v_0$ 。将 $a = qU / md$ 和 $t = l / v_0$ 代入 $y = at^2 / 2$ 中即可求得

$$y = \frac{ql^2}{2mv_0^2 d} U \quad (2)$$

代入数值得 $y = 0.036$ 厘米。

电子离开电场时竖直方向的分速度 $v = at = \frac{qlU}{mv_0 d}$ ，离开电场时偏转的角度 f 可由下式确定

$$\operatorname{tg} f = \frac{v}{v_0} = \frac{ql}{mv_0^2 d} U \quad (3)$$

代入数值可求得

$$f = 0.68^\circ.$$

在示波管中如果偏转电极 X 和 X' 没有加电压，电子离开偏转电极 Y 和 Y' 后将沿直线前进，打在荧光屏上产生亮斑，这个亮斑在竖直方向发生偏移 y' (图 1 - 66)。

改变加在偏转电极 Y 和 Y' 上的电压 U ，亮斑在竖直方向的位置也随着改变。当 Y' 的电势高于 Y 的电势时，亮斑移向下方。当 U 随着时间而变化时，亮斑的位置也随着时间而改变。从(2)式和(3)式可知， y 和 $\operatorname{tg} f$ 都与 U 成正比，由此可以判断，亮斑的偏移 y' 也与 U 成正比。可见，亮斑在竖直方向偏移的规律与电压变化的规律应当是相同的。如果电压按正弦规律变化 $U = U_m \sin t$ ，偏移也按正弦规律变化 $y' = y'_m \sin t$ ，即亮斑在竖直方向的运动是简谐振动。不过当电压变化很快时，亮斑的移动也很快，由于视觉暂留和荧光物质的残光特性，在荧光屏上亮斑的移动看起来成了一条竖直的亮线。

希望你自已推出偏移 y' 的下述表达式：

$$\begin{aligned} y' &= \frac{ql}{mv_0^2 d} \left(L + \frac{1}{2} \right) U \\ &= \operatorname{tg} f \left(L + \frac{1}{2} \right) \end{aligned}$$

同样的道理，如果只在偏转电极 X 和 X' 上加电压，光斑就在水平方向发生偏移。加上随时间而变化的电压，亮斑的位置就在水平方向随时间而改变。加上特定的周期性变化的电压，可以使亮斑在水平方向这样运动：亮斑从一侧匀速地移至另一侧，然后迅速返回原处，再匀速地移向另一侧，如此反复继续。这个过程叫做扫描，所加电压叫做扫描电压。如果扫描电压变化很快。亮斑看起来成了一条水平的亮线。

在偏转电极 X 和 X' 上加扫描电压有什么作用？通常加在偏转电极 Y 和 Y' 上的电压是所要研究的信号电压，如果信号电压是周期性的，且周期与扫描电压的周期相同，在荧光屏上就显示出一个图线，表示出信号电压随时间而变化的规律。例如信号电压是按正弦规律变化的，荧光屏上就显示出一条正弦曲线(图 1 - 67)。

为什么加上扫描电压，就显示出如图 1 - 67 所示的正弦曲线？扫描电压的变化情况又是怎样的？这是很有意思的问题，有兴趣的同学不妨自己研讨一下，这对巩固所学知识以及提高运用知识的能力都会大有好处。

为什么会得到如图 1 - 67 所示的正弦曲线？让我们回忆一下力学中得出简谐振动图象的演示，并且把演示的图示重画在这里(图 1 - 68)。让单摆摆动，同时沿着跟摆动垂直的方向匀速拉动硬纸板，漏在硬纸板上的细砂就显示出单摆的振动图象。现在我们换一个角度来思考这个问题。设想有一位小小的观察者静止在硬纸板上观察同一现象，他将观察到装着细砂的漏斗一方面做简谐振动，同时沿着跟摆动垂直的方向做匀速运动，漏斗同时参与这两种运动，它的运动轨迹是一条正弦曲线(或余弦曲线)。现在我们就是这位小小的观察者，站在地面这个大“硬纸板”上观察示波管荧光屏上亮斑的运动。亮斑一方面沿着竖直方向做简谐振动，同时沿水平方向做匀速运动，它的轨迹是一条正弦曲线。

如果在偏转电极 X 和 X' 上加以变化规律如图 1 - 69 所示的电压，亮斑在荧光屏上怎样运动？

(二) 练习使用示波器

示波器是一种常用的电子仪器，它的内部除了示波管这个核心部件，还有比较复杂的电子线路，我们不作具体研究。利用示波器能够直接观察电信号随时间变化的情况。振动、温度、光等的变化，可以通过各种传感器转化成电压的变化，然后用示波器来研究。示波器已经成为检测和修理各种电子仪器以及科学研究的不可缺少的工具。

懂得了示波管的原理，你将会感到示波器并不那么神秘，你也可以用它进行各种实验了。

认识示波器的面板

图 1 - 70 是 J2459 型示波器的面板，上面各个旋钮和开关的名称、作用如下：

- 1：辉度调节旋钮 α ——用来调节图像亮度。
- 2：聚焦调节旋钮；3：辅助聚焦调节旋钮 ——二者配合使用可使

电子束会聚成一细束，在屏上出现小亮斑，使图像线条清晰。

4：电源开关；5：指示灯——电源接通时指示灯明亮。

6：竖直位移旋钮；7：水平位移旋钮——分别用来调节图像在竖直方向和水平方向的位置。

8：Y增益旋钮；9：X增益旋钮——分别用来调节图像在竖直方向和水平方向的幅度。

10：衰减调节旋钮——有1、10、100、1000四个挡，“1”挡不衰减，其余各挡分别可使加在竖直偏转电极上的信号电压按上述倍数衰减，使图像在竖直方向的幅度依次减为前一挡的十分之一。最右边的正弦符号“”挡不是衰减，而是由机内自行提供竖直方向的按正弦规律变化的交流电压。

11：扫描范围旋钮——用来改变扫描电压的频率范围，有四个挡，左边第一挡是10~100赫，向右旋转每升高一挡，扫描频率增大10倍。最右边是“外X挡”，使用这一挡时机内没有加扫描电压，水平方向的电压可以从外部输入。

12：扫描微调旋钮——使扫描电压的频率在选定的范围内连续变化。

13：“Y输入”、“X输入”、“地”——分别是对应方向的信号输入电压的接线柱和公共接地的接线柱。

14：交直流选择开关——置于“DC”位置时，所加信号电压是直接输入的；置于“AC”位置时，所加信号电压是通过一个电容器通过的，可以让交流信号通过而隔断直流成分。

15：同步极性选择开关，其作用下面会讲到。

观察荧光屏上的亮斑并进行调节

先把辉度调节旋钮反时针转到底，竖直位移旋钮和水平位移旋钮旋转到中间位置，衰减调节旋钮置于最高挡，扫描范围旋钮置于“外X”挡。打开电源开关，指示灯亮，预热一两分钟后，顺时针旋转辉度调节旋钮，屏上即出现一个亮斑，亮斑的亮度要适中。注意不应使亮斑过亮，特别是当亮斑长时间停留在屏上不动时，应把亮度减弱，以免损伤荧光屏，减少示波管的使用寿命。旋转聚焦调节旋钮和辅助聚焦旋钮，观察亮斑的变化，使亮斑最圆最小。旋转竖直位移旋钮，观察亮斑的上下移动。旋转水平位移旋钮，观察亮斑的左右移动。

观察扫描并进行调节

把X增益旋钮顺时针转到三分之一处，扫描微调旋钮反时针转到底，扫描范围旋钮置于最低挡。可以看到扫描的情形：亮斑从左向右移动，到右端后又很快回到左端。顺时针旋转扫描微调旋钮以增大扫描频率，可以看到亮斑迅速移动成为一条亮线。调节X增益旋钮，可以看到亮线长度的改变。

观察亮斑在竖直方向的偏移并进行调节

现在给竖直方向加一个直流电压。把扫描范围旋钮置于“外X”挡，使亮斑位于屏的中心，把“DC、AC”开关置于“DC”位置。照图1-71连接电路，直流电源用一、二节干电池即可。逐步减小衰减挡，观察亮斑的向上偏移。再调节Y增益使亮斑偏移一段适当的距离。调节变阻器改变输入电压，可以看到亮斑的偏移随着改变，电压越高，偏移越大。调换电池

的正负极，改变输入电压的方向，可以看到亮斑改为向下偏移。

观察按正弦规律变化的电压的图线

把扫描范围旋钮置于第一挡(10 ~ 100 赫)。把衰减调节旋钮置于“”挡，即由机内提供竖直方向的按正弦规律变化的电压。调节扫描微调旋钮，使屏上出现完整的正弦曲线。调节 Y 增益和 X 增益，使曲线形状沿竖直或水平方向发生变化。

把同步极性选择开关置于“+”位置，正弦曲线从正半周开始，如图 1 - 72 甲所示，置于“-”位置，正弦曲线从负半周开始，如图 1 - 72 乙所示。

本章小结

这一章学习电场的知识，下面提供一个复习线索，供同学们参考，目的是希望你们能把学过的知识联系起来，形成一个知识结构。

一、电荷的相互作用 电场

这部分是本章的基本知识。

(1)电荷之间的相互作用是通过电场发生的。点电荷之间的相互作用服从库仑定律。

(2)电场可以从力的角度来研究，电场强度就是反映电场的力的性质的物理量。电场强度是矢量。知道了电场强度 E ，就可以知道电荷 q 在电场中所受的力 $F=qE$ 。

(3)电场也可以从功和能的角度来研究，电势和电势差就是反映电场的能的性质的物理量。电势和电势差却是标量。知道了电场中两点的电势差 U ，就可以知道在这两点间移动电荷 q 时，电场力所做的功 $W=qU$ 。

(4)电场力所做的功等于电势能的改变量。功是能的转化的量度，电场力做多少功，就有多少电势能与其他形式的能发生转化。试分析电场力做正功和做负功两种情况下，电势能怎样转化。

(5)在匀强电场中，沿场强方向上两点间的电势差 U 与电场强度 E 的关系是： $U=Ed$ ，其中 d 是这两点间的距离。

(6)电场可以用电场线和等势面形象地表示出来。你自己总结一下，通过电场线或等势面的分布图可以知道有关电场的什么知识。

二、电场中的导体 电容

这部分是把基本知识应用于导体。

(1)处于静电平衡的导体有怎样的特点？请你自己加以总结。

(2)电容器的电容是表示电容器容纳电荷本领的物理量。电容器电容的大小由其本身的因素决定。电容器可以串联或并联起来使用。

三、带电粒子在匀强电场中的运动

这部分是电学和力学知识的综合应用。

带电粒子在匀强电场中的运动主要是加速和偏转两种情况。请你就这两种情况，结合学过的力学、电学的知识自己加以总结。

习题

A 组

(1)如图 1-73 所示，用两根同样长度的细绳，把两个带同种电荷的小球悬挂在同一点，两球的质量相等，A 球所带电量大于 B 球所带电量。两球静止时，下列表示 α 角与 β 角的关系的答案哪个正确？说明理由。

A. $\alpha > \beta$. B. $\alpha = \beta$. C. $\alpha < \beta$.

(2)在氢原子中，可以认为核外电子沿圆形轨道绕原子核(质子)旋转，轨道半径为 5.3×10^{-11} 米。电子沿轨道运动的动能是多大？

(3)在电场中把电量为 2.0×10^{-9} 库的正电荷从 A 点移到 B 点，电场力做了 1.5×10^{-7} 焦的正功，再把这个正电荷从 B 点移到 C 点，电场力做了 4.0×10^{-7} 焦的负功。A、B、C 三点中哪点的电势最高，哪点的电势最低？A、B 间，B、C 间和 A、C 间的电势差 U_{AB} 、 U_{BC} 和 U_{AC} 各是多大？

(4)下面一些说法哪个正确，哪个错误？说明理由。

a. 正电荷在电场力的作用下只能向着电势低的地方运动。

b. 正电荷在电场力的作用下只能向着电势能低的地方运动。

c. 初速度为零的电荷在电场力的作用下一定向着电势能低的地方运动。

(5)在真空中有一对平行金属板，相距 6.2 厘米，加上 90 伏的电压。两价的氧离子由静止被加速，从一极板到另一极板时，它的动能是多大？

这道题有几种解法？哪种解法比较简单？

(6)两价离子在 90 伏的电压下从静止加速后，测出它的动量是 1.2×10^{-21} 千克·米/秒。这种离子的质量是多大？

(7)图 1-74 所示的实验装置可以用来验证电场对带电粒子的加速作用只跟电压有关。左边的非匀强电场使电子加速，右边的匀强电场使电子减速。设非匀强电场的电压为 U ，匀强电场的电压为 U' 。实验结果是：只要 $U' > U$ ，电流计的指针就偏转；只要 $U' < U$ ，电流计的指针就不偏转。你从这个实验结果可以得出什么结论？

(8)有一个电容器，电容是 1.5×10^{-4} 微法，两板分别带电 6×10^{-8} 库和 -6×10^{-8} 库。如果两板的距离为 1 毫米，电容器两板间的电场强度是多大？保持电容器所带电量不变，两板的距离增大为 2 毫米时，两板间的电场强度是多大？

B 组

(1)有两个带电小球，电量分别为 $+Q$ 和 $+9Q$ ，在真空中相距 0.4 米。如果引进第三个带电小球，正好使三个小球都处于平衡状态，第三个小球带的是哪种电荷？应放在什么地方？电量是 Q 的几倍。

(2)指出图 1-75 所示的哪种情况中，a、b 两点的电势相等，a、b 两点的电场强度矢量也相等。

A. 带电平行板电容器两板间除边缘附近外的两点 a、b。

B. 达到静电平衡时的导体内部两点 a、b。

C. 离点电荷等距的两点 a、b。

D. 两个等量异种电荷连线的中垂线上，与连线中点 O 等距的两点 a、

b。

(3)一带电粒子射入固定在O点的点电荷的电场中 粒子运动轨迹如图1 - 76中虚线所示。图中实线表示电场的等势面。试判断下列说法的正误：

- A . 粒子受静电斥力的作用 , ab 段电场力做正功 , bc 段电场力做负功。
- B . 粒子受静电引力的作用 , ab 段电场力做正功 , bc 段电场力做负功。
- C . 粒子受静电斥力的作用 , ab 段电场力做负功 , bc 段电场力做正功。
- D . 粒子受静电引力的作用 , ab 段电场力做负功 , bc 段电场力做正功。

(4)如图1 - 77所示,质量为 4.5×10^{-3} 千克的带电小球用2.0米长的线悬挂在带等量异种电荷的平行板之间,平衡时小球偏离竖直位置2.0厘米。如果两板间的电压是 1.5×10^4 伏,两板的距离是10厘米,那么,小球带有多少个多余的电子?

(5)先让一束电子,后让一束氢核通过同一偏转电场。设电子和氢核的初速度相同,电子和氢核原来的动能相同,试分别求出两种情况下电子的偏角 θ_e 和氢核的偏角 θ_H 的正切之比。

(6)让一价氢离子、一价氦离子和二价氦离子的混合物经过同一加速电场由静止加速,然后在同一偏转电场里偏转,它们是否会分为三股?说明理由。

(7)图1 - 78是静电分选的原理示意图。将磷酸盐和石英的混合颗粒由传送带送至两个带电平行板上方中部,经电场区域下落。电场强度为 5×10^5 伏/米。磷酸盐颗粒带正电,石英颗粒带负电,颗粒带电率(即颗粒所带电量与颗粒质量之比)均为 10^{-5} 库/千克。如果要求两种颗粒经电场区域后至少分离10厘米,粒子在电场中通过的竖直距离至少应多长?

第二章 恒定电流

这一章我们在初中所学知识的基础上，进一步学习关于恒定电流的知识。要复习初中所学知识，并在复习中有所提高；又要学习新的知识。欧姆定律和串并联电路的知识是本章的基础，要切实加以掌握，学会用它们分析和解决直流电路的问题。

一、电流

形成电流的条件 我们在初中学过，电荷的定向移动形成电流。要形成电流，首先要有能自由移动的电荷——自由电荷。金属中的自由电子，电解液(酸、碱、盐的水溶液)中的正、负离子，都是自由电荷。在什么条件下，自由电荷才能发生定向移动呢？

当导体内没有电场时，导体中的大量的自由电荷就像气体中的分子一样，不停地做无规则的热运动，朝任何方向运动的机会都一样。对导体的任一横截面来说，在一段时间内从两侧穿过截面的自由电荷都相等(图 2 - 1)，从宏观角度来看，导体中的自由电荷没有定向移动，因而没有电流。

把导体的两端分别接到电源的两极上，导体中就有了电流。电源正极的电势高，负极的电势低，电源的两极间有电势差，也就是有电压。当导体的两端与电源的两极接通时，导体的两端也有了电压，导体中就有了电场。导体中的自由电荷在电场力的作用下定向移动，形成了电流。所以，导体中产生电流的条件是：导体两端存在电压。干电池、蓄电池、发电机等都是电源。电源的作用是保持导体两端的电压，使电路中有持续的电流。

导体中的电流可以是正电荷的定向移动，也可以是负电荷的定向移动，还可以是正、负电荷沿相反方向的定向移动。习惯上规定正电荷的定向移动方向为电流的方向。在金属导体中电流的方向与自由电子定向移动的方向相反。在电解液中，电流的方向与正离子定向移动的方向相同，与负离子定向移动的方向相反。正电荷在电场力的作用下是从电势高处向电势低处移动，所以导体中电流的方向是从电势高的一端流向电势低的一端，即在电源外部的电路中，电流的方向是从电源的正极流向负极。

电流强度 电流有强弱的不同，电流的强弱用电流强度来表示。通过导体横截面的电量 q 跟通过这些电量所用的时间 t 的比值，叫做电流强度，简称电流。用 I 表示电流，有

$$I = \frac{q}{t}$$

在国际单位制中，电流的单位是安培，简称安，国际符号是 A。如果在 1 秒钟内通过导体横截面的电量是 1 库，导体中的电流就是 1 安。电流的常用单位还有毫安(mA)和微安(μ A)。

$$1 \text{ 毫安} = 10^{-3} \text{ 安},$$

$$1 \text{ 微安} = 10^{-6} \text{ 安}$$

方向不随时间而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恒定电流。通常所说的直流电常常是指恒定电流。

思考与讨论

图 2 - 2 中的 AD 表示粗细均匀的一段导体，两端加以一定的电压，导体中的自由电荷沿导体定向移动的速率为 v 。现在设想在导体中取两个横截面 B 和 C，它们之间的距离在数值上等于 v 的大小。在单位时间内截面 B、C 之间的自由电荷将全部通过截面 C。为什么？设导体的横截面积为 S ，导体每单位体积内的自由电荷数为 n ，每个自由电荷所带的电量为 q ，单位时间内通过截面 C 的电量是多少？你能不能求出导体中电流 I 的表达式？

设横截面积为 1.0 毫米^2 的铜导线中通过 1.0 安 的电流。铜在单位体积中的自由电子数为 $8.5 \times 10^{28} \text{ 米}^{-3}$ ，电子的电量为 $1.6 \times 10^{-19} \text{ 库}$ 。可以算出这时自由电子的定向移动速率为 $7.4 \times 10^{-5} \text{ 米/秒}$ (希望你自已算一算)。常温下金属中自由电子热运动的平均速率约为 10^5 米/秒 。可见，在金属导电中，自由电子只不过在速率巨大的无规则热运动上附加了一个速率很小的定向移动。

既然自由电子定向移动的速率很小，为什么合上开关，电流会立即传到远处，使那里的用电器工作呢？这是因为“电流的传播速率”不是自由电子的定向移动速率，而是电场的传播速率。电场的传播速率是很大的，等于光速 ($3 \times 10^8 \text{ 米/秒}$)。金属导线中各处都有自由电子，电路一旦接通，导线中便以 $3 \times 10^8 \text{ 米/秒}$ 的速率在各处迅速地建立起电场，在这个电场作用下，导线中各处的自由电子几乎同时开始做定向移动，整个电路中几乎同时形成了电流。

有人认为，电路接通后，自由电子从电源出发，以定向移动的速率在金属导线中传播，等到它们到达用电器，那里才有电流。这种看法为什么不正确？

练习一

(1) 一导线中通过的电流为 1.6 安 ，在 1 秒 内通过导线某一横截面的电子有多少个？

(2) 原子中的电子绕原子核运动可等效为一环形电流。设氢原子的电子以速率 v 在半径为 r 的轨道上绕核旋转，电子电量为 e ，等效电流有多大？

二、欧姆定律 电阻

欧姆定律 电阻 既然在导体两端加上电压，导体中才有电流，那么导体中的电流跟导体两端的电压有什么关系呢？德国物理学家欧姆(1787~1854)通过实验研究得出结论：导体中的电流 I 跟导体两端的电压 U 成正比，即 $I \propto U$ 。通常把这个关系写作

$$\frac{U}{I} = R$$

式中 R 是电压与电流的比值。实验表明，对同一个导体来说，不管电压和电流的大小怎样变化，比值 R 都是恒定的。对不同的导体来说，R 的数值一般是不同的。这表明，R 是一个跟导体本身有关的量。导体的 R 越大，在同一电压下，通过它的电流越小。可见，比值 R 反映出导体对电流的阻碍作用，叫做导体的电阻。

上面的公式可写成

$$I = \frac{U}{R}$$

这个公式表示，导体中的电流 I 跟导体两端的电压 U 成正比，跟导体的电阻 R 成反比。这就是我们在初中学过的欧姆定律。

电阻的单位是欧姆，简称欧，国际符号是 Ω 。它是根据欧姆定律规定的：如果在某段导体两端加上 1 伏的电压，通过它的电流是 1 安，这段导体的电阻就是 1 欧。1 欧=1 伏/安。常用的电阻单位还有千欧(k Ω)和兆欧(M Ω)。

$$1 \text{ 千欧} = 10^3 \text{ 欧},$$

$$1 \text{ 兆欧} = 10^6 \text{ 欧}.$$

欧姆定律是在金属导体的基础上总结出来的，对其他导体是否适用，要经过实验的检验。实验表明，除金属外，欧姆定律对电解液也适用，但对气态导体(如日光灯管中的汞蒸气)和某些导电元件(如晶体管)并不适用。

导体的伏安特性 导体中电流跟电压的关系还可以用图线来表示。用横轴表示电压 U，纵轴表示电流 I，画出的 U—I 图线叫做导体的伏安特性曲线。在金属导体中，电流跟电压成正比，伏安特性曲线是通过坐标原点的直线(图 2-3)。具有这种伏安特性的电学元件叫做线性元件。图 2-3 中直线的斜率等于导体电阻的倒数，直线的斜率越小，表示电阻越大。同学们自己研究一下，图 2-3 中的两条直线哪一条代表的电阻大。

对欧姆定律不适用的导体或元件，电流与电压不成正比，伏安特性曲线不是直线。这种电学元件叫做非线性元件(图 2-4)。

电阻定律 电阻率 导体的电阻是由导体本身决定的。那么，决定电阻大小的因素有哪些呢？

实验表明，用同一种材料制成的横截面积相等而长度不等的导体，电阻跟导体的长度成正比；长度相等而横截面积不等的导体，电阻跟导体的横截面积成反比。导体的电阻 R 跟它的长度 l 成正比，跟它的横截面积 S 成反比。这就是电阻定律。写成公式，有

$$R = \rho \frac{l}{S}$$

式中的比例系数 ρ 跟导体的材料有关系，是一个反映材料导电性能的物理量，叫做材料的电阻率。横截面积和长度都相等的不同材料的导体， ρ 越大的电阻越大。

式中 $l=1$ 米， $S=1$ 米²时， ρ 的数值等于 R 。可见，材料的电阻率在数值上等于这种材料制成的长 1 米、横截面积 1 米² 的导体的电阻。式中 R 的单位是欧姆， S 的单位是米²， l 的单位是米，所以 ρ 的单位是欧姆·米，简称欧·米，国际符号是 $\Omega \cdot m$ 。

几种材料在 20℃ 时的电阻率

材料	(欧·米)
银	1.6×10^{-8}
铜	1.7×10^{-8}
铝	2.9×10^{-8}
钨	5.3×10^{-8}
铁	1.0×10^{-7}
锰铜 (85%铜+3%镍+12%锰)	4.4×10^{-7}
康铜 (54%铜+46%镍)	5.0×10^{-7}
镍铬合金 (67.5%镍+15%铬+16%铁+1.5%锰)	1.0×10^{-6}

从上表可以看出，纯金属的电阻率小，合金的电阻率较大。连接电路用的导线一般都用电阻率较小的铜或铝来制作，电炉、电阻器的电阻丝一般都用电阻率较大的合金来制作。

各种材料的电阻率都随温度而变化。金属的电阻率随温度升高而增大。利用金属电阻率随着温度升高而增大的特性，可以制成电阻温度计(图 2-5)。常用的电阻温度计是用金属铂做成的。已知铂丝的电阻随温度的变化情况，测出铂丝的电阻，就可以知道温度。有些合金如锰铜和康铜的电阻率几乎不受温度变化的影响，常用来制作标准电阻。

现在我们对金属导电作微观解释。设有一段长度为 l 的导体，两端加以电压 U ，则导体内部有了电场，场强 $E=U/l$ (图 2-6)。自由电子在电场力作用下做定向加速运动，加速度为 $a=Ee/m=eU/ml$ ，其中 e 和 m 分别为电子电量和电子质量。

在金属导体中，除了自由电子，还有金属正离子。运动的自由电子要频繁地跟金属离子碰撞，结果使自由电子的定向移动受到破坏，限制了定向移动速率的继续增加。自由电子在碰撞后向各个方向弹射的机会相等，因而平均说来失去了碰撞前具有的定向移动的特性，可以认为每个自由电子要从新开始做初速为零的定向加速运动(图 2-7)。

自由电子与离子相继两次碰撞的时间，即电子的自由飞行时间，有长有短。对大量电子的频繁碰撞来说，设电子的平均自由飞行时间为 τ 。电子在一次碰撞后定向移动速率变为零，到下一次碰撞前获得的定向移动速率为 $v = a\tau$ ，在时间 τ 内定向移动的平均速率为 $\bar{v} = v/2 = a\tau/2 = eU/2ml$ 。可见，自由电子定向移动的平均速率 \bar{v} 与电压 U 成正比。可以认为，

所有电子都以这个平均速率做定向移动，在金属导体中形成电流。

在前一节的学习中你一定已经推导出电流强度 I 与定向移动速率 v 的关系： $I=nevS$ 。这表示电流 I 与自由电子定向移动速率 v 成正比，而 v 与 U 成正比，由此可知 I 与 U 成正比。这就是金属导电的宏观规律——欧姆定律所表达的内容。

前面说过，电阻反映导体的阻碍作用，从微观角度看，就是自由电子与离子碰撞引起的对电子定向移动的破坏作用。

练习二

(1) 某电流表可测量的最大电流是 10 毫安。已知一个电阻两端的电压是 8 伏时，通过的电流是 2 毫安。如果给这个电阻加上 50 伏的电压，能否用这个电流表测量通过这个电阻的电流？

(2) 画出电阻为 5 欧的导体的伏安特性曲线。当导体的电阻增大为 10 欧时，图线将怎样变化？电阻减小为 2.5 欧时又怎样？

(3) 一卷铝导线长 100 米，横截面积为 1 毫米²，这卷导线的电阻是多大？

(4) 有一段导线，电阻是 4 欧，把它对折起来作为一条导线用，电阻是多大？如果把它均匀拉长到原来的两倍，电阻又是多大？

(5) 用横截面积为 0.63 毫米²、长 200 米的铜线绕制一个线圈。这个线圈容许通过的最大电流是 8.0 安，线圈两端最多能加多高的电压？

(6) 滑动变阻器的结构如图 2 - 8 所示。A、B 是绕在绝缘筒上的电阻丝的两个端点，C、D 是金属杆的两个端点。滑动电阻丝接触处导线上的绝缘漆已刮去，可滑动的滑片 P 把金属杆与电阻丝连接起来。如果把 A 和 C 接线柱接入电路中，当滑片 P 由 B 向 A 移动时，接入电路的电阻由大变小，这是为什么？你是否可以设计出另外几种方案，使滑片 P 移动时，接入电路的电阻由大变小？

三、电功和电功率

电功和电功率 电流通过一段电路时,自由电荷在电场力作用下发生定向移动,电场力对自由电荷做功。设一段电路两端的电压为 U ,通过的电流为 I 。在时间 t 内通过这段电路任一横截面的电量为 q (图 2 - 9),这相当于在时间 t 内将电荷 q 由这段电路的一端移到另一端。从上一章讲的可知,电场力所做的功 $W=qU$,由于 $q=It$,所以

$$W=UIt \quad (1)$$

在一段电路中电场力所做的功,就是通常说的电流所做的功,简称电功。上式表示电流在一段电路上所做的功 W ,等于这段电路两端的电压 U 、电路中的电流 I 和通电时间 t 三者的乘积。

单位时间内电流所做的功叫做电功率。用 P 表示电功率,则有

$$P = \frac{W}{t} = UI \quad (2)$$

上式表示,一段电路上的电功率 P ,等于这段电路两端的电压 U 和电路中电流 I 的乘积。

若电压 U 、电流 I 和通电时间 t 的单位分别是伏特、安培和秒,则由(1)式和(2)式求出的电功 W 和电功率 P 的单位分别是焦耳和瓦特。

电功率和热功率 电场力对电荷做功的过程,就是电能转化为其他形式能量的过程。在真空中,正电荷由电势高的一处移向电势低的另一处时,电场力对电荷做正功,电荷做加速运动,减少的电势能转化为电荷的动能。而在电阻元件中电能的转化情况与真空中有所不同。例如在金属导体中,除了自由电子,还有金属正离子。在电场力作用下做加速定向移动的自由电子要频繁地与离子发生碰撞,并把定向移动的动能传给离子,使离子的热运动加剧。平均起来看,可以认为大量自由电子以某一速率做定向移动。可见,在电阻元件中,通过自由电子与离子的碰撞电能完全转化成内能。

如果在一段电路中只有电阻元件,电场力在这段电路中所做的功 W 等于电流通过这段电路时所发的热量 Q ,即 $Q=W=UIt$ 。由欧姆定律 $U=IR$,热量 Q 的表达式可写成

$$Q = I^2 Rt \quad (3)$$

这个关系最初是由焦耳由实验直接得到的,这就是我们在初中学过的焦耳定律。

因为 $P=W/t=Q/t$,所以由(3)式可得出单位时间内发热的功率——热功率:

$$P=I^2 R. \quad (4)$$

(1)式和(3)式,或者(2)式和(4)式,意义是不同的。(2)式表示输入给一段电路的全部电功率,或者说在这段电路上消耗的全部电功率。(4)式是这段电路上因发热而消耗的功率。在电路中只有电阻元件时,二者是相等的(图 2 - 10)。电路中有电动机、电解槽等用电器时,电能要分别转化成机械能、化学能等,只有一部分转化成内能,电功率大于热功率,二者并不相等。

类比：物体在真空中自由下落时，重力势能转化为动能；物体在粘滞性较大的液体中匀速下落时，重力势能通过克服液体阻力而转化成内能。

例如一台电动机，额定电压是 220 伏，线圈电阻是 0.4 欧，在额定电压下通过的电流是 50 安。在额定电压下输入给电动机的电功率 $P=UI=11$ 千瓦，热功率 $P=I^2R=1$ 千瓦，大部分电能(功率为 10 千瓦)转化成机械能(图 2 - 11)。

练习三

(1)日常使用的电功单位是千瓦时(俗称“度”)，等于功率为 1 千瓦的电流在 1 小时内做的功。千瓦时等于多少焦耳？

(2)有两个额定电压是 220 伏的灯泡，一个功率为 40 瓦，一个为 100 瓦。

- 正常发光时，哪个灯泡的电阻大？电阻各是多少？
- 把它们改接在 110 伏的电压上，哪个功率大？各是多少？
- 把它们串联后，接在 220 伏的电压上，哪个功率大？各是多少？

回答 b、c 两问时，不考虑温度对电阻的影响，即认为灯泡的电阻仍为正常发光时的电阻。

(3)在电阻器上除了标明电阻值，还标明额定功率值。这是它工作时允许消耗的最大功率，超过这个功率，电阻器会被烧坏。有一个“2 千

欧 $\frac{1}{4}$ 千瓦”的电阻器，求：

- 允许加在这个电阻器上的最大电压是____伏。
- 这个电阻器上能通过的最大电流是____安。
- 给这个电阻器加上 10 伏的电压时，它消耗的功率是____瓦。

(4)输电线的电阻共计 1.0 欧，输送的电功率是 100 千瓦。用 400 伏的低压送电，输电线上发热损失的功率是多少千瓦？改用 1 万伏的高压送电呢？

(5)用功率为 2 千瓦的电炉把 2 千克的水从 20 加热到 100 如果电炉的效率为 60%，需要多少时间？水的比热为 4.2×10^3 焦/(千克·)。

四、串联电路和并联电路

串联电路 把若干个电阻或电学元件一个接一个地连接起来，这种连接方式叫做串联。图 2 - 12 是由三个电阻组成的串联电路。在串联电路中，电流只能沿着一条通路流过各个电阻，所以串联电路中各处的电流相同。

电流通过串联电路的各个电阻时，沿电流方向每通过一个电阻，电势要降低一定的数值，因此电阻两端的电压又叫做电势降。电流在各电阻上的电势降之和等于串联电路两端的电势降，即等于串联电路两端的电压(图 2 - 13)。串联电路两端的电压等于各电阻两端的电压之和。设串联电路有 n 个电阻，则有

$$U=U_1+U_2+\dots+U_n \quad (1)$$

串联电路中的 n 个电阻可以用一个电阻 R 来代替，电阻 R 连入电路中时，在相同的电压下，通过电路的电流跟原来的相同(图 2 - 14)。电阻 R 叫做串联电路的等效电阻或总电阻。根据欧姆定律， $U_1=IR_1$ ， $U_2=IR_2$ ……

$U_n=IR_n$ 。代入(1)中得

$$U=I(R_1+R_2+\dots+R_n)。$$

由此得
$$R = \frac{U}{I} = R_1 + R_2 + \dots + R_n。 \quad (2)$$

上式表示，串联电路的总电阻等于各电阻之和。

由 $U_1 = IR_1$ ， $U_2 = IR_2$ …… $U_n = IR_n$ 。可得

$$\frac{U_1}{R_1} = \frac{U_2}{R_2} = \dots = \frac{U_n}{R_n} = I \quad (3)$$

上式表示，串联电路中电压的分配与电阻成正比。串联电路中的每个电阻都分担了一部分电压，阻值越大的电阻，分担的电压越大。

各个电阻上消耗的功率分别为 $P_1=I^2R_1$ ， $P_2=I^2R_2$ …… $P_n=I^2R_n$ 由此可得

$$\frac{P_1}{R_1} = \frac{P_2}{R_2} = \dots = \frac{P_n}{R_n} = I^2 \quad (4)$$

上式表示，串联电路中功率的分配与电阻成正比。在串联电路中，阻值越大的电阻，消耗的功率越大。

试证明：在纯电阻电路中，串联电路上消耗的总功率 $P=UI$ 等于各个电阻上消耗的热功率之和。

[例题 1] 有一盏弧光灯，额定电压 $U_1=40$ 伏，正常工作时通过的电流 $I=5.0$ 安(图 2 - 15 甲)，应该怎样把它连入 $U=220$ 伏的家庭电路中，它才能正常工作？

分析和解答 不能直接把弧光灯连入家庭电路中，因为家庭电路的电压比弧光灯的额定电压高得多。要使弧光灯在家庭电路中正常工作，需要在弧光灯上串联一个电阻 R_2 ，分掉多余的电压(图 2 - 15 乙)。

要分掉的电压 $U_2=U-U_1=180$ 伏。弧光灯的电阻 $R_1=U_1/I=8$ 欧。由串联电

路中的电压分配关系可以求出

$$R_2 = \frac{U_2}{U_1} R_1 = 36 \text{ 欧}$$

这道例题告诉我们，串联电阻可以分担一部分电压，使额定电压低的用电器能连到电压高的线路上使用。串联电阻的这种作用叫做分压，作这种用途的电阻叫做分压电阻。

并联电路 把若干个电阻或电学元件并列地连接起来，这种连接方式叫做并联。图 2 - 16 是由三个电阻组成的并联电路。并联电路的各支路有两个公共连接点 A 和 B，支路中每个电阻两端的电压都等于 A、B 两点间的电压，所以并联电路各支路两端的电压相同。

实验表明，流入 A 点的电流 I 等于从该点流出的电流 I_1 、 I_2 、 I_3 之和，即并联电路干路中的电流等于各支路的电流之和。设并联电路有 n 个支路，则有

$$I = I_1 + I_2 + \dots + I_n \quad (1')$$

并联的 n 个电阻也可以用一个电阻 R 来代替，把电阻 R 连在两个公共连接点上，在相同的电压下，干路中的电流不变(图 2 - 17)。电阻 R 叫做并联电路的等效电阻或总电阻。根据欧姆定律， $I_1 = U/R_1$ ， $I_2 = U/R_2$ …… $I_n = U/R_n$ 。代入(1')中得

$$I = U \left(\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} + \dots + \frac{1}{R_n} \right)$$

$$\text{由此得} \quad \frac{1}{R} = \frac{1}{U} = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} + \dots + \frac{1}{R_n} \quad (2')$$

上式表示，并联电路总电阻的倒数等于各电阻倒数之和。

试证明：并联电路的总电阻比并联的每个电阻都小。想一想，这一结论有什么实际应用。

由并联电路各支路两端的电压 U 相同，以及欧姆定律可得

$$I_1 R_1 = I_2 R_2 = \dots = I_n R_n = U. \quad (3')$$

上式表示，并联电路各支路中电流的分配与电阻成反比。支路中的电阻越小，通过的电流越大。

各支路电阻上消耗的功率分别为 $P_1 = U^2/R_1$ ， $P_2 = U^2/R_2$ …… $P_n = U^2/R_n$ ，由此可得

$$P_1 R_1 = P_2 R_2 = \dots = P_n R_n = U^2 \quad (4')$$

上式表示，并联电路各支路中电流的分配与电阻成反比。由这个功率分配关系知道，并联在家庭电路中的额定电压相同(220 伏)的灯泡，额定功率大的，灯丝电阻小。这一点我们在初中已经学过。

试证明：在纯电阻电路中，并联电路上消耗的总功率 $P = UI$ 等于各个电阻上消耗的热功率之和。

[例题 2] 有一个电阻元件 R_1 ，阻值为 100 欧，允许通过的最大电流为 5 毫安。在图 2 - 18 所示的并联电路中，已知干路中的电流 $I=1A$ ，并联电阻 R_2 应为多大？

分析和解答 要使通过 R_1 的电流 $I_1=5$ 毫安，在 R_2 中分去的电流应为 $I_2=I-I_1=995$ 毫安。由并联电路中的电流分配关系可以求出

$$R_2 = \frac{I_1}{I_2} R_1 = 0.5 \text{ 欧}$$

如果 $R_2 > 0.5$ 欧， R_1 中的电流将超过 5 毫安，所以答案应为 $R_2 = 0.5$ 欧。

这道例题告诉我们，如果电路中的电流超过某个元件所能允许的最大电流，并联一个适当的电阻，就可以使通过元件的电流减小到允许的数值。并联电阻的这种作用叫做分流，作这种用途的电阻叫做分流电阻。

练习四

(1) 图 2 - 19 所示的电路中，哪些可以化为串并联的组合，哪些不能？

(2) 在图 2 - 20 所示的电路中，求下列几种情况下 ab 间的等效电阻 R_{ab} 。

- a. S_1 和 S_2 都断开。
- b. S_1 合上， S_2 断开。
- c. S_1 断开， S_2 合上。
- d. S_1 和 S_2 都合上。

(3) 在图 2 - 21 所示的电路中，加在 ab 上的电压为 100 伏，已知 $R_4=80$ 欧，测得 R_4 两端的电压为 40 伏，求 ac 间的等效电阻 R_{ac} 。

(4) 在图 2 - 22 所示的电路中，已知 $R_1=200$ 欧，通过 R_1 的电流 $I_1=0.2$ 安，通过整个电路的电流 $I=0.8$ 安，求 cd 间的等效电阻 R_{cd} 。

(5) 在图 2 - 23 所示的串联电路中，保持 ab 上的电压 U 不变，当增大 R_1 的阻值时，

- a. R_1 和 R_2 上的电压 U_1 和 U_2 各怎样变化？增大还是减小？
- b. R_1 和 R_2 消耗的功率 P_1 和 P_2 各怎样变化？增大还是减小？
- c. 串联电路上消耗的总功率怎样变化？增大还是减小？

(6) 在图 2 - 24 所示的并联电路中，保持干路上的电流 I 不变，当增大 R_1 的阻值时，

- a. R_1 和 R_2 上的电压 U 怎样变化？增大还是减小？
- b. R_1 和 R_2 上的电流 I_1 和 I_2 各怎样变化？增大还是减小？
- c. 并联电路上消耗的总功率怎样变化？增大还是减小？

(7) 试证明：在任一个可化为串并联组合的电路中，任一个电阻的阻值增大时，整个电路的等效电阻都增大。

(8) 在图 2-25 所示的电路中， $R_1=2$ 欧， $R_2=8$ 欧， $R_3=1$ 欧， $R_4=4$ 欧，ab 间的电压为 10 伏，a 的电势为 10 伏，b 的电势为 10 伏。

a . c 点和 d 点的电势各是多少伏？

b . 如果在 cd 之间连入一个 $R=10$ 欧的电阻，电路各部分的电压和电流是否发生变化？

c . 如果在 cd 之间连入一根导线($R=0$)，电路各部分的电压和电流是否发生变化？

(9)如图 2 - 26 所示，线路的电压 $U=220$ 伏，每条输电线的电阻 $r=5$ 欧，电炉 A 的电阻 $R_A=100$ 欧，求电炉 A 上的电压和它消耗的功率。如果再并联一个阻值相同的电炉 B，两个电炉上的电压和每个电炉消耗的功率各是多少？

(10)在图 2 - 27 所示的电路中，L 是跟 R_2 并联的一条导线。下列说法哪些是正确的？

A . 通过 R_1 、 R_2 的电流 I 相等： $I = \frac{U}{R_1 + R_2}$ 。

B . R_1 上的电压 $U_1=R_1 I$ ， R_2 上的电压 $U_2=R_2 I$ ，导线 L 中的电流为零。

C . R_1 上的电压 $U_1=U$ ， R_2 上的电压为零。

D . R_1 中的电流 $I_1 = \frac{U}{R_1}$ ，导线 L 中的电流等于 I_1 ， R_2 中的电流为零。

E . R_2 去掉后，电路中的电阻和电流不发生变化。

五、电压表和电流表

电压表和电流表 常用的电压表和电流表都是由小量程的电流表的表头改装而成的。常用的电流表头主要由永久磁铁和放入永久磁铁磁场中的可转动的线圈组成。线圈中有电流通过时，线圈在磁场力的作用下带着指针一起偏转。电流越大，指针偏转的角度越大，由指针在标有电流值的刻度盘上所指的位置就可以读出通过表头的电流值。由欧姆定律知道，通过表头的电流跟加在表头两端的电压成正比。如果在刻度盘上标出电压值。由指针所指的位置就可以读出加在表头两端的电压值。

电流表的电阻 R_g 通常叫做电流表的内阻。指针偏转到最大刻度时的电流 I_g 叫做电流表的满偏电流。电流表通过满偏电流时，加在电流表两端的电压 U_g 叫做满偏电压。由欧姆定律可知， $U_g = I_g R_g$ (图 2 - 28)。

电流表的满偏电压和满偏电流一般都比较小，测量较大电压时要串联分压电阻把电流表改装成电压表，测量较大电流时要并联分流电阻把小量程的电流表改装成大量程的电流表。

[例题 1] 有一电流表，内阻 $R_g = 10$ 欧，满偏电流 $I_g = 3$ 毫安。把它改装成量程为 3 伏的电压表，要串联一个多大的分压电阻？

分析和解答 电压表由电流表(也叫表头)和分压电阻 R 组成，如图 2 - 29 中虚线框内所示。所谓量程为 3 伏，意思是当电压表两端的电压 $U = 3$ 伏时，表头分担的电压为满偏电压 U_g ，通过表头的电流为满偏电流 I_g ，指针指在最大刻度处，而最大刻度直接标以 3V。

满偏电压 $U_g = I_g R_g = 0.03$ 伏。分压电阻 R 分担的电压应为 $U_R = U - U_g = 2.97$ 伏。由串联电路中的电压分配关系可以求出 R ：

$$R = \frac{U_R}{U_g} R_g = 990 \text{ 欧。}$$

电压表的内阻 R_V 等于 R_g 和 R 串联时的总电阻，即 $R_V = R_g + R = 1000$ 欧。

[例题 2] 有一电流表，内阻 $R_g = 25$ 欧，满偏电流 $I_g = 3$ 毫安。把它改装成量程为 0.6 安的电流表，要并联一个多大的分流电阻？

分析和解答 电流表由表头和分流电阻 R 组成，如图 2 - 30 中虚线框内所示。所谓量程为 0.6 安，意思是通过电流表的电流 $I = 0.6$ 安时，通过表头的电流为满偏电流 I_g ，最大刻度直接标以 0.6A。

这时通过分流电阻 R 的电流 $I_R = I - I_g = 0.597$ 安。由并联电路中的电流分配关系可以求出 R ：

$$R = \frac{I_g}{I_R} R_g = 0.126 \text{ 欧。}$$

电流表的内阻 R_A 等于 R_g 和 R 并联时的总电阻。你自己算一算本题中电流表的内阻是多大。

电流表和电压表内阻对测量的影响 要测量图 2-31 甲所示电路中通过电阻 R_1 (或 R_2) 的电流 I ，必须把电流表串联在电路中，组成乙图所示的电路。电流表有内阻 R_A ，连入电路后，改变了电路中的电流(增大还是

减小?)，电流表测出的是改变后的电流 I' ，因而使测量产生误差。 R_A 比 $R=R_1+R_2$ 小得越多，误差越小。电流表的内阻都很小，在 R_A 比 R 小得多且测量不要求十分精确的情况下，可不考虑这一误差，而认为电流表的内阻 $R_A=0$ ， $I=I'$ 。

要测量图 2-32 甲所示电路中电阻 R_1 两端的电压 U_1 ，必须把电压表与 R_1 并联在电路中，组成乙图所示的电路。

电压表有内阻 R_V ，连入电路后，改变了电压分配，电压表测出的是改变后的电压 U_1' (U_1' 比 U_1 大还是小?)，因而产生误差。 R_V 比 R_1 大得越多，误差越小。电压表的内阻都很大，如果 R_V 比 R_1 大得多且不要求十分精确，可不考虑这一误差，而认为 $R_V=\infty$ ， $U_1=U_1'$ 。

在本书中除非特别提到，在一般测量中均可认为 $R_A=0$ ， $R_V=\infty$ 。

[例题 3] 在图 2-32 所示的电路中， $R_1=R_2=50$ 欧， $U=50$ 伏。在未连入电压表时， R_1 两端的电压 U_1 是多大? 用内阻 $R_V=2$ 千欧的电压表来测量，测量的结果 U_1' 应为多大? 用内阻 $R_V=50$ 千欧的电压表来测量， U_1' 应为多大?

分析和解答 因为 $R_1=R_2$ ，所以 $U_1=U/2=25$ 伏。连入 $R_V=2$ 千欧的电压表时，电压表与 R_1 并联的等效电阻 $R_{\text{并}} = \frac{R_1 R_V}{R_1 + R_V} = 48.8$ 欧，电路的总电阻 $R_{\text{总}} = R_{\text{并}} + R_2 = 98.8$ 欧。由串联电路的电压分配关系可求得

$$U_1' = \frac{R_{\text{并}}}{R_{\text{总}}} U = 24.7 \text{ 伏}$$

这时误差较大。同样可以求出 $R_V=50$ 千欧时 $U_1'=24.99$ 伏，与 25 伏接近，误差较小。

思考与讨论

用电压表测出电阻两端的电压 U ，用电流表测出通过电阻的电流 I ，根据欧姆定律就可以求出电阻 $R=U/I$ 。这种测量电阻的方法叫做伏安法。电路图如图 2-33 所示。

如果不考虑电表的内阻，即认为 $R_V=\infty$ ， $R_A=0$ ，用图 2-33 甲和乙两种接法测出的电阻应该是相等的。但实际上电表有内阻，测出的电阻值与真实值不同。

a. 用哪种接法测出的电阻值比真实值大? 哪种接法测出的电阻值比真实值小? 说明理由。

b. 待测电阻的阻值比电压表的内阻小得越多，采用图甲的接法引起的误差越小; 待测电阻的阻值比电流表的内阻大得越多，采用图乙的接法引起的误差越小。说明理由。

六、滑动变阻器

我们在初中已经学过滑动变阻器，在前面的练习二中又作了复习。滑动变阻器有两种用途。一个用途是限流，即用来控制电路中的电流，电路的连接方法如图 2 - 34 所示。移动滑片 P 可以改变连入电路中的电阻值，从而可以控制负载 R 中的电流。滑片 P 移到变阻器的 B 端时，连入电路中的电阻最大，电路中的电流最小。因此，在接通电源之前，应把 P 移至 B 端，以保证安全。

另一个用途是分压，即用来调节负载 R 上的电压，电路的连接方法如图 2 - 35 甲所示。移动滑片 P 可以改变加在负载 R 上的电压。

[例题]在图 2 - 35 甲所示的电路中， $U=6$ 伏，变阻器的电阻 $R'=50$ 欧，负载电阻 $R=100$ 欧。(1)滑片 P 移到 A 端时，R 上的电压是多大？滑片 P 移到 B 端时 R 上的电压是多大？滑片 P 在 AB 的中点时 R 上的电压是多大？(2)滑片从 A 端向 B 端移动时，R 上的电压怎样变化？

分析和解答 R' 由两部分组成，一部分是 AP 间的电阻 r_1 ，另一部分是 PB 间的电阻 r_2 ，且 $R'=r_1+r_2$ 。为清楚起见，图 2 - 35 甲所示的电路可改画成如乙图所示。

滑片 P 移到 A 端时， $r_1=0$ ， $r_2=R'$ 。此时 R 被短路，电压 U 全部加在 $r_2=R'$ 上，R 上的电压 $U_R=0$ 。

滑片 P 移到 B 端时， $r_2=0$ ， $r_1=R'$ 与 R 并联在电源上，所以 $U_R=U=6$ 伏。

滑片 P 在中点时， $r_1=r_2=R'/2=25$ 欧。 r_1 与 R 并联，等效电阻 $R_{并}=\frac{Rr_1}{R+r_1}=20$ 欧。 $R_{并}$ 与 r_2 串联在电路中（丙图），由串联电路的电压分配

关系可求得 $U_R = \frac{R_{并}}{R_{并} + r_2} = 2.7$ 伏。

滑片 P 从 A 端向 B 端移动时， r_1 增大，因而 $R_{并}$ 增大，同时 r_2 减小。所加电压 U 不变，由串联电路的电压分配关系可知加在负载 R 上的电压增大。

练习五

(1)已知电流表的内阻 $R_g=120$ 欧，满偏电流 $I_g=3$ 毫安。要把它改装成量程是 6 伏的电压表，应串联多大的电阻？要把它改装成量程是 3 安的电流表，应并联多大的电阻？

(2)如果给电压表串联一个阻值等于电压表内阻的电阻，它的量程变为多大？刻度盘上的数字(图 2 - 36 甲)应怎么改？

如果给电流表并联一个阻值等于电流表内阻的电阻，它的量程变为多大？刻度盘上的数字(图 2 - 36 乙)应怎么改？

(3)一个量程为 150 伏的电压表，内阻为 20 千欧，把它与一高电阻串

联后接在 110 伏的电路上,电压表的读数是 5 伏。高电阻的阻值是多少?(这是测量高电阻的一种方法)

(4)如果电流表的内阻 $R_A=0.03$ 欧,电压表的内阻 $R_V=2.0$ 千欧,要测量的电阻 R 大约为 1.5 千欧,采用图 2-33 中哪种联接方法误差较小?如果要测量的电阻 R 大约为 20 欧,采用哪种联接方法误差较小?

(5)为了控制电动机里电磁铁磁性的强弱,有时给电磁铁线圈串联一个变阻器,电路如图 2-37 所示。电磁铁线圈的电阻 $R=310$ 欧,当电压为 220 伏时,要求 R 中的电流在 0.35 ~ 0.7 安的范围内变化,应选下述规格变阻器的哪一种?

A . 0 ~ 1000 欧, 0.5 安。

B . 0 ~ 200 欧, 1 安。

C . 0 ~ 350 欧, 1 安。

D . 0 ~ 200 欧, 2 安。

(6)现有 L_1 、 L_2 两盏分别为“110 伏 60 瓦”和“110 伏 40 瓦”的灯泡,如果把它们接在 220 伏的电源上,并使它们正常发光,需要在电路中接入一个变阻器。

a . 图 2-38 的几种电路,哪种连接方法正确?

b . 在正确的连接方法中,哪种消耗的功率小?

c . 你还能设计出别的正确连接方法吗?

七、闭合电路的欧姆定律

这一节我们研究闭合电路中的电压、电流、功率等问题。为此，需要先介绍一个表征电源特性的物理量——电动势。

电动势 电源有两个极，正极的电势比负极的高，两极间有一定的电压。不同的电源，两极间电压的大小不同。用伏特表测量不同型号的干电池，两极间的电压都是 1.5 伏；测量不同型号的铅蓄电池，两极间的电压都是 2 伏。可见，电源两极间电压的大小是由电源本身的性质决定的。为了表征电源的这种特性，物理学中引入了电动势的概念。电源的电动势，等于电源没有接入电路时两极间的电压。电源的电动势用符号 \mathcal{E} 来表示。电动势的单位跟电压的单位相同，也是伏特。

路端电压 把电源接入电路，闭合电路中有了电流，再将伏特表连接到电源的两极间(图 2 - 39)，可以看到伏特表的示数小于电源的电动势。为什么会产生这种现象呢？

闭合电路可以看作是由两部分组成的。一部分是电源外部的电路，叫外电路。外电路的电阻有时称为外电阻。另一部分是电源内部的电路，叫内电路。内电路也有电阻。电流通过内电路时，例如通过发电机电枢的导线或通过电池。

内部的溶液时，都要受到阻碍作用。内电路的电阻通常叫做电源的内阻。

闭合电路中有电流通过时，不但在外电阻上有电势降，在内阻上也有电势降。现在我们来分析内、外电路上的电势降与电源电动势的关系。

设想内阻 $r=0$ ，则内阻上没有电势降。图 2 - 40 表示在这种情况下闭合电路中电势的升降。在电源内部，由负极到正极电势升高，升高的数值等于电源的电动势。在外电阻上沿电流方向有电势降，降落的数值也等于电源的电动势。外电路上的电势降，即外电路两端的电压，通常叫做路端电压。可见，如果电源的内阻 $r=0$ ，则不论有无电流以及电流是多大，路端电压 U 也不会发生变化，总等于电源的电动势。这样的电源叫做理想电压源。

一个有内阻 r 的实际电源可以等效为一个电动势等于 \mathcal{E} 的理想电压源与一个阻值等于 r 的电阻相串联，如图 2 - 41 所示。图 2 - 39 中电压表测出的路端电压小于电动势，就是因为电源的内阻不为零，因而内阻上有电势降的缘故。图 2 - 42 表示在这种情况下闭合电路中电势的升降。在电源内部，由负极到正极电势升高，升高的数值等于电源的电动势，同时在内阻上有电势降 Ir (I 为闭合电路中的电流)。路端电压 U 等于电源的电动势 \mathcal{E} 减去内阻上的电势降 Ir ，即

$$U = \mathcal{E} - Ir \quad (1)$$

闭合电路中的电流 设外电阻为 R ，闭合电路中的电流为 I ，则路端电压 $U=IR$ 。代入(1)式中得 $IR = \mathcal{E} - Ir$ ，由此可求出闭合电路中的电流

$$I = \frac{\mathcal{E}}{R + r} \quad (2)$$

上式表示，闭合电路中的电流跟电源的电动势成正比，跟内、外电路中的电阻之和成反比。这个结论通常叫做闭合电路的欧姆定律。

由(1)式和(2)式我们可以进一步讨论路端电压跟外电阻 R 的关系。当 R 增大时，由(2)式可知 I 减小，由(1)式可知内阻上的电势降 $I r$ 减小，路端电压 U 增大。当外电路断开时， R 变为无限大， I 变为零， $I r$ 也变为零， $U = \mathcal{E}$ ，即断路时的路端电压等于电源的电动势。

当 R 减小时，由(2)式可知 I 增大，由(1)式可知 $I r$ 增大，路端电压 U 减小。当外电路短路时， R 趋近于零，由(2)式可知 I 趋近于 \mathcal{E} / r ，由(1)式可知路端电压趋近于零。电源的内阻一般都很小，例如铅蓄电池的内阻只有 $0.005 \sim 0.1$ 欧，所以短路时电流很大。电流太大会烧坏电源，还可能引起火灾。

图 2 - 39 中当变阻器的滑片向左移动时，电压表的示数怎样变化？滑片向右移动时，电压表的示数怎样变化？

图 2 - 43 是路端电压 U 与电流 I 的关系曲线，也就是(1)式的函数图象。这种关系曲线反映出化学电源的特性，是一条向下倾斜的直线。当 $R = \infty$ 时， $I = 0$ ， $U = \mathcal{E}$ 。随着 R 的减小， I 逐渐增大， U 逐渐减小。直线倾斜的程度跟内阻 r 有关系。内阻越大，倾斜得越厉害。内阻越小，这条直线越平；内阻趋于零时，这条直线趋近于跟横轴平行，这相当于前面提到的理想电压源。

思考与讨论

前面说过，用电压表测出的断路时的路端电压就是电源的电动势。可是，测定时电压表本身成了外电路。电压表测出的路端电压严格地等于电源的电动势吗？如果不要求十分准确，能用这个办法测定电动势吗？

电池的内阻一般只有几欧甚至更小，电压表的内阻为几千欧以至几十千欧。这里提供的数据，有助于你思考上面的问题。

闭合电路中的功率 在 $\mathcal{E} = U + I r = I R + I r$ 的两端乘以电流 I ，得到

$$I \mathcal{E} = U I + I^2 r = I^2 R + I^2 r \quad (3)$$

上式中 $U I$ 是电源向外电路输出的电功率， $I^2 R$ 是外电阻上消耗的热功率，由于这里讨论的是纯电阻电路，所以二者相等。 $I^2 r$ 是内阻上消耗的热功率。电源是把其他形式的能量转化为电能的装置， $I \mathcal{E}$ 是单位时间内电源提供的电能。根据能量守恒定律，电源提供的电能，一部分消耗在内阻上，其余部分输出到外电路中。从能量观点来看，电动势越大，表示电源把其他形式的能量转化为电能的本领越大。

练习六

(1) 电源的电动势为 1.5 伏，内阻为 0.12 欧，外电路的电阻为 1.28

欧，求电路中的电流和路端电压。

(2) 电源的电动势为 2.0 伏，外电阻为 9.0 欧时，路端电压为 1.8 伏，求电源的内电阻。

(3) 电源的电动势为 4.5 伏，内阻为 0.5 欧，外电路的电阻为 4.0 欧，路端电压是多大？如果在外电路上并联一个 6.0 欧的电阻，路端电压又是多大？如果 6.0 欧的电阻不是并联而是串联在外电路中，路端电压又是多大？

(4) 利用图 2 - 44 所示的电路可以测出电源的电动势和内阻。当变阻器的滑片在某一位置时，安培表和伏特表的读数分别是 0.20 安和 1.98 伏。改变滑片的位置后，两表的读数分别是 0.40 安和 1.96 伏。求电池的电动势和内阻。

(5) 许多人造卫星都用太阳能电池供电。太阳能电池由许多片电池板组成。某电池板的开路电压是 600 微伏，短路电流是 30 微安。求这块电池板的内阻。

(6) 有 10 个相同的蓄电池，每个蓄电池的电动势为 2.0 伏，内阻为 0.04 欧。把这些蓄电池串联起来组成电池组(图 2 - 45)，外接电阻为 3.6 欧。求电路中的电流和电池组两端的电压。

提示：串联电池组的电动势等于各个电池的电动势之和，串联电池组的内阻等于各个电池的内阻之和。

(7) 在图 2 - 46 所示的电路中，电源是用 4 节电池连成的串联电池组，每节电池的电动势为 1.5 伏，内阻为 1 欧， $R_1=8$ 欧， $R_2=8$ 欧， $R_3=4$ 欧。 R_1 上的电流 $I_1=$ ___安， R_2 上的电流 $I_2=$ ___安， R_3 上的电流 $I_3=$ ___安。

(8) 在图 2 - 47 所示的电路中，电源的电动势为 \mathcal{E} ，内阻为 r 。当变阻器的滑片 P 向 b 点移动时，伏特表 V_1 的示数 U_1 和伏特表 V_2 的示数 U_2 的变化情况是

- A . U_1 变大， U_2 变小。
- B . U_1 变大， U_2 变大。
- C . U_1 变小， U_2 变小。
- D . U_1 变小， U_2 变大。

八、专题 多用电表的原理和使用

(一)原理

多用电表(通常叫万用表)能够测量直流电流、直流电压、电阻、交流电压等,并且每种测量都有几个量程。多用电表具有用途多、量程广、使用方便等优点,因而有广泛的应用。

多用电表由一只灵敏的直流电流表(表头)与若干元件组成测量电路,每进行一种测量时,只使用其中一部分电路,其他部分不起作用。下面通过一个具体实例说明它的原理。

问题

现有一表头,满偏电流 $I_g=500$ 微安,内阻 $R_g=200$ 欧。用它作多用电表的表头,要求多用电表具有下列各项量程:

- (1)0~1 毫安的直流电流挡。
- (2)0~10 毫安的直流电流挡。
- (3)0~50 伏的直流电压挡。
- (4)0~500 伏的直流电压挡。
- (5)内阻为 1.5 千欧的电阻挡。

应该怎样设计这个简易多用电表的整个电路呢?

直流电流挡

直流电流挡的电路如图 2-48 所示。当公共端与 1mA 端接入被测电路中时,量程为 $I_1=1$ 毫安。当公共端与 10mA 端接入被测电路中时,量程为 $I_2=10$ 毫安。

当公共端与 1mA 端接入被测电路时,电阻 R_1 和 R_2 串联,再与表头内阻 R 并联。由并联电路中的电流分配关系可以求出

$$\begin{aligned} R_1 + R_2 &= \frac{I_g}{I_1 - I_g} R_g = \frac{500 \times 10^{-6}}{1 \times 10^{-3} - 500 \times 10^{-6}} \times 200 \text{ 欧} \\ &= 200 \text{ 欧} \end{aligned} \quad (1)$$

当公共端与 10mA 端接入被测电路时,电阻 R_1 与表头支路的电阻 R_g+R_2 并联。由并联电路的特点可知

$$I_g(R_g+R_2)=(I_2-I_g)R_1$$

代入 $I_g=500 \times 10^{-6}$ 安, $I_2=10 \times 10^{-3}$ 安, $R_g=200$ 欧, 可得

$$R_2+200 \text{ 欧}=19R_1 \quad (2)$$

由(1)(2)两式可解得

$$\begin{aligned} R_1 &= 20 \text{ 欧}, \\ R_2 &= 1800 \text{ 欧} \end{aligned}$$

直流电压挡

直流电压挡的电路如图 2-49 所示。当公共端与 50V 端接入被测电路时,量程为 $U_1=50$ 伏。当公共端与 500V 端接入被测电路时,量程为 $U_2=500$ 伏。虚线框内相当于表头。表头的内阻 R'_g 为 $R_g=200$ 欧与 $R_1+R_2=200$ 欧并

联的总电阻, $R'_g=100$ 欧。表头的满偏电压 $U_g=I_gR_g=500 \times 10^{-6} \times 200$ 伏=0.1 伏。

当公共端与 50V 端接入被测电路时, 由串联电路的电压分配关系可得

$$R_3 = \frac{U_1 - U_g}{U_g} R'_g = \frac{50 - 0.1}{0.1} \times 100 \text{ 欧} \\ = 49.9 \text{ 千欧。}$$

当公共端与 500V 端接入被测电路时, 由串联电路的电压分配关系可得

$$R_4 = \frac{U_2 - U_g}{U_g} R'_g = \frac{500 - 0.1}{0.1} \times 100 \text{ 欧} \\ = 499.9 \text{ 千欧。}$$

电阻挡(欧姆挡)

电阻挡的最简单的电路如图 2-50 所示。电池的电动势为 E , 内阻力 r 。电阻 R 是可变电阻, 也叫调零电阻。

当红、黑表笔相接时(图甲), 相当于被测电阻 $R_x=0$, 调节 R 的阻值, 使 $I/(r+R_g+R)=I_g$, 则表头的指针指到满刻度, 所以刻度盘上指针在满偏处定为电阻挡刻度的零点。

当红、黑表笔不接触时(图乙), 相当于被测电阻 $R_x=\infty$, 电流中没有电流, 表头的指针不偏转, 此时指针所指的位置是电阻挡刻度的“ ∞ ”点。

当红、黑表笔间接入被测电阻 R_x 时(图丙), 通过表头的电流 $I= E/(r+R_g+R+R_x)$ 。改变 R_x , 电流 I 随着改变。如果在刻度盘直接标出与 I 对应 R_x 值, 就可以从刻度盘上直接读出被测电阻的阻值。

$r+R_g+R$ 是电阻挡的内阻, 当被测电阻 R_x 等于电阻挡的内阻时, 即 $R_x=r+R_g+R$ 时, 通过表头的电流 $I= E/(r+R_g+R+R_x)= E/2(r+R_g+R)=I_g/2$, 即流过表头的电流为满偏电流的一半, 此时指针指在刻度的中央, 所以一般把电阻挡的内阻称为中值电阻。

设图 2-50 中, 电池的电动势 $E=1.5$ 伏, 电流表的满偏电流 $I_g=1$ 毫安= 1×10^{-3} 安, 电阻挡的中值电阻是多大? 电流表刻度盘中央的电阻值刻度是多大?

多用电表中直流电流挡、直流电压挡、电阻挡结合在一起的整个电路如图 2-51 所示。图中 $R_5 + R_6$ 相当于图 2-50 中的 R , 虚线框内相当于直流电压挡和电阻挡的表头, 此表头的满偏电流 $I'_g=2I_g=2 \times 500$ 微安= 1×10^{-3} 安, 内阻 $R'_g=R_g/2=100$ 欧。设电池的电动势 $E=1.5$ 伏, 则中值电阻为 1.5 千欧。如果电池的内阻忽略不计, 则可求得 $R_5+R_6=1.4$ 千欧。

电流表指针偏转的角度与通过的电流成正比, 所以直流电流挡和直流电压挡的刻度是均匀的。电阻挡的刻度是均匀的吗? 为什么?

(二) 练习使用

多用电表的型号很多，但使用的方法基本相同，下面以 J0411 型多用电表为例来说明它的使用方法和注意事项。

(1) J0411 型多用电表的外形如图 2 - 52 所示。上半部是表头，表盘上有电阻、电流、电压等各种量程的刻度。有的刻度是均匀的，因此合用一个刻度。下半部是选择开关，它的四周刻着各种测量项目和量程。电流和电压分为直流(用符号“—”表示)和交流(用符号“~”表示)，要区别开，不要弄错。另外还有电阻挡的调零旋钮和测试笔插孔。

测量前，应先检查表针是否停在左端的“0”位置，如果没有停在零位置，要用小螺丝刀轻轻地转动表盘下边中间的调整定位螺丝，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。

(2) 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，要用跟选择开关的挡位相应的刻度。

测量电流时，跟电流表一样，应把多用电表串联在被测电路里；对于直流电，必须使电流从红表笔流进多用电表，从黑表笔流出来。

测量电压时，跟电压表一样，应把多用电表和被测部分并联；对于直流电，必须用红表笔接电势较高的点，用黑表笔接电势较低的点。

测量电阻时，在选择好选择开关的挡位后，要先把两根表笔相接触，调整欧姆挡的调零旋钮，使指针指在电阻刻度的零位置上(注意，电阻刻度的零位置在表盘的右端)。然后再把两表笔分别与待测电阻的两端相接，进行测量。先测量一两个标了电阻值的电阻元件，练习选择欧姆挡的量程和读数。然后再测量一个额定电压 220 伏、功率 60 瓦的电灯泡的电阻和人体或一些常用物体的电阻。

应当注意：换用欧姆挡的另一量程时，需要重新调整欧姆挡的调零旋钮，才能进行测量；测量时待测电阻要跟别的元件和电源断开(为什么?)；测量时手不要碰到表笔的金属触针，以保证安全和测量的准确。

(3) 使用后，要把表笔从测试笔插孔拔出，并且不要把选择开关置于欧姆挡，以防电池漏电；长期不使用时，应把电池取出。

(三) 实习活动

下面提供几个供研究的问题，希望在老师指导下选择一个进行研究，并写出研究报告。研究过程中，希望你查找一些有关书籍和资料作为参考。

(1) 就图 2 - 51 所示的电路和给出的数据，在刻度盘上作出各个挡的刻度。

(2) 换用另外一个表头，重新设计一个简易的多用电表的电路，并在刻度上作出各个挡的刻度。

(3) 实际安装一个简易多用电表，并用它来进行测量。

本章小结

欧姆定律以及串并联电路的知识是本章的基础，一定要切实掌握，学

会用它们？分析和解决直流电路的问题。

(1)形成电流的条件是什么？物理学中是怎样规定电流方向的？什么是电流强度？写出它的定义式。

(2)欧姆定律的内容是什么？写出它的公式。欧姆定律的适用范围是什么？

(3)电阻定律的内容是什么？写出它的公式。什么是材料的电阻率？

(4)什么是电功和电功率？写出它们的公式。什么是焦耳定律？写出它的公式？说明电功率和热功率的区别和联系。

(5)串联电路中电流、电压的基本特点是什么？串联电路的等效电阻、电压分配、功率分配是怎样的？你自己根据欧姆定律和串联电路的基本特点作出推导。为什么串联电阻有分压作用？举出应用实例。

(6)并联电路中电流、电压的基本特点是什么？并联电路的等效电阻、电压分配、功率分配是怎样的？你自己根据欧姆定律和并联电路的基本特点作出推导。为什么并联电阻有分流作用？举出应用实例。

(7)怎样把表头改装成电流表和电压表？电流表和电压表的内阻对测量有什么影响？用伏安法测电阻有两种接法，如图 2 - 33 所示。什么情况下采用图甲的接法？什么情况下采用图乙的接法？说明理由。

(8)滑动变阻器有什么用途？各是怎样连入电路中的？使用时要注意什么？

(9)什么是闭合电路的欧姆定律？写出它的公式。什么是路端电压？外电阻增大或减小时，路端电压怎样改变？为什么这样改变？画出路端电压 U 与电流 I 的关系曲线。

(10)公式 $I = UI + I^2 r = I^2 R + I^2 r$ 中的各项分别表示什么？从能量转化的观点说明这一公式的意义。从能量的观点看，电源的电动势表示的是什么？

(11)在分析和解决直流电路的问题中，你有什么体会？要注意什么问题？闭合电路中某一部分的电阻发生变化时，会不会影响电路各部分的电流、电压、功率及其分配？

(12)你一定很好地学习了“多用电表的原理和使用”这个专题，并研究了其中提出的某个问题。总结一下你研究的体会。

习 题

A 组

(1)一根做电学实验用的铜导线，长度是 60 厘米，横截面积是 0.5 毫米^2 ，它的电阻是多少欧？一根输电用的铝导线，长度是 10 千米，横截面积是 1 厘米^2 ，它的电阻是多少欧？为什么做电学实验时可以不考虑连接用的导线的电阻，而输电线路的导线的电阻则需要考虑？

(2)一个盒子内装有由导线和三个阻值都为 R 的电阻组成的电路。盒外有三个接线柱，如图 2 - 53 所示。已知 1 和 2 间的电阻 $R_{12} = 0.5R$ ，2 和 3 间的电阻 $R_{23} = R$ ，1 和 3 间的电阻 $R_{13} = 1.5R$ 。试画出盒内的接线图。

(3)一只鸟站在一条通过 400 安电流的铝质裸导线上(图 2 - 54)。鸟的两爪间的距离为 5 厘米，导线的横截面积为 185 毫米^2 。求两爪间的电压。

(4)直流电动机线圈的电阻很小，起动时的电流很大，这对电动机本身和接在同一电源上的其他用电器都产生不良的后果。为了减小电动机起动时的电流，需要给电动机串联一个起动电阻 R ，如图 2 - 55 所示。电动机起动后再将 R 逐渐减校如果电源电压 $U=220$ 伏，电动机的线圈电阻 $r_0=2$ 欧，那么，

- a. 不串联电阻 R 时的起动电流是多大？
- b. 为了使起动电流减小为 20 安，起动电阻应为多大？

(5)照明电路的电压 $U=220$ 伏，并联了 20 盏电阻 R 都是 807 欧(发光时的电阻)的电灯，两条输电线的电阻 r 都是 1.0 欧(图 2 - 56)。只开 10 盏灯时，整个电路消耗的电功率、输电线上损失的电压和损失的电功率各是多大？20 盏灯都打开时，情况又怎样？

(6)有两根不同材料的电阻丝，长度相同，甲的半径是乙的 2 倍，甲的电阻率是乙的 2 倍。

- a. 把它们并联在电路中，甲消耗的电功率是乙的____倍。
- b. 把它们串联在电路中，甲消耗的电功率是乙的____倍。

(7)有一用电器 W ，额定电压为 100 伏，额定功率为 150 瓦。用 120 伏的电源供电。为了使用电器能正常工作，用一电阻为 210 欧的变阻器进行分压(图 2 - 57)。 R_1 、 R_2 为多大时，用电器才能正常工作？

(8)在图 2 - 58 中， $R_1=14.0$ 欧， $R_2=9.0$ 欧。开关 S 扳到位置 1 时，测得电流 $I_1=0.20$ 安； S 扳到位置 2 时，测得电流 $I_2=0.30$ 安。求电源的电动势和内阻。

(9)在图 2 - 58 中，不用电流表，改用电压表能不能测出电源的电动势和内阻？画出电压表应怎样接入电路，说明要取得哪些数据，写出计算电动势和内阻的公式。

(10)在图 2 - 44 所示的电路中，电压表的示数值随着滑片的位置不同而改变。如果发现电压表的示数为零，这时电路中发生了什么问题，会产生什么后果？采取什么措施，可避免发生这种情况？

B 组

(1)在图 2 - 59 所示的电路中， ab 间的电压 $U=10$ 伏， $R_1=1$ 千欧， $R_2=5$ 欧， $R_3=2$ 千欧， $R_4=10$ 欧。试估算干路中的电流 I 有多大？

(2) A 和 B 两地相距 40 千米，从 A 到 B 的两条输电线的总电阻为 800 欧。如果在 A 、 B 之间的某处 E 两条电线发生短路(图 2 - 60)，可用电压表、电流表和电池组检查出发生短路的地点。如果在 A 处测得电压表的示数是 10 伏，电流表的示数是 40 毫安。求短路处 E 到 A 的距离。

(3)电饭锅工作时有两种状态：一是锅内水烧干前的加热状态，一是水烧干后的保温状态。图 2 - 61 是电饭锅的电路图， R_1 是一电阻， R_2 是加热用的电阻丝。

- a. 自动开关 S 接通和断开时，电饭锅分别处于哪种状态？说明理由。
- b. 要使 R_2 在保温状态时的功率是加热状态时的一半， R_1/R_2 应当是多大？

(4)在图 2 - 62 所示的电路中，ab 间的电压为 8 伏，输入给这个电路的总功率是多少瓦？

(5)在图 2 - 63 所示的电路中，电源的电动势 $\mathcal{E}=12$ 伏，内阻 $r=1$ 欧， $R_1=R_4=15$ 欧， $R_2=R_3=3$ 欧。C 点接地，C 点的电势 $U_C=0$ 。

- a. 开关 S_1 断开时，干路中的电流是多少安？
- b. 开关 S_1 断开时，D 点的电势是多少伏？
- c. 开关 S_1 接通时，干路中的电流是多少安？
- d. 开关 S_1 接通时，D 点的电势是多少伏。

(6)在图 2 - 64 所示的电路中，电源的电动势 $\mathcal{E}=6$ 伏，内阻不计。 $R_1=4$ 欧， $R_2=2$ 欧， $R_3=7$ 欧，电容器 C 的电容为 10^{-6} 法。电容器所带的电量为

- | | |
|-------------------------|-------------------------|
| A. 2×10^{-6} 库 | B. 6×10^{-6} 库 |
| C. 0 库 | D. 4×10^{-6} 库 |

(7)在图 2 - 65 所示的电路中， r_1 和 r_2 是固定电阻，且 $r_1=r_2$ ，R 为滑动变阻器，且 $R=2r_1$ ； V_1 和 V_2 是电压表，可认为内阻为无限大；电源的电动势为 \mathcal{E} ，内阻为 r 。

起初，变阻器的滑片 P 在变阻器的中央处， V_1 表的示数为 V_2 表示数的一半。移动滑片 P，使 V_1 表的示数为原来的 1.5 倍，则

- A. 通过 r_1 的电流变为原来的 1.5 倍。
- B. 通过 r_2 的电流变为原来的 1.5 倍。
- C. V_2 表的示数有所下降。
- D. V_2 表的示数有所增加。

第三章 磁场

像电现象一样，磁现象也与人类有着密切的联系。例如生活中离不开的电话、电视、发电机、电动机，现代科学研究中离不开的电流表、质谱仪、计算机、回旋加速器等，都跟磁现象有关。这是因为电现象和磁现象有着密不可分的联系，凡是用到电的地方，几乎都有磁相伴随。现在人们已经认识到磁现象的电本质。从本章开始我们将在初中所学知识的基础上，进一步学习有关磁现象以及电磁联系方面的知识。

这一章我们学习两方面的知识：一是定量地描述磁场；二是定量地确定磁场对电流和运动电荷的作用。通过本章的学习，你将体会到磁场知识的重要性。

一、磁场 磁现象的电本质

我们在初中学过，把一根磁铁放在另一根磁铁的附近，两根磁铁的磁极之间会产生相互作用的磁力：同名磁极互相排斥，异名磁极互相吸引。我们知道，两个电荷之间相互作用的电力，不是在电荷之间直接发生的，而是通过电场发生的。同样，磁极之间相互作用的磁力，也不是在磁极之间直接发生的，而是通过磁场发生的。磁极在周围的空间里产生磁场，磁场对处在它里面的磁极有磁场力的作用。这可以简明地图示如下：



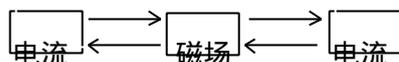
磁铁并不是磁场的唯一来源。1820年丹麦物理学家奥斯特(1777~1851)做过下面的实验：把一条导线平行地放在磁针的上方，给导线通电，磁针就发生偏转(图3-1)。这说明不仅磁铁能产生磁场，电流也能产生磁场，电和磁是有密切联系的。

电流能产生磁场，那么，电流在磁场中又会怎样呢？我们初中做过的图3-2所示的实验回答了这个问题。把一段直导线放在磁铁的磁场里，当导线中通过电流时，可以看到导线因受力而发生运动。这个实验使我们进一步知道电和磁的联系，磁场不仅对磁极产生磁场力的作用，对电流也产生磁场力的作用。



电流能够产生磁场，而磁场对电流又有磁场力的作用，那么电流和电流之间自然应该通过磁场发生相互作用。下面让我们用实验来验证一下这一猜想。如图3-3所示，两条平行的直导线，当通以相同方向的电流时，它们相互吸引；当通以相反方向的电流时，它们相互排斥。这时每个电流都处在另一个电流产生的磁场里，因而受到磁场力的作用。这就是说，电流和电流之间，就象磁极和磁极之间一样，也会通过磁场而发生相互作用。

综上所述，我们认识到：磁极或电流在其周围的空间里会产生磁场，而磁场的基本特性是对处在它里面的磁极或电流有磁场力的作用。这样，我们对磁极和磁极之间、磁极和电流之间、电流和电流之间的相互作用获得了统一的认识，所有这些相互作用都是通过同一种场——磁场来传递的。



磁场是看不见，摸不到的，但人们可以根据它所表现出来的性质研究它，认识它，这是科学研究常用的方法。

磁铁的磁场和电流的磁场是否有相同的起源呢？电流是电荷的运动产生的，所以电流的磁场应该是由于电荷的运动产生的；那么，磁铁的磁场是否也是由电荷的运动产生的呢？我们在初中学过，通电螺线管外部的磁场与条形磁铁的磁场很相似。法国学者安培由此受到启发，提出了著名的分子电流的假说。他认为，在原子、分子等物质微粒内部，存在着一种环

形电流——分子电流，分子电流使每个物质微粒都成为微小的磁体，它的两侧相当于两个磁极(图 3 - 4)。

一根铁棒，在未被磁化的时候，内部各分子电流的取向是杂乱无章的(图 3 - 5 甲)，它们的磁场互相抵消，对外界不显磁性。当铁棒受到外界磁场的作用时，各分子电流的取向变得大致相同(图 3 - 5 乙)，铁棒被磁化，两端对外界显示出较强的磁作用，形成磁极。磁体受到高温或猛烈的敲击会失去磁性。这是因为在激烈的热运动或机械振动的影响下，分子电流的取向又变得杂乱了。

在安培所处的时代，人们对物质内部为什么会有分子电流还不清楚。直到 20 世纪初，才知道分子电流是由原子内部电子的运动形成的。磁极的磁场和电流的磁场，它们的来源相同，都来源于电荷的运动。

运动的电荷(电流)产生磁场，磁场对运动的电荷(电流)有磁场力的作用。所有的磁现象都可以归结为运动电荷(电流)之间通过磁场而发生的相互作用。这就是磁现象的电本质。

二、磁场的方向 磁感线

把小磁针放在磁体或电流的磁场中，小磁针因受磁场力的作用，它的两极静止时不再指向南北方向，而指向一个别的方向(图 3 - 6)。在磁场中的不同点，小磁针静止时指的方向一般并不相同。这个事实说明，磁场是有方向性的。我们规定，在磁场中的任一点，小磁针北极受力的方向，亦即小磁针静止时北极所指的方向，就是那一点的磁场方向。正像在电场中可以利用电场线来形象地描写各点的电场方向一样，在磁场中可以利用磁感线来形象地描写各点的磁场方向。所谓磁感线，是在磁场中画出的一些有方向的曲线，在这些曲线上，每一点的磁场方向都在该点的切线方向上(图 3 - 7)。

实验中常用铁屑在磁场中被磁化的性质，来显示磁感线的形状。在磁场中放一块玻璃板，在玻璃板上均匀地撒一层细铁屑，细铁屑在磁场里被磁化成“小磁针”。轻敲玻璃板使铁屑能在磁场作用下转动，铁屑静止时有规则地排列起来，就显示出磁感线的形状。

图 3 - 8 表示条形磁铁和蹄形磁铁的磁感线分布情况。磁铁外部的磁感线是从磁铁的北极出来，进入磁铁的南极。

图 3 - 9 甲表示直线电流磁场的磁感线分布情况。直线电流磁场的磁感线是一些以导线上各点为圆心的同心圆，这些同心圆都在跟导线垂直的平面上。实验表明，改变电流的方向，各点的磁场方向都变成相反的方向，即磁感线的方向随着改变。直线电流的方向跟它的磁感线方向之间的关系可以用安培定则(也叫右手螺旋定则)来判定：用右手握住导线，让伸直的大拇指所指的方向跟电流的方向一致，弯曲的四指所指的方向就是磁感线的环绕方向。

请你判断图 3 - 1 所示的实验中，小磁针的偏转方向。如果改变导线中电流的方向，小磁针向哪个方向偏转？

图 3 - 10 甲表示环形电流磁场的磁感线分布情况。环形电流磁场的磁感线是一些围绕环形导线的闭合曲线。在环形导线的中心轴线上，磁感线和环形导线的平面垂直。环形电流的方向跟中心轴线上磁感线方向之间的关系，也可以用安培定则来判定：让右手弯曲的四指和环形电流的方向一致，伸直的大拇指所指的方向就是环形导线中心轴线上磁感线的方向。

图 3 - 11 表示通电螺线管磁场的磁感线分布情况。螺线管通电以后表现出来的磁性，很像是一根条形磁铁，一端相当于北极，另一端相当于南极。改变电流的方向，它的南北极就对调。通电螺线管外部的磁感线和条形磁铁外部的磁感线相似，也是从北极出来，进入南极。通电螺线管内部具有磁场，内部的磁感线跟螺线管的轴线平行，方向由南极指向北极，并和外部的磁感线连接，形成一些闭合曲线。通电螺线管的电流方向跟它的

磁感线方向之间的关系，也可用安培定则来判定：用右手握住螺线管，让弯曲的四指所指的方向跟电流的方向一致，大拇指所指的方向就是螺线管内部磁感线的方向，也就是说，大拇指指向通电螺线管的北极。

如图 3 - 12 所示，一小磁针静止在通电螺线管的内部，请分别标出通电螺线管和小磁针的南北极。

练习一

(1)如图 3 - 13 所示，把小磁针放在磁场中，磁场方向如图中箭头所示。说明小磁针将怎样转动以及停在哪个方向。

(2)在图 3 - 14 中，当电流通过线圈时，磁针的南极指向读者。试确定线圈中电流的方向。

(3)试确定图 3 - 15 中电源的正极和负极。

· 小实验 ·

验证环形电流的磁场方向

在一个瓶子(或硬纸筒)上用漆包线绕一个 10 至 15 匝的线圈，把绕好的线圈从瓶子上取下来，用胶布把线圈竖直固定在一块木板上。把小磁针(或自制的指南针)放在图 3 - 16 中所示的位置，并使磁针处在线圈平面内。先判断一下，如果线圈的两端接上电池，小磁针将怎样偏转。然后给线圈通电，看一看实验结果跟你的判断是否一致。

三、磁感强度

磁感强度 磁场不仅有方向性，而且有强弱的不同。巨大的电磁铁能够吸起成吨的钢铁，小的磁铁只能吸起小铁钉。我们怎样来表示磁场的强弱呢？

电场的基本特性是对其中的电荷有电场力的作用，研究电场强弱的时候，我们从分析电荷在电场中的受力情况着手，用电场强度这个物理量来表示电场的强弱。磁场的基本特性是对其中的电流有磁场力的作用，研究磁场的强弱，我们可以从分析电流在磁场中的受力情况着手，找出表示磁场强弱的物理量，

把一小段通电导线放在磁场中的某处，我们发现，当导线方向跟该处的磁场方向一致时，通电导线所受的力最小，等于零。当导线方向跟该处的磁场方向垂直时，所受的力最大。当导线方向跟磁场方向斜交时，所受的力介于零和最大值之间。下面，为了确定起见，我们总是把一小段通电导线垂直放入磁场中，也就是放在与该处磁场方向垂直的方向上。

通过实验可以发现，垂直放入磁场的通电导线所受的磁场力不仅跟其中的电流有关，而且跟导线的长短有关。导线长度一定时，电流 I 越大，导线受到的磁场力 F 越大；电流一定时，导线 l 越长，导线受到的磁场力 F 越大。精确的实验表明：通电导线受到的磁场力 F 跟通过的电流 I 和导线的长度 l 成正比，或者说， F 跟乘积 Il 成正比。在导线与磁场方向垂直时，比值 F/Il 跟乘积 Il 无关，是一个恒量。将导线放在磁场中不同的地方做实验，你会发现在磁场中不同的地方，这个比值一般是不同的。这个比值越大的地方，那里的磁场越强。因此我们可以用这个比值来表示磁场的强弱。

在磁场中垂直于磁场方向的通电导线，所受的磁场力 F 跟电流 I 和导线长度 l 的乘积 Il 的比值叫做通电导线所在处的磁感强度，也叫磁感应强度。如果用 B 表示磁感强度，那么，

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

上式给出了磁感强度的大小，但磁场还具有方向性，我们把磁场中某一点的磁场方向定义为该点磁感强度的方向，这样磁感强度这一矢量就可以全面地反映出磁场的性质。

磁感强度 B 的单位是由 F 、 I 和 l 的单位决定的。在国际单位制中，磁感强度的单位是特斯拉，简称特，国际符号是 T 。在导线与磁场方向垂直时，1 米长的导线，通过 1 安的电流，受到的磁场力为 1 牛时，该磁场的磁感强度就是 1 特。

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

永磁铁的磁极附近的磁感强度大约是 $10^{-3} \sim 1$ 特，在电机和变压器的铁心中，磁感强度可达 $0.8 \sim 1.4$ 特，通过超导材料的强电流的磁感强度可

这个物理量所以叫做磁感强度，而没有叫做磁场强度，是由于历史上磁场强度一词已用来表示另外一个物理量。

高达 1000 特，而地面附近地磁场的磁感强度大约 $0.3 \sim 0.7 \times 10^{-4}$ 特。

正像用电场线的疏密程度可以形象地表示电场强度的大小一样，用磁感线的疏密程度也可以形象地表示磁感强度的大小。在同一磁场的图示中，磁感强度大的地方磁感线密一些，在磁感强度小的地方磁感线稀一些。这样，根据磁感线的疏密程度，我们可以大致地了解磁感强度的大小。

图 3 - 17 中 A、B 两点哪一点的磁感强度大？

如果在磁场的某一区域里，磁感强度的大小和方向处处相同，这个区域的磁场叫做匀强磁场。匀强磁场是最简单但又很重要的磁场，在电磁仪器和科学实验中有重要的应用。距离很近的两个异名磁极之间的磁场(图 3 - 18)，通电螺线管内部的磁场，除边缘部分外，都可认为是匀强磁场。

磁通量 在电磁学里常常要讨论穿过某一个面的磁场，为此需要引入一个新的物理量——磁通量。设在匀强磁场中有一个与磁场方向垂直的平面(图 3 - 19)，磁场的磁感强度为 B ，平面的面积为 S ，我们定义磁感强度 B 与面积 S 的乘积，叫作穿过这个面的磁通量(简称磁通)。如果用 Φ 表示磁通量，则有

$$\Phi = BS$$

磁通量的意义可以用磁感线形象地加以说明。我们知道在同一磁场的图示中，磁感线越密的地方，也就是穿过单位面积的磁感线条数越多的地方，磁感强度 B 越大。因此， B 越大， S 越大，穿过这个面的磁感线条数就越多，磁通量就越大。

如果平面不跟磁场方向垂直，我们可以作出它在垂直于磁场方向上的投影平面。从图 3 - 20 可以看出，穿过这两个面的磁感线条数相等，即磁通量相等。因此，同一个平面，当它跟磁场方向垂直时，穿过它的磁感线条数最多，磁通量最大。当它跟磁场方向平行时，没有磁感线穿过它，即穿过的磁通量为零。

在国际单位制中，磁通量的单位是韦伯，简称韦，国际符号是 Wb。

$$1 \text{ 韦} = 1 \text{ 特} \times 1 \text{ 米}^2$$

从 $\Phi = BS$ ，可以得出 $B = \frac{\Phi}{S}$ ，这表示磁感强度等于穿过单位面积

的磁通量，因此常把磁感强度叫做磁通密度，并且用韦 / 米²作单位。

$$1 \text{ 特} = 1 \frac{\text{韦}}{\text{米}^2} = 1 \frac{\text{牛}}{\text{安} \cdot \text{米}}。$$

练习二

(1)有人根据 $B = F/Il$ 提出 磁场中某点的磁感强度 B 跟磁场力 F 成正比，跟电流强度 I 和导线长度 l 的乘积 Il 成反比。这种提法有什么问题？错在哪里？

(2)能不能用一小段通电导线在磁场中所受磁场力的方向来定义磁感

强度的方向？讨论一下这个问题。

(3)把长 10 厘米的导线垂直放入匀强磁场中,导线中的电流是 3.0 安,受到的磁场力是 1.5×10^{-3} 牛。求该处的磁感强度。

(4)把一个面积为 5.0×10^{-2} 米² 的单匝矩形线圈放在磁感强度为 2.0×10^{-2} 特的匀强磁场中,当线圈平面与磁场方向垂直时,穿过线圈的磁通量是多大？

(5)是通电螺线管内部的磁感强度大,还是管口外部的磁感强度大？你是根据什么判断的？

(6)将面积是 0.5 米² 的导线环放入匀强磁场中,环面与磁场方向垂直。已知穿过这个导线环的磁通量是 2.0×10^{-2} 韦,求穿过它的磁通密度。

四、磁场对电流的作用力

磁场对放在其中的电流有磁场力的作用，通常称这种力为安培力。法国物理学家安培(1775~1836)对电流在磁场中受力的研究有着杰出的贡献，故人们常称这种力为安培力。这一节讨论安培力的大小和方向。

安培力的大小 上一节我们把一小段通电导线垂直放入磁场中，由通电导线所受的磁场力 F 、导线中的电流 I 和导线长度 l 定义了磁感强度

$B = \frac{F}{Il}$ 长度为 l 、电流为 I 的一小段通电导线，垂直于磁场方向放在该处时，

所受的安培力 F 是多大呢？很明显，由 $B = \frac{F}{Il}$ 可以求得安培力的大小

$$F = IlB。$$

这个公式只适用于一小段通电导线的情形；导线较长时，导线所在处各点的磁感强度矢量一般并不相同，不能应用这个公式。如果磁场是匀强磁场，这个公式就适用于长的通电导线了。

如果电流方向不跟磁场方向垂直，电流受到的安培力又怎样呢？当电流方向与磁场方向有一个夹角 θ 时(图 3 - 21) 我们可以把磁感强度矢量 B 分解为两个分量：一个是跟电流方向平行的分量 $B_1 = B\cos\theta$ ，另一个是跟电流方向垂直的分量 $B_2 = B\sin\theta$ 。 B_2 与电流方向垂直，对电流没有作用力，电流受到的力是由 B_2 决定的，即 $F = IlB_2$ 。将 $B_2 = B\sin\theta$ 代入上式，得到

$$F = IlB\sin\theta。$$

这就是电流方向与磁场方向成某一角度时安培力的公式。这就是说，安培力的大小等于电流 I 、导线长度 l 、磁感强度 B 以及 I 和 B 间的夹角 θ 的正弦 $\sin\theta$ 的乘积。公式 $F = IlB$ 是上式 $\theta = 90^\circ$ 时的特殊情况。

在国际单位制中，上式中的各个物理量分别用牛顿、安培、米、特斯拉作单位。

安培力的方向 上式给出了安培力的大小。安培力的方向是怎样的呢？在图 3 - 2 所示的实验中，如果改变电流的方向，导线运动的方向就随着改变；如果调换磁铁两极的位置，改变磁场的方向，导线运动的方向也随着改变。可见通电导线在磁场中的受力方向跟磁场方向、导线中的电流方向都有关系。实验表明：电流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。

通电直导线所受安培力的方向和磁场方向、电流方向之间的关系，可以用左手定则来判定(图 3 - 22)：伸开左手，使大拇指跟其余四个手指垂直，并且都跟手掌在一个平面内，把手放入磁场中，让磁感线垂直穿入手心，并使伸开的四指指向电流的方向，那么，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。

上面讲的是磁场方向跟电流方向垂直的情况，如果这两个方向不垂

直 安培力的方向又如何判定呢？把图 3 - 2 装置中的导线在竖直平面上转过一个角度，使磁场方向不再跟电流方向垂直，结果发现，导线受力的方向并没有改变，只是所受的力减小了。因此，我们仍旧可以用左手定则来判定力的方向，只是这时磁感线是倾斜进入手心的。

练习三

(1)图 3 - 23 表示一根放在磁场里的通电直导线，直导线与磁场方向垂直。图中已分别标明电流、磁感强度和安培力这三个物理量中两个的方向，试标出第三个量的方向。

(本书用“·”表示磁感线垂直于纸面向外，“×”表示磁感线垂直于纸面向里；“ ”表示电流垂直于纸面向外，“⊗”表示电流垂直于纸面向里。)

(2)试解释图 2 - 3 所示的实验现象。

(3)把一小段通电直导线放入磁场中，导线受到安培力的作用。关于安培力的方向，下列说法中正确的是：

- A. 安培力的方向一定跟磁感强度的方向相同。
- B. 安培力的方向一定跟磁感强度的方向垂直，但不一定跟电流方向垂直，
- C. 安培力的方向一定跟电流方向垂直，但不一定跟磁感强度方向垂直。
- D. 安培力的方向，既跟磁感强度的方向垂直，又跟电流方向垂直。

(4)一根长 2 米的直导线，通有 1 安的电流，把它放在 $B = 0.2$ 特的匀强磁场中，当导线与磁感线的夹角为 0° 、 30° 和 90° 时，导线所受的安培力分别有多大？

(5)在磁感强度是 4.0×10^{-2} 特的匀强磁场里，有一条与磁场方向成 60° 角、长 8 厘米的通电直导线 ab(图 3 - 24)。通电导线 ab 所受的安培力是 1.0×10^{-2} 牛，方向垂直纸面指向读者。求导线中电流的大小和方向。

(6)在赤道上，地磁场可看成是沿南北方向的匀强磁场，磁感强度的大小是 0.50×10^{-4} 特。如果赤道上有一根沿东西方向的直导线，长为 20 米，载有从东向西的电流 30 安，地磁场对这根导线的作用力有多大？方向如何？通过计算你会发现，虽然地磁场很弱，但由于导线比较长，通过的电流又比较大，安培力并不小，完全可以精确地测量出来。这实际上告诉我们一种测量弱磁场的磁感强度的方法。

*五、电流表的工作原理

电流表是测定电流强弱和方向的电学仪器。在第二章中我们知道常用的电流表、电压表都是由小量程的电流表(表头)改装而成的。所以学习电流表的工作原理很重要。实验时经常使用的电流表是磁电式仪表。这种电流表的构造如图 3 - 25 所示。在一个很强的蹄形磁铁的两极间有一个固定的圆柱形铁心，铁心外面套有一个可以绕轴转动的铝框，铝框上绕有线圈，铝框的转轴上装有两个螺旋弹簧和一个指针。线圈的两端分别接在这两个螺旋弹簧上，被测电流经过这两个弹簧流入线圈。

蹄形磁铁和铁心间的磁场是均匀地辐向分布的(图 3 - 26)不管通电线圈转到什么角度，它的平面都跟磁力线平行。当电流通过线圈的时候，线圈上跟铁柱轴线平行的两边都受到安培力(图 3 - 26)，这两个力的作用是使线圈发生转动。线圈转动时，螺旋弹簧被扭动，产生一个阻碍线圈转动的作用，且此作用随线圈转动角度的增大而增大。当这种阻碍作用增大到同安培力的转动作用相抵消时，线圈停止转动。

磁场对电流的作用力跟电流成正比，因而线圈中的电流越大，安培力的转动作用也越大，线圈和指针偏转的角度也就越大。因此，根据指针偏转角度的大小，可以知道被测电流的强弱。

当线圈中的电流方向改变时，安培力的方向随着改变，指针的偏转方向也随着改变。所以，根据指针的偏转方向，可以知道被测电流的方向。

磁电式仪表的优点是灵敏度高，可以测出很弱的电流；缺点是绕制线圈的导线很细，允许通过的电流很弱(几十微安到几毫安)，如果通过的电流超过允许值，很容易把它烧坏。这一点我们在使用时一定要特别注意。

六、磁场对运动电荷的作用

磁场对电流有力的作用，电流是由电荷的定向移动形成的。由此自然会想到：这个力可能是作用在运动电荷上的，而作用在通电导线上的安培力是作用在运动电荷上的力的宏观表现。

为了检验这种设想，我们来做一个实验。图 3 - 27 是一个抽成真空的电子射线管，从阴极发射出来的电子束，在阴极和阳极间的高电压作用下，轰击到长条形的荧光屏上激发出荧光，可以显示出电子束运动的径迹。实验表明，在没有外磁场时，电子束是沿直线前进的(图 3 - 28 甲)。如果把射线管放在蹄形磁铁的两极间，荧光屏上显示出的电子束运动的径迹发生了弯曲(图 3 - 28 乙)。这表明，运动电荷确实受到了磁场的作用力，这个力通常叫做洛伦兹力。荷兰物理学家洛伦兹(1853 ~ 1928)首先提出了运动电荷产生磁场和磁场对运动电荷有作用力的观点，为纪念他，人们称这种力为洛伦兹力。

洛伦兹力的方向也可用左手定则来判定：伸开左手，使大拇指跟其余四个手指垂直，且处于同一平面内，把手放入磁场中，让磁感线垂直穿入手心，四指指向正电荷运动的方向，那么，拇指所指的方向就是正电荷所受洛伦兹力的方向。运动的负电荷在磁场中所受的洛伦兹力，方向跟正电荷相反。

现在来确定洛伦兹力的大小。有一段长度为 l 的通电导线，横截面积为 S ，单位体积中含有的自由电荷数为 n ，每个自由电荷的电量为 q ，定向移动的平均速率为 v 。由第二章第二节知道，导线中的电流为 $I = nqvS$ 。这段导线在磁感强度为 B 的磁场中所受的安培力 $F = IlB\sin\theta$ ，将 $I = nqvS$ 代入上式，得 $F = (nqvS)lB\sin\theta$ 。安培力 F 可以看作是作用在每个运动电荷上的洛伦兹力 f 的合力。这段导线中含有的运动电荷数为

nlS ，所以 $f = \frac{F}{nlS}$ ，由此得

$$f = qvB\sin\theta。$$

为 v 和 B 间的夹角。上式中各量的单位分别为牛顿、库仑、米/秒、特斯拉。

当 $\theta = 90^\circ$ 时，即电荷的运动方向与磁场方向垂直时，

$$f = qvB$$

这就是说，当电荷在垂直于磁场的方向上运动时，磁场对运动电荷的洛伦兹力 f ，等于电量 q 、速率 v 、磁感强度 B 三者的乘积。

当 $\theta = 0$ 时，即电荷的运动方向跟磁场方向一致时， $f = 0$ ，即运动电荷不受洛伦兹力的作用。

思考与讨论

带电粒子在磁场中运动时，洛伦兹力对带电粒子是否做功？说明理由。

练习四

(1) 试判断图 3 - 28 中所示的带电粒子刚进入磁场时所受的洛伦兹力的方向。

(2) 一电荷 q 在某一匀强磁场中运动，判断下面几种说法是否正确，并说明理由。

A . 只要速度的大小相同，所受的洛伦兹力就相同。

B . 如果速度大小不变，把电荷 q 改为 $-q$ ，洛伦兹力的方向将反向，但大小不变。

C . 如果速度大小不变，把 B 反向，洛伦兹力的方向将反向，但大小不变。

(3) 一个电子以速率 v 射入磁感强度为 B 的匀强磁场中。电子沿什么方向射入，受到的洛伦兹力最大？最大值是多大？沿什么方向射入，不受洛伦兹力的作用？

(4) 电子的速率 $v = 3.0 \times 10^6$ 米/秒，垂直射入 $B = 0.10$ 特的磁场中，它受到的洛伦兹力是多大？

(5) 一个电子以 1.2×10^7 米/秒的速率射入 $B = 0.02$ 特的匀强磁场中。当速度 v 与磁感强度 B 的夹角为 30° 和 60° 时，电子所受洛伦兹力分别是多大？

七、带电粒子在磁场中的运动

运动轨迹 垂直射入匀强磁场中的带电粒子，在洛伦兹力 $f = qvB$ 的作用下，将会偏离原来的运动方向。那么，粒子的运动径迹是怎样的呢？

我们来做下面的实验。实验所用的仪器如图 3 - 29 所示，是一种特制的电子射线管，由电子枪发出的电子射线可以使管内的低压水银蒸气(或氢气)发出辉光，显示出电子的径迹。在暗室中可以清楚地看到，在没有磁场作用时，电子的径迹是直线；在管外加上匀强磁场(这个磁场是由两个平行的通电环形线圈产生的)，电子的径迹就弯曲成圆形。

粒子的运动轨迹为什么是圆形的呢？同学们可以试着用学过的运动学和动力学的知识进行论证，然后阅读下面的课文。

粒子的初速度和它受力的方向都在跟磁场方向垂直的平面内，没有任何作用使粒子离开这个平面，所以粒子只能在这个平面内运动。洛伦兹力总是跟粒子的运动方向垂直，不对粒子做功，它只改变粒子运动的方向，而不改变粒子的速率，所以粒子运动的速率 v 是恒定的。这时洛伦兹力 $f = qvB$ 的大小不变，即带电粒子受到一个大小不变、方向总与粒子运动方向垂直的力，因此带电粒子做匀速圆周运动(图 3 - 30)，其向心力就是洛伦兹力。

轨道半径和周期 一带电粒子的质量为 m ，电量为 q ，速率为 v ，它在磁感强度为 B 的匀强磁场中做匀速圆周运动的轨道半径 r 有多大呢？粒子做匀速圆周运动所需的向心力 $F = mv^2/r$ 是由粒子所受的洛伦兹力提供的，所以

$$qvB = \frac{mv^2}{r}$$

由此得出

$$r = \frac{mv}{qB}。$$

上式告诉我们，在匀强磁场中做匀速圆周运动的带电粒子，它的轨道半径跟粒子的运动速率成正比。运动的速率越大，轨道的半径也越大。

由上式我们还可以求出带电粒子做匀速圆周运动的周期。将 $r = \frac{mv}{qB}$

代入周期公式 $T = 2\pi r / v$ 中，得到

$$T = \frac{2\pi m}{qB}$$

这个式子告诉我们，带电粒子在磁场中做匀速圆周运动的周期跟轨道半径和运动速率无关。

到现在为止，我们已经知道，电场可以对带电粒子施加影响，磁场也可以对运动的带电粒子施加影响，当然，电场和磁场共同存在时对带电粒子也会施加影响。这一知识在现代科学技术中有着广泛的应用。例如电视

机中的显像管、电子显微镜和下面我们将要学到的回旋加速器、质谱仪等，都是利用电场和磁场控制电荷的运动的。

【例题】一个初速度为零的质子，经过电压 $U = 1.30 \times 10^3$ 伏的电场加速后，垂直进入磁感强度 $B = 0.20$ 特的匀强磁场。求： 质子进入磁场时的速率； 质子在磁场中运动的轨道半径。质子的质量 $m = 1.67 \times 10^{-27}$ 千克，电量 $q = 1.60 \times 10^{-19}$ 库。

分析和解答 质子进入磁场时的速率 v 等于它在电场中被加速而得到的速率。由动能定理可知，质子在电场中得到的动能等于电场对它所做的功，即

$$\frac{1}{2}mv^2 = qU$$

由此可解出

$$v = \sqrt{\frac{2qU}{m}}$$

代入数值得 $v = 5.0 \times 10^5$ 米/秒。

质子在磁场中做匀速圆周运动的轨道半径为

$$r = \frac{mv}{qB}$$

代入数值得

$$r = 2.6 \times 10^{-2} \text{ 米。}$$

练习五

(1) 电子以 1.6×10^6 米/秒的速率垂直射入 $B = 2.0 \times 10^{-4}$ 特的匀强磁场中，求电子做圆周运动的轨道半径和周期。

(2) 电子垂直射入 $B = 7.0 \times 10^{-4}$ 特的匀强磁场中，做圆周运动的轨道半径为 3.0×10^{-2} 米，求电子运动的速率。

(3) 匀强磁场中，在两个电子分别以速率 v 和 $2v$ 沿垂直于磁场方向运动，哪个电子先回到原来的出发点？

(4) 有三束粒子，分别是质子 (P)、氦核 (${}^3_2\text{He}$) 和 α 粒子，它们以相同的速度沿垂直于磁场方向射入匀强磁场(图 3 - 31)。在下列 4 个图中，哪个图正确地表示出这三束粒子的运动轨迹？氦核的质量约为质子的 3 倍，带有一个基本电荷的正电。 α 粒子即氦核，质量约为质子的 4 倍，带有两个基本电荷的正电。

(5) 一束粒子中有带正电的，有带负电的，还有不带电的。要想把它们分开，可以有哪些办法？

(6) 在匀强磁场中，如果带电粒子的运动方向不和磁感强度的方向垂直，它的运动径迹是什么样的曲线？试定性地加以说明。

*八、回旋加速器

在现代物理学中，人们要用能量很高的带电粒子去轰击各种原子核，观察它们的变化情况，例如要从原子核中把中子或质子打出来，就得用 8 兆电子伏的质子。为了探索质子的内部结构，使用了 200 亿电子伏的电子去轰击质子。怎样才能使在实验室大量产生这样高能量的带电粒子呢？这就需要用一种新的实验设备——加速器。

我们已经学过，利用电场可以使带电粒子加速。早期制成的加速器，就是用高压电源的电势差来加速带电粒子的。这种加速器受到实际所能达到的电势差的限制，粒子获得的能量并不太高，只能达到几十万到几兆电子伏。为了提高粒子的能量，可以设想让粒子经过多次电场来加速，这倒是是一个很合乎道理的想法。但是想实现这一设想，需要建一个很长很长的实验装置，其中包含多级提供加速电场的装置(图 3 - 32)。能不能在较小的空间范围内让粒子受到多次电场的加速呢？1932 年美国物理学家劳伦斯发明了回旋加速器，巧妙地应用带电粒子在磁场中的运动特点解决了这一问题。

回旋加速器(彩图 6)的工作原理如图 3 - 33 所示。放在 A_0 处的粒子源发出一个带正电的粒子，它以某一速率 v_0 垂直进入匀强磁场，在磁场中做匀速圆周运动。经过半个周期，当它沿着半圆弧 $\widehat{A_0A_1}$ 到达 A_1 时，在 $A_1A'_1$ 处造成一个向上的电场，使这个带电粒子在 $A_1A'_1$ 处受到一次电场的加速，速率由 v_0 增加到 v_1 。然后粒子以速率 v_1 在磁场中做匀速圆周运动。我们知道，粒子的轨道半径跟它的速率成正比，因而粒子将沿着半径增大的圆周运动。又经过半个周期，当它沿着半圆弧 $\widehat{A'_1A_2}$ 到达 A'_2 时，在 A'_2A_2 处造成一个向下的电场，使粒子又一次受到电场的加速，速率增加到 v_2 。如此继续下去，每当粒子运动到 $A_1A'_1$ 、 A_3 、 A'_3 等处时都使它受到向上电场的加速，每当粒子运动到 A'_2A_2 、 A'_4A_4 等处时都使它受到向下电场的加速，粒子将沿着图示的螺线 $A_0A_1A'_1A'_2A_2\dots\dots$ 回旋下去，速率将一步一步地增大。

带电粒子在匀强磁场中做匀速圆周运动的周期 $T=2\pi m/qB$ 跟运动速率和轨道半径无关，对一定的带电粒子和一定的磁感强度来说，这个周期是恒定的。因此，尽管粒子的速率和半径一次比一次增大，运动周期 T 却始终不变，这样，如果在直径 AA 、 $A'A'$ 处造成一个交变电场，使它也以相同的周期 T 往复变化，那就可以保证粒子每经过直径 AA 和 $A'A'$ 时都正好赶上适合的电场方向而被加速。

回旋加速器的核心部分是两个 D 形的金属扁盒(图 3 - 34)。这两个 D 形盒就像是沿着直径把一个圆形的金属扁盒切成的两半。两个 D 形盒之间留一个窄缝，在中心附近放有粒子源。D 形盒装在真空容器中，整个装置放在巨大电磁铁的两极之间，磁场方向垂直于 D 形盒的底面。把两个 D 形盒分别接在高频电源的两极上，如果高频电源的周期与带电粒子在 D 形盒中的运动周期相同，带电粒子就可以像图 3 - 36 所示的那样不断地被加速

了。带电粒子在 D 形盒内沿螺线轨道逐渐趋于盒的边缘，达到预期的速率后，用特殊装置把它们引出。

回旋加速器的出现，使人类在获得具有较高能量的粒子方面前进了一步。为此，1939 年劳伦斯荣获了诺贝尔物理学奖。但是，在 30 年代末期发现，用这种经典的回旋加速器加速质子，最高能量仅能达到 20 兆电子伏，要想进一步提高质子的能量就很困难了。这是因为，在粒子的能量很高的时候，它的运动速度接近于光速，按照狭义相对论(以后会介绍)，这时粒子的质量将随着速率的增加而显著地增大，粒子在磁场中回旋一周所需的时间要发生变化。交变电场的频率不再跟粒子运动的频率一致，这就破坏了加速器的工作条件，进一步提高粒子的速率就不可能了。如果从这一点考虑，我们上面提到的多级加速装置就表现出了它的优越性。因为在这一装置中，粒子是在一条直线形装置上被加速的，不存在上述困难。这种多级加速装置在过去没有条件建造，现在已经建造出来，科学家称它为直线加速器，长度达几公里至几十公里。

为了把带电粒子加速到更高的能量，以适应高能物理实验的需要，人们还设计制造了各种类型的新型加速器，如同步加速器、电子感应加速器等等。这些加速器可以把带电粒子加速到几十亿电子伏以上。目前世界上最大的质子同步加速器，能使质子的能量达到 10000 亿电子伏。我国 1989 年初投入运行的第一台高能粒子加速器——北京正负电子对撞机，能使电子束流的能量达到 $28 + 28$ 亿电子伏。

· 阅读 · 物质的磁性和磁性材料

实验表明，任何物质在外磁场中都能够或多或少地被磁化，只是磁化的程度不同。根据物质在外磁场中表现出的特性，物质可粗略地分为三类：顺磁性物质，抗磁性物质，铁磁性物质。现将它们的特性列在下表中：

特性 \ 分类	顺磁性物质	抗磁性物质	铁磁性物质
被磁化后磁性的强弱	很弱	很弱	很强
被磁化后的磁场方向	使外磁场稍有增强	使外磁场稍有减弱	使外磁场大大增强
外磁场撤去以后	磁性几乎完全消失	磁性几乎完全消失	剩余一部分磁性(剩磁)
典型代表物质	锰、铬、铝等	铋、铜、银和惰性气体等	金属磁性材料,包括铁、钴、镍、及其合金等; 铁氧体

根据分子电流假说，物质在磁场中应该表现出大体相似的特性，但此

表告诉我们物质在外磁场中的特性差别很大。这反映了分子电流假说的局限性。实际上，各种物质的微观结构是有差异的，这种物质结构的差异性物质磁性差异的原因。

我们把顺磁性物质和抗磁性物质称为弱磁性物质，把铁磁性物质称为强磁性物质。通常所说的磁性材料是指强磁性物质。

磁性材料按磁化后去磁的难易可分为软磁性材料和硬磁性材料。磁化后容易去掉磁性的物质叫软磁性材料，不容易去磁的物质叫硬磁性材料。一般来讲软磁性材料剩磁较小，硬磁性材料剩磁较大。磁性材料按化学成分可分为金属磁性材料和铁氧体。铁氧体是以氧化铁为主要成分的磁性氧化物。

软磁性材料的剩磁弱，而且容易去磁。适用于需要反复磁化的场合。可以用来制造半导体收音机的天线磁棒，录音机的磁头，电子计算机中的记忆元件，以及变压器、交流发电机、电磁铁和各种高频元件的铁芯等。常见的金属软磁性材料有软铁、硅钢、坡莫合金(镍铁合金)等，常见的软磁铁氧体有锰锌铁氧体、镍锌铁氧体等。硬磁性材料的剩磁强，而且不易退磁，适合制成永久磁铁，应用在磁电式仪表、扬声器、话筒、永磁电机等电器设备中。常见的金属硬磁性材料有碳钢、钨钢、铝镍钴合金等，常见的硬磁铁氧体为钡铁氧体和锶铁氧体。

随着社会的进步，磁性材料和我们日常生活的关系也越来越紧密。录音机上用的磁带，录像机上用的录像带，电子计算机上用的磁盘，储蓄用的信用卡等，都含有磁性材料。这些磁性材料称为磁记录磁性材料。靠着磁记录磁性材料，我们可以在磁带、录像带、磁盘上保存大量的信息，并在需要的时候“读”出这些信息。磁记录磁性材料在20世纪70年代以前采用磁性氧化物，1978年合金磁粉研制成功之后，开始采用金属磁性材料，从而大大提高了磁记录的性能。现在人们正在试验用金属薄膜作磁记录磁性材料。如果试验成功，磁记录技术又会得到进一步的提高。

本章小结

这一章我们学习了磁场的性质及其描述，学习了磁场对电流和运动电荷的作用，并且讨论了这些知识在科学技术中的应用。

通过本章的学习，我们不但要掌握上述知识，而且应当理解自然界的各种现象(如电现象和磁现象)是相互联系的这一观点。

(1)人们对磁极和磁极之间、磁极和电流之间、电流和电流之间的相互作用是怎样获得统一认识的？

(2)磁场的基本特性是什么？磁场中某一点的磁场方向是如何规定的？

(3)磁感线如何表示磁场的方向？条形磁铁、蹄形磁铁、通电直导线、环形电流、通电螺线管的磁感线分布是怎样的？怎样用安培定则判定通电直导线、环形电流和通电螺线管的磁场方向？

(4)磁感强度是矢量，是反映磁场强弱和方向的物理量。磁感强度的强弱是如何定义的？写出它的定义式。磁感强度的方向是怎样的？

(5)什么叫磁通量？写出磁通量的定义式。怎样用磁感线形象地说明磁通量？

(6) 什么叫安培力？写出安培力大小的表达式。安培力的方向如何来判定？

(7) 什么叫洛伦兹力？写出洛伦兹力大小的表达式。洛伦兹力的方向如何判定？

(8) 初速度方向与磁场方向垂直的带电粒子，在匀强磁场中为什么做匀速圆周运动？你自己推出轨道半径和周期的表达式。轨道半径和周期各与哪些因素有关？

(9) 你自己总结一下，带电粒子在电场和磁场中的运动都有哪些实际应用。除了课本所讲的，你还能举出其他的例子吗？如果一时举不出，希望你课外多看一些有关书籍和杂志，以便扩展眼界，开阔思路。

习题

A 组

(1) 照图 3 - 35 那样，把一根柔软的弹簧竖直地悬挂起来，使它的下端刚刚跟导电液体接触。给弹簧通入电流时，会发生什么现象？做一下这个实验，并解释所发生的现象。

(2) 一个同学说：“一小段通电导线在某点如果不受安培力作用，则该点的磁感强度一定为零。”另一个同学说：“一小段通电导线放在磁感强度为零的位置，它受的安培力一定等于零。”哪个同学说得不对，为什么？

(3) 在匀强磁场里，有一根长 1.2 米的通电导线，导线中的电流为 5.0 安。这根导线与磁场方向垂直时，所受的安培力为 1.8 牛，求磁感强度的大小。

(4) 在磁感强度为 0.8 特的匀强磁场中，放一根与磁场方向垂直的、长度为 0.5 米的通电导线，导线中的电流为 5.0 安。这根导线在与磁场方向垂直的平面内沿安培力的方向移动了 0.4 米，求安培力对导线所做的功。

(5) 有一匀强磁场，磁感强度为 1.2 特，方向水平地由南指向北。如果有一速度为 5.0×10^5 米/秒的质子沿竖直向下的方向进入磁场，求磁场作用在质子上的力。质子进入磁场时将向哪个方向偏转？

(6) 质子和 α 粒子在同一匀强磁场中做半径相同的圆周运动。由此可知质子的动能 E_1 和 α 粒子的动能 E_2 之比 $E_1:E_2$ 等于

- A. 4:1 B. 1:1
C. 1:2 D. 2:1

B 组

(1) 如图 3 - 36 所示，挂在天平底部的矩形线圈 abcd 的一部分悬在匀强磁场中。当给矩形线圈通入如图所示的电流 I 时，调节两盘中的砝码，使天平平衡。然后使电流 I 反向，这时要在天平的左盘上加质量为 2×10^{-2} 千克的砝码，才能使天平重新平衡。求磁场对 bc 边作用力的大小。

(2) 如图 3 - 37 所示，A 和 B 之间的距离为 0.1 米，电子在 A 点的速度

$v_0 = 1.0 \times 10^7$ 米/秒。

a. 要使电子沿半圆周由 A 运动到 B, 求所加匀强磁场的磁感强度的大小和方向。

b. 电子从 A 运动到 B 需要多长时间?

(3) 在图 3 - 38 所示的平行板器件中, 电场 E 和磁场 B 相互垂直。具有某一水平速度 v 的带电粒子将沿着图中所示的虚线穿过两板间的空间而不发生偏转。具有其他速度的带电粒子将发生偏转。这种器件能把具有上述速度 v 的粒子选择出来, 所以叫做速度选择器。试证明带电粒子具有

速度 $v = \frac{E}{B}$ 时, 才能沿着图示的虚线路径通过。

(4) 质谱仪是一种测定带电粒子质量和分析同位素的重要工具, 它的构造原理如图 3 - 39 所示。离子源 S 产生质量为 m、电量为 q 的正离子, 离子产生出来时速度很小, 可以看作速度为零。产生的离子经过电压 U 加速, 进入磁感强度为 B 的匀强磁场, 沿着半圆周运动, 到达记录它的照相底片上的 P 点。测得 P 点到入口处 S_1 的距离为 x。试证明离子的质量

$$m = \frac{qB^2}{8U} x^2。$$

(5) 利用学过的知识, 请你想办法把下面的带电粒子分开; a. 速度不同的电子; b. 具有相同动能的质子和 α 粒子。

(6) 目前世界上正在研究的一种新型发电机叫磁流体发电机, 图 3 - 40 表示它的发电原理: 将一束等离子体(即高温下电离的气体, 含有大量带正电和带负电的微粒, 而从整体来说呈中性), 喷射入磁场, 磁场中有两块金属板 A、B, 这时金属板上就聚集电荷, 产生电压。说明金属板上为什么聚集电荷。在磁极配置如图中所示的情况下, 电路中的电流方向如何?

磁流体发电是一项新兴技术, 有兴趣的同学可以找来有关的报纸、杂志看看。

(7) 图 3 - 41 表示两个平行金属板, 它们之间的距离为 d, 分别接在电源的两极上。在两平行金属板当中的空间存在着彼此垂直的电场和磁场, 电场强度为 E, 磁感强度为 B。从负极板的小孔射入一个电子, 经过有电场和磁场同时存在的空间, 并打在正极板上。射入电子的初速度为 v_0 , 方向跟竖直方向成 θ 角。求电子打在正极板上时速度的大小。

第四章 电磁感应

自从 1820 年奥斯特发现电流的磁效应以后，人们很自然地思考：既然电流能够产生磁场，反过来，磁场是不是也能产生电流呢？不少物理学家都开始探索怎样用磁体使导线中产生电流。但是，在相当长的时间里，并没有得到预期的结果。英国物理学家法拉第经过十年坚持不懈的努力，终于取得重大突破，在 1831 年发现了由磁场产生电流的条件和规律。由磁场产生电流这种现象后来被称为电磁感应现象。

电磁感应现象是电磁学的重大发现之一，这一重大发现进一步揭示了电和磁的密切联系，为后来麦克斯韦建立完整的电磁理论奠定了基础。根据这一发现后来发明了发电机、变压器等电器设备，使电能在生产 and 生活中得到广泛应用，开辟了电气化时代。

一、电磁感应现象

在什么条件下才能产生电磁感应现象呢？

最容易产生的设想是，把绕在磁铁上的导线和电流表串联起来组成一个闭合电路，看能不能产生电流。法拉第就是这样开始研究的，结果发现电流表的指针并不偏转。换用强的磁铁，或者换用更灵敏的电流表，也都没有电流产生。

怎样才能产生电流呢？下面通过几个实验来说明这个问题。

实验一 我们在初中学过，照图 4 - 2 那样，把导体 AB 和电流表串联起来组成闭合电路，当导体 AB 在磁场中做切割磁感线运动时，电流表的指针发生偏转，表明电路中产生了电流。

导体 AB 是闭合电路的一部分，可见，当闭合电路的一部分导体在磁场里做切割磁感线运动时，电路中就有了电流。这是我们在初中学过的结论。

在这个实验中，导体 AB 是运动的，如果反过来让磁体运动，而导体不动，会不会在电路中产生电流呢？

实验二 如图 4 - 3 所示，把磁铁插入螺线管，或者从螺线管里拿出来，可以看到，磁铁相对于螺线管运动的时候，电流表的指针发生偏转，表明螺线管电路中有了电流。如果保持磁铁在螺线管中不动，或者让二者以同一速度运动，即保持相对静止，螺线管中就没有电流。磁铁相对于螺线管运动时，螺线管的导线切割磁感线，可见，不论是导体运动，还是磁体运动，只要闭合电路的一部分导体切割磁感线，电路中就有电流产生。

图 4—2

图 4—3

闭合电路的一部分导体切割磁感线时，穿过闭合电路的磁通量发生变化。由此提示我们：如果导体和磁体不发生相对运动，而让穿过闭合电路的磁场发生变化，会不会在电路中产生电流呢？

图 4—4

实验三 如图 4—4 所示，把螺线管 B 套在螺线管 A 的外面，合上开关给螺线管 A 通电时，电流表的指针发生偏转，螺线管 B 中有了电流。当螺线管 A 中的电流达到稳定时，螺线管 B 中的电流消失。打开开关使螺线管 A 断电时，螺线管 B 中也有电流产生。如果用变阻器来改变电路中的电阻，使螺线管 A 中的电流发生变化，螺线管 B 中也有电流产生。

螺线管 B 处在螺线管 A 的磁场中，当 A 通电和断电时，或者 A 中的电流发生变化时，A 的磁场随着发生变化。可见，在导体和磁体不发生相对运动的情况下，只要闭合电路中的磁场发生变化，因而穿过闭合电路的磁通量发生变化，闭合电路中就有电流产生。

结论 不论是闭合电路的一部分导体做切割磁感线的运动，还是闭合电路中的磁场发生变化，穿过闭合电路的磁通量都发生变化。这样，就可以总结出如下的结论：

不论用什么方法，只要穿过闭合电路的磁通量发生变化，闭合电路中

就有电流产生。这种利用磁场产生电流的现象叫做电磁感应，产生的电流叫做感应电流。

把你所知道的，或者你自己设想的使穿过闭合电路的磁通量发生变化的各种不同的方法一一列举出来，并且在老师的指导下到实验室中去做实验，验证你的方法是否能产生感应电流。

在电磁感应现象中能量的转化是怎样的呢？能量守恒定律是一个普遍适用的定律，同样适用于电磁感应现象。当电路闭合时，感应电流做功，消耗了电能。在图 4 - 2 和图 4 - 3 中，外力移动导体 AB 或磁铁时做功，消耗的电能是从机械能转化而来的，发电机就是应用这个原理制成的。在图 4 - 4 中，电能是由螺线管 A 转移给螺线管 B 的，变压器就是应用这个原理制成的。在这种转化和转移中能量保持不变。

· 阅读 · 法拉第关于电磁感应现象的实验

奥斯特发现了电流的磁效应后，法拉第仔细地分析了电流的磁效应。他认为，既然磁铁可以使靠近它的铁块具有磁性，静电荷可以使靠近它的导体带电，那么电流也应当使靠近它的线圈感应出电流。1822 年法拉第在日记中记载着“把磁转变成电”的光辉思想。1831 年 8 月法拉第把两个线圈绕在一个铁环上(图 4 - 5)，线圈 A 接直流电源，线圈 B 接电流表。他发现，当线圈 A 的电路接通或断开的瞬间，线圈 B 中产生瞬时电流。法拉第发现，铁环并不是必须的。拿走铁环，再做这个实验，电磁感应现象仍然发生，只是线圈中的电流弱些。

图 4—5

法拉第怎样分析他的实验呢？他的思路大致如下：

第一，线圈 B 除了处在通电线圈 A 的磁场中，同 A 没有别的联系，所以 B 的感应电流只能由 A 的磁场引起。

第二，A 中电流稳定因而周围磁场稳定时，B 中没有感应电流，表明稳定的磁场不引起感应电流；只有当 A 通电或断电，它的电流变化因而周围磁场变化时，B 中才有感应电流。这表明变化的磁场才能引起感应电流。

第三，磁场可以由磁感线形象地表示，B 所在处的磁场发生变化时，穿过线圈 B 的磁通量发生变化。所以，感应电流的产生条件可以归结为穿过线圈的磁通量发生变化。

为了透彻研究电磁感应现象，法拉第做了许多实验。1831 年 11 月法拉第在所写的论文中把产生感应电流概括为五种情况：变化着的电流；变化着的磁场；运动的稳恒电流；运动的磁铁；在磁场中运动的导体。

练习一

(1)如图 4 - 6 所示，在磁场中有一个闭合的弹簧线圈。先用手把线圈撑开(图甲)，然后放开手，让线圈收缩(图乙)。线圈收缩时，其中是否有感应电流？为什么？

图 4—6

(2)在图 4 - 7 所示的匀强磁场中有一个线圈。保持线圈平面垂直于磁感线，当线圈在磁场中上下运动时，是否会在线圈中引起感应电流？当线圈在磁场中左右运动时，是否会在线圈中引起感应电流？为什么？

(3)如图 4 - 8 所示，线圈在匀强磁场中绕 OO' 轴转动时，线圈里是否有感应电流？为什么？

图 4—8

(4)如图 4 - 9 所示，让闭合线圈由位置 1 通过一个匀强磁场运动到位置 2。线圈在运动过程中，什么时候有感应电流，什么时候没有感应电流？为什么？

图 4—9

(5)矩形线圈 ABCD 位于通电直长导线附近(图 4 - 10)，线圈跟导线同在一个平面内，且线圈的两个边与导线平行。在这个平面内，线圈远离导线平动时，线圈中有没有感应电流？线圈和导线都不动，当导线中的电流 I 逐渐增大或减小时，线圈中有没有感应电流？为什么？

图 4—1

注意： I 越大，直线电流的磁场越强；离直导线越远，磁感强度 B 越小。

(6)把一个铜环放在匀强磁场中，使环的平面与磁场的方向垂直(图 4 - 11 甲)。如果使环沿着磁场的方向移动，铜环中是否产生感应电流？为什么？如果磁场是不均匀的(图 4 - 11 乙)，是否产生感应电流？为什么？

图 4—11

二、法拉第电磁感应定律——感应电动势的大小

要使闭合电路中有电流，电路中必须有电源，电流是由电源的电动势产生的。在电磁感应现象中，既然闭合电路中有感应电流，这个电路中就一定有电动势。电路断开时，虽然没有感应电流，电动势依然存在。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。图 4 - 2 中的导体 AB，图 4 - 3、图 4 - 4 中的螺线管 B，都相当于电源。感应电流的强弱由感应电动势的大小和闭合电路的电阻决定，可以由闭合电路欧姆定律算出。

感应电动势的大小跟什么有关呢？

在图 4 - 1 所示的实验中，导体 AB 切割磁力线的速度越大，穿过闭合电路所围面积的磁通量的变化就越快，感应电流和感应电动势就越大。在图 4 - 3 的实验中，磁铁运动得越快，穿过螺线管的磁通量的变化就越快，感应电流和感应电动势就越大。在图 4 - 4 的实验中，通电和断电时，比起逐渐改变电阻器的电阻时，A 中电流变化得快，因而穿过 B 的磁通量也变化得快，B 中的感应电流和感应电动势就大。

实验表明：感应电动势的大小与磁通量变化的快慢有关。磁通量变化的快慢可以用单位时间内磁通量的变化来表示。单位时间内磁通量的变化量通常叫做磁通量的变化率。这就是说，感应电动势的大小跟磁通量的变化率有关。精确的实验表明：

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。

设时刻 t_1 时穿过闭合电路的磁通量为 ϕ_1 ，时刻 t_2 时穿过闭合电路的磁通量为 ϕ_2 ，则在时间 $t = t_2 - t_1$ 内磁通量的变化量为 $\Delta\phi = \phi_2 - \phi_1$ ，

磁通量的变化率为 $\frac{\Delta\phi}{\Delta t}$ ，设感应电动势为 \mathcal{E} ，则有

$$\mathcal{E} = k \frac{\Delta\phi}{\Delta t}.$$

其中 k 为比例常数。在国际单位制中，上式中各量的单位都已确定：

\mathcal{E} 的单位是伏特， ϕ 的单位是韦伯， t 的单位是秒。同学们可以自己证明 1 伏 = 1 韦 / 秒。所以上式中的 $k=1$ ，上式可写成

$$\mathcal{E} = \frac{\Delta\phi}{\Delta t} \quad (1)$$

设闭合电路是一个 n 匝线圈，且穿过每匝线圈的磁通量变化率都相同，由于 n 匝线圈可以看作由 n 个单匝线圈串联而成，因此整个线圈中的感应电动势是单匝线圈的 n 倍，即

$$\mathcal{E} = n \frac{\Delta\phi}{\Delta t} \quad (2)$$

在实际工作中。为了获得较大的感应电动势，常常采用多匝线圈。

在图 4 - 3 的实验中，设在 0.5 秒的时间内把磁铁的一极由螺线管的顶部插到底部，在这段时间里穿过每匝线圈磁通量的变化为 1.5×10^{-5} 韦伯。螺线管线圈的匝为 100 匝，这个螺线管产生的感应电动势有多大？如果闭

合电路的总电阻为 3.0 欧，感应电流有多大？

下面，我们推导导体做切割磁力线运动时感应电动势的表达式。

如图 4 - 12 所示，把矩形线框 abcd 放在磁感强度为 B 的匀强磁场里，线框平面跟磁感线垂直。设线框可动部分 ab 的长度是 l，以速度 v 向右运动，在 t 时间内由原来的位置 ab 移到 a₁b₁，这时线框的面积变化量 $\Delta S = lvt$ ，穿过闭合电路的磁通量的变化量 $\Delta \Phi = B \Delta S = Blvt$ 。代入公式 $\mathcal{E} = \frac{\Delta \Phi}{\Delta t}$ 中，得到

$$\mathcal{E} = Blv \quad (3)$$

图 4—12

如果导线的运动方向跟导线本身垂直，但跟磁力线方向有一个夹角 (图 4—13)，我们可以把速度 v 分解为两个分量：垂直于磁感线的分量 $v_1 = v \sin \theta$ ，平行于磁感线的分量 $v_2 = v \cos \theta$ 。后者不切割磁感线，不产生感应电动势。前者切割磁感线，产生的感应电动势为 $\mathcal{E} = Blv_1$ ，而 $v_1 = v \sin \theta$ ，所以

$$\mathcal{E} = Blv \sin \theta \quad (4)$$

图 4—13

可见，导线切割磁感线时产生的感应电动势的大小，跟磁感强度 B、导线长度 l、运动速度 v 以及运动方向和磁感线方向的夹角 θ 的正弦 $\sin \theta$ 成正比。

在国际单位制中，(3)和(4)两式中 \mathcal{E} 、B、l、v 的单位分别用伏特、特斯拉、米、米/秒。同学们可以自己证明，公式等号两边的单位是一致的，即 1 伏 = 1 特 × 1 米 × 1 米/秒。

练习二

(1) 关于电磁感应的下述说法中，正确的是什么？

- A. 穿过线圈的磁通量越大，感应电动势越大。
- B. 穿过线圈的磁通量为零，感应电动势一定为零。
- C. 穿过线圈的磁通量的变化越大，感应电动势越大。
- D. 穿过线圈的磁通量变化越快，感应电动势越大。

(2) 试证明：a. 1 伏 = 1 韦/秒。 b. 1 伏 = 1 特 × 1 米 × 1 米/秒。

(3) 有一 10 匝的线圈放在匀强磁场中，磁场方向垂直于线圈平面，线圈的面积为 10 厘米²。当 t=0 时 $B_1 = 0.2$ 特。经过 0.1 秒后，磁场变为 $B_2 = 0.05$ 特，磁场方向保持不变。求线圈中的感应电动势。

(4) 在 0.4 特的匀强磁场中，长度为 25 厘米的导线以 6 米/秒的速率做切割磁感线的运动，运动方向跟导线本身垂直，跟磁感线成 30° 角。求感应电动势。

(5) 如图 4 - 14 所示，矩形线圈在匀强磁场中绕 OO' 轴转动时，线圈中是否有感应电动势？为什么？设线圈的边长分别为 l_1 和 l_2 ，转动角速度为 ω ，磁场的磁感强度为 B。试证明，

图 4—14

在图示的位置时，线圈中的感应电动势为

$$=BS$$

其中 S 为线圈的面积， $S=l_1l_2$ 。

(6) 有一个 1000 匝的线圈，在 0.4 秒内穿过它的磁通量从 0.02 韦增加到 0.09 韦，求线圈中的感应电动势。如果线圈的电阻是 10 欧，把它跟一个电阻为 990 欧的电热器串联组成闭合电路时，通过电热器的电流是多大？

(7) 如图 4 - 15 所示，让线圈由位置 1 通过一个匀强磁场的区域运动到位置 2，下述说法中正确的是什么？

A．线圈进入匀强磁场区域的过程中，线圈中有感应电流，而且进入时的速度越大，感应电流越大。

B．整个线圈在匀强磁场中匀速运动时，线圈中有感应电流，而且电流是恒定的。

C．整个线圈在匀强磁场中加速运动时，线圈中有感应电流，而且电流越来越大。

D．线圈穿出匀强磁场区域的过程中，线圈中有感应电流，而且穿出时的速度越大，感应电流越大。

图 4—15

三、楞次定律——感应电流的方向

在第一节实验中，电流表的指针有时向右偏转，有时向左偏转，表示在不同情况下感应电流的方向是不同的。怎样确定感应电流的方向呢？

现在我们利用图 4 - 2 的实验来研究这个问题。

前两节用磁通量的概念表达出产生感应电流的条件和感应电动势的大小，由此自然地想到，也要用磁通量的概念来表达确定感应电流方向的规律。

图 4—16

通过实验观察可以发现如图 4 - 16 所示的规律：当磁铁移近或插入线圈时，线圈中感应电流的磁场方向跟磁铁的磁场方向相反(图 4 - 16 甲、丙)；当磁铁离开线圈或从线圈中拔出时，线圈中感应电流的磁场方向跟磁铁的磁场方向相同(图 4 - 16 乙、丁)。

当磁铁移近或插入线圈时，穿过线圈的磁通量增加，这时感应电流的磁场方向跟磁铁的磁场方向相反，阻碍磁通量的增加(图 4 - 17 甲)；当磁铁离开线圈或从中拔出时，穿过线圈的磁通量减少，这时感应电流的磁场方向跟磁铁的磁场方向相同，阻碍磁通量的减少(图 4 - 17 乙)。

图 4—17

在其他电磁感应现象中也有相同的规律。凡是由磁通量的增加引起的感应电流，感应电流激发的磁场就阻碍原来磁通量的增加；凡是由磁通量的减少引起的感应电流，感应电流激发的磁场就阻碍原来磁通量的减少。

物理学家楞次(1804 ~ 1865)概括了各种实验结果，在感应电流具有这样的方向，就是感应电流的磁场总要阻碍引起感应电流的磁通量的变化。这就是楞次定律。

我们还可以从另一个角度认识楞次定律。如图 4 - 17 甲所示，当磁铁的 N 极移近螺线管时，螺线管的上端是 N 极，因而磁铁受到推斥，阻碍磁铁相对于螺线管的运动。如图 4 - 17 乙所示，当磁铁的 N 极离开螺线管时，螺线管的上端是 S 极，因而磁铁受到吸引，也要阻碍磁铁相对于螺线管的运动。总之，楞次定律的内容是：从磁通量变化的角度来看，感应电流总要阻碍磁通量的变化；从导体和磁体的相对运动的角度来看，感应电流总要阻碍相对运动。

利用楞次定律可以判断各种情况下感应电流的方向。感应电流的方向跟感应电动势的方向是一致的，判断出感应电流的方向也就判断出感应电动势的方向。

思考与讨论

在图 4 - 3 所示的实验中，按照楞次定律，感应电流总要阻碍磁体相对于螺线管的运动。这就是说，把磁体移近螺线管是外力时，外力要克服磁体和螺线管间的斥力做功；让磁体离开螺线管时，外力要克服磁体和螺线管间的引力做功。你能从能量转化和守恒的角度解释这一现象吗？如果感应电流不是按照楞次定律所确定的方向流动，而是相反，那将会出现什么情况？

· 小实验 ·

观察电磁感应现象

在一个大些的铁钉上，用漆包线绕上两个线圈 A 和 B，将线圈 B 的两端接在一起，并把 CD 段漆包线放在静止的自制指南针的上方(图 4 - 18)。试判断用干电池给线圈 A 通电的瞬间，指南针偏转的方向。做这个实验，看一看你的判断与实验结果是否一致。

四、楞次定律的应用

应用楞次定律判断感应电流的方向，首先要明确原来磁场的方向；其次，要明确穿过闭合电路的磁通量是增加还是减少；然后根据楞次定律确定感应电流的磁场方向；最后利用安培定则确定感应电流的方向。

【例 1】现在来确定磁铁的 S 极移近或离开螺线管时感应电流的方向。

如图 4—19 甲所示，把磁铁的 S 极移近螺线管时，原来的磁场方向向上，穿过螺线管的磁通量增加。从楞次定律知道，感应电流要阻碍磁通量的增加，因此感应电流的磁场方向跟原来的磁场方向相反，即感应电流的磁场方向是向下的。知道了感应电流的磁场方向，利用安培定则就可以确定感应电流的方向。

如图 4 - 19 乙所示，当磁铁的 S 极离开螺线管时，原来的磁场方向向上，穿过螺线管的磁通量减少。从楞次定律知道，感应电流要阻碍磁通量的减少，因此感应电流的磁场方向跟原来的磁场方向相同，方向也是向上的。知道了感应电流的磁场方向，利用安培定则就可以确定感应电流的方向。

图 4—19

在这个例子中，感应电流是不是也总要阻碍磁体和螺线管的相对运动呢？请你自己分析一下。

【例 2】现在来确定图 4 - 4 中感应电流的方向。

合上开关给螺线管 A 通电时，或者减小变阻器的电阻，使螺线管 A 中的电流增大时，穿过螺线管 B 的磁通量增加(4 - 20 甲)。设螺线管 A 中的电流沿着顺时针方向流动，因而原来的磁场方向是向下的，如图中所示。从楞次定律知道，感应电流要阻碍磁通量的增加，因此螺线管 B 中感应电流的磁场方向跟 A 的磁场方向相反，即磁力线的方向是向上的。由此可以知道，感应电流在 B 中是沿着反时针方向流动的。

打开开关使 A 断电时，或者增大变阻器的电阻时，B 中感应电流是沿着顺时针方向流动的，如图 4 - 20 乙所示。这种情形请同学们自己来判断。

【例 3】现在来确定图 4 - 21 中感应电流的方向。

这种情形可以用右手定则来判断(图 4 - 21)：伸开右手，让拇指跟其余四指垂直，并且都跟手掌在一个平面内，让磁感线垂直从手心进入，拇指指向导体运动的方向，其余四指指的就是感应电流的方向。

图 4—21

在图 4 - 2 的实验中，当导体 AB 向右运动时，用右手定则判断的结果是：感应电流是由 A 流向 B。现在用楞次定律来判断。导体 AB 向右运动时，

穿过闭合电路的磁通量减少，而感应电流要阻碍磁通量的减少，因此感应电流在闭合电路内部的磁场方向跟磁铁的磁场方向相同，即磁感线的方向也是向下的。利用安培定则可以知道，感应电流的方向是由 A 流向 B 的。可见，用楞次定律来判定跟用右手定则来判定，结果是一致的。右手定则可以看作是楞次定律的特殊情况。

在什么情况下，用右手定则判定感应电流的方向比较简便？把你得出的结论和同学们讨论一下。

· 阅读 · 寻找磁单极子

在电现象里有电荷，而且正、负电荷可以单独存在。在磁现象里却没有发现磁荷，南北极也不能单独存在。一块磁体，无论把它分得多么小，总是有南极和北极。

1931 年，英国物理学家狄拉克从理论上预言存在着只有一个磁极的粒子——磁单极子。根据磁单极子的理论，电和磁之间的相似将更加完美。理论的动人前景，吸引了一批物理学家，用各种方法，在岩石中，在宇宙射线（即从宇宙空间飞来的粒子）中，在加速器实验中，去寻找磁单极子。但是到现在还没有找到。人们推测，磁单极子可能是在宇宙形成初期产生的，残存下来的为数较少，而且分散在广漠的宇宙之中，要找到它不是很容易的。

美国的一位物理学家卡布莱拉用实验寻找磁单极子，实验根据的原理就是电磁感应现象。仪器的主要部分是由超导体做成的线圈。设想有一个磁单极子穿过超导线圈（图 4—22），穿过超导线圈的磁通量将发生改变，而且引起的感应电动势的方向不变，于是在超导线圈中将引起感应电流。超导体的电阻为零，这个电流将长期维持下去而不减弱。1982 年 2 月，这位物理学家发现在超导线圈中出现了稳定的电流，认定这是磁单极子穿过了超导线圈。不过以后没有重复观察到那次实验中观察到的现象，所以这一事例还不能确证磁单极子的存在。

目前，寻找磁单极子的实验还在进行中。如果磁单极子确实存在，现在的电磁理论就要做重大的修改，对整个物理学基础理论的发展将产生重大的影响。

图 4—22

把一个条形磁铁从闭合螺线管的一端插入，由另一端抽出，在整个过程中，螺线管里产生的感应电流的方向是否改变？一个磁单极子（比如是 N 极）穿过螺线管时，感应电流的方向是否改变，说明理由。

练习三

(1) 在图 4 - 10 中，当线圈远离通电导线而去时，线圈中感应电流的方

向如何？

(2)如图 4 - 23 所示，导线 AB 和 CD 互相平行。试确定在闭合和断开开关 S 时导线 CD 中感应电流的方向。

图 4—23

(3)在图 4 - 24 中 CDEF 是金属框。当导体 AB 向右移动时，试应用楞次定律确定 ABCD 和 ABFE 两个电路中感应电流的方向。我们能不能用这两个电路中的任意一个来判定导体 AB 中感应电流的方向？

图 4—24

(4)在图 4 - 25 中，线圈 M 和线圈 P 绕在同一铁芯上。

a. 当合上开关 S 的一瞬时，线圈 P 里有没有感应电流？

b. 当线圈 M 里有恒定电流通过时，线圈 P 里有没有感应电流？

c. 当断开开关 S 的一瞬时，线圈 P 里有没有感应电流？

d. 在上面三种情况里，如果线圈 P 里有感应电流，指出线圈 P 的哪一端是 N 极。

图 4—25

(5)图 4 - 26 中的 A 和 B 都是很轻的铝环，环 A 是闭合的，环 B 是断开的。用磁铁的任一极来接近 A 环，会产生什么现象？把磁铁从 A 环移开，会产生什么现象？磁极移近或远离 B 环时，又会产生什么现象？解释所发生的现象。

图 4—26

(6)如图 4 - 27 所示，让线圈 A 自由落下，并通过一段有匀强磁场的空间。试定性地讨论线圈运动的加速度变化情况。(不考虑空气阻力)

五、自感

在电磁感应现象中，有一种叫做自感现象的特殊情形，现在来研究这种现象。

自感现象 在图 4 - 28 所示的实验中，先合上开关 S，调节变阻器 R 的电阻，使同样规格的两个灯泡 A₁ 和 A₂ 的明亮程度相同。再调节变阻器 R₁ 使两个灯泡都正常发光。然后断开开关 S。

再接通电路时可以看到，跟变阻器 R 串联的灯泡 A₂ 立刻正常发光，而跟有铁芯的线圈 L 串联的灯泡 A₁ 却是逐渐亮起来的。为什么会出现这样的现象呢？原来，在接通电路的瞬间，电路中的电流增大，穿过线圈 L 的磁通量也随着增加，因而线圈中必然会产生感应电动势，这个感应电动势阻碍线圈中电流的增大。所以通过 A₁ 的电流只能逐渐增大，灯泡 A₁ 只能逐渐亮起来。

图 4—28

现在再来做图 4 - 29 的实验。把灯泡 A 和带铁芯的线圈 L 并联在直流电路里。接通电路，灯泡 A 正常发光后，再断开电路，这时可以看到，灯泡 A 要过一会儿才熄灭。为什么会出现这种现象呢？这是由于电路断开的瞬间，通过线圈的电流突然减弱，穿过线圈的磁通量也就很快地减少，因而在线圈中产生感应电动势。虽然这时电源已经断开，但线圈 L 和灯泡 A 组成了闭合电路，在这个电路中有感应电流通过，所以灯泡不会立即熄灭。

图 4—29

从上述两个实验可以看出，当导体中的电流发生变化时，导体本身就产生感应电动势，这个电动势总是阻碍导体中原来电流的变化的。这种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。

自感系数 自感电动势的大小和其他感应电动势一样，跟穿过线圈的磁通量变化的快慢有关系。线圈的磁场是由电流产生的，所以穿过线圈的磁通量变化的快慢跟电流变化的快慢有关系。对于同一个线圈来说，电流变化得快，穿过线圈的磁通量变化得也就快，线圈中产生的自感电动势就大；反之，电流变化得慢，产生的自感电动势就小。对于不同的线圈，在电流变化快慢相同的情况下，产生的自感电动势是不同的。电学中用自感系数来表示线圈的这种特性，自感系数简称自感或电感。线圈的自感系数跟线圈的形状、长短、匝数等因素有关系。线圈越粗、越长、匝数越密，它的自感系数就越大。另外，有铁芯的线圈的自感系数比没有铁芯时大得多。

自感系数的单位是亨利，简称亨，国际符号是 H。如果通过线圈的电流在 1 秒钟内改变 1 安时产生的自感电动势是 1 伏，这个线圈的自感系数就是 1 亨。1 亨=1 伏·秒/安。

常用的较小单位有毫亨和微亨。

$$1 \text{ 毫亨} = 10^{-3} \text{ 亨},$$

$$1 \text{ 微亨} = 10^{-6} \text{ 亨}。$$

自感现象在各种电器设备和无线电技术中有广泛的应用。自感线圈是交流电路中的重要元件。在无线电设备中，用它和电容器组成振荡电路，以发射电磁波，这在下面的两章中就会讲到。我们用的日光灯的镇流器也是利用自感现象制成的。请看阅读：日光灯原理。

自感现象也有不利的一面。在自感系数很大而电流又很强的电路(如大型电动机的定子绕组)中，在切断电路的瞬间，由于电流在很短的时间内发生很大的变化，会产生很高的自感电动势，使开关的闸刀和固定夹片之间的空气电离而变成导体，形成电弧。这会烧坏开关，甚至危及工作人员的安全。因此，切断这类电路时必须采用特制的安全开关。常见的安全开关是将开关放在绝缘性能良好的油中，防止电弧的产生，保证安全。

在制造精密电阻时，为了消除使用过程中因电流变化引起的自感现象，往往采用双线绕法，如图 4 - 30 所示。由于两根平行导线中的电流方向相反，它们的磁场互相抵消，从而可以使自感现象的影响减弱到可以忽略的程度。

· 阅读 · 日光灯原理

你家里使用日光灯吗？你知道为什么它有一个镇流器(长方形的“铁盒子”)吗？它正是一个利用线圈自感现象的例子。

图 4 - 31 是日光灯的电路图，它主要是由灯管、镇流器和起动机组成的。镇流器是一个带铁芯的线圈。起动器的构造如图 4 - 32 所示，它是一个充有氖气的小玻璃泡，里面装有两个电极，一个是固定不动的静触片，一个是用双金属片制成的 U 形触片。灯管内充有稀薄的水银蒸气。水银蒸气导电时发出紫外线，使涂在管壁上的荧光粉发出柔和的白光。激发水银蒸气导电所需的电压比 220 伏的电源电压高得多，因此，日光灯在开始点燃时需要一个高出电源电压很多的瞬时电压。日光灯点燃后正常发光时，灯管的电阻变得很小，只允许通过不大的电流，电流过强就会烧毁灯管，这时又要使加在灯管上的电压大大低于电源电压。这两方面的要求都是利用跟灯管串联的镇流器来达到的。

图 4—31

当开关闭合后，电源把电压加在起动器的两极之间，使氖气放电而发出辉光。辉光产生的热量使 U 形触片膨胀伸长跟静触片接触而把电路接通。于是镇流器的线圈和灯管的灯丝中就有电流通过。电路接通后，起动器中的氖气停止放电，U 形触片冷却收缩，两个触片分离，电路自动断开。在电路突然中断的瞬间，在镇流器两端产生一个瞬时高电压，这个电压加上电源电压加在灯管两端，使灯管中的水银蒸气开始放电，于是日光灯管成为电流的通路开始发光。在日光灯正常发光时，由于交流电不断通过镇流器的线圈，线圈中就有自感电动势，它总是阻碍电流变化的。这时镇流器起着降压限流作用，保证日光灯的正常工作。

注意观察你周围的日光灯工作的情况，认识镇流器和起动器的作用。

*六、涡流

仔细观察发电机、电动机和变压器，可以看到它们的铁芯都不是整块金属，而是用许多薄的硅钢片叠合而成的。为什么要这样呢？

原来，把块状金属放在变化的磁场中，或者让它在磁场中运动时，金属块内将产生感应电流。这种电流在金属块内自成闭合回路，很像水的旋涡，因此叫做涡电流，简称涡流。整块金属的电阻很小，所以涡流常常很强。

如图 4 - 33 所示，把绝缘导线绕在块状铁芯上，当交流电通过导线时，穿过铁芯的磁通量不断变化，铁芯中会产生如图中虚线所示的涡流。块状铁芯中的涡流很强，会使铁芯大量发热，浪费大量的电能。

图 4—33

为了减少涡流损失，电机和变压器通常用涂有绝缘漆的薄硅钢片叠压制成的铁芯，如图 4 - 34 所示。这样，涡流被限制在狭窄的薄片之内，回路的电阻很大，涡流大为减弱，涡流损失大大降低。铁芯采用硅钢片，是因为这种钢比普通钢的电阻率大，可以进一步减少涡流损失。硅钢的涡流损失只有普通钢的 $1/5 \sim 1/4$ 。

图 4—34

在各种电机、变压器中涡流是有害的，要采取各种办法来减弱它。但涡流也是可以利用的，下面举两个例子。

图 4 - 35 是冶炼金属的高频感应炉的示意图。这种电炉利用涡流熔化金属。冶炼锅内装入被冶炼的金属，让高频交流电通过线圈，被冶炼的金属中就产生很强的涡流，从而产生大量的热使金属熔化。这种冶炼方法速度快，温度容易控制，能避免有害杂质混入被冶炼的金属中，适于冶炼特种合金和特种钢。

图 4—35

电学测量仪表要求指针的摆动很快停下来，以便可以迅速读出示数。前一章讲的电流表，线圈要绕在铝框上，铝框就是起这个作用的。当被测电流通过线圈时，线圈带动指针和铝框一起转动。铝框在磁场中转动时产生涡流，磁场对这个涡流的作用力阻碍它们的摆动，使指针能很快地指到示数位置上。

· 阅读 · 电磁感应现象的应用(一)——动圈式话筒的原理

在剧场里，为了使观众能听清演员的声音，常常需要把声音放大。放大声音的装置主要包括话筒，扩音器和扬声器三部分(图 4-36)。

图 4—36

话筒是把声音转变为电信号的装置。图 4 - 37 是动圈式话筒的构造原理图，它是利用电磁感应现象制成的。当声波使金属膜片振动时，连接在

膜片上的线圈(叫做音圈)随着一起振动。音圈在永久磁铁的磁场里振动,其中就产生感应电流(电信号)。感应电流的大小和方向都变化,变化的振幅和频率由声波决定。这个信号电流经扩音器放大后传给扬声器,从扬声器中就发出放大的声音。

电磁感应现象的应用(二)——磁带录音机的原理

磁带录音机主要由机内话筒、磁带、录放磁头、放大电路、扬声器、传动机构等部分组成。图 4 - 38 是录音机的录、放原理示意图。

图 4—38

录音时,声音使话筒中产生随声音而变化的感应电流——音频电流。音频电流经放大电路放大后,进入录音磁头的线圈中,在磁头的缝隙处产生随音频电流变化的磁场。磁带紧贴着磁头缝隙移动,磁带上的磁粉层被磁化,在磁带上就记录下声音的磁信号。

放音是录音的逆过程。放音时,磁带紧贴着放音磁头的缝隙通过,磁带上变化的磁场使放音磁头线圈中产生感应电流,感应电流的变化跟记录下的磁信号相同,所以线圈中产生的是音频电流。这个电流经放大电路放大后,送到扬声器,扬声器把音频电流还原成声音。

在录音机里,录、放两种功能是合用一个磁头完成的,录音时磁头与话筒相连;放音时磁头与扬声器相连。

本章小结

这一章讲了关于电磁感应现象产生的条件和它的两个基本定律:法拉第电磁感应定律,楞次定律。前者确定了感应电动势的大小,后者确定了感应电流的方向,也就是感应电动势的方向。还介绍了重要的、特殊的电磁感应现象——自感。

(1)关于产生感应电流的条件,有如下论断:不论用什么方法,只要穿过闭合电路的磁通量发生变化,闭合电路中就有感应电流,这里提的是“不论用什么方法”。请列举出你所想到的各种不同的方法。你能不能找到例外,即:穿过闭合电路的磁通量发生变化,但闭合电路中却没有感应电流。试试看。

(2)法拉第电磁感应定律的内容是: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。这里说的是“变化率”,而不是“变化量”。“变化率”和“变化量”有什么区别和联系?回忆一下,速度的变化量指的是什么?速度的变化率又是指的什么?

(3)课文中由一般公式 $\mathcal{E} = \frac{\Delta\phi}{\Delta t}$ 推导出导体切割磁感线这种特殊情形的公式 $\mathcal{E} = Blv$ 。请你自己独立推导一下。

(4)楞次定律的内容是:感应电流具有这样的方向,就是感应电流的磁场总要阻碍引起感应电流的磁通量的变化。请你对“阻碍……变化”的含义给予具体的解释,并举例说明。

(5)用楞次定律来判断感应电流的方向,应当按照怎样的步骤进行?结合实例具体总结一下。

(6)电磁感应现象的规律是否跟能量守恒定律相一致?设想在图 4 - 3 的实验中,感应电流不是阻碍而是推动磁铁相对于螺线管的运动,那会出现什么情况?为什么这个设想的情况不会发生?

(7)什么是自感现象?线圈的自感系数跟哪些因素有关系?在实际中,自感现象对我们有什么利和弊?举出几个应用自感现象和防止它的弊端的实例。

* (8)简述日光灯的原理。

* (9)什么是涡流?为什么发电机、电动机和变压器的铁芯要用许多相互绝缘的薄硅钢片叠合起来制成?

(10)你从法拉第发现电磁感应现象中受到什么启迪?为什么说这一发现是划时代的?多找些材料看看,和老师、同学一起议论一下。

习题

A 组

(1)在图 4 - 39 中,条形磁铁以某一速度 v 向螺线管靠近,下面哪种说法是正确的?

- A. 螺线管中不产生感应电流。
- B. 螺线管中产生感应电流,方向如图中所示。
- C. 螺线管中产生感应电流,方向与图中所示的相反。

图 4—39

(2)弹簧上端固定,下端悬挂一根磁铁。将磁铁抬到某一高度后放开,磁铁能上下振动较长时间才停下来。如果在磁铁下端放一个固定的闭合线圈,使磁铁上下振动时穿过它(图 4 - 40),磁铁就会很快地停下来。解释这个现象,并说明此现象中能量转化的情况。

这种现象叫做电磁阻尼,在实际中有很多应用。课文中讲的使电学测量仪表的指针很快地停下来,就是电磁阻尼的应用。电磁阻尼还常用于电气机车的电磁制动器中。

(3)如图 4 - 41 所示,把一个闭合线圈放在蹄形磁体的两磁极之间,蹄形磁体和闭合线圈都可以绕 OO' 轴转动。当转动蹄形磁体时,线圈也跟着转动起来。解释这个现象。

这种现象叫做电磁驱动,在实际中也有很多应用。下一章要介绍的感应电动机就是利用这个道理驱动的。家庭中用的电能表,汽车上用的电磁式速度表,也利用这种电磁驱动。

(4)如图 4 - 42 所示,在匀强磁场中有一个线圈。

a. 当线圈分别以 P_1 和 P_2 为轴按逆时针方向转动时(如图中箭头所示),感应电流的方向各是什么?

b. 当转速恒定时,上述两种情况下感应电流的大小有什么关系?

c. 转速恒定时,感应电动势的大小跟线圈面积有何关系?

d. 设磁感强度 B 为 1.5 特, AB 为 10 厘米, BC 为 4 厘米, 转速为每秒 $120/2$ 转, 分别求出以 P_1 和 P_2 为转轴时感应电动势的最大值。

(5) 如图 4-43 所示, 在平行的金属导轨上放有两根可以自由滑动的导体 ab 和 cd , 它们放在匀强磁场中, 磁场方向如图所示。当导体 ab 向右运动时, 导体 cd 将向哪个方向运动? 如果不要求判定导体 cd 中感应电流的方向, 你能不能直接运用楞次定律判定导体 cd 的运动方向? 如果磁场变成相反的方向, 导体 cd 将向哪个方向运动?

(6) 如图 4-44 所示, 电阻 $R_{ab}=0.1$ 欧的导体 ab 沿光滑导线框向右做匀速运动, 线框中接有电阻 $R=0.4$ 欧。线框放在磁感应强度 $B=0.1$ 特的匀强磁场中, 磁场方向垂直于线框平面。导体 ab 的长度 $l=0.4$ 米, 运动的速度 $v=5.0$ 米/秒。线框的电阻不计。

a. 电路 $abcd$ 中相当于电源的部分是____; ____相当于电源的正极。

b. 电源的电动势即产生的感应电动势 =____伏, 电路 $abcd$ 中的电流 I =____安。

c. 导体 ab 所受安培力的大小 F =____牛, 方向是____; 使导体 ab 向右匀速运动所需的外力 F' =____牛。

d. 外力做功的功率 $P'=F'v$ =____瓦。

e. 电源的功率即感应电流的功率 $P=I^2R_{ab}$ =____瓦。

f. 电源内部消耗的功率 $P_1=I^2R_{ab}$ =____瓦, 电阻 R 上消耗的功率 $P_2=I^2R$ =____瓦。

这道题实际上讲的是发电机的工作原理。请你从能量的角度分析一下, 能量是怎样转化的, 转化中是否守恒。

(7) 有一边长为 $L=0.1$ 米的正方形导线框 $abcd$, 质量 $m=10$ 克, 由高度 $H=0.2$ 米处自由下落(图 4-45)。其下边 ab 进入匀强磁场区域后, 线圈开始做匀速运动, 直到其上边 cd 刚刚开始穿出匀强磁场为止。此匀强磁场区域宽度也是 L 。求线框在穿越匀强磁场过程中发出的焦耳热。 g 取 10 米/秒²。

B 组

(1) 宇航员飞到某一个不熟悉的行星上, 他们想用一只灵敏电流表和一个线圈来探测一下行星周围是否有磁场, 应当怎样办?

(2) 如图 4-46 所示, 固定在匀强磁场中的正方形导线框 $abcd$ 边长为 l , 其中 ab 边是电阻为 R 的均匀电阻丝, 其余三边是电阻可忽略的铜导线。匀强磁场的磁感应强度为 B , 方向垂直于纸面向里。现有一段长短、粗细、材料均与 ab 边相同的电阻丝 PQ 架在线框上, 并以恒定速度 v 从 ad

边滑向 bc 边。 PQ 在滑动过程中与导线框的接触良好。当 PQ 滑过 $\frac{1}{3}$ 的距时, 通过 aP 段电阻丝的电流是多大?

(3) 图 4-47 是生产中常用的一种延时继电器的示意图。铁芯上有两个线圈 A 和 B 。线圈 A 跟电源连接, 线圈 B 的两端接在一起, 构成一个闭合电路。在拉开开关 S 的时候, 弹簧 K 并不能立即将衔铁 D 拉起, 从而使触头 C (连接工作电路) 立即离开, 过一段短时间后触头 C 才能离开; 延时继电器就是这样得名的。试说明这种继电器的原理。

(4)图 4 - 48 是高频焊接原理示意图。线圈中通以高频交流电时，待焊接的金属工件中就产生感应电流。由于焊缝处的接触电阻很大，放出的焦耳热很多，致使温度升得很高，将金属熔化，焊接在一起。我国生产的自行车车架就是用这种办法焊接的。

试定性地说明：为什么交流电的频率越高，焊缝处放出的热量越大。

(5)图 4 - 49 是电磁流量计的示意图。在非磁性材料做成的圆管道外加一匀强磁场区域，当管中的导电液体流过此磁场区域时，测出管壁上的 ab 两点间的电动势 \mathcal{E} ，就可以知道管中液体的流量 Q —单位时间内流过液体的体积(米³/秒)。已知管的直径为 D ，磁感强度为 B ，试推出 Q 与 \mathcal{E} 的关系表达式。

因为电磁流量计是一根管道，内部没有任何阻碍流体流动的结构，所以可以用来测量高粘度及强腐蚀性流体的流量。它具有测量范围宽、反应快、易与其他自动控制装置配套等优点。

(6)图 4 - 50 中的 A 是一个边长为 l 的方形导线框，其电阻为 R 。现维持线框以恒定速度 v 沿 x 轴运动，并穿过图中所示的匀强磁场区域 B 。如果以 x 轴的正方向作为力的正方向，线框在图示位置的时刻作为时间的零点，则磁场对线框的作用力 F 随时间变化的图线应为图 4 - 51 中的哪个图？

第五章 交流电

我们已经学过了直流电。除了直流电，还有大小和方向都随时间作周期性变化的电流，叫做交流电。交流电比起直流电来有许多优点。交流电可以利用变压器升高或者降低电压，可以驱动结构简单、运行可靠的感应电动机。因此在工农业生产和日常生活中普遍使用交流电。

交流电和直流电都是电荷定向移动形成的，它们存在着共同点。学习交流电，应该注意这种共同点。但是交流电不同于直流电，有它自己的特点。正是这些特点使交流电具有上述优点。学习交流电，更要注意它的特点。

一、交流电的产生和变化规律

交流电的产生 照图 5 - 1 那样,使矩形线圈 abcd 在匀强磁场中匀速转动。可以看到电流表的指针随着线圈的转动而摆动,并且线圈每转一周,指针左右摆动一次。这表明转动的线圈里产生了大小和方向都随时间做周期性变化的交流电。

线圈 abcd 在磁场中转动时,它的 ab 边和 cd 边切割磁感线,在线圈中产生感应电动势,在电路中就产生感应电流。图 5 - 2 表示线圈 abcd 在磁场中逆时针转动一周的几个位置。从图 5 - 2 可以看到,当 ab 边向右、cd 边向左运动时(乙图),感应电流是沿着 abcd 方向流动的;当 ab 边向左、cd 边向右运动时(丁图),感应电流是沿着 dcba 方向流动的。这两种情况交替出现,因此在线圈中出现了交流电。

在线圈平面垂直于磁感线时,各边都不切割磁力线,线圈中没有感应电流,这样的位置叫做中性面(甲、丙图)。从图 5 - 2 可以看出,线圈平面每经过中性面一次,感应电流的方向就改变一次。因此线圈转动一周,感应电流的方向改变两次。

交流电的变化规律 图 5 - 3 中标 a 的小圆圈表示图 5 - 1 中线圈 ab 边的横截面,标 d 的小圆圈表示线圈 cd 边的横截面。设线圈平面从中性面开始转动,角速度是 ω (弧度/秒)。经过时间 t ,线圈转过的角度是 ωt ,ab 边的线速度 v 的方向跟磁感线方向间的夹角也等于 ωt 。设 ab 边的长度是 l ,磁感应强度是 B ,ab 边中的感应电动势就是 $e_{ab}=Blv\sin \omega t$ 。cd 边中的感应电动势跟 ab 边中的大小相同,而且两边又是串联的,所以,这一瞬间整个线圈中的感应电动势。 $e=2Blv \sin \omega t$ 。

令 $e_m=2Blv$,我们得到

$$e= e_m \sin \omega t \quad (1)$$

式中的 e 随着时间而变化,不同的时刻有不同的数值,叫做电动势的瞬时值, e_m 叫做电动势的最大值。上式表明,电动势是按照正弦规律变化的。

如果把线圈和电阻组成闭合电路,电路中就有感应电流。实验证明,在只含有电阻的电路中,适用于直流电路的欧姆定律也适用于交流电路。设闭合电路的总电阻为 R ,则电流的瞬时值

$$i=e/R=(e_m/R)\sin \omega t,$$

其中 e_m/R 为电流的最大值,用 I_m 表示,于是有

$$i=I_m \sin \omega t \quad (2)$$

可见,感应电流也是按正弦规律变化的。

这时,电路的某一段上电压的瞬时值同样是按着正弦规律变化的,即

$$u=U_m \sin \omega t \quad (3)$$

其中电压的瞬时值 $u=iR'$,电压的最大值 $U_m=I_m R'$, R' 是该段电路的电阻。

这种按正弦规律变化的交流电叫正弦交流电。图 5 - 4 是正弦交流电的电动势 e 、电流 i 和电压 u 随时间变化的图象。

正像简谐振动是一种最简单又最基本的振动一样,正弦交流电是一种最简单又最基本的交流电。家庭电路的交流电就是正弦交流电。把家庭电路的交流电输入到示波器中,在荧光屏上显示出如图 5 - 5 甲所示的正弦波形。

实际中应用的交流电，不只限于正弦交流电，它们随时间变化的规律是各种各样的。图 5 - 5 表示出几种交流电的波形。

二、表征交流电的物理量

恒定电流不随时间而变化，要描述电路中的电流或电压，只要指出电流或电压的数值就够了。交流电的电流或电压，大小和方向都随时间作周期性的变化，要描述它们，需要的物理量就要多些。下面讨论表征正弦交流电的物理量。

最大值和有效值 交流电的最大值(I_m, U_m)是交流电在一个周期内所能达到的最大数值，可以用来表示交流电的电流强弱或电压高低，在实际中有重要意义。例如把电容器接在交流电路中，就需要知道交变电压的最大值。电容器所能承受的电压要高于交变电压的最大值，否则电容器可能被击穿。但是，交流电的最大值不适于用来表示交流电产生的效果。在实际中通常用有效值来表示交流电的大小。

交流电的有效值是根据电流热效应来规定的。让交流电和直流电通过相同阻值的电阻，如果它们在相同时间内产生的热量相等，就把这一直流电的数值叫做这一交流电的有效值。例如某一交流电通过一段电阻丝，在一段时间内产生的热量为 Q ，如果改用 3 安的直流电通过这段电阻丝，在相同的时间内产生的热量也为 Q ，那么，这一交流电的有效值就是 3 安。交流电压的有效值可以用同样的方法来确定。通常用 I 和 U 分别表示交流电的电流和电压的有效值。

计算表明，正弦交流电的有效值与最大值之间有如下的关系：

$$I = \frac{I_m}{\sqrt{2}} = 0.707I_m$$

$$U = \frac{U_m}{\sqrt{2}} = 0.707U_m$$

我们通常说家庭电路的电压是 220 伏，便是指有效值。各种使用交流电的电气设备上所标的额定电压和额定电流的数值，一般交流电流表和交流电压表测量的数值，也都是有效值。以后提到交流电的数值，凡没有特别说明的，都是指有效值。

照明用交流电的电压是 220 伏，动力供电线路的电压是 380 伏，它们的有效值、最大值各是多少？

周期和频率 跟任何周期性过程一样，交流电也要用周期或频率来表示变化的快慢。在图 5 - 1 所示的实验里，线圈匀速转动一周，电动势、电流都按正弦规律变化一周。我们把交流电完成一次周期性变化所需的时间，叫做交流电的周期，通常用 T 表示，单位是秒。交流电在 1 秒内完成周期性变化的次数，叫做交流电的频率，通常用 f 表示，单位是赫兹。

根据定义，周期和频率的关系是

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

我国工农业生产和生活用的交流电，周期是 0.02 秒，频率是 50 赫，电流方向每秒改变 100 次。

练习一

(1)有人说,在图 5 - 2 中,线圈平面转到中性面的瞬间,穿过线圈的磁通量最大,因而线圈中的感应电动势最大;线圈平面跟中性面垂直的瞬间,穿过线圈的磁通量为零,因而线圈中的感应电动势为零。这种说法对不对?为什么?

(2)在图 5-1 所示的实验中,设 ab 边长为 20 厘米,线圈的宽 ad 为 10 厘米,磁感强度 B 为 0.01 特,线圈的转数为 50 转/秒,求电动势的最大值和有效值。如果从线圈平面在中性面的位置开始计时,经过 0.01 秒时电动势的瞬时值是多大?

(3)一台发电机产生的正弦交流电的电动势的最大值为 400 伏,线圈匀速转动的角速度为 314 弧度/秒,试写出电动势瞬时值的表达式。如果该发电机的外电路只有电阻元件,且闭合电路的总电阻为 2000 欧,则电路中电流的最大值为多少?写出电流瞬时值的表达式。

(4)某用电器两端允许加的最大直流电压是 100 伏,能否把它接在交流电压是 100 伏的电路里?为什么?

(5)有一正弦交流电,电流的有效值是 2 安,它的最大值是多少?

(6)图 5-6 是一个正弦交流电的电流图象。根据图象求出它的周期、频率和电流的最大值。

三、电感和电容对交流电的影响

在直流电路中，影响电流跟电压关系的只有电阻。在交流电路中，情况要复杂一些，影响电流跟电压关系的，除了电阻，还有电感和电容。

电感对交流电的阻碍作用 如图 5-7 所示，把电感线圈 L 和白炽灯泡串联在电路里。利用双刀双掷开关 S 可以分别把这个电路接到直流电源或交流电源上。实验中取直流电压和交流电压的有效值相等。实验表明，接通直流电源时，灯泡亮些；接通交流电源时，灯泡变暗。这表明电感对交流电有阻碍作用。

为什么电感对交流电有阻碍作用呢？交流电通过电感线圈时，由于电流时刻在改变，电感线圈中必然产生自感电动势，阻碍电流的变化，这样就形成了对电流的阻碍作用。

电感对交流电阻碍作用的大小，用感抗来表示。实验表明，线圈的自感系数越大、交流电的频率越大，电感对交流电的阻碍作用就越大，感抗也就越大。

在电工和电子技术中使用的扼流圈，就是利用电感阻碍交流电的作用制成的。扼流圈通常有两种，一种叫低频扼流圈(图 5-8 甲)。线圈绕在闭合的铁心上，匝数为几千甚至超过一万，自感系数为几十亨。这种线圈对低频交流电就有很大的阻碍作用。而线圈的电阻较小，对直流电的阻碍作用较小。这种线圈可用来“通直流，阻交流”。另一种叫高频扼流圈(图 5-8 乙)。线圈有的绕在圆柱形的铁氧体心上，有的是空心的，匝数为几百，自感系数为几个毫亨。这种线圈对低频交流电的阻碍作用较小，对高频交流电的阻碍作用很大，可用来“通低频，阻高频”。

交流电能够通过电容器照图 5-9 那样，把白炽灯泡和电容器串联在电路里。如果接通直流电源，灯泡不亮，说明直流电不能通过电容器。如果接通交流电源，灯泡就亮了，说明交流电能够“通过”电容器。我们看到，这里交流电又表现出跟直流电不同的特性。

直流电不能通过电容器是容易理解的。交流电为什么能够“通过”电容器呢？原来，自由电荷并没有通过电容器的电介质，只不过在交变电压的作用下，当电源电压升高时，电容器充电，电荷向电容器的极板上集聚，形成充电电流；当电源电压降低时，电容器放电，电荷从电容器的极板上放出，形成放电电流。电容器交替进行充电和放电，电路中就有了电流，表现为交流电“通过”了电容器。

在电子技术中，从某一装置输出的电流常常既有交流成分，又有直流成分。如果只需要把交流成分输送到下一级装置，只要在两级电路之间串联一个电容器(图 5-10)，就可以使交流成分通过，而阻止直流成分通过。作这种用途的电容器叫做隔直电容器。

电容对交流电的阻碍作用在图 5-9 的实验中，如果把电容器从电路中取下来，使灯泡直接与交流电源相接，可以看到，灯泡要比接有电容器时亮得多。这表明电容也对交流电有阻碍作用。

为什么电容对交流电有阻碍作用呢？原来，当电源的电压推动自由电荷向某一方向做定向运动的时候，电容器两极板上积累的电荷却反抗它们向这个方向做定向运动，这就产生了电容对交流电的阻碍作用。

电容对交流电的阻碍作用的大小，用容抗来表示。实验表明，电容器

的电容越大、交流电的频率越高，电容器对交流电的阻碍作用就越小，容抗也就越小。

在电子技术中，从某一装置输出的交流电常常既有高频成分，又有低频成分。如果只需要把低频成分输送到下一级装置，只要在下一级电路的输入端并联一个电容器就可以达到目的(图 5-11)。电容器对高频成分的容抗小，对低频成分的容抗大，高频成分就通过电容器，而使低频成分输入到下一级。作这种用途的电容器叫做高频旁路电容器。

电感和电容对交流电的阻碍作用的大小不但跟电感、电容本身有关，还跟交流电的频率有关。这关系可以简单概括为：

电感是“通直流、阻交流，通低频、阻高频”。

电容是“通交流、阻直流，通高频、阻低频”。

请你结合实例慢慢体会。

四、变压器

在实际应用中，常常需要改变交流电的电压。大型发电机发出的交流电，电压有几万伏，而远距离输电却需要高达几十万伏的电压。各种用电设备所需的电压也各不相同。电灯、电炉等家用电器需要 220 伏的电压，机床上的照明灯需要 36 伏的安全电压。一般电子管的灯丝只需 6.3 伏的低电压，电视机显像管却需要一万多伏的高电压。交流电便于改变电压，以适应各种不同的需要。变压器就是改变交流电电压的设备。

变压器原理 图 5 - 12 是变压器的示意图。变压器是由闭合铁芯和绕在铁芯上的两个线圈组成的。一个线圈跟电源连接，叫原线圈(也叫初级线圈)；另一个线圈跟负载连接，叫副线圈(也叫次级线圈)。两个线圈都是用绝缘导线绕制成的，铁芯由涂有绝缘漆的硅钢片叠合而成。

在原线圈上加交变电压 U_1 ，原线圈中就有交变电流，它在铁芯中产生交变的磁通量。这个交变磁通量既穿过原线圈，也穿过副线圈，在原、副线圈中都要引起感应电动势。如果副线圈电路是闭合的，在副线圈中就产生交变电流，它也在铁芯中产生交变磁通量。这个交变磁通量既穿过副线圈，也穿过原线圈，在原、副线圈中同样要引起感应电动势。在原、副线圈中由于有交变电流而发生的互相感应现象，叫做互感现象。互感现象是变压器工作的基础。

原线圈和副线圈中的电流共同产生的磁通量，绝大部分通过铁芯，只有一小部分漏到铁芯之外。在通常的计算中可以略去漏掉的磁通量，认为穿过这两个线圈的交变磁通量相同，因而这两个线圈的每匝产生的感应电动势相等。设原线圈的匝数是 n_1 ，副线圈的匝数是 n_2 ，穿过铁芯的磁通量是 Φ ，原、副线圈中产生的感应电动势分别是

$$e_1 = n_1 \frac{\Delta\Phi}{\Delta t}, \quad e_2 = n_2 \frac{\Delta\Phi}{\Delta t}$$

由此可得

$$\frac{e_1}{e_2} = \frac{n_1}{n_2}$$

在原线圈中，感应电动势 e_1 起着阻碍电流变化的作用，跟加在原线圈两端的电压 U_1 的作用相反。原线圈的电阻很小，如果略去不计，则有 $U_1 = e_1$ 。副线圈相当于一个电源，感应电动势 e_2 相当于电源的电动势。副线圈的电阻也很小，如果忽略不计，副线圈就相当于无内阻的理想电压源，因而副线圈的端电压 $U_2 = e_2$ 。于是得到

$$\frac{U_1}{U_2} = \frac{n_1}{n_2} \quad (1)$$

可见，变压器原、副线圈的端电压之比等于这两个线圈的匝数比。

$n_1 > n_2$ 时， $U_2 > U_1$ ，变压器使电压升高，这种变压器叫做升压变压器。
 $n_2 < n_1$ 时， $U_2 < U_1$ ，变压器使电压降低，这种变压器叫做降压变压器。

变压器原、副线圈的电流 I_1 、 I_2 之间又有什么关系呢？变压器工作的时候，输入的功率一部分从副线圈输出，另一部分消耗在发热上。但是消耗的功率一般不超过百分之几，特别是大型变压器效率可达 97 ~ 99.5%。

所以，可以认为变压器输入的电功率 I_1U_1 等于输出的电功率 I_2U_2 ，即

$$I_1U_1 = I_2U_2$$

由 $U_1/U_2=n_1/n_2$ 可以知道

$$\frac{I_1}{I_2} = \frac{n_2}{n_1} \quad (2)$$

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。变压器的高压线圈匝数多而通过的电流小，可用较细的导线绕制；低压线圈匝数少而通过的电流大，应当用较粗的导线绕制。

几种常用的变压器 变压器的种类很多，我们介绍几种常用的变压器。

图 5 - 13 是自耦变压器的示意图。这种变压器的特点是铁芯上只绕有一个线圈。如果把整个线圈作原线圈，副线圈只取线圈的一部分，就可以降低电压(图 5 - 13 甲)；如果把线圈的一部分作原线圈，整个线圈作副线圈，就可以升高电压(图 5 - 13 乙)。

调压变压器就是一种自耦变压器，它的构造如图 5 - 14 所示。线圈 AB 绕在一个圆环形的铁芯上。AB 之间加上输入电压 U_1 。移动滑动触头 P 的位置就可以调节输出电压 U_2 。

互感器也是一种变压器。交流电压表和电流表都有一定的量度范围，不能直接测量高电压和大电流。用变压器把高电压变成低电压，或者把大电流变成小电流，这个问题就可以解决了。这种变压器叫做互感器。互感器分电压互感器和电流互感器两种。

电压互感器(图 5 - 15)用来把高电压变成低电压，它的原线圈并联在高压电路中，副线圈上接入交流电压表。根据电压表测得的电压 U_2 和铭牌上注明的变压比(U_1/U_2)，可以算出高压电路中的电压。为了工作安全，电压互感器的铁壳和副线圈应该接地。

电流互感器(图 5 - 16)用来把大电流变成小电流。它的原线圈串联在被测电路中，副线圈上接入交流电流表。根据电流表测得的电流 I_2 和铭牌上注明的变流比(I_1/I_2)，可以算出被测电路中的电流。如果被测电路是高压电路，为了工作安全，同样要把电流互感器的外壳和副线圈接地。

练习二

(1) 变压器为什么不能改变直流电的电压？

(2) 收音机中的变压器，原线圈有 1210 匝，接在 220 伏的交流电源上。要得到 5 伏、6.3 伏和 350 伏三种输出电压，三个副线圈的匝数应当分别是多少匝？

(3) 为了安全，机床上照明电灯用的电压是 36 伏，这个电压是把 220 伏的电压降压后得到的。如果变压器的原线圈是 1140 匝，副线圈是多少匝？用这台变压器给 40 瓦的电灯供电，原副线圈中的电流各是多大？

(4) 变压器原理可以用来测量线圈的匝数：把被测线圈作原线圈，用一个匝数已知的线圈作副线圈，通入交流电，测出两线圈的电压，就可以求出被测线圈的匝数。已知副线圈有 400 匝，把原线圈接到 220 伏的线路中，

测得副线圈的电压是 55 伏，求原线圈的匝数。

(5) 在图 5 - 15 所示的电压互感器电路中，为什么副线圈的匝数比原线圈的少？在图 5 - 16 所示的电流互感器的电路中，为什么副线圈的匝数比原线圈的多？是“随意”画的，还是必须这样？

五、电能的输送

为了合理地利用水、煤等能源，发电站通常修建在靠近这些天然资源的地方，但是用电的地方却分布很广，有的地方离发电站很远，因此就需要把电能输送到远方。电能便于输送，用输电导线把电源和用电设备连起来，就可以输送电能了。这是电能的一个优点。

输送电能的基本要求应当是：可靠、保质、经济。

可靠，是指保证供电线路可靠地工作，少有故障和停电；保质，就是保证电能的质量——电压和频率稳定。因为各种用电设备都是按着一定的工作电压(使用交流电的用电器还按一定频率)设计、制造的，供电电压过低或过高，用电器都不能正常工作，甚至被损坏；经济，则是指输电线路建造和运行的费用低，电能损耗少，电价低。

输电导线上的功率损失 任何输电线都具有电阻，因而输电过程中必然有一部分电能转化成热而损失掉。设输电电流为 I ，输电线的电阻为 R ，则功率损失为

$$P=I^2R$$

在输电线上的这种损失显然是一种浪费，我们要尽量减少它。一般要求这种损失不超过输送功率的 10%。

怎样来减少输电中的功率损失呢？可以有两种方法。

一种是减小输电线的电阻。由电阻定律 $R = \frac{l}{S}$ 可知，在输电线长度 l 已定的情况下，为了减小电阻，应当选用电阻率小、横截面积大的导线。目前一般用电阻率较小的铜或铝作导线材料。但是，要增大导线的横截面积，就要多耗费金属材料，会使输电线太重，给架线也带来很大困难。实际上，有时即使把横截面积增大到十分惊人甚至实际做不到的程度，也不能把功率损失降低到要求的范围以内。

你计算一下就会知道，把功率为 200 千瓦的电能用铝导线输送到 10 千米以外的地方，要使功率损失为输送功率的 10%，用 110 伏的电压输电，导线横截面积大约需要 96000 毫米²！显然太粗了。

另一种方法是减小输电导线中的电流。在导线电阻不变的条件下，电流如果减小到原来的百分之一，功率损失 $P=I^2R$ 就减小到原来的万分之一。输送功率的大小是由输电任务决定的，不能任意变动。要保证输送功率 P 不变，由 $P=UI$ 知道，必须提高输电的电压 U ，才能减小电流 I 。这就是要采用高压输电的道理。

在上面的例子中，如果其他条件不变，把输电电压提高 100 倍，即用 11 千伏的电压输电，导线的横截面积大约只需 9.6 毫米²。请你自己计算一下。

输电线路上的电压损失 输电导线有电阻，欧姆定律告诉我们，电流通过输电导线时，会在线路上产生电势降低，致使输电线路末端(也就是用电设备两端)的电压 U' 比起始端电压 U 要低(图 5 - 17)。这个差值

$U=U-U'$ 称为输电线路上的电压损失。

对交流输电线路来说，既有电阻造成的电压损失 $U=IR$ ，也有感抗和容抗(总称电抗)造成的电压损失。交流电通过输电导线时，由于自感电动势阻碍电流的变化，会产生感抗。导线架在空中，和大地这一导体之间构成电容器。导线敷设在地下，需要用绝缘层和大地隔开，导线和大地也构成电容器。电容器对交流电有阻碍作用，会产生容抗。感抗和容抗都会造成电压损失。当输电线路电压较高，导线截面积比较粗时，电抗造成的电压损失常比电阻造成的还要大！

线路上电压损失太大，送到用电设备的电压就会太低，这样可能达不到用电设备的额定电压，影响正常使用。比如电灯不亮，电动机运转不正常或转不动等等。这就造成电能质量不高，即使输送到用户，技术上也不能满足需要，无法使用。通常要求线路上的电压损失不超过正常输电电压的

减小输电线路上的电压损失也有两种方法。一种是增大输电导线的截面积以减小电阻。但这种方法只在低压照明电路上才有效。在高压线路上，电抗造成的电压降常比电阻造成的还要大，而增大导线截面积对减小电抗不起多大作用。因此，这种办法效果不佳。另一种是减小输电电流。在输送电功率不变的前提下，必须提高输电电压。

通过以上分析，我们看到，无论从减小输电中的功率损失，还是减小电压损失方面看，都要求提高输电电压，减小输电电流。

但也不是说输电电压越高越好，可以无限制提高电压。电压越高，对输电线路绝缘的要求越高，线路修建费用就会增多。输电电压越高，变压器上的电压也越高，制造变压器时在绝缘、结构等方面的要求也相应增加。实际输送电能时，要综合考虑各种因素，如输送功率大小、距离远近、技术和经济要求等，依照不同情况选择适合的输电电压。

如果输送功率比较大，输电距离比较远，就要采用较高的电压输电。电压低了，势必要加大导线的横截面积。如果输送功率不太大，距离也不太长，就不必用太高的电压输电。电压高了反而增加花在绝缘上的费用，而且导线因机械强度的限制又不能太细。例如，输送功率为 100 千瓦以下，距离为几百米以内，一般采用 220 伏的电压送电。这就是通常用的低压线路。输送功率为几千千瓦到几万千瓦，距离为几十千米到上百千米，一般采用 35 千伏或 110 千伏的电压送电。这就是所谓高压输电。如果输送功率为 10 万千瓦以上，距离为几百千米，就必须采用 220 千伏甚至更高的电压送电。这就是所谓超高压输电。

目前我国远距离送电采用的电压有 110 千伏、220 千伏和 330 千伏，在少数地区已开始采用 500 千伏的超高压送电。目前世界上正在试验的最高输电电压是 1150 千伏。

大型发电机发出的电压，等级有 10.5 千伏、13.8 千伏、15.75 千伏、18.0 千伏，都不符合远距离送电的要求。因此，要在发电站内用升压变压器升压后再向远距离送电。如果输电电压是 220 千伏或 330 千伏，到了用电区，先在一次高压变电所降到 110 千伏，再由二次高压变电所降到 10 千伏，其中一部分送往需要高电压的工厂，另一部分送到低压变电所降到 220/380 伏，送给一般用户。图 5-18 表示出了从发电站到用户的输电线路。

练习三

(1) 输送 4800 千瓦的电功率，采用 110 千伏高压输电，若不考虑电抗的影响，输电导线中的电流是多少安？如果用 110 伏电压输电，输电导线中的电流将是多少？

(2) 指出下面的一段叙述错在哪里，并说明原因。

将电能从发电站送到用户，在输电线上会损失一部分功率。设输电电压为 U ，则功率损失为

$$P_{\text{损}} = UI \quad (1)$$

而

$$U = IR \quad (2)$$

将(2)代入(1)式，得到

$$P_{\text{损}} = \frac{U^2}{R} \quad (3)$$

由(3)式可知，要减小功率损失 $P_{\text{损}}$ ，就应当用低压送电和增大输电线电阻 R 。

(3) 从发电站输出的功率为 200 千瓦，输电线总电阻为 0.05 欧，用 110 伏和 11 千伏两种电压输电，输电线上由电阻造成的电压损失各是多少伏？

(4) 如果用 220 伏和 11 千伏两种电压来输电，设输送的电功率、输电线上的功率损失、导线的长度和电阻率都相同，求导线的横截面积之比。

(5) 一座小型水电站，它输出的电功率是 20 千瓦，输电电压是 100 伏。输电线的总电阻是 0.5 欧，输电线上的功率损失是多少？用户得到的电功率是多少？假如用 250 伏的电压输电，输电导线上损失的功率和用户得到的功率又各是多少？

· 阅读 · 直流输电

人类历史上最早的输电线路就是直流的。开始时输电电压只有 100 伏，后来逐步提高，到 1885 年提高到 6 千伏。但是，此后在输电技术上发生了巨大变化。

一方面，制造高电压大功率的直流发电机很困难，又不能直接给直流电升压，而远距离输电需要高电压。另一方面，19 世纪 80 年代末发明了三相交流发电机、变压器，特别是发明了结构简单、运行可靠、价格便宜的感应电动机，交流电的应用得到进一步的发展。于是，适应这种情况，输电技术转为发展交流输电。

但是，随着电力系统的扩大，输电功率的增加，输电距离的增长，交流输电遇到了一些技术困难。现在直流输电作为解决输电技术困难的方向之一，又重新受到重视。

交流输电遇到了什么困难，直流输电又有什么优点呢？

导线不但有电阻，还有电感。较细的导线，电阻的作用超过电感。在输电功率大，输电导线横截面积大的情况下，对交流电来说，感抗会超过电阻，但对稳定的直流电则只有电阻，没有感抗。

输电线一般是架空线，但跨过海峡给海岛输电时要用水下电缆，穿过

人口密集的城市输电时要用地下电缆，电缆在金属芯线的外面包着一层绝缘皮，水和大地都是导体，被绝缘皮隔开的金属芯线和水(或大地)构成了电容器。在交流输电的情况下，这个电容对输电线路的末端(受电端)起旁路电容的作用，并且随电缆增长而增大，旁路电容会增大到交流电几乎送不出去的程度。这时交流输电已无实际意义，只能用直流输电，因为电容对稳定的直流不起作用。

设想有甲、乙两台交流发电机给同一条电路供电，假如甲的是正的最大值时，乙恰好是负的最大值，它们发的电在电路里恰好互相抵消，电路无法工作。所以要电路正常工作，给同一条电路供电的所有发电机都必须同步运行，即同时达到正的最大值，同时达到负的最大值。现代的供电系统是把许多电站连成一个电力网，要使电力网内许多发电机同步运行，技术上是很困难的。直流输电就不存在同步问题。

现代的直流输电，只是输电这个环节是直流，发电仍是交流。在输电线路的起端有专用的换流设备将交流变换为直流，在输电线路的末端也有专用的换流设备将直流换为交流。目前换流设备存在着制造难、价格高等困难，有待研究解决。

高压直流输电主要用于远距离大功率输电、海底电缆输电、非同步运行的交流系统之间的连络等方面。随着大型水电站的开发和坑口电站的建设，以及大电网的互相联接，远距离大功率的直流输电必将在我国得到发展。

*六、三相交流电

三相交流电的产生 像图 5-2 那样, 只有一个线圈在磁场里转动, 电路里只产生一个交变电动势, 这样的发电机叫做单相交流发电机, 它发出的电流叫做单相交流电。如果在磁场里有三个互成角度的线圈同时转动, 电路里就产生三个交变电动势, 这样的发电机叫做三相交流发电机, 它发出的电流叫做三相交流电。

图 5-19 是三相交流发电机的示意图。在铁芯上固定着三个相同的线圈 AX、BY、CZ, 始端是 A、B、C, 末端是 X、Y、Z; 线圈平面互成 120° 角。匀速转动铁芯, 三个线圈就在磁场里匀速转动。这三个线圈是相同的, 它们产生出三个最大值和周期都相同的交变电动势。如果像图 5-20 那样把每个线圈分别跟负载 1、2、3 连接起来, 三相发电机就相当于三个独立的电源同时供电。

这三个线圈中的电动势虽然最大值和周期都相同, 但是它们不能同时为零或者同时达到最大值。由于三个线圈的平面依次相差 120° 角, 它们到达零值 (即通过中性面) 和最大值的时间, 依次落后 $\frac{1}{3}$ 周期。如果取

图 5-19 所示的瞬间作为时间的起点, 即 $t=0$ 时线圈 AX 位于中性面上, 三个线圈里的电动势就可以用图 5-21 中三条正弦曲线来表示。

在实际应用中, 三相发电机和负载并不像图 5-20 那样用六条导线连接, 而是只用三条或四条导线连接的。

星形连接 如果把图 5-20 中线圈的末端和负载之间的三条导线合在一起, 照图 5-22 那样用一条导线来连接, 每相负载上的电压并不改变, 却可以节省两条导线。这种连接方法叫做星形连接 (符号是 Y)。从每个线圈始端引出的导线叫做端线, 也叫相线, 在照明电路里俗称火线。从公共点引出的导线叫做中性线, 照明电路里中性线是接地的, 叫零线。

在三相电路里, 每个线圈两端的电压叫做相电压, 两条端线之间的电压叫做线电压。在星形连接中, 火线跟中性线之间的电压就是相电压。在我国日常电路中, 相电压是 220 伏, 线电压是 380 伏。

三角形连接 如果把发电机的三个线圈的始端和末端依次相连, 并照图 5-23 那样跟负载相连, 这种连接方法叫做三角形连接 (符号是 Δ)。在三角形连接中, 每两条端线之间的电压就是其中一个线圈的相电压, 所以线电压等于相电压。

· 阅读 · 感应电动机

照图 5-24 那样, 在磁铁中间放一个铝框, 如果转动磁铁, 造成一个旋转磁场, 铝框就随着转动。这种电磁驱动现象, 在前一章的习题中已经提到了。不仅转动磁铁可以产生旋转磁场, 用三相交流电也可以产生旋转磁场。照图 5-25 那样, 使三个相同的线圈的平面互成 120° 角, 并把它们接入三相交流电路中, 通电时可以看到放在线圈中间的铝框转动起来。感应电动机就是根据这个原理制成的。

感应电动机有一个定子 (图 5-26 甲) 和一个转子 (图 5-26 乙)。在定子内侧的凹槽里, 嵌有互成 120° 角的三组线圈 (定子绕组), 把这三组线圈

用星形连接法或三角形连接法连入三相电路中，就产生旋转磁场。

感应电动机的转子是由铁芯和嵌在铁芯上的闭合导体构成的。闭合导体是由嵌在铁芯凹槽中的铜条(或铝条)和两个铜环(或铝环)连在一起制成的，形状像个鼠笼(图 5-26 丙)，所以这种电动机也叫鼠笼式感应电动机。这个闭合导体相当于图 5-25 中的铝框，有了旋转磁场，它就转动起来。

感应电动机的构造简单，要改变转动方向，只要把定子上的任意两组线圈的电流互换一下就行。这种电动机在制造、使用和保养上都比较简单，广泛应用在工农业生产上。能够使用感应电动机，是三相交流电的突出的优点。

本章小结

在这一章里，我们学习了交流电的产生和它的特点。由于它的这些特点，使交流电在生活和生产中有广泛的应用。我们要注意掌握交流电不同于直流电的各方面特点，了解它的广泛应用。

1. 什么是交流电？什么是正弦交流电？它是怎样产生的？什么是中性面？

2. 正弦交流电的电动势、电流以及一段交流电路上电压的瞬时值表达式是怎样的？交流电的最大值和有效值各是什么？写出它们的关系式。通常说的交流电的电压和电流指的是什么值？

3. 表征交流电特征的物理量有哪些？写出周期和频率的关系式。我国在生产、生活中使用的交流电的周期和频率各是多少？

4. 在交流电路中，影响电流跟电压关系的，除了电阻，还有电容和电感。这是交流电和直流电的重大区别之一。电容和电感对交流电路各有什么影响？其特点是什么？

5. 变压器是根据什么原理制成的？变压器的原、副线圈的电压 U_1 和 U_2 之间、电流 I_1 和 I_2 之间有什么关系？这种关系在什么条件下成立？我们在推导这种关系时作了哪些假设？课文中讲的变压器是一种理想化模型，叫做理想变压器。

6. 远距离输电有什么要求？为什么要采用高压输电？

*7. 什么是三相交流电？它是怎样产生的？什么是星形连接？什么是三角形连接？

习题

A 组

(1) 在有效值为 220 伏的交流电路中，接入 50 欧的电阻，电流的有效值和最大值各是多少？这时消耗的功率是多少瓦？

(2) 晚会上装饰着 120 个小彩色电灯，每个小灯泡的额定电压都是 4 伏，工作电流都是 0.1 安，它们并联在一起，由一台变压器供电。变压器的原线圈接在 220 伏的照明电路上。求通过原线圈的电流。

(3) 使用一个强磁铁可以判断灯泡中的电流是交流还是直流。请你说明怎样判断和判断的根据。

(4) 下列各段文字中，单独的每一句话在多数情况下未必是错的，但整

体的推论存在明显的错误，请你指出错误，并说明理由。

A. 由于变压器的原、副线圈之间并未直接用导线相连而有电流，而是靠线圈中磁通量的变化传输功率，因此，能量在传输过程中不会有损失，变压器也不会发热。

B. 为了把送电电压变成适合各用户的负载电压，要使用变压器。变压器原线圈中电流的变化引起铁芯中磁通量的变化，铁芯中磁通量的变化使得穿过副线圈的磁通量也变化，因而在副线圈中产生感应电动势。根据法拉第电磁感应定律，副线圈中的感应电动势与磁通量的变化率成正比，而交流电的频率越高，磁通量的变化率越大，所以对于相同的原电压 U_1 ，交流电的频率越高，副线圈的感应电动势和端电压 U_2 也越高。这就是说，变压比 U_1/U_2 不只与匝数比有关，还与交流电频率有关。

C. 理想变压器中原、副线圈间电压的关系是 $U_2 = \frac{n_2}{n_1} U_1$ ，其中 U_1 、 U_2 分别是原、副线圈的端电压， n_1 、 n_2 分别是原、副线圈的匝数。对于升压变压器 $\frac{n_2}{n_1} > 1$ 。由于原、副线圈中通过相同的磁通量，所以它们的电流相同， $I_1 = I_2$ 。功率 $P_1 = U_1 I_1$ ， $P_2 = U_2 I_2$ ，由此得 $P_1/P_2 = U_2/U_1$ ，即 $P_2 = \frac{n_2}{n_1} P_1$ 。这就是说，升压变压器在升高电压的同时，也增大了功率。

B 组

(1) 图 5-27 是钳形测量仪的原理图。所示的钳形测量仪可以在不切断被测导线的情况下，通过电流表 A 测出导线中的电流。导线中的电流是交流还是直流？请你说明仪表的工作原理。

(2) 图 5-28 是电子技术中用到的限幅电路。电池组的电动势都为 E ，左端输入的是正弦交流电，电压 u_1 的最大值为 $2E$ 。试画出右端输出的电压 u_2 的图象，并分析说明理由(电池组的内阻略去不计)。说明：二极管有两个极：正极(+)和负极(-)。当正极的电势高于负极时，二极管导电。当正极的电势低于负极时，二极管不导电。也就是二极管具有单向导电性。

(3) 有一个教学用的可拆变压器，它的原、副线圈外部还可以绕线。现在要测定原、副线圈的匝数。现有一根足够长的绝缘导线，还需要什么器材？简要说明实验原理。

(4) 一台效率为 55% 的离心水泵，每秒钟能把 0.03 米^3 的水抽到 20 米的高度。现在用一台感应电动机通过皮带传动带动水泵运行，皮带传动的效率是 80%。在功率分别为 14 千瓦、20 千瓦、28 千瓦的三台电动机中，选用哪一台比较合适？

(5) 电站发出的电，在用电高峰时不够用，到深夜，发出的电又不能充分利用。为了解决这个问题，人们修建了水力蓄能电站。夜间，水泵利用多余的电能把水抽到高处的蓄水池中，到用电高峰时再利用蓄水池的水来推动水轮机发电。有一蓄能电站，4 台水泵 6 小时抽上来的水够 7 台水轮机工作 3 小时。如果每台水泵的功率是 45000 千瓦，每台水轮机的功率是

36000 千瓦。求这个水力蓄能电站的效率。

(6)图 5-29 是一个理想变压器的示意图，铁芯上绕有三个线圈，其中有两个副线圈。原副线圈匝数之比为 $n_1 : n_2 : n_3 = 10 : 5 : 1$ 。已知负载电阻 $R_2 = 110$ 欧， $R_3 = 11$ 欧。在原线圈 n_1 上加 220 伏的交变电压时，通过 n_1 、 n_2 、 n_3 的电流 I_1 、 I_2 、 I_3 分别是多少安培？

波动

设想在池塘中飘浮着一只玩具小船，我们把石子投到塘边的水里，激起一圈圈起伏不平的水波向周围传播开去，传到小船，使它动荡起来。在这个简单的例子中我们接触了一种广泛存在的重要运动形式——波动。

声波把能量和信息传给我们，使我们听到声音，得以用语言进行交流。远处发生地震，激起的地震波把能量传来，有时会引起地面的震动，甚至造成危害。打开收音机、电视机，我们听到声音，看到图像，是因为收音机等接收到了无线电波传来的能量和信号。太阳供给地球巨大的能量，是靠光波传来的。光纤通信也是靠光波传递信息的。我们接收到来自宇宙深处的电磁波，可以探知遥远天体的奥秘。

水波、声波、地震波是由机械振动引起的机械波，光波和无线电波都是电磁波。机械波和电磁波虽然物理本性不同，但它们都是以波动的形式传播的，它们都能发生反射、折射、衍射、干涉等现象，而衍射和干涉是波特有的现象。因此，我们把有关波的知识放在一起学习，便于体会它们的共性和比较它们的区别。

下面，我们先从机械波开始学习波动的知识。

第六章 机械波

一、波的形成和传播

在直线上传播的波 你看过长绸舞吗？演员抖动长绸的一端，长绸随之上下飞舞。我们也仿照这样，如图 6-1 所示，取一根较长的软绳，用手握住一端，拉平后向上抖动一下，或者说给绳的一端一个外来的扰动，我们可以看到有一个凸起状态沿着软绳向另一端传去，或者说有一个脉冲向另一端传去。为什么会有脉冲传播呢？因为绳的各部分之间存在着相互作用力，当绳的一端发生扰动时，就会引起相邻部分发生扰动，并依次引起更远的部分发生扰动，不过扰动开始的时刻依次推迟一些。这样，就有脉冲沿绳传播开去。

脉冲的形成和传播可以这样来模拟：如图 6-2 所示，一组同学排成一行，从左边第一位同学开始，下蹲一下然后起立，第二位、第三位……同学依次做这个动作，而开始下蹲的时刻依次推迟一会儿。另一组同学将会看到脉冲向右传播。如果不断地重复这种动作，就会看到一系列波向右传播。同学们不妨一试。

如果用手不断地上下抖动绳的一端，也就是使绳的一端发生振动，就有一列凹凸相间的波向绳的另一端传去(图 6-3)。设想把绳分成许多小部分，每一小部分可以看作质点。质点和质点之间有相互作用力，质点 1 在外力作用下振动起来以后，就带动质点 2 振动起来，只是质点 2 开始振动的时刻比质点 1 要迟一些，这样依次带动下去，后一个质点总比前一个质点迟一些开始振动。于是，振动逐渐传播开去，从整体上看，形成凹凸相间的波向右传播。

绳上的质点都在上下振动，并不随波迁移，沿绳传播的只是振动这种形式。

在上面这种波动中绳上的质点上下振动，波向右传播，二者的方向是垂直的。质点的振动方向跟波的传播方向垂直的波，叫做横波。在横波中，凸起的最高处通常叫做波峰，凹下的最低处通常叫做波谷。

现在我们来观察另外一种波。把一根长的螺旋弹簧用细线水平悬挂起来，在它的一端连接一个金属球，球固定在钢片上(图 6-4)。拨动钢片，使金属球沿着弹簧方向左右振动时，弹簧上就有疏密相间的波向右传去。我们也可以把弹簧看作一系列由弹力联系着的质点。金属球振动起来以后，依次带动后面的质点，而且后一个质点总比前一个迟一些开始振动。从整体上看形成疏密相间的波向右传播。弹簧上的质点也只是左右振动，并不随波迁移，传播的只是运动形式——振动。

弹簧上的质点左右振动，波向右传播，二者在同一直线上。质点的振动方向跟波的传播方向在同一直线上的波，叫做纵波。在纵波中，质点分布最密的地方叫做密部，质点分布最疏的地方叫做疏部。

在平面和空间传播的波 水面上传播的波，是常见的波在平面上传播的例子。向平静的水面投一颗石子，石子落处的水面受到扰动，开始振动起来，并激起一圈圈起伏不平的水波向周围传播开去(图 6-5)。石子落处是波源。所有各方向的波峰(或波谷)在同一时刻构成的轨迹，叫做波面，

最前面的波面叫做波阵面或波前。图 6-5 所示的水波，波面是圆形的，用图 6-6 表示。图中跟各波面垂直的线，叫做波线，用来表示波的传播方向。

图 6-7 是在水波演示槽中得到的波。波面是直线，波线是垂直于波面的平行的直线(图 6-8)。

在空气中传播的声波是三维波动。声源发生振动时，在声源周围的空气中有疏密相间的纵波向四面八方传播。在三维波动中，波面是球面的波叫做球面波，波面是平面的波叫做平面波。球面波传播到远处时，只观察其中一部分波面，就可以将它看做平面波。在平面上作图时，通常用图 6-6 和图 6-8 分别表示球面波和平面波。

你在电视中或许看到过一种团体表演。众多表演者排成一个方阵，他们上面覆盖着一大幅布，比如一面红旗，每人拿着红旗的一处(图 6-9)。从左面开始第一竖列的表演者一起不断地下蹲、起立，第二竖列、第三竖列……以后各竖列依次比前一竖列稍迟些开始重复这种动作。我们就会看到在这幅红旗上有一列直线波向右传播，仿佛红旗迎风飘扬一样。这就是一个有趣的直线波的模拟。实际中，红旗迎风飘扬，就是因为风的扰动使旗形成波动状。

绳上和弹簧上的波是在绳和弹簧上传播的，水波是在水中传播的，声波是在空气中传播的，地震波是在地壳中传播的。绳、弹簧、水、空气、地壳等借以传播波的物质叫做介质。机械振动在介质中传播，形成机械波。上面提到的波都是机械波。

介质虽然能够以波的形式把振动传播开去，但介质中的物质本身并不随着波一起迁移。介质中本来静止的质点，随着波的传来开始振动起来，这表明它获得了能量。这个能量是从波源通过前面的质点依次传递过来的。所以波在传播振动形式的同时，也将波源的能量传递出去。持续地供给波源能量，就能够持续地从波源以波的形式把能量传递出去。波是传递能量的一种方式。

波不但能够传递能量，而且可以传递信息。我们用言语来交流，就是利用声波传递信息。广播、电视是利用无线电波传递信息的，光缆是利用光波传递信息的。

二、波的图象

波的运动情况可以用图象来表示，用横坐标 x 表示在波的传播方向上介质各质点的平衡位置，纵坐标 y 表示某一时刻各质点偏离平衡位置的位移。在横波中，我们规定位移方向向上时，位移取正值；位移方向向下时，位移取负值。在 $x-y$ 坐标平面上，作出表示各质点平衡位置 x 与偏离平衡位置位移 y 的各个点 (x, y) ，把这些点连成曲线，就得到某一时刻的波的图象(图 6-10)。正因为我们规定位移方向向上时位移取正值，所以图 6-10 所示的某一时刻的波的图象跟该时刻横波的形状(波形)相似。

波以一定的速率 v (波速)在介质中传播。在单位时间内某一波峰(或波谷)向前移动的距离等于波速。如果知道一列波的传播方向和波速，从某一时刻 t 的波的图象就可以知道任一时刻的波的图象，例如时刻 $t + \Delta t$ 的波的图象。使波的图象沿着波的传播方向移动一段距离 $x = v \cdot \Delta t$ ，就得到时刻 $t_1 = t + \Delta t$ 的波的图象(图 6-11)。如果我们在想象中让波的图象活动起来，就可以形成一幅波在传播的情景。

图 6-10 所示的波形曲线是正弦曲线，它所表示的波叫做简谐波。当波源做简谐振动，因而介质中的各个质点也都做简谐振动时，形成的波就是简谐波。简谐波是一种最简单而又最基本的波。其它的波都可以看作是由若干简谐波合成的。

波的图象是一种数学表示方法，只不过在横波的情况下能直观地表示出波形。在纵波中，如果我们规定位移方向向右时位移取正值，位移方向向左时取负值，虽然同样可以画出图 6-10 所示的波的图象，但与纵波的“形状”并无相同之处(图 6-12)。即使在横波中，如果我们规定位移向下时位移为正值(一般不这样规定，但这样规定未尝不可)，作出的波的图象与横波的形状恰好相反，并不完全相同。

横坐标表示各质点所在的平衡位置，纵坐标表示各质点的位移。图中的 x_2 是质点 2 向右的位移， x_5 是质点 5 向左的位移

思考与讨论

设图 6-11 中的 Δt 时间很短，请你根据图中的两条波形曲线判断：沿竖直方向上下做简谐振动的质点 1、2、3、4 在时刻 t 的速度方向。

练习一

(1)图 6-13 是一列简谐波在某时刻的波形曲线，已知波速为 0.5 米/秒，波向着 x 轴的正方向传播，试画出经过 1 秒后和经过 5 秒后的波形曲线。

(2)在上题中，如果波向着 x 轴的负方向传播，试画出经过 2 秒后和经过 6 秒后的波形曲线。

三、波长、频率和波速

现在，我们来研究图 6-3 中的横波的传播情况。由质点 1 发出的振动传播到质点 13 以后，质点 13 的振动跟质点 1 的振动步调完全一致：这两个质点在振动中的任何时刻对平衡位置的位移总是相等的。同样，质点 2 和质点 14，质点 3 和质点 15，等等，在振动中的任何时刻对平衡位置的位移也总是相等的。

在波动中两个相邻的、在振动过程中对平衡位置的位移总是相等的质点间的距离，叫做波长。波长通常用字母

在横波中，两个相邻的波峰间的距离或两个相邻的波谷间的距离，都等于波长。

在纵波中，两个相邻的密部间的距离或两个相邻的疏部间的距离，都等于波长(图 6-14)。

波源以某一周期和频率振动后，在波的传播过程中，介质中各质点均以这个周期和频率振动，因此这个周期和频率也就是波的周期和频率。

在图 6-3 中，质点 1 振动一个周期后质点 13 开始振动。所以经过一个周期，振动在介质中传播的距离等于一个波长。由此可以得出波速：

$$v = \frac{\lambda}{T}$$

周期 T 与频率 f 互为倒数，即 $f = \frac{1}{T}$ ，所以上式可以写成

$$v = \lambda f$$

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，但是它对以后要学习的电磁波、光波也是适用的。

机械波在介质中传播的速率是由介质本身的性质决定的，在不同介质中传播的速率并不相同。

[例题] 如图 6-15 所示， S 点是波源，振动频率为 100 赫，产生的简谐波向右传播，波速 $v=80$ 米/秒，在传播途中经过 P 、 Q 两点。已知 $SP=4.2$ 米， $SQ=5.4$ 米。

a. 在某一时刻 t ，当 S 点通过平衡位置向上运动时， P 和 Q 是处于波峰，处于波谷，还是处于其他位置？

b. 取时刻 t 为时间起点，分别作出 S 、 P 、 Q 三点的振动图象。

分析和解答

a. 在时刻 t ， S 点通过平衡位置时的波可能有两种，如图 6-16 甲实线和虚线所示。其中哪条曲线能正确地表示出 S 点此时正通过平衡位置向上运动，还要结合波的传播方向才能做出判断。先看实线表示的波。已知波向右传播，经过 t 的下一时刻，波应向右移动一段距离 $S=v \cdot t$ ，如图 6-16 乙中虚线所示。由图 6-16 乙可见， S 点经过 t 后移至平衡位置上方，即在 t 时刻 S 点正通过平衡位置向上运动。可见图甲中实线表示的波符合题目要求。

根据 $v = \lambda f$ 及题目所给数据，此简谐波的波长 $\lambda = v/f = 0.8$ 米。 $SP=4.2$ 米 $= 5 \times 0.8$ 米。现在考虑在 S 点右方、距 S 点为 0.2 米的一点，在时刻 t ，这一点在波谷(见图 6-16 甲)；由于波的空间周期性，在时刻 t ，这一点的

振动情况与 P 点的振动情况相同，所以 P 点在波谷。

同样可以判断，Q 点在波峰。

如果准确地把波形图线画至 P 点和 Q 点，也可以得出相同的判断。但是没必要这样做，因为波长实际上代表了空间的周期性，运用这一知识就可以作出判断。

b. 取时刻 t 为时间起点 ($t=0$)，S、P、O 三点的振动图象如图 6-17 所示。

在简谐波中，波的图象与振动图象都是正弦曲线，但它们的意义是不同的。波的图象表示介质中各个质点在某一时刻的位移，振动图象表示介质中某个质点在各个时刻的位移。在波的图象中，曲线上相邻两个最大值之间的间隔等于波长，显示出空间的周期性。在振动图象中，曲线上相邻两个最大值之间的间隔等于周期 T ，显示出时间的周期性。

练习二

(1) 有一列波，它在某一时刻的波形曲线如图 6-11 中的实线所示。这列波向着 x 轴的正方向传播，经过 $T/4$ 后的波形曲线是什么样？经过 $2T/4$ 、 $3T/4$ 后又是什么样？

(2) 抖动绳子的一端，每秒做两次全振动，产生如图 6-18 所示的横波。求绳上横波的频率、波长和波速。

(3) 每秒做 100 次全振动的波源产生的波，如果波速是 10 米/秒，波长是多少？

(4) 一艘渔船停泊在岸边，如果海浪的两个相邻波峰的距离是 6 米，海浪的速度是 15 米/秒，渔船摇晃的周期是多长？

*四、波的反射和折射

波的反射 波传到两种介质的界面时，会发生反射和折射。将水波演示槽中的波作为入射波，射到一个平板上，可以看到有反射波传出。这种现象叫做波的反射(图 6-19)。入射波的波线与法线的夹角 i 叫做入射角，反射波的波线与法线的夹角 i' 叫做反射角。在波的反射中，反射角 i' 与入射角 i 相等，即 $i'=i$ 。实验表明，反射波的波长、频率和波速都跟入射波相同。

波的折射 在水波演示槽的一部分底面上放一块厚玻璃板，使槽分成两个区域。放有厚玻璃板的区域(图 6-20 中的区域)，槽中的水较浅；没有放玻璃板的区域(图 6-20 中的区域)，槽中的水较深。深水区和浅水区的波速不同，我们可以把这两个区域看作是不同的介质。让水波作为入射波由介质 (区域)射到两种介质的分界面上，可以看到有折射波在介质 (区域)中传播，但传播方向发生了改变。这种现象叫做波的折射。入射波的波线与法线的夹角 i 叫做入射角，折射波的波线与法线的夹角 r 叫做折射角。浅水区的波速较小，折射角比入射角小，波的传播向着法线偏折。实验表明，在波的折射中，波的频率不改变，波速和波长都发生了改变。可以证明：在波的折射中。入射角 i 、折射角 r 和波速之间有下列关系：

$$\frac{\sin i}{\sin r} = \frac{v_1}{v_2}$$

其中 v_1 和 v_2 分别是波在介质 和介质 中的波速。

我们看到，波的反射、折射跟光的反射、折射遵循相同的规律，那么光会不会是一种波呢？研究表明，光确实具有波动性，不过光波不是机械波，而是电磁波，这些在下面两章就要学到。

五、波的衍射

人们最常见的波是水波。水波的许多性质是各种波所共有的，我们可以通过对水波观察来研究波的性质。

在水波槽里，水波碰到挡板会被反射。如果把挡板换成一个大小比波长还小的障碍物，水波会绕过障碍物而继续传播。在水塘里，微风激起的水波遇到突出水面的小石、芦苇，也会绕过它们继续传播，好像它们并不存在。这种波绕过障碍物的现象，叫做波的衍射。

除了利用小障碍物以外，在波的前进方向上放一个有孔的屏，也可以观察到波的衍射现象。现在用水波槽观察水波通过孔的情形，研究在什么条件下才能发生波的衍射。

在图 6-21 所示的两次实验中，水波的波长相同，孔的宽度不同。在孔的宽度跟波长差不多的情况下(图甲)，孔后的区域里传播着以孔为中心的圆形波，即发生了明显的衍射现象。在孔的宽度比波长大好多倍的情况下(图乙)，在孔的后面，水波几乎沿直线传播。

我们还可以保持孔的宽度不变，而改变水波的波长。图 6-22 是在做这种实验时拍下的三张照片。照片甲中，波长是孔宽的 $7/10$ 。照片乙中，波长是孔宽的 $5/10$ ，照片丙中，波长是孔宽的 $3/10$ 。对比这三张照片会看出，波长跟孔的宽度差不多时，衍射现象明显；波长比孔的宽度小得越多，衍射越不明显。可以设想，波长跟孔的宽度相比非常小时，水波几乎不发生衍射，而沿直线传播。

可见，能够发生明显的衍射现象的条件是，障碍物或孔的尺寸比波长小，或者跟波长相差不多。

不只是水波，一切波都能发生衍射。衍射是波特有的现象。

六、波的干涉

波的叠加 前面研究的只限于从一个波源传出的一列波，但常常有几列波同时在介质中传播。例如，把两块石子在不同的地方投到池塘里，就有两列水波在水面上传播。

两列或几列波相遇，会不会像两个球或几个球相碰那样改变了它们原来的运动状态呢？我们用实验来研究这个问题。

一个波源在绳的左端发出波 1，另一个波源在绳的右端发出波 2，如果两个波源都在经过 $1/2$ 周期后停止振动，就会有二个波分别从绳的两端出发相向传播(图 6-23)。我们发现，两个波相遇以后，仍像相遇以前一样，各自保持原有的波形，继续向前传播；只是在两波重叠时，绳上质点的位移等于两个波单独传播时引起的位移的矢量和。

在两列波重叠的区域里，任何一个质点的总位移，都等于两列波分别引起的位移的矢量和。

波的干涉 把两根金属丝固定在同一个振动片上做为振源，在水波槽里分别发出两列圆形波。由于振源的振动频率和振动步调都相同，这两列波重叠时会形成如图 6-24 所示的水波图样：在振动着的水面上，出现了一条从两个波源中间伸展出来的水面平静的区域。

这种现象是怎样产生的呢？可以用波的叠加来解释。

如图 6-25 所示，用两组同心圆弧分别表示从波源 S_1 、 S_2 发出的两列波的波面，实线圆弧表示波峰，虚线圆弧表示波谷。某一时刻，在某一点如果是两列波的波峰和波峰相遇，位移为正的最大值(等于两列波振幅之和)，那么经过半个周期，两列波各前进了半个波长的距离，在这一点就是波谷和波谷相遇，位移为负的最大值。再经过半个周期，这一点又是波峰和波峰相遇。依此类推，这一点就会按一定的振幅振动，振幅等于两列波的振幅之和，所以这一点的振动总是最强。从图 6-25 可以看出，这样的点都在实线 a 上。

某一时刻，在某一点如果是第一列波的波峰和第二列波的波谷相遇，那么经过半个周期，这一点就是第一列波的波谷和第二列波的波峰相遇，再经过半个周期，在这一点又是第一列波的波峰和第二列波的波谷相遇。依此类推，这一点也会按一定的振幅振动，它的振幅等于两列波的振幅之差，所以这一点的振动总是最弱。如果两列波的振幅相等，这一点的振幅就等于零。从图 6-25 可以看出，这样的点都在虚线 b 上。a 和 b 是互相间隔的。

可见，两个频率相同的波源发出的波叠加，将出现稳定的互相间隔的振动最强的区域和振动最弱的区域。

频率相同的两列波叠加，使某些区域的振动加强，某些区域的振动减弱，并且振动加强和振动减弱的区域互相间隔，这种现象叫做波的干涉，形成的图样叫做波的干涉图样。

如果两个波源的频率不同，它们发出的两列波互相叠加时，水面上各点的合振动的振幅，有时是两个振动的振幅的和，有时是两个振动的振幅的差，没有振动总是加强或减弱的区域。这样的两个波源不能产生稳定的干涉现象，不能形成干涉图样。

叠加规律适用于一切波。所以干涉也跟衍射一样是波特有的现象。

七、声波

声波 在初中我们学过，一切发声体只有在振动时才能发出声音。不但音叉、鼓膜、琴弦、声带等固体能振动发声，气体和液体也能振动发声。各种管乐器就是靠气柱的振动而发声的。各种振动着的发声物体都是声源。

声源振动时，使周围的空气产生疏密变化，形成疏密相间的纵波向四周传播开去，这就是声波。声波不仅能在气体中传播，在液体、固体介质中也能传播。声波在不同介质中的传播速率是不同的。下面列出了声波在几种介质中的传播速率。

0 时几种介质中的声速（米/秒）

空气	332	玻璃	5000 ~ 6000
水	1450	松木	3320
铜	3800	软木	430 ~ 530
铁	4900	橡胶	30 ~ 50

声波传入人耳，使耳膜发生振动，人们就产生了声音的感觉。人耳能听到的声波的频率范围是有限的，大致在 20 赫兹到 20000 赫兹之间。低于 20 赫兹的声波，我们称它为次声波。高于 20000 赫兹的声波，我们称它为超声波。次声波和超声波都不能引起人类听觉器官的感觉，但它们仍具有实际意义，请参看阅读：次声波和超声波。

声波的反射 我们讲话时发出的声波，在碰到障碍物时要反射回来。反射回来的声波传到耳朵里，如果到达人耳比原来的声音滞后 0.1 秒以上，我们就能把反射回来的声音跟原来的声音区分开，而听到回声。

声波的反射是很普遍的现象。夏日的雷声，有时轰鸣不绝，是声波在云层界面多次反射造成的。在空房子里讲话，声波会多次反射而余音缭绕。声波会被帐幔、地毯所吸收，使反射波大大减弱。使声波的反射减到最低限度的实验室，叫消声室。处理好各种不同建筑物的声音效果，是建筑师的重要职责。

声波的衍射 闻其声而不见其人，这是司空见惯的现象。这种现象是由声波的衍射造成的。声波的波长在 1.7 厘米到 17 米之间，可以跟一般障碍物的尺寸相比，所以能绕过一般障碍物，使我们听到障碍物另一侧的声音。这就是闻其声而不见其人的原因。后面我们会学到，光也是一种波，光波的波长约在 0.4 到 0.8 微米的范围内，跟一般障碍物的尺寸相比非常非常小，所以在通常条件下几乎看不到衍射。

声波的干涉 声波能发生干涉，这可以用音叉来演示。音叉发声的时候，它的两个叉股是两个相同的波源，它们产生的两列波发生干涉，出现相间的加强区和减弱区。在加强区，空气的振动加强，我们听到的声音也强。在减弱区，空气的振动减弱，我们听到的声音也弱。因此，当我们环绕正在发声的音叉走一周，或者人不动而使音叉绕叉柄的纵轴旋转，就会听到声音忽强忽弱。

声音的共鸣 声音的共振现象叫共鸣。取两只频率相同的单叉并列放

在一起，如图 6 - 26 所示。敲响其中的一只，然后用手按住使它停止振动，可以听到没有被敲的那只音叉发出了声音。被敲响的那只音叉振动时发出声波，传到另一只音叉，对它产生周期性作用力，使它做受迫振动。两只音叉的频率相等，后一只音叉受到的周期性作用力的频率跟它的固有频率相等，所以后一只音叉产生了最大振幅的受迫振动，也就是发生了共鸣。如果两只音叉的频率不同，受迫振动比较弱，不会发生共鸣，这时按住敲响的音叉使它停止振动，就听不到另一只音叉的声音了。

· 阅读 · 次声波和超声波

地震、台风、核爆炸、火箭起飞都能产生次声波。所以建立次声波站，可以探知几千千米外的核武器试验和导弹发射。由地震引起的巨大海浪的传播速度和台风中心的移动速度都小于次声波的波速，所以接收次声波还能预报破坏性很大的海啸、台风。但到目前为止，次声波的研究和应用还只是刚刚开始。

超声波具有不同于可闻声波的特性，在现代生产技术和科学研究中有许多重要应用。

超声波的波长非常短，可以定向发射。它在水中传播的距离要比光波和无线电波远得多。声纳(水声测位仪)就是根据超声波的这种特性制成的装置。这种装置既能发出短促的超声波脉冲，又能接收被潜艇、鱼群或海底反射回来的超声波，根据反射波滞后的时间和波速，就可以确定潜艇、鱼群的位置或海底深度(图 6 - 27)。

超声波的穿透能力很强，能透过几米厚的金属。利用超声波的穿透能力和反射，可以制成超声波探伤仪，用来探查金属内部的缺陷。例如可以用来探查巨大的汽轮机轴、水轮机轴内部是不是有气泡或裂缝。混凝土制品、塑料制品、陶瓷制品以及水库的堤坝，也可以用超声波进行探伤。

超声波在液体中传播时，可使液体内部产生相当大的液压冲击，能很快地把各种金属零件、玻璃、陶瓷等制品的表面污垢清洗干净。

超声波可以用来制造各种乳胶，颗粒极细，而且均匀。例如溴化银经超声波“粉碎”后，可制成优质照相乳胶，用于航空摄影以及从空间实验室或资源卫星上拍摄地面照片。

超声波在诊断、医疗和卫生工作中，也有广泛的应用。利用超声波的反射，可以探查人体内部的肿瘤，确定肿瘤的有无、位置和大小。超声波作用于人体时，机体细胞受到振荡和刺激，可起按摩作用，治疗神经痛等疾患。超声波还可以把药物击碎成微粒和空气混合形成“药雾”，病人吸入可以治疗肺部疾病。用超声波消毒灭菌也是很有效的。用它来给牛奶消毒，效果良好，而且能避免煮沸法对营养的破坏。

有趣的是许多动物都有完善的发射和接收超声波的器官。视觉很不发达的蝙蝠，主要靠发出超声波的回声来发现目标、确定飞行方向。现代的无线电定位器——雷达，质量有几十、几百、几千千克，蝙蝠的超声定位系统只有几分之一克，而在一些重要性能上，如确定目标方位角的灵敏度、抗干扰的能力等，都远优于现代的无线电定位器。水中生活的海豚，也有完善的超声探测系统，使它能在混浊的水里，准确地确定远处小鱼的位置。深入研究动物身上的器官构造、功能，将获得的知识用来改进现有的设备

和创制新的设备，不仅是发展超声技术的途径，也是现代仿生学的重要课题。

· 阅读 · 混响

声波在室内传播时，要被墙壁、天花板、地板等障碍物反射，每反射一次还要被障碍物吸收一些。这样，当声源停止发声后，声波在室内要经过多次反射和吸收，最后才消失，我们就感觉到声源停止发声后声音还继续一段时间。这种现象叫做混响，这段时间叫做混响时间。混响时间的长短是音乐厅、剧院、礼堂等建筑物的重要声学特性。

对讲演厅来说，混响时间不能太长。我们平时讲话，每秒钟大约发出2~3个单字，假定发出两个单字“物理”，设想混响时间是3秒，那么，在发出“物”字的声音之后，虽然声强逐渐减弱，但还要持续一段时间(3秒)，在发出“理”字的声音的时刻，“物”字的声强还很大。因而两个单字的声音混在一起，什么也听不清楚了。混响时间也不能太短，太短则响度不够，也听不清楚。因此需要选择一个最佳混响时间。北京科学会堂有一个学术报告厅，混响时间为1秒。

不同用途的厅堂，最佳混响时间也不相同，一般来说，音乐厅和剧场的最佳混响时间比讲演厅要长些，而且因情况不同而不同。轻音乐要求节奏鲜明，混响时间要短些，交响乐的混响时间可以长些。难于听懂的剧种如昆曲之类，混响时间一长，就更难于听懂，节奏较慢而偏于抒情的剧种，混响时间则可以长些。总之，要有一定的、恰当的混响时间，才能把演奏和演唱的感情色彩表现出来，收到应有的艺术效果。北京“首都剧场”的混响时间，坐满观众时为1.36秒，空的时候是3.3秒。这是因为满座时，被吸收的声音多了，所以混响时间缩短，上面所说的最佳混响时间就是指满座时的混响时间。

高级的音乐厅或剧场，为了满足不同的要求，需要人工调节混响时间。其中一种办法是改变厅堂的吸声情况。在厅堂内安装一组可以转动的圆柱体，柱面的一半是反射面，反射强、吸声少；另一半是吸声面，反射弱、吸声多。把反射面转到厅堂内表面，混响时间变长；反之，把吸声面转到厅堂内表面，混响时间变短。

处理好不同建筑物的声音效果，取得好的音质，这是一门很重要的学问，叫做建筑声学。上面介绍的混响只是其中的点滴，希望能引起同学们对声学的兴趣，钻研这门与我们生活关系密切的科学。

*八、多普勒效应

在铁路旁听行驶中的火车的汽笛声，你会发现汽笛声的音调发生了变化：火车向你驶来时，音调变高，火车驶离你远去时，音调变低。如果你没有注意到这种现象，今后有意识地注意一下。这种由于波源和观察者有相对运动，使观察者发现频率发生变化的现象，叫做多普勒效应。它是奥地利物理学家多普勒(1803~1853)首先发现的，因此以他的名字命名。

怎样解释这种现象呢？音调发生了变化，说明声波的频率发生了变化。原来，在声源和观察者有相对运动时，声源(如火车汽笛声)的频率并没有发生变化，而是观察者接收到的频率发生了变化。

我们知道，声源完成一次全振动，向外发出一个完全波，即一个波长的波。频率表示每单位时间内完成的全振动的次数，所以，波源的频率等于单位时间内波源发出的完全波的个数。在波源和观察者相对于介质都不动，即二者没有相对运动时，单位时间内波源发出几个完全波，观察者在单位时间内就接收到几个完全波(图 6 - 28)。观察者接收到的频率等于观察者单位时间内接收到的完全波的个数，可见，在这种情况下，观察者接收到的频率等于波源的频率。

现在设波源相对介质不动，而观察者向着波源运动(图 6 - 29)。这时，在单位时间内观察者向着波源移动一段距离，与观察者不动的情况比较，观察者单位时间内接收到的完全波的个数增多，也就是接收到的频率增大了。同样的道理，如果观察者远离波源，观察者单位时间内接收到的完全波的个数减少，也就是接收到的频率减小了。

现在设观察者相对于介质不动，而波源运动(就像我们站在铁道旁听驶来、驶去的火车的汽笛声。)，这时波源发出的波，其波面如图 6 - 30 所示。波一经从波源发出，在均匀介质中就以球面波的形式在介质中传播，球面的球心就是发出该波时波源所在的位置。波源向右运动时，相当于波面的球心向右运动，所以波源右方的波面变得密集，左方的波面变得稀疏，也就是说，波源右方的波长变短，左方的波长变长。波在介质中的传播速度并没有改变，观察者在波源右方时，即波源接近观察者时，观察者单位时间内接收到的完全波的个数增多，即接收到的频率增大。同样道理，观察者在波源左方时，即波源远离观察者时，接收到的频率减小。

总之，当波源与观察者有相对运动时，如果二者相互接近，观察者接收到的频率增大；如果二者远离，观察者接收到的频率减小。

声波是机械波。不仅机械波，后面要讲到的电磁波和光波，也会发生多普勒效应。多普勒效应是波动过程共有的特征。

多普勒效应有很多实际应用。有经验的铁路工人可以从火车的汽笛声判断火车的运行方向和快慢。有经验的战士可以从炮弹飞行时的尖叫声判断炮弹的飞行方向。交通警察向行进中的汽车发射一个已知频率的电磁波，波被运动的汽车反射回来时，接收到的频率发生变化，由此可指示汽车的速度，以便于进行交通管理。根据光波的多普勒效应，由地球上接收到的遥远天体的光波频率可以判断遥远天体相对于地球的运动(参见讲座第十节)。

本章小结

这一章我们学习了机械波的产生和传播，还学习了机械波的性质，如反射、折射、衍射、干涉等。很好地理解和总结这些知识，对今后学习其他形式的波动是很重要的。

(1)机械波是怎样形成的？什么是纵波？什么是横波？什么是波线和波面？

(2)怎样理解“波只是传递振动形式”和“波是传递能量的一种方式”？

(3)什么是波的图象？它的横、纵坐标各表示什么量？图象的物理意义是什么？它和振动图象有什么区别？

(4)什么叫波长？波长、频率及波速之间有什么关系？

* (5)机械波的反射和折射的规律各是什么？

(6)什么是波的衍射？产生明显衍射现象的条件是什么？举出衍射的实例。

(7)什么是波的叠加？什么是波的干涉？举出干涉的实例。

(8)空气中的声波是怎样产生的？举例说明声波的反射、衍射、干涉和声音的共鸣。

* (9)举例说明多普勒效应的现象、产生原因和应用。

习题

A组

(1)在百米赛跑中，站在终点的计时员，假如在听到起跑枪声才开始计时，他记录下来的成绩有多大误差？

(2)一个人在高处用望远镜注视地面上的木工以每秒一次的频率钉钉子，他听到声音时恰好看到击锤的动作，当木工停止击锤后，他又听到了两次击锤声，木工离他有多远？

(3)第一次测定声音在水中的传播速度是 1872 年在日内瓦湖上进行的：两只船相距 14 千米，在一只船上实验员向水里放一口钟，当他敲钟的时候，船上的火药同时发光；另一只船上的实验员向水里放一个听音器(图 6 - 31)，他看到火药发光后 10 秒听到了水下的钟声。计算一下水中的声速是多大。

(4)频率为 1000 赫的声音，由空气传入水中，声波在水中的波长是多长？

(5)第一次测定铸铁里的声速是在巴黎用下述方法进行的。在铸铁管的一端敲一下钟，在管的另一端听到两次响声，第一次是由铸铁传来的，第二次是由空气传来的。管长 931 米，两次响声相隔 2.5 秒，如果当时空气中的声速是 340 米 / 秒，求铸铁中的声速。

(6)地震波的纵波和横波在地表附近的传播速度分别是 6.1 千米 / 秒和 3.7 千米 / 秒。在一次地震时某观测站记录的纵波和横波的到达时刻相差 5.0 秒。地震的震源距这个观测站多远？

(7)甲乙二人分乘两只船在湖中钓鱼。两船相距 24 米。有一列水波在湖面上传播开来。每只船每分钟上下浮动 10 次。当甲船位于波峰时，乙船

位于波谷，这时两船之间还有一个波峰。水波的波速是多大？

B 组

(1) 在 xy 平面内有一沿 x 轴正方向传播的正弦横波，波速为 1 米 / 秒。振幅为 4 厘米，频率为 2.5 赫。在 $t=0$ 时刻， P 点位于其平衡位置上方最大位移处(图 6 - 32)，则距 P 为 0.2 米的 Q 点：

- A . 在 0.1 秒时的位移是 4 厘米。
- B . 在 0.1 秒时的速度最大。
- C . 在 0.1 秒时的速度向下。
- D . 在 0 到 0.1 秒时间内的路程是 4 厘米。

(2) 图 6 - 33 中实线是一列正弦波在某时刻的波形曲线，虚线是 0.2 秒后它的波形曲线。试求这列波可能的传播速度。

* (3) 横波的图象直观地表现了横波在某一时刻的波形，纵波的图象却不能直观地表现纵波的情况，但是，我们应当学会在看到纵波的图象时，自然地想出纵波的情况，就像我们看到振动图象时，自然地想出弹簧振子或单摆的振动情况一样。仔细考察图 6 - 12，回答下列问题。

- a . 在图象的什么地方，质点向右的位移最大？
- b . 在图象的什么地方，质点向左的位移最大？
- c . 在图象的什么地方，质点的位移为零？
- d . 密部中央两侧质点的位移有什么特征？
- e . 疏部中央两侧质点的位移有什么特征？

第七章 电磁波

广播和电视都要利用电磁波，导弹、人造卫星的控制以及宇宙飞船跟地面的通信联系也要利用电磁波。电磁波是怎样产生的呢？它有些什么性质？是否具有波的共同特性？又怎样利用它来传递各种信号呢？这一章就要学习这些问题。

在上一章的学习中我们知道，机械波是由机械振动产生的。电磁波则是由电磁振荡产生的。我们就从电磁振荡开始学习。

一、电磁振荡

电磁振荡的产生 我们来观察下面的实验。

把自感线圈、电容器、电流表、电池组和单刀双掷开关照图 7 - 1 连成电路。先把开关扳到电池组一边，给电容器充电。稍后再把开关扳到线圈一边，让电容器通过线圈放电。我们会看到电流表的指针左右摆动，这表明电路里产生了大小和方向做周期性变化的电流。这样产生的大小和方向都做周期性变化的电流叫做振荡电流。能够产生振荡电流的电路叫做振荡电路。图 7 - 1 中由自感线圈和电容器组成的电路，就是一种简单的振荡电路，简称 LC 回路。

由 LC 回路产生的振荡电流也是一种交流电，只是它的频率要比照明用交流电的频率高得多。用示波器观察振荡电流时会发现，LC 回路里产生的振荡电流跟正弦交流电一样，也是按正弦规律变化的。

LC 回路中的振荡电流是怎样产生的呢？

把开关刚扳到线圈的一边的瞬间(图 7 - 2 甲 1)，也就是已被充电的电容器正要放电的瞬间，电路里没有电流，电容器两极板上的电荷最多。此时，电容器里的电场最强，电路里的能量全部是储存在电容器中的电场能。

电容器开始放电后，由于线圈的自感作用，放电电流不能立刻达到最大值，而是由零逐渐增大，同时电容器极板上的电荷逐渐减少。到放电完毕的瞬间，电容器极板上没有电荷，放电电流达到最大值(图 7 - 2 甲 2)。在这个过程中，线圈的磁场逐渐增强，电容器里的电场逐渐减弱，电场能逐渐转化为磁场能。到放电完毕的瞬间，电场能全部转化为磁场能。

电容器放电完毕的瞬间，由于线圈的自感作用，电流并不能立即减小为零，而是保持原来方向继续流动，并逐渐减小。同时，电容器在反方向重新充电，电容器两板带上相反的电荷，并且电荷逐渐增多。到反方向充电完毕的瞬间，电流减小为零，电容器两板上的电荷达到最大值(图 7 - 2 甲 3)。在这个过程中，线圈的磁场逐渐减弱，电容器里的电场逐渐增强，磁场能逐渐转化为电场能。到反方向充电完毕的瞬间，磁场能全部转化为电场能。

此后电容器再放电，再充电(图 7 - 2 甲 4, 5)，这样不断地充电和放电，电路中就出现了振荡电流。在这个过程中，电容器极板上的电荷 q ，电路中的电流 i ，电容器里电场的场强 E ，线圈磁场的磁感强度 B ，都发生周期性的变化。这种现象叫做电磁振荡。在电磁振荡过程中，电场能和磁场能也发生周期性的相互转化。图 7 - 2 乙、丙表示出在电磁振荡过程中，回路中的电流 i 和电容器极板上的电荷 q 随时间做周期性变化的情况。

机械振动和电磁振荡有本质的不同，但它们具有共同的变化规律。在机械振动中，例如在单摆振动中，位移 x 、速度 v 、加速度 a 这几个物理量随时间做周期性变化。在电磁振荡中，电荷 q 、电流 i 、电场强度 E 、磁感强度 B 这几个物理量随时间做周期性变化。在机械振动中，动能和势能发生周期性的相互转化。在电磁振荡中，磁场能和电场能发生周期性的相互转化。

阻尼振荡和无阻尼振荡 在电磁振荡中，如果没有能量损失，振荡

应该永远持续下去，振荡电流的振幅应该永远保持不变，如图 7 - 3 甲所示。这种振荡叫做无阻尼振荡。

但是，任何电路都有电阻，电路中的能量有一部分要转化为内能，还有一部分能量要辐射到周围空间中去。这样，振荡电路中的能量要逐渐损耗，振荡电流的振幅要逐渐减小，直到最后停止振荡，如图 7 - 3 乙所示。这种振荡叫做阻尼振荡。

如果能够适时地把能量补充到振荡电路中，用来补偿电路中的能量损耗，在振荡电路中也可以得到振幅不变的等幅振荡。实际中需要的等幅振荡是用振荡器来产生的，振荡器靠晶体管(或电子管)周期性地把电源的能量补充到振荡电路中去。

二、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。一秒钟内完成的周期性变化的次数叫做频率。

振荡电路中发生电磁振荡时，如果没有能量损失也不受其他外界的影响，这时电磁振荡的周期和频率叫做振荡电路的固有周期和固有频率，简称振荡电路的周期和频率。

LC 回路的周期和频率跟哪些因素有关呢？

在图 7—1 所示的实验里，如果改变电容器的电容 C 或改变线圈自感系数 L 的大小，电流表的指针左右摆动一次的时间就改变。这说明振荡电流的周期跟振荡电路中的电容和自感系数有关。可以看到：电容或电感增加时，周期变长，频率变低；电容或电感减小时，周期变短，频率变高。

进一步的研究证明，周期 T 和频率 f 跟自感系数 L 和电容 C 的关系是：

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

式中的 T、L、C、f 的单位分别是秒、亨利、法拉、赫兹。

根据上述公式可知，适当地选择电容器和线圈，就可以使振荡电路的周期和频率符合我们的需要。在需要改变振荡电路的周期和频率的时候，可以用可变电容器和线圈组成电路，改变电容器的电容，振荡电路的周期和频率就随着改变。

练习一

(1)在电磁振荡的过程中，LC 回路里的电容器极板上的电荷和极板间的电场是怎样变化的？线圈中的电流和线圈的磁场是怎样变化的？试结合图 7 - 2 给予说明。

(2)在 LC 振荡电路中，在电容器充电完毕但未开始放电的瞬间，下述说法中正确的是：

- A. 电场能正向磁场能转化。
- B. 磁场能正向电场能转化。
- C. 电容器两板间的电场最强。
- D. 线圈的磁场最强。

(3)LC 振荡电路中线圈的自感系数是 2 微亨，要产生 7.5 兆赫的振荡电流，应选用多大电容的电容器？

(4)在图 7 - 4 的线路中，可变电容器的最大电容是 300 皮法，要获得最低频率是 550 千赫的振荡电流，线圈的自感系数应当是多大？如果可变电容器动片完全转出时电容变为 30 皮法，这时可产生多大频率的振荡电流？

(5)把 LC 回路中的电磁振荡跟单摆的简谐振动相对比，说明它们的相同和不同点。

三、电磁场

机械振动可以产生机械波，电磁振荡也可以产生电磁波。在 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。这个理论不仅说明了当时已知的电磁现象，而且成功地预言了电磁波的存在。下面简要地介绍一下麦克斯韦的这个理论。

变化的磁场产生电场 在变化的磁场中放一个闭合电路，电路里将会产生感应电流(图 7 - 5 甲)，这是我们学过的电磁感应现象。麦克斯韦从场的观点研究了电磁感应现象，认为电路里能产生感应电流，是因为变化的磁场产生了一个电场，这个电场驱使导体中的自由电荷做定向的移动。麦克斯韦还把这种用场来描述电磁感应现象的观点推广到不存在闭合电路的情形。他认为，在变化的磁场周围产生电场，是一种普遍存在的现象，跟闭合电路是否存在无关(图 7 - 5 乙)。

变化的电场产生磁场 既然变化的磁场可以产生电场，相反地，变化的电场是否也可以产生磁场呢？一个静止的电荷，它产生的是静电场，即空间各点的电场强度不随时间而变化。这个电荷一旦运动起来，电场就发生变化，即空间各点的电场强度将随着时间而变化。另一方面，运动电荷要产生磁场。用场的观点来分析这个问题，就可以说：这个磁场是由变化的电场产生的。例如在电容器充放电的时候，不仅导体中的电流产生磁场，而且在电容器两极板间周期性变化着的电场也产生磁场(图 7 - 6)。

变化的磁场产生电场，变化的电场产生磁场，这是麦克斯韦理论的两大支柱。按照这个理论，变化的电场和磁场总是相互联系的，形成一个不可分离的统一的场，这就是电磁场。电场和磁场只是这个统一的电磁场的两种具体表现。

四、电磁波

电磁波的产生 从麦克斯韦的电磁场理论可以知道：如果在空间某处发生了变化的电场，就会在空间引起变化的磁场，这个变化的电场和磁场又会在较远的空间引起新的变化的电场和磁场。这样，变化的电场和磁场并不局限于空间某个区域，而要由近及远向周围空间传播开去。电磁场这样由近及远地传播就形成电磁波。

在图 7 - 1 所示的振荡电路中有振荡电流时，会产生周期性变化的电场和磁场，因而会激起电磁波向外传播(图 7-7)。电磁波的周期和频率等于激起电磁波的振荡电流的周期和频率。

电磁波的特点 图 7 - 8 表示做正弦变化的电场或磁场所引起的电磁波在某一时刻的波的图象。波峰表示在该点的电场强度 E 或磁感强度 B 在正方向具有最大值，波谷表示在该点的 E 或 B 在反方向具有最大值。两个相邻的波峰(或波谷)之间的距离等于电磁波的波长。

在传播方向上的任一点， E 和 B 都随时间作正弦变化， E 的方向平行于 x 轴， B 的方向平行于 y 轴，它们彼此垂直，而且都跟波的传播方向垂直，因此电磁波是横波。

电磁波在空间以一定的速度传播。图 7 - 9 表示经过一个周期 T 电磁波向前传播的情形。可以看出，经过一个周期 T ，电磁波传播的距离等于波长 λ 。我们学过的波长、频率(或周期)和波速之间的关系，即 $v = \lambda / T = \lambda f$ ，对电磁波也完全适用。

麦克斯韦从理论上预见：电磁波在真空中的传播速度等于光在真空中的传播速度，即电磁波在真空中的传播速度 $c = 3.00 \times 10^8$ 米 / 秒。从理论上发现电磁波以光速传播，这是物理学史上最伟大的成就之一。后面学到光的本性时还要提到这一点。

从场的观点来看，必须把场看作能量的贮存场所。电场贮存电能，磁场贮存磁能，电磁场贮存电磁能。电磁波的发射过程就是辐射能量的过程。电磁波在空间传播，电磁能就随着一起传播。

麦克斯韦从理论上预见电磁波的存在以后，过了 20 多年，在 1888 年，德国物理学家赫兹(1857—1894)第一次用实验证实了电磁波的存在。赫兹还测定了电磁波的波长和频率，得到电磁波的传播速度，证实这个速度等于光速。赫兹还用实验证明，电磁波跟所有波动一样，能产生反射、折射、衍射、干涉等现象，从而充分证实了麦克斯韦的电磁场理论。现在，麦克斯韦的理论已经成为无线电技术的基础。

无线电技术中使用的电磁波叫做无线电波。无线电波的波长从几毫米到几十千米。通常根据波长或频率把无线电波分成几个波段，如下表所示。

波段	波长	频率	传播方式	主要用途
长波	30000 ~ 3000 米	10 ~ 100 千赫	地波	超远程无线电通讯和导航
中波	3000 ~ 200 米	100 ~ 1500 千赫	地波和天波	调幅 (AM) 无线电广播电报通讯
中短波	200 ~ 50 米	1500 ~ 6000 千赫		
短波	50 ~ 10 米	6 ~ 30 兆赫	天波	

波段		波长	频率	传播方式	主要用途
微波	米波 (VHF)	10 米 ~ 1 米	30 ~ 300 兆赫	近似直线传播	调频 (FM) 无线电广播电视导航
	分米波 (UHF)	10 ~ 1 分米	300 ~ 3000 兆赫	直线传播	电视
	厘米波	10 ~ 1 厘米	3000 ~ 30000 兆赫		雷达
	毫米波	10 ~ 1 毫米	30000 ~ 300000 兆赫		导航

电磁波与机械波有本质的不同。前者是电磁现象，后者是力学现象。机械波要靠介质来传播，电磁波的传播则不需要靠别的物质作介质，在真空中也可以传播。但二者具有波动的共性。机械波是位移这个物理量随时间和空间做周期性的变化，电磁波则是 E 和 B 这两个物理量随时间和空间做周期性的变化。二者都能产生反射、折射、衍射和干涉等现象。

练习二

(1) 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)

(2) 我国第一颗人造地球卫星采用 20.009 兆赫和 19.995 兆赫的频率发送无线电信号。这两种频率的电磁波的波长各是多少？光速为 2.9979×10^8 米/秒。

(3) 一般收音机在中波波段接收的波长范围由 560.7 米到 186.9 米，它接收的频率范围有多大？

*五、无线电波的发射和接收

无线电波的发射 要向外界发射电磁波,振荡电路必须具有如下的特点:

第一,要有足够高的振荡频率。理论的研究证明,振荡电路向外界辐射能量的本领,即单位时间内辐射出去的能量,与频率的四次方成正比。频率越高,发射电磁波的本领越大。

第二,振荡电路的电场和磁场必须分散到尽可能大的空间,才能有效地把电磁场的能量传播出去。

在普通的电容器和线圈组成的振荡电路(图 7 - 10 甲)中,电场几乎完全集中在电容器的极板之间,磁场主要集中在线圈内部。在振荡过程中,电场能和磁场能主要是在电路内互相转化,辐射出去的能量极少,实际上不能用来发射电磁波。

为了把电磁波发射出去,就要改造图 7 - 10 甲中的振荡电路,像图乙、丙那样,增大电容器极板间的距离,减小极板的面积,同时减小自感线圈的匝数,以便减小 L、C 的值,增大振荡频率,并使电场和磁场扩展到外部空间。这样的振荡电路叫做开放电路。

在实际应用中常把开放电路的下端跟地连接(图 7 - 11)。跟地连接的导线叫做地线。线圈上部接到比较高的导线上,这条导线叫做天线。天线和地线形成了一个敞开的电容器,电磁波就是由这样的开放电路发射出去的。电视发射塔要建得很高,是为了使电磁波发射得较远。

发射电磁波是为了利用它传递某种信号。例如无线电报传递的是电码符号,无线电广播传递的是声音,电视广播传递的不仅有声音,还有图像。这就要求发射的电磁波随信号而改变。在电磁波发射技术中,使电磁波随各种信号而改变叫做调制。使高频振荡的振幅随信号而改变叫做调幅,调幅广播(AM)一般使用中波和短波波段。使高频振荡的频率随信号而改变叫做调频,调频广播(FM)和电视广播都采用调频的方法来调制,通常使用微波中的甚高频(VHF)和超高频(UHF)波段。

无线电波的接收 电磁波在空间传播时,如果遇到导体,会使导体中产生感应电流。感应电流的频率跟激起它的电磁波的频率相同。因此,利用放在电磁波传播空间中的导体,就可以接收到电磁波。在无线电技术中,用天线和地线组成的接收电路来接收电磁波。

世界上有许许多多的无线电台、电视台以及各种无线电通讯设备,它们不断地向空中发射不同频率的电磁波,这些电磁波强弱不等地弥漫在我们周围。如果不加选择地把它们都接收下来,那必然是信号一片混乱,分辨不清,达不到我们传递信息的目的。

所以,接收电磁波时,首先要从诸多的电磁波中把我们需要的选出来,通常叫做选台。这就要设法使我们需要的电磁波在接收天线中激起的感应电流最强。在无线电技术里,是利用电谐振来达到这个目的的。当接收电路的固有频率跟接收到的电磁波的频率相同时,接收电路中产生的振荡电流最强。这种现象叫做电谐振,相当于机械振动中的共振。

接收电路产生电谐振的过程叫做调谐,能够调谐的接收电路叫做调谐电路。图 7 - 12 是收音机的调谐电路。调节可变电容器的电容来改变调谐

电路的频率，使它跟要接收的电台发出的电磁波的频率相同，这个频率的电磁波在调谐电路里激起较强的感应电流，这样就选出了这个电台。

由调谐电路接收到的感应电流，是经过调制的高频振荡电流，还不能使我们直接感受到所需要的信号。例如在收音机中，这种高频振荡电流不能使耳机或扬声器的振动片振动发声。要听到声音，必须从高频振荡电流中“检”出声音信号，使扬声器(或耳机)中的动片随声音信号振动。从接收到的高频振荡中“检”出所携带的信号，叫做检波。检波是调制的逆过程，因此也叫解调。检波之后的信号再经过放大、重现，我们就可以听到或看到了。

*六、无线电波的传播

波长不同的电磁波有不同的传播特性，这里只介绍无线电波的传播。通常，无线电波有三种主要传播方式：地波、天波和直线传播。

地波 沿地球表面空间传播的无线电波叫地波(图 7 - 13)。地面上有高低不平的山坡和房屋等障碍物，只有能绕过这些障碍物的无线电波，才能被各处的接收机收到。根据前一章学过的波的衍射特性可知，当波长大于或相当于障碍物的尺寸时，波可以绕到障碍物的后面。地面上的障碍物一般不太大，长波可以很好地绕过它们。中波和中短波也能较好地绕过它们，短波和微波由于波长过短，绕过障碍物的本领就很差了。

地球是个导体，地球表面会因地波的传播引起感应电流，因而地波在传播过程中有能量损失。频率越高，损失的能量越多，所以从能量损失角度来看，这种传播方式对长波、中波和中短波比较适宜，对短波和微波则不适宜。

由于地波在传播过程中要不断损失能量，因此中波和中短波的传播距离不太大，一般在几百千米范围内，收音机在这一波段一般只能收听到本地或附近省市的电台。虽然长波的传播距离要远得多，但发射长波的设备庞大，造价高，所以无线电广播一般不用长波。由于地波传播稳定可靠，近年来在超远程无线电通讯和导航技术等方面，发射长波的技术已有很大发展。

天波 依靠电离层的反射来传播的无线电波叫做天波(图 7 - 14)。什么是电离层呢？地球被厚厚的大气层包围着，在距地表 50 千米到几百千米的范围内，大气中一部分气体分子由于受到太阳光的照射而发生电离，成为带正电的离子和自由电子，这层大气就叫做电离层。

电离层对于不同波长的电磁波表现出不同的特性。实验证明，对于波长短于 10 米的微波，电离层能让它穿过，飞向宇宙。对于波长超过 3000 米的长波，电离层基本上把它吸收掉。对于中波、中短波、短波，波长越短。电离层对它吸收得越少而反射得越多。因此，短波最适宜以天波的形式传播。可以传播到几千千米外的远处。

电离层是不稳定的。白天电离程度高，夜晚电离程度低。由于夜晚电离程度低，它对中波和中短波的吸收减弱，这时中波和中短波也可以用天波的形式传播。收音机在夜晚能够收听到许多远地的中波或中短波电台，就是这个缘故。

直线传播 微波又叫超短波，它既不能以地波的形式传播，又不能依靠电离层的反射以天波的形式传播。微波的传播形式跟光一样。是沿直线传播的。这种沿直线传播的电磁波叫空间波或视波。

地球表面是球形的，微波沿直线传播时能够传播的距离不大，一般只有几十千米。在进行远距离通信时，要设立中继站。由某地发射出去的微波，被中继站接收，并加以放大，再传向下一站，这就像接力赛跑一样，一站传一站，把电信号传到远方(图 7 - 15)。直线传播方式受大气的干扰小，能量损耗少，所以接收到的信号较强而且比较稳定。电视、雷达采用的都是微波。

现在，可以用同步通信卫星传送微波。由于同步通信卫星静止在赤道上空 36000 千米高的地方，用它来做中继站，可以使无线电信号跨越大陆

和海洋，只要有三颗卫星，广播就可以传遍除两极小部分地区外的世界各地。

· 阅读 · 传真、电视、雷达

人类认识电磁波到现在不过一百年，但电磁波在科学技术上已经得到了十分广泛的应用。这里我们介绍无线电的现代应用——传真、电视和雷达。

传真 传真是利用无线电波传送图表、书信、照片的一种方法。报纸上印的许多照片都是传真照片。

把图片贴在图 7 - 16 甲中的转动筒上。转动筒在光电管近旁一面滚动一面沿轴移动。这样，图片上各点反射出来的明暗不同的光，就按照一定次序照射在光电管上。光电管可以把光信号转化为电信号，且电信号的强弱随着光信号的明暗而改变，于是在光电管电路中就出现了强弱不断变化的信号电流。把信号电流调制到等幅振荡电流上，经过发射机就把带有信号的电磁波发射出去(图 7 - 16 甲)。

接收机收到了载有信号的电磁波后，经过放大、检波，得到随信号而变化的电流，送到辉光管。辉光管是一种充气管，它发光的强弱随着电流的强弱而变化。辉光管发出的光会聚到卷在接收端转动筒的感光纸上(图 7 - 16 乙)，使它感光。接收端的转动筒跟发射端的相同，运动状态也完全一样。感光纸经过显影、定影等手续，就得到跟发射端转动筒上一样的图片。

电视 传真传递的是静止的图像，而电视机传递的是活动的景像。

在电视发射端，由摄像管摄取景物并将景物反射的光转换为电信号(图 7 - 17)。摄像镜头把被摄景物的像成在摄像管中的屏上。电子枪发出的电子束按一定规律偏转，对屏上的图像进行扫描。扫描的路线如图 7 - 18 所示，从 a 开始，逐行进行，直到 b。把一幅图像按照各个部分的明暗情况，逐点地变为强弱不同的信号电流。然后通过天线把带有信号的电磁波发射出去。

在电视接收端，由电视接收机的显像管(图 7 - 19)把电信号还原成景物的像。电视接收天线接收到电磁波以后，经过调谐、检波，将得到的电信号送到显像管。显像管里的电子枪发射电子束的强弱受电信号的控制，并且用与摄像管的电子枪相同的方式和步调进行扫描。这样，当电子束射到显像管的荧光屏上时，在屏上便出现了与摄像管屏上相同的像。

摄像机在一秒钟内要传送 25 张画面，电视接收机也以相同的速率在荧光屏上显现这些画面。由于画面更换迅速和视觉暂留，我们感觉到的便是活动景像。

电视接收机的天线接收到的电磁波除了载有图像信号外，还有伴音信号。伴音信号经检波取出后，送到扬声器，扬声器便伴随电视屏幕上的景像发出声音来。

图 7 - 20 是电视广播的发射和接收的示意图。

电视的应用正在日益扩大。例如，在自动化企业的控制中心，可以利用电视来监视各条生产线的工作情况。一些不便直接观察的地方，如有毒

气或强烈放射性的地方，可以用电视作间接的观察。现在，电视技术已经应用到工业、交通、文化教育、国防和科学研究等各个方面。

雷达 雷达是利用无线电波来测定物体位置的无线电设备。

电磁波遇到障碍物要发生反射，雷达就是利用电磁波的这个特性工作的。波长越短的电磁波，传播的直线性越好，反射性能越强，因此雷达用的是微波波段的无线电波。

雷达有一个特制的可以转动的天线(图 7 - 21)。它能向一定的方向发射不连续的无线电波。每次发射的时间约为百万分之一秒，两次发射的时间间隔大约是万分之一秒。这样，发射出去的无线电波遇到障碍物时，可以在这个时间间隔内反射回来被天线接收。

无线电波的传播速度是 c ，测出从发射无线电波到接收到反射回来的无线电波的时间 t ，就可以由公式 $2s = ct$ 确定障碍物的距离 s 。再根据发射无线电波的方向和仰角，便可以确定障碍物的位置了。

实际上，障碍物的距离等情况是由雷达的指示器直接显示出来的。当雷达向目标发射无线电波时，在指示器的荧光屏上呈现出一个尖形波；在收到反射回来的无线电波时，在荧光屏上呈现出第二个尖形波(图 7 - 22)。根据两个波的距离，可直接从荧光屏上的刻度读出障碍物的距离。

利用雷达可以探测飞机、舰艇、导弹以及其他军事目标。除了军事用途外，雷达在交通运输上可以用来为飞机、船只导航，在天文学上可以用来研究星体，在气象上可以用来探测台风、雷雨、乌云。

本章小结

这一章我们学习了电磁振荡和麦克斯韦的电磁场理论的基本思想，介绍了电磁波及其应用。电磁波跟机械波既有相同之处又有本质区别，我们要注意它们的共同点和不同点。

1. LC 回路产生电磁振荡的过程是怎样的？试把它和机械振动做一比较，说明它们的相同点和不同点。

2. LC 振荡电路的周期和频率跟哪些因素有关？写出周期和频率的表达式。

3. 麦克斯韦电磁场理论的基本思想是什么？

4. 什么是电磁场？什么是电磁波？电磁波是怎样产生的？有什么特点？电磁波在真空中传播的速度有多大？

5. 电磁波和机械波有什么相同和不同点？同学们一起讨论一下。

*6. 电磁波的发射和接收主要经历哪些过程？

*7. 无线电波有几种传播方式，各适用于什么波段？

习题

(1) 要使 LC 振荡电路的频率增大，在如下方法中应采用什么方法：

- A. 增大电容器两极板间的距离。
- B. 增大电容器两极板的正对面积。
- C. 在线圈中插入铁芯。
- D. 减少线圈的圈数。

(2) 一台收音机短波段的频率范围是 4 兆赫至 12 兆赫，试求该波段最高频率的电容是最低频率的电容的多少倍？

(3) 调谐电路的可变电容器的动片从完全旋入到完全旋出仍接收不到某较高频率电台发出的电信号。要收到该电台的信号，应采用什么方法？

- A. 增加调谐电路中线圈的圈数。
- B. 加大电源电压。
- C. 减少调谐电路中线圈的圈数。
- D. 减小电源的电压。

(4) 图 7 - 23 表示 LC 振荡电路中电容器极板上的电量 q 随时间 t 的变化图线，由图线判断下述说法中正确的是：

- A. 在时刻 t_1 ，电路中的磁场能最小。
- B. 从时刻 t_1 到 t_2 ，电路中的电流值不断变小。
- C. 从时刻 t_2 到 t_3 ，电容器不断被充电。
- D. 在时刻 t_4 ，电容器的电场能最小。

* (5) 回旋加速器中的磁感强度为 B ，被加速的粒子的电量为 q ，质量为 m ，用 LC 振荡器作为高频电源，电感 L 和电容 C 的数值应该满足什么条件？

第八章 光的本性

一、微粒说和波动说

光的本性问题，虽然早就引起了人们的注意，但是在很长的时期内对这个问题的认识却进展很慢，直到 17 世纪才明确地形成了两种学说。一种是牛顿主张的微粒说，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。另一种是惠更斯(1629~1695)提出的波动说，认为光是某种振动，以波的形式向周围传播。

微粒说很容易解释光的直进，解释光的反射也很容易，因为弹性小球跟弹性光滑平面发生碰撞时的反射规律跟光的反射定律相同。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，以及几束光交叉相遇后会彼此毫无妨碍地继续向前传播等现象时，却发生了很大的困难。

波动说解释后面这些现象却比较容易，因为人们知道这是波经常发生的现象。水波可以同时发生反射和折射，并且水波的反射和折射规律跟光完全相同。湖面上几列水波能够自由地互相穿过，通过一个窗口能同时听到窗外几个人讲话的声音，这是人们熟知的波的现象。然而，早期的波动说缺乏定量的数学严密性，也缺乏对波动特性的足够说明，仍摆脱不了几何光学的观念。

光的微粒说和波动说各有成功的一面，但都不能完全解释当时知道的各种光现象。到了 19 世纪初，人们成功地在实验中观察到了光的干涉、衍射现象，这是波的特征，无法用微粒说来解释，因而证明了波动说是正确的。波动说解释了光的直进、反射、折射、干涉和衍射等光现象，得到了公认。19 世纪 60 年代，麦克斯韦预言了电磁波的存在，并提出了光的电磁说，认为光是一种电磁波。光的电磁说使光的波动说发展到相当完美的地步，取得了巨大成功。

但是，19 世纪末又发现了用波动说不能解释的新现象——光电效应。爱因斯坦于 20 世纪初提出了光子说，解释了光电效应，而光子具有粒子性。不过这里所提到的“光子”完全不同于牛顿所说的“微粒”的概念。现在人们认识到光既具有波动性，又具有粒子性。

学习本章的目的，就是要从光的波动性和粒子性两方面来认识光的本性。

二、光的干涉

光的干涉 干涉现象是波的主要特征之一。光如果是一种波，就必然会观察到光波的干涉现象。1801年，英国物理学家托马斯·杨(1773~1829)在实验室里成功地观察到了光的干涉现象。

让一束单色光(例如红光)投射到一个有孔的屏上(图8-1)，这个小孔就成了一个“点光源”。光从小孔射出后，射到第二个屏的两个小孔上，这两个小孔离得很近(例如0.1毫米)，而且与前一个小孔的距离相等。如果光是一种波，那么，任何时刻从前一个小孔发出的光的球面波都会同时传到后两个小孔，这两个小孔就成了两个振动情况总是相同的波源，它们发出的球面波在屏上叠加，会出现干涉现象(图8-2)：在波峰跟波峰叠加、波谷跟波谷叠加的地方，光波互相加强；在波峰跟波谷叠加的地方，光波互相抵消或削弱。实验果然得到了预期的结果，在光屏上发生了亮暗相间的干涉条纹。这就证明了光的确是一种波。

后来杨氏又发现，用狭缝来代替小孔，可以得到同样清晰但是明亮得多的干涉图样。这就是著名的双缝干涉实验(参看封2图3)。

在双缝干涉现象中，屏上出现亮暗条纹的位置跟两缝间的距离、缝到屏的距离以及光波的波长有关。在图8-3甲中，两个狭缝 S_1 、 S_2 到屏上P点的距离相等，从两个狭缝到达P点的波经过的路程也相等。因此在P点总是波峰跟波峰叠加、波谷跟波谷叠加，出现亮条纹。

如果在P的上方取一点 P_1 (图8-3乙)，两个狭缝跟 P_1 点的距离就不相等： $S_2P_1 > S_1P_1$ 。两个狭缝到 P_1 点的路程差 $d_1 = S_2P_1 - S_1P_1 = S_2D_1$ 。从图中可以看出， P_1 点离P点越远， d_1 就越大。如果 d_1 等于一个波长，即 $d_1 = \lambda$ ，两个狭缝发出的波在 P_1 点也是波峰跟波峰叠加、波谷跟波谷叠加，出现亮条纹。同理，在 P_1 点的上方可以找到 P_2 、 P_3 ……各点，使两个狭缝到这些点的路程差 d_2 、 d_3 ……等于波长的整数倍，即分别等于 2λ 、 3λ ……(图8-3丙)，在 P_2 、 P_3 ……各点也会出现亮条纹。在两个亮条纹之间还可以找到 Q_1 、 Q_2 ……各点(图8-4)，使两个狭缝到这些点的路程差等于半波长的奇数倍，即分别等于 $\lambda/2$ 、 $3\lambda/2$ ……在这些点则是波峰跟波谷叠加，出现暗条纹。

波长和频率 由封2图3可以看出，在双缝干涉现象里，明条纹或暗条纹之间的距离是相等的。在狭缝间的距离、狭缝与屏的距离都不变的条件下，用不同颜色的光做实验，条纹间的距离是不同的。红光的条纹间距最大，紫光的条纹间距最小。定量的研究告诉我们，条纹的间距跟光波的波长成正比，波长越长，条纹的间距越大。不同色光的条纹间距不同，表明不同色光的波长不同：红光的波长最长，紫光的波长最短。

如果换用白光来做双缝干涉实验，在屏上就会出现不同颜色的彩色条纹。这是因为白光是由不同颜色的单色光复合而成的，而不同色光的波长不同，产生的明暗条纹的间距也不同，所以在屏上出现了彩色条纹(封2图3)。

我们知道，波长与频率的乘积等于波速，这个关系对于一切波都是适用的。不同色光在真空中的传播速度相同，所以波长不同的色光，它们的频率也不同，波长越长频率越小，波长越短频率越大。各色光在真空中的

波长和频率的范围见下表：

各色光在真空中的波长和频率

光的颜色	波长 (微米)	频率 (10^{14} 赫)	光的颜色	波长 (微米)	频率 (10^{14} 赫)
红	0.77 ~ 0.62	3.9 ~ 4.8	绿	0.58 ~ 0.49	5.2 ~ 6.1
橙	0.62 ~ 0.60	4.8 ~ 5.0	蓝-靛	0.49 ~ 0.45	6.1 ~ 6.7
黄	0.60 ~ 0.58	5.0 ~ 5.2	紫	0.45 ~ 0.40	6.7 ~ 7.5

波长也可以用纳米 (nm) 作单位, 1 纳米 = 10^{-9} 米。在过去出版的书籍里, 常用埃 (A) 作波长的单位, 1 埃 = 10^{-10} 米。

三、薄膜干涉

薄膜干涉 用薄膜也可以观察到光的干涉。把酒精灯放在金属丝圈上的肥皂液薄膜前(图 8 - 5 甲), 在酒精灯火焰里洒上一些氯化钠, 用火焰发出的黄光照射薄膜, 就可以在薄膜上看到火焰的反射像, 像上出现了明暗相间的条纹。

竖立的肥皂液薄膜在重力的作用下成了上薄下厚的楔形。酒精灯火焰的光照射到薄膜上时, 从膜的前表面和后表面分别反射出来形成两列波, 这两列波的频率相同, 能产生干涉。在薄膜的某些地方, 两列波反射回来时恰是波峰和波峰叠加、波谷和波谷叠加, 使光波的振动加强, 形成黄色的亮条纹; 在另外一些地方, 两列波的波峰和波谷叠加, 使光波的振动互相抵消, 形成暗条纹。

如果用白光照射上述肥皂液薄膜, 薄膜就出现各种不同颜色的条纹。在肥皂泡上和水面上的油膜上常常看到的彩色花纹, 就是因为光的干涉造成的。

光的干涉在技术上的应用 光的干涉现象在技术中有重要应用。例如, 在磨制各种镜面或其他精密部件时, 对加工表面的形状可以用干涉法检查。如果被检查的表面是一个平面, 可以在它的上面放一个透明的标准样板, 并在一端垫一薄片, 使样板的标准平面和被检查的平面间形成一个楔形的空气薄层(图 8 - 6 甲)。用单色光从上面照射, 入射光从空气层的上、下表面反射出两列光波, 从反射光中就会看到干涉条纹。如果被测表面是平的, 空气层的厚度相同的各点就位于一条直线上, 产生的干涉条纹就是平行的(图 8 - 6 乙); 如果被测表面某些地方不平, 那么空气层的厚度相同的各点就不再位于一条直线上, 产生的干涉条纹就要发生弯曲, 从干涉条纹弯曲的方向和程度可以了解被测表面的不平情况(图 8 - 6 丙)。这种测量的精度可达 10^{-6} 厘米。

现代光学装置, 如摄影机和电影放映机的镜头、潜水艇的潜望镜等, 都是由许多光学元件——透镜、棱镜等组成的。进入这些装置的光, 在每个元件的表面都要发生反射, 结果只有入射光的 10 ~ 20% 通过装置, 所成的像既暗又不清晰。怎样消除表面反射造成的后果呢? 可以在透镜和棱镜的表面涂上一层薄膜(一般用氟化镁)。当薄膜的厚度适当时, 在薄膜的两个面上反射的光, 路程差恰好等于半个波长, 因而互相抵消。这就大大减少了光的反射损失, 增强了透射光的强度。这种薄膜叫增透膜。

四、光的衍射

我们知道，波能够绕过障碍物产生衍射，衍射也是波特有的现象。并且知道，只有障碍物或孔的尺寸比波长小，或者跟波长相差不多时，才能明显地观察到波的衍射现象。

光既然是一种波动，那么，光在传播中是否也能产生衍射现象呢？从前面讲的光的干涉实验知道，光波的波长是很短的，只有十分之几微米，通常的物体都比它大得多，因此很难看到光的衍射现象。但是，当光射向一个针孔、一条狭缝、一根细丝时，就会出现衍射现象。

取一个不透光的屏，在屏上装一个宽度可以调节的缝，在缝后适当距离处放一个光屏(图 8 - 7)。用平行单色光照射带有缝的屏，我们看到，当缝比较宽时，光沿着直线方向通过缝，在光屏上产生一条跟缝的宽度相当的亮线。但是，当缝调到很窄时，光通过缝后就明显地偏离了直线传播方向，照到了屏上相当宽的地方，并且出现了明暗相间的条纹。这就是光通过单缝时的衍射现象。图 8 - 8 是在一次实验中拍下来的光的单缝衍射的照片。

用点光源来照射有较大的圆孔 AB 的屏(图 8 - 9 甲)，在后一个屏 MN 上就得到一个光亮的圆(图 8 - 9 乙)，圆的大小跟按光沿直线传播计算出来的结果是一致的。缩小圆孔，亮圆也随着缩小。但是，圆孔缩小到一定程度时，在屏 MN 上就得到一些亮暗相间的圆环，这些圆环达到的范围远远超过了光按直线传播所应照明的面积(图 8 - 9 丙)。这就是光通过圆孔时的衍射现象。

不只是缝和圆孔，各种不同形状的障碍物都能使光发生衍射，致使影的轮廓模糊不清，出现亮暗相间的条纹。插页图 8 - 10 是刮胡须刀片的阴影，可以看到在阴影的边缘处出现亮暗相间的条纹。封 2 图 1 是圆孔衍射的照片，图 2 是在光束中放一个不透明圆盘时发生衍射的照片。特别有趣的是图 2，在不透明圆盘的阴影中心，竟然出现一个亮斑。这就是著名的泊松亮斑。关于泊松亮斑，历史上曾有过一段趣事。19 世纪初，法国物理学家菲涅耳按照波动理论对光的衍射现象作出了数学分析，当时著名数学家泊松根据菲的衍射现象作出了数学分析，当时著名数学家泊松根据菲涅耳的理论推算出在圆盘阴影的中心应该出现一个亮斑。在影子中央出现亮斑，似乎是十分荒谬的，于是泊松宣称他驳倒了光的波动说。后来，菲涅耳用实验证明了圆盘阴影的中心确实有一个亮斑，泊松的计算反而帮助了波动说，确切无疑地证明了波动理论的正确。

衍射现象的研究表明，我们在高中一年级学过的光沿直线传播只是一种特殊情况。光在没有障碍物的均匀介质中是直线传播的。在光的波长比障碍物小得多的情况下，衍射现象不明显，光可以看做是直线传播的。在障碍物的尺寸可以跟光的波长相比甚至比光的波长还要小的时候，衍射现象就十分明显了。

· 小实验 ·

光的干涉和衍射现象的观察

做下面的小实验，可以观察到光的干涉和衍射。

(1)取两块平玻璃板，用手指把它们紧紧捏在一起，会从玻璃板面上看到许多彩色花纹。改变手指用力的大小，花纹的颜色和形状也随着改变。

(2)把两根铅笔并在一起，中间留一条狭缝，放在眼前，通过这条狭缝去看远处的日光灯，使狭缝的方向跟灯管平行，就会看到许多平行的彩色条纹。

上面两个小实验，哪个表示光的干涉，哪个表示光的衍射？

练习一

(1)在真空中，波长分别为 0.75 微米的红光、0.59 微米的黄光和 0.40 微米的紫光，频率各是多大？

(2)单色光从真空射入某一介质后，频率保持不变，但光速减小，光的波长如何变化？

(3)在真空中，波长为 0.75 微米的红光，对某种玻璃的折射率为 1.50，此红光进入该种玻璃后的波长是多大？

五、光的电磁说电磁波谱

光的电磁说 光的干涉和衍射现象无可怀疑地证明了光是一种波。到 19 世纪中期，光的波动说已经得到公认。但是光波的本质问题仍然没有解决。人们总是习惯于按照机械波的模型把光波看成是在某种弹性介质里传播的振动。到了 19 世纪 60 年代，英国物理学家麦克斯韦预言了电磁波的存在，并且从理论上得出了电磁波的传播速度跟实验测得的光速相同。在这个基础上，麦克斯韦提出光是一种电磁波。这就是光的电磁说。后来，赫兹用实验证实了麦克斯韦的理论，从而证明了麦克斯韦的光的电磁说是正确的。

红外线 在电磁波中，能够作用于我们的眼睛并引起视觉的部分，只是一个很窄的波段，通常叫做可见光。在可见光波范围外还存在着看不见的红外线和紫外线。

红外线是英国物理学家赫歇耳(1738~1822)在 1800 年发现的，他用灵敏温度计研究光谱里各种色热的热作用时，把温度计移到光谱的红光区域外侧，发现温度计的温度上升得更高，说明那里有看不见的射线照射到温度计上。这种射线后来就叫做红外线。

红外线最显著的作用是热作用，所以可利用红外线来加热物体，烘干油漆和谷物，进行医疗等。红外线容易透过云雾烟尘，所以可利用对红外线敏感的底片进行远距离摄影和高空摄影。一切物体，包括大地、云雾、人体、飞机和车船，都在不停地辐射红外线，并且不同的物体辐射的红外线的波长和强度不同，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，就可以察知被探测物体的特征。这种技术叫做红外线遥感。利用红外线遥感技术，可以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、预报台风和寒潮等。红外线遥感技术的应用正在迅速发展。

紫外线 紫外线是德国物理学家里特(1776~1810)在 1801 年发现的。在光谱的紫外区域放一张照相底片，底片就会感光，由此可以查知紫外线的存在。紫外线的波长比紫光还短。一切高温物体，如太阳、弧光灯发出的光都含有紫外线。

紫外线的主要作用是化学作用。用紫外线照相能辨认出细微差别，例如可以清晰地分辨出留在纸上的指纹。紫外线有很强的荧光效应，能使许多物质发出荧光。日光灯和农业上诱杀害虫用的黑光灯，都是用紫外线来激发荧光物质发光的。紫外线还有杀菌消毒作用。医院里常用紫外线来消毒病房和手术室。紫外线还能促进生理作用和治疗皮肤病、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。电焊的弧光中有强烈的紫外线，因此电焊工在工作时必须穿好工作服，并戴上防护面罩。

伦琴射线 比紫外线波长还短的电磁波，有伦琴射线，也叫 X 射线，是德国物理学家伦琴(1845~1923)在 1895 年发现的。它的穿透本领很大，能使包在黑纸里的照相底片感光。高速电子流射到任何固体上，都会产生这种射线。图 8-11 是产生伦琴射线的装置，叫做伦琴射线管。图中的螺

紫外线照在荧光物质上，使之发射可见光。

旋钨丝 K 是它的阴极，用钨或铂制成的电极 A 是它的阳极，又叫对阴极。管里的真空程度很高，气压约为 $10^{-5} \sim 10^{-3}$ 帕。用电池组或变压器给钨丝 K 通电，钨丝达到赤热状态就向周围发射电子。把管的阴阳两极接到几万伏的高压电源上，炽热钨丝发出的电子在电场力的作用下以很大的速度射到对阴极上，从那里激发出相当强的伦琴射线。由于伦琴射线穿透物质的本领跟物质的密度有关系，在工业上可以用它来检查金属部件有没有砂眼、裂纹等缺陷，在医学上可以用它来透视人体，检查体内的病变和骨折的情况。

此外，还有比伦琴射线波长更短的电磁波，那就是放射性元素放出的射线，我们将在第九章学习。

电磁波谱 无线电波、红外线、可见光、紫外线、伦琴射线、 γ 射线合起来，构成了范围非常广阔的电磁波谱(图 8 - 12)，其中最长的波长是最短的波长的 10^{21} 倍以上。不同的电磁波产生的机理不同。无线电波是振荡电路中自由电子的周期性的运动产生的，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， γ 射线是原子核受到激发后产生的。从图中可以看出，长波的红外线和微波已经重叠，短波的紫外线已经进入伦琴射线的区域。所以，它们之间的区别并没有绝对意义。从无线电波到 γ 射线，都是本质上相同的电磁波，它们的行为服从共同的规律，另一方面，由于它们的频率或波长不同而又表现出不同的特性，例如，波长较长的无线电波容易表现出干涉、衍射等现象，但对波长越来越短的可见光、紫外线、伦琴射线、 γ 射线，要观察到它们的干涉、衍射现象，就越来越困难了。

六、光谱和光谱分析

光波是由原子内部的电子受到激发后产生的。各种物质的原子内部电子的运动情况不同，它们发射的光波也不同，每种元素的原子发出的光都具有自己的特征。研究不同物质的发光和吸收光的情况，有重要的理论和实际意义，已经成为一门专门的学科——光谱学。下面简要介绍光谱的知识及其应用。

发射光谱 由发光物体直接产生的光谱叫做发射光谱。炽热的固体、液体及高压气体的光谱，是由波长连续分布的光组成的，这种光谱叫做连续光谱(见封 2 图 4)。例如电灯灯丝发出的光，炽热钢水发出的光，都形成连续光谱。

稀薄气体发光，会产生另一种光谱。这种光谱是由一些不连续的亮线组成的，叫做明线光谱(见封 2 图 4)。明线光谱是由游离状态的原子发出的，也叫原子光谱。把固态或液态物质放到煤气灯的火焰或电弧中去烧，使它们气化后发光，就可以得到它们的明线光谱。

从实验知道，各种元素都有一定的明线光谱，元素不同，明线光谱也不同。每种元素的原子只能发出某些具有特定波长的光谱线，这些谱线叫做那种元素的特征谱线。

吸收光谱 让炽热固体发出的白光通过较冷的钠蒸气(在酒精灯心上放一些食盐，食盐受热分解就产生钠蒸气)，会看到在连续光谱的背景上出现两条挨得很近的暗线，这两条暗线的波长恰好跟钠蒸气的发射光谱中两条黄色亮线的波长相同。实验表明，白光通过每一种气体时，光谱中都会产生一组暗线，每条暗线的波长都跟那种气体原子的一条特征谱线相对应。这表明每种气体都从通过它的白光中吸收跟它的特征谱线波长相同的那些光，使白光的连续光谱中出现暗线。连续光谱中某些波长的光被物质吸收后产生的光谱，叫做吸收光谱。吸收光谱中的暗线也是原子的特征谱线，只是通常在吸收光谱中看到的特征谱线比明线光谱中的要少一些。

光谱分析 由于每种元素都有自己的特征谱线，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。做光谱分析时，可以利用发射光谱，也可以利用吸收光谱。这种方法的优点是非常灵敏而且迅速。某种元素在样品中的含量只要有 10^{-10} 克，就可以从光谱中发现它的特征谱线，因而能够把它检查出来。光谱分析在科学技术中有广泛的应用。例如，在检查半导体材料硅和锗是不是达到了高纯度的要求时，就要用到光谱分析。在历史上，光谱分析还帮助人们发现了许多新元素。例如，铷和铯就是从光谱中看到了以前所不知道的特征谱线而发现的。光谱分析对于研究天体的化学组成也很有用。19 世纪初，在研究太阳光谱时，发现它的连续光谱中有许多暗线(参看封 2 图 4，其中只有一些主要暗线)。最初不知道这些暗线是怎样形成的，后来人们了解了吸收光谱的成因，才知道这是太阳内部发出的强光经过温度比较低的太阳大气层时产生的吸收光谱。仔细分析这些暗线，把它跟各种原子的特征谱线对照，人们知道了太阳大气层中含有氢、氦、氮、碳、氧、铁、镁、硅、钙、钠等几十种元素。

七、光电效应

光的电磁说使光的波动理论发展到相当完美的地步，但是，还在赫兹用实验证实光的电磁说的时候，就已经发现了后来叫做光电效应的现象，这个现象使光的电磁说遇到了无法克服的困难。

光电效应 把一块擦得很亮的锌板连接在灵敏验电器上，用弧光灯照射锌板(图 8 - 13)，验电器的指针就张开一个角度，表示锌板带了电。进一步检查知道锌板带的是正电。这说明在弧光灯的照射下，锌板中有一部分自由电子从表面飞出来，锌板中缺少了电子，于是带正电。

在光(包括不可见光)的照射下从物体发射出电子的现象叫做光电效应，发射出来的电子叫光电子。

对于光电效应的研究，得到了如下的结果：

1. 对任何一种金属，都有某一极限频率，入射光的频率必须大于这个极限频率，才能产生光电效应；低于这个频率的光不能产生光电效应。下表中列出了几种金属的极限频率 ν_0 和波长 λ_0 的数值。

2. 光电子的最大初动能与入射光的强度无关，只随着入射光频率的增大而增大。

3. 当入射光的频率大于极限频率时，单位时间内发射出的光电子数与入射光的强度成正比。

这就是光电效应的规律，这些规律无法用波动理论来解释。

几种金属的极限频率和极限波长

金属	铯	钠	锌	银	铂
ν_0 (赫)	4.545×10^{14}	6.000×10^{14}	8.065×10^{14}	1.153×10^{15}	1.529×10^{15}
λ_0 (微米)	0.6600	0.5000	0.3720	0.2600	0.1962

金属中的自由电子，由于受到带正电的金属离子的吸引，必须从外部获得足够的能量才能从金属中逸出。在光电效应中，电子获得的能量是由入射光提供的。

按照波动理论，光的能量是由光的强度决定的，而光的强度又是由光波的振幅决定的，跟频率无关。因此，无论光的频率如何，只要光的强度足够大或照射时间足够长，都能使电子获得足够的能量产生光电效应。然而这跟实验结果是直接矛盾的。极限频率的存在，即频率低于某一数值的光不论强度如何都不能产生光电效应，这是波动理论不能解释的。同样，波动理论也不能解释光电子的最大初动能只与光的频率有关而与光的强度无关。

光子说 1900年，德国物理学家普朗克在研究电磁辐射的能量分布时发现，只有认为电磁波的发射和吸收不是连续的，而是一份一份地进行的，每一份的能量等于 $h\nu$ ，理论计算的结果才能跟实验事实完全符合。这里的 ν 是光的频率， h 是一个普适常量，叫做普朗克常量。实验测出 $h = 6.63 \times 10^{-34}$ 焦·秒。在这个学说的启发下，为了解释光电效应，爱因斯坦(1879~1955)于1905年提出，在空间传播的光也不是连续的，而是一份一份的，

每一份叫做一个光子，光子的能量跟它的频率成正比，即 $E = h\nu$ ，式中的 h 就是上面讲的普朗克常量。这个学说后来就叫做光子说。

光子说能很好地解释光电效应。

当光子照射到金属上时，它的能量可以被金属中的某个电子全部吸收。电子吸收光子的能量后，动能增加，如果动能足够大，电子就能克服金属离子对它的引力，离开金属表面逃逸出来，成为光电子。电子吸收光子的能量后可能向各个方向运动，有的向金属内部运动，并不从金属逸出。向金属表面运动的电子，经过的路程不同，途中损失的能量不同，因此，从金属表面逸出时的初动能也不同。只有直接从金属表面逸出的电子具有最大初动能。这些电子克服金属离子的引力所做的功，叫做逸出功。

根据能量守恒定律，光电子的最大初动能跟入射光子的能量 $h\nu$ 和逸出功 W 之间有这样的关系：

$$\frac{mv^2}{2} = h\nu - W。$$

这个方程叫做爱因斯坦的光电方程。

对于一定的金属来说，逸出功 W 的值是一定的。所以，入射光子的频率 ν 越大，光电子的最大初动能也越大。如果入射光子的频率比较低，它的能量小于金属的逸出功，就不能产生光电效应，这就是存在极限频率的原因。极限频率 ν_0 可由 $h\nu_0 = W$ 求出：

$$\nu_0 = \frac{W}{h}$$

不同金属的逸出功不同，所以它们的极限频率也不同。若入射光比较强，即单位时间内入射光子的数目多，单位时间内发射出的光电子就多。

光电管 光电效应可以把光信号转变为电信号，动作非常迅速灵敏，因此在科学技术中得到了广泛的应用。光电管就是适应这种需要而制成的。

图 8 - 13 甲是一种真空光电管，玻璃泡里的空气已经抽出，有的光电管的玻璃泡里充有少量的惰性气体(如氩、氖、氦等)。管的内半壁涂有极限频率小的碱金属(如钠、铯、铷)作为阴极 K。管内另有一阳极 A。使用时照图 8 - 14 乙那样把它连在电路里，当光照射到光电管的阴极 K 时，电路里就产生电流，电流的强度取决于照射光的强度。光电管产生的电流很弱，应用时可以用放大器把它放大。

光电管用在各种自动化装置以及有声电影、无线电传真等技术装置里。

在新兴的光纤通信技术中，光电管是不可缺少的器件。真空光电管体积大，使用起来不方便，在光纤通信中用的是半导体光电管。这是利用半导体的光电效应制成的器件，它的作用跟真空光电管相似，能够把光信号转变为电信号。

练习二

(1) 光子的能量是由光的_____决定的，可见光中紫光的光子能量最_____，红光的光子能量最_____，因为紫光的_____，红光的_____。

(2) 要产生光电效应，射到金属上的光的频率必需_____这种金属

的_____。

(3) 计算波长是 0.1220 微米的紫外线的光子能量，并用焦和电子伏两种单位来表示。

(4) 可见光的光子，能量范围有多大？波长是 0.4 微米的可见光的光子，能量有多大？波长是 10^{-7} 微米的 射线的光子，能量有多大？(用电子伏作能量单位)

* (5) 使锌产生光电效应的光子的最长波长是 0.3720 微米，锌的逸出功是多大？

八、光的波粒二象性

光既有波动性，又有粒子性，我们不能只用其中的一种去说明光的一切行为，必须承认光具有波粒二象性。

在宏观现象中，波动是连续的，粒子是分立的，二者是互相对立的。宏观物体通常不能既显示波动性，又显示粒子性。

而光子与质子、中子、电子一样，是一种微观粒子，具有二象性。承认光的波粒二象性，要求我们不可把光当成宏观观念中的粒子，同时，对光的波动性也要有新的认识。

那么，在微观世界中，波和粒子的图象又是怎样统一起来的呢？物理学家做的下述实验可以帮助我们理解这个问题。在光的双缝干涉实验中，在屏处放上照相底片，并设法减弱光的强度，使光子只能一个一个地通过狭缝。实验结果表明，如果曝光时间不太长，底片上只出现一些无规则分布的点子，那些点子是光子打在底片上形成的，表现出光的粒子性。这些点子的分布是无规则的，可见光子的运动跟宏观现象中的质点的运动不同，没有确定的轨道。如果曝光时间足够长，底片上就出现了规则的干涉条纹，就像用强光经短时间曝光后产生的一样。可见，光的波动性是大量光子表现出来的现象。在干涉条纹中，那些光波强度大的地方，是光子到达机会多的地方，或者说是光子到达的概率大的地方；光波强度小的地方，是光子到达的机会少的地方，或者说光子到达的概率小的地方。所以光的波动性可看做是大量光子运动的规律。图 8-15 底片曝光程度的不同，同样说明了光的粒子性这个问题。

人类对于光的本性的认识经历了曲折的发展过程。经过长期的探索，认识到光具有波粒二象性，并从此开始接触到微观世界具有的特殊规律。

本章小结

在这一章里，我们研究了光的干涉和衍射，学习了光的电磁说，认识到光具有波动性。之后，我们又学习了光电效应和光子说，认识到光还具有粒子性。光具有波粒二象性，这使我们对物质世界的认识深入了一层。在以后的学习中将会知道，其实我们通常认为的“粒子”，也具有波动性。物质世界的神奇、复杂，还需待我们进一步认识和探索。

(1)什么是光的干涉？在双缝干涉实验中，干涉图样上的亮条纹和暗条纹分别出现在什么地方？用白光和单色光做这个实验，干涉条纹有什么不同？为什么？

(2)薄膜干涉现象是怎样产生的？举例说明它在生产技术上的应用。

(3)什么是光的衍射？举例说明光的衍射现象与光的直线传播是否有矛盾？在什么情况下光沿直线传播？

(4)什么是光的电磁说？确立光的电磁说，根据是什么？电磁波谱中，除了可见光，还有哪些电磁波？它们各有什么特点？

(5)什么叫特征谱线？为什么用光谱分析的方法可以鉴定物质的组成元素？

(6)比较机械波、电磁波(包括光波)，它们有什么不同？又有哪些共同

点？

(7)什么是光电效应？光电效应有哪几条规律？为什么说光的波动说不能解释这些规律？什么是光子说？光子说是怎样解释光电效应的？

(8)光电管有什么作用？举例说明它的应用。

(9)为什么说光具有波粒二象性？你怎样理解光的波粒二象性？

习题

(1)用哪些现象或实验结果可以说明：光是一种波；跟水波的波长比较，光波的波长非常短；绿光的波长比红光的波长短。

(2)水对真空中波长为 0.66 微米的红光的折射率为 $n_1=1.33$ ，而对真空中波长为 0.40 微米的紫光的折射率为 $n_2=1.34$ 。求这两种波在水中的传播速度和波长。

(3)设 λ_1 和 λ_2 是两种可见单色光 1 和 2 在真空中的波长，且 $\lambda_1 > \lambda_2$ ，则这两种单色光相比，下列说法中正确的是什么？

- A. 单色光 1 的频率较小。
- B. 玻璃对单色光 1 的折射率较大。
- C. 在玻璃中，单色光 1 的传播速度较大。
- D. 单色光 1 的光子能量较大。

(4)下面哪种光能使锌产生光电效应？红外线；紫外线；黄光；蓝光。

(5)功率为 1 瓦的手电筒灯泡大约有 5% 的电转化为可见光，试估算它 1 秒钟能释放出多少个可见光的光子？

(6)太阳的辐射功率为 3.86×10^{26} 焦 / 秒，如果把太阳光看成是频率为 5×10^{14} 赫的单色光，太阳每秒钟辐射出多少个光子？

*(7)用波长为 0.20 微米的紫外线照射钨的表面，释放出的光电子的最大初动能是 2.94 电子伏。用波长为 0.16 微米的紫外线照射钨的表面，释放出的光电子的最大初动能是多少电子伏？

原子物理 近代物理讲座

19 世纪后期，经典物理在理论上建立了完整的体系，在应用上也取得了巨大的成就。当时普遍的看法是，物理学已发展到了一个相当完美的阶段，不会有什么重大的问题出现了。然而就在 19、20 世纪之交，一系列重大的发现(如 X 射线、放射性、电子、 α 粒子等的发现)否定了这种看法，揭开了近代物理学的序幕。下面我们就先从原子结构开始学习这些知识。

第九章 原子结构

一百多年前，化学家们从实验中知道，物质是由分子组成的，分子是由原子组成的。由于在化学反应中原子的种类和数目不变，于是形成了原子是组成物质的最小微粒的观念。直到 19 世纪末，人们一直认为原子是不可再分的。但是随着物理研究的深入和实验技术的提高，19 世纪末发现了一些新的事实，证明原子是由更基本的微粒组成的。20 世纪以来，物理学家们对原子和原子核的研究日益深入，建立了原子物理和核物理的科学理论，并在实际应用原子能方面取得了很大的进展。这一章和下一章我们就来学习原子结构和原子核的初步知识。

一、原子的核式结构的发现

原子不是不可再分的，而是由更小的微粒组成的，这一认识是从电子的发现开始的。1897年，汤姆生(1856~1940)在研究阴极射线时发现了电子。后来发现，在x射线使气体电离以及光电效应等现象中，都可以从物质中击出电子。电子的质量比最轻的氢原子的质量小得多，因而认为电子是原子的组成部分。电子是带负电的，而通常情况下原子是中性的，可见原子中还有带正电的物质。这些带正电的物质和带负电的电子是怎样构成原子的，就成了物理学家们最关心的问题之一。

汤姆生的原子模型 在20世纪的头十年，已经提出了几种原子模型，其中最有影响的是汤姆生的原子模型。在这个模型里，原子是一个球体，正电荷均匀分布在整个球内，电子像枣糕里的枣子那样镶嵌在原子内部(图9-1)。原子受到激发以后，电子开始振动发光，形成了原子光谱。汤姆生模型能解释一些实验事实，但不久就被新的实验事实否定了。

卢瑟福的原子核式结构模型 为了探测原子内电荷的分布，在20世纪的头十年里，发展了一种实验方法：用各种粒子(电子、 α 粒子等)轰击很薄的物质层，通过观察这些粒子穿过物质层后的偏转情况，获得原子结构的信息。这种实验叫做散射实验。 α 粒子是一种带正电荷的重粒子，电量是电子电量的2倍，质量大约是电子质量的7300倍。 α 粒子更详细的特性，下一章我们将进一步学习。某些放射性元素放出的 α 粒子具有很大的动能，可以当作轰击粒子。1909年到1911年，在英国物理学家卢瑟福(1871~1937)指导下，他的合作者们做了用 α 粒子轰击金箔的实验，获得了重要的发现。

实验的做法如下：在一个小铅盒里放有少量的放射性元素钋，它发出的 α 粒子从铅盒的小孔射出，形成很细的一束射线射到金箔上。 α 粒子穿过金箔后，打到荧光屏上产生一个个的闪光，这些闪光可以用显微镜观察到。整个装置放在一个抽成真空的容器里。荧光屏和显微镜能够围绕金箔在一个圆周上转动(图9-2)从而可以观察到穿过金箔后偏转角度不同的 α 粒子。

实验表明，绝大多数 α 粒子穿过金箔后仍沿原来的方向前进，但是有少数 α 粒子发生较大的偏转，并且有极少数 α 粒子的偏转超过了 90° ，有的甚至几乎达到 180° ，像是被金箔弹了回来。这就是 α 粒子的散射实验。

α 粒子的大角度散射现象是出人预料的。根据汤姆生原子模型的计算， α 粒子穿过金箔后的偏转最大不超过零点几度。这是因为电子的质量很小，比 α 粒子的质量小得多， α 粒子碰到金箔原子内的电子，就像飞行的子弹碰到尘埃一样，运动方向不会发生明显的改变。正电荷在原子内又是均匀分布的， α 粒子穿过原子时，它受到两侧正电荷的斥力有相当大一部分互相抵消，因而使 α 粒子偏转的力不会很大。

汤姆生的原子模型同 α 粒子的散射实验现象发生了矛盾，如果你遇到了这个问题，你应该如何对待？

卢瑟福对 α 粒子散射实验的结果进行了分析，得出结论，除非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核上，否则， α 粒

子的大角度散射是不可能的。由此，卢瑟福提出了他的原子核式结构模型：在原子的中心有一个很小的核，叫做原子核，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。

按照这个学说， α 粒子穿过原子时，电子对 α 粒子运动的影响很小，影响 α 粒子运动的主要是原子核。如果离核较远，受到的库仑斥力很小，运动方向就改变很小。只有当 α 粒子与核十分接近时，才会受到很大的库仑斥力，发生大角度的偏转(图 9-3)。原子核很小， α 粒子十分接近它的机会很少，所以绝大多数 α 粒子基本上仍按直线方向前进，只有极少数发生大角度的偏转。

从 α 粒子散射实验的数据还可以估计出原子核的大小约为 $10^{-15} \sim 10^{-14}$ 米。原子半径大约是 10^{-10} 米，所以原子核的半径只相当于原子半径的万分之一，原子核的体积只相当于原子体积的万亿分之一。原子核虽小，却集中着原子的几乎全部的质量，因为核外电子的质量跟原子的质量比较起来是很微小的。

思考与讨论

卢瑟福在他提出的原子核式结构模型中，假设带负电的电子在核外空间里绕核旋转。为什么他没有像汤姆生那样认为电子是静止地均匀分布在原子范围内？一定要如此吗？

· 阅读 · 电子的发现

19 世纪后半期，科学家们在研究稀薄气体的放电时发现，当玻璃管内的气体足够稀薄时，阴极就发出一种射线，这种射线能使对着阴极的玻璃管壁发出荧光，叫做阴极射线。

英国科学家汤姆生对阴极射线进行了一系列的实验研究。1897 年，他确认阴极射线是带负电的粒子。汤姆生研究了阴极射线在电场和磁场中的偏转，根据测得的数据计算出了这种带电粒子的荷质比 $\frac{e}{m}$ 。这种测定荷质比的原理，我们在第三章中已经讲过。汤姆生发现，不同物质做成的阴极发出的射线都有相同的 $\frac{e}{m}$ 值。这表明不同物质都能发射这种带电粒子，它是构成各种物质的共有成分。

汤姆生测得的阴极射线粒子的荷质比，大约是当时已知的氢离子的荷质比的 2000 倍。汤姆生认为，这可能是由于阴极射线粒子的电荷 e 很大，或者是它的质量 m 很小。后来汤姆生测量了氢离子和阴极射线粒子的电荷，虽然测量不很准确，但是足以证明阴极射线粒子的电荷与氢离子的电荷大小基本上是相同的。由此得出结论，阴极射线粒子的质量比氢离子的质量小得多。后来人们逐渐把这种粒子叫做电子。汤姆生对证实电子的存在有很大的功劳，因而公认他是电子的发现者。以后，美国科学家密立根又精确地测定了电子的电量，这样由电子的荷质比和电量就可以算出电子的质量。

氢原子是当时已知的质量最小的原子，由电子的质量比氢离子的质量

小得多，汤姆生认为，电子可能是组成原子的基本部分。

汤姆生发现电子，是物理学史上的重要事件。由于电子的发现，人们认识到原子不是组成物质的最小微粒，原子本身也具有结构。此后，围绕着原子结构的问题，原子物理以飞跃的速度发展，人们对物质结构的认识进入了一个新时代。

练习一

(1) 在卢瑟福散射实验中，少数 α 粒子大角度偏转的原因是什么？

(2) 卢瑟福的原子模型与汤姆生的原子模型的主要区别是什么？

(3) 已知氢原子的半径是 0.53×10^{-10} 米，按照卢瑟福的原子模型，如果电子是绕核做匀速圆周运动的，它的速度和频率各是多少？

(4) 如果把剥离了电子的原子核一个挨一个地叠放在一起，这种材料的密度将达到 1.0×10^8 吨/厘米³。说明为什么会有这么大的密度。

二、玻尔的原子模型能级

卢瑟福的原子核式结构学说很好地解释了 α 粒子的散射实验，初步建立了原子结构的正确图景，但跟经典的电磁理论发生了矛盾。既然核外的电子没有被库仑力吸引到核上，它一定是以很大的速度绕核运动，这种绕核运动是有加速度的。按照经典电磁理论，做加速运动的电荷应该辐射出电磁波，它的能量要逐渐减少。随着能量的减少，电子绕核运行的轨道半径也要减小，于是电子将沿着螺旋线的轨道落入原子核，就像绕地球运行的人造卫星受到上层大气阻力不断损失能量后要落到地面上一样。这样看来，原子应当是不稳定的，然而实际上并不是这样。同时，按照经典电磁理论，电子绕核运行时辐射电磁波的频率应该等于电子绕核运行的频率，随着运行轨道半径的不断变化，电子绕核运行的频率要不断变化，因此原子辐射电磁波的频率也要不断变化。这样，大量原子发光的光谱就应该是连续光谱，然而实际上原子光谱是由一些不连续的亮线组成的明线光谱。

为了解决以上的矛盾，你能在卢瑟福的原子核式结构模型的基础上保留其合理的部分，然后再发展一步提出自己的假说吗？将自己提出的假说与其他同学的比较一下，看谁的更合理。

以上矛盾表明，从宏观现象总结出来的经典电磁理论不适用于原子这样小的物体产生的微观现象。

玻尔的原子理论 为了解决上述矛盾，1913 年丹麦青年物理学家玻尔(1885 ~ 1962)在卢瑟福学说的基础上，把普朗克的量子理论运用到原子系统上，提出了新的原子理论，在原子物理的研究上迈出了重要的一步。玻尔原子理论的主要内容是如下的假设：

一、原子只能处于一系列不连续的能量状态中，在这些状态中原子是稳定的，电子虽然做加速运动，但并不向外辐射能量。这些状态叫做定态。

二、原子从一种定态(设能量为 E_2)跃迁到另一种定态(设能量为 E_1)时，它辐射或吸收一定频率的光子，光子的能量由这两种定态的能量差决定，即

$$h\nu = E_2 - E_1$$

三、原子的不同能量状态对应于电子的不同运行轨道。由于原子的能量状态是不连续的，因此电子的可能轨道也是不连续的，即电子不能在任意半径的轨道上运行。只有满足下列条件的轨道才是可能的：轨道半径 r 跟电子的动量 mv 的乘积等于 $h/2\pi$ 的整数倍，即

$$mvr = n \frac{h}{2\pi}, n = 1, 2, 3, \dots$$

式中的 n 是正整数，叫做量子数。这种现象叫做轨道的量子化。 h 是普朗克常数。

玻尔把量子观念引入原子理论中，这是一个创举。根据玻尔的假设，电子只能在某些可能的轨道上运动，电子在这些轨道上运动时不辐射能量，处于定态，只有电子从一条轨道跃迁到另一条轨道上时才辐射能量。辐射的能量是一份一份的，等于这两个定态的能量差。这些就是玻尔理论的主要内容。

氢原子的大小和能级 玻尔在上述假设的基础上，利用经典电磁理论和牛顿力学，对结构最简单的氢原子(只有一个电子)进行了计算，算出了氢的电子的各条可能轨道的半径和电子在各条轨道上运动时的能量(包括动能和电势能)。玻尔的计算结果可以得出下面的两个公式：

$$\left. \begin{aligned} r_n &= n^2 r_1, \\ E_n &= \frac{1}{n^2} E_1. \end{aligned} \right\} n = 1, 2, 3, \dots$$

式中的 r_1 代表第一条(即离核最近的一条)可能轨道的半径, E_1 代表电子在第一条轨道上运动时的能量, r_n 、 E_n 分别代表第 n 条可能轨道的半径和电子在第 n 条轨道上运动时的能量, n 是量子数。玻尔计算出 r_1 的值为 0.53×10^{-10} 米, 与过去用其他方法计算出的氢原子的半径非常符合。玻尔计算出 E_1 的值为 -13.6 电子伏。(计算中取离核无限远处的电势能为零, 电子带负电, 在正电荷的场中电势能为负值; 电子的动能等于电势能绝对值的一半, 所以总能量为负值。)

氢原子的各个定态的能量值, 叫做它的能级。上面计算 E_n 的式中就是氢原子的能级公式。已知 $E_1 = -13.6$ 电子伏, 把 E_1 的值代入能级公式中, 可以计算出氢原子各能级的值: $n=2$ 时, $E_2 = -3.4$ 电子伏; $n=3$ 时, $E_3 = -1.51$ 电子伏; $n=4$ 时, $E_4 = -0.85$ 电子伏……可以看出, 氢原子各个能级的能量是不连续的。这种现象叫做能量的量子化。

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, 这种定态叫做基态。给物体加热或有光照射物体时, 物体中的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, 从基态跃迁到较高能级, 这时电子在离核较远的轨道上运动, 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。原子从较高的激发态向较低的激发态或基态跃迁的过程, 是辐射能量的过程, 这个能量以光子的形式辐射出去, 这就是原子发光现象。原子无论吸收能量或辐射能量, 这个能量都不是任意的, 而是等于原子发生跃迁的两个能级间的能量差。

练习二

(1) 何为定态、基态和激发态? 他们之间有什么关系?

(2) 利用公式 $r_n = n^2 r_1$ 和 $E_n = \frac{E_1}{n^2}$ 计算氢原子的第2、3、4轨道的半径和电子在这些轨道上的能量。

(3) 根据上题算出的结果, 说明要把基态的氢原子激发到 $n=2$ 的能级上去, 需要供给电子多大的能量。如果用电磁波来供给这个能量, 需要用波长多长的电磁波? 这个波长属于哪个波段?

三、玻尔原子理论对氢光谱的解释

玻尔理论成功地解释了氢光谱的规律。

氢光谱的规律 人们很早就发现每种元素都发出自己独特的光谱,各种元素的每条光谱线的频率都是固定不变的。在所有的光谱中,人们对氢光谱研究得最清楚。氢光谱在可见光区内有四条谱线,这四条谱线叫做 H_α、H_β、H_γ、H_δ, 它们的波长分别是

H_α 0.6562 微米,

H_β 0.4861 微米,

H_γ 0.4340 微米,

H_δ 0.4101 微米。

1885 年瑞士的中学教师巴耳末(1825~1898)研究了这些波长之间的关系,发现了它们之间的关系可以用一个公式来表示。如果利用波长的

倒数 $\frac{1}{\lambda}$, 巴耳末的公式可写作

$$\frac{1}{\lambda} = R \left(\frac{1}{2^2} - \frac{1}{n^2} \right), n = 3, 4, 5, \dots$$

式中的 R 是一个常数,叫做里德伯常量,实验测得 R 的值为 $1.096776 \times 10^7 \text{米}^{-1}$ 。

上面的公式叫做巴耳末公式。当 $n=3, 4, 5, 6$ 时,用这个公式计算出的四条光谱线的波长跟上面从实验测得的 H_α、H_β、H_γ、H_δ 四条谱线的波长符合得非常好。于是人们把氢光谱的这一系列谱线叫做巴耳末系。巴耳末公式反映了氢光谱这一系列谱线的规律性。

玻尔原子理论对氢光谱规律的解释 按照玻尔原子理论,氢原子的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

量应为 $h\nu = E_n - E_2$ 。利用第二节中氢原子的能级公式,可得 $E_n = \frac{E_1}{n^2}$,

$E_2 = \frac{E_1}{2^2}$, 由此可得

$$h\nu = -E_1 \left(\frac{1}{2^2} - \frac{1}{n_2} \right),$$

由于 $\nu = \frac{c}{\lambda}$, 所以上式可写作

$$\frac{1}{\lambda} = \frac{-E_1}{hc} \left(\frac{1}{2^2} - \frac{1}{n_2} \right)。$$

历史上巴耳末公式对玻尔氢原子理论的提出起了很大的作用,玻尔正是在看到了公式中的 n 才产生了轨道量子化的想法。善于从表面现象发现其内在本质,要靠平时多学习,勤思考,逐步培养。

把这个式子与前面的巴耳末公式相比较,可以看出它们的形式是完全

一样的，并且 $R = -\frac{E_1}{hc}$ 。计算出 $-\frac{E_1}{hc}$ 的值为 $1.097373 \times 10^7 \text{ 米}^{-1}$ ，与前面给出的 R 的实验值符合得很好。这就是说，根据玻尔理论，不但可以推导出表示氢光谱的规律性的公式，而且还可以从理论上来计算里德伯常量的值。

由此可知，氢光谱的巴耳末系是电子从 $n=3, 4, 5, 6$ 等能级跃迁到 $n=2$ 的能级时辐射出来的。

玻尔理论不但成功地解释了氢光谱的巴耳末系，而且对当时已发现的氢光谱的另一线系——帕邢系(在红外区)也能很好地解释。它是电子从 $n=4, 5, 6$ 等能级向 $n=3$ 的能级跃迁时辐射出来的。此外，玻尔理论还预言了当时尚未发现的氢原子的其他光谱线系，这些线系后来相继被发现，也都跟玻尔理论的预言相符。其中莱曼系在紫外区，是电子从 $n=2, 3, 4$ 等能级向 $n=1$ 的能级跃迁时发出的；布拉开系在远红外区，是电子从 $n=5, 6, 7$ 等能级向 $n=4$ 的能级跃迁时发出的。

玻尔理论的局限性 玻尔的原子模型在解释氢原子光谱上获得了成功，但用来解释比较复杂的原子，例如有两个外层电子的原子光谱时却碰到很大的困难，理论推导出来的结论跟实验事实出入很大。玻尔和其他物理学家研究了这些问题，终于明白这个理论成功之处在于它引入了量子观念，失败之处在于它保留了过多的经典物理理论。到本世纪 20 年代，大约在玻尔理论建立十年之后，建立了量子力学。量子力学是一种彻底的量子理论。量子力学不但成功地解释了玻尔理论所能解释的现象，而且能够解释大量的玻尔理论所不能解释的现象。

· 阅读 · 定态存在的实验证明——弗兰克-赫兹实验

玻尔原子理论的一个重要假设是原子存在着某些分立的能态，各能态之间有一定的间隔。玻尔的这一假设能从实验中观察到吗？1914 年，也就是玻尔原子理论提出后的第二年，由德国物理学家弗兰克(1882~1964)和赫兹所做的著名实验，证实了原子分立能态的存在，为玻尔假设提供了有力的证据。

弗兰克-赫兹实验的方法是，使电子通过压强很低的汞蒸气，测量电子与汞原子碰撞前后损失的能量，同时测定汞原子在这些碰撞中获得的能量。弗兰克和赫兹发现，当电子以较小的动能碰撞汞原子时，电子通过汞蒸气后的能量几乎不变。这个结果可以这样来解释：汞原子的质量是电子质量的几十万倍，当电子的动能较小时，电子和汞原子相碰就像皮球和墙相碰一样，汞原子只吸收电子的极小一部分动能，电子几乎不损失动能。

但是当电子的动能增加到 5 电子伏时，实验结果发生明显的变化。这时电子与汞原子碰撞时，几乎准确地损失 4.9 电子伏的能量。当电子的动能增加到 6 电子伏时，电子与汞原子碰撞也仍然只损失 4.9 电子伏的能量。这表明，汞原子不能吸收小于 4.9 电子伏的能量；当提供的能量比 4.9 电子伏稍微多一点时，它也仍然只接受 4.9 电子伏。由此可以认为，汞原子有一个比它的最低能态大 4.9 电子伏能量的定态。在这个能态和最低能态之间不存在其他的能态。

按照玻尔原子理论，汞原子在吸收了 4.9 电子伏的能量后，将从最低

能态跃迁到较高能态；当电子从较高能态跃迁回低能态时，应辐射出光子。而且辐射出的光子的能量应等于原来跃迁到较高能态时吸收的能量，即 4.9 电子伏。弗兰克和赫兹在实验中果然找到了被激发的汞原子辐射出的这一光谱线，其波长为 2.5×10^{-7} 米，它的能量恰好是 4.9 电子伏。这表明，汞原子和电子碰撞时，确实获得了 4.9 电子伏的能量。

弗兰克和赫兹在以后的实验中还发现，被电子碰撞的汞原子也能获得其他确定的能量，例如 6.7 电子伏、10.4 电子伏，这相当于把汞原子激发到更高的能态。在每一种情况下，汞原子都辐射出相应能量的光谱线。这样就用实验证明了玻尔关于原子存在着不连续能态的假设是正确的。

练习三

(1) 根据玻尔理论，H α 、H β 谱线光子的能量应该是多少电子伏？根据实验测得的 H α 、H β 的波长算得的光子的能量是多少电子伏？二者是否一致？

(2) 已知氢的电子在第一条轨道上运动时的能量是 -13.6 电子伏，那么在第四条轨道上运动时的能量应该是：

A. $\frac{1}{4}$ (-13.6) 电子伏。

B. $\frac{1}{8}$ (-13.6) 电子伏。

C. $\frac{1}{16}$ (-13.6) 电子伏。

D. $\frac{1}{16}$ (13.6) 电子伏。

(3) 计算氢原子从 $n=4$ ， $n=5$ 能级分别跃迁到 $n=3$ 能级时辐射出的光子的波长。这两条谱线在哪个波段？它们属于哪个线系？

(4) 许多物质在受到紫外线照射时能发出荧光，但是发出的荧光波长总是等于或大于照射光的波长。你能解释这个现象吗？

* 四、原子受激辐射 激光

激光的产生 高温物体能够发光,因为处于激发状态的原子是不稳定的,经过很短的时间,通常约为 10^{-8} 秒,就自发地辐射光子,跃迁到较低的能级上去。这种辐射叫做自发辐射。在自发辐射中,各个原子发出的光是向四面八方辐射的,频率也不相同。这就是普通光源发出的自然光。

还有一种情形,就是当原子处于激发态 E_2 时,恰好有能量 $h\nu=E_2-E_1$ 的光子从附近通过,在入射光子的电磁场影响下,原子会发出一个同样的光子而跃迁到低能级 E_1 去。这种辐射叫做受激辐射。原子发生受激辐射时,发出的光子的频率、发射方向等,都跟入射光子完全一样。这样,一个入射光子由于引起受激辐射就变成了两个同样的光子。如果这两个光子在介质中传播时再引起其他原子发生受激辐射,就会产生越来越多的频率和发射方向都相同的光子,使光得到加强(也叫光放大),这就是激光。

激光的应用 激光的主要特点是:方向性好(光子的发射方向相同)、单色性好(光子的频率相同)、亮度高。这些特点,使它获得了广泛应用。

由于激光是非常好的平行光,用它来测量距离可以达到很高的精度。对准目标发出一个极短时间的激光脉冲,测出激光从发射到反射回发射点经过的时间 t ,就可以按公式 $l=1/2ct$ 求出从激光发射点到被测目标的距离 l ,式中的 c 是光速。实际上按着这种原理设计制造的激光测距仪就是一种激光雷达。多用途的激光雷达不仅可以测量距离,而且能够测定被测目标的方位、运动速度、运动轨迹,甚至能描绘出目标的形状,进行识别和自动跟踪。所以激光雷达可以用在导航、气象、天文、大地测量、军事和人造卫星、宇宙飞船等方面。

由于激光是很好的单色光,因此它产生的干涉现象很清晰。我们知道,两束光干涉时产生的叠加效果与两束光通过的路程差有关,只要其中一束光通过的路程增加或减少半个波长,那么干涉条纹就要发生显著的变化,原来的亮条纹变成暗条纹,原来的暗条纹变成亮条纹。所以,利用干涉现象可以精确地测定物体的长度。光的单色性越好,测量的精度越高。用激光测量几米的长度,测量精度可达 0.1 微米以内。

激光的亮度高,是由于它能把巨大的能量高度集中地辐射出来。如果把强大的激光束会聚起来照射到物体上,可以使物体的被照部分在不到千分之一秒的时间内产生几千万度的高温,最难熔化的物质,在这一瞬间也要汽化了。因此,我们可以利用激光束来切割各种物质、焊接金属以及在硬质难熔材料上打孔。医学上还可以用激光作“光刀”来切开皮肤、切除肿瘤或做其他外科手术。

在化学反应中,用一定频率的红外激光照射反应物,可以破坏反应物分子中的某些化学键,引发某些特定的反应,抑制不希望发生的反应,制得用普通方法难以合成的化合物。在农业上,用一定波长、一定剂量的激光按一定方式辐照农作物种子或生物体,可能改变其遗传性,培育新的优良品种。

激光的应用还不只上面这些,而且还在不断发展。这方面的介绍文章很多,同学们可以自己找来看看。

这一章我们主要学习了卢瑟福和玻尔的原子结构模型；了解了科学家们为了探知物质世界的真谛，如何不断修正原有的理论，提出新的假说，不断向真理的彼岸靠近的过程和方法。希望你在掌握知识的同时，能悟出一些研究问题和解决问题的方法。

(1) 卢瑟福是怎样发现原子的核式结构的？他的原子模型的基本内容是什么？怎样用卢瑟福的原子模型来解释 α 粒子的大角度散射？

(2) 卢瑟福原子模型的困难是什么？玻尔是怎样解决这一困难的？根据玻尔的原子理论，原子的模型又是怎样的？

(3) 玻尔的氢原子的轨道半径公式和能级公式各是什么？氢原子能级跃迁而吸收或放出光子的频率如何计算？

(4) 玻尔理论怎样成功地解释了氢原子光谱的规律？它有何不足之处？

(5) * 什么叫做受激辐射？怎样才能产生大量的受激辐射，从而得到激光？激光有哪些主要的特点？举例说明激光的应用。

第十章 原子核

由上一章的学习我们知道，原子并不是组成物质的最小微粒，它是由原子核和绕核旋转的电子组成的。那么原子核和电子是否是组成物质的最小微粒呢？科学家们经过长期的研究发现，仅占原子体积万亿分之一的小小原子核有着极其复杂的结构。这一章我们就来学习原子核的结构和它的变化规律。

一、天然放射现象

天然放射现象 人类认识原子核的复杂结构和它的变化规律,是从发现天然放射现象开始的。

1896年,法国物理学家贝克勒耳(1852~1908)发现,铀和含铀的矿物能发出某种看不见的射线,这种射线可以穿透黑纸使照相底片感光。物质发射这种射线的性质,叫做放射性;具有放射性的元素,叫做放射性元素。

在贝克勒耳的建议下,玛丽·居里(1867~1934)和她的丈夫皮埃尔·居里(1859~1906)对铀和铀的各种矿石进行了深入的研究,并且发现了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(读作“坡”,元素符号是Po),另一种命名为镭。

铀、钋和镭放出的射线到底是什么呢?科学家们将这种射线引入强磁场中(图10-1),发现射线分成了三束,其中一束沿原来的方向前进,另外两束向相反方向偏转。这表明无偏转的射线是电中性的,偏转的两束射线是由带电的粒子组成的,且电荷的符号相反。

请你判断一下哪束带正电,哪束带负电?

人们把带正电的射线叫 α 射线,把带负电的射线叫 β 射线,把无偏转的射线叫 γ 射线。

放射线的本质 通过研究 β 射线在电场和磁场中的偏转,测定它的荷质比,证明 β 射线是高速运动的电子流。 β 射线的贯穿本领很强,很容易穿透黑纸,甚至能穿透几毫米厚的铝板,但它的电离作用比较弱。

1909年卢瑟福通过实验证明了 α 射线是由 α 粒子流组成的, α 粒子的电荷等于元电荷的2倍,质量是氢原子质量的4倍。即, α 粒子就是氦原子核。 α 粒子射出的速度约为光速的十分之一,但是贯穿物质的本领很小,在空气中只能飞行几厘米,一张薄铝箔或一张薄纸就能把它挡住;不过它有很强的电离作用,很容易使空气电离,使照相底片感光的作用也很强。

γ 射线的性质非常像X射线,只是它的贯穿能力比X射线大得多,甚至能贯穿几厘米厚的铅板。但它的电离作用却很小。后来,发现了 γ 射线在晶体上的衍射现象并测定了它的波长以后,证明了它是波长极短的电磁波,它的波长在 10^{-10} 米以下。

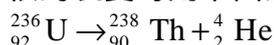
放射性元素的衰变 放射性并不是少数几种元素才有的,原子序数大于83的所有天然存在的元素,它们的原子核都是不稳定的,都会自发地衰变为别种元素的原子核。原子序数小于83的天然存在的元素,也有一些具有放射性。

某种元素的原子核,例如铀核,放出一个 α 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为新核的变化叫做原子核的衰变。在衰变中电荷数和质量数都是守恒的。我们用

${}_{92}^{238}\text{U}$ 代表铀原子核,上标“238”表示核的质量数,下标“92”表示核的电荷数(可以省去下标,简写为 ${}^{238}\text{U}$,还可以简写为铀238或U238)。用 ${}_{2}^4\text{He}$ 代表氦原子核(即 α 粒子),用 ${}_{90}^{234}\text{Th}$ 代表钍原子核。于是,铀

在原子核物理中,把基元电荷取作电荷的单位;把原子量为12的碳原子质量的 $1/12$ 取作质量的单位。原子核的质量数通常非常接近整数,因此习惯上都用整数表示。

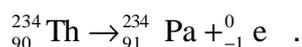
238 核放出 α 粒子变成钍 234 核的衰变可用下面的方程来表示：



从这个方程可以看出，方程两边的质量数和电荷数都是相同的。这种放出 α 粒子的衰变叫做 α 衰变。

${}_{92}^{234}\text{U}$ 发生 α 衰变产生的 ${}_{90}^{234}\text{Th}$ 也具有放射性，它能放出一个 β 粒子而变成 ${}_{91}^{234}\text{Pa}$ (镤)。由于 β 粒子就是电子，电子的质量比核的质量小得多，一个原子核放出一个 β 粒子后，它的质量数不变。因此，可以认为电子的质量数是零，电荷数是 -1，于是我们用 ${}_{-1}^0\text{e}$ 来表示电子(即 β 粒子)。

上述的衰变可表示为：



这个方程两边的质量数和电荷数也是相同的。这种放出 β 粒子的衰变叫做 β 衰变。

放射性的原子核在发生 α 衰变或 β 衰变时产生的新核有的具有过多的能量(核处于激发态中)，这时它就会辐射出 γ 光子。因此， γ 射线是伴随 α 射线或 β 射线产生的。当放射性物质连续发生衰变时，各种原子核中有的发生 α 衰变，有的发生 β 衰变，同时伴随有 γ 辐射，这时在放射线中就会同时有 α 、 β 和 γ 三种射线。

半衰期 放射性元素的衰变有一定的规律。例如，氡 222 经过 α 衰变变为钋 218，如果隔一定时间测定一次剩余的氡的数量，就会发现，大约每过 3.8 天，就有一半的氡发生了衰变。也就是说，经过第一个 3.8 天以后，剩有一半的氡，经过第二个 3.8 天以后，剩有四分之一的氡，再经过 3.8 天以后，就只剩有八分之一的氡了。因此，我们可以用半衰期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需要的时间**，每一种放射性元素都有一定的半衰期，不同的放射性元素，半衰期不同，甚至差别非常大。例如前面说的氡 222 变为钋 218 的半衰期是 3.8 天，而镭 226 变为氡 222 的半衰期是 1620 年，铀 238 变为钍 234 的半衰期竟长达 4.5×10^9 年！

放射性元素衰变的快慢是由核内部本身的因素决定的，而跟原子所处的物理状态或化学状态无关。例如，一种放射性元素，不管它是呈单质存在或是化合物存在，或者对它施加压力，或者增高它的温度，都不能改变它的半衰期。

练习一

(1) 钍 230 是 α 放射性的，它放出一个 α 粒子后变成了什么？写出衰变方程。

(2) 钷 223 是 β 放射性的，它放出一个 β 粒子后变成了什么？写出衰变方程。

(3) 钍 232 经过六次 α 衰变和四次 β 衰变后变成一种稳定的元素。这种元素是什么？它的原子量是多少？它的原子序数是多少？

实际上还同时放出一个质量数和电荷数都是零的反中微子。

(4) ${}_{92}^{238}\text{U}$ 变成 ${}_{82}^{206}\text{Pb}$, 要经过几次 α 衰变和几次 β 衰变?

(5) ${}_{83}^{210}\text{Bi}$ 的半衰期是 5 天。10 克的铋 210 经过 20 天后还剩下多少?

(6) 在现代考古学中, 应用“放射性碳 14 定年法”分析从古代文化遗址中挖掘出的木片可以推测出这座遗址的年代。由于宇宙射线的作用, 大气中二氧化碳除了含有稳定的碳 12, 还含有放射性的碳 14, 并且碳的这两种同位素的含量之比几乎保持不变。活的植物通过光合作用吸收到体内的既有碳 12, 也有碳 14, 它们体内碳 12 与碳 14 的含量保持着与大气中一样的比例。植物死后, 光合作用停止了, 碳 14 由于 β 衰变含量逐渐减少。已知碳 14 的半衰期是 5730 年, 如果现在有一个从远古居民遗址中挖掘出来的木片, 它的碳 14 的含量只是活体的二分之一, 那么这个木片大约是多少年前的植物? 这座远古居民遗址大约是多少年前的?

*二、探测放射线的方法

放射性元素放射出的 α 射线、 β 射线和 γ 射线都是看不见的，需要根据它们跟其他物质作用产生的各种效应，用适当的仪器来探测。下面简单介绍三种方法。

1. 云室 水蒸气遇冷凝结，会形成很小的雾珠，这时它需要有凝结核心，如果空气中没有任何尘埃或离子，水蒸气就是达到过饱和状态，也不能马上凝结。但是，如果这时由于某种原因在空气中产生了离子，那么过饱和的水蒸气就会以这些离子为核心立即凝结成雾珠。因此可以根据出现的雾珠来推测产生离子的情形。云室就是根据这个原理制成的。

云室(图 10-2)的主要部分是一个塑料或玻璃制的容器，它的下底是在小范围内可以上下移动的活塞，上盖是透明的，可以通过它来观察室内发生的现象或进行照相。实验时，先往云室里加一些酒精(或乙醚)，使室内充满酒精的饱和蒸气。然后，使活塞突然迅速向下移动，室内气体由于迅速膨胀而降低温度，酒精蒸气达到过饱和。这时如果有射线粒子从室内气体中飞过，使沿途的气体分子电离，过饱和的酒精蒸气就会以这些离子为核心凝结成一条雾迹。这种云室是英国物理学家威尔逊(1869~1959)于1911年发明的，通常叫威尔逊云室。

用云室可以清楚地看出 α 粒子和 β 粒子的径迹(图 10-3)。 α 粒子质量比较大，在气体中行进时不易改变方向，它的电离本领大，在每厘米的路程中能使气体分子产生 10000 对离子，所以它的径迹直而粗。 β 粒子质量很小，跟气体分子的电子碰撞时容易改变方向，而且电离本领小，在每厘米的路程中只能产生几百对离子，所以它的径迹比较细而且有时发生弯曲。 γ 粒子的电离本领更小，在云室中一般不直接留下径迹。

2. 计数器 计数器的主要部分是计数管，它是一支玻璃管，里面有一个导电的圆筒作阴极，一根通过圆筒轴心的金属丝作阳极(图 10-4)，管里装入惰性气体(如氩、氖等)和少量的酒精蒸汽或溴汽，气压大约是 $1.3 \times 10^4 \sim 2.7 \times 10^4$ 帕。在两极加上大约 800~1500 伏的直流电压，这个电压略低于管内气体的击穿电压。当有射线粒子飞进管内，使管内气体电离时，产生的电子在电场作用下向阳极加速运动。电子在运动中能量越来越大，达到一定值时，跟气体分子碰撞，又可使气体分子电离，再产生电子，于是经过一段很短时间，就会产生大量电子，这些电子到达阳极，正离子到达阴极(正离子由于质量大，运动较慢，在运动中不会再使气体分子电离)，就使计数管发生一次短暂的放电，从而得到一个脉冲电流。这个脉冲电流可以用电子设备记录下来。

3. 乳胶照相 放射线能够使照相底片感光。放射线中的粒子经过照相底片上的乳胶时，使乳胶中的溴化银分解，经显影后，就有一连串的黑点显示出粒子的径迹。这些径迹可用显微镜来进行观察与测量，根据径迹的长短和形状，可以判断粒子的能量、性质和种类。由于乳胶的密度较大，所以粒子在乳胶中的射程约为空气中的千分之一，因此容易看到径迹的全部。

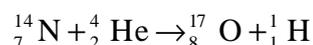
三、原子核的人工转变原子核的组成

放射现象的发现使人们认识到原子核仍然具有复杂结构，并且是能够发生变化的。但是，能不能用人工的方法使原子核发生变化呢？原子核是由什么组成的呢？

原子核的人工转变 1919年，卢瑟福做了用 α 粒子轰击氮原子核的实验，得出了重大的发现，从此开辟了人工核反应的道路。卢瑟福的实验装置如图10-5所示。容器C里放有放射性物质A，从A射出的 α 粒子射到一片铝箔F上，适当选取铝箔的厚度，使 α 粒子恰好被它完全吸收，而不能透过。在F的后面放一荧光屏S，用显微镜M来观察荧光屏上是否出现闪光。通过阀门T往容器C里通入氮气后，卢瑟福从荧光屏S上观察到了闪光。这个实验表明，闪光一定是 α 粒子击中氮核后产生的新粒子透过铝箔引起的。

后来，测出了这种粒子的质量和电量，确定它就是氢原子核，又叫做质子，通常用符号 ${}^1_1\text{H}$ 或 ${}^1_1\text{P}$ 表示。

为了进一步证实这个实验的结果，英国物理学家布拉凯特在充氮的云室里做了这个实验，拍摄了两万多张云室照片，终于从40多万条 α 粒子径迹的照片中，发现有8条产生了分叉(图10-6)。分析径迹的情况可以确定，分叉后的细长径迹是质子的径迹，另一条短粗的径迹是新产生的核的径迹， α 粒子的径迹在跟核碰撞后不再出现。从质量数守恒和电荷数守恒可以知道，新产生的核是质量数等于17的氧。这个变化过程可以用下面的核反应方程来表示：



后来，人们用同样的方法使氟、钠、铝等核发生了类似的转变，并且都产生了质子。由于从各种原子核里都能打出质子来，可见质子是原子核的组成部分。

中子的发现 到本世纪20年代，原子核中包含着质子，已经为大多数人所公认。由于原子核的质量大体上是质子质量的整数倍，有人认为，原子核可能是由质子组成的。但是不久就知道了这种想法是不正确的。如果原子核只是由质子组成的，它的电荷数(以基本电荷为单位)应该与质量数相等。实际上原子核的电荷数只是质量数的一半或者还少一些。卢瑟福根据这一事实，预想到原子内可能还存在着质量跟质子相等的不带电的中性粒子，他把它称之为中子。后来人们又发现用 γ 射线轰击铍能产生一种能量较高、贯穿能力很强的中性粒子。英国物理学家查德威克(1891~1974)经过仔细研究，终于证明这种中性粒子即是卢瑟福所预言的中子。

原子核的组成 发现中子以后，如果认为原子核是由质子和中子组成的，以前在原子结构理论中遇到的问题都可以解决。于是原子核是由质子和中子组成的这一看法很快得到了公认。

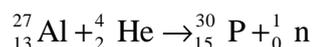
质子和中子统称为核子。质子带一个单位的正电荷，中子不带电；质子和中子的质量几乎相等，都等于一个质量单位。所以原子核的电荷数等于它的质子数，原子核的质量数等于它的质子数与中子数的和。具有相同质子数的原子，它们核外的电子数相同，因而有相同的化学性质，属于同一种元素。但它们的中子数可以是不同的，这些具有相同的质子数和不同

的中子数的原子互称同位素。

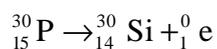
原子核的半径很小，其中的质子之间的库仑斥力是很大的，然而通常的原子核却是很稳定的。这表明，在原子核里，除了质子间的库仑力，还有另一种力，它把各种核子紧紧地拉在一起。这种力叫做核力。从实验知道，核力是一种很强的力，它在质子和质子间、质子和中子间、中子和中子间都存在，并且只在 2.0×10^{-15} 米的短距离内起作用。超过了这个距离，核力就迅速减小到零。质子和中子的半径大约是 0.8×10^{-15} 米，因此每个核子只跟它相邻的核子间才有核力的作用。关于核力的本质问题现在仍在深入研究中。

四、放射性同位素及其应用

1934年，约里奥·居里(1900~1958)和伊丽芙·居里(1897~1956)夫妇在用 α 粒子轰击铝箔时，除探测到预料中的中子外，还探测到了正电子。正电子的质量跟电子的相同，带一个单位的正电荷，跟电子正好相反。更意外的是，拿走放射源以后，铝箔虽不再发射中子，但仍继续发射正电子，而且这种放射性也有一定的半衰期。原来，铝核被 α 粒子击中后发生了下面的反应：



反应生成物 ${}_{15}^{30}\text{P}$ 是磷的一种同位素，也有放射性，像天然放射性元素一样发生衰变，衰变时放出正电子。我们用符号 ${}_1^0\text{e}$ 表示正电子，于是 ${}_{15}^{30}\text{P}$ 的衰变反应可写为：



用人工方法得到放射性同位素，这是一个很重要的发现。后来人们用质子、 α 核、中子和 γ 光子轰击原子核，也得到了放射性同位素。天然放射性同位素只不过40几种，而今天人工制造的放射性同位素已达1000多种，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的许多方面得到了广泛的应用。

放射性同位素主要有两方面的应用。

1. 利用它的射线

利用放射性同位素放出的 γ 射线的贯穿本领，可以检查金属内部有没有砂眼或裂纹，这叫做 γ 射线探伤(图10-7)。用 γ 射线比用X射线好，因为用X射线只能检查2~3厘米厚的钢板，用 γ 射线可以检查30厘米厚的钢铁部件，还可以把放射性同位素放进器件的内部，操作很方便。

利用射线的电离作用，可以消除机器在运转中因摩擦而产生的有害静电。把用钷238、钷210等放射源制成的静电消除器安装在生产设备的适当部位，放射性物质发出的射线可以使空气分子电离，变成导电气体，把积累的电荷泄出。

利用 γ 射线对生物组织的物理、化学效应，通过射线辐照可以使种子发生变异，培育出新的优良品种；可以杀死食物中的致腐细菌，使其长期保鲜；可以防止马铃薯、大蒜等块根块茎作物发芽，便于长期保存。射线辐照还能抑制农业害虫的生长，甚至直接消灭害虫。在医疗卫生上，可以应用放射性钴60的 γ 射线治疗肿瘤等疾病；还可以消毒灭菌，处理医院排放的污泥污水，杀死各种病原体，保护环境免受污染。

根据放射性物质的衰变规律，分析含有放射性物质的岩石、矿物、古生物化石、陨石等可以测定它们的生成年代。

2. 做为示踪原子

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，再用放射性探测器进行追踪，就可以知道放射性原子通过什么路径，运动到哪里，是怎样分布的，从而可以了解某些不容易察明的情况或规律。人们把作这种用途的放射性同位素叫做示踪原子。

实际上还同时放出一个中微子。

示踪原子的应用是多方面的。例如，用示踪原子可以检查地下输油管道漏油情况。先让含有放射性碘 131 的油流过待检测的地下油管，这种带放射性的油从漏油处渗入土中，再用特制的检测仪器在管道中随油料一起流过，测量并记录碘 131 的放射性强度，就可以确定漏油的位置和估计漏洞的大小。

在农业生产中，可以把含有放射性元素的肥料施给农作物，然后用检测放射性的办法确定放射性元素在农作物内的转移和分布情况，可以帮助我们确定植物在生长过程中究竟需要哪几种肥料，需要多少，何时施肥最为适宜。

在医学上，可以用示踪原子来进行诊断。例如，放射性碘 131 可以随注射的血浆蛋白一起进入脑部肿瘤，再用小型探测器的探针测量碘的放射性，就能确定肿瘤的部位和范围。还可以把示踪原子放到药物中去，通过动物实验，发现药物在动物体内吸收、分布、聚积和排泄规律，从而为指导临床使用提供信息。

在生物科学研究方面，同位素示踪技术也起着十分重要的作用。生物大分子结构及其功能的研究，几乎都要借助于示踪原子。我国科学家于 1965 年 9 月首先用人工方法合成了牛胰岛素，这是我国科学战线上的一项重大成就。在这一工作中需要证明人工合成的牛胰岛素结晶跟天然牛胰岛素的结晶是同一种物质。因此，在合成过程中掺入放射性 ^{14}C 作为示踪原子，然后把掺入 ^{14}C 的人工合成的牛胰岛素与天然牛胰岛素混合到一起，经过多次重新结晶后，得到了放射性 ^{14}C 分布均匀的牛胰岛素结晶，这就证明了人工合成的牛胰岛素与天然牛胰岛素完全融为一体，它们是同一种物质，从而为我国在国际上首先合成牛胰岛素提供了有力的证据。

放射线对人体组织是有伤害作用的，在使用放射性同位素时必须注意安全。要防止放射性物质对水源、空气、用具、工作场所的污染，并且要防止射线过多地照射人体。

练习二

(1) 用 α 粒子轰击氦 40 时，产生一个中子和一个新的核。这个新核是什么？写出核反应方程。

(2) 用 α 粒子轰击硼 10，产生一个中子和一个具有放射性的核，它是什么？这个核能放出一个正电子，它衰变后变成什么？写出核反应方程。

(3) 用中子轰击氮 14，产生碳 14，碳 14 具有放射性，它放出一个粒子后衰变成什么？写出核反应方程。

(4) 用中子轰击铝 27，产生钠 24，写出核反应方程。钠 24 是具有放射性的，衰变后变成镁 24，写出核反应方程。

(5) 带电的验电器在放射线照射下电荷会很快消失。说明它的原因。

(6) 图 10-8 是工厂利用放射线自动控制铝板厚度的装置示意图。

a. 请你简述自动控制的原理。

b. 如果工厂生产的是厚度为 1 毫米的铝板，在 α 、 β 和 γ 三种射线中，你认为哪一种对铝板的厚度控制起主要作用，为什么？

*五、专题 中子的发现

(一)弹性碰撞

弹性碰撞的知识在中子的发现中起了很重要的作用。那么，什么是弹性碰撞呢？

让我们来做图 10-9 所示的实验。两个质量相同的钢球分别吊在细绳上，静止时挨在一起。使 A 球偏开一个角度后放开，它回到原来位置时撞上 B 球。可以看到，碰撞后 A 球静止下来，B 球摆到与 A 球原来高度几乎相等的高度。当 B 球摆回来撞上 A 球后，B 球又静止下来，A 球又摆到与原来差不多的高度上。这个过程还将继续下去，两个球交替摆动。

思考与讨论

为什么碰撞后一个球会停下来而把它的动量完全传递给另一个球？为什么第一个球不向后弹回或者两个球都以较小的速度向前运动？例如，碰撞前 A 球的速度是 v ，碰撞后它以 $-0.5v$ 的速度弹回，B 球以 $1.5v$ 的速度向前运动，或碰撞后 A 球以 $0.2v$ 的速度、B 球以 $0.8v$ 的速度都向前运动，这两种情况都不违反动量守恒定律。在不违反动量守恒定律的许多种可能的情况中，为什么实际发生的只是我们看到的这一种情况呢？

上述的实验和问题是物理学史上一件著名的事情。1666 年，在成立还不久的英国皇家学会的例会上表演了这个实验并引起了很大的兴趣，随后出现了许多对这一现象的不同的甚至是混乱的解释。到 1668 年，才有三位学者作出了正确的说明，其中对这一问题作出完整分析的是荷兰物理学家惠更斯。惠更斯认为，在这种碰撞中，除了动量守恒以外，还有另一物理量守恒，他指出这个物理量就是当时所说的“活力” mv^2 。后来人们把“活力”改叫动能。并且把它的定义式由 mv^2 改为 $1/2mv^2$ 。

其实，只要我们仔细分析一下这个实验，就会发现，这种碰撞除了动量守恒外，动能也应该守恒。因为在两次碰撞之后，A 球又摆回到原来的位置，说明碰撞中能量并未损失，动能在相互传递中是守恒的。这种在碰撞中除动量守恒外，动能也守恒的碰撞叫做弹性碰撞。

并不是在所有的碰撞中动能都守恒。有的碰撞动能守恒，有的不守恒。只有在碰撞后物体不发生永久形变、不裂成碎块、不粘在一起、不发热以及不发生其他内部变化的情况下，动能才守恒。

大多数的碰撞，动能都不守恒，都要有一部分动能转化成其他形式的能，这样的碰撞叫做非弹性碰撞。在非弹性碰撞中，如果物体在相碰后粘在一起，这时动能的损失最大，这种碰撞叫做完全非弹性碰撞。

钢球、玻璃球、硬木球等坚硬物体之间的碰撞，其实也并不是完全的弹性碰撞，在碰撞时动能也是有损失的，只是在通常情况下，动能的损失很小，不到百分之三、四，因此我们可以把它们当成弹性碰撞来处理。真正的弹性碰撞，只有在分子、原子以及更小的粒子之间才会遇到。

现有两个钢球，质量分别为 m_1 和 m_2 ，球 2 静止，球 1 以速度 v_1 向球 2

运动。请你运用所学知识证明两球发生弹性正碰后，球 1 的速度 $v_1 = (m_1 - m_2)v_1 / (m_1 + m_2)$ ，球 2 的速度 $v'_2 = 2m_1v_1 / (m_1 + m_2)$ ，并说明在什么情况下从公式中就能得出我们在实验中所看到的结果。

(二)中子的发现

1930 年发现用天然放射性元素钋放出的 α 射线轰击铍时，会产生一种看不见的贯穿能力很强的不带电粒子，它能够贯穿 10~20 厘米的铅板。起初认为这种中性粒子可能是能量很高的光子，即 γ 射线。1932 年约里奥·居里和伊丽芙·居里用来自铍的这种射线去轰击石蜡(含有大量氢原子)，竟从石蜡中打出了质子(图 10-10)。当时还不知道卢瑟福中子假说的居里夫妇没能很好地研究、解释这一实验现象，也把这种射线认为是 γ 射线。

其实，无论从能量、质量还是从速度方面，都可以证明这种射线不是 γ 射线。

居里夫妇的实验给当时正致力于验证卢瑟福中子假说的查德威克以很大的启发，他以极大的兴趣研究了这种射线，发现它在磁场中不发生偏转，可见它是一种中性粒子流。测出这种射线的速度不到光速的十分之一，因此排除了它是 γ 射线的可能。查德威克用这种射线轰击氢原子和氮原子。结果打出了一些氢核(质子)和氮核。他测量了被打出的氢核和氮核的速度，并运用能量守恒和动量守恒，推算出这种射线粒子的质量。

一般来讲中子的速度难于准确地测定，而打出后的氢核和氮核的速度容易测定。根据氢核和氮核质量间的关系及它们被撞后的速度比，可算出中子的质量。

被打出的氢核的速度是不同的。查德威克认为速度最大的氢核是由于未知射线中的粒子与它正碰的结果，其他速度较小的是由于斜碰的结果。设 m 是未知粒子的质量， v 是它的速度， m_H 是氢核的质量， v'_H 是被打出的氢核的最大速度。对于打出氮核的实验，设 m_N 是氮核的动量， v'_N 是被打出的氮核的最大速度。假定它们间的碰撞是弹性碰撞，即碰撞中保持动能守恒和动量守恒，氢核在和氮核未被打出前可以认为是静止的。

请你根据弹性碰撞的知识，算出这种粒子的质量约是氢核质量的多少倍。计算中可用查德威克在实验中测得的氢核的最大速度值 3.3×10^9 厘米/秒和氮核的最大速度值 4.7×10^8 厘米/秒。

通过计算，你可以得出这种粒子的质量约为氢核质量

查德威克还用别的物质来代替氢和氮重做这个实验，得到的结果都是这种未知粒子的质量差不多等于氢核的质量。这样，查德威克就发现了一种新的与氢核(质子)的质量差不多的粒子。由于这种粒子不带电，所以叫

根据从石蜡中打出的质子能量 5.7 兆电子伏来推算，如果轰击石蜡的是 γ 射线，光子的能量应该达到 55 兆电子伏。但是，用放射性元素钋放出的 α 射线轰击铍时，只能产生能量为 7 兆电子伏的 γ 光子，即远小于从石蜡中打出质子所需要的光子能量。卢瑟福正确的假说，导致查德威克发现了中子。可见假说的重要性，它往往能引导人们发现新的事实和规律。否则，即使像约里奥夫妇这样的大师也会使即将唾手可得的重大发现失之交臂。

做中子。

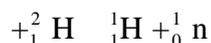
后来的更精确的实验测出，中子的质量非常接近于质子的质量，只比后者大千分之一多(中子的质量是 1.674920×10^{-24} 克，质子的质量是 1.672614×10^{-24} 克)。

中子的发现是物理学史上的一件大事。中子不带电荷，它与各种物质粒子不发生静电作用，很容易接近甚至打进原子核。中子发现后，不少科学家用中子轰击原子核，进一步揭示了物质的微观结构，对近代物理的发展起了很大的作用。由于发现中子的重大贡献，查德威克获得了 1935 年诺贝尔物理学奖。

中子的发现是科学猜想跟严密的科学实验和理论推证相结合的产物，也是查德威克和与他同代的物理学家们在科学研究中科学思想互相交流、启发，共同探讨的结果。查德威克事后说：“先进的科学知识通常是很多人劳动的成果。”

六、核能

在第三节中我们讲到，在核子之间存在着强大的核力，它将各核子紧紧地拉在一起，组成一个坚固的集体。要把原子核拆散成核子，就需要克服核力做巨大的功，或者说需要巨大的能量。例如，用强大的 γ 光子照射氘核(它是由 1 个质子和一个中子组成的)，可以使它分解为质子和中子，这时的核反应方程是：



从实验知道，当光子能量小于 2.22 兆电子伏时，这个反应并不发生；只有光子的能量等于或大于 2.22 兆电子伏时，这个反应才会发生。相反的过程，例如一个中子和一个质子结合成氘核，要放出 2.22 兆电子伏的能量，这个能量以 γ 光子的形式辐射出去。这时的核反应方程是：



这表明，发生核反应时，伴随着巨大的能量变化。有些核反应能释放出巨大的核能。我们知道，1 摩的碳完全燃烧释放出的能量为 393.5 千焦。每个碳原子在燃烧过程中释放出来的化学能不过 4 电子伏，跟上述核反应中每个原子可能释放的能量相比，两者相差数十万倍。

质能方程 质量亏损 怎样求出核反应过程中释放的能量呢？虽然核力的本质还在研究之中，但是物理学家却有办法求出释放的核能。这要归功于大科学家爱因斯坦。他从相对论得出质量和能量间有下述关系：

$$E = mc^2$$

这个方程叫做爱因斯坦质能联系方程，简称质能方程，式中 c 是真空中光速， m 是物体的质量， E 是物体的能量。这个方程表明，物体的质量跟它的能量有一定的联系：物体的能量跟它的质量成正比。如果物体的能量增加了 E ，物体的质量也相应地增加 m ，反过来也一样。 E 和 m 之间的关系符合爱因斯坦的质能方程

$$E = m \cdot c^2$$

核子结合成原子核时要释放出核能，可见原子核的能量要比组成它的核子的能量小，所以原子核的质量也要比组成它的核子的质量小。我们把组成原子核的核子的质量与原子核的质量之差叫做核的质量亏损。如果知道核的质量亏损，根据质能方程就可以求出核子结合成原子核时释放的能量。

在上面讲的中子和质子结合成氘核的例子里，质量亏损 $m = 0.002388u$ ，根据爱因斯坦的质能方程可求出放出的能量：

$$\begin{aligned} E &= mc^2 \\ &= \frac{0.002388 \times 1.66 \times 10^{-27} \times (3.00 \times 10^8)^2}{1.60 \times 10^{-10}} \text{ 电子伏} \\ &= 2.22 \text{ 兆电子伏} \end{aligned}$$

这一数值跟实验结果符合得很好。

练习三

(1) 试证明，1 原子质量单位 u 相当于 931.50 兆电子伏的能量。 $1u =$

1.6606×10^{-27} 千克，光速 $c = 2.9979 \times 10^8$ 米/秒，基本电荷 $e = 1.6022 \times 10^{-19}$ 库。

(2) 碳 12 原子的质量是 $12.000000u$ ，可以看做是由 6 个氢原子(质量是 $1.007825u$)和 6 个中子组成的。求核子结合成碳原子核时释放的能量。(在计算中可以用碳原子的质量代替碳原子核的质量，用氢原子的质量代替质子的质量，因为电子的质量可以在相减过程中消去。)

(3) ${}_{92}^{232}\text{U}$ (原子量为 232.0372)衰变为 ${}_{90}^{228}\text{Th}$ (原子量为 228.0287)时，释放出 α 粒子 (${}_{2}^4\text{He}$ 的原子量为 4.0026)。写出核反应方程，并且求衰变过程中释放出多少能量。

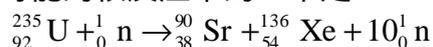
七、重核的裂变

铀核的裂变 我们已经看到，在原子核里蕴藏着多么巨大的能量。物理学家们很早就了解到这一点，但是在相当长的时间里一直找不到释放核能的实际方法。

1938年12月，德国化学家哈恩和斯特拉斯曼在用中子轰击铀核的产物中发现了钡的放射性同位素。一个月以后终于证实，铀核在俘获一个中子后，发生了一个重核分裂成两个中等质量的核的反应过程——裂变。这一发现，为核能的利用开辟了道路。

铀核裂变的产物是多种多样的，有时裂变为氙(Xe)和锶(Sr)，有时裂变为钡(Ba)和氪(Kr)或锑(Sb)和铌(Nb)，同时放出2~3个中子。铀核还可能分裂成三部分或四部分，不过这种情形比较少见。实验还证明，当入射中子的能量小于1兆电子伏时，只有铀235俘获中子能产生裂变，铀238俘获中子后并不产生裂变。

铀核裂变的许多可能的核反应中的一个为：



在这个反应中释放的能量可以计算如下：

裂 变 以		裂 变 以 后 ：	
前 ：			
		${}_{38}^{90}\text{Sr}$	89.9077u
${}_{92}^{235}\text{U}$	235.0439u	${}_{54}^{136}\text{Xe}$	135.9072u
${}_0^1\text{n}$	1.0087u	$10{}_0^1\text{n}$	10.0867u
	<hr/>		<hr/>
	236.0526u		235.9016u

反应过程中质量减少了 $m = 0.1510\text{u}$. 反应中释放的能量

$$E = mc^2 = 141 \text{ 兆电子伏 .}$$

在不同的反应中，铀核释放的能量也不同。一般说来，铀核裂变时，平均每个核子放出的能量约为1兆电子伏。如果1千克铀全部裂变，它放出的能量就相当于2500吨优质煤完全燃烧时放出的化学能。

链式反应 铀核裂变时，同时放出2~3个中子，如果这些中子再引起其他铀235核裂变，就可使裂变反应不断地进行下去。这种反应叫做链式反应(图10-11)。

铀块的体积对于产生链式反应也是一个重要因素。因为原子核非常小，如果铀块的体积不够大，中子从铀块中通过时，可能还没有碰到铀核就跑到铀块外面去了。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的体积超过了它的临界体积，只要有中子进入铀块，立即会引起铀核的链式反应，在极短时间内就会释放出大量的核能，发生猛烈的爆炸。原子弹就是根据这个原理制成的。

核反应堆 核电站 原子弹爆炸时链式反应的速度是无法控制的。为了用人工方法控制链式反应的速度，使核能比较平稳地释放出来，人们制成了核反应堆。

利用反应堆工作时释放出的热能使水汽化以推动汽轮发电机发电，这

就是核电站。图 10 - 12 是核电站示意图。核电站示意图电站消耗的“燃料”很少。一座 100 万千瓦的核电站，每年只消耗 30 吨浓缩铀，而同样功率的火力发电站，每年却要消耗 250 万吨煤。

目前，核能发电技术已基本成熟，在经济效益上也跟火电站不相上下。核能发电对环境的污染，也比火电站要小。到 1985 年底，核发电已占世界发电总量的 15%。在我国也具备了发展核电的基本条件，既有相当的核资源储量，又有相当规模的核技术装备和核技术队伍。目前，浙江秦山核电站和广东大亚湾核电站已运行发电。预计到 2010 年，我国核电站的装机总容量可达 2000 万千瓦左右。为了适应现代化建设对能源的日益增长的需要，发展核电是一项有战略意义的措施。但是核电站的建设必须采用可靠的保护措施，防止放射性物质泄漏，以免给人类和自然界造成巨大的灾害。

· 阅读 · 核反应堆

核反应堆 图 10-13 是核反应堆的示意图。反应堆里用的铀。

棒是由天然铀或浓缩铀(铀 235 的含量占 2 ~ 4%)制成的。裂变产生的是速度很大的快中子，很容易被铀 238 俘获而不发生裂变，必需设法使快中子变成慢中子，因为慢中子更容易被铀 235 俘获，产生裂变。为此在铀棒周围放上不吸收或很少吸收中子的物质，使快中子跟这些物质的原子核碰撞后，能量减少，变成慢中子。这种用来使中子减速的物质叫做减速剂。常用的减速剂有石墨、重水和普通的水。

为了调节中子数目以控制反应速度，还需要在铀棒之间插进一些镉棒。镉吸收中子的能力很强，当反应过于激烈时，使镉棒插入深一些，让它多吸收一些中子，链式反应的速度就会慢一些；当反应过于缓慢，达不到所需功率时，使镉棒插入浅一些，让它少吸收一些中子，链式反应速度就可以增大。这种镉棒叫做控制棒。用电子仪器自动地调节控制棒的升降，就能使反应堆安全正常地工作。

反应堆工作时，核燃料裂变释放出来的能量，大部分转化为热，使反应区温度升高。为了控制反应堆的温度，使它能正常工作，要用水、液态金属钠或空气等流体做冷却剂，在反应堆内外循环流动，把反应堆内的能量传输出去。这就是反应堆的冷却系统，它同时可以用来输出能量。

为了防止铀核裂变产物放出的各种射线对人体的危害，在反应堆的外面需要修建很厚的水泥防护层，用来屏蔽射线，不让它们透射出来。对放射性的废料，也要装入特制的容器，埋入深地层进行处理。

增殖反应堆 慢中子反应堆所用的核燃料铀 235，在天然铀中只占 0.7%；约占天然铀的 99.3%的铀 238，在这种反应堆中得不到利用。为了解决这个问题，更合理地利用有限的铀资源，目前，快中子型的反应堆也在研究、试验之中。在这种反应堆中，裂变产生的快中子，除维持链式反应外，还有一部分被铀 238 吸收。铀 238 吸收中子后变成铀 239，铀 239 是不稳定的，经过两次衰变，变成钚 239，钚 239 也是一种可裂变的核燃料。这种反应堆每消耗一个铀 235 或钚 239 原子核，平均能生成多于一个的钚 239 原子核，所以又叫做增殖反应堆。

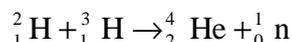
除了快中子增殖堆外，还有一种用慢中子引发的增殖堆也在研究之中。在这种反应堆中，使钍 232 俘获中子转变成钍 233，钍 233 是不稳定

的，经过两次 衰变，变成铀 233。铀 233 也是一种可以裂变的核燃料。这样，人类就可以从储量丰富的天然钍矿中获得大量的核燃料。

增殖反应堆虽然还处在试验阶段，但是从长远的观点来看，是很有前途的。

八、轻核的聚变

轻核的聚变 某些轻核结合成质量较大的核时，能释放出更多的核能。例如，一个氘核和一个氚核结合成一个氦核时，释放出 17.6 兆电子伏的能量，平均每个核子放出的能量在 3 兆电子伏以上。这时的核反应方程是



轻核结合成质量较大的核叫做聚变。

使核发生聚变，必须使它们接近到 10^{-15} 米，也就是接近到核力能够发生作用的范围。由于原子核都是带正电的，要使它们接近到这种程度，必须克服电荷之间的很大的斥力作用。这就要使核具有很大的动能。用什么办法能使大量的轻核获得足够的动能来产生聚变呢？有一种办法，就是把它们加热到很高的温度。从理论分析知道，物质达到几百万度以上的高温时，原子的核外电子已经完全和原子脱离，成为等离子体，这时小部分原子核就具有足够的动能，能够克服相互间的库仑斥力，在互相碰撞中接近到可以发生聚变的程度。因此，这种反应又叫做热核反应。怎样产生这样高的温度呢？我们知道，原子弹爆炸时能产生这样高的温度，所以可以用原子弹来引起热核反应。氢弹就是这样制造出来的。

热核反应在宇宙中是很普遍的现象。在太阳内部和许多恒星内部，温度都高达 1000 万度以上，在那里热核反应激烈地进行着。太阳每秒钟辐射出来的能量约为 3.8×10^{26} 焦，就是从热核反应中产生的。地球只接受了其中的二十亿分之一，就使地面温暖，产生风云雨露，河川流动，生物生长。

可控热核反应 如果热核反应能够控制，把它作为一种能源，那是非常理想的，它释放出的能量，就每一个核子平均来说，比裂变反应还要大好几倍。而且裂变反应会产生带有强放射性的物质，对环境造成放射性污染；热核反应对环境的污染要轻得多，也比较容易处理。热核反应需要的原料——氘，在世界上的储量是非常丰富的。1 升海水中大约有 0.03 克的氘，如果用来发生热核反应，它放出的能量就和燃烧 300 升汽油相当。因此，海水中的氘是异常丰富的能源。

世界上许多国家，都在积极研究可控热核反应的理论和技術。我国自行设计和制造的最大可控核聚变实验装置“中国环流器一号”1984 年在四川省乐山地区建成。经过近 10 年卓有成效的实验研究，取得了 400 多项研究成果。1995 年 5 月“中国环流器新一号”又通过国家验收。“中国环流器新一号”是在“中国环流器一号”的基础上重新改建的一个新的实验装置，它的各项参数均有重大的提高。它标志着我国研究可控热核聚变的实验手段又有了新的发展和提高，并将为人类探求新能源的事业做出自己的贡献。

本章小结

这一章我们从天然发射现象出发，学习了原子核是如何组成的以及如何计算和利用原子核发生核反应时所释放出的巨大能量。

(1) 什么是放射性元素？ α 射线、 β 射线和 γ 射线的本质是什么？三种

射线的性质有什么异同？在 α 衰变和 β 衰变过程中，原子核的变化有什么规律？各举一例说明。怎样表示放射性元素衰变的快慢？

* (2) 试述云室、计数器和乳胶照相的作用和原理。

(3) 什么是质子？怎样知道质子是原子核的组成部分？中子是怎样发现的？原子核是怎样组成的？什么叫同位素？

(4) 简述放射性同位素有哪些主要的应用。

(5) 什么是质能联系方程？这个方程告诉了我们什么？怎样根据原子核反应前后的质量亏损来计算核反应中释放的能量？

(6) 什么是重核的裂变？什么是链式反应？*在核反应堆中怎样控制核裂变的速率？

(7) 什么是轻核的聚变？产生核聚变的条件是什么？研究受控热核反应有什么意义？

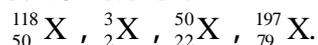
习题

A 组

(1) 原子核的衰变、原子核的人工转变、重核的裂变、轻核的聚变都是核反应，它们有什么不同？

(2) 钍 232 经过 6 次 α 衰变和 4 次 β 衰变后变成一种稳定的元素。这种元素是____，它的质量数是____，原子序数是____。

(3) 下面是 4 种元素的同位素的原子核：



请将 X 改为元素符号，并说明每个原子核中的中子数。

(4) 在某些恒星内，3 个 α 粒子经过一系列中间反应后结合成 1 个 ${}_{6}^{12}\text{C}$ 核。 ${}_{6}^{12}\text{C}$ 原子的质量是 12.0000u， ${}_{2}^4\text{He}$ 原子的质量是 4.0026u。这个反应中放出多少能量？

(5) 放射性物质每分钟衰变的次数跟尚未发生衰变的原子核数成正比。利用计数器探测某放射源的半衰期，如果最初每分钟平均计数 100 次，15 天后，每分钟平均计数为 12.5 次。那么，该放射源的半衰期是多少天？

(6) 将一计数器放在实验桌上，打开开关。在连续 3 分钟内，计数器的读数是每分钟 11、9 和 16。将一放射源放在计数器附近，在连续 3 分钟内，计数器的读数变为每分钟 1310、1270 和 1296。现将一块厚纸板放在放射源和计数器之间，每分钟读数降为 1250、1242 和 1236。又将一块厚为 2 毫米的铅板代替厚纸板，则读数降为每分钟 13、12 和 11。

a. 为什么没有放射源时，计数器会有读数？

b. 根据上述的实验数据，你对射线的本质有何推断？为什么？

(7) 秦山核电站第一期工程装机容量为 30 万千瓦，如果 1 克铀 235 完全裂变时产生的能量为 8.2×10^{10} 焦，并且假定所产生的能量都变成了电能，那么每年要消耗多少铀 235？(一年按 365 天计算。)

B 组

(1) 铀 238 的半衰期是 4.5×10^9 年。假设一块矿石中含有 1 千克的铀

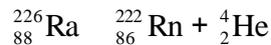
238, 经过 45 亿年(相当于地球的年龄)以后, 还剩有多少铀 238? 假设发生衰变的铀 238 都变成了铅 206, 矿石中会有多少铅? 这时铀、铅的比例是多少? 再经过 45 亿年, 矿石中的铀、铅比例将变成多少? 根据这种铀、铅比例能不能判断出矿石的年龄?

(2) 静止状态的放射性原子核镭 (${}^{226}_{88}\text{Ra}$) 进行 α 衰变。为了测量 α 粒子的动能 E , 让 α 粒子垂直飞进 $B=1$ 特的匀强磁场, 测得 α 粒子的轨道半径 $r=0.2$ 米。

a. 写出 Ra 的 α 衰变方程。

b. 试计算 α 粒子的动能 E 。

(3) 已知 ${}^{226}_{88}\text{Ra}$, ${}^{222}_{86}\text{Rn}$, ${}^4_2\text{He}$ 的原子量分别是 226.0254, 222.0175, 4.0026。求在 ${}^{226}_{88}\text{Ra}$ 的 α 衰变



中放出的能量是多少电子伏? 如果这些能量都以 Rn 核和 He 核的动能形式释放出来, 放出的 α 粒子的速度有多大?

提示: 能量和动量都守恒。

(4) 设质量为 $m_a=4u$ 、速度为 v 的 α 粒子去正面碰撞静止的、质量为 $m_{\text{Au}}=197u$ 的金原子核, 碰撞时没有能量损失, α 粒子被弹回, 如图 10-14 所示。试问:

a. 碰撞后 α 粒子和金原子核的速度 v' 和 V' 各是多大?

b. 这样被碰回的 α 粒子极少, 说明了什么?

(5) 在一原子反应堆中, 用石墨(碳)作减速剂使快中子减速。已知碳核的质量是中子的 12 倍, 假设把中子与碳核的每次碰撞都看作是弹性正碰, 而且认为碰撞前碳核都是静止的。

a. 设碰撞前中子的动能是 E_0 , 经过一次碰撞, 中子损失的能量是多少?

b. 至少经过多少次碰撞, 中子的动能才能小于 $10^{-6}E_0$?

* 第十一章 近代物理讲座

在本世纪前期，相对论和量子理论建立了起来，它们是对经典物理的革命和发展。在相对论和量子力学的基础上，物理学的诸多方面进展十分迅速，应用也非常广泛。在包括前两章介绍的原子结构和原子核在内的近代物理学的领域里，解决物质深层结构的基本粒子物理以及解决宇宙起源和演化的天体物理，成为当代科学的两大前沿领域。后来，非线性物理研究了系统的自组织与混沌现象，再一次突破经典物理学的局限性。本讲座将对上述有关知识作初步的介绍。第一至第三节为狭义相对论和广义相对论。第四节至第六节为量子论和量子力学。第七至第九节为基本粒子物理。第十、十一两节，为宇宙的起源和恒星的演化。第十二、十三两节为自组织现象和混沌现象。

一、狭义相对论的基本原理

伽利略相对性原理 1632年，伽利略发表了《关于两种世界体系的对话》一书，其中对船舱里观察到的现象有一段生动的描述：“……船停着不动时，你留神观察，小虫都以等速向各方向飞行，鱼向各个方向随意游动，水滴滴进下面的罐中；你把任何东西扔给你的朋友时，只要距离相等，向这一方向不必比向另一方向用更多的力，你双脚齐跳，无论向哪个方向跳过的距离都相同。当你仔细观察这些事情之后，再使船以任何速度前进，只要运动是匀速的，也不忽左忽右地摆动，你将发现，所有上述现象丝毫没有变化。你也无法从其中任何一个现象来确定，船是在运动还是停着不动……”

伽利略这段描述说明：在相对于地面做匀速直线运动的船舱里所进行的力学实验和观测，其结果与地面上的力学实验和观测结果没有差异。不能根据在船舱内的力学实验和观测，来判断船相对于地面是静止还是运动。正如地球以30千米/秒的速度相对太阳而运动，我们却丝毫没有感觉地球在运动一样，也不能根据地面上的力学实验来直接判断地球的公转。这是因为地面上和船舱里的力学规律具有相同的形式。牛顿第二定律的形式 $F = ma$ ，在静止的船上和做匀速直线运动的船上是一样的。牛顿运动定律是经典力学的基础，凡是牛顿运动定律成立的参照系，称为惯性参照系，或简称惯性系。地面参照系是惯性系，相对地面做匀速直线运动的船也是惯性系。一般而言，相对惯性系做匀速直线运动的任何参照系，都是惯性系。

综上所述，相对任何惯性系，力学规律都具有相同的形式。换言之，在描述力学的规律上，一切惯性系都是等价的。这一原理称为伽利略相对性原理，或经典力学的相对性原理。

狭义相对论的基本原理 19世纪中叶，麦克斯韦在总结前人研究电磁现象的基础上，建立了完整的电磁理论，又称麦克斯韦电磁场方程组。麦克斯韦电磁理论不但能够解释当时已知的电磁现象，而且预言了电磁波的存在，确认光是波长较短的电磁波，电磁波在真空中的传播速度为一常数， $c = 3.0 \times 10^8$ 米/秒，并很快为实验所证实。

从麦氏方程组中解出的光在真空中的传播速度与光源的速度无关。如果光波也和声波一样，是靠一种媒质(以太)传播的，那么光速相对于绝对静止的以太就应该是不变的。科学家们为了寻找以太做了大量的实验，其中以美国物理学家迈克耳孙和莫雷实验最为著名。这个实验不但没能证明以太的存在，相反却宣判了以太的死刑，证明光速相对于地球是各向同性的。但是这却与经典的运动学理论相矛盾。

爱因斯坦分析了物理学的发展，特别是电磁理论，于1905年提出了狭义相对论。狭义相对论的基本原理可表述于下：

1. **相对性原理** 相对任何惯性系，包括电磁理论在内的物理规律具有相同的形式。也就是说，没有任何物理实验能确定一个惯性系的运动状态。

2. **光速不变原理** 相对任何惯性系，真空中的光速都是一个常量， $c = 3.0 \times 10^8$ 米/秒，与传播的方向无关，与光源的速度也无关。

根据狭义相对论的基本原理，必须改变我们认为理所当然的时空观念，还必须应用相对论的基本原理改造牛顿力学。在下一节，我们将对此

加以讨论。

二、狭义相对论的时空观和动力学结论

经典的时空概念我们在学习力学时，总要涉及时间间隔和空间距离的概念。例如在匀加速度运动的公式 $s = v_0 t + \frac{1}{2} a t^2$ 中，就包括时间 t 和距离 s 的计算或测量。早在牛顿建立经典力学时，就考虑并形成了绝对时空的概念。他认为全宇宙都在这共同的时间中发展。两个理想的钟，不论它们是否有相对运动，它们的快慢总是一样的。两个事件同时发生，任何观察者，不论他们是否有相对运动，都认为是同时发生的。所以时间的概念是绝对的。世界万物都在共同的空间里，或静止或运动。空间任何两点的距离，比如一个理想刚性杆 的长度，对任何观者来说，不论它们是否有相对运动，测量的结果都是相同的。所以说空间也是绝对的。经典的时空观念就是绝对的时空观念。

如图 11-1 所示，以地面作为 S 参照系，火车为 S' 参照系，火车以速度 v 向右运动。设有一束光在火车里沿车运行方向传播，速度为 c' ，按经典时空概念，在 S 系内测量此光束的速度应为 $c = c' + v$ 。这与光速不变原理相矛盾。为解决此矛盾必须改变经典的时空观念。

狭义相对论的时空概念 爱因斯坦在研究电磁规律的同时，也分析了时间和空间的概念，指出了经典时空概念的局限性。研究时空的性质需要进行测量，光或电磁波是测量时空的唯一工具，从而是了解时空性质不可缺少的因素。以下，简单地介绍狭义相对论的时空概念。

1. 同时的相对性 在相隔一定距离的两点发生的事件是否同时，需用光讯号来测量。爱因斯坦提供了一种测量方法，可以作为同时的定义。在两点连线的中点设立一光讯号的探测装置，在每个事件发生的同时各发射一光讯号，如果位于中点的探测装置同时接收到这两个光讯号，则这两个事件是同时发生的。如果不是同时发生的，也可以根据两光讯号到达的先后，来判断两事件发生的先后。

比如，一列火车以速度 v 向右行驶，如图 11-2 所示。 A' 和 B' 为车首尾处的两点， C' 为 A' 和 B' 连线的中点。 A 和 B 是在事件发生时，地面上与 A' 和 B' 分别对应的两点， C 为 A 和 B 连线的中点。车从左侧开来，当行至图示位置时， A 和 B 各发射一光讯号，代表两个事件。如果在 C 点同时接收到这两个光讯号，则在地面上判断，两讯号是同时发生的。而火车向右行驶，设在车上 C' 点的探测装置必然先接收到 A 发出的光讯号。反之，如果 A' 、 B' 两点发出的两光讯号被 C' 点的装置同时接收到，则车内的观者认为 A' 和 B' 两讯号同时发出，而地面的观者必然认为 B' 处的光讯号比 A' 处的光讯号先发出。可见同时性是相对的，而不是绝对的。

2. 运动时间的膨胀 在一惯性系内，同一地点发生的两事件的时间（间隔），称为原时。原时为静止的钟所记录的时间。比如，在一列运动的火车中，相对火车静止的钟记录的发生在火车上同一地点的两件事的原时为 Δt_0 ，在地面看来，火车以速度 v 运动，这两件事并非发生在同一地点，地面上的钟测量该两事件的时间间隔 Δt 要大于原时 Δt_0 ，这种效应称为运动时间的膨胀。在地面上看来，运动的钟走得慢些，所以又称这个效应为运

刚性杆是指在任何情况下都不发生形变的理想杆。

动时钟的变慢。可以证明

$$t = t_0 / \sqrt{1 - v^2 / c^2}$$

为运动钟的速度， c 为光速。质量为电子质量 207 倍的 μ 子的寿命为 $t_0 = 2.26 \times 10^{-6}$ 秒(原时)，当它以 $v = 0.998c$ 而高速运动时，测得其寿命为 $t = 30 \times 10^{-6}$ 秒，完全符合运动时间的膨胀效应。运动时间的膨胀效应是相对的，在火车中的人观察，地面向后运动，地面的钟走得比车内的钟慢些。

3. 运动距离的缩短 空间两点的距离，比如理想刚性杆的长度，当它静止时，称为静止长度，简称静长。有一刚性杆静止在火车内，沿车行进方向放置，其静长为 l_0 。火车以速度 v 运动，当地面上要测量随车一起运动的刚性杆长度时，需用地面上静止的尺同时读出刚性杆两端对准的刻度，这样测得的长度 l 要小于静长 l_0 。这种效应称为运动距离的缩短，可以证明，

$$l = l_0 \sqrt{1 - v^2 / c^2}$$

运动距离缩短的效应是相对的。火车里的人测量静止在地面上沿运动方向而放置的刚性杆长度，也小于其静长。

狭义相对论的时间和空间概念不再是绝对的，而是相对的，和运动密切相关。如果运动速度比光速小得多，即 $v \ll c$ ，运动时间的膨胀和运动距离的缩短都可以忽略。日常生活和大部分工程技术中，所涉及的物体的运动速度都远小于光速，经典时空的概念仍然适用。

4. 相对论的速度叠加 由于时间和空间的相对性，对于物体的速度，在某一惯性系 S' 内观测，要用 S' 系的时间和空间坐标表示；在另一惯性系 S 内观测，要用 S 系的时间和空间坐标表示。这样，速度叠加公式就不再是绝对时空的速度叠加公式了。假如 S' 和 S 两系的坐标轴相平行， S' 以速度 v 沿 x 轴而运动，一质点以 v' 相对 S' 沿 x' 轴而运动，则相对 S ，其速度 u 为

$$u = \frac{v + v'}{1 + vv'/c^2}$$

这是相对论的速度叠加公式。如果 $v' < c$ ，则 $u < c$ ；如果 $v' = c$ (光速)，则 $u = c$ 。与相对论的时空概念相协调。

狭义相对论的动力学结论 经典力学定律不符合狭义相对论的基本原理，必须改造成相对论力学，这里只介绍相对论力学的两个重要结论。

1. 质量和速率的关系 在经典物理的概念里，一个物体的质量为一常量，与物体的运动状态无关。但是在相对论理论里，质量和运动的速度有关。物体的静止质量 m_0 是一常量，相对任何惯性系均为 m_0 ，而物体以速度 v 运动时，它的(运动)质量 m 为

$$m = \frac{m_0}{\sqrt{1 - v^2 / c^2}}$$

质量随速率增加而变大，实验完全证实了这个公式。从质量和速度的关系式可以看出，当物体速度趋近于光速时，质量将趋向无限大。这是不可能的。一切物体的速度都永远小于真空中的光速。

2. 质量和能量的联系 这就是著名的爱因斯坦质能公式

$$E = mc^2 = \frac{m_0 c^2}{\sqrt{1 - v^2 / c^2}}$$

$m_0 c^2$ 称为静止能量， mc^2 包含静止能量和动能， $(m - m_0)c^2$ 为物体的相对论动能。当 $v \ll c$ ，可以证明

$$(m - m_0)c^2 \approx \frac{1}{2} m_0 v^2$$

这就是我们所熟悉的动能公式。这也说明，当物体的速度远小于光速时，相对论力学就近似为经典力学了。

三、广义相对论

狭义相对论在惯性系里研究物理规律，不能处理引力问题。

1915年，爱因斯坦在数学家的协助下，把相对性原理从惯性系推广到任意参照系，发表了广义相对论。由于这个理论过于抽象，数学运算过于复杂，这里只介绍一下大致的思路。

非惯性系与惯性力 牛顿运动定律在惯性系里才成立，在相对惯性系做加速运动的参照系(称非惯性系)里，会出现什么情况呢？例如，在一列以加速度 a_1 做直线运动的车厢里，有一个质量为 m 的小球，放在光滑的桌面上，如图 11-3 所示。相对于地面惯性系来观测，小球保持静止状态，小球所受合外力为零，符合牛顿运动定律。相对于非惯性系的车厢来观测，小球以加速度 $-a_1$ 向后运动，而小球没有受到其他物体力的作用，牛顿运动定律不再成立。

不过，车厢里的人可以认为小球受到一向后的力，把牛顿运动定律写为 $f_{\text{惯}} = -ma_1$ 。这样的力不是其他物体的作用，而是由参照系是非惯性系所引起的，称为惯性力。如果一非惯性系以加速度 a_1 相对惯性系而运动，则在此非惯性系里，任一质量为 m 的物体受到一惯性力 $-ma_1$ ，把惯性力 $-ma_1$ 计入在内，在非惯性系里也可以应用牛顿定律。当汽车拐弯做圆周运动时，相对于地面出现向心加速度 a_1 ，相对于车厢人感觉向外倾倒，常说受到了离心力，正确地说应是惯性离心力，这就是非惯性系中出现的惯性力。

惯性质量和引力质量 根据牛顿运动定律，力一定时，物体的加速度与质量成反比，牛顿定律中的质量度量了物体的惯性，称为惯性质量，以 $m_{\text{惯}}$ 为符号，有

$$F = m_{\text{惯}} a$$

根据万有引力定律，两物体(质点)间的引力和它们的质量乘积成正比。万有引力定律中的质量，类似于库仑定律中的电荷，称为引力质量，以 $m_{\text{引}}$ 为符号。

惯性质量和引力质量是两个不同的概念，没有必然相等的逻辑关系。它们是否相等，应由实验来检验。本世纪初，匈牙利物理学家厄缶应用扭秤证明，只要单位选择恰当，惯性质量和引力质量相等，实验精度达 10^{-8} 。后来，人们又把两者相等的实验精度提高到 10^{-12} 。

设一物体在地面上做自由落体运动，此物体的惯性质量和引力质量分别为 $m_{\text{惯}}$ 和 $m_{\text{引}}$ ，以 $M_{\text{引}}$ 代表地球的引力质量，根据万有引力定律和牛顿第二定律，有

$$G \frac{M_{\text{引}} \cdot m_{\text{引}}}{R^2} = m_{\text{惯}} g,$$

式中 G 为万有引力常量， R 为地球半径， g 为物体下落的加速度。因为 $m_{\text{引}} = m_{\text{惯}}$ ，所以 $g = GM_{\text{引}}/R^2$ ，与物体的质量无关。这就是伽利略自由落体实验的结论。

既然惯性质量与引力质量相等，就可以简单地应用质量一词，并应用相同的单位。质量也度量了物质的多少。

广义相对论的基本原理 爱因斯坦提出广义相对论，主要依据就是

引力质量和惯性质量相等的实验事实。既然引力质量和惯性质量相等。就无法把加速坐标系中的惯性力和引力区分开来。比如，在地面上，物体以 $g = 9.8 \text{ 米/秒}^2$ 的加速度向下运动。这是地球引力作用的结果。设想在没有引力的太空，一个飞船以 $a = 9.8 \text{ 米/秒}^2$ 做直线运动(现在可以做到)，宇航员感受到惯性力，力的方向与 a 的方向相反，这时他完全可以认为是受到引力的作用。匀加速的参照系与均匀引力场等效，这是爱因斯坦提出的等效原理的特殊形式。因为引力质量和惯性质量相等，所以，在均匀引力场中，不同的物体以相同的加速度运动。这也是伽利略自由落体实验的结果。它可一般叙述为：在引力场中，如无其他力作用，任何质量的质点的运动规律都相同。这是等效原理的另一种表述。

由于等效原理，相对于做加速运动的参照系来观测，任一质点的运动规律都是引力作用的结果，具有相同的规律形式。爱因斯坦进一步假设，相对任何一种坐标系，物理学的基本规律都具有相同的形式。这个原理表明，一切参照系都是平等的，所以又称为广义协变性原理。

等效性原理和广义协变性原理是广义相对论的基本原理。

引力场的强度可用单位引力质量的物体在引力场中受到的引力来量度。引力场强度处处相等的引力场，叫做均匀引力场。地面上引力场，可认为是均匀引力场。

广义相对论的实验验证 在广义相对论的基本原理下，应建立新的引力理论和运动定律，爱因斯坦完成了这个任务。这样，牛顿运动定律和万有引力定律成为一定条件下广义相对论的近似规律。根据广义相对论得出的许多重要结论，有一些已得到实验的证实。下面介绍几例。

1. **水星近日点的进动** 按照牛顿引力理论，水星绕日做椭圆运动，轨道不是严格封闭的，轨道离太阳最近的点(近日点)也在做旋转运动，称为水星近日点的进动，如图 11-4 所示。理论计算和实验观测的水星轨道长轴的转动速率有差异。牛顿的引力理论不能正确地给予解释，而广义相对论的计算结果与观测值符合。爱因斯坦当年给朋友写信说：“方程给出了进动的正确数字，你可以想象我有多高兴，有好些天，我高兴得不知怎样才好。”

2. **光线的引力偏折** 在没有引力存在的空间，光沿直线行进。在引力作用下，光线不再沿直线传播。比如，星光经过太阳附近时，光线向太阳一侧偏折，如图 11-5 所示。这已在几次日蚀测量中得到了证实，证明广义相对论的计算偏折角与观测值相符合。

3. **光谱线的引力红移** 按照广义相对论，在引力场强的地方，钟走得慢，在引力场弱的地方，钟走得快。原子发光的频率或波长，可视为钟的节奏。引力场存在的地方，原子谱线的波长加大，引力场越强，波长增加的量越大，称这个效应为引力红移。引力红移早已为恒星的光谱测量所证实。20 世纪 60 年代，由于大大提高了时间测量的精度，即使在地面上几十米高的地方由引力场强的差别所造成的微小引力红移，也已经精确地测量出来。这再一次肯定了广义相对论的正确性。

4. **引力波的存在** 广义相对论预言，与电磁波相似，引力场的传播形成引力波。星体做激烈的加速运动时，发射引力波。引力波也以光的速度

传播。虽然还没有直接的实验证据，但后来对双星系统的观测，给出了引力波存在的间接证据。

广义相对论建立的初期并未引起人们的足够重视，后来在天体物理中发现了许多广义相对论对天体物理的预言，如脉冲星、致密 X 射线源、类星体等新奇天象的发现以及微波背景辐射的发现等。这些发现一方面证实了广义相对论的正确性，另一方面也大大促进了相对论的进一步发展。

四、初期量子理论

在 19 世纪末期，经典物理已形成完整的体系，取得了辉煌的成就。但是，仍有一些突出的物理实验规律不能被经典物理所解释。20 世纪之初，物理学家提出了量子理论，解释了一些经典物理不能解释的现象，并为日后量子力学的建立奠定了基础。

普朗克量子论 一切物体都发射并吸收电磁波。物体发射电磁波又称热辐射，温度越高，辐射的能量越多，辐射中短波成份比例越大。完全吸收电磁辐射的物体发射电磁辐射的本领也最强，称这种理想的物体为黑体。研究黑体辐射电磁波的能量与黑体温度以及电磁波波长的关系，从实验上得出了著名的黑体辐射定律。

假设电磁辐射是组成黑体的谐振子所发出，按照经典理论，谐振子的能量可以连续地变化，电磁波的能量也是可以连续变化的，但是理论结果与实验定律相矛盾。1900 年，德国物理学家普朗克提出了量子理论：黑体中的振子具有的能量是不连续的，从而，它们发射或吸收的电磁波的能量也是不连续的，如果发射或吸收的电磁辐射的频率为 ν ，则发射或吸收的辐射能量只能是它的整倍数， h 为一普适量，称为普朗克常量。普朗克的量子理论成功地解释了黑体辐射定律。这种能量不连续变化的概念，是对经典物理概念的革命。普朗克的理论预示着物理观念上革命的开端。

爱因斯坦光子理论 因为电磁波理论也不能解释光电效应，在普朗克量子论的基础上，爱因斯坦于 1905 年提出了光子概念。他认为光的传播能量也是不连续的，而是一份一份的，每一份能量称为一个光子，即光是由光子组成的，频率为 ν 的光的光子能量等于 $h\nu$ ， h 为普朗克常量。光子理论圆满地解释了光电效应。人们对光本性的认识前进了一步：光具有波粒二象性。在经典物理中，波是连续的，粒子是分立的，二者不相容。所以，不能把光看作经典物理中的波，也不能把光看作经典物理中的粒子。

电子及其他粒子的波动性 我们已从第九章了解到，玻尔把普朗克的量子论和爱因斯坦的光子理论，应用到原子系统上，于 1913 年提出了原子理论。按照玻尔原子理论，原子中存在着分立的能级，电子从某一能级向另一能级跃迁时，发射或吸收一个光子。这与经典物理的概念也迥然不同。这就启发人们：组成原子的粒子，如电子，必然不是经典意义下的粒子，所遵从的规律也不同于经典物理的规律。

在光具有波粒二象性的启发下，法国物理学家德布罗意提出一个问题：“在光学中，比起波的研究方法来，如果说过于忽视粒子的研究方法的话，那么，在粒子的理论上，是不是发生了相反的错误，把粒子的图象想得太过分，而过分忽视了波的图象呢？”接着，他在 1924 年提出一个假说，认为波粒二象性不只是光子才有，一切微观粒子，包括电子、质子和中子，都有波粒二象性。他指出：具有质量 m 和速度 v 的运动粒子也具有波动性，这种波的波长等于普朗克恒量 h 与粒子动量 mv 的比，即 $\lambda = h/mv$ 。这个关系式称做德布罗意公式。

根据德布罗意公式，很容易算出运动粒子的波长。例如，以 10^7 米/秒的速度运动的电子，波长与伦琴射线的波长相仿，如果电子确有波动性，就应该像伦琴射线一样，在通过晶体点阵时，能观察到衍射现象。后来，物理学家将电子束射到铝箔上，在铝箔的后面放一张照相底片，就得到图

11-6 所示的照片，在中央亮斑的周围，出现了明暗相间的环形花纹。这个衍射图样和伦琴射线穿过同一铝箔后产生的衍射图样(图 11-7)非常相似。这就证明了电子的确具有波动性。

后来又用原子射线和分子射线做类似的实验，同样得到了衍射图样。质子和中子的衍射实验也做成功了。这就证明了一切运动的微观粒子都具有波粒二象性，其波长与动量的关系都符合德布罗意公式。粒子的波动性又称为德布罗意波或物质波。

我们不能把电子等微观粒子视为经典的粒子，也不能把物质波视为经典的波。实验和理论的进一步研究发现，电子等微观粒子的波动性与声波或电磁波的特性并不完全相同，它们遵从的规律也不一样。这就导致了量子力学的诞生。

五、量子力学的初步概念

波函数与概率密度 电子等微观粒子具有波粒二象性,应用什么样的概念,或应用什么样的物理量,来描写它们的运动状态呢?在经典物理里,描写粒子的运动状态,用粒子的位置和动量;描写声波时,用介质中各点的位移;描写电磁波时,用各点的电场强度或磁感强度。因为电子等微观粒子既不是经典的粒子,也不是经典的波,需要另找适合描写微观粒子的物理量。在量子力学建立的过程中,经过薛定谔和玻恩等人的努力,找到了描写微观粒子运动状态的物理量。即用波函数或态函数,来反映微观粒子的波动性,波函数常用希腊字母 ψ 来表示。1926年,玻恩提出了波函数的正确解释。

的物理意义如何呢?关于光的波粒二象性,爱因斯坦从统计观点作了解释,即光的波动性可看作是大量光子运动时表现出的统计规律,光波振幅大因而光强大的地方,光子到达的概率大,或者严格一点说,光子在该处单位体积中出现的概率大,即概率密度大。玻恩说:“爱因斯坦的观念又一次引导了我。他曾经把光波的振幅解释为光子出现的概率密度,从而使粒子(光量子或光子)和波的二象性成为可理解的。这个观念可以马上推广到 ψ 函数上: $|\psi|^2$ 必须是电子(或其他粒子)的概率密度。”根据玻恩的诠释,波函数 ψ 是位置和时间的函数, $\psi = \psi(x, y, z, t)$,就如同声波中的位移。电磁波中的电场强度和磁感强度是位置和时间的函数一样,只是 $|\psi|^2$ 代表了在时刻 t ,位置 (x, y, z) 处粒子出现的概率密度。粒子的波动性就是这种概率性质的反映,所以物质波又称概率波。这样看来,微观粒子遵从的规律是概率性的,与经典力学规律不同,后者是决定论的,即初始条件一经决定,就可以根据牛顿定律决定粒子在任一时刻的位置和速度。

量子力学的基本规律——薛定谔方程 波函数是描写微观粒子的基本物理量,波函数所遵从的规律,就是量子力学的基本规律,它将决定粒子波函数的特征,从而决定粒子的运动状态。正像在经典力学里,粒子的位置和动量描写粒子的运动状态,牛顿运动定律决定了粒子的位置和动量如何变化,因而牛顿运动定律是经典力学的基本规律。

奥地利物理学家薛定谔(1887~1961)在1926年找到了 ψ 遵从的规律,称为薛定谔方程。在应用数学形式描述电子的波粒二象性上,他从麦克斯韦电磁理论得到启发,认为电子的德布罗意波也可以应用类似于光波的方式加以描述。这个方程既描述了电子的波动行为,又蕴涵着粒子性特征。写出并求解薛定谔方程,超出本书的范围。不过,我们可以讨论一下有关结论。

波函数 ψ 必须满足一些物理条件:作为描写粒子运动状态的 ψ 应是时空坐标的单值函数。变化应是连续的,不能变为无限大,即应有界。这样,薛定谔方程的解,不但成功地解释了玻尔原子理论所能解释的现象,而且能够解释大量玻尔理论所不能解释的现象。在第九章所介绍的玻尔理论的基本假设,在量子力学里是从理论上推导出来的必然结果。原来,在薛定谔方程中,只有原子中电子具有某些不连续的能量值时,方程的解才满足上述物理条件。由薛定谔方程解中得出的氢原子中电子能量的可能值,正好就是玻尔原子理论给出的值。

概率密度与电子云 我们将以原子的稳定态为例,讨论一下由波函数所决定的电子在原子中的概率密度,这波函数就是由薛定谔方程求解出来的。因为是稳定态,所以和时间无关,说明在任何时候,电子出现在任一处的概率密度都相同。例如,氢原子处在基态时,电子经常出现的概率最大的地方,是以原子核为中心的一个球壳,这个球壳的半径为 0.53×10^{-10} 米,这个数值与玻尔原子理论计算出来的基态轨道半径相同,可见,玻尔的原子轨道只不过是电子出现概率最大的地方。

电子在核外的运动情况,通常用电子云来形象地描述。用小黑点的稠密与稀疏,来代表电子在核外各处单位体积中出现的概率(即概率密度)的大小,这样就可以画出原子的电子云图,图中的原子核好像被一层云雾笼罩着,云雾浓度大的地方,单位体积中电子出现的概率大;云雾浓度小的地方,单位体积中电子出现的概率小。图 11-8 是氢原子基态的电子云。

现在看一下以核为中心的一层层很薄的球壳中电子出现的概率。在靠近原子核的地方,虽然云雾浓度较大,小黑点稠密,但在靠近原子核的一个薄球壳中包含的小黑点的总数却不会很多,即电子出现在这个球壳中的概率不会很大,因为这个球壳的体积较小。在远离原子核的地方,球壳的体积虽然较大,但是小黑点稀疏,因而出现在这个球壳中的概率也不会很大。经过计算知道,在半径为 $r_1 = 0.53 \times 10^{-10}$ 米的一薄的球壳中电子出现的概率最大, r_1 就是玻尔理论中氢原子基态的轨道半径。

六、量子力学的应用和发展

量子力学建立后，应用它计算氢原子的光谱，获得了巨大成功，其理论计算与实验结果完全符合。量子力学不仅可以正确地解释氢原子光谱，而且，还可以说明复杂原子的构造，解释复杂原子的光谱。这确实表明，量子力学是微观粒子所遵从的规律。

在量子力学发展的早期，就认识到它的应用不限于电子，对其它粒子也一样适用。1927年，美国物理学家康登应用量子力学解释了 α 衰变现象。这又称为隧道效应。在 α 粒子放射体中 α 粒子被约束在原子核内，其能量小于核对它的约束能量——势垒，按照经典理论， α 粒子是不可能穿出原子核的。但是，按照量子力学， α 粒子有穿过势垒的概率。这个概率即使很小，但不为零。对大量的原子核来说，总会有一小部分原子核的 α 粒子，穿透势垒而发射出来。理论计算为实验数据所证实。

量子力学在建立之初，就用于研究分子的结构。美国物理学家和化学家泡令阐明了化学键的本性，就是以量子力学为依据的。比如，对 N_2 , H_2 , CO 等分子，原子之间的相互作用是量子力学效应。当两个氢原子互相靠近时，它们能量的减小在于相互吸引作用，而这是由于两个原子共享两个电子造成的，和电子波函数的对称性密切相关。量子力学可以计算出 H_2 分子的平衡距离为 $r_0 = 7.4 \times 10^{-11}$ 米，两个氢原子结合成氢分子时释放的能量为4.52电子伏。同样，量子力学也解释了共价键以外的结合键。这里不作具体介绍。

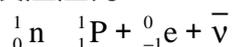
凝聚态物理，如液体和固体的构造理论，其导电与导热性能的解释，也是建立在量子力学基础之上的。比如研究电子在晶体中的运动，因为晶体点阵的周期性结构，电子受的力也具有空间的周期性，量子力学能揭示电子在晶体中的运动状态，就像一个原子中的电子可以处在不同的能级上，在固体中，电子可以处在不同的能带上，能带有一定的宽度，代表一个能量范围。这就是能带理论。应用能带理论，可以成功地解释金属和半导体的导电特性。在近代，其实际应用几乎随处可见。

薛定谔方程是非相对论的，不能应用于高速的微观粒子。1928年，狄拉克建立了相对论的量子力学方程，称为狄拉克方程。它不仅成功地说明电子自旋的存在，而且还证明，对于每一种粒子，都存在相应的反粒子。电子的反粒子带正电，其他性质都和电子相同。1932年，美国物理学家安德森从宇宙射线中发现了正电子，证明了狄拉克理论的正确性，这是基本粒子广泛研究的开始。

七、基本粒子

什么是基本粒子 在古代就有一些哲学家认为物质是由原子组成的，原子是组成物质的最小颗粒，不可再分，有基本的涵义，可称为基本粒子。19世纪初，英国科学家道尔顿以化学反应为依据，提出物质是由原子组成的学说，使原子理论成为科学。原子作为基本粒子的概念，并没有持续多长时间，科学家发现了电子。随后，确认氢的原子核就是质子。原子是由原子核和核外电子组成的，原子不再是基本粒子。1932年，查德威克发现中子，人们知道原子核由质子和中子组成。这样，除电子外，质子和中子都是基本粒子了。后来人们又发现了正电子、中微子、介子等大量的基本粒子。基本粒子数目的大量增加，使人们认识到它们也不可能是最基本的组分，所以有“基本粒子不基本”的说法。

中微子的发现 中子不是稳定粒子，它衰变为质子和电子： ${}^1_0\text{n} \rightarrow {}^1_1\text{P} + {}^0_{-1}\text{e}$ 。实验发现此衰变中动量不守恒。例如，静止的中子衰变成的质子和电子应该向相反的方向运动，实验测量并非如此。瑞士物理学家泡利据此预言存在中微子，中微子不带电，质量可能为零，有极强的穿透力。把中微子的动量计算在内，反应前后的动量是守恒的。虽然到50年代才从实验上得到中微子存在的直接证据，但是物理学家已经肯定中微子也是一个基本粒子。中子衰变的正确反应应为



为中微子的符号， $\bar{\nu}$ 为 的反粒子的符号。

粒子的自旋 到本世纪30年代末，加上在宇宙射线中发现的 μ 子，人们认为，电子、质子、中子、中微子、 μ 子和光子都是基本粒子。除中子和 μ 子是不稳粒子外，其余都是稳定的。基本粒子的主要特征除质量和电荷外，还有自旋，这是一个量子力学概念，表征粒子的内部属性，相当于经典物理概念是微粒的自转。它遵从量子力学的规律，以 $h/2$ 为单位，只能取整数0、1、2、……，或半整数1/2、3/2……。上述6种粒子，除光子自旋为1外，其余都是自旋为1/2的粒子。自旋为整数的粒子又称为玻色子；自旋为半整数的粒子又称为费米子。

粒子和反粒子 在本章第六节已经提到，每一种粒子都存在相应的反粒子。反粒子和粒子的质量、自旋都相同，电量相同而符号相反。对不带电的粒子，粒子和反粒子有其它的区别标志，这里不具体描述。在粒子的符号上加一横，代表反粒子，如 $\bar{\nu}$ 为反中微子。也有的粒子的反粒子就是自身，而无区别，如光子。1932年安德森发现了正电子，使反粒子的存在第一次得到了证实。其他反粒子也先后被发现。如反质子和反中子分别是1955年和1956年在加速器中发现的。粒子和反粒子是互为反粒子的，只是当初称呼电子、质子等为粒子而已。我们这个世界是由粒子组成的，而不是由反粒子组成的。

核子玻色子遵从玻色—爱因斯坦统计，费米子遵从泡利不相容原理。

泡利不相容原理：不能有两个或两个以上的粒子同时处于相同的状态。

强子——介子和重子 本世纪 40 年代到 50 年代，从宇宙射线中又发现了一批粒子。比如发现了 π 介子和 K 介子，它们的自旋为零；又发现了与核子(质子和中子)属于同一类而质量更大的粒子，称为超子，有 Σ 超子、 Λ 超子和 Ξ 超子，它们都是不稳定粒子。 π 介子就是日本物理学家汤川秀树在 30 年代预言的传递核力的粒子和超子统称重子。介子和重子又统称为强子，因为它们之间的相互作用强大。

粒子的奇异性 仔细地分析新发现的各种粒子的衰变反应，以及它们参与的其它反应，发现 K 介子和超子具有产生快，衰变慢和同时产生两个或多个粒子的新特性，与 π 介子和核子所有的性质不同，当时认为有些奇异，引入了一个称为奇异数的量子数来标志这种奇异性。 K^+ 介子和 K^0 介子的奇异数为 1； K^0 ， K^- ， Σ^0 ， Σ^+ 超子的奇异数为 -1； Σ^- 、 Ξ^0 超子的奇异数为 -2。具有奇异数的粒子，如其奇异数为 s，则其反粒子的奇异数为 -s。 π 介子和核子的奇异数为 0。在强相互作用中，奇异数守恒。

八、夸克和今日的基本粒子

夸克模型 原子不再是基本粒子，原子核也不是基本粒子，介子和重子是否也由更为基本的粒子组成的呢？1964年，美国物理学家盖尔曼和以色列物理学家兹韦格分别提出了夸克模型，中国科学家也在1965年提出了类似的概念，在基本粒子物理上取得了重大的进展。

按照夸克理论，一切强子(参与强相互作用的粒子)都是由夸克组成的。初期提出的夸克有三种，分别称为上夸克 u ，下夸克 d 和奇夸克 s 。它们的自旋都是 $1/2$ ，属于费米子。夸克的重要特征之一是带有分数电荷。以电子电荷为单位 e 的电荷为 $2/3$ d 的电荷为 $-1/3$ s 的电荷也是 $-1/3$ 。此外， s 的奇异数为 -1 。对于重子，有重子数作为标志，上节所述的重子的重子数为 1 ，反重子的重子数为 -1 。夸克的重子数为 $1/3$ 。对于每一种夸克，都存在相应的反夸克。反夸克的质量、自旋同于夸克，而电荷、奇异数和重子数的数值相同，符号相反。

夸克之间存在着强相互作用。靠这种相互作用，每一个介子由一个夸克和一个反夸克组成；每一个重子由三个夸克组成，每一个反重子由三个反夸克组成。比如， π^+ 介子是由 u 夸克和反下夸克 \bar{d} 组成的。质子是由 u 、 u 和 d 三个夸克组成的； Λ^0 超子是由 u 、 d 和 s 三个夸克组成的，余此类推。图 11-9 为 P 、 Λ^0 和 π^+ 三个强子的结构示意图。

夸克模型的扩充 夸克的味 当时已经发现的强子都可以成功地由 3 种夸克组建起来。还预言了新的介子或重子。但是，进一步的实验和理论又都表明 3 种夸克理论的局限性，似乎夸克不止有 3 种。美国物理学家格拉肖从理论上预言存在第四种夸克。称这第四种夸克为粲夸克 c ，它的电荷为 $2/3$ ，带一种新的量子数，称为粲数，用 c 来表示，粲夸克的粲数 $c = 1$ 。1973 年，美国物理学家丁肇中和里希特分别独立地发现了自旋为 1 的一种新介子，他们分别命名这种粒子为 J 和 ψ 粒子，它是自旋为 1 的介子，是由一个粲夸克和一个反粲夸克组成的。这样，不计反粒子，夸克的家族变成了 4 个。

对称性理论进一步预言，还应存在另外两种夸克，被分别称为底夸克 b 和顶夸克 t 。这样，夸克家族的成员变成了 6 个。6 种夸克不同，称为它们的“味”不同，用上、下、奇、粲、底和顶加以区分。“味”只是一种比喻，和生活中的味感是两回事。1977 年，美国物理学家富德曼发现了 r 介子，被证明是由一个底夸克和一个反底夸克组成的。最近报导，顶夸克也已被证实。

夸克的色 为了符合泡利不相容原理，物理学家还发现了夸克的一种更为深刻的性质：每种夸克都具有(颜色)，可以用红、黄、兰(或红、绿、兰)三种加以区分。这只不过是借用光的颜色名字，夸克的色与光波的色完全是两回事。就像粒子带电称为电荷一样，夸克带色，也可以称为色荷。正是色荷间的相互作用，才使强子中的夸克互相吸引而束缚在一起。三种不同色的夸克组成不带色的重子，好像三原色组成白色一样。同样，夸克和反色夸克的色互补，它们组成的介子也不带色。这就是为什么强子不带色的原因。

基本粒子：夸克和轻子 在当今看来，强子的基础是夸克，夸克是基本粒子。此外，基本粒子族还存在轻子一类。最早发现了电子和电中微

子；后来发现了 μ 子和 μ 中微子；70 年代，又发现了 τ 子和 τ 中微子。
子的质量比核子质量还大，它不能由轻重来区分它们了。虽然 τ 子的质量大，但从其性质上看，仍属于轻子一类。这样，轻子也分 6 种，类似于夸克的味。时至今日，实验研究还没有发现轻子的内部结构。也就是说，这 6 种轻子也属于基本粒子。

九、基本粒子间的相互作用

四种基本的相互作用 一切物质归根结底都是由基本粒子组成的。基本粒子间的相互作用属于基本的相互作用，相互作用是力学中力的概念的推广。其他一切力都是基本相互作用直接或间接的表现形式。实践证明，基本的相互作用有四种：

1. **引力作用** 在宏观上，特别是对于天体，引力作用是极其重要的。但是，对于基本粒子来说，比起其他相互作用来，引力作用极其微弱，可不予考虑。

2. **弱相互作用** 强度远小于电磁相互作用和强相互作用，存在于除光子外所有粒子之间的一种短程作用。

3. **电磁相互作用** 直接存在于带电的粒子之间。

4. **强相互作用** 存在于夸克之间。介子或重子之间的相互作用是夸克间强相互作用的间接表现，核子之间的相互作用即核力属强相互作用。

这四种的基本相互作用，按由强到弱排列，它们的相对强度为

强相互作用	电磁相互作用	弱相互作用	引力相互作用
1	10^{-2}	10^{-14}	10^{-39}

正像电和磁是电磁相互作用的两个不同的表现方面一样，科学家们认为，电磁和弱相互作用两者是电-弱相互作用的两个不同的表现方面。近年来，电弱统一的理论获得了成功。

传递相互作用的粒子 相互作用的本质是什么呢？在电学部分，我们知道，带电粒子是通过电磁场传递力的。电磁场的传播就是电磁波，其量子是光子。所以，带电粒子是通过交换光子发生相互作用的。传递相互作用的粒子又称媒介子。光子是一切带电粒子间电磁相互作用的媒介子。

轻子之间不存在强相互作用，轻子或重子之间都存在弱相互作用。弱相互作用的媒介子又称为中间玻色子或弱介子。理论预言有 W^+ 、 W^- 和 Z^0 三种弱介子。它们的质量都很大，自旋都等于 1，在本世纪 80 年代，这三种媒介子先后被实验所证实。

夸克之间存在强相互作用。强相互作用的媒介子称为胶子。胶子的静质量为 0，电荷为 0，自旋等于 1，但带有色荷。

夸克或胶子都没有被分离出来而直接观测到。为什么没有单个的夸克出现呢？理论上认为，夸克之间的相互作用随着夸克之间的距离增加而加大，以致巨大的撞击能量未分离开夸克，而产生了两个或三个夸克组成的强子。这个理论又称为夸克的禁闭理论。按照这个理论，单个夸克是不能从强子中分离出来的。

十、宇宙的起源

每当我们仰望夜空，看到繁星密布，往往不能自己地想到宇宙的起源和发展问题。这是当今科学研究的前沿领域。本节将介绍一些有关的初步知识。

恒星系统和宇宙学原理 恒星的分布具有成团的结构。由恒星组成的小系统，如星群，其线度约 1 光年。我们的太阳系，包括受太阳引力作用的星际物质在内，其线度也有 1~2 光年。由星群或更多恒星组成的系统称为星团，其线度约 100 光年。由若干星团组成的更大的系统称为星系。银河系为典型的星系，它包含 2000 多亿个恒星，线度大约为 10 万光年。由若干星系可组成星系群，其线度大约为 100 万光年。由若干星系群或更多的星系可组成星系团，其线度约为 1000 万光年。由若干星系团可组成超星系团，其线度约为 1 亿光年。

虽然局部看，星体内部密度很大，星群或星团也不是均匀的，但是从大范围平均地看，则没有区别。说得具体一些，在尺度为 10^8 光年的体积内，物质的平均密度处处一样。这样大范围地看称为宇观。这一规律用宇宙学原理的名称叙述如下：宇观上，在任何时刻，从任何处观测，宇宙是均匀的和各向同性的。

宇宙膨胀和哈勃定律 1929 年，美国天文学家哈勃观测并分析了遥远星系光谱线的红移，发现红移量随星系的距离而增加。由此得出远方星系都在离开银河系而运动的结论，这就是所谓宇宙膨胀。

什么是光谱线的红移现象呢？在声学里，我们已经知道什么是多普勒效应。当声源和听者相互远离时，听到的声音频率比它们相对静止时为低，即声波波长加大；当声源和听者相互靠近时，听到的声音频率比它们相对静止时为高，即声波波长减小。在光学里，也存在类似的多普勒效应，当光源和观者相互远离时，测量到的光谱线的波长比相对静止时为大，称为光谱线的红移；当光源和观者相互靠近时，测量到的谱线波长比相对静止时为小，称为光谱线的兰移。远方星系均呈现光谱线的红移现象，其最自然的解释就是星系都远离我们而运动，运动的速度称为退行速度。退行速度可以根据红移量，即波长的相对改变量，由多普勒效应计算出来。退行速度和距离成正比，称为哈勃定律，即

$$v = HD$$

v 为星系的退行速度， D 为星系与地球的距离， H 为一常量，称为哈勃常量。

根据宇宙学原理，在宇宙任何处观测，都应得到同样的远方星系的退行规律，这就是说，宇宙在膨胀。图 11-10 为宇宙膨胀的一维示意图。在一无限长的直线上，均匀地分布着质点。从 F 点看，它外侧的质点均在退行，越远处的质点退行速度越大。在 E、G 或任何其它质点观测，得到的结论都相同。如果空间是有限的。可用二维球面来考虑。设想在一气球上均匀地分布着蚂蚁，当气球匀速膨胀时，每个蚂蚁都看到远处的蚂蚁在退行，退行的速度和距离(球面上的弧长)成正比。

宇宙膨胀的大爆炸理论 如果宇宙一直在膨胀，则可想到，多少亿年以前，宇宙的物质密度比现在的密度大得多。1948 年，美国物理学家伽莫夫等人提出了宇宙起源的大爆炸理论。后来，这一理论和基本粒子物理

结合起来，而成为宇宙起源的标准模型。按照这个模型，宇宙在其起源之际发生大爆炸。如果宇宙本来就是无限的，则爆炸发生在空间的每一点。如果宇宙是有限的，则大爆炸时的宇宙范围比现在的宇宙小得多。

在大爆炸的瞬间($\sim 10^{-44}$ 秒)，谈不上时空概念，空间不分六合(上下左右前后)，时间不分先后；也分不出四种相互作用。这种原始宇宙与中国神话中盘古开天地之前的混沌相似。到可以讨论时空概念时，宇宙处在极大密度、极高压强和极高温(10^{32} K)之中，这近乎混沌初开之际。物质存在的形式为夸克、轻子和有关的规范粒子(如光子、胶子等)。从大爆炸伊始，到四种相互作用分别起作用，大约历时 10^{-10} 秒。

爆炸后约 10^{-6} 秒，夸克构成质子和中子等强子，此时温度约为 10^{13} K，质子和中子的总数约略相等。随着温度的降低和中子的衰变，中子数越来越少。当时间约为 10^2 秒，温度约为 10^9 K，中子数仅占质子数的大约 $1/6$ 时，中子和质子组成氘核，并开始形成氦核，另外还有质子、中子、光子等粒子存在。此时粒子数下降，光子能量已小于氦原子核分裂成核子所需的能量，氦原子核不再分裂。这时宇宙就像一个大火球，处处充满了温度高达 10^9 K 的光辐射。到大爆炸后 10000 年，宇宙温度已下降到 4000K，电子与原子核结合成原子。原子与光子分成两个独立部分之后，散布在空间的原子靠引力会聚在一起，在约十亿年的时间内逐步形成恒星和星系，随着宇宙膨胀的发展，也开始了星体的演化。

根据哈勃定律，可以约略地估计出宇宙的年龄大约为 $1\sim 2\times 10^{10}$ 年。一切天体的年龄均不应超过此值。比如，测定陨石和月岩的年龄都小于 47 亿年。由热核反应计算出最古老的恒星的年龄约为 $1\sim 1.5\times 10^{10}$ 年，与预期相符。

微波背景辐射 按照大爆炸理论，在宇宙形成后的火球阶段，宇宙充满了 10^9 K 的光辐射。随着宇宙膨胀，辐射温度不断下降，光辐射的波长不断增加。1948 年，阿尔芬和赫尔曼计算出，这种辐射今日仍充满宇宙，称为背景辐射。因为波长在微波阶段，所以又称微波背景辐射，温度已降到 5K 左右。1965 年，美国物理学家彭齐阿斯和威尔逊在测量宇宙的电波噪声时，发现了微波背景辐射，温度大约为 3K。这一发现是天文学和物理学史上的大事件。它是支持宇宙起源大爆炸理论的主要事实之一。

十一、恒星的演化

恒星的形成 宇宙大爆炸后的几十亿年间，空间弥漫着原子或分子，以氢为主要成分，密度很低，局部分布并不均匀，可能形成团块，类似云雾，常称为星云。在温度低、密度大的地方，在引力作用下不断收缩，使体积急剧减小，密度急剧增大，而形成恒星的原始型，称原恒星。原恒星在收缩时，引力能转变为内能，温度升高。如果继续收缩，温度增加到 $(0.7 \sim 1) \times 10^7 \text{K}$ 时，会引发核聚变，使氢聚变为氦，向外辐射更多的能量，一个恒星就诞生了，称这样的星为主序星。

原恒星能否发展成主序星，取决于其质量的大小。质量太小，不能触发核反应；质量过大，会因产生巨大的辐射压，而分裂瓦解。质量在 $(0.1 \sim 100)M_{\odot}$ 范围内，才能形成主序星， M_{\odot} 为太阳质量。太阳由原恒星到主序星需要几千万年。质量越小，形成主序星的时间越长；质量越大，需要的时间越短。

主序星的发展 主序星的光和热的来源是氢到氦的核聚变。核聚变产生光子等各种辐射，正像气体分子运动产生压力一样，辐射也产生压力。当辐射压力与引力达到平衡时，恒星的体积和温度不再有明显的变化，进入相对稳定时期。主序星属于恒星的青壮年时期，为恒星生命的主要阶段。太阳由原恒星发展成主序星已有 50 亿年，其体积只有大约 5% 的膨胀。

当主序星核心的氢完全转变为氦后，其外围壳层中的氢开始燃烧——聚变为氦，生成的氦落入核心。随着氦核质量的增加核心将进一步收缩，核心收缩，温度升高，亮度增加恒星的体积增大，其半径可增加百倍。但内部辐射出去的能量并没有增加，所以星体表面温度降低，发光偏红。称这个阶段的星为红巨星。在红巨星阶段，恒星要向空间迅速抛失质量，其质量损失可达每年百万分之一的太阳质量。再过 50 亿年，太阳将变为红巨星，那时，太阳的体积将膨胀到把水星甚至金星的轨道包括在内。估计太阳将在红巨星阶段生存 10 亿年。红巨星属于恒星的老年阶段，其演化进入恒星的晚年。

恒星晚年的突变 新星与超新星 正像一个人总要经历从生到死的过程一样，恒星从产生经发展，也会进入晚年，直到“死亡”。在它生存的阶段，恒星经历着剧烈的变化，向外辐射大量的能量。这样的过程总会终止。但是，在终止之前，还要出现激烈得多的变化，才能沉寂下来。

红巨星之后星体的演化随质量的不同有很大差异。小质量恒星经红巨星阶段后，随着星体的内核氢燃料耗尽，外层的氢和氦被引力吸入内部，将迅速聚变，释放出大量能量，辐射压突增，大量物质被抛离星体，形成行星状星云。如果这个突然事件更加剧烈，也可形成新星。新星诞生时，其亮度可在很短的时间内增加几千倍。对于大质量恒星这种爆炸则更加猛烈，从而形成超新星。超新星的亮度可增加上亿倍(达 17 个星等)，相当于整个银河系的发光。超新星的出现比新星少得多。经过这样剧烈的事件后，一颗恒星将按不同质量而进入白矮星或中子星的阶段。

白矮星、中子星和黑洞

1. 白矮星 如果恒星的质量较小，当核反应停止后，辐射压力减小，星体收缩，在收缩过程中，星体内部升温，使物质电离，成为等离子体。星体内部充满了电子，这种高密度的等离子体使电子产生一种量子效应，

称为电子简并压，这是由于泡利不相容原理所决定的。早在 1931 年，美国物理学家钱德拉塞卡计算得出，当演化后的恒星质量 $m < 1.44M_{\odot}$ 时，电子简并压可与引力相抗衡。此时星体很小，而密度很大，可达 $0.1 \sim 10$ 吨 / 厘米³，靠恒星余热发光。因为温度高，星呈白色，称为白矮星。典型的白矮星为天狼星的一颗著名伴星，即天狼 B。由于没有能源，白矮星在不断地辐射后，温度降低，最后变为黑矮星，而从视野中消失。这就是小质量恒星的最后归宿了。

2. 中子星 对于大质量恒星，当其塌缩的内核质量超过 $1.44M_{\odot}$ 但小于 $3.2M_{\odot}$ 时，电子的简并压也不能抗拒引力，恒星将继续塌缩，星体内部温度和密度继续增加，原子核被拆成质子和中子，质子吸收了电子，又转变为中子，并放出中微子。携带着大量能量的中微子将猛烈地推开外壳而冲出星核和恒星，这就是超新星爆发。超新星爆炸后，其中心留下一个由简并中子气和铁核组成的中子星。中子星是一颗密度极大的天体，中心密度可达 10^{15} 克 / 厘米³，其直径极小，半径为 7—20 千米。

中子星理论早在本世纪 30 年代就提了出来。直到 1967 年，天文学家在金牛星座的蟹状星云中，发现了周期性的脉冲星，后来确认它是一颗中子星。早年，天文学家发现金牛星座的蟹状星云在膨胀，据推测，此膨胀起源于九百年前，断定那时曾出现一颗超新星。这正是我国宋朝至和元年 (1054 年) 记录下来的“客星”。此客星遗留下来的中子星，就是 1967 年天文学家第一次发现的中子星。一般而言，中子星的寿命不过几亿年，而归宿于不发光的黑矮星。

3. 黑洞 如果中子星内核的质量超过 $3.2M_{\odot}$ ，则中子星的简并压也不能抗拒引力。引力造成进一步的塌缩，成为密度极大质量几乎集中为一点的天体。其表面引力大到使任何物质不能逃逸，只能吸收外来的物质。即便是光也不能从黑洞内的强大引力场中逃逸出来，这种天体就是黑洞。

十二、耗散系统与自组织现象

研究复杂性事物如何由无序过渡到有序，又如何由规则过渡到混沌，在近二三十年里建立了称为耗散论或协同论的物理理论，可统称为非线性物理。本章最后两节，介绍有关这方面的某些基本概念。

自组织现象

1. 无序和有序 考虑一绝热壁的容器，内充气体，中间用一绝热板分为两部分，两部分温度不同，密度也不同(图 11-11 甲)。抽去隔板后，两部分气体由于扩散和热传导，最终达到同一温度和同一密度，当然压强也处处相同，不再变化。(图 11-11 乙)。这样的状态称为平衡态，或称热力学的平衡态。显然，由平衡态不可能自动地恢复到刚抽取隔板时的有差别的状态。这是自然界的规律。

现在比较一下刚抽去隔板时的非平衡状态 和最终达到的平衡状态。由于分子的热运动和相互碰撞，在状态 ，分子的热运动使整个容器内的气体混合均匀，处处没有任何差别，宏观上看是均匀的和各向同性的。这样的状态无序程度最高。在状态 ，尚未混匀，容器两侧的温度和密度都不相同，存在着差别，宏观上看，是不均匀的，也不是各向同性的。这样的状态，相对状态 ，称为无序程度低，属于较为有序的状态。无序的状态对称性高，比如在状态 ，经过平移或转动，就气体内部来说看不出变化；而有序状态的对称性减少，比如在状态 ，沿竖向均匀，沿横向不均匀，从左侧平移到右侧，温度和密度都有变化。对于一个孤立系统，即对外界没有物质和能量交换的系统，总是由有序的状态过渡到无序的状态，而不可能自动地由无序的状态过渡到有序的状态。

2. 无序向有序的过渡——自组织概念 世界上形形色色的复杂系统，如细胞的生存、生物的进化，或处在有序的非平衡状态，或向更有序的方向演变，而不是趋向平衡状态。显然，这样的系统一定不是孤立系统，系统与外界有物质或能量交换；更重要的是，这样的系统内部必然遵从一定的规律，可以在一定的条件下，向有序和差别的方向发展。与外界有物质或能量交换的系统称为开放系统或耗散系统。耗散系统可以在一定的条件下遵照规律而演化，由无序变为有序，而不是靠外力的安排。这种现象称为自组织现象。生命现象是自组织现象，生命系统是极为复杂的耗散系统。科学家们正朝着解决生命自组织现象前进。下面就一个简单的物理系统，介绍自组织现象。

贝纳德对流图样 我们先分析一下处在平衡状态下的流体的特点，比如说研究一个容器内的水。假设容器很大，只着眼水的内部。因为处在平衡状态，水内各点的温度相同，密度相同，和上面叙述的平衡状态下的气体一样，是最无序的状态，没有办法找出各部分的差别来。空间是均匀的，各向同性的。这就是有高度对称的状态。

现在，在液体的上下表面维持一定的温差，下表面的温度 T_1 高于上表面的温度 T_2 。当温差较小时，出现热传导现象。热量从高温面向低温面传递，这是我们很熟悉的现象。若上下两面的温差保持不变，这个热传导状态也是稳定的。对称性虽然略有减少，但是和平衡状态的区别尚不显著。

加大温差，达到一临界值(又称阈值，此值与流体的性质、几何因素有关)以后，流体内出现机械运动——对流，这相当于有了内部结构，如图

11-12 所示，称为贝纳德图样，是 1900 年法国科学家贝纳德从实验上发现的。自然界中对流现象很多，如大气环流、海洋环流，工程技术中对流现象也广泛出现。在实验室条件下，贝纳德实验中小旋流的尺寸在 1 毫米到 1 厘米的范围内。为什么会出现热对流呢？因为，当上下两面的温度不同时，流体内孕育着不稳定结构。下层温度高，流体密度小；上层温度低，流体密度大。上下层中任一小块流体受到的浮力和重力不相等，靠热传导和内部摩擦维持着平衡。前者欲消除温差，后者反抗运动。但当温差达到临界值，平衡被破坏，热对流图样就出现了。只要维持临界温差或超过它，能量不断从下表面输入，从上表面输出，贝纳德图样就一直保持不变，而且具有稳定的特点。这是系统在此条件下自组织的结果：由无序过渡到有序，流体内部出现了结构——有序排列的对流图样。

随贝纳德图样的出现，液体不再是均匀和各向同性了。对称性减少，称为对称破缺。从无序到有序，出现对称破缺。

贝纳德图样中的小旋流总是左旋和右旋交替地出现，并无差错。至于当图样出现时，在某一确定处，是左旋还是右旋，则是随机的，由当时的各种因素决定。这样的因素并不是固定的，如热运动或其他微小扰动，称为涨落。这个现象又称为通过涨落而做随机性的选择。在这个例子里，有两种可能的选择，如图 11-13 所示。这种随机性，就像掷一个硬币，问它落地后那一面朝上一样，各有 $1/2$ 的可能性，称概率为 $1/2$ 。

当液面上下温差达到临界值时，在整个流体内部，按左右旋依次排列，同时出现贝纳德图样。似乎信息自一处起，立即传给各处做出协调，这是一种长程的作用，称为长程关联。这是从无序向有序过渡时系统自组织的结果，也是耗散系统的重要规律性。

自组织现象的共同规律 通过大量自组织现象的分析，可归纳出共同的规律性如下：

1. 一个耗散系统，只有当系统的某一参量达到临界值时，新的内部结构才突然出现。新结构常是在随机性选择下出现的，具有长程关联的特点。

2. 新结构的出现是从无序状态过渡到有序状态，新结构的时空对称性减少。

3. 在临界条件下，自组织系统只有不断地从外界摄入物质或能量，新结构才得以维持，系统内部的协同合作现象即自组织现象才可以存在。

4. 满足上述条件时，自组织系统的新结构具有稳定性。微小的扰动不能破坏这种结构。这可使我们联想到作为生命系统的特点。

十三、混沌

蝴蝶效应 我们很难想象，一个遵从经典力学规律的粒子，当条件稍有改变时，运动会变得杂乱无章。经典力学的辉煌成就，如解释行星的运动，发现海王星等，使人们确信，过去决定现在，现在决定将来，条件稍有改变，运动只能稍有改变。亦即，物理学的规律是决定论的。

条件稍有改变，运动状态可能急剧而大幅度地改变的现象，称为混沌现象。荷兰物理学家洛伦茨曾给出一个简单的碰球模型，可作为混沌现象的形象化的一例。如图 11-14 所示，大球任意分布，一小球与它们作弹性碰撞。显然，只要小球的初始条件有微小改变，如图中 1 和 2 的不同起始位置，几次碰撞的结果就大相径庭了。

1963 年，美国气象学家洛伦茨对大气环流现象作了理论研究，提出了一个简化的模型。计算结果表明，大气运动的结果，以极其敏感的方式决定于初始条件。他夸张地形容之为“蝴蝶效应”：在南美洲一只蝴蝶扇一扇翅膀，可能日后在北美洲引起一场龙卷风。

近二三十年来，科学家对混沌现象已了解了很多。下面介绍一种典型的混沌现象——湍流。

流体中湍流的混沌状态

流体的湍流运动是近一个世纪

未能

解决的科学上的老大难问题。由于后来对混沌的深入研究，这个问题才得以解决。

观察水流经过一个障碍物的运动，比如，河水流过一个桥墩。当流速很小时，流水平缓地绕着障碍物而运动，流线如图 11-15 甲所示，称之为层流。测量障碍物后某一点(如图中 A 点)的水流速度 v ，得出 v 不随时间而变化，这是层流的特点，如图 11-15 乙所示。当水流速度增大，旋涡开始出现并随水流去，障碍物后 A 点的水流速度出现了周期性的变化，如图 11-16 乙所示。

流速增大到一临界值(此临界值和障碍物的几何因素以及流水的性质有关)，则流体的运动完全紊乱起来，水流状态极其复杂而不稳定，瞬息万变。障碍物后 A 点的运动速度变化毫无规则，这就是湍流的特点(图 11-17)。湍流是完全的混沌状态。

混沌状态的特征 上面分析了流体运动导致混沌的条件与湍流的混沌状态。从微观到宏观，甚至宇观，混沌现象非常普遍。人们常说，条条道路通往混沌，这是因为系统所遵从的规律具有非线性的特点。什么是非线性关系呢？先看线性关系，比如一段金属导线，通过导线的电流强度 I 与导线两端的电压 U 成正比，这关系是线性的；而对电子二极管，电流和电压的 $3/2$ 次方成正比，即 $I \propto U^{3/2}$ ，这就是非线性关系了。以前人们对非线性规律的认识尚不深入；计算机发展之前，也难于求解非线性方程。所以对混沌的特点不甚了解。近年来发生了很大的变化，对非线性规律也有了深入的了解。即使在很简单的非线性方程中，只要参数改变，如流水的速度的改变，都可以导致混沌状态。

至于混沌状态的特点，可以作如下描写。当我们研究一个物理系统随时间而变化时，实际上就是用实验测量一个物理量随时间的变化，如障碍

物后 A 点的水流速度；或是根据物理定律，从理论上计算一个量随时间的变化。对于一个没有阻尼的单摆，随时间而周期地运动着；实际单摆总存在着阻尼，时间足够长，它将停止在平衡位置。这都是我们熟悉的物理现象。但是，一个物理系统进入混沌状态，其物理量可在一定范围内无规则地紊乱变化着，时间足够长，它几乎经历了这范围内的所有可能值。如湍流状态下，障碍物后 A 点水流的速度变化就是这种情况。这样，没有办法预言它会处在哪一确定的状态上。但也不是毫无规律可言，时间足够长，可以计算出它处在某一状态附近的概率，这正是混沌的特征。正像掷一个硬币或一个骰子，预言它落地后那一面朝上一样，它不遵从决定论的规律，而是遵从概率论的规律。只能给出可能性的大小，即概率，而不能得出精确的结果。

学生实验

一、电场中等势线的描绘

在这个实验里，我们要用描迹法画出电场中一个平面上的等势线。

如图实-1所示，在一块平整的木板上，依次铺放白纸、复写纸、导电纸各一张，导电纸有导电物质的一面要向上。用图钉把白纸、复写纸和导电纸一起固定在木板上。

将两个圆柱形电极平放在导电纸上，想办法使两个电极固定在木板上并保持与导电纸的良好接触。电极A与电源的正极相连作为正电荷，电极B与电源的负极相连作为负电荷。两个电极之间的距离约为10厘米，电压约为6伏。

从一个灵敏电流表的两个接线柱引出两个探针。把两个探针分别跟导电纸上的两点接触，如果电流表的指针发生偏转，表示这两点的电势不等；指针不发生偏转，表示这两点的电势相等。

在导电纸上画出两个电极的连线，在连线上选取间距大致相等的五个点作基准点，并用探针把它们的位置复印在白纸上。将左手拿着的探针与某一基准点接触，在两电极连线的某一侧距此基准点约1厘米处再选一个点，在此点将右手拿着的探针跟导电纸接触。这时电流表的指针一般会发生偏转。但左右移动探针的位置，可以找到一点，使电流表的指针不发生偏转，说明这个点跟基准点的电势相等。用探针把这个点的位置复印在白纸上。照上述方法，在这个基准点的两侧，各探测出五个等势点，每个等势点大约相距1厘米。用同样的方法，探测出另外四个基准点的等势点。最后，取出白纸，根据五个基准点的等势点画出五条平滑的曲线，它们就是五条等势线。你能不能根据这些等势线在白纸上画出两个异种电荷的电场线？画一画看。

思考

1. 同此实验的原理相仿，请你设计一个实验，来描绘平行板间的电场或同轴柱面间的电场的等势线。

2. 能否用这种模拟方法描绘两个等量同种电荷间的等势线？

直接描绘静电场中的等势线是相当困难的。由于静电场和恒定电流的电场（恒定电场）遵循的规律相似，这里是用在导电纸上形成的恒定电场模拟静电场做实验的。

二、测定金属的电阻率

由电阻定律可知，金属的电阻率

$$= R \frac{S}{l}$$

因此，测出金属导线的长度 l ，横截面积 S 和导线的电阻 R ，便可以求出制成导线的金属的电阻率。

导线的电阻 R 可用伏安法测量；长度 l 用米尺测量；横截面积 S 要由导线的直径 d 算出，导线的直径需要用较精密的测量长度的仪器——螺旋测微器来测量。

根据上面所说的方法，请你考虑一下这个实验应该怎样进行？你应当选用什么规格的仪器来进行实验？实验得到的数据应该如何处理？应该注意的是，在给导线通电时，电流不宜太大。想想看，这是为什么？

*三、把电流表改装为电压表

改装电流表，需要知道它的三个数据：满偏电流 I_g 、满偏电压 U_g 和内阻 r_g 。 I_g 可以从刻度盘上直接读出， r_g 可用实验方法测出， U_g 可由 $U_g = I_g r_g$ 算出。

现在用图实-2 所示的电路测定电流表的内阻 r_g 。图中的 R 用电位器， R' 用电阻箱。合上开关 S_1 ，调整 R 的阻值，使电流表指针偏转到满刻度（注意不要使通过电流表的电流超过它的满偏电流，以免把表烧坏）。再合上开关 S_2 ，调整 R' 的阻值，使电流表指针偏转到正好是满刻度的一半。当 R 比 R' 大很多时，可以认为 $r_g = R'$ 。

测出电流表的内阻 r_g 后，算出电流表的满偏电压 U_g 。然后算出把它改装为量程是 2 伏的电压表时，应该串联多大的电阻 R_1 。在电阻箱上取好阻值 R_1 ，把电流表跟电阻箱串联起来，就改装成一个量程是 2 伏的电压表。

现在把改装的电压表跟标准电压表进行核对。实验电路如图实-3 所示， V 是标准电压表，改变变阻器 R_2 的滑片位置，使 V 的示数分别为 0.5 伏特、1 伏特、1.5 伏特、2 伏特，并核对改装的电压表的示数是否正确。核对时要注意搞清楚改装后电流表刻度盘上的每一小格表示多大电压。最后算出改装的伏特表满刻度时的百分误差。例如改装的电压表在满刻度 2 伏时，标准电压表的读数为 2.1 伏，满刻度时的百分误差就是 $|2.1 - 2| / 2.1 = 4.8\%$ 。

思考

1. 此实验中，如果电阻 R 比 R' 大得很多，接入 R' 后，当 R' 被调至电流表的指针偏转到正好是满刻度的一半时，可以认为 $r_g = R'$ 。为什么需要 R 比 R' 大得多这个条件？

2. 当 R' 被接入电路后，如果改变电位器 R 的阻值，使电流表的指针偏转到正好是满刻度的一半，你认为此时是否仍有 $r_g = R'$ ？

四、用电流表和电压表测定 电池的电动势和内阻

这个实验是用电流表和电压表测出电流和电压，再用闭合电路的欧姆定律求出电池的电动势和内阻。实验的电路如图实-4所示。

我们知道，只要改变 R 的阻值，测出两组 I 、 U 的数据，代入方程组

$$= U_1 + I_1 r,$$

$$= U_2 + I_2 r,$$

就可以求出电动势 E 和内阻 r ，这样做虽然很简单，但误差可能很大。

为了减小误差，我们可以多测出几组 I 、 U 的数据，求出几组 E 、 r 值，最后分别算出它们的平均值。此外，还可以用作图法来处理数据，求出 E 、 r 的值。下面介绍一下如何用作图法来处理此实验的数据。

在坐标纸上以 I 为横坐标， U 为纵坐标，用测出的几组 U 、 I 值画出 U - I 图象，如图实-5所示。根据闭合电路的欧姆定律 $U = E - Ir$ ，可知 U 是 I 的一次函数，这个图象应该是一条直线。这条直线跟纵轴的交点表示 $I = 0$ ，属于断路的情况。这时的电压 U 等于电源电动势。这条直线与横轴的交点表示电压 $U = 0$ ，属于短路的情况，根据短路电流 $I_{\text{短}}$ 与内阻 r 、电动势的关系

$$r = \frac{E}{I_{\text{短}}},$$

可求出电源的内阻 r 。

思考

1. 图实-5中 U - I 图象斜率的物理含义是什么？

2. 作图时要适当地选取横坐标、纵坐标的比例和坐标的起点，使实验数据大致布满整个图纸，不要只集中在一边或一角。如果此实验纵坐标 U 的起点不是零而是 U_0 ，横坐标 I 仍以零为起点，请你分析一下图线与纵轴的交点、与横轴的交点及斜率的物理含义各是什么。

五、研究电磁感应现象

现在用图实-6 所示的实验来研究产生电磁感应的条件和怎样判断感应电流的方向。线圈 A 带有铁心，线圈 B 是空心的，它的内径略大于线圈 A 的外径。

在物理实验中常常用作图法寻找规律，求出测量的结果，这种方法具有直观、简便等优点。但是，必须是在测量数据准确和作图严格认真的前提下，才能从图象中找出正确的结论和准确的答案。

首先查明电流表指针的偏转方向和线圈 B 中电流方向的关系，然后把蓄电池(或其他低压直流电源)、开关和线圈 A 串联成一个电路，把电流表和线圈 B 串联成另一个电路。

接通电源，给线圈 A 通电。把线圈 A 插入线圈 B 中，停留一会儿再取出来，同时注意观察，当线圈 A 在插入和取出的过程中以及停止运动时，跟线圈 B 相连的电流表的指针有无偏转，从而确定线圈 B 中是否有感应电流，并记下感应电流的方向。

改变线圈 A 中的电流方向，重做上面的实验，观察线圈 B 中是否有感应电流，并记下感应电流的方向。

把线圈 A 放在线圈 B 中不动，观察在给线圈 A 通电和断电的瞬间，线圈 B 中是否有感应电流，感应电流的方向如何。改变线圈 A 的通电方向，再观察在通电和断电的瞬间，线圈 B 中是否有感应电流，感应电流的方向又如何。观察当线圈 A 中的电流保持不变时，线圈 B 中是否有感应电流。

分析你的实验结果，回答下列问题。

(1) 什么情况下线圈 B 中有感应电流？什么情况下线圈 B 中没有感应电流？产生电磁感应的条件是什么？

(2) 线圈 B 内部的磁场增强时，感应电流的磁场方向是什么方向？线圈 B 内部的磁场减弱时，感应电流的磁场方向是什么方向？可以根据什么规律来判断感应电流的方向？

*六、观察双缝干涉现象并测定光波的波长

实验装置如图实-7所示。光源发出的光经滤光片成为单色光。单色光通过单缝后，经双缝产生干涉。干涉条纹可从屏上观察到。

双缝间的距离 d 是已知的，双缝到屏的距离 l 和相邻两条干涉条纹间的距离 x 能够测出，波长可用下式求出：

$$\lambda = \frac{d\Delta x}{l}$$

现在来做实验。把直径约 10 厘米、长约 1 米的遮光筒水平放在光具座上，筒的一端装有双缝，另一端装有毛玻璃屏。取下双缝，打开光源，调节光源的高度，使它发出的一束光能够沿着遮光筒的轴线把屏照亮。然后放好单缝和双缝，单缝和双缝间的距离为 5~10 厘米，使缝互相平行，中心大致位于遮光筒的轴线上。这时在屏上就会看到双缝的干涉条纹。你看到的干涉条纹是不是彩色的？

放上滤光片，注意观察暗条纹间的距离是否相等。测出 n 条干涉条纹间的距离 a ，求出相邻两条干涉条纹间的距离 $x = a / (n - 1)$ 。用米尺测出双缝到屏的距离 l 。根据已知的双缝间的距离 d 和实验所得的数据，代入公式求出单色光的波长。

换用另外颜色的滤光片，观察干涉条纹间的距离有什么变化，并求出波长。

七、用卡尺观察光的衍射现象

把线状白炽灯跟电源接通。调节游标卡尺的两脚间的距离，形成一个 0.5 毫米宽的狭缝。让狭缝竖直地紧靠眼睛，通过狭缝观看竖直放置的线光源的灯丝，这时在狭缝的两侧可以看到彩色条纹。

把狭缝的宽度由 0.5 毫米增加到 0.8 毫米，对观察条纹有什么影响？把狭缝宽度缩小到 0.2 毫米，看到的条纹有什么变化？

如果没有线光源，用普通的白炽灯或日光灯，通过狭缝也能看到光的衍射现象，不过狭缝离光源的距离要远一些。用日光灯做实验，狭缝的方向要与灯管的方向平行。

思考

如果没有游标卡尺，你能想出什么方法自制一工具，使其产生一个很窄的单缝来做此实验？

附录一 常用电磁学量的国际单位制单位

电磁学的单位制，是一个比较复杂的问题。长期以来存在着多种单位制，而且在不同的单位制里，电磁学量和电磁学的公式也不同。在这本书里我们只介绍国际单位制单位。

在国际单位制中，所有的电磁学量，都是由长度、质量、时间和电流这四个基本量导出的。因此，米、千克、秒、安培就成为电磁学里的基本单位。其中电流单位安培的定义，是通过两根平行的直线电流间的磁相互作用力给出的：在真空中，截面积可忽略的两根相距 1 米的无限长平行圆直导线内，通以等量的恒定电流时，如果这两根导线间相互作用力在每米长度上为 2×10^{-7} 牛，则每根导线中的电流就是 1 安培。

下表列出了本书中常用的电磁学量的国际单位制单位。

物理量		单 位			备 注
名称	符号	名称	中文符号	国际符号	
电流	I	安培	安	A	
电量	Q	库仑	库	C	
电场强度	E	牛每库	牛/库	N/C	
电势差 电压	U (V)	伏特	伏	V	1 伏 = 1 瓦 / 安
电容	C	法拉	法	F	1 法 = 1 库 · 伏
电阻	R	欧姆米	欧 · 米	· m	1 欧 = 1 伏 / 安
电阻率		欧姆米	欧 · 米	· m	
磁感应 强度	B	特斯拉	特	T	1 特 = 1 韦 / 米 ²
磁通量		韦伯	韦	Wb	1 韦 = 1 伏 · 秒
电感	L	亨利	亨	H	1 亨 = 1 韦 / 安

附录二 常用的物理常量

静电力常量	$K = 9.0 \times 10^9 \text{ 牛} \cdot \text{米}^2 / \text{库}^2$
元电荷	$e = 1.60 \times 10^{-19} \text{ 库}$
电子的质量	$m_e = 0.91 \times 10^{-30} \text{ 千克}$
质子的质量	$m_p = 1.67 \times 10^{-27} \text{ 千克}$
中子的质量	$m_n = 1.67 \times 10^{-27} \text{ 千克}$
α粒子的质量	$m_\alpha = 6.64 \times 10^{-27} \text{ 千克}$
原子质量单位	$1u = 1.66 \times 10^{-27} \text{ 千克}$
真空中光速	$C = 3.00 \times 10^8 \text{ 米} / \text{秒}$
电子的荷质比	$e / m = 1.76 \times 10^{11} \text{ 库} / \text{千克}$
氢原子的半径	$r_0 = 0.53 \times 10^{-10} \text{ 米}$
普朗克常量	$h = 6.63 \times 10^{-34} \text{ 焦} \cdot \text{秒}$

