

McGraw Hill Education

美国高中主流理科教材

科学发现者

物理

Physics 原理与问题

Principles and Problems

下册



浙江教育出版社

美国高中主流理科教材

科学发现者

物理

Physics

原理与问题

Principles and Problems

下册



浙江教育出版社

图书在版编目(CIP)数据

科学发现者. 物理 原理与问题 下册 / (美) 齐泽维茨(Zitzewitz, P. W.)等著; 钱振华等译. —杭州: 浙江教育出版社, 2008. 8

ISBN 978-7-5338-7248-9

I. 科… II. ①齐… ②钱… III. 物理课—高中—教学参考资料 IV. G634

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2008)第 118044 号

科学发现者

物理 原理与问题

出版发行 浙江教育出版社(杭州市天目山路40号 邮编 310013)

原著名 PHYSICS principles and problems

原出版 McGraw-Hill Education Glencoe

翻译 钱振华 沈珊雄 徐在新

责任编辑 周延春

封面设计 曾国兴

责任校对 郑德文

责任印务 温劲风

图文制作 君红阅读(北京)出版咨询有限公司

印刷 杭州富春印务有限公司

开本 787×1092 1/16

印张 54.25

字数 1 250 000

版次 2008年8月第1版

印次 2008年8月第1次

印数 0 001—5 000

标准书号 ISBN 978-7-5338-7248-9

定价 120.00元(上、中、下册)

联系电话: 0571-85170300-80928

e-mail: zjjy@zjcb.com

网址: www.zjeph.com

本书封底贴有麦格劳-希尔公司激光防伪标签, 无标签者不得销售。

第20章

静电

内容提要

- 观察电荷的行为，分析这些电荷是怎样与物质发生作用的。
- 考察存在于电荷之间的作用力。

学习本章的意义

在印刷机、复印机等设备的工作中，都应用了静电技术。但是，对于电子器件和闪电而言，静电现象却存在很大的危害。

闪电 你碰触到门的把手时所感受到的小火花，暴风雨中令人目眩的闪电等，都是放电现象的实例。尽管在这些情况中，电荷的产生过程及放电的规模有很大的区别，但它们的本质却是类似的。

想一想 ▶

雷电云层中形成电荷的原因是什么？它又是怎样以如此壮观的闪电形式放电的？

物理  在线
physicspp.com



起步实验



塑料尺吸引小纸屑

问题

将经毛皮摩擦过的塑料尺移近小纸屑时，你会看到什么现象？

步骤

1. 用打孔机打下15~20片碎圆纸屑，将它们放在桌面上。
2. 取一把塑料尺，将它与一块毛皮摩擦。
3. 将这把尺移近碎圆纸屑，观察这把尺对纸屑的作用。

分析

当尺移近纸屑时，有什么现象发生？当这些纸屑与尺接触后，又有什么现象发生？当尺移近纸屑时，你是否观察到某些未曾预料到的结果？如果是，请描述这些结果。

理性思维

当尺移近纸屑之前，有哪些力作用在纸屑上？当尺移近纸屑时，你能否推断出纸屑受到了哪些力的作用？

根据你对上述问题的思考，提出一种假设，以解释尺对纸屑的作用。



20.1 电荷

你 是否有过这样的体验：当你走在地毯上时，你的鞋子在与地毯充分摩擦后，如果再接触其他某个物体时，你的鞋底会有火花产生。1752年，富兰克林(B. Franklin)用他著名的风筝实验证明，闪电和摩擦所引起的火花是同一回事，由此激发了人们对电学领域的研究兴趣。富兰克林在实验中，将一串钥匙系在风筝上，并将这只风筝放飞到天空。当暴风雨来临时，他发现风筝线上松弛的部分开始向上竖起并摆动起来。而当富兰克林将他的指关节靠近这串钥匙时，产生了火花。用这种方法产生的电即为静电。

本章中，你将重点对**静电(electrostatics)**进行研究。静电的特点之一是能被人们收集并储存起来。从宏观世界的闪电现象，到微观世界的原子分子，都可以观察到静电的作用。由电池和发电机产生的是电流，而与电流有关的内容将在以后章节中讨论。

学习目标

- 指出带电物体之间存在的作用力，包括吸引力和排斥力。
- 理解起电是电荷的分离过程，而不是电荷的创生过程。
- 描述导体和绝缘体之间的区别。

关键词语

静电
电中性
绝缘体
导体

带电物体

不知你是否注意到，在空气干燥的日子里，当你用塑料梳子梳头时，你的头发会被梳子吸引过去。如果用一只气球摩擦你的头发，你的头发就会竖立起来。或许你还观察到这样的现象：当你从干衣机中取出衣物，尤其是袜子时，它们有时会粘在一起。从这些现象，你也许就可以理解本章开头的塑料尺吸引小纸屑的实验了。如图20-1所示，在这个实验中，许多纸屑被尺子所吸引。这表明，有一个较强的力作用在纸屑上，且这个力所引起的向上的加速度比重力导致的向下的加速度更大。

这个力和重力之间还存在其他的区别。只有用毛皮摩擦过的塑料尺才会吸引纸屑；而过一会儿后，尺子的这种吸引能力就会消失。与此不同的是，重力既不需要摩擦，也不会消失。当年，古希腊人在摩擦琥珀时，发现了与此类似的现象。琥珀一词在希腊语中为“elektron”，因此人们将这种吸引轻小物体的特性称为电，将物体经过摩擦而显示出电荷相互作用的过程称为起电。

同种电荷 事实上，你可以使用非常简单的器材（如透明胶带）来揭示电荷的相互作用。将一条胶带的一端折叠起5 cm作为把手，然后将余下的长约8~12 cm的部分贴在干燥、光滑的书桌上。然后，在它的旁边贴上第二条相同的胶带，并快速地将它们从桌面上拉起并使它们彼此靠近。这时你会看到，这两条胶带相互排斥，于是人们就说它们带电了。由于使它们带电的方法相同，因此它们带有的必然是同种电荷。这样，你就通过实验证明了带电物体的一条重要特性——带同种电荷的物体相互排斥。

你还可以通过一些简单的实验了解更多的静电知识。例如，你可能会发现，这种胶带也会被你的手所吸引。那么，是两面都能被吸引，还是仅仅一面被吸引呢？此外你还会发现，用不了多久，胶带上的电荷就会消失，尤其是在空气潮湿的日子里。当然，你可以再次采用上述方法使胶带带电。你也可以通过用你的手指在胶带两面轻轻摩擦的方法，将胶带上的电荷移去。

异种电荷 现在，请将一条胶带贴在桌面上，再将另一条胶带贴在第一条的上面。如图20-2a所示。然后，拉住下方胶带的把手，使两条胶带一起离开桌面。用你的手指摩擦它们，直到它们不再被手吸引。这表明，你已经移走了胶带上的所有电荷。此时，如果用你的双手分别拉这两条胶带的把手，快速地将它们分开，你就会发现，它们又都带电了，且同时被你的手所吸引。那么这时它们是否依然相互排斥？答案是否定的，它们相互吸引了。这表明它们都带了电，但两者所带的不再是同种电荷，而是异种电荷。

■ 图20-1 用毛皮摩擦过的塑料尺对小纸屑产生了吸引力。当这把尺靠近纸屑时，这个吸引力就会使纸屑克服重力而向上做加速运动。



再次将两条胶带重叠地贴在桌面上。将下方的胶带标记为B，上方的胶带标记为T。将它们一起从桌面上拉起，使其放电，再将它们分开。然后，将这两条胶带的把手端分别粘在桌子、灯罩或其他类似物体的边缘上，并保持一定的距离。如果此时将在衣服上摩擦过的梳子或笔杆逐一靠近这两条胶带，你就会发现，其中的一条胶带被梳子等物件吸引，而另一条却被排斥，如图20-2b所示。这样，你就能通过胶带来揭示带电物体间的相互作用了。

电荷实验 你可以通过什么方法使其他物体，如玻璃、塑料袋等带电呢？其实方法很简单：只要用丝绸、羊毛、塑料纸等不同的材料与它们摩擦即可。如果空气干燥，你还可以将脚上的鞋子在地毯上摩擦几下，然后再将你的手指靠近塑料袋，使其带电。如果你想要检验丝绸或毛皮等布料的带电情况，那么你可以在手上套一只塑料袋。在与布料摩擦后，从塑料袋中抽出你的手，然后将塑料袋和布料一同靠近胶带纸条。这样，通过观察它们的吸引或排斥情况，你就可以一目了然地得到结果了。

大多数带电物体会吸引一条胶带而排斥另一条胶带。你永远也不可能发现对两条胶带都排斥的物体。但是你却会发现，某些物体对两条胶带都会产生吸引。例如，你的手指就可能会将两条胶带都吸引过来。在本章后面部分，你将会探讨这种情况。

电荷的种类 通过上面的实验，你可以列出一张表，标记为B，表中的物体与贴在桌面上的下方胶带带有同种电荷。你还可以列出另一张表，标记为T，表中的物体与上方的胶带所带的电荷相同。不过，你无法列出第三张表，因为自然界中只存在两种类型的电荷——富兰克林分别称它们为正电荷和负电荷。根据富兰克林的规定，硬橡胶在与塑料摩擦后，所带的是负电荷；玻璃在与毛皮摩擦后，所带的是正电荷。

正如你已经证明的一样，原本不带电的两条胶带可以带异种电荷。你还可以证明，如果用毛皮摩擦塑料，那么塑料带负电，毛皮带正电。两类电荷不可能单独产生，而只能成对产生。这些实验表明，物体通常只能有两类电荷，即正电荷和负电荷。通过某些方式的接触，正、负电荷可以分离。若想进一步了解这一点，你必须考察物质的微观图像。

从微观角度考察电荷

电荷存在于原子中。1897年，汤姆孙（J.J.Thomson）发现，所有物质都包含质量很小且带负电荷的粒子，这种粒子被称为电子。在1909~1911年间，汤姆孙的学生，来自新西兰的卢瑟福（E.Rutherford）发现，原子中有一个质量很大的带正电的核。如果原子核所带的正电荷等于周围电子所带的负电荷，那么就说该原子呈电中性（neutral）。



■ 图20-2 两条胶带可以带有异种电荷(a)，因此它们可用来演示同种电荷与异种电荷的相互作用(b)。

颜色惯例

- 正电荷用红色表示。
- 负电荷用蓝色表示。

■ 图20-3 在用毛皮使硬橡胶棒带电的过程中，一些电子从毛皮转移到了硬橡胶棒上。通过这种方式，两者都变成了带电体。



借助外部能量，外层电子可以从原子中脱离。从整体上看，失去电子的原子带正电，因此，任何由这种缺少电子的原子所构成的物质都带正电。从原子中脱离的电子可以保持独立状态，或者附着在另外的原子上，成为带负电的粒子。从微观的角度看，物体获得电荷的过程就是电子的转移过程。

电荷的分离 如果两个电中性的物体相互摩擦，那么每个物体都将带电。例如，当硬橡胶棒和毛皮摩擦时，毛皮原子中的电子便转移到了硬橡胶棒上，如图20-3所示。硬橡胶棒上多余的电子使它带负电；失去电子的毛皮则带正电。但是，这两个物体的总电荷保持不变，即电荷是守恒的。这也从一个侧面说明，电荷既不能被创生，也不能被消灭，所有实际能够发生的只是通过电子的转移而使正负电荷分离而已。

摩擦会使行驶中的汽车或卡车的轮胎带电；雷电云内部的活动会使其底部云层带负电，顶部云层带正电。在这两种情况中，电荷都没有被创生，而只是被分离了。

导体和绝缘体

从中间握住一根塑料棒或一把梳子，只摩擦它们的一端，此时你会发现，只有被摩擦的一端带电了。换句话说，转移到塑料棒上的电子停留在原处而没有发生移动。在某些物体中，电荷很难发生移动，这些物体称为**绝缘体 (insulator)**。本章前面进行的起电实验中的胶带就是绝缘体。此外，玻璃、干燥的木头、大多数塑料、布料以及干燥的空气等，都是很好的绝缘体。

假定用绝缘体架起一根金属棒，那么金属棒就被绝缘了，或者说它完全被绝缘体包围了。此时如果用带电的梳子接触这根金属棒的一端，你就会发现，这些电荷会很快地散布于整根金属棒中。与绝缘体不同，在某些物体中，电荷很容易发生移动，人们将这种物体称为**导体 (conductor)**。例如，电荷能迅速地传遍整个金属，因此金属就是一种良导体。组成金属的每个原子中，至少有一个电子是很容易移动的，因此这

物理学的应用

► **导体还是绝缘体** 人们通常喜欢简单地将某种物体归入导体或者绝缘体，但事实上，这种分类可能会随着物体存在形态的改变而改变。例如，当碳以金刚石的形式存在时，它是一种绝缘体；而如果它是以石墨的形式存在的，它就变成导体了。这是因为，金刚石中的每个碳原子与另外四个碳原子总是紧密地结合在一起；然而，石墨中的每个碳原子只与另外三个碳原子有较强的作用力，而对第四个碳原子的束缚力较弱，因此在一定程度上容许其电子自由移动。这种内部结构的不同，导致石墨的导电性比金刚石强得多，虽然它们都是由同样的碳原子构成的。

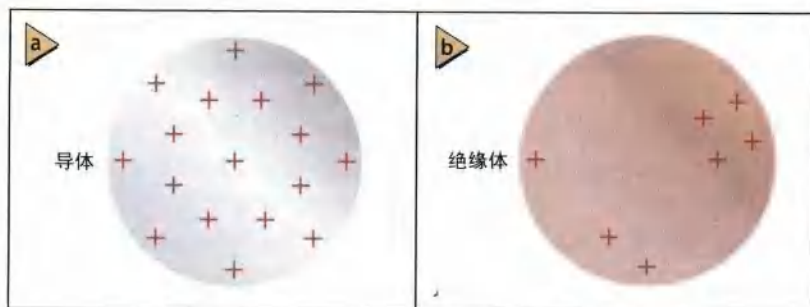


图20-4 导体中的电荷分布于整个表面(a)，而绝缘体中的电荷总是停留在它们原来的地方(b)。

些电子不是属于某个原子，而是属于整个金属的，它们可以在金属中自由穿行。如图20-4所示说明了电荷在导体和绝缘体中的区别。铜和铝都是很好的导体，它们被广泛应用于电路中。等离子体（一种高度电离的气体）以及石墨也都是电的良好导体。

空气可变为导体 空气是一种绝缘体，但在一定条件下，它可变为导体，使电荷在其中通过。例如，当你穿着鞋子与地毯摩擦后再去开门时，你的手指与门把手之间会有火花跳跃而使你放电，放电后过量的净电荷离你而去，你又呈现为电中性。同样地，闪电是由于雷电云间的放电而产生的。在上述两种情况中，空气在短时间内变成了导体。你之前已经学过，导体中必须具有可以自由移动的电荷。所以，在呈电中性的空气中，必然可以形成可自由移动的带电粒子，只有这样才会产生前面提到的电火花与闪电。当闪电发生时，云层和大地中的过量电荷足以使电子从空气分子中脱离。这些电子会与带正电或带负电的原子形成等离子体（导体的一种）。大地与雷电云之间通过这种导体形式的放电而形成的明亮的电弧就是闪电，而你的手指与门把手之间的放电则称为火花放电。

本节复习题

- 带电物体** 在与羊毛衣服摩擦之后，塑料梳子就能吸引小纸屑了。为什么几分钟后这把梳子又会失去这种能力？
- 电荷的种类** 在本节开始所描述的实验中，你如何知道究竟哪条胶带是带正电的？
- 电荷的种类** 木髓球是由轻质材料，如泡沫塑料制成的小球，其表面常常涂有一层石墨或铝粉。你该如何确定一只用绝缘线悬挂着的木髓球所带的电是正电还是负电？
- 电荷分离** 硬橡胶棒与毛皮摩擦后带负电。此时毛皮上的电荷会发生什么情况？为什么？
- 电荷守恒** 一只苹果包含了亿万个带电粒子。当把两只苹果放在一起时，为什么它们不会相互排斥？
- 使导体带电** 用丝线将一根长金属棒悬挂起来，这样就可以认为它是绝缘的。现在用一根带电玻璃棒去接触这根金属棒的一端，描述此时金属棒上的电荷分布情况。
- 摩擦起电** 硬橡胶棒在与毛皮摩擦后就会带负电。如果将一根铜棒与毛皮摩擦，会发生什么情况？
- 理性思维** 曾有人提出，电荷是一种流体，它具有过量的这种流体的物体流向缺少这种流体的物体中。为什么两种电荷的流动模型比这种单流体的模型要好？

► 学习目标

- 归纳静电力与电荷以及两者距离之间的关系。
- 解释怎样通过传导和感应的方法使物体带电。
- 建立一种模型，显示带电物体是怎样吸引电中性物体的。
- 应用库仑定律求解一维和二维问题。

► 关键术语

验电器
传导起电
感应起电
接地
库仑定律
库仑
元电荷

静电力一定很强，因为它很容易就能产生比重力加速度更大的加速度。你已经知道，静电力可能是排斥力，也可能是吸引力，而重力肯定是吸引力。许多科学家曾经花费了许多年的时间，试图对静电力进行测量。因在流体力学领域的出色工作而闻名于世的伯努利（D.Bernoulli）就曾在1760年对静电力进行过某种粗略的测量。1770年，卡文迪许（H.Cavendish）证明了静电力服从平方反比关系，但他却一直沒有公布他的这一研究成果。直到一个多世纪后，他的手稿才被人们发现，而那时，他所做的所有工作都已由别人重复完成并公布于世了。

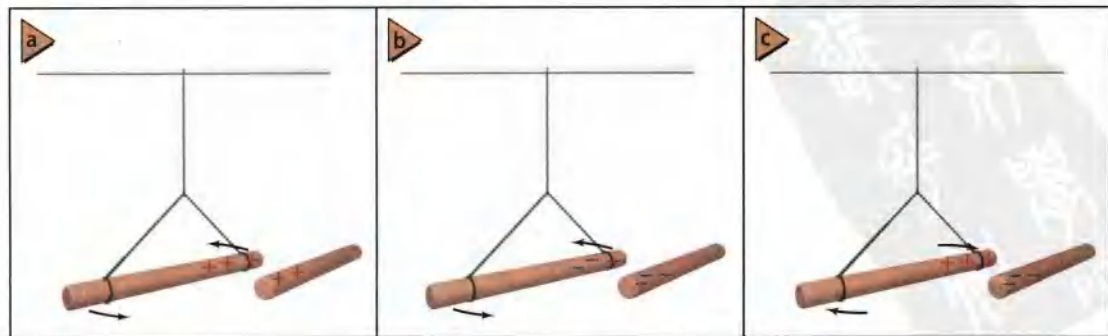
作用在带电体上的力

你在胶带实验中所观察到的力，也可以通过一根悬挂着的并能自由转动的带负电的硬橡胶棒来显示，如图20-5所示。如果将另一根带负电的硬橡胶棒接近这根悬挂着的硬橡胶棒，那么它就会被弹开。也就是说，两根带负电的棒，即使并不相互接触，也彼此排斥。它们之间的这种力称为静电力，它能超越距离产生作用。如果将一根带正电的玻璃棒悬挂起来，再将另一根带同种电荷的玻璃棒靠近它，那么这两根带正电的棒也会彼此相斥。但是，如果将一根带负电的硬橡胶棒靠近一根带正电的玻璃棒，它们就会彼此相互吸引，且悬挂着的玻璃棒将转向带异种电荷的硬橡胶棒。根据胶带实验以及带电棒实验的结果，可以得出以下结论：

- 电荷有两类：正电荷与负电荷。
- 电荷可以在相隔一定距离的情况下对其他电荷施加作用力。
- 当电荷彼此靠近时，这种力将会增强。
- 同种电荷相互排斥，异种电荷相互吸引。

无论是胶带实验还是带电棒实验，都不能非常灵敏且方便地确定物体所带的电荷。为此，科学家发明了一种称为验电器的仪器。验电器（electroscope）上有一个金属球，它通过一根金属杆与两片又轻又薄的金属箔片相连。如图20-6所示为一只尚未带电的验电器，此时金属箔片自由下垂。验电器中的金属箔片被密封在瓶中，以消除空气流动对它的影响。

■ 图20-5 当一根带电棒移近另一根悬挂着的带电棒时，两者或者相互吸引，或者相互排斥。



传导起电 当带负电的棒接触验电器上的金属球时，负电荷就会转移到球上。然后，这些电荷将遍布金属的整个表面，如图20-7a所示。由于两片金属箔片上都有了负电荷，它们便相互排斥而彼此分开，此时验电器获得了净电荷。通过与带电物体接触，使电中性的物体带电的过程称为**传导起电 (charging by conduction)**。如果验电器带的是正电，箔片也会张开。那么，怎样才能知道验电器带的究竟是正电还是负电呢？这可以通过将带有已知电荷类型的棒靠近该验电器的金属球，然后根据箔片张开的情况来确定。如果验电器与这根棒的电性相同，如图20-7b所示，那么箔片将分得更开；如果验电器与这根棒的电性相反，如图20-7c所示，那么箔片将靠拢。



■ 图20-6 验电器是用来检验电荷的仪器。当验电器尚未带电时，两片金属箔自由下垂，几乎靠在一起。

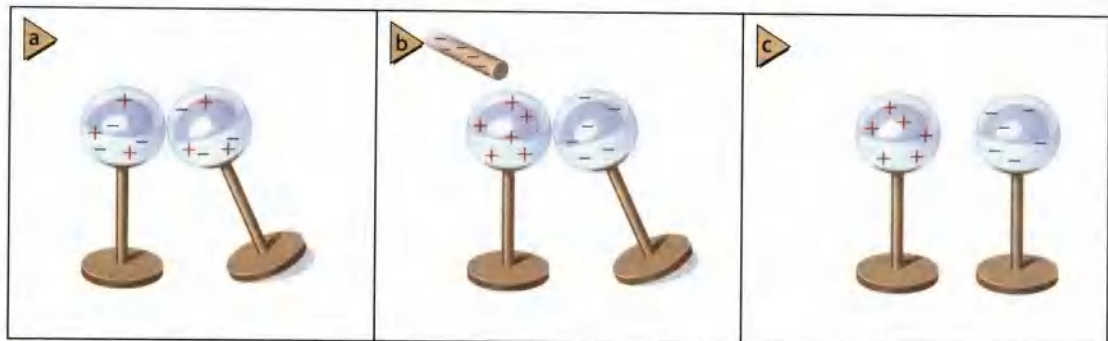
电中性物体上的电荷分离 在本章开头的实验中，当你的手指接近胶带时，胶带被你的手指所吸引。但是你的手指是电中性的，它具有等量的正电荷与负电荷。你已经知道，金属中的电荷很容易移动。并且，在出现电火花的情况下，静电力可使绝缘体变成导体。根据这些知识，你就可以建立一个简单的模型，并用它来解释你的手指对带电胶带的施力问题。

假定你将你的手指或其他任何不带电的物体靠近一个带正电的物体，此时你手指中的负电荷将被这个带正电的物体所吸引，而你手指中的正电荷将被排斥。尽管此时手指仍保持电中性，但正负电荷却被分离了。你的手指与带电物体靠得越近，静电力越强。因此，电荷的分离使得你的手指与带电物体之间产生了吸引力。带电的塑料尺对电中性的纸屑的作用力同样也是这种电荷分离过程的结果。

雷电云层下部的负电荷也能导致大地中的电荷分离，使得大地中的正电荷被吸引到云层下方的地球表面上去。云层与地面上的电荷之间的作用力可将空气分子电解为带正、负电荷的粒子。这些粒子可以自由运动，因此它们在大地与云层之间建立了导电通道。当雷电以500 000 km/h的数量级的速率通过这种导电通道，使得云层放电时，你就看到了闪电。

■ 图20-7 验电器带负电后，它的两片金属箔片将分开(a)。带负电的棒将电子推向箔片，使金属箔片分得更开(b)；而带正电荷的棒吸引了一些电子，从而使两片金属箔片并拢些(c)。





■ 图20-8 感应起电的一种办法是让两个电中性的球相互接触(a)，将一根带电棒靠近它们(b)，然后将两球分开，再移去带电棒(c)。分开后，这两个球上所带的电荷的数值相等，但电性相反。

感应起电 如图20-8a所示，有两个完全相同且互相接触的带绝缘支架的金属球。当一根带负电的棒移近其中一个金属球时，如图20-8b所示，靠近棒的球上的电子就会被驱赶到离棒较远的那个球上，使其带负电。此时若将两球分开，那么每个球上便都带了电。而且，如图20-8c所示，它们所带的电荷的数量相等而电性相反。这种没有接触而使物体带电的过程称为**感应起电**(charging by induction)。

单个物体通过**接地**(grounding)的方法也能感应起电。接地就是将物体与大地连接以消除过量电荷的过程。地球是一个巨大的球体，它能吸收大量的电荷而不会成为明显的带电体。如果将一个带电体与大地接触，那么带电体上的所有电荷都会流向大地。

如图20-9a所示，当一根带负电的棒移近验电器的金属球时，电子被排斥到了箔片上。如果此时将验电器的金属球接地，那么这些电子就会不断地从验电器转移到大地上，直到箔片变成电中性为止，如图20-9b所示。如果撤除接地，移走带电棒，此时验电器就如图20-9c所示，因缺少了电子而带正电。接地也可用来产生负电。例如，将带正电的棒移近一个接地验电器的金属球，那么大地中的电子将被吸引过来，验电器便获得了负电。在这个过程中，验电器上的感应电荷的电性与用来使它起电的物体的电性相反。由于带电棒始终未曾与验电器接触，它的电荷没有被转移，因此它可多次被用来使物体感应起电。

■ 图20-9 带负电的棒引起验电器中的电荷分离(a)。如果验电器接地，负电荷就会从验电器转移到大地上(b)。撤除接地，再移走带电棒，验电器上便只留下了正电荷(c)。



库仑定律

你已经看到,两个或多个带电体之间存在力的作用。在胶带实验中你又发现,这个力与距离有关。带电梳子离胶带越近,这个力就越强。你还发现,梳子所带的电荷量越多,这个作用力就越大。那么,在实验中,如何才能控制电荷量的变化呢?1785年,法国物理学家库仑(C.Coulomb)解决了这个问题。库仑使用了如图20-10所示的装置:一根绝缘棒的两端各有一个导体小球A和A',绝缘棒用一根金属丝悬挂着。将一个同样的小球B固定在球A相接触的位置上。当A、B两球与一个带电体接触后,电荷便均匀地分布在这两个球上。因为这两个球的大小相同,因此它们所带的电荷的数值相同。如果用 q 表示电荷量,那么这两个球所带的电荷量可分别表示为 q_A 和 q_B 。

静电力与距离的关系 通过实验,库仑发现了两个带电小球之间的作用力与它们之间的距离存在一定的关系。首先,他仔细测量了使金属丝扭转一定角度所需的力的大小。其次,他设法使A球和B球带上等量的电荷,并改变它们之间的距离 r 。此时,作用在A球上的力使金属丝发生了扭转。通过测量A球的扭转角度,库仑计算出了A球和B球之间的排斥力。他的这一实验表明,带电小球之间的静电力 F 与两球球心之间距离 r 的平方成反比,即

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

静电力与电荷量的关系 为了研究静电力与电荷量的关系,必须在测量中改变两球所带的电荷量。这并没有难倒库仑。首先,他像之前所做的那样,使两球带上等量电荷。然后,他取一个不带电的、大小与B球相同的C球,当C球与B球接触时,这两个球便会平均分配原来B球上的电荷。因为两球的大小相同,所以此时B球上的电荷量只有原先的一半。也就是说,此时B球上的电荷量等于A球的一半。接着,库仑将C球移走,调整B球的位置,使得A、B两球的距离 r 与先前相同。此时他发现,A、B两球间的作用力只有原来的一半大小。也就是说,两个物体之间的静电力与物体所带的电荷量成正比,即

$$F \propto q_A q_B$$

经过多次类似的测量后,库仑归纳出一条定律,即著名的**库仑定律**(Coulomb's law)。库仑定律指出,两个相距为 r 的电荷 q_A 和 q_B 之间的作用力大小,与它们所带的电荷量成正比,与它们之间距离的平方成反比:

$$F \propto \frac{q_A q_B}{r^2}$$

电荷的单位:库仑 直接测量一个物体所带的电荷量是比较困难的。不过,库仑实验表明,电荷量与静电力之间存在一定的关系。因此,你可以通过带电物体之间的静电力来推导电荷量的单位。在SI单位制中,电荷量



图20-10 库仑利用该装置测量了A球和B球之间的作用力。同时,他还研究了改变A、B两球之间的距离时球A的偏转情况。

迷你实验

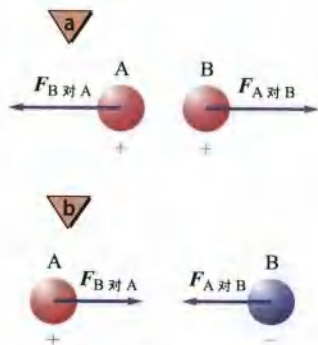
对感应起电和传导起电的研究

利用气球和验电器研究感应起电和传导起电。

1. 将一只气球与毛皮摩擦,使它带电,然后让它接近一个尚未带电的验电器。对将会发生的情况作出预测。
2. 预测当这只气球与验电器接触时,将会发生什么情况。
3. 检验你的上述预测。

分析与结论

4. 描述你的观察结果。
5. 解释每一步骤中金属箔片的状况,并将其用示意图表示出来。
6. 描述用毛皮使验电器起电的结果。



■ 图20-11 确定静电力的方向的规则:同种电荷相互排斥,异种电荷相互吸引。

的单位为库仑(Coulomb),用符号C表示。1 C是指 6.24×10^{18} 个电子或质子所带的电荷量。一个电子所带的电荷量为 1.60×10^{-19} C,人们将这个最小的电荷量称为元电荷(elementary charge)。即使是一个很小的物体,如一枚分币,也含有大约 1×10^6 C的负电荷。但是,数量如此巨大的负电荷却几乎不产生任何外部效应,因为它被等量的正电荷所平衡。若电荷不平衡,即使是 10^{-9} C的电荷量,也能显示出很大的力来。

根据库仑定律,电荷 q_B 作用在与它相距 r 处的电荷 q_A 上的力可表示为:

$$\text{库仑定律 } F = k \frac{q_A q_B}{r^2}$$

两个电荷之间的静电力,等于静电力常量与这两个电荷的电荷量的乘积,再除以它们之间距离的平方。

当电荷的单位为C,距离的单位为m,力的单位为N时,静电力常量 $k = 9.0 \times 10^9 \text{ N} \cdot \text{m}^2/\text{C}^2$ 。

库仑定律既给出了 q_A 作用于 q_B 上的力的大小,也给出了 q_B 作用于 q_A 上的力的大小。这两个力大小相等、方向相反。当你将两条带有同种电荷的胶带靠近时,你就会观察到一个符合牛顿第三定律的情况:每条胶带都对另一条施加作用力。这时,如果将一把带电的梳子靠近其中任一条胶带,你就会发现,质量较小的胶带更容易发生运动。但是,由于梳子和你的总质量很大,所以你们的加速度非常小,根本无法显现出来。

与其他的力一样,静电力也是矢量,它既有大小又有方向。然而上面的库仑定律仅仅给出了力的大小。为了确定力的方向,就需要利用“同性相斥、异性相吸”的原理作出判断。当两个带正电的物体A和B相互靠近时,它们彼此间施加的是排斥力,如图20-11a所示;但是,如果物体A带正电而物体B带负电,那么这种力就是吸引力了,如图20-11b所示。

► 解题策略

关于静电力的问题

用以下步骤求解电荷间静电力的大小和方向。

1. 作出系统的示意图,标出所有的距离和角度的大小。
2. 作出系统的矢量图。
3. 利用库仑定律计算力的大小。
4. 根据你所画的图示,利用三角关系找出力的方向。
5. 分别对数值和单位进行代数运算,保证单位与问题中变量的单位一致。
6. 检查你的答案,看一看数值是否合理。

► 例题 1

二维空间中的库仑定律 已知小球A所带的电荷量为 $+6.0\ \mu\text{C}$ ，小球B所带的电荷量为 $-3.0\ \mu\text{C}$ ，B球位于A球右方 $4.0\ \text{cm}$ 处。

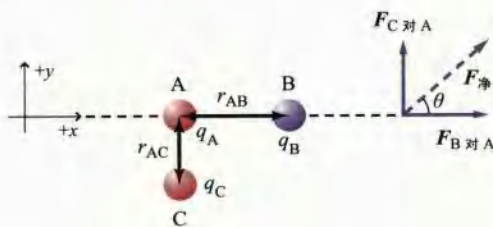
a. 求B球对A球的作用力。

b. 如果所带电荷量为 $+1.5\ \mu\text{C}$ 的第三个小球C加入该系统，它位于A球的正下方 $3.0\ \text{cm}$ 处，求此时A球受到的静电力。

1 分析概括问题

- 建立坐标轴，标出这些小球的大概位置。
- 画出并标明各球之间的距离。
- 画出并标明各个矢量力。

已知:	未知:
$q_A = +6.0\ \mu\text{C}$	$r_{AB} = 4.0\ \text{cm}$
$q_B = -3.0\ \mu\text{C}$	$F_{B\text{对}A} = ?$
$q_C = +1.5\ \mu\text{C}$	$r_{AC} = 3.0\ \text{cm}$
	$F_{C\text{对}A} = ?$
	$F_{\text{净}} = ?$



2 求解未知量

a. 计算B球对A球的作用力。

$$F_{B\text{对}A} = k \frac{q_A q_B}{r_{AB}^2} = 9.0 \times 10^9\ \text{N} \cdot \text{m}^2/\text{C}^2 \times \frac{6.0 \times 10^{-6}\ \text{C} \times 3.0 \times 10^{-6}\ \text{C}}{(4.0 \times 10^{-2}\ \text{m})^2} = 1.0 \times 10^2\ \text{N}$$

将 $q_A = 6.0\ \mu\text{C}$, $q_B = 3.0\ \mu\text{C}$, $r_{AB} = 4.0\ \text{cm}$ 代入。

因为A球与B球所带的是异种电荷，所以B对A的静电力方向向右。

b. 计算C球对A球的作用力。

$$F_{C\text{对}A} = k \frac{q_A q_C}{r_{AC}^2} = 9.0 \times 10^9\ \text{N} \cdot \text{m}^2/\text{C}^2 \times \frac{6.0 \times 10^{-6}\ \text{C} \times 1.5 \times 10^{-6}\ \text{C}}{(3.0 \times 10^{-2}\ \text{m})^2} = 9.0 \times 10^1\ \text{N}$$

将 $q_A = 6.0\ \mu\text{C}$, $q_C = 1.5\ \mu\text{C}$, $r_{AC} = 3.0\ \text{cm}$ 代入。

C球与A球所带的是同种电荷，因此它们彼此相斥，所以C球对A球的静电力方向向上。

计算 $F_{B\text{对}A}$ 及 $F_{C\text{对}A}$ 的矢量和，求出作用在A球上的净力 $F_{\text{净}}$ 。

$$F_{\text{净}} = \sqrt{F_{B\text{对}A}^2 + F_{C\text{对}A}^2} = \sqrt{(1.0 \times 10^2\ \text{N})^2 + (9.0 \times 10^1\ \text{N})^2} = 130\ \text{N}$$

将 $F_{B\text{对}A} = 1.0 \times 10^2\ \text{N}$, $F_{C\text{对}A} = 9.0 \times 10^1\ \text{N}$ 代入。

$$\tan \theta = \frac{F_{C\text{对}A}}{F_{B\text{对}A}}$$

$$\theta = \tan^{-1} \left(\frac{F_{C\text{对}A}}{F_{B\text{对}A}} \right)$$

$$= \tan^{-1} \left(\frac{9.0 \times 10^1\ \text{N}}{1.0 \times 10^2\ \text{N}} \right) = 42^\circ$$

将 $F_{C\text{对}A} = 9.0 \times 10^1\ \text{N}$, $F_{B\text{对}A} = 1.0 \times 10^2\ \text{N}$ 代入。

$F_{\text{净}} = 130\ \text{N}$ ，方向与x轴成 42° 角向上。

3 验证答案

- 单位是否正确?** $1\ \text{N} \cdot \text{m}^2/\text{C}^2 \cdot \text{C} \cdot \text{C}/\text{m}^2 = 1\ \text{N}$ 。因此答案的单位的单位是N。
- 方向是否有意义?** 同种电荷相互排斥，异种电荷相互吸引。
- 数值是否合理?** 净力与分力的大小相差并不大。

► 练一练

9. 一个电荷量为 $-2.0 \times 10^{-4} \text{ C}$ 的电荷与另一个电荷量为 $8.0 \times 10^{-4} \text{ C}$ 的电荷相距 0.30 m 。这两个电荷间的静电力为多大?
10. 一个电荷量为 $-6.0 \times 10^{-6} \text{ C}$ 的电荷对另一个相距 0.050 m 的电荷施加了 65 N 的吸引力。第二个电荷的电荷量为多少?
11. 在例题1中, 如果B球所带电荷量为 $+3.0 \mu\text{C}$ 。试作出示意图, 计算A球受到的净力。
12. A球位于原点, 所带的电荷量为 $+2.0 \times 10^{-6} \text{ C}$ 。B球位于x轴上的 $+0.60 \text{ m}$ 处, 所带的电荷量是 $-3.6 \times 10^{-6} \text{ C}$ 。C球位于x轴上的 $+0.80 \text{ m}$ 处, 所带的电荷量是 $+4.0 \times 10^{-6} \text{ C}$ 。试确定作用在A球上的净力。
13. 确定第12题中作用在B球上的净力。

在应用库仑定律时, 要牢记库仑定律只适用于点电荷或电荷均匀分布的带电小球。也就是说, 如果电荷均匀地分布在整个球面或球体上, 那么就可以将这个球体作为全部电荷位于其球心处的一个点电荷来处理。但是, 如果带电球为一个导体, 且附近存在另外的带电体, 那么由于球上的电荷会被吸引或排斥, 因此它的作用就不能再等同于一个位于球心的点电荷了。所以, 在应用库仑定律之前, 必须仔细考察两个带电球的大小及其距离远近的情况。在本书的习题中, 除非另有说明, 一般总是假定带电球足够小, 相距足够远, 因此它们都可看成是点电荷。当你应用库仑定律讨论长导线或平板等形状的带电体时, 这种非点电荷的情况要另作考虑。

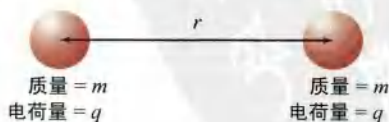
静电知识的应用

静电知识在实际生产、生活中有很多应用。例如, 如图20-12所示, 利用静电技术收集从烟囱排出的煤烟灰, 可减少空气污染; 通过静电感应使

● 挑战性问题

如右图所示, 两个质量均为 m 的相同小球带有等量的正电荷 q , 已知它们相距 r 。

1. 为了使每个球都处于平衡状态, 也就是说, 为了使两球间的万有引力和静电斥力相等, 试推导出球上所带的电荷量 q 所必须满足的关系式。
2. 如果两球的距离增加1倍, 这对上一问题中所得到的 q 的表达式会有怎样的影响?
3. 如果两球的质量均为 1.50 kg , 为了保持平衡, 小球所带的电荷量为多少?





■ 图20-12 从高大的烟囱中排出的煤灰是煤燃烧的产物。静电除尘器可用来减少煤灰的排放量。

油漆微粒带电，这样油漆就能被非常均匀地喷涂在汽车或其他物体上了；复印机利用静电将墨粉印到纸上，从而使原文件精确地再现……但是，静电也有许多危害——静电会引起灰尘的吸附，从而毁坏胶片；静电荷放电时会损坏电子设备。由于存在这些情况，因此在设计电子和电器设备时，要尽量避免静电荷的聚集，并设法消除已积累的静电荷，以保证安全。

本节复习题

14. **静电力与电荷量** 静电力与电荷量之间有什么关系？描述一下同种电荷间和异种电荷间的静电力。
15. **静电力与距离** 静电力与距离之间有什么关系？如果两个电荷间的距离增加到原来的3倍，静电力的大小将如何改变？
16. **验电器** 验电器带电时，它的金属箔片将张开一定的角度，并保持这一角度不变。为什么它们不会进一步张开？
17. **使验电器带电** 解释怎样利用以下带电体使验电器带正电。
 - a. 带正电的棒。
 - b. 带负电的棒。
18. **吸引电中性物体** 哪两个特性可以说明电中性的物体能被带正电和带负电的物体所吸引的原因？
19. **感应起电** 在用验电器进行感应起电时，如果先移走带电棒，再撤去金属球的接地，这样做可能会发生什么情况？
20. **静电力** 两个带电小球相距 r 。已知其中一个小球所带的电荷量为 $+3\mu\text{C}$ ，另一个小球所带的电荷量为 $+9\mu\text{C}$ 。试比较前者对后者的静电力与后者对前者的静电力。
21. **理性思维** 假定你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。按照库仑定律，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。

物理实验 • 实验设计

带电物体

在本章中，你观察和研究了由于电荷分离所引起的现象。你已经知道，摩擦时，硬橡胶和塑料容易得到电子而带负电，玻璃和毛皮则容易失去电子而带正电。那么，如果两种都容易得到电子而带负电的物体相互摩擦，情况又将如何？此时是否有电子转移？如果有，哪种物体将获得电子？哪种物体将失去电子？在这个实验中，你要设计一种方法，以便加深关于正负电荷的研究。

问题

怎样检测某种物体获取正负电荷的能力？

目标

- 观察容易得到电子或失去电子的各种物体。
- 对比与比较各种物体获得电子的能力。
- 解释数据，按照从得电子能力最强到失电子能力最强的次序将各种物体排序。

安全警示



实验器材

15 cm的塑料尺

细线

支架

胶带

各种将被带电的物体，如硬橡胶棒、塑料棒、玻璃棒、PVC管、铜管、钢管、铅笔、钢笔、毛皮、丝绸、塑料纸、塑料袋、蜡纸及铝箔等

实验步骤

1. 如左图所示，将15 cm的塑料尺悬挂在支架上。使用前最好先将这把尺用肥皂水洗涤，然后用清水彻底冲洗干净并晾干，尤其在潮湿的天气更要如此。细线应系在尺子的中点，并用胶带在细线与尺子的系点处环绕2~3圈。
2. 作为参考，你可以采用以下方法使物体带有某种类型的电荷：(1) 将塑料尺与毛皮摩擦，结果塑料尺上有过量的负电荷，而毛皮上有过量的正电荷。(2) 将塑料尺与塑料袋摩擦，结果塑料尺上有过量的正电荷，而塑料袋上有过量的负电荷。



数据表					
物体 1	物体 2	尺上的电荷 (+, -, 0)	观察到的 尺的运动	物体1上的电荷 (+, -, 0)	物体2上的电荷 (+, -, 0)

- 设计一种方案，以检测哪种物体容易获得电子，哪种物体容易失去电子。尝试各种物体的组合，并将你的观察结果记录在数据表中。
- 设计一种测试方法，以确定某个物体是否呈电中性。注意，带电的尺可吸引电中性物体，只要它引起了电中性物体中的电荷的分离。
- 在进行实验前，与老师一起讨论你的方案，并征得老师的同意。

分析

- 观察与推断** 当你将两种带电物体放在一起时，你能否检测出这两种带电物体间的作用力？描述这个力。
- 建立模型** 画出这两种物体上的电荷分布情况，其中之一是你所要考察的。利用你所作的示意图，解释在你的实验中为什么这些物体是这样作用的。
- 得出结论** 哪种物体获得了过量的电子？哪种物体不容易获得电子？
- 得出结论** 哪种物体容易获得电子？哪种物体容易失去电子？
- 解释数据** 根据你的数据表，列出一张表格，反映物体获得电子的能力。

结论与应用

- 解释下列术语在静电学中的含义：过量电荷、电荷不平衡。
- 过量电荷能保存在物体上吗？过一段时间它会消失吗？
- 你能否用金属棒代替悬挂的塑料尺完成同样的实验？请说明理由。
- 盛有食品的塑料盒常常需要用光亮的塑料薄膜封住。为什么将塑料薄膜从盒口上拉开时，它们会粘在一起？

进一步探索

复习本书中关于验电器的知识。设计一个新的实验，要求不用悬挂尺而用验电器来检测物体的带电类型。

生活中的物理学

大型卡车的后端常常拖有一根镶嵌金属丝的橡皮条或铁链，这有什么用？


物理 在线

若想了解更多关于静电方面的知识，请登录网站：physicspp.com。

实际上，地球上的大多数物体都不会产生静电，因为它们的表面吸附了一层水汽，电子很容易移向大地或从大地中移入。你在本章的学习中已经知道，地球几乎可以吸收任何数量的电荷。但是太空中没有水汽，且与地球离得很远。因此，来自太阳或者电离层中的带电粒子会投射并吸附在宇宙飞船上，使飞船表面的电压高达数千伏。

等离子体与起电 在第13章中你已经知道，等离子体是由自由电子与正离子组成的。位于轨道上的宇宙飞船的周围就环绕着一层薄薄的等离子体。由于等离子体中的电子比质量较大的正离子更容易移动，因此飞船表面容易吸引电子，从而产生负电。这种负电最终又会吸引某些质量较大的带正电的物体，而这些物体对飞船的撞击可能会损坏飞船的表面。

国际空间站面临的另一个问题来自将太阳能转化为电能的太阳能电池板阵列。当电池板向宇宙飞船供电时，飞船表面的电压会趋近于太阳能电池板阵列的电压，从而会在飞船表面与其周围的等离子体之间产生电弧。

电弧引起的问题 电弧的温度极高，且伴有较大的电流。它们可能会过早点燃回程火箭或诱发电雷，并因此干扰控制飞船的电子设备。太阳能电池板尤其容易被电弧所损坏。

此外，电弧还有可能损坏飞船的零件，甚至危及在太空行走的宇航员。

为了减小电压，以保护飞船和宇航员，空间站的表面需要通过一种称为等离子

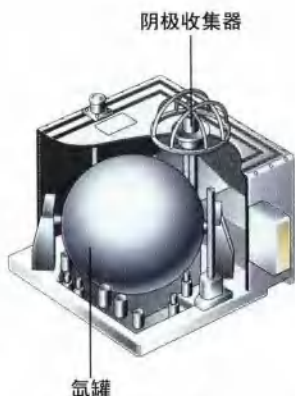
体接触器的导体与飞船周围的等离子体云连接。这种连接从空间站边缘处开始，这里有一台“等离子体接触器单元 (PCU)”。从PCU中的储存罐内会放出一种氙蒸气，它在阴极收集器上被电流所电离。处于等离子态的电离氙穿过阴极收集器后，到达飞船外部。正是这种导电的等离子体蒸气，使得飞船与其周围的等离子体云形成连接，从而使飞船表面电压降低到安全的范围内。

未来应用 未来的宇宙飞船可能会将等离子体接触器应用于推进系统中。例如，可变的特种脉冲磁等离子体火箭就有可能应用这种为飞船与其周围等离子体提供电接触而排出的

等离子体。科学家设想，这类火箭可用于未来的星际航行。



等离子体接触器单元 (PCU)



PCU截面图

进一步探索

- 应用** 等离子体接触器的作用是什么？它是否与你的手指使验电器接地的作用类似？
- 研究** 科学家是如何估算国际空间站表面的电荷量的？

20.1 电荷

关键术语

- 静电
- 电中性
- 绝缘体
- 导体

重要概念

- 电荷有两种：正电荷和负电荷。你在胶带实验中所观察到的吸引和排斥现象，可用这两种电荷的相互作用来解释。
- 电荷既不会被创生，也不会被消灭，它是守恒的。起电是电荷的分离过程，而不是电荷的创生过程。
- 物体能通过电子的转移而带电。得到电子的物体带负电，失去电子的物体带正电。
- 如果将电荷加在绝缘体的某个部分，电荷就会停留在那个部分而不会发生移动。绝缘体包括玻璃、干木头、塑料以及干燥的空气等。
- 加在导体上的电荷会迅速地分布到导体的表面上。常见的导体包括石墨、金属，以及处于等离子态的物质等。
- 在某些特定条件下，绝缘体也有可能变为导体。闪电就是空气的导电现象。

20.2 静电力

关键术语

- 验电器
- 传导起电
- 感应起电
- 接地
- 库仑定律
- 库仑
- 元电荷

重要概念

- 验电器带电后，静电力会使金属箔片张开。
- 一个物体可通过与带电体的接触而带电。
- 带电物体会引起电中性的导体中的电荷发生分离。这个过程会在带电体与电中性导体间产生吸引力。
- 为了使导体感应起电，可先将一个带电体靠近它，引起电荷分离。然后撤去带电体，此时导体的两端便带有异种电荷。
- 接地就是通过将物体与地球接触而移去过量电荷的过程。接地可使验电器感应起电。
- 库仑定律表述为，两个点电荷之间的静电力与它们所带的电荷量的乘积成正比，与它们之间距离的平方成反比：

$$F = k \frac{q_A q_B}{r^2}$$

为了确定力的方向，请记住以下规则：同种电荷相互排斥，异种电荷相互吸引。

- 在SI单位制中，电荷的单位为库仑(C)。1 C的电荷量为 6.24×10^{18} 个电子或质子的电荷量。元电荷，即一个质子或一个电子的电荷量，它的值为 1.60×10^{-19} C。

绘制概念图

22. 用下列术语完成概念图：传导起电、距离、元电荷。



理解概念

23. 在干燥的天气用塑料梳子梳头，梳子带了正电，那时你的头发还会保持电中性吗？请说明理由。(20.1)
24. 列举一些绝缘体和导体。(20.1)
25. 是什么性质使得金属为一种良导体，而橡胶为一种良绝缘体？(20.1)
26. **干衣机** 将尼龙袜从干衣机中取出时，为什么有时它会与别的衣服粘在一起？(20.2)
27. **CD片** 用干净的布擦拭CD片后，为什么它会变得更容易吸附灰尘？(20.2)
28. **硬币** 一枚硬币中所有电子的电荷量加起来有数十万库仑，这是否意味着它有那么多净电荷？请说明理由。(20.2)
29. 两个电荷间的距离是怎样影响它们间的作用力的？如果距离减小而电荷量保持不变，那么这种力将如何改变？(20.2)
30. 如果你只有一根带正电的棒，你怎样可以使得一个导体带负电？(20.2)

应用概念

31. 电子电荷与质子电荷有什么不同之处？又有什么相同点？
32. 怎样利用一根带电棒与一只验电器，检验某个物体是不是导体？

33. 将一根带电棒靠近一堆小塑料球，其中有一些球会被吸引到棒上。但是一旦它们接触到棒后，便又会向不同的方向飞出。试解释这个现象。
34. **闪电** 当云层中的负电荷向大地转移时，通常会发生闪电。如果地面呈电中性，那么将电子拉向地面的力是怎样产生的？
35. 当带有以下电荷的棒靠近但不接触验电器时，说明原来带正电的验电器的金属箔片将会发生什么情况？
a. 正电荷
b. 负电荷
36. 如图20-13所示，库仑定律与牛顿万有引力定律在形式上非常相似。那么，静电力与万有引力哪些方面相似？哪些方面不同？

万有引力定律

$$F = G \frac{m_A m_B}{r^2}$$

 m_A

 m_B

 r

库仑定律

$$F = k \frac{q_A q_B}{r^2}$$

 q_A

 q_B

 r

图20-13 (不按比例)

37. 库仑定律中的静电力常量 k 比万有引力定律中的引力常量 G 大得多。这意味着什么？
38. 本书在描述库仑使A、B两球带电的内容中指出，通过某种方法，可以使B球所带的电荷量精确地等于A球的一半。请你为库仑想一种方法，使得B球所带的电荷量精确地等于A球的 $\frac{1}{3}$ 。
39. 库仑测量了当A、B两球具有等量电荷且相距为 r 时A球的偏转情况。然后，他使B球所带的电荷量变为A球的 $\frac{1}{2}$ 。此时两球需要相距多远，A球的偏转才会与之前一样？
40. 已知两个带电物体间的相互作用力为0.145 N。如果将它们之间的距离缩小至原来的 $\frac{1}{4}$ ，此时的静电力为多大？
41. 与万有引力相比，电荷间的静电力非常巨大。然而我们通常并没有感受到自己与周围物体间的这种静电力，却时刻感觉到地球的引力作用。试说明其中的原因。

问题解决

20.2 静电力

42. 两个点电荷 q_A 和 q_B 相距 r ，它们之间的相互作用力为 F 。用库仑定律分析，在下列条件下，这个力将变为多大。
- q_A 增加1倍
 - q_A 和 q_B 各减为原来的 $\frac{1}{2}$
 - r 变为原来的3倍
 - r 减小为原来的 $\frac{1}{2}$
 - q_A 变为原来的3倍，而 r 变为原来的2倍
43. 闪电 一次强闪电将25 C的电荷输送到大地。此过程共输送了多少个电子？
44. 原子 一个普通原子中的两个电子相距为 1.5×10^{-10} m。它们间的静电力为多大？
45. 一个正电荷与一个负电荷相距15 cm，它们的电荷量均为 1.5×10^{-5} C。试求每个电荷受到的力。
46. 一个 8.0×10^{-5} C的正电荷与一个 3.0×10^{-5} C的正电荷之间的作用力为 2.4×10^2 N，它们之间的距离是多少？
47. 两个相同的正电荷之间的排斥力为 6.4×10^{-9} N，它们相距 3.8×10^{-10} m。试计算各个电荷的电荷量。
48. 一个 $3\mu\text{C}$ 的正电荷被两个负电荷所吸引，如图20-14所示。其中一个 $-2.0\mu\text{C}$ 的负电荷位于它的西侧0.050 m处；另一个 $-4.0\mu\text{C}$ 的负电荷位于它的东侧0.030 m处。求该正电荷受到的净力。

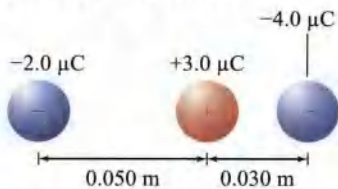


图20-14

49. 如图20-15所示，有两个带正电的小球，其中一个球所带的电荷量是另一个球的3倍。已知两球相距16 cm，它们之间的作用力为0.28 N。这两个球所带的电荷量分别是多少？

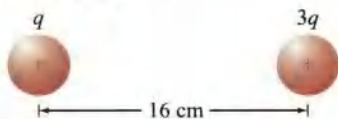


图20-15

50. 硬币中的电荷 用如下方法回答以下问题：一枚镍币中的电子的电荷量为多少？

- 求出镍币中的原子数。已知一枚镍币的质量大约为5 g，其中75%是铜，25%是镍，所以每摩尔镍币原子的质量大约是62 g。
- 求出这枚镍币中的电子数。平均而言，每个原子有28.75个电子。
- 求出全部电子的电荷量。

51. 三个粒子位于一条直线上。左边粒子所带的电荷量为 $-55\mu\text{C}$ ，中间的为 $+45\mu\text{C}$ ，右边的为 $-78\mu\text{C}$ 。已知中间粒子与两边粒子的距离均为72 cm，如图20-16所示。

- 求作用在中间粒子上的净力。
- 求作用在右边粒子上的净力。

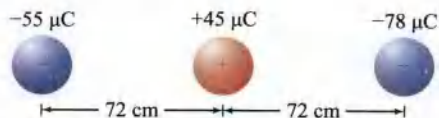


图20-16

复习提高

52. 将一个所带电荷量为 1.2×10^{-5} C的金属小球与另一个完全相同的中性球接触，然后将它们分开0.15 m远。此时这两球之间的静电力为多大？
53. 原子 氢原子的半径大约为 5.3×10^{-11} m。相距同为此值的电子和质子间的静电力为多大？
54. 一个球所带的电荷量为 $2.4\mu\text{C}$ 。当将另一个电荷量未知的球放在距离它5.5 cm的位置上时，它所受到的静电力为0.36 N。第二个球所带的电荷量是多少？
55. 两个完全相同的带电小球相距12 cm，它们间的静电力为0.28 N。每个球所带的电荷量是多少？
56. 在用库仑扭秤做实验时，所带电荷量为 3.6×10^{-8} C的小球与另一个电荷量未知的小球相距为1.4 cm，两球间的相互作用力为 2.7×10^{-10} N。另一个球所带的电荷量是多少？
57. 一个质子和一个电子间的静电力为 3.5×10^{-10} N。它们之间的距离是多少？

第20章 测评

理性思维

58. **应用概念** 计算氢原子中电子与质子间的静电力与万有引力之比。
59. **分析与总结** 所带电荷量为 $+64\ \mu\text{C}$ 的A球位于原点，所带电荷量为 $-16\ \mu\text{C}$ 的B球位于 x 轴上的 $+1.00\ \text{m}$ 处。
- 所带电荷量为 $+12\ \mu\text{C}$ 的C球位于何处时，它不受净静电力的作用？
 - 如果第三个球所带的电荷量为 $+6\ \mu\text{C}$ ，那么应将它放置在何处？
 - 如果第三个球所带的电荷量为 $-12\ \mu\text{C}$ ，那么又应将它放置在何处？
60. 三个带电球的位置如图20-17所示。试计算作用在B球上的净力。

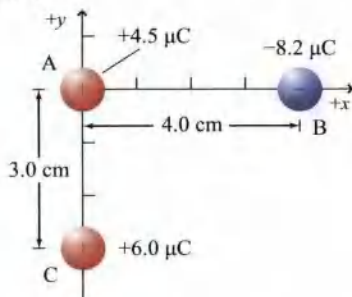


图20-17

61. 如图20-18所示，两个木髓球的质量均为 $1\ \text{g}$ ，并带有等量电荷。其中一个木髓球用绝缘线悬挂着，另一个距离悬挂球 $3.0\ \text{cm}$ 。悬挂球的绝缘线此时与竖直方向成 30.0° 。在 F_E 、 F_g 和 F_T 的作用下，该球处于平衡状态。试计算下列各物理量。
- 作用于悬挂小球上的力 F_g 。
 - F_E 。
 - 木髓球所带的电荷量。

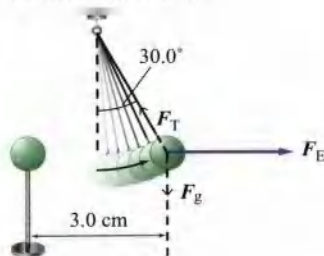


图20-18

62. 两个点电荷 q_A 和 q_B 静止在一个电荷量为 $+7.2\ \mu\text{C}$ 的试探电荷 q_T 的附近。 q_A 是电荷量为 $3.6\ \mu\text{C}$ 的正电荷，位于与 q_T 相距 $2.5\ \text{cm}$ 且成 35° 的位置上； q_B 是电荷量为 $-6.6\ \mu\text{C}$ 的负电荷，位于与 q_T 相距 $6.8\ \text{cm}$ 且成 125° 的位置上。
- 试确定作用于 q_T 上的每一个力的大小。
 - 作出受力分析图。
 - 从图中确定 q_T 受到的净力。

科技写作

63. **科学史** 考察几种17、18世纪用于研究静电的仪器，例如莱顿瓶、维姆胡斯起电机等。分析它们的构造，并解释它们是怎样工作的。
64. 你在第13章中学习了存在于水分子之间的力，这种力使 $0\sim 4^\circ\text{C}$ 的液态水的密度大于 0°C 时固态冰的密度。这种力从本质上说也属于静电力的范畴。考察一下这类具有静电性质的分子力，例如范德瓦耳斯力以及两个电偶极子间的作用力等，描述它们对物质的作用。

日积月累

65. 说明如何用单摆测定重力加速度。(第14章)
66. 一艘以 $12.0\ \text{m/s}$ 的速率航行的潜艇向正前方的一座海底山脉发出一束频率为 $1.50 \times 10^3\ \text{Hz}$ 的声波， $1.800\ \text{s}$ 后接收到回声。(第15章)
- 这艘潜艇与这座海底山脉之间相距多远？
 - 碰到这座海底山脉的声波的频率是多少？
 - 潜艇所接收到的回声的频率又是多少？
67. **安全镜** 一面安全镜所产生的像位于镜面后方 $12.0\ \text{cm}$ 处，其大小是物的 $\frac{3}{4}$ 。这面安全镜的焦距是多少？(第17章)
68. 高 $2.00\ \text{cm}$ 的物体距离发散透镜 $20.00\ \text{cm}$ ，该透镜的焦距为 $24.0\ \text{cm}$ 。此时像的位置在哪里？高度是多少？方向怎样？是实像还是虚像？(第18章)
69. **分光镜** 一面分光镜含有一片每厘米刻有11 500条狭缝的光栅。试计算波长为 $527\ \text{nm}$ 的光经过这面分光镜产生的干涉图样中第一级亮条纹的角度。(第19章)

标准化测试

选择题

1. 如果验电器上的净电荷为 $+7.5 \times 10^{-11} \text{ C}$, 那么从验电器上移出的电子数量为 ()

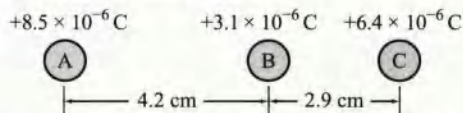
(A) 7.5×10^{-11} (B) 2.1×10^{-9}
(C) 1.2×10^8 (D) 4.7×10^8

2. 一个电荷量为 $5.0 \times 10^{-9} \text{ C}$ 的粒子受到另一个相距4 cm的粒子的作用力的大小为 $8.4 \times 10^{-5} \text{ N}$. 另一个粒子的电荷量为 ()

(A) $4.2 \times 10^{-13} \text{ C}$ (B) $2.0 \times 10^{-9} \text{ C}$
(C) $3.0 \times 10^{-9} \text{ C}$ (D) $6.0 \times 10^{-5} \text{ C}$

3. 三个点电荷A、B和C位于一条直线上, 如下图所示. 作用在B上的净力为 ()

(A) 78 N, 方向指向A
(B) 78 N, 方向指向C
(C) 130 N, 方向指向A
(D) 210 N, 方向指向C



4. 验电器上带有 4.8×10^{10} 个过量电子, 该验电器上的电荷量为 ()

(A) $3.3 \times 10^{-30} \text{ C}$ (B) $4.8 \times 10^{-10} \text{ C}$
(C) $7.7 \times 10^{-9} \text{ C}$ (D) $4.8 \times 10^{10} \text{ C}$

5. 两个带电体间的相互作用力为86 N. 如果将它们之间的距离变为原来的6倍, 此时它们之间的相互作用力变为 ()

(A) 2.4 N (B) 14 N
(C) 86 N (D) $5 \times 10^2 \text{ N}$

6. 两个完全相同的带电体间的相互作用力为90 N. 如果用另一个大小相同、所带电荷量为原来3倍的物体替代其中的一个带电体, 此时它们之间的相互作用力变为 ()

(A) 10 N (B) 30 N
(C) $2.7 \times 10^2 \text{ N}$ (D) $8.1 \times 10^2 \text{ N}$

7. 已知 α 粒子的质量为 $6.68 \times 10^{-27} \text{ kg}$, 所带电荷量为 $3.2 \times 10^{-19} \text{ C}$. 两个 α 粒子间的静电力与万有引力的比值为 ()

(A) 1 (B) 4.8×10^7
(C) 2.3×10^{15} (D) 3.1×10^{35}

8. 通过与带电体接触而使一个电中性物体带电的过程称为 ()

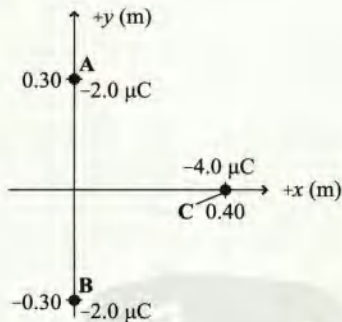
(A) 传导起电 (B) 感应起电
(C) 接地 (D) 放电起电

9. 麦基用毛皮摩擦一个气球, 使它带上 $-8.9 \times 10^{-14} \text{ C}$ 的电荷. 该气球与相距为2 km、所带电荷量为25 C的一个金属球之间的作用力为 ()

(A) $8.9 \times 10^{-15} \text{ N}$ (B) $5.0 \times 10^{-9} \text{ N}$
(C) $2.2 \times 10^{-12} \text{ N}$ (D) $5.6 \times 10^4 \text{ N}$

拓展题

10. 如下图所示, 点电荷A和B作用在电荷C上的力的矢量和为多大? 在图中标出矢量力 $F_{A \text{ 对 } C}$ 、 $F_{B \text{ 对 } C}$ 以及 $F_{\text{净}}$.



✓ 考试小贴士

不要着急

在考试时, 应该认真核对每道难题的答案。要非常仔细地阅读问题、选择答案。记住, 做对大部分题目总比完成了全部题目但错误百出的情况要好。

第21章 电场

内容提要

- 了解电场强度与静电力之间的联系和区别。
- 确定电势差与功和能之间的关系。
- 描述导体上的电荷是怎样分布的。
- 解释电容器是怎样储存电荷的。

学习本章的意义

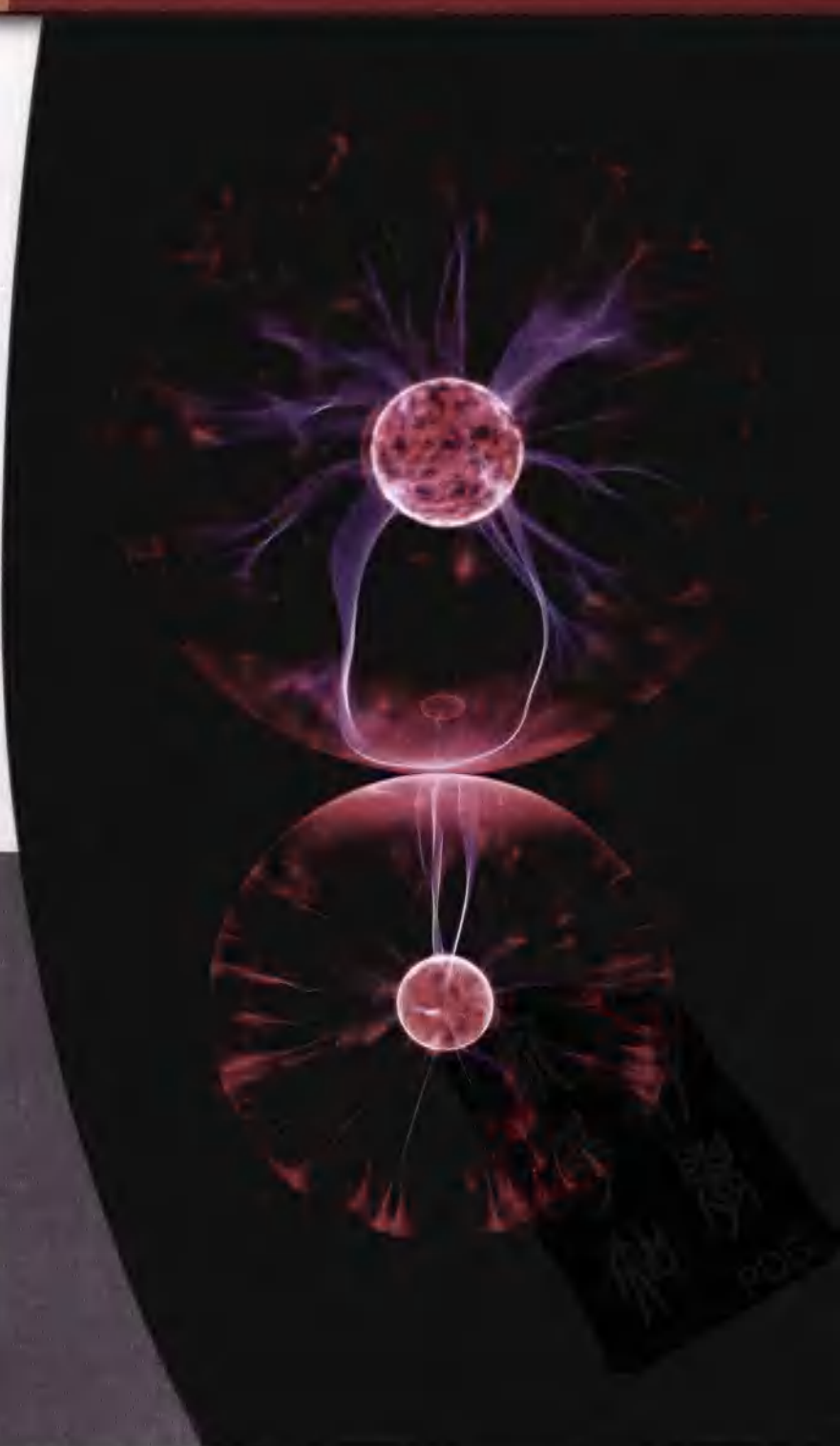
电能是现代生活中一种基本的能量形式。

高压放电 你可以在放电球中看到由高压发生器产生的鲜艳夺目的亮光。

想一想

为什么普通灯泡不会像这种与高压发生器接通的放电球那样，产生鲜艳夺目的亮光？

物理  在线
physicspp.com



起步实验



探究相隔一定距离的带电物体之间的相互作用

问题

当两个带电物体相隔一定距离时，它们彼此会受到怎样的影响？

步骤

1. 将两只气球充气后用细线扎紧，然后在每只气球上系一根0.5 m长的细线。
2. 用你的衣服来回摩擦其中的一只气球，重复6~8次，使它带电。再用胶带将细线粘贴在壁橱、桌子或其他支撑物上。
3. 用同样的办法摩擦第二只气球，然后用细线将它悬挂起来。
4. **观察** 慢慢地将第二只气球向第一只气球靠近。观察此时会发生什么情况。用胶带粘住第二只气球的细线，将它悬挂在第一只气球的旁边。
5. **观察** 将你的手靠近带电的气球，观察此时会发生什么情况。

分析

当两只气球彼此靠近时，你观察到了什么现象？当你的手靠近带电的气球时，又有什么现象发生？

理性思维 你曾经看到过哪两个物体在相隔一定距离时，它们之间的相互作用与此类似？



21.1 电场的产生与测量

静电力与你在第8章中学过的万有引力类似，都与两个质点间距离的平方成反比。这两种力都能作用到很远的距离。那么，一个力又是怎样越过似乎空无一物的空间而对物体产生作用的呢？法拉第(M. Faraday)认为，如果一个带电物体A能对位于空间中任一点处的另一个带电物体B产生作用，那么带电物体A必然以某种方式使空间的特性发生了改变，而物体B则感受到了空间的这种改变，并因此受到了反映它所在空间的这种特性的作用力。人们将改变了的空间的这种特性称为**电场(electric field)**。电场的存在意味着，两个相隔一定距离的物体之间的相互作用，并不是它们之间的相互作用，而是其中的一个物体与另一个物体在该物体所在点处所产生的场之间的相互作用。

电场所施加的力能够做功，从而将能量从电场转移至受力的带电物体中。在日常生活中，无论你是将电器的插头插进电源插座，还是将它与电池连接，你都在使用这种能量。在本章中，你将学习许多关于电场、电场力以及电场能等方面的知识。

学习目标

- 定义电场强度。
- 求解与电荷、电场以及电场力有关的问题。
- 画出电场线。

关键术语

电场
电场线

电场

颜色惯例

- 电场线用靛紫色表示。
- 正电荷用红色表示。
- 负电荷用蓝色表示。

那么，怎样测量电场呢？你可以将一个小的带电物体放在某个位置上，如果它受到静电力的作用，那么就说明该点处存在电场。由于这个物体上的电荷可以用来检验电场的存在，故人们将它称为试探电荷。试探电荷必须足够小，以免对其他电荷产生影响。

如图21-1所示，有一个电荷量为 q 的带电体。假定在某点A处放置一个带正电的试探电荷，并测得它所受到的静电力为 F 。按照库仑定律，这个力与试探电荷的电荷量 q' 成正比。也就是说，若电荷量 q' 增加1倍，那么静电力也增加1倍。因此，静电力与试探电荷的电荷量的比值是一个常量。如果用静电力 F 除以试探电荷的电荷量 q' ，就得到一个矢量 $\frac{F}{q'}$ ，这个量与试探电荷无关，其大小仅仅取决于静电力以及A点的位置。所以，A点（即 q' 所在处）的电场强度可用下式表示：

$$\text{电场强度 } E = \frac{F_{\text{静}q'}}{q'}$$

电场强度等于作用在试探电荷上的力除以该试探电荷的电荷量。

电场强度的方向就是作用在试探电荷上的力的方向。电场强度的单位为牛每库，符号为N/C。

如图21-1所示，用带箭头的线段表示各处的电场强度矢量，这样就可以画出电场的示意图。其中，线段的长度表示电场强度的大小，箭头的方向表示电场强度的方向。若要计算两个电荷所产生的场强，可将每个电荷单独产生的电场的场强作矢量相加。用正试探电荷可得到任何带电体所产生的场强。由带电体产生的典型电场的场强如表21-1所示。

必须用非常小的试探电荷来测量电场，因为试探电荷也会对产生场的电荷 q 产生作用力。这里要强调的是，由试探电荷施加的力不会引起产生场的电荷 q 在导体上的重新分布，从而改变作用在 q' 上的力以及正在被测量的电场的场强。总之，试探电荷要足够小，这样才能忽略它对 q 的影响。

■ 图21-1 带箭头的线段可用来表示电荷周围各点处电场强度的大小和方向。

表 21-1	
典型电场的场强的近似值	
电 场	电场强度 (N/C)
带电硬橡胶棒附近的电场	1×10^3
电视机显像管中的电场	1×10^5
在空间能产生电火花的电场	3×10^6
氢原子中电子轨道上的电场	5×10^{11}

例题 1

电场强度 用一个电荷量为 $3.0 \times 10^{-6} \text{ C}$ 的正试探电荷测量电场。若该试探电荷受到大小为 0.12 N 的静电力，方向是东偏北 15° 。求这个试探电荷所在处的电场强度。

1 分析概括问题

- 画出并标明试探电荷 q' 。
- 作出坐标系，原点取在试探电荷所在处。
- 画出并标明沿东偏北 15° 方向的力的矢量。

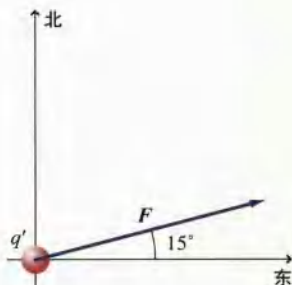
已知：

$$q' = 3.0 \times 10^{-6} \text{ C}$$

$$F = 0.12 \text{ N, 沿东偏北 } 15^\circ \text{ 方向}$$

未知：

$$E = ?$$



2 求解未知量

$$\begin{aligned} E &= \frac{F}{q'} \\ &= \frac{0.12 \text{ N}}{3.0 \times 10^{-6} \text{ C}} \quad \text{将 } F = 0.12 \text{ N, } q' = 3.0 \times 10^{-6} \text{ C 代入。} \\ &= 4.0 \times 10^4 \text{ N/C} \end{aligned}$$

作用在试探电荷上的力的方向与电场的方向相同。

$$E = 4.0 \times 10^4 \text{ N/C, 沿东偏北 } 15^\circ \text{ 方向}$$

3 验证答案

- 单位是否正确？** 电场强度的单位 N/C 是正确的。
- 符号是否有意义？** 因为试探电荷是正电荷，所以电场的方向就是力的方向。
- 数值是否合理？** 电场强度符合表 21-1 中所列的值。

练一练

- 一个电荷量为 $5.0 \times 10^{-6} \text{ C}$ 的正试探电荷在电场中受到的静电力为 $2.0 \times 10^{-4} \text{ N}$ 。试探电荷所在处的电场强度的大小是多少？
- 一个电荷量为 $2.0 \times 10^{-8} \text{ C}$ 的负电荷在电场中受到 0.060 N 的向右方向的静电力。该点电场的场强的大小和方向如何？
- 一个电荷量为 $3.0 \times 10^{-7} \text{ C}$ 的正电荷位于某一电场中，该电场的电场强度的方向向南，大小为 27 N/C 。求作用在该电荷上的静电力。
- 一个重 $2.1 \times 10^{-3} \text{ N}$ 的木髓球位于某一电场中，该电场的电场强度的方向向下，大小为 $6.5 \times 10^4 \text{ N/C}$ 。木髓球上要带怎样的电荷(包括数值和符号)，才能使作用于它的静电力能克服重力作用而使其悬浮起来？
- 如果你正在探测由一个电荷量和符号未知的电荷所产生的电场。你先用电荷量为 $1.0 \times 10^{-6} \text{ C}$ 的试探电荷进行测量，然后再用 $2.0 \times 10^{-6} \text{ C}$ 的试探电荷重复你的测量。
 - 在同一地方用这两个试探电荷测得的静电力相同吗？说明理由。
 - 两次实验得到的电场强度相同吗？说明理由。

例题 2

电场强度 有一个所带电荷量为 $-4.0 \times 10^{-6} \text{ C}$ 的小球，求在它右边 0.30 m 处的电场的电场强度。

1 分析概括问题

- 画出并标明这个球和它所带的电荷量 q ，以及试探电荷的电荷量 q' 。
- 标出电荷间的距离。
- 画出并标明作用在 q' 上的矢量力。

已知：

$$q = -4.0 \times 10^{-6} \text{ C}$$

$$d = 0.30 \text{ m}$$

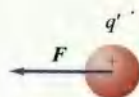
未知：

$$E = ?$$

$$q = -4.0 \times 10^{-6} \text{ C}$$



$d = 0.30 \text{ m}$



2 求解未知量

试探电荷的电荷量和电性均未知，所以要通过联立库仑定律和电场强度的定义式来求解。

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

$$= k \frac{qq'}{d^2 q'}$$

$$= k \frac{q}{d^2}$$

$$= 9.0 \times 10^9 \text{ N} \cdot \text{m}^2/\text{C}^2 \times \frac{-4.0 \times 10^{-6} \text{ C}}{(0.30 \text{ m})^2}$$

$$= -4.0 \times 10^{-6} \text{ N/C}$$

$$E = 4.0 \times 10^{-6} \text{ N/C, 方向指向小球, 或者说方向向左}$$

将 $F = k \frac{qq'}{d^2}$ 代入。

将 $k = 9.0 \times 10^9 \text{ N} \cdot \text{m}^2/\text{C}^2$, $q = -4.0 \times 10^{-6} \text{ C}$, $d = 0.30 \text{ m}$ 代入。

3 验证答案

- 单位是否正确?** $1 \text{ N} \cdot \text{m}^2/\text{C}^2 \cdot \text{C}/\text{m}^2 = 1 \text{ N/C}$ 。导出单位 N/C 是正确的电场强度的单位。
- 符号是否有意义?** 负号表明正试探电荷被带负电的点电荷所吸引。
- 数值是否合理?** 电场强度符合表 21-1 中所列数值。

练一练

- 点电荷的电荷量为 $4.2 \times 10^{-6} \text{ C}$ 。距离它 1.2 m 处的电场的场强大小是多少?
- 第 6 题中，在与点电荷的距离增加 1 倍的地方，电场强度的大小又是多少?
- 点电荷的电荷量为 $+7.2 \times 10^{-6} \text{ C}$ 。求点电荷东面 1.6 m 处的电场的场强。
- 距离小球 0.25 m 处的电场的场强为 450 N/C ，其方向指向该小球。小球所带的电荷量是多少?
- 试探电荷需要放置在距离电荷量为 $+2.4 \times 10^{-6} \text{ C}$ 的点电荷多远处，所测得的电场强度才是 360 N/C ?

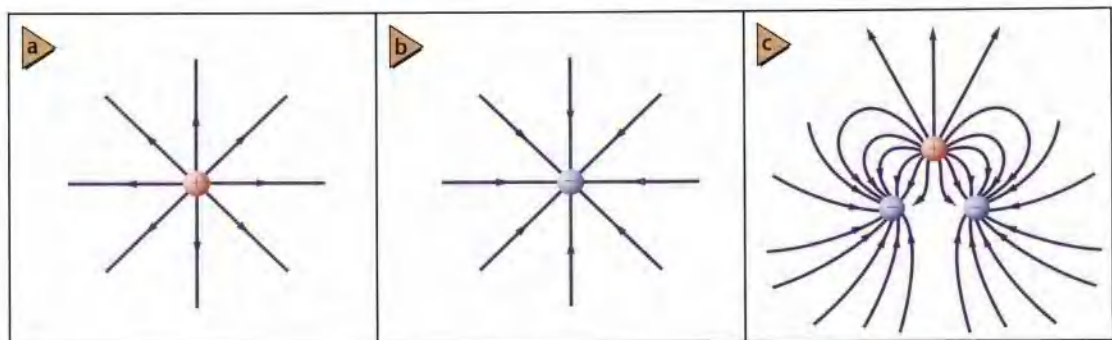


图21-2 电场线的画法是，垂直地离开带正电的物体(a)，垂直地指向带负电的物体(b)。(c)图显示的是同种电荷与异种电荷之间的电场线。

至此，你已经学会了如何测量某个点上的电场的场强。现在设想一下，将试探电荷移到另一个位置，测量它所受到的静电力，然后算出电场强度。不断重复这一过程，直到试探电荷遍及空间中的每个位置，这样你就测量出了某一空间内每一点处的电场强度。即使没有试探电荷，电场依然存在。任何位于电场中的电荷都会受到该处电场对它的作用力。这个力的大小取决于该处的电场强度 E 以及电荷量 q ，即 $F = Eq$ ；而它的方向则取决于电场的方向以及电荷的性质。

电场的图示

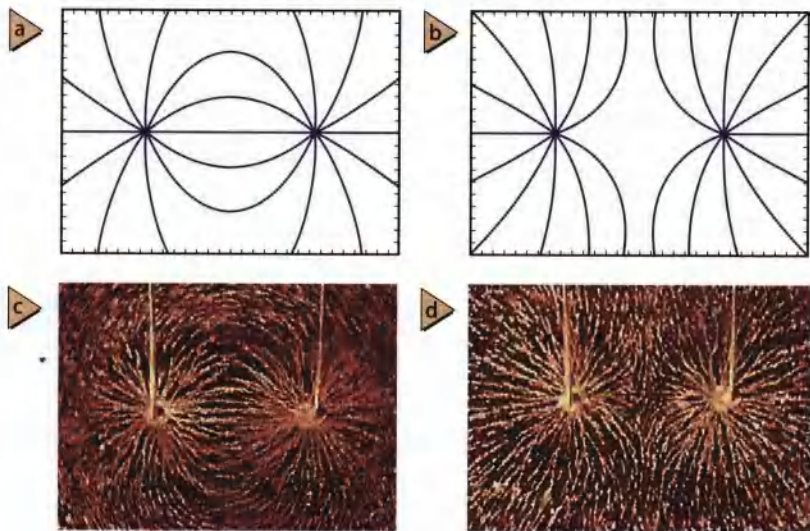
如图21-2所示为三幅电场图。在电荷周围的空间中用来表示实际电场的线称为**电场线(electric field line)**。任一点电场的方向就是电场线在该点处的切线方向。电场强度可用电场线的疏密程度来表示。电场线越稠密处，电场强度越大；电场线越稀疏处，电场强度越小。虽然这里只能显示出二维的模型，但请记住，电场是存在于三维空间中的。

当一个正试探电荷靠近另一个正电荷时，它受到的静电力的方向背离该电荷，因此电场线的方向将像车轮的辐条那样沿径向向外，如图21-2a所示。当该试探电荷靠近负电荷时，作用在这个正试探电荷上的力的方向指向该负电荷，因此电场线的指向将沿径向向内，如图21-2b所示。当存在两个或多个电荷时，它们的电场就是各电荷电场的矢量和，因此，如图21-2c所示，电场线就会变得弯曲复杂了。注意，电场线总是从正电荷发出，到负电荷终止，且各条电场线永远不会交叉。



图21-3 在范德格拉夫起电机中(a)，电荷在A处转移到了移动的传送带上，然后在B处又从传送带转移到了金属罩。为了增大电荷的电势能，电动机需要做功。当人们接触范德格拉夫起电机时，会发生戏剧性的现象(b)。

■ 图21-4 异种电荷间的电场线(a、c)以及同种电荷间的电场线(b、d)，它们描述了带正电的物体在场中的行为。上方两幅图是由计算机描出的电场线图。



20世纪30年代，范德格拉夫(R.Van de Graaff)发明了一种高压静电起电机，即上一页图21-3a所示的范德格拉夫起电机。这是一种将大量电荷从设备的某处输送到设备顶端处金属罩上的装置。电荷在底座A处被转移到了传送带上，然后在顶端B处又被转移到了金属罩上。通过电动机的做功，电荷的电势能增大。人一旦接触范德格拉夫起电机的金属罩，就会带电。这时，如图21-3b所示，人头发上的电荷将相互排斥，从而使头发趋于按电场线的方向排列。

另一种观察电场线的办法是，将草籽放入诸如矿物油这样的绝缘液体中。静电力会使细长草籽中的电荷发生分离。于是这些草籽将会转向，并沿着电场线的方向排列，显示出类似图21-4所示的电场线图样。电场线实际上并不存在，它只是简单地提供了一种描述电场的模型，但电场却是真实存在的。电场强度以及电场线模型提供了一种计算带电体所受作用力的方法，但它们并不能说明带电物体间为何彼此施力的问题。

本节复习题

11. **测量电场** 如果你要测量空间中的电场，那么你应该怎样做才能探测出某点处的电场？你又该如何确定场强的大小？你应该选择怎样的电荷作为试探电荷？然后你将做些什么？
12. **电场强度的大小和方向** 一个电荷量为 $2.40 \times 10^{-8} \text{ C}$ 的试探电荷受到大小为 $1.50 \times 10^{-3} \text{ N}$ 、方向向东的静电力的作用。求该试探电荷处的电场强度。
13. **电场线** 如图21-4所示，你能否指出哪些电荷是正的，哪些电荷是负的？你能否在这些电场线上增加某些记号，以便使得它更为完备？
14. **电场强度与静电力** 试探电荷所在处的电场强度 E 和作用在该试探电荷上的静电力 F 有何区别？
15. **理性思维** 假定在图21-2c中，上方的电荷是试探电荷，它用来测量两个负电荷所产生的电场。那么，这个电荷是否小到了足以对电场进行精确的测量？请说明理由。

21.2 电场的应用

在力学中，能量这一概念是非常重要的。通过能量守恒定律，你能够在对力的状况并不十分了解的情况下求解运动问题。在研究电荷的相互作用时，这种方法同样适用。在电场中通过移动带电粒子做功，可以使粒子获得势能或动能，或同时获得这两种能。因为本章中考察的都是静止的电荷，所以你只需考虑势能的变化。

电势能和电势

如图21-5所示，在力学中，当一个小球被举高时，它的重力势能就会发生变化。重力 F 以及重力场 $g = \frac{F}{m}$ 都指向地球。为了克服重力使小球升高，你必须对小球做功，这样小球的重力势能就会增加。

在电学中，两个异种电荷间的情况与此类似：由于它们彼此吸引，因此，要将一个电荷从另一个电荷附近拉开，你就需要做功。当你做功时，你将能量转移给了电荷，这个能量以电势能的形式储存在电荷中。电荷量越大，电势能的增量 ΔE_p 就越大。

虽然作用在电荷上的力与电荷量 q' 有关，但由它得出的电场强度却不然。电场强度 $E = \frac{F}{q'}$ ，它等于单位电荷所受的力。类似地，电势差(electric potential difference) ΔU 定义为在电场中两点间移动一个正试探电荷时所做的功与该试探电荷的电荷量之比。

$$\text{电势差 } \Delta U = \frac{W_{\text{外}q'}}{q'}$$

电势差等于移动电荷时所做的功与该电荷的电荷量之比。

电势差的单位是焦/库，又称为伏特(volt)，简称伏，用V表示(1 J/C = 1 V)。

考虑下页图21-6所示的情况，负电荷产生一个指向自身的电场。假定你将一个小的正试探电荷放置在该电场中的A点处，那么它就会在沿场的方向上受到一个力的作用。如果要将此试探电荷移到离负电荷更远的B点处，如图21-6a所示，你就必须对它施加力 F 。由于你施加在试探电荷上的这个力与位移的方向相同，因此你对试探电荷做了正功，电势差将有一个正的变化。电势差的改变与试探电荷的电荷量无关，它仅取决于电场强度和位移。

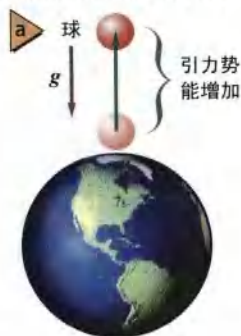


图21-5 移动物体需要克服重力做功(a)，移动电荷需要克服电场力做功(b)。在这两种情况下，物体的势能均有所增加。

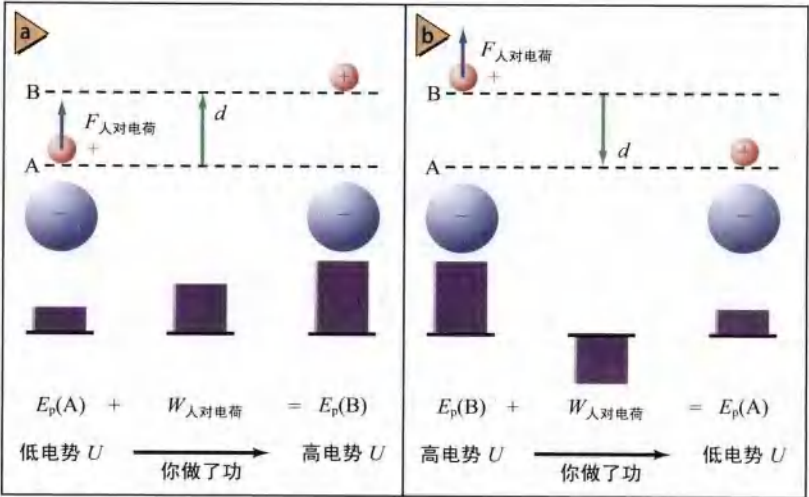
学习目标

- 定义电势差。
- 计算移动电荷所需做的功，并由此计算电势能。
- 描述实心与空心导体上的电荷分布。
- 求解有关电容的问题。

关键术语

电势差
伏特
电势
电容器
电容

■ 图21-6 电势差可通过测量对单位电荷所做的功来确定。将异种电荷分开，电势差增大(a)；将异种电荷靠近，电势差减小(b)。



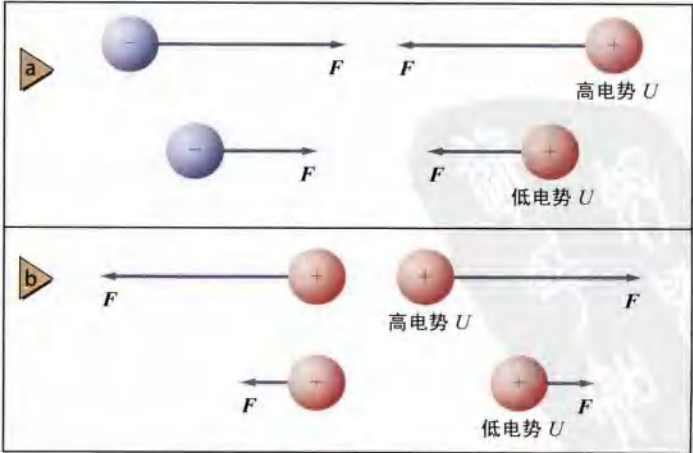
物理学的应用

■ 静电 计算机等现代电子器件中的组件很容易由于静电放电而损毁。在修理时，为了避免损坏这些灵敏组件，技术人员会在自己的手腕上套上导电的金属条，并将金属条的另一端夹住接地线。这样，金属条就会将电荷从技术人员的身上移走，从而消除任何可能产生的与接地设备之间的电势差。

假定现在将试探电荷由B点移回到A点，如图21-6b所示。由于你施力的方向与位移的方向相反，所以你做的是负功，电势差是负的。这个电势差实际上与电荷从A点移到B点时的电势差大小相等，只是符号相反。电势差与电荷的具体运动路径无关，它仅仅取决于始末两点的位置。

那么，两点间是否总存在电势差呢？假定将试探电荷绕着负电荷移动一周，此时，电场施加在试探电荷上的力始终与它的运动方向垂直，因此电场力不做功，电势差为零。只要两个点或多个点间的电势差为零，它们即是等势 (equipotential) 的。

你已经学过，势能是相对的，它的大小与参考面的选择有关；而势能差是绝对的，且可以被测量。电势与电势差也是同样的道理。从A点到B点的电势差 $\Delta U = U_B - U_A$ 。电势差可以用电压表测量。有时，它也可简称为电压。



■ 图21-7 异种电荷靠近时，电势减小(a)；同种电荷靠近时，电势增加(b)。

你已经看到，当正试探电荷与一个负电荷之间的距离增加时，电势差随之增加。那么，当正试探电荷与一个正电荷之间的距离增加时，情况又会怎样？你知道，这两个电荷间存在排斥力，电势能随着两个正电荷距离的增大而减小。因此，如图21-7所示，离开正电荷越远，电势越低。

正如你在第11章中学到的，你可将系统中任一点作为参考点，将该点处的势能定义为零。同样的，你也可以将任一点处的电势定义为零。不管参考点如何选定，从A点到B点的电势差的数值都是一样的。

匀强电场中的电势差

将两块大而平的金属板平行放置，可获得匀强电场。如果一块板上带正电，另一块板上带负电，那么此时除板的边缘处外，两板间的电场是恒定的，其方向从正板到负板。如图21-8所示的用草籽形成的图像显示了两块平行板间的电场情况。

正试探电荷 q 沿着与电场相反的方向移动了距离 d 时，它所做的功可用下式计算： $W_{\text{对}q} = Fd$ 。因此，电势差，即电场对单位电荷所做的功为 $\Delta U = \frac{Fd}{q} = \frac{F}{q} \times d$ ，其中单位电荷受到的力就是电场强度，即 $E = \frac{F}{q}$ 。所以，在匀强电场 E 中，相距为 d 的两点间的电势差可表示如下：

$$\text{匀强电场中的电势差 } \Delta U = Ed$$

匀强电场中的电势差等于电场强度与两点间距离的乘积。

在与电场相反的方向上，电势增加。也就是说，离带正电的极板越近，电势越高。由量纲分析可知， E 和 d 的单位的乘积是 $\text{N/C} \cdot \text{m}$ ，它与 J/C 等价，也就是 V 。



图21-8 两块平行板间的电场情况。

练一练

16. 两块大的带电平行板间的电场强度为 $6\,000\text{ N/C}$ ，两板相距 0.05 m 。两板间的电势差是多少？
17. 接在两块带电平行板间的电压表的示数为 400 V ，两板相距 0.020 cm 。两板间的电场强度为多大？
18. 相距为 0.200 m 的两块平行金属板间的电场强度为 $2.50 \times 10^3\text{ N/C}$ 。两板间的电势差为多大？
19. 当两块平行板间的电势差为 125 V 时，其间的电场强度为 $4.25 \times 10^3\text{ N/C}$ 。两板的间距是多少？
20. 相距为 0.35 cm 的两块平行板间的电势差为 275 V 。两板间的电场强度是多少？

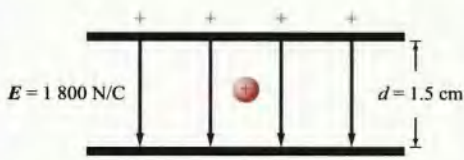
► 例题 3

在两块带电平行板之间移动一个质子所做的功 两块带电平行板相距1.5 cm，两板间的电场强度为1 800 N/C。

- 两板间的电势差为多大？
- 要将一个质子从带负电的极板移到带正电的极板，需做多少功？

1 分析概括问题

- 作出相距1.5 cm的两块平行板的示意图。
- 在一块板上标上正电荷，在另一块板上标上负电荷。
- 画出几条间隔均匀的从正极到负极的电场线。
- 标出两板间的电场强度。
- 标出电场中的一个质子。



已知：

$$E = 1\,800\text{ N/C}$$

$$d = 1.5\text{ cm}$$

$$q = 1.60 \times 10^{-19}\text{ C}$$

未知：

$$\Delta U = ?$$

$$W = ?$$

2 求解未知量

$$\Delta U = Ed$$

$$= 1\,800\text{ N/C} \times 0.015\text{ m} \quad \text{将 } E = 1\,800\text{ N/C}, d = 1.5\text{ cm} \text{ 代入。}$$

$$= 27\text{ V}$$

$$\Delta U = \frac{W}{q}$$

$$W = q\Delta U$$

$$= 27\text{ V} \times 1.6 \times 10^{-19}\text{ C} \quad \text{将 } q = 1.6 \times 10^{-19}\text{ C}, \Delta U = 27\text{ V} \text{ 代入。}$$

$$= 4.3 \times 10^{-18}\text{ J}$$

3 验证答案

- 单位是否正确？** $1\text{ N/C} \cdot \text{m} = 1\text{ N} \cdot \text{m/C} = 1\text{ J/C} = 1\text{ V}$ 。导出单位为V。而 $1\text{ C} \cdot \text{V} = 1\text{ C} \cdot \text{J/C} = 1\text{ J}$ 则是功的单位。
- 符号是否有意义？** 将正电荷移向正极时，需做正功。
- 数值是否合理？** 将电荷量如此小的电荷移过几个伏特的电势差所做的功是很小的。

► 练一练

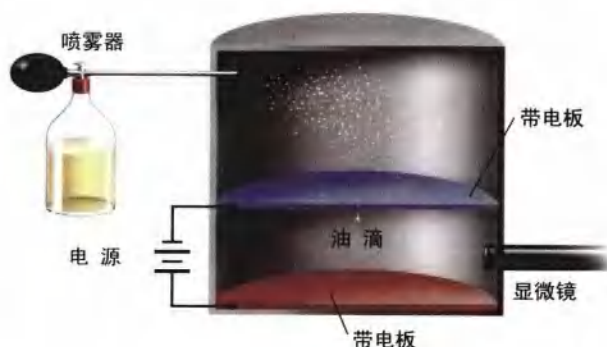
- 当电荷量为3.0 C的电荷通过1.5 V的电势差时，做了多少功？
- 一块12 V的汽车电池可储存 $1.44 \times 10^6\text{ C}$ 的电荷量。当这些电荷量全部放出而需重新充电前，该电池做了多少功？
- 显像管中电子通过的电势差为18 000 V。在这个过程中，电场对电子做了多少功？
- 如果第18题中两块平行板的间隔为2.4 cm，此两板间的电场强度为多大？
- 在一台粒子加速器中，电场强度为 $4.5 \times 10^5\text{ N/C}$ 。将一个质子在该电场中移动25 cm时，需做多少功？

密立根油滴实验

两块平行金属板间的匀强电场的一个重要应用是测量电子的电荷量。这项工作是由美国物理学家密立根(R. Millikan)于1909年率先完成的。如图21-9所示为密立根用于测量单个电子电荷量的装置。首先,他通过喷雾器将细小的油滴喷入某一密闭空间中,这些油滴在喷出时由于与喷雾器产生摩擦而带了电。重力的作用使油滴下落,其中少量油滴通过夹板上的小孔进入了测试设备中。然后,密立根增大了两板间的电势差,于是两板间的电场就会对这些带电油滴施加作用力。当上板的正电势足够高时,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,地球重力场对油滴施加的向下的力与电场对油滴施加的向上的力的大小相等。

已知两板间的电势差,便可求出电场强度 E 。接下来要做的便是求出另一个需要测的量,即油滴所受的重力 mg 。油滴非常小,以至于它重力的无法用普通的方法测量。为了解决这一问题,密立根先让油滴在电场中悬浮,然后撤除电场,测出油滴下落的速率。因为与空气分子摩擦,下落的油滴会很快达到收尾速度,而这个速度又与油滴的质量有关。因此,通过测量收尾速度,密立根算出了 mg ,并通过已知的 E ,得出了电荷量 q 的大小。

电子的电荷量 密立根发现,各油滴所带的电荷量差异很大。但是他注意到,当用X射线使空气电离,从而增加或移去油滴上的电子时,油滴所带电荷量的改变量总是 $1.60 \times 10^{-19} \text{ C}$ 的倍数。这种改变是从油滴上增加或移去一个或几个电子引起的。他由此断定,油滴上电荷量的最小改变量就是一个电子的电荷量。据此,密立根推断,每个电子的电荷量均为 $1.60 \times 10^{-19} \text{ C}$ 。密立根实验证明了电荷量是量子化的。这表明,任何物体所带的电荷量在数值上只能是电子电荷量的整数倍。



迷你实验

电场



取一根长20 cm的尼龙线,将它的一头接一个木髓球,另一头接一根塑料吸管。水平地拿住吸管,让木髓球竖直地悬挂着。然后,用一块毛皮摩擦一块规格为30 cm × 30 cm的泡沫塑料,使两者带电。将泡沫塑料竖直放置,然后握住吸管,让木髓球接近毛皮。

1. 预测当木髓球接近泡沫塑料时,将发生什么情况。
2. 将悬挂着的木髓球慢慢地接近带电的泡沫塑料,检验你的预测。
3. 预测小球移近这块泡沫塑料周围不同位置处时的行为,然后检验你的预测。
4. 观察当你将木髓球移到泡沫塑料周围的不同区域时,尼龙线的角度。

分析与结论

5. 用电场解释为什么小球会摆向这块带电塑料。
6. 比较当木髓球位于泡沫塑料周围各点处时这根尼龙线的角度。为什么角度会有变化?
7. 推断尼龙线的角度是如何显示电场的大小和方向的。

图21-9 密立根用于测量电子电荷量的实验装置的剖面示意图。

例题 4

求油滴所带的电荷量 在密立根油滴实验中，测出一油滴重 $2.4 \times 10^{-14} \text{ N}$ ，两块平行板的间距为 1.2 cm 。当两板间的电势差为 450 V 时，该油滴悬浮不动。

- 该油滴所带的电荷量是多少？
- 如果上板带正电，那么油滴上有多少个过量电子？

1 分析概括问题

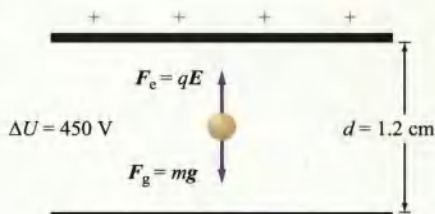
- 画出两块平行板以及两板间悬浮着的油滴。
- 标出矢量力。
- 指出两板间的电势差以及两板间距。

已知：

$$\begin{aligned}\Delta U &= 450 \text{ V} \\ F_g &= 2.4 \times 10^{-14} \text{ N} \\ d &= 1.2 \text{ cm}\end{aligned}$$

未知：

$$\begin{aligned}\text{油滴所带的电荷量 } q &=? \\ \text{电子数 } n &=?\end{aligned}$$



2 求解未知量

为了使油滴悬浮，静电力和重力必须相等。

$$\begin{aligned}F_e &= F_g \\ qE &= F_g && \text{将 } F_e = qE \text{ 代入。} \\ \frac{q\Delta U}{d} &= F_g && \text{将 } E = \frac{\Delta U}{d} \text{ 代入。}\end{aligned}$$

求解 q 。

$$\begin{aligned}q &= \frac{F_g d}{\Delta U} \\ &= \frac{2.4 \times 10^{-14} \text{ N} \times 0.012 \text{ m}}{450 \text{ V}} && \text{将 } F_g = 2.4 \times 10^{-14} \text{ N}, d = 0.012 \text{ m}, \Delta U = 450 \text{ V} \text{ 代入。} \\ &= 6.4 \times 10^{-19} \text{ C}\end{aligned}$$

求该油滴上过量的电子数。

$$\begin{aligned}n &= \frac{q}{e} \\ &= \frac{6.4 \times 10^{-19} \text{ C}}{1.6 \times 10^{-19} \text{ C}} && \text{将 } q = 6.4 \times 10^{-19} \text{ C}, e = 1.6 \times 10^{-19} \text{ C} \text{ 代入。} \\ &= 4\end{aligned}$$

3 验证答案

- 单位是否正确？** $1 \text{ N} \cdot \text{m}/\text{V} = 1 \text{ J}/(\text{J}/\text{C}) = 1 \text{ C}$ ，这是电荷量的单位。
- 数值是否合理？** 这是一个小的整数，表示元电荷数。

练一练

- 当撤去电场时，一滴油在密立根油滴实验装置中下落。不考虑它的加速度，此时有哪些力作用在油滴上？如果油滴以恒定的速率下落，描述此时它的受力情况。
- 一滴油重 $1.9 \times 10^{-15} \text{ N}$ ，它悬浮在电场强度为 $6.0 \times 10^3 \text{ N/C}$ 的电场中。该油滴所带的电荷量是多少？油滴上有多少个过量电子？
- 一滴油重 $6.4 \times 10^{-15} \text{ N}$ ，带有一个过量电子。若要使它悬浮不动，电场强度需多大？
- 一滴带正电的油滴重 $1.2 \times 10^{-14} \text{ N}$ ，它悬浮在间距为 0.64 cm 的两块平行板之间，两板间的电势差为 240 V 。该油滴所带的电荷量是多少？它失去了多少个电子？

电荷的分配

对于任何系统而言，当它的能量达到最小时，它便处于平衡状态。例如，放在山顶上的球最终将落下并静止在山谷里，此时它的重力势能最小。这里也是它的重力势能减小到最小值的位置。根据这个道理，你就可以解释一个绝缘的带电金属球与另一个不带电的球相接触时发生的情况，如图21-10所示。

A球上的过量电荷将会彼此相斥，所以当 一个电中性的B球与A球接触时，A球上的电荷便会受到一个指向B球的净力。现在假定你一份一份地将电荷从A球搬移到B球，那么当你搬移第一份电荷时，A球上的其他电荷会将它推向B球。为了控制搬移速度，你必须施加一个相反方向的力，因此你要对它做负功，所以此时，从A到B的电势差是负的。其后，在搬移下一份电荷时，这份电荷将感受到已移至B球上的电荷的较小的排斥力，不过它仍然受到一个正向净力的作用。直到某个时候，将电荷从A球推出的力与之前搬移到B球上的电荷的排斥力相等时，电势差便等于零。达到这种平衡后，要再将电荷搬移到B就必须做功了，而这靠电荷本身是无法实现的，因为这样做需要增加系统的能量。但此时你如果继续搬移电荷，那么从A球到B球的电势差是正的。由此可见，当两球间的电势差为零时，电荷的移动也就停止了。

不同大小的球 假定如图21-11所示，两个球的大小不同。此时，虽然这两个球所带的电荷量相同，但较大的球有较大的表面积，所以电荷分布得开些，其间的排斥力相对较小。因此，如果将这两个球接触，那么就会有净力使电荷从小球移到大球。另一方面，电荷会向电势较低的球移动，直到两个球之间的电势差为零。在这种情况下，当达到平衡时，大球所带的电荷量会比小球的更多些。

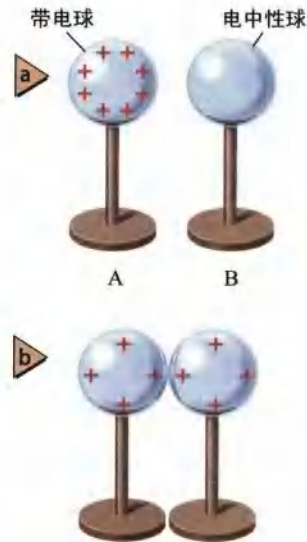


图21-10 一个带电球与另一个大小相等的电中性的球相接触时，带电球上的电荷将平均分配到两个球上。

大小不同的金属球

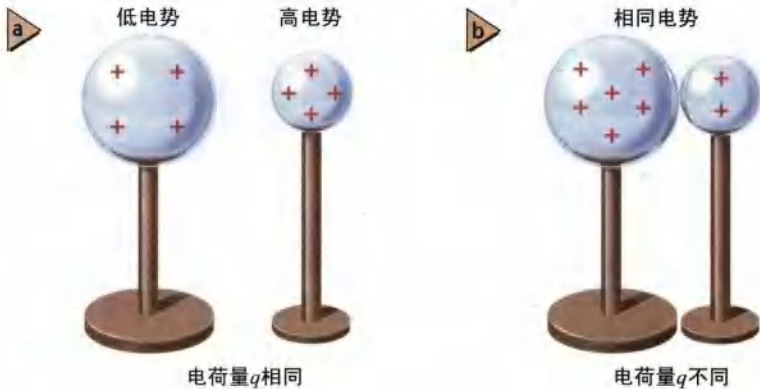


图21-11 当两球接触时，电荷从电势较高的球转移到电势较低的球上。电荷的这种转移，使两球不再存在电势差。

■ 图21-12 油罐车上的接地线可以防止汽油蒸气点燃而发生爆炸。



■ 图21-13 导电球上的电荷均匀地分布在它的表面(a)。空心球上的电荷全部均匀地分布在它的外表面上(b)。不规则形状的导体上的电荷在尖端处较密集(c)。

单个球或任何导体上的电荷移动情况都可用上述方法进行分析。电荷的重新分布最终使得每个电荷都不受到净力的作用。没有净力，导体的表面就没有电场，导体表面上任何两点间也就不存在电势差。因此导体的表面是一个等势面。

如果将带电体接地，那么几乎任何数量的电荷都会流入地球，直到该物体与地球间的电势差等于零为止。例如，油罐车会因摩擦而带电。如果油罐车上的电荷通过汽油蒸气进入地面，就可能引起爆炸。为了防止爆炸的发生，如图21-12所示，需要用一根金属线将电荷安全地引入大地。同样地，如果计算机不接地，那么在计算机与大地间也会产生电势差。那个时候，人如果接触这台计算机，电荷就可能通过计算机传到人体内，从而毁坏设备，伤及人体。

导体附近的电场

导体上的电荷总是尽量相互远离，以便使系统的能量尽可能地低。其结果就是所有电荷都分布在实心导体的表面。如果是空心导体，过量的电荷将移到外表面上。所以，封闭的金属容器即使带有电荷，在该容器的内表面上也不可能有电荷存在。由此可知，封闭的金属容器能屏蔽电场，保护其内部结构。例如，汽车里的人可免遭雷电产生的电场的伤害。同样，一只开启的咖啡罐的内表面上只有少量电荷，而接近底部处则几乎没有电荷。即使物体的内表面凹凸不平，且表面积比外表面大，其所带的电荷也会全部分布在外表面上。

另一方面，导体外部的电场通常不为零。虽然导体的表面是一个等势面，但其周围的电场仍取决于导体的形状以及导体与地球间的电势差。导体尖端处的电荷较密集，如图21-13所示。因此，此处的电场线也较密，电场强度较大。导体尖端附近的电场可以变得非常强，使得被宇宙射线从原子中激发出来的电子及残留的离子在这种强电场作用下做加速运动，然后去撞击其他原子，从而使更多的原子电离。例如，你在气体放电球内看到的粉红色的亮光便是这种链式反应的结果。如果电场强度足够大，那么当这些粒子撞击其他分子时，将产生离子和电子束流，形成等离

子体。等离子体是导体。其结果是导致火花放电，或者更进一步，产生雷电。为了减少放电和火花，带有大量电荷或具有较高电势的导体都要做成球形，以减弱电场。

与此相反，避雷针要制成尖锐的形状，以使针尖附近的电场很强。这种强电场使电子和离子加速运动，从而在避雷针与云层间形成一条导电通道。避雷针的尖锐形状使云层中的电荷容易通过避雷针，而不是通过烟囱或其他房屋、建筑物的制高点放电。这样，电荷就会沿着导线，从避雷针安全地传入大地。

通常情况下，只有当大地与云层间的电势差达到几百万伏时，才会发生闪电。即使对于小型的放电管来说，它的工作电压也只有数千伏。另一方面，家庭电路的电压一般并不高，不足以引起放电。

电荷的储存：电容器

当你举起一本书时，便增加了这本书的重力势能，或者说，你将能量储存在了重力场中。同样，你也可以将能量储存在电场中。1746年，荷兰医学家和物理学家穆森布鲁克（P.Musschenbroek）发明了一种可储存大量电荷的小器件。这种器件以他工作的城市命名，被称为莱顿瓶。富兰克林就是利用莱顿瓶收集了来自雷电的电荷，并做了许多相关实验的。各种形式的莱顿瓶当今仍然被应用于各种电气设备中。不过，今天使用的这些储存电荷的新器件，其形式更为新颖，尺寸更小，连名字也改了，称为电容器（capacitor）。

当一个物体带电后，它与大地间的电势差增加了。对于给定形状和大小的物体来说，它所储存的电荷量与电势差之比 $\frac{q}{\Delta U}$ 是一个常量，称为电容（capacitance），用C表示。对于远离地面的小球而言，即使增加少量电荷，也会使它的电势差增大，因此它的电容很小。而对于较大的球，在增加同样电势差的情况下，它可以带有更多的电荷，因此它的电容较大。

电容器是由被绝缘材料隔开的两块导体组成的，两块导体带有等量异种电荷。电容器有确定的电容。在现代电路中，电容器被用于储存电荷。典型的电容器产品如图21-14所示，它们是由两片铝箔夹着一层薄塑料膜制成的。为了节省空间，它们被紧紧地卷在一起。

电容器的电容与它所带的电荷量无关。测量电容时，可先让一块金属板上带有电荷量 q ，另一块金属板上带有电荷量 $-q$ ，然后测出它们之间的电势差 ΔU ，最后用下述公式计算出电容。电容的单位是法拉，符号为F。

$$\text{电容 } C = \frac{q}{\Delta U}$$

电容等于一块金属板上的电荷量与两极板间的电势差之比。

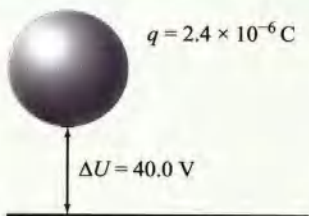
图21-14 各种类型的电容器。



电容的单位：法拉 电容的单位法拉是以法拉第的名字命名的，用符号F表示。 $1\text{ F} = 1\text{ C/V}$ 。正如1 C的电荷量是一个很大的量一样，1 F的电容也相当大。大多数现代电子设备中的电容器的电容一般在 $10\text{ pF}(10 \times 10^{-12}\text{ F}) \sim 500\text{ }\mu\text{F}(500 \times 10^{-6}\text{ F})$ 之间。不过，在某些计算机中使用的为了防止数据丢失的“记忆电容”的值可大到 $0.5 \sim 1.0\text{ F}$ 。注意，如果电荷量增加，那么电势差也会增加，但是电容器的电容仅取决于其自身的构造，而与所带的电荷量 q 无关。

► 例题 5

求电容 当一个球所带的电荷量为 $2.4 \times 10^{-6}\text{ C}$ 时，它与地面的电势差为 40.0 V 。它的电容是多少？



1 分析概括问题

- 画出位于地面上方的一个球，标出它所带的电荷量及电势差。

已知：

$$\Delta U = 40.0\text{ V}$$

$$q = 2.4 \times 10^{-6}\text{ C}$$

未知：

$$C = ?$$

2 求解未知量

$$\begin{aligned} C &= \frac{q}{\Delta U} \\ &= \frac{2.4 \times 10^{-6}\text{ C}}{40.0\text{ V}} \quad \text{将 } \Delta U = 40.0\text{ V}, q = 2.4 \times 10^{-6}\text{ C} \text{ 代入。} \\ &= 6.0 \times 10^{-8}\text{ F} \\ &= 0.060\text{ }\mu\text{F} \end{aligned}$$

3 验证答案

- 单位是否正确？** $1\text{ C/V} = 1\text{ F}$ 。这个单位就是法拉。
- 数值是否合理？** 电容很小，因此它在低电压下只能储存少量电荷。

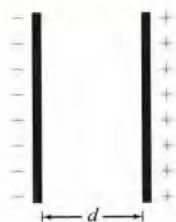
► 练一练

- 一只 $27\text{ }\mu\text{F}$ 的电容器，其两板间的电势差为 45 V 。这个电容器所带的电荷量是多少？
- 两个电容分别为 $3.3\text{ }\mu\text{F}$ 和 $6.8\text{ }\mu\text{F}$ 的电容器，它们两板间的电势差均为 24 V 。哪个电容器所带的电荷量更多？具体是多少？
- 同样第31题中的两个电容器，每个所带的电荷量都是 $3.5 \times 10^{-4}\text{ C}$ 。哪个电容器中的电势差更大？具体是多少？
- 一个 $2.2\text{ }\mu\text{F}$ 的电容器，充电后它的电势差为 6.0 V 。为了使它的电势差提高到 15.0 V ，需增加多少电荷量？
- 在一个电容器上增加 $2.5 \times 10^{-5}\text{ C}$ 的电荷量后，它的电势差从 12.0 V 提高到了 14.5 V 。该电容器的电容是多少？

● 挑战性问题

电容器两极板由于带有异种电荷而彼此吸引。假定一个电容器由间距为 d 的两块平行金属板组成，其电容为 C 。

1. 如果电容器上极板所带的电荷量为 q ，试推导出两金属板间作用力的表达式。
2. 如果一只 $22\ \mu\text{F}$ 的电容器两极板的间距为 $1.5\ \text{mm}$ ，那么，为了使两板间的作用力为 $2.0\ \text{N}$ ，需在电容器中储存多少电荷量的电荷？



可变电容器 如图21-14所示，电容器有许多种类型和大小。有些电容器大到像房间一样，存储的电荷多得足以产生人造闪电或激光，能在数十亿分之几秒内释放出几千焦的能量。电视机组件中的电容器可在数百伏的高电压下储存足够的电荷，此时如果接触它，那是非常危险的。当电视机的电源被切断后，这些电容器还能保存充足的电荷量达数小时之久。这就是你不能打开电视机外壳或计算机设备的原因，即使它们的电源已被切断。

你可以通过改变电容器中两极板的面积、两板间的距离或绝缘材料的类型等办法来改变电容器的电容大小。如果按照隔开两板的绝缘材料，或者说电介质的类型来命名电容器，就有如下的电容器：陶瓷电容器、云母电容器、聚酯电容器、纸质电容器以及空气电容器等。根据电容大小的决定因素，你可以通过增加两极板的面积和减小两板间距等办法增大电容器的电容。电介质具有部分屏蔽金属板上电荷的能力，所以它能使电容器储存更多的电荷。

本节复习题

35. **电势差** 电势能与电势差有什么区别？
36. **电场与电势差** 证明 $1\ \text{V/m}$ 与 $1\ \text{N/C}$ 是相同的。
37. **密立根实验** 当悬浮在密立根实验装置中的油滴所带的电荷量发生改变时，应怎样改变两板间的电势差，才能使油滴恢复到平衡状态？
38. **电荷与电势差** 在第37题中，如果改变电势差对于油滴的下落已不起作用，这说明了什么？
39. **电容** 在一只 $0.47\ \mu\text{F}$ 的电容器上，当施加的电势差为 $12\ \text{V}$ 时，它储存了多少电荷？
40. **电荷分配** 如果一个大的带正电的导体球与一个小的带负电的导体球相接触，下列物理量会发生什么变化？
 - a. 两球的电势
 - b. 两球所带的电荷量
41. **理性思维** 参考图21-3a，说明为什么电荷能连续不断地传送到范德格拉夫起电机的金属罩上。特别要说明的是，为什么金属罩上的电荷不会因被排斥而回到B点处的传送带上。

课外CBL培训可
见如下网站:
physicspp.com

电容器充电实验

电容器是由被绝缘材料隔开的两块导体或金属板构成的一种器件,它具有特定的电容。电容器的电容取决于导体和绝缘材料的物理特性与几何特性。在电路系统中,即使开关处在闭合位置,电容器看上去还是处于开路状态的。但是,由于电容器能储存电荷,所以当开关闭合时,会有电荷从电源移向电容器,在电容器的两极板上产生等量的异种电荷,从而形成一定的电势差。随着电容器上电荷量的增加,两板间的电势差也随之增加。在本实验活动中,你将要检测几种不同电容器的充电情况。

问题

电容器的充电时间是怎样随它们的电容的改变而改变的?

目标

- 收集与整理不同电容器充电快慢的数据。
- 对比与比较不同电容的电容器充电的快慢。
- 绘制和运用图象,显示几种电容器在充电过程中电势差随时间变化的情况。

安全警示

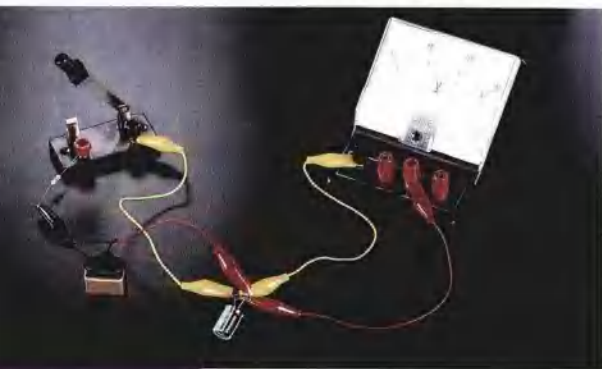


实验器材

9 V干电池	电压表
9 V电池接线夹	47 k Ω 的电阻器
带夹子的导线	停表
开关	1 000 μ F、500 μ F、 240 μ F的电容器

实验步骤

1. 实验开始前,将开关打开,此时不要连接电池。
注意:小心操作以避免短路,特别注意防止连接电池的两个接线夹相碰。如照片所示,连接电路。将电阻的一端与开关的一端相连。电阻是用来减慢电容器的充电速率,以方便你的测量的。将电阻的另一端与9 V干电池的负极接线夹相连。然后检查一下你的1 000 μ F电容器哪一端标有负号,或带有负号的箭头,该端要与电池的负极相连。将电容器的负极与开关的另一端相连;电容器上另一个尚未连接的(正)极则与电池的正极接线夹相连。
2. 将电压表的正极与电容器的正极相连,电压表的负极与电容器的负极相连。将你的电路与照片中的进行比较,以验证你的连接是否正确。经老师检查后再接通电源。
3. 准备一张数据表,第一列表示时间,另外三列分别记录三种不同电容器的电势差。
4. 请一位同学计时,另一位同学记录在设定时间内的电势差。闭合开关,每隔5 s测量一次电势差。测得数据后,将开关打开。



数据表

时间(s)	1 000 μF 电容器上的 电势差(V)	500 μF 电容器上的 电势差(V)	240 μF 电容器上的 电势差(V)	时间(s)	1 000 μF 电容器上的 电势差(V)	500 μF 电容器上的 电势差(V)	240 μF 电容器上的 电势差(V)
0				55			
5				60			
10				65			
15				70			
20				75			
25				80			
30				85			
35				90			
40				95			
45				100			
50				105			

- 完成实验后，用一根短导线触碰电容器的两端，使它放电。
- 用一只500 μF 的电容器代替1 000 μF 的电容器，重复步骤4~5，并将数据记录在数据表中。
- 用一只240 μF 的电容器代替500 μF 的电容器，重复步骤4~5，并将数据记录在数据表中。

分析

- 观察与推断** 是否每只电容器都会充电至9 V？对你的观察结果作出解释。
- 绘制和运用图象** 作出图线，其水平轴表示时间，竖直轴表示电势差。对每个电容器，用不同标记的曲线表示。

结论与应用

- 解释数据** 电容器两端的电势差会立即达到电源电压(9 V)吗？对你的观察结果作出解释。
- 推断** 电容器的电容越大，所需的充电时间是否越长？说明理由。

进一步探索

- 电容器充电达到电源电压所需的时间取决于它的电容以及电路中阻碍电荷流动的电阻。在这个实验中所采用的电阻的阻值为47 k Ω 。由一只电容器和一个电阻器构成的电路充电达到电源电压的63.2%所需的时间(s)等于电容和电阻的乘积，这个值称为时间常数。用公式表示为 $T = RC$ ，这里 T 的单位是s， R 的单位是 Ω ， C 的单位是F。试计算每个电容器与47 k Ω 电阻器所构成的电路的时间常数。
- 将你由计算得到的时间常数与由图线得到的结果进行比较。

生活中的物理学

说明 在用装有闪光灯的便携式小型照相机拍照时，如果要用到闪光，则需要一定的预备时间，以贮存闪光所需要的能量。试说明在你等待拍摄下一张照片的时间间隔内，照相机内发生了什么情况。

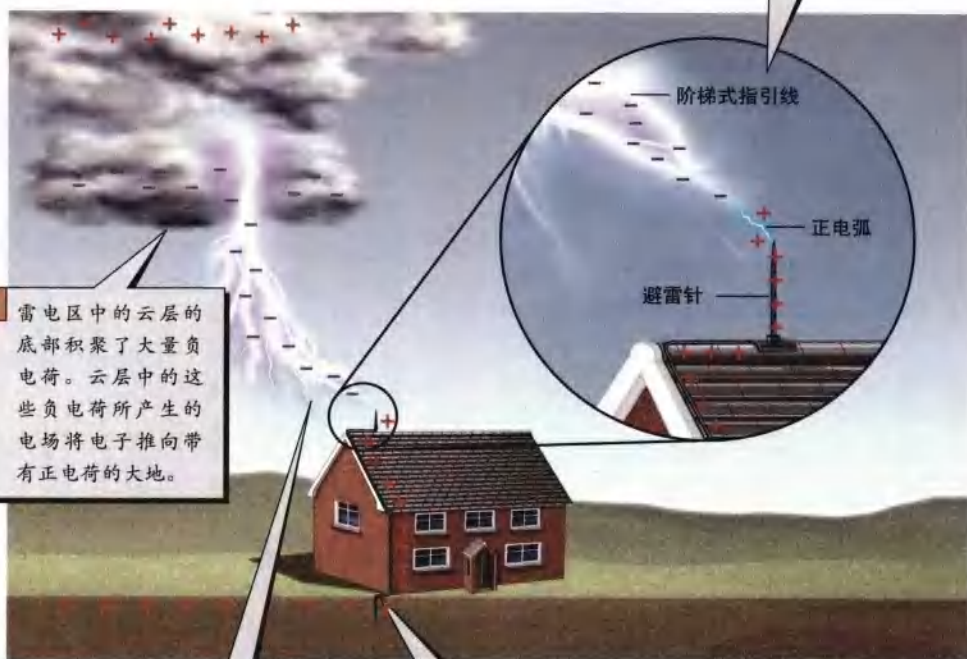
物理在线

若想了解更多关于电场的知识，请登录网站：
physicspp.com。



闪电有很大的破坏性，因为闪电能在导电性不好的材料中产生极大的电流，从而产生巨大的热量。避雷针除了在雷击发生前能消除一些电荷以保护建筑物外，它还是极其良好的导体，能为电流提供一条安全通道。人们公认，第一个避雷针装置是富兰克林于18世纪50年代发明的。

3 从避雷针的火花中发出的正电荷与阶梯式指引线相遇，形成导电通道，使原先分离的电荷发生中和。因此，即使阶梯式指引线并没有直接击中避雷针，巨大的电流也能沿着避雷针这条电阻最小的通道流向大地。



1 雷电区中的云层的底部积聚了大量负电荷。云层中的这些负电荷所产生的电场将电子推向带有正电荷的大地。

2 强电场使电子和离子加速运动，导致在空气中发生链式电离反应，形成等离子体。电离的空气是一种导体，它从云层中产生并形成所谓的阶梯式指引线。

4 电流安全地通过导线直达终端处的大地。

理性思维

1. 假设 当没有安装避雷针的房子被雷电击中时，电流将沿着什么路径传播？
2. 估计 接地端与大地间的电阻应当大一些还是小一些？
3. 推断 避雷针安装不当会造成什么后果？

21.1 电场的产生与测量

关键术语

- 电 场
- 电场线

重要概念

- 带电体周围存在电场。电场对其中的其他带电物体施加力的作用。
- 电场强度等于单位电荷所受的力：

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

- 电场强度的方向就是作用在一个小的正试探电荷上的力的方向。
- 电场线提供了一种电场的图象。它们从正电荷出发，向负电荷会聚，且永远不会相交。它们的疏密程度与电场强度的大小有关。

21.2 电场的应用

关键术语

- 电势差
- 伏 特
- 等 势
- 电容器
- 电 容

重要概念

- 电势差就是电场中单位电荷电势能的改变量：

$$\Delta U = \frac{W}{q}$$

- 电势差的单位是伏特，简称伏，用符号V表示。
- 两块平行板之间的电场除边缘处之外都是匀强电场。在匀强电场中，电势差与电场强度之间存在以下关系：

$$\Delta U = Ed$$

- 密立根油滴实验证明，电荷是量子化的。
- 密立根油滴实验还证明，每个电子所带的负电荷的电荷量为 $1.60 \times 10^{-19} \text{ C}$ 。
- 电荷会在导体中移动，直至导体中各处的电势相等。
- 接地会使物体与大地间的电势差等于零。
- 接地可避免电中性的物体与带电体接触时产生火花。
- 导体尖端附近的电场强度最大。
- 一个导体的电容就是该物体所带的电荷量与它的（与大地之间的）电势差之比：

$$C = \frac{q}{\Delta U}$$

- 导体的电容与它所带的电荷量以及它的电势差无关。
- 电容器可用来储存电荷。

绘制概念图

42. 用下列术语完成概念图：电容、电场强度、J/C、功。



理解概念

43. 试探电荷必须具有的两个特性是什么？(21.1)
44. 电场的方向是怎样定义的？(21.1)
45. 什么是电场线？(21.1)
46. 怎样用电场线表示电场的强弱？(21.1)
47. 在以下两个电荷间画出几条电场线。(21.1)
 - a. 两个等量同种电荷
 - b. 两个等量异种电荷
 - c. 一个正电荷和一个负电荷，其中负电荷的电荷量是正电荷电荷量的2倍
 - d. 两块带异种电荷的平行金属板
48. 如图21-15所示，正电荷电场线的终点在哪里？(21.1)



图21-15

49. 电势能是用哪个SI制单位度量的？电势差呢？(21.2)
50. 用电荷在电场中移动时其电势能的变化量来定义单位“伏特”。(21.2)
51. 当一个带电体与大地接触时，它为什么会失去电荷？(21.2)
52. 将一根带电的橡胶棒放在桌子上，为什么在一段时间内它能保持它的带电状态？(21.2)
53. 一只金属盒带了电。试比较盒角与侧面上电荷的密集程度。(21.2)
54. 计算机 如图21-16所示，塑料箱里的电子设备中的精密部分为何必须安装在金属盒内？(21.2)



图21-16

应用概念

55. 若用于测量电场的试探电荷所带的电荷量减少一半，那么所测得的电场强度将如何变化？
56. 为了使一个电荷量恒定的正电荷在不断增强的电场中移动，需要的能量是越来越多还是越来越少？
57. 带电粒子在电场中自由运动时，该粒子的电势能将如何变化？
58. 如图21-17所示为三个带等量电荷的小球，电荷的符号如图所示。球y和球z固定不动，球x可自由移动。开始时，球x与球y和球z之间的距离相等。假定无其他力的作用，试确定球x的运动路径。

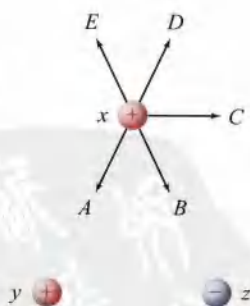


图21-17

59. 用m、kg、s和C表示的电势差的单位是什么？
60. 如果某区域内的电场强度处处相同，那么此区域中电场线的形状如何？
61. **密立根油滴实验** 在做密立根油滴实验时，最好使油滴带少量电荷。这样，当电场接通时，你看到的油滴的运动会不会更快些还是更慢些？请说明理由。
62. 在密立根油滴实验中，两油滴悬浮不动。
- 你能断定它们所带的电荷量相等吗？
 - 这两油滴的荷质比相等吗？
63. 约瑟和苏伊手拉手站在一个绝缘平台上，如图21-18所示。约瑟的体型较大。当他们带电时，谁身上的电荷量更多？他们所带的电荷量能相等吗？



图21-18

64. 直径分别为1 cm和10 cm的两个铝球，哪个球的电容更大？
65. 同一个电容器怎样储存不同的电荷量？

问题解决

21.1 电场的产生与测量

电子所带的电荷量为 $-1.60 \times 10^{-19} \text{ C}$ 。

66. 试探电荷在电场强度为 $5.0 \times 10^{-4} \text{ N/C}$ 的某点处所受到的作用力为 $1.4 \times 10^{-8} \text{ N}$ 。该试探电荷的电荷量是多少？
67. 将一个电荷量为 $1.0 \times 10^{-5} \text{ C}$ 的正电荷放置在空间某

点处时，它受到的力为 0.30 N ，如图21-19所示。该点的电场强度为多大？

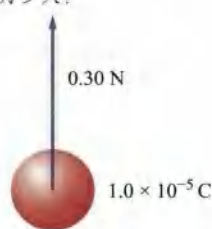


图21-19

68. 一个试探电荷被放置在电场强度为 $4.5 \times 10^5 \text{ N/C}$ 的电场中，所受到的力是 0.30 N 。该试探电荷的电荷量是多少？
69. 大气中的电场强度约为 150 N/C ，方向向下。
- 带负电的粒子在大气中受到的力的方向怎样？
 - 试求作用在电荷量为 $-1.60 \times 10^{-19} \text{ C}$ 的电子上的静电力。
 - 将b中的结果与电子所受到的重力进行比较。
(电子的质量 $m = 9.1 \times 10^{-31} \text{ kg}$)
70. 仔细作出下列示意图。(使电场线的条数与电荷量成正比)
- 由一个 $+1.0 \mu\text{C}$ 的电荷所产生的电场。
 - 由一个 $+2.0 \mu\text{C}$ 的电荷所产生的电场。
71. 一个电荷量为 $6.0 \times 10^{-6} \text{ C}$ 的正试探电荷位于电场强度为 50.0 N/C 的电场中，如图21-20所示。该试探电荷将受到多大的力的作用？

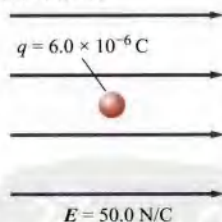


图21-20

72. 电荷X、Y和Z两两间的距离相等。已知X所带的电荷量为 $+1.0 \mu\text{C}$ ，Y所带的电荷量为 $+2.0 \mu\text{C}$ ，而Z只带很少量的负电。
- 作图表示作用在电荷Z上的力。
 - 如果Z带的是很少量的正电荷，再作图表示作用在电荷Z上的力。

第21章 测评

73. 在电视机显像管中, 电子被电场强度为 $1.00 \times 10^5 \text{ N/C}$ 的电场加速。

a. 试求电子所受的力。

b. 如果这是一个匀强电场, 求电子的加速度。(电子的质量 $m = 9.1 \times 10^{-31} \text{ kg}$)

74. 与电荷量为 $8.0 \times 10^{-7} \text{ C}$ 的点电荷相距 20.0 cm 处的电场强度为多大?

75. 铅原子核带有82个质子的电荷量。

a. 在距离铅原子核 $1.0 \times 10^{-10} \text{ m}$ 处, 电场的大小和方向怎样?

b. 在这个距离上, 电子将受到的力的大小和方向又是怎样?

21.2 电场的应用

76. 假定将电荷量为 2.4 C 的电荷从正极板移至负极板时, 所做的功为 120 J , 如图21-21所示。两极板间的电势差是多少?



图21-21

77. 将电荷量为 0.15 C 的电荷移过电势差为 9.0 V 的两点时, 需做多少功?

78. 要使一个电子通过电势差为 450 V 的两点, 需对它做多少功?

79. 一只 12 V 的电池在移动电荷时做了 1200 J 的功, 有多少电荷被移动?

80. 两块带电板之间的电场强度为 $1.5 \times 10^3 \text{ N/C}$, 两板相距 0.060 m 。两板间的电势差是多少?

81. 电压表指示两板间的电势差为 70.0 V 。已知两板相距 0.020 m , 存在于两板间的电场强度为多大?

82. 一个电容器与 45.0 V 的电源相连接, 此时电容器带电 $90.0 \mu\text{C}$ 。该电容器的电容是多少?

83. 一个 $5.4 \mu\text{F}$ 的电容器带电 $8.1 \times 10^{-4} \text{ C}$, 此时它的两板间的电势差为多大?

84. 如图21-22所示, 油滴带负电, 重 $4.5 \times 10^{-15} \text{ N}$, 悬浮在场强为 $5.6 \times 10^3 \text{ N/C}$ 的电场中。

a. 该油滴所带的电荷量是多少?

b. 它带了多少个过量电子?



图21-22

85. 有一个 15.0 pF 的电容器。当它与 45.0 V 的电源连接时, 储存了多少电荷?

86. 在匀强电场中, 一个 0.065 N 的力将 $37 \mu\text{C}$ 的电荷移动了 25 cm , 如图21-23所示。这两点间的电势差为多大?

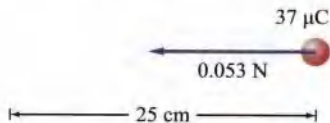


图21-23

87. 闪光灯 储存在电容为 C 、电势差为 ΔU 的电容器中的能量可表示为 $W = \frac{1}{2} C \Delta U^2$ 。此式可应用于如图21-24所示的电子闪光灯。假定在某种电子闪光灯单元中, $10.0 \mu\text{F}$ 的电容器充电至 $3.0 \times 10^2 \text{ V}$, 求此时它所储存的能量。



图21-24

88. 如果第87题中的那个电容器充电用了 25 s 时间。

a. 求这段时间内对电容器充电的平均功率。

b. 假定此电容器通过闪光灯放电, 释放出所有能量的时间为 $1.0 \times 10^{-4} \text{ s}$ 。求对闪光灯做功的功率。

c. 为什么会有如此大的功率?

89. **激光** 激光已可用于产生受控聚变反应。这种激光需要很短的脉冲式能量，它们可预先储存在一个装有电容器的大房间里，这种房间中的电容器的电容可达 $61 \times 10^{-3} \text{ F}$ ，可充电至 10.0 kV 的电势差。

- 利用表达式 $W = \frac{1}{2} C \Delta U^2$ ，求这种电容器所储存的能量。
- 电容器在 10 ns 内放电，它所产生的功率为多大？
- 如果该电容器用一台功率为 1.0 kW 的发电机充电，那么充满电需要多长时间？

复习提高

- 使一个 $0.25 \mu\text{C}$ 的电荷在间隔为 0.40 cm 的两块平行金属板间移动，需做多少功？假定两金属板间的电场强度为 6400 N/C 。
- $0.22 \mu\text{F}$ 的平行金属板电容器中储存有多少电荷？假定两金属板间距为 1.2 cm ，两金属板间的电场强度为 2400 N/C 。
- 两个完全相同的小球相距 25 cm ，它们带有 $0.060 \mu\text{C}$ 的等量异种电荷，如图21-25所示。如果它们之间的电势差为 300 V ，该系统的电容是多少？

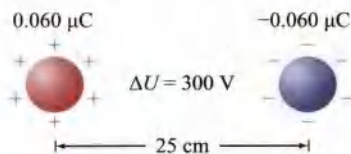


图21-25

- 电容为 $0.047 \mu\text{F}$ 的电容器，其两板相距 0.25 cm 。当该电容器充电至电势差为 120 V 时，它所储存的电荷量是多少？
- 在第93题中，该电容器两板间的电场强度为多大？
- 一个电子位于第93题中那个电容器的两板间，如图21-26所示。该电子所受到的力为多大？

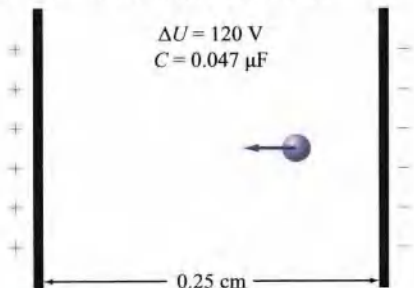


图21-26

96. 第93题中，当电势差为 120 V 时，如果在两板间再移过 $0.010 \mu\text{C}$ 的电荷，需做多少功？

97. 如图21-27所示的图线表示电容器上的电荷量随电势差的增大而变化的规律。这条线的斜率表示什么？

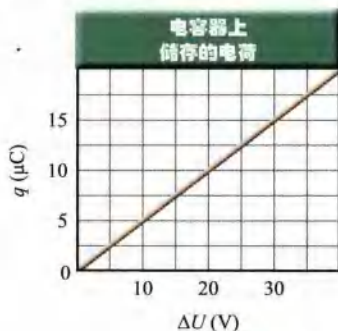


图21-27

- 如图21-27所示的电容器，其电容为多大？
- 如图21-27所示的那条图线下方的面积表示什么？
- 第98题中的那个电容器在充电至 25 V 的过程中，需做多少功？
- 在第100题中你可以发现，电容器做的功并不等于 $q\Delta U$ 。这是为什么？
- 作出正点电荷附近的电场强度随离开它的距离而变化的函数图线。
- 点电荷的电场强度何处等于零？
- 在点电荷所在处，电场强度为多大？实际中这样的点电荷存在吗？

理性思维

- 应用概念** 虽然避雷针在实际使用中，主要是将电荷安全地转移到大地，但是在最初设计时，它的目的是避免建筑物的至高点被闪电击中。这个说法对吗？
- 分析与结论** 在1911年的实验中，密立根测出了如下所示的油滴所带的电荷量。由这些数据推断出的元电荷的电荷量为多大？

a. $6.563 \times 10^{-19} \text{ C}$	b. $8.204 \times 10^{-19} \text{ C}$
c. $11.50 \times 10^{-19} \text{ C}$	d. $13.13 \times 10^{-19} \text{ C}$
e. $16.48 \times 10^{-19} \text{ C}$	f. $18.08 \times 10^{-19} \text{ C}$
g. $19.71 \times 10^{-19} \text{ C}$	h. $22.89 \times 10^{-19} \text{ C}$
i. $26.13 \times 10^{-19} \text{ C}$	

第21章 测评

107. **分析与结论** 两个小球A和B位于x轴上,如图21-28所示。球A所带电荷量为 $+3.00 \times 10^{-6} \text{ C}$,B球位于A球右边0.800 m处,所带电荷量为 $-5.00 \times 10^{-6} \text{ C}$ 。试求x轴上方与A球和B球构成的等边三角形顶端处的电场强度的大小和方向。

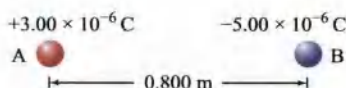


图21-28

108. **分析与结论** 在喷墨打印机中,墨滴在进入两块大的平行板间之前,被带上一定量的电荷。两板的作用是使电荷偏转而被一槽沟挡住,不能到达纸上。如图21-29所示,长1.5 cm的两板间的电场强度 $E = 1.2 \times 10^6 \text{ N/C}$ 。墨滴的质量 $m = 0.1 \text{ ng}$,所带的电荷量 $q = 1.0 \times 10^{-16} \text{ C}$,且以 $v = 15 \text{ m/s}$ 的速率沿着与板平行的水平方向运动。当它离开板时,它在竖直方向的位移是多少?按下列顺序回答这一问题。
- 墨滴在竖直方向所受的力为多大?
 - 墨滴在竖直方向的加速度为多大?
 - 墨滴在两板间的运动时间是多少?
 - 墨滴在竖直方向的位移为多大?

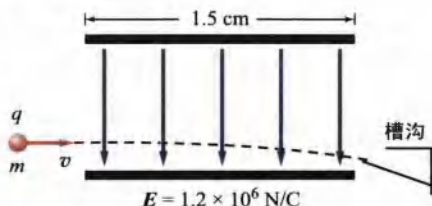


图21-29

109. **应用概念** 假定月球带有负的净电荷 $-q$,地球带有正的净电荷 $+10q$ 。当 q 为多大时,它们之间的静电引力才能与万有引力一样大?

科技写作

110. 选择一个电学单位,如库仑、伏特或法拉,研究以其名字命名的科学家的生平和成就。撰写一篇关于这位科学家的短文,包括对他名字命名的单位的相关工作的讨论。

日积月累

111. 迈克耳孙采用将一束光射到一面镜子上的办法来测量光速。这面镜子安放在35 km远处的山上。(第16章)
- 光抵达山上的镜面然后返回需多少时间?
 - 假定迈克耳孙采用一个八面体旋镜,并假定从其中一个镜面上反射的光将射到另一座山上,然后被固定在这座山上的一面镜子反射回八面体旋镜处。如果调整旋镜的转速,使返回的光恰好被转过的下一个镜面反射。旋镜的转速应多大?
 - 如果每面镜子的质量均为 $1.0 \times 10^1 \text{ g}$,在一个圆周上转动的平均半径为 $1.0 \times 10^1 \text{ cm}$ 。为了使镜子转动,需要对它施加多大的向心力?
112. **山景** 在平静的湖面上,你可以看到湖边的一位骑自行车的人,同样你也可以看到远处的一座高山,从这两者所发出的光射到湖面的入射角相同,因此它们同时反射到了你的眼中。假定湖面的直径为100 m,山顶的反射大致在湖面的中央,高山离湖50 km,你的身高大约为2 m。那么这座山大致为多高?(第17章)
113. 凸透镜的焦距为38.0 cm。如果将它放置在离物60.0 cm处,那么像与透镜的距离是多少?(第18章)
114. 测得相距为 r 的两个电荷 Q 和 q 之间的静电力为 F 。在下列情况下,它们间的静电力分别变为多大?(第20章)
- r 变为原来的3倍
 - Q 变为原来的3倍
 - r 和 Q 都变为原来的3倍
 - r 和 Q 变为原来的2倍
 - r 、 Q 和 q 都变为原来的3倍

标准化测试

选择题

1. 只可以用很小的试探电荷来测量电场的原因是 ()

- (A) 为了使它不致干扰被测电场
- (B) 小电荷的动量小
- (C) 为了不使试探电荷的分布发生改变
- (D) 总是用电子作为试探电荷, 而电子是很小的

2. 电荷量为 $2.1 \times 10^{-9} \text{ C}$ 的电荷 q 所受的力为 14 N , 由此可得出它所在点的电场强度为 ()

- (A) $0.15 \times 10^{-9} \text{ N/C}$
- (B) $6.7 \times 10^{-9} \text{ N/C}$
- (C) $29 \times 10^{-9} \text{ N/C}$
- (D) $6.7 \times 10^9 \text{ N/C}$

3. 电荷量为 $8.7 \mu\text{C}$ 的正试探电荷所受的力为 $8.1 \times 10^{-6} \text{ N}$, 方向为东偏北 24° 。该试探电荷所在处的电场强度的大小和方向分别为 ()

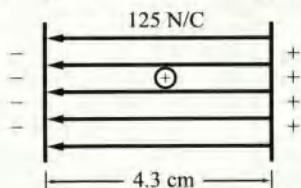
- (A) $7.0 \times 10^{-8} \text{ N/C}$, 东偏北 24°
- (B) $1.7 \times 10^{-6} \text{ N/C}$, 西偏南 24°
- (C) $1.1 \times 10^{-3} \text{ N/C}$, 南偏西 24°
- (D) $9.3 \times 10^{-1} \text{ N/C}$, 东偏北 24°

4. 两块相距 18 cm 的平行金属板之间的电场强度为 $4.8 \times 10^3 \text{ N/C}$, 两金属板间的电势差是 ()

- (A) 27 V
- (B) 86 V
- (C) 0.86 kV
- (D) 27 kV

5. 如图所示, 假定两块平行金属板的间距为 4.3 cm , 两板间的电场强度为 125 N/C 。将一个质子从负极板移到正极板所需做的功为 ()

- (A) $5.5 \times 10^{-23} \text{ J}$
- (B) $8.6 \times 10^{-19} \text{ J}$
- (C) $1.1 \times 10^{-16} \text{ J}$
- (D) 5.4 J

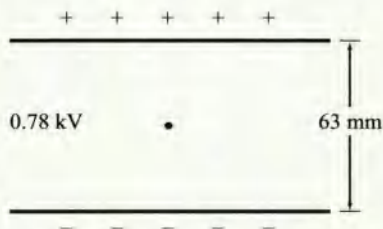


6. 在密立根油滴实验中, 电场强度的大小是 ()

- (A) 用适当的电磁铁测量得到的
- (B) 通过两板间的电势差计算得到的
- (C) 通过电荷的大小计算得到的
- (D) 用验电器测量得到的

7. 在油滴实验中, 重 $1.9 \times 10^{-14} \text{ N}$ 的油滴静止地悬浮在间隔为 63 mm 、电势差为 0.78 kV 的两板间。该油滴所带的电荷量为 ()

- (A) $-1.5 \times 10^{-18} \text{ C}$
- (B) $-3.9 \times 10^{-16} \text{ C}$
- (C) $-1.2 \times 10^{-15} \text{ C}$
- (D) $-9.3 \times 10^{-13} \text{ C}$



8. 一个电容器的电容为 $0.093 \mu\text{F}$ 。如果该电容器上极板所带的电荷量为 $58 \mu\text{C}$, 那么两极板间的电势差为 ()

- (A) $5.4 \times 10^{-12} \text{ V}$
- (B) $1.6 \times 10^{-6} \text{ V}$
- (C) $6.2 \times 10^2 \text{ V}$
- (D) $5.4 \times 10^3 \text{ V}$

拓展题

9. 假定在一滴油上有 18 个过量电子, 试计算油滴上的电荷量, 以及使它悬浮所需的电势差。假定油滴重 $6.12 \times 10^{-14} \text{ N}$, 两板间距为 14.1 mm 。

✓ 考试小贴士

小组学习

在小组中进行学习。参加小组学习会拓宽你的解题思路, 使你获取更多的知识。你的小组不要太大, 在小组学习时, 要针对同一目标相互提问, 然后进行交流讨论。

第22章

电 流

内容提要

- 说明能量在电路中是如何传递的。
- 求解有关电流、电压及电阻的问题。
- 学会作简单的电路图。

学习本章的意义

电路具有在一定电压的作用下转移能量并做功的本领。你所使用的电动工具和电气设备的运作，都是建立在这一基础之上的。

电力输电线路 输电线遍布全国，将电能输送到人们需要的地方。这些电能通常是通过电压高达500 000 V的高压输电线路进行传输的。

想一想 ▶

输电线路的电压对于家庭和工厂用户来说实在太高，且很不安全。那么，为什么输电线路上还是要用如此高的电压呢？

物理  在线
physicspp.com



起步实验

使灯泡发光

问题

给你一段导线、一节干电池和一个灯泡。你能使这个灯泡发光吗？

步骤

1. 取一个灯泡、一段导线和一节干电池。尝试各种不同的方法使这个灯泡发光。**注意：导线两端较尖锐，小心割伤皮肤。在将导线与电池相连时，导线会发烫。**
2. 画出两种能使你的灯泡发光的电路图。注意使用正确的符号表示电池、导线和灯泡。
3. 画出至少三种不能使你的灯泡发光的电路图。

分析

你如何知道电路中是否存在电流？能够使灯泡发光的电路图有哪些共性？无法使灯泡发光的

电路图又有什么相同之处？根据你的观察，你认为使灯泡发光的必要条件是什么？

理性思维 是什么原因使电流能够通过灯泡？



22.1 电流和电路

你 在第11章中已经学过，瀑布顶部的水流既有势能，又有动能。虽然自然界中存在着大量可利用的势能和动能，但是，如果不能将其有效地输送出去，那么这些能量对于100 km外的人们的日常生活和生产而言并无用处。电能是一种可远距离大量输送且损耗很小的能量形式。这种能量的输送通常是如上页照片所示的那样，通过大功率高压输电线路实现的。一旦传送到用户处，这种能量就可方便地转化为其他形式的能量，包括声能、光能、热能以及机械能等。

由于电能非常容易转化为其他的能量形式，因此在日常生活中，电力已成为人们不可或缺的资源。只需抬头看看周围，你就会发现大量电能转化的实例。在家里，晚上用来照明的电灯、用来烹调食物的微波炉和电炉，还有计算机和音响等，实际上都是以电能作为动力的。在屋外，路灯、商店招牌以及汽车的启动等也都要用到电。在本章中，你将要学习电压、电阻及电流的关系，以及电功和电能的转化问题。

学习目标

- 描述电路中产生电流的条件。
- 解释欧姆定律。
- 设计闭合电路。
- 区分电路中的电功和电能。

关键术语

电 流
常规电流
电池组
电 路
安 培
电 阻
电阻器
并 联
串 联

电流的产生

在第21章中你曾经学过，当两个带电导体球相互接触时，电荷会从电势较高的球流向电势较低的球。这种流动将持续到两球的电势相等时为止。

电荷的定向移动形成**电流 (electric current)**。如图22-1a所示，导体A和导体B通过一根导线C相连。正电荷从电势较高的导体B通过C流向导体A。这种正电荷的移动称为**常规电流 (conventional current)**。当A、B及C之间的电势差为零时，这种电荷的移动便停止。你可以通过将电荷从A“泵回”B的办法维持B和A之间的电势差，如图22-1b所示。因为泵取电荷的过程中，电荷的电势能将会增加，所以必须要有外界能量才能做到这一点。这种能量可来自于各种电源，例如大家熟悉的电池等，它们能将化学能转换成电能。如果将几节电池连在一起，就组成了**电池组 (battery)**。此外，光电池（也称太阳能电池）还可将光能转化为电能。

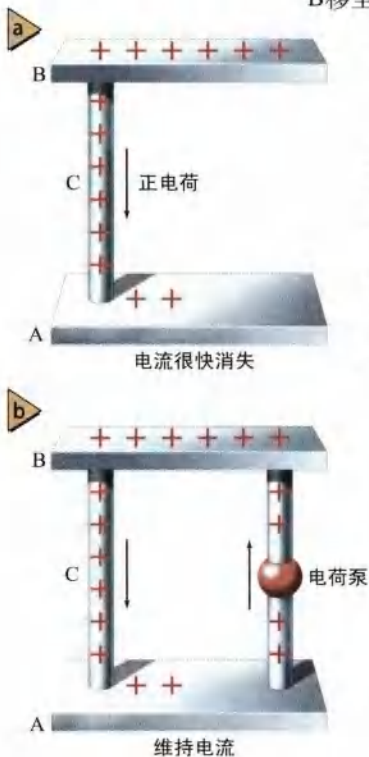
电路

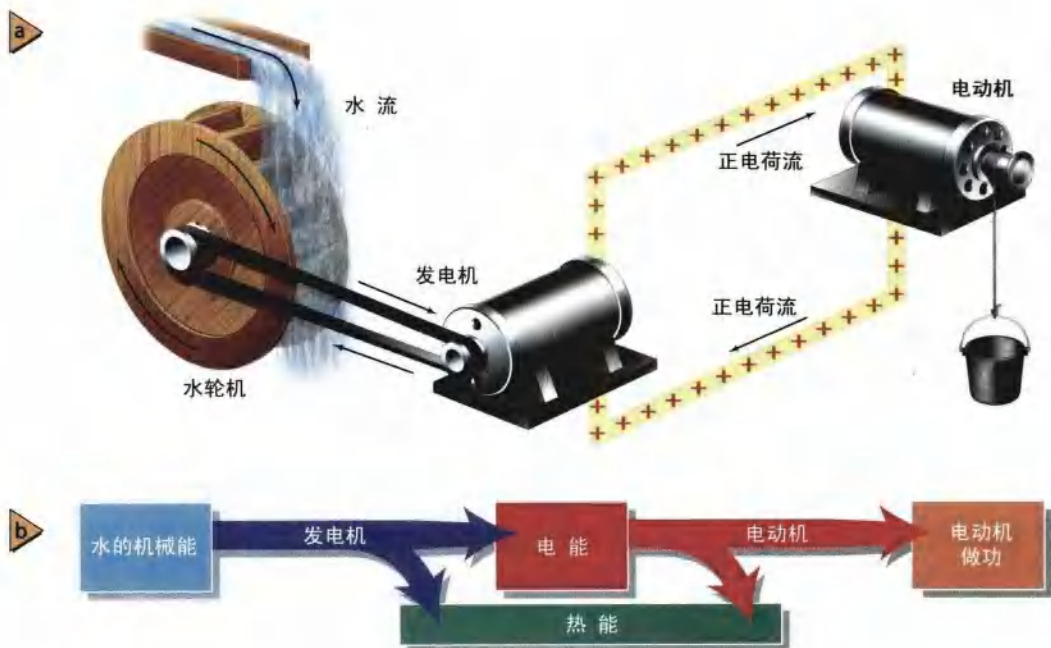
如图22-1b所示，电荷在一个闭合的回路中流动，从“电荷泵”将带电粒子泵至B后开始，通过C到A，再回到电荷泵，不断循环。容许电荷通过的闭合回路或导电通路称为**电路 (electric circuit)**。一条电路含有一个将电荷从A移至B以增加其电势能的“电荷泵”，以及一个将电荷从B移至A以减少其电势能的用电器。电荷通过用电器所损失的电势能 qU 通常将转化为其他形式的能。例如，电动机将电能转化为动能，电灯将电能转化为光能，电热器将电能转化为热能等。

“电荷泵”使电荷定向移动而形成电流。考虑一台如图22-2a所示的由水轮机驱动的发电机。水下落带动水轮机，继而带动发电机转动。因此，水的动能便转化成了发电机的电能。发电机就像一台“电荷泵”，使电势差增加了 U ，因此电荷的电势能增加了 qU 。这个能量来自水的机械能。不过，如图22-2b所示，并非水的所有动能都可以转化为电能。如果将由水轮机带动的发电机与一台电动机相连，导线中的电荷就会流入电动机，然后继续经电路返回发电机。此时电动机将电能转化为动能。

电荷守恒 电荷既不会被创生，也不会被消灭，但它们可以被分离。因此，电路中总的电荷量，或者说负电子数与正离子数不会改变。如果每秒有1 C的电荷流经发电机，那么每秒也就有1 C的电荷流经电动机。因此，电荷是一个守恒量。能量也是一个守恒量。电能的变化量 $\Delta E = qU$ 。因为 q 守恒，所以电荷绕电路一周后，其电势能的净改变量必然为零。由发电机产生的电势的增加量等于通过电动机的电势的减小量。

图22-1 常规电流即正电荷从正极到负极的移动 (a)。“电荷泵”将正电荷移回正极，从而维持电流 (b)。对于大多数金属来说，实际上是带负电的电子从负极流向正极。负电荷的运动可视为正电荷沿相反方向的运动。





若两根导线间的电势差为120 V，那么发电机对被传送的每库仑电荷需做120 J的功。而每库仑电荷在经过电动机时便将这120 J的功传递给了电动机。

电荷流动速率与能量的传输

以W为单位的电功率量度了电能传输的速率。假定一台发电机每秒内将1 J的动能转化为电能，那么它转化能量的速率便是1 J/s，即1 W。电流携带的能量取决于它所传输的电荷量 q 及其移动所历经的电势差 U ，即 $E = qU$ 。你在第20章中已经学过，电荷量的单位是库仑，符号为C。而电荷流动的速率，即 $\frac{q}{t}$ ，称为电流，它的单位是库每秒，即C/s。电流用符号 I 表示，所以有 $I = \frac{q}{t}$ 。1 C/s的电荷量的流动速率称为**安培 (ampere)**，用符号A表示。

电流所携带的能量与电压的关系为 $E = qU$ 。根据电流的定义式 $I = \frac{q}{t}$ ，可以得到电荷量 $q = It$ 。根据以上两个关系式，可以推导出用电器的功率 $P = \frac{E}{t} = \frac{qU}{t} = IU$ ，即为电压和电流的乘积：

$$\text{电功率 } P = IU$$

电功率等于电流乘以电压。

假定图22-2a中通过电动机的电流为3.0 A，电压为120 V，那么该电动机的功率为： $P = 3.0 \text{ C/s} \times 120 \text{ J/C} = 360 \text{ J/s} = 360 \text{ W}$ 。

■ 图22-2 水的机械能最终转化为提起吊桶所做的功(a)。电能生产和利用的效率不可能达到100%。溅起的水花、摩擦和电阻等都会产生热，消耗部分电能(b)。

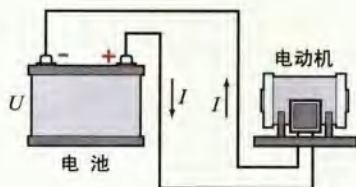
► 例题 1

电功率和能量 一节6.0 V的电池向连接在它两极上的电动机提供0.50 A的电流。

- 提供给这台电动机的功率是多少？
- 这台电动机运转5 min需要多少电能？

1 分析概括问题

- 作出电路图，指明与电动机相连的电源的正极，以及与电动机返回导线相连的电源的负极。
- 标出电流的方向。



已知：

$$U = 6.0 \text{ V}$$

$$I = 0.50 \text{ A}$$

$$t = 5 \text{ min}$$

未知：

$$P = ?$$

$$E = ?$$

2 求解未知量

- 根据 $P = IU$ 计算电功率。

$$P = IU$$

$$= 0.50 \text{ A} \times 6.0 \text{ V}$$

将 $I = 0.50 \text{ A}$ 、 $U = 6.0 \text{ V}$ 代入。

$$= 3.0 \text{ W}$$

- 在第10章中你已经知道， $P = \frac{E}{t}$ 。根据此式求解电能 E 。

$$E = Pt$$

$$= 3.0 \text{ W} \times 5 \text{ min}$$

将 $P = 3.0 \text{ W}$ 、 $t = 5 \text{ min}$ 代入。

$$= 3.0 \text{ W} \times 5 \text{ min} \times \frac{60 \text{ s}}{1 \text{ min}}$$

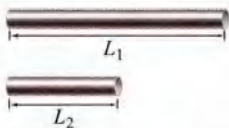
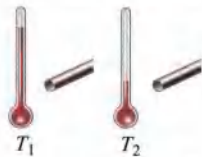
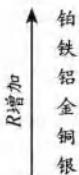
$$= 9.0 \times 10^2 \text{ J}$$

3 验证答案

- 单位是否正确？** 功率的单位是W，能量的单位是J。
- 数值是否合理？** 相对较低的电压和较小的电流只能产生数瓦的功率。

► 练一练

- 流经灯泡的电流为0.50 A，它连接在120 V的电源插座上。该灯泡将电能转化为光能的速率为多大？（假定转换效率为100%）
- 汽车电池对一个电灯的输出电流为2.0 A，在灯泡两端产生的电压为12 V。这个灯泡消耗的电功率是多少？
- 一个75 W的灯泡连接到120 V的插座上。流经它的电流是多少？
- 通过一台汽车启动电动机的电流为210 A。如果与电动机相连的电池的电压保持为12 V，那么它在10 s内向这台电动机提供了多少电能？
- 闪光灯的功率为0.90 W。如果闪光灯的电压为3.0 V，通过它的电流为多大？

表 22-1		
影响电阻的因素		
因素	电阻怎样改变	例子
长度	电阻随长度的增大而增大	 $R_{L1} > R_{L2}$
横截面	电阻随横截面积的增大而减小	 $R_{A1} > R_{A2}$
温度	电阻随温度的升高而增大	 $R_{T1} > R_{T2}$
材料	长度、横截面积以及温度保持不变时，电阻随所用的材料而改变	

电阻和欧姆定律

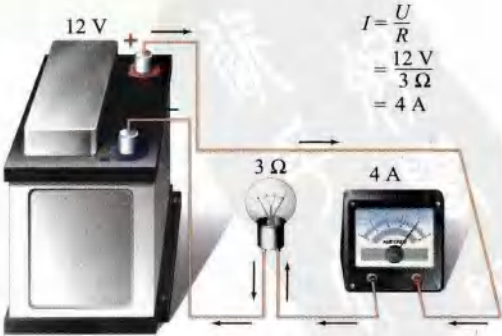
假定两个导体间存在电势差，那么，当你将它们与一根铜棒相连时，就会产生较大的电流。作为比较，如果用一根玻璃棒与它们相连，则几乎不会有电流产生。确定能产生多大电流的物质的这种性质称为**电阻（resistance）**。如表22-1所示为影响电阻的一些因素。导体的电阻可通过将其两端施加的电势差除以电流的办法进行测量。电阻*R*定义为电压*U*与电流*I*之比：

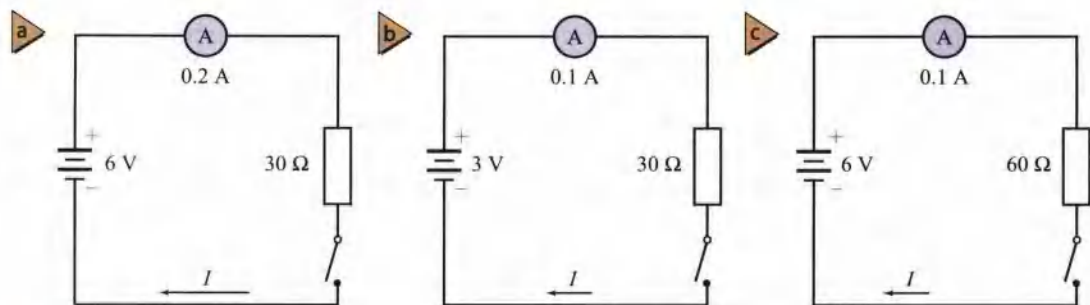
电阻 $R = \frac{U}{I}$

电阻等于电压除以电流。

电阻*R*的单位为欧姆，用符号Ω表示。当加在导体两端的电势差为1 V，容许通过的电流为1 A时，该段导体的电阻便是1 Ω。如图22-3所示的简单电路涉及电阻、电流及电压间的关系：一个12 V的汽车电池接在电阻为3 Ω的车灯上，在电路中还接有一只电流表（一种测量电流的仪表）。图中电流表测得的提供灯泡能量的电流为4 A。

图22-3 1 Ω = 1 V/A。在由3 Ω的电阻及12 V的电池所构成的电路中，其电流为4 A。





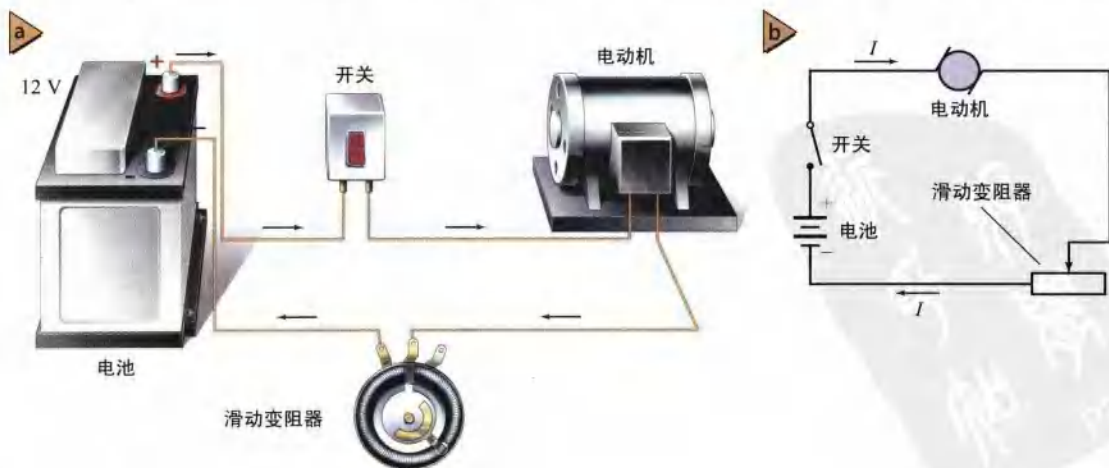
■ 图22-4 简单电路中的电流(a)可通过改变电源电压(b)或增大电路电阻(c)的方法进行调节。

电阻的单位是以德国科学家欧姆(G.Ohm)的名字命名的。欧姆发现,对于给定的导体,其两端的电压与通过的电流之比是恒定的。大多数导体的电阻不随加在其两端的电压的大小和方向的改变而改变。具有不随电压改变的恒定电阻服从欧姆定律。

大多数金属导体服从欧姆定律,至少在一定的电压范围内是如此。但是许多重要的器件并不服从欧姆定律,例如收音机和计算器中所包含的晶体三极管和二极管等元件。对于灯泡而言,由于其电阻与温度存在一定的关系,因此也不服从欧姆定律。用于连接电器的导线的电阻很小。物理实验室中常用的导线每米的电阻大约只有 $0.03\ \Omega$ 。家庭电路所使用的导线的电阻更小,每米只有 $0.004\ \Omega$ 左右。由于导线的电阻很小,在导线上几乎不存在电压。为了产生较大的电压,必须在小范围内有较大的电阻。**电阻器(resistor)**就是一种具有特定电阻的器件,它可由石墨、半导体或细导线等材料制成。

有两种方法可以控制电路中的电流。由于 $I = \frac{U}{R}$,因此,可通过改变 U 或 R ,或两者都改变的方法来改变 I 。如图22-4a所示为一个简单电路。当 $U = 6\text{ V}$ 、 $R = 30\ \Omega$ 时,电流为 0.2 A 。那么,怎样才能将电流减小到 0.1 A 呢?按照欧姆定律,电阻器两端的电压越大,通过它的电流就越大。若要使通过电阻器的电流减半,它两端的电压也要减半。如图22-4b所示,如

■ 图22-5 变阻器可用来改变电路中的电流。



果通过电阻器的电压从6 V降低到3 V，那么电流也随之减小到了0.1 A。将电流减小到0.1 A的第二种方法是，如图22-4c所示，用60 Ω的电阻器替代那只30 Ω的电阻器。

电阻器常被用来控制电路或部分电路中的电流。有时你会需要平稳且连续变化的电流。例如在控制某些电动摩托车的速率时，你需要使转速连续变化，而不是一级一级地变化。为了实现这种控制，就需要应用一种称为滑动变阻器的可变电阻。如图22-5所示即是一种包含滑动变阻器的电路。常见的可变电阻器由一个用电阻丝绕成的线圈和一个滑动触点构成。移动触点在线圈上的位置，就会改变接入电路的电阻丝的长度。随着接入电路的电阻丝长度的增大，电路中的电阻也增大，电流则按 $I = \frac{U}{R}$ 的规律变化。按照这种方式，就可以调节摩托车的速率了：当接入电路的电阻丝比较短时，摩托车行驶得快；当接入电路的电阻丝比较长时，摩托车的速度就会很小。此外，电视机的面板显示的音量、亮度、对比度、音调以及色彩等的控制利用的都是可变电阻器。

人体的电阻 人体实际上也是一个可变电阻器。当皮肤干燥时，人体的电阻很大，此时由低电压或中等电压所产生的电流很小。但是如果皮肤变得潮湿，它的电阻便很小，此时电流很容易增大到危险的水平。小于1 mA的电流会使你感到中度的电击，15 mA的电流会使你的肌肉失去控制，而100 mA的电流则可能造成死亡。

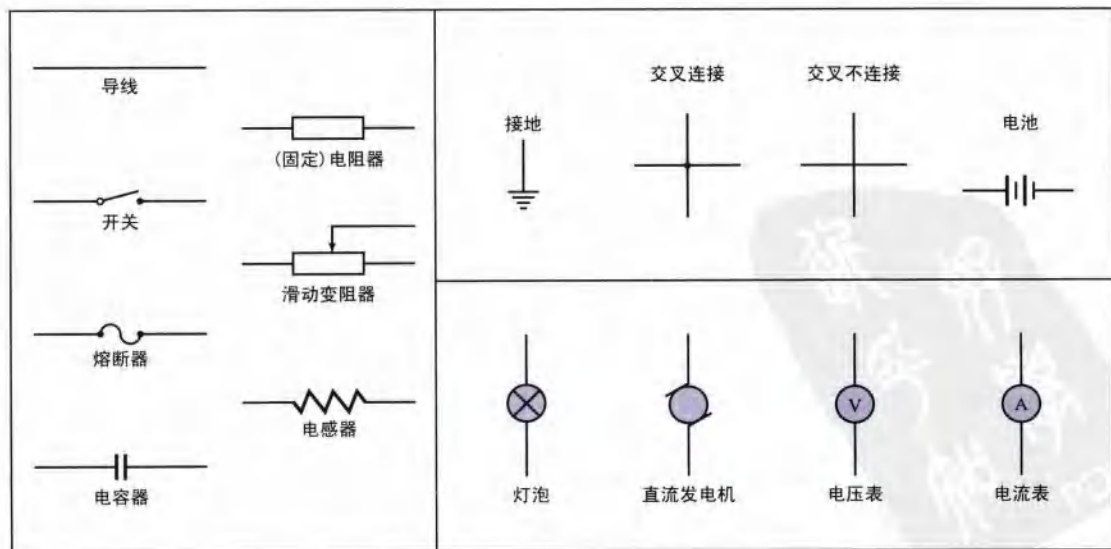
► **电阻** 一个正在工作的100 W的灯泡的电阻大约为140 Ω。切断电流后，它在室温下的电阻大约只有10 Ω。这是因为灯泡的工作温度与室温相差很大的缘故。

与生物学的联系

电路图

简单的电路可用文字描述，也可用照片或实物图表示。不过，最常见的是用电路元件的标准符号画成的电路图，如图22-6所示。

■ 图22-6 电路图中通常使用的符号。



► 例题 2

通过电阻器的电流 一个 $10.0\ \Omega$ 的电阻器与一个 $30.0\ \text{V}$ 的电池相连，电路中的电流为多大？

1 分析概括问题

- 画出包括电池、电流表和电阻器的电路图。
- 标明电流的方向。

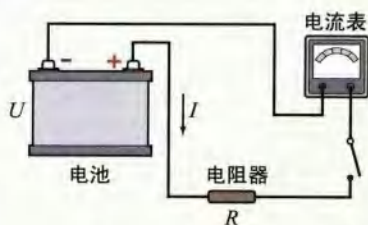
已知：

$$U = 30.0\ \text{V}$$

$$R = 10.0\ \Omega$$

未知：

$$I = ?$$



2 求解未知量

根据 $I = \frac{U}{R}$ 求解电流。

$$\begin{aligned} I &= \frac{U}{R} \\ &= \frac{30.0\ \text{V}}{10.0\ \Omega} \quad \text{将 } U = 30.0\ \text{V}, R = 10.0\ \Omega \text{ 代入。} \\ &= 3.00\ \text{A} \end{aligned}$$

3 验证答案

- 单位是否正确？** 电流的单位是A。
- 数值是否合理？** 电压相当大，而电阻较小，所以电流可达 $3.00\ \text{A}$ 。

► 练一练

对下列所有问题，无论电流多大，都认为电源电压及电灯的电阻均保持不变。

- 汽车前灯的电阻为 $33\ \Omega$ ，与一个 $12\ \text{V}$ 的电池连接。该电路中的电流为多大？
- 一台电动机工作时的电阻为 $32\ \Omega$ ，流经它的电流为 $3.8\ \text{A}$ 。电动机所用电源的电压为多大？
- 一个传感器与 $3.0\ \text{V}$ 的电池接通工作时，通过的电流为 $2.0 \times 10^{-4}\ \text{A}$ 。该传感器的电阻为多大？
- 有一盏电灯，当它与 $120\ \text{V}$ 的电源接通时，流过它的电流是 $0.50\ \text{A}$ 。
 - 这盏灯的电阻为多大？
 - 这盏灯消耗的功率为多大？
- 一盏 $75\ \text{W}$ 的电灯接到 $125\ \text{V}$ 的电源上。
 - 通过这盏电灯的电流为多大？
 - 这盏灯的电阻为多大？
- 将一个电阻器串联在上题的电灯电路中，使电流减小到原来的一半。
 - 此时电灯两端的电压是多少？
 - 加入电路中的那个电阻器的阻值为多大？
 - 此时电灯消耗的功率为多大？

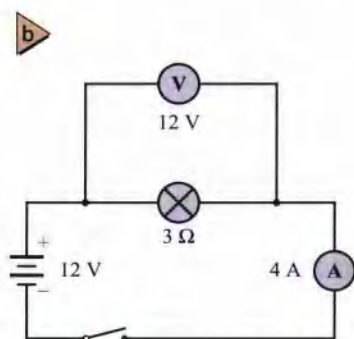


图22-7 一个简单电路的实物图(a)和电路图(b)。

同一电路的实物图和电路图分别如图22-7a和图22-7b所示。注意，在这两种电路图中，电荷都是从电池的正极流出的。你可以通过如下解题步骤作出电路图，注意始终要采用约定的电流方向。

你已经知道，电流表是用来测量电流的，而电压表是用来测量电压的。它们都有两个接线柱，通常标以“+”和“-”。电压表测量的是某段电路两端的电压，所以将它接入电路时，要将它的“+”接线柱接到被测电路的靠近电源正极的一端，而将“-”接线柱接到电路的另一端。

► 解题策略

作出电路图

作电路图时可参照以下步骤。

1. 将代表电池或其他电源(如发电机等)的符号画在纸的左边，正极位于上方。在电源的一侧画上开关。
2. 从电源的正极开始画导线，当到达电阻器或其他器件的位置时，标出它们的符号。
3. 在两条电路的交汇处，如果要将电压表接入，那么在图中画出连接符号。然后循着一条电流路径继续画下去，直至两条电流路径再次相连为止，那时再画出另一条路径。
4. 循着电流路径直至电源的负极。
5. 检查你所画的电路图，确定没有遗漏，且电流的路径是闭合的。

● 迷你实验

电流

你是否考虑过电流通过电路中的不同元件时的衰减问题？你也可以像科学家那样来探究这个问题。

1. 作出一幅包含电源及两个小灯泡的电路图。
2. 再作出一幅电路图，其中包含一只电流表，用于测量电源与小灯泡间的电流。
3. 作出第三幅电路图，将电流表画在两个灯泡之间，以测量流经该处的电流。

分析与结论

4. 预测两个灯泡之间的电流是大于、小于还是等于流经两个灯泡之前的电流，并给出解释。
5. 连接电路，检验你的预测。注意：导线两端较尖锐，小心划伤皮肤。

练一练

12. 作出一幅串联电路图，其中包括一个 60.0 V 的电源、一只电流表以及一个 $12.5\ \Omega$ 的电阻器。指出电流表的示数和电流的方向。
13. 作出一幅串联电路图，其中包括一节 4.5 V 的电池、一个电阻器，以及一只 85 mA 的电流表。确定并标出电阻器的阻值，选择电流的方向，指出电池的正极。
14. 第12题和第13题中，在电阻器的两端再接上电压表，然后回答相应的问题。
15. 作出一幅电路图，其中包括电源、电灯、一个调节灯泡亮度的滑动变阻器，以及一个开关。
16. 重复上一个问题，附加接上一只电流表，以及一只跨接在灯泡两端的电压表。

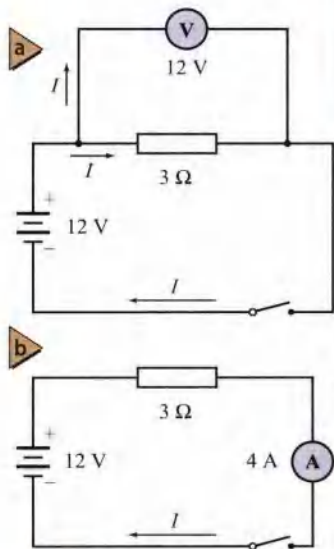


图22-8 并联电路(a)和串联电路(b)。

电压表与所测量的电路是彼此并行连接的，这种连接方式称为**并联 (parallel connection)**，如图22-8a所示。凡是电流可通过两条或多条路径流动的连接方式，都称为并联。通过电压表的电压与它跨接的那段电路两端的电压相等。电压这个词总是与并联接法联系在一起。

电流表测量的是通过电路元件的电流，因此这部分电流必须与通过电流表的电流相同，故它们只能是在一条电流路径上。只有一条电流路径的连接方式称为**串联 (series connection)**，如图22-8b所示。为了将电流表接入电路，要将该段电路的连线断开，并在此处接入电流表。在串联电路中，只存在一条通路。电流这个词总是与串联接法联系在一起的。

本节复习题

17. **作电路图** 作出包括一个电源与一个灯泡的电路图，并确定此电路图中的灯泡会发光。
18. **电阻** 乔依说，因为 $R = \frac{U}{I}$ ，所以当电压增大时，电阻也会增大。他的说法正确吗？说明理由。
19. **电阻** 为了测量一段长导线的电阻，请画出电路图，其中包括一节电池、一只电压表、一只电流表，以及这根待测导线。详细说明你需要测量哪些物理量，以及如何计算电阻。
20. **功率** 某一电路由一个 $12\ \Omega$ 的电阻和一个 12 V 的电源连接构成。若该电阻减小到 $9.0\ \Omega$ ，试求其消耗功率的变化。
21. **能量** 某一电路工作时，在 3.0 min 内转化了 $2.2 \times 10^3\text{ J}$ 的能量。那么，在 1 h 内它将转化多少能量？
22. **理性思维** 人们常说，电功率被消耗在电阻器上。这里的“消耗”包括使用、损耗、浪费等含义。那么，当电荷通过电阻器时，又是怎样“被使用”了呢？

22.2 电能的应用

许多你所熟悉的家用电器，都要将电能转化为某种其他形式的能量，如光能、动能、声能或热能等。当你打开电器设备的开关时，你就接通了电路并开始了电能的转化。在本节中，你将学习如何确定这种电能转化的速率以及转化的量值。

电路中的能量转化

供给电路的能量可按多种不同的方式使用。例如，电动机将电能转化成机械能，而电灯将电能转化成光能。但是，并非提供供给电动机和电灯的所有能量最终都转化成了有用的能量形式。电灯（尤其是白炽灯）会发热，电动机也经常热得烫手。在这些情况下，部分电能转化成了热能。下面介绍的这些器件的共通之处，就是都可将电能尽可能多地转化为热能。

加热电阻器 电流通过电阻器时，会使电阻器变热。这是因为运动的电子与电阻器中的原子发生了碰撞，这种碰撞增大了原子的动能，于是电阻器的温度升高。取暖器、电熨斗以及电吹风中的加热元件等都是将电能转化为热能的器件。这些器件以及如图22-9所示的家用电器在电路中的作用都可等效为电阻器。当电荷 q 通过电阻器时，将产生电压 U 。如你所知，此时电荷能量的变化可用 qU 表示。在实际应用中，能量的转化速率，即功率 $P = \frac{E}{t}$ ，是一个重要的物理量。先前你已学过，电流是电荷的移动速率，即 $I = \frac{q}{t}$ 。所以，电阻器消耗的功率可表示为 $P = IU$ 。对电阻器而言， $U = IR$ ，因此，如果已知 I 和 R ，就可将此式代入电功率的表达式，从而得到下式：

$$\text{电功率 } P = I^2 R$$

电功率等于电流的平方乘以电阻。

电阻器消耗的功率与通过电阻器的电流的平方以及电阻器的电阻均成正比。如果已知 U 和 R ，但不知道 I ，那么可将 $I = \frac{U}{R}$ 代入 $P = IU$ ，从而得到下式：

$$\text{电功率 } P = \frac{U^2}{R}$$

电功率等于电压的平方除以电阻。

► 学习目标

- 解释电能是怎样转化为热能的。
- 探讨将电能输送往各地用户处的办法。
- 定义千瓦时。

► 关键术语

超导体
千瓦时

■ 图22-9 这些电器都可将电能转化为热能。



功率描述的是能量从一种形式转化为另一种形式的速率。能量从电能转化为热能，电阻器的温度就会升高。例如，若这种电阻器是浸没式加热棒或正在烧水的电水壶中的电阻丝，那么热能便会很快进入冷水中，使水在短时间内达到沸点。

如果功率保持不变，那么经时间 t 后电器转化的热能为 $E = Pt$ 。因为 $P = I^2 R$ 和 $P = \frac{U^2}{R}$ ，所以转化为热量的总的电能可用下式表示：

$$E = Pt$$

电能 $E = I^2 R t$

$$E = \left(\frac{U^2}{R} \right) t$$

电能等于电功率乘以时间。它也等于电流的平方乘以电阻和时间，或电压的平方除以电阻再乘以时间。

► 例题 3

电流产生的热 一台电热器的电阻为 $10.0 \, \Omega$ ，它的工作电压为 $120.0 \, \text{V}$ 。

- 这台电热器消耗的电功率是多少？
- 在 $10.0 \, \text{s}$ 内，这台电热器提供了多少热能？

1 分析概括问题

- 作出电路图。
- 标出已知的电路元件，它们是一个电压为 $120.0 \, \text{V}$ 的电源及一个 $10.0 \, \Omega$ 的电阻。

已知：

$$R = 10.0 \, \Omega$$

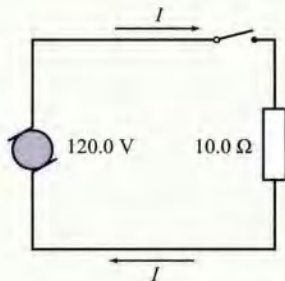
$$U = 120.0 \, \text{V}$$

$$t = 10.0 \, \text{s}$$

未知：

$$P = ?$$

$$E = ?$$



2 求解未知量

- 因为 R 和 U 已知，所以可用 $P = \frac{U^2}{R}$ 计算 P 。

$$P = \frac{(120.0 \, \text{V})^2}{10.0 \, \Omega} \quad \text{将 } U = 120.0 \, \text{V}, R = 10.0 \, \Omega \text{ 代入。}$$

$$= 1.44 \, \text{kW}$$
- 求解能量。

$$E = Pt$$

$$= 1.44 \, \text{kW} \times 10.0 \, \text{s} \quad \text{将 } P = 1.44 \, \text{kW}, t = 10.0 \, \text{s} \text{ 代入。}$$

$$= 14.4 \, \text{kJ}$$

3 验证答案

- 单位是否正确？** 功率的单位是 W ，能量的单位是 J 。
- 数值是否合理？** 对于电功率，因 $10^2 \times 10^2 \times 10^{-1} = 10^3$ ，故 kW 的数量级是合理的。对于能量，因 $10^3 \times 10^1 = 10^4$ ，故 $10^4 \, \text{J}$ 的数量级也是合理的。

▶ 练一练

23. 一台 $15\ \Omega$ 的电热器在 $120\ \text{V}$ 的电压下工作。
 - a. 通过这台电热器的电流为多大?
 - b. 在 $30.0\ \text{s}$ 内, 这台电热器消耗了多少电能?
 - c. 这段时间内这台电热器放出了多少热能?
24. 一个 $30\ \Omega$ 的电阻器接在一个 $45\ \text{V}$ 的电源上。
 - a. 该电路中的电流为多大?
 - b. 电阻器在 $5.0\ \text{min}$ 内消耗了多少电能?
25. 一个 $100.0\ \text{W}$ 灯泡的发光效率为 22% , 这意味着电能中有 22% 将转化为光能。
 - a. 灯泡工作时, 每分钟有多少能量转化为光能?
 - b. 灯泡每分钟将产生多少热能?
26. 电炉的加热元件在工作时的电阻为 $11\ \Omega$ 。
 - a. 如果它所接的电源是 $220\ \text{V}$, 那么通过电炉加热元件的电流为多大?
 - b. 在 $30.0\ \text{s}$ 内, 该元件将多少电能转化为热能?
 - c. 如果这电炉用来加热一只盛有 $1.2\ \text{kg}$ 水的水壶, 并假定有 65% 的热量被水吸收。那么, 在 $30.0\ \text{s}$ 时间内, 这壶水的温度将升高多少?
27. 一只 $120\ \text{V}$ 的电水壶在 $2.2\ \text{h}$ 内将一定量体积的水加热至某一温度。那么, 以同样电流工作的一只 $240\ \text{V}$ 的电水壶完成同样的任务将需要多少时间?

超导体 超导体 (superconductor) 是一种电阻为零的材料。电流在超导体中不会受到阻力, 所以超导体中不存在电压。因为导体损耗的功率取决于 IU , 所以超导体可传输电能而没有损耗。目前, 绝大多数超导体必须保持在低于 $100\ \text{K}$ 的低温下。超导体已广泛应用于核磁共振体及同步加速器中。这些仪器需要很大的电流, 并可以保持接近 $0\ \text{K}$ 的温度。

电能的传输

水电设施, 例如如图22-10所示的位于伊塔普水坝上的水电站, 能够生产大量的电能。然而, 这种从水力转化来的电能需要经过长距离的输送才能到达家庭和工厂。那么, 怎样才能使热能损失尽可能少的情况下做到这一点呢?

热能产生的快慢由 $P = I^2 R$ 确定。电气工程师称这种无用的热能为“焦耳热损耗”或“ $I^2 R$ 损耗”。为了减少这种损耗, 就必须减小电流 I 或电阻 R 。

所有导线即使电阻再小, 但总还是有一定的电阻。例如将电流输入家庭的那种粗导线, 每 $1\ \text{km}$ 长的电阻约为 $0.20\ \Omega$ 。假定家庭的导线直接接到了

■ 图22-10 在2000年, 伊塔普水电站生产的电能满足了巴西24%的电能需求及乌拉圭95%的电能需求。



3.5 km外的发电厂，那么将电流输入家庭再返回电厂的电路中的导线的电阻为： $R = 2 \times 3.5 \text{ km} \times 0.20 \Omega/\text{km} = 1.4 \Omega$ 。如果一只电炉在导线中引起41 A的电流，那么这样的电流在线路中产生的损耗功率为： $P = I^2 R = (41 \text{ A})^2 \times 1.4 \Omega = 2\,400 \text{ W}$ 。

所有这些由电能转化成的热能都被浪费了。你可能会想到，为什么不通过减小导线电阻的办法来降低这种损耗呢？如果这样的话，就需采用高导电性、大直径（因此电阻小）的电缆。但这种电缆既昂贵又笨重，并不实用。但另一方面，这种损耗与导线中电流的平方也成正比，所以也许减小输电线路中的电流才是最好的节能方法。

怎样才能使输电线路中的电流减小呢？在远距离输电线路中每秒输送的电能（即功率）由关系式 $P = IU$ 确定。所以，在不减小功率的前提下，可通过提高电压的办法使电流减小。一些远距离输电线路所采用的电压常高于500 000 V。减小电流的结果使 I^2 因子变小，从而降低了电路中 $I^2 R$ 的损耗。从发电厂输出的电压在到达地区变电站时降至2 400 V，然后在进入家庭前再次降至240 V或120 V。

千瓦时

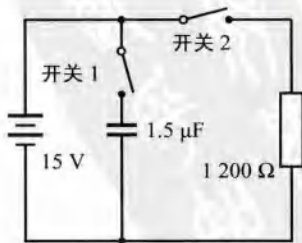
电力公司有时被称为“动力”公司，但它实际上提供的是电能而非功率。功率是指能量的传递速率。当消费者在支付他们的家庭帐单时，他们所购买的是电能而非功率。

任何设备所使用的电能等于用J/s（即W）作单位的能量消耗速率乘以该设备工作的时间秒数，即J/s·s，也就是焦（J）。焦耳也可定义为瓦·秒（W·s），这是一种相对较小的能量单位，不适合作为商业上的单位使用。基于这个理由，电力公司在量度出售的电能时采用了一种较大的单位：**千瓦时（kilowatt-hour）**。1千瓦时等于3 600 s（1 h）内持续传递1 000 W功率的能量，即 $3.6 \times 10^6 \text{ J}$ 。很多家用电器，除了电热水器、电

挑战性问题的挑战

利用右图回答下列问题。

1. 电容器开始时不带电。开关1闭合，开关2保持断开。此时电容器上的电压怎样？
2. 断开开关1，开关2保持断开。此时电容器上的电压又是怎样？为什么？
3. 现在，闭合开关2，开关1保持断开。在开关2刚闭合时，电容器上的电压以及通过电阻器上的电流将会如何？
4. 随着时间的推移，电容器上的电压以及通过电阻器上的电流将如何变化？



炉、电熨斗、微波炉、电取暖器及电吹风等外，很少有超过1 000 W功率的。10个100 W的灯泡同时开启1 h才用电1 kW·h。

练一练

28. 一台电暖器接在120 V电源上时，通过的电流为15.0 A。假定它平均每天使用5.0 h。
- 电暖器的功率为多大？
 - 使用30天，它消耗了多少千瓦时的电能？
 - 如果每千瓦时的电价为12美分，30天要交多少电费？
29. 一台数字钟的电阻为12 000 Ω ，现将它接在115 V的电源插座上。
- 流经它的电流为多大？
 - 它消耗的功率为多大？
 - 如果钟的主人每使用1 kW·h的电要支付12美分，那么这台钟使用30天需支付多少电费？
30. 一个12 V的汽车电池在1 h内可持续提供55 A的电流。由于效率并非100%，所以充电能量需是放电能量的1.3倍。那么，如果用7.5 A的电流对这个电池充电，需多长时间？假定充电电压与放电电压相同。
31. 重新解答上面的第30题。假定那个电池的充电电压为14 V。

在本节中，你学习了电力公司解决远距离输电问题的几种方法。你还学习了电力公司是怎样计算电费的，以及你应该如何预测家中各种电器所消耗的电费。将电能输送到千家万户，是20世纪工程学上最伟大的成就之一。

本节复习题

32. **能量** 汽车发动机驱动发电机向汽车电池充电，使它产生并储存电能。汽车电池又将所储存的电能用于车灯照明。写出这三种过程中能量转化的情况。
33. **电阻** 一只电吹风在120 V的电压下工作，它有热、温两挡。哪挡的电阻较小？为什么？
34. **功率** 当电路的电压减小一半时，它所消耗的功率改变了多少？
35. **效率** 评估动力传输线改进的研究对社会和环境产生的影响。
36. **电压** 为什么家用电炉和电热水器最好连接到240 V而不是120 V的电源上？
37. **理性思维** 当电力需求达到高峰时，电力公司有时会采取降低电压的办法，使得灯光变得较为昏暗。这样做节省了什么？

物理实验

电压、电流和电阻

在本章中，你学习了电压、电流及电阻三者之间的关系。电压就是促使电流通过电路的电势差，而电阻决定了当电压存在时究竟会产生多大的电流。在本实验中，你将要收集数据，并利用图象来研究电压与电流，以及电阻与电流之间的函数关系。

问题

电压与电流以及电阻与电流之间存在怎样的关系？

目标

- 测量电流，并用SI制单位表示。
- 描述电路的电阻与通过电路的总电流之间的关系。
- 描述电压与通过电路的总电流之间的关系。
- 绘制和运用图象，显示电压与电流之间，以及电阻与电流之间的关系。

安全警示



- 电阻器和电路可能会发烫。
- 导线两端较尖锐，小心划伤皮肤。

实验器材

- | | |
|----------------------|----------------------|
| 四节1.5 V的电池 | 一个20 k Ω 的电阻器 |
| 四个电池盒 | 一个30 k Ω 的电阻器 |
| 一个10 k Ω 的电阻器 | 一个40 k Ω 的电阻器 |
| 一只500 μ A的电流表 | |
| 五根带有鳄鱼夹的导线 | |

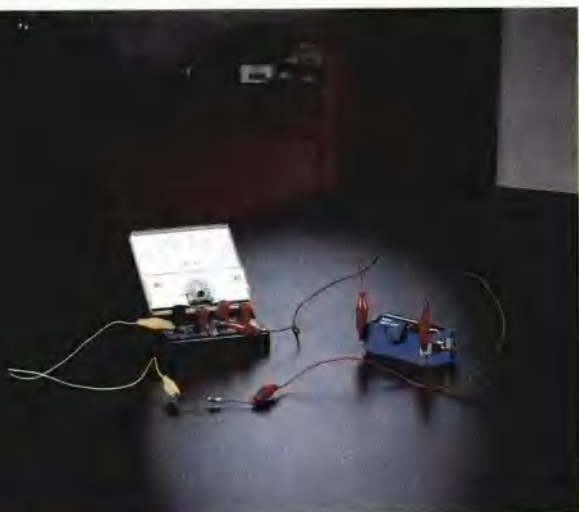
实验步骤

实验 A

1. 将电池放入电池盒内。
2. 连接一条电路，其中包括电池、10 k Ω 的电阻器以及500 μ A的电流表。
3. 将电阻和电流的值记录在数据表1中。电阻即电阻器的阻值，电流可从电流表上读出。
4. 用20 k Ω 的电阻器代替10 k Ω 电阻器。
5. 将此时电阻和电流的值记录在数据表1中。
6. 用30 k Ω 的电阻器代替20 k Ω 的电阻器，重复步骤4~5。
7. 用40 k Ω 的电阻器代替30 k Ω 的电阻器，重复步骤4~5。

实验 B

8. 重新连接步骤2中的电路，核对电路中的电流，并将此时电压和电流的值记录在数据表2中。
9. 增加一节1.5 V的电池，构成电池组。将此时电压和电流的值记录在数据表2中。当你用两节或更多节电池时，要将这些电池的电压之和记录在数据表2中。
10. 用三节1.5 V的电池，重复步骤9。
11. 用四节1.5 V的电池，重复步骤9。



数据表 1		
电压 (V)	电阻 (k Ω)	电流 (μ A)
1.5		
1.5		
1.5		
1.5		

数据表 2		
电压 (V)	电阻 (k Ω)	电流 (μ A)
	10	
	10	
	10	
	10	

分析

1. **绘制和运用图象** 作出电流和电阻的关系图象, 其中电阻为 x 轴, 电流为 y 轴。
2. **绘制和运用图象** 作出电流和电压的关系图象, 其中电压为 x 轴, 电流为 y 轴。
3. **误差分析** 在实验A中, 除了电阻外, 还有哪些因素会影响电流的值? 怎样才能降低这些因素的影响?
4. **误差分析** 在实验B中, 除了多加电池外, 还有哪些因素会影响电流的值? 怎样才能降低这些因素的影响?

结论与应用

1. 考察你所作出的第一幅图, 描述电阻与电流之间的关系。
2. 为什么你认为电阻与电流之间存在这种关系?
3. 考察你所作出的第二幅图, 描述电压与电流之间的关系。
4. 为什么你认为电压与电流之间存在这种关系?

进一步探索

1. 在电压为3.0 V、电阻为20 k Ω 的电路中, 电流是多少? 你是如何确定的?
2. 你能否从你的实验数据中导出一个公式, 以解释电压、电流及电阻之间的关系? 提示: 假定电流随电压变化的图线是一条过原点的直线。
3. 你的数据是否符合这个公式? 请作出解释。

生活中的物理学

1. 调查有哪些日常电器设备使用的是240 V, 而不是120 V的电源。
2. 为什么你列举的那些电器设备需用240 V的电源? 如果将这些电器设备接在120 V的电源上, 会产生怎样的结果?

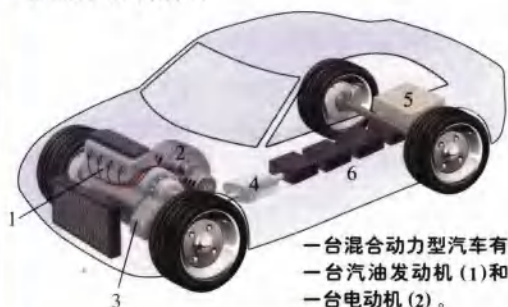
物理 在线

若想了解更多关于电流的知识, 请登录网站:
physicspp.com。

混合动力型汽车省油、舒适、安全、噪声小、清洁，且加速快，因此这种车的销售量正在持续增长。

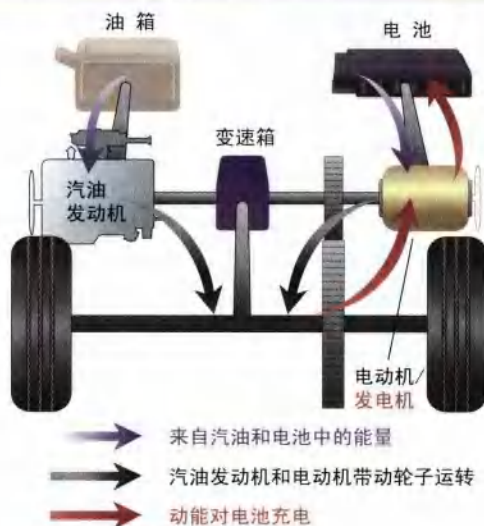
“混合动力型汽车”名称的由来 利用两种或两种以上能源的汽车称为混合动力型汽车，例如柴油—电力型汽车。不过混合动力型汽车通常指的是利用汽油和电力的汽车。

普通汽车的发动机一般都较大，以便使汽车加速快，能爬坡。但是发动机越大，其费用越高。在混合动力型汽车中，一般有一台质量较小且较为经济的汽油发动机，它足以满足大多数情况下行驶的需要。当需要更多的动力时，这些动力可由能重复充电的蓄电池的电力提供。



混合动力型汽车的工作原理 上图所示为混合动力型汽车的一种类型，称为“并联混合动力型汽车”。在大多数情况下，它由小型内燃机(1)提供动力行驶。汽油发动机和电动机(2)通过同一个变速器(3)与车轮相连。电子计算器(4)用于确定何时使用汽油发动机，何时使用电动机，何时两者同时使用。

这类混合动力型汽车除了油箱(5)里的汽油之外，不需要其他外界能源。与电动汽车不同，你不需要将混合动力型汽车中的蓄电池(6)接到电源插座上去充电。它的电池是通过如右上图所示的所谓制动再生的途径充电的。一般的汽车通过与轮子的摩擦实现



在制动再生中，汽车通过做功的方式对电池充电。

制动，此时汽车的动能转化为热能。但是，在混合动力型汽车中，电动机可作为发电机使用。当电动机的飞轮与轮子摩擦，汽车在减速的同时，把动能转化成了电能，实现了对电池的充电。

混合动力型汽车的社会效益 混合动力型汽车节约了汽油，减少了尾气排放。节约汽油就节省了汽车的行驶费用；而汽车排放的尾气中包括二氧化碳和一氧化碳，以及各种碳氢化合物和氮的氧化物等，这些尾气的排放会导致烟尘等大气污染问题。混合动力型汽车既节约汽油，又减少尾气的排放，因此许多人认为，使用这样的汽车是保护大气、节约能源的一种可行的办法。

进一步探索

1. **分析与结论** 什么是制动再生？
2. **预测** 增加混合动力型汽车的销量对社会有益吗？说说你的理由。

22.1 电流和电路

关键术语

- 电 流
- 常规电流
- 电池组
- 电 路
- 安 培
- 电 阻
- 电阻器
- 并 联
- 串 联

重要概念

- 常规电流的方向即为正电荷定向移动的方向。
- 发电机将机械能转化成电能。
- 电路将电能转化成热能、光能或其他有用的能。
- 电荷在电路在做定向运动时，电阻引起电压降。
- 1 A等于1 C/s。
- 电功率可表示为电压与电流的乘积：

$$P = IU$$

- 一个器件上的电阻等于加在该器件上的电压与所通过的电流之比：

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

- 欧姆定律可表述为，对于一个给定的导体来说，电压与电流之比为常量。任何电阻器，如果它的电阻不随温度、电压以及电荷流动的方向而改变，它便服从欧姆定律。
- 可通过改变电压或电阻来控制电路中的电流。

22.2 电能的应用

关键术语

- 超导体
- 千瓦时

重要概念

- 电路中的电功率等于电流的平方乘以电阻，或电压的平方除以电阻：

$$P = I^2 R \text{ 或 } P = \frac{U^2}{R}$$

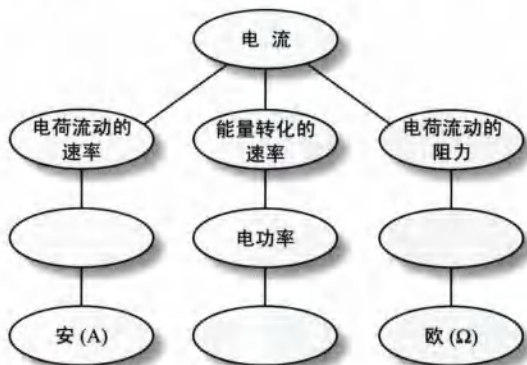
- 如果功率以恒定的速率消耗，那么被转化的电能就等于电功率与时间的乘积。电功率也可用以下两个等式中的 $I^2 R$ 和 $\frac{U^2}{R}$ 表示：

$$\begin{aligned} E &= Pt \\ &= I^2 R t \\ &= \left(\frac{U^2}{R} \right) t \end{aligned}$$

- 超导体是一种零电阻材料。目前超导体的应用并不多。
- 在电能的传输过程中所不希望产生的热称为焦耳热损耗，或 $I^2 R$ 损耗。降低焦耳热损耗的最好方法就是减小输电线路中的电流。高压输电可减小电流而不降低功率。
- 千瓦时 (kW·h) 是一种能量单位，它等于 $3.6 \times 10^6 \text{ J}$ 。

绘制概念图

38. 用下列术语完成概念图：瓦、电流、电阻。



理解概念

39. 用基本单位m、kg、s定义电流的单位。(22.1)

40. 如图22-11所示，你应该如何连接一只电压表，才能测得电动机的电压？(22.1)

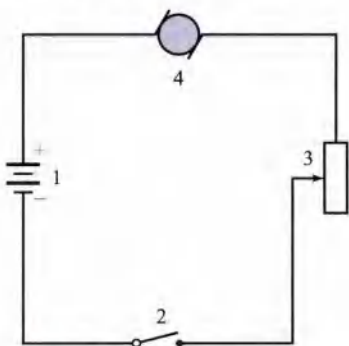


图22-11

41. 如图22-11所示，你应该如何连接一只电流表，才能测得通过电动机的电流？(22.1)

42. 如图22-11所示，哪个方向是通过电动机的常规电流的方向？(22.1)

43. 如图22-11所示，回答下列问题。(22.1)

- 哪个器件将电能转化为机械能？
- 哪个器件将化学能转化为电能？
- 哪个器件能使电路接通或切断？
- 哪个器件能调节电动机的转速？

44. 试描述下列器件中发生的能量转化过程。(22.1)

- 白炽灯
- 干衣机
- 数字钟控收音机

45. 有两根一样长的导线，一根的横截面的直径较大，另一根的横截面的直径较小。哪一根导线的电阻更小一些？(22.1)

46. 有一简单电路，由一个电阻器、一节电池以及若干连接导线组成。(22.1)

- 作出此电路的电路图。
- 为了正确测量电流，在电路中应怎样连接一只电流表？
- 为了测量电阻器两端的电压，应怎样将电压表与它连接？

47. 为什么灯丝是在接通时，而不是在工作过程中更容易被烧断？(22.2)

48. 如果将电池的两极用一根粗铜丝连接，就会造成短路，铜丝的温度将会升高。这是为什么？(22.2)

49. 为了经济地实现远距离输电，哪些电学量需保持较小的值？(22.2)

50. 用基本单位m、kg、s定义电功率的单位。(22.2)

应用概念

51. **电池** 在电池与外电路接通的瞬间，电路中立即会有电荷的流动。试说明这一现象。

52. 说明为什么奶牛在接触到电篱笆时会感受到适度的电击。

53. **电线** 为什么小鸟栖息在高压线上不会受到伤害？

54. 说出两种可增大电路中电流的方法。

55. **灯泡** 两个功率分别为50 W和100 W的灯泡均在120 V的电压下工作。哪个灯泡的电阻更大？请说明理由。

56. 如果电路中的电压保持不变而电阻增加1倍，这对该电路中的电流有什么影响？

57. 如果电路中的电压和电阻都增加1倍，这对电路中的电流有什么影响？说明理由。

58. **欧姆定律** 苏珊找到一个看来像电阻器的器件。当将它与一节1.5 V的电池接通时,她测得通过它的电流仅为 4.5×10^{-7} A;而当她改用3.0 V的电池时,测得电流为 2.5×10^{-7} A。该器件是否服从欧姆定律?
59. 如果将如图22-4a所示的那只电流表移到图的下方位置,其示数还会相同吗?说明理由。
60. 两根导线均跨接在一节6.0 V电池的两极上,一根电阻大,另一根电阻小。哪根导线产生热量的速率更快?为什么?

问题解决

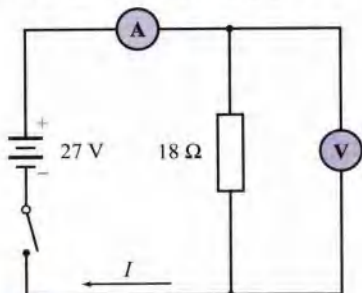
22.1 电流和电路

61. 一台电动机连接在一节12 V的电池上,如图22-12所示。
- 传递给电动机的功率为多大?
 - 如果电动机工作15 min,有多少电能被转化?



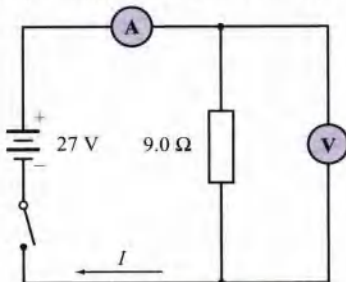
62. 如图22-13所示,回答如下问题。

- 电流表的示数是多少?
- 电压表的示数是多少?
- 提供给电阻器的电功率是多少?
- 每小时提供给电阻器的电能是多少?



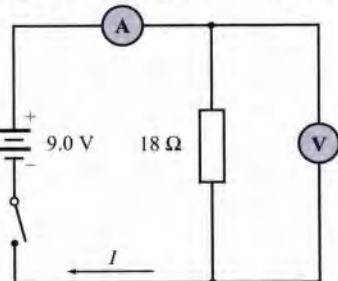
63. 如图22-14所示,回答如下问题。

- 电流表的示数是多少?
- 电压表的示数是多少?
- 提供给电阻器的电功率是多少?
- 每小时提供给电阻器的电能是多少?



64. 如图22-15所示,回答如下问题。

- 电流表的示数是多少?
- 电压表的示数是多少?
- 提供给电阻器的功率是多少?
- 每小时提供给电阻器的电能是多少?



65. **电烤箱** 通过电烤箱的电流为8.0 A,它连接在120 V的电源上。这台电烤箱所消耗的电功率是多少?

66. **灯泡** 当一个灯泡接在120 V的电源上时,测得通过它的电流为1.2 A。它所消耗的电功率是多少?

67. 一盏电灯接在120 V的电源上,通过它的电流为0.50 A。

- 它消耗的功率是多少?
- 在5 min内有多少能量被转化?

68. 一只12 V的汽车电池接到一台启动电动机上,通过启动电动机的电流为210 A。

- 电池每秒内提供给电动机多少能量?
- 这台电动机的功率是多少?

第22章 测评

69. **干衣机** 将一台4 200 W的干衣机接到220 V的电源上。通过这台干衣机的电流为多大？
70. **闪光** 一盏闪光灯接在3.0 V的电源上，通过它的电流是1.5 A。
- a. 闪光灯的额定功率是多少？
 - b. 在11 min内，闪光灯将转化多少电能？
71. **电池** 有一个60.0 Ω 的电阻器，当它接到一节电池上后，流过它的电流为0.40 A。该电池的电压是多少？
72. 一个4.0 Ω 的电阻器，当通过它的电流为1.5 A时，它两端的电压为多大？
73. 一台工作电阻为15 Ω 的电动机，当通过它的电流为8.0 A时，它两端的电压为多大？
74. 一个15 Ω 的电阻器两端的电压为75 V，通过它的电流是多少？
75. 几位学生将一段镍铬导线接到一个可变电源上，以便产生从0.00~10.00 V的电压。然后他们测量了在某些电压下通过这根导线的电流，并将所选电压以及测得的相应的电流数据记录在了表22-2中。
- a. 对应于每一组数据，计算相应的电阻。
 - b. 作出 I 随 U 变化的图线。
 - c. 镍铬导线是否遵循欧姆定律？如果不是在所有电压值的情况下都服从欧姆定律，试确定遵循欧姆定律的电压范围。

表 22-2		
电压 U (V)	电流 I (A)	电阻 $R = \frac{U}{I}$ (Ω)
2.00	0.014 0	
4.00	0.027 0	
6.00	0.040 0	
8.00	0.052 0	
10.00	0.063 0	
-2.00	-0.014 0	
-4.00	-0.028 0	
-6.00	-0.039 0	
-8.00	-0.051 0	
-10.00	-0.062 0	

76. 画出一幅串联电路图，其中包括一个16 Ω 的电阻器、一节电池及一只量程为1.75 A的电流表。标出电池的正极和电压的值，以及电流表的正极和常规电流的方向。

77. 一盏电灯，当接在6.0 V的电源上时，通过它的电流为66 mA，当接在9.0 V的电源上时，通过它的电流为75 mA。
- a. 这盏灯遵循欧姆定律吗？
 - b. 接在6.0 V的电源上时，它消耗的功率为多大？
 - c. 接在9.0 V的电源上时，它消耗的电功率又为多大？
78. **灯泡** 一盏60.0 W的电灯工作0.5 h使用了多少电能？如果这盏灯将电能转化为光能的效率是12%，那么它在这0.5 h内产生了多少热能？
79. 一盏电灯接到120 V电源上正常发光时，通过它的电流为0.40 A。
- a. 当电灯正常发光时，它的电阻为多大？
 - b. 当灯泡冷却后，它的电阻是炽热时的 $\frac{1}{5}$ 。那么冷却后它的电阻是多少？
 - c. 它与120 V的电源接通瞬间，通过它的电流为多大？
80. 如图22-16所示为通过硅二极管的电流—电压图象。
- a. 当二极管两端的电压为+0.70 V时，它的电阻是多少？
 - b. 当二极管两端的电压为+0.60 V时，它的电阻又是多少？
 - c. 这种二极管遵循欧姆定律吗？

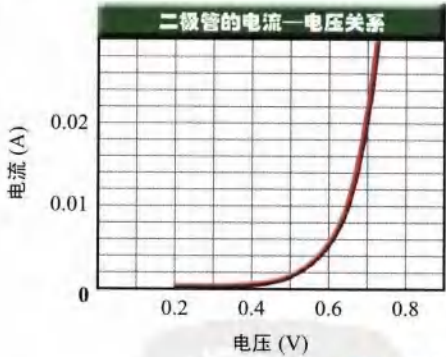


图22-16

81. 画出一幅串联电路图，其中包括90 V的电源、一只电流表，以及一个45 Ω 的电阻器。此时电流表的示数是多少？在图中用箭头表示出常规电流的方向。

22.2 电能的应用

82. **电池** 一节9.0 V电池的售价为3.00美元。这种电池能在26.0 h内连续提供0.025 0 A的电流，直至耗尽。试计算每千瓦时的费用。

83. 对于一个 5.0 W 、 $220\ \Omega$ 的电阻器而言, 允许通过它的最大电流是多少?
84. 通过一只 110 V 的电熨斗的电流为 3.0 A 。在 1 h 内它将放出多少热量?
85. 如图22-17所示的电路的最大安全功率为 $5.0 \times 10^1\text{ W}$ 。试求下列各物理量。
- 最大安全电流
 - 最大安全电压

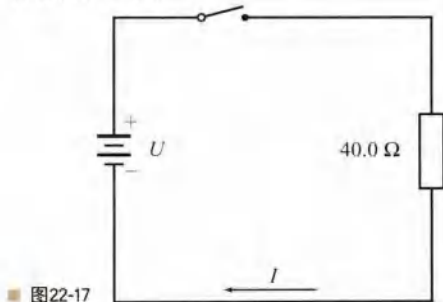


图22-17

86. **用电器** 如图22-18所示为一只电炉。试计算每月(30天)的电费。假定每千瓦时的电费为10美分, 且图中的温度控制开关在 $\frac{1}{4}$ 时间内是接通的。

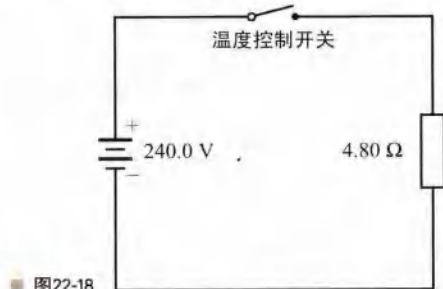


图22-18

87. **应用** 假定一台窗式空调一半时间在工作, 且每千瓦时的电费为9美分, 这台空调工作30天的费用估计为50美元。计算通过接在 120 V 电源上的这台空调的电流。
88. **收音机** 一台晶体管收音机用 9.0 V 的电池供电, 通过它的电流为 50.0 mA 。
- 如果电池的售价为2.49美元, 可使用 300.0 h 。那么这台收音机工作时, 每千瓦时的电费是多少?
 - 同一台收音机, 若用电源转换器接在家庭电路的插座上, 其电价为12美分/千瓦时。那么这台收音机工作 300.0 h 要花多少电费?

复习提高

89. 如果你有5美元, 你能支付一台 200 W 的立体声电唱机工作多长时间的电费? 假定每千瓦时的电费是15美分。
90. 测得通过 $50.0\ \Omega$ 电阻器的电流为 1.2 A 。在 5.0 min 时间内, 该电阻器将产生多少热量?
91. 一个 $6.0\ \Omega$ 的电阻器接在 15 V 的电池上。
- 电路中的电流是多少?
 - 它在 10.0 min 内将产生多少热能?
92. **灯泡** 一个白炽灯泡在不发光时的电阻为 $10.0\ \Omega$, 当接上 120 V 的电源发光时的电阻为 $40.0\ \Omega$ 。
- 灯泡发光时, 流经它的电流是多少?
 - 在灯泡接通电源的瞬间, 流经它的电流是多少?
 - 何时这个灯泡消耗的功率为最大?
93. 用一个滑动变阻器控制一台 12 V 的电动机的转速。当电动机的转速最小时, 流经它的电流为 0.02 A , 当电动机的转速最大时, 流经它的电流为 1.2 A 。该滑动变阻器阻值的变化范围是多少?
94. 水泵由一台电动机带动, 每小时将 $1.0 \times 10^4\text{ L}$ 的水竖直提升 8.0 m 。已知电动机工作时的电阻为 $22.0\ \Omega$, 它连接在 110 V 的电源上。
- 流经电动机的电流为多大?
 - 这台电动机的效率是多少?
95. 电热线圈的电阻为 $4.0\ \Omega$, 在 120 V 的电压下工作。
- 它工作时的电流为多大?
 - 在 5 min 内提供给这只线圈的电能是多少?
 - 如果该线圈在这段时间内浸没在盛有 20.0 kg 水的隔热容器中, 水的温度将升高多少? 假定100%的热量被水吸收。
 - 如果每千瓦时的电费是8美分, 它在30天中每天使用 30 min 。那么共需多少电费?
96. **应用** 一台电取暖器的功率为 500 W 。
- 在 1.5 h 内它消耗了多少电能?
 - 如果用这台取暖器为含有 50 kg 空气的房间加热, 设空气的比热容为 $1.10\text{ J}/(\text{kg} \cdot ^\circ\text{C})$, 所发出热量的50%用于加热空气。那么, 0.5 h 后房间的温度将改变多少?
 - 如果每千瓦时的电费是8美分, 在30天中每天使用 6 h , 那么共需多少电费?

第22章 测评

理性思维

97. 建立模型 有多少能量被储存在电容器中? 增加电荷 q 的电势差所需要的能量可表示为 $E = qU$ 。在电容器中, $U = \frac{q}{C}$ 。因此当电荷增加时, 电压也增加。但随着更多电荷的增加, 再要增加电荷时就需要更大的能量。考虑计算机中作为储能器件的1 F“超级电容器”。作出将5 C的电荷加到电容器上的过程中电压变化的图象。电容器两端的电压怎样变化? 曲线下的面积就是储存在电容器中的电能。以焦耳为单位, 求这种能量的值。它是否等于总电荷量与最终电压的乘积? 请说明理由。

98. 应用概念 微波炉的工作电压为120 V, 所需的电流为12 A。假定它将交流电转化为微波辐射的效率为75%, 将微波辐射转化为水的热能的效率也为75%。

- 画出一张与图22-2b所示的能量图类似的功率框图。按照每秒总焦耳数, 标明每个方框的作用。
- 根据第12章中学到的知识, 推导出一个关于水的温度的增加速率(即 $\frac{\Delta T}{\Delta t}$)的公式。要求在能量输入速率、质量以及物质比热容给定时, 通过这个公式就可解出温度的升高速率。
- 假定用这只微波炉从室温开始加热250 g的水。请用你的方程算出每秒内温度的升高量。
- 仔细检查你计算中所用的单位, 并讨论你的答案为什么是正确的。
- 对于可能提高微波加热效率的各种方法进行一般性讨论。
- 对于为什么并非任何物体都可用微波炉来进行加热的问题进行简单的讨论。
- 不能让微波炉空转。对此进行一般性讨论。

99. 分析与结论 一家电器商店的售货员宣称, 微波炉的电效率越高, 意味着它加热物体的效率也越高。

- 提出论据反驳这位售货员的说法。提示: 考虑加热一个特殊的物体。
- 提出论据支持这位售货员的说法。提示: 考虑加热一个特殊的物体。
- 写一篇短文答复这位售货员。

100. 应用概念 电阻为10 Ω 的电阻器可能小如一个针头, 也可能大如一只罐头。请对此作出解释。

101. 绘制和运用图象 如图22-17所示的二极管的电流—电压的关系图象要比服从欧姆定律的电阻的电流—电压的关系图象更有用。请对这种说法作出解释。

102. 绘制和运用图象 根据你在本章中学习的内容, 找出两个物理量之间存在抛物线关系的图线。

科技写作

103. 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) $1 \text{ A} = 1 \text{ C/s}$; (2) $F = ma$; (3) $E = \frac{U^2}{R}$ 。写一篇短文, 说明“电阻等于电压除以电流($R = \frac{U}{I}$)”。在撰写说明前, 先研究一下上述三种类型的公式。

104. 在第13章中你曾经学过, 物质受热时会发生膨胀。研究一下高压传输线与热膨胀的关系。

日积月累

105. 一个人大约每天要消耗 $8.4 \times 10^6 \text{ J}$ 的能量。他因此每天使得宇宙中的熵增加了多少? 这个熵的增加量与20 kg冰溶化过程中所引起的熵的增加量相比, 哪个更大? (第12章)

106. 当你乘坐高层建筑的电梯上升时, 由于气压迅速改变, 你的耳膜会感到发胀。乘坐电梯升高30层楼(约150 m)时, 气压将改变多少? 已知海平面上大气的密度为1.3 kg/m³。(第13章)

107. 空气中17 kHz的声波的波长是多少? 已知这种声波的频率为人耳能听到的频率范围的上限。(第15章)

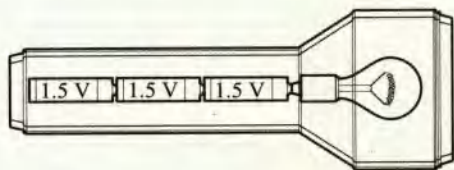
108. 478 nm的光波通过双缝后, 第一级亮条纹与中心亮条纹间的距离为3.00 mm, 光屏与双缝相距0.91 m。此双缝的间距是多少? (第19章)

109. 一个 $+3.6 \times 10^{-6} \text{ C}$ 的电荷距离另一个 $+6.0 \times 10^{-5} \text{ C}$ 的电荷2.0 m。它们间的作用力是多少? (第20章)

标准化测试

选择题

- 一个100 W的灯泡接在120 V的电源上, 通过这个灯泡的电流是 ()
 (A) 0.8 A (B) 1 A
 (C) 1.2 A (D) 2 A
- 一个 $5.0\ \Omega$ 的电阻器接在一节9.0 V的电池上, 在7.5 min时间内产生的热量为 ()
 (A) $1.2 \times 10^2\ \text{J}$ (B) $3.0 \times 10^3\ \text{J}$
 (C) $1.3 \times 10^3\ \text{J}$ (D) $7.3 \times 10^3\ \text{J}$
- 下图所示的手电筒中的电流为0.50 A, 电压为三节单电池的电压之和。该手电筒的电珠所消耗的功率为 ()
 (A) 0.11 W (B) 1.1 W
 (C) 2.3 W (D) 4.5 W



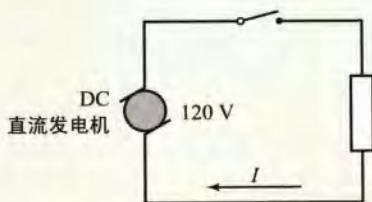
- 假定上题中的那只手电筒持续点亮3.0 min, 它消耗的电能为 ()
 (A) 6.9 J (B) 14 J
 (C) $2.0 \times 10^2\ \text{J}$ (D) $4.1 \times 10^2\ \text{J}$
- 通过某电路的电流为2.0 A, 该电路包括一台电阻为 $12\ \Omega$ 的电动机。如果这台电动机工作1 min, 被转化的电能为 ()
 (A) $4.8 \times 10^1\ \text{J}$ (B) $2.0 \times 10^1\ \text{J}$
 (C) $2.9 \times 10^3\ \text{J}$ (D) $1.7 \times 10^5\ \text{J}$
- 如果简单电路中的电压和电阻都减半, 这会使电路中的电流 ()
 (A) 减少一半 (B) 不变
 (C) 增加1倍 (D) 增加4倍

- 一个 $50.0\ \Omega$ 的电阻器与一节电池相连接的电路中, 电流为5.00 mA。该电路的电功率是 ()
 (A) $1.00 \times 10^{-2}\ \text{W}$ (B) $1.00 \times 10^{-3}\ \text{W}$
 (C) $1.25 \times 10^{-3}\ \text{W}$ (D) $2.50 \times 10^{-3}\ \text{W}$
- 一个60 W的灯泡持续点亮2.5 h, 需消耗的电能为 ()
 (A) $4.2 \times 10^{-2}\ \text{J}$ (B) $2.4 \times 10^1\ \text{J}$
 (C) $1.5 \times 10^2\ \text{J}$ (D) $5.4 \times 10^5\ \text{J}$

拓展题

- 下图所示为一个包含一台直流发电机和一个电阻器的简单电路。下表给出了几种小电器的电阻。假定图中的电阻器代表的是电吹风, 那么电路中的电流为多大? 若此电吹风持续工作2.5 min, 它需消耗多少电能?

电器	电阻 (Ω)
电吹风	8.5
电热器	10.0
小电动机	12.0



✓ 考试小贴士

要注意所有的附表及附图

试题中的图表一般都是有用的。如果你只用了其中的一部分, 那么你可能会丢失某些重要的信息。

第23章

串联和并联电路

内容提要

- 学会区分串联、并联及混联电路，并解决包含这些电路的问题。
- 说明保险丝、断路器以及漏电保护器的作用，描述怎样将电流表和电压表运用于电路中。

学习本章的意义

电路是电灯、微波炉以及计算机等一切电器设备的基础。知道电路的工作原理，将有助于你理解各种电器设备的功能。

电力控制中心 电力控制中心在电力公司与建筑物的电路间建立了一定的联系。每条独立的线路都有断路器保护，电路中的各种负载以并联的方式连接。

想一想

为什么建筑中的各种负载要以并联的方式连接？断路器又是怎样接入电路的？

物理  在线
physicspp.com



起步实验

保险丝保护电路的方式

问题

保险丝是怎样防止电路因受电流过大而被损毁的?

步骤

1. 用一根铜导线将一节9 V电池的负极与一个安在灯座中的手电筒灯泡的一端相连。**注意: 导线两端较尖锐, 小心割伤皮肤。**
2. 用铜导线将安在灯座中的灯泡的另一端与一根极细的金属丝的一头相连。这根细金属丝必须安放在小的玻璃容器中。
3. 用铜导线将这根细金属丝的另一头接到一只开关上。确认开关是断开的。
4. 将开关的另一端连接电池的正极。
5. **假设** 预测当开关闭合时将发生什么情况。
6. **观察** 闭合开关, 观察细金属丝的情况。
7. 取一根较粗些的细金属丝, 或将几根细金属丝绞在一起, 重复步骤1~6。

分析

说明导线的粗细与它通电后发热的快慢及烧断的关系。为什么现在家庭的配电箱中, 要用断路器替代保险丝?

理性思维 在调换你家中或汽车电路中被烧毁的保险丝时, 必须要使用正确规格的熔丝。为什么说这点非常重要?



23.1 简单电路

你可以用一条山间溪流来模拟电路, 虽然你可能无法立刻明白它们之间的联系。溪水从山上高处的源头流向山下的平原。无论这些溪水沿着哪条路径, 它从山上到平原的高度改变量总是一样的。溪流有时以一涧水流的形式下山, 有时则可能分成两股或多股更小的水流。也就是说, 在这些情况下, 溪水有时通过一条路径, 有时则会通过多条不同的路径。但是无论有多少条路径, 从山上流下的溪水的总量保持不变。换句话说, 从山上流下的溪水的总量与它的路径无关。

► 学习目标

- 描述串联电路和并联电路。
- 计算电流、电压以及串联和并联电路中的等效电阻。

► 关键技术语

串联电路
等效电阻
分压器
并联电路



■ 图23-1 河流或溪流无论沿着什么样的路径从山上流下，水的总量和落差总是一样的。

那么，怎样用如图23-1所示的溪流来模拟电路呢？水流下落的距离可用来比拟电路中的电压；溪流中每秒流过的水量可用来比拟电路中的电流；狭窄的水道产生阻力，因此可用来比拟电路中的电阻。那么，用什么来比拟电路中的电池或发电机呢？将水提升到山上所需的能量来自太阳。太阳能使湖泊和大海中的水蒸发，形成云彩，然后通过雨和雪的形式降落到山上。所以，当你遇到电路问题时，就可以联想一下这种溪水模型。

串联电路

三位学生将两个相同的灯泡接到一节电池上，如图23-2所示。在最终接上电池前，老师要求他们预测这两个灯泡的亮度。每位学生都知道，灯泡的亮度取决于通过它的电流。第一位学生说，只有靠近电池“+”极的灯泡才会亮，因为所有的电流将在那里转化为热能和光能。第二位学生说，电流在第一个灯泡处只用了一部分，因此第二个灯泡也会亮，且会比第一个灯泡更亮些。而第三位学生则说，这两个灯泡会一样亮，因为电流是电荷的流动，因此电荷在离开第一个灯泡后，除了通过第二个灯泡外无路可走。这位学生于是推论说，两个灯泡中的电流相同，所以它们的亮度也相同。那么，你认为哪位学生的说法正确呢？

如果用溪水模型想象电路，你就会发现第三位学生的说法是正确的。你在第20章中学过，电荷既不能被创生，也不能被消灭。电路中的电荷只能沿着一条路径行走，且不会半途消灭，因此在一段电路上流出的电流必然等于流入的电流。这意味着该电路中各处的电流都相同。如果你将三只电流表接入如图23-3所示的电路中，它们的示数将完全相同。这样的电路称为**串联电路**（series circuit）。在串联电路中，全部电流将通过每一个元件。

如果电路中的电流相同，那么灯泡是用什么来产生光和热的呢？回想一下电功率，即电能转化的速率，它可表示为 $P = IU$ 。因此，如果灯泡两端有电压，那么就会有电能被转化为其他形式的能量。灯泡的电阻定义为 $R = \frac{U}{I}$ ，因此电压也可表示为 $U = IR$ 。

■ 图23-2 你认为电路接通后，两个灯泡的亮度会一样吗？

串联电路中的电流和电阻 从溪水模型你已经知道，各段溪水的落差之和等于从山顶到海平面的总落差。在电路中，由发电机或其他电源提供的电压等于灯泡A和灯泡B两端的电压之和，这可用下式表示：

$$U_{\text{电源}} = U_A + U_B$$



将电路中的电流与每个电阻器的电阻相乘，便可得到该电阻器两端的电压。因通过这两个灯泡的电流相同，所以有 $U_A = IR_A$ 和 $U_B = IR_B$ ，因此有 $U_{\text{电源}} = IR_A + IR_B$ 或 $U_{\text{电源}} = I(R_A + R_B)$ 。通过电路的电流于是可用下式表示：

$$I = \frac{U_{\text{电源}}}{R_A + R_B}$$

同样的观念可拓展到包含任何数目电阻器的串联电路中。如果电路中只有一个电阻器，且其电阻 R 与这两个灯泡的电阻之和相同，那么这个电阻便称为该电路的**等效电阻 (equivalent resistance)**。对于串联电路，其等效电阻等于每个电阻之和。

串联电阻器的等效电阻 $R = R_A + R_B + \dots$

串联电阻器的等效电阻等于每个电阻器的电阻之和。

注意，这里的等效电阻大于其中任一电阻器的电阻。因此，如果电池的电压不变，那么串联的元件越多，电路中的电流越小。为了计算串联电路中的电流，可先算出等效电阻，然后再利用下式求出电流：

$$\text{电流 } I = \frac{U_{\text{电源}}}{R}$$

串联电路中的电流等于电源电压除以等效电阻。

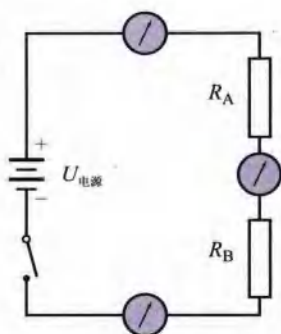
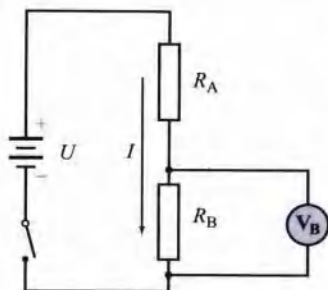


图23-3 电流表的示数表明，串联电路中各处的电流相等。

练一练

- 将三个 20Ω 的电阻器串联后接到 120 V 的发电机上。该电路的等效电阻为多大？电路中的电流为多大？
- 将三个电阻分别为 10Ω 、 15Ω 和 5Ω 的电阻器串联后接到 90 V 的电源上。该电路的等效电阻为多大？电路中的电流为多大？
- 将三个电阻器串联后接到一节 9 V 的电池上。
 - 如果其中一个电阻器的电阻变大，电路的等效电阻将怎样变化？
 - 电流将怎样变化？
 - 电池的电压会发生变化吗？
- 一串彩灯由阻值相等的 10 个小灯泡串联组成。当将它接到 120 V 的电源插座上时，通过灯泡的电流是 0.06 A 。
 - 这串彩灯的等效电阻是多少？
 - 每个灯泡的电阻是多少？
- 分别计算第2题中三个电阻器两端的电压，看看它们之和是否等于电源电压。



■ 图23-4 在分压器电路中，选取适当的 R_A 和 R_B 的值，使得 R_B 两端的电压等于所需的电压。

串联电路中的电压 电流通过任何闭合电路所引起的电势的净变化必然为零。这是因为电路中的电源（如电池或发电机）使电势升高的值与电流通过电阻器所引起的电势的减小值相等。

串联电阻器的一个重要应用即所谓的**分压器 (voltage divider)**。它是一种串联电路，用于从较高电压的电源产生一个能提供所需电压值的电压源。例如，如果你有一节9 V的电池，但你需要的是一个5 V的电压源，那么分压电路就能提供这种电压。考虑如图23-4所示的电路，两个电阻器 R_A 和 R_B 串联后接在一个电压为 U 的电源上。电路的等效电阻为 $R = R_A + R_B$ 。电路中的电流由下式表示：

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

$$= \frac{U}{R_A + R_B}$$

所希望得到的5 V的电压就是电阻器 R_B 两端的电压 U_B ，而 $U_B = IR_B$ 。将此式代入上面电流的表达式中，可得：

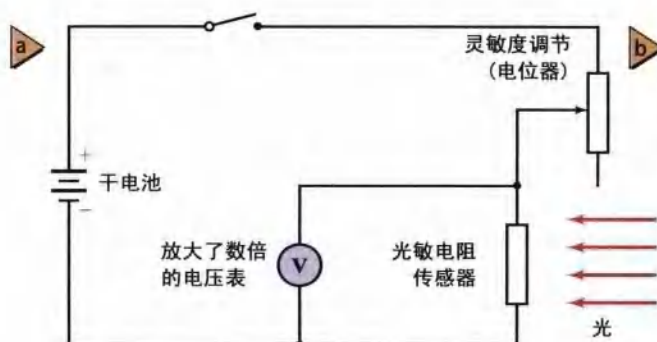
$$U_B = IR_B$$

$$= \frac{U}{R_A + R_B} \times R_B$$

$$= \frac{UR_B}{R_A + R_B}$$

分压器常常与敏感元件，如光敏电阻器等一起使用。光敏电阻器一般由诸如硅、锗、硫化镉等半导体材料制成，它的电阻取决于照射在它上面的光的强度。一个典型的光敏电阻器在受到光照射时，其电阻为400 Ω ，而在无光照射时的电阻为400 000 Ω 。用于光敏电阻电路中的分压器，其输出电压取决于照射在它上面的光的强度。在如图23-5所示的光照测量计中就用了这种电路。在这种仪器中，由电子电路探测到的电压值被转化成用数字显示的光照度的测量值。当光照度增加时，电压表的读数将变小。

■ 图23-5 这种分压器的输出电压取决于照射在光敏电阻器上的光的强度(a)。光照测量计的电路中就应用了分压器(b)。



例题 1

串联电路中的电压 两个电阻分别为 $47.0\ \Omega$ 和 $82.0\ \Omega$ 的电阻器，串联后接在 $45.0\ \text{V}$ 的电源上。

- 电路中的电流是多少？
- 两个电阻器两端的电压分别是多少？
- 如果将 $47.0\ \Omega$ 的电阻器换成了 $39.0\ \Omega$ 的电阻器，电流将是增大、减小还是保持不变？
- 此时， $82.0\ \Omega$ 电阻器两端的电压是多少？

1 分析概括问题

- 作出电路图。

已知：

$$U_{\text{电源}} = 45.0\ \text{V}$$

$$R_A = 47.0\ \Omega$$

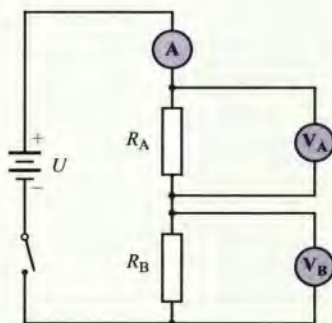
$$R_B = 82.0\ \Omega$$

未知：

$$I = ?$$

$$U_A = ?$$

$$U_B = ?$$



2 求解未知量

- 为了确定电流，先求出等效电阻。

$$\begin{aligned}
 I &= \frac{U_{\text{电源}}}{R}, \text{ 其中 } R = R_A + R_B \\
 &= \frac{U_{\text{电源}}}{R_A + R_B} \quad \text{将 } R = R_A + R_B \text{ 代入。} \\
 &= \frac{45.0\ \text{V}}{47.0\ \Omega + 82.0\ \Omega} \quad \text{将 } U_{\text{电源}} = 45.0\ \text{V}, R_A = 47.0\ \Omega, R_B = 82.0\ \Omega \text{ 代入。} \\
 &= 0.349\ \text{A}
 \end{aligned}$$

- 对每个电阻器，应用 $U = IR$ 。

$$\begin{aligned}
 U_A &= IR_A \\
 &= 0.349\ \text{A} \times 47.0\ \Omega \quad \text{将 } I = 0.349\ \text{A}, R_A = 47.0\ \Omega \text{ 代入。} \\
 &= 16.4\ \text{V}
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 U_B &= IR_B \\
 &= 0.349\ \text{A} \times 82.0\ \Omega \quad \text{将 } I = 0.349\ \text{A}, R_B = 82.0\ \Omega \text{ 代入。} \\
 &= 28.6\ \text{V}
 \end{aligned}$$

- 根据 $R_A = 39.0\ \Omega$ 再次计算电流。

$$\begin{aligned}
 I &= \frac{U_{\text{电源}}}{R_A + R_B} \\
 &= \frac{45.0\ \text{V}}{39.0\ \Omega + 82.0\ \Omega} \quad \text{将 } U_{\text{电源}} = 45.0\ \text{V}, R_A = 39.0\ \Omega, R_B = 82.0\ \Omega \text{ 代入。} \\
 &= 0.372\ \text{A}
 \end{aligned}$$

电流将增加。

- 确定此时 R_B 两端的电压。

$$\begin{aligned}
 U_B &= IR_B \\
 &= 0.372\ \text{A} \times 82.0\ \Omega \quad \text{将 } I = 0.372\ \text{A}, R_B = 82.0\ \Omega \text{ 代入。} \\
 &= 30.5\ \text{V}
 \end{aligned}$$

3 验证答案

- 单位是否正确？** 电流的单位 $1\ \text{A} = 1\ \text{V}/\Omega$ ，电压的单位 $1\ \text{V} = 1\ \text{A} \cdot \Omega$ 。
- 数值是否合理？** 对于电流，如果 $R > U$ ，则 $I < 1$ 。此外，任一电阻器两端的电压一定小于电路上的总电压，所以两次算出的 U_B 的值都小于 $U_{\text{电源}}(45\text{V})$ 。

练一练

- 假定在例题1的电路中，电流表的示数为0 A，电压表 U_A 的示数为0 V， U_B 的示数为45 V。分析该电路发生了什么情况。
- 假定例题1中，已知 $R_A = 255 \Omega$ ， $R_B = 292 \Omega$ ， $U_A = 17.0 \text{ V}$ 。
 - 电路中的电流为多大？
 - 电池的电压为多大？
 - 求总功率以及每个电阻器上的功率。
 - 电路中每个电阻器上的功率是否等于总功率？请说明理由。
- 节日彩灯通常用串联方式连接，且用的是一种特殊的灯泡，当某个灯泡上的电压增加时它将会被短路。试说明这种灯泡的原理，并解释为什么当一串灯泡中的多个灯泡烧毁后，可能会导致保险丝熔断。
- 在例题1的电路中，两个电阻器的电阻不相等。试解释为什么工作时，电阻较小的电阻器的温度也较低。
- 三个电阻器串联后接在一节12.0 V的电池上，其中一个电阻器两端的电压为1.21 V，另一个电阻器两端的电压为3.33 V。第三个电阻器两端的电压是多少？

例题 2

分压器 一个分压器由一节9.0 V的电池以及两个电阻分别为390 Ω 和470 Ω 的电阻器组成。那么470 Ω 的电阻器两端的电压是多少？

1 分析概括问题

- 作出电池和电阻器的串联电路图。

已知：

$$U_{\text{电源}} = 9.0 \text{ V}$$

$$R_A = 390 \Omega$$

$$R_B = 470 \Omega$$

未知：

$$U_B = ?$$

2 求解未知量

$$R = R_A + R_B$$

$$I = \frac{U_{\text{电源}}}{R} = \frac{U_{\text{电源}}}{R_A + R_B}$$

将 $R = R_A + R_B$ 代入。

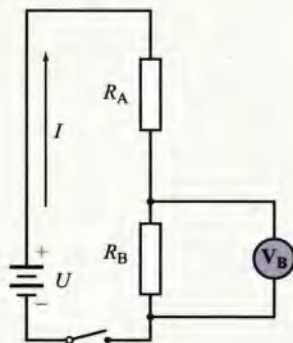
$$U_B = IR_B$$

$$= \frac{U_{\text{电源}} U_B}{R_A + R_B}$$

将 $I = \frac{U_{\text{电源}}}{R_A + R_B}$ 代入。

$$= \frac{9.0 \text{ V} \times 470 \Omega}{390 \Omega + 470 \Omega} = 4.9 \text{ V}$$

将 $U_{\text{电源}} = 9.0 \text{ V}$ ， $R_A = 390 \Omega$ ， $R_B = 470 \Omega$ 代入。



3 验证答案

- 单位是否正确？** 电压的单位 $1 \text{ V} = 1 \text{ V} \cdot \Omega / \Omega$ ， Ω 相消，只剩下V。
- 数值是否合理？** 输出电压小于电源电压。因为470 Ω 大于等效电阻的一半，所以此分压器的输出电压大于电源电压的一半。

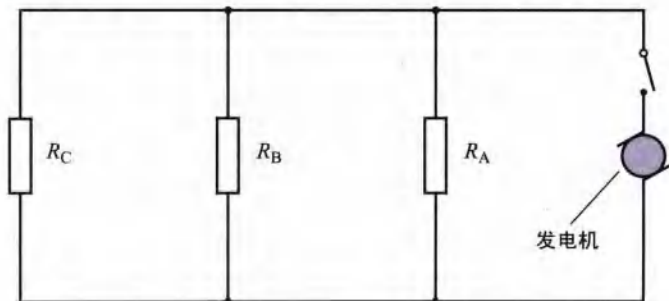
练一练

11. 一个 $22\ \Omega$ 的电阻器和一个 $33\ \Omega$ 的电阻器串联后接到 $120\ \text{V}$ 的电源上。
 - a. 电路的等效电阻为多大?
 - b. 电路中的电流为多大?
 - c. 每个电阻器两端的电压为多大?
 - d. 两个电阻器两端的总电压为多大?
12. 阻值分别为 $3.3\ \text{k}\Omega$ 、 $4.7\ \text{k}\Omega$ 和 $3.9\ \text{k}\Omega$ 的三个电阻器串联后接到 $12\ \text{V}$ 的电源上。
 - a. 它们的等效电阻为多大?
 - b. 通过这些电阻器的电流为多大?
 - c. 每个电阻器两端的电压为多大?
 - d. 三个电阻器两端的总电压为多大?
13. 一位同学用一节 $45\ \text{V}$ 的电池、一个 $470\ \text{k}\Omega$ 的电阻器和一个 $235\ \text{k}\Omega$ 的电阻器制作了一个分压器，并测量了较小电阻两端的输出电压。此输出电压为多大?
14. 选取一个电阻器作为分压器的一部分，分压器的另一个电阻器的电阻为 $1.2\ \text{k}\Omega$ 。当电源电压为 $12\ \text{V}$ 时，在 $1.2\ \text{k}\Omega$ 电阻器两端的电压为 $2.2\ \text{V}$ 。那么，所选取的那个电阻器的电阻为多大?

并联电路

观察如图23-6中所示的电路，其中有多少条电流通路？从发电机流出的电流可通过三个电阻器中的任何一条通路。这种有多条电流通路的电路称为**并联电路 (parallel circuit)**。这三个电阻器是并联连接的，三条通路的两端分别相连。在溪流模型中，这种电路可用溪流上的三束水流支路来比拟。有的支路上水的流量大些，而另一些则小些。不过这些支路上的流量之和等于落下溪水的总水量。此外，这些水流无论沿什么支路从山上流下，其落差都是相同的。类似地，在并联电路中，总电流等于各支路电流之和，且每条支路两端的电势差相等。

图23-6 图中电流的平行通路可比拟为溪水从山上流下时的多条通路。



迷你实验

并联电阻

将一个电源、一个电阻器以及一只电流表接成串联电路。

1. **预测**将第二个相同的电阻器并联在第一个电阻器上时，电路中电流的变化情况。

2. **检验**你的预测。

3. **预测**当电路中有第三、第四个相同的并联电阻器时，电路中电流的变化情况。

4. **检验**你的预测。

分析与结论

5. **作出**数据表，证明你的结论。

6. **解释**你的结果。

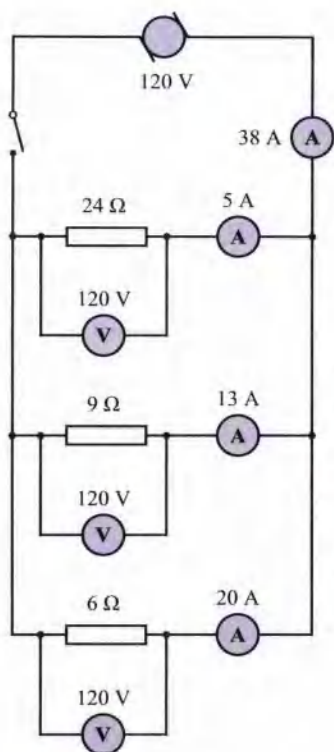


图23-7 在并联电路中，总电流等于各支路电流之和。

那么，通过并联电路中各电阻器的电流又是什么情况呢？这取决于它们的电阻值。例如，如图23-7所示，每个电阻器两端的电压均是120 V。通过任一电阻器的电流为 $I = \frac{U}{R}$ ，由此你可以算出，通过24 Ω的电阻器的电流为 $I = 120 \text{ V} \div 24 \Omega = 5.0 \text{ A}$ 。同理，你还可以算出通过其他两个电阻器的电流，以及从发电机流出的电流（等于通过这三条支路的电流之和，本例中这个值为38 A）。

如果将6 Ω的电阻器从电路中移去，那么会发生什么变化呢？通过那个24 Ω的电阻器的电流会改变吗？你知道，电流仅取决于电阻器的电阻以及它两端的电压，如果它们都不改变，那么电流也不会变。这点同样适用于通过9 Ω电阻器的电流。并联电路中各支路彼此独立。不过，通过发电机的总电流将会发生变化。将6 Ω的电阻器从电路中移去时，各支路电流之和为18 A。

并联电路的电阻 怎样求并联电路的等效电阻呢？如图23-7所示，发电机两端的电压为120 V，通过它的总电流为38 A，由此不难用下式算出电路的等效电阻：

$$\begin{aligned} R &= \frac{U}{I} \\ &= \frac{120 \text{ V}}{38 \text{ A}} \\ &= 3.2 \Omega \end{aligned}$$

注意，此电阻比并联的三个电阻中的任何一个都要小。将两个或多个电阻并联，其等效电阻总是减小的。这种电阻减小的原因是：每一个并联上去的新电阻提供了附加的电流通路，因此当电压不变时总电流将会增大。

为了计算并联电路的等效电阻，首先应注意到总电流等于通过各支路的电流之和。如果用 I_A 、 I_B 、 I_C 分别表示各支路中的电流，用 I 表示总电流，那么有 $I = I_A + I_B + I_C$ 。各电阻两端的电压相同，而通过各电阻，例如 R_A 的电流为 $I_A = \frac{U}{R_A}$ 。因此，电流之和的式子可表示为：

$$\frac{U}{R} = \frac{U}{R_A} + \frac{U}{R_B} + \frac{U}{R_C}$$

等式两端同时除以 U ，便得到并联电阻器的等效电阻：

$$\text{并联电阻器的等效电阻} \quad \frac{1}{R} = \frac{1}{R_A} + \frac{1}{R_B} + \frac{1}{R_C} + \dots$$

并联电阻器的等效电阻的倒数等于各电阻器电阻的倒数之和。

这一公式适用于包含任何数目电阻器的并联电路。

物理学的应用

■ **检测电阻** 欧姆表用于测量电阻，它是通过将确定的已知电压加在待测电阻的两端，然后测量电流的方法实现的，测得的电阻显示在其表盘上。有些欧姆表所用的电压小于1 V，它们主要被用于检测精密的电子元件；而另有一些欧姆表的电压可达几百伏，它们可用来检测材料的绝缘性。

例题 3

并联电路中的等效电阻和电流 三个电阻分别为 $60.0\ \Omega$ 、 $30.0\ \Omega$ 和 $20.0\ \Omega$ 的电阻器并联后接在 $90.0\ \text{V}$ 的电源上。

- 求通过每条支路的电流。
- 求电路的等效电阻。
- 求通过电源的电流。

1 分析概括问题

- 作出电路图。
- 标上电流表以显示你要测量电流的地方。

已知：

$$R_A = 60.0\ \Omega$$

$$R_B = 30.0\ \Omega$$

$$R_C = 20.0\ \Omega$$

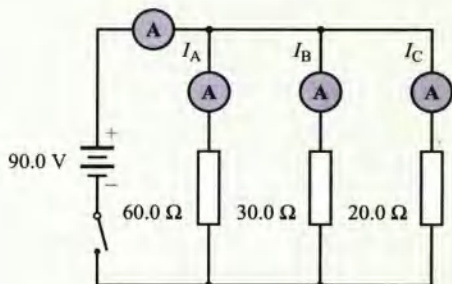
$$U = 90.0\ \text{V}$$

未知：

$$I_A = ? \quad I = ?$$

$$I_B = ? \quad R = ?$$

$$I_C = ?$$



2 求解未知量

- 利用 $I = \frac{U}{R}$ 计算各支路中的电流，其中各支路电阻器两端的电压 U 相同。

$$\begin{aligned} I_A &= \frac{U}{R_A} \\ &= \frac{90.0\ \text{V}}{60.0\ \Omega} \quad \text{将 } U = 90.0\ \text{V}, R_A = 60.0\ \Omega \text{ 代入。} \\ &= 1.50\ \text{A} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} I_B &= \frac{U}{R_B} \\ &= \frac{90.0\ \text{V}}{30.0\ \Omega} \quad \text{将 } U = 90.0\ \text{V}, R_B = 30.0\ \Omega \text{ 代入。} \\ &= 3.00\ \text{A} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} I_C &= \frac{U}{R_C} \\ &= \frac{90.0\ \text{V}}{20.0\ \Omega} \quad \text{将 } U = 90.0\ \text{V}, R_C = 20.0\ \Omega \text{ 代入。} \\ &= 4.50\ \text{A} \end{aligned}$$

- 利用并联电路的等效电阻公式。

$$\begin{aligned} \frac{1}{R} &= \frac{1}{R_A} + \frac{1}{R_B} + \frac{1}{R_C} \\ &= \frac{1}{60.0\ \Omega} + \frac{1}{30.0\ \Omega} + \frac{1}{20.0\ \Omega} \quad \text{将 } R_A = 60.0\ \Omega, R_B = 30.0\ \Omega, R_C = 20.0\ \Omega \text{ 代入。} \\ &= \frac{1}{10.0\ \Omega} \\ R &= 10.0\ \Omega \end{aligned}$$

- 利用 $I = \frac{U}{R}$ 计算总电流。

$$\begin{aligned} I &= \frac{U}{R} \\ &= \frac{90.0\ \text{V}}{10.0\ \Omega} \quad \text{将 } U = 90.0\ \text{V}, R = 10.0\ \Omega \text{ 代入。} \\ &= 9.00\ \text{A} \end{aligned}$$

3 验证答案

- 单位是否正确？** 电流的单位是 A，电阻的单位是 Ω 。
- 数值是否合理？** 等效电阻小于任一单个电阻器的电阻。电路的总电流 I 等于各电阻器中的电流之和 $I_A + I_B + I_C$ 。

► 练一练

15. 三个都是 $15.0\ \Omega$ 的电阻器并联后接到 $30.0\ \text{V}$ 的电源上。
 - a. 该并联电路的等效电阻是多少?
 - b. 电路中的总电流是多少?
 - c. 各支路中的电流分别是多少?
16. 电阻分别为 $120.0\ \Omega$ 、 $60.0\ \Omega$ 和 $40.0\ \Omega$ 的三个电阻器，并联后接到 $12.0\ \text{V}$ 的电源上。
 - a. 该并联电路的等效电阻是多少?
 - b. 电路的总电流是多少?
 - c. 各支路中的电流分别是多少?
17. 假定第15题中，用一个 $10.0\ \Omega$ 电阻器替代其中一个 $15.0\ \Omega$ 的电阻器。
 - a. 它们的等效电阻改变吗? 如果改变，怎样改变?
 - b. 电路的总电流改变吗? 如果改变，怎样改变?
 - c. 通过另外两个 $15.0\ \Omega$ 电阻器的电流改变吗? 如果改变，怎样改变?
18. 在电路中的某支路上需增加一个电阻器，以便使该支路的电阻从 $150\ \Omega$ 减小为 $93\ \Omega$ 。这个加上去的电阻器的电阻应是多少? 需怎样连接?
19. 将“ $12\ \Omega$ 、 $2\ \text{W}$ ”的电阻器与“ $6.0\ \Omega$ 、 $4\ \text{W}$ ”的电阻器并联。当它们两端的电压不断地增加时，哪个电阻器会变得更热些?

串联与并联的区别也体现在对电灯线路的影响上。假设有两个电灯泡，一个为 $60\ \text{W}$ ，另一个为 $100\ \text{W}$ 。灯泡的亮度与它们所消耗的功率成正比，即 $P = I^2 R$ 。当它们并联连接时，每个灯泡两端的电压都是 $120\ \text{V}$ ，因此 $100\ \text{W}$ 的灯泡会更亮些。当它们串联连接时，通过每个灯泡的电流相同，因为 $60\ \text{W}$ 灯泡的电阻比 $100\ \text{W}$ 的大，所以具有较大电阻的 $60\ \text{W}$ 的灯泡功率更大，因此更亮一些。

本节复习题

20. **电路的类型** 比较并联电路和串联电路中的电压和电流。
21. **总电流** 并联电路有四条支路，通过各支路的电流分别是 $120\ \text{mA}$ 、 $250\ \text{mA}$ 、 $380\ \text{mA}$ 及 $2.1\ \text{A}$ 。电源所提供的电流是多少?
22. **总电流** 串联电路有四个电阻器，通过其中一个电阻器的电流为 $810\ \text{mA}$ 。电源所提供的电流是多少?
23. **电路** 一只开关与一个 $75\ \text{W}$ 的灯泡串联后接在 $120\ \text{V}$ 的电源上。
 - a. 当开关闭合时，其两端的电压是多少?
 - b. 如果在电路中再串联一只 $75\ \text{W}$ 的灯泡，此时开关两端的电压又是多少?

24. **理性思维** 如图23-8所示，有四个相同的电阻器。如果用一段导线将电路中的A、B两点连接起来，试回答如下问题并说明理由。

- a. 通过这根导线的电流是多少?
- b. 通过各电阻器的电流会发生什么变化?
- c. 通过电池的电流会发生什么变化?
- d. 各电阻器两端的电压会发生什么变化?

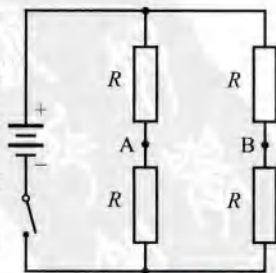


图23-8

23.2 电路的应用

你已经学过了一些基本的家庭电路。了解这种电路系统的要求及其局限性是非常重要的。不过比这些更为重要的是，你必须清楚有关家庭电路的一些安全标准，以预防事故的发生。

安全设备

在电路中，保险丝和断路器都是为了电路的安全而设置的，它们能防止因过多的用电器同时接入而引起的电路过载。当电路的电阻太小时会发生**短路 (short circuit)**，此时小的电阻会导致非常大的电流。当用电器并联时，每接入一台正在工作的电器就会使电路的等效电阻减小，总电流增加。电流过大可能会产生大量的热量，导致导线的绝缘层熔化，从而造成短路，甚至引起火灾。

保险丝 (fuse) 是一小段的金属丝，当通过它的电流过大时，它就会熔化。保险丝的粗细由电路中规定的安全电流的大小来确定。若保险丝过粗，那么只有当超过安全标准的电流通过电路时才能使保险丝熔化并切断电路。而如图23-9所示的**断路器 (circuit breaker)** 则是一种自动开关，当电流达到或超过某个设定值从而可能使电路过载时，它就会自动打开，切断电流。

电流通过单一路径从电源流经用电设备后再返回电源。有时，电器设备不合格格，或者不巧浸到了水，就会形成另外的电流通路。如果另外的电流通路是人体，那么只要引起5 mA这样小的电流，就会对人体造成严重的伤害。**触电保护器 (ground-fault interrupter)** 中的电子线路能检测到由于另外的通路而引起的微小的电流变化，自动切断电路，从而防止伤害事故的发生。在浴室、厨房以及户外插座的电器设备安装中，通常规定需要安装触电保护器。

学习目标

- 解释保险丝、断路器及触电保护器是怎样保护家庭电路的。
- 分析和求解有关混联电路的问题。
- 解释电压表和电流表是怎样接入电路的。

关键术语

短路
保险丝
断路器
触电保护器
混联电路
电流表
电压表



■ 图23-9 当有过大的电流通过双金属片时，它就会发热，从而引起弯曲并与弹簧片脱开。于是，开关手柄跳向断开位置，触点分开，电路切断。



家庭电路的应用 如图23-10所示为用于家庭线路的并联电路，以及一些常用的电器设备，它们都是并联连接的。任何支路中的电流均不依赖于其他支路中的电流。假定一台240 W电视机的插头插在120 V的插座上，那么流经它的电流为 $I = \frac{P}{U} = \frac{240 \text{ W}}{120 \text{ V}} = 2.0 \text{ A}$ 。当一台720 W的卷发器插入插座时，流经它的电流为 $I = \frac{720 \text{ W}}{120 \text{ V}} = 6.0 \text{ A}$ 。最后，当一台1 440 W的吹风机的插头插入插座时，流经吹风机的电流为 $I = \frac{1\,440 \text{ W}}{120 \text{ V}} = 12 \text{ A}$ 。每个用电器的电阻可用下式计算： $R = \frac{U}{I}$ 。因此，这三台电器设备的等效电阻为

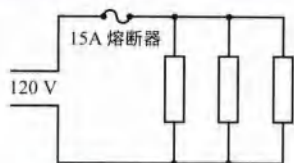


图23-10 这种用于室内的并联电路可使多台电器同时使用。不过，如果同时使用的电器过多，那么保险器可能会熔化。

$$\begin{aligned}\frac{1}{R} &= \frac{1}{60 \Omega} + \frac{1}{20 \Omega} + \frac{1}{10 \Omega} \\ &= \frac{1}{6 \Omega} \\ R &= 6 \Omega\end{aligned}$$

保险丝与电源串联，所以通过它的电流即为总电流。通过保险丝的电流可利用等效电阻计算：

$$I = \frac{U}{R} = \frac{120 \text{ V}}{6 \Omega} = 20 \text{ A}$$

如果保险丝的额定电流是15 A，那么电路中的电流20 A就超过了保险丝的额定电流，这就会导致保险丝熔化，电路被切断。

保险丝和断路器也可用来防止由于短路而引起的大电流。若电路中不安装保险丝或断路器，那么因短路而导致的大电流极易引发火灾。例如，当绞在一起的电灯线的绝缘层老化时，就可能引起短路。绞在一起的两根电灯线若偶然碰到一起，此时导线的电阻可能只有 0.010Ω ，这样的电阻产生的电流是：

$$I = \frac{U}{R} = \frac{120 \text{ V}}{0.010 \Omega} = 12\,000 \text{ A}$$

如此巨大的电流会使得保险丝或断路器立即将电路切断，从而避免由于电路过热而引发火灾。

挑战性问題

检流计是一种用于测量微小电流或电压的仪器。若如图所示的电路中的检流计的示数为零，那么你就可以认为该电路是平衡的。

1. 与你一起做实验的同学说，只有一种办法可以使该电路平衡，那就是所有的电阻都相等。这能使该电路平衡吗？是否还有别的办法使该电路平衡？请说明。
2. 用图中的符号推导出满足电路平衡的一般方程。提示：将这种电路作为分压器处理。
3. 哪个电阻器可用一只可变电阻器替代，然后用它来调节电路，使电路平衡？
4. 哪个电阻器可用一只可变电阻器替代，然后用它来调节灵敏度？为什么用可变电阻器替代是必要的？在实际中应该如何应用这种电路？

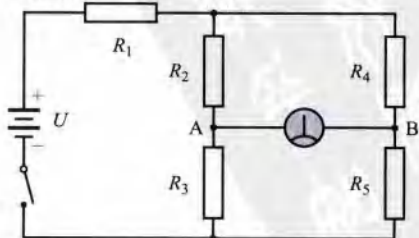




图23-11 连接导线的小电阻串联在家用电器的并联电路中。

混联电路

你是否注意到，当你打开电吹风时，浴室或卧室中的灯光会突然暗一下？电灯和电吹风是并联在120 V的电源上的，这意味着当你打开电吹风时，通过灯泡的电流应当不会改变。然而灯光还是变暗了，这说明在实际生活中，电流是改变的。之所以灯光会变暗，是因为室内电线中存在一个很小的电阻。如图23-11所示，这个小电阻与并联电路串联。这种既包含串联电路又包含并联电路的混合电路称为**混联电路** (combination series-parallel circuit)。下面是分析这种电路的基本步骤。

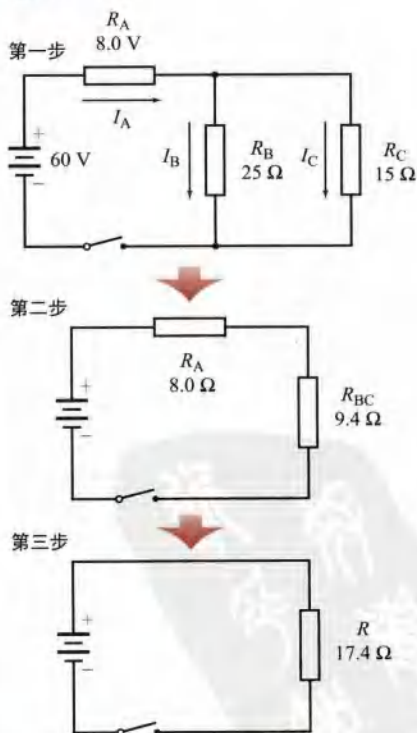
► 解题策略

混联电路

可按下列步骤来分析和求解有关混联电路问题。

1. 作出电路图。
2. 找出所有并联电阻。并联电阻具有独立的电流通路，它们两端的电压必须相同。求出替代它们的等效电阻，然后用等效电阻作出新的电路图。
3. 所有电阻（包括等效电阻）现在是否呈串联连接？串联电路只有一条电流通路，它将通过所有的电阻。求出可替代它们的新的等效电阻，作出新的电路图。
4. 重复步骤2和3，直至将电路简化为只包含一个电阻的电路。求出总电流，然后再计算通过每个电阻的电流及其两端的电压。

电路简化图



► 例题 4

混联电路 一只电吹风的电阻为 $12.0\ \Omega$ ，它与一盏电阻为 $125\ \Omega$ 的电灯并联后，再串联一个 $1.50\ \Omega$ 的电阻器，最后接在 $125\ \text{V}$ 的电源上。试求吹风机工作时通过灯泡的电流。

1 分析概括问题

- 作出包括电吹风和灯泡的混联电路图。
- 用 R_p 表示 R_A 和 R_B 的等效电阻。

已知：

$$\begin{aligned} R_A &= 125\ \Omega & R_C &= 1.50\ \Omega \\ R_B &= 12.0\ \Omega & U_{\text{电源}} &= 125\ \text{V} \end{aligned}$$

未知：

$$\begin{aligned} I &=? & I_A &=? \\ R &=? & R_p &=? \end{aligned}$$

2 求解未知量

先求并联电路的等效电阻，然后求整个电路的等效电阻，最后求电流。

$$\begin{aligned} \frac{1}{R_p} &= \frac{1}{R_A} + \frac{1}{R_B} = \frac{1}{125\ \Omega} + \frac{1}{12.0\ \Omega} \\ R_p &= 10.9\ \Omega \end{aligned}$$

将 $R_A = 125\ \Omega$, $R_B = 12.0\ \Omega$ 代入。

$$\begin{aligned} R &= R_C + R_p = 1.50\ \Omega + 10.9\ \Omega \\ &= 12.4\ \Omega \end{aligned}$$

将 $R_C = 1.50\ \Omega$, $R_p = 10.9\ \Omega$ 代入。

$$\begin{aligned} I &= \frac{U_{\text{电源}}}{R} = \frac{125\ \text{V}}{12.4\ \Omega} \\ &= 10.1\ \text{A} \end{aligned}$$

将 $U_{\text{电源}} = 125\ \text{V}$, $R = 12.4\ \Omega$ 代入。

$$\begin{aligned} U_C &= IR_C = 10.1\ \text{A} \times 1.50\ \Omega \\ &= 15.2\ \text{V} \end{aligned}$$

将 $I = 10.1\ \text{A}$, $R_C = 1.50\ \Omega$ 代入。

$$\begin{aligned} U_A &= U_{\text{电源}} - U_C = 125\ \text{V} - 15.2\ \text{V} \\ &= 1.10 \times 10^2\ \text{V} \end{aligned}$$

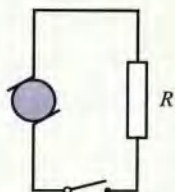
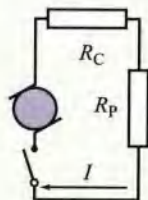
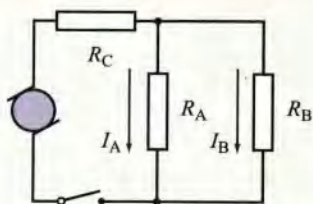
将 $U_{\text{电源}} = 125\ \text{V}$, $U_C = 15.2\ \text{V}$ 代入。

$$\begin{aligned} I_A &= \frac{U_A}{R_A} = \frac{1.10 \times 10^2\ \text{V}}{125\ \Omega} \\ &= 0.880\ \text{A} \end{aligned}$$

将 $U_A = 1.10 \times 10^2\ \text{V}$, $R_A = 125\ \Omega$ 代入。

3 验证答案

- 单位是否正确?** 电流的单位是 A，电压的单位是 V。
- 数值是否合理?** 电阻的数值大于电压的数值，所以电流应小于 $1\ \text{A}$ 。



► 练一练

- 混联电路有三个电阻，它们的功率分别为 $2.0\ \text{W}$ 、 $3.0\ \text{W}$ 和 $1.5\ \text{W}$ 。当该电路接在 $12\ \text{V}$ 的电池上时，电路中的电流是多少？
- 11 个灯泡串联后再与 2 个串联在一起的灯泡并联，假定这 13 个灯泡完全相同。它们中哪些会更亮一些？
- 如果第 26 题中有一个灯泡的灯丝烧断了，该电路会如何变化？
- 如果第 26 题中有一个灯泡短路了，该电路又会如何变化？

第23章 测评

98. **应用概念** 设计一条电路, 用48 V的电源使一打12 V的灯泡同时正常发出同样亮度的光。

- 方案A: 要求当一个灯泡烧坏时, 其他灯泡能继续发光。
- 方案B: 要求当一个灯泡烧坏时, 其他灯泡能继续正常发光。
- 方案C: 要求当一个灯泡烧坏时, 另外有一个灯泡也将被烧坏。
- 方案D: 要求当一个灯泡烧坏时, 另外有两个灯泡将被烧坏, 或者除此之外没有灯泡再被烧坏。

99. **应用概念** 电池可视为由一个理想电压源以及一个小电阻串联组成的。电池的电能由其内部发生的化学反应产生。然而, 这种反应也会导致产生无法完全消除的小电阻。在手电筒中有两节串联的电池, 如图23-25所示。每节电池的电压均为1.5 V, 内阻为 $0.200\ \Omega$, 灯泡的电阻为 $22.0\ \Omega$ 。

- 通过灯泡的电流是多少?
- 灯泡的功率是多少?
- 如果电池没有内阻, 那么功率将会增加多少?

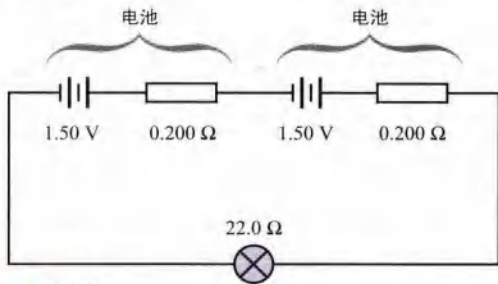


图23-25

100. **应用概念** 欧姆表由一节6 V的电池、一个可变电阻器以及一只理想的电流表串联组成。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。

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

科技写作

101. 研究基尔霍夫(G.Kirchhoff)和以他名字命名的定律。写一篇短文, 说明怎样利用基尔霍夫定律求解本章所出现的三种类型的电路问题。

日积月累

102. **飞机** 一架在静止空气中飞行的飞机, 它在前方产生的声波波前与它相距0.5 m; 在后方产生的声波波前与它相距1.5 m。已知空气中的声速为340 m/s。(第15章)

- 相对于这架飞机来说, 声波的波长是多少?
- 这架飞机所产生的声波的频率是多少?
- 飞机的航行速率为多大?
- 这架飞机正前方的观察者所测到的声波的频率是多少?
- 这架飞机正后方的观察者所测到的声波的频率又是多少?

103. 一个物体位于距离凸面镜12.6 cm处, 该凸透镜的焦距为-18.0 cm。该物体的像将落在何处?(第17章)

104. 光在一块玻璃中的传播速率为 1.75×10^8 m/s。此玻璃的折射率是多少?(第18章)

105. **单片眼镜** 在折射率为1.52的单片眼镜片上涂了一层折射率为1.4的防反射膜。如果膜层的厚度为75 nm, 那么会发生完全相消干涉的光的波长是多少?(第19章)

106. 电荷量分别为 2.0×10^{-5} C和 8.0×10^{-6} C的两个点电荷之间的相互作用力为9.0 N。它们相距多远?(第20章)

107. 在距离点电荷 Q 为 d 处测得的电场强度为 E 。说明在下列情况下, E 的值将如何变化。(第21章)

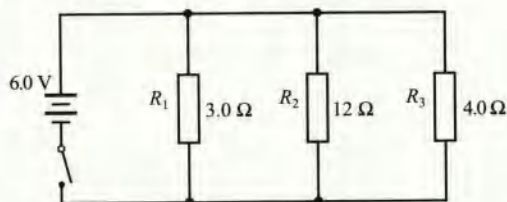
- d 变为原来的3倍
- Q 变为原来的3倍
- d 和 Q 都变为原来的3倍
- 试探电荷 q 变为原来的3倍
- d 、 Q 以及 q 都变为原来的3倍

108. 在电源电压为12 V的电路中, 电流从0.55 A降到0.44 A。试计算电阻的变化。(第22章)

标准化测试

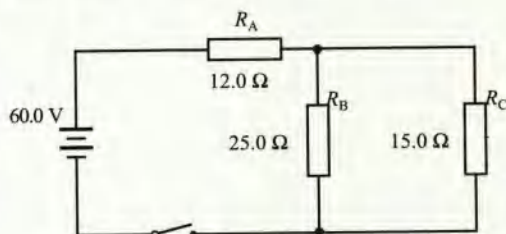
选择题

根据下面的电路图，回答第1~3题。



1. 电路的等效电阻为 ()
 (A) $\frac{1}{9} \Omega$ (B) 1.0Ω
 (C) 1.5Ω (D) 19Ω
2. 电路中的电流为 ()
 (A) 0.32 A (B) 0.80 A
 (C) 1.2 A (D) 4.0 A
3. R_3 中的电流为 ()
 (A) 0.32 A (B) 1.5 A
 (C) 2.0 A (D) 4.0 A
4. 接在 R_2 两端的电压表的示数为 ()
 (A) 0.32 V (B) 1.5 V
 (C) 3.8 V (D) 6.0 V

根据下面的电路图，回答第5~6题。



5. 电路的等效电阻为 ()
 (A) 8.42Ω (B) 10.7Ω
 (C) 21.4Ω (D) 52.0Ω

6. 电路中的电流为 ()

(A) 1.15 A (B) 2.35 A
 (C) 2.80 A (D) 5.61 A

7. 尼娜将8个 12Ω 的灯泡串联接在一起，该电路的总电阻为 ()

(A) 0.67Ω (B) 1.5Ω
 (C) 12Ω (D) 96Ω

8. 下列说法正确的是 ()

(A) 一般的电流表的电阻非常大
 (B) 一般的电压表的电阻非常小
 (C) 电流表的电阻为零
 (D) 电压表会使电流发生较小的变化

拓展题

9. 查理斯正在筹备一场橄榄球赛前夜的爵士音乐晚会。为此，他将15个大灯泡接在他的 12.0 V 的汽车电池上，然而接好后这些灯泡并不发光。电流表显示，此时通过这些灯泡的电流为 0.350 A 。假定使灯泡发光的电流为 0.500 A ，那么查理斯必须从该电路中撤去几个灯泡？

10. 串联电路包括一节 8.0 V 的电池和4个电阻分别为 $R_1 = 4.0 \Omega$ 、 $R_2 = 8.0 \Omega$ 、 $R_3 = 13.0 \Omega$ 和 $R_4 = 15.0 \Omega$ 的电阻器。试计算该电路中的电流和电功率。

✓ 考试小贴士

休息一下

如果测验过程中有机会可以休息一会儿或者站起来活动一下，你就要抓住这个机会。站起来活动一下会使你的精力充沛些，头脑清醒些。在短暂的休息时，不要去想考试的事，这样你就能更精神饱满地进行随后的测试。

第24章

磁场

内容提要

- 确定各磁极间的吸引和排斥作用。
- 建立磁与电之间的联系。
- 了解电磁学在实际中的应用。

学习本章的意义

磁学是许多科技领域的基础。计算机中的信息就是以磁的形式储存在硬盘中的。

轰击原子 如图所示，加速器的周围环绕着超导磁体。高能粒子通过的管体中心区域没有磁场。如果粒子偏离中心区，就会受到磁场的推力，从而使它们始终沿着中心区运动。

想一想 ▶

磁作用力会引起粒子产生加速度吗？它能否使任何粒子做加速运动？

物理  在线
physicspp.com



起步实验



磁场的作用方向

问题

磁场中作用于磁性物体上的力沿着什么方向？

步骤

1. 将一根条形磁铁水平放置在你的面前，让北极朝向左侧。
2. 将第二根条形磁铁水平放置在第一根条形磁铁的旁边，两者在同一直线上，间隔 5.0 cm。使第二根磁铁的北极也朝向左侧。
3. 将你的实验布置画在一张纸上，不要忘记标明磁铁的极性。
4. 将一枚指南针放置在这两根条形磁铁之间，画出指南针的N极所指的方向。
5. 先后将指南针移至其他地方，画出每次指南针的方向。总共画出15~20个箭头。
6. 将两个北极面对面放置，重复步骤3~5。

分析

指南针的红色端在磁铁的磁极附近指向何处？背离何处？为什么有些箭头并非指向或背离磁极？

理性思维 你所得到的用箭头表示的图就是一个磁场图。回忆一下重力场和电场，然后对磁场作出定义。



24.1 永磁铁和暂时性磁铁

人类发现磁铁至今已有2 000多年的历史了。大约900多年前，中国人就利用磁铁制成了指南针，并将其应用于航海中。世界上的科学家早期所研究的是被称为磁石的有磁性的矿石。现在，磁铁在人们的日常生活中起到了越来越重要的作用。发电机、电动机、电视显像管、阴极射线管、磁带录音机以及计算机的硬盘等，其中都应用了电流的磁效应。

如果你使用过指南针，或者用磁铁吸起过铁钉或回形针，那么你就会观察到某些磁效应。你也可以将导线绕在一根铁钉上，然后将它连接到电池上，制成一个电磁铁。假如你用两根磁铁来做这个实验，那么磁铁的性质就会更加明显。为了更好地研究磁的性质，你可用如下页图24-1所示的那些磁铁来做一些实验。

学习目标

- 描述磁铁的性质和物质磁性的起源。
- 比较各种磁场。

关键术语

极性
磁场
磁通量
第一类右手定则
螺线管
电磁铁
第二类右手定则
磁畴



■ 图24-1 在大多数五金店里，都可以买到普通的磁铁。

磁铁的一般特性

将一根磁铁用线悬挂起来，如图24-2a所示。如果你使用的是条形磁铁，那么你就需要用支架使它保持水平。当磁铁静止时，它是否总是朝着某个特定的方向呢？将磁铁转到另一个方向，然后再将它释放，此时它是否又会转回到原来那个方向上？如果是，那个特定的方向又是指向哪里呢？

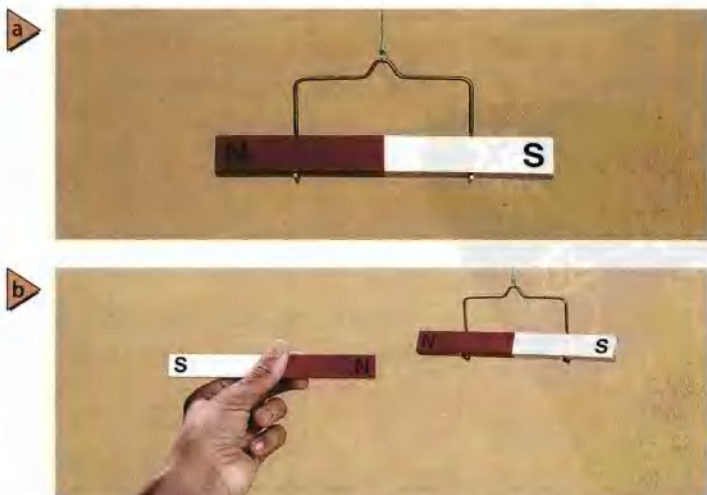
通过实验你会发现，磁铁总是朝着南北方向的。将磁铁指向北极的一端用字母N标记，作为参考。从这个简单的实验可以看出，磁铁具有**极性 (polarized)**。也就是说，它的两端是不同的，且具有相反的性质。磁铁的一端总是在“寻找北极”，另一端则“寻找南极”。指南针不过是一个可以自由转动的小磁体而已。

再吊起一根磁铁，然后像你对待第一根磁铁所做的那样，确定并标出它指北的那一端。现在，将另一根磁铁靠近它，如图24-2b所示，观察这两根磁铁的相互作用。如果将两个指北的N极彼此靠近，会发生什么情况？再尝试将两个S极靠近，看看情况又是怎样。最后，当你将两个相反的极（即一根磁铁的N极和另一根磁铁的S极）彼此靠近时，又发生了什么情况？

你会看到，当两根磁铁的N极靠近时，它们相互排斥；将它们的S极靠近时，它们也相互排斥；然而，当一根磁铁的N极与另一根磁铁的S极靠近时，两者却相互吸引。因此可以得出结论：同性磁极相互排斥，异性磁极相互吸引。磁铁总有两个相反的磁极。若将磁铁断成两块，它就变成两块小磁铁，且每块仍然有两个磁极。科学家一直设法将磁铁的N极和S极分开，但至今为止，无论是在宏观还是微观尺度上，这个尝试都没有获得成功。

磁体总是使自己沿着南北方向指向。据此你可能会猜想，也许地球本身就是一个巨大的磁体。因为异性磁极相互吸引，而指南针的N极总是指向北方，所以地球这个磁体的S极必然在它的地理北极附近。

■ 图24-2 如果用线将磁铁悬挂起来，它将会与地球的磁场方向平行，且N极指向北方(a)。如果此时用另一根磁铁的N极靠近这根悬挂着的磁铁的N极，那么悬挂着的磁铁将被排斥(b)。





■ 图24-3 普通铁钉可被磁铁所吸引。在此过程中，铁钉有了磁性，这一点可从接触磁铁的铁钉能够吸引其他金属物件上看出。不过，如果将磁铁移开，那么这枚铁钉将失去部分磁性，原本被吸在铁钉上的一些物件就会掉落下来。

磁铁怎样影响其他物质 你可能从孩提时代就已发现，磁铁能吸引铁钉、大头针、回形针以及许多其他金属物体。然而，与两个磁铁间的相互作用情况不同，磁铁的任何一极都能吸引这些物体的任何一端。你能否对这个现象作出解释？尝试做以下这个实验：首先，用磁铁接触一枚铁钉；然后，让这枚铁钉接触其他较小的金属物体，如图24-3所示。此时铁钉也变成了磁铁，这是因为磁铁使铁钉磁化了。铁钉的磁化方向取决于磁铁的极性。如果将磁铁移走，铁钉就会失去部分磁性，不再对其他金属物体具有很强的吸引力了。

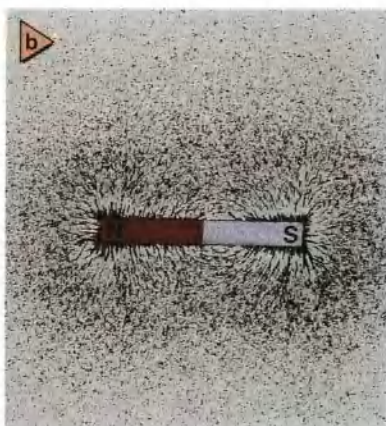
如果用一块软铁（碳的成分很低的铁）代替铁钉重复如图24-3所示的实验，你会发现，当磁铁移走后，这块软铁将完全失去吸引其他金属物体的能力。这表明，软铁是一种暂时性磁铁。与软铁不同，铁钉中含有某些材料，它们使得它变得较硬，并且能在永磁铁移去后保留部分磁性。

永磁铁 要使永磁铁产生磁性，可采用使铁钉生磁的那种方法。由于磁铁材料具有特殊的微观结构，因此它所感应的磁性能永久保持。许多永磁铁是由称为铝镍钴V的铁合金材料制成的，其中包含了铝、镍、钴等成分。各种稀土元素，如铈和钕等，可用来制成磁性非常强的小型永磁铁。

永磁铁周围的磁场

当你用两根磁铁做实验时，你会发现磁铁间的作用力，包括吸引力和排斥力，不仅当它们彼此接触时存在，而且当它们隔开一定距离时也存在。你已经知道，超越一定距离作用的电场力和万有引力可分别用电场和引力场进行描述，类似地，磁场力可以用磁铁周围的磁场来描述。**磁场 (magnetic field)** 也是一种矢量场，它存在于磁场力发生的空间中。

■ 图24-4 将磁铁悬挂于放有铁屑的甘油中，便可清楚地观察到三维空间中条形磁铁周围磁场的分布情况(a)。而较之更为方便的方法是将撒有铁屑的纸放在一根条形磁铁上面，这样就可以显示出磁场的二维图象了(b)。



磁铁周围的磁场可用铁屑显示出来。细小的铁屑通过感应而变成一个个小磁体，在磁场中，它们就像小磁针那样转动，直到它们都沿着平行于磁场的方向为止。如图24-4a所示为甘油中的铁屑在条形磁铁周围的分布情况，由此你可以看到磁场的三维图象。如图24-4b所示为用铁屑显示的磁场的二维图象，它将有助于你直观地了解磁场线。铁屑也可用来显示由于其他物体的引入而引起的磁场变化情况。

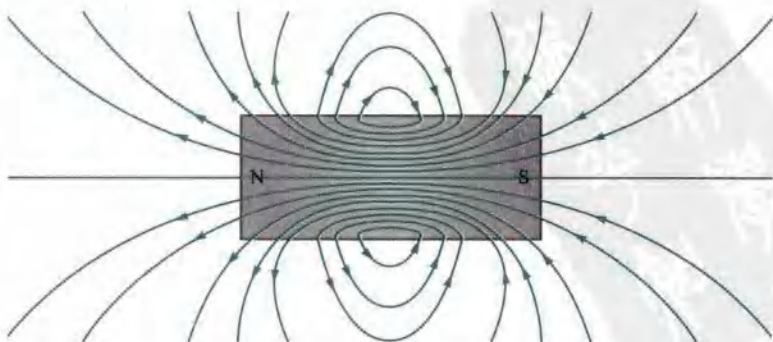
磁感线 与电场线一样，磁感线也是一种假想的线，它有助于你形象化地想象实际存在的磁场，同时它还提供了量度磁感应强度的方法。通过某一平面的磁感线的条数称为**磁通量(magnetic flux)**。单位面积的磁通量与磁场的磁感应强度成正比。正如你在图24-4中看到的那样，磁感线在两极附近最为密集，这说明那里的磁通量最大，磁场也最强。

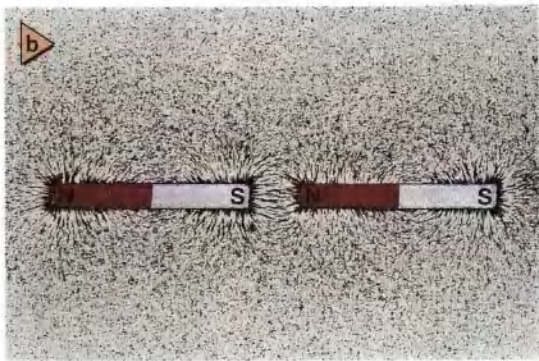
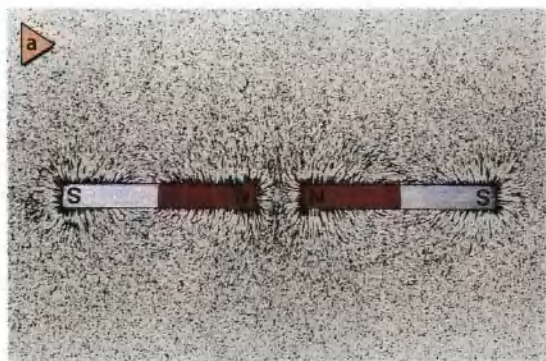
磁感线的方向定义为放置 in 磁场中的小磁针的N极所指的方向。在磁铁外部，磁感线由磁铁的N极穿出，进入S极，如图24-5所示。那么，在磁铁的内部，情况又如何呢？因为不存在磁感线可发出或到达的孤立的磁极，所以在磁铁内部，磁感线总是从S极到N极，从而形成闭合的回路。

颜色惯例

- 正电荷用红色表示。
- 负电荷用蓝色表示。
- 电场线用靛蓝色表示。
- 磁感线用绿色表示。

■ 图24-5 磁感线可用闭合曲线形象化地表示出来。它们从N极出发，然后进入同一根磁铁的S极。





■ 图24-6 由纸面上铁屑的排列所显示的磁感线清晰地表明，同性磁极相互排斥(a)，异性磁极相互吸引(b)。在同性磁极间，铁屑无法形成连续的线。但是在N极和S极之间，铁屑显示出磁感线在两个异性磁极间是直接相连的。

由两根条形磁铁产生的磁场是什么样的呢？你可在一张纸上放两根磁铁，然后向纸上撒铁屑，这样就能显示出它们的磁场。如图24-6a所示为两个同性磁极间的磁感线分布情况。作为对比，如图24-6b所示为两个靠近的异性磁极（N极和S极）的磁感线的图像。从铁屑的分布可以看出，两个异性磁极间的磁感线直接从一个磁极到达另一个磁极。

磁场对磁性物体的作用力 磁场对其他磁铁施加作用力。一根磁铁的N极所产生的磁场将沿磁感线方向推开另一根磁铁的N极；而同样的磁场则将沿着与磁感线相反的方向吸引另一根磁铁的S极。于是，第二根磁铁就会像指南针那样趋向于场的方向。

将由铁、钴、镍制成的小磁针放入永磁铁的磁场后，小磁针内部的磁感线将变得非常密集。从磁铁的N极发出的磁感线进入小磁针的一端，然后通过小磁针从另一端离开。这样，小磁针最靠近磁铁N极的一端就成为小磁针的S极，因此小磁针将被磁铁吸引。

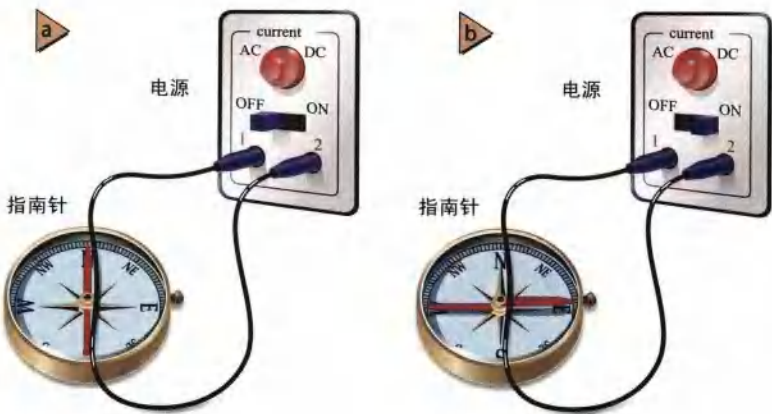
► 练一练

- 如果你的双手各拿一根条形磁铁，然后将它们相互靠近。指出在下列情况下，它们之间的力是吸引力还是排斥力。
 - 使两个N极彼此靠近。
 - 使N极和S极彼此靠近。
- 如图24-7所示为5个环形磁铁逐个浮起的情景，最上面的那个环形磁铁的N极位于它的上表面。其他每个磁铁的上表面分别是什么极？
- 如图24-3所示，磁铁能吸引铁钉，铁钉又能吸引许多小图钉。如果永磁铁的N极在它的左端，那么图中铁钉的S极是哪一端？
- 为什么指南针有时会出现指向错误的情况？



■ 图24-7

■ 图24-8 通过类似于图(a)所示的实验, 奥斯特利用通电导线发现了电和磁之间的联系(b)。

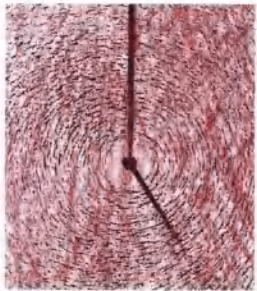


电流的磁效应

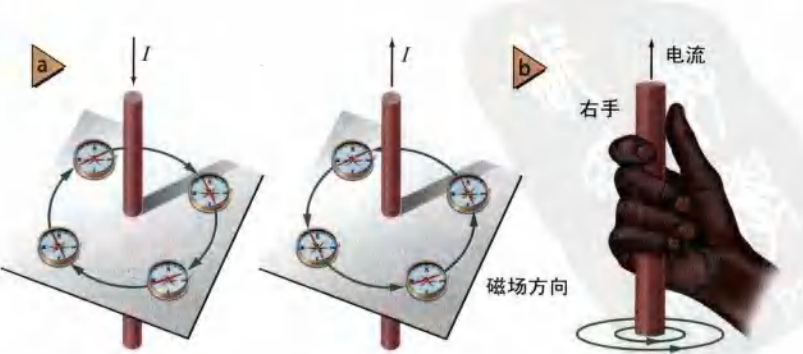
1820年, 丹麦物理学家奥斯特(H. Oersted)做了著名的导线电流实验。奥斯特把一根与电路相连的导线放在一枚小磁针的上方, 如图24-8a所示。他原本以为小磁针会沿导线或导线中电流的方向指向, 但是令他惊奇的是, 小磁针居然转了起来, 并最终指向垂直于导线的方向, 如图24-8b所示。这表明, 小磁针在垂直于导线电流的方向上受到了力的作用。奥斯特还发现, 当导线中没有电流时, 小磁针不再受到力的作用。

位于通电导线附近的小磁针所发生的偏转必然是电流所产生的磁场作用的结果。只要让通电导线竖直穿过一块撒有铁屑的水平纸板, 就可以清楚地显示出通电导线周围磁场的分布情况。实验发现, 当导线中通过电流时, 纸板上的铁屑将环绕着这根导线形成一个个同心圆, 如图24-9所示。

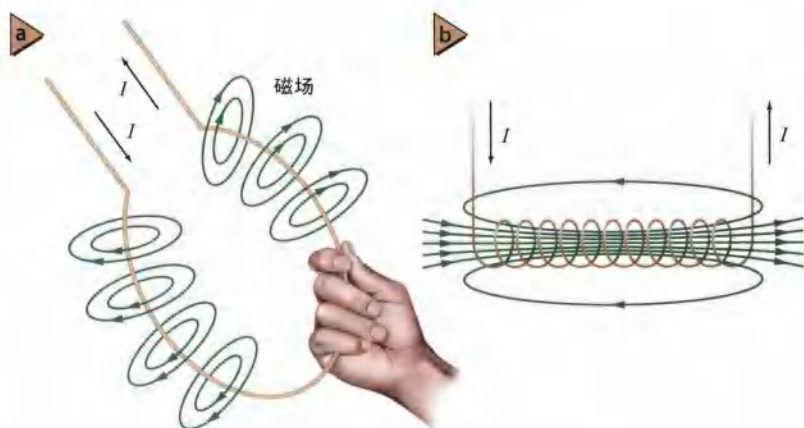
这种环线表明, 通电导线周围的磁感线呈闭合回路, 这和永磁铁的磁感线的情况是一样的。通电直导线周围磁场的磁感应强度与导线中的电流成正比, 而与离开导线的距离成反比。磁感线的方向可用小磁针来显示。如果将导线中的电流反向, 如图24-10a所示, 小磁针也反向。



■ 图24-9 通过一块纸板的导线中的电流所产生的磁场, 可由铁屑绕电流的一个个同心圆显示出来。



■ 图24-10 如果通电直导线中的电流反向, 那么电流产生的磁场也反向(a)。通电直导线周围的磁场的方向遵循第一右手定则(b)。



■ 图24-11 通电螺线管的磁场可借助第一类右手定则模拟出来(a)。通电螺线管的磁场是所有单个线圈产生的磁场的叠加(b)。

你可以用**第一类右手定则 (first right-hand rule)***来判断直线电流的磁场相对于电流的方向。想象你用右手握住导线，如图24-10b所示，使拇指指向电流方向，那么环绕导线的其他四指所指的方向就是磁场的方向。

线圈附近的磁场 一个圆环线圈中的电流所产生的磁场将环绕着该圆环回路。如图24-11a所示，对回路的任一部分应用右手定则可以发现，圆环内磁场的方向都是一致的，这个磁场总是垂直穿出纸面；而圆环外的磁场则总是穿入纸面。如果将导线环绕几圈，就构成线圈。通电后，环绕各圆环的磁场在线圈内的方向相同。一个包含有许多圆环的长线圈称为**螺线管 (solenoid)**，如图24-11b所示。螺线管中各个线圈所产生的磁场叠加，形成较强的总磁场。

通电线圈所产生的磁场与永磁铁的磁场类似。将通电线圈靠近一根悬挂着的永磁铁时，线圈的一端将与磁铁的N极相斥，因此通电线圈也有一个N极和一个S极，所以它也是一种磁铁。由于电流通过线圈而形成的磁铁称为**电磁铁 (electromagnet)**。电磁铁所产生的磁场的磁感应强度与线圈中的电流成正比。各线圈产生的磁场的大小和方向都相同，所以增加圈数就能增大磁场的磁感应强度。

在线圈里放入一根铁棒或铁芯，也能增大电磁铁的强度，这是因为线圈的磁场能使铁芯磁化，从而产生“暂时性”磁场。这种情况与将永磁铁靠近金属使它磁化的情况类似。

你可以用**第二类右手定则 (second right-hand rule)**来判断电磁铁产生的磁场相对于电流的方向。想象你用右手握住线圈，如图24-12所示，让四指沿电流方向环绕线圈，那么伸直的拇指指向的便是电磁铁的N极方向。

物理学的应用

► **电磁铁** 工厂中搬运钢铁用的起重机常采用电磁铁。一块这样的电磁铁的工作电压为230 V，工作电流为156 A，它的起重质量可超过11 300 kg。

■ 图24-12 可用第二类右手定则判断电磁铁的极性。



*译者注：本书涉及的四类右手定则，与国内现行教材的提法有所不同。

► 练一练

- 将一根长通电直导线南北放置。
 - 放在导线上方的一枚小磁针，如果其N极指向东面，那么导线中的电流方向如何？
 - 如果此时将这枚小磁针放在导线下方，它又将如何指向？
- 指出距离通电直导线1 cm处的磁场的磁感应强度与下列各处磁场的磁感应强度相比如何。
 - 距离导线2 cm处
 - 距离导线3 cm处
- 一位同学将导线绕在一根铁钉上，然后将它与电池连接，制成电磁铁，如图24-13所示。与电池接通后，铁钉的N极在哪一端？是尖端还是尾端？
- 假设你有一个线圈、一根玻璃棒、一根铁棒以及一根铝棒。你用哪些材料做成的电磁铁可提起钢制物体。说明理由。
- 如果第8题中的电磁铁已能很好地工作，但是你想利用电位计作为可变电阻器，制作一个可调节强度的电磁铁。这可能吗？试说明理由。

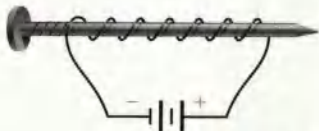


图24-13

磁性物质的微观结构

回顾一下，当你将铁、镍或钴靠近一块磁铁时，这些材料就有了磁性，有了N极和S极。但是，这种磁性是暂时的，它的极性取决于外磁场的方向。当外磁场撤去后，这些材料的磁性也会随之消失。铁、镍、钴这三种材料的性质在许多方面都与电磁铁类似，它们具有称为铁磁性的性质。

19世纪初叶，法国科学家安培（A.Ampere）注意到，电磁铁的磁效应是电流通过它的闭合回路的结果，于是他提出了关于铁磁性理论来解释这个现象。安培认为，条形磁铁的磁效应是由存在于其中的许多微小的环形电流所产生的。

磁畴 虽然安培推论的细节是错误的，但是他的基本观点是正确的。原子中的每个电子都会产生类似于电磁铁的作用。相邻一群原子中的电子的磁场会朝着同一方向，形成**磁畴（domain）**。尽管一个磁畴可能包含多达 10^{20} 个原子，但它还是非常小，通常只有 $10 \sim 1\,000\ \mu\text{m}$ 。因此，即使在极小的铁块中，也包含有大量的磁畴。

当铁块不处于磁场中时，磁畴的方向是杂乱无章的，它们的磁场彼此相消。但是若将铁块放入磁场，磁畴就会趋向于外磁场的方向排列，如图24-14所示。对于软铁，由于它没有磁畴结构，所以当磁场撤去后，各环形电流很容易回复到无序排列状态；而永磁铁是用铁和其他物质的合金制成的，因此当外磁场撤去后，它仍能保持磁畴的排列方向。

● 迷你实验

三维磁场



在一枚铁钉的中部系一根线，使它水平悬挂。在系线处贴一小条胶带，以防它滑动。然后，将铁钉放进一只线圈内。接通电源，然后关闭电源，取出铁钉。用线将铁钉悬挂起来。

1. **预测** 将这枚铁钉移近永磁铁时，会发生什么情况。

2. **检验** 你的预测。

分析与结论

3. 有何证据证明铁钉被磁化了？

4. 作出铁钉周围磁场的三维图像。

记录工具 电磁铁可用于制造录音机和录像机的磁头。录音机和录像机将需要记录的声音和图像变为电信号，这种电信号在磁头中产生磁场。当涂有大量微小磁性材料颗粒的薄塑料带（即磁带）通过磁头时，磁性材料颗粒中的磁畴就会按照磁头的磁场定向排列。磁畴的方向取决于磁头中电流的方向，因此声音和图像就被记录在了磁带上。所以，必须选用能长久保持磁畴方向的材料来制作磁带，只有足够强的磁场才能再次改变这些材料的磁畴方向。当磁带回放，磁头通过磁性颗粒时，就会有信号电流产生，它们经放大后被传至扬声器或耳机中。如果要用已用过的录音带记录新的声音，就需要通过抹音磁头产生急剧变化的磁场，使磁带上磁性颗粒中磁畴的方向再次无序排列。

地球的磁性历史 含有铁的岩石记录了历史上地球磁场方向的改变情况。海底的岩石是岩浆从海底裂缝中喷出时形成的，当它们冷却时，就会沿着当时地球磁场的方向发生磁化。由于海底的扩展，远离裂缝的岩石比裂缝附近的岩石更为古老。科学家在研究了海底的岩石后惊奇地发现，不同时期岩石中的磁化方向是不同的。根据这些数据他们断言，地球的磁极曾多次发生过交替。地球磁场的起源目前尚不清楚，地球磁场的方向究竟能否反转，对于人类来说更是一个还未解开的谜题。

a



b



图24-14 当铁(a)变成磁铁时，它的磁畴方向变为一致(b)。

本节复习题

10. **磁场** 磁场是实际存在的，还是仅仅是一种科学模型？
11. **磁场力** 辨认一下你的周围所存在的磁作用力。你能否演示这些力的效应？
12. **磁场** 将一根通电导线穿过撒满铁屑的纸板，铁屑的分布显示了导线周围磁场的分布情况。将第二根导线靠近第一根导线并与之平行，两根导线中的电流大小相等。如果两根导线中的电流的方向也相同，那么第一根导线的磁场会受到怎样的影响？如果它们的电流方向相反，情况又会怎样？
13. **磁场方向** 描述用于判定通电直导线周围磁场方向的右手定则。
14. **电磁铁** 在电磁铁的上方放一块玻璃板，然后将铁屑撒在上面，你会发现铁屑会形成一定的图样。将线圈的两端分别与电源的正负极连接，再做一次实验。两次实验的结果有什么不同？请说明理由。
15. **理性思维** 设想一个玩具中有两根上下平行的水平金属棒。
 - a. 上面的棒悬浮在下面棒的上方。但是，若将上面的棒反向，它就会落到下面的棒上。试说明之所以会发生这种情况的原因。
 - b. 假如上面的棒丢失了，换用另一根棒。此时，无论沿着什么方向放置，它总会落到下面这根棒上。这根代用棒是用何种材料制成的？

24.2 磁场产生的力

► 学习目标

- 建立磁感应强度与磁场中通电导线受力方向的联系。
- 求解有关通电导线和运动电荷在磁场中的受力问题。
- 描述电动机的工作原理。

► 关键术语

第三类右手定则
灵敏电流计
电动机
转子

在上一节你已经知道，安培在研究磁铁的性质时注意到，电流跟永磁铁一样，也能产生磁场。因为磁场会对永磁铁施加作用力，由此安培推论，放置在磁场中的通电导线也会受到力的作用。

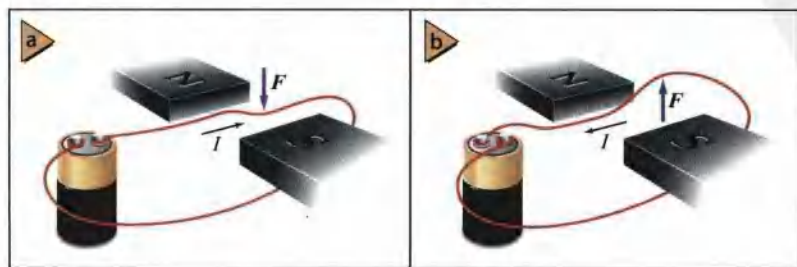
电流在磁场中受到的力

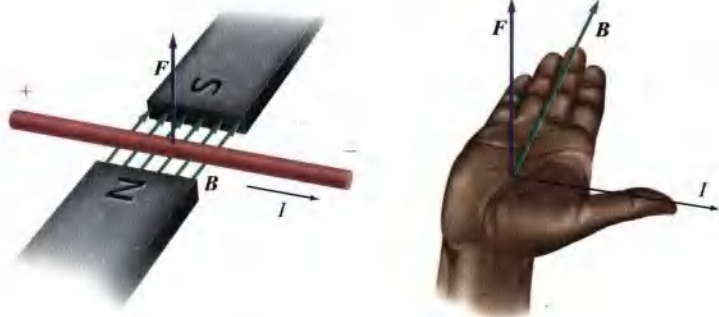
通电导线在磁场中受到的力的作用可通过如图24-15所示的实验进行演示。电源产生的电流通过位于两块条形磁铁之间的一根导线，两块磁铁之间的磁场的方向从N极到S极。当通有电流时，导线就会受到力的作用。作用在导线上的力的方向取决于电流的方向，可能向下，如图24-15a所示；也可能向上，如图24-15b所示。法拉第(M. Faraday)发现，作用在导线上的力与磁场的方向和电流的方向均垂直。

力的方向 法拉第对通电导线受力的描述并不完善，因为这个力可以向上，也可以向下。磁场中通电导线受力的方向可通过第三类右手定则(third right-hand rule)确定，如图24-16所示。磁感应强度用 B 表示，它的方向用一系列箭头表示。为了应用右手定则，伸出你的右手，使拇指与其余四个手指垂直，并且都与手掌在一个平面内；让四指指向磁场方向，拇指指向电流方向，那么你手掌的朝向就是作用在通电导线上的力的方向。这里需要指出的是，在某些情况下，当代表方向的箭头穿入或穿出纸面时，其所指方向分别用叉和点表示。其中，叉可想象为箭的尾部，点可想象为箭的头部。

在奥斯特发现通电导线产生的磁场的方向与导线中的电流相垂直后不久，安培证实了两根通电导线之间也彼此存在力的作用。如图24-17a所示为每根通电导线周围磁场的方向，它们都可用第一类右手定则确定。如果再对每根导线应用第三类右手定则，你就会发现，它们确实会彼此吸引。如图24-17b所示为电流相反时的情况。当两根导线中的电流相反时，它们之间存在排斥力。

■ 图24-15 磁场中的通电导线将受到力的作用，这个力的方向取决于电流的方向，可能向下(a)，也可能向上(b)。





■ 图24-16 在已知电流和磁场的方向，求力的方向时，可应用第三类右手定则。

力的大小 与磁场垂直的通电导线所受到的磁场力是可以确定的。实验表明，这种作用在导线上的力 F 的大小与磁感应强度 B 、导线中的电流 I ，以及这根导线在磁场中的长度 L 成正比。这四个量的关系如下：

磁场中通电导线所受的力 $F = ILB$

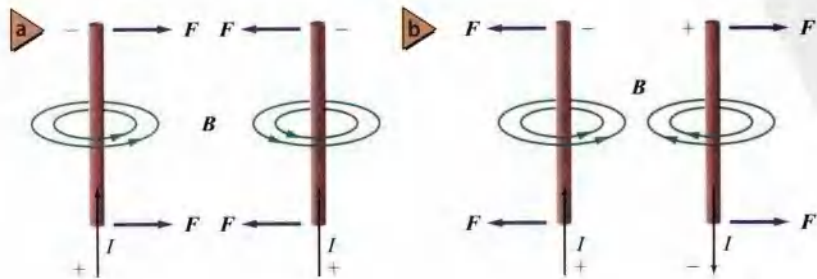
磁场中通电导线所受的力等于磁感应强度、电流和导线长度的乘积。

磁感应强度 B 的单位是特斯拉，用符号T表示。 $1\text{ T} = 1\text{ N/A} \cdot \text{m}$ 。

注意，如果导线与磁场不垂直，那么在上式中需引入一个因子： $\sin \theta$ ，其结果为 $F = ILB \sin \theta$ 。当导线平行于磁场时， $\theta = 0^\circ$ ，此时力 $F = 0$ ；当 $\theta = 90^\circ$ 时，此式便简化为 $F = ILB$ 。

扬声器

扬声器就是应用通电导线在磁场中受到作用力这一原理制成的，它将电能转化成声能。扬声器的制作方法很简单：将细导线绕在锥型纸盆上，然后放置在磁场中。放大器输出的电流通过线圈时，就会驱动扬声器工作。电流的方向每秒变化20~20 000次，具体取决于声音的高低。由于线圈处于磁场中，因此它将受到磁场力的作用。而随着电流方向的变化，线圈不断被推拉，导致纸盆发生振动，从而在空气中产生了声波。



■ 图24-17 当两个导体中的电流方向相同时，它们相互吸引(a)；当方向相反时，它们相互排斥(b)。

► 例题 1

计算磁感应强度 在匀强磁场中有一根通有5.0 A电流的直导线，导线和磁场的方向垂直。假定这根导线在磁场中的长度为0.10 m，所受的磁场力为0.20 N，试求该磁场的磁感应强度。

1 分析概括问题

- 画出导线，用箭头标出电流和磁感线的方向，然后标出 B 和作用在导线上的力 F 。
- 用第三类右手定则确定导线的受力方向。磁场、导线和力互成直角。

已知：

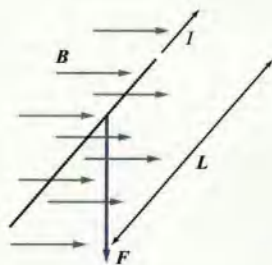
$$I = 5.0 \text{ A}$$

$$L = 0.10 \text{ m}$$

$$F = 0.20 \text{ N}$$

未知：

$$B = ?$$



2 求解未知量

因为 B 是一个常量，且 B 与 I 相互垂直，所以可用公式 $F = ILB$ 求解 B 。

$$F = ILB$$

求解 B 。

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

$$= \frac{0.20 \text{ N}}{5.0 \text{ A} \times 0.10 \text{ m}}$$

将 $F = 0.20 \text{ N}$ ， $I = 5.0 \text{ A}$ ， $L = 0.10 \text{ m}$ 代入。

$$= 0.40 \text{ N}/(\text{A} \cdot \text{m}) = 0.40 \text{ T}$$

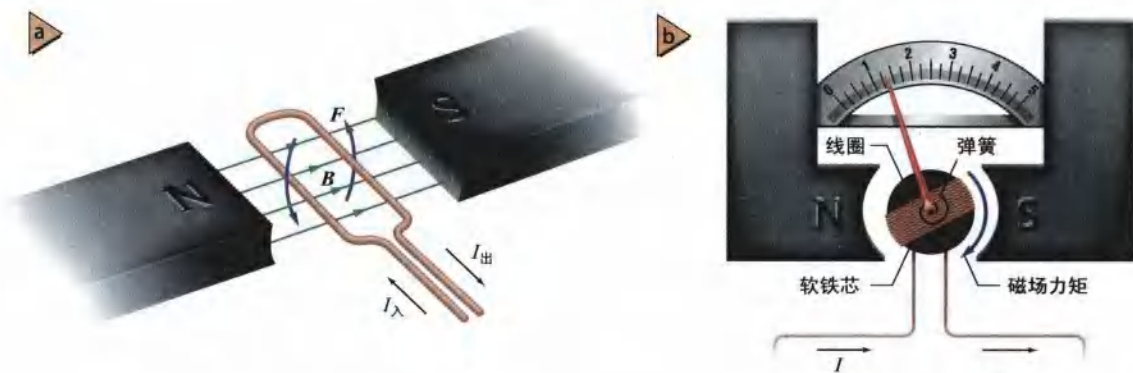
B 的大小为0.40 T，方向自左向右，且与 I 和 F 相垂直。

3 验证答案

- **单位是否正确？** 答案中的单位是T，这正是磁感应强度的单位。
- **数值是否合理？** 对于这样大小的电流、长度和力来说，需要相当大的磁感应强度。

► 练一练

16. 用来判断与磁场相垂直的通电导线所受作用力的方向的法则叫什么？为了应用这一法则，需已知哪些要素？
17. 一根长0.5 m的直导线通过8.0 A的电流，它的方向与磁感应强度为0.40 T的磁场的方向垂直。作用在这根导线上的力为多大？
18. 一根长75 cm的直导线通过6.0 A的电流。当它与磁场的方向垂直时，所受的力为0.60 N。该磁场的磁感应强度为多大？
19. 一根长40.0 cm直铜导线通过6.0 A的电流，已知它重0.35 N。为了使磁场对它的作用力与重力平衡，其磁感应强度应为多大？
20. 在磁感应强度为0.49 T的磁场中，要使一根与磁场方向垂直的长度为10.0 cm的通电导线上产生0.38 N的力，导线中的电流应为多大？



■ 图24-18 当有电流通过磁场中的线圈时，线圈会发生转动(a)。在灵敏电流计中，线圈转过的角度与电流的大小成正比(b)。

灵敏电流计

根据线圈在磁场中受到的作用力，可以测量出电流的大小。例如，将一个通电小线圈放置在永磁铁产生的强磁场中，如图24-18a所示，这样就可以测量非常微弱的电流。电流从线圈的一端流入，从另一端流出。对线圈各侧应用第三类右手定则，你会发现，如果一边受到向下的力，那么相应的对边就会受到向上的力，这样就会产生一个使线圈转动的力矩。这种作用在线圈上的力矩的大小与线圈中的电流成正比。这就是**灵敏电流计 (galvanometer)** 的工作原理。灵敏电流计是一种用来测量非常微弱的电流的仪器，它在改装后也可作为电流表和电压表使用。

灵敏电流计中的小弹簧会产生一个与电流作用相反的力矩，线圈转过的角度与电流的大小成正比。因此，只要根据已知的电流通过时线圈转过的角度划分仪器刻度，如图24-18b所示，就可用这只灵敏电流计来测量未知电流了。

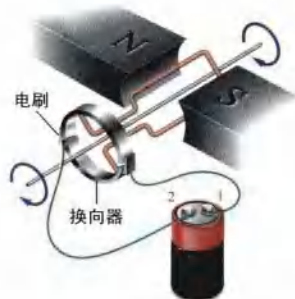
许多灵敏电流计只要有像 $50\ \mu\text{A}$ ($50 \times 10^{-6}\ \text{A}$) 这样的小电流流过，它的刻度就会满偏。灵敏电流计线圈的电阻大约是 $1\ 000\ \Omega$ 。为了测量较大的电流，需将灵敏电流计改装成电流表。具体做法是：在灵敏电流计上并联一个电阻小于灵敏电流计阻值的电阻器，如图24-19a所示。因为电流与电阻成反比，所以电流中的大部分 I_s 将通过那只称为分流器的并联电阻器，此时只有很小的电流 I_m 通过灵敏电流计。分流器的电阻按所需的量程来确定。

灵敏电流计也可改装成电压表。为此，你需要在灵敏电流计上串联一个称为分压器的电阻器，如图24-19b所示。此时灵敏电流计测量的是通过分压器的电流，这个电流可表示为 $I = \frac{U}{R}$ ，其中 U 是电压表两端的电压， R 是灵敏电流计和分压器电阻的等效电阻。假定你要使电压表在测量 $10\ \text{V}$ 时指针达到满偏刻度，那么你就选用一个作为分压器的电阻，使电压在 $10\ \text{V}$ 时流经灵敏电流计的电流恰好达到满偏。

■ 图24-19 灵敏电流计可改装成电流表(a)，也可改装成电压表(b)。



■ 图24-20 在电动机中，半环状换向器可以使线圈中的电流方向发生改变，从而使线圈可作360°的转动。



电动机 你已经看到，灵敏电流计中线圈转过的角度不能大于180°。线圈受到的向上推动右边、向下推动左边的力只能使线圈到达竖直位置。此时，线圈所受的力依然向上和向下，与线圈平行，所以线圈无法再进一步转动了。

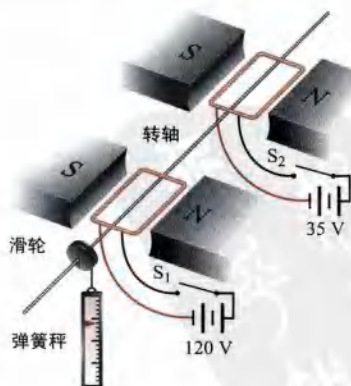
那么，有什么方法能够使线圈在到达竖直位置后继续转动呢？如图24-20所示，你可以在此时使通过线圈的电流反向。为了使电流反向，可采用一种由分成两个半环状的换向器和与之接触的电刷组成的装置。与换向器接触的电刷一般用石墨制成，它使电流能够进入线圈。当线圈及换向器转动时，这种半环装置使得每当线圈抵达竖直位置，换向器就会交换电刷，从而改变线圈中的电流方向。这样，线圈两边的受力方向就会改变，从而使线圈可以继续转动。这个过程每半圈重复一次，以保证线圈在磁场中能连续转动。**电动机 (electric motor)** 就是利用这种方法将电能转化为转动动能的。

如图24-20所示只画出了一匝线圈，但在实际的电动机中，称为**转子 (armature)**的部件是由许许多多匝线圈绕制在铁芯上构成的。转子受到的净力与 $nILB$ 成正比，其中 n 是绕制在转子上的线圈的总匝数， B 是磁感应强度， I 是电流， L 是在磁场中运动的每匝线圈两边的长度。磁场可由永磁铁产生，也可由称为励磁线圈的电磁铁产生。作用在转子上的力矩以及由此导致的电动机的转速可以通过改变流经电动机中的电流进行控制。

● 挑战性问题

如图显示了两台完全相同且安装在同一根轴上的电动机。为简便起见，没有画出换向器。已知每个转子绕有48匝长、宽分别为35 cm和17 cm的矩形线圈。转子的电阻为12 Ω，磁感应强度为0.21 T，滑轮的直径为7.2 cm。一根绳子连接了滑轮和弹簧秤，而弹簧秤则被固定在了地板上。

1. 根据 $F = ILB$ ，推导出转子在图中所示位置时产生的力矩的表达式。
2. 当 S_1 闭合、 S_2 断开时，求转轴上的力矩和弹簧秤上的力。
3. 当 S_1 和 S_2 都闭合时，求转轴上的力矩和弹簧秤上的力。
4. 图中的转子处在不同位置时，转轴上的力矩会发生怎样的变化？



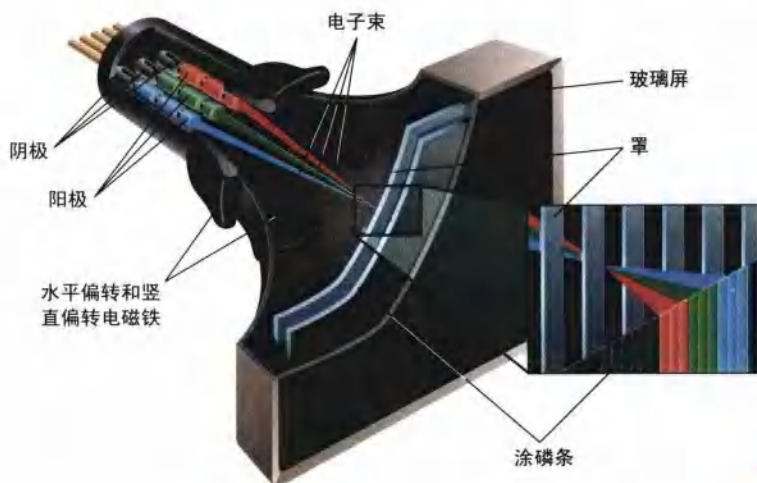


图24-21 两对磁铁使得电子束在竖直方向和水平方向发生偏转，形成图像。

带电粒子受到的力

带电粒子并非只能局限于导线中。它们也可以在真空中运动，那里没有空气分子与之碰撞。被广泛地应用于计算机显示器和电视机中的显像管（也称阴极射线管），它的工作原理主要就是利用电子被磁场偏转，然后在屏幕上形成图像，如图24-21所示。在阴极射线管中，电场将电子从阴极的原子中拉出，然后通过收集、加速，使这些电子汇聚成很细的束流。通过偏转磁场的控制，电子束上下左右地打在屏幕上。屏幕上覆盖着一层荧光物质，它们受到电子撞击时就会发光，于是就产生了图像。

磁场对电子的作用力的大小取决于电子的速度、磁场的磁感应强度以及速度和磁场方向间的夹角。考虑一个电子在长度为 L 的导线中垂直于磁场的运动。电流 I 等于单位时间内进入导线的电荷量，即 $I = \frac{q}{t}$ 。在现在的情况下， q 是电子的电荷量， t 是电子通过距离 L 所需的时间。速度为 v 的粒子通过距离 L 所需的时间可由运动方程 $L = vt$ 求出。于是有 $t = \frac{L}{v}$ 。因此，电流的定义式 $I = \frac{q}{t}$ 可表示为 $I = \frac{qv}{L}$ 。由此可得到在磁感应强度为 B 的磁场中，垂直于磁场方向运动的电子所受的力为：

磁场作用在运动电荷上的力 $F = qvB$

磁场作用在运动电荷上的力等于磁感应强度、粒子的电荷量以及它的速度三者的乘积。

粒子电荷量的单位是C，速度的单位是m/s，磁感应强度的单位是T。

力的方向既与粒子速度的方向垂直，也与磁场的方向垂直。不过，第三类右手定则所确定的方向是对带正电荷的粒子而言的。对于电子，这个方向刚好相反。

► 例题 2

磁场中带电粒子受到的力 一束电子以 $3.0 \times 10^6 \text{ m/s}$ 的速度垂直通过磁感应强度为 $4.0 \times 10^{-2} \text{ T}$ 的磁场。每个电子受到的作用力为多大？

1 分析概括问题

- 画出电子束和它的运动方向；画出磁感线，并标上 B ；画出电子束受到的力 F 。记住，因为电子带负电，所以它受到的力的方向与第三类右手定则所确定的方向相反。

已知：

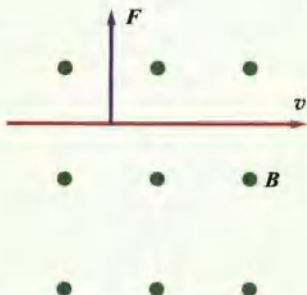
$$v = 3.0 \times 10^6 \text{ m/s}$$

$$B = 4.0 \times 10^{-2} \text{ T}$$

$$q = -1.6 \times 10^{-19} \text{ C}$$

未知：

$$F = ?$$



2 求解未知量

$$F = qvB$$

$$= -1.6 \times 10^{-19} \text{ C} \times 3.0 \times 10^6 \text{ m/s} \times 4.0 \times 10^{-2} \text{ T}$$

$$= -1.9 \times 10^{-14} \text{ N}$$

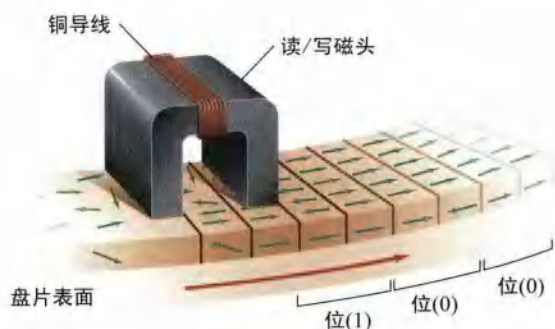
将 $q = -1.6 \times 10^{-19} \text{ C}$, $v = 3.0 \times 10^6 \text{ m/s}$,
 $B = 4.0 \times 10^{-2} \text{ T}$ 代入。

3 验证答案

- 单位是否正确？** $1 \text{ T} = 1 \text{ N}/(\text{A} \cdot \text{m})$ ，且 $1 \text{ A} = 1 \text{ C/s}$ ，所以 $1 \text{ T} = 1 \text{ N} \cdot \text{s}/(\text{C} \cdot \text{m})$ ，于是 $1 \text{ T} \cdot \text{C} \cdot \text{m} = 1 \text{ N}$ 。这正是力的单位。
- 方向是否有意义？** 利用第三类右手定则可以证实，上述结果中力的方向是正确的。记住，电子受到的力的方向与第三类右手定则所确定的方向相反。
- 数值是否合理？** 作用在电子和质子上的力总是很小的。

► 练一练

- 对电子沿垂直于磁场方向运动应用第三类右手定则时，拇指所指的是什么方向？
- 一个电子以 $4.0 \times 10^6 \text{ m/s}$ 的速度沿垂直方向进入磁场，该磁场的磁感应强度为 0.50 T 。此时作用在电子上的力为多大？
- 一束二次电离（即失去2个电子，因此带有2个净元电荷）的粒子束以 $3.0 \times 10^4 \text{ m/s}$ 的速度垂直于磁感应强度为 $9.0 \times 10^{-2} \text{ T}$ 的磁场运动，此时作用在每个离子上的力为多大？
- 三次电离的粒子带有3个净元电荷。这种粒子束以 $9.0 \times 10^6 \text{ m/s}$ 的速率垂直地进入磁感应强度为 $4.0 \times 10^{-2} \text{ T}$ 的磁场中，此时作用在每个粒子上的力为多大？
- 二次电离的氦原子（即 α 粒子）以 $4.0 \times 10^4 \text{ m/s}$ 的速率垂直地进入磁感应强度为 $5.0 \times 10^{-2} \text{ T}$ 的磁场中。此时作用在每个粒子上的力为多大？



■ 图24-22 当磁介质在读/写磁头下面通过时，通过改变读/写磁头中的磁场，就可以将信息写在计算机的盘片上。

利用磁介质储存信息

计算机要将数据和软件命令转化成比特(bit)，即二进制数位进行处理，每位区分为0和1。那么这些比特又是怎样储存的呢？计算机储存盘的表面均匀地分布着一层磁性颗粒，颗粒中的磁畴方向随磁场而变化。在记录到磁盘的过程中，电流在读/写磁头中流动。读/写磁头实际上是一个绕有线圈的铁芯所构成的电磁铁，导线中的电流在铁芯中感应产生磁场。

随着读/写磁头扫过转动着的磁盘，如图24-22所示，磁膜中原子的磁畴将分段同向排列，它们的方向取决于电流的方向。

两段二进制码表示一位信息，两段的磁化方向相同代表0，两段的磁化方向相反代表1。当读/写磁头开始记录下一位数据时，记录电流就会自动反向。

读取数据时，读/写磁头中没有电流，而磁头下旋转磁盘上的磁化段将在线圈中感应出电流。计算机会获取到这种感应电流方向的改变，并将其翻译成0和1。

本节复习题

26. **磁场力** 设想有一根通电导线垂直于地球磁场，且沿东西向放置。假定电流自西向东，那么导线所受到的力的方向怎样？
27. **偏转** 阴极射线管中的一束电子进入偏转磁场区，偏转磁铁的N极在管子的上方，S极在下方。如果你从荧光屏的方向看管子，这些电子将向哪个方向偏转？
28. **灵敏电流计** 比较图24-18中的灵敏电流计和图24-20中的电动机。它们有什么相似之处？又有什么不同？
29. **电动机** 当电动机的线圈平面与磁场方向垂直时，作用在线圈上的力矩为0。这是否意味着线圈不再转动？说明理由。
30. **电阻** 灵敏电流计的满偏电流为 $180\mu\text{A}$ 。为了将它改装为量程为5V的电压表，该电流计和分压电阻器的总电阻应是多少？
31. **理性思维** 你是如何确定两根平行通电导线间的作用力是磁场力而不是静电力的？提示：先考虑当显示为吸引力时，电荷是否相同，然后再考虑两根带电导线的电流同方向时的作用力。

物理实验 • 实验设计

制作电磁铁

电磁铁利用电流产生的磁场使磁性物质磁化。在本活动中，你要制作一个电磁铁，然后测试你所想到的可能会影响电磁铁磁感应强度的变量。

问题

哪些变量影响了电磁铁的磁感应强度？

目标

- 假设可能会影响电磁铁磁感应强度的变量。
- 观察这些变量对电磁铁磁感应强度的影响。
- 收集和整理数据，比较所选变量对电磁铁磁感应强度的影响。
- 绘制和运用图象，揭示可以控制的变量与受其影响的变量之间的关系。
- 分析与总结所选变量对电磁铁磁感应强度造成的影响。

安全警示



实验器材

大号回形针	小号回形针
铁壳电池组	导线
铁钉	6 V灯泡电池
9 V电池	直流电源

实验步骤

1. 列出你准备用来制作电磁铁的材料。
2. 列出你所想到的可能会影响电磁铁磁感应强度的各种变量。
3. 选择一个你能够确定影响电磁铁磁感应强度的变量。
4. 确定一种能检测电磁铁产生的磁感应强度的方法。
5. 在继续你的实验之前，将你前面的这些想法跟老师沟通，征得老师的同意。
6. 简要列出你的实验步骤，其中应包括所有你将选作为常量的取值。
7. 作出类似于下页所示的数据表，标出你准备要测量的两个量。
8. 用铁钉和一段导线制作一个电磁铁。将导线绕在铁钉上，不要忘记在线圈的两头各留几厘米的导线，以便与电源连接。**注意：铁钉尖端和导线两端可能比较尖锐，拿取这些材料时要小心，不要刮破或刺痛手指。**
9. 在继续你的实验之前，请你的老师检查一下你所做的电磁铁。
10. 进行实验，记录数据。**注意：实验中如果要用到电池组，要防止它掉落到地板砸伤你的脚。**



数据表	
_____ 的值	_____ 的值

分析

1. **绘制和运用图象** 作出图象，显示你所选取的两个变量之间的关系。
2. 实验中你想要控制的变量有哪些？哪些量是你无法控制的？
3. 如果用能够吸起的物体的数量来衡量电磁铁的磁感应强度的大小，那么，在磁铁要吸就只能吸起整数个物件的情况下，你应该如何控制测量的误差？

结论与应用

1. 你所选取的变量和磁铁的磁感应强度之间有什么样的关系？
2. 你班级中的其他同学还发现了哪些会影响电磁铁磁感应强度的变量？
3. 是否有哪个小组发现有某些变量对电磁铁的磁感应强度没有影响？

进一步探索

1. 比较同学们发现的各种变量对磁铁磁感应强度的影响。是否存在某个变量，只要它稍微改变，就会使电磁铁的磁感应强度大为增加？如果存在，这个变量是什么？

2. 为了增大电磁铁的磁感应强度，哪种方法最有效？试说明理由。
3. 怎样做才能方便地调节电磁铁的磁感应强度？

生活中的物理学

1. 如果需要一块安装在笔记本电脑里的体积很小的电磁铁，那么你可以采用怎样的措施来增大这种小体积电磁铁的磁感应强度？
2. 某些建筑物中应用电磁铁来控制防火门的开启。这些磁铁就像门吸那样被安装在门背后的墙壁上。设想一个控制火灾的防火警报系统。这种控制房门开启的系统有何优点？在灾害发生时，这种系统又有何优点或缺点？
3. 有些电铃是通过用臂锤击打一个半球型金属盖的边缘工作的。如何应用电磁铁使电铃工作？怎样才能使臂锤不断地重复击打，以产生持续的铃声，直到电源被切断？



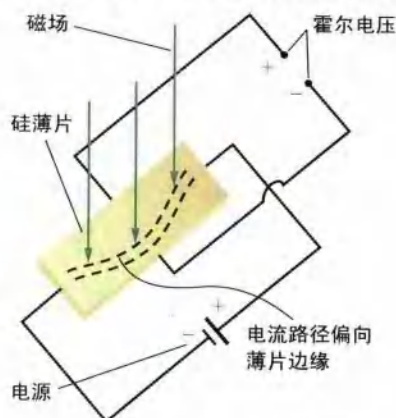
物理 在线

若想了解更多关于磁场的知识，请登录网站：
physicspp.com。

物理学前沿

霍尔效应

磁场使带电粒子发生偏转这一简单现象导致了一场物理学革命，它使我们能够测量或检测诸如自行车的轮子和机动车曲轴之类物体的运动。而这一切都基于电流通过置于磁场中的一片宽而薄的导体片时所发生的现象。



磁场使得大量电子积聚在金属薄片的边缘处，从而产生了霍尔电压。

磁感线垂直于薄片表面，使运动的电子向薄片的边缘积聚。由于薄片的一侧比另一侧有更多的电子，因此薄片的两侧便产生了电压。这种在薄片横向上产生的电压称为霍尔电压。霍尔电压的大小与磁感应强度有关。

这个效应是由霍尔 (E.H.Hall) 于1879年发现的。不过，它在科学和工业上的应用却是近年来的事，因为一般金属薄片中的霍尔电压非常得小。但研究发现，半导体硅薄片上却可产生有实用价值的霍尔电压。

霍尔效应可用于揭示不同类型材料的导电性。霍尔电压的符号显示的是载流子带电的正负性，而霍尔电压的大小则能说明关于载流子的密度及其运动速度的情况。实验表明，铜以及大多数金属的载流子是带负电荷的电子，但锌中的载流子带的却是正电。

一种有用的传感器 工程师已经研发了霍尔效应传感器。在如下图所示的由黑色的小塑料包装的器件内，有一块带有连接导线的硅膜。霍尔电压通过导线传入一个小型放大器中，使得它能被另外的仪器所检测到。

当永磁铁运动到霍尔效应传感器附近时，放大器就能检测到霍尔电压。因此，这种传感器可用来检测这块磁铁的靠近事件。



自行车速度计利用霍尔效应传感器显示自行车的运动速率。

日常生活中的应用 自行车速度计的工作原理主要依靠的就是安装在自行车前轮上的一块磁铁。轮子每转一圈，这块磁铁就靠近霍尔电压传感器一次，这样便可测出在某段时间内的脉冲数。霍尔电压传感器也可用来控制汽车发动机的点火时间。当安装在曲轴或分配器转子上的磁铁转到靠近霍尔电压传感器时，就会产生一个电压脉冲，激发点火系统，瞬间点燃火花塞。

进一步探索

- 1. 分析** 为何测量霍尔电压的电极要安置在薄片两侧彼此正对的位置处？如果不这样，会出现什么问题？
- 2. 理性思考** 作为霍尔效应的结果，加在导体薄片上的强磁场是否会改变这块薄片的电阻？回忆你学过的关于导线横截面的问题，以拓宽思路。

24.1 永磁铁和暂时性磁铁

关键术语

- 极 性
- 磁 场
- 磁通量
- 第一类右手定则
- 螺线管
- 电磁铁
- 第二类右手定则
- 磁 畴

重要概念

- 同性磁极相互排斥，异性磁极相互吸引。
- 磁感线从磁铁的N极出来，回到S极。
- 磁感线总是形成封闭的回路。
- 通电导线的周围存在磁场。
- 通电线圈的周围存在磁场。线圈周围的磁场与永磁铁周围的磁场相似。

24.2 磁场产生的力

关键术语

- 第三类右手定则
- 灵敏电流计
- 电动机
- 转 子

重要概念

- 磁感应强度的单位是特斯拉，用T表示。
- 放置在磁场中的通电导线将受到力的作用，这种作用力的方向既垂直于磁场的方向，又垂直于导线方向。
- 磁场中通电导线受到的作用力与磁感应强度、电流以及导线的长度成正比：

$$F = ILB$$

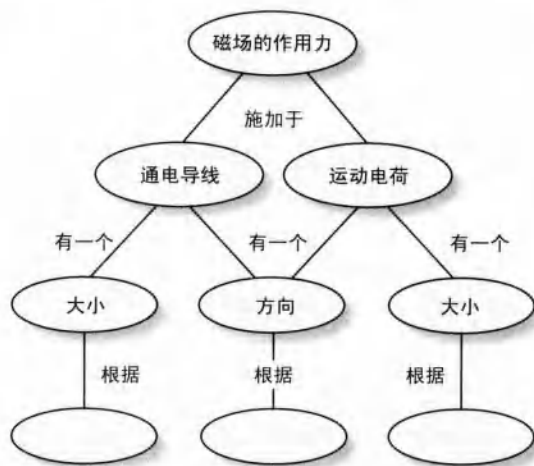
- 灵敏电流计由磁场中的一个线圈构成，用来测量微小电流。当电流通过线圈时，作用在线圈上的力将使它发生偏转。
- 可将灵敏电流计改装成电流表，办法是附加一个与灵敏电流计并联连接的小电阻分流电阻器。
- 可将灵敏电流计改装成电压表，办法是附加一个与灵敏电流计串联连接的大电阻分压电阻器。
- 扬声器的工作原理是，变化的电流通过安置在磁场中的线圈，该线圈紧贴在纸盆上，因此变化的电流将使纸盆发生振动，从而发出声音。
- 电动机由放置在磁场中的一个线圈构成。线圈中存在电流时，由于磁场中通电导线受到力的作用，因此该线圈将发生转动。当线圈转动时，利用换向器改变电流的方向，就能使它完成360°的转动。
- 磁场作用在运动电荷上的力的大小取决于三个因素：带电粒子的速度、粒子的电荷量以及磁感应强度。作用力的方向、磁场的方向和粒子速度的方向两两垂直。

$$F = qvB$$

- 计算机显示器和电视机显像管都利用了磁铁对射向荧光屏的粒子束的聚焦、准直和偏转作用。当粒子撞击荧光屏时，会使它发光，从而在屏上产生图像。

绘制概念图

32. 用下列术语和公式完成概念图：右手定则、 $F = qvB$ 、 $F = ILB$ 。



理解概念

33. 陈述磁极相吸和相斥的规律。(24.1)
34. 描述暂时性磁铁与永磁铁的不同点。(24.1)
35. 给出三种描述磁性的最重要的物理量的名称。(24.1)
36. 画出一根小条形磁铁及其周围的磁感线，并用箭头表示出这些磁感线的方向。(24.1)
37. 分别画出两个同性磁极和异性磁极之间的磁感线，并标出场的方向。(24.1)
38. 如果将一块磁铁分成两块，你能否得到孤立的N极和S极？请说明理由。(24.1)
39. 试描述怎样用第一类右手定则确定通电直导线周围磁场的方向。(24.1)
40. 如果将一根通电导线弯成一个环，为什么此时环内的磁场比环外的强？(24.1)
41. 试描述怎样用第二类右手定则确定电磁铁磁极的极性。(24.1)

42. 在铁块中，每个电子都类似于一个个小磁铁，然而这块铁本身却可能并没有磁性。这是为什么？(24.1)
43. 为什么摔打或加热会使磁铁的磁性减弱？(24.1)
44. 试描述怎样用第三类右手定则确定磁场中通电导线的受力方向。(24.2)
45. 一根导线中突然通入强电流，但导线却并未受到力的作用。你能否由此得出在导线处没有磁场的结论？请说明理由。(24.2)
46. 在灵敏电流计上加一个分流电阻，可改装成何种电表？(24.2)

应用概念

47. 一块小的条形磁铁固定隐藏在一个网球内。试描述一种能发现该磁铁的N极和S极位置的实验方法。
48. 一片金属被吸引到一块大磁铁的一个极上。试描述能确定这片金属究竟是暂时性磁铁还是永磁铁的方法。
49. 地磁场施加在指南针上的力是小于、等于还是大于这枚指南针施加在地球上的力？试作出解释。
50. **指南针** 如果你在树林里迷了路，而你正好有一枚指南针，但不幸的是指南针上标记N极的红漆脱落了。好在你还有一支备有电池的手电筒以及一段导线。此时，你该如何确定这个指南针的N极方向？
51. 磁铁可吸引没有磁性的铁块，带电棒可吸引不带电的绝缘体。试描述产生这两种类似现象的不同的微观过程。
52. 将一根通电导线放在实验桌上。试描述至少两种能确定导线中电流方向的方法。
53. 在磁场中什么方向上放置通电导线，可使它受到的磁场作用力最小，甚至为零？
54. 两根平行导线通有大小相等的电流。
- a. 如果这两根导线中的电流方向相反，那么何处的磁感应强度大于每根导线所产生的磁感应强度？

- b. 何处的磁感应强度正好等于每根导线所产生的磁感应强度的2倍?
- c. 如果两根导线中电流的方向相同, 何处的磁感应强度正好为零?
55. 电压表中的分压电阻增大时, 电压表的量程将如何变化?
56. 磁场对带电粒子会产生力的作用, 那么它能否改变带电粒子的动能? 为什么?
57. 一束质子从房间的后面运动到前面时, 因受到磁场的作用而向上弯曲。引起该质子偏转的磁场朝着哪个方向?
58. 地球的磁感线如图24-23所示。在什么地方, 是两极处还是赤道处, 其磁感应强度最大?

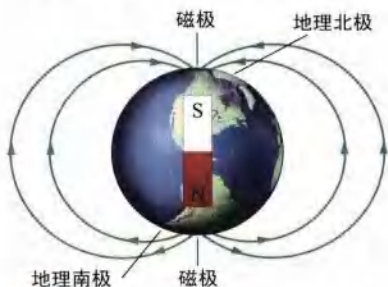


图24-23

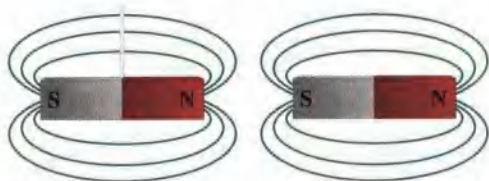


图24-25

61. 如图24-26所示, 回答如下问题。
- a. 何处是磁极?
- b. 何处是N极?
- c. 何处是S极?

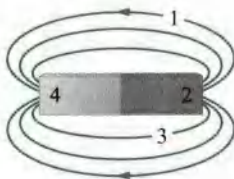


图24-26

62. 如图24-27所示为指南针在一根磁铁附近两个不同位置时的情况。这根磁铁的S极位于何处?



图24-27

问题解决

24.1 永磁体和暂时性磁铁

59. 如图24-24所示, 当右边的那根磁铁移向左边悬挂着的磁铁时, 这根用绳子悬挂着的磁铁将会怎样?

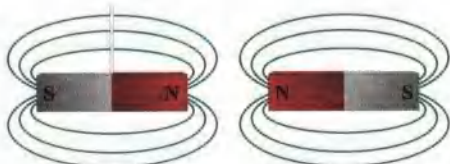


图24-24

60. 如图24-25所示, 当右边的那根磁铁移向左边悬挂着的磁铁时, 这根用绳子悬挂着的磁铁将会怎样?

63. 一根长1.50 m的垂直于匀强磁场的导线载有10.0 A的电流, 作用在导线上的力是0.60 N。该磁场的磁感应强度为多大?
64. 一根导线中的电流如图24-28所示。画出这根导线的横截面, 并作出该电流所产生的磁场的示意图。



图24-28

65. 如图24-29所示, 电流垂直流出纸面。复制此图, 并作出该电流所产生的磁场的示意图。



图24-29

第24章 测评

66. 如图24-30所示为一个有电流通过的电磁铁线圈。
- a. 线圈内部磁场的方向如何？
 - b. 线圈外部磁场的方向如何？



图24-30

67. **磁性陶瓷** 某同学测量了两个磁性陶瓷间的排斥力，得出了如表24-1所示数据，它显示了这个力与这两块陶瓷的距离间的关系。
- a. 画出这个力与距离的函数图线。
 - b. 这个力是否遵循平方反比定律？

表 24-1	
距离 d (cm)	力 F (N)
1.0	3.93
1.2	0.40
1.4	0.13
1.6	0.057
1.8	0.030
2.0	0.018
2.2	0.011
2.4	0.007 6
2.6	0.005 3
2.8	0.003 8
3.0	0.002 8

24.2 磁场产生的力

68. 如图24-31所示的电路是将灵敏电流计改装为何种电表的接法？

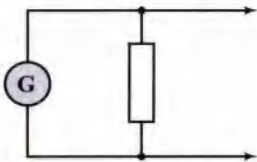


图24-31

69. 如图24-31所示的那个电阻叫做什么？
70. 如图24-32所示的电路是将灵敏电流计改装为何种电表的接法？

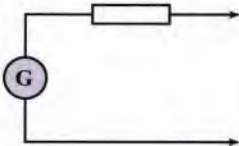


图24-32

71. 如图24-32所示的那个电阻叫做什么？
72. 如图24-33所示，一根通电导线放置在磁铁的两极之间，该导线所受力的方向如何？

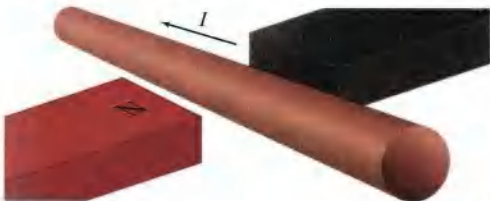


图24-33

73. 一根长0.50 m的垂直于匀强磁场的导线载有8.0 A的电流，作用在导线上的力是0.40 N。该磁场的磁感应强度为多大？
74. 通过长0.80 m导线中的电流为5.0 A，导线与磁感应强度为0.60 T的磁场的方向垂直。此时作用在这根导线上的力为多大？
75. 一根长25 cm的导线与磁感应强度为0.30 T的匀强磁场的方向成直角，通过这根导线的电流为6.0 A。此时作用在这根导线上的力为多大？
76. 一根导线长35 cm，与磁感应强度为0.53 T的匀强磁场的方向平行，通过这根导线的电流是4.5 A。此时作用在这根导线上的力为多大？
77. 一根长625 m的导线垂直于磁感应强度为0.40 T的磁场，作用在这根导线上的力为1.8 N。此时通过这根导线的电流为多大？
78. 作用在长0.80 m且与地磁场相垂直的导线上的力为0.12 N。此时通过这根导线的电流为多大？已知地磁场的磁感应强度为 5.0×10^{-5} T。
79. 作用在一根与磁感应强度为0.80 T的磁场垂直的导线上的力为3.6 N，导线中的电流为7.5 A。这根导线有多长？

80. 一根与地面平行的输电线载流225 A, 电流的方向自东向西。

- 地磁场作用在每米输电线上的力为多大? 设 $B_{\text{地}} = 5.0 \times 10^{-5} \text{ T}$ 。
- 力的方向怎样?
- 根据你的判断, 这个力对于支撑输电线的铁塔的设计重要吗?

81. **灵敏电流计** 一只灵敏电流计满偏时的电流为 $50.0 \mu\text{A}$ 。

- 为了将它改装成满偏刻度为10 V的电压表, 串联电阻器和灵敏电流计的总电阻应为多大?
- 如果灵敏电流计的电阻为 $1.0 \text{ k}\Omega$, 那么串联电阻器的电阻应为多大?

82. 若将第81题中的那只灵敏电流计改装成满偏刻度为10 mA的电流表。

- 当通过该灵敏电流计(电阻为 $1.0 \text{ k}\Omega$)的电流为 $50.0 \mu\text{A}$ 时, 它两端的电压是多少?
- 如果在该电压下通过电路的总电流为10 mA, 并联电路的等效电阻应为多大?
- 与灵敏电流计并联的电阻应为多大, 才能得到b中计算得到的电阻值?

83. 一束电子沿着与磁感应强度为 $6.0 \times 10^{-2} \text{ T}$ 的磁场垂直的方向运动, 速度为 $2.5 \times 10^6 \text{ m/s}$ 。每个电子受到的作用力为多大?

84. **基本粒子** 一个 μ 子(一种带有与电子相同电荷的粒子)以 $4.21 \times 10^7 \text{ m/s}$ 的速度在垂直于磁场的方向上运动, 所受到的力为 $5.00 \times 10^{-12} \text{ N}$ 。

- 该磁场的磁感应强度为多大?
- 如果 μ 子的质量为 $1.88 \times 10^{-28} \text{ kg}$, 它所获得的加速度是多少?

85. 有一个一价离子, 当它沿着与磁感应强度为 0.61 T 的磁场相垂直的方向运动时, 受到的作用力为 $4.1 \times 10^{-13} \text{ N}$ 。此时该粒子的速度是多少?

86. 一个房间内有匀强磁场, 其中放有一只闭合的通有电流的小线框。如果转动线框, 直到磁场不再使它有转动的趋向, 此时磁场的方向相对于线框平面怎样?

87. $5.78 \times 10^{-16} \text{ N}$ 的力作用在一个沿着与磁场相垂

直的方向运动的未知粒子上。如果粒子的速度为 $5.65 \times 10^4 \text{ m/s}$, 磁场的磁感应强度为 $3.20 \times 10^{-2} \text{ T}$, 那么该粒子带有多少个元电荷?

复习提高

88. 一根电阻可忽略的铜导线位于两个磁极间隙的中央部位, 如图24-34所示。磁场局限在该间隙中, 它的磁感应强度为 1.9 T 。

- 当开关打开时, 求导线所受的力的方向和大小。
- 当开关闭合时, 求导线所受的力的方向和大小。
- 闭合开关, 并使电池反接, 求此时导线所受的力的方向和大小。
- 闭合开关, 并用一根电阻为 5.5Ω 的导线取代之前的导线。求此时导线所受的力的方向和大小。

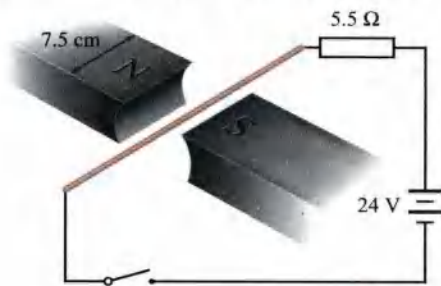


图24-34

89. 有两只灵敏电流计, 其中一只的满偏电流是 $50.0 \mu\text{A}$, 另一只的满偏电流是 $500.0 \mu\text{A}$, 它们的线框的电阻都是 855Ω 。你的任务是它们改装成量程为 100.0 mA 的电流表。

- 求 $50.0 \mu\text{A}$ 的那只表上需连接的分流电阻器的电阻。
- 求 $500.0 \mu\text{A}$ 的那只表上需连接的分流电阻器的电阻。
- 在实际应用时, 用这两只表中的哪一只进行改装更好? 为什么?

90. **亚原子粒子** 一个 β 粒子(高速运动的电子)以 $2.5 \times 10^7 \text{ m/s}$ 的速度在与磁感应强度为 0.60 T 的磁场垂直的方向上运动。它所受到的作用力为多大?

91. 第90题中 β 粒子的加速度为多大? 已知电子的质量为 $9.11 \times 10^{-31} \text{ kg}$ 。

第24章 测评

92. 一个磁感应强度为16 T的磁场指向正西方向, 一个电子以 $4.21 \times 10^7 \text{ m/s}$ 的速度向正南方向运动。此时作用在该电子上的磁场力的大小和方向如何?
93. **扬声器** 扬声器中的磁场的磁感应强度为0.15 T, 圆柱形线圈共有250匝, 直径为2.5 cm, 线圈的电阻为 8.0Ω 。当线圈两端与15 V的电源接通时, 求作用在线圈上的力。
94. 在磁感应强度为0.85 T的磁场中有一根长25 cm的直导线, 导线中的电流为15 A。通电导线在匀强磁场中所受的作用力可用公式 $F = ILB \sin \theta$ 确定。试求导线与磁感线呈下列角度时作用在导线上的力。
a. 90° b. 45° c. 0°
95. 如图24-35所示, 一个电子通过电势差为20 000 V的两极板 P_1 和 P_2 之间的电场区后, 再通过一个小孔进入磁感应强度为 B 的匀强磁场区, 如图所示, 磁场的方向垂直纸面向内。
- a. 两极板间电场的方向是从 P_1 指向 P_2 , 还是从 P_2 指向 P_1 ?
b. 利用所给条件, 计算电子到达 P_2 时的速度。
c. 描述电子通过磁场区时的运动情况。



图24-35

理性思维

96. **应用概念** 如图24-36所示, 弹簧的一端插在盛满汞的杯子中, 当电流通过这根竖直弹簧时将发生什么现象? 为什么?

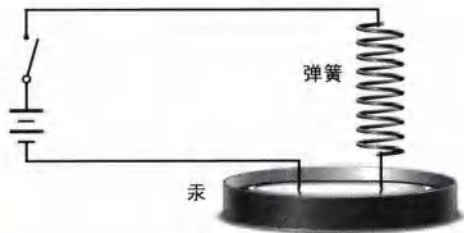


图24-36

97. **应用概念** 通电直导线所产生的磁场可用下式表示: $B = (2 \times 10^{-7} \text{ T} \cdot \text{m/A}) \frac{I}{d}$, 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。
- a. 家庭导线中的电流很少超过10 A。距离这种导线0.5 m处的磁场与地磁场相比如何?
- b. 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。这与你家庭电路的磁场相比如何?
- c. 一些消费者组织建议, 孕妇不要使用电热毯, 以防止磁场引起健康问题。试估计胎儿可能离开这种导线的距离, 并考证你的假设是否正确。如果电热毯中的电流为1 A, 试求胎儿处磁场的磁感应强度, 并将它与地磁场进行比较。

98. **矢量和** 在第97题所描述的各种情况中, 假设有第二根载有大小相等、方向相反的电流的导线。试求在距离每根通电10 A的导线0.1 m处的磁感应强度。假定这两根导线相距0.01 m, 按比例作出示意图。计算每根导线产生的磁感应强度的大小, 并用第一类右手定则画出表示磁场方向的矢量。最后, 求出两个磁感应强度的矢量和, 确定它的大小和方向。

科技写作

99. 研究超导磁体, 写出一篇报告, 说一说这种磁体未来的应用前景, 以及它在实际应用时可能会遇到的障碍。

日积月累

100. 将一个所带电荷量为 $6.40 \times 10^{-3} \text{ C}$ 的粒子移过电势差为2 500 V的两点之间, 需做多少功? (第21章)
101. 在120 V的电路中, 电流从1.3 A增加到2.3 A。试计算功率的变化。(第22章)
102. 三个 55Ω 的电阻器并联后再与两个 55Ω 的串联电阻器串联, 试求它们的总电阻。(第23章)

标准化测试

选择题

1. 一根通电7.2 A的直导线处在磁感应强度为 8.9×10^{-3} T的磁场中, 导线与磁场的方向垂直。要使它所受的力为2.1 N, 在场中的导线的长度应为 ()

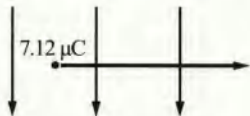
(A) 2.6×10^{-3} m (B) 3.1×10^{-2} m
(C) 1.3×10^{-1} m (D) 3.3×10^1 m

2. 假定一根长19 cm的通电直导线处于磁感应强度为4.1 T的磁场中, 导线与磁场的方向垂直, 它受到的作用力为7.6 mN。导线中的电流为 ()

(A) 3.4×10^{-7} A (B) 9.8×10^{-3} A
(C) 1.0×10^{-2} A (D) 9.8 A

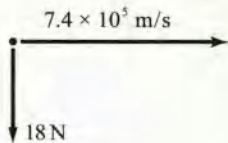
3. 一个电荷量为7.12 μ C的带电粒子以光速在磁感应强度为4.02 mT的磁场中运动, 它所受到的力的大小为 ()

(A) 8.59 N (B) 2.90×10^1 N
(C) 8.59×10^{12} N (D) 1.00×10^{16} N



4. 一个电子以 7.4×10^5 m/s的速度垂直于磁场运动, 它受到的力为18 N。该磁场的磁感应强度为 ()

(A) 6.5×10^{-15} T (B) 2.4×10^{-5} T
(C) 1.3×10^7 T (D) 1.5×10^{14} T



5. 下列因素中, 与螺线管中的磁感应强度无关的是 ()

(A) 螺线管的匝数 (B) 电流
(C) 导线的粗细 (D) 芯子的种类

6. 下列关于磁单极的说法中, 错误的是 ()

(A) 磁单极是一种假定存在的单个的N极
(B) 磁单极是科学家用来做内科检查的
(C) 磁单极是一种假定存在的单个的S极
(D) 磁单极并不存在

7. 一个磁感应强度为0.25 T的匀强磁场, 其方向竖直向下。一个质子以 4.0×10^6 m/s的水平速度进入该磁场。在质子刚进入磁场的瞬间, 它所受到的力的大小和方向分别为 ()

(A) 1.6×10^{-13} N, 方向向左
(B) 1.6×10^{-13} N, 方向向下
(C) 1.0×10^6 N, 方向向上
(D) 1.0×10^6 N, 方向向右

拓展题

8. 利用量纲分析以及公式 $F = qvB$ 和 $F = ILB$, 导出用kg、m、s和C表示的磁感应强度单位T的表达式。

9. 在电路中, 一根与5.8 V电池连接的导线处于磁感应强度为0.85 T的磁场中, 导线的电阻为 18Ω , 长度为14 cm, 所受到的力为22 mN。试用公式 $F = ILB \sin \theta$ 确定导线与磁场方向的夹角。

✓ 考试小贴士

仔细阅读注意点

在每次考试或做测试练习时, 你都应全面阅读每组题目的说明。这不需要很多时间, 却能使你在整个考试中避免简单错误, 取得好成绩。

第25章

电磁感应

内容提要

- 描述变化的磁场是怎样产生电势差的。
- 应用电磁感应现象制造发电机和变压器。

学习本章的意义

磁场与电流间的关系奠定了电动机、发电机和变压器等设备的基础。

水力发电 水坝通常建造在江河上，为就近的城市和农村提供电力。通过水坝，流水的势能和动能转化成了电能。

想一想

安置在大坝内的发电机是如何将流水的动能和势能转化为电能的？

物理  在线
physicspp.com



起步实验

探究变化的磁场中发生的现象

问题

通过线圈的磁场发生变化时, 对该线圈会产生怎样的影响?

步骤

1. 将灵敏电流计的两端与一个铜导线线圈的两端相连。
2. 将条形磁铁的N极插入线圈, 观察灵敏电流计的读数和指针偏转的方向。
3. 将条形磁铁的S极插入线圈, 观察灵敏电流计的读数和指针偏转的方向。
4. 改变磁铁插入线圈的速度, 结果有什么不同?

分析

是什么原因引起了灵敏电流计的指针发生偏转? 什么情况下它偏转的角度最大?

理性思维 当磁铁插入线圈时, 线圈中会发生什么情况?



25.1 变化的磁场产生电流

在第24章中, 你已经知道是奥斯特发现了电流产生磁场的奥秘。法拉第认为, 既然电流能产生磁场, 那么反过来, 磁场应该也能产生电流。1822年, 法拉第在他的笔记本上写下了他的研究课题: 磁生电。多年来, 法拉第利用了多种磁场和导线的组合进行实验, 但是都没有成功。在经历了大约十年的不断失败后, 法拉第终于发现, 磁场中运动的导线能感应出电流。同年, 美国的一位中学教师亨利 (J. Henry) 也证实, 变化的磁场可产生电流。亨利将其他科学家提出的观念应用于他的一些教学演示设备中, 使磁场产生电流的现象更为明显。他所做的工作虽然并不属于新的发现, 不过这些器件使得他的教学更加直观, 更为有效。与法拉第不同, 亨利并没有发表他的研究成果。

► 学习目标

- 解释变化的磁场是怎样产生电流的。
- 定义电动势。
- 求解有关导线在磁场中运动时产生感应电动势的问题。

► 关键技术语

电磁感应
第四类右手定则
电动势
发电机
平均功率

■ 图25-1 当导线在磁场中运动时，导线中会产生电流。但只有运动的导线才能产生电流。这种电流的方向取决于导线在磁场中的运动方向。图中箭头所指的即为电流的方向。



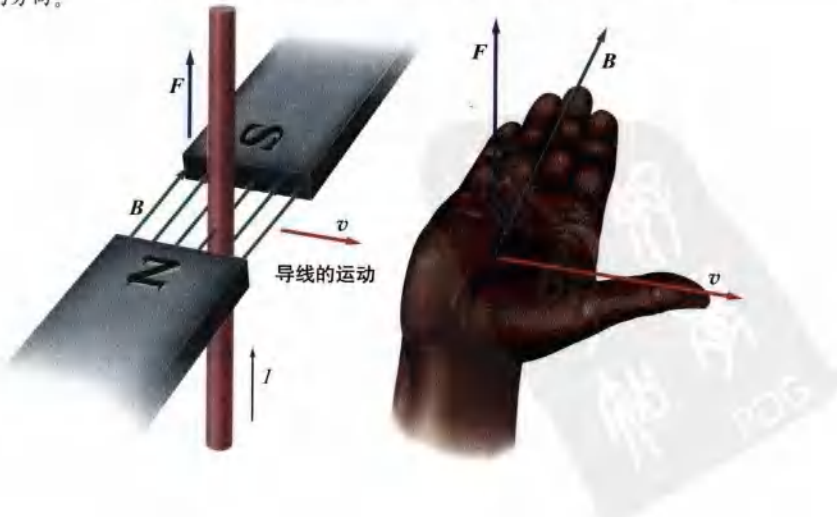
电磁感应

如图25-1所示为法拉第的一个实验。实验中，作为闭合回路一部分的一段导线处于磁场中。当这段导线固定不动，或者沿平行于磁场的方向运动时，导线中不存在电流。但是，当导线向上通过磁场运动时，导线中就会产生某个方向的电流；当导线向下通过磁场运动时，会产生相反方向的电流。所以，只有当导线切割磁感线时，才会产生电流。

法拉第发现，无论是导线在磁场中运动，还是磁场相对导线运动，导线中都可能产生电流。这表明，这种电流的产生是由于导线和磁场的相对运动所致。以这种方式在电路中产生电流的过程称为**电磁感应** (electromagnetic induction)。

怎样确定这种电流的方向呢？为了找出导线中电荷的受力方向，要应用**第四类右手定则** (fourth right-hand rule)：如图25-2所示，伸出右手，使你的拇指指向导线的运动方向，其他四指指向磁场方向，则手掌指向的便是电流的方向。

■ 图25-2 第四类右手定则可用来确定在磁场中运动的导体内部的电荷所受到的磁场力的方向。



电动势

在电路的学习中你已经知道，为了产生连续的电流，必须要有诸如电池这样的电源。电池给予电荷的电势差或电压称为**电动势** (electromotive force)，记为 E 。电动势不是力，而是一种电势差，单位也是伏。电动势使电流从较低电势处流向较高电势处，其作用类似于喷泉中的水泵。

在法拉第的实验中，引起感应电流的电压是怎样产生的呢？当你使导线在磁场中运动时，你就对导线中的电荷施加了力。由于它们在力的方向上运动，因此你对电荷做了功，它们的电势能以及电势差都增加了。这种电势差就称为感应电动势。感应电动势的大小取决于磁感应强度 B 、导线在磁场中的长度 L ，以及导线在磁场中的运动速度在垂直于磁场方向上的分量 $v\sin\theta$ ：

感应电动势 $E = BLv\sin\theta$

感应电动势等于磁感应强度、导线的长度、导线在垂直于磁场方向的分速度这三者的乘积。

如果导线与磁场方向成某一角度运动，那么只有垂直于磁场方向上的导线速度的分量才能产生感应电动势。如果导线在磁场中的运动速度垂直于磁场，则 $\sin 90^\circ = 1$ ，因此上式便简化为 $E = BLv$ 。核实一下此式中 E 的单位，这将有助于你在解题时能进行正确的代数运算。 E 的单位是V。在第24章中， B 定义为 $\frac{F}{IL}$ ，所以 B 的单位是 $\text{N/A}\cdot\text{m}$ 。速度的单位是 m/s 。从前几章中你还知道， $1\text{ J} = 1\text{ N}\cdot\text{m}$ ， $1\text{ A} = 1\text{ C/s}$ ， $1\text{ V} = 1\text{ J/C}$ 。所以，利用量纲分析可得： $1\text{ (N/A}\cdot\text{m)}\cdot\text{(m)}\cdot\text{(m/s)} = 1\text{ N}\cdot\text{m/A}\cdot\text{s} = 1\text{ J/C} = 1\text{ V}$ 。

感应电动势的应用 麦克风是应用感应电动势的一个简单例子。动圈式麦克风的结构与扬声器类似。如图25-3所示，在这种麦克风中，有一片与线圈连在一起的薄膜，该线圈可在磁场中自由移动。声波使薄膜振动，致使线圈在磁场中运动，从而在线圈的两端产生感应电动势。感应电动势随声波频率的变化而变化。通过这种方式，声波被转化成了电信号。这样产生的电压很低，一般只有 10^{-3} V ，但可用电子器件将它增强或放大。

图25-3 在这个动圈式麦克风的示意图中，铝膜与磁场中的一个线圈连接在一起。当声波使膜振动时，线圈就在磁场中运动，从而产生与声波成正比的电流。



► 例题 1

感应电动势 一根长 0.20 m 的直导线，以 7.0 m/s 的速度垂直于磁感应强度为 $8.0 \times 10^{-2}\text{ T}$ 的磁场运动。

- 导线中的感应电动势为多大？
- 如果这根导线是电路的一部分，它的电阻为 $0.50\ \Omega$ ，此时导线中的电流是多少？
- 如果采用另一种电阻为 $0.78\ \Omega$ 的金属导线，此时导线中的电流又是多少？

1 分析概括问题

- 建立坐标系。
- 画出一根长为 L 的直导线，并将它与一只电流表相连，以测量电流。
- 选择一个与导线垂直的磁场方向。
- 选择一个与导线和磁场均垂直的速度方向。

已知：

$$v = 7.0\text{ m/s}$$

$$L = 0.20\text{ m}$$

$$B = 8.0 \times 10^{-2}\text{ T}$$

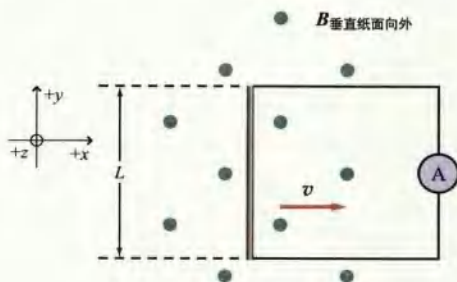
$$R_1 = 0.50\ \Omega$$

$$R_2 = 0.78\ \Omega$$

未知：

$$E = ?$$

$$I = ?$$



2 求解未知量

a. $E = BLv$

$$= 8.0 \times 10^{-2}\text{ T} \times 0.20\text{ m} \times 7.0\text{ m/s} \quad \text{将 } B = 8.0 \times 10^{-2}\text{ T}, L = 0.20\text{ m}, v = 7.0\text{ m/s} \text{ 代入。}$$

$$= 0.11\text{ T} \cdot \text{m}^2/\text{s}$$

$$= 0.11\text{ V}$$

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

$$= \frac{E}{R} \quad \text{将 } U = E \text{ 代入。}$$

$$= \frac{0.11\text{ V}}{0.50\ \Omega} \quad \text{将 } E = 0.11\text{ V}, R_1 = 0.50\ \Omega \text{ 代入。}$$

$$= 0.22\text{ A}$$

利用第四类右手定则可知，电流是逆时针方向的。

c. $I = \frac{E}{R}$

$$= \frac{0.11\text{ V}}{0.78\ \Omega} \quad \text{将 } E = 0.11\text{ V}, R_2 = 0.78\ \Omega \text{ 代入。}$$

$$= 0.14\text{ A}$$

电流是逆时针方向的。

3 验证答案

- 单位是否正确？** 电动势的单位是V，电流的单位是A，这些都是正确的。
- 方向是否有意义？** 导线中电流所受的力的方向遵循第四类右手定则， v 沿拇指方向， B 沿四指方向， F 沿手掌方向，电流的方向与力的方向一致。
- 数值是否合理？** 答案的数量级是 10^{-1} ，这是正确的。

练一练

1. 一根长0.5 m的直导线，以20 m/s的速度沿垂直于磁感应强度为0.4 T的水平方向的磁场向上运动。
 - a. 导线中的感应电动势为多大?
 - b. 如果该导线是总电阻为 $6\ \Omega$ 的电路的一部分，此时电路中的电流是多少?
2. 一根长25 m的直导线安装在一架以125 m/s的速度飞行的飞机上，这根导线的运动方向与地磁场 ($B = 5.0 \times 10^{-5}\text{ T}$) 的方向垂直。导线中的感应电动势为多大?
3. 一根长30.0 m的直导线，以2.0 m/s的速度垂直通过一个磁感应强度为1.0 T的磁场运动。
 - a. 导线中的感应电动势为多大?
 - b. 如果该导线是总电阻为 $15.0\ \Omega$ 的电路的一部分，电路中的电流是多少?
4. 一块马蹄型永磁铁的磁感线呈竖直方向分布。如果一位学生将一根水平方向放置的直导线通过两极间的磁场拉向自己，导线中产生了自右向左的电流，那么哪端是磁铁的N极?

发电机

法拉第发明的**发电机 (electric generator)** 可以将机械能转化为电能。发电机由安装在强磁场中的多匝线圈构成，线圈绕在铁芯上，以增强磁感应强度。与电动机相仿，这种绕有线圈的铁芯称为转子。

发电机的转子可在磁场中自由转动。随着转子的转动，线圈不断切割磁感线，从而产生感应电动势。发电机产生的感应电动势通常称为电压，其值取决于磁场中转动着的导线的长度。增加转子线圈的匝数也就增加了导线的长度，从而使感应电动势增大。

发电机产生的电流 当发电机接入闭合电路时，感应电动势就会产生电流。如图25-4所示为一只没有铁芯的单圈发电机。感应电流的方向可由第三类右手定则确定。当线圈转动时，电流的大小和方向都会改变。

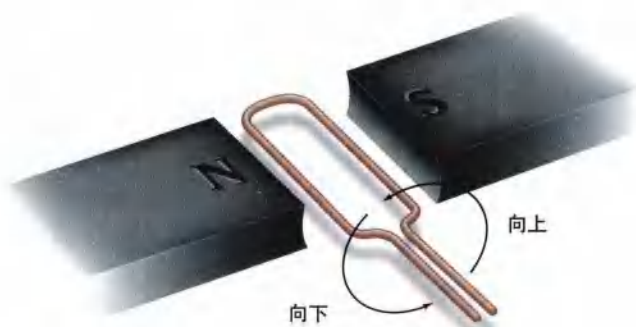
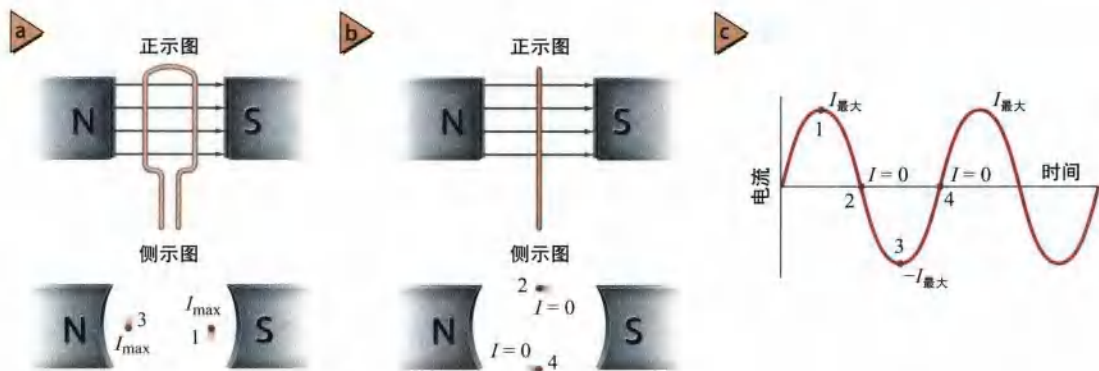


图25-4 当线圈转动时，就会在其中产生电流。



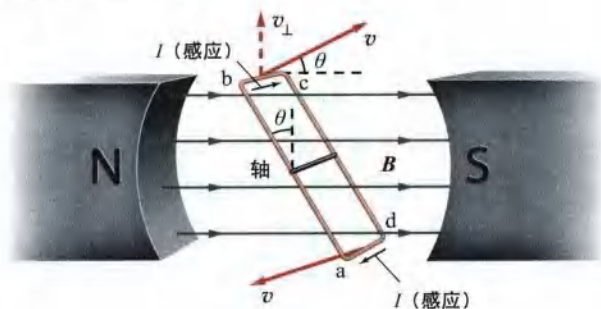
■ 图25-5 转动线圈的剖视图显示出产生最大电流时线圈的位置(a)。当线圈处在竖直位置时, 电流为零(b)。电流随着线圈的转动而改变(c)。感应电动势随时间的变化情况可用类似的图线表示。

当线圈处在如图25-5a所示的水平位置时, 它的运动方向与磁场方向垂直, 此时电流达到最大值。在这个位置上, 线圈垂直于磁场方向的速度分量达到最大值。随着线圈从水平位置转到竖直位置, 如图25-5b所示, 其垂直于磁场方向的速度分量变小, 它在单位时间内切割磁感线的条数减少, 因此电流减小。当线圈转到竖直位置时, 导线的运动方向与磁场方向平行, 所以此时电流为零。线圈继续转动, 它又开始向下切割磁感线, 因而线圈中产生了相反方向的电流。线圈每转过 180° , 电流的方向就改变一次。线圈每转半圈, 电流将平滑地从零变到某一最大值, 然后又变到零。下一半圈, 方向将逆转。电流随时间变化的图线如图25-5c所示。

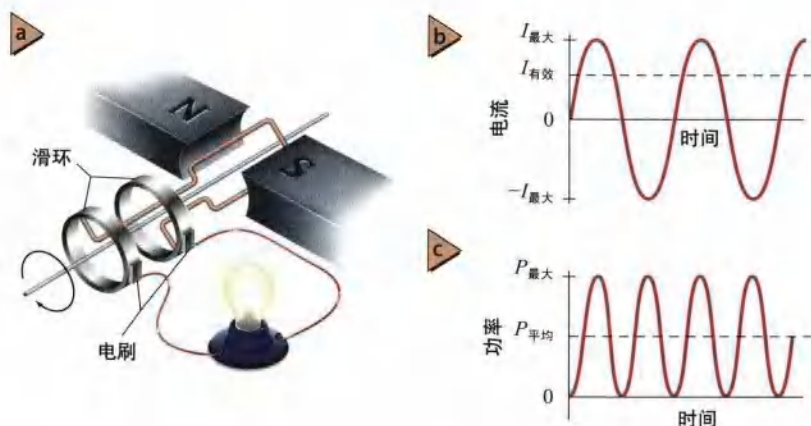
是否整个线圈都对感应电动势有所贡献呢? 如图25-6所示, 其中线圈的四条边都处在磁场中。对ab边应用第四类右手定则, 便可发现其感应电流的方向指向导线的侧面。cd边的情况相同。因此, 在ab或cd边, 沿着导线方向没有电流。不过, 在bc边, 存在从b到c方向的感应电流; 而在ad边, 存在从d到a方向的感应电流。

导体线圈在圆周上转动, 所以线圈上每一点的运动方向与磁场夹角的变化是恒定的。电动势可用前面所给出的公式 $E = BLv \sin \theta$ 计算, 只是 L 现在是指bc边和ad边的长度。当线圈垂直于磁场方向运动时, $\theta = 90^\circ$, 此时产生的感应电动势最大。

■ 图25-6 只有在bc边和ad边中才能产生感应电动势, 这可以用第四类右手定则来进行判别。



如本章开头照片所示, 被大坝拦住的水的势能转化为动能, 使水轮机转动, 再带动磁场中的线圈转动, 从而产生感应电动势。发电机与电动机的结构几乎相同, 但能量的转化情况却正好相反。发电机将机械能转化为电能, 而电动机则将电能转化为机械能。



■ 图25-7 交流发电机利用电刷—滑环装置将电流传送到外电路(a)。这样产生的电流随时间成正弦函数变化(b)，而它的功率恒为正值(c)。

交流发电机

可以通过使用一种装置，使发电机的转子在磁场中保持匀速旋转。在美国，家庭用电的频率为60 Hz。这意味着电流从一个方向变到另一个方向，然后再变回原样，这样的循环每秒要进行60次。如图25-7a显示了发电机转子中的交流电是怎样传递到外电路之中的。电刷—滑环装置使转子可以自由转动，同时又能使电流流入外电路。随着转子的转动，如图25-7b所示，交变电流将在某一最大值和零之间变化。

平均功率 发电机的功率等于电流和电压的乘积。因为电流和电压都在变化，所以功率也将随着电流和电压的变化而变化。如图25-7c所示为交流发电机的功率图象。注意， I 和 U 要么同时为正，要么同时为负，所以功率总是正值。交流电的**平均功率 (average power)** $P_{\text{平均}}$ 是最大功率的一半，即 $P_{\text{平均}} = \frac{1}{2}P_{\text{最大}}$ 。

电压和电流的有效值 描述交变电流和电压时，通常使用的是有效值而非最大值。回忆第22章中的公式 $P = I^2 R$ ，你可以用电流的有效值 $I_{\text{有效}}$ 表示交流电的平均功率： $P_{\text{平均}} = I_{\text{有效}}^2 R$ 。为了由电流的最大值 $I_{\text{最大}}$ 确定 $I_{\text{有效}}$ ，可从功率关系 $P_{\text{平均}} = \frac{1}{2}P_{\text{最大}}$ 出发，代入 $I^2 R$ ，再解出 $I_{\text{有效}}$ 。

$$\text{电流的有效值 } I_{\text{有效}} = \frac{\sqrt{2}}{2} I_{\text{最大}} = 0.707 I_{\text{最大}}$$

电流的有效值等于电流的最大值乘以 $\frac{\sqrt{2}}{2}$ 。

类似地, 电压的有效值可用下述公式表示:

$$\text{电压的有效值 } U_{\text{有效}} = \frac{\sqrt{2}}{2} U_{\text{最大}} = 0.707 U_{\text{最大}}$$

电压的有效值等于电压的最大值乘以 $\frac{\sqrt{2}}{2}$ 。

在美国, 家庭中墙壁上的插座所提供的电压通常为120 V, 这里的120 V指的就是电压的有效值, 而不是最大值。各国民用交流电的频率和电压的有效值是不同的。

► 练一练

5. 一台发电机产生的电压的最大值为170 V。
 - a. 电压的有效值是多少?
 - b. 一个60 W的灯泡接到这台发电机上, 其电流的最大值 $I_{\text{最大}} = 0.70 \text{ A}$ 。通过该灯泡的电流的有效值是多少?
 - c. 灯泡工作时的电阻是多少?
6. 如果家用插座的电压的有效值为117 V, 那么接在插座上的灯泡两端电压的最大值是多少? 如果通过灯泡的电流的有效值为5.5 A, 灯泡中电流的最大值是多少?
7. 一台交流发电机产生的电压的最大值为425 V。
 - a. 发电机两端的电压的有效值是多少?
 - b. 如果电路的电阻为 $5.0 \times 10^2 \Omega$, 电流的有效值是多少?
8. 如果灯泡消耗的平均功率为75 W, 其功率的最大值是多少?

本节你已经研究了在磁场中运动的导体产生感应电流的现象。但是法拉第还发现, 当导体周围的磁场发生变化时, 也能在导体中感应出电流。在下一节中, 你将考察变化的磁场产生感应电动势的现象, 以及这种电磁感应现象的应用。

本节复习题

9. **发电机** 你能否制作一台转子为永磁铁、定子为线圈的发电机? 说明理由。
10. **自行车发电机** 自行车发电机使车前灯发光。当骑车人沿着平坦的路面骑行时, 灯泡的能量来自何方?
11. **麦克风** 考虑如图25-3所示的麦克风。当铝膜被推入时, 线圈中电流的方向如何?
12. **频率** 为了增加所产生的交变电流的频率, 需怎样改变发电机?
13. **输出电压** 说明为什么当发电机中的磁场增强时, 输出的电压会增加。除了增强磁场外, 还有什么办法可使电压增加?
14. **发电机** 说明发电机的基本工作原理。
15. **理性思维** 一位学生问: “当电流为正时, 能量进入灯泡; 当电流为负时, 能量流出灯泡。因此净流入为零。那么, 交流电为什么还要消耗功率呢?” 请说明这种说法为什么是错误的。

25.2 变化的磁场产生感应电动势

当发电机中的转子在磁场中旋转时，就会产生电流，而这种感应电流又会使转子的导线受到力的作用。那么，转子的导线受到的这种力又是朝着哪个方向的呢？

楞次定律

现在考虑一段在磁场中运动的导线，如图25-8a所示，此时导线的感应电动势 $E = BLv$ 。如果磁场垂直于纸面向外指向，导线速度的方向向右，那么由第四类右手定则可知，感应电动势的方向向下，因此感应电流的方向也向下，如图25-8b所示。在第24章中你已经知道，磁场中的通电导线将受到力的作用，这个力是磁场与电流产生的磁场之间相互作用的结果。为了确定这个力的方向，可应用第三类右手定则：如图25-8c所示，如果电流 I 的方向向下，磁场 B 的方向向外，那么所产生的力的方向便向左。这意味着，这个力的方向与导线原来的运动速度 v 的方向相反。也就是说，这种力的作用会阻碍转子的转动。这种确定力的方向的方法是楞次（H.Lenz）于1834年首先提出的，因此称为楞次定律。

楞次定律（Lenz's Law）是这样来确定感应电流方向的：感应电流的磁场总是阻碍引起感应电流产生的原磁场的变化。注意，这里所说的感应磁场的作用是指阻碍原磁场的变化，而并非指阻碍原磁场本身。

阻碍变化 如下页图25-9所示是一个能够说明楞次定律的例子。磁铁的N极向线圈的左端运动。为了产生一个力以阻碍这个N极的接近，该线圈的左端应变成N极，也就是说，磁感线要从该线圈的左端出来。利用第24章中学过的第二类右手定则，你会发现，如果楞次定律正确，那么从磁铁插入线圈的那一端看，感应电流必须沿逆时针方向。实验证明事实确是如此。如果调转磁铁，将S极接近线圈，那么感应电流将沿着顺时针方向。

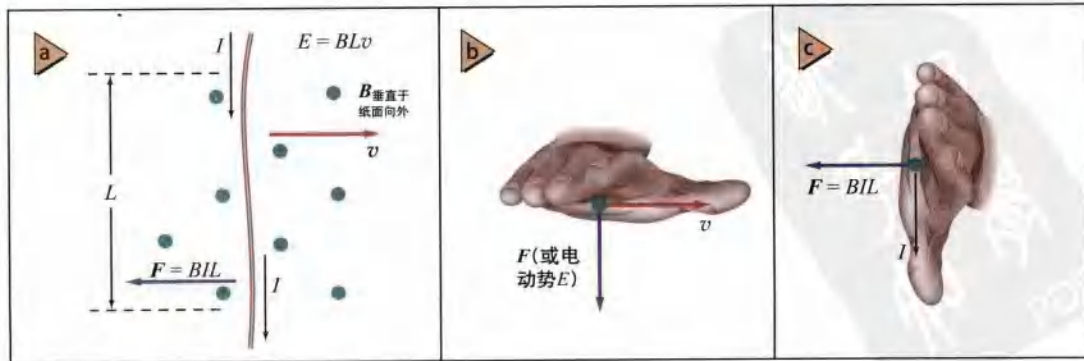
学习目标

- 应用楞次定律。
- 解释反电动势，说明它是怎样影响电动机和发电机的工作的。
- 解释自感现象，说明它对电路的影响。
- 求解有关变压器的电压、电流和匝数比等问题。

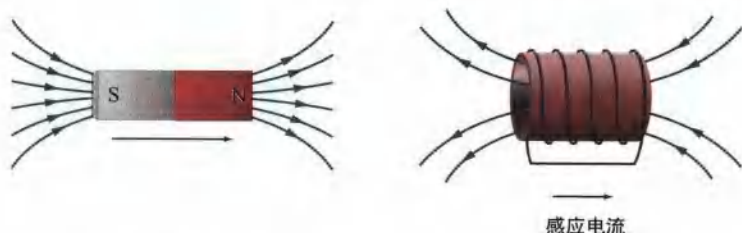
关键术语

楞次定律
涡流
自感
变压器
初级线圈
次级线圈
互感
升压变压器
降压变压器

图25-8 一根长为 L 的导线在磁感应强度为 B 的磁场中运动，便会产生感应电动势。若这根导线是电路的一部分，就会产生感应电流 I 。这个电流又会受到磁场力 F 的作用。注意，这个力与导线速度 v 的方向相反。



■ 图25-9 当磁铁靠近线圈时，线圈中就会产生感应电流。可用楞次定律预测如图所示的电流方向。



如果发电机产生的电流很小，那么转子受到的阻力就很小，转子比较容易转动。如果发电机产生的电流很大，那么转子受到的阻力也很大，转子转起来就困难些。大电流发电机会产生大量的电能。转子受到阻力的作用，意味着必须为发电机提供机械能，才能使它产生电能，这符合能量守恒定律。

电动机和楞次定律 楞次定律也可应用于电动机中。当通电导线在磁场中运动时，就会产生电动势。这种电动势与电流的方向相反，所以称为反电动势。因为电动机的电阻很小，所以当它刚启动时，会产生很大的电流。但是随着电动机逐渐运转起来，在磁场中运动的导线将产生阻碍电流的反电动势，因此通过电动机的净电流就会减小。如果电动机有了负载，例如要它做功提起重物，那么它的转速就会变小，反电动势也会变小，这将使得通过电动机的电流增大。这也符合能量守恒定律：电流增大，电动机消耗的电功率就增大，这些功将转化为机械能，以承受负载。如果机械负载大到使电动机停止了运转，那么电流可能就会大得使导线过热。

随着电动机转速的改变，电流也会发生变化，因而电动机线圈两端的电压也随之改变。此时与电动机并联的其他用电器，如电灯，也将受到这种电压改变的影响。这就是为什么当诸如空调机或电锯等大功率的电动设备启动时，家中的电灯会突然变暗的原因。

当电动机的电源被切断时，磁场的突然改变也会产生反电动势。这种反电动势可能非常大，以至在开关或插头和墙壁插座之间产生火花。

楞次定律的应用 实验室使用的灵敏天平利用楞次定律阻止因物件放置到秤盘上而引起的摆动。如图25-10所示，安装在天平臂一端的金属片置于一块马蹄型

■ 图25-10 灵敏天平利用涡流阻尼控制天平臂的摆动(a)。当臂端的金属片在磁场中运动时，金属片中将产生电流。该电流继而产生一个磁场，它将阻碍电流的运动，从而阻碍天平臂的摆动(b)。



磁铁的两个磁极之间。当天平臂摆动时，金属片便在磁场中运动，于是金属片中就会产生称为**涡流 (eddy current)** 的电流。这个电流会受到磁场力的作用，其方向与金属片的运动方向相反，使得金属片的运动减慢。无论金属片向哪个方向运动，这种磁场力的方向总是与它的运动方向相反，只有当金属片静止时才不存在这种力的作用。因此这种力并不会改变天平上物体的质量读数。这种效应称为**涡流阻尼**。实际的电动机或变压器的铁芯都是由多层薄铁片构成的，以减小涡流的影响。

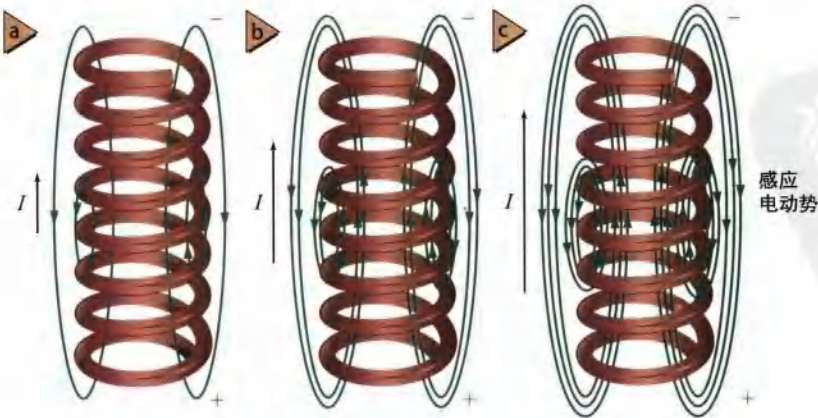
金属片在磁场中运动时就会产生涡流。另一种说法也是正确的：将金属回路置于变化的磁场中就会产生电流。按照楞次定律，这样所产生的电流将阻碍磁场的变化。如图25-11所示，这种电流将产生一个反向磁场，从而使没有开口的铝环悬浮起来。图中的线圈中通有交变电流，因而会产生一个恒定变化的磁场，而这个变化的磁场又在铝环中产生感应电动势。如果这个环是由诸如尼龙这样的非金属材料构成的，那么就不会产生感应电流。对于闭合金属环而言，这种由感应电动势引起的电流会产生一个磁场，这个磁场将阻碍原磁场的变化。这两个磁场相互作用的结果，与两个磁铁的N极相互排斥的情况类似，金属环将被推离线圈而悬浮起来。对于另一个开口的环，它也会产生感应电动势，但由于没有闭合的回路，不会产生感应电流，因此也就不会产生反向的磁场了。



■ 图25-11 闭合的金属环中将感应出电流，而有开口的环中不存在感应电流。

自感

反电动势还可以用另一种方式来解释。正如法拉第指出的那样，只要导线切割磁感线，就会产生感应电动势。如图25-12所示，假定导线中的电流和磁场自图25-12a到图25-12c增大，线圈中就会产生感应电动势，以阻碍电流的这种变化。此时的感应电动势将使线圈顶端的电势低一些，底端的电势高一些。这种因导线中电流的变化而产生感应电动势的现象称为**自感 (self-inductance)**。



■ 图25-12 随着线圈中的电流自(a)到(c)增大，电流所产生的磁场也随之增强。这种增强的磁场将会在线圈中产生一个与电流方向相反的感应电动势。

● 迷你实验

电动机和发电机



电动机和发电机的主要区别在于它们对能量的转变方向不同，前者将电能转化为机械能，后者将机械能转化为电能。

1. 将一个微型直流电动机、一个小灯泡以及一只电流表串联起来。

2. 转动摇柄或电动机的转轴，使灯泡发光。

分析与结论

3. 当你改变摇柄的转速时，将发生什么情况？

4. 当电路中连接另一个微型电动机时，将发生什么情况？

感应电动势的大小与电流变化的快慢有关，电流变化越快，反电动势越大。如果电流不变，那么磁场保持恒定，这时感应电动势为零。如果电流减小，所产生的感应电动势就要阻碍磁场和电流的减小。因为自感现象，增大线圈中的电流需要做功，因此磁场中储存有能量。这与电容器两极板间的电场中储存有能量的情况类似。

变压器

变压器 (transformers) 是一种升高或降低交流电电压的装置。因为变压器改变电压时损失的能量相对很小，所以它得到了广泛的应用。在实际生活中，你家里的许多器件，如游戏机、打印机、音响等，都需要用到变压器。这些变压器被安置在机箱内，或通过连线作为这些器件的一个组成部分。

变压器的工作原理 当单个线圈中的电流发生改变时，由于自感，就会产生一个感应电动势。而变压器中有两个彼此绝缘的线圈，它们被绕制在同一个铁芯上，其中一个线圈称为**初级线圈 (primary coil)**，另一个线圈称为**次级线圈 (secondary coil)**。当初级线圈与交流电源接通后，变化的电流将产生变化的磁场。这个变化的磁场又通过铁芯传至次级线圈，并在次级线圈中感应出变化的电动势。这个现象称为**互感 (mutual inductance)**。

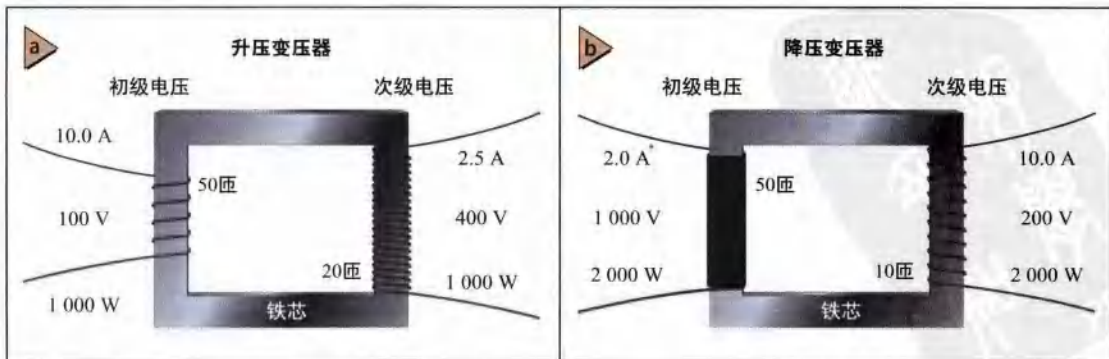
次级线圈中的感应电动势又称次级电压，它与初级电压成正比。次级电压还取决于次级线圈匝数和初级线圈匝数之比：

$$\frac{\text{初级电压}}{\text{次级电压}} = \frac{\text{次级线圈匝数}}{\text{初级线圈匝数}}$$

$$\frac{U_s}{U_p} = \frac{N_s}{N_p}$$

次级电压大于初级电压的变压器称为**升压变压器 (step-up transformer)**，如图25-13a所示；次级电压小于初级电压的变压器称为**降压变压器 (step-down transformer)**，如图25-13b所示。

■ 图25-13 在变压器中，输入电压和输出电压之比取决于初级线圈和次级线圈的匝数比。输出电压可能等于或大于输入电压(a)，也可以小于输入电压(b)。



对理想变压器而言，传递到次级线圈上的电功率与提供给初级线圈的电功率相等。理想变压器本身不消耗电功率，因此下列公式成立：

$$P_p = P_s$$
$$U_p I_p = U_s I_s$$

从上式可以看出，初级电路中的电流与次级电路中的电流有关。将这个关系与之前关于电压和线圈匝数比的公式联立，可得到如下结果：

变压器公式 $\frac{I_s}{I_p} = \frac{U_p}{U_s} = \frac{N_p}{N_s}$

次级线圈中的电流与初级线圈中的电流之比等于初级线圈的电压与次级线圈的电压之比，也等于初级线圈的匝数与次级线圈的匝数之比。

前面说过，升压变压器使电压增加。因为变压器不可能使输出功率增加，因此，次级线圈中的电流必然相应地减小。同理，在降压变压器中，次级线圈中的电流大于初级线圈中的电流。电压的降低对应于电流的增大，这显示了数学与物理学之间的联系。如图25-13所示为升压变压器和降压变压器的原理。某些变压器既可用作升压变压器，也可用作降压变压器，这取决于怎样将它接入电路，如图25-14所示。



图25-14 如果输入电压与左边匝数较多的线圈连接，这台变压器就是降压变压器；反之，如果输入电压与右边线圈连接，这台变压器就是升压变压器。

物理学的应用

常用单位 变压器常用VA、kVA或mVA作单位来量度它的实际功率。技术上，纯电阻负载上的功率才用W作单位。对于电抗性负载，则需用VA作为功率的单位。

数学与物理学的链接

不等式 下列式子将有助于你理解升压变压器和降压变压器中的电压、电流和匝数之间的关系。

升压变压器	降压变压器
$U_p < U_s$	$U_p > U_s$
$I_p > I_s$	$I_p < I_s$
$N_p < N_s$	$N_p > N_s$

► 例题 2

升压变压器 一台升压变压器的初级线圈为200匝，次级线圈为3 000匝，提供给初级线圈的交流电压的有效值为90.0 V。

- 次级电路的电压是多少？
- 当次级电路中的电流为2.0 A时，初级电路中的电流是多少？

1 分析概括问题

- 画出绕有初级线圈和次级线圈的铁芯。
- 标出各变量 I 、 U 和 N 。



已知：

$$N_p = 200$$

$$U_p = 90.0 \text{ V}$$

未知：

$$U_s = ?$$

$$N_s = 3\,000$$

$$I_s = 2.0 \text{ A}$$

$$I_p = ?$$

2 求解未知量

- 求解 U_s 。

$$\frac{U_s}{U_p} = \frac{N_s}{N_p}$$

$$U_s = \frac{N_s U_p}{N_p}$$

$$= \frac{3\,000 \times 90.0 \text{ V}}{200} \quad \text{将 } N_s = 3\,000, U_p = 90.0 \text{ V}, N_p = 200 \text{ 代入。}$$

$$= 1\,350 \text{ V}$$

- 假定变压器的效率是100%，初级电路和次级电路中的功率相等。

$$P_p = P_s$$

$$\frac{U_p}{I_p} = \frac{U_s}{I_s} \quad \text{将 } P_p = U_p I_p, P_s = U_s I_s \text{ 代入。}$$

求解 I_p 。

$$I_p = \frac{U_s I_s}{U_p}$$

$$= \frac{1\,350 \text{ V} \times 2.0 \text{ A}}{90.0 \text{ V}} \quad \text{将 } U_s = 1\,350 \text{ V}, I_s = 2.0 \text{ A}, U_p = 90.0 \text{ V 代入。}$$

$$= 3.0 \times 10^1 \text{ A}$$

3 验证答案

- 单位是否正确？** 电压的单位是V，电流的单位是A，这些都是正确的。
- 数值是否合理？** 大的匝数比导致大的次级电压和小的次级电流，这与答案一致。

► 练一练

在下列问题中，电压和电流均指有效值。

- 一台降压变压器的初级线圈为7 500匝，次级线圈为125匝，初级线圈两端的电压为7.2 kV。次级线圈两端的电压是多少？当次级电路中的电流为36 A时，初级电路中的电流为多大？
- 一台升压变压器的初级线圈为300匝，次级线圈为90 000匝。初级线圈与电压为60.0 V的发电机相连，此时次级电路中的电压是多少？当次级电路中的电流为0.50 A时，初级电路中的电流为多大？

● 挑战性问题

一台供电变压器 (T_1)，它的初级线圈与3.0 kV的交流电源相连，次级线圈用铜导线与另一台变压器 (T_2) 的初级线圈相连，最后，变压器 T_2 的次级线圈再与功率为10.0 kW的负载相连。已知变压器 T_1 的匝数比为5:1， T_2 的负载电压为120 V，变压器的效率分别为100.0%和97.0%。

1. 计算负载电流。
2. 变压器 T_2 消耗的功率是多少？
3. 变压器 T_1 的次级电流是多少？
4. 交流电源提供给 T_1 的电流是多少？

变压器的日常使用 正如你在第22章中学过的那样，只有采用低电流、高电压输电才是经济的。升压变压器可将电源电压提升至高达480 000 V。高电压减小了输电线路中的电流，从而降低了电阻上损失的能量。而当电能输送到消费者所在地时，再使用如图25-15所示的降压变压器，就能为消费者提供所需的低电压。

家用电器中也有变压器，它将电压进一步调整到用电器所要求的电压。当你对玩具或电子仪器供电时，你会将“长方块”上的插头插入墙壁上的插座内。在这种“长方块”内就安装了变压器，它可将120 V的家用电压降低到比方说3~26 V的范围。

并非所有变压器都是用来提升或降低电压的。变压器也可用来隔离电路，因为初级线圈和次级线圈的导线并不直接相连。在一些小型电子仪器中经常会看到这类变压器。



图25-15 降压变压器将输电线上的高电压降低到消费者所需要的低电压。

本节复习题

18. **线圈和磁铁** 将一个两端连接的线圈悬挂起来，使它能自由地摆动。此时将一根磁铁插入该线圈，它就会摆起来。线圈相对于磁铁如何摆动？为什么？
19. **电动机** 与将电灯插头从插座中拔出时的情况相比，将一台正在工作的吸尘器的插头从插座上拔出时更容易看到火花，这是为什么？
20. **变压器和电流** 试说明为什么变压器只能应用在交流电路中。
21. **变压器** 在通常情况下，变压器中匝数少的线圈用粗导线（小电阻）绕制，匝数多的线圈用细导线绕制。这是为什么？
22. **升压变压器** 对于如图25-13所示的升压变压器，试说明当次级线圈短路时，初级线圈中电流的情况。
23. **理性思维** 能否用永磁铁制作变压器的铁芯？试说明理由。

物理实验

电磁感应和变压器

变压器是一种没有任何移动组件的电学器件。它由两组通过磁场相互作用的线圈构成。变压器常用于升高或降低交流电的电压。在你的周围，几乎随处都可以发现变压器。接在家庭电路中的每个电子器件的内部都安装有变压器，以便将电路的电压降低，使电子器件能正常运转。例如，使用显像管的电视机内安装有高压变压器，它将标准的市用电压升高到上万伏，从而使显像管中的电子获得了很大的加速度。在本实验中，你将使用两个具有可拆卸铁芯的线圈，一个作为初级线圈，另一个作为次级线圈。当交流电压接入初级线圈时，它所产生的变化的磁场就会在次级线圈中感应出电流和电压。这样所产生的感应电压可用下式确定： $\frac{U_s}{U_p} = \frac{N_s}{N_p}$ ，其中 N 表示线圈的匝数。

问题

变压器两个线圈中的电压存在怎样的关系？

目标

- 描述变压器是怎样工作的。
- 观察变压器与直流电压连接时的情况。
- 观察变压器与交流电压连接时的情况。

安全警示



实验器材

初级线圈和次级线圈装置
小型交流电源
交流电压表
直流电源 (0~6 V, 0~5 A)
带有鳄鱼夹的导线若干
带有接线的小灯泡

实验步骤

1. 估计初级线圈和次级线圈的匝数。为此，你可以先数出1 cm长的线圈中所包含的匝数，然后乘以以cm为单位的线圈的宽度。初级线圈为一层；次级线圈有两层，所以要将结果乘以2。将所得结果记录在数据表中。
2. 将小灯泡跨接在次级线圈的两端。然后，小心地将次级线圈插入初级线圈。接着，将铁芯慢慢地插入次级线圈。
3. 在直流电源输出端接出两根导线。将与正极相连的导线接在初级线圈的一端。然后，转动电源输出旋钮，使输出电压达到差不多最大值。拿住与电源负极相连的导线的另一自由端，轻触初级线圈的另一端。观察接触处的情况，并将你的观察结果记录在数据表中。



数据表	
初级线圈匝数	
次级线圈匝数	
步骤3中的观察结果	
步骤4中的观察结果	
步骤5中的观察结果	
步骤6中的观察结果	
步骤7中的测量结果	
步骤8中的观察和测量结果	
步骤9中的观察结果	

- 当你轻触初级线圈使得电路接通时，观察小灯泡的情况。在接通以及之后断开时，有什么情况发生？将你的观察结果记录在数据表中。
- 拿住与电源负极相连的导线的另一端，使之与初级线圈接触5 s，观察小灯泡的情况。将你的观察结果记录在数据表中。
- 撤除初级线圈中的直流电源，保留次级线圈中的小灯泡。然后，将初级线圈的两端与交流电源相连，接通交流电，观察小灯泡的情况。将你的观察结果记录在数据表中。
- 调节电压表的量程开关，将两支表笔一端的导线分别与电压表的两端相连。然后，小心地将表笔接触初级线圈的两端，测出电压。再小心地将表笔接触次级线圈的两端，测出电压。将这两次读数记录在数据表中。
- 慢慢地抽出次级线圈中的铁芯，观察小灯泡的情况。在抽出铁芯后，重复步骤7，测量初级线圈和次级线圈上的电压。将你的观察和测量结果记录在数据表中。
- 小心地触摸铁芯，你有什么发现？将结果记录在数据表中。

分析

- 根据你的实验数据，计算比值 $\frac{N_s}{N_p}$ 。
- 根据你的实验数据，计算比值 $\frac{U_s}{U_p}$ 。

- 解释数据** 比值 $\frac{N_s}{N_p}$ 和 $\frac{U_s}{U_p}$ 之间有怎样的关系？
- 认识因果** 根据步骤7的结果，你认为这只变压器是升压变压器还是降压变压器？有什么证据支持你的结论？

结论与应用

- 推断** 怎样解释步骤4中对小灯泡的观察结果？
- 推断** 怎样解释步骤3中的观察结果？
- 推断** 怎样解释步骤8中抽出铁芯后，初级线圈和次级线圈电压的测量结果？
- 解释** 对步骤9中铁芯温度升高的现象作出解释。

进一步探索

为什么变压器不能在直流电路中工作，而只能在交流电路中工作？

生活中的物理学

讨论电能从发电厂传送到用户家庭的过程中变压器的使用情况。

物理 在线

若想了解更多关于电磁感应和变压器的知识，可登录网站：physicspp.com。



信用卡的发明及广泛应用堪称全球经济领域的一场革命，它使货币的流通更为快捷和方便。信用卡阅读器从信用卡背面的磁条中获得数据，它是电子货币流通过程中最重要的环节之一。

1 永磁铁与涂有氧化铁涂层的塑料卡片接触，在其上留下了磁化区。

2 磁铁在磁条上产生了一个个连续的相反极性的磁化区。这些磁化区代表了二进制数1和0，用以储存诸如信用卡持有者姓名及卡号等编码信息。

信用卡阅读器

信用卡背面

3 信用卡阅读器有一个检测头，它是一个带有缝隙、绕有线圈的小型铁环。

4 刷卡时，磁条拉过检测头的缝隙，在线圈中产生变化的电压。

刷卡

5 磁条上的二进制码转换为电压波形。这个波形输入计算机后，就会被传送至银行的复核中心。

理性思维

- 1. 观察** 为什么步骤5磁条上的二进制码与电压波形的次序相反？
- 2. 分析** 若小铁环没有缝隙，将发生什么情况？

25.1 变化的磁场产生电流

关键术语

- 电磁感应
- 第四类右手定则
- 电动势
- 发电机
- 平均功率

重要概念

- 法拉第发现, 当导线在磁场中运动时, 导线中有可能产生电流。
- 导线中的电流大小取决于导线的运动速度与磁场方向的夹角。当导线垂直于磁场运动时, 产生的电流为最大。
- 感应电动势 E 就是在磁场中运动的导线的两端的电势差, 它的单位是伏。
- 在磁感应强度为 B 的匀强磁场中, 长度为 L 、速度沿垂直于磁场方向的分量为 $v\sin\theta$ 运动的直导线中产生的感应电动势 E 由下式确定:

$$E = BLv\sin\theta$$

- 交流电的电流和电压可用它们的有效值表示:

$$I_{\text{有效}} = 0.707I_{\text{最大}}$$

$$U_{\text{有效}} = 0.707U_{\text{最大}}$$

- 发电机和电动机是类似的设备。发电机将机械能转化为电能, 而电动机将电能转化为机械能。

25.2 变化的磁场产生感应电动势

关键术语

- 楞次定律
- 涡流
- 自感
- 变压器
- 初级线圈
- 次级线圈
- 互感
- 升压变压器
- 降压变压器

重要概念

- 楞次定律表述为, 感应电流产生的磁场总是阻碍引起感应电流产生的原磁场的变化。
- 载流导线在磁场中运动时将会产生反电动势。反电动势的方向与电流的方向相反。
- 自感是载有变化电流的导线的一种特性。电流的变化越快, 阻碍其变化的感应电动势就越大。
- 变压器由绕制在同一铁芯上的两个线圈构成。通过初级线圈的交变电流在次级线圈中感应出交变电动势。交变电路中的电压可利用变压器进行升高或降低。

$$\frac{I_s}{I_p} = \frac{U_p}{U_s} = \frac{N_p}{N_s}$$

绘制概念图

24. 用下列术语完成概念图：发电机、反电动势、楞次定律。



理解概念

25. 什么是发电机的转子？(25.1)
26. 为什么转子中要用到铁芯？(25.1)
第27~29题请参考图25-16。
27. 导线在磁场中运动时将产生电压。导线相对于磁场沿什么方向运动时，所产生的电压最小？(25.1)
28. 当导线向右做切割磁感线的运动时，导线中的感应电动势的方向如何？(25.1)
29. 在发电机中增加导线的净长度时，会产生怎样的效果？(25.1)

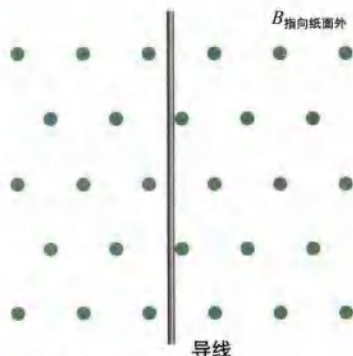


图25-16

30. 奥斯特和法拉第的发现有什么相同点？又有什么不同？(25.1)
31. 如果你有一个线圈和一根条形磁铁，试描述你怎样用它们来产生电流。(25.1)
32. 电动势表示什么意思？为什么说这个名词并不确切？(25.1)
33. 发电机和电动机有什么区别？(25.1)
34. 列出交流发电机的主要部件。(25.1)
35. 为什么交变电流的有效值小于它的最大值？(25.1)
36. **水力发电** 水坝拦住的水推动与发电机相连接的水轮机。试列出参与这一能量转化过程的所有能量形式，包括贮存的水和产生的电。(25.1)
37. 描述楞次定律。(25.2)
38. 导致电动机中产生反电动势的原因是什么？(25.2)
39. 为什么当你闭合开关使电感线圈中通有电流时，不会产生火花，而在断开时却有火花产生？(25.2)
40. 为什么在交流电路中，线圈的自感是一个重要的因素，而在直流电路中它却并不重要？(25.2)
41. 为什么本章中常常出现“变化”这个词汇？(25.2)
42. 变压器的初级线圈和次级线圈中的电动势之比与什么因素有关？(25.2)

应用概念

43. 试用量纲分析证明， BLv 的单位是V。
44. 当导线在磁场中运动时，闭合电路中的电阻是否对电路中的电流和电动势有所影响？
45. **骑自行车** 当洛根减小了他的自行车的速度时，对自行车发电机产生的电动势有什么影响？在你的解释中要使用“转子”这一词汇。
46. 交变电压的方向每秒改变120次。这是否意味着，连接在该交变电压上的用电器在交替地输入和输出能量？

47. 一根导线在磁铁两磁极间做水平方向的运动，如图25-17所示。感应电流的方向如何？



图25-17

48. 将导线绕在一根大铁钉上，制成一个电磁铁，如图25-18所示。如果你将这个电磁铁接到电池上，那么，是刚接通时的电流大，还是接通十分之几秒后的电流大，或者电流根本就没有变化？请说明理由。



图25-18

49. 回路中的一段导线在一对磁极之间向下运动，如图25-19所示。导线中感应电流的方向怎样？

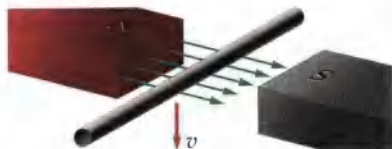


图25-19

50. 变压器的初级线圈通过开关与电池相联，次级电路中有一个灯泡，如图25-20所示。你认为只要开关闭合灯泡就会发亮，还是只有在开关闭合或者断开的瞬间灯泡才会发亮？请说明理由。



图25-20

51. **地磁场** 地球磁场的方向在北半球向下倾斜并向北指向，如图25-21所示。如果一根东西向放置的导线自北向南运动，感应电流的方向怎样？

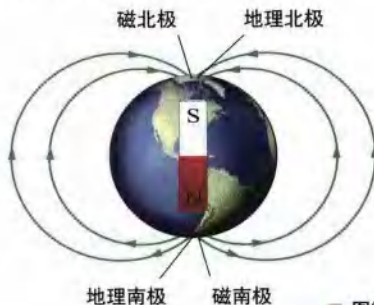


图25-21

52. 假设你使一根铜导线向下通过磁场 B 运动，如图25-19所示。

- 导线中感应电流的方向是向右还是向左？
- 只要导线在磁场中运动，导线中就会产生电流，此时这段导线就是在磁场中的载流导线，它必然会受到力的作用。这根导线由于感应电流而受到的作用力的方向怎样？

53. 在一次物理演示中，一根条形磁铁在一根铜管中落下，如图25-22所示。磁铁落下时非常缓慢，由此同学们推断，它一定受到了某种与重力方向相反的力的作用。

- 如果磁铁的S极朝下，那么下落磁铁在管子中产生的感应电流的方向怎样？
- 这个感应电流所产生的磁场的方向又是怎样的？
- 这个磁场是如何使下落磁铁的加速度减小的？



图25-22

54. **发电机** 为什么当发电机与外电路接通输出电流时，比它空载时的转动更为困难？

第25章 测评

55. 在 $t > 0$ 的瞬间, 为什么电动机中的起始电流非常大? 试利用楞次定律对此现象作出解释。
56. 联系图25-10, 应用楞次定律, 说明为什么实际变压器的铁芯都是用一片片薄片叠合而成的。
57. 实际变压器的铁芯是由一片片薄片叠合而成的, 以降低它的导电性。但是, 涡电流无法完全消除, 因此总会存在小的铁芯损耗。这是变压器总损耗中的一个部分。哪个基本定律表明, 这种损耗不可能等于零?
58. 说明变压器中的互感过程。
59. 肖恩让一根条形磁铁在一根竖直的铜管中落下, 磁铁的N极朝下。
- 当磁铁的底部通过铜管时, 铜管内感应电流的方向怎样?
 - 这个感应电流产生的感应磁场的方向怎样?

问题解决

25.1 变化的磁场产生电流

60. 一根长20.0 m的导线, 以4.0 m/s的速度沿垂直于磁场的方向运动, 在导线中产生40 V的感应电动势。磁场的磁感应强度为多大?
61. 飞机 一架飞机以 9.50×10^2 km/h的速度通过磁感应强度为 4.5×10^{-5} T的地磁场区, 且速度方向与地磁场方向几乎垂直。在相距75 m的飞机两翼尖端之间的感应电动势为多大?
62. 一根长0.75 m的直导线, 以16 m/s的速度向上通过一个磁感应强度为0.30 T的水平方向的磁场, 如图25-23所示。
- 导线中的感应电动势为多大?
 - 如果这根导线是一个电阻为11 Ω 的电路的一部分, 导线中的电流为多大?
63. 一根长0.20 m的导线, 以多大的速度在磁感应强度为2.5 T的磁场中运动时, 才能产生10 V的感应电动势?
64. 一台交流发电机产生的电压的最大值为565 V, 它供给外电路的电压的有效值是多少?
65. 一台交流发电机产生的电压的最大值为150 V, 输出电流的最大值为30 A。
- 发电机的电压的有效值是多少?
 - 它供给外电路的电流的有效值是多少?
 - 电路中消耗的有效功率是多少?
66. 电炉 一只电炉接在有效电压为240 V的交流电源上。
- 求电炉使用时, 它的发热元件两端的电压的最大值是多少?
 - 如果发热元件的电阻为11 Ω , 通过它的电流的有效值是多少?
67. 一根导线以4.0 m/s的速度在磁感应强度为0.050 T的磁场中运动。为了产生4.5 V的感应电动势, 这根导线至少要多长?
68. 一根长40.0 cm的导线, 以1.3 m/s的速度在磁感应强度为0.32 T的磁场中沿垂直于磁场的方向运动。如果这根导线与10.0 Ω 的电阻连成电路, 电路中的电流为多大?
69. 将一根总电阻为0.10 Ω 的铜导线的两端与电阻为875 Ω 的灵敏电流计的两个接线柱相连。然后, 将铜导线中10.0 cm的一段导线以1.0 m/s的速度垂直通过磁感应强度为 2.0×10^{-2} T的磁场。灵敏电流计的示数为多大?
70. 有一个磁感应强度为0.045 T的磁场, 它的方向与水平面成60.0°。一根长2.5 m的导线以2.4 m/s的速度沿水平方向运动。
- 该磁场的磁感应强度在竖直方向上的分量为多大?
 - 导线中的感应电动势为多大?
71. 水坝 一台发电机能提供375 MW (375×10^6 W)的电功率。假定水轮机和发电机的效率都是85%。
- 求每秒落下的水提供给水轮机的能量。
 - 已知水的动能来自势能的变化: $E = mgh$ 。每秒内需要多少这种势能的变化?
 - 如果水的落差为22 m, 每秒内需多少质量的水通过水轮机, 才能产生这样的功率?

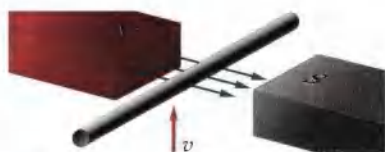


图25-23

72. 一根长20 cm的导线在磁感应强度为4.0 T的磁场中运动。求当导线做垂直切割磁感线的运动时, 导线中的感应电动势。假定导体以1 m/s的恒定速率运动。
73. 参考例题1和图25-24, 回答如下问题。假定磁感应强度为 7.2×10^{-2} T。
- 求导体中的感应电压。
 - 求电流 I 。
 - 确定A端相对于B端的极性。

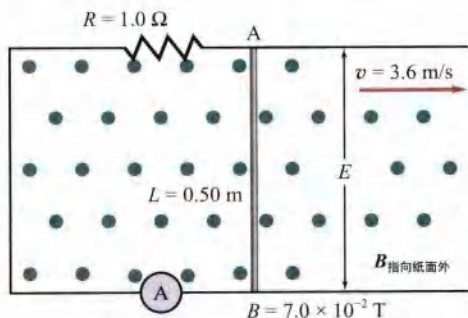


图25-24

25.2 变化的磁场产生感应电动势

74. 一台变压器的初级线圈为150匝, 接在120 V的电源上。要提供下列电压, 试计算所需的次级线圈的匝数。
- 625 V
 - 35 V
 - 6.0 V
75. 一台升压变压器的初级线圈为80匝, 次级线圈为1 200匝, 初级线圈接在120 V的交变电流上。
- 次级线圈两端的电压为多大?
 - 如果次级电路中的电流是2 A, 初级电路中的电流为多大?
 - 这台变压器的输入和输出功率分别为多大?
76. 笔记本电脑 一台笔记本电脑需从120 V的电源中得到有效值为9.0 V的电压。
- 如果变压器的初级线圈为475匝, 那么次级线圈的匝数应是多少?
 - 若计算机中的电流为125 mA, 那么初级线圈中的电流是多少?
77. 电吹风 美国使用的电吹风在120 V的电压下工作, 电流为10 A。现将它在中国市用电压为240 V的英国使用。
- 所需变压器的匝数比是多少?
 - 电吹风工作时的电流为多大?
78. 一台150 W的变压器, 输入电压为9.0 V, 输出电流为5.0 A。
- 它是升压变压器还是降压变压器?
 - 它的输出电压和输入电压之比是多少?
79. 斯科特将一台变压器接到24 V的电源上, 测得次级线圈两端的电压为8.0 V。如果将初级和次级线圈对调, 那么输出电压为多大?

复习提高

80. 一台升压变压器的初级线圈为500匝, 次级线圈为15 000匝。初级线圈接在120 V的交流电源上。
- 试计算次级电路两端的电压。
 - 如果次级电路中的电流为3.0 A, 试求初级电路中的电流。
 - 初级电路得到了多大的功率? 次级电路提供了多大的功率?
81. 一根长0.2 m的导线在磁感应强度为2.5 T的磁场中做垂直切割磁感线的运动。如果导线中的感应电动势为10 V, 导线的运动速度必须是多少?
82. 一根长50 cm的导线沿着垂直于磁感应强度为0.20 T的磁场方向运动。如果导线中的感应电动势为1.0 V, 导线的运动速度必须是多少?
83. 家庭照明电路的有效电压是120 V, 它的电压的最大值是多少?
84. 电烤箱 如果通过电烤箱的交变电流的有效值是2.5 A, 电流的最大值是多少?
85. 如果瞬时电压超过575 V, 某个电容器的绝缘层就会被击穿。能够施加在这个电容器上的交流电压的有效值最大是多少?
86. 电路损毁 如果某电路中的瞬时电流达到21.25 A时, 它就会被损毁。那么, 该电路可通过的电流的有效值最大是多少?
87. 一所变电站输入的交变电压是240 000 V。为了得到440 V的输出电压, 它所使用的降压变压器的匝数比应是多少?

第25章 测评

88. 一台交流发电机为一套45 kW的工业电热设备供电。如果该系统的电压的有效值是660 V，它的电流最大值是多少？
89. 一台升压变压器的初级线圈为100匝，次级线圈为10匝。如果它的电阻性负载是2.0 kW，那么初级线圈中电流的有效值为多大？假定次级电路的电压的最大值是60.0 V。
90. 一台变压器的额定功率是100 kVA，效率是98%。
- 如果它与98 kW的用户功率负载相连，它的输入功率是多少？
 - 此时初级线圈中电流的最大值是多少？假定电压的最大值是600 V。
91. 一根长0.40 m的导线，以8.0 m/s的速度在磁感应强度为2.0 T的磁场中做垂直切割磁感线的运动。
- 导线中的感应电动势为多大？
 - 如果这根导线是一个电阻为6.4 Ω 的电路的一部分，导线中的电流为多大？
92. 一根长7.50 m的导线，以5.50 m/s的速度在垂直方向做切割地磁场的运动。如果这根导线是一个电阻为 $5.0 \times 10^{-2} \text{ m}\Omega$ 的电路的一部分，那么导线中的电流为多大？假定地磁场的磁感应强度为 $5 \times 10^{-5} \text{ T}$ 。
93. 接在144 Ω 电阻器上的交变电压的最大值是 $1.00 \times 10^2 \text{ V}$ ，该电阻器消耗的功率为多大？
94. 电视机 电视机需利用升压变压器将120 V的电压提高到48 000 V。已知变压器次级线圈有20 000匝，输出电流为1.0 mA。
- 初级线圈的匝数应是多少？
 - 输入电流为多大？

理性思维

95. 应用概念 假定存在一条“反楞次定律”，这意味着存在某种力，它能推进磁场的变化。因此，当需要更多的能量时，转动发电机所需要的力反而可以减小。这条“定律”违反了哪条守恒定律？请说明。
96. 分析 实际变压器的效率达不到100%。写出变压器效率的表达式。假定一台将125 V的市电电压降低到28.0 V的降压变压器的效率为92.5%，次级线圈中的电流为25.0 A。那么，初级线圈中的电流为多大？

97. 分析与结论 一台效率为95%的变压器为8户家庭供电。当所有这8户家庭都开启“240 V、35 A”的电炉时，供给他们的总功率是多少？有多少功率以热量的形式消耗在变压器中？

科技写作

98. 在很多日常工具（如电钻）中，都要用到电动机。查阅资料，说明这类电动机既可使用交流电，也可使用直流电。

日积月累

99. 从某颗远距离星球射来的光的频率为 $4.56 \times 10^{14} \text{ Hz}$ 。如果该星球朝向地球运动的速率为2 750 km/s，地球上测得的该光的频率是多少？（第16章）
100. 从某远距离星云射来的光的频率为 $7.29 \times 10^{14} \text{ Hz}$ ，地球上测得此光的频率为 $6.14 \times 10^{14} \text{ Hz}$ 。该星云的运动速率为多大？方向又是如何？（第16章）
101. 将48 V的电压施加在一个22 μF 的电容器上，该电容器极板上的电荷量是多少？（第21章）
102. 一个规格为22 Ω 、5.0 W的电阻器工作时，它消耗的功率为2.5 W。此时，加在该电阻器两端的电压为多大？（第22章）
103. 三个85 Ω 的电阻器并联后，再与两个并联的85 Ω 电阻器相串联，如图25-25所示。求该系统的总电阻。（第23章）

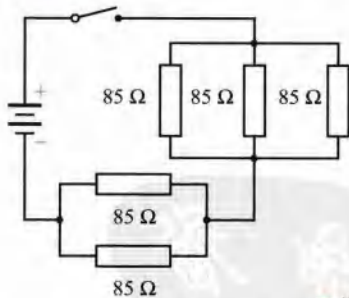


图25-25

104. 速度为 $2.1 \times 10^6 \text{ m/s}$ 的电子垂直进入磁感应强度为0.81 T的匀强磁场区。电子受到的磁场的作用力为多大？它的加速度又是如何？已知电子的质量为 $9.11 \times 10^{-31} \text{ kg}$ 。（第24章）

标准化测试

选择题

1. 对于电动势，下列量纲分析正确的是 ()

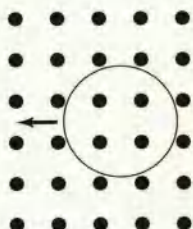
- (A) $(\text{N} \cdot \text{A} \cdot \text{m}) \cdot \text{J}$
 (B) $(\text{N} \cdot \text{A/m}) \cdot \text{m} \cdot (\text{m/s})$
 (C) $\text{J} \cdot \text{C}$
 (D) $(\text{N} \cdot \text{m} \cdot \text{A/s}) \cdot (1/\text{m}) \cdot (\text{m/s})$

2. 长427 mm的导线在磁场中以18.6 cm/s的速度做垂直切割磁感线的运动，导线中的感应电动势为4.20 V。该磁场的磁感应强度为 ()

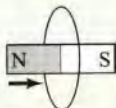
- (A) $5.29 \times 10^{-4} \text{ T}$ (B) $1.89 \times 10^{-2} \text{ T}$
 (C) 0.334 T (D) 52.9 T

3. 下列实验中，在线圈中不会产生感应电流的是 ()

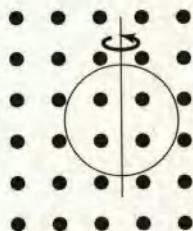
(A)



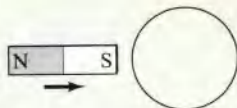
(B)



(C)



(D)



4. 长15 cm的导线在磁场中以0.12 m/s的速度做垂直切割磁感线的运动，磁场的磁感应强度为1.4 T。导线中的感应电动势为 ()

- (A) 0 V (B) 0.018 V
 (C) 0.025 V (D) 2.5 V

5. 一台变压器利用91 V的电源为一个13 V的器件提供能量。如果变压器的初级线圈为130匝，该器件从变压器获得的电流为1.9 A，那么初级线圈中的电流为 ()

- (A) 0.27 A (B) 0.70 A
 (C) 4.8 A (D) 13.3 A

6. 一台能提供202 V最大值电压的发电机与一台电阻为480 Ω 的电热器相连接。通过这台电热器的电流的有效值是 ()

- (A) 0.298 A (B) 1.68 A
 (C) 2.38 A (D) 3.37 A



拓展题

7. 试比较在输送功率均为800 W，而输出电压分别为160 V和960 V的两种情况下，输电线路中的功率损耗。假定线路的电阻为2 Ω 。由此，你能得出怎样的结论？

✓ 考试小贴士

调查

咨询你的老师，测试中可能会出现哪些题型。然后，针对这些题型做一些模拟测试，以便做好针对性的复习。

第26章

电磁现象

内容提要

- 利用电场和磁场的组合，测量电子、原子和分子的质量。
- 说明电磁波是怎样产生、传播和接收的。

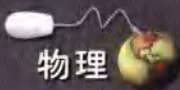
学习本章的意义

在日常生活中，各种电磁波，包括无线电波、电磁波、微波、可见光以及X射线等，都扮演着重要的角色。

抛物面接收器 如图所示的这种抛物面碟形接收器，常被用来接收来自地面上空数百千米远处轨道上的卫星以及太阳系外星球发出的电磁波信号。

想一想 ▶

抛物面碟形接收器的名称来源于它的反射面的形状。为什么抛物面碟形接收器适用于接收微弱的电磁波信号呢？



物理 在线
physicspp.com



起步实验

探究无线电广播信号来自何处

问题

收音机接受的是无线电波。你的收音机所接收到的调幅频道节目是从多远处的广播电台发送来的？

步骤

1. 无线电调幅波段的频率在540~1 690 kHz之间。作一张数据表，使它的各列分别表示频率(kHz)、电台名称、信号强度、电台位置、距离(km)。
2. 将收音机调谐在540 kHz，中等音量。
3. **收集和整理数据** 缓慢地从低到高调节频率，直到你能清晰地听到某个电台的广播内容，弄清这个广播电台的名称。将这个电台的频率、信号强度(分为强、中、弱)、名称记录在你的数据表中。
4. 重复步骤3，确保你的数据已经遍及直到1 690 kHz的所有无线电调幅波段的广播电台。
5. 确定每个电台的位置，将每个电台所在的城市记录在你的数据表中。

6. **用SI制测量** 从地图上找出每个电台所在的城市的位置，量出无线电波传播的距离，将所得结果记录在你的数据表中。

分析

最远的广播电台距离你有多远？无线电波传播的距离对它的信号强度是否有影响？

理性思维

改变天线的方向一般会对所接收到的信号的强度有一定的影响。这显示了无线电波的什么特性？



26.1 电场、磁场与物质的相互作用

你或许已经听到过短波无线电、微波、高频电视信号、超高频电视信号等词汇，尽管你可能并不了解这些词汇的含义。事实上，它们都是用来描述不同类型的电磁波的。这些电磁波通过空气传播，为收音机、电视机以及其他各种类型通讯工具提供信号。所有这些电磁波都是由在空间中传播的电场和磁场构成的。

理解电磁波的关键是了解电子的性质。你可能会好奇这是为什么。你知道，电磁波是由加速运动的电子产生的。电子的电荷产生电场，而运动的电荷还会产生磁场。此外，电磁波是通过天线发射或吸收的，而天线的材料中也包含了电子。因此从逻辑上说，要了解电磁波的产生、传播和接收过程，以及在这些过程中所使用的各式各样的器件，就必须先考察电子的性质。

学习目标

- 描述阴极射线管的工作原理。
- 求解有关阴极射线管、质谱仪中带电子与电场和磁场相互作用的问题。
- 解释质谱仪是如何对不同质量的离子进行分离的。

关键术语

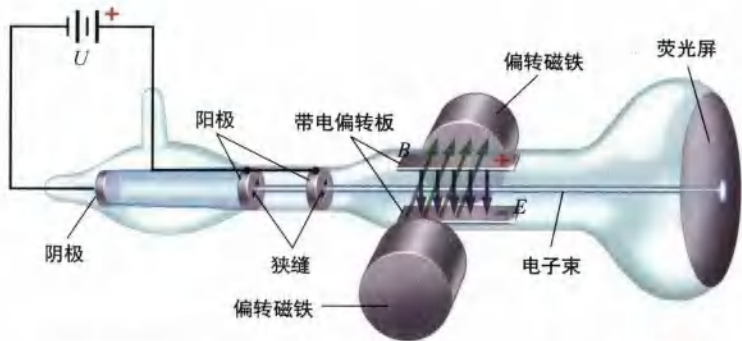
同位素
质谱仪

电子的质量

你知道应该如何确定那些无法用肉眼看到的微观粒子的质量吗？这些物体的质量是如此的小，以至于你根本无法用最灵敏的测量工具对它进行称量。如何测量电子的质量，是摆在19世纪末物理学家面前的一个极具挑战性的难题。你在第21章中已经知道，密立根利用油滴实验测量了电子的电荷量 q ($1.602 \times 10^{-19} \text{ C}$)，由此掀开了冰山的一角。其后，英国物理学家汤姆孙 (J.J.Thomson) 测量了电子的荷质比 $\frac{q}{m}$ 。在知道了电子的荷质比以及它的电荷量后，汤姆孙就能计算出电子的质量了。

汤姆孙测量电子荷质比的实验 1897年，汤姆孙成功地完成了测量电子荷质比的实验。汤姆孙在实验中使用了如图26-1所示的能产生电子束的阴极射线管。为了尽量减少电子束与空气分子的碰撞，汤姆孙将玻璃管抽成真空。

■ 图26-1 汤姆孙最早通过阴极射线管实验测量了电子的荷质比。阴极射线管利用了电场和磁场来改变电子束的运动路径。



在阴极射线管中，阴极与阳极间的高电压能产生一个电场。从阴极发射出来的电子受到这个电场的作用而向阳极做加速运动，然后通过阳极狭缝形成很细的电子束。当电子抵达阴极射线管的末端时，它就会撞击荧光屏，产生亮点。

汤姆孙利用电场和磁场产生的力使通过阴极射线管的电子束发生偏转。由两块带电平行板产生的电场与电子束的方向垂直。场强为 E 的电场作用在电子上的力等于 qE ，它使电子向上朝正极板方向偏转。偏转磁场则由两块电磁铁产生，其方向垂直于电子束以及偏转电场的方向。在第24章中你知道，磁场作用在运动电子上的力既垂直于磁场方向，又垂直于电子的运动方向。磁感应强度为 B 的磁场作用在电子上的力等于 Bqv ，其中 v 为电子的速度，它使电子向下偏转。

通过调节电场和磁场，可以使电子束不发生偏转，而保持沿直线方向行进。此时，偏转电场和偏转磁场作用在电子上的力的大小相等而方向相反。这可表示如下：

$$Bqv = Eq$$

解出 v ，得

$$v = \frac{Eq}{Bq} = \frac{E}{B}$$

此结果表明，只有当电子的速度取某一特定值时，它所受到的偏转电场和偏转磁场的作用力之和才等于零。此时若撤除电场，仅保留磁场，那么由于磁场力垂直于电子的运动方向，导致电子具有向心加速度，并沿着半径为 r 的圆周路径行进。利用牛顿第二运动定律，可以写出此时电子的运动方程：

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

由此式解出 $\frac{q}{m}$ ，便得到如下结果：

$$\text{阴极射线管实验中，电子的荷质比 } \frac{q}{m} = \frac{v}{Br}$$

在阴极射线实验中，电子的荷质比等于电子的速度与磁感应强度和电子的圆轨道半径乘积之比。

汤姆孙利用测得的 E 值和 B 值，计算出了电子在直线轨道上的速度。然后，他又测量了电子仅受磁场力作用时荧光屏上的光点与无偏转时光点间的距离。利用这个距离，他算出了电子圆轨道的半径 r 。这样，汤姆孙就可得出 $\frac{q}{m}$ 了。通过多次实验求平均，他断定 $\frac{q}{m} = 1.759 \times 10^{11} \text{ C/kg}$ 。利用这个结果及已知 q 的值，便可计算电子的质量：

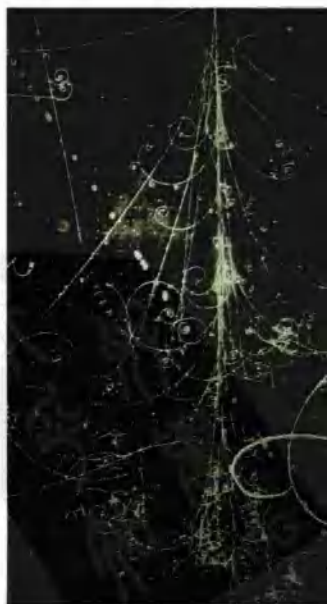
$$m = \frac{q}{\frac{q}{m}} = \frac{1.602 \times 10^{-19} \text{ C}}{1.759 \times 10^{11} \text{ C/kg}} = 9.107 \times 10^{-31} \text{ kg}$$

$$m \approx 9.11 \times 10^{-31} \text{ kg}$$

质子的荷质比 汤姆孙还利用同样的装置测量了质子的荷质比。他的实验基于以下这个事实：无论是在电场中还是在磁场中，带正电的粒子的偏转方向总是与电子的相反，如图26-2所示。

为了将带正电荷的粒子加速到偏转区，汤姆孙将阳极与阴极间的电场反向。他还将少量氢气充入管中，电场将氢原子中的电子“拉”出，使其成为带正电的离子。带正电的氢离子，即质子，被加速通过阳极中的狭缝，再通过电场和磁场，向阴极射线管的荧光屏射去。在这个实验中，汤姆孙用来确定质子质量的方法与前面确定电子质量的方法相同。实验测得的质子的质量为 $1.67 \times 10^{-27} \text{ kg}$ 。汤姆孙还利用这种方法测量了诸如氦、氟、氙等较重离子的质量。

■ 图26-2 照片中显示了电子(e^-)和正电子(e^+)在云室中通过磁场运动时的圆轨道径迹。云室是早期高能物理实验中常用的一类粒子探测器。电子和正电子的弯曲方向相反。



► 例题 1

轨道半径 电子的质量为 $9.11 \times 10^{-31} \text{ kg}$ ，它以 $2.0 \times 10^5 \text{ m/s}$ 的速度通过阴极射线管，其方向与磁感应强度为 $3.5 \times 10^{-2} \text{ T}$ 的偏转磁场相垂直。求偏转电场被关闭后，电子运动的圆轨道半径。

1 分析概括问题

- * 画出电子路径，并标出速度 v 。
- * 标出垂直于速度方向的磁场。
- * 标出电子受到的力和电子运动轨道的半径。

已知：

$$v = 2.0 \times 10^5 \text{ m/s}$$

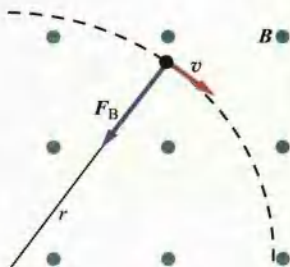
$$B = 3.5 \times 10^{-2} \text{ T}$$

$$m = 9.11 \times 10^{-31} \text{ kg}$$

$$q = 1.602 \times 10^{-19} \text{ C}$$

未知：

$$r = ?$$



2 求解未知量

利用牛顿第二运动定律，计算电子在阴极射线管的偏转磁场中做圆轨道运动时的轨道半径。

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

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

$$= \frac{9.11 \times 10^{-31} \text{ kg} \times 2.0 \times 10^5 \text{ m/s}}{3.5 \times 10^{-2} \text{ T} \times 1.602 \times 10^{-19} \text{ C}}$$

$$= 3.3 \times 10^{-5} \text{ m}$$

将 $m = 9.11 \times 10^{-31} \text{ kg}$, $v = 2.0 \times 10^5 \text{ m/s}$,
 $B = 3.5 \times 10^{-2} \text{ T}$, $q = 1.602 \times 10^{-19} \text{ C}$ 代入。

3 验证答案

- * **单位是否正确？** 圆轨道的半径是长度，所以它的单位是 m。

► 练一练

下列习题中，假定所有带电粒子均垂直于匀强磁场运动。

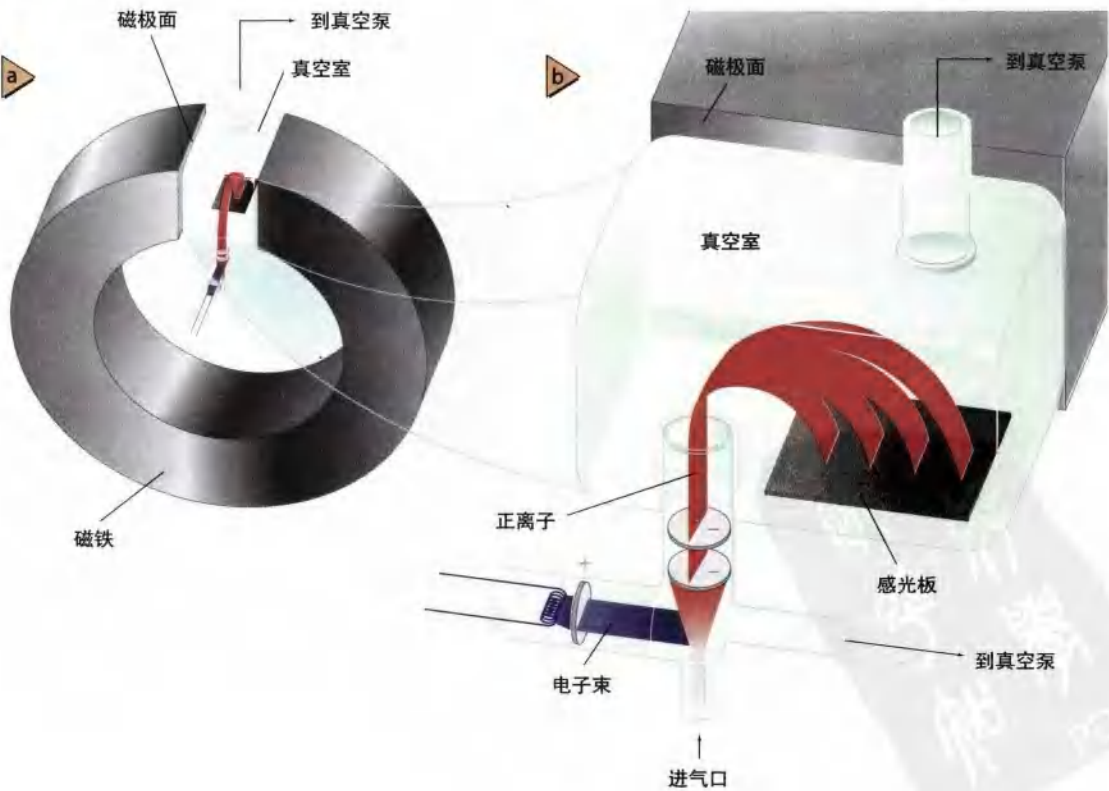
1. 质子以 $7.5 \times 10^3 \text{ m/s}$ 的速度通过一个磁感应强度为 0.6 T 的磁场区，试求它的圆轨道半径。已知质子的电荷量与电子相同，但是带正电。
2. 电子通过磁感应强度为 $6.0 \times 10^{-2} \text{ T}$ 的磁场时所受到的磁场力被 $3.0 \times 10^3 \text{ N/C}$ 的电场所施加的力抵消。该电子的速率为多大？
3. 第2题中，如果电场不存在，电子做圆轨道运动的半径为多少？
4. 质子在通过一个磁感应强度为 0.6 T 的磁场区时，因同时受到一个 $4.5 \times 10^3 \text{ N/C}$ 的电场的作用力而不发生偏转。质子的速度为多大？

质谱仪

当汤姆孙将氖充入阴极射线管中时，有趣的情况发生了：此时荧光屏上的亮点不是一点，而是两点。每一点对应于一种荷质比的值，也就是说，他得到了两种不同的 $\frac{q}{m}$ 值。汤姆孙由此断定，同一元素可以有不同的原子，它们的化学性质相同而质量不同。化学性质相同而质量不同的同种原子就称为同位素（isotope）。

质谱仪（mass spectrometer）是一种常用于研究同位素的仪器，它的结构类似于汤姆孙的阴极射线管。质谱仪可用来精确测量正离子的荷质比。通过它，科学家就可计算出元素的各种同位素的质量。被研究的材料称为离子源，因为在测量时要将它变成正离子。离子源必须或者是气体，或者是能通过加热而形成蒸气的物体。当加速电子撞击这种气体或蒸气中的原子时，就会将其中的电子击出，从而形成正离子。电极间的电势差将产生一个电场，使离子加速。如图26-3所示为质谱仪的基本结构。

图26-3 质谱仪常用于分析元素的同位素成分。在质谱仪中，磁铁使真空室中的正离子按它们的质量发生不同程度的偏转(a)；在真空室中，这一过程被记录在感光板或固态检测器上(b)。



● 迷你实验

模拟质谱仪

将一块橡皮泥垫在有槽沟的直尺的一端，使其倾斜。然后将一个直径为6 mm的钢球安放在斜槽的中部位置，放手让它滚下。

1. 观察小球沿斜槽滚下，并在桌面上运动的情况。

2. 实验：将一块磁铁放置在桌面的一角，使它能引起小球的运动路径发生弯曲。但不要让小球和磁铁靠得过近，以免它被磁铁直接吸引过去。如有必要，重复步骤1。

3. 预测当小球从斜槽的较高或较低处被释放时，小球的运动路径。

4. 检验你的预测。

分析与结论

5. 解释上述的观察结果与带电粒子通过磁场的运动情况是否一致。

为了选择以某一速度运动的离子，与汤姆孙的阴极射线管实验相仿，首先要让离子通过由电场和磁场所构成的偏转场。然后，让通过这两个场而未偏转的离子进入只有匀强磁场的区域，此时离子将做圆轨道运动，其轨道半径可用来确定离子的荷质比。轨道半径 r 可由牛顿第二运动定律算出。根据牛顿第二运动定律，有

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

由此解出 r ：

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

离子未偏转时的速度可从它由静止开始经过电压 U 加速而获得的动能算出：

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

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

将这个表达式代入 $r = \frac{mv}{qB}$ ，就可得到圆轨道的半径

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

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

$$= \frac{1}{B} \sqrt{\frac{2mU}{q}}$$

等号两边各乘以 B ，可得

$$Br = \sqrt{\frac{2mU}{q}}$$

此结果便可用来确定离子的荷质比。

$$\text{质谱仪中离子的荷质比} \quad \frac{q}{m} = \frac{2U}{B^2 r^2}$$

在质谱仪中，离子的电荷与它的质量的比值等于加速电场的电压除以磁感应强度的平方和离子圆轨道半径的平方的乘积，再乘以2。

如图26-3所示，在这类质谱仪中，离子射在感光板上并留下痕迹。真空中离子弯曲轨道的直径很容易测量，它等于感光板上的条痕与电极上的缝隙之间的距离。因此，离子的轨道半径 r 就等于所测得的这个距离的一半。

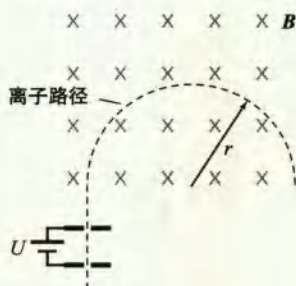
例题 2

氖原子的质量 质谱仪操作者制备了一束二价电离的氖原子。它们先通过了34 V的加速电场，然后进入磁感应强度为0.050 T的磁场区，此时它们的轨道半径为53 mm。试确定氖原子的质量。这相当于多少个质子的质量数？

1 分析概括问题

- 画出离子的圆轨道路径，并标出半径。
- 画出两个电极，标出电势差。

	已知：	未知：
$U = 34 \text{ V}$	$m_p = 1.67 \times 10^{-27} \text{ kg}$	$m_{\text{Ne}} = ?$
$B = 0.050 \text{ T}$	$q = 2 \times 1.60 \times 10^{-19} \text{ C}$	$N_p = ?$
$r = 53 \text{ mm}$	$= 3.20 \times 10^{-19} \text{ C}$	



2 求解未知量

利用质谱仪中确定离子荷质比的公式求解。

$$\begin{aligned} \frac{q}{m_{\text{Ne}}} &= \frac{2U}{B^2 r^2} \\ m_{\text{Ne}} &= \frac{qB^2 r^2}{2U} \\ &= \frac{3.20 \times 10^{-19} \text{ C} \times (0.050 \text{ T})^2 \times (53 \text{ mm})^2}{2 \times 34 \text{ V}} \quad \text{将 } q = 3.20 \times 10^{-19} \text{ C}, B = 0.050 \text{ T}, \\ &= 3.3 \times 10^{-26} \text{ kg} \quad r = 53 \text{ mm}, U = 34 \text{ V} \text{ 代入。} \end{aligned}$$

将氖原子的质量除以质子的质量，就可得到氖原子的质子数。

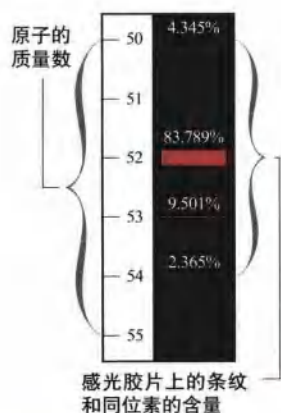
$$\begin{aligned} N_p &= \frac{m_{\text{Ne}}}{m_p} = \frac{3.3 \times 10^{-26} \text{ kg}}{1.67 \times 10^{-27} \text{ kg/个}} \\ &\approx 20 \text{ 个质子} \end{aligned}$$

3 验证答案

- 单位是否正确？** 质量的单位是g或kg。质量数应无单位。
- 数值是否合理？** 氖有两种同位素，它们的质量分别为20个和22个质子质量。

练一练

- 使一束一价电离的氧原子进入质谱仪，所测得的数据为： $B = 7.2 \times 10^{-2} \text{ T}$ ， $q = 1.60 \times 10^{-19} \text{ C}$ ， $r = 0.085 \text{ m}$ ， $U = 110 \text{ V}$ 。试求氧原子的质量。
- 从一次质谱仪的实验中得到的关于二价电离的氢原子的数据为： $q = 2 \times 1.60 \times 10^{-19} \text{ C}$ ， $B = 5.0 \times 10^{-2} \text{ T}$ ， $r = 0.106 \text{ m}$ ， $U = 66.0 \text{ V}$ 。试求氢原子的质量。
- 一束一价电离的锂原子无偏转地通过一个由磁感应强度为 $1.5 \times 10^{-3} \text{ T}$ 的磁场和与之相垂直的场强为 $6.0 \times 10^2 \text{ N/C}$ 的电场所构成的区域。锂原子在通过该区域时的速度为多大？
- 在例题2中，已确定了一种氖同位素的质量。若已知氖的另一种同位素的质量为22个质子的质量，那么，这两种同位素落在质谱仪感光板上的位置相距多远？



■ 图26-4 质谱仪被广泛地应用于元素的同位素成分分析领域。图中显示的胶片上留下的痕迹是对铬的同位素成分分析的结果。

同位素分析 如图26-4所示为铬（Cr）离子样品在胶片上的痕迹。四条不同的红线痕迹表明，自然界中的铬原子是由四种同位素构成的。痕迹线的宽度与同位素的含量相对应。可见，在自然界中，质量数为52的铬的同位素的含量最大。四种同位素含量的百分比之和等于100%。你可能从化学中已经知道，在元素周期表中列出的各种元素的质量实际上是该元素的所有稳定同位素的质量的加权平均值。

所有投射在胶片上的铬离子具有相同的电荷量，它取决于从作为离子源的铬原子中有多少个电子被移出。你知道，当加速电子将中性原子中的电子击出时，就形成了离子。击出一个电子，就产生一价离子。若要击出第二个电子而产生二价离子，就需要更多的能量。这可以通过让电子经过更强的电场，从而产生更大的加速度的方法得到。因此，高能加速电子可同时产生一价离子和二价离子。在这种情况下，质谱仪操作者可根据需要选择离子。

其他应用 质谱仪被应用于各个领域。例如，它可以用来分离铀的同位素，从而“提纯”铀样品。此时，质谱仪胶片将被收集容器所替代。质谱仪还可用来检测和辨认样品中的微量分子，这种技术被广泛地应用于环境科学和法医学等领域。质谱仪的灵敏度极高，研究者可用它来分离质量差仅为百万分之一的离子，也可用它从包含百亿个分子的样品中辨认出其中的一个分子。

本节复习题

- 9. 阴极射线管** 描述阴极射线管中电子束的形成过程。
- 10. 磁场** 在质谱仪中，一个离子的圆轨道半径为 $r = \frac{1}{B} \sqrt{\frac{2Um}{q}}$ 。根据此式，说明质谱仪可用来分离不同质量的离子。
- 11. 磁场** 现代质谱仪可用来分析质量是质子质量几百倍的分子。如果这些分子的一价离子是采用相同的加速电压产生的，那么应如何改变偏转磁场的磁感应强度，才能使它们投射到胶片上？
- 12. 轨道半径** 以 $4.2 \times 10^4 \text{ m/s}$ 的速率运动的质子通过磁感应强度为 1.20 T 的磁场，试求它的圆轨道半径。
- 13. 质量** 一束二价电离的氧原子通过电势差为 232 V 的加速电场，然后进入磁感应强度为 75 mT 的偏转磁场，做半径为 8.3 cm 的圆轨道运动。氧原子的质量是多少？
- 14. 理性思维** 无论怎样提高产生离子的电子的能量，汤姆孙都无法从氢原子中移出第二个电子。你能否由此对氢原子中的正电荷作出某种判断？

26.2 空间中的电磁场

你 每天的生活都与电磁波紧密地联系着, 尽管你可能并不真正了解它。来自电视台、广播电台、轨道卫星甚至遥远星云的信号实际上都是以电磁波为载体的。电磁波还应用在诸如微波炉、遥控器以及手机等许许多多的日用产品中。本节中, 你将要学习电磁波的性质, 以及它的产生、传播和接收过程。

电磁波

电磁波的发现是19世纪的一大成就。它推动了许多新产品与新技术的创造发明, 极大地推进了现代社会的发展。

电磁波的发现 1821年, 丹麦物理学家奥斯特(H. Oersted) 在学生做演示实验时发现, 电流会使它附近的小磁针发生偏转。奥斯特相信, 这个现象表明电与磁之间存在着某种本质的联系。他认为, 导体中的电流能产生磁场, 导体中的交变电流能产生交变的磁场。奥斯特的发现极大地激发了当时科学工作者的创造力, 导致了大量新的发现和发明。

七年后, 英国的法拉第和美国的中学教师亨利各自发现了电磁感应现象, 即运动的磁场能感应出电场。更有趣的是, 如图26-5a所示, 即使不存在导线, 也会有感应电场产生。这说明, 变化的磁场能产生变化的电场。注意, 如图26-5a所示, 这种感应电场的电场线是闭合的。这是因为, 与静电场的情况不同, 在感应电场中, 没有电荷作为电场线的起点或终点。

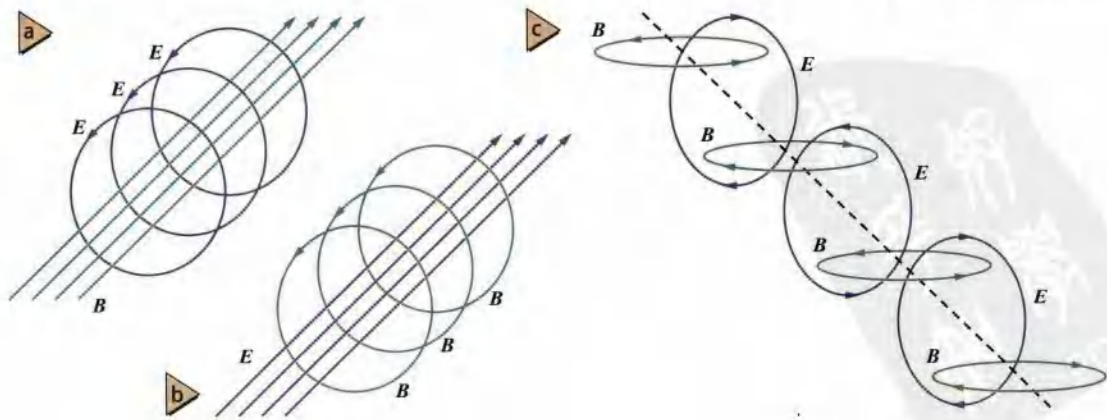
► 学习目标

- 描述电磁波是怎样通过空间传播的。
- 求解有关电磁波性质的问题。
- 解释影响天线接收某特定波长电磁波能力的因素。
- 求解电磁波在介质中传播的问题。

► 关键词语

电磁波
电介质
天线
电磁波谱
电磁辐射
压电效应
接收器

图26-5 这些图表示感应电场(a)、感应磁场(b)以及同时存在的感应电场和感应磁场(c)。



1860年, 苏格兰物理学家麦克斯韦(J. Maxwell)假设, 如上页图26-5b所示, 上述过程的逆过程——变化的电场能产生变化的磁场——也是正确的。麦克斯韦认为, 电荷在这里并不是必需的, 只要有变化的电场, 就能产生磁场。于是他预言, 加速运动的电荷和变化的磁场能产生在空间中运动的电场和磁场。

电磁波 (electromagnetic wave) 就是一种组合的电场和磁场, 如上页图26-5c所示。德国物理学家赫兹(H. Hertz)于1887年通过实验证明了麦克斯韦理论的正确性。麦克斯韦理论给出了对电磁现象的完整的描述。

电磁波的性质 电磁波的速度与光速相同, 为 $3.00 \times 10^8 \text{ m/s}$, 记为 c 。光是一种电磁波。电磁波的波长与它的频率和速度的关系如下:

$$\text{电磁波的波长和频率的关系 } \lambda = \frac{v}{f}$$

电磁波的波长等于它的速度除以它的频率。

在这一公式中, 波长 λ 的单位是m, 速度 v 的单位是m/s, 频率 f 的单位是Hz。由于电磁波在真空中的传播速度 v 等于光速 c , 因此上式可表示为:

$$\lambda = \frac{c}{f}$$

其中, $c = 3.00 \times 10^8 \text{ m/s}$ 。

对于任何种类的电磁波来说, 上述波长和频率的关系式都是适用的, 即波长和频率的乘积恒等于常量 c 。因此, 波长增大, 频率降低, 反之亦然。所以说, 电磁波长波段的频率低, 而短波段的频率高。

► 练一练

15. 频率为 $3.2 \times 10^{19} \text{ Hz}$ 的电磁波在空气中的速度是多少?
16. 频率为 $5.70 \times 10^{14} \text{ Hz}$ 的绿光的波长是多少?
17. 频率为 $8.2 \times 10^{14} \text{ Hz}$ 的电磁波的波长是多少?
18. 波长为 $2.2 \times 10^{-2} \text{ m}$ 的电磁波的频率是多少?

介质中传播的电磁波 电磁波也可以在介质中传播。例如，光在通过一杯水的过程中，要经过三种材料的介质：空气、玻璃和水。空气、玻璃和水都是非导体，这些材料也称为**电介质（dielectrics）**。电磁波在介质中的传播速度比在真空中小一些，它可利用下式计算：

$$v = \frac{c}{\sqrt{k}}$$

其中，波速 v 的单位是m/s，光速 $c = 3 \times 10^8$ m/s，而相对介电常数 k 是一个无量纲的量。在真空中， $k = 1.000\ 00$ ，因此真空中的波速为 c 。在空气中， $k = 1.000\ 54$ 。因此，电磁波在空气中的速度比在真空中要稍小一些。

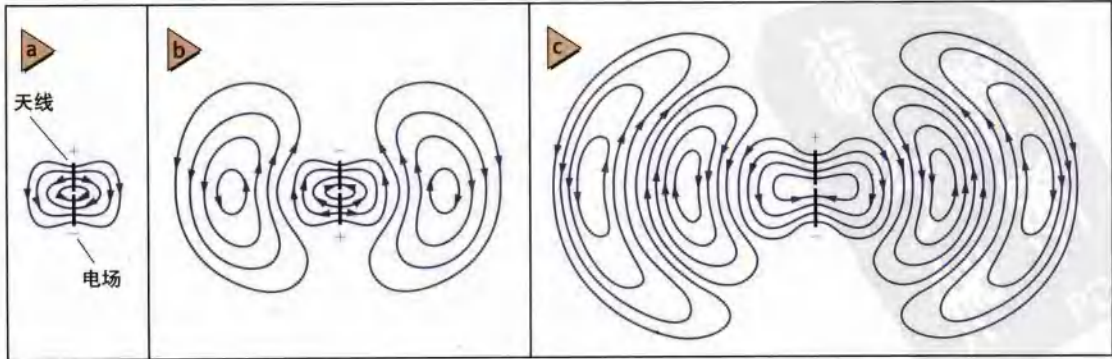
练一练

- 19. 电磁波在空气中的传播速度是多少？取 $c = 299\ 792\ 458$ m/s。
- 20. 水的介电常数为1.77。电磁波在水中的传播速度为多大？
- 21. 光在某种介质中的传播速度是 2.43×10^8 m/s。该介质的介电常数是多少？

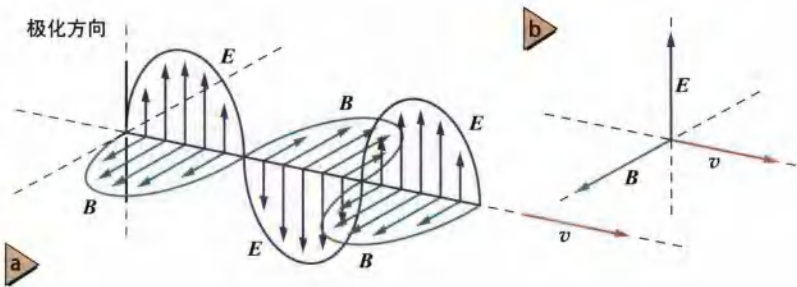
电磁波在空间中的传播 如图26-6所示为电磁波的形成过程。一根用于发射或接收电磁波的天线（antenna）与一个交流电路连接。交流电源使得天线中产生了与它的频率一致的变化的电动势，从而产生一个向外传播的变化的电场，这个变化的电场又会产生一个垂直于纸面的变化的磁场。该磁场并没有显示在图26-6中，但是它也不断地从这根天线向外传播。这种变化的电场和磁场的组合就是以光速 c 在空间中向外传播的电磁波。

设想你能看到电磁波，那么从正对电磁波传播的方向上来看，它的变化的电场和磁场将如图26-7所示：电场上下振动，磁场在与电场垂直的方向上左右振动，且它们都与波的传播方向垂直。由天线产生的电磁波是带有极性的，电磁波中的电场与天线平行。

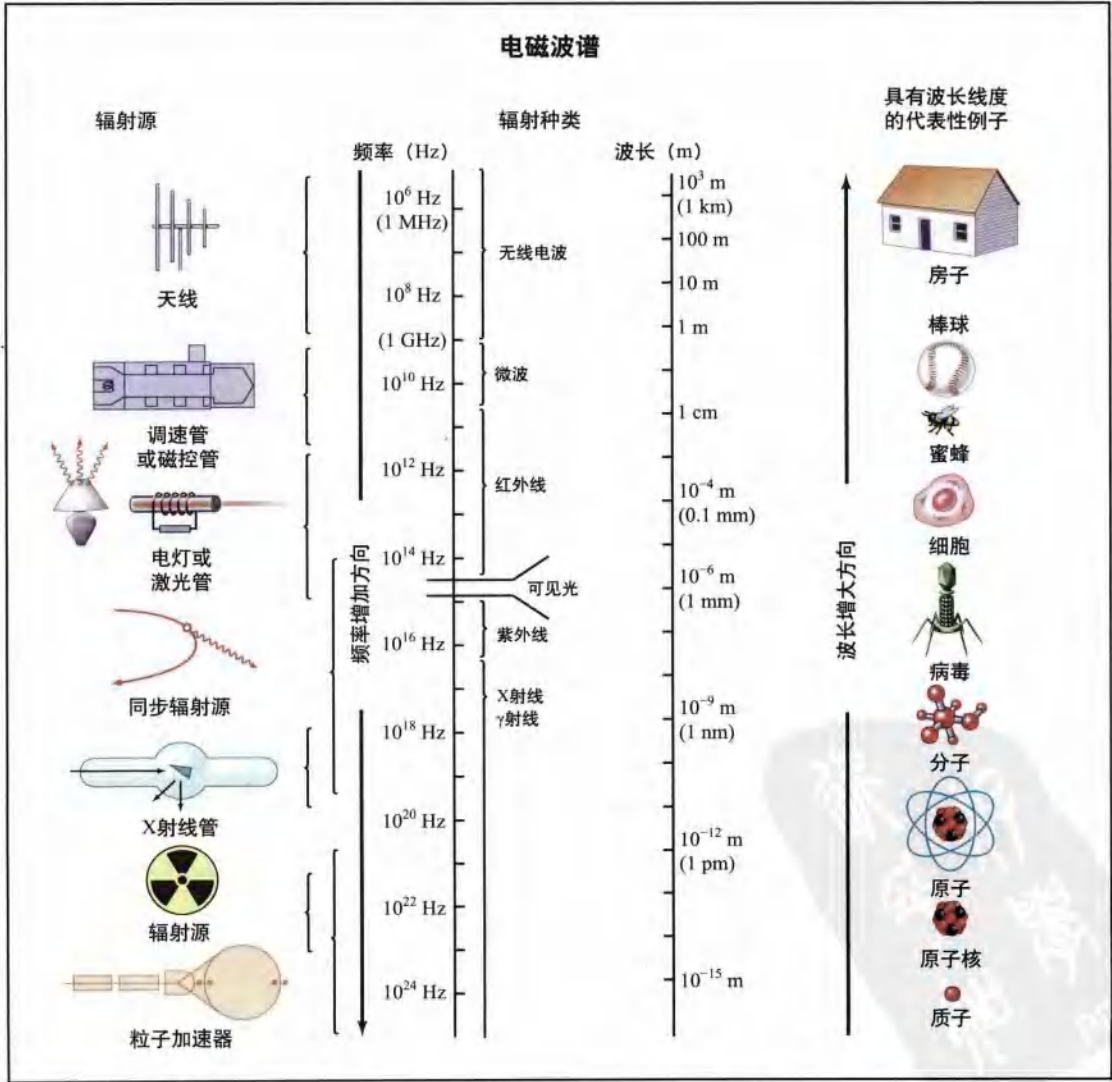
图26-6 与天线连接的交流电源在天线中产生了变化的电动势，从而产生了变化的电场(a)。这个变化的电场又产生变化的磁场（图中未显示），而变化的磁场再产生变化的电场。这样的过程不断重复，从而天线便持续产生了向外传播的电磁波(b、c)。



■ 图26-7 由天线产生的电磁波中的电场和磁场在某一时刻的情况(a)。电磁波的电场、磁场以及传播速度 v 的两两垂直(b)。



■ 图26-8 各种类型的电磁辐射及其波长。



● 挑战性问题

可见光在整个电磁波谱中只占有很小的范围。如表26-1所示列出了部分可见光的波长。

1. 波长最长的可见光是什么颜色?
2. 在真空中, 哪种色光传播最快?
3. 波长较长的波在它们的传播路径上遇到物体时所产生的衍射效应比波长较短的波更明显。那么, 哪种色光的衍射效应最明显? 哪种色光的衍射效应最不明显?
4. 试计算表26-1中各种色光的频率范围。

表 26-1	
可见光的波长	
颜色	波长 (nm)
靛青	390~455
蓝	455~492
绿	492~577
黄	577~597
橙	597~622
红	622~700

电磁波的产生

使用交流电源产生电磁波 你已经知道, 交流电源与天线连接时能产生电磁波。电磁波的频率与这台交流发电机的转动频率相同, 它大约不会超过 1 kHz。构成各种类型电磁波的频率和波长的范围如图26-8所示, 它被称为电磁波谱 (electromagnetic spectrum)。

使用线圈和电容器产生电磁波 科学家通常采用将线圈和电容器接成串联电路的方法来产生高频电磁波。电容器被电池充电后, 由于它两端存在电势差, 因此就会产生一个电场。撤去电池, 原来储存在电容器极板上的电子就会通过线圈流动, 产生磁场。当电容器放电时, 线圈中的磁场开始减小, 因此将产生反电动势, 从而对电容器重新充电, 但充电的方向与先前相反。然后电容器再次放电, 重复前面的过程。如图26-9所示为一次电磁振荡的全过程。当用天线替代电容器时, 电容器中的场就会向空间传播开去。

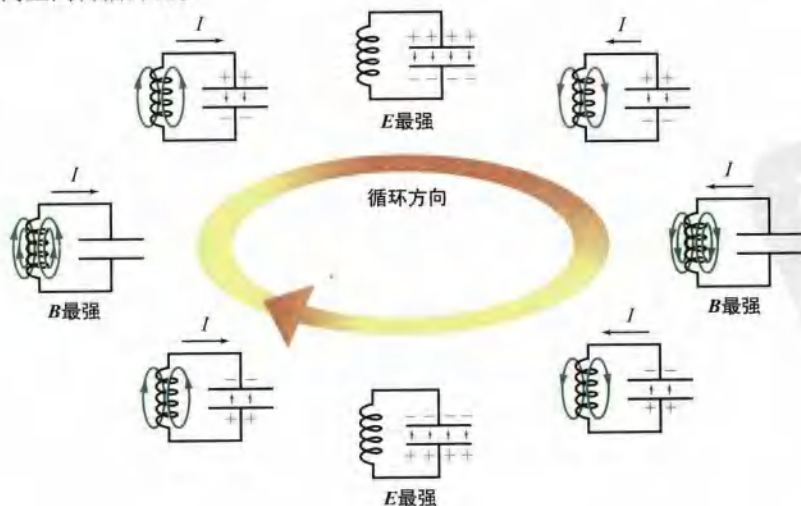


图26-9 电容器和线圈电路的一次完整的振荡过程。电路的振荡频率取决于电容器的电容和线圈的电感。

物理学的应用

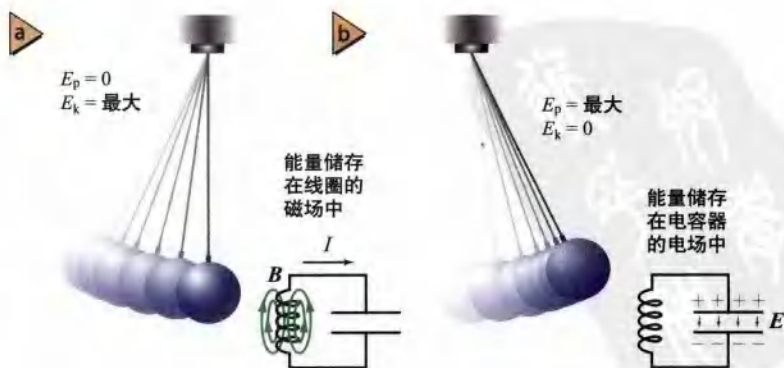
● **频率** 美国联邦通讯委员会 (FCC) 为每个电台和电视台分配了一个特定的载波频率。每个电台和电视台将信号“载”在这个频率的波上向外传播。当你的收音机或电视机接收到这种波后, 载波将被剥离, 仅留下所需的信号, 这样你就既能听到声音, 又能看到图像了。

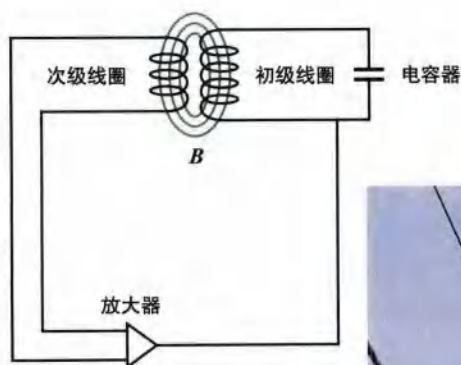
假定将线圈—电容器电路中的电子比拟为摆动的小球, 那么这种线圈—电容器电路中所发生的过程, 如图26-10所示, 与悬挂小球的摆动过程类似。当小球摆到最低位置时, 它的速度和动能最大, 而重力势能为零。小球在摆动过程中的这个位置, 如图26-10a所示, 可与电容器的电荷量为零而通过线圈的电流最大的情况相比拟。当小球摆到最高位置时, 它的竖直位移最大, 速度为零, 因此此时它的势能最大, 而动能为零。如图26-10b所示, 摆球的这个位置相当于电容器中的电荷量最大, 而线圈中的电流为零的情况。

线圈和电容器电路中的能量 你已经知道, 摆球的竖直位移最大时, 势能最大; 速度最大时, 动能最大。而在摆球的运动过程中, 势能与动能之和 (即总能量) 保持不变。在线圈—电容器电路中, 线圈中的磁场和电容器中的电场都具有能量。当电流最大时, 储存在磁场中的能量最大。而当电流为零时, 电容器中的电场最大, 此时所有能量都储存在电场中。同样地, 电路中的总能量, 包括磁场能、电场能、热损耗和被电磁波带走的能量的总和是不变的。以电磁波的形式带走的辐射或能量常称为**电磁辐射** (electromagnetic radiation)。

就像自由摆动的单摆最终会停下来一样, 线圈—电容器电路中的振荡也会因电阻的存在而终止。这两类系统的振荡只有不断地补充能量才能继续。适时地轻推单摆可使它保持摆动。当施加的推力的频率与单摆的频率一致时, 单摆的振幅可达最大。这就是你在第14章中讨论过的共振条件。类似地, 将适当频率的电压脉冲施加在线圈—电容器电路中, 就会使电路的振荡过程继续。为了达到这一目的, 通常的做法是在电路上加一个次级线圈而形成一个变压器, 如图26-11所示。在次级线圈中感应的交变电流通过放大器放大, 然后再反馈到线圈—电容器电路上。利用这种电路所产生的频率大约可达400 MHz。

■ 图26-10 可用单摆的运动模拟线圈—电容器电路中的电子的运动。摆球可模拟为电路中的电流(a), 摆球速度为零的位置可模拟电路中电流为零的情况(b)。





■ 图26-11 变压器次级线圈中放大的振荡电流与线圈—电容器电路发生共振，使振荡持续进行。

共振腔中的电磁波 为了使线圈—电容器电路的振荡频率增加，就要减小线圈的电感或电容器的电容。但是频率超过1 GHz时，分立的线圈—电容器电路便不再有效。1~100 GHz的电磁波可由共振腔产生。共振腔是方型的金属盒，它可以替代线圈和电容器的共同作用。盒子的大小决定了振荡频率。在微波炉中就有这种共振腔，它被用以产生微波，烹调食物。

为了产生频率更高的红外线，共振腔的线度必须减小到分子尺度。实际上，红外线是由分子中振动的电子产生的，可见光和紫外线是由原子中的电子产生的，X射线和 γ 射线则是由原子核内的加速电荷产生的。电磁波都来自电荷的加速运动，且都以光速 c 传播。

压电效应 线圈—电容器电路并不是产生振荡电压的唯一方法。石英晶体有一种称为**压电效应** (piezoelectricity) 的特性。如果在石英晶体的两侧施加电压，它就会发生形变。如果施加的是交变电压，那么石英晶体就会产生持续的振荡。这种振荡的频率与石英晶体的厚度成反比。石英晶体能按它的固有频率振动，这与金属片被弯曲再释放后会按照它的固有频率振动的情况类似。当晶体发生形变时，也会产生电动势。这种电动势随石英晶体的固有频率而发生改变，因此可通过放大、反馈来维持它的振动。因为石英晶体的振荡频率非常稳定，所以它被广泛地应用于手表的制作中。

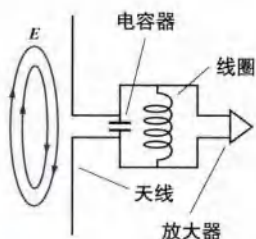


图26-12 来自电台的变化的电场信号使天线中的电子加速运动，然后通过解码、放大，推动扬声器的工作。

电磁波的接收

你已经知道了电磁波是如何产生和传播的，接下来你需要考虑的是电磁波的接收与检测。你或许已经想到，接收电磁波要用天线。如图26-12所示，电磁波中的电场使天线材料中的电子做加速运动。当天线与波的极化方向，即电场方向一致时，电子的加速度最大。天线两端的电势差以电磁波的频率不断振荡。当天线的长度等于被测电磁波波长的一半时，其两端的电势差最大。所以，天线的长度通常设计为它计划接受的电磁波的波长的 $\frac{1}{2}$ 。可见，用于接收无线电波和电视波的天线比接收微波的天线要长得多。

尽管单根天线就可以检测到电磁波，但若使用多根天线则更为有效。因此，电视天线通常由两根或多根相隔 $\frac{1}{4}$ 波长的导线组成，每根导线中接收到的电场形成相长干涉图样，这样就能增强接收信号的强度。

不仅可见光波，其他各种类型的电磁波也都存在反射、折射和衍射现象。如本章开始的图片中所显示的碟形天线，它能反射波长很短的电磁波，这与抛物面镜反射可见光波的情况完全类似。表面积很大的碟形天线非常适合于接收微弱的无线电信号。抛物面碟形天线将它表面所接收到的信号聚焦在一个包含有短偶极天线的称为喇叭形天线的器件上，该喇叭形器件用三角架安装在主抛物面碟形天线的上方。这个喇叭形器件再将信号输送到一个由天线、线圈—电容器电路、解码器以及放大器所构成的接收器(receiver)中。

无线电波的选择 许多不同的电台同时传送着电磁波。要接收所发送的信息，就必须先选择特定电台的电磁波。而为了选择特定频率的波，同时排除其他波，就需要将一个线圈—电容器电路作为调谐器连接在天线中。调节电容器的电容，可使电路的振荡频率等于所要接收的电磁波的频率。此时，只有这种频率的电磁波才能在电路中引起明显的电磁振荡。

电磁波的能量 电磁波载有能量和信息。微波和红外线能使分子中的电子获得加速度，这些波的能量便在分子中转化为热量，这就是微波炉能加热食物的原因。

光波也能将能量转移给电子。在照相胶片中，光波的能量可引起化学反应，从而使射到胶片上的来自物体的光永久地记录在胶片上。在更高频率波段，紫外线辐射能产生许多化学反应，包括将人皮肤晒黑等。

与生物学的联系

X射线

1895年,德国物理学家伦琴(W.Roentgen)让电子在如图26-13所示的真空玻璃管中运动。他在玻璃管内的金属板上加了非常高的电压,以使电子获得很大的动能。当电子撞击在金属阳极上时,伦琴看到附近的一块荧光屏上发出了辉光。他还注意到,将一片木块安放在玻璃管和荧光屏之间时,这种辉光依然存在。由此他断言,这是一种来自玻璃管中的穿透力很强的射线。

当时伦琴不知道这种奇怪的射线是什么,所以称它为X射线。几星期后,伦琴发现感光板受X射线照射后会变黑。此外他还发现,人体的软组织可以透过这种射线,但骨头却能挡住它。他摄下了他夫人的手的X射线图像。没过几个月,医生们便意识到伦琴的这个发现在医学上具有非常宝贵的价值。

现在人们知道,X射线是一种高频电磁波。在X射线管中,高于20 000 V的电压将电子加速,使它们达到很大的速度。当这种高能电子撞击到物体上时,它们的动能就可转化为称为X射线的高频电磁波。

电子在诸如电视机显像管这类阴极射线管中也能加速到如此大的速度。当这种电子射在荧光屏上时,就会突然被阻止,从而产生有色的荧光。电视机荧光屏的玻璃中含有铅,这样就能防止观看者受到X射线的伤害了。

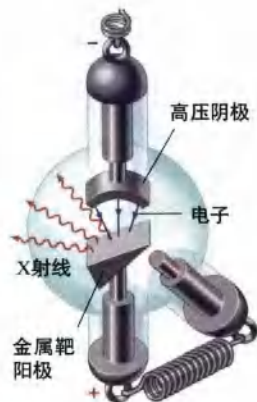


图26-13 在X射线管中,当高能电子撞击在金属靶上时,就会发射出X射线。不同的金属靶会产生不同波长的X射线。

本节复习题

22. **波的传播** 说明电磁波是怎样通过空间传播的。
23. **电磁波** 电磁波有哪些最基本的特性?它与其他形式的波(如声波)有何不同?请说明。
24. **频率** 波长为 1.5×10^{-5} m的电磁波的频率是多少?
25. **电视信号** 电视天线通常包含几根水平的金属杆零件,由此能否推断出电视信号中电场的方向?
26. **抛物面接收天线** 为什么抛物面碟形接收天线要向着电磁波传来的方向?
27. **天线设计** 电视2~6频道的频率恰好低于调频无线电波段,而7~13频道的信号频率却高得多。接收7频道还是6频道的天线需要更长一些?说明理由。
28. **介电常数** 光通过某种介质的速度为 1.98×10^8 m/s。取光在真空中的速度为 3.00×10^8 m/s,该介质的介电常数是多少?
29. **理性思维** 来自太阳的大部分紫外线被地球大气中的臭氧层所阻挡。科学家已经发现,南极和北冰洋上空的臭氧层都变薄了。运用你所学过的关于电磁波和能量的知识,说明为什么一些科学家非常关注这种臭氧层变薄的效应。

课外CBL培训可
见如下网站:

physicspp.com

电磁波的屏蔽

电磁波谱是由按频率或波长区分的多种类型的电磁辐射组成的。 γ 射线的频率最高,能量最大,它们的波长只有几纳米。从 γ 射线起,随着波长的增加(频率和能量的减小),其他类型的电磁辐射依次为X射线、紫外线、可见光、红外线、微波和无线电波。只有可见光波段的电磁辐射才能为人们的肉眼所检测到,其他所有的电磁辐射都是看不见的。

天线可用于检测诸如广播电台和电视台发送的无线电波。每一台通有变化电流的用电器实际上都是一个电磁波的辐射源,它们会干扰无线电波的接收。此外,某些材料能阻止或屏蔽无线电波。本实验中,你将研究各种材料对无线电波的屏蔽效应。

问题

哪些材料能屏蔽电磁波?

目标

- 用各种材料进行**实验**,看看它们是否能屏蔽电磁波。
- **观察和推断**何种类型的材料能屏蔽无线电波。
- **收集和整理数据**,了解各种不同的屏蔽类型。

安全警示



- **戴上安全护目镜,穿上实验室工作服。**
- **在弯曲或制作金属网屏蔽罩时,要戴好手套。**
- **在使用订书机时要小心。**

实验器材

使用电池的小型AM/FM收音机
两只小卡片盒
金属盒或易拉罐
铝箔
静电屏蔽袋(用于保护计算机的那种屏蔽袋)
金属网
胶纸
皮手套
订书机

实验步骤

1. 用铝箔制作一只盒子,它的一面能够开启。
2. 用金属网围成一个长方体,它的前后方开口。用订书机将合拢的一条侧边固定。长方体的大小要足以将收音机放入其中。然后剪两块金属网,固定在长方体的前后两面上,其中一面的金属网要能够开启和关闭。



数据表							
波段	频率 (Hz)	屏蔽方法	观察结果	波段	频率 (Hz)	屏蔽方法	观察结果
AM		人体手臂		FM		人体手臂	
AM		卡片盒		FM		卡片盒	
AM		用铝箔覆盖的卡片盒		FM		用铝箔覆盖的卡片盒	
AM		金属网		FM		金属网	
AM		金属盒		FM		金属盒	
AM		静电屏蔽袋		FM		静电屏蔽袋	

- 将收音机调谐在某一个信号比较强的AM电台，记下这个电台的频率。这个频率可以通过收音机的屏幕指示得到；在你听广播的过程中，播音员也会时不时播报出电台的频率来。
- 把收音机放到你的身前，用你的手臂围住它。如果排除喇叭被盖住音量变小的因素，此时电磁波信号的接收到了怎样的影响？记下你的观察结果。
- 将收音机放入卡片盒中，盖好盖子，观察收音机的接收情况，记下你的观察结果。
- 分别用铝箔、金属网、金属板做的盒子以及静电屏蔽袋，重复步骤5。
- 将收音机调谐在一个FM电台，重复步骤4~6。

分析

- 归纳** 哪类材料能有效地屏蔽无线电波？
- 已知每个电台无线电波的频率，计算它们的波长。计算时可利用公式 $c = f\lambda$ ，其中 $c = 3.00 \times 10^8 \text{ m/s}$ 。
- 对比与比较** 你在实验中调谐接收的无线电波的波长与屏蔽盒的小孔或缝隙的线度相比如何？
- 解释数据** 哪些材料常用于有效地屏蔽无线电信号？

结论与应用

- 解释** 对于被屏蔽材料阻挡而无法传到收音机的无线电波中的电场和磁场的情况作出说明。
- 推断** 为什么当用你的双臂围住收音机时，无线电波不能有效地被屏蔽？
- 运用科学解释** 海水会吸收电磁波，使它们只能透入海水表面以下大约一个波长的深度。所以要用超低频（40~80 Hz）无线电波来探测潜在水下的潜水艇。那么，为什么用于潜水艇通信的高功率无线电发射基地可以位于远离海洋的区域？（提示：如果使用半波长天线进行探测，试估计它的长度）

进一步探索

微波炉金属屏蔽门上的小孔的线度与2.4 GHz微波的波长相比如何？

生活中的物理学

假定你要将一些记录在计算机磁盘上的照片或音响资料邮寄给你的朋友，你应怎样加以包装，以免它们在邮寄过程中因受到电磁波的影响而损坏？

物理 在线

若想了解更多关于电磁波的知识，可登录网站：physicspp.com。

你是否拥有一部手机？曾经非常稀少和昂贵的手机现在已经变得非常大众化。美国十几岁的青少年中，大约20%的人都拥有自己的手机。

手机网络 电信公司将一个城市分成若干区，每个区的面积随地区情况以及用户数而有所不同，通常大约为26 km²。它们在每个区域中建立一个基站，其中包括一个转播塔以及安装了电子设备的建筑物。当你打电话时，从你手机发出的信号就会传送到当地的基站，基站在接收到你的信号后又将之传送到与你通话的对方所在地区的基站。

那么，手机信号是怎样在不同基站之间传播的呢？事实上，手机是利用无线电波向基站发送或者接收信号的。一部手机基本上都具有发射和接收无线电波的功能。当你使用手机时，手机就会将你的声音编码成无线电波，传送到附近的基站，然后再传送到与你通话的对方附近的基站中。当对方的手机接收到你的信号后，通过解码，就能将信号转化为人们能够理解的语音。这个过程要使用两种载波频率，一种是为了发送你说话的声音，另一种是为了接收你要听到的声音。这样，你就能畅通无阻地与通话对方进行交流了。

电信公司的基站网络遍布全国。当你从一个地方转移到另一个地方时，手机的信号会自动通过附近的基站进行发送和接收。

使用手机的危险 使用手机并非毫无风险。例如，如果你在驾驶汽车时使用手机，那是非常危险的事。一项研究表明，一边驾驶汽车一边使用手机时，发生交通事故的概率是不用手机时的4倍。某些地方贴有严禁使用手机的标记。

手机所产生的静电甚至可能点燃汽油。

手机可能产生的另一类危害目前还处于很大的争议中：手机辐射出的电磁波属于射频波段，某些研究表明，这种辐射可能会引发诸如脑部肿瘤和老年痴呆症之类的健康问题。对于长期使用手机是否会影响健康这一问题，争论的双方各持己见，迄今人们仍然无法对此作出肯定的回答。



进一步探索

- 1. 对比与比较** 调频和调幅广播与手机通讯有什么相似之处？又有什么不同？
- 2. 理性思维** 解释为什么手机所采用的低功率发送器可以有效地减轻手机的质量。

26.1 电场、磁场与物质的相互作用

关键术语

- 同位素
- 质谱仪

重要概念

- 电子的荷质比最早是由汤姆孙利用阴极射线管中电场和磁场平衡的方法测得的：

$$\frac{q}{m} = \frac{v}{Br}$$

- 通过汤姆孙测得的荷质比以及密立根测得的电子的电荷量，可求得电子的质量。
- 同一种元素的原子可能具有不同的质量。
- 质谱仪是一种利用电场和磁场测量电离的原子和分子质量的仪器。
- 质谱仪可用来测量离子的荷质比：

$$\frac{q}{m} = \frac{2U}{B^2 r^2}$$

26.2 空间中的电磁场

关键术语

- 电磁波
- 电介质
- 天线
- 电磁波谱
- 电磁辐射
- 压电效应
- 接收器

重要概念

- 电磁波是空间中运动的互相交替变化的电场和磁场。
- 电磁波的波长等于它的传播速度除以频率：

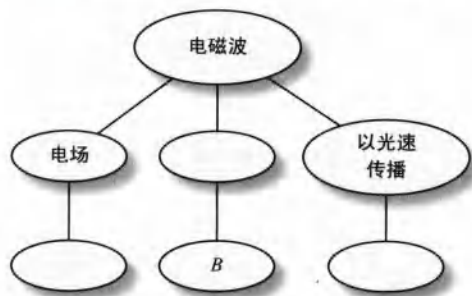
$$\lambda = \frac{v}{f}$$

当电磁波在真空中传播时，上式中的速度 v 就等于光速 c 。

- 电磁波在介质中的速度小于真空中的光速 c 。
- 发射天线中变化的电流可产生电磁波。
- 通过介质或真空中的电磁辐射可用来传递能量和信息。
- 晶体的压电效应是指在施加外电压时，晶体会发生弯曲或形变，并产生电磁振荡的现象。
- 接收天线将电磁波转化为导体中变化的电场。
- 天线中产生的电动势可用来探测电磁波。利用线圈—电容器调谐电路，可选择出特定频率的电磁波。
- 接收器用于获得电磁波中传来的信息。
- 最有效的天线的长度等于被测电磁波波长的一半。
- 微波和红外线可使分子中的电子获得加速度，从而产生热。
- X射线是一种频率很高的电磁波，它是由高度加速的电子放出的一种短波辐射。

绘制概念图

30. 用下列术语和符号完成概念图： E 、 c 、磁场。



理解概念

31. 电子的质量和电荷量分别是多少？(26.1)
32. 同位素是什么？(26.1)
33. 感应磁场的方向与变化电场之间的夹角恒为多少？(26.2)
34. 为什么要用交变电流才能产生电磁波？如果用直流电，在什么情况下才能产生电磁波？(26.2)
35. 一根竖天线正在发射无线电波。作出天线及其所产生的电场和磁场的示意图。(26.2)
36. 当一块石英晶体两端加上电压时，将发生什么情况？(26.2)
37. 对于天线接收电路而言，它怎样才能选择某个频率的无线电波，同时抑制其他频率的无线电波？(26.2)

应用概念

38. 汤姆孙管中的电子从左向右运动，如图26-14所示。为了使电子束向上偏转，偏转板的哪个极板应带正电？

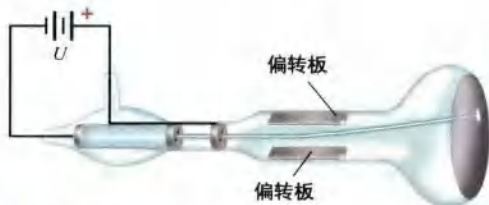


图26-14

39. 第38题的汤姆孙管中，利用磁场使电子束发生偏转。为了使电子束向下偏转，偏转磁场应取怎样的方向？
40. 证明 $\frac{E}{B}$ 的单位与速度的单位相同。
41. 如图26-15所示为质谱仪的真空室。如果它测量的是氖离子样品，那么若要使离子的运动路径为沿顺时针方向弯成半圆，偏转磁场应取怎样的方向？



图26-15

42. 某种带电粒子通过互相垂直的电场和磁场时，若调整粒子的速度至某个值，就能使它沿直线飞出。如果粒子的电荷由正变为负，要使粒子不偏转，电场和磁场的方向都要改变，还是只改变一个即可？
43. 对于无线电波、可见光、X射线，下列哪个物理量的值最大？
 - a. 波长
 - b. 频率
 - c. 速度
44. 电视波段 电视台2频道的频率大约为58 MHz，7频道的频率大约为180 MHz。接收哪个频道的天线需更长些？
45. 假定外星人的眼睛可感受微波，那么你认为他们的眼睛与你的相比，会更大一些还是更小一些？为什么？

问题解决

26.1 电场、磁场与物质的相互作用

46. 电子以 $3.6 \times 10^4 \text{ m/s}$ 的速度通过一个场强为 $5.8 \times 10^8 \text{ N/C}$ 的电场。要使电子不发生偏转，必须同时加上一个磁感应强度为多大的磁场？
47. 一个质子在磁感应强度为 0.36 T 磁场中做半径为 0.20 m 的圆周运动，如图26-16所示。它的速度为多大？

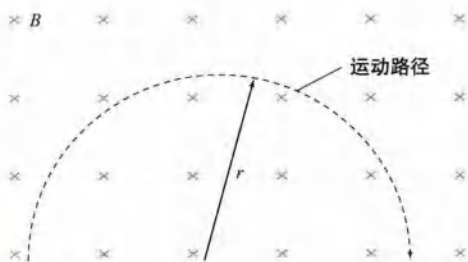


图26-16

48. 一个以 $5.4 \times 10^4 \text{ m/s}$ 的速度运动的质子进入了一个磁感应强度为 $6.0 \times 10^{-2} \text{ T}$ 的磁场。该质子的圆轨道半径是多少？
49. 一个电子经电压为 4.5 kV 的电场加速后进入一个磁场区，做半径为 5.0 cm 的圆周运动。该磁场的磁感应强度为多大？
50. 二价电离钠原子束的质谱仪实验中的数据如下：
 $B = 8.0 \times 10^{-2} \text{ T}$, $q = 2 \times 1.60 \times 10^{-19} \text{ C}$, $r = 0.077 \text{ m}$, $U = 156 \text{ V}$ 。试计算钠原子的质量。
51. α 粒子的质量约为 $6.6 \times 10^{-27} \text{ kg}$ ，带有两个正元电荷，它在磁感应强度为 2.0 T 的磁场中做半径为 0.15 m 的圆周运动。
- 该 α 粒子的速度为多大？
 - 它的动能为多大？
 - 需多大的电压才能使它获得如此大的动能？
52. 用质谱仪分析一种质量为 1.75×10^3 个质子质量的含碳分子。为了获得只有质量数为12而没有质量数为13的碳同位素分子样品，这台质谱仪的分辨率至少要多大？

53. 硅同位素 在质谱仪中，硅离子的轨道半径如图26-17所示。若半径较小的轨道对应于28个质子质量的硅同位素，那么另一个硅同位素的质量为多大？

真空室

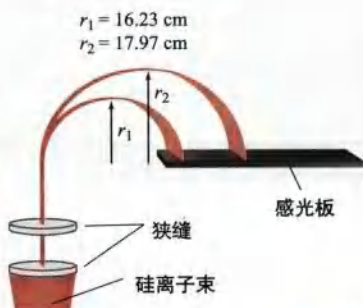


图26-17

26.2 空间中的电磁场

54. 无线电波 若抛物面天线反射的无线电波的波长为 2.0 cm ，那么探测它的天线应多长？
55. 电视 电视信号的载波频率为 66 MHz 。如果接收天线的两段导线隔开 $\frac{1}{4}\lambda$ ，这两段导线隔开的实际距离为多少？
56. 条形码扫描 已知扫描条形码的激光的波长大约为 650 nm ，试求这种激光的频率。
57. 为了接收 101.3 MHz 的无线电波，最好应选用多长的天线？
58. 频率为 100 MHz 的电磁波通过介电常数为 2.30 的同轴电缆传播，波的传播速度为多大？
59. 手机 如果手机信号的载波频率为 $8.00 \times 10^8 \text{ Hz}$ ，接收这种信号的手机天线最好应设计为多长？已知当用于手机的单端天线的长度为 $\frac{1}{4}\lambda$ 时，其感应电动势在接收端将达到最大值。

第26章 测评

复习提高

60. 二价电离氧原子的质量为 $2.7 \times 10^{-26} \text{ kg}$ 。如果原子质量单位 (amu) 为 $1.67 \times 10^{-27} \text{ kg}$ ，氧原子有多少个原子质量单位?
61. 收音机 一个调频广播电台的频率为 94.5 MHz。需用长度为多少的天线接收该台节目的效果最好?
62. 用长度为 8.3 cm 的天线发射和接收手机信号的频率是多少? 参考第 59 题, 其中说到, 用于手机的单端天线的长度等于发射或接收的电磁波波长的 $\frac{1}{4}$ 时, 其感应电动势在接收端将达到最大值。
63. 一个带电粒子通过电势差为 $1.50 \times 10^3 \text{ V}$ 的电场加速后, 垂直地进入一个磁感应强度为 50.0 mT 的磁场, 做半径为 9.80 cm 的圆周运动。该粒子的荷质比是多少?

理性思维

64. 应用概念 许多地方使用雷达测速计探测汽车违章超速情况。雷达测速仪是一种利用高频电磁信号测量运动物体速率的器件。测速计发射的已知频率的信号被运动物体反射回接收系统中。由于物体相对于测速仪运动, 返回信号的频率与原来发出信号的频率并不相同。这个现象称为多普勒效应。当物体向着测速仪运动时, 返回信号的频率大于原来所发出的信号的频率。如果原来发出信号的频率为 10.525 GHz, 而返回信号的频率移动了 1 850 Hz, 那么目标物体的运动速率为多大?

如果原来发出信号的频率为 f , 而返回信号频率的多普勒位移为 Δf , 目标物体的运动速率 v 可用下式计算:

$$v = \frac{c\Delta f}{2f}$$

其中, c 为光速。

65. 应用概念 H. 威尔士撰写的一部名为《隐形人》的科幻小说中, 一位男士喝了一种药水后就可以隐身, 不被别人看到, 但他仍然保留着正常人的其他功能。试说明为什么隐形人是不可能看见物体的。
66. 设计实验 请你根据本章介绍的原理设计一台质谱仪, 但要用电子探测器取代感光板, 将质量为 175

个质子质量的单价电离分子从 176 个质子质量的分子中区分开来。电子探测器上相邻的光电元件相距为 0.10 mm, 分子的加速电压最小为 500.0 V。在你的这台质谱仪中, U 、 B 、 r 分别应取怎样的值?

科技写作

67. 撰写一篇篇幅为 1~2 页的报告, 包括方块图和示意图, 说明用于电视机、DVD、VCR 的红外遥控器的工作原理。并说明为什么这些遥控器同时使用时并不会相互干扰。

日积月累

68. 氦—氦激光器用来照亮一条未知宽度的狭缝, 在 0.95 m 远处的一块屏上形成干涉图样。如果干涉图样中的第一级暗条纹与中央亮条纹中线的距离为 8.5 mm, 狭缝的宽度是多少? (第 19 章)
69. 两个完全相同的带电金属球之间的相互作用力为 F , 如图 26-18 所示。现在如果使两球接触, 然后再分开回到各自的原来位置, 此时它们之间的作用力为多大? (第 20 章)



70. 两块间隔 1.2 cm、电势差为 45 V 的平行金属板之间的电场强度为多大? (第 21 章)
71. 假定一台空气压缩机每天工作 6 h, 它的电压是 245 V, 电流是 12.0 A, 每千瓦时的电费是 9.50 美分。试计算这台压缩机每天所需的电费。(第 22 章)
72. 与磁场方向相垂直的一根长 440 cm、电流为 7.7 A 的载流导线所受的力为 0.55 N。该磁场的磁感应强度为多大? (第 24 章)
73. 一根南北方向放置的导线向东通过磁场运动, 磁场的方向垂直向下。导线中感应电流的方向怎样? (第 25 章)

标准化测试

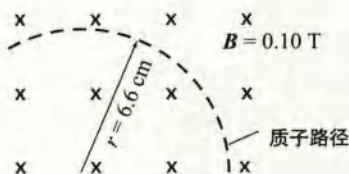
选择题

1. 对于在圆轨道上运动的带电粒子，下列说法正确的是 ()

- (A) 磁场力与速度方向平行，且指向圆心
- (B) 磁场力与速度方向垂直，且背离圆心
- (C) 磁场力与速度方向平行，且背离圆心
- (D) 磁场力与速度方向垂直，且指向圆心

2. 在磁感应强度为 0.10 T 的匀强磁场中，质子的圆轨道半径是 6.6 cm 。该质子的速度为 ()

- (A) $6.3 \times 10^5\text{ m/s}$
- (B) $2.0 \times 10^6\text{ m/s}$
- (C) $6.3 \times 10^7\text{ m/s}$
- (D) $2.0 \times 10^{12}\text{ m/s}$



3. 云母的介电常数为 5.4 ，光在这种材料中传播的速度大小为 ()

- (A) $3.2 \times 10^3\text{ m/s}$
- (B) $9.4 \times 10^4\text{ m/s}$
- (C) $5.6 \times 10^7\text{ m/s}$
- (D) $1.3 \times 10^8\text{ m/s}$

4. 某无线电台发送的电磁波的波长为 2.87 m 。这种电磁波的频率是 ()

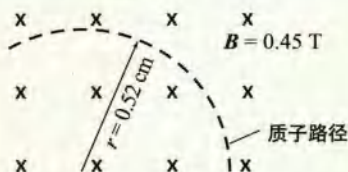
- (A) $9.57 \times 10^{-9}\text{ Hz}$
- (B) $3.48 \times 10^{-1}\text{ Hz}$
- (C) $1.04 \times 10^8\text{ Hz}$
- (D) $3.00 \times 10^8\text{ Hz}$

5. 下列情况中，不可能产生电磁波的是 ()

- (A) 直流电压施加在压电石英晶体上
- (B) 电流通过密封在塑料管子内的导线
- (C) 电流通过一个与分子大小的共振腔相连接的线圈—电容器电路
- (D) X射线管中高能电子打在金属板上

6. 一个质子在垂直于磁感应强度为 0.45 T 的匀强磁场的平面中运动，质子的圆轨道半径为 0.52 m ，质量为 $1.67 \times 10^{-27}\text{ kg}$ 。该质子的速率为 ()

- (A) 1.2 m/s
- (B) $4.7 \times 10^3\text{ m/s}$
- (C) $2.2 \times 10^7\text{ m/s}$
- (D) $5.8 \times 10^8\text{ m/s}$



拓展题

7. 氦核的质量为 $3.34 \times 10^{-27}\text{ kg}$ ，电荷量为 $+e$ 。它在磁感应强度为 1.5 T 的磁场中做半径为 0.0400 m 的圆周运动。氦核的速度为多大？

✓ 考试小贴士

注意某些文字

当你看到考题中出现诸如“从来没有”、“总是”、“至少”、“不”、“除此以外”等文字时，要用下划线标出，以提醒自己要对它们特别加以注意。这些文字对于问题的理解非常重要。

第27章

量子理论

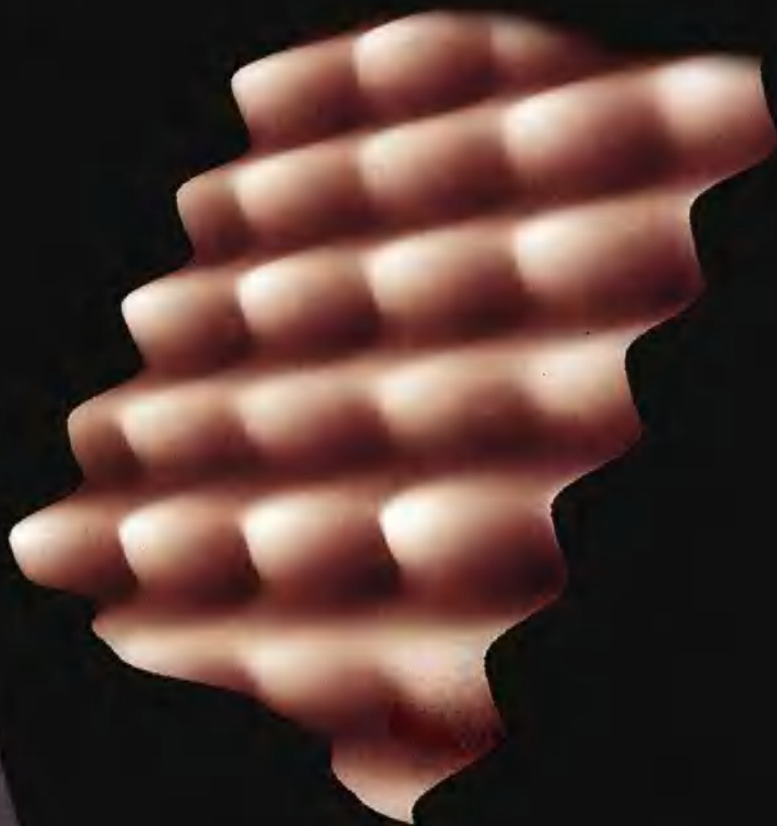
内容提要

- 理解光的粒子性，它像粒子那样具有动量和能量。
- 物质粒子也具有波动性，能发生衍射和干涉。

学习本章的意义

量子理论是电子扫描隧道显微镜（STM）得以发明的理论基础。在DNA及化学反应机理的研究方面，STM扮演着极其重要的角色。量子理论还应用于计算机技术中，它使得计算机朝着更小、更快的方向发展。

原子尺度的影像 这是一张由STM拍摄的碳的图像。



想一想 ▶

研究人员运用STM制作出了这幅碳的表面图像。制作时，他们利用了电子跳跃穿越势垒的能力，但是根据能量守恒定律，这一跳跃是不可能发生的。那么，这又是怎样一回事呢？

物理  在线
physicspp.com

起步实验



观察白炽灯泡的发光光谱

问题

一个炽热的白炽灯泡发出的可见光是什么颜色的?

步骤

1. 把白炽灯泡插入灯座, 并拧紧灯泡。
2. 将电灯与调光开关相连, 打开开关, 使得灯泡发出微弱的光。**注意: 当灯泡正在发光并且非常热时, 切莫接触灯泡!**
3. 把教室内的其他照明灯关掉或调暗。
4. 站在白炽灯泡前约1~2 m处, 将一个全息衍射光栅放在你的一只眼睛前, 透过光栅观察白炽灯泡。**注意: 必须借助衍射光栅来观察炽热的白炽灯泡, 否则会伤害你的眼睛。**
5. **绘制和运用图像** 用彩色笔绘出你观察到的图像。
6. 调节调光开关, 增加白炽灯泡的光亮度, 使其达到最大亮度。

7. **绘制和运用图像** 用彩色笔绘出你所观察到的图像。

分析

描述由白炽灯泡发出的光谱。它是连续的, 还是清晰分立的彩色线条? 当灯泡的光亮度增大时, 你所观察到的光谱又是如何变化的?

理性思维 白炽灯泡中发光的物体是什么? 当灯泡炽热发光时, 灯泡的灯丝温度发生了什么变化?



27.1 波的粒子模型

在上一章中, 你学习了麦克斯韦的电磁波理论。1889年, 赫兹(H.Hertz)通过实验验证了这一理论, 这也使得光是一种电磁波的这一说法得到了人们的公认。所有的光学现象, 包括干涉、衍射和偏振等, 似乎都可以用电磁波理论进行解释。

然而事实上, 这一理论并不完美。科学家发现, 将光看做是纯粹的电磁波的麦克斯韦理论, 在解释光的某些重要现象时, 却遇到了一些问题。这些问题主要涉及电磁辐射的发射与吸收。例如, 热物体(热的客体)的发射光谱, 以及在紫外光照射下带电粒子从金属表面的逃逸等现象, 都无法用电磁波理论来解释。后面你将学到, 电磁波不但具有类似波的性质, 还具有类似粒子的性质。这样, 你就能很好地解释以上这些现象了。

学习目标

- 描述热物体的发射光谱。
- 解释光电效应及康普顿效应。
- 求解有关光电效应的问题。

关键术语

发射光谱
量子化
光电效应
截止频率
光子
逸出功
康普顿效应

● 迷你实验

黑暗中的 发光实验



拉好窗帘，关闭室内的电灯。先用手电筒照射一只装有荧光物质的烧杯，再将一片红色滤光片放在手电筒的前面，只让红光射到烧杯上。

1. 描述实验现象。
2. 预测若改用绿色滤光片代替红色滤光片，会发生什么现象。
3. 检验你的预测。
4. 解释你的实验结果。
5. 预测当改用蓝色滤光片时，荧光物质的发光情况，并作出解释。
6. 检验你的预测。

分析与结论

7. 撰写一篇简要的说明，总结并解释你所观察到的现象。

炽热物体的辐射

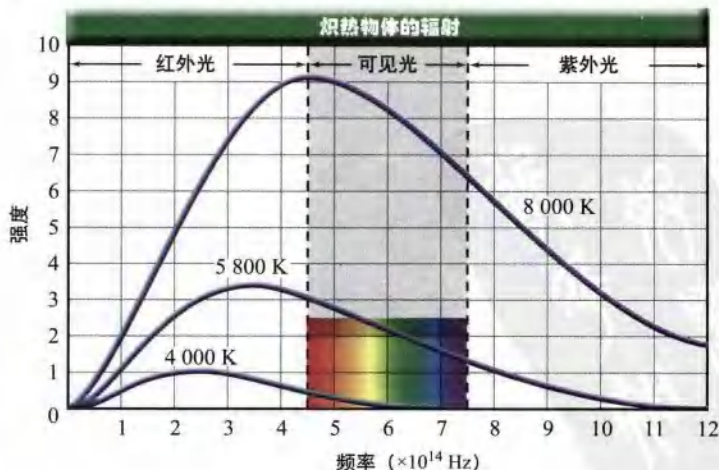
为什么热物体的辐射是一个令物理学家感到困扰的问题呢？这是因为这个问题涉及物体在不同温度下发出的辐射的强度和频率，而麦克斯韦的电磁波理论并不能解释人们实际观察到的热物体的辐射特征。那么，热物体发出辐射的本质究竟是什么呢？

在本章开始的“起步实验”中，你所观测的白炽灯泡就是一个典型的热物体。按照电磁波理论的说法，光及红外线辐射都是由灯丝中振动的带电粒子发出的。灯丝之所以会发光，是由于它受到了热，也就是说，灯丝是炽热的，因此这种灯称为白炽灯。而你所见到的颜色，取决于各种频率电磁波辐射间的比例关系，以及你的眼睛对这些电磁波的敏感程度。

当你用调光开关增大灯泡的电压时，发光灯丝中的温度就会升高，结果使得灯丝的颜色由暗红色变为橙色，再变为黄色，并最后变成白色。因为高温使灯丝发出高频的辐射，所以灯丝的颜色发生了变化。来自可见光谱高频端（紫端）的高频辐射使得灯丝看上去变白了。

假如你通过一个衍射光栅观察发光的灯丝，你觉得你看到的会是什么呢？事实上，你除了能看到彩虹般的所有颜色外，灯泡还发射了你看不到的红外线辐射。物体自身发光时所发出的光的光谱叫做**发射光谱**（emission spectrum）。在温度分别为4 000 K、5 800 K及8 000 K时，炽热物体的发射光谱如图27-1所示。注意，在每个温度上，都存在一个辐射能量达到最大值的频率。若比较一下每条曲线最大值的位置，你会发现，当温度升高时，辐射能量最大值所对应的频率也相应提高了。

■ 图27-1 炽热物体在三个不同温度下的发射光谱图。



热物体辐射的总功率会随着温度的升高而增大。而电磁波的功率（每秒辐射的能量）与热物体的开尔文温度的4次方成正比，即 $P \propto T^4$ 。因此，较热物体比较冷物体的辐射功率要大许多。辐射出巨大功率的一个最常见的例子就是太阳。太阳是一个致密的气体球，其内部的热量使它处于炽热的状态。太阳的表面温度为5 800 K，而它的辐射功率达到了 4×10^{26} W。这是一个非常巨大的数字。平均来说，太阳的辐射使得地球表面每平方米接收到的能量约为1 000 J/s（即1 000 W），这足以让10个100 W的电灯长明不息。

现在的问题是，麦克斯韦的电磁波理论无法解释如图27-1所示的谱线图。在1887~1900年间，许多物理学家试图运用当时经典的物理学理论来解释这一谱线，但都以失败告终。1900年，德国物理学家普朗克（M. Planck）发现，若引入一个革命性的假设——原子不能连续地改变它的能量——就能得到类似图27-1所示形状的谱线。普朗克假定固体中原子的振动能量只对应于下式所示的特定频率：

$$\text{振动能量 } E = nhf$$

振动原子的能量等于普朗克常量与振动频率乘积的整数倍。

在上述公式中， f 是原子的振动频率； h 是一个常量，叫做普朗克常量，其值为 6.626×10^{-34} J/Hz； n 是一个整数，诸如0, 1, 2, 3, …。

$$n = 0; E = (0)hf = 0$$

$$n = 1; E = (1)hf = hf$$

$$n = 2; E = (2)hf = 2hf$$

$$n = 3; E = (3)hf = 3hf$$

……

因此，能量 E 可能具有 hf 、 $2hf$ 、 $3hf$ 等值，而决不会有诸如 $\frac{2}{3}hf$ 或 $\frac{3}{4}hf$ 等值。可以这么说，能量是量子化（quantized）的。量子化的能量只能是一份一份的特定值。普朗克常量 h 在计算时的常用值取为 6.63×10^{-34} J/Hz。

普朗克还提出，原子在振动时，并不总是如麦克斯韦所预言的那样辐射电磁波，而只是在原子振动能量改变时才会发出辐射。例如，一个原子的能量从 $3hf$ 改变为 $2hf$ 时，原子就发出辐射。而辐射的能量就等于原子能量的改变量，在本例中即为 hf 。

普朗克发现常量 h 的值极为微小，这意味着能量改变的增量是非常微小的，所以在常见物体中这个量并不引人注意。然而，量子化能量的引入，对物理学家而言，是一个非常大的麻烦，特别对普朗克本人更是。因为这个理论首次暗示，牛顿和麦克斯韦的经典物理学可能仅在一定的条件下才是正确的。正因为能量量子化这一开创性理论，普朗克获得了1918年的诺贝尔奖，如图27-2所示为纪念这一理论而发行的邮票。

物理学的应用

■ 宇宙的温度 宇宙中充满着辐射，这种辐射是宇宙在温度非常高的时期发射出的。目前宇宙的发射光谱，相当于开尔文温度为2.7 K的物体的发射光谱。这是一个非常低的温度。回忆一下，0 K是开尔文温标的最低温度，被称为绝对零度。

■ 图27-2 这枚邮票的发行是为了表彰普朗克的杰出贡献。它是以普朗克常量“ h ”为主要图案的。普朗克常量 h 的值为 6.626×10^{-34} J/Hz。这个常量出现在了許多量子化的关式中。



光电效应

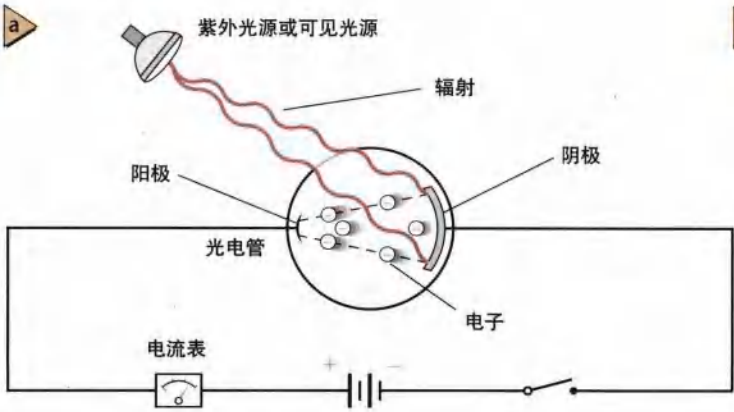
摆在20世纪初物理学家面前的另一个挑战，就是麦克斯韦的电磁波理论无法解释一个意想不到的实验结果：当紫外线照射到一块带有负电的锌板时，锌板就会放电；而当普通的可见光照射到同样的带电锌板上时，锌板却并不放电。这个结果与电磁波理论预测的结果正好相反。紫外线与可见光都是电磁波，为什么一种辐射能使锌板放电，而另一种却不能呢？另外，为什么带有正电的锌板不能发生相类似的放电呢？进一步的研究表明，带有负电的锌板是通过发射或排斥电子而放电的。电磁辐射照射到物体上并使其发射电子的现象叫做**光电效应**（photoelectric effect）。

可以用如图27-3所示的光电管来研究光电效应。光电管包括密封在真空管中的两个金属电极。抽去管中的空气，可以保证金属电极表面不被氧化，并使得放出的电子不受空气分子的撞击。两个电极中，较大的那个是阴极，通常阴极上涂有一层铯或其他碱金属；较小的是阳极，它由很细的金属丝制成，只能阻挡少量的辐射。真空管通常是用石英玻璃制成的，紫外线能顺利地通过它。在两电极间加有电压，保证电子可以被吸引到阳极。

在没有辐射照到阴极上时，电路中不存在电流。当辐射照到阴极上时，如图27-3所示，电流表的指针发生了偏转，即表示有电流产生。这个电流之所以会产生，是因为光电效应引起了来自阴极的电子（即光电子）的逃逸。电子流形成了电路中的电流，它从阴极流向阳极（正极）。

截止频率 并不是所有的辐射照射到阴极上时都能产生电流的。只有当辐射频率大于某个最小值时，电子才会从阴极射出，这一最低频率叫做**截止频率**（threshold frequency），用 f_0 表示。对于不同的金属，截止频率的差异很大。例如，除红光外的所有可见波段的光都能使金属铯发射电子；而所有可见光又都不能使锌发射电子，只有较高频率的紫外光才能使锌发生光电效应。

图27-3 从光电管的示意图中可以看出，从阴极发射的电子流向阳极，形成了一个完整的电路，并产生了电流(a)。这个手提光度计是摄影者用来测量光强的，它的工作原理就是光电效应(b)。



对于给定的金属，不论光的强度有多大，如果辐射频率低于 f_0 ，该金属就不会发射电子。相反，即使辐射的强度非常小，但只要辐射频率高于截止频率，那么光电效应就会立即发生。当入射光的频率等于或大于截止频率时，增加照射光的强度，光电流就会增大。

是否可以运用电磁波理论来解释光电效应呢？事实上，这是行不通的。根据电磁波理论，电场加速并使得金属发射电子，而电场的强弱取决于辐射的强度（与辐射的频率无关）。因此，对于暗淡的光源，金属只有长时间地吸收足够多的能量，才能发射出电子。然而正如你所知道的，这种情况并没有出现。实验表明，只要入射光的频率在截止频率之上，即使照射到金属上的辐射非常微弱，电子也即刻能从金属表面挣脱出来。

光子与量子化能量 1905年，为了更好地解释光电效应，爱因斯坦提出了一个革命性的理论：光和其他形态的电磁辐射是由分立的量子化的能量包组成的。后人将这种量子化的能量包称为**光子 (photon)**。光子的能量大小由它的频率决定：

$$\text{光子的能量 } E = hf$$

光子的能量等于普朗克常量与光子频率的乘积。

在以上公式中， f 是频率，单位为Hz； h 是普朗克常量。由于 $1 \text{ Hz} = 1/\text{s}$ 或 s^{-1} ，所以普朗克常量的单位为J/Hz，它也等于 $\text{J} \cdot \text{s}$ 。对原子尺度的系统来说，J是一个非常大的能量单位，所以物理学家一般使用另外一个更为方便的能量单位——电子伏特 (eV)——来量度电子的能量。1 eV等于1个电子在1 V的电压下加速所获得的能量。

$$\begin{aligned} 1 \text{ eV} &= 1.60 \times 10^{-19} \text{ C} \times 1 \text{ V} \\ &= 1.60 \times 10^{-19} \text{ C} \cdot \text{V} \\ &= 1.60 \times 10^{-19} \text{ J} \end{aligned}$$

利用电子伏特的定义，可以把光子的能量公式改写为更加简化的形式：

$$\text{光子的能量 } E = \frac{hc}{\lambda} = \frac{1240 \text{ eV} \cdot \text{nm}}{\lambda}$$

光子的能量等于 $1240 \text{ eV} \cdot \text{nm}$ 除以光子的波长。

这一公式的由来、说明以及应用方法，将在下一页的解题策略中给出。

hc 的单位及光子的能量

把 hc 的单位转换成 $\text{eV} \cdot \text{nm}$ ，这样导出的一个简明公式，可用于解答包含光子波长的问题。

1. 波长为 λ 的光子的能量公式为 $E = hf$ 。

2. 由于 $f = \frac{c}{\lambda}$ ，以上公式可写为 $E = \frac{hc}{\lambda}$ 。

3. 如果 hc 的值以 $\text{eV} \cdot \text{nm}$ 为单位，而除数 λ 用 nm 作单位，那么在应用公式 $E = \frac{hc}{\lambda}$ 时，你就得到用 eV 作单位的能量。不难发现用 $\text{eV} \cdot \text{nm}$ 表示 hc 值的简便之处。

4. hc 转换为 $\text{eV} \cdot \text{nm}$ 单位的步骤如下：

$$\begin{aligned} hc &= 6.626 \times 10^{-34} \text{ J} \cdot \text{Hz} \times 2.998 \times 10^8 \text{ m/s} \times \frac{1 \text{ eV}}{1.602 \times 10^{-19} \text{ J}} \times \frac{10^9 \text{ nm}}{1 \text{ m}} \\ &= 1240 \text{ eV} \cdot \text{nm} \end{aligned}$$

5. 把 $hc = 1240 \text{ eV} \cdot \text{nm}$ 代入光子的能量公式，公式就转化为如下形式。其中， λ 以 nm 为单位，而 E 的单位为 eV ：

$$E = \frac{hc}{\lambda} = \frac{1240 \text{ eV} \cdot \text{nm}}{\lambda}$$

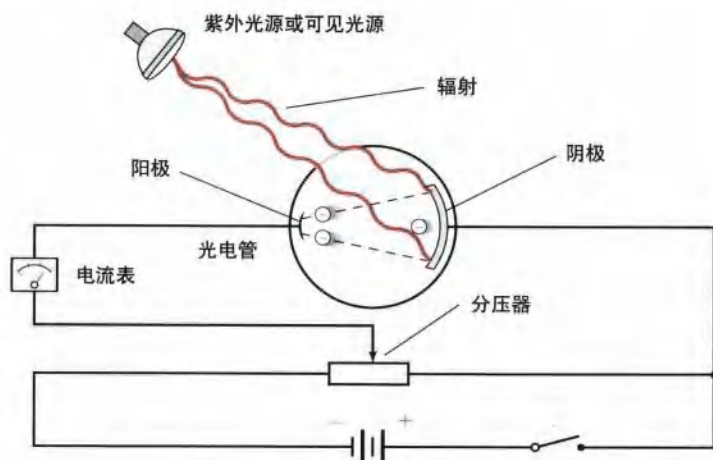
6. 当要求以 eV 作为能量单位时，你可以用以上公式求解有关光子能量的问题。

爱因斯坦的光子理论比普朗克的炽热物体的辐射理论又前进了一大步。尽管当时普朗克已经提出振动原子发出的电磁辐射的能量等于 nhf ，但他并没有建议将光及其他电磁辐射当作粒子来处理。爱因斯坦的光子理论对普朗克的炽热物体的辐射理论进行了重新的诠释及进一步的扩展。

应用爱因斯坦的光电效应理论，就能够解释截止频率的存在。要使电子从金属中逸出，光子的频率最小为 f_0 ，其能量为 hf_0 。如果光子的频率低于 f_0 ，那么光子就不具备足以使电子逸出的能量。因为一个光子只与一个电子相互作用，所以电子不可能把低于阈值能量的光子积累起来，直至它们具有足以使其逸出的能量。另一方面，频率大于 f_0 的光子具有的能量大于使电子逸出的能量。事实上，多出的能量 $hf - hf_0$ 成了逸出电子的动能。

由光电效应发射的电子的动能 $E_k = hf - hf_0$

发射的电子的动能为入射光子的能量 hf 与使电子脱离金属束缚所需的能量 hf_0 之差。



■ 图27-4 利用这个装置，可以测量从阴极射出的电子的最大动能。电流表测量的是电路中的电流。通过调整分压器，实验者可以确定电流为零时的电压。发射电子的可能的最大动能也可以由此计算出来。

值得注意的是， hf_0 是原子中结合得最为松散电子脱离原子所需的最小能量。由于原子中的所有电子具有的能量并不相同，为了脱离原子，有些电子需要比这个最小能量更大的能量，这使得发射的电子的动能也各不相同。因此，“发射的电子的动能”指的是一个电子可能具有的最大动能，而有一些发射出来的电子具有的动能可能比这个值更小一些。

光电效应理论的检验 如何检验爱因斯坦的这一理论呢？发射的电子的动能可以通过如图27-4所示的装置间接测量出来。分压器用于调节光电管两端的电压，使得阳极的电压低于阴极时，射出的电子必须消耗能量才有可能达到阳极，即从阴极射出的电子仅当具有足够的动能时才能到达阳极。

如图27-4所示，选择一定频率的光照射阴极，然后逐渐增大反向电压。随着反向电压的逐步增大，电子到达阳极所需的动能越来越大，因此只有越来越少的电子才能到达阳极形成回路。在到达某一确定电压（称为遏止电压）后，再也没有电子具有足够的动能到达阳极，此时电路中的电流就停止了。

在到达遏止电压时，在阴极处的电子的动能等于电场阻止它们逃逸所做的功，用公式表示为 $E_k = -qU_0$ 。在这个公式中， U_0 为遏止电压，单位是伏特（J/C）； q 是电子的电荷量（ $-1.60 \times 10^{-19} \text{ C}$ ）。注意公式中的负号是由于 q 为负值，为了保证动能为正值而定出的。

应用 光电效应应用于日常生活中的各个方面。如图27-5所示的太阳能电池板，就是利用光电效应把太阳能转化为电能的。又如，车库的开门器上带有安全红外线光束，它利用光电效应在接收器中产生电流。如果红外光束被物体挡住，而车库门正关着，此时接收器中的电流就会中止，从而启动开门器把门打开。此外，夜灯和照相机上的闪光灯可以根据白天和晚上光线的明暗情况自动地打开或关闭，应用的也是光电效应。

■ 图27-5 房屋上的太阳能电池板利用光电效应把太阳能转换成了电能。



► 例题 1

光电子的动能 某种光电管的遏止电压为 4.0 V ，入射光给予电子的动能是多少？请用 J 和 eV 两种单位来表示你的答案。

1 分析概括问题

- 作图表示阴极、阳极、入射光和射出电子的方向。注意遏止电压阻止电子穿越光电管的两极。

已知：

$$U_0 = 4.0\text{ V}$$

$$q = 1.60 \times 10^{-19}\text{ C}$$

未知：

$$E_k (\text{用J和eV表示}) = ?$$



2 求解未知量

电场对电子做功，当所做的功 W 等于电子的初动能 E_k 的负值时，电子不再穿越光电管。

$$E_k + W = 0\text{ J}$$

求解动能。

$$E_k = -W$$

$$= -qU_0$$

将 $W = qU_0$ 代入。

$$= -(-1.60 \times 10^{-19}) \times 4.0\text{ V} \quad \text{将 } q = 1.60 \times 10^{-19}\text{ C}, U_0 = 4.0\text{ V} \text{ 代入。}$$

$$= +6.4 \times 10^{-19}\text{ J}$$

把 E_k 的单位由 J 替换成 eV 。

$$E_k = 6.4 \times 10^{-19}\text{ J} \times \frac{1\text{ eV}}{1.60 \times 10^{-19}\text{ J}} \\ = 4.0\text{ eV}$$

3 验证答案

- 单位是否正确？** J 与 eV 都是能量的单位。
- 符号是否有意义？** 动能总是正的。
- 数值是否合理？** 用电子伏特作单位的能量，在数值上等于用伏特做单位的遏止电压。

► 练一练

- 已知电子的能量为 2.3 eV 。这个能量等于多少焦耳？
- 以 $6.2 \times 10^6\text{ m/s}$ 的速度运动的电子，其能量为多少电子伏特？
- 第1题中的电子的速度为多少？
- 对于遏止电压为 5.7 V 的光电管，请以 eV 为单位，计算发射光电子的最大动能。
- 已知阻止电流通过光电管的遏止电压是 3.2 V 。请以 J 为单位，计算发射光电子的最大动能。

挑战性问题

将一枚质量为 5.0 g 的镍币与一根弹簧相连，使其做上下振动。已知振动时，镍币的最大速度为 1.0 cm/s 。若将镍币的振动看做原子内电子的量子化振动模型，振动能量用公式 $E = nhf$ 表示。

1. 求振动物体的最大动能。
2. 若振动物体按 $5.0 \times 10^{14}\text{ Hz}$ 的频率，以光的形式发射能量。每发射一份量子能量，物体损失的能量为多少？
3. 若以第2题中的能量大小发射，振动物体需要发射多少份能量，才会失去所有的能量？



质量 = 5.0 g
最大速度 = 1.0 cm/s

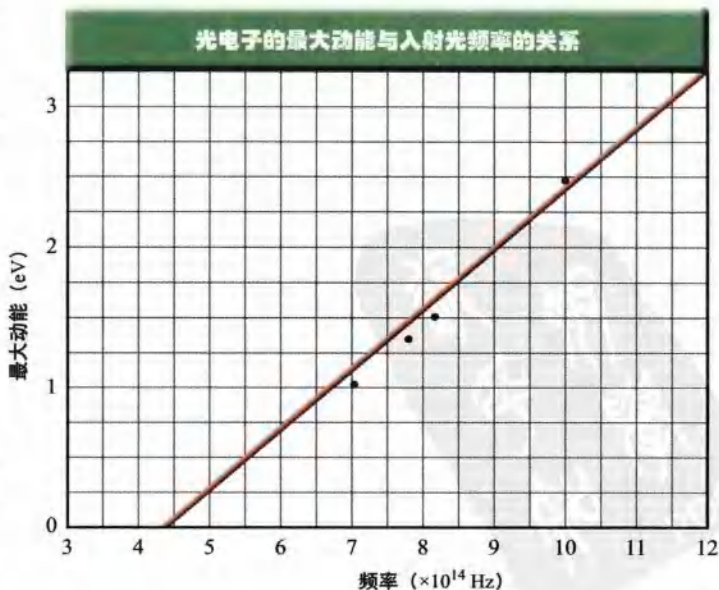
如图27-6所示，从金属发射出的电子的动能与入射光子的频率呈线性相关。所有金属都有着相似的图线，并具有相同的斜率。这一斜率等于直线的纵坐标增量与横坐标增量的比值，其值正好等于普朗克常量 h 。

$$\text{斜率} = \frac{\text{纵坐标增量}}{\text{横坐标增量}} = \frac{\text{发射电子最大动能的增量}}{\text{入射光频率的增量}} = \frac{\Delta E_k}{\Delta f} = h$$

不同金属发射出的电子的动能与入射光子的频率的关系图线之间的差别，仅仅在于电子从金属逸出所需的截止频率不同。在图27-6中，截止频率 f_0 处的 $E_k = 0$ ， f_0 位于直线与 x 轴的交点，其值接近 $4.4 \times 10^{14}\text{ Hz}$ 。截止频率与金属的逸出功有关。金属的**逸出功 (work function)** 是金属中受束缚最弱的电子逃逸出金属所需的能量。逸出功的值等于 hf_0 。当频率为 f_0 的光子照射到金属上时，光子的能量足以使电子获得释放，但不能使它带有任何动能。

在1905~1916年间，美国物理学家密立根 (R. Millikan) 完成了一系列杰出的实验，试图证明爱因斯坦的光电效应理论是不成立的。然而，他的实验结果却进一步肯定了爱因斯坦的光子理论。正是得益于密立根的实验，爱因斯坦凭借他的光电效应理论获得了1921年的诺贝尔奖。两年后，也就是1923年，密立根也被授予了诺贝尔奖，以表彰他在测定电子的电荷量以及对光电效应所作的质疑性的研究方面的成就。

图27-6 这一图线显示，当入射光的频率增大时，发射电子的动能随之成正比地增大。



例题 2

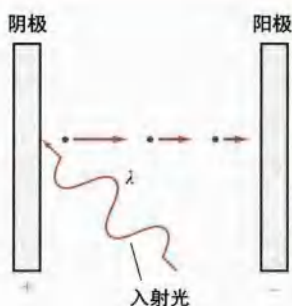
逸出功与能量 一个以钠作为阴极的光电管，其阴极的红限波长为 536 nm。

a. 求钠的逸出功，用 eV 作单位。

b. 若波长为 348 nm 的紫外线照射到钠阴极上，射出的电子的能量为多少电子伏特？

1 分析概括问题

• 作出示意图，标出阴极、阳极、入射光以及发射电子的方向。



已知：

$$\lambda_0 = 536 \text{ nm} \quad \lambda = 348 \text{ nm}$$

$$hc = 1240 \text{ eV} \cdot \text{nm}$$

未知：

$$W = ? \quad E_k = ?$$

2 求解未知量

a. 利用普朗克常量与红限波长，求解逸出功。

$$W = hf_0 = \frac{hc}{\lambda_0}$$

$$= \frac{1240 \text{ eV} \cdot \text{nm}}{536 \text{ nm}} \quad \text{将 } hc = 1240 \text{ eV} \cdot \text{nm}, \lambda_0 = 536 \text{ nm} \text{ 代入。}$$

$$= 2.31 \text{ eV}$$

b. 利用爱因斯坦的光电效应公式求入射光的能量。

$$E = \frac{1240 \text{ eV} \cdot \text{nm}}{\lambda}$$

$$= \frac{1240 \text{ eV} \cdot \text{nm}}{348 \text{ nm}} \quad \text{将 } \lambda = 348 \text{ nm} \text{ 代入。}$$

$$= 3.56 \text{ eV}$$

为了计算发射电子的能量，从入射光能量中减去逸出功。

$$E_k = hf - hf_0 = \frac{hc}{\lambda} - \frac{hc}{\lambda_0}$$

$$= E - W \quad \text{将 } \frac{hc}{\lambda} = E, \frac{hc}{\lambda_0} = W \text{ 代入。}$$

$$= 3.56 \text{ eV} - 2.31 \text{ eV} \quad \text{将 } E = 3.56 \text{ eV}, W = 2.31 \text{ eV} \text{ 代入。}$$

$$= 1.25 \text{ eV}$$

3 验证答案

- **单位是否正确？** 根据量纲分析，证实 eV 作为 E_k 的单位是正确的。
- **符号是否有意义？** E_k 总是正的。
- **数值是否合理？** 光电子的能量应当是几个电子伏特。

练一练

6. 锌的红限波长为 310 nm。求锌的截止频率 (Hz) 及其逸出功 (eV)。
7. 铯的逸出功为 1.96 eV。当波长为 425 nm 的紫外光照射到铯上时，射出的光电子的动能 (eV) 为多少？
8. 当波长为 193 nm 的紫外线照射到某种金属上时，射出电子的能量为 3.5 eV。该种金属的逸出功为多大？
9. 某种金属的逸出功为 4.50 eV。能够引起该金属发射光电子的最大波长是多少？

康普顿效应

光电效应表明，尽管光子没有质量，但它却具有如粒子那样的动能。1916年，爱因斯坦预言光子应该还具有粒子的另一种性质——动量。他证明了光子的动量为 $\frac{E}{c}$ 。又因为 $E = hf$ 及 $\frac{f}{c} = \frac{1}{\lambda}$ ，所以光子的动量可用下式表示：

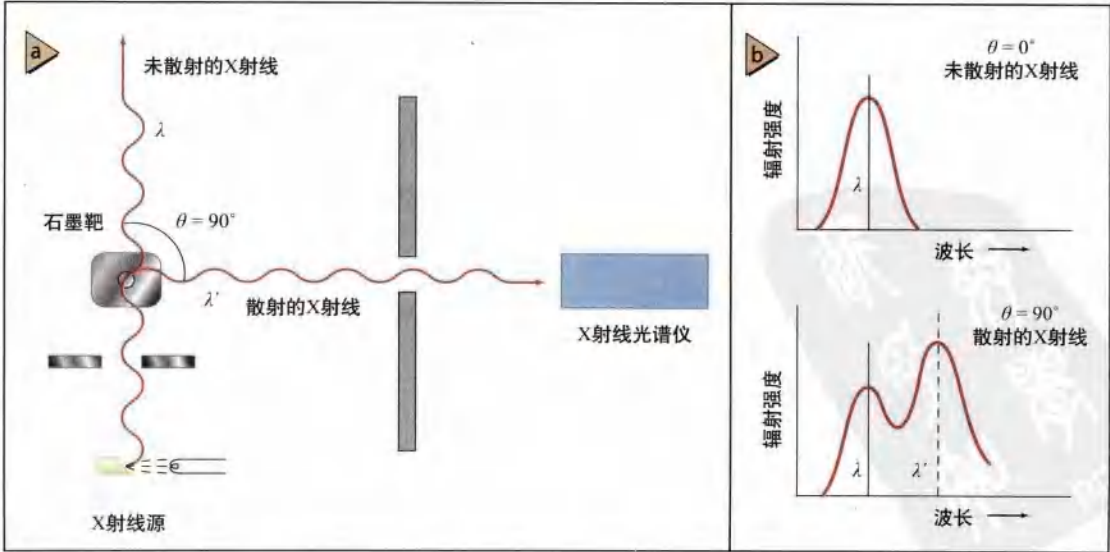
光子的动量 $p = \frac{hf}{c} = \frac{h}{\lambda}$

光子的动量等于普朗克常量除以光子的波长。

1922年，美国物理学家康普顿 (A.H.Compton) 用实验验证了爱因斯坦的理论，他的实验结果进一步支持了光子的粒子模型。康普顿把已知波长的X射线对准石墨靶照射，如图27-7a所示，并测量由靶散射出的X射线的波长。他发现，一些被散射的X射线的波长没有发生改变，而另一些X射线的波长却变长了，如图27-7b所示。注意，图中未散射的X射线的峰值波长，是与原来入射的X射线的波长一致的。然而，散射后的X射线的峰值波长比原来入射的X射线要大一些。

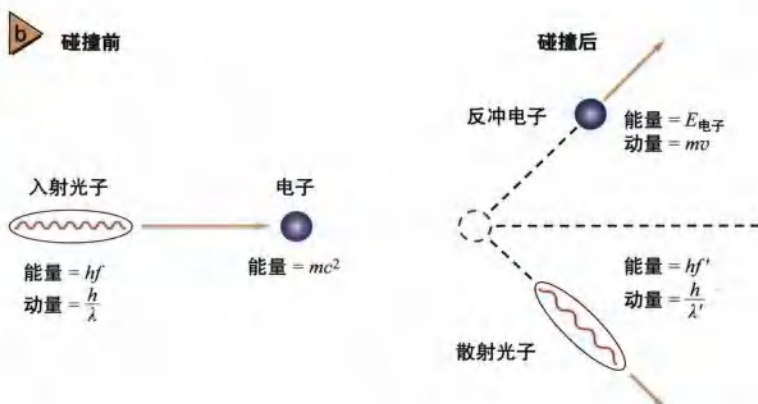
你已经知道，光子的能量公式为 $E = hf$ ，也可以写成 $E = \frac{hc}{\lambda}$ ，这个公式表明光子的能量与其波长成反比。康普顿观测到散射后的X射线的波长增大，表明X射线的光子的能量与动量都有所减少。散射光子波长的改变称为康普顿效应 (Compton effect)。这种波长的改变量很小，大约只有 10^{-3} nm，所以，仅当实验用的X射线的波长不大于 10^{-2} nm时，才可能检测到这种波长的改变。

图27-7 康普顿利用类似于图示的装置研究了光子的性质(a)。散射光子波长的增大，是X射线的光子已经损失部分能量的证据(b)。





■ 图27-8 与两个台球间的碰撞十分相似(a)，当光子与电子碰撞时，电子所获得的能量及动量与光子所失去的能量及动量相等(b)。



在之后的实验中，康普顿发现，有电子从石墨块中发射了出来。他猜想，这些X射线的光子可能与石墨靶中的电子发生了碰撞，并把能量与动量转移给了电子。康普顿认为，这些光子与电子的碰撞，就如同台球间所经历的弹性碰撞类似，如图27-8所示。通过对出射电子的能量的测量，他验证了这一想法。康普顿还发现，电子获得的能量及动量等于光子失去的能量及动量。因此，在与其他粒子发生碰撞时，光子同样遵循能量及动量的守恒定律。

本节复习题

10. **光电效应** 为什么高强度、低频率的光辐射不能使电子从金属中发射出来，而低强度、高频率的光辐射却可能使电子发射？
11. **热物体辐射的能量与频率的关系** 随着物体温度的升高，峰值强度的频率将如何改变？辐射能量的总值又会如何变化？
12. **光电效应与康普顿效应** 某实验者向一个靶发射X射线，靶上出现电子但没有其他辐射。这一事件是由光电效应还是由康普顿效应引起的？
13. **光电效应与康普顿效应** 试说明光电效应与康普顿效应的主要不同点。
14. **光电效应** 绿光 ($\lambda = 532 \text{ nm}$) 照射到一块未知金属上，结果有电子从该金属上发射出来。射出的电子可以在一个 1.44 V 的电压下停止运动。该金属的逸出功为多少电子伏特？
15. **光子的能量** 激光笔发出光子的波长为 650 nm ，该光子的能量 (eV) 为多大？
16. **光电效应** 一种X射线被骨骼吸收，并释放出了电子。若这种X射线的波长约为 0.02 nm ，试估算放出电子的能量为多少电子伏特。
17. **康普顿效应** 一种X射线照射到骨骼，与电子碰撞并发生散射。被散射的X射线的波长与入射X射线的波长相比，大小关系如何？
18. **理性思维** 以两个台球的碰撞为模型，设想光子与电子间相互作用的康普顿效应。假定用大质量的质子替代电子，那么这样的质子从碰撞中获得的能量是否与电子一样多？光子失去的能量是否跟它与电子的碰撞中失去的一样多？

27.2 物质波

光电效应与康普顿散射实验表明，无质量的电磁波具有像粒子一样的动量与能量。既然电磁波具有和粒子一样的性质，那么实物粒子会不会出现像波一样的干涉与衍射现象呢？也就是说，实物粒子具有像波一样的性质吗？1923年，法国物理学家德布罗意（L. de Broglie）提出：实物粒子具有波动性。这个想法是如此的超出常人所想，因此当时它并没有引起其他科学家的重视。直到爱因斯坦读了德布罗意的论文并支持他的想法后，物质粒子波动性这一说法才逐渐被其他学者所接受。

德布罗意波

一个物体的动量等于它的质量乘以它的速度，即 $p = mv$ 。而光子的动量 $p = \frac{h}{\lambda}$ ，因此德布罗意认为粒子的动量可用下式表示：

$$p = mv = \frac{h}{\lambda}$$

在以上的关系式中，表示运动粒子的波长就是著名的**德布罗意波长**（de Broglie wavelength）。通过下式可直接解出德布罗意波长：

$$\text{德布罗意波长 } \lambda = \frac{h}{p} = \frac{h}{mv}$$

一个运动粒子的德布罗意波长等于普朗克常量除以粒子的动量。

按照德布罗意的想法，像电子与质子这样的粒子都应该表现出类似波的性质。但对于这样的一些粒子，从来没有人观察到它们的干涉与衍射效应，所以德布罗意的观点遭到了许多人的质疑。然而，在1927年，两个独立的实验都证明，电子可以像光一样发生衍射。在一次实验中，英国物理学家汤姆孙（G. Thomson）将一束电子射到一片极薄的晶体上。晶体中的原子排列成非常整齐规则的列阵，正好可起到衍射光栅的作用。电子经晶体衍射形成的图样，与相似波长的X射线的衍射图样相同，如图27-9所示。而在美国，戴维孙（C. Davisson）和革末（L. Germev）利用电子在厚晶体上的反射与衍射完成了类似的实验。这两个实验都证明了实物粒子具有波动性。

在你的日常生活中，物体的波动性是不可能被观察到的，因为它们的波长极小。例如，当一个质量为0.145 kg的棒球以38 m/s的速度离开球棒时，它的波长为：

$$\lambda = \frac{h}{mv} = \frac{6.63 \times 10^{-34} \text{ J} \cdot \text{s}}{0.145 \text{ kg} \times 38 \text{ m/s}} = 1.2 \times 10^{-34} \text{ m}$$

这一波长太小，因而人们无法观察到它的效应。然而在下面的例题中你将看到，一个质量非常小的粒子（比如电子），就会产生可观察并可测量的波长。

► 学习目标

- **描述**可以证明物质具有波动性的证据。
- **求解**有关粒子的德布罗意波长的问题。
- **描述**波粒二象性与海森堡的不可测原理的重要性。

► 关键术语

德布罗意波长
海森堡不确定性原理

■ 图27-9 这张用锗立方晶体做出的电子衍射图样，证明了实物粒子的波动性。



例题 3

德布罗意波长 一个电子被75 V的电压加速后，其德布罗意波长为多大？

1 分析概括问题

- 绘制包括正负极板的示意图。

已知：

$$U = 75 \text{ V}$$

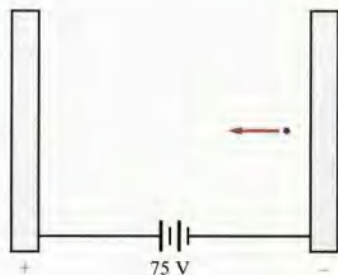
$$q = -1.60 \times 10^{-19} \text{ C}$$

$$m = 9.11 \times 10^{-31} \text{ kg}$$

$$h = 6.63 \times 10^{-34} \text{ J} \cdot \text{s}$$

未知：

$$\lambda = ?$$



2 求解未知量

写出电子的动能与所受电压的关系式，以及电子的动能与其运动的公式，利用它们计算出电子的速度。

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

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

动能的两种形式数值相等。

求解 v 。

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

$$= \sqrt{\frac{-2 \times 1.60 \times 10^{-19} \text{ C} \times 75 \text{ V}}{9.11 \times 10^{-31} \text{ kg}}}$$

将 $q = -1.60 \times 10^{-19} \text{ C}$, $U = 75 \text{ V}$, $m = 9.11 \times 10^{-31} \text{ kg}$ 代入。

$$= 5.1 \times 10^6 \text{ m/s}$$

求解动量 p 。

$$p = mv$$

$$= 9.11 \times 10^{-31} \text{ kg} \times 5.1 \times 10^6 \text{ m/s}$$

将 $m = 9.11 \times 10^{-31} \text{ kg}$, $v = 5.1 \times 10^6 \text{ m/s}$ 代入。

$$= 4.6 \times 10^{-24} \text{ kg} \cdot \text{m/s}$$

求解德布罗意波长 λ 。

$$\lambda = \frac{h}{p}$$

$$= \frac{6.63 \times 10^{-34} \text{ J} \cdot \text{s}}{4.6 \times 10^{-24} \text{ kg} \cdot \text{m/s}}$$

将 $h = 6.63 \times 10^{-34} \text{ J} \cdot \text{s}$, $p = 4.6 \times 10^{-24} \text{ kg} \cdot \text{m/s}$ 代入。

$$= 1.4 \times 10^{-10} \text{ m} = 0.14 \text{ nm}$$

3 验证答案

- 单位是否正确？** 对单位进行量纲分析，确定 v 的单位为 m/s ， λ 的单位为 nm 。
- 符号是否有意义？** 对于 v 及 λ 的预期都为正值。
- 数值是否合理？** 波长接近 0.1 nm ，这个波长在电磁波谱的X射线范围内。

练一练

- 一个质量为 7.0 kg 的保龄球以 8.5 m/s 的速度滚动。
 - 该保龄球的德布罗意波长为多大？
 - 为什么保龄球没有表现出可观察的波动性质？
- 一个电子经 250 V 的电压加速后，它的速率及德布罗意波长分别为多少？
- 一个电子的波长为 0.125 nm ，它需要的加速电压为多大？
- 在例题3中，假设电子的德布罗意波长为 0.14 nm 。带有相同波长的质子 ($m = 1.67 \times 10^{-27} \text{ kg}$) 的动能为多少电子伏特？

粒子与波

光究竟是粒子还是波？为了更好地说明光的行为，粒子与波这两种模型似乎都是必不可少的。随着研究的不断深入，量子理论与电磁辐射的波粒二象性，将成为非常有趣的科学原理，并呈现许多重要的应用。其中一个重要的应用就是电子扫描隧道显微镜（STM），本书的后面将会对它的工作原理进行介绍。

确定位置和动量 要正确定义一个物体的性质，从逻辑上说，你必须设计一个直接测量这一性质的实验。例如，你不能简单地说，一个微观粒子在某个位置正以特定的速率运动着，而应当设计一个实验，既测出微观粒子的具体位置，又测出它的速率。

那么，如何才能测定一个微观粒子所在的位置呢？你可以触摸它，或者通过光在它表面的反射进行判断。若用光，那么反射光一定要为仪器或人的眼睛所能接收。由于衍射效应，用来探测微观粒子的光会散开，使得精确测定微观粒子的位置显得不那么可行。那么，利用更短波长的光或辐射减少衍射效应，这样是否就能更精确地测量出微观粒子的位置了呢？

海森堡不确定性原理 事实上，当短波长、高能量的辐射射到微观粒子上时，由于康普顿效应，粒子的动量会发生改变，如图27-10所示。因此，精确测量微观粒子的位置，就会使得微观粒子的动量发生改变。越是精确地测定微观粒子的位置，微观粒子动量的不确定性就越大。同样，如果微观粒子的动量被测定了，那么它的位置的不确定性就会增加。上述的这种情景可以总结为**海森堡不确定性原理 (Heisenberg uncertainty principle)**，它表明要同时精确测量微观粒子的位置与动量是不可能的。这个以德国物理学家海森堡 (W. Heisenberg) 的名字命名的原理，是光和物质具有波粒二象性的结果。海森堡不确定性原理说明，测量微观粒子的位置与动量的精确度存在一个极限。

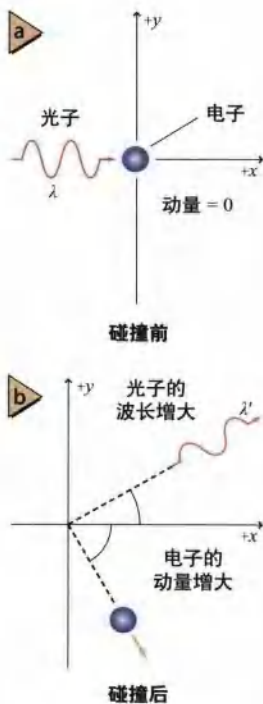


图27-10 仅当光被微观粒子散射时，微观粒子才能被看到。因此，逗留在那里的电子一直没有被人们所发现(a)，直到一个入射光的光子与它发生碰撞(b)。碰撞使光子与电子发生散射，由此却改变了它的动量。

本节复习题

23. **波动性** 描述证实实物粒子具有波动性的实验。
24. **波动本性** 说明为什么宏观物体的波动本性不是轻易能看见的。
25. **德布罗意波长** 一个电子经125 V的电压加速后，它的德布罗意波长为多大？
26. **物质和辐射的波长** 当一个电子与一个质量较大的粒子碰撞后，电子的速度和波长都会减小。怎样才能使光子的波长增大呢？
27. **海森堡不确定性原理** 当光或一束原子通过双缝时，都会形成干涉图样。即使每次只有一个粒子通过，原子或光子的干涉也会发生。海森堡不确定性原理是如何解释这种现象的？
28. **理性思维** 最近，物理学家制造出了一个光的驻波的衍射光栅。原子通过这个光栅时，将产生一个干涉图样。如果这种光栅的缝间距是 $\frac{1}{2}\lambda$ （大约250 nm），那么原子的德布罗意波长大约是多少？

模拟光电效应

一个被电磁辐射照射的物体会发射出电子，这就是光电效应。仅当辐射频率大于某一最小值（即截止频率）时，物体才会发射出电子。在本实验中，你将用钢球模拟光电效应，并理解为什么只有某种类型的电磁辐射才能导致光电子的发射。

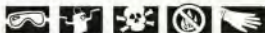
问题

怎样才能用钢球来模拟光电效应？

目标

- 构建一个模型，用来研究光电效应。
- 描述光子的能量与它的频率之间的关系。
- 说明为什么宏观现象不能解释原子的量子行为。

安全警示



- 保证酒精远离明火。
- 绝不能喝酒精。
- 酒精会使你的皮肤干燥。

实验器材

3颗钢球
滑槽（U形凹槽或槽形搁架）
书本若干
红、橙、黄、绿、蓝和紫色的记号笔（或彩色粘纸）
米尺
酒精

实验步骤

1. 把滑槽弯成如图所示的形状，再用几本书把滑槽支撑起来。确定书本不会阻挡滑槽的终端。
2. 用红色记号笔在桌面之上4 cm处的滑槽上，写一个大写字母R，如图所示。R代表红色。
3. 用紫色记号笔在桌面之上14 cm处的滑槽上，写一个大写字母V，如图所示。V代表紫色。用其他彩色记号笔在滑槽上分别写上蓝色B、绿色G、黄色Y以及橙色O，使它们在R与V之间均匀分布。
4. 将两个钢球放在滑槽的最低点。这些钢球代表原子的价电子。
5. 取一个钢球放在滑槽上R的位置处，这一钢球代表入射红光的光子。注意，红光光子是所模拟的可见光中能量最小的。
6. 释放钢球（光子），若它有足够的能量移开原子中的一个价电子，你会发现两个钢球之一（电子）从滑槽上逃出。把你的观察结果记录在数据表中。



数据表	
光子的颜色或能量	观察结果
红	
橙	
黄	
绿	
蓝	
紫	
比红更低	
比紫更高	

- 从滑槽底部移走代表入射光子的钢球。在滑槽底部重新放上两个代表价电子的钢球。
- 对滑槽上每种颜色的钢球重复步骤5~7。保证开始时总有两个钢球位于滑槽的底部。注意，紫光光子是所模拟的可见光中能量最大的。把你的观察结果记录在数据表中。
- 重复步骤5~7，这一次把代表入射光子的钢球从比R稍低一些的位置上释放。把你的观察结果记录在数据表中。
- 重复步骤5~7，这一次把代表入射光子的钢球从比V稍高一些的位置上释放。把你的观察结果记录在数据表中。
- 回答“结论与应用”中的问题1，并把你的预测与实验结果进行比较。
- 在做完实验后，把所有材料按你的实验指导老师的要求，分类安放到原处。用酒精清除滑槽上的墨水记号（或者除去滑槽上的彩色粘纸）。

分析

- 解释数据** 哪些颜色的光子有能力移开在你的模型中最低处的那个电子？
- 解释数据** 实验中，是否有光子具有足够大的能量，可移动多于一个电子？如果是这样，请注明光子的颜色。
- 利用模型** 步骤9中的钢球代表哪一类光子？
- 利用模型** 步骤10中的钢球代表哪一类光子？

- 解释** 在研究光电效应时，是否只考虑可见光的光子？
- 归纳** 根据光子的能量，总结你的观察结果。

结论与应用

- 推断** 如果用两个红光光子同时去碰撞两个价电子，将会发生什么结果？通过实验判断你的预测是否正确。
- 理性思维** 某些材料对价电子的束缚力比其他材料更大。应该如何修正你的模型，使其体现这种情景？
- 作出结论** 在本实验的模型中，如果光子与电子碰撞后却不能从原子中逸出电子，那么光子的能量将发生什么转变？

进一步探索

利用公式 $E = hf$ ，其中 h 是普朗克常量， f 是电磁辐射的频率，计算红光光子的能量，并与蓝光光子的能量作对比。

生活中的物理学

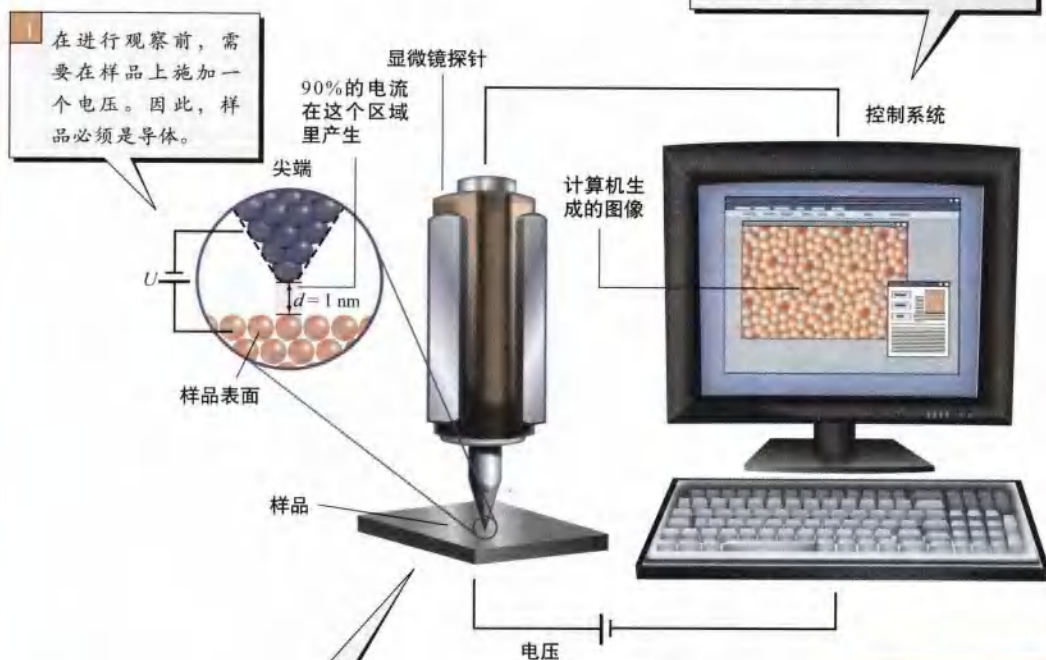
摄影爱好者通常在他们的暗室中安装红光灯，为什么他们不选用蓝光灯？

物理 在线

若要了解更多有关光电效应与量子理论的内容，请登录网站：physicspp.com。



电子扫描隧道显微镜 (STM) 是1981年由宾尼希 (G. Binnig) 与罗雷尔 (H. Rohrer) 发明的。5年后, 他们因此被授予了诺贝尔物理学奖。一台原子级分辨率的STM可以让科学家得到原子的图像。下图所示的计算机的显示屏上显示的就是硅原子的图像。那么, STM是如何工作的呢?



3 控制系统在样品表面上操控探针, 使它前进或倒退、向上或向下地扫描。样品表面与探针尖端之间的距离保持不变, 以产生一个恒定的电流。针尖向上与向下的移动被记录下来, 并被转变为图像。

2 STM的探针的尖端, 必须极其接近样品的表面 (大约在样品表面之上1 nm)。正如量子物理预言的那样, 一些电子会跳过或打通隧道, 从而穿过样品表面与探针尖端间的间隙。运动的电子就会产生电流 (测量出的电流的单位为毫微安)。

理性思维

- 1. 计算** 若穿过隧道的电子电流为 $1.0 \times 10^{-9} \text{ A}$, 那么1 s内有多少电子流过探针尖端?
- 2. 估计** 在一台STM中, 电流 I 和探针与样品之间的距离 d 的关系式为 $I = I_0 e^{-kd}$, 其中 I_0 与 k 是两个常量。利用样品的测量值, 证明当距离增加时, 电流会随之减小。
- 3. 设计实验** 如果你希望利用一台STM来研究一种非导体样品, 你该怎么做?

27.1 波的粒子模型

关键术语

- 发射光谱
- 量子化
- 光电效应
- 截止频率
- 光子
- 逸出功
- 康普顿效应

重要概念

- 一个热物体会发光，这是它的原子内部带电粒子振动的结果。
- 热物体的光谱覆盖了很大的波长范围，光谱的分布曲线取决于该物体的温度。
- 普朗克通过粒子只能具有某个能量的整数倍这一假设，成功地解释了炽热物体的光谱。粒子的能量可用下式表示，其中的常量 h 被称为普朗克常量：

$$E = nhf$$

- 爱因斯坦通过光存在于称为光子的能量包中这一假设，解释了光电效应：

$$E = hf = \frac{hc}{\lambda} = \frac{1240 \text{ eV} \cdot \text{nm}}{\lambda}$$

- 光电效应就是某些金属在电磁辐射下发射电子的现象。

$$E_k = hf - hf_0$$

- 光电效应可以用来测量普朗克常量 h 。
- 逸出功等于束缚电子的能量。它可利用光电效应中的截止频率进行计算。
- 康普顿效应表明光子具有动量，这与爱因斯坦的预言是一致的。

$$p = \frac{hf}{c} = \frac{h}{\lambda}$$

- 尽管以光速运动的光子的质量为零，但它具有能量和动量。

27.2 物质波

关键术语

- 德布罗意波长
- 海森堡不确定性原理

重要概念

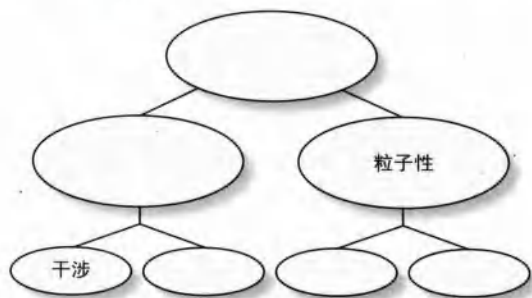
- 实物粒子的波动性是由德布罗意提出的，并通过电子穿过晶体的衍射实验得以证实。所有运动的实物粒子都具有波长，即众所周知的德布罗意波长：

$$\lambda = \frac{h}{p} = \frac{h}{mv}$$

- 粒子和波这两种形态是互相补充的，它们是物质和光完整性的两个方面。
- 海森堡不确定性原理表明，要同时测量光或微观粒子的精确位置和动量是不可能的。

绘制概念图

29. 用下列术语完成概念图：波粒二象性、质量、波动性、动量、衍射。



理解概念

30. **白炽光** 一个白炽灯可通过一个调光器进行调控。随着调光器向下调节（电压调低），灯泡发出的光的颜色将发生什么变化？(27.1)
31. 说明量子化能量的概念。(27.1)
32. 在普朗克关于炽热物体辐射的解释中，什么被量子化了？(27.1)
33. 光的量子称为什么？(27.1)
34. 说明爱因斯坦的光电效应理论是如何解释以下现象的：截止频率之上的光照射到光电管的金属阴极上时，随着光照强度的增加，光电子的电流也随之增大。(27.1)
35. 在某种金属的截止频率以下的光，不管它的强度如何增强，光电子都不会产生。爱因斯坦的光电效应理论是如何解释这一现象的？(27.1)
36. **摄影胶卷** 由于在红光下不感光，某种黑白胶卷可以在红光照明的暗室中显影。试从光的光子理论的角度分析上述现象。(27.1)
37. 康普顿效应是如何显示光子不仅具有能量，而且还具有动量的？(27.1)
38. 物质粒子的动量 p 可以由 $p = mv$ 求出。你能否利用相同的公式计算一个光子的动量？说明理由。(27.2)
39. 解释电子的下列特征量的测量过程。(27.2)
- 电荷量
 - 质量
 - 波长
40. 解释光子的下列特征量的测量过程。(27.2)
- 能量
 - 动量
 - 波长

应用概念

41. 如图27-1所示为三个不同温度的炽热物体的发射光谱。利用该图回答以下问题：
- 对于三个温度的发射光谱，各个峰值发射强度的频率分别是多少？
 - 关于峰值发射强度的频率与炽热物体温度之间的关系，你能推导出什么结论？
 - 当物体的温度从4 000 K升高到8 000 K时，通过什么方法可使发出的红光的强度发生改变？
42. 将两根铁棒插入炉火中，一根铁棒呈暗红色，另一根铁棒发出橙色的光。
- 哪一根棒较烫？
 - 哪一根棒辐射出的能量更多？
43. 高频的光将会比低频的光使光敏物质的表面发射出更多的电子。假如这两种光的频率都在截止频率之上，那么这个结论正确吗？
44. 当蓝光投射到金属钾上时，有光电子放出；当紫外线投射到金属钨上时，也有光电子放出。
- 哪一种金属的截止频率较高？
 - 哪一种金属的逸出功较大？
45. 试用如图27-11所示的棒球，比较棒球的德布罗意波长与棒球的直径大小。

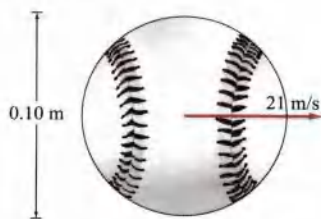


图27-11

解决问题

27.1 波的粒子模型

46. 根据普朗克理论，若一个原子发出 $5.44 \times 10^{-19} \text{ J}$ 的能量，同时它的量子数 n 改变了1，那么原子振动的频率是多少？
47. 若要使一个具有最大动能为 $4.8 \times 10^{-19} \text{ J}$ 的电子停止运动，需要施加多大的电压？
48. 一个紫色光的光子的波长为 $4.0 \times 10^2 \text{ nm}$ ，它的动量为多大？

49. 某一金属的遏止电压如图27-12所示。计算在以下单位中, 光电子的最大动能。

a. 电子伏特

b. 焦耳

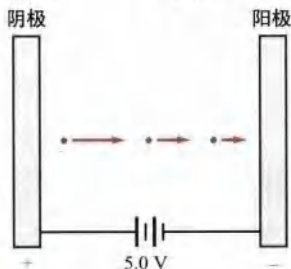


图27-12

50. 某种金属的截止频率为 3.00×10^{14} Hz。当波长为 6.50×10^2 nm 的光照射在这种金属表面上时, 它发出的光电子的最大动能是多少?

51. 金属钠的截止频率为 4.4×10^{14} Hz。一个电子从金属钠的表面逸出, 必须做多大的功?

52. 如果频率为 1.00×10^{15} Hz 的光照射到金属钠上, 在上题中, 光电子的最大动能为多少?

53. **测光表** 摄影师的测光表是利用光电管来测量被照相物体上的光强的。如果光电管对于红光 ($\lambda = 680$ nm) 的感光性与其他颜色的光一样好, 那么光电管阴极材料的逸出功必须是多大?

54. **太阳能** 一个家庭每年所用的能量大约为 4×10^{11} J。在美国的许多地方, 每年的日照时间大约是3 000 h。

a. 太阳每年照射到地球每平方米面积上的能量为多大?

b. 如果将太阳能转变为有用能量的效率为20%, 多大的面积可以转变成成一个家庭所需的能量?

27.2 物质波

55. 一个以 3.0×10^6 m/s 的速度运动的电子, 它的德布罗意波长为多大?

56. 德布罗意波长为 3.0×10^{-10} m 的电子, 它的运动速度为多大?

57. 一个阴极射线管用 5.0×10^3 V 的电压从静止加速电子。

a. 电子的速度为多大?

b. 与该电子相关的波长为多大?

58. 一个中子被约束在一个金属中, 它的动能仅为 0.025 eV。

a. 中子的速度是多少?

b. 求中子的德布罗意波长。

59. 氢原子的电子具有的动能为 13.65 eV。

a. 求电子的速度。

b. 计算电子的德布罗意波长。

c. 设氢原子的半径为 0.519 nm, 计算氢原子的周长, 并将其与氢原子上电子的德布罗意波长相比较。

60. 一个电子的德布罗意波长为 0.18 nm。

a. 如果电子从静止开始加速, 那么施加在电子上的电压为多大?

b. 如果质子的德布罗意波长为 0.18 nm, 它也从静止开始加速, 那么施加在质子上的电压为多大?

复习提高

61. 从加有遏止电压为 3.8 V 的金属上发射出的光电子的最大动能为多少?

62. 某种金属的截止频率为 8.0×10^{14} Hz。该金属的逸出功是多少?

63. 如果频率为 1.6×10^{15} Hz 的光照射在上题的金属上, 那么光电子的最大动能是多少?

64. 已知氘核的质量为 3.3×10^{-27} kg, 运动速率为 2.5×10^4 m/s。求氘核 (^2H 同位素的核) 的德布罗意波长。

65. 铁的逸出功是 4.7 eV。

a. 铁的红限波长是多少?

b. 铁被暴露在波长为 150 nm 的辐射下时, 发射出的电子的最大动能是多少电子伏特?

66. 金属钨的逸出功为 2.48 eV。若使电子从金属钨中发射出来, 光的最长波长为多少?

67. 一个电子的德布罗意波长为 400.0 nm, 这等于可见光的最短波长。

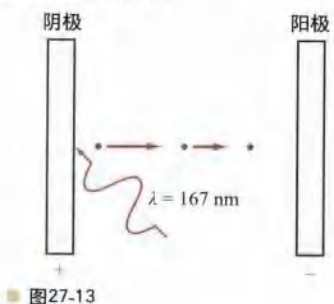
a. 求这个电子的速度。

b. 用 eV 作单位, 计算电子的能量。

68. **电子显微镜** 由于电子的德布罗意波长可以比可见光的波长更短, 因此电子显微镜在科学研究中非常有用。为了使电子具有的德布罗意波长为 20.0 nm, 必须给予它多大的能量 (eV)?

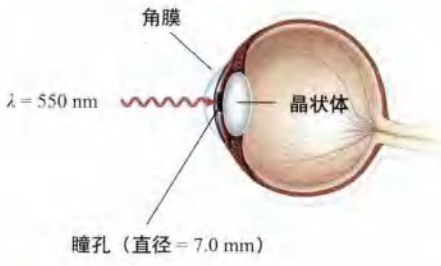
第27章 测评

69. 照射到金属锡上的辐射如图27-13所示。已知锡的截止频率是 1.2×10^{15} Hz。
- a. 锡的红限波长是多少?
 - b. 锡的逸出功是多少?
 - c. 入射的电磁辐射的波长为167 nm, 发射电子的动能 (eV) 为多大?



理性思维

70. 应用概念 一台氦—氖激光器发射出波长为632.8 nm的光子。
- a. 求激光器发射出的每个光子的能量 (J)。
 - b. 如果一台小型激光器的功率为0.5 mW (5×10^{-4} J/s), 通过激光器每秒可发射出多少个光子?
71. 应用概念 若进入人眼的最低限度的可见光的光强为 1.5×10^{-11} W/m², 如图27-14所示。
- a. 若光线进入人眼并穿过眼睛的瞳孔, 求光进入人眼的功率。
 - b. 利用图27-14中提供的信息以及设定的入射光的波长, 计算每秒钟进入眼睛的光子数。



72. 绘制和运用图象 一位学生做完了光电效应实验, 并记录了遏止电压随波长变化的相关数据, 如表27-1所示。已知光电管中有一个钠的阴极。利用给出的数据 (遏止电压与频率的关系), 画出最佳拟合直线。根据直线的截距与斜率, 求出本实验中的逸出功、红限波长以及 $\frac{h}{q}$ 的值。把 $\frac{h}{q}$ 值与公认值进行比较。

表 27-1	
截止电压与对应的波长	
λ (nm)	U_0 (eV)
200	4.20
300	2.06
400	1.05
500	0.41
600	0.03

科技写作

73. 研究迄今所见的最质量的粒子的干涉效应。描述实验过程, 并说明干涉是怎样产生的。

日积月累

74. 当一个重400.0 N的儿童站在大弹簧上时, 弹簧被压缩了15 cm。该弹簧的弹性系数是多少? (第14章)
75. 一个军乐队在非常寒冷的天气演奏时, 听起来像降低了半个音阶, 这是为什么? (第15章)
76. 将一个电荷量为 8.0×10^{-7} C的电荷, 放置在距离另一个电荷0.02 m处的地方, 结果它受到了9.0 N的作用力。另一个电荷的电荷量为多大? (第20章)
77. 一位房主购买了一打 (12个) 完全相同的、额定电压为120 V的灯光装置。每个灯光装置中有24个串联的灯泡, 每个灯泡的电阻为6 Ω 。假定房主把所有的装置都从单一的外部出线接入, 计算通过总负载的电流。 (第23章)
78. 作用在长1.2 m的金属导线上的力是 1.1×10^{-3} N, 这根金属导线与地磁场垂直。这根金属导线中的电流为多大? (第24章)

标准化测试

选择题

1. 当原子吸收或发射能量时, 原子的能级就发生了改变。下列原子的能级不可能出现的是 ()

(A) $\frac{3}{4}hf$ (B) hf
(C) $3hf$ (D) $4hf$

2. 下列对于光电效应的截止频率的说法中, 正确的是 ()

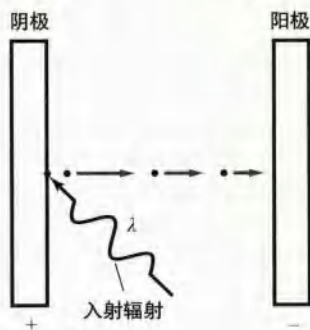
(A) 它是引起光电管阳极原子发射所需入射辐射的最小频率
(B) 它是引起光电管阴极原子发射所需入射辐射的最小频率
(C) 它是入射辐射的最小频率, 低于这个频率时原子将要发射电子
(D) 它是引起从原子发射电子所需入射辐射的最小频率

3. 一个光子的频率是 1.14×10^{15} Hz, 这个光子的能量是 ()

(A) 5.82×10^{-49} J (B) 7.55×10^{-19} J
(C) 8.77×10^{-16} J (D) 1.09×10^{-12} J

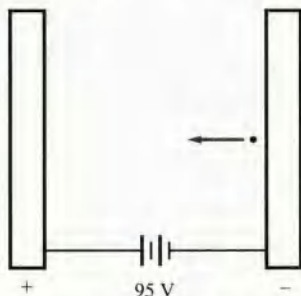
4. 如图所示, 照射在光电管阴极上的辐射能量为 5.17 eV。若光电管的逸出功是 2.31 eV, 那么发射出的光电子的能量是 ()

(A) 0.00 eV (B) 2.23 eV
(C) 2.86 eV (D) 7.48 eV



5. 如下图所示, 一个电子在 95.0 V 的电压下被加速。该电子的德布罗意波长是 ()

(A) 5.02×10^{-22} m (B) 1.26×10^{-10} m
(C) 2.52×10^{-10} m (D) 5.10×10^6 m



6. 一个速度为 391 km/s 的电子, 其质量为 9.11×10^{-31} kg。该电子的德布罗意波长是 ()

(A) 3.5×10^{-25} m (B) 4.79×10^{-15} m
(C) 4.8×10^{-15} m (D) 1.86×10^{-9} m

7. 金属的逸出功是 ()

(A) 用来衡量从金属发射出的电子所需做的功的大小
(B) 等于截止频率
(C) 金属原子最内部的电子获得自由所需的能量
(D) 最弱束缚的电子获得自由所需的能量

拓展题

8. 一个物体以 45 m/s 的速度运动时, 它的德布罗意波长是 2.3×10^{-34} m。该物体的质量是多少?

✓ 考试小贴士

控制时间

如果你正在参加一场限时考试, 那么你必须保持适当的答题速度。不要在一个问题上纠缠太久, 而应先跳过难题, 在回答了较容易的题目之后, 再回过头来重新考虑这些难题。

第28章

原子

内容提要

- 了解有关原子结构的探索史。
- 确定氢原子的能量。
- 学习如何根据量子理论推导出现代原子模型。
- 了解激光的工作原理及其应用。

学习本章的意义

原子的量子模型及原子在能级间的跃迁理论可以解释物质的许多可观察的效应。

发射光谱 每一种充气管都发射一种独特色彩的光谱。当气体原子中的电子跃迁到较低能态时，气体就会发射出明亮的光。

想一想 ▶

为什么各道光的颜色是不同的？你如何判断管内所装气体的类型？

物理  在线
physicspp.com



起步实验



旋转的硬币与原子

问题

当一枚枚25美分、10美分、5美分和1美分的硬币同时在桌面上旋转时，你会根据什么特征来辨识各枚硬币？

步骤

1. 左手捏住一枚25美分硬币的边缘，用右手的食指快速弹击硬币，使之旋转。注意观察硬币在旋转过程中的形态和发出的声音，直到它在桌上停止转动为止。
2. 依次取10美分、5美分和1美分的硬币各一枚，重复步骤1的操作3~4次。
3. 让一位同学随机抽取一枚硬币，并将其旋转起来。然后，请其他同学观察这枚旋转的硬币，尝试判断它的类型。
4. 重复步骤3，这一次你得闭上眼睛，努力识别每一枚旋转的硬币。

分析

如果让你仅凭听力来判断旋转硬币的类型，你是否掌握了一些成功判断的技巧？可以通过

哪些特征来判断硬币的类型？假如可以借助仪器，你认为哪种仪器可以轻而易举地识别出旋转硬币的类型？

理性思维 在两端高电压的气体放电管中，一种元素的受激原子通过发射光来释放能量。这些发射的光是如何来帮助判断放电管中原子的种类的？哪些仪器可以帮助你进行判断？



28.1 原子的玻尔模型

19世纪末，绝大多数科学家已经认同了原子的存在。汤姆孙对电子的发现，提供了原子是由更小的亚原子粒子组成的有力证据。在汤姆孙的测试中，每个原子都包含带负电的电子，但这些电子的质量都非常小。因为原子的质量要比它们所含电子的总质量大很多，所以，科学家开始寻找每个原子应有的、尚待发现的这一部分质量。这个“尚待发现的”质量究竟是以什么形式存在，又是如何分布的呢？

另一方面，原子公认为是呈电中性的，但是，在原子内部，只有带负电的电子已得到了科学家的确认，由此引发了一系列的疑问：带负电的电子在原子内是如何排列的？原子如何保持电中性？在原子内部是否存在带正电的粒子？……在人们对原子的了解与认识还远远不够时，科学家踏上了尝试解答这些为数众多、颇具挑战性的难题的征途。

学习目标

- 描述核式原子的结构。
- 对比与比较连续光谱和明线光谱。
- 求解有关轨道半径和能级的问题。

关键术语

α 粒子
原子核
吸收光谱
能级
基态
激发态
主量子数

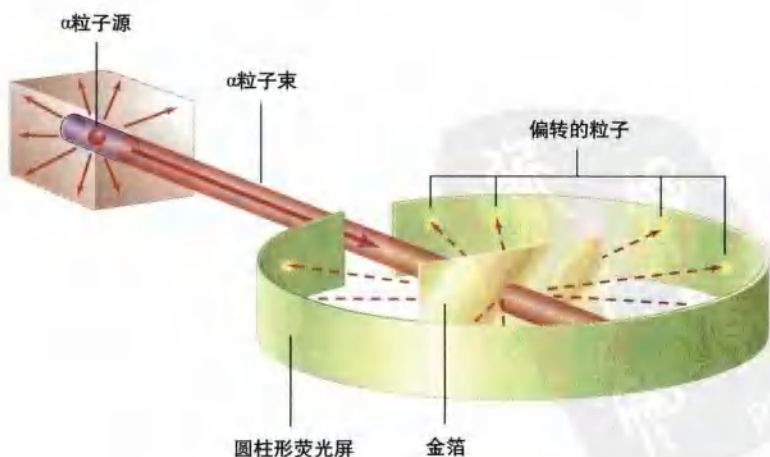
原子的核式模型

探究原子本质的研究人员面对着众多的问题：是什么引起原子发光？电子在原子内部又是怎样分布的？在当时，世界各国的物理学家和化学家都在探求这些问题的答案。因为对这些问题的解答，不仅能帮助人们提出有关原子结构的理论，而且还标志着一个全新的物理学和化学领域的开创。研究原子本质的这段历史，是20世纪最令人兴奋的一段时光。

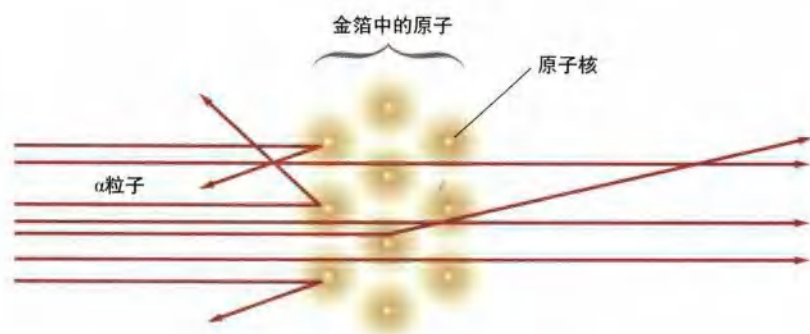
在汤姆孙看来，原子内部充满了一些大质量的带正电的物质。他认为带负电的电子在正电物质中的分布，就像蛋糕中的葡萄干一样。然而，卢瑟福（E.Rutherford）与他的同伴盖革（h.Geiger）、马斯登（E.Marsden）一起，通过一系列的实验，提出了一个与汤姆孙完全不同的原子结构模型。

卢瑟福在实验中采用了一种能发射穿透性射线的放射性化合物，这是一种高速、大质量的正电粒子。现在，人们称这些粒子为 α 粒子（alpha particles）。在卢瑟福的实验中，当这些 α 粒子撞击到表面涂有硫化锌的屏幕时，会发射出一些小的闪光，通过这些闪光就能检测出 α 粒子了。

如图28-1所示，卢瑟福用一束 α 粒子轰击一张极薄的金箔片。实验之前，卢瑟福已经听说了汤姆孙的原子模型，因此，他设想，当大质量、高速运动的 α 粒子穿过正电荷均匀分布的金原子时，它们的路径只会有较小的偏转。但实验的结果却让他大吃一惊。虽然大多数的 α 粒子穿过金箔时，要么不偏转，要么稍有偏转，但少数的粒子却以十分大的角度发生了散射。某些粒子的偏转角度甚至超过了 90° ，如图28-2所示。事后卢瑟福回忆，他当时的惊愕程度就好比一枚15英寸大小的炸弹朝着一张薄纸发射，竟然有弹片被弹回，并且击中了他。



■ 图28-1 通过用 α 粒子轰击金箔的实验，卢瑟福的研究小组断定，原子的大部分质量都集中在原子核中。

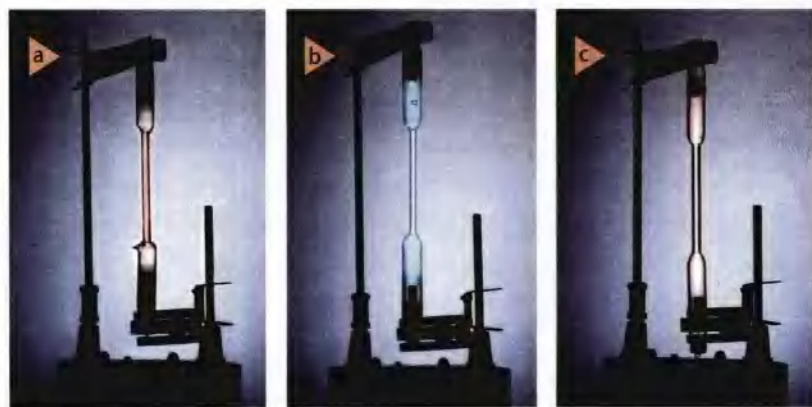


■ 图28-2 瞄准金箔发射的 α 粒子绝大多数没有发生偏转，而有两万分之一的粒子是以大角度偏转的。

根据库仑定律和牛顿运动定律，卢瑟福认为对这个实验结果的唯一解释，就是原子的全部正电荷都集中在一个体积极小但质量很大的中心核里，这个中心核即**原子核 (nucleus)**。因此，卢瑟福的原子模型被叫做核式模型。在此之后，研究者测得原子的全部正电荷和99.9%的质量都集中于它的核中。而电子的质量在原子中是微不足道的，且分布在远离原子核的外部区域内。所以说，电子的活动范围决定了原子的大小，或原子的直径。由于原子的直径大约为原子核直径的10 000倍，因此，原子大体上是由空旷的空间组成的。

发射光谱 环绕原子核的电子是如何排列的呢？科学家回答这个问题的线索之一，来自于对原子发光的研究。回顾上一章，由一种原子发射的电磁波长系列被称为原子的发射光谱。

如图28-3所示，在气体放电管中，气体样品的原子能够发光。你可能在商场中见过许多彩色的霓虹灯广告，这些霓虹灯的工作原理与气体放电管是一样的。气体放电管中装有低压气体，玻璃管的两端各有一个金属电极。当玻璃管两端加上一个高电压时，气体就会发光。科学家最感兴趣的是不同的气体可以发出不同的独特颜色的光，如图28-3所示为几种气体的特征辉光。



■ 图28-3 当给气体加上高电压时，它就会发射出独特的色光。气体氢发出红紫色的光(a)，水银发出亮蓝色的光(b)，而氖气发出玫瑰—橙黄色的光(c)。

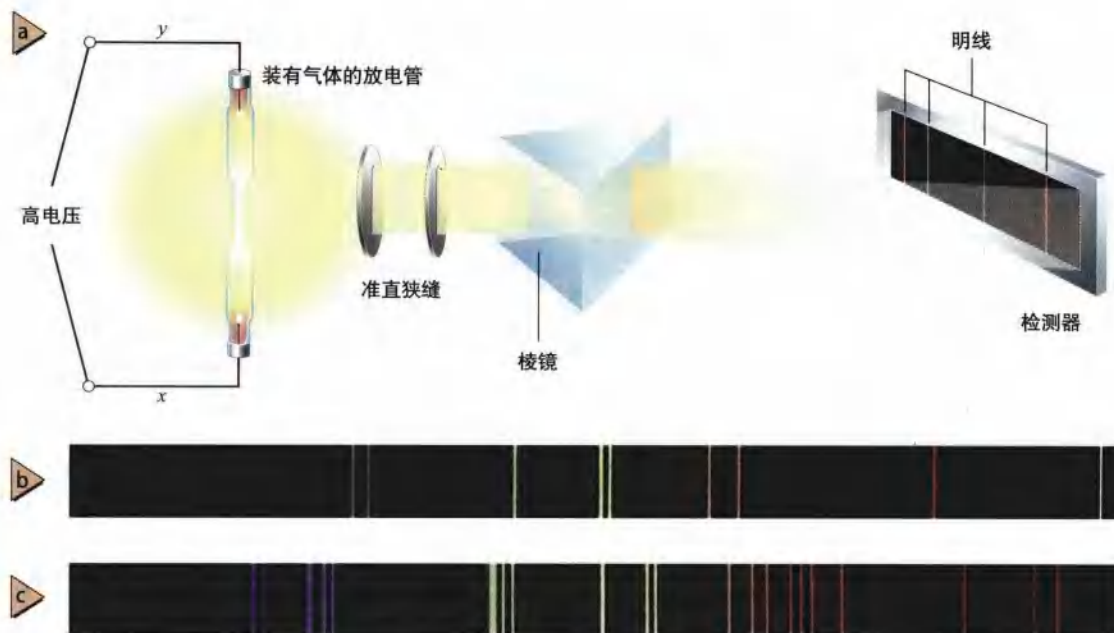


图28-4 可以利用棱镜分光镜(a)来观察发射光谱。图中分别显示了汞蒸气(b)和氫蒸气(c)的特征谱线。

当气体发射的光通过棱镜或衍射光栅时，就可以得到原子的发射光谱。利用一种叫做分光镜的仪器，可对发射光谱进行更为细致的研究。如图28-4a所示，在棱镜分光镜里，光先穿过一条狭缝，然后经过棱镜并散射开来。一个透镜系统（图中没有显示）把分散的光聚焦，使它能被观察者观察到，或者记录在照相底片或电子检测器上。对应不同的波长，光通过分光镜在不同的位置上形成了狭缝的像。

人体或白炽的固体（如灯泡里的灯丝）的光谱是从红到紫的连续的彩色波带，而气体的光谱则是一系列鲜明的、不同颜色的线。如图28-4b和c所示分别为汞蒸气和氫蒸气的明线光谱，每一条彩色线都相应于气体原子所发射的一种特定波长的光。

发射光谱可以作为一种很有用的分析工具。比如，它可以用于识别一种未知的气体样品。当未知气体被放置在气体放电管中时，它能发射出光。发射的光中肯定包含一些该气体原子的特征谱线。因此，只需把未知气体所发射的光的波长与已知气体原子的特征谱线的波长进行对比，就能识别出未知气体的身份了。

发射光谱也可用于分析混合气体。当混合气体的发射光谱被拍下后，通过分析照片上的谱线，就能判断出混合气体的成分以及各成分的相对含量。如果待测物质中的某种元素含量很高，那么照片上该元素的谱线肯定比其他含量较少的元素的谱线强。通过谱线强度的比较，就能确定待测气体中各种元素所占的百分比了。



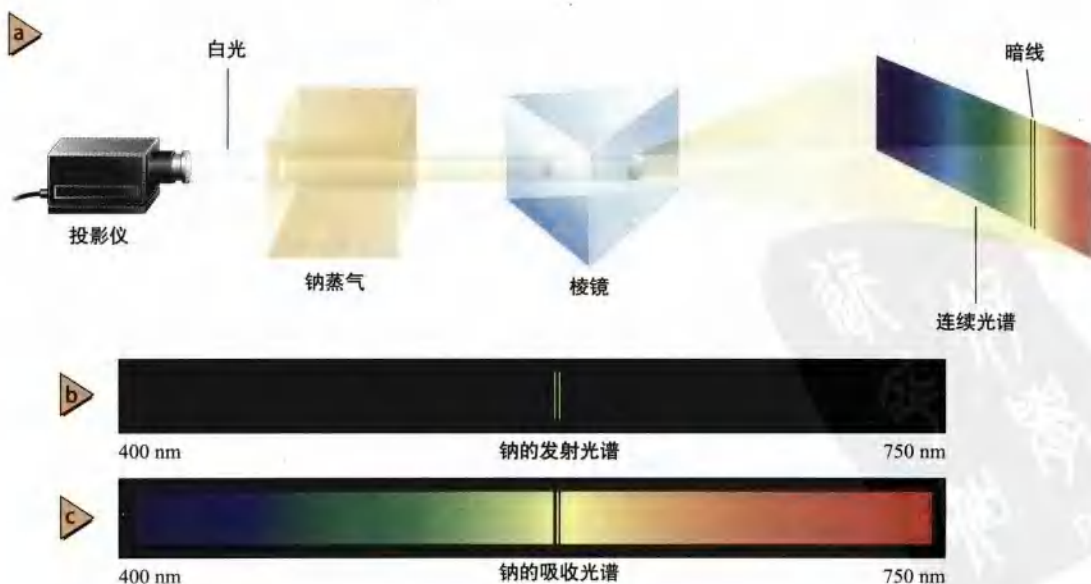
■ 图28-5 夫琅和费谱线存在于太阳光的吸收光谱中。由于太阳中各种元素的含量不一，因此有些线条比较灰暗，有些则非常暗。

吸收光谱 1814年，夫琅和费（J.Fraunhofer）观察到太阳光的光谱中存在几条暗线。现在，人们称这些暗线为夫琅和费谱线，如图28-5所示。夫琅和费认为，当太阳光穿过环绕太阳的大气层时，大气层中的气体吸收掉了某些特有的波长，这些被吸收掉的波长在观察到的光谱中就表现为黑线。被一种气体吸收后产生的光谱，叫做该气体的**吸收光谱**（absorption spectrum）。通过把吸收光谱里缺失的线与已知元素的发射光谱进行对比，就可以确定太阳大气的组成。运用此项技术，科学家还确定了许多其他恒星的组成元素。

让白光通过一种气体的样品，再通过分光镜，你就可以观察到吸收光谱，如图28-6a所示。因为气体吸收特定波长的光，所以在白光通过气体以后，它的连续光谱中就会出现一些黑线。对于同一种气体，发射光谱中的明线和吸收光谱中的黑线通常出现在同一波长处，如图28-6b和c所示。由此可以发现，冷的气体原子吸收的光，恰好就是该元素受激时所发射的光。正如你可能想到的那样，气体的组成可以通过气体的吸收光谱的暗线来确定。

与人文的联系

■ 图28-6 钠的吸收光谱(a)可通过图中所示的流程获得。钠的发射光谱包含着几条明显的谱线(b)，但钠的吸收光谱却是几近连续的光谱(c)。



光谱学 发射光谱与吸收光谱都是非常有用的科学工具。正是因为元素具有特征光谱，所以通过对材料的发射光谱和吸收光谱的观察，科学家可以分析、确认和量化未知的材料。除了科学研究之外，元素的发射光谱和吸收光谱在工业上的应用也同样重要。例如，钢铁厂要对大量的成分不同的废铁进行再处理。利用分光镜，研究人员瞬间就能确定废铁样品的精确组成。这样，钢铁厂就可以通过调整钢的组成，开发新规格的钢材，以适应市场的需求。铝、锌和其他金属的加工厂，采用的也是同样的方法，进行产品的研发。

作为科学的一个分支，光谱学在工业领域具有非常大的作用。不仅如此，光谱学还是分析地球上各种材料的有效工具，也是目前研究遥远太空中星体组成的唯一利器。

原子的玻尔模型

19世纪，许多物理学家企图通过原子光谱来分析原子的结构。由于氢是最轻的元素，并且它的光谱也最简单，所以刚开始时，科学家对氢的研究最多。氢的可见光谱包含有4条谱线：红、绿、蓝和紫，如图28-7所示。任何用来解释原子结构的理论，都必须对这些谱线的波长作出说明，并且支持原子的核式模型。然而此时，卢瑟福提出的原子核式模型却出现了一些问题。卢瑟福认为，电子绕核运动的轨道非常像行星绕太阳运行的轨道；但事实证明，这个行星模型存在严重的缺陷。

行星模型的缺陷 恒定轨道上的电子，将受到指向原子核的向心力的作用。正如你在第26章里学到的，加速的电子将通过发射电磁波辐射能量。若以旋转电子失去能量的速度进行计算，电子应该在 10^{-9} s内落入核中。然而事实上，这个情况并没有发生，因为原子公认是非常稳定的。因而，行星模型与电磁学定律是矛盾的。另外，行星模型预言，加速电子辐射的能量将覆盖所有波长。然而实际的情况是，正如你刚刚学过的，由原子辐射所发射的光只有几个特定的波长。

1911年，丹麦物理学家玻尔（N.Bohr）来到英国，和卢瑟福研究小组一起探究原子结构的问题。玻尔试图将核式模型与普朗克的量子化能级以及爱因斯坦的光电理论统一起来。这是一个非常大胆的设置，因此在当时，这些革命性的思想并没有得到广泛的理解与支持。



■ 图28-7 在可见光范围内，氢的发射光谱中有4条谱线。

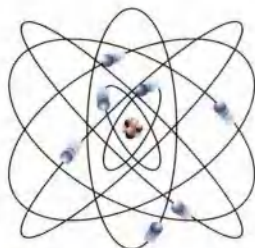
量子化的能量

玻尔一方面将电子按照行星的运行方式进行排布,如图28-8所示;而另一方面,他又大胆地假设电磁学定律在原子内部并不适用。他假定在稳定轨道上的电子,即便它是加速的,也不会辐射能量。玻尔建议把这个稳定的状态作为一种定态。然后,他继续进行假设:定态只允许对应一些特定的能量值。换句话说,玻尔认为,原子内的能量值是量子化的。

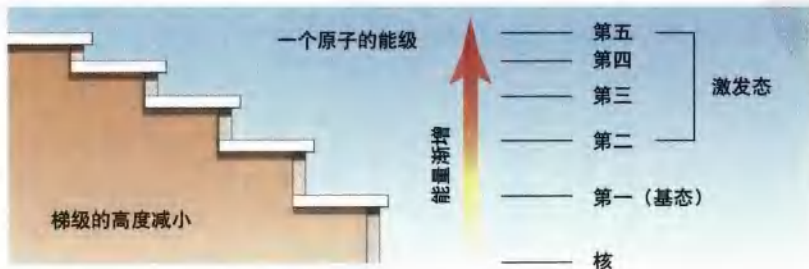
如图28-9所示,原子内量子化的能量可以比作是楼梯上的台阶。要上楼梯,你必须从一级台阶登上另一级台阶——而不可能停留在两级台阶之间的半空中。与楼梯的台阶相似,原子有量子化的能量,其中的每一个能量值叫做一个**能级 (energy level)**。就像你不能停留在两级台阶之间的某一位置一样,一个原子的能量不可能具有处于能级之间的数值。当原子的能量值为最小的可允许值时,称该原子处于**基态 (ground state)**。而当原子吸收能量时,核外的电子就会发生移动,或说是跃迁到较高的能级。任何比基态更高的能级都叫做**激发态 (excited state)**。

原子的能量 是什么决定了原子的能量大小呢? 一个原子的能量,等于核外电子的动能以及电子与核之间相互吸引所引起的势能的总和。处在近核轨道上的电子的能量,要比处在离核较远的轨道上的电子的能量小,这是因为在电子远离核的过程中需要额外的功。因此,当原子处于激发态,即具有较高的能量时,它的电子是在较大的、离核较远的轨道上运行的。另外,原子的能量是量子化的,而且能量与轨道的大小有关,所以轨道的大小也是量子化的。中心为原子核,核外带有轨道电子、具有特定量子化能级的原子模型,就是著名的玻尔原子模型。

如果玻尔关于稳定的原子不辐射能量的假设是正确的,那么,原子的特征光谱是如何产生的呢? 为了回答这个问题,玻尔提出,当原子从一个定态转变为另一个定态时,它就会辐射电磁能。结合爱因斯坦的光电理论,玻尔提出每个光子的能量可用方程式表示为 $E_{\text{光子}} = hf$ 。然后,他假设当原子吸收一个光子时,该原子增加的能量就等于光子的能量。这个受激原子随后通过发射一个光子,转换到较低的能级上。



■ 图28-8 玻尔关于原子的行星模型是基于这样的假设: 电子绕核运行的轨道是固定的。



■ 图28-9 高度渐减的台阶可以比拟为原子内部的能级。注意, 当能级不断升高时, 邻近能级间的能量差将随之减小。

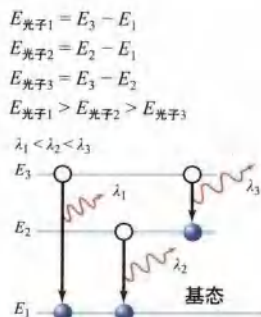


图28-10 辐射光子的能量等于原子的最初能级与最终能级之差。

当原子从最初的能级 E_i 跃迁到最终的能级 E_f 时，它改变的能量 $\Delta E_{\text{原子}}$ 可由下式确定：

$$\Delta E_{\text{原子}} = E_f - E_i$$

如图28-10所示，原子能量的变化量等于它辐射的光子的能量：

$$E_{\text{光子}} = \Delta E_{\text{原子}}$$

或者

$$E_{\text{光子}} = E_f - E_i$$

下述方程概述了原子能态的改变与辐射光子的能量之间的关系：

辐射光子的能量 $E_{\text{光子}} = hf$ 或 $E_{\text{光子}} = \Delta E_{\text{原子}}$

辐射光子的能量，等于普朗克常量和辐射光子的频率的乘积。
辐射光子的能量也等于原子损失的能量。

玻尔模型的预言

一个科学理论除了必须提出假设以外，还必须提出能够用实验数据检验的预言。而一个优秀的理论，还需能用于解决许多不同的问题，并最终为物理世界的某些领域提供一个简单、统一的解释。

玻尔用他的理论计算了氢原子发射的光的波长，其计算结果正好与其他科学家的测量数据相吻合。因此，玻尔的原子模型得到了广泛的认可。然而，这个模型只适用于氢元素，却不能预测第二个最简单的元素氦的光谱。另一方面，它没有很好地说明为什么电磁学定律在其他地方都能适用，而在原子内部却是例外的原因。甚至连玻尔本人也认为他的模型是一个有待进一步完善的原子结构理论。然而，尽管有着这些缺点，玻尔的原子模型在利用氢原子的能级解释光的吸收和发射波长方面，还是取得了令人瞩目的成功。

玻尔模型的发展 为了进一步完善他的模型，玻尔尝试把牛顿第二运动定律 $F_{\text{净}} = ma$ 应用于电子中。根据库仑定律，可以算出电荷量为 $-q$ 的电子与电荷量为 $+q$ 的质子在相隔距离 r 时的相互作用力，其计算式为 $F = \frac{kq^2}{r^2}$ 。电子在环绕比其质量大得多的质子的圆形轨道运动时，它的加速度为 $a = \frac{-v^2}{r}$ 。这里的负号表示电子的运动方向是朝向原子核的。由此，玻尔得到了下述关系式：

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

此式中， k 为库仑常量，它的值为 $9.0 \times 10^9 \text{ N} \cdot \text{m}^2/\text{C}^2$ 。

接下来,玻尔考虑了轨道电子的角动量,它等于电子的动量和电子圆轨道半径的乘积,可由 mvr 求出。玻尔假设角动量也是量子化的,换言之,电子的角动量只能有某些确定的值。他主张这些允许的值为 $\frac{h}{2\pi}$ 的整数倍,这里的 h 即为普朗克常量。用 n 表示一个整数,玻尔假定 $mvr = \frac{nh}{2\pi}$ 。重列方程,可得到 $v = \frac{nh}{2\pi mr}$ 。结合 $\frac{kq^2}{r^2} = \frac{mv^2}{r}$,玻尔得到了氢原子中电子的轨道半径的计算式:

$$\text{氢原子内部的电子轨道半径 } r_n = \frac{h^2 n^2}{4\pi^2 k m q^2}$$

第 n 层电子轨道的半径,等于普朗克常量的平方与整数 n 的平方的乘积,除以4,再除以常数 k 、电子的质量 m 、电子的电荷量 q 的平方以及 π 的平方的乘积。

在上述方程中,代入已知量以及 $n=1$,就能计算出氢原子最内层轨道的半径,即玻尔半径的值。

$$\begin{aligned} r_1 &= \frac{(6.23 \times 10^{-34} \text{ J}\cdot\text{s})^2 \times 1^2}{4\pi^2 \times 9.0 \times 10^9 \text{ N}\cdot\text{m}^2/\text{C}^2 \times 9.11 \times 10^{-31} \text{ kg} \times (1.60 \times 10^{-19} \text{ C})^2} \\ &= 5.3 \times 10^{-11} \text{ J}^2\cdot\text{s}^2/\text{N}\cdot\text{m}^2\cdot\text{kg} \\ &= 5.3 \times 10^{-11} \text{ m}, \text{ 或 } 0.053 \text{ nm} \end{aligned}$$

再进行简单的代数运算,就能计算出原子的总能量。它是电子的动能及由 $\frac{-kq^2}{2r}$ 给定的势能之和,可用下述公式表示:

$$E_n = \frac{-2\pi k^2 m q^4}{h^2} \times \frac{1}{n^2}$$

代入常量的数值,就能算出原子的总能量(以J为单位),用下式表示:

$$E_n = -2.17 \times 10^{-18} \text{ J} \times \frac{1}{n^2}$$

将这个关系式的单位转换成电子伏特,就可得到下述方程:

$$\text{氢原子的能量 } E_n = -13.6 \text{ eV} \times \frac{1}{n^2}$$

主量子数为 n 的原子的总能量,等于 -13.6 eV 和 n^2 的倒数的乘积。

电子的轨道半径和原子的能量是量子化的。出现在这些方程式中的整数 n 叫做主量子数(principal quantum number)。主量子数决定了 r 和 E 的量子化值。概括地说,半径 r 随 n^2 的增大而增大,而能量 E 却取决于 $\frac{1}{n^2}$ 。

● 迷你实验

明线光谱



将气体放电管的电源与气体管相连,开启电源开关,使气体管发出亮光。

注意:小心操作气体管,防止损坏。当电源接通时,不要与任何暴露在外的金属接触。注意防范电压的危险。变动气体管之前,一定得先关闭电源。

关掉房间里的灯。

1. 描述你所观察到的颜色。
2. 观察气体放电管的光通过衍射光栅的情形。
3. 概述气体放电管的光通过衍射光栅时的观察结果。
4. 预测当不同的气体放电管的光通过衍射光栅时,观察到的光谱是如何改变的。
5. 检验你的预测。

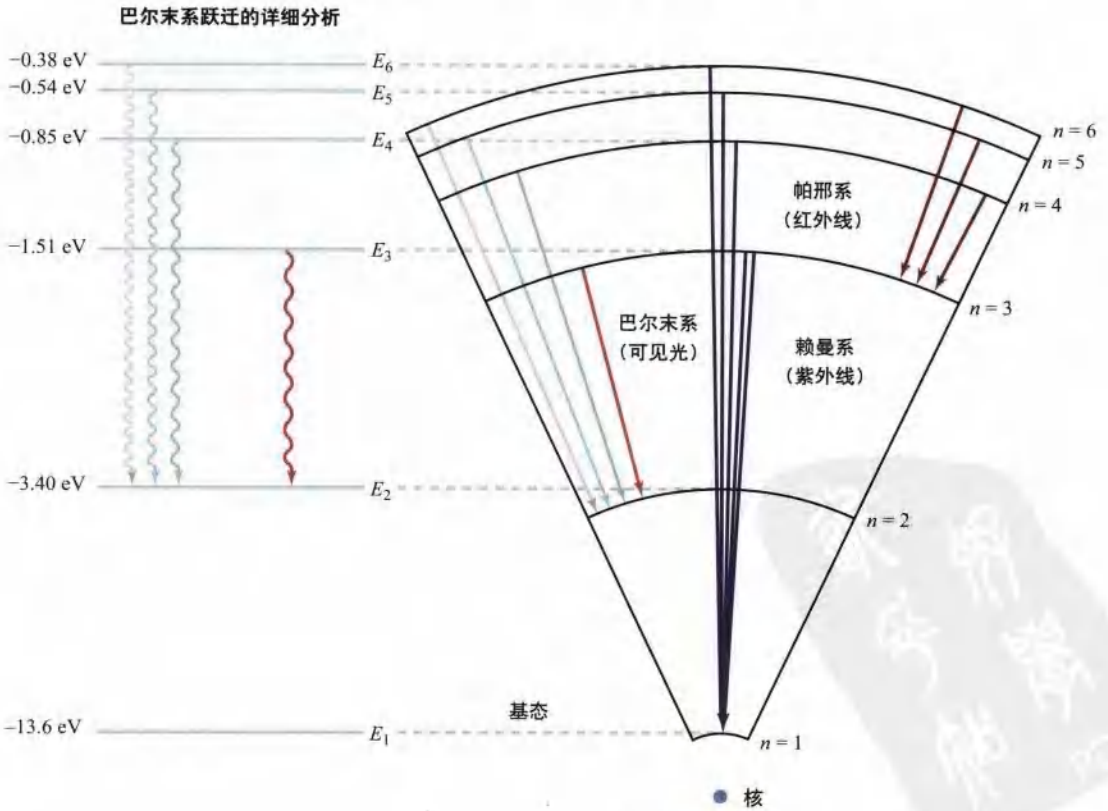
分析与结论

6. 概述新的气体放电管的光通过衍射光栅的观察结果。
7. 解释为什么两幅光谱存在某些差异。

电子的跃迁和能量 你可能会感到疑惑：为什么在玻尔模型中，原子的能量是一个负值呢？回忆第11章，只有能量的差才是有意义的，零能级可以随意选择。在这种情况下，当电子与原子核的距离无限远，并且没有动能时，原子的能量被定义为零。当原子被电离，也就是电子从原子中移走时，就满足这个条件。因为电离原子的过程需要做功，所以带有核外电子的原子，其能量比零还小，即原子的能量为负值。当原子从较低能级跃迁到较高能级时，总能量将会负得少一些，但能量的变化量却是正的。

如图28-11所示为氢的一些能级和氢原子可能经历的能级跃迁。注意，一个受激氢原子发射的电磁波，是否处于红外线、可见光或紫外线的范围内，完全取决于电子发生的跃迁。例如，当原子从任何受激态返回基态时，就会发射紫外光线；当原子从 $n = 3$ 或其他较高的能级跃迁回 $n = 2$ 的能级时，氢原子的光谱中就会产生4条可见谱线。

图28-11 氢原子可见光谱中的一系列彩色谱线，组成了巴尔末系。这些可见光是电子从史高能级跃迁到第二能级（即 $n = 2$ ）时发射光子的结果。氢原子中其他电子的跃迁将产生紫外线的（赖曼系）和红外线的（帕邢系）电磁能量。



► 例题 1

能级 一个氢原子吸收能量，使得它的电子从最内层的能级 ($n=1$) 跃迁到了第二能级 ($n=2$)。确定第一和第二能级的能量，以及原子吸收的能量。

1 分析概括问题

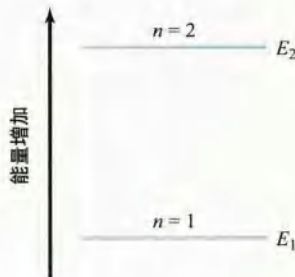
- 画出能级 E_1 和 E_2 。
- 在图中标出能量增加的方向。

已知：

最内层能级的主量子数，
 $n=1$
第二层能级的主量子数，
 $n=2$

未知：

E_1 能级的能量 $E_1 = ?$
 E_2 能级的能量 $E_2 = ?$
能量差 $\Delta E = ?$



2 求解未知量

利用轨道电子的能量公式，计算每一能级的能量。

$$E_n = -13.6 \text{ eV} \times \frac{1}{n^2}$$

$$E_1 = -13.6 \text{ eV} \times \frac{1}{1^2}$$

$$= -13.6 \text{ eV}$$

将 $n=1$ 代入。

$$E_2 = -13.6 \text{ eV} \times \frac{1}{2^2}$$

$$= -3.40 \text{ eV}$$

将 $n=2$ 代入。

原子吸收的能量 ΔE 等于原子最终的能级 E_f 和最初的能级 E_i 的能量差。

$$\Delta E = E_f - E_i$$

$$= E_2 - E_1$$

将 $E_f = E_2$, $E_i = E_1$ 代入。

$$= -3.40 \text{ eV} - (-13.6 \text{ eV})$$

将 $E_2 = -3.40 \text{ eV}$, $E_1 = -13.6 \text{ eV}$ 代入。

$$= 10.2 \text{ eV} \quad \text{被吸收的能量}$$

3 验证答案

- **单位是否正确？** 轨道能量值是以 eV 为单位的。
- **符号是否有意义？** 当电子从较低的能级跃迁到较高的能级时，能量差是正的。
- **数值是否合理？** 电子从第一能级跃迁到第二能级需要的能量接近于 10 eV，结果是正确的。

► 练一练

1. 计算氢原子第二、第三、第四能级的能量。
2. 计算氢原子 E_3 和 E_2 之间的能量差。
3. 计算氢原子 E_4 和 E_2 之间的能量差。
4. 书中指出，可以通过公式 $r_n = \frac{h^2 n^2}{4\pi^2 k m q^2}$ 计算氢原子最内层的轨道半径。注意，方程中除了 n^2 外，其他所有的因数都是常量，其中 $r_1 = 5.3 \times 10^{-11} \text{ m}$ 或 0.053 nm 。利用这些信息，计算氢原子内第二、第三和第四能级的轨道半径。
5. 已知氢核的直径为 $2.5 \times 10^{-15} \text{ m}$ ，核与第一能级上电子间的距离约为 $5 \times 10^{-11} \text{ m}$ 。如果你用一个直径 7.5 cm 的球代表氢核，那么电子将离核多远？

► 例题 2

发射光子的波长和频率 一个受激氢原子从第二能级 ($n=2$) 跃迁到第一能级 ($n=1$), 计算发射光子的波长和能量。利用例题1中得出的 E_2 和 E_1 进行计算。

1 分析概括问题

- 画出能级 E_2 和 E_1 。
- 在图上标出能量增加的方向, 并画出发射的光子。

已知:

能级 $E_1 = -13.6 \text{ eV}$

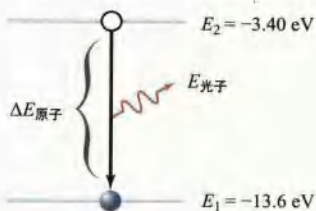
能级 $E_2 = -3.40 \text{ eV}$

未知:

频率 $f = ?$

波长 $\lambda = ?$

能量差 $\Delta E = ?$



2 求解未知量

发射光子的能量为 ΔE , 即原子的最终能级与最初能级的能量差。

$$\Delta E = E_f - E_i$$

$$= E_1 - E_2$$

$$= -13.6 \text{ eV} - (-3.40 \text{ eV})$$

$$= -10.2 \text{ eV} \quad \text{发射的能量}$$

将 $E_f = E_1$, $E_i = E_2$ 代入。

将 $E_1 = -13.6 \text{ eV}$, $E_2 = -3.40 \text{ eV}$ 代入。

运用以下公式, 计算光子的波长。

$$\Delta E = hf, \text{ 所以 } f = \frac{\Delta E}{h}$$

利用光子能量公式解出频率。

$$c = \lambda f, \text{ 所以 } \lambda = \frac{c}{f}$$

根据波长与频率的关系, 求解波长。

$$\lambda = \frac{\Delta E}{hf}$$

将 $f = \frac{\Delta E}{h}$ 代入。

$$= \frac{hc}{\Delta E}$$

$$= \frac{1240 \text{ eV nm}}{10.2 \text{ eV}}$$

将 $hc = 1240 \text{ eV nm}$, $\Delta E = 10.2 \text{ eV}$ 代入。

$$= 122 \text{ nm}$$

3 验证答案

- 单位是否正确?** 能量的单位是 eV。在 SI 单位制中, 基本单位 m 前加前缀 n, 叫做纳米, 记作 nm, 它是波长的正确单位。
- 符号是否有意义?** 当从第二能级跃迁到第一能级时, 原子发射一个光子, 释放能量, 因而能量差是负的。
- 数值是否合理?** 跃迁产生的光属于紫外光, 波长小于 400 nm。

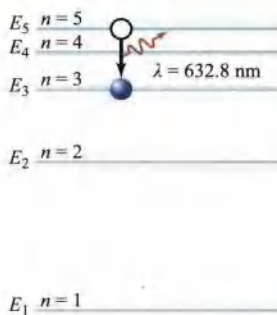
► 练一练

- 求出第2题和第3题中发射光的波长。在图28-7中, 对应于每一次跃迁的分别是哪些线?
- 对于一个特定的跃迁, 汞原子的能量由 8.82 eV 减少到 6.67 eV。
 - 汞原子发射的光子的能量是多少?
 - 汞原子发射的光子的波长是多少?
- 一个氦离子的基态能量为 -54.4 eV, 电子跃迁到基态并发射了一个 304 nm 的光子。受激态的能量是多少?

挑战性问题

虽然玻尔的原子模型正确地解释了氢原子的特性，但它却不能解释其他任何原子的特性。通过对氦原子中电子跃迁的分析，科学家发现玻尔原子模型具有一定的局限性。与氢原子不同，氦原子中有10个电子。其中的一个电子在 $n = 5$ 和 $n = 3$ 的能级间跃迁，在此过程中发射一个光子。

1. 假设氦原子的电子能够像氢原子的电子一样处理，那么玻尔模型预期的光子的能量是多少？
2. 假设氦原子的电子能够像氢原子的电子一样处理，那么玻尔模型预期的光子的波长是多少？
3. 若跃迁过程发射光子的实际波长是632.8 nm，玻尔模型预期的光子波长的百分误差是多少？



玻尔模型的主要贡献是让科学家了解了原子的结构。另外，通过发射光谱的计算，玻尔和他的学生算出了氢原子的电离能。一个原子的电离能，是指一个电子脱离原子而完全自由所需要的能量。玻尔得出的电离能与实验数据是一致的。玻尔模型还进一步提供了对元素的某些化学性质的解释。每种元素的原子具有独特的电子排布情况，这一思想是化学反应和化学键等许多知识的基础。1922年，玻尔被授予了诺贝尔奖，如图28-12所示的邮票是对他的这项伟大成就的纪念。



图28-12 玻尔为人类理解原子作出了杰出的贡献，并因此获得了诺贝尔奖以及全世界的赞誉。来自丹麦和瑞典的这些邮票是对他的纪念。

本节复习题

9. **卢瑟福的核式模型** 按照卢瑟福的核式模型，概述原子的结构。
10. **光谱** 白炽固体与原子气体的发射光谱有什么不同？在哪些方面它们是相似的？
11. **玻尔模型** 说明当原子吸收了一个光子时，能量是如何守恒的。
12. **轨道半径** 氦离子的许多特性类似于氢原子。已知它的最低能级的半径为0.026 5 nm。按照玻尔模型，它的第二能级的半径是多少？
13. **吸收光谱** 说明如何能够确定气体的吸收光谱。说明光谱的形态特征的产生缘由。
14. **玻尔模型** 科学家已经检测出氢可以从第101能级跃迁到第100能级。在这个跃迁过程中，发射的光子的波长是多少？在电磁波谱里，该辐射属于哪种类型？
15. **理性思维** 氢原子核的半径大约为 $1.5 \times 10^{-15} \text{ m}$ 。如果你要建立一个氢原子模型，用 $r = 5 \text{ cm}$ 的垒球代表核，你将把 $n = 1$ 的玻尔轨道上的电子放在什么地方？这个模型是否能放在你的教室里？

28.2 原子的量子模型

主要内容

- 描述玻尔原子模型的缺点。
- 描述原子的量子模型。
- 说明激光的工作原理。
- 描述激光的特性。

关键术语

量子模型
电子云
量子力学
相干光
非相干光
受激发射
激光器

玻尔所作的假设，无法用当时公认的物理原理解释。例如，根据电磁学理论，加速粒子会辐射能量，使原子很快地塌缩。另外，电子具有确定轨道的思想与海森伯的不确定性原理也发生抵触。那么，如何能让玻尔的假设建立在稳固的基础上呢？

从轨道到电子云

解决这些问题的第一个线索是由德布罗意提供的。回忆第27章中，德布罗意提出，与光具有粒子性相似，粒子也具有波动性。动量为 mv 的粒子，它的德布罗意波长为 $\lambda = \frac{h}{mv}$ ，角动量为 $mvr = \frac{hr}{\lambda}$ 。因此，玻尔要求的角动量的量子化条件 $mvr = \frac{nh}{2\pi}$ 可以写成下述形式：

$$\frac{hr}{\lambda} = \frac{nh}{2\pi} \text{ 或 } n\lambda = 2\pi r$$

这就是说，玻尔轨道的圆周长 $2\pi r$ 等于德布罗意波长 λ 的整数倍。如图28-13所示解释了这个关系式。

1926年，奥地利物理学家薛定谔利用德布罗意的波动模型，创立了基于波动的原子的量子理论。这个理论并没有像玻尔模型所做的那样，提出原子的一个简单的行星模型。事实上，电子轨道与行星环绕太阳的轨道差别很大。

海森伯的不确定性原理表明：同时测定电子的位置和动量是不可能的。因而，现代原子的量子模型（quantum model）仅预言了电子在一个特定区域出现的概率。有趣的是，量子模型预测的氢原子中电子与核之间的最可能的距离，与玻尔模型预测的电子半径相同。

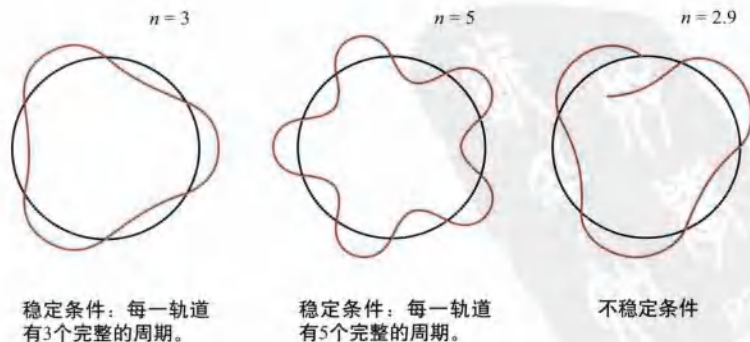


图28-13 为了让电子绕核运动有一个稳定的轨道，轨道的圆周必须是德布罗意波长的整数倍。注意，当 n 为整数，如 $n=3$ 和 $n=5$ 时，轨道是稳定的；但当 $n=2.9$ 时，轨道是不稳定的。

电子在任意特定半径范围内出现的概率，可以通过计算得到，并且显示等几率区的三维图也可以被构建出来。其中电子出现的高概率区域叫做**电子云 (electron cloud)**。如图28-14所示为氢原子的两个最低能级的电子云的剖面图。

尽管把原子的量子模型形象化是非常困难的，但利用波的性质来研究物体性质的**量子力学 (quantum mechanics)**，却利用这一模型成功地预测了原子结构的许多方面。不过，即使是最简单的原子，要精确地计算出各个细节也是十分困难的。唯有高性能的计算机，才能对较重的原子做高精度的模拟。量子力学使得对许多分子结构的计算成为可能，从而使得化学家可以确定分子中原子的排列方式。借助量子力学，化学家已经可以创造一些很有价值的但自然界中并不存在的原子。量子力学还可用来分析由原子发射和吸收光的细节。作为量子力学理论的又一个成果，科学家开发出了一种新的光源。

激光

正如你所知道的，由一个白炽光源发射的光具有连续的波长，但是由原子的气体产生的光只有少数几个差别明显的波长。这两种光都可以朝着各个方向传播。此外，气体放电管两端的原子所发射的光波的步调并不一定一致，或者说完全同步。也就是说，在同一时间，这些波可能处在周期中的不同位点上。回顾第19章，步调一致的波，它们到达最大值或最小值的时间是完全一致的，即是相干的。相干的光称为**相干光 (coherent light)**，步调不一致的光称为**非相干光 (incoherent light)**。如图28-15所示即为这两类光。

光是由被激发的原子发射出来的。到目前为止，你已经学习了两种激发原子的方法：热激发和电子碰撞。原子还可以通过与能量正好合适的光子发生碰撞而受到激发。

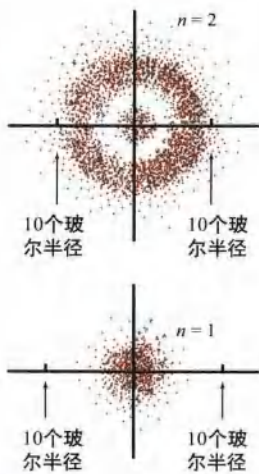


图28-14 图中显示了在氢原子内部离原子核10个玻尔半径的区域内，在第一和第二能级处找到电子的概率。图中小点分布的密度对应于电子出现的概率。注意，玻尔半径为0.053 nm。

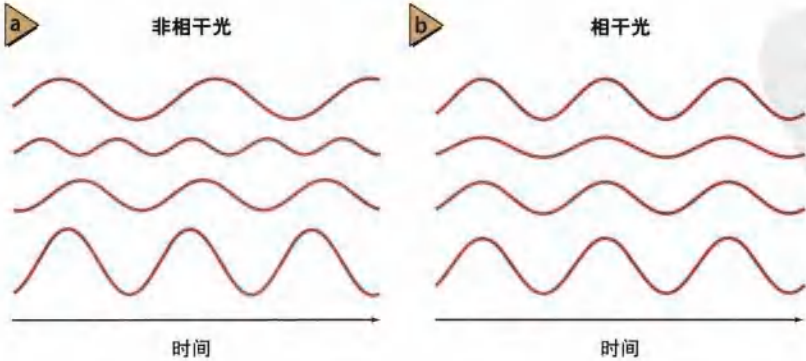
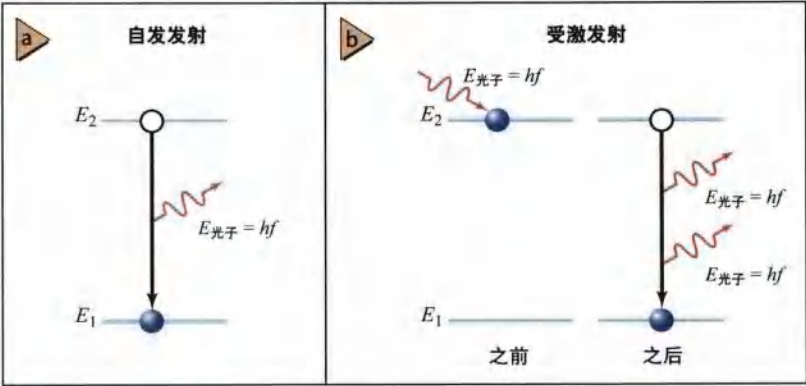


图28-15 非相干光波(a)和相干光波(b)。

■ 图28-16 在自发发射的过程中，原子中的一个电子从激发态 E_2 跃迁到基态 E_1 ，发射出一个带有能量 hf 的光子(a)。在受激发射的过程中，用一个具有能量 $(E_2 - E_1)$ 的光子碰撞一个受激原子。该原子跃迁回基态时发射了一个光子。入射光子和发射光子具有相同的能量值： $E_{\text{光子}} = E_2 - E_1$ (b)。



自发发射和受激发射 当一个原子处在激发态时，会发生什么现象呢？通常它会在很短的时间内回到基态，并发射出一个与它吸收的能量相同的光子，如图28-16a所示。这个过程叫做自发发射。

1917年，爱因斯坦考虑，假如用一个光子碰撞一个已经处在激发态的原子，且这个光子的能量等于该原子受激发态与基态间的能量之差，此时将会发生什么情况呢？他指出，在这种情况下，原子通过一个称为**受激发射** (stimulated emission) 的过程回到基态，并发射一个能量等于两能态能量之差的光子。而引起（或激发）发射的光子是不受影响的。这两个离开原子的光子，不仅具有相同的频率，而且是完全同步的，或者说是相干的，如图28-16b所示。这两个光子中的任意一个又可以碰撞其他处于激发态的原子，从而产生出与原光子同步的其他的 photons。这个过程能够持续进行并产生雪崩般的大量光子，所有光子都有相同的波长，并且同时达到它们的最大值或最小值。

为了引发这个过程，必须满足一定的条件。第一，必须要有处于激发态的其他原子；第二，原子在被光子撞击之前必须在激发态保持足够长的时间；第三，必须包含有这样一些能够去撞击其他受激原子的光子。1959年，科学家发明了一种称为**激光器** (laser) 的装置，它可以满足产生相干光的全部条件。“laser”这个词，在英语中是只取首字母的缩写词，意为“受激辐射的光放大” (light amplification by stimulated emission of radiation)。当原子在激光器里受激发射光时，就称其为放出激光。

原子的激发 激光器中的原子可以被激发或泵浦，如图28-17所示。波长比激光的波长短一些的强烈闪光，可用于泵浦原子。而由闪光产生的波长较短、能量较高的光子，在与激光原子发生碰撞后，就可将其激发。当受激原子通过发射光子衰变到较低的能态时，光子的雪崩就开始了，从而引起短脉冲激光的发射。除了以上方式，还可以通过其他原子的碰撞来激发激光原子。在氦-氖激光器中，电子的放电激发了氦原子，这些受激的氦原子与氖原子碰撞，泵浦它们到激发态，并使它们发出激光。由这个过程引起的激光是连续的，而不是脉冲式的。

发射激光 激光器把激光原子限制在一个玻璃管里，而由激光原子发射的光子也被收集在该管中。管子的两端各有一面相互平行的镜子：其中一面镜子的反射率超过99.9%，几乎反射全部的人射光；另一面则是部分反射，允许大约1%的人射光透过它。在管子两端连线方向上的发射光子被镜子反射回气体中，来回反射的光子撞击了更多的原子。随着光子在镜子间的每一次穿行，释放的光子越来越多，从而大量高能量的光子被积聚了起来。这些光子通过部分反射镜，穿出管子，形成激光束。如图28-18所示为实验室里的激光器。

因为所有受激发射的光子都是与撞击原子的光子同步的，所以激光是相干光。同时，激光具有单一的波长，即是单频的（单色的），这是因为电子仅在涉及的同类原子的唯一一对能级间跃迁。激光器中的平行反射镜，保证了发射的激光具有高度的方向性。换言之，激光束在传播过程中的发散程度很小。因为典型的激光束是很细的，通常只有大约2 mm的直径，所以激光的强度非常大。许多固体、液体和气体材料都能发射激光。大部分材料只在某一个波长上产生激光。但是，也有一些激光器经过调节，可以在一个波长范围内发出激光。



■ 图28-17 当光子与受激原子发生撞击时，光子将激发原子发射出第二个相干光子，并使原子跃迁到一个较低的能级上。



■ 图28-18 激光器产生相干光束。

激光眼部外科手术 把准分子激光用于激光眼部外科手术，是因为它们发射的光子的能量能够摧毁病态组织而不引起周围健康组织的损伤。因此，熟练的外科医生能够用激光去除极薄的组织层，以便重建角膜。

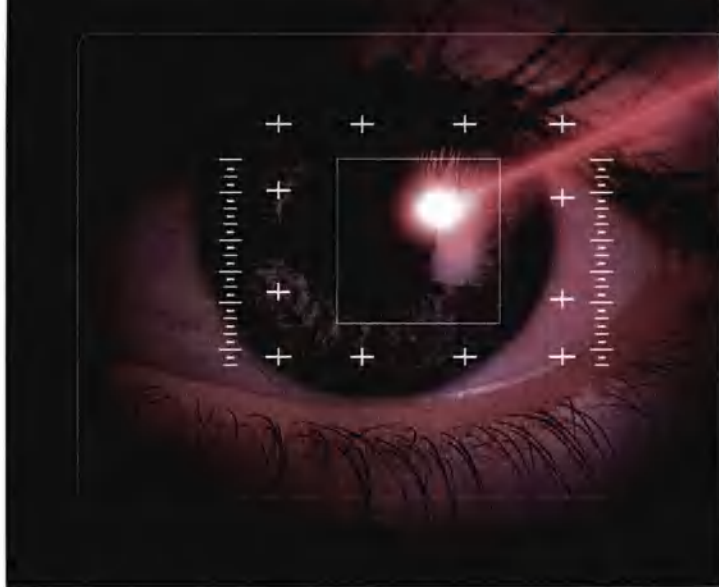
表 28-1		
普通激光器		
介质	波长(nm)	类型
氟化氪气体 (KrF)	248 (紫外线)	脉冲
氦气 (N ₂)	337 (紫外线)	脉冲
铟镓氮晶体 (InGaN)	420	连续
氩离子气体 (Ar ⁺)	476.5, 488.0, 514.5	连续
氖气 (Ne)	632.8	连续
镓铝砷晶体 (GaAlAs)	635 680	连续
砷化镓晶体 (GaAs)	840~1 350 (红外线)	连续
钕晶体 (Nd:YAG掺钕钇铝石榴石)	1 064 (红外线)	脉冲
二氧化碳气体 (CO ₂)	10 600 (红外线)	连续

激光的应用

如果你用过CD或DVD播放器，那么你就已经使用过激光器了。这些激光器以及激光笔，都是用半导体制成的。例如，CD播放器中的激光器就是用砷化镓 (GaAs) 或镓铝砷 (GaAlAs) 晶体制成的。发射激光的薄层只有200 nm厚，而且晶体的每一边都只有1~2 mm长。在半导体晶体里，原子是由电流泵浦激发的，并且形成的光子在晶体抛光的两端间来回反射，从而被放大。如表28-1所示列举了一些由普通激光器产生的激光的波长和类型，包括脉冲型和连续型的。

大多数激光器的效率都比较低。例如，递送到气体激光器的电能，只有不到1%被转化成了光能。虽然晶体激光器的效率接近20%，但通常它们的功率比气体激光器要小得多。尽管激光器的效率不高，但激光独特的性质已经得到了广泛的应用。激光束是集束且高方向性的——经过长距离传输也不会发散。基于此，测量员通常用激光束来检测长隧道或管子的准直度。宇航员在探月的时候，把镜子安放在了月球的表面。科学家用这种镜子反射从地球传送出去的激光束，从而精确地测定了地月之间的距离。此外，通过在地球的不同部位对月球的位置进行跟踪，科学家已经测得了地球板块移动的一些数据。

激光也被用于光纤通讯中。由于运用了光的全反射原理，光纤电缆在传导信号的过程中损失的能量极少。因此，通过快速地发射或关闭波长为1 300~1 500 nm的激光，就能使光纤以脉冲的形式传送信息。现在，在全世界范围内，电话、电脑的数据，甚至电视的图像，都已不再使用铜导线，而是以光缆进行传导了。



■ 图28-19 由激光器发射的紫外光可以从目标组织的原子中剥离电子。光子可破坏化学键，并促使目标组织蒸发。

激光是单一波长的光，这使得它在光谱学中具有很大的应用价值。利用激光激发其他原子，可使该原子返回到基态时发射出特征光谱。这种方法可以用来分析样品中所含的微量原子。事实上，它甚至能检测出单个的原子，并且依靠激光激发的方法把原子控制在几乎静止的状态。

激光所具有的能量高度集中性被应用在了许多领域中。例如，在医学方面，激光被用于修复眼睛的角膜，如图28-19所示。此外，激光也能用于外科手术，代替手术刀，这样可大大地减少患者血液的流失。在工厂里，激光不但能用于切割像钢之类的材料，而且还能把材料焊接起来。将来，激光还可能用于产生核聚变，以创造一种几乎用之不尽的能源。

如图28-20所示为全息照相技术。全息照片依靠的是激光的相干性，它可同时记录光的相位和振幅。与普通照相相比，全息照相的一个明显优点在于它形成了真实的三维图像。全息技术在生产实践和科学研究领域中有着广泛的应用。例如，在工业上，全息技术可用于研究与检测灵敏仪器及其零部件的抖动。

■ 图28-20 全息照相技术利用两束激光的干涉，可记录来自客体的光波的全部信息——相位和振幅。



本节复习题

16. **激光器** 在表28-1中，哪一种激光器发射的光最红（指带有最长波长的可见光）？哪一种激光器发射出蓝色的光？哪一种激光器发射出了人眼不可见的光束？
17. **泵浦原子** 说明是否能用绿光泵浦红色的激光。为什么红光不能用于泵浦绿色的激光？
18. **玻尔模型的局限性** 为什么说玻尔原子模型尽管能准确预言出氢的特性，但它还是存在严重的不足？
19. **量子模型** 说明为什么玻尔的原子模型与海森伯不确定性原理相抵触，而量子模型却没有。
20. **激光器** 说明激光器利用受激发射产生相干光的过程。
21. **激光** 激光的重要性主要依赖于它的哪四个特点？
22. **理性思维** 假设原子的电子云可以被压缩，使得原子几乎只有原子核那样大小，利用海森伯不确定性原理，说明为什么这将需要巨大的能量。

物理实验

探寻原子的大小

运用统计分析和概率的方法，卢瑟福分析了金箔实验的结果。在本实验中，你将用杯子和轴承滚珠模拟金箔实验。然后，你将根据概率方法来分析你的结果，以估计一个不可见的客体的大小。

问题

如何应用概率方法来确定一个不可见的客体的大小？

目标

- **解释数据**，确定轴承滚珠与一个不可见的客体的撞击概率。
- **计算**不可见的客体的大小。计算时可参考撞击概率。

安全警示



- 应及时捡起掉落在地板上的轴承滚珠。

实验器材

鞋盒	3只相同的小纸杯
200颗轴承滚珠	厘米刻度尺
大的毛巾或布	



实验步骤

1. 用厘米刻度尺测量鞋盒内部的长和宽，将测量结果记录在数据表中。
2. 用厘米刻度尺测量一只杯子口径的大小，将测量结果记录在数据表中。
3. 把鞋盒放在折好的毛巾的中央，毛巾至少从鞋盒的每一边延伸出30 cm。
4. 将3只纸杯任意放在鞋盒的底部。
5. 让你的实验伙伴任意地将200颗轴承滚珠扔进鞋盒里。他应当在鞋盒上方均匀地散播轴承滚珠。注意，某些轴承滚珠可能没有落在鞋盒里，而是掉在毛巾上。
6. 清点鞋盒里轴承滚珠的数目，并把这个值记录在数据表中。

分析

1. 计算鞋盒的面积。矩形的面积由下述公式给出：面积 = 长 × 宽。
2. 用你测定的直径 d 计算杯口的面积。圆周的面积由下述公式给出：面积 = $\frac{\pi d^2}{4}$ 。
3. 将杯子的总数乘以每只杯子的杯口面积，从而得到杯子的总面积。
4. 用杯子的总面积除以鞋盒的面积，然后乘以100，计算3只杯子占鞋盒面积的百分比。
5. 将落在杯子里的轴承滚珠的数目除以跌落的轴承滚珠的数目，然后乘以100，计算落在杯子里的轴承滚珠的百分比。

数据表						
	你的数据	第二组数据	第三组数据	第四组数据	第五组数据	班级平均值
鞋盒的长(cm)						
鞋盒的宽(cm)						
鞋盒的面积(cm ²)						
杯子的口径(cm)						
杯口的面积(cm ²)						
杯子的总数	3	3	3	3	3	3
杯口的总面积(cm ²)						
杯口面积占鞋盒面积的百分比(%)						
轴承滚珠的总数	200	200	200	200	200	200
进入杯子的轴承滚珠的数目						
进入杯子的轴承滚珠的百分比						
根据概率算出杯子占鞋盒的百分率						
根据概率算出杯子的总面积(cm ²)						
杯子的数目	3	3	3	3	3	3
根据概率算出一只杯子的面积(cm ²)						

- 根据概率确定杯子占鞋盒的百分比。要注意的是，这个百分比（理想化地）就等于落进杯子里的轴承滚珠占有所有滚珠的百分比。
- 根据概率计算杯子的总面积，即概率与鞋盒面积的乘积。
- 用根据概率算得的杯子的总面积，进一步计算每只杯子的面积。
- 在数据表中记录其他组的实验数据，随后再根据所有的数据计算出班级的平均值。
- 误差分析** 把根据概率得到的杯子面积（即实验值）与由直径测量得出的杯子面积（即公认值）进行比较。你的实验误差是多少？用下述公式计算百分误差：

$$\text{百分误差} = \frac{|\text{公认值} - \text{实验值}|}{\text{公认值}} \times 100\%$$

结论与应用

- 根据概率，你能精确地确定一只杯子的面积吗？根据百分误差说明理由。

- 列出实验中误差的来源，并描述它们对实验结果的影响。

进一步探索

如果该实验采用的是更大的杯子，那么为了达到精确的结果，你认为所需的轴承滚珠的数量应当是更少、相同还是更多？请说明理由。

生活中的物理学

你的老师想在班里就考试延迟作一项民意测验。民意测验的精确度是否取决于被调查学生的数量？请说明理由。

物理 在线

若想了解更多关于原子的内容，请登录网站：
physicspp.com。

原子激光器是一项很有发展前景的技术。传统激光器发射的是相干的光子束或光子脉冲，而原子激光器发射的是相干的原子束或原子脉冲。正如下面将要介绍的，相干原子与组成普通物质的非相干原子是大不相同的。

历史 1923年，德布罗意预言，包括原子在内的所有的粒子都具有波动性。波长与粒子的质量及速度成反比，但在室温下，由于这个波长太小而无法被观察到。在冷冻条件下，原子的速度减小，因此它的波长就增大了。

19世纪20年代，爱因斯坦和玻色（S.Bose）研究了一些名为“玻色子”的粒子。他们预言，如果玻色子能够冷冻到它们最低可能的能态，那么全部的粒子将具有相同的相位和波长。换句话说，这些粒子将具有相干性。这种不平常的物质相，被称为玻色—爱因斯坦凝聚。

首份玻色—爱因斯坦凝聚是在1995年由康奈尔（E.Cornell）和威依曼（C.Wieman）所做出的。凯特尔（W.Ketterle）也独立地完成了类似的研究工作。在进一步的研究中，凯特尔将两份隔离的玻色—爱因斯坦凝聚样品彼此靠近，并观察到了像波一样的干涉图样。凯特尔的实验表明，凝聚态中所有的原子具有相同的波长，并处于同相位。就如玻色和爱因斯坦预言的那样，凝聚态中的原子是相干的。

第一台原子激光器 1997年，凯特尔和同事宣称他们迈出了原子激光器发展的第一步。他们发展了一种方法，把来自玻色—爱因斯坦凝聚的相干原子喷射成一股小脉冲（原子数为100 000~1 000 000个）。

在这第一台原子激光器中，相干原子的脉冲只能沿单一方向传播。由于重力的影响，它发射原子的行为与抛射体有些类似，并且形成了向下凸起的弧形带。在传播过程中，脉冲中的相干原子会趋于散开，如照片所示。1999年，飞利浦（W.Phillips）开发出了可朝各个方向发送相干原子脉冲的技术，同时还有效防止了原子的散开。借助一连串十分短小的脉冲，飞利浦制造出了一束连续的相干原子束。



一台原子激光器发射出相干的钠原子脉冲。每一脉冲包含有 $10^5 \sim 10^6$ 个原子。因为受到重力的作用，脉冲加速向下传播。脉冲的扩散是因排斥力引起的。

将来 玻色—爱因斯坦凝聚和原子激光器，将被应用于对量子力学和物质波的基本

性质的研究等领域。科学家期待着运用原子激光器，制造出更精确的原子钟和电子电路。原子激光器也可以用于原子干涉测量法，从而精确地测量万有引力，检验相对论的正确性。

进一步探索

1. 研究 调查什么是费米子，以及它们是否能形成玻色—爱因斯坦凝聚。

（提示：思考泡利不相容原理是如何应用于费米子的）

2. 理性思维 原子激光器是在一个超高真空环境里运作的。这是为什么？

28.1 原子的玻尔模型

关键术语

- α 粒子
- 原子核
- 吸收光谱
- 能级
- 基态
- 激发态
- 主量子数

重要概念

- 卢瑟福用带正电的、高速的 α 粒子瞄准薄金箔。通过研究反射粒子的径迹，他得到了如下结论：原子几乎是一个空旷的空间，在它的中心有一个微小的、质量很大的、带正电荷的核。
- 运用元素的原子产生的光谱，可以识别包含该种元素的未知样品。
- 如果白光通过一种气体，气体会吸收与它被激发时所发射的波长相同的波长。随后如果此束光通过一面棱镜，那么可以看见该气体的吸收光谱。
- 原子的玻尔模型指出，原子的能量只能有某些确定的值，因而，它是量子化的。玻尔指出，氢原子在 n 能级时的能量等于 -13.6 eV 和 n^2 的倒数的乘积：

$$E_n = -13.6\text{ eV} \cdot \frac{1}{n^2}$$

- 按照玻尔模型，原子在两个可允许的能级间进行跃迁，并以光子(电磁波)的形式吸收或辐射能量。此光子的能量等于原子在终态和初态之间的能量之差：

$$E_{\text{光子}} = E_f - E_i$$

- 按照玻尔模型，电子的轨道半径只能有某些确定的(量子化的)值，在氢原子 n 能级上的电子的半径由下式给出：

$$r_n = \frac{h^2 n^2}{4\pi^2 k m q^2}$$

28.2 原子的量子模型

关键术语

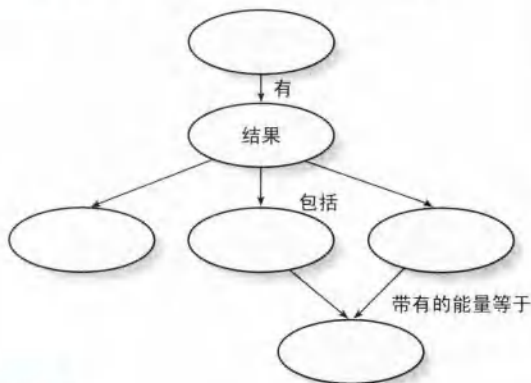
- 量子模型
- 电子云
- 量子力学
- 相干光
- 非相干光
- 受激发射
- 激光器

重要概念

- 在原子的量子力学模型里，原子的能量只能有特定的量子化的值。
- 在原子的量子力学模型里，只能确定在特定的范围里找到电子的概率。在氢原子中，电子离开核的概率最大的距离与玻尔模型中电子的轨道半径是相同的。
- 量子力学在计算原子、分子和固体的性质方面是极其成功的。
- 激光器产生的光是准直的、功率强大的、单色的和相干的。每一特性都使激光具有广泛的应用。

绘制概念图

23. 用下列术语完成概念图：能级、确定的电子轨道半径、玻尔模型、光子的发射和吸收、能级差。



理解概念

24. 描述卢瑟福是如何确定在原子中，正电荷是集中在一个微小的区域里，而不是散布于整个原子的。(28.1)
25. 解释玻尔模型是如何说明氢的吸收光谱包含与它的发射光谱完全相同的频率的。(28.1)
26. 复习原子的行星模型。原子的行星模型带来了一些什么问题？(28.1)
27. 分析与判断原子的玻尔模型。哪三个假设使玻尔发展了他的模型？(28.1)
28. **气体放电管** 解释明线光谱是如何从气体放电管中产生的。(28.1)
29. 对于由原子发射的光谱，玻尔模型作了什么解释和估计？(28.1)
30. 说明为什么由氢气放电管产生的明线光谱和由氦气放电管产生的明线光谱是不同的。(28.1)
31. **激光器** 实验室的激光器只有 0.8 mW (即 $8 \times 10^{-4} \text{ W}$) 的功率。为什么看起来它的光比一个 100 W 电灯的光还明亮？(28.2)
32. 一种与激光器相似，发射微波辐射的装置，叫做微波激光器 (maser)。哪些词汇的首字母拼凑了这个缩写词？(28.2)
33. 激光的什么特征使得它在灯光表演方面有着重要的应用？(28.2)

应用概念

34. 鉴于不同原子的原子能级变的复杂性，设想它们产生的光谱会有什么不同？
35. **北极光** 北极光是来自太阳的高能粒子撞击地球大气高层原子而产生的。如果你通过分光镜观察那些光，你将看到一幅连续光谱还是明线光谱？试说明理由。
36. 如果让在太空中的某宇航员观察从地球表面发射的白光，它的光谱是连续的吗？试说明理由。
37. 钱币是量子化的一个很好的例子吗？水呢？说明理由。
38. 如图28-21所示，带有 6.2 eV 能量的光子进入到处于基态的汞原子中，它将被原子吸收吗？请说明理由。

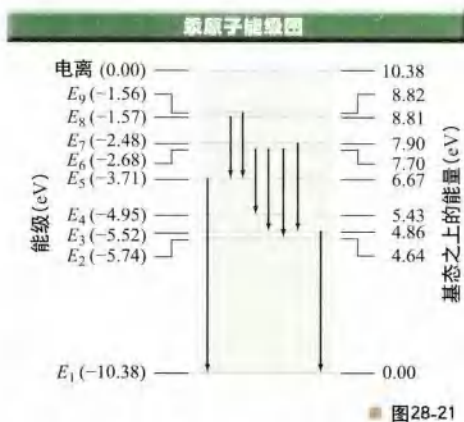


图28-21

39. 一个给定的原子有四个能级，用 E_4 表示最高能级， E_1 表示最低能级。如果原子能够在任意两个能级间跃迁，那么该原子能够发射多少条光谱线？哪一种跃迁产生的光子具有最大的能量？
40. 当一个处于激发态的氢原子中的电子向下跃迁到低能级时，发射一个光子。光子具有的最大能量是多少？如果将同等的能量给予基态的原子，将产生什么现象？
41. 把原子的量子力学理论与玻尔模型进行比较。
42. 发出红、绿和蓝光的激光器，哪一种产生的光子具有的能量最高？

问题解决

28.1 原子的玻尔模型

43. 钙原子从高于基态 5.16 eV 处跌到高于基态 2.93 eV 处时, 发射的光子的波长是多少?
44. 钙原子处在激发态 E_2 , E_2 能级比基态高 2.93 eV 。能量为 1.20 eV 的光子撞击钙原子, 并被它吸收了, 钙原子将上升到什么能级? 可参考如图28-22所示的内容。

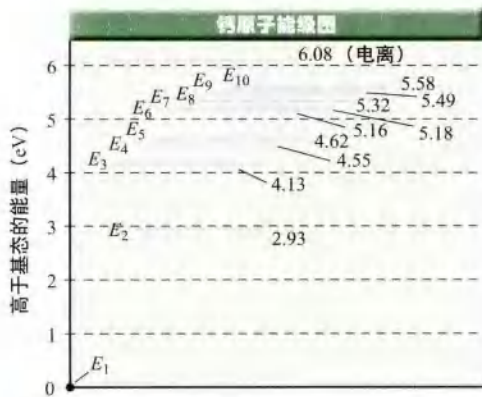


图28-22

45. 一个钙原子处在激发态 E_6 能级。当该原子跌回到 E_2 能级时, 将释放多少能量? 可参考如图28-22所示的内容。
46. 橙色光的一个光子具有 $6.00 \times 10^2\text{ nm}$ 的波长。当它进入一个处在激发态 E_6 能级的钙原子后, 可使原子电离。当电子逃出原子时具有多少动能?
47. 计算与氢原子的 E_7 和 E_2 能级相联系的能量。
48. 计算上题中能级的差。

第49~50题可参考图28-21。

49. 汞原子处在激发态 E_6 能级。
- 电离该原子需要多少能量?
 - 如果该原子下降到 E_2 能级, 它将释放多少能量?
50. 一个汞原子处在激发态, 具有 -4.95 eV 的能量。它吸收一个光子便上升到下一个较高的能级。该光子的能量和频率分别为多少?
51. 与氢原子 E_2 、 E_3 、 E_4 、 E_5 和 E_6 能级相对应的能量分别是多少?

52. 用第51题算出的值, 计算下列能量差。

- $E_6 - E_5$
- $E_6 - E_3$
- $E_4 - E_2$
- $E_5 - E_2$
- $E_5 - E_3$

53. 利用第52题求出的值, 确定当原子进行上题中所列举的各种能级改变时, 所发射的光子的频率。
54. 确定你在第53题中计算得到的频率所对应的光子的波长。
55. 当氢原子落到基态时, 发射一个波长为 94.3 nm 的光子。氢原子是由哪一个能态落下的?
56. 对于处在 $n=3$ 玻尔轨道的氢原子, 求出下列各量。
- 该轨道的半径。
 - 质子与电子间的作用力。
 - 电子的向心加速度。
 - 电子的轨道速度。(将该速度与光的速度进行比较)

28.2 原子的量子模型

57. **CD播放器** 砷化镓激光器通常用于CD播放器。这样一台发射波长为 840 nm 的光的激光器, 它的两个受激能态间的能量差是多少电子伏特?
58. 镓铝镓激光器在间隔为 2.90 eV 的两个能级间发射激光。
- 它发射的光的波长是多少?
 - 这种光处在光谱中的哪个位置上?
59. 二氧化碳激光器发射高功率的红外辐射。它两个发光能级间的能量差是多少电子伏特? 可参考表28-1中的内容。
60. 激光束的功率等于每一光子的能量乘以每秒发射的光子数目。
- 如果你要求 840 nm 的激光器与另一个 427 nm 的激光器具有相同的功率, 前者每秒发射的光子需要是后者的多少倍?
 - 求出 840 nm 、 5.0 mW 的激光器每秒发射的光子数。
61. **氦氖激光器** 一种氦-氖激光器可以产生三种波长的激光: 632.8 nm 、 543.4 nm 和 1152.3 nm 。
- 求出产生每一种波长所对应的两能级间的能量差。
 - 确认每一种波长的光的颜色。

第28章 测评

复习提高

62. 具有14.0 eV能量的光子击中处在基态的氢原子，并使它电离。从原子逸出的电子有多少动能？
63. 计算与氢原子 E_5 和 E_6 能级相对应的轨道半径。
64. 一个氢原子处在 $n=2$ 能级。
- 如果一个波长为332 nm的光子撞击这个原子，证明原子将被电离。
 - 当原子电离时，假设电子接受了电离后剩余的能量，那么电子的动能是多少焦耳？
65. 将一束电子瞄准原子态的氢气样品。为了使氢原子从 $n=3$ 跃迁到 $n=2$ 的能态时发射出红光，电子需要的最小能量是多少？
66. 最精确的光谱学实验运用的是“双光子”技术。波长相同的两个光子，从相反的方向瞄准目标原子，每一个光子具有把原子从基态激发到设计能态所需的能量的一半。为了精确研究氢原子 $n=1$ 和 $n=2$ 能级间的能量差，需要什么波长的激光。

理性思维

67. **应用概念** 高压汞蒸气灯的光谱，在暗室墙上投影的结果如图28-23所示。三条明线中的每一条分别对应什么能级差？

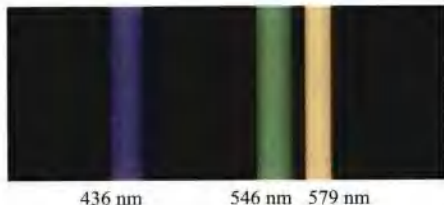


图28-23

68. **解释科学图示** 汞原子在发射第67题中描述的可见光子以后，继续发射光子直到它到达基态。通过对图28-21的观察，是否可知这些光子中的任何一个都是可见的？说明理由。
69. **分析与结论** 一个电子偶素原子，是由一个电子和与它相对的反物质（即正电子）束缚在一起组成的。

虽然这个“原子”的寿命很短——平均为 $\frac{1}{7} \mu\text{s}$ ，但它的能级可以被测定。只要将它的一半质量代替电子的质量，就可以用玻尔模型计算出能量值。它的轨道半径和每一能级的能量可能受到怎样的影响？从 E_2 跃迁到 E_1 ，发射的光子的波长是多少？

科技写作

70. 研究原子模型的历史，简略描述每种模型，并说出它们的优缺点。
71. 绿激光指示器发射波长为532 nm的光。研究这种指示器用的激光器，并描述它的原理。简要说明发射的激光是脉冲的还是连续的。

日积月累

72. 作用在电荷量为 $+3.00 \times 10^{-7} \text{ C}$ 的试验电荷上的力是0.027 N。该试验电荷所在处的电场强度是多少？（第21章）
73. 一位技师需要 4Ω 的电阻，但他手头只有若干个 1Ω 的电阻器。有什么办法可以使他获得所需的电阻？说明理由。（第23章）
74. 一根长1.0 m的金属线以4.0 m/s的速度垂直于地磁场运动，该处的磁感应强度是 $5.0 \times 10^{-5} \text{ T}$ 。金属线中的感应电动势是多少？（第25章）
75. 电子束中的电子以 $2.8 \times 10^8 \text{ m/s}$ 的速度在场强为 $1.4 \times 10^4 \text{ N/C}$ 的电场中运动。如果电子横穿电场而不发生偏斜，磁感应强度应当是多少？（第26章）
76. 如果汤姆孙要修改他的阴极射线管，以使它能够加速质子（不是电子）。先考虑如何修改，然后回答下列问题。（第26章）
- 要选择相同速度的粒子，比率 $\frac{E}{B}$ 将要改变吗？说明理由。
 - 为了使磁场引起的偏转一直保持不变，磁感应强度应大一些还是小一些？为什么？
77. 要使由金属发射的电子全部返回，所需要的截止电压是7.3 V。电子的最大动能是多少电子伏特？（第27章）

标准化测试

选择题

1. 下列原子模型中，基于卢瑟福的金箔实验结果的是 ()

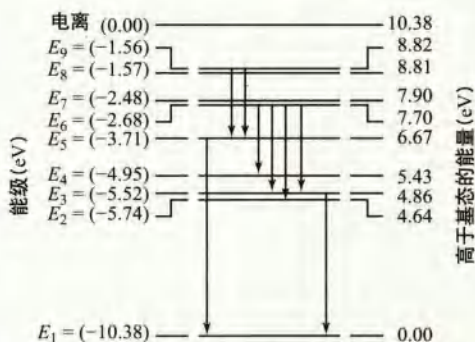
- (A) 玻尔模型
- (B) 核模型
- (C) 葡萄干布丁模型
- (D) 量子力学模型

2. 一个汞原子发射波长为405 nm的光时，所涉及的两个能级间的能量差是 ()

- (A) 0.22 eV
- (B) 2.14 eV
- (C) 3.06 eV
- (D) 4.05 eV

3. 下图展示了汞原子的能级。当汞原子从 E_7 跃迁到 E_4 能级时，发射的光的波长为 ()

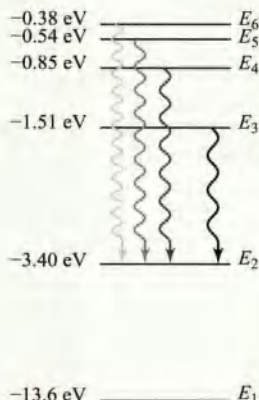
- (A) 167 nm
- (B) 251 nm
- (C) 500 nm
- (D) 502 nm



4. 下列关于原子的量子模型的说法中，错误的是 ()

- (A) 原子允许的能级是量子化的
- (B) 电子绕核的位置是精确知晓的
- (C) 电子云被定义为很可能找到电子的区域
- (D) 稳定的电子轨道与德布罗意波长有关

第5~6题涉及氢原子的巴耳末系的电子跃迁图，如下所示。



5. 发射最大频率的光相应于哪两个能级间的跃迁 ()

- (A) 从 E_2 到 E_5
- (B) 从 E_3 到 E_2
- (C) 从 E_3 到 E_6
- (D) 从 E_6 到 E_2

6. 与 E_4 到 E_2 能级跃迁有关的巴耳末系谱线的频率是 () ($1 \text{ eV} = 1.60 \times 10^{-19} \text{ J}$)

- (A) $2.55 \times 10^{14} \text{ Hz}$
- (B) $4.32 \times 10^{14} \text{ Hz}$
- (C) $6.15 \times 10^{14} \text{ Hz}$
- (D) $1.08 \times 10^{14} \text{ Hz}$

拓展题

7. 当氢原子从 $n=5$ 能级跃迁到 $n=2$ 能级时，发射的光子的波长为多少？

✓ 考试小贴士

一时绊倒，并非失败

考试过程中，难免会遇到这样的情况：你对某几道题的答案一无所知；即使将题目读上好几遍，仍感觉一头雾水。如果是多选题，那就集中精力对付该题中你略有所知的选项，排除你能排除的，从而得出你最有信心的猜测。然后，继续解答后面的题目。

第29章

固态电子学

内容提要

- 分辨导体、半导体和绝缘体。
- 考察纯半导体是如何改变以产生所需要的电学特性的。
- 比较晶体二极管和三极管。

学习本章的意义

半导体具有单向导电性，因此在许多常见的电子设备中，它被用来放大一些微弱的信号。

高速运算 利用半导体里的电子或空穴的受控运动，计算机和电子设备可以进行快速的数字计算和逻辑运算。

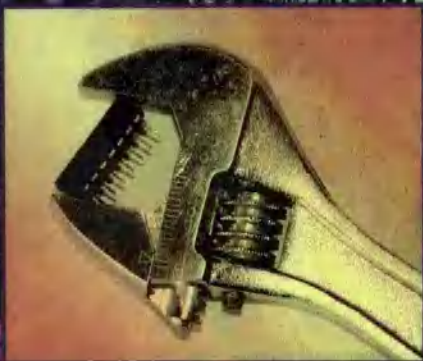
想一想 ▶

一个微型硅芯片非常小，但是它可以容纳大约数百万个电阻器、二极管和三极管。如何才能把这些高度复杂的东西集成在如此微小的结构中呢？



物理  在线

physicspp.com



起步实验

探究二极管的导电性

问题

双色发光二极管(LED)是以什么方式导电的?

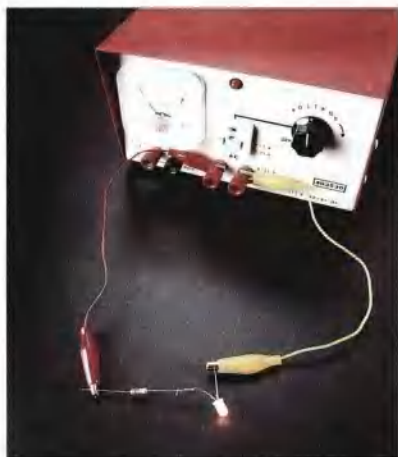
步骤

1. 取一个双色(红—绿)发光二极管和一台9~12 V的交流电源或变压器。
2. 用导线把一个100 Ω 的电阻器和发光二极管串联,再接到交流电源上。
3. 接入电源时小心不要触电。当电阻发热时,别去碰触它。把交流电源插入GFCI插座。
4. 记录你对发光二极管的观察结果。
5. 将一片频闪观测盘放在发光二极管前,并使观测盘旋转。通过频闪盘观察发光二极管,并记录你的观察结果。

分析

在你接上电源以后,发光二极管是什么颜色?当通过频闪盘观测时,发光二极管又是什么颜色?

理性思维 对于你的观测结果,提出一个合理的解释。



29.1 固体导电

除了天然的导体和绝缘体材料之外,由科学家和工程师们共同研制的材料也被用于电子器件的制造。对电子学的简要认知,可以从研究材料如何导电开始。

电子器件最早起源于20世纪初期的真空管。在真空管中,电子束会通过一段空间,以达到放大和控制弱的电信号的目的。真空管非常庞大,需要消耗大量的电能,并产生相当可观的热量。由于它们必须采用热的灯丝,而灯丝会损耗,因此真空管的使用寿命一般在1~5年左右。

20世纪40年代后期,科学家发明了一些固态器件,它们的工作原理与真空管相似。这些器件是由如硅和锗这样的称为**半导体(semiconductor)**的材料制成的,它们通过电子在微小的晶体空间中的运动来控制 and 放大弱的电信号。因为内部流动的电子非常少,而且没有灯丝,所以由半导体制成的器件的输入功率非常低。同时,它们的体积很小,不会产生多少热量,生产成本又十分低廉,而使用寿命却可达20年或20年以上。

学习目标

- 描述导体和半导体里电子的运动情况。
- 对比与比较N型和P型半导体。

关键术语

半导体
能带理论
本征半导体
掺杂剂
非本征半导体

固体的能带理论

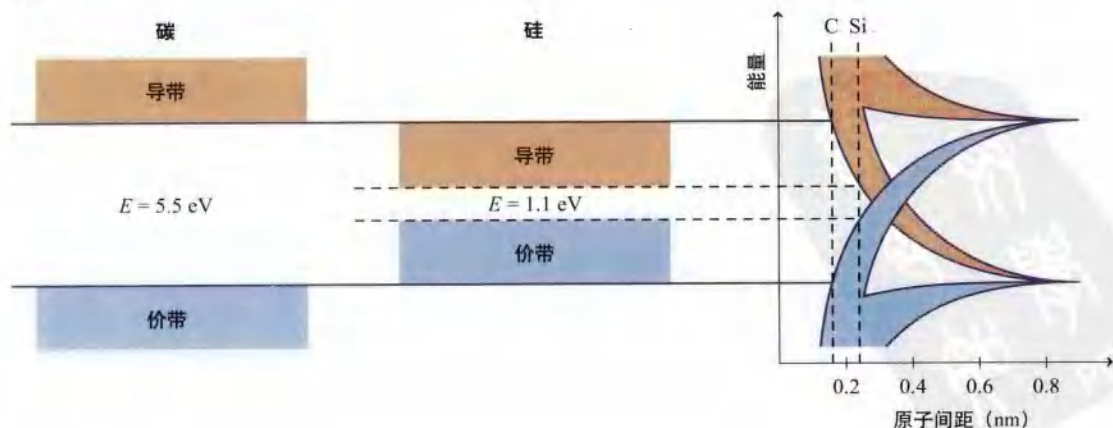
你已经学习了什么是电的导体和绝缘体。电荷能够很容易地在导体内移动，但在绝缘体里却不能。当你从原子的层面来审视这两类物质时，它们在携带电荷方式上的差异就变得十分明显了。

第13章中提到，固态的晶体是由规则排列且束缚在一起的原子组成的。在第27章和第28章中你又了解到，原子是由带负电荷的电子云环绕一个致密的、带正电的核组成的。这些电子只能处于某些允许的能级上。大多数情况下，原子中的电子占据的都是尽可能低的能级。在此状态下，就涉及所谓的基态。因为电子只能具有某些能量，所以任何的能量变化都是量子化的。也就是说，能量的改变以特定的值出现。

能带 假设你能够通过将原子一个接一个地排在一起的方式来构造固体。你的工作将从一个处于基态的原子开始。此时，在原子间的巨大空间里 ($> 0.8 \text{ nm}$)，没有非常靠近的原子。这个原子的两个不连续的能级如图29-1所示。当移动一些原子，使它们靠近该原子构成固态的晶体时，这些邻近原子的电场会影响这个原子的电子能级。在固态晶体内部，各个原子的基态能级由于受到周围所有邻近原子的电场的作用，而被分裂成多个能级。由于能级的数量非常多，并且紧密相连，因此它们不再呈现清晰的能级，而是显示为如图29-1所示的能带形式。较低的能量（即价带）被晶体中的束缚电子占领，而较高的能量（即导带）可以使电子从一个原子移动到另一个原子。

注意在图29-1中，晶体硅和晶体碳（金刚石）的原子间隔转化成了被能隙隔开的价带和导带。这些能隙不具有可供电子占有的能级，因此它们被称之为能量禁止区域（也称为禁带）。有关被禁带隔开的价带和导带的描述，称为固体的**能带理论 (band theory)**，利用这一理论能很好地

■ 图29-1 当另一些原子移近某一个原子时，这个原子的能级被分裂，导致在价带和导带之间出现了一个能隙。



理解固体的导电特性。例如，如图29-1所示的能带图条显示，与晶体硅相比，使晶体碳（金刚石）中的价电子从价带移动到导带，需要的能量更大；石墨形态的碳之所以是一种很好的导体，是因为在石墨形态中原子排列的结构与在金刚石结构里的相比，其能隙更小一些。

与金刚石相比，晶体硅的能隙较小。在绝对零度时，硅的价带被全部填满，而导带则是完全空闲的。而在室温时，一定数量的价电子具有的热能足以跳过这个1.1 eV的能隙到达导带，并成为载流子。随着温度的升高，越来越多的电子获得了足够跳过能隙的能量，因此硅的导电性逐渐增强。锗有一个0.7 eV的能隙，它比硅的能隙小。这意味着，在任何给定的温度，锗的导电性都比硅强。然而这也意味着，对于许多电子学的应用来说，锗对于热过于敏感。相对小的温度的变化，就会引起锗的导电性发生巨大的改变，这一点对于电路的控制和稳定十分不利。

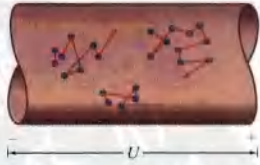
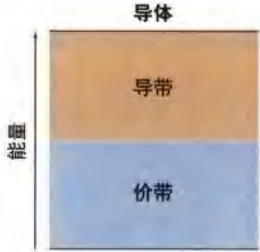
铅的原子间隔为0.27 nm。从图29-1可看出，这可以转化为一个导带与价带相交迭的能带—能隙图。因此，人们有理由认为，铅是一种良导体，而事实上它确是如此。具有交迭的、部分被填满的能带的材料就是导体，如图29-2所示。

导体

当给物质的两端加上电压时，产生的电场将对电子施加力的作用。电子加速并获得能量，同时电场对它们做功。如果物质中的能带仅部分被填满，那么一定还存在可利用的能级，这些能级只是比电子的基态能级稍微高一些。这样，从电场获得能量的电子就能够从一个原子转移到下一个原子。这种从一个原子到下一个原子的电子运动就是电流，而这整个过程就是你所熟知的电的传导过程。这些带有部分填满能带的材料——如金属铝、铅和铜等——都是很易导电的。

随机运动 导体中的自由电子以随机的方式快速运动。当它们与原子实（即原子核+内层电子）碰撞时，就会改变运动方向。然而，如果沿着导线的纵向加上一个电场，那么就有一个净力把电子朝着某一方向推动。虽然这个力对单个电子的运动影响不大，但从整体看，所有电子会沿着电场方向缓慢地运动，如图29-3所示。也就是说，在电子继续以 10^6 m/s的速度快速地沿随机方向运动的同时，还会以 10^{-5} m/s或更小的速度缓慢地向着导线的正极端漂移。导体的这个模型叫做电子气模型。如果温度升高，电子的速度就会增大，因此它们与原子实的碰撞就会更为频繁。因而，随着温度的升高，金属的导电性降低。电导率为电阻率的倒数。当导电性下降时，金属的电阻增大。

■ 图29-2 在良导体材料中，部分导带被填满。这个浅蓝色的部分表示由电子占据的能量区域。



■ 图29-3 在导体中，电子做快速的随机运动。如果在导线的两端加上一个电场，那么电子就会向一端漂移。电子总是朝着常规电流的相反方向流动的。

► 例题 1

导体的自由电子密度 在 1 cm^3 的铜中存在多少个自由电子？已知每个原子贡献一个自由电子。铜的密度、原子质量和每摩尔的原子数都能够在附录中查到。

1 分析概括问题

- 利用附录确定已知量。

已知：

铜：每个原子提供1个自由电子

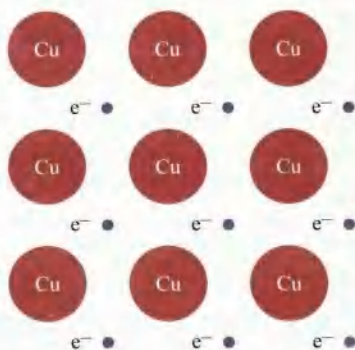
$$\rho = 8.96\text{ g/cm}^3$$

$$M = 63.54\text{ g/mol}$$

$$N_A = 6.02 \times 10^{23}\text{ mol}^{-1}$$

未知：

$$\text{自由电子/cm}^3 = ?$$



2 求解未知量

$$\text{自由电子/cm}^3 = \frac{\text{自由电子}}{\text{原子}} \times N_A \times \frac{1}{M} \times \rho$$

$$= \frac{1\text{个自由电子}}{1\text{个原子}} \times \frac{6.02 \times 10^{23}\text{个原子}}{1\text{ mol}} \times \frac{1\text{ mol}}{63.54\text{ g}} \times \frac{8.96\text{ g}}{1\text{ cm}^3}$$

$$= 8.49 \times 10^{22}\text{ 个自由电子/cm}^3$$

将 $\frac{\text{自由电子}}{\text{原子}} = \frac{1\text{个自由电子}}{1\text{个原子}}$ ，
 $N_A = 6.02 \times 10^{23}\text{ mol}^{-1}$ ， $M = 63.54\text{ g/mol}$ ， $\rho = 8.96\text{ g/cm}^3$ 代入。

3 验证答案

- **单位是否正确？** 根据量纲分析，确定单位为每立方厘米中的自由电子数。
- **数值是否合理？** 根据预期， 1 cm^3 铜中的电子数是非常大的。

► 练一练

1. 锌的密度为 7.13 g/cm^3 ，原子质量是 65.37 g/mol 。已知每个锌原子有2个自由电子，那么每立方厘米的锌中有多少个自由电子？
2. 每个银原子有1个自由电子。根据附录，求每立方厘米银中有多少自由电子。
3. 每个金原子有1个自由电子。根据附录，求每立方厘米金中有多少自由电子。
4. 每个铝原子有3个自由电子。根据附录，求每立方厘米铝中有多少自由电子。
5. 已知华盛顿纪念碑的顶部是用 $2\,835\text{ g}$ 的铝制成的，因为在19世纪铝是非常稀有且贵重的金属。利用第4题中的数据，确定华盛顿纪念碑的顶部的自由电子数目。

绝缘体

在绝缘材料中，价带是填满（电子）的，而导带是空的。如图29-4所示，电子要进入下一个能级，必须获得大量的能量。在绝缘体中，导带中的最低能级要高出价带中的最高能级 $5 \sim 10\text{ eV}$ ，如图29-4a所示。也就是说，至少有 5 eV 的能隙是电子不能占领的。

虽然由于热运动，电子具有一些动能，但是室温下的电子的平均动能并不足以让电子跳过禁带。如果在某一绝缘体上加上一个小的电场，由于几乎没有电子可以获得到达导带的足够能量，因此也就不存在电流。要将绝缘体中的电子推进导带，必须给予它很大的能量。这样的结果就是，绝缘体中电子具有维持在原地的趋势，因而绝缘材料不导电。

半导体

半导体里的电子的运动活性介于绝缘体与导体之间。如图29-4b所示，在半导体中，价带与导带间的能隙接近于1 eV。为了说明半导体的电子特征，先来分析一下它的结构。大多数常见的半导体，如硅（Si）和锗（Ge）等，它们的原子具有4个价电子。这4个价电子用来束缚原子，把它们连结在一起形成固态晶体。就像在绝缘体里一样，这些价电子形成了一个填满的能带，但价带与导带间的禁带宽度要比绝缘体中小得多。如图29-5a所示，要从硅原子中推出一个电子并把它送入导带，并不需要太多的能量。确实，由于禁带非常小，以致一些电子仅凭它们的热运动能量就可以到达导带了。也就是说，原子和电子的随机运动就能给一些电子足够的能量，使它们摆脱原子家族的束缚，在硅晶体中四处漫游。

如果给半导体加一个电场，那么导带里的电子将沿所加电场的方向通过固体。与金属的效应不同，半导体的温度越高，到达导带的电子就越多，因而电导率也越高。

如果一个电子摆脱了原子的束缚而得到自由，那么就说这个原子包含了一个空穴。如图29-5b所示，空穴就是价带里的一个空能级。这个原子具有一个净的正电荷。一个来自导带的电子可以跳进这个空穴，并再次被原子束缚。当一个空穴和一个自由电子重新结合时，它们所带的相反电荷就会彼此中和。

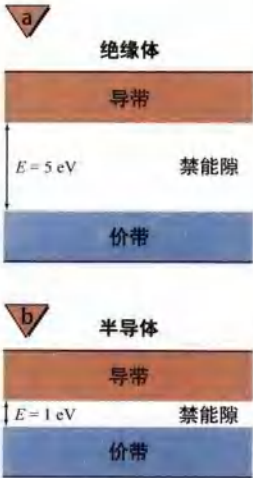
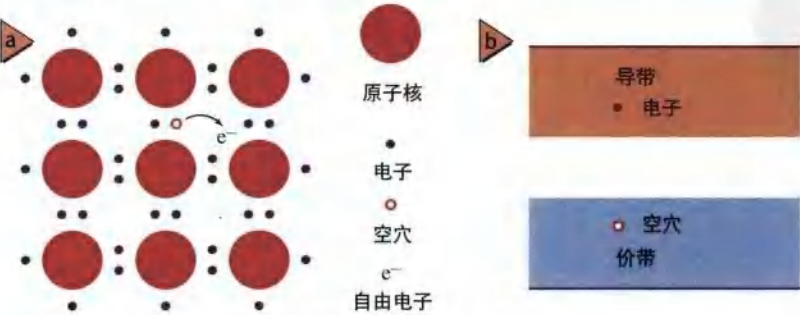


图29-4 比较绝缘体(a)和半导体(b)里的价带和导带。把这几幅图与图29-2所示的进行比较。

图29-5 在半导体中，有一些电子具有足够的热动能，可以摆脱束缚而在晶体中自由穿行，如在晶体结构(a)和能带(b)中所示的那样。



然而，由于电子已经在它原先的位置上留下了一个空穴，因此，就如同听音乐抢座位的游戏那样，带负电的自由电子朝一个方向运动，而带正电的空穴就会朝相反的方向运动。利用热能引起自由电子和空穴进行导电的纯半导体，叫做**本征半导体 (intrinsic semiconductor)**。在这种半导体中，用于携带电荷的自由电子和空穴非常少，所以本征半导体的导电能力很低，它们的电阻非常高。

► 例题 2

本征半导体中的自由电子数 已知室温下，固体硅的热运动能量使每立方厘米硅中存在 1.45×10^{10} 个自由电子。求室温下每个硅原子中的自由电子数。

1 分析概括问题

• 确认已知量和未知量。

已知：

$$\rho = 2.33 \text{ g/cm}^3$$

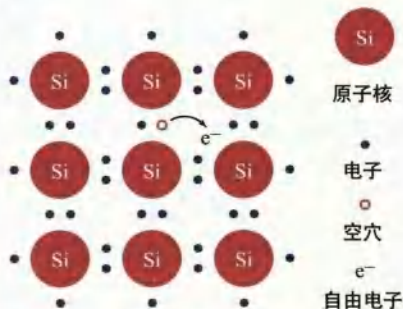
$$M = 28.09 \text{ g/mol}$$

$$N_A = 6.02 \times 10^{23} \text{ mol}^{-1}$$

$$\text{硅: } 1.45 \times 10^{10} \text{ 个自由电子/cm}^3$$

未知：

硅的自由电子/原子 = ?



2 求解未知量

$$\text{自由电子/原子} = \frac{1}{N_A} \times M \times \frac{1}{\rho} \times 1.45 \times 10^{10} \text{ 个自由电子/cm}^3$$

$$= \frac{1 \text{ mol}}{6.02 \times 10^{23} \text{ 个原子}} \times \frac{28.09 \text{ g}}{1 \text{ mol}} \times \frac{1 \text{ cm}^3}{2.33 \text{ g}} \times \frac{1.45 \times 10^{10} \text{ 个自由电子}}{\text{cm}^3}$$

$$= 2.90 \times 10^{-13} \text{ 个自由电子/原子}$$

或者粗略地说，3万亿个硅原子中有1个自由电子。

将 $N_A = 6.02 \times 10^{23} \text{ mol}^{-1}$,
 $M = 28.09 \text{ g/mol}$, $\rho = 2.33 \text{ g/cm}^3$,
 硅的自由电子/cm³ = 1.45×10^{10} 个
 自由电子/cm³ 代入。

3 验证答案

- **单位是否正确？** 根据量纲分析，这个单位是正确的。
- **数值是否合理？** 在本征半导体（如室温下的硅）中，非常少的原子具有自由电子。

► 练一练

- 已知纯锗的密度为 5.23 g/cm^3 ，原子质量为 72.6 g/mol 。在室温下，每立方厘米锗中有 2.25×10^{13} 个自由电子。每个锗原子中有多少个自由电子？
- 在 200.0 K 时，每立方厘米硅中具有 1.89×10^5 个自由电子。在该温度下，每个硅原子有多少个自由电子？若用摄氏温标表示此温度，为多少摄氏度？
- 在 100.0 K 时，每立方厘米硅中具有 9.23×10^{-10} 个自由电子。在该温度下，每个硅原子有多少个自由电子？若用摄氏温标表示此温度，为多少摄氏度？
- 在 200.0 K 时，每立方厘米锗中具有 1.16×10^{10} 个自由电子。在该温度下，每个锗原子有多少个自由电子？
- 在 100.0 K 时，每立方厘米锗中具有 3.47 个自由电子。在该温度下，每个锗原子有多少个自由电子？

非本征半导体

要制造实用的器件，就必须极大地提高本征半导体的导电性。**掺杂剂 (dopants)** 是施加或接受电子的原子，它们能以低浓度的方式添加到本征半导体中去。掺杂剂通过制造额外的电子或空穴来提高导电性。加入掺杂剂的半导体即所谓的**非本征半导体 (extrinsic semiconductor)**。

N型半导体 若将一个带有5个价电子的施主杂质[如砷 (As)]作为硅的掺杂剂，那么其生成物叫做N型半导体。如图29-6a所示，硅晶体中的一个硅原子的位置已经由杂质原子取代了。砷的5个价电子中的4个与邻近的硅结合，这第五个电子就叫做施主电子。施主电子的能量与导带非常接近，以致热能可轻易地把电子从掺杂原子移入导带中，如图29-7a所示。由于这些额外的施主电子到达导带，N型半导体的导电性得到了进一步的提高。

P型半导体 若将一个带有3个价电子的受主杂质[如镓 (Ga)]作为硅的掺杂剂，那么其生成物叫做P型半导体。如图29-6b所示，当一个镓原子取代了一个硅原子时，由于缺少了一个结合的电子，因此硅晶体中产生了一个空穴。导带中的电子能轻易地跌进这些空穴，而更多价带中的电子进入这些空穴，并生成新的空穴。如图29-7b所示，由于掺杂剂受主原子提供了可利用的额外空穴，P型半导体的导电性得到了进一步的提高。

P型和N型两类半导体都是电中性的，添加的两类掺杂原子并不在本征半导体中附加任何净电荷。这两类半导体是通过电子或空穴来导电的。每100万个硅原子中只要有少数几个杂质原子，就能使半导体的电导率增加1 000倍甚至更多。

硅的掺杂是通过在真空中往纯硅晶体里放入杂质材料样品实现的。掺杂剂被加热直至汽化，并使原子凝结到冷的硅上。在重新加热之后，掺杂剂扩散进硅晶体中，然后将一薄层铝或金蒸发到掺杂晶体上。最后，将金属线焊接到金属层上，这样就可以让用户在掺杂硅的两端加上电压了。

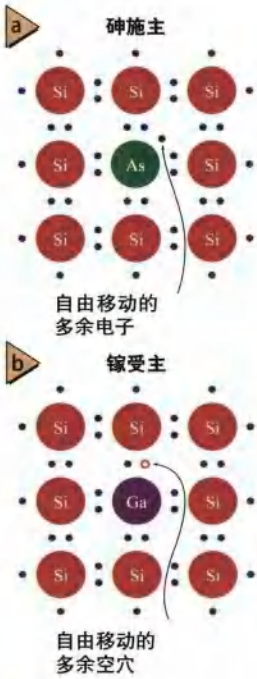


图29-6 有5个价电子的砷施主原子替代了1个硅原子，并向硅晶体提供了一个不受束缚的电子(a)。有3个价电子的镓受主原子在硅晶体中产生了一个空穴(b)。

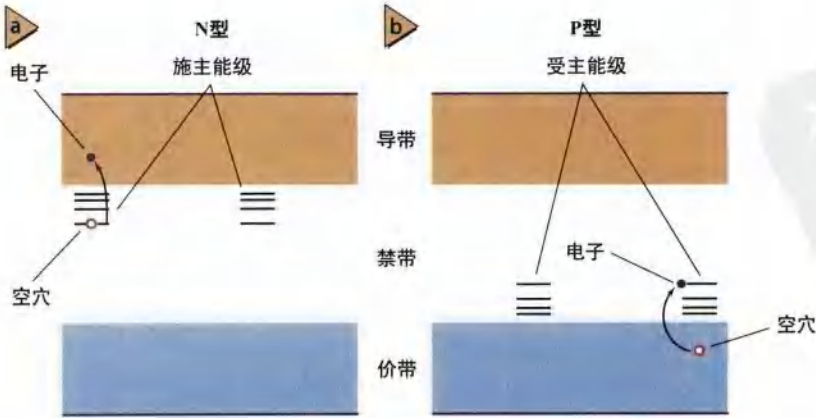


图29-7 在N型半导体(a)中，施主能级使电子进入导带。而在P型半导体(b)中，受主能级在价带中产生了空穴。

热敏电阻 本征和非本征半导体的导电性对温度和光都是非常敏感的。你知道，当温度升高时，金属的电导率就会减小。与此不同，对于半导体而言，随着温度的升高，会有更多的电子到达导带，因此电导率就会增大，而电阻减小。据此，科学家研制了一种叫做热敏电阻的半导体器件，它的电阻强烈地依赖于温度。在实际应用中，热敏电阻被制成了灵敏温度计，并可以用作补偿电路中其他元件受温度变化的影响。此外，热敏电阻还能用于检测无线电波、红外线辐射和其他形式的辐射等。

► 例题 3

掺杂硅的导电性 用砷对硅进行掺杂，使得每100万个硅原子中有1个原子被砷原子取代。已知每个砷原子转移出1个电子到导带中。

- 自由电子的密度是多少？
- 这个密度比本征硅的密度 (1.45×10^{10} 个自由电子/ cm^3) 大多少倍？
- 起主要导电作用的是硅的电子还是砷的电子？

1 分析概括问题

- 确定已知量与未知量。

已知：

1个砷原子/ 10^6 个硅原子

1个自由电子/1个砷原子

4.99×10^{22} 个硅原子/ cm^3

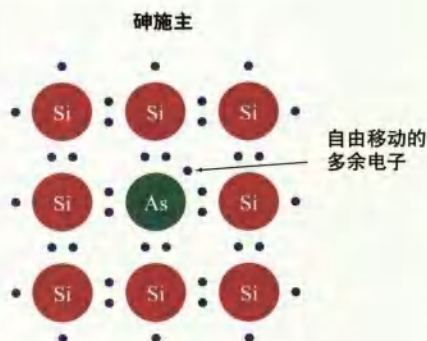
本征硅： 1.45×10^{10} 个自由电子/ cm^3

未知：

由砷转移出的自由电子/ $\text{cm}^3 = ?$

砷转移出的自由电子

与本征硅的自由电子的比值 = ?



2 求解未知量

$$\text{a. 砷的自由电子}/\text{cm}^3 = \frac{\text{自由电子}}{1 \text{ 个砷原子}} \times \frac{\text{砷原子数}}{\text{硅原子数}} \times \frac{\text{硅原子数}}{\text{cm}^3}$$

$$\begin{aligned} \text{自由电子}/\text{cm}^3 &= \frac{1 \text{ 个自由电子}}{1 \text{ 个砷原子}} \times \frac{1 \text{ 个砷原子}}{1 \times 10^6 \text{ 个硅原子}} \times \frac{4.99 \times 10^{22} \text{ 个硅原子}}{\text{cm}^3} \\ &= 4.99 \times 10^{16} \text{ 个自由电子}/\text{cm}^3 \text{ 由砷转入掺杂硅} \end{aligned}$$

$$\text{b. 比例} = \frac{\text{掺杂硅中的自由电子}/\text{cm}^3}{\text{本征硅中的自由电子}/\text{cm}^3}$$

$$\begin{aligned} &= \frac{4.99 \times 10^{16} \text{ 个自由电子}/\text{cm}^3}{1.45 \times 10^{10} \text{ 个自由电子}/\text{cm}^3} \quad \text{将掺杂硅中 } 4.99 \times 10^{16} \text{ 个自由电子}/\text{cm}^3, \text{ 本} \\ &= 3.44 \times 10^6 \text{ 个砷转移的电子}/\text{本征硅电子} \quad \text{征硅中 } 1.45 \times 10^{10} \text{ 个自由电子}/\text{cm}^3 \text{ 代入。} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{将} \frac{\text{自由电子}}{\text{砷原子}} &= \frac{1 \text{ 个自由电子}}{1 \text{ 个砷原子}}, \\ \frac{\text{砷原子数}}{\text{硅原子数}} &= \frac{1 \text{ 个砷原子}}{1 \times 10^6 \text{ 个硅原子}}, \\ \frac{\text{硅原子数}}{\text{硅原子}/\text{cm}^3} &= \frac{4.99 \times 10^{22} \text{ 个}}{\text{硅原子}/\text{cm}^3 \text{ 代入。}} \end{aligned}$$

- 因为对每个本征电子有超过300万个砷转移的电子，所以导电主要依靠的是砷转移的电子。

3 验证答案

- 单位是否正确？** 根据量纲分析，确认这个单位是正确的。
- 数值是否合理？** 这个比值大得足以让本征电子对电导率几乎没有贡献。

► 练一练

11. 在室温条件下, 若你希望由砷施主掺入 1×10^4 个电子作为硅的热自由电子, 那么多少个硅原子中有一个砷原子?
12. 若你希望由砷施主掺入 5×10^3 个热自由电子进入第6题中描述的锗半导体中, 那么多少个锗原子中有一个砷原子?
13. 在400.0 K时, 每立方厘米锗中具有 1.13×10^{15} 个由热释放的载流子。如果每百万个锗原子掺杂1个砷原子, 那么掺杂载流子与热载流子的比率是多少?
14. 在400.0 K时, 每立方厘米硅中具有 4.54×10^{12} 个热释放的载流子。如果每百万个硅原子掺杂1个砷原子, 那么掺杂载流子与热载流子的比率是多少?
15. 在第14题的基础上, 在超过水的沸点温度的条件下, 对有关锗器件的性能作出一个推断, 并与硅器件的性能作一比较。

■ 图29-8 摄影者用测光计测量物体表面上入射光的强度。

测光计 半导体的另一个重要应用依赖于它们对光的敏感性。当光照射到半导体上时, 能够把电子从价带激发到导带, 这与其他能源激发原子的方式相同。因而, 随着光的强度的增大, 半导体的电阻就会减小。基于这一特征, 非本征半导体可以对光的某些特殊波长特别敏感, 这些波长包括光谱中的红外光和可见光区域。因此, 它们可以用来制作光敏电阻。比如, 在测光计中作为光敏电阻的就是硅和镉的硫化物等材料。测光计经常被灯光师用来进行仓库、办公室和家庭的照明设计; 而摄影者则用它们来调节照相机, 以寻求最好的影像, 如图29-8所示。



本节复习题

16. **载流子的迁移率** 导体、半导体或绝缘体, 哪一种材料中的电子最有可能逗留在原来的原子中?
17. **半导体** 如果温度升高, 本征半导体里的自由电子的数目就会增加。例如, 温度每上升 8°C , 硅中的自由电子数目就会增加1倍。那么, 对于本征半导体材料和非本征半导体而言, 哪个的导电性对温度的依赖程度更大? 说明理由。
18. **绝缘体和导体** 二氧化硅被广泛地应用于固态器件的生产中。能带图显示, 它的价带和导带间具有 9 eV 的禁带。它更多的被用作导体还是绝缘体?
19. **导体和绝缘体** 氧化镁有一个 8 eV 的禁带。它是导体、半导体还是绝缘体材料?
20. **本征半导体和非本征半导体** 你要用一块单晶硅设计一条集成电路。如果你希望有一个绝缘性能相当好的区域, 那么应该在这个区域进行掺杂还是保持它为本征半导体?
21. **理性思维** 温度每升高 8°C , 硅释放的热载流子就会增加1倍; 而锗需要升高 13°C , 才会产生比原先增加1倍的载流子。由此, 你可能会认为高温时, 应用锗应该是上好的选择, 但实际刚好相反。这是为什么?

29.2 电子元件

主要内容

- **描述** 二极管是如何限制电流，使它只沿一个方向运动的。
- **解释** 三极管是如何放大或增强电压变化的。

关键技术语

二极管
耗尽层
三极管
微型芯片

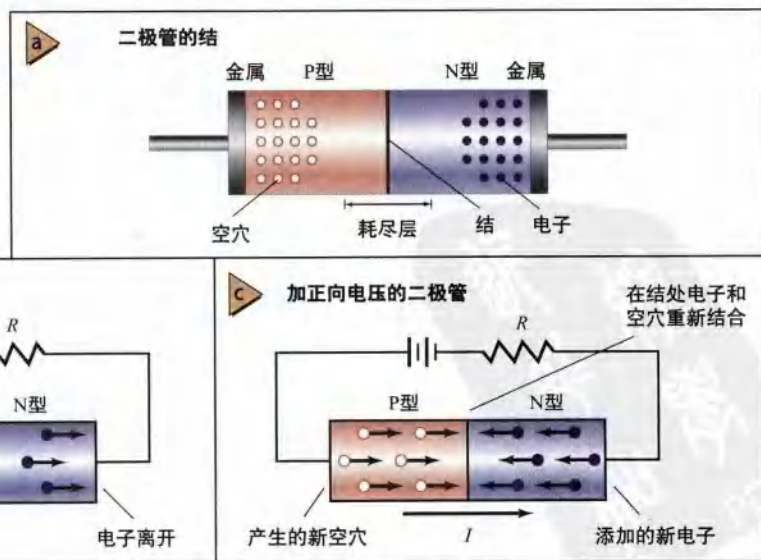
当 今的电子产品，如收音机、电视机、CD播放器和微型计算机等，其核心都是集成在几毫米大小的硅芯片上的半导体器件。这些器件中的电流和电压的关系比欧姆定律描述的要复杂得多。因而，半导体器件具有把电流从交流变为直流及放大电压的功能。

二极管

二极管 (diode) 是最简单的半导体元件。它是N型和P型半导体的一个“三明治”组合。注意，这并不是指简单地将两片分离的掺杂硅连接在一起，而是取一块本征硅样品，先用P型掺杂剂处理，然后再用N型掺杂剂处理。最后，将两个金属接头分别接在样品的两端，引出金属导线，如图29-9a所示。P型区域和N型区域的边界叫做结，因此以这种方式生成的器件叫做PN结二极管。

结的N型区的自由电子会被吸引到P型区的带正电的空穴处。这样，电子就可以轻松地移入P区，并重新与空穴结合。同样，空穴也会从P区移动进入N区，并在那里重新与电子结合。经过这种流动之后，N区具有净的正电荷，而P区具有净的负电荷。这些电荷产生的相反方向的力会阻止载流子的进一步运动。同时，在靠近结的区域里，既没有空穴也没有自由电子。这种耗尽了载流子的区域叫做**耗尽层 (depletion layer)**。因为没有载流子，所以它是一个不良导体。因此，结型二极管是由两端相对较好的导体包围着一个不良导体组成的。

■ 图29-9 PN结二极管的图示(a)显示，耗尽层里不存在载流子。比较一下加反向电压的二极管(b)和加正向电压的二极管(c)中的电流的大小。



当一个二极管以如图29-9b所示的方式接入电路时，N型半导体中的自由电子和P型半导体中的空穴分别趋向于电池的正极与负极方向。耗尽层的宽度增大，并且没有载流子会彼此相遇。此时，几乎没有电流通过二极管。二极管的作用就像一个电阻非常大的电阻器，它几乎就是一个绝缘体。以这种加上反向电压的方式，即电池的负极与P端，正极与N端连接的二极管，称为反偏置二极管。

如果电池以相反的方向连接，如图29-9c所示，载流子就会被推往结的方向。如果电池的电压足够大（对于硅二极管而言为0.6 V），电子就会到达P端并填充空穴。这样，耗尽层被渐渐消除，同时有一个电流穿过二极管。电池继续对N端提供电子，并像提供空穴那样从P端移走电子。随着来自电池的电压不断增大，电流也增大。以这种加上正向电压的方式，即电池的正极与P端、负极与N端连接的二极管，称为正偏置二极管。

如图29-10所示为通过硅二极管的电流与加在它两端的电压的关系图。若所加的电压是负的，那么这个反偏置二极管相当于一个电阻很大的电阻器，只有极小的电流（对于硅二极管而言大约为 10^{-11} A）通过。如果电压是正的，那么这个二极管就是正偏置的，它相当于一个电阻很小的电阻器，然而它并不遵循欧姆定律。二极管的一个重要用途是将交流电压转变为只有单一极性的直流电压。当一个二极管在电路中起这种作用时，它被叫做整流管。在例题4中，你会看到这种二极管的符号，它的箭头所指的方向即为常规电流的方向。

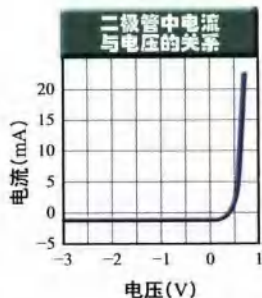


图29-10 图象显示了硅的结型二极管的电流—电压特性。

► 例题 4

简单电路中的二极管 一个硅二极管的 I - U 特性如图29-10所示，二极管通过一个 $470\ \Omega$ 的电阻器连接到电源上。已知二极管是正向偏置的，且通过调节电压，使得通过二极管的电流为12 mA。电源提供的电压为多少？

1 分析概括问题

- 作出包括二极管、 $470\ \Omega$ 的电阻器和电源的电路图，标示电流的方向。

已知：

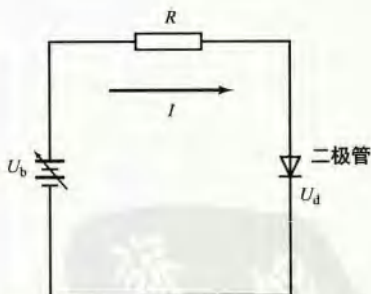
$$I = 0.012\ \text{A}$$

$$U_d = 0.70\ \text{V} \quad (\text{由图29-10读得})$$

$$R = 470\ \Omega$$

未知：

$$U_b = ?$$



2 求解未知量

由 $U = IR$ 可知电阻器两端的电压，而电源电压是电阻和二极管两端电压的总和。

$$U_b = IR + U_d$$

$$= 0.012\ \text{A} \times 470\ \Omega + 0.70\ \text{V} \quad \text{将 } I = 0.012\ \text{A}, R = 470\ \Omega, U_d = 0.70\ \text{V} \text{ 代入。}$$

$$= 6.3\ \text{V}$$

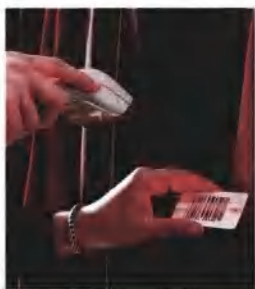
3 验证答案

- 单位是否正确？** 电源电压是以V为单位的。
- 数值是否合理？** 它与电流和电阻的关系是一致的。

练一练

22. 为了使例题4中的二极管产生2.5 mA的电流，需要在二极管上加多大的电源电压？
23. 如果例题4中再串联另一个同样的二极管，那么要产生2.5 mA的电流，需要加多大的电压？
24. 在上题中，二极管应该怎样连接？
25. 在第23题中，如果二极管以不正确的极性串联，将发生什么现象？
26. 当12 mA的电流通过一个锗二极管时，它两端的电压为0.40 V。如果电路中串联的是一个470 Ω 的电阻器，那么需要的电源电压为多大？

图29-11 在条形码扫描器中，二极管激光器被用作光的发射器和探测器。



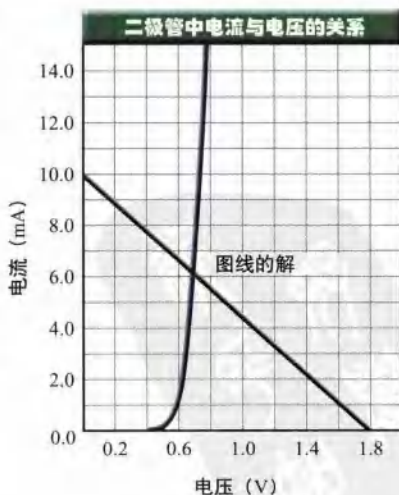
发光二极管 由镓或铝的化合物、砷和磷制成的二极管，当它们正向偏置时就会发射光。这是因为，当电子到达结中的空穴时，它们会重新结合，并以一定波长的光的形式释放过剩的能量。这类二极管叫做发光二极管，即LED。某些LED被配置成发射一窄束相干的单色激光。这些二极管激光器是紧凑的、高功率的光源，它们被广泛应用于CD播放器、激光指示器以及如图29-11所示的超市条形码识别器中。二极管在发射光的同时，也可以用来探测光。照射到一个反偏置PN结二极管上的光，可以使结中产生电子和空穴，从而产生一个与光强有关的电流，这样就可以探测到光了。

挑战性问题

由于二极管的电阻不是一个常量，所以在求解有关二极管电路的问题时，常常会采用近似法。常见的近似有三种：第一种近似忽略了加在二极管上的正偏置电压；第二种近似考虑了二极管电压降的典型值；第三种近似应用了二极管的附加信息，这个信息通常是以如右图所示的图象形式提供的。图中的曲线为该二极管的伏安特性曲线。图中的直线表示的是在二极管的所有可能电压的条件下，由一个二极管、一个180 Ω 的电阻器、一节1.8 V电池串联而成的电路中的电流—电压的关系，直线一端的电压为零，电流为10.0 mA；另一端的电压为1.8 V、电流为0.0 mA。

利用例题4的二极管电路，令 $U_b = 1.8$ V， $R = 180$ Ω 。

1. 利用第一种近似，确定二极管中的电流。
2. 利用第二种近似，并假定二极管两端的电压为0.70 V，确定二极管中的电流。
3. 通过附加的二极管图线，利用第三种近似，确定二极管中的电流。
4. 忽略电池和电阻，估计三种近似的误差，讨论较大的电池电压对误差的影响。



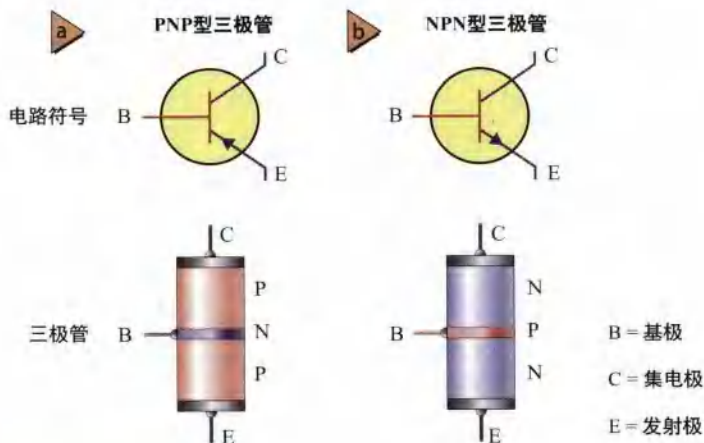


图29-12 比较用于表示 PNP型三极管(a)和NPN型三极管(b)的电路符号。

三极管和集成电路

三极管 (transistor) 是由非本征半导体组成的一个简单元件。一个 NPN 型三极管是由一层作为中心的 P 型半导体及上下两层 N 型薄层组成。这个中心层叫做基极，两边的区域为发射极和集电极。两种三极管的示意图及符号如图 29-12 所示。发射极上的箭头显示了常规的电流方向。

NPN 型三极管的工作原理如图 29-13 所示。在三极管中的这两个 PN 结可以想象为最初由两个背对背的二极管组成的。右边的电池 U_C 保证了集电极比发射极的电位更高。这个基极—集电极二极管是反偏置的，它具有一个宽大的耗尽层，所以不存在从集电极流向基极的电流。当与左边的电池连接后，基极的电位比发射极更高，使得基极—发射极二极管是正偏置的，它允许电流 I_B 从基极流向发射极。

十分薄的基极区域是三极管中的两个二极管的共同部分。由电流 I_B 注入的电荷减小了基极—集电极二极管的反偏置电压，使电荷由集电极流向发射极成为了可能。因而， I_B 的一个较小的变化，可以使得 I_C 产生一个较大的变化。

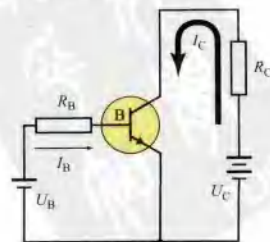
集电极电流会造成电阻 R_C 上产生一个电压。施于基极的电压 U_B 的一个较小的变化，足以使得集电极的电流中发生一个很大的变化，进而引起电阻 R_C 上的电压的变化。结果，三极管把小的电压变化放大为大的电压变化。如果用一个 N 型区域取代中心层，那么这个元件就叫做 PNP 型三极管。PNP 型三极管的工作原理与 NPN 型三极管是一样的，只不过它的两个电池的极性都要反向罢了。

电流增益 从基极电路到集电极电路的电流增益是三极管性能的一个重要指标。尽管基极电流非常小，但是它通过基极—发射极电压控制着集电极电流。例如，如果在图 29-13 的电路中移走 U_B ，那么集电极的电流就会降为零。如果增大 U_B ，基极电流 I_B 就会增大，集电极电流 I_C 也将随之增大，而且将增大许多倍（或许有 100 倍左右）。对于常用的三极管而言，从基极到集电极的电流增益约为 50 ~ 300 倍。

物理学的应用

► **激光二极管** 一个典型的激光二极管发射波长为 800 nm 的近红外的光。这束光是从镓铝砷芯片上一个小斑点处输出的，这时的输入电流约为 80 mA，二极管上的正偏置电压约为 2 V。激光二极管通常被应用于光纤传输。

图 29-13 一个 NPN 型三极管的电路显示了电压是如何被放大的。



● 迷你实验

红光

用一个直流电源、一个 $470\ \Omega$ 的电阻器、一个红色发光二极管接成一个串联电路。把发光二极管的一根短导线连接到已插入GFCI保险插座里的电源的负极，另一根导线接到电阻器上。把电阻器另一头的导线接到电源的正极。慢慢地增大电压，直到发光二极管发光。注意电源的额定电压。

1. 如果使电流的方向反转，对可能会发生的现象作出假设。

2. 将电源反向连接，进行实验。

分析与结论

3. 解释你对于二极管特征方面的观察结果。

在磁带播放机中，磁带上的磁化区域在线圈中感应出微弱的电压变化。随后，这个电压变化被放大，以推动扬声器线圈。而在计算机中，基极—发射极电路中的微小电流能够打开或截断集电极—发射极电路中的较大电流。另外，一些晶体管可以连在一起执行逻辑运算或数值连加。在这种情况下，它们所起的作用是快速开关而不是放大。

微型芯片 一种叫做微型芯片（microchip）的集成电路，由几千个三极管、二极管、电阻以及导体组成，各个元件的线度比 $1\ \mu\text{m}$ 还小。所有这些元件都可由施主或受主原子掺杂硅制造而成。开始时，准备一个极纯的、直径为 $10\sim 30\ \text{cm}$ 、长 $1\sim 2\ \text{m}$ 的柱体单晶硅，如图29-14所示。然后，用金刚石涂层的锯片将它切割成厚度不到 $1\ \text{mm}$ 的小圆片。最后，在这个小圆片的表面上制作一层又一层的电路，这样就制成了一个微型芯片。

通过照相处理，单晶片的大部分表面被覆盖上了一层保护层，但还留下一些精选的模式区域未被覆盖，以使它们能被恰当地掺杂。将这些晶片放置进一个真空室中，然后把砷之类的掺杂剂的蒸气充入这个真空室，对晶片的未保护区域进行掺杂。通过控制曝露的时间，工程师能够控制芯片上裸露区的电导率。这种处理可产生出一些电阻，以及一个二极管的两层中的一层或三极管的三层中的一层。接着，去除原先的保护层，选择晶片的另一处作为裸露的模式区域，再进行类似的处理。这次，晶片被曝露于另一种掺杂剂（通常为镓）中，产生PN结。如果再加上第三层，那么就可以形成NPN三极管。晶片也可以曝露于氧气中，以产生二氧化硅的绝缘区域。曝露于铝蒸气的一层模式区域，能够在电阻、二极管和三极管之中产生一个细小的导电通路。

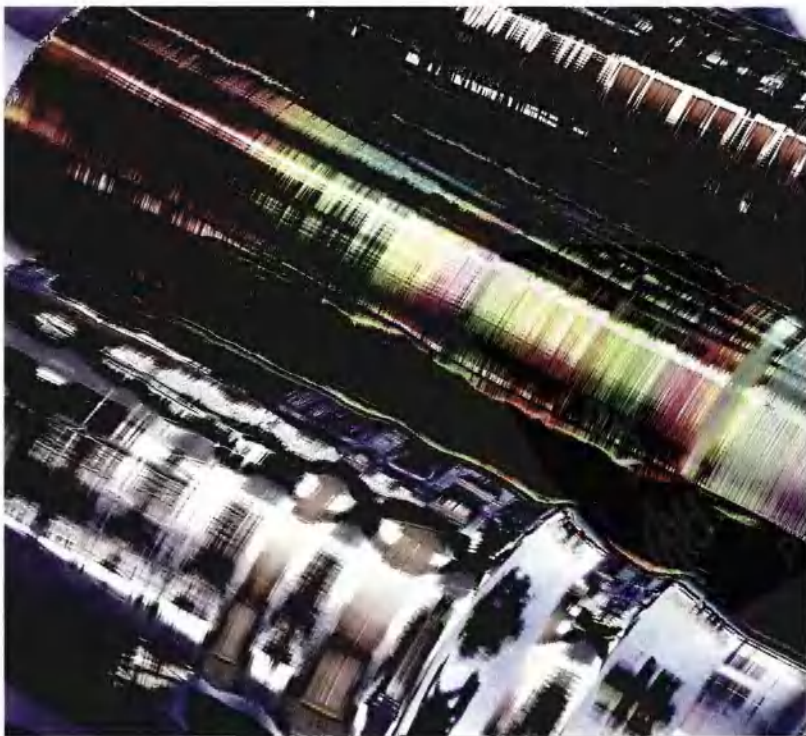
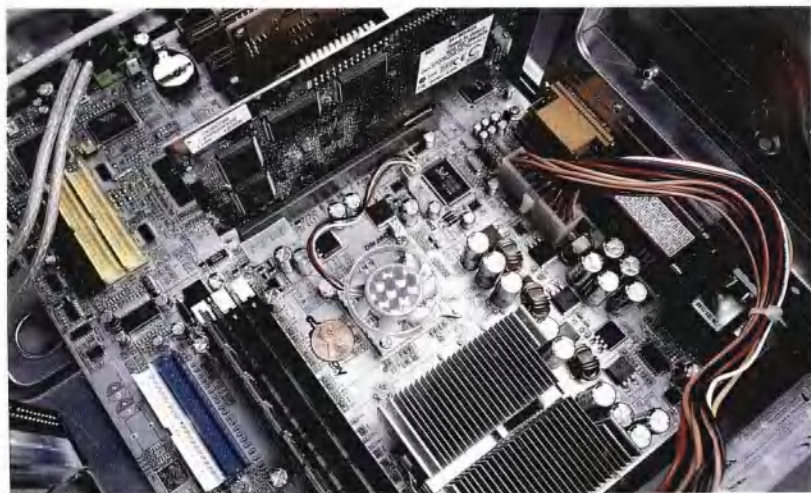


图29-14 把这些很大的硅晶体切割后，就能制成微型芯片的薄片。



■ 图29-15 微型芯片构成了计算机中央处理器的心脏。通过与图中所示的一便士（硬币）的比较，你就可以感性认识微型芯片的尺度了。

在一块普通的晶片上，可以同时存在几千个完全等同的叫做芯片的电路。技术人员先将这些芯片进行检测、切割，然后焊接到托架上；随后，把金属线连接到每个接点上；最后，这些最终的装配会被封装在一个塑料保护壳中。如图29-15所示，芯片的尺寸虽然微小，但是在这个极小的空间里，却可以装配十分复杂的电路。由于电子信号只需要传输极短的距离，因此这种微型化同时增大了计算机的运行速率。就如在计算机里那样，微型芯片已被广泛应用于各种机械装置和汽车中。

半导体电子学的发展，依靠的是物理学家、化学家以及工程师们的共同协作。物理学家揭示了电子和空穴在半导体中的运动原理，并和化学家一起精确地控制加入纯净硅中的掺杂剂的量；与此同时，工程师研发了大规模生产包含成千上万个微型二极管和三极管芯片的方法。他们的共同努力，使人类成功地迈入了当今的电子时代。

本节复习题

27. **三极管电路** 在三极管电路中，发射极电流总是等于基极电流和集电极电流之和： $I_E = I_B + I_C$ 。如果基极相对集电极的电流增益为95，那么发射极电流相对基极电流的比值是多少？
28. **二极管电压降** 如图29-10所示的二极管，用一节电池和一个串联电阻器作正向偏置，使得电路中产生大于10 mA的电流，且电压保持约为0.70 V。现将电池电压加大1 V。
 - a. 二极管两端或电阻器两端的电压将增大多少？
 - b. 通过电阻器的电流将增大多少？
29. **二极管阻抗** 当一个PN结二极管分别正偏置和反偏置时，比较它的阻抗。
30. **二极管极性** 要使发光二极管发光，应将电源的哪一极连接到P端？
31. **电流增益** 在三极管电路中，测得基极电流为55 μA ，集电极电流为6.6 mA。基极相对集电极的电流增益是多少？
32. **理性思维** 你可以将两个分开的二极管的P端连起来，以此取代一个NPN三极管吗？说明理由。

课外CBL培训可见如下网站：
physicspp.com

二极管的电流和电压

半导体元件，如二极管和三极管等，是由部分P型材料和部分N型材料制成的半导体器件。其中，用施主原子掺杂的半导体叫做N型半导体，而用在晶格结构中留有空穴的元素掺杂的半导体称为P型半导体。二极管是通过在半导体的紧邻区域分别掺杂施主和受主原子，形成PN结而制成的。在本实验中，你将要研究接在直流电路中的二极管的电流和电压特性，并将其与你对电阻的相关知识进行比较。

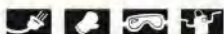
问题

如何比较二极管、发光二极管以及电阻的电流—电压特性？

目标

- 收集和整理数据，包括一个二极管和一个发光二极管的电流和电压的值。
- 测量通过二极管和发光二极管的电流及与其对应的电压。
- 对比与比较电阻与二极管的电流—电压关系。

安全警示



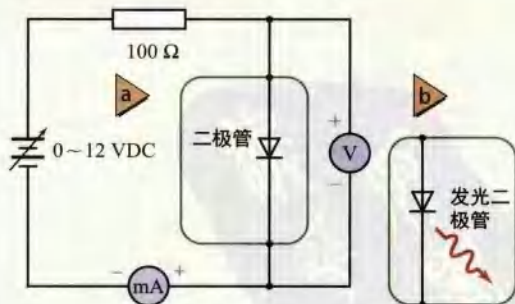
- 谨慎处理电的连接。当电阻可能变热时，请勿与它接触。
- 将电源插入GFCI保护插座，以防止触电。

实验器材

可变直流电源，0~12 VDC
100 Ω 电阻器， $\frac{1}{2}$ W或1 W
1N4002二极管
红色发光二极管
直流电流表，0~100 mA
直流伏特表，0~5 V
带鳄鱼夹的导线若干

实验步骤

1. 准备一份类似于下页所示的数据表。
2. 按照下面的电路图，用导线将电源负极连接到电流表的负极一端。



3. 找出二极管上有银色环纹的一端。将这一端接到电流表的正极端。
4. 把一个100 Ω 的电阻接到二极管的另一端。



数据表

二极管两端的电压(V)	二极管的电流(mA)	发光二极管的电流(mA)
0		
0.1		
0.2		
0.3		
1.7	——	
1.8	——	
1.9	——	
2.0	——	

- 将 $100\ \Omega$ 电阻器的自由端连接到电源的正极。
- 如电路图所示，将电压表与二极管并联。将电压表的正端连线到二极管接电阻器的一端，将电压表的负端连接到二极管有银色环纹的一端，同时连接电流表。
- 使二极管的电路如上页图a所示。接入电源，并使其由零启动。缓慢地增大电源电压，使二极管两端的电压逐步以 $0.1\ \text{V}$ 的增量由0增大到 $0.8\ \text{V}$ 。记录每一个电压相应的电流。**注意：如果你的电流超过电流表的量程，不要再增大电压，并放弃读数。**关闭电源，并拔下电源插头。
- 观察发光二极管的引线。其中的一根应比另一根短一些。用发光二极管取代二极管，电路如上页图b所示。
- 将发光二极管的较短的引线连接到电流表正端（电压表的负端），也就是之前连接二极管银色环纹的一端。然后将发光二极管的较长的引线连接到电阻器以及电压表的正端。
- 接入电源。打开电源并缓慢增大发光二极管两端的电压，以 $0.1\ \text{V}$ 的增量从0增大到 $2.0\ \text{V}$ 。记录每个电压对应的电流值。同时，观察发光二极管的情况，并记录你的观察结果。

分析

- 绘制和运用图象** 在同一张图上，绘制出二极管和发光二极管的电流与电压的关系图线。其中， y 轴表示电流， x 轴表示电压。这些图线的形状是怎样的？
- 构建模型** 利用欧姆定律，计算并在上一张图中利用划分相同的小块（如每隔 $0.1\ \text{V}$ 为一小块），作出 $100\ \Omega$ 电阻器的电压—电流关系图，其中电压的变化范围为 $0\sim 2\ \text{V}$ 。这些小块是什么形状的？

结论与应用

- 对比与比较** 如何比较二极管、发光二极管和电阻的电流—电压曲线？
- 这些曲线中，哪一条遵循欧姆定律？
- 分析与结论** 二极管有一个导通的电压。对于硅二极管而言，这个电压是多少？发光二极管的呢？
- 解释** 为什么发光二极管的说明书中必须明确指出它的输出电流的大小，比如 $20\ \text{mA}$ ？

进一步探索

对于一个二极管而言，要获得较准确的电流测量值，你可以做些什么？

生活中的物理学

小型白炽灯泡的额定电流一般为 $75\sim 150\ \text{mA}$ 。为什么在用电池驱动的CD或MP3播放器里，厂商只使用发光二极管作为指示灯？

物理 在线

若想了解更多关于固态电子学的知识，可登录网站：physicspp.com。

物理学前沿

人工智能

“人工智能”这个词出现于1955年。它被定义为“机械装置对潜在的和智能行为的科学理解，以及它们在机械中的体现”。某些时候，一项任务需要人工智能具有很好的逻辑性；而在另外一些时候，又可能需要人工智能按人类的偏好进行思索和行动。人工智能领域的目标是发展能实现以上两个目标的系统。



“火星漫游者”号模拟车正在判断该如何通过面前的障碍物。

应用 人工智能已经应用于许多领域，并且在不久的将来，它将为人类的生活作出更多的贡献。你可能听说过电脑与国际象棋大师的对弈。在这个过程中，电脑会搜索出成千上万个可能的走法，然后选择最合理的一步。而这个搜索过程正在被科学家不断改进，以求进一步提高其运算效率。

如今，人工智能还被应用于免提自动电话的语音识别和某些交互式电话的处理中。虽然到目前为止，它还不能完全理解自然的语言，但这是其发展的目标之一。

三维计算机视觉是人工智能的另一个发展方向。为了模拟人类的感觉和行为，计算机需要从二维映象中提取出三维现实。虽然这个方面已经有了一定的发展，但是，相比

人类自身而言，计算机做的还远远不够。随着计算机视觉技术的不断发展，如今，人类已经不需要亲自登陆，而只要通过人工智能技术，在地球上远程遥控航天器或机器人，就能对其他行星进行探索了。

人工智能还被应用于专家系统的创建，即使用有关专门课题的知识编制程序。人类只要告诉计算机特定情景的诸多细节，计算机就会推算出最合理的行动方案。在医疗范围内，专家系统可以准确地对病情进行诊断。人工智能在权衡情景的真实性后，能够推断哪一种作用是最恰当的。由于计算机只能按数据库中已有的信息进行操作，因此使用者必须认识到专家系统的这个局限性。



这个机器人正在操纵鼠标。

前景 数学、数理逻辑以及计算机程序语言的研究，对发展能够作出理性判断的系统是非常重要的。同时，心理学知识可以保证这些判断具有人类的思维特征。

进一步探索

- 1. 话题争论** 人工智能的发展是否存在某些道德限制？
- 2. 因果识别** 哪些问题可能引起专家系统得出无效的判断？
- 3. 理性思维** 在哪些情景中人工智能系统必须是绝对理性的？在哪些情景中它应体现人类的偏好？

29.1 固体导电

关键词语

- 半导体
- 能带理论
- 本征半导体
- 掺杂剂
- 非本征半导体

重要概念

- 物体的导电性可以用固体的能带理论来解释。
- 在固体中，原子外部的电子所允许的能级，由于邻近原子中电子的电场作用，被分裂成宽的能带。
- 价带和导带被能隙分隔开来。能隙是电子无法通过的能级区域。
- 在导体中，电子之所以能通过固体移动，是因为导带只是部分被填满。
- 金属中的电子总是做快速的随机运动。如果在金属两端加上一个电压，就会造成电子缓慢的漂移，形成电流。
- 要将绝缘体中的电子移入导带，需要的能量比一般能提供的更多。
- 在半导体中，如果将少量的叫做掺杂剂的另一种原子对纯晶体进行掺杂，可以提高其导电性。
- N型半导体是用施主原子掺杂的，它们通过对施主电子外加适应的电压来导电。
- 砷具有5个价电子，它是典型的施主原子。
- P型半导体是用受主原子掺杂的，它们通过形成空穴来导电，与导带中的电子导电效果相同。
- 镓有3个价电子，它是典型的受主原子。

29.2 电子元件

关键词语

- 二极管
- 耗尽层
- 三极管
- 微型芯片

重要概念

- 一个PN结由一层P型半导体与一层N型半导体结合组成。
- 二极管只在一个方向导电。它们能够把交流电转化为直流电。
- 靠近二极管结两边的电子和空穴相结合而产生的一个没有载流子的区域，称为耗尽层。
- 如果在二极管上加一个适当极性的电压，使耗尽层更加宽，且观测不到电流，那么就说这个二极管是反偏置的。
- 如果将相反极性的电压加到二极管上，使耗尽层大大减小，且可以观测到电流，那么就说这个二极管是正偏置的。
- 三极管由“三明治”式的半导体材料构成，它有NPN及PNP两种类型。它的中心层为基极。与其他两层（即集电极和发射极）相比，基极是很薄的。
- 三极管能够起放大器的作用，把微弱的信号转变成较强的信号。
- 集电极—发射极电流与基极电流之比叫做电流的增益。它是三极管放大性的一个有用的指标。
- 半导体的电导率会随着温度或光照度的增加而增大，因此它们可以用作温度计或测光计。加上电压的发光二极管则可作为光学元件。

绘制概念图

33. 用下列术语完成概念图：晶体（三极）管、硅二极管、发射光、两种导电方式。



理解概念

34. 某元素组成晶体时的能级与该元素的单一原子中的能级相比，有什么不同？(29.1)
35. 为什么当半导体的温度升高时，它的电导率也会增大？(29.1)
36. 在P型半导体里，主要的载流子是什么？(29.1)
37. 欧姆表是一种仪器，它通过给测试元件加上一定的电压，然后测量电流的方式来显示电阻。如果你将欧姆表接在一只二极管的两端，你将要测量的电流取决于欧姆表的正极连接到二极管的哪一端。请说明理由。(29.2)
38. 在三极管电路的符号中，集电极处箭头的含义是什么？(29.2)
39. 描述正偏置二极管的结构，并说明它是怎样工作的。(29.2)

应用概念

40. 根据如图29-16所示的能带图，哪一种材料的电阻最大？

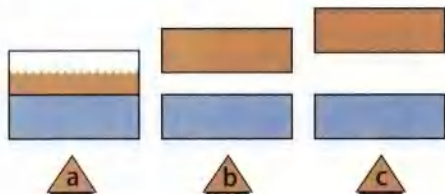


图29-16

41. 根据如图29-16所示的能带图，哪一种材料具有半填满的导带？
42. 根据如图29-16所示的能带图，哪一种材料表示半导体？
43. 当温度升高时，石墨的电阻反而减小。石墨的导电性更类似于铜还是硅？
44. 下列材料中，哪一种材料更适合制造绝缘体：具有8 eV宽的禁能隙，具有3 eV宽的禁能隙，没有禁能隙。
45. 在第44题的三种材料中，从哪一种材料中迁移电子最困难？
46. 对于图29-17 (a、b和c) 所示的电路中的灯泡，分别说出它们是否发光。

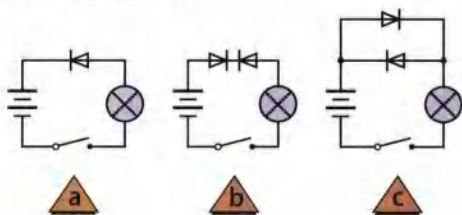


图29-17

47. 在如图29-18所示的电路中，究竟是灯 L_1 还是 L_2 在发光，还是两者都发光，或者两者都不发光？

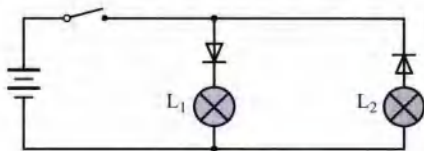


图29-18

48. 利用元素周期表，确定下列哪一种元素可以加到锗中制成P型半导体：B、C、N、P、Si、Al、Ge、Ga、As、In、Sn或Sb。
49. 一个PN结二极管是正偏置还是反偏置时，欧姆表显示的电阻较大？
50. 如果第49题中的欧姆表显示的是较小的电阻，欧姆表接到二极管的箭头一边的电压比接到另一边的电压高还是低？
51. 如果你单独用镓对纯锗进行掺杂，你制成的是电阻器、二极管还是三极管？

52. 假定一个输入的交流电压的波形如图29-19b所示。

对于图29-19a中的A点，画出时间—振幅的波形图。

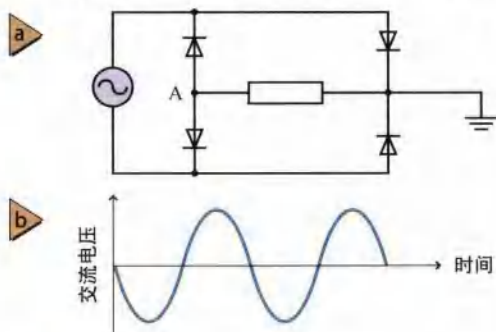


图29-19

问题解决

29.1 固体导电

53. 在 1 cm^3 的钠中，存在多少个自由电子？已知钠的密度是 0.971 g/cm^3 ，原子质量是 22.99 g/mol ，每个钠原子中有1个自由电子。

54. 当温度为 0°C 时，热能使得纯硅中释放的电子数密度为 $1.55 \times 10^9\text{ 电子/cm}^3$ 。已知硅的密度为 2.33 g/cm^3 ，原子质量是 28.09 g/mol 。在纯硅中，具有自由电子的原子所占的百分比是多少？

29.2 电子元件

55. **发光二极管** 一个正在发光的发光二极管两端的电势差约为 1.2 V 。如图29-20所示，电阻两端的电压为电源电压与发光二极管的电压之差。计算通过下列各个元件的电流分别是多少。

- 发光二极管
- 电阻

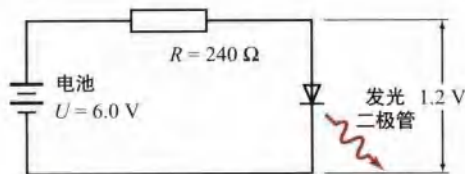


图29-20

56. 乔思想把第55题中通过发光二极管的电流提高到 $3.0 \times 10\text{ mA}$ ，以增强它的亮度。假定发光二极管两端的电压仍是 1.2 V ，那么应该用多大的电阻器？

57. **二极管** 如图29-10所示，一个具有 I - U 特征的硅二极管通过一个 $270\ \Omega$ 的电阻器接在电池上，电池对二极管正偏置，且通过二极管的电流为 15 mA 。电池电压是多少？

58. 假定如图29-21所示的电路中的开关是断开的。

- 确定基极的电流。
- 确定集电极电流。
- 确定电压表的读数。

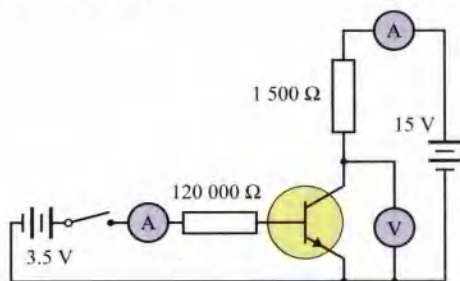


图29-21

59. 假定如图29-21所示的开关是闭合的，并且在基极—发射极结两端有 0.70 V 的电压，基极相对集电极的电流增益为220。

- 确定基极的电流。
- 确定集电极电流。
- 确定电压表的读数。

复习提高

60. 在硅中，禁能隙为 1.1 eV 。电磁波照射到硅上引起电子从价带迁移到导带。能以这种方式激发电子的辐射，其波长最长是多少？已知 $E = \frac{1\ 240\text{ eV nm}}{\lambda}$ 。

61. **硅二极管** 有一个硅二极管，当它反偏置时，在 0°C 时通过它的电流为 1.0 nA 。假定这个反偏置电压保持不变，而温度升高到 104°C 。那么此时通过它的电流是多少？已知温度每升高 8°C ，硅的热载流子量增加1倍。

62. **锗二极管** 有一个锗二极管，当它反偏置时，在 0°C 时通过它的电流为 $1.5\ \mu\text{A}$ 。假定这个反偏置电压保持不变，而温度升高到 104°C ，那么此时通过它的电流是多少？已知温度每升高 13°C ，锗的热载流子量增加1倍。

第29章 测评

63. **发光二极管** 有一个发光二极管，当一个电子从导带移动到价带时，它会发出550 nm的绿光。求二极管中禁能隙的宽度。
64. 如图29-22所示，解答下列各题。
- a. 确定电压表的读数。
 - b. 确定电流表A₁的读数。
 - c. 确定电流表A₂的读数。

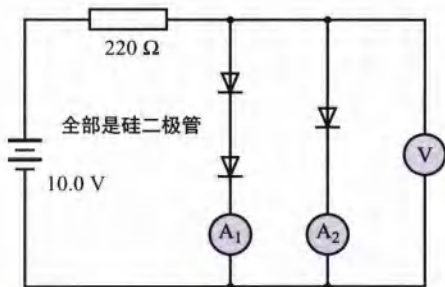


图29-22

理性思维

65. **应用概念** 如图29-23所示，当电动机加上某一给定极性的电压时，它往一个方向运转；而当加上反向的电压时，它往相反的方向运转。
- a. 哪一个电路 (a, b或c) 仅允许电动机朝一个方向运转？
 - b. 如果运用了不正确的极性，哪一个电路会引起保险丝的熔断？
 - c. 哪一个电路中，不管应用的极性怎样，它总会产生正确方向的转动？
 - d. 讨论三种电路的优势与不足。

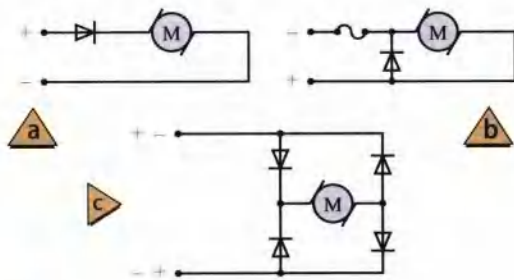


图29-23

66. **应用概念** 两只发出不同颜色光的发光二极管，它们的*I*-*U*特性如图29-24所示。将它们通过一个电阻器接到9.0 V的电池上，要求通过它们的电流均为0.040 A。它们应该分别选择什么电阻器？

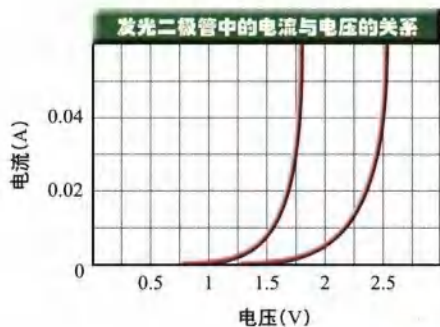


图29-24

67. **应用概念** 将第66题中的两只发光二极管串联起来。若使用同样的电池，要求通过它们的电流为0.035 A，那么应该用多大的电阻器？

科技写作

- 68. 研究泡利不相容原理和泡利的生平，要求突出他对科学的杰出贡献。讨论不相容原理在能带理论，尤其是在半导体的能带理论中的应用。
- 69. 写一篇短文，探讨费米能级对半导体能带图的应用。在你的文章中，至少包括一幅图。

日积月累

- 70. 一个α粒子 (即二价电离的氦原子) 的质量 6.7×10^{-27} kg。它通过1.0 kV的加速电压后，又受到一个磁感应强度为 6.5×10^{-2} T的匀强磁场的持续作用。粒子的曲率半径为多大？ (第26章)
- 71. 要使最大动能为 8.0×10^{-19} J的光电子停止运动，需要加多大的电势差？ (第27章)
- 72. 计算与氢原子的*E*₄能级相关的轨道半径。 (第28章)

标准化测试

选择题

1. 下列有关二极管的描述中, 错误的是 ()

- (A) 二极管能放大电压
- (B) 二极管能探测光
- (C) 二极管能发射光
- (D) 二极管能整流交流电

2. 每个钙原子中有2个自由电子。已知钙的密度为 $8\,650\text{ kg/m}^3$, 每立方厘米钙中的自由电子数为 ()

- (A) 1.24×10^{21} 个
- (B) 9.26×10^{22} 个
- (C) 9.26×10^{24} 个
- (D) 1.17×10^{27} 个

3. 在三极管电路中, 测得基极电流为 $45\text{ }\mu\text{A}$, 集电极电流为 8.5 mA 。基极相对集电极电流的增益为 ()

- (A) 110
- (B) 190
- (C) 205
- (D) 240

4. 在第3题中, 如果基极电流增加 $5\text{ }\mu\text{A}$, 那么集电极电流增加 ()

- (A) $5\text{ }\mu\text{A}$
- (B) 1 mA
- (C) 10 mA
- (D) $190\text{ }\mu\text{A}$

5. 一个三极管电路显示集电极电流为 4.75 mA , 而基极相对集电极电流的增益是250。基极电流是 ()

- (A) $1.19\text{ }\mu\text{A}$
- (B) $1.89\text{ }\mu\text{A}$
- (C) 4.75 mA
- (D) $1\,190\text{ mA}$

6. 下表中, 对N型和P型两种硅半导体最好的描述是 ()

	N型	P型
(A)	掺磷杂的	添加电子
(B)	添加电子	掺磷杂的
(C)	掺磷杂的	添加空穴
(D)	添加空穴	掺磷杂的

7. 下列对本征半导体硅温度升高时的习性的描述中, 最确切的是 ()

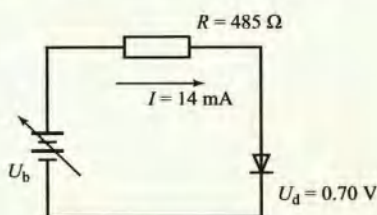
	导电性	电阻
(A)	增大	增大
(B)	增大	减小
(C)	减小	增大
(D)	减小	减小

8. 温度每升高 8°C , 硅中的热电子量增加1倍。有一个 0°C 的硅二极管, 当其反偏置时, 通过它的电流为 2.0 nA 。如果保持反偏置电压恒定, 在 112°C 时, 通过它的电流为 ()

- (A) $11\text{ }\mu\text{A}$
- (B) $33\text{ }\mu\text{A}$
- (C) $44\text{ }\mu\text{A}$
- (D) $66\text{ }\mu\text{A}$

拓展题

9. 将一个硅二极管通过一个 $485\text{ }\Omega$ 的电阻器后, 以正偏置方式连到电源上, 如下图所示。如果二极管两端的电压是 0.70 V , 当通过它的电流为 14 mA 时, 电源电压是多少?



✓ 考试小贴士

集中精力

如果在考试期间有同学靠近你, 你应该尽量避免。在考试时, 只对监考老师的问话进行应答。谈话会使你分心, 而且监考老师会认为你在作弊。不要冒这个险, 将全部精力都集中在考试上。

第30章

核物理

内容提要

- 描述原子核的组成，以及放射性衰变对原子核的影响。
- 计算核反应中释放的能量。
- 检查放射性同位素及核能是如何产生与应用的。
- 理解构造物质的“基元”。

学习本章的意义

原子物理有许多重要的应用，包括对医药、能量产生和物质结构的研究等。

医药 放射性同位素可以用来得到处于工作状态的脑或其他组织的影像，为医学的诊断和研究提供帮助。

想一想 ▶

科学家和医生是如何利用放射性同位素的辐射来了解实时的手术情况的？

物理  在线
physicspp.com



起步实验



构建原子核模型

问题

如何利用双面胶带所施的力比拟原子核内部的强相互作用?

步骤

1. 用双面胶带把3~6个磁铁圆盘的外部边缘包起来。再做3~6个木制或铝制的大小相同的圆盘。这个磁铁圆盘代表质子, 其他圆盘代表中子。
2. 把磁铁圆盘全部以北极面朝上排列。
3. **描述** 当一个“质子”移近某一个“质子”时, 对其施加的力的情况, 直到它们最终接触为止。
4. **描述** 当把“质子”或“中子”放在一起时, 另一个“中子”或“质子”施加于这个“中子”的力的情况, 直到它们最终接触为止。

分析

当两个核子的中心之间的距离比它们的直径更大时, 强相互作用下降为零。这与胶带作用力的范围相比较如何? 强相互作用对于质子和中子是相同的吗? 这个模型表现了强相互作用的作用方式吗?

理性思维 通常, 在稳定的原子核内, 中子比质子更多。为什么这个模型却显示出相同的情况?



30.1 原子核

卢瑟福 (E. Rutherford) 不仅证明了原子核的存在, 而且还通过一些早期的实验揭示了原子核的结构。不过有一点你必须注意: 无论是卢瑟福还是他之后的科学家, 都没能直接观察到原子。他们的结论都是通过他们的实验现象总结提炼出来的。在第28章里说过, 当 α 粒子撞击金箔时, 卢瑟福的同伴对 α 粒子路径的偏向进行了仔细的测量。如果原子中大部分空间是真空的, 那么这些偏差就可以得到解释。该实验表明, 原子有一个极小的致密的正电荷中心, 它的周围环绕着几乎没有质量的电子。

1896年贝克勒尔 (Becquerel) 在发现了放射性之后, 他与其他科学家开始研究天然放射性衰变中原子核裂变时产生的效应。玛丽 (Marie) 和居里 (P. Curie) 发现了新元素镭, 使全世界研究者增强了对放射性元素研究的信心。科学家发现, 通过放射现象, 一种原子可以转变为另一种原子, 由此他们得出结论: 原子必定是由更小的粒子构成的。在这以后, 卢瑟福和索迪 (F. Soddy) 利用放射性探索到了原子的中心, 即原子核。

学习目标

- 确定核素中质子和中子的数量。
- 定义原子核的结合能。
- 总结核反应中释放的能量与反应期间改变的结合能之间的关系。

关键术语

原子序数
原子质量单位
质量数
核素
核力
核子
结合能
质量亏损

原子核的一般描述

原子核仅仅是由带正电的粒子构成的吗？最初，只有原子核的质量以及它是带正电这些事实是已知的。卢瑟福研究小组的成员莫塞莱（H.Moseley）通过X射线散射实验，得出了原子核中电荷的大小。实验结果显示，带正电的质子的质量大体上只占原子核质量的一半。一种假设认为，原子核的另一半质量也是质子引起的，只是核内的电子抵消了观察到的核的电荷值。然而，这种假设存在一些根本问题。1932年，英国物理学家查德威克（J.Chadwick）发现了一种称为中子的中性粒子，其质量与质子接近。中子的发现，既解决了原子核中缺失的质量问题，又没有增加额外的电荷。

原子核的质量数和所带的电荷 在原子核里，唯一的带电粒子就是质子。**原子序数（atomic number）Z**就是原子中的质子数。原子核所带的总电荷就是质子数乘以元电荷 e ，即：

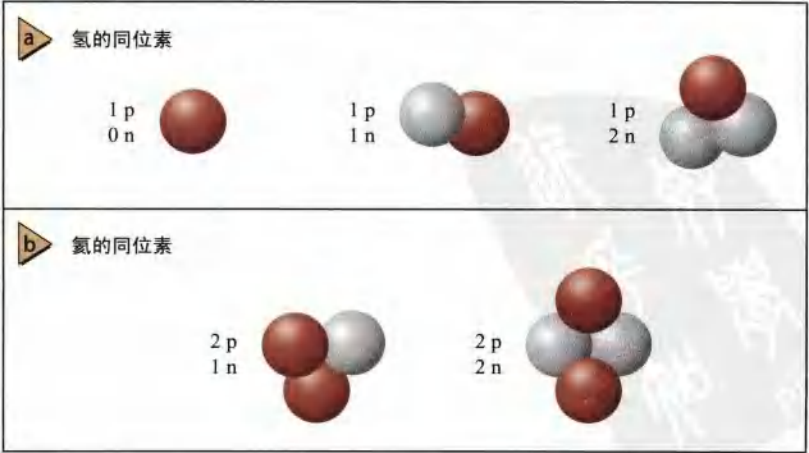
原子核的电荷 = Ze

质子和中子所具有的质量大约均是电子质量的1 800倍。质子和中子的质量都接近等于1 u，这里的u是**原子质量单位（atomic mass unit）**，即 1.66×10^{-27} kg。原子核的近似质量，等于质子数与中子数之和，即**质量数（mass number）A**，再乘以原子质量单位u：

原子核的质量 $\approx A(u)$

原子核的大小 卢瑟福的实验第一次测量了原子核的大小。他发现原子核的直径约为 10^{-14} m。一个普通原子的半径可以大于核的大小的10 000倍。虽然原子核几乎拥有原子的全部质量，但是，按比例来说，核在原子中所占的空间比太阳在太阳系中所占的空间还要小。原子核的密度是惊人的——大约为 1.4×10^{18} kg/m³。也就是说，如果有1 cm³的原子核，那么，原子的质量大约为 10^9 t。

■ 图30-1 氢(a)和氦(b)的核素图解。一种元素的原子核中的质子数肯定相同，但中子数可以不同。图中红色的球代表质子，灰色的球代表中子。



同一元素的质量数都相同吗

查看元素周期表，你可以发现，最前面的四个元素的原子质量数 A 都接近于整数。但是，第五个元素硼的质量却是 10.8 u 。如果原子核仅仅是由质子和中子构成的，它们每一个的质量都接近于 1 u ，那么，任何原子的总质量不都应该近似于整数吗？

质谱仪的发明，很好地解决了原子质量不是整数这一难题。在第26章中你已经知道，质谱仪证明了一种元素可以包含不同质量的原子。例如，在分析纯氖样品时，在质谱仪胶片上显示的斑点不是一个而是两个。这两个斑点是由不同质量的氖原子产生的，其中一种氖原子的质量为 20 u ，而另一种为 22 u 。所有不带电的氖原子中，都具有10个质子和10个电子。然而，一种氖原子的核中有10个中子，而另一种有12个中子。这两种原子叫做氖的同位素。同位素的原子核叫做**核素 (nuclide)**。

一种元素的所有核素都具有相同数目的质子和不同数目的中子。如图30-1所示为氢和氦的核素的图解。一种中性元素的全部同位素具有相同数目的绕核电子，并且它们的化学性质也相同。

平均质量 通过实验，科学家测得氖气的质量为 20.183 u 。现在你已经知道，这个数字是氖的天然同位素的平均质量。因而，单个氖原子的质量接近原子质量单位的整数倍，但氖原子样品的平均原子质量却不是一个整数。大多数元素有几种天然的同位素。科学家采用碳的一种同位素碳12 (^{12}C) 来定义原子质量单位。一个原子质量单位 (即 1 u) 定义为碳12这种同位素的质量的 $\frac{1}{12}$ 。

为了表示同位素，科学家采用了一种专门的标记原子核的方法—— ${}_Z^AX$ 。其中， X 为元素符号，下角标的字母 Z 表示原子序数或电荷数，上角标的字母 A 即为元素的质量数。例如，碳12写成 $^{12}_6\text{C}$ ，而氖的两种同位素的原子序数均为10，写成 $^{20}_{10}\text{Ne}$ 和 $^{22}_{10}\text{Ne}$ 。

► 练一练

1. 铀的三种同位素的质量数分别为234、235和238。已知铀的原子序数为92，在铀的这些同位素的每个核中分别有多少个中子？
2. 氧的一种同位素的质量数是15，这种同位素的核里有多少个中子？
3. 汞的同位素 ^{200}Hg 中有多少个中子？
4. 氢的三种同位素的核中分别有0、1、2个中子，分别写出它们的符号。

维系原子核的力

带负电的电子围绕着带正电的原子核运动，通过适当的电磁引力把它们维系在一起成为原子。由于原子核是由带正电的质子和中性的中子组成的，因此可以预期质子之间的电磁排斥力会使它们彼此分离。然而，这个现象并没有发生，所以原子核的内部必定还存在一个十分强大的吸引力。

核力

在一个原子核里，将质子和中子紧靠在一起的力叫做**核力** (**strong nuclear force**)，也叫做强相互作用。这种力比电磁力大100多倍。核力的作用范围非常小，大约仅是一个质子的半径范围，即 1.4×10^{-15} m左右。它是一种吸引力，且在质子和质子、质子和中子及中子和中子之间的大小都是相同的。

质子和中子两者统称为**核子** (**nucleons**)。核力把核子维系在原子核里面。如果要把一个核子拉出原子核，那就必须对其做功以克服这种吸引力，而做功会使系统的能量增加。因此，结合成核后所具有的能量比构成它的离散的质子和中子的总能量要少。两者的差就是核的**结合能** (**binding energy**)。由于结合成核后具有的能量较小，所以结合能始终都是负的。

核的结合能

爱因斯坦指出，质量和能量是相关的。通过下述公式，就能将结合能与质量联系起来：

$$\text{质量与能量的关系 } E = mc^2$$

包含在物质里的能量等于质量乘以真空中的光速的平方。

把一个核拆散，必须添加能量，可见结合成核的质量比组成它的核子的总质量要小些。

例如，氦核 (${}^4_2\text{He}$) 由两个质子和两个中子组成，其中一个质子的质量是1.007 276 u，一个中子的质量是1.008 865 u。如果氦核的质量等于两个质子和两个中子的质量之和，那么你可以预测，核的质量应该是4.031 882 u。然而，经过仔细地测量，科学家却发现氦核的质量只有4.002 603 u。也就是说，氦核的实际质量比构成它的核子的质量小了0.029 79 u。所有核子的质量之和与原子核的实际质量之间的差叫做**质量亏损** (**mass defect**)。

通常质谱仪测出的同位素的质量，是核素及其所有电子的质量的总和。当计算一个核的质量亏损时，严格说来，必须把电子的质量计算在内。因而，在质量亏损问题中通常给出的是氢（一个质子和一个电子）的质量，而不是单个核子的质量。

物理学的应用

● **力** 一个正电子即一个带正电的电子。一个电子和一个正电子间的电磁引力比它们间的万有引力大 4.2×10^{42} 倍。

原子质量的标准度量单位即原子质量单位。那么，你知道1 u (1.660 5 × 10⁻²⁷ kg) 的原子包含了多少能量吗？为了确定这一能量，你必须把质量乘以真空中的光速 (2.997 9 × 10⁸ m/s) 的平方。这是一个以5位有效数字表示的值：

$$\begin{aligned} E &= mc^2 \\ &= 1.660\,5 \times 10^{-27} \text{ kg} \times (2.997\,9 \times 10^8 \text{ m/s})^2 \\ &= 1.492\,4 \times 10^{-10} \text{ kg} \cdot \text{m}^2/\text{s}^2 \\ &= 1.4924 \times 10^{-10} \text{ J} \end{aligned}$$

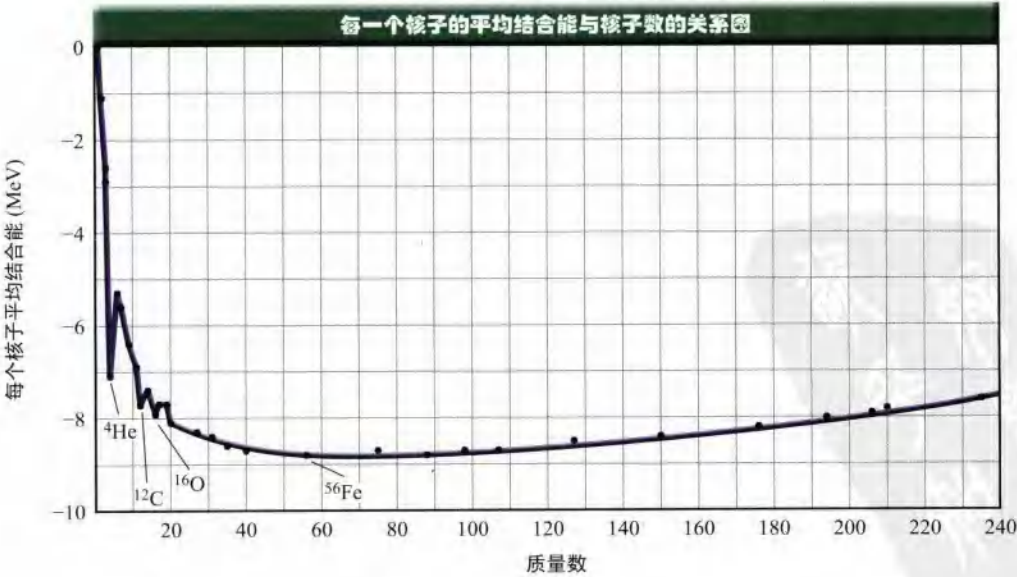
能量最方便的单位是电子伏特 (eV)，这样又有

$$\begin{aligned} E &= 1.4924 \times 10^{-10} \text{ J} \times 1 \text{ eV}/1.602\,17 \times 10^{-19} \text{ J} \\ &= 9.314\,9 \times 10^8 \text{ eV} \\ &= 931.49 \text{ MeV} \end{aligned}$$

由此可知，1 u的质量相当于931.49 MeV的能量。如图30-2所示的图象显示了每个核子的结合能与原子核的质量之间的关系。从图上可以看出，一般较重的核比较轻的核束缚得更紧。除了少数核以外，随着质量数增大到56时，每个核子的结合能变得更负。你知道，质量数A = 56的元素是Fe。因此，束缚得最紧的核为⁵⁶Fe，而质量数与铁的质量数接近的原子核为较稳定的核。质量数比铁的质量数更大的核束缚得不太紧，所以不太稳定。

若一个核反应是释放能量的，也就是说，如果一个核转变为另一个更加接近图线最低点A = 56的核，那么该核反应将自发地发生。对于质量数小于56的核，如果反应使它的原子质量增大，那么，核反应也将自发地发生。在太阳和其他恒星上，氢转化成氦、碳和其他较重的元素并在反应时释放能量，释放的能量引起的电磁辐射就是你所看到的太阳光。

图30-2 每个核子的结合能与质量数A的关系。



质量数在56以上的原子，如果核反应使原子质量减少，那么核反应将自发地发生。当铀238衰变为钍234时，所生成的钍核比铀核更加稳定。在反应中，能量以带有质量和动能的放射性粒子的方式被释放。钍不会自发地转变成铀，除非对核添加能量。元素周期表中最重的核，可以在粒子加速器里通过较小的核彼此碰撞的方式创造出来。一般地，这类重的元素在核衰变成较小的、更加稳定的核之前只能够存在几分之一秒。相反，当小核得到核子时，大核的结合能比小核的结合能之和负得更多，因而也更为稳定。

在下一节中，你将通过对结合能的计算来了解核反应。当轻核聚变（如在恒星上）或大核裂变（如放射性元素衰变）时，结合能可以用来解释被释放出的能量。

► 例题 1

质量亏损和原子核结合能 试求氦核 (${}^4_2\text{He}$) 的质量亏损和结合能。已知氦的原子质量为 $3.016\,049\,\text{u}$ ，氢的原子质量为 $1.007\,825\,\text{u}$ ，中子的质量为 $1.008\,665\,\text{u}$ 。

1 分析概括问题

已知：

一个氢原子的质量 = $1.007\,825\,\text{u}$

一个中子的质量 = $1.008\,665\,\text{u}$

氦核的质量 = $3.016\,049\,\text{u}$

$1\,\text{u}$ 的结合能 = $931.49\,\text{MeV}$

未知：

核子与电子的总质量 = ?

质量亏损 = ?

氦核的结合能 = ?

2 求解未知量

将1个氢原子（1个质子和1个电子）的质量加上2个中子的质量，得到氦的核子的总质量。

1个氢原子的质量： $1.007\,825\,\text{u}$

加2个中子的质量： $+2.017\,330\,\text{u}$

核子的总质量： $3.025\,155\,\text{u}$

质量亏损等于氦的原子质量减去它的核子的总质量。

氦的原子质量： $3.016\,049\,\text{u}$

减去核子的总质量： $-3.025\,155\,\text{u}$

质量亏损： $-0.009\,106\,\text{u}$

结合能就是与质量亏损等当的能量。

$E = \text{以u为单位的质量亏损} \times 1\,\text{u的结合能}$

$E = (-0.009\,106\,\text{u}) \times 931.49\,\text{MeV/u}$ 将质量亏损 = $0.009\,106\,\text{u}$ ， $1\,\text{u的结合能} = 931.49\,\text{MeV}$ 代入。

$= -8.482\,1\,\text{MeV}$

3 验证答案

- **单位是否正确？** 质量的单位是u，而能量的单位是MeV。
- **符号是否有意义？** 结合能应该是负的。
- **数值是否合理？** 如图30-2所示，每个核子的结合能是在 $-2 \sim -3\,\text{MeV}$ 之间。所以对于三个核子，上述答案是合理的。

练一练

利用以下数据求解下列问题：

氢原子的质量 = 1.007 825 u, 中子的质量 = 1.008 665 u, $1 \text{ u} = 931.49 \text{ MeV}$ 。

5. 碳的一种同位素 $^{12}_6\text{C}$ 的原子质量为 12.000 0 u。
 - a. 计算它的质量亏损。
 - b. 它的核的结合能是多少 (MeV)?
6. 氘包含一个质子和一个中子的同位素叫做氘, 其原子质量是 2.014 102 u。
 - a. 它的质量亏损是多少?
 - b. 氘核的结合能是多少 (MeV)?
7. 氮的同位素 $^{15}_7\text{N}$ 有 7 个质子和 8 个中子, 它的原子质量为 15.010 109 u。
 - a. 计算它的核的质量亏损。
 - b. 计算它的核的结合能。
8. 氧的同位素 $^{16}_8\text{O}$ 核的原子质量为 15.994 915 u。
 - a. 它的质量亏损是多少?
 - b. 它的核的结合能是多少?

在物理学中, 没有一个领域能够像核物理那样, 新发现的知识很快就能加以应用。放射性元素镭的医学应用在发现镭后不到 20 年就开始了; 质子加速器在它被发明还不到 1 年就被用来为医疗服务; 至于核裂变, 更是在基础物理理论尚未被完全认识之前, 就已经开始开发其在军事上的应用了, 而在随后不足 10 年的时间里, 对于它的研究方向又转向了和平领域的应用中。

本节复习题

9. **核** 考虑以下两对核: $^{12}_6\text{C}$ 和 $^{13}_6\text{C}$, $^{11}_5\text{B}$ 和 $^{12}_6\text{C}$ 。在哪一方面它们是相似的? 在哪一方面它们是不同的?
10. **结合能** 当氦核 (^4_2He) 衰变时, 它发射 β 粒子而变成 ^3_2He 。哪一种核具有的负的结合能更大?
11. **核力** 核力的作用距离是如此之短, 以致于只有当核子彼此靠近时, 核力才会起作用。利用这个事实说明在大的原子核里, 电磁斥力为什么能够克服强吸引力而使核不稳定。
12. **质量亏损** 在第 10 题中, 两个核中的哪一个的质量亏损较大?
13. **质量亏损和结合能** 碳的放射性同位素 $^{14}_6\text{C}$ 的原子质量为 14.003 074 u。
 - a. 这一同位素的质量亏损是多少?
 - b. 它的核的结合能是多少?
14. **理性思维** 在古老的恒星上, 利用更加紧密地束缚使核结合, 不仅产生氮和碳, 而且还产生氧 ($Z=8$) 和硅 ($Z=14$)。以这种方式能够产生的最重的核的原子序数是多少? 说明理由。

30.2 核衰变和核反应

主要内容

- 描述放射性衰变的三种形式。
- 求解核反应方程。
- 计算一定时间以后放射性材料的剩余量及活度。
- 定义核裂变和核聚变。
- 描述核反应堆的运作。

关键术语

放射性
 α 衰变
 β 衰变
 γ 衰变
核反应
半衰期
活度
裂变
链式反应
聚变

1896年，贝克勒尔在研究含有元素铀的化合物时意外地发现，当这些铀的化合物靠近照相底片后，经过避光处理的底片就变成灰雾状了，或者说被部分地曝光了。这些灰雾说明来自铀的某种射线已经穿透了底片的覆盖物。除了铀和它的化合物之外，科学家发现还有几种材料也能发射这些具有穿透性的射线。现在人们把能发射这种射线的材料叫做**放射性 (radioactive)** 物质。因为这种材料会放出粒子，所以说它在衰变。核衰变使核从一种不稳定的形态转变为较稳定的形态，放射现象是一种自然的过程。

放射性衰变

1899年，卢瑟福和他的同伴们发现，元素氦会自发地分裂成一个较轻的核和一个轻的氦核。同年，卢瑟福又发现铀的化合物能产生三种不同的辐射。根据这三种辐射贯穿能力的不同，他将它们分别命名为 α (alpha)、 β (beta)和 γ (gamma)辐射。 α 辐射用厚一点的纸板就可以挡住；6 mm的铝板能够挡住大部分的 β 粒子；但要挡住 γ 射线，就需要用几厘米的铅板了。

α 衰变 α 粒子即氦原子核(${}^4_2\text{He}$)。由原子核放出一个 α 粒子的过程叫做 **α 衰变 (alpha decay)**。 α 粒子的质量数为4，原子序数为2。当原子核放出了一个 α 粒子后，衰变核的质量数减少4，而原子序数 Z 减少2，该元素衰变为一个不同的新元素。例如，铀核(${}^{238}_{92}\text{U}$)经过 α 衰变而变成钍核(${}^{234}_{90}\text{Th}$)。

β 衰变 β 粒子是从原子核中放出的电子。然而，原子核内并不含有电子，那么这些电子是从哪里来的呢？原来，当核内的一个中子变成质子时，原子核就会发生 **β 衰变 (beta decay)**。在所有的核反应过程中，电荷必须是守恒的，也就是说，核反应前的电荷数一定等于反应后的电荷数。因此，在 β 衰变中，当一个不带电的中子转变为电荷数为+1的质子时，就会出现一个电荷数为-1的电子。同样的，一个原来有 N 个中子和 Z 个质子的核经过 β 衰变，最终变成了一个具有 $N-1$ 个中子和 $Z+1$ 个质子的新核。 β 衰变还会产生另一种粒子，那就是反中微子。

γ 衰变 γ 衰变 (gamma decay) 导致原子核中能量的再分配。 γ 射线是一种高能光子。在 γ 衰变中，原子核的质量数与原子序数都不会发生改变。 γ 辐射通常伴随着 α 衰变和 β 衰变。如表30-1所示扼要总结了三类辐射的特征。

放射性元素常常通过一系列连续的衰变，最终形成一个稳定的原子核。例如，铀核(${}^{238}_{92}\text{U}$)在变成稳定的铅核(${}^{206}_{82}\text{Pb}$)之前，就经历了14次衰变。

表 30-1		
三种辐射		
α 粒子	β 粒子	γ 射线
电荷数为+2	电荷数为-1	不带电
穿透力最小	中等能量	穿透力最大
核发生转变	核发生转变	只改变能量
$A \rightarrow A - 4$	$A \rightarrow A$	$A \rightarrow A$
$Z \rightarrow Z - 2$	$Z \rightarrow Z + 1$	$Z \rightarrow Z$
$N \rightarrow N - 2$	$N \rightarrow N - 1$	$N \rightarrow N$

核反应及核反应方程

当发生核反应 (nuclear reaction) 时，原子核里随时都会出现能量、中子数或质子数的变化。正如在化学反应中那样，某些核反应会放出能量，而另一些核反应只有加入了能量后才会发生。

核反应的一种形式是通过放射性核放出粒子。这类反应以射出粒子的动能的方式释放能量。如图30-3所示为两例这类反应。

核反应可以用语言、图解和方程等方式来描述。在核反应方程中采用核的标记法，可以使反应前后元素的原子序数和质量数的计算较为简单。例如，如图30-3a所示的核反应方程可以写成如下形式：

23892U -> 23490Th + 42He

由于在核反应期间核子总数保持不变，所以方程每一边元素的左上标的总和必须相等：238 = 234 + 4。由于电荷总数也是守恒的，所以方程每一边元素的左下标的总和也必须相等：92 = 90 + 2。

发生β衰变时，产生一个电子 0-1e和一个反中微子 00ν̄ (反中微子的符号是希腊字母ν带一根上划线，上划线表示反物质粒子)。如图30-3b所示为钍原子通过放出一个β粒子的衰变：

23490Th -> 23491Pa + 0-1e + 00ν̄

要注意的是，方程左边元素的左上标的总和等于右边元素的左上标的总和。方程两边元素的左下标之间也存在相等的关系。

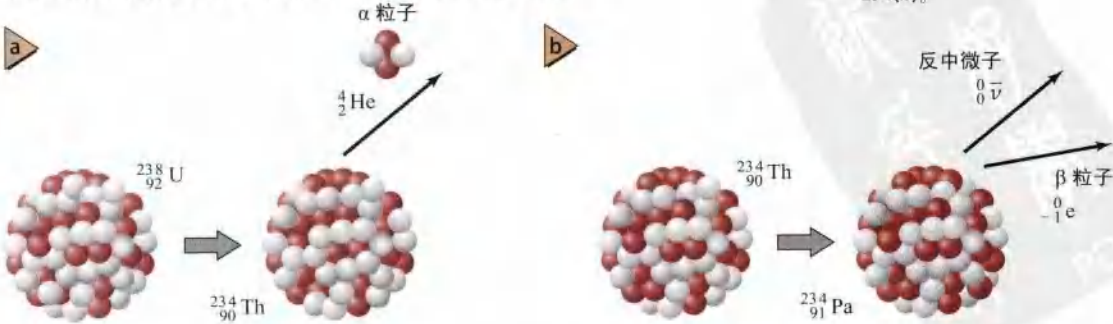


图 30-3 铀 238 发射一个α粒子，结果形成钍 234(a)；钍 234 发射一个β粒子，结果形成镤 234(b)。

► 例题 2

α 和 β 衰变 写出下列各个放射性过程的核反应方程。

- a. 镭核 ($^{226}_{88}\text{Ra}$) 放出一个 α 粒子衰变成氡核 ($^{222}_{86}\text{Rn}$)。
b. 铅核 ($^{209}_{82}\text{Pb}$) 通过放出一个 β 粒子和一个反中微子衰变成铋核 ($^{209}_{83}\text{Bi}$)。

1 分析概括问题

已知:

a. $^{226}_{88}\text{Ra} \rightarrow \alpha\text{粒子} + ^{222}_{86}\text{Rn}$
 $\alpha\text{粒子} = ^4_2\text{He}$

b. $^{209}_{82}\text{Pb} \rightarrow ^{209}_{83}\text{Bi} + \beta\text{粒子} + \text{反中微子}$
 $\beta\text{粒子} = ^0_{-1}\text{e}$
 $\text{反中微子} = ^0_0\bar{\nu}$

未知:

是否可能衰变?

是否可能衰变?

2 求解未知量

a. $^{226}_{88}\text{Ra} \rightarrow ^4_2\text{He} + ^{222}_{86}\text{Rn}$
b. $^{209}_{82}\text{Pb} \rightarrow ^{209}_{83}\text{Bi} + ^0_{-1}\text{e} + ^0_0\bar{\nu}$

将 $\alpha\text{粒子} = ^4_2\text{He}$ 代入。

将 $\beta\text{粒子} = ^0_{-1}\text{e}$, 反中微子 $= ^0_0\bar{\nu}$ 代入。

3 验证答案

* **核子数是否守恒?**

- a. $226 = 222 + 4$, 故质量数守恒。
b. $209 = 209 + 0 + 0$, 故质量数守恒。

* **电荷数是否守恒?**

- a. $88 = 86 + 2$, 故电荷数守恒。
b. $82 = 83 - 1 + 0$, 故电荷数守恒。

► 练一练

15. 写出铀核 ($^{234}_{92}\text{U}$) 通过放出一个 α 粒子衰变成钍核 ($^{230}_{90}\text{Th}$) 的核反应方程。
16. 写出钍核 ($^{230}_{90}\text{Th}$) 通过放出一个 α 粒子衰变成镭核 ($^{226}_{88}\text{Ra}$) 的核反应方程。
17. 写出镭核 ($^{226}_{88}\text{Ra}$) 通过 α 衰变变成氡核 ($^{222}_{86}\text{Rn}$) 的核反应方程。
18. 铅核 ($^{214}_{82}\text{Pb}$) 可以通过放出一个 β 粒子和一个反中微子衰变成铋核 ($^{214}_{83}\text{Bi}$)。写出这个核反应方程。
19. 碳核 ($^{14}_6\text{C}$) 经过 β 衰变成为氮核 ($^{14}_7\text{N}$)。写出这个核反应方程。

在 α 和 β 衰变中, 出现在方程左边的一个核衰变为方程右边的另一个核和一个或多个放射性粒子。而当粒子与原子核碰撞时, 将会发生另一种转变, 通常会导致其他粒子的射出, 如 $^{12}_6\text{C} + ^1_1\text{H} \rightarrow ^{13}_7\text{N}$ 。这类反应将在下一个例题以及下一节核聚变的讨论中说明。

例题 3

求解核反应方程 当氮遭到 α 粒子轰击时, 它会放出高能质子。此时还产生出什么新的同位素?

1 分析概括问题

已知:

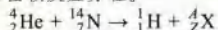
氮 = ${}^{14}_7\text{N}$, α 粒子 = ${}^4_2\text{He}$
 质子 = ${}^1_1\text{H}$

未知:

方程的右边是什么
 元素的同位素?

2 求解未知量

写出核反应方程。



解出 Z 和 A 。

$$Z = 2 + 7 - 1 = 8, A = 4 + 14 - 1 = 17$$

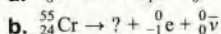
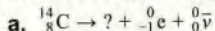
根据元素周期表, 电荷数 $Z = 8$ 的元素是氧, 该同位素是 ${}^{17}_8\text{O}$ 。

3 验证答案

• **方程是否平衡?** 核子数是守恒的: $4 + 14 = 1 + 17$; 电荷数也是守恒的: $2 + 7 = 1 + 8$ 。

练一练

20. 利用元素周期表, 完成下列核反应方程。



21. 写出镭核 (${}^{263}_{106}\text{Sg}$) 通过放出 α 粒子转变为钷核 (${}^{259}_{104}\text{Rf}$) 的核反应方程。

22. 一个质子与氮核 (${}^{15}_7\text{N}$) 碰撞形成一个新的原子核和一个 α 粒子。这个新的原子核是什么? 写出核反应方程。

23. 写出下列放射性元素的 β 衰变的核反应方程。



半衰期

一定量的任意放射性同位素, 它的一半原子衰变所需要的时间称为该元素的**半衰期 (half-life)**。在每一个半衰期之后, 未衰变的核的数目缩减为原先的一半, 如图30-4所示。每一特定的同位素都有它自己的半衰期。

例如, 镭核 (${}^{226}_{88}\text{Ra}$) 的半衰期是1 600年。也就是说, 在1 600年内, 给定量的镭的一半要衰变成另一个元素氡。在第二个1 600年里, 镭的剩余样品中的一半还将衰变掉。换句话说, 在3 200年后, 它将只剩下原有数量的 $\frac{1}{4}$ 了。作为对比, 钋210的样品衰变到原量的 $\frac{1}{4}$ 只需276天。

图30-4 放射性核衰变为较稳定的形态。

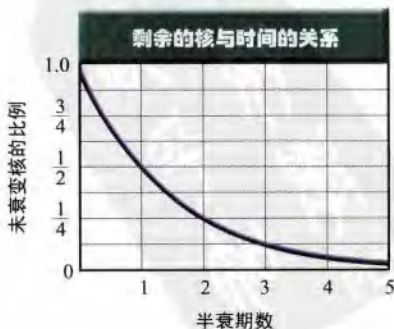


表 30-2

几种同位素的半衰期

元素	同位素	半衰期	生成的辐射
氢	${}^3_1\text{H}$	12.3年	β
碳	${}^{14}_6\text{C}$	5 730年	β
钴	${}^{60}_{27}\text{Co}$	30年	β, γ
碘	${}^{131}_{53}\text{I}$	8.07天	β, γ
铅	${}^{212}_{82}\text{Pb}$	10.6小时	β
钋	${}^{194}_{84}\text{Po}$	0.7秒	α
钋	${}^{210}_{84}\text{Po}$	138天	α, γ
铀	${}^{235}_{92}\text{U}$	7.1×10^8 年	α, γ
铀	${}^{238}_{92}\text{U}$	4.51×10^9 年	α, γ
钚	${}^{236}_{94}\text{Pu}$	2.85年	α
钚	${}^{242}_{94}\text{Pu}$	3.79×10^5 年	α, γ

如表30-2所示列举了几种放射性同位素的半衰期。如果已知一种放射性物质的最初的量和它的半衰期，那么你就能计算出在给定的半衰期数之后剩余物的总量。

$$\text{半衰期 剩余物} = \text{最初的量} \times \left(\frac{1}{2}\right)^t$$

在样品中剩余的放射性同位素的总量，等于最初的量乘以 $\frac{1}{2}$ 的 t 次幂，这里的 t 是样品经历的半衰期数。

放射性同位素的半衰期常被用来确定物质的年代。通过测量碳14的剩余物的量，可以得出有机体材料的年代。地球的年龄也可以根据铀衰变成铅的比例算出。

放射性物质的衰变速率，即每秒衰变的原子核数，叫做该放射性物质的**活度 (activity)**，也叫放射性强度。放射性活度与现存放射性原子的数目成正比。因此，特定样品的放射性活度在经过一个半衰期后就会减小一半。由于 ${}^{131}_{53}\text{I}$ 的半衰期是8.07天，若某碘131样品的放射性活度是 8×10^5 次衰变/秒，那么8.07天之后，它的活度将变为 4×10^5 次衰变/秒。再经过8.07天，它的活度将是 2×10^5 次衰变/秒。一个样品的放射性活度也与它的半衰期有关。半衰期越短，放射性活度越高。重要的是，如果你知道了物质的放射性活度和该物质的量，那么你就能确定它的半衰期。在SI单位制中，放射性活度的单位是贝克勒耳(Bq)， $1 \text{ Bq} = 1 \text{ 次核衰变/秒}$ 。

练一练

参照图30-4和表30-2，求解下列问题。

24. 现有1.0 g氚(${}^3_1\text{H}$)样品，24.6年后剩余氚的质量是多少？
25. 已知镅(${}^{238}_{93}\text{Np}$)的半衰期是2.0天。如果星期一生产出了4.0 g的镅，那么到下个星期二剩余镅的质量是多少？
26. 某校在9月1日购买了钋210的样品，它的放射性活度为 $2 \times 10^6 \text{ Bq}$ 。若样品要在下一年6月1日的实验中使用，那时钋的放射性活度是多少？
27. 有很长一段时间，夜光手表利用氚(${}^3_1\text{H}$)产生荧光，以便它们能够在黑夜中使用。如果荧光的亮度与氚的放射性活度成正比，那么当表使用6年后，与最初的亮度相比，该表的亮度将有什么变化？

人造放射性同位素

用α粒子、质子、中子、电子或γ射线轰击稳定的同位素，就可以形成放射性同位素，这样生成的不稳定的核会发射射线，直到它们转变为稳定的同位素。放射性核不仅可以射出α、β和γ射线，也能射出中微子、反中微子和正电子（正电子即带正电的电子， e^+ ）。

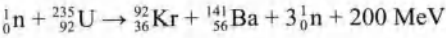
人工产生的放射性同位素通常应用于医疗和医学研究领域。在许多医学应用中，给病人注入的放射性同位素元素被身体的某些特定部位所吸收。医生利用辐射计数器来监控有问题部位的放射性强度。放射性同位素还能通过附加于某些物质分子，使其被人们感兴趣的区域吸收。正电子发射断层扫描仪，即一般所说的PET扫描仪，基于的就是这一原理。如图30-5a和b所示为两张脑部的PET扫描照片。

辐射经常被用来摧毁癌细胞。由于癌细胞比正常细胞分裂得更快，所以它们对于辐射的破坏效应更加敏感。源自同位素 $^{60}_{27}\text{Co}$ 的γ射线就常用于癌症的治疗；放射性碘则被注射到甲状腺癌的细胞中；此外，粒子加速器产生的粒子如果被集束地射入组织，它们就会在患癌的组织里发生衰变并消灭癌细胞。

核裂变

19世纪30年代，人们曾经讨论过从核反应中获得可利用形态的能量的可能性。利用中子轰击物质是最有希望成功的方案。1934年，在意大利，费米（E.Fermi）和西格雷（E.Segre）通过用中子轰击铀，得到了许多新的放射性同位素。1939年，德国化学家哈恩（O.Hahn）和斯特拉斯曼（F.Strassmann）证明，这个实验最终获得的原子的化学性质类似于钡。一周以后，迈特纳（L.Meitner）和弗里希（O.Frisch）提出，中子引起了铀核分裂成两个较小的核，并导致大量能量的释放。这种一个核分裂成两个或更多碎块的现象叫做核的裂变（fission）。裂变不仅可能作为一种能量的来源，而且还可能成为一种爆炸性的武器，这一点很快就为许多科学家意识到了。

当核裂变成两个或更多碎块时，导致了中子和能量的释放。如果用中子轰击铀的同位素 $^{235}_{92}\text{U}$ ，铀就会发生裂变。元素钡（Ba）和氪（Kr）是典型的裂变产物。可以用下述方程说明这一反应：



每一个核裂变释放的能量可以通过方程每一边原子的质量计算求出。在铀235反应中，等式右边的总质量比左边的小0.215 u，该质量等当的能量为 $3.21 \times 10^{-11}\text{ J}$ （或 $2.00 \times 10^2\text{ MeV}$ ）。这个能量以裂变产物的动能形式出现。

物理学的应用

辐射治疗 γ射线对于癌细胞和正常细胞都具有杀伤力，因此在进行辐射治疗时，辐射光束必须对准癌细胞。

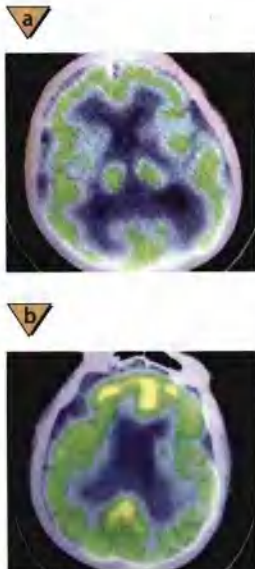
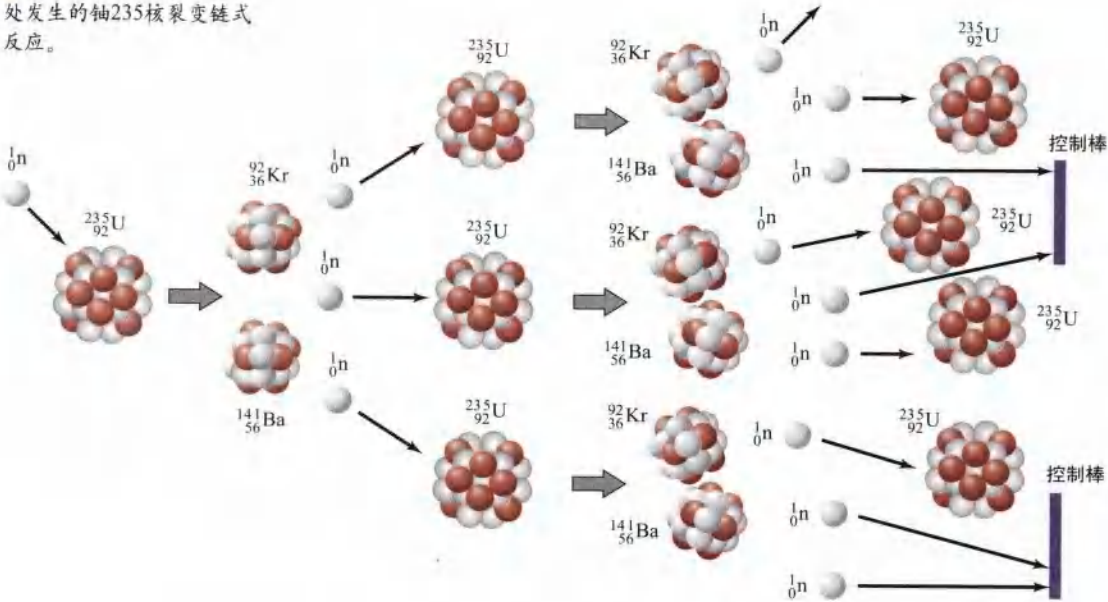


图30-5 为了进行PET扫描，医生把含有放射性同位素（如氟 $^{18}_{9}\text{F}$ ）依附的分子的溶液，注射到目标组织中。当 $^{18}_{9}\text{F}$ 衰变时，它产生的正电子与邻近的电子发生湮灭，形成γ射线。PET扫描器在检测到γ射线后，通过计算机作出一幅三维的同位素分布图。这是一组正常人脑(a)和痴呆疾病患者脑(b)的对照图。

图30-6 在核反应堆核心处发生的铀235核裂变链式反应。



一次裂变过程一旦开始，它所产生的中子会引发其他的 $^{235}_{92}\text{U}$ 发生裂变。想象一下，一个或更多中子引起裂变，而一次裂变将释放三个或更多中子，它们中的每一个又会引起更多的核裂变。由最初的裂变反应释放的中子引起新的裂变反应，这种重复而持续的过程叫做**链式反应 (chain reaction)**，如图30-6所示。

图30-7 当进入水中的高速粒子的速度超过水中的光速时，会发生切伦科夫效应。辉光是由切伦科夫效应引起的。当燃料棒放到水中时，电子就会发射光子，而光子引起了水的辉光。这个辉光不是放射性的结果。

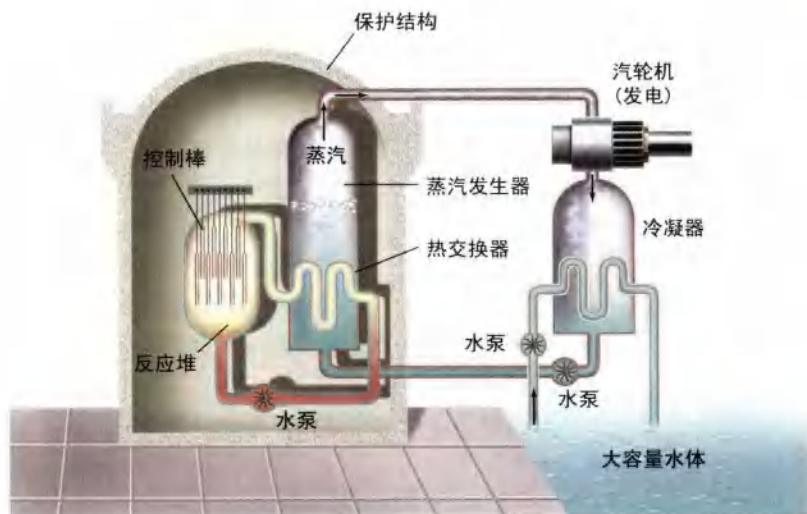


核反应堆

要控制链式反应的速度并使产生的能量得以利用，那么中子和与它作用的可裂变铀应保持正确的比例。 $^{235}_{92}\text{U}$ 裂变释放的大多数中子是高速运动的，它们叫做快中子。而天然存在的铀是由不足1%的 $^{235}_{92}\text{U}$ 和99%以上的 $^{238}_{92}\text{U}$ 组成的。当 $^{238}_{92}\text{U}$ 吸收一个快中子后，它并不会发生裂变，而是变为一个新的同位素 $^{239}_{92}\text{U}$ 。由于 $^{238}_{92}\text{U}$ 对中子的吸收，使得大多数中子不能到达可裂变的 $^{235}_{92}\text{U}$ 。因此，由 $^{235}_{92}\text{U}$ 裂变释放的大多数中子不可能引起另一个 $^{235}_{92}\text{U}$ 的裂变。

为了控制核反应，铀被分割成小块并放入减速剂（能使快中子慢下来的物质）中。当中子与减速剂里轻的原子碰撞时，它把动量和能量转移给原子而失去了能量。于是，减速剂使许多快中子的速度减小，致使它们被 $^{235}_{92}\text{U}$ 吸收比被 $^{238}_{92}\text{U}$ 吸收要容易得多。大量的慢中子极大地增加了由 $^{235}_{92}\text{U}$ 裂变释放的中子去引起另一个 $^{235}_{92}\text{U}$ 裂变的可能性。如果样品中有足够的 $^{235}_{92}\text{U}$ ，那么链式反应就能发生。如果要增加可裂变铀的数量，可以利用增加更多的 $^{235}_{92}\text{U}$ 的方法使铀浓缩。因此，在核反应中，两种铀都得到了利用。

图30-8 在核电厂中，核反应中产生的热能被转化成电能。



在美国采用的核反应堆，即压水式反应堆中，大约有200 t的铀密封在几百根金属棒中，而棒浸没在水里，如图30-7所示。水不仅是减速剂，而且还从铀裂变中转移热能。镉金属棒放在铀棒中间，镉吸收中子并起减速剂的作用。通过将镉棒在反应堆中移进移出，可控制链式反应的速度，因而镉棒又叫做控制棒。当把控制棒完全插入反应堆时，它们会吸收足够的由裂变反应放出的中子，以阻止任何进一步的链式反应的发生。而当控制棒从反应堆中移出时，能量释放的速度增大了，因此会有更多的自由中子维持链式反应。

由裂变释放的能量加热了铀棒周围的水。这些水本身并不沸腾，因为它处于高压之下，而压力提高了它的沸点。如图30-8所示，水被泵到热交换器里，在这里它引起了其他水的沸腾，产生的蒸汽推动了汽轮机。汽轮机与发电机相连，输出电能。

$^{235}_{92}\text{U}$ 裂变产生Kr、Ba和其他在燃料棒里的原子，这些原子中的多数是具有放射性的。大约每年一次，一些铀燃料棒必须被更换。这些老的棒不能在反应堆中再使用，但是它们仍然有极强的放射性，因而必须被储藏到能够保证安全的地方。永久储藏这些放射性废物的方法现在还在不断地研发改进中。

核聚变

在核聚变(fusion)时，多个小质量的核会结合为大质量的核，如下一页的图30-9所示。这个过程会释放能量。你通过本章前面的学习已经知道，较大的核束缚得较紧密，所以它的质量比所有组成它的较小的核的质量之和要小。这个损失的质量就等于释放的能量。

迷你实验

模拟放射性

衰变

准备50个硬士硬币代表50个放射性同位素原子。用正面向上的硬币表示还没有衰变掉的核。

1. 记录50个正面硬币，作为起点。
2. 在一个大的杯子里摇晃全部硬币，然后将它们倒出，把所有反面向上的硬币放至一边。清点并记录正面向上的硬币的数目。
3. 用上一次倒出的正面向上的硬币重复步骤2，每倒一次模拟一个半衰期。

分析与结论

4. 作图显示硬币数与半衰期之间的关系。
5. 收集其他同学的实验结果，并利用所有数据再作出一幅图。
6. 比较这两幅图，哪一幅与图30-4所示的图线更为接近？

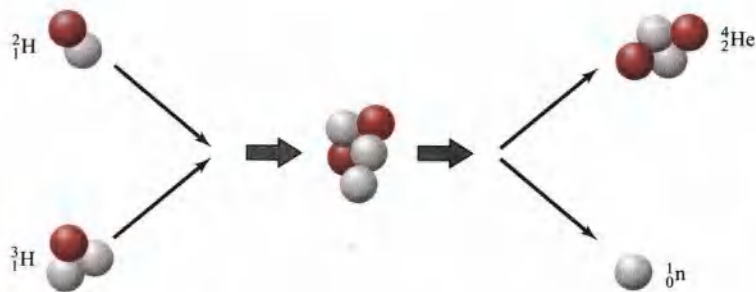
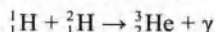
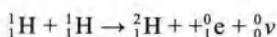


图30-9 氘和氚聚变生成氦。图中红色的球代表质子，而灰色的球代表中子。

太阳内部发生的反应就是聚变反应的一个典型例子。四个氢核（质子）分几步聚变成一个氦核。四个质子的质量比生成的氦核的质量要大一些。这一质量差产生的能量以生成粒子的动能的形式呈现。聚变生成一个氦核所释放的能量

为25 MeV。作为对比，一个炸药分子发生化学反应所释放的能量大约是20 eV，即比聚变能约小100万倍。

发生在太阳中的核聚变经历了好几个过程。其中最重要的是质子—质子的链式反应过程：



最开始的两个反应必须发生两次，以生成两个 ${}_2^3\text{He}$ 粒子，满足最后一个反应的需要。净结果（即扣除掉两个在最后一步中生成的质子）是四个质子生成一个 ${}_2^4\text{He}$ 、两个正电子 ${}_1^0\text{e}$ 和两个中微子 ${}_0^0\nu$ 。

带电核之间的排斥力需要聚变核具有较高的能量。因此，聚变反应仅当核具有大量热能时才能发生。质子—质子链需要的温度约为 $2 \times 10^7 \text{ K}$ ，相当于在太阳中心出现的高温。聚变反应也发生在氢（或热核）弹中。在这个装置中，产生聚变所需要的高温由铀裂变，即原子弹爆发产生。

本节复习题

28. **β衰变** 如果核内没有电子，在β衰变中核内如何能排出电子？
29. **核反应** 钋的同位素 ${}_{84}^{210}\text{Po}$ 经历了一次α衰变。写出这一核反应方程。
30. **半衰期** 根据图30-4和表30-2，估计在多少天之内， ${}_{53}^{131}\text{I}$ 的样品中仍保留有它初始活度的 $\frac{3}{8}$ 。
31. **核反应堆** 铅通常用作放射性的防护物。为什么在核反应堆中它不是减速剂的上好选择？
32. **聚变** 一个聚变反应包含两个氘核（ ${}_1^2\text{H}$ ），一个氘分子包含两个氘原子。为什么氘分子不会发生聚变？
33. **能量** 计算在太阳上的第一个聚变反应 ${}_1^1\text{H} + {}_1^1\text{H} \rightarrow {}_1^2\text{H} + {}_1^0\text{e} + {}_0^0\nu$ 中释放出的能量。
34. **理性思维** 应用在烟雾检测器中的α粒子发射体，安装在电容器的一个面板上，α粒子撞击电容器的另一面板。结果，在此两板间有了一个电势差。说明并预测哪一块板的电势较高。

30.3 基本粒子

最早利用高速粒子来研究原子核的物理学家，他们所采用的高速粒子即来自放射源的 α 粒子。之后，另一些物理学家开始利用宇宙射线代替 α 粒子进行实验，虽然在当时，人们还并不了解这些来自恒星及星际空间的宇宙射线的形成过程。到了20世纪30年代早期，能够加速质子或 α 粒子的、能量高到足以穿透原子核的第一批实验设备逐渐开始研制。其中，直线加速器和同步加速器这两种设备一直被延用至今。

直线加速器

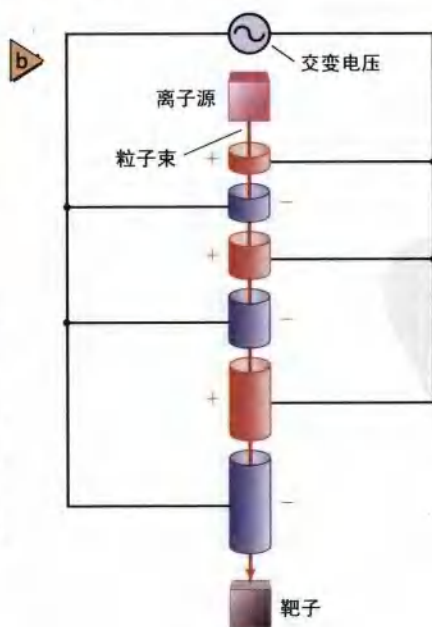
直线加速器是一种用来加速质子或电子的设备。它由一系列内部有着很长真空室的中空管组成。这些中空管与高频交变电压相连，如图30-10所示。质子是由类似于第26章中描述的离子源产生的。当向第一根管子的两端施加一个负电压时，质子被加速并进入管中。因为管内不存在电场，所以质子做匀速运动。管子的长度和交变电压的频率是调准匹配的，当质子到达每一根管子的远端时，第二根管子的电压相对于前一根管子是负的，两管间隙中形成的电场使质子加速进入第二根管子。质子在每一对管子间经历一次加速，这一过程不断持续，且每一次加速都会使质子的能量增加 10^5 eV。质子随电场波峰的移动而前进，就像在海洋中的冲浪板一样。在加速器的终端，质子可能会具有几百万甚至几千万电子伏特的能量。用类似的方法也可加速电子。要注意的是，直线加速器只能用来加速带电粒子。

► 学习目标

- 描述粒子加速器和粒子检测器的工作原理。
- 描述物质的标准模型，并说明媒介子的作用。

► 关键术语

夸克
轻子
标准模型
媒介子
粒子偶的产生
弱相互作用

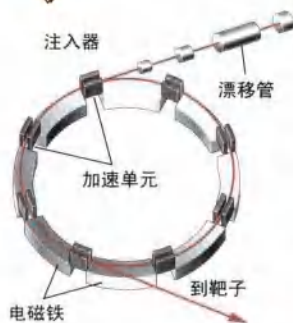


■ 图30-10 斯坦福大学的直线加速器，它的长度为3.3 km，能使电子的能量加速到20 GeV(a)。通过改变中空管上的电荷极性的方法，质子在直线加速器中被不断加速(b)。(不按比例)

a



b



■ 图30-11 费米实验室的同步加速器的直径有2 km(a)。这个同步加速器是圆形的。其中的电磁铁用以控制粒子的路径和加速度(b)。

同步加速器

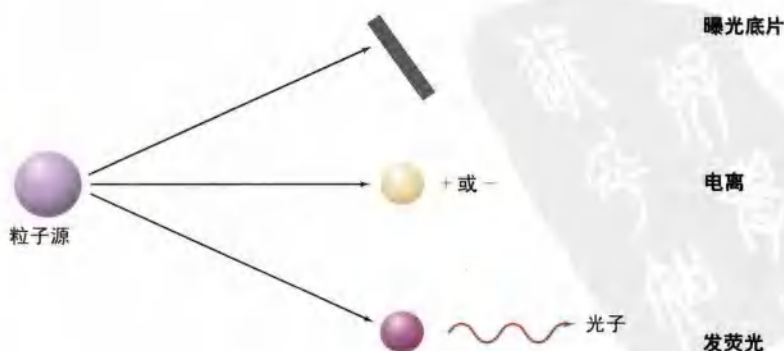
利用磁场把粒子的路径弯成圆形，可以使加速器变得较小。在同步加速器中，弯曲的磁体被加速区域分割开，如图30-11b所示。在直线区域中，高频交变电压对粒子进行加速。而弯曲区域的磁场强度和路径长度都是设定好的，以使粒子在到达交变电场的位置时电场正好能对它们进行加速。如图30-11a所示为目前使用的最大的同步加速器，它位于美国芝加哥附近的费米国家加速器实验室中。这一加速器加速的质子能量可达到1 TeV（即 10^{12} eV）。质子束和反质子束是以相反的方向沿圆环运动的（反质子是质子的反粒子，它具有与质子相同的质量及相反的电荷）。这些粒子束会在某些相互作用区域发生碰撞，其结果可供科学家进行研究。

粒子探测器

一旦有粒子产生，就需要去探测它们的碰撞结果。换句话说，需要用某种方式使它们与物质发生相互作用，使人类相对有限的感官能够感觉到它们。你的手能够阻挡一个 α 粒子，而你完全无法感觉到粒子对你的撞击。正当你在阅读这一句子时，几十亿个太阳中微子穿过了你的身体，而你对此毫无感觉一样。为了克服这一局限，在20个世纪，科学家研制出了许多探测和区分核反应产生的各类粒子的工具。

在上一节里，你已经知道铀样品是如何使照相底片曝光的。当 α 粒子、 β 粒子和 γ 射线照射照相底片时，底片变得模糊了，或者说被曝光了。因此，照相底片可以用来检测放射性。其他还有许多装置也可以用于检测带电粒子和 γ 射线。大多数这类装置的工作原理都是基于原子与高速粒子的碰撞会失去电子这一事实的。也就是说，高速粒子会使它们撞击的物质电离。此外，当某些物质暴露于一定类型的放射性下时，它们会发出荧光或射出光子，因而荧光物质也能用于辐射的检测。这三种检测放射性的方法在图30-12中作了说明。

■ 图30-12 当粒子与物质相互作用时，就会使底片感光、使材料带电或使物质射出光子，这时粒子就能被检测出来。



盖革计数器 盖革—米勒计数管包含一个接电源负极的圆柱形铜管，在铜管的中间有一条接正极的硬质金属丝。金属丝与铜管间的电压保持为低于发生自发放电或打火电压的值。当带电粒子或 γ 射线进入铜管时，它使铜管和金属丝间的气体原子电离，产生的正离子受到电压加速趋向铜管，而电子加速趋向带正的金属丝。在这些带电粒子在向电极运动时，它们引发带电粒子雪崩般地产生，这样铜管中便有脉冲电流流过。

凝结径迹 威尔逊云室曾经用来探测粒子。这个云室包括一个充满过饱和水蒸气或乙醇蒸气的区域。当带电粒子穿过云室时，蒸气在离子上凝结成小的液滴，于是它们的路径上就会留下离子的径迹。在这种方式中，可见的径迹是由液滴或雾气所形成的。还有一种与此类似的一直沿用至今的探测器，叫做气泡室。在气泡室中，带电粒子通过的液体的温度刚刚控制在沸点以上。在这种情形下，粒子运动导致的小气泡显示了带电粒子的径迹，如图30-13所示。

利用现代技术，科学家还发明了叫做线室的探测室，它类似于巨大的盖革—米勒管。庞大的极板被充满低压气体的小的气隙分割开来。在粒子穿过气室时会放电。计算机探明放电的地点，并记录它的位置，这样就可供以后分析所用。

中性粒子的运动不会留下径迹，因为它们不会产生放电现象。利用碰撞中的动量和能量守恒定律，人们就可以知道是否有中性粒子产生。其他探测器则用来测量各粒子的能量。大部分用在高能加速器实验中的探测器，例如费米实验室中的对撞机探测器（CDF），可以有三层楼高，如图30-14a所示。CDF被用来监测每秒25万次的粒子的碰撞，它的功能相当于一台5 000吨级的照相机，可产生如图30-14b所示的碰撞事件的计算机影像。



图30-13 气泡室的彩色照片显示出了带电粒子的径迹。

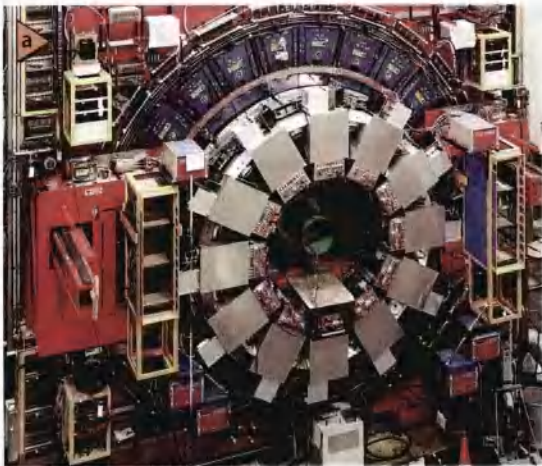
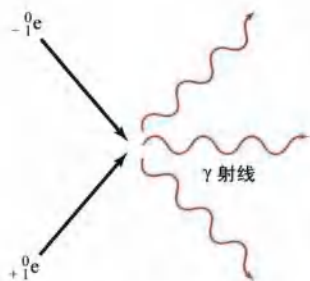


图30-14 费米实验室的对撞机探测器（CDF）可以从几十亿次碰撞中记录踪迹(a)。(b)中所示为一幅显示顶夸克事件的CDF计算机影像。



■ 图30-15 正电子和电子碰撞生成γ射线。

反物质

20世纪20年代后期，狄拉克 (P.Dirac) 预言，每一种粒子必定都对应存在一种反粒子。1932年，科学家发现了正电子（也称阳电子），它就是一种反粒子。电子和正电子具有相同的质量和电荷量，然而，它们的电荷符号却相反。当一个正电子和一个电子碰撞时，它们可以彼此湮灭，产生以γ射线形式释放的能量，如图30-15所示。

粒子

原子模型在1930年还相当简单：一些质子和中子，以及围绕着的电子。然而，随着对放射性衰变研究的逐渐深入，这幅简单的图景被严重扰乱。虽然，利用放射性核发射的α粒子和γ射线所依赖的衰变原子核具有单一能量，但它射出的β粒子却与一个范围很宽的能量相联系。一种可能的预期是β粒子的能量等于衰变前核的能量和衰变生成核的能量之差。事实上，由β衰变射出的电子具有范围很宽的能量现象启发了玻尔：在核反应中，可能还涉及另外的粒子带走了能量。泡利在1931年、费米在1934年分别提出，在β衰变中，伴随β粒子还射出一种看不见的中性粒子。费米将这种粒子命名为中微子（在意大利语中中微子就是一种“小的中性粒子”）。事实上，这种粒子是一种反中微子，它直到1956年才被科学家直接观察到。

通过研究，科学家渐渐发现了更多的粒子。一种称为μ子的重轻子，在1937年被发现。1935年，日本物理学家汤川秀树提出的一个惊人的假设，更是推动了随后几年的许多研究。汤川秀树假设存在着一种新的粒子，它能够携带核力穿过空间，就像光子携带电磁力一样。1947年，π介子被发现了。虽然它并不是核力的携带者，但也是一类新的物质粒子。

在粒子加速器发明之后，科学家发现了越来越多的粒子，其中一些粒子的质量中等，另一些比质子重得多。它们有的带正电，有的带负电，也有的不带电。一些粒子的寿命只有 10^{-23} s，而另一些的寿命很长，根本看不到它们的衰变。费米曾一度被问及该怎样识别粒子的径迹并将其分类，他的回答是：“如果我能够记住所有这些粒子的名称，那么我就是植物学家了。”

■ 图30-16 尽管夸克带有分数电荷，但是它们组成的全部粒子都带有整数电荷。



标准模型

20世纪60年代后期，人们弄清楚了基本粒子既不是质子，也不是中子，更不是π介子。它们是由一个叫做夸克 (quark) 的粒子家族组成的，如图30-16所示。电子和中微子则属于另一个叫做轻子 (lepton) 的家族。如今，物理学家认为，自然界存在三个基本粒子家族：夸克、轻子和媒介子 (force carrier) (也叫规范玻色子)。这一物质基元的模型叫做标准模型 (Standard Model)。其中，质子和中子等由三个夸克组成的粒子，叫做重子；由一对夸克和反夸克组成的粒子，如π介子，叫做介

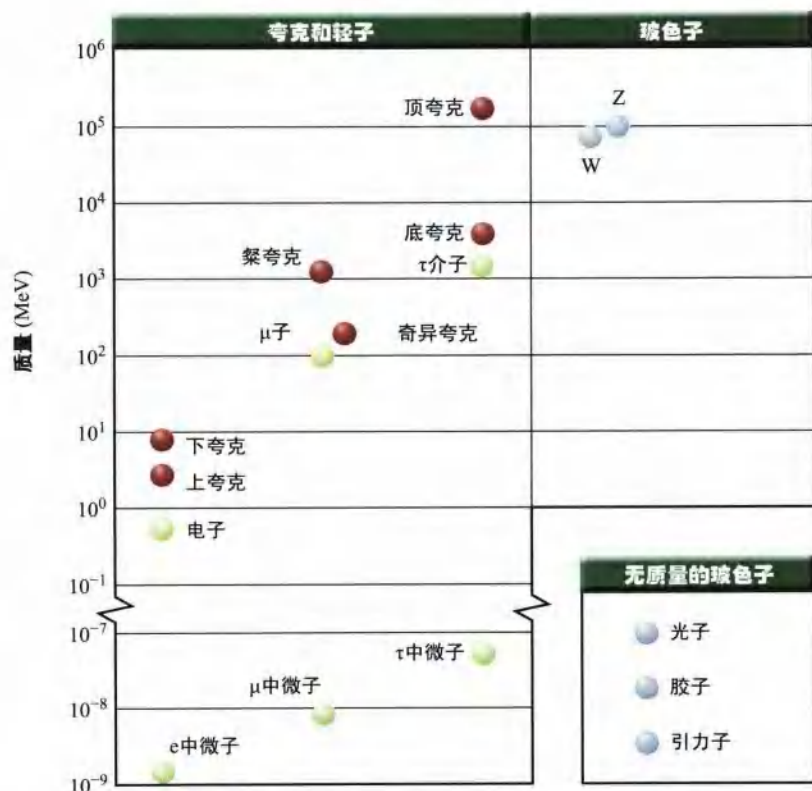


图30-17 已知的夸克和轻子分别属于三个家族。日常的物质世界是由左边一族的粒子 (u、d、e) 组成的。中间一组的粒子 (c、s、μ) 是在宇宙射线中发现, 且通常是由粒子加速器产生的。右边一族的粒子 (b、t、τ) 估计在宇宙大爆炸的最早的瞬间就已经存在了, 它们是在高能碰撞中产生的。规范玻色子传递弱相互作用、电磁力、强相互作用和重力。爱因斯坦质能方程 $E = mc^2$ 给出了质量与能量之间的关系。

子。还有一种新型的粒子, 它由四个夸克和一个反夸克组成, 叫做“五夸克态”, 现在科学家已可观察到这种粒子了。自然界中一共存在六种夸克和六种轻子。夸克和轻子构成了各种物质, 而媒介子 (也称传播子) 则是传递力的粒子。例如, 光子传递电磁力, 八种胶子传递的则是将夸克结合成重子和介子的核力。在β衰变中, 涉及了三种弱媒介子。引力子是一种尚未发现的引力媒介子。如图30-17所示概括了作为标准模型基础的几种基本粒子的特性。

质子和中子

夸克模型把核子 (质子和中子) 看做夸克的一个集合体。每一个核子由三个夸克组成。质子具有两个上夸克u (电荷为 $+\frac{2}{3}e$) 和一个下夸克d (电荷为 $-\frac{1}{3}e$)。因此, 一个质子可以描述为 $p = uud$ 。质子所带的电荷即三个夸克所带电荷之和, 即 $[\frac{2}{3} + \frac{2}{3} + (-\frac{1}{3})]e = +e$ 。中子则是由一个上夸克和两个下夸克组成的, $n = udd$ 。中子不带电, 即 $[\frac{2}{3} + (-\frac{1}{3}) + (-\frac{1}{3})]e = 0$ 。

单个的自由夸克不能被人们所观察到, 因为当夸克被排斥到刚要分离时, 将夸克固定在一起的强相互作用变得很大。在这种情况下, 强相互作用的作用就像弹簧的力; 它不像电荷间的电磁力那样, 随带电粒子的远离而变得很小。在夸克模型中, 强相互作用是通过胶子传递的。

质量与能量之间的转换

在粒子湮灭中创生的能量可以用爱因斯坦质能方程式 $E = mc^2$ 计算得出。已知电子的质量是 $9.11 \times 10^{-31} \text{ kg}$ ，而正电子的质量与电子相同。因此，正电子与电子的共同能量可以计算如下：

$$\begin{aligned} E &= 2 \times 9.11 \times 10^{-31} \text{ kg} \times (3.00 \times 10^8 \text{ m/s})^2 \\ &= 1.64 \times 10^{-13} \text{ J} \times \frac{1 \text{ eV}}{1.60 \times 10^{-19} \text{ J}} \\ &= 1.02 \times 10^6 \text{ eV} \\ &= 1.02 \text{ MeV} \end{aligned}$$

当一个正电子与一个静止的电子彼此湮灭时，所发射的 γ 射线的能量总量为1.02 MeV。

与湮灭相反的过程也能发生。也就是说，能量能直接转化成物质。当具有不少于1.02 MeV能量的 γ 射线经过一个核的附近时，就能够产生一个正负电子对。

$$\gamma \rightarrow e^- + e^+$$

能量转化成一对正反物质的粒子，叫做**粒子偶的产生** (pair production)。然而，单个的反应，如 $\gamma \rightarrow e^-$ 或 $\gamma \rightarrow e^+$ 是不可能发生的，因为这违反了电荷守恒定律。而像 $\gamma \rightarrow e^- + \text{质子}$ 这样的反应也不会发生，因为粒子和它相应的反粒子必须成对产生。



图30-18 当一个粒子生成时，它的相应的反粒子也同时产生。图中， γ 射线衰变成了电子—正电子对。

物质与反物质粒子对的生成 如图30-18所示为成对产生的正电子—电子对。气泡室周围的磁场引起带相反电荷的粒子的径迹向相反的方向弯曲。 γ 射线不生成径迹。若 γ 射线的能量大于1.02 MeV，这个超出的能量将成为电子和正电子的动能。正电子将立即与另一个电子发生碰撞，并且两者湮灭，结果生成总能量不低于1.02 MeV的两个或三个 γ 光子。

粒子的守恒 每一个夸克和每一个轻子都有它的反粒子。对于带电粒子而言，除了电荷符号相反外，反粒子与粒子在其他方面是完全相同的。例如，一个上夸克 u 带有 $+\frac{2e}{3}$ 的电荷，而一个反上夸克 $\bar{u}$ 带有 $-\frac{2e}{3}$ 的电荷。一个质子 uud 有 $+e$ 的电荷，而一个反质子 $\bar{u}\bar{u}\bar{d}$ 有 $(-\frac{2}{3} - \frac{2}{3} + \frac{1}{3})e = -1e$ 的电荷。当粒子和反粒子碰撞时，它们彼此湮灭并转化成光子或者更轻的粒子—反粒子对，同时释放能量。在宇宙中，夸克的总数和轻子的总数是守恒的。也就是说，夸克与轻子的产生或消灭都只能使粒子—反粒子对成对产生。另一方面，如果有足够的能量，那么引力子、光子、胶子和弱玻色子等媒介子都能被产生或消灭。

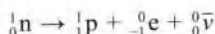
反质子也能被生成。一个反质子有着和质子一样的质量，但它是带负电的。质子的质量是电子质量的1836倍。因此，产生质子—反质子对所需要的能量是非常大的。第一个质子—反质子对是在1955年在加利福尼亚的伯克利产生并被观察到的。中子也有反粒子，叫做反中子。

► 练一练

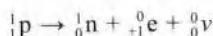
35. 质子的质量为 $1.67 \times 10^{-27} \text{ kg}$ 。
- 与质子质量相当的能量是多少焦?
 - 这一数值相当于多少电子伏特?
 - 求出能够生成质子—反质子对的 γ 射线所具有的最小总能量。
36. 一个正电子和一个电子能够湮灭并形成三个 γ 光子。检测两个 γ 光子, 发现其中一个的能量为 225 keV , 另一个的能量为 357 keV 。第三个 γ 光子的能量是多少?
37. 中子的质量为 $1.008\,665 \text{ u}$ 。
- 与中子的质量相当的能量 (MeV) 为多少?
 - 能够生成中子—反中子对的 γ 射线所具有的最小总能量是多少?
38. μ 子的质量是 $0.113\,5 \text{ u}$, 它会衰变成一个电子和两个中微子。在这个衰变过程中, 共释放出多少能量?

β 衰变和弱相互作用

一个放射性核的 β 衰变中射出的高能电子, 在原子核中并不存在。那么, 它们是从那里来的呢? 在衰变过程中, 一个中子转变成了一个质子。虽然在稳定的原子核中, 中子是不会衰变的, 然而, 自由中子或在不稳定核中的中子, 却可以通过发射一个 β 粒子而衰变成质子。与质子和 β 粒子一起分享所释放的能量的是一个反中微子 ${}^0_0\bar{\nu}$ 。这个反中微子的质量非常小并且不带电, 但是它像光子一样, 将带走动量和能量。中子衰变的方程如下:



当一个同位素通过发射一个正电子(反电子)发生衰变时, 就经历了一个类似于 β 衰变的过程。虽然还没有人观察到自由质子的衰变, 但是, 核内的质子可以转变成中子并射出一个正电子 ${}_{+1}^0\text{e}$ 和一个中微子 ${}^0_0\nu$ 。



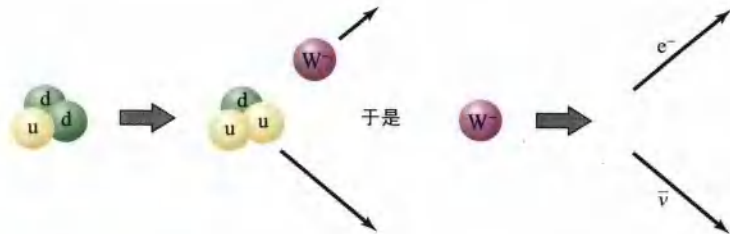
中子衰变成质子和质子衰变成中子都不能用强相互作用来解释。 β 衰变的存在说明肯定有另外的一种相互作用, 即在核中起作用的弱相互作用(weak nuclear force), 这个力比强相互作用要弱许多。

● 挑战性问题

${}_{92}^{238}\text{U}$ 通过放射出 α 粒子和连续两次放射出 β 粒子而变回到铀。

- 写出这三个核反应方程。
- 预测最后形成的铀原子的质量数是多少。

图30-19 中子 β 衰变成质子的过程可以用夸克模型表示为： $d \rightarrow u + W^-$ ，于是 $W^- \rightarrow e^- + \bar{\nu}_e$ 。



β 衰变的夸克模型 质子uud和中子udd之间的区别仅仅是一个夸克的不同。在夸克模型中， β 衰变分两步进行，如图30-19所示。以中子为例，第一步，中子中的一个下夸克d变成上夸克u，同时射出一个 W^- 玻色子。 W^- 玻色子是弱相互作用的三个媒介子之一。第二步， W^- 玻色子衰变成一个电子和一个反中微子。类似地，原子核内质子的衰变将放射出一个中子和一个 W^+ 玻色子，而 W^+ 玻色子又衰变成一个正电子和一个中微子。

第三个弱相互作用媒介子—— Z^0 玻色子，却不是在一个夸克变成另一个夸克时伴随电子一起射出的。 Z^0 玻色子在原子核内的核子和电子间产生一种相互作用，这种相互作用类似于把原子维系在一起的电磁力，但要比它弱得多。1979年，科学家首次检测出这种相互作用，并于1983年第一次直接观察到了 W^+ 、 W^- 和 Z^0 玻色子。

人们在很长一段时间内都认为，中微子和反中微子是没有质量的。但是，近期的一些对来自太阳和长程加速器的中微子的检测显示，中微子具有质量，但是这些质量比任何已知的其他粒子的质量都要小得多。

标准模型的检验

从图30-17中你可以看出，夸克和轻子可分成三族。我们周围世界的物质是由左边一族的粒子——质子、中子和电子——组成的。中间一族的粒子是在宇宙射线中发现、且通常是在粒子加速器中产生的。对于右边一族中的粒子，科学家估计它们在宇宙大爆炸的最早的瞬间就已经存在了，并且它们是在高能碰撞中产生的。

夸克和轻子的质量又是由什么决定的呢？科学家曾假定决定夸克和轻子质量的粒子是还没有发现的希格斯玻色子。标准模型还不是一个完备的理论，它既没有解释粒子的质量，也没有说明为什么夸克和轻子有三族。

为什么存在四种相互作用 四种基本相互作用是明显不同的：它们可以作用于不同的物理量（例如电荷或质量）；它们所决定的作用距离是不同的；传递这些力的媒介子也是不同的。然而，这些相互作用之间也存在某些相似点。例如，由光子传递的带电粒子间的力（即电磁相互作用力），与由弱玻色子传递的弱相互作用的传递方式是完全相同的。由于光子的质量等于零，因此电荷作用的范围较广，而弱相互作用的范围则很小，因为W和Z玻色子的质量相对较大。然而，弱相互作用和电磁相互作用力理论的数学结构是相似的。



■ 图30-20 在超新星上，电磁力和弱相互作用是不可区分的。由此显示出从超新星1987A发射的光和中微子是在同一时间到达地球的。这证明正如预言的那样，中微子在超新星内产生并以接近光的速度传播。(a)显示的是它爆发之前的超新星1987A，(b)显示的是它爆发期间的情况，而(c)是取自哈勃望远镜的一张特写照片。

天体物理学的超新星理论指出，在如图30-20所示的这样的大质量恒星爆发期间，电磁相互作用与弱相互作用是完全相同的。宇宙起源的现代理论同样认为，在早期宇宙的瞬间，这两个力也是同一的。根据这个原因，电磁力和弱相互作用被说成是统一的一个力，叫做电弱力。

在20世纪70年代，电磁力和弱力被统一成电弱力，以同样的方式，物理学家目前正在发展包括强相互作用在内的更大的统一理论，但工作还不完善，理论有待改进，而检验这些理论的实验正在规划中。要得出一个包括重力在内的完全统一理论，尚需作更进一步的研究。

然而，对众多星系的研究结果却令人困惑。研究显示，由标准模型描述的物质仅仅是组成宇宙物质的一小部分，宇宙的更大部分是由暗物质组成。所谓暗物质，就是除了通过引力之外，它不与光子或普通物质发生相互作用。另外，宇宙中还显示有暗能量存在，即有一种未知的力使宇宙加速膨胀。

因此，组成核的最微小粒子的研究与最大的系统、组成宇宙的星系的研究是直接相连的。粒子物理学家和天文学家研究的正好是长度标尺相反的两极；现在他们要共同回答的问题是：“这世界究竟是由什么组成的？”也许将来你能够回答这个问题。

本节复习题

39. 核爆炸 当利用核子轰击原子核时，为什么质子比中子需要更多的能量？

40. 粒子加速器 在如图30-11所示的费米实验室的加速器中的质子是沿逆时针方向运动。弧形磁铁的磁场指向的是什么方向？

41. 电子偶的产生 如图30-18所示为两个电子—正电子偶的产生。为什么在顶部的一对粒子的径迹比在底部的一对粒子弯曲程度更大？

42. 标准模型 研究标准模型的限制因素和可能的替代模型。

43. 理性思维 考虑以下方程：

$$u \rightarrow d + W^+ \text{ 和 } W^+ \rightarrow e^+ + \nu$$

如何引用它们来说明核的放射性衰变的结果是发射了正电子和中微子？用核子表示这个方程是否比用夸克更方便？

物理实验 • 实验设计

课外CBL培训可
见如下网站：
physicspp.com

辐射的检测

辐射检测器利用各种方法来检测辐射。一种常用的检测器是盖克-米勒管。它是由一根充满低压气体的金属管和一段沿着管轴的长金属丝组成的。金属丝相对于管子的电压较高，一般为400~800 V。在管子的一端有一扇薄而易碎的窗口。当高能光子或带电粒子通过窗口进入管子时，一些气体发生电离。电离出的电子受金属丝的吸引而加速运动。然后，它们使另一些原子电离产生一个撞击金属丝的电荷脉冲，这个电荷脉冲又转变为电压脉冲，经放大后，被计数或送入扬声器中。

通过前面的学习你已经知道，从辐射源发出的光和其他电磁辐射沿各个方向都是直线传播的。在这一实验中你将要探究，与 γ 和 β 辐射源的距离和测量到的辐射强度两者间的关系。

问题

辐射强度与离开 γ 和 β 源的距离两者间有什么关系？

目标

- 测量辐射。
- 利用变量、常量和可控量设计你的实验。
- 收集和整理数据，将 γ 和 β 辐射的强度与它们离开辐射源的距离进行比较。
- 对比与比较 γ 和 β 的辐射活性。

安全警示



- 在用盖克计数管时，请把手、铅笔等远离盖克管的端面，因为管子的窗口是十分薄而易碎的。
- 仪器的插头必须插入GFCI保护插座，以防止触电。
- 当在用放射性材料工作时，请不要吃零食、喝饮料或使用化妆品。
- 千万不要撕裂或打开覆盖在放射性材料上的防护塑料壳。如果发生曝露，要立刻报告老师。

实验器材

γ 和 β 放射源
辐射计数器或学生用辐射监测器
米 尺
遮蔽胶带
停 表



数据表

背景辐射计数率 (cpm = 每分钟的计数)		cpm		
距离 (cm)	测量的 β 辐射 计数率(cpm)	校正的 β 辐射 计数率(cpm)	测量的 γ 辐射 计数率(cpm)	校正的 γ 辐射 计数率(cpm)
2				
4				
6				
8				
10				
12				
14				

实验步骤

1. 各种计数器、盖克—米勒管以及学校使用的计数器，它们之间有很大的区别。因此，你在设计实验步骤时，应该要考虑如何评价及处理你要用到的仪器设备——包括探测器和放射性材料等。
2. 探测器至少放在离开放射性材料1 m处。打开探测器并测量辐射。测量得到的这一辐射叫做背景辐射。在数据表中记录下你的数据。
3. 在与你的放射源相隔不同距离的位置上测量 β 和 γ 辐射。
4. 将你测得的辐射计数率（即每分钟的辐射计数）减去背景辐射计数率，得到校正的材料辐射计数率（即辐射强度）。
5. 请老师检查你的设计。在老师批准后再进行实验。

分析

1. **观察和推断** 这个实验中的背景辐射源是什么？
2. **绘制和运用图象** 作一幅 γ 辐射计数率与距离的关系图象。以距离作为水平轴，以样品的校正辐射计数率作为垂直轴。如果计数率是相似的，那么将 β 辐射计数率也画在同一幅图上，并且把每一组数据标注在各条图线上。
3. **绘制和运用图象** 对于 β 辐射和 γ 辐射的数据，分别作出校正计数率与 $\frac{1}{d^2}$ 的关系图象。

结论与应用

1. **解释** 两幅图相比的结果。距离和辐射计数率之间存在什么关系？
2. **解释** 你在海平面上（例如在沿海地区）及在落基山的海拔高度上时，背景辐射计数率有什么不同。
3. **描述** 如果将盖克—米勒计数管移到最初位置的3倍距离时， β 辐射计数率将发生什么变化。

进一步探索

遵循相似模式的其他物理现象有哪些？

生活中的物理学

如果你和他人离放射性材料很近，说明为什么这是很危险的。

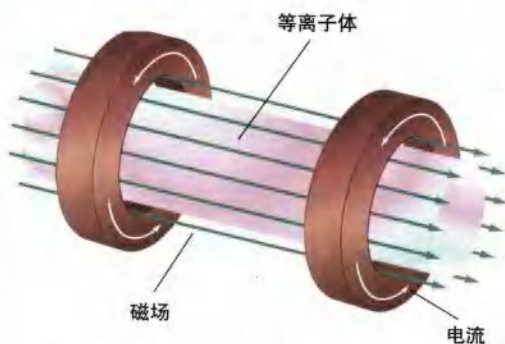
物理 在线

若想了解更多有关辐射的知识，请登录网站：physicspp.com。

近几十年来，物理学家正在尝试开发并持续一种聚变反应，这种反应产生的能量要比它消耗的能量更多。这种热核反应将用少量的氘和氚产生大量的热，而氘和氚可以从海水中提炼出来。

要引发聚变反应，氘和氚的混合物必须加温和加压到如在太阳上那种典型的条件。它所需的温度足以烧毁在裂变反应中使用的容器。在此温度下，气体原子已全部电离成等离子体。等离子体的限制是聚变反应堆的设计中面临的最重要的问题之一。

磁约束 在磁约束反应堆中，一个强电流穿过氘和氚气体的容器，以使等离子体被压缩在一个弧形区域内。附加磁场使等离子体流形成如图所示那样，并限制它从容器壁离开。一个有希望成功的结构是把等离子体保持在环行室或圆环圈中，而环行室具有的最大优点是它的两端不封闭。



磁约束：高热的等离子体受到磁场的压缩和禁锢。

惯性约束 如果你注意观察那似直线一样连绵不断而快速运动的电弧，你就会知道，要把等离子体形成一个稳定的形态是非常困难的。在惯性约束反应堆中，极其微小的冷冻液化的氘—氚小球，在各个方向上被大功率的激光束照射。这些激光使小球的外层发

热，以致它急剧爆发。在此同时，小球内部余下的物质受到巨大的压缩和急剧的加热，引发了聚变反应。来自这些小球聚变反应释放的能量超过了用于加热小球的能量。因此，一连串的氘—氚小球一个接一个地熔合，产生了持续的聚变反应，而所得的热量则被用来产生蒸汽，推动汽轮机工作。



在惯性约束中，由来自激光的光束或X射线束迅速地使小球的表面加热，形成一个周围等离子体的包围圈。剩余的核燃料被表面材料排放的热压缩。

未来 一段极短时间的热核聚变已能在以上介绍的两类反应堆中维持，研究人员已经艰难地完成了一种不亏损的反应堆（在这类反应堆中，由反应产生的能量超过维持反应所需的能量）。要朝一个实际的热核反应堆方向前进，费用是昂贵的，进展是缓慢的，但它的前景十分美好。一个聚变反应堆完全没有辐射危险，因为聚变反应产生的是中子。而且，燃料本身没有放射性，而核废物的量又是微不足道的。核聚变的优越性显而易见。

进一步探索

- 1. 分析** 为什么热核反应看起来是如此吸引人的一种能量来源方式？
- 2. 比较** 你已经知道了三类“热动力”的发电厂。它们的共同特征是什么？

30.1 原子核

关键术语

- 原子序数
- 原子质量单位
- 质量数
- 核 素
- 核 力
- 核 子
- 结合能
- 质量亏损

重要概念

- 原子序数 Z 确定了原子核中的质子数。
- 在一个原子核内，质子和中子的总数等于原子的质量数 A 。
- 原子核内质子数相同而中子数不同的原子叫做同位素。
- 强相互作用把核子束缚在一起。
- 在核反应中释放的能量可以通过求质量亏损算出。质量亏损就是反应前后粒子的质量之差：

$$E = \Delta mc^2$$

- 结合能是与质量亏损相等当的能量。

30.2 核衰变和核反应

关键术语

- 放射性
- α 衰变
- β 衰变
- γ 衰变
- 核反应
- 半衰期
- 活 度
- 裂 变
- 链式反应
- 聚 变

重要概念

- 一个不稳定核衰变后转化为另一个元素。
- 放射性衰变产生三类粒子。其中， α 粒子是氦核， β 粒子是高速电子， γ 射线是高能光子。
- 在核反应中，总质量数 A 和总电荷数 Z 是不变的。
- 放射性同位素的半衰期是该元素核衰变掉一半所需的时间。 t 个半衰期后：

$$\text{剩余核} = \text{最初核} \left(\frac{1}{2}\right)^t$$

- 放射性活度就是放射性样品每秒衰变的次数。
- 在裂变中，铀核裂变成两个较小的核，同时释放出几个中子及能量。
- 原子核反应堆利用裂变释放的能量产生电能。
- 氢核聚变成氦核释放的能量使恒星发光。

30.3 基本粒子

关键术语

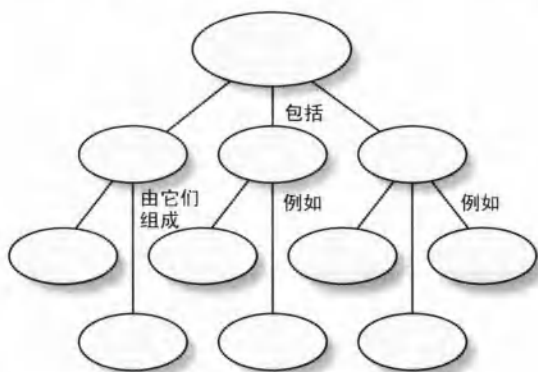
- 夸 克
- 轻 子
- 标准模型
- 媒介子
- 粒子偶的产生
- 弱相互作用

重要概念

- 直线加速器和回旋加速器产生出高能粒子。
- 盖克-米勒计数器、云室和其他的粒子检测器的工作原理都是带电粒子穿过物质时会引起电离。
- 所有物质看来都是由夸克和轻子组成的。
- 各种物质间通过叫做媒介子的粒子发生相互作用。
- 标准模型包括夸克、轻子和媒介子。
- 当物质与相应的反物质粒子结合时，它们的质量和能量转化成能量或较轻的物质—反物质粒子对。
- 通过粒子偶的产生，能量被转化成物质—反物质粒子对。

绘制概念图

44. 用下列术语完成概念图：标准模型、夸克、 γ 射线、媒介子、质子、中子、轻子、W玻色子、中微子、电子、胶子。



理解概念

45. 在原子核内什么力的作用把核子推开？什么力把核子维系在一起？(30.1)
46. 定义原子核的质量亏损。它与什么有关？(30.1)
47. 小的核或大的核，一般来说哪一种更不稳定？(30.1)
48. 铀235和铀238哪一种同位素的质子数更多？(30.1)
49. 定义作为核物理学用的术语“衰变”，并给出一个例子。(30.2)
50. 辐射 α 粒子、 β 粒子和 γ 射线常见的名称分别是什么？(30.2)
51. 在任何核反应方程中总是守恒的是哪两个量？(30.2)
52. 核能 为了引发链式反应，必须发生怎样的一系列事件？(30.2)
53. 核能 在裂变反应堆中减速剂起什么作用？(30.2)
54. 裂变和聚变是相反的过程。为什么这两种过程都能释放能量？(30.2)
55. 高能物理 为什么不能用直线加速器加速中子？(30.3)
56. 力 在四种相互作用（强、弱、电磁和引力）中，说明下列粒子分别参与哪一种。(30.3)
- a. 电子
- b. 质子
- c. 中微子
57. 一个原子核射出了一个正电子后，它的原子序数和质量数分别发生了什么变化？(30.3)
58. 反物质 如果一颗由反质子、反中子和正电子组成的陨星落到了地球上，将会发生什么现象？(30.3)

应用概念

59. 裂变 一则网页新闻声称科学家已经可以让铁原子核发生裂变了。这一言论有可能是真实的吗？说明理由。
60. 利用图30-2中的每一个核子的结合能图线，确定 ${}^2_1\text{H} + {}^3_1\text{H} \rightarrow {}^4_2\text{He}$ 这个反应是否有可能发生。
61. 同位素 说明自然产生的和人工产生的放射性同位素之间有什么不同。
62. 核反应堆 在核反应堆中，通过反应堆核心的水流经一个环形回路。当此水变成蒸汽去推动汽轮机时，又会流经第二个环形回路。为什么要有两个回路？
63. 1个铀核裂变和4个氢核聚变产生1个氦核，两者都产生能量。
- a. 哪一个反应产生的能量更多？
- b. 1 kg的铀核裂变与1 kg的氢核聚变相比，哪一种产生的能量更多？
- c. 为什么a、b两小题的答案是不同的？

问题解决

30.1 原子核

64. 什么粒子、每一种粒子要多少，才能组成一个 ${}^{109}_{47}\text{Ag}$ 原子？
65. 由30个质子和34个中子组成的锌原子，这个同位素的符号（指用在核方程中的一种符号）是什么？
66. ${}^{32}_{16}\text{S}$ 的质量为31.972 07 u。
- a. 它的质量亏损是多少？
- b. 它的结合能是多少？
- c. 每一个核子的结合能又是多少？

67. 已知 $^{12}_7\text{N}$ 的质量为 $12.018\,8\,\text{u}$ 。
- 每一个核子的结合能是多少?
 - 从 $^{14}_7\text{N}$ 中分离出一个核子比从 $^{12}_7\text{N}$ 中分离出一个核子需要的能量更多吗? 已知 $^{14}_7\text{N}$ 的质量为 $14.003\,07\,\text{u}$ 。
68. 在氦核里, 两个带正电的质子被分开约 $2.0 \times 10^{-15}\,\text{m}$ 。利用库仑定律求出这两个质子间相互排斥的静电力。这一结果会让你大致了解强相互作用的尺度。
69. ^4_2He 的结合能是 $-28.3\,\text{MeV}$ 。计算它的质量(以原子质量单位 u 为单位)。

30.2 核衰变和核反应

70. 对氡核($^{222}_{86}\text{Rn}$)的 α 衰变, 写出完整的核反应方程。
71. 对于 $^{89}_{36}\text{Kr}$ 的 β 衰变, 写出完整的核反应方程。
72. 完成下列每一个核反应方程:
- $^{225}_{89}\text{Ac} \rightarrow ^4_2\text{He} + \underline{\hspace{2cm}}$
 - $^{227}_{88}\text{Ra} \rightarrow ^0_{-1}\text{e} + \underline{\hspace{2cm}} + \underline{\hspace{2cm}}$
 - $^{65}_{29}\text{Cu} + ^1_0\text{n} \rightarrow \underline{\hspace{2cm}} \rightarrow ^1_1\text{P} + \underline{\hspace{2cm}}$
 - $^{235}_{92}\text{U} + ^1_0\text{n} \rightarrow ^{96}_{40}\text{Zr} + 3(^1_0\text{n}) + \underline{\hspace{2cm}}$
73. 一种放射性同位素的半衰期为3.0天。说出它在下列天数以后剩余的质量为最初的百分之几。
- 6.0天
 - 9.0天
 - 12天
74. 在研究性实验室的一次事故中, 半衰期为3天的一种放射性同位素被泄漏了。已知它的放射量是最大允许量的8倍。工人必须等待多长时间才能够进入这个房间?
75. 当硼核($^{11}_5\text{B}$)被质子轰击时, 它吸收了一个质子并射出了一个中子。
- 这一过程产生的元素是什么?
 - 写出这个核反应方程。
 - 这一过程产生的同位素是放射性的, 并且通过射出一个正电子而发生衰变。写出这个反应的核反应方程。
76. 第一颗原子弹释放的能量相当于 $2.0 \times 10^4\,\text{t}$ 的TNT炸药爆炸释放的能量。已知 $1\,000\,\text{t}$ TNT爆炸释放的能量相当于 $5.0 \times 10^{12}\,\text{J}$, 且铀235每个原子释放的能量为 $3.21 \times 10^{-11}\,\text{J}$ 。该原子弹中裂变产生能量的铀235的质量是多少?

77. 在聚变反应期间, 两个氘核(^2_1H)结合形成一个氦核(^3_2He), 另外还产生什么粒子?
78. 已知钋核($^{209}_{84}\text{Po}$)的半衰期是103年。100 g样品钋209衰变到只剩3.1 g, 需要历经多长时间?

30.3 基本粒子

79. 由三个上夸克组成的粒子的电荷是多少?
80. 反夸克与夸克所带的电荷是相反的。一个 π 介子由一个上夸克和一个反下夸克组成, 这个 π 介子带有多少电荷?
81. π 介子由一个夸克和一个反夸克组成。求出下列组合成的 π 介子的电荷。
- $u\bar{u}$
 - $d\bar{u}$
 - $d\bar{d}$
82. 重子是由三个夸克组成的粒子。求出下列每一种重子所带的电荷。
- 中子 ddu
 - 反质子 $\bar{u}\bar{u}\bar{d}$
83. 在费米实验室中的同步加速器的直径为2.0 km。质子在其中以近似于真空中的光速运动。
- 质子完成一周运动要花多长时间?
 - 质子以8.0 GeV的能量进入圆环, 每绕一圈它获得2.5 MeV的能量。在达到400.0 GeV能量以前, 质子要绕行多少圈?
 - 质子加速到400.0 GeV要花多少时间?
 - 质子在加速期间飞行了多远距离?
84. 如图30-21所示为一个气泡室中的一些径迹。一条径迹可能比其他的径迹弯曲程度更大的原因是什么?

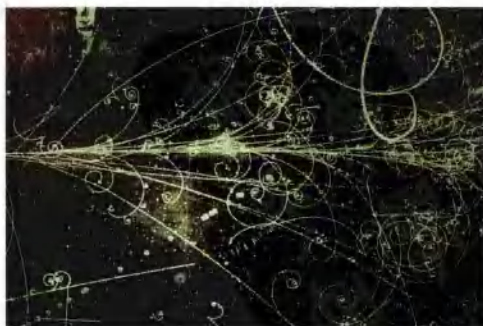


图30-21

第30章 测评

复习提高

85. 下列每一种核都能吸收一个 α 粒子。假定这些核不再放射出第二个粒子，完成下列核反应方程。
- a. $^{14}_7\text{N} + ^4_2\text{He} \rightarrow$ _____
- b. $^{27}_{13}\text{Al} + ^4_2\text{He} \rightarrow$ _____
86. 氡核 ($^{211}_{86}\text{Rn}$) 的半衰期是15 h。60 h后样品还剩下几分之几？
87. 最简单的聚变反应即由一个质子和一个中子生成氘核 (^2_1H) (质量为2.014 102 u)。写出完整的聚变反应方程，并求出释放的总能量。
88. 质量为232.0372 u的铀核 ($^{232}_{92}\text{U}$)，通过发射一个带有5.3 MeV的动能的 α 粒子(质量为4.002 6 u)，衰变成质量为228.0287 u的钍核 ($^{228}_{90}\text{Th}$)。钍核的反冲动能有多大？

理性思维

89. 推断 γ 射线带有动量。能量为 E 的 γ 射线的动量等于 $\frac{E}{c}$ ，这里的 c 是真空中光速。当电子—正电子对衰变成两个 γ 射线时，动量和能量必定都是守恒的。这些 γ 射线的能量的总和是1.02 MeV。如果正电子和电子最初是静止的，那么，这两个 γ 射线的动量的大小和方向是怎样的？
90. 推断 最初静止的电子—正电子对也能衰变成三条 γ 射线。如果三条 γ 射线的能量相同，那么它们相对的方向是怎样的？画一张草图表示。
91. 估计 在太阳中的一次聚变反应释放约25 MeV的能量。根据太阳的发光度，估算每秒发生这样的反应的次数。已知光照度就是每秒发出的能量值，太阳的光照度是 4×10^{26} W。
92. 解释数据 通过一个放射性检测器监察到一个同位素发生了衰变。每隔5 min记录一次计数，结果如表30-3所示。移走样品以后，检测器记录到来自宇宙射线的计数是每5分钟20次。求出同位素的半衰期。注意，你应该首先从每一个记录结果中减去20次的背景辐射，然后把计数作为时间的函数作图。通过你的图线求出元素的半衰期。

表 30-3	
放射性表变的测量	
时间 (min)	计数 (每5分钟一次)
0	987
5	375
10	150
15	70
20	40
25	25
30	18

科技写作

93. 研究目前理解的宇宙中的暗物质。对于宇宙学家来说，为什么暗物质是必需的？暗物质可能是由什么组成的？
94. 研究顶夸克。为什么物理学家假设它是存在的？

日积月累

95. 一个电子以 1.7×10^6 m/s的速度垂直进入磁感应强度为0.91 T的磁场，磁场对电子的作用力是多大？(第24章)
96. 当一根长0.10 m的金属线以4.0 m/s的速度垂直于匀强磁场运动时，导线内的感应电动势为2.0 mV。磁感应强度是多少？(第25章)
97. 一个电子的德布罗意波长为400.0 nm，这是可见光的最短波长。(第27章)
- a. 求出这个电子的速度。
- b. 计算电子的能量是多少电子伏特。
98. 具有14.0 eV能量的一个光子进入一个基态的氢原子并使它电离。从原子射出的电子的动能为多大？(第28章)
99. 一个硅二极管($U = 0.70$ V)与一个电阻器串联并加有6.67 V的电压，通过它的电流是137 mA。(第29章)
- a. 电阻器上的电压是多少？
- b. 电阻器的电阻为多大？

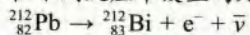
标准化测试

选择题

1. 同位素镍60核($^{60}_{28}\text{Ni}$)的质子数、中子数和电子数分别为()

	质子	中子	电子
(A)	28	32	28
(B)	28	28	32
(C)	32	32	28
(D)	32	28	28

2. 在下列反应中发生的是()



- (A) α 衰变
(B) β 衰变
(C) γ 衰变
(D) 失去一个质子

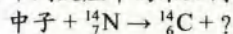
3. 当钋210核($^{210}_{84}\text{Po}$)经历 α 衰变后,生成()

- (A) $^{206}_{82}\text{Pb}$ (B) $^{208}_{82}\text{Pb}$
(C) $^{210}_{85}\text{Pb}$ (D) $^{210}_{80}\text{Pb}$

4. 放射性碘131样品以 $2.5 \times 10^8 \text{ Bq}$ 的衰变速率发射 β 粒子,已知它的半衰期是8天。16天以后它的放射性活度变为()

- (A) $1.6 \times 10^7 \text{ Bq}$ (B) $6.2 \times 10^7 \text{ Bq}$
(C) $1.2 \times 10^8 \text{ Bq}$ (D) $2.5 \times 10^8 \text{ Bq}$

5. 下列反应中的未知同位素为()



- (A) ${}^1_1\text{H}$ (B) ${}^3_1\text{H}$
(C) ${}^2_1\text{H}$ (D) ${}^4_2\text{He}$

6. 下列衰变中,不改变核中质子或中子的数目的是()

- (A) 正电子 (B) α 衰变
(C) β 衰变 (D) γ 衰变

7. 钋210的半衰期是138天。2.34 kg的钋样品在4年以后还保留了()

- (A) 0.644 mg (B) 1.50 mg
(C) 1.51 g (D) 10.6 g

8. 一个电子和一个正电子碰撞发生湮灭,且以 γ 射线的形式释放它们的能量。 γ 射线的最小能量是() (与一个电子质量等当的能量为0.51 MeV)

- (A) 0.51 MeV (B) 1.02 MeV
(C) 931.49 MeV (D) 1863 MeV

9. 下图显示当一个 γ 射线衰变成电子—正电子对时在气泡室中产生的径迹。 γ 射线不能留下径迹的原因是()



- (A) γ 射线运动得太快,来不及检测它们的径迹
(B) 只有粒子对才能够在气泡室中留下径迹
(C) 粒子必须有质量去与液体相互作用并留下径迹,而 γ 射线实际上是无质量的
(D) γ 射线是电中性的,所以在气泡室中它不能使液体电离

拓展题

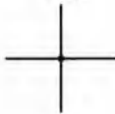
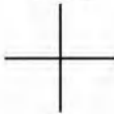
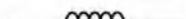
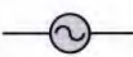
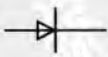
10. 一个铀235核裂变释放出约 $3.2 \times 10^{-11} \text{ J}$ 的能量,1 t TNT(炸药)约释放 $4 \times 10^9 \text{ J}$ 的能量。在核裂变武器中多少铀235核释放的能量相当于20 000 t的TNT?

✓ 考试小贴士

做一些路勘

了解将要参加的考试的一些情况。考试是限时的还是不限时的?你能否使用计算器或其他工具?这些工具又能提供什么帮助?物理常量是否给出?预先了解这些情况,有助于你更顺利地进行考试。

颜色惯例			
位移矢量 (d)		正电荷	+
速度矢量 (v)		负电荷	-
加速度矢量 (a)		电流方向	
力矢量 (F)		电子	
动量矢量 (p)		质子	
光线		中子	
物		坐标系	
像			
电场 (E)			
磁感线 (B)			

电路符号	
 导线	 接地
 开关	 电路相交
 保险丝	 电路不相交
 电容	 电池
 电阻器 (固定)	 灯泡
 滑动变阻器	 直流电源
 电感	 电压表
	 电流表
	 交流电源
	 三极管
	 二极管

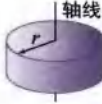
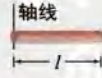
SI 基本单位		
物理量	名称	符号
长度	米	m
质量	千克	kg
时间	秒	s
热力学温度	开尔文	K
物质的量	摩尔	mol
电流	安培	A
发光强度	坎德拉	cd

SI 导出单位				
测量量	单位	符号	用基本单位表示	用其他SI制单位表示
加速度		m/s ²	m/s ²	
面积		m ²	m ²	
电容	法拉	F	A ² ·s ⁴ /(kg·m ²)	
密度		kg/m ³	kg/m ³	
电荷量	库仑	C	A·s	
电场强度		N/C	kg·m/(C·s ²)	
电阻	欧姆	Ω	kg·m ² /(A ² ·s ³)	V/A
电压	伏特	V	kg·m ² /(A·s ³)	
功, 能	焦耳	J	kg·m ² /s ²	N·m
力	牛顿	N	kg·m/s ²	
频率	赫兹	Hz	s ⁻¹	
光照度	勒克斯	lx	cd/m ²	
磁感应强度	特斯拉	T	kg/(A·s ²)	N·s/(C·m)
电势差	伏特	V	kg·m ² /(A·s ³)	W/A 或 J/C
功率	瓦特	W	kg·m ² /s ³	J/s
压强	帕斯卡	Pa	kg/(m·s ²)	N/m ²
速度		m/s	m/s	
体积		m ³	m ³	

有用的转换		
1 in = 2.54 cm	1 kg = 6.02 × 10 ²⁶ u	1 atm = 101 kPa
1 mi = 1.61 km	1 oz ↔ 28.4 g	1 cal = 4.184 J
1 mi ² = 640 acres	1 kg ↔ 2.21 lb	1 eV = 1.60 × 10 ⁻¹⁹ J
1 gal = 3.79 L	1 lb = 4.45 N	1 kWh = 3.60 MJ
1 m ² = 264 gal	1 atm = 14.7 lb/in ²	1 hp = 746 W
1 knot = 1.15 mi/h	1 atm = 1.01 × 10 ⁵ N/m ²	1 mol = 6.022 × 10 ²³ items

物理常量			
物理量	符号	数值	大致数值
原子质量单位	u	$1.660\,538\,86 \times 10^{-27} \text{ kg}$	$1.66 \times 10^{-27} \text{ kg}$
阿伏加德罗常数	N_A	$6.022\,141\,5 \times 10^{23} \text{ mol}^{-1}$	$6.022 \times 10^{23} \text{ mol}^{-1}$
玻尔兹曼常量	k	$1.380\,650\,5 \times 10^{-23} \text{ Pa}\cdot\text{m}^3/\text{K}$	$1.38 \times 10^{-23} \text{ Pa}\cdot\text{m}^3/\text{K}$
库仑常量	k	$8.987\,551\,788 \times 10^9 \text{ N}\cdot\text{m}^2/\text{C}^2$	$9.0 \times 10^9 \text{ N}\cdot\text{m}^2/\text{C}^2$
元电荷量	e	$1.602\,176\,53 \times 10^{-19} \text{ C}$	$1.602 \times 10^{-19} \text{ C}$
盖斯常量	R	$8.314\,472 \text{ Pa}\cdot\text{m}^3/(\text{mol}\cdot\text{K})$	$8.31 \text{ Pa}\cdot\text{m}^3/(\text{mol}\cdot\text{K})$
引力常量	G	$6.674\,2 \times 10^{-11} \text{ N}\cdot\text{m}^2/\text{kg}^2$	$6.67 \times 10^{-11} \text{ N}\cdot\text{m}^2/\text{kg}^2$
电子的质量	m_e	$9.109\,382\,6 \times 10^{-31} \text{ kg}$	$9.11 \times 10^{-31} \text{ kg}$
质子的质量	m_p	$1.672\,621\,71 \times 10^{-27} \text{ kg}$	$1.67 \times 10^{-27} \text{ kg}$
中子的质量	m_n	$1.674\,927\,28 \times 10^{-27} \text{ kg}$	$1.67 \times 10^{-27} \text{ kg}$
普朗克常量	h	$6.626\,069\,3 \times 10^{-34} \text{ J}\cdot\text{s}$	$6.63 \times 10^{-34} \text{ J}\cdot\text{s}$
真空中的光速	c	$2.997\,924\,58 \times 10^8 \text{ m/s}$	$3.00 \times 10^8 \text{ m/s}$

SI 词头		
词头名称	符号	因数
飞	f	10^{-15}
皮	p	10^{-12}
纳	n	10^{-9}
微	μ	10^{-6}
毫	m	10^{-3}
厘	c	10^{-2}
分	d	10^{-1}
十	da	10^1
百	h	10^2
千	k	10^3
兆	M	10^6
吉	G	10^9
太	T	10^{12}
拍	P	10^{15}

不同物体的惯性动量			
物 体	轴线位置	图	惯性动量
半径为 r 的环	通过中心 直径		mr^2
半径为 r 的固体圆柱体	通过中心		$\frac{1}{2}mr^2$
半径为 r 的球体	通过中心		$\frac{2}{5}mr^2$
长度为 l 的长棒	通过中心		$\frac{1}{12}ml^2$
长度为 l 的长棒	通过尾端		$\frac{1}{3}ml^2$
长度为 l 、宽度为 w 的薄矩形板	通过中心		$\frac{1}{12}m(l^2 + w^2)$

一些常见物质的密度

物 质	密 度 (g/cm ³)
铝	2.702
镉	8.642
铜	8.92
锗	5.35
金	19.31
氢	8.99×10^{-5}
铟	7.30
铁	7.86
铅	11.34
汞	13.546
氧	1.429×10^{-3}
硅	2.33
银	10.5
水 (4°C)	1.000
锌	7.14

一些物质的熔点和沸点

物 质	熔 点 (°C)	沸 点 (°C)
铝	660.37	2 467
铜	1 083	2 567
锗	937.4	2 830
金	1 064.43	2 808
铟	156.61	2 080
铁	1 535	2 750
铅	327.5	1 740
硅	1 410	2 355
银	961.93	2 212
水	0.000	100.000
锌	419.58	907

一些常见物质的比热容

材 料	比热容 [J/(kg·K)]	材 料	比热容 [J/(kg·K)]
铝	897	铅	130
黄铜	376	甲醇	2 450
碳	710	银	235
铜	385	水蒸气	2 020
玻璃	840	水	4 180
冰	2 060	锌	388
铁	450		

一些常见物质的熔解热和汽化热

材 料	熔解热, H_f (J/kg)	汽化热, H_v (J/kg)
铜	2.05×10^5	5.07×10^6
金	6.30×10^4	1.64×10^6
铁	2.66×10^5	6.29×10^6
铅	2.04×10^4	8.64×10^5
汞	1.15×10^4	2.72×10^5
甲醇	1.09×10^5	8.78×10^5
银	1.04×10^5	2.36×10^6
水 (冰)	3.34×10^5	2.26×10^6

20℃ 时的热膨胀系数		
材 料	线膨胀系数 $\alpha (^{\circ}\text{C})^{-1}$	体膨胀系数 $\beta (^{\circ}\text{C})^{-1}$
固 体		
铝	25×10^{-6}	75×10^{-6}
黄铜	19×10^{-6}	56×10^{-6}
水泥	12×10^{-6}	36×10^{-6}
铜	17×10^{-6}	48×10^{-6}
软玻璃	9×10^{-6}	27×10^{-6}
耐热玻璃	3×10^{-6}	9×10^{-6}
铁, 钢	12×10^{-6}	35×10^{-6}
铂	9×10^{-6}	27×10^{-6}
液 体		
汽油		950×10^{-6}
汞		180×10^{-6}
甲醇		$1\,100 \times 10^{-6}$
水		210×10^{-6}
气 体		
空气 (和其他气体)		$3\,400 \times 10^{-6}$

声音在各种介质中的传播速率	
介 质	m/s
空气 (0°)	331
空气 (20°)	343
氮 (0°)	972
氢 (0°)	1 286
水 (25°)	1 493
海水 (0°)	1 533
橡胶	1 600
铜 (25°)	3 560
铁 (25°)	5 130
耐热玻璃	5 640
金刚石	12 000

可见光的波长	
颜 色	波 长
紫光	380~430 nm
靛光	430~450 nm
蓝光	450~500 nm
蓝绿光	500~520 nm
绿光	520~565 nm
黄光	565~590 nm
橙光	590~625 nm
红光	625~740 nm

介电常数, k (20℃)	
真空	1.000 0
空气 (1 atm)	1.000 59
氮 (1 atm)	1.000 13
玻璃	4~7
石英	4.3
熔凝石英	3.75
水	80

行 星								
	水 星	金 星	地 球	火 星	木 星	土 星	天王星	海王星
质量 (kg × 10 ²⁴)	0.330 2	4.868 5	5.973 6	0.641 85	1 898.6	568.46	86.832	102.43
赤道半径 (km)	2 439.7	6 051.8	6 378.1	3 397	71 492	60 268	25 559	24 764
平均密度 (kg/m ³)	5 427	5 234	5 515	3 933	1 326	687	1 270	1 638
反照率	0.119	0.750	0.306	0.250	0.343	0.342	0.300	0.290
半长轴 (km × 10 ⁶)	57.91	108.21	149.60	227.92	778.57	1 433.53	2 872.46	4 495.06
轨道周期 (地球日)	87.969	224.701	365.256	686.980	4 332.589	10 759.22	30 685.4	60 189
轨道倾角 (度)	7.00	3.39	0.000	1.850	1.304	2.485	0.772	1.769
轨道偏 心率	0.205 6	0.006 7	0.016 7	0.093 5	0.048 9	0.056 5	0.045 7	0.011 3
转动周期 (h)	1 407.6	5 832.5 ^R	23.934 5	24.622 9	9.925 0	10.656	17.24 ^R	16.11
轴面倾角 (度)	0.01	177.36	23.45	25.19	3.13	26.73	97.77	28.32
平均表面 温度(K)	440	737	288	210	112	84	53	55

R 指后退运动。

月 球	
质量	0.073 49 × 10 ²⁴ kg
赤道半径	1 738.1 km
平均密度	3 350 kg/m ³
反照率	0.11
半长轴	0.384 4 km × 10 ⁶
公转周期	27.321 7 地球日
月相变化周期	29.53 地球日
轨道倾角	18.28°~28.58°
轨道偏心率	0.054 9
转动周期	655.728 h

太 阳	
质量	1 989 100 × 10 ²⁴ kg
赤道半径	696 000 km
平均密度	1 408 kg/m ³
绝对量	+4.83
发光度	384.6 × 10 ²⁴ J/s
光谱型	G2 V
转动周期	609.12 h
平均能量产生	0.193 7 × 10 ⁻³ J/kg
平均温度	5 778 K



相对原子质量加括号的为放射性元素半衰期最长的同位素的质量数。

87	Fr	140.908	88	Ra	140.908
89	Ac	144.24	90	Th	232.038
91	Pa	231.036	92	U	238.029
93	Np	(237)	94	Pu	(244)
95	Am	(243)	96	Cm	(247)
97	Bk	(247)	98	Cf	(251)
99	Es	(252)	100	Fm	(257)
101	Md	(258)	102	No	(259)
103	Lr	(262)	104	Rf	(261)
106	Db	(262)	107	Sg	(266)
108	Hs	(277)	109	Mt	(268)
110	Ds	(271)	111	Rg	(272)
112	Cn	(285)	113	Nh	(284)
114	Fl	(289)	115	Mc	(288)
116	Lv	(293)	117	Ts	(294)
118	Og	(294)	119	Uu	(298)
120	Ubn	(304)	121	Ubn	(304)

鋼系

鋼索

元素

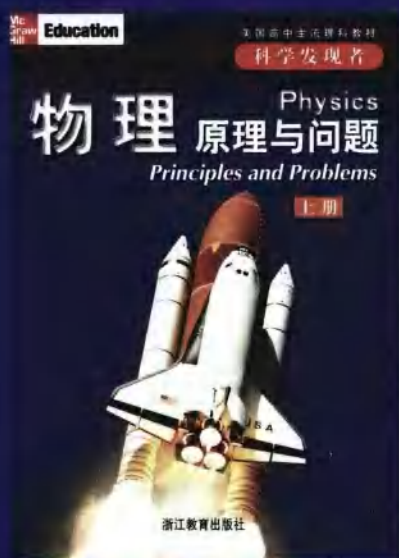
元素	符号	原子序数	原子质量	元素	符号	原子序数	原子质量
铀	Ac	89	(227)	汞	Hg	80	200.59
铝	Al	13	26.982	钼	Mo	42	95.94
镅	Am	95	(243)	钕	Nd	60	144.24
铈	Sb	51	121.760	氖	Ne	10	20.180
氩	Ar	18	39.948	铈	Np	93	(237)
砷	As	33	74.922	镍	Ni	28	58.693
砹	At	85	(210)	铌	Nb	41	92.906
钡	Ba	56	137.327	氮	N	7	14.007
铍	Bk	97	(247)	铈	No	102	(259)
铍	Be	4	9.012	铀	Os	76	190.23
铋	Bi	83	208.980	氧	O	8	15.999
铍	Bh	107	(264)	钨	Pd	46	106.42
硼	B	5	10.811	磷	P	15	30.974
溴	Br	35	79.904	铂	Pt	78	195.078
镉	Cd	48	112.411	钋	Pu	94	(244)
钙	Ca	20	40.078	钋	Po	84	(209)
锕	Cf	98	(251)	钾	K	19	39.098
碳	C	6	12.011	镧	Pr	59	140.908
铈	Ce	58	140.116	铈	Pm	61	(145)
铯	Cs	55	132.905	镨	Pa	91	231.036
氯	Cl	17	35.453	镭	Ra	88	(226)
铬	Cr	24	51.996	氡	Rn	86	(222)
钴	Co	27	58.933	铈	Re	75	186.207
铜	Cu	29	63.546	铈	Rh	45	102.906
镅	Cm	96	(247)	铷	Rb	37	85.468
镉	Ds	110	(281)	铀	Ru	44	101.07
铈	Db	105	(262)	钬	Rf	104	(261)
镱	Dy	66	162.500	钐	Sm	62	150.36
铈	Es	99	(252)	铈	Sc	21	44.956
铈	Er	68	167.259	镧	Sg	106	(266)
镱	Eu	63	151.964	铈	Se	34	78.96
镱	Fm	100	(257)	硅	Si	14	28.086
氟	F	9	18.998	银	Ag	47	107.868
钫	Fr	87	(223)	钠	Na	11	22.990
钆	Gd	64	157.25	锶	Sr	38	87.62
镓	Ga	31	69.723	硫	S	16	32.065
锗	Ge	32	72.64	钽	Ta	73	180.948
金	Au	79	196.967	铈	Tc	43	(98)
铪	Hf	72	178.49	碲	Te	52	127.60
铪	Hs	108	(277)	铪	Tb	65	158.925
氦	He	2	4.003	铈	Tl	81	204.383
钬	Ho	67	164.930	钍	Th	90	232.038
氢	H	1	1.008	铈	Tm	69	168.934
铟	In	49	114.818	锡	Sn	50	118.710
碘	I	53	126.904	钛	Ti	22	47.867
铱	Ir	77	192.217	钨	W	74	183.84
铁	Fe	26	55.845	铀	U	92	238.029
氪	Kr	36	83.798	钒	V	23	50.942
镧	La	57	138.906	氙	Xe	54	131.293
镧	Lr	103	(262)	铈	Yb	70	173.04
铅	Pb	82	207.2	钇	Y	39	88.906
锂	Li	3	6.941	铈	Zn	30	65.409
镧	Lu	71	174.967	铈	Zr	40	91.224
镁	Mg	12	24.305	元素 111	Uuu	111	(272)
锰	Mn	25	54.938	元素 112	Uub	112	(285)
钨	Mt	109	(268)	元素 114	Uuq	114	(289)
钨	Md	101	(258)				

科学发现者

美国高中主流理科教材

新课标、新观念、新学法的资源宝库

- 像科学家那样思考
- 像科学家那样探索
- 知识能力方法并重
- 动手动脑趣味无穷



有了这样的教材，阅读变成了一种享受，学习科学也变得趣味盎然。

在轻松、愉悦而又像侦探破案那样的阅读与探索中，不用多久，你就能像科学家那样思考，像科学家那样探索与发现。

《科学发现者》，将使你成为探索自然奥秘、做出科学创造的科学发现者。

[G e n e r a l I n f o r m a t i o n]

书名=物理：原理与问题·下册

作者=齐泽维茨著，钱振华译

页数=300

出版社=杭州：浙江教育出版社

出版日期=2008.8

I S B N = 9 7 8 - 7 - 5 3 3 8 - 7 2 4 8 - 9

中图分类号=G634

价格=¥

类别=物理课 - 高中 - 教学参考资料

电和磁

第 2 0 章

- 起步实验：塑料尺吸引小纸屑
- 2 0 . 1 电荷
- 2 0 . 2 静电力
- 迷你实验：对感应起电和传导起电的研究
- 物理实验：带电物体

第 2 1 章 电场

- 起步实验：探究相隔一定距离的带电物体之间的相互作用
- 2 1 . 1 电场的产生与测量
- 2 1 . 2 电场的应用
- 迷你实验：电场
- 物理实验：电容器充电实验

第 2 2 章

- 起步实验：使灯泡发光
- 2 2 . 1 电流和电路
- 迷你实验：电路
- 2 2 . 2 电能的应用
- 物理实验：电压、电流和电阻

第 2 3 章

- 起步实验：保险丝保护电路的方式
- 2 3 . 1 简单电路
- 迷你实验：并联电阻
- 2 3 . 2 电路的应用
- 物理实验：串联电路和并联电路

第 2 4 章 磁场

- 起步实验：磁场的作用方向
- 2 4 . 1 永磁体和暂时性磁铁
- 迷你实验：三维磁场
- 2 4 . 2 磁场产生的力
- 物理实验：制作电磁铁

第 2 5 章 电磁感应

- 起步实验：探究变化的磁场中发生的现象
- 2 5 . 1 变化的磁场产生电流
- 2 5 . 2 变化的磁场产生感应电动势
- 迷你实验：电动机和发电机
- 物理实验：电磁感应和变压器

第 2 6 章 电磁现象

- 起步实验：探究无线电广播信号来自何处
- 2 6 . 1 电场、磁场与物质的相互作用
- 迷你实验：模拟质谱仪
- 2 6 . 2 空间中的电磁场
- 物理实验：电磁波的屏蔽

近代物理

第 2 7 章 量子理论

- 起步实验：观察白炽灯泡的发光光谱
- 2 7 . 1 波的粒子模型
- 迷你实验：黑暗中的发光实验
- 2 7 . 2 物质波
- 物理实验：模拟光电效应

第 2 8 章 原子

- 起步实验：旋转的硬币与原子
- 2 8 . 1 原子的玻尔模型
- 迷你实验：明线光谱
- 2 8 . 2 原子的量子模型
- 物理实验：探寻原子的大小

第 2 9 章 固体电子学

- 起步实验：探究二极管的导电性
- 2 9 . 1 固体导电
- 2 9 . 2 电子元件
- 迷你实验：红光
- 物理实验：二极管的电流和电压

第 3 0 章 核物理

- 起步实验：构建原子核模型
- 3 0 . 1 原子核
- 3 0 . 2 核衰变和核反应
- 迷你实验：模拟放射性衰变
- 3 0 . 3 基本粒子
- 物理实验：辐射检测

附录

实验	表格
实验	起步实验
	第 2 0 章 塑料尺吸引小纸屑
	第 2 1 章 探究相隔一定距离的带电物体之间的相互作用
	第 2 2 章 使灯泡发光
	第 2 3 章 保险丝保护电路的方式
	第 2 4 章 磁场的作用方向
	第 2 5 章 探究变化的磁场中的发生的现象
	第 2 6 章 探究无线电广播信号来自何处
	第 2 7 章 观察白炽灯泡的发光光谱
	第 2 8 章 旋转的硬币与原子
物理实验	第 2 9 章 探究二极管的导电性
	第 3 0 章 构建原子核模型
	第 2 0 章 带电物体
	第 2 1 章 电容器充电实验
	第 2 2 章 电压、电流和电阻
	第 2 3 章 串联电路和并联电路
	第 2 4 章 制作电磁铁
	第 2 5 章 电磁感应和变压器
	第 2 6 章 电磁波的屏蔽
	第 2 7 章 模拟光电效应
迷你实验	第 2 8 章 探寻原子的大小
	第 2 9 章 二极管的电压和电压
	第 3 0 章 辐射的检测
	第 2 0 章 对感应起电和传导起电的研究
	第 2 1 章 电场
	第 2 2 章 电流
	第 2 3 章 并联电阻
	第 2 4 章 三维磁场
	第 2 5 章 电动机和发电机
	第 2 6 章 模拟质谱仪
生活中的物理	第 2 7 章 黑暗中的发光实验
	第 2 8 章 明线光谱
	第 2 9 章 红光
	第 3 0 章 模拟放射性衰变
	技术与社会
	第 2 2 章 混合动力型汽车
	第 2 6 章 手机
	工作原理
	第 2 1 章 避雷针
	第 2 3 章 触电保护器
未来技术	第 2 5 章 信用卡阅读器
	第 2 7 章 电子扫描隧道显微镜
	第 2 0 章 宇宙飞船与静电
	第 2 8 章 原子激光
	第 3 0 章 热核聚变
	物理学前沿
	第 2 4 章 霍尔效应
	第 2 9 章 人工智能
	数学和物理学的应用
	解题策略
数学与物理学的链接	第 2 0 章 关于静电力的问题
	第 2 2 章 作出电路图
	第 2 3 章 混联电路
	第 2 7 章 $h c$ 的单位及光子的能量
	第 2 5 章
	第 2 7 章
	物理学的应用
	第 2 0 章 导体还是绝缘体
	第 2 1 章 静电
	第 2 2 章 电阻
物理学的应用	第 2 3 章 检测电阻
	第 2 4 章 电磁铁
	第 2 5 章 常用单位
	第 2 6 章 频率
	第 2 7 章 宇宙的温度
	第 2 8 章 激光眼外科手术
	第 2 9 章 激光二极管

