

学校的理想装备

电子图书·学校专集

校园网上的最佳资源

高级中学课本 物理 (二年级用) 试用本



12 . 电功 电功率

近 100 多年来 ,各种用电器大量地出现在人们的生产和生活领域里(图 12-1)。电灯可以用来照明 ;电风扇、空调器可以改善人们的生活环境 ;收音机、电视机可以丰富人们的文化生活 ;各种类型的电动机可以用作机床、起重机、升降机和电力机车等的发动机。

图 12-1

图 12-2

在这一章里 ,我们将通过研究电功和电功率来进一步学习电路知识。

12.1 电能转化的量度——电功

在电路里接上各种用电器，可以把电能转化成各种其他形式的能。电灯、电热毯、电饭堡和工业上用来冶炼钢铁的电弧炉，可以把电能转化成内能；洗衣机、电车可以把电能转化成机械能；电解池、电镀装置可以把电能转化成化学能。

我们已经知道，从一种形式的能转化成另一种形式的能需要通过做功的过程。电能转化成其他形式的能的过程实际上就是电流做功的过程。例如，在图 12-2 所示的电路中，将灯泡接在 B、C 间，闭合电键，电路中有电流做功，电灯就会发出热和光；在 B、C 间接入电动机，当电流做功时，电动机就会旋转；同样，在 B、C 间接入电解池，当电流做功时，电解池中就产生化学反应，析出物质。

我们把电流所做的功叫做电功，常用符号 W 表示。在国际单位制中，电功的单位名称是焦〔耳〕，单位符号是 J，它用来量度有多少电能转化成其他形式的能。例如，电流通过电炉做了 500J 的功，就有 500J 的电能转化为 500J 的内能。电流做功所消耗的电能是由电路中的电源供给的。

12.2 电功率

电流所做的功跟完成这些功所用时间的比叫做电功率，用符号 P 表示，即

$$P = \frac{W}{t}。$$

在国际单位制中，电功率的单位名称是瓦〔特〕，单位符号是 W 。用电器上通常都标有电功率值和电压值，叫做用电器的额定功率和额定电压。如果用电器两端的电压等于它的额定电压，这时用电器就正常工作，它的电功率就等于它的额定功率。如果用电器两端的电压不等于它的额定电压，那么它的电功率也就不等于额定功率。例如，一个家用白炽灯泡上标有“220V40W”字样，表示在灯泡两端加上220V电压时，它的电功率是40W；若电压超过220V，电功率将超过40W，灯丝就有被熔断的危险。

现在让我们通过实验来研究电功率与哪些因素有关。

实验 12.1

〔目的〕

1. 研究用电器的电功率与哪些因素有关。
2. 研究用电器电功率的量度公式。

〔器材〕电源 2 个，变阻器 2 个，电流表和电压表各

2 个，不同规格的白炽灯 4 只（ EL_1 ：“6V1.5W”、 EL_2 ：“6V3W”、 EL_3 ：“12V6W”、 EL_4 ：“12V3W”），电键 2 个，导线。

〔步骤〕

1. 按照图 12-3 所示的电路图，连接两个电路，分别接入白炽灯 EL_1 、 EL_2 。

图 12-3

2. 调节变阻器的电阻，使两个电压表的读数都等于 6V，分别读出通过灯 EL_1 、 EL_2 的电流，并比较它们电功率的大小。（白炽灯的电功率越大，灯就越亮）

3. 用白炽灯 EL_3 更换电路上的灯 EL_1 ，调节变阻器的电阻，使两个电流表的读数都等于 0.5A，分别读出灯 EL_2 、 EL_3 两端的电压，并比较它们的电功率的大小。

4. 用白炽灯 EL_4 更换电路上的灯 EL_3 ，调节变阻器的电阻，使灯 EL_2 两端的电压为 6V，灯 EL_4 两端的电压为 12V，分别读出通过灯 EL_3 、 EL_4 的电流，并比较它们的电功率的大小。

〔结果〕

1. 白炽灯两端电压一定时，通过灯的电流越____，电功率越____。

2. 通过白炽灯的电流一定时，灯两端的电压越____，电功率越____。

3. 白炽灯的电压与电流的乘积 IU 相等时，电功率____。

进一步实验得出，用电器的电功率跟它两端的电压和通过用电器的电流成正比。用电器的电功率量度公式可以表示为

$$P = IU。$$

再根据功与功率的关系，可以得出电功的公式

$$W = Pt = IUt。$$

式中若电流 I 的单位是安(a)，电压 U 的单位是伏(V)，做功的时间 t 的单位是秒(s)，则电功 W 的单位就是焦(J)。电流通过用电器所做的功，跟用电器的电流、用电器两端的电压和通电的时间成正比。例如，电炉的电功率 P 一定，使用电炉时间越长，电流所做的功也就越多。

通常我们用改变用电器两端的电压或通过的电流来改变用电器的功率。如家用可调光的台灯(图 12-4)拨到最亮一档时灯泡的实际功率等于额定功率，拨到前几档时灯泡的实际功率都小于额定功率。

图 12-4

一般说来，灯泡的额定功率越大，在额定电压下发光也越强，单位时间内发出的热和光也越多。然而白炽灯消耗的电能大部分都转化成内能，而转化成光的能量并不多。后来人们改进了灯丝，从最早的碳丝灯泡改为钨丝灯泡。近几十年来，人们应用了气体放电原理来改革灯泡，设计出气体放电灯的新光源。新型电光源品种多、发光强、光色和谐，现已大量地应用在工业、农业、交通运输业和医疗、科研等领域中。图 12-5 所示的是一种发光强度高的高压汞灯。

图 12-5

下表列出了一些用电器的电功率。

一些用电器的电功率

用电器	电功率(W)
六管晶体管收音机	0.06 ~ 0.4
家用日光灯	3 ~ 40
家用白炽灯	15 ~ 100
电烙铁	20 ~ 100
53 ~ 74cm 彩色电视机	60 ~ 100
照明用碘钨灯	500 ~ 2000
无轨电车	6×10^4
韶山 I 型电力机车	4.2×10^6

[例题 12 . 1] 无轨电车的电动机的额定功率为 60kW，如果它的额定电压为 600V，那么它在正常工作时，通过电动机的电流多大？

解 由于 $P = 60\text{kW}$ 、 $U = 600\text{V}$ ，根据电功率的公式 $P = IU$ ，它在正常工作时通过的电流

$$I = \frac{P}{U} = \frac{60000}{600} \text{A} = 100\text{A}。$$

我们一般不用焦 [耳] 作为电功的单位。由于焦这个单位太小，因此在日常生活中经常使用的电功单位是千瓦·时 ($\text{kW} \cdot \text{h}$)。1 $\text{kW} \cdot \text{h}$ 等于电功率为 1kW 的用电器连续工作 1h 所消耗的电能。用电器所消耗电能的多少可由连接在电路中的电能表 (图 12-6) 来测定。电能表的计数器上先后两次读数的差就是这段时间内用电器所消耗的电能。

图 12-6

[例题 12 . 2] 一只标有“220V5A”的电能表，它的额定电压是 220V，允许通过的最大电流是 5A，它可以用在最大功率是多少瓦的家庭电路上？

解 由于电能表允许通过的最大电流 $I = 5\text{A}$ ，额定电压 $U = 220\text{V}$ ，根据电功率的公式，算出线路上允许使用用电器的最大电功率为

$$P = IU = 5 \times 220\text{W} = 1100\text{W} = 1.1\text{kW}。$$

[例题 12 . 3] 一个接在 220V 电压的电路中的电炉，正常工作时通过的电流是 3A，电炉的额定功率是多少？通电 4h 消耗多少电能？

解 由于 $U = 220\text{V}$ ， $I = 3\text{A}$ ，根据电功率公式可以得出电炉丝的额定功率

$$P = IU = 3 \times 220\text{W} = 660\text{W}。$$

又因通电时间 $t = 4\text{h}$ ，根据电功公式可以得出

$$W = Pt = 0.66 \times 4\text{kW} \cdot \text{h} = 2.64\text{kW} \cdot \text{h}。$$

12.3 焦耳定律

我们已经知道，电能转化成其他形式的能是由电流通过用电器做功完成的，电烙铁、电熨斗等电热器是把电能转化为内能的装置。

现在让我们通过实验来研究电路上放出热量的多少跟哪些因素有关。

实验 12.2

〔目的〕研究电路上放出热量的多少跟哪些因素有关。

〔器材〕电热丝（附有三个接线柱的框架），量热器，煤油，电池组，电流表，温度计，变阻器，电键，导线。

〔步骤〕

图 12-7

1. 按图 12-7(a)连接电路（将接线柱 1、2 连入电路，这时连入电路的只有半根电热丝），读出温度计的示数。闭合电键，读出电流表的读数，在通电 1min 和 2min 时各读一次温度计的示数，算出温度变化 t 的大小。

根据热量公式 $Q = cm \Delta t$ 可知，由于煤油的比热 c ，煤油质量 m 一定，所以热量 Q 与温度差 Δt 成正比，即 $\frac{Q_x}{Q_y} = \frac{t_x}{t_y}$ 。设 1min 内电热丝放出的热量为 Q_1 ，2min 内电热丝放出的热量为 Q_2 。

2. 调节变阻器的电阻，使电路上电流 I 增大为原来的 2 倍，通电 1min，观察温度变化 Δt 的大小。

设电流为 $2I$ 时，在 1min 内电热丝放出的热量为 Q_3 。

3. 把电热丝的接线柱 1、3 接入电路，使电热丝的电阻为原来的 2 倍，调节变阻器的电阻使电流仍为 I 。通电 1min，观察温度变化 Δt 的大小。

设电流为 I 、电阻为 $2R$ 时，在 1min 内电热丝放出的热量为 Q_4 。

〔记录〕

实验次序	电阻	电	流通电时间 $t(s)$	温度差 $t()$	放出的热量 $Q(J)$	放出热量 之比
1	R	I	60	$t_1 =$	$Q_1 =$	
2	R	I	120	$t_2 =$	$Q_2 =$	$\frac{Q_2}{Q_1} =$
3	R	$2I$	60	$t_3 =$	$Q_3 =$	$\frac{Q_3}{Q_1} =$
4	$2R$	I	60	$t_4 =$	$Q_4 =$	$\frac{Q_4}{Q_1} =$

〔结果〕

实验表明，在电流做功的过程中：

当电流和电阻一定时，电路上放出的热量与通电时间_____；

当电阻和通电时间一定时，电路上放出的热量与电流_____；

当电流和通电时间一定时，电路上放出的热量与电阻_____。

英国物理学家焦耳（1818~1889）经过多次实验，研究了这个问题后指出：电流通过导体产生的热量，与电流的平方、导体的电阻和通电的时间成正比。这就是焦耳定律。用公式可以表示为

$$Q = I^2Rt。$$

上述公式又可称为电热公式。它与前面提出的电功公式 $W = IUt$ 存在什么关系呢？

在纯电阻电路中（电路中只含有电阻），电流做功所消耗的电能全部转化为内能，这时电功等于电热，即

$$W = Q = IUt = I^2Rt。$$

在非纯电阻电路中（电路中还包含有电动机、电解池等），则电流做功所消耗的电能除有一部分转化为内能外，还要转化为机械能、化学能等。这时电功就大于电热，即

$$W > Q, IUt > I^2Rt。$$

* [例题 12.4] 一台电动机的额定电压为 220V，电阻为 0.5Ω ，电动机在正常工作时通过的电流为 32A，电动机在运转 20min 的过程中，问：(1)消耗了多少电能？(2)有多少电能转化为内能？(3)有多少电能转化为机械能？

解 由于 $I = 32A$ ， $U = 220V$ ， $R = 0.5 \Omega$ ， $t = 20min = 1200s$ 。根据电功公式 $W = IUt$ ，可以算出电动机所消耗的电能

$$\begin{aligned} W &= IUt \\ &= 32 \times 220 \times 1200J \\ &= 8.4 \times 10^6J。 \end{aligned}$$

根据电热公式 $Q = I^2Rt$ ，可以算出电动机所放出的热量

$$\begin{aligned} Q &= I^2Rt \\ &= (32)^2 \times 0.5 \times 1200J \\ &= 6.1 \times 10^5J, \end{aligned}$$

这部分就是转化为内能的电能，因此可以算出转化为机械能的电能

$$\begin{aligned} E &= W - Q \\ &= (8.4 \times 10^6 - 6.1 \times 10^5)J \\ &= 7.8 \times 10^6J。 \end{aligned}$$

家用电器中的电热器如电饭堡、电热毯、电熨斗、电炉等组成的电路都属于纯电阻电路，在本章和下一章里，我们只研究纯电阻电路。

12.4 电阻定律

我们已经知道，在纯电阻电路中，电流做功的过程是电能转化为内能的过程，即

$$W = Q, IUt = I^2Rt,$$

由上式可以得出

$$U = IR,$$

$$\text{即 } I = \frac{U}{R}.$$

这就是部分电路欧姆定律的公式。

对于同一个用电器，改变加在它两端的电压，通过的电流将随着改变，但它的电阻却是一个不变的值。

导体的电阻究竟跟哪些因素有关呢？下面通过实验来研究这个问题。

实验 12.3

〔目的〕研究导体的电阻与哪些因素有关。

〔器材〕电池，变阻器，电流表，电压表，电键，镍铬线 a（长度为 L，截面积为 S），镍铬线 b（长度为 L/2，截面积为 S），镍铬线 c（长度为 L/2，截面积为 2S），铝线 d（长度为 L，截面积为 S），导线。

〔步骤〕

按图 12-8 所示的电路图连接电路，在 B、C 两点间分别接入 a、b、c、d 等镍铬线和铝线，每次都通过变阻器调节加在导线两端的电压，使电压表读数相等，记下相应的电流表读数，算出镍铬线和铝线的电阻。分析导体的电阻与长度、截面积及材料的关系。

图 12-8

〔记录〕

实验次序	金属线	长度	截面积	材料	电压 U(V)	电流 I(A)	电阻 R()
1	a	L	S	镍铬			
2	b	L/2	S	镍铬			
3	c	L/2	2S	镍铬			
4	d	L	S	铝			

〔结果〕

1. 截面积相同的两根镍铬线，电阻与长度成____比。
2. 长度相同的两根镍铬线，电阻与截面积成____比。

3. 截面积和长度相同的镍铬线和铝线，电阻的大小____（相等、不相等）。

进一步的精确实验表明：在温度不变时，导体的电阻与导体的长度成正比，与导体的截面积成反比。这就是电阻定律，用公式可以表示为

$$R = \rho \frac{L}{S},$$

式中的比例系数 ρ ，决定于导体材料的导电性能，叫做材料的电阻率。若式中 R、L、S 的单位依次为欧(Ω)、米(m)、米²(m²)，则电阻率的单位是欧·米(Ω·m)。下表是一些常用材料在温度 20℃ 时的 ρ 值：

导体	电阻率 (Ω·m)	半导体	电阻率 (Ω·m)	绝缘体	电阻率 (Ω·m)
银	1.6×10^{-8}	锗	60	赛璐珞	2×10^6
铜	1.75×10^{-8}	硅	6.36×10^2	象牙	2×10^8
铝	2.8×10^{-8}			烧瓷	3×10^{12}
铁	1.0×10^{-8}			火漆	8×10^{15}
汞	9.58×10^{-7}			硬橡胶	1×10^{16}
锰铜	4.4×10^{-7}				
镍铬合金	1.1×10^{-7}				

电阻率很小的导体有良好的导电性能，绝缘体的电阻率很大，它的导电性能很差。半导体的电阻率介于导体和绝缘体之间，它们的导电性能很独特。有些半导体当温度升高时，电阻率明显减小；有些半导体掺入其他元素的物质会引起导电性能的明显变化；有些半导体在光照时，电阻率会发生改变。各种晶体管就是利用半导体的这些特性制造出来的(图 12-9)。

图 12-9

温度对物质的电阻率也有很大影响，白炽灯钨丝在正常发光时(约 2500℃)的电阻值约为不发光时的十多倍。

1911 年，荷兰物理学家昂尼斯用液态氦把汞冷却到零下 268℃ 时，发现汞的电阻变为零；不久又发现铝和锡在不同的极低温度下电阻也都忽然消失。人们把这种现象叫做超导现象。具有这种特性的材料叫做超导材料，从非超导材料开始转变为超导材料的温度叫做临界温度。近年来，各国科学家们大都在寻找临界温度较高的超导材料并试制超导物品。中国科学院上海冶金研究所已制成一种可用于粒子加速器上的超导电缆。这种材料还可以用在超导电机和磁悬浮列车(图 12-10)上。由超导材料制成的电机具有不会发热的优点。超导材料通电后对磁场会有很大的“抗拒”作用，磁悬浮列车就是利用这个原理制成的。

图 12-10

[例题 12.5] 把一根导线拉长为原来的 2 倍 (图 12-11), 此导线的电阻变为原来的多少倍?

图 12-11

解 设导线的原长为 L , 截面积是 S , 则导线原来的电阻

$$R = \rho \frac{L}{S}。$$

拉长后导线的长度增大为 $2L$, 截面积则改变为 $S/2$ 。因此被拉长后导线的电阻

$$R' = \rho \frac{2L}{\frac{S}{2}} = 4\rho \frac{L}{S} = 4R。$$

即电阻变为原来的 4 倍。

[例题 12.6] 用两根长短、粗细都一样的导体来做实验, 其中一根是铁丝, 另一根的材料为未知。现把它们分别接在 220V 电压的电路, 发现铁丝的电功率是另一根导线电功率的 11 倍, 问另一根导线是什么材料制成的?

解 运用欧姆定律公式和电功率的公式可以得到

$$P = IU = \frac{U^2}{R}。$$

这表明在电压一定的情况下, 导体的电功率是跟它的电阻成反比的, 于是可以列出

$$\frac{P_{\text{铁}}}{P_x} = \frac{R_x}{R_{\text{铁}}} = \frac{\rho_x \frac{L}{S}}{\rho_{\text{铁}} \frac{L}{S}} = \frac{\rho_x}{\rho_{\text{铁}}}$$

由于 $\frac{P_{\text{铁}}}{P_x} = 11$

所以 $\frac{\rho_x}{\rho_{\text{铁}}} = 11,$

$$\rho_x = 11 \rho_{\text{铁}} = 1.1 \times 10^{-6} \cdot \Omega \cdot \text{m}。$$

未知材料的电阻率为铁的电阻率的 11 倍, 经查表可知另一根导线是镍铬合金。

实验 12.4

[目的] 作出标准电阻的 $U-I$ 特性曲线。

〔器材〕 电池组，变阻器，电流表，电压表，电键，标准电阻，导线。

〔步骤〕

图 12-12

1. 按图 12-12 连接电路，闭合电键，改变滑动变阻器 R 滑片的位置，各读出一组电流表、电压表的数据，记录在下面表格中。

实验次序	电流表读数(A)	电压表读数(V)
1		
1		
3		
4		
5		

2. 在坐标纸上把记录的 5 组数据画在 U-I 图上，从原点开始把这些点连接起来，画成一条图线。

3. 研究作出的图线有什么特点。

〔结果〕 对一个阻值不变的标准电阻，它的 U-I 特性曲线是_____。

【讨论】

如果电阻不是标准电阻，它的 U-I 特性曲线是不是都是跟阻值不变的标准电阻的 U-I 特性曲线一样？有条件的可以测定一下小灯泡电阻的 U-I 特性曲线，看有什么不同。

12.5 用电器的串联

如图 12-13(a)所示,把电阻分别是 R_1 、 R_2 、 R_3 的用电器一个接一个地顺次连接起来,就组成了串联电路。闭合电键后,用电流表分别测量电路中各处的电流,可以发现串联电路中电流处处相等。

图 12-13

为了便于计算,我们设想用一个等效电阻 $R_{\text{总}}$ 来替代串联着的三个用电器的电阻 R_1 、 R_2 、 R_3 ,即假设电阻 $R_{\text{总}}$ 跟三个串联电阻的效果完全相同[图 12-13(b)],这种方法叫做等效替代法。

作为等效替代,在同一电路中三个串联电阻的电功率之和必定跟替代它们的 $R_{\text{总}}$ 的电功率完全相等,由此可列出下式

$$P_{\text{总}} = P_1 + P_2 + P_3。$$

根据电功率的公式 $P = IU = I^2R$,可以得出

$$I^2R_{\text{总}} = I_1^2R_1 + I_2^2R_2 + I_3^2R_3。$$

由于在串联电路中电流处处相等,即 $I = I_1 = I_2 = I_3$,因此等号两边消去电流平方,可以得出串联电路的等效电阻,即总电阻 $R_{\text{总}}$ 跟各个用电器电阻之间的关系式

$$R_{\text{总}} = R_1 + R_2 + R_3。$$

上式表明:串联电路的总电阻等于电路上各个用电器电阻之和。

串联电路中总电阻 $R_{\text{总}}$ 两端的电压是 $U_{\text{总}}$,而用电器 R_1 、 R_2 、 R_3 两端的电压分别是 U_1 、 U_2 、 U_3 ,根据等效替代的关系 $P_{\text{总}} = P_1 + P_2 + P_3$ 和电功率的公式 $P = IU$ 可得

$$IU_{\text{总}} = I_1U_1 + I_2U_2 + I_3U_3。$$

由于在串联电路中电流处处相等,即 $I = I_1 = I_2 = I_3$,因此消去等号两边的电流,可以得出

$$U_{\text{总}} = U_1 + U_2 + U_3。$$

上式表明:串联电路的总电压等于电路上各个用电器两端的电压之和。

[例题 12.7] 一个额定电压为 3.8V 的小灯泡,正常工作时通过的电流为 0.3A,问应该怎样把它连接到电压为 4.5V 的电路上去才能使它正常发光?

[分析] 由于 4.5V 比小灯泡的额定电压高,直接把小灯泡接入电路,会使灯泡因发热过多而烧毁。因此可以用一个电阻跟小灯泡串联后接入电路,让电阻分掉一部分电压,从而使小灯泡正常发光。

解用一个电阻 R_x 与小灯泡串联后接入电压为 4.5V 的电路(图 12-14),根据串联电路的特点和小灯泡正常发光的要求,这个电阻 R_x 两端的电压应

为

$$U_x = 4.5V - 3.8V = 0.7V ,$$

通过的电流

$$I_x = 0.3A ,$$

则电阻

$$R_x = \frac{U_x}{I_x} = \frac{0.7}{0.3} \quad 2.3 \quad \text{。}$$

图 12-15

实际的做法是用一个变阻器与小灯泡串联后接到电路中去（图 12-15）。先把变阻器的全部电阻接入电路，然后调节变阻器逐渐减小电阻，以改变分配在小灯泡上的电压，直到与小灯泡两端相连的电压表的示数等于它的额定电压 3.8V 时为止。这时小灯泡就正常发光。

在上面的例题中，串联的电阻分担了电路上的一部分电压。串联电阻的这种作用叫做分压作用，串联的电阻叫做分压电阻。

实验 11.5

〔目的〕研究串联电路中电功率分配的规律。

〔器材〕三个电阻不同的电灯泡 EL_1 、 EL_2 、 EL_3 （额定电压相同，额定功率不同），灯座，电源，导线。

〔分析〕根据公式 $P = \frac{U^2}{R}$ 可知，在额定电压相同时，额定功率越大，电阻越小。

〔步骤〕将电灯泡 EL_1 、 EL_2 、 EL_3 串连后，连接到电路中去。比较哪一盏灯最亮，哪一盏灯最暗。

〔结果〕电阻最_____的电灯最亮；电阻最_____的电灯最暗。

上述实验中，电灯 EL_1 、 EL_2 、 EL_3 的电阻依次为 R_1 、 R_2 、 R_3 。根据电功率的公式 $P = IU = I^2R$ 可以列出

$$P_1 = I_1^2 R_1, P_2 = I_2^2 R_2, P_3 = I_3^2 R_3。$$

由于通过串联电路中的电流处处相等，即 $I_1 = I_2 = I_3 = I$ ，因此可以列出

$$\frac{P_1}{R_1} = \frac{P_2}{R_2} = \frac{P_3}{R_3} = I^2。$$

上式表明：串联电路中各个电阻所消耗的电功率是跟它的电阻成正比的。因此，电阻越大的灯泡，在串联电路中所消耗的电功率也越大，电灯就越亮。

【讨论】

串联电路有哪些特点？

12.6 用电器的并联

如图 12-16 所示，把三个电阻分别是 R_1 、 R_2 、 R_3 的用电器的一端连接在一起，把另一端也连接在一起，这样就组成了并联电路。

图 12-16

在并联电路中，用电压表测量各个支路上用电器两端的电压，可以发现读数是相同的，这表明并联电路中各支路两端的电压相等。

为了便于计算，我们可以设想用 $R_{\text{总}}$ 来等效替代三个并联用电器的电阻 R_1 、 R_2 、 R_3 ，在同一电路中并联着的三个电阻的电功率的和必定跟替代它们的 $R_{\text{总}}$ 的电功率完全相等，于是可以列出

$$P_{\text{总}} = P_1 + P_2 + P_3。$$

根据电功率的公式

$$P = IU = \frac{U^2}{R}，$$

可以得出
$$\frac{U^2}{R_{\text{总}}} = \frac{U_1^2}{R_1} + \frac{U_2^2}{R_2} + \frac{U_3^2}{R_3}。$$

由于并联电路各支路两端的电压相等，即 $U = U_1 = U_2 = U_3$ ，因此消去等式两边的电压平方，可以得出并联电路的等效电阻，即总电阻 $R_{\text{总}}$ 跟各个支路上用电器电阻 R_1 、 R_2 、 R_3 之间的关系式

$$\frac{1}{R_{\text{总}}} = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} + \frac{1}{R_3}。$$

上式表明：并联电路总电阻的倒数，等于各个支路上用电器电阻的倒数之和。

并联电路中通过总电阻的电流是 I ，通过支路上用电器 R_1 、 R_2 、 R_3 的电流分别是 I_1 、 I_2 、 I_3 。根据等效替代的关系 $P_{\text{总}} = P_1 + P_2 + P_3$ 和电功率的公式 $P = IU$ 可得

$$IU = I_1U_1 + I_2U_2 + I_3U_3，$$

由于并联电路各支路两端的电压相等，因此消去等号两边的电压，可以得出

$$I = I_1 + I_2 + I_3。$$

上式表明：并联电路的总电流，等于通过各支路用电器的电流之和。

【例题 12.8】用电器的电阻为 1000 Ω ，允许通过的最大电流为 100 μA ，如果要接到电流为 0.1A 的电路中去，必须采取什么措施？

【分析】如果通过用电器的电流超过它允许通过的最大电流，用电器会因发热过多而烧毁，因此必须在用电器上并联一个电阻，如图 12-17 所示，让一部分电流通过支路电阻。

图 12-17

解设用电器的电阻为 R_m ，并联的电阻为 R_x ，允许通过用电器的最大电流为 $I_m = 0.0001A$ ，则通过支路电阻的电流

$$I_x = 0.1A - 0.0001A = 0.0999A。$$

根据并联电路的特点，可以列出

$$I_m R_m = I_x R_x = U，$$

因此，可以算出支路电阻

$$R_x = \frac{I_m}{I_x} R_m = \frac{0.0001}{0.0999} \times 1000 \quad 1。$$

上面例题中，并联的电阻分担了电路中一部分电流，这种作用叫做分流作用，并联的电阻叫做分流电阻。

【讨论】

将几个电阻不同的电灯泡并联起来，连接到电路里去，哪一个最亮？哪一个最暗？

实验 12.6

〔目的〕研究并联电路中电功率分配的规律。

〔器材〕三个电阻不同的灯泡 EL_1 、 EL_2 、 EL_3 （额定电压相同，额定功率不同），灯座，电源，导线。

〔步骤〕将灯泡 EL_1 、 EL_2 、 EL_3 并联后连接到电路中去，比较哪一盏灯最亮，哪一盏灯最暗。

〔结果〕

1. 根据公式 $P = \frac{U^2}{R}$ 可知，在额定电压 U 相同时，额定功率越大，电阻_____。

2. 电阻最_____的灯泡最亮，电阻最_____的灯泡最暗。

假设上述实验中灯泡 EL_1 、 EL_2 、 EL_3 的电阻依次为 R_1 、 R_2 、 R_3 ，根据电功率的公式 $P = IU = \frac{U^2}{R}$ ，可以列出

$$P_1 = \frac{U^2}{R_1}，P_2 = \frac{U^2}{R_2}，P_3 = \frac{U^2}{R_3}。$$

由于并联电路，各支路两端的电压相等，即 $U_1 = U_2 = U_3 = U$ ，因此可以列出

$$P_1 R_1 = P_2 R_2 = P_3 R_3 = U^2。$$

上式表明：并联电路各个支路上，电阻所消耗的电功率是跟它的电阻成反比的。因此电阻越大的灯泡在并联电路中所消耗的电功率越小，灯泡

越暗。

【讨论】

1. 并联电路有哪些特点？

2. 将两个额定电压相同、额定功率不同的灯泡，并联起来接在家庭电路中时，哪一个灯泡较亮？把这两个灯泡串联起来接到家庭电路中时，原来较亮的一个灯泡还是较亮吗？

12.7 电路的计算

图 12-18(a)所示的电路中的用电器既有串联，又有并联，怎样计算这种电路的电阻呢？

图 12-18(a)

假设电阻 R_{12} 可以等效替代并联电路中的电阻 R_1 、 R_2 ，根据并联电路的特点，可以列出

$$\frac{1}{R_{12}} = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} = \frac{R_1 + R_2}{R_1 R_2},$$

即
$$R_{12} = \frac{R_1 R_2}{R_1 + R_2}。$$

这样，原来的电路就可以简化为图 12-18(b)所示的串联电路，再根据串联电路的特点可以得出电路的总电阻

$$R_{\text{总}} = R_{12} + R_3,$$

即
$$R_{\text{总}} = \frac{R_1 R_2}{R_1 + R_2} + R_3。$$

图 12-18(b)

[例题 12.9] 在图 12-18(a)所示的电路图中，若 $R_1 = 3$ ， $R_2 = 2$ ， $R_3 = 5$ ，求 R_{12} 和 $R_{\text{总}}$ 。

解
$$R_{12} = \frac{R_1 R_2}{R_1 + R_2} = \frac{3 \times 2}{3 + 2} = 1.2,$$

$$R_{\text{总}} = R_{12} + R_3 = 1.2 + 5 = 6.2。$$

[例题 12.10] 在图 12-19 所示的电路图中，已知 $R_1 = R_2 = R_3 = 1 \Omega$ ，求这三个电阻所消耗电功率 P_1 、 P_2 、 P_3 之比。

图 12-19

解 根据串联电路的特点，可以得出

$$P_1 = P_2 = R_1 = R_2 = 1 \Omega。$$

假设电阻 R_{12} 可以等效替代电阻 R_1 和 R_2 ，则根据 $R_1 = R_2 = 1 \Omega$ 的关系可以列出

$$R_{12} = R_1 + R_2 = R_1 + 2R_1 = 3R_1。$$

根据并联电路的特点，可以得出

$$P_{12} = P_3 = R_3 = R_{12} = 3R_1 = 1 \Omega，$$

即

$$P_{12} = P_1 + P_2 = P_3。$$

上式表明：三个电阻所消耗电功率的比为

$$P_1 : P_2 : P_3 = 1 : 2 : 3。$$

[例题 12 . 11] 图 12-20 所示的电路中，U 为 220V 的恒定电压，R₁ 是 0 ~ 500 的滑动变阻器，R₂ = 1000 ，EL 为标有“100V40W”的灯泡。当电键 SA 断开，R₁ 连入电路的电阻为多少时，灯泡能正常发光？SA 接通，R₁ 连入电路的电阻为多少时，灯泡又能正常发光？

图 12-20

解 灯泡的额定电压为 100V，R₁ 两端的电压应是

$$U_1 = U - U_{EL} = (220 - 100)V = 120V。$$

通过 R₁ 的电流 I₁ 与通过灯泡的电流 I_{EL} 相等，因灯泡正常发光，得

$$I_1 = I_{EL} = \frac{P_{EL}}{U_{EL}} = \frac{40}{100} A = 0.4A，$$

这时连入电路的电阻 R₁ 为

$$R_1 = \frac{U_1}{I_1} = \frac{120}{0.4} = 300 。$$

当电键 SA 接通时，因灯泡正常发光，通过灯泡的电流仍为 0.4A，灯泡两端的电压仍为 100V。这时 R₂ 两端的电压 U₂ 与灯泡的电压相等，U₂ = 100V，因此通过 R₂ 的电流 I₂ 为

$$I_2 = \frac{U_2}{R_2} = \frac{100}{1000} A = 0.1A，$$

变阻器 R₁ 两端的电压 U₁ 为

$$U_1 = U - U_{EL} = (220 - 100)V = 120V，$$

变阻器 R₁ 中通过的电流 I₁ 为

$$I_1 = I_{EL} + I_2 = (0.4 + 0.1)A = 0.5A，$$

可以得到变阻器连入电路的电阻 R₁ 应为

$$R_1 = \frac{U_1}{I_1} = \frac{120}{0.5} \Omega = 240\Omega。$$

本章学习要求

1. 理解电功，掌握电功率的概念。
2. 理解焦耳定律。
3. 掌握部分电路欧姆定律。
4. 理解电阻定律。
5. 知道电阻率。

6. 理解串联电路的特点和分压作用。
7. 理解串联电路的功率分配。
8. 理解并联电路的特点和分流作用。
9. 理解并联电路的功率分配。

13 闭合电路的欧姆定律

用导线把用电器、电源、电键连接起来就组成了闭合电路。这一章主要研究闭合电路中电流、电压和电阻之间的变化关系。

13.1 电源

用电器消耗的电能是由电源供给的，电流通过用电器做了多少功，电源就提供给用电器多少电能。电源所提供的电能是从其他形式的能转化而来的，电源是一种把其他形式的能转化成电能的装置。

我们知道，要使用电器工作，必须给用电器加上电压，使用电器上有电流通过。电源就起到这样的作用。

电池和发电机是常用的电源。于电池和蓄电池能够把化学能转化成电能，发电机能够把机械能转化成电能。我国近年来已研制成功各种新型电池。例如，氧化银电池（也叫银锌电池）是一种轻便而容量较大的新型电池，广泛用于电子手表、导弹上。我国的人造卫星上使用的是能够把太阳能转化成电能的硅光电池（图 13-1），硅光电池性能稳定，寿命长，但成本较高。

图 13-1

13.2 外电路和内电路

闭合电路由两部分组成：一部分是电源外部的电路，叫做外电路；另一部分是电源内部的电路，叫做内电路。内电路和外电路交接的地方是电源的两极，两极是外电路的两个端点。

在一个蓄电池的正、负极间，用两根导线接上一个低值电阻，通电一段时间后断开电路。我们发现电路上的导线、电阻都发热了，电池也发热了。

导线和电阻发热，表明电流通过外电路做功，在外电路上把电能转化为内能。电池发热说明电流通过电池内部的内电路也做功，在内电路上把电能转化成内能。在外电路上电流的方向是从电源的正极经过用电器流向负极，在内电路上电流的方向是从电源的负极经过内电路流向正极，形成闭合回路。图 13-2 所示的是内、外电路上电流的方向。

图 13-2

有电流通过内、外电路，内、外电路上必定都存在电压。外电路两端的电压叫做端[电]压，内电路两端的电压叫做内电压。

下面通过实验来研究闭合电路中端压和内电压的变化关系。

实验 13.1

[目的]研究闭合电路中端压和内电压的变化关系。

[器材]电压表 2 个，变阻器，电键，干电池，盛有氯化锌溶液的玻璃缸，导线。

[步骤]

1. 把干电池的整张锌皮剥下[图 13-3(a)]，用纱布和棉线把干电池芯扎好[图 13-3(b)]，然后把包好的干电池芯和摊开的锌皮浸没在玻璃缸的氯化锌溶液里[图 13-3(c)]作实验用的电源。电源的正极是电池芯中的碳棒，负极是锌皮。

图 13-3(a)(b)(c)

2. 按图 13-4 所示的电路图连接电路，把测量端压的电压表 V 连接在电源的正、负极上，把测量内电压的电压表 V 连接在插在两极附近的两个探针上。

图 13-4

3. 接通电路，记下电压表 V 和 V 的读数。
4. 改变变阻器的电阻，记下电压表 V 和 V 的读数。再重复一次，把测得的三组端压和内电压数据记录在表格上。
5. 断开电路，记下开路时电压表 V 和 V 的读数。

[记录]

实验次序		端压 $U_{外}$	内电压 $U_{内}$	端压与内电压之和 $U_{外} + U_{内}$
通 路 时	1			
	2			
	3			
开路时				

[结果]

1. 闭合电路的端压和内电压都随着外电路电阻的变化而_____。在误差允许的范围内，内、外电路上电压之和是一个_____。

2. 外电路断开时，端压达到最大值，内电压为_____，但内、外电路上电压之和仍为_____。

实验表明，同一电源组成不同的闭合电路，内、外电路上电压之和是一个恒量，这个恒量用 E 表示。 E 的数值等于断路时的端压。

不同电源， E 的数值也不同。可见 E 的数值是由电源的性质决定的，我们把它叫做电源的电动势。电源的电动势等于断路时的端压，电动势的单位跟电压的单位相同。一节干电池的电动势为 $1.5V$ ，一只铅蓄电池的电动势为 $2V$ ，伏打电池的电动势是 $1V$ ，碱性的铁镍电池的电动势是 $1.3V$ ，而硅光电池（图 13-5）每组的电动势是 $41.5V$ ，每只新型的镍镉电池和银锌电池的电动势分别为 $1.2V$ 和 $1.5V$ 。

图 13-5

电动势和内、外电路上电压的关系可以用如下的公式表示

$$E = U_{外} + U_{内}$$

在上式的每一项中乘上电流 I ，可以得到

$$IE = IU_{外} + IU_{内}$$

$IU_{外}$ 是电源的输出功率，也是外电路上消耗的功率，用 $P_{外}$ 表示， $IU_{内}$ 是电源内部消耗的功率，用 $P_{内}$ 表示，它们的和 IE 是电源的总功率，用 $P_{总}$ 表示，即

$$P_{总} = P_{外} + P_{内}$$

上式表明了在内、外电路中电能转化为其他形式能的功率分配情况。

13.3 闭合电路的欧姆定律

电流通过内电路有热量放出，说明内电路存在电阻，内电路的电阻称为内阻，用 r 表示。因为内、外电路是串联的，电流 I 相等。根据欧姆定律，在内电路上 $U_{\text{内}} = Ir$ ，在外电路上 $U_{\text{外}} = IR$ 。代入公式 $E = U_{\text{外}} + U_{\text{内}}$ 可得

$$E = IR + Ir,$$

因此闭合电路中的电流

$$I = \frac{E}{R + r}。$$

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

[例题 13.1] 某电路如图 13-6 所示，已知电源电动势 E 为 $6V$ ，内阻 r 为 $1\ \Omega$ ，外电路上 R_1 为 $3\ \Omega$ ， R_2 为 $2\ \Omega$ ，求电压表的示数。

图 13-6

解 由于 $E = 6V$ ， $r = 1\ \Omega$ ， $R_1 = 3\ \Omega$ ， $R_2 = 2\ \Omega$ ，所以闭合电路中的电流

$$I = \frac{E}{R_1 + R_2 + r} = \frac{6}{3 + 2 + 1} A = 1A。$$

电压表上的示数

$$U = IR_1 = 1 \times 3V = 3V。$$

13.4 测电源的电动势和内阻

电动势和内阻是描述电源性质的两个物理量，下面我们通过实验来研究测定电源的电动势和内阻的方法。

实验 13.2 测定电源的电动势和内阻

[目的]测定电源的电动势和内阻。

[器材]电池，电键，电压表，电流表，变阻器，导线。[步骤]

1. 按图 13-7 连接电路，读出电流表和电压表的读数 I_1 、 U_1 。移动变阻器上的滑片，改变连入电路的电阻，再读出电流表和电压表的读数 I_2 、 U_2 。

图 13-7

2. 将测得的数据代入方程组

$$\begin{cases} E = U_1 + I_1 r, \\ E = U_2 + I_2 r. \end{cases}$$

解方程，求出电池的电动势和内阻。

[结果]电源的电动势 $E = \underline{\hspace{2cm}}$ ，内阻 $r = \underline{\hspace{2cm}}$ 。

实验 13.3 研究测定电源的电动势和内阻的其他方法

[目的]研究测定电源的电动势和内阻的其他方法。

[器材]电键和选自图 13-8 所示的器材。

图 13-8

[步骤]自行设计。

[结果]电源的电动势 $E = \underline{\hspace{2cm}}$ ，内阻 $r = \underline{\hspace{2cm}}$ 。

13.5 端压的变化

我们已经知道，闭合电路的端压 $U_{\text{外}}$ 随着外电阻的改变而变化，它是如何变化的？为什么会变化呢？

把图 13-9 所示闭合电路中变阻器的滑片向左滑动，使外电阻 R 减小。

图 13-9

根据 $I = \frac{E}{R+r}$ 可以知道，当外电阻 R 减小时，电路上的电流增大。

那么，端压 $U_{\text{外}}$ 将如何改变呢？将闭合电路的欧姆定律公式变形，得到 $U_{\text{外}} = E - Ir$ ， E 和 r 不变，此式表示 $U_{\text{外}}$ 随 I 变化的关系。当 I 增大时， $U_{\text{外}}$ 减小。

由此可得：闭合电路中，外电阻减小时，电流增大，导致了内电压增大，因而端压减小。

当 $R_{\text{外}}$ 趋近于零， $I = \frac{E}{r}$ ，电流达到最大值。由于电源内阻一般都比较小，这样就会使电源短路，短路时电流很大，不但会烧坏电源，还可能引起火灾。

【练习 13.1】

若把图 13-9 中变阻器的滑片向右滑动，使 R 增大，分析闭合电路中端压的变化规律。

(1) 在公式 $I = \frac{E}{R+r}$ 中，_____ 不变，当外电阻 R 增大时，电流 I

_____。

(2) 在 $U_{\text{外}} = E - Ir$ 中，_____ 不变，当电流 _____ 时，端压 $U_{\text{外}}$ _____。

(3) 当外电阻 R _____，即外电路断开时，电流 I _____，端压 $U_{\text{外}}$ _____。

【练习 13.2】

在图 13-10 所示的电路中，已知电源电动势 $E = 8\text{V}$ ，内阻 $r = 1$ ，外电阻 $R_1 = 3$ ， $R_2 = 4$ 。

图 13-10

(1) 闭合电键 SA_1 ，断开电键 SA_2 ，由于电源电动势 $E = 8\text{V}$ ，内阻 $r = 1$ ，电阻 $R_1 = 3$ ， $R_2 = 4$ ，根据公式 _____，可以算出电流 $I =$ _____。

又根据 $U_{\text{外}} =$ _____，可以算出端压（电压表的示数）为 _____。

(2) 再闭合电键 SA_2 后，外电路总电阻 R _____（增大、减小、不变），因为 _____，可以推知端压（电压表的示数）_____（增大、减小、不变）。

13.6 电池组

用电器的额定电压和额定电流常常高于单个电池的电动势和允许通过的最大电流，这时就需要把几个电池连成电池组，以便提高供电的电压或增大供电的电流。

13.6.1 串联电池组

如果在电路中用一个电池作为电源而电压不够时，就可以使用串联电池组。把第一个电池的负极跟第二个电池的正极相连接，再把第二个电池的负极跟第三个电池的正极相连接，这样依次连接起来就组成了串联电池组，如图 13-11 所示。例如手电筒常将几节干电池串联起来作为电源。以串联电池组为电源的电路如何计算电流呢？

图 13-11

假设用一个电池来替代串联电池组，串联电池组的总功率为 $P_{\text{总}}$ ，各个电池的规格相同，每个电池的功率分别为 P_1, P_2, \dots, P_n ，根据电功率的关系可以得到

$$P_{\text{总}} = P_1 + P_2 + \dots + P_n。$$

因为每个电池的规格都相同，则

$$P_{\text{总}} = nP。$$

由于 $P_{\text{总}} = IE_{\text{总}}$ ， $P = IE$ ，可以得到

$$IE_{\text{总}} = nIE, E_{\text{总}} = nE。$$

所以，由几个规格相同的电池组成的串联电池组，它的电动势等于各个电池电动势之和。

由于各个串联的电池之间的内阻是串联的，所以由几个规格相同的电池组成的串联电池组，它的内阻等于各电池内阻之和，即

$$r_{\text{总}} = r_1 + r_2 + \dots + r_n = nr。$$

因此，闭合电路中的电流 $I = \frac{nE}{R + nr}$ 。

[例题 13.2] 把 4 个相同的电池串联后，再连接一个电阻构成闭合电路（图 13-12）。若每个电池的电动势为 1.5V，内阻为 0.25，电路上的电流是 1A。求外电路的端压和电池组的总功率。

图 13-12

解设串联电池组的电动势为 $E_{\text{总}}$ ，内阻为 $r_{\text{总}}$ ，则

$$E_{\text{总}} = nE = 4 \times 1.5V = 6V,$$

$$r_{\text{总}} = nr = 4 \times 0.25 = 1 \text{ }。$$

由于 $I = 1\text{A}$ ，所以外电路的端压

$$U_{\text{外}} = E_{\text{总}} - Ir_{\text{总}} = (6 - 1 \times 1)\text{V} = 5\text{V}，$$

电池组的总功率

$$P_{\text{总}} = IE_{\text{总}} = 1 \times 6\text{W} = 6\text{W}。$$

13.6.2 * 并联电池组

如果在电路中用一个电池作为电源而电流不够时，就可以使用并联电池组。把电动势相同的电池正极和正极相连接，负极和负极相连接就组成并联电池组，如图 13-13 所示。以并联电池组为电源的电路如何计算电流呢？

图 13-13

假设用一个电池来替代并联电池组，并联电池组的总功率为 $P_{\text{总}}$ ，各个电池的规格相同，每个电池的功率分别为 P_1, P_2, \dots, P_n ，根据电功率的关系可以得到

$$P_{\text{总}} = P_1 + P_2 + \dots + P_n。$$

若每个电池的规格相同，则

$$P_{\text{总}} = nP。$$

由于 $P_{\text{总}} = I_{\text{总}}E_{\text{总}}$ ， $P = IE$ ， $I_{\text{总}} = nI$ ，可以得到

$$\begin{aligned} I_{\text{总}}E_{\text{总}} &= nIE， \\ E_{\text{总}} &= E。 \end{aligned}$$

所以，由 n 个规格相同的电池组成的并联电池组，它的电动势等于一个电池的电动势。

由于各个并联的电池之间的内阻是并联的，所以由几个规格相同的电池组成的并联电池组，它的内阻为

$$r_{\text{总}} = \frac{1}{n^r}。$$

因此，闭合电路中的电流

$$I = \frac{E}{R + \frac{r}{n}} = \frac{nE}{nR + r}。$$

13.7 欧姆计

测定用电器的电阻有许多种方法，我们通常利用多用[电]表的欧姆档（即欧姆计）来测电阻。

多用表是一种多用仪表，它可以用来测量电流、电压、电阻等，因此在多用表的表面上有电流、电压和电阻值的刻度。转动开关旋钮，还可以改换测定电流、电压、电阻的量程。

图 13-14

欧姆计是根据闭合电路的欧姆定律制成的，它的构造原理可用图 13-14 表示。如图 13-14(a)所示，图中 G 是多用表的灵敏电流计，它的内阻为 R_g ，满偏电流为 I_g ，R 是可变电阻，又称调零电阻。欧姆计需要用干电池作电源，设电源的电动势为 E，内阻为 r。在使用欧姆计前，必须进行调零，即在两表笔互相接触的情况下调节可变电阻 R，使灵敏电流计 G 的指针指在电阻为零的刻度处，表明两表笔间的电阻为零，这时欧姆计中通过的电流等于满偏电流，即

$$I = \frac{E}{R_g + r + R} = I_g。$$

在两表笔不接触的情况下[图 13-14(b)]，欧姆计电路断路，指针指在欧姆计的满刻度处，表明两表笔间的电阻为无限大，这时欧姆计中通过的电流等于零。

在两表笔间接入一个待测电阻 R_x 时[图 13-14(c)]，则通过欧姆计电路中的电流为

$$I = \frac{E}{R_g + r + R + R_x}，$$

灵敏电流计 G 的指针发生偏转，指在一定的刻度上。

当待测电阻 R_x 改变时，电流 I 也随着改变，表明对不同的电阻 R_x 都有一个电流 I_x 值与它对应。在刻度盘上标出与电流 I_x 相对应的电阻 R_x 的值，就可以直接读出 R_x 的值。

利用多用表的欧姆计测电阻的步骤是：

1. 根据待测电阻的估计值，选好适当的倍率档。
2. 在两表笔相互接触的情况下，拨动调零旋钮，对欧姆计进行调零。
3. 用两表笔分别连接待测电阻的两端，从多用表表面上指针所指的刻度乘以倍率读出待测电阻的电阻值。
4. 指针指在刻度盘的中央附近时测量的值比较准确，如果指针偏离中央过远，最好改换倍率，这时应重新调零。

使用欧姆计测电路中的电阻时，必须先把电路断开。

欧姆计内的干电池用久以后，它的电动势和内阻都要改变，造成的误差相当大，所以使用欧姆计只能粗略地测出电阻的值。

下面通过实验，练习使用多用表测电阻、电压和电流。

实验 13.4 用多用表测电阻、电压和电流

[目的]练习用多用表测电阻、电压和电流。

[器材]多用表，待测电阻，电源，电键等。

[步骤]

1. 按图 13-15 把待测电阻和电源、电键连接成电路。
2. 断开电路，用多用表测电阻 R 的阻值。
3. 接通电路，用多用表测电阻 R 两端的电压。
4. 把多用表串联接入电路，测通过电阻 R 的电流。
5. 用测出的电压和电流计算电阻值，并跟直接测出的电阻值进行比较。

图 13-15

本章学习要求

1. 知道闭合电路的内、外电路。
2. 知道电源存在内阻。
3. 知道电源的电动势等于内、外电路上电压之和。
4. 掌握闭合电路的欧姆定律。
5. 会用电流表、电压表测电源的电动势和内阻。
6. 理解端压跟外电路电阻的关系。
7. 理解断路和短路时的端压和电流。
8. 理解串联电池组的总电动势和总内阻。
9. 会用多用表测电阻、电流和电压。
10. 理解闭合电路中的能量转化。

14 电场和磁场

要使导体中有电流，导体两端一定要有电压。那么，电压是怎样产生的呢？电动机中的线圈为什么在磁场中会转动起来？为了研究这些问题，本章来学习一些关于电场和磁场的知识。

14.1 库仑定律

把一个带电小球靠近一个带电体，带电小球会受到力的作用。它在不同的位置上所受力的大小和方向一样吗？下面我们通过实验来研究这个问题。

实验 14.1

把一个挂在丝线下端的带正电的小球 B 靠近带正电的球体 A (图 14-1)，通过观察小球所处位置的变化，来判断带电小球的受力情况。

图 14-1

〔结果〕带正电的小球 B _____ (偏离、未偏离) 原来的位置。

丝线偏离竖直方向，表明丝线下端的带电小球受到力的作用。偏角越大，表明丝线下端的带电小球所受的力也越大。

实验 14.2

改变带正电的小球 B 的位置，观察丝线与竖直方向间的偏角是否发生变化，偏离的方向是否发生变化。

改变带电小球 B 的电量，比较带不同电量的小球在同一位置上，丝线与竖直方向间的偏角的变化情况。

〔结果〕

1. 带正电的小球 B 离带正电球体 A 越近，偏角就越 _____ (大、小)。

2. 保持小球 B 的位置不变，带正电的小球 B 所带电量越多，偏角就越 (大、小)。

实验表明：带电小球在带电球体周围各个位置上都要受到力的作用。一般来说，位置不同，所带的电量不同，带电小球所受的力也不同。

带电体之间的作用力不仅与它们的电量和距离有关，而且还与它们的形状有关。但是当带电体的大小比起带电体之间的距离小得多时，带电体的形状对相互作用力的影响就可以忽略不计。物理学里把这种大小与距离相比小到可以忽略不计的带电体称为点电荷，点电荷是一种理想化模型。

图 14-2

法国物理学家库仑 (1736 ~ 1806) 通过精确的实验发现这样的规律：在真空中两个点电荷间的作用力跟它们所带的电量的乘积成正比，跟它们

之间的距离的平方成反比，作用力的方向在它们的连线上。这一规律被称为库仑定律。如果用 Q_1 、 Q_2 表示两个点电荷所带的电量，用 r 表示两点电荷之间的距离，则库仑定律可以用下面的公式表示，即真空中两个静止的点电荷之间静电力的大小为

$$F = k \frac{Q_1 Q_2}{r^2}。$$

上述公式只适用于点电荷，式中的 k 是比例常数，叫做静电力恒量。在国际单位制中，电量的单位名称是库[仑]，单位符号是 C。

如果公式中 F 、 Q 、 r 的单位分别是国际单位牛(N)、库(C)、米(m)，则由实验可以得出静电力恒量

$$k = 9 \times 10^9 \text{ N} \cdot \text{m}^2 / \text{C}^2。$$

一个电子或一个质子所带的电量都是 $1.60 \times 10^{-19} \text{C}$ 。实验表明，任何带电体所带的电量都是这个电量的整数倍，因此人们把 $1.60 \times 10^{-19} \text{C}$ 的电量叫做基本电荷，用 e 表示。

[例题 14.1] 在真空中，点电荷 A 所带的电量为 $-4 \times 10^{-8} \text{C}$ ，点电荷 B 所带的电量为 $-2 \times 10^{-8} \text{C}$ 。如果它们相距 0.2m，求点电荷 B 所受的静电力。

解 由于点电荷 A 所带的电量 $Q_A = -4 \times 10^{-8} \text{C}$ ，点电荷 B 所带的电量 $Q_B = -2 \times 10^{-8} \text{C}$ 。运用库仑定律可以算出当 $r = 0.2 \text{m}$ 时，点电荷 B 所受的静电力

$$\begin{aligned} F &= k \frac{Q_A Q_B}{r^2} \\ &= 9 \times 10^9 \times \frac{4 \times 10^{-8} \times 2 \times 10^{-8}}{(0.2)^2} \text{N} \\ &= 1.8 \times 10^{-4} \text{N} \end{aligned}$$

点电荷 B 所受的静电力的方向如图 14-3 所示。

图 14-3

[例题 14.2] 在上例中，如果点电荷 A 所带的电量不变，两点电荷之间的距离不变，而点电荷 B 先后所带的电量为 (1) $Q_B = -4 \times 10^{-8} \text{C}$ ；(2) $Q_B = +1 \times 10^{-8} \text{C}$ 。

请分别求出点电荷 B 所受的静电力。

解 如图 14-4 所示，运用库仑定律可以算出点电荷 B 所受的静电力 F 和 F' 。

图 14-4

$$\begin{aligned}(1)F &= k \frac{Q_A Q_B}{r^2} \\ &= 9 \times 10^9 \times \frac{4 \times 10^{-8} \times 4 \times 10^{-8}}{(0.2)^2} \text{ N} \\ &= 3.6 \times 10^{-4} \text{ N} [\text{方向沿AB连线背离点电荷A, 见图14 - 4(a)}].\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}(2)F &= k \frac{Q_A Q_B}{r^2} \\ &= 9 \times 10^9 \times \frac{4 \times 10^{-8} \times 1 \times 10^{-8}}{(0.2)^2} \text{ N} \\ &= 9 \times 10^{-5} \text{ N} [\text{方向沿AB连线指向点电荷A,} \\ &\text{见图14 - 4(b)}].\end{aligned}$$

上述计算结果表明如果电荷间距离不变, 电荷所受静电力的大小与电荷本身所带的电量有关, 所受静电力的方向则与电荷的正、负有关。

14.2 电场 电场强度

将带电小球放在带电体周围会受到静电力，这个力是怎样发生的呢？理论研究和实践都表明，电荷周围存在着一种叫做电场的物质。电场对放在其中的电荷有力的作用，这是电场的基本特性。异种电荷间的引力和同种电荷间的斥力都是通过电场发生作用的。

电场对放在其中的电荷的作用力叫做电场力。同一电荷在电场中某点所受的电场力较大，表明这一点电场较强；在电场中某点所受的电场力较小，表明这一点电场较弱。

通过前面的计算可以看出，电量不等的电荷放在电场中的同一点上，所受的电场力是不同的。这表明电荷在电场中某一点所受的电场力不仅跟这一点的电场性质有关，而且跟电荷的正、负与电量的多少有关。

物理学中用电场强度来描述电场的力的性质，把单位正电荷在电场中某一点所受的电场力叫做这一点的电场强度，用符号 E 表示。假设带电量为 q 的正电荷在电场中某一点 P 所受的电场力为 F (图 14-5)，可以算出单位正电荷在 P 点所受的电场力为 F/q ，则电场中 P 点的电场强度

$$E = \frac{F}{q}。$$

图 14-5

在国际单位制中，电场强度的单位名称是牛[顿]每库[仑]，单位符号为 N/C 。电场强度既有大小，又有方向，是个矢量。物理学中规定正电荷在电场中所受电场力的方向就是电场强度的方向；负电荷在电场中所受电场力的方向则与电场强度的方向相反。

[例题 14.3] 运用例题 14.2(1)、(2)的数据，分别算出点电荷 B 所在位置的电场强度。

解 (1) 由于点电荷 B 所受的电场力 $F = 3.6 \times 10^{-4} N$ (方向沿 AB 连线背离电荷 A)，所带的电量 $Q_B = 4 \times 10^{-8} C$ ，根据电场强度的定义式，可以算出电荷 B 所在位置的电场强度

$$\begin{aligned} E &= \frac{F'}{Q_B} \\ &= \frac{3.6 \times 10^{-4}}{4 \times 10^{-8}} N/C \end{aligned}$$

$= 9 \times 10^3 N/C$ (方向与 F 相反，沿 AB 连线指向电荷 A)。

(2) 同理可以算出电荷 B 所在位置的电场强度

$$E = \frac{F''}{Q_B}$$

$$= \frac{9 \times 10^{-5}}{1 \times 10^{-8}} \text{ N/C}$$

$= 9 \times 10^3 \text{ N/C}$ (方向与F 一致, 沿AB连线指向电荷A)。

从上述计算结果可以看出, 虽然电量不同的电荷在电场中同一点所受的电场力的大小和方向都不同, 但是单位正电荷在这一点所受的电场力, 即这一点的电场强度总是一个恒量, 不仅大小相同, 而且方向也相同。这表明电场强度反映了这一点电场的力的性质, 而与放入电荷的正、负与电量的多少没有关系, 即使在这点上不放电荷, 这一点的电场强度依然存在。

如果在同一空间里存在着两个电荷, 形成两个电场, 怎样计算电场强度呢? 实验表明, 在同一空间里的两个电场会叠加起来形成一个合电场。合电场中某一点的电场强度就等于两个电场各自在这一点的电场强度的矢量和。例如在图 14-6 中, 正电荷 Q_1 和负电荷 Q_2 由于同时存在, 它们的电场就叠加起来。P 点的电场强度 E 就等于 $+Q_1$ 和 $-Q_1$ 的电场在 P 点的电场强度 E_1 、 E_1 的矢量和。

图 14-6

14.3 电场线

为了形象地描述电场中各点电场强度的分布情况，英国物理学家法拉第（1791～1867）首先提出可以在电场中用从正电荷出发到负电荷终止的一系列曲线把各处的电场强度表示出来。规定曲线上每一点的切线方向都与这一点的电场方向一致，如图 14-7 所示。这样的曲线叫做**电场线**。图 14-8、图 14-9、图 14-10、图 14-11 依次表示正电荷、负电荷、两个等量异种电荷和两个等量同种电荷周围的电场线图。电场线上的箭头表示电场线的方向。在电场线图上，我们还可以用电场线的疏密程度来描述电场的强弱情况。电场线越密的地方，电场越强，电场线越疏的地方，电场越弱。

图 14-7

图 14-8

图 14-9

图 14-10

图 14-11

必须指出，电场线是用来描述电场强度分布情况所假想的曲线，在电场中并不存在电场线，但是我们可以通过实验把电场线形象地表示出来。

实验 14.3

图 14-12

图 14-13

图 14-14

在有头发屑悬浮着的蓖麻油中，放入一个电极，在蓖麻油里形成电常观察发屑的排列情况（图 14-12）。

在有头发屑悬浮着的蓖麻油中，放入两个带等量异种电荷的电极，在蓖麻油里形成电场。观察发屑的排列情况（图 14-13）。

在有头发屑悬浮着的蓖麻油中，放入两个带等量同种电荷的电极，在蓖麻油里形成电场。观察发屑的排列情况（图 14-14）。

[结果]发屑在电极附近_____（有规则、无规则）地排列起来。

在蓖麻油里没有放入电极时，发屑的排列是杂乱的，放入电极后，发屑开始有规则地排列起来，形象地形成了电场线的分布图样。

下面来研究一种最简单的电场。

实验 14.4

在有头发屑悬浮着的蓖麻油中，放入两块靠得很近、正对面互相平行的金属板，使它们带上等量的异种电荷。观察发屑的排列情况(图 14-15)。

图 14-15

[结果]发屑在两块金属板间排列成近似_____。

精确的实验表明，两块靠得很近的带有等量异种电荷的平行金属板间各点的电场强度都相同，这个区域的电场叫做匀强电场。在匀强电场里，电场线是距离相等、互相平行的直线(图 14-16)。

图 14-16

14.4 电势

跟在地球引力范围内物体因受到重力作用而具有重力势能一样，电场中的电荷由于受到电场力的作用，也具有势能，这种势能叫做电势能。下面来研究电场中电荷的电势能与电场力所做的功之间的关系。

假设 A、B、C 是匀强电场中一条电场线上的三点（图 14-17），把一个静止的正电荷放在 B 点，它将如何运动？在运动过程中，电场力对它做正功还是负功？电势能增加了还是减少了？

图 14-17

静止的正电荷放在 B 点受到沿电场线方向的电场力作用，它沿着电场线向 C 点运动。在运动过程中，电场力的方向与正电荷的运动方向一致，因而电场力做正功。就像自由落体下落时因重力做正功而重力势能减小一样，正电荷在匀强电场中沿着电场线的方向运动时，因电场力做正功而电势能逐渐减小。跟重力做功的情况相似，可以证明电场力所做的功也和电荷移动的路径无关。

【练习 14.1】

在图 14-17 中，如果把一个静止的负电荷放在 B 点，原来静止的负电荷将由 B 点向_____点运动，在运动过程中电场力对负电荷做_____功；电势能逐渐_____。

就像地面附近的物体质量越大，重力势能也越大一样，电荷在电场中所具有的电势能不仅与电场的性质有关，还跟它本身所带电量的多少、电荷的正、负都有关。为了描述电场的能的性质，物理学中把单位正电荷在电场中某一点所具有的电势能叫做电场在这一点电势，用符号 U 表示。在国际单位制中，电势的单位名称是伏 [特]，单位符号是 V 。电势只有高低，没有方向，因而是标量。

因为电势能的大小如同重力势能的大小一样，具有相对的意义，所以只有确定了零电势能位置之后，才能确定电势能的数值，从而确定电势的数值。根据电势的意义可以知道，电场中某点的电势在数值上等于单位正电荷从该点移至零电势能位置时电场力所做的功。在图 14-17 所示匀强电场中的三点 A、B、C，设 C 点为零电势能位置，则正电荷在电场中由 A 点移至 C 点电场力所做的功，比由 B 点移至 C 点电场力所做的功要多，也就是正电荷在 A 点所具有的电势能比在 B 点时大。因而在该电场中，对 A、B、C 三点来说，A 点的电势最高，B 点的电势则低于 A 点的电势而高于 C 点的电势。由此可见，电场中的电势总是沿着电场线方向逐点降低的。（想一想，如果以其他点作零电势能位置，这一结论是否仍然正确？）

在实际应用中，通常取大地为零电势能位置，因而大地的电势就为零。

电场中两点间电势的差叫做这两点的电势差。假设某电场中 A、B 两点的电势依次为 U_A 、 U_B ，这两点的电势差

$$U_{AB} = U_A - U_B。$$

通电导体中也存在着电场（图 14-18）。导体两端的电压，就是指电场中某两点间的电势差。

图 14-18

14.5 电容器 电容

电容器是电子设备的重要元件。电容器种类很多，变电站里的巨型电容器比人还高，微电子技术中用的电容器小如米粒。

电容器是储存电能的装置，它是由两个相互绝缘而又靠得很近的导体组成，中间的绝缘体又称电介质。根据电容器所用的电介质不同，可分为空气电容器、云母电容器、陶瓷电容器、纸质电容器、极性电容器等等。从容量能否改变，还可分为固定电容器和可变电容器。改变电容器的电介质、相对面积、相对距离，可达到改变电容器容量的目的。图 14-19 是常见的几种电容器及其在电路中的符号。

图 14-19

两块互相平行、彼此绝缘的金属板就组成一个最简单的平行板电容器。

如果将电源的两极分别与电容器两极板相连接，两极板就分别带上等量的正、负电荷 Q 。使电容器带电的过程叫做充电，每个极板所带的电量叫做电容器所带的电量。电容器在充电过程中，随着两极板上电量的不断增加，极板间的电场也不断增强，两极板间的电势差也不断增大。当极板间的电势差等于电源两极间的电压时，充电过程结束。

用导线将充电后的电容器的两极板连接起来，两极板上的正、负电荷将通过导线而中和，这个过程叫做放电。

充、放电是电容器的重要特性之一，它可以将电能储存起来在需要时释放，这一特性在电子技术中有着广泛应用。

电容器带电时，它的两极之间就产生电势差，我们通过实验来研究电容器两极间的电势差跟所带电量的关系。

实验 14.5

让平行板电容器先后带不同的电量，用静电计来测量两极板间的电势差（图 14-20）。

图 14-20

静电计是用来测量导体间电势差的仪器。

使用时把它的金属球跟一个导体相连接，同时把它的金属外壳跟另一个导体相连接，从指针偏转的角度可以知道两导体间的电势差。

〔结果〕电容器两极板间的电势差随着两极板所带电量的增加

而_____。

精确的实验证明，电容器所带的电量跟电势差成正比，它们的比值是一个恒量。对于不同的电容器，这个比值是不同的。可见，这个比值反映了电容器本身的性质。电容器所带电量 Q 与两极板间的电势差 U 的比值叫做电容器的电容，用符号 C 表示，得

$$C = \frac{Q}{U}。$$

在国际单位制中，电容 C 的单位名称是法 [拉]，单位符号是 F ，它表示电容器带 $1C$ 的电量时，两极板间的电势差是 $1V$ ，这个电容器的电容就是 $1F$ 。

$$1F = 1C/V。$$

在实际应用中，法这个单位太大，常用较小的单位微法 (μF) 和皮法 (pF)。它们之间的关系是

$$1F = 10^6 \mu F = 10^{12} pF。$$

[例题 14.4] 电容器的电容是 $0.05pF$ ，两极板间的电压是 $3kV$ 。求电容器所带的电量。

解 由于电容 $C = 0.05pF = 0.05 \times 10^{-12}F$ ，电压 $U = 3kV = 3 \times 10^3V$ 。

根据 $C = \frac{Q}{U}$ ，可以得到电容器所带的电量

$$Q = CU = 0.05 \times 10^{-12} \times 3 \times 10^3 C = 1.5 \times 10^{-10} C。$$

【讨论】

有人认为不带电的电容器，电容为零。这个结论对吗？

实验 14.6

〔目的〕研究平行板电容器的电容跟哪些因素有关。

〔器材〕平行板电容器演示仪，静电计，导线，绝缘体，起电机。

〔步骤〕

1. 如图 14-21 所示，让平行板电容器带电后，用静电计测量两极板 A、B 间的电势差。不改变 A、B 两极板所带的电量，只改变两极板间的距离，观察电势差的变化。

图 14-21

2. 不改变 A、B 两极板所带电量和它们之间的距离，只改变两极板的正对面积，观察电势差的变化。

3. 不改变 A、B 两极板所带电量、它们之间的距离以及它们的正对面积，只在两极板间插入一块绝缘体（电介质），观察电势差的变化。

〔结果〕

1. 平行板电容器两极板的距离越大, 电势差_____, 即平行板电容器的电容_____。

2. 平行板电容器两极板的正对面积越大, 电势差_____, 即平行板电容器的电容_____。

3. 平行板电容器两极板间的电介质不同, 电势差_____, 即平行板电容器的电容_____。

精确实验和理论分析都表明: 平行板电容器的电容, 跟两极板间的距离成反比, 跟两极板的正对面积成正比, 跟两极板间的电介质也有关系。

14.6 磁场磁感线

我们已经知道，磁铁的周围存在着磁场，通电导线的周围也存在着磁场。磁场对放在其中的磁体和电流有力的作用，这是磁场的基本特性。

磁场和电场一样，也有方向。物理学中规定：在磁场中的任何一点，小磁针北极受力的方向，即小磁针静止时北极所指的方向，就是该点磁场的方向。

在研究电场时，曾引入电场线来形象地描述电场。同样，在研究磁场时，也可用一些假想的线——磁感[应]线来描述磁场。

磁感线是描述磁场分布情况的闭合曲线，在磁体外部由N极到S极，在磁体内部由S极到N极。在这些曲线上每一点的切线方向与该点的磁场方向相同（图14-22）。

图 14-22

我们过去做过将铁屑或小磁针放在磁场中来探测磁感线分布情况的实验。下面再来看一些通电导线周围磁场的磁感线分布情况。

实验 14.7

在两块玻璃板的小圆孔中分别安放着直导线和环形导线。在导线中通电流，观察直导线中电流和环形导线中电流周围铁屑的排列情况（图14-23）。

图 14-23

[结果]

1. 直导线中电流周围的铁屑排列成以导线上各点为圆心的_____。
2. 环形导线中电流周围的铁屑排列成一些围绕环形导线的_____线。

在这些磁场中磁感线的方向和电流方向之间的关系，都可以用右手螺旋定则来判定。

直导线中电流磁场的磁感线是一些以直导线上各点为圆心的同心圆，这些同心圆都跟直导线垂直[图14-24(a)]。运用右手螺旋定则，用右手握住导线[图14-24(b)]，让伸直的大拇指指向电流的方向，那么弯曲的四指指的就是磁感线的环绕方向。

图 14-24

环形导线中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，磁感线的方向与环形导线所在的平面垂直[图 14-25(a)]。运用右手螺旋定则，让右手弯曲的四指与环形导线中电流的方向一致，伸直的大拇指所指的就是环形导线中心轴线上磁感线的方向[图 14-25(b)]。

图 14-25

通电螺线管的磁感线分布与条形磁铁的磁感线分布十分相似，它内部的磁感线与轴线平行，并和外部的磁感线连接成闭合曲线[图 14-26(a)]。运用右手螺旋定则，用右手握住螺线管，让弯曲的四指跟电流方向一致，那么大拇指所指的就是螺线管内部磁感线的方向[图 14-26(b)]。

图 14-26

想一想，电场中的电场线是不会相交的，那么在磁场中能否找到两条相交的磁感线？为什么？

【练习 14.2】

图 14-27 中磁针的_____极最终将指向读者，图 14-28 中磁针的_____极最终将指向读者。

图 14-27

图 14-28

【练习 14.3】

通电螺线管外部的磁感线从_____极出来，进入_____极；其内部的磁感线跟螺线管的_____平行，方向由_____极指向_____极。通电螺线管内部的磁感线是一些分布均匀的_____直线，并和外部的磁感线形成了曲线。

14.7 磁感强度

就像电场强度可以用来描述电场的力的性质一样，磁感[应]强度是用来描述磁场的力的性质的物理量。

为了使磁感线的疏密可以用来表示磁感强度，物理学中把穿过某一平面的磁感线条数叫做穿过这一平面的**磁通量**，用符号 Φ 表示。在国际单位制中，磁通量的单位名称是韦[伯]，单位符号是 Wb。并且规定，在垂直于磁场方向的单位面积上的磁通量就等于该处的**磁感强度**，用符号 B 表示。如果在磁场中穿过垂直于磁场方向、面积为 S 的平面上的磁通量为 Φ ，则该处的磁感强度

$$B = \frac{\Phi}{S},$$

方向与该处的磁感线方向相同。在国际单位制中，磁感强度的单位名称是特[斯拉]，单位符号是 T，即

$$1\text{T} = \frac{1\text{Wb}}{1\text{m}^2} = 1\text{wb}/\text{m}^2。$$

在磁场的某一区域里，如果各点的磁感强度的大小和方向都相同，这个区域的磁场就叫做**匀强磁场**。匀强磁场的磁感线是疏密均匀、方向相同的直线。

当磁铁的两个异名磁极，距离很近且相互平行时，磁极间的磁场除边缘外，其余是匀强磁场（图 14-29）。一个较长的通电螺线管内部的磁场，也可以近似地看作匀强磁场。

图 14-29

在匀强磁场里，穿过和磁感强度(b)垂直的平面(S)的磁通量

$$\Phi = BS。$$

14.8 磁场对通电直导线的作用

下面通过实验来研究磁场对通电直导线的作用。

实验 14.8

〔目的〕研究磁场对电流的作用。

〔器材〕直导线，支架，电键，蹄形磁铁，变阻器，电源，导线。

〔步骤〕

1. 按图 14-30 装置将磁铁固定起来并连接电路。

图 14-30

2. 将一根直导线放在导轨上构成电路，闭合电键，使直导线中有电流通过，观察直导线的运动情况。

3. 改用磁性较强的磁铁，改变磁场的磁感强度，重做上述实验，观察直导线的运动情况。

4. 移动变阻器的滑片，改变电路中电流的大小，重做上述实验，观察直导线的运动情况。

5. 增加几个蹄形磁铁，改变直导线在磁场中的有效长度，重做上述实验，观察直导线的运动情况。

〔结果〕

1. 通电直导线在磁场中_____，表明通电直导线在磁场中受到的作用。

2. 通电直导线在磁场中所受的力的大小跟_____、_____、_____有关。

3. 通电直导线在磁场中的受力方向跟_____有关。

精确的实验发现，当通电导线跟磁场的方向垂直时，磁场对通电导线的作用力 F 跟磁感强度 B 、通电导线在磁场中的长度 L 成正比，跟电流 I 也成正比，即

$$F = kBIL,$$

式中 k 是比例系数，当式中的 F 、 B 、 I 、 L 的单位依次用国际单位牛(N)、特(T)、安(a)、米(m)时，比例系数 $k = 1$ ，即上式可以写为

$$F = BIL。$$

知道了磁场中某处的磁感强度 B ，就可以求出放在该处垂直于磁场方向的一根长度是 L 、电流是 I 的通电直导线所受磁场力。通常把通电导线在磁场中所受的磁场力叫做安培力。

实验表明，通电直导线在磁场中所受安培力的方向与磁场的方向以及

电流的方向都有关系。这三个量的方向相互垂直，只要知道了其中的两个量的方向，第三个量的方向就可以用左手来判定：伸出左手，让大拇指与其余四指垂直并且都跟手掌在同一平面内（图 14-31），如果使磁感线垂直穿过手掌，四指指向电流方向，那么，大拇指所指的就是直线电流所受安培力的方向。这就是左手定则。

图 14-31

【练习 14.4】

图 14-32 中表示通电直导线在磁场中受力的情况，但磁感线、安培力和电流三个量的方向只标出了两个。请将第三个量的方向在图上标出来。（图中叉表示电流方向朝里，点表示电流方向朝外）。

图 14-32

根据磁场对通电直导线的作用，可以按下列公式测出匀强磁场的磁感强度

$$B = \frac{F}{IL}。$$

由上述公式可以看出

$$1T = 1N/(A \cdot m)。$$

本章学习要求

1. 知道点电荷、基本电荷、电量。理解真空中的库仑定律。
2. 知道电荷周围存在电场，知道电场可以叠加。理解电场强度的概念及其定义式。理解电场线。知道匀强电场的特点。
3. 知道电势能，知道电势，知道电势差。知道沿电场线方向电势逐点降低。
4. 知道电容器。理解电容的概念及其定义式。知道决定平行板电容器电容大小的因素。
5. 知道电流周围存在磁场。理解磁感线，会用右手螺旋定则。
6. 知道磁通量，记住磁通量的单位：韦[伯]。知道磁感强度。知道匀强磁场的特点。
7. 知道磁场对电流有作用力。会用左手定则。

15 电磁感应

长期的观察和实验，使人们逐步认识到电和磁之间的紧密联系。本章所研究的电磁感应现象在生产技术上有十分广泛的应用。交流发电机、变压器等都是根据电磁感应的原理制成的。

15.1 电磁感应现象

电流的周围存在磁场，这表明电能够产生磁。那么磁能否产生电呢？关于这个问题英国物理学家法拉第（1791~1867）经过十年的探索，终于在1831年8月找到了答案。

实验 15.1

将线圈和灵敏电流计连接成闭合电路（图 15-2）。

图 15-2

将磁铁插入线圈的瞬间，观察灵敏电流计指针的偏转情况。

磁铁插入线圈后磁铁静止不动时，观察灵敏电流计指针的偏转情况。

将磁铁从线圈中拔出的瞬间，观察灵敏电流计指针的偏转情况。

〔结果〕磁铁插入线圈的瞬间，灵敏电流计指针_____（发生、不发生）偏转，表明线圈中_____（有、没有）电流产生；磁铁静止不动，灵敏电流计指针_____（发生、不发生）偏转，表明线圈中_____（有、没有）电流产生；磁铁从线圈中拔出时，灵敏电流计指针_____（发生、不发生）偏转，表明线圈中_____（有、没有）电流产生。

【讨论】

磁铁靠近和离开线圈的过程中，穿过线圈的磁通量发生了怎样的变化？

实验 15.2 研究电磁感应现象

〔目的〕研究电磁感应现象的产生条件(1)。

〔器材〕带铁芯的线圈，空心线圈，灵敏电流计，变阻器，电键，电源。

〔步骤〕

1. 按图 15-3 所示连接电路。

图 15-3

2. 闭合电键的瞬间，观察灵敏电流计指针偏转情况。

3. 闭合电键后，观察灵敏电流计指针的偏转情况。

4. 断开电键的瞬间，观察灵敏电流计指针偏转情况。

5. 断开电键后，观察灵敏电流计指针的偏转情况。

6. 闭合电键, 当移动变阻器滑片, 使 A 线圈中电流减小的瞬间, 观察灵敏电流计指针的偏转情况。

7. 闭合电键, 当移动变阻器滑片, 增大 A 线圈中电流的瞬间, 观察灵敏电流计指针的偏转情况。

〔结果〕闭合电键的瞬间, 灵敏电流计指针_____ (发生、不发生) 偏转, 表明 B 线圈中_____ (有、没有) 电流产生。闭合电键后, 灵敏电流计指针_____ (发生、不发生) 偏转, 表明 B 线圈中_____ (有、没有) 电流产生。断开电键的瞬间, 灵敏电流计指针_____ (发生、不发生) 偏转, 表明 B 线圈中_____ (有、没有) 电流产生。断开电键后, 灵敏电流计指针_____ (发生、不发生) 偏转, 表明 B 线圈中_____ (有、没有) 电流产生。

在 A 线圈中电流减小的瞬间, 灵敏电流计指针_____ (发生、不发生) 偏转, 表明 B 线圈中_____ (有、没有) 电流产生。在 A 线圈中电流增大的瞬间, 灵敏电流计指针_____ (发生、不发生) 偏转, 表明 B 线圈中_____ (有、没有) 电流产生。

【讨论】

闭合或断开电键的瞬间, 穿过 B 线圈的磁通量发生了怎样的变化? 增大或减小 A 线圈电流的瞬间, 穿过 B 线圈的磁通量发生了怎样的变化?

实验表明, 当穿过闭合线圈的磁通量发生变化时, 闭合线圈中就会有电流产生, 这种现象叫做电磁感应。由电磁感应产生的电流叫做感应电流。

实验 15.3

〔目的〕研究电磁感应现象的产生条件(2)。

〔器材〕蹄形磁铁, 灵敏电流计, 导线。

〔步骤〕

1. 按图 15-4 所示, 在磁场中悬挂一根直导线, 导线两端与灵敏电流计相连。

2. 让直导线在磁场中垂直于磁感线方向运动, 观察灵敏电流计指针的偏转情况。

3. 让直导线在磁场中沿磁感线方向运动, 观察灵敏电流计指针的偏转情况。

〔结果〕

1. 直导线在磁场中垂直于磁感线方向运动, 灵敏电流计指针 (发生、不发生) 偏转, 表明闭合电路中 (有、没有) 感应电流产生。

2. 直导线在磁场中沿磁感线方向运动, 灵敏电流计指针_____ (发生、不发生) 偏转, 表明闭合电路中_____ (有、没有) 感应电流产生。

实验表明：闭合电路的一部分导线在磁场中做切割磁感线运动时，导线中就有感应电流产生。

【讨论】

当导线在切割磁感线时，穿过闭合电路的磁通量是否发生变化（图 15-5）？

通过实验 15.2 和实验 15.3 的研究可以知道，不论是闭合电路中的磁场发生变化，还是闭合电路的一部分导体做切割磁感线运动，穿过闭合电路的磁感线条数都发生变化，这时闭合电路中就有感应电流产生。

由此可见，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产生。这一重大发现进一步揭示了电和磁的密切联系，为电能的广泛应用奠定了基础。

15.2 感应电流的方向

我们发现闭合电路中的磁通量发生变化时，闭合电路中就会有感应电流产生。我们还发现，在不同情况下产生的感应电流的方向不同，那么怎样判定感应电流的方向呢？

在实验 15.1 中，将条形磁铁的 N 极插入线圈 B 中，或从线圈 B 中拔出时，灵敏电流计中指针偏转方向是不同的；如果将条形磁铁的 S 极插入线圈 B 中，或从线圈 B 中拔出时，灵敏电流计中指针偏转的方向也是不同的。可见在电磁感应现象中，涉及到两个磁场，一个是产生感应电流的原磁场，另一个是感应电流的磁场，下面通过实验来研究这两个磁场之间的关系。

实验 15.4

〔目的〕研究感应电流的磁场跟闭合电路中原磁场磁通量变化之间的关系。

〔器材〕带铁芯的原、副线圈，滑动变阻器(0~10 Ω)，灵敏电流计，电池组(6V)，电键，导线。

〔步骤〕

1. 按图 15-6 连接电路。

图 15-6

2. 确定灵敏电流计指针偏转方向跟通入灵敏电流计的感应电流方向的关系。

3. 确定原、副线圈中导线的绕向。

4. 在闭合电键时，观察灵敏电流计指针的偏转情况，确定副线圈 B 中感应电流的方向。

5. 在断开电键时，观察灵敏电流计指针的偏转情况，确定副线圈 B 中感应电流的方向。

6. 改变原线圈 A 中的电流方向，重复步骤 4、5。

7. 闭合电键，当用变阻器改变原线圈 A 中电流大小时，观察灵敏电流计指针的偏转情况，并确定感应电流的方向。

〔记录〕在线圈上画出箭头表示电流方向，在线圈中心画“×”或“·”表示磁感线方向，并填入下表空格中。

实验 次序	原线圈 A 中穿 过副线圈 B 的磁通量 的变化 (俯视)	副线圈 B 中原磁通量 的变化 (俯视)	副线圈 B 中感应电 流的方向 (俯视)	副线圈 B 中感应电 流的磁 场方向 (俯视)	感应电 流的磁 场方向 和原磁 场方向 的关系 (相同 或相反)
1. 闭 合电 键					
2. 断 开电 键					
3. 原 线圈 中电 流增 大					
4. 原 线圈 中电 流减 小					
5. 改 变原 线圈 中电 流方 向					

〔结论〕从实验可以得出，感应电流磁场遵循这样的规律：当原磁场的磁通量增加时，感应电流的磁场方向与原磁场方向_____（相同、相反），可见感应电流的磁场起了阻碍原磁场增强的作用；当原磁场的磁通量减少时，感应电流的磁场方向与原磁场方向_____（相同、相反），可见感应电流的磁场起了阻碍原磁场减弱的作用。

俄国物理学家楞次分析了法拉第及其他学者的实验结果后，于 1833 年提出判定感应电流方向的定律：感应电流的磁场总是要阻碍引起感应电流的磁通量的变化。这就是楞次定律，它是电磁学中的一个重要定律。

〔例题 15.1〕如图 15-7 所示，A、B 为两个套在同一铁芯上的线圈，

当电键 SA 闭合时，标出与线圈 B 相连的灵敏电流计中电流的方向。

图 15-7

解 在线圈 A 和电路接通时，根据右手螺旋定则，可知线圈 A 产生的磁感线穿过线圈 B 中的方向是自上而下（图 15-8），使穿过线圈 B 的磁通量增加。根据楞次定律，感应电流的磁场要阻碍引起感应电流磁通量的增加，因此线圈 B 内感应电流的磁感线方向应与之相反，即自下向上穿过线圈 B，根据右手螺旋定则可判定线圈 B 中感应电流的方向如图 15-9 的线圈 B 上所示，表明通过灵敏电流计的电流方向应是 D 到 C。

图 15-8

图 15-9

[例题 15 . 2] 在图 15-10 中，当磁铁从线圈中拔出时，标出线圈中感应电流的方向。

图 15-10

解 磁铁放在线圈中，线圈中的原磁场方向自下而上；磁铁从线圈中拔出时，线圈中原磁场减弱，磁通量减少，根据楞次定律，感应电流的磁场方向应是自下而上，应用右手螺旋定则就知道线圈中感应电流的方向如图 15-11 中的箭头所示。

图 15-11

【讨论】

通过上述例题分析，归纳应用楞次定律判定感应电流方向的步骤。

利用实验 15 . 3 还可以发现，当闭合电路的一部分直导线在磁场中切割磁感线时，所产生的感应电流的方向与磁感线的方向、直导线的运动方向都有关系。这三个量的方向相互垂直，只要知道了其中的两个量的方向，第三个量的方向就可用右手定则来判定：伸开右手，让大拇指跟其余四个手指垂直，并且都跟手掌在一个平面内，使磁感线垂直穿入手掌，大拇指指向直导线的切割磁感线方向，那么其余四个手指所指的就是感应电流的方向（图 15-12）。

图 15-12

【练习】

图 15-13 中各图都是闭合电路的一部分直导线在磁场中切割磁感线的示意图。在图上标出感应电流的方向。

图 15-13

【讨论】

用右手定则判定感应电流方向与用楞次定律及右手螺旋定则判定感应电流方向的结果是否一致？

电磁感应现象也是符合能量守恒定律的。例如在图 15-14 中，当导体向右作匀速运动时，产生由 A 到 B 的感应电流，这时导体将受到安培力 F 的作用。根据左手定则可以知道，安培力的方向是跟导体的运动方向相反的，因此必须有和安培力大小相等、方向相反的外力对导体做功才能维持导体运动。在这个过程中机械能转化为电能。

图 15-14

15.3 磁通量变化时产生的感应电动势

要使电路中有电流就必须有电源，电流是电源电动势引起的。在电磁感应现象中，穿过闭合电路的磁通量发生变化，必然先产生电动势，这样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是电源。如果那部分导体没有形成闭合电路，穿过电路的磁通量发生变化时，电路中只有感应电动势而没有感应电流。

示波器是一种应用较为广泛的电学仪器，为了定量地研究感应电动势的大小，我们先来熟悉一下示波器的使用方法。

实验 15.5

〔目的〕练习使用示波器。

〔器材〕示波器（J2459型）一台，滑动变阻器，电键，干电池1~2节，导线若干。

〔步骤〕

1. 了解示波器（图15-15）面板上各个旋钮和开关的名称和作用。

图 15-15

2. 将辉度调节旋钮按逆时针方向转到底，竖直位移和水平位移旋钮旋转到中间位置，衰减旋钮置于最高档，扫描范围旋钮置于“外X”档。

3. 打开电源开关，经预热后，顺时针旋转辉度调节旋钮，注意不应使屏上光点过亮。旋转聚焦调节和辅助聚焦旋钮，使光点最圆、最小。

4. 旋转竖直位移旋钮，观察光点上下移动；旋转水平位移旋钮，观察光点左右移动。

5. 把X增益旋钮按顺时针方向转到三分之一处，扫描微调旋钮按过时针方向转到底，扫描范围旋钮置于最低档。观察光点从左到右移动，再很快回到左端的扫描情况。

6. 按顺时针方向旋转扫描微调旋钮以增大扫描频率，可观察到光点迅速移动成为一条光线。调整X增益旋钮，可看到亮线长度的改变。

7. 扫描范围旋钮仍置于“外X”档，使光点位于屏的中心，把“DC、AC”开关置于“DC”位置，按图15-16连接电路。直流电源用干电池1~2节。

图 15-16

8. 逐步减小衰减档，观察光点向上偏移，调整Y增益旋钮，使光点偏

移一段适当的距离。

9. 调节变阻器改变输入电压，可看到光点的偏移会变化，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，可看到光点改为向下偏移。

10. J2459 型示波器竖直位移已校准，当衰减旋钮处于“1”位置，Y 增益旋钮顺时针方向转到底。如果输入电压为 50mV 时，光点恰好偏移 1 格，可根据光点偏移的格数算出输入的电压值。

11. 衰减旋钮处于 10、100 或 1000 档时，只要将算出电压值乘以相应的倍数即可。

实验完毕关机前，一定要调节辉度旋钮使亮度减到最小。

下面来研究感应电动势的大小跟哪些因素有关。图 15-17 所示是一套研究感应电动势大小的装置。图中的线框 S 共有两组，能沿着滑槽 AB 滑至所需的位置上，线框的接线柱可与示波器的输入端或电压表相连，用以显示线框中感应电动势的大小。通电螺线管固定在操纵杆的滑块 Q 上，滑块也能沿滑槽 A'B' 滑移至与线框对应的位置上。控制操纵杆以一定的角速度转动时，通电螺线管就以一定的速度穿入线框。由于它离圆心 O 的距离可以调节，从而可以控制它穿入线框时的速度，用以控制穿入线框磁通量变化的快慢。

图 15-17

现在来研究感应电动势与穿过电路的磁通量变化情况的关系。

实验 15.6

〔目的〕研究感应电动势的大小跟哪些因素有关。

〔器材〕J2459 型示波器（或 0~15V 电压表），0~3A 电流表，电源，0~10 滑线变阻器，电磁感应实验装置，导线若干根。

〔步骤〕

1. 将线框 S 与通电螺线管分别置于图 15-17 的 R 处，将线框中的一组线圈抽头与电压表（或示波器，下同）的正、负接线柱分别用导线连接在实验装置的正、负接线柱上，让一根螺线管的接线端（即 a 与 a' 或 b 与 a' b）与电源、变阻器及电流表按图 15-17 中的连接方法接成通路，调节变阻器，使螺线管中的电流为 1A 左右。

2. 扳动操纵杆，使通电螺线管进入线框中，读出电压表上的示数，并记入实验表格中。

3. 调整线框 S 与滑块 Q 的位置至 2R 或 3R 处，重复步骤 2，分别读出电压表的示数并记入实验表格中。

4. 把线框 S 与滑块 Q 均固定在 R 位置，让两根螺线管通电（即电路中的导线与 ab 相连），调节电源电压和滑线变阻器，使螺线管中的电流仍和步骤 1 中的电流值相同，以步骤 2 中的速度扳动操纵杆，使通电螺线管进入线框中，读出电压表上的示数并记入实验表格中。

5. 将线框的两组线圈串联后接入电路（即将 cd 端接到正、负接线柱上），重复步骤 2，读出电压表上的示数并记入实验表格中。

在做本实验时应注意两点：

(1) 每次做实验，应及时控制复位开关，使电压表及时回零。

(2) 复位开关拨在一侧时，能显示感应电动势的瞬时值，而拨在另一侧时，指针停留在感应电动势的最大值处。实验中可根据需要加以选用。

〔记录〕

通电螺线管的电流 _____ A。

实验条件	实验次序	通电螺线管数	线圈数	通电螺线管插入线圈的速度	电压表（或示波器）显示感应电动势读数(V)
单只螺线管和单只线圈,改变螺线管插入线圈的速度	1				
	2				
	3				
改变通电螺线管和线圈数目,保持螺线管插入线圈的速度不变	4				
	5				
	6				

通电螺线管穿入线圈的速度反映了磁通量变化时间 t 的长短；穿入线圈的通电螺线管数反映了穿过电路磁通量变化量 的大小，线圈的多少反映了磁通量变化量 的倍数。

〔结果〕

1. 磁通量的变化量 一定时，感应电动势 E 跟穿过电路的磁通量变化时间 t 成_____比。

2. 穿过电路的磁通量变化的时间 t 一定时，感应电动势 E 跟磁通量的变化量 成_____比。

精确的实验结果表明，电路中感应电动势的大小跟穿过这一电路的磁通量变化率 $\frac{\Delta \Phi}{\Delta t}$ 成正比。即

$$E = k \frac{\Delta \Phi}{\Delta t}。$$

这个规律是英国物理学家法拉第首先发现的，因而叫做法拉第电磁感应定律。

上式中的 k 是比例常数，在国际单位制中，磁通量变化率的单位是韦/秒 (Wb/S)，感应电动势的单位是伏 (V)，由于

$$1\text{Wb} / \text{s} = 1\text{T} \cdot \text{m}^2 / \text{s} = 1 \frac{\text{Nm}^2}{\text{Ams}} = 1\text{J} / \text{C} = 1\text{V}，\text{因而} k = 1。$$

法拉第电磁感应定律所考虑的是单匝线圈的情况，但在实际工作中，为了获得较大的感应电动势，都采用多匝线圈。若线圈的匝数为 n ，整个线圈中的感应电动势就等于单匝线圈的 n 倍，即

$$E = n \frac{\Phi}{t}。$$

这一点，通过上述实验也可得到证实。

感应电动势的有无与电路中磁通量是否变化有关；感应电动势的大小则决定于磁通量的变化率；而感应电流的大小，不仅与感应电动势有关，还与电路的电阻有关。

15.4 切割磁感线时产生的感应电动势

我们知道，导体在磁场中切割磁感线时，在导体上也会产生感应电动势，怎样计算它的大小呢？

图 15-18

如图 15-18 所示，在磁感强度为 B 的匀强磁场中，磁感线的方向跟导轨所在平面垂直，导轨的宽度为 L ，导体沿着导轨 MM' 和 NN' 向右作速度为 v 的匀速运动。设在 t 时间内，导体从原来的位置 CD 移至 $C'D'$ ，则闭合线框的面积变化量

$$S = S_{C'D'D} = Lv \cdot t,$$

穿过闭合线框的磁通量变化量

$$\Delta \Phi = B \cdot S = BLv \cdot t,$$

于是根据法拉第电磁感应定律，在导体两端产生的感应电动势

$$E = \frac{\Delta \Phi}{t} = \frac{BLv \cdot t}{t} = BLv.$$

可见此式也是法拉第电磁感应定律的一种特殊情况。

图 15-19

如果导体的运动方向跟导体本身垂直而跟磁感线方向成一夹角（图 15-19），导体斜向切割磁感线，我们可将切割速度 v 分解成垂直于磁感线的分量 v_1 和平行于磁感线的分量 v_2 ，由于 v_2 不切割磁感线，对产生感应电动势不起作用，而 v_1 垂直切割磁感线，产生感应电动势，这时公式可写成

$$E = BLv \sin \theta,$$

式中 θ 为 v 与 B 之间的夹角。式中的单位，若都采用国际单位制，则

$$1\text{T} \times 1\text{m} \times 1\text{m/s} = 1 \frac{\text{N}}{\text{A} \cdot \text{m}} \cdot \text{m} \cdot \text{m/s} = 1 \frac{\text{N} \cdot \text{m}}{\text{A} \cdot \text{s}} = 1\text{J/C} = 1\text{V},$$

可见 E 的单位也是伏。

进一步分析感应电动势的公式，可以知道：导体作切割磁感线运动，当导体运动方向跟磁场方向垂直时，感应电动势的值最大；当导体运动方向跟磁场方向平行时，感应电动势为零。

导体作切割磁感线运动，若速度 v 为瞬时速度，则感应电动势为瞬时电动势；若速度 v 为平均速度，则感应电动势为平均电动势。

*[例题 15.3] 匝数为 40 的矩形线圈 $abcd$ ， $L_{ab} = 0.4\text{m}$ ， $L_{bc} = 0.3\text{m}$ ，线圈的电阻 $r = 2\ \Omega$ ，置于 $B = 0.2\text{T}$ 的匀强磁场中，当线圈以 $v = 2\text{m/s}$ 速度从磁场中拉出（图 15-20），求线圈拉出过程中线圈中感应电流的大校解

当矩形线圈的 cd 边移出磁场后，ab 边就作为闭合电路中一部分导体做垂直切割磁感线的运动，因而可直接用公式 $E=BLv$ 来解。

图 15-20

ab 边切割磁感线产生的感应电动势

$$E_1 = BL_{ab}v = 0.2 \times 0.4 \times 2V = 0.16V,$$

线圈产生的总电动势

$$E = nE_1 = 40 \times 0.16V = 6.4V,$$

闭合电路中的感应电流

$$I = \frac{E}{r} = \frac{6.4}{2} A = 3.2A。$$

* [例题 15.4] 试用法拉第电磁感应定律解例题 15.3。

解 线圈从磁场中拉出的过程中，磁通量的变化量

$$= BS = BL_{ab}L_{bc} = 0.2 \times 0.4 \times 0.3Wb = 0.024Wb。$$

磁通量变化所用的时间

$$t = \frac{L_{bc}}{v} = \frac{0.3}{2} s = 0.15s,$$

闭合电路中的感应电动势

$$E = n \frac{\Phi}{t} = 40 \times \frac{0.024}{0.15} V = 6.4V,$$

闭合电路中的感应电流

$$I = \frac{E}{r} = \frac{6.4}{2} A = 3.2A。$$

[例题 15.5] 如图 15-21 所示，边长分别为 a 和 l 的矩形线框的总电阻为 R，当它以速度 v 匀速通过磁感强度为 B 的匀强磁场时，若磁场宽度为 d(d > l)，求线框中产生的热量。

图 15-21

解 线框的右边进入磁场时切割磁感线而产生了感应电动势，从而在回路中有了感应电流并产生热量；直到线框全部进入磁场，线框内磁通量没有发生变化，感应电动势为零，不产生感应电流及热量。当线框的右边离开了磁场，只有线框的左边在磁场中运动时，回路中又有了感应电动势和感应电流，因而又有热量产生。

当线框的右边进入磁场，直至线框的左边也进入磁场，线框的右边切割磁感线所产生的感应电动势

$$E = Bav,$$

闭合电路中的感应电流

$$I = \frac{E}{R} = \frac{Bav}{R},$$

运动的时间

$$t = \frac{l}{v},$$

在 t 时间内电路中产生的热量

$$Q = I^2 R t = \frac{B^2 \cdot a^2 \cdot v^2}{R^2} \cdot R \frac{l}{v} = \frac{B^2 a^2 v l}{R}。$$

当线框的右边离开了磁场，只有线框的左边在磁场中运动，直至线框的左边离开磁场所产生的热量也等于 Q ，因此整个线框通过磁场的过程中产生的总热量

$$Q_{\text{总}} = 2Q = \frac{2B^2 a^2 v l}{R}。$$

【讨论】

1. 若 $l > d$ ，上述结果将会怎样？
2. 线圈穿过磁场的过程中，能量如何转化？

15.5 自感现象

电感器是电路中常用的一种元件，它是一个线圈，可以是空心的，也可以在线圈中插入铁芯（图 15-22）。将电感器接入电路，会产生什么作用呢？让我们将电感器接在直流电路中来研究。

图 15-22

实验 15.7

按图 15-23 连接电路， EL_1 、 EL_2 是两个完全相同的小灯泡， EL_1 与线圈 L 串联， EL_2 与变阻器 R 串联。调节 R 的阻值，使两条支路上的电阻相同，闭合电键，观察闭合时和闭合后两个小灯泡的发光情况。

图 15-23

〔结果〕

1. 电键 SA 刚合上，小灯泡_____先亮，小灯泡_____后亮。
2. 过一段时间后，两灯的亮度_____。

实验表明，电路刚接通时，穿过线圈 L 的磁通量随着电流的增大而增加，线圈 L 中产生的感应电动势要阻碍线圈中电流的增大。通过小灯泡 EL_1 的电流逐渐增大，因而小灯泡 EL_1 逐渐亮起来，最后两灯泡亮度相同。

实验 15.8

按图 15-24 连接电路，L 是一个带铁芯而电阻较小的线圈，当电键 SA 闭合时，小灯泡 EL 正常发光。断开电键的瞬间，观察小灯泡的发光情况。

图 15-24

〔结果〕电键 SA 断开的瞬间，小灯泡 EL_____立即熄灭、继续发光），亮度_____。

实验表明，电路刚断开时，线圈中的电流突然减小，线圈中产生感应电动势，线圈 L 和小灯泡 EL 组成的闭合电路中有感应电流通过，因而小灯泡能继续发光，但通过灯泡的电流方向跟原来方向相反。

从以上两个实验可知，导体中的电流发生变化时，导体本身就产生感应电动势，这个感应电动势阻碍导体中原来磁场的变化，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，所产生的电动

势叫做自感电动势。

自感电动势也是与穿过线圈的磁通量的变化率 $\frac{d\Phi}{dt}$ 成正比的，当线圈面积一定时，磁通量 Φ 与磁感强度 B 成正比， B 又和产生这个磁场的电流 I 成正比，即

$$E = - \frac{d\Phi}{dt} = - L \frac{dI}{dt},$$

所以

$$E = L \frac{dI}{dt}。$$

式中比例恒量 L 叫做线圈的自感系数，其大小是由线圈本身决定的。在国际单位制中，自感系数的单位名称是亨[利]，单位符号是 H ，常用的单位还有毫亨 (mH) 与微亨 (μH)，它们之间的关系是

$$1mH = 10^{-3}H, 1\mu H = 10^{-6}H。$$

从以上实验中，我们知道将电感器接入直流电路中时，只有当通电、断电等电流发生变化时，它才会发生阻碍电流变化的作用。电流不变时，电感器不起作用。

日光灯电路（图 15-25）中的镇流器是电感器在交流电路中的应用。

图 15-25

图中 SA_2 是一个自动开关（起辉器）。在闭合电键 SA_1 时， SA_2 先接通并立即自动切断，它的作用是在电感器上产生瞬时的自感电动势，从而在灯管两端产生一个高电压，使灯管中的气体电离而导通。当灯正常工作时，电感器又起着阻碍交流电的作用，使通过灯管的电流不致太大。

本章学习要求

1. 知道电磁感应现象。
2. 理解产生感应电流的条件。
3. 会用实验方法研究电磁感应现象。
4. 理解楞次定律。会用右手定则。
5. 知道感应电动势。
6. 知道法拉第电磁感应定律。
7. 理解导体作切割磁感线运动时感应电动势的大小。
8. 知道自感现象，知道自感系数。

16 交流电

自从法拉第发现了电磁感应现象后，人们根据导体在磁场中切割磁感线可以产生感应电动势的原理，制造出功率强大的交流发电机，使人类进入了电气化时代。跟直流电相比，交流电有许多优点。例如，交流电源的功率比较大，改变交流电电压比较容易，交流电便于远距离输送等。那么交流电是怎样产生的？如何来描述交流电？这些就是本章研究的主要内容。

16.1 交流电的产生

首先通过观察图 16-1 所示的交流发电机模型的工作过程来研究线圈在磁场里转动时所产生的电流的大小和方向。

图 16-1

交流发电机演示器由产生磁场的磁铁，产生感应电动势的线圈，引出电流的滑环 K、L 和电刷 A、B，以及底座，支架等组成。线圈一般由装在转轴上的皮带轮来带动。

实验 16.1

把导线从手摇交流发电机演示器电刷的输出端引出，接到灵敏电流计的接线柱上，缓慢转动摇柄，观察灵敏电流计指针的变化。

〔结果〕随着电枢在磁场中作缓慢转动，灵敏电流计的指针作_____摆动，线圈每转动一周，指针就完成_____次往复摆动。

实验 16.2

把交流发电机演示器上的橡皮带从皮带轮上摘下，用手缓慢地转动固定在转动轴上的小皮带轮，观察示波器荧光屏上所显示的电压随时间变化的情况。

实验表明，发电机产生的电流（或电压）的大小和方向，随时间作周期性的变化。我们把这种大小和方向都随时间作周期性变化的电流叫做交流电。

线圈在匀强磁场中作匀速转动，所产生的交流电的大小和方向为什么会发生变化呢？交流电的变化有什么规律？下面讨论这个问题。

如图 16-1 所示，线圈在转动过程中只有 ab 和 cd 边切割磁感线，产生感应电动势。

线圈处在图 16-2(a)中(1)所示的位置时，ab 与 cd 边的运动方向跟磁感线方向平行，都不切割磁感线，因此线圈中没有感应电动势，这时线圈所在的平面叫做中性面。线圈离开中性面以后，ab 与 cd 边开始切割磁感线，运动方向跟磁感线方向间的夹角 θ 很小， $\sin \theta$ 值也很小，因而感应电动势的值很小，随着夹角 θ 的增大，感应电动势逐渐增大。当线圈转到图 16-2(a)中(2)所示的位置时，ab 与 cd 边的运动方向跟磁感线方向垂直，感应电动势达到最大值，根据右手定则，可知 cd 边中感应电流方向从 d 到 c，ab 边中电流方向从 b 到 a。线圈继续转动，感应电动势逐渐减小，

但方向不变。当线圈转至图 16-2(a)中(3)所示的中性面位置，感应电动势减小为零。线圈继续转至图 16-2(a)中的(4)所示的位置时，cd 和 ab 边垂直切割磁感线，感应电动势达到最大值，但 ab 与 cd 边中感应电流的方向跟线圈在(2)位置时恰好相反，即感应电流分别从 a 到 b 和 c 到 d。当线圈转至图 16-2(a)中(5)所示的中性面位置时，感应电动势减小为零。这样就完成了交流电一周的变化。线圈继续转动，所产生的交流电将重复上述变化。

图 16-2(a)(b)(c)

线圈转动过程中，产生的交流电遵循什么定量规律呢？

图 16-3

在磁感强度为 $B(T)$ 的匀强磁场中，设线圈在中性面 NN' 位置开始，以角速度 ω (rad/s) 逆时针方向转动，经过时间 t 转过 $\theta = \omega t$ (rad)，cd 边运动方向与磁感线方向之间的夹角也是 θ (图 16-3)，cd 边长为 $L(m)$ ，以线速度 $v(m/s)$ 切割磁感线，则 cd 边中产生的瞬时感应电动势

$$e_{cd} = BLv \sin \theta = BLv \sin \omega t (V)。$$

ab 边中感应电动势的大小 e_{ab} 跟 cd 边中感应电动势 e_{cd} 相同，而且两者是串联的，所以在这一瞬间，每一匝线圈中的感应电动势的瞬时值是

$$e_1 = 2BLv \sin \omega t (v)。$$

如果线圈共有 N 匝，则整个线圈里的感应电动势的瞬时值

$$e = 2NBLv \sin \omega t (v)。$$

当 $\omega t = \frac{\pi}{2}$ 时，即线圈平面转到跟磁感线平行的位置时， $\sin \omega t = 1$ ，

此时感应电动势最大，称为感应电动势的最大值，即

$$E_m = 2NBLv (v)。$$

把它代入上式可以得到瞬时值和最大值的关糸式

$$e = E_m \sin \omega t (v)。$$

由上式可知，在匀强磁场中作匀速转动的线圈里所产生的感应电动势是按正弦规律变化的[图 16-2(b)]。

如果把线圈和电阻 R 组成闭合电路，则电路中就有感应电流，设线圈本身电阻为 r ，感应电流的瞬时值为 i ，那么

$$i = \frac{e}{R+r} = \frac{E_m}{R+r} \sin \omega t (A)，$$

式中的 $\frac{E_m}{R+r}$ 是电流的最大值，用 I_m 表示，则电流的瞬时值可表示为

$$i = I_m \sin \omega t (A)。$$

可见感应电流也是按正弦规律变化的[图 16-2(c)]，这种按正弦规律变化的电流叫做正弦交流电。

交流电的变化规律除了用公式表示外，还可用图象直观地表示出来。正弦交流电的感应电动势 e 和感应电流 i 都是时间 t (或角度 ωt) 的正弦函数，它们的图象必然是正弦曲线。图 16-2(b)和图 16-2(c)所示就是正弦交流电的感应电动势和感应电流的图象。从图 16-2(b)中可以看出，线圈平面每经过中性面一次，感应电动势的方向就改变一次。因此，正如实验 16-1 和实验 16-2 所显示的那样，线圈每转动一周，感应电动势或感应电流的方向就改变两次。线圈每转过一周，瞬时值 e 和 i 的大小和方向又恢复到开始时的情况。这就是说，交流电的电动势 e 和电流 i 都在做周期性的变化。

16.2 描述交流电的物理量

交流电的大小随时间而变化，且这种变化具有周期性，那么我们如何来表示交流电的大小，又如何反映交流电周期性变化的快慢呢？下面来讨论这些问题。

交流电的电压、电流的大小随时间而变化，没有一个恒定的数值。那么我们平时所说的家庭电路的电压是 220V，电能表的容量是 10A 等又是什么意思呢？

在实际问题中，我们常用交流电有效值来表示交流电的电压和电流。

交流电的有效值是根据电流的热效应来规定的：如果让交流电和某一种直流电通过同一电阻，它们在相同时间里产生的热量相等，那么这个直流电的电压值和电流值，就叫做该交流电电压和电流的有效值。例如，在同一时间内，某一交流电通过电阻产生的热量跟一个电流为 10A、电压为 220V 的直流电通过这电阻产生的热量相等，那么这一交流电电流的有效值就是 10A，电压的有效值就是 220V。

各种使用交流电的设备上所标出的额定电压和额定电流的数值、交流电压表和交流电流表标度的数值都是指有效值。我国家庭电路电压的有效值为 220V，有些国家如美国、法国、日本等则为 110V。

如果用 E 、 U 、 I 分别表示交流电的电动势、电压和电流的有效值， E_m 、 U_m 、 I_m 分别为交流电的电动势、电压和电流的最大值，实验和计算可以证明，按正弦规律变化的交流电的有效值与最大值之间存在着如下的关系

$$E = \frac{E_m}{\sqrt{2}} = 0.707E_m,$$

$$U = \frac{U_m}{\sqrt{2}} = 0.707U_m,$$

$$I = \frac{I_m}{\sqrt{2}} = 0.707I_m。$$

交流电是用周期或频率来表示它变化快慢的，在实验 16.2 中，线圈匀速转动一周，电动势和电流都完成一次周期性变化。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。周期通常用 T 表示，在国际单位制中，周期的单位名称是秒，单位符号是 s。交流电在单位时间内完成周期性变化的次数叫做交流电的频率。频率通常用 f 表示，在国际单位制中，频率的单位名称是赫[兹]，单位符号是 Hz，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 0.02s，频率是 50Hz，电流方向每秒改变 100 次。

有些国家如美国等交流电的频率为 60Hz，所以在选择有些电气设备

时，除了要注意电压值外，还需注意频率是否一致。

16.3* 发电机

发电机是一种将机械能转化成电能的装置。

交流发电机主要由两个部分组成：(1)线圈(线圈绕在铁芯上，通常叫电枢)；(2)磁铁(一般用电磁铁)。

电枢转动，磁铁不动的，叫做旋转电枢式发电机，大多属小型发电机(图 16-4)。

图 16-4

磁铁转动，电枢不动的，叫做旋转磁极式发电机，大型发电机都采用这种形式(图 16-5)。

图 16-5

现代交流发电机输出的功率可以从几十万千瓦到上百万千瓦。我国早在 60 年代末，就自行设计、制造出 $12.5 \times 10^4 \text{kW}$ 双水内冷发电机，当年制成的第一台的发电机就是现在上海吴泾热电站的 5 号机。我国制造的单机容量最大的 $6 \times 10^5 \text{kW}$ 的发电机现已安装在淮南平圩火电站。

发电站是电力系统的核心，根据其利用的能源不同主要可分为火力发电站、水力发电站和核能发电站等。到 1989 年为止，我国拥有百万千瓦以上的发电站有 15 座。我国的水能资源极为丰富，蕴藏量为 6.8 亿 kW，其中可开发的约有 3.8 亿 kW，居世界第一位，但现在已开发的仅占 7% 左右，绝大部分尚未开发。葛洲坝水电站是我国目前最大的水电站，装机容量为 $2.715 \times 10^6 \text{kW}$ ，年发电量为 138 亿 $\text{kW} \cdot \text{h}$ ，拦河坝的主坝全长 2561m，高 70m。黄河上游刘家峡水电站，装机容量 $1.225 \times 10^5 \text{kW}$ 。华东地区以新安江水电站为最大，装机容量 $6.5 \times 10^5 \text{kW}$ 。位于浙江省海盐县的秦山核电站，容量为 $3 \times 10^5 \text{kW}$ ；在广东兴建的大亚湾核电站，容量为 $1.8 \times 10^6 \text{kW}$ 。

利用风力，潮汐，地热都可以发电，但还不能提供大量电能。

将交流发电机电枢线圈的引出部分加以改变就成为直流发电机，交流发电机电枢线圈的引出部分是两个与电刷保持接触的圆环[图 16-6(a)]。直流发电机电枢线圈的引出部分是两个与电刷保持接触的半圆环 K、L[图 16-6(b)]，虽然线圈上产生的是交流电，而供给外部的却是直流电。线圈转动时，ab、cd 线段在沿逆时针方向向上运动时，半圆环 L 或 K 都是与电刷 A 相连，线圈上电流总是通过半圆环由电刷 B 流出。这样，电流一直是由电刷 B 通过外电路流向电刷 A。

图 16-6

16.4 变压器

在交流电的实际应用中，常常需要改变电压。我国民用的交流电源电压一般是 220V，但各种用电器需要的电压却不相同，如广告霓虹灯的灯管要 10⁴V 以上的电压，机床上使用的照明灯为了安全，一般额定电压在 24V 以下，如在 24~36V 之间，接触灯具时，需要采取一些绝缘措施，如戴橡皮手套等。发电站大型交流发电机发出的交流电，电压为几十千伏，而远距离输电却需要几百千伏的高电压。为此，人们根据法拉第电磁感应定律研制出变压器。

变压器是由铁芯、原线圈和副线圈组成的，变压器的作用是改变交流电的电压。

实验 16.3

用一个可拆变压器，将一个标明 220V 的匝数较多的线圈接入 220V 交流电源。另一个标明 6V 的匝数较少的线圈接上一个“6.3V”的小灯泡，观察小灯泡的发光情况（图 16-7）。

图 16-7

变压器的线圈中与电源连接的，叫做原线圈（或称初级线圈），另一个与用电器连接的叫做副线圈（或称次级线圈）。两个线圈都是用绝缘导线（漆包线或纱包线）绕制而成。在初级线圈上加交流电压 U_1 ，初级线圈上就有交流电流，它在铁芯中产生交变的磁通量；这个交变磁通量通过铁芯穿过次级线圈，根据电磁感应的原理，在次级线圈上就会产生感应电动势，在次级线圈的输出端有了交流电压 U_2 。

所以在实验 16.3 中变压器可以将 220V 的电压改变成为 6V 的低电压，使“6.3V”的小灯泡正常发光。

那么， U_1 和 U_2 的大小跟什么因素有关呢？

实验 16.4

〔目的〕

1. 学会使用多用表的交流电压档测交流电压。
2. 研究变压器的变压比 U_1 、 U_2 与什么因素有关。

〔器材〕具有多组次级线圈的可拆变压器，多用表，导线。

〔步骤〕

1. 读出初级、次级线圈的匝数 n_1 和 n_2 （在线圈上已经标好）。

2. 按图 16-8 连接电路, 初级线圈接到 220V 的交流电源上。用多用表的交流电压档测次级线圈的端压 U_2 。

图 16-8

3. 换上匝数不同的次级线圈, 重复步骤 2, 测出相应的端压 U_2 。

由理论与实验都能得出

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

可见变压器初级、次级线圈的电压比等于这两个线圈的匝数比。

若 $n_2 > n_1$, 则 $U_2 > U_1$, 变压器用来升高电压, 这种变压器叫做升压变压器。若 $n_2 < n_1$, 则 $U_2 < U_1$, 变压器用来降低电压, 这种变压器叫做降压变压器。

[例题 16.1] 变压器的初级线圈匝数 $n_1 = 2200$, 初级线圈的输入电压为 220V, 为使次级线圈得到 36V 的端压, 次级线圈的匝数应为多少?

解 由于 $U_1 = 220V$, $U_2 = 36V$, $n_1 = 2200$, 代入下式

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

得次级线圈的匝数为

$$n_2 = \frac{36}{220} \times 2200 = 360。$$

变压器工作时, 它的内部损耗很小, 可以忽略不计。没有损耗的变压器, 叫做理想变压器。

理想变压器的输出功率与输入功率相等, 即

$$U_1 I_1 = U_2 I_2 ,$$

把 $U_1 = \frac{n_1}{n_2} U_2$, 代入上式, 得

$$\frac{n_1}{n_2} U_2 I_1 = U_2 I_2 ,$$

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

由此可知, 理想变压器工作时, 初级线圈和次级线圈中的电流跟线圈的匝数成反比。

[例题 16.2] 一个理想变压器, 初级线圈接 220V 的交流电源, 如在次级线圈上接有一个额定电压为 6V、额定功率为 12W 的灯泡, 灯泡正常发光, 求此时初级线圈上的电流。

解 已知次级线圈输出电压为 6V, 灯泡正常发光时, 次级线圈的输出功率为 12W, 初级线圈的输入功率也是 12W, 则原线圈上的电流

$$I_1 = \frac{P_1}{U_1} = \frac{12}{220} \text{ A} = 0.055 \text{ A}。$$

在实验室和剧场里常用一种调压变压器，这种变压器的输出电压大小可以连续改变，图 16-9 是它的结构示意图。在铁芯上只绕一个线圈 AB，把整个线圈作为初级线圈，取线圈一部分 PB 作为次级线圈，移动滑动触头 P，改变 P 与线圈接触的位置，就可以调节输出电压 U_2 。

16.5 * 涡流

变压器的铁芯是由涂有绝缘漆的硅钢片叠合而成的，这是为了减少由于铁芯中交变磁通量引起的涡流损失。

什么是涡流呢？

让块状金属放在变化的磁场中，或让它在磁场中运动时，金属块内会产生感应电流。这种电流在金属块内自成闭合回路，电路形状很像水的涡流，因而这种电流叫做涡流。涡流会使金属发热，损耗电能。

为了减少涡流损失，很多电机的铁芯都是用硅钢片叠合而成。涡流有害，人们要尽量减少它造成的损失。但它也有可利用的地方，在工业上广泛利用涡流所产生的热量来冶炼金属，焊接金属。图 16-10 是冶炼金属的高频感应炉的示意图，这种电炉接上高频交流电源时，让高频交流电通过线圈，在冶炼锅内被冶炼的金属中就产生涡流，产生大量的热使金属熔化。这种冶炼方法冶炼时间短，温度容易控制，并能避免有害杂质混入。

图 16-10

高频焊接也是利用涡流产生的热使金属管缝焊接起来的，图 16-11 是高频焊接示意图。将两根需要焊接的钢管对齐插入通有高频交流电的线圈中，两根钢管接触处因涡流而产生大量的热使两管焊牢。

生活中所用的电磁灶，也是利用涡流产生热。图 16-12 是电磁灶的示意图。工作时，将交流电通入线圈产生交变磁场，磁感线由铁芯穿过锅底，形成磁回路，在锅底产生涡流直接对锅加热。电磁灶与利用电流通过电阻丝产生热量的电灶相比，热效率较高，还具有锅内温度分布均匀的优点。

图 16-12

上面是有关涡流热效应的应用，涡流在磁场中受力的应用也很多。

图 16-13 所示是一种汽车上速率表的原理图。永久磁铁与车轮转轴用软轴相连，车轮转动时，磁铁被带动旋转，使铝质圆盘 S 产生涡流，同时涡流受到安培力而转动。当圆盘所受力矩能迅速与弹簧 A 的反力矩平衡时，指针 P 即指出车速的大小。

图 16-13

16.6 电能的输送

大型的火力发电站，总是要靠近煤矿、油田或中心城市；水力发电站是要建在水能较丰富的江河上。这样，发电站发出的电能就要输送到很远的用电地区。远距离输送电能要比输送燃料方便。

葛洲坝水电站地处长江三峡东端的湖北宜昌附近，为了把电能输送到华中、华东地区，现在建成了从葛洲坝到上海南桥的一条正负 500kV 高压远距离输电线，全长 1045.7km，途经湖北，安徽，浙江三省共 36 个县（图 16-14）。

图 16-14

输电线上是有电流的，有电流就会发热。因此要实施远距离输电，先要解决如何减少这种损耗。

远距离输电，输电线上损耗的功率与哪些因素有关？用什么办法可以减少输电线上的损耗呢？

根据焦耳定律，输电线上的热损耗功率为

$$P_{\text{耗}} = I^2 R,$$

表明输电线上损耗的功率跟电流的平方以及电阻成正比。为了减少输电线损耗的功率，是否能够通过减小输电线的电阻来实现呢？

[例题 16.3] 要将 200kW 的电能输送到 10km 外的地方去，如果用 220V 的电压输电，并且使能量损耗限制在输送电能的 5% 以内，用铜导线作输电线，求输电线的截面积。

解已知输送的电功率 $P = 200\text{kW}$ ，电压 $U = 220\text{V}$ ，因此输电线上的电流

$$I = \frac{P}{U} = \frac{200000}{220} \text{A} \approx 909\text{A}。$$

为了使损耗的功率限制为输送的总功率的 5%，允许损耗的功率

$$P_{\text{耗}} = 200\text{kW} \times 5\% = 10\text{kW}。$$

因此输电线的允许电阻

$$R = \frac{P_{\text{耗}}}{I^2} = \frac{10000}{909^2} = 0.0121 \text{ }。$$

根据输电线长度 $l = 2 \times 10\text{km} = 20\text{km}$ ，铜的电阻率 $\rho = 1.75 \times 10^{-8} \text{ } \cdot \text{m}$ ，可以得出输电线的截面积

$$\begin{aligned} S &= \frac{l}{R} = \frac{1.75 \times 10^{-8} \times 20000}{0.0121} \text{m}^2 = 0.029\text{m}^2 \\ &= 290\text{cm}^2。 \end{aligned}$$

这样粗的输电线不但耗费材料，而且由于过重而造成建造上的困难。

为了减少输电线损耗的功率，是否能够通过减小输电线上的电流来实现呢？在电功率保持不变的情况下，要减小电流就必须提高电压。下面通过

实验看是否能通过

升高电压的方法来减少输电线上损耗的功率。

实验 16 . 5

为了使实验效果明显，用电阻率较高的电阻丝代替输电线，进行输电实验。

第一次将“6.3V”小灯泡直接接在6V电源上，观察小灯泡的发光情况（图16-15）。

图 16-15

第二次在输电线的输入端接6V的电压（图16-16），观察输电线的输出端连接的小灯泡的发光情况。第三次在输电线的输入端接220V的电压，输电线的输出端先通过变压器把电压降低到6V再连接小灯泡（图16-17），观察小灯泡的发光情况。

图 16-16

图 16-17

〔结果〕用低电压输送时小灯泡_____，用较高电压输送时小灯泡_____。

实验表明，提高输电电压就可以减少输电线上的电能损耗。

根据公式

$$P_{\text{耗}} = I^2 R = \left(\frac{P}{U}\right)^2 R。$$

可以看出，当发电站的输出功率P和输电线电阻R一定时，输电线上损耗的功率 $P_{\text{耗}}$ 与输电电压U的平方成反比，所以远距离输电要采用高压输送，我国远距离输电的最高电压是500kV。图16-18是从发电站到用户的交流输电线路的示意图。

图 16-18

远距离输电除了可采用高压交流输电外，现代电力新技术是采用高压直流输电，其优越性主要是在并接各个地区的电网时可以避免像交流电那样要求各地区电网的频率与“步调”一致所带来技术上的困难。同时还可以减少输电线的根数，节约材料。但由于直流高压输电的变流设备成本高，在距离不太长的情况下，还是采用交流高压输电方便。

16.7 *三相交流电

在固定的电枢槽中，安放三个结构相同的线圈 AX, BY, CZ, 让它们沿着电枢圆周对称分布(图 16-19), 彼此相隔 120° 角。当电磁铁转子转动时, 在三个线圈中都会产生感应电动势。像这种各相差 120° 的交流电叫做三相交流电, 每个线圈叫做一相。

图 16-19

在实际应用中, 是将发电机三个线圈的末端 X、Y、Z 与负载 1、2、3 末端的三条导线合在一起, 像图 16-20 那样用一根导线来连接。这样, 并不影响发电机每相的端压, 却可以节省两根导线。以每相线圈始端 A、B、C 引出的导线叫做相线, 从公共端 O 引出的导线叫做中线, 这种连接方法, 称为三相四线制。通常在工厂、学校或者一幢居民楼旁边, 常看到电杆上有四根线, 就是采用三相四线制的照明电路, 其中三根是相线(火线), 一根是中线(地线)。相线之间的电压叫线电压为 380V, 相线与中线之间的电压叫相电压为 220V, 图 16-21 是一所学校中的照明电路的示意图。

图 16-20

图 16-21

如果每相负载都相同, 这时中线将没有电流通过。这种情况, 中线可以省去不用, 成为三相三线制(图 16-22)。

图 16-22

实验 16.6

用三相交流发电机模型(图 16-23), 三个相同的小灯泡与灯座和蓄电池一组(供激磁用), 演示三相交流电的产生以及三相四线制、三相三线制的连接方法。

图 16-23

分别按下列顺序连接电路:

- (1)按图 16-19, 用六根线连接发电机与灯泡。
- (2)按图 16-20, 用四根线以三相四线制连接发电机与灯泡。
- (3)按图 16-22, 用三根线以三相三线制连接发电机与灯泡。

观察上面三种情况下三相交流电的工作情况。

三相交流电的优点是：对于同容量的发电机，三相比单相的体积小，而且效率高。如果输送相同的电功率，用三相交流电可以比用单相交流电节省导线用量。

16 . 8 * 电动机

电动机是把电能转化成机械能的装置。它是根据通电线圈在磁场中受到安培力的力矩而转动的原理制成的。电动机在工农业生产、交通运输以及家用电器中得到广泛的使用。许多机器也都是用电动机带动工作的。

目前在工厂、农村使用最普遍的电动机是三相感应电动机，因为它的构造简单，制造容易，成本低廉。这种电动机需要使用三相交流电。

实验 16 . 7

如图 16-24 所示，在磁铁中放一个铝框，转动磁铁，形成旋转磁场，观察铝框所发生的现象。

图 16-24

〔结果〕铝框随着磁铁的转动而_____。

上述实验结果也可以看成磁场不动，铝框作相反方向的转动（图 16-25），铝框切割磁感线，产生了感应电流。磁场作用在铝框上的安培力使铝框转动。

图 16-25

实验 16 . 8

如图 16-26 所示，三个相同的线圈，互成 120° 的角叠起来，线圈中通三相交流电，观察线圈中的铝框是不是会转动。

图 16-26

实验表明，线圈中通以三相交流电，就会产生旋转磁场，线圈中的铝框就会转动起来。

由以上两个实验可以知道三相感应电动机的原理与构造。

三相感应电动机有一个定子[图 16-27(a)]和一个转子[图 16-27(b)]。在定子上嵌有互成 120° 角的三组线圈（定子绕组），把这三组线圈接入三相电路，就能产生旋转磁场。

图 16-27

转子是一个将铜条嵌在铁芯上，形状像鼠笼的“笼子”，这个“笼子”相当于前面实验中的铝框，有了旋转磁场，它就会转动起来。

三相感应电动机的定子绕组有六个线端，它的接法要看铭牌规定。如某一电动机的铭牌是 Y/Δ 380 / 220，这就是说，如果三相交流电源相线之间电压是 380V，就应该将电动机的三相绕组接成Y形[图 16-28a)、(b)]。

图 16-28

直流电动机的构造如同直流发电机(图 16-29)。将直流电通过电刷 A、B，换向器 K、L 通入线圈，磁场就会给线圈以力矩使线圈转动。由于换向器的作用，可使通入线圈中的电流成为交流电，因而磁场会使线圈按一个方向转动。

图 16-29

直流电动机的优点是起动力矩大，容易改变转速，因此许多大型起重设备、电力机车、电车等都使用直流电动机。

本章学习要求

1. 知道交流电的产生。
2. 知道中性面。
3. 知道交流电的瞬时值、最大值和有效值；理解交流电的有效值和最大值的关系。
4. 理解交流电的周期与频率。
5. 知道交流电的图象。
6. 知道变压器的构造；理解理想变压器原、副线圈的电压、电流跟匝数的关系。
7. 知道远距离输电采用高压输送可以减少电能损失。

17 电磁振荡 电磁波

无线电通信、无线电广播、微波传送、无线遥感、无线制导等都是利用电磁波来传送各种信号的。那么电磁波是怎样产生、传播和接收的呢？

17.1 电磁振荡

我们通过实验来研究电磁振荡，先做两个准备实验。实验 17.1

将电容器与电池、单刀双掷开关、灵敏电流计按图 17-1 所示的电路连接起来。把单刀掷向 a，让电容器充电，然后将单刀掷向 b，观察灵敏电流计指针的偏转情况。

图 17-1

〔结果〕灵敏电流计的指针偏转，说明有_____通过灵敏电流计。

进一步的研究表明，充了电的电容器中贮存着电场能。电容器贮存电场能的多少与电容器的电容和电压有关。电容器的电容越大，电压越大，电容器中贮存的电场能就越多。

实验 17.2

将电感器与电池、单刀双掷开关、灵敏电流计按图 17-2 所示的电路连接起来。将单刀掷向 a，让电流通过电感器，然后将单刀掷向 b，观察灵敏电流计指针的偏转情况。

图 17-2

〔结果〕灵敏电流计的指针偏转，说明有_____通过灵敏电流计。由此可知，电感器中贮存着磁场能。

进一步的研究表明，电感器中贮存的磁场能的多少与电感器的自感系数有关，与电感器中的电流有关。电感器的自感系数越大，电感器中的电流越大，电感器中贮存的磁场能就越多。

电和磁有着密切的联系，通电直导线周围存在着磁场，穿过闭合导线中的磁通量发生变化就会产生电流，由此可知电场和磁场之间必然存在着某种联系。

实验 17.3

将电感器、电容器、灵敏电流计、单刀双掷开关和电池组按图 17-3 电路连接。先让电容器充电，然后将单刀双掷开关换向，电容器通过电感器放电，观察灵敏电流计指针的偏转情况。

〔结果〕灵敏电流计的指针_____。

怎样解释上述实验结果呢？

由电容器和电感器组成的电路叫做 LC 回路，这种回路中产生的大小和方向都随时间变化的电流叫做振荡电流。交流电就是一种频率很低的振荡电流，LC 回路产生的振荡电流频率一般都较高。能产生振荡电流的电路叫做振荡电路，LC 回路是一种基本的振荡电路。

在振荡电路中，被充电的电容器尚未开始放电时，电容器里的电场最强，电容器具有电场能。电路中没有电流[图 17-4(a)]。

图 17-4

电容器开始放电，电流通过电感器，同时在线圈中建立磁场。由于电感器的自感作用，电流要经过一段时间才能达到最大值，在电流增大的过程中，电容器具有的电场能转化成磁场能。电路中电流最大时，电感器中的磁场最强，电场能全部转化成磁场能[图 17-4(b)]。电流继续保持原方向，电容器开始反向充电，电路中的磁场能开始转化成电场能。由于电感器的自感作用，电流要经过一段时间减小为零。当电路中的电流减小为零时，磁场能又全部转化为电场能[图 17-4(c)]。接着，电容器又开始放电，电流方向跟以前相反。放电完毕时，电路中的电场能又一次全部转化成磁场能[图 17-4(d)]，不过磁场方向跟以前相反。此后，电容器又反向充电，重复上面的过程[图 17-4(e)]。假如电路中没有能量损失，这个过程就能永远周期性地继续下去。

在振荡电路中，产生振荡电流的过程中，电容器极板上的电荷，以及与之有关的电场和磁场都在作周期性的变化，这种现象叫做电磁振荡。

然而在放电的过程中，由于电感器和电路中存在电阻，电路中能量损失较大，所以灵敏电流计指针摆动的次数不多。假如能不断补充能量，就能使灵敏电流计指针作等幅、等周期的摆动。这样就能在电路中产生大小和方向都作周期性变化的电流，使电容器中的电场能和电感器中的磁场能持续不断地相互转化。

一个振动系统都有一个由它本身性质所决定的振动周期，叫做固有周期。那么电磁振荡是否也有固有的电磁振荡周期呢？

长期的研究表明，由电感器和电容器组成的振荡电路也有一定的固有振荡周期，简称振荡电路的周期。

大量的实验表明，振荡电路的周期是由振荡电路中电感器的自感系数和电容器的电容决定的，电路中电感器的自感系数越大，电容器的电容越大，振荡电路的周期就越大。振荡电路的周期 T 跟自感系数 L 和电容 C 的关系是

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

式中 T 、 L 、 C 的单位分别是秒(s)、亨[利](H)、法[拉](F)。

振荡电路的频率 f 和 L 、 C 的关系是

$$f = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}}。$$

由此可见，只要改变 LC 电路中的电感器的自感系数，或者电容器的电容就能改变振荡电路的周期和频率。

* [例题] 某 LC 电路能产生 535 ~ 1605kHz 的电磁振荡。已知其电感器的自感系数为 300 μ H，求可变电容器的最大电容和最小电容。

解 根据 LC 电路的频率公式可以推知 C 与 f、L 的关系是

$$C = \frac{1}{4\pi^2 f^2 L}。$$

已知该 LC 电路所产生的最小频率 $f_m = 535\text{kHz}$ ， $L = 300 \mu\text{H}$ ，代入可得可变电容器的最大电容

$$C_m = \frac{1}{4 \times 87 \times 535^2 \times 10^6 \times 300 \times 10^{-6}} \text{F} = 2.95 \times 10^{-10} \text{F}。$$

同理可按 LC 电路的最大频率 $f_n = 1605\text{kHz}$ ， $L = 300 \mu\text{H}$ ，求出可变电容器的最小电容

$$C_n = \frac{1}{4 \times 9.87 \times 1605^2 \times 10^6 \times 300 \times 10^{-6}} \text{F} = 3.28 \times 10^{-11} \text{F}。$$

17.2 电磁波

我们已经知道，振动在介质中的传播就形成波，电磁振荡在介质中是否也可以进行传播呢？

实验 17.4

莱顿瓶是荷兰莱顿大学的几位科学家在 1745 年制造的，它由一只普通的玻璃圆筒制成，内壁和外壁都贴上一层银箔构成一个电容器。内层银箔和一根伸出瓶口外的带有金属球的金属棒相连接，莱顿瓶能聚集大量电荷。取两个相同的莱顿瓶：一只莱顿瓶的外层银箔和一个带有金属球的矩形金属棒制成的框相连接；在另一只莱顿瓶的内、外层银箔上分别连接着两根金属棒，在两根棒之间接入一个可移动的带有氖管的金属棒。莱顿瓶是电容器、金属棒构成的矩形线框，是电感器，所以这两个电路都是 LC 振荡电路。

首先让莱顿瓶甲充电，当两金属球之间的电压达到一定值时，金属球间开始放电，出现电火花，这时移动莱顿瓶乙矩形线框中的可移动的带有氖管的金属棒，当两个矩形线框的大小相同时，氖管发光（图 17-5）。

图 17-5

改变带氖管的莱顿瓶乙的位置，发现在周围距离不太远的各个位置上都能看到氖管发光。

莱顿瓶乙氖管发光，它的能量显然是由莱顿瓶甲传播过来的。

在电磁场理论的研究中，英国物理学家麦克斯韦在 19 世纪 60 年代指出：在变化的电场周围会产生磁场，在变化的磁场周围会产生电场。周期性变化的电场周围会产生周期性变化的磁场，而周期性变化的磁场周围又会产生周期性变化的电场。这样就形成了变化电场和变化磁场的不可分割的统一体，叫做**电磁场**。周期性变化的电场和周期性变化的磁场的交替产生，并从发生区域向周围空间传播，就形成**电磁波**。

麦克斯韦还从理论研究发现，在真空中电磁波的传播速度跟光速相等，它的传播速度

$$c = 3.00 \times 10^8 \text{ m / s.}$$

1888 年，德国物理学家赫兹（1857 ~ 1894），利用莱顿瓶所做的实验发现了电磁波，并证实了电磁波的传播速度就是光速，使麦克斯韦的理论为实验所证实。

电磁波在形式上与机械波十分相似，同样可用频率、波长、波速、振幅等来描述，但在本质上完全不同。机械波只能在弹性介质中传播，而电

磁波却能在真空中以光速 c 传播。电磁波在空气中的传播速度略小于 c ，但一般仍可按 c 计算。在机械波通过的地方使介质中各点的位移在作周期性的变化；而在电磁波通过的地方，却使空间各点的电场强度 E 和磁感强度 B 作周期性的变化。

电磁波的波长、波速和频率同样存在着下列关系，即电磁波的波长

$$= \frac{c}{f}。$$

例如，我国广播电台所发射的电磁波的频率范围是在 $535 \sim 1605\text{kHz}$ ，即其波长范围是在 $560.7 \sim 186.9\text{m}$ 。

17.3 *电磁波的发射和接收

一般由电容器和电感器组成的振荡电路，电容器极板间的距离很小，电路里的电场几乎都集中在电容器的极板之间；电感器线圈是绕成螺线管形状的，磁场也几乎都集中在线圈内部。因此在振荡过程中，电场能和磁场能的转化主要是在电路内部，向外辐射的电磁能量极少，这就不利于向外辐射电磁波。为了有效地发射电磁波，必须把电容器的尺寸加大，并把极板间的距离逐渐增大，变成两条长的直导线，一条伸入高空成为天线，另一条接入地下成为地线；同时把自感线圈逐渐拉开，变成一条直线。这样的振荡电路，由于L、C的值很小，振荡频率很大，具有较大的向外辐射能量的本领，因而叫做开放电路（图17-6）。在实际应用中，开放电路中还有一个自感系数不大的线圈L，它的作用是与产生高频振荡的LC回路相耦合，使LC回路中的高频振荡电流通过耦合，在线圈L中产生同频率的振荡电流，传送到发射天线上，在天线四周的空间产生电磁波。

图 17-6

发射电磁波的目的是要利用它来传递某种信号。先把要传递的信号转换成电信号，但这种电信号频率很低，不能直接用来发射电磁波，必须把低频的电信号“加载”到高频的电磁波上去，才能利用电磁波这个运载工具，把电信号载送到很远的地方去。把低频电信号加载到高频、等幅的电磁波上去的过程叫做调制，常用的调制方式有调频和调幅两种。调频就是使高频的振荡电流的频率随着要调制的电信号改变；调幅则是使高频的振荡电流的振幅随着要调制的电信号改变。调制后的高频电流通常还要通过高频放大以获得足够强大的高频电流，然后耦合到发射天线（开放电路），向外发射。

在空间传播的电磁波，如果遇到导体，就会使导体产生微弱的感应电流，而这个感应电流的频率是跟通过导体的电磁波频率相同。无线电技术中由天线和地线组成的接收回路就是利用这个原理来接收电磁波的（图17-7）。由于空间传播着许多由发射台发出的各种频率的电磁波，它们同时会在接收天线上产生各种频率不同的感应电流。要在其中取得我们需要的信号，还需经过调谐和检波两个过程。

图 17-7

无线电技术中是利用与控制机械共振十分相似的调谐电路来实现这一目的的。图17-7所示是一个可以调谐的接收回路。它实际上就是一个附有可变电容器 C_1 和电感器线圈L组成的振荡电路的接收回路，即通过改变

可变电容器 C_1 的电容，就可以改变接收回路的固有频率。当我们需要接收某一频率的电磁波时，只要通过可变电容器 C_1 把接收回路的固有频率调整到这一频率。于是在接收天线中具有这一频率的电磁波就会激起较强的感应电流，而其他频率的电磁波所激起的感应电流都十分微弱，这样就可以取得所需频率的电磁波。

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，它还不是我们需要的信号。从经过调制的高频振荡电流中取出所载信号的过程叫做检波。检波后的信号经过放大，再通过耳机，就能使耳机里的振动片随着信号而振动发声。

17.4 *电磁波在现代通信、科学技术等方面的应用

从电磁波地发现至今虽然只有 100 多年，而电磁波在现代通信、科学技术等方面的应用已十分广泛。在上一节里，通过电磁波的发射和接收已经简单介绍了无线电广播的基本原理。在无线电技术中应用的电磁波叫做无线电波，它的波长范围是从 1mm 到 3000m 以上，可以划分为几个波段。无线电波各个波段的性质不同，因而用途也不同。波长在 3000m 以上的无线电波称为长波，主要用于电报通信和传真方面；无线电广播一般只使用中波（波长范围为 200~3000m）、中短波（波长范围为 50~200m）和短波（波长范围为 10~50m）；电视广播使用超短波（波长范围为 1~10m）；雷达、导航则使用微波（波长范围为 0.001~1m）。

无线电传真是利用电磁波把图表、文件、照片等图象信号向远方传递的一种技术。图 17-8 就是滚筒式光电扫描传真机的示意图。图 17-8(a) 是传真机的发射部分。把要传递的图象贴在滚筒上，滚筒迅速转动，同时装有光电管、光源和光学系统的拖板沿着滚筒的轴缓慢移动。当光源发出的光束照射在滚筒的图象上，从图象上反射出来的光线经过光学系统射入光电管。滚筒每转动一周，光束就在图象上扫描一行，图象上反射出的光就一行行依次射入光电管。光电管根据接收到的反射光的明暗程度，把光信号转换成电信号，用这个电信号去调制发射机里的高频等幅振荡电流后，即可用无线电波发射出去。图 17-8(b) 是传真机的接收部分。在接收机里把接收到的载有传真信号的电磁波进行放大、检波，取出传真信号送入辉光管。辉光管的作用与光电管相反，可以根据收到的电流的强弱程度，把电信号转换成光信号，让辉光管发出的光会聚在滚筒上的感光纸上。由于两边的滚筒转速相同，拖板的移动速度也相同，于是感光纸上就按照发射端的扫描情况一行行依次逐点曝光，再经过显影、定影，即可得到与发射端一样的传真图象。

图 17-8

无线电传真是传递不动的图片，而电视广播所传递的则是活动的景象。实际上电视所传递的是一幅幅更换得很快、带连续性的照片，更换速度是每秒 24 幅。由于人眼的视觉暂留效应，使人们对这些连续的照片产生了连续活动的景象。

在电视的发射端有一个特制的摄像管，它的作用与光电管一样，能把从实物上反射出来的光信号转换成电信号，而这种转换是用电子枪发出的电子射线以扫描的方式进行的。图 17-9 画出了电子扫描的路线。按照我国的电视广播规定，每幅图象要扫 625 行，并在 1/25s 内扫完一幅。由扫描

得到的光信号经转换成电信号，与相应的伴音信号，分别经过放大、调制后，利用同一天线发射出去。

图 17-9

在电视接收机里，通过天线接收到载有电视信号的电磁波后，经过调谐、放大、检波，分别取出图象信号和伴音信号。伴音信号可以通过扬声器发声，而图象信号通过显象管转换成活动的景象。

电视技术除了作为电视广播外，在工业上还用来监视自动生产线的工作情况。交通、公安部门可以利用电视技术对各交通要道的交通治安情况进行监视，以便了解交通全貌。

雷达是利用电磁波遇到障碍物要发生反射的特性来测定物体位置的装置。雷达利用的是波长只有 1m 的微波，这种微波具有反射性能强和直线传播的优点。

雷达有一个可以转动的天线（图 17-10），并能向一定的方向发射不连续的微波脉冲，每次发射的时间只有 $1\mu\text{s}$ ，两次发射的时间间隔约为发射时间的 100 倍。这样，发射出去的微波脉冲，遇到障碍物就能及时反射回来，被天线所吸收。根据雷达荧光屏上显示的反射脉冲与发射脉冲间的时间间隔，可以直接从荧光屏上的刻度读出障碍物的距离。

图 17-10

利用雷达可以探测飞机、舰艇、导弹以及其他军事目标，在交通运输上可以用来为飞机、轮船导航。

此外，波长只有几个分米的电磁波（微波）还能用来加热和消毒物体。人们利用电磁波的这一特性制成微波炉用来加工食品和对食品消毒。

然而电磁波也有其危害的一面，例如电磁波会影响电子设备正常工作，使之信号失误、控制失灵。某医院附近有一工厂使用高频感应炉，其发射的电磁波的干扰使该医院的脑电图、心电图设备无法正常工作。某塑料厂的热压机工作时，附近居民就无法收看电视。电磁波干扰信号还会使铁路、飞机的指示信号失误，使通信联络失误；强烈的电磁场甚至会使导弹的制导系统失灵，或自动引爆造成恶性事故。此外，高强度的电磁波会对人体发生危害，引起神经衰弱和植物神经功能紊乱，更严重的会使人的眼球晶体混浊而产生白内障，还会使癌症发病率增高。

我国规定电磁波的安全阈值为小于 $5\text{mW}/\text{cm}^2$ ，否则不允许继续工作，除非采取适当的防护措施。实践表明，树木和绿化环境对电磁波有较强的吸收作用，绿化环境能达到减弱电磁波的强度，保护人们身体健康的目的。

解放以前我国电磁波应用技术相当落后，解放以后有了很大的进展，

特别是十一届三中全会以来，更是突飞猛进。

解放初期，全国只有广播电台 35 座，至 1990 年发展为 555 座。

我国从 1958 年实验电视广播，1973 年北京、上海、天津等大城市成功播出彩色电视。至 1990 年全国已有电视台 489 座，每 100 户城镇居民已拥有彩色电视机 51.47 台，1988 年年生产电视机 1037.66 万台。

我国于 1984 年 4 月 8 日成功发射了一颗试验通信卫星（图 17-11），1995 年 11 月 28 日，我国采用自行研制生产的大推力“长征二号”捆绑式运载火箭成功地将“亚洲二号”地球同步轨道通信卫星送入太空，并顺利进入预定转移轨道。这是长征系列运载火箭的第 38 次发射，标志着我国卫星通信技术进入了世界先进行列。

图 17-11

本章学习要求

1. 知道电磁振荡。
2. 知道振荡电路中产生振荡电流的过程。
3. 知道振荡电路中电场能和磁场能的相互转化。
4. 知道电磁振荡的周期和频率。
5. 知道电磁场。
6. 知道电磁波，记住电磁波在真空中的传播速度。
7. 理解电磁波频率、波长和波速的关系

18 光的性质

伽利略曾经说过，我们能获得的有关宇宙的知识，几乎都必须由光来告诉我们。随着近代科学的发展，光的作用更大，最有效的通信是光纤通信，最理想的火箭是光动力火箭；若想和外星球建立联系的话，就更离不开光。从人类第一次使用光来驱赶自然界的黑暗以来，许多研究物理科学的巨匠都怀着极大的兴趣去研究光，研究光究竟是什么。牛顿认为光具有粒子的性质，并成功地用弹性小球的模型解释了光的直线传播、光在介质界面上的反射等现象。荷兰的物理学家惠更斯提出光的波动说，但未能获得有力的论证，加上牛顿在学术领域的威望，在一个多世纪中，人们对光的认识一直停留在牛顿的微粒学说的基础上。

直到 1801 年，英国物理学家托马斯·杨在实验室成功地观察到光的干涉现象，人们对光的认识进入一个新的阶段，光的波动说得到人们的公认。

19 世纪 60 年代，英国物理学家麦克斯韦根据他的电磁理论提出光是电磁波，他的假说在 1888 年被赫兹的实验所证实。随后的一系列实验又证实了电磁波具有反射、折射、干涉、衍射等波的性质，赫兹又通过实验计算出电磁波的波长、波速，这些实验和计算的结果都和麦克斯韦的理论相吻合。

科学不断发展，人类对光的认识也随之不断深化，20 世纪初，物理学家爱因斯坦的光子说又将光的粒子说建立在量子的新的理论基础上。

光究竟是什么？到今天，人们的回答仍只能这样说，光既具有波动性，又具有粒子性，光具有波粒二象性。光是什么，仍有待于人类对它作进一步的探索，这将是人类感兴趣的重大课题。

18.1 光的干涉

两列机械波相互干涉时，某些地方的振动被加强，而另一些地方的振动却被减弱。那么，是不是同样能看到光产生这种现象呢？

18.1.1 薄膜干涉现象

实验 18.1

观察下列表面上呈现的现象：

- (1)肥皂泡膜的表面；
- (2)用汽油擦过玻璃的表面；
- (3)浮在液面上油膜的表面。

〔结果〕在肥皂膜、汽油膜和油膜的表面都有_____条纹。

上述现象都是由于照射在薄膜上的光，从薄膜的前表面和后表面分别反射出来形成的两列波叠加后，某些颜色的光被加强而某些颜色的光被减弱的结果。

实验 18.2

金属丝圈浸入肥皂液中，在金属丝圈上形成肥皂薄膜；点燃酒精灯，在酒精灯火焰上撒一些氯化钠粉末，酒精火焰发出黄光；观察肥皂薄膜靠近黄色火焰时肥皂薄膜上呈现的现象。

〔结果〕在肥皂膜上有一个酒精灯火焰的象，象上有明显的_____条纹。

怎样解释上述实验结果呢？

在薄膜表面上看到明暗相间的条纹[图 18-1(a)]，这是竖立着的肥皂薄膜在重力的作用下形成了上面薄、下面厚的楔型薄膜，由薄膜前表面 A_1B_1 和后表面 A_2B_2 分别反射出来形成的两列黄光波在某些地方被加强，某些地方被减弱的结果[图 18-1(b)]。这种现象就是光的干涉现象，在薄膜表面产生的光的干涉现象就叫薄膜干涉现象。肥皂泡在阳光的照射下出现的彩色条纹就是薄膜干涉的结果。

图 18-1

18.1.2 光的双缝干涉

实验 18.3

〔目的〕观察光的双缝干涉现象。

〔器材〕光具座，光源，滤光片，单缝，有双缝和屏的遮光筒。

〔步骤〕

1. 按图 18-2 将光源、滤光片、单缝和遮光筒固定在光具座上。

图 18-2

2. 先取下双缝，调节遮光筒，使单缝中穿过的光能沿着遮光筒的轴线把屏照亮。

3. 放上双缝，使双缝和单缝互相平行，调节单缝和双缝的位置，使它们相距约 5~10cm，且中心大致在遮光筒的轴线上。

4. 用不同颜色的滤光片，观察屏上出现的光现象。

〔结果〕

1. 不论滤光片是何种颜色，在屏上都能看到_____的条纹，且条纹相互之间的距离基本上是_____的。

2. 滤光片是红色时，亮条纹是_____色的；滤光片是紫色时，亮条纹是_____色的；红光和紫光产生的条纹的间距是不相等的，_____光产生的条纹的间距要比_____光产生的条纹的间距宽一些。

3. 不用滤光片，同样可以看到屏上有条纹，不过这时的条纹是_____色的。

从实验中可知，经过双缝后的两束光产生了干涉现象，在屏上形成明暗相间的条纹（图 18-3、图 18-4），证明了光具有波动性，光是一种波。这就是有名的杨〔氏〕实验。1801 年英国物理学家托马斯·杨在实验室里首先利用一个单孔屏和一个双孔屏，在光屏上获得光的干涉条纹，这些条纹和两列机械波相干时的干涉条纹极为相似。

图 18-3

图 18-4

18.1.3 光产生干涉的条件

在杨实验中，无论是双孔实验还是双缝实验，都对孔和缝有一定的要求。现以杨实验的双孔实验（图 18-5）为例来说明。

图 18-5

单色光照射在单孔屏上，单孔屏上的小孔就成了一个“点光源”。双

孔屏是一个具有两个相距很近（如 0.1mm）的小孔的屏。双孔屏放置时，必须使两孔与前面小孔的距离相等，这样点光源射出的光波将同时传到这两个小孔，这两个小孔就将成为两个振动情况总是相同的光源。像这种从同一光源分出来的两个光源是相干光源。由相干光源发出的光束就会在屏上叠加，出现干涉现象（图 18-6）。任意两个光源或一个光源上不同部分发出的光不会产生干涉现象，只有当光源上同一点发出的光沿不同的路径传播后再相遇，才能发生干涉。能够实现干涉的光束，叫做相干光束。

图 18-6

18.2 光的衍射

机械波除了能产生干涉现象外，还能产生衍射现象。那么光能否产生衍射现象呢？

18.2.1 光的衍射现象

实验 18.4

将两支铅笔平行放置紧靠在一起，中间留有细缝，通过细缝对着光观察。调节细缝的宽度，观察光通过细缝出现的现象。

〔结果〕狭窄的区域内有明暗相间的条纹（图 18-7）。两支铅笔之间的细缝扩大到一定的宽度后，暗线消失，只看到一条明亮的窄条。

图 18-7

上面的实验通过手指并拢时产生的狭缝来做，同样可以观察到。

实验 18.5

〔目的〕观察光的衍射现象。

〔器材〕光源，滤光片，可调节的单缝，光屏，光具座。

〔步骤〕

1. 将光源、滤光片、单缝和屏安置在光具座上，并将它们的中心调节到相同高度上。

2. 装上红色的滤光片，调节单缝的宽度，观察屏上产生的现象。

3. 换上紫色的滤光片，调节单缝的宽度，观察屏上产生的现象。

4. 不用滤光片，当单缝很窄时观察屏上产生的现象。

〔结果〕

1. 当单缝调节得很窄时，屏上被照亮的部分反而比单缝较宽时照亮的部分_____，而且在被照亮的部分出现_____条纹，这些条纹与条纹相互之间_____。

2. 不论用红色光还是紫色光，条纹最宽的在_____，中间条纹宽的是色光。

3. 使用白光时，出现的条纹是_____色的，中间条纹是_____色的。

通过狭缝后，光明显地偏离了直线传播的方向，使光屏上被照亮的范围变宽，并且出现了明暗相间的条纹，这种现象叫做光的衍射。光的干涉现象和光的衍射现象都是牛顿关于光的粒子说理论所不能解释的。

18.2.2 光产生衍射的条件

实验 18.6

通过较厚纸上的圆形小孔观察，可以看到小孔内呈现出一组同心圆环（图 18-8），若小孔不够圆时，则可以看到明暗相间的网状图形。

图 18-8

大量的实验证明，光的衍射现象是普遍存在的，光通过狭缝或小孔时都能产生衍射，并出现明暗相间的条纹，如图 18-7 和图 18-8 所示都是由于光的衍射所产生的衍射图形。光通过障碍物时也会产生衍射现象。图 18-9 表示光通过圆板时，能绕过圆板的边缘，而在圆板的阴影中心产生一个亮斑。

图 18-7

图 18-8

图 18-9

光波和机械波一样，只有在光波的波长比狭缝或障碍物大或差不多时才能看到明显的衍射现象，所以在一般情况下我们看到的光是直线传播的。由此我们可以知道，初中物理里讲的小孔成象的小孔应该是一个比较大的小孔，如果小孔相当小时，我们将在屏上看到衍射图样。

18.3 光的色散

我们在雨后的天空中看到的彩虹可以用人工的方法去制造。口中含一口水，背着太阳向空中喷出一串小水珠，就可以看到在空中形成的一条人造彩虹。彩虹是太阳光经过小水珠所产生的现象。

18.3.1 光的色散现象

实验 18.7

透过三棱镜观察物体。

〔结果〕

1. 看到物体的位置发生了变化，这说明我们看到的已经不是物体本身，而是物体的象。这个象是物体反射出来的光经棱镜折射后所产生的。
2. 看到物体的边缘镶上颜色。往往是在平行的两边镶上不同的颜色，一边为红色，一边为紫色。

实验 18.8

让一束白光通过棱镜，观察白光穿过棱镜后在屏上产生的现象。

〔结果〕我们在屏上看到的不再是一束白光，而是一条光带，这条光带的排列顺序是：红、橙、黄、绿、蓝、靛、紫（图 18-10）。

图 18-10

这种白光经过棱镜后使各种色光分离的现象叫做光的色散。由色散而产生的按一定顺序排列的彩色光带叫做光谱。

实验 18.9

在前面实验中的棱镜旁再加一个倒置的、同样的棱镜，使白光通过棱镜后再通过一个棱镜。

〔结果〕通过第二个棱镜后的光线成为白光（图 18-11）。

图 18-11

实验表明，白光是由各种单色光组成的复色光，棱镜既能使复色光分离成单色光，也能将被分离的单色光重新复合成复色光。

实验 18 . 10

将一束光由空气斜射入水中（图 18-12），观察光在空气和水的分界面上发生的现象。

图 18-12

〔结果〕光射在空气和水的分界面上，一部分光被_____，另一部分光则被_____。

我们把入射光线和法线的夹角叫做入射角，用 i 表示；把折射光线和法线的夹角叫做折射角，用 r 表示。光从空气斜射入水时，_____角大于角。

改变入射角的大小，可以看到，随着入射角的增大，折射角随之_____；随着入射角的减小，折射角随之_____。

人们经过 1000 多年的实践和研究，终于在 1621 年由荷兰数学家斯涅尔找到了它们之间的关系，这就是光的折射定律。它的表述是：折射光线是在入射光线和由入射点所引法线所决定的平面内；入射角的正弦和折射角的正弦之比对于给定的两种介质是一个常数，我们用 n 表示这个常数，则有

$$n = \frac{\sin i}{\sin r}。$$

当光从真空射入某种介质时测得的 n ，称为这种介质的折射率。对于不同的介质，折射率是不同的，它是介质的特性之一。

几种介质的折射率

介质	金刚石	二硫化碳	玻璃	酒精	水	空气
折射率	2.42	1.63	1.5 ~ 1.9	1.36	1.33	1.0028

实验又证明，光由空气射入某种介质时的折射率和光从真空射入这种介质时的折射率几乎相等，我们一般认为光从空气进入某种介质时的折射率就是那种介质的折射率。

上面的折射率是由白光测得的，光的色散现象表明，即使是在同一介质中，对于不同色光的折射率是有差别的，例如冕牌玻璃，对不同色光的折射率分别为：

色光	紫	蓝	绿	黄	橙	红
折射率	1.532	1.528	1.519	1.517	1.514	1.513

根据理论和实验的进一步研究表明：某种介质的折射率等于光在真空

中的速度 c 和光在这种介质中的速度 v 的比，即

$$n = \frac{c}{v}。$$

各种色光在真空中的传播速度都等于 c ，但同一介质对各种色光的折射率是不同的，根据公式 $n = \frac{c}{v}$ ，可以推知不同的色光在同一介质中的传播速度是不一样的，同一介质对紫光的折射率最大，紫光在该介质中传播速度最小；红光的折射率最小，红光在该介质中传播速度最大。在粗略讨论问题时，我们一般不考虑光的色散效应，因为介质对各种色光的折射率的差异不大。

18.3.3 介质折射率的测定

实验 18.11 测定玻璃的折射率

〔目的〕测定玻璃的折射率。

〔器材〕玻璃砖，白纸，大头针，刻度尺。

〔步骤〕

1. 在白纸上画直线 aa' ，在 aa' 上任选一点 O 作 aa' 的垂直线 NN' ，并任画一段线段 AO 。

2. 让玻璃砖的一边和 aa' 对齐，则 AO 为入射线， NN' 为法线，同时画出玻璃砖的另一边 bb' 。

3. 在线段 AO 上插两枚大头针 P_1 、 P_2 。

4. 透过玻璃砖观察大头针 P_1 、 P_2 的象，直至 P_1 被 P_2 遮住，在观察的一侧插两枚大头针 P_3 、 P_4 ，使 P_3 遮住 P_1 和 P_2 的象， P_4 遮住 P_1 、 P_2 的象和 P_3 ，记下 P_3 和 P_4 的位置。

5. 移去玻璃砖，连接 P_3 、 P_4 交 bb' 于 O' ，则线段 $O'B$ 是第二次折射的折射线[图 18-13(a)]。

图 18-13

6. 过 O' 点作 aa' 的垂线交 aa' 于 D ，延长 AO 交 $O'D$ 于 C [图 18-13(b)]。

7. 用刻度尺量出 OO' 的长和 OC 的长。

8. 根据关系式 $n = \frac{\sin i}{\sin r} = \frac{OO'}{OC}$ 计算出折射率 n 。

为减小测量的误差，可以先将 OO' 延长到 O'' ，过 O'' 作 aa' 的垂线交 aa' 于 D'' ，延长 OC 交 $D''O''$ 于 C' [图 18-13 (C)]，则 $n = \frac{OO''}{OC'}$ 。

图 18-13

9. 改变 OA 和 aa' 的交角, 测出 n 的值。重做两次, 求出三次的平均值, 即是玻璃的折射率。

【讨论】

1. 试证明: $n = \frac{\sin i}{\sin r} = \frac{OO'}{OC}$ 。

2. 如果给你一个量角器, 如何测定介质的折射率 n?

18.4 全反射

在一般情况下，光的反射和折射现象总是同时发生的。但是在特殊的条件下，入射光在两种介质的分界面上会只发生反射而不发生折射，这种现象叫做全反射。

下面来研究发生全反射现象的特殊条件。

实验 18.12

在装水的玻璃缸底部，放一个具有狭缝的光源，让光源发出的发散光束射向水面（图 18-14），仔细观察随着入射角的增大，反射光和折射光强弱的变化情况。

图 18-14

〔结果〕光从水斜射入空气时，随着入射角增大，折射光逐渐由（强变弱、弱变强），而反射光逐渐由（强变弱、弱变强）。入射角增大到一定程度，折射光消失，发生现象。

当光从光密介质射向光疏介质时，折射角大于入射角，并且折射角随着入射角的增大而增大。这样就有可能在入射角还没有增大到 90° 以前，而折射角已经增大到 90° 。这时折射线就和界面平行，并沿着界面传播。

如果继续增大入射角，入射光就全部反射回光密介质而不进入光疏介质，从而发生全反射现象。通常把折射角等于 90° 时的入射角叫做临界角。但是当光从光疏介质射向光密介质时，折射角永远小于入射角。因此在入射角增大到 90° 时，折射角不可能等于 90° ，所以不会发生全反射现象。

对于确定的两种介质，临界角是确定的。利用光的折射定律公式，可以求出各种介质对空气或真空的临界角。如果用 C 表示临界角， n 表示介质的折射率。由于空气对这种介质的折射率等于 $1/n$ ，因此可以列出

$$\frac{\sin C}{\sin 90^\circ} = \frac{1}{n}$$

即
$$\sin C = \frac{1}{n}。$$

因此，只要知道了介质的折射率，利用上式就可以求出这种介质对空气（或真空）的临界角。

几种透明介质对空气（或真空）的临界角

对于两种介质说来，折射率较小的介质叫做光疏介质，折射率较大的介质叫做光密介质，例如水对玻璃来说是光疏介质，而玻璃对水来说是光密介质。

介质 临界角	水 48 . 5 °	酒精 47 °	水晶 40 . 5 °	金刚石 24 . 4 °	各种玻璃 37 ° ~ 42 °
-----------	---------------	------------	----------------	-----------------	---------------------

在阳光照耀下的露水珠，由于光在进入水珠后在水和空气的界面上发生的全反射，因此看起来特别明亮。

全反射现象在生产技术上的应用十分广泛。图 18-15 是一个截面是直角三角形的直角棱镜，当光线直射到它的斜面上，只要入射角大于玻璃的临界角时，就会发生全反射现象，因此又叫做全反射棱镜。用它来代替潜望镜中的平面镜，效果更好。这是因为平面镜上的反光物质往往容易氧化，时间一长就会发黑，影响反射效果。

图 18-15

最近几十年发展起来的光学纤维就是利用全反射的原理制成的新型光学元件。它是一种由光学玻璃或塑料拉制而成的很细的玻璃丝或透明的塑料丝。一根光学纤维的直径只有 $10\mu\text{m}$ 左右，分为内外两层。内芯材料的折射率为 1.8，在它外面包一层薄膜，折射率约为 1.4。当光从纤维的一端射入，就会在纤维的内壁上通过多次全反射而传播到另一端（图 18-16），这样就可以使光线沿着一条弯曲的路径传播而不会向四周散失。很明显，光学纤维中，内、外两层材料的折射率相差越大，临界角就越小，也就越容易产生全反射现象。

图 18-16

一根光学纤维只能传递一个光点，要传递图象就必须把一根根光学纤维整齐地排列起来，使每一根光学纤维在两端的位置都一一对应。在两端涂上环氧树脂，让它固定之后再磨平抛光，就成为可以传递图象的光导纤维（图 18-17）。

图 18-17

在医学上，光导纤维可以帮助医务人员诊察人体内部深处的病变，例如胃镜就是利用这个原理制成的。

光导纤维的最大优点是柔软、不怕震，无论怎样弯曲都能传光、传象，能起一般光学元件所不能起的特殊作用。

在现代通信技术中，就像无线电技术中把信号调制到无线电波上去一样，把要传送的信号调制到光波上，让光载着信号沿着光导纤维传送出去，就可以实现光纤通信。光纤通信的特点是能够同时传送大量信号，因此采用光纤通信将会引起通信技术的重大变革。

18.5 光的电磁说

光和电磁波在真空中传播速度为什么是相同的？它们是否存在着某种联系呢？

18.5.1 光的电磁说

19世纪60年代，英国理论物理学家麦克斯韦（1831~1879）提出了统一的电磁场理论，也就是电磁波理论。他认为变化的电场和变化的磁场联系在一起形成统一的电磁场，电磁场能以波的形式从它产生的地方向四周传播形成电磁波（图18-19）。他还从理论上得出电磁波传播的速度就是光速，并提出光是一种电磁波，从而建立了光的电磁说。他的这一理论在1888年被赫兹用实验所证实。赫兹通过电磁波的反射、折射、干涉、衍射等实验计算出电磁波的波速和麦克斯韦的预言完全一致，至此，麦克斯韦关于光的电磁说理论得到了证实。

图 18-19

根据光的电磁说理论，光是电磁波中的可见部分，色光的频率范围在 $3.9 \times 10^{14} \sim 7.5 \times 10^{14}$ Hz 之间。色光的频率越高，在同一介质中的传播速度越小，介质对该种频率的色光的折射率越大，这同样和电磁波实验相吻合。

由于各种色光在真空中的传播速度均为 c ，所以色光的频率越高，波长越短。各种色光在真空中的波长和频率的范围见下表。

各种色光的频率和在真空中的波长

色光	红	橙	黄	绿	蓝-靛	紫
频率 (10^{14} Hz)	3.9 ~ 4.8	4.8 ~ 5.0	5.0 ~ 5.2	5.2 ~ 6.1	6.1 ~ 6.7	6.7 ~ 7.5
波长 (μm)	0.77 ~ 0.62	0.62 ~ 0.60	0.60 ~ 0.58	0.58 ~ 0.49	0.49 ~ 0.45	0.45 ~ 0.40

根据麦克斯韦电磁理论，不同频率的电磁波在真空中的传播速度均为光速 c ，同一频率的电磁波在不同介质中频率不变，均为真空中的频率。电磁波在其他介质中传播时速度变小，波长变短。光也同样如此。

18.5.2 红外线、紫外线和 X 射线

红外线是一种不可见光，红外线在1800年为英国物理学家赫谢尔所发现。红外线的频率比红光低，它有明显的热效应，这一效应可以用来加

热物体，工业上广泛应用远红外线来使物体干燥。红外线的波长较长，衍射现象明显，容易透过云雾、烟尘，被广泛应用于红外遥感和红外高空摄影。由于一切发热物体均向外辐射红外线，所以可以在军事上研制红外夜视装置，便于夜间作战。

然而近年来由于红外线应用的日益广泛，红外线污染问题也随之产生。红外线是一种热辐射，对人体可造成高温伤害。较强的红外线可造成皮肤伤害，情况与烫伤相似。波长为 750 ~ 1300nm 的红外线可造成眼底视网膜的伤害；波长在 1900nm 以上的红外线会造成角膜烧伤；人眼若长期暴露于红外线可能会引起白内障。

紫外线同红外线一样属于不可见光，它的频率比紫光高。紫外线在 1801 年由德国物理学家里特所发现。紫外线有明显的化学作用，它被广泛应用于杀菌、消毒。同时，紫外线有较强的荧光效应，能使很多物质发出荧光，我们常用的日光灯和农业上消灭害虫的黑光灯都是用紫外线来激发荧光物质发光的。

紫外线对人体的伤害主要是眼角膜和皮肤。造成角膜损伤的紫外线主要是波长在 250 ~ 305nm 的部分，紫外线对角膜的伤害除剧痛外，还会导致流泪、眼结膜充血和眼睑痉挛等。紫外线对皮肤的伤害作用主要是引起红斑和小水疱，严重时会使表皮坏死和脱皮。

因此我们必须注意避免受强的红外线、紫外线的照射，注意个人用眼卫生。

X 射线是德国物理学家伦琴 (1845 ~ 1923) 在 1895 年发现的比紫外线的频率还要高的电磁波。当时他发现阴极射线的高速电子流射在玻璃管壁上，会使玻璃管壁发出一种看不见的射线。这种射线具有很强的穿透本领，能使荧光物质发出荧光，还能使照相底片感光。后来人们发现高速电子流射到任何固体上都能产生这种射线。X 射线穿透物质的本领跟物质的密度有关，利用这种特性在工业上可以用来检查部件的裂纹和气孔，在医学上还可以用来透视人体和检查体内的病灶。图 18-20 是产生 X 射线的装置，称为 X 射线管。图中 K 是阴极，A 是阳极（又称对阴极）。管内被抽成真空，当 X 射线管的阴、阳极被接在几万伏的高压电源上，就在两极间产生很强的电场，促使由阴极发出的热电子以很大的速率射向对阴极，从而使对阴极激发出很强的 X 射线。

图 18-20

18.5.3 电磁波谱

近代物理的研究成果表明，还有比 X 射线频率更高的电磁波，那就是放射性元素放出的 γ 射线。 γ 射线、X 射线、紫外线、可见光、红外线和无线电波结合起来，构成了范围非常广阔的电磁波谱（图 18-21）。电磁波谱家族中的各个成员之间既有共性，又有个性。它们的共性是都属于电磁波，都具有电磁波的一切性质，都能产生干涉和衍射，但是由于它们的频率不同，最高和最低相差 10^{21} 倍。低频的无线电波，由于波长长而很容易产生干涉和衍射现象，而高频的 X 射线和 γ 射线要观察到它们的干涉和衍射现象就相当困难了。

图 18-21

18.6 光电效应

光的电磁理论对光的反射、折射、干涉、衍射等都能很好地解释。但也就在建立麦克斯韦电磁理论的同时，又发现了光电效应现象，应用电磁理论却不能解释。爱因斯坦克服了这一困难提出了光子说，使人们对光的认识又向前推进了一步。

18.6.1 光电效应

实验 18.13

将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 18-22），观察验电器上的指针。〔结果〕验电器指针_____，表明锌板带了电。

图 18-22

用丝绸摩擦过的玻璃棒靠近与锌板断开的验电器，结果验电器指针的张角增大，说明锌板所带的是正电。

由此可知，锌板被弧光灯照射后，锌板中一部分自由电子从表面飞了出来，使锌板带上正电。这种在光（包括不可见光）的照射下，物体表面发射出电子的现象叫做光电效应，在光的作用下发射出来的电子叫做光电子。大量光电效应实验研究得出光电效应服从以下规律。

1. 光电子的发射几乎是瞬时的，在入射光照后发射的时间不会超过 10^{-9}s 。
2. 任何一种金属都有一个能产生光电效应的最低照射光的频率，叫做极限频率。
3. 光电子的最大初动能随入射光的频率增大而增大，而与入射光的强度无关。
4. 光电流强度与入射光的强度成正比。

光电效应的这些规律，很难用光的电磁波理论来解释。

金属	铯	钠	锌	银	铂
波长 λ_0 (μm)	0.6600	0.5000	0.3720	0.2600	0.1962
频率 ν_0 (10^{14}Hz)	4.545	6.000	8.065	11.53	15.26

18.6.2 光子说

1905 年爱因斯坦在光电效应的实验基础上提出了光子说。他指出：光

的辐射能并不像电磁波理论所认为的那样连续分布的，而是一份一份地集中在一些叫做光子的粒子上，光是由大量光子组成的按光速运动的光子流。每个光子所具有的能量跟它的频率成正比，即

$$E = h \nu$$

式中的 ν 是光的频率，比例常数 $h = 6.63 \times 10^{-34} \text{J} \cdot \text{s}$ ，叫做普朗克常量。

光子说能很好地解释光电效应。

按照光子说，当光照射在金属板上时，光子就与金属中的电子相互作用，电子是通过吸收光子获得能量而逸出金属表面的。电子吸收一个光子，就获得能量 $h\nu$ 。如果入射光的频率 ν 大于金属的极限频率 ν_0 ，那么一个光子的能量就足以使电子克服金属原子核的引力所需做的功而立即逸出金属表面，因而光电子的发射几乎是瞬时的，不需要能量积累的时间。入射光的频率越大，光子的能量就越大，电子所获得的多余能量就转化成为光电子逸出金属表面时的初动能。入射光越强，表示单位时间入射的光子数越多，那么单位时间射出的光电子数也越多，这样光电流就增强了。

18.6.3 利用光电元件控制电路

利用光电效应可以很快地把光信号转化为电信号。光电管就是应用光电效应的原理制成的光电元件。把光电管连接在电路里（图 18-23），当光信号照射在光电管的阴极 K 上，阴极就会发射光电子，使电路接通形成电信号。但在实际应用中，由于光电管产生的光电流很弱，必须用放大器将它放大。

图 18-23

随着科学技术的发展，人们发现某种类型的半导体材料具有把光形式的电磁能直接转变为电能，即当光入射在这样的材料上时，就会引起电流流动，入射的光越强，引起的电流也越大，光电二极管、光电三极管就是利用这种材料制成的。

实验 18.14 用光电元件控制电路

〔目的〕用光电元件控制电路。

〔器材〕光敏元件（81-C 型）、光电二极管（2CU 系列）或光电三极管（3DU 系列），低频小功率管（3AX31C），121 型高灵敏继电器，12V 直流电源，手电筒，220V 红、绿信号灯及交流 220V 电铃。

〔步骤〕

1. 识别各种元件，分辨小功率管的 b、c、e 三个管脚，分辨继电器的接线头和触点，熟悉电路图。

2. 按照图 18-24 将各元件连接好。

图 18-24

3. 接通电源。

4. 将手电筒光照射光敏电阻。

5. 用纸板遮挡手电筒光。

6. 移去纸板。

〔结果〕

1. 接通电源，看到_____灯亮。

2. 用手电筒光照射时，看到_____灯熄灭，_____灯亮，电铃_____。

3. 用纸板遮挡手电筒光后，看到_____。

4. 移去纸板后，看到_____。

18.6.4 光的波粒二象性

光能相互干涉，光能衍射，这些都表明光具有波动性；而在光电效应现象中，却表明光具有粒子性。波动性和粒子性在宏观现象中是对立的、矛盾的，但是对于光子这样的微观粒子，却无法只用其中的一种性质去说明它的一切行为，因此只能认为光具有波粒二象性。实际上光子说并没有否定光的电磁说，光子的能量 $E = h\nu$ 就表明光子具有波的特征。但要注意，光既不能认为是宏观观念中的波，也不能认为是宏观观念中的粒子。

1924 年，法国物理学家德布罗意认为波粒二象性不只是光的本性，提出了一切微观粒子，包括电子、质子和中子都具有波粒二象性的假设。他指出：质量为 m 、速度为 v 的运动粒子也具有波动性，这种波的波长等于普朗克常量 h 跟粒子的质量、速度的乘积 mv 的比，即 $\lambda = \frac{h}{mv}$ 。德布罗

意的这个假设在 1927 年被一系列电子衍射实验所证实，表明一切微观粒子都具有波粒二象性。光所具有的性质就是有波动性和粒子性，也就是光具有波粒二象性。但要注意，光波不是机械波，光的干涉和衍射的本质也和机械波的干涉和衍射完全不同。

本章学习要求

1. 知道光的干涉及其产生的条件。

2. 知道光的衍射及其能够发生明显衍射的条件。

3. 知道光的色散。

4. 理解光的折射定律，理解介质的折射率。5. 会用插针法测定玻璃的折射率。

6. 知道红外线、紫外线、X射线和 γ 射线及其主要作用。

7. 知道光的电磁本性。

8. 知道电磁波谱。

9. 知道光电效应现象的基本规律。

10. 初步学会用光电元件控制电路。

11. 知道光子说，知道光子的能量跟频率有关。

12. 知道光的波粒二象性。

13. 知道一切微观粒子都具有波粒二象性。

19 原子物理的初步知识

直到 19 世纪末，人们一直认为原子是不可再分的。1897 年英国科学家汤姆逊（1856 ~ 1940）从阴极射线的研究中发现了电子。从此，人们认识到原子不是组成物质的最小微粒，原子也具有一定的结构。

原子物理就是物理学中专门研究原子和原子核结构和运动规律的一个分支。它是近代物理学的基础，也是半导体、激光、磁性材料、高能物理等高科技的基础。

19.1 原子核式结构的发现

为了研究原子的内部结构，1903年汤姆逊提出了一种原子模型。他认为整个原子就好像是一个均匀分布的正电荷的球，而电子则是一颗颗嵌在其中的负电荷。

19.1.1 粒子的散射实验

图 19-1

为了证实汤姆逊的原子模型，英国物理学家卢瑟福（1871~1937）研究了由放射性元素放出的高能 α 粒子通过各种物质薄箔而产生散射的情况。1901~1911年他和合作者集中做了用 α 粒子轰击金箔的实验（图 19-2），这就是著名的 α 粒子散射实验。

图 19-2

在一个小铅盒里放少许放射性元素钋，它发射的 α 粒子从铅盒的小孔射出一束射线，射线穿过金箔后在荧光屏上产生闪光。这些闪光可由显微镜观察到。荧光屏和显微镜可以沿以靶为中心的圆板上转动。记下不同散射角上单位时间内的闪光次数，就可以了解到 α 粒子被散射的情况（图 19-3）。

图 19-3

实验发现：绝大多数 α 粒子穿过金箔后仍沿原方向前进，少数 α 粒子产生较大的偏转，极少数 α 粒子产生超过 90° 的大角度偏折，个别 α 粒子被弹回。

19.1.2 卢瑟福模型

粒子散射的实验结果和卢瑟福的初衷竟如此大相径庭，若原子的结构如汤姆逊所述，那么大角度散射是绝对不可能的（图 19-4）。为了解释大角度散射的实验结果，卢瑟福在 1911 年提出了关于原子结构的全新模型（图 19-5）。

图 19-4

图 19-5

卢瑟福模型是：在原子的中心有一个很小的原子核，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核高速旋转。依据 粒子散射实验可以估算出原子核的大小约 $10^{-15} \sim 10^{-14}\text{m}$ ，原子的半径约为 10^{-10}m 。两者相比，原子核的半径是原子半径的万分之一，体积则相差 1 万亿倍，该模型和行星模型很相似（图 19-6）。

19.1.3 玻尔模型

卢瑟福的核式结构模型较好地解释了 粒子大角度散射问题。但是根据经典理论，绕核高速旋转的电子将向外辐射电磁波，使电子能量减小，电子运动的轨道也随之变小，直至电子落入原子核为止，这样的原子结构显然是不稳定的。

为了解决这一矛盾，1913 年丹麦物理学家玻尔（1885~1962）在卢瑟福核式结构模型的基础上，结合普朗克的量子理论，建立了一整套理论假说，确立了玻尔的原子模型，这是原子的早期量子理论。

玻尔原子结构模型的基本假说包含有（图 19-7）：

图 19-7

1. 原子只能处于一系列不连续的能量状态中，在这些状态中的原子才是稳定的，称为定态。处在定态中的原子的核外电子虽然作高速绕核运动，但并不向外辐射能量。

2 原子只有在从一种能量为 $E_{\text{初}}$ 的定态跃迁到另一种能量为 $E_{\text{末}}$ 的定态时，才会发射或者吸收辐射能，辐射能由两定态的能量差决定。根据普朗克理论，发射或吸收的光子的频率 同样也是确定的，即

$$h\nu = E_{\text{末}} - E_{\text{初}},$$

式中的 h 是普朗克常量， $h = 6.63 \times 10^{-34}\text{J} \cdot \text{s}$ 。

根据玻尔理论，原子只能处于一定的稳定状态，原子由一种稳定状态跃迁到另一种稳定状态时才能辐射或吸收一定频率的光子。某一种元素的原子，处于被激发状态时只能放射出有限的几种具有一定频率的光子。玻尔关于原子只能处于一系列不连续的能量状态中的假设于 1914 年由德国物理学家弗兰克（1882~1964）和赫兹所做的著名实验所证实。

19.1.4 光谱

实验 19.1

使用分光镜观察光谱，分光镜的构造原理如图 19-8 所示。它是由平行光管 A、三棱镜 P、望远镜 B 组成。平行光管 A 的前方有一个宽度可以调节的狭缝 S，从狭缝射出的光经凸透镜 L_1 折射后变成平行光线射到三棱镜 P 上。不同频率的光经过三棱镜两次折射后产生不同程度的偏折，并在透镜 L_2 后面的平面 MN 上会聚成不同颜色的象，形成一组谱线。这些谱线可用望远镜观察，也可用照相底片摄取。

图 19-8

用分光镜观察酒精灯的火焰，看到的谱线是由连续分布的一切波长组成的光带，叫做连续光谱。炽热的固体、液体和高压气体都能产生连续光谱。

由稀薄气体或蒸气在高温下发光，在分光镜中看到的是一些不连续的明线所组成的光谱叫明线光谱。明线光谱又称原子光谱。

高温物体发出的白光穿过温度较低的蒸气或气体后所形成的、在连续光谱的背景上分布着许多暗线所组成的光谱叫做吸收光谱。例如让弧光灯发出的白光，穿过温度较低的钠蒸气，用分光镜观察可以看到在连续光谱上有两条和钠的明线光谱谱线相对应的暗线。科学研究表明，任何一种原子的吸收光谱中的每一条暗线都跟该种原子发射的明线光谱中的一条明线相对应，这表明低温气体原子所能吸收的光跟它在高温时所能发出的光是一致的。

19.2 玻尔理论对氢原子光谱的解释

早在 19 世纪 20 年代，人们就发现每种元素的原子都能发出某些具有特定波长的光谱线。元素不同，光谱也不同。这一节先介绍一些关于原子光谱的知识，再说明玻尔理论是怎样对氢原子光谱的规律进行解释的。

实验 19.2

将一支充有低压氢气的氢光谱管，接在高压电源上，当光谱管中稀薄氢气放电时，通过分光镜观察，并摄取它的光谱，可以发现它的谱线是由几条频率固定不变的紫、蓝、红色谱线组成的。

20 世纪初人们仔细研究了氢光谱，发现氢光谱有两个谱线系：一个叫巴尔末系，有四条可见光谱线和一些紫外光谱线组成；另一个叫帕邢系，在红外区。

经测定，氢光谱巴尔末系的四条可见光谱线的频率和能量分别是（图 19-9）。

图 19-9

$$\begin{aligned} H_{\text{H}} &= 4.57 \times 10^{14} \text{Hz}, E_{\text{H}} = h \nu_{\text{H}} = h \nu_{\text{H}} = 1.89 \text{eV} \\ H_{\text{H}} &= 6.17 \times 10^{14} \text{Hz}, E_{\text{H}} = 2.55 \text{eV} \\ H_{\text{H}} &= 6.91 \times 10^{14} \text{Hz}, E_{\text{H}} = 2.86 \text{eV} \\ H_{\text{H}} &= 7.31 \times 10^{14} \text{Hz}, E_{\text{H}} = 4.85 \text{eV} \end{aligned}$$

根据玻尔理论，氢原子只能处于一系列不连续的能量状态之中，氢原子的各个定态的能量值叫做氢原子的能级。在正常情况下，氢原子处于最低能级，这时电子在离核最近的轨道上运动，这种定态叫做基态。当氢原子吸收了一定量的外界辐射能后，就会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，这种定态叫激发态。处于激发态的氢原子是不稳定的，它会向较低的激发态和基态跃迁，跃迁时释放出来的能量以光子形式向外辐射，这就是原子发光现象，原子发光的能量等于两能级间的能量差（图 19-10）。

图 19-10

氢原子的基态能量： $E_1 = -13.6 \text{eV}$ 。

氢原子的激发态能量： $E_n = \frac{1}{n^2} E_1$ （ n 为正整数）。

其中：
$$E_2 = \frac{1}{2^2} E_1 = -3.40\text{eV}。$$

$$E_3 = \frac{1}{3^2} E_1 = -1.51\text{eV}。$$

$$E_4 = \frac{1}{4^2} E_1 = -0.850\text{eV}。$$

$$E_5 = \frac{1}{5^2} E_1 = -0.544\text{eV}。$$

氢原子由高激发态跃迁到 E_2 激发态时放出的能量为：

$$E_3 - E_2 = [-1.51 - (-3.40)]\text{eV} = 1.89\text{eV}。$$

$$E_4 - E_2 = 2.55\text{eV}。$$

$$E_5 - E_2 = 2.86\text{eV}。$$

和氢光谱巴尔末系几条谱线的实测能量对照可知：

$$E_3 - E_2 = E_H 。$$

$$E_4 - E_2 = E_H 。$$

$$E_5 - E_2 = E_H 。$$

按照玻尔理论计算的结果和氢光谱巴尔末系可见光范围内谱线能量的实测结果相一致，可见巴尔末系的谱线就是由氢原子从高激发态向第二轨道跃迁时所发出的光子形成的（图 19-11）。

图 19-11

此后，又在紫外区域和远红外区域发现了氢光谱的另外一些谱线系，这些谱线系的谱线能量的实测值也同样和玻尔理论电子跃迁时的计算值符合得很好。

玻尔理论在解释氢原子光谱的规律上获得了极大的成功，但在解释其他比较复杂的原子光谱时却遇到很大的困难。这表明玻尔理论具有很大的局限性，问题在于玻尔在引进量子观念的同时，保留了过多的经典物理的理论，对经典物理的改造还不够彻底。然而玻尔理论毕竟在引进量子观念上跨出了重要的一步，在物理学的发展史上有着不可磨灭的功绩。

19.3 放射性元素的衰变

人类认识原子核有复杂结构和掌握它的变化规律，是从发现天然放射现象开始的。

19.3.1 天然放射现象

1896年，法国物理学家贝可勒尔（1852~1908）在研究荧光矿物的性质时发现，硫酸钾铀能够发射出一种穿透力很强、并可使照相底片感光的不可见射线，这种现象就称为天然放射现象。物质发射出射线的性质叫放射性，具有放射性的元素叫做放射性元素。

在贝可勒尔的建议下，法国籍波兰物理学家、化学家玛丽·居里（1867~1934）和她的丈夫皮埃尔·居里（1859~1906）一起，发现所有的铀矿石都具有放射性，但是其中有一种沥青铀矿的放射性，比从它含有的铀量所能预期的放射性还要强四倍。她认为在沥青铀矿中一定存在着某种未知的放射性很强的元素。于是在实验室中，从沥青铀矿中艰辛地寻找这种微量的未知元素。结果他们于1898年7月发现了钋，同年12月又发现了镭。钋(Po)的命名是为了纪念居里夫人的祖国波兰。1903年，居里夫妇与贝可勒尔共同获得了诺贝尔物理学奖。

图 19-12

以后，人们发现原子序数 84 以后的所有元素都具有天然放射性。

19.3.2 放射性射线的性质

从放射性元素中放射出来的射线究竟是什么？像研究 X 射线一样，把放射性元素放到电场和磁场中加以研究，发现不同的放射性元素所放出的射线并不是完全一样的。采用多种放射源来做实验，发现射线的种类有三种。

在图 19-13 所示的实验示意图中，下部是一个铅盒，把微量的放射源放在铅盒底部，由于射线不能穿透很厚的铅板，因此由放射源放出的射线就沿铅盒上方的小孔向外射出。将整个装置放在电场中，可以从照相底片感光的位置发现，射线在电场的作用下分成了三束。这表明三种射线在电场中偏转情况不一样。

你能从图 19-13 中看出三种射线带电的情况吗？

图 19-13

我们称带正电的射线为 α 射线，带负电的射线为 β 射线，不带电的射线为 γ 射线。

进一步的研究表明： α 射线是一种高速的 α 粒子流，而 α 粒子就是氦原子核，它带 2 个基本电荷的正电，质量是氢原子质量的 4 倍，其速度约为光速的 $\frac{1}{10}$ 。 β 射线是一种高速的 β 粒子流， β 粒子就是电子，带一个

基本电荷的负电，质量极小，约是 α 粒子的 $1/7000$ ，其速度接近光速。

γ 射线则是一种高速的 γ 光子流，即波长很短 ($10^{-10} \sim 10^{-13}\text{m}$) 的电磁波，具有很大的能量。它不带电，因而在电场中不发生偏转。

这三种射线都具有电离作用，凡是射线经过的地方，周围空气会发生电离，其中 α 射线的电离作用最强， β 射线较弱， γ 射线最弱。它们还能穿透一般可见光所不能穿透的物质，其中 α 射线的穿透本领最强， β 射线较弱， γ 射线最弱。另外，这三种射线对照相底片都有感光作用，都具有杀菌和破坏植物种子的发芽能力，还能使某些化合物产生荧光等。

19.3.3 放射性元素的衰变

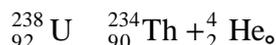
人们发现，放射性元素的原子核在自发地放出射线以后，它本身就转变成另一种新的原子核。我们把原子核由于放出某种射线而转变为新核的变化，叫做原子核的衰变。

原子核衰变前后的电荷数 Z 相同，质量数 A 也相同。核变化的过程可以用核的代号和核反应方程表示出来。原子核的代号由元素符号、电荷数(原子序数)和质量数组成。假定某元素符号为 X ，在其左上角标出质量数 A ，左下角标出电荷数 Z ，

则 ${}^A_Z X$ 就是某元素 X 的原子核代号。例如，铀 238 原子核代号是 ${}^{238}_{92}\text{U}$ ；

α 粒子 (氦原子核) 的代号是 ${}^4_2\text{He}$ 。电子是带负电荷的粒子，质量极小，用代号 ${}^0_{-1}\text{e}$ 表示。

原子核放出 α 粒子的衰变叫做 α 衰变。放射性元素的原子核进行一次 α 衰变后，电荷数减少 2，新核在周期表上的位置要向前 (左) 移动 2 格；同时，质量数减少 4。例如，铀核 ${}^{238}_{92}\text{U}$ 进行一次 α 衰变后就变为钍核 ${}^{234}_{90}\text{Th}$ ，其衰变方程是

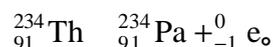


钍核 ${}^{234}_{90}\text{Th}$ 也具有放射性，它能放出 α 粒子。原子核放出 α 粒子的衰变叫

在原子核物理中，把基本电荷作为电量的单位，原子核的带电量就是基本电荷的整数倍。

把碳 12 原子质量的 $1/12$ 取作质量单位，叫做原子质量单位，用符号 u 表示。原子核的质量数非常接近整数，习惯上都用整数表示。

做衰变。钍核 ${}_{90}^{234}\text{Th}$ 进行一次衰变，由于 β^- 粒子带一个负电荷，新核的电荷数就会增加1，在元素周期表中就要向后（右）移动一格，成了镤核 ${}_{91}^{234}\text{Pa}$ ，其衰变方程可写成



放射性元素的原子核在放出 α 射线或 β 射线后，新的原子核往往处于激发状态辐射出 γ 光子，也就是发射出 γ 射线。可见， γ 射线总是伴随着 α 射线或 β 射线产生的。某一块放射性物质连续发生衰变时，有的原子核发生 α 衰变，有的发生 β 衰变，同时又伴有 γ 辐射，从总体上看就同时有 α 、 β 、 γ 三种射线发射出来。

19.3.4 半衰期

放射性原子核的衰变存在着一定的规律。我们把放射性元素有半数的核发生衰变所需要的时间称为这种核的半衰期。各种放射性元素都有一定的半衰期，不同的放射性元素的半衰期是不同的，甚至差别很大。例如，氡核 ${}_{86}^{222}\text{Rn}$ 衰变为钋核 ${}_{84}^{218}\text{Po}$ 的半衰期只有3.8天，而镭核 ${}_{88}^{226}\text{Ra}$ 衰变为氡核 ${}_{86}^{222}\text{Rn}$ 的半衰期要1620年，铀核 ${}_{92}^{238}\text{U}$ 衰变为钍核 ${}_{90}^{234}\text{Th}$ 的半衰期竟长达45亿年。

图 19-14 中的纵坐标表示某放射性物质中未衰变的原子核数(N)占原来总原子核数(N_0)的百分比 $[(N/N_0) \times 100\%]$ ，横坐标表示衰变时间。

那么，从图线中能否找出这种放射性物质的半衰期是多少？

图 19-14

放射性元素的半衰期是由原子核内部本身的因素决定的，跟原子所处的物理状态和化学状态无关。实验证明，几千摄氏度的高温、几十百万帕的高压或强磁场都不能显著地影响放射过程的衰变速率。对于某种放射性元素，不管它是单质还是化合物，都不能改变它的半衰期。

19.4 原子核的人工转变

天然放射现象的发现，使人们认识到原子核内部有复杂的结构，而且原子核可以发生变化成为新的原子核。那么，能否用人工方法把原子核“轰开”，从而使它发生变化呢？原子核内部究竟是由什么东西组成的呢？

19.4.1 原子核的人工转变

1919年英国物理学家卢瑟福在实验里第一次成功地实现了原子核的人工转变。卢瑟福实验装置的示意图如图19-15所示。A是装气体的密封盒子；B是涂有放射源（镭，发射高速 α 粒子，其速度达 $2 \times 10^7 \text{m/s}$ ）的架子；S是一张薄的铝箔，它的厚度刚好能吸收镭放出的 α 粒子；S后放一片涂有硫化锌的荧光屏F。A室内不充气时， α 粒子全被铝箔吸收，在F屏上看不到闪烁的光点；如果A室内充以氮气，可以在F屏上看到闪烁；如果抽去氮气，换进氧气或二氧化碳，F屏上的闪烁又看不见了。很明显，A室内充氮气时荧光屏上的闪光是 α 粒子击中氮核后产生的新粒子透过铝箔而引起的。进一步用电场、磁场中偏转的实验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。

图 19-15

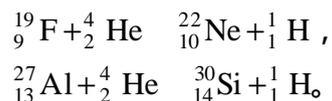
那么，打中氮核的 α 粒子到哪里去了呢？

氮核俘获了 α 粒子后成为新的原子核，从质量数守恒和电荷数守恒可以知道，新产生的核的质量数是17，电荷数是8，可见新核是氧原子核。写成核反应方程



这一结论后来为云室中摄的照片所证实。氮核受到 α 粒子轰击后转变成了氧核。

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。例如：



既然多种原子核在 α 粒子的轰击下都能放出质子，这就表明氢原子核——质子是原子核的组成部分。

19.4.2 中子的发现

由于原子核的质量大体上是质子质量的整数倍，假定原子核全部由质子组成，那么根据元素的原子序数就可以预言它的原子量。但实际情况并非如此，例如氧的原子序数是 8，原子量是 16；铀的原子序数是 92，原子量是 238 等。除了氢之外，所有元素都反映出类似的情况，这就使人们提出了这样一个问题：原子核中除了质子的质量之外，多余的质量应当怎样解释呢？卢瑟福根据这一事实，预言原子核内可能还存在着跟质子的质量相等的不带电的中性粒子。

1930 年，用 α 粒子去轰击铍、锂、硼等元素，发现有一种穿透力很强的不带电的射线放出，它几乎不能使气体电离。当时物理学家们以为这是射线。1932 年约里奥·居里夫妇用这种射线通过石蜡时，竟从石蜡中打出了质子来（图 19-16）。根据能量的测定和计算表明，光子绝对不可能从石蜡中打出质子来。后来由卢瑟福的学生、英国物理学家查德威克（1891 ~ 1974）于同年根据实验结果确定，这种新的射线是质量接近于质子的不带电的粒子流，这种粒子叫做中子，其符号可写作 ${}^1_0\text{n}$ 。

图 19-16

发现中子实验的核反应过程可表示为



后来，科学家又做了许多实验，发现在 α 粒子的轰击下，原子核可能放出质子，也可能放出中子。这就表明中子也是原子核的组成部分。

中子由于不带电，经过物质时不会和原子中的电子发生电磁作用，因而能量损失很小，中子具有强大的穿透能力（能穿透几十厘米厚的铅层）；同时又不会受到原子核电场的排斥作用，容易进入原子核而使核分裂。实验表明， α 粒子只能分裂轻元素的原子核，而中子几乎能使一切元素的原子核分裂。所以中子是进行原子核人工转变良好的核“炮弹”。

19.5 原子核的组成

中子被发现以后，物理学家海森伯和伊凡宁柯立即创立了原子核的质子-中子结构学说，即原子核是由质子和中子组成的理论。这个理论不久就获得了普遍的承认。质子和中子统称为核子。

在原子核中，只有质子带正电，因此原子序数 Z 就等于核内的质子数。又因为中子的质量接近于质子，所以原子核的质量数 A 就等于核内的质子数和中子数的总和。由此可见，核内的中子数 $N = A - Z$ 。例如，氢核具有2个质子和2个中子，铀核 ${}_{92}^{238}\text{U}$ 有92个质子和146个中子。下表所列的是元素周期表中前三个元素的原子核组成的情况。(表中 \otimes 表示质子， \circ 表示中子)

	氢原子核	氦原子核	锂原子核
核的组成	\otimes		
核代号	${}^1_1\text{H}$	${}^4_2\text{He}$	${}^7_3\text{Li}$
质子数	1	2	3
中子数	0	2	4

在原子核中，质子间具有很大的静电斥力，而原子核仍处于稳定状态，这表明核子间必定还存在着一种强大的力才能克服质子间的静电斥力。这种核子间的力叫做核力。

核力作用范围极小，当核子间距离在 10^{-15}m 以内时，核力约为电磁力的 10^3 倍，但是当距离大于 10^{-15}m 时，核力很快地减少到接近于零。各种核子间（中子与中子、质子与质子或中子与质子）的核力大致是相等的，与核子是否带电无关。

对于核力的性质目前了解得很少，有待于进一步研究。

19.6 *放射性同位素

具有相同质子数的原子可以有不同的质量数，也就是可以有不同的中子数。这些原子具有相同的核外电子数，因而有相同的化学性质，在元素周期表中占有同一位置，属于同一种元素。这些具有相同质子数和不同中子数的原子称为同位素。下面表格所列的是氢和氘的两种同位素。

名称	核代号	质子数	中子数	自然界中存在面分比
氢(H)	${}^1_1\text{H}$	1	0	99.984 %
同位素氘(D)	${}^2_1\text{H}$	1	1	0.015 %
同位素氚(T)	${}^3_1\text{H}$	1	2	0.001 %不到

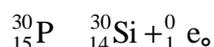
在元素周期表中标出的某种元素的原子量，是根据天然存在的同位素在自然界中存在的比例计算出来的。氢的原子量是 1.00797。

1934 年，约里奥·居里夫妇在用 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。正电子的质量与电子相同，带一个单位的正电荷，也称为是电子的反粒子。当移走 α 粒子放射源以后，铝箔停止发射中子，但仍继续发射正电子。这是怎么回事呢？

根据 α 粒子轰击铝核的核反应方程



知道核反应后生成的新核是磷的同位素。可见，正电子是由磷 30 衰变发射出来的。用 ${}^0_1\text{e}$ 表示正电子，磷 30 的衰变方程可写成



像磷 30 这种具有放射性的同位素就叫做放射性同位素。由于自然界中的放射性同位素比较稀少，约里奥·居里夫妇的发现开辟了获得人工放射性同位素的道路。

放射性同位素在工业、农业、医疗卫生和科学研究等方面都得到了广泛的应用。

放射性同位素主要有两方面的应用。

(1) 利用它的射线应用放射性同位素的射线，首先应根据射线的种类、强度、半衰期、能量等选择适当的射线源，当然还应当考虑供应射线的方式是否方便，价格高低以及是否容易发生放射污染等问题。

利用射线的贯穿本领，可以探知物体内部的缺陷，检查成品的质量。例如，射线探伤法检查金属铸件内部有没有砂眼或裂纹，可以检查深达 30cm 处的伤痕，而且可以把放射源放到器件内部去操作，使用方便。

利用射线对有机体的物理、化学效应，在医疗卫生上可以治疗癌症，杀菌消毒，特别适宜于不耐高温的药物器具和手术器械的消毒；在食品工业中，通过低剂量射线辐照可以抑制马铃薯的发芽以便长期保存等。

利用射线的电离作用，可以用来消除电的不良导体在迅速运输过程中

积累的静电荷。在生产设备的适当部位装上有放射源的静电消除器，放射源发出的射线使空气分子电离，变成导电气体，积累的静电荷就通过空气“漏去”

(2)用作示踪原子把放射性同位素的原子掺到其他物质中去，让他们一起运动、迁移、变化，再用放射性探测仪器进行追踪，就可以知道放射性原子通过什么途径，运动到什么部位，又是如何分布的，从而了解某些不容易察明的情况或规律。人们把作为这种用途的放射性同位素叫做示踪原子。用放射性同位素作示踪剂，研究化学、生物或其他过程的方法称为同位素示踪法。

同位素示踪法的应用非常广泛。

在生命科学中，可以观察到生物体内或细胞内生理、生化过程，认识生命活动的物质基础。

在医学上示踪原子主要用于诊断疾病。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 131 的放射性，就可以确定肿瘤的部位和范围。

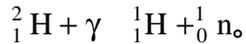
在农业、畜牧业上广泛应用于农业科学的研究。如施肥途径和肥效的研究；杀虫剂、除莠剂对昆虫和杂草的作用；激素、维生素、微量元素、饲料、药物对家畜生长和发育的影响等。

19.7 *核能

原子核是由核子组成的。核子间存在着强大的核力。由分散的核子结合成原子核，或原子核分解为核子时，都伴随着巨大的能量变化。例如，一个质子和一个中子结合成氘核时，要放出 2.22MeV 的能量，以 γ 射线形式辐射出去。这种能量叫做核能，也叫原子能。其核反应方程是



反之，若以 γ 射线照射氘核，则氘核可分解成一个质子和一个中子



但是， γ 光子的能量小于 2.22MeV 时，这个反应不会发生，只有当 γ 光子的能量等于或大于 2.22MeV 时，氘核才能分解。

经过精确的测量表明，几个独立存在的核子的质量和总要略大于由这些核子组成的原子核的质量。我们把这个质量差值叫做原子核的质量亏损。

一个质子和一个中子可以组成一个氘核，但质子与中子的质量和略大于氘核的质量。在进行计算时，为方便起见，采用原子质量单位 u 表示质量大小。

中子质量	$m_n = 1.008665u$,
质子质量	$m_H = 1.007276u$,
中子和质子质量和	$m = 2.015941u$,
氘核质量	$m_D = 2.013553u$,
质量亏损	$m = 0.002388u$ 。

爱因斯坦在相对论研究取得进展的时候，提出了质量和能量相互联系的质能联系方程

$$E = mc^2,$$

简称质能方程。这个方程告诉我们：物体具有的能量跟它的质量之间存在着简单的正比关系。当物体能量改变时，必定伴随着相应的质量变化。分散的核子结合成原子核时出现了质量亏损 m 表明在这个过程中释放了能量 E ，而

$$E = m \cdot c^2,$$

式中 c 表示光速。

可见，利用质量亏损的数值可以用来计算核子结合成原子核时释放出的能量。在上述例子中，若取 $1u = 1.660566 \times 10^{-27}\text{kg}$ ，则质量亏损 $m = 0.002388 \times 1.660566 \times 10^{-27}\text{kg} = 3.96543 \times 10^{-30}\text{kg}$ 。那么，根据爱因斯坦质能联系方程可知

1eV = 1.602 × 10⁻¹⁹J。

1u = 1.660566 × 10⁻²⁷kg。

$$E = m \cdot c^2 = 3.96543 \times 10^{-30} \times (3 \times 10^8)^2 \text{J} = 2.22 \text{MeV}.$$

这个能量值跟前面所提到的实验结果符合得很好。

[例题] 碳原子核的质量是 12.000000u，碳原子核可以看成由 6 个氢原子核（质量是 1.007276u）和 6 个中子组成的，那么这些核子结合成碳原子核时释放的能量是多少电子伏？如果每个碳原子在燃烧过程中释放出来的化学能是 4eV，那么核能与化学能相比，核能是化学能的多少倍。

$$\text{解 } m = (6 \times 1.007276 + 6 \times 1.008665) \text{u} - 12.000000 \text{u}$$

$$= 0.038457 \text{u},$$

$$E = m \cdot c^2 = 0.038457 \times 1.660566 \times 10^{-27} \times (3 \times 10^8)^2 \text{J}$$

$$5.74 \times 10^{-12} \text{J}$$

$$35.8 \text{MeV},$$

$$\frac{E}{E'} = \frac{35.8 \times 10^6}{4} = 8.95 \times 10^6 \text{ (倍)}.$$

由核子结合成碳原子核释放的能量是 35.8MeV，核能是化学能的 8.95×10^6 倍。

从上述计算中，说明原子核内部蕴藏着巨大的能量。如何将核能从原子核内部释放出来，为人类造福，这是物理学家们的一个重要研究课题。

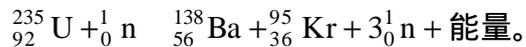
19.8 *重核裂变

19.8.1 铀核的裂变

1938年，哈恩和斯特拉斯曼发现铀核被中子轰击后出现了钡的放射性同位素。证实了这是铀核在俘获一个中子后发生的一个重核分裂为两个中等质量的核反应过程，这种反应过程称为裂变。后来我国科学家钱三强、何泽慧又发现了非常罕见的三分裂和四分裂的裂变。

重核裂变时产生的“裂变碎片”往往具有很强的放射性，而且其质量亏损也很大，因而伴随着巨大的能量变化。

铀 235 裂变的一个可能是分裂成钡 138 和氪 95，放出三个中子并释放大量的核能。写成核反应方程



通过计算可知，反应后质量亏损约 0.3u，根据爱因斯坦质能方程就可求出释放出的原子核能约为 280MeV。

在不同的反应中，铀核释放的能量也不同。一般来说，一个铀原子核裂变时放出的能量约在 200MeV 以上，是一个碳原子氧化时放出的化学能 (4eV) 的 5×10^7 倍左右。即 1kg 铀全部发生裂变，放出的能量相当于 2500t 优质煤完全燃烧时放出的化学能。

19.8.2 链式反应

要使裂变所释放的能量有实际应用意义，必须有大量的铀核裂变。铀核的裂变过程所以能连续发生，因为一个铀核裂变时，除了碎片之外，还要发出两个到三个中子。这些中子又能引起两、三个铀核的裂变，依次使裂变反应不断进行下去，这样的反应过程叫做链式反应。图 19-17 所示是链式反应的示意图。

19.8.3 临界体积

裂变反应中铀块的体积对于是否能产生链式反应，也是一个重要的因素。由于原子核非常小，如果铀块体积不够大，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，铀核的新的裂变就会中断。能够发生链式反应的铀块的最小体积叫做临界体积。

原子弹是利用链式反应在极短的时间内使大量的铀核裂变而释放原子核能的爆炸武器。图 19-18 就是原子弹构造示意图。把浓缩铀制成两个半球形块，分开安置，每块铀的体积都小于它的临界体积。当需要爆炸时，利用引爆装置使这两个半球形铀块迅速合并起来，体积就超过了临界体积

而发生裂变，在极短时间内可引起强烈的爆炸。

图 19-18

1964 年 10 月 16 日，我国爆炸了一颗原子弹，成功地进行了第一次核试验（图 19-19、图 19-20）。这是我国人民加强国防、保卫祖国的重大成就，也是我国人民对于保卫世界和平事业的重大贡献。正如我国政府声明中指出的：“中国政府一贯主张全面禁止和彻底销毁核武器”；“中国发展核武器，不是由于中国相信核武器的万能，要使用核武器，恰恰相反，中国发展核武器，正是为了打破核大国的核垄断，要消灭核武器”。

图 19-19

图 19-20

我国一贯主张原子能应用于和平建设上。30 多年来，我国在原子能的和平利用方面已经取得了不少成就。

19.9 *原子核反应堆

19.9.1 核反应堆

链式反应提供了释放原子能的有效方法。1942年，费密领导的科学家小组建成了世界上第一座人工的裂变反应堆，它用人工的方法控制链式反应的速度，使核能比较平稳地释放出来。这是原子能时代的一个重要里程碑，开创了原子能和平利用的新纪元。

反应堆（图 19-21）的核心部分是堆芯，又称活性区。堆芯主要由燃料元件（具有特定形状和结构的核燃料）、减速剂、控制棒和一些结构部件等组成的，还需要有冷却剂流过堆芯。一般情况下在堆芯周围设有反射层，把逃逸的部分中子送回堆芯，以减少中子的损失。反射层以外是堆的壳体，再外面是屏蔽层。

图 19-21

大多数反应堆采用圆棒形燃料元件。可以用天然铀，也可以用浓缩铀作裂变材料。图 19-22 所示的二氧化铀小棒在裂变后释放的能量相当于 10t 煤完全燃烧放出的化学能。

图 19-22

核反应堆发出的功率完全取决于中子产生的速率，也就是链式反应的速度，这可以由抽出或插入控制棒来实现控制反应速度。

19.9.2 核电站

自从 20 世纪 40 年代反应堆问世以来，反应堆技术有了很大的进展。1954 年，苏联建成了世界上第一座利用核能发电的核电站，当时它的发电功率是微不足道的。目前全世界已建立的 425 座核电站，总发电功率为 $3.36 \times 10^8 \text{kW}$ ，占世界总发电能力的 17%，而且还有 100 余座核电站正在兴建。核电与水电、火电成了当代电力的三大支柱。

核电站是利用裂变反应堆放出的核能使水汽化，以推动汽轮发电机发电的发电厂。它的核心部分是原子核反应堆。与其他动力工厂（如火力发电厂）相比，不同之处仅仅在于汽轮机所用的蒸汽其产生的方法不同（图 19-23）。

图 19-23

核电站所产生的放射性物质一般是不允许泄漏到环境中去的，由于核电站设置了三道屏障（燃料包壳、压力壳、安全壳），可以防止放射性物质外逸，确保不污染环境，不危害周围居民（图 19-24）。

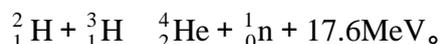
图 19-24

我国第一座自行设计、自行建造的核电站——秦山 3.0×10^5 kW 压堆核电站，于 1985 年 3 月正式开建，通过电站建设者的辛勤劳动，已于 1991 年 12 月并网发电。它表明我国已较为全面地掌握了核电技术，并为秦山二期两个 6.0×10^5 kW 机组的建设打下良好基础。中国大陆无核电的历史已宣告结束。

19.10 *轻核聚变

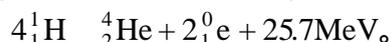
19.10.1 聚变

当几个轻核结合成 ${}^4_2\text{He}$ 、 ${}^9_4\text{Be}$ 等核时，也可以放出巨大的原子核能来。例如



像这种把几个轻核聚合成一个较重的原子核的反应叫做轻核的聚变。与重核裂变相比，轻核聚变一次所释放的能量虽然较少，但由于轻核质量小，1g轻核聚变所释放的能量要比1g重核裂变所释放的能量大好几倍。

1938年，天文物理学家汉斯·贝蒂提出：太阳及其他恒星之所以能持久地产生巨大的能量，是由于轻核的聚变，其核反应方程是



19.10.2 热核反应

要使核发生聚变，必须使它们接近到 10^{-15}m 的距离，也就是接近到核力能够发生作用的范围。为了克服带正电荷的原子核之间的静电斥力，必须使它们达到几百万摄氏度以上的高温，这时原子外层的电子完全变成了自由电子，这种完全电离了的物质称之为物质的第四态——等离子态。处于等离子态的部分原子核具有了足够的动能克服库仑斥力，在互相碰撞中接近到可以发生聚变的程度。可见，聚变必须在高温下发生。所以轻核聚变也叫作热核反应。

怎样才能得到聚变所需的高温呢？从上节学习的内容可以知道，原子弹爆炸可以得到高温。我们就利用原子弹来引起热核反应。氢弹就是这样设计制造出来的。

19.10.3 可控热核反应

如果热核反应能够控制，把它作为一个能源，那是非常理想的。热核反应所需要的原料氘，在世界上的储量非常大。通过计算可知，假如地球上所有海水中的氘都能起聚变反应，那么它所产生的能量可以供人类使用几百亿年！从这里可以看出聚变反应有多么大的现实意义，从而可以理解人们为什么对可控热核反应的研究特别重视。可控热核反应的实现，将使人类解决了廉价而大量的动力来源，使人类社会的生产力推向更高峰。

目前，世界上许多国家都在积极研究可控热核反应的理论和技术。最近，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”，已在四川省乐山地区建成，并于1984年9月顺利启动。它标志着我国研究

可控热核反应的实验手段又有了新的发展和提高，并将为新能源的探索奠定基础。

原子核物理的发展促使人们在微观世界中向更深的层次进行探索。人们在发现天然放射现象和原子的核式结构的基础上，开始了对宇宙射线的研究。从此，科学家们对物质结构的研究，从原子、原子核进入到了基本粒子的领域。大量的实验结果告诉我们，基本粒子实际上不基本，它也是可分的。这种对微观粒子的认识，进一步证实了物质是无限可分的，自然界是无限的，因而人类认识世界、改造世界的斗争也是永远没有止境的。

本章学习要求

1. 知道 α 粒子的散射实验，知道原子的核式结构模型。
2. 知道玻尔模型。知道玻尔理论对氢原子光谱的解释。
3. 知道光子的发射与吸收。
4. 知道 α 、 β 、 γ 射线的本质和性质，知道放射性元素的衰变和衰变及其衰变方程，知道放射性元素的半衰期。
5. 知道原子核的人工转变方程，知道质子、中子的发现及核反应方程。
6. 知道原子核的组成。

说 明

本教材根据上海中小学课程教材改革委员会制订的《高中物理学科课程标准》（修改稿）编写，供二年级试用。

本教材由闸北区教育局组织编写，经上海中小学教材编审委员会审查通过。

主编 汪思谦 副主编 林在珩

参加本册教材编写的有王振文、俞南薰、沈菁华、郭成宝、陈炜、谭玉美等。

