



普通高中教科书

W U L I

物理

必修

第三册



 广东教育出版社

普通高中教科书

物理

必修

第三册

主编 熊建文



 广东教育出版社

· 广州 ·

图书在版编目(CIP)数据

物理：必修 第三册 / 熊建文主编. —广州：广东教育出版社，2019.8（2022.1重印）

普通高中教科书

ISBN 978-7-5548-2815-1

I. ①物… II. ①熊… III. ①中学物理课—高中—教材
IV. ①G634.71

中国版本图书馆CIP数据核字（2019）第091620号

编写单位 广东教育出版社

主 编 熊建文

副 主 编 王笑君 姚跃涌

本 册 主 编 姚跃涌

本 册 副 主 编 陈汉光

核心编写人员（以姓氏笔画为序）

许桂清 李朝明 李德安

何晋中 何琴玉 张军朋

陈炳社 周少娜

出 版 人 朱文清

责任编辑 蔡潮生 李敏怡

责任技编 杨启承 陈 瑾

装帧设计 何 维 梁 杰

物理 必修 第三册

WULI BIXIU DI-SANCE

广东教育出版社出版

（广州市环市东路472号12-15楼）

邮政编码：510075

网址：<http://www.gjs.cn>

广东新华发行集团股份有限公司发行

广州市新思程印刷有限公司印刷

（广州市番禺区沙头街大富村白仙岗4号）

890毫米×1240毫米 16开本 10印张 250 000字

2019年8月第1版 2022年1月第7次印刷

ISBN 978-7-5548-2815-1

定价：11.67元

批准文号：粤发改价格〔2017〕434号 举报电话：12315

著作权所有·请勿擅用本书制作各类出版物·违者必究

如有印装质量或内容质量问题，请与我社联系。

质量监督电话：020-87613102 邮箱：gjs-quality@nfc.com.cn

购书咨询电话：020-87772438

前言

欢迎进入《物理》必修第三册的学习。

在必修第一册和必修第二册中，我们通过学习“机械运动与物理模型”“相互作用与运动定律”“机械能及其守恒定律”“曲线运动与万有引力定律”“牛顿力学的局限性与相对论初步”等内容，形成运动与相互作用观念、能量观念和模型建构、科学推理、科学论证等物理核心素养，提高了科学探究能力。

在必修第三册中，我们将重点学习“静电场”“电路及其应用”“能源与可持续发展”“电磁场与电磁波初步”四个主题，围绕“静电场的描述→静电场的应用→恒定电流→闭合电路→电能与能源的可持续发展→电磁现象与电磁波”这条线索进行学习、探索与发现。

人类很早就认识了电现象和磁现象。但是，对电磁现象的系统研究却是在欧洲文艺复兴之后才逐渐开展起来的，到19世纪才建立了完整的电磁学理论。

电磁学及其应用对人类的影响十分巨大，在电磁学研究基础上发展起来的电能的生产 and 利用，打开了通往电气化时代的大门，标志着科学技术的质的飞跃。当今社会层出不穷的新技术，都是在电磁学的基础上发展起来的。尤其是微电子技术和计算机技术的应用，正以前所未有的速度渗透到人类生产生活的各个方面。

学习物理是一个动手动脑、体验物理学魅力的过程，为此，本书设计了一系列引人入胜的栏目。“观察与思考”栏目，锻炼我们观察、描述、分析物理现象的能力。“实验与探究”栏目，使我们体会问题、证据、解释、交流等要素在开展科学探究中的重要性。“讨论与交流”栏目，让我们展示对物理问题的见解，感受思维碰撞的乐趣。“实践与拓展”栏目，使我们发散思维，在实践性的课题探索中提升创新能力，认识科学、技术、社会与环境发展的关系。“资料活页”栏目，让我们感悟物理学史上科学家们的智慧，感受前沿科技的成就。“练习”和“习题”栏目，巩固我们对物理概念与规律的理解以及解决实际问题的方法。“本章小结”栏目，通过知识结构图梳理全章的知识主线，让我们回顾和整理学习成果，反思自己的学习情况。

学习物理，不仅是为了记住物理概念和认识物理规律，而且是为了帮助我们形成正确的物理观念，指导我们认识自然万物；培养科学思维，辩证地分析实际生产和生活中遇到的问题；学会科学探究的方法，培养基于观察和实验探究自然规律的能力；形成正确的科学态度与社会责任意识。这才是物理学习的要义，让我们共同努力！

目 录



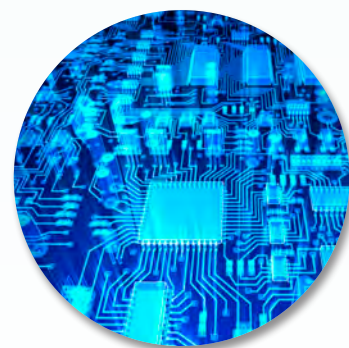
第一章 静电场的描述 1

第一节	静电现象	2
第二节	库仑定律	7
第三节	电场 电场强度	13
第四节	电势能与电势	19
第五节	电势差及其与电场强度的关系	24



第二章 静电场的应用 32

第一节	电容器与电容	33
第二节	带电粒子在电场中的运动	39
第三节	静电的利用与防护	45



第三章 恒定电流 54

第一节	导体的伏安特性曲线	55
第二节	决定导体电阻大小的因素	60
第三节	测量金属丝的电阻率	64
第四节	电阻的串联和并联	68



第四章 闭合电路 76

第一节	常见的电路元器件	77
第二节	闭合电路的欧姆定律	81
第三节	测量电源的电动势和内阻	87
第四节	练习使用多用电表	90
第五节	家庭电路与安全用电	94



第五章 电能与能源的可持续发展 103

第一节	电路中的能量	104
第二节	能源的利用方式	109
第三节	能量的转化与守恒	114
第四节	能源与环境	118



第六章 电磁现象与电磁波 127

第一节	磁现象与磁场	128
第二节	磁感应强度	134
第三节	电磁感应现象	138
第四节	电磁波及其应用	143
第五节	量子化现象	148



第一章

静电场的描述

远古时代一个风雨交加的漆黑夜晚，一群用兽皮树叶遮体的原始人为躲避风雨的侵袭，蜷缩在一个天然的山洞中。突然，整个山洞都被照亮，他们不由自主地向外望去，漆黑的苍穹被数道亮光撕裂。紧接而来的是震耳欲聋的巨响，人们赶紧收回刚刚向外望去的目光，大家挤得更紧了……这就是人们最早对电的认识。

雷电来去匆匆，稍纵即逝。几千年以来人们一直想探究其中的奥秘，更想将它驾驭于手中。人们想知道：雷电是怎样产生的？物体起电的原因是什么？自然界存在几种电荷？电荷间的相互作用遵循什么规律？在这一章里，我们将研究静电的产生、静电现象所遵循的规律，从而揭开它神秘的面纱。

在本章的学习中，我们将了解静电现象；能用原子结构模型和电荷守恒的观念分析静电现象；知道点电荷模型，体会科学研究中的理想化模型方法；知道两个点电荷间相互作用的规律；体会探究库仑定律过程中的科学思想和方法；知道电场是一种物质；了解电场强度，体会用比值定义物理量的方法；会用电场线描述电场；知道静电场中的电荷具有电势能；了解电势能、电势的含义；知道匀强电场中电势差及其与电场强度的关系。

第一节

静电现象



在干燥的冬天，人们常有这样的经历：经过铺有地毯的走道来到房门口，在伸手接触金属门把的一刹那，突然听到“啪”的一声，手被电了一下，是哪里来的电呢？答案可能令人有点意外，原来是电荷在作怪。

各种起电方式

公元前 600 年左右，希腊人泰勒斯（Thalēs，约前 624—约前 547）发现了用毛皮摩擦过的琥珀能吸引羽毛、头发等轻小物体。公元 1 世纪，我国学者王充在《论衡》一书中写下“顿牟掇芥”一语，指的是经过摩擦的玳瑁壳能够吸引轻小的物体。物体有了这种吸引轻小物体的性质，就说它带了电，或者说荷了电荷。那么，有哪些方法能使原来不带电的物体带上电呢？



实验与探究

实验 1：如图 1-1-1 所示，拿一把塑料直尺在头发上来回摩擦几下，然后将塑料直尺移近碎纸屑堆，观察发生的现象，探究其中的原因。



图 1-1-1 摩擦起电

实验 2：如图 1-1-2 所示，将带有绝缘柄的金属小球 D 先与带电体接触，再与验电器上部的金属球 A 接触，观察两片金属箔 C 、 C' 是否张开。重复多次，观察金属箔张开角度的变化情况，探究其中的原因。

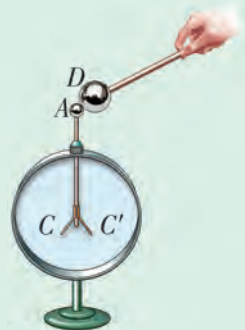


图 1-1-2 电荷传导

实验 3：如图 1-1-3 (a) 所示，取两个由绝缘柱支撑着的空心铝罐 A 和 B ，起初它们彼此接触且不带电，铝罐 A 的左端和铝罐 B 的右端各自安装有两片金属箔。

(1) 如图 1-1-3 (b) 所示，将带电金属小球 C 移近铝罐 A 的左侧，观察铝罐 A 和 B 各自的两片金属箔有什么变化？

(2) 如图 1-1-3 (c) 所示, 金属小球 C 和铝罐 A 保持在原来的位置上, 手持铝罐 B 的绝缘柱, 将其移开, 观察铝罐 A 、 B 各自的两片金属箔有什么变化?

(3) 如图 1-1-3 (d) 所示, 把金属小球 C 和铝罐 B 轻轻移走, 观察铝罐 A 的两片金属箔又有什么变化?

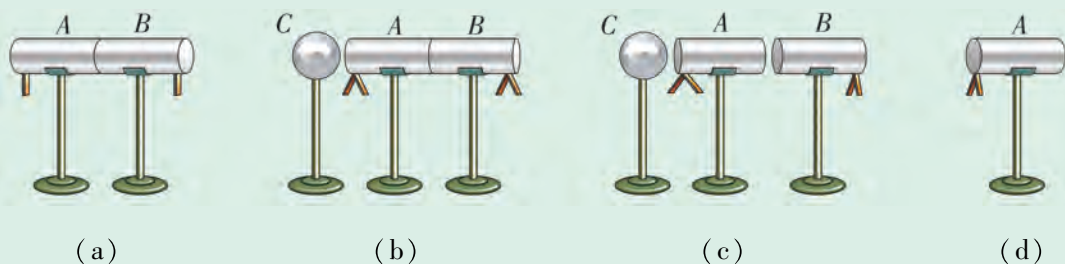


图 1-1-3 静电感应

从实验 1 可见, 经摩擦后的塑料直尺会吸引碎纸屑, 这是因为经过摩擦的塑料直尺带上了电而对碎纸屑有了吸引力. 这种用摩擦的方法使物体带电的过程叫作**摩擦起电**. 相互摩擦的两个物体一般选择不同的材料, 比如丝绸和玻璃棒、毛皮和硬橡胶棒等.

从实验 2 可见, 验电器的两片金属箔张开了一定的角度, 重复次数越多, 两片金属箔张开的角度越大. 这是由于通过传导, 金属小球 D 上的电荷不断传递至两片金属箔.

从实验 3 的 (1) 中可见, 铝罐 A 和 B 各自的两片金属箔都张开了相同的角度. 从 (2) 中可见, 铝罐 A 的两片金属箔张开的角度比 (1) 中的稍大一点, 铝罐 B 的两片金属箔张开的角度比 (1) 中的稍小一点. 从 (3) 中可见, 铝罐 A 的两片金属箔张开的角度比 (2) 中的稍小一点. 这说明铝罐 A 、 B 都带上了电荷. 由于电荷间相互吸引或排斥, 导体靠近带电体的一端带异种电荷, 远离带电体的一端带同种电荷. 这种由于受附近带电体影响而引起导体中正负电荷重新分布的现象叫作**静电感应** (electrostatic induction).

元电荷

物体所带电荷数量的多少叫作**电荷量** (electric quantity), 简称电量. 在国际单位制中, 它的单位是库仑, 简称库, 符号是 C . 研究发现, 自然界只存在两种电荷: 正电荷和负电荷. 我们把用丝绸摩擦过的玻璃棒所带的电荷叫作正电荷, 用毛皮摩擦过的硬橡胶棒所带的电荷叫作负电荷. 电子带有最少的负电荷, 质子带有最少的正电荷, 它们的电量的绝对值相等.

电子的电量最早是由美国物理学家密立根 (R. A. Millikan, 1868—1953) 通过油滴实验测定的. 实验还发现, 任何油滴所带的电量都等于电子或质子所带电量的整数倍, 因此, 人们把一个电子 (或质子) 所带电量的绝对值叫作**元电荷** (elementary charge), 用 e 表示. 在科学研究中, 常常用元电荷作为电量的单位.

根据 1999 年发布的数据，元电荷的精确值 $e = 1.602176462(83) \times 10^{-19} \text{ C}$ 。在通常的计算中，可取 $e = 1.60 \times 10^{-19} \text{ C}$ 。

电子的电量 e 与电子的质量 m_e 之比，叫作电子的比荷。电子的质量 $m_e = 9.11 \times 10^{-31} \text{ kg}$ ，因此，电子的比荷 $\frac{e}{m_e} = 1.76 \times 10^{11} \text{ C/kg}$ 。它是一个重要的物理常量。

电荷守恒定律

为什么通过摩擦或感应能使物体带电？下面我们从物质的微观结构来认识静电现象的本质。

我们知道，构成物质的原子由原子核和绕核运动的电子组成。原子核带正电，核外电子带负电。原子核的正电荷数与核外电子的负电荷数相等，所以整个原子呈电中性。

观察与思考

手持有机玻璃棒，用力将两块由不同材料制成的起电板快速地摩擦后分开，如图 1-1-4 (a) 所示。

将其中一块板插入箔片验电器上端的空心金属球（注意不要接触金属球），如图 1-1-4 (b) 所示，我们可以观察到什么现象？

接着抽出这块板，再将两块板互不接触地同时插入空心金属球（同样不接触金属球），如图 1-1-4 (c) 所示，我们可以观察到什么现象？

请解释实验中所发生的现象。

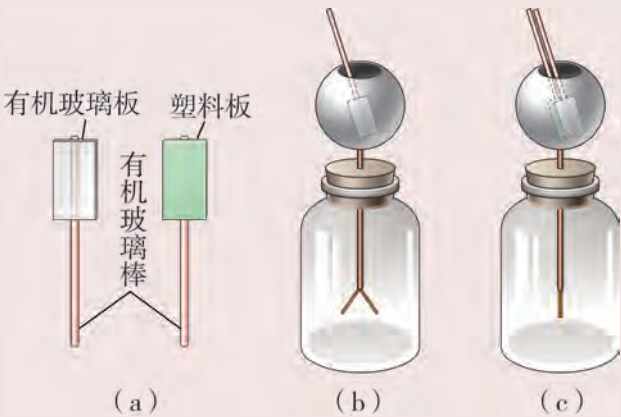


图 1-1-4 验证电荷守恒的实验

实验中，两块起电板摩擦前呈电中性，净电荷量为零。在图 1-1-4 (b) 中可看到箔片张开，即箔片带电，说明插入验电器上端空心金属球内的起电板带上了电荷；在图 1-1-4 (c) 中可看到箔片闭合，说明两块起电板带有等量异种电荷，净电荷量为零，所以系统的电荷是守恒的。

实验中，物体带电的过程实际上就是得失电子的过程，从而使物体内的正电荷数与负电荷数不再相等，这时物体就带电了。但带电的两个物体所组成的系统的电量总和保持不变。

大量事实证明：电荷既不能被创造，也不能被消灭，它们只能从一个物体转移到其他物体，或者从物体的一部分转移到另一部分。在任何转移的过程中，电荷的总量保持不变。这个规律叫作电荷守恒定律（law of conservation of charge）。

电荷守恒定律是自然界的基本守恒定律，它不仅在一切实宏观物理过程中成立，而且也是一切微观物理过程（如核反应过程）所普遍遵循的规律。

静电现象的解释

从前面实验中可知，利用摩擦的方法能够使物体带电。这是因为两种不同材料的物体相互摩擦时，使一个物体中一些原子的电子获得了能量，挣脱了原子核的束缚，转移到了另一个物体上。如图1-1-5所示，当毛皮摩擦硬橡胶棒时，毛皮中原子的电子便转移到了硬橡胶棒上，硬橡胶棒上出现多余的电子而带负电；失去电子的毛皮则带正电。但是，由这两个物体组成的系统的电荷总量保持不变，即电荷是守恒的。这说明，摩擦起电的实质是电子从一个物体转移到另一个物体的过程。

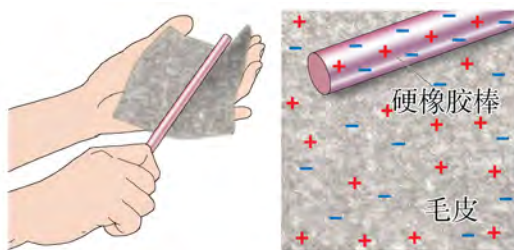


图1-1-5 硬橡胶棒与毛皮摩擦，毛皮带正电，硬橡胶棒带等量的负电荷

从前面实验中还可知，利用静电感应能够使导体带电。这是因为当带电体靠近导体时，导体内的自由电子会向靠近或远离带电体的地方移动。如图1-1-3（b）所示，若带正电的金属小球C靠近铝罐A的左侧，根据异种电荷相互吸引的性质，铝罐A与金属小球C距离最近的左端则带负电；根据同种电荷相互排斥的性质，铝罐B与金属小球C距离最远的右端带正电。当把铝罐B移开，铝罐A上的负电荷由于金属小球C的正电荷的吸引而继续保留；接着移走金属小球C，铝罐A就带上了负电荷，如图1-1-3（d）所示。因此，静电感应的实质是在带电体上的电荷的作用下，导体上的正负电荷重新分布，使电荷从导体的一部分转移到另一部分。

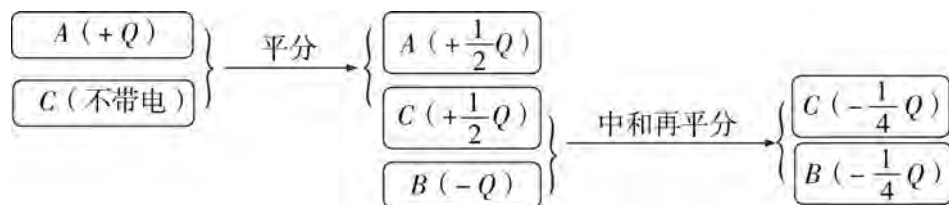
从以上的两种情况中我们可以看到，电荷既不能被创造，也不能被消灭，只是发生了转移。

例题：真空中两个完全相同的带等量异种电荷的小球A和B，分别被固定在两处。用一个不带电的相同小球C先和小球A接触，再与小球B接触，然后移走小球C，则小球A、B的带电量各是原来带电量的多少？

分析：完全相同的带电小球相接触，在电荷的转移过程中，电荷的分配遵循如下规律：

- （1）不带电小球与带电小球接触，电量平分。
- （2）带同种电荷的小球互相接触，电量相加再平分。
- （3）带异种电荷的小球互相接触，正负电量中和后再平分。

解：先设小球 A 带正电，则小球 B 带负电，带电量大小均为 Q ，再采用如下思路分析：



由以上分析可知，小球 A 的电性与原来相同，带电量为原来的 $\frac{1}{2}$ ；小球 B 的电性与原来相同，带电量为原来的 $\frac{1}{4}$ 。



实践与拓展

查找资料，了解范德格拉夫 (R. J. van de Graaff, 1901—1967) 起电机的起电原理，并了解起电机在生产生活中的应用。



练习

1. 在如图 1-1-2 所示的实验中，两片金属箔可能带上什么性质的电？为什么？实验重复次数越多，两片金属箔张开的角度越大，这又是为什么？

2. 请用原子结构模型和电荷守恒的知识分析摩擦起电和静电感应实质的异同。

3. 某同学将用毛皮摩擦过的硬橡胶棒靠近绝缘细线下方悬挂的金属小球，如图 1-1-6 所示，观察金属小球的摆动情况，并解释其原因。

4. 两个完全相同的金属球 A 和 B 分别带有电荷 $Q_A = 3 \times 10^{-9} \text{ C}$ 和 $Q_B = -9 \times 10^{-9} \text{ C}$ ，两个球均被置于绝缘支架上。

(1) 将两球接触一下后分开，它们分别带有多少电荷？

(2) 简要论述电子是如何转移的，并计算转移的电子数目。

5. 打开水龙头，慢慢调节使水流变得很细，再用摩擦过的气球靠近细水流，如图 1-1-7 所示，仔细观察，会发现什么现象？这是静电现象吗？

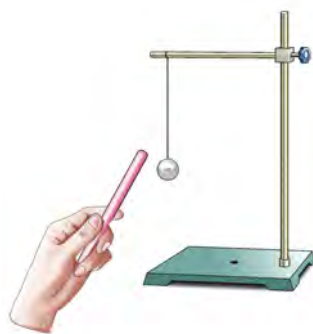


图 1-1-6



图 1-1-7

第二节

库仑定律



同种电荷互相排斥，异种电荷互相吸引，这说明电荷之间存在着相互作用力。物理学上，把静止电荷之间的相互作用力称为**静电力** (electrostatic force)。受牛顿万有引力定律公式的启发，18 世纪的科学家推测带电体间的相互作用力也是与距离的二次方成反比。18 世纪末，法国物理学家库仑 (C. A. Coulomb, 1736—1806) 通过实验总结出静止电荷间的相互作用力即静电力的规律。



图 1-2-1 库仑

点电荷

研究表明，带电体之间的相互作用力除了与它们所带的电量及相对位置有关，还与它们的形状和大小有关，这大大增加了研究这一问题的复杂性。如果一个带电体本身的大小比它与其他带电体的距离小得多，那么在研究它与其他带电体的相互作用时，电荷在带电体上的具体分布情况可以忽略，即可以把带电体抽象成一个点。这个带电的点称为**点电荷** (point charge)。与力学中的质点模型一样，点电荷是一种理想化的物理模型。

带电体能否被视为点电荷，要看它们本身的几何大小是否比它们之间的距离小得多，而不是看带电体本身的大小。即使是两个比较大的带电体，只要它们之间的距离足够大，也可以被视为点电荷。至于带电体本身的大小比它们之间的距离小多少才能被视为点电荷，应由对两者之间相互作用的影响大小和测量的要求决定。只要在测量精度要求的范围内，带电体的形状、大小以及电荷分布等因素的影响可以忽略不计，即可视为点电荷。



讨论与交流

1. 谈谈建立理想化模型的方法在科学研究中的作用。
2. 与质点模型相比，体会在什么情况下可将带电体抽象为点电荷。

影响静电力的因素

两个带电体之间存在相互作用力，这种相互作用力的大小与哪些因素有关呢？让我们用实验进行探究。



观察与思考

如图 1-2-2 所示，用摩擦起电的方法分别让球形导体 A 和通草球 B 带同种电荷，并使球形导体 A 与通草球 B 处在同一水平面上。

(1) 不断给 A 增加电量，观察摆线偏角的变化。

(2) 保持 A 和 B 上的电量不变，改变 A 与 B 之间的水平距离，观察摆线偏角的变化。

分析以上实验现象，这两个带电体之间的静电力可能与什么因素有关？

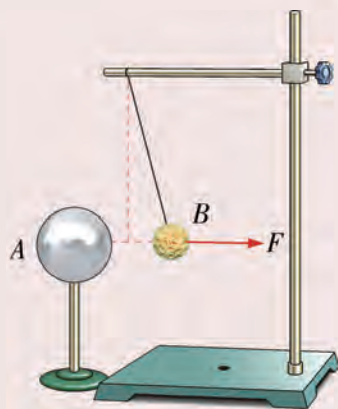


图 1-2-2 探究影响电荷间相互作用力的因素

从上面实验可知，当球形导体 A 电量增加时，摆线偏角增大，说明静电力随带电体电量增加而增大；当球形导体 A 和通草球 B 的电量不变，改变 A 和 B 之间的水平距离，发现距离越近，摆线偏角越大，说明静电力越大。

那么，两个带电体之间的静电力与它们的电量、距离之间存在怎样的定量关系？我们应怎样进行探究？

库仑定律

如图 1-2-2 所示的实验只能定性探究影响静电力的因素。科学家们花费很长时间，试图对静电力进行精密测量。18 世纪中叶以前，研究带电体之间的静电力遇到三大困难：一是这种“电力”非常小，没有仪器能测量这么小的力；二是当时还没有量度电量的单位；三是任意带电体上的电荷分布难以确定，因而无法确定相互作用的电荷之间的距离。

那么，这些困难可以解决吗？

1785 年，库仑通过扭秤实验解决了这些困难，并在实验的基础上提出了两个点电荷之间相互作用的规律。这项成果意义重大，它标志着电学研究从定性走向定量。下面我们借鉴科学家实验的思想方法，创新改进实验装置，开展一次实验探究。

如图 1-2-3 所示，在干燥的环境中，高精度电子秤上有两块金属圆片 A 、 B 固定在两个轻质绝缘支架上，下支架放在电子秤检测台面上，上支架等距贴上红色纸圈，再穿过固定支架的小孔。

(1) 下支架放在电子秤检测台面上，将电子秤的示数归零。

(2) 将 A 、 B 两块金属圆片正对距离调为 d ，然后用起电机让两块金属圆片带上相同的电量（设为 q_0 ），通过读出此时电子秤的示数，经过单位换算便可得到 B 对 A 的静电力大小。

(3) 保持电量不变，把 A 、 B 两块金属圆片的距离定量增大，通过读取电子秤示数，经过单位换算便可得到 B 对 A 的静电力大小，把所得数据记录在表 1-2-1 中。

表 1-2-1 探究静电力 F 与两块金属圆片距离 r 的关系

探究变量	距离 r				
	d	$2d$	$3d$	$4d$	$5d$
F					
$\frac{1}{r}$					
$\frac{1}{r^2}$					

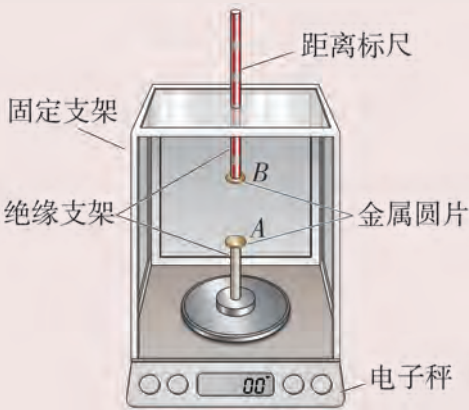


图 1-2-3 借助电子秤探究库仑力

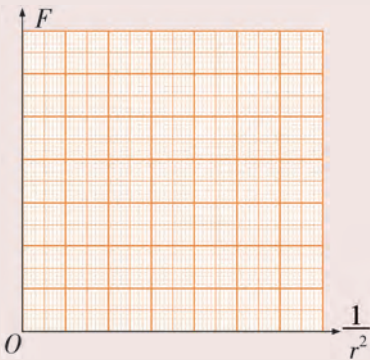


图 1-2-4 $F - \frac{1}{r^2}$ 关系图像

因 r 越大，而 F 越小，说明 F 与 r 不是正比关系。利用计算器计算 $\frac{1}{r}$ ，描点作图，发现 $F - \frac{1}{r}$ 的关系图线是曲线。进一步尝试作 $F - \frac{1}{r^2}$ 的关系图像，概括实验结论。

(4) 保持 A 、 B 两块金属圆片的距离为 d ，逐次用另一相同且不带电的金属圆片 C 与 A 接触，使 A 的电量依次减半，通过读取电子秤的示数，经过单位换算便可得到 B 每次对 A 的静电力大小，把所得数据记录在表 1-2-2 中，尝试作 $F - q_1$ 的关系图像，概括实验结论。

表 1-2-2 探究静电力 F 与金属圆片 A 的电量 q_1 的关系

静电力	电量 q_1			
	q_0	$\frac{q_0}{2}$	$\frac{q_0}{4}$	$\frac{q_0}{8}$
F				

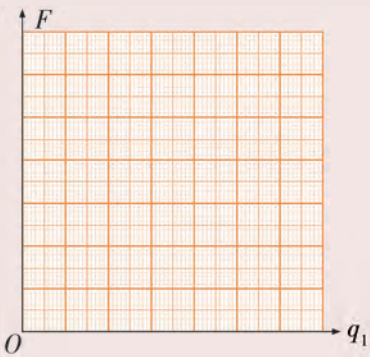


图 1-2-5 $F-q_1$ 关系图像

(5) 保持两块金属圆片 A 、 B 的距离为 d ，逐次用另一相同且不带电的金属圆片 D 与 B 接触，使 B 的电量依次减半，通过读取电子秤的示数，经过单位换算即可得到 B 每次对 A 的静电力大小，把所得数据记录在表 1-2-3 中，尝试作 $F-q_2$ 的关系图像，概括实验结论.

表 1-2-3 探究静电力 F 与金属圆片 B 的电量 q_2 的关系

静电力	电量 q_2			
	q_0	$\frac{q_0}{2}$	$\frac{q_0}{4}$	$\frac{q_0}{8}$
F				

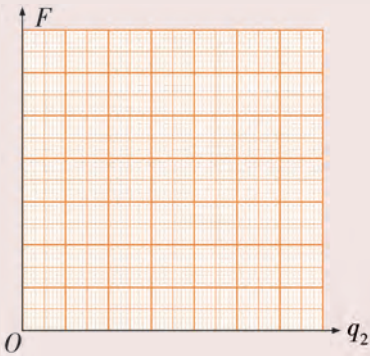


图 1-2-6 $F-q_2$ 关系图像

实验表明，在保持两个带电体的电量不变时，它们之间静电力的大小与它们之间距离的二次方成反比，即 $F \propto \frac{1}{r^2}$. 在保持两个带电体间的距离不变时，它们之间静电力的大小与每个带电体的电量成正比，即 $F \propto q_1$, $F \propto q_2$.

库仑在前人工作的基础上通过实验研究得到：在真空中两个静止点电荷之间的相互作用力，其大小与它们的电量 q_1 、 q_2 的乘积成正比，与它们之间距离 r 的二次方成反比. 作用力的方向在它们的连线上. 这个规律称为库仑定律 (Coulomb law). 电荷之间的这种相互作用力称为静电力，也称为库仑力.

库仑力的大小可表示为

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

(1.2.1)

式 (1.2.1) 中 k 是一个常量，叫静电力常量. 若式中各物理量均使用国际单位制，即力的单位为 N ，电量的单位为 C ，距离的单位为 m ，通过实验可以得出 $k = 9.0 \times 10^9 N \cdot m^2 / C^2$ ，它表示真空中静止的两个相距为 $1 m$ 、电量都为 $1 C$ 的点电荷的静电力大小为 $9.0 \times 10^9 N$.

电量的单位 C (库仑) 是为了纪念库仑而命名的. 通常, 一把梳子和衣袖摩擦后所带的电量不到百万分之一库仑, 但天空中发生闪电之前, 巨大的云层中积累的电量可达几百库仑.

与其他力一样, 静电力也是矢量, 它既有大小又有方向, 上面的库仑定律仅仅给出了静电力的大小. 为了确定静电力的方向, 就需要利用电荷之间“同种电荷互相排斥, 异种电荷互相吸引”的特点加以判断. 两个或两个以上点电荷对某一点电荷的作用力, 等于各点电荷单独对这个电荷的作用力的矢量和.



讨论与交流

1. 谈谈利用电子秤探究库仑力的实验中, 我们可以使用理想化模型的前提条件.
2. 相隔一定距离的两个带电金属球, 因体积偏大而不能被视为点电荷, 如果用两个金属球的球心间距离来计算库仑力, 计算结果比真实值偏大、偏小还是相等? 为什么?

例题: 氢原子由一个质子和一个电子组成. 根据经典模型, 电子绕核做圆周运动, 轨道半径 $r = 5.3 \times 10^{-11} \text{ m}$. 已知质子的质量 $m_p = 1.67 \times 10^{-27} \text{ kg}$, 电子的质量 $m_e = 9.11 \times 10^{-31} \text{ kg}$, 万有引力常量 $G = 6.67 \times 10^{-11} \text{ N} \cdot \text{m}^2/\text{kg}^2$.

- (1) 求电子受到质子的静电力和万有引力的大小.
- (2) 库仑定律和万有引力定律的表达式有哪些相似之处?
- (3) 在研究微观物质的相互作用力时, 在库仑定律和万有引力定律中, 哪一种力可以被忽略呢? 请说明理由.

分析: 这是一道计算静电力和万有引力, 并进行对比研究的题目. 在氢原子系统中, 质子和电子可被视为点电荷, 也可被视为质点, 根据库仑定律和万有引力定律可以解答本题.

解: (1) 由库仑定律, 得两粒子间的静电力的大小为

$$F_e = k \frac{e^2}{r^2} = \frac{9.0 \times 10^9 \times (1.60 \times 10^{-19})^2}{(5.3 \times 10^{-11})^2} \text{ N} = 8.20 \times 10^{-8} \text{ N}.$$

由万有引力定律, 得两粒子间的万有引力的大小为

$$F_g = G \frac{m_e m_p}{r^2} = \frac{6.67 \times 10^{-11} \times 9.11 \times 10^{-31} \times 1.67 \times 10^{-27}}{(5.3 \times 10^{-11})^2} \text{ N} = 3.61 \times 10^{-47} \text{ N}.$$

(2) 静电力和万有引力的计算公式具有高度相似性. 它们都包含一个常量: 静电力常量 k 或万有引力常量 G ; 都包含两个物质的参量: 电量或质量; 都表现为与距离的二次方成反比关系; 计算结果单位都一致等.

(3) 由 (1) 的计算结果, 可得静电力与万有引力的大小之比为

$$\frac{F_e}{F_g} = \frac{8.20 \times 10^{-8}}{3.61 \times 10^{-47}} = 2.27 \times 10^{39}.$$

根据计算结果, 可知氢原子中电子与质子的静电力远远大于万有引力. 因此, 在研究微观带电粒子的相互作用时, 万有引力通常可以忽略.

库仑扭秤实验

库仑扭秤的结构如图 1-2-7 所示. 在悬丝下挂一根秤杆, 它的一端有一小球 A , 另一端有平衡体 P , 在 A 旁还放置有一固定小球 B . 先使 A 、 B 各带一定的电荷, 这时秤杆会因 A 端受力而偏转. 通过观察悬丝扭转的角度可以比较力的大小. 改变 A 、 B 之间的距离 r , 记录每次悬丝扭转的角度, 便可找到力 F 与距离 r 的关系, 结果发现力 F 与距离 r 的二次方成反比, 即

$$F \propto \frac{1}{r^2}$$

库仑当时还不知道怎样测量电量, 但他巧妙地解决了这个难题. 他将带有电量 q 的小球与另一相同的不带电小球接触, 使带电小球的电荷减半. 利用此方法, 库仑把带电小球的电量分为

$$\frac{q}{2}, \frac{q}{4}, \frac{q}{8}, \dots$$

通过进一步研究, 库仑又给出了力 F 与电量的关系: 力 F 与 q_1 和 q_2 的乘积成正比, 即

$$F \propto q_1 q_2$$

这样就可以用一个公式来表示库仑定律, 即

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

库仑定律是库仑从大量实验中归纳出来的基本实验定律, 是电学发展史上的第一个定量规律, 是建立整个电学理论的基础.

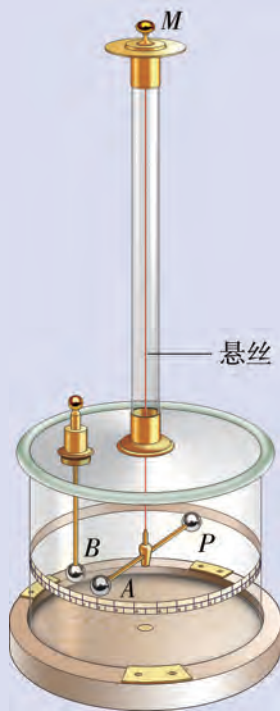


图 1-2-7 库仑扭秤



练习

1. 在真空中两个点电荷间的相互作用力, 是否会因其他一些电荷被移近而改变? 试说明其中的原因.

2. 如图 1-2-8 所示, 在一条直线上有两个相距为 r 的点电荷 A 、 B , A 带电 $+Q$, B 带电 $-9Q$. 现引入第三个点电荷 C , 恰好使三个点电荷都处于平衡状态, 则点电荷 C 应带什么性质的电? 放于何处? 所带电量为多少?

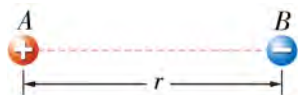


图 1-2-8

3. 假定我们正在用一个带正电的小塑料球和一个带正电的大金属球验证库仑定律. 根据库仑定律可知, 它们之间的静电力与 $\frac{1}{r^2}$ 有关, 其中 r 是两球球心间的距离. 然而, 随着两球间距离的减小, 它们之间的静电力比用库仑定律计算所得到的要小, 试说明原因.

第三节

电场 电场强度



我们知道，两个相隔一定距离的电荷之间有相互作用力。这种相互作用力与手推车的推力、绳拉船的拉力、滑块在桌面上滑动受到的摩擦力不同，后三者都是物体在和另一个物体直接接触的情况下产生的，而电荷之间的相互作用力却可以发生在两个相隔一定距离的物体之间。那么，电荷之间是如何发生作用的呢？

电场

经过长期的科学研究，人们认识到电荷之间的相互作用是通过电场发生的。场是物质存在的形式之一，引进场的概念对物理学的发展有重要意义。凡是有电荷的地方，在它周围就存在电场，电场对处于其中的其他电荷有力的作用。下面用如图 1-3-1 和图 1-3-2 所示的模拟示意图来分析。

如果从电荷 A 的角度来看，电荷 A 在其周围产生电场，放在此电场中的电荷 B 受到电荷 A 的电场施加的力 F_1 ，如图 1-3-1 所示。如果从电荷 B 的角度来看，电荷 B 在其周围产生电场，放在此电场中的电荷 A 受到电荷 B 的电场施加的力 F_2 ，如图 1-3-2 所示。我们把产生电场的电荷称为场源电荷；把电场对电荷的作用力称为电场力。本章只研究静止场源电荷在其周围产生的电场，即**静电场**（electrostatic field）。

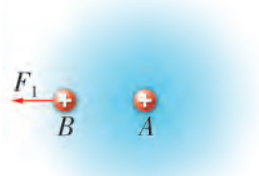


图 1-3-1 电荷 B 受到电荷 A 的电场施加的力 F_1

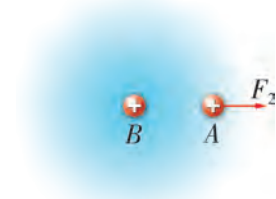


图 1-3-2 电荷 A 受到电荷 B 的电场施加的力 F_2

电场强度

电场的基本性质之一是对放入其中的电荷有作用力，因此我们可以通过这一性质来研究电场。放入电场中探测电场性质的电荷称为**试探电荷**，试探电荷的电量应足够小，使得它被放入电场后不会明显影响原有电场的分布；另外，它的体积也应足够小，这样才能方便研究电场中各点的情况。

观察与思考

1. 如图 1-3-3 所示, 把两个带电量均为 $+q$ 的试探电荷分别放置在电量为 $+Q$ 的固定小球两边, 且使它们与固定小球间距离不相等, 观察两个试探电荷在电场不同位置受到的电场力是否相同.

2. 移动电量为 $+Q$ 的固定小球, 使它处于两试探电荷的正中央, 再给两个试探电荷分别带上 $+q$ 和 $+2q$ 的电量, 如图 1-3-4 所示. 比较它们受到的电场力.

3. 保持试探电荷的电量及位置不变, 改变固定小球所带的电量, 观察实验现象.

实验现象表明了什么?

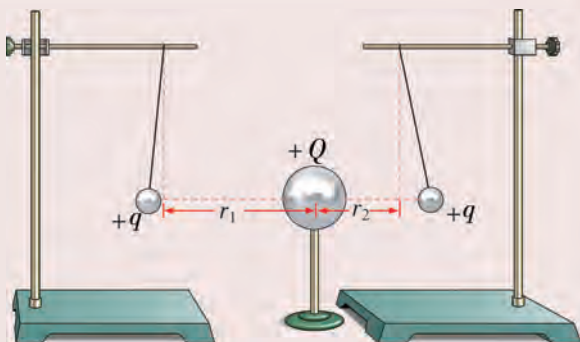


图 1-3-3 离场源电荷不同距离

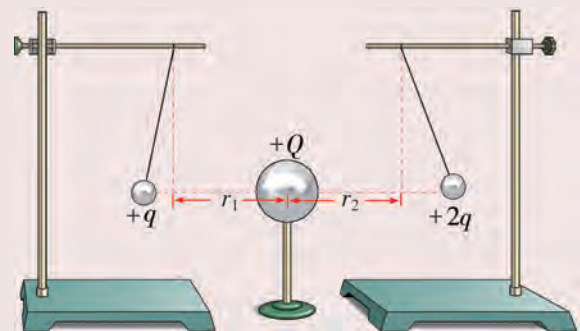


图 1-3-4 离场源电荷相同距离

同一试探电荷放在电场中的不同位置时, 它受到电场力的大小和方向一般并不相同, 这表明电场中不同点的电场强弱不同; 另一方面, 电量不同的试探电荷在电场的同一点上受到电场力的大小不同.

大量实验表明, 在电场的同一点, 电场力的大小 F 与试探电荷的电量 q 之比是恒定的, 与试探电荷的电量无关, 它只与场源电荷以及试探电荷在电场中的具体位置有关, 也就是说 F 与 q 的比值反映了电场自身的某种性质.

物理学中把放入电场某点处的试探电荷受到的电场力 F 与它的电量 q 之比, 叫作电场在该点的**电场强度** (electric field intensity), 简称场强, 用符号 E 表示, 即

$$E = \frac{F}{q} \quad (1.3.1)$$

在国际单位制中, 场强的单位为牛顿每库仑, 符号为 N/C . 如果 1 C 的电荷在电场中某点受到的电场力的大小为 1 N , 则该点的场强的大小就等于 1 N/C .

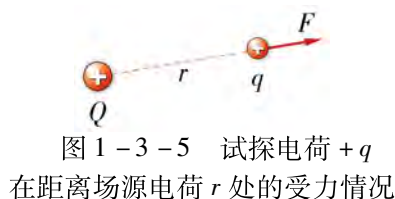
场强是矢量. 物理学上规定, 电场中某点的场强的方向与正电荷在该点受到的电场力的方向相同. 负电荷在某点受到的电场力的方向与该点场强的方向相反.

各点场强的大小和方向都相同的电场叫作**匀强电场** (uniform electric field).

点电荷的电场

点电荷作为一种理想化的物理模型,其在空间产生的电场是静电学中最基本的,也是很重要的研究对象.

以点电荷 $+Q$ 在真空中形成的电场为例. 如图 1-3-5 所示,把试探电荷 $+q$ 放在距离场源电荷 r 处,设电场对 $+q$ 的电场力大小为 F ,根据场强公式 $E = \frac{F}{q}$ 和库仑



定律公式 $F = k \frac{Qq}{r^2}$,可以推导出真空中的点电荷 Q 在与其距离为 r 处的场强为

$$E = k \frac{Q}{r^2} \quad (1.3.2)$$

式 (1.3.2) 说明了场强 E 的大小与场源电荷自身的电量 Q 成正比,与 r^2 成反比,而与试探电荷是否放入电场无关.

如果以 Q 为中心任意作一球面,如图 1-3-6 所示,则球面上各点的场强大小相等. 当 Q 为正电荷时, E 的方向沿半径向外;当 Q 为负电荷时, E 的方向沿半径向内.

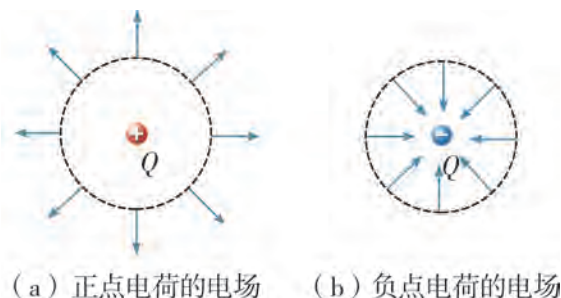


图 1-3-6 点电荷的电场

如果在空间同时存在多个点电荷,这时在空间某一点的场强等于各点电荷单独存在时在该点产生的场强的矢量和. 这叫作**电场强度叠加原理** (superposition principle of electric field intensity).



讨论与交流

1. 公式 $E = \frac{F}{q}$ 与 $E = k \frac{Q}{r^2}$ 都可以用来计算场强,它们有什么区别呢?
2. 把一个试探电荷 $+q$ 放在电场中的一点 A 上,其受到电场力的大小为 F ,方向向东;如果把试探电荷 $+q$ 取走,则该点的场强是否为零?

电场线

电场看不见、摸不着,能否用一种形象的方式来描述它呢? 最早引入电场概念的法拉第 (M. Faraday, 1791—1867) 提出用电场线来描述电场.

在电场中画出一系列有方向的曲线,使曲线上每一点的切线方向都和该处的场强方向一致,如图 1-3-7 所示,这样的曲线就叫作**电场线** (electric field line). 电场线的形状可以通过实验来模拟. 我们把奎宁的针状结晶或头发屑悬浮在蓖麻油里,加上电场后,它们就会按照场强的方向排列,显示出电场线的分布情况.

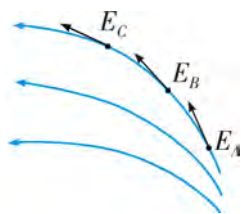
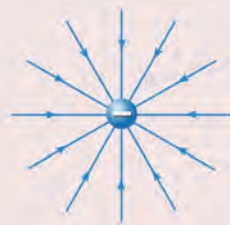
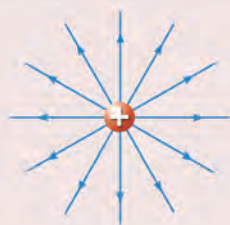
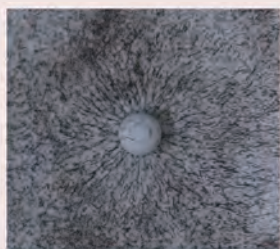


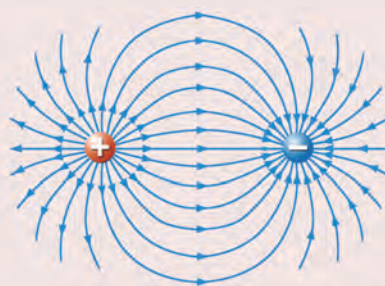
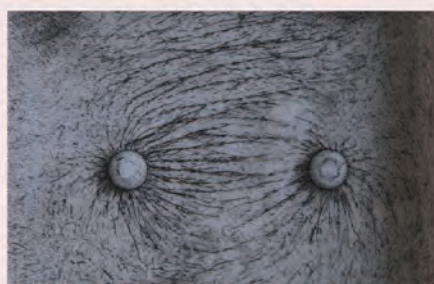
图 1-3-7 电场线

观察从图 1-3-8 到图 1-3-11 中的电场线，从中能发现什么规律？



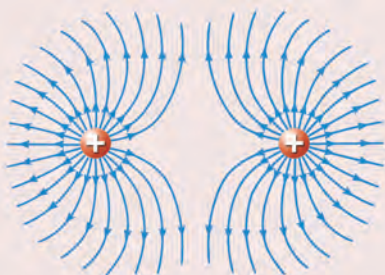
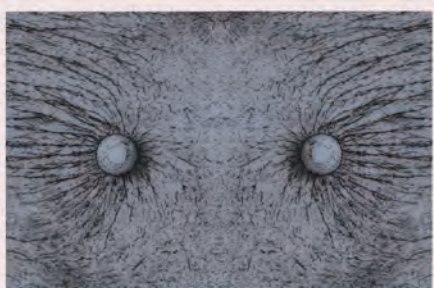
(a) 模拟点电荷的电场线 (b) 正点电荷的电场线分布 (c) 负点电荷的电场线分布

图 1-3-8 点电荷的电场线分布情况



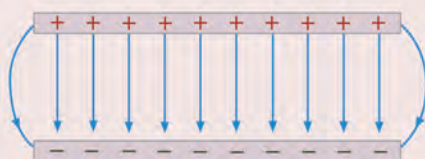
(a) 模拟等量异种点电荷的电场线 (b) 等量异种点电荷的电场线分布

图 1-3-9 等量异种点电荷的电场线分布情况



(a) 模拟等量同种点电荷的电场线 (b) 等量同种点电荷的电场线分布

图 1-3-10 等量同种点电荷的电场线分布情况



(a) 模拟带等量异种电荷的平行金属板的电场线 (b) 带等量异种电荷的平行金属板的电场线分布

图 1-3-11 带等量异种电荷的平行金属板的电场线分布情况

从以上各图可以看出, 电场线有以下几个特点:

(1) 电场线从正电荷或无限远出发, 终止于无限远或负电荷.

(2) 同一幅图中, 场强越大的地方, 电场线越密; 场强越小的地方, 电场线越疏. 电场线的疏密程度反映了场强的相对大小.

(3) 任意两条电场线都不相交, 这是因为电场中每一点处的场强只能有一个确定的方向.

此外, 匀强电场的电场线是间隔距离相等的平行直线. 两块相同、正对放置的平行金属板, 若板间距离很小, 当它们分别带有等量的异种电荷时, 板间的电场 (除边缘附近) 就是匀强电场.

虽然电场并不存在电场线, 但引入电场线概念可以形象地描绘出电场的总体情况, 对于分析某些实际问题很有帮助. 在研究某些复杂的电场时, 常采用模拟的方法把它们的电场线画出来.

例题: 如图 1-3-12 所示, 带箭头的直线是某电场中的一条电场线, 电场线上 a 、 b 两点的场强分别用 E_a 、 E_b 表示, 试根据下面的情况确定 E_a 与 E_b 的关系.

(1) 如果这条电场线在匀强电场中.

(2) 如果这条电场线在由一个正点电荷产生的电场中.

(3) 如果这条电场线在由一个负点电荷产生的电场中.



图 1-3-12 某电场中的一条电场线

分析: 在匀强电场中, 电场线分布均匀, 场强处处相等; 在点电荷产生的电场中, 越靠近场源电荷, 电场线分布越密集, 则该区域内场强越大. 本题讨论的情况如图 1-3-13 所示.

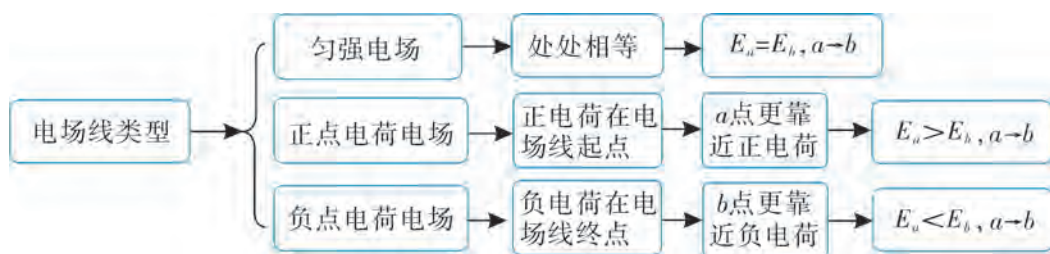


图 1-3-13 分析图

解: 根据以上分析可知:

(1) 如果这条电场线在匀强电场中, 则 $E_a = E_b$, 方向由 a 指向 b .

(2) 如果这条电场线在由一个正点电荷产生的电场中, 则 a 点靠近场源电荷, $E_a > E_b$, 方向由 a 指向 b .

(3) 如果这条电场线在由一个负点电荷产生的电场中, 则 b 点靠近场源电荷, $E_a < E_b$, 方向由 a 指向 b .

练习

1. 电场线有曲有直,如图 1-3-14 所示.如果把试探电荷放入电场中使电荷仅在电场力的作用下开始运动,那么,电场线是不是电荷运动的路径?



图 1-3-14

2. 如图 1-3-15 所示是带电量不同的正、负点电荷的电场线,其中 A、B、C 三点的位置如图所示,点 A 和点 C 到正点电荷的距离相等.

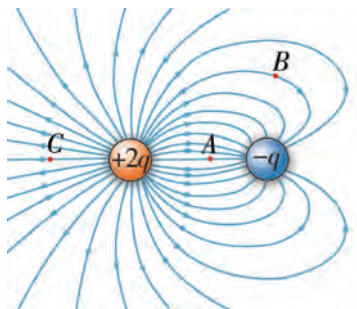


图 1-3-15

(1) 在 A、B、C 三点中,试探电荷置于哪一点时所受到的电场力最大?

(2) 把一个正点电荷置于点 A,试作出电场作用于该电荷上的力的示意图.

(3) 把一个负点电荷置于点 B,试作出电场作用于该电荷上的力的示意图.

3. 如图 1-3-16 所示,一倾角 $\theta = 30^\circ$ 的光滑绝缘斜槽放在方向竖直向下的匀强电场中.有一质量为 m 、电量为 q 的带负电小球从斜槽顶端 A 处,以初速度 v_0 沿斜槽向下运动.

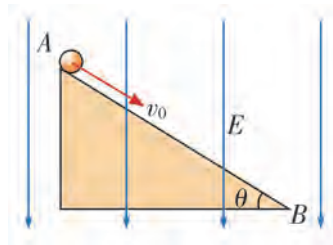


图 1-3-16

(1) 为了保证小球能到达点 B,场强 E 的大小应满足什么条件?

(2) 如果场强的大小 $E = \frac{mg}{2q}$,求小球的加速度.

4. 模拟点电荷电场的电场线,如图 1-3-17 所示.

(1) 用 3~5 mm 厚的透明有机玻璃制成一个框架,中间放置一个培养皿,两边架子上有两个接线柱固定电极,用自行车辐条制成点电荷电极.

(2) 向培养皿内倒入适量蓖麻油,再轻轻把干燥木屑均匀撒在油面上.

(3) 将一个点电荷电极放在培养皿中央并接到起电机的一个电极上.

(4) 缓慢地加速转动起电机.

观察木屑的分布排列情况,并解释这样排列的原因.

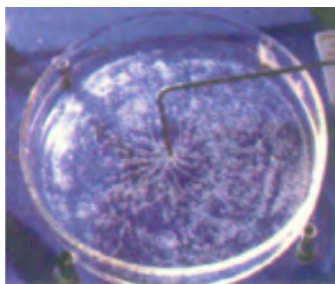


图 1-3-17

第四节

电势能与电势



我们学习了场强的概念，知道它是描述电场性质的物理量，而电场力在电场中能够做功，功是能量转化的量度，所以电场也有“能”的性质。为了研究电场中“能”的性质，我们首先要研究电场中电场力做功的特点。

电场力做功

当物体在地球表面沿竖直方向上的高度差发生变化时，我们说重力对物体做了功。重力的方向始终是竖直向下的。根据功的表达式，可以归纳出重力做功的特点：重力做功的多少与路径无关，仅取决于物体始末位置沿竖直方向上的高度差。那么，电场力做功是否也具有类似的特点呢？



讨论与交流

如图 1-4-1 所示，在场强为 E 的匀强电场中，电量为 $+q$ 的试探电荷沿三种不同路径从点 A 移动到点 B 。试讨论：

- (1) 沿 s_1 (AB) 路径的电场力做功是多少？
- (2) 沿 s_2 (ACB) 路径的电场力做功是多少？
- (3) 沿 s_3 (ACB) 路径的电场力做功是多少？

这三种情况下电场力做功相同吗？

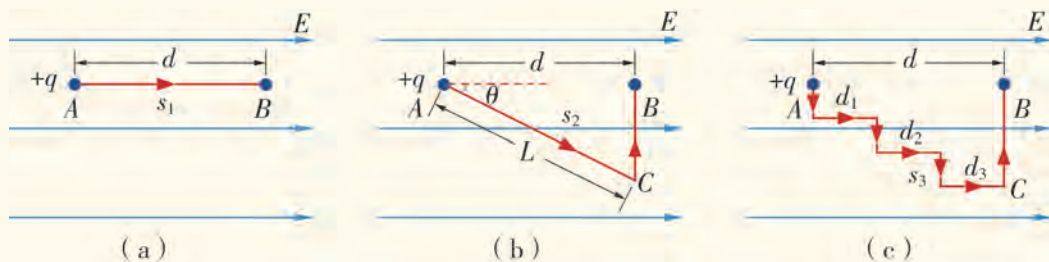


图 1-4-1 试探电荷沿不同路径移动时电场力做功情况

分别对上述三种情况进行计算：

(1) 电场力做功 $W_1 = qEd$ (正功)。

(2) 沿斜线电场力做功 $W_2 = qEL\cos\theta = qEd$ ，沿竖直向上的路径不做功，故电场力做功为 $W_2 = qEd$ (正功)。

(3) 沿三段水平线，电场力做功 $W_3 = qEd_1 + qEd_2 + qEd_3 = qEd$ ，沿竖直向下和竖直向上的路径不做功，故电场力做功为 $W_3 = qEd$ (正功)。

研究表明，在匀强电场中移动电荷时，电场力所做的功只与电荷的电量及其起点、终点的位置有关，与路径无关。更多的研究表明，上述结论也适用于非匀强电场。

电势能

既然电场力对电荷做功和重力对物体做功都与路径无关，我们便可以采用与引入重力势能类似的方法来引入电势能。

一个物体在地面附近的某一位置具有重力势能。同样，一个电荷在静电场中的某一位置也具有势能，这种势能叫作**电势能** (electric potential energy)，用符号 E_p 表示。



讨论与交流

如图 1-4-2 所示，在匀强电场中，电荷从点 A 移动到点 B ，电荷电势能的变化与电场力做功有什么关系？

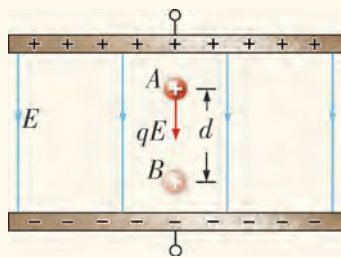


图 1-4-2 电势能的变化与电场力做功的关系

类似于物体重力势能变化与重力做功的关系，设电荷在匀强电场 A 、 B 两点所具有的电势能分别为 E_{pA} 和 E_{pB} ，电荷从点 A 移动到点 B ，电场力做功 W_{AB} 等于始点的电势能 E_{pA} 减去终点的电势能 E_{pB} ，即

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

若 $W_{AB} > 0$ ，表示电场力做正功，有 $E_{pA} > E_{pB}$ ，则从点 A 移动到点 B ，电荷的电势能减少；若 $W_{AB} < 0$ ，表示电场力做负功，有 $E_{pA} < E_{pB}$ ，则从点 A 移动到点 B ，电荷的电势能增加。

与重力势能一样，只有选择了参考点（零电势能位置）之后，电势能才有确定的值。若将无穷远点 O 处的电势能定为零，则电荷在电场中点 A 的电势能大小就等于将电荷从该点移到无穷远处电场力所做的功，即

$$E_{pA} = W_{AO}$$

在国际单位制中，电势能的单位是焦耳，简称焦，符号是 J。

电势能是能量的一种形式，电荷的电势能是由电荷和电场共有的，就像重力势能由在地球上的物体和地球共有的一样，平时我们说某电荷的电势能只是一种简略的说法。

尽管静电场中的电势能与地球表面存在的重力势能有很多相似之处，但是也有很大的区别。因为电荷有正负之分，而质量却没有。例如，在图 1-4-2 中，若从点 A 到点 B 移动的是正电荷，则电势能减少；若移动的是负电荷，则电势能增加。

电势

我们通过对静电力的研究认识了场强，现在通过对电势能的研究来认识另一个表征电场性质的物理量——电势。

下面用比值定义法，从研究电荷在电场中的电势能与其电量之比入手研究电势。

讨论与交流

有一个场强为 E 的匀强电场，如图 1-4-3 所示，规定负极板的电势能为零（极板接地）。取极板附近一点 O ，从与点 O 距离为 d 的点 A ，把一个电量 $q = q_0$ 的正试探电荷由点 A 移到点 O ，则电场力做功为 $W = q_0Ed$ ，电荷在点 A 的电势能 $E_{pA} = W$ ，电势能与电量之比为 $\frac{E_{pA}}{q} = Ed$ 。如果把电量换为 $q = 2q_0$ ， $3q_0$ ， $\cdots$ ， nq_0 ，试分析它们之间的规律，并填入表 1-4-1 中。

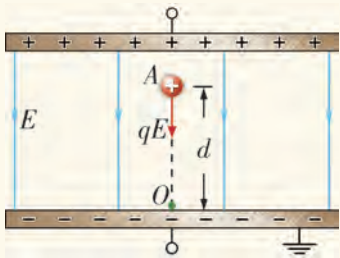


图 1-4-3 讨论电荷在某点的电势能与电量之间的关系

表 1-4-1 电势能与电量之比的规律

试探电荷的电量 q	q_0	$2q_0$	$3q_0$	$\cdots$	nq_0
电荷从点 A 移到点 O 时电场力所做的功 W	q_0Ed				
电荷在点 A 具有的电势能 E_{pA}	q_0Ed				
电荷在点 A 具有的电势能与电量之比 $\frac{E_{pA}}{q}$	Ed				

由表 1-4-1 可见，在匀强电场中，电荷在任意一点 A 的电势能 E_{pA} 与 q 成正比；无论电量 q 是多少，它的电势能与电量之比 $\frac{E_{pA}}{q}$ 都是相同的。

研究表明，电荷在电场中某一点的电势能与它的电量之比，是由电场中这点的电场性质决定的，与试探电荷本身无关。这个结论虽然是从匀强电场中得出的，但可以证明对其他电场同样适用。

电荷在电场中某一点的电势能与它的电量之比，叫作这一点的**电势** (electric potential). 如果用 E_{pA} 表示电荷 q 在点 A 的电势能，用 φ_A 表示点 A 的电势，则

$$\varphi_A = \frac{E_{pA}}{q}$$

(1.4.1)

在国际单位制中，电势的单位是伏特，简称伏，符号是 V. 在电场中某一点，电量为 1 C 的电荷在该点的电势能为 1 J，这一点的电势就是 1 V，即 $1\text{ V} = 1\text{ J/C}$.

在图 1-4-3 中，假如正试探电荷沿着电场线自上而下运动，则它的电势能减少，电势逐渐降低. 因此，电场线指向电势降低的方向.

确定某点的电势时，同样要规定电势的零点. 在物理学的研究中，常取离场源无限远的电势为零. 在实际应用中，则常取大地的电势为零.

在规定了电势零点之后，电场中各点的电势可以取正值，也可以取负值，这由场源电荷的性质决定.

电势也是反映电场性质的物理量. 电势只有大小，没有方向，是个标量.

等势面

在地图中常用等高线来表示地势的高低. 与此相似，在电场的示意图中常用等势面来表示电势的高低.

电场中电势相同的各点构成的面叫作**等势面** (equipotential surface). 与电场线相似，等势面是一个虚构的面，用来形象地描绘电场的另一性质.

在同一个等势面上，任何两点间的电势都相等. 所以，在同一等势面上移动电荷时电场力不做功. 由此可知，等势面一定与电场线垂直，即与场强的方向垂直.

我们可以在与电场线垂直的曲面（包括平面）上绘制等势面. 如图 1-4-4 所示是几种常见电场的电场线和等势面，实线表示电场线，虚线表示等势面.

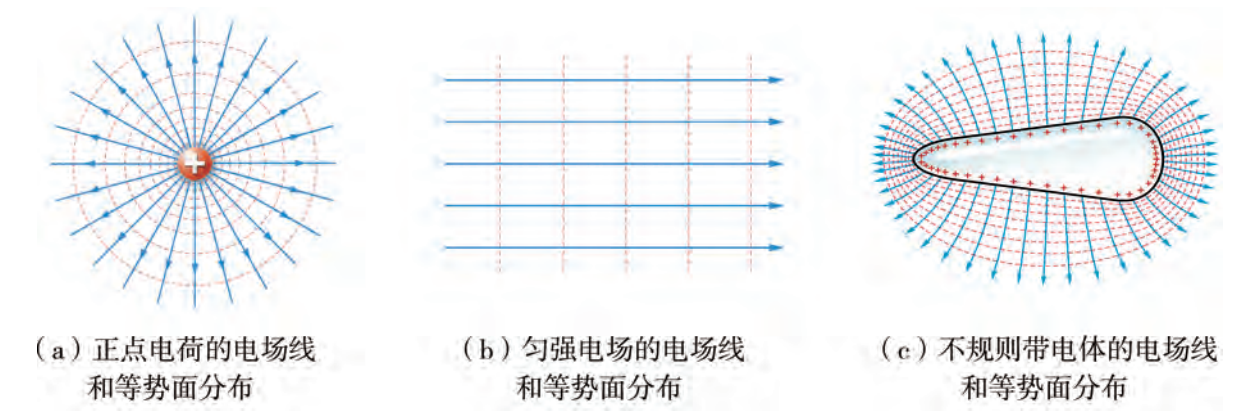
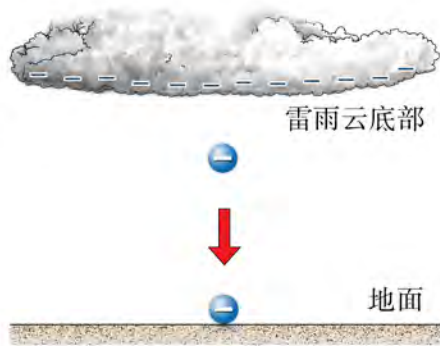


图 1-4-4 几种常见电场的电场线和等势面分布图

沿着电场线的方向，电势越来越低，即电场线由电势高的等势面指向电势低的等势面.

例题：雷雨云层可以形成几百万伏以上的电压，足以击穿空气产生几十万安培的瞬间电流，电流生热使空气发光，形成闪电；空气受热突然膨胀发出巨响，发出雷声。如图 1-4-5 所示，雷雨云底部的电势较地面低 $1.5 \times 10^8 \text{ V}$ ，闪电时，一个电子从雷雨云底部抵达地面，求它的电势能变化量。



分析：因为电势能和电势都是标量，故在计算时，电势、电量的正负值都要代入，得到的正数越大，说明电势能越大，得到的负数越大，说明电势能越小。本题运用的公式为 $\Delta E_p = E_{p地} - E_{p云}$ ，而 $E_{p云} = -e\varphi_{云}$ ， $E_{p地} = -e\varphi_{地}$ 。因地面的电势为零，所以 $\Delta E_p = e\varphi_{云}$ 。

图 1-4-5 电子从雷雨云底部抵达地面

解：取地面的电势 $\varphi_{地} = 0$ ，一个电子在雷雨云底部和在地面的电势能分别为

$$E_{p云} = -e\varphi_{云} = -1.6 \times 10^{-19} \times (-1.5 \times 10^8) \text{ J} = 2.4 \times 10^{-11} \text{ J}.$$

$$E_{p地} = -e\varphi_{地} = 0.$$

一个电子从雷雨云底部抵达地面，电势能的变化量为

$$\Delta E_p = E_{p地} - E_{p云} = 0 - 2.4 \times 10^{-11} \text{ J} = -2.4 \times 10^{-11} \text{ J}.$$

故电势能减少。这些电势能的减少量转化为闪电所发出的热和光。

练习

1. 试解答如下问题：

(1) 取无限远的电势为零，则正点电荷产生的电场中电势是正值还是负值？移入一个正电荷，则该正电荷的电势能是正值还是负值？移入一个负电荷，结果又如何？总结电势与电势能两个物理量的区别与联系。

(2) 两个同种电荷相互靠近，它们的电势能增加还是减少？两个异种电荷相互靠近，结果又如何？总结判断依据，可以通过几种方法判断？

(3) 沿着电场线的方向移动正电荷，电荷的电势能增加还是减少？沿着电场线的方向移动负电荷，结果又如何？说明判断依据，并总结电势能增减的判断方法。

2. 两个带等量正电的点电荷的等势面分布如图 1-4-6 所示， a 、 b 、 c 、 d 、 e 处在不同等势面上，则各点的电势大小应如何排列？负试探电荷在各点的电势能大小又应如何排列？

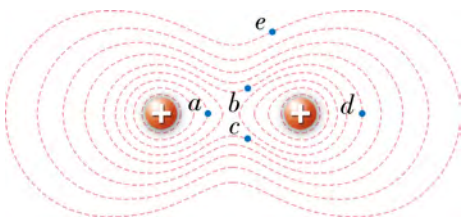


图 1-4-6

3. 将电量为 $q = 3.0 \times 10^{-9} \text{ C}$ 的点电荷移至电场中的点 A ，该电荷具有的电势能为 $6.0 \times 10^{-7} \text{ J}$ ，求点 A 的电势；若把 $q' = -5.0 \times 10^{-9} \text{ C}$ 的点电荷移至电场中的点 A ，其具有的电势能为多少？

第五节

电势差及其与 电场强度的关系



我们已知描述电场有两个物理量：场强和电势。场强从电场对电荷有作用力的角度来描述电场，电势则从电场力对在电场中移动的电荷做功的角度来描述电场。既然描述的是同一电场，那么场强与电势、电势差有什么联系呢？

电势差

电场中两点间电势的差值叫作**电势差**（electric potential difference），也叫**电压**（voltage），用符号 U 表示。设电场中点 A 的电势为 φ_A ，点 B 的电势为 φ_B ，则 A 、 B 两点之间的电势差 U_{AB} 可以表示为

$$U_{AB} = \varphi_A - \varphi_B \quad (1.5.1)$$

电势差与电势一样都是标量，它可以为正值，也可以为负值。若 U_{AB} 为正值，则表示点 A 的电势比点 B 的电势高；若 U_{AB} 为负值，则表示点 A 的电势比点 B 的电势低。



讨论与交流

当电量为 $+q$ 的电荷从点 A 移至点 B 时，电场力做功为 W_{AB} ，而 A 、 B 两点的电势差为 U_{AB} 。如何借助电势能作为“桥梁”，找出电场力做功 W_{AB} 与电势差 U_{AB} 之间的关系呢？

根据从电场力做功与电势能的关系，可得

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

即

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

这说明在电场中把正电荷从电势高的点 A 移至电势低的点 B 时，电场力做的功由移动电荷的电量以及 A 、 B 两点间的电势差共同决定。移动的正电量 q 越大， A 、 B 两点间的电势差 U_{AB} 越大，电场力做的功 W_{AB} 越多。

如果把上面的式子变换一下, 可得两点间的电势差

$$U_{AB} = \frac{W_{AB}}{q} \quad (1.5.2)$$

利用比值定义法, 我们也可以把电场力做的功与所移动电荷的电量之比叫作电势差. 电势差反映的是电场自身在 A 、 B 两点间的性质, 与电量 q 无关, 只和电场中 A 、 B 的位置有关. $U_{AB} = \frac{W_{AB}}{q}$ 说明电场中 A 、 B 两点间的电势差 U_{AB} 等于把单位电荷从点 A 移动到点 B 时电场力所做的功.

电势差与电场强度的关系

场强和电势差都是描述电场的物理量, 那么电势差与场强之间存在着什么联系呢?



讨论与交流

如图 1-5-1 所示是一匀强电场的电场线和等势面, 匀强电场的场强大小为 E , A 、 B 两点在同一条电场线上, 但在两个不同的等势面上, 它们之间的距离为 d , 电势差为 U . 如何借助电场力所做的功 W 作为“桥梁”, 找出电势差 U 与场强 E 的关系呢?

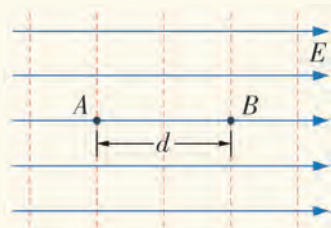


图 1-5-1 匀强电场

如果沿着场强的方向, 将一个点电荷 $+q$ 由匀强电场中的点 A 移到点 B , 则点电荷 $+q$ 受到电场力的大小 $F = qE$, 电场力所做的功 $W = Fd = qEd$, 因此, 由电势差的定义式 $U = \frac{W}{q}$, 可得 A 、 B 两点电势差 U 与场强大小 E 的关系为

$$U = Ed \quad (1.5.3)$$

理论研究表明, 在匀强电场中任意两点之间的电势差等于场强与这两点沿电场方向的距离的乘积.

式 (1.5.3) 可变换为

$$E = \frac{U}{d} \quad (1.5.4)$$

由此说明, 在匀强电场中, 场强在数值上等于沿场强方向距离为每单位长度的两点间的电势差. 由 $E = \frac{U}{d}$ 还可以看出, 场强的另一个单位是伏/米, 符号为 V/m .



讨论与交流

1. 公式 $U = Ed$ 适用于非匀强电场吗？
2. 匀强电场中两点的连线与电场线互成一定角度时，该怎样分析这两点之间的电势差？

例题：在如图 1-5-2 所示的匀强电场中（未画场强方向）有 A 、 B 、 C 三点， $d_{AB} = 4 \text{ cm}$ ， $d_{BC} = 6 \text{ cm}$ ，其中 AB 与电场线平行， BC 和电场线成 37° 角。一个电量为 $q = -4 \times 10^{-8} \text{ C}$ 的电荷从点 A 移动到点 B ，电场力做功为 $W_{AB} = 8 \times 10^{-6} \text{ J}$ ，已知 $\cos 37^\circ = 0.8$ 。

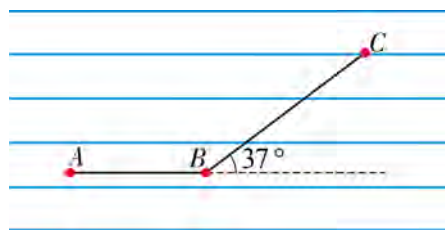


图 1-5-2 某一场强方向未知的匀强电场

(1) 求场强的大小和方向。若根据 $W = Fl$ 和 $E = \frac{F}{q}$ ，可得场强的大小 $E = 5 \times 10^3 \text{ N/C}$ ，这与解得的结果有矛盾吗？

(2) 若取点 B 的电势为零，则点 C 的电势为多大？请解释电势和电势差的区别。

分析：在计算电场力做功、电势能、电势、电势差时，需要把正负数值代入；而在计算场强的大小时，要取电势差的绝对值代入，场强的方向要通过分析电荷所受的电场力方向或电势的高低来判断。

解：(1) 根据 $E = \frac{U}{d}$ ，可得场强的大小

$$E = \frac{|U_{AB}|}{d_{AB}} = \frac{\left| \frac{W_{AB}}{q} \right|}{d_{AB}} = \frac{\left| \frac{8 \times 10^{-6}}{-4 \times 10^{-8}} \right|}{4 \times 10^{-2}} \text{ V/m} = 5 \times 10^3 \text{ V/m}.$$

分析可知负电荷所受的电场力的方向向右，所以场强的方向向左。

$E = 5 \times 10^3 \text{ N/C}$ 与 $E = 5 \times 10^3 \text{ V/m}$ 没有矛盾。V/m 和 N/C 都是场强的单位，物理本质相同，只不过 V/m 由电势差的定义推导得到，N/C 由场强的定义推导得到。

(2) 根据 $U = Ed$ ，可得

$$|U_{BC}| = |Ed_{BC} \cos 37^\circ| = 5 \times 10^3 \times 6 \times 10^{-2} \times 0.8 \text{ V} = 240 \text{ V}.$$

由于场强的方向向左，故

$$U_{BC} = -240 \text{ V}.$$

而 $U_{BC} = \varphi_B - \varphi_C$ ， $\varphi_B = 0$ ，可得

$$\varphi_C = 240 \text{ V}.$$

要确定电场中某点的电势，需要规定电势的零点。而电势差是指电场中两点电势的差值，既与电荷无关，也与电势零点的选取无关。

电势差和医学诊断

在人体细胞内以及细胞和细胞之间的液体中都含有大量的离子，例如钠离子(Na^+)、钾离子(K^+)和氯离子(Cl^-)等。由于离子会进入和离开细胞，因此细胞内外的电势会改变，导致人体表面不同点之间存在微小的电势差($30 \sim 500 \mu\text{V}$)。这个电势差成了某些重要医学诊断技术发展的基础，心电图学便是其中一例。如图1-5-3所示，在进行心电图检查时，先把电极放在人体上的不同位置。由于人的心脏跳动过程中，不同点之间的电势差会随时间变化，由此可根据这些变化获取与心脏健康状态有关的信息。

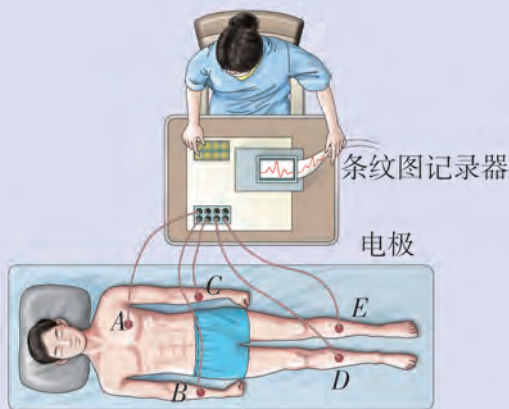


图1-5-3 心电图检查

练习

1. 在电场中，哪些物理量会受到电势零点选取的影响？选择不同的电势零点，得到的值有何变化？

2. 如图1-5-4所示，在一点电荷产生的电场中，三个等势面 a 、 b 和 c 的电势分别为6 V、4 V和1.5 V。当电量为 e 的质子从 a 上某处由静止释放，经过等势面 b 时的速率为 v ，求：

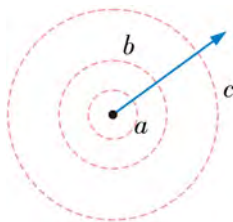


图1-5-4

- (1) 该场源电荷带什么电？
- (2) 质子从等势面 a 运动到 b 时电场力做多少功？
- (3) 质子经过等势面 c 时的速率为多大？

3. 如图1-5-5所示，两块平行金属板 A 、 B 相隔6 cm，分别接在36 V的直流电源的正、负极上。点 C 在两板间且到板 A 的距离为2 cm，正极板 A 接地。

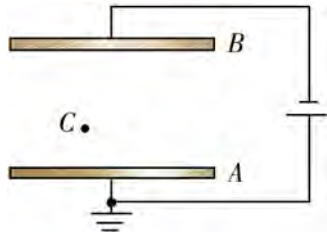


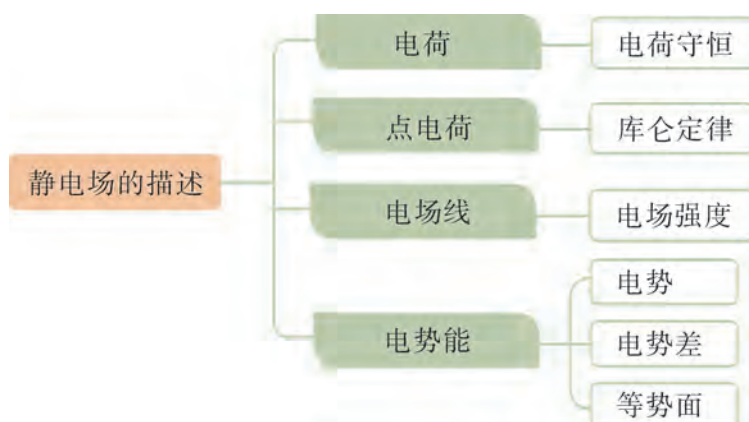
图1-5-5

- (1) 求 A 、 B 两板间的场强。
- (2) 以地面为电势零点，求点 C 的电势。

本章小结

知识结构

参考下面的知识结构，请进一步梳理本章的知识.



回顾与评价

1. 比较点电荷、电场线等物理模型的建构方法有何异同，它们在物理研究中有何重要作用？设想一下，缺少这些物理模型对研究这些具体问题有何影响？
2. 结合本章场强、电势等物理量的定义，谈谈对应用物理量之比定义新物理量的方法的认识.
3. 结合实例分析，在研究电场性质时主要学习了哪些科学思维方法，对电场产生了哪些新的认识.
4. 谈谈对“电场是一种物质”的认识.

习题一

1. 某同学做静电感应实验，步骤及结论如下：①把不带电的绝缘导体球甲移近带负电的绝缘导体球乙，但甲、乙两球不接触；②用手触摸甲球；③手指移开；④移开乙球；⑤甲球带正电；⑥甲球不带电。下列操作过程和所得结论正确的有（ ）。

- A. ①→②→③→④→⑥ B. ①→②→④→③→⑥
C. ①→②→③→④→⑤ D. ①→②→④→③→⑤

2. 法拉第首先提出用电场线形象生动地描绘电场。如图1-1所示是点电荷 a 、 b 所形成电场的电场线分布图，下列说法正确的是（ ）。

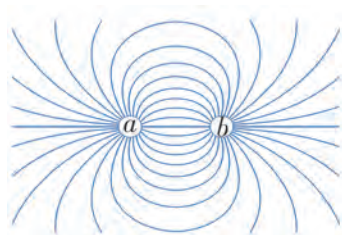


图1-1

- A. a 、 b 为异种电荷， a 的带电量大于 b 的带电量
B. a 、 b 为异种电荷， a 的带电量等于 b 的带电量
C. a 、 b 为同种电荷， a 的带电量等于 b 的带电量
D. a 、 b 为同种电荷， a 的带电量小于 b 的带电量

3. 如图1-2所示，一正电荷仅在电场力作用下从点 a 运动到点 b ，在点 a 的速度大小为 v_0 ，方向与电场方向相同。该电荷从点 a 到点 b 的 $v-t$ 图像正确的是（ ）。

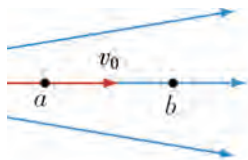
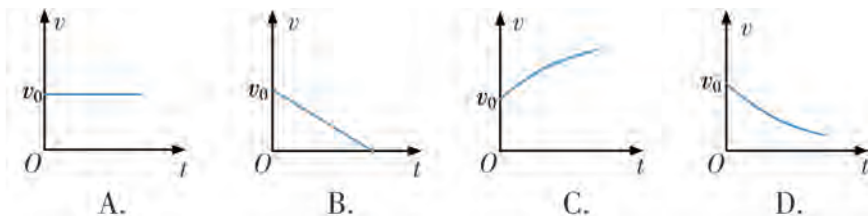


图1-2



4. 如图1-3所示的实线为一正点电荷的电场线，虚线为其等势面。如果在点 A 处轻轻放入一个质子（带正电）或一个电子，下列判断正确的是（ ）。

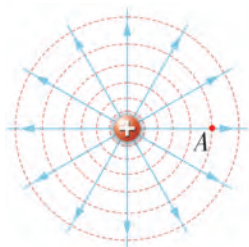


图1-3

- A. 质子的电势能将不断减少
B. 电子的电势能将不断减少
C. 质子将沿着电场线向电势低的地方运动
D. 电子将沿着电场线向电势低的地方运动

5. 式① $E = \frac{F}{q}$ 和式② $E = k \frac{q}{r^2}$ 分别为场强大小的定义式和点电荷场强大小的表达式。下列说法错误的是（ ）。

- A. 式①和式②都只对点电荷产生的场成立
 B. 式②中 E 是某电场的场强大小, q 是场源电荷
 C. 式①中 F 是放入某电场中的电荷所受的力, q 是产生这电场的电荷
 D. 式①中的 E 是式中的电荷 q 所产生的电场的场强, 式②中的 E 是式中的电荷 q 产生的电场的场强

6. 将一整条塑胶带撕成几十条小塑胶丝, 用黑胶布把上端裹紧, 然后用手提塑胶丝, 如图 1-4 (a) 所示. 取一条干净的干布料, 自上而下地摩擦塑胶丝, 如图 1-4 (b) 所示. 观察被摩擦后的塑胶丝, 发现几十条小塑胶丝分散开来, 如图 1-4 (c) 所示. 这是什么原因造成的? 通过这个实验可以证明带电体的什么性质?

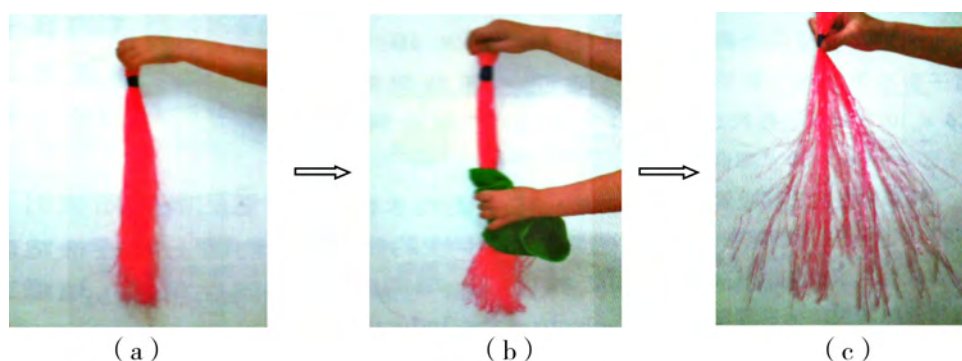


图 1-4

7. 用一块干的毛皮摩擦一个塑料球, 再把带电的塑料球悬吊在半空, 在它正下方的桌面上放置一台电子秤, 秤上放置一个静止的中性金属球. 然后把塑料球慢慢接近金属球, 如图 1-5 所示.

- (1) 试画出两个球体上的电荷分布.
 (2) 试描述并解释电子秤的示数变化.
 (3) 一名同学认为这个装置可以用来验证库仑定律. 他的看法对吗? 为什么?
 (4) 如果保持塑料球静止, 把金属球瞬时接地, 电子秤的示数有什么变化?

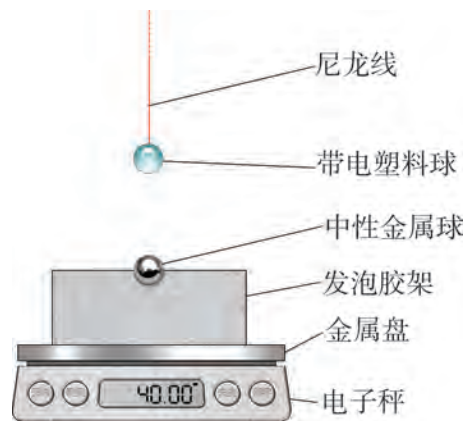


图 1-5

8. 如图 1-6 所示是滚筒式静电分选器, 由料斗 A , 导板 B , 导体滚筒 C , 刮板 D , 料槽 E 、 F 和放电针 G 等部件组成. C 和 G 分别接于直流高压电源的正、负极, 并令 C 接地. 电源电压很高, 足以使放电针 G 附近的空气发生电离而产生大量离子. 现有导电性能不同的两种物质粉粒 a 、 b 的混合物从料斗 A 下落. 沿导板 B 到达转动着的滚筒 C , 粉粒 a 具有良好的导电性, 粉粒 b 具有良好的绝缘性.

- (1) 刮板 D 的作用是什么?
 (2) 粉粒 a 会落入哪个料槽, 粉粒 b 会落入哪个料槽? 为什么?

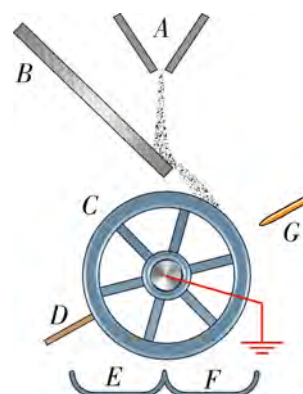


图 1-6

9. 如图 1-7 所示, 在绝缘的光滑水平面上有 A 、 B 两个点电荷, A 带正电, B 带负电, 电量都是 q , 它们之间的距离为 d . 为使两电荷在电场力作用下都处于静止状态, 必须在水平方向加一个匀强电场. 求两电荷都处于静止状态时, AB 连线的中点处的场强. (已知静电力常数为 k .)



图 1-7

10. 如图 1-8 所示, 一个质量为 m 的金属小球 B , 用长为 l 的绝缘细线固定在左边一檐角上, 使其刚好贴着正面墙壁. 在正面墙壁上画好一个量角刻度尺. 取一个与小球 B 完全相同的小球 A , A 连接绝缘细杆. 手提绝缘细杆让小球 A 接触某带电体, 然后与小球 B 接触一下, 会发现小球 B 向右偏转. 小球 A 上下移动至小球 A 、 B 在同一水平线上且平衡时, 读出小球 B 偏离竖直方向 θ 角. 请利用库仑定律、平衡力、三角关系推导每个小球的电量 q 与 θ 、 l 、 m 、 g 、 k 的关系式.

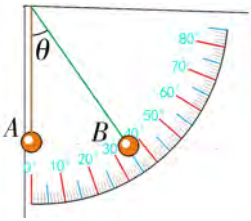
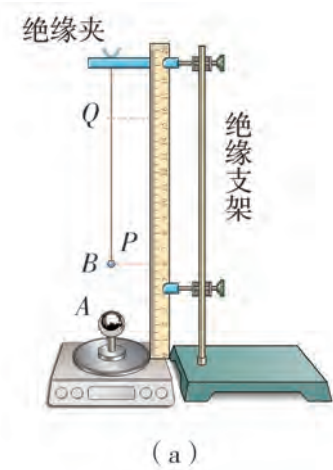


图 1-8

11. 为研究一均匀带正电球体 A 周围静电场的性质, 某同学在干燥的环境中先将球 A 放在一灵敏电子秤的绝缘托盘上, 如图 1-9 (a) 所示, 此时电子秤的示数为 N_1 ; 再将另一小球 B 用绝缘细线悬挂在一绝缘支架上, 使其位于球 A 的正上方点 P , 电子秤稳定时的示数减小为 N_2 . 缓慢拉动绝缘细线, 使小球 B 从点 P 沿竖直方向逐步上升到点 Q , 用刻度尺测出点 P 正上方不同位置到点 P 的距离 x , 并采取上述方法确定该位置对应的场强 E , 然后作出 $E-x$ 图像, 如图 1-9 (b) 所示. 已知点 M 和点 Q 到点 P 的距离分别为 $5x_0$ 和 $10x_0$. 小球 B 质量为 m , 所带电量为 $-q$, 且 q 远小于球 A 所带的电量, 球 A 与球 B 之间的距离远大于两球的半径. 忽略空气阻力的影响, 重力加速度为 g .



(a)

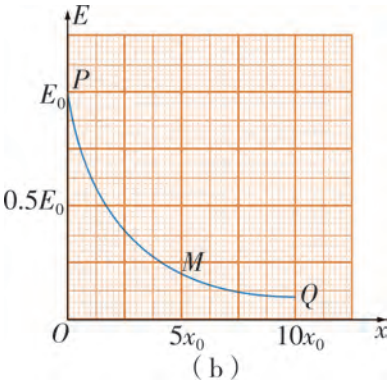


图 1-9

- (1) 求点 M 处, 由球 A 所激发的电场的场强大小.
- (2) 小球 B 位于点 M 时, 电子秤的示数应为多大?
- (3) 实验过程中, 当小球 B 位于点 Q 时, 剪掉细线, 小球 B 将由静止开始运动, 估算小球 B 落回到点 P 时动能的大小.



第二章

静电场的应用

手机触摸屏已经成为现今的主流，而全面屏手机时代的来临，更是对手机触摸屏提出了更高的要求。电容式手机触摸屏是利用人体的电流感应进行工作的，电容屏应用非常广泛；北京正负电子对撞机是我国建成的第一台高能加速器，北京正负电子对撞机为自己也为科学“撞”出了一番新天地；欧洲“莱泼”大型正负电子对撞机（LEP）是世界上最大的科学仪器之一，被安置在欧洲粒子物理研究所地下50米处、周长为27千米的区域，能把电子的速度增加到光速（ $3.0 \times 10^8 \text{ m/s}$ ）的99.9999%。如何利用电场的知识解释正负电子对撞机对电子加速的问题？人类应该怎样利用静电？又该怎样防止静电的危害？

在本章的学习中，我们将了解电容器的构造、电容器的电容以及电容器的充放电现象，能举例说明电容器的应用；能分析带电粒子在电场中的运动情况并解决简单的实际问题；还将了解生产生活中对静电的利用与防护。

第一节

电容器与电容



人们在使用相机或手机拍照时，若光线不足，相机或手机一般会开启闪光灯以补充光线。那闪光的能量是从哪里来的呢？它来自**电容器**（capacitor）。照相机内安装的大容量电容器提供了闪光所需的能量。

识别电容器

电容器是如何构成的？我们先来观察一下常见的电容器。



观察与思考

观察日光灯启辉器中的电容器，思考其所起的作用。



图 2-1-1 日光灯启辉器

电容器由两个互相靠近、彼此绝缘的导体组成，电容器的导体间可以填充绝缘物质（电介质）。在电路中，电容器用字母“ C ”及电路符号“ $\text{—}| \text{—}|$ ”表示。常见的平行板电容器就是由两块正对而又相距很近的金属板组成的。如图 2-1-2 所示的是几种常见的电容器。实际上，任何两个彼此绝缘又相隔很近的导体，都可以看成一个电容器。

电容器是一种常用的电学元件，可以用来储存电荷，在电工、电子技术中有着广泛的应用。如图 2-1-3 所示是一种电容式键盘，键盘上每个键下面都连有一块小金属片，与该金属片隔有一定空气间隙的是另一块固定的小金属片，这样两块金属片



图 2-1-2 几种常见的电容器



图 2-1-3 电容式键盘

就组成一个小电容器。当键被按下时，此小电容器的电容就发生变化，与之相连的电子线路就能检测到是哪个键被按下了，从而给出相应的信号。

电容器的充放电

电容器如何充、放电荷呢？

观察与思考

1. 在如图 2-1-4 所示的电路中，将开关接到 a 端，观察电路中是否有电流通过，以及电流通过的时间长短。思考在这个过程中电容器的极板上带何种电荷。
2. 将开关接到 b 端，观察电路中是否有电流通过。思考在此过程完成后电容器的极板上是否还有电荷。

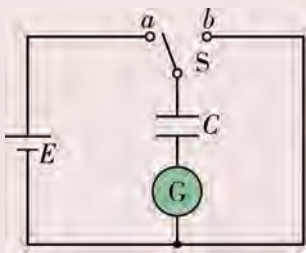


图 2-1-4 观察电容器充、放电的电路图

使电容器的两极板带上等量异种电荷的过程叫**充电**（charging），每一极板所带电量的绝对值称为电容器所带的电量。电容器充电后，两极板间存在电场，从电源获得的能量储存在电场之中，称为电场能。电场具有能量是电场物质性的重要表现。

使电容器两极板上的电荷中和的过程叫**放电**（discharge）。通过电流计可以观察到短暂的放电电流，电容器放电后，板间电场消失，电场能在放电过程中转换成其他形式的能量。

电容器的电容

电容器能够储存电荷，那么，用什么物理量来描述它储存电荷的能力呢？

观察与思考

如图 2-1-5 所示的实验原理图，其中 $R = 10\text{ k}\Omega$ ，电容器 C 标有“ $50\text{ }\mu\text{F}$ ”，耐压为 25 V ，电源为 1 节干电池。实验时，将电流传感器和电压传感器采集的数据传输给计算机，计算机通过对数据进行处理，得到电容器充、放电过程中的 $U-t$ 图像和 $I-t$ 图像。

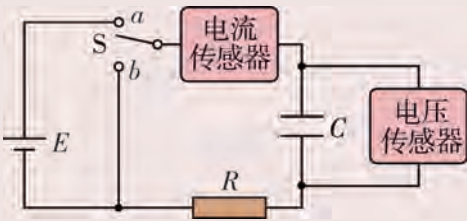
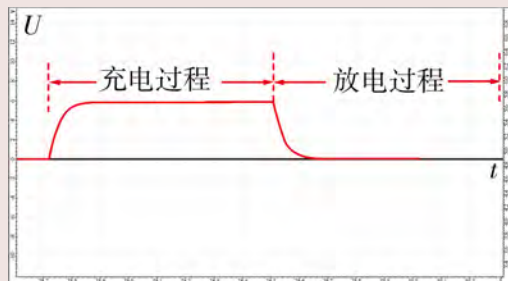


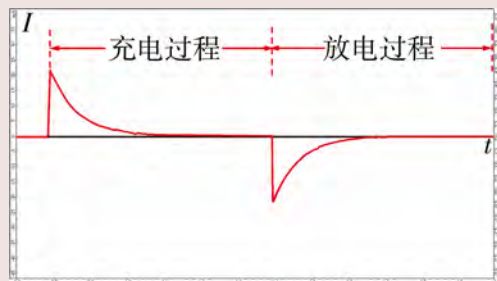
图 2-1-5 用传感器在计算机上观察电容器充、放电过程的原理图

(1) 在充、放电过程中得到的 $U-t$ 图像如图 2-1-6 (a) 所示, 试说明电容器两极板间的电压 U 随时间 t 的变化特点.

(2) 在充、放电过程中得到的 $I-t$ 图像如图 2-1-6 (b) 所示, 试说明电路中的电流 I 随时间 t 的变化特点.



(a) $U-t$ 图像



(b) $I-t$ 图像

图 2-1-6 电容器充、放电过程中两极板间电压 U 、电路中的电流 I 与时间 t 的关系图像

(3) 图 2-1-6 (b) $I-t$ 图像中, I 轴与 t 轴所围的面积表示了什么?

(4) 当电源干电池改用 2 节、3 节、4 节、5 节时, 利用实验测得的数据可得极板的电量 Q 与所加电压 U 的关系图线如图 2-1-7 所示, 由此可得出什么结论?

换用不同标度值的电容器, 重复以上的实验.

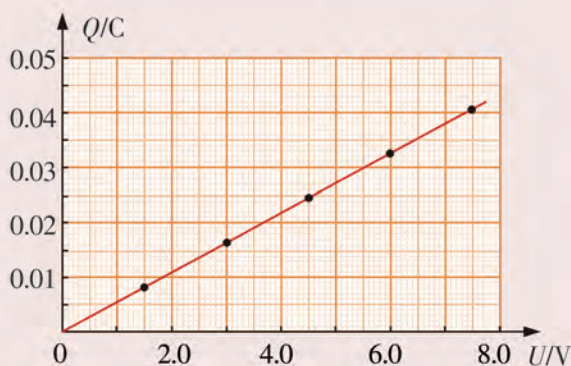


图 2-1-7 电容器极板电量 Q 与所加电压 U 的关系图像

从图 2-1-7 可知, 一个电容器所带的电量 Q 与电容器两极板间的电压 U 成正比. 对于一个电容器, Q 与 U 的比值是一个恒量; 对于不同的电容器, 这个比值是不同的. 可见, Q 与 U 的比值表示电容器自身储存电荷本领的特性, 它的大小只与电容器本身的结构有关, 与电容器所带的电量 Q 及两极板间电压 U 的大小无关.

物理学中把电容器所带的电量 Q 与电容器两极板间的电压 U 之比, 叫作电容器的电容 (capacitance). 电容用符号 C 表示, 即

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

(2.1.1)

式 (2.1.1) 表示电容器的电容在数值上等于使两极板间的电压为 1 V 时电容器所需的电量. 电容器的电容越大, 所需的电量越多. 这可以用横截面积不同的容器容纳液体的本领来类比. 如图 2-1-8 所示, 我们可观察到: 当两个杯中液面的高度相同时, 横截面积越大的杯子容纳的液体越多. 由此类比, 当电容器极板间



图 2-1-8 两杯液体

的电压相同时，电容越大的电容器容纳的电量越多。可见，电容是表示电容器容纳电荷本领的物理量。

在国际单位制中，电容的单位是法拉，简称法，符号是 F。如果使一个电容器的两极板间的电势差为 1 V，电容器上所储存的电量为 1 C，则这个电容器的电容就是 1 F。

实际使用中常常采用较小的单位：微法（ μF ）和皮法（ pF ）。它们之间的换算关系是

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

决定电容的因素

电容是由电容器本身的哪些因素决定的？下面我们通过平行板电容器进行探究。

观察与思考

如图 2-1-9 所示，将一个平行板电容器的两极板分别与静电计的金属球及地线相连，静电计的外壳接地。给电容器充电，此时静电计的指针偏转一定角度 θ ，表明电容器的两极板间存在一定的电势差。设电容器两极板间的电压为 U ，极板上所带的电量为 Q ，两极板的正对面积为 S ，两极板间的距离为 d 。

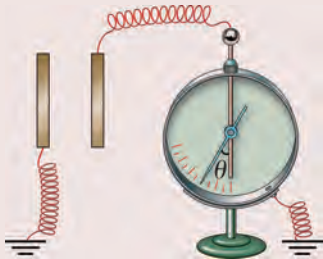


图 2-1-9 用静电计测量平行板电容器两极板间电势差的装置图

(1) 保持两极板正对面积 S 不变，增大电容器平行极板间的距离 d ，如图 2-1-10 (a) 所示。观察静电计指针的偏角 θ 的变化，思考电容 C 变大还是变小。

(2) 保持极板的间距 d 不变，减小电容器平行极板的正对面积 S ，如图 2-1-10 (b) 所示。观察静电计指针的偏角 θ 的变化，思考电容 C 变大还是变小。

(3) 保持两极板正对面积 S 和间距 d 不变，在平行板电容器内插入电介质，如图 2-1-10 (c) 所示。观察静电计指针的偏角 θ 的变化，思考电容 C 变大还是变小。

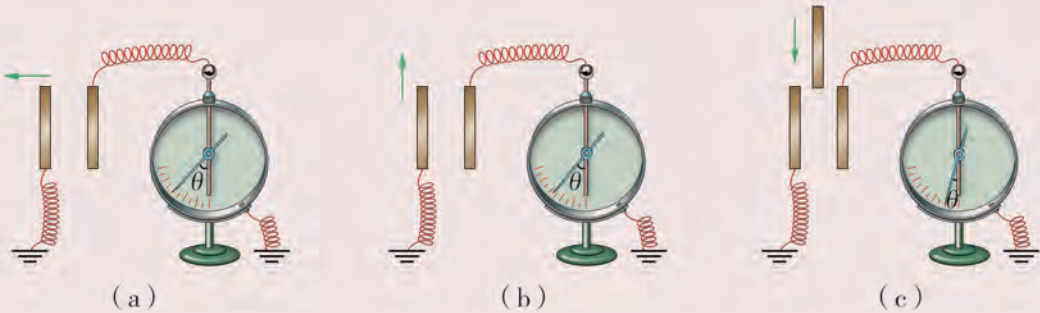


图 2-1-10 研究影响平行板电容器电容大小的因素

由上述实验可观察到，当极板上所带的电量 Q 不变时，增大两极板间的距离 d ，静电计指针的偏角 θ 变大，说明两板间的电压 U 变大，根据电容定义，可知电容 C 变小；当极板上所带的电量 Q 不变时，减小两极板的正对面积 S ，静电计指针的偏角 θ 变大，说明两板间的电压 U 变大，根据电容定义，可知电容 C 变小；当极板上所带的电量 Q 不变时，在两极板间插入电介质，静电计指针的偏角 θ 变小，说明两板间的电压 U 变小，根据电容定义，可知电容 C 变大。

理论计算和定量的实验也都表明，平行板电容器的电容 C 跟两极板的正对面积 S 成正比，与两极板间的距离 d 成反比，并与两极板间插入的电介质有关。

当平行板电容器的两极板间为真空时，其电容

$$C_0 = \frac{S}{4\pi kd}$$

式中 k 为静电力常量。

当平行板电容器的两极板间充满同一种电介质时，其电容变大为真空时的 ϵ_r 倍，即

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

式中 ϵ_r 是一个常数，与电介质的性质有关，称为电介质的相对介电常数。

表 2-1-1 列出了几种常用电介质的 ϵ_r 值，由表可以看出，空气的相对介电常数十分接近 1，所以在一般性研究中，空气对电容的影响可以忽略。

表 2-1-1 几种常用电介质的相对介电常数值

电介质	真空	空气 (0 ℃)	水 (20 ℃)	变压器油	云母	硼硅酸玻璃	陶瓷
ϵ_r	1	1.000 59	80.2	2.2 ~ 2.5	5.4	5 ~ 10	6

实践与拓展

1. 查阅资料，了解电容器在照相机闪光灯电路中的作用。
2. 通过观察、查阅资料等方式，了解并分析电容器应用的实例，撰写研究报告。



图 2-1-11 照相机闪光灯

手机触摸屏

智能手机的触摸屏可分为电阻屏和电容屏两种，这里仅介绍最常用的电容屏。

电容屏全称电容式触摸屏，俗称“硬屏”，它利用人体的电流感应进行工作。电容屏是一块四层复合玻璃屏，其结构示意图如图 2-1-12 所示。电容屏的内表面和夹层各涂有一层透明的纳米锡金属氧化物（ITO）导电层，最外层是一薄层砂土玻璃保护层，ITO 夹层作为工作面，四个角上引出四个电极，内层 ITO 为屏蔽层，以保证良好的工作环境。当手指触摸电容屏时，手指和屏的夹层工作面形成一个电容器，因为工作面上接有高频信号，电流通过电容器分别从屏的四个角上的电极中流出，并且流经这四个电极的电流与手指到四角的距离成正比，控制器通过对这四个电极的电流比例的精确计算，得出触摸点的位置。电容屏具有灵敏度高，容易实现多点触控技术等优点，目前被广泛应用于智能手机。

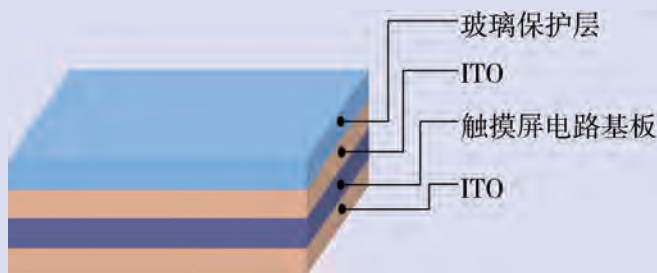


图 2-1-12 手机电容屏结构示意图



练习

1. 如图 2-1-13 所示是测定液面高度 h 的电容传感器原理图。取金属芯线与导电液体为电容器的两极，如果与传感器连接的电脑显示电容增大时，我们就知道液面高度 h 增大了。请利用所学的知识进行解释。

2. 在如图 2-1-14 所示的电路图中， C 为标有“ $1000\ \mu\text{F}$ ”、耐压 $10\ \text{V}$ 的电容器， L 为小灯泡， G 为零刻度在中央的灵敏电流计。

(1) 将开关 S 接到 a 端，观察电流计 G 中是否有电流通过，思考电容器的两极板分别带上了何种电荷。

(2) 将开关 S 从 a 断开停在 a 、 b 的中间，一段时间后再改接到 b 端，观察电流计 G 中是否有电流通过和小灯泡 L 是否发光，思考电容器的两极板的电荷发生了什么变化。

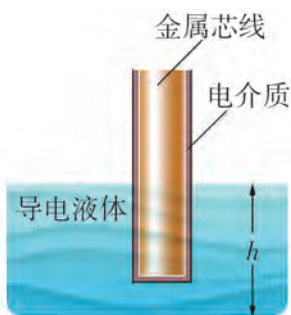


图 2-1-13

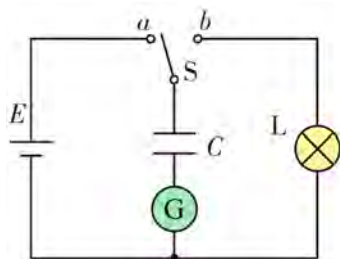


图 2-1-14

第二节 带电粒子在电场中的运动

在现代科学实验和技术设备中，常常利用带电粒子在电场中受到电场力作用的规律来改变或控制带电粒子的运动。这种应用大致可以分为两种情况：一是利用电场使带电粒子加速；二是利用电场使带电粒子偏转。

带电粒子在电场中的加速

如图 2-2-1 所示，在真空中安装一对面积较大的平行金属板，并在两板间加上电压 U ，两板之间便形成了一个匀强电场。在紧靠正极板中间处有一电量为 q 、质量为 m 的带正电粒子，重力不计。在电场力的作用下，该粒子由静止开始向负极板做匀加速直线运动，在此过程中，电场力做的功 $W = qU$ ，带电粒子到达负极板的动能 $E_k = \frac{1}{2}mv^2$ 。

根据动能定理，可知

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

由此可得带电粒子到达负极板时速度的大小为

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

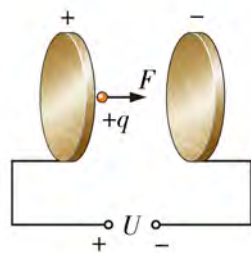


图 2-2-1 带电粒子在电场中的加速



讨论与交流

1. 如果两极板不平行，则中间的电场不再是匀强电场，带电粒子仍由静止开始从正极板处运动到负极板，带电粒子末速度的大小仍为 $v = \sqrt{\frac{2qU}{m}}$ 吗？为什么？
2. 如果带电粒子改从电场的中央由静止开始释放，到达负极板时末速度的大小仍为 $v = \sqrt{\frac{2qU}{m}}$ 吗？为什么？

加速器

在科学研究中,为了使带电粒子获得较高的能量,最直接的做法是让带电粒子在电场力的作用下不断加速.

早期制成的加速器是利用高电压的电场来加速带电粒子的. 由于实际所能达到的电压有限,因此带电粒子的能量最高只能达到约 10 MeV . 为了进一步提高带电粒子的能量,科学家制成了直线加速器,让带电粒子通过多级电场来加速.

如图 2-2-2 所示是电场直线加速器的原理示意图,由于电子每经过缝隙就被电场加速,所以进入每个圆筒左侧的小孔时速度都变大了,又由于经过每个圆筒的时间相同,则越往后,圆筒的长度必定越长,但都与进入圆筒时的速度成正比.

通过分析可知,为了能让电子获得极大的动能,整个加速器的管道必须得非常长. 科学家们就是为了使电子获得无限接近光速的动能而给欧洲大型强子对撞机铺设了周长为 27 km 的加速管道.

加速器被广泛应用于工农业、医疗、科研等各个领域. 例如,在工业上,利用加速器产生的粒子束(射线)来改良材料的机械、耐温或绝缘等各方面的性能;在医疗上,利用加速器产生的粒子束治疗某些癌症;在科研上,北京正负电子对撞机和欧洲大型强子对撞机可使电子获得巨大能量,用于粒子物理实验及研究等.

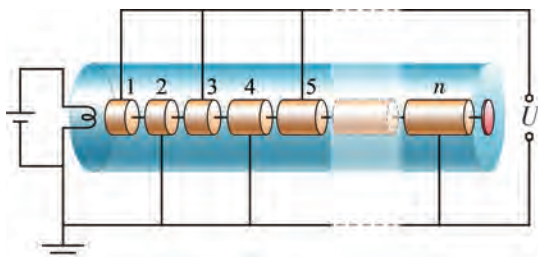


图 2-2-2 电场直线加速器原理示意图

带电粒子在电场中的偏转

让带电粒子以一定初速度沿垂直于电场方向射入匀强电场中,带电粒子会做怎样的运动呢? 下面通过实验来观察现象.



观察与思考

观察带电粒子在电场中的运动,实验装置示意图如图 2-2-3 所示.

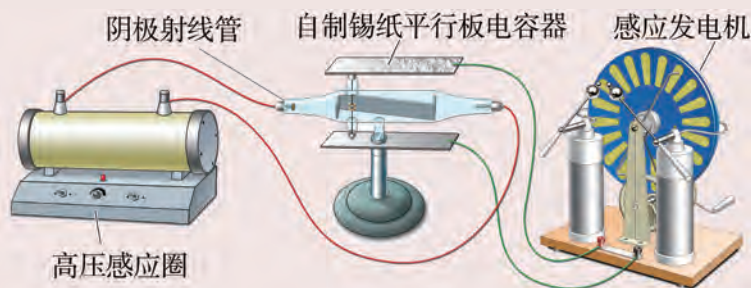


图 2-2-3 带电粒子在电场中运动的实验装置示意图

(1) 接通高压感应圈, 让阴极射线管预热一下, 看到带电粒子从阴极水平射向阳极; 摇动感应起电机, 给电容器充电, 观察带电粒子的偏转方向.

(2) 给电容器放电后, 接线柱调换连接, 再次摇动感应起电机, 给电容器充电, 观察带电粒子的偏转方向.

通过观察实验现象可知, 电子束垂直射入电场, 运动轨迹会发生偏转; 当电场方向改变, 带电粒子在电场中的偏转方向也会随之改变.

带电粒子在电场中受到电场力, 如果带电粒子进入电场时的速度方向与电场力的方向不平行, 带电粒子就会受到侧向的作用力, 从而发生偏转. 本节只研究带电粒子的初速度方向与电场方向垂直时发生偏转的情况.

如图 2-2-4 所示, 两平行导体板水平放置, 导体板长度为 l , 板间距离为 d , 板间电压为 U . 有一质量为 m 、电量为 q 的带电粒子以水平初速度大小 v_0 进入板间的匀强电场. 重力忽略不计.

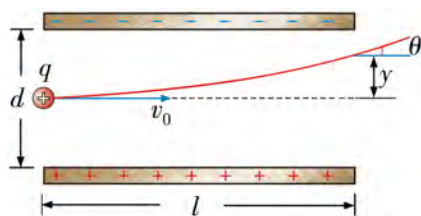


图 2-2-4 带电粒子在电场中的偏转

带电粒子垂直进入匀强电场的运动类似物体的平抛运动. 因为带电粒子在水平方向上不受力, 竖直方向上受到一个恒定不变的电场力, 所以可以将它的运动看成是由水平方向上的匀速直线运动和竖直方向上初速度大小为零的匀加速直线运动合成的.

带电粒子在电场中运动的时间为

$$t = \frac{l}{v_0}$$

忽略带电粒子的重力, 它的加速度的大小为

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

穿出电场时, 带电粒子在竖直方向上位移的大小为

$$y = \frac{1}{2}at^2 = \frac{ql^2}{2dmv_0^2}U$$

穿出电场时, 带电粒子在竖直方向上分速度的大小

$v_y = at = \frac{ql}{dmv_0}U$, 如图 2-2-5 所示, 其中 θ 为带电粒子离开电场时偏转的角度.



图 2-2-5 速度 v 的分解

结合数学知识, 可得

$$\tan\theta = \frac{v_y}{v_0} = \frac{ql}{dmv_0^2}U$$

如果知道 $\tan\theta$ 的确切数值, 通过查表, 便可求出偏转角 θ .

示波器

示波器是一种常用的实验仪器,如图2-2-6所示,它常被用来显示电信号随时间变化的情况.振动、光、温度等的变化可以通过传感器转化成电信号的变化,然后用示波器来研究.



图2-2-6 示波器

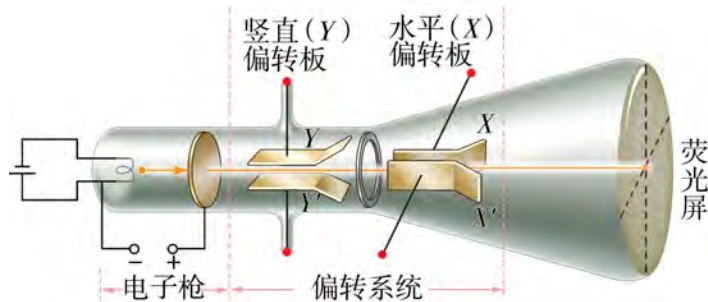


图2-2-7 示波管结构图

示波器的基本原理是带电粒子在电场力的作用下加速和偏转,屏幕上的亮线是由电子束高速撞击荧光屏产生的.示波器的核心部件是示波管,它主要由电子枪、偏转系统和荧光屏三部分组成,如图2-2-7所示.



观察与思考

按以下要求利用示波器观察实验现象.

- (1) 当 Y 偏转板、 X 偏转板不加电压,电子束从电子枪发射后沿直线运动,在荧光屏上产生一个亮斑.
- (2) 只在 Y 偏转板加电压, X 偏转板不加电压,观察亮斑出现在荧光屏的什么地方,并试着加以解释.
- (3) 只在 X 偏转板加电压, Y 偏转板不加电压,观察亮斑出现在荧光屏的什么地方,并试着加以解释.

由上述实验可见,当只在 Y 偏转板加电压时,荧光屏上的亮斑在竖直方向上发生偏移,这是由于电子束经过 Y 偏转板时受到竖直方向的电场力的作用.当只在 X 偏转板加电压时,荧光屏上的亮斑在水平方向上发生偏移,这是由于电子束经过 X 偏转板时受到水平方向的电场力的作用.

示波器的灯丝通电后给阴极加热,使阴极发射电子.电子经阳极和阴极间的电场加速聚焦后形成一很细的电子束,电子射出打在管底的荧光屏上,形成一个小亮斑.亮斑在荧光屏上的位置可以通过调节 Y 偏转板与 X 偏转板上的电压大小来控制.如果加在 Y 偏转板上的电压是随时间按正弦规律作周期性变化的信号,并在 X 偏转板上加上适当的偏转电

压, 荧光屏上就会显示出一条正弦曲线.

示波器在实际工作时, Y 偏转板和 X 偏转板都加上电压, 打在荧光屏上的亮斑既在竖直方向上发生偏移, 也在水平方向上发生偏移, 亮斑的运动是竖直和水平两个方向运动的合运动.



实践与拓展

查阅示波器说明书及相关资料, 了解加在示波器 X 偏转板上的电压有何特点.

密立根油滴实验

1897 年, 英国物理学家汤姆孙 (J. J. Thomson, 1856—1940) 通过阴极射线管实验发现了电子. 1913 年, 美国物理学家密立根用实验测得电子电量的精确数值.

如图 2-2-8 所示是密立根油滴实验示意图. 密立根油滴实验主要应用了两块间距为 d 且水平放置的平行金属板间的匀强电场对油滴产生的静电力与油滴的重力相平衡的原理.

首先, 密立根通过喷雾器将细小的油滴喷入一密闭空间中, 这些油滴在喷出时由于与喷雾器产生摩擦而带了负电.

油滴因重力的作用而下落, 其中少量油滴通过夹板上的小孔进入了测试设备中. 在两板间加电压, 两板间的电场就会对这些油滴施加作用力. 当上板的电势足够高时, 静电力将使带负电的油滴上升. 接着, 他对两板间的电势差进行调节, 使带电的油滴悬浮在两板间. 此时, 油滴的重力与电场对油滴施加向上的静电力的大小相等, 即 $mg = qE = q \frac{U}{d}$.

因而, 悬浮油滴的电量为 $q = \frac{mgd}{U}$.

上式中的 U 、 d 均可直接测量, 但油滴太小, 以至于其重力 mg 的大小无法用普通的方法直接测量. 为了解决这一问题, 密立根先让油滴在电场中悬浮, 然后撤去电场, 测出油滴下落的速度. 由于空气阻力的存在, 下落的油滴速度会很快达到匀速, 而这个速度又与油滴的质量有关. 因此, 通过测量这个速度, 密立根计算出 mg , 从而求得油滴的电量 q .

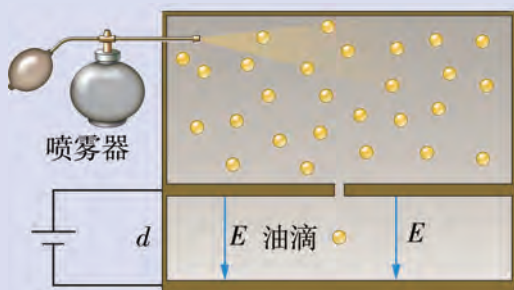


图 2-2-8 密立根油滴实验示意图

练习

1. 如图 2-2-9 所示, 两极板加以恒定的电压 U , 有一质量为 m 、电量为 $+q$ 的带电粒子在正极板附近由静止开始向负极板做直线运动.

(1) 如果两板间距离越小, 带电粒子获得的加速度是否越大? 带电粒子到达负极板时的速度是否越大? 电荷到达负极板的时间是否越短?

(2) 由 (1) 可得提高带电粒子离开电场时的速度的方法是什么?

2. 如图 2-2-10 所示是直线加速器的一部分, A 、 B 接在电压大小为 U 、极性随时间 t 周期性变化的电源上. 一质量为 m 、电量为 e 的电子, 以初速度 v_0 进入第 3 个金属圆筒左侧的小孔, 此后在每个筒内均做匀速直线运动, 时间恰好都为 t , 在每两筒的缝隙间利用电场加速, 时间不计. 试计算确定 3 个筒各自的长度以及电子从第 5 个金属圆筒出来时的速度.

3. 如图 2-2-11 所示, A 为粒子源, F 为荧光屏. 在 A 和极板 B 间的加速电压为 U_1 , 在两水平放置的平行导体板 C 、 D 间加有偏转电压 U_2 . 现分别有质子和 α 粒子 (氦核) 由静止从 A 发出, 经加速后以水平速度进入 C 、 D 间, 忽略粒子所受的重力, 它们能打到 F 的同一位置上吗? 为什么?

4. 在如图 2-2-7 所示的示波管中, 如果在荧光屏右上方出现亮斑, 那么示波管中的 X 偏转板应带什么电? Y 偏转板应带什么电? 为什么?

5. 图 2-2-12 中, 从炽热金属丝射出的电子流, 经电场加速后进入偏转电场. 已知加速电极间的电压是 25 V, 偏转板间的电压是 2.25 V, 偏转板长 60 cm, 相距 20 cm. 电子的质量是 9.1×10^{-31} kg, 电量 $e = 1.6 \times 10^{-19}$ C. (结果均保留一位有效数字.)

(1) 求电子离开加速电场时的速度大小.

(2) 电子能否从偏转电场右侧飞出? 若能, 求偏转速度的大小.

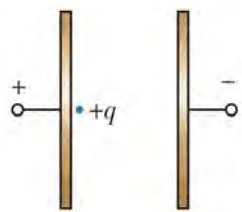


图 2-2-9

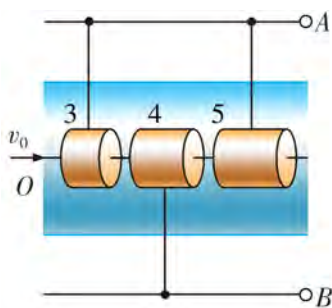


图 2-2-10

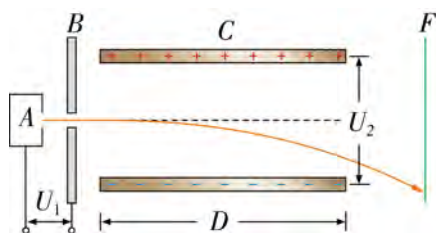


图 2-2-11

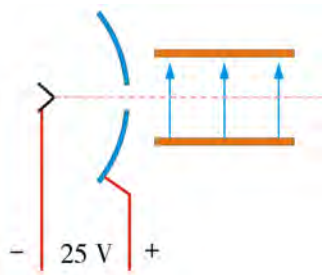


图 2-2-12

第三节 静电的利用与防护

随着科学技术的发展，人们对静电特性的认识越来越深入，静电在生产、生活实践中得到了广泛的应用，如静电喷涂、静电除尘、静电复印、静电植绒等。下面介绍几种利用静电的技术。

静电喷涂

静电喷涂是一种利用静电作用使雾化涂料微粒在高压电场作用下带上负电荷，并吸附于带正电荷的被涂物的涂装技术。与传统的喷漆工艺相比较，静电喷涂具有显著优势，如涂层质量高、涂料利用率高、对使用者操作技巧要求低等。目前，大到高铁、汽车、拖拉机，小到工件、玩具、家用电器等，都会用到静电喷涂技术。

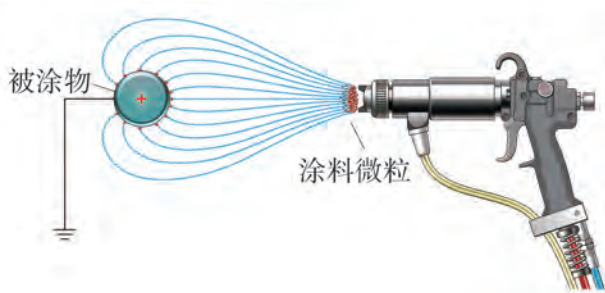


图 2-3-1 静电喷涂机

静电除尘

过去，一些水泥厂、石灰厂以及以煤作为燃料的发电厂，每天都会排出大量的粉尘，这不仅损害工厂里的职工和周边居民的身体健康，而且严重污染环境。如何消除粉尘对环境的影响呢？人们利用静电作用制成了静电除尘设备。

观察与思考

如图 2-3-2 所示是一个静电除尘的简易实验装置。透明的玻璃瓶中充满烟尘，将高压电源的正、负两极分别接到绕在玻璃瓶上的金属螺旋线和插在玻璃瓶内的金属直导线上，能观察到什么现象？思考分析这些现象产生的原因。



图 2-3-2 静电除尘装置图

静电除尘是利用电荷相互作用的性质，把带有不同电性的粉尘从烟气中分离出来，再分类处理的过程。如图 2-3-3 所示是一种实用的静电除尘设备图。把高压电源的正极接到金属圆筒上，负极接到悬挂在管心的金属线上，它们之间有很强电场，而且距离管心的金属线越近的地方，场强越大。因此，金属线附近的气体分子被强电场电离，成为电子和正离子。在电场力的作用下，正离子被吸引到负极（金属线）上；电子在向着正极（金属圆筒）运动的过程中，附在空气中的尘埃上，使粉尘带负电，并被吸附到金属圆筒上。粉尘在筒壁积累到一定程度时，会在重力的作用下落入下面的漏斗中再被排出。此设备既可清洁环境，又可在除尘过程中回收有用物质。

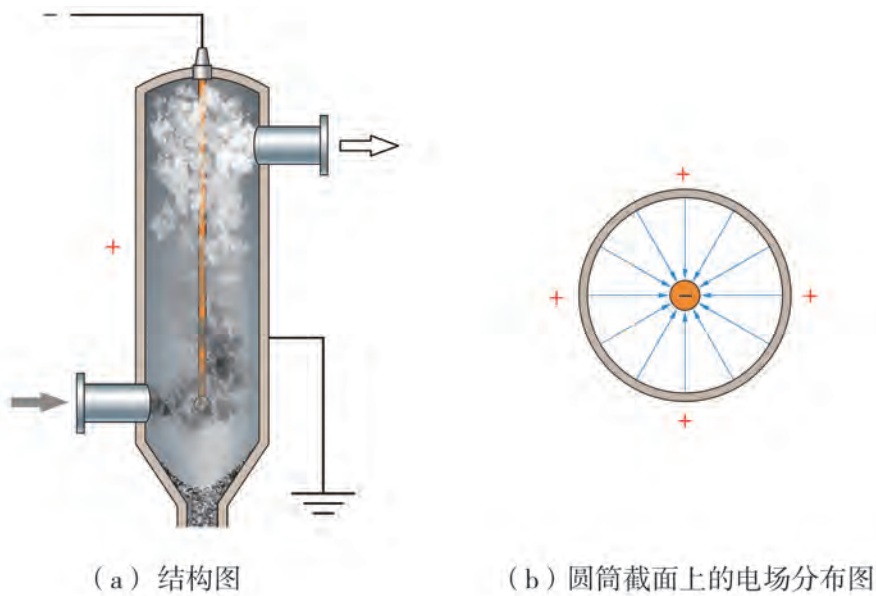


图 2-3-3 静电除尘设备

静电复印

静电复印技术是美国物理学家卡尔逊（C. Carlson，1906—1968）于 1938 年发明的一种影印复印技术。它是一种利用正、负电荷的吸引力进行油墨转移的印刷方式，又称无压印刷。其核心部件是一个有机光导体鼓的金属圆柱，它的表面被涂上有机光导体（OPC），没有光照时，OPC 是绝缘体，受到光照时则变成导体。

静电复印机在预热时，先通过机内电路使有机光导体鼓在暗处带正电，如图 2-3-4（a）所示。按下复印键时，把强光照到文件上，文件反射的光通过光学系统在鼓上成像，亮处的 OPC 层变成导体，所带的电荷流失，暗处的电荷则保留下来。这时在鼓上就形成了与曝光图像相同的带电图案（肉眼看不见），称为“静电潜像”，如图 2-3-4（b）所示。接着，有机光导体鼓转动，“静电潜像”经过墨粉盒时，带负电的墨粉被吸附在鼓表面带正电的部位上，使“静电潜像”变成了可见的像，如图 2-3-4（c）所示。之后，有机光导体鼓继续转动，潜像部分经过复印纸时把掺有树脂胶的墨粉印在白纸上，白纸就逐渐变

成文件的副本，如图 2-3-4（d）所示。最后，纸从有机光导体鼓区域出来后，定影器热晒新印的文件，让墨粉永久粘在纸上，纸张最终送出，文件的复印流程完成。

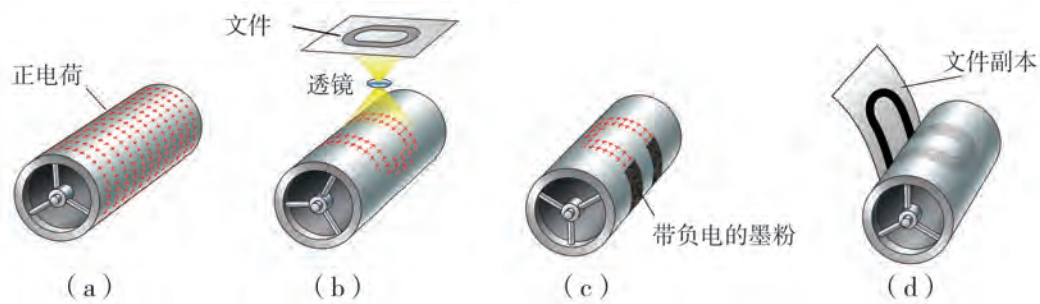


图 2-3-4 有机光导体鼓工作原理

如今，静电复印技术已发展成一门成熟的技术，被广泛应用于激光打印机、喷墨打印机、模拟式复印机、数字式复印机、速印机、传真机等。

静电植绒

静电植绒是利用电荷之间同性相斥、异性相吸的性质，通过使绒毛带上负电荷，令绒毛被吸引到带正电的被植体表面上。如图 2-3-5 所示是给布匹静电植绒的工作流程图。真空中带负电的绒毛通过设计按照一定的下落规律到达相应位置，与布匹上的黏合剂接触，并粘贴在布匹上，从而形成设计的图案。

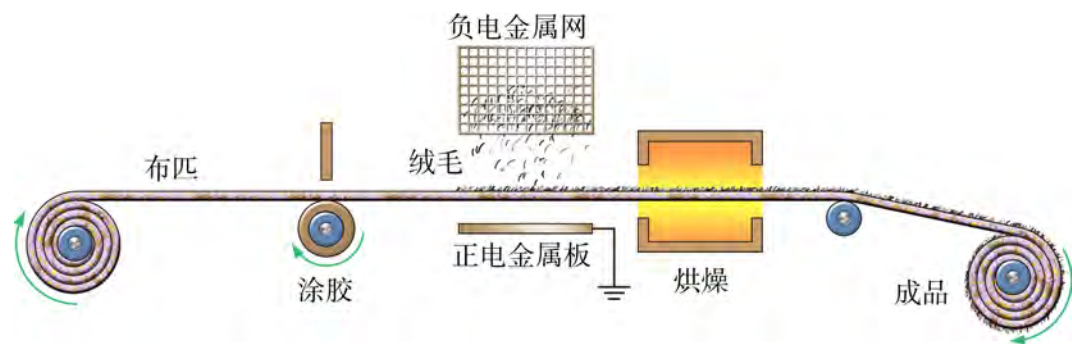


图 2-3-5 静电植绒工作流程图

近年来，静电在海水淡化、人工降雨、低温冷冻、喷洒农药、航天器补充燃料等方面也得到广泛应用。

尖端放电

导体尖端的电荷密度很大，附近的电场很强，空气中残留的带电粒子在强电场的作用下发生剧烈的运动，把空气中的气体分子撞散，并使分子中的正、负电荷分离，我们把这种现象叫作空气的**电离**（ionization）。

观察与思考

如图 2-3-6 所示, 将两根放电针分别安装在感应线圈的接线柱上, 再将 $8 \sim 10 \text{ V}$ 的低压直流电源接在感应线圈上, 闭合开关, 适当调节感应线圈上振动簧片的位置, 就可以观察到火花放电现象. 如果利用改造后的范德格拉夫起电机供电, 将上、下正对的两支放电针分别接到电源的两极上, 则可看到放电针的放电现象与雷电发生时的效果相似. 那么, 这个实验的基本原理是什么呢?



图 2-3-6 实验装置图

原来, 两根放电针附近形成的强电场使空气发生了电离, 电离后的电荷各自奔向与它自身带异种电荷的放电针, 与尖端上的电荷中和. 在这个过程中尖端电量减少, 这种现象叫作**尖端放电**.

避雷针（如图 2-3-7 所示）是利用尖端放电原理保护建筑物等避免雷击的一种设施. 它是由一根或几根尖锐的金属棒构成, 被安装在建筑物的顶部, 用粗导线将其与埋在地下的金属板连接, 保持其与大地的良好接触.

在雷雨天气, 当高楼上空云层带大量的某种电荷时, 避雷针和高楼顶部通过静电感应, 带上大量的异种电荷. 由于导体尖端容易聚集电荷, 所以避雷针的尖头就聚集了整个建筑大部分的电荷. 避雷针与带电云层就像图 2-3-6 实验中的两根放电针一样, 当云层上电荷较多时, 避雷针与云层之间的空气就很容易被击穿而发生电离, 成为导体. 这样, 带电云层与避雷针连通形成电路, 而避雷针又是接地的, 因此就可以把云层上的电荷导入大地, 使其不对高层建筑构成威胁, 保证建筑物的安全.



图 2-3-7 避雷针

防止静电危害

静电时常也会给人们带来不便、烦恼甚至危害. 长期处于静电环境下的人容易出现精神疲劳、头晕目眩等不良反应. 工业生产中的静电现象可能造成设备失控、产品报废, 或造成严重的火灾等. 静电危害一般分为两类: 一是静电力造成的不良后果; 二是静电火花引发的灾害. 表 2-3-1 分类列出了一些常见的静电危害.

表 2-3-1 常见的静电危害

静电力造成的不良后果	静电火花引发的灾害
观看电视时荧屏表面的静电容易吸附灰尘，使图像的清晰度和亮度下降	医院手术台上，静电火花可能会引起麻醉剂或氧气爆炸
混纺衣服上常出现不易拍掉的灰尘	煤矿里，静电火花可能会引起瓦斯爆炸
长期穿尼龙内衣，因尼龙与皮肤的摩擦起电可能损伤皮肤	在航天工业里，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失败
印刷厂里，纸页之间因静电而黏合，给印刷带来不便	在石化工业里，因静电放电会引起爆炸事故
制药厂里，因静电吸引尘埃，使药品达不到标准纯度	油罐车运输汽油时，静电放电易使汽油着火进而引发爆炸

日常生活和生产中，防止静电产生的措施：一是控制静电的产生。可以采用起电较少的设备材料，如穿棉质含量高的衣服，用石棉等绝缘材料作为导体的外壳，在机械经常发生摩擦处添加抗静电剂等；二是把产生的电荷尽快导走。最简单又最可靠的办法是用导线把设备接地，这样可以把电荷导入大地，避免静电积累。

飞机在飞行过程中会因与空气摩擦而带有静电，因此在飞机的两侧翼尖及飞机的尾部都装有“放电刷”（如图 2-3-8 所示），飞机起落架大都使用特制的接地轮胎或接地线；油罐车尾部拖着的铁链（如图 2-3-9 所示），可把因油与罐壁摩擦而产生的电荷及时导入大地。

此外，当湿度提高时，固体材料的电阻降低，可以加快静电的泄漏，所以增加湿度也是防止静电危害的常用方法。有些工厂的生产车间要保持恒定的湿度就是这个道理。



图 2-3-8 飞机上的“放电刷”



图 2-3-9 油罐车尾的铁链

 练习

1. 身上穿的化纤衣服常会贴在人的身体上，为什么？
2. 传送带被广泛应用于各行各业。在干燥的日子里，人靠近传送带，会有什么感觉？为什么？可以用什么方法解决这个问题？
3. 通过上网或去图书馆收集关于防止雷电危害等的资料，写一篇科普小报告。

本章小结

知识结构

参考下面的知识结构，请进一步梳理本章的知识。



回顾与评价

1. 谈谈你对电容器充、放电过程的特点和规律的认识，并结合实例，说明电容器在电路中的应用。
2. 你采用了哪些科学思维方法研究带电粒子在电场中运动的问题，并通过抽象概括又发现了哪些新的物理规律？
3. 你了解哪些有关静电利用与防护的知识？有哪些可预防静电危害的方法？

习题二

1. 下列关于静电复印机在工作过程中的说法正确的是 ()。

- A. 墨粉带正电
- B. 硒鼓上“静电潜像”带正电
- C. 复印过程中, 白纸不带电
- D. 充电时让硒鼓表面带上负电

2. 如图 2-1 所示是静电除尘装置示意图, 它由金属管 A 和管中金属丝 B 组成。下列有关静电除尘原理的说法正确的是 ()。

- A. A 接高压电源负极, B 接高压电源正极
- B. 煤粉等烟尘吸附电子后被吸在 B 上
- C. 靠近 B 处场强大, B 附近的空气被电离成正离子和电子
- D. 煤粉等烟尘在强大电场作用下电离成负、正离子, 分别吸附在 B 和 A 上

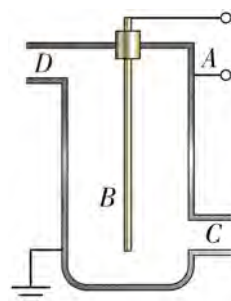


图 2-1

3. 如图 2-2 所示是某电容式话筒的原理示意图, E 为电源, R 为电阻, 薄片 P 和 Q 为两金属板。从左向右对着振动片 P 说话, P 振动而 Q 不动。在 P、Q 间距减小的过程中 ()。

- A. 电容器的电容增大
- B. P 上电量保持不变
- C. 点 M 的电势比点 N 的低
- D. 点 M 的电势比点 N 的高

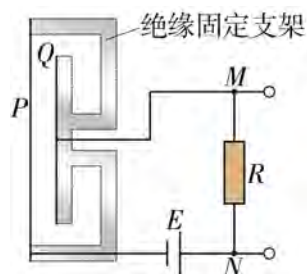


图 2-2

4. 对于电容式键盘, 当连接电源不断电, 按下某个键时, 与之相连的电子线路就给出与该键相关的信号。当按下键时, 电容器的 ()。

- A. 电容变小
- B. 极板的电量变大
- C. 极板间的电压变小
- D. 极板间的场强变大

5. 如图 2-3 所示是静电喷涂示意图, 被喷工件带正电, 喷枪喷出的涂料在静电力作用下, 向被喷工件运动, 最后吸附在其表面上。在涂料微粒向工件靠近的过程中 ()。

- A. 涂料微粒带正电
- B. 涂料微粒的电势能减少
- C. 电场力对涂料微粒做负功
- D. 离工件越近, 所受静电力越大

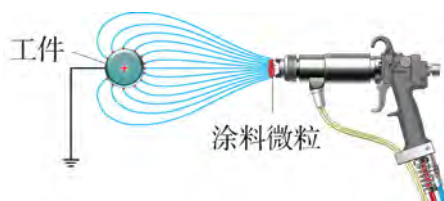


图 2-3

6. 如图 2-4 所示是模拟避雷针作用的实验装置. 金属板 M 接高压电源的正极, 金属板 N 接负极. 金属板 N 上有两个等高的金属柱 A 、 B , A 为尖头, B 为圆头. 逐渐升高电源电压, 当电压达到一定数值时, 可以看到放电现象. A 、 B 两个金属柱, 哪个容易放电? (实验时注意身体要远离带电体, 以防触电.)

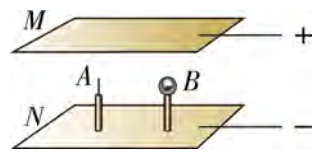


图 2-4

7. 如图 2-5 所示是密立根油滴实验的原理示意图, 把两块间距为 d 且水平放置的平行金属板与电源连接, 上板带正电, 下板带负电. 由喷雾器喷出的小油滴, 经上板的小孔落入两板间的匀强电场中, 油滴喷出时因摩擦而带电. 假如油滴带负电, 电量为 q , 调节电压 U 可使小油滴所受电场力与所受重力平衡, 用显微镜观察总会发现大部分小油滴做加速运动, 只有少部分小油滴保持悬浮状态, 那么两板间的电压满足什么关系时, 才能使半径为 R 、密度为 ρ 的小油滴处于悬浮状态? (重力加速度为 g , 忽略空气对油滴的浮力和阻力.)

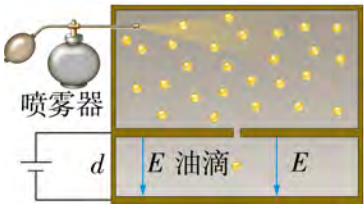


图 2-5

8. 计算机键盘每个键下面都连有一块小金属片, 与该金属片隔有一定空气间隙的是另一块固定的小金属片, 这组金属片组成一个可变电容器, 如图 2-6 所示. 该电容器的电容可用公式 $C = \varepsilon \frac{S}{d}$ 计算, 式中常量 $\varepsilon = 9 \times 10^{-12} \text{ F/m}$, S 表示金属片的正对面积, d 表示两

金属片间的距离. 当键被按下时, 此小电容器的电容发生变化, 与之相连的电子线路就能检测到是哪个键被按下, 从而给出相应的信号. 设每个金属片的正对面积 S 为 50 mm^2 , 键未被按下时两金属片的距离 d 为 0.6 mm . 如果电容变化 0.25 pF , 电子线路恰能检测出必要的信号, 则键被按下时金属片的距离变小了多少?



图 2-6

9. 为研究静电除尘, 有人设计了一个盒状容器, 如图 2-7 所示. 容器侧面是绝缘的透明有机玻璃, 它的上、下底面是面积 $S = 0.04 \text{ m}^2$ 的金属板, 间距 $L = 0.05 \text{ m}$, 当连接到 $U = 2500 \text{ V}$ 的高压电源正、负两极时, 能在两金属板间产生一个匀强电场. 现把均匀分布的一定量烟尘颗粒密闭在容器内, 每立方米有烟尘颗粒 10^{13} 个, 假设这些颗粒都处于静止状态, 每个颗粒所带电量为 $q = 1.0 \times 10^{-17} \text{ C}$, 质量为 $m = 2.0 \times 10^{-15} \text{ kg}$, 不考虑烟尘颗粒之间的相互作用和空气阻力, 并忽略烟尘颗粒所受重力. 求合上开关后:

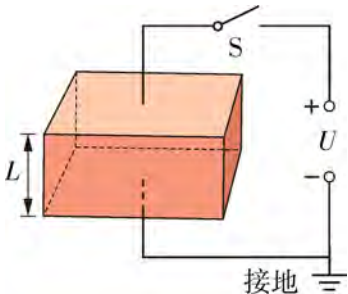


图 2-7

- (1) 经过多长时间烟尘颗粒才可以被全部吸附?
- (2) 除尘过程中电场对烟尘颗粒共做了多少功?
- (3) 经过多长时间容器中烟尘颗粒的总动能达到最大?

10. 如图 2-8 所示是一示波管工作的原理图. 电子经一电压为 U_1 的加速电场, 加速后垂直进入偏转电场, 离开偏转电场时的偏移量是 h , 两平行板间的距离为 d , 电压为 U_2 , 板长为 L . 每单位电压引起的偏移量 $\frac{h}{U_2}$ 叫示波管的灵敏度. 为了提高示波管的灵敏度, 可采用哪些方法?

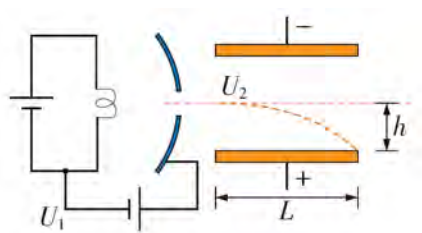


图 2-8

11. 电场直线加速器由粒子源 (如炽热的金属丝)、 n 个长度不同的金属圆筒 (两底面开有小孔) 和一个靶组成. 把所有的圆筒交叉连接到电压为 U 、做周期性变化的电源上, 确保每次电子从金属丝到第一个圆筒的左侧及随后每经过两个圆筒之间的缝隙时都被电势差为 U 的电场加速, 在圆筒内却做匀速运动. 缝隙宽度很小, 电子经过缝隙时间不计, 经过每个圆筒的时间都为 t . 试讨论: 每个圆筒的长度必须满足什么条件? 最后打在靶上的电子动能有多大?

12. 喷墨打印机的原理示意图如图 2-9 所示, 其中墨盒可以喷出墨汁液滴, 此液滴经过带电室时被带上负电, 带电多少由计算机按字体笔画高低位置输入信号加以控制. 带电后液滴以一定的初速度进入偏转电场, 带电液滴经过偏转电场发生偏转后打到纸上, 显示出字体. 计算机无信号输入时, 墨汁液滴不带电, 径直通过偏转板最后注入回流槽流回墨盒.

设偏转板长 $L_1 = 1.6 \text{ cm}$, 两板间的距离 $d = 0.5 \text{ cm}$, 两板间的电压 $U = 8.0 \times 10^3 \text{ V}$, 偏转板的右端距纸的距离 $L_2 = 3.2 \text{ cm}$. 若一滴墨汁液滴的质量 $m = 1.6 \times 10^{-10} \text{ kg}$, 墨汁液滴以 $v_0 = 20 \text{ m/s}$ 的初速度垂直电场方向进入偏转电场, 此液滴打到纸上的点距原入射方向的距离为 2.0 mm . 忽略空气阻力和重力作用.

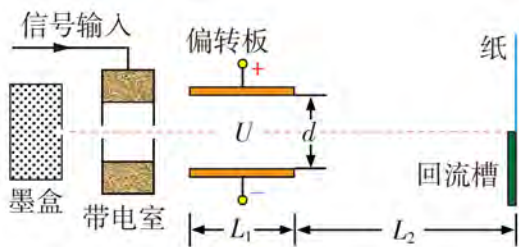


图 2-9

- (1) 求这滴液滴通过带电室后所带的电量 q .
- (2) 若要使纸上的字体放大, 可通过调节两极板间的电压或调节偏转板右端距纸的距离 L_2 来实现. 现调节 L_2 使纸上的字体放大 10%, 调节后偏转板的右端距纸的距离 L_2 为多大?



第三章

恒定电流

第二次工业革命以电力的广泛应用为标志，不仅推动了社会生产由机械化向电气化、自动化转变，而且极大地改变了人们的生活方式，打开了人类进入现代文明时代的大门。

1800年，伏特（A. Volta，1745—1827）发明了电池，人类第一次得到持续稳定的电流——恒定电流，开创了人类认识 and 实际利用电能的新纪元。今天的用电技术就是在恒定电流的基础上发展起来的。

电流是怎样形成的？恒定电流有哪些特点？它在导体中受到怎样的阻碍作用？这些都是我们将在本章探究的内容。

在本章的学习中我们将了解金属导体的电阻与材料、长度和横截面积的定量关系；会测量金属的电阻率；能应用电阻定律来解释日常生活中的现象。

第一节

导体的伏安特性曲线

我们知道，欧姆定律反映的是导体中的电流与导体两端的电压、导体的电阻之间的关系。

电流

电流是由电荷定向移动形成的。要形成电流，首先必须有能够自由移动的电荷——自由电荷。一切导体都有自由电荷，例如金属中的自由电子，电解液中的正、负离子，都是自由电荷。那么，在什么条件下，自由电荷才能定向移动呢？

当导体的两端分别与电源的两极连接时，导体两端有了电压，此时，导体中也有了电场，导体中的自由电荷就在电场力的作用下发生定向移动，形成电流。由此可见，导体中产生电流的另一条件是导体两端存在电压。

电流是有方向的，习惯上规定正电荷定向移动的方向为电流的方向。在金属中，能够移动的是自由电子，所以，金属中电流的方向与电子定向移动的实际方向相反。

为了表示电流的强弱，物理学中把通过某段导体横截面的电量 Q 与所用时间 t 之比称为通过这段导体的**电流** (electric current)。用 I 表示电流，则

$$I = \frac{Q}{t} \quad (3.1.1)$$

国际单位制中，电流的单位是安培，简称安，符号是 A。1 A = 1 C/s。常用的电流单位还有毫安 (mA) 和微安 (μA)。

如果导体中的电流方向不随时间而改变，则这样的电流称为**直流**。如果电流的方向和强弱都不随时间而改变，则这样的电流称为**恒定电流**。通常所说的直流就是指恒定电流。



讨论与交流

如图 3-1-1 所示，一段均匀导体长度为 L ，横截面积为 S 。设导体中单位体积内所含自由电荷数为 n ，每个自由电荷的电量为 q ，自由电荷定向移动平均速率为 v 。试推导出导体中电流 I 的表达式。

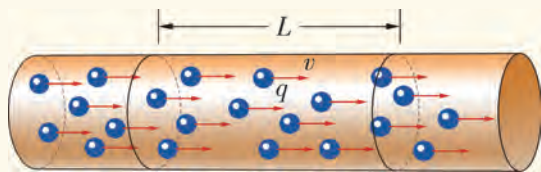


图 3-1-1 均匀导体

上述推导可得电流的微观表达式为 $I = nqSv$ ，可见同一导体中自由电荷的定向移动平均速率 v 越大，电流 I 就越大。

欧姆定律

德国物理学家欧姆（G. S. Ohm，1787—1854）通过实验研究发现：导体中的电流与导体两端的电压成正比，与导体的电阻成反比。这就是我们初中学过的**欧姆定律**。其数学表达式为

$$I = \frac{U}{R} \tag{3.1.2}$$

式（3.1.2）表明，在导体的电阻不变的情况下，电压越大，通过的电流越大；电压越小，通过的电流越小。同样，在相同电压作用下，导体的电阻越小，通过导体的电流越大；导体的电阻越大，通过导体的电流越小。

通过对 $I = \frac{U}{R}$ 的变形，可得到计算电阻的表达式

$$R = \frac{U}{I} \tag{3.1.3}$$

物理学中，电阻用导体两端的电压跟通过的电流之比来定义。在实验室中，我们通过用电压表测量导体两端的电压、用电流表测量通过导体的电流的方法来计算导体的电阻。这样的方法叫作**伏安法**。

导体的伏安特性曲线

如何直观地反映导体中的电流 I 、电压 U 和电阻 R 之间的关系呢？

观察与思考

如图 3-1-2 所示，用电流表测量通过金属导体 a 的电流 I ，用电压表测量 a 两端的电压 U 。图中虚线框内是一个能提供可变电压的电路，通过调节滑动变阻器的滑片，可得到金属导体 a 的几组 I 和 U 的值。然后，换用另一个金属导体 b 代替 a 进行实验，可得金属导体 b 的几组 I 和 U 的值。

记录实验数据，并在同一坐标系中作出 a 和 b 的 $I-U$ 图像。

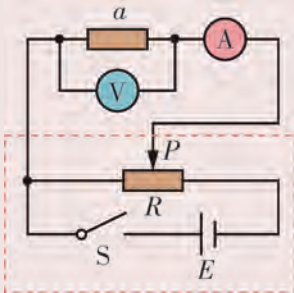


图 3-1-2 探究导体电流与其两端电压关系实验图

如图 3-1-3 所示是根据某次实验作出的金属导体 a 和 b 的 $I-U$ 图像，这种以纵坐标表示电流 I 、横坐标表示电压 U 画出的 $I-U$ 图像叫作导体的**伏安特性曲线**。导体的伏安特

性曲线是研究导体电流和电压关系的重要工具.

在温度不太高时,同一金属导体的 $I-U$ 图像是一条通过原点的直线,如图 3-1-3 所示.这表明,同一导体的电阻与电压和电流无关,而是由导体本身的性质决定的.

对于金属导体,当温度不变时,电流与电压成正比,其伏安特性曲线是通过坐标原点的直线,其电阻为定值,具有这种伏安特性曲线的电学元件称为线性元件.欧姆定律是在金属导体的基础上总结得出的,对其他导体是否适用,需要经过进一步的实验.实验表明,除金属外,欧姆定律对电解质溶液也适用,但对气体导体(如日光灯中的气体),以及某些导电器件(如晶体管)并不适用.在这种情况下,其伏安特性曲线不是直线,这些电学元件称为非线性元件.

虽然欧姆定律不适用于非线性元件,但计算电阻的公式 $R = \frac{U}{I}$ 仍适用,以此判断导体在不同状态下的导电特性.

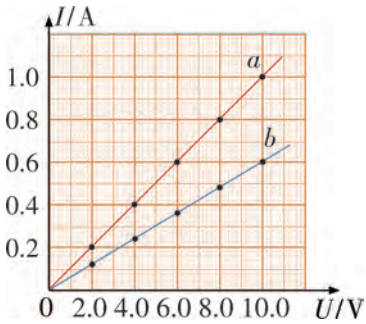


图 3-1-3 金属导体的 $I-U$ 图像



讨论与交流

- 如图 3-1-3 所示的直线 a 、 b 的斜率有什么物理意义?哪一条表示的金属导体的电阻较大?
- 如图 3-1-4 所示是某额定电压为 3 V 的小灯泡的伏安特性曲线.当加在小灯泡两端的电压分别是 0.2 V、0.9 V、3 V 时,求小灯泡钨丝的电阻,并讨论其导电特性.

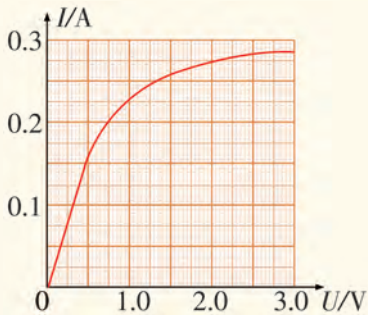


图 3-1-4 小灯泡的伏安特性曲线

一般情况下,非线性元件的电阻随电路电压、电流的变化而变化.



实践与拓展

按如图 3-1-5 所示电路图连接电路进行实验,画出半导体二极管的伏安特性曲线,可以发现什么规律?并将其与电炉丝、小灯泡的 $I-U$ 特性曲线对比,说出它们的导电性能特点.

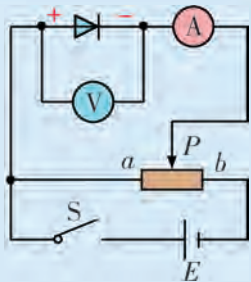


图 3-1-5 电路图

电流的发现

18 世纪末，电流的发现，把电学从静电研究推进到电流研究，奏响了电磁学辉煌发展的序曲。那么，电流是如何发现的？

1. 伽伐尼的研究

1780 年 9 月的一天，意大利生物学家伽伐尼（L. Galvani, 1737—1798）在做解剖青蛙的实验时，偶然发现了电效应。他和学生一起做解剖实验，一名学生用手术刀轻轻触动了青蛙的小腿神经，这只青蛙立即痉挛了起来。当时，另一名学生正在附近练习使用摩擦起电机。伽伐尼注意到青蛙痉挛时，正好是起电机发出火花的一瞬间。为了掌握青蛙痉挛规律，伽伐尼进行了一系列实验，发现只用刀尖触青蛙神经，然后只让起电机发出火花，都不能使青蛙痉挛。而使用两种不同金属连接而成的导体，把它的两端分别与青蛙肌肉和神经接触时，即使没有其他外界带电体在场，也会引起青蛙痉挛。于是他猜想这是由神经传到肌肉的一种特殊的“动物电”引起的。

2. 伏打的研究

伽伐尼的发现引起了物理学家们的极大关注，他们竞相重复伽伐尼的实验，企图找到一种产生电流的方法。意大利物理学家伏打在重复伽伐尼的青蛙实验后认为伽伐尼的“动物电”之说有问题，他拿来一只活青蛙，发现用两种不同金属构成的弧叉跨接在青蛙身上，一端触碰青蛙的腿，另一端触碰青蛙的脊背，青蛙就会发生痉挛（如图 3-1-6 所示）；改用莱顿瓶经青蛙的身体放电也会使之痉挛，说明两种不同金属构成的弧叉和莱顿瓶的作用是一样的。他认为青蛙之所以发生痉挛，是外部电流作用的结果，而不是因为青蛙自身内部的“动物电”。

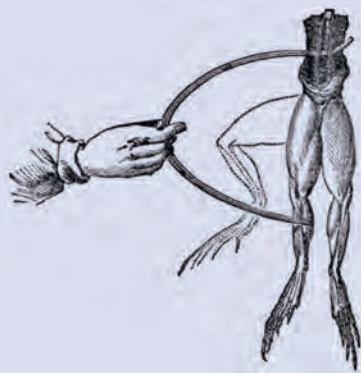


图 3-1-6 伏打用金属叉使青蛙痉挛

后来，物理学界在伏打的金属接触说和伽伐尼的神经电流说之间展开了长期的争论。为了证明电流的产生与生物组织无关，伏打只用金属而不用生物组织进行实验，并确定了一个金属接触的序列：锌、锡、铅、铁、铜、银、金，当任选两种金属接触时，在序列中排在前面的金属必带正电，排在后面的必带负电。1799 年，伏打正式发表他的研究成果，并在寄给英国皇家学会的信件中，公布了他发明的“电堆”，即电池的前身。他在一块锌片和一块铜片之间，夹上浸透了盐水或碱水的厚纸板，再把几十个这样的单元叠置起来，便可以在两端引出强大的电流，提供莱顿瓶无法提供的持续电流。

3. 伏打电堆的影响

伏打电堆的发明，提供了产生恒定电流的电源，使人们有可能研究电流的规律和电流的各种效应。从此，电学进入了一个飞速发展的时期——研究电流（流电学）和电磁效应（电磁学）的新时期。基于伏打的成就，科学界用他的姓氏“伏特”（即“伏打”，音译演变的）命名电压的单位。



练习

1. 如图 3-1-7 所示是电阻 R_1 和 R_2 的伏安特性曲线，求两电阻阻值之比。
2. 一研究小组通过实验画额定电压为 3 V 的小灯泡的伏安特性曲线，实验时，要求小灯泡两端的电压从零开始逐渐增大。该小组应选用如图 3-1-8 所示电路中哪个电路进行实验？为什么？

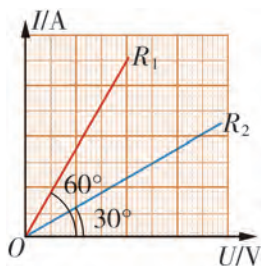


图 3-1-7

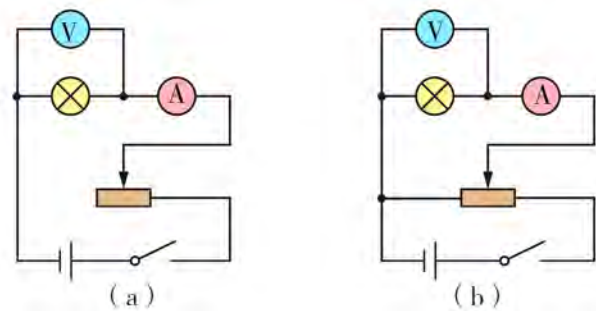


图 3-1-8

3. 有一个小灯泡，当它两端的电压在 3 V 以下时，电阻均约为 $14\ \Omega$ ；当它两端的电压增大到 4 V 时，钨丝温度明显升高，它的电阻为 $16\ \Omega$ ；当电压增大到 5 V 时，它的电阻为 $18\ \Omega$ 。试画出小灯泡在 0 ~ 5 V 范围内的伏安特性曲线。

4. 科学上通常会遇到三类公式：①定义式；②定律；③导出公式。例如，① $I = \frac{Q}{t}$ ；② $F = ma$ ；③ $P = \frac{U^2}{R}$ 。试写一篇短文，说明“电阻等于电压除以电流 $(R = \frac{U}{I})$ ”。在撰写前，先研究一下上述三种类型的公式。

第二节 决定导体电阻大小的因素

我们知道，电阻是导体本身的一种特性，它描述导体对电流的阻碍作用。本节将通过实验探究导体电阻大小与其影响因素的定量关系。

电阻定律

在温度不变的情况下，导体电阻与通过的电流无关，与导体的长度、横截面积、材料等因素有关。下面通过实验进行定量研究。



实验与探究

如图 3-2-1 所示是实验电路图，图中 BC 是待测导线。准备三根材料、横截面积都相同，长度不同的锰铜导线 B_1C_1 、 B_2C_2 、 B_3C_3 ；准备三根材料、长度都相同，横截面积不同的锰铜导线 B_4C_4 、 B_5C_5 、 B_6C_6 ；准备两根长度、横截面积都相同，材料不同的锰铜导线 B_7C_7 、镍铬导线 B_8C_8 。实验时，在电路中的 B 、 C 之间接入待研究的合金导线，通电前应使滑动变阻器接入电路的电阻最大。

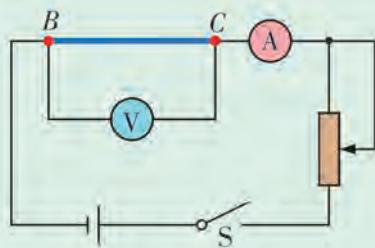


图 3-2-1 实验电路图

(1) 把 B_1C_1 、 B_2C_2 、 B_3C_3 三根导线分别接入电路中，闭合开关 S ，调节滑动变阻器，测出电流、电压，计算出导线的电阻。分别测量三次，取其平均值作为导线电阻的测量值，并把数据记录在表 3-2-1 中。

(2) 把 B_4C_4 、 B_5C_5 、 B_6C_6 三根导线分别接入电路中，测量方法同上，把数据记录在表 3-2-1 中。

(3) 把 B_7C_7 、 B_8C_8 两根导线分别接入电路中，调节滑动变阻器，使通过导线的电流相同，比较电压大小便可知电阻的大小，把数据记录在表 3-2-1 中。

表 3-2-1 实验记录表

接入的导线	导线长度	横截面积	材料	电压 U/V	电流 I/A	电阻 R/Ω
B_1C_1		——	锰铜导线			
B_2C_2		——	锰铜导线			
B_3C_3		——	锰铜导线			
B_4C_4	——		锰铜导线			
B_5C_5	——		锰铜导线			
B_6C_6	——		锰铜导线			
B_7C_7	——	——	锰铜导线		——	
B_8C_8	——	——	镍铬导线		——	

根据实验数据及结果，可以得到什么结论？

由上述实验可见，对于同种材料的导体，在横截面积保持不变时，导体的电阻与导体的长度成正比；在长度保持不变时，导体的电阻与导体的横截面积成反比。对于不同材料的导体，在导体的长度和横截面积保持不变时，导体的电阻与材料有关。

大量实验表明，在一定温度下，均匀导体的电阻 R 与它的长度 l 成正比，与它的横截面积 S 成反比，这就是电阻定律（law of resistance）。用公式表示为

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

(3.2.1)

式中的比例常量 ρ ，反映材料对导体电阻的影响。

讨论与交流

1. 为什么滑动变阻器能够改变电阻的大小？
2. 白炽灯、日光灯的灯丝什么时候最容易烧断？

电阻率

电阻定律中的比例常量 ρ 与导体的材料有关，是一个反映材料导电性能的物理量，称为材料的电阻率（resistivity）。

一般来说，不同导体的电阻率是不同的。当 l 、 S 一定时，电阻率 ρ 越大，电阻 R 越

大，该材料的导电性能越差。国际单位制中， ρ 的单位是 $\Omega \cdot \text{m}$ ，读作欧姆米，简称欧米。

实验表明，材料的电阻率随温度的变化而改变，一般金属材料的电阻率随温度的升高而增大。表 3-2-2 中列出了一些常见导体材料在 20℃ 时的电阻率。

表 3-2-2 一些常见导体材料在 20℃ 时的电阻率

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

注：①锰铜合金：85% 铜，3% 镍，12% 锰；②镍铜合金：54% 铜，46% 镍；③镍铬合金：67.5% 镍，15% 铬，16% 铁，1.5% 锰。

从表 3-2-2 中可以看出，一般情况下，金属单质的电阻率较小，合金的电阻率较大。我们一般用电阻率较小的铝或铜来制作导线，必要时还可在导线上镀银。

例题：工业上经常用“电导仪”来测定液体的电阻率。它是把两片金属放到液体中形成一个电容器形状的液体电阻，而中间的液体即电阻的有效部分，如图 3-2-2 所示。A、B 是两片面积为 1 cm^2 的正方形铂片，间距 $d = 1\text{ cm}$ ，把它们浸没在待测液体中。通过两根引线加上电压 U ，当 $U = 6\text{ V}$ 时，测出电流 $I = 1\text{ }\mu\text{A}$ ，那么这种液体的电阻率为多少？

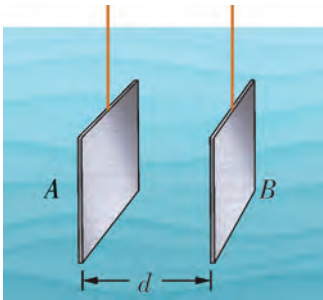


图 3-2-2 电导仪的一个部件

分析：假设铂片 A 接在电源正极一端，则电流从铂片 A 通过液体流到铂片 B，电流通过液体的长度 $d = 1\text{ cm}$ ，横截面积 $S = 1\text{ cm}^2$ 。

解：根据电阻定律，可得

$$R = \rho \frac{d}{S}.$$

由欧姆定律，可得液体接入电路的电阻

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

可得液体的电阻率

$$\rho = \frac{RS}{d} = \frac{US}{Id} = \frac{6 \times 1 \times 10^{-4}}{1 \times 10^{-6} \times 1 \times 10^{-2}}\text{ }\Omega \cdot \text{m} = 6 \times 10^4\text{ }\Omega \cdot \text{m}.$$

从上述例子可知，不只固体有电阻，液体也有电阻，甚至气体都有电阻。



实践与拓展

超导现象是指导体材料在低于某一温度时电阻变为零的现象。查阅资料，了解我国科学家研究超导体的历程及其对科学技术的贡献，并撰写一篇研究报告。



练习

1. 滑动变阻器的结构如图 3-2-3 所示，金属电阻丝绕在绝缘瓷筒上， A 、 B 是其两个引出端， C 、 D 是金属杆的两个端点，可在杆上滑动的金属滑片 P 把金属杆与电阻丝连接起来（可接触部位的绝缘漆已被刮去）。如果把 A 和 C 接线柱连入电路中，当滑片 P 由 B 向 A 移动时，接入电路的电阻阻值由大变小。请说出理由。

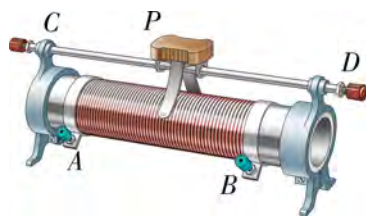


图 3-2-3

2. 如图 3-2-4 所示，一只小鸟站在一条通电的铝制裸导线上，已知导线的横截面积为 185 mm^2 ，导线上通过的电流为 400 A ，鸟两爪间的距离为 1 cm ，求小鸟两爪间的电压。



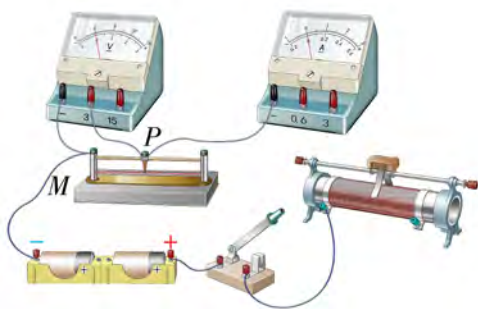
图 3-2-4

3. 某同学采用如图 3-2-5 (a) 所示的电路来探究镍铜丝的电阻与长度的关系。

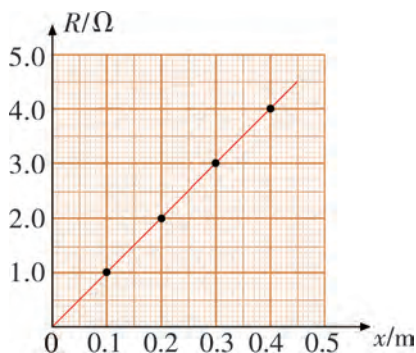
(1) 请思考电流表应选择的量程，并用笔画线代替导线把电流表和滑动变阻器连接好。

(2) 调节 P 的位置，闭合开关，读出 MP 的长度为 x 时电压表和电流表的示数，算出对应的电阻 R ，利用多组数据绘出如图 3-2-5 (b) 所示的 $R-x$ 图像。通过图线分析，镍铜丝的电阻与长度有什么关系？该图线的斜率 k 是多少？

(3) 如果该镍铜丝的直径为 d ，试用 k 、 d 写出其电阻率 ρ 的表达式。



(a)



(b)

图 3-2-5

第三节

测量金属丝的电阻率



我们知道，输电导线的材料通常是铜而不是铁，集成电路中的焊接位置使用的材料是锡，制作定值电阻的材料是锰铜合金，制作滑动变阻器的材料是镍铬合金，制作灯丝的材料是钨，制作保险丝的材料是铅锑合金……我们选择材料所考虑的因素是多方面的，其中一个共同的因素是它们的电阻率不同。电阻率越小，材料的导电性能越好。如何根据实验室提供的仪器设计一个实验方案来测量金属丝的电阻率呢？

学会使用螺旋测微器

如图 3-3-1 所示是常用的螺旋测微器结构图，它的小砧 A 和固定刻度 G 固定在 U 形框架 F 上；微测螺杆 P 、可调刻度 H 和粗调旋钮 K 、微调旋钮 K' 连在一起，通过精密螺纹穿过 U 形框架 F ，用锁 T 给予锁定。

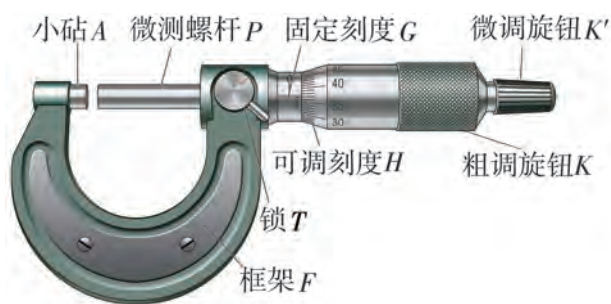


图 3-3-1 常用的螺旋测微器结构图

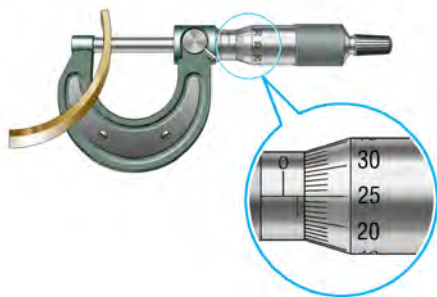


图 3-3-2 螺旋测微器的局部放大图

如图 3-3-2 所示，微测螺杆 P 与固定刻度 G 间的精密螺纹的螺距为 0.5 mm ，即粗调旋钮 K 每旋转一周， P 前进或后退 0.5 mm 。可调刻度 H 上的刻度为 50 小格，每转动一小格， P 前进或后退 0.01 mm ，即精确度为 0.01 mm 。读数时误差出现在毫米的千分位上，因此，螺旋测微器又叫千分尺。

从固定刻度上读取整毫米或半毫米数，然后从可调刻度上读取剩余部分（因为是 10 分度，所以在最小刻度后应再估读一位），再把两部分读数相加得到测量值。即测量值 $d = \text{固定刻度数} + \text{可调刻度数} \times 0.01$ （单位： mm ）。如图 3-3-2 所示的示数为 $d = 0.5\text{ mm} + 25.0 \times 0.01\text{ mm} = 0.750\text{ mm}$ 。考虑估读的差异，读 $0.749 \sim 0.751\text{ mm}$ 中的任一个数都正确。

用伏安法测定金属丝的电阻率

由电阻定律 $R = \rho \frac{l}{S}$ ，可得导体材料的电阻率 $\rho = \frac{RS}{l}$ 。测出金属丝的电阻 R 、长度 l 和横截面积 S ，即可求得金属丝的电阻率 ρ 。本实验提供的实验器材如表 3-3-1 所示。

表 3-3-1 实验器材

实验器材	实验器材
毫米刻度尺	电流表 A（量程 3 A、0.6 A）
一段长约 1 m 的金属丝	电压表 V（量程 3 V、15 V）
游标卡尺	滑动变阻器 R_1 （阻值范围 0 ~ 20 Ω ，额定电流 2 A）
螺旋测微器	滑动变阻器 R_2 （阻值范围 0 ~ 1 k Ω ，额定电流 0.5 A）
干电池	导线若干、开关



实验与探究

1. 使用螺旋测微器在金属丝的不同位置、不同侧面测量金属丝的直径 D ，将测得数据填入表 3-3-2 中，并求出平均值。
2. 用毫米刻度尺测量金属丝的长度 L ，填入表 3-3-2 中，并多次测量求出平均值。
3. 按如图 3-3-3 所示的实验电路图连接电路，将金属丝接入 BC 之间。检查电流表、电压表的量程是否合适。把滑动变阻器的滑片移到一端，使其接入电路的阻值最大。
4. 闭合开关，调节变阻器，使电流表有明显示数，读取电流表、电压表的示数 I 、 U ，并记录在表 3-3-2 中。实验中不要将电流调得过大，读数要快，每次读完后立即断电。
5. 改变滑动变阻器的阻值，重复步骤 4，测量并记录多组 I 和 U 的值。
6. 断开开关，整理器材。

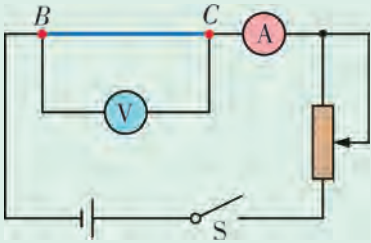


图 3-3-3 实验电路图

表 3-3-2 实验数据记录表

物理量	实验次数					平均值
	1	2	3	4	5	
D/mm				—	—	
L/cm				—	—	
U/V						—
I/A						—
R/Ω						

分析实验数据，可以得出什么结论？



讨论与交流

1. 根据实验数据，为了减小实验误差，可以采用什么方法计算金属丝的电阻？
2. 实验中，哪些因素影响金属丝两端的电压和电路中的电流值？怎样才能减少这些因素的影响？



实践与拓展

用数据采集器、电流传感器、电压传感器、螺旋测微器、学生电源、滑动变阻器、金属丝、导线、计算机等器材，按如图 3-3-4 所示的实验原理图进行实验。

(1) 分别用毫米刻度尺和螺旋测微器测量待测金属丝的长度 L 和横截面直径 D 。

(2) 按实验原理图连接实验装置，并将电流传感器、电压传感器分别与数据采集器连接，如图 3-3-5 所示。

(3) 对传感器调零后，将金属丝接入电路中，记录一组电压和电流的数据。

(4) 更换长度不同、横截面积相同的金属丝接入电路中，记录一组数据。

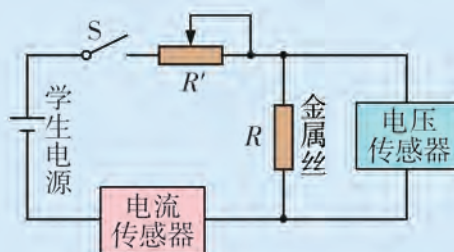


图 3-3-4 实验原理图



图 3-3-5 实验装置图

(5) 作出 $R-L$ 图像, 对数据点进行线性拟合, 总结横截面积不变时, 电阻丝电阻与电阻丝长度的关系.

(6) 更换横截面积相同、材料不同的金属丝, 重复上面的步骤.

分析数据, 可以得出什么结论?



练习

1. 若用毫米刻度尺测得金属导线长度为 $L=60.00\text{ cm}$, 用螺旋测微器测得的导线直径如图 3-3-6 (a) 所示, 则该导线的直径是 $d=$ _____ mm; 电压表接 $0\sim3\text{ V}$ 量程时指针所指的位置如图 3-3-6 (b) 所示,



(a)



(b)



(c)

图 3-3-6

则电压为 $U=$ _____ V; 电流表接 $0\sim0.6\text{ A}$ 量程时指针所指的位置如图 3-3-6 (c) 所示, 则电流 $I=$ _____ A. 该金属丝的电阻率 $\rho=$ _____ $\Omega\cdot\text{m}$.

2. 有一根细长而均匀的金属管线, 横截面如图 3-3-7 所示. 因管内中空部分截面形状不规则, 无法直接测量. 已知这种金属的电阻率为 ρ , 请设计一个实验方案, 测量中空部分的横截面积 S_0 .

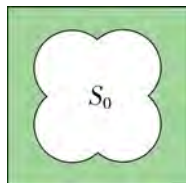


图 3-3-7

现已提供的器材: 毫米刻度尺、螺旋测微器、电压表 V、电流表 A、滑动变阻器 R 、蓄电池 E 、开关一个、带夹子的导线若干.

(1) 根据你的设计, 用笔画线代替导线, 把如图 3-3-8 所示的实物连成实际测量电路.

(2) 实验中, 用电压表测量金属管线两端的电压 U , 用电流表测量流过金属管线的电流 I , 用螺旋测微器测量金属管线的直径为 a , 用毫米刻度尺测量接入电路中的金属管线的有效长度为 l . 则金属管线内部空间横截面积 S_0 为 _____.

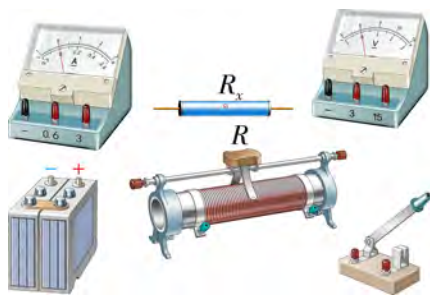


图 3-3-8

第四节 | 电阻的串联和并联

我们知道，电路一般有两种基本的连接方式：串联和并联。本节将定量探究串、并联电路电阻的特点。

电阻的串联

在串联电路中，电路的总电阻与电路中各电阻有什么关系？

观察与思考

将四个满足 $R_1 = R_2 > R_3 > R_4$ 关系的电阻连接成串联电路，如图 3-4-1 所示，先测量通过各电阻的电流及其两端的电压，再测出串联电路总电流和总电压，将实验结果填入表 3-4-1 中。

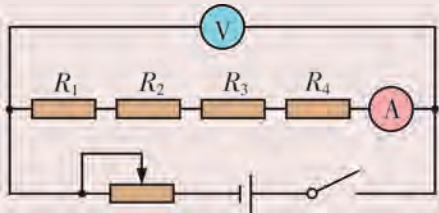


图 3-4-1 串联电路图

表 3-4-1 探究串联电路实验数据记录表

电阻	通过电阻的电流 I/A	总电流 $I_{\text{总}}/\text{A}$	各电阻两端的电压 U/V	总电压 $U_{\text{总}}/\text{V}$
R_1				
R_2				
R_3				
R_4				

比较分析实验数据，可以得出什么结论？

由上述实验可见，在串联电路中，通过各电阻的电流相同，电路两端的总电压等于各电阻两端电压之和。总电阻等于电路中各电阻之和。

理论推导与更多精确的实验也都表明，串联电路的总电阻等于电路中各电阻之和。即

$$R = R_1 + R_2 + \cdots + R_n$$

电阻的并联

在并联电路中，电路的总电阻与电路中各电阻有什么关系？

观察与思考

将四个满足 $R_1 = R_2 > R_3 > R_4$ 关系的电阻连接成并联电路，如图3-4-2所示，先分别测量通过各支路电阻的电流及其两端的电压，再测出并联电路总电流和总电压，将实验结果填入表3-4-2中。

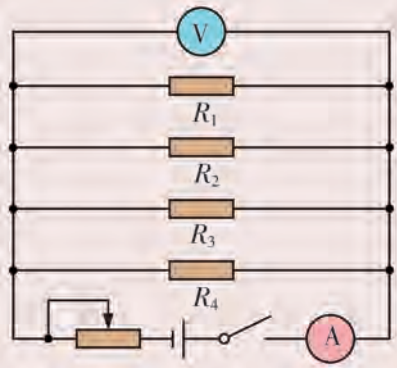


图 3-4-2 并联电路图

表 3-4-2 探究并联电路实验数据记录表

电阻	通过电阻的电流 I/A	总电流 $I_{\text{总}}/\text{A}$	各电阻的两端电压 U/V	总电压 $U_{\text{总}}/\text{V}$
R_1				
R_2				
R_3				
R_4				

通过比较分析实验收集的数据，可以得出什么结论？

由上述实验可见，在并联电路中，各电阻两端的电压相同，电路的总电流等于各支路电流之和。总电阻的倒数等于电路中各电阻的倒数之和。

理论推导与更多精确的实验也都表明，并联电路的总电阻的倒数等于电路中各电阻的倒数之和。即

$$\frac{1}{R} = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} + \cdots + \frac{1}{R_n}$$

讨论与交流

1. 试证明 n 个相同的电阻并联，总电阻为一个电阻的 $\frac{1}{n}$ 。
2. 试证明若干个不同的电阻并联，总电阻小于其中最小的电阻。

电流表和电压表

我们经常用电流表和电压表来测量电路中的电流和电压，在初中的学习中，我们粗略地把电流表的电阻看作零，电压表的电阻看作无穷大。当我们对电压、电流与电阻进行定量分析时，这一做法还合适吗？



观察与思考

电阻是导体本身的一种性质，由欧姆定律可得 $R = \frac{U}{I}$ 。设计如图 3-4-3 所示的两种电路图，通过测量导体两端的电压和电流，可以间接测量导体的电阻。

- (1) 比较两种电路结构的差异。
- (2) 尝试用两种电路测量同一定值电阻的阻值 R ，并比较两种电路测量的结果。
- (3) 如果两种电路的测量结果存在差异，思考其中的原因。

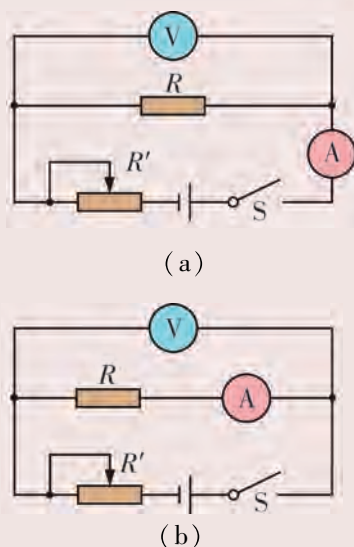


图 3-4-3 电路图

常用的电流表和电压表都是由图 3-4-4 所示的小量程电流表 G（简称表头）改装而成的。电流流过表头时，指针发生偏转，电流的大小可以从刻度盘读出。

表头与其他导体一样也有电阻 R_g ，叫作表头内阻。指针偏转到最大刻度时的电流 I_g 叫作满偏电流。由欧姆定律可知，表头指针满偏时加在两端的满偏电压 $U_g = I_g R_g$ 。

由于表头的满偏电流和满偏电压一般都比较小，因此为了测量较大的电流和电压，需对它进行改装以扩大量程。根据串联电路中各个电阻两端的电压与它的阻值成正比，可以给表头串联一个大电阻，把它改装成更大量程的电压表，如图 3-4-5 所示；根据并联电路中通过各个电阻的电流与它的阻值成反比，可以给表头并联一个小电阻，把它改装成更大量程的电流表，如图 3-4-6 所示。



图 3-4-4 小量程电流表

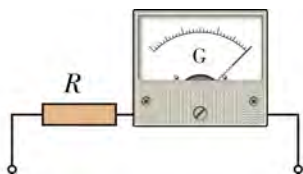


图 3-4-5 大量程电压表

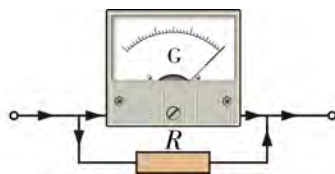


图 3-4-6 大量程电流表



讨论与交流

如图 3-4-7 所示的是内阻为 $100\ \Omega$ 、满偏电流为 $3\ \text{mA}$ 的表头刻度盘，现指针指着某一电流刻度。



图 3-4-7 表头刻度盘

- (1) 流过表头的电流为多大？
- (2) 表头通过的电流为某一数值时，两接线柱之间存在一定的电压，请在刻度盘上标出相应的电压示数。
- (3) 如果要把它改装为 $0 \sim 3\ \text{V}$ 的电压表，需串联多大的电阻？

- (4) 如果要把它改装为 $0 \sim 0.6\ \text{A}$ 的电流表，需并联多大的电阻？



练习

1. 一盏弧光灯的额定电压 $U_1 = 40\ \text{V}$ ，正常工作时通过的电流 $I = 5.0\ \text{A}$ 。应怎样把它连入 $U = 220\ \text{V}$ 的电路中，它才能正常工作？

2. 如图 3-4-8 所示是具有两个量程的电压表，当使用 a 、 b 两个端点时，量程为 $0 \sim 10\ \text{V}$ ；当使用 a 、 c 两个端点时，量程为 $0 \sim 100\ \text{V}$ 。已知表头的内阻 $R_g = 500\ \Omega$ ，满偏电流 $I_g = 1\ \text{mA}$ ，求电阻 R_1 、 R_2 的值。

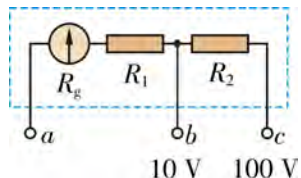


图 3-4-8

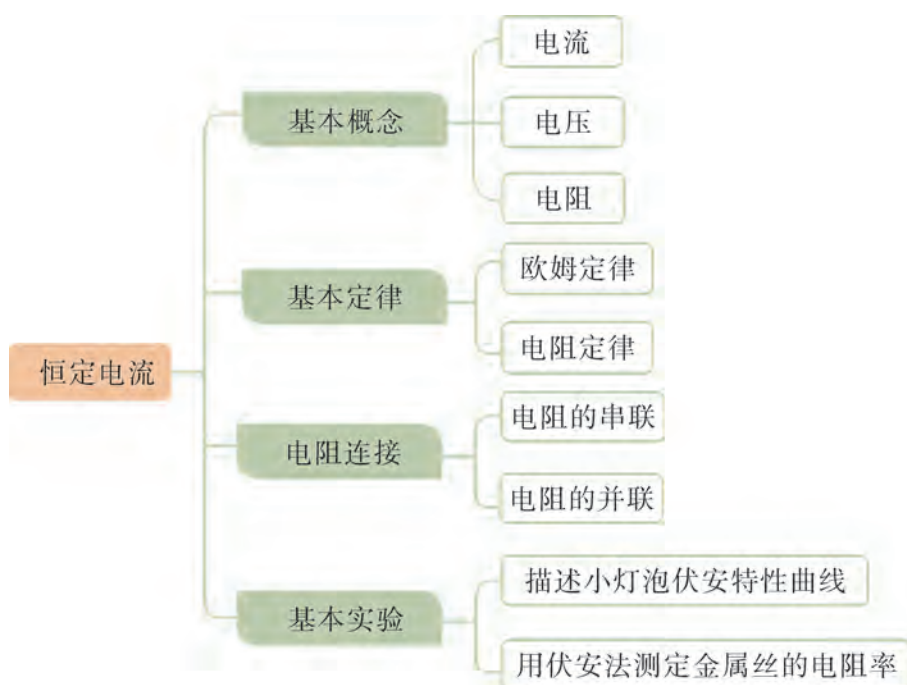
3. 设计一个电路，用 $48\ \text{V}$ 的电源使 12 个 $12\ \text{V}$ 的灯泡同时正常发出同样亮度的光。

- (1) 方案 A：要求当一个灯泡烧坏时，其他灯泡能继续发光。
- (2) 方案 B：要求当一个灯泡烧坏时，其他灯泡能继续正常发光。

本章小结

知识结构

参考下面的知识结构，请进一步梳理本章的知识。



回顾与评价

1. 通过本章的学习，你解决了哪些电路问题，形成了哪些物理观念？
2. 通过金属导体、小灯泡、半导体二极管的 $I-U$ 特性曲线的实验探究，你发现了电器元件的哪些不同特性？
3. 通过把小量程电流表改装成大量程电流表（或电压表）的实验探究，能否提出一些质疑或创新方案并进行论证？

习题三

1. 关于电流表和电压表, 下列说法正确的是 ().

- A. 电流表的内阻为零
- B. 一般电流表的内阻非常大
- C. 一般电压表的内阻非常小
- D. 接入电压表会使电流发生较小的变化

2. 如图 3-1 所示, 两段长度和材料相同、各自粗细均匀的金属导线 a 、 b , 单位体积内的自由电子数相等, 横截面积之比为 $S_a : S_b = 1 : 2$. 已知 5 s 内有 5×10^{18} 个自由电子通过导线 a 的横截面, 则 ().

- A. 流经导线 a 的电流为 0.16 A
- B. 流经导线 b 的电流为 0.32 A
- C. 5 s 内有 10×10^{18} 个自由电子通过导线 b 的横截面
- D. 自由电子在导线 a 和 b 中移动的速率之比 $v_a : v_b = 2 : 1$

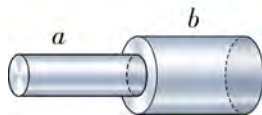


图 3-1

3. 某同学为探究小灯泡的伏安特性, 连好如图 3-2 所示的电路后闭合开关 S , 通过移动变阻器的滑片, 使小灯泡中的电流由零开始逐渐增大, 直到小灯泡正常发光. 由电流表和电压表得到的多组数据描绘出的 $U-I$ 图像应是 ().

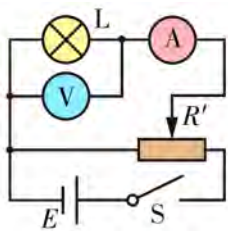
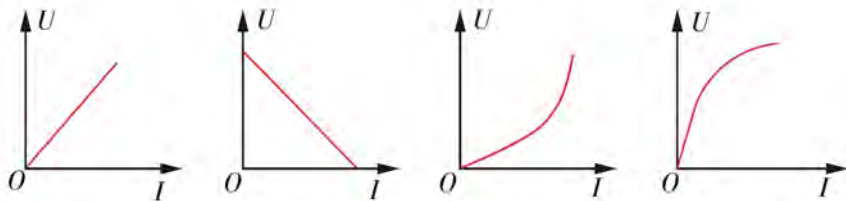


图 3-2



A.

B.

C.

D.

4. 如图 3-3 所示是一种能自动测定油箱内油面高度的装置, 油量表由电流表改装而成. 金属杠杆的一端接浮球, 另一端触点 P 接滑动变阻器 R . 当油箱内油面下降时, 下列分析正确的有 ().

- A. 触点 P 向下滑动
- B. 触点 P 向上滑动
- C. 电路中的电流变大
- D. 电路中的电流变小

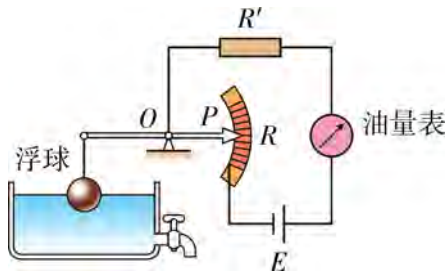


图 3-3

5. 电位器是一类变阻器. 如图 3-4 所示, 把电位器与灯泡、电源串联起来, 利用它改变灯泡的亮度, 下列说法正确的是 ().

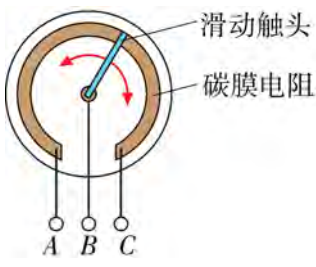


图 3-4

- A. 连接 A、B, 使滑动触头顺时针转动, 灯泡变暗
- B. 连接 A、C, 使滑动触头逆时针转动, 灯泡变亮
- C. 连接 A、C, 使滑动触头顺时针转动, 灯泡变暗
- D. 连接 B、C, 使滑动触头顺时针转动, 灯泡变亮

6. 有一个额定电压为 2.8 V 的小灯泡, 现要用伏安法描绘这个小灯泡的 $I-U$ 图像, 有下列器材供选用:

- A. 电压表 (量程 3 V, 内阻 6 k Ω)
- B. 电压表 (量程 15 V, 内阻 30 k Ω)
- C. 电流表 (量程 3 A, 内阻 0.1 Ω)
- D. 电流表 (量程 0.6 A, 内阻 0.5 Ω)
- E. 滑动变阻器 (阻值范围 0 ~ 10 Ω , 额定电流 2 A)
- F. 滑动变阻器 (阻值范围 0 ~ 200 Ω , 额定电流 0.5 A)
- G. 学生电源 (输出电压为 3 V)

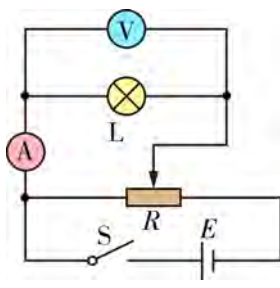


图 3-5

(1) 用如图 3-5 所示的电路进行测量, 电压表应选用_____, 电流表应选用_____, 滑动变阻器应选用_____. (均用字母表示.)

(2) 通过实验测得灯泡的伏安特性曲线如图 3-6 所示, 由图像得灯泡在正常工作时的电阻为_____ Ω . (结果保留两位有效数字.)

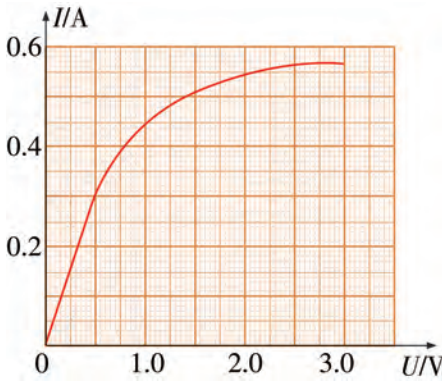


图 3-6

7. 将量程为 200 μ A 的电流表改装成量程为 1 mA 的电流表, 并用一标准电流表与改装后的电流表串联, 对它进行校准. 改装及校准所用器材的实物图如图 3-7 所示, 其中标准电流表已与一固定电阻串联, 以防烧表. 校准时要求, 通过电流表的电流能从 0 连续调到 1 mA, 试按实验要求用笔画线代替导线连接实物图.



图 3-7

8. A 、 B 两地间铺有长为 L 的通信电缆，它由两条并在一起彼此绝缘的均匀导线组成，通常被称为双线电缆。在一次检修中，维修人员发现电缆上某处的绝缘保护层受损，导致两导线之间漏电，相当于该处电缆的两导线之间接了一个电阻。为了确定损坏的具体位置，检修人员进行了以下的测量操作：

- (1) 令 B 端的双线断开，在 A 处测出双线两端间的电阻 R_A 。
- (2) 令 A 端的双线断开，在 B 处测出双线两端间的电阻 R_B 。
- (3) 在 A 端的双线间加一电压 U_A ，在 B 端用内阻很大的电压表测出两线间的电压 U_B 。试由以上测量结果确定损坏的位置。

9. 如图 3-8 所示是一种悬球式加速度仪，可以用来测定沿水平轨道运动的列车的加速度。质量为 m 的金属球系在金属丝的下端，金属丝的上端悬挂在点 O ， AB 是一根长为 l 的电阻丝，其阻值为 R 。金属丝与电阻丝接触良好，摩擦不计。在电阻丝的中点 C 焊接一根导线，从点 O 引出一根导线，两线之间接入一个电压表（金属丝和导线电阻不计），图中虚线 OC 与 AB 相垂直，且 $OC = h$ 。电阻丝 AB 接在电压为 U 的直流稳压电源上，整个装置固定在列车中使 AB 沿着车前进的方向，列车静止时金属丝呈竖直方向，从电压表的示数变化可以测出加速度的大小。

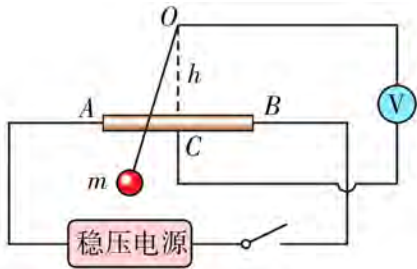


图 3-8

(1) 当列车向右做匀加速运动时，试写出加速度 a 与电压表示数 U 的对应关系，以便重新刻制电压表表盘使它成为直读加速度数值的加速度计。

(2) 为什么点 C 设置在电阻丝 AB 的中间？对电压表的选择应有什么特殊要求？

10. 如图 3-9 (a) 所示是某同学自制的电子秤原理示意图，目的是利用理想电压表的示数指示物体的质量。图中托盘与电阻可忽略的金属弹簧相连，托盘与弹簧的质量均不计。滑动变阻器的滑动端与弹簧上端相连，当托盘中没有放物体时，滑动触头恰好指在滑动变阻器的最上端，此时电压表示数为零。设滑动变阻器总电阻为 R ，总长度为 L ，电源电动势为 E ，内阻不计，限流电阻阻值为 R_0 ，弹簧劲度系数为 k ，忽略所有阻力。

(1) 请推出电压表示数 U 与所称物体质量 m 的关系式。

(2) 为使电压表示数与待测物体质量成正比，请对原有器材进行改进，在图 3-9 (b) 的基础上完成改进后的电路原理图，并求出电压表示数 U 与所称物体质量 m 的关系式。

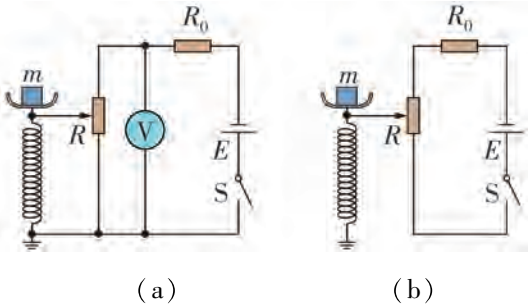


图 3-9



第四章

闭合电路

爱迪生发明了电灯，从此照亮了世界。

在生产中，各种各样的电气化、自动化的机械设备显著地减轻了人们的劳动强度，提高了社会生产力。在生活中，电灯给我们带来了光明和多彩的生活；冰箱、微波炉让我们随时可享受美味佳肴；电话、电视拉近了我们与远方朋友的距离，方便了彼此的了解和交流……

所有这一切都离不开电路！那么，电路是如何组成的？电路有着什么样的规律呢？这些规律对我们的生活、生产方式又会产生怎样的影响呢？

在本章的学习中，我们将能识别常见的电路元器件，了解它们在电路中的作用；会使用多用电表；理解闭合电路的欧姆定律；会测量电源的电动势和内阻；能分析和解决家庭电路中的简单问题；能将安全用电和节约用电的知识应用于日常生活中。

第一节 常见的电路元器件

遍布城乡的电网系统、现代化工厂中的电气设备、家里的用电器、智能手机等，均离不开电路。那么，电路是如何组成的？电路中有哪些常见的元器件？它们各有什么作用？

识别几种常见元器件

电阻器、电感器、电容器和二极管是电路中常见的元器件，在前面我们已认识了电容器，这里将认识电阻器、电感器和二极管。

电阻器 可分为阻值固定的电阻器和阻值可变的电阻器两种类型。阻值固定的电阻器包括碳膜电阻、绕线电阻、熔断电阻等，阻值可变的电阻器包括电位器、滑动变阻器和电阻箱等。在电路图中，电阻器用字母“ R ”及符号“ $\square$ ”表示。常见的电阻器如图 4-1-1 所示。

电感器 由绝缘导线绕成，通过电磁感应能把外部电路的电能储存在电感器内部的磁场中。在电路图中，电感器用字母“ L ”及符号“ $\sim$ ”表示。为增强磁场，有些电感器的线圈中间还插有铁芯，插入铁芯的电感器符号用“ $\sim$ ”表示。常见的电感器如图 4-1-2 所示。

二极管 根据不同的用途，二极管可分为整流二极管、检波二极管、开关二极管等，其外形如图 4-1-3 所示。在电路中，它只允许电流由单一方向通过，反向时阻断。在电路图中，二极管用字母“ D ”及符号“ $\rightarrow$ ”表示，箭头表示正向电流的方向。



图 4-1-1 几种常见的电阻器



图 4-1-2 几种常见的电感器



图 4-1-3 几种常见的二极管

电路

在简单电路中，用一段导线连接一个灯泡和一节干电池，只有形成闭合回路，小灯泡才能发光，如图 4-1-4 所示。

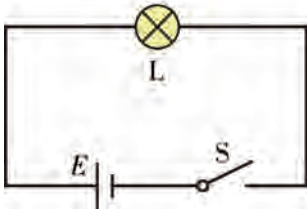


图 4-1-4 闭合回路

在电子技术中，我们通常将需要的电阻器、电感器、电容器等元器件装配在同一个电路板上，再通过金属导线将各个元器件连接组成闭合回路。当输入端接入电源时，电子会在闭合回路中循环流动，这个闭合回路称为**电路**（electric circuit），电路是电流所流经的路径。如图 4-1-5 所示是某音响系统功率放大器的电路板，图中标出了电路的四种基本元器件。从高低压输电网电路到集成电路，电路均由元器件通过连接构成。

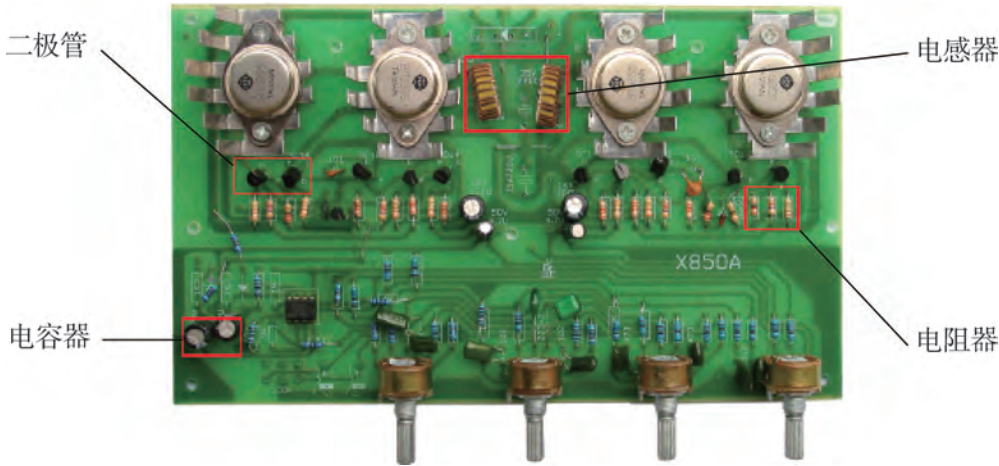


图 4-1-5 某音响系统功率放大器的电路板

为了研究和工程规划需要，人们用物理电学标准化的符号表示电路中的元器件，并把它们连接起来，形成电路图。如图 4-1-6 所示是某手机充电器的电路原理图，图中标出了电路的四种基本元器件。

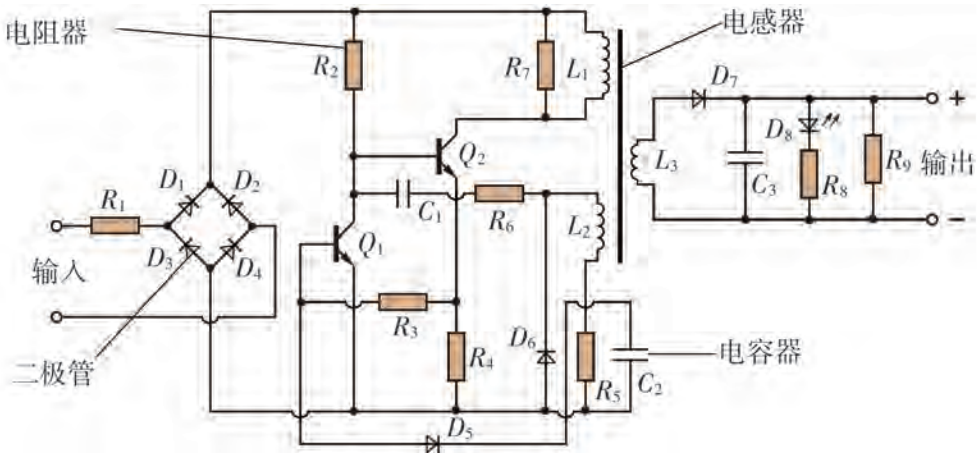


图 4-1-6 某手机充电器的电路图

电路图可以让人们了解电路的工作原理，为分析产品性能、安装电子电器产品提供规划方案。工程师可以先在纸上或电脑上设计电路图，确认完善后再进行实际安装。采用电路仿真软件进行电路辅助设计、虚拟的电路实验，可以提高工程师的工作效率。

常见元器件在电路中的作用

电路中的电阻器、电感器、二极管等常见元器件分别具有什么作用？

观察与思考

1. 如图 4-1-7 所示，用学生交直流低压电源、两个小灯泡（6 V）、多抽头电感线圈等实验器材进行实验，观察实验现象。

（1）接入多抽头电感线圈，将开关 S 接到学生电源直流 6 V 输出端，观察灯泡 L_1 和 L_2 的亮度。

（2）将开关 S 接到学生电源交流 6 V 输出端，观察灯泡 L_1 和 L_2 的亮度。

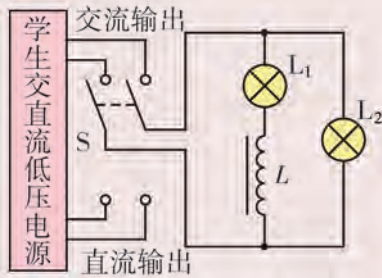


图 4-1-7 实验电路图

请对比使用这两种不同电源时的实验现象。

- 2. 将电感线圈换成电容器 C ，重复上述实验，对比实验现象。
- 3. 将电感线圈换成电阻器 R ，重复上述实验，对比实验现象。
- 4. 将电感线圈换成二极管 D （注意正、负极的连接），重复上述实验，对比实验现象。

上述实验表明，电感器具有“通直流阻交流”的作用，即电感线圈对交流有限流作用。此外电感器还具有电感性，能建立磁场储存磁场能，是储能元器件。电容器具有“通交流隔直流”的作用。由于电容器在充、放电的过程中能够进行电场能与其他能的转换，因此也可作为储能元器件。电阻器在电路中的主要作用是调节电路中的电流和电压。二极管具有单向导电、反向阻断的特性，因此，二极管可作为各种逻辑电路的开关，或对高频交流电路进行滤波整流等。

实践与拓展

- 1. 查阅资料，列举集成电路在生产生活中的应用的实例。
- 2. 用光敏二极管和微型话筒制作楼道灯的光控—声控开关。

了解集成电路

集成电路 (IC) 是指把晶体管、电阻器、电容器等元件, 按电路结构的要求, 集成在一块硅或陶瓷基片上, 再加以封装而成的具有一定功能的整体电路。

中国的 IC 产业经过 40 余年的发展, 已形成了良好的产业基础。特别是进入 21 世纪后, 随着经济的快速发展以及信息化进程的加快, 我国集成电路的研制和生产取得了丰硕的成果。2002 年 9 月, 我国自主研发生产的高性能通用 CPU 龙芯 (Godson) 一号 (如图 4-1-8 所示) 正式投入商业市场。它的最高主频达 266 MHz, 包含近 400 万个晶体管。2017 年 4 月, 龙芯 3A3000/3B3000 投入市场, 它是我国目前国产 CPU 中单核实测性能最高的芯片之一。



图 4-1-8 龙芯一号 CPU



练习

1. 音箱可分为高音扬声器和低音扬声器。为了让特定扬声器得到较为纯粹的高频或低频信号, 常常采用由电容器与电感器组成的分频器电路。如图 4-1-9 所示分别是高音扬声器和低音扬声器的电路图, 你能分辨它们吗?

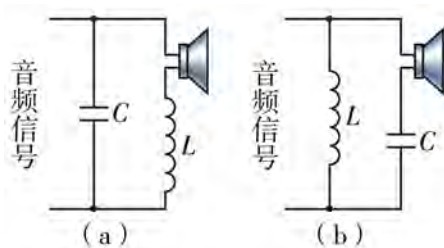


图 4-1-9

2. 某同学设计了如图 4-1-10 所示的实验电路图来观察电阻、电容、电感三个电器元件对直流和交流电路的影响, 其中三个小灯泡 L_1 、 L_2 、 L_3 是相同的, S 为双刀双掷开关。

(1) 为了观察三个电器元件对直流电路的影响, 要怎样操作开关?

(2) 为了观察三个电器元件对交流电路的影响, 要怎样操作开关?

(3) 在实验过程中可以观察到小灯泡发光时亮度的差异, 请根据上述的实验操作, 设计一个记录小灯泡发光现象的表格。

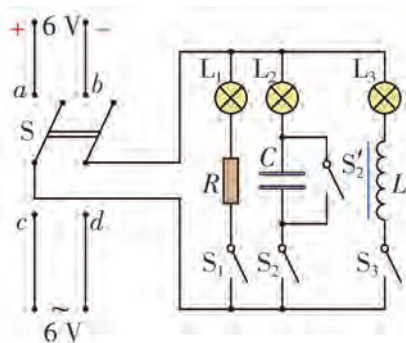


图 4-1-10

第二节 闭合电路的欧姆定律

用导线把电源、用电器连成一个闭合电路，电路中就有了电流。电源外部的电路叫作外电路，外电路上的电阻称为外电阻；电源内部的电路叫作内电路，内电路上的电阻称为内阻。在外电路中，电流由电势高的正极流向电势低的负极；在内电路中，电流从电势低的负极流向电势高的正极，与外电路形成闭合回路。

电动势

用什么物理量可以描述电源的特性呢？



观察与思考

如图 4-2-1 所示，以铜片和锌片为极板，分别用果汁、牛奶和食用油等作为电解液制成原电池，用电压表测量各个原电池两极板间的电压（两极板间距相同），并将测量数据填入表 4-2-1 中。



图 4-2-1 用不同电解液制成的原电池

表 4-2-1 原电池两极板间的电压

电解液	两极板间的电压 U/V
果汁	
牛奶	
食用油	

比较分析实验收集的数据，可以得出什么结论？

由上述实验可见，用果汁、牛奶和食用油三种不同电解液制成原电池，其两极板间的电压不同。

电源有两个极，正极的电势比负极的电势高，两极间存在电压。不同的电源，在不与用电器相接时两极间的电压一般不相同，它反映了电源本身的一种性质。比如干电池的电压约为 1.5 V，蓄电池的电压约为 2 V。物理学中用**电动势**（electromotive force）来描述电

源的特性，电源的电动势在数值上等于不接用电器时电源正负两极间的电压。

如图 4-2-2 所示，电源两极板上的正负电荷，在电源内部形成从正极指向负极的电场。如果要使正电荷从负极移至正极，电源必须提供方向与电场力相反的非静电力，让正电荷克服电场力做功，使电势能增加，这与我们乘电梯上楼克服重力做功的情形相似。

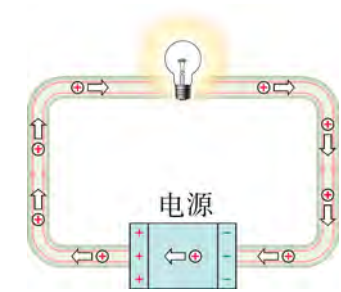


图 4-2-2 电源提供非静电力

不同类型电源的非静电力有不同的来源。化学电池提供的非静电力是一种与离子的溶解和沉积过程相联系的化学作用；在一般发电机中，非静电力起源于磁场对运动电荷的电磁作用。从能量转化的角度看，电源是通过非静电力做功把其他形式的能转化为电能的装置。

把相同正电荷从负极移至正极，电源两极电压越大，非静电力做的功 W 越多，电荷增加的电势能就越大，说明电源将其他形式的能转化为电能的本领就越强。因此，可以用搬运单位正电荷的非静电力做的功，来描述电源将其他形式的能转化为电能的本领，即电源电动势 E 表示为

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

(4.2.1)

式 (4.2.1) 中 W 、 q 的单位分别是焦耳 (J)、库仑 (C)；电动势 E 的单位与电势、电压的单位相同，都是伏特 (V)。电源电动势的大小只取决于电源本身的性质，与电源的体积无关，也与外电路无关。

电源内部由导体组成，因此也有电阻，这个电阻叫作电源的内阻 (internal resistance)，用符号 r 表示。内阻和电动势都是电源的重要参数。

讨论与交流

1. 如图 4-2-3 所示，用果汁电池接上一小灯泡时，灯泡不亮，而用牛奶电池接同一小灯泡时，灯泡却亮了。果汁电池的电动势较大，但能使灯泡发光的却是牛奶电池，这是为什么呢？

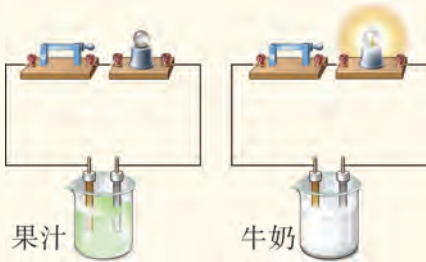


图 4-2-3 果汁电池和牛奶电池实验



图 4-2-4 加了稀硫酸的果汁电池实验

2. 如图 4-2-4 所示，测得果汁电池的电动势约为 0.96 V。加入稀硫酸后再测得其电动势约为 0.98 V。接入小灯泡，发现小灯泡发光了。为什么加了稀硫酸的果汁电池能使小灯泡发光呢？

研究闭合电路欧姆定律

根据欧姆定律，外电路中的电流由电势高的一端流向电势低的一端，在外电阻上沿电流方向电势是降低的。如图 4-2-5 表示了三个电阻上的电势降低情况，外电路上降低的电势的总和 $U_{\text{外}} = U_1 + U_2 + U_3$ 。同理，在内阻上也应有电势降低，在电源内部由负极到正极电势升高，当电源不接用电器时，升高的数值等于电源的电动势 E 。那么，电流在内外电路上降低的电势 $U_{\text{内}}$ 和 $U_{\text{外}}$ 间的关系如何？下面我们通过实验来研究电动势 E 、外电路电压 $U_{\text{外}}$ 、内电路电压 $U_{\text{内}}$ 三者之间的定量关系。

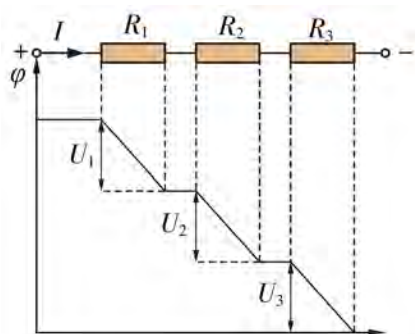


图 4-2-5 外电路上的电势降落

观察与思考

如图 4-2-6 所示，装有稀硫酸的两个烧杯内，分别插有作为电源正、负极的铜片和锌片。U 形玻璃管内放入粗棉线，倒插在两个烧杯中，利用粗棉线把两边烧杯中的稀硫酸溶液连成一体。这个装置构成了一个化学电源，只需改变棉线的粗细，就可以改变电源的内阻。电压表 V_1 、 V_2 分别用于测量电源的外电压和内电压。内电压通过插在正、负电极旁边的两根铜丝端测得。

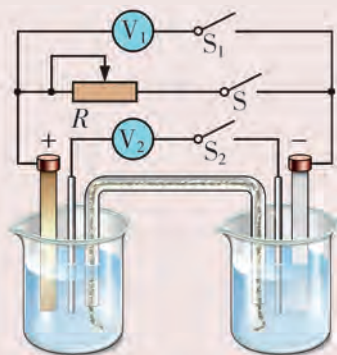


图 4-2-6 实验电路图

(1) 使滑动变阻器接入电路的电阻最大，仅闭合 S_1 ，记下电压表 V_1 的示数 U_1 。想一想： U_1 与电源的电动势有什么关系？

(2) 闭合开关 S_1 、 S_2 、 S ，并逐渐减小滑动变阻器的阻值，观察电压表 V_1 和 V_2 示数的变化，将数据记在表 4-2-2 中。

(3) 分析表 4-2-2 中的数据，想一想： E 、 $U_{\text{外}}$ 、 $U_{\text{内}}$ 之间有什么定量关系？

表 4-2-2 实验数据记录表

电压表	各次测量的电压 U/V				
	1	2	3	4	5
V_1					
V_2					

比较分析收集的数据，可以得出什么结论？

实验研究表明, 电源的电动势 E 等于 $U_{\text{外}}$ 和 $U_{\text{内}}$ 之和. 即

$$E = U_{\text{外}} + U_{\text{内}}$$

设闭合电路中的电流为 I , 外电阻为 R , 内阻为 r , 把欧姆定律分别用于外电路和内电路, 可得

$$E = IR + Ir$$

也就是

$$I = \frac{E}{R + r} \quad (4.2.2)$$

式 (4.2.2) 表明, 闭合电路中的电流与电源的电动势成正比, 与内、外电路的电阻之和成反比, 这就是闭合电路的欧姆定律 (Ohm law of closed circuit).

电源的种类很多, 形成非静电力的机理也不一样, 但是对于所有电源, 式 (4.2.2) 所表示的闭合电路欧姆定律都是成立的.



讨论与交流

在图 4-2-7 中, A 组为 4 节 1.5 V 干电池, B 组为 6 V 蓄电池, 两组电源的电动势均为 6 V. 将它们与额定电压为 6 V 的灯泡、电压表、开关按图示连接成电路.

单独闭合开关 S_1 或 S_2 , 可以观察到灯泡的亮度和电压表的示数不相同. 在闭合电路中电动势和用电器都相同的情况下, 用电器两端的电压不相同说明了什么?

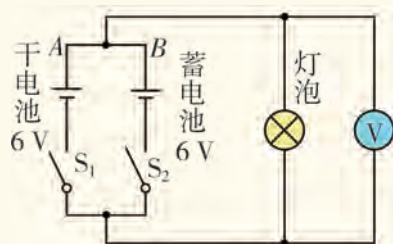


图 4-2-7 实验电路图

路端电压与负载的关系

在电路中, 内电路的电压用 $U_{\text{内}}$ 表示, 外电路的电压用 $U_{\text{外}}$ 表示. 外电路电压也叫作路端电压. 由于内电路电压的存在, 实际加在用电器 (负载) 上的电压通常并不等于电源的电动势, 因此路端电压才是用电器的实际工作电压. 那么, 路端电压与接入电路的用电器之间有什么关系呢?



观察与思考

如图4-2-8所示的电路是研究路端电压和负载关系的实验原理图，图中各灯泡的额定电压与额定功率都是相同的。观察当接入电路的灯泡逐渐增多时，灯泡的亮度如何变化，解释观察到的现象。

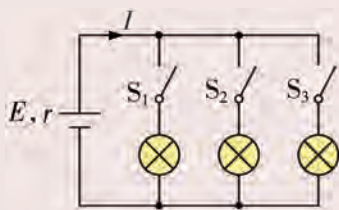


图4-2-8 实验原理图

从实验可知，当接入电路的灯泡逐渐增多时，灯泡的亮度逐渐变暗。

对于一个电源，它的电动势 E 和内阻 r 是确定的。由于灯泡采用并联方式，当接入电路的灯泡逐渐增多，即负载增加时，外电路等效电阻 R 逐渐减小。由闭合电路欧姆定律 $I = \frac{E}{R+r}$ 可知，电路中的电流 I 增大，内电压 $U_{\text{内}} = Ir$ 逐渐增大，所以路端电压 $U = E - Ir$ 减小，灯泡变暗。

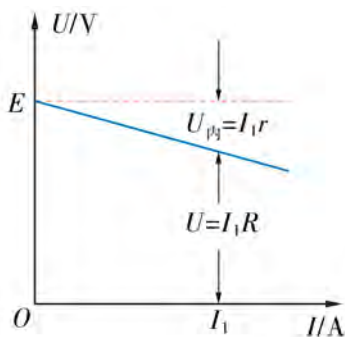


图4-2-9 $U-I$ 图像

根据 $U = E - Ir$ ，作出路端电压 U 与电流 I 的关系图像，如图4-2-9所示。从图线可见，这是一条向下倾斜的直线，故路端电压 U 随着电流 I 的增大而减小。



讨论与交流

1. 在路端电压 U 与电流 I 的关系图像中，如何确定电源电动势和电源的内阻？
2. 无内阻（即 $r = 0$ ）的电源被称为理想电源。理想电源的路端电压与电源电动势的关系如何？

例题：人造地球卫星大多用太阳能电池供电。太阳能电池是由许多片太阳能电池板组成的。现把太阳能电池置于如图4-2-10所示的电路中，当断开开关时，电压表的示数 $U_1 = 800 \text{ mV}$ 。已知电阻的阻值为 20Ω ，当闭合开关时，电压表的示数 $U_2 = 400 \text{ mV}$ 。求该太阳能电池的内阻 r 。

分析：本题需要注意 U_1 和 U_2 是不同的，因为太阳能电池并非理想电源，它本身具有内阻。该内阻可以看成是一个与外接电阻串联的电阻器。

解：断开开关时，电压表测得的电压是太阳能电池的电动势，即 $E = U_1 = 800 \text{ mV}$ 。闭合开关后，电压表测得的是电

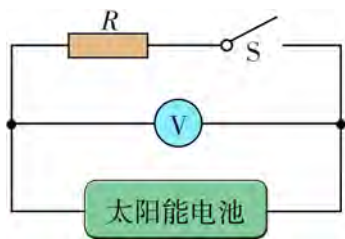


图4-2-10 电路图

阻 R 两端的电压，此时干路中的电流为

$$I = \frac{U_2}{R} = \frac{400}{20} \text{ mA} = 20 \text{ mA}.$$

由闭合电路欧姆定律，有

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

$$\text{则 } r = \frac{E}{I} - R = \frac{800 \times 10^{-3}}{20 \times 10^{-3}} - 20 \, \Omega = 20 \, \Omega.$$

由计算结果可知，太阳能电池内阻的阻值与外接电阻的阻值接近，不可以忽略. 在生产生活中，电源内阻是否可以忽略，需要根据具体情况而定.

 练习

1. 电动势为 E 的电源将电量为 q 的正电荷从负极移至正极，非静电力对其做的功为多大？

2. 把铜片和锌片插入一个橙子里，就可以制成一个简单的水果电池. 将四个电池的正负极依次连接起来，如图 4-2-11 所示，就制成了一个水果电池组，可使 LED 灯发光. 将水果电池组和干电池组分别连接小灯泡，观察两种情况下小灯泡的亮度，并分析其原因.

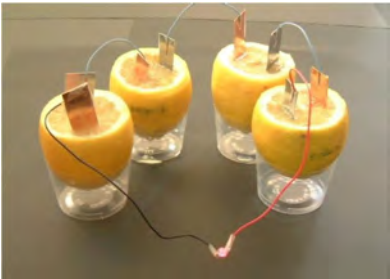


图 4-2-11

3. 手电筒里的两节干电池用久了，灯泡发出的光会变暗，这时我们会以为电池没电了. 有人为了“节约”，在手电筒里装一节新电池和一节旧电池搭配使用. 设新电池的电动势 $E_1 = 1.5 \text{ V}$ ，内阻 $r_1 = 0.3 \, \Omega$ ；旧电池电动势 $E_2 = 1.2 \text{ V}$ ，内阻 $r_2 = 4.0 \, \Omega$. 手电筒使用的小灯泡的电阻为 $4.5 \, \Omega$ ，则：

- (1) 当使用两节新电池时，求灯泡两端的电压.
- (2) 当使用新、旧电池混装时，求灯泡两端的电压.
- (3) 根据上面的计算结果，分析将新、旧电池搭配使用是否妥当.

4. 如图 4-2-12 所示是探究外电压 $U_{\text{外}}$ 和内电压 $U_{\text{内}}$ 之间关系的实验原理图. 实验器材有计算机、电压传感器、电流传感器、电学实验板、滑动变阻器、待测电池、导线等. 试写出实验探究过程，并总结外电压 $U_{\text{外}}$ 和内电压 $U_{\text{内}}$ 之间的关系.

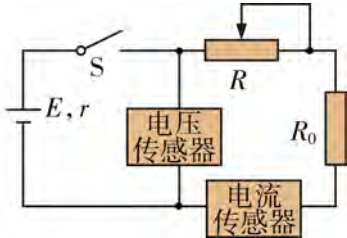


图 4-2-12

第三节 | 测量电源的电动势和内阻

为了合理地使用电源，我们需要了解电源的特性。电源的电动势和内阻是描述电源特性的重要参数。实验中，应如何测量电源的电动势和内阻呢？下面我们利用两种方法测定电源的电动势和内阻。可供使用的实验器材如表 4-3-1 所示。

表 4-3-1 实验器材

实验器材	实验器材
被测干电池一节 (E 约为 1.5 V)	滑动变阻器 R_1 (阻值范围 0 ~ 1 k Ω , 额定电流 0.5 A)
直流电压表 V (量程 3 V、15 V)	滑动变阻器 R_2 (阻值范围 0 ~ 15 Ω , 额定电流 2 A)
直流电流表 A (量程 0.6 A、3 A)	电阻箱 R (阻值范围 0 ~ 9999 Ω)
多用电表	导线若干、开关

实验与探究

实验 1：由 $E = U + Ir$ 可知， $U = E - Ir$ 。以电流 I 为横轴，电压 U 为纵轴，得到的 $U-I$ 图像是一条直线，则这条直线的纵轴截距在数值上等于电源电动势 E ，斜率绝对值等于电源的内阻 r 。

(1) 按如图 4-3-1 所示连接实验电路，检查电流表、电压表的量程是否合适。把滑动变阻器的滑片移到一端，使接入电路的阻值最大。

(2) 闭合开关，调节变阻器，使电流表指针偏过一定角度，读取电流表、电压表的示数 I 、 U ，并把数据记录在表 4-3-2 中。

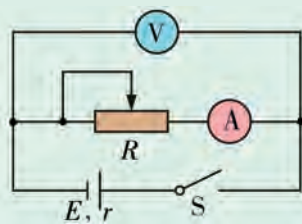


图 4-3-1 实验原理图

表 4-3-2 实验数据记录表

物理量	实验次数				
	1	2	3	4	5
U/V					
I/A					

(3) 改变滑动变阻器的阻值，重复上述步骤(2)，将测量结果记录在表 4-3-2 中。

(4) 断开开关，整理器材。

实验 2: 由 $I = \frac{E}{R+r}$ 可知, $\frac{1}{I} = \frac{1}{E}R + \frac{r}{E}$. 以电阻 R 为横轴, 电流的倒数 $\frac{1}{I}$ 为纵轴, 得到的 $\frac{1}{I} - R$ 图像是一条直线, 则这条直线的斜率 k 在数值上等于 $\frac{1}{E}$, 纵轴截距 b 在数值上等于 $\frac{r}{E}$. 因此, 电源的电动势 $E = \frac{1}{k}$, 内阻 $r = \frac{b}{k}$.

(1) 按如图 4-3-2 所示连接好实验电路, 检查电流表的量程是否合适, 并把电阻箱的阻值调至最大.

(2) 闭合开关 S , 调节电阻箱, 使电流表有明显示数, 读取此时电阻 R 和电流表示数 I , 并把数据记录在表 4-3-3 中.

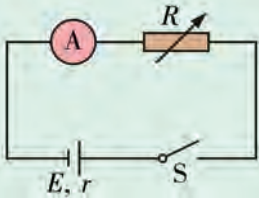


图 4-3-2 实验原理图

表 4-3-3 实验数据记录表

物理量	实验次数				
	1	2	3	4	5
R/Ω					
I/A					
$\frac{1}{I}/\text{A}^{-1}$					

(3) 改变电阻箱的阻值, 重复上述步骤 (2), 将测量结果记录在表 4-3-3 中.

(4) 断开开关, 整理器材.

根据表 4-3-2 的数据, 在图 4-3-3 (a) 中作出 $U-I$ 图像. 干电池的电动势和内阻分别是多少?

根据表 4-3-3 的数据, 在图 4-3-3 (b) 中作出 $\frac{1}{I} - R$ 图像. 干电池的电动势和内阻分别是多少?

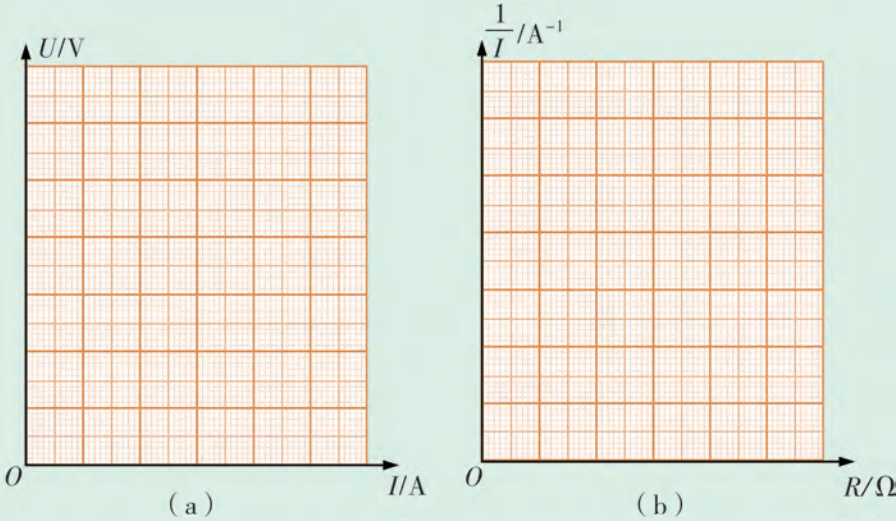


图 4-3-3

实验1是用电压表、电流表加上一个滑动变阻器来测定电源的电动势 E 和内阻 r ；实验2是用电流表、电阻器来测定电源的电动势和内阻。除了以上两种方法，还可以用电压表、电阻箱来测定电源的电动势和内阻。具体采用何种方法，可根据实际实验条件进行选择。



讨论与交流

- 实验1中，还有哪些因素会影响路端电压和电流的值？怎样才能减少这些因素的影响？
- 实验2中，还有哪些因素会影响外电阻和电流的值？怎样才能减少这些因素的影响？



实践与拓展

- 如何只用一个电压表、一个电阻箱和若干导线测量电源的电动势和内阻？自行设计一个实验方案并动手实践。
- 串联电池组的电动势和内阻与单个电池的电动势和内阻有什么关系？自行设计一个实验方案并动手实践。



练习

1. 用电流表和电压表测定电池的电动势 E 和内阻 r ，所用的电路如图4-3-4所示，某同学测得的六组数据如表4-3-4所示。

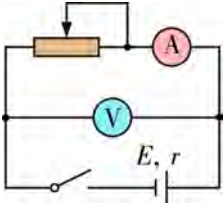


图4-3-4

- 试根据这些数据在图4-3-5的方格坐标中作出 $U-I$ 图线。
- 根据图线得出电池的电动势 $E = \underline{\hspace{2cm}}$ V，内阻 $r = \underline{\hspace{2cm}}$ Ω 。
- 如果不作出图线，只选用其中两组 U 和 I 的数据，可利用公式 $E = U_1 + I_1 r$ 和 $E = U_2 + I_2 r$ 算出 E 和 r ，这样做可能会得出误差很大的结果，选用第 $\underline{\hspace{2cm}}$ 组和第 $\underline{\hspace{2cm}}$ 组的数据，求得的结果的误差最大。

表4-3-4

组别	I/A	U/V
1	0.12	1.37
2	0.20	1.32
3	0.31	1.24
4	0.32	1.18
5	0.50	1.10
6	0.57	1.05

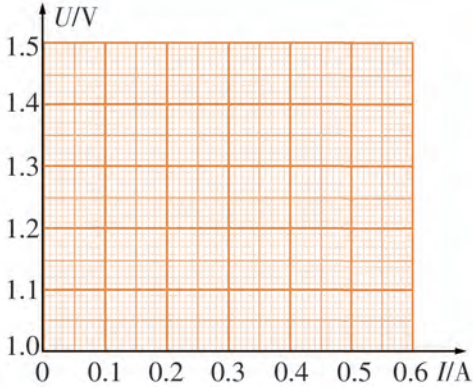


图4-3-5

2. 请自行设计一个测量电源的电动势和内阻的方案，并与同学交流。

第四节 | 练习使用多用电表

多用电表是一种可以测量电流、电压以及电阻等电学物理量的仪表。它具有多功能、多量程、方便携带的特点，是科学实验和生产实践中用来判断电路故障、检测电路元件的重要工具。

多用电表

多用电表由表头、测量电路、选择开关以及红、黑测量表笔等组成，一般可分为指针式和数字式两大类。

如图 4-4-1 所示是一种指针式多用电表。表的上半部分为刻度显示盘，下半部分是选择开关，开关周围标有测量功能的区域及量程。将选择开关旋转到电流挡，多用电表内的电流表电路就被接通；将选择开关旋转到电压挡或电阻挡，表内的电压表电路或欧姆表电路就被接通。



图 4-4-1 指针式多用电表



图 4-4-2 数字式多用电表

如图 4-4-2 所示是一种数字式多用电表。表的上半部分为读数屏，下半部分是选择开关，开关周围标有测量功能的区域及量程。数字式多用电表的测量值以数字形式直接显示，使用方便。

多用电表为什么能够“一表多用”？



观察与思考

如图 4-4-3 所示是指针式多用电表的电路简图, 它由表头 G 、直流电流测量电路、直流电压测量电路、电阻测量电路以及转换开关 S 等部分组成, 黑表笔插入公共端, 红表笔则通过转换开关 S 接入与待测物理量相应的测量端. 使用时, 只有一部分电路起作用. 观察电路的结构, 思考下列问题:

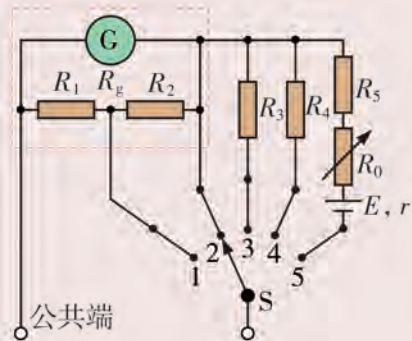


图 4-4-3 指针式多用电表电路简图

(1) 根据电表的改装原理, 判断 5 个端口的功能.

(2) 测量电路电压和电流时, 外界电流从哪一端流入指针式多用电表?

(3) 如果在测量电压或电流时误选了“5”端, 那么可能会造成什么后果?

测量电流时, 黑表笔插入公共端, 红表笔根据待测电流的大小, 通过转换开关接入“1”端或“2”端. 多用电表中测量端旁标出的电流是该测量端的最大测量电流, 即量程.“1”端和“2”端的量程不同.

测量电压时, 黑表笔插入公共端, 红表笔根据待测电压的大小, 通过转换开关接入“3”端或“4”端, 它们的量程不同.

测量电阻时, 黑表笔插入公共端, 红表笔通过转换开关接入“5”端. 在红、黑表笔间接入待测电阻 R 后, 形成闭合电路, 其中电阻 R_0 为可变电阻, 称为调零电阻, E 为电池电动势.

实际上, 多用电表的电阻测量端不止一个. 它的多个测量端共用一个电阻刻度盘, 电阻值按十进倍率扩大.



讨论与交流

1. 为什么红表笔接“1”端时的量程比接“2”端时的大?
2. 为什么红表笔接“3”端时的量程比接“4”端时的小? 能判断出分压电阻 R_3 和 R_4 哪一个大吗?
3. 多用电表测电阻时, “0”刻度在表盘的左边还是右边? 表盘刻度均匀吗? 为什么要设置调零电阻 R_0 ?
4. 分析分别测量电压、电流、电阻时, 红表笔和黑表笔的电流方向.

多用电表的使用

使用多用电表前，应先检查其机械零位。若一开始指针不正对电流的零刻度，应调节多用电表的机械调零旋钮，使指针正对零刻度。多用电表使用后，要把选择开关拨至“OFF”或最大交流电压挡处。多用电表长期不用时，应取出表内电池，防止电池漏电或变质。



实验与探究

1. 如图 4-4-4 所示，用学生电源、小灯泡、滑动变阻器等组成闭合电路，用多用电表测量电路中小灯泡两端的电压和通过小灯泡的电流。

测量前请先思考：

- (1) 测量时多用电表应如何与被测电路连接？
- (2) 多用电表的红表笔应接被测电路的哪一端？

2. 用多用电表测量各种电阻。

(1) 估计各电阻的阻值，选择适当的倍率挡，将选择开关旋至“ Ω ”挡的恰当倍率处。

(2) 将两表笔短接，调节机械调零旋钮，使指针指在欧姆刻度最右端的零刻度处。

(3) 对各电阻进行测量。

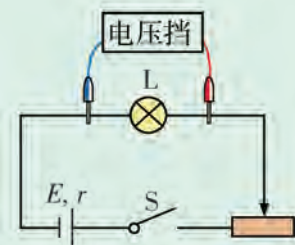
3. 旋转多用电表挡位至适当倍率的电阻挡，将两表笔分别连接二极管的两极，然后将两表笔反过来连接二极管的两极，可以测出两个电阻值。思考下列问题，与同学交流并作出判断：

(1) 如果两次测得的电阻值相差很大，说明二极管的质量如何？

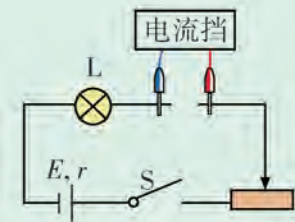
(2) 在两个电阻值差别明显的前提下，对于测得电阻较小的一次，与黑表笔相接的一极为二极管的正极，与红表笔相接的一极为二极管的负极。这其中的理由是什么？

(3) 如果测得两个电阻值相差很小，说明二极管的质量如何？如果两个电阻均为零或均为无限大，又说明什么问题？

4. 在如图 4-4-5 所示的电路中，闭合开关 S 后，灯泡不亮。先思考可能的原因，再用多用电表查找故障。方法有几种？用什么办法最简便？



(a) 测量小灯泡两端的电压



(b) 测量通过小灯泡的电流

图 4-4-4 实验电路图

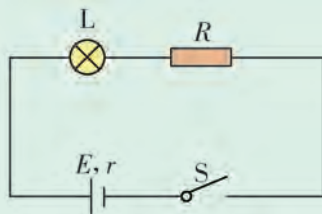


图 4-4-5 实验电路图

用多用电表测量电压时，在用直流电源对小灯泡正常供电的情况下，将多用电表的选择开关旋至直流电压挡，选择的量程应该大于小灯泡两端电压的估计值。用两支表笔分别接触灯泡两端的接线柱，注意红表笔接触点的电势应该比黑表笔高。表盘上所选量程对应的直流电压刻度示数，就是小灯泡两端的电压。

用多用电表测量电流时，在直流电源对小灯泡正常供电的情况下，断开电路开关，把多用电表串联在电路中，将选择开关旋至直流电流挡合适的量程处；闭合开关，表盘上所选量程对应的直流电流刻度示数，就是通过小灯泡的电流。

用多用电表测量电阻时，测量前要先将红、黑表笔短接进行调零，测量时应将红、黑表笔接在被测电阻器两端，注意不能将电阻两端用手和红、黑表笔相接，因人体是导体，也有电阻，这样接就相当于把人体电阻和被测电阻并联，使测出的电阻值偏小。因此，应将电阻放在桌上或绝缘板上进行测量。读取表盘欧姆刻度线上的示数，将此数值乘选择开关所指的倍率，就是被测电阻的阻值。

用多用电表判断二极管的好坏及极性时，由于二极管具有单向导电性能，因此当二极管两端加上正向电压时，流过二极管的电流很大，测量的电阻值很小；当二极管两端加上反向电压时，流过二极管的电流很小，测量的电阻值很大。

用多用电表查找电路故障时，在简单的串联电路中，小灯泡不亮，可能是电阻的阻值极大，造成电路的电流极小而无法看到亮度，这时可采用多用电表的欧姆挡测量其电阻，但注意要在断开开关的条件下进行；小灯泡不亮，也可能是因为灯泡的钨丝断了，或是因为电阻坏了，也可能是因为某段导线内部断了。除了可采用以上方法，也可采用在闭合开关的条件下，选择多用电表的直流电压挡分别与各元件或各段导线并联，如果电压表的示数等于电源电动势，即可判断所并联的部分一定断路了。



实践与拓展

尝试用多用电表测量电容器的电阻，并判断电容器是否断路或漏电。



练习

1. 多用电表是采用什么方法来扩大测量电流、电压的量程的？
2. 在图 4-4-6 所示的电路中，假设表头的满偏电流 $I_g = 200\ \mu\text{A}$ ，内阻 $R_g = 100\ \Omega$ ，如果要达到多用电表所设定的两个量程，图中的电阻 R_1 与 R_2 的大小应为多大？
3. 一个满偏电流 $I_g = 200\ \mu\text{A}$ 、内阻 $R_g = 800\ \Omega$ 的表头，如果把它改装成量程为 $0 \sim 50\ \text{V}$ 的电压表，应如何改装？画出电路图，并计算所需电阻的阻值。

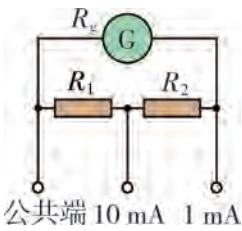


图 4-4-6

第五节

家庭电路与安全用电



我们身边的家用电器种类繁多，为我们的生活带来了许多便利，或许我们有过这样的经历：当打开电灯时，灯泡闪了几下便灭了，但其他用电器却仍在正常工作；冬天家里开着电暖器，微波炉也正在工作，这时电冰箱启动制冷，结果家里所有用电器一下子都停止了工作。为什么有时某个用电器坏了不影响其他电器的工作，有时却令所有的用电器都停止工作呢？这是关乎家庭电路和安全用电的问题。

家用电器

家用电器简称家电，包括电视机、空调机、电冰箱、洗衣机、录像机、音响系统、微波炉、电磁炉、电热水壶、电饭煲、电风扇、电暖器等。当前，家电发展的总体趋势是逐步实现数字化、智能化和网络化，并且越来越注重功能与环保之间的协调。家电一般包含控制部分、工作部分和安全部分。控制部分用于控制家电的运转，工作部分是实现家电功能的核心，安全部分则用于防止各种原因损害家电或者造成事故。下面简单介绍几种家电的功能及使用注意事项。



图 4-5-1 常见的家用电器

电视机 电视机是很常见的一种家用电器，它使我们安坐家中便能欣赏外面精彩的世界。现在，电视机正向着大屏幕、轻薄化、高清晰度等方向发展。按显示器的类型，电视机可分为阴极射线管（CRT）电视机、液晶（LCD）电视机、等离子（PDP）电视机等。CRT 电视机技术成熟、价格低，但耗电量大而且难以轻薄化。LCD 电视机外观纤薄，但它的背光

源含汞，正逐渐被发光二极管（LED）取代。LED 电视机比 LCD 电视机更环保节能、更轻薄，图像更清晰。PDP 电视机亮度更均衡，更容易实现大屏幕化，但耗电量大。

空调机 早年的空调机只能恒定地制冷、制热。现在，利用变频技术和传感技术，空调机已开始向智能化和人性化发展，使操作更简便，使用更舒适。例如变频空调机每次启动时，先以高功率、大风量制冷或制热，迅速接近设定温度后便降低制冷或制热能力，以低功率精确地维持设定温度，大大降低了耗电量。

洗衣机 常用的洗衣机分为波轮式和滚筒式两种。波轮式洗衣机体积小，重量轻，省时间，耗电量小，但衣物磨损率高；滚筒式洗衣机容量大，衣物磨损率小，洗涤范围广，但洗涤时间长，耗电量大。随着科技的发展，市场上出现了一系列采用高科技的洗衣机，包括具有变频、模糊控制、超声波、臭氧去污、电磁去污等功能的新型洗衣机。

微波炉 微波炉利用微波加热食物，它主要由磁控管、炉腔、电源以及控制系统等组成。磁控管能产生高功率的微波，是微波炉实现加热的主要元件。微波能够穿透食物表面进入内部，使食物分子高速振动。大部分微波能量被转换成食物分子的动能，使食物温度升高。对于富含水分或者脂肪的食物，这种能量转化尤为显著。炉腔是用反射微波的金属导体制造的，能够使微波来回多次穿透食物而产生加热效应，同时也保证微波不会泄漏到炉腔外。而微波炉烹调器皿用可以被微波穿透的绝缘体制造，也有助于食物的加热。

电磁炉 利用电磁感应原理制成的电磁炉，其通过交变电流产生交变磁场，使放在灶台上的铁锅或不锈钢锅体内产生感应电流而发热。电磁炉通过锅体本身发热而加热食品。电磁炉工作时没有明火，灶台本身并不发热，即使在锅与灶之间放一张纸，也不会烹调过程中被点燃。不过，手表、录音磁带等易受磁场影响的物体，应远离工作中的电磁炉，以防受损。



讨论与交流

随着人工智能技术的发展，家用电器的智能化程度越来越高。试以一种家用电器为例，谈谈它具有哪些智能化功能和实现该功能的装置。

家庭电路

常见的家庭电路一般由供电线路、电能表、总开关、保险设备、插座、导线、用电器等组成，如图 4-5-2 所示是家庭电路示意图。

供电线路 家庭电路的低压供电线路有两根线，一根叫火线，另一根叫零线，它们之间接 220 V 的交流电压。如果用试电笔来判别，能使试电笔的氖管发光的是火线，不发光的是零线。

电能表 供电线路在接其他元件之前，首先接电能表，也可以说电能表要接在干路

上. 电能表用来测量用户在一定时间内消耗的电能. 图 4-5-2 中电能表的标识 220 V 是指电能表的额定电压, 10 A 是指通过电能表的额定电流, 1250 r/(kW·h) 是指每消耗 1 kW·h 的电能, 电能表的表盘转 1250 转. 记下起始时间的值, 再记下结束时间的值, 两者的差就是这段时间消耗的电能, 注意电能表上最末一位数字为小数部分. 电能单位为千瓦时, 也叫度.



图 4-5-2 家庭电路示意图

总空气开关 空气开关又叫空气断路器, 是一种只要电路中电流超过额定电流就会自动断开的装置. 总空气开关安装在电能表之后, 专线空气开关之前. 有时用双刀开关同时控制火线和零线, 有时用单刀开关只控制火线. 漏电保护开关可以在线路漏电时保障用电者的人身安全.

插座 在家庭电路中插座是为了给可移动电器供电. 分为固定插座和可移动插座, 又可分为两孔插座和三孔插座. 三孔插座的两个孔分别接火线和零线, 另一孔是接地的, 这样在把三脚插头插入时, 会把用电器的金属外壳和大地连接起来.

用电器 各用电器之间并联连接, 使各用电器两端的电压均为 220 V. 用电器的控制开关要接在火线上, 不允许接在零线上. 大功率家电需要用专线连接.

**讨论与交流**

1. 为什么火线都要先接开关再接用电器?
2. 为什么家庭电路里要有漏电保护开关和地线?
3. 为什么空调机等大功率家用电器都要用专线连接?

安全用电

要在日常生活中安全用电, 除了注意家电故障的因素, 还应该考虑家庭电路中各组成部分的选择. 为了在家庭电路中安全使用家电, 一般应该考虑以下几个方面.

电能表和供电导线应与所用的家电匹配。例如即热式电热水器的功率通常至少为 6 kW，这要求供电导线铜芯横截面积不能小于 6 mm^2 。而家庭电能表的额定电流多为 10 A，室内导线铜芯面积一般不超过 4 mm^2 。如果不更换适合的电能表和导线，使用这种电热水器可能会引发火灾。随着家庭中各种用电器的不断增加，电路中的总电流也会越来越大，新添家电前必须检查电能表是否有足够容量。

为安全起见，最好使用固定插座。使用多位移动插座时应谨慎小心。将多种电器接在同一个移动插座上并同时开启的做法，看似方便但弊端很多。因为这样会造成瞬间电流太大，电压下降，影响电器正常工作，使电线因超负荷而发热，甚至可能引起火灾。而且移动插座的额定电流容量一般较小，用于启动电流很大的家电时容易发生危险。

电源插头应该与插座匹配。家庭中安装的多是 10 A 电源插座，而一些功率较大的家电如滚筒式洗衣机或者空调机等，通常用 16 A 插头。因此，使用前必须更换插座。

使用三脚插头的电器比两脚插头的电器更安全。因为发生漏电事故时，地线会把短路电流引向大地而不流经人体，从而保证了使用者的安全。

节约用电与环境保护

家电给我们的工作和生活带来便捷的同时，也大量消耗着自然界有限的资源。因此，我们必须提高自己的环保意识，从环保的角度节约用电，爱护我们的地球。

家用电器的选择要根据家庭人口和实际需要，不要盲目地追求大型化；应该参考能效标识，选择高能效节能产品，减少能源消耗和对环境的污染；合理配置照明电器，尽量选用发光效率高的节能光源。家电的使用应符合节约用电的原则，养成良好习惯，例如电器停止使用时要及时切断电源等。

此外，废旧家电的处理已成为全世界普遍关注的问题。科学地回收和循环利用被淘汰的家电，既可以减少环境污染，又能产生良好的经济效益。我国不断推广和完善的家电以旧换新政策，以及于 2011 年 1 月 1 日起施行的《废弃电器电子产品回收处理管理条例》，都将促进资源的循环利用，为环境保护工作提供新的发展方向。



实践与拓展

1. 根据家中的用电器数量，估算需要匹配什么规格的家庭电路。
2. 观察与记录家用电器的工作状况，检查是否存在安全问题，并与家人一起及时解决隐患。
3. 调查近年来家庭用电的情况，讨论节约用电如何从自己做起，养成节约用电的习惯。

能效标识

能效标识又称能源效率标识，是附在耗能产品或其最小包装物上，表示产品能源效率等级等性能指标的一种信息标签。它为消费者选购产品提供必要的信息，引导和帮助消费者选择高能效节能产品。目前已有上百个国家实施了能效标识制度。

中国能效标识分为五个等级，等级1表示产品达到国际先进水平，最节电，即耗能最低；等级2表示比较节电；等级3表示产品的能源效率为我国市场的平均水平；等级4表示产品能源效率低于市场平均水平；等级5是市场准入指标，低于该等级要求的产品不允许生产和销售。

中国是全球最大的家用电器生产和消费国之一。家用电器拥有量的迅速增长带来了巨大的能源消耗，同时也加重了对环境的污染。制定和有效地实施能效标准与能效标识制度，有效地提高产品的能效水平和消费者的节能环保意识，将带来巨大的环境效益。



图 4-5-3 中国能效标识图



练习

1. 家中的用电器是否安全而且环保？大家都有良好的家电使用习惯吗？请与同学们交流和讨论。

2. 电击对人的危害，取决于通过人体的电流大小。为了保护用电者的安全，通常在家庭电路中安装一个漏电保护开关。如图 4-5-4 所示为电流对人体的影响情况图，根据图中提供的参数，讨论漏电电流多大时漏电保护开关应该开始工作。

3. 随着科技的发展，越来越多的节能家电被研发出来，包括节能灯、节能空调、节能电冰箱等。上网搜索资料与查阅电器说明书，记录家里电器工作状态下的消耗功率。结合自己日常生活使用电器的时长，试探讨假如家里采用节能家电的话，每个月能节省多少度电。可尝试为自己家规划节能改造方案，并撰写题为“节能用电”的调查报告。

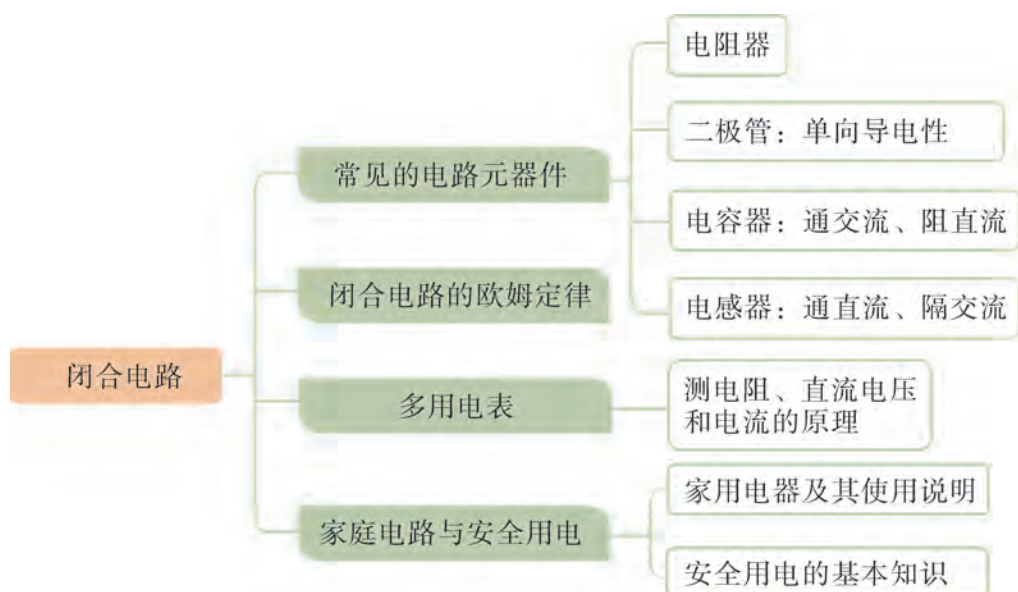


图 4-5-4

本章小结

知识结构

参考下面的知识结构，请进一步梳理本章的知识。



回顾与评价

1. 你能识别哪些常见的电路元器件，它们在电路中分别起了什么作用？
2. 实际操作并比较本章所列举的“测量电源电动势和内阻”实验的不同方案，谈谈不同方案对自己有哪些启示，并尝试设计出新的实验方案。
3. 你了解了哪些安全用电的知识？尝试将安全用电的知识整理成册，分享给身边的人。

习题四

1. 如图 4-1 所示是某同学连接的实验实物图, 其中电源由 4 个电动势各为 1.5 V 的 5 号电池串联而成. 闭合开关 S 后, 发现灯泡 L_1 、 L_2 都不亮, 他用多用电表的直流电压挡进行检查, 那么选择开关应选择的量程挡是 ().

- A. 2.5 V B. 10 V
C. 50 V D. 250 V

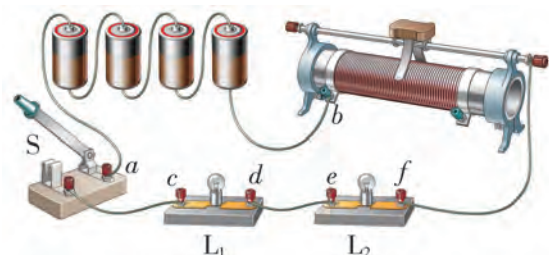


图 4-1

2. 某同学在研究串联电路的电压时, 接成如图 4-2 所示的电路, 接通 S 后, 他将电压表并联在 A、C 两点间时, 电压表示数为 U , 当并联在 A、B 两点间时, 电压表示数也为 U , 当并联在 B、C 两点间时, 电压表示数为零, 出现此种情况的原因是 (R_1 、 R_2 阻值相差不大) ().

- A. AB 段断路 B. BC 段断路
C. AB 段短路 D. BC 段短路

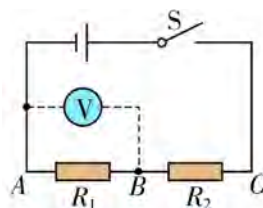


图 4-2

3. 甲、乙两同学使用多用电表欧姆挡测同一个电阻时, 他们都把选择开关旋到 “ $\times 100$ ” 挡, 并正确操作. 在观察到表的指针偏角太小后, 甲把选择开关旋到 “ $\times 1k$ ” 挡, 乙把选择开关旋到 “ $\times 10$ ” 挡, 但乙重新调零, 而甲没有重新调零, 则以下说法正确的是 ().

- A. 甲选挡错误, 操作正确 B. 乙选挡正确, 操作错误
C. 甲选挡错误, 操作也错误 D. 乙选挡错误, 操作正确

4. 使用多用电表的欧姆挡测导体电阻时, 如果两手同时分别接触红、黑两表笔的金属杆, 则造成测量值 ().

- A. 比真实值大 B. 比真实值小
C. 与真实值相等 D. 可能比真实值大, 也可能比真实值小

5. 高温超导限流器由超导部件和限流电阻并联组成, 如图 4-3 所示, 超导部件有一个超导临界电流 I_c , 当通过限流器的电流 $I > I_c$ 时, 将造成超导体失超, 从超导态 (电阻为零) 转变为正常态 (一个纯电阻), 以此来限制电力系统的故障电流. 已知超导部件的正常态电阻为 $R_1 = 3 \Omega$, 超导临界电流 $I_c = 1.2 A$, 限流电阻 $R_2 = 6 \Omega$, 小灯泡 L 的额定电压为 6 V, 电源电动势 $E = 8 V$, 内阻 $r = 2 \Omega$, 原来电路正常工作, 现小灯泡 L 突然发生短路, 则 ().

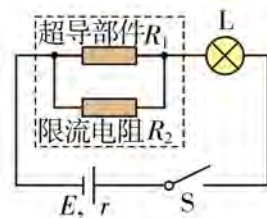


图 4-3

A. 短路前通过 R_1 的电流为 1 A

B. 短路后通过 R_1 的电流为 2 A

C. 短路后通过 R_1 的电流为 $\frac{4}{3}$ A

D. 短路后超导部件将由超导状态转化为正常态

6. 使用多用电表测电流、电压、电阻. 表盘中指针的位置如图 4-4 所示.

(1) 选用 100 mA 直流电流挡, 示数 $I =$ _____ mA.

(2) 选用 2.5 V 直流电压挡, 示数 $U =$ _____ V.

(3) 选用 “ $\times 10$ ” 欧姆挡, 示数 $R =$ _____ Ω .

7. 某兴趣小组计划用如下三组器材设计不同的实验方案来测定干电池的电动势和内阻.

第一组: 一个电流表、一个电压表和一个滑动变阻器;

第二组: 一个电压表和多个定值电阻;

第三组: 两个电流表.

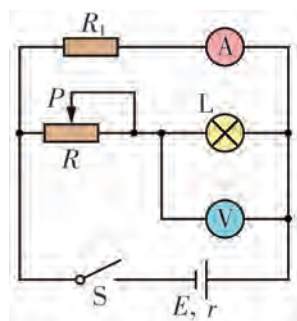
(1) 请根据所学的知识评估这三组器材能否测定干电池的电动势和内阻. 如果不能, 说明其原因. 如果能, 画出实验的电路图, 说明实验的原理.

(2) 请再选取器材组合, 设计新的实验方案, 交流科学探究的体会.

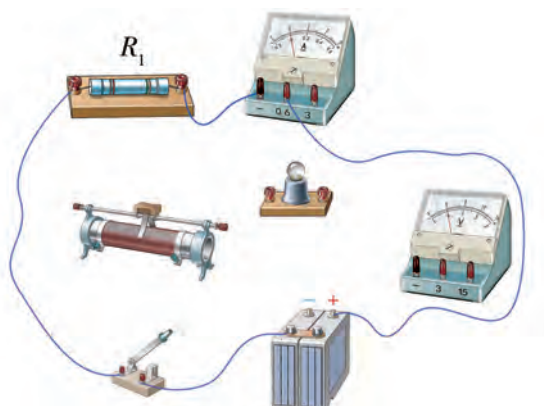
8. 为了测量 R_1 的阻值、电源的电动势 E 和内阻 r , 某同学设计了如图 4-5 (a) 所示的电路, 其中灯泡 L 的额定电压为 4 V, 滑动变阻器 R 的总电阻为 50 Ω , 电流表选择量程 0.6 A (内阻忽略). 闭合开关 S, 当滑片 P 滑至某位置时, 灯泡 L 恰好正常发光, 电流表的示数为 0.45 A.



图 4-4



(a)



(b)

图 4-5

(1) 按照如图 4-5 (a) 所示的电路图, 用笔画线代替导线把如图 4-5 (b) 所示的实物图连接完整.

(2) 如果灯泡 L 突然熄灭, 此时电流表的示数变为 0.5 A, 电压表的示数变为 10 V, 如果导线完好, 电路中各处接触良好, 则故障发生在何处? 是短路还是断路?

(3) 发生故障前, R_1 的阻值为 _____ Ω , 滑动变阻器接入电路的阻值为 _____ Ω .

(4) 电源的电动势 $E = \underline{\hspace{2cm}}$ V, 内阻 $r = \underline{\hspace{2cm}}$ Ω .

9. 某学习小组在学习“闭合电路的欧姆定律”后, 利用如图 4-6 所示的电路来探究电路中各部分的电压、电流随滑动变阻器 R 阻值变化的关系. 电路中 R_1 、 R_2 、 R_3 为三个定值电阻, 四个电表均视为理想电表, 当滑动变阻器 R 的滑片 P 分别置于 a 、 b 两个位置时, 读出四个电表的两组数据如表 4-1 所示.

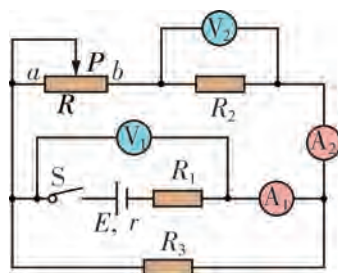


图 4-6

表 4-1

P 的位置	A_1 的示数/A	A_2 的示数/A	V_1 的示数/V	V_2 的示数/V
a	0.42	0.26	3.20	2.00
b	0.48	0.34	2.80	1.70

学习小组的同学们通过对上述两组数据的分析, 发现其中某个电表的示数存在偏差, 经过仔细检查, 发现有个电压表的内部接线出现松动, 致使其读出的数值不准确.

- (1) 内部接线松动的电压表是 .
- (2) 利用另外三个无故障电表的示数, 可求出 $R_3 = \underline{\hspace{2cm}}$ Ω .
- (3) 电源的电动势 $E = \underline{\hspace{2cm}}$ V.
- (4) 电源的内阻 r 能测量吗? 为什么?

10. 某个盒子内装有由导线和几个相同阻值的电阻组成的电路, 盒外的“1”“2”“3”“4”是该电路的四个接线柱, 如图 4-7 所示. 已知“1”“2”两端间的电阻是“1”“3”和“2”“4”两端间电阻的 2 倍, “3”“4”两端间的电阻为零, 试画出盒内可能的电路图.



图 4-7

11. 在如图 4-8 所示的电路中, 电源电动势 $E = 8$ V, 内阻 $r = 1$ Ω , 电阻 $R_1 = 5$ Ω , $R_2 = R_3 = 4$ Ω .

- (1) 断开开关 S , 求理想电压表 V 和理想电流表 A 的示数.
- (2) 接通开关 S , 求理想电压表 V 和理想电流表 A 的示数.

12. 欧姆表由一节内阻为 1 Ω , 电动势为 6 V 的电池、一个可变电阻器以及一个理想电流表串联组成. 电流表的满偏示数为 1.0 mA. 两根表笔接触时, 调节可变电阻器, 使电流表的示数为 1.0 mA.

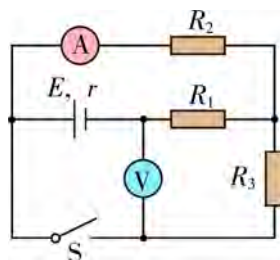


图 4-8

- (1) 此时可变电阻器的电阻是多少?
- (2) 现将表笔接到一个未知电阻器的两端. 该电阻器的电阻必须多大才能使电流表显示为半偏示数 (0.50 mA), 或满偏示数的 $\frac{1}{4}$ (0.25 mA), 或满偏示数的 $\frac{3}{4}$ (0.75 mA)?
- (3) 欧姆表的刻度是均匀的吗? 请说明理由.



第五章 电能与能源的可持续发展

现代生活离不开电. 没有了电, 通讯、交通一片混乱, 楼房一片漆黑, 地铁停开, 飞机停飞, 电梯停用, 工厂停产……

电的重要性使人类想尽办法通过各种途径获取电能, 然而受到技术、生产力等限制, 到目前为止, 人们最常用的获取电能方式, 往往伴随着对环境的污染和生态的破坏. 例如火力发电的方式主要是燃煤或者其他矿物燃烧产生蒸汽推动汽轮机发电. 在燃料燃烧时放出二氧化硫、一氧化碳、二氧化碳、氮氧化物、三四苯丙吡、烟尘等产物, 会破坏植被和土壤, 损害人体健康, 污染大气以及造成温室效应.

电能的生产、输送和应用过程涉及能源的利用和开发、发电站和变电站的建设、应用方式的变革等一系列问题. 这其中又有哪些物理理论和技术可以指导我们更安全、环保、有效地利用电能?

在本章的学习中, 我们将初步了解自然界存在哪些能量的形式, 能量之间是否可以相互转化, 在转化过程中能量的“量”存在怎样的规律, 能量的转变是否存在方向性, 以及是否存在环保且可再生能源, 同时也将认识到如果不有效利用能源、保护环境, 将会给人类带来怎样的灾难.

第一节

电路中的能量



现代社会生活离不开电，各种各样的用电器进入人们的生活，改变了人们的生活、生产方式，提高了人们的生活质量。用电器需要用电能进行工作，其共同特点是电流通过用电器做功，将电能转化为其他形式的能。例如电饭煲将电能转化为热能，洗衣机将电能转化为机械能。那么，电能是如何转化为其他形式的能，在转化为其他形式的能的过程中又遵循着怎样的规律呢？

电功和电功率

通过前面的学习，我们知道物体从高处运动到低处的过程，重力会对物体做功，重力势能会转化为动能，物体减少的重力势能等于重力对物体所做的功。同样，电流通过一段电路时，自由电荷在电场力的推动下做定向移动，电场力对自由电荷做功，将电能转化为其他形式的能。我们把电场力所做的功，称为**电功**。根据功与能的关系，电功的大小等于被消耗的电能。



讨论与交流

如图 5-1-1 所示，假设在一段导体两端加上电压 U 后，导体内的自由电荷在电场力的作用下定向移动，形成电流 I 。电流通过导体做的电功与什么因素有关？

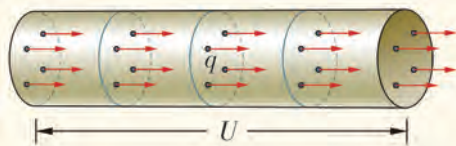


图 5-1-1 两端电压为 U 的导体

由电流的定义，可知在时间 t 内通过这段电路任一横截面的电量 $q = It$ ，即在时间 t 内有电量 q 由电路的一端移动到另一端。根据电场力做功的表达式 $W = qU$ ，可得

$$W = UIt \quad (5.1.1)$$

式 (5.1.1) 表明，电流在一段电路上所做的功等于这段电路两端的电压 U 、电路中的电流 I 和通电时间 t 三者的乘积。在国际单位制中，电功的单位是焦耳，简称焦，符号是 J。

电流做功与完成这些功所用时间之比叫作**电功率** (electric power), 用 P 表示. 则 $P = \frac{W}{t}$, 结合式 (5.1.1), 可得

$$P = UI \quad (5.1.2)$$

式 (5.1.2) 表示电流在一段电路上做功的功率 P 等于电流 I 与这段电路两端的电压 U 的乘积.

在国际单位制中, 电功率的单位是瓦特, 简称瓦, 符号是 W. 常用的单位还有 kW. $1 \text{ kW} = 1 \times 10^3 \text{ W}$.



讨论与交流

$P = UI$ 和 $P = \frac{W}{t}$ 两式的意义相同吗?

焦耳定律

电场力对电荷做功的过程, 就是将电能转化为其他形式的能的过程. 当电流通过电炉丝等金属导体时, 自由电子与金属中的其他电荷或者原子发生碰撞, 电能全部转化为金属导体的内能, 我们把这类元器件称为纯电阻元件. 那么, 电流通过纯电阻元件产生的热量与哪些因素有关呢?



观察与思考

用数据采集器、温度传感器、焦耳定律实验器 (如图 5-1-2 所示)、学生电源、导线、煤油 (或色拉油)、计算机等实验器材, 按如图 5-1-3 所示的实验原理图连接电路.



图 5-1-2 实验装置图

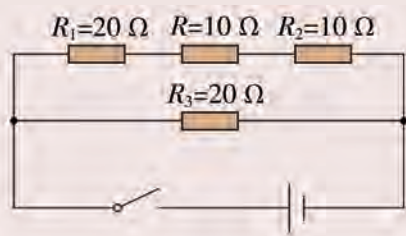


图 5-1-3 实验原理图

(1) 用注射器在焦耳定律实验器的三个测温有机玻璃管中注入等量的煤油(或色拉油),将电阻 R_1 、 R_2 、 R_3 分别插入有机玻璃管中,再分别插入三个温度传感器探头,如图 5-1-2 所示.

(2) 将三个温度传感器与数据采集器连接.

(3) 把焦耳定律实验器接入学生电源,电压调至 $6 \sim 9 \text{ V}$,设置采样时间为 10 s ,每隔 10 s 自动采集一组温度数据.

(4) 采集数据 $3 \sim 5 \text{ min}$,停止采集数据,关闭电源.

(5) 以时间 t 为横轴,传感器测量温度 T 为纵轴,分别画出三个温度传感器温度随时间变化的图线.

(6) 分别对三组数据进行处理得到三条图线.

温度 T 分别与哪些因素有关?

上述实验表明,煤油(或色拉油)的温度与通过电阻的电流 I 、电阻的阻值 R 及通电时间 t 有关. 由于煤油(或色拉油)的热量是由电阻元件产生的,由 $Q = cm\Delta T$ 可知,比热容和质量相同的煤油(或色拉油),吸收的热量 Q 与温度的变化量 ΔT 成正比. 因此,电流通过电阻元件产生的热量与电流 I 、电阻 R 和时间 t 有关,那么它们之间具体有什么关系呢?

在一段只有电阻元件的纯电阻电路中,电场力所做的功 W 等于电流通过这段电路时发出的热量 Q ,即 $Q = W = UIt$. 结合欧姆定律 $I = \frac{U}{R}$,热量 Q 可写成

$$Q = I^2 R t \quad (5.1.3)$$

即电流通过导体产生的热量与电流的二次方成正比,与导体的电阻及通电时间成正比. 这就是焦耳定律(Joule law). 它最初由英国物理学家焦耳(J. P. Joule, 1818—1889)通过实验研究得到.

在生产和生活中,利用电产生热来工作的用电器很多,比如各种工业电炉、电烙铁、电热毯、电饭煲、电热水器、电熨斗等.

如果工作电路不是纯电阻电路,如电路中还包含电动机、电解槽等用电器,电能除一部分转化为内能外,还转化为机械能、化学能等其他形式的能,其电功仍等于 UIt ,电阻上产生的热量仍为 $I^2 R t$,但此时电功比电阻上产生的热量大.

一段电路因发热而消耗的功率 $P = \frac{Q}{t}$,称为热功率. 由 $Q = I^2 R t$,可得纯电阻电路上的热功率

$$P = I^2 R \quad (5.1.4)$$



讨论与交流

$P = UI$ 和 $P = I^2 R$ 两式的意义相同吗？两者的数值在什么条件下相等？

闭合电路中的能量

将 $E = U_{\text{外}} + U_{\text{内}}$ 的两边同时乘电流 I ，可得

$$EI = U_{\text{外}}I + U_{\text{内}}I \quad (5.1.5)$$

式 (5.1.5) 反映了闭合电路中的能量转化关系，式中左边的 EI 表示电源提供的电功率，右边的 $U_{\text{外}}I$ 和 $U_{\text{内}}I$ 分别表示外电路和内电路上消耗的电功率。式 (5.1.5) 表明，电源提供的能量一部分消耗在外电路上，转化为其他形式的能；另一部分消耗在内阻上，转化为内能。此外还可知，电动势反映了电源把其他形式的能转化为电能的能力。当电路通过相同的电流时，电源电动势越大，电源提供的电功率越大，电源把其他形式的能转化为电能的能力越强。

例题：我国大部分电器的额定电压是 220 V。

(1) 一台电动机的线圈电阻 $R_1 = 0.2 \, \Omega$ ，正常工作时通过的电流 $I_1 = 20 \, \text{A}$ ，求每秒电流所做的功以及线圈上每秒内产生的热量。

(2) 电饭煲正常工作时的电流 $I_2 = 5 \, \text{A}$ ，其发热盘的电阻 $R_2 = 40 \, \Omega$ ，其消耗的电能大部分转化为哪种能？

分析：本题的电路中有电动机，不是纯电阻电路，因此电功与电阻产生的热量是不相等的。

解：(1) 电流所做的功 $W = UI_1 t = 220 \times 20 \times 1 \, \text{J} = 4400 \, \text{J}$ 。

线圈电阻产生的热量 $Q = I_1^2 R_1 t = 20^2 \times 0.2 \times 1 \, \text{J} = 80 \, \text{J}$ 。

(2) 电阻产生的热量 $Q = I_2^2 R_2 t = 5^2 \times 40 \times 1 \, \text{J} = 1000 \, \text{J}$ 。

电功 $W = UI_2 t = 220 \times 5 \times 1 \, \text{J} = 1100 \, \text{J}$ 。

通过计算，可知电动机消耗的电能远大于线圈电阻上产生的热量，大部分电能被转化为机械能；而电饭煲则把大部分电能转化为电阻上的热量。



实践与拓展

收集新型电热器的资料，了解其发热原理。

练习

1. 如图 5-1-4 所示是三种发光原理不同的照明灯具, LED 灯是直接把电转化为光, 荧光灯是电磁辐射后发光, 白炽灯是由灯丝通电加热发光. 在同等亮度下, 白炽灯消耗的电能是荧光灯的 5 倍, 是 LED 灯的 15 倍.



图 5-1-4

(1) 选用哪种照明灯具更加节能和环保, 为什么?

(2) 如果三种照明灯具的额定电压相同, 则这三种灯具在相同时间内电流所做的功之比为多少?

2. 一台标有“220 V 66 W”的电风扇, 线圈的电阻为 $20\ \Omega$.

(1) 当加上 220 V 电压, 求电风扇消耗的功率、转化为机械能的功率和发热功率.

(2) 如果接上 220 V 的电源后, 扇叶被卡住, 不能转动, 求电风扇消耗的功率和发热功率.

3. 电池的电能由其内部发生的化学反应产生. 然而, 这种反应会导致产生无法完全消除的小电阻. 将电池视为由一个理想电压源和一个小电阻串联组成的. 在手电筒中有两节串联的电池, 如图 5-1-5 所示. 每节电池的电压均为 1.5 V, 内阻为 $0.2\ \Omega$, 灯泡的电阻为 $22.0\ \Omega$.

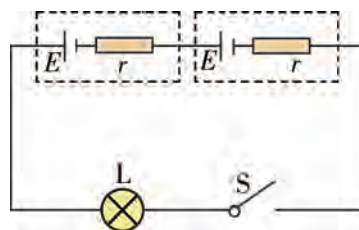


图 5-1-5

(1) 通过灯泡的电流是多少?

(2) 灯泡的功率是多少?

(3) 如果电池没有内阻, 那么功率将会增加多少?

4. 用一条标有“220 V 400 W”的电炉丝来将一壶水加热煮开, 为了缩短煮水的时间, 一名同学建议将电炉丝剪短一段后使用, 另一名同学则建议将电炉丝剪成长度相等的两段, 然后并联起来使用. 请分析评价这两名同学的做法.

第二节

能源的利用方式



能源是整个世界发展和经济增长最基本的驱动力。在当前世界能源结构中，人类所利用的能源主要是石油、煤炭、天然气等化石能源。但是化石燃料的使用给人类带来了环境污染和能源短缺的现实压力，使得全世界开始关注新能源，并希望新能源能够克服化石燃料燃烧带来的污染和可能出现的能源枯竭问题。水能、风能、太阳能和核能等作为新能源，已经是当前国际能源开发利用领域中的热点。了解能源的开发和利用现状与前景，对我国的能源开发与建设具有重大的意义。

水能

水能是一种能源，是指水体的动能、势能和压力能等能量资源。广义的水能资源包括河流水能、潮汐水能、波浪能、海流能等能量资源；狭义的水能资源指河流的水能资源。目前最易开发和利用的比较成熟的水能是河流水能，主要用于水力发电。

水力发电过程其实就是一个能量转换的过程。通过在天然的河流上修建拦水建筑物，积蓄势能，然后通过引水管道将高位的水引导到低位置的水轮机，使水的势能转变为水轮机的机械能，带动与水轮机同轴的发电机发电，从而实现从水能到电能的转换。发电机发出的电再通过输电线路送往用户，形成整个水力发电到用电的过程。如图 5-2-1 所示。

水能资源最显著的特点是可再生、无污染。开发水能对江河的综合治理和综合利用具有积极作用，对促进国民经济发展，改善能源消费结构，缓解由于消耗煤炭、石油资源所带来的环境污染有重要意义，因此世界各国都把开发

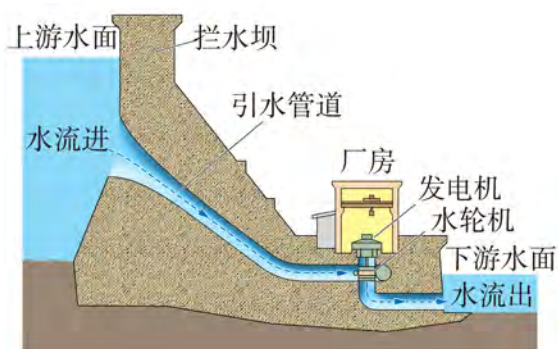


图 5-2-1 水力发电站原理图



图 5-2-2 三峡水电站

水能放在能源发展战略的优先地位. 我国三峡水电站（如图 5 - 2 - 2 所示）是目前世界上规模最大的水电站，它在国民经济中发挥着巨大的作用. 截至 2018 年底，我国水电总装机容量达到 3.52 亿千瓦，年发电量 1.23 万亿千瓦时，水电装机容量和年发电量均居世界第一.

风能

风能是因空气流动而提供给人类的一种可利用的能量. 人类利用风能具有悠久的历史，早在古代，人们就已利用风车将收集到的机械能用来磨碎谷物和抽水. 到了现代，人们开始利用涡轮叶片将气流的机械能转化为电能.



观察与思考

如图 5 - 2 - 3 所示是风力发电原理示意图，请简述风力发电工作原理.

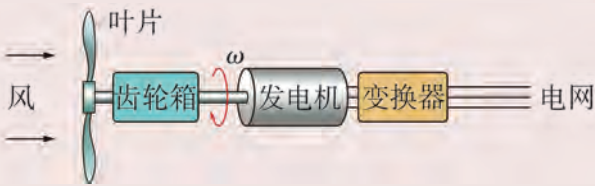


图 5 - 2 - 3 风力发电原理示意图

风力发电是利用风力带动风车叶片旋转，把风的动能转变为风车叶片的机械能，发电机在风车叶片转轴带动下旋转发电，最终经变换器转换成合适的电压送入电网. 依据目前的风车技术，大约 3 m/s 的风速（微风的角度）便可用于风力发电.

风能是一种清洁、安全、可再生的绿色能源，利用风能对环境无污染，对生态无破坏，环保效益和生态效益良好，对于人类社会可持续发展具有重要意义. 我国风能资源丰富，目前可开发利用的风能储量约 10 亿千瓦，其中，陆地上风能储量约 2.53 亿千瓦，海上可开发和利用的风能储量约 7.50 亿千瓦. 截至 2018 年底，我国风力发电总装机容量达到 1.84 亿千瓦，预计到 2020 年将达 2.10 亿千瓦，届时在全国电力能源结构中的比例将占到 2%.



图 5 - 2 - 4 新疆达坂城风力发电

太阳能

太阳表面温度高达 6000 ℃，以辐射方式向宇宙空间释放出巨大的能量. 据估计，每三天太阳向地球辐射的能量，就相当于地球所有矿物燃料能量的总和. 对太阳能的利用主要有太阳能的光热转换、光电转换和光化学转换三种.

观察与思考

如图 5-2-5 所示是太阳能热水器原理示意图,请简述太阳能热水器的工作原理.

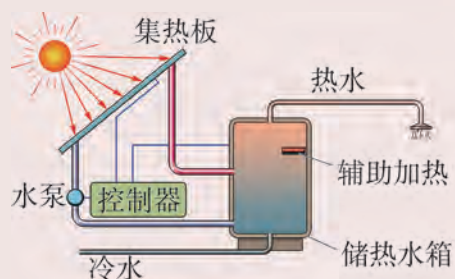


图 5-2-5 太阳能热水器原理示意图

太阳能热水器是一种将太阳能转换成热能的加热装置,如图 5-2-5 所示,冷水通过管道进入太阳能热水器内,流过集热板,集热板能收集太阳能,将太阳能转化为热能,然后把冷水加热。由于冷水的密度比热水的密度大,热水会自动往上升,然后形成一个循环动力,水就在集热板处逐渐升温,达到一定温度后就能进入储热水箱供热水。

太阳能是一种取之不尽、用之不竭且对环境无污染的能源。利用太阳能可以建成温室大棚、太阳房等节能建筑;太阳能集热器作为热源可代替传统锅炉;使用太阳能热水器和太阳灶等,可节约生活燃料;太阳能还可用来淡化海水、制冷、发电。利用太阳能电池直接把太阳能转换为电能,是利用太阳能最有前途的方式。太阳能电池已被成功用于人造地球卫星,现在开始转向地面应用。利用太阳能发电,可省去费用庞大的输电设备,随着太阳能电池转换效率的提高及制作太阳能电池成本的降低,其发电成本将大大低于目前其他方式的发电成本,前景非常诱人。可以预见,太阳能将成为 21 世纪人类的一种主要能源。截至 2018 年底,我国太阳能发电总装机容量为 1.74 亿千瓦。

核能

核能(或称原子能)是一种储存在原子核内部的能量,原子核发生核反应时,会释放巨大的能量。核裂变和核聚变是核反应的两种方式。由较重的原子核(主要是指铀核或钚核)分裂成两个或多个质量较轻的原子核的反应叫作核裂变,如图 5-2-6 所示。由两个质量较轻的原子核(如氘或氚)在一定条件下聚合成一个较重的原子核的反应叫作核聚变,如图 5-2-7 所示。

目前核能主要用于发电。核能发电是利用核反应堆中核裂变所释放出的热能进行发电的方式。它

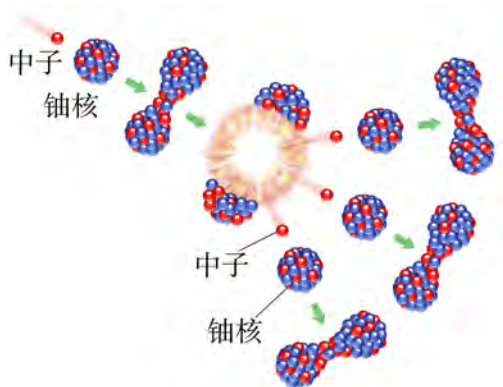


图 5-2-6 核裂变

与火力发电极其相似，只是以核反应堆及蒸汽产生器来代替火力发电的锅炉，以核裂变能代替矿物燃料的化学能。如图 5-2-8 所示是核能发电基本结构示意图。它主要由裂变反应核、核蒸汽供应系统、汽轮发电机系统及其他辅助系统组成。

核能作为清洁、高效的新能源，在这几十年间得到了快速的发展。发展核能发电有助于满足人们的电力需求，优化能源结构，保障能源安全。我国是继美国、英国、法国、俄罗斯、加拿大、瑞典之后世界上第七个能够自行设计、建造核电站的国家。截至 2018 年底，我国投入商业运营的核电机组共 44 台，装机容量 4465 万千瓦，年发电量为 2944 亿千瓦时。我国核电已具备了加快发展的条件，到 2020 年，核电运行装机容量争取达到 4000 万千瓦，在建机组容量争取达到 1800 万千瓦。

此外，生物质能、地热能、海洋能、氢能、可燃冰等能源开发和利用前景广阔，人类只要适度开发、合理利用，地球永远是我们美丽的家园。

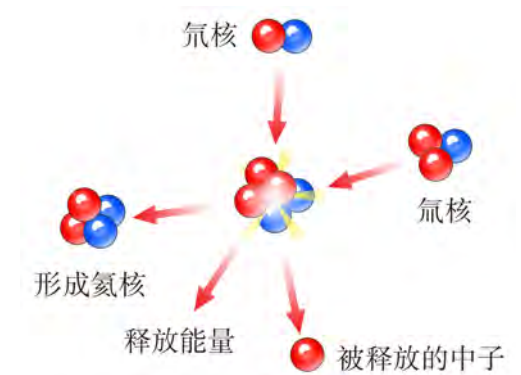


图 5-2-7 核聚变

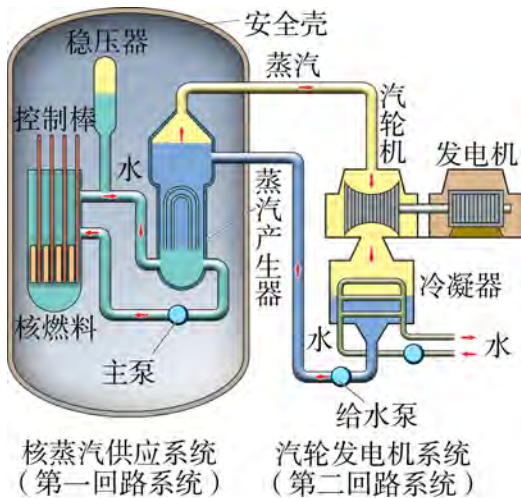


图 5-2-8 核能发电基本结构示意图

实践与拓展

1. 查询一个火力发电厂的发电量和单位发电量煤耗，计算该厂的效率，估算该发电厂每日发电的用煤量。
2. 设计、交流和讨论利用太阳能取暖的方案，考虑周围环境对太阳能利用的影响。
3. 收集资料，了解人类利用核裂变和核聚变释放核能的前景与挑战。

我国成功试开采可燃冰

可燃冰是由天然气和水在高压低温状态下形成的固体结晶物质，学名是天然气水合物，外貌多呈白色、淡黄色、琥珀色和暗褐色。纯净的天然气水合物形似冰雪，能被直接点燃，故被形象地称为“可燃冰”。可以说，可燃冰就像一个天然气的压缩包，包含数量巨大的天然气。据理论计算， 1 m^3 的可燃冰可释放出

164 m³ 的甲烷气体和 0.8 m³ 的水，而且燃烧后仅会生成少量的二氧化碳和水，不会像煤炭和石油产品燃烧时释放出粉尘、硫化物、氮氧化物等环境污染物，所以可燃冰被誉为“21 世纪最理想的清洁能源”，今后很有可能成为化石能源的替代能源。据保守估计，我国可燃冰的总资源量约是常规天然气、页岩气等资源量总和的两倍，按当前的消耗水平，可满足我国近 200 年的能源需求。



图 5-2-9 可燃冰

由于绝大部分的可燃冰深藏于海底或冻土层，所以开采难度十分巨大。目前，日本、加拿大等国都在加紧对这种未来能源进行试开采，但因种种原因未能实现或未达到连续产气的预定目标。如何安全、经济地开采可燃冰，并且从中分离出甲烷气体，依然是目前各国研究和利用可燃冰的核心难题。

2017 年 5 月，国土资源部中国地质调查局组织实施了我国海域可燃冰试采作业，投入了大量国产化装备，包括我国最新研制成功的世界最大、钻井深度最深的海上钻井平台“蓝鲸一号”。该平台是目前全球最先进的双井架半潜式钻井平台，可适用于全球任何深海作业，堪称“大国重器”。同月 18 日，试采作业成功实现连续 8 天稳定产气。这使我国勘察和开采可燃冰的核心技术得到验证，也标志着中国在海底可燃冰的研究和勘探领域的综合实力达到世界顶尖水平。



图 5-2-10 “蓝鲸一号”海上钻井平台



练习

1. 待机功率是指电器在接通电源但未开机时的功率。
 - (1) 估算你家里的电器一年中由于处于待机状态而损耗的电量。
 - (2) 结合生活实际，讨论可采取哪些方式节能。
2. 查阅相关资料，了解我国目前已建成并运转的核电站，它们都是利用什么反应产生的能量来发电的。

第三节 | 能量的转化与守恒

我们生活在一个复杂多变的世界中，物质、能量、信息都是构成世界的基本要素。能量无处不在，能量转化无时不有。那么，常用的能量有哪些？能量的转化是如何实现的？能量转化遵循什么规律呢？能量会永恒存在吗？

各种各样的能量

除了我们已学过的机械能、电能和核能，自然界中还存在着不同形式的能量，如表 5-3-1 所示。

表 5-3-1 不同形式的能量

能量形式	含 义	示 例
机械能	机械能是与物体的运动或位置高度、形变相关的能量，可以表现为动能，也可以表现为势能	行驶的汽车、被拉开的弓、声音等
内能	物质中分子的动能和势能总和	自然界的一切物质
电能	电能是与电有关的能量	工作中的发电机、电池等
电磁能	电磁场所具有的能量	无线电波、可见光、紫外线、红外线等
核能	通过核反应（裂变或聚变）由原子核释放的能量	原子弹、氢弹等
化学能	发生化学变化时释放出来的能量	石油、煤、天然气等

能量的转化和转移

太阳能是地球上最主要的能量源泉，一切生物都离不开太阳的光和热。我们日常消耗的能量大部分是由太阳能辐射到地球后转化而来的。



讨论与交流

如图 5-3-1 所示是太阳能转化为其他形式能量的过程示意图。图中存在着哪些形式的能量？简要写出太阳能转化为其他形式能量的过程。

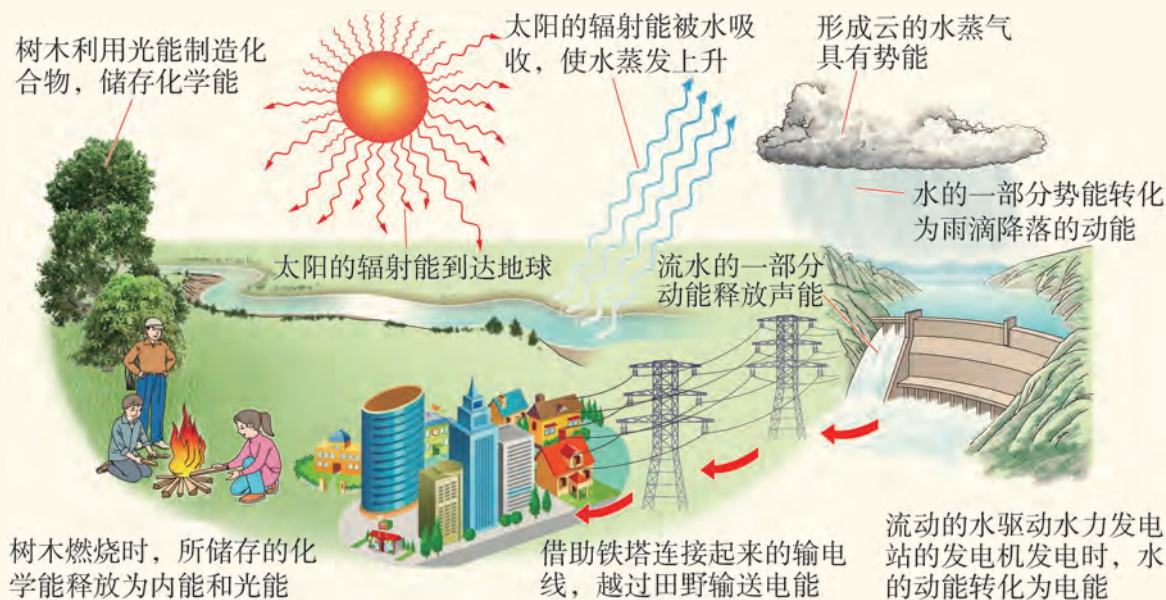


图 5-3-1 太阳能转化为其他形式能量的过程示意图

能量的存在形式多种多样，而且不同形式的能量可以相互转化。水从高处流向低处过程中，通过发电机将水的机械能转化为电能，又通过电动机将电能转化为机械能；化学电池在充电过程中将电能转化为化学能，使用时又将化学能转化为电能；树木利用光能制造化合物，储存化学能，燃烧时又将化学能转化为光能和内能。能量在被利用的过程中，可利用的效率不断下降。

能量守恒

我们知道，在只有重力做功的情形下，动能和势能可以相互转化，在转化过程中机械能总量不变。那么，不同形式的能量在相互转化的过程中，能的总量是否也保持不变？

在闭合电路中，根据闭合电路的欧姆定律 $E = U + Ir$ ，可得 $EIt = UIt + I^2rt$ ，其中， EIt 等于电源产生的电能， UIt 为电源对外输出的能量， I^2rt 为电源内阻消耗的内能。上式表明，电能转化过程中能的总量保持不变，即能量守恒。

做功和热传递都是能量变化的量度。做功或热传递提供给一个物体多少能量，物体内能就增加多少，能量在转化或转移中守恒。不仅机械能，其他形式的能都可以和内能互相转化。例如，通过电流的导体温度升高，电能转化为内能。

大量事实表明，能量既不会凭空产生，也不会凭空消失，它只能从一种形式转化为其他形式，或者从一个物体转移到别的物体；在转化和转移过程中其总量不变。这就是能量守恒定律。

自从能量守恒定律被发现以来，小到基本粒子，大到天体所发生的自然现象，都遵守能量守恒定律。

能量转化（转移）的方向性

日常经验告诉我们，自然界中有些变化可以自发地进行，而另一些却不能，必须借助外界的作用才能实现。

热传导过程是有方向性的。热量从高温物体向低温物体的热传导过程是能自发进行的，而其相反方向的过程是不能自发进行的。要使热量从低温物体传给高温物体，必须借助外界的作用。例如，电冰箱消耗了电能，对冷却系统做了功，可以不断地把热量从冰箱内部的低温区传给外界的空气，以维持电冰箱内部的低温。一旦切断电源，外界的热量就会自发地传给电冰箱，使其温度升高。

一个物体在水平面上运动，由于克服摩擦力做功，最后会停下来。在此过程中，物体的机械能全部转化为内能，这个过程是自发进行的。但人们从来没有发现静止在地面的物体，靠自行降低温度而自发地运动起来。这表明，机械能和内能的转化过程也是有方向性的。机械能全部转化为内能的过程是可以自发进行的，而其相反方向的过程是不能自发进行的。

理论和实践研究表明，在自然界的一切自发过程中，能量的转化（转移）都是有方向性的，但都不违反能量守恒定律。

抽水蓄能电站

抽水蓄能电站（如图 5-3-2 所示）是在负荷低谷时，通过抽水将电力系统难以消耗的电能转换为势能；在负荷高峰或系统需要时，通过发电将势能转换为系统需要的电能。抽水蓄能电站在电力系统中主要承担调峰、填谷、调频、调相和紧急事故备用任务，相当于特高压清洁能源输送的“蓄电池”，具有促进新能源消纳、减少污染排放等优点。

截至 2017 年 5 月，我国抽水蓄能电站装机容量达到 2773 万千瓦，在建机组容量 3095 万千瓦，我国抽水蓄能在建和运行电站机组容量均居世界第一。



图 5-3-2 浙江省安吉县天荒坪抽水蓄能电站



练习

1. 下列各物体或人具有哪些形式的能量？

- A. 被拉长的橡皮筋 B. 被拦河坝挡住的河水 C. 正在空中下落的伞兵
D. 在路上行走的人 E. 被拧紧的钟表发条 F. 被抽水机抽到高处的水

2. 当翠鸟发现鱼儿露出水面时，翠鸟就蹬开苇秆，像箭一样飞过去，叼起小鱼贴着水面往远处飞走。只见苇秆还在摇晃，水波还在荡漾。请说出翠鸟在这一系列动作中涉及哪些能量转化。

3. 某同学认为家用电冰箱可以使食物的温度降低，因此我们可以打开电冰箱的门，利用电冰箱散发的“冷气”给房间降温，你认为可以吗？

第四节

能源与环境



从古人的“钻木取火”到蒸汽机的发明，再到各种电器设备的广泛应用，无不伴随着能源的利用和开发；社会的文明进步和经济繁荣，无不与能源的变革和技术的发展息息相关。但随着社会的发展，人类对能源的需求越来越大，能源的消耗不但使自然资源锐减，而且带来了诸多环境问题，能源危机和环境污染都是人类目前面临的巨大挑战。

能源的分类

能源一般是指在一定条件下能够提供可利用能量的物质资源。它是经济发展的原动力、现代文明的物质基础。

能源种类繁多，根据不同的划分方式，能源也可分为不同的类型。按能源的基本形态分类，有一次能源（包括可再生能源和不可再生能源）和二次能源；根据能源消耗后是否造成环境污染，可分为污染型能源和清洁型能源；根据能源使用的类型，又可分为常规能源和新型能源或商品能源和非商品能源……这里重点了解可再生能源和不可再生能源。

人们对一次能源进一步加以分类，将能够在短期内重新形成的或者循环利用的能源称为可再生能源，如太阳能、风能、水能、地热能等；将在短期内不可以再次得到、一旦利用了就很难或者不能再次得到的能源称为不可再生能源，如煤炭、石油、天然气等。可再生能源具有清洁、环保、持续、长久的优势，成为人们应对能源短缺、气候变化与节能减排的重要选择之一，越来越受到强烈的关注。



图 5-4-1 可再生能源产业



讨论与交流

1. 请列举生产生活中的能源并进行分类。
2. 讨论家里一天所用的能量哪些来自可再生能源，哪些来自不可再生能源。

能源与环境

在由简单到复杂、由低级到高级的发展过程中，人类社会创造了前所未有的文明，但同时也带来了一系列环境问题。能源是人类社会赖以生存和发展的重要物质基础，而由能源开发利用所造成的环境污染，则是导致环境问题日益严重的主要原因。

对大气环境的影响 大气环境和人类生存密切相关，大气环境的每一个因素几乎都可以影响到人类，能源开发利用排出的有害气体可以改变原有空气的组成，并引起污染，造成全球气候变化。化石燃料的开采、运输、加工、转换和利用都会污染大气环境，尤其是化石燃料的燃烧排放。

对生态环境的影响 不合理开发利用能源造成的生态环境破坏主要有对动植物、微生物、土地、海洋、河流水分等天然物质要素的破坏，以及对地面、地下的各种建筑物和相关设施等人工物质要素的负面影响。如随意砍伐森林、过度开采矿产造成生物多样性减少、水土流失以及土地荒漠化，煤炭开采引发矿区土体坍塌、地表沉陷、地质灾害频发，以及洗煤水污染、煤矸石堆积等。

对居住环境的影响 能源开发利用干扰了人类生活的空间场所，造成居住环境偏离人们理想中的居住环境，甚至导致人类生存环境的恶化。如能源的过度开发利用导致空气能见度低，引起酸雨进而腐蚀建筑、抑制植物生长、间接加剧温室效应等，导致环境质量下降。

20 世纪六七十年代人们对环境问题的界定主要停留在环境污染或公害的层面上，如大气污染、放射性污染等，而对于地震、水灾、旱灾等则认为纯属于自然灾害。近些年来，经济的迅速发展，各种自然灾害频发乃至加剧，使得人们意识到能源过度开发利用也是诱发或导致灾害频发的原因之一。



图 5-4-2 大气污染



图 5-4-3 过度砍伐森林



图 5-4-4 居住环境质量下降



讨论与交流

1. 如何看待能源开发与社会发展需求之间的关系？
2. 如何看待和评价当前能源的过度开发和利用现状？

环境污染的危害

环境污染不仅给生态系统造成直接的破坏和影响,而且对人类社会也造成间接的危害。温室效应、酸雨和臭氧层破坏就是由大气污染衍生出的环境效应。这种由环境污染衍生的环境效应具有滞后性,往往在污染发生的当时不易被察觉或预料到,然而一旦发生就表示环境污染已经发展到相当严重的地步。当然,环境污染最直接、最容易被人们感受到的后果是使人类生存环境质量下降,影响人类的生活质量、身体健康和生产活动。例如城市的空气污染造成空气污浊,人们的发病率上升;水污染使水环境质量恶化,饮用水源的质量普遍下降,威胁人的身体健康,引起胎儿早产或畸形等。严重的污染事件不仅带来健康问题,也影响社会安定。

环境污染问题在全球范围内普遍存在,并随着经济和贸易的全球化日益呈现国际化趋势。某些国家和地区的环境问题,其影响和危害可能波及其他国家和地区,如酸雨、海洋污染、有毒化学品和危险废物越境转移等。尽管世界各国和地区已经重视全球气候变化、臭氧层耗损、生物多样性锐减、水污染和水资源短缺、土地沙漠化、水土流失等环境问题,也做出了一些努力去试图改善,但情况并没有得到较大的好转。因此,我们要充分认识到环境问题与人类的未来发展和生死存亡息息相关,一起行动起来努力改善地球环境,利用科学技术发展绿色经济,加强环境保护教育,改变生活和消费观念。



讨论与交流

列举生产生活中造成环境污染的例子,并与同学交流如何减少污染。

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,解决现实或潜在的环境问题,协调人类与环境的关系,保护人类的生存环境,保障经济社会的可持续发展已成为当务之急。

当前,环境科技已成为人们促进可持续发展的重要手段之一,遥感技术、核技术、高梯度磁分离技术、活性炭技术、生物工程技术等新技术在环境保护中的广泛应用,为环境问题的解决提供了有效途径。例如,利用遥感技术,我们可以监测城市中的大气污染、水污染、地面污染、固体废物堆场污染和热污染,进行土壤侵蚀与地面水污染负荷产生量估算,生物栖息地评价和保护,工程选址以及防护林保护规划和建设。如图 5-4-5 所示是通过遥感卫星监测到的 1989—2016 年广东省的空气质量情况,图中显示自 2007 年以来,珠三角地区灰霾日数呈现波动性下降,这些都为广东省大气污染治理提供必要的数据支撑。

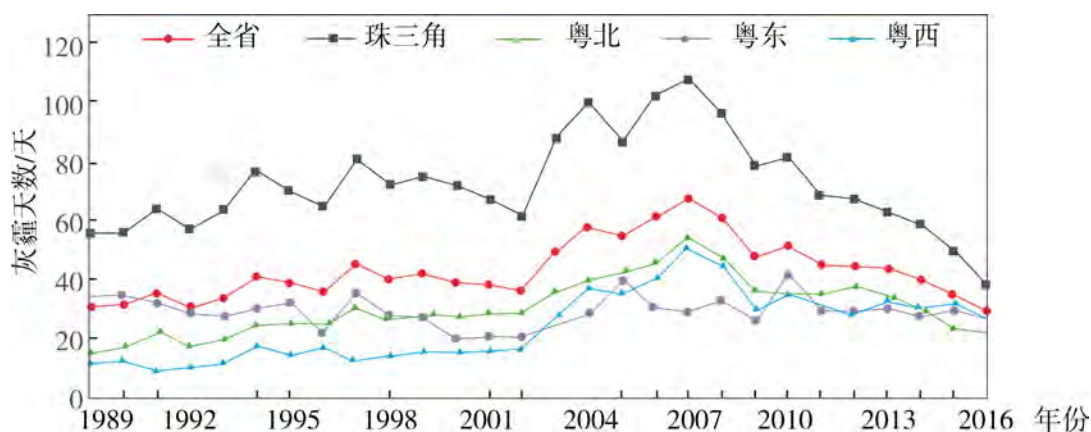


图 5-4-5 通过遥感卫星监测到的 1989—2016 年广东省的空气质量情况

在生产和生活中，我们可以从多方面保护我们的环境。

防治生产和生活的污染 包括防治工业生产排放的“三废”（废水、废气、废渣）、粉尘、放射性物质以及产生的噪声、振动、恶臭和电磁微波辐射，交通运输活动产生的有害气体、液体、噪声，海上船舶运输排出的污染物，工农业生产和人民生活使用的有毒有害化学品，城镇生活排放的烟尘、污水和垃圾等造成的污染。

防止建设和开发的破坏 包括防止由大型水利工程、铁路、公路干线、大型港口码头、机场和大型工业项目等工程建设对环境造成的污染和破坏，农垦和围湖造田活动、海上油田、海岸带和沼泽地的开发、森林和矿产资源的开发对环境的破坏和影响，新工业区、新城镇的设置和建设等对环境的破坏、污染和影响。

保护自然环境 包括对珍稀物种及其生活环境、特殊的自然发展史遗迹、地质现象、地貌景观等提供有效的保护。另外，城乡规划，控制水土流失和沙漠化、植树造林、控制人口的增长和分布、合理配置生产力等，也都属于环境保护的内容。



讨论与交流

1. 讨论在生活中可采取哪些方式节能。
2. 从能源的角度讨论为什么要对生活垃圾进行分类。



图 5-4-6 生活垃圾分类

人与自然是生命共同体的科学自然观，“绿水青山就是金山银山”的绿色发展观，良好生态环境是最普惠的民生福祉的基本民生观，统筹山水林田湖草系统治理的整体系统观，实行最严格生态环境保护制度的严密法治观，建设清洁美丽世界的共赢全球观，是我国生态文明建设的重要战略思想。坚持人与自然和谐共生，全方位开展生态环境保护和美丽中国建设需要我们每一个人从自身做起。树立环保意识，实践环保行为，是我们每一个人义不容辞的责任。



实践与拓展

收集资料，调查当地大气污染、水污染、噪声污染等的主要污染源，了解预防方法。



练习

1. 能源可分为一次能源和二次能源。直接取之于自然界，未经人类加工转换的能源称为一次能源，如煤、石油、天然气、水能、风能、太阳能、生物能、海洋能等。从一次能源直接或间接转化而来的能源称为二次能源，如电能、氢能、焦炭等，下面按照表 5-4-1 中给出的能源分类法，填写能源的名称。

表 5-4-1

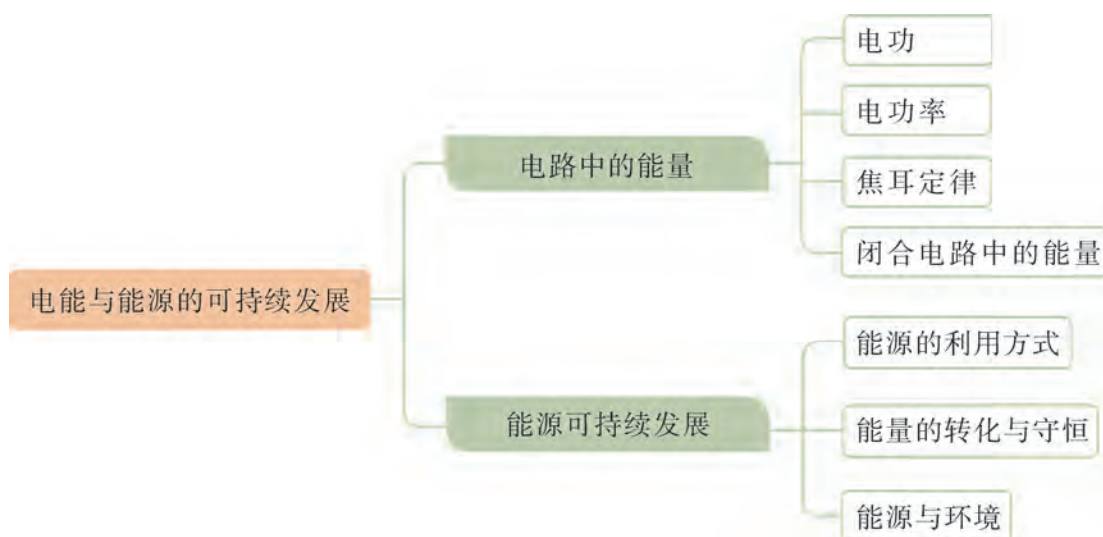
类别	一次能源	二次能源
可再生能源		
不可再生能源		
未来的理想能源		

2. 以家庭中与热有关的一个用电器的使用情况为例，讨论如何使用才能节约能源。

本章小结

知识结构

参考下面的知识结构，请进一步梳理本章的知识。



回顾与评价

1. 通过本章的学习，你对能量有哪些新的认识？在解决实际问题中有哪些作用？
2. 尝试从能量转化与守恒的视角分析实际问题，并体会其中所蕴含的守恒思想的价值。
3. 通过本章的学习，你对能源开发与利用有哪些新的认识？我们该如何在保护环境、节约能源和促进可持续发展方面做出贡献？

习题五

1. 生态文明要求人们注重环保和节能，下列获得电能的方法中，不符合低碳要求的是 ()。
- A. 火力发电 B. 风力发电 C. 太阳能发电 D. 水力发电
2. 表 5-1 所示是某封闭型贮水式电热水器铭牌上所列的主要技术参数，那么在额定电压下处于加热状态时，通过该电热水器的电流约为 ()。

表 5-1

额定容量	54 L	最高水温	75 ℃
额定功率	1500 W	额定压力	0.7 MPa
额定电压	220 V	电器类别	I 类

- A. 6.8 A B. 0.15 A C. 4.4 A D. 0.23 A
3. 电吹风中的电动机带动风叶转动，电热丝给空气加热，生成的热风可将头发吹干。设电动机线圈的电阻为 R_1 ，它与电热丝的电阻 R_2 串联，接到直流电源上，电吹风两端电压为 U ，通过的电流为 I ，消耗的电功率为 P ，以下选项正确的是 ()。
- A. $IU > P$ B. $IU = P$
- C. $P > I^2(R_1 + R_2)$ D. $P = I^2(R_1 + R_2)$
4. 如图 5-1 所示是一个家用电熨斗电路结构图，通过改变内部接线方式可以使电熨斗处于断开状态或获得中、低、高三个不同的温度挡。下列接线方式中，能获得低挡温度的是 ()。

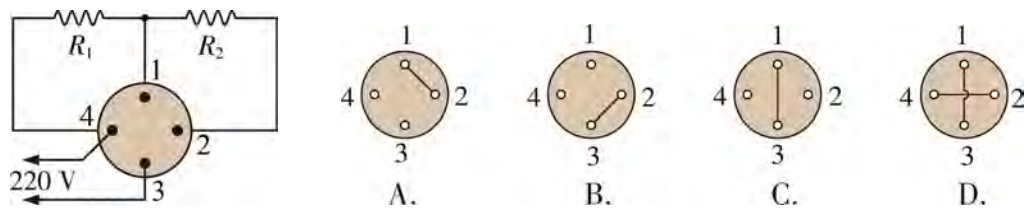


图 5-1

5. 电饭煲工作时有两种状态：一种是煲内水烧干前的加热状态，另一种是煲内水烧干后的保温状态。如图 5-2 所示是电饭煲电路原理示意图，S 是用感温材料制造的开关。下列说法正确的是 ()。
- A. 当开关 S 接通时电饭煲为保温状态，当开关 S 断开时电饭煲为加热状态

B. 当开关 S 接通时电饭煲为加热状态, 当开关 S 断开时电饭煲为保温状态

C. 要使 R_2 在保温状态时的功率为加热状态时的一半, $R_1 : R_2$ 应为 $2 : 1$

D. 要使 R_2 在保温状态时的功率为加热状态时的一半, $R_1 : R_2$ 应为 $(\sqrt{2} - 1) : 1$

6. 某实验小组设计如图 5-3 所示的实验装置电路图, 探究电机中的能量转化过程.

(1) 简要实验步骤:

①把玩具小电动机固定在木板上, 然后把木板固定在方座支架的底座上, 保证不倾斜.

②在方座支架顶端装上十字夹. 把定滑轮固定在横杆上, 再将细线一头系在电机的转轴上, 并按电机的转动方向先绕两圈, 然后把另一头穿过定滑轮, 钩挂在地面上的钩码上.

③按照电路图把电动机、开关、小灯泡、电源连接起来.

④实验时用开关使电机接通电源, 调节滑动变阻器, 使质量为 m 的钩码缓缓上升 (可看成匀速), 用秒表测量钩码从地面上升到最高点的时间 t , 记录电压表和电流表测量电动机的输入电压 U 和电流 I , 断开开关.

⑤将开关扳向小灯泡一侧, 使小灯泡与电动机构成闭合电路, 由静止释放钩码, 同时注意观察小灯泡的发光情况.

(2) 分析与论证:

①接通电源时, _____ 做功使电动机转动, 牵引重物上升, 将 _____ 能转化为 _____ 能; 当开关扳向小灯泡一侧, 释放钩码, 钩码在下落过程中, 灯泡发光, 这一过程将 _____ 能转化为 _____ 能, 表明不同形式能量之间可以 _____.

②电动机消耗的电能 $E =$ _____, 用刻度尺量出重物上升的高度 h , 则电动机的效率为 $\eta =$ _____, η _____ 1 (选填 “ $>$ ” “ $=$ ” 或 “ $<$ ”), 说明 _____.

7. 水能是可再生能源, 可为人类提供清洁的能源. 如果一水力发电站水的平均流量为 Q (m^3/s), 落差为 h , 发电效率为 η , 则全年发电量是多少千瓦时?

8. 在如图 5-4 所示的电路中, 直流发电机 $E = 250 \text{ V}$, $r = 3 \Omega$, $R_1 = R_2 = 1 \Omega$, 电热器组中装有 50 个完全相同的电热器, 每个电热器的额定电压为 200 V , 额定功率为 1000 W , 其他电阻不计, 并且不计电热器电阻随温度的变化. 问:

(1) 当接通几个电热器时, 实际使用的电热器是否都能正常工作?

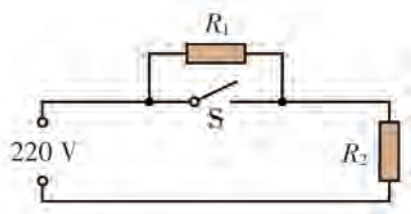


图 5-2

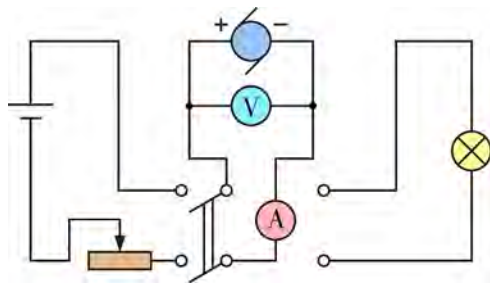


图 5-3

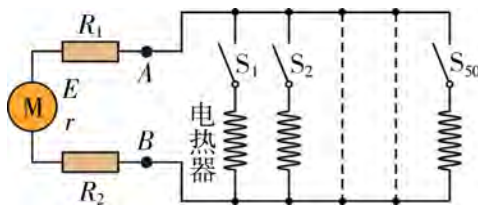


图 5-4

- (2) 当接通几个电热器时, 发电机输出功率最大?
- (3) 当接通几个电热器时, 电热器组加热物体最快?
- (4) 当接通几个电热器时, 电阻 R_1 、 R_2 上消耗的功率最大?
- (5) 当接通几个电热器时, 实际使用的每个电热器中电流最大?

9. 某辆以蓄电池为驱动能源的电动汽车的总质量 $m = 3 \times 10^3 \text{ kg}$. 当它在水平路面上以 $v = 36 \text{ km/h}$ 的速度匀速行驶时, 驱动电机的输入电流 $I = 50 \text{ A}$, 电压 $U = 300 \text{ V}$. 在此行驶状态下:

(1) 求驱动电机的输入功率 $P_{\text{电}}$.

(2) 若驱动电机能够将输入功率的 90% 转化为用于牵引汽车前进的机械功率 $P_{\text{机}}$, 求汽车所受阻力与车重之比 (g 取 10 m/s^2).

(3) 设想改用太阳能电池给该车供电, 其他条件不变, 已知太阳辐射的总功率 $P_0 = 4 \times 10^{26} \text{ W}$, 太阳到地球的距离 $r = 1.5 \times 10^{11} \text{ m}$, 太阳光传播到达地面的过程中大约有 30% 的能量损耗, 该车所用太阳能电池的能量转化效率约为 15%. 求所需的太阳能电池板的最小面积. 结合计算结果, 简述对设想的思考.

10. 风能是一种能被大规模开发的可再生清洁能源. 风力发电机是将风能 (气流的动能) 转化为电能的装置, 其主要部件包括风轮机叶片、齿轮箱、发电机等, 如图 5-5 所示.

(1) 利用总电阻 $R = 10 \Omega$ 的线路输送风力发电机产生的电能, 输送功率 $P_{\text{总}} = 300 \text{ kW}$, 输电电压 $U = 10 \text{ kV}$, 求导线上损失的功率与输送功率之比.

(2) 风轮机叶片旋转所扫过的面积为风力发电机可接收风能的面积, 设空气密度为 ρ , 气流速度为 v , 风轮机叶片长度为 r , 求单位时间内流向风轮机的风能 $P_{\text{风}}$. 在风速和叶片数确定的情况下, 要提高风轮机单位时间接收的风能, 可采取哪些措施?

(3) 已知风力发电机输出的电功率 P 与 $P_{\text{风}}$ 成正比, 某风力发电机在风速 $v_1 = 9 \text{ m/s}$ 时, 能够输出电功率 $P_1 = 540 \text{ kW}$. 我国某地区风速不低于 $v_2 = 6 \text{ m/s}$ 的时间每年约 5000 h, 试估算这台风力发电机在该地区的最小年发电量是多少千瓦时.

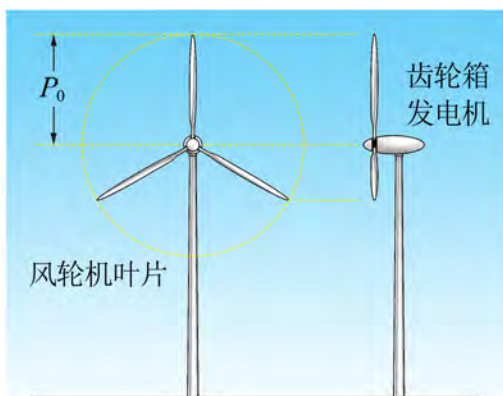
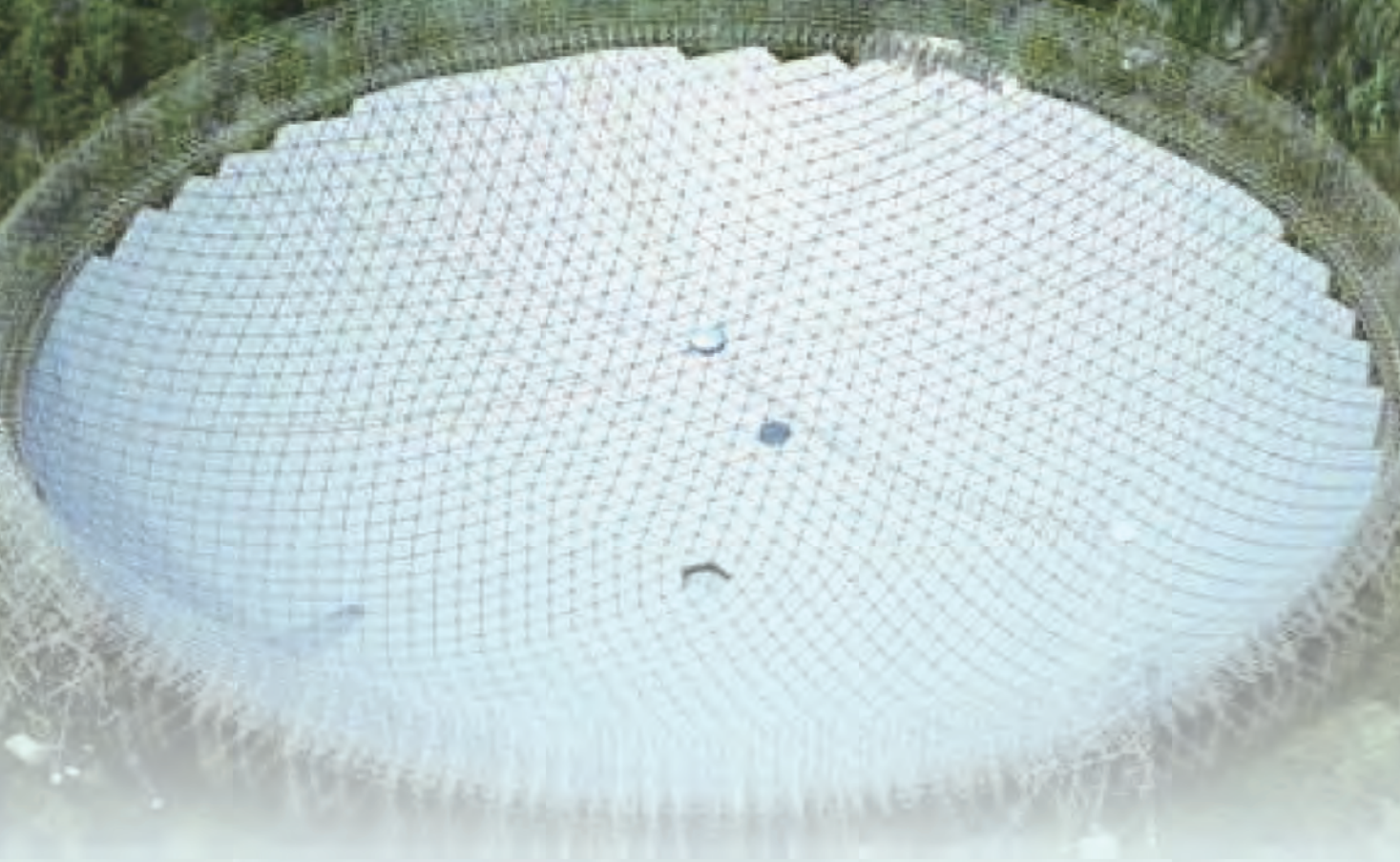


图 5-5



第六章 电磁现象与电磁波

1820年，丹麦科学家奥斯特发现了电流的磁效应，打开了寻找电和磁联系的大门，从此产生了电磁学。英国科学家法拉第引入了“场”的概念，经过十年努力，终于观察到电磁感应现象，发现了磁场产生电流的条件和规律，大大推进了电磁学的研究进程。此后，电磁学的理论和技术不断发展，并且在生产和生活中得到广泛的应用。

电容器和电感器简单连接成电路，能实现电能与磁能的相互转化，激发电磁波，推动技术的进步，促进电磁研究的发展。

麦克斯韦电磁场理论的建立及其在工业生产中的应用，改变了人们的生产和生活方式，促使经济以前所未有的速度向前发展。电磁场理论还拓展了人们对世界物质性的认识。场作为物质存在的一种基本形态，电场、磁场统一于电磁场中，今天已经被人们普遍接受。电磁场理论既体现了哲学上普遍联系的观点，又是美学中对称美在自然科学中的生动展现。

在本章的学习中，我们将了解磁场、磁感应强度、磁通量和电磁感应的基本概念；了解电磁波的发现过程，体会科学假设与实验检验在物理学发展中的重要作用；能用磁感线模型分析磁场中比较简单的问题，并得出结论；能说出磁在生产生活中应用的实例；能利用场的性质解释有关电磁波的现象。

第一节

磁现象与磁场



电与磁经常联系在一起并互相转化，可以说凡是用到电的地方，几乎都有磁现象参与其中。在现代技术、科学研究和日常生活中，大至发电机、电动机等电力装置，小到各种电子设备、计算机，无不与磁现象有关。下面我们一起探索它吧！

磁现象

我国古代积累了较为丰富的与磁相关的生活经验，早就有磁现象的发现和应用的记载。

北宋科学家沈括在《梦溪笔谈》中记述了指南针的制作方法：“方家以磁石磨针锋，则能指南，然常微偏东，不全南也。”这比西方用天然磁石摩擦铁棒制作指南针的记载早了一百多年。同时，这条记载也说明沈括观察到了地磁偏角现象，比哥伦布发现新大陆时观察到的地磁偏角现象早了四百多年。

指南针在我国北宋时期（960—1127）开始应用于航海导航。朱彧的《萍洲可谈》中“舟师识地理，夜则观星，昼则观日，阴晦则观指南针”说的就是在当时的航海船上设有专门掌握航行方向的“舟师”，他能在阴天时根据指南针来把握航行的方向。后来，指南针经海上丝绸之路传到西方，促进了人类开启全球海洋远航，对整个人类社会的经济文化交流产生了巨大的影响。

在现代生活里，我们几乎被包围在“磁海”之中。电话、电视机、电动机、发电机等，都要用到磁；电磁铁、磁悬浮列车（如图6-1-1所示）、核磁共振成像（如图6-1-2所示）等，更是离不开磁。

生物也有磁现象。人体心脏的生物电流会产生微弱的心磁场；细菌含有磁性氧化铁微



图 6 - 1 - 1 磁悬浮列车



图 6 - 1 - 2 核磁共振成像

粒，能在水中沿磁场方向游动；鸽子借助体内的“罗盘”能够准确地从千里之外飞回鸽巢……

磁场

我们知道磁作用的主要表现，一是磁体与磁体之间的相互作用，两个磁体的同名磁极相互排斥，异名磁极相互吸引；二是磁体与通电导体之间的相互作用，如电流磁效应实验、电动机的基本原理。那么，通电导体与通电导体之间是否也存在相互作用？



观察与思考

在如图 6-1-3 所示的装置中，给两根平行直导线通入电流。

(1) 当两根平行直导线通过的电流方向相同时，会出现怎样的实验现象？实验现象说明了什么？

(2) 如果两根平行直导线通过的电流方向相反，情况又将如何？



图 6-1-3 实验装置图

研究表明，通电导体和通电导体之间存在相互作用。由于电流具有磁效应，因此，通电导体之间的相互作用可以看作第三类磁作用。

综上所述，磁体与磁体、磁体与电流、电流与电流之间，都存在着相互作用，统称为**磁相互作用**（或磁力），它们本质上都是相同的力。

在物理学发展史中，随着磁相互作用的发现，一个深刻的问题凸显出来：这些作用是直接的而不需媒介的相互作用，还是需要某种媒介进行间接传递的？

我们知道电荷之间的相互作用是通过电场这种媒介发生的。与此类似，磁相互作用是通过另外一种媒介——**磁场**（magnetic field）发生的。实验表明，磁场是客观存在的物质，磁体和电流周围都存在磁场，磁场对置于其中的其他磁体或电流施加作用力。由此我们可以把各类磁的相互作用统一起来，即所有磁的相互作用都是通过磁场发生的。

磁感线

为了形象地描述磁体和电流周围的磁场，英国科学家法拉第提出了磁感线的概念。所谓**磁感线**（magnetic induction line），是在磁场中画出一些有方向的曲线，在这些曲线上，每一点的切线方向都与该点的磁场方向一致，如图 6-1-4 所示。

为了“看见”磁场，法拉第在纸板上均匀洒满细小的铁屑，在其下方放置磁铁，然后轻敲纸板，磁化后的铁屑在磁力的作用下重新沿着磁场方向排列，清楚呈现出“磁感线”。

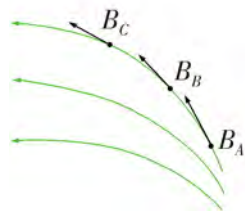


图 6-1-4 磁感线



观察与思考

1. 条形磁铁磁场中铁屑的分布情况如图 6-1-5 所示，条形磁铁的磁感线分布如图 6-1-6 所示。



图 6-1-5 条形磁铁磁场中铁屑的分布情况图

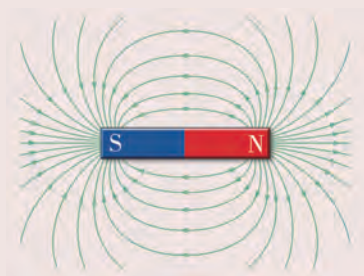


图 6-1-6 条形磁铁的磁感线分布图

2. 蹄形磁铁磁场中铁屑的分布情况如图 6-1-7 所示，蹄形磁铁的磁感线分布如图 6-1-8 所示。



图 6-1-7 蹄形磁铁磁场中铁屑的分布情况图

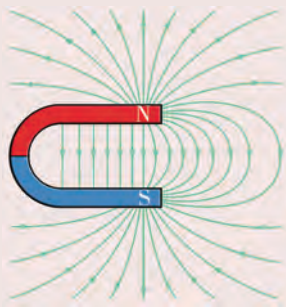


图 6-1-8 蹄形磁铁的磁感线分布图

3. 直线电流周围磁场中铁屑的分布情况如图 6-1-9 所示, 它的磁感线分布如图 6-1-10 所示, 试判断直线电流方向与磁感线方向之间的关系.



图 6-1-9 直线电流周围
磁场中铁屑的分布情况图

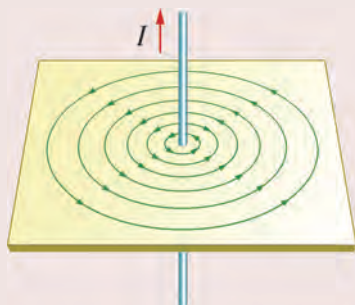


图 6-1-10 直线电流的
磁感线分布图

4. 环形电流磁场中铁屑的分布情况如图 6-1-11 所示, 应用安培定则判断环形电流中心轴上磁感线方向与电流方向之间的关系, 如图 6-1-12 所示.



图 6-1-11 环形电流磁场
中铁屑的分布情况图

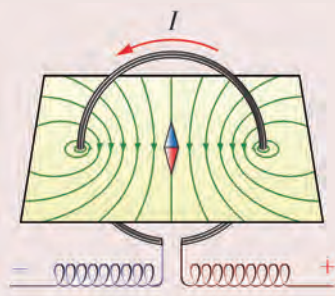


图 6-1-12 环形电流的
磁感线分布图

5. 通电螺线管外部磁场中铁屑的分布情况如图 6-1-13 所示. 比较其与条形磁铁外部磁感线的分布情况. 应用安培定则, 判断通电螺线管内、外部磁感线方向与电流方向之间的关系, 如图 6-1-14 所示.

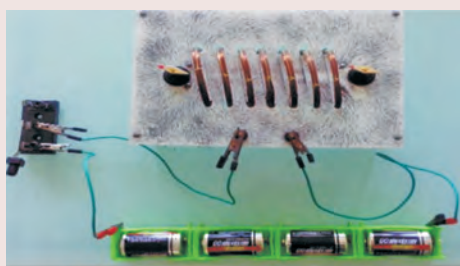


图 6-1-13 通电螺线管外部
磁场中铁屑的分布情况图

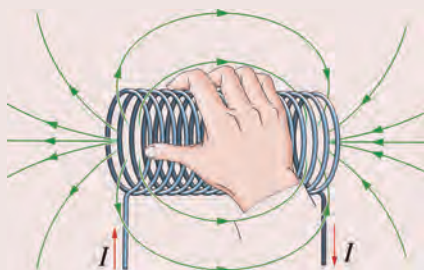


图 6-1-14 通电螺线管
外部磁感线分布图

从各类磁场的磁感线分布图可以看到, 磁场越强的地方, 磁感线越密; 在磁体或通电螺线管的外部, 磁感线从北极 (N 极) 出发回到南极 (S 极), 在内部的磁感线由 S 极指向 N 极, 形成闭合的曲线.

需要指出的是，磁感线是人为画出来的，能直观、形象地描述磁场分布情况的一簇曲线，实验虽然可以模拟磁感线的形状，但磁感线不是真实存在的，是假想出来的一种曲线。

安培分子电流假说

通电螺线管产生的磁场与条形磁铁产生的磁场非常相似，而通电螺线管的磁场由电流产生，那么条形磁铁的磁场也可能由某种电流产生。安培注意到这一点，经过研究后于1822年提出了著名的**分子电流假说**：在原子、分子等物质微粒的内部都存在一种环形电流——分子电流，分子电流使每个物质分子都成为一个微小的磁体，如图6-1-15所示。安培的假说能够解释一些磁现象，例如铁棒的磁化与高温去磁。铁棒未被磁化时，内部各分子电流的取向是杂乱无章的，如图6-1-16所示，它们与外界磁场效应互相抵消，对外不显磁性。当铁棒受到外磁场的作用时，各分子电流的取向趋于规则，如图6-1-17所示，铁棒被磁化，对外显示磁性。在高温下，铁棒的分子热运动加剧，分子电流的规则取向被破坏，铁棒又会失去磁性。

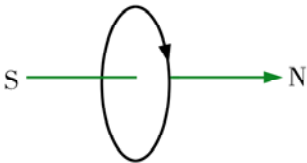


图 6-1-15 分子电流

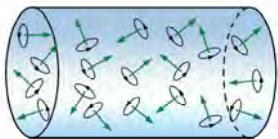


图 6-1-16 未被磁化的铁棒

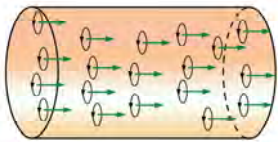


图 6-1-17 被磁化后的铁棒

地磁场

指南针静止时沿地球南北取向，表明地球是一个大磁体。如图6-1-18所示，地球磁体的N极位于地理南极附近，地球磁体的S极位于地理北极附近。地磁极与地理极并不重合，它们之间的夹角被称为磁偏角。磁偏角在航海导向中起着重要的作用。有趣的是，地磁极有围绕地理极做周期性运动的现象，其周期约为数万年。从地球形成至今，地磁极曾发生多次极性倒转。

地球由于本身具有磁性而在周围形成的磁场叫作**地磁场** (geomagnetic field)，它对人类的生活、生产有着重要的意义。例如，利用在陆地、海洋或空中测量大地的磁性所获得的地磁图，可以发现未知的矿藏或特殊的地质构造。

研究表明，宇宙中许多天体都具有磁场，例如太阳表面的黑子、耀斑和太阳风等活动都与太阳的磁场有关。2016年7月5日，美国“朱诺号”探测器（如图6-1-19所示）成功进入木星轨道，其任务之一就是利用携带的磁强

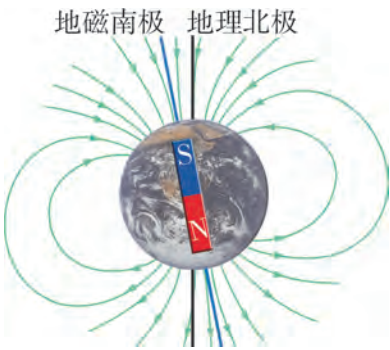


图 6-1-18 地磁场



图 6-1-19 “朱诺号”
探测器模拟图

计测量木星的磁场，以深入了解木星内部的结构。关于天体磁场的起源、磁场对生物的影响等诸多谜团有待进一步探索。这些谜团也是当前科学研究的方向之一。

实践与拓展

- 1. 查找资料，列举磁现象在生产和生活中的应用。
- 2. 查阅资料，了解我国古代对磁现象的认识和应用及对人类文明的影响。
- 3. 收集有关电磁领域重大技术发明的资料，说明其对社会发展所起的作用。

练习

- 1. 如图 6-1-20 所示，系在细线下端的回形针受磁铁吸引悬在空中，在回形针的下方用点燃的蜡烛加热回形针。过一段时间可以观察到回形针不再受磁铁吸引，细线回到竖直方向。试解释这一现象。
- 2. 将图 6-1-21 中的电磁铁连入设计的电路中（请在虚线框内完成电路图），要求：
 - (1) 电路能改变电磁铁磁性的强弱。
 - (2) 使小磁针静止时的指向如图 6-1-21 所示。

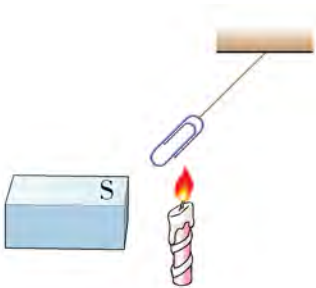


图 6-1-20

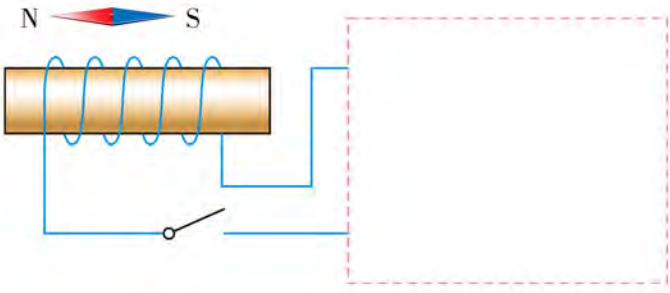


图 6-1-21

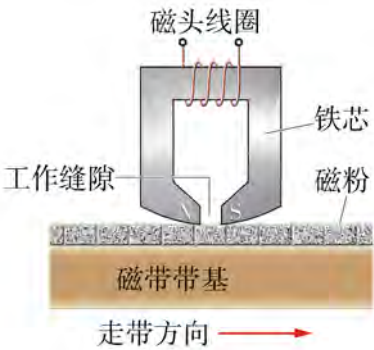


图 6-1-22

- 3. 如图 6-1-22 所示是录音磁头的工作原理图。录音时，磁带上一层磁性材料通过磁头的作用被磁化成类似于图中的小磁体，从而记录声音。请根据图中小磁体的极性标出此时磁头线圈中电流的方向。
- 4. 请查一查资料，了解沈括提出的磁偏角度数的范围，西方国家对磁偏角的认识及起源的时间、人物及事件等。

第二节

磁感应强度



电磁起重机可以将数吨重的钢铁物品悬空吸起，实验室的小磁铁却只能吸起几枚小铁钉，这说明磁体产生的磁场有强有弱。我们把指南针放置于磁场中的不同位置，其指向会发生变化，这说明磁场具有方向。

在研究电场时，我们引入试探电荷来测量电场的强弱和方向。运用类比法，在研究磁场时，我们可以引入磁体或通电导线，测量它们在磁场中受到的力，进而定义描述磁场强弱和方向的物理量。

磁感应强度的方向

物理学中，我们用磁感应强度来描述磁场的强弱和方向。

在静电学中，为了考察空间某处是否有电场存在，可以在该处放一静止试验电荷，若试验电荷受到力的作用，我们就可以说该处存在电场，并以电场强度来描述该处的电场。与此类似，我们可以把一枚能自由转动的小磁针作为检验磁体放在磁场中的某一点，观察它的受力情况，由此来描述磁场。

将可自由转动的小磁针放在磁场中某一点，小磁针静止时 N 极有确定的指向。在磁场中的不同点，小磁针静止时 N 极所指的方向一般不同，如图 6-2-1 所示。这说明磁场是有方向性的。物理学规定，在磁场中的任一点，小磁针 N 极受力的方向，亦即小磁针静止时 N 极所指的方向，就是该点磁感应强度的方向，简称磁场的方向。

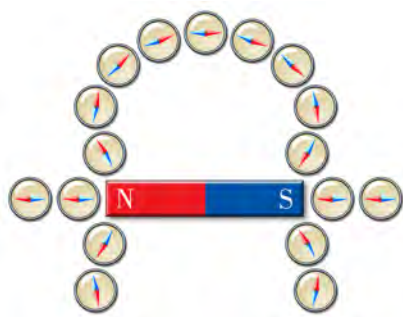


图 6-2-1 磁场中各处小磁针静止时的指向

磁感应强度的大小

由于磁体的南北磁极不能分开单独存在，故无法用探究单个磁极受力情况的方法来研究磁感应强度的大小。类比研究电场时所采用的方法，我们将一小段通电导线作为研究对象，通过检测磁场对这一小段通电导线的作用情况，间接探究磁场的强弱。

观察与思考

如图 6-2-2 所示, 将一小段通电导线水平悬挂在并排放置的蹄形磁铁两极之间, 导线方向与磁场方向垂直。

(1) 保持通过导线的电流一定, 改变磁场中导线的长度 (可通过增加或减少蹄形磁铁的个数来实现), 比较不同情况下导线摆动幅度的大小与通电导线在磁场中的长度之间的关系, 其侧视图如图 6-2-3 所示。

(2) 保持通电导线在磁场中的长度一定 (不改变蹄形磁铁的个数), 改变导线中电流的大小, 比较不同情况下导线摆动幅度的大小与导线中电流的大小之间的关系。

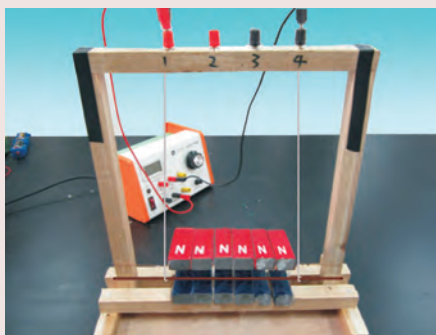


图 6-2-2 实验装置图

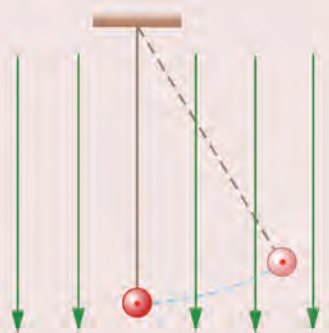


图 6-2-3 侧视图

由上述实验可见, 当保持通电导线的电流一定时, 磁场中导线的长度越长, 导体摆动的幅度越大; 当保持通电导线在磁场中的长度一定时, 导线中电流越大, 导线摆动的幅度越大。

更精确的实验研究表明, 当通电导线与磁场方向垂直时, 它在同一磁场中所受磁场作用力 F 的大小, 与电流 I 和导线长度 L 的乘积 IL 成正比, 即 $F \propto IL$ 。在同一磁场中, 无论电流 I 和导线长度 L 如何改变, F 与 IL 的比值总是确定的。而在不同的磁场中, 这个比值一般是不同的。可见, F 与 IL 的比值由磁场本身决定, 其大小反映了磁场的强弱。这个比值越大, 表示磁场越强。

我们采用比值定义法, 把当通电导线与磁场垂直时, 通电导线所受磁场的作用力 F 与电流 I 和导线长度 L 的乘积 IL 之比, 称为**磁感应强度** (magnetic induction)。用符号 B 表示, 即

$$B = \frac{F}{IL} \quad (6.2.1)$$

磁感应强度 B 的单位由 F 、 I 和 L 的单位决定, 在国际单位制中, 磁感应强度的单位是特斯拉, 简称特, 符号是 T, $1 \text{ T} = 1 \text{ N}/(\text{A} \cdot \text{m})$ 。



讨论与交流

在某次讨论活动中，甲、乙两名同学对表达式 $B = \frac{F}{IL}$ 提出了自己的观点。

甲：通电直导线在磁场中受到的力越大，说明导线所处的磁场越强。

乙：如果将通电直导线撤去，则 $F=0$ ，说明此时导线所处磁场的磁感应强度为零。

他们的认识有误吗？请说明理由。

匀强磁场

如果磁场中某一区域内磁感应强度的大小和方向处处相同，则该区域的磁场叫作 **匀强磁场** (uniform magnetic field)。匀强磁场的磁感线是一些间隔相同的平行直线。如图 6-2-4 所示，距离很近的两个平行异名磁极之间（除边缘外）的磁场、通电螺旋管内中间部分的磁场，都可近似认为是匀强磁场。匀强磁场在电磁仪器和科学实验中有许多应用，例如医学上的核磁共振仪就需要一个较强的匀强磁场。

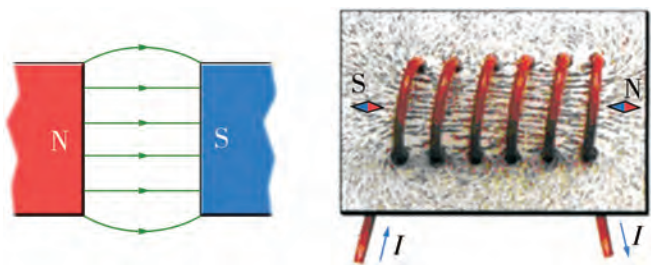


图 6-2-4 两种典型的匀强磁场

磁通量

为了研究穿过某一平面的磁场及其变化，我们引入一个新的物理量。如图 6-2-5 所示，在匀强磁场中有一个与磁场方向垂直的平面，设磁场磁感应强度为 B ，平面面积为 S ，磁感应强度 B 与面积 S 的乘积叫作穿过该平面的 **磁通量** (magnetic flux)，简称磁通。用 Φ 表示磁通量，则

$$\Phi = BS$$

(6.2.2)

在国际单位制中，磁通量的单位是韦伯，简称韦，符号是 Wb。

由 $\Phi = BS$ ，可得 $B = \frac{\Phi}{S}$ ，表示磁感应强度 B 在数值上等于垂

直磁感应强度的单位面积上的磁通量。在工程领域，技术人员常把磁感应强度称为磁通密度，并用 Wb/m^2 作为其单位。

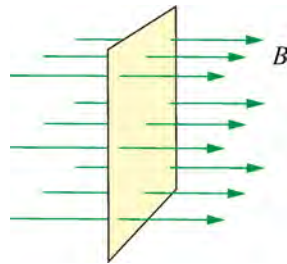


图 6-2-5 磁场方向与所研究平面垂直的情形



讨论与交流

1. 将一个矩形线圈放置于某匀强磁场中，线圈面积越大，磁场穿过线圈的磁通量会越大吗？

2. 如果磁场的方向与所研究的平面 S 没有垂直而是成一定的角度 θ ，如图 6-2-6 所示，应如何计算磁通量的大小呢？

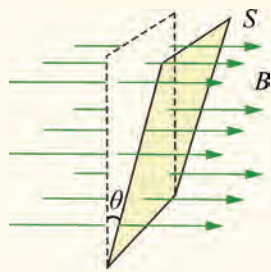


图 6-2-6 磁场的方向与平面 S 成一定的角度 θ



练习

1. 如果空间某点同时存在多个分磁场，则该处真实磁场为合磁场。合磁场的磁感应强度与分磁场的磁感应强度之间遵循平行四边形定则。如图 6-2-7 所示，在竖直向上的匀强磁场中，水平放置着一根通电直导线（图中圆环中心处），电流方向指向纸外， a 、 b 、 c 、 d 是以通电直导线为圆心的同一圆周上的四点，这四点的磁感应强度的大小和方向有何异同？

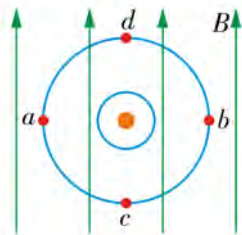


图 6-2-7

2. 如图 6-2-8 所示是实验室简易手摇发电机的结构原理图，设两磁极间匀强磁场的磁感应强度 $B = 0.2 \text{ T}$ ，单匝矩形线圈面积 $S = 0.08 \text{ m}^2$ 。求在下列情况下，磁场穿过线圈的磁通量：

- (1) 线圈平面与磁场方向垂直。
- (2) 线圈平面与磁场方向平行。
- (3) 线圈平面与磁场方向成 30° 角。

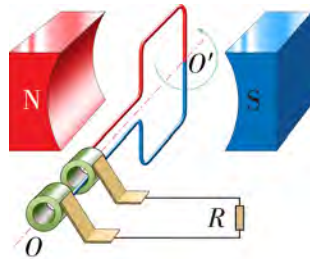


图 6-2-8

3. 如图 6-2-9 所示，一个课外物理兴趣小组通过实验研究通电螺线管中心轴线上磁感应强度的分布规律。他们将磁传感器从螺线管外部，沿轴心线逐步向内部移动，绘制出磁感应强度与相对距离关系的图线。改变通电螺线管中的电流，重复实验操作，得到不同电流下 A 、 B 两条曲线，如图 6-2-10 所示。



图 6-2-9

(1) 由图 6-2-10 所示的图像可知，通电螺线管内部的磁感应强度具有什么特点？

(2) 比较图线 A 、 B 所对应的电流大小关系，并说明理由。

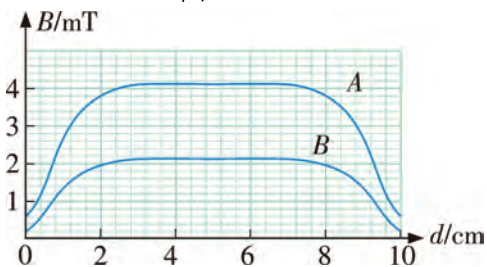


图 6-2-10

第三节

电磁感应现象



1820 年，丹麦物理学家奥斯特发现了电流的磁效应，揭示了通电导线周围有磁场，表明电能产生磁。奥斯特的发现极大地触动了法拉第，1822 年，法拉第在日记中写下“磁能转化为电”，并由此开始了近十年的艰苦探索，最终取得了成功。

电磁感应现象的发现

法拉第在一个粗软铁环上，绕上两个彼此绝缘的线圈 A 和 B ，线圈 A 的两端用导线连接成闭合回路，并在导线下面放置一个与导线平行的小磁针，线圈 B 则和一个电池组及开关相连接，如图 6-3-1 所示。

1831 年 8 月 29 日，法拉第在进行上述实验时偶然发现，当合上开关电流通过线圈 B 的瞬间，小磁针发生了偏转，随后又回到并停在原来的位置上；当开关断开瞬间，磁针再次发生了偏转。虽然当时法拉第意识到，这可能是他寻找了近十年的磁生电现象，但他由于受到“稳恒电流”的思维定式影响，起初并没有完全明白其中的道理，未能明确这一瞬时性现象的意义。

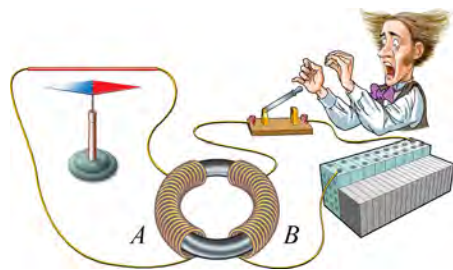


图 6-3-1 法拉第电磁感应实验

幸好，法拉第进一步分析和探索了这个实验中小磁针发生偏转的原因。他想：如果没有铁质圆环作为内芯，还会发生这类现象吗？于是，他将 A 、 B 线圈的内芯换成木头，结果小磁针依然发生偏转。

接着法拉第又做了各种各样的实验，最终他不仅证实了磁生电的猜想，而且完全理清了这一过程的基本规律。1831 年 11 月 24 日，法拉第向英国皇家学会报告了整个实验情况，并把这种现象正式命名为**电磁感应**（electromagnetic induction）。这种由磁生电的现象叫作电磁感应现象，由电磁感应现象产生的电流叫作**感应电流**（induction current）。

法拉第的实践活动和认识活动，不仅铸成了电磁学研究实践的基石，也带来了人类对自然世界认识观的变化。动态、暂态的客观现实进入人们的头脑，丰富和完善着人们的世界观。

电磁感应现象的发现具有划时代的意义，它打开了通向电气化的大门。

产生感应电流的条件

我们知道，闭合电路的一部分导体在磁场中做切割磁感线运动时，导体中会产生感应电流。我们从熟悉的“磁生电”实验入手，探究感应电流产生的条件。



实验与探究

实验1：如图6-3-2(a)所示，将导体 ab 和电流计连接组成闭合电路。

(1) 当导体 ab 在磁场中做切割磁感线运动时，观察电流计的指针是否偏转。

(2) 当导体 ab 在磁场中做与磁感线平行的运动时，观察电流计的指针是否偏转。

(3) 借助图6-3-2(b)，分析当导体 ab 在磁场中做切割磁感线运动时，穿过由导体 ab 和电流计组成的闭合电路的磁通量变化情况。

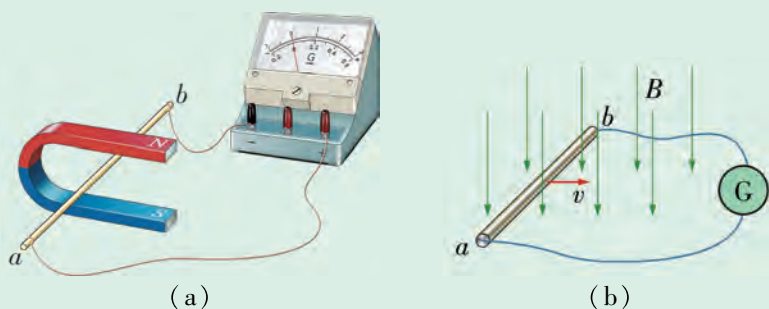


图6-3-2 利用蹄形磁铁的探究实验

实验2：如图6-3-3所示，将螺线管用导线与电流计连接成闭合电路。分别把条形磁铁插入螺线管，然后静止在螺线管中，最后从螺线管中拔出来，观察以上三个过程中电流计的指针是否偏转。分析螺线管中磁通量的变化情况。



图6-3-3 利用条形磁铁的探究实验

实验3：如图6-3-4所示，用导线把一个大螺线管 B 与电流计连接成闭合电路，被套在大螺线管 B 中的小螺线管 A 通过滑动变阻器、开关与电源连接。怎样才能使大螺线管 B 中有电流产生？按表6-3-1的要求进行实验，注意观察实验现象，并将结果填入表中。



图6-3-4 利用通电螺线管的探究实验

表 6-3-1 实验现象记录表

操作	电流计指针 如何偏转	大螺线管 B 中的 磁通量如何变化	是否有 感应电流
开关接通瞬间			
开关接通, 滑片 P 不动			
开关接通, 滑片 P 移动			
开关断开瞬间			

由上述实验可知, 当导体 ab 静止在磁场中或做平行于磁感线运动时, 电流计的指针不偏转; 当导体 ab 在磁场中做切割磁感线运动时, 电流计的指针发生偏转, 表明产生了电流; 当条形磁铁静止在螺线管中, 电流计的指针不偏转; 在条形磁铁插入或拔出螺线管的过程中, 电流计的指针都发生偏转, 表明产生了电流; 当连接小螺线管 A 的开关接通后电路电流稳定时, 电流计的指针不偏转, 连接小螺线管 A 的开关接通瞬间、断开瞬间或开关接通而滑动变阻器的滑片 P 移动时, 电流计的指针都发生偏转, 表明产生了电流。

讨论与交流

上述实验都产生了感应电流, 它们之间有何共同点?

在实验 2 中, 螺线管和电流计组成了闭合回路。当条形磁铁在螺线管中不动时, 穿过螺线管的磁通量不变, 没有电流产生; 当条形磁铁插入或取出时, 穿过螺线管的磁通量发生变化, 产生了电流。因此, 产生的电流应来自磁通量的变化。在实验 3 中, 通电小螺线管 A 产生的磁场与条形磁铁相似, 产生电流的情况与实验 2 的分析一样。实验 1 表面看起来与实验 2、实验 3 不一样, 但是导体 ab 在磁场中做切割磁感线运动时, 由导体 ab 和电流表组成的闭合回路的磁通量发生改变, 因而产生了电流。

实验表明, 只要穿过闭合回路的磁通量发生变化, 闭合回路中就有感应电流产生。这就是产生感应电流的条件。在闭合回路中有磁通量但不变化, 即使磁场很强, 磁通量很大, 也不会产生感应电流。如果回路不闭合, 即使磁通量发生变化, 也不会产生电流。当然, 引起磁通量变化的原因是各不相同的, 可能是闭合回路或闭合回路一部分的磁感应强度发生变化, 可能是闭合回路在磁场中的面积发生变化, 也可能是闭合回路与磁场的夹角发生变化。

电磁感应的应用

电磁感应现象是一个划时代的伟大发现，它深刻地改变了人类生产和生活的方式。电磁感应原理在生产和生活中有着广泛的应用，如发电机、电话、漏电保护开关、磁悬浮列车等。下面我们来看看几个电磁感应的应用。

汽车防抱死制动系统（ABS） 汽车防抱死制动系统是为了防止汽车紧急制动时，因车轮被抱死，从而发生侧滑，如图 6-3-5 所示。ABS 由轮速传感器、电子控制模块和电磁阀三个部分组成。其中轮速传感器是利用电磁感应现象来测量车轮的转速。如图 6-3-6 所示，铁质齿轮 P 与车轮同步转动，它的右侧有一个绕着线圈的磁铁。当每个轮齿在接近和离开磁铁时，穿过线圈的磁通量会发生变化，线圈中出现感应电流。随着各个轮齿的运动，磁通量的变化会使线圈中产生相应的感应电流。这个电流由电流检测器 D 检测，并送到电子控制模块以控制电磁阀，为制动器提供合适的制动力，有效避免了汽车后轮侧滑的现象。



图 6-3-5 没有安装 ABS 的汽车（左）与安装了 ABS 的汽车（右）的模拟刹车情况

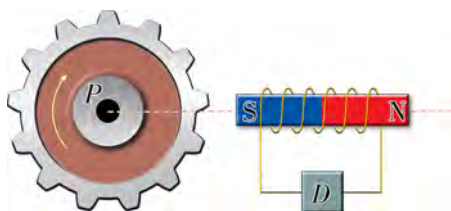


图 6-3-6 ABS 的轮速传感器示意图

无线充电技术 无线充电，又称为非接触式感应充电，是利用供电设备直接将电能传送给用电器的技术。电磁感应是目前实现无线充电的一种重要技术途径，常用于对手机或智能手表等小功率用电器的充电，如图 6-3-7 所示。充电器与用电器之间通过电感耦合传送电能。充电器中有发射线圈，给线圈一定频率的交变电流，通过电磁感应，用电器的接收线圈中产生的电流给电池充电。



图 6-3-7 手机无线充电

无线充电具有安全、耐用、方便等特点，还可应用于生物医疗，能够在不损害身体组织的情况下对植入在人体内的医疗装置进行充电，免去手术与感染的风险。然而，由于技术发展的限制，无线充电技术仍存在效率低、成本高、兼容性差等特点，发展完善的空间较大。



实践与拓展

查阅相关资料，了解电磁感应现象的发现过程。



练习

1. 如图 6-3-8 所示，磁场中有一个闭合的弹簧线圈。如果该磁场是匀强磁场，采取哪些措施可以使线圈中产生感应电流？

如果该磁场是非匀强磁场，还可以增加哪些措施使线圈中产生感应电流？

2. 某同学将电流计、线圈 A 和线圈 B、蓄电池、开关用导线连接成如图 6-3-9 所示的实验电路。

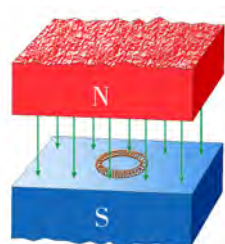


图 6-3-8

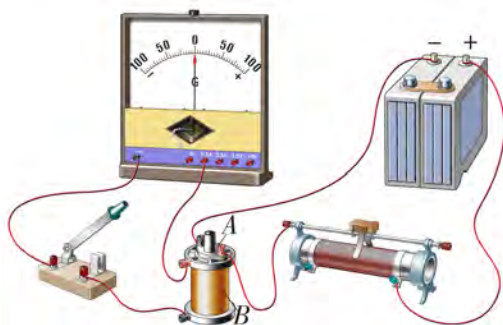


图 6-3-9

(1) 当接通、断开开关时，电流计的指针都没有偏转。请分析其可能的原因。

(2) 电路正常后，这套实验装置可以用于探究哪些物理问题？

3. 动圈式话筒的内部结构如图 6-3-10 所示，该装置能够将声信号转化为电信号（即感应电流），再经扩音器放大后传给扬声器。

(1) 请尝试解释动圈式话筒将声信号转化为电信号的工作原理。

(2) 如果这类动圈式话筒出现了故障，故障最有可能出现在什么地方？如何检测并排除故障？

4. 举例说明电磁感应现象的其他应用及其对现代社会的影响。

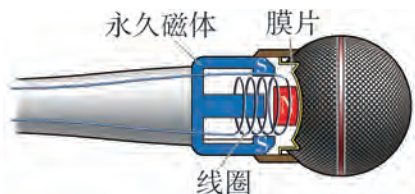


图 6-3-10

第四节

电磁波及其应用



我们生活在电磁波的海洋之中，无线电广播、电视广播、移动电话、微波炉等等，都是依靠电磁波传递信息或能量。1895 年，意大利无线电工程师马可尼（G. Marconi，1874—1937）利用电磁波成功实现了无线电通信，揭开了人类通信史上的新篇章。进入 21 世纪，Wi-Fi、即时通信等新的通信方式的出现又带来了电磁波应用的技术性革命，给我们的生活带来了巨大的影响。

电磁场与电磁波

恒定电流会产生磁场，那么恒定电场能否产生磁场？麦克斯韦（J. C. Maxwell，1831—1879）在系统总结人类直至 19 世纪中叶对电磁规律的研究成果的基础上，提出了变化的电场会产生磁场，变化的磁场也会产生电场。由此，变化的电场和变化的磁场构成了一个不可分离的统一的场，我们把这个场称为**电磁场**（electromagnetic field）。变化的电磁场在空间中的传播形成了**电磁波**（electromagnetic wave）。



实验与探究

实验 1：打开收音机的开关，转动选台旋钮，使收音机收不到电台的广播。然后开大音量。如图 6-4-1 所示，在收音机附近，将一根导线的一端连接电池的一个电极，另一端反复碰触电池的另一电极，会发现什么现象？为什么会产生这种现象？

实验 2：打开电风扇，将它靠近收音机，又会发现什么现象？为什么？

实验 3：将收音机调至可以收听广播电台的频道，在听到清晰的广播电台播音后，把收音机放进一只纸质的盒子里，盖紧纸盒的盖子，观察收音机是否还能收到广播。

实验 4：取一个铝饭盒，将正在清晰播音的收音机放入其中，盖紧饭盒盖子，再次观察会出现什么现象。



图 6-4-1 实验探究图

在实验1中，当导线另一端反复碰触电池的另一电极时，收音机会发出“喀喀”声。这是因为在导线与电池电极反复碰触过程中，电路中有迅速变化的电流，即产生了变化的电场，变化的电场又产生了变化的磁场，电磁场向四周传播形成了电磁波，对收音机所接收到的电磁波产生了干扰。

在实验2中，将转动的电风扇靠近收音机同样会听到收音机发出“喀喀”声，这是由于电风扇中电动机使用的是交变电流，变化的电流产生的电磁波对收音机产生干扰。

在实验3中，将收音机放进紧盖盖子的纸盒中，同样能够听到清晰的广播电台播音，表明纸盒并不能屏蔽电磁波。

在实验4中，当盖紧铝饭盒的盖子后，贴近铝饭盒听不到清晰的广播电台的播音，而只能听到杂音，这说明铝饭盒对广播电台发出的电磁波产生了屏蔽效果。我们在高层建筑的地下层，有时接收不到广播电台的信号也是同样的道理。

电磁场的物质性

电磁场看不见摸不着，没有固定的形状和体积，几个电磁场可以同时占有同一空间，这些都与由分子、原子组成的实物大不相同。那么电磁场到底是不是一种客观存在的物质呢？

物质具有质量、能量，物质间可以相互作用，并遵守相应的守恒定律，要证明电磁场是一种物质，需要检验电磁场是否具有以上所说的物质性。

微波炉（如图6-4-2所示）利用电磁波来加热食物，这说明电磁场具有能量。

俄国物理学家列别捷夫（П. Н. Лебедев，1866—1912）测量出光对被照射的物体有压力，用实验证明了由电磁场理论预言的光压。在天文现象中，彗星尾就是太阳光的光压压迫彗星尘埃物质形成的，如图6-4-3所示。这表明电磁场具有与其他物质相互作用的属性。

电磁场虽然没有静止质量，但爱因斯坦提出的质能关系，揭示出电磁场因具有能量而具有运动质量。光压现象也说明电磁场是有质量的，因为有质量的物质才能对其他物体表现出压力作用。

美国物理学家康普顿（A. H. Compton，1892—1962）通过实验验证了电磁场和电荷系统相互作用时遵守动量守恒定律和能量守恒定律。

由此可见，电磁场具备物质的各类性质，是物质存在的基本形态之一。探索电磁场物质性的过程，是人类不断探索新知的过程，认识到电磁场是一种物质，能够让人类充分利用其物质属性，开展更深入、广泛的研究与应用。



图 6-4-2 微波炉



图 6-4-3 彗星尾

电视广播

电视通过电磁波传播视频信号，其原理与传播音频信号相似。电视图像和声音信号的形成、发射与接收、重现过程如图 6-4-4 所示。

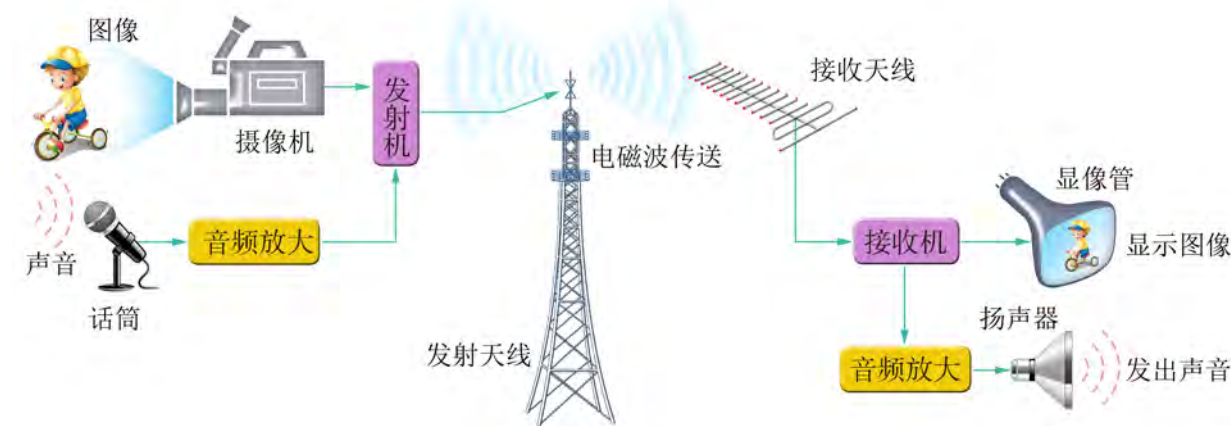


图 6-4-4 电视图像和声音信号的形成、发射与接收、重现

通常电视广播使用微波传送电视信号。微波只能沿直线传播，碰到高大的建筑物或高山就会被阻隔。因此，必须每隔一定距离建立中继站，发射天线也要架设在较高的地方。

现在，人们利用电磁波将电视信号先传送给地球同步通信卫星，然后由通信卫星将信号转发回地面，大大增加了信号的覆盖面积，因此，卫星电视能被更广地域的人们收看。理论计算表明，只要三颗通信卫星就几乎可以覆盖整个地球的表面。



讨论与交流

请举例说明电视广播对社会生活的影响。

雷达

雷达是利用电磁波进行测距、定位的仪器。雷达主要由发射机、接收机和显示器等部分组成。

雷达工作时使用的是微波。如图 6-4-5 所示，雷达发射机产生足够的电磁能量，经过收发转换开关传送给天线。天线将这些电磁能量集中在某一个方向上形成波束，向前传播。当电磁波波束遇到目标后，将沿着各个方向产生反射，其中的一部分电磁能量会反射回雷达的方向，被雷达天线获取。天线

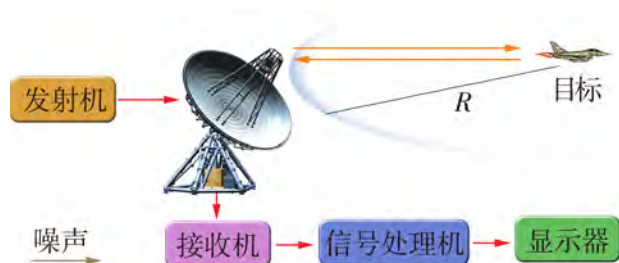


图 6-4-5 雷达系统的工作原理

获取的能量经过收发转换开关送到接收机，形成雷达的回波信号。由于在传播过程中电磁波会随着传播距离而衰减，雷达回波信号会非常微弱，几乎被背景噪声淹没。接收机可将回波信号放大，经过信号处理机处理，提取出包含在回波中的信息，并送到显示器显示出目标的距离、方向和速度等信息。

移动电话

现代通信技术是电磁波最辉煌的应用成果之一。无线电话、无线对讲机、移动电话均是通过电磁波实现信号的发射与接收的。

移动电话又称为手机。每台手机都是一个小型电磁波发射台，它将用户的语音或数字信息转变为高频信号发射到空中；同时它又相当于一个收音机，捕捉空中的电磁波，使用户接收到对方发射来的信息。

如图 6-4-6 所示是手机之间的通信示意图。甲手机通过电磁波将信号发射到它附近的基站，基站接收后利用有线方式将信号传输到 A 地电信总机，A 地电信总机利用有线方式将信息传输到 B 地电信总机，再传送到乙手机附近的基站，最后由基站通过电磁波将信号传到乙手机，这样便实现了甲、乙手机之间的通信。

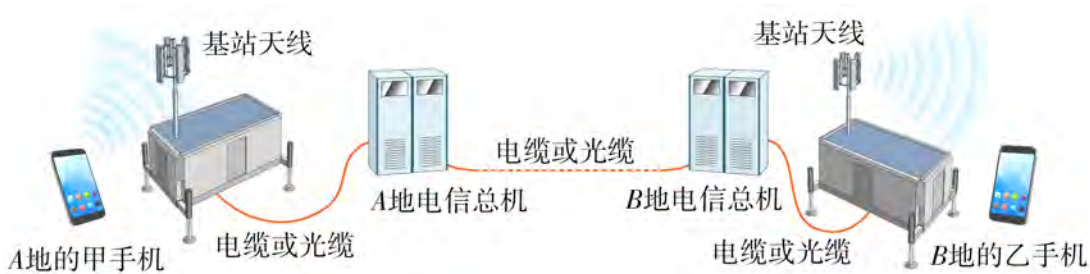


图 6-4-6 手机之间的通信示意图

实践与拓展

调查电磁波在现代社会中应用的实例，并撰写一篇调查报告。

中国“天眼”睁开，开启射电天文新时代

2016 年 9 月 25 日，有着中国“天眼”之称的 500 m 口径球面射电望远镜（Five-hundred-meter Aperture Spherical Telescope，简称 FAST）在贵州省平塘县的喀斯特洼坑中落成启用，开始接收来自宇宙深处的电磁波，这是我国在重大科学基础设施方面的又一重要成果。中国“天眼”工程由我国天文学家于 1994 年提出构想，从预研到建成历时 22 年，是具有我国自主知识产权、目前世界最大单口径、最灵敏的射电望远镜，其面积相当于 30 个足球场大小。

射电望远镜的基本原理是，被精确的镜面反射后，利用天线（抛物面）将宇宙中投射来的电磁波进行反射，并实现同相聚焦，收集天体的射电辐射；同时将这些信号加工、转化记录下来，并按特定的要求进行处理并显示出来。FAST 的 500 m 的口径意味着其具备更高的灵敏度。理论上，FAST 能接收到 137 亿光年以外的电磁波，这个距离接近于目前可视宇宙的边缘。

借助这只“天眼”，科研人员可以窥探星际互动的信息，观测暗物质，测定黑洞质量，甚至搜寻可能存在的星外文明。此外，FAST 研究涉及了众多高科技领域，如天线制造、高精度定位与测量、超宽带信息传输等，FAST 涉及的这些关键技术成果可应用于诸多相关领域，如大尺度结构工程、大型工业机器人研制以及多波束雷达装置等。

2017 年 10 月 10 日国家天文台宣布，中国“天眼”FAST 在南天银道面通过漂移扫描发现两颗新脉冲星，一颗编号 J1859 - 0131（又名 FP1-FAST pulsar #1），自转周期为 1.83 s，据估算距离地球 1.6 万光年；另一颗编号 J1931 - 01（又名 FP2），自转周期 0.59 s，据估算距离地球约 4100 光年。这是我国射电望远镜首次发现脉冲星。

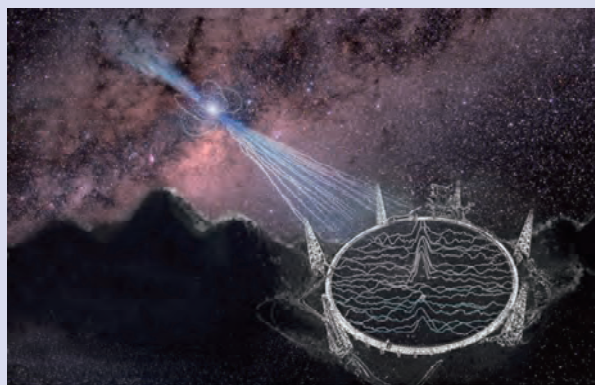


图 6-4-7 借助 FAST 发现的其中一颗脉冲星

“天眼”睁开，未来 20 年可以说是射电天文乃至天文学的“黄金时代”，不断增强的科技创新力，让我们拥有向宇宙更深处探索、实现前沿科学领域突破的信心。



练习

1. 列举电磁波在生产、科技和生活中的应用。
2. 我们周围哪些设备是利用电磁波工作的？各利用了哪一类电磁波的什么特性？
3. 电磁波根据频率值分成无线电波、红外线、可见光、紫外线、X 射线、 γ 射线六个波段，物理学上把它称为电磁波谱。请收集资料，了解每个波段电磁波的特点及其应用，写一篇介绍电磁波谱及其应用的短文。

第五节

量子化现象



从 19 世纪末到 20 世纪初，物理学家们在研究黑体辐射、光电效应、原子光谱和原子稳定性等问题时，发现这些现象很难用经典物理学理论去解释。为了解释这些现象，普朗克、爱因斯坦等物理学家大胆提出了量子假说，从而掀起了物理学史上的一场革命——量子论的建立，改变了人们对物质世界的认识。

光是一种电磁波

19 世纪 60 年代，麦克斯韦建立了电磁场理论。基于这一理论，他预言电磁波的存在，并从理论上推算出电磁波在真空中传播的速度与光的速度十分接近。麦克斯韦认为这不是一种巧合，光与电磁波的物理本质是一致的，光是一种电磁波，它通过电场和磁场的相互激发可以在真空中传播。

1888 年，赫兹用实验证实了电磁波的存在，并且证明了电磁波和光一样具有反射、折射、干涉和衍射等性质。他还通过实验测出了一定频率的电磁波的波长，算出了电磁波的速度，证明了电磁波的速度与光速相等。这使物理学家们认识到可见光是其中某一段波长范围的电磁波。



讨论与交流

从哪些现象可以说明光是一种电磁波？

能量子假说

我们知道，所有物体都发射出热辐射，这种辐射就是电磁波。对外来的辐射，物体有反射或吸收的作用。如果一个物体能够全部吸收外来辐射而无任何反射，这种物体就称为黑体。黑体辐射问题所研究的是黑体辐射与外界处于平衡状态时的能量密度按波长或频率的分布。

长期以来,经典物理中的连续性观念在人们头脑中根深蒂固,认为能量是连续变化的,在物体之间也是连续地交换能量,然而按照这个观念研究黑体辐射时遇到了无法解释的困惑:理论分析与实验结果不符.

德国物理学家普朗克(M. Planck, 1858—1947)研究黑体辐射时,为了从理论上解释黑体辐射的实验数据,于1900年提出能量的发射和吸收不是连续的,而是一份一份地进行.每一份的能量等于 $h\nu$,称为**能量子**.这里的 ν 是电磁波的频率, h 是一个常量,叫作**普朗克常量**(Planck constant),实验测得 $h=6.63\times 10^{-34}\text{ J}\cdot\text{s}$.基于这个假说,普朗克得到了与实验结果符合得很好的黑体辐射公式,从而解决了黑体辐射的理论分析与实验结果不符的问题,翻开了物理学上崭新的一页.



图 6-5-1 普朗克



讨论与交流

普朗克的能量子假说与宏观世界中我们对能量的认识有什么不同?

光子假说

人们对光的进一步认识,是从解释光电效应开始的.当光照射在金属上时,有时会有电子从金属表面逸出,这种现象被称为**光电效应**(photoelectric effect),如图6-5-2所示.逸出的电子被称为**光电子**(photoelectron).在光电效应实验中,用不同频率的光去照射阴极时,发现光的频率越高,光电子动能越大,频率低于某一数值时,不论光的强度多大,都不能产生光电子.这一现象用经典电磁波动理论是无法解释的.

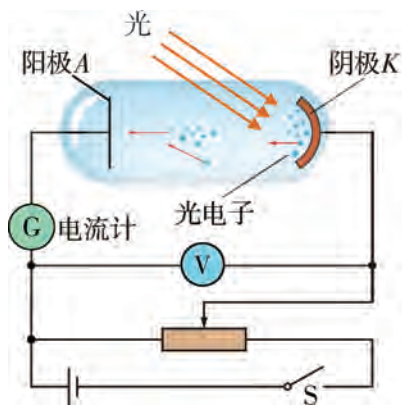


图 6-5-2 光电效应实验原理图

为了解释光电效应,在普朗克能量子假说的启发下,爱因斯坦于1905年指出,当光和物质相互作用时,光的能量不是连续的,而是一份一份光量子.这些光量子后来被称为**光子**(photon),光子的能量与它的频率成正比,即

$$\varepsilon = h\nu \quad (6.5.1)$$

根据这一假说,当光照射到金属表面上时,能量为 $h\nu$ 的光子被电子所吸收.电子把这些能量中的一部分用来脱离金属表面,另一部分是电子离开金属表面时的动能.如果光子的能量大于电子脱离金属表面所需的能量,则电子脱离金属表面产生光电子,且光的强度越大,光子的数量越多,则产生的光电子也越多.否则,无论光的强度多大,都无法产生光电子.这样光电效应就得到了解释.

光的波粒二象性

爱因斯坦的光子假说成功地解释了光电效应，说明了光具有粒子性。而在此之前，人们所观察到的光的干涉（如图 6-5-3）、衍射（如图 6-5-4 所示）等实验事实，清楚地显示光具有波动性，那么光究竟是粒子还是波呢？

实际上，光子假说并没有否定光是电磁波，光子的能量 $\varepsilon = h\nu$ ，其中的频率 ν 是描述波的典型物理量。我们把光的这种既具有波动性，又具有粒子性的性质称为**光的波粒二象性**。

在光的干涉和衍射实验中，如果短时间曝光，发现光子在底片上呈现不规则分布的点，长时间曝光会形成明暗相间的条纹。这说明光的波动性不同于机械波，也不同于经典意义上的电磁波，而是一种概率波。概率大的地方落下的光子多，形成亮纹；概率小的地方落下的光子少，形成暗纹。

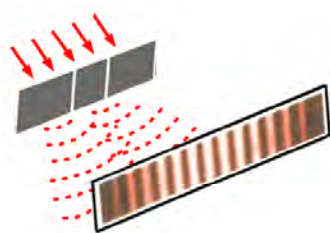


图 6-5-3 光的干涉

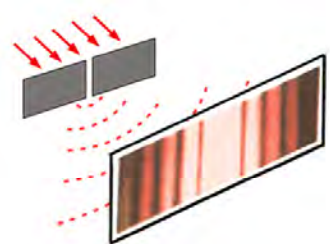


图 6-5-4 光的衍射

原子结构的玻尔理论

物理学家们在研究原子光谱时发现，氢原子光谱出现分立的谱线，如图 6-5-5 所示。而基于经典理论，无法从氢原子的结构来解释氢原子光谱的分立特征。首先，根据经典理论，电子在

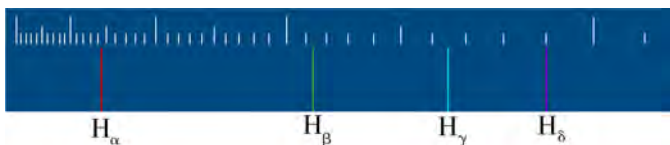


图 6-5-5 氢原子光谱

围绕着原子核转动时，必然要向外辐射电磁波，辐射能量后的电子，将因能量减少而最终落到原子核上。此外，核外电子所产生的辐射，其频率是连续分布的，这与原子光谱是分立的特征不符。因此，基于经典理论无法解释氢原子谱线的分立特征和氢原子的稳定性。

为了解释氢原子的稳定性和氢原子光谱的分立特征，玻尔（N. Bohr, 1885—1962）提出了氢原子中电子轨道量子化假说，即电子轨道半径是量子化的，电子只能在某些特定的轨道上运动；电子在不同的轨道上具有不同的能量，这些量子化的能量值称为**能级**（energy level）；只有当电子在不同轨道之间跃迁时，才辐射光子。基于这一假说，可以确定分立的原子光谱，这与实验结果吻合。

玻尔的氢原子理论尽管成功解释了氢原子的稳定性和氢原子光谱的分立特征，但是这一理论由于没有彻底挣脱经典物理学理论的束缚，其本身仍存在不可克服的缺点。直到 1924 年，德布罗意（L. de Broglie, 1892—1987）把光的波粒二象性推广到实物粒子（例如电子、质子等），提出实物粒子也具有波动性的假说，这一假说其后被电子衍射实验所证实。此后，海森伯（W. Heisenberg, 1901—1976）、薛定谔（E. Schrödinger, 1887—1961）等人建立了量子力学理论。量子力学理论的建立，标志着人类对微观粒子运动规律的认识

有了新的突破.

量子论的发展不仅带来了 20 世纪科学技术的繁荣,开辟了众多高新技术领域,成为当今物理科技的基础理论,而且改变了人们的思维方式,深刻地影响着人类社会和文化,对现代科学进步产生了深远的影响.

量子通信及量子通信网络

所谓量子通信,是指利用粒子在由两个或两个以上粒子组成的系统中相互影响(即量子纠缠)进行信息传递的一种新型的通信方式.与现在成熟的通信技术相比,量子通信具有保密性强、容量大、传输距离远等巨大的优越性.因此量子通信不仅在军事、金融等领域具有重要的作用,而且会极大地促进国民经济的发展.

我国对量子通信的研究始于 20 世纪 90 年代,1997 年,我国科学家首次实现了未知量子态的远程传输,这是国际上第一次在实验上成功地将一个量子态从甲地的光子传送到乙地的光子上,并于 2006 年实现超过 100 km 的信息传输,由此打开了量子通信走向应用的大门.2009 年 9 月,我国建成了世界上首个全通型量子通信网络,首次实现了实时语音量子保密通信,标志着我国在城域量子网络关键技术方面已经达到了产业化要求.2016 年 8 月,由我国科学家自主研制的世界上首颗量子科学实验卫星“墨子号”成功发射,人类首次完成卫星和地面之间的量子通信,标志着我国空间科学研究又迈出重要一步.2018 年 1 月,我国科研团队利用“墨子号”量子科学实验卫星,在中国和奥地利之间首次实现了距离达 7600 km 的洲际加密数据传输和视频通信,标志着“墨子号”已具备洲际量子保密通信能力.

全球跨度最大、史上最安全的量子通信网络正在悄然出现.



图 6-5-6 量子通信



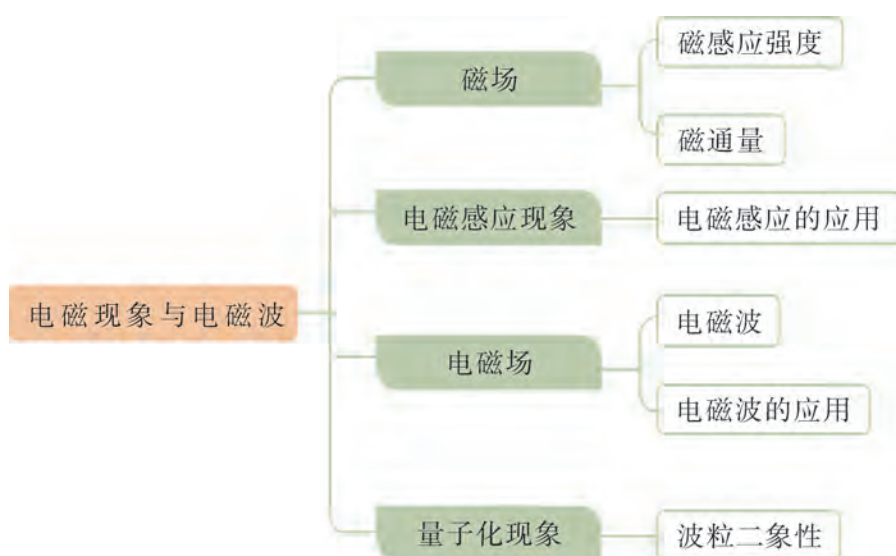
练习

1. 在网上查阅资料,写一篇关于普朗克和爱因斯坦生平的小论文.
2. 普朗克的能量子假说和爱因斯坦的光子假说的内容是什么?它们分别能解释哪些现象?

本章小结

知识结构

参考下面的知识结构，请进一步梳理本章的知识。



回顾与评价

1. 通过本章的学习，你对磁场和电磁场有了哪些新的认识？
2. 电磁波在改善人类生活的同时，也存在许多不利的因素，我们该如何为社会的健康发展做出贡献？
3. 通过本章的学习，你对“量子化现象”有哪些认识？量子论可以解释哪些相关现象？你了解了哪些量子理论的新成果？

习题六

- 下列情形能产生磁场的有 ().
 A. 电流
 B. 变化的电场
 C. 静止的电荷
 D. 定向移动的电荷
- 手机通话时, 手机是将信号发送到 ().
 A. 基站
 B. 对方手机
 C. 电缆或光缆
 D. 地方电信局总机
- 如图 6-1 所示, 当圆环通有顺时针方向的电流 I 时, 环中点 A 处的磁场方向是 ().
 A. 沿着纸面向上
 B. 沿着纸面向下
 C. 垂直纸面向里
 D. 垂直纸面向外
- “神舟五号”飞船飞行过程中, 由多个地面测控站和四艘“远望号”远洋航天测量船组成了测控网, 通过发射和接收某种波, 对飞船进行跟踪、测量与控制. 这种波是 ().
 A. 红外线
 B. X 射线
 C. 微波
 D. 超声波
- 如图 6-2 所示是当年法拉第实验装置示意图, 两个线圈分别绕在一个铁环上, 线圈 A 接直流电源, 线圈 B 接灵敏电流计, 下列情况可能使电流计 G 产生感应电流的是 ().
 A. 开关 S 接通的瞬间
 B. 开关 S 断开的瞬间
 C. 开关 S 接通后一段时间
 D. 开关 S 接通后, 不断移动滑动变阻器滑片 P 时
- 老师做了一个物理小实验让学生观察: 一轻质横杆两侧各固定一金属环, 横杆可绕中心点自由转动, 老师拿一条形磁铁插向其中一个小环, 后又取出插向另一个小环, 如图 6-3 所示, 可以看到的现象是 ().
 A. 磁铁插向左环, 横杆发生转动
 B. 磁铁插向右环, 横杆发生转动
 C. 无论磁铁插向左环还是右环, 横杆都发生转动
 D. 无论磁铁插向左环还是右环, 横杆都不发生转动

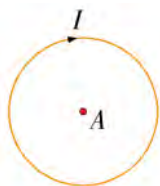


图 6-1

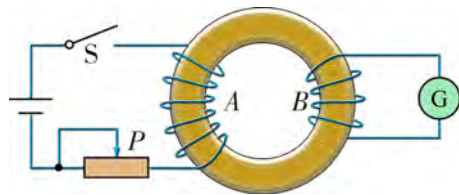


图 6-2

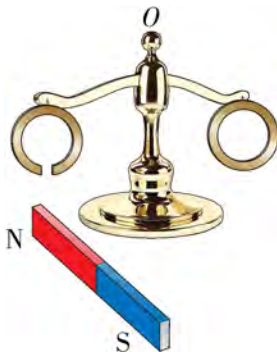


图 6-3

7. 有一种多功能 LED 限速牌, 如图 6-4 所示. 没有车通过的时候, 它显示出该路段的限速值. 当有车通过时, 它显示出该车的车速, 并根据该车是否超速给出提示, 这是雷达在生活中的一种应用. 下列说法正确的是 ().

- A. 该雷达只需发送一次电磁脉冲就能知道车的速度
- B. 该雷达至少要发送两次电磁脉冲才能知道车的速度
- C. 该雷达只需发送一次电磁脉冲就能知道车离雷达的距离
- D. 该雷达必须发送两次电磁脉冲才能知道车离雷达的距离

8. 如图 6-5 所示, 把一根柔软的弹簧竖直地悬挂起来, 使它的下端刚刚跟导电液体接触. 给弹簧通入电流时, 会发生什么现象? 为什么?

9. 如图 6-6 所示, 取一根长 10 m 左右较粗的导线 (也可用多根导线并联), 将导线两端连在一个灵敏电流计的两个接线柱上, 形成闭合回路. 两名同学迅速摇动这条导线, 可以观察到电流计指针偏转, 说明产生了感应电流. 比较两名同学沿南北方向站立摇绳与沿东西方向站立摇绳, 哪种情形产生的感应电流较大? 为什么?

10. 隐形飞机是人们通过研究仿生学, 应用最新的技术和材料, 让雷达无法侦察到飞行轨迹而实现“隐形”飞行的飞机, 如图 6-7 所示. 充分发挥想象力, 结合本章所学的电磁波的知识, 设计出若干种有可能让飞机“隐形”飞行的方案.

11. 通电直导线所产生的磁场可表示为 $B = (2 \times 10^{-7} \text{ T} \cdot \text{m/A}) \frac{I}{d}$, 其中 B 是以 T 为单位的磁感应强度, I 是以 A 为单位的电流, d 是以 m 为单位的离开导线的距离. 利用这个公式, 估计如下日常生活中所遇到的磁场的磁感应强度.

(1) 家庭导线中的电流很少超过 10 A, 那么距离这种导线 0.5 m 处的磁场大小与地磁场大小相比如何?

(2) 765 kV 的高压输电线中的电流常常可达 200 A. 假定这种输电线的高度为 20 m, 试估计输电线下地面处的磁感应强度. 这与家庭电路产生的磁场大小相比如何?

(3) 一些组织建议, 孕妇不要使用电热毯, 以防止磁场引起胎儿健康问题. 如果电热毯中的电流为 1 A, 胎儿离电热毯距离为 10 cm. 试求胎儿处磁场的磁感应强度, 并将它与地磁场进行比较.



图 6-4

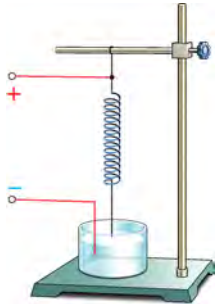


图 6-5

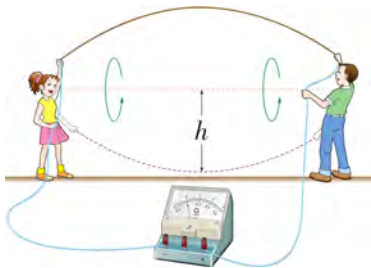


图 6-6



图 6-7



绿色印刷产品

批准文号：粤发改价格〔2017〕434号 举报电话：12315



定价：11.67元



致力于用榜样的力量提升学生成绩的共享家教平台

中国家庭教育学会荣誉会员单位

985/211 大学生 1对1 上门辅导

找家教就像叫“代驾”一样简单
家长们都在偷偷用的家教预约神器

记得拍照留存哦



扫码关注 预约上门

关注送200元优惠券

小初高全科辅导

学霸云集任您挑

学历真实可担保



与优秀大学生同行，激发孩子无限潜能



微信搜索公众号：365优教网

咨询热线：4000-711-365

YOUJ 优教

既是找老师，更是找榜样

家教老师全国招募中