



普通高中教科书

物理

WULI

必修

第三册



上海科学技术出版社

普通高中教科书

物理

必修

第三册

上海科学技术出版社

主 编：蒋最敏 高 景

本册主编：严 明

编写人员：(以姓氏笔画为序)

王肇铭 严 明 李沐东 陈琪琪 赖佳颖

责任编辑：施 成 张 燕 李林高

美术设计：房惠平

普通高中教科书 物理 必修 第三册

上海市中小学（幼儿园）课程改革委员会组织编写

出 版 上海世纪出版（集团）有限公司 上海科学技术出版社

（上海市闵行区号景路159弄A座9F-10F 邮政编码201101）

发 行 上海新华书店

印 刷 上海新华印刷有限公司

版 次 2021年1月第1版

印 次 2025年8月第5次

开 本 890毫米×1240毫米 1/16

印 张 9.25

字 数 195千字

书 号 ISBN 978-7-5478-5220-0/G · 1025

定 价 11.60元

版权所有·未经许可不得采用任何方式擅自复制或使用本产品任何部分·违者必究

如发现印装质量问题或对内容有意见建议，请与本社联系。电话：021-64848025，邮箱：jc@sstp.cn

全国物价举报电话：12315

声明 按照《中华人民共和国著作权法》第二十五条有关规定，我们已尽量寻找著作
权人支付报酬。著作权人如有关于支付报酬事宜可及时与出版社联系。

目 录

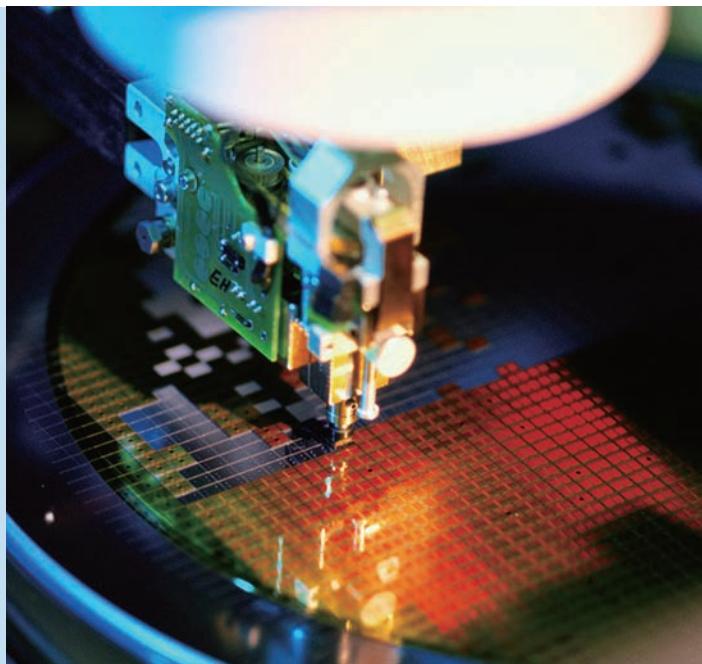
第九章 · 静电场 / 1

- 第一节 静电现象 电荷 / 2
- 第二节 电荷的相互作用 库仑定律 / 7
- 第三节 电场力 电场强度 / 13
- 第四节 电势能 电势 / 20
- 第五节 带电粒子在电场中的运动 / 26
- 第六节 电容 电容器 / 33
- 第七节 静电的利用与防范 / 40



第十章 · 电路及其应用 / 48

- 第一节 简单串联、并联组合电路 / 49
- 第二节 电阻定律 / 55
- 第三节 测量金属丝的电阻率 / 60
- 第四节 多用电表 / 67
- 第五节 闭合电路欧姆定律、电源电动势及内阻 / 72
- 第六节 电源电动势和内阻的测量 / 77
- 第七节 电功、电功率及焦耳定律 / 81
- 第八节 家庭电路 / 86





第十一章 · 电磁场与电磁波初步 / 95

-
- 第一节 磁现象 磁感线 / 96
 - 第二节 电流的磁场 磁感应强度 / 100
 - 第三节 磁通量 电磁感应现象 / 106
 - 第四节 电磁场与电磁波 / 112



第十二章 · 能源与可持续发展 / 121

-
- 第一节 能源及其应用 / 122
 - 第二节 能量的转化 / 129
 - 第三节 能源与环境 / 133



图示为经头发反复摩擦后的塑料梳子靠近细小水流，使竖直下落的细小水流发生偏转。我国东汉王充《论衡》书中就有“顿牟掇芥”的记载，就是玳瑁摩擦后能吸引轻小物体的静电现象。摩擦后的梳子为何能使细小水流偏转？

第九章 静电场

- 在本章中我们将：
 1. 了解静电现象，知道两个电荷间相互作用的规律。知道电场是一种物质。
 2. 体会探究库仑定律过程中的科学思想。体会运用类比、比值等方法定义物理量。
 3. 了解生产生活中关于静电的利用与防护，了解电容器的作用。
- 本章的学习涉及电场强度、电场力等概念，会从多视角描述电场的特性，解释相关的静电现象。
- 本章的学习有助于提升物质、相互作用和能量的观念。



图 9-1 摩擦后的气球可使猫毛竖起

第一节 静电现象 电荷

在生活中静电现象是十分常见的。比如章导图所示的摩擦过的梳子可以吸引细小水流；摩擦后的气球可使猫毛竖起（图 9-1）；冬天脱毛衣的时候常会听到“噼噼啪啪”的声音，黑暗中还能看见毛衣“冒火星”；有时候用钥匙去开门或触摸金属门把手的时候会突然感觉被刺了一下；自然界中的闪电等都是静电现象。

大家谈

日常生活中你还经历过哪些静电现象？

我们已经知道，电荷分为两种：正电荷和负电荷。电荷间存在相互作用：同号电荷间相互排斥，异号电荷间相互吸引。

② 静电是如何产生的？

静电可通过物体间的摩擦、接触、感应等方法来产生。

1. 摩擦起电

物体是由分子、原子组合而成，而原子的基本结构为原子核和核外的电子，原子核由

质子和中子组成。科学家们发现质子带的电荷为正电荷，中子不带电，而电子带负电荷。在正常状况下，一个原子的核内质子与核外电子正、负电荷彼此平衡，物体对外表现不出带电性。但是，如果物体受到摩擦的作用，就会使原子中的电子发生转移而使自身的正负电荷不平衡，从而使物体呈现带电性。两个物体发生摩擦时，得到电子的物体带负电，失去电子的物体带正电。在日常生活中所说的摩擦起电实质上就是两种物体间相互摩擦而使电子转移的过程。如图 9-2 所示，当橡胶棒和毛皮在一起互相摩擦时，毛皮上的电子转移到橡胶棒上，橡胶棒得到电子导致带负电荷，毛皮失去电子导致带正电荷。

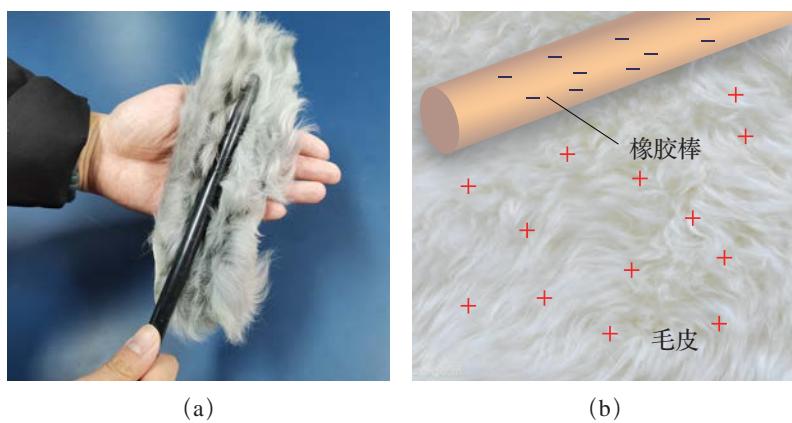


图 9-2 摩擦起电

2. 接触起电

接触起电是指带电体和不带电的物体相接触而使后者带电的现象。例如，用毛皮摩擦过的橡胶棒与验电器接触，使验电器带电，这就是接触起电的例子。

3. 感应起电

如图 9-3 所示，一对用绝缘柱支撑的不带电的导体 *A* 和 *B* 彼此接触，*A*、*B* 下方均连有两片闭合的金属箔。观察下列几种情况下金属箔的变化情况。① 把带正电荷的物体 *C* 移近导体 *A*；② 把 *A* 和 *B* 分开，然后移去 *C*；③ 再让 *A* 和 *B* 接触。

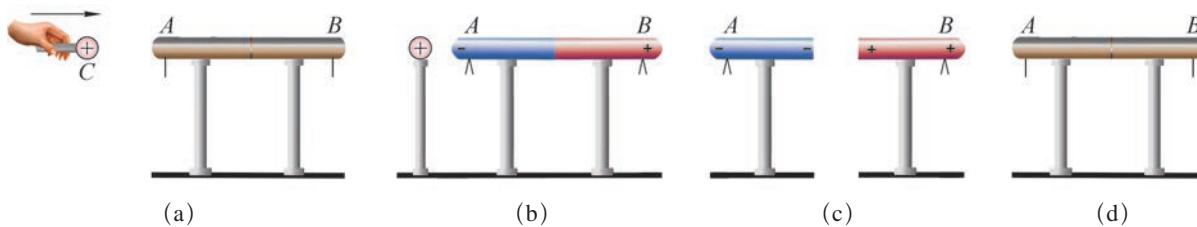


图 9-3 静电感应现象

我们可观察到带电体 *C* 移近导体 *A* 时，*A*、*B* 下方的金属箔张开；把 *A* 和 *B* 分开，然后移去 *C* 时，可观察到 *A*、*B* 下方的金属箔仍然继续张开；再让 *A* 和 *B* 接触时，可观察到 *A*、*B* 下方的金属箔立即闭合。这说明带电体 *C* 移近导体 *A* 时，导体 *A* 和 *B* 带上了异号电荷。

大量实验发现，若将一个带电体靠近一个不带电的导体，该导体在靠近带电体的一端聚集了与带电体相反的电荷，而远离带电体的一端聚集了与带电体相同的电荷。这种现象叫做静电感应（**electrostatic induction**）。通过静电感应使金属导体带电的过程叫做感应起电。

摩擦起电、接触起电、感应起电从本质上都源于物质的原子中的电子在不同物体间或者同一物体的不同部分间发生了转移，它们之间电荷的总量并没有发生变化。

物理学中往往把研究的物体或物体的集合作为一个系统。对于一个孤立系统，不论发生什么样的物理过程，系统内电荷总量保持不变。电荷可以从一个物体转移到其他物体，或者从物体的一部分转移到其他部分，但在转移过程中电荷的总量保持不变。这就是**电荷守恒定律**（**law of conservation of charge**），它是物理学的一条基本定律。现代物理研究表明，在粒子的相互作用过程中，电荷是可以产生和消失的，然而电荷守恒定律依然成立。例如，在正、负电子对的产生与湮灭过程中，正、负电荷总量始终为零。

为了观察静电现象，人们设计了许多专门产生静电的设备，如图 9-4 所示就是两种常用的起电机。

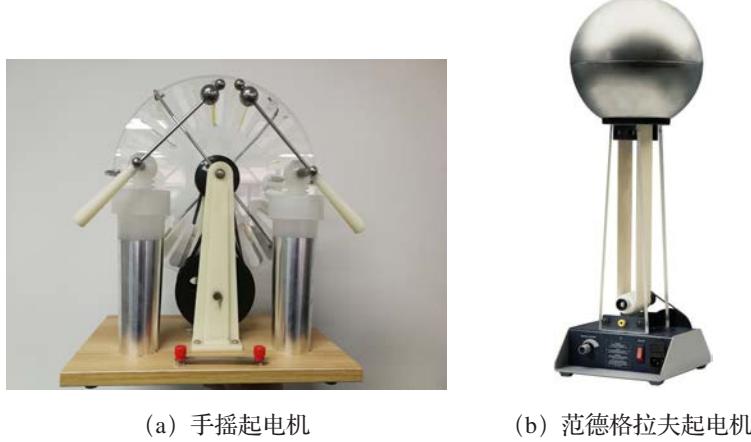


图 9-4 两种常用的起电机

② 如何描述物体所带电荷的多少？

不同带电体带电的多少往往是不同的。物体所带电荷的多少叫做**电荷量**（**amount of electric charge**），用符号 Q 或 q 表示。电荷量是标量，我们通常取正电荷的电荷量为正值，取负电荷的电荷量为负值。电荷量的国际单位是库仑，简称库；符号为 C。库仑是一个相当大的电荷量单位，因此通常还用微库作电荷量单位，符号为 μC 。库仑和微库的换算关系是

$$1 \mu\text{C} = 10^{-6} \text{ C}$$

物体所带电荷的电荷量不是任意的，而是某个最小电荷量的整数倍。人们把最小电荷量叫做**元电荷**（**elementary charge**），用符号 e 来表示，通常 e 取 $1.6 \times 10^{-19} \text{ C}$ 。任何带电体所带电荷都是 e 的整数倍。实验表明，单个质子携带的电荷量为 e ，单个电子携带的电荷量则为 $-e$ 。

拓展视野

美国科学家密立根 (R. A. Millikan, 1868—1953) 在 1907—1913 年间首次测定了元电荷的电荷量，为此获得了 1923 年的诺贝尔物理学奖。他设计的实验装置如图 9-5 所示，实验中用一个喷雾器向一个透明的圆柱形容器里喷入带电油滴；容器中的 A、B 板分别连接电源的两极，使 A 板为正极板、B 板为负极板；带负电的油滴在 A、B 之间受重力、电场力和空气阻力的作用而运动，可以通过改变极板间的电压来控制油滴的运动。当油滴所受的重力与极板间电场的作用力平衡时，油滴可静止悬浮于电场中。为测得电荷量，还需测得油滴质量。两极板间不加电压，油滴受重力作用而加速下降。由于空气阻力的作用，下降一段距离达到某一速度后，油滴所受的重力与阻力平衡，油滴将匀速下降，通过计算得到油滴的质量。经过反复实验，得出结论：油滴的电荷量是某个最小固定值的整数倍，这个最小固定值就是单个电子的电荷量的绝对值。

现在得到的元电荷的精确值在 2019 年更正为： $e = 1.602\ 176\ 634 \times 10^{-19} \text{ C}$ ，一般情况下可取值 $e = 1.60 \times 10^{-19} \text{ C}$ 。

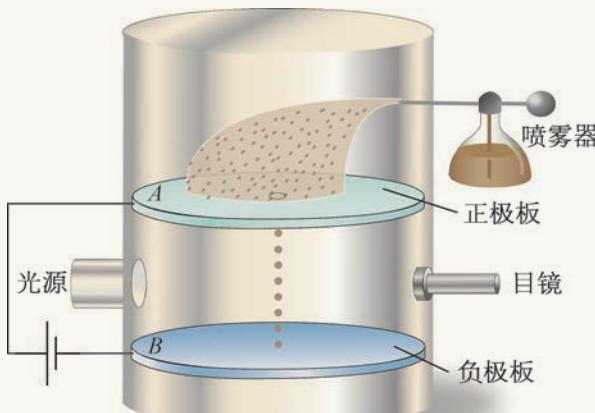


图 9-5 密立根油滴实验

自主活动

实验器材包括验电器（图 9-6）、数字式静电计（图 9-7）、玻璃棒、橡胶棒、丝绸、毛皮。

使用验电器或数字式静电计观察、测量摩擦后物体的带电情况。

使用验电器时，将带电体接触验电器的金属球，根据下方金属箔张角的变化可定性显示金属球所带的电荷量的多少。

使用数字式静电计时，按下数字式静电计的调零按键将电荷量的显示归零。将物体接触数字式静电计的金属球，数字式静电计的屏幕定量显示金属球所带的电荷量。

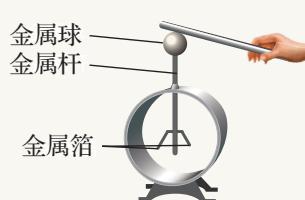


图 9-6 用验电器检测物体是否带电



图 9-7 用数字式静电计检测物体所带的电荷量

问题与思考

- 木髓球是一种由轻质材料制成、外部涂一层石墨或铝的轻质小球。现有一个悬挂在绝缘线上的木髓球，如何判断木髓球是带正电荷、带负电荷还是不带电？
- 某次雷雨时一次闪电从云层向地面输送了 32 C 的负电荷，在这个过程中有多少个电子到达地面？
- 高速飞行的飞机机身会带上静电；当飞机靠近带电的云层时，飞机靠近云的一侧会带上与之相反的电荷。试分析上述两种情况下机身带电的主要原因。
- 四个完全相同、相互间隔较远的导体球， A 球所带电荷量为 $+16Q$ ， B 球所带电荷量为 $-32Q$ ， C 球所带电荷量为 $+48Q$ ， D 球不带电荷。首先，将 D 球接触 A 球后分开；然后，将 D 球接触 B 球后分开；最后，将 D 球接触 C 球后分开。问： D 球上最终的电荷量是多少？
- 密立根通过实验测得了元电荷的电荷量为 $e = 1.602 \times 10^{-19}\text{ C}$ 。实际测量时测得的部分油滴电荷量的数据如表 9-1 所示，通过对这些实验数据作分析，给出结论。

表 9-1

序号	电荷量	序号	电荷量	序号	电荷量
1	$6.563 \times 10^{-19}\text{ C}$	4	$13.13 \times 10^{-19}\text{ C}$	7	$19.71 \times 10^{-19}\text{ C}$
2	$8.204 \times 10^{-19}\text{ C}$	5	$16.48 \times 10^{-19}\text{ C}$	8	$22.89 \times 10^{-19}\text{ C}$
3	$11.50 \times 10^{-19}\text{ C}$	6	$18.08 \times 10^{-19}\text{ C}$	9	$26.13 \times 10^{-19}\text{ C}$

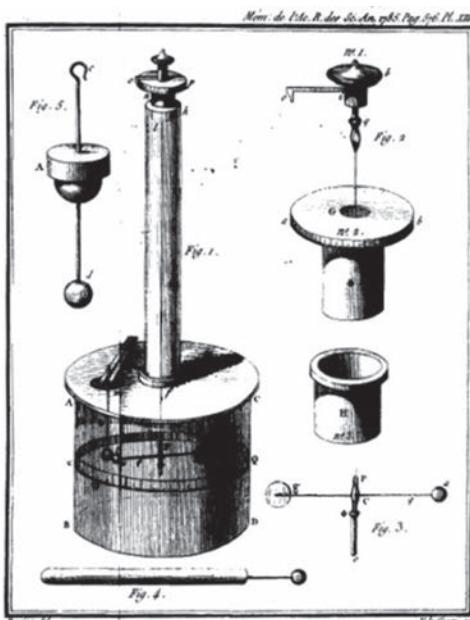


图 9-8 库仑扭秤实验装置图手稿

第二节 电荷的相互作用 库仑定律

在如图 9-9 所示的场景中，将塑料丝的一半撕成细丝，用干燥的手掌握住塑料丝捋几下，塑料丝就会散开。我们在初中已经知道，电荷之间有相互作用，同号电荷间相互排斥、异号电荷间相互吸引。塑料丝散开正是因为手掌的摩擦在其上产生同号电荷相互排斥的结果。这种静止电荷之间的相互作用又叫做静电力。



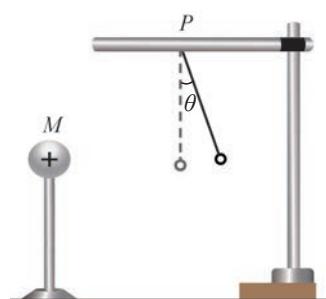
图 9-9 相互排斥的

塑料绳细丝

② 静电力的大小由哪些因素决定？

如图 9-10 所示，把一个带正电的物体放在 M 处，然后把系在丝线上带正电的小球悬挂在 P 位置，小球带动丝线发生偏转；改变 M 处带电体与小球之间的距离，观察偏角 θ 的变化；固定带电体的位置，改变其所带电荷量的大小，观察偏角 θ 的变化。带正电物体和小球间有静电排斥力作用，我们可以通过偏角 θ 的大小来定性判断小球受到的静电力的大小；偏角 θ 越大表示小球受到的静电力越大。

通过这样的实验，我们可初步知道电荷间相互作用力的大小与带电体间的距离有关，距离越小，作用力越大；静电力的大小还与两电荷的电荷量的大小有关，电荷量越大，作用力越大。

图 9-10
同号电荷间的相互排斥

如何定量探究电荷间相互作用力的规律?

18世纪中叶以前,研究带电体之间的静电力遇到三大困难:一是任意带电体上的电荷分布难以确定,无法确定相互作用的电荷间的距离;二是这种静电力非常小,没有测量如此小力的工具;三是当时还没有度量电荷量的单位,也就无法确定电荷量的大小。

法国物理学家库仑(C. A. de Coulomb, 1736—1806)巧妙地解决了这些困难。他根据电荷在金属球表面上均匀分布的特点,把金属球上的电荷想象成集中在球心的“点电荷”。这一模型就解决了测量带电体之间距离的问题。

助一臂

当带电体的形状、大小、电荷分布对电荷间相互作用力的影响可以忽略时,带电体可以看成带有电荷的点,这样的带电体叫做点电荷。

大家谈

与质点模型类比,带电体抽象为点电荷的条件是什么?

库仑设计制作了一台能够测出微弱作用力的扭秤,用以测量两个同种点电荷之间的作用力,如图9-8所示就是他当时的手稿,装置主要结构如图9-11所示。库仑从牛顿的万有引力规律得到启发,用类比的方法来研究电荷间的相互作用。

如图9-11所示,库仑扭秤固定装置中有一根弹性扭丝(细金属丝、石英玻璃丝等),它的一端固定在一个旋转螺丝上,另一端连接绝缘棒的中点,使绝缘棒水平悬挂在扭丝上;绝缘棒的一端有一个金属小球A,另一端是一个质量大小相同的金属小球B;在离A不远处放一个跟A相同的金属球C。当弹性扭丝处于自然状态时,调节螺丝使A与C接触;接着使C带电,则A、C带同号电荷,它们之间的斥力使绝缘棒发生转动,扭丝扭转,使得绝缘棒重新平衡。根据扭丝的扭转角 θ 与使扭丝扭转的力F成正比的规律就可以找出电荷间的相互作用力跟距离的关系。

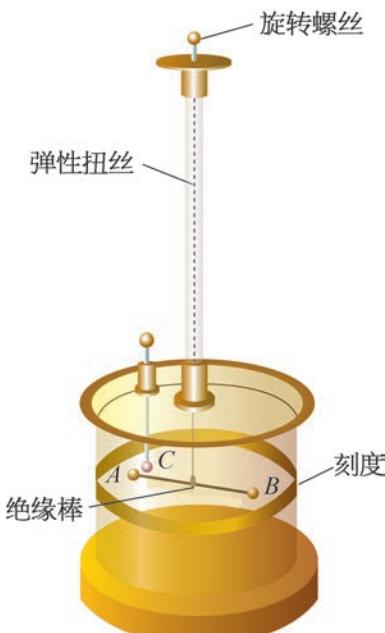


图9-11 库仑扭秤实验装置

拓展视野

根据库仑对电荷间的相互作用力的研究历史,当年库仑得到表9-2所示的三组实验数据。他分析在电荷量一定的条件下弹性扭丝的扭转角 θ 与两带电体A、C之间距

离 r 的关系，得到弹性扭丝的扭转角 θ 与 r 的二次方成反比 $(\theta \propto \frac{1}{r^2})$ 。再根据电荷间的相互作用力 F 与扭丝的扭转角 θ 成正比 ($F \propto \theta$)，并以 9 个刻度对应 1 单位的距离，由表 9-2 的数据可得两带电球间的距离与静电力之间的关系，如表 9-3 所示。

表 9-2 弹性扭丝的扭转角 θ 与两带电体之间距离 r 的关系

实验序号	两带电体之间距离 r	扭丝的扭转角 θ
1	36 个刻度	36°
2	18 个刻度	144°
3*	8.5 个刻度	575.5°

表 9-3 库仑扭秤实验的数据处理

实验序号	两带电体之间距离 r	距离之比	扭丝的扭转角 θ	静电力之比
1	36 个刻度	4	36°	1
2	18 个刻度	2	144°	4
3	8.5 个刻度	0.94	575.5°	15.99

库仑用扭秤进行实验，通过和万有引力的类比较快得出了电荷间作用力 F 跟距离 r 的二次方成反比 $(F \propto \frac{1}{r^2})$ 的规律。如仅靠实验数据的积累，也许这个规律的发现可能会被推迟。

电荷间的相互作用力一定和电荷量有关。库仑细心地发现两个相同的带电金属球相互接触后，它们对相同距离外的第三个带电小球的作用力相等，所以他断定这两个小球所带的电荷量相等。利用了电荷在两个相同金属球之间等量分配的原理，可把带电小球的电荷量 q 分为 $\frac{q}{2}, \frac{q}{4}, \frac{q}{8}, \dots$ ，这样就保证了实验中金属球的电荷量成倍变化。

从而，库仑发现了电荷间的相互作用力 F 与电荷量 q 的关系，即 F 与电荷量 q_1, q_2 的乘积成正比 ($F \propto q_1 q_2$)。

$$\text{综上可得, } F \propto \frac{q_1 q_2}{r^2}.$$

助一臂

类比是根据两个不同对象的部分特性相似而推出它们其他性质也可能相似的一种推理方法。类比是一种重要的科学方法，在科学发展史中发挥了巨大的作用。

在库仑之前，就有很多科学家将静电力与万有引力进行类比，猜想静电力也与距离的二次方成反比。

* 第三组数据略有偏差，库仑分析是因为漏电所致。

真空中两个静止的点电荷之间相互作用力的大小跟它们的电荷量的乘积成正比，跟它们之间的距离的二次方成反比，作用力的方向在它们的连线上。这叫做库仑定律（Coulomb's law），可用下面的公式表示

$$\mathbf{F} = k \frac{q_1 q_2}{r^2}$$

电荷间的这种相互作用的静电力又称为库仑力。式中 k 叫做静电力常量，在国际单位制中， $k = 9 \times 10^9 \text{ N}\cdot\text{m}^2/\text{C}^2$ 。就是说，两个均带 1 C 电荷量的点电荷即使在相距 1 m 的情况下，它们相互间的库仑力依然高达 $9 \times 10^9 \text{ N}$ ，可见库仑（C）是个很大的电荷量单位。

示例 1 如图 9-12 所示，真空中有两个点电荷 q_1 和 q_2 ，它们的电荷量分别是 $+4.0 \times 10^{-9} \text{ C}$ 和 $-2.0 \times 10^{-9} \text{ C}$ ，两点电荷间相距 10 cm，求这两个点电荷间的相互作用力。（已知静电力常量 $k = 9 \times 10^9 \text{ N}\cdot\text{m}^2/\text{C}^2$ ）

分析：在运用库仑定律时，物理量都要采用国际单位制；点电荷的电荷量可用绝对值代入，这样可以避免因对正、负号意义混淆不清而造成错误；库仑力的方向可以通过同号电荷相互排斥、异号电荷相互吸引来直接判断。

解：以电荷 q_2 为研究对象， q_2 受到 q_1 对其的静电力作用，根据库仑定律， q_1 对 q_2 的静电力的大小

$$\begin{aligned} F_{12} &= k \frac{|q_1| \cdot |q_2|}{r^2} \\ &= 9 \times 10^9 \times \frac{4.0 \times 10^{-9} \times 2.0 \times 10^{-9}}{(0.10)^2} \text{ N} \\ &= 7.2 \times 10^{-6} \text{ N} \end{aligned}$$

方向为沿 q_1 、 q_2 连线指向 q_1 。

同理，以电荷 q_1 为研究对象，根据库仑定律，可得 q_2 对 q_1 的静电力 F_{21} 与 q_1 对 q_2 的静电力 F_{12} 大小相等、方向相反、作用在同一直线上。因此 F_{21} 大小也为 $7.2 \times 10^{-6} \text{ N}$ ，方向为沿 q_1 、 q_2 连线指向 q_2 。

示例 2 已知氢原子中质子的质量为 $m_1 = 1.67 \times 10^{-27} \text{ kg}$ ，电子的质量为 $m_2 = 9.1 \times 10^{-31} \text{ kg}$ ，在氢原子内质子和电子间的距离为 $r = 5.3 \times 10^{-11} \text{ m}$ ，求氢原子中质子与电子之间的库仑力和万有引力大小的比值。（已知引力常量 $G = 6.67 \times 10^{-11} \text{ N}\cdot\text{m}^2/\text{kg}^2$ ，静电力常量 $k = 9 \times 10^9 \text{ N}\cdot\text{m}^2/\text{C}^2$ ，元电荷 $e = 1.6 \times 10^{-19} \text{ C}$ ）

分析：氢原子内质子和电子间距离为 $5.3 \times 10^{-11} \text{ m}$ 。当代物理学认为氢核即质子，其直径在 10^{-15} m 量级，而电子直径则在 10^{-18} m 量级，两带电体间距离远大于带电体的直径，故质子和电子均可看成质点和点电荷。它们间的相互作用符合万有引力和库仑定律的适用范围。

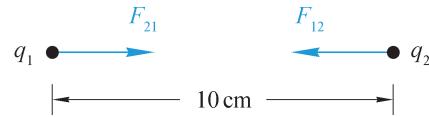


图 9-12 两个点电荷间的相互作用

解：设质子和电子间的库仑力为 F_1 ，万有引力为 F_2 ，质子所带电荷量为 q_1 ，电子所带电荷量为 q_2 ，则由库仑定律和万有引力定律

$$F_1 = k \frac{q_1 q_2}{r^2}, \quad F_2 = G \frac{m_1 m_2}{r^2}$$

可得彼此间的库仑力和万有引力大小之比为

$$\begin{aligned} \frac{F_1}{F_2} &= \frac{k |q_1| \cdot |q_2|}{G m_1 m_2} \\ &= \frac{9 \times 10^9 \times 1.6 \times 10^{-19} \times 1.6 \times 10^{-19}}{6.67 \times 10^{-11} \times 1.67 \times 10^{-27} \times 9.1 \times 10^{-31}} \\ &\approx 2.3 \times 10^{39} \end{aligned}$$

大家谈

试比较带电粒子间的静电力和万有引力在力的大小、方向和表达式上有何异同。

问题与思考

- 在研究带电体间相互作用力的过程中，库仑利用扭秤实验巧妙解决了电荷量测量问题和微小库仑力测量问题。库仑扭秤实验采用了哪些科学思想方法？在实验中如何体现？
- 真空中甲、乙两个点电荷的相互距离为 r ，它们间的库仑力为 F 。若两个点电荷的电荷量均减半，它们间的距离变为 $2r$ ，则它们间的库仑力变为多大？
- 如图 9-13 所示，把一电荷量为 $q_1 = -2.0 \times 10^{-6} \text{ C}$ 的带电小球用绝缘细绳悬挂在 P 位置，将电荷量为 $q_2 = -4.0 \times 10^{-5} \text{ C}$ 的带电体 M 靠近带电小球。当带电体和带电小球均静止时，两个带电体在同一高度，相距 0.2 m，求：
 - 这两个带电体间的相互作用力。
 - 如需计算带电小球的质量，还需测量哪些物理量？简述理由。

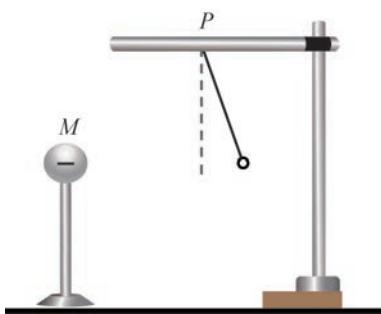


图 9-13

4. 如图 9-14 所示为氯化钠晶体的一个原子面的排列示意图，可以看出每个一价钠离子 (Na^+) 的周围有距离相等的一价氯离子 (Cl^-)。同样，每个一价氯离子的周围也有距离相等的一价钠离子。相邻的一价钠离子与一价氯离子之间的距离 $d = 2.82 \times 10^{-10} \text{ m}$ ，则相邻两个钠离子间的静电力大小是多少？

5. 设想为了抵消地球和月球间的万有引力，可在地球和月球上各放置电荷量相等的正电荷 Q ，试求 Q 的电荷量。另外，需要多少千克氢离子才能提供所需的电荷量？[地球质量 $m_{\text{地}} = 6.0 \times 10^{24} \text{ kg}$ ，月球质量 $m_{\text{月}} = 7.3 \times 10^{22} \text{ kg}$ ，氢离子摩尔质量 $M(\text{H}^+) = 1 \text{ g/mol}$ ，阿伏加德罗常数 $N_A = 6.02 \times 10^{23} \text{ mol}^{-1}$]

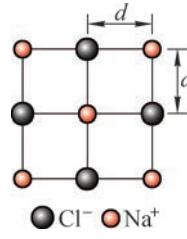


图 9-14



图 9-15 科技馆的“怒发冲冠”项目

第三节 电场力 电场强度

上海科技馆智慧之光展区内有一“怒发冲冠”(图 9-15)的项目，通过 2×10^5 V 的高压演示了静电现象。站在绝缘地板上的长发女士，手摸着范德格拉夫起电机的金属球罩，范德格拉夫起电机产生大量电荷，这位女士的长发就会立刻张开，呈现了怒发冲冠的情景。

？电荷间的相互作用如何传递？

带电体周围空间存在一种物质，这种物质称为**电场** (electric field)。电荷间的相互作用就是靠电场来传递的。场的概念对早先的传统观念是一个重大的突破。现在，场的概念已经成为现代物理学中最重要的基本概念之一。

场是物质存在的一种形态。电场是一种看不见也摸不到的物质。然而，电场却无处不在，几乎弥漫于整个宇宙。人类的生活也时刻离不开各种场：重力场、磁场、电场等。在信息化时代，信息的形成、传递、储存都离不开场。我们把相对观察者静止的电荷产生的电场叫做**静电场** (electrostatic field)。

只要有电荷存在，电荷的周围就存在着电场。电场的基本性质是能够对放入其中的电荷有力的作用，这种力就叫做**电场力** (electric field force)。

如何形象描述电场？

电场虽看不见、摸不着，但我们仍然可以利用电场对放入其中的电荷有力的作用来探究电场的分布特征。

在初中物理学习中，我们已经使用磁感线来形象地描述磁场。法拉第在研究电场时，采用了**电场线**（electric field lines）来描述电场。电场线是为了直观形象地描述电场分布而在电场中引入的一些假想的曲线。如图 9-16 所示，电场线是有方向的曲线；电场线起始于正电荷（或无穷远），终止于负电荷（或无穷远）；曲线上每一点的切线方向与正电荷在该点所受的电场力的方向相同，与负电荷在该点所受的电场力的方向相反；电场线的疏密可以大致反映电场的强弱，电场线密集的地方电场强，稀疏的地方电场弱。

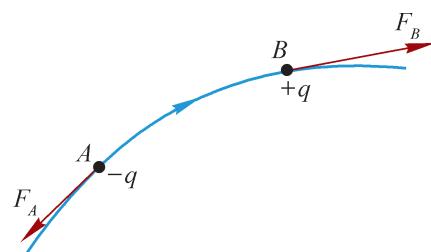


图 9-16 电场线

自主活动

如图 9-17 所示，把奎宁（一类植物树皮中的生物碱）的针状晶体或头发屑悬浮在蓖麻油或洗洁精中，并把高电压加到两个电极上。电极是电荷集中的地方，其周围存在电场。针状晶体或头发屑因受到电场力的作用而有规律地排列。它们的排列走向顺着电场力的方向，从而可以形象地模拟静电场电场力的大致分布，好像一条条的曲线。

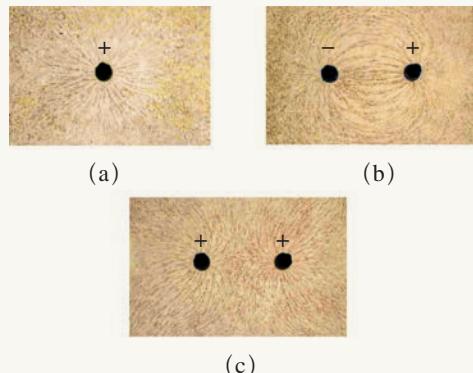


图 9-17 模拟电场线

把上述自主活动观察到的模拟电场线分布作理想化的描绘，得到如图 9-18 所示的电场线。

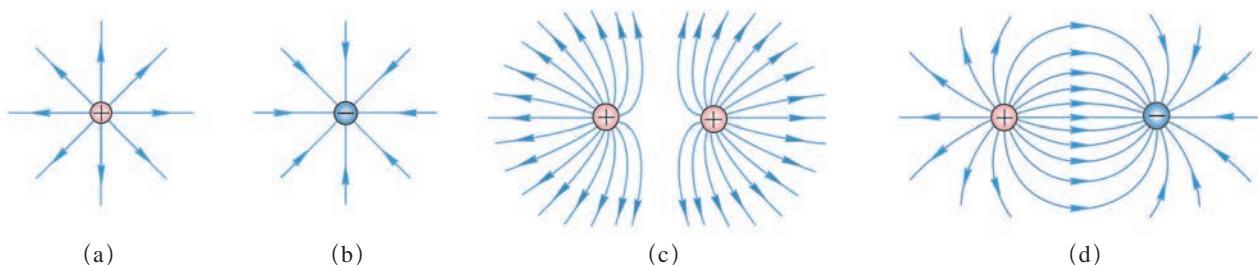


图 9-18 典型电场线

大家谈

如图 9-18 所示的典型电场线分布有何特点？如何与如图 9-17 所示的模拟电场线相对应？

② 如何定量描述电场力的性质？

如图 9-19 所示，为了研究点电荷 A 周围电场力的性质，我们需要在电场中引入另一个点电荷 B。点电荷 B 的电荷量必须足够小，以致可忽略其对电场的影响，我们把点电荷 A 称为场源电荷，点电荷 B 称为试探电荷。

保持场源电荷 A 不动，移动试探电荷 B，观察其在不同位置的受力情况。可以看出试探电荷 B 在电场不同位置所受电场力的大小、方向一般是不同的，这反映了电场中各点的电场强弱和方向是不同的。

当试探电荷 B 的位置不变而电荷量 q 发生变化时，其受到的电场力 F 也随之变化，但电场力 F 与试探电荷的电荷量 q 之比 $\frac{F}{q}$ 不变。如果再将试探电荷 B 放在电场中的其他位置，

F 与 q 之比与放在前一位置时 F 与 q 之比则一般是不同的。

这个比的大小可以反映电场中不同点的电场的强弱程度。因此，我们将放入电场中某点的电荷所受的电场力 F 和其电荷量 q 之比叫做该点的电场强度，用符号 E 表示。即

$$E = \frac{F}{q}$$

电场强度 E 是矢量。物理学中规定，电场中某点电场强度的方向跟正电荷在该点所受电场力的方向相同。上式是电场强度的定义式，表明了电场强度的物理意义，其数值上等于单位正电荷所受的电场力。但电场强度是由电场本身决定的物理量，它与试探电荷置入电场与否无关。电场强度的国际单位是 N/C，读作牛每库。

如果已知电场中某一点的电场强度 E，那么，放在该点的点电荷 q 所受到的电场力 F 的大小就是 qE ，F 的方向则取决于电场的方向和点电荷 q 的正负。

示例 1 如图 9-20 所示，有一固定的点电荷 q_1 ， q_1 左方的 A 点处有一个负电荷 q_2 ，其电荷量为 -1×10^{-9} C。测出 q_2 受到的电场力 F 为 2×10^{-5} N，方向水平向右。

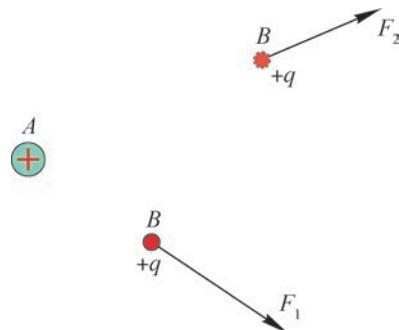


图 9-19 试探电荷在电场中受力

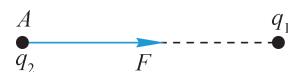


图 9-20 负电荷在 A 点所受电场力

(1) 求点电荷 q_1 产生的电场在 A 点的电场强度。

(2) 如把 A 点电荷的电荷量 q_2 变为 $5q_2$, 其他条件不变, 求 q_1 产生的电场在 A 点的电场强度和该 $5q_2$ 电荷受到的电场力。

分析: 可利用电场强度的定义式计算空间某点处的电场强度, 但这只是对电场强度的一种间接反映, 实际上电荷在空间某处电场的强弱仅由场源电荷本身决定, 与试探电荷的有无或电荷量的大小无关。试探电荷受到的电场力大小由所在处的电场强度和自身所带电荷量所决定。在计算中电荷量取绝对值, 电场强度的方向由电荷所受电场力的方向来判断。

解: (1) 已知放入 q_1 的电场中 A 点的电荷所受的电场力 F 和该电荷所带电荷量 q_2 , 由电场强度的定义式, 可得 A 点的电场强度的大小

$$E = \frac{F}{|q_2|} = \frac{2 \times 10^{-5}}{1 \times 10^{-9}} \text{ N/C} = 2 \times 10^4 \text{ N/C}$$

由于负电荷所受电场力的方向跟该点的电场强度方向相反, 可知 A 点的电场强度方向水平向左。

(2) 电场强度的大小只与电场本身性质有关, 也就是只与产生该电场的场源电荷有关, 而与放入电场的试探电荷无关。即使放在 A 点的电荷的电荷量变化了, q_1 产生的电场在 A 点的电场强度也不会发生变化, 仍为 $2 \times 10^4 \text{ N/C}$, 方向为水平向左。

放入 A 点的电荷变为 $5q_2$, 则该电荷受到的电场力大小为

$$F' = 5|q_2| \cdot E = 5 \times 10^{-9} \times 2 \times 10^4 \text{ N} = 1 \times 10^{-4} \text{ N}$$

方向为水平向右。

真空中点电荷 q 产生电场, 由库仑定律可得在距其 r 处的电场强度

$$E = k \frac{q}{r^2}$$

若 q 为正电荷, 电场强度的方向远离 q ; 若 q 为负电荷, 电场强度的方向指向 q 。

研究表明, 如果在空间中有几个点电荷同时存在, 这时在空间的某一点的电场强度等于各个点电荷单独存在时在该点产生的电场的电场强度的矢量和, 这叫做电场的叠加原理。

示例2 如图 9-21 (a) 所示, 真空中相距 $2r$ 的点电荷 A 、 B 带电荷量分别为 $+q$ 和 $-q$ 。求:

(1) 两点电荷连线中点 O 的电场强度。

(2) 在 A 、 B 连线上, 点电荷 B 的外侧且与点电荷 B 之间的距离为 r 的 P 点处的电场强度。

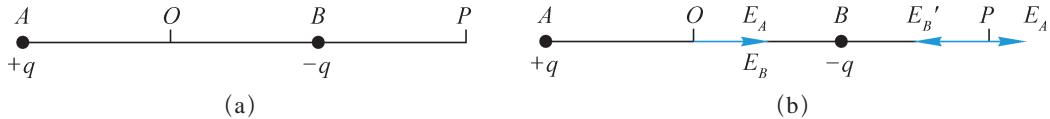


图 9-21 电场的叠加

分析：由于有两个点电荷产生的电场同时存在，因此要利用电场的叠加原理来计算 O 点与 P 点的电场强度。

如图 9-21 (b) 所示， O 点电场强度由电荷 A 产生的电场在该点的电场强度 E_A 和电荷 B 产生的电场在该点的电场强度 E_B 叠加而成；同样， P 点电场强度是由电荷 A 产生的电场在该点的电场强度 E'_A 和电荷 B 产生的电场在该点的电场强度 E'_B 叠加而成。

解：(1) 由于点电荷 $+q$ 与 $-q$ 的电场同时存在，由图 9-21 (b) 所示。两个电荷分别产生的电场在 O 点的电场强度 E_A 、 E_B 方向相同，根据电场的叠加原理可知， O 点的电场强度大小

$$\begin{aligned} E_O &= E_A + E_B \\ &= k \frac{q}{r^2} + k \frac{q}{r^2} \\ &= 2k \frac{q}{r^2} \end{aligned}$$

O 点的电场强度方向为由 O 指向 B 。

(2) 由图 9-21 (b) 可知，两个点电荷产生的电场同时存在，但因为 E'_B 方向向左， E'_A 方向向右， $E'_B > E'_A$ ，所以根据电场的叠加原理可得， P 点的电场强度大小

$$\begin{aligned} E_P &= E'_B - E'_A \\ &= k \frac{q}{r^2} - k \frac{q}{(3r)^2} \\ &= k \frac{8q}{9r^2} \end{aligned}$$

P 点的电场强度方向为由 P 指向 B 。

② 是否能产生电场强度处处相同的电场？

两块正对放置的相同的平行金属极板，若板间距离远小于极板的线度，在两板之间能构建出一个电场强度处处相同的电场。当两板分别带有等量的正电荷和负电荷时，极板间（除边缘附近外）的电场强度在不同位置大小和方向都不变，如图 9-22 所示。我们把在某个区域内各处电场强度大小相等、方向相同的电场称为匀强电场。匀强电场的电场线是相互平行疏密相同的直线。

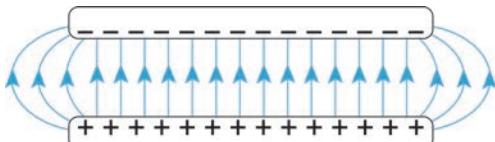


图 9-22 带等量异号电荷的平行金属板间的电场

问题与思考

1. 判断以下关于电场的说法是否正确，简述理由。

- 电场只是一个理想模型，实际上并不存在。
- 电场中的电场线不是人为画出的，而是实际存在的。
- 电场的基本性质就是对放入其中的电荷有力的作用。

2. 我们已经知道，电荷量分别为 q_1 、 q_2 的两个点电荷距离为 r 时，它们之间的静电作用力 $F = k \frac{q_1 q_2}{r^2}$ ，其中 k 为静电力常量。当 q_1 和 r 一定时， F 与 q_2 之间的关系可用图 9-23 中的哪条图线表示？

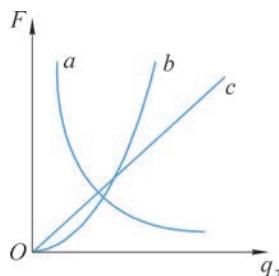


图 9-23

3. 如图 9-24 所示，在两个等量异号点电荷产生的电场中有 A 、 B 、 C 三点，都在两个电荷的连线上， B 处于两点电荷连线的中点， $AB = BC$ ，均等于两点电荷距离的 $\frac{1}{4}$ 。若某正电荷先后放在 A 、 B 、 C 三点，该电荷在 A 、 B 、 C 三点所受的电场力大小、方向关系如何？

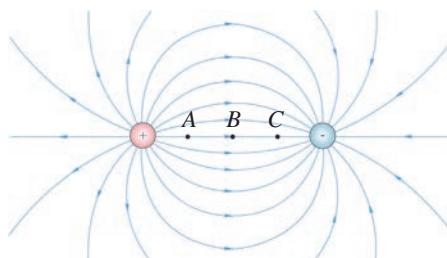


图 9-24

4. 图 9-25 中各方框内给出的均是电场的部分电场线，它们分别对应哪种电荷系统周围电场线？

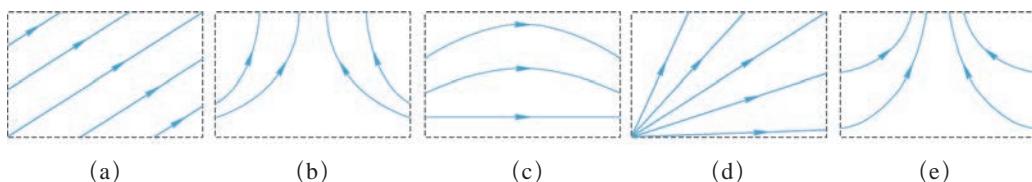


图 9-25

5. 固定在 A 、 B 两点的带电粒子，分别如图 9-26 (a)、(b)、(c)、(d) 所示。在两带电粒子连线上的 A 点的左侧附近有一个负电荷。在图 9-26 中哪些情况下，负电荷可能处于平衡状态？简述理由。

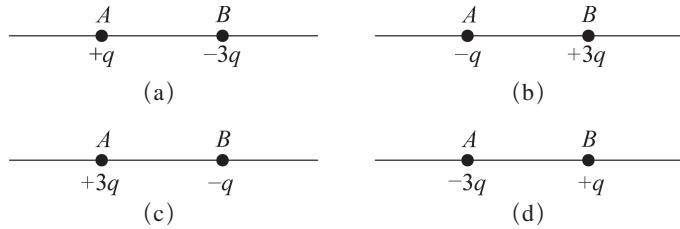


图 9-26

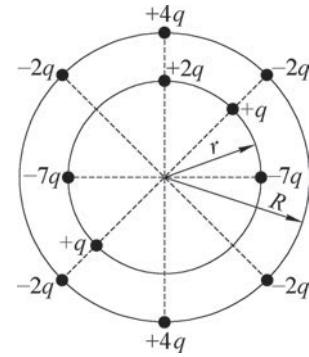


图 9-27

6. 点电荷分布在两个半径不同的同心圆周上，所带电荷量如图 9-27 所示。写出圆心处电场强度的表达式；若在圆心放一个电荷量大小为 q 的负电荷，它所受电场力为多大，方向如何？



图 9-28 城市上空的闪电

第四节 电势能 电势

闪电（图 9-28）是一种常见的自然现象，是带电的云层与云层之间、带电的云层与地面之间强烈的放电现象。据估计，每秒约有几十到上百次的闪电击中地球表面。一次闪电在短时间内释放出很多能量，这一能量来自放电电荷的电势能。

？什么是电势能？

我们已经知道，地球上的物体因为受到地球引力作用具有重力势能而能做功，重力做功与重物的移动路径无关，如图 9-29 (a) 所示。

如图 9-29 (b) 所示，在一个电场强度为 E 的匀强电场中，沿着不同的路径把试探电荷 $+q$ 从 A 点移动到 B 点。由于匀强电场的电场力为恒力，不论 $+q$ 经由什么路径从 A 点移动到 B 点，电场力所做的功都是一样的。

不仅匀强电场的电场力做功与电荷移动的路径无关，一般静电场的电场力做功也同样

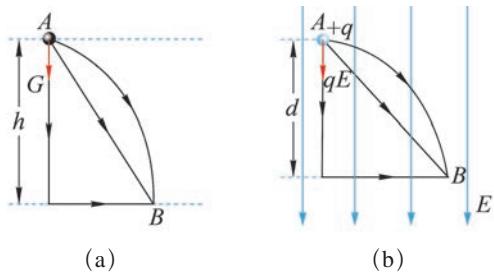


图 9-29 重力与电场力做功特点类比

与路径无关。因此，我们可以得到这样的结论：在电场中移动电荷时，静电力做的功只与电荷的起始位置和终止位置有关。由于重力做功与路径无关，物体具有重力势能。与此类似，在静电场中电场力对其中移动的电荷做功也与路径无关，只决定于始末位置，因此，电荷在电场中也具有势能。这种势能就叫做电势能（electric potential energy）。

电势能是标量，通常用符号 E_p 表示；电势能的单位是焦耳，符号 J。

拓展视野

引力做功与路径无关源自万有引力定律，两质点间的万有引力沿质点间的连线方向，与彼此间距离的二次方成反比，即万有引力是各向同性的有心力。同引力一样，以库仑定律描述的电荷间的静电力同样具有各向同性的有心力的特点，也具有做功和电荷移动路径无关的特点。万有引力是保守力，静电力也是保守力。

② 电场力做功与电势能变化之间有何关系？

功是能量变化的量度，当地球上的物体从一个位置移动到另一个位置时，若重力做正功，则物体的重力势能减少；若重力做负功，则物体的重力势能增加。同样，当电场中的电荷从一个位置移动到另一个位置时，若电场力做正功，则电荷的电势能减少；若电场力做负功，则电荷的电势能增加。

将点电荷在电场中由 A 点移到 B 点，电场力做功

$$W_{AB} = E_{pA} - E_{pB}$$

E_{pA} 为 A 点电势能， E_{pB} 为 B 点电势能。

点电荷在电场中从 A 点移到 B 点，这个点电荷的电势能的变化量

$$\Delta E_p = E_{pB} - E_{pA}$$

因此，电场力对电荷做功与电荷的电势能变化量的关系为

$$W_{AB} = -\Delta E_p$$

重力势能的大小等于物体从现有位置移动到重力势能为零处的过程中重力所做的功。与此类似，电荷 q 在电场中某点的电势能在数值上等于把此电荷从该点移动到电势能为零处电场力所做的功。

通常我们把电荷在离场源电荷无穷远处的电势能规定为零，或把电荷在大地表面上的电势能规定为零。而且电势能也和重力势能一样只有相对意义，电势能的变化量才有绝对物理意义。

必须强调，就像重力势能属于重物和地球构成的体系一样，电荷的电势能并非只属于该电荷，而是该电荷和场源电荷相互作用的能量，同属于该电荷和场源电荷。通常为了方便而简称为某电荷的电势能。

示例 1 如图 9-30 所示, 在某正点电荷的电场中, 沿电场线有 A、B 两点。若将一个正电荷 q_1 从 A 点移至无穷远处, 电场力做了 3.0×10^{-6} J 的功; 若将正电荷 q_1 从 B 点移至无穷远处, 电场力做了 1.5×10^{-6} J 的功。则:

- (1) 该电荷在 A、B 两点的电势能为多大?
- (2) 如果将一个电荷量为 q_2 的负电荷从 A 移至 B,

则该负电荷在 A、B 两点中哪一点电势能大?

分析: 电荷 q 在电场中某点的电势能在数值上等于把电荷从这点移动到无穷远处电场力所做的功。

解: (1) 正电荷 q_1 在 A 点受到的电场力方向向右, 电荷从 A 点至无穷远处的过程中, 电场力做正功、电势能减小至零, 所以 A 点的电势能 E_{pA} 大于零。则

$$E_{pA} = 3.0 \times 10^{-6} \text{ J}$$

同理, B 点电势能

$$E_{pB} = 1.5 \times 10^{-6} \text{ J}$$

(2) 负电荷 q_2 放在 A 点, 受到的电场力方向向左, 从 A 点移至 B 点的过程中, 电场力做负功, 电势能增加, 所以 $E_{pA} < E_{pB}$, 即负电荷 q_2 在 B 点电势能大。

由示例 1 可知, 在同一电场中, 同样从 A 点到 B 点分别移动正电荷与负电荷时, 相应的电势能的变化是相反的。

如何从能量的角度描述电场的性质?

同一物体在地球上不同位置的重力势能不尽相同, 不同物体在地球上同一位置的重力势能也不尽相同。类似地, 根据电场力做功与电势能变化的关系可知, 同一电荷在电场中的不同位置上的电势能不尽相同, 不同电荷在电场中的同一位置上的电势能也不尽相同。

进一步的研究表明, 在一个确定的电场中, 不同电荷在场中同一位置的电势能与其电荷量之比是一定的, 即 $\frac{E_{p1}}{q_1} = \frac{E_{p2}}{q_2} = \frac{E_{p3}}{q_3} = \dots = \frac{E_{pn}}{q_n}$ 。这个比仅由电场决定, 和电场强度一样, 它与试探电荷置入与否无关。可见, 这个比像电场强度从电场力的角度描述电场一样, 从能量的角度客观地反映了电场的性质。

在电场中, 任意一点电荷的电势能 E_p 和它所带的电荷量 q 之比叫做这一点的电势 (electric potential)。电势通常用符号 φ 来表示, 则

$$\varphi = \frac{E_p}{q}$$

电势的国际单位是伏特, 简称伏, 用符号 V 表示, $1 \text{ V} = 1 \text{ J/C}$ 。

由上式可看出电势的物理意义。电场中任意一点的电势数值上等于单位正电荷在该点

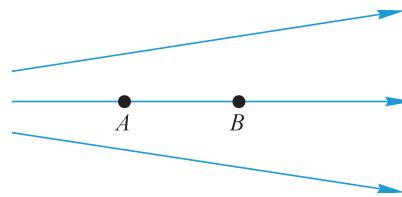


图 9-30 分析电荷在电场中的电势能

所具有的电势能。

电势跟电势能一样，其数值不具有绝对意义，只具有相对意义。只有规定了某处的电势为零后，才能确定电场中其他各点的电势的值。

电势 φ 是标量，只有大小，没有方向，但有正、负之分，正、负只表示比零电势高还是低。若将正试探电荷沿电场线方向移至无穷远处，电场力做正功，电势能逐渐减小，电势逐渐降低。因此，沿着电场线方向，电势越来越低。

示例 2 在点电荷 $+Q$ 的电场中，沿电场线方向有 A 、 B 两点。若将一个电荷量为 $1 \times 10^{-8} \text{ C}$ 的正电荷 q 从 A 点缓慢移至无穷远处，电场力做了 $3.0 \times 10^{-6} \text{ J}$ 的功；若将该正电荷从 B 点缓慢移至无穷远处，电场力做了 $1.5 \times 10^{-6} \text{ J}$ 的功。则 A 、 B 两点的电势各为多少？

分析：电场中任意一点的电势数值上等于单位正电荷在该点所具有的电势能。

解：设正电荷 q 在 A 点的电势能为 E_{pA} 、在 B 点的电势能为 E_{pB} 。由于点电荷 q 与产生电场的点电荷均为正电荷，因此在 q 从 A 点移至无穷远的过程中，电场力做正功、电势能减小至零， A 点的电势能 E_{pA} 大于零，可得

$$E_{pA} = 3.0 \times 10^{-6} \text{ J}$$

同理， B 点的电势能

$$E_{pB} = 1.5 \times 10^{-6} \text{ J}$$

则 A 点的电势

$$\varphi_A = \frac{E_{pA}}{q} = \frac{3.0 \times 10^{-6}}{1.0 \times 10^{-8}} \text{ V} = 3.0 \times 10^2 \text{ V}$$

B 点的电势

$$\varphi_B = \frac{E_{pB}}{q} = \frac{1.5 \times 10^{-6}}{1.0 \times 10^{-8}} \text{ V} = 1.5 \times 10^2 \text{ V}$$

大家谈

如试探电荷为负电荷是否还能得到关于电势能和电势的讨论中得到的结论？

已知电场中某一点的电势为 φ ，则处于该点的点电荷 q 所具有的电势能

$$E_p = q\varphi$$

电荷在电场中沿垂直于电场方向移动时电场力不做功，电荷的电势能不发生变化，说明电场中的这些点的电势相等。电场中电势相同的各点构成的面叫做等势面（equipotential surface）。可见，等势面一定跟电场强度的方向垂直。等势面和电场线相似，也是用来形象地描述电场的。

如图 9-31 所示是几种常见电场的等势面（图中虚线为等势面的截面图）和电场线。图中，两个相邻等势面间的电势之差是相等的。

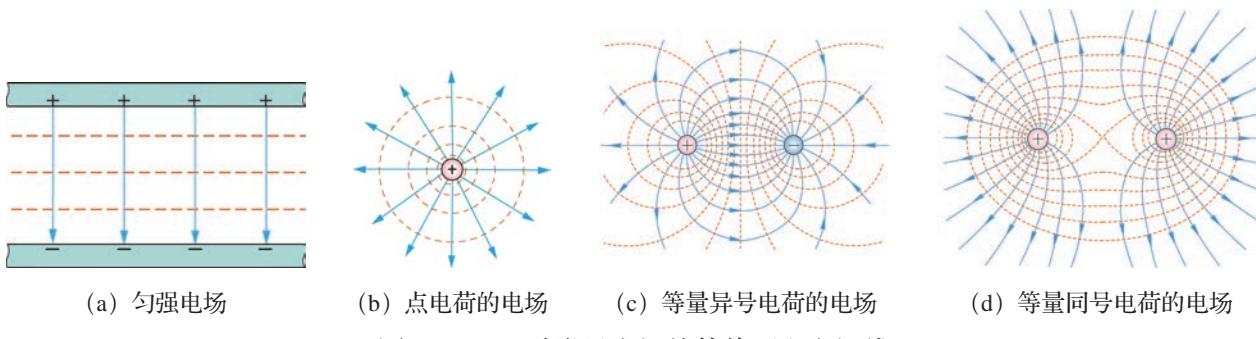


图 9-31 几种常见电场的等势面和电场线

问题与思考

- 有两个带正电的点电荷 Q_1 、 Q_2 分别位于 A 、 B 两点，若保持电荷 Q_2 静止，并使 Q_1 分别沿着图 9-32 中 a 、 b 、 c 三条不同的路径移动到位置 C 。在此过程中，电场力是否对 Q_1 做功？如做功，做的是正功还是负功？ Q_1 沿三条不同路径移动到 C 点的过程中，电场力对 Q_1 所做功的大小关系如何？ A 、 C 两点哪点电势高？
- 电场中 A 点放有电荷量为 $+1 \times 10^{-8}$ C 的点电荷 q_1 。若 q_1 的电势能为 2×10^{-6} J， A 点的电势为多大？若移走该点电荷， A 点的电势为多大？若在 A 点放另一电荷量为 -3×10^{-8} C 的点电荷 q_2 ，则 q_2 的电势能为多大？
- 有两个等量异号电荷，如图 9-31 (c) 所示。在图中找出电势为正、电势为负和电势为零的区域。如将一个负电荷置于此电场中，在哪个区域电势能为正值？(取无穷远处的电势为零)
- 如图 9-33 所示，在真空中有两个等量同号的正点电荷 q_1 、 q_2 ，分别置于 A 、 B 两点， DC 为 AB 连线的中垂线。将一负电荷 q_3 由 C 点沿中垂线移动到无穷远的过程中， q_3 的电势能如何变化？电势如何变化？简述理由。

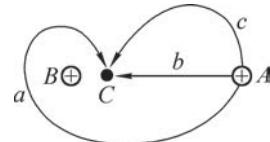


图 9-32

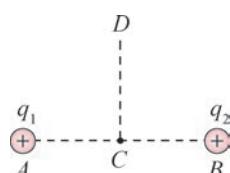


图 9-33

5. 在如图 9-34 所示的 4 种情况下，图 (b) 和图 (d) 中 a 、 b 为两点电荷连线中垂线上关于 O 点对称的两点。分别描述 4 种情况下 a 、 b 两点的电势和电场强度的关系。

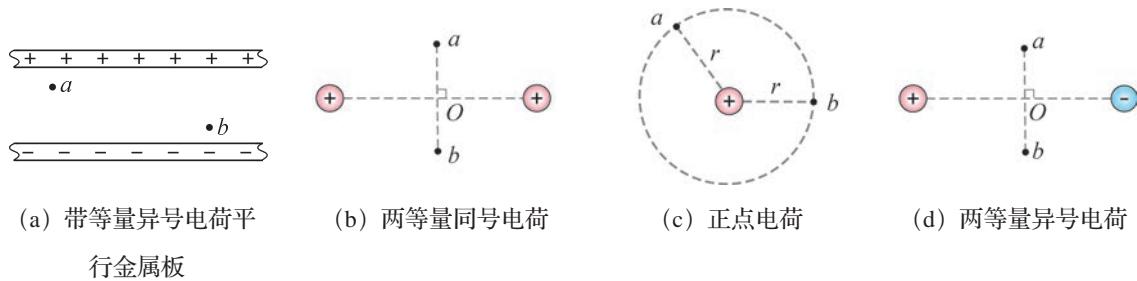


图 9-34

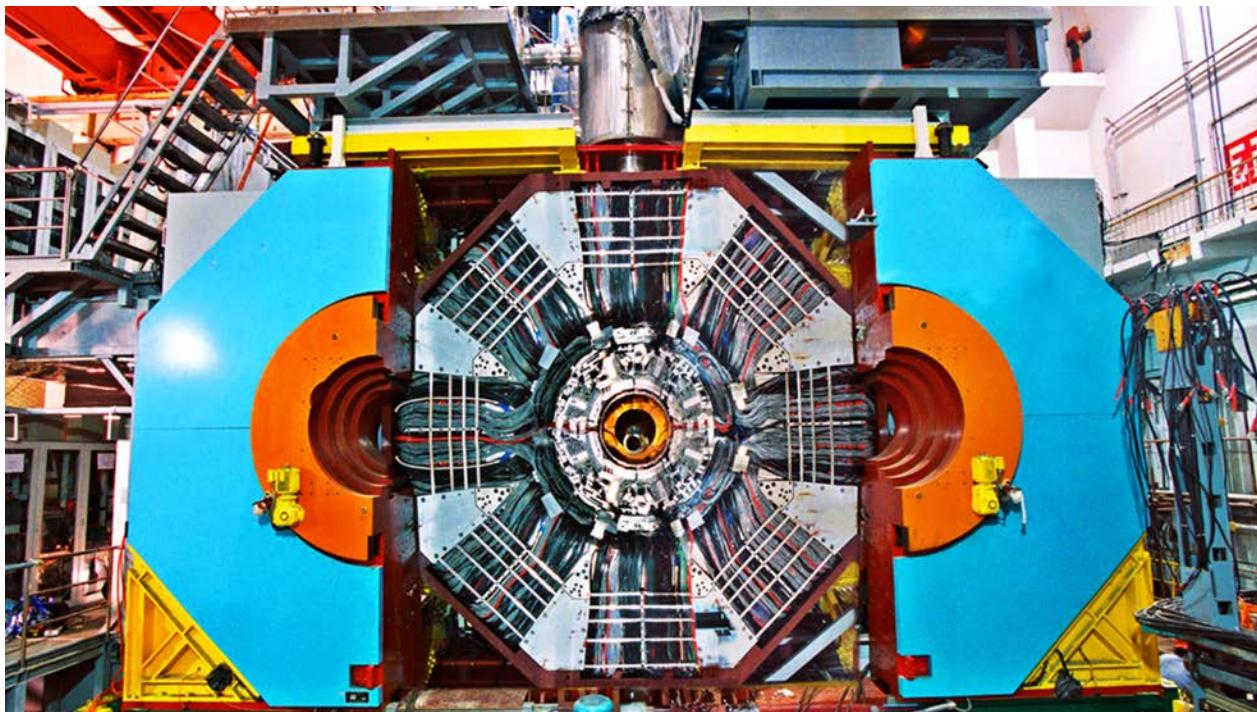


图 9-35 北京正负电子对撞机的双储存环

第五节 带电粒子在电场中的运动

带电粒子由于携带电荷，在电场中会受到电场力的作用产生加速度，使其速度发生变化。在现代科学实验和技术设备中，常常根据这个原理利用电场来改变或控制带电粒子的运动。北京正负电子对撞机是我国第一台高能加速器，也是世界八大高能加速器之一，如图 9-35 所示是该装置中的双储存环。该对撞机是高能物理研究的重大科技基础设施，它为中国粒子物理和同步辐射应用提供了基本研究实验手段和条件，使中国高能物理研究进入了世界前沿。而且，正负电子对撞机产生的同步辐射作为特殊光源，可在生物、医学、化学、材料等领域开展广泛的应用研究工作。

② 电场中两点的电势之差与电场力做功有何关系？

测量高度的起点不同，同一点的高度的数值就不相同，但两点间的高度差却保持不变。同样的道理，选择不同的位置作为电势零点，电场中任意点的电势的大小会随之改变，但电场中任意两点间的电势之差却保持不变。

电场中两点间电势之差称为**电势差**（**electric potential difference**），也叫电压。设电场中 A 点的电势为 φ_A ，B 点的电势为 φ_B ，A、B 两点间的电势差用符号 U_{AB} 表示，则

$$U_{AB} = \varphi_A - \varphi_B$$

电势差是标量，只有大小，没有方向。当 A 点电势比 B 点电势高时， U_{AB} 为正值； U_{BA} 则为负值。在国际单位制中电势差的单位也是伏特，简称伏，用符号 V 表示。

把正电荷 q 沿电场线的方向从 A 点移到 B 点，若 A 点的电势为 φ_A ，B 点的电势为 φ_B ，电场力做正功 W_{AB} ，则有

$$\begin{aligned} W_{AB} &= E_{pA} - E_{pB} \\ &= q\varphi_A - q\varphi_B \\ &= q(\varphi_A - \varphi_B) \\ &= qU_{AB} \end{aligned}$$

即

$$U_{AB} = \frac{W_{AB}}{q}$$

这就是电势差与电场力做功的关系，说明电场中任意两点之间的电势差数值上等于移动单位正电荷电场所做的功。因此，知道了电场中两点的电势差就可以方便地计算在这两点间移动电荷时电场力所做的功，而不必考虑电荷移动的路径。

示例 1 电场中有 A、B 两点，已知电势 $\varphi_A = 650 \text{ V}$ ， $\varphi_B = 800 \text{ V}$ 。把电荷量 $q = -2 \times 10^{-9} \text{ C}$ 的带电粒子从 A 点移动到 B 点，则：

- (1) A、B 两点间的电势差是多少？
- (2) 电场力做了多少功？做的是正功还是负功？

分析：根据 A、B 两点的电势可求出两点间电势之差。利用电场中某一点的电势与电荷量的乘积可求得带电粒子在该点所具有的电势能，根据电场力做功与电势能变化量的关系便可求解。

解：(1) A、B 两点间的电势差

$$\begin{aligned} U_{AB} &= \varphi_A - \varphi_B \\ &= 650 \text{ V} - 800 \text{ V} \\ &= -150 \text{ V} \end{aligned}$$

(2) 带负电粒子在 A 点的电势能

$$\begin{aligned} E_{pA} &= q\varphi_A \\ &= -2 \times 10^{-9} \times 650 \text{ J} \\ &= -1.3 \times 10^{-6} \text{ J} \end{aligned}$$

带负电粒子在 B 点的电势能

$$\begin{aligned} E_{pB} &= q\varphi_B \\ &= -2 \times 10^{-9} \times 800 \text{ J} \\ &= -1.6 \times 10^{-6} \text{ J} \end{aligned}$$

带电粒子从 A 点移动到 B 点电场力所做的功

$$\begin{aligned}W_{AB} &= E_{pA} - E_{pB} \\&= -1.3 \times 10^{-6} \text{ J} - (-1.6 \times 10^{-6}) \text{ J} \\&= 3 \times 10^{-7} \text{ J}\end{aligned}$$

当然，也可以用公式 $W_{AB} = qU_{AB}$ 进行计算，即

$$\begin{aligned}W_{AB} &= qU_{AB} \\&= (-2 \times 10^{-9}) \times (-150) \text{ J} \\&= 3 \times 10^{-7} \text{ J}\end{aligned}$$

因此电场力做功 $3 \times 10^{-7} \text{ J}$ ，做的是正功。

② 匀强电场中电场强度和电势差有何关系？

如图 9-36 所示，匀强电场的电场强度为 E ， AB 间距离为 d 、电势差为 U_{AB} 。把正电荷 q 沿电场方向从 A 点移动到 B 点，在此过程中，它受到的电场力为 qE ，电场力对其做功 $W_{AB} = qEd$ 。由电场力做功与电势差的关系，也可得 $W_{AB} = qU_{AB}$ 。

由此可得电场强度与电势差的关系为

$$E = \frac{U_{AB}}{d}$$

上式说明匀强电场中电场强度数值上等于沿电场线方向单位距离上降低的电势，而且，沿电场线的方向电势降低得最快。

大家谈

请证明 $1 \text{ N/C} = 1 \text{ V/m}$ 。

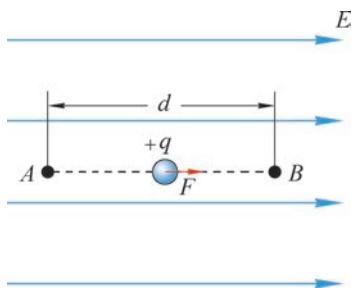


图 9-36 匀强电场中移动电荷

示例 2 如图 9-37 (a) 所示，在电场强度大小为 60 V/m 的匀强电场中有 a 、 b 、 c 三点， $ab = 5 \text{ cm}$ ， $bc = 8 \text{ cm}$ ，其中 ab 沿电场方向， bc 与电场方向的夹角为 60° 。求： a 、 c 两点间的电势差 U_{ac} 。

分析：根据匀强电场中电场强度与电势差的关系 $E = \frac{U_{ac}}{d}$ ，可得 $U_{ac} = Ed$ ，其中 d 为 a 、 c 两点间沿电场线方向的距离或 a 、 c 两点所在等势面间的间距，如图 9-37 (b) 所示。

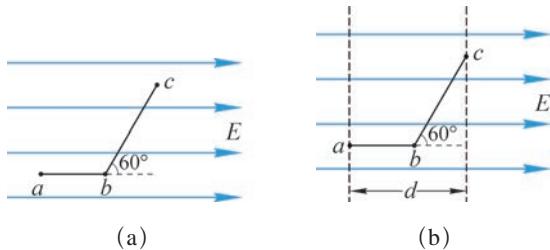


图 9-37 a 、 b 、 c 三点在匀强电场中的关系

解： a 、 c 两点间沿电场线方向的距离

$$d = ab + bc \cdot \cos 60^\circ = (5 + 8 \times 0.5) \text{ cm} = 9 \text{ cm} = 0.09 \text{ m}$$

根据匀强电场中电场强度与电势差的关系， a 、 c 两点电势差的大小

$$|U_{ac}| = Ed = 60 \times 0.09 \text{ V} = 5.4 \text{ V}$$

因为沿电场线方向电势逐渐降低， $\varphi_a > \varphi_b > \varphi_c$ ，所以电势差 U_{ac} 为正值。 $U_{ac} = 5.4 \text{ V}$ 。

② 如何分析带电粒子在电场中的运动？

带电粒子在电场中受到电场力的作用，通常电场力远大于带电粒子的重力，从而可以忽略重力对带电粒子的影响。如图 9-38 所示，真空中有一对平行金属板，两板间电势差为 U ，板间距为 d ，将一质量为 m 、带电荷量为 $+q$ 的粒子在正极板附近由静止释放，分析带电粒子在电场中的运动情况。

带电粒子在匀强电场中做初速度为零的匀加速直线运动。为了求带电粒子到达负极板时速度 v 的大小，我们用两种方法来研究。

方法一：由于带电粒子在匀强电场中受到电场力 F 作用，从正极板出发做初速度为零的匀加速直线运动，则由牛顿第二定律可得，带电粒子做匀加速直线运动的加速度

$$a = \frac{F}{m}$$

又 $F = qE$ ，由匀强电场的电场强度与电势差的关系 $E = \frac{U}{d}$

得到

$$a = \frac{qU}{md}$$

根据初速度为零的匀加速直线运动的运动学规律，则有

$$v^2 = 2ad$$

可得

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

方法二：带电粒子从正极板出发到达负极板，仅有电场力做功 $W = qU$ ，改变了带电粒子的动能，则根据动能定理，有

$$qU = \frac{1}{2}mv^2 - \frac{1}{2}mv_0^2$$

由于 $v_0 = 0$ ，也可得

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

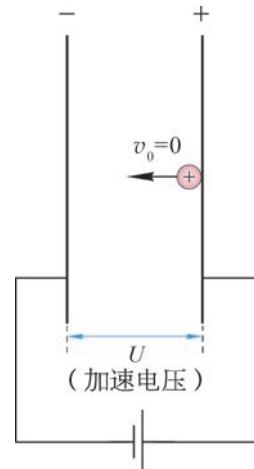


图 9-38 带电粒子在电场中的加速

大家谈

如果不是匀强电场，方法一和方法二中是否有些等式不适用了？请说明理由。

电荷在电场中运动会受到电场力的影响，必然获得加速度。因此，可以利用电场来控制带电粒子的运动。

自主活动

阴极射线是从低压气体放电管的阴极射出的带负电的电子流。如图 9-39 所示即为用阴极射线管演示带电粒子在电场中的偏转的实验装置。

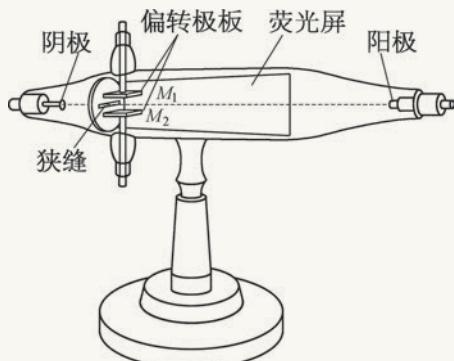


图 9-39 阴极射线在电场中偏转实验装置

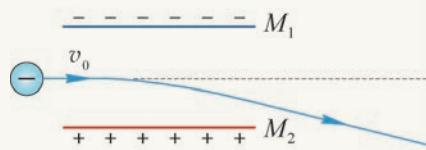


图 9-40 电子束在电场中的偏转

给阴极射线管左右两端加上高电压，电子束从阴极射向阳极。利用荧光屏可清晰地显示出电子束运动的径迹。在荧光屏前有一狭缝，射线只能从狭缝中通过沿直线前进。在射线经过路径的上下方有一对平行金属板 M_1M_2 ，称为偏转极板。通过控制偏转极板施加的电压观察带电粒子在电场中的偏转情况。

当平行金属板 M_1M_2 之间未加电压时，电子束不发生偏转，沿直线运动；当平行金属板 M_1M_2 之间施加上负下正的电压时，电子束在电场力的作用下如图 9-40 所示向下偏转；当平行金属板 M_1M_2 之间施加上正下负的电压，电子束将在电场力的作用下向上偏转。

带电粒子在电场中由于受到电场力的作用产生加速度，其速度大小和方向都可能发生变化。带电粒子在电场中沿直线加速和偏转是两种最基本的运动情况。

拓展视野

如图 9-41 所示，一电子（电荷量大小为 e 、质量为 m ）以初速度 v_0 沿水平方向射入水平放置、相距 d 、长为 L 、电势差为 U （能使电子飞出极板）的一对平行金属板间。

设两极板间为向上的匀强电场。电子进入匀强电场后，由于重力通常远小于电场力，重力可忽略不计。忽略极板的边缘效应，电子受到竖直向下的电场力作用而发生偏转。电子的运动类似于重力场中的平抛运动。

电子在水平方向的分运动是速度为 v_0 的匀速直线运动，即 $v_x = v_0$ ，因此电子在电场内运动的时间 $t = \frac{L}{v_0}$ 。

电子在竖直方向受电场力 eE 的作用，做初速为零、加速度为 a 的匀加速直线运动，产生垂直于板面方向偏移的距离 $y = \frac{1}{2}at^2$ 。其中

$$a = \frac{F}{m} = \frac{eE}{m} = \frac{eU}{md}$$

所以

$$y = \frac{1}{2}at^2 = \frac{eUL^2}{2mdv_0^2}$$

电子离开电场时，速度 v 的竖直方向分量

$$v_y = at = \frac{eU}{md} \cdot \frac{L}{v_0}$$

偏转角度 θ 可由 $\tan \theta$ 来确定，即

$$\tan \theta = \frac{v_y}{v_x} = \frac{eU}{md} \cdot \frac{L}{v_0^2}$$

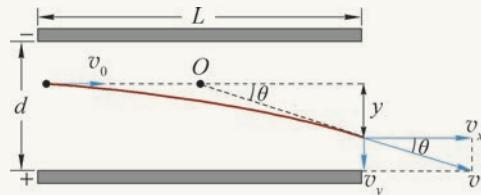


图 9-41 带电粒子在电场中偏转

问题与思考

- 在某次雷暴中，地面和云层之间的电势差是 1.2×10^9 V。假设一个电子从云层运动到地面，其电势能改变了多少？
- 电场中有 A 、 B 两点，已知两点的电势为 $\varphi_A = 300$ V， $\varphi_B = -200$ V。将一电荷量为 $+4 \times 10^{-6}$ C 的粒子从 A 点移到 B 点，电场力对带电粒子做了多少功？做的是正功还是负功？带电粒子的电势能是增加还是减少？改变了多少？

3. 如图 9-42 所示是一匀强电场的等势面，相邻等势面相距 2 cm，则该匀强电场的电场强度为多大，方向如何？

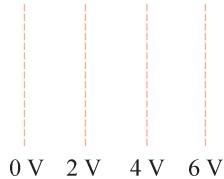


图 9-42

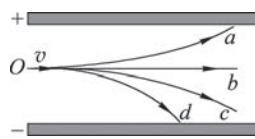


图 9-43

4. 如图 9-43 所示，一束粒子从 O 点沿水平方向射入平行板之间的电场后分成了 a 、 b 、 c 、 d 四束，各粒子束中粒子的带电情况如何？(不计粒子重力)
5. 如图 9-44 所示的装置处在真空中，电场加速电压为 $U = 10 \text{ V}$ ，两极板间距离 $d = 2 \text{ cm}$ 。若电子在负极板处由静止释放，求其在装置中被加速后离开电场时的速度 v 。(电子的质量为 $9.1 \times 10^{-31} \text{ kg}$)

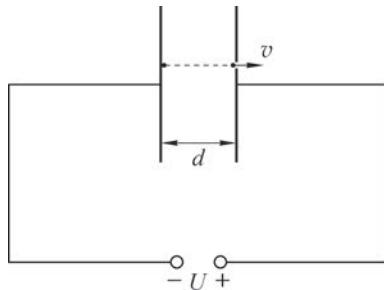


图 9-44



图 9-45 上海公交 11 路超级电容车

第六节 电容 电容器

如今在城市街头我们时常看到新能源汽车——电动汽车在路上行驶，其中超级电容车是典型的代表，作为城市公交的一员为市民提供公共服务。上海公交 11 路（图 9-45）是世界上首条使用超级电容车实现快速充电技术商业化的公交线路。

超级电容车借助车上安装的“超级电容器”，可以通过车顶的充电设备从充电站的电缆上实现几十秒的快速充电，然后继续行驶。超级电容车行驶所需的能量贮存在“超级电容器”里。

② 什么是电容器？

如图 9-46 所示的莱顿瓶可看作电容器的原型。莱顿瓶是一个玻璃容器，内外包覆着导电金属箔作为极板。瓶口插一根与外侧金属箔绝缘的金属棒，棒的上端接一个金属球，下端利用金属链与内侧金属箔连接。莱顿瓶具有贮存电荷的功能。

随着科技的发展，不断有新的用来储存电荷的装置被

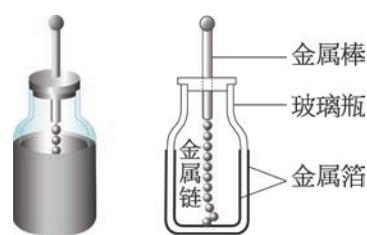


图 9-46 莱顿瓶

创造出来，我们把能存储电荷和电能的装置叫做**电容器（capacitor）**。各种电容器在电子或电力设备里有广泛的应用。

电容器（图 9-47）可分为容量固定的与容量可变的两种。电容器的符号如图 9-48 所示。常见的是固定容量的电容器，包括电解电容器和瓷片电容器等。

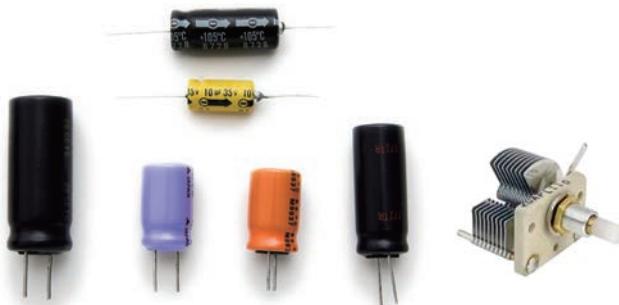


图 9-47 常见电容器



图 9-48 电容器的符号

平行板电容器（图 9-49）是最简单的电容器。它是在两个相距很近的平行金属板中间夹上一层绝缘物质——电介质（如空气、聚丙烯、云母等）组成的。

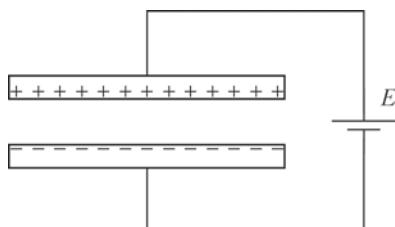


图 9-49 电路中的平行板电容器

② 电容器如何存储和释放电荷？

图 9-50 中如将单刀双掷开关 S 置于接线柱 1，电源的两极就分别与电容器两极板相连接，两极板就分别带上了等量异号电荷。这个过程称为对电容器充电。每个极板所带的电荷量的绝对值叫做电容器所带的电荷量。

随着极板上积累的电荷量不断增大，电容器两极板间的电势差 U 逐渐增大。当两板间电势差增大至与电源两端电压相等时，电路中不再有电流流动，电容器的充电过程完成。此时，将单刀双掷开关 S 置于接线柱 2，电容器上的电荷中和放电，极板上电荷量下降，两极板之间的电势差 U 也随之下降。当极板上的电荷量减小为零时，两极板之间电势差也下降为零，电容器最终不再带电，电容器的放电过程完成。

充、放电是电容器的重要特性之一。它可以将电能储存起来而在需要时释放。

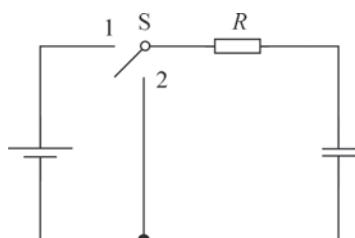


图 9-50 电容器的充、放电原理图

学生实验

观察电容器的充、放电现象

实验原理与方案

如图 9-50 所示，将单刀双掷开关 S 置于接线柱 1 时就构成了电容器的充电电路。当电容器充电结束后，将开关 S 置于接线柱 2 时就构成了电容器的放电电路。

实验装置与方法

方法一：如图 9-51 所示，通过灯泡的亮度变化观察电容器的充电和放电过程。

方法二：如图 9-52 所示，利用电压传感器和电流传感器，分别代替电压表与电流表，采集所测电路的电压、电流信号，得到电容器充、放电时电压 U 和电流 I 随时间 t 变化的图像，分别如图 9-53 和图 9-54 所示；从而可了解电容器的充电和放电过程。

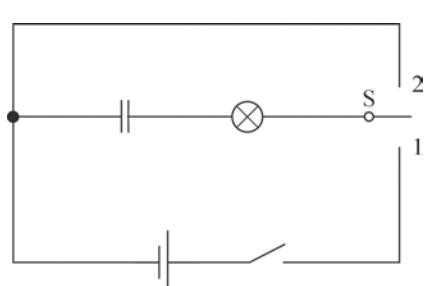


图 9-51 用灯泡观察电容器的充、放电电路

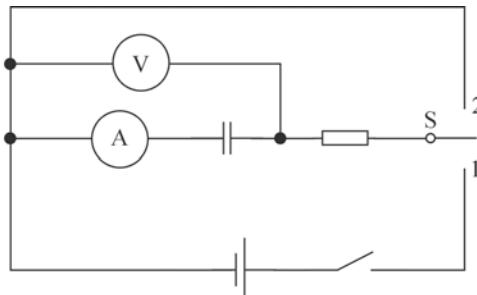


图 9-52 用传感器观察电容器的充、放电电路

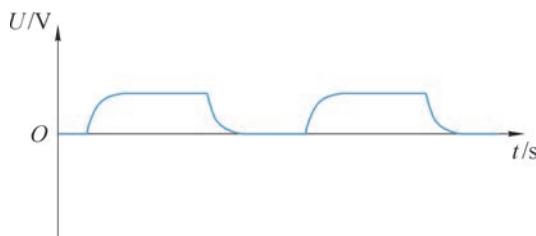


图 9-53 $U-t$ 图像

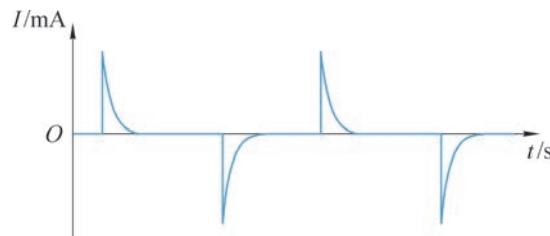


图 9-54 $I-t$ 图像

实验操作和数据收集

根据方法一或方法二的实验原理图组装电路，进行实验，观察电容器的充、放电现象。

数据分析

实验观察到的现象：_____。

实验结论：_____。

交流与讨论

电容器在充电过程中获得的能量来自哪里？

电容器在充、放电过程后，电源提供的电能又去了哪里？（电源视为其内阻为零）

如何描述电容器存储电荷本领的强弱?

将电容器A、电压传感器、电流传感器、电压可变的直流电源等按如图9-52所示组成电路。调节直流电源的电压，闭合开关，分别记录电容器两极板间的电势差U和在不同电压下充电完毕时电容器所带的电荷量Q(将电流传感器采集的数据处理后得到)。以电容器所带的电荷量Q为纵轴，以两极板间的电势差U为横轴，绘制电容器A的Q-U图像(图9-55)，发现电容器A每个极板所带的电荷量Q和电容器两极板间的电势差U成正比。

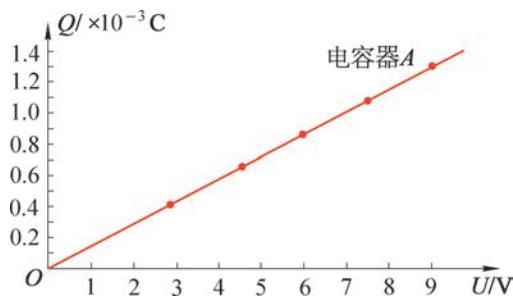


图9-55 电容器A的Q-U图像

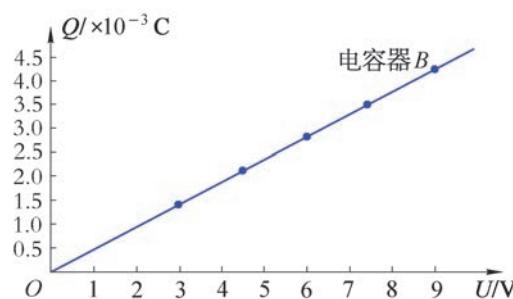


图9-56 电容器B的Q-U图像

选择另一个不同的电容器B，重复上述实验步骤，绘制电容器B的Q-U图像(图9-56)，同样发现电容器B每个极板所带的电荷量Q和电容器两极板间的电势差U成正比，但电容器B的比例系数与电容器A的比例系数不同。

大量研究表明，对于同一个电容器，每个极板所带的电荷量Q和电容器两极板间的电势差U成正比，也就是说 $\frac{Q}{U}$ 是确定的；对于不同电容器 $\frac{Q}{U}$ 一般是不同的。可见，电荷量Q和电势差U之比描述了电容器存储电荷的本领。

物理学中把电容器所带的电荷量Q与电容器两极板间的电势差U之比称为电容器的电容(**capacitance**)，用符号C来表示。

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

由上式可见，电容器的电容在数值上等于两极板间的电势差为1 V时电容器极板上所带的电荷量。电容的国际单位是法拉，简称法，用符号F表示。一般电容器的电容往往比1 F小得多，常用微法(μF)、纳法(nF)、皮法(pF)等单位，它们的关系是：

$$1 \mu\text{F} = 10^{-6} \text{ F}, 1 \text{nF} = 10^{-9} \text{ F}, 1 \text{pF} = 10^{-12} \text{ F}$$

如加在电容器两极板上的电压超过某个极限数值，电介质将变成导体，这种现象称为电介质的击穿。电介质击穿会导致电容器损坏。这个极限电压称为击穿电压。

电容器通常都标明电容器的电容和额定电压。额定电压是电容器长期工作时所能承受的电压，这个数值比击穿电压低。

超级电容车的“超级电容器”一般使用活性炭电极材料，具有储存电荷量大的特点，其电容可达几百至上千法。超级电容作为绿色节能的新型器件，以其容量高、寿命长、充电时间短、高效率、低污染等优异特性在交通运输、电力、机械工业等方面得到广泛的使用。

大家谈

规定电容器的电容这个物理量时采用了什么方法？在本章的学习过程中哪些物理量的定义也采用了这一方法？

示例 一个平行板电容器的电容是 $0.05 \mu\text{F}$ ，两极板间的电势差为 3 V ，求电容器所带的电荷量。

分析：可由电容的定义公式求得电荷量。

解：已知平行板电容器的电容 $C = 0.05 \mu\text{F} = 5 \times 10^{-8} \text{ F}$ ，电容器两极板的电势差 $U = 3 \text{ V}$ 。

则由电容的定义式 $C = \frac{Q}{U}$ ，得电容器的电荷量

$$\begin{aligned} Q &= CU \\ &= 5 \times 10^{-8} \times 3 \text{ C} \\ &= 1.5 \times 10^{-7} \text{ C} \end{aligned}$$

拓展视野

如图 9-57 (a) 所示，使一个极板与静电计相连的电容器充电后断开电源。在保持极板上的电荷量 Q 不变的条件下分别改变两极板的正对面积 S 、两极板间的距离 d 、两极板间的电介质。静电计指针的偏转角可定性地反映两极板间电势差 U 的大小。指针偏转角大反映了两极板间电势差大，由于极板上电荷量不变，说明电容器电容值小；指针偏转角小反映了两极板间电势差小，说明电容器电容值大。因此就可用不同情况下电势差 U 的大小反映电容器电容值 C 的大小从而研究影响电容器电容的因素。

1. 如图 9-57 (b) 所示，保持 Q 、 d 不变，改变 S ，研究 C 与 S 的关系；
2. 如图 9-57 (c) 所示，保持 Q 、 S 不变，改变 d ，研究 C 与 d 的关系；
3. 如图 9-57 (d) 所示，保持 Q 、 S 、 d 不变，在两极板间插入电介质，研究 C 与电介质的关系。

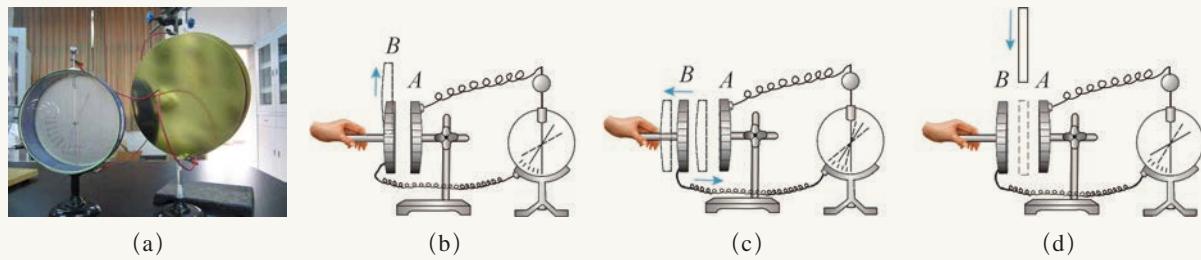


图 9-57 探究影响平行板电容器电容的因素

实验表明： S 越小， U 越大，说明 C 越小； d 越大， U 越大，说明 C 越小；插入介质后， U 减小，说明 C 变大。

由实验可得平行板电容器的电容大小与两极板的正对面积、极板间的距离和极板间电介质有关。

STSE

目前智能手机普遍采用了电容触摸屏，电容触摸屏可分为自电容屏和互电容屏两种类型。这里以支持多点触控的互电容屏为例进行说明。

如图 9-58 所示为互电容屏结构。互电容屏内部由驱动线路与玻璃基板上的传感线路等部分组成，驱动线路发出低电压高频信号投射到传感线路形成稳定的电流。

如图 9-59 所示，当手指接触到电容屏时，人体与电容屏就形成一个等效电容，而高频信号可以通过这一等效电容流入地线，这样传感线路所接收的电荷量减小，手指越靠近发射端，电荷量减小越明显，由此可根据传感线路所接收的电流确定触碰点的位置。

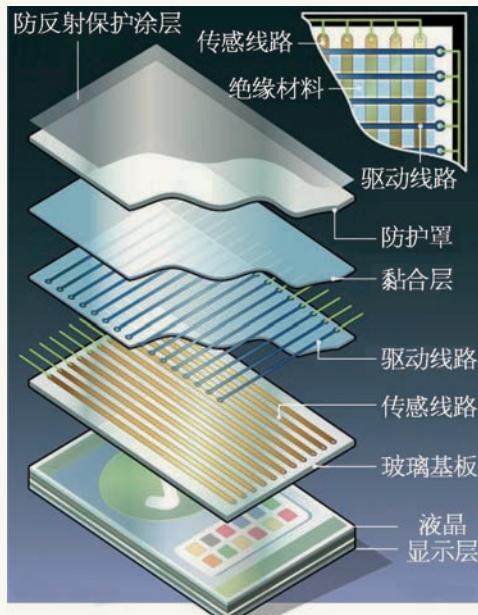


图 9-58 互电容屏结构

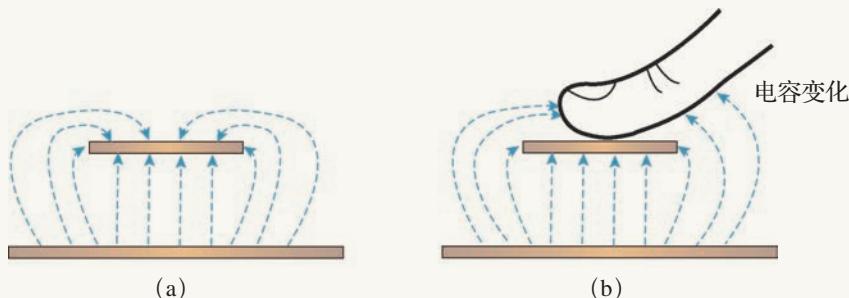


图 9-59 触屏原理示意图

问题与思考

1. 如图 9-60 所示为五种不同型号的电容器，试按储存电荷本领由强到弱排序。



图 9-60

2. 有一个电容器的电容为 C ，当电容器所存储的电荷量 q 加倍时，其电容如何变化？如果电容器两端的电势差 U 增至三倍，其电容又如何变化？简述理由。
3. 给一个额定电压为 25 V 的固定电容器充电。试在如图 9-61 所示的坐标系中画出这个电容器在充电过程中电荷量 Q 、电压 U 和电容 C 这三个物理量中任意两个物理量之间的关系。

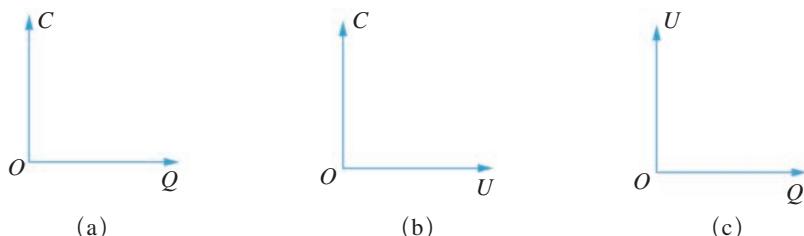


图 9-61

4. 如图 9-62 所示，有一固定电容器的电容为 $4.7 \mu\text{F}$ ，额定电压为 50 V ，求该电容器在额定电压下充电完成后所带的电荷量。若实际电压降到 40 V 时，电容器的电容和所带电荷量将如何变化？



图 9-62

5. 手能够使手机触摸屏工作是因为手指接触到电容屏时，人体与电容屏间形成一个等效电容。普通手套一般由绝缘材料制成，戴着普通手套无法使触屏手机屏幕工作。佩戴触屏手套则可以使得触屏手机屏幕正常工作，观察如图 9-63 所示的触屏手套，触屏手套拇指和食指部位的材料有何特点，才能使手机屏幕工作？



图 9-63



图 9-64 静电复印

第七节 静电的利用与防范

随着科学技术的发展和各种用电器的普及，静电与人们的关系越来越密切。在生产和社会生活中，静电既有有利的一面，如静电除尘、静电喷雾、静电复印（图 9-64）等，也有需要防范的一面。

② 如何利用静电？

1. 静电除尘

在工业生产中常利用静电以净化气体或回收有用尘粒。如图 9-65 所示为静电除尘装置及其示意图。在强电场 B 附近空气分子被电离为正离子和电子，电子在奔向正极 A 的运动过程中遇到尘粒，使尘粒带负电被吸附到正极处。这一装置常用于火力发电站收集烟气中的煤灰和粉尘，以及用于冶金业收集锡、锌、铅、铝等的氧化物。静电除尘也可以用于家庭除尘灭菌。

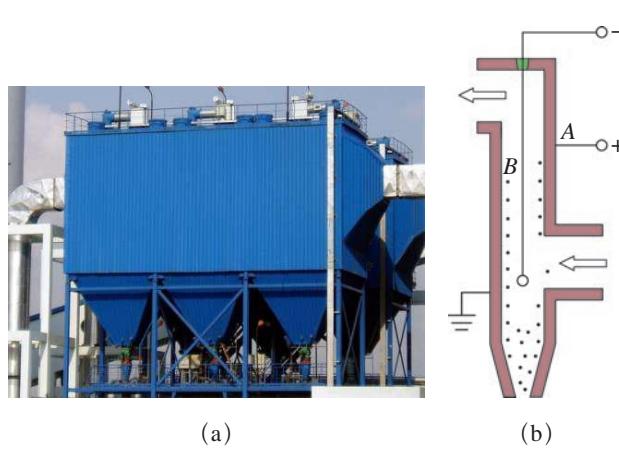


图 9-65 静电除尘

2. 静电喷雾

静电喷雾的特点是形成带有电荷的雾滴。在工业生产中，静电喷雾技术可用于汽车、家电、仪表等外壳的喷涂。

如图 9-66 所示，静电喷雾的喷枪口上有金属导流管接高压负极，被涂工件接地作为正极，在喷口和工件之间形成较强的静电场。当高压空气将涂料从输料管送到喷口的导流管时，由于导流管连接高压负极使涂料微粒带上负电荷，在静电力和压缩空气的作用下飞向工件，并均匀地吸附在工件表面。经过干燥或加热，固化成厚度均匀、质地坚固的涂层，完成喷涂工作。

3. 静电复印

现代电子技术的广泛应用给人们带来了许多方便，大大提高了工作效率。静电复印机具有简便、迅速、清晰、可扩印和缩印并可复印彩色原件等优点而被广泛应用。

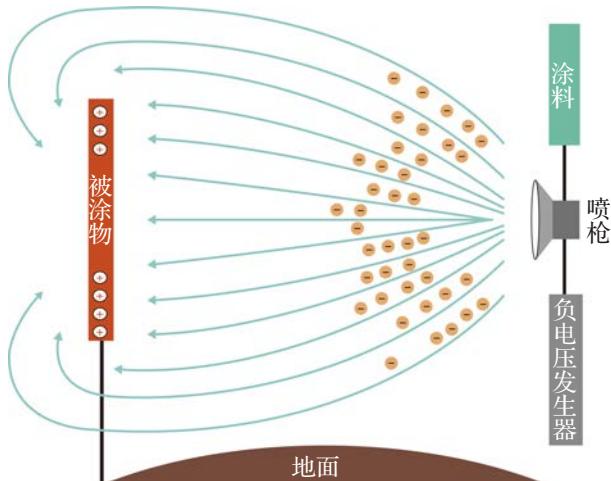


图 9-66 静电喷雾

自主活动

准备塑料板一块，丝绸一块，一些细木屑（或粉笔屑）。用丝绸在塑料板上用力摩擦后，再用手指在塑料板上缓慢移动写字，比如写一个“大”字，然后把干燥的细木屑（或粉笔屑）均匀地撒在塑料板上，竖起塑料板在桌面上轻轻敲击后，塑料板上就会留下一个空心的“大”字。

如图 9-67 所示，当一张要复印的图像放在静电复印机的稿台上时，在机内灯光照射下，反射光通过光学系统在光导硒鼓上成像。光导硒鼓表面覆有光敏导体薄膜。光敏导体对光很敏感，没有光线时电阻大，能保持电荷；遇到光照电阻就急剧下降，将所带的电荷传走。光敏导体表面在充电极的作用下带有均匀的正电荷。图像的反射光形成的像就落在光导硒鼓的光敏导体表面上。由于反射光有强有弱（与原稿图像的深浅对应），光敏导体的电阻相应发生变化。光敏导体表面的静电电荷也随光线强弱程度而不同程度地消失，在光敏导体膜层上便形成一个相应的静电图像。但人们看不到它，好像潜藏在膜层内，故称“静电潜像”。

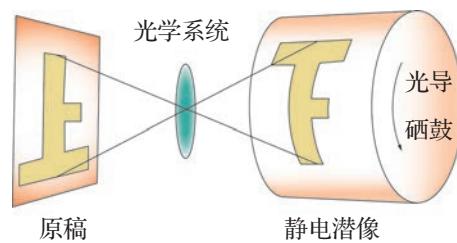


图 9-67 静电复印

这时带负电的显影墨粉在电场力的作用下被吸附到光敏导体表面。潜像上吸附的墨粉量与潜像上电荷的多少相对应。于是，在光导硒鼓的表面显现出有深浅层次的墨粉图像。复印机将送来的复印纸充上比光导硒鼓表面更强的正电。当复印纸与墨粉图像接触时便将带负电的墨粉转移到复印纸上。再经定影器加热，墨粉便被熔化并牢固地黏附在纸上，图像和文字就复印在纸上了。

大家谈

在生活中，静电是否给你带来过麻烦？你又是如何应对的？

虽然静电有许多用处，但静电的麻烦也不少。静电危害来源于带电体静电场的作用。例如飞机飞行时机体与空气、水汽、灰尘等微粒摩擦会使飞机带电，如果不采取措施，将会严重干扰飞机电子设备的正常工作；在印刷厂里，纸页之间的静电会使纸页黏合在一起，难以分开，给印刷带来麻烦；在制药厂里，由于静电吸引尘埃，会使药品达不到标准的纯度。另外，还可能因静电火花点燃某些易燃物体而引发爆炸等事故。

② 如何防范静电对人类的危害？

1. 良好接地

如图 9-68 所示，常见的油罐车尾的拖地链和加油机上的金属键盘等都是通过有效接地的方法把静电传入地下，以防止静电的积聚，避免静电放电的火花引发爆炸。飞机使用导电橡胶制作的轮胎，在着陆时静电通过导电轮胎及时传入大地，保证乘客和飞机的安全。



(a) 油罐车尾的拖地链



(b) 加油机上的金属键盘

图 9-68 良好接地

2. 工艺控制

静电的产生与环境湿度和空气中的离子浓度存在密切的关系。因此，保持一定湿度，让静电通过潮湿空气转移出去是一种有效的防范措施。同时，与普通场合相比，在空气纯净的场所（如无尘车间）内，静电更易产生。同样的操作在不同的湿度下产生的静电电压可以相差许多。值得注意的是，并不是湿度越高越好，湿度过高会导致设备易结露水；因此湿度应控制在一个合理范围内。另外，在橡胶、纤维、纸张、涂料中，常采用不同工艺掺加抗静电剂，从而使材料具有持久的抗静电效果。

3. 使用避雷针（接闪杆）

现代建筑物都装有避雷针。避雷针（接闪杆）的原理是尖端放电。如图 9-69 所示，在雷雨天气高楼上空出现带电云层时，高楼顶部会被感应上大量电荷。由于避雷针是尖的，在其周围形成强电场而导致尖端放电。这就是把空气击穿（电离）形成导电通路，使云层中积累的电荷通过避雷针导入大地，减少地面物受雷击的可能性。所以避雷针其实不“避雷”，反而是“接雷”，只不过是化强为弱，避免强雷电的破坏。

总之，静电利用是借助电荷间的相互作用，而静电防范是让产生的电荷及时转移出去，不产生累积。



图 9-69 避雷针的原理

问题与思考

- 下列关于生活中常见静电现象的实例是利用静电还是防范静电？为什么？
 - 油罐车有一条铁链拖地。
 - 飞机轮胎用导电橡胶制作。
 - 喷漆时让喷嘴喷出的油漆带电。
 - 汽车加油站的工作人员不能穿腈纶衣服。
- 如图 9-70 (a) 所示是家用燃气灶的电子点火器，电子点火器的放电电极为何要做成针尖形？如图 9-70 (b) 所示是实验室中的静电计，它的金属杆上端固定一个金属球而不做成针尖状，这又是为什么？



(a)

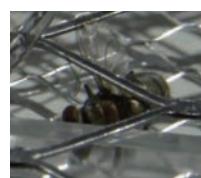


(b)

图 9-70



(a)



(b)

图 9-71

- 观察电蚊拍的结构，如图 9-71 所示。仔细观察会发现电蚊拍的金属网有三层。外面两层金属网连通处于低电势，中间层金属网高电势，外层与中间层电势差可达上千伏。试分析电蚊拍的灭蚊原理。

学期 活动

我国每年因心脏骤停死亡的人数超过 50 万，大约每 60 s 就会有一条生命因此离去。4 min 是心脏骤停发生后的黄金救助时间。在生死一线的黄金时刻，自动体外除颤器（Automated external defibrillator，缩写 AED，图 9-72）可以担负起挽救生命的职责。自动体外除颤器智能易操作，能完成心脏电击除颤，为患者争取更大的生存机会。自动体外除颤器以 100 kW 的电功率用 20 A 的电流通过胸腔，在约 2 ms 的时间内最多可传输 200 J 的电能。在人流密集的公共场所，如何才能找到自动体外除颤器？

以小组为单位，查阅资料了解自动体外除颤器具体的工作原理和使用方法，并寻找我们身边设置有自动体外除颤器的地点，完成一篇调查报告，同时绘制宣传海报。介绍自动体外除颤器的工作原理、使用方法和学校周边 AED 设备的分布。



图 9-72 地铁站中的自动体外除颤器

小结

· 基本概念和基本规律

元电荷：最小的电荷量，用符号 e 表示。通常 e 取 $1.6 \times 10^{-19} \text{ C}$ 。

库仑定律：真空中两个静止点电荷之间的相互作用力的大小跟它们的电荷量的乘积成正比，跟它们之间的距离的二次方成反比；作用力的方向沿两点电荷的连线，

$$F = k \frac{q_1 q_2}{r^2} \quad (k \text{ 为静电力常量, } k = 9 \times 10^9 \text{ N}\cdot\text{m}^2/\text{C}^2)。$$

电场强度：放入电场中任意点的电荷所受的电场力 F 跟其电荷量 q 之比，用符号 E 表示， $E = \frac{F}{q}$ 。

电势能：在电场中的电荷受电场力作用而具有的能做功的能量，用符号 E_p 表示。

电势：电场中某一点电荷的电势能 E_p 跟它所带的电荷量 q 的比，用符号 φ 表示， $\varphi = \frac{E_p}{q}$ 。

电势差：电场中两点间电势之差，也叫电压， $U_{AB} = \varphi_A - \varphi_B$ 。

电容：电容器所带的电荷量 Q 与电容器两极板间的电势差 U 之比，用符号 C 表示， $C = \frac{Q}{U}$ 。

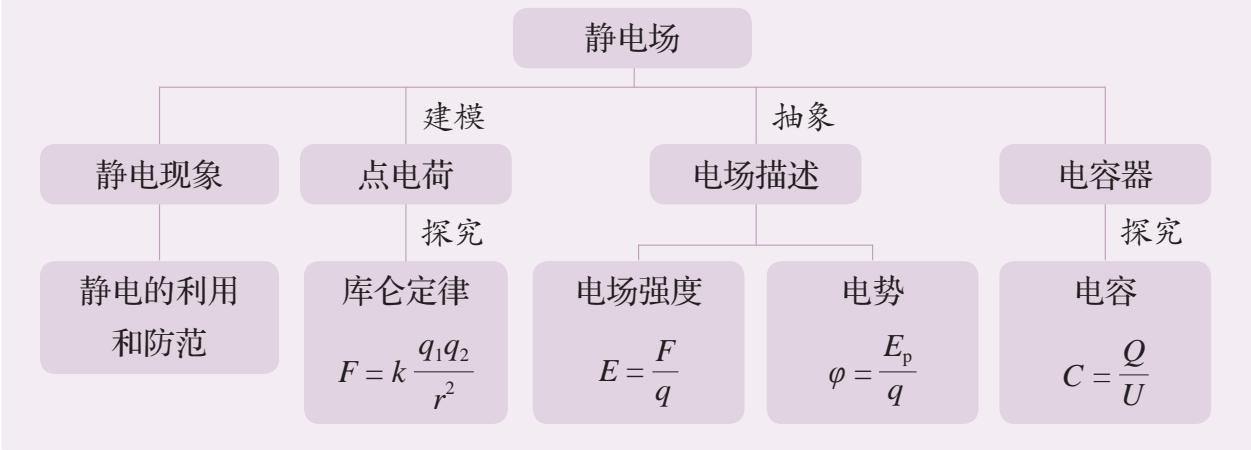
· 基本方法

通过研究带电体之间相互作用所建立的点电荷模型，认识模型建构的思想方法。

通过科学家发现库仑定律的过程，认识库仑扭秤实验巧妙解决电荷量和微小库仑力的测量问题，感受类比、微小力放大、守恒和对称等思想方法。

通过电场强度、电势、电容等物理量的概念和定义的建立，认识比值定义法。

· 知识结构图



复习与巩固

1. 下列物理量是矢量还是标量?
 - (1) 电场强度
 - (2) 电场力
 - (3) 电势
 - (4) 电势能
 - (5) 电容

2. 如图 9-73 所示为某电场的电场线分布, A、B 是电场中的两点。A、B 两点中哪一点的电场强度大? 画出正点电荷在 A 点和负点电荷在 B 点所受电场力的方向。

3. 某点电荷在距离其 50 cm 处产生的电场的电场强度大小为 2 N/C。该点电荷所带电荷量的大小是多少?

4. 如图 9-74 所示, 棒 AB 上均匀分布着正电荷, 它的中点正上方有一 P 点。P 点的电场强度的方向如何? 简述理由。

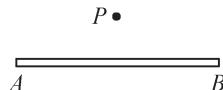


图 9-74

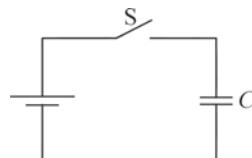


图 9-75

5. 如图 9-75 所示, 将一电容 $C = 0.25 \mu\text{F}$ 的不带电电容器和电势差 $U = 12 \text{ V}$ 的电源连接。闭合开关 S, 对电容器充电。充电完成后, 电容器的负极板上带的电荷的电荷量相当于多少个电子所带的电荷量?

6. 两个完全相同的金属小球 A 和 B 所带的电荷量大小相等, 相隔一定距离, 两球之间的相互吸引力的大小为 F。现让第三个完全相同的不带电的金属小球 C 先后与 A、B 接触后移开, 则此时 A、B 两金属小球之间的静电相互作用是吸引还是排斥? 相互作用力的大小为多少?

7. 如图 9-76 所示, 实线是一组未标明方向的由点电荷产生的电场线, 虚线是某一带电粒子通过该电场区域的运动轨迹, a、b 是其轨迹上的两点。若带电粒子在运动中只受电场力作用, 比较带电粒子在 a、b 两点的电势能大小和速度大小的关系。

8. 把电荷量 $q = -3 \times 10^{-6} \text{ C}$ 的点电荷从 A 点移到 B 点, 电场力做功为 $6 \times 10^{-4} \text{ J}$ 。把同样的点电荷从 B 点移到 C 点, 克服电场力做功 $3 \times 10^{-4} \text{ J}$ 。比较电场中 A、B、C 三点的电势大小。

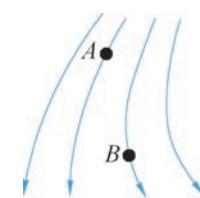


图 9-73

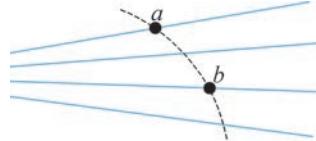


图 9-76

9. 细胞膜的厚度约等于 8 nm ($1 \text{ nm} = 10^{-9} \text{ m}$)。若将细胞膜内的电场视为匀强电场，试求当细胞膜的内外层之间的电压达 40 mV 时，细胞膜内电场强度的大小。此时一价钠离子 (Na^+) 可发生渗透通过细胞膜，则一个钠离子发生渗透时电势能改变多少？

10. 一电场的电场线分布关于 y 轴对称， O 、 M 、 N 是 y 轴上的三个点，且 $OM = MN$ 。 P 点在 y 轴右侧， $MP \perp ON$ ，如图 9-77 所示。 M 点与 P 点的电势哪点更高？电势差 U_{OM} 与 U_{MN} 的大小关系如何？

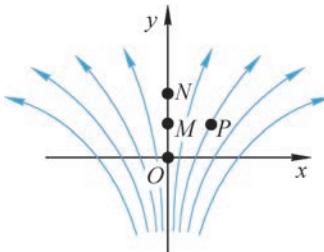


图 9-77

*11. 在与 x 轴平行的匀强电场中，一带电荷量为 $1.0 \times 10^{-8} \text{ C}$ 、质量为 $2.5 \times 10^{-3} \text{ kg}$ 的物体在光滑水平面上沿 x 轴做直线运动，其位移与时间的关系是 $x = 0.16t - 0.02t^2$ ，式中 x 以 m 为单位， t 以 s 为单位。从开始运动到第 5 s 末，物体所经过的路程为多少？克服电场力所做的功为多少？

*12. 如图 9-78 所示，两块分别带等量异号电荷的大平行金属板相距 5.0 cm ，它们之间的电场可视为匀强电场。电子 (e) 从负极板表面静止释放的同时，质子 (p) 也从正极板表面静止释放。忽略电子和质子间的相互作用力，当它们到达同一等势面时，该等势面与正极板之间的距离是多少？(质子的质量为 $1.67 \times 10^{-27} \text{ kg}$ ，电子的质量为 $9.11 \times 10^{-31} \text{ kg}$)

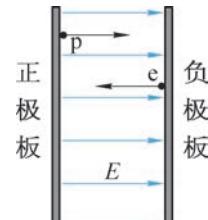
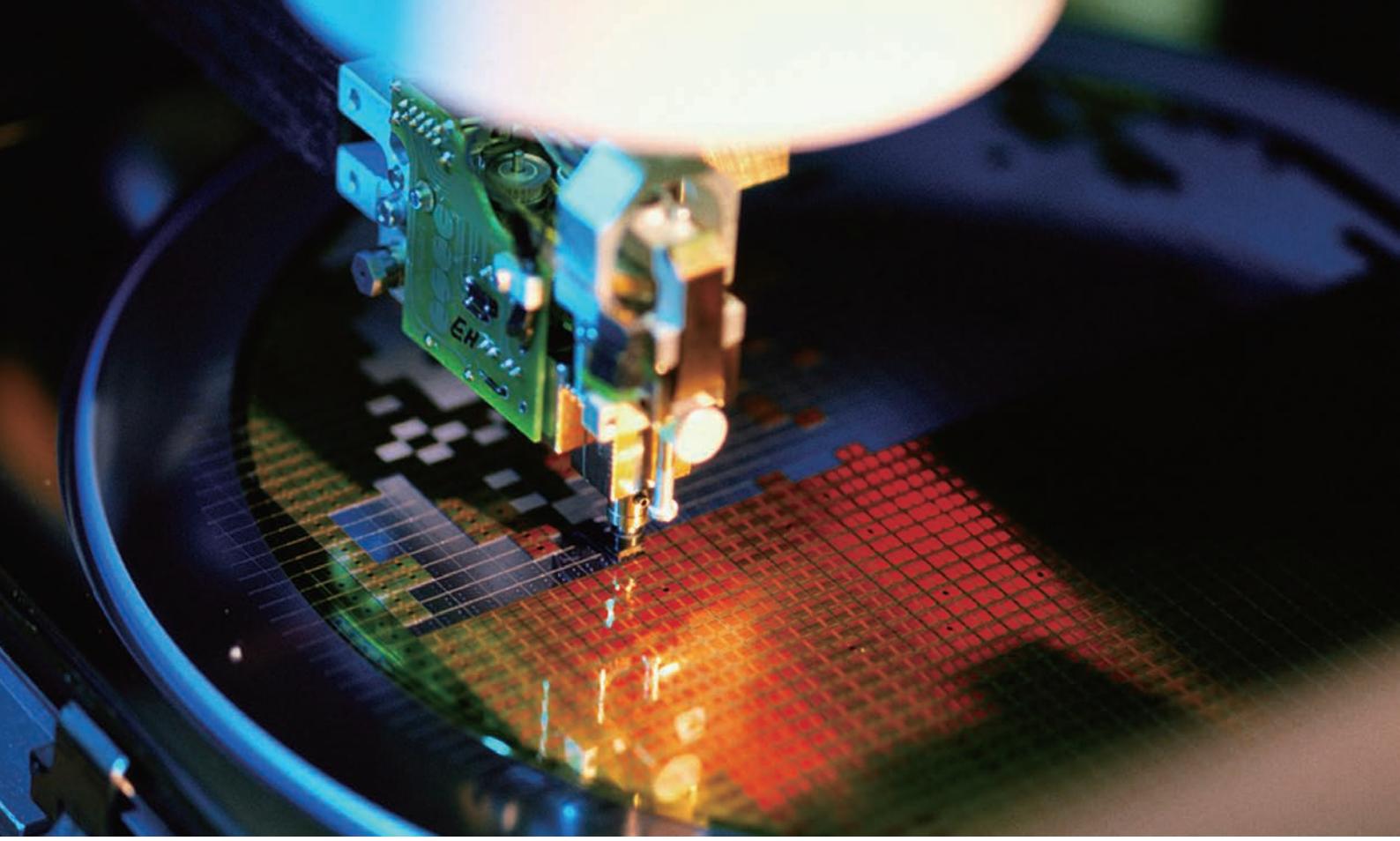


图 9-78



图为从硅晶圆上取下已制好的集成电路所需的芯片。如今， 1 cm^2 的集成电路就可以拥有几十亿甚至上百亿个电子元器件。稳定、高效、轻便的集成电路为人们的生活、科技带来了无限的可能。集成电路极为复杂，要研究集成电路，我们需先从认识简单电路开始。那么，电路元器件如何构成简单电路，电路工作中遵循哪些规律呢？

第十章 电路及其应用

• 在本章中你将：

1. 认识常见的电路元器件，了解串并联组合电路特点，理解闭合电路欧姆定律、电功、电功率及焦耳定律等有关电路的概念和规律。
2. 探究影响导体电阻的因素；练习使用多用电表；测量电阻率、电源电动势和内阻。
3. 运用电路知识解释生活中的有关现象，分析和解决家庭电路的简单问题。

- 本章的学习将从微观机制深入理解电学量；在初中学习的基础上学习简单的串联、并联组合电路及闭合电路。
- 本章的学习将进一步认识等效替代、控制变量等思想方法。



图 10-1 上海浦东陆家嘴的璀璨夜景

第一节 简单串联、并联组合电路

夜晚的上海浦东陆家嘴（图 10-1）灯光璀璨，美丽壮观。实现这些照明效果，需要使用各种各样的电路元器件搭建电路。

② 常见的电路元器件有哪些？

如图 10-2 所示是一些常见的电路元器件，自左至右依次为小型电动机、电感器、电容器、电阻器、三极管和二极管。如表 10-1 所示为电路中常见元器件的名称及符号。



图 10-2 常见的电路元器件

表 10-1 常见电路元器件的名称及符号

名称	图形符号	名称	图形符号	名称	图形符号
电源	+	电阻器	□	电容器	
开关	—	可调电阻器	—	可变电容器	—
电灯	○	滑动变阻器	—	空心线圈	—
电动机	M	晶体二极管	—	铁芯线圈	—

各种元器件连接在一起形成**电路 (electric circuit)**。初中我们已学过一个简单的电路由电源、用电器、开关、导线组成，如图 10-3 所示。其中电源提供电能；用电器消耗电能；导线提供电流通道，起到输送电能的作用；开关控制电路的通、断，若开关闭合，电路中即有电流通过。

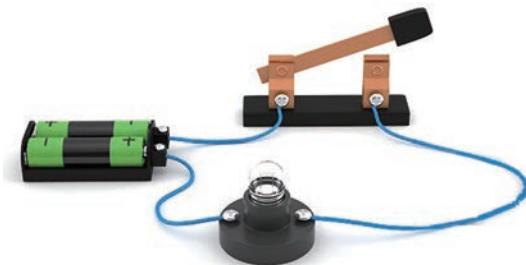


图 10-3 简单电路

？电流是如何形成的？

为了简单起见，我们以金属导体为例讨论。如图 10-4 所示，在金属导体中，有“固定”在晶体结构点阵上失去电子的原子，我们把它称为原子实。还有大量的自由电子，这些电子是金属导体内的自由电荷。一般情况下，金属导体中的自由电子大约以 10^5 m/s 的速率做永不停息的无规则热运动，做热运动的自由电子向各个方向运动的机会均等，从宏观上看，不会形成电流。

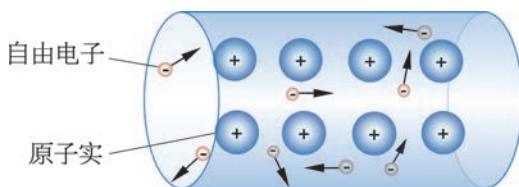


图 10-4 导体中自由电子的热运动

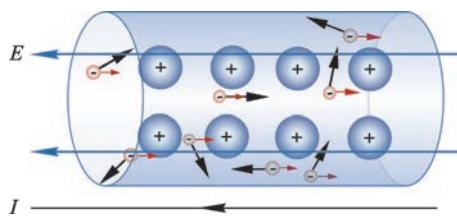


图 10-5 存在电场时导体中电子的运动

(说明：漂移速度远小于热运动速度，图中代表漂移速度的红色箭头仅为示意，不代表实际大小)

若导体中存在电场，在电场力的作用下，导体中的自由电子获得与电场方向相反的加速度。自由电子在加速运动过程中和原子实频繁碰撞，持续加速受到阻碍，最终获得沿加

速度方向一定的速度，这一速度称为漂移速度，如图 10-5 所示。电子的漂移速度很小，比热运动的速度小许多个量级。但由于漂移速度的存在，使导体内的自由电子从整体上发生了逆电场方向的定向移动，便形成了和电场方向相同的电流。

物理学中规定，通过导体某一横截面的电荷量 Q 与所用时间 t 之比称为电流（electric current），用符号 I 表示，即

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

在国际单位制中，电流的单位是安培，简称安，符号为 A。

大家谈

导体中的自由电子在电场力的作用下获得漂移速度。由于电场力持续存在，该速度是否会持续增大，从而使导体中的电流持续增大呢？

？ 电路中的电压如何理解？

我们知道导体中的自由电荷是在电场力的作用下才发生定向移动的。正电荷在电场力的作用下从电势高处向电势低处运动，我们规定正电荷定向移动的方向为电流的方向，因此，沿着电流的方向电势逐渐降低。电流方向上的两点间存在电势差，这个电势差就是电路中这两点间的电压（voltage）。

拓展视野

当对金属导体两端施加电压时，金属内部就建立起电场并形成和电场方向相同的电流。虽然导体内一直存在电场对电子加速，但是电子的漂移速度却不会无限增加。这是因为电子会和原子实发生碰撞，这种碰撞对电子的定向运动形成“阻碍”。加速与碰撞两种作用同时存在，结果便是一定的电场下，电子获得一定的漂移速度。所以电流不会无限增大，即一定的外加电压形成一定的电流。

另一方面，电场对电子加速必对电子做功，使所有电子的总动能增加。在电子与原子实碰撞过程中，电子的一部分动能传递给原子实，使原子实在点阵位置上的热振动加剧，表现为导体获得热量，温度升高。由此可见，自由电子与晶体点阵上的原子实碰撞，形成对电子定向运动的阻碍作用，这就是“电阻”产生的原因，也是电阻元件在通电时发热的原因。

？什么是串联、并联组合电路？

初中时我们已经学过了两个用电器的串联或并联，当用电器的数目超过两个，用电器间的连接方式会比较复杂，可能既有串联又有并联。将用电器同时采用串联和并联的方式组合起来形成的电路叫做串联、并联组合电路。实际生活中大部分电路都是采用串联、并联组合电路的方式连接的。

示例 把阻值分别为 $R_1 = 20 \Omega$ 、 $R_2 = 30 \Omega$ 、 $R_3 = 8 \Omega$ 的三个电阻连接成如图 10-6 所示的组合电路，电路的总阻值为多少？若电源电压 $U = 20 \text{ V}$ ，则闭合开关后，流过每个电阻的电流大小分别为多少？

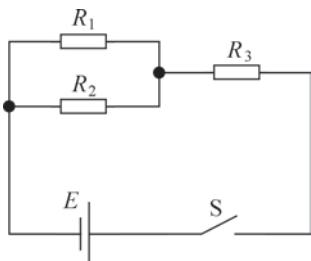


图 10-6 组合电路图

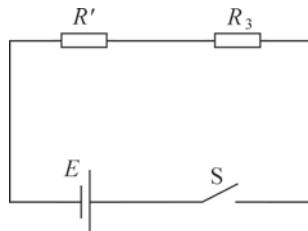


图 10-7 等效电路图

分析：这个组合电路为 R_1 与 R_2 并联后再与 R_3 串联。将 R_1 、 R_2 按照并联关系等效为电阻 R' ，则原电路可等效为如图 10-7 所示的 R' 与 R_3 的串联电路，这样就可以求解电路的总阻值了。可先将原电路等效为如图 10-7 所示的串联电路，然后再根据串并联电路特点逐步还原求解。

解： R_1 与 R_2 并联，则 R_1 、 R_2 与等效电阻 R' 之间的关系为

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

因此

$$R' = \frac{R_1 R_2}{R_1 + R_2}$$

又 R' 与 R_3 串联，因此电路中总电阻

$$\begin{aligned} R_{\text{总}} &= R' + R_3 \\ &= \frac{R_1 R_2}{R_1 + R_2} + R_3 \\ &= \left(\frac{20 \times 30}{20 + 30} + 8 \right) \Omega \\ &= 20 \Omega \end{aligned}$$

助一臂

等效电路是将一个复杂的组合电路通过电阻等效等方法，化简成具有与原电路功能相同的简单电路。这个简单的电路，称作原复杂电路的等效电路。

“等效”的目的是为了在电路分析时，通过等效替代，简化分析过程。之前学习的平均速度、力的合成等都是等效替代思想的应用。

闭合开关后，由欧姆定律得，电路中的总电流，即流过 R_3 的电流

$$I_3 = I = \frac{U}{R_{\text{总}}} = \frac{20}{20} \text{ A} = 1 \text{ A}$$

设流过电阻 R_1 的电流为 I_1 ，流过电阻 R_2 的电流为 I_2 ，由于 R_1 与 R_2 并联，有

$$\frac{I_1}{I_2} = \frac{R_2}{R_1}$$

又

$$I_1 + I_2 = I = 1 \text{ A}$$

则

$$I_1 = 0.6 \text{ A}, I_2 = 0.4 \text{ A}$$

STSE

集成电路是一种微型电子器件或部件。采用一定的工艺，把一个电路中所需的晶体管、电阻、电容等元件及布线互连在一起，制作在一小块或几小块半导体晶片或介质基片上，然后封装在一个管壳内，成为具有所需电路功能的微型结构。如图 10-8 所示为一款封装后的集成电路。集成电路的诞生，使电子技术发生了划时代的革命。集成电路与由分立元件组装的普通电路相比，具有重量轻、体积小、性能好和能耗小等多项明显优势。



图 10-8 集成电路

在集成电路的制造过程中，光刻技术是一个非常重要的环节，它决定了集成电路的集成度，即单位面积上的元器件数目。随着集成度需求的不断提升，光刻技术正在逼近物理极限。在集成电路未来的发展中，人类想要突破极限，就需要新的技术和解决方案。

问题与思考

1. 如图 10-9 所示是一块电路板，指出至少 2 种电路元件，并说出其名称。

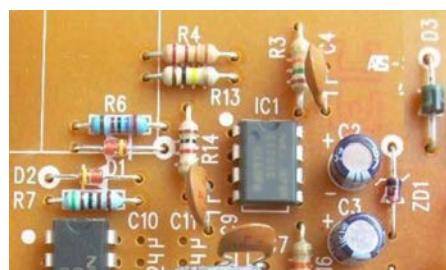


图 10-9

2. 石墨是元素碳的一种同素异形体，每个碳原子的周边连结着另外3个碳原子，单层石墨碳原子的排列方式呈蜂巢式的六边形平面结构，如图10-10所示。每个碳原子最外层有4个价电子，其中3个电子与周围的碳原子形成3个共价键，剩余的1个电子能够自由移动。

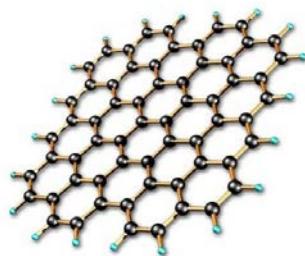


图 10-10

- (1) 由上述材料判断石墨能否导电，若能导电，则形成定向移动的带电微粒是什么？
- (2) 查阅金刚石的结构，判断其能否导电？
3. 当雷雨云聚集的电荷达到一定的数量时，在带电的云层与云层之间或者带电的云层与地面之间能形成很强的电场，足以把空气击穿，同时激发出耀眼的闪光，这就是人们常说的闪电。若一次闪电放电的电荷量大小是300 C，放电的时间是0.005 s，则这次闪电放电时的平均电流为多大？

4. 如图10-11所示为某控制电路的一部分。已知AA'间的输入电压为24 V，如果电阻 $R=6\text{ k}\Omega$ ， $R_1=6\text{ k}\Omega$ ， $R_2=3\text{ k}\Omega$ ，则BB'输出的电压可能为多少？
5. 有三只阻值均为 6Ω 的电阻，取其中的一只、两只或三只使用，通过不同的连接方式，共可获得多少种不同的阻值，分别为多少？

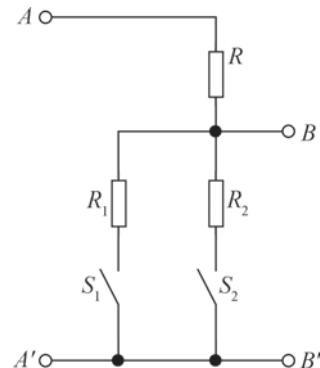


图 10-11

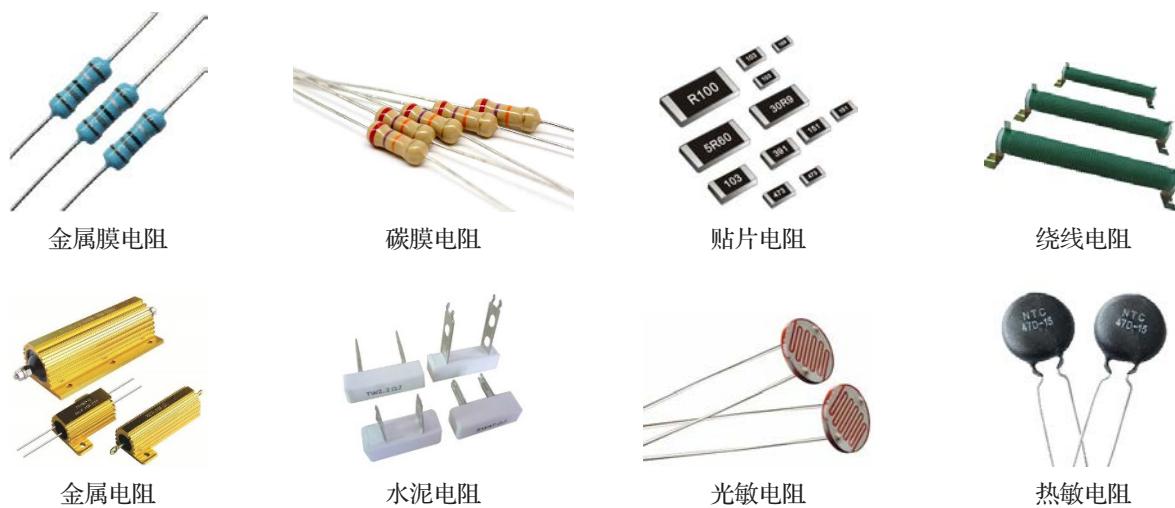


图 10-12 形形色色的电阻器

第二节 电阻定律

如图 10-13 所示，在用伏安法测一根细铁丝的电阻时，我们发现，将其两端直接接入电路和将铁丝对折头尾相连再接入电路，两次测得的电阻值不同。若将细铁丝换成形状相同的细铜丝，测得铜丝的电阻值与铁丝的也不同。我们知道，**电阻 (resistance)** 是一个物理量，表示导体对电流阻碍作用的大小，通常用 R 表示；电阻是导体本身的一种特性，不同的导体，电阻大小一般不同；电阻越大，表示导体对电流的阻碍作用越大。同样的铁丝为什么两次测量的电阻值不同呢？相同形状的铁丝与铜丝的电阻值为什么又不同呢？

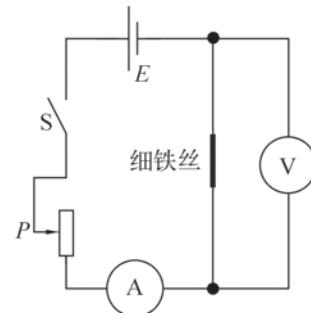


图 10-13 伏安法测细铁丝的电阻

大家谈

一段金属导体的电阻由哪些因素决定？有怎样的定量关系？请猜测、提出假设并说明假设的依据。

② 一段金属导体电阻与长度、横截面积等因素有怎样的定量关系？

1. 研究金属导体电阻与长度的关系

采用粗细均匀的长金属电阻丝，按如图 10-14 所示的电路连接。不断改变导线与电阻丝

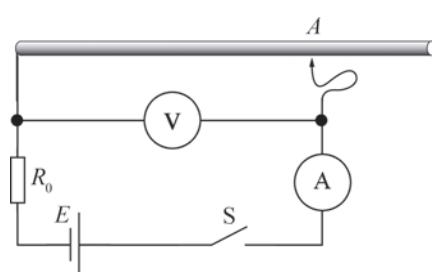


图 10-14 研究金属导体电阻与长度的关系

的接触点 A 的位置，依次记录电压表、电流表的示数及连入电路的电阻丝的长度 L，随后根据电压表、电流表的示数计算连入电路部分的电阻丝的电阻值 R，最终绘制 R—L 图像，判断导体电阻与长度的关系。

2. 研究金属导体电阻与横截面积大小的关系

采用材料及长度相同、横截面积不同的电阻丝，分别接入如图 10-15 所示的电路 a、b 两端。记录电压表及电流表的示数，计算出电阻丝阻值 R，绘制电阻丝阻值 R 与横截面积 S 的 R—S 图像，从而判断导体电阻与横截面积间的关系。

3. 研究金属导体的电阻与材料的关系

采用横截面积、长度相同但材料不同的金属电阻丝，分别连入如图 10-15 所示的电路 a、b 两端。通过记录电压表、电流表的示数，计算电阻丝阻值 R，判断材质是否影响电阻阻值。

实验表明：在温度不变时，导体的电阻 R 与导体的长度 L 成正比，与导体的横截面积 S 成反比，与构成它的材料有关，即

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

这就是电阻定律（law of resistance）。式中 ρ 叫做材料的电阻率（resistivity），电阻率的单位是欧姆·米，符号为 $\Omega\cdot\text{m}$ 。不同材料的电阻率 ρ 是不同的，它的数值是由导体的材料性质所决定的，反映了材料的导电性能。在一定的温度下，对同一种材料而言， ρ 不变。如表 10-2 所示为一些常见导体材料在温度为 20 ℃时的电阻率。

表 10-2 一些常见导体材料在温度为 20 ℃时的电阻率

导体	电阻率 $\rho/(\Omega\cdot\text{m})$	导体	电阻率 $\rho/(\Omega\cdot\text{m})$
银	1.6×10^{-8}	铁	1.0×10^{-7}
铜	1.7×10^{-8}	汞	9.6×10^{-7}
铝	2.9×10^{-8}	锰铜合金 *	4.4×10^{-7}
钨	5.3×10^{-8}	镍铜合金 **	5.0×10^{-7}
铂	1.0×10^{-7}	镍铬合金 ***	1.0×10^{-6}

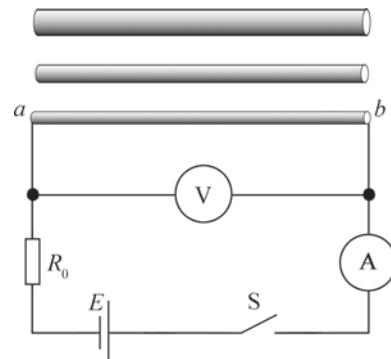


图 10-15 研究金属导体电阻与横截面积大小的关系

* 锰铜合金：85% 铜，3% 镍，12% 锰。

** 镍铜合金：54% 铜，46% 镍。

*** 镍铬合金：67.5% 镍，15% 铬，16% 铁，1.5% 锰。

示例 一根长 $L = 10 \text{ m}$ 的铁丝，质量 $m = 0.156 \text{ kg}$ 。试求其在温度为 20°C 时的电阻。
(铁的密度 $D = 7.8 \times 10^3 \text{ kg/m}^3$)

分析：由电阻定律公式 $R = \rho \frac{L}{S}$ 可知，若求铁丝的电阻 R ，必须知道铁丝的电阻率 ρ 、长度 L 和横截面积 S 。其中 ρ 可以由表 10-2 查得， L 已知， S 则要通过铁丝的质量 m 、密度 D 和长度 L 来求得。

解：设铁丝的体积为 V ，横截面积为 S ，由 $m = DV = DSL$ 得

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

将上式代入电阻定律公式，则铁丝的电阻

$$R = \rho \frac{DL^2}{m} = \frac{1.0 \times 10^{-7} \times 7.8 \times 10^3 \times 10^2}{0.156} \Omega = 0.5 \Omega$$

大家谈

导体的电阻和电阻率有何区别？

② 温度对导体的电阻有何影响？

前面讨论电阻和电阻率时我们都假定“温度不变”，那么温度对导体的电阻有何影响呢？下面我们就先来做一个实验。

自主活动

利用电压表、电流表、温度传感器，按如图 10-16 所示的电路研究小灯泡的 $I-U$ 特性曲线。

实验时，闭合开关，缓慢调节滑动变阻器阻值，记录电压 U 、电流 I 的数据，并相应记录此时小灯泡周围的温度值。得到的实验 $I-U$ 图线如图 10-17 所示。

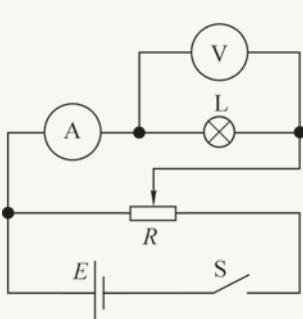


图 10-16 研究小灯泡的电压、电流关系

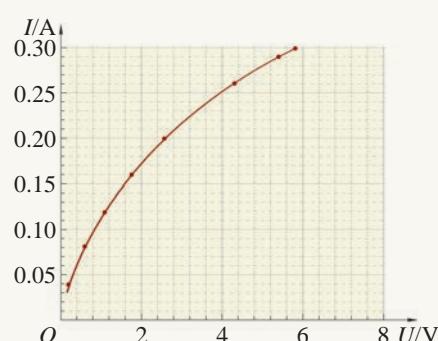


图 10-17 小灯泡 $I-U$ 特性曲线

从 $I-U$ 图线不是一条直线可知，电阻不是一个常数。由实验可知，随着流过小灯泡的电流的增加，小灯泡灯丝的温度逐渐升高。温度对灯丝的电阻存在影响，灯丝温度变化时，它的电阻发生了变化。从实验获得的图线可知，灯丝电阻随温度升高而增大。小灯泡的灯丝在正常发光时的电阻值比不发光时大很多。电阻随温度的变化主要是由于导体材料的电阻率随温度发生了变化。尽管如此，在中学物理中，除非特别指出，一般不考虑温度对电阻变化的影响。

利用金属的电阻跟温度的关系，可以制成电阻温度计。通常用铂电阻丝做成的温度计叫做铂温度计，它比汞温度计更精确，且测量范围更广。

电阻器 (resistor) 是用导体材料制成的、在电路中对电流起一定阻碍作用的电子元件，在日常生活中也常常被直接称为电阻。人们根据电阻定律，设计生产出各种各样的电阻器（图 10-12）来满足社会生产生活实际需要。作为重要基础电子元件，电阻器在工业生产中有着重要而且广泛的应用。

STSE

1911 年，荷兰物理学家昂内斯 (H. K. Onnes, 1853—1926) 发现，当汞温度降到 4.15 K (-269°C) 附近时，电阻会突然降到零。之后，又有科学家发现，某些金属、合金和化合物在温度降到绝对零度附近某一特定温度时，电阻会突然减小到无法测量，这种现象叫做超导现象。由正常状态转变为超导状态的温度称为这种物质的临界温度。现在已发现，大多数金属元素以及数以千计的合金、化合物都在不同条件下显示出超导性。

超导体可以通过大电流，并产生强磁场，因此在电磁设备中有着广泛的应用，如核磁共振成像仪、加速器等。不过超导现象大规模应用遇到的主要障碍是超导所要求的低温。如果能得到在室温下呈现超导现象的材料，就会使世界发生巨大的变化。

我国著名物理学家赵忠贤 (1941—) 从 1976 年开始从事探索高温超导体的研究，1983 年开始研究氧化物超导体 BPB 系统及重费米子超导性，1986 年底在 Ba-La-Cu-O 系统研究中，注意到杂质的影响，并于 1987 年参与发现了液氮温区超导体。1987 年 2 月，他所在的小组独立地发现了液氮温区超导体，并首先向世界上公布了其化学成分 Ba-Y-Cu-O。这个研究成果推动了超导研究。现在，许多科学家正在研究超导。

问题与思考

- 导致电路烧毁的故障，经常发生在插座处。试说明可能的原因。
- 某实验室需要绕制一个总阻值是 $50\ \Omega$ 的滑动变阻器。根据表 10-2 的数据，计算需要用多长的横截面积是 $0.02\ \text{mm}^2$ 的镍铬线？

3. 观察滑动变阻器的外观，说出图 10-18 中各字母标识的部件的名称，并解释滑动变阻器能改变电阻的原因。

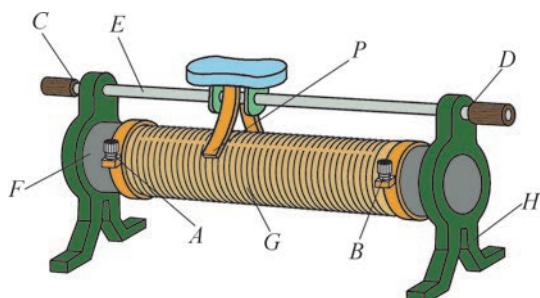


图 10-18

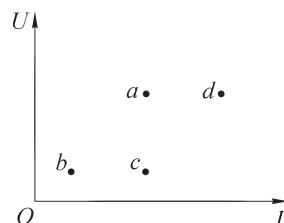


图 10-19

4. 将四个定值电阻 a 、 b 、 c 、 d 分别接入电路，测得电流、电压值如图 10-19 中相应的点所示。试指出其中阻值最接近的两个电阻，并简述理由。
5. 两根长短、粗细都相同的导体，一根是铜丝，另一根材料未知。若将这两根导体串接在电路中，发现另一根导线两端的电压约为铜丝两端电压的 30 倍，试问另一根导线是用何种材料制成的？
6. 研究表明，人体中的水分绝大部分存在于血液、肌肉及内脏中，而脂肪中含水量极低，因此脂肪部分比肌肉和人体其他组织电阻率更高。电子脂肪秤是一种测量人体脂肪百分率、水分百分率、骨骼质量等数据的产品。脂肪秤的表面隐藏有两个电极片，使用时人需要赤脚站立在脂肪秤上。根据上述资料，建立简单物理模型，猜测脂肪秤的工作原理，并查找资料对脂肪秤测量的准确性进行评价。



图 10-20 汽车后挡风玻璃上的电阻丝

第三节 测量金属丝的电阻率

细心观察，你会发现汽车的后挡风玻璃上有一条条的细线，如图 10-20 所示，其实这些细线是金属电阻丝。当挡风玻璃起雾、起霜时，汽车对挡风玻璃上的电阻丝通电加热可以起到除雾化霜的作用。我们已经知道金属丝的长度和横截面积一定时，其阻值取决于金属材料的电阻率。本节我们将通过实验测量金属丝的电阻率。

？ 金属丝的电阻率如何测量？

若有一根长为 L 、直径为 d 的金属丝，则可以根据电阻定律 $R = \rho \frac{L}{S}$ ，得其电阻率 $\rho = \frac{SR}{L}$ ，又 $S = \pi \left(\frac{d}{2}\right)^2$ ，所以可得

$$\rho = \frac{\pi d^2 R}{4L}$$

因此，要测得金属丝的电阻率 ρ ，需要先测得金属丝的长度 L 、直径 d 和电阻 R 。

学生实验

学生实验一：长度测量及其测量工具的选用

长度是物理学中的基本物理量之一。长度的测量是最基本的测量，测量工具众多，最常用的工具是刻度尺。另外，也可以使用游标卡尺（图 10—21）和螺旋测微器（图 10—22）等。测量工具的分度值（测量工具所能测量的最小值）决定了测量工具所能达到的精度。通常情况下，刻度尺的分度值为 1 mm，游标卡尺的分度值有 0.1 mm、0.05 mm 和 0.02 mm 三种，螺旋测微器的分度值一般为 0.01 mm。

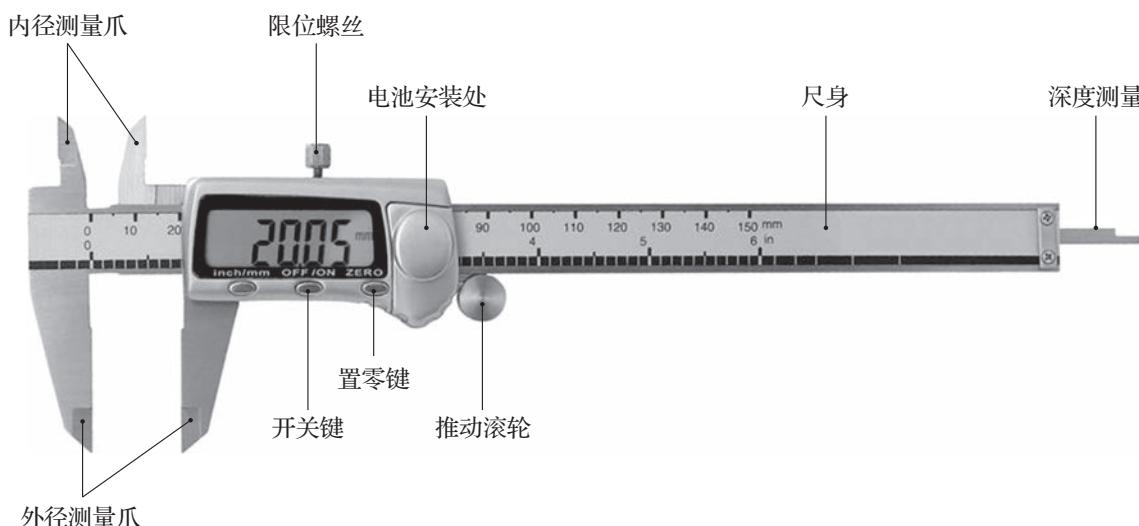


图 10—21 数字显示游标卡尺

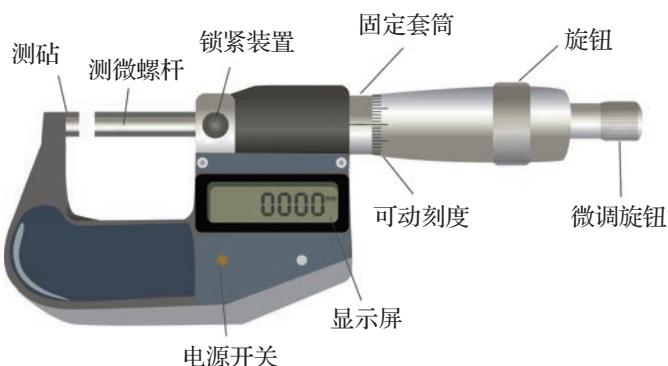


图 10—22 数字显示螺旋测微器

测量长度时要根据不同的场景和要求选择不同的工具。应尽量选择测量工具的量程大于被测物体长度，避免多次测量的累加造成的测量精确度下降；测量工具的分度值要小于测量精度的要求。如金属丝的长度可用刻度尺测量，但金属丝的直径用刻度尺测量则满足不了精度的要求，会造成较大的误差，因此需要选用精度更高的游标卡尺或螺旋测微器对金属丝直径进行测量。

实验原理与方案

用刻度尺测量金属丝的长度，用数字显示螺旋测微器测量金属丝的直径。多次测量取平均值以减少误差。

实验操作和数据收集

1. 用刻度尺测量金属丝的长度，将数据记录在表 10-3 中；
2. 用数字显示螺旋测微器测量金属丝横截面的直径。打开电源开关，在测砧与测微螺杆接触时进行调零；将金属丝置于测砧与测微螺杆之间；旋转旋钮，当测砧即将夹紧金属丝时，改旋微调旋钮使测砧夹紧金属丝，将显示屏上显示的金属丝直径数值记录在表 10-3 中。

表 10-3 实验数据记录表

实验序号	1	2	3	4	5	平均值
金属丝长度 l/mm						
金属丝直径 d/mm						

实验结论

金属丝的长度 l 为 _____；金属丝的直径 d 为 _____。

交流与讨论

也可用游标卡尺测金属丝的直径。各组交流使用不同测量仪器的体会，讨论提高测量准确度的方法。

拓展视野

1. 游标卡尺的测量原理

游标卡尺作为一种被广泛使用的高精度测量工具，可以测量物体的长度、内径、外径及深度等。它是由主尺和附在主尺上能滑动的游标尺两部分构成，如图 10-23 所示。游标尺上的刻度线越多，测量的精确程度就越高。如分度值为 0.1 mm、0.05 mm、0.02 mm 的游标卡

尺的游标尺上分别有 10 条、20 条、50 条刻度线。那么，游标卡尺是如何实现测量精度的提高的呢？

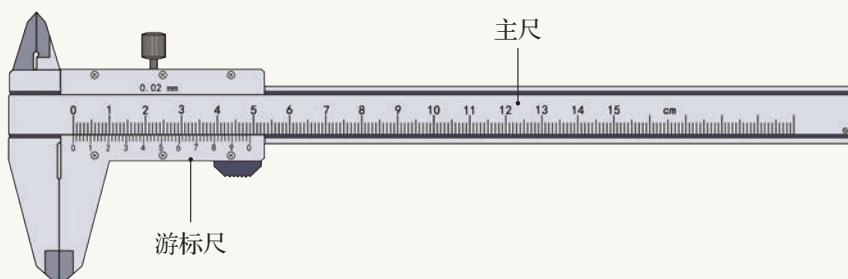


图 10-23 游标卡尺

游标尺上的刻度间距 x 比主尺上的刻度间距 y 略小一点。一般游标尺上的 n 个刻度间距等于主尺上 $(n-1)$ 个刻度间距，即

$$nx = (n-1)y$$

由此可知，游标上的刻度间距与主尺的刻度间距相差 $\frac{1}{n}$ mm，这就是游标尺的精度。

以分度值 0.1 mm 的游标卡尺为例，如图 10-24 所示，游标尺上有 10 个等分刻度，总长 9 mm，因此游标尺的每一分度为 0.9 mm，比主尺上的最小分度小 0.1 mm。当测量爪并拢时，主尺和游标尺的零刻度线对齐，两者的第一条刻度线相差 0.1 mm，第二条刻度线相差 0.2 mm，……，第 10 条刻度线相差 1 mm，即游标的第 10 条刻度线恰好与主尺的 9 mm 刻度线对齐。若测量时测量爪的卡口间距为 0.3 mm，游标尺就要向右移动 0.3 mm，使得它第 3 条刻度线恰好与尺身的 3 mm 刻度线对齐。这样就将主尺上读数时所涉及的估读问题转化为确定主尺上的刻度线与游标尺上的哪条刻度线对齐的问题。所以，游标卡尺是利用主尺的单位刻度（1 mm）与游标尺的单位刻度之间固定的微量差值来提高测量精度的，即采取了错位放大法提高了测量的精度。

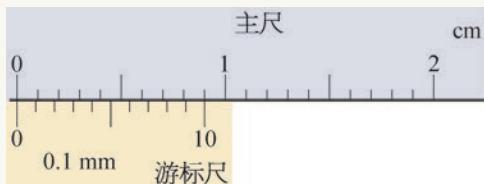


图 10-24 分度值为 0.1 mm 的游标卡尺的刻度线

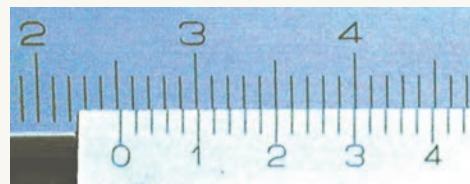


图 10-25 分度值为 0.02 mm 的游标卡尺的读数

如图 10-25 所示的游标卡尺的精度为 $\frac{1}{50}$ mm，即 0.02 mm。在读数时，先从主尺上读得游标尺的零刻度线所在的整数分度值（25 mm）；再到游标尺上找与主尺刻度线准确对齐的游标刻度线（第 11 根刻度线）；求得游标尺的分度值 $11 \times \frac{1}{50} = 0.22$ mm；最后得到测量值 $25 + 0.22 = 25.22$ mm。由于使用游标卡尺测量长度时没有进行估读，只是判断刻度线的对齐与否，因此其测量误差即为游标尺的精度值，本例中为 0.02 mm。

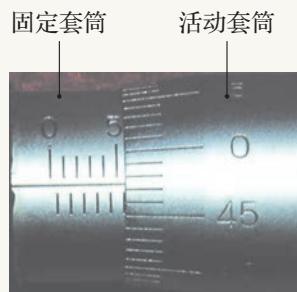
2. 螺旋测微器的测量原理

螺旋测微器 [图 10-26 (a)] 是依据螺旋放大的原理制成的。该原理类似于在盘旋式楼梯上行走时，走过的距离与上升高度间存在放大关系，即螺杆在螺母中旋转一周的同时即沿着旋转轴线方向前进（后退）一个螺距的距离。在螺旋测微器中，可动

刻度的一圈为 50 格，而旋转一圈，螺杆前进（后退） 0.5 mm ，即为固定刻度中的一个小格，所以，螺旋测微器可精确测量的最小刻度为 $\frac{0.5}{50}\text{ mm} = 0.01\text{ mm}$ 。



(a) 实物



(b) 读数

图 10-26 螺旋测微器

如图 10-26 (b) 所示的螺旋测微器（局部）螺距为 0.5 mm ，活动套筒（可动刻度）的周界被等分为 50 格，故活动套筒转动 1 格，螺杆相应地移动 0.01 mm ，再加上估读，其测量精度值可达到 0.001 mm 。读数时，先读固定套筒（刻度）上标尺的数值，再加上活动套筒上标尺的数值。应特别注意活动套筒上的示数是否过 0，过 0 则加 0.5，不过 0 则不能加 0.5。如图 10-26 (b) 所示，虽然固定套筒上的 5.5 mm 刻度线已经可以看到，但活动套筒上的示数尚未过 0，因此读数应为 $5.0 + 0.474 = 5.474\text{ mm}$ ，而非 $5.5 + 0.474 = 5.974\text{ mm}$ 。

学生实验

学生实验二：测量金属丝的电阻率

实验原理与方案

要测得金属丝的电阻率，在金属丝的长度和直径的测量基础上，还需要进一步测出金属丝的电阻 R 。本实验采用伏安法测量金属丝阻值 R ，电路图如图 10-27 所示。

实验装置与方法

本实验要用到学生稳压电源、电压表、电流表、滑动变阻器、待测金属丝等实验器材。

实验操作和数据收集

根据图 10-27 连接电路，闭合开关，调节滑动变阻器，设计表格，记录多组电压、电流值。

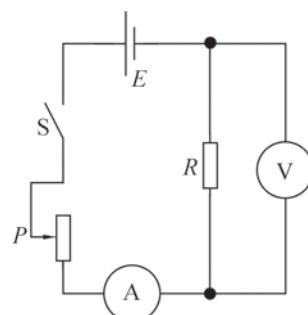


图 10-27 实验电路图

数据分析

根据实验数据，绘制 $U-I$ 图像，由图线的斜率得出金属丝的阻值 R 。

根据测得的金属丝长度、直径和阻值计算金属丝的电阻率。

实验结论

金属丝的电阻率 $\rho = \text{_____}$ 。

交流与讨论

与其他实验小组分享、比较同一金属丝电阻率的测量结果，并通过查表对比标准值与所测金属丝电阻率的差异。

分析实验误差产生的原因，提出减少实验误差的方法。

STSE

把各种材料的电阻率由小到大排列起来，如图 10-28 所示。

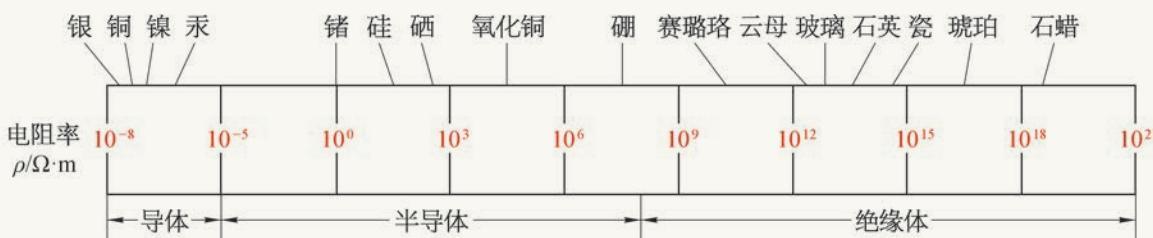


图 10-28 各种材料的电阻率

可见，锗、硅、硒、氧化铜、硼等的电阻率比绝缘体小而比金属大，这类材料称为半导体。

半导体的电阻率常随周围各种环境条件的改变而变化。利用半导体的电阻率随温度升高而减小的特性，可以制成热敏电阻。如图 10-29 所示是一个用热敏电阻制成的半导体体温计，灵敏度、精确度都比较高。

热敏电阻还广泛应用于电子器件的自动调节和控制，是自动化设备的一种重要元件。

有的半导体材料在光照下，电阻率也会改变，这类半导体材料可制成光敏电阻。它也是自动控制、遥测技术中的重要元件。例如，若机器上装有光敏电阻控制的制动装置，使一束光照射在光敏电阻上，操作时，若手伸入了危险区，光路就被截断，光敏电阻阻值迅速增大。通过控制电路，机器立刻自动停止运转，从而保证操作工人的安全。在货物传送带旁安装光敏电阻控制的计数器，就可对货物自动计数。



图 10-29 电子体温计

问题与思考

1. 根据“测量金属丝的电阻率”的实验，判断下列操作是否正确，并对错误的操作做出修改。
 - (1) 用刻度尺多次测量金属丝的全长，算出其平均值。
 - (2) 用螺旋测微器在金属丝上一个部位测量直径。
 - (3) 实验中尽可能保持金属丝的温度不变。
2. 某段导线的电阻是 2Ω ，如果把它均匀拉长到原来的 1.2 倍，这段导线的电阻将变为多少？
3. 某同学为了测定自动铅笔笔芯的电阻率做了以下实验：他取出一根直径为 0.7 mm 的自动铅笔笔芯，用刻度尺测出笔芯的长度为 11.0 cm，又用“伏安法”测得其电阻阻值为 25.1Ω 。计算铅笔芯的电阻率并提出 1~2 个在实验中可能产生误差的原因。
4. 将若干张相同的纸叠放在一起，用刻度尺测量出其总厚度，然后除以张数，可以得到一张纸的厚度。受此方法启发，如何用刻度尺测出一根细电阻丝的直径？写出测量方法，并用字母表示出测量值。若该电阻丝的总电阻为 R ，总长度为 l ，试写出该电阻丝的电阻率的表达式。
5. 长江口涨潮时海水倒灌，出现所谓“咸潮”现象，使得崇明岛的水质受到影响。如果海水的电阻随长度、横截面积的变化规律与金属导体相同。设计一个测量海水电阻率的实验方案以研究“咸潮”出现的规律。



图 10-30 飞机仪表盘

第四节 多用电表

在现代的工厂、交通运输工具以及航空航天器上都能看到各类仪表。它们中绝大多数是由电表和传感器构成的，通过数字或者指针显示的方式非常直观地体现着各种量的变化，在帮助我们操作设备、减少事故、节约能源、防止污染等方面发挥着重要的作用。例如，如图 10-30 所示的飞机仪表盘就可以帮助飞行员及时掌握有关飞机自身或飞行状态的各项数据。

大家谈

谈一谈生活中的各类仪表，以及这些仪表的功能。

什么是多用电表？

多用电表是一种集测量电压、电流、电阻于一体的多用途电表。多用电表也是装配、修理电子仪器的必备检测工具，常见的有指针式和数字式两种。

指针式多用电表可以用来测量电压、电流、电阻等电学量。它的外部有刻度盘、旋转式选择开关、调零旋钮和红黑表笔插孔等，如图 10-31 (a) 所示。

数字式多用电表的外部主要有液晶显示屏、电源开关、功能旋钮（其中量程选择有手

动和自动两种), 以及若干表笔插孔。表笔插孔中标有“COM”的为公共插孔, 测量时需插入黑表笔。其他插口处标有“V”“A”“ Ω ”, 分别代表测量电压、电流、电阻时红表笔对应的插孔, 如图 10-31 (b) 所示。此外, 数字式多用电表还可以测量交流信号频率、电容值等。由于数字式多用电表更为精确和便捷, 现在已逐步代替指针式多用电表成为主流。



图 10-31 多用电表

② 如何使用数字式多用电表测量各种电学量?

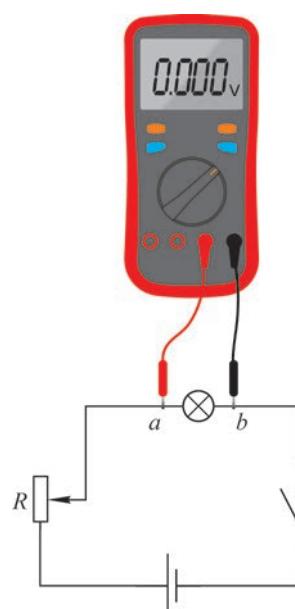
在使用数字式多用电表之前, 需检查表笔以及表壳是否有损坏; 接通电源, 判断电池是否能正常供电。若遇到问题应及时检查更换。

测量时, 应按需求调节功能旋钮到相应的挡位, 待示数稳定后才能开始测量。使用完毕后, 功能旋钮应旋至 OFF 挡, 或者旋至交流高压挡, 并关闭电源。长期不使用还应取出电池。

1. 使用数字式多用电表测量电压

如图 10-32 所示为利用滑动变阻器调节小灯泡亮度的电路。电路中电源电压为 3 V, 小灯泡的规格为“2.5 V, 0.3 A”。连接电路, 闭合开关。为了使小灯泡正常发光, 应调节滑动变阻器滑片的位置, 利用数字式多用电表测量小灯泡两端的电压, 直至额定电压为止, 具体步骤如下:

- ① 将红表笔插入电压插孔, 黑表笔插入公共插孔;
- ② 将功能旋钮旋转至(直流)电压挡, 根据待测值选择合适的量程;
- ③ 在电路接通的情况下, 将红、黑表笔的金属笔尖分别与小灯泡两端的 a、b 两点接触(红表笔接高电势), 如图 10-32 所示;
- ④ 缓慢调节滑动变阻器滑片的位置, 直到数字式多用

图 10-32 用数字式多用电表
测电压

电表的示数为 2.5 V 为止。此时小灯泡在额定电压下工作。

测量时要选择合适的量程，若液晶屏显示“OL”或最高位显示“1”等字样，则代表量程选择过小，待测量超过量程。此时应断开多用电表连接，重新换挡后继续测量。若无法预估待测值，应选择最大量程测量一次，再逐渐减小至最合适的量程。

大家谈

在测量电压时，有同学将两支表笔均插入了正确的位置，但是数字式多用电表的电压示数为负，这表示什么含义？

2. 使用数字式多用电表测量电流

在先前的图 10-32 电路中，为了检验小灯泡在额定电压下的工作电流，可以使用数字式多用电表继续实验，具体步骤如下：

- ① 将红表笔插入电流插孔，黑表笔插入公共插孔；
- ② 将功能旋钮旋转至（直流）电流挡，根据待测值选择合适的量程；
- ③ 断开电路，将红、黑表笔的金属笔尖分别与电路中的 c、d 两点接触（接通电路后，电流由红表笔流入多用电表），如图 10-33 所示；
- ④ 闭合开关，保持小灯泡正常发光时滑动变阻器滑片的位置不变，记录数字式多用电表的电流示数。

值得注意的是，由于数字式电表的内部结构不同，测量较小电流 (μA 或 mA) 和较大电流 (A) 时，红表笔应插入不同的插孔，在实际使用时，应根据待测值选择合适的插孔。

3. 使用数字式多用电表测量电阻

使用数字式多用电表测量电阻的基本步骤如下：

- ① 将红表笔插入电阻插孔，黑表笔插入公共插孔；
- ② 将功能旋钮旋转至电阻挡位，根据待测电阻的估计值选择合适的量程；
- ③ 将红、黑表笔与待测电阻相连，如图 10-34 所示，从数字式多用电表中直接读出阻值。

使用数字式多用电表测量电阻时，必须先把电阻从电路中断开。测量时既要保持表笔与电阻良好接触，又不能使待测电阻与其他导电物体（包括手）接触。

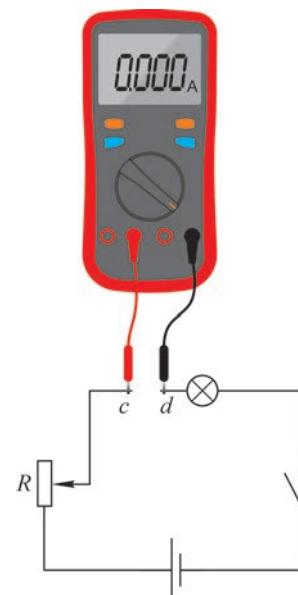


图 10-33 用数字式多用电表测电流



图 10-34 用数字式多用电表测电阻

拓展视野

指针式多用电表 [图 10-31 (a)] 测电压、电流、电阻的原理主要是利用通过内部灵敏电流计的电流大小，来反映待测物理量的大小，其中刻度盘如图 10-35 所示。在测量电阻时根据第一排刻度读数，在测量直流电流及直流电压时，则根据第二排刻度读数。

在测量电压与电流时，指针式多用电表的使用方法与指针式电压表和电流表的使用方法相类似。首先，将红、黑表笔分别插入“+”“-”插孔，随后选择合适的测量量程。测量电压时，将指针式多用电表的红、黑表笔并联在待测元器件两端；测量电流时，通过红、黑表笔把多用电表串联接入电路。最后记录指针所在位置的示数，并结合刻度的最大值与所选量程的大小，等比例缩放所读数值，便能得到待测物理量的大小。例如，当选择量程为 5 V 直流挡位时，若指针根据 0~500 的刻度线获得的示数为 200，则最终测得电压的示数为 2 V。值得注意的是，通常指针式多用电表不能测量负值，因此红表笔需与高电势点连接或者作为电流流入端。

指针式多用电表测量电阻的原理图如图 10-36 所示，其中 G 为灵敏电流计，E 为干电池，其利用到的原理是之后将学习的闭合电路欧姆定律，即利用电路中电流与电阻大小有一一对应关系，通过测量电流来间接获得电阻的阻值。

与电压及电流刻度不同，指针式多用表的电阻刻度不均匀，且零刻度位于最右侧，而无穷大则位于最左侧。用指针式多用电表测电阻时，应先根据电阻估测值，选择倍率挡；再将红、黑表笔短接观察指针偏转，调节调零旋钮，使指针指向电阻零刻度处；最后将红、黑表笔与电阻接触，根据刻度盘示数乘以倍率挡中的倍率后即为测量电阻值。由于指针式多用电表内部结构的特殊性，当指针在刻度盘中央位置附近时电阻测量值比较准确，如果偏离中央位置较远，应改变倍率，并重新调零后测量。



图 10-35 指针式多用电表的刻度盘

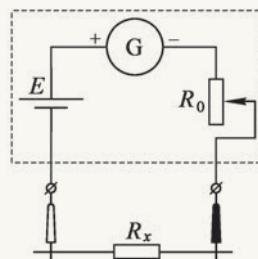


图 10-36 指针式多用电表测量电阻的原理图

学生实验

用多用电表测量电学中的物理量

实验装置与方法

将电阻、电源以及开关按如图 10-37 所示的方式连接，依次测量电阻 R 两端电压 U、流过电阻 R 的电流 I 及电阻 R 的阻值。

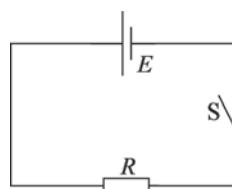


图 10-37 实验电路图

实验操作与数据收集

- ① 接通电路，选择多用电表直流电压挡，其量程应大于电阻两端的电压的估计值，测量电阻 R 两端的电压 U ；
 - ② 选择多用电表直流电流挡，其量程应大于通过电阻电流的估计值，将多用电表串联接入电路中，测量通过电阻 R 的电流 I ；
 - ③ 断开电路，选择合适的电阻量程挡位，用多用电表测量电阻 R 的阻值。
- 电阻 R 两端电压 $U = \underline{\hspace{2cm}}$ ，流过电阻 R 的电流 $I = \underline{\hspace{2cm}}$ ，电阻 $R = \underline{\hspace{2cm}}$ 。

问题与思考

1. 某同学在使用多用电表测电阻时，双手不小心碰到两支表笔的金属部分，判断电阻的测量值与真实值的大小之间的关系，简述判断理由。
2. 二极管是重要的电路元件，它有两根引线，分别为正极、负极。在电路中，二极管具有单向导通性。当二极管加上正向电压时，它的电阻阻值很小；当二极管加上反向电压时，它的电阻就会变得很大。根据上述特征，简述用多用电表检测二极管的极性及好坏的方法。
3. 如图 10-38 所示为一个暗盒，盒内有两个电阻、一个恒压电源，它们分别连接在暗盒的三个接线柱 A、B、C 的任意两个之间，构成回路。某同学使用多用电表电压挡位进行测量，测得 $U_{AB} = -2\text{ V}$ ， $U_{BC} = 0.4\text{ V}$ ， $U_{CA} = 1.6\text{ V}$ 。试画出三个元件构成的电路图，并求出电源电压及两电阻阻值之比。 $(U_{AB}$ 为当红色接线柱接在 A 处而黑色接线柱接在 B 处时测得的电压，以此类推)
4. 某同学发现在如图 10-39 所示的电路中，开关闭合后小灯不亮。若本电路仅在开关或小灯的位置存在一处故障。列举可能引发故障的原因，并简述使用多用电表检测故障的过程。

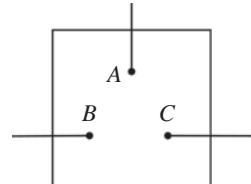


图 10-38

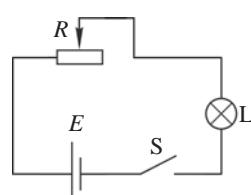


图 10-39

5. 如图 10-40 所示为某指针式多用电表测电阻的原理图，电源电压为 1.5 V 。电流计可以测量的最大电流为 $300\text{ }\mu\text{A}$ ，将红、黑表笔直接接触，调节 R 使电流计的示数达到最大，则此时虚线框内的总电阻值是多大？若在红、黑表笔间接入一个待测电阻 R_x ，电流计的示数变为原来的一半，则 R_x 的阻值是多大？

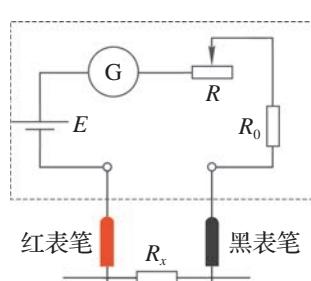


图 10-40

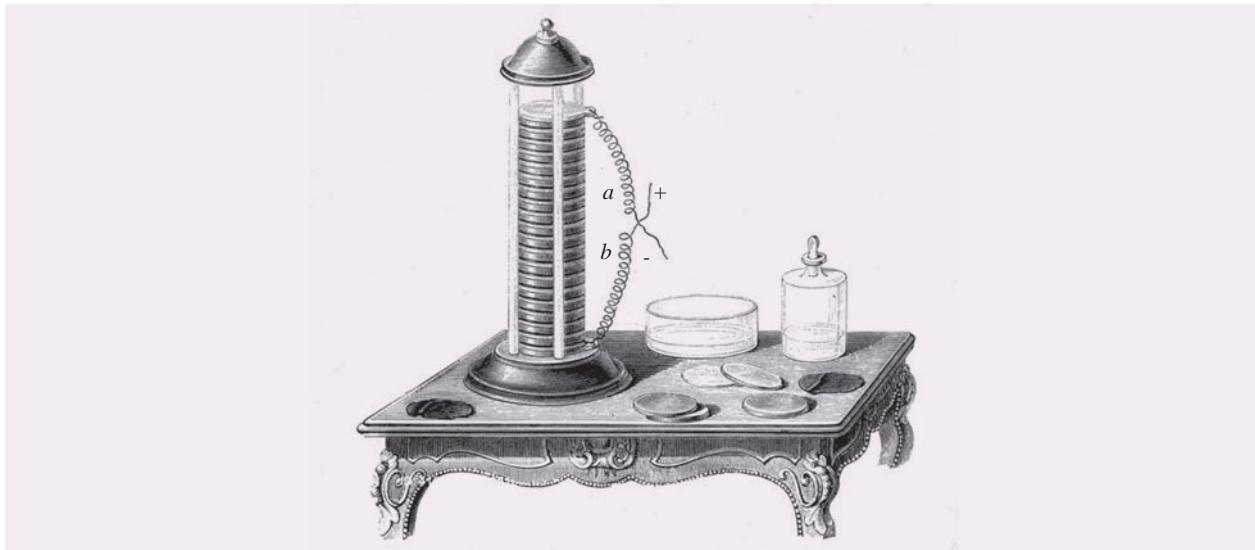


图 10-41 由银片、锌片和浸湿的布叠合而成的伏打电堆

第五节 闭合电路欧姆定律、电源电动势及内阻

为了能在导体两端间维持一个稳定的电势差以产生稳定的电流，科学家探寻了很长时间。直到 1800 年，意大利物理学家伏打（A. Volta, 1745—1827）发明了伏打电池才出现突破。如图 10-41 所示，许多伏打电池依次叠放起来成为很高的一摞，被称为伏打电堆。为了纪念伏打在电学中的贡献，把电压的单位命名为伏特。其实，我们用一个水果、一片锌片和一片铜片即可以制作一个电池。

自主活动

制作一个水果电池，试着能否点亮小灯泡。首先，将一片锌片和一片铜片插入柠檬中，柠檬与锌片、铜片构成了一节化学电池。随后用多用电表测量这节电池两端的电压，如图 10-42 (a) 所示。再将一个标有“1.5 V, 0.3 A”的小灯与它连接构成回路，小灯是否会被点亮呢？

如图 10-42 (b) 所示，出乎意料的是小灯不仅没有发光，而且此时再测量电池两端的电压，电压几乎全部“消失”了！若再取走小灯，水果电池的两端电压又会恢复。

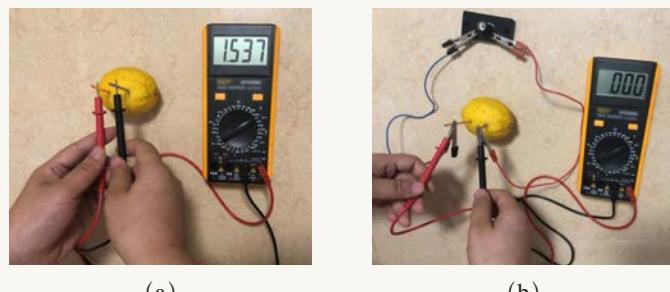


图 10-42 用多用电表测量水果电池两端的电压

要弄清水果电池两端电压“消失”的原因，我们需要对电路的知识有更多的了解。

我们把由电源、用电器和导线等组成的完整回路叫做闭合电路或者全电路。闭合电路可以分成两部分，其中电源外部的电路叫做外电路，电源内部的电路叫做内电路。电流在内、外电路中流动均会受到阻碍作用。外电路对电流的阻碍作用叫做外电阻，用 R 表示；内电路对电流的阻碍作用叫做内电阻（internal resistance），简称内阻，用 r 表示。

外电路两端的电压，称为外电压（ $U_{\text{外}}$ ），也叫做端电压，它是电源正负极两端的电压；内电路两端的电压，称为内电压（ $U_{\text{内}}$ ）。

② 闭合电路中内、外电压之间存在什么关系？

如图 10-43 所示为探究外电压、内电压间关系的仪器——可调高内阻电池。这种电池的正、负极板（A、B）为二氧化铅及铅，电解液为稀硫酸。与一般的铅蓄电池相比，它的内阻是可以调节的。只要降低或者提升电池两极之间的液面高度，电源的内阻便会增大或减小。外电路接有滑动变阻器，可以方便地改变外电阻的大小。位于两个电极内侧的探针 a、b 与电压表 V_1 相连，测量内电压；电源的两极 A、B 与电压表 V_2 相连，测量外电压。实验时改变正、负极板间液面高低、调节滑动变阻器，从而改变内、外电阻阻值，记录相应的内、外电压 $U_{\text{内}}$ 、 $U_{\text{外}}$ 。

由实验数据可以证明，当内电阻不变，外电阻阻值增大时，外电压增大，内电压减小；当外电阻不变，内电阻阻值增大时，内电压增大，外电压减小。内、外电压之和为恒量，这一恒量称为电源电动势（electromotive force），通常用符号 E 表示，单位为伏特（V）。

$$E = U_{\text{内}} + U_{\text{外}}$$

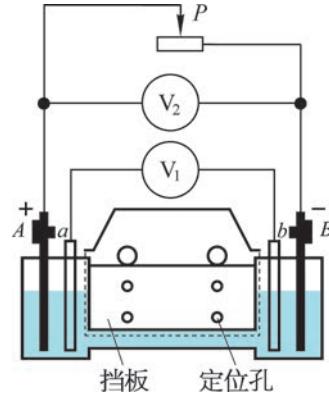


图 10-43 可调高内阻电池

② 闭合电路中电流与电源电动势之间存在什么关系？

在闭合电路中，若外电路用电器为纯电阻，阻值为 R ，回路中电流为 I ，电源内阻为 r ，则根据 $E = U_{\text{外}} + U_{\text{内}}$ ，又 $U_{\text{外}} = IR$ ， $U_{\text{内}} = Ir$ ，因此

$$I = \frac{E}{R + r}$$

即在闭合电路中电流与电源电动势成正比，与内、外电阻的阻值之和成反比，这个结论叫做闭合电路欧姆定律（Ohm law of closed circuit）。相应地，初中学习的欧姆定律称为部分电路欧姆定律。

示例 在如图 10-44 所示的电路中，电源电动势 $E = 9 \text{ V}$ ，内阻 $r = 2 \Omega$ ，外电阻 R 为可变电阻箱。闭合开关，若电阻 R 分别调节到 $R_1 = 2 \Omega$ 、 $R_2 = 10 \Omega$ 、 $R_3 = 400 \Omega$ ，求回路中的电流及外电压。

分析：根据闭合电路欧姆定律可以求出电路中的电流，再对外电路根据部分电路欧姆定律求出外电压。

解：根据闭合电路欧姆定律 $I = \frac{E}{R + r}$ 及 $U_{\text{外}} = IR$ 分别得到三种情况下回路中的电流及外电压。

当电阻 R 调节到 R_1 时，回路中电流 I_1 及外电压 $U_{\text{外}1}$ 有

$$I_1 = \frac{E}{R_1 + r} = \frac{9}{2 + 2} \text{ A} = 2.25 \text{ A}, \quad U_{\text{外}1} = I_1 R_1 = 2.25 \times 2 \text{ V} = 4.5 \text{ V}$$

当电阻 R 调节到 R_2 时，回路中电流 I_2 及外电压 $U_{\text{外}2}$ 有

$$I_2 = \frac{E}{R_2 + r} = \frac{9}{10 + 2} \text{ A} = 0.75 \text{ A}, \quad U_{\text{外}2} = I_2 R_2 = 0.75 \times 10 \text{ V} = 7.5 \text{ V}$$

当电阻 R 调节到 R_3 时，回路中电流 I_3 及外电压 $U_{\text{外}3}$ 有

$$I_3 = \frac{E}{R_3 + r} = \frac{9}{400 + 2} \text{ A} = 0.022 \text{ A}, \quad U_{\text{外}3} = I_3 R_3 = 0.022 \times 400 \text{ V} = 8.8 \text{ V}$$

一个固定的闭合电路，由于电源电动势 E 和内阻 r 均不变，根据闭合电路欧姆定律 $I = \frac{E}{R + r}$ ，可以看出：当外电阻 R 增大后，电流 I 会减小，内电压 $U_{\text{内}} = Ir$ 也会减小，外电压 $U_{\text{外}}$ 增大了；反之，当外电阻 R 减小时，外电压 $U_{\text{外}}$ 也会减小。

对于外电路断开和短路两种特殊的情况，同样可以根据闭合电路欧姆定律进行分析。

1. 当外电路断开时，外电阻阻值可视为无穷大，此时电流 I 变为零，内电压 $U_{\text{内}} = Ir$ 也为零，此时外电压在数值上等于电源电动势。因此，用电压表直接测量电源两端电压，就可得出电源电动势的近似值。

2. 当外电路短路时，外电阻阻值 R 接近零，此时外电压 $U_{\text{外}} = IR$ 也接近于零，回路中电流称为短路电流 $I_{\text{短}} = \frac{E}{r}$ 。通常电池内阻较小，一旦发生短路，电路中电流很大，极易损坏电源，甚至发生火灾。因此要防止发生短路。

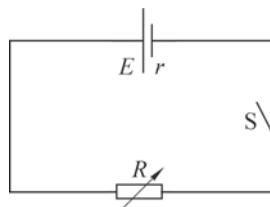


图 10-44 外电阻可调的闭合电路

大家谈

根据以上学习的内容，请讨论并回答在之前的自主活动中水果电池两端电压“消失”的原因。

？电源为什么能在闭合回路中产生持续电流？

电流是由于大量的自由电荷定向移动而产生的。在金属导体中，能够自由移动的电荷是自由电子。由于它们带负电荷，电子向某一方向的定向移动相当于正电荷向相反方向的定向移动。为了方便，下面我们仍以正电荷为例讨论。

如图 10-45 所示，由于电源正、负极总保持一定数量的正、负电荷，所以，电源正极的电势高于电源负极。在外电路，正电荷在静电力的作用下由电源正极流向负极；在电源内部，正电荷所受的静电力阻碍它继续向正极移动。因此，在电源内部要使正电荷向正极移动，就一定要有“非静电力”作用于电荷才行。在干电池中，非静电力是化学作用；在发电机中，非静电力是电磁作用。电源把正电荷从负极搬运到正极的过程中，非静电力在做功，使电荷的电势能增加。干电池使化学能转化为电势能；发电机使机械能转化为电势能。所以，从能量转化的角度看，电源是通过非静电力做功把其他形式的能转化为电势能的装置。

综上所述，电源之所以能维持电路中稳定的电流，是因为它有能力不断地把来到负极的正电荷经过电源内部搬运到正极去。在不同的电源中，把单位正电荷在电源内部从负极搬运到正极的过程中，非静电力做功的本领不同。电动势就是描述电源这种特性的物理量，数值上等于非静电力把 1 C 的正电荷在电源内从负极搬运到正极所做的功。电动势由电源内部非静电力的特性决定，跟外电路无关。

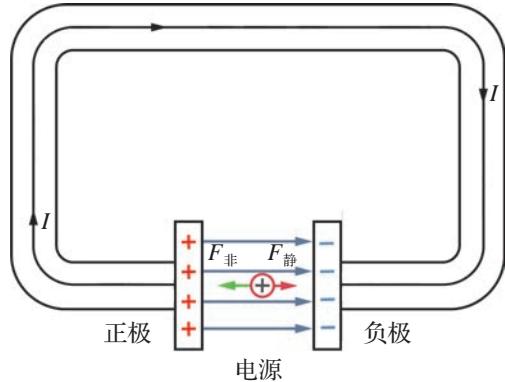


图 10-45 电源内存在非静电力

STSE

电池从发明至今已经有 200 余年的历史。这一期间，一代代电池的更替和发展都在很大程度上改变着人类的生活。

1800 年，伏打正式宣布“伏打电堆”的诞生，这令持续产生电流成为可能，为科学家们从对静电的研究转入对电流的研究创造了条件。1836 年，英国人丹尼尔对“伏打电堆”作了改良，用稀硫酸作为电解液制造了一种能保持稳定电流的“锌铜电池”。1860 年，法国的普朗泰发明了一种在电压下降后能再次充电的铅蓄电池。1887 年，英国的赫勒森发明了干电池。1909 年，爱迪生成功研制出了性能良好、可反复充放电的镍铁电池。直至今日，干电池的种类已经有 100 多种，包含常见的锌锰电池和碳锌电池等。

常见的干电池大多数为锌锰电池和碱锰电池，其中含有汞等有毒重金属。废电池无论在大气中还是深埋在地下，其重金属成分都会随渗液溢出，造成地下水和土壤的污染，日积月累会严重危害人类健康。因此，我们使用过的干电池不能随手丢弃，应进行分类回收。

近年来，我国在开发新能源方面发展迅速。锂电池由于具有较高的能量及更具环保性，已经开始全面取代传统的铅酸、镍氢和镍镉电池，成为目前重要的储能元件。

我国具有丰富的锂资源和完善的锂电池产业链，已成为全球最大的锂电池制造国，年产量超过全球年总产量的一半。随着新能源汽车对动力锂电池的需求不断提升，我国的锂电池产业将不断发展扩大。

问题与思考

- 如图 10-46 所示，电源电动势为 1.5 V，内阻为 0.3Ω ，小灯泡电阻为 1.2Ω 。则：

- 当开关闭合后，电路中电流和小灯泡两端的电压各为多少？
- 简述闭合电路中电流做功与能量转化的情况。

- 汽车电瓶是一种蓄电池，电源电动势为 13 V 左右。启动时外电压不低于 11 V 即算正常，低于此电压就可能造成汽车启动困难。如图 10-47 所示，测量得到一汽车蓄电池的电源电动势为 12.78 V。某同学通过查阅资料得知该汽车启动时，电瓶正、负极间的电压为 11.2 V，电流为 200 A，则该汽车电瓶的内阻为多大？

- 有一蓄电池，当从负极向正极移动 1 C 电荷时，非静电力做功 2 J，该蓄电池的电动势是多少？用此蓄电池给一个小灯泡供电，供电电流是 0.2 A，若供电 10 min，非静电力做多少功？

- 在初中阶段，往往认为电源供给电路的电压是不变的。试对此作出评论，并指出在什么情况下这种看法近似正确。

- 在如图 10-48 所示的电路中，闭合开关，将滑动变阻器触头 P 向左移动，判断电流表、电压表的示数分别如何变化？简述判断过程。

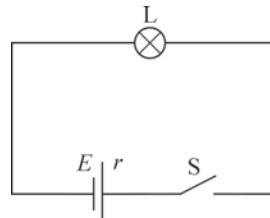


图 10-46



图 10-47

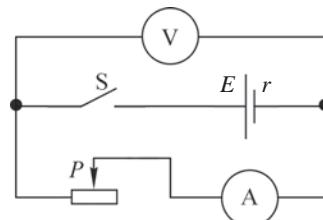


图 10-48

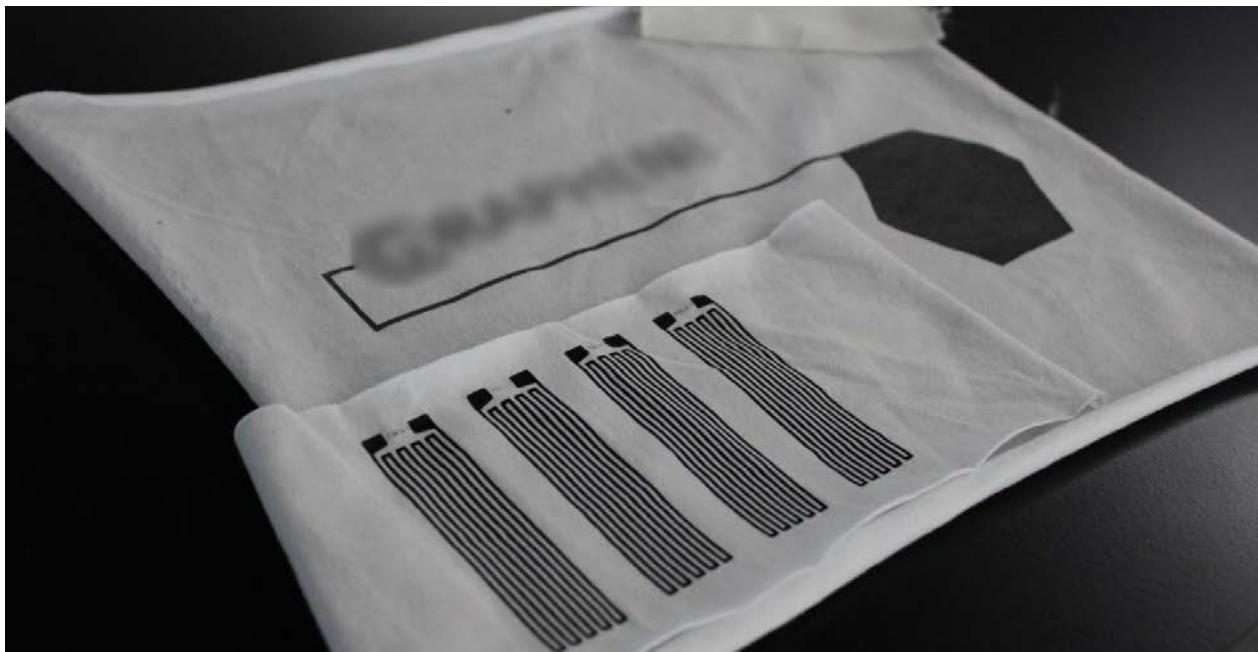


图 10-49 柔性纺织电池

第六节 电源电动势和内阻的测量

21世纪以来，电池工艺日新月异，一些实验室在研制柔性纺织电池（图 10-49），它不仅可以提供电能，同时还可以像普通的棉布一样柔韧。未来有望突破可穿戴产品的技术障碍，打开可穿戴智能电器和智能布料的大门。我们日常使用的干电池、蓄电池等电源，有两个标志其特性的重要参数——电动势和内阻。

② 电源电动势和内阻如何测量？

在一个闭合电路中，电源电动势、外电阻和内电阻等物理量取决于电源和用电器的性质，与电路是否工作无关；而电流、外电压和内电压等物理量则反映了电路的工作状态。这六个物理量通过部分电路欧姆定律和闭合电路欧姆定律相互联结，从而使我们可以有很多种测量电源电动势和内阻的方法。

电源电动势 E 、内电阻 r 与外电压 U 、电流 I 的关系可以写成

$$E = U + Ir$$

如果能测出 U 、 I 的两组数据，就可以列出两个关于 E 、 r 的方程，联立求解可得 E 和 r 。因此，用一个滑动变阻器，加上测量电压、电流的仪器，就能测定电源的电动势 E 和内阻 r ，如图 10-50 所示。

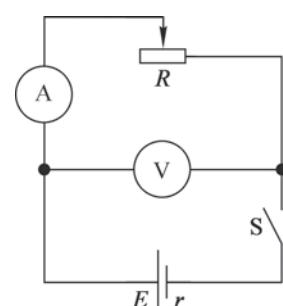


图 10-50 伏安法测电源的电动势和内阻

大家谈

如果有一个电阻箱，同时只有一个电流表或电压表，如何测量电源的电动势与内阻呢？

学生实验**测量电源的电动势和内阻****实验原理与方案**

本实验采用伏安法测电源的电动势 E 及内阻 r ，根据闭合电路欧姆定律， $U = E - Ir$ 。将待测电池接入电路，改变外电阻，用电压表和电流表测量不同工作状态下的外电压 U 和电流 I ，并作出 $U-I$ 图线，由图线分析即得出电动势 E 和内阻 r 。

实验装置与方法

如图 10-51 所示为测量电源电动势和内阻的实验电路图，其中电压表测量电源的外电压 U ，电流表则测量流过电源的电流 I 。电路中的固定电阻 R 起到保护电路的作用，它可防止滑动变阻器不慎短路时回路中电流过大而损坏电源及其他设备。

实验操作和数据收集

根据图 10-51 连接电路。改变滑动变阻器 R' 的阻值，从而改变外电阻。设计表格，记录每组电压和电流值。

数据分析

建立直角坐标系，以外电压 U 为纵轴，以电流 I 为横轴。根据实验数据作出 $U-I$ 图像（选择合适的坐标范围），并由图线的截距得出被测电源的电动势，由图线的斜率得出被测电源的内阻值。

实验结论

$$E = \text{_____}, r = \text{_____}.$$

交流与讨论

1. 在本实验中为什么要采用 $U-I$ 图像来处理数据？
2. $U-I$ 图像中斜线上的点代表怎样的含义？
3. 当外电路断开时，外电压为多少？
4. 当电源被短路时，电流是否为无穷大呢？
5. 若一节干电池的电动势为 1.5 V 左右，允许通过的最大电流为 0.6 A 左右，请确定保护电阻 R 的阻值范围。

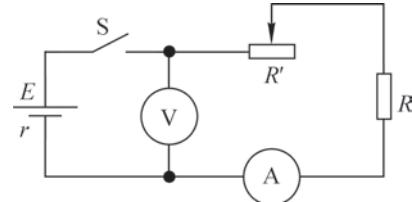


图 10-51 测量电源电动势和内阻的实验电路图

如果用电器需要比较高的电压和比较大的电流，一个电池不能符合要求时，往往需要把几个相同的电池连接起来组成电池组。例如，家电遥控器内通常用两节干电池作为电源。如图 10-52 所示的上海浦东机场屋顶太阳能电池板，由很多“晶片”连接在一起。许多“太阳能电池板”连接在一起组成“太阳能电池阵”，也是一种电池组。



图 10-52 浦东机场的屋顶太阳能电池板

② 电池如何连接成电池组？

串联电池组

如图 10-53 所示，依次将电池的正极和其他电池的负极相连，就组成了串联电池组。如果串联电池组是由 n 个相同的电池串联而成的，且每个电池的电动势都为 E ，内阻都为 r ，则串联电池组的电动势和内阻为

$$E_{\text{串}} = nE$$

$$r_{\text{串}} = nr$$

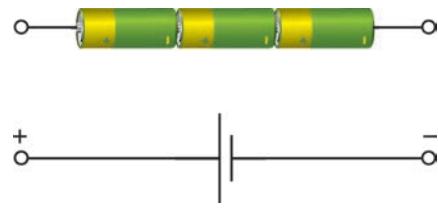


图 10-53 串联电池组

当用电器的额定电压高于单个电池时，可以采用串联电池组供电，但是用电器的最大工作电流必须小于每个电池允许通过的最大电流。

拓展视野

如图 10-54 所示，把所有电池的正极连接在一起，成为电池组的正极；把所有电池的负极连接在一起，成为电池组的负极，就组成并联电池组。如果并联电池组由 n 个相同的电池并联而成，且每个电池的电动势都为 E ，内阻都为 r ，则并联电池组的电动势和内阻

$$E_{\text{并}} = E$$

$$r_{\text{并}} = \frac{r}{n}$$

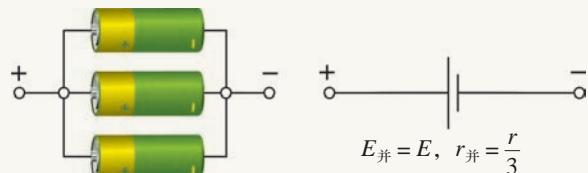


图 10-54 并联电池组

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

问题与思考

1. 在“测量电源的电动势和内阻”的实验中，连接成如图 10-55 所示的电路。
- 图中方框 A、B 中的仪表分别测量什么物理量？闭合开关前，滑动变阻器的滑动头 P 应位于 a 端还是 b 端？
 - 在用伏安法测电池电动势和内阻的实验中，共记录五组数据，作图得到 $U-I$ 图线，如图 10-56 所示。则该电池的电动势和内阻分别为多大？

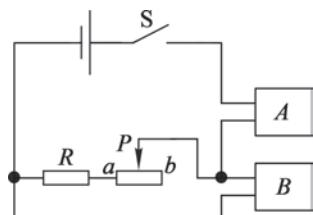


图 10-55

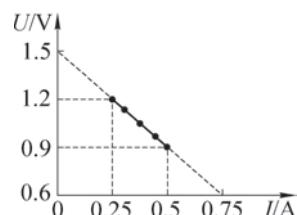


图 10-56

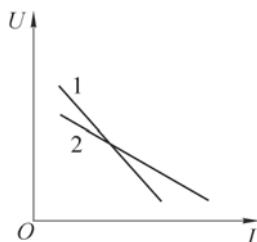


图 10-57

2. 实验室内有两个不同的电源，用伏安法测量这两个电源的电动势和内阻，根据实验数据得到端电压和电流的关系如图 10-57 中直线 1、2 所示。试比较这两个电源电动势 E 和内阻 r 的大小。

3. 手电筒由两节电源电动势大小均为 1.5 V 的相同电池串联成电池组供电，如图 10-58 所示。当开关接通后，测得小灯泡两端电压为 2.5 V ，流过的电流为 0.3 A ，则：
- 每节电池的内阻是多少？
 - 开关断开后，电池组两端的电压为多少？

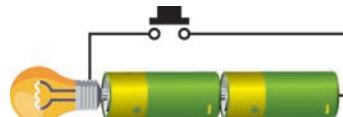


图 10-58

4. 如图 10-59 所示，已知定值电阻 $R_1 = 9\Omega$ ， $R_2 = 5\Omega$ 。当单刀双掷开关 S 置于位置 1 时，电压表的示数为 5.4 V ；当 S 置于位置 2 时，电压表的示数为 5 V 。求电源电动势及内阻。

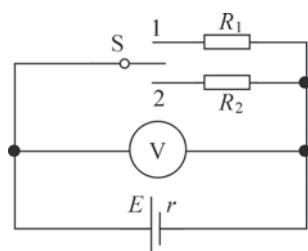


图 10-59

5. 某锂电池的电动势是 3.2 V ，内阻是 $16\text{ m}\Omega$ 。将该锂电池串联使用，给一个“ $24\text{ V } 12.5\text{ A}$ ”的直流电机供电。问：
- 需要几个电池串联才可以保证该直流电机正常使用？
 - 如果不小心将该电池正、负极短路，电路中的电流多大？说明为何要尽量避免电池正、负极短路。



图 10-60 电熨斗

第七节 电功、电功率及焦耳定律

用电器可以把电能转化成各种其他形式的能。电熨斗（图 10-60）、电热毯、电饭煲和工业上用来冶炼钢铁的电弧炉，主要把电能转化成内能；洗衣机、电车主要把电能转化成机械能；电解池、电镀装置主要把电能转化成化学能。我们知道，从一种形式的能转化成另一种形式的能的过程需要做功。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。

② 什么是电功？

我们把电流所做的功叫做**电功**（electric work）。电流做了多少功就表示有多少电能转化成其他形式的能。

电功实质上是导体中的电场对自由电荷的作用力做的功。设通过导体的恒定电流为 I ，导体两端的电压为 U ，则在时间 t 内电流通过这段导体的电荷量为 $q = It$ ，电场力对电荷所做的功为

$$W = qU = UIt$$

电功的单位是焦耳，简称焦，符号是 J。

？什么是电功率？

以前已经学过用功率表示机械做功的快慢，类似的，我们用电功率来表示电流做功的快慢。电流所做的功与完成这些功用的时间之比叫做电功率（electric power），用 P 表示。

根据功率的定义式 $P = \frac{W}{t}$ ，将 $W = UIt$ 代入得

$$P = UI$$

电功率的单位是瓦特，简称瓦，符号是 W。

大家谈

日常生活使用的电器上都贴有一个铭牌，标识该用电器的额定电压、额定功率或额定电流等。如图 10-61 所示是一台电风扇的铭牌，说说铭牌上标识的电学量及其含义。

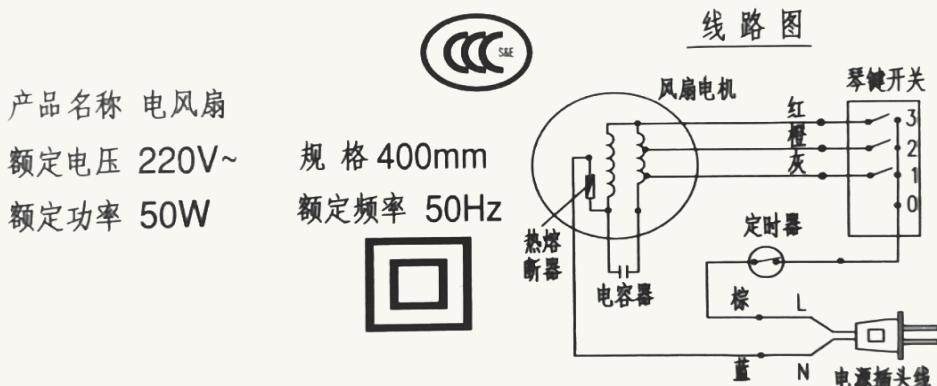


图 10-61 某电风扇的铭牌

示例 1 一浴霸的额定功率 $P = 1.1 \text{ kW}$ 、额定电压 $U = 220 \text{ V}$ 。试问：该浴霸在正常工作时，通过的电流有多大？如果连续正常工作 30 min，消耗多少电能？

分析：电流可由 $I = \frac{P}{U}$ 求解，消耗的电能即为这段时间电流做的电功。

解：设浴霸正常工作时电流为 I ，则根据电功率的公式 $P = UI$ ，可得

$$I = \frac{P}{U} = \frac{1100}{220} \text{ A} = 5 \text{ A}$$

浴霸连续正常工作时间 $t = 30 \text{ min} = 1800 \text{ s}$ ，消耗电能

$$W = Pt = 1100 \times 1800 \text{ J} = 1.98 \times 10^6 \text{ J}$$

需要说明的是，由于焦耳这个单位较小，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 1 kW 的用电器连续工作 1 h 所消耗的电能。因此，如需知道示例 1 中的浴霸消耗了多少千瓦·时电能，可由运行时间 $t = 30 \text{ min} = 0.5 \text{ h}$ 及额定功率 $P = 1.1 \text{ kW}$ ，得浴霸消耗电能

$$W = Pt = 1.1 \times 0.5 \text{ kW}\cdot\text{h} = 0.55 \text{ kW}\cdot\text{h}$$

② 什么是电热？

英国物理学家焦耳 (J. P. Joule, 1818—1889) 经过多次实验指出：电流通过导体产生的热量 Q ，与电流 I 的二次方、导体的电阻 R 和通电的时间 t 成正比。这就是焦耳定律 (Joule's law)，即

$$Q = I^2 R t$$

通常把电流流过导体时产生的热量称为电热，也叫做焦耳热。电流通过导体产生的热量与所用时间之比叫做热功率，其表达式为

$$P = \frac{Q}{t} = I^2 R$$

电路将消耗的电能全部用于发热，这样的电路称为纯电阻电路，典型的应用有电熨斗、电饭煲等。

示例 2 一台标有“ $220 \text{ V } 1000 \text{ W}$ ”字样的电热水器在额定电压下使用， 1 min 产生多少热量？如果电路电压略有下降，降为 210 V ，电热水器 1 min 放出的热量又是多少？

分析：电热水器的电路可视作纯电阻电路，电功率等于热功率。当电压不是额定电压时，电热水器的实际功率就不是额定功率 1000 W 。

解：设该电热水器额定电压为 U 、额定功率为 P 、电阻为 R ，则其 1 min 产生的热量

$$Q = Pt = 1000 \times 60 \text{ J} = 6.0 \times 10^4 \text{ J}$$

根据 $P = UI = \frac{U^2}{R}$ ，可得电热水器的电阻

$$R = \frac{U^2}{P} = \frac{220^2}{1000} \Omega = 48.4 \Omega$$

当电路电压 U_1 为 210 V 时，电热水器 1 min 产生的热量

$$Q_1 = \frac{U_1^2}{R} t = \frac{210^2}{48.4} \times 60 \text{ J} \approx 5.5 \times 10^4 \text{ J}$$

由本示例可知，用电器只有在额定电压下，其电功率才是额定功率，如果电压发生变化，实际功率就会发生变化。

？电功和电热有什么区别？

如果电路是纯电阻电路，电能都转化为内能，这时电功 W 与电流所产生的热量 Q 相等，即 $W=Q$ 。

如果电路中有电动机或电解槽等用电器，则在这类非纯电阻电路中，电能并不全都转化为内能，有部分电能转化为机械能或化学能。这时，电功 $W>$ 电热 Q ，它们的差就是电能转化成机械能或化学能的部分。

示例 3 一台电动机的额定电压 $U=220\text{ V}$ ，线圈的电阻 $R=0.8\Omega$ 。正常工作时，它每秒产生的热量为 1280 J ，则正常工作时的电流为多大？电动机的输出功率为多大？

分析：含有电动机的电路是非纯电阻电路，电能会转化为内能和机械能。应先根据电动机产生的热量算出通过线圈的电流 I ；再根据电功率的公式 $P=UI$ 算出电动机的输入功率 P ，将输入功率减去转化为内能的功率 $P_{\text{热}}$ ，就是电能转化为机械能的功率，也即输出功率 $P_{\text{输出}}$ 。

解：设电动机正常工作时通过的电流为 I ， 1 s 产生的热量为 Q ，则由 $Q=I^2Rt$ 得

$$I=\sqrt{\frac{Q}{Rt}}=\sqrt{\frac{1280}{0.8\times 1}}\text{ A}=40\text{ A}$$

电动机正常工作时输入功率

$$P=UI=220\times 40\text{ W}=8800\text{ W}$$

电动机正常工作时的热功率

$$P_{\text{热}}=\frac{Q}{t}=\frac{1280}{1}\text{ W}=1280\text{ W}$$

因此，电动机的输出功率

$$P_{\text{输出}}=P-P_{\text{热}}=(8800-1280)\text{ W}=7520\text{ W}$$

问题与思考

1. 在力学和电学的学习中，已经知道功率的多种表达式，简要说明下述表达式的含义及其适用范围：

$$\textcircled{1} P=\frac{W}{t} \quad \textcircled{2} P=Fv \quad \textcircled{3} P=UI \quad \textcircled{4} P=I^2R \quad \textcircled{5} P=\frac{U^2}{R}$$

2. 一台电热水器接入电压为 220 V 的电路中， 0.5 h 内产生的热量为 $1.452\times 10^6\text{ J}$ ，求这台热水器加热时的电阻。

3. 一台电动机额定电压是 220 V, 线圈电阻为 0.5Ω , 电动机在正常工作时通过的电流为 32 A, 则电动机在运转 20 min 的过程中, 消耗了多少电能? 线圈电阻产生了多少热量? 最多有多少电能转化为机械能?
4. 一台冰箱的输入功率是 180 W, 一天耗电 1 kW·h。若冰箱每次制冷时间为 7 min, 且间隔均匀相等, 估算该冰箱 1 h 制冷的次数。
5. 移动电源, 也叫“充电宝”, 常采用锂电芯, 能为手机、平板计算机等设备供电, 但使用不当可能会造成过充、短路等安全隐患。出于安全原因, 中国民航总局规定当移动电源的额定容量不超过 100 W·h 才可在乘机时随身携带。某移动电源的铭牌如表 10-4 所示。
- (1) 通过计算, 判断乘客在乘机时是否能随身携带该移动电源。
- (2) 该移动电源在充满电的情况下, 能为一个“3 W 1.5 A”的 USB 风扇供电多长时间?

表 10-4

输入	DC 5 V 2.0 A
输出	DC 5 V 2.1 A
容量	10 000 mA·h
转换率	>85%



图 10-62 家庭配电箱

第八节 家庭电路

各式各样的家用电器为人类的生活提供便利。家中几乎所有的用电器都需要接入家庭供电线路，而家庭配电箱（图 10-62）则控制着其中的各条线路。你是否关注过为家用电器供电的线路呢？了解家庭电路的主要组成，掌握故障分析的基本技术，具有节能环保的意识，安全、合理地用电，才能使我们拥有更美好的生活。

② 家庭电路包含哪些部分？

家庭电路主要由供电线路、电能表、总开关、低压断路器、插座、开关、用电器等组成。其中供电线路包含相线（又称火线）及零线，相线与零线间的电压为 220 V，除了相线、零线外，入户线中还应铺设一条地线，地线的对地电压为 0。家庭用电器的种类繁多，厨房、浴室中的用电器和空调的用电量较大，因此往往将家庭电路分为若干支路，分别对应照明、浴室、空调等。如图 10-63 所示为常见家庭配电系统。

家庭电路中，为了避免用电器通断时的相互影响，所有用电器都是并联连接在相线、零线间，且有的用电器还需与地线连接。在实际生活中，接入电路的用电器数目及总功率

往往不时发生改变，因此为了保障家庭用电的安全，我们应该根据实际需求来选择合适的电路元器件。

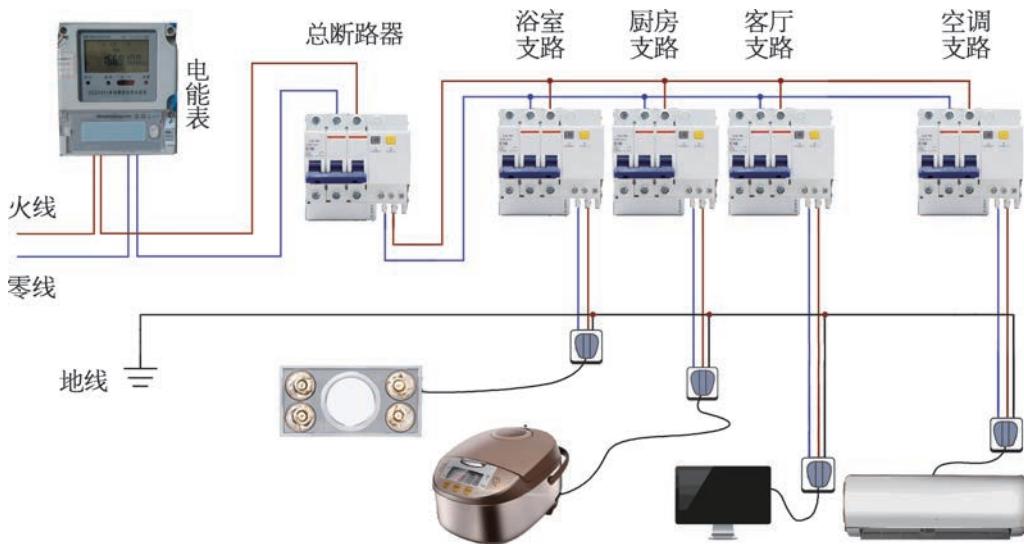


图 10-63 家庭配电系统

低压断路器

低压断路器是家庭用电安全的重要保障之一，如图 10-64 所示。断路器与火线、零线连接，具有过载、短路保护功能，即当火线、零线中的电流超过额定电流时，断路器会自动切断供电线路，避免损害用电器和发生其他危害。有些断路器还带有漏电保护功能，当断路器检测到相线与零线中流过的电流不一致，且差值超过一定大小时便会在短时间内断开电路。

导线

家庭电路中用导线与用电器、低压断路器、开关等连接。我们知道，导线具有一定的电阻，通过电流时，会发热。若导线持续处于过热状态会加快绝缘层老化，甚至损坏，引发事故。因此，导线长时间通电时能承载的最大安全电流是选择导线时重点考虑的要素之一。表 10-5 是常见的铜导线横截面积与安全电流对照表。



图 10-64 低压断路器

表 10-5 铜导线横截面积与安全电流对照表

序号	横截面积 S/mm^2	安全电流 I/A	序号	横截面积 S/mm^2	安全电流 I/A
1	2.5	28	4	10	65
2	4	35	5	16	91
3	6	48	6	25	120

选择家用导线时，可以通过用电器铭牌、说明书等，查找或计算用电器的工作电流，如图 10-65 所示；随后根据连接在导线上的用电器使用需求，对照表 10-5，选择有合适横截面积的导线。

② 如何分析家用电路的简单故障及排除安全隐患？

家用电路的故障主要有短路、断路、过载、漏电及连接错误等。

断路器不仅能保障用电安全，也有助于排查故障所在。断路器自动断开表示其所在回路发生过载或短路、漏电等故障；因此不可以强行接通，应立即排查故障所在。如总断路器因故障断开，应先断开所有断路器，随后接通总断路器，再逐一接通支路断路器。如总断路器再次自动断开，便可判断刚刚接通的支路发生了故障。在生活中，应重视断路器的自动断开现象，及时排除故障，否则可能会加快线路老化，或引发火灾、触电等事故。

多用电表及验电笔是对简单电路故障检测的常用工具。当验电笔接触相线时，其中有电流通过，氖泡会发光。当验电笔正常工作时，通过的微弱电流不会对身体造成伤害，但 220 V 家庭用电电压远高于人体安全电压，因此在对家庭用电故障进行检测时，应熟知操作注意事项，做好安全防护措施，否则会危及生命安全！

大家谈

谈谈家庭安全用电的注意事项，并进行交流。

STSE

我国的发电厂主要依靠燃烧煤炭发电。煤炭发电不仅难以可持续发展，而且会带来严重的环境问题。我们应节约用电、保护环境，并从以下身边的事情做起。

1. 及时更换“超龄”电器。家用电器都有安全使用期限，超过期限之后不仅会线路老化、元器件性能下降导致耗电量大幅增大，还可能会引发漏电、起火、有害物质泄漏等事故。按照国家规定，冰箱的使用年限为 12~16 年，电饭煲、微波炉的使用年限为 10 年，一些小家电的使用期限则更短。

2. 选择高效、节能电器。2004 年起，我国对主要的家用电器采用能效标识分类，如图 10-66 所示为某电冰箱的能效标识。能效标识将用电器的能效划分为 5 个等级，

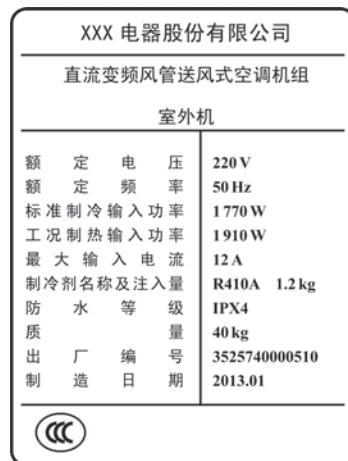


图 10-65 电器铭牌

数字越小表示用电器能效越高，节能效果越好。

3. 合理利用分时电费。白天与夜晚人们用电的需求差别很大，所以在夜晚发电厂产能过剩，若又无法储存大量电能，很容易造成浪费。因此不少国家推出了峰谷电费的方式，鼓励一些工厂在夜间生产。对于家庭用电，也可以做好用电计划，这样既可以节约电费，又可以减少用电高峰时的用电量，对减小碳排放，提高资源利用效率有很大帮助。

4. 养成良好的用电习惯。对于使用完毕或暂时不使用的电器，如机顶盒、计算机、电灯等，应及时关闭，以减少能源浪费。在使用空调时，应在保证交换一定量的新鲜空气的基础上减少自然风对流；夏天温度宜在27℃左右，而冬天温度宜在20℃左右。冰箱要定期清理过期食物，及时化霜，避免不必要的开门和存取。



图 10-66 中国能效标识

问题与思考

- 某同学学习了家庭电路的知识后，在家中观察家用电器和电路。他发现洗衣机用的是三脚插头，其上标有“10 A 250 V”字样，如图10-67(a)所示，其中的“10 A”表示什么含义？他还发现标有“E”字的插脚比其他两脚稍长一些，如图10-67(b)所示。他又查看了其他家用电器的三脚插头，都是如此。查找资料解释标有“E”字的插脚为何要比其他两脚稍长？

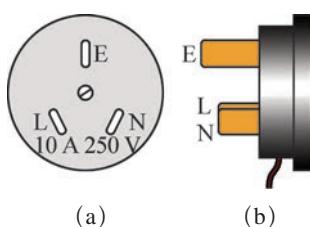


图 10-67

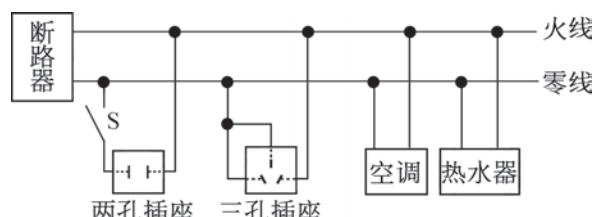


图 10-68

- 在一个三口之家，共有5盏40 W白炽灯，倘若使用照明显度相近的5 W LED灯代替，每年可因此节约多少电费？（假设每盏灯的日照明时间为5 h，家庭电费为0.61元/kW·h）
- 请根据所学的知识，分析如图10-68所示的家庭电路中存在哪些安全隐患，并提出改进措施。

4. 某同学家中一盏照明灯突然熄灭，电路示意图如图 10-69 所示。检查发现，断路器并未断开。试分析照明灯不亮的原因可能有哪些？如何进一步检测、排除电路故障？

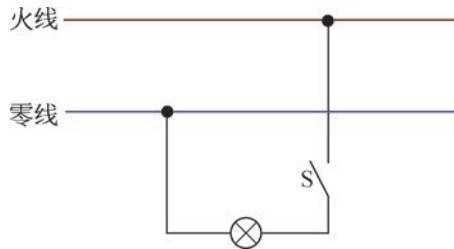


图 10-69

小结

• 基本概念和基本规律

电流：通过导体某一横截面的电荷量 Q 与所用时间 t 之比，用 I 表示， $I = \frac{Q}{t}$ 。

电阻定律：在温度不变时，导体的电阻 R 与导体的长度 L 成正比，与导体的横截面积 S 成反比， $R = \rho \frac{L}{S}$ ， ρ 为导体材料的电阻率。

闭合电路欧姆定律：闭合电路中电流 I 等于电源的电动势 E 与内、外电阻的阻值和 $R + r$ 之比，即 $I = \frac{E}{R + r}$ 。

电功：电流所做的功，用 W 表示， $W = UIt$ 。

电功率：电流所做的功与其完成时间之比，用 P 表示， $P = \frac{W}{t} = UI$ 。

焦耳定律：电流通过导体产生的热量 Q 等于电流 I 的二次方、导体的电阻 R 和通电的时间 t 的乘积，即 $Q = I^2Rt$ 。

• 基本方法

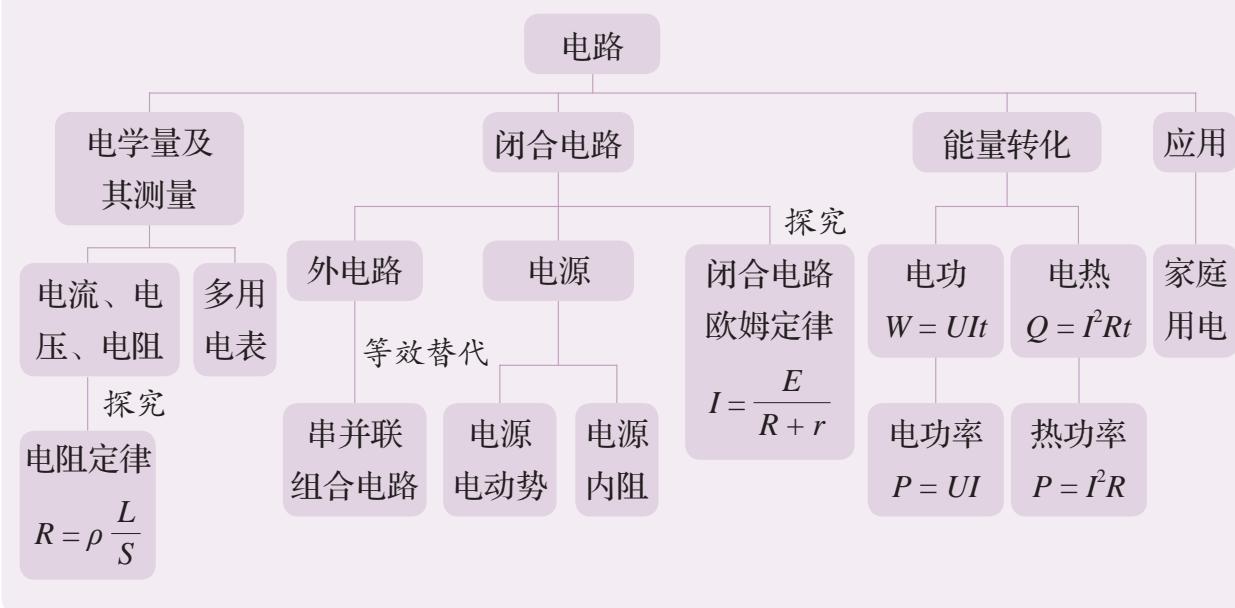
通过电路中的等效电阻，认识等效替代法。

通过探究金属导体的电阻与材料、长度和横截面积的定量关系，认识控制变量法。

通过了解游标卡尺、螺旋测微器的原理，感受错位放大和螺旋放大的方法。

通过测量电源电动势和内阻的实验，认识数据处理的图像分析法。

• 知识结构图



复习与巩固

- 在某导体的两端加上 16 V 电压，若 120 s 内通过导体横截面的电荷量大小为 480 C ，该导体电阻值为多大？若两端电压降为 6 V ，则流过该导体的电流为多少？
- 甲同学认为电动势的大小等于电源接入电路正常供电时电源正、负两极间的电压。判断甲同学关于电动势的说法是否正确，简述理由。
- “珍爱生命、注意安全”，请判断下列有关安全用电的说法是否正确，简述理由。
 - 发现有人触电时，应立即用手把触电人拉离电线。
 - 家用电器或电线着火时，应该迅速浇水灭火。
 - 断路器“跳闸”一定是出现了短路。
 - 有金属外壳的用电器，金属外壳一定要接地。
- 甲、乙两电阻的电流–电压关系图线如图 10–70 所示。
 - 试判断甲、乙两电阻的大小关系。
 - 在图中大致绘制出将甲、乙串联后得到的新电阻的电流–电压关系图线，并说明理由。
- 在如图 10–71 所示的电路中，三个电阻的阻值均为 $R = 6\Omega$ ，电压 U 恒为 18 V ，则电流表和电压表的示数分别为多少？若将电压表与电流表的位置互换，则电流表和电压表的示数又分别为多少？
- 表 10–6 中列出了不同品牌的电视机、电冰箱、电风扇、空调器铭牌上的主要技术指标。
 - 各用电器正常工作时，功率最大的是哪一个？
 - 根据铭牌所提供的信息，比较 8 h 内连续正常使用的电冰箱与电风扇消耗的电能的大小。

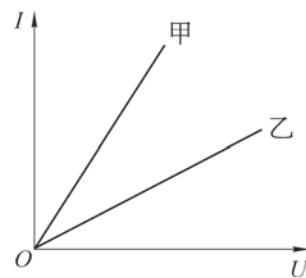


图 10-70

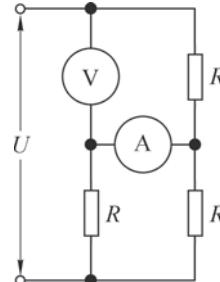


图 10-71

表 10-6

电视机	电冰箱	电风扇	空调器
工作电压 220 V	额定电压 220 V	规格 400 mm	额定电压 220 V
整机功率 75 W	电源频率 50 Hz	额定电压 220 V	电源频率 50 Hz
待机功率 $\leqslant 0.05\text{ W}$	额定功率 70 W	电源频率 50 Hz	制冷 / 制热电流 6.5 A/8.0 A
	耗电量 $0.50\text{ kW}\cdot\text{h}/24\text{ h}$	额定功率 65 W	

7. 一台小型电动机在 12 V 的电压下工作，通过的电流是 0.5 A。该电动机能在 1 min 内把 9.6 kg 的物体匀速提升 3 m。不计各处摩擦， g 取 10 m/s^2 ，求电动机输入电功率、输出机械功率、电动机的效率及电动机线圈的电阻。
8. 一只电能表标有“220 V 5 (60) A 1 600 imp/kW·h”字样。
- 请查找资料，了解“220 V 5 (60) A”以及“1 600 imp/kW·h”的物理意义。
 - 当某一用电器工作 3 min 后，电能表的脉冲指示灯闪烁了 60 下，则这个用电器消耗的电能为多少焦，该用电器的功率多大？
9. 在进行家庭装修时，需根据需求选择合适截面积的铜导线。现有一捆长度为 100 m、横截面积为 2.5 mm^2 的铜电线，请估算它的阻值约为多大？(铜在 20 ℃ 时的电阻率为 $1.7 \times 10^{-8} \Omega \cdot \text{m}$)
10. 如图 10-72 所示， $R_1 = 8 \Omega$ ， $R_2 = 20 \Omega$ ， $R_3 = 30 \Omega$ ，接到电压 $U = 20 \text{ V}$ 的电源两端，求每个电阻两端的电压和通过电流的大小。

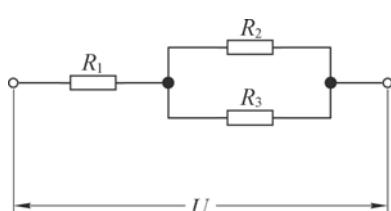


图 10-72

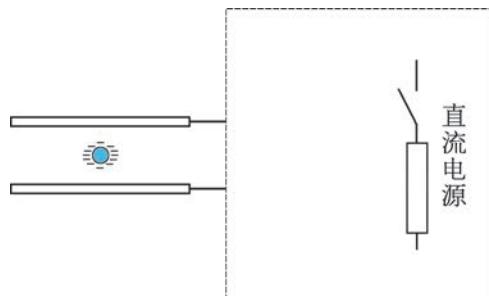


图 10-73

11. 如图 10-73 所示，质量为 m 、带负电的小油滴位于两平行放置、间距为 d 的水平金属板之间，调节两金属板间的电压，使小油滴保持静止。在虚框内画出控制电路图，并标出直流电源的正负极。可用的器材有：滑动变阻器和电压表。
12. 在如图 10-74 所示的电路中，电源电动势为 E ，内阻为 r ， R_1 和 R_2 是两个阻值固定的电阻。闭合开关 S 后，若滑动变阻器 R 的滑片向 a 移动，则通过 R_1 的电流 I_1 和通过 R_2 的电流 I_2 如何变化？

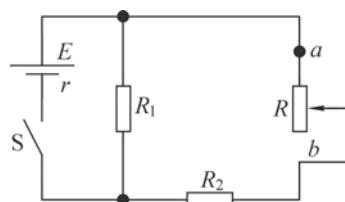


图 10-74

13. 在如图 10-75 所示的电路中，电阻 R 两端的电压是 U ；当将 R 换成 $3R$ 之后，其两端的电压为 $2U$ 。问：

- (1) 换成 $3R$ 时的电流是电路接入 R 时的多少倍？
- (2) 该电源是否存在内电阻 r ，简述理由。

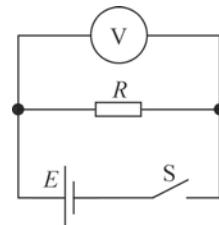


图 10-75

14. 某智能扫地机器人利用自身携带的小型吸尘部件吸尘清扫，其前端装有感应器，通过发射、接收超声波或者红外线来侦测障碍物。已知机器人电池容量为 $3\text{000 mA}\cdot\text{h}$ ，电机两端电压为 15 V ，吸尘时的额定功率为 30 W ，输出功率为 22 W ，问：

- (1) “ $\text{mA}\cdot\text{h}$ ” 是哪个物理量的单位？
- (2) 扫地机器人电机的电阻大小是多少？

- *15. 取一片铜片和一片锌片，相隔一定距离插入水果（如苹果等）内，就构成了简易水果电池。用电阻箱、内阻为 300Ω 的微安表（量程 $0\sim 500\mu\text{A}$ ）、水果电池、开关等构成如图 10-76 所示的电路。闭合开关后，某同学调节电阻箱，相应记录电阻箱阻值及微安表示数，如表 10-7 所示。则：

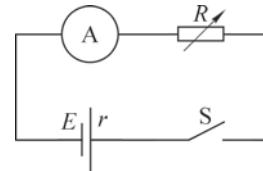


图 10-76

表 10-7

$R/\text{k}\Omega$	1	2	3	4	5
$I/\mu\text{A}$	150	127	110	97	88

- (1) 该电池的电动势、内阻分别为多少？
- (2) 试设计实验方案进一步研究水果电池的电动势大小与金属片（铜片、锌片）插入水果深度间的关系。



图示为位于贵州省平塘县喀斯特洼坑中的 500 m 口径球面射电望远镜（简称 FAST），被誉为“中国天眼”，是我国自主设计建设的世界最大单口径、最灵敏的射电望远镜。射电望远镜如何发现遥远天体发出的信息？

第十一章 电磁场与电磁波初步

- 在本章中我们将：
 1. 了解磁场的基本概念，知道磁通量是一个重要的物理量，知道电磁场的物质性。
 2. 通过类比的方法，知道磁感应强度是描述磁场强弱的物理量。通过实验了解产生感应电流的条件，体会科学实验在物理学发展中的重要作用。
 3. 知道电磁感应现象在生产生活中的应用，能利用场的性质解释有关电磁波的现象。
- 本章的学习将进一步认识磁场的物质性，理解电和磁的内在联系。磁场和电磁感应现象是学习法拉第电磁感应定律的基础，也是学习、了解电磁波的基础。
- 本章的学习有助于深化科学探究的意识，提升物质观念和相互作用的观念。



图 11-1 上海磁浮列车是世界上首条投入商业运营的高速磁浮列车

第一节 磁现象 磁感线

在人类生活中处处可遇到磁场。随着科学技术的发展，磁技术已经渗透到了我们的日常生活和工农业生产技术的各个方面。磁浮列车（图 11-1）就是一种现代高科技轨道交通工具。世界上第一条商业运营的磁浮列车线路在上海浦东新区运行，其列车的最高速度达 430 km/h。磁场是物质的一种形态，但这类物质形态并不能像实物一样为人类的感官直接觉察。历史上人类对磁场的研究是从磁铁的磁性及其相互作用开始的，我国古代对磁现象的研究成果丰硕，对人类文明影响深远。

？为什么说我国是对磁现象认识最早的国家之一？

公元前 4 世纪左右成书的《管子·地数篇》中就有“上有慈石者，其下有铜金”的记载，这是关于磁的最早记载。古代的人们就发现了磁石只能吸铁，而不能吸金、银、铜等其他金属的现象，并将能吸铁的磁石形象地比喻为慈母对子女的关爱呵护。利用磁石制成的“司南”是世界上最早使用的指南针。东汉王充在《论衡·是应篇》中记有“司南之杓，投之于地，其柢指南”*。南宋后，以磁针为主要结构的罗盘在航海中被普遍使用。到了

* “杓”即勺子，是一种舀东西的器具，略作半圆形，有柄。“柢”原指树根，此借为杓柄。此句意为：司南是用天然磁铁矿石琢成一个杓形的东西，放在一个光滑的刻着方位的盘上，杓柄指向南方。

明代，遂有郑和下西洋远航到非洲东海岸之壮举。中国指南针约于 12 世纪末 13 世纪初由海路传入阿拉伯，又由阿拉伯传到欧洲。指南针的传播，正如英国哲学家培根所说的那样，在促进人类航海事业发展和改变世界面貌上产生了巨大的影响。

天然磁石主要成分是四氧化三铁。现代工业上可以制造出各种各样的人造磁体，20 世纪 70 年代制造出稀土强磁材料使得磁性元件更加小型化，到目前为止具有最强磁力的永久磁体是钕磁体，也称为钕铁硼磁体（图 11-2）。

在生命体中也存在磁现象，有人认为信鸽识途归巢、候鸟千里迁徙等就是利用地磁场辨别方向。人体及器官也有磁性，利用电子技术及超导量子干涉技术可得到心磁图、脑磁图、肺磁图及人体磁场分布。基于磁场的核磁共振技术成像（图 11-3）及磁疗技术也广泛用于医学临床。



图 11-2 钕磁体



图 11-3 核磁共振断层成像仪

② 如何形象地描述磁场？

在磁体周围存在磁场。在条形磁体周围撒上的铁屑会呈现有规则的排列（图 11-4）。磁场的强弱和方向可以形象地用磁感线来描述：磁感线的疏密程度表示磁场的强弱，磁感线越密集的地方磁场就越强；磁感线的切线方向表示该点的磁场方向，即放在该处小磁针静止时的 N 极所指的方向。

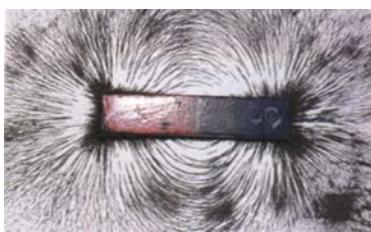


图 11-4 条形磁体周围铁屑分布情况

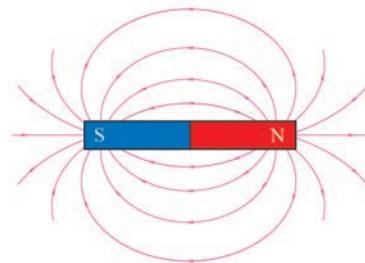


图 11-5 条形磁体外部的磁感线

磁感线是闭合曲线，磁体外部的磁感线是从 N 极出来，回到磁体的 S 极，内部是从 S 极到 N 极。任意两条磁感线不相交，两条磁感线之间的区域仍然有磁场。如图 11-5 所示为条形磁体外部的磁感线。

③ 指南针指向地球南极吗？

如图 11-6 所示，地球周围存在一个大范围的磁场，宛如一个大的条形磁体。在地磁

场的作用下，指南针会调整方向，使其取向顺着地磁场的磁感线，N极指向地磁南极；S极指向地磁北极。地磁南极在地理北极附近；地磁北极在地理南极附近。地磁两极与地理两极不完全重合，地磁轴和地球自转轴之间的夹角约为 11° 。我们将地球表面水平放置的指南针静止时N极所指的方向与地球北极方向之间的夹角称为磁偏角，地球表面不同地区磁偏角是不相同的。不仅如此，由于地球磁极的缓慢移动，磁偏角也在缓慢变化。

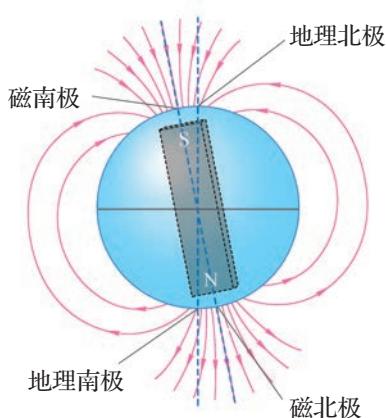


图 11-6 地理两极与地磁两极不重合

我国宋代科学家沈括是历史上第一个提出磁偏角现象的人，他在《梦溪笔谈》中记载了地磁偏角现象：“方家以磁石磨针锋，则能指南，然常微偏东，不全南也。”*较系统地研究磁偏现象原始理论的是英国人吉尔伯特。磁偏角的发现对指南针在航海方面的应用十分重要。

拓展视野

科学家发现地球磁场的方向并不是恒定不变的，它的南北磁极曾经对换过位置，这就是“磁极倒转”现象。

在地球的几十亿年历史中，磁极倒转事件发生多次。仅在最近的450万年里，就出现了4个磁场极性不同的时期。有两次和现在基本一样，是“正向期”，即地磁北极在地理南极附近，地磁南极在地理北极附近。还有两次则是和现在正好相反的“反向期”。在每一个磁性时期里，有时还会发生短暂的磁极倒转现象。

为什么会出现地磁极变化呢？地球磁场反复变化有什么规律吗？迄今科学家们仍然没有得出统一的结论。大部分科学家认为，当地球内部液态铁质流围绕着地核中心旋转时，如果突然发生变化，其流动方向倒转，就会引发磁极倒转现象。

地球磁场的倒转是否有一定的规律可循，是否可以预报？由于地心变化太过复杂，更难于直接观测，迄今人们仍未得出结论。

* “方家”原指深于道术的人，后指精通某种学问或技艺的专家。此句意为：用磁石磨针的针尖，针尖就能指向南方，但是常常稍微向东偏，不完全指南。

问题与思考

1. 在条形磁体外部靠近中央位置处有没有磁场？如何判断？
2. 假设将指南针移到地球地心处，则指南针 N 极将指向什么方向？
3. 通过学习磁场和磁感线，某同学总结了如下几个结论。试判断这些说法是否正确，并简述理由。
 - (1) 磁感线是铁屑组成的。
 - (2) 磁感线是磁体周围空间实际存在的曲线。
 - (3) 磁场是看不见摸不着的，但是可以借助小磁针感知它的存在。
 - (4) 地磁场的磁感线是从地球南极附近发出回到地球北极附近。
4. 判断下列关于磁场的说法是否正确，并简述理由。
 - (1) 两个磁极之间总是直接发生相互作用的。
 - (2) 磁场是为了解释磁极间相互作用而人为规定的。
 - (3) 磁场是特殊物质，它对放入其中的磁性物体有力的作用。
 - (4) 由于磁场弱处磁感线疏，所以两条磁感线之间没有磁场。
5. 日常生活中磁的应用给我们带来了方便，想想还有哪些地方可以应用磁性？



图 11-7 中国科学院强磁场科学中心的“稳态强磁场实验装置 (SHMFF)”

第二节 电流的磁场 磁感应强度

早期人们对磁现象没有进行系统的科学探究和测量，仅仅停留在对磁极间相互作用和地球磁性等表面现象的观察上。直到 19 世纪 20 年代，丹麦著名物理学家奥斯特发现了电流的磁效应后才开启了电磁学研究的新纪元。

与天然磁体的磁场相比，电流产生的磁场的强弱和方向容易控制和调节，在科学的研究和实际中有更多的应用；电磁起重机、电话、电动机、发电机、电磁继电器、磁浮列车、电子门锁、智能通道闸和电磁流量计等都离不开电流产生的磁场。中国科学院强磁场科学中心建成的强磁场实验装置（图 11-7）为我国电子材料、铁基超导体、新型拓扑超导体、非常规超导体、低维体系量子效应及输运研究、生物大分子在疾病中的分子机制、肿瘤发病机理和小分子药物作用机制等研究提供了有力的支持。

② 通电直导线周围的磁场方向如何判断？

让一根粗直导线竖直穿过一块均匀撒有铁屑的水平纸板中央。接上直流电源后，轻轻敲击纸板就可以清楚显示出通电导线周围铁屑的分布情况。我们可以发现，当导线中通过

电流时，纸板上的铁屑将环绕着这根导线形成一个个同心圆，如图 11-8 (a) 所示。清除铁屑后在纸板上画一个以中央为圆心的圆，再将一小磁针放在水平纸板上，导线接通直流电源，沿圆周移动小磁针的位置，观察小磁针 N 极的指向，并把小磁针的指向画在纸板的相应位置上。

实验表明通电直导线周围磁场的磁感线是一些和导线垂直的平面上以导线为圆心的同心圆；靠近导线处的磁感线较密，磁场较强，离开导线越远磁感线越疏，磁场越弱。

大量的实验都表明，通电直导线中电流方向与其周围磁场的方向满足右手螺旋定则：用右手握住通电直导线，让大拇指指向电流的方向，四指的指向就是磁感线的环绕方向，如图 11-8 (b) 所示。

通常，我们用“ \otimes ”和“ \odot ”分别表示通电导线中垂直于纸面向内和垂直于纸面向外的电流方向。用“ \times ”和“ \bullet ”分别表示垂直于纸面向内和垂直于纸面向外的磁场方向。

如图 11-9 (a) 所示为通电直导线附近磁场的俯视图，中间导线中的电流方向垂直于纸面向外；载流直导线垂直平面上磁场呈同心圆状的分布。如图 11-9 (b) 所示为通电直导线所在平面上的磁场分布，越靠近导线磁场越强，越远离导线磁场越弱。

通电螺线管周围也有磁场，类似于条形磁体周围的磁场。可以用右手螺旋定则来判断通电螺线管环绕的电流方向与螺线管内部磁场方向之间的关系，如图 11-10 (a) 所示。如果螺线管很长，而且绕得很密，其内部的磁感线就近似为平行于螺线管轴线的、同方向、间隔均匀的直线，如图 11-10 (b) 所示。通电螺线管的磁场可以看成是由许多环形电流的磁场叠加而成的，环形电流内部磁场方向也可以用右手螺旋定则来判断。

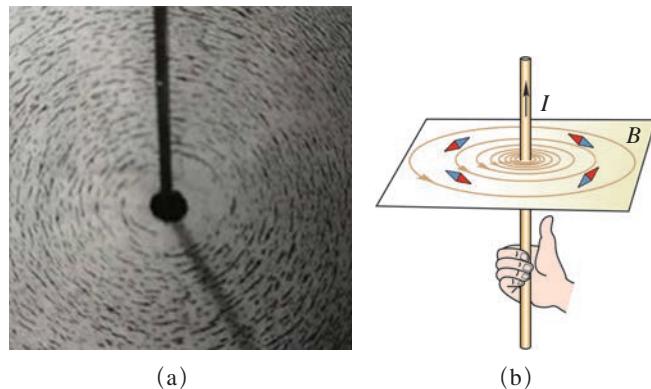


图 11-8 载流直导线周围的铁屑分布和磁场

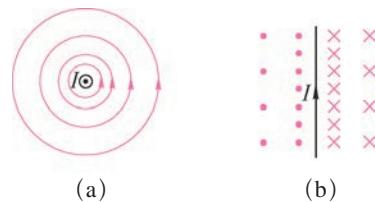


图 11-9 直线电流周围的磁感线

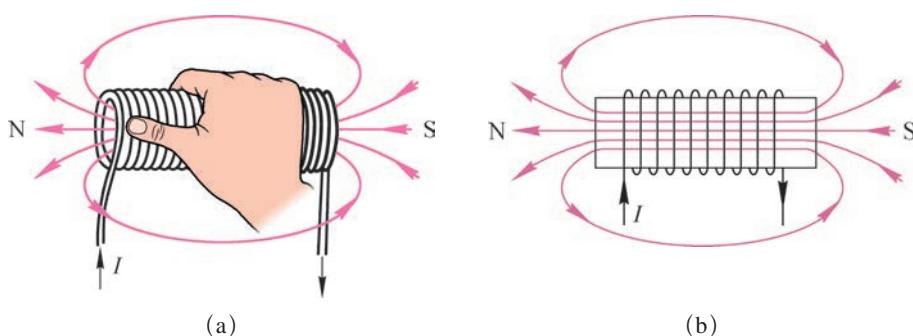


图 11-10 通电螺线管的磁感线

拓展视野

安培观察到通电螺线管的磁场和条形磁体的磁场很相似，提出了分子电流假说。

安培认为在分子等物质微粒的内部，存在着一种环形电流——分子电流，使每个分子成为微小的磁体，分子的两侧相当于两个磁极。通常情况下磁体分子的分子电流取向是杂乱无章的，如图 11-11 (a) 所示。它们产生的磁场互相抵消，对外不显磁性。当外界磁场作用后，分子电流的取向大致相同，如图 11-11 (b) 所示。在垂直于导体的平面上，相邻分子间的电流作用抵消，所有分子电流的总效果显示出宏观的磁性。

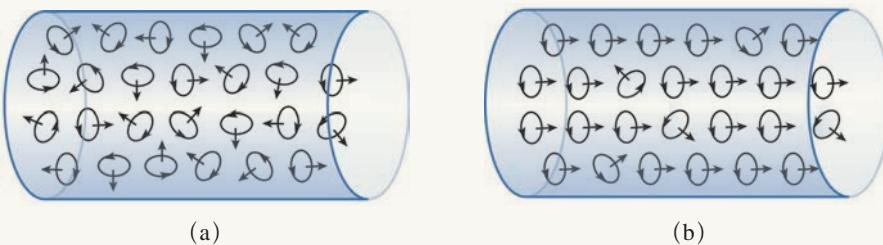


图 11-11 分子电流假说示意图

安培的分子电流假说与现代原子分子结构的概念相符合，分子电流对应核外电子绕核旋转形成的电流；除了能够解释软铁棒被磁化的现象以外，还能够解释磁体受到高温或猛烈敲击会失去磁性的现象，这是由于分子电流的取向由大致相同变成杂乱无章所致。

如何定量地描述磁场的强弱？

磁体在周围空间产生磁场，另一块磁体在此磁场中会受到磁场力的作用。通电导线在周围空间产生的磁场也会对其中的磁体产生磁场力的作用；反之，通电导线在磁场中也会受到磁场力的作用。

与定义电场强度类似，假定我们将长度 Δl 足够短的电流元 $I\Delta l$ 放在磁场中的任意点 P ，如果电流元受到的最大磁场力为 F ，则我们可以用 F 与 $I\Delta l$ 之比来定义 P 点描述磁场大小和方向的物理量——**磁感应强度**（magnetic induction）

$$B = \frac{F}{I\Delta l}$$

磁感应强度的单位是特斯拉，简称特，符号为 T。磁感应强度是矢量，在某一点磁感应强度的方向就是放在该点可以在任意方向自由转动的小磁针 N 极的指向，也是磁感线在该点的切线方向。磁场中某处磁感应强度的大小和方向是磁场本身的性质，与其中是否存在电流元及电流的大小无关。

实际情形中，磁场的强弱可以有很大的区别。表 11-1 列出了一些磁场的磁感应强度大小的近似值。

表 11-1 一些磁场的磁感应强度大小的近似值

地点	磁感应强度
中子星表面	10^8 T
钕磁体附近	10^0 T
小条形磁体附近	10^{-2} T
地球表面	10^{-5} T
星际空间	10^{-10} T
磁屏蔽室内	10^{-14} T

自主活动

将螺线管串接 10Ω 电阻和开关后接入 3 节 1.5 V 干电池组成的电源，如图 11-12 (a) 所示。

将磁传感器（收集所在位置磁场的磁感应强度数据）与计算机相连接。

螺线管放置在水平桌面上，调节磁传感器的高度，使探测管正好处在螺线管的轴线上，如图 11-12 (b) 所示。



图 11-12 用磁传感器研究通电螺线管内部的磁感应强度

合上开关，记录磁传感器探测管的前端插入螺线管内部的距离 d 与相应磁感应强度 B 的测量值，绘制 $B-d$ 曲线。

从实验结果不难发现，在通电螺线管中心轴线上靠近中央处的磁感应强度几乎不随位置变化。

磁场强弱和方向处处相同的磁场称为匀强磁场。匀强磁场的磁感线是一系列疏密间隔相同的、同方向的平行直线。通电密绕直螺线管内部的磁场，靠得很近的两个平行异名磁

极之间中央部分的磁场，或者较大的蹄形磁体两磁极间的磁场，都可以近似看作匀强磁场，如图 11-13 和图 11-14 所示分别为铁屑显示的部分区域近似存在匀强磁场的磁场分布和磁感线。

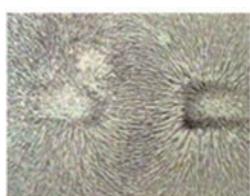


图 11-13 两个平行异名磁极间的磁场

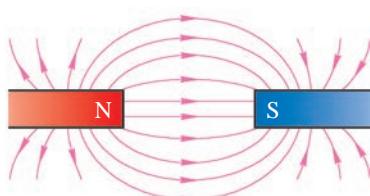
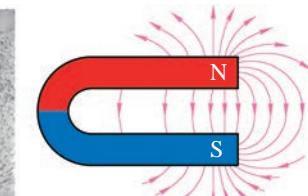


图 11-14 蹄形磁体两磁极间的磁场



磁体是科学的研究工具。借助强磁场有助于我们“看到”物质本性和科学规律。强磁场是半导体、超导、特殊功能材料和器件研究不可缺少的条件，同时强磁场下的核磁共振，又是生命科学、医学研究的必要工具。2017 年 9 月，中国科学院强磁场科学中心成功建成“稳态强磁场实验装置”。在此建设过程中，取得了一系列成就，成功研制了由内部水冷磁体和外部超导磁体组合而成的混合磁体，最大磁感应强度达 43 T。另外，该中心建成了国际首创水冷磁体扫描隧道显微镜系统、扫描隧道—磁力—原子力组合显微镜系统，以及强磁场下低温、超高压实验系统，使得我国稳态强磁场相关实验条件达到国际领先水平。

STSE

电磁铁是通电产生磁性的一种装置，其结构为在铁芯的外部缠绕通电线圈。工业上使用起重电磁铁吊运钢材、铁砂等导磁材料，或者用电磁铁作电磁机械手夹持钢铁等导磁材料。在实际生活中电磁铁是电磁继电器、电磁阀门、电子门锁、智能通道闸和电磁流量计等的核心部件之一。如图 11-15 所示的半自动式智能通道闸就是通过电磁铁来控制机芯的运转和停止的。

一般而言，电磁铁所产生的磁场与电流大小、线圈匝数及铁芯都有关。另外，为了使电磁铁断电后立即消磁，往往采用消磁较快的软铁或硅钢材料来制作电磁铁。这样的电磁铁在通电时有磁性，断电后立即失去磁性；磁性的强弱能用电流的大小来控制；磁极可以由电流的方向来控制。



图 11-15 电磁铁控制的智能通道闸

问题与思考

- 在奥斯特电流磁效应的实验中，水平放置的通电直导线如果不恰好沿南北方向平行地放在小磁针的上方，能否发现小磁针的偏转？
- 指出图 11-16 中导线接通电流后小磁针的偏转情况。

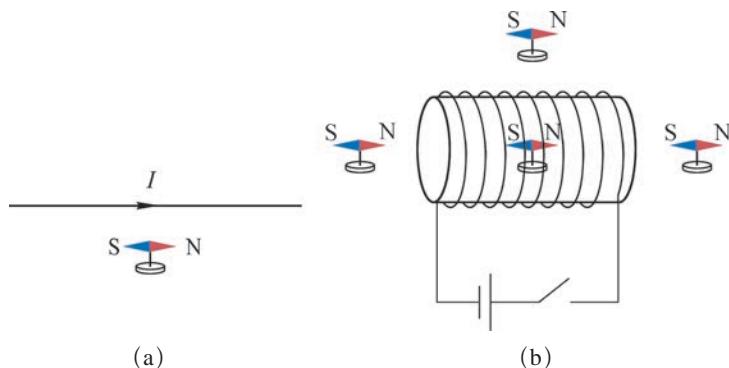


图 11-16

- 若电流元 $I\Delta l$ 在某空间 P 点受到的最大磁场所力为 F , 该处的磁感应强度多大? 如果电流元的电流增大, P 点处的磁感应强度是否相应增大? 如果撤去电流元, 该处的磁感应强度是否变化?
- 如图 11-17 所示, ab 、 cd 是两根在同一竖直平面内的长直导线, 在两导线中央悬挂一个小磁针, 小磁针与两根直导线静止在同一竖直平面内。当两导线中通以大小相等的电流时, 小磁针 N 极垂直于纸面向外转动, 则导线 ab 中电流方向如何? 导线 cd 中电流方向如何? 若导线 ab 中电流方向是 $b \rightarrow a$, 如何才能使小磁针 N 极仍然垂直于纸面向外转动?
- 如图 11-18 所示, AB 是一根通电导线且绕了一个圈, 处于纸面所在的平面上, 导线下有一个小磁针, 通电时 N 极指向纸外。试在纸面上画出导线附近 M 、 P 、 Q 处磁感应强度的方向 (用“•”或“ \times ”表示), 简述判断的理由。

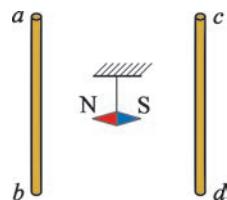


图 11-17

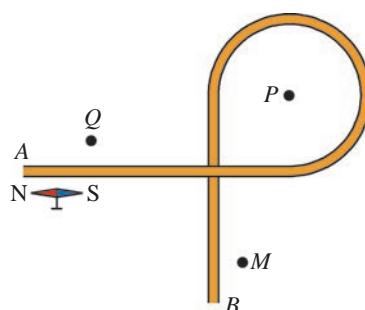


图 11-18



图 11-19 “华龙一号”核能发电机

第三节 磁通量 电磁感应现象

电力工业是一个国家经济发展的命脉，2019年，我国发电装机容量已达19亿千瓦。电力的获得依赖于煤炭、水力、风力、核燃料等能源的转换。正是由于物理学家发现了磁场与电场之间的联系，才使得其他形式的能转变成电能成为现实。磁场有何性质？它与电场有何联系呢？

为了进一步研究磁场的性质，以及磁场与电场之间存在的关系，物理学家引入了磁通量的概念。

② 什么是磁通量？

如图11-20所示，设在磁感应强度为 B 的匀强磁场中，有一个面积为 S 且与磁场方向垂直的平面，磁感应强度 B 与面积 S 的乘积叫做穿过这个平面的磁通量（magnetic flux），简称磁通，用 Φ 表示，即

$$\Phi = BS$$

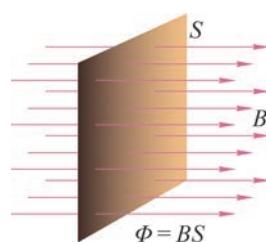


图 11-20 磁通量

磁通量是标量，如果设定磁感应强度指向右方时穿过这一面积的磁通量为正，那么，磁感应强度指向左方时穿过这一面积的磁通量就为负。

在国际单位制中，磁通量的单位是韦伯，简称韦，符号是 Wb；面积的单位是 m²，则

$$1 \text{ Wb} = 1 \text{ T} \cdot \text{m}^2$$

由 $\Phi = BS$ 可得 $B = \frac{\Phi}{S}$ 。由此可知磁感应强度数值上等于穿过垂直于磁场方向单位面积的磁通量，因此也常把磁感应强度叫做磁通密度。上式虽然得自匀强磁场，同样适用于非匀强磁场的一般情况。由于我们约定磁场较强处磁感线较密集，磁场较弱处磁感线较稀疏，可以看出在给定的磁场中穿过某一面积的磁感线的条数与穿过该面积的磁通量成正比，即磁通量越大，穿过相同面积的磁感线越多。

拓展视野

如图 11-21 所示，面积为 S 的平面与匀强磁场方向不垂直。若平面的法线方向与磁场方向的夹角为 θ ，则该平面在垂直于磁场方向上的投影面积

$$S' = S \cos \theta$$

由图可知，通过平面 S 的磁通量等于通过平面 S 在垂直于磁场方向上的投影区域 S' 的磁通量，即

$$\Phi = BS' = BS \cos \theta$$

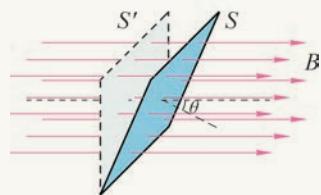


图 11-21 平面与磁场方向不垂直

奥斯特发现电流磁效应的实验揭示了电现象与磁现象之间的联系。自然界的许多规律都具有对称性，对称性是人类认识自然界的一个重要法则。那么电和磁是否也具有对称性？英国物理学家法拉第（图 11-22）就认为电与磁应该是一对和谐的对称现象。



图 11-22 法拉第 (M. Faraday, 1791—1867)

既然电流可以产生磁场，反过来磁场能否产生电流呢？

经过近十年的艰苦探索，1831 年，法拉第对此终于有所发现。如图 11-23 所示，在软铁环的 A 侧接好导线，把 B 侧的线圈接到灵敏电流计上，再把 A 侧的线圈接到电池组上；当 A 侧电路接通的瞬间，法拉第看到 B 侧灵敏电流计的指针立即明显偏转，这就表明 B 侧的线圈中出现了电流；当 A 侧电路断开时，他又看到指针向相反方向偏转。由于通电线圈产生磁场，法拉第把他发现的这种由磁产生电流的现象正式定名为电磁感应（electromagnetic induction）现象，产生的电流就叫做感应电流（induction current）。

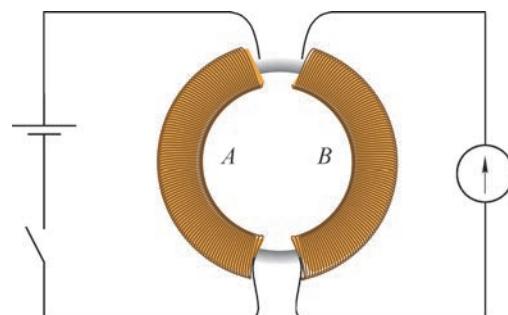


图 11-23 法拉第实验示意图

？产生感应电流的条件是什么？

除了上述法拉第的实验外，还有什么办法可以产生感应电流？

自主活动

准备一根条形磁体，按照如图 11-24 所示先将灵敏电流计和线圈 B 连接组成闭合回路，观察灵敏电流计的指针是否偏转。灵敏电流计的指针发生偏转说明在线圈 B 内产生了感应电流。

按照表 11-2 中的实验操作，将观察到的结果填入表格中。

在这一实验中，发现什么情况下能够产生感应电流？线圈 B 内什么物理量发生了变化？

按照图 11-25 将灵敏电流计和线圈 B 连接成闭合回路。线圈 A 通过滑动变阻器和开关连接到电源上，组成另一个闭合回路。将线圈 A 插在线圈 B 里面，再将软铁棒插在线圈 A 中。

按照表 11-3 中的实验操作，将观察的实验结果填入表格中。

在这一实验中，发现什么情况下能够产生感应电流？线圈 B 内什么物理量发生了变化？

表 11-2 实验现象记录表

磁体的动作	灵敏电流计指针是否偏转
插入线圈	
停在线圈中	
从线圈中抽出	

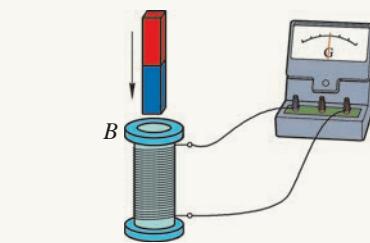


图 11-24 研究电磁感应现象实验

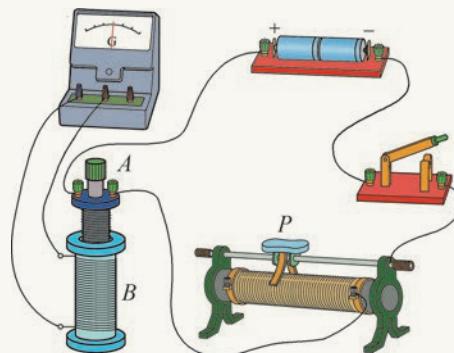


图 11-25 研究电磁感应现象实验

表 11-3 实验现象记录表

开关、滑动变阻器的状态	灵敏电流计指针是否偏转
开关闭合瞬间	
开关闭合时，滑动变阻器的滑片静止	
开关闭合时，滑动变阻器的滑片快速滑动	
开关断开瞬间	

在如图 11-24 所示的实验中，条形磁体插入线圈，线圈中的磁场均由弱变强；条形磁体从线圈中抽出，线圈中的磁场均由强变弱，如图 11-26 所示。这两种情况下，线圈中都产生了感应电流。

在如图 11-25 所示的实验中，开关闭合或断开的瞬间，或者在开关闭合、滑动变阻器的滑动头快速滑动时，线圈 A 中电流都会迅速变化，产生的磁场也迅速变化。由于线圈 A 与线圈 B 套在一起，使线圈 B 中磁场的强弱也迅速变化，如图 11-27 所示，这时，线圈 B 中产生了感应电流。

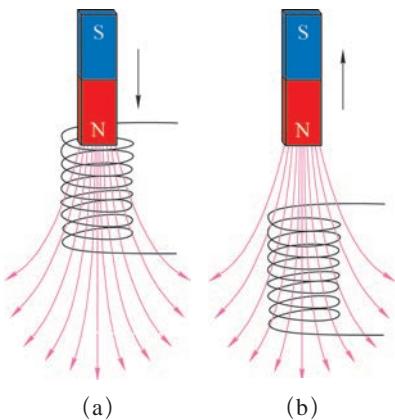


图 11-26 条形磁体插入或者抽出线圈，使线圈内的磁场强弱发生变化

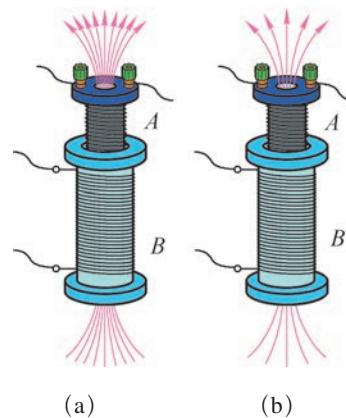


图 11-27 线圈 A 中电流的变化使线圈 B 中的磁场变化

从上述两个实验还可以发现：无论磁体还是通电线圈，只要能使线圈 B 内的磁场强弱变化，就会在线圈 B 中产生感应电流。

线圈内的磁场强弱发生变化时，是否一定产生感应电流？将一块条形磁体固定在一个特殊圆锥曲面的上端，该圆锥外曲面的形状恰好沿着条形磁体的磁感线（图 11-28）。将一根导线两端连接微电流传感器的输入端（或者灵敏电流计）；再将导线环绕在圆锥外曲面的下端。沿曲面拉动导线，使导线沿着圆锥外曲面向上滑动。该导线组成的闭合回路内的磁场变强，但是微电流传感器（或者灵敏电流计）却没有检测到感应电流。



图 11-28 沿着特殊圆锥外曲面向上滑动的闭合回路

大家谈

为什么线圈内的磁场变强时，却没有产生感应电流呢？

以上实验和其他事实都表明：只要通过闭合导体回路的磁通量发生变化，闭合导体回路中就会产生感应电流。

新中国成立以来，我国电力工业在火力发电、水力发电、风力发电和核能发电等领域都取得了举世瞩目的成就。尤其在核能发电领域，我国自主研发的第三代核电“华龙一号”发电机（图 11-19）具有多项设计创新，其安全指标和技术性能都达到了国际三代核电技术的先进水平。但归根结底，无论是火力发电、水力发电、风力发电，还是核电站的发电，都是利用了电磁感应的基本原理。

问题与思考

- 如图 11-29 所示，在匀强磁场中有一个矩形闭合线框，判断在下列情况下线框中是否产生感应电流，并说明理由。
 - 如图（a）所示，保持线框平面始终与磁感线垂直，线框在磁场中由上向下运动。
 - 如图（b）所示，保持线框平面始终与磁感线垂直，线框在磁场中由左向右运动。
 - 如图（c）所示，保持线框平面始终与磁感线平行，线框在磁场中由左向右运动。
 - 如图（d）所示，线框绕轴线 OO' 转动。

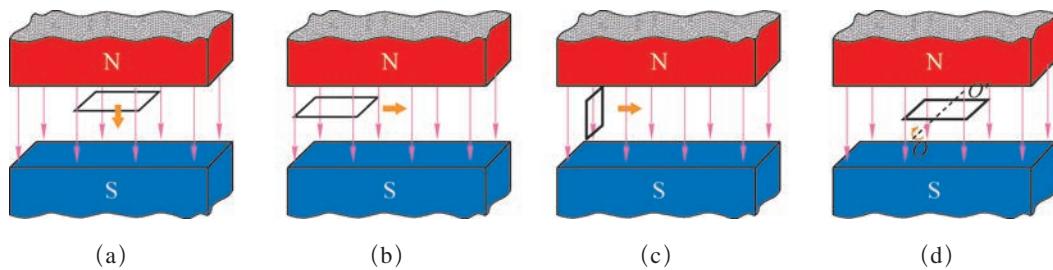


图 11-29

- 如图 11-30 所示，围绕条形磁体中央有两个面积大小不同且处于同一平面内的线圈 a 和 b 。试比较通过的线圈 a 与线圈 b 的磁通量大小，并简述理由。
- 甲、乙两同学关于磁通量有不同的看法。甲同学认为：根据磁通量的计算公式 $\Phi = BS$ ，在匀强磁场中，线圈的面积越大磁通量一定越大；乙同学认为：在非匀强磁场中，线圈的面积越大磁通量越小。试对甲、乙两位同学的看法作出评价。

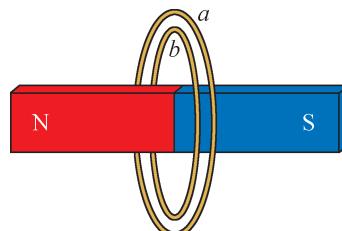


图 11-30

4. 如图 11-31 所示，空间固定一条形磁体，有三个金属环 a 、 b 、 c ，则：

- (1) 若圆环 a 由无穷远向右移到靠近条形磁体的 N 极，通过圆环 a 的磁通量如何变化？
- (2) 若圆环 a 由条形磁体的 N 极通过条形磁体移到 S 极，通过圆环 a 的磁通量如何变化？
- (3) 若垂直于地面的圆环 b 从条形磁体的中央位置竖直下落，通过圆环 b 的磁通量如何变化？
- (4) 若在条形磁体附近，环面平行于地面的圆环 c 从条形磁体右边的位置 1 下降到位置 3，通过圆环 c 的磁通量如何变化？
- (5) 若在条形磁体附近，圆环 c 从条形磁体右边的位置 1，沿着水平方向移到磁体左边，通过圆环 c 的磁通量如何变化？

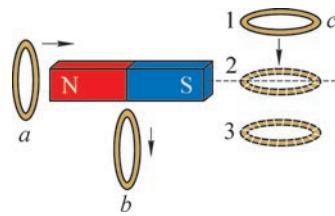


图 11-31

5. 如图 11-32 所示，在无限长的通电直导线附近放置一矩形线圈，与导线处在同一平面内，且线圈中的上下两条边与导线平行。则当线圈做下列三种不同方向的平行移动时，线圈内能否产生感应电流？

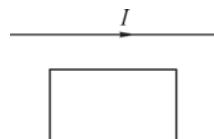


图 11-32

- (1) 线圈平行移动的方向与导线中电流的方向一致。
- (2) 线圈平行移动的方向与导线中电流的方向垂直，并保持线圈与导线在同一平面内。
- (3) 线圈平行移动的方向垂直于纸面向上。

6. 如图 11-33 所示是研究电磁感应现象实验所需的器材。试用笔画线代替导线，将带有铁芯的线圈 A 、电源、滑动变阻器和开关连接成回路，将灵敏电流计和线圈 B 连接成另一个回路。简述在实验中采用不同的元器件改变线圈 B 回路的磁通量，使回路产生感应电流的四种不同方式。

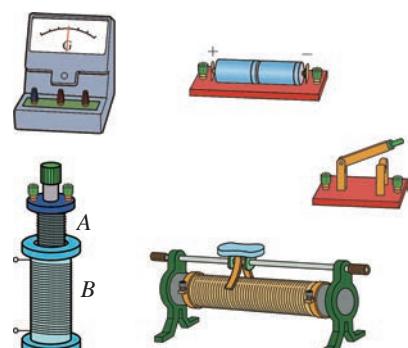


图 11-33



图 11-34 中国北斗卫星导航系统示意图

第四节 电磁场与电磁波

现代社会离不开电子通信技术，它的稳定持续发展离不开电磁场与电磁波的应用。北斗卫星导航系统（图 11-34）是我国自行研制的全球卫星导航系统，可在全球范围内全天候、全天时提供导航、定位和授时服务，并具有短报文（传送 120 个汉字的短信息）通信能力。北斗卫星导航系统是利用电磁波传递信息的。

？什么是电磁场？什么是电磁波？

19 世纪 60 年代，英国物理学家麦克斯韦（图 11-35）在总结前人对电和磁研究的基础上，将电磁场理论用简洁、对称、完美的数学形式表示出来。经后人整理和改写，确立了经典电磁学主要基础的麦克斯韦方程组，建立了完整的电磁场理论。这个理论不仅说明了当时已知的电磁现象，而且预言了电磁波的存在。

麦克斯韦指出：如果在空间某处有交替变化的电场，就会在空间引起交替变化的磁场；这个交替变化的电场和磁场又会在较远的空间引起新的交替变化的电场和磁场……交替变



图 11-35 麦克斯韦

化的电场和磁场相互联系，形成一个不可分离的统一的场，这就是**电磁场 (electromagnetic field)**。电磁场能独立于场源存在，反映了电磁场作为物质存在的一种形式。电磁场并不局限于空间某个区域，而要由近及远向周围空间传播开去。电磁场这样由近及远地传播，就形成**电磁波 (electromagnetic wave)**。

电磁波与我们的生活联系紧密，用仪器可以检测到电磁波信号。如图 11-36 所示，高灵敏度环形线圈两端与微电流传感器相连，再接入计算机，可以检测多种电磁波信号源（如电动机、电动剃须刀等）。如果采集到电磁波，则在显示器上显示出得到的电磁波信号。



图 11-36 用微电流传感器检测电磁波

② 电磁波主要有哪些应用？

电磁波的频率范围极为宽广，各个频段都有专门的名称，如无线电波、红外线、可见光、紫外线、X 射线、 γ 射线等。电磁波在日常生活中有广泛的应用，我们的生活离不开电磁波。

1. 卫星通信

利用人造地球卫星在地面站之间进行通信的系统，称为卫星通信系统，人造卫星相当于离地面很高的中继站。卫星通信（图 11-37）可以在两个或多个地面站之间进行。卫星通信的特点是：通信范围大，只要在卫星发射的电磁波所覆盖的范围内，任何两点之间都可进行通信。

如果一位在中国的用户要与南极洲的科考人员打电话，这个过程就是先通过手机把声音转换为数字信号发射到基站，通过基站把用户电话线路与地面站连通，地面站把电话信号发射到卫星，卫星接到这个信号后经过信号放大再转发到南极洲的地面站，地面站把电话信号取出来，送到科考人员的手机上，手机把数字信号转换成声音。无线电广播、电视节目转播的原理与电话传输相似。

2. 微波加热

微波炉是利用电磁波中的微波加热食物的，使用微波炉加热食物快速高效，且能保证食物的营养，尤其是蛋白质和维生素不被破坏。

3. 遥控和自动控制

电磁波中特定波段的红外线常用于遥控和自动控制。例如，家用电器的遥控器大多是

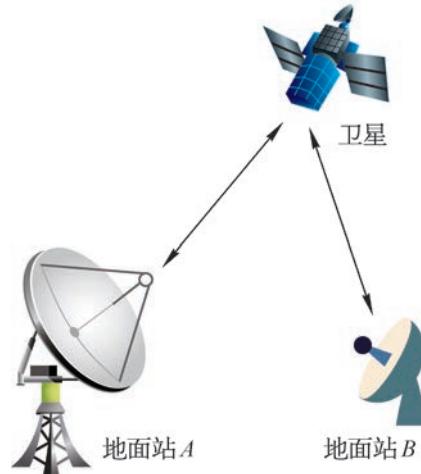


图 11-37 卫星通信

利用发射红外线进行遥控的。公共场所的感应式水龙头则是靠人手遮挡反射红外线实现自动控制。

4. 无线射频识别技术

射频识别是一种非接触式的自动识别技术，可以通过无线电信号自动识别特定目标，并读写相关数据，而无需识别系统与特定目标之间建立机械或光学的接触。图 11-38 所示是公交卡的内部结构，当公交卡接近刷卡机时，卡内的线圈就会产生感应电流，实现卡内芯片与外部数据库的数据传输。

5. 医疗设备

电磁波中的紫外线可以用于医用消毒，形成无菌空间；X 射线透射照相和 X-CT 扫描用于疾病检查。X 射线和 γ 射线常用于治疗疾病。许多种理疗设备也是靠电磁波对人体的作用治疗疾病。如图 11-39 所示是由我国原陆军总医院研制成功的“稀土材料小型 16 层移动 X-CT”，各项质量指标显著优于国际同类 CT 扫描仪。

6. 雷达

雷达是利用电磁波测定物体位置的设备。电磁波如果遇到尺寸明显大于波长的障碍物就要发生反射，雷达向一定的方向发射周期性的不连续的电磁波（叫做电磁脉冲）。发射出去的电磁波遇到障碍物反射，反射波可以在脉冲周期时间间隔内被天线接收。测出从发射到接收电磁脉冲之间的时间，就可以得到障碍物的距离，再根据发射电磁波的方向，便能确定障碍物的位置。

我国自主设计建设的 500 m 口径球面射电望远镜（FAST）与雷达接收天线类似，遥远天体投射来的微弱电磁波信号被精确镜面反射后会聚到公共焦点，接收机将这些信号加工、转化成可供记录、显示的形式。FAST 主导国际甚长基线干涉测量网，能获得天体超精细结构。FAST 具有空间飞行器的测控与通信能力，将深空通信能力延伸至太阳系外缘行星，将卫星数据接收能力提高 100 倍。FAST 建成启用以来，已经在脉冲星探测方面取得众多成果，未来在暗物质和暗能量的探测及地外文明搜寻等方面将会起到重要作用。

一方面人们利用电磁波为人类服务，借助电磁波工作、生活，另一方面还有更多的电磁波是在无意中产生的。例如：家用电器中的电风扇、吹风机、榨汁机等，这些电器工作时都会产生电磁波。在利用电磁波提高人们的生活质量的同时，电磁波也可能对人们产生一定的危害，我们需要加以防范，趋利避害。

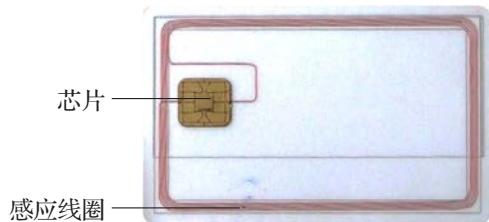


图 11-38 公交卡的内部结构



图 11-39 稀土材料小型 16 层移动 X-CT

？电磁波和光有何关系？

麦克斯韦从理论上得出电磁波在真空中的传播速度等于光在真空中的传播速度，认为光是一种电磁波，并在此基础上提出了光的电磁说。

光的本性是复杂的。19世纪末，科学家发现了光电效应现象，但无法用当时流行的光的波动理论解释。爱因斯坦提出了光子说，成功地解释了光电效应现象。爱因斯坦指出空间传播的光能量是不连续的，而是一份一份的，每一份叫做一个光子，这是人们对微观粒子本质认识的一个飞跃。

科学家发现光既具有波动特性，又具有粒子特性。光既能像波一样传播，有时又表现出粒子的特征，因此我们称光具有“波粒二象性”。

麦克斯韦的电磁场理论在物理学上具有重要意义；这一理论推进了第二次工业革命，为人类利用电能提供了科学依据，使人类进入了电气化时代。现在，在电磁场理论和近代物理发展的基础上，人类又迈向信息化时代。

问题与思考

1. 2018年，中国成功发射了嫦娥四号月球探测器的中继卫星“鹊桥”。随后的几天里，“鹊桥”号中继星飞行到月球背面上空的地月引力平衡点L2点（图11-40）附近运行，为嫦娥四号月球探测器的发射以及在月球背面着陆提供了通畅的地月中继通信支持。L2点位于月球的背后，到地球的距离超过 4×10^5 km，比月球到地球的距离还要再远 6.5×10^4 km。如果从月球背面发射的无线电信号通过“鹊桥”号中继星转发，试问信号到地球所需的时间约为多少？（不计“鹊桥”号中继星转发信号的时间）

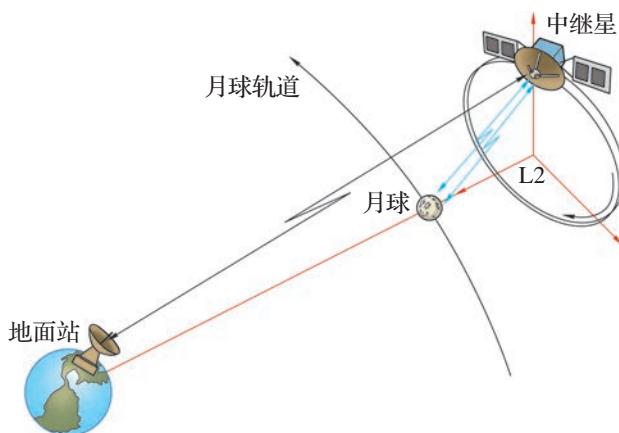


图 11-40

2. 为了证实磁场的存在，常将小磁针放到磁体附近，可以观察到小磁针受到磁场力的作用其 N 极所指的方向发生了偏转。试设计一种简单可行的办法，以证实电磁波的存在。
3. 太阳光传到地球约需要 500 s，太阳与地球之间的距离约为多少？在地球和太阳之间的大部分区域都处于真空状态，太阳光能够传到地球说明了什么？
4. 手机和收音机都依靠电磁波传递信号。尝试将手机或收音机放入不同材质的容器中，例如：铝膜袋、塑料袋或者金属饭盒中，观察手机或收音机是否还能正常工作。观察的结果与容器的材质和器壁厚度有没有关系？如何用实验验证？
5. 举例简述电磁波载有能量，也能载有信息。

小结

• 基本概念和基本规律

磁场: 磁体内外和电流周围存在的物质。

磁感应强度: 描述磁场大小和方向的物理量。磁感应强度的方向是放在该点可以在任意方向自由转动的小磁针 N 极的指向。磁感应强度的单位是特斯拉, 简称特, 符号为 T。

磁通量: 在给定的磁场中, 磁通量为磁感应强度与垂直于磁场面积的乘积。磁通量的单位是韦伯, 简称韦, 符号是 Wb。

电磁感应现象: 通过闭合导体回路的磁通量发生变化从而产生感应电流的现象。

电磁场: 交替变化的电场和磁场相互联系, 形成一个不可分离的统一的电磁场。电磁场是物质存在的一种形式。

电磁波: 在空间传播的交替变化的电磁场。光是一种电磁波, 同时具有波动性和粒子性。

• 基本方法

通过建立磁感线、电流元等物理模型, 感受抽象、简化和建模的方法。

通过产生感应电流的探究实验, 认识实验数据获取、分析和处理的基本方法。

• 知识结构图



复习与巩固

1. 导线中分别通以如图 11-41 所示方向的电流，当小磁针静止时，N 极分别指向什么方向？

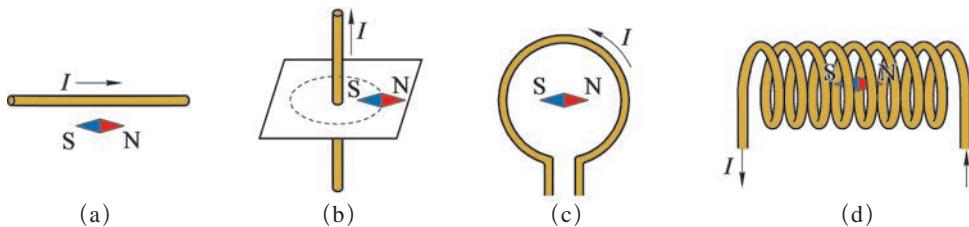


图 11-41

2. 闭合导线环处在匀强磁场中，导线环的环面与磁场垂直，导线环面积为 0.5 m^2 ，通过环的磁通量为 0.2 Wb ，则该磁场的磁感应强度为多少？当环面转至与磁场方向平行时，通过环的磁通量为多少？在闭合导线环旋转的过程中该处匀强磁场的磁感应强度是否改变？

3. 如图 11-42 所示为“研究电磁感应现象”的实验装置。

(1) 在图示状态下，线圈 A 插入线圈 B 后，将滑动变阻器滑动头向左快速滑动，线圈 B 的磁通量如何变化？这时灵敏电流计的指针会不会偏转？

(2) 线圈 A 插入线圈 B 后，闭合开关的瞬间和断开开关瞬间线圈 B 的磁通量如何变化？这时灵敏电流计的指针是否偏转？

(3) 根据上述实验过程，说明线圈 B 中产生感应电流的条件。

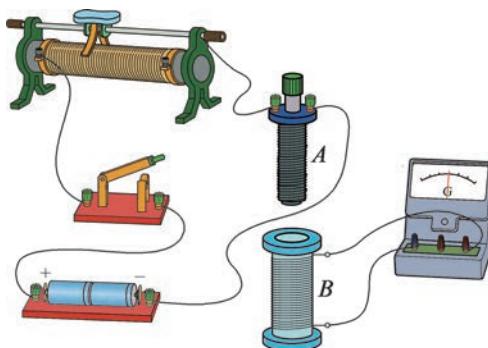


图 11-42

4. 如图 11-43 所示是三根平行通电直导线的截面图，它们的电流 I 大小相同，方向垂直纸面向外。如果 $AB = BC = CA$ ， D 点、 E 点和 F 点分别是 AB 、 BC 和 CA 的中点，则 D 点、 E 点和 F 点的磁感应强度的方向如何？磁感应强度的大小是否相等？

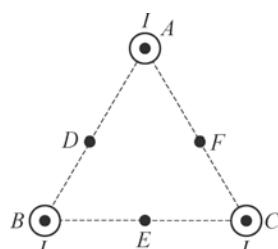


图 11-43

5. 如图 11-44 所示，在同一平面内有四条彼此绝缘的通电长直导线围成一个正方形， O 点为正方形的中心，四根导线中的电流方向如图所示，电流 $I_1 < I_2 < I_3 < I_4$ 。试

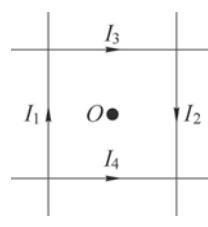


图 11-44

判断 I_1 和 I_2 在 O 点产生的磁感应强度沿什么方向? I_3 和 I_4 在 O 点的磁感应强度沿什么方向? 如果切断电流 I_4 , O 点的磁感应强度沿什么方向? 如果切断电流 I_1 , O 点的磁感应强度沿什么方向? 简述判断的理由。

6. 如图 11-45 所示, 在一方向竖直向上的匀强磁场中, 沿水平方向放置一长直通电导线, 导线中的电流方向垂直纸面向里。 a 、 b 、 c 、 d 是以通电导线为圆心的竖直平面内同一圆周上的四个点, 则在这四个点中, 哪两点的磁感应强度大小相同? 哪个点的磁感应强度最大? 哪个点的磁感应强度最小?

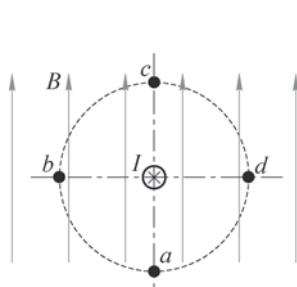


图 11-45

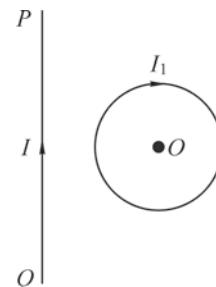


图 11-46

7. 如图 11-46 所示, 圆环与通电长直导线 PQ 导线位于同一平面内。已知圆环中心 O 点的磁感应强度为 B , 通电圆环在 O 点产生的磁感强度为 B_1 , 则:

- (1) 通电直导线在 O 点产生的磁感应强度 B_2 为多大?
- (2) 改变长直导线的电流, 使通电直导线在 O 点产生的磁感应强度增为 $2B_2$; 改变通电圆环的电流使通电圆环在 O 点产生的磁感应强度相应减小为 $\frac{B_1}{2}$, 则 O 点的磁感应强度变为多大?

8. 如图 11-47 所示, 小线圈放在通有恒定电流的大线圈上, 小线圈恰好一半面积在大线圈内, 小线圈和大线圈互相绝缘。规定垂直纸面向外的磁通量为正, 判断通过小线圈的磁通量正负, 简述判断的理由。

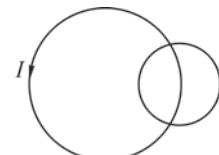


图 11-47

9. 如图 11-48 所示, 直三菱柱放在空间直角坐标系内, $ab = 50 \text{ cm}$, $ad = 20 \text{ cm}$, $abcd$ 平面垂直 Oxy 平面, 与 Ox 、 Oy 的夹角分别为 $\alpha = 37^\circ$, $\beta = 53^\circ$ ($\sin 37^\circ \approx 0.6$, $\cos 37^\circ \approx 0.8$), 匀强磁场沿 Ox 方向, 磁感应强度为 0.20 T 。通过 $Ocbe$ 面的磁通量为多大? 通过 $adOe$ 面的磁通量为多大?

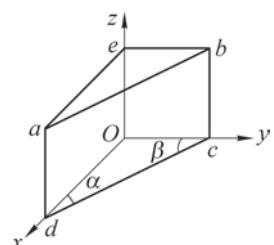


图 11-48

10. 在磁感应强度为 B 的匀强磁场中, 用一根长为 l 的导线绕制一个线圈。若使通过该线圈的磁通量最大, 线圈应为什么形状且如何放置? 求出磁通量的这个最大值。

11. 如图 11-49 所示, 四根完全相同的长直导线互相平行, 它们的截面处于一个正方形 $abcd$ 的四个顶点 a 、 b 、 c 、 d 处, 导线 a 、 b 、 c 、 d 中通有大小都相同的电流, 导线 a 、 b 、 d 的电流方向垂直于纸面向里, 导线 c 的电流方向垂直于纸面向外, a 、 c 连线和 b 、 d 连线的交点为 O 。测得通电导线 a 在 O 处产生磁场的磁感应强度大小为 B , 则通电导线 a 和 c 在 O 处产生磁场的磁感应强度大小如何? 通电导线 b 和 d 在 O 处产生磁场的磁感应强度大小如何?

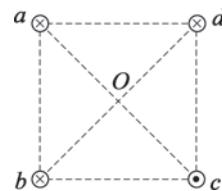


图 11-49

*12. 自行车发电机的结构如图 11-50 所示, 一块永久磁体置于绕有线圈的 U 形导磁硅钢片的内部。当自行车骑行时车轮的边缘通过摩擦轮带动磁体转动。解释该装置为何能对车灯供电。

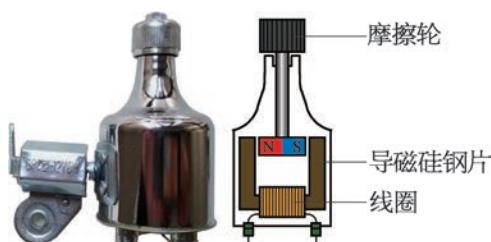


图 11-50

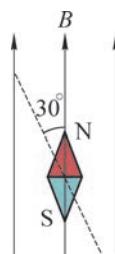


图 11-51

*13. 某科考队进入矿区后发现水平放置的指南针原来指向正北的 N 极逆时针转过 30° , 如图 11-51 中的虚线所示。设该处地磁场的磁感应强度水平分量为 B , 则该矿区产生的磁感应强度在水平面内的最小值为多少?

*14. 如图 11-52 所示, 在磁感应强度为 B 且范围足够大的匀强磁场中有一个面积为 S 的线框。线框平面与匀强磁场方向成 θ 角, 则:

- (1) 通过该平面的磁通量为多少?
- (2) 若将线框从水平位置 I 顺时针转到竖直位置 II, 则磁通量变化量为多少?
- (3) 若将线框从水平位置 I 转到水平位置 III, 顺时针旋转和逆时针旋转的磁通量变化量各为多少?

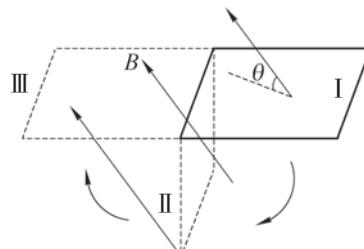


图 11-52

创 新 协 调 绿 色 开 放 共 享



图示为格尔木光伏电站，位于青海省西部的柴达木盆地，于2011年建成并网发电。电站总规划装机容量达7210MW。太阳能光伏发电是利用太阳能电池吸收太阳光，将光能直接转变成电能输出的一种发电方式。世界各国对环境的保护和对再生清洁能源有着巨大需求，还有哪些可开发利用的新能源呢？

第十二章 能源与可持续发展

· 在本章中你将：

1. 了解利用水能、风能、太阳能和核能的方式，初步了解核裂变和核聚变。知道能量在转化过程中总量保持不变，能量转化具有方向性。认识能源及其分类。
 2. 经历对社会生活中的能源利用及其对环境影响的关注过程，增强环境保护意识。
- 本章的学习将了解能源分类的知识，进一步了解新能源的开发与利用。了解科学、技术、社会、环境协调发展的重要性。
- 本章的学习有助于领会能量转化与守恒的能量观念，认识能源的过度开发和利用对环境的影响。知道保护环境、节约能源、促进可持续发展的重要意义。



图 12-1 采用电池供电的新能源公交车

第一节 能源及其应用

自然界中处处充满能量，能量无所不在，而它的表现形式是多种多样的。以汽车为例：汽车行驶，具有动能；鸣响喇叭，声波在空气中传播，是声能的表现；打开车灯照亮道路，这是光能的作用。如图 12-1 所示的新能源公交车内部电池中贮存着电能，电能转化为声能、光能、机械能等能量形式。此外，自然界还有原子核能、引力势能、生物质能等。正是由于在这个世界上到处有能量存在，而且这些能量还可以相互转化，才使得我们这个世界绚丽多彩，充满了生机和活力。

能量在日常生活中的表现更是多种多样：按下开关，台灯亮起；点燃煤气，煮饭烧菜；人吃饱饭，充满力量……这些都反复证明，能量不仅普遍存在，而且无时无刻不在发挥作用。

大家谈

我们每天都要吃饭、喝水，要使用手机、冰箱、热水器，还要乘坐交通工具。我们人类的活动，用电器、交通工具的运转，都需要能量。日常生活中所用的能量都从何而来呢？

② 什么是能源?

能量来自能源。能源是能提供多种形式、可以相互转换的能量的源泉。简单确切地说，能源是自然界中能为人类提供某种形式能量的物质资源。人类利用的能源有太阳、草木、风、水、煤、石油、天然气等。

② 能源如何分类?

能源有若干种，人类为了更好地认识能源，按照不同的分类准则对其进行分类。

能源按来源可分为三大类：来自太阳的能源、地球本身蕴藏的能源及太阳、月球等天体与地球的相互作用产生的能源。来自太阳的能源有太阳光的热辐射能和间接来自太阳的煤、石油、天然气以及生物质能、水能、风能等；地球本身蕴藏的能源有地热能和核燃料（如铀矿等）所蕴藏的原子核能；太阳、月球等天体与地球的相互作用产生的能源有潮汐能等。

能源按生产的方式分类可分为一次能源和二次能源。一次能源是指在自然界现成存在的能源，如太阳能、水能、煤、石油、天然气等；二次能源是指由一次能源加工转换而成的能源产品，如电力、焦炭、煤气、蒸汽等。一次能源又可分为可再生能源和不可再生能源两大类。可以不断得到补充，或能在较短周期内再产生的能源称之为可再生能源，如太阳能、生物质能、风能、水能、潮汐能等；经过亿万年形成而短期内无法恢复的能源称之为不可再生能源，如煤、石油、天然气等。

还有其他不同的能源分类方式。如按能源的性质可分为燃料能源、非燃料能源；按能源的利用技术可分为常规能源、新能源等。

大家谈

家庭生活中一天所用的能量哪些来自可再生能源，哪些来自不可再生能源？

② 如何开发和利用新能源?

从保护环境和可持续发展的角度来看，煤、石油和天然气等燃料，不仅存量有限，而且有的燃料在使用时会排放大量有害气体，引起温室效应和大气污染。而太阳能、水能、风能具有可再生、无污染等特点。人们一直在研究和开发这些“清洁能源”，同时也在发展和利用核能。

1. 水能

水力发电是利用水能的主要方面。一般需筑坝拦截江河水流或蓄水成水库，水流自上而下冲击安装在坝底的发电机组发电。可见水力发电的能源乃是上游水的势能。归根结底，能量来自太阳，因为上游水主要来自雨水，而雨水是靠太阳蒸发地表水系成为水汽，凝结成云而化雨下落。

我国三峡水电站（图 12-2）位于湖北省宜昌市三斗坪镇境内，总装机容量达到 2 240 万千瓦，是我国最大的水力发电站和清洁能源生产基地。三峡水电站通过华东电网保障了上海市巨大的用电量。三峡工程是一项极具综合效益的水利工程，集发电、防洪、航运、供水灌溉等多种效益于一体。

水能不仅可再生，而且成本低、效率高。许多国家在规划电力工业时也往往优先发展水电。

2. 风能

风力发电是利用风能的最重要的方面。风力发电就是把风的动能转化为电能。如图 12-3 所示的上海市东海大桥 10 万千瓦风电场是中国第一个国家海上风电示范项目。该项目位于上海市浦东新区临港新城至洋山深水港的东海大桥两侧，海上风电机组全部是我国自主研发。每年为国家节约燃煤几十万吨，减排大量二氧化碳。



图 12-2 三峡水电站



图 12-3 上海市东海大桥 10 万千瓦风电场

STSE

上海中心大厦（图 12-4）高达 632 m，大厦屋顶上全年平均风速可达到 8~10 m/s，非常适合利用风力来发电。上海中心的外幕墙上开了三个很大的开孔，安装高空风力发电系统，包含 270 台“垂直轴涡轮”风力发电机，总装机容量为 135 kW，每年可以为大厦提供 100 多万千瓦·时的绿色电力，供屋顶、观光层中的设备使用。

大厦顶部设计成现在的造型也是为了收集屋面雨水，将收集的雨水和生活废水作为中水（又叫再生水，是指废水或雨水经过适当处理后，达到一定水质指标的水）水源，两类不同水质的原水经各自的设施处理后，用于除酒店客房外的其他所有中水用

水场所，包括冲厕、绿化浇灌、水景补水、道路冲洗等，还有部分中水供陆家嘴地区市政绿化浇灌之用。

上海中心大厦内在多个高度设有“空中大堂”，方便租户就近享受休闲娱乐生活，从而减少能源消耗。如某人在 78 楼工作，从这一层出发，如果他能在上下不超过 14 层的范围内到达一处康乐区吃午餐，而不必一直下到楼底，就是节约了能源。

上海中心大厦又称“绿色大厦”。大厦采用双层幕墙结构，外层幕墙保证主体结构的规则性，内部再加一层幕墙构成了世界上最大的“保温瓶”。双幕墙系统用以调整室内外温差，起到绿色节能的功效。



图 12-4 上海中心大厦

风能也是太阳能的一种转化形式。太阳辐射造成地球表面各部分受热不均匀，引起大气层中气压分布不均匀，从而形成风。风力发电不需要使用燃料，也不会产生辐射或空气污染，但存在风能转换效率偏低的发展瓶颈。风能作为一种清洁的可再生能源，越来越受到世界各国的重视。

3. 太阳能

太阳能的利用有光热转换和光电转换，光伏发电是一种新兴的可再生能源，是太阳能利用的重要方面。光伏的含义是利用半导体技术直接将太阳的光能转换成电能（称为光伏效应）输出，相应的发电元件称为太阳能电池或光伏电池。简单的光伏电池可为手表、计算器、路灯（图 12-5）提供能源，较复杂的光伏发电系统把光能转换成电能并实时输送上电网。我国太阳能光伏发电潜力巨大，到 2030 年光伏装机容量将达 1 亿千瓦，年发电量可达 1 300 亿千瓦·时。

太阳能既便捷又环保。阳光普照大地、无需开采运输，可直接利用，且清洁无污染。同时，太阳能既量大又长久。每年照射到地球表面的太阳能相当于 130 万亿吨煤，其总量属当今世界最大能源。科学家认为太阳寿命仍有约 50 亿年，因此，太阳能可谓取之不尽、用之不竭。

我国太阳能发电技术走在世界前列，已成为世界最大的太阳能发电国。



图 12-5 太阳能路灯

大家谈

常见的计算器上都有一个小太阳能电池板，可以很多年不充电、不换电池。曾经有手机厂商推出太阳能电池手机，但这一技术措施未获推广，谈谈原因何在。

4. 核能

核能是一种重要的新能源。我国核电工业历经艰辛，已具一定规模。其中秦山核电站（图 12-6）是中国自行设计、建造和运营管理的第一座 30 万千瓦压水堆核电站，地处浙江省嘉兴市海盐县。秦山核电站采用目前世界上技术成熟的压水堆，核岛内采用燃料包壳、压力壳和安全壳 3 道屏障，能承受极限事故引起的高压、高温和各种自然灾害等异常情况。秦山核电基地经过多次扩建，9 台机组的总装机容量达到 650 多万千瓦，年发电量约 500 亿千瓦·时，成为国内核电机组数量最多、堆型最丰富、装机容量最大的核电基地。

核能的能量释放速度极快；并且核燃料的能量密度比传统化石燃料高几百万倍，因此核电厂所需的燃料体积小，运输储存都很方便。如果对核能有正确的认识，安全生产，核能也会和其他新能源一样为人类发展提供强有力的能量保障。

核裂变

1939 年，物理学家发现用中子轰击铀核时铀核分裂成几个其他原子核，同时释放出能量。较重的原子核分裂成几个较轻的原子核的过程叫做核裂变（图 12-7）。一个铀 235 核裂变可释放约 200 MeV 能量（eV 是能量单位，称为“电子伏特”， $1 \text{ eV} = 1.6 \times 10^{-19} \text{ J}$ ， $1 \text{ MeV} = 10^6 \text{ eV}$ ）。若有足够数量的铀核裂变且能持续进行，那么，所释放的能量就能为人类所用。



图 12-6 秦山核电站

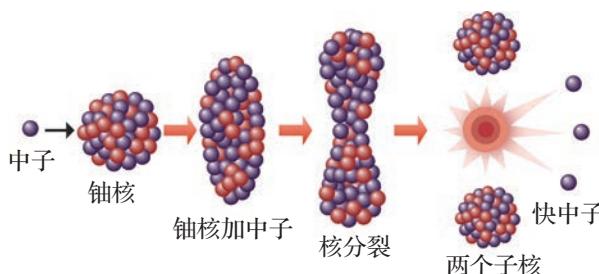


图 12-7 核裂变

自主活动

如图 12-8 所示，将若干枚骨牌排列起来，然后用手指轻轻向左推一下最右边第一枚骨牌，你会看到什么现象？

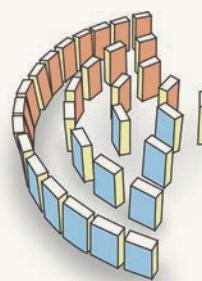


图 12-8 多米诺骨牌

如图 12-9 所示，铀核受中子轰击而发生裂变时能放出 2~3 个中子和一定的能量。这 2~3 个中子又迅速引起周围其他铀核的裂变，这就使裂变迅速扩大，释放出越来越多的能量。这种反应过程的产物可以引起随后的反应，因而使这种反应一经开始就能自动持续进行的反应过程叫做链式反应。链式反应能够迅速释放巨大的核能。

铀材料的体积大小是产生链式反应的一个重要条件。由于原子核非常小，如果铀块的体积不够大，中子射入铀块时可能一个铀核都没碰到就穿了出去。能够发生链式反应的铀块的最小体积叫做临界体积。如果一块铀 235 的体积超过了临界体积，只要有中子进入就会立即引起铀核的链式反应，在极短时间内释放出大量核能，会发生猛烈的爆炸。原子弹就是根据这个原理制成的。

为了控制核裂变的链式反应速度从而安全稳定地利用核能，必须建立一种装置，使铀核不但能发生链式反应，而且中子的再生率是可以控制的。这种装置叫做反应堆。

目前，利用核能发电的技术已经成熟。作为核燃料的铀、钍等元素在地球上的可采储量的核能是煤、石油等所能提供的能量的 15 倍左右。因此，发展核电的前景广阔。

核聚变

若干个较轻的原子核也可以结合成一个较重的原子核，同时释放出巨大能量，这样的过程称为核聚变。太阳能就来源于太阳内部氢的核聚变。氢弹也是依靠核聚变释放出巨大的能量，是不可控核聚变。在我国的氢弹研究事业中，“两弹一星”元勋、核物理学家于敏（1926—2019）突破了氢弹原理研究的一系列问题，填补了我国原子核理论的空白，对我国的氢弹研制起到了关键作用，被誉为“中国‘氢弹之父’”。他隐姓埋名 28 载，不求名利，无私奉献，为我国的国防科技事业做出了重要贡献。

可控核聚变是未来人类能源的理想来源，相比核裂变，核聚变的放射性污染等环境问题少很多。如氘和氚的核聚变反应，其原料可直接取自地球上储量巨大的海水。目前科学家们正在攻克可控核聚变问题。中国科学院合肥物质科学研究院研制的世界上第一个非圆截面全超导托卡马克装置，即可控核聚变反应装置，被叫做“东方超环”，也被称为“人造小太阳”，2019 年已实现在 1×10^8 ℃ 条件下运行 10 s。

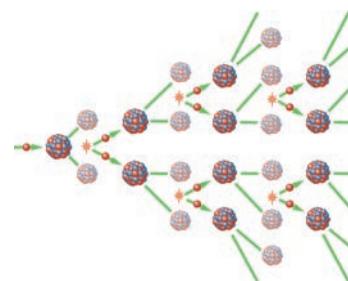


图 12-9 链式反应

问题与思考

- 自然界物质的运动有许多不同的形式，每种运动形式都有对应的能量。说明机械运动、热运动、电荷的定向移动分别对应何种形式的能量？
- 链式反应中，重核裂变时放出的可以使裂变不断进行下去的粒子是质子、中子还是电子？要使链式反应发生，裂变物质的体积应满足何种条件？

3. 电动喇叭发出的声波是空气振动的传播，声波具有能量。追根溯源，声波的能量是从哪里来的？又到哪里去了？
4. 人们常用“太阳常数”来描述地球大气层上方的太阳辐射强度，这是指在平均日地距离时地球大气层外界垂直于太阳辐射的 1 m^2 、 1 s 接收的太阳辐射能量值。近年来，通过各种手段测得太阳常数标准值为 $1\ 366\text{ W/m}^2$ 。地球半径约为 $6.371 \times 10^6\text{ m}$ 。试根据上述数据估算太阳每秒辐射到地球的总能量。
5. 风力发电机的原理是风吹在叶片上推动叶片转动发电，将风的动能转化为电能。一台风力发电机 1 min 作用在叶片上风的动能从 $30\ 000\text{ J}$ 减小为 $18\ 000\text{ J}$ ，发电功率为 160 W ，求该风力发电机的效率。



图 12-10 蒸汽机车将内能转化为机械能

第二节 能量的转化

各种形式的能量可以相互转化。如图 12-10 所示是一辆行驶中的蒸汽机车，燃料燃烧将化学能转化为内能，蒸汽机再将内能转化为机械能。在吸热化学反应中，内能转化为化学能；在发电机和电动机中，电能和机械能相互转化；照明灯发光时，电能转化为光能；电池充放电时，化学能和电能相互转化。利用能源本质上就是利用能量的转化过程。

大家谈

电能的产生及其使用包含了哪些能量转化过程？

② 能量转化过程是否会产生或损失能量？

在学习机械能守恒定律时我们知道，在只有重力和弹力做功的情况下物体的动能和势能可以相互转化，而两者之和即总机械能保持不变。人们根据积累的经验和大量的生产实践、科学实验发现，不只是机械能守恒，在任何能量转化过程中能量的总量都不变。这就

是能量守恒定律 (**law of conservation of energy**)：能量既不会凭空产生，也不会凭空消失；只能从一种形式转化为其他形式，或者从一个物体转移到其他物体，或者从物体的一部分转移到其他部分；在转化或转移的过程中，能量的总量保持不变。

能量守恒定律的发现是科学史上的重大事件。人们曾经认为互不相关的各种现象，如力学的、热学的、电磁学的、光学的、化学的、生物学的……都能通过能量守恒定律联系起来，把表面上不同的各类运动统一在同一个自然规律之中。恩格斯把能量守恒定律与细胞学说、生物进化论一起列为 19 世纪的三大发现。能量守恒定律是自然界中最普遍的规律之一，一切现象都遵循这一定律。直到现在，能量守恒定律仍然是我们研究自然科学强有力 的工具。

拓展视野

在 17—18 世纪，为了满足生产力日益增加的需求，许多人致力于制造一种机器，可以不消耗任何能量，却能源源不断地对外做功；这样的机器称为“第一类永动机”。

如图 12-11 所示为意大利人泰斯尼尔斯设计的磁力“永动机”。左侧高台上有一个强力磁体，能将右侧的小铁球吸上斜面；小铁球从斜面顶端的小孔落下，回到斜面底部，再穿过底部的小孔回到斜面上；如此往复实现小铁球的永动。实践后却发现，如果磁体磁性够强，则小铁球无法从左侧斜面顶端的小孔落下；如果磁体磁性不够强，则小球无法被吸上斜面。

迄今为止，历史上所有对第一类永动机的尝试都以失败告终。事实证明，任何制造“永动机”的设想无论看上去多么巧妙，都无法实现，因为这类永动机违背了能量守恒定律。

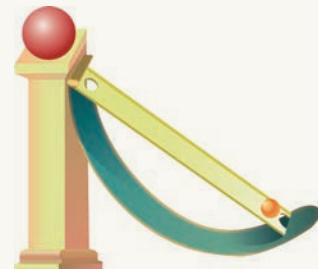


图 12-11 泰斯尼尔斯设计的磁力“永动机”

凡是能量守恒的过程就一定能发生吗？

人死不能复生、破镜不能重圆，覆水难收、落叶归根……这些事实和成语都反映了一个道理——实际过程具有“单向性”或“不可逆性”（图 12-12）。而且，这是另外一条重要的物理规律的表现。

下面我们通过简单的例子来考察“单向性”的含义。

烧开的水放在空气中会逐渐冷却，最终温度与室温相同。谁也没有见过这样的现象：热量自发地从低温物体传给高温物体，使低温物体的温度越来越低，高温物体的温度越来越高。这里所说的“自发地”，指的是没有任何外界的帮助，也没有对外界产生任何影响。这说明热传递过程具有单向性，只能自发地从高温物体传向低温物体。

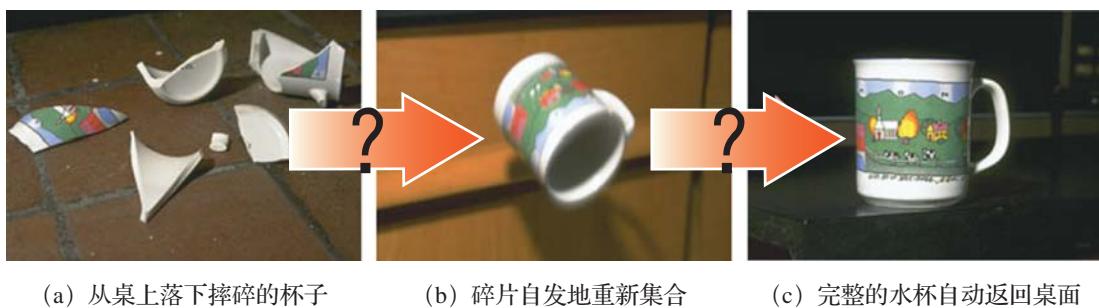


图 12-12 如图所示的过程不会发生

自由膨胀和扩散现象也具有单向不可逆性。如图 12-13 所示，隔板将气室隔成两部分；左边有气体，右边为真空。抽去隔板，气体会自发地向真空区域膨胀，最终均匀地分布于整个容器。但我们从未观察到相应的逆过程：气体自发地缩回容器的一边。又如图 12-14 所示，两种不同的气体可以自发地混入对方，最后形成均匀混合气体，但是绝不会发生相反的现象：两种气体均匀混合后又自发地各自分开回到原处。

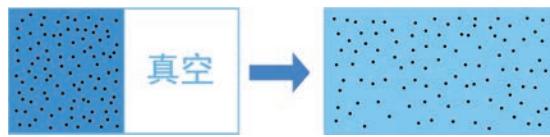


图 12-13 自由膨胀过程

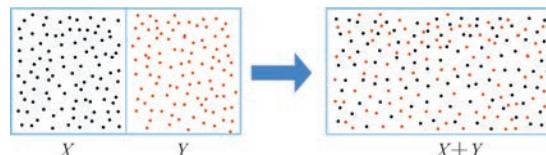


图 12-14 扩散过程

能量转化的方向性是指内能和其他形式的能量（如电能、机械能等）的相互转化具有方向性。机械能可以无条件地全部转化为内能，而内能不可以无条件地全部转化为机械能。

秋千在来回摆动许多次后总会停下来，它通过克服阻力做功而使其机械能转化为内能。同样，我们也从未观察到相应的逆过程：传到空气中的这部分内能重新自发地转变为机械能而使秋千恢复摆动。

热传递、气体自由膨胀、分子扩散、摩擦生热……这些现象的逆过程并不违反能量守恒定律，却从未能自发地发生。大量事实表明，自然界中的一切实际变化都具有方向性。朝某个方向的变化是可以自发发生的，相反方向的变化却是受到限制的。如果要使变化了的事物重新恢复到原来的状态，一定要外界施加影响，或者对外界产生影响，这就是自然过程的不可逆性。

② 既然能量守恒，为什么还会有能源危机？

在自然界发生的种种变化中，能量的总值虽然保持不变（守恒），但是能量可被利用的价值却越来越小，也就是说能量是在退降。

对于人类来说，既需要内能，更需要机械能和电能。内能在转化为机械能的过程中，总有一部分要散发到温度较低的环境里，只有部分内能可成为有用的机械能，另一部分成了“废品”。从这个意义上说，内能是一种可被利用价值低的能量。如果其他形式的能量通过摩擦、碰撞、燃烧等过程转化成内能，其能量的可被利用的价值就降低了。

由于自然过程的不可逆性，如果一个系统的内能增加，这个系统就永远无法依靠自身的作用（自发地）回到原先的状态，除非系统依靠外界的帮助。而“外界的帮助”往往回更多地消耗其他形式的能量，又将产生出更多的内能来。

当我们使用地球上的能源时，并不会减少地球上能量的总量，但是能量的可利用价值在降低。例如，汽车行驶时要消耗汽油，汽油在发动机中燃烧，将一部分内能转化为驱动汽车行驶的机械能、一部分内能使发动机整体升温而传到空气中，还有一部分内能被汽车排气管排出的废气带走，后两部分内能就很难再利用了。

目前，人类消耗的能量主要来自煤炭、石油、天然气等物质。这些能源在地球上的总储量是有限的，燃烧使用后在几百年，乃至几千年内是无法再生的。如果人类不研究和开发新能源，能源危机就会迫在眉睫。所以，为了解决能源危机，很多国家都在积极研究和开发可再生能源和核能等。

问题与思考

- 在日常生活中以下哪些现象能够发生，哪些不能发生？
 - 一杯热水在打开杯盖后逐渐变得更热
 - 蒸汽机把蒸汽的内能全部转化成机械能
 - 桶中混浊的泥水在静置一段时间后，泥沙下沉，上面的水变清；泥、水分离
 - 电冰箱通电后把电冰箱内低温物体的热量传到电冰箱外高温物体
- 古代没有玻璃透镜，但古人用冰制成透镜，称为“阳燧”，用它能将阳光聚到木材上取火。这是热量从低温物体传到高温物体的例子吗？
- 如图 12-15 所示是一种风、光兼备型节能路灯。它“头”顶风扇，“肩”扛太阳能电池板。简述此节能灯装置一昼夜的能量转化情况。
- 在某城市，居民使用 $1 \text{ kW}\cdot\text{h}$ 的家庭用电需要支付 0.61 元。那么，购买能提供相同能量的 5 号干电池需要花多少钱？对此你有何想法？（取每节 5 号干电池容量 $1500 \text{ mA}\cdot\text{h}$ ，零售价格 2.30 元）



图 12-15



图 12-16 全面综合治理后的上海苏州河

第三节 能源与环境

在现代社会中，能源关系着一个国家的经济发展和国家安全。在 100 多年的历史中，煤、石油、天然气等传统能源占据着主要地位。能源的使用大大提高了人们的生活质量，但也对环境造成了巨大的影响。环境保护和治理已成为现代社会普遍关注的问题。

如图 12-16 所示是上海苏州河综合治理后的景色，苏州河两岸现已成为上海市的文化、艺术、休闲的场所。

② 人类使用能源对环境造成哪些影响？

20 世纪中叶以前，能源的使用对环境的破坏没有引起人类足够的重视，导致温室气体急剧增加、极端气候增加、酸雨区增多等诸多环境问题，严重影响人类的生存环境和生活质量。

历史上，工业的发展带来了严重的环境污染问题（图 12-17）。在一些工业发达的国家，污染曾经一度达到“土不能植、水不能饮、空气也不能



图 12-17 钢铁厂黑烟滚滚的烟囱

呼吸”的严重程度。《美国经济史》对1884年的匹兹堡这样描述：“从住家、商店、工厂、汽船等处冒出来的一股股烟柱汇成一大片乌云，笼罩在城市所在的狭窄山谷之中，直到太阳冲破重重乌云黑雾，显露出它黄铜色的圆脸来……城市住户和工厂燃烧的煤炭有很大一部分化为浓烟直冲云霄。”可见当年使用化石燃料对环境的严重影响。

人类过度放牧、滥伐森林植被，尤其是人为过度垦荒破坏地面植被、扰动地面结构，造成大面积土地荒漠化，直接加速了沙尘暴（图12-18）的形成和扩散。强烈的沙尘暴可造成交通供电受阻或中断、火灾、人畜伤亡等；而且污染自然环境，破坏作物生长，给人类的生产和生活造成严重危害。沙尘暴是过度开发自然资源所引起的极端天气现象之一。

近几十年来，由于人类生产、生活大量排放二氧化硫、氮氧化物等酸性气体，造成酸雨日渐频繁，严重危害生态环境。酸雨危害的主要方面包括：损坏植被，导致森林死亡（图12-19）；湖泊中的鱼虾死亡；破坏土壤成分，使农作物减产甚至死亡；酸化饮用水源，危害人体健康；腐蚀建筑物和工业设备；破坏露天的文物古迹。煤和石油的燃烧是造成酸雨的主要原因，酸雨已成为全世界面临的最严重的环境问题之一。

20世纪全球严重的环境污染事件基本都发生在工业化起步较早的国家，但是后来这些国家采取保护环境、防治污染的措施，环境污染事件明显减少。不过，这些污染事件仍然不应该被遗忘，值得发展中国家在经济发展过程中引以为鉴。

煤、石油等传统能源除了会造成环境污染以外，由于其不可再生，随着大规模的开发利用，储量越来越少，总有枯竭之时。人们已经意识到这样的能源危机，开始思考如何可持续发展。发展新能源是一种解决能源危机和环境污染的有效途径。

大家谈

哪些能源不会对环境造成污染？



图12-18 铺天盖地的沙尘暴



图12-19 酸雨让草木尽枯

② 如何预防污染？

地球是人类赖以生存的家园。随着经济的发展，人们的生活水准日益提高，但环境也因此遭受很多破坏。如温室气体排放所引起的全球气候变暖；工业和生活污水排放导致江

河湖泊受到严重污染；生产废料与生活垃圾乱排乱放等。保护环境已成为世界各国共同努力的主题。

节约能源与开发新能源、严控排放、垃圾分类与处理是预防污染的重要措施。节能减排是应对全球气候变化的迫切需要，如新能源汽车的研发和推广，节约用纸、节约用水、节约用电。纸张的大量消费不仅造成森林毁坏，而且因生产纸浆排放污水使江河湖泊严重污染。在生活中，为珍惜水资源，不要让水龙头空流；应缩短淋浴时间；安装节水龙头；用节水型抽水马桶等。应节约用电，如使用节能灯具，随手关灯；随时关紧电冰箱门；使用高效低能耗电器等应成为大家的习惯。

能源是环境的一种组成部分，节约能源本身就是保护环境。《中华人民共和国节约能源法》指出“节约资源是我国的基本国策。国家实施节约与开发并举、把节约放在首位的能源发展战略”。为节约资源、保护环境，国家调整经济结构、转变经济增长方式，倡导节约发展、清洁发展、安全发展，以实现经济的可持续发展。

大家谈

生活中可采取哪些方式节能减排？

人们大量地消耗资源的同时，每个人每天又都会扔出许多垃圾。若垃圾被简易堆放或填埋，必然是臭气蔓延，还会污染土壤和地下水体。生活垃圾的分类，大致都是根据垃圾的成分构成、产生量，结合本地垃圾的资源利用和处理方式进行的。垃圾利用既可节省自然资源，又能减轻环境污染。处理利用 100 万吨废纸用于再生造纸，可避免砍伐 600 km^2 的森林；处理利用 120~130 t 罐头盒可回收 1 t 锡，相当于开采冶炼 400 t 矿石；处理利用废弃的黑色金属（铁、铬、锰及其合金），可节省铁矿石炼钢所需电能的 75% 和所需水的 40%，显著减少对大气的污染并降低矿山和冶炼厂周围堆积废石的数量；处理利用废弃的食物可补充饲料来源，明显提高农业效益，用 100 万吨废弃食物加工饲料，可节省 36 万吨饲料用谷物。

垃圾是被浪费的资源。合理进行垃圾分类，充分利用这一资源是节能减排的重要手段之一。2017 年，我国对“普遍推行生活垃圾分类制度”作出了部署，将基本建立生活垃圾分类标准，逐步形成可复制、可推广的生活垃圾分类模式。

STSE

苏州河是上海重要的河流之一，也曾经是污染最严重的河流。苏州河发源于太湖瓜泾口，于外白渡桥汇入黄浦江。苏州河的污染可追溯到 20 世纪 20 年代。由于上海

工业的迅速发展和人口激增，污染状况日益严重。到 1978 年，苏州河在上海境内全部遭受污染，市区河段终年黑臭、鱼虾绝迹。苏州河的污染源主要是未经处理的工业废水和生活污水的大量排放，还有船舶航运、码头装卸、上游来水的影响。同时，苏州河不利的水动力条件也加剧了污染。

上海市政府于 1995 年 12 月正式提出要把苏州河作为“上海环保重中之重”开展全面综合治理。数以百亿元计的财力及大量的人力物力投向苏州河。经过多年的治理，苏州河早已消除黑臭、重现鱼虾，成为上海一道亮丽的风景。

虽然苏州河的治理获得了成功，但耗费了太多的资源和人力、财力，付出了太大的代价。我们不禁想象要是苏州河不曾被污染该有多好。相对于污染后的治理，如何预防污染是我们更值得思考的问题。

问题与思考

- 某学校有 30 个班级，每个教室有 4 个“220 V, 100 W”的电风扇。有同学发现在到操场做课间操的 30 min 内部分教室里的电风扇仍在工作。试想：如果在课间操时间内每个教室的电风扇都关闭，那么一个月（按 20 天计算）学校能节约电能多少千瓦·时？
- 传统的火力发电技术发电 $1 \text{ kW}\cdot\text{h}$ 需要完全燃烧 400 g 煤。我国国家体育场“鸟巢”用太阳能发电系统替代了部分火力供电。该系统正常工作 1 h 可发电 $130 \text{ kW}\cdot\text{h}$ ，大约可以减少排放多少千克二氧化碳？（设煤的含碳量为 90%，煤燃烧的化学方程式为 $\text{C} + \text{O}_2 = \text{CO}_2$ ）
- 从个人的角度而言，为了节约能源每个人能做点什么？从社会的角度而言，你能为管理部门提出哪些节约能源的建议？
- 上海外高桥第三发电厂（图 12-20）承担着上海 10% 的供电量，投产以来一直是全球最干净、最节能的火电厂。每发 $1 \text{ kW}\cdot\text{h}$ 电的煤耗比国际最高技术水平的电厂低 10 g，达到了 $276 \text{ g/kW}\cdot\text{h}$ 。收集相关资料，说说电厂采取了哪些技术措施来减少能量消耗。



图 12-20

学期 活动

围绕主题“清洁能源和太阳能的利用”开展分组探究活动。

以下提供一些相关探究的问题，供大家选取。

1. 调查我国能源结构的现状和未来转型趋势，对我国能源结构转型提出合理建议。
2. 了解地球能源危机的起因和现状，提出一些行之有效的解决措施。
3. 了解科学技术为我们的生产生活带来的利弊。研究如何趋利避害，让科学技术更好地服务于社会发展。
4. 调查人们对太阳能的利用情况，了解太阳能利用的常见方式及应用前景，研究太阳能利用的新方法。
5. 设计利用太阳能取暖或发电的方案，讨论环境对太阳能利用的影响，研究提高太阳能利用效率的方法，研究太阳能的优缺点和制约太阳能利用的因素。
6. 查阅资料，了解太阳能电池的结构和原理，研究太阳能电池的优缺点和改良方法。
7. 调查太阳能电池产业发展现状、趋势和瓶颈，提出突破瓶颈、促进产业发展的方案。
8. 查阅资料，了解太阳能电池常见的应用方式，研究太阳能电池产业发展带来的社会效应。

活动要求

1. 自主选择探究的问题，每个问题2~3组，每组2~3人。
2. 如涉及实验，需将实验过程和结果详细记录，并进行展示交流。
3. 如涉及问卷调查，需设计问卷，详细记录并分析调查数据。
4. 完成一份书面结题报告和汇报演示文档（PPT），期末展示交流。
5. 留意并交流研究过程中本组和其他组遇到的困难和提出的解决方案，对课题研究进行自评和互评。

小结

• 基本概念和基本规律

能源：自然界中能为人类提供能量的物质资源。

新能源：水能、风能、太阳能、核能等。

核裂变：较重的原子核分裂成几个较轻的原子核的过程。

核聚变：若干个较轻原子核结合成一个较重的原子核的过程。

能量守恒定律：能量既不会凭空产生，也不会凭空消失。能量只能从一种形式转化为其他形式，或者从一个物体转移到其他物体，或者从物体的一部分转移到其他部分。在转化或转移的过程中，能量的总量保持不变。

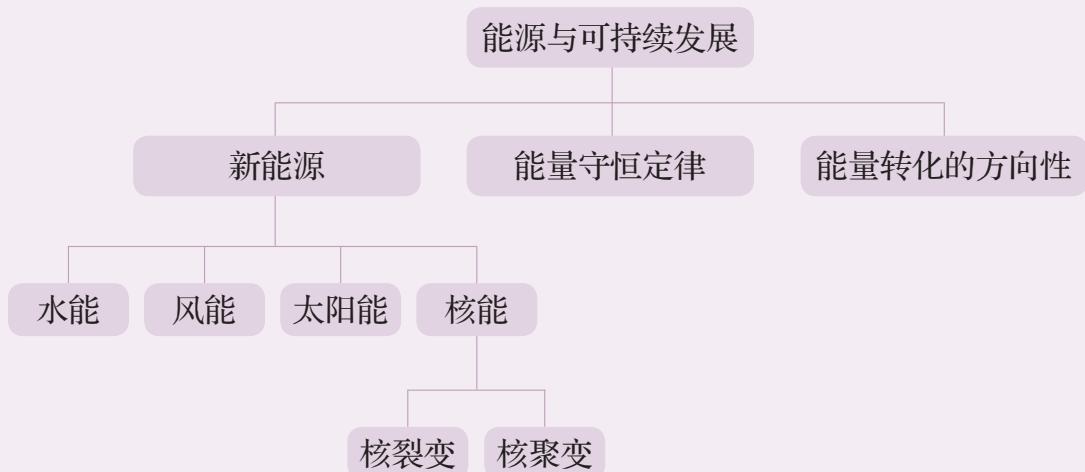
能量转化的方向性：内能和其他形式的能量（如电能、机械能等）的相互转化具有方向性。机械能可以无条件地全部转化为内能，而内能不可以无条件地全部转化为机械能。

• 基本方法

通过可再生能源和不可再生能源的比较，感受比较与分类的思维方法。

了解能源开发与利用方式，体会科技进步对人类生活和社会发展的影响，认识归纳与提炼的思维方法。

• 知识结构图



复习与巩固

1. 举例说明在自然界发生的种种变化中，能量的总值虽然保持不变（守恒），但是能量可被利用的价值却越来越小。
2. 人类社会自从进入电气化时代以来，就一直在不断地探寻电能的来源。如今有哪些常见的发电方式？说明相应的能量转化形式。
3. 目前核电站主要采用哪一种核燃料？这种核燃料发生的核反应是核裂变还是核聚变？
4. 打火机中使用了一种叫做“压电陶瓷”的电子元件，当对它挤压或拉伸时，它的两端就会形成一定的电压，这种现象称为压电效应。用大拇指压一下打火机上的按钮，压电陶瓷片就会产生 $10\sim20\text{ kV}$ 的高压，形成火花放电，从而点燃可燃气体。简述在上述过程中所发生的能量转化形式。
5. 太阳光照射到地球上，地球表面的水吸收太阳的能量蒸发成水蒸气，上升后形成云，再以雨、雪等形式落下，流入江河；地球表面被晒热，而地面各个部位受热不均，使空气流动形成了风。简述上述自然现象中能量的转化。
6. 有人认为太阳能来源于化学能。这种说法是否正确？简述理由。
7. 如图 12-21 所示是我国古代的一种农业机械，它叫做水碾，是利用水的动能来做功的装置。当水冲击下部水轮时，转动的轮子会带动上部的碾来碾米。假若每秒冲击叶片的水量为 10 kg ，水速从 5 m/s 减小为 1 m/s ，则水碾每秒从水流中获得能量为多少？这些能量是否都被用来碾米？
8. 以自行车代替汽车出行可以减少现代生活中留下的“碳足迹”，积极应对全球气候变暖的严峻挑战。人们的各种行为留下的“碳足迹”可以用直观的“碳足迹计算器”估算。设开车的二氧化碳排放量 (kg) = 汽油消耗量 (L) \times 2.2 (kg/L) 。现用骑自行车代替开车出行 100 km ，可以节约 9 L 汽油，则相应减少排放了多少二氧化碳？
9. 科学家们通过大量的实践研究，估算出了整个地球表面接受的太阳辐射能主要去向的数据，如表 12-1 所示。

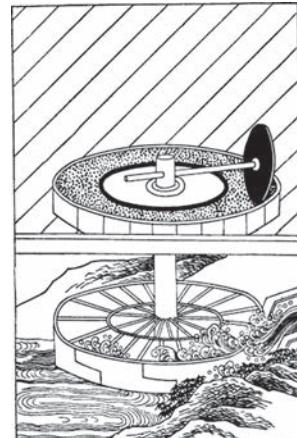


图 12-21

表 12-1

去向	直接反射	向太空热辐射	水循环	大气流动	光合作用
辐射功率	5.0×10^{13} kJ/s	8.0×10^{13} kJ/s	4.0×10^{13} kJ/s	4.0×10^{11} kJ/s	5.0×10^{10} kJ/s

根据以上数据试估算地球对太阳能的利用率有多大？每年植物通过光合作用利用的太阳能为多少？

10. 人们工作、学习和劳动都需要能量，能量来自食物。食物在人体内经消化过程转化为葡萄糖，葡萄糖在体内又转化为 CO_2 和 H_2O ，同时释放能量，每克葡萄糖释放的能量 $E = 1.56 \times 10^4$ J。一个质量为 60 kg 的人登高 100 m，至少需要消耗多少克葡萄糖？

*11. 我国自古有“昼涨称潮，夜涨称汐”的说法。潮汐主要是由太阳和月球对海水的引力造成的，以月球对海水的引力为主。

(1) 如图 12-22 所示是一种潮汐发电示意图。涨潮时开闸，水由通道进入海湾水库蓄水，待水面升至最高点时关闭闸门。当落潮时，开闸放水发电。设海湾水库面积为 $5.0 \times 10^8 \text{ m}^2$ ，平均潮差为 3.0 m，一天涨落潮两次，发电的平均能量转化率为 10%，发电的平均功率约为多少？($\rho_{\text{海水}}=1.0 \times 10^3 \text{ kg/m}^3$, $g=10 \text{ m/s}^2$)

(2) 如图 12-23 所示为双水库潮汐电站原理示意图。两个水库之间始终保持着水位差，以保障能够全天发电。试问涨潮时和落潮时应如何开关闸门？

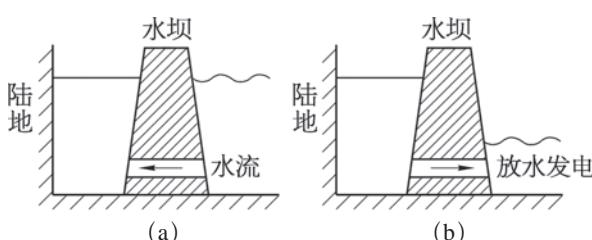


图 12-22

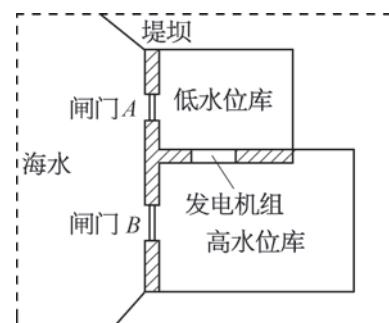


图 12-23

附录

索引

- | | |
|----------------------|-------------------|
| 闭合电路 / 73 | 电磁场 / 113 |
| 闭合电路欧姆定律 / 73 | 电磁感应 / 107 |
| 串联、并联组合电路 / 52 | 电磁铁 / 104 |
| 磁场 / 96 | 电功 / 81 |
| 磁感线 / 97 | 电功率 / 82 |
| 磁感应强度 / 102 | 电荷量 / 4 |
| 磁极倒转 / 98 | 电荷守恒定律 / 4 |
| 磁偏角 / 98 | 电流 / 51 |
| 磁通量 / 106 | 电容 / 36 |
| 等势面 / 23 | 电容器 / 34 |
| 地磁场 / 97 | 电容器的充、放电现象 / 34 |
| 点电荷 / 8 | 电势 / 22 |
| 电场 / 13 | 电势差 / 26 |
| 电场的叠加原理 / 16 | 电势差与电场力做功的关系 / 27 |
| 电场力 / 13 | 电势能 / 21 |
| 电场力做功与电势能变化间的关系 / 21 | 电源电动势 / 73 |
| 电场强度 / 15 | 电阻定律 / 56 |
| 电场线 / 14 | 电阻率 / 56 |
| 电磁波 / 113 | 电阻器 / 58 |

分子电流假说 / 102	库仑扭秤实验 / 8
感应电流 / 107	类比法 / 9
感应起电 / 3	密立根油滴实验 / 5
光子说 / 115	摩擦起电 / 2
核聚变 / 127	内电阻 / 73
核裂变 / 126	能量守恒定律 / 129
尖端放电 / 43	能量转化的方向性 / 131
焦耳定律 / 83	能源 / 123
接触起电 / 3	平行板电容器 / 34
静电场 / 13	试探电荷 / 15
静电感应 / 4	右手螺旋定则 / 101
静电力 / 7	元电荷 / 4
静电力常量 / 10	匀强电场 / 17
静电现象 / 2	匀强电场中电场强度和电势差的关系 / 28
库仑定律 / 10	

后记

本教材根据教育部颁布的《普通高中物理课程标准（2017年版2020年修订）》编写并经国家教材委员会专家委员会审核通过。

本教材是在上海市高中物理“二期课改”教材的基础上全面改写而成的，当年参加编写的主要人员有张越、徐在新、刘齐煌、谭玉美、唐一鸣、冯容士、蒋元方、倪闽景、王铁桦等。王铁桦、朱广天、汤清修、陈刚、金松、胡卫平、袁芳、桑嫣、潘苏东等给本教材的编写提出了不少宝贵意见。马世红、王祖源、陆昉、陈树德、蒋平、冀敏在本教材编写的各个阶段审阅了书稿。编写过程中，上海市中小学（幼儿园）课程改革委员会专家工作委员会，上海市教育委员会教学研究室，上海市课程方案教育教学研究基地、上海市心理教育教学研究基地、上海市基础教育教材建设研究基地及基地所在单位华东师范大学，上海市物理教育教学研究基地（上海高校“立德树人”人文社会科学重点研究基地）及基地所在单位复旦大学给予了大力支持。在此一并致谢。

本教材出版之前，我们就教材中使用的照片、图片等选用作品，通过多种途径与作者进行了联系，得到了他们的大力支持，在此表示衷心的感谢！对于未联系到的作者，我们也希望作者能及时联系出版社，以便支付相应的稿酬。

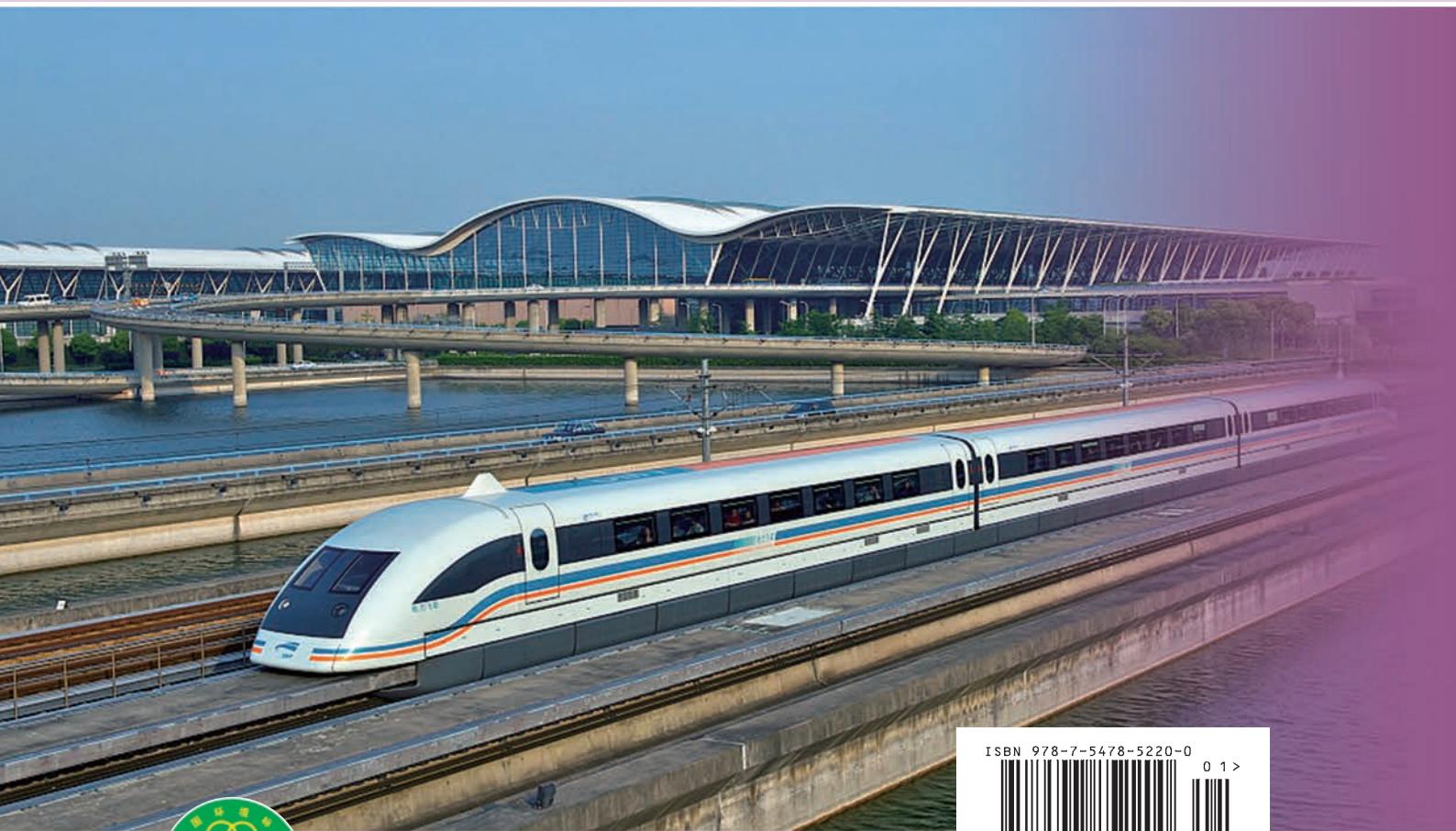
欢迎广大师生来电来函指出教材的差错和不足，提出宝贵意见。

2020年5月

本册教材图片提供信息：

本册教材中的图片由视觉中国、IC photo 和中国全球图片总汇（图 9-35，图 11-3，图 11-9）等提供。

物理 必修 第三册



绿色印刷产品



定价：11.60 元