

普通高中教科书




# 物理

必修

第三册



 上海科技教育出版社

普通高中教科书

# 物理

必修

第三册

总主编 束炳如 何润伟



## 亲爱的同学：

欢迎你学习《物理(必修3)》!

学习物理是一项激动人心的探索活动。让我们继续携手,度过一段美好的时光。

你周围世界发生的事情几乎都跟物理学有关,现代社会的许多技术进步都源于对物理规律的理解和应用。学习物理可以使你从事科学事业的愿望得以实现,甚至可以使你成为“专家”。作为现代社会的公民,我们要学会用物理学知识解决生活、生产中的许多问题。

你已经学习了《物理(必修1)》和《物理(必修2)》,初步领略了物理学的魅力。在《物理(必修3)》中,你将经历探索电场、电路、电磁场、电磁波与能源的过程,体验物理学思想方法的威力,在科学探究和理论思维的过程中充分施展你的才智;你将比较全面地学习电磁学与能源的有关知识,了解电磁学的研究成果及其在现代科学技术中的广泛应用,认识物理学与社会发展以及人类文化的相互作用。

为了让你在学习《物理(必修3)》的过程中获得更大的成功,请浏览下面的本书栏目介绍。



每章的开头都有一些情境,提出一些问题,让你明确本章研究的主要内容。

### 第 1 章 电荷的相互作用

闪电撕裂了天空,雷霆震撼着大地。在这惊心动魄的自然现象背后,蕴藏着许多物理原理,吸引了不少科学家进行探究。美国的富兰克林(B. Franklin)、法国的达利巴尔(T. d'Alibard)等科学家冒着生命危险去捕捉闪电,证实了闪电与实验室中的电是相同的。

雷电是怎样形成的?

物体带电是怎么回事?

电荷有哪些特性?

电荷间的相互作用遵循什么规律?

人类应该怎样利用这些规律?

本章不仅要探究并解答这些问题,还要从库仑(C. de Coulomb)巧妙设计的扭秤实验和点电荷模型的抽象过程,进一步体会科学思想与方法的价值。

### 实验探究

这里将要求你提出问题,设计实验方案,动手做一些有意义的实验,进行科学探究。



图 1-3-7 静电植绒实验装置

#### 实验探究 模拟静电植绒

参照图 1-3-7 所示的装置准备器材,进行安装,然后进行如下模拟静电植绒的操作:

(1) 用蘸上胶水的毛笔在硬纸片上写字、作画,再用夹子将此硬纸片固定在金属圆板 A 下面(有字画的一面朝下)。

(2) 将各种颜色的细碎纸屑均匀撒在下方金属圆板 B 上,调整两块金属板之间的距离为 4~5 cm。

(3) 用导线将两块金属板分别接到感应起电机的两个放电球上,转动起电机,观察“静电植绒”的过程。

## 分析与论证

这里你将进行分析、综合，并运用数学工具进行推理，得出物理学规律和公式。通过这一过程，你将体会科学思维的魅力。

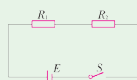


图 3-2-6 电阻串联电路图

数学中常用符号 $\Sigma$ 表示求和，

即

$$R_{\Sigma} = \sum_{i=1}^n R_i = R_1 + R_2 + \dots + R_n$$

## 分析与论证 串联、并联电路的总电阻

在图 3-2-6 所示的串联电路中，设通过电阻  $R_1$ 、 $R_2$  的电流为  $I$ ， $R_1$ 、 $R_2$  两端的电压分别为  $U_1$ 、 $U_2$ ， $R_{\Sigma}$  为  $R_1$ 、 $R_2$  串联后的总电阻，它又叫做  $R_1$ 、 $R_2$  串联的等效电阻。

$R_1$ 、 $R_2$  两端的电压跟总电压  $U$  有什么关系？请你利用欧姆定律，导出  $R_{\Sigma}$  跟  $R_1$ 、 $R_2$  的关系式

$$R_{\Sigma} = R_1 + R_2$$

假如将  $n$  个电阻串联，则

$$R_{\Sigma} = \sum_{i=1}^n R_i$$



## 学生必做实验 观察电容器的充、放电现象

将电源两极与电容器两极连接，电容器两块极板就分别带上等量的异种电荷。这个过程叫做**充电**（charging）。用导线将充电后的电容器两极板相连接，两块极板上的电荷就相互中和，电容器最终不再带电。这个过程叫做**放电**（discharging）。

电容器的充电和放电过程有什么特点？某同学设计了如图 2-4-3 所示的电路，试图通过手电筒小灯泡  $H$  的发光情况来观察电容器的充放电过程。

## 学生必做实验

这里为你提供了完整的实验活动，让你通过动手实验，探索物理规律，学习物理方法，形成物理观念，提高解决问题的能力，体验成功的喜悦。

## 信息浏览、STSE

这里为你提供了各种有趣、有用的资料，包括物理学史上的经典事例、科学家小故事等，它们反映了物理学与科学、技术、社会、环境的紧密联系。你的视野将更开阔，你会更加热爱科学。

## STSE

### 超导现象

1911 年，荷兰物理学家卡末林-昂内斯（H. Kamerlingh-Onnes）发现，在很低温度下，水银的电阻率并不像预料的那样仍然随温度的降低逐渐减小，当温度降到 4.15 K（-269℃）附近时，水银的电阻会突然降到零。后来人们发现，某些金属、合金和化合物在温度降到绝对零度（-273.15℃）附近某一特定温度之下时，其电阻率会突然减小到测量不出。这种现象叫做超导电现象（superconductivity），能够发生超导电现象的物质叫做超导体（superconductor）。超导体由正常

## 多学一点 电场的等势面

在地理学中，为了形象地表示地形的高低，常采用在地图上画等高线的方法。在电场中，我们也可以采用类似的方法表示电势的高低分布（图 2-3-3）。在物理学中，把电场中电势相等的点构成的线（面）叫做等势线（面）（equipotential line/surface）。同一等势线（面）上任意两点间的电势差为零，所以，在同一等势线（面）上移动电荷时，电场力不做功。因此，电场线一定跟等势面垂直，并且由电势高的等势面指向电势低的等势面。

## 多学一点

这里将介绍更多更深的奥秘，以开阔你的视野。你如果有兴趣，可以作进一步的探索。

## 课题研究

这里提供了一些课题供你选择研究，这种研究将使你的才智得到充分的展示。

## 课题研究

### 验证电荷的分配规律

给你一只指针验电器、一台感应起电机（参见第 18 页旁批）和两个带有绝缘柄的大小相同的金属球，请你设计一个实验，粗略验证电荷在两

个相同金属球之间等量分配的原理。

- (1) 说明实验原理，写出实验步骤。
- (2) 按实验步骤操作，并写出实验报告。

# 目 录

---

## 第 1 章 电荷的相互作用.....6

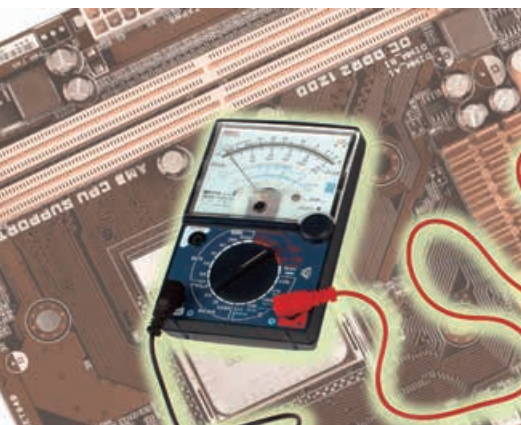
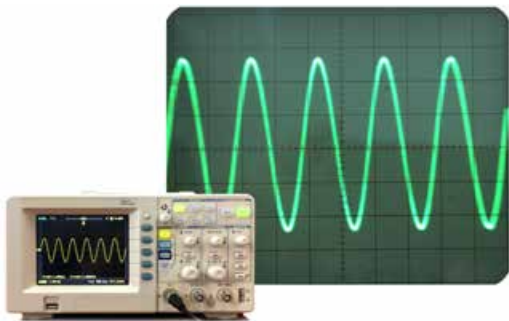
- 1.1 静电现象与电荷守恒 .....7
- 1.2 电荷相互作用的规律 .....11
- 1.3 静电的应用和防护 .....16

## 第 2 章 电场的性质 .....22

- 2.1 电场强度.....23
- 2.2 电场力做功的特点 电势能.....29
- 2.3 电势 电荷在电场中的运动.....33
- 2.4 电容器 电容 .....38

## 第 3 章 电路 .....46

- 3.1 多用电表 .....47
- 3.2 电流、电压和电阻.....52
- 3.3 影响电阻的因素 ..... 56



## 第4章 闭合电路欧姆定律 .....63

- 4.1 闭合电路欧姆定律 .....64
- 4.2 闭合电路欧姆定律的应用 .....69
- 4.3 电路中的能量转化与守恒 .....74
- 4.4 现代家庭电路 .....78

## 第5章 电磁场与电磁波 .....86

- 5.1 磁与人类文明 .....87
- 5.2 磁场的描述 .....90
- 5.3 电磁感应 .....95
- 5.4 电磁波 .....101

## 第6章 能源与可持续发展 .....107

- 6.1 能量的转化与守恒 .....108
- 6.2 能源利用与环境污染 .....110
- 6.3 能源开发与环境保护 .....115
- 6.4 节约能源、保护资源与可持续发展 .....121

总结与评价 课题研究成果报告会..... 126

研究课题示例 ..... 126

评价表 ..... 127





## 第 1 章 电荷的相互作用

闪电撕裂了天空，雷霆震撼着大地。在这惊心动魄的自然现象背后，蕴藏着许多物理原理，吸引了不少科学家进行探究。美国的富兰克林（B. Franklin）、法国的达利巴尔（T. d'Alibard）等科学家冒着生命危险去捕捉闪电，证实了闪电与实验室中的电是相同的。

雷电是怎样形成的？

物体带电是怎么回事？

电荷有哪些特性？

电荷间的相互作用遵循什么规律？

人类应该怎样利用这些规律？

本章不仅要探究并解答这些问题，还要从库仑（C. de Coulomb）巧妙设计的扭秤实验和点电荷模型的抽象过程，进一步体会科学思想与方法的价值。

## 1.1 静电现象与电荷守恒

实验表明，用丝绸摩擦过的玻璃棒和用毛皮摩擦过的橡胶棒（图 1-1-1）都能吸引轻小物体，我们通常说它们带了电或有了电荷（electric charge）。



a 用丝绸摩擦过的玻璃棒吸引轻小物体

b 用毛皮摩擦橡胶棒

图 1-1-1

物理学中规定，用丝绸摩擦过的玻璃棒所带的电荷叫做正电荷（positive charge）；用毛皮摩擦过的橡胶棒所带的电荷叫做负电荷（negative charge）。自然界中只存在这两种电荷；同种电荷相互排斥，异种电荷相互吸引。

电荷的正负性是相对的，哪一种叫做“正”，哪一种叫做“负”，都是可以的。现行的这种命名是富兰克林首先提出的，国际上一直沿用至今。

### 物体起电的原因

#### 分析与论证 摩擦起电的原因

用丝绸摩擦过的玻璃棒和用毛皮摩擦过的橡胶棒都带了电，这是什么原因呢？

原来，物体是由分子、原子组成的；原子是由带正电的原子核和带负电的电子组成。在两个不同物体相互摩擦的过程中，两个物体中都有一些电子脱离原子核的束缚而转移到对方。在通常情况下，两种不同材料的物体彼此向对方转移的电子数不相等。电子减少的物体就显示出带正电；电子增加的物体就显示出带负电。这就是说，摩擦起电并不是摩擦创生电荷，而是使两个物体中的电荷重新分配。

物体是否带电，可以用验电器来检验（图 1-1-2）。验电器顶端的金属球通过金属杆跟可转动的金属指针相连。当带电的玻璃棒或橡胶棒接触金属球时，指针就会转过一定的角度。

你能用电荷间相互作用的知识，解释验电器带电后金属指针为什么偏转吗？



富兰克林（B. Franklin, 1706—1790），美国科学家和政治家。1752年，他冒着生命危险在雨中进行“风筝实验”，证明闪电与摩擦起电的电是相同的。他还用“正电”和“负电”区分两种不同性质的电，为定量研究电现象打下了基础。上图描绘富兰克林正在进行“风筝实验”。





图 1-1-2 用验电器检验物体是否带电

物体所带电荷的多少叫做**电荷量**，简称**电荷**或**电量**。在国际单位制中，电荷量的单位是库仑（coulomb），简称库，用C表示。正电荷的电荷量用正值表示，负电荷的电荷量用负值表示。

### 实验探究

### 感应起电

在金属导体中，金属原子最外层的电子比较容易摆脱原子核的束缚在原子间自由运动，这种电子叫做自由电子。金属导体中存在着大量自由电子。

在用验电器检验玻璃棒或橡胶棒是否带电的实验中，你会发现，只要带电棒靠近验电器的金属球，验电器的指针就会发生偏转（图 1-1-3）。再用手接触一下验电器的金属球，然后移走带电棒，验电器的指针仍然保持某一偏转角度。这是怎么回事呢？

实验表明，一个带电的物体靠近一个导体时，导体的电荷分布会发生变化，显示出带电现象。物理学中把这种现象叫做**静电感应**（electrostatic induction）。利用静电感应使物体带电叫做**感应起电**。

在上述实验中，当带正电荷的物体靠近金属球时，金属杆和指针中的自由电子就被吸引过来，球上出现多余的负电荷；验电器金属杆和指针上则带有正电荷，使指针偏转。

当再用手接触一下验电器的金属球，大地中的负电荷会通过人体转移到金属球、金属杆及指针上，使它们都带负电，因此，移走带电棒后，验电器的指针因负电荷相互排斥而保持偏转状态。

请思考一下，当带有负电荷的物体靠近金属球时，指针上带什么电荷？为什么？



图 1-1-3 静电感应

## 电荷守恒

### 电荷守恒

摩擦起电和感应起电的过程，都是电荷从一个物体转移到另一个物体，或从物体的一部分转移到另一部分的过程。

下面让我们做一个如图 1-1-4 所示的实验。

手持起电板的两根有机玻璃棒，用力将两块起电板快速摩擦后分开，将其中一块板插入箔片验电器上端的空心金属球（不要接触金属球），接着抽出这块板，再将两块板同时插入空心金属球。你观察到怎样的现象？

请你解释实验中所发生的现象。

箔片验电器通常是在金属杆下挂两条金属箔片，其原理与指针验电器相同。



图 1-1-4 电荷守恒实验

大量事实表明，电荷既不能被创造，也不能被消灭，只能从一个物体转移到另一个物体，或者从物体的一个部分转移到另一个部分，在转移过程中，电荷的总量不变。这个结论叫做电荷守恒定律（the law of conservation of charge）。

近代科学研究表明，电荷守恒定律不仅在一切宏观过程中成立，而且在微观过程中也成立。因此，电荷守恒定律是物理学中普遍适用的规律。

### 元电荷

自然界中电荷的总量是守恒的。原子核中的每个质子和核外每个电子所带的电荷量有多少？它们是不是自然界中最小的电荷单元呢？

美国实验物理学家密立根设计了如图 1-1-5 所示的实验。



密立根（R. Millikan, 1868—1953），美国物理学家。第一位在美国本土出生的诺贝尔物理学奖获得者。

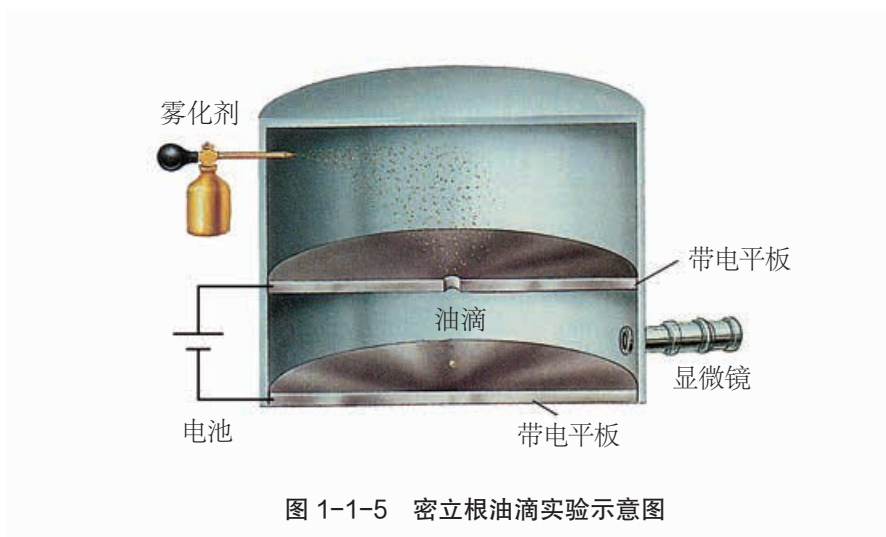


图 1-1-5 密立根油滴实验示意图

电子的电荷量  $e$  跟电子的质量  $m_e$  之比, 叫做电子的比荷。它是一个重要的物理常量。电子的质量  $m_e = 9.1 \times 10^{-31} \text{ kg}$ , 因此, 电子的比荷为

$$\frac{e}{m_e} = 1.76 \times 10^{11} \text{ C / kg}$$

将两块水平放置的金属板分别与电源的正、负极相接, 两板便带上异种电荷。用喷雾器喷入雾状带电油滴, 当带电油滴进入两平板间时, 调节两板间的电压, 使带电油滴受到的电力与重力平衡, 由此就可以求出油滴所带的电荷量。密立根不断改进实验方法, 取得了上千组测量数据, 发现这些油滴所带的电荷量总是某一元电荷 (elementary charge) 的整数倍。进一步研究表明, 这种“元电荷”就是电子所带的电荷, 一般用  $e$  表示。1986年国际计量大会推荐的元电荷值为  $e = 1.602\,177\,33 \times 10^{-19} \text{ C}$ , 通常取  $e = 1.6 \times 10^{-19} \text{ C}$ 。

### 家庭作业与活动

1. 请你列举一些日常生活中摩擦起电和感应起电的事例。
2. 如果用验电器检验直接用手拿着经摩擦后的金属棒是否带电, 那么金属棒带电吗? 怎样才能使摩擦后的金属棒带电?
3. 算一算, 多少个电子所带的电荷量之和是  $1 \text{ C}$ ?
4.  $A$ 、 $B$ 、 $C$ 、 $D$  四个球都带电,  $A$  球能排斥  $B$  球,  $C$  球能吸引  $A$  球,  $D$  球又排斥  $C$  球。已知  $D$  球带正电, 则  $B$  球应带何种性质的电?
5. 有  $A$ 、 $B$ 、 $C$  三个用绝缘柱支撑的相同导体球,  $A$  球带正电, 电荷量为  $q$ ,  $B$  球和  $C$  球不带电。讨论用什么办法能使:
  - (1)  $B$  球、 $C$  球都带等量的正电;
  - (2)  $B$  球、 $C$  球都带负电;
  - (3)  $B$  球、 $C$  球各带等量的异种电荷;
  - (4)  $B$  球带  $\frac{3}{8}q$  的正电荷。

## 1.2 电荷相互作用的规律

人类很早就发现了电现象。但长期以来，由于受社会生产力和科技发展水平的限制，对电的认识一直处于定性的水平。直到18世纪中叶，人们才开始对电荷之间的相互作用规律进行定量的研究。

### 影响电荷相互作用的因素

#### 实验探究 探究电荷相互作用规律

电荷间相互作用力的大小跟哪些因素有关？请你参照图1-2-1所示装置，按以下步骤进行实验：

(1) 分别让球形导体A和通草球B带上同种电荷，并使球形导体A与通草球B处在同一水平面上。

(2) 不断改变球形导体A的电荷量，观察悬线与竖直方向偏角的变化。

(3) 保持球形导体A和通草球B上的电荷量不变，改变球形导体A与通草球B之间的距离，观察悬线与竖直方向偏角的变化。

(4) 让球形导体A和通草球B带异种电荷，重复步骤(2)(3)，观察悬线与竖直方向偏角的变化。

请根据你观察的现象，通过分析得出结论。

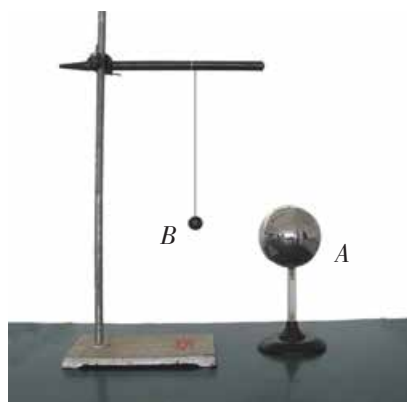


图 1-2-1 探究电荷相互作用规律的实验装置

### 电学中第一个定律——库仑定律

#### 定量研究的困难

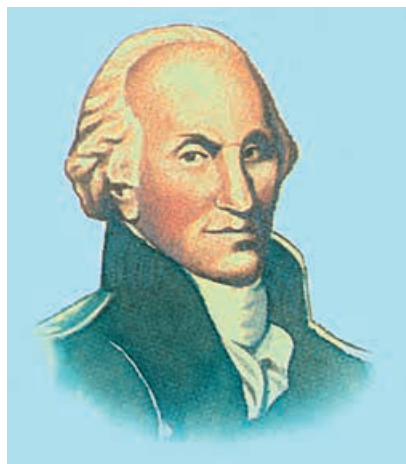
18世纪中叶以前，研究电荷间的作用力存在三大困难：一是这种作用力非常小，没有足够精密的测量器具；二是那时还没有电量的单位，当然就无法比较电荷的多少了；三是带电体上电荷的分布不清楚，难以确定相互作用的电荷之间的距离。

请思考一下，看看你有没有好的方法来解决这些困难。

#### 库仑的探究

法国物理学家库仑经过长期研究，较好地解决了这些困难。

为测量电荷间微小的作用力，库仑发明了一种扭秤，后人将这种扭秤称为库仑扭秤。



**库仑** (C. de Coulomb, 1736—1806), 法国物理学家、军事工程师。从事摩擦力和电磁力的研究, 设计制作库仑扭秤并发现库仑定律。

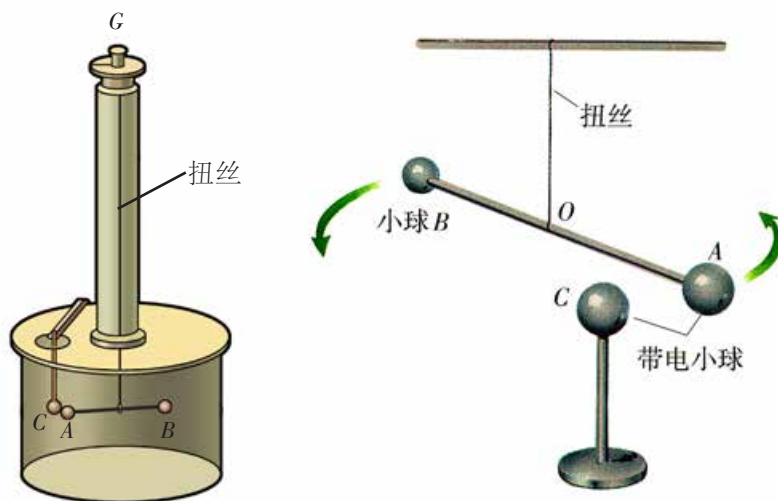
库仑把球形带电体看作“点电荷”是一种理想化做法。当两个带电体之间的距离比它们本身的尺寸大得多时, 带电体可看作是一个点, 即“点电荷”。

库仑扭秤的结构如图 1-2-2a 所示。其主要部件是一根弹性扭丝(细金属或石英丝), 上端由悬头  $G$  固定, 下端悬挂一根绝缘横杆。杆的一端装有用来带电的小球  $A$ , 另一端装一平衡小球  $B$ 。另外还有一固定小球  $C$ 。当扭丝处于自然状态时, 调节悬头  $G$ , 使  $A$  球与  $C$  球接触。当  $C$  球带电时,  $A$ 、 $C$  球之间的斥力使横杆转动。当  $A$ 、 $C$  球间斥力产生的转动作用与扭丝弹力的作用达到平衡时, 横杆就静止在某一角度上(图 1-2-2b)。根据这一角度, 便可测出带电小球间的斥力。

为了使物体的电量按实验的需要而改变, 库仑根据对称性原理, 用两个相同的金属球, 让其中一个带上电荷  $q$ , 另一个不带电, 把它们接触后分开。由于“对称”关系, 这两个金属球的电量均应为  $\frac{q}{2}$ 。若再用第三个相同的不带电金属球与带电荷  $\frac{q}{2}$  的金属球接触, 然后分开, 这两个金属球的电荷均应为  $\frac{q}{4}$ , 依此类推。这样, 就可以保证实验中不同金属球的电荷量从大到小成比例变化。

库仑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”。这样就解决了测量带电体之间距离的问题。

请归纳库仑设计的扭秤实验有哪些巧妙之处。



a 库仑扭秤结构示意图

b 库仑扭秤原理图

图 1-2-2 库仑扭秤

## 库仑定律

1785年,库仑在前人研究的基础上,通过实验得出结论: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 $q_1$ 与 $q_2$ 的乘积成正比,跟它们距离 $r$ 的平方成反比,作用力的方向沿着它们的连线。这就是库仑定律(Coulomb's law),它的数学表达式为

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

式中 $k$ 是一个常量,叫做静电力常量(electrostatic force constant)。这种电荷间的相互作用力叫作库仑力或静电力。在国际单位制中,电荷量的单位是库[仑](C),力的单位是牛[顿](N),距离的单位是米(m)。由实验可得出

$$k = 9.0 \times 10^9 \text{ N} \cdot \text{m}^2/\text{C}^2$$

库仑定律虽仅适用于计算点电荷间的作用力,但对任意带电体来说,如果知道电荷的分布情况,利用库仑定律和力的合成法则即可求出带电体之间的作用力。

英国物理学家普里斯特利(J. Priestley)和卡文迪许(H. Cavendish)也在实验的基础上推定,电荷的相互作用力跟距离的平方成反比。

库仑定律是电磁学中的一个基本定律,它的建立使电磁学进入了定量研究的阶段,使电磁学真正成为了一门科学。从18世纪末到19世纪初这一段时期,由于数学的应用,有关静电学和静磁学的研究取得了很有意义的进展。

## 案例分析

**案例** 真空中有两个直径很小的完全相同的金属小球 $a$ 、 $b$ , $a$ 球带电量为 $Q_a = +5.0 \times 10^{-9} \text{ C}$ , $b$ 球带电量为 $Q_b = -7.0 \times 10^{-9} \text{ C}$ ,两球相距1 m。问:它们之间的库仑力有多大?若把它们接触后放回原处,它们之间的相互作用力为多大?

**解答** 根据库仑定律,两小球未接触时,小球带异种电荷,小球之间的库仑力为引力,库仑力的大小为

$$\begin{aligned} F &= k \frac{Q_a Q_b}{r^2} \\ &= \frac{9.0 \times 10^9 \times 5.0 \times 10^{-9} \times 7.0 \times 10^{-9}}{1.0^2} \text{ N} \\ &= 3.15 \times 10^{-7} \text{ N} \end{aligned}$$

两小球分别受到的库仑力均指向对方(图1-2-3a),两球互相吸引。

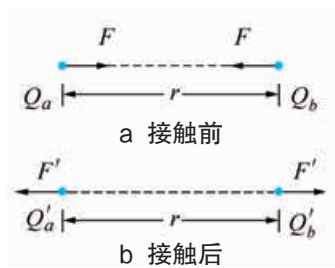


图 1-2-3

当两小球接触后,部分电荷中和,剩余净电荷为 $-2.0 \times 10^{-9} \text{C}$ ,由于两金属球完全相同,净电荷均分,各带 $-1.0 \times 10^{-9} \text{C}$ 。此时,小球带同种电荷,两小球之间的库仑力为斥力,库仑力的大小为

$$\begin{aligned} F' &= k \frac{Q'_a Q'_b}{r^2} \\ &= \frac{9.0 \times 10^9 \times 1.0 \times 10^{-9} \times 1.0 \times 10^{-9}}{1.0^2} \text{ N} \\ &= 9.0 \times 10^{-9} \text{ N} \end{aligned}$$

此时两小球分别受到的库仑力的方向如图 1-2-3b 所示。

### 多学一点

### 电介质中的库仑定律

我们在初中学过,空气、煤油、玻璃、橡胶、瓷器等都是绝缘体。绝缘体的导电性能很差,但也并不是一点也不能导电。在物理学中,绝缘体又被称做电介质。如果把两个点电荷放在电介质中,电荷间的静电力将比在真空中小,而且放在不同的电介质中,力的大小也不同。在电介质中,库仑定律的表达式为

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

式中  $\varepsilon$  叫作相对介电常数。同一种电介质的  $\varepsilon$  是固定的。下表是几种电介质的相对介电常数。

电介质	空气	煤油	石蜡	陶瓷	玻璃	云母	水
相对介电常数	1.005	2	2	6	4~11	6~8	81

### 课题研究

#### 验证电荷的分配规律

给你一只指针验电器、一台感应起电机(参见第 18 页旁批)和两个带有绝缘柄的大小相同的金属球,请你设计一个实验,粗略验证电荷在两

个相同金属球之间等量分配的原理。

- (1) 说明实验原理,写出实验步骤。
- (2) 按实验步骤操作,并写出实验报告。

## 家庭作业与活动

1. 有两个半径为  $r$  的金属球如图 1-2-4 放置, 两球表面间最小距离也为  $r$ 。今使两球带上等量异种电荷  $Q$ , 两球间库仑力的大小为  $F$ , 那么( )。

- A.  $F = k \frac{Q^2}{(3r)^2}$       B.  $F > k \frac{Q^2}{(3r)^2}$   
 C.  $F < k \frac{Q^2}{(3r)^2}$       D. 无法判定  $F$  的大小

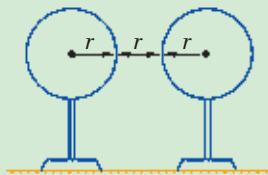


图 1-2-4

2. 20 世纪 20 年代, 物理学家卢瑟福 (E. Rutherford) 在  $\alpha$  粒子 (氦核) 散射实验中发现, 当两个原子核之间距离小到  $10^{-15}$  m 时, 它们之间的斥力仍遵守库仑定律。具有足够高能量的  $\alpha$  粒子能够到达与金原子核相距  $2.0 \times 10^{-14}$  m 的地方。请你算一算, 在这一距离时,  $\alpha$  粒子受到金原子核的斥力为多大? 此力相当于质量多大的物体受到的重力?

3. 现有两个相同的金属小球, 分别带有  $+2.0 \times 10^{-7}$  C 和  $-3.2 \times 10^{-7}$  C 的电荷。
- (1) 把它们放在相距 0.5 m 的地方, 两小球之间的库仑力多大? 方向如何?
- (2) 使两小球接触后再放回相距 0.5 m 的原位置, 两小球之间的库仑力多大? 方向如何?

4. 相距  $L$  的点电荷  $A$ 、 $B$  的带电量分别为  $+4Q$  和  $-Q$ 。

- (1) 若  $A$ 、 $B$  电荷固定不动, 在它们连线的中点放入带电量为  $+2Q$  的电荷  $C$ , 电荷  $C$  受到的静电力是多少?
- (2) 若  $A$ 、 $B$  电荷是可以自由移动的, 要在通过它们的直线上引入第三个电荷  $D$ , 使三个点电荷都处于平衡状态, 求电荷  $D$  的电量和放置的位置。

5. 两个质量都为  $3.0 \times 10^{-4}$  kg 的金属小球, 分别被两根长 0.04 m 的丝线吊在同一点上。让它们带上等量同种电荷后, 两球互相排斥, 至图 1-2-5 所示位置平衡。

- (1) 试求两球间静电力的大小和金属小球所带的电量。
- (2) 如果让其中一个小球的电荷量减少一半, 而另一个小球的电荷量加倍, 小球还能在原位置平衡吗?

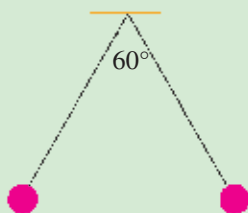
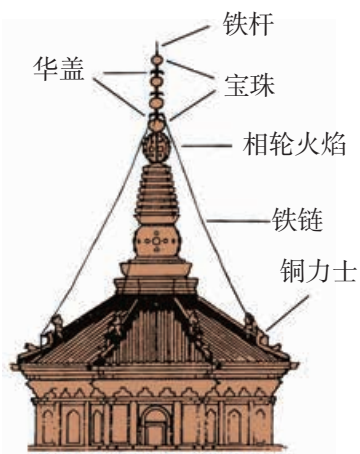
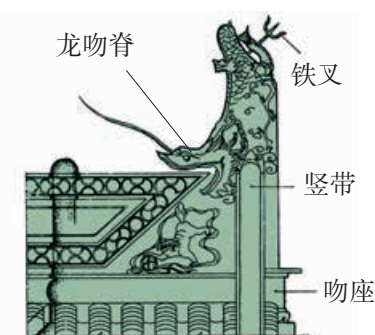


图 1-2-5





a 庆州白塔塔刹构件



b 殿脊吻兽

图 1-3-1 古建筑上的“避雷针”

## 1.3 静电的应用和防护

自然界到处都有静电。生产中的挤压、切割、搅拌和过滤，生活中的起立、行走、穿衣和脱衣等过程都会产生静电。

静电给我们的工作与生活带来了什么影响？我们应如何“趋其利，避其害”呢？

### 雷电与避雷

自然界产生雷电的主要原因，是云层的相互摩擦导致了云层间异种电荷大量集聚。靠近地面的云层中电荷的大量集聚，会使地面因静电感应而引起电荷集聚。云层之间、云层与地面之间会形成几百万伏以上的电压。这个电压足以击穿空气（使空气电离），产生几十万安培的瞬间电流。电流生热使空气迅速升温而发光产生闪电，空气受热突然膨胀发出巨响形成雷声。

云层与地面之间的雷电会对我们的生命财产造成威胁，甚至带来巨大的损失。那么，如何避免雷电的危害呢？

我国大约从汉代起，人们就注意到长兵器尖端在大气中的放电现象。古人利用这种现象，在许多建筑物上安装了既有避雷作用，又有装饰作用的塔刹构件和殿脊吻兽（图 1-3-1），这就是现代避雷针的雏形。现代建筑物上的避雷针如图 1-3-2 所示。

### 实验探究

#### 避雷针为什么能避雷

用如图 1-3-3 所示的感应圈，可以观察“实验室中的雷电现象”，帮助我们理解避雷针的避雷原理。将两枚放电针分别安装在感应圈的接线柱上，再将低压电源的 8 ~ 10 V 直流电接在感应圈上，闭合开关，适当调节感应圈上振动簧片的位置（有些感应圈会自动完成这一操作），就可以观察到火花放电的现象。

请比较火花放电图景与雷电时看到的闪电图景。它们有哪些相似之处？

试用放电针放电的现象说明避雷针的原理。

### 静电与现代科技

随着科学技术的发展，人们对静电特性的认识越来越深入，静电的应用范围也越来越广泛。

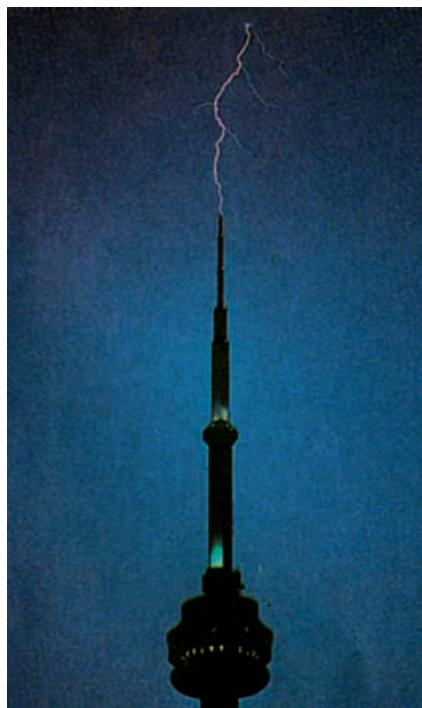


图 1-3-2 现代建筑上的避雷针

### 用静电净化空气

图 1-3-4 是电子空气净化器工作原理示意图。电子空气净化器利用风扇将空气送入机内。空气首先经过带正电的网格，这时带负电的烟尘等微粒被吸附在其上。接着，空气又通过带负电的网格，这时带正电的烟尘等微粒被吸附在其上。最后，活性炭过滤器再将空气中的剩余尘粒过滤掉，把洁净的空气送入室内。

### 用静电提高农药喷洒效果

喷洒农药的飞机上安装有静电喷嘴。静电喷嘴内装有一根带正电的针，使得农药水珠离开喷嘴时会带有大量正电荷。由于与大地相连的农作物的叶子一般都带负电，带正电的农药水珠喷洒到农作物上时，就被吸附在叶子上，不会被风吹走（图 1-3-5）。



图 1-3-3 感应圈火花放电现象

感应圈可以在两接线柱之间产生几万伏的电压。安装放电针之后，两针尖端附近的空气就会被击穿，形成放电电流。

注意！感应圈通电后，切勿用手触摸放电针。

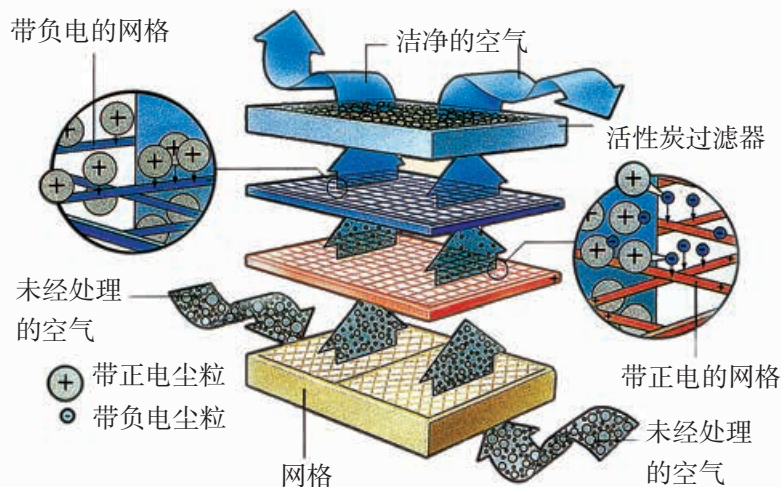


图 1-3-4 电子空气净化器工作原理示意图

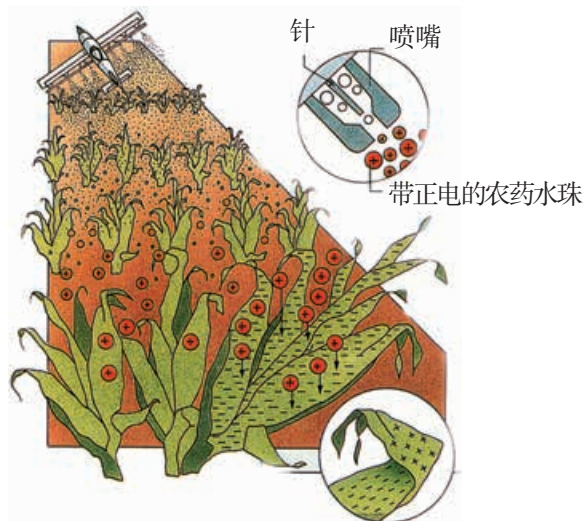


图 1-3-5 利用静电喷洒农药示意图

### 静电复印

静电复印机的使用已经很普遍。它的基本工作原理是：激光扫描原稿上的文字或图案，经反射，聚焦在携带静电的硒鼓上；激光扫描到原稿上的空白处，硒鼓上相应部位的静电荷就被消除，留在硒鼓上的静电荷就形成了原稿上的文字或图案；墨粉被硒鼓上的静电吸引，再被转移到复印纸上并被加热固定，复印纸上就出现了原稿上的文字或图案。图 1-3-6 用图解的方式展示了这一过程。

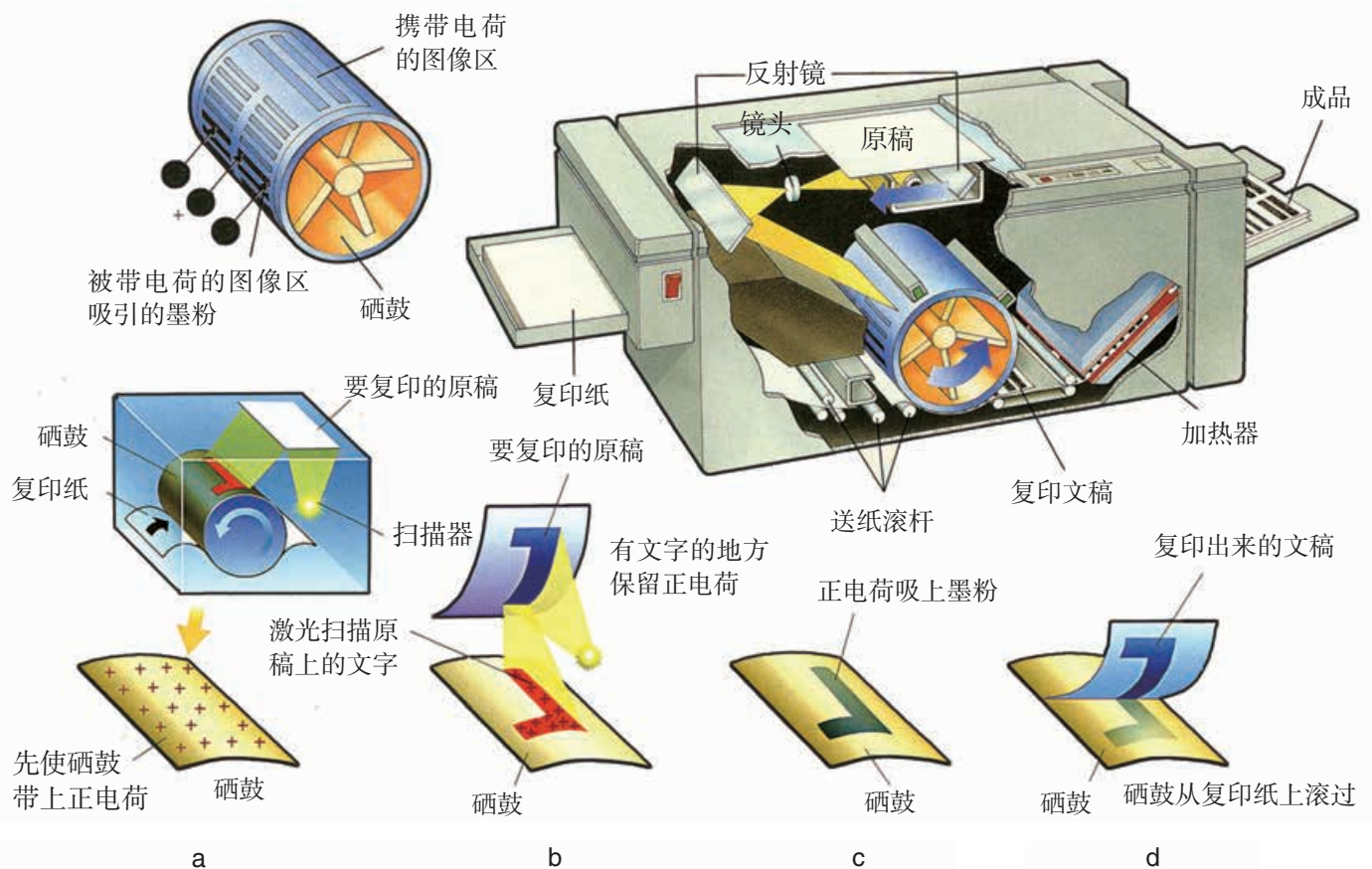


图 1-3-6 静电复印机结构及工作过程图解

## 静电植绒

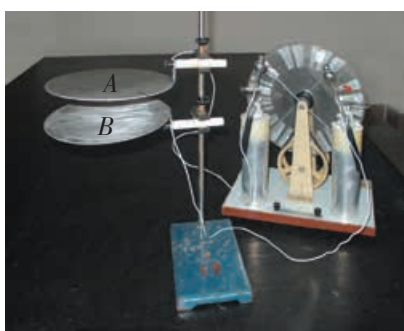


图 1-3-7 静电植绒实验装置

感应起电机利用静电感应，使两个莱顿瓶（储存电荷的容器）不断集聚电荷，从而在两放电球之间形成极高的电压。把两块金属圆板分别接在两个放电球上，两块金属板就分别带上异种的电荷。

### 实验探究

#### 模拟静电植绒

参照图 1-3-7 所示的装置准备器材，进行安装，然后进行如下模拟静电植绒的操作：

(1) 用蘸上胶水的毛笔在硬纸片上写字、作画，再用夹子将此硬纸片固定在金属圆板 A 下面（有字画的一面朝下）。

(2) 将各种颜色的细碎纸屑均匀撒在下方金属圆板 B 上，调整两块金属板之间的距离为 4 ~ 5 cm。

(3) 用导线将两块金属板分别接到感应起电机的两个放电球上，转动起电机，观察“静电植绒”的过程。

近年来，静电已开始在海水淡化、人工降雨、低温冷冻等方面大显身手，甚至在宇宙飞船上也安装有静电加料装置。

请你在课后上网收集有关静电应用方面的资料并与同学开展交流。

## 静电的危害及防护

无论是在日常生活和工农业生产中，还是在科学实验中，随时都可能出现因静电作用而引起的危害。下表列出了其中的一些。

静电力作用的不良后果	静电火花引起的危害
<ul style="list-style-type: none"> <li>● 电视机的荧屏表面容易吸附灰尘,使图像的清晰度和亮度下降。</li> <li>● 混纺衣服上常出现不易拍掉的灰尘。</li> <li>● 印刷厂里,纸张之间因静电而黏合,给印刷带来不便。</li> <li>● 制药厂里,因静电吸引尘埃,药品达不到标准纯度。</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>● 医院手术台上,静电火花会引起麻醉剂爆炸。</li> <li>● 煤矿里,静电火花会引起瓦斯爆炸。</li> <li>● 在航天领域,静电放电会干扰航天器的运行,甚至会造成火箭和卫星发射的失败。</li> <li>● 在石化领域,因静电放电引起的事故屡见不鲜。</li> </ul>

当人们认识到静电危害的起因后,各种防止静电危害的措施便应运而生。例如在工业生产中,改造起电强烈的工艺环节,采用起电较少的设备和抗静电材料;用导线将设备接地,把电荷导入大地;适当增加工作环境的湿度以让静电随时释放等。图 1-3-8 所示是用抗静电材料包装电子产品,图 1-3-9 所示是飞机加油时,飞机与加油车之间安装的接地装置。

空气与飞机摩擦使飞机带上正电,如果电荷量积累到一定程度就会向大地放电,在放电的过程中,会产生放电火花,引起火灾或爆炸事故。为了避免事故,飞机在加油前,往往要用接地的金属导线把加油车和飞机连接起来。



图 1-3-8 用抗静电材料包装电子产品



图 1-3-9 飞机加油车的接地装置

## 家庭作业与活动

1. 观察你身边发生的静电现象,分析产生的原因。
2. 分析保鲜膜在使用过程中,为什么常常会吸附在手上。
3. 静电的应用有多种,如静电除尘、静电喷涂、静电植绒、静电复印,它们共同的物理原理是:让带电的物质微粒在 \_\_\_\_\_ 力作用下,“奔向”并吸附到 \_\_\_\_\_ 电极上。
4. 把带电体上产生的静电荷移走可以防止静电荷

积累而造成的危害。下列措施中,采取了上述方法的是( )。

- A. 油罐车后面装一条拖地铁链
  - B. 电工钳柄上套有绝缘胶套
  - C. 飞机上安装接地电缆
  - D. 印染车间里保持适当的湿度
5. 请你上网或去图书馆收集关于防止雷电危害的资料,写一篇科普报告。

## 第 1 章 家庭作业与活动

### A 组

1. 打开自来水龙头，慢慢调节龙头，使水流变得很细，再用摩擦过的塑料棒靠近细水流，你发现了什么？解释你所观察到的现象。
2. 用毛皮摩擦过的橡胶棒靠近用绝缘细线悬挂的轻小软木球，请按照图 1-A-1 所示的装置做一做。除了观察到软木球被吸引以外，你还发现了什么现象？用学过的知识解释这些现象。

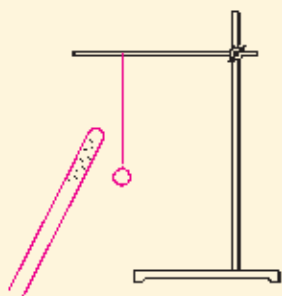


图 1-A-1

3. 请你尽可能多地找一些不同材料制成的物体，如塑料片、纸板、玻璃、毛线、腈纶丝、石蜡、铅笔杆等，分别让它们相互摩擦，比较这些物体得失电子的难易程度。
4. 有同学设计了一个验证库仑定律的实验：让两个软木球带电，用绝缘丝线将其中一个球悬挂起来，另一个球装在绝缘柄上，使它们处在同一水平高度上，保持某一水平距离，如图 1-A-2

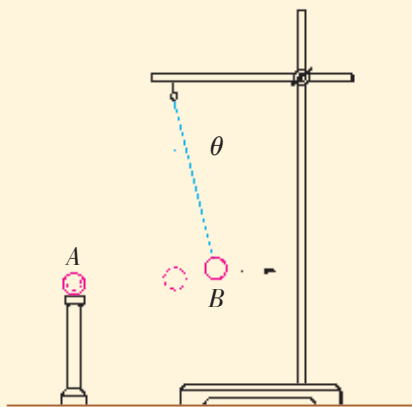


图 1-A-2

所示。这时，只要测出以下两种情况下悬挂球偏离竖直方向上的角度  $\theta$ ，就能算出库仑力，进而验证库仑定律。①保持两球带电量  $q_1$ 、 $q_2$  不变，改变它们之间的水平距离  $r$ ；②保持两球水平距离不变，改变两球的带电量  $q_1$ 、 $q_2$ 。

- (1) 请你利用测出的角度  $\theta$ ，根据共点力的平衡条件，推导库仑力和  $\theta$  之间的关系式。
  - (2) 怎样让两个软木球带上等量同种电荷？又怎样改变它们的电荷量？
  - (3) 怎样测量两球之间的水平距离？为什么要这样测量？
5. 某同学设计了一个验证电荷守恒定律的实验，实验装置如图 1-A-3 所示。实验步骤如下：

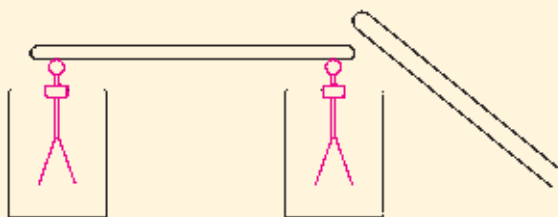


图 1-A-3

- (1) 用一根金属杆连接两只相同的验电器，让带电的有机玻璃棒靠近金属杆的一端，两只验电器的箔片均张开，为什么？
- (2) 在两只验电器的箔片均张开的情况下，先移走金属杆，再移走带电的有机玻璃棒，这时验电器的箔片是否保持张开状态？为什么？
- (3) 再用金属杆连接两只验电器，将会出现什么现象？这个现象说明了什么？这个实验能验证电荷守恒定律吗？为什么？

## B 组

1. 下面是几个有趣的静电实验, 请你动手做一做, 体验一下做实验的乐趣。

## (1) 静电间歇喷泉

取一根尖嘴内径  $0.5 \sim 0.8 \text{ mm}$  的玻璃管, 管的另一端用橡皮管与自来水龙头相连。玻璃管尖嘴口朝上, 并固定在铁支架上, 如图 1-B-1 所示。打开水龙头, 使尖嘴喷射出高  $15 \sim 20 \text{ cm}$  的喷泉。用带电的有机玻璃棒置于喷泉上方约  $30 \text{ cm}$  处, 你会观察到断续喷射的喷泉。想一想, 出现这个现象的原因是什么?



图 1-B-1

## (2) 自动蓬松的腈纶线

取一小团腈纶线, 剪 40 根长为  $80 \text{ cm}$  的线段, 并成一股, 梳理整齐后, 两端用粗铜丝扎紧。让腈纶线松松地悬于木架的两只羊眼圈上, 如图 1-B-2 a 所示。再用一支铅笔按在线上, 用力快速来回摩擦几下。移开铅笔后, 你会观察到腈纶线向四周蓬松, 呈橄榄状, 如图 1-B-2 b 所示。请你解释这个现象。若用沾少量水的脱脂棉在腈纶线上从左至右揩一下, 再用铅笔重复摩擦, 它们再也不会呈现橄榄状了, 这又是什么原因?

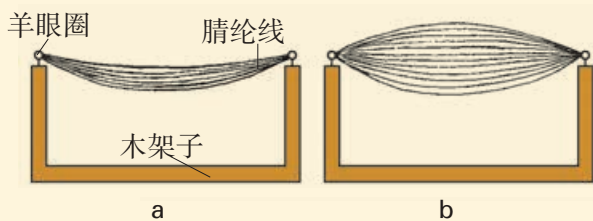


图 1-B-2

(3) 人体不仅能产生数千伏静电压, 而且能承受数千伏到数万伏的静电压, 下面请你尝试一下人体静电实验。

① 晚上, 取一根  $8 \text{ W}$  日光灯管, 用干净布将灯管上的灰揩去。左手握住灯管一端, 右手捏住灯管管身并来回连续摩擦, 灯管就会闪光。不信, 你就试一试, 想一想为什么。

② 请你站在聚苯乙烯绝缘板上, 手握  $8 \text{ W}$  日光灯管的一个电极, 让一位伙伴手握塑料薄膜或化纤布, 反复在你身上拍打。请另一位伙伴握住  $8 \text{ W}$  日光灯管的中间或另一个电极。若在暗室里或晚上, 你会发现日光灯管发光。请你与你的伙伴们试一试, 仔细观察现象并加以解释。

2. 真空中, 带电荷量分别为  $+Q$  和  $-Q$  的点电荷  $A$ 、 $B$  相距  $r$ , 在距  $A$ 、 $B$  电荷都为  $r$  的地方放置带电荷量为  $+Q$  的点电荷  $C$ 。求:

- (1) 点电荷  $C$  所受的静电力;
- (2) 点电荷  $A$  所受的静电力。

3. 把一个点电荷的电荷量  $Q$  分为两部分  $q_1$  和  $q_2$ , 使点电荷  $q_1$  和  $q_2$  相距一定的距离。问:  $q_1$  和  $q_2$  满足什么关系时, 它们之间的库仑斥力达到最大值?

4. 两个小球各带电  $q = 2.1 \times 10^{-7} \text{ C}$ , 它们可以在图 1-B-3 所示的绝缘棒上无摩擦地自由滑动。若两个小球的质量都是  $1.0 \times 10^{-4} \text{ kg}$ , 试确定它们的平衡位置及棒对它们的作用力。

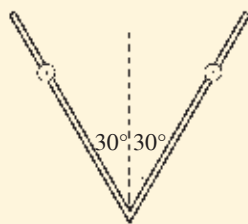
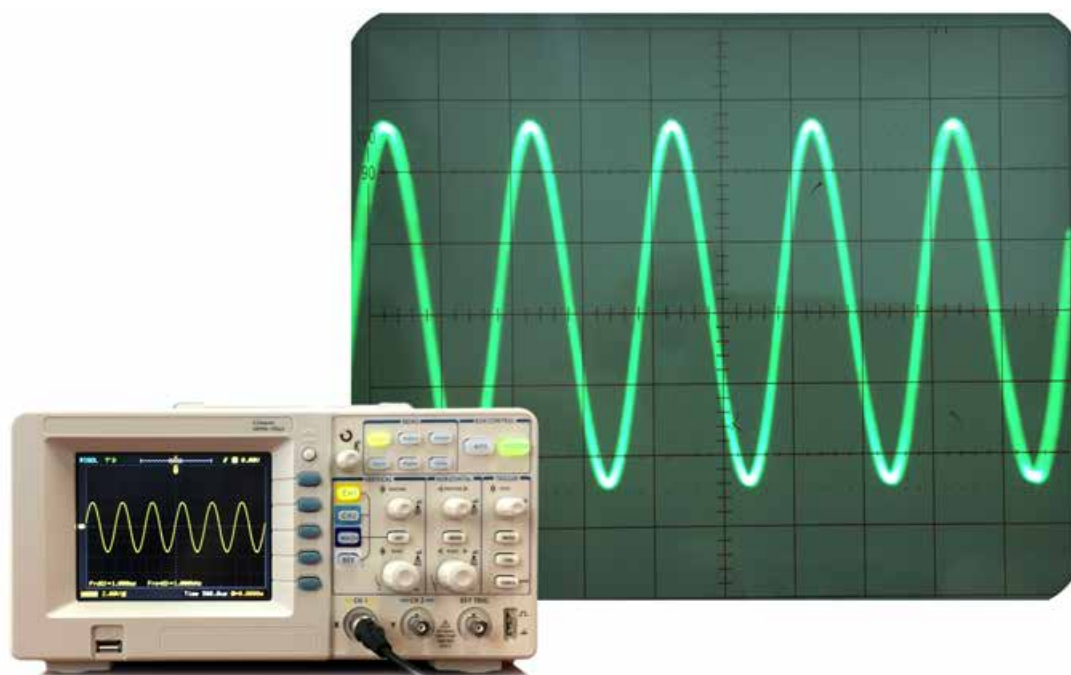


图 1-B-3



## 第 2 章 电场的性质

示波器（oscilloscope）在电子技术中有着广泛的应用。示波器的工作原理是，用变化的电场来控制电子束的运动，使电子束打在荧光屏上不同的位置，从而显示出电场变化的图像。那么：

什么是电场？

电场具有什么性质？

电场对场中电荷会产生什么作用？

如何利用电场控制场中电荷的运动？

.....

本章首先从电荷的相互作用出发认识电场，理解电场是一种物质；然后从力的性质和能的性质两方面研究电场，学习用电场线物理模型定性分析电场，应用物理量定量研究电场；接着分析带电粒子在电场中的运动；最后实验探究电容器的特性，完整地经历科学探究过程。

## 2.1 电场强度

库仑定律揭示了电荷间的相互作用规律，那么，电荷间的相互作用是靠什么传递的呢？

### 电场

19世纪30年代，法拉第在大量实验的基础上提出，电荷周围存在着由它产生的**电场**（electric field），处在电场中的其他电荷受到的作用力，就是这个电场给予的。电荷间的相互作用是靠电场来传递的。在法拉第研究的基础上，麦克斯韦建立了完整的电磁场理论。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。凡是有电荷的空间，就存在着电场，电场的基本性质是能够对场中的电荷产生力的作用，这种力叫做**电场力**（electric field force）。

本章只讨论相对于观察者静止的电荷产生的电场，这种电场叫做**静电场**（electrostatic field）。

在物理学中出现了一个新的概念，这是牛顿时代以来最重要的发明：场。用来描写物理现象最重要的不是带电体，也不是粒子，而是带电体之间与粒子之间的空间中的场，这需要很大的科学想象力才能理解。

——爱因斯坦

### 怎样描述电场

#### 定量描述电场

为了研究电场的力的性质，我们需要在电场中引入**试探电荷**（test charge），然后考察试探电荷的受力情况。

试探电荷是一种理想化的物理模型。试探电荷的电荷量和尺寸都必须充分小，以致可忽略它对原来电场的影响，同时又能确切地反映它所在处电场的性质。

#### 分析与论证 定量研究电场的力的性质

假设我们所研究的电场是由点电荷  $+Q$  所产生的，则定量研究电场的力的性质可分为两步进行。

1. 如图 2-1-1 所示，把电量为  $+q$  的试探电荷分别放在电场中的  $A$ 、 $B$ 、 $C$  各处（设  $r_A = 3r_C$ ， $r_B = 2r_C$ ），计算电场对  $+q$  的电场力  $F_A$ 、 $F_B$ 、 $F_C$ 。

可以发现，同一试探电荷  $q$  在电场中不同点处受到的电场力不同，其比  $\frac{F}{q}$  也不同。



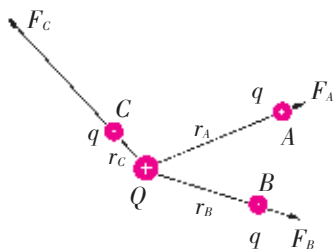


图 2-1-1 点电荷电场研究

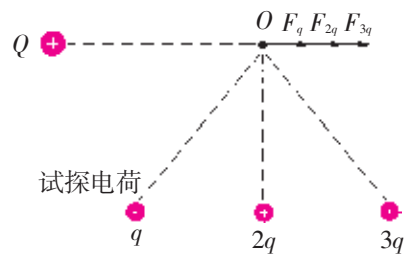


图 2-1-2 点电荷电场研究

2. 如图 2-1-2 所示, 把电量分别为  $+q$ 、 $+2q$ 、 $+3q$  的试探电荷依次放在电场中的同一点  $O$  处, 计算电场对它们的电场力  $F_q$ 、 $F_{2q}$ 、 $F_{3q}$ 。

可以发现, 不同的试探电荷, 在电场中同一点处受到的电场力虽然不同, 但比  $\frac{F}{q}$  却相同。

由此可见, 在电场中确定的点处, 试探电荷受到的电场力  $F$  与试探电荷的电荷量  $q$  的比  $\frac{F}{q}$  是一个不变的量, 它与试探电荷的电荷量无关, 仅与试探电荷在电场中的位置有关。因此, 可以用这个比反映电场的强弱, 即电场的力的性质。

物理学中把放入电场中某点处的电荷所受到的电场力  $F$  跟它的电荷量  $q$  的比叫做电场在该点的电场强度 (electric field strength), 简称场强, 用  $E$  表示, 即

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

电场强度是由电场本身决定的物理量, 它跟电场中是否有试探电荷、试探电荷的电量以及试探电荷受到的电场力均无关。

电场强度的单位是牛 [顿] / 库 [仑], 符号是  $\text{N/C}$ , 其物理意义是, 如果  $1\text{ C}$  的电荷在电场中某点处受到的电场力是  $1\text{ N}$ , 则该点的电场强度就是  $1\text{ N/C}$ 。下表给出了一些典型电场的电场强度的大小。

典型电场的一般强度值

电 场	电场强度 $E / (\text{N} \cdot \text{C}^{-1})$
带电硬橡胶棒的近处	$1 \times 10^3$
示波器	$1 \times 10^5$
能在真空中产生火花	$3 \times 10^6$
氢原子的电子轨道上	$5 \times 10^{11}$

用比来定义物理量是一种常用的研究方法。用这种方法可以揭示物质的某种属性, 如: 物质的密度  $\rho = \frac{m}{V}$ , 电阻  $R = \frac{U}{I}$  等。

电场强度是矢量。物理学中规定，电场中某点场强的方向跟正电荷在该点所受到的电场力的方向相同。显然，负电荷在电场中某点所受到的电场力的方向跟该点场强的方向相反。

如果已知电场中某一点的电场强度为  $E$ ，就可以求出放在该点的电荷  $q$  受到的电场力，即

$$F = qE$$

根据库仑定律和电场强度的定义式，很容易得到真空中点电荷电场强度的公式

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

式中， $r$  是该点离开场源电荷  $Q$  的距离。

### 思考与讨论

1. 公式  $E = \frac{F}{q}$  和  $E = k \frac{Q}{r^2}$  中的  $q$  与  $Q$  分别表示什么意义？

两个公式的适用条件有何不同？

2. 如何从点电荷电场强度公式  $E = k \frac{Q}{r^2}$  去理解库仑定律？

### 形象描述电场

在初中物理中，我们用磁感线来形象地描述磁场。在研究电场时，我们也可以用电场线来形象地描述电场。**电场线** (electric field line) 就是在电场中画出的一些有方向的曲线，在这些曲线上，每一点切线的方向表示该点的电场强度方向 (图 2-1-3)。应该注意，电场线不是电场中实际存在的线，而是形象地描述电场的假想的线。电场线是一种物理模型。

电场线的疏密程度可以表示场强的大小，在同一幅用电场线描述电场的图中，电场线稠密的地方，场强大；电场线稀疏的地方，场强小。

把奎宁的针状结晶或头发屑悬浮在蓖麻油里，加上电场，针状奎宁结晶或头发屑就会按照场强的方向排列起来，形象地显示出电场线的大致分布情况 (图 2-1-4a、图 2-1-5a 和图 2-1-6a)。

图 2-1-7 显示的是两块靠近的、分别带有等量异种电荷的平行金属板的电场线分布。除边缘附近外，两板之间电场的电场线是疏密程度一致的平行直线。这表明，该区域中场强的大小和方向都相同。

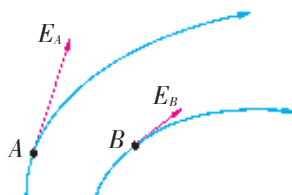
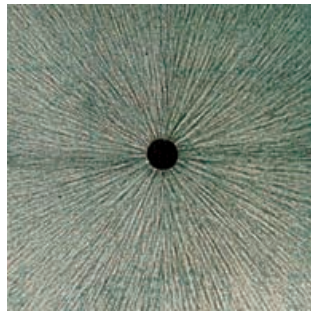


图 2-1-3 电场线与电场强度



a 奎宁结晶或头发屑在点电荷电场中的分布情况

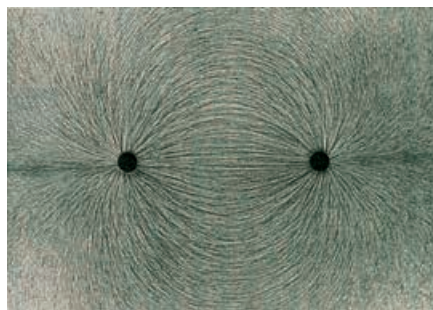


b 正电荷的电场线

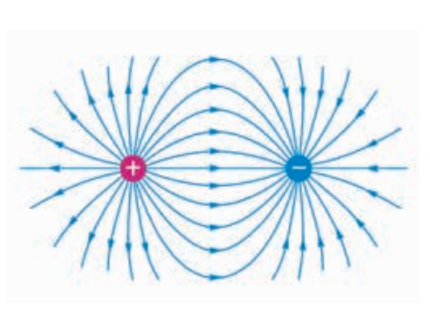


c 负电荷的电场线

图 2-1-4 点电荷的电场线分布情况：电场线从正电荷（或从无限远）出发到无限远（或到负电荷）

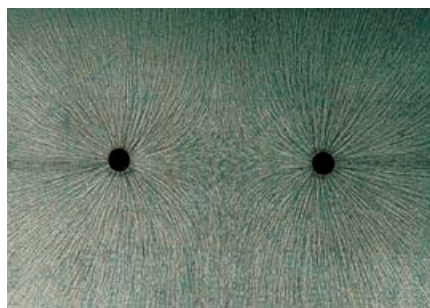


a 奎宁结晶或头发屑在等量异种点电荷的电场中的分布情况

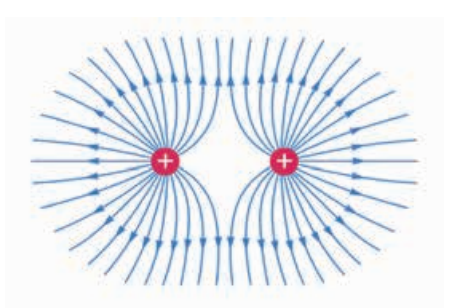


b 等量异种电荷的电场线分布情况

图 2-1-5 两等量异种点电荷的电场线分布



a 奎宁结晶或头发屑在等量同种点电荷的电场中的分布情况



b 等量同号电荷的电场线分布情况

图 2-1-6 两等量同种点电荷的电场线分布

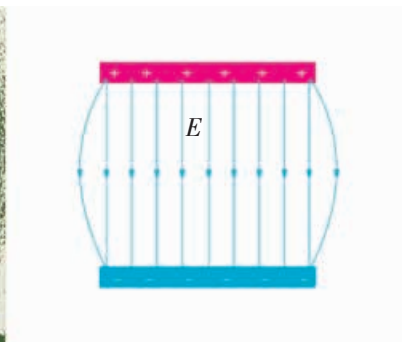
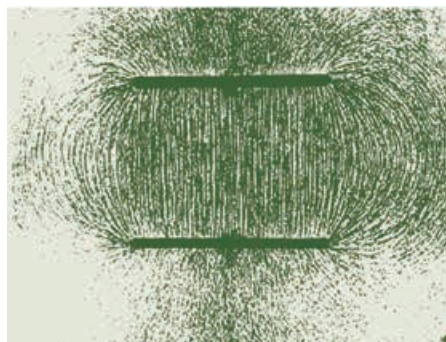


图 2-1-7 匀强电场的电场线分布

物理学中，把各处场强的大小和方向都相同的电场叫做匀强电场 (uniform electric field)。同一电荷在匀强电场中各处受到的电场力相同。

请归纳一下，电场线有哪些特点？想一想，电场中是否存在两条相交的电场线？

### 多学一点

### 电场的叠加原理

我们知道，每个电荷都会在它的周围空间产生电场，那么当许多电荷同时存在时，空间各处的场强应该怎样计算呢？

我们先研究两个点电荷的电场。如图 2-1-8 所示，在真空中有两个相距为  $l$  的点电荷  $Q_1$ 、 $Q_2$  (设均为正电荷，且  $Q_1 = Q_2 = Q$ )。空间某处  $P$  离开两点电荷的距离均为  $r$ ，用  $E_1$ 、 $E_2$  分别表示点电荷  $Q_1$ 、 $Q_2$  单独存在时在  $P$  点产生的电场强度。根据放置在  $P$  点的正电荷  $q$  所受电场力可以知道，场强的合成跟力的合成一样，所以  $P$  点的合场强  $E_P$  应该由  $E_1$ 、 $E_2$  用平行四边形定则得到。

一般情况下，许多点电荷在某点的合场强，等于各点电荷的电场在该点场强的矢量和，这叫做**电场的叠加原理**。

有人说，空间某处周围的正电荷越多，该处的电场强度一定越大；有人说，在一个正电荷周围再放一个负电荷，空间各处的电场强度一定变小。这两种说法对不对，为什么？

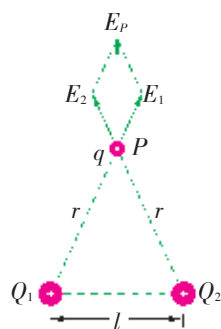


图 2-1-8 电场的叠加

一个带电体或带电板 (例如示波管偏转电极)，可以看成是由若干点电荷组成的。因此，它产生的电场实际上就是若干点电荷产生的电场的叠加。

### 信息浏览

#### 场的物质性

现代物理学的研究表明，电荷间的相互作用是通过场来传递的。场是物质存在的另一种形态。常见的场有电磁场、引力场 (在地球附近称为重力场)、强相互作用场和弱相互作用场等。物体间的电磁相互作用通过电磁场以光速  $3 \times 10^8$  m/s 传递。

场与实物一样，具有质量、能量和动量等，能够对处于其中的物体产生作用力、压强等。电磁场的质量密度很小，大约为  $10^{-23}$  kg/m<sup>3</sup>。光是电磁场，太阳光每秒照射在每平方米地球表面上的能量约为  $1.35 \times 10^3$  J，对地球上物体产生的光压约为  $10^{-6}$  Pa。

## 家庭作业与活动

- 在电场中某点，当放入正电荷时受到的电场力方向水平向右。下列说法中正确的是（ ）。
  - 当在该点放正电荷时，该点场强方向向右
  - 当在该点放负电荷时，该点场强方向向左
  - 该点的场强方向一定向右
  - 该点的场强方向可能向右，也可能向左
- 关于场强，下列说法中正确的是（ ）。
  - 由  $E = F/q$  可知，某电场的场强  $E$  与  $q$  成反比，与  $F$  成正比
  - 正、负试探电荷在电场中同一点受到的电场力方向相反，因此某一点场强方向与放入试探电荷的正负有关
  - 电场中某一点的场强与放入该点的试探电荷正负无关
  - 电场中某点不放试探电荷时，则该点场强等于零
- 地球的表面通常存在一竖直方向的电场，一带负电的微粒在此电场中受到一个竖直向上的力，请判断此电场的方向。
- 真空中有一个点电荷  $A$ ，若在与  $A$  相距为  $r$  处放置电荷量为  $q$  的试探电荷，试探电荷受到的电场力为  $F$ 。现在移走试探电荷，则在与  $A$  相距为  $2r$  处的电场强度为多大？
- 如图 2-1-9 所示，在真空中有两个点电荷  $q_1$  和  $q_2$ ，分别位于  $A$  点和  $B$  点， $q_1$  的带电量为  $+4 \times 10^{-8} \text{ C}$ ， $q_2$  的带电量为  $-8 \times 10^{-8} \text{ C}$ 。 $AB = AD = 20 \text{ cm}$ ，求：
  - $q_1$  在  $D$  点产生的场强大小；
  - $q_2$  在  $D$  点产生的场强大小；
  - $D$  点的场强大小和方向。

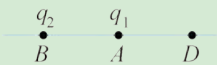


图 2-1-9

## 2.2 电场力做功的特点 电势能

在上一节中，我们运用比的方法，引入了描述电场性质的一个重要物理量——电场强度，初步认识了电场的力的性质。现在，我们从电荷在电场中移动时电场力做功引起电荷能量变化的关系上，进一步研究电场的能的性质。

### 研究电场力做功的特点

#### 分析与论证 电场对电荷做功的特点

如图 2-2-1 所示，在场强为  $E$  的匀强电场中，有一个带电量为  $q$  的正电荷，它在电场力作用下从  $A$  点沿着电场线移动到  $B$  点 ( $AB = L$ )，电场力对它做功

$$W_{AB} = FL = qEL$$

如果使它在电场力作用下从  $A$  点沿路径  $ACB$  移动到  $B$  点，电场力做功为

$$\begin{aligned} W_{ACB} &= W_{AC} + W_{CB} \\ &= qE \cdot \cos \alpha \cdot AC + 0 \\ &= qEL \end{aligned}$$

因此

$$W_{AB} = W_{ACB}$$

如果  $q$  在电场力的作用下从  $A$  点沿任意曲线  $ADB$  移动到  $B$  点 (图 2-2-2)，我们可以将曲线分成非常多的小段，每段可看成直线，以该直线为一直角三角形的斜边，两直角边分别平行和垂直于电场线。

容易证明

$$W_{ADB} = qEL$$

因此

$$W_{AB} = W_{ADB}$$

也就是说，电场力做功跟移动电荷的路径无关。

上面从匀强电场中得到的结论具有普遍意义，可以证明，在任意静电场中，电场力对电荷所做的功跟移动电荷的路径无关。

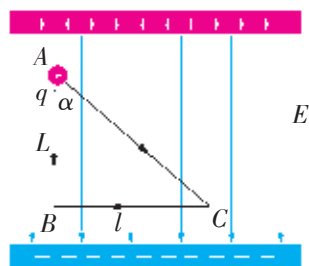


图 2-2-1 探究电场力对电荷做功的特点

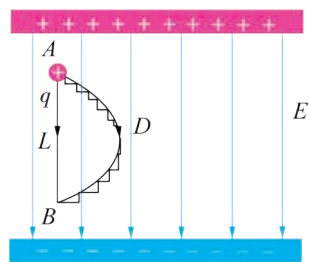


图 2-2-2 电场力对电荷做功的特点

## 研究电荷在电场中的功能关系

### 分析与论证

### 电荷在电场中的电势能

用重力场与电场类比，可以帮助我们通过熟悉的重力场去认识尚未了解的有相似规律的电场。

我们知道，重力做功与路径无关。物体在重力场中具有重力势能。重力做功的结果引起物体重力势能的变化。既然电场力做功也与路径无关，可以推知，电荷在电场中也一定具有势能。电场力做功，必然会引起电荷势能的变化。

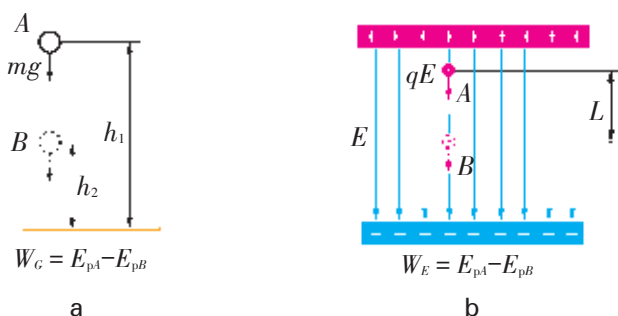


图 2-2-3 重力做功和电场力做功

我们把电荷在电场中具有势能叫做**电势能**（electric potential energy），用  $E_p$  来表示。如图 2-2-3 所示，设电量为  $q$  的点电荷在  $A$ 、 $B$  两点的电势能分别为  $E_{pA}$  和  $E_{pB}$ 。根据电场力做功与重力做功的类比，可以得出电荷从  $A$  点移到  $B$  点的过程中，电场力做功与电势能变化的关系，即

$$W_E = E_{pA} - E_{pB}$$

这个关系式也适用于非匀强电场。

所以，在电场中移动电荷，电场力做正功时，电荷的电势能一定减少；电场力做负功时，电荷的电势能一定增加。

电势能跟重力势能一样，也是一个相对量。电势能的大小跟零电势能位置的选择有关。如果规定  $B$  点的电势能为零，则  $E_{pA} = W_E$ ，也就是说，电荷在电场中某处的电势能，等于在电场力作用下把它从该处移动到零电势能位置时电场力所做的功。

在物理学中，通常把离开场源电荷无限远处规定为零电势能位置，或者把地球表面规定为零电势能位置。

## 电势差

### 分析与论证

### 电场中两点之间的电势差

根据电场力做功的特点，在匀强电场中，电荷  $q$  由  $A$  点移动到  $B$  点（图 2-2-4），无论沿怎样的路径，电场力所做的功

都是

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

由此可得

$$\frac{W_{AB}}{q} = \frac{E_{pA} - E_{pB}}{q} = EL$$

可见在匀强电场中，电场力对电荷做的功  $W_{AB}$  与电荷  $q$  的比值  $\frac{W_{AB}}{q}$ ，只跟电场中  $A$ 、 $B$  两点的位置和电场强度有关，它反映了电场的能的性质。物理学中，把  $\frac{W_{AB}}{q}$  叫做电场中  $A$ 、 $B$  两点间的电势差（electric potential difference）。

上面的结论虽然是从匀强电场中得出的，但它对非匀强电场也都是适用的。

因此，一般情况下（图 2-2-5），如果电荷  $q$  在电场中由  $A$  点移动到  $B$  点，电场力做的功为  $W_{AB}$ ，则  $A$ 、 $B$  两点间的电势差  $U_{AB}$  为

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

或

$$W_{AB} = qU_{AB}$$

电场力所做的功可以是正功也可以是负功。两点间的电势差可以是正值，也可以是负值。

电势差也叫电压。在国际单位制中，电势差的单位是伏特（volt），简称伏，符号是 V。如果 1 C 的正电荷在电场中由一点移动到另一点，电场力所做的功为 1 J，这两点间的电势差就是 1 V，即

$$1 \text{ V} = 1 \text{ J/C}$$

### 案例分析

**案例** 在图 2-2-6 所示的非匀强电场中，如果已知带电量  $q = -1 \times 10^{-5} \text{ C}$  的点电荷由  $A$  点移动到  $B$  点，电场力所做的功  $W_{AB} = 8 \times 10^{-3} \text{ J}$ ，则电荷的电势能如何变化？ $A$ 、 $B$  两点的电势差  $U_{AB}$  等于多少？

**分析** 在任意电场中，移动电荷时电场力做功跟电荷电势能的变化、两点间的电势差之间有关系式

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

因此可以直接利用该式求解。

**解答** 由题意知，电荷从  $A$  点移到  $B$  点时电场力做正功（ $W_{AB} > 0$ ），因此电荷的电势能减少。电势能的减少量为

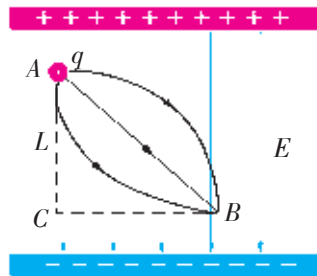


图 2-2-4 研究匀强电场中的电势差

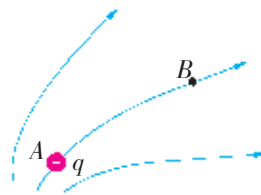


图 2-2-5 研究电势差

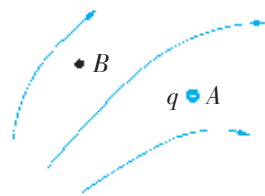


图 2-2-6 非匀强电场中各点间的电势差



$$E_{pA} - E_{pB} = W_{AB} = 8 \times 10^{-3} \text{ J}$$

由于移动的是负电荷 ( $q < 0$ )，因此  $A$ 、 $B$  两点间的电势差为

$$U_{AB} = \frac{W_{AB}}{q} = \frac{8 \times 10^{-3}}{-1 \times 10^{-5}} \text{ V} = -800 \text{ V}$$

在研究微观粒子时，常用电子伏特（简称电子伏，符号是 eV）作为能量的单位。如果两点间的电压为 1 V，电场力把一个电子由一点移动到另一点，电场力所做的功等于 1 eV，而电子的电荷量  $e = 1.6 \times 10^{-19} \text{ C}$ ，则

$$1 \text{ eV} = 1.6 \times 10^{-19} \text{ J}$$

### 家庭作业与活动

1. 下列说法中正确的是（ ）。

- A. 无论是正电荷还是负电荷，从电场中某点移到无限远处时，电场力做的正功越多，电荷在该点的电势能越大
- B. 无论是正电荷还是负电荷，从电场中某点移到无限远时，电场力做的正功越少，电荷在该点的电势能越大
- C. 无论是正电荷还是负电荷，从无限远移到电场中某点时，克服电场力做功越多，电荷在该点的电势能越大
- D. 无论是正电荷还是负电荷，从无穷远移到电场中某点时，电场力做功越多，电荷在该点的电势能越大

2. 在某电场中，把带电量  $q = -5 \times 10^{-9} \text{ C}$  的点电荷由  $A$  点移动到  $B$  点，电场力所做的功为  $1 \times 10^{-7} \text{ J}$ 。 $A$ 、 $B$  两点间的电势差  $U_{AB}$  是多大？ $B$ 、 $A$  两点间的电势差  $U_{BA}$  是多大？

3. 电荷的电势能发生变化时，其减少量总是等于电场力对电荷所做的正功。在正电荷  $Q$  的电场中（图 2-2-7），把正电荷  $q$  从  $A$  点移到  $B$  点，电场力的方向与电荷移动的方向相同，电场力

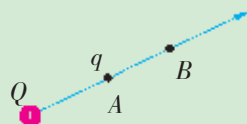


图 2-2-7

对电荷  $q$  做什么功？电势能怎样变化？在正电荷  $Q$  的电场中，负电荷  $q$  在  $A$ 、 $B$  间移动时电势能如何变化？你能得出什么结论？

4. 如图 2-2-8 所示，在场强为  $E$  的匀强电场中有相距为  $L$  的  $A$ 、 $B$  两点，连线  $AB$  与电场线的夹角为  $\theta$ 。现将一电荷量为  $q$  的正电荷从  $A$  点移到  $B$  点。现若沿直线  $AB$  移动该电荷，电场力做的功  $W_1 = \underline{\hspace{2cm}}$ ；若沿路径  $ACB$  移动该电荷，电场力做的功  $W_2 = \underline{\hspace{2cm}}$ ；若沿曲线  $ADB$  移动该电荷，电场力做功  $W_3 = \underline{\hspace{2cm}}$ 。由此可知，电荷在电场中移动时，电场力做功的特点是  $\underline{\hspace{2cm}}$ 。

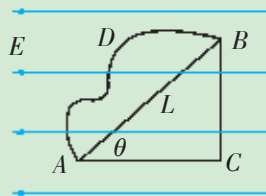


图 2-2-8

## 2.3 电势 电荷在电场中的运动

### 电势

#### 分析与论证 电场中各点的电势

我们从电场力做功与电势能变化的关系，可以推知同一电荷在电场中不同位置上的电势能一般不同，不同电荷在电场中同一位置上的电势能一般也不同。进一步的研究指出，在一个确定的电场中，不同电荷 ( $q_1, q_2, q_3, \dots, q_n$ ) 在电场中同一位置的电势能 ( $E_{p1}, E_{p2}, E_{p3}, \dots, E_{pn}$ ) 与其电荷量之比是一定的，即

$$\frac{E_{p1}}{q_1} = \frac{E_{p2}}{q_2} = \frac{E_{p3}}{q_3} = \dots = \frac{E_{pn}}{q_n}$$

这个比值仅由电场所决定，而跟放在该处的电荷无关。可见，这个比值可以客观地反映电场的能的特性。在物理学上，把电荷在电场中某一点的电势能与其电荷量的比，叫做这一点的电势 (electric potential)。如果用  $\varphi_M$  表示电场中任意一点  $M$  的电势，用  $E_{pM}$  表示电荷  $q$  在该处的电势能，则

$$\varphi_M = \frac{E_{pM}}{q}$$

在国际单位制中，电势的单位也是伏 [特]。

电势也具有相对的意义，电场中某点电势的大小跟零电势位置 (称为零电势点) 的选择有关。在理论研究中，常取离场源电荷无限远处的电势为零；在实际应用中，常取大地的电势为零。

如果我们选定了零电势点，电场中  $A$ 、 $B$  两点的电势分别为  $\varphi_A$ 、 $\varphi_B$ ，则  $A$ 、 $B$  两点间的电势差就可表示为

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

在  $A$ 、 $B$  两点间移动电荷时电场力做的功为

$$W_{AB} = qU_{AB} = q(\varphi_A - \varphi_B)$$

#### 思考与讨论

请根据电场力做功与电势差的关系，比较图 2-3-1 所示点电荷电场中  $A$ 、 $B$  两点与  $C$ 、 $D$  两点电势的高低。由此你能否找出比较点电荷场中各点电势高低的简单方法？

电荷在电场中的这个特性同样可跟重力场类比：同一物体在重力场中不同位置上的重力势能一般不同，不同物体在重力场中同一位置上的重力势能一般也不同。

令  $\varphi_B = 0$ ， $q = 1\text{C}$ ，可以看出，电场中某点  $A$  的电势  $\varphi_A$ ，数值上等于把单位正电荷从该点移到零电势点时电场力所做的功。

对点电荷的电场，我们通常选无限远处为零电势点。

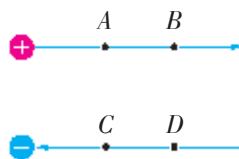


图 2-3-1 比较电势高低

电势是标量，没有方向，但有高低及正负之分。可以证明，在任何电场中，某处电场线的指向就是该处电势降落的方向。

### 案例分析

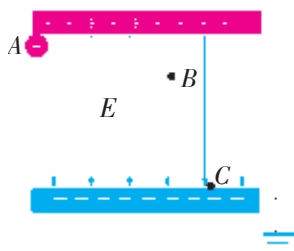


图 2-3-2 探究电场中各点的电势

**案例** 在图 2-3-2 所示的匀强电场中，带电量  $q=4 \times 10^{-9} \text{C}$  的点电荷由上极板上 A 点移至 B 点时，电场力做的功为  $8 \times 10^{-3} \text{J}$ ；由 B 点移至下极板上 C 点，电场力做的功为  $1 \times 10^{-2} \text{J}$ 。A、B、C 各点的电势分别为多大？

**分析** 图中的下极板接地，表示取下极板电势为零，C 点在下极板上， $\varphi_C = 0$ 。根据电场力做功与电势差的关系，求出  $U_{BC}$ 、 $U_{AB}$  就可确定  $\varphi_B$ 、 $\varphi_A$  的大小。

**解答** 由题知， $q = 4 \times 10^{-9} \text{C}$ ， $W_{AB} = 8 \times 10^{-3} \text{J}$ ， $W_{BC} = 1 \times 10^{-2} \text{J}$ ，C 点为接地的下极板上的一点，故  $\varphi_C = 0$ 。

$$\text{对于 } B、C \text{ 两点，} U_{BC} = \frac{W_{BC}}{q} = \frac{1 \times 10^{-2}}{4 \times 10^{-9}} \text{ V} = 2.5 \times 10^6 \text{ V}$$

由  $U_{BC} = \varphi_B - \varphi_C$  得 B 点电势

$$\varphi_B = U_{BC} + \varphi_C = 2.5 \times 10^6 \text{ V} + 0 = 2.5 \times 10^6 \text{ V}$$

$$\text{对于 } A、B \text{ 两点，} U_{AB} = \frac{W_{AB}}{q} = \frac{8 \times 10^{-3}}{4 \times 10^{-9}} \text{ V} = 2.0 \times 10^6 \text{ V}$$

由  $U_{AB} = \varphi_A - \varphi_B$  得 A 点电势

$$\varphi_A = U_{AB} + \varphi_B = 2.0 \times 10^6 \text{ V} + 2.5 \times 10^6 \text{ V} = 4.5 \times 10^6 \text{ V}$$

### 多学一点

### 电场的等势面

在地理学中，为了形象地表示地形的高低，常采用在地图上画等高线的方法。在电场中，我们也可以采用类似的方法表示电势的高低分布（图 2-3-3）。在物理学中，把电场中电势相等的点构成的线（面）叫做等势线（面）（equipotential line/surface）。同一等势线（面）上任意两点间的电势差为零，所以，在同一等势线（面）上移动电荷时，电场力不做功。因此，电场线一定跟等势面垂直，并且由电势高的等势面指向电势低的等势面。

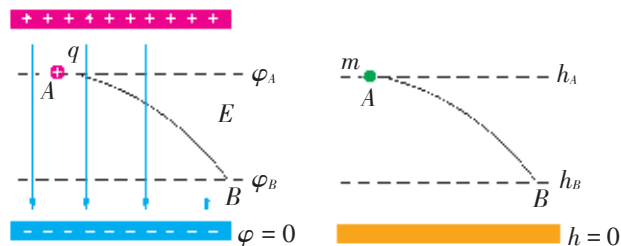


图 2-3-3 等势面与等高线

在定量研究电场时，由于测量电势比测量电场强度容易，所以常常先测绘出电场的等势面的形状和分布，再根据电场线跟等势面垂直的关系，绘出电场线的分布，就可以知道电场的总体情况了。

常见的几种电场的等势面如图 2-3-4 所示。

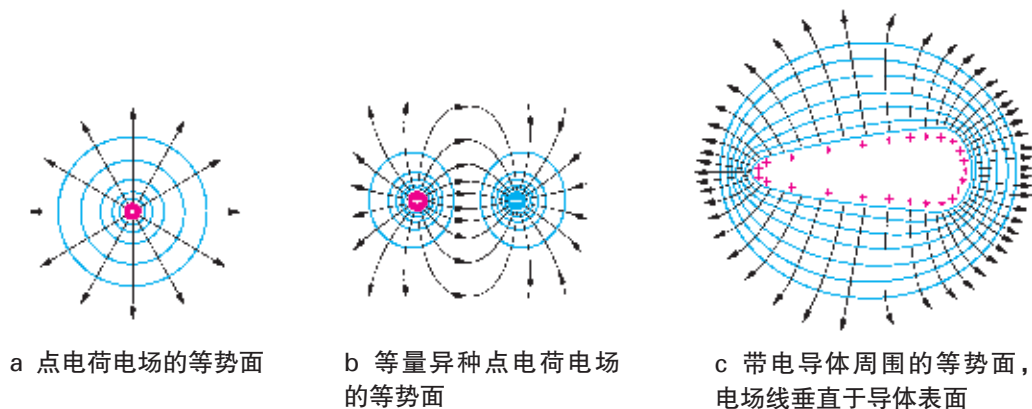


图 2-3-4 各种电场的等势面

## 电势差与电场强度的关系

电场强度和电势差都是描述电场性质的物理量，两者必然有内在的联系。

为了研究电势差与电场强度之间的关系，我们以匀强电场为例进行分析。图 2-3-5 表示某一匀强电场的电场线分布情况。设  $A$ 、 $B$  两点间的距离为  $d$ ，电势差为  $U$ ，场强为  $E$ 。把正电荷  $q$  由  $A$  点移动到  $B$  点，电场力所做的功  $W = Fd = qEd$ ，而  $W = qU$ ，可见

$$U = Ed$$

这表明，在匀强电场中，沿场强方向的两点间的电势差等于场强与这两点间距离的乘积。上式可变换为

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

这表明，在匀强电场中，电场强度在数值上等于沿场强方向每单位距离上的电势差。因此，电场强度的另一个单位是  $\text{V/m}$ 。

请证明： $1 \text{ N/C} = 1 \text{ V/m}$ 。

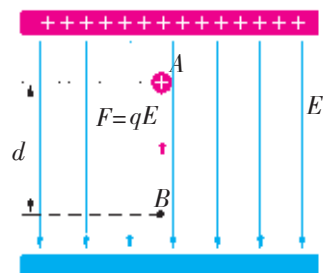


图 2-3-5 探究电势差与电场强度的关系

## 探究电子束在偏转电极中的偏移

示波管是示波器的核心部件，它由电子枪、偏转电极和荧光屏等组成，管内抽成真空。

在示波管工作过程中，通电灯丝发射的电子在电子枪阴极和阳极间受电场力的作用被加速，形成电子束，进入偏转电极

$YY'$ 、 $XX'$ (图2-3-6)。电子束在 $YY'$ 、 $XX'$ 中受到电场力的作用,发生偏转,打到荧光屏上形成亮斑。亮斑的偏转情况跟电子束在 $YY'$ 、 $XX'$ 的电场中受到的力有关。

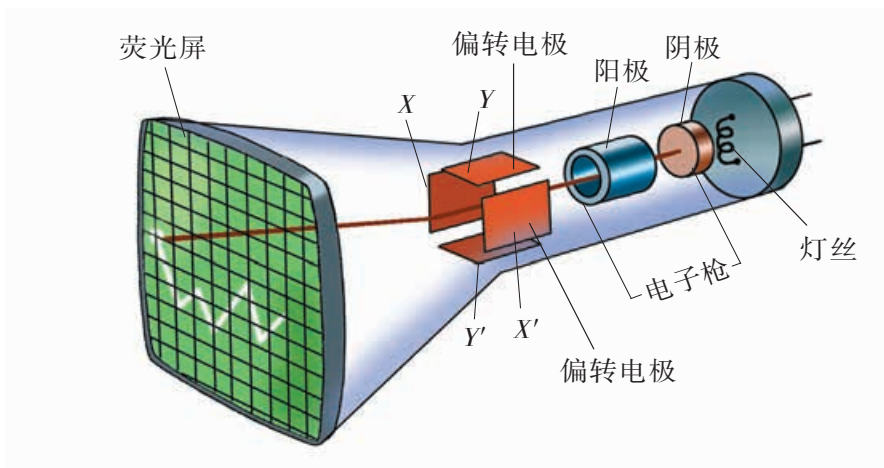


图 2-3-6 示波管示意图

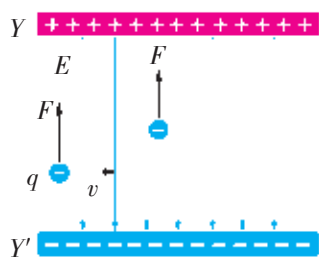


图 2-3-7 电子在电场中的偏转

示波管偏转电极 $YY'$ 实际上是两块靠近的、大小相等、互相正对的平行金属板。偏转电极 $XX'$ 的情况也是这样。

由于偏转电极的两块金属板靠得很近,可以认为,除了两板边缘外,电荷在板面中部均匀分布,电场线垂直于板面且均匀分布。

偏转电极两极板间的电场是匀强电场,电子在两极板间受到一个大小和方向都不变的电场力(图2-3-7)。电子束进入偏转电极后是怎样运动的呢?下面用图2-3-8所示的模拟实验进行探究。

### 实验探究

### 观察带电油滴在匀强电场中的偏移

在图2-3-8所示的实验中,将两块金属板分别与起电机的

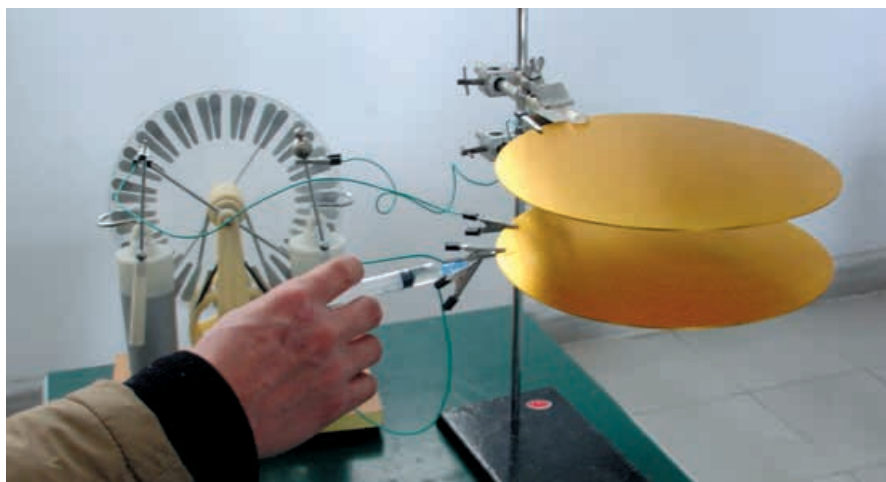


图 2-3-8 观察带电油滴在匀强电场中的偏移

正负极连接。在注射器中注入缝纫机油，用导线把注射器针头与负极金属板连接起来。摇动起电机后，推动注射器活塞，将机油水平射入两金属板之间的匀强电场中，观察带电油滴的运动情况。

根据上述实验，描画出匀强电场中电子运动轨迹的图形。利用《物理（必修2）》的知识进行分析。

### 家庭作业与活动

1. 在图 2-3-9 所示的匀强电场中，如果 A 板接地，M、N 两点中，哪一点的电势高？电势是正值还是负值？如果 B 板接地，哪一点的电势高？电势是正值还是负值？取大地的电势为零。

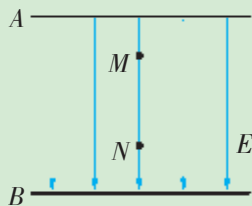


图 2-3-9

2. 如图 2-3-10 所示，M、N 为电场中两个等势面，直线 GH 是其中的一条电场线，则下列说法中正确的是（ ）。



图 2-3-10

- A.  $E_{pG} < E_{pH}$   
 B. 正电荷置于 G 点时电势能大于置于 H 点时的电势能  
 C.  $\varphi_G < \varphi_H$   
 D. 负电荷由 H 点移动到 G 点时电场力做正功
3. 将电荷量为  $1 \times 10^{-8}$  C 的正电荷，从无限远处移到电场中的 A 点，要克服电场力做功  $2 \times 10^{-6}$  J。  
 (1) 电荷在 A 点的电势能是多少？  
 (2) A 点的电势是多少？

4. 如图 2-3-11 所示，A、B 是电场中两点，A 点

的电场强度要\_\_\_\_于 B 点的电场强度，A 点的电势要\_\_\_\_于 B 点的电势。一个带负电的点电荷 Q 在 A 点所受的电场力要比它在 B 点所受的电场力\_\_\_\_，该负电荷在 A 点的电势能要比它在 B 点的电势能\_\_\_\_。

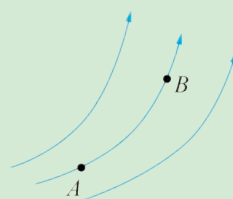


图 2-3-11

5. 在以点电荷为球心、r 为半径的球面上各点相同的物理量是（ ）。
- A. 电场强度    B. 同一电荷所受的电场力  
 C. 电势        D. 同一电荷具有的电势能
6. 将一个带电量为  $-2 \times 10^{-9}$  C 的点电荷从电场中的 N 点移到 M 点，需克服电场力做功  $1.4 \times 10^{-8}$  J。N、M 两点间的电势差  $U_{NM}$  为多少？若将该点电荷从 M 点移到 N 点，电场力做什么功？ $U_{MN}$  为多少？
7. 如图 2-3-12 所示，A、B、C、D 是匀强电场中一正方形的四个顶点，已知 A、B、C 三点的电势分别为  $\varphi_A = 15$  V， $\varphi_B = 3$  V， $\varphi_C = -3$  V，问 D 点的电势  $\varphi_D$  为多大？

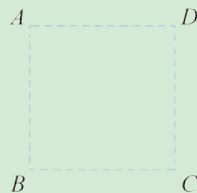


图 2-3-12

## 2.4 电容器 电容

### 电容器

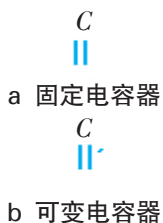


图 2-4-1 电容器的符号

电容器是一种重要的电路元件，在电子技术和电工技术中有着很重要的应用。什么是电容器呢？物理学中，把能储存电荷和电能的元件叫做**电容器**（capacitor）。两块正对的平行金属板中间夹有一层绝缘物质（例如空气、聚苯乙烯、云母等），就构成一个最简单的电容器，叫做平行板电容器。这两块金属板叫做电容器的极板。实际上，任何两个彼此绝缘又相隔很近的导体，都可以看成是一个电容器。电容器的符号如图 2-4-1 所示。电容器的种类很多，如图 2-4-2 所示。



图 2-4-2 各种电容器

### 学生必做实验

### 观察电容器的充、放电现象

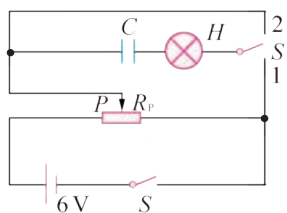


图 2-4-3 电容器充放电电路图

将电源两极与电容器两极连接，电容器两块极板就分别带上等量的异种电荷。这个过程叫做**充电**（charging）。用导线将充电后的电容器两极板相连接，两块极板上的电荷就相互中和，电容器最终不再带电。这个过程叫做**放电**（discharging）。

电容器的充电和放电过程有什么特点？某同学设计了如图 2-4-3 所示的电路，试图通过手电筒小灯泡  $H$  的发光情况来观察电容器的充放电过程。

### 思考讨论

请结合图 2-4-3 所示电路, 思考和讨论下列问题:

1. 为什么要在电路中接入滑动变阻器?
2. 适当调节滑动变阻器后, 将单刀双掷开关  $S$  置于“1”位置, 是给电容器充电还是让它放电?
3. 当将单刀双掷开关  $S$  置于“2”位置时, 是给电容器充电还是让它放电?
4. 该同学根据什么来分析电容器充放电过程的特点? 有什么特点?

### 设计实验

根据思考与讨论的结果, 你能参考该同学的电路制订出你观察和研究电容器充放电的实验方案吗?

### 收集证据

根据你所制订的实验方案进行实验, 将实验中观察到的现象记录在下表中。

电容器的充放电过程现象记录

电容器	充电电压	电容器状态	小灯泡闪光亮度与发光持续时间
电容器 A	$U_1$	充电	
		放电	
	$U_2$	充电	
		放电	
电容器 B	$U_2$	充电	
		放电	

### 分析论证

请分析讨论如下问题:

1. 当给电容器充电时, 为什么小灯泡开始较亮, 然后逐渐变暗, 最后熄灭?
2. 当电容器放电时, 为什么小灯泡亮了一下又熄灭了? 此时电容器在电路中起什么作用?
3. 同一电容器在不同充电电压下, 其充放电过程中小灯泡闪光亮度与发光持续时间的差异说明什么?



4. 相同充电电压下，不同电容器充放电过程中小灯泡闪光亮度与发光持续时间的差异又说明了什么？

## 电容

电容器到底储存了多少电荷？在以上实验中，充电电压越高，电容器放电时小灯泡发光越亮，持续时间越长，这说明电容器储存的电荷越多。实验表明，对于同一个电容器，每个极板所带的绝对电荷量  $Q$  跟电容器两极板间的电势差  $U$  成正比，也就是说它们的比  $\frac{Q}{U}$  是一个确定的值，用  $C$  表示这个比。对于一个电容器来说，有

$$\frac{Q_1}{U_1} = \frac{Q_2}{U_2} = \dots = \frac{Q_n}{U_n} = C$$

或

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

实验还表明，对于不同的电容器，即使两极板间的电势差相同，电容器储存的电荷也不一定相同。因此，对于不同的电容器，这个比  $\frac{Q}{U}$  一般是不同的。可见，这个比反映了电容器储存电荷的本领。

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  $U$  的比，叫做电容器的电容（capacitance），用  $C$  表示。

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

电容器的电容在数值上等于两极板间的电势差为 1 V 时，电容器上所储存的电荷量。

在国际单位制中，电容的单位是法拉（farad），简称法，符号是 F。如果一个电容器带 1 C 的电荷量，两极板间的电势差是 1 V，这个电容器的电容就是 1 F。法这个单位太大，实际科研和生产中常用较小的单位：微法（ $\mu\text{F}$ ）和皮法（pF）。它们的换算关系为

$$1 \text{ F} = 10^6 \mu\text{F} = 10^{12} \text{ pF}$$

## 探究影响平行板电容器电容的因素

### 实验探究

### 平行板电容器的电容

前面指出，电容是反映电容器储电特性的物理量。那么，电容器的电容大小究竟由什么因素决定呢？下面，我们对最简

单的平行板电容器进行研究。

参照图 2-4-4 所示的实验装置和实验操作进行探究。用摩擦过的玻璃棒或橡胶棒使与静电计相连的极板带电。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,用静电计测量已充电的平行板电容器两极板间的电势差  $U$ 。通过不同情况下  $U$  的大小来探究电容  $C$  的大小跟相对介电常数  $\varepsilon$ 、正对面积  $S$  及两极板间距离  $d$  的关系。

理论研究指出,平行板电容器的两极板间为真空时,其电容跟极板的正对面积成正比,跟两极板间的距离成反比,即

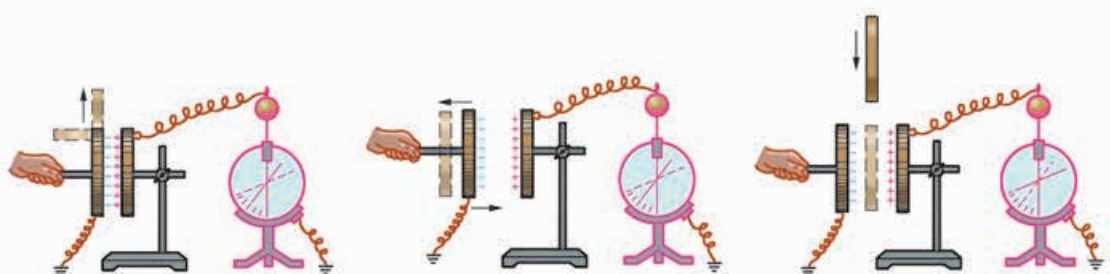
$$C = \frac{S}{4\pi kd}$$

式中,  $k$  为静电力常量。

当两极板间充满相对介电常数为  $\varepsilon$  的电介质时,电容量增大到  $\varepsilon$  倍,即

$$C = \frac{\varepsilon S}{4\pi kd}$$

静电计是测量电势差的仪器。其指针的偏转角度越大,表示被测的两个导体间的电势差越大。



a 保持  $Q$  和  $d$  不变,研究  $C$  与  $S$  的关系  
——发现  $S$  越小,  $U$  越大,说明  $C$  越小

b 保持  $Q$  和  $S$  不变,研究  $C$  与  $d$  的关系  
——发现  $d$  越大,  $U$  越大,说明  $C$  越小

c 保持  $Q$ 、 $S$  和  $d$  都不变,插入介质板,研究  $C$  与电介质的关系  
——发现插入介质后,  $U$  减小,说明  $C$  变大

图 2-4-4 探究影响平行板电容器电容的因素

## 常用电容器

从构造来看,常用的电容器可以分为固定电容器和可变电容器。

固定电容器的电容是固定不变的,常用的有聚苯乙烯电容器和电解电容器。聚苯乙烯电容器是在两层锡箔或铝箔中间夹以聚苯乙烯薄膜,卷成圆柱体制成的(图 2-4-5)。改变锡箔或铝箔的面积,就可以制成不同电容的聚苯乙烯电容器。

电解电容器(图 2-4-6)是用铝箔作为一个极板,用铝

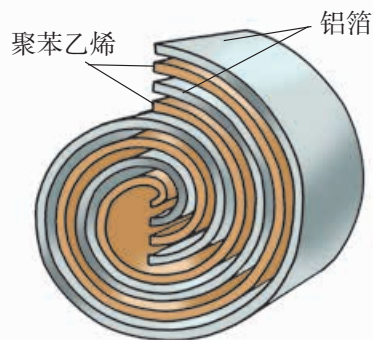


图 2-4-5 聚苯乙烯电容器内部结构示意图

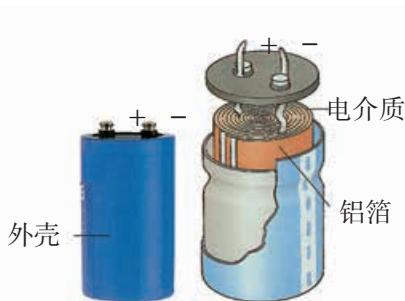


图 2-4-6 电解电容器

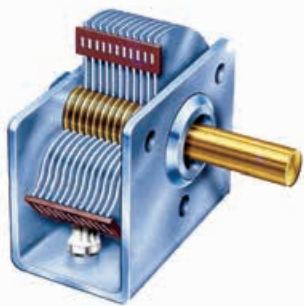


图 2-4-7 可变电容器

箔上很薄的一层氧化膜作为电介质，用浸渍过电解液的纸作为另一个极板制成的。由于氧化膜很薄，电解电容器的电容就较大。电解电容器的极性是固定的，使用时不能接错。

可变电容器由两组铝片组成（图 2-4-7），它的电容是可以改变的。固定的一组铝片叫做定片，可以转动的一组铝片叫做动片。转动动片，就可以使两组铝片的正对面积发生变化，电容就随着改变。

当加在电容器两极板上的电压超过某一限度时，电容器两极板间的电介质将被击穿，成为导体，两极板上的电荷就会中和，电容器就损坏了。这个极限电压叫做击穿电压。因此，电容器工作时的电压应低于击穿电压。电容器上一般都标明其电容和额定电压的数值。额定电压是电容器正常工作时所能承受的电压，它比击穿电压要低一些。

### 家庭作业与活动

- 对电容  $C = \frac{Q}{U}$ ，下列说法中正确的是（ ）。
  - 一个电容器充的电荷量越多，电容就越大
  - 对于固定的电容器，它所充电荷量跟它两极板间所加电压的比值保持不变
  - 可变电容器充的电荷量跟加在两极板间的电压成正比
  - 由  $C = \frac{Q}{U}$  知，如果一个电容器没有电压，就没有充电的电荷量，也就没有电容
- 一个电容器的电容是  $1.5 \times 10^{-2} \mu\text{F}$ ，把它的两极接在  $90 \text{ V}$  的电源上，电容器每个极板所带的电荷量是多少？
- 如图 2-4-8 所示，四个图像描述了对给定的电容器充电时，电容器电量  $Q$ 、电压  $U$  和电容  $C$  三者的关系，正确的图像有（ ）。
 

A.

B.

C.

D.

图 2-4-8

- 两个较大的平行金属板  $A$ 、 $B$  相距为  $d$ ，分别接

在电压为  $U$  的电源正、负极上，这时质量为  $m$ 、带电量为  $-q$  的油滴恰好静止在两极之间，如图 2-4-9 所示。在其他条件不变的情况下，如果将两极非常缓慢地错开一些，那么在错开的过程中（ ）。

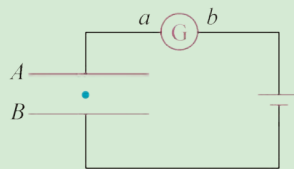


图 2-4-9

- 油滴将向上加速运动，电流计中电流从  $b$  流向  $a$
  - 油滴将向下加速运动，电流计中的电流从  $a$  流向  $b$
  - 油滴静止不动，电流计中的电流从  $b$  流向  $a$
  - 油滴静止不动，电流计中的电流从  $a$  流向  $b$
- 图 2-4-10 所示为某一电容器中所带电量和两端电压之间的关系图像。若将该电容器两端的电压从  $40 \text{ V}$  降低到  $36 \text{ V}$ ，对电容器来说正确的是（ ）。
    - 电容器处于充电过程

- B. 电容器处于放电过程  
 C. 该电容器的电容为  $5.0 \times 10^{-2} \text{ F}$   
 D. 电容器的电量变化量为  $0.20 \text{ C}$

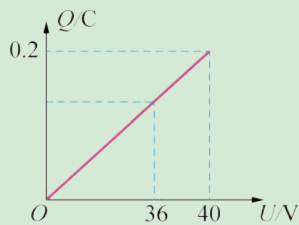


图 2-4-10

6. 图 2-4-11 所示电路中,  $A$ 、 $B$  为两块竖直放置的金属板,  $G$  是一只静电计, 开关  $S$  闭合后, 静电计指针张开一个角度。下述做法中可使指针张角增大的是 ( )。
- A. 使  $A$ 、 $B$  两板靠近一些  
 B. 使  $A$ 、 $B$  两板错开一些

- C. 断开  $S$  后, 使  $B$  板向右平移, 拉开一些  
 D. 断开  $S$  后, 使  $A$ 、 $B$  错开一些

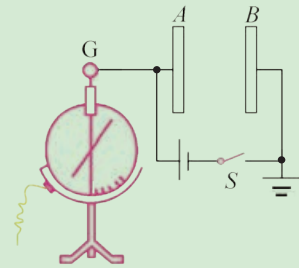


图 2-4-11

7. 某平行板电容器的电容为  $C$ , 所带电荷量为  $Q$ , 极板相距为  $d$ 。现在板间中点放一个电荷量为  $q$  的点电荷, 则该点电荷受到的电场力的大小为 ( )。
- A.  $\frac{2kQq}{d^2}$     B.  $\frac{4kQq}{d^2}$     C.  $\frac{Qq}{Cd}$     D.  $\frac{2Qq}{Cd}$

## 第2章 家庭作业与活动

## A组

1. 在图 2-A-1 所示电场中的  $P$  点放置一正电荷，使其从静止开始运动，加速度逐渐增大的是图中的 ( )。

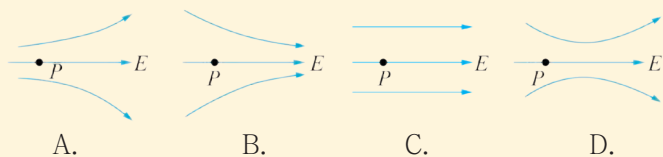


图 2-A-1

2. 如图 2-A-2 所示是电场中某点的电场强度  $E$  与放在该点处的检验电荷  $q$  及所受电场力  $F$  之间的函数关系图像，其中正确的是 ( )。

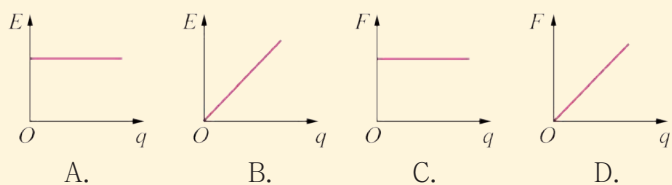


图 2-A-2

3. 图 2-A-3 所示为某静电场的一部分电场线分布情况，下列说法中正确的是 ( )。

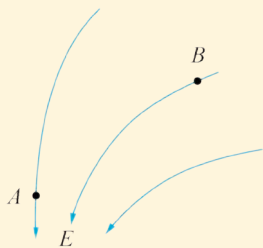


图 2-A-3

- A. 这个电场可能是负点电荷的电场  
 B.  $A$  点的电场强度大于  $B$  点的电场强度  
 C.  $A$ 、 $B$  两点的电场强度方向不相同  
 D. 负电荷在  $B$  点处受到的电场力的方向沿  $B$  点切线方向
4. 真空中， $A$ 、 $B$  两点与点电荷  $Q$  的距离分别为  $r$  和  $3r$ ，则  $A$ 、 $B$  两点的电场强度大小之比为 ( )。  
 A. 3 : 1    B. 1 : 3    C. 9 : 1    D. 1 : 9
5. 传感器是一种采集信息的重要器件，图 2-A-4

所示的是一种测定压力的电容式传感器。当待测压力  $F$  作用于可动膜片电极上时

- ① 若  $F$  向上压膜片电极，电路中有从  $a$  到  $b$  的电流  
 ② 若  $F$  向上压膜片电极，电路中有从  $b$  到  $a$  的电流  
 ③ 若  $F$  向上压膜片电极，电路中不会出现电流  
 ④ 若电流表有示数，则说明压力  $F$  发生变化  
 ⑤ 若电流表有示数，则说明压力  $F$  不发生变化
- 以上说法中正确说法的组合是 ( )。

- A. ②④    B. ①④  
 C. ③⑤    D. ①⑤

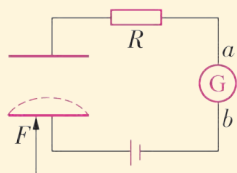


图 2-A-4

6. 1999 年 7 月 12 日，日本原子能公司下属敦贺湾核电站由于水管破裂导致高辐射冷却剂外泄。在检测此次重大事故中应用了非电量变化（冷却剂外泄使管中液面变化）转换为电信号的自动化测量技术。图 2-A-5 是一种通过检测电容器电容的变化来检测液面高低的仪器的原理图。容器中装有导电液体，是电容器的一个电极，中间的芯柱是电容器的另一个电极，芯柱外面套有绝缘管（塑料或橡皮）作为电介质，电容器的两个电极分别用导线接在指示器上，指示器上显示的虽然是电容的大小，但从电容的大小就可知容器中液面位置的高低。对此，下列说法中正确的是 ( )。
- A. 如果指示器显示出电容增大了，则两电极正对面积增大，必为液面升高  
 B. 如果指示器显示出电容减小了，则两电极正对面积增大，必为液面升高  
 C. 如果指示器显示出电容增大了，则两电极正

对面积减小, 必为液面降低

- D. 如果指示器显示出电容减小了, 则两电极正对面积增大, 必为液面降低

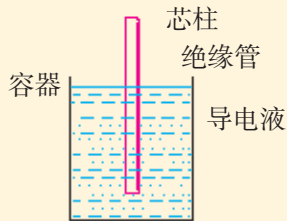


图 2-A-5

**B 组**

1. 密立根油滴实验进一步证实了电子的存在, 揭示了电荷的非连续性。图 2-B-1 是密立根油滴实验的原理示意图。设小油滴的质量为  $m$ , 调节两板间电势差为  $U$ 。当小油滴悬浮不动时, 测出两板间距离为  $d$ , 可求出小油滴的带电量  $q =$  \_\_\_\_\_。

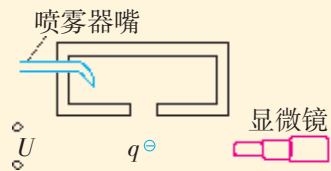


图 2-B-1

2. 如图 2-B-2 所示, 水平放置的两平行金属板相距为  $d$ , 充电后其间形成匀强电场。一带电量为  $+q$ 、质量为  $m$  的液滴从下板边缘射入电场, 并沿直线运动恰好从上板边缘射出。

- (1) 该液滴在电场中做什么运动?
- (2) 求电场强度的大小;
- (3) 求电场力所做的功。

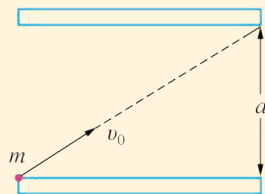


图 2-B-2

3. 一匀强电场方向水平向右, 一带电颗粒沿图 2-B-3 中所示虚线, 在电场中沿斜向做直线运动。带电颗粒在从 A 点运动到 B 点的过程中, 下列关于其能量变化及带电情况的说法中, 正确的是 ( )。

- A. 颗粒一定带负电
- B. 颗粒可能带正电
- C. 颗粒的机械能减少, 电势能增加
- D. 颗粒的机械能减少, 动能增加

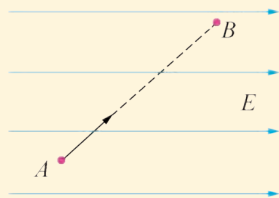


图 2-B-3

4. 如图 2-B-4 所示, 虚线  $a$ 、 $b$ 、 $c$  代表静电场中的三个等势面, 它们的电势分别为  $\varphi_a$ 、 $\varphi_b$  和  $\varphi_c$ ,  $\varphi_a > \varphi_b > \varphi_c$ 。一带正电的粒子射入电场中, 其运动轨迹如图中实线  $KLMN$  所示, 由图可知 ( )。

- A. 粒子从  $K$  到  $L$  的过程中, 电场力做负功
- B. 粒子从  $L$  到  $M$  的过程中, 电场力做负功
- C. 粒子从  $K$  到  $L$  的过程中, 电势能增加
- D. 粒子从  $L$  到  $M$  的过程中, 动能减少

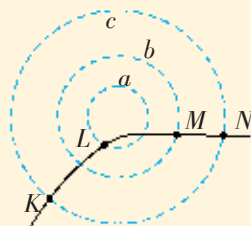


图 2-B-4

5. 在实验室完成下述实验 (图 2-B-5): 将一只开口的空心金属球放在验电器 A 的导杆上, 用与丝绸摩擦过的玻璃棒接触空心金属球, 观察验电器 A 指针的情况。用绝缘小金属球分别与空心金属球外表和内壁接触, 再分别与验电器 B 的金属球接触 (即把电荷转移到验电器 B 上)。分别反复操作几次, 观察两种情况下验电器 B 指针的位置变化。你发现了什么? 请完成实验报告。

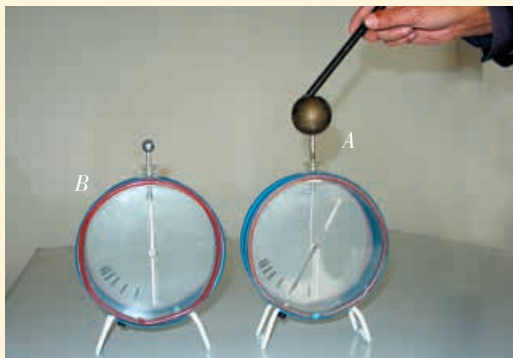
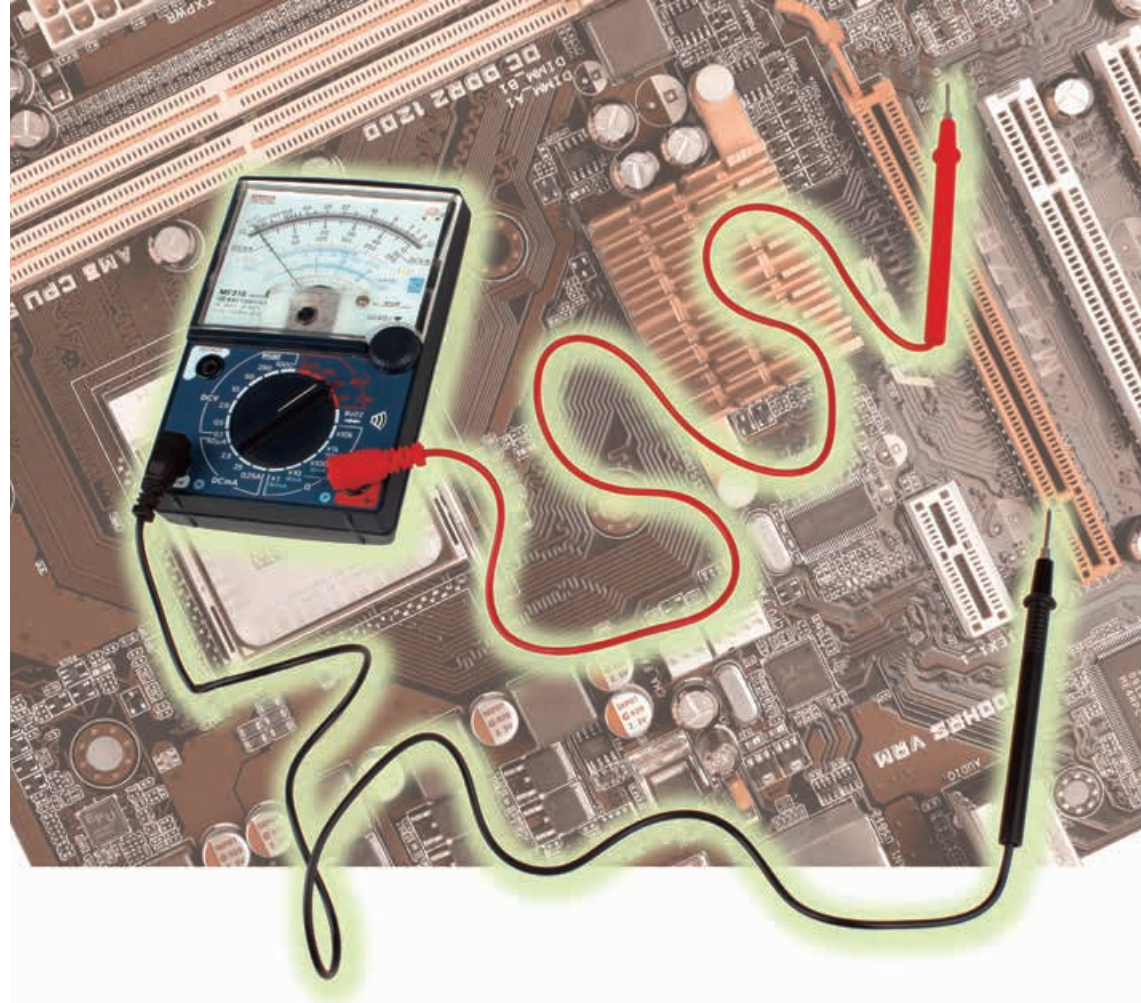


图 2-B-5 研究带电空心金属球的电荷分布



## 第 3 章 电路

电路（electric circuit）跟我们的生活密切相关，从电视机、影碟机、数码相机、计算机到人造卫星和宇宙飞船，都离不开电路。

研究电路就必须进行测量。多用电表（multimeter）是最常用的电学测量仪表。多用电表既能测量电流又能测量电压，还能测量电阻。

本章先学习使用多用电表测量部分电路中的物理量，识别常见的电路元器件；接着研究电路中的电流、电压和电阻的有关规律，了解串、并联电路电阻的特点；最后通过两个自主制订实验方案的科学探究活动，探究影响电阻的因素，并测算金属丝的电阻率，激发探究的欲望，培养实验设计、分析论证、反思评估的能力。

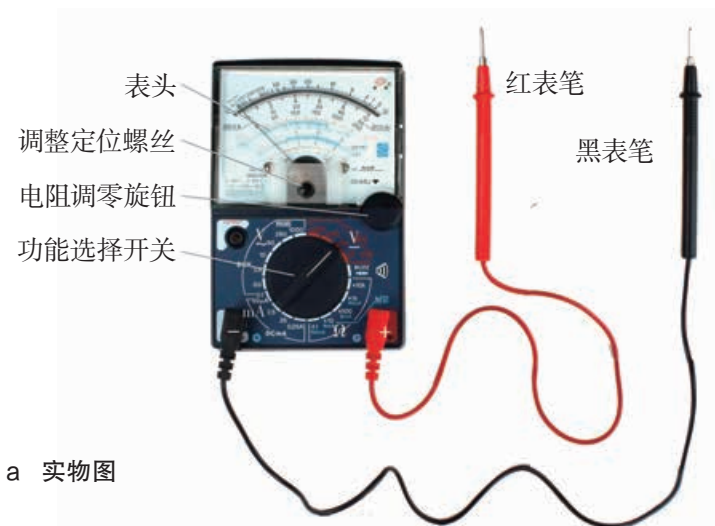
## 3.1 多用电表

在初中，我们分别用电流表和电压表来测量电路中的电流和电压。人们经过研究和实践，设计制作了一种既能测量电流、电压，又能测量电阻等多个电学量的多功能、多量程仪表——多用电表（曾叫万用电表）。

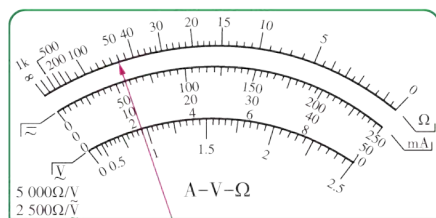
### 认识多用电表

仔细观察如图3-1-1b所示的多用电表的面板，对照说明书，了解它能测量哪些电学量。

多用电表主要由表头、电路板和旋钮组成。电表表头由一个小量程的电流表和电路元件组成。面板的上半部为表盘，分别标有电压、电流和电阻的刻度线，用于读取这些电学量的测量值。面板中央的定位螺丝用于调节指针的“0”位。面板下半部中间的旋钮是功能选择开关，周围标有各种测量功能及量程：“V”表示直流电压挡，“ $\tilde{V}$ ”表示交流电压挡，“mA”表示直流电流挡，“ $\Omega$ ”表示电阻挡。面板上有一个电阻挡的调零旋钮，还有两个标有“+”“-”的插孔，分别用于插红、黑测试表笔。



a 实物图



b 多用电表的表盘示意图

图 3-1-1 多用电表

### 使用多用电表

#### 学生必做实验

#### 用多用电表测量电学中的物理量

使用多用电表前，应检查指针是否停在刻度线左端的“0”位置。如果没有停在“0”位置，要用螺丝刀轻轻调整定位螺丝，使指针指“0”。再将红、黑测试表笔分别插入“+”“-”插孔。

测量时，要根据所需测量的电学量，将功能选择开关旋转到相应的测量挡位和量程上。读数时，要读取跟功能选择开关



挡位相应的刻度值。测量结束后，要将功能选择开关旋转到交流电压挡的最大量程处或“off”处，以保护多用电表。

### 测量直流电压

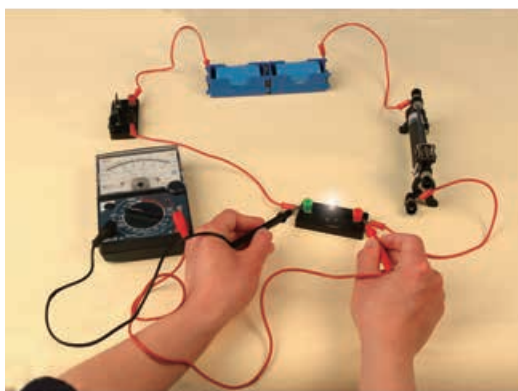
如图 3-1-2 所示，用多用电表分别测量 1 节干电池以及 2 节、3 节干电池串联后灯泡两端的电压。

实验前想一想：

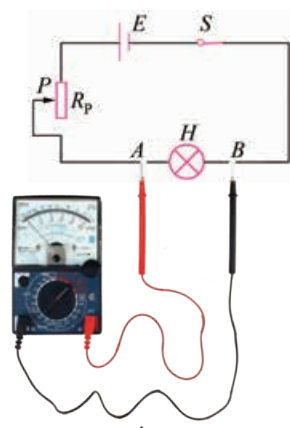
- (1) 应选择哪个挡位和量程？依据是什么？
- (2) 如果预先无法估计待测电压是多大，该怎么办？
- (3) 如果用“50 V”以上的大量程进行测量，会有什么问题？为什么？试一试。

根据挡位所指的量程以及指针所指的刻度值，读出电压表的示数，填入下表。

干电池	1 节	2 节	3 节
灯泡两端的电压 / V			



a



b

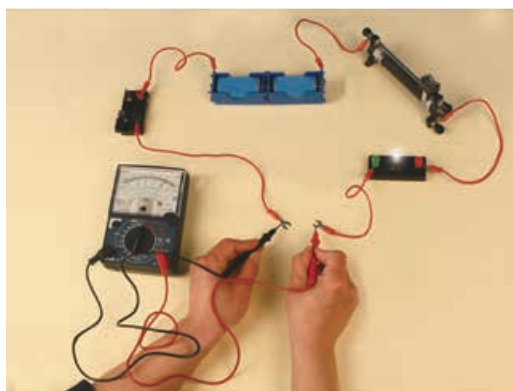
图 3-1-2 测量直流电压

### 测量直流电流

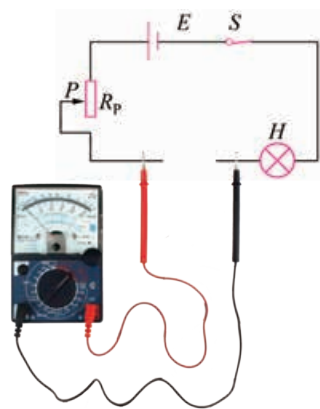
用多用电表测量直流电流时，应将多用电表串联在待测电路中，使电流从“+”插孔流入，从“-”插孔流出。多用电表直流电流挡是毫安挡，不能测量比较大的电流。

我们已经有了用多用电表测量直流电压的经验，如何用它来测量电路中的直流电流呢？

请参照图 3-1-3 所示的电路，拟定实验步骤，进行测量并做好记录。



a



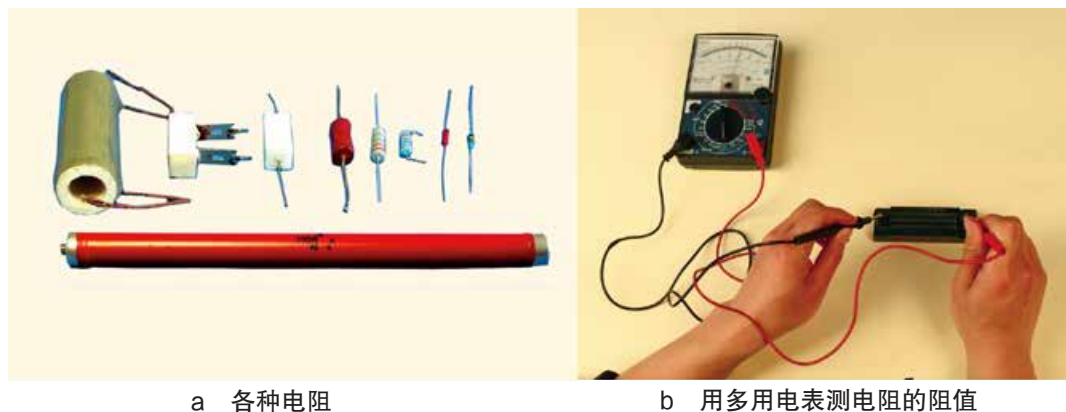
b

图 3-1-3 测量直流电流

### 测量导体的电阻

1. 图 3-1-4a 中是一些待测电阻。

选择好量程。测量前，将红、黑表笔直接接触，此时刻度盘上电阻挡的阻值应为“0”。如果不为“0”，则用调零旋钮把指针调到电阻刻度线的“0”位置上。然后，参照图 3-1-4b 所示的方法，分别测出几个电阻的阻值。



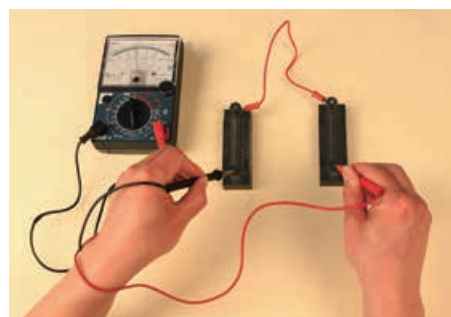
a 各种电阻

b 用多用电表测电阻的阻值

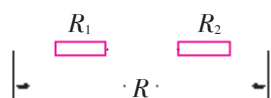
图 3-1-4 测量导体的电阻

改变电阻挡的量程时，需要重新调整电阻挡调零旋钮。电阻挡有若干个量程挡位，分别标注  $\times 1$ 、 $\times 10$ 、 $\times 100$  …… 意思是倍率。测电阻时指针示数乘以相应的倍率，就是所测电阻的阻值。

2. 参照图 3-1-5 和图 3-1-6 进行实验，测出图中所示的串联和并联电阻的总阻值并做好记录。串（并）联电阻的总阻值跟每个电阻的阻值间有何关系？

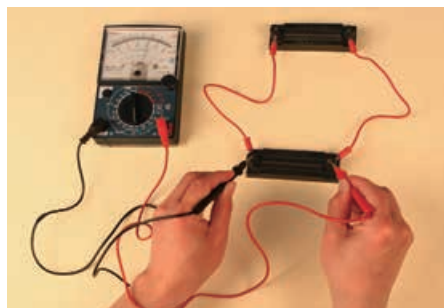


a

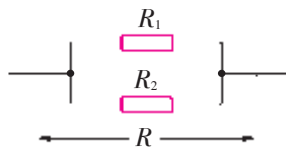


b

图 3-1-5 用多用电表测串联电阻的总阻值



a



b

图 3-1-6 用多用电表测并联电阻的总阻值

用多用电表测量电阻时，电表内部提供电源。黑表笔与表内电源的正极相连，红表笔与负极相连。

通过本节的学习和实践，请总结一下，使用多用电表测量电压、电流和电阻时，需要注意哪些问题？

### 判断晶体二极管的正负极

晶体二极管 (crystal diode) 是用半导体材料制成的电路元件，简称二极管。二极管有两根引线，一根叫正极，一根叫负极 (图 3-1-7)。

晶体二极管具有单向导电性，当电流从正极流入时电阻比较小，当电流从正极流出时则电阻就比较大。

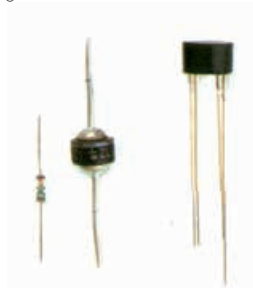
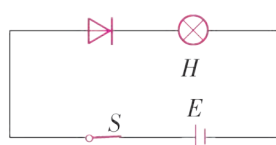
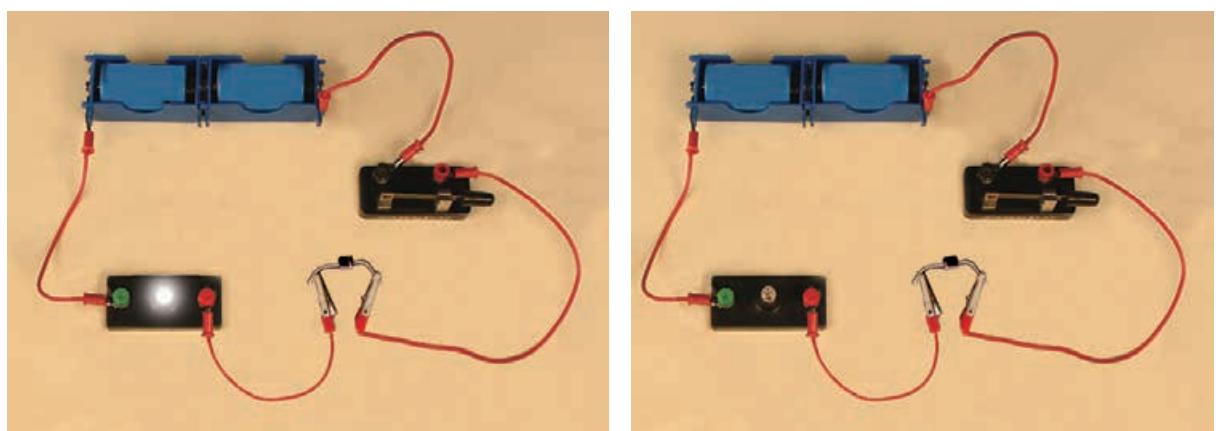


图 3-1-7 晶体二极管和它的符号

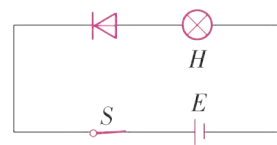
将二极管和小灯泡  $H$  按图 3-1-8a 所示的电路连接起来。闭合开关，给二极管加上正向电压，可以看到，小灯泡正常发光。将二极管的两极接线对调一下 (图 3-1-8b)，闭合开关，给二极管加上反向电压，可以看到，小灯泡不发光。

上述实验现象说明，二极管具有单向导电性。当给二极管加上一定的正向电压时，它的电阻值很小；当给二极管加上反向电压时，它的电阻值变得很大。根据二极管的这种特性，可以用多用电表来判断它的正负极。

请思考一下，使用多用电表怎样判断二极管的正负极？请实际测量一下二极管的正、反向电阻，并判别二极管的正、负极。



a 正向导通状态



b 反向截止状态

图 3-1-8 探究二极管特性的实验

## 信息浏览

## 数字式多用电表

图 3-1-9 所示的是一种用数字显示测量结果的新型电学测量仪表,通常叫做数字式多用电表。

数字式多用电表(digital multimeter)在测量有关电学量时,不仅能显示数值的大小,而且能显示单位和极性,有的还能将测量结果打印出来。还有的可以与计算机连接,通过计算机来帮助人们处理有关数据。



图 3-1-9 数字式多用电表

## 智能多用电表

图 3-1-10 所示的是一种智能多用电表。这种多用电表具有自动选择测量挡位、自动调节量程、自动开启和关闭电源等功能。

使用智能多用电表测量有关电学量时,不需要进行任何调节,测量会自动进行,测量结果以数字形式显示。这种多用电表使用十分方便,人们戏称它为“傻瓜多用电表”。



图 3-1-10 智能多用电表

## 家庭作业与活动

1. 图 3-1-11 所示为多用电表测量某一电阻、某一电压或某一电流时指针在刻度盘上停留的位置,若选择旋钮在:

- (1) “ $\times 1\text{k}\Omega$ ”位置,则所测量电阻的阻值为 \_\_\_\_\_  $\text{k}\Omega$ ;
- (2) “10V”位置,则所测量电压的值为 \_\_\_\_\_ V;
- (3) “50mA”位置,则所测量电流的值为 \_\_\_\_\_ mA。



图 3-1-11

2. 用多用电表按正确步骤测量一电路元件  $P$  的电阻,  $P$  的两端分别为  $a$ 、 $b$ , 多用电表选择开关置于  $\times 10$  倍率挡位上, 表指针指示位置如图 3-1-12 所示。

- (1) 若  $P$  是电阻, 则通过  $P$  的电流方向是 \_\_\_\_\_。为使测量比较准确, 应将选择开关旋到 \_\_\_\_\_ 倍率挡位上, 并要 \_\_\_\_\_, 再进行测量。
- (2) 若  $P$  是二极管, 用多用电表再次测量  $P$  的两端  $a$ 、 $b$ , 观察到指针偏转很小, 则 \_\_\_\_\_ 端是二极管的正极。

3. 测量一支铅笔芯的阻值。先估计一下铅笔芯的阻值, 然后再测量, 看你估计得是否准确?

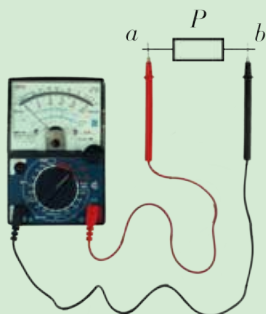


图 3-1-12

## 3.2 电流、电压和电阻

### 电流是怎样形成的

我们在初中已经知道，导体中的自由电荷朝一个方向移动就会形成“电荷流”，我们称它为电流。

为了反映电流的强弱，物理学中把流过导体某一横截面的电荷量  $Q$  跟所用时间  $t$  的比叫做电流（electric current），用  $I$  表示电流，即

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

在国际单位制中，电流的单位是安培（ampere），简称安，符号是 A。

导体中的自由电荷为什么会定向移动形成电流呢？为了简单起见，我们讨论金属导体中的电流。

### 分析与论证 电流形成的微观机理

一般情况下，金属导体中的自由电子以大约  $10^5$  m/s 的速率做永不停息的无规则热运动（图 3-2-1）。做热运动的自由电子向各个方向运动的机会相等，从宏观上看，不会形成电流。

如图 3-2-2 所示，当金属导体与电源连接，构成闭合回路时，导体中就会产生电场，导体中的自由电子就在电场力的作用下，发生定向移动，形成电流。

在不同的导体中，形成电流的自由电荷是不相同的。金属导体中的自由电荷是自由电子，电解质溶液（酸、碱、盐的水溶液）中的自由电荷是正、负离子，电离气体中的自由电荷是正、负离子和电子。

电流是有方向的，物理学规定正电荷定向移动的方向为电流的方向。

下面再从金属导体的微观结构分析电流的形成机理。如图 3-2-2 所示，假设金属导体的横截面积为  $S$ ，导体中每单位体积的自由电子数为  $n$ ，每个自由电子的电荷量为  $q$ ，自由电子定向移动的平均速率为  $v$ ，那么，在时间  $t$  内通过该横截面的电荷量的表达式  $Q = nqv t S$ 。将这个表达式代入  $I = \frac{Q}{t}$ ，就能得到通过该导体的电流的表达式  $I = nqvS$ 。

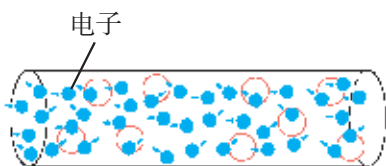


图 3-2-1 自由电子的无规则热运动

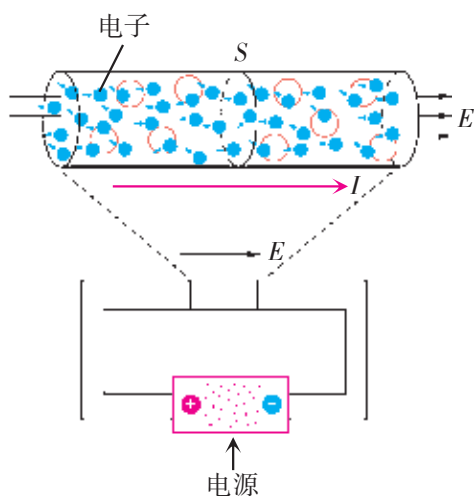


图 3-2-2 自由电子在电场力作用下的定向移动，实际上是在自由电子的速率巨大的无规则热运动上附加的一个速率很小的定向移动

### 案例分析

**案例** 现有一铜导线，横截面积为  $1 \text{ mm}^2$ 。若通过该铜导线的电流为  $2.4 \text{ A}$ ，单位体积内的自由电子数为  $8.4 \times 10^{28} \text{ m}^{-3}$ 。求自由电子定向移动的平均速率。

**分析** 根据  $I = nqvS$ ，我们可以得到  $v = \frac{I}{nqS}$ ，式中  $q$  是电子的电荷量，为  $1.6 \times 10^{-19} \text{ C}$ 。将数据代入  $v$  的表达式，便可以算出自由电子定向移动的平均速率。

上述铜导线中的自由电子定向移动的平均速率只有  $1.8 \times 10^{-4} \text{ m/s}$ ，但为什么一旦接通电路，整个电路中几乎立刻形成电流？“电”的传播速度到底有多大？

### 电路中的电压与电势降落

我们已经知道，电场中任意两点间的电势差就是电压。那么电路中的电压是怎么回事呢？

由于电流是电荷在电场力的作用下发生定向移动而形成的，我们又知道，正电荷在电场力的作用下总是从电势高处向电势低处运动，并且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是逐渐降低的，也就是沿电流方向上的任意两点间都有电势差，这就是电路中的电压（voltage）。

### 实验探究

#### 电路中电势变化的规律

参照图 3-2-3 选择器材，连接电路，先在断开电路的情况下，用多用电表测出  $R_{ea}$ 、 $R_{ab}$ 、 $R_{bc}$ 、 $R_{cd}$  的阻值。然后接通电路，先用多用电表测出路端电压  $U_{ed}$ （ $e$  点电势高于  $d$  点电势），再沿着电流方向，用多用电表测量电势差（电压） $U_{ea}$ 、 $U_{ab}$ 、 $U_{bc}$ 、 $U_{cd}$ 。最后把测量结果标在图 3-2-4 中，并分析电势变化的趋势。

实验表明，电路中沿着电流方向的电势是逐渐降低的。所以，

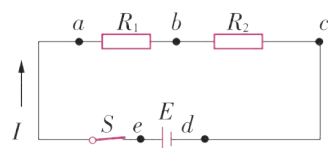


图 3-2-3 研究电势变化的电路图

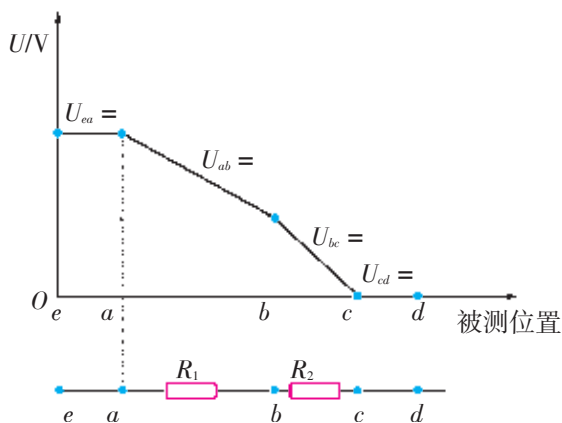


图 3-2-4 外电路中电势变化图像

电路中任意两点间的电势差（电压）又叫做电势降落。导线的电阻很小，导线中的电势降落近乎为零，常忽略不计。

### 电阻是怎样形成的

在金属导体中，除了有大量的自由电子之外，还有晶体结构点阵上的金属原子。我们把失去一些核外电子的金属原子叫做原子实（图 3-2-5）。

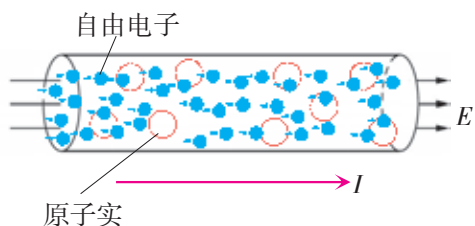


图 3-2-5 金属导体中的自由电子和原子实

金属导体中的自由电子在电场力作用下做定向运动的过程中，电场力将对自由电子做功，使电子的动能增大。同时，自由电子又不断地与晶体点阵上的原子实碰撞，将它的一部分动能传递给原子实，使原子实的热振动加剧，导体的温度就升高了。

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，这是“电阻”产生的根本原因，也是电阻在通电时发热的原因。

### 探究电阻的串联和并联

我们曾做过用多用电表测串联、并联电阻总阻值的实验。下面我们将通过分析论证的方法来研究串联、并联电路中关于电阻的定量规律。

#### 分析与论证 串联、并联电路的总电阻

在图 3-2-6 所示的串联电路中，设通过电阻  $R_1$ 、 $R_2$  的电流为  $I$ ， $R_1$ 、 $R_2$  两端的电压分别为  $U_1$ 、 $U_2$ ， $R_{\text{总}}$  为  $R_1$ 、 $R_2$  串联后的总电阻，它又叫做  $R_1$ 、 $R_2$  串联的等效电阻。

$R_1$ 、 $R_2$  两端的电压跟总电压  $U$  有什么关系？请你利用欧姆定律，导出  $R_{\text{总}}$  跟  $R_1$ 、 $R_2$  的关系式

$$R_{\text{总}} = R_1 + R_2$$

假如将  $n$  个电阻串联，则

$$R_{\text{总}} = \sum_{i=1}^n R_i$$

即串联电路的总电阻等于各个电阻之和。

在图 3-2-7 所示的并联电路中，设  $R_1$  和  $R_2$  两端的电压为  $U$ ， $R_{\text{总}}$  为  $R_1$ 、 $R_2$  并联后的总电阻。

请你利用欧姆定律，导出  $R_{\text{总}}$  跟  $R_1$ 、 $R_2$  的关系式

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

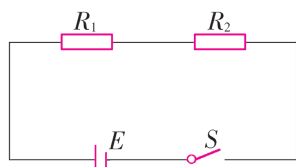


图 3-2-6 电阻串联电路图

数学中常用符号  $\Sigma$  表示求和，

即

$$R_{\text{总}} = \sum_{i=1}^n R_i = R_1 + R_2 + \cdots + R_n$$

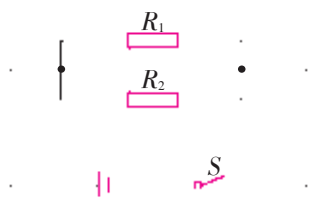


图 3-2-7 电阻并联电路图

将上式推广到  $n$  个电阻并联的情况, 则可得

$$\frac{1}{R_{\text{总}}} = \sum_{i=1}^n \frac{1}{R_i}$$

即并联电路总电阻的倒数等于并联的各电阻倒数之和。

请你将分析论证的结果, 与用多用电表测串联和并联电阻的总阻值的结果相比较, 它们相吻合吗?

### 案例分析

**案例** 怎样计算如图 3-2-8 所示的混联电路的总电阻?

**分析** 对于这个电路可以用等效电路的方法来处理。先将  $R_1$ 、 $R_2$  按照并联关系计算出它们并联后的等效阻值  $R'$ , 再把原电路转换为图 3-2-9 所示的等效电路, 这是一个  $R'$ 、 $R_3$  的串联电路。这样就可以计算混联电路的总电阻了。

**解答**

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

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

由图 3-2-9 可得

$$R_{\text{总}} = R' + R_3 = \frac{R_1 R_2}{R_1 + R_2} + R_3$$

请自行计算如图 3-2-10 所示电路的总电阻。

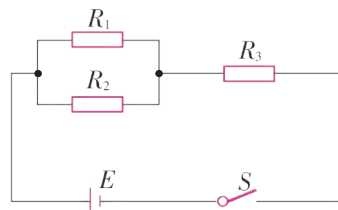


图 3-2-8 电阻混联电路图

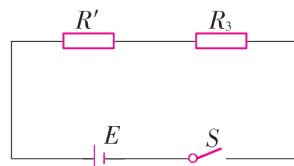


图 3-2-9 等效电路图

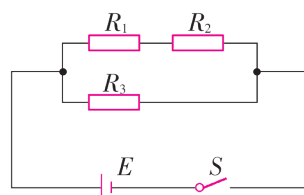


图 3-2-10 测算总电阻

### 家庭作业与活动

- 导线中的电流是  $1 \times 10^{-8}$  A, 导线的横截面积为  $1 \text{ mm}^2$ 。那么
  - 在 1 s 内, 有多少个电子通过导线的横截面 (电子电量  $e = 1.6 \times 10^{-19}$  C)?
  - 自由电子的平均移动速率是多大 (设导体每立方米内有  $8.5 \times 10^{28}$  个自由电子)?
- 在一次闪电形成过程中, 流动的电荷量大约是 300 C, 持续的时间大约是 0.005 s, 那么所形成的平均电流为多大? 这些电荷如果以 0.5 A 的电流流过灯泡, 则可供灯泡照明多长时间?
- 导体中形成电流的原因是什么? 假设用多用电表测出电路中通过一个小灯泡的电流为 0.3 A, 那么, 每秒通过灯丝横截面上的电荷量是多少?
- 请你说说电场、电势和电压三者之间的关系。在电路中, 电流从电源的正极出发, 经过用电器后回到负极, 请你比较电源正负极电势的高低。假

设某电源两极的电压为 3 V, 若选择电源的正极为零电势点, 那么, 它的负极电势是多少?

- 电路中的电势降落与电阻的关系是什么? 为什么是这种关系?
- 有一金属丝, 长 1 m, 电阻为  $15 \Omega$ 。现将金属丝两端连接, 成一闭合圆环 (图 3-2-11), 在圆环上取  $P$ 、 $Q$  两点。已知  $P$ 、 $Q$  间的短圆弧长 20 cm, 求  $P$ 、 $Q$  间的电阻值。若在  $P$ 、 $Q$  两点间加 10 V 的电压, 请计算通过  $P$ 、 $Q$  长圆弧和短圆弧的电流。

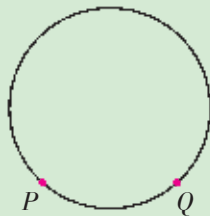


图 3-2-11



### 3.3 影响电阻的因素

在初中物理中我们知道，电阻（resistance）是导体的一种属性，它的大小跟导体的长度、横截面积和导体的材料有关，那么，它们之间到底是怎样的关系呢？

#### 探究影响电阻的因素

要探究导体电阻跟其长度、横截面积等因素的关系，关键是选择恰当的测量工具。以长度为例，我们在初中已经学过用刻度尺来测量长度，并且知道，在进行较为精密的测量时，可以选择螺旋测微器、游标卡尺（见第 125 页附录）等测量长度的工具。

#### 学生必做实验

#### 长度的测量及其测量工具的选用

以测量金属丝为例，金属丝的长度可以用常用的刻度尺测量，而金属丝的直径只有几毫米甚至不到 1 mm，为了保证测量的精确度，我们选择螺旋测微器测量金属丝的直径。

#### 认识螺旋测微器

螺旋测微器又称千分尺，是比较精密的长度测量工具。用螺旋测微器测量长度，测量范围为几个厘米，可以准确到 0.01 mm。螺旋测微器的结构如图 3-3-1 所示。螺旋测微器的活动套管和测微螺杆连成一体，活动套管周边等分成 50 个分格，螺杆的螺纹螺距为 0.5 mm。当利用旋钮和微调旋钮使活动套管旋转一圈时，测微螺杆将前进或后退 0.5 mm。因此，活动套管旋转一小分格，测微螺杆就前进或后退  $0.5 \div 50 = 0.01$  mm。



图 3-3-1 螺旋测微器

用螺旋测微器进行测量时，先读固定套管上刻度的整毫米

数和半毫米数。若半刻度线已露出，则读数加上 0.5 mm；若半刻度线未露出，则读数加上 0.0 mm。再读可动刻度数（包括估读值），并将可动刻度数乘以 0.01 mm 计入最终读数。

使用螺旋测微器前应先检查零点：缓缓转动微调旋钮，使测微螺杆和小砧接触，直到棘轮发出咔咔的响声为止。此时活动套管上的零刻度线应当和固定套管上的基准线（长横线）对准，否则会有零误差。

使用螺旋测微器测量时，左手持框架，右手转动粗调旋钮使测微螺杆与小砧间距稍大于被测物；放入被测物，转动微调旋钮使夹住被测物，直到棘轮发出咔咔的响声为止；拨动锁紧装置扳钮，使测微螺杆固定，然后读数。

请读出图 3-3-1 所示螺旋测微器的示数。

### 测量金属丝的直径

测量不同粗细金属丝的直径，并将测量结果填入下表。

镍铬导线	测量结果	
	三次直径测量结果 / mm	直径的平均值 / mm
镍铬导线 A	1	
	2	
	3	
镍铬导线 B	1	
	2	
	3	

### 思考讨论

1. 在测量金属丝直径的过程中，为什么要进行多次测量？
2. 金属丝的横截面可能不是绝对的圆，那么应该怎样对其直径进行多次测量？

研究一个物理量跟几个因素的关系时，我们常采用控制变量的方法。初中物理中研究欧姆定律和物质的比热容时，都用过这种方法。

### 实验探究

#### 电阻与材料、长度和横截面积的关系

请利用图 3-3-2 所示的器材，设计实验方案，拟定实验步骤，研究金属丝的电阻跟它的长度、横截面积和材料之间的定量关系。

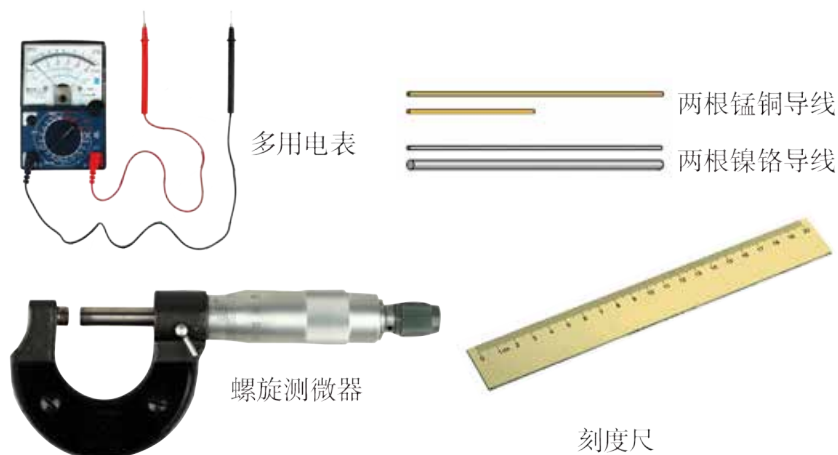


图 3-3-2 探究影响电阻的因素的实验器材

请将实验中测得的数据填入下表。

实验序号	材料	长度/m	横截面积/m <sup>2</sup>	电阻/Ω
1	锰铜导线	$L_1 =$	$S_1 =$	$R_1 =$
2	锰铜导线	$L_2 =$	$S_1 =$	$R_2 =$
3	镍铬导线	$L_1 =$	$S_1 =$	$R_3 =$
4	镍铬导线	$L_1 =$	$S_2 =$	$R_4 =$

分析表中的数据，看电阻  $R$  跟金属丝长度  $L$ 、横截面积  $S$  是什么关系？

金属丝是实验室常见的导体。大量实验表明，对同种材料的导体而言，导体的电阻跟它的长度成正比，跟它的横截面积  $S$  成反比，即

$$R \propto \frac{L}{S}$$

引入比例系数  $\rho$ ，可将上式写成

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

对于不同的材料，上式中的  $\rho$  是不同的。因此， $\rho$  反映了材料的导电性能，我们把它叫做材料的电阻率（resistivity）。电阻率的单位是  $\Omega \cdot \text{m}$ 。在一定的温度时，对同一种材料而言，电阻率是一个不变的物理量。

请利用你的实验数据，分别计算出锰铜、镍铬金属丝的电阻率  $\rho$ 。

### 多学一点

### 金属的电阻率与温度的关系

在下页的导体材料电阻率表中，为什么要标明是  $20^\circ\text{C}$  时的电阻率呢？

实验表明，纯金属的电阻率随温度的变化与纯金属电阻随温度的变化一样，也比较有规则。当温度的变化范围不大时，电阻率与温度之间近似地存在着如下的线性关系：

$$\rho = \rho_0 (1 + \alpha t)$$

式中， $\rho$  表示温度为  $t^\circ\text{C}$  时的电阻率， $\rho_0$  表示  $0^\circ\text{C}$  时的电阻率。不同材料的温度系数  $\alpha$  是不同的，大多数纯金属的  $\alpha$  值近似为  $0.004^\circ\text{C}^{-1}$ 。

在室温时，金属导体的电阻率约为  $10^{-8}\sim 10^{-6}\ \Omega\cdot\text{m}$ ，绝缘体的电阻率一般为  $10^8\sim 10^{18}\ \Omega\cdot\text{m}$ ，半导体材料的电阻率介于两者之间，为  $10^{-5}\sim 10^7\ \Omega\cdot\text{m}$ 。绝缘体和半导体的电阻率除了大小与金属导体的差别很大外，它们随温度变化的规律也与金属导体大不相同，一般都随温度的升高而急剧减小，而且变化也不是线性的。

几种导体材料在  
温度  $20^\circ\text{C}$  时的电阻率

材料	$\rho / \Omega\cdot\text{m}$
银	$1.6\times 10^{-8}$
铜	$1.7\times 10^{-8}$
铝	$2.9\times 10^{-8}$
钨	$5.3\times 10^{-8}$
铁	$1.0\times 10^{-7}$
锰铜合金	$4.4\times 10^{-7}$
镍铜合金	$5.0\times 10^{-7}$
镍铬合金	$1.0\times 10^{-6}$

### 学生必做实验 测量金属丝的电阻率

由于  $\rho = \frac{RS}{L}$ ，我们可以用它来测量某种金属丝的电阻率了。

图 3-3-3 是测量某种金属丝导体电阻率所用到的实验器材。

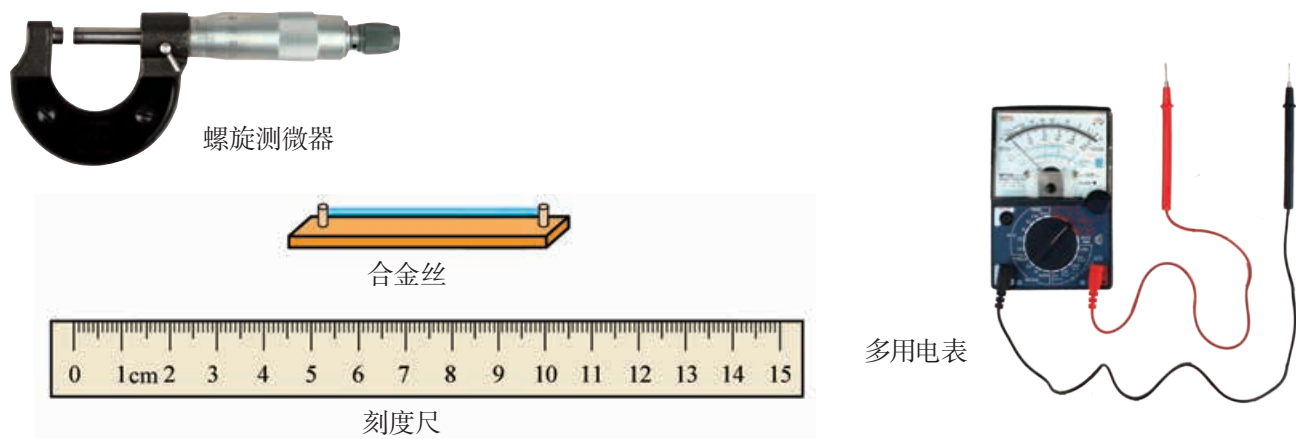


图 3-3-3 测量金属丝的电阻率

### 思考讨论

请结合前面所学内容思考和讨论下列问题：

1. 如何测量金属丝的横截面积？
2. 如何减小金属丝横截面积和长度的测量误差？

### 设计实验

根据  $\rho = \frac{RS}{L}$ ，可以设计以下实验方案：

- (1) 用刻度尺测量金属丝的长度；
- (2) 用螺旋测微器测量金属丝的直径，测算合金丝的横截面积；
- (3) 用多用电表测量金属丝的电阻；
- (4) 利用测量数据计算金属丝的电阻率。

### 收集证据

根据实验方案，请设计实验数据记录表格，并进行实验和记录实验数据。

### 分析论证

根据所记录的实验数据和测量原理，你求得的该金属丝的电阻率是多少？在网上搜索一下，看一看该金属丝是由哪种材料制成的？

## STSE

### 超导现象

1911年，荷兰物理学家卡末林-昂内斯（H. Kamerlingh-Onnes）发现，在很低温度下，水银的电阻率并不像预料的那样仍然随温度的降低逐渐减小，当温度降到4.15 K（-269℃）附近时，水银的电阻会突然降到零。后来人们发现，某些金属、合金和化合物在温度降到绝对零度（-273.15℃）附近某一特定温度之下时，其电阻率会突然减小到测量不出。这种现象叫做超导现象（superconductivity），能够发生超导现象的物质叫做超导体（superconductor）。超导体由正常状态转变为超导状态的温度，称为这种物质的转变温度（或临界温度） $T_c$ 。大多数金属元素以及数以千计的合金、化合物，在不同条件下都显示出超导性。例如，钨、锌和铅的转变温度分别为0.012 K、0.75 K和7.193 K。

经典物理理论对超导现象产生的原因无法解释。为了从微观上对这一现象进行解释，固体物理学家花费了近半个世纪的心血。直到1957年，巴丁（J. Bardeen）、库珀（L. Cooper）和施里弗（J.

Schrieffer）才建立了超导的BCS理论。为此，他们荣获1972年诺贝尔物理学奖。

我们知道，在功率较大的电磁铁或电机中，通过线圈的电流很大。为了避免产生过多热量，就必须用较粗的导线绕制线圈并采用冷却措施。如果用超导体做线圈，就可以避免这种缺陷。目前用超导体制造电机方面的研究工作已取得较大的进展。

超导现象在高能物理领域也有重要应用。用超导线圈制成的电磁铁能产生强大的磁场，在核聚变中的等离子体约束和粒子加速等方面都有很大的用处。

阻碍超导现象大规模应用的主要困难是超导所要求的低温。1986年起，科学家发现有些铜氧化物的超导转变温度比常规理论预言的温度更高，目前这类材料的转变温度已达到164 K。我们称这类超导现象为“高温超导”。2008年以来，又有一类新的铁基高温超导材料被发现。当前，我国在高温超导材料研究方面走在世界前列。

## 家庭作业与活动

1. 一根粗细均匀的金属丝, 当其两端电压为  $U$  时, 通过的电流是  $I$ 。若将此金属丝均匀拉长到原来的 2 倍时, 电流仍为  $I$ , 金属丝两端所加的电压变为 ( )。

A.  $U/2$     B.  $U$     C.  $2U$     D.  $4U$

2. 请读出下列螺旋测微器的示数。

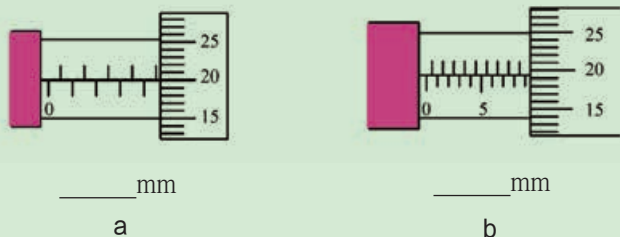


图 3-3-4

3. 用横截面积为  $0.63 \text{ mm}^2$ 、长 200 m 的铜丝绕制一个线圈。如果这个线圈允许通过的最大电流是 8.0 A, 那么它两端最多能加多大的电压?

4. 有一根长为 1.22 m 的金属丝, 横截面积为

$0.10 \text{ mm}^2$ 。在它两端加 0.6 V 电压时, 通过它的电流正好是 0.1 A。这根金属丝可能是由哪种材料制成的?

5. 神经系统中, 把神经纤维分为有髓鞘与无髓鞘两大类。现代生物学认为, 髓鞘是由多层(几千到几百层不等)类脂物质——髓质累积而成的, 髓质具有很大的电阻率。已知蛙有髓鞘神经, 髓鞘的厚度只有  $2 \mu\text{m}$  左右, 而它在  $1 \text{ cm}^2$  的面积上产生的电阻却高达  $1.6 \times 10^5 \Omega$ 。

(1) 若不计髓质各层间的接触电阻, 计算髓质的电阻率。

(2) 若有一圆柱体是由髓质制成的, 该圆柱体的体积为  $32\pi \text{ cm}^3$ , 当在其两底面加上 1000 V 的电压时, 通过该圆柱体的电流为  $10\pi \mu\text{A}$ 。求该圆柱体的底面半径和高。

## 第3章家庭作业与活动

## A 组

1. 用多用电表测电压和电阻时, 若红表笔插入多用电表的正插孔, 黑表笔插入多用电表的负插孔, 则 ( )。

A. 测量电压时, 电流从红表笔流入多用电表  
 B. 测量电压时, 电流从黑表笔流入多用电表  
 C. 测量电阻时, 电流从红表笔流入多用电表  
 D. 测量电阻时, 电流从黑表笔流入多用电表

2. 电路中有一段金属丝长为  $L$ , 电阻为  $R$ , 要使电阻变为  $4R$ , 下列方法中可行的是 ( )。

A. 将金属丝拉长至  $2L$   
 B. 将金属丝拉长至  $4L$   
 C. 将金属丝对折后拧成一股  
 D. 将金属丝两端的电压提高到原来的 4 倍

3. 用一个有“ $\times 1$ ”“ $\times 10$ ”“ $\times 1k$ ”三个欧姆挡的多用电表, 粗测一个未知电阻  $R_x$  的阻值。测量前经检查, 表的指针指在左端“0”位置上。某同学先将选择开关旋到“ $\times 10$ ”挡上, 并将两表笔短接, 调整调零旋钮, 使指针指在电阻刻度的

零位置上; 然后用两表笔分别与  $R_x$  的两端相连, 发现指针偏转角度很小。随后他进行了一系列的操作, 正确地测出了  $R_x$  的阻值。下面提供的操作步骤有:

A. 将两表笔短接  
 B. 根据表的指针读数  
 C. 将选择开关旋到“ $\times 1$ ”挡  
 D. 将选择开关旋到“ $\times 1k$ ”挡  
 E. 调节欧姆挡调零旋钮  
 F. 将选择开关旋到“OFF”挡  
 G. 将两表笔与  $R_x$  的两端相接  
 H. 将两表笔从电表插孔中拔出

请帮该同学选择合适的操作步骤并按顺序排列 \_\_\_\_\_。

4. 如图 3-A-1 所示, 厚薄均匀的矩形金属薄片边长  $ab:bc=2:1$ 。当仅将  $A$  与  $B$  接入电路时, 导体电阻为  $R_{AB}$ ; 当仅将  $C$  与  $D$  接入电路时, 导体电阻为  $R_{CD}$ 。那么  $R_{AB}:R_{CD}$  为 ( )。

A. 2:1    B. 1:2    C. 4:1    D. 1:4

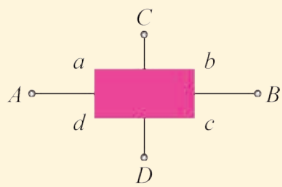


图 3-A-1

5. 当电路中的电流超过熔丝的熔断电流时, 熔丝就会熔断。由于种种原因, 一根熔丝各处的横截面积略有差别。那么熔丝熔断的可能性较大的是 ( )。
- A. 横截面积大的地方  
B. 横截面积小的地方  
C. 同时熔断  
D. 横截面积大和小的地方均有可能
6. 如图 3-A-2 所示,  $P$  是一根表面镶有很薄电热膜的长陶瓷管, 其长度为  $L$ , 直径为  $D$ , 镀膜的厚度为  $d$ 。陶瓷管两端有导电金属箍  $M$ 、 $N$ 。现把它接入电路中, 测得它两端电压为  $U$ , 通过它的电流为  $I$ , 则金属膜的电阻为多少? 镀膜材料的电阻率为多少?

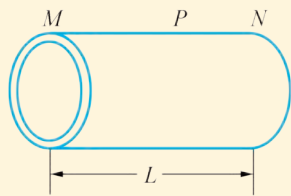


图 3-A-2

## B 组

1. 图 3-B-1 所示是某同学连接的实验电路实物图。闭合开关  $S$  后, 发现  $A$ 、 $B$  灯都不亮, 他采用下列两种方法检查故障。

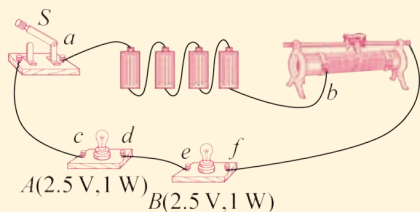


图 3-B-1

(1) 用多用电表的直流电压挡进行检查:

- ① 选择开关应置于下列量程的 \_\_\_\_\_ 挡 (用字母序号表示)。
- A. 2.5 V    B. 10 V    C. 50 V    D. 250 V

② 在测试  $a$ 、 $b$  间直流电压时, 红表笔应接触 \_\_\_\_\_ (选填 “ $a$ ” 或 “ $b$ ”)。

③ 该同学的测试结果如下表所示, 根据测试结果, 假设故障只是下列情况之一, 可以判定故障是 ( )。

- A. 灯  $A$  断路                      B. 灯  $B$  短路  
C.  $c$ 、 $d$  段断路                  D.  $d$ 、 $f$  段断路

(2) 用欧姆挡进行检查:

① 测试前, 应将开关  $S$  \_\_\_\_\_ (选填 “断开” 或 “闭合”)。

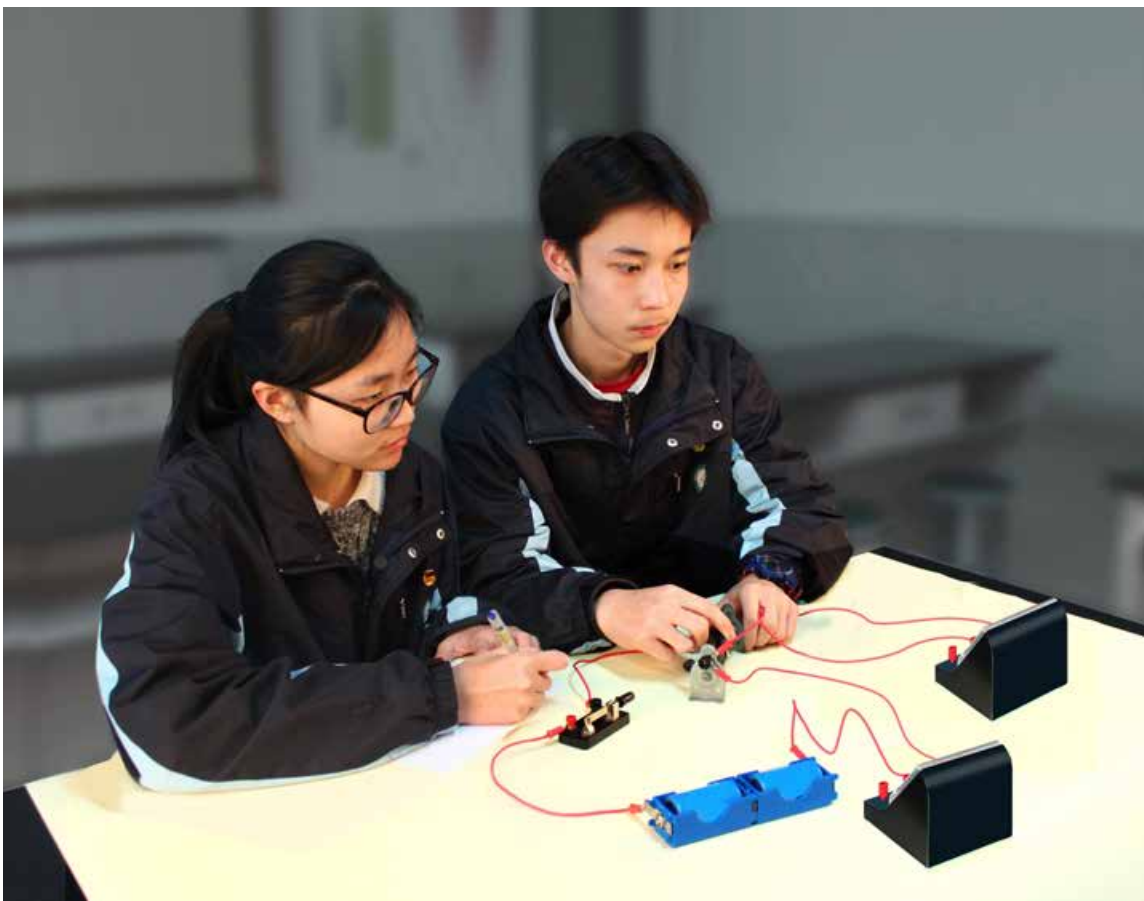
② 测量结果如下表所示, 由此可以断定故障是 ( )。

- A. 灯  $A$  断路  
B. 灯  $B$  断路  
C. 灯  $A$ 、 $B$  都断路  
D.  $d$ 、 $e$  间导线断路

测试点	电压示数
$a, b$	有示数
$c, b$	有示数
$c, d$	无示数
$d, f$	有示数

测量点	表头指针
$c, d$	
$d, e$	
$e, f$	

2. 用电流表、电压表和滑动变阻器等器材设计一个实验, 测定同长度的 “2B” 和 “H” 型号铅笔芯的电阻。把多次测量的电流表和电压表的读数记录在表格中, 并在同一张坐标纸上画出两种铅笔芯的  $U-I$  图像, 比较两种型号铅笔芯的  $U-I$  图像, 测算它们的电阻。



## 第4章 闭合电路欧姆定律

在第3章中，我们研究了多用电表测量电压、电流和电阻的原理，这些测量均未涉及电源内部。通常，把不涉及电源的电路叫做部分电路（partial circuit），把含有电源的电路叫做闭合电路（closed circuit），也叫做全电路。

电源在闭合电路中起什么作用呢？闭合电路中的电流、电压和电阻等物理量有怎样的关系呢？

本章将通过实验探究和分析论证，研究电源的性质与作用，探究闭合电路欧姆定律，进一步激发探究的欲望，学习图像法处理实验数据与获得结论，培养实验设计和分析论证的能力；再用这一定律分析多用电表的欧姆挡电路，解决有关的实际问题，分析闭合电路中能量的转化与守恒问题；最后通过分析家庭电路中的实际问题，进一步学习生活实际中安全用电与节约用电的知识。



## 4.1 闭合电路欧姆定律

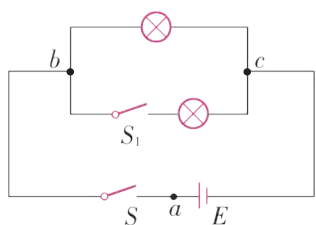


图 4-1-1 测量路端电压电路图

用导线把电源、用电器连成一个如图 4-1-1 所示的闭合电路。其中用电器和导线组成了外电路，电源内部是内电路。

我们将外电路两端（即电源两极）的电压称为路端电压（terminal voltage），电源内部的电压称为内电压。

在闭合电路中，内、外电压间有什么关系呢？下面通过实验来进行研究。

### 测量闭合电路的路端电压和内电压

#### 实验探究 1 用多用电表测量路端电压

请参照图 4-1-1 所示的电路选择器材，连接电路，并按下面的实验步骤进行操作。

(1) 闭合  $S$ ，断开  $S_1$ ，用多用电表测量  $b$ 、 $c$  两端的电压  $U_{bc}$ （图 4-1-2 a）。

(2) 闭合  $S$  和  $S_1$ ，用多用电表测量  $b$ 、 $c$  两端的电压  $U_{bc}'$ （图 4-1-2 b）。

(3) 断开  $S$  和  $S_1$ ，用多用电表测量  $a$ 、 $c$  两端的电压  $U_{ac}$ （图 4-1-2 c）。

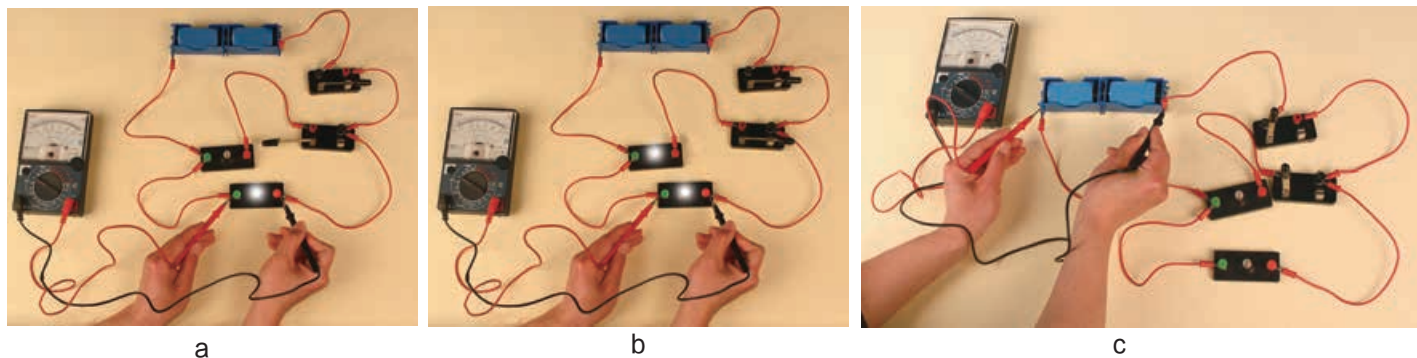


图 4-1-2 实测路端电压

实验表明， $U_{bc}$  和  $U_{bc}'$  均比  $U_{ac}$  小，且  $U_{bc}'$  更小，这是什么原因呢？

#### 实验探究 2 测电源内部的电压

图 4-1-3 是实验室的一种可调内阻的化学电池。A、B 为电池的正、负极，C、D 为靠近正、负极的两个探极，用于测量电池内部的电压。向电池内打气，可以改变电解质溶液液面的高低，从而改变电池的内阻。可调内阻电池的内阻一般较大。图 4-1-4 是实验电路图。下面向你提供某小组同学利用这个装置进行实

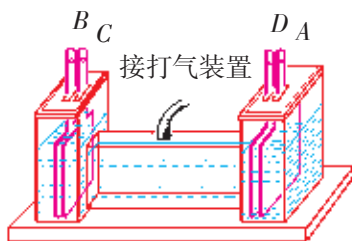


图 4-1-3 可调内阻电池结构示意图

验所收集到的数据记录，供你参考。同时，请你参照图 4-1-4 进行实验，并仿照下面的表格填写你所收集到的实验数据。你得出的结论是什么？

实验数据记录

实验序号	1	2	3	4	5	6
$U_{\text{外}}/V$	1.92	1.80	1.72	1.59	1.49	
$U_{\text{内}}/V$	0.12	0.22	0.32	0.42	0.51	

实验表明，电源内部确有电势降落。请算一算同一个电源的闭合电路的内电压与外电压之和，你能得出什么结论？

## 电源的作用——电动势

### 分析与论证 电源内部的能量转化与守恒

我们从上面的实验中发现，对同一电源，闭合电路的  $U_{\text{外}} + U_{\text{内}}$  是一个恒量。若用符号  $E$  表示这个恒量，则  $E = U_{\text{外}} + U_{\text{内}}$ 。

$E$  是表示电源特性的一个重要物理量，那么它的物理意义是什么呢？

如图 4-1-4 所示，由于电源两端有电压，在外电路中，正电荷在电场力的作用下，由电源的正极向电源的负极做定向移动，从而形成了电流（在金属导体中是电子由负极向正极移动）。

要使电路中有持续恒定的电流，就必须保持电源的正、负极间有持续电压。电源的作用就是使正电荷不断地由电源的负极移动到正极，以保持电源两极之间的电压。这好比小朋友在玩游戏时，将小球从地面搬至滑梯上面，再让小球从滑梯上滑至地面（图 4-1-5）。为了保持总有小球从滑梯上滑下，小朋友必须不断地将小球从地面搬至滑梯上。小朋友对小球做功，

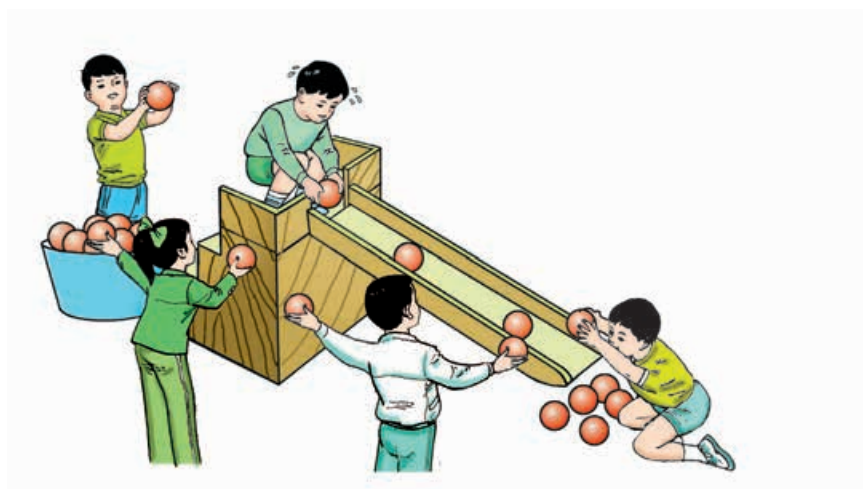


图 4-1-5 小朋友不断地把小球从地面搬至滑梯上

在实验探究 2 中，最好用内阻很大的数字式电压表或多用电表的电压挡测量内电压。

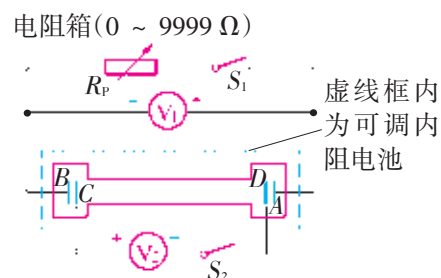


图 4-1-4 测电源内电压的电路图

非静电力是指除静电力外，其他能对电荷起作用的力。例如，在干电池、蓄电池等化学电池中，溶液里的离子对电荷的化学亲和力，发电机中的电磁力等，都是非静电力。

使小球重力势能增加。

在电源内部，要使正电荷从负极移至正极，靠静电力不可能，因此只有依靠非静电力  $F_{\text{非}}$  对电荷做功以增加电荷的电势能。可见，电源是把其他形式的能转化为电能的装置。化学电池把化学能转化成电能，发电机把机械能转化成电能。

依据能量转化与守恒的观点，电源内部非静电力所做的功应当等于电场力在外电路与内电路所做的功之和，即

$$qU_{\text{外}} + qU_{\text{内}} = W_{\text{非}}$$

从前面的实验中已经知道  $E = U_{\text{外}} + U_{\text{内}}$ ，由此，我们可以得出

$$E = \frac{W_{\text{非}}}{q}$$

这个式子表明， $E$  就是电源内部非静电力移送单位电荷所做的功，物理学中把它叫做电源的**电动势**（electromotive force）。在国际单位制中， $E$  的单位是伏〔特〕。

电源的电动势是电源的重要参数，它跟电源的容量和外电路无关。

## 闭合电路欧姆定律

上述实验探究和分析论证均表明，电源的电动势等于闭合电路中内、外电压之和，即

$$E = U_{\text{外}} + U_{\text{内}}$$

若用  $R$  表示外电路的电阻， $r$  表示电源的内电阻（internal resistance，简称内阻），由部分电路欧姆定律可知，

$$U_{\text{外}} = IR, \quad U_{\text{内}} = Ir$$

代入上式得

$$E = IR + Ir$$

整理后得到

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

上式表明：闭合电路中的电流跟电源的电动势成正比，跟内、外电路的电阻之和成反比。这个结论叫做闭合电路欧姆定律（Ohm's law for closed circuit）。

请思考：1. 当外电路断开时，电源的路端电压  $U_{\text{外}}$  跟电源的电动势  $E$  之间有什么关系？利用这个关系，你能用多用电表粗测电源（如干电池）的电动势吗？

2. 当外电路短路时，为什么会烧坏电源，甚至引起火灾？

### 案例分析

**案例** 在图 4-1-6 所示的电路中,  $R_1$ 、 $R_2$ 、 $R_3$  和  $R_4$  都是定值电阻,  $R_p$  是可变电阻, 电源的电动势为  $E$ , 内阻为  $r$ 。设电路中的总电流为  $I$ , 电流表的示数为  $I'$ , 电压表的示数为  $U$ 。闭合开关  $S$ , 当  $R_p$  的滑片  $P$  向  $a$  端移动时 ( )。

- A.  $I'$  变大,  $U$  变小
- B.  $I'$  变大,  $U$  变大
- C.  $I'$  变小,  $U$  变大
- D.  $I'$  变小,  $U$  变小

**分析** 一般认为, 内电阻可以忽略不计的电流表和内电阻可以视为无穷大的电压表为理想电表。当滑片  $P$  向  $a$  端移动时,  $R_p$  减小, 外电路总电阻也随着减小。由  $I = \frac{E}{R+r}$  知, 电路中的总电流  $I$  增大。由  $U = E - Ir$  知, 路端电压  $U$  减小, 即电压表的示数减小。同时,  $I$  的增大使  $R_1$  与  $R_3$  两端的电压  $U_1$  和  $U_2$  增大, 而  $U = U_1 + U_{ab} + U_3$ , 故  $U_{ab}$  必减小, 通过电流表的电流  $I'$  也减小, 选项 D 正确。

这一案例是一个动态电路问题。从分析可知, 外电路的部分变化会引起整个闭合电路的变化。通常, 外电路中只要有一个电阻增大 (或减小), 外电路的总电阻就增大 (或减小), 总电流减小 (或增大), 路端电压增大 (或减小)。由此可再进一步分析电路其他部分的变化。

请思考: 当  $P$  向  $a$  移动时,  $R_p$  减小,  $R_p$  两端电压也减小, 通过  $R_p$  的电流如何变化?

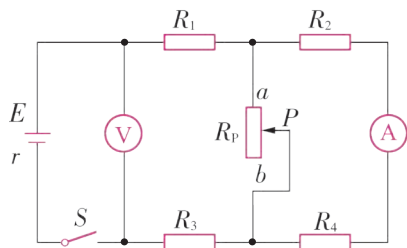


图 4-1-6 研究电路中电流、电压变化的电路

### 信息浏览

#### 电池与电动势

常见的化学电池、太阳能电池、温差电池、核电池等都是电源。最早的电池是伏打发明的“伏打电堆”。近代电子工业和航天工业的发展, 促进了新型电池的研制。1941 年法国人安德烈 (H. Andre) 研制出实用性银锌电池; 1958 年英国人培根 (F. Bacon) 研制出高功率氢燃料电池, 这种电池后来被成功地用于美国“阿波罗”号登月飞船中;

20 世纪 70 年代前半期, 美、法、日等国家研制出高能量锂电池。

“电动势”是电池的一个重要参数, 它取决于电极、电解液材料的性质, 与电池的大小无关。电池的另一个重要参数是内阻, 它取决于电极板面积和电解质的性质。电池还有一个重要参数“容量”, 它表示电池能输出的总电荷量, 通常用 Ah (安 [培] 小时) 做单位。

## 家庭作业与活动

1. 图 4-1-7 所示的是甲、乙两种型号电池的外壳上的说明文字。甲电池的电动势是\_\_\_\_\_V；乙电池最多可放出\_\_\_\_\_mAh 的电量，若该

电池平均工作电流为 0.03 A，则最多可使用\_\_\_\_\_h。图中还提供了哪些信息？你能说明这些信息的物理意义吗？

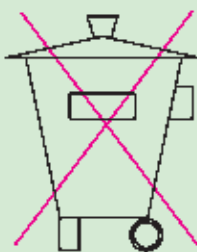
	甲型号电池	乙型号电池
	RECHARGEABLE	GNYO.6(KR—AA)
	1.2 V 600 mAh	1.2 V 600 mAh
	STANDARD	RECHARGEABLE
	CHARGE	STANDARD CHARGE
	15 h ac 50 mA	15 h ac 60 mA

图 4-1-7

2. 某同学在图 4-1-8 所示的研究闭合电路欧姆定律的实验中，保持电池内阻不变，改变  $R_p$  的阻值，记录了 8 次实验数据，如下表。请利用这些数据算出此电源的电动势  $E =$  \_\_\_\_\_V，内阻  $r =$  \_\_\_\_\_ $\Omega$ 。

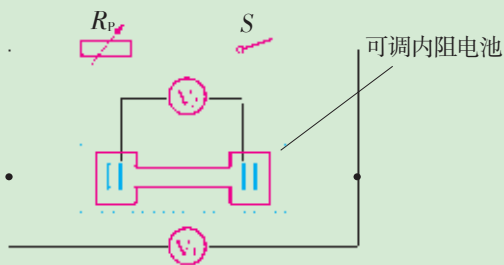


图 4-1-8

$R_p / \Omega$	2	3	10	20	25	30	40	50
$U_{外} / V$	0.14	0.32	0.57	0.89	1.03	1.10	1.24	1.37
$U_{内} / V$	1.94	1.75	1.50	1.18	1.04	0.97	0.83	0.71

3. 电源的电动势为 4.5 V，内电阻为 0.5  $\Omega$ ，外电路接一个 4.0  $\Omega$  的电阻。这时电源两端的电压为多少？
4. 用电动势  $E = 6$  V、内阻  $r = 4$   $\Omega$  的直流电源对“6 V，9 W”的电珠供电。这时流过电源的电流为多少？

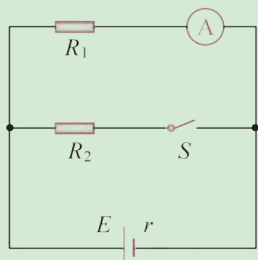


图 4-1-9

5. 图 4-1-9 所示的电路中，电阻  $R_1 = 6$   $\Omega$ ， $R_2 = 3$   $\Omega$ 。开关 S 断开时，电流表的示数

为 0.9 A；开关 S 闭合时，电流表的示数为 0.8 A。求电源电动势和内阻。

6. “神舟”七号发射成功，实现了中国人太空行走的梦想。“神舟”七号在太空中可以利用太阳能电池板供电。已测得一太阳能电池板的开路电压（电动势）为 800 mV，短路电流为 40 mA。若将该电池板与一阻值为 60  $\Omega$  的电阻器连成一闭合电路，则它的路端电压是（ ）。
- A. 0.1 V    B. 0.2 V    C. 0.4 V    D. 0.6 V

## 4.2 闭合电路欧姆定律的应用

### 测量电源的电动势和内电阻

电源的电动势  $E$  和内阻  $r$  是反映电源特征的两个重要的物理量。在电源的设计、生产、使用和维护中，常常需要对它们进行测量。若采用上节介绍的测电源内电压的方法，在许多情况下是不可行的。因此需要设计合适的实验电路，选择实验器材进行实验，还需要科学地处理数据，才能得到满意的结果。

#### 学生必做实验

#### 测量电源的电动势和内阻

#### 设计实验

图 4-2-1 是一个用伏安法测电源的电动势和内阻的电路。

这个电路的设计思想是：实验时，不需要测  $U_{\text{内}}$ ，只需改变  $R_p$  的阻值测两次  $U_{\text{外}}$  和通过电源的电流  $I$ ，由闭合电路欧姆定律建立方程组

$$E = U_1 + I_1 r$$

$$E = U_2 + I_2 r$$

解此方程组式便可求出电源的电动势  $E$  和内阻  $r$ 。

你能选用不同的器材，设计出其他的电路吗？

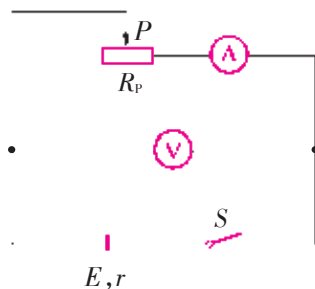


图 4-2-1 测量电源电动势和内阻的电路

#### 收集证据

#### 测量电源的电动势和内阻

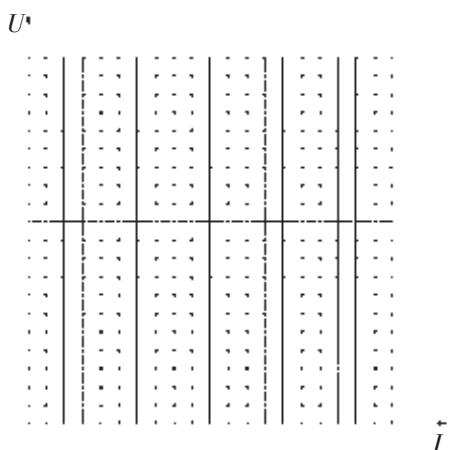
请参照图 4-2-1 所示的电路，拟定实验步骤，进行实验，将测得的数据填入下表。

实验序号	1	2	3	4	5	6	7	8
$U/V$								
$I/A$								

请分别测量不同大小的 AA 型干电池，如 1 号、2 号、5 号、7 号电池，比较它们的电动势的大小。

#### 分析论证

为了求出电源的电动势  $E$  和内阻  $r$  的值，原则上只要用实验测得的两组  $I$ 、 $U$  数据，代入上面的方程组求解便可。这样做

图 4-2-2  $U-I$  图像

虽简单,但误差可能很大。怎样科学地处理实验测得的数据以减小误差呢?

**方法一** 充分运用实验测得的  $I$ 、 $U$  数据。通过上述方程组,多求出几组  $E$ 、 $r$  值,再求其平均值。这比只用一组数据求得结果的误差要小。

**方法二** 在坐标纸上,以  $I$  为横坐标,  $U$  为纵坐标,选取适当比例,用测得的电流  $I$  和外电压  $U$  的值,画出  $U-I$  图像。由于  $U = E - Ir$  中的  $E$ 、 $r$  是确定值,  $U$  与  $I$  是一次函数关系,故  $U-I$  应是一条直线。但因实验误差,实测数据的点不会严格地分布在同一条直线上。我们可以根据坐标纸上点的分布情况,用直尺画出一条最接近各个点的直线。

请将你测得的数据,在图 4-2-2 中的坐标纸上画出  $U-I$  图像,并讨论:应怎样画这条直线?怎样利用这条直线,获得  $E$  和  $r$  的值?这样做有什么好处?

### 案例分析

**案例** 用电阻箱和一只高阻值的电压表,可以测出电源的电动势和内阻。按图 4-2-3 所示连接电路,先闭合  $S_1$ ,从电压表中读得  $U_1 = 2\text{ V}$ ;再闭合  $S_2$ ,改变电阻箱的电阻,当  $R = 24\ \Omega$  时,  $U_2 = 1\text{ V}$ 。请根据上述数据计算电源的电动势  $E$  和内阻  $r$ 。

**分析** 开关  $S_1$  闭合时,电压表测得的是电源没有接入电路时两极上的电压,即为电动势

$$E = U_1 = 2\text{ V}$$

开关  $S_2$  闭合时,干路中电流为

$$I = \frac{U_2}{R} = \frac{1}{24}\text{ A}$$

而电动势为

$$E = I(R + r)$$

代入有关数据,解得内阻  $r = 24\ \Omega$ 。

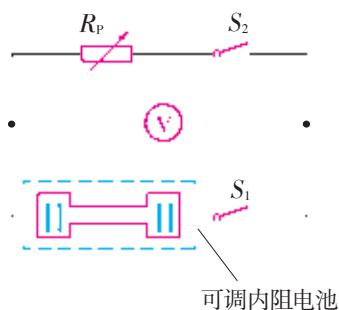


图 4-2-3 用电阻箱测电源电动势和内阻电路图

### 多用电表测量电阻的原理

用多用电表测量电阻的阻值时,先要将红、黑表笔相接触,进行电阻挡调零,再在红、黑表笔间接入被测电阻,就可以通过刻度盘的示数直接读出电阻值。为什么通过刻度盘能直接读出电阻值呢?

图 4-2-4 是多用电表电阻挡的电路图。设表头的满偏电流为  $I_g$ ,内阻为  $R_g$ ;电池的电动势为  $E$ ,内阻为  $r$ ;可变电阻为  $R_p$ (调零电阻)。因此欧姆表的内阻  $R_0 = r + R_g + R_p$ 。

当红、黑表笔相接触时(图4-2-4a),被测电阻  $R_x = 0$ 。调节调零电阻  $R_p$  的阻值,使表头的指针指到满刻度。在刻度盘上,把指针所指的电流满偏的位置,定为电阻刻度的“0”点。

当红、黑表笔不接触时(图4-2-4b),被测电阻  $R_x \rightarrow \infty$ ,电表没有电流,表头的指针不偏转,把此时指针所指的位置定为电阻刻度的“ $\infty$ ”点。

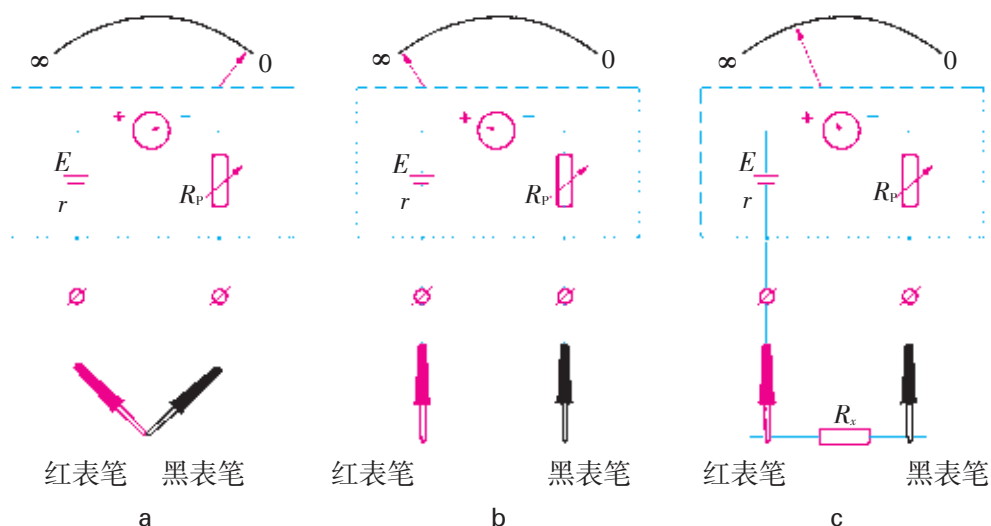


图 4-2-4 多用电表电阻挡的电路图

当红、黑表笔间接入被测电阻  $R_x$  时(图4-2-4c),通过表头的电流

$$I = \frac{E}{r + R_g + R_p + R_x}$$

式中,表头内阻  $R_g$ 、电池内阻  $r$  都是确定值,调零电阻  $R_p$  在测量前已调整好。用  $R_0$  表示  $r + R_g + R_p$ , 则可得

$$I = \frac{E}{R_0 + R_x}$$

由此可见,电流  $I$  随着被测电阻  $R_x$  的改变而变化。每个  $R_x$  值都对应着一个  $I$  值。在刻度盘上直接标出与  $I$  值对应的  $R_x$  值(图4-2-5),就可以直接读出被测电阻的阻值了。

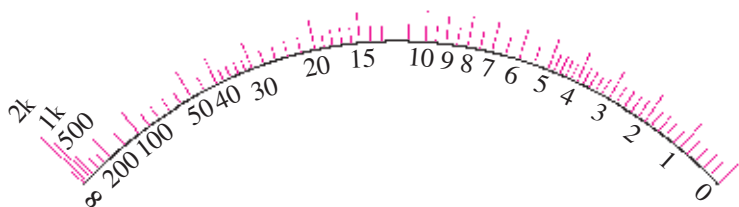


图 4-2-5 欧姆挡的刻度盘

欧姆挡刻度盘上的刻度为什么是不均匀的?

是否每次测量电阻时,都要先调节调零电阻  $R_p$ ?



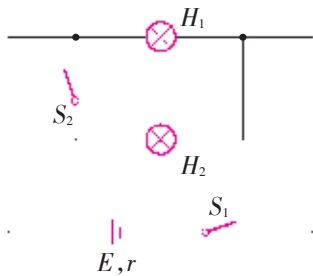


图 4-2-6 案例分析电路

### 案例分析

**案例** 如图 4-2-6 所示, 电源的电动势为 3 V, 内阻为 1  $\Omega$ ; 两个相同的小灯泡  $H_1$  和  $H_2$  的额定电压均为 2.5 V, 额定电流均为 0.3 A。

(1) 当开关  $S_1$  闭合,  $S_2$  断开时, 试计算  $H_1$  中的电流和加在  $H_1$  上的电压。

(2) 当开关  $S_1$ 、 $S_2$  都闭合时, 试计算  $H_2$  中的电流和加在  $H_2$  上的电压。

有同学做了如下解答:

(1) 小灯泡  $H_1$  和  $H_2$  的电阻均为

$$R = \frac{2.5}{0.3} \Omega = 8.33 \Omega$$

$$\text{干路中电流 } I = \frac{E}{R+r} = \frac{3}{8.33+1} \text{ A} = 0.32 \text{ A}$$

小灯泡  $H_1$  上的电压即为路端电压

$$U = E - Ir = (3 - 0.32 \times 1) \text{ V} = 2.68 \text{ V}$$

(2) 因小灯泡  $H_2$  与小灯泡  $H_1$  并联, 小灯泡  $H_2$  上的电压

$$U = 2.68 \text{ V}, \text{ 小灯泡 } H_2 \text{ 中的电流 } I_2 = \frac{U}{R_2} = \frac{2.68}{8.33} \text{ A} = 0.32 \text{ A}$$

你认为这位同学的解答正确吗? 为什么?

请把你的想法说出来, 并与同学进行交流。再把你的解答过程写出来。

### 家庭作业与活动

1. 图 4-2-7 为一太阳能电池板示意图, 现测得它的电动势为 0.80 V, 内阻为 10  $\Omega$ 。若将此电池板与一阻值为 30  $\Omega$  的电阻连成一闭合电路, 则此太阳能电池板的路端电压是多少?

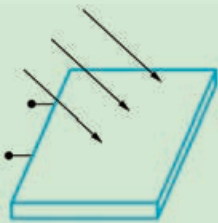


图 4-2-7

2. 在闭合电路中, 下列叙述中正确的是 ( )。
- 闭合电路中的电流跟电源电动势成正比, 跟整个电路的电阻成反比
  - 当外电路断开时, 路端电压等于零
  - 当外电路短路时, 电路中的电流趋近于无穷大
  - 当外电阻增大时, 路端电压也增大
3. 图 4-2-8 所示是某电源的  $U-I$  图像。关于此图像, 下列说法中正确的是 ( )。

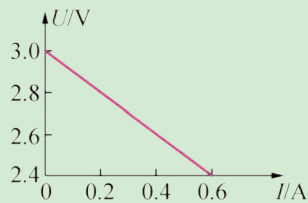


图 4-2-8

- 纵轴的截距表示电源的电动势, 即  $E = 3.0 \text{ V}$
  - 横轴的截距表示电源的短路电流, 即  $I_{\text{短}} = 0.6 \text{ A}$
  - 电源的内阻  $r = 5 \Omega$
  - 电源的内阻  $r = 1.0 \Omega$
4. 关于欧姆表及其使用中的问题, 下列说法中正确的是 ( )。
- 接表内电源负极的应是黑表笔
  - 换挡后, 都要重新调节调零电阻, 使指针指



## 4.3 电路中的能量转化与守恒

在初中物理中我们知道，能量转化与守恒定律是自然界的普遍规律。那么，闭合电路中能量是怎样转化的呢？

### 电功与电热关系的分析

#### 电功和电功率的普遍表达式

我们知道，在导体两端加上电压，导体中就会产生电场，导体中的自由电荷在电场力的作用下就会发生定向移动从而形成电流。在这一过程中电场力对电荷做功，这个功叫做**电功**（electric work）。

由前面学过的知识知道，电场力对电荷  $q$  所做的功为  $W = qU$ ，而  $q = It$ ，所以

$$W = U I t$$

上述电功公式表示，一段电路上的电功就等于这段电路两端的电压、电路中的电流和通电时间的乘积。

根据上式，可得出**电功率**（electric power）的计算公式：

$$P = U I$$

我们已经知道，功是能量转化的量度，电场力做功的过程就是电能转化为其他形式能的过程，电场力做了多少功，就有多少电能转化为其他形式的能。

#### 电功和电热

电场力做功时，究竟电能会转化为哪些形式的能呢？这要看电路中有哪些用电器或元器件。只含白炽灯、电炉等电热元件的电路叫纯电阻电路。在纯电阻电路中，电场力做功时，电能几乎全部转化为内能（热能）。那么，电功跟电热间有什么关系呢？

在初中物理中我们知道，**电流通过导体时产生的热量跟电流的平方成正比，跟导体的电阻成正比，跟通电时间成正比**。它的数学表达式是

$$Q = I^2 R t$$

这个规律叫做**焦耳定律**（Joule's law），是英国物理学家焦耳（J. Joule）于1840年在大量实验的基础上总结出来的。通常把电流流过导体时产生的热量称为**电热**，有时也叫做**焦耳热**。

单位时间内电流通过导体发出的热叫做**热功率**，其表达式为

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

$P = UI$  式中的  $UI$  是指输入某段电路的全部电功率，它取决于这段电路两端的电压和通过这段电路的电流。上式中  $I^2 R$  是指在这段电路上发热的热功率，它取决于通过这段电路的电流和电阻。

在纯电阻电路中，电能全部转化为内能。对于非纯电阻电路，电能除转化为内能以外，还将转化为其他形式的能。例如，当电路中有电动机时，电能转化为内能和机械能；当电路中有电解槽时，电能转化为内能和化学能。

请思考并讨论：

1. 通过  $I = \frac{U}{R}$  进行变换，计算电功的公式有  $W = UIt$ ， $W = I^2 R t$  和  $W = \frac{U^2}{R} t$ 。试说明它们的区别、联系及适用范围。

2. 通过  $I = \frac{U}{R}$  进行变换，计算电功率的公式有  $P = \frac{W}{t}$ ， $P = UI$  和  $P = I^2 R$ ， $P = \frac{U^2}{R}$ 。试说明它们的区别、联系及适用范围。

### 案例分析

**案例** 电动机的额定电压为 220 V，其线圈的电阻为 0.8  $\Omega$ 。设正常工作时，每秒产生的热量为 1280 J，则正常工作时的电流为多大？每秒有多少焦 [耳] 的电能转化为机械能？

**分析** 本案例涉及电路中能的转化问题：电路中的电动机通电后具有机械能，同时电动机在运转过程中，其线圈会发热，也要消耗能量。电动机的机械能和热能都是由电源的电能转化而来的。应注意的是，电路中有电动机，故这是非纯电阻电路问题。应先根据电动机产生的热能算出通过线圈的电流；再根据电功率的有关公式，可算出电动机的输入功率，将输入功率减去转化为热能的功率，就是电能转化为机械能的功率了。

请按上述分析，完成有关计算。

### 闭合电路中的能量转化与守恒

根据闭合电路欧姆定律， $E = U_{\text{外}} + U_{\text{内}}$ 。如果在等式两边同时乘以电流  $I$ ，则变为

$$EI = U_{\text{外}} I + U_{\text{内}} I$$

上式中， $E I$  表示电源产生的电功率， $U_{\text{外}} I$  表示外电路上消耗的电功率， $U_{\text{内}} I$  表示内电路上消耗的电功率。这说明电源产生的

电能，一部分消耗在外电路上，转化为其他形式的能；另一部分消耗在内电路上，转化为内能，而总的能量是守恒的。它完全符合能量转化与守恒定律。

从上式还可以看出，电动势  $E$  越大，电源提供的电功率也越大，这表示电源把其他形式的能转化为电能的本领就越大。

电源的总功率为

$$P_{\text{总}} = EI$$

电源的输出功率为

$$P_{\text{出}} = U_{\text{外}}I$$

电源的效率为

$$\eta = \frac{U_{\text{外}}I}{EI} \times 100\% = \frac{U_{\text{外}}}{E} \times 100\%$$

### 案例分析

**案例** 如图 4-3-1 所示，已知发电机的内阻  $r = 0.1 \Omega$ ，输电导线的电阻  $r' = 0.2 \Omega$ ，负载电阻  $R = 22 \Omega$ ，电路中电流  $I = 10 \text{ A}$ 。求：（1）负载两端的电压；（2）外电路上的电压；（3）发电机的电动势；（4）整个外电路上消耗的功率；（5）负载上消耗的功率；（6）导线上消耗的功率；（7）发电机内部消耗的功率；（8）发电机的功率。

**分析** 负载两端的电压可由电流  $I$  和负载电阻  $R$  求得，即

$$U_R = IR = 10 \times 22 \text{ V} = 220 \text{ V}$$

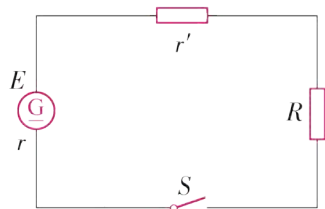


图 4-3-1 含发电机电路

请自行完成其余部分的分析和计算。

通过上述案例分析和计算，你得到了哪些启发？譬如，外电路上的功率、负载上的功率和导线上的功率三者之间有什么关系？发电机功率、外电路功率和内电路功率三者之间有什么关系？这些关系说明了什么？

### 家庭作业与活动

#### 1. 试证明：

- (1) 在纯电阻电路中，串联电路上消耗的总功率  $P = UI$  等于各个电阻上消耗的热功率之和。
- (2) 在纯电阻电路中，并联电路上消耗的总功率  $P = UI$  等于各个电阻上消耗的热功率之和。

#### 2. 如图 4-3-2 所示，电源的电动势是 $6 \text{ V}$ ，内阻

是  $0.5 \Omega$ ，小电动机  $M$  的线圈电阻为  $0.5 \Omega$ ，限流电阻  $R_0$  为  $3 \Omega$ 。若闭合开关  $S$  后，电压表的示数为  $3 \text{ V}$ ，试求：

- (1) 电源的功率和输出功率。
- (2) 电动机消耗的功率和电动机输出的机械功率。电动机在工作时，每分钟消耗多少电能？产生多少电热？

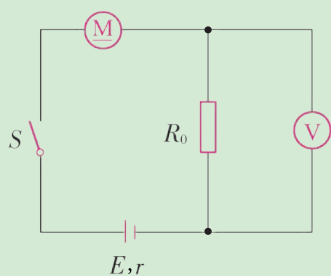


图 4-3-2

3. 一直流电动机所加电压为  $U$ ，电流为  $I$ ，线圈内阻为  $R$ 。当它工作时，下列说法中错误的是( )。

- A. 电动机的输出功率为  $\frac{U^2}{R}$
- B. 电动机的发热功率为  $I^2R$
- C. 电动机的输出功率为  $IU - I^2R$
- D. 电动机的功率为  $\frac{U^2}{R}$

4. 如图 4-3-3 所示，用电动势为  $8\text{ V}$ 、内阻为  $2\ \Omega$  的电池组连接两根阻值各为  $1\ \Omega$  的电阻线，向某用电器(纯电阻)供电，该用电器可获得  $3\text{ W}$  的电功率。求通过该用电器的电流和它两端的电压。

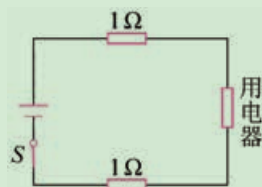


图 4-3-3

5. 把两个相同的电灯分别接成如图 4-3-4 所示的两种电路，调节变阻器，使电灯都正常发光。若两电路消耗的总功率分别为  $P_1$ 、 $P_2$ ，两个变阻器  $R_1$ 、 $R_2$  消耗的电功率分别为  $P_1'$ 、 $P_2'$ ，则可以判定( )。

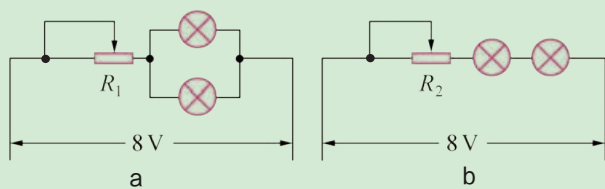


图 4-3-4

- A.  $P_1 = P_2$
- B.  $P_1' = P_2'$
- C.  $P_1' = 2P_2'$
- D.  $P_1' > 2P_2'$

6. 图 4-3-5 中虚线框内是一个未知电路，测得它的两端点  $a$ 、 $b$  之间的电阻是  $R$ 。在  $a$ 、 $b$  之间加上电压  $U$ ，测得流过此电路的电流为  $I$ ，则未知电路的电功率一定是( )。

- A.  $I^2R$
- B.  $U^2/R$
- C.  $UI$
- D.  $I^2R + UI$

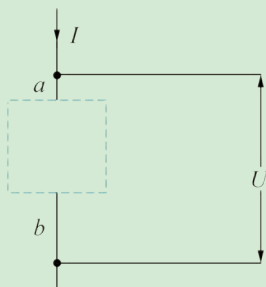


图 4-3-5

7.  $R_1$  和  $R_2$  分别标有“ $2\ \Omega, 1.0\text{ A}$ ”和“ $4\ \Omega, 0.5\text{ A}$ ”，将它们串联后接入电路中，如图 4-3-6 所示，则此电路中允许消耗的最大功率为( )。

- A.  $1.5\text{ W}$
- B.  $3.0\text{ W}$
- C.  $5.0\text{ W}$
- D.  $6.0\text{ W}$



图 4-3-6

8. 图 4-3-7 所示是额定电压为  $220\text{ V}$  的理发用电吹风的典型电路，其中电热丝通电后可以发热，电动机通电后可以送风，且电动机的额定功率为  $120\text{ W}$ 。

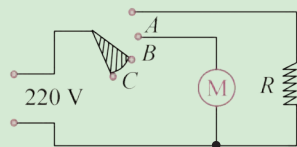


图 4-3-7

- (1) 要送冷风，选择开关应放在\_\_位置；要送热风，选择开关应放在\_\_位置(选填“ $A$ ”“ $B$ ”或“ $C$ ”)。
- (2) 若电吹风在额定电压下工作，送冷风时，通电  $1\text{ min}$ ，则电流所做的功是多少？
- (3) 若电吹风在额定电压下工作，送热风时电路消耗的总功率为  $560\text{ W}$ ，则电热丝  $R$  的阻值应为多大？

## 4.4 现代家庭电路

### 家庭电路

我们在初中学习过简单家庭电路。图 4-4-1 是常见的家庭电路实物图，图 4-4-2 是家庭电路的示意图。

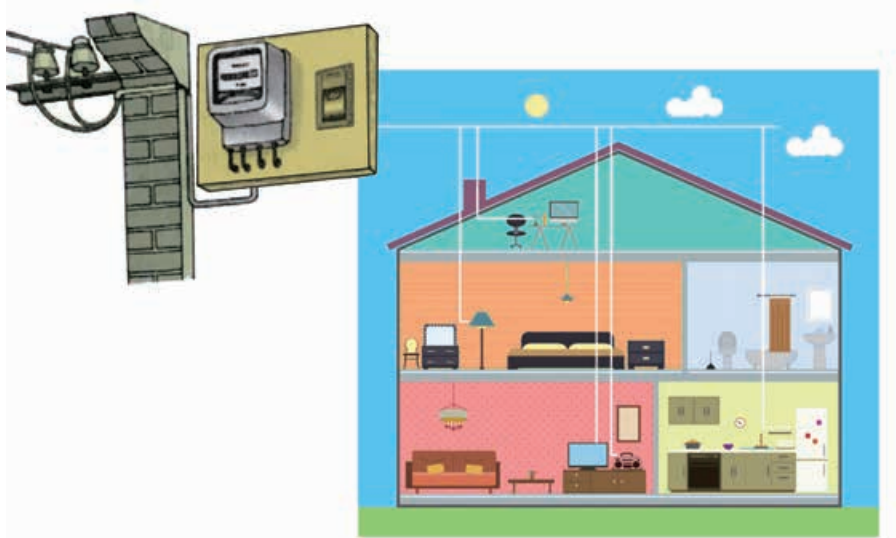


图 4-4-1 家庭电路实物图（图中白线是电线的套管）

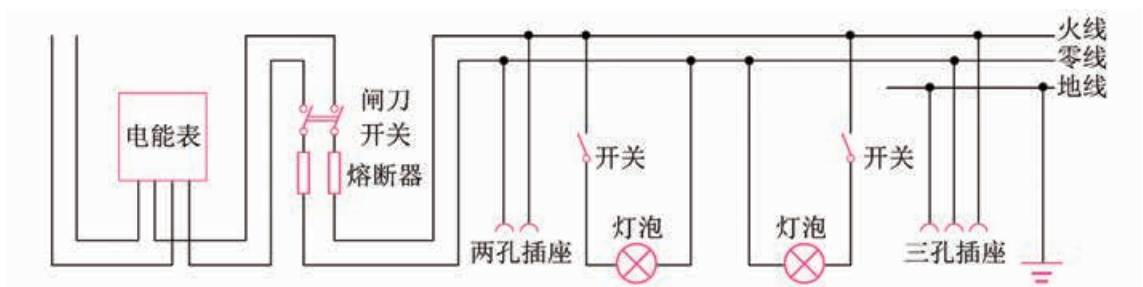


图 4-4-2 家庭电路示意图

家庭电路由两根进户线、电能表、总开关、保险装置、用电器、插座和导线等组成。前面我们做电路实验时，通常用干电池或学生电源等来提供电能，而家庭照明和家用电器所用的电能是从发电厂通过输电线输送来的。我国家庭电路的电压是 220 V，属于交流电。

家用电器主要包括家用电冰箱、空调器、电扇、洗衣机、电熨斗、吸尘器、微波炉、电磁灶、电烤箱、电饭锅、电热水器、电热毯、电视机、录像机、摄像机、组合音响等。在我国，各种家用电器的额定电压都是 220 V，但它们的额定功率往往不同。因此，各种家用电器在正常工作状态下，工作电流是有很大差异的。

### 思考与讨论

1. 家庭电路中各个用电器之间是如何连接的？每户的用电器之间又是如何连接的？为什么？
2. 插座与开关是如何连接到电路中去的？
3. 现代家庭电路中已经广泛用空气开关来代替熔丝。为什么各用电器支路中空气开关的工作电流不相同（5 A、15 A、20 A、30 A）？这样设计的原因是什么？
4. 家庭电路中所消耗的电功率与各用电器消耗的电功率之间有怎样的关系？

### 安全用电

电能的应用推动着人类社会的进步，给人们的生活带来便利。但若不注意安全用电，将会造成生命危险及财产损失。安全用电包括人身安全和设备安全。造成用电不安全的主要因素是**过载、短路和触电**。

**过载**是指电路中同时工作的用电器过多，导致线路总电流超过额定值的现象。过载容易引起导线、开关、插座等发热，会加速绝缘材料老化，甚至引发事故。

现代厨房中，有电饭煲、微波炉、电烤箱、电热水壶等。若这些大功率用电器同时工作，有时会“跳闸”。请分析一下，这是什么原因？

**短路**是指火线未经用电器直接与零线相接触的现象。短路往往导致家庭电路中的电流过大，产生危害。

### 思考与讨论

最近几年，我国城乡许多地区在进行家庭供电线路的改造，改造的主要内容是把输电线换成更粗的，电能表换成标定电流更大的。请利用学过的知识分析其中的原因。

我国家庭电路的电压是220 V，高出安全电压（36 V）很多。家庭用电引起的触电事故，都是跟地面不绝缘的人体直接或间接地碰触到火线引起的。

研究表明，电对人体造成的伤害程度与通过人体电流的大小及持续时间有关。人体是导体，通常情况下人体的电阻为 $10^4 \sim 10^5 \Omega$ ；在皮肤潮湿时，人体的电阻可降低到约 $10^3 \Omega$ 。加在人体两端的电压越高，流过人体的电流就越大，达到一定程度就会有危险。我国工厂用的动力电路的电压是



380 V，高压输电线路的电压高达 10~500 kV，这些都远远超出了安全电压。

当发生触电时，人体成为闭合电路的一部分，于是会有电流通过人体，发生触电事故。如果电流较大，就会造成生命危险。

防范触电事故最重要的是要有安全用电的意识，遵守安全用电的原则。为了确保用电安全，日常生活中要做到：（1）不接触低压带电体，不靠近高压带电体；（2）更换灯泡、搬动电器前应断开电源开关；（3）不弄湿用电器，不损坏绝缘层；（4）保险装置、插座、导线、家用电器等达到使用寿命应及时更换。

### 案例分析

**案例** 在用电高峰，我们会发现家庭电路中的白炽灯比正常发光时暗一些。某物理兴趣小组对这一现象进行了调查研究。如图 4-4-3 所示，供电电源的电压始终是 220 V，当用户的总功率是 8.6 kW 时，该小组测得用户端实际得到的电压是 215 V。请对上述调查结果进行分析。



图 4-4-3 案例分析电路示意图

**分析** 在实际的家庭电路中，当用电器接入家庭电路后，用电器（全部是并联）、输电线（火线和零线）以及供电电源构成一个闭合电路。我们可以将它转换为一个等效的直流电路。图 4-4-4 中  $r$  是输电线的等效电阻，设电源内阻为 0。

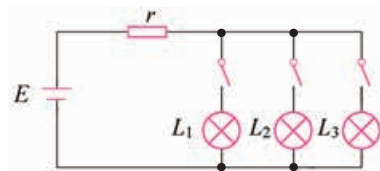


图 4-4-4 等效电路图

根据前面学过的知识，当电流流过输电线时，输电线电阻  $r$  上也会产生电压降。用电高峰时，随着接入电路中用电器数量的增加，干路中的总电流会明显增加，输电线的电阻虽然较小，但是它上面的电压降还是较明显的，因此，灯泡和其他用电器两端的电压都会比正常发光或正常工作时的电压（220 V）小一些。根据电功率公式可知，灯泡消耗的实际电功率要比额定功

率小，所以它会比正常发光时要暗一些。

由于输电线存在电阻，电流流过输电线时，输电线会发热，过大的干路电流会使输电线温度过高，导致发生火灾，造成安全隐患。

请思考：

1. 上述电路中，标有“220 V 100 W”的白炽灯的实际电功率是多少？忽略温度对灯丝电阻的影响。

2. 当用户的总功率为 8.6 kW 时，通过输电线的电流是多少？输电线上的电阻是多少？在 3 h 内输电线上消耗的电能是多少？

3. 根据上述分析，结合你所学过的知识，你认为家庭电路中用户的总功率（所有用电器）确定后，干路和各用电器支路的输电线应该如何选择？

## 节约用电

随着我国经济建设的发展，对电能的需求量日益增加。一方面，国家正大力发展水力发电和火力发电，积极开发利用新能源，以适应国民经济和社会发展的需要；另一方面，合理、节约利用电能有着重要的意义。

在利用电能过程中，由于输电线存在电阻、用电器会发热等因素，电能损耗不可避免。我们把用户可利用的有效电能总量与消耗电能总量之比称为电能利用率，两者的差值为损耗的电能。

在用电的过程中，我们要自觉养成节约用电的意识。例如，对于照明电器，用节能灯、LED 灯来代替白炽灯，可大大降低耗电量；对于电视机，把音量和亮度调至最合适状态，不要过响过亮，而且不要让电视机长时间处于待机状态；对于电冰箱，把它放置在阴凉通风处，绝不能靠近热源，以保证散热片很好地散热，同时尽量减少开门次数和时间；对于空调，温度设置在 27~28℃ 为宜，开启空调时，要关闭门窗，定期清洗隔尘网，不要频繁启动，停机后必须过 2~3 min 后再开机。

我们的生活中，无处不在用电，节约用电，从我做起！

## 案例分析

**案例** 为了测出电视机机顶盒在待机时的电功率，某同学在外出旅游期间，关闭家里其他用电器的电源，用电能表测出待机时机顶盒所消耗的电能，数据见下页表中。请解答：

(1) 机顶盒待机时的电功率是多少？

(2) 若某市有 100 万户家庭，按每户家庭一台机顶盒，每

天机顶盒待机 20 h，每度电按 0.6 元计算，该市所有家庭一天总共额外支付电费多少？

时间	电能表示数
2016年6月2日上午9点	2 6 0 3 5
2016年6月7日上午9点	2 6 0 4 7

■ **分析** 电视机机顶盒在 5 d (120 h) 时间内消耗的电能为 1.2 kW·h，由此可求出机顶盒待机时的电功率为 0.01 kW。全市家庭一天总共额外支付电费 12 万元。

现代家庭里，有许多类似电视机机顶盒的附属用电器，比如无线路由器、手机充电器等。但是，许多人没有用完之后及时切断这类用电器电源的习惯。由上述计算可知，随着时间的积累，全国所有家庭因此而浪费的电能是巨大的。因此，节约电能应从我们每一个人做起。

下面是从网络上摘录下来的一些数据：

- 某品牌网络机顶盒——用遥控器打开电源，显示当前功率为“2.4 W”；用遥控器关闭电源后显示“0.0 W”。

- 数字电视机顶盒——打开机顶盒，显示功率为“7.2 W”；用遥控器关闭机顶盒后显示“7.0 W”。

- 48 寸液晶电视——打开电视机，显示功率为 72.8 W；用遥控器关闭电源后显示“0.9 W”。

- 燃气热水器——接上电源但不开机，显示功率“4.1 W”；按“开/关”键后不点燃热水器，显示“6.0 W”。

- 网络路由器——使用中的路由器功率为“4.7 W”；关闭电源开关后，显示屏上数值迅速归零。

- 笔记本电脑——开机使用中显示功率为“36 W”；将电池充电至 100% 后，将电脑关机，显示为“0.7 W”。

- 1.5 匹冷暖空调挂机——接上电源但不启动，显示“0.9 W”。

假设你家里有这些用电器，请根据上述案例和数据，设计一个方案来估算你家一年可能支付的额外电费，并将计算结果告诉你的家人和周围的人，广泛宣传节约用电知识。

## 家庭作业与活动

请对自己家中的家庭电路进行调查研究。

- (1) 观察自己家中的用电线路，画出电路图并标明各个用电器以及电能表、供电箱中的开关

等的名称与规格。

- (2) 请设计一个方案来估测一下各用电器的实际功率。

## 第4章 家庭作业与活动

## A组

- 若有一电池，外电路断开时的路端电压为  $3.0\text{ V}$ ，外电路接上阻值为  $8.0\ \Omega$  的负载电阻后路端电压降为  $2.4\text{ V}$ ，则可以确定电池的电动势  $E$  和内电阻  $r$  为（ ）。
  - $E = 2.4\text{ V}$ ， $r = 1.0\ \Omega$
  - $E = 3.0\text{ V}$ ， $r = 2.0\ \Omega$
  - $E = 2.4\text{ V}$ ， $r = 2.0\ \Omega$
  - $E = 3.0\text{ V}$ ， $r = 1.0\ \Omega$
- 图 4-A-1 为两个不同闭合电路中两个不同电源的  $U-I$  图像，下列判断中正确的是（ ）。
  - 电动势  $E_1 = E_2$ ，发生短路时的电流  $I_1 > I_2$
  - 电动势  $E_1 = E_2$ ，内阻  $r_1 > r_2$
  - 电动势  $E_1 > E_2$ ，内阻  $r_1 < r_2$
  - 当两电源的工作电流变化量相同时，电源 2 的路端电压变化大

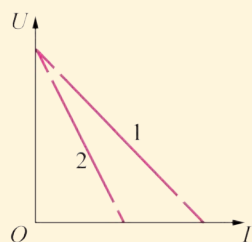


图 4-A-1

- 在图 4-A-2 所示的电路中，电源的内阻不能忽略。已知定值电阻  $R_1 = 10\ \Omega$ ， $R_2 = 8\ \Omega$ 。如果当单刀双掷开关  $S$  置于位置 1 时，电压表的示数为  $2\text{ V}$ ，那么当  $S$  置于位置 2 时，电压表的示数的可能值为（ ）。
  - $2.2\text{ V}$
  - $1.9\text{ V}$
  - $1.6\text{ V}$
  - $1.3\text{ V}$

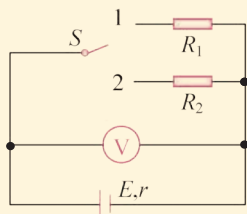


图 4-A-2

- 有两根用同种材料制成的电阻丝甲和乙：甲电阻丝的长度和直径分别为  $l$  和  $d$ ；乙电阻丝的长度和直径分别为  $2l$  和  $2d$ 。将甲、乙两根电阻丝分别接入电路时，如果两电阻丝消耗的电功率相等，则加在两根电阻丝上的电压比值  $U_{\text{甲}} : U_{\text{乙}}$  应满足（ ）。
  - $1 : 1$
  - $\sqrt{2} : 2$
  - $\sqrt{2} : 1$
  - $2 : 1$
- 在图 4-A-3 所示的电路中，当滑动变阻器的滑动片向上移动时，关于灯泡  $A$  的亮度及电容器  $C$  所带电量  $Q$  的变化，下列判断中正确的是（ ）。
  - 灯泡  $A$  变亮， $Q$  增大
  - 灯泡  $A$  变亮， $Q$  减小
  - 灯泡  $A$  变暗， $Q$  增大
  - 灯泡  $A$  变暗， $Q$  减小

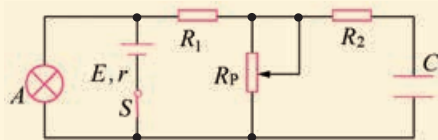


图 4-A-3

- 有一个长方体金属电阻，材料密度均匀，边长分别为  $a$ 、 $b$ 、 $c$ ，且  $a > b > c$ 。电流沿图 4-A-4 所示各方向流过该金属电阻，其中电阻阻值最小的是（ ）。
  - Current flows along the  $a$  edge.
  - Current flows along the  $b$  edge.
  - Current flows along the  $c$  edge.
  - Current flows along the  $a$  edge from the other perspective.

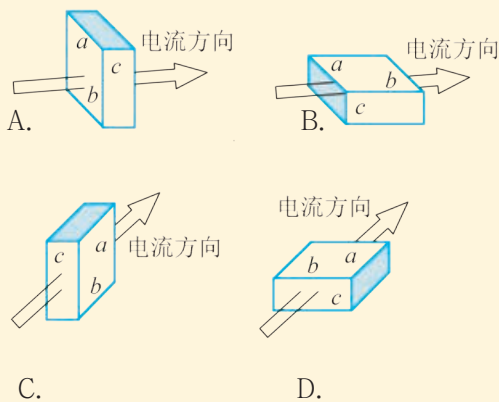


图 4-A-4

- 如图 4-A-5 所示的电路中，电阻  $R_1 = 9\ \Omega$ ， $R_2 = 15\ \Omega$ ，电源的电动势  $E = 12\text{ V}$ ，内阻  $r = 1\ \Omega$ ，

电流表的示数  $I = 0.4 \text{ A}$ 。求电阻  $R_3$  的阻值和它消耗的电功率。

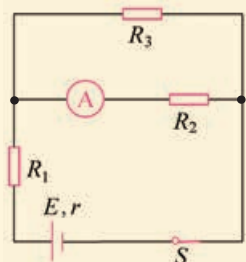


图 4-A-5

8. 如图 4-A-6 所示, 电阻  $R_3 = 4 \Omega$ , 电表为理想表。开始时  $R_1$ 、 $R_2$ 、 $R_3$  中都有电流通过, 电压表的示数为  $2 \text{ V}$ , 电流表的示数为  $0.75 \text{ A}$ 。后来  $R_1$  发生断路, 使电压表的示数变为  $3.2 \text{ V}$ , 电流表的示数变为  $0.8 \text{ A}$ 。问:

- (1) 电阻  $R_1$ 、 $R_2$  的阻值各为多少?
- (2) 电源电动势和内阻各为多少?

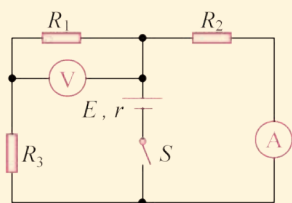


图 4-A-6

9. 在图 4-A-7 所示电路中,  $A$ 、 $B$  两灯均正常发光,  $R_p$  为一滑动变阻器,  $P$  为滑动片。若将滑动片向下滑动, 则 ( )。

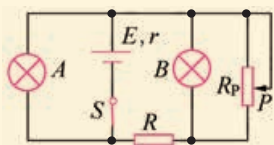


图 4-A-7

- A.  $A$  灯变亮
- B.  $B$  灯变亮
- C.  $R$  上消耗功率变大
- D. 总电流变小

10. 在图 4-A-8 所示电路中, 闭合开关  $S$ 。当滑动变阻器的滑动片  $P$  向下滑动时, 四个理想电表的示数都发生变化。电表的示数分别用  $I$ 、 $U_1$ 、 $U_2$  和  $U_3$  表示, 电表示数变化量的大小分别用  $\Delta I$ 、 $\Delta U_1$ 、 $\Delta U_2$  和  $\Delta U_3$  表示。下列判

断中正确的是 ( )。

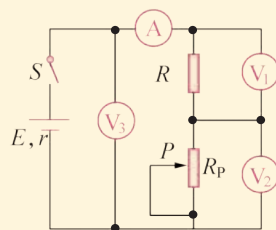


图 4-A-8

- A.  $U_1/I$  不变,  $\Delta U_1/\Delta I$  不变
- B.  $U_2/I$  变大,  $\Delta U_2/\Delta I$  变大
- C.  $U_2/I$  变大,  $\Delta U_2/\Delta I$  不变
- D.  $U_3/I$  变大,  $\Delta U_3/\Delta I$  不变

11. 在图 4-A-9 所示的  $U-I$  图像中, 直线  $a$  表示了某电源的路端电压  $U$  与干路电流  $I$  的关系, 直线  $b$  为某电阻  $R$  的伏安特性曲线。用该电源和电阻  $R$  连接成闭合电路, 由图像可知 ( )。

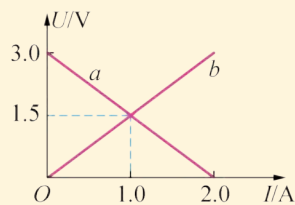


图 4-A-9

- A.  $R$  的阻值  $1.5 \Omega$
- B. 电源的电动势为  $3 \text{ V}$ , 内阻为  $0.5 \Omega$
- C. 电源的输出功率为  $3.0 \text{ W}$
- D. 电阻  $R$  的电功率为  $1.5 \text{ W}$

12. 如图 4-A-10 所示, 设电表为理想电表, 外电阻  $R_1 \neq R_2 \neq R_3$ 。若把电流表和电压表位置互换, 则 ( )。

- A. 电流表的示数为零
- B. 电压表的示数为零
- C. 电流表的示数增大
- D. 电压表的示数增大

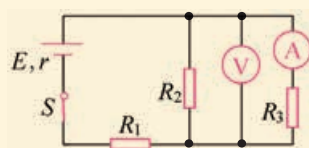


图 4-A-10

## B组

1. 如图 4-B-1 所示, 在相距 40 km 的 A、B 两地架两条输电线, 电阻共为  $800\ \Omega$ 。如果在 A、B 间的某处发生短路, 那么接在 A 处的电压表的示数为 10 V, 电流表的示数为 40 mA。发生短路处距 A 地有多远?



图 4-B-1

2. 如图 4-B-2 所示, 图 a 为在温度为  $10\ ^\circ\text{C}$  左右的环境中工作的某自动恒温箱原理简图, 箱内的电阻  $R_1 = 20\ \text{k}\Omega$ ,  $R_2 = 10\ \text{k}\Omega$ ,  $R_3 = 40\ \text{k}\Omega$ ,  $R_4$  为热敏电阻, 它的电阻随温度变化的图像如图 b 所示。当  $a$ 、 $b$  端电压  $U_{ab} < 0$  时, 电压鉴别器会令开关  $S$  接通, 恒温箱内的电热丝发热, 使箱内温度升高; 当  $U_{ab} > 0$  时, 电压鉴别器使  $S$  断开, 停止加热, 恒温箱内的温度恒定在  $\quad\quad\quad\ ^\circ\text{C}$ 。

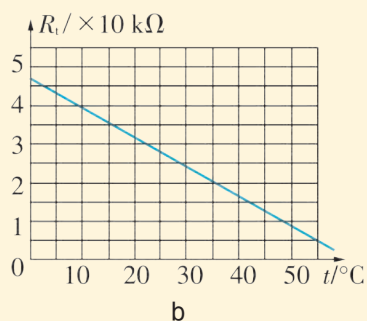
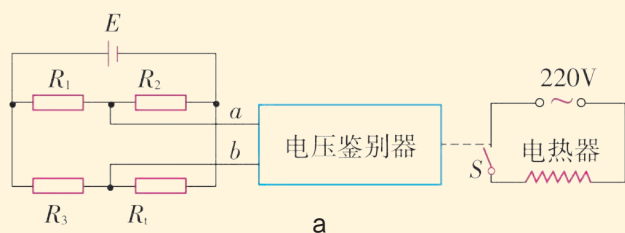


图 4-B-2

敏电阻, 它的电阻随温度变化的图像如图 b 所示。当  $a$ 、 $b$  端电压  $U_{ab} < 0$  时, 电压鉴别器会令开关  $S$  接通, 恒温箱内的电热丝发热, 使箱内温度升高; 当  $U_{ab} > 0$  时, 电压鉴别器使  $S$  断开, 停止加热, 恒温箱内的温度恒定在  $\quad\quad\quad\ ^\circ\text{C}$ 。

3. 图 4-B-3 是用电学方法测水流对小球作用力  $F$  的示意图。质量为  $m$  的小铅球  $P$  系在细金属丝下面, 悬挂在  $O$  点。BC 为在水平方向上固定的一根粗细均匀的电阻丝,  $C$  端在  $O$  点正下方, 且  $OC$  长为  $h$ ,  $BC$  长为  $l$ ,  $BC$  与金属丝接触良好, 接触点为  $D$ , 不计接触点  $D$  处的摩擦和金属丝电阻。将小铅球  $P$  放入水平流动的水中时, 球向左摆起一定的角度  $\theta$ , 水流速度越大,  $\theta$  越大。现取一电动势为  $E$ 、内阻不计的电源和一只电压表, 用这些器材连成测量电路, 使水不流动时, 电压表的示数为零, 水流速度增大时, 电压表的示数也增大。请画出电路图 ( $B$ 、 $C$ 、 $O$  均可接线)。若小球平衡时, 电压表的示数为  $U$ , 请用  $m$ 、 $l$ 、 $h$ 、 $E$ 、 $U$  表示  $F$ 。

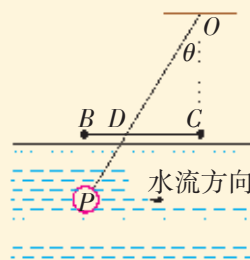


图 4-B-3

位于贵州南部的500米口径球面射电望远镜(FAST),由中国科学家独创设计,是目前世界最大的高灵敏度巨型单口径球面射电望远镜,能捕捉到远在百亿光年外的电磁波。



## 第5章 电磁场与电磁波

自从人类发现天然磁石吸铁的特征,就开始了对于磁现象的研究。奥斯特发现通电导线周围的磁场,法拉第发现电磁感应规律,揭示了电与磁的联系;麦克斯韦建立了电磁场理论,预言了电磁波的存在。现在,人类广泛地使用着收音机、电视机、计算机、手机和互联网,已经越来越离不开电磁技术及电磁波。

那么,应该怎样描述磁场?电与磁之间有什么联系?电磁波产生的条件是什么?电磁波有哪些应用?……

本章首先了解人类对磁现象研究的成果特别是我国古代在磁现象方面对人类文明的影响,认识磁性材料在现代生活中的广泛应用;然后学习用磁感线模型定性描述磁场和用物理量定量研究磁场的方法;接着探究电流周围的磁场及电磁感应现象,了解电磁感应现象的应用;最后回顾电磁波的发现过程,进一步理解电磁场的物质性,认识电磁技术对社会的推动作用。

## 5.1 磁与人类文明

### 改变人类活动的发明

指南针 (compass) 是著称于世的我国四大发明之一。远在春秋战国时期,我国古人对天然磁石(古称“慈石”,就是磁铁矿,主要成分是  $\text{Fe}_3\text{O}_4$ ) 就有了一些认识,并开始用于寻找铁矿。公元前 4 世纪的《鬼谷子·谋篇》中的记述表明,我国古人已发现了磁石指向南北的特性,并发明了指示方向的指南针。

指南针一经发明,很快就被应用于航海业。明代伟大的航海家郑和曾用罗盘(把指南针装配在方位盘上构成的仪器)导航,率领庞大的船队 7 次大规模远航,访问了亚非 30 多个国家,最远到达红海和非洲东岸。中国的指南针约在公元 12 世纪末到 13 世纪初,由海路传入阿拉伯,再传到欧洲。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整个世界面貌上产生了巨大的影响。

查阅有关资料,讨论我国古代对磁现象的研究还有哪些主要成就。

通过上网查阅资料,了解现代轮船上是否还利用罗盘导航。

英国哲学家弗兰西斯·培根(F. Bacon, 1561—1626),在称颂我国四大发明中的印刷术、火药和指南针时说:“这三种东西,曾改变了整个世界的面貌和事物的状况。第一种在文学上,第二种在战争中,第三种在航海上,从那里接着产生无数的变化,变化如此之大,以至没有一个帝国,没有一个学派……能比这三种发明,对人类事业产生更大的力量和影响。”

### 我们生活在天然磁场——地磁场中

指南针为什么会指南?这在古代曾是一个不解之谜,直到 1600 年英国宫廷医生吉尔伯特(W. Gilbert)认识到地球本身是一个巨大的磁体,才对此作出了比较正确的解释。

现在我们知道,地球周围存在着磁场,这个磁场叫做地磁场(geomagnetic field),指南针在地磁场的作用下发生偏转而指示方向。地磁场的磁南极(S极)在地球的北端(西经  $100.5^\circ$ , 北纬  $75.5^\circ$  的北美洲帕里群岛附近),磁北极(N极)在地球的南端(东经  $139.9^\circ$ , 南纬  $66.6^\circ$  的南极洲威尔斯附近),如图 5-1-1 所示。

地磁的两极跟地理的两极并不重合,地磁轴和地球自转轴两者的夹角约为  $11^\circ$ ,因而水平放置的磁针的指向跟地理子午线之间有一个交角,这个交角叫做磁偏角(magnetic declination)。

查阅资料,了解地磁场与天文、地质、气象、采矿、航行和通信技术等方面的密切关系。

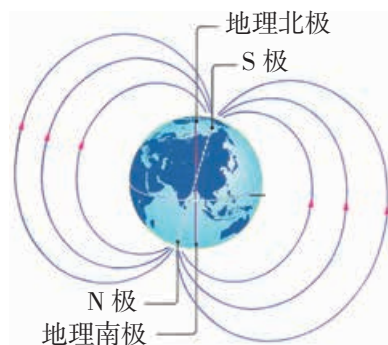
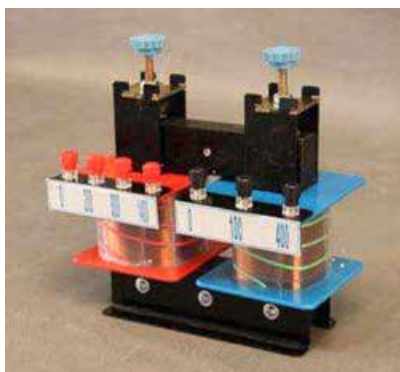


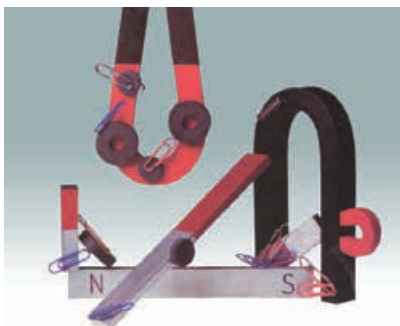
图 5-1-1 地磁场示意图

我国宋代的沈括在《梦溪笔谈》中最早指出磁针所指的方向“常微偏东,不全南”的现象,即地球磁体的磁子午线与地理子午线之间有一个很小的偏角——磁偏角。据考证,11 世纪沈括居住在长江下游地区,那里磁偏角一般不超过  $3^\circ \sim 4^\circ$ 。这样小的角度差别是很难被发现的。西方国家直到 1492 年哥伦布在横渡大西洋时才观测到磁偏角现象。





a 软磁性材料的应用



b 硬磁性材料的应用

图 5-1-2

计算机把信息都储存在内外存储器中。外存主要是磁盘、U 盘和光盘。在存储器中,信息是以“0”、“1”形式存放的。一个数据或一条指令放在一个存储单元。存储器中存储单元的个数就是存储容量,以 K 或 M 为单位。1 K 是  $2^{10}$ 。 $2^{20}$  称为 1 M, 约等于 1000 K 个存储单元。G 和 T 是更大的单位,  $1 G = 1024 M$ ,  $1 T = 1024 G$ 。

## 形形色色的磁性材料

随着科学的发展,人们又认识了除天然磁石以外的许多磁性材料。如今,磁性材料琳琅满目,它们同生产和生活的关系越来越紧密。

请讨论:生活中有哪些家电设备用到磁性材料?请举例说明它们的作用。

在大多数情况下,技术上是通过人工方法使磁性材料获得磁性的,这个过程叫做**磁化**(magnetization)。磁性材料被磁化后,在一定条件下会失去磁性,这个过程叫做**退磁**(demagnetization)或去磁。

### 软磁性材料和硬磁性材料

磁性材料按磁化后退磁的难易程度分为软磁性材料和硬磁性材料。磁化后容易退掉磁性的物质叫做软磁性材料,不容易退掉磁性的物质叫做硬磁性材料。

软磁性材料适用于需要反复磁化的场合,例如可以用来制造天线磁棒、磁头、计算机的记忆元器件,以及变压器、交流电机、电磁铁和各种高频元器件的铁芯等。常见的金属软磁性材料有软铁、硅钢、镍铁合金等,常见的软磁铁氧体有锰锌铁氧体、镍锌铁氧体等。

硬磁性材料适合制造永磁铁,应用在扬声器、话筒等电器设备中。常见的金属硬磁性材料有碳钢、钨钢、铝镍钴合金等,常见的硬磁铁氧体有钡铁氧体和锶铁氧体等。天然磁石也是硬磁性材料。

### 计算机磁盘及磁盘驱动器

图 5-1-3 是计算机磁盘及磁盘驱动器的结构示意图。

计算机磁盘是在盘片上均匀地涂上一层极薄的磁性材料构成的。其中,盘片是软塑料薄膜的叫软盘,盘片是硬的铝片或陶瓷片的叫硬盘。磁盘在使用前先要进行格式化(将磁盘划分为若干磁道和扇区),以帮助找到记录的位置。

计算机磁盘之所以能够把图像、声音和数字等信息保存在上面,是因为我们把它们转换成磁头电流信号,磁头电流产生的磁场使磁盘上的软磁性材料磁化,把磁头的磁作用保存在磁性材料中。这就是说,将信息保存到了计算机的磁盘上。在需要这些信息时,我们又用磁头与这些被磁化的软磁性材料相互作用,把信息“读”出来。

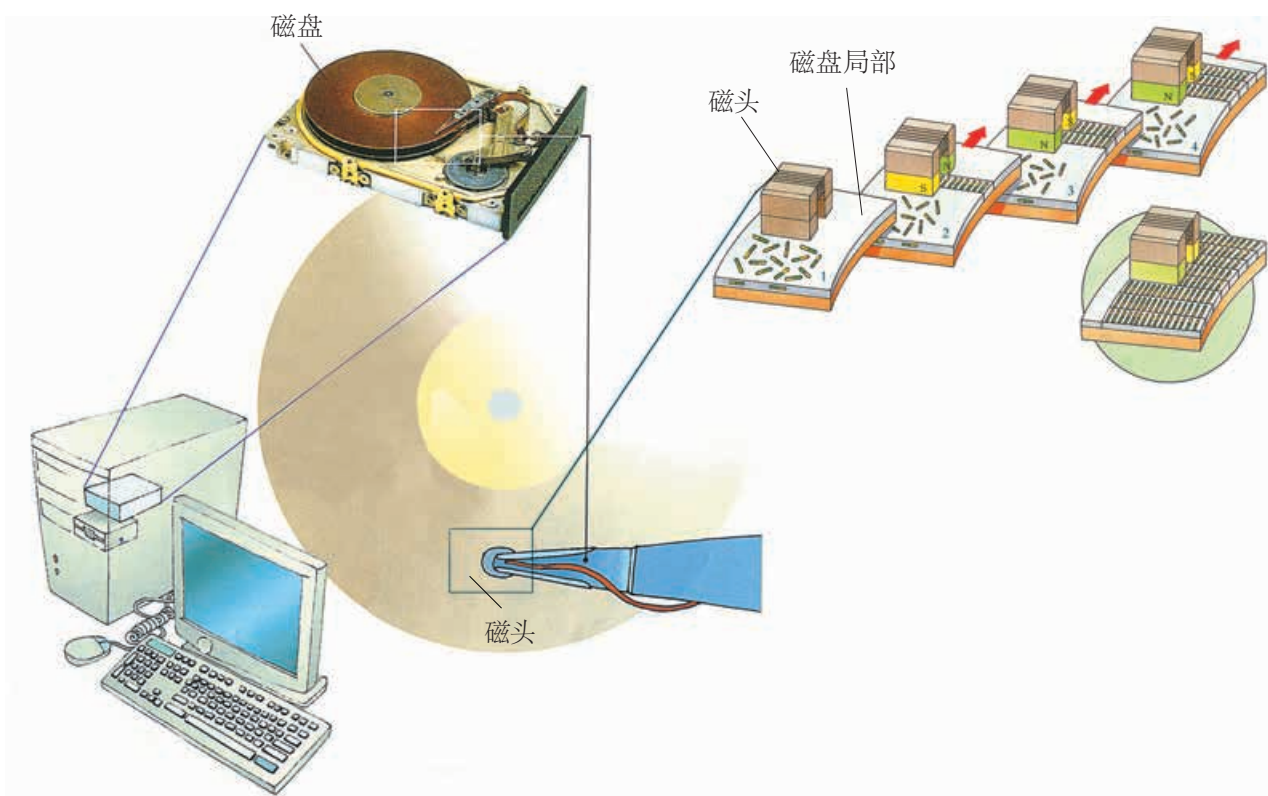


图 5-1-3 计算机磁盘工作原理示意图

## 信息浏览

### 信用卡

信用卡是银行发放给单位和个人的一种特制的“信用凭证”。信用卡可以代替现金,买东西时,只要“刷刷卡”就行了。使用信用卡,不仅消费结账十分方便,更重要的是不用再为随身携带大量现金而提心吊胆了。有一种信用卡的背面有一条黑色的磁条,上面记录着持卡人的资料和个人密码,供自动柜员机或销售点终端阅读和鉴别使用。这种信用卡俗称磁条卡(磁卡)。

现在广泛使用的信用卡为 IC 卡。IC 卡又称“智能卡”,卡内装有一小块集成电路芯片,芯片里既有微处理器,又有存储器和相应的接口电路,因而它具有数据存储和运算处理的能力,而且存储量大。相比之下,磁卡的存储容量一般只有几十至几百个字节,远不如 IC 卡。磁卡的最大缺点是防伪和安全性较差,而 IC 卡则较为安全。

## 家庭作业与活动

1. 用磁铁、水、酒精和烧杯等器材,设计一个实验,探究水、酒精和空气等物质对磁铁磁性的影响。将结果与其他同学的结果进行比较。
2. 为了研究铁和铁锈的磁性,有人做了一个实验。他在两个相同的纸杯中分别放入等量的(几小勺)铁屑,并向一个纸杯中注入水。一个多小时后,将杯中的水倒掉,让其干燥。第二天,

他把硬纸板分别盖在两纸杯上,然后用同一条形磁铁分别在硬纸板上吸铁屑和铁锈,比较收集到的铁屑和铁锈的质量。请分析,他会得到什么结果?你自己也可以做一做,看看你的分析对不对。

3. 查阅资料,了解明代伟大的航海家郑和利用罗盘导航,访问了亚非哪些国家。

## 5.2 磁场的描述

### 磁场的形象描述

磁感线是人们描述磁场分布、强弱等引入的假想的曲线，它是一种物理模型。物理学家用电场线和磁感线来分析电磁场的问题，既形象又方便，甚至可以借鉴流体力学的方法（通量或流量）来研究电磁场的问题。

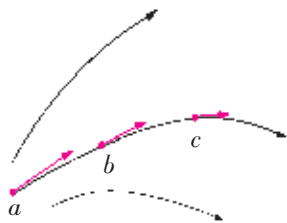


图 5-2-1 磁感线

我们在初中学过，可以用磁感线来形象地描述空间磁场的分布情况。磁感线是在磁场中人为地画出的一些有方向的曲线，在这些曲线上，每一点的切线方向都在该点磁场的方向上（图 5-2-1）。

### 实验观察磁感线的分布

把条形磁铁置于一块水平玻璃板下方，在玻璃板上均匀地撒一层细铁屑。铁屑在磁场中被磁化为一个个小磁针，轻轻敲击玻璃板，细铁屑就在磁场作用下转动，并按一定规律排列起来（图 5-2-3）。

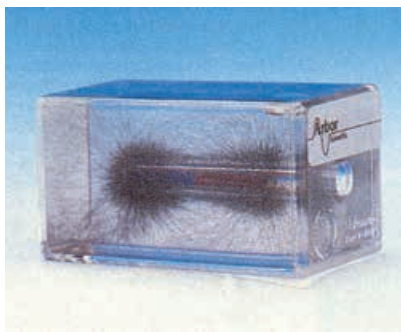


图 5-2-2 磁感线的空间分布

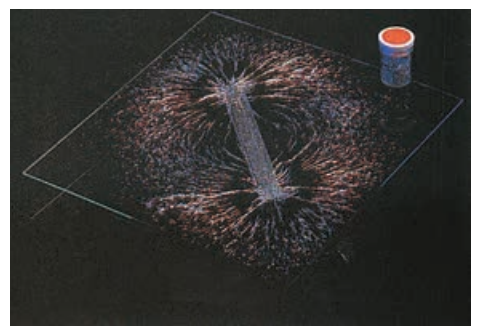


图 5-2-3 铁屑显示条形磁铁磁场的分布情况

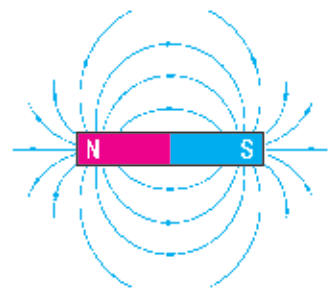


图 5-2-4 条形磁铁磁感线的分布

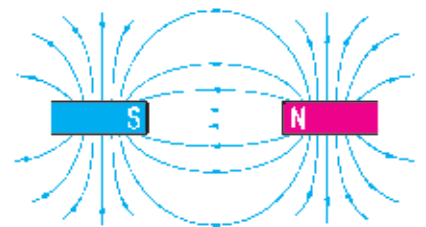
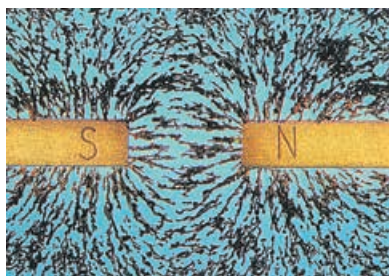


图 5-2-5 异名磁极间磁感线的分布

细铁屑显示的并不是磁感线，它只是形象地表示了磁感线或磁场的分布情况。图 5-2-4 和图 5-2-5 是条形磁铁和两根条形磁铁异名磁极间磁场的磁感线分布情况。

请讨论磁感线分布与磁场强弱的关系。

两根近距离的条形磁铁异名磁极间的磁场分布有什么特点？

### 用磁感线描述磁场强弱

跟用电场线表示电场强度一样，用磁感线的疏密程度可以描述磁场的强弱。磁感线密的地方，表示磁场强，磁感线稀疏的地方，表示磁场弱。如图 5-2-4 所示，条形磁铁两极附近的磁感线比较密，磁场比较强；条形磁铁中部磁感线比较稀疏，磁场比较弱。

在图 5-2-5 中，两根条形磁铁异名磁极间中间区域里的磁感线，从 N 极指向 S 极，并均匀分布。物理学中，把磁感线的间距相等、相互平行且指向相同的磁场叫做**匀强磁场**（uniform magnetic field）。匀强磁场是最简单但又很重要的磁场，在电磁仪器和科学实验中有着很重要的应用。

## 磁场的定量描述

为了定量地描述磁场的强弱，我们引入一个新的物理量——**磁通量**（magnetic flux），用  $\Phi$  表示。如图 5-2-6 所示，设想在匀强磁场中有一块与磁感线方向垂直的平面，若穿过该平面的磁感线有  $\Phi$  条，我们就称穿过这个平面的磁通量为  $\Phi$ 。

磁场越强，磁感线越密，穿过单位面积的磁感线的条数就越多。在图 5-2-6 中，设垂直于磁感线的平面的面积为  $S$ ，穿过的磁通量为  $\Phi$ ，则磁场的强弱可以用  $\frac{\Phi}{S}$  来表示。

物理学中，把垂直穿过某平面的磁通量跟该平面的面积之比叫做**磁感应强度**（magnetic induction），用  $B$  表示。磁场中某处磁感应强度的大小表示该处磁场的强弱，即

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

在国际单位制中，磁通量的单位是韦伯（weber），符号是 Wb；面积单位是平方米，符号是  $\text{m}^2$ ；磁感应强度的单位是特斯拉（tesla），简称特，符号是 T，则

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

如果平面跟磁场方向不垂直（如图 5-2-7），我们可以作出它在垂直于磁场方向上的投影平面，从而计算出磁感应强度。

磁感应强度是有方向的，磁场空间各点磁感应强度的方向与该点处磁感线的切线方向一致。

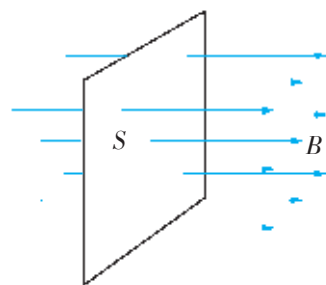


图 5-2-6

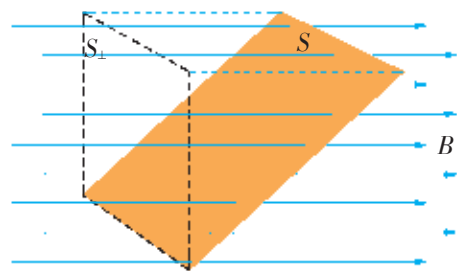


图 5-2-7 磁通量的确定

## 人体、天体和空间的磁场

磁场名称	磁感应强度 / T	磁场名称	磁感应强度 / T
正常人的心磁场	约 $10^{-10}$	脉冲星磁场	$10^8 \sim 10^9$
正常人的脑磁场	约 $5 \times 10^{-13}$	星际空间磁场	$10^{-9} \sim 10^{-13}$
地球磁场	约 $5 \times 10^{-5}$	一般永磁体磁场	0.4 ~ 0.7
太阳普遍磁场	约 $10^{-4}$	电机、变压器铁芯中的磁场	0.8 ~ 1.4
太阳黑子磁场	$10^{-2} \sim 10$	原子核表面磁场	约 $10^{12}$
月球磁场	约 $10^{-9}$		

## 探究电流周围的磁场

长期以来，人们认为电与磁是两类截然不同的现象，电学与磁学的研究一直彼此独立地发展着。

1820年，丹麦物理学家奥斯特（H. Oersted）发现通电导线也能使小磁针偏转，终于揭示了电与磁的联系，开辟了科学研究的一个新领域——电磁学。

现在我们知道，磁铁能产生磁场，电流也能够产生磁场。电流的磁场有什么特征呢？下面我们通过实验作进一步的研究。

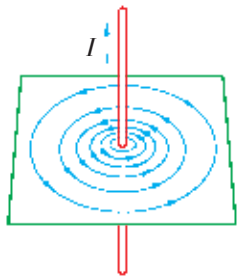


图 5-2-8 直线电流磁感线分布



图 5-2-9 直线电流磁感线分布

## 观察直线电流磁场的分布

让一直导线垂直穿过一块水平硬纸板（图 5-2-8）。将小磁针放置在水平硬纸板各处，接通电源。观察小磁针在各处的指向，并把指向画在纸板上相应的位置。由此，你可以对直线电流磁场的磁感线的分布和方向作出初步判断。

大量实验表明，直线电流磁场的磁感线是一些以导线上各点为圆心的同心圆，这些同心圆都在跟导线垂直的平面上（图 5-2-8）。改变电流的方向，各点的磁场方向都反向，即磁感线的方向随之改变。

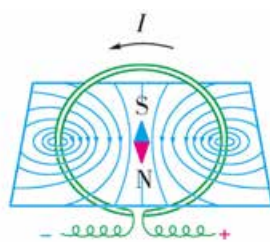
直线电流的方向跟它产生的磁场的磁感线方向之间的关系，可以用安培定则（Ampère's rule，也叫右手螺旋定则）来判断。如图 5-2-9 所示，用右手握住导线，让大拇指指向电流的方向，则弯曲的四指所指的方向就是磁感线的环绕方向。

## 探究通电线圈的磁场

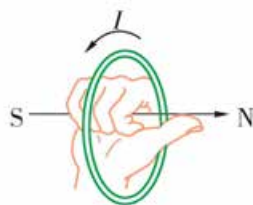
环形电流磁场的磁感线分布如图 5-2-10 所示。环形电流磁场的磁感线是一些围绕环形导线的闭合曲线。在环形导线的中心轴线上，磁感线和环形导线的平面垂直（图 5-2-11）。



图 5-2-10 铁屑在环形电流磁场中的分布



a 磁感线分布



b 安培定则

图 5-2-11 环形电流的磁场

请讨论，环形电流的方向跟中心轴上的磁感线方向之间有什么关系？怎样判断环形电流的磁感线方向？

通电螺线管的磁场分布如图 5-2-12 所示。螺线管 (solenoid) 通电以后，就像一根条形磁铁，一端相当于北极，另一端相当于南极。改变电流的方向，它的南北极就对调。通电螺线管外部磁感线和条形磁铁外部的磁感线相似，也是从北极出来，进入南极。

通电螺线管内部也有磁场。如果通电螺线管很长，螺线管内中间部分的磁感线跟螺线管的轴线平行，方向由南极指向北极，并和外部的磁感线连接，形成闭合曲线。因此，长直通电螺线管内中间部分的磁场近似为匀强磁场。在科学研究和生产中，我们常常利用较长的通电螺线管来提供匀强磁场。

通电螺线管的电流方向跟它产生的磁场的磁感线方向之间的关系，也可用安培定则来判断。请你参见图 5-2-13，把判断通电螺线管外部和内部的磁感线方向的方法总结出来。

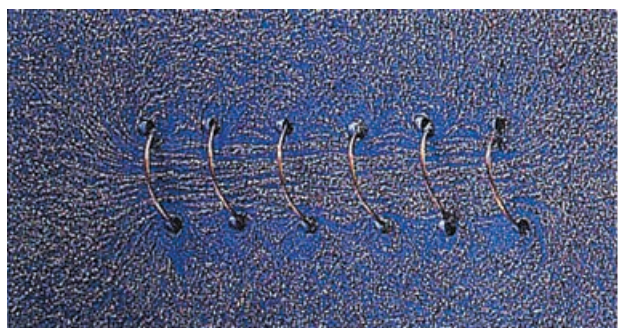


图 5-2-12 铁屑在通电螺线管的磁场中的分布

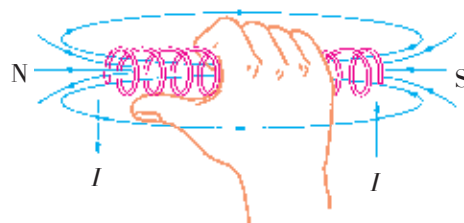


图 5-2-13 确定通电螺线管磁场的安培定则

## 家庭作业与活动

1. 通电直导线附近的小磁针如图 5-2-14 所示，请标出导线中的电流方向。

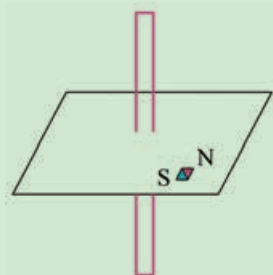


图 5-2-14

2. 在“探究通电螺线管周围的磁场方向”的实验中，在螺线管附近放置了一枚小磁针，通电后小磁针静止时的指向如图 5-2-15 所示。图中通电螺线管的左端为\_\_\_\_\_极，小磁针的 A 端为\_\_\_\_\_极。

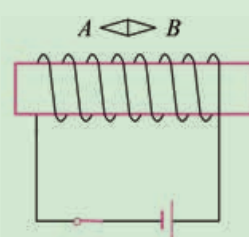


图 5-2-15

3. 如图 5-2-16 所示，在  $x$  轴和  $y$  轴构成的平面直角坐标系中，过原点再做一个  $z$  轴，就构成了空间直角坐标系。匀强磁场的磁感应强度  $B = 0.2 \text{ T}$ ，方向沿  $x$  轴正方向，且  $ab = dc = 0.4 \text{ m}$ ， $bc = ef = ad = 0.3 \text{ m}$ ，通过面积  $S_1(abcd)$ 、 $S_2(befc)$ 、 $S_3(aefd)$  的磁通量  $\Phi_1$ 、 $\Phi_2$ 、 $\Phi_3$  各是多少？

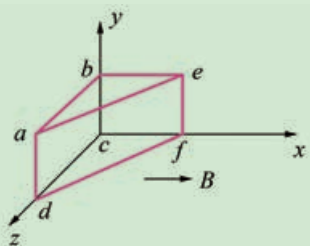


图 5-2-16

4. 如图 5-2-17 所示，A 为橡胶圆盘，其盘面竖直。B 为紧贴 A 的毛皮。在靠近盘的中轴上有一个小磁针静止于图示位置。当沿图中箭头的方向转动把手 C 时，小磁针将发生什么现象？

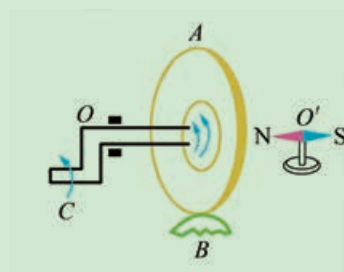


图 5-2-17

5. 历史上对地磁场的形成有这样一种看法：我们居住的地球是一个带电星球，它带的电荷量约为  $4 \times 10^6 \text{ C}$ ，由于地球自西向东旋转，会形成许多环形电流，如图 5-2-18 所示。由此猜想：地球带的是\_\_\_\_\_（选填“正”或“负”）电。

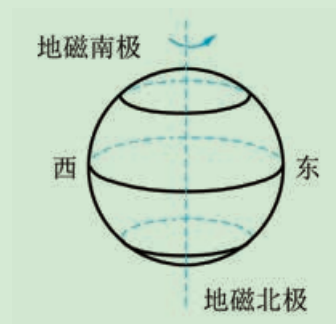


图 5-2-18

## 5.3 电磁感应

### 法拉第发现电磁感应的艰难历程

#### 新课题的提出

既然电能转化为磁，那么磁也应该能转化为电。奥斯特、亨利（J. Henry）、科拉顿（T. Colladen）等当时著名的科学家，都曾对“将磁转变为电”进行过研究，但均未能取得实质性进展。时任英国皇家研究所实验室主任的法拉第从1822年起即致力于“把磁转变为电”的研究。他在一篇日记中写道：“从普通的磁中获得电的希望，时时激励着我从实验上去探求电流的感应效应。”

#### 思维定势路漫长

法拉第开始进行“把磁转变为电”的实验研究时，想法比较简单。他的基本思路是：

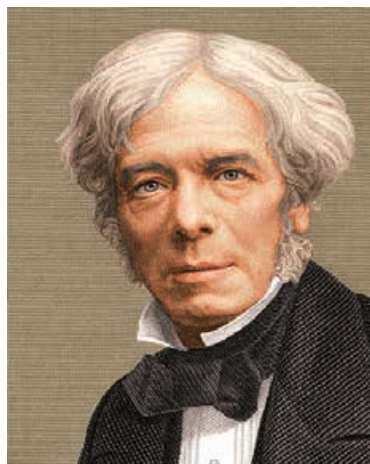
既然恒定的电流能产生磁场，那么放在磁体旁边的导体也应能感应出电流；既然电荷可以感应出电荷，那么电流也应能感应出电流。

法拉第基于上述思路，在很长一段时间内，基本上做了如下两种类型的实验：一是将两根导线并列放置，将其中的一根导线通以电流，希望在另一根导线中感应出电流；二是在强磁体旁边放置导线或线圈，希望在导线或线圈中感应出电流。这两类实验都没有成功。他在一个铁环上绕了两个线圈（图5-3-1），将其中一个线圈（原线圈）接在电池上，另一个线圈接电流计，也没有感应出电流；他不断增加电池的数量，将原线圈几乎烧坏了，还是感应不出电流。

探索之路如此漫长，时间已过去十年。法拉第在实验日记上记下了一次次的失败，也一次次地表达了他“把磁转变为电”的坚定信念。

#### 深入探究得真谛

时至1831年8月29日，法拉第再次用图5-3-2所示的线圈做实验。图5-3-3是实验装置示意图，A线圈两端与开关和电池组连接，B线圈两端用导线连接，在导线下放一枚小磁针。法拉第发现，每当开关闭合或断开时，小磁针都突然跳动一下；将A线圈维持接通状态，小磁针则不动。



法拉第（M. Faraday, 1791—1867），19世纪伟大的物理学家、化学家、发明家，电磁理论的奠基人。他发现了电磁感应现象，提出了场的概念和用力线描述场的方法。麦克斯韦曾说：“我们把法拉第首先看作是科学家中最有成效、最崇高的典型……他高尚简单而无戏剧性紧张情节的生活，将同他那使他名字不朽的发现一起永远铭刻在人们的记忆中。”



图 5-3-1 法拉第做实验用的线圈



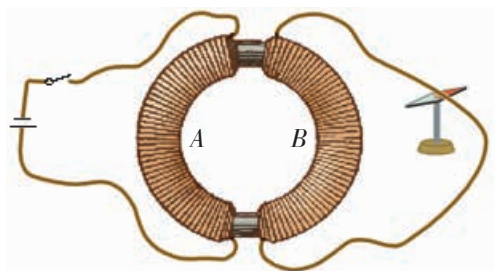


图 5-3-2 法拉第实验示意图之一

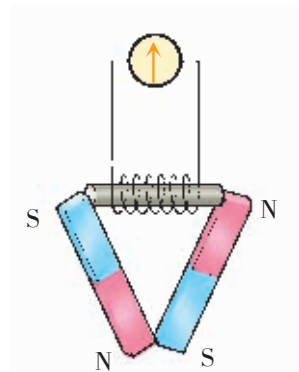


图 5-3-3 法拉第实验示意图之二

我不能不认为……关于磁电的这个发现是迄今为止所获得的最伟大的实验成果。这是法拉第成就的勃朗峰。

——丁铎尔

据说，法拉第在英国皇家学会上演示他的圆盘发电机时，一位贵妇人问：“先生，你发明这种玩意儿，又有什么用呢？”法拉第沉思片刻，答道：“夫人，新生的婴儿又有什么用呢！”

1831年9月24日，法拉第做了如图5-3-3所示的实验。将两根条形磁铁成V形放置，在张开的两端（分别为N、S极）之间，放一根绕有线圈的圆铁棒，线圈与电流计连接。他发现当圆铁棒脱离或接触磁极的瞬间，电流计的指针发生偏转。

1831年10月17日，法拉第在一个纸做的空心圆筒上，用220英尺铜线绕了8个线圈，再将这8个线圈串联或并联后与电流计连接，然后将一根条形磁铁以不同的速度插进空心圆筒内，观察电流计指针的偏转情况。

十年磨一剑。法拉第终于找到了开启电能宝库的“金钥匙”：“把磁转变为电”不是一种稳态效应，而是一种在变化、运动过程中才会出现的效应。他把“变化”“运动”概括为：变化的电流、变化的磁场、运动的磁铁、在磁场中运动的导体等。

法拉第把这种由磁得到电的现象称作为**电磁感应**（electromagnetic induction）现象。在电磁感应现象中产生的电流叫做**感应电流**（induction current）。

为了获得持续的感应电流，1831年10月28日，法拉第将一个铜圆盘放在永久磁铁的两极之间，再从铜盘的轴心和边上引出两根导线，转动圆盘，导线中就有了持续的电流。这就是世界上第一台“直流发电机”。

请思考：从法拉第发现电磁感应的艰难历程，你有什么体会和感想？

## 探究感应电流产生的条件

通过法拉第发现电磁感应的过程，你能归纳出产生感应电流的条件吗？

### 实验探究 产生感应电流的条件

请完成以下两个实验。实验中，要注意观察感应电流是在怎样的条件下产生的。

**实验 1** 用图 5-3-4 所示的装置进行实验。观察当条形磁铁插入或拔出线圈时，线圈中产生感应电流的情况。

请讨论：如图 5-3-5 所示，在条形磁铁插入线圈的过程中，线圈中的磁通量怎样变化？在拔出过程中，线圈中的磁通量又是怎样变化的？

在初中，我们知道图 5-3-6 所示的实验中，导体切割磁感线时也会产生感应电流。你能用磁通量变化产生感应电流来解释这个现象吗？

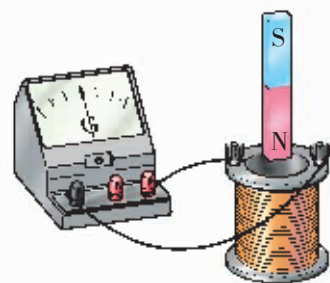


图 5-3-4 条形磁铁和线圈有相对运动，就会产生感应电流

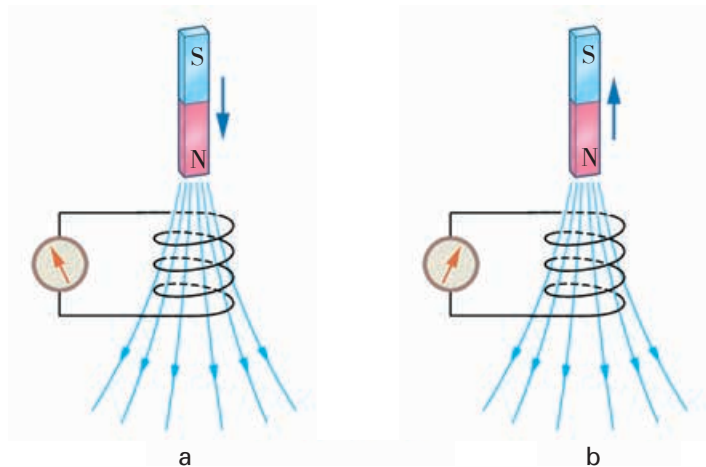


图 5-3-5 磁铁插入和拔出线圈时，线圈中的磁通量发生变化

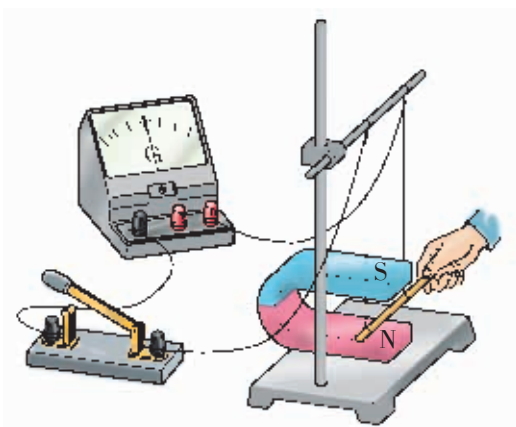


图 5-3-6 导体切割磁感线产生感应电流

**实验 2** 用图 5-3-7 所示的装置进行实验。这里有两个线圈，原线圈 A 通电后就是一个电磁铁，怎样做才能使副线圈 B 中产生电流？

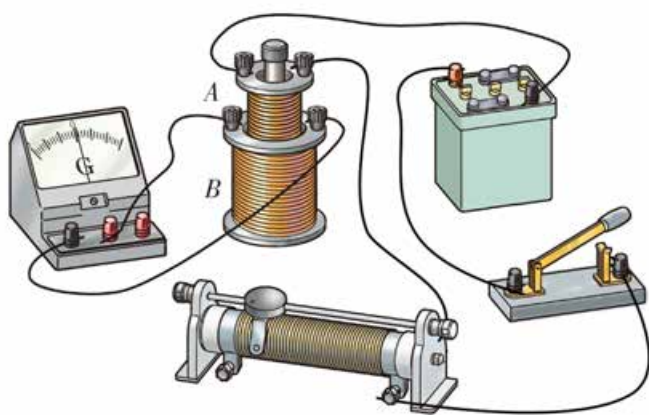


图 5-3-7 改变原线圈中的电流，在副线圈中产生感应电流

请记录：

在怎样的情况下，副线圈中有感应电流。感应电流是否持续。

不做实验，任何预测都没有意义。理论再好，没有实验，预测就没有任何实际意义。

——丁肇中

请讨论：

1. 本实验与法拉第的哪一类实验相似？法拉第当初对该实验现象是怎样认识的？

2. 在开关闭合和断开的瞬间，副线圈  $B$  中的磁通量是怎样变化（增加或减少）的？请从磁通量变化的角度，总结出闭合电路中产生感应电流的条件。

大量事实表明：只要穿过闭合电路的磁通量发生变化，闭合电路中就会产生感应电流。

## 电磁感应现象的应用

电磁感应现象及其规律的发现，使人类进入电气化时代。电磁感应现象除了在发电机中直接应用外，还广泛应用于变压器、电磁炉、动圈话筒、无线充电器等的工作过程。

### 变压器

为了获得不同电压的交流电，人们往往会利用变压器来实现。变压器是利用电磁感应现象来改变交流电压的装置。其主要构件是初级线圈、次级线圈和铁芯。当初级线圈中输入一定电压的交变电流时，铁芯中将产生交变磁场，交变磁场使次级线圈中产生感应电流，这样便可以向电器提供某一电压的电流。初级线圈的匝数少于次级线圈时，变压器起到升压的作用，次级线圈的输出电压高于初级线圈的输入电压；初级线圈的匝数多于次级线圈时，变压器起到降压的作用，次级线圈的输出电压低于初级线圈的输入电压。

### 电磁炉

电磁炉又称为电磁灶（图 5-3-8）。电磁炉是利用电磁感应现象进行锅内食物加热的家用电器。电磁炉的炉面是耐热、耐冲击的高强度陶瓷板，陶瓷板下方是产生交变磁场的线圈。电磁炉工作时，利用特殊装置产生高频交变电流流过陶瓷板下方的线圈，高频交变电流通过线圈便产生方向不断改变的交变磁场。因此，处于交变磁场中的平底铁锅或平底不锈钢锅的底部会产生强大的感应电流，锅底内的感应电流的热效应使得锅底迅速升温，从而实现加热锅内食物的目的。



图 5-3-8 电磁炉

### 动圈式话筒

话筒旧称麦克风，是一种声电转换的换能器。话筒种类繁多，但电路比较简单。其中有一种是利用电磁感应原理的动圈式话筒（图 5-3-9）。动圈式话筒工作时，声音使得话筒的振膜振动，带动磁场中线圈的振动，磁场中运动的线圈便产生感应电流（电信号），线圈中的感应电流（电信号）经过放大器放大后输入扬声器，扬声器再把电信号转化为薄膜的振动，产生声音。



图 5-3-9 动圈式话筒

### 信息浏览

#### 无线充电器

无线充电器指不用传统的导线连接到需要充电的设备上进行充电的器件。在无线充电过程中，充电器通过产生的变化磁场作用于需要充电设备，在需要充电的设备中产生感应电流，从而完成待充电电池的充电。也就是说，应用无线充电技术，用户只需要将待充电设备放在充电器的“平板”上即可进行充电。

无线充电技术过去曾经出现在手表和剃须刀上。但是，当时还无法针对大容量锂离子电池进行有效充电。经过科学家不断探索，目前解决了大容量锂离子电池的充电问题，实现了手机等产品的无线充电。无线充电技术必须有两个环节：

其一是与电源连接无线充电器，负责产生变化的磁场；其二是一般安装在电子产品里的线圈，负责接受变化磁场并产生感应电流，从而给设备电池充电。



图 5-3-10 手机无线充电图

### 家庭作业与活动

1. 如图 5-3-11 所示，竖直放置的长直导线通以恒定电流，有一矩形线框与导线在同一平面，在下列情况中线圈产生感应电流的是（ ）。

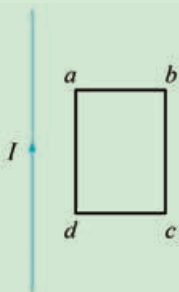


图 5-3-11

- A. 长直导线中的电流变大  
B. 线框向右平动  
C. 线框向下平动  
D. 线框以  $ab$  边为轴转动

2. 如图 5-3-12 所示，在正方形线圈的内部有一条形磁铁，线圈与磁铁在同一平面内，两者有共同中心轴线  $OO'$ 。有关线圈中是否产生感应

电流，下列说法中正确的是（ ）。

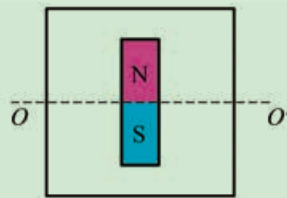


图 5-3-12

- A. 当磁铁向纸面外平移时，线圈中不产生感应电流  
B. 当磁铁向上平移时，线圈中不产生感应电流  
C. 磁铁在线圈平面内顺时针转动时，线圈中产

生感应电流

D. 当磁铁 N 极向纸外、S 极向纸内绕  $OO'$  轴转动时，线圈中产生感应电流

3. 某同学在“探究电磁感应产生条件”的实验中，设计了如图 5-3-13 所示的装置。线圈 A 通过电流表甲、高阻值的电阻  $R'$ 、滑动变阻器  $R_p$  和开关  $S$  连接到电源上，线圈 B 的两端接到另一个电流表乙上，两个电流表完全相同，零刻度居中。闭合开关后，当滑动变阻器  $R$  的滑片  $P$  不动时，甲、乙两个电流表指针的位置如图所示。

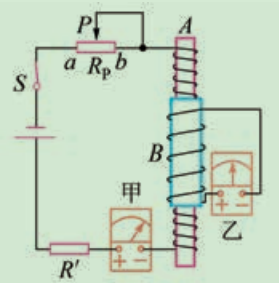


图 5-3-13

(1) 当滑片  $P$  较快地向左滑动时，电流表甲的指针的偏转情况是 \_\_\_\_\_，电流表乙的

指针的偏转情况是 \_\_\_\_\_(选填“向左偏”“向右偏”或“不偏转”)。

(2) 断开开关，待电路稳定后再迅速闭合开关，电流表乙的指针的偏转情况是 \_\_\_\_\_(选填“向左偏”“向右偏”或“不偏转”)。

4. 磁感应强度为  $B$  的匀强磁场仅存在于边长为  $2l$  的正方形范围内，有一个电阻为  $R$ 、边长为  $l$  的正方形导线框  $abcd$ ，沿垂直于磁感线方向，以速度  $v$  匀速通过磁场区域，如图 5-3-14 所示，从  $ab$  边进入磁场开始计时。

(1) 画出穿过线框的磁通量随时间变化的图像；  
(2) 从进入到穿出磁场的过程中，请分析线框中产生感应电流的情况。

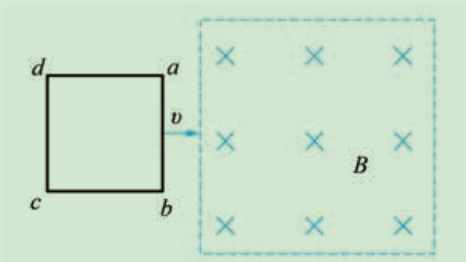


图 5-3-14

## 5.4 电磁波

### 伟大的丰碑——电磁场理论

1831年，法拉第发现电磁感应现象，麦克斯韦同年降生。电磁研究的接力棒传到了又一位巨人手中，法拉第的实验最终由麦克斯韦完成理论解释。

法拉第通过对自己电磁实验的深入思考，提出了一种全新的观点：磁体和电荷周围存在着一种由电荷和磁体本身产生的连续的介质，通过这种介质传递着电磁相互作用。法拉第把这种看不见、摸不着的介质，称做场（field）。

场的概念也使自然哲学对物质概念的认识提升到一个新的高度，即物质的存在可以有两种形态：一种是以分子、原子等实物粒子的形态存在的，另一种就是以场的形态存在的。

深入研究了奥斯特实验和法拉第电磁感应实验后，麦克斯韦提出了电磁场理论，其主要内容如下：

（1）变化的磁场能产生电场。如果磁场的变化是均匀的，产生的电场是稳定的；如果磁场的变化是不均匀的，产生的电场是变化的。

（2）变化的电场能产生磁场。如果电场的变化是均匀的，产生的磁场是稳定的；如果电场的变化是不均匀的，产生的磁场是变化的。

麦克斯韦的电磁场理论，全面系统地总结了前人有关电磁现象的发现。法拉第的“力线”和场的思想，以及创造性地推导出全面反映电磁规律的麦克斯韦方程，奠定了电磁学的理论基础；预言了电磁波的存在，完成了物理学的又一次大综合。

### 电磁波的存在

麦克斯韦的电磁场理论，特别是电磁波的预言，深邃而新颖，以至在它问世后的相当长时间内没有得到普遍的认同，一些科学家对这一没有通过实验证明的理论表示怀疑。直到1887年，德国物理学家赫兹才用实验发现了电磁波。

赫兹的贡献在于用实验事实证明了麦克斯韦电磁场理论的正确性，进一步证明了电磁场的物质性，为人类利用电磁波奠定了重要的基础，预示着广泛利用电磁波技术的时代即将到来。



麦克斯韦（T. Maxwell, 1831—1879），英国数学家、物理学家，经典电磁理论的奠基人。

## 实验探究

## 感受电磁波

如图 5-4-1 所示，打开收音机，转动调谐旋钮至无电台处，再调音量旋钮，使音量些大些。取一节干电池和一根导线，先将导线的一端跟电池的一个极相接，再用导线的另一端与电池的另一个极迅速断续接触。在接通和断开这一电路的瞬间，发出了电磁波并被收音机接收，收音机便发出“咯、咯”的声音。



图 5-4-1 感受电磁波实验

物理学家们花了几十年的时间才理解到麦克斯韦发现的全部意义……只是等到赫兹以实验证实了麦克斯韦电磁波的存在以后，对新理论的抵抗才被打垮。

——爱因斯坦

## 电磁波的应用

赫兹发现电磁波后，人们通过许多实验，证明光也是一种电磁波，而且还发现了其他形式的电磁波。电磁波已广泛用于广播、电视、医疗、军事和工业生产等人类活动。

通常人们按照波长将电磁波划分为无线电波、红外线、可见光、紫外线、X 射线、 $\gamma$  射线六种。

进入人眼能引起视觉的电磁波叫做可见光。如果没有可见光，地球上的生物就难以生存，世界就不会丰富多彩。

无线电波广泛用于广播、电视、无线网络和移动通信，成为人类生活不可或缺的工具。

红外线容易透过云雾、烟尘，因此被广泛应用于红外遥感和红外高空摄影。

紫外线能够杀死活细胞，医院病房常用紫外线灯杀菌。紫外线还具有较强的荧光效应。我们常用的日光灯和农业上消灭害虫的黑光灯，都是用紫外线来激发荧光物质发光的。较强的红外线和紫外线照射眼睛和皮肤时，可能使眼睛受伤和皮肤灼伤甚至癌病。因此，人们必须采取防护措施，避免较强的红外

线和紫外线对人体的危害。

X射线有穿透物质的本领。这种特性在工业上可以用来检查部件的裂纹和气孔，在医学上则可以用来透视人体和检查体内的病灶（图5-4-2）。

$\gamma$ 射线比X射线的穿透能力更强，也常用于工业生产中探测部件裂纹和气孔，还用来杀死癌细胞。

X射线和 $\gamma$ 射线照射人体时，会使正常细胞受到伤害甚至死亡。因此，必须对X射线和 $\gamma$ 射线进行防护。

你周围的环境中，哪些设备是借助于电磁波进行工作的？



图5-4-2 用X射线进行医疗诊断

## 光的量子化特征

在18~19世纪，人们通过大量实验证明，光是一种电磁波。这几乎完全否定了过去光的微粒学说，也使人们对光的能量的连续性深信不疑。其实，在发现电磁波的实验中，赫兹为了使接收器两个小球之间缺口放电强一些，尝试用高能射线照射接收器缺口，果然发现电火花变得很强。于是，赫兹把振荡器的电源开关关掉，用不同的射线照射接收器缺口。他发现，高频、高能量射线照射这个缺口的时候，立刻有电火花跳动；低频、低能量射线无论照射这个缺口多长时间，始终没有电火花产生。这一现象称为**光电效应**（photoelectric effect）。然而，赫兹无法用电磁波的理论来解释光电效应。

1905年，爱因斯坦发表了一篇《关于光的产生和转变的启发性的观点》的论文，提出了光量子概念，圆满地解释了光电效应。他认为，当光量子的能量大于某一值时，金属中的电子就能够获得光量子的能量而形成光电流；当光量子的能量小于某一值时，金属中的电子不能脱离原子束缚，始终不会形成光电流。光电效应说明了光的能量是不连续的，具有量子化特征。当然，光的量子学说并不是传统的光的微粒说。我们现在知道，无论是光还是电子，都具有量子化特征，这是微观世界的一个最基本的特征。

## 信息浏览

### 电磁辐射的危害与防护

电磁波在给人类带来福祉的同时，也给人类的生存环境带来危害。电磁辐射会引起人体的疾病，电磁辐射引起的环境污染叫做“电磁污染”。

电磁辐射对人体的危害可以是急性的，也可

以是慢性的。它会引起人体的心血管系统、神经系统和造血系统的功能紊乱，造成人体免疫力下降。人长时间处于电磁辐射作用下，容易引起头晕、失眠、嗜睡等神经功能的紊乱症状，也有可能使人体白细胞下降、视力模糊、心电图



不正常。特别是强电磁辐射作用会导致人体多种器官的损坏。

避免或减小电磁辐射危害的方法主要有：

(1) 正确摆放和使用家用电器。

家用电器摆放要合理，不要过于集中放置，尽可能在卧室内少放置电器。正确使用家用电器，家用电器的电磁辐射量一定要在国家标准规定的范围内。电器使用的时间不宜过长，且尽可能避免多台电器同时使用，使用时人体与电器之间要

保持适当的距离。

(2) 电磁屏蔽。

屏蔽主要是利用导电性能和导磁性能良好的金属板和金属网，通过反射和吸收来阻隔电磁波的传播。例如长期在强电磁辐射环境下工作的人，应穿具备电磁屏蔽功能的衣服。

(3) 注意饮食，多吃些富含维生素 B 或螺旋藻的食物。

## 家庭作业与活动

- 根据麦克斯韦电磁场理论，下列说法中正确的是（ ）。
  - 变化的磁场一定产生变化的电场
  - 均匀变化的磁场一定产生均匀变化的电场
  - 稳定的电场一定产生稳定的磁场
  - 并不是只要空间有变化的电场或磁场，就一定能够产生电磁波
- 电磁波包含了  $\gamma$  射线、红外线、紫外线、无线电波等，按波长由长到短的排列顺序是无线电波、\_\_\_\_\_、\_\_\_\_\_、\_\_\_\_\_。
- 电磁波是一个大家族，生活中有许多应用会涉及电磁波，请举出几个与你关系密切或印象深刻的实例。

## 第5章家庭作业与活动

## A组

1. 请判断下列说法是否正确。

- (1) 空间各点磁场的方向就是该点磁感线的切线方向。
- (2) 磁感线越密, 该处磁通量越大。
- (3) 磁感线越疏, 该处磁感应强度越大。
- (4) 近距离平行放置的两个条形磁铁异名磁极间的磁场是匀强磁场。
- (5) 铁屑在磁场中显示的就是磁感线。
- (6) 磁通量为零并不说明磁感应强度为零。

2. 如图 5-A-1 所示, 线圈  $ABCO$  的面积为  $0.4 \text{ m}^2$ , 匀强磁场的磁感应强度  $B = 0.1 \text{ T}$ , 方向为  $x$  轴正方向。在线圈由图示位置绕  $z$  轴向下转过  $60^\circ$  的过程中, 通过线圈的磁通量改变  $\text{Wb}$ 。

3. 如图 5-A-2 所示, 在水平虚线上方有磁感应强度为  $2B$ 、方向水平向右的匀强磁场, 下方有磁感应强度为  $B$ 、方向水平向左的匀强磁场。边长为  $l$  的正方形线圈放置在两个磁场中, 线圈平面与水平虚线成  $\alpha$  角, 线圈分处在两个磁场中的面积相等, 则穿过线圈平面的磁通量的大小为  $\text{Wb}$ 。

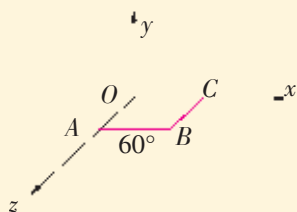


图 5-A-1

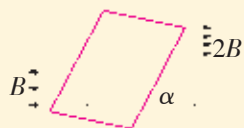


图 5-A-2

4. 如图 5-A-3 所示, 在条形磁铁外套有  $A$ 、 $B$  两个大小不同的圆环, 穿过  $A$  环的磁通量  $\Phi_A$  与穿过  $B$  环的磁通量  $\Phi_B$  相比较, 则 ( )。

- A.  $\Phi_A > \Phi_B$
- B.  $\Phi_A < \Phi_B$
- C.  $\Phi_A = \Phi_B$
- D. 不能确定

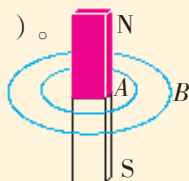


图 5-A-3

5. 建立完整的电磁场理论并首先预言电磁波存在的科学家是 ( )。

- A. 法拉第
- B. 奥斯特
- C. 赫兹
- D. 麦克斯韦

6. 电磁波在生活中有着广泛的应用。不同波长的电磁波具有不同的特性, 因此也有不同的应用。下列器件与其所应用的电磁波对应关系不正确的是 ( )。

- A. 雷达 — 无线电波
- B. 手机 — X 射线
- C. 紫外消毒柜 — 紫外线
- D. 遥控器 — 红外线

7. 如图 5-A-4 所示, 一个金属薄圆盘水平放置在竖直向上的匀强磁场中, 下列做法中能使圆盘产生感应电流的是 ( )。

- A. 圆盘绕过圆心的竖直轴匀速转动
- B. 圆盘以某一水平直径为轴匀速转动
- C. 圆盘在磁场中向右匀速平移
- D. 匀强磁场均匀增加

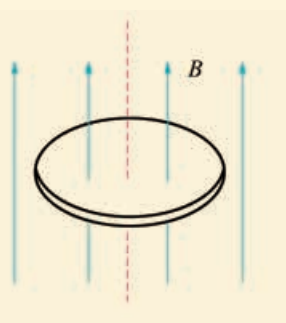


图 5-A-4

8. 如图 5-A-5 所示, 当电流通过线圈时, 磁针的南极指向读者。试确定线圈中电流的方向。

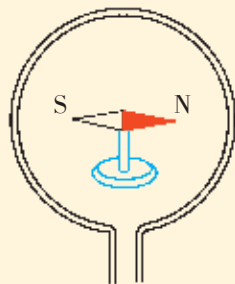


图 5-A-5

9. 如图 5-A-6 所示, 小磁针静止在通电螺线管的内部, 请分别标出通电螺线管磁场方向和小磁针的南北极。

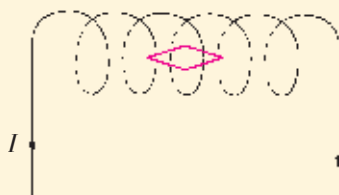


图 5-A-6

10. 把小磁针放在磁场中, 磁场的磁感线如图 5-A-7 所示。说明该磁场的特点。小磁针将怎样转动? 它最终停在哪个位置?

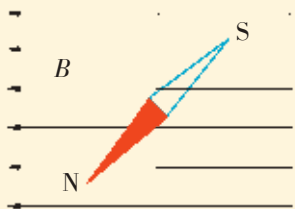


图 5-A-7

11. 下列说法正确的是 ( )。
- 恒定电流能够在周围空间产生稳定的磁场
  - 稳定电场能够在周围空间产生稳定的磁场
  - 均匀变化的电场能够在周围空间产生稳定的磁场
  - 均匀变化的电场和磁场互相激发, 形成由近及远传播的电磁波

## B 组

1. 在闭合铁芯上绕有一组线圈, 线圈与滑动变阻器、电池构成电路, 假定线圈产生的磁感线全部集中在铁芯内,  $a$ 、 $b$ 、 $c$  三个闭合金属圆环位置如图 5-B-1 所示, 当滑动变阻器的滑片  $P$  左右滑动时, 能产生感应电流的圆环是 ( )。

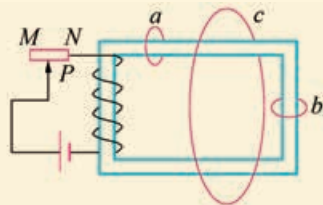


图 5-B-1

- 把一个面积为  $5 \times 10^{-2} \text{ m}^2$  的单匝矩形线圈放在磁感应强度为  $2 \times 10^{-2} \text{ T}$  的通电螺线管中, 当线圈平面与磁场方向垂直时, 穿过线圈的磁通量多大?
- 将面积为  $0.4 \text{ m}^2$  的导线环置入通电螺线管中部, 环面与磁场方向垂直。已知穿过导线环的磁通量是  $2.0 \times 10^{-2} \text{ Wb}$ , 求导线环处磁场的磁感应强度。
- 如图 5-B-2 所示, 矩形导体线框  $abcd$  放置在水平面内。磁场方向与水平方向成  $\alpha$  角, 已知  $\sin \alpha = \frac{4}{5}$ , 回路面积为  $S$ , 磁感应强度为  $B$ , 则通过线框的磁通量为 ( )。

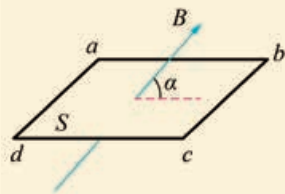


图 5-B-2

- $BS$
  - $\frac{4}{5}BS$
  - $\frac{3}{5}BS$
  - $\frac{3}{4}BS$
5. 如图 5-B-3 所示, 开始时矩形线框与匀强磁场的方向垂直, 且一半在磁场内, 一半在磁场外。若要使线框中产生感应电流, 下列方法中不可行的是 ( )。

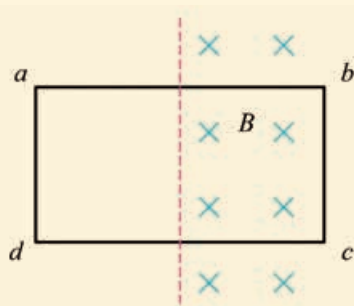


图 5-B-3

- 将线框向左拉出磁场
  - 以  $ab$  边为轴转动 (小于  $90^\circ$ )
  - 以  $ad$  边为轴转动 (小于  $60^\circ$ )
  - 以  $bc$  边为轴转动 (小于  $60^\circ$ )
6. 现将电池组、滑动变阻器、带铁芯的线圈  $A$ 、线圈  $B$ 、电流计及开关如图 5-B-4 所示连接。下列说法中正确的是 ( )。
- 开关闭合后, 线圈  $A$  插入或拔出线圈  $B$  都会引起电流计指针偏转
  - 线圈  $A$  插入线圈  $B$  中后, 开关闭合和断开的瞬间电流计指针均不会偏转
  - 开关闭合后, 滑动变阻器的滑片  $P$  匀速滑动, 会使电流计指针静止在中央零刻度处
  - 开关闭合后, 只有滑动变阻器的滑片  $P$  加速滑动, 电流计指针才能偏转

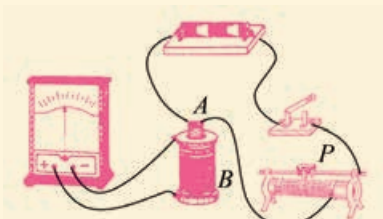


图 5-B-4



## 第 6 章 能源与可持续发展

随着人类文明的不断进步，地球上的能源消耗量正在以惊人的速度增长。与此同时，地球上的矿物燃料储藏量正在急剧地减少。而且，化石燃料的大量使用，已导致了全球气候变暖等生态环境问题。面对日趋严重的能源危机和环境污染，人类必须思考：

能源和环境与人类生存有怎样的关系？

能源的开发和利用会带来哪些问题？

未来究竟应该使用什么样的能源？

怎样才能做到可持续发展？

本章将首先学习能量守恒定律，了解能量转化过程的方向性；接着从目前能源的开发、利用和消耗情况出发，认识能源和环境与人类生存的关系；最后研究能源开发利用带来的问题及其应对策略，分析技术进步对利用自然资源和节约能源的影响，树立节能与环境保护的意识和行为，探讨可持续发展的战略。

## 6.1 能量的转化与守恒

在变化的世界中探索一种不变的秩序，历来是哲学家、科学家感兴趣的课题。能量守恒定律的发现经历了漫长的过程。

### 不同形式能量的转化

进入 19 世纪以后，相继出现了一系列关于不同运动形式之间联系与转化的新发现。

1800 年，意大利科学家伏打（C. Volta）发明“伏打电堆”，实现了化学运动与电运动之间的转化，这是不同运动形式的联系与转化的重要环节。1820 年，丹麦物理学家奥斯特发现了电流的磁效应，揭示了电与磁的联系。1821 年，法拉第制成了“电磁旋转器”，实现了电运动和机械运动之间的转化。

迈尔是德国的青年医生，他是从生理学出发对能量进行研究的。他在一家造纸厂设计了一个实验，通过搅拌纸浆，测出纸浆的升温，计算出一定的机械功所产生的热。他进一步将机械能与热能的转化关系扩展到其他现象，分析了 25 种不同形式能量之间的转化现象，形成了一切能量可以相互转化的思想。

在各种不同的自然现象中，机械运动和热运动的联系与转化最为普遍。英国物理学家焦耳以此为突破口，从 19 世纪 40 年代起，经历 40 年的沧桑，设计了各种不同的方案，先后做了 400 多次实验，测定功与热之间的当量关系。焦耳用日益精确的数据，奠定了各种形式能量之间互相转化与守恒的实验基础。

### 能量守恒定律

大量事实证明：各种运动形式及其对应的能量可以互相转化，其总量在转化中守恒。

能量既不能凭空产生，也不能凭空消失，它只能从一种形式转化为其他形式，或者从一个系统（物体）转移到其他系统（物体），在转化和转移的过程中其总量不变。这就是能量守恒定律（the law of conservation of energy）。

能量守恒定律是自然界的一条普遍规律。任何自然过程，不论是物理的、化学的、生物的，也不论是宏观的、微观的，都得遵循能量守恒定律。这是科学规律统一性的表现。

能量守恒定律可以指导人们有效地开发和利用新能源，也可以指导人们主动地创造条件，实现能量的转化，以实现某种特定的应用。例如红外摄影，就是把目标物发出的能量微弱的红外线接收下来，转化为电信号进行放大，再把放大的电信

号转化为光信号显示出来。

能量守恒定律可以指导人们对新的物理现象做出解释，建立新的理论，或根据物理现象做出惊人的预言。例如，爱因斯坦光电效应方程就是能量转化与守恒的反映。

能量守恒定律也可以用来启迪和检验新的发明。历史上曾风靡一时的永动机，无论构思多么巧妙，外表多么华丽，由于违背了能量守恒定律，只能以失败告终。

## 能量转化的方向性

在自然界中，任何运动变化过程都遵循能量守恒定律。那么，能量可以被人们不断地反复利用吗？

在自然界中，一切自发过程都是有方向性的，是不可逆的。

生活经验告诉我们，热量能够自发地从高温物体传到低温物体，却不能自发地从低温物体传到高温物体。这是因为热传递具有方向性。

打开一瓶香水，香水分子总是自发地向四周散开，不会自发地从四面八方重新聚集到瓶子里。

河水只能从高处流向低处，“奔流到海不复回”，不会自动地从低处流向高处。

一块石块从高处落下，重力势能转化为动能和由于克服空气阻力做功而产生的内能。当石块落到地面最终静止的时候，其动能又转化为由于撞击而产生的内能。然而静止在地面上的石块不会把它的内能自动转化为动能，使自己重新升到空中。

物理学研究表明，不同形式的能量可以互相转化，在转化过程中能量总量保持守恒，能量转化是有方向性的。

恩格斯把能量守恒定律、细胞学说、达尔文的生物进化论，称为19世纪中叶自然科学的“三个伟大发现”。



a 怒放的礼花不可能收回再放



b 水往低处流，下落的石头也不会把内能自动转化为动能，使自己重新飞上天去

图 6-1-1 过程的方向性

## 家庭作业与活动

1. 分析打桩机工作时各种形式的能量是如何转化的。
2. 简述闭合电路中的能量转化过程。
3. 分析你家中消耗的电能分别转化为哪些能量。
4. 分析在地热发电、风力发电、太阳能光电池等发电方式中，发生的是什么样的能量转化。
5. 人体在最佳状态下只能把其化学能的 25% 转化为有用的机械能。假设一位质量为 60 kg 的同学有这样的转化效率，他登山时平均每小时登高 400 m，那么，在 3 h 内，该同学共消耗了多少化学能？ $g$  取  $10 \text{ m/s}^2$ 。

## 6.2 能源利用与环境污染

### 能源及其分类

所谓能源，是指能够提供可利用能量的物质。它是人类赖以生存和生活的重要物质基础。人类利用能源的历史大致经历了柴薪、煤炭、石油这三个时期。

目前，人类消耗的能源主要是煤、石油、天然气等。这些能源在有限的时间内不可再生，通常叫做不可再生能源。水能、风能、太阳能、生物质能、海洋能等，可以由自然的力量再生，叫做可再生能源。

### 我国的能源现状

我国能源资源总量比较丰富。我国拥有较为丰富的化石能源资源，其中煤炭占主导地位，石油、天然气资源储量相对不足。截至 2015 年底，煤炭探明储量为  $1.145 \times 10^{12}$  t，石油为 257 亿桶（约合  $3.5 \times 10^{10}$  t），天然气为  $4.8 \times 10^{12}$  t。油页岩、煤层气等非常规化石能源储量潜力较大。我国拥有较为丰富的可再生能源资源，水力资源的可开发年发电量列世界首位。

由于我国人口众多，人均能源资源拥有量在世界上处于较低水平，煤炭和水力资源人均拥有量相当于世界平均水平的 50%，石油、天然气人均资源量仅为世界平均水平的 1/15 左右。而且，我国能源资源分布广泛但不均衡，资源赋存与能源消费地域存在明显差别。

改革开放以来，中国能源工业迅速发展，为保障国民经济持续快速发展作出了重要贡献。经过几十年的努力，中国已经初步形成了煤炭为主体、电力为中心、石油天然气和可再生能源全面发展的能源供应格局，基本建立了较为完善的能源供应体系。随着经济的发展，我国人均能源消费量将逐年增加，能源工业有待于进一步发展。

近年来，我国能源节约效果显著，万元国内生产总值能源消耗逐年下降。能源消费结构不断优化，目前我国能源消费结构如图 6-2-1 所示，其中原煤占 63.7%，原油占 18.6%，天然气占 5.9%，一次电力（水电、核电、再生能源发电）占 11.9%。

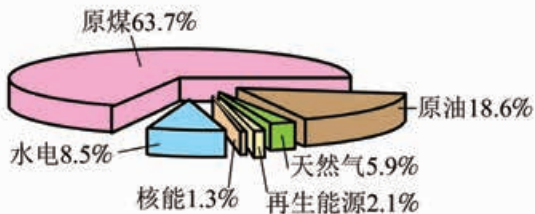


图 6-2-1 我国能源消费结构 (2015 年)

当今世界人类最关心的五大问题是：能源、粮食、环境、人口和资源。

为了把各种燃料从所含能量的角度统一起来，能源科学中引进了“标准煤”的概念，1 kg 标准煤的热值为  $2.92 \times 10^7$  J。原油、天然气、原煤与标准煤的换算关系为：

1 t 原煤 = 0.714 t 标准煤，

1 t 原油 = 1.43 t 标准煤，

1000 m<sup>3</sup> 天然气 = 1.10 ~ 1.33 t 标准煤。

### 人类生存环境及污染

煤炭、石油等化石燃料的大量使用，带来了严重的环境污染问题。直接的污染是大气污染和水污染，引起的后果是温室

效应和酸雨。据统计,2015年,我国二氧化硫的排放量达 $1.974 \times 10^7$  t,其中88%是工业排放。酸雨面积占国土面积的7.6%,酸雨城市比例为22.5%,酸雨频率平均为14.0%,酸雨类型总体为硫酸型,污染主要分布在长江以南—云贵高原以东地区。由酸雨造成的经济损失约占当年国内生产总值(GDP)的2%。

我国城市生活垃圾的历年堆存量已达到 $6 \times 10^9$  t,现在已有不少城市被日益增多的垃圾所困扰。迄今为止,我国许多城市处理生活垃圾仍以露天堆放、填埋为主,这不仅占用了宝贵的土地资源,而且对环境造成了严重的二次污染。

废旧电池对环境的污染也十分严重。资料表明,一节1号有汞电池烂在地里,会使 $1 \text{ m}^2$ 的土地失去农业价值;一粒纽扣电池会使600 t水受污染而无法饮用。

环境噪声污染、光污染、电磁辐射污染等也日趋严重,越来越被人们所关注。

环境噪声污染是指在工业生产、建筑施工、交通运输和社会生活中所产生的环境噪声超过国家规定的环境噪声排放标准,并干扰他人正常生活、工作和学习的现象。

一般将光污染分成白亮污染、人工白昼和彩光污染三类。所谓白亮污染,就是在阳光强烈照射时,城市里建筑物的玻璃幕墙、釉面砖墙、磨光大理石和各种涂料等装饰物反射光线,明晃白亮、炫眼夺目。长时间在白色光亮污染环境下工作和生活的人,视网膜和虹膜都会受到不同程度的损害,视力急剧下降,产生类似神经衰弱的症状。所谓人工白昼,就是在夜幕降临后,商场、酒店的广告灯、霓虹灯闪烁夺目,如同白天一样。人工白昼扰乱人体正常的生物钟,导致白天工作效率低下。所谓彩光污染,就是舞厅、夜总会安装的黑光灯、旋转灯、荧光灯以及闪烁的彩色光源构成的光污染。彩光污染有损人的生理功能,伤害眼睛,干扰大脑中枢神经,出现头晕目眩、恶心呕吐、失眠等症状,还会影响人的心理健康。

声波的能量越大,声音就越强。人们通常用声级计测量声音的强弱,声级的单位是分贝(dB)。正常人刚能听到的最弱的声音叫做听阈,听阈的声级为0 dB。人耳开始感到疼痛的声音叫做痛阈,痛阈的声级为120 dB。人们轻声耳语的声级为30 dB,一般交谈的声级为60 dB,大声吵嚷的声级为80~90 dB,火车、拖拉机开动时的声级为100 dB,大炮发射炮弹时和飞机起飞时的声级为130 dB。



图 6-2-2 大气被污染



图 6-2-3 水被污染



现代科学研究发现,电视机、空调器、电冰箱、电风扇、洗衣机、组合音响、电脑等各种家用电器和电子设备,在使用过程中会产生多种不同波长和频率的电磁波,这些电磁波充斥空间,对人体具有潜在的危害,被称为“电磁污染”。

“白色污染”是人们对塑料垃圾污染环境的一种形象说法。它是指用聚苯乙烯、聚丙烯、聚氯乙烯等难降解高分子化合物制成的各类生活塑料制品,使用后被随意丢弃而造成的城市环境严重污染。

保护人类的生存环境已成为世界各国共同关注的问题。“让我们的天更蓝,地更绿,水更清,空气更洁净”,这句口号表达了人们治理环境问题的目标和信心。

### 案例分析

**案例 1** 什么叫温室效应?试分析温室效应的产生原因与危害。

**解答** 大气中二氧化碳含量增加导致气温升高的现象叫温室效应。

通常情况下,地球大气中含有一定量的水蒸气和较少的二氧化碳气体,它们对地球的向外散热起了遮拦的作用。这种遮拦作用叫做自然温室效应。

自工业革命以来,由于工厂、家庭、汽车大量使用煤、石油、天然气等化石燃料,每时每刻都在向大气排放废气,加上森林被毁,因此大气中二氧化碳的含量明显增加,温室效应不断增强,地球表面的平均气温逐渐升高。地球气温的升高,导致海水的蒸发加快,大气中水蒸气的含量增加,温室效应的增强更为加剧。

此外,电冰箱、空调机等制冷机所排放的氯氟烃气体破坏臭氧层,使臭氧层变薄而出现空洞,会让紫外线更多地到达地球表面,也使温室效应增强。

由温室效应导致的地球变暖、气候反常、海洋风暴增多、海平面上升、病虫害增加、土地干旱、沙漠面积增多等现象,对人类的生存和发展造成了严重的威胁。

请思考并讨论:温室效应还有哪些危害?如何抑制日益增强的温室效应?

**案例 2** 试分析雾霾的成因与危害,提出治理雾霾的措施。

**解答** 雾霾是一种大气污染现象。大气中直径小于等于 2.5 微米的颗粒物(简称 PM<sub>2.5</sub>)超过大气循环能力和承载能力时将持续积聚,如果遇上大气层结比较稳定、无明显扩散的情况,就会发生雾霾天气了。

雾霾天气的罪魁祸首是PM2.5，其来源主要是：煤炭、石油等化石燃料燃烧后的排放物，如二氧化硫、氮氧化物；废弃物燃烧所产生的有毒颗粒；建筑行业所排放的固体颗粒；大气化学反应所产生的固体颗粒等。

PM2.5能直接进入人体呼吸道和肺泡并粘附在其上，从而引起急性鼻炎、急性支气管炎等病症。长期吸入这种有害气体，会诱发肺癌。出现雾霾天气时，大气能见度降低，从而影响交通运输，导致航班停飞，高速公路关闭，交通事故增加等。这时个人应减少户外活动，出门戴防护口罩，保持室内空气洁净。

治理雾霾的关键在于控制并降低PM2.5的排放量，要严格依照《中华人民共和国大气污染防治法》，防治大气污染，保护和改善环境；要落实节能减排政策，降低能源消耗，提高能源的利用率，通过技改措施减少二氧化硫、氮氧化物和粉尘的排放量；加快能源结构的调整，做好煤炭的高效清洁利用，提高燃油品质，促进清洁能源的发展。



图 6-2-4 温室效应使极地冰山融化



图 6-2-5 酸雨对森林的破坏

STSE		空气的质量指标	
空气质量级别	污染物指数	建 议	
	500		
五级	400	污染物浓度达到这样的危险水平时,所有人都应该待在室内,减少体力活动。	
	300	污染物浓度达到这种极不利于健康的水平时,任何人都应避免户外活动。敏感的人,特别是有心脏病或肺病的人,应待在室内。	
四级	200	污染物浓度达到这种极不利于健康的水平时,所有的人,包括健康成人和儿童,都应避免剧烈的户外活动。敏感的人,特别是有心脏病或肺病的人,应待在室内。	
	138	污染物浓度达到这种不利于健康的水平时,任何人,包括健康成人和儿童,都应避免长时间剧烈的户外活动。敏感的人,特别是有心脏病或肺病的人,应避免户外活动。	
三级	100	污染物浓度达到这种不利于健康的水平时,敏感的人,如有心脏病或肺病的人,应减少户外活动。	
	50	良	
二级	50		
一级	0	优	

## 信息浏览

### 20 世纪世界六大污染事故

20 世纪，世界上发生了许多起突发性的污染事故，其中最严重的是以下六大污染事故。

#### ■ 意大利塞维索化学污染事故

1976 年 7 月，意大利塞维索一家化工厂发生爆炸，使剧毒化学品二噁英扩散，许多人中毒。事发几年后，当地的畸形儿出生率大为增加。

#### ■ 美国三哩岛核电站泄漏事故

1979 年 3 月，美国宾夕法尼亚州三哩岛核电站反应堆受损，放射性裂变物质泄漏，使周围 80 km 内的约 200 万人处于放射物污染的危险之中。人们停工停课，纷纷撤离，一片混乱。

#### ■ 墨西哥液化气爆炸事件

1984 年 11 月，墨西哥城郊一家石油公司液化气站的 54 座储气罐几乎全部爆炸起火，对周围环境造成严重危害，死亡上千人，50 万居民逃难。

#### ■ 印度博帕尔毒气泄漏事故

1984 年 12 月，美国联合碳化物公司设在印度博帕尔市的农药厂剧毒气体外泄，使 2500 人死亡，20 万人受害，其中 5 万人可能双目失明。

#### ■ 苏联切尔诺贝利核电站事故

1986 年 4 月，苏联基辅地区切尔诺贝利核电站 4 号反应堆爆炸起火，放射性物质外泄，上万人受到伤害，同时其他国家也遭受放射性尘埃的污染，我国北京上空就检测到这样的尘埃。

#### ■ 德国莱茵河污染事故

1986 年 11 月，瑞士巴塞尔市桑多兹化学公司的仓库起火，大量有毒化学品随灭火用水流进莱茵河，使靠近事故地段的河流生物绝迹，成为死河。160 km 处鳗鱼和大多数鱼类死亡，500 km 处的井水不能饮用，德国和荷兰被迫向居民定量供水，德国几十年来为治理莱茵河投资的 210 亿美元也付诸东流。

## 家庭作业与活动

1. 调查一下本地主要使用哪些能源，并了解这些能源的储量和开发情况。
2. 什么叫温室效应？温室效应有哪些危害？如何控制温室效应的增强？
3. 什么叫酸雨？酸雨有哪些危害？如何防治酸雨？
4. 向气象部门了解本地区气候变化的有关情况及其原因。
5. 取两只大小相同的广口玻璃瓶，一只充满干燥洁净的空气，另一只存有少量水。利用你学过的化学知识，使瓶中充满二氧化碳和水蒸气。盖好瓶盖，各插入一支温度计，并将玻璃瓶密封。把两只玻璃瓶一起放在太阳光下，1 h 以后，观测它们的温度有什么差异，分析造成差异的原因。

## 6.3 能源开发与环境保护

能源的大量开发和利用，给我们带来了许多值得引起重视的问题，例如，怎样解决经济高速发展与能源资源严重短缺的矛盾、有限的能源与能源利用效率较低的矛盾、能源造福于人类与污染环境的矛盾，等等。这些问题影响着人类的生活和生产，制约着社会的更快进步和发展。为此，各国政府和科学家正在积极努力，按照“高效、接近零排放、经济上可推广”的原则，寻求解决问题的对策。

### 能源危机和开发新能源

#### 树立能源危机的意识

地球储存的煤、石油、天然气三大“初级能源”，在过去几百年里维系着人类社会和经济的发展。然而，随着人口的增长和社会的进步，世界能量消耗量以每年约 2.7% 的速度增长。人们在享用这些资源的同时，也使这些资源的储存量逐渐减少。据估算，到 21 世纪后期人类将首先面临石油资源枯竭的危机(图 6-3-1)。

中国能源资源的现状是：人均能源占有量偏低，人均煤炭可采储量为世界平均值的 1/2，人均石油可采储量为世界平均值的 1/10；优质能源资源（石油、天然气等）严重短缺，能源结构不合理；相当长的时间内还得以煤为主要能源。这将给环境和交通运输带来巨大的压力。

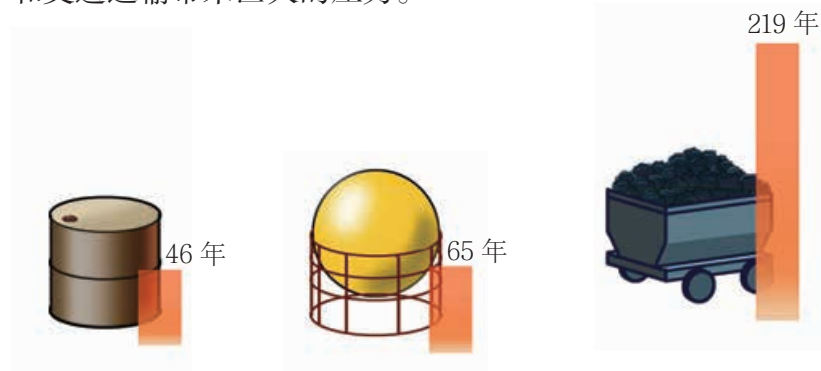


图 6-3-1 化石燃料目前估计的使用年限

#### 研究和开发新的能源资源

研究和开发新的能源资源，是人类当前面临的重大任务。研究表明，核能和氢能有可能在未来替代石油，成为人类的第四代能源。

**核能** 核能的最大优点是无大气污染，集中生产量大，可以替代煤炭、石油和天然气等燃料。自 1954 年世界上第一座原



图 6-3-2 秦山核电站全景

子能电站建成以来，全世界已有 20 多个国家建成了 400 多座核电站，这些核电站的发电量占全世界总发电量的 16%。我国于 1991 年建成了自行设计的第一座核电站——浙江秦山核电站(图 6-3-2)，后又建成了广东大亚湾核电站。目前，一批新的核电站正在建设之中。到 2020 年，我国核电装机容量预计将达到  $5.8 \times 10^7$  kW。

**氢能** 氢的来源很丰富。据估计，氢构成了宇宙质量的 75%。氢的热值大，为  $1.21 \times 10^8$  J/kg，是汽油热值的 2.8 倍。氢的燃烧产物是水，污染极小，因此氢能是一种前景广阔的清洁能源。但是，制氢(如电解水)需消耗大量的电能，成本很高。如何开发和利用氢能是一个重大的技术课题。

### 发展可再生能源技术

可再生能源包括太阳能、生物质能、风能、地热能、海洋能等，其共同特点是储量大、清洁、可再生。但是，由于可再生能源受自然环境影响大、稳定性差，要利用它们，还有许多问题有待研究。从现实需求以及从技术与经济可行性的角度看，太阳能、生物质能等已经具备应用条件。

**太阳能** 太阳能的特点是巨大、清洁、取之不竭。太阳辐射到地球大气层的功率高达  $1.73 \times 10^{17}$  W，也就是说太阳每秒照射到地球上的能量就相当于  $5 \times 10^6$  t 标准煤产生的能量。

目前利用太阳能的技术主要有：(1)太阳能热利用技术，如太阳能热水器、太阳能聚焦高温加工、太阳灶等；(2)太阳能光电转换技术，即通过太阳能光电池把光能转换成电能；(3)光化学转换技术，如利用太阳能光化学电池电解水，产生氢气。

**风能** 风能是一种机械能。我国幅员辽阔、海岸线漫长，拥有丰富的陆上和海上风电资源，发展前景十分广阔。



图 6-3-3 我国的“长征”五号火箭用液氢和液氧作燃料



图 6-3-4 地热发电站



图 6-3-5 风力发电场

**生物质能** 生物质是指由光合作用产生的各种有机体，如薪柴、农林作物等。生物质能是太阳能以化学能形式贮存在生物中的一种能量。利用多种技术可把生物质转化成常规的固态、液态和气态燃料。例如，利用热化学转换技术，可把木材废料等通过气化炉加热转换成煤气，或者通过干馏将生物质变成煤气、焦油和木炭。利用生物转换技术，把粪便等生物质通过沼气池发酵生成沼气。沼气的主要成分是甲烷，沼气在我国农村已有了较好的应用，工业沼气技术也已开始应用。

请查阅我国的风力资源以及风能的利用情况，讨论地热能的形成及潮汐能发电的原理。

## 提高能源利用效率

能源的高消耗是对能源的极大浪费，科学家正在为提高能源的利用效率而进行着不懈的努力。

### 开发能量转换新技术

传统的能量使用是将燃料的化学能转化成热能，再转换成机械能，然后变为电能。由于热机把热能转换成机械能的效率非常低，有用的热能只有 25%~30%，大部分热能都散失掉了。因此，必须开发能量转换新技术。有希望取代热机技术的新技术是磁流体发电和燃料电池技术。磁流体发电的热电转换效率可达 55% 以上，燃料电池的化学能转换成电能的效率则高达 75% 以上。

### 煤的洁净利用技术

煤直接燃烧有很多缺点，如燃烧不完全，热能利用率低，造成大面积的环境污染等。而且煤体积大、笨重，运输、储存、加工和使用都很不方便。

采用煤的洁净技术，可提高用煤发电的效率，并使煤成为一种安全、稳定、廉价的能源。

以制煤浆技术为例。先把煤块研磨成直径 90  $\mu\text{m}$  以下的极细微粒，然后通过浮选除去灰粉和有害杂质，再把它们同水按 3:1 的比例混合，最后加进一种表面活性剂，这样就制成了一种廉价而清洁的胶体状代油燃料——煤浆。煤浆的外观像油，燃烧起来也像油。它能稳定地着火燃烧，既保留了煤的燃烧特性，又具备了类似重油的液态燃料特点。煤浆是一种最现实的煤基流体燃料，也是一种制备相对简单、便于输送储存、安全可靠、低污染的新型清洁燃料。

### 先进的发电技术

普通发电厂的能源效率只有 35%，高达 65% 的能源大部分以热的形式散发出去，白白地浪费了。联合热电技术就是将这



图 6-3-6 潮汐发电站

部分热再用来发电或者提供给工厂和家庭，这样可使能源利用率提高到 85% 以上。

此外，先进的发电技术和装备、先进电机冷却技术、余热利用技术、高效大容量输电技术，以及将计算机引入能源管理系统等，都是有效提高能源利用效率的重要举措。



图 6-3-7 污水处理厂



图 6-3-8 测量市区噪声强度的设施

## 环境污染和环境保护

为了营造一个天更蓝、地更绿、水更清、空气更洁净的环境，控制现有能源利用过程中的污染物排放和建立清洁高效的能量利用技术已成为当务之急。科学家正在加紧研究环境能源技术，它主要解决以下几个方面的问题。

### 城市生活垃圾问题

通过垃圾分选技术，使不同垃圾各尽其用。如有些垃圾能通过燃烧供热发电，有机易腐蚀垃圾可转化为高品位有机肥料等。建造日处理数百吨城市生活垃圾的综合利用工业系统，实现城市生活垃圾的能源化、资源化和无害化综合利用，是现代化城市建设的一项重要指标。

### 汽车尾气污染问题

为了适应越来越严格的汽车尾气排放标准，减少城市中的大气污染，目前科学家正在研制燃料电池电动车。如果汽车能以纯氢为燃料，就可以达到废气的“零”排放。我国在燃料电池材料、电池系统和电动汽车电气驱动系统的研究方面取得了可喜的进展。

### 环境污染的综合治理问题

积极采用新技术，有效地做好环境保护工作，如建立污水处理厂（图 6-3-7）、垃圾处理场、废水和废气的封闭循环处理系统等。城市噪声的治理也已经提到了议事日程，一些城市的环保部门规定，车辆进入市区，不允许鸣喇叭。还在交通要道设置了测量噪声强度的仪器（图 6-3-8），用来监测噪声的强度。对控制光污染、电磁辐射污染和白色污染等也有相关的规定。

## 几种新能源

### ■ 燃料电池

燃料电池是将氢、天然气、煤气、甲醇、肼等燃料的化学能直接转换成电能的一种化学电源。

早在1839年,英国科学家格罗夫(W. R. Grove)就提出了氢氧燃料电池的原理。如图6-3-9所示,燃料电池由燃料(例如氢、甲烷等)、氧化剂(例如氧和空气等)、电极和电解液这四部分组成。在正极(燃料电极),氢气在催化剂作用下被分离为氢离子(质子)和电子,其中氢离子通过电解液流到负极(氧气电极),而电子不能通过电解液,只能留在正极,这样就在两电极之间形成了电势差。如果接通两电极,氢原子分离出的电子就会沿电路从正极流到负极,在那里同氢离子结合后,与氧气发生反应,生成水并释放出热量。

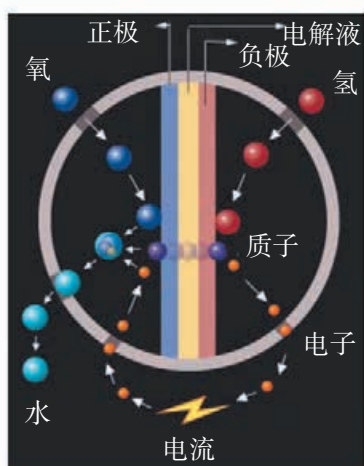


图 6-3-9 燃料电池工作原理图

燃料电池构造简单,能量利用率高,工作稳定。理论上,应用于汽车的燃料电池可以把氢燃料能量的60%~70%转化为动能。更引人注目的是,燃料电池发电时,不产生氮氧化物和硫化物,产生的二氧化碳也很少,不会增加光化学烟雾、酸雨污染及温室效应。

### ■ 卫星太阳能发电

卫星太阳能发电就是将太阳能发电装置组装在卫星上进行发电。当卫星绕地球做同步旋转时,装在卫星上的太阳能电池直接将太阳能转换成电能,再通过卫星上的大功率微波发生器转换成微

波电磁能,并用定向天线将微波能向设在地面近海或海岛上的微波接收站发射。地面接收站接收卫星发射来的微波能并将其转换为电能供用户使用(图6-3-10)。

根据推测,卫星太阳能发电站可设计成容量达 $1.5 \times 10^6 \sim 2.0 \times 10^7$  kW的规模,其最大容量可满足几十个百万以上人口的大城市的用电。

### ■ 天然气水合物

天然气水合物是天然气和水分子组成的一种固态晶体,也称甲烷水合物,又称可燃冰,主要储藏在海平面以下500~2000 m的海底。在我国东海、南海已发现贮藏着大量的天然气水合物。

天然气水合物是在一定条件下,由气体或挥发性液体与水相互作用而形成的白色固体结晶物质,外观像冰。天然气水合物通常含有大量甲烷或其他碳氢气体,因此极易燃烧,被称为“可燃冰”。它燃烧产生的能量比同等条件下的煤、石油、天然气所产生的能量要多得多,而且在燃烧以后几乎不产生任何残渣或废弃物,污染比煤、石油、天然气要小得多。

天然气水合物在地球上储量极大,是自然界中天然气的主要存在形式。据估计,陆地上20.7%和大洋底90%的地区具有形成天然气水合物的有利条件。绝大多数的天然气水合物分布在海洋里,其资源量是陆地上的100倍以上,因此可以满足人类长期的能源需求,它可能成为21世纪中后期的一种重要能源。

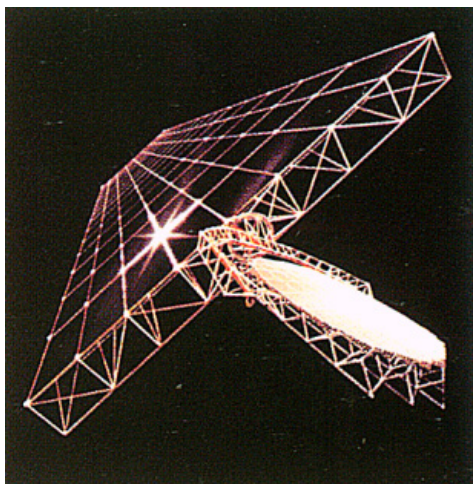


图 6-3-10 卫星太阳能发电示意图



### 警惕居室中的物理污染

物理污染，从字面上理解，是指和化学物质无关的污染，包括光、噪声、电磁波等。居室中的陈设、家具、照明、色彩等，也可能造成对环境的污染。物理污染好像是小事，但是时间长了，对人造成的伤害还是很大的。

怎样发现并避免物理污染呢？几乎所有的物理污染都是可通过视觉、听觉、触觉等感官感受到的。

视觉污染往往来自白色。很多人都将白色作为居室的万能颜色，认为白色看起来干净、整洁、一尘不染，殊不知白色是视觉污染中的重要方面之一。表面白色的物体在阳光的照射下可以产生比较强的炫光，这种炫光会刺痛眼睛，严重的会使人暂时失明，类似于人在雪地里时间长了会产生雪盲。白色使用不当或者白色面积很大，会使人的视觉产生一种盲点。因此，居室内的墙面和家具的颜色，首先不要滥用白色，可以试着多使用比较柔和的颜色，像粉红、米色等。至于那些

鲜艳明快的颜色，可以作为点缀，但过多则会造成视觉疲劳。

居室内存在着听觉污染的隐患。在平常，我们肯定不会把电视、音响的声音以及人们的谈话声当作噪声来看待，但是在有人想休息的时候，你的发烧音响，你朋友的大嗓门，就会成为影响休息的一种污染，所以很多设计师建议将居室划分成不同的功能区，如学习区、娱乐区、休息区等。现在，墙面隔音的方法有很多，比较常见的有墙体的软包处理、在墙上涂抹隔音材料、使用微孔铝板等。这些方法都可以有效地阻隔噪声。

触觉污染可能带来的是直接的人身伤害。在装修和选择家具时，一定要注意避免过多地出现棱角太突出的情况，比如家具的把手不能太翘、太锋利，少选择线条过于硬朗的家具等。在喷涂墙面的时候，一般不宜搞得太粗糙，如果过于粗糙，人在触摸它的时候会感到不舒服甚至造成一些伤害。

### 家庭作业与活动

- 有人说，目前已出现了“能源危机”，你的看法怎样？
- 提高能源利用效率的办法有哪些？
- 太阳能是用之不竭的清洁能源。试举出两个关于开发和利用太阳能的实例。
- 请你调查一下：本地已用上了哪些新能源？它们在所用能源中占了多大的比例？
- 你目前所知道的污染有哪些？其中哪些是物理污染？我们应如何来减轻物理污染？
- 请具体说出环境污染的含义，并讨论：保护环境有什么意义？如何保护好环境？向有关工厂或居民调查本地环境污染的情况，了解减少这些污染的方法。

## 6.4 节约能源、保护资源与可持续发展

1996年联合国环境署的报告指出：“在过去的20年里，全世界能源消耗增长了50%，从现在起到2020年，全球能源消耗还将比现在增长50%到100%，由此造成的温室效应气体排放量会增加45%到90%，从而带来灾难性的后果。”

全世界的有识之士都在思考，人们以不同的语言表达了共同的思想——应该采取一切可能的措施，给子孙后代多留一点能源，让他们继我们之后有足够的时间完成开发新能源以替代传统能源的历史使命，让人类的文明永远辉煌。

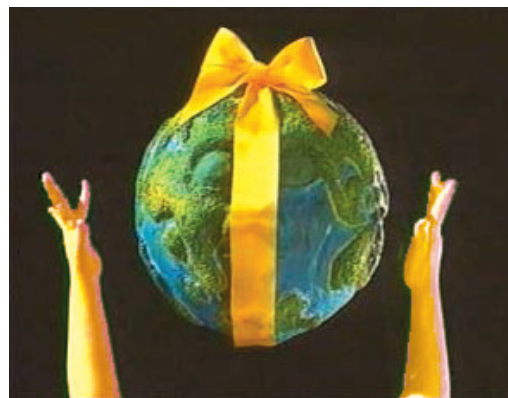


图 6-4-1 把完好的地球交给孩子

### 节约能源与可持续发展

为了使经济得到可持续发展，一方面，在开发利用能源时，要做好环境保护工作；另一方面，在使用能源时，要千方百计地节约能源，提高能源利用效率。

由于在产业结构、经济体制、能源政策等方面的努力，过去几十年中，我国在能源领域取得了GDP翻两番而能源消费仅翻一番、能源利用效率大幅度提高，以及相当大的环境效益等成就。我国的单位GDP能耗不断下降，“十三五”规划提出，到2020年，我国单位GDP能耗五年累计要下降15%。

自20世纪80年代开始，我国已大力实施各种节能措施，并在广大农村地区推广适合当地特点的能源项目（沼气、小水电等），同时开发和利用了多种形式的新能源（太阳能、风能、地热能等）。

但应该看到，我国为实现全面建成小康社会的目标，能源的需求量很大，能源供应相当紧张。能耗与发达国家相比，还有待进一步降低。环境保护还需加大力度。因此，我国的能源和可持续性发展面临着十分严峻的形势和挑战。

### 案例分析

**案例 1** 据报道，由于能源紧张，世界石油价格连创新高。试讨论原油涨价对我们日常生活的影响。

**解答** 不断上升的原油价格将影响到我们的衣食住行各个方面。

服装价格可能有少许上涨。目前市场上大部分服装以合成纤维面料为主，其中涤纶等面料所占的比例达到70%左右。这些产品的价格都与原油价格有关。

洗衣业也将受到影响，这是因为生产洗衣粉、洗洁精的原材料有一半提炼自石油。

商品包装成本增高。聚丙烯的价格会上涨，导致塑料袋的出厂价格上涨。

汽车销售面临危机。原油上涨，汽油价格会同步上涨。“看一看油价走势，再决定买不买车，买什么车”，成了大多数打算买车者的共同想法。

请同学们做进一步的调查，并思考其中原因和解决办法。

**案例 2** 请你估算一下，一辆汽车每行驶 100 km 消耗的能量相当于一个家庭多少天的用电量？怎样才能更有效地节约能量？参考数据：小汽车的“100 km 耗油量”约 7 L，汽油的热值为  $4.7 \times 10^7 \text{ J/kg}$ ，电视机功率约 60 W，电灯功率约 40 W，洗衣机功率约 150 W。

**分析** 建议先做两项工作：一是访问汽车驾驶员，向他了解汽车的“100 km 耗油量”（同时向他请教节约汽油的技巧）。可多访问几位驾驶员，取得多种汽车的“100 km 耗油量”，取其平均值，作为估算依据。二是向家长了解你家的月平均用电量，再算得日平均用电量，然后进行有关的计算，同时归纳有哪些可推广的节能措施。

请你自己解答这个案例。

## 保护自然资源与可持续发展

自然资源是指地球能提供的为人类衣、食、住、行、医所需的物质原料。人类必须珍惜的自然资源主要有以下四类：

(1) 三大生命要素——空气、水和土壤。

(2) 六种自然资源——矿产、森林、淡水、土地、生物物种、化石燃料（石油、煤炭和天然气）。

(3) 两类生态系统——陆地生态系统（如森林、草原、荒野、灌丛等）与水生生态系统（如湿地、湖泊、河流、海洋等）。

(4) 多样景观资源，如山岳、水流、本土动植物种类、自然与文化历史遗迹等。

当前，为保护地球上有限的自然资源，人们已采取了很多措施。例如，为保护地球上紧缺的淡水资源，要求公众应从三个方面做起：第一，节约用水，一水多用；第二，少用化学合成剂；第三，收集利用雨水。

又如，为保护好我们的土地，当前处理垃圾的国际潮流是动员公众尽量从三个方面努力：第一，减少浪费；第二，物尽

中国上古时代的《诗经》中有“怀柔百神，及河峽岳”一句，意思是：善待百神，也要善待河流高山。

西周时期颁布的《伐崇令》规定：“毋填井，毋伐树，毋动六畜，有不如令者，死无赦。”这是中国古代较早的保护水源、森林和动物的法令，其惩处措施极为严厉。

其用；第三，废物回收。

请调查了解你所在地区自然资源的利用和保护情况，在班上交流，谈谈你对保护自然资源的认识。

## 信息浏览

### 可持续发展战略

可持续发展战略是于1992年6月在巴西里约热内卢召开的“联合国环境与发展大会”上提出的。“可持续发展”(sustainable development)已成为各国公民都应当了解的常识。可持续发展的社会是一种“既能满足当代人的需要，又不对后代人满足其生存能力构成危害”的新型社会发展模式。“可持续发展”关注的方面有生态可持续性、社会可持续性、文化可持续性。

可持续发展战略的九项原则是：

- (1) 建立一个具有可持续性的社会。
- (2) 尊重和保护环境。
- (3) 改善人类生活的质量。
- (4) 保护地球的生命力和多样性。
- (5) 维持在地球的承载能力之内。
- (6) 改变个人的态度和生活习惯。

(7) 使公民团体能够关心自己的环境。

(8) 建立协调发展与保护的国家网络。

(9) 创建全球性联盟。

“可持续发展”的理念要求公民了解和关心下列问题：

(1) 哪些是地球上最基本的生存条件？

(2) 哪些是地球上最重要的自然资源？

(3) 如何能够持续利用地球资源？

(4) 如何能够尽量减少对地球不可再生资源的消耗？

(5) 如何监测环境受损害的信号？

(6) 如何医治地球环境目前的创伤？

“可持续发展”的理念要求我们吸取20世纪地球环境被极大破坏的深刻教训，帮助地球环境得以恢复，使我们能够把她完好地传给我们的孩子。

## STSE

### 环境保护标志

中国环境标志图形由中心的青山、绿水、太阳及周围的十个环组成。图形的中心表示人类赖以生存的环境。外围的十个环紧密结合，环环紧扣，表示公众参与，共同保护环境；同时十个环的“环”字与环境的“环”同字，其寓意为“全民联系起来，

共同保护人类赖以生存的环境”。

请同学们查找有关资料，再列举一些环境保护方面的标志，弄清它们的具体含义。



图 6-4-2 中国环境标志

## 家庭作业与活动

1. 论述节约能源的意义。调查总结家庭或学校的节能经验，提出你的节能建议。
2. 向公交车辆的驾驶员了解每天的载客数和耗油量，了解如何从节能的角度出发合理安排公交线路和停靠站，如何运用驾驶技术来减少油耗，以及公交公司对驾驶员在节能方面有哪些考核

措施。

3. 什么叫自然资源？我们必须珍惜哪些自然资源？采取哪些举措来保护自然资源？
4. 请你说说可持续发展战略的具体含义和实施可持续发展的意义。你打算在实施可持续发展方面做哪些工作？

## 第 6 章 家庭作业与活动

### A 组

1. 图 6-A-1 是一幅“能源分类相关图”。以下四组能源中，全部符合图中阴影部分的是( )。
- A. 煤炭、石油、沼气  
B. 水能、潮汐能、天然气  
C. 太阳能、风能、生物能  
D. 地热能、海洋能、核能

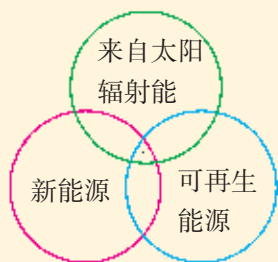


图 6-A-1

2. 若有条件，请调查一个发电厂在正常情况下的发电量、每天耗煤量、所用煤的热值，并据此计算该发电厂把煤的化学能最终转化为电能的效率。
3. 准备一些 pH 试纸，在你所到之处（如家乡的城市和农村，外地的城市和风景区），凡遇下雨，就用这些 pH 试纸测定雨水的酸度，连同测量时间、地点及所了解到的当地工业发展状况，一起记录下来，并据此写出调查报告或论文。适当的时候在班上举行一次关于酸雨的研讨会。
4. 某市有 20 万台空调机，每台空调机在夏季平均使用 60 d，每天耗电  $8 \text{ kW} \cdot \text{h}$ 。为了节约能源，该市政府建议大家把空调机的室内设定温度

提高  $1^\circ\text{C}$ ，这样每台空调机每天可节省 6% 的电能。那么这样做能使该市节省多少电能？已知标准煤的热值是  $2.92 \times 10^7 \text{ J/kg}$ ，发电厂的发电效率是 30%。请计算一下：这项节能建议的实现能为我们后辈留下多少吨标准煤？

### B 组

请阅读 2004 年 11 月 4 日某报的报道（摘要）：

电荒、地荒、水荒的警钟接连在长江三角洲上空敲响。这使得长三角地区城市的负责人深刻反省：“必须站在长三角全面、协调、可持续发展的全局高度来统筹全地区的发展。”

日前在长江三角洲 16 个城市峰会上，有关领导在总结一年来的工作情况时说，长三角总的形势虽好，但隐忧凸显。今年以来，我国最大的区域电网——华东电网饱受缺电之苦。仅 1 到 5 月份，全网拉限电量就超过 56 亿千瓦时，接近去年全年拉限电总量 60 亿千瓦时的水平，达到历史之最。

“河网纵横”“湖泊星罗棋布”曾是描述“鱼米之乡”长三角典型地貌的用语。但眼下，在卫星遥感照片中，“星罗棋布”的不再是湖泊而是开发区，本是土地丰饶的长三角地区已出现“地荒”。

更令人震惊的是，河网纵横的长三角地区竟然因为水质型缺水而酿成“水荒”。由于工业排污日益严重，长三角的水源不断恶化，一些城市出现了工业用水和居民饮用水吃紧的局面。

你阅读了这一报道后，有什么想法？请与同学商讨、交流后作出回答。

## 附录

## 熟悉游标卡尺

游标卡尺是一种测量长度、内外径、深度的工具。游标卡尺由主尺和附在主尺上能滑动的游标（副尺）两部分构成。主尺一般以毫米为最小刻度单位。不同的游标卡尺，其副尺上分格是不同的。副尺上有10个分格的游标卡尺，副尺长为9 mm，准确到0.1 mm；副尺有20个分格的游标卡尺，副尺长为19 mm，准确到0.05 mm；副尺有50个分格的游标卡尺，副尺长为49 mm，准确到0.02 mm。

游标卡尺的主尺上有两副固定卡脚，副尺上有两副活动卡脚，它们分别叫内测量卡脚和外测量卡脚。内测量卡脚通常用来测量内径，外测量卡脚通常用来测量长度和外径。

下面以准确到0.1 mm的游标卡尺为例来进行介绍。



该游标卡尺主尺上的最小分度是1 mm，副尺上有10个小的等分刻度，总长9 mm，每一分度为0.9 mm，比主尺上的最小分度小0.1 mm。卡脚并拢时，主尺和副尺的零刻度线对齐，它们各自

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，即副尺的第10条刻度线恰好与主尺的9 mm刻度线对齐。

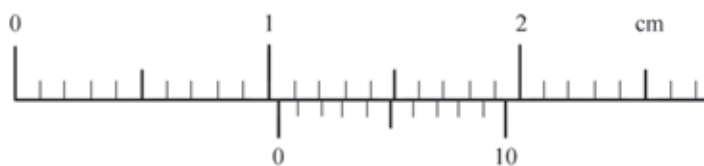
使用游标卡尺进行长度测量之前，应用软布将卡脚擦干净，使其并拢，查看副尺和主尺的零刻度线是否对齐。如果对齐就可以进行测量。如果没有对齐则要记取零误差：副尺的零刻度线在主尺零刻度线右侧的叫正零误差，在主尺零刻度线左侧的叫负零误差。

测量时，右手拿住尺身，大拇指移动游标（副尺），左手拿待测外径（或内径）的物体，使待测物位于外测量卡脚之间。当待测物与卡脚紧紧相贴时，即可读数。读数时，首先以副尺零刻度线为准在主尺上读取以毫米为单位的整数部分；然后看副尺上第几条刻度线与主尺的刻度线对齐，如果第6条刻度线与主尺上某刻度线对齐，则小数部分即为0.6 mm（若没有正好对齐的线，则取最接近对齐的线进行读数）。如有零误差，则一律用上述结果减去零误差（零误差为负，相当于加上相同大小的零误差），读数结果为：

$$\text{长度} = \text{整数部分} + \text{小数部分} - \text{零误差}$$

如果采用测量几次取平均值的方法，不必每次都减去零误差，只要从最后结果减去零误差即可。

请读出下图所示的游标卡尺的示数（没有零误差）。



# 总结与评价 课题研究成果报告会

亲爱的同学：

祝贺你即将完成《物理（必修3）》的学习。在那些激动人心的探索活动中，你和你的同学经受了困难的考验，也享受了成功的喜悦。在学完本书后，你一定想让同学们分享自己的研究成果，那么，就让我们开一个“课题研究成果报告会”吧！

你可以把你平时做过的最满意的课题拿来，再作进一步的研究，取得更有意义的成果，到这个报告会上去展示；你也可以从下面的研究课题示例中，选择你感兴趣的课题，自己一人或与

同学合作进行研究。当然，你还可以自选其他课题进行研究。

在这个报告会上，也许没有鸿篇大论，也许没有什么重大发明。但这里展示的成果，铭刻着你们的勤奋，凝聚着你们的心血……这里，最可贵的是真实！

简单就是美丽，巧妙就是智慧！

这个“课题研究成果报告会”，将让你的智慧放出灿烂的火花，让你的才智得到充分的展示！

## 研究课题示例

### ■ 静电与现代科技

通过查阅图书资料和上网查询等方式，调查静电在现代科技中应用或预防静电的事例，写出调查报告。

### ■ 探究半导体二极管的伏安特性曲线

这里要你选择仪器，设计一个实验，来探究半导体二极管的伏安特性曲线。最好能与电阻的特性曲线进行一下比较。

### ■ 超导应用的现状和前景

近年来，超导特别是高温超导方面的研究进展很快，

并已在科技中得到应用，如应用超导进行受控热核反应的实验。研究这方面的资料，可以拓展我们的视野，感受现代科技的魅力。

### ■ 电视显示技术的新进展

近年来，家用电器市场上出现了许多新型电视机，如液晶电视机、等离子电视机、大屏幕投影电视机等。了解这些电视机的显像原理是很有意义的。你对此感兴趣吗？你愿意做一些调查和探究吗？

## 评价表

课题名称:

姓名:

完成日期:

合作者:

1. 课题设计思路

2. 课题研究过程

3. 收集的主要资料或证据

4. 分析与论证

5. 研究成果和结论



## 6. 自我评价

我在课题研究中的表现：

我对小组研究的贡献是：

我擅长的是：

我在研究中遇到的困难是：

我在这些方面应该做得更好：

自我评价等级（在评价的等级上画圈）：

A 级（优秀）

B 级（良好）

C 级（合格）

D 级（低于标准）

## 7. 小组评语

建议从成果的科学性、创造性、实践性，以及从参与课题研究的热情和态度、克服困难的勇气、团队合作精神等方面进行评价。

## 8. 教师评语

建议从成果的科学性、创造性、实践性，以及从参与课题研究的热情和态度、克服困难的勇气、团队合作精神等方面进行评价。

## 后 记

我们编写的《普通高中物理课程标准实验教科书》（沪科教版）在实验区已试用十余年了，随着基础教育课程改革的深入，教育部又颁布了《普通高中物理课程标准（2017年版）》，为此，我们根据新课标的要求，对这套教科书进行了全面修订，以适应新时期课程改革的要求。

这次修订旨在落实“立德树人”根本任务，进一步提升学生的物理核心素养，为学生的终身学习、终身发展和做有责任感的社会公民奠定基础。

参加本册修订的编写组成员如下：

总主编：束炳如 何润伟

副总主编：母小勇 仲扣庄

本册主编：母小勇 王全

本册主要作者：母小勇 王全 朱春晓 谭庆仁 桑芝芳

本教科书于2004年首次出版，当时参加本册书有关内容编写的人员还有：汪延茂、宋世骏、谢宏、谢步时、王继珩、陈聆等。沈永昭、倪汉彬、汪乾荣、王文祥、罗基鸣、徐建国、梁明奋等同志也曾对本书的修改提出了许多宝贵意见。随着课程改革的深入，编写队伍的组成人员也发生了一些变化，旨在进一步优化编写队伍，以适应新时期课程改革的需求。

在本书的编写过程中，得到了许多专家、学者、教学研究人员和广大教师的热情帮助和大力支持。上海科技教育出版社的李志棣、朱惠霖、汤世梁等同志和有关工作人员为本书的编辑加工、美术设计、排版印刷等方面做了大量的工作，在此，编写组特向关心本书及为本书的出版提供帮助的所有同志表示诚挚的谢意。

研制符合时代要求的、有特色的、高质量的高中物理教科书，始终是我们的追求目标。恳请广大专家、学者、教师、教研员、学生和家长对本套教科书提出宝贵的意见和建议，与我们一起，合作共建这套教科书。

编者  
2018年8月

PUTONG GAOZHONG JIAOKESHU  
WULI

普通高中教科书

物理 必修

第三册

上海科技教育出版社有限公司出版发行

(上海市闵行区号景路159弄A座8楼 邮政编码201101)

各地新华书店发行 上海华顿书刊印刷有限公司印刷

开本 890×1240 1/16 印张 8

2019年7月第1版 2021年12月第6次印刷

ISBN 978-7-5428-7034-6/G·4075

定价:9.42元

批准文号:琼发改费管[2019]845号 举报电话:12358

ISBN 978-7-5428-7034-6



9 787542 870346 >