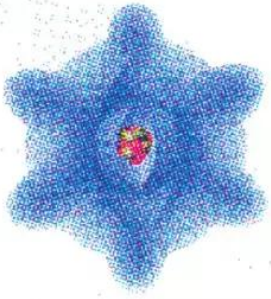
目 录



第 1 章 电荷的相互作用 6

1.1 静电现象与电荷守恒 7

1.2 探究电荷相互作用规律 12

1.3 静电与生活 18

第 2 章 电场与示波器 26

2.1 认识和使用示波器 27

2.2 探究电场的力的性质 30

2.3 研究电场的能的性质 37

2.4 电容器 电容 43

2.5 电子束在示波管中的运动 49

第 3 章 从电表电路到集成电路 57

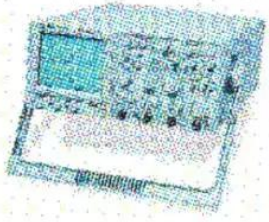
3.1 学会使用多用电表 57

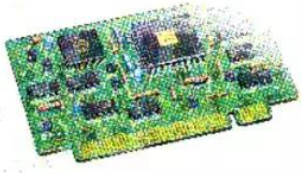
3.2 探究电流、电压和电阻的成因 63

3.3 探究电阻定律 66

3.4 多用电表电路分析与设计 70

3.5 逻辑电路与集成电路 73





第4章 探究闭合电路欧姆定律 78
4.1 探究闭合电路欧姆定律 78
4.2 测量电源的电动势和内阻 83
4.3 典型案例分析 87
4.4 电路中的能量转化与守恒 91
第5章 磁场与回旋加速器 98
5.1 磁与人类文明 98
5.2 怎样描述磁场 105
5.3 探究电流周围的磁场 110
5.4 探究安培力 115
5.5 探究洛仑兹力 120
5.6 洛仑兹力与现代科技 125
总结与评价 课题研究成果报告会 135
研究课题示例 135
评价表 136





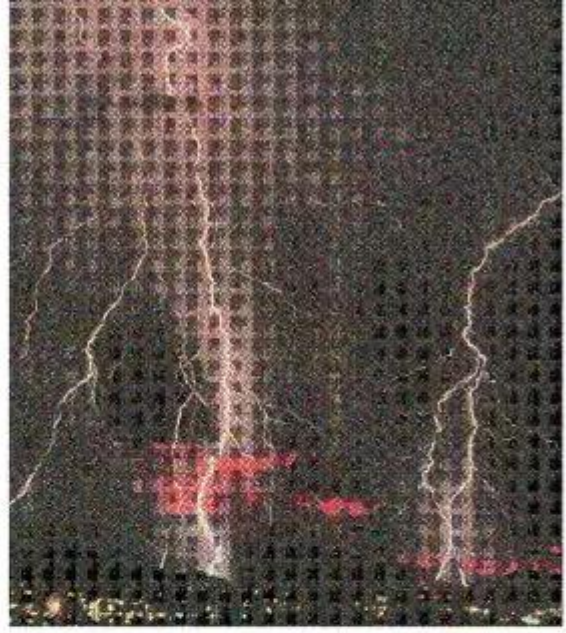


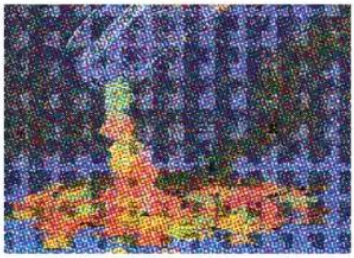
图 1-1　电闪雷鸣



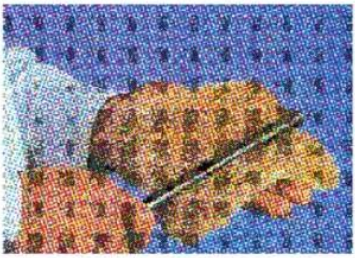
图 1-2　富兰克林（B. Franklin，1706—1790），美国科学家和政治家。1752 年，他冒着生命危险在雨中进行“风筝实验”，证明闪电与摩擦起电是相同的。他还创造了“正电”和“负电”区分两种不同性质的电的方法，为定量研究电现象提供了基础。图为富兰克林正在进行“风筝实验”。

第 1 章
电荷的相互作用

闪电撕裂了天空，雷霆震撼着大地。在这惊心动魄的自然现象背后，蕴藏着许多物理原理，吸引了不少科学家对它们进行探究。美国科学家富兰克林、法国科学家达利巴尔德（T. F. d'Alibard）等人冒着生命危险去捕捉闪电（图 1-2），证实了闪电与实验室中的电是相同的。他们想知道：雷电是怎样产生的？电是从哪里来的？物体带电的本质原因是什么？电荷有哪些特性？电荷间的相互作用遵从什么规律？人类应该怎样利用这些规律？这一连串的问题正是本章要探究并做出解答的。



a 梳过干燥头发的塑料梳子能吸引轻小物体



b 用毛皮摩擦橡胶棒

图 1-3

1.1 静电现象与电荷守恒

怎样使物体起电

实验探究1　摩擦起电

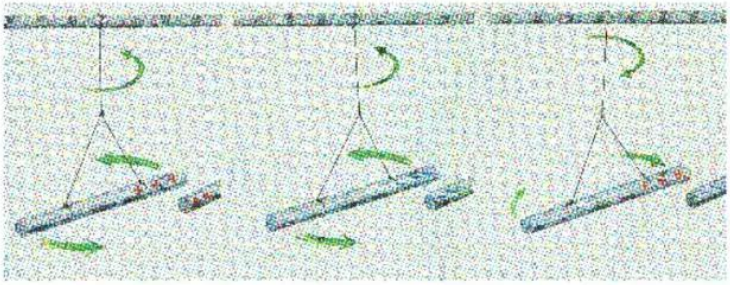
梳过干燥头发的塑料梳子能吸引轻小物体(图 1-3a)。请用丝绸摩擦玻璃棒和用毛皮摩擦橡胶棒(图 1-3b),随后将两棒分别靠近轻小物体,观察所发生的现象。

用丝绸摩擦过的玻璃棒和用毛皮摩擦过的橡胶棒能吸引轻小物体,我们就说它们带了电或有了**电荷**(electric charge)。物理学中规定,用丝绸摩擦过的玻璃棒所带的电荷,叫做**正电荷**(positive charge);用毛皮摩擦过的橡胶棒所带的电荷,叫做**负电荷**(negative charge)。

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

在初中物理中,我们已经知道,同种电荷相互排斥,异种电荷相互吸引。

参照图 1-4 进行实验,验证同种电荷相互排斥,异种电荷相



a　　b　　c

图 1-4　同种电荷相互排斥,异种电荷相互吸引



图 1-5　用验电器检验物体是否带电

互吸引。

物体是否带电，我们可以用验电器(electroscope)进行检验(图 1-5)。验电器的金属球通过金属杆跟可转动的金属指针相连。当带电的玻璃棒或橡胶棒接触金属球时，指针就会转过一定角度。

你能用电荷间相互作用的知识，解释验电器金属指针偏转的原因吗？

实验探究 2　感应起电

在用验电器检验玻璃棒或橡胶棒是否带电的实验中，你是否发现，只要带电物体靠近金属球，而并未跟金属球接触时，指针就会发生偏转(图 1-6)。这是怎么回事？

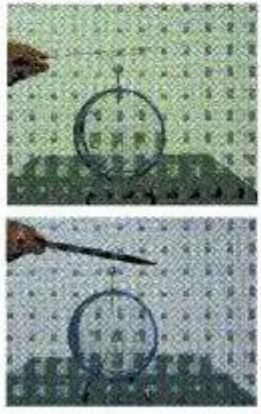


图 1-6　静电感应

请你做一做这个实验，推测验电器指针偏转的原因。

实验表明，一个带电的物体靠近另一个绝缘导体时，导体的电荷分布发生明显的变化。物理学中把这种现象叫做**静电感应**(electrostatic induction)。

在进行图 1-6 所示的实验过程中，当验电器指针发生偏转时，用手接触一下验电器的金属球，然后再移走带电棒。观察验电器的指针是否仍然偏转。如果仍然偏转，验电器上带什么电？为什么？

请思考一下：验电器感应后，指针上的电荷是从哪里来的？

电荷守恒

物质的电结构

在初中物理中我们已经知道，物质是由分子、原子组成的，原

周南物理段石岸

子由带正电的原子核和带负电的电子组成，原子核由带正电的质子和不带电的中子组成(图 1-7)。

物体内部存在带负电的电子和带正电的质子，是物体带电的内在原因。在正常情况下，物体中电子的总数跟质子的总数是相等的，而一个质子和一个电子所带的电荷量又相等，因此物体对外界不显电性。但是，如果物体受到某种外部的影响，它就可能得到或失去一定数量的电子，呈现出电性。

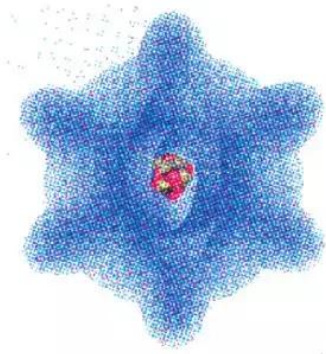


图 1-7　氟-19 原子模型

电荷守恒

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

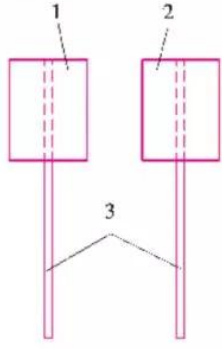
近代科学研究表明，电荷守恒定律不仅在一切宏观过程中成立，在微观过程中也成立。因此，电荷守恒定律是物理学中普遍适用的规律。

验证电荷守恒

参照图 1-8 进行实验。手持起电板柄，用力将两块起电板快速摩擦后分开，将其中一块板插入箔片验电器上端的空心金属球(不要接触金属球)，接着抽出这块板，再将两块板同时插入空心金属球。在这一系列的实验过程中，你观察到了哪些现象？

箔片验电器通常是在金属导杆下贴一条或挂两条金属箔片，其原理与指针验电器相同。

请你解释实验中所发生的现象。这个实验能证明电荷守恒吗？为什么？



1—有机玻璃板　2—塑料板
3—有机玻璃棒

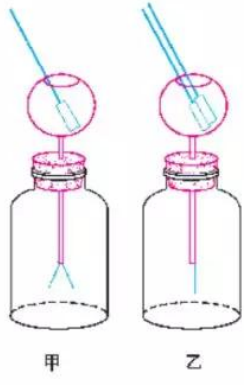


图 1-8　验证电荷守恒

元电荷

自然界中电荷的总量是守恒的。原子核中的每个质子和核

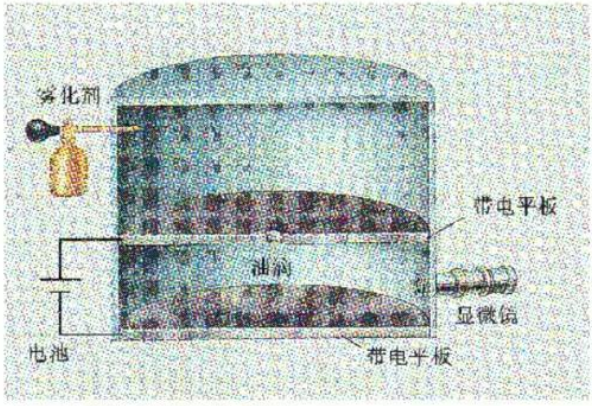


图 1-9　密立根油滴实验示意图

电子的电荷量 e 跟电子的质量 m_e 之比，叫做电子的比荷。它是一个重要的物理常量。电子的质量 $m_e = 9.1\times10^{-31}$ kg，因此，电子的比荷为

$$\frac{e}{m_e} = 1.76\times10^{11}\ \mathrm{C/kg}$$

外每个电子所带的电荷量有多少呢？它们是不是自然界中最小的电荷单元呢？

美国实验物理学家密立根(R. A. Millikan)为了探究这些问题，设计了如图 1-9 所示的实验。两块金属板上下放置，给它们加上电压，两板便带上异种电荷。然后在两板间喷入雾状带电油滴，调节两板间电压，使带电油滴上受到的电力与重力平衡。由此，就可以求出油滴所带的电荷量。密立根不断改进实验方法，取得了上千组测量数据，发现这些雾状油滴所带电荷量总是某一个元电荷(elementary charge)的整数倍。这个“元电荷”就是电子的电荷，一般用 e 表示。

1986 年国际计量大会推荐的元电荷值为 $e = 1.60217733\times10^{-19}$ C，通常取 $e = 1.6\times10^{-19}$ C。其中 C 是量度电荷的单位库仑(coulomb)，简称库。把两个等量的电荷放在相距 1m 的地方，若它们之间的作用力是 9.0×10^{9} N，那么，这两个电荷分别所带的电荷量就是 1C。

案例分析

案例　应用物质电结构的特征和电荷守恒定律，解释摩擦起电和感应起电的原因，比较它们的异同。

分析　两个不同质料的物体相互摩擦后分别带电，是因为摩擦使两个物体中都有一些电子脱离原子核的束缚而转移到对方。

通常情况下，不同质料的物体彼此向对方转移的电子数目不相等，因此，一个物体失去的电子多，得到的电子少，就显示出带正电；而另一个物体得到的电子多，失去的电子少，就显示出带负电。

请你解释感应起电的原因，并与同学交流，同时说说这两种起电过程的异同。

信息浏览　电荷量子化与元电荷

密立根的油滴实验，证明了微小粒子的带电量不是连续变化的，电荷量总是某个元电荷的整数倍，电荷量遵循量子变化规律。1964 年，盖尔曼（M. Gell-Mann）等人提出的夸克模型认为，质子和中子等，分别由具有 $-\frac{1}{3}e$ 和 $\frac{2}{3}e$ 的**夸克**（quark）组成，这表明，电荷可以是 e 的 $\frac{1}{3}$ 或 $\frac{2}{3}$ 的倍数，这里电荷量仍是量子化的。元电荷的精确测定，在理论和实践上都有重要意义。密立根在元电荷的测量和光电效应的研究上做出了杰出的贡献，因而荣获 1923 年的诺贝尔物理学奖。

现代物理研究发现，除了通常带负电的电子外，自然界还存在着带正电的电子，这种带正电的电子被叫做**正电子**（positron）。当一个正电子和一个负电子在一定的条件下互相靠近时，会发生“湮灭”，同时产生两个或三个不带电的光子。而当一个高能光子与一个原子核相碰时，又会产生一对正负电子。这就是说，在微观过程中，正负电子总是成对产生或成对“湮灭”，系统中电荷的总量不会改变。

家庭作业与活动

1. 当你发现某一个静电现象用你所学的知识无法解释时，你打算怎么办？若现有的知识与理论均无法作出解释时，你又打算怎么办？
2. 请你列举一些日常生活中摩擦和感应两种起电现象的事例。
3. 摩擦玻璃棒和橡胶棒均能起电，但是用验电器检验却发现摩擦后的金属棒不带电。你能解释这种现象吗？怎样才能使摩擦后的金属棒带电？
4. 算一算，多少个电子所带的电荷量之和是 1C。
5. A、B、C、D 四个球都带电，A 球能排斥 B 球，C 球能吸引 A 球，D 球又排斥 C 球。已知 D 球带正电，则 B 球应带何种性质的电？

1.2 探究电荷相互作用规律

决定电荷相互作用的因素

实验探究

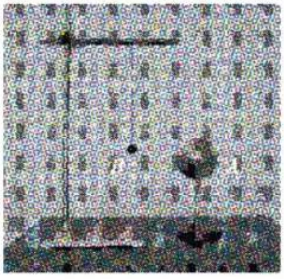


图 1-10 探究电荷相互作用规律的实验装置

电荷相互作用力的大小跟哪些因素有关？请你参照图 1-10 所示装置，按以下步骤进行实验：

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

(2) 不断给球形导体 A 增加电荷量，观察摆线偏角 θ 的变化。

(3) 保持球形导体 A 和通草球 B 上的电荷量不变，改变球形导体 A 与通草球 B 之间的距离，观察摆线偏角 θ 的变化。

请你观察现象，通过分析得出结论。

电学中第一个定律——库仑定律

在很早的时候，人类就发现了电现象。我国西汉末年的《春秋纬·考异邮》就记载了摩擦后的玳瑁甲壳能吸引轻的小物体；古希腊的泰勒斯(Thales of Miletus)也发现摩擦过的琥珀能吸引羽毛、头发等轻小物体。发现电现象后 2000 多年中，人们对电的认识一直处于定性的水平上。

为什么直到 18 世纪中叶，人们才开始对电荷之间的相互作用规律进行定量研究呢？这是因为，在此之前，社会生产力的发展还没有提出应用电力的需要；同时，人们对电的规律的研究没有较精密的测量仪器。

定量研究的困难

18 世纪中叶以前，研究带电体之间的“电力”遇到三大困难：一是这种“电力”非常小，没有测量这样小的力的工具；二是当时

还没有量度电荷量的单位；三是任意带电体上的电荷分布难以确定，因而无法确定相互作用的电荷之间的距离。

请思考一下，你有什么好的方法来解决这些困难？

库仑的探究

法国物理学家库仑巧妙地解决了这些困难。

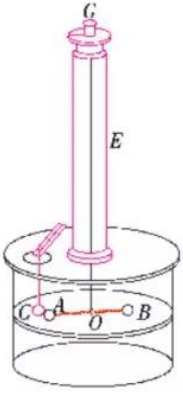


库仑（C. Coulomb，1736—1806），法国军事工程师、物理学家、科学院院士。他从事摩擦力和电磁力的研究，设计制作库仑扭秤并发现库仑定律。

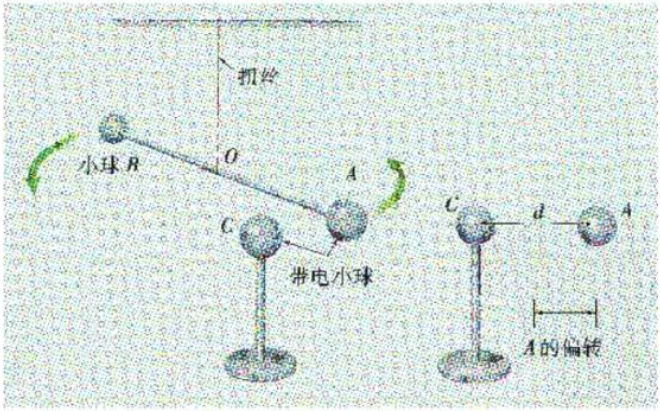
为测量微小的电力，库仑发明了一种扭秤，后人将这种扭秤称之为库仑扭秤。1785 年，他在论文《电力定律》中写道："这种扭秤能非常准确地测量物体上的电力，即使它仅带少量的电。"

库仑扭秤的结构如图 1-11a 所示。AB 是两端带有同样重量的小金属球的质量均匀绝缘棒。固定装置 E 中有一根弹性扭丝（细的金属丝、石英玻璃丝等）拴在 AB 的中点 O，使 AB 水平地悬挂在 E 顶端的一个旋转螺丝 G 上。C 也是一根绝缘棒，其下端装有小金属球。当弹性扭丝处于自然状态时，调节螺丝 G，使 A 与 C 接触。接着给 C 加上电荷，因 A、C 之间的斥力，使 AB 转动。当 A、C 间的斥力产生的转动力矩与扭丝阻碍绝缘棒 AB 转动的力矩达到平衡时，AB 就静止在某一角度上。根据这一角度，便可测出带电小球间的斥力。

为控制带电体的电荷量，库仑利用了电荷在两个相同金属球之间等量分配的原理：取两个相同的金属球，让其中一个带上电荷 q，另一个不带电，把它们接触后分开，于是这两个金属球便分别带上了等量的电荷 $q/2$。若再用第三个相同的金属球与带电荷 $q/2$ 的金属球接触，然后分开，这两个金属球就分别带上了等量的



a 库仑扭秤结构示意图



b 库仑扭秤原理图

图 1-11

电荷 $q/4$，依此类推。这样，就可保证实验中金属球的电荷量成倍变化。

库仑又根据电荷在金属球表面上均匀分布的特点，把金属球上的电荷想像成集中在球心的"点电荷"。这样就解决了测量带电体之间距离的问题。

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

库仑当时得到的一组数据

A、C 两球距离	距离比	扭秤转角/度	转角比
36 个刻度	1	36°	1
18 个刻度	1/2	144°	4
8.5 个刻度	1/4	575.5°	16

注：第 3 组数据略有偏差，库仑分析是因为漏电所致

库仑定律

1785 年，在前人研究的基础上，库仑通过实验得出结论：**真空中两个静止的点电荷之间相互作用力的大小，跟它们的电荷量 q_1 与 q_2 的乘积成正比，跟它们的距离 r 的平方成反比，作用力的方向沿着它们的连线。**这就是**库仑定律**(Coulomb's law)，它的数学表达式为

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

式中 k 是一个常量，叫做静电力常量。这种电荷间的相互作用力叫做**库仑力**或**静电力**。在国际单位制中，电荷量的单位是 C，力的单位是 N，距离的单位是 m，则由实验可得出

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

电场

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

——爱因斯坦

库仑定律揭示了电荷间的相互作用规律，电荷间的相互作用力是靠什么传递的呢？

原来，电荷的周围存在着电场，电荷间的相互作用是通过电场发生的。

物理学中把电荷周围客观存在的物质叫做**电场**(electric field)。把放入电场中的电荷所受到的力叫做**电场力**(electric field force)。

信息浏览

早在万有引力定律发现之后，引力作用靠什么传递这一问题就一直困扰着人们。牛顿时代的人认为，引力作用和电荷相互作用可以不需要任何中介，也不需要花时间，就能够由一个物体传递到另一个物体，这就是所谓“超距作用”的观点。

现代物理学的研究表明，引力作用和电荷相互作用是通过“场”来传递的。场是物质存在的另一种形态，甚至可以脱离实物、电荷、电流存在。常见的场包括电场、磁场、引力场（在地球附近称为重力场）、强相互作用场和弱相互作用场等。物体间的相互作用通过场以 3×10^8 m/s 的速度传递。

根据相对论，场与实物一样，也具有质量、能量和动量等，也能够对处于其中的物体产生作用力、压强等。一般场的密度很小，大约为 10^{-23} kg/m^3。光是电磁场，太阳光每秒照射在每平方米地球表面上的能量约为 1.35×10^3 J，对地球上物体产生的光压约为 10^{-6} Pa。

案例分析 1

案例　已知氢原子核的质量为 1.7×10^{-27} kg，电子的质量为 9.1×10^{-31} kg，核外电子与氢原子核间的距离为 0.53×10^{-10} m。试求氢原子核与核外电子间的库仑力、万有引力和电子绕氢原子核做匀速圆周运动的线速度。

请你依据库仑定律和万有引力定律的公式，分别计算库仑力和万有引力，并比较这两种力在数量级上相差多少。（这两种力在计算公式上十分相似，你认为它们之间是否有什么联系？）再根据匀速圆周运动的向心力公式计算出电子绕氢原子核运动的线速度。

案例分析 2

案例　在图 1–12 中，A、B、C 是三个相同的绝缘金属小球，其中 A、B 不带电，C 带有 4.4×10^{-9} C 的电荷。先使 A 与 C 接触，再使 B 与 C 接触。求分开之后各小球的带电量。

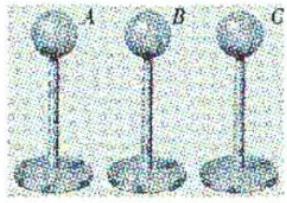


图 1–12

分析　因为三个小球相同，故两球接触再分开之后，电荷被两个小球平分。根据电荷守恒定律，三个小球电荷量之和与接触前 C 球所带电荷量相等，因而分开之后各小球的带电量分别是 $q_A=2.2\times10^{-9}$ C，$q_B=q_C=1.1\times10^{-9}$ C。

现设 C 球的带电量不变，B 球不带电，而 A 球带有 1.4×10^{-9} C 的负电荷。若使 C 先与 A 接触后分开，再与 B 接触后分开，则各小球的带电量是多少？

多学一点　电介质中的库仑定律

电介质就是绝缘体。空气、煤油、玻璃、橡胶、瓷器等都是电介质。如果把两个点电荷放在电介质中，电荷间的静电力将比在真空中小，而且放在不同的电介质中，力的大小也不同。在电介质中，库仑定律的表达式为

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

其中 ε 叫做介电常数。同一种电介质的 ε 是固定的。下表是几种电介质的介电常数。

电介质	空气	煤油	石蜡	陶瓷	玻璃	云母	水
介电常数	1.0005	2	2.02	6	4—11	6—8	81

信息科技　关于库仑定律的研究历史

在库仑定律发现之前，曾有科学家猜想电荷相互作用力类似于万有引力，甚至用各种实验相当准确地得出了电荷相互作用力与电荷之间距离的平方成反比的关系。

1769年，英国医生约翰·鲁宾孙(J. Robinson)首次用实验确定两种电荷的斥力与它们之间距离的2.06次方成反比，但这一结果很晚才发表出来。

1772年，英国物理学家卡文迪许(H. Cavendish)通过巧妙的实验，结合理论分析，给出了电力反比于距离的$\left(2\pm\frac{1}{50}\right)$次方的报告(未公布于世)。

后来，英国物理学家麦克斯韦(J. C. Maxwell)也用与卡文迪许类似的方法，得出了电力反比于距离的$\left(2\pm\frac{1}{21600}\right)$次方的结果。

库仑定律是电学的基本规律，其中的二次方反比关系是否精确地成立至关重要。库仑定律发表以后，科学家们用越来越精确的实验来验证这个二次方反比关系。1971年进行的一次实验，所得结果与二次方反比关系的偏差小于2.7×10^{-16}。可见，当年库仑设计的扭秤，其测量的精确度是很高的。

课题研究

验证电荷的分配规律

给你一只指针验电器、一台感应起电机(参见第22页旁批)和两个带有绝缘柄的大小相同的金属球，请你设计一个实验，粗略验证电荷在两个相同金属球之间等量分配的原理。

(1) 说明实验原理，写出实验步骤。

(2) 按实验步骤操作，并写出实验报告。

家庭作业与活动

1. 卢瑟福(E. Rutherford)在 α 粒子(氦核)散射实验中发现，当两个原子核之间距离小到 10^{-15} m 时，它们之间的斥力仍遵守库仑定律。只有足够高能量的 α 粒子能够到达与金原子核相距 2.0×10^{-14} m 的地方。请你算一算，在这一距离时 α 粒子受到金原子核的斥力为多大？此力相当于质量多大的物体受到的重力？在原子尺度内电荷相互作用力是强还是弱？
2. 现有两个质量都为 1.0×10^{-3} kg 的相同的金属球，分别带有 2.0×10^{-7} C 和 -3.2×10^{-7} C 的电荷：
   (1) 把它们放在相隔 0.5m 的地方，这时两者之间的作用力有哪些？合力有多大？

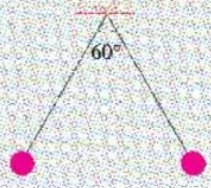


图 1-13

   (2) 使两球接触后再使它们相距 0.5m，这时两者之间作用力的合力有多大？方向如何？
3. 两个质量都为 3.0×10^{-1} kg 的导体球，分别被两根长 0.04 m 的丝线吊在同一点上。让它们带上等量同号的电荷后，两球互相排斥，至图 1-13 所示的位置平衡。试求两球间静电力的大小和导体球所带的电荷量。
4. 两个小球各带电 $q=2.0\times10^{-7}$ C，它们可以在图 1-14 所示的绝缘棒上无摩擦地自由滑动。若两个小球的质量都是 1.0×10^{-4} kg，试确定它们的平衡位置及棒对它们的作用力。

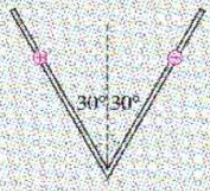


图 1-14

1.3 静电与生活

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

静电给我们的工作带来了什么影响？我们应如何“趋其利，避其害”呢？



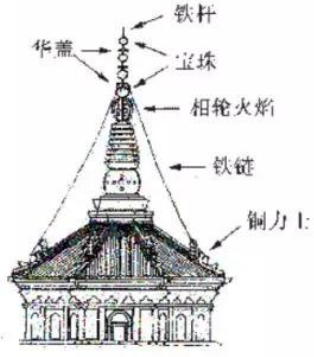
图 1-15 自然界中的雷电

雷电与避雷

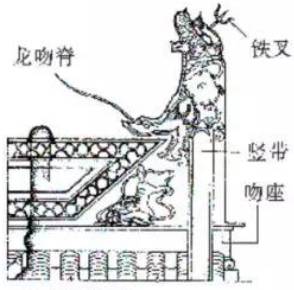
自然界产生雷电（图 1-15），主要是由于云层的相互摩擦。摩擦导致了云层间异种电荷大量集聚。靠近地面的云层中电荷的大量集聚，会使地面因静电感应而引起电荷集聚。云层之间、云层与地面之间会形成几百万伏以上的电压。这个电压足以击穿空气（使空气电离），产生几十万安培的瞬间电流。电流生热使空气发光，叫做闪电；空气受热突然膨胀发出巨响，叫做雷声。

云层与地面之间的雷电会对我们的生命财产产生威胁，甚至带来巨大的损失。那么，如何避免它的危害呢？

我国大约从汉代起，人们就注意到长兵器尖端在大气中的放电现象。古代人们利用这种现象，在许多建筑物上安装了既有避雷作用，又有装饰作用的塔刹构件和殿脊吻兽（图 1-16），这就是现代避雷针（lightning rod）的雏形。现代建筑上的避雷针如图 1-17 所示。



a 庆州白塔塔刹构件



b 殿脊吻兽

图 1-16 古建筑上的避雷针

实验探究 避雷针为什么能避雷

用如图 1-18 所示的感应圈，可以观察“实验室中的雷电现象”，也可以帮助我们理解避雷针为什么能避雷。将两枚放电针分别安装在感应圈的接线柱上，然后将低压电源的 8—10 V 直流电接在感应圈上，闭合开关，适当调节感应圈上振动簧片的位置（有些感应圈会自动完成这一操作），就可以观察到火花放电的现象。

请将放电火花图景与雷电时看到的闪电图景进行比较，看看是否相似。

放电针击穿了哪一部分空气形成了放电火花？试用这一结果说明避雷针的原理。

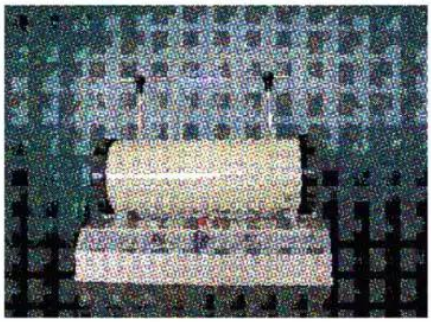


图 1-18　火花放电现象

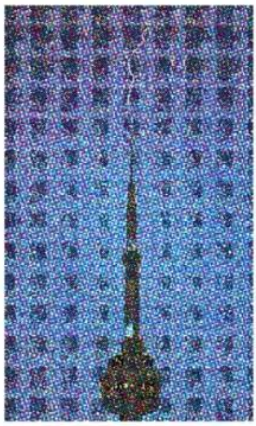


图 1-17　现代建筑上的避雷针

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

人体上的静电

通常情况下，每个人身上都带有一些静电。在干燥的冬天，差不多每个人的身体上因为有静电而形成人与地之间的电压，这个

信息浏览　人体带有1~12kV静电电压时的感觉

人体带静电电压/kV	身体感觉程度	其他现象
1.0	完全无感觉	
2.0	在手指外部有感觉，但不痛	有轻微响声
2.5	放电部分有针触感，发痒但不痛	
3.0	感觉刺痛	
3.5	有针扎的感觉	
4.0	手指内部感到疼痛	看见放电火花
4.5	感觉用针刺扎般的痛	
5.0	手指至前臂区感到电击痛	从手指放电发光
6.0	手指内感觉到疼痛，后臂感到严重电击	
7.0	手指、手掌强烈疼痛，感觉麻木	
8.0	手掌乃至前臂感觉麻木	
9.0	手臂强烈疼痛，手麻木沉重	
10.0	整个手疼痛并感觉到电的流动	
11.0	手指强烈麻木，整个手感觉强烈电击	
12.0	回强烈电击，整个手感受到痛击	

电压甚至达到数千伏。不过人体所带的静电电荷量很小，即使全部释放给大地，静电也不会对人体产生多大的影响。例如，晚上熄灯后，我们脱腈纶或混纺毛衣时，常能在黑暗中看到明亮的火花，甚至听到轻微的响声，但身体却并没有受到伤害。

静电与现代科技

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

用静电净化空气

图 1–19 是电子空气净化器的基本工作原理示意图。电子空气净化器利用风扇将空气送入机内。空气流经正负电极间时，首先经过带正电的网格，这时带负电的烟尘等微粒被吸附在其上。接着，空气又通过带负电的网格，这时带正电的烟尘等微粒被吸附在其上。最后，活性炭过滤器再将空气中的剩余尘粒过滤一遍，把洁净的空气送入室内。

静电提高喷洒农药效果

喷洒农药的飞机上安装有静电喷嘴。静电喷嘴内装有一根带正电的针，喷洒过程中农药水珠离开喷嘴时会带有大量正电荷。由于与大地相连的农作物的叶子一般都带负电，带正电的农药水珠喷洒到农作物上时，就被吸附在叶子上，不会被风吹走。如图 1–20 所示。

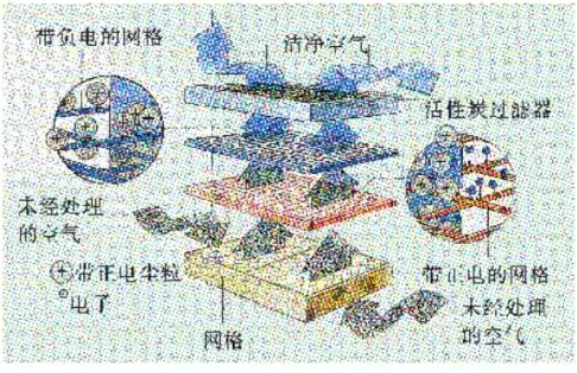


图 1–19　电子空气净化器工作原理示意图

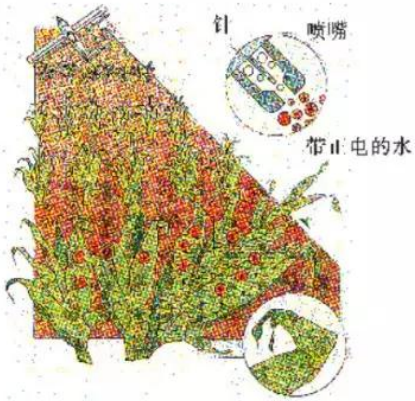


图 1–20　利用静电喷洒农药示意图

静电植绒和静电复印

实验探究　静电植绒

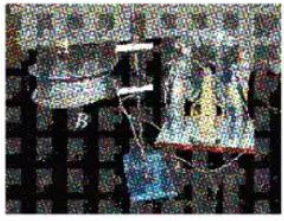


图 1-21　静电植绒实验装置

参照图 1-21 所示的装置准备器材，进行安装，然后进行如下模拟静电植绒的操作：

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

2. 将各种颜色的细碎纸屑均匀撒在金属圆板 B 上，调整两块金属板之间的距离，使之为 4—5 cm。

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

请交流各自的“静电植绒”字或画，看看谁的字或画漂亮。

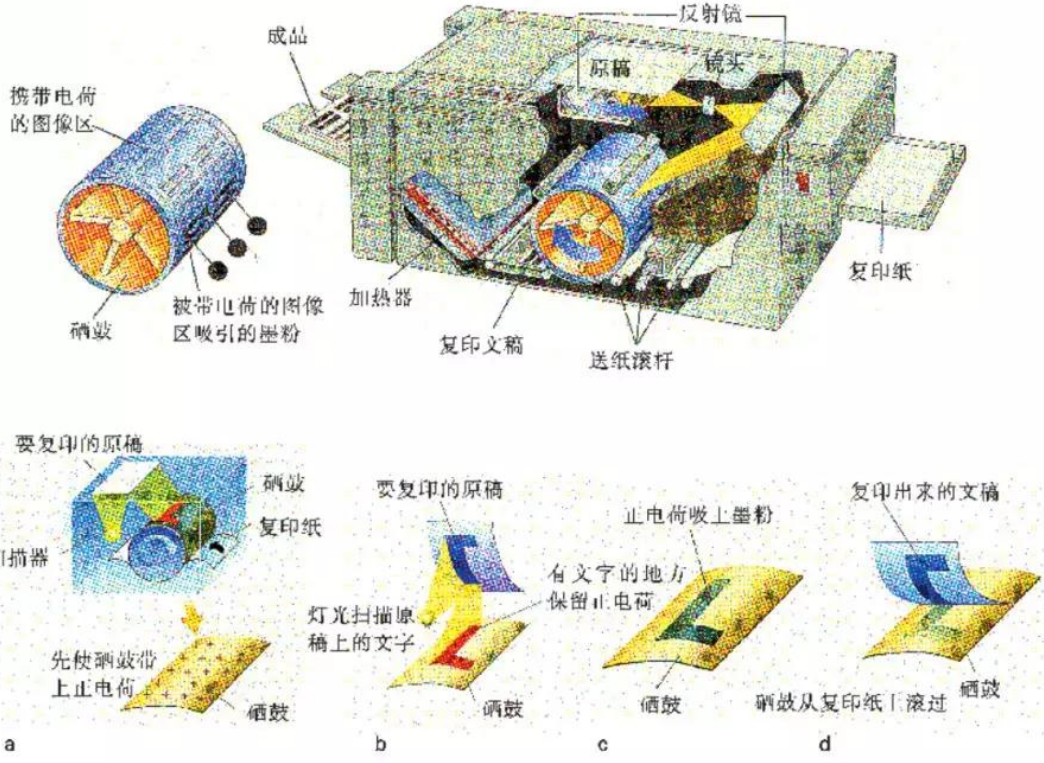


图 1-22　静电复印机结构及工作过程图解

感应起电机是利用静电感应，使两个莱顿瓶（参阅第2章信息浏览）不断聚集电荷，从而在两放电球之间形成极高的电压。把两块金属圆板分别接在两个放电球上，两块金属板就分别带上异号的电荷。

静电复印机的使用已很普遍。它的基本工作原理是：激光扫描原稿上的文字或图案，经反射，聚焦在携带静电的硒鼓上。激光扫描到原稿上的空白处，硒鼓上相应部位的静电荷就被消除，留在硒鼓上的静电荷就形成了原稿的文字或图案。墨粉被硒鼓上的静电吸引，被转移到复印纸上并被加热固定，复印纸上就出现了原稿上的文字或图案。图 1–22 用图解的方式展示了这一过程。

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

请你在课后上网收集有关静电应用方面的资料并与同学开展交流。

静电的危害及控制

无论是在日常生活和工农业生产中，还是在科学实验中，随时都可能发生因静电而引起的危害。下表列出了一些静电造成的危害。

静电力的不良后果	静电火花引起的危害
• 电视机的荧屏表面容易吸附灰尘，使图像的清晰度和亮度下降。 • 混纺衣服上常出现不易拍掉的灰尘。 • 印刷厂里，纸页之间因静电而粘合，给印刷带来不便。 • 制药厂里，因静电吸引尘埃，使药品达不到标准纯度。	• 医院手术台上，静电火花会引起麻醉剂爆炸。 • 煤矿里，静电火花会引起瓦斯爆炸。 • 在航天工业里，静电放电会干扰航天器的运行，甚至会造成火箭和卫星的发射失败。 • 在石化工业里，因静电放电引起的事故屡见不鲜。

当人们认识到静电危害的起因后，各种防止静电危害的措施便应运而生。

例如，在工业生产中，改造起电强烈的工艺环节，采用起电较少的设备和抗静电材料；用导线将设备接地，把电荷导入大地；适当增加工作环境的湿度以让静电随时释放等。图 1–23 所示是一些抗静电材料，图 1–24 所示是飞机加油时，飞机与加油车之间安装的接地装置。

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

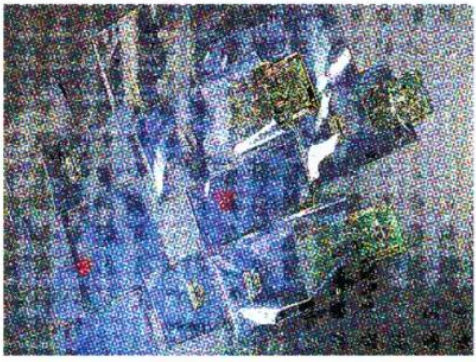


图 1-23　抗静电材料



图 1-24　飞机加油

信息浏览　奇怪的马特利现象

在沙特阿拉伯腹地的卷边岩村，居住着牧羊人拉西德·马特利一家。1986 年开斋节的一天中午，他家的一间毛毯房突然失火，火被妻子和女儿及时扑灭。第二天，一间内室又突然起火。地方政府派人调查，未找到起火原因，只是建议他搬家。于是他迁到离哈迪岩村 30 km 的哈斯遥，在那里支起了两座帐篷。不料有一天，妻子、女儿居住的帐篷又起火了，而且他放在汽车里的一件羊皮衣服也无缘无故地自燃起来。马特利家中的怪事引起了科学界的重视，人们把这种无名火叫做马特利现象。

目前科学界对此问题的猜想很多，其中得到较多人认同的是：干燥的冬天，差不多每个人的身体与地之间的电压都要上升到几千伏，在 10 万人中就会有一个人的皮肤特别干燥，因此，他身体与大地之间的电压就特别高，甚至可以达到几万伏。具有这种特征的人是十分危险的，如果放电火花遇到空气中的易燃气体，就会引发火灾。

马特利现象的原因是否与人体静电有关？你的猜想是什么呢？

家庭作业与活动

1. 调查你身边发生的静电现象，分析产生的原因。
2. 分析保鲜膜使用过程中的静电现象。
3. 请你上网或去图书馆收集关于防止雷电危害的资料，写一篇科普报告。

1.x

第 1 章家庭作业与活动

A组

1. 打开自来水龙头，慢慢调节它，使水流变得很细，再用摩擦过的塑料棒靠近细水流，你发现了什么？解释你所观察到的现象。
2. 用毛皮摩擦过的橡胶棒靠近用绝缘细线悬挂的软木球，请按照图 1-25 所示的装置做一做，你发现了哪些现象？用学过的知识解释这些现象。

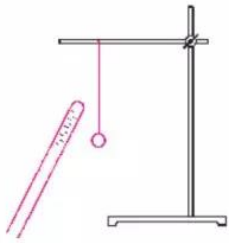


图 1-25

3. 请你尽可能多地找一些不同材料的物体，如塑料片、纸板、玻璃、毛线、腈纶丝、石蜡、铅笔杆等，分别让它们相互摩擦，比较这些物体得失电子的难易程度。
4. 有同学设计了一个验证库仑定律的实验：让两个软木球带电，用绝缘丝线将其中一个球悬挂起来，另一个球装在绝缘柄上，使它们处在同一水平高度上，保持某一水平距离，如图 1-26 所示。这时，只要测出悬挂球偏离竖直方向上的角度 θ，就能算出库仑力。他认为：①保持两球带电量 q_1、q_2 不变，改变它们之间的水平距离 r；②保持两球水平距离不变，改变两球的带电量 q_1、q_2。只要收集这两个实验的数据，就可以验证库仑定律。

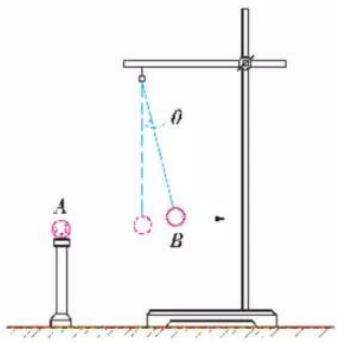


图 1-26

(1) 请你利用测出的角度 θ，根据共点力的平衡条件，推导库仑力和 θ 角之间的关系式。

(2) 怎样让两个软木球带上等量同种电荷？又怎样改变它们的电荷量？

(3) 怎样测量两球之间的水平距离？为什么要这样测量？

5. 电子的电荷量是 1.6×10^{-19} C，质量是 9.0×10^{-31} kg，设万有引力常量 G 为 6.7×10^{-11} N·m^2/kg^2。

(1) 相隔 1×10^{-12} m 的两个电子间的库仑力多大？

(2) 上述情形中的万有引力多大？

(3) 库仑力和万有引力之比是多少？

6. 你相信库仑力是靠电荷周围的电场来传递的吗？说说你相信或不相信的理由。
7. 某同学设计了一个证明电荷守恒的实验，实验装置如图 1-27 所示。实验步骤如下：

(1) 用一根金属杆连接两只相同的验电器，让带电的有机玻璃棒靠近金属杆的一端，两只验电器的箔片均张开，为什么？

(2) 在两只验电器的箔片均张开的情况下，先移走金属杆，再移走带电的有机玻璃棒，这时验电器的箔片是否保持张开状态？为什么？

(3) 再用金属杆连接两只验电器，将会出现什么现象？这个现象说明了什么？这个实验能

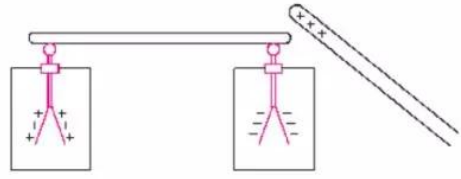


图 1-27

证明电荷守恒吗？为什么？

B组

下面是几个有趣的静电实验，请你动手做一做，体验一下做实验的乐趣和价值。

(1) 静电间歇喷泉

取一根尖嘴玻璃管（尖嘴内径 0.5—0.8 mm），管的另一端用橡皮管与自来水的龙头相连。玻璃管尖嘴口朝上，并固定在铁支架上，如图 1-28 所示。打开水龙头，使尖嘴喷射出高 15—20 cm 的喷泉，用带电的有机玻璃棒置于喷泉上方约 30 cm 处，你会观察到断续喷射的喷泉。想一想，出现这个现象的原因是什么？



图 1-28

(2) 自动蓬松的腈纶线

取一小团腈纶线，剪 40 根长为 80 cm 的线段，梳理整齐后，两端用粗铜丝扎紧，让腈纶线松松地悬于木架的两只羊眼圈上，如图 1-29a 所示。再用一枝铅笔按在线上，用力快速来回摩擦几下。移开铅笔后，你会观察到腈纶线向四周蓬松，呈做操状，如图 1-29b 所示。请你解释这个现象。若用沾少量水的脱脂棉在腈纶线上从左至右揩一下，再用铅笔重复摩擦，它们再也不会呈现做操状了，这又是什么原因？

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

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

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

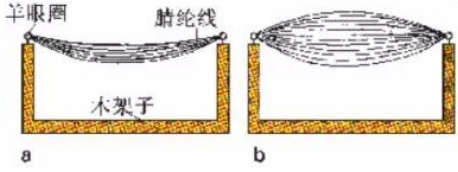
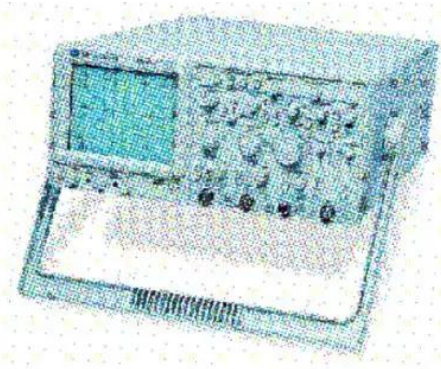


图 1-29



a J2459 型示波器



b 双踪示波器

图 2-1　示波器

第 2 章
电场与示波器

电子束由带负电的电子组成。

你知道示波器吗？示波器(oscilloscope)是把电信号转换成图像信号的仪器(图 2-1)，其基本原理是通过电场控制电子束的运动，电子束打在荧光屏上产生荧光，从而显示图像。

本章将以示波器为背景，先学习使用示波器，以研究示波管的原理为线索，研究电场的力和能的性质，然后分析示波管中电子束运动的规律。

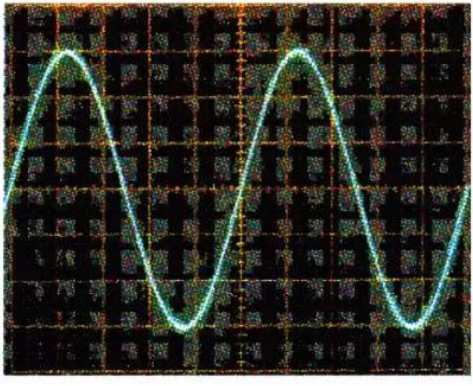


图 2-2　示波器上观察到的图像信号

2.1 认识和使用示波器

示波器是一种常用的电子仪器，如何正确地使用它呢？

熟悉示波器

要使用示波器，就必须熟悉示波器面板上各旋钮、开关的作用和调节方法。J2459 型示波器的面板如图 2-3 所示。

请参阅附录《J2459 型学生示波器面板控制说明》，了解示波器面板上各旋钮、开关的功能和使用方法。

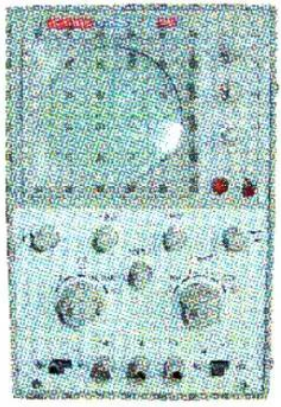


图 2-3 示波器面板

学习使用示波器

实验探究 观察亮斑的偏移

1. 调整示波器

在确认各旋钮在预定位置后，把扫描范围旋钮置于“外 X”挡。打开电源开关，预热后，调节有关旋钮，使荧光屏中央出现一个亮度适中、清晰的圆形亮斑（图 2-4）。

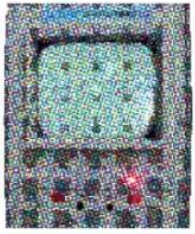


图 2-4 调整后的示波器

2. 观察竖直偏移

将交直流选择开关置于“DC”位置，把扫描范围旋钮置于“外 X”挡，按照图 2-5 和图 2-6 连接电路，闭合开关 S，逐步减小衰减挡或加大 Y 增益，观察亮斑在竖直方向的偏移情况。

固定某一恰当的衰减挡和 Y 增益，用变阻器调节“Y 输入”和“地”之间的电压，观察亮斑在竖直方向的偏移，讨论亮斑在竖直方向的偏移跟输入电压的关系。

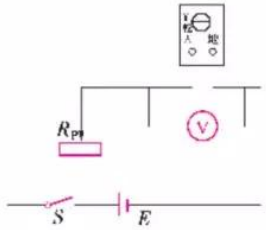


图 2-5 观察竖直偏移电路图

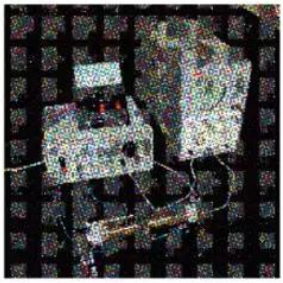


图 2-6　研究亮斑在竖直方向的偏移跟输入电压的关系

3. 观察水平偏移

把扫描范围旋钮置于“外 X”挡，参照图 2-5 连接电路，用变阻器调节“X 输入”和“地”之间的电压，观察亮斑在水平方向的偏移情况，讨论亮斑在水平方向的偏移跟输入电压的关系。

实验探究　用示波器测量直流电压

通过前面的实验，我们发现，“Y 输入”和“地”之间的电压越大，亮斑在竖直方向的偏移越大，偏移跟电压成正比。因此，可以用示波器来测量直流电压。

在选择开关置于“DC”位置的情况下，按照图 2-5 连接电路，调节变阻器，分别用示波器和电压表测量不同情况下“Y 输入”和“地”之间的电压，填入下表。

在“Y 增益”顺时针旋到底时，“Y 衰减”的挡位跟竖直方向每格电压值的对应关系如下：

“1”挡	0.05V/格
“10”挡	0.5V/格
“100”挡	5V/格
“1000”挡	50V/格

示波器格数		
示波器电压示数 / V		
电压表示数 / V		

示波器和电压表的示数一致吗？

完成作业与活动

1. 你在使用示波器的过程中，遇到了哪些困难？是怎样克服的？
2. 图 2-7 是改变示波器的输入电压的简图。请根据该图回答：(1)为了使屏上亮斑最圆最小，应调节　　两个旋钮。(2)为了使亮斑在屏上中央位置，应调节　　两个旋钮。(3)为了使输入电压变小，则应将滑动变阻器的滑片向　　移动。
3. 写出“用示波器测量直流电压”的实验报告。



图 2-7

附录

图 2-3 所示的是 J2459 型示波器的面板，图上标出编号的旋钮与开关的使用方法和功能如下：

“1”是电源开关。

“2”是辉度调节旋钮，用来调节图像的亮度；

“3”是聚焦调节旋钮，“4”是辅助聚焦调节旋钮。两个旋钮配合使用，用来调节图像的清晰程度。

“5”是指示灯。指示灯亮表示电源接通。

“6”是竖直位移旋钮，“7”是水平位移旋钮。它们分别用来调节图像在竖直方向和水平方向的位置。

“8”是 Y 增益旋钮，“9”是 X 增益旋钮。它们分别用来调节图像在竖直方向和水平方向的幅度。

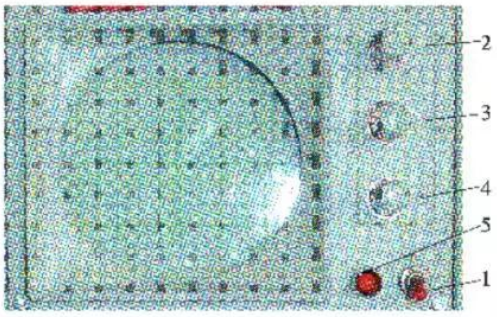


图 2-8 示波器局部面板

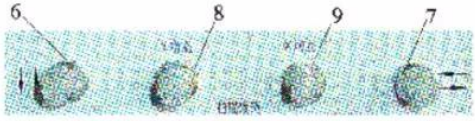


图 2-9 示波器局部面板

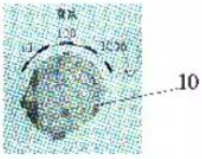


图 2-10 衰减调节旋钮

“10”是衰减调节旋钮。它与 Y 增益旋钮配合使用，用来调节由“Y 输入”和“地”两接线柱之间输入的竖直方向信号电压，从而控制图像在竖直方向的显示比例和幅度，以便观察图像的整体或局部情况。该旋钮有 1、10、100、1000 四挡，“1”挡不衰减，其余各挡可使图像在竖直方向的幅度依次为前一挡的十分之一。最右边的正弦符号“∿”挡不衰减，由机内自行提供竖直方向的按正弦规律变化的交流电压。

“11”是扫描范围旋钮，“12”是扫描微调旋钮。扫描范围旋钮用来初步选定机内提供的水平方向扫描电压的频率范围。频率范围分为四挡，左边第一挡为 10—100Hz，向右每升高一挡增加 10 倍。最右边的“外 X”挡表明机内不提供扫描电压，可在“X 输入”和“地”两接线柱之间输入水平方向的电压。扫描微调旋钮可在初定的频率范围内，为确定某一需要的扫描频率进行微小的调节，它可以连续调节。

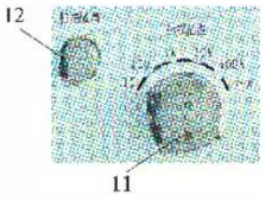


图 2-11 扫描调节旋钮

“13”是交直流选择开关。置于“DC”位置，“Y 输入”和“地”两接线柱之间信号电压直接输入；置于“AC”位置，“Y 输入”和“地”两接线柱之间只输入交流信号而隔断直流成分。

“14”是同步极性选择开关。

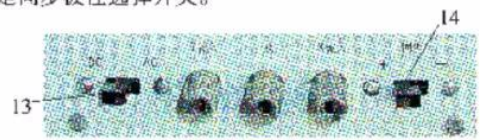


图 2-12 示波器局部面板

接通电源前，应该确认衰减调节旋钮在 1000 挡，竖直位移旋钮和水平位移旋钮旋到中间位置，Y 增益旋钮、X 增益旋钮、辉度调节旋钮沿逆时针旋到底。接通电源后预热一二分钟再开始调整示波器。

2.2

探究电场的力的性质

示波管与偏转电极

示波管是示波器的核心部件，它由电子枪、偏转电极和荧光屏组成，管内抽成真空，如图 2-13 所示。

在示波管工作过程中，通电灯丝发射出的电子在电子枪阴极和阳极间受电场力的作用被加速，形成电子束，进入偏转电极 YY'(图 2-13)。电子束在 YY' 中受到电场力的作用，发生偏转，打到荧光屏上形成亮斑。亮斑的偏转情况跟电子束在 YY' 两板间电场中受到的力有关(图 2-14)*。怎样描述电场的力的性质呢？

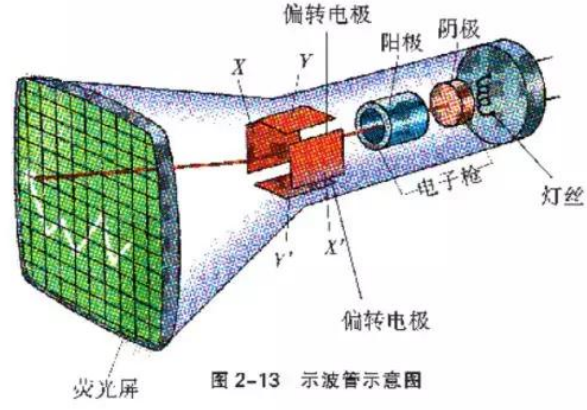


图 2-13　示波管示意图

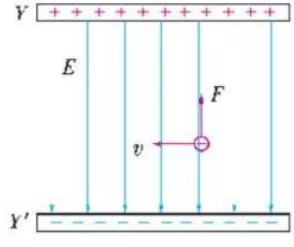


图 2-14　电荷偏转原理示意图

* 由于电子在竖直方向和水平方向偏移的原理是相同的，这里我们只研究电子的竖直偏移情况。

怎样描述电场

电场的定量描述

为了简单起见，我们首先研究点电荷产生的电场的力的性质。要考察电场的力的性质，就必须在电场中放入**试探电荷**(test charge)。但是，放入的试探电荷也要产生电场，会影响原来的电场。

为了使试探电荷产生的电场尽可能不影响原来电场的性质，你认为对放入的试探电荷应有什么要求？

分析论证

定量研究电场的力的性质可分为两步进行。

1. 如图 2-15 所示，把试探电荷 $+q$，分别放在点电荷 $+Q$ 产生的电场中的 A、B、C 各处($r_A = 3r_C$，$r_B = 2r_C$)，计算电场对 $+q$ 的电场力 F_A、F_B、F_C。

请比较 F_A、F_B、F_C 的大小，看看有什么规律。

2. 如图 2-16 所示，把试探电荷 $+q$、$+2q$、$+3q$ 分别放在点电荷 $+Q$ 产生的电场的同一位置，计算电场对它们的电场力 F_q、F_{2q}、F_{3q}。

请比较 F_q、F_{2q}、F_{3q} 的大小，看看有什么规律。

根据上述分析，在电场中确定的点，试探电荷受到的电场力的大小虽然跟其电荷量有关，但电场力 F 与试探电荷的电荷量 q 的比值 F/q 却是一个不变的量，它反映了电场的强弱，即电场的

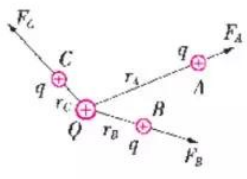


图 2-15 点电荷电场研究

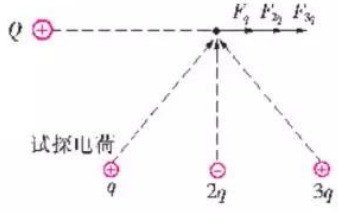


图 2-16 点电荷电场研究

力的性质。

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

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

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

电场强度是由电场本身决定的物理量，它与试探电荷置入电场与否无关。

电场强度的单位是牛顿/库仑，符号是 N/C，其物理意义是，如果 1C 的电荷在电场中某点受到的电场力是 1N，则该点的电场强度就是 1N/C。

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

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

$$F = qE$$

电场的形象描述

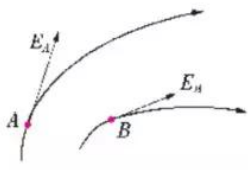
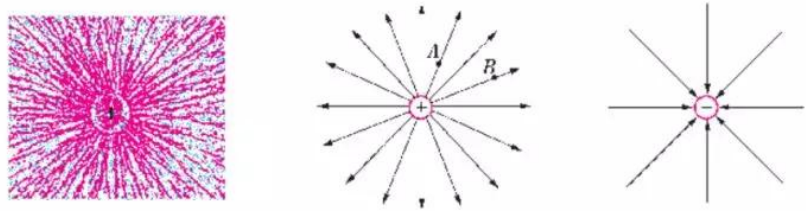


图 2-17　电场线与电场强度

在初中物理中，我们用磁感线来形象地描述磁场，并用细铁屑在磁场中的排列显示磁感线的分布情况。在研究电场时，我们也可以用电场线来形象地描述电场。**电场线**（electric field lines）就是在电场中画出的一些有方向的辅助曲线，在这些曲线上，每一点的切线方向都表示该点的电场强度方向（图 2-17）。

电场线的分布情况可用下面的方法显示：把奎宁的针状结晶或头发屑悬浮在蓖麻油里，加上电场，针状奎宁结晶或头发屑就按照场强的方向排列起来，这样就显示出电场线的分布情况（图 2-18a、图 2-19 和图 2-20）。

电场线的疏密程度可以描述空间各点场强的大小。电场线密



a 点电荷的电场线分布　　b 正电荷的电场线　　c 负电荷的电场线

图 2-18　点电荷的电场线分布情况

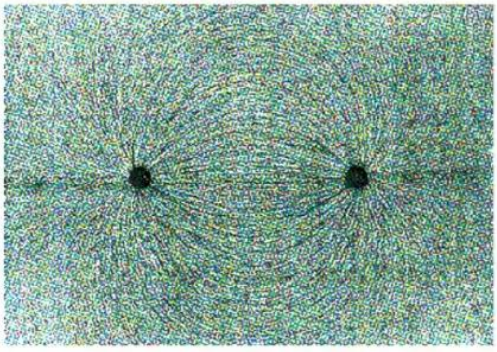


图 2-19 等量异号点电荷的电场线分布情况

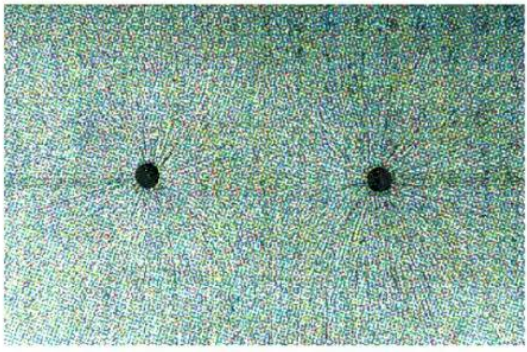


图 2-20 等量同号点电荷的电场线分布情况

的地方，场强大；电场线稀疏的地方，场强小。

图 2-21 显示的是两块靠近的、分别带有等量异号电荷的平行金属板的电场线分布。除边缘附近外，两板之间电场的电场线是距离相等的平行直线。这表明，该区域中场强的大小和方向都相同。

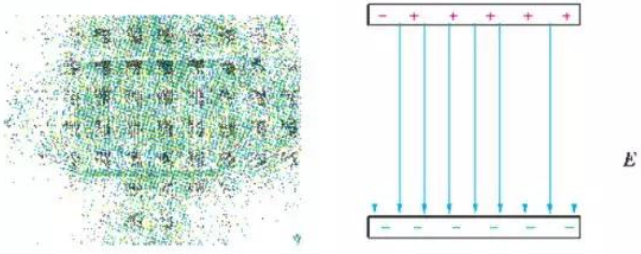


图 2-21 匀强电场

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

图 2-18b 中，电场中 A、B 两点，哪一点的场强大？哪一点的场强小？

请讨论：电场线是客观存在的吗？电场中任何两条电场线能否相交？电场线一定是带电粒子在电场中运动的轨迹吗？

电场的叠加原理

分析论证

如果用 E_1、E_2 分别表示点电荷 Q_1、Q_2 单独存在时某点的电场

强度，那么，Q_1、Q_2 同时存在时，该点的电场强度如何计算呢？

电场强度是矢量，应当运用平行四边形法则求 E_1 和 E_2 在该点的合场强。

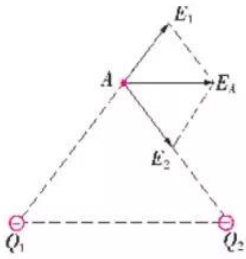


图 2-22

如图 2-22 所示，在真空中有两个点电荷 $Q_1 = +3.0 \times 10^{-8}$ C 和 $Q_2 = -3.0 \times 10^{-8}$ C，它们相距 0.1m，A 点与两个点电荷的距离均为 0.1m。怎样求 A 点的场强呢？

点电荷 Q_1 和 Q_2 在 A 点的场强分别为 E_1 和 E_2，大小相等，方向如图 2-22 所示。由平行四边形法则可知，E_A 在 E_1 和 E_2 夹角的平分线上，此平分线跟 Q_1 和 Q_2 的连线平行。

请计算 E_A 的大小。

如果你有兴趣的话，可以引入一个试探电荷 q，先求出试探电荷受到 Q_1、Q_2 的电场力，利用力的矢量合成方法，得出试探电荷受到的电场力的合力 F。再由场强公式 $E = F/q$，求出合场强 E_A。

请思考：对两个点电荷在某点的合场强，用怎样的方法求比较方便？

一般地，许多点电荷在某点的场强，等于各点电荷在该点场强的矢量和。这叫做电场的叠加原理。

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

探究电子束在偏转电极中的偏移

示波管偏转电极 YY' 实际上是两块靠近的、大小相等、互相正对的平行金属板。

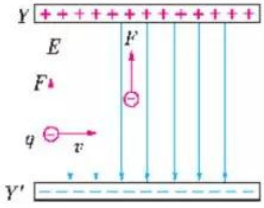


图 2-23

由于偏转电极的两块导体板靠得很近，可以认为，除了两板边缘外，电荷在表面中部均匀分布，电场线垂直于偏转板表面均匀分布。

偏转电极 YY' 两极间的电场是匀强电场，电子在两极间受到一个大小和方向都不变的电场力（图 2-23）。电子束进入偏转电极后是怎样运动的呢？下面用模拟实验进行探究。

实验探究　观察带电油滴在匀强电场中的偏移

如图 2-24 所示，两块金属板分别与起电机的正负极连接。在注射器中注入缝纫机油，用导线把注射器针头与负极金属板连接起来。摇动起电机后，推动注射器活塞，将机油水平射入两金属板

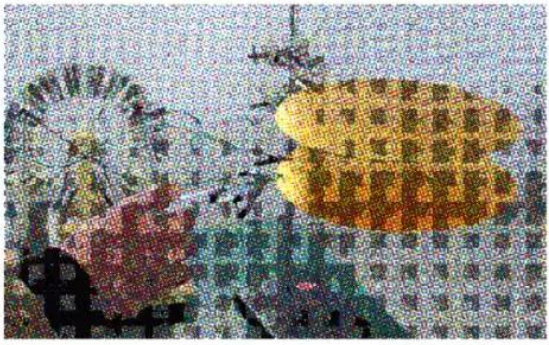


图 2-24 观察带电油滴在匀强电场中的偏移

之间的匀强电场，观察带电油滴的运动情况。

根据上述实验，描出图 2-23 中电子运动轨迹的大致图形。请思考：电子束在匀强电场中的运动跟力学中学过的什么运动相似？

多学一点 匀强电场中金属导体的电荷分布

一块处于匀强电场中的金属板在外电场 E 的作用下（图 2-25），上表面感应出负电荷，下表面感应出正电荷。感应出的电荷也要产生一个附加电场 E'。该导体实际上处于 E 和 E' 两个电场中。金属导体在完成电荷重新分布后，电荷就不再在导体内和表面移动，我们称这时的导体处于**静电平衡**(electrostatic equilibrium)状态。

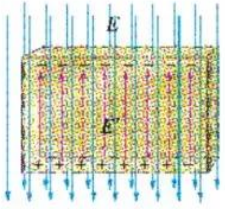


图 2-25 匀强电场中的金属导体

在静电平衡后，由于电荷不再在导体内部和表面移动，导体内部的电场强度一定为零，即 E 和 E' 的合场强为零。

同时，在导体表面附近，电场线一定垂直于导体表面。

因此，在静电平衡时，导体内部的电场强度处处为零，电荷只分布在导体的外表面。

请思考：如果导体内部某处有电荷，会出现什么情况？导体表面附近的电场线不垂直于导体表面，会出现什么情况？

课堂作业与previous

1. 地球的表面通常存在一竖直方向的电场。悬浮电荷的微粒在此电场中受到一个向上的力，电场强度的方向是竖直向上，还是竖直向下？
2. 氢原子中，电子和质子的平均距离是 5.3×10^{-11}m。质子在这个距离处产生的电场的场强多大？方向如何？电子受到的电场力多大？方向如何？
3. 下列关于电场线的说法中正确的是
   A. 电场线越密的地方，同一试探电荷受到的电场力就越大
   B. 电场线就是点电荷在电场中的运动轨迹
   C. 电场线弯曲的地方是非匀强电场，电场线为直线的地方是匀强电场
   D. 不存在两条平行的电场线
4. 两个固定的异号点电荷 q_1 和 q_2，电荷量绝对值大小不等，且 $q_1>q_2$。则 E_1 和 E_2 分别表示两个点电荷产生的电场强度的大小，则在通过两个点电荷的直线上，$E_1=E_2$ 的点
   A. 有一个，其中间处合场强为零
   B. 有三个，其中一处合场强为零
   C. 只有两个，其中一处合场强为零
   D. 只有一个，该处合场强不为零
5. 如图 2-26 所示，一光滑绝缘斜槽放在方向竖直向下、强度为 E 的匀强电场中，现从倾角为 α 的顶端 A 释放一初速度为 v_0 的小球，小球质量为 m，带负电，电荷量为 q。要使小球沿斜槽运动到达 B 点，电场强度 E 应满足的条件是 _____。

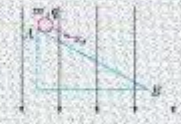


图 2-26

课题研究

研究带电空心金属球的电荷分布

在实验室完成下述实验（图 2-27）：将一只开口的空心金属球放在验电器 A 的导杆上，用与丝绸摩擦过的玻璃棒接触空心金属球，观察验电器 A 指针的情况。用绝缘小金属球与空心金属球内壁接触，再与验电器 B 的金属球接触（即把电荷转移到验电器 B 上）。反复操作几次，观察验电器 B 指针的情况，你发现了什么？请画出带电空心金属球的电场线分布情况。

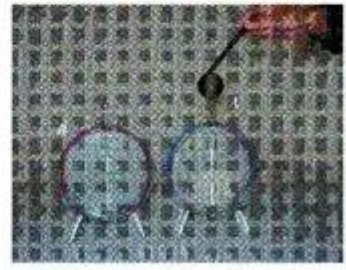


图 2-27　研究带电空心金属球的电荷分布

周南物理段石岸

2.3 研究电场的能的性质

研究电场做功的特点

分析论证

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

电子束中的电子在偏转电极受到电场力作用，发生位移，表明电场力对电子做了功。电场力对电荷做功有什么特点呢？

从前面的讨论中，我们发现，电荷在匀强电场中的运动与物体在重力作用下的运动相似（图 2-28、图 2-29）。

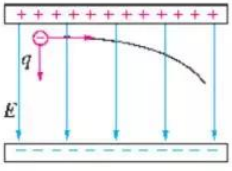


图 2-28　电荷在匀强电场中运动

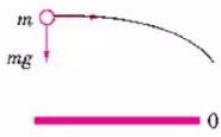


图 2-29　物体在重力作用下运动

我们知道，重力做功与路径无关，重力对物体做功的大小可以通过重力势能进行研究和计算。在匀强电场中，电场力对带电粒子做功也与路径无关吗？

我们以带电粒子 q 在匀强电场 E 中的运动为例，研究电场力对电荷做的功与路径的关系。如图 2-30 所示，带电粒子 q 在匀强电场 E 中分别沿路径 AB 和 ACB 由 A 点到 B 点，电场力做的功各为多少？

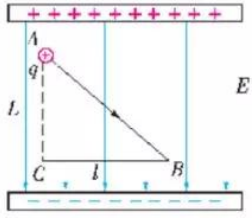


图 2-30　探究电场力对带电粒子做功的特点

1. 电荷 q 从 A 直接到 B，电场力对电荷 q 所做的功 W_1=____。

2. 电荷 q 从 A 沿 ACB 路径到 B，电场力对电荷 q 所做的功 W_2=_____。

比较 W_1 和 W_2，你可以得出什么结论？

可以证明，在任意静电场中，电场力对电荷所做的功跟移动电荷的路径无关。

研究电荷在电场中的功能关系

分析论证

既然重力对物体做功和电场力对电荷做功都与路径无关，我们就可以采用与引入重力势能相类似的方法，引入**电势能**(electric potential energy)的概念，来研究电场力对电荷做功跟电势能变化的关系。

请利用图 2-31，自行分析：电荷 q 电势能的变化跟电场力做功的关系，并导出其数学表达式。

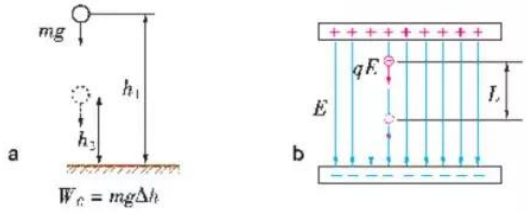


图 2-31　重力做功和电场力做功

电势差

分析论证

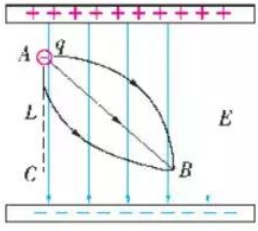


图 2-32　研究匀强电场中的电势差

在匀强电场中，电荷 q 由 A 点移动到 B 点(图 2-32)，无论沿怎样的路径，电场力所做的功都是

$$W_{AB} = qEL$$

由此可得

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

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

上面的结论虽然是从匀强电场中得出的，但它对任意电场都是适用的。

因此，一般情况下(图 2-33)，如果电荷 q 在电场中由 A 点移动到 B 点，电场力做的功为 W_{AB}，则 A、B 两点间的电势差 U_{AB} 为

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

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

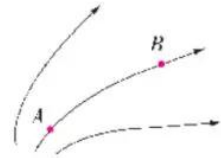


图 2-33 研究电势差

请思考：在怎样的情况下，电场力做正功，电势差是正值；在怎样的情况下，电场力做负功，电势差是负值。

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

案例分析 1

案例 在图 2-34 所示的电场中，如果已知两极板间的电压为 500V，把带电量 $q = 1\times 10^{-5}$ C 的点电荷由正极板 A 点沿任意路径移到负极板 B 点，电场力所做的功为多少？

分析 一般说来，求电场力做功，需要知道电场强度(或电场力)和距离，但从题目所给的条件，无法知道电场强度和距离。然而由 $U_{AB} = W_{AB}/q$ 就可以得到 $W_{AB} = qU_{AB}$。

这样我们很容易求得

$W_{AB} = qU_{AB} = 500 \times 10^{-5}\text{J} = 5 \times 10^{-3}\text{J}$

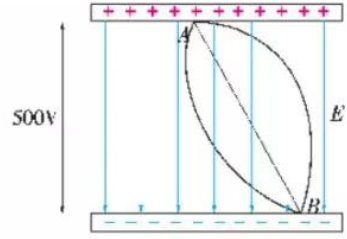


图 2-34 研究电场力所做的功

案例分析 2

案例 在图 2-35 所示的非匀强电场中，如果已知带电量 $q = -10^{-5}$C 的点电荷由 A 点移动到 B 点，电场力所做的功 $W_{AB} = 8 \times 10^{-3}$J，则 U_{AB} 等于多少？U_{BA} 等于多少？

请利用 $U_{AB} = W_{AB}/q$，仿照案例分析 1 的过程和方法，完成分析和计算。

在研究微观粒子时，常用**电子伏特**(简称**电子伏**，符号是 eV)作为能量的单位。在电压为 1V 的两点间，把一个电子由一点移动到另一点，电场力所做的功等于 1eV。已知电子的电荷量 $e = 1.6 \times 10^{-19}$C，则

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

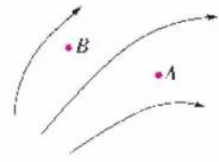


图 2-35 非匀强电场中各点间的电势差

电势

分析论证

上面所说的电势差 U_{AB} 就是电场中 A、B 两点之间的**电势**(electric potential)之差。那么，A 点和 B 点的电势为多大呢？

我们知道，在地球上，要知道空中某一点的“高度”，通常要规定地面高度为零点，把地面作为参考点(图 2-36a)。要确定电场中某一点的电势，也要选择一个电势为零的参考点(零电势点)。在图 2-36b 中，如果选择地球的电势为零，则电场中各点的电势跟参考点之间的电势之差就是该点的电势。电势通常用符号 φ 来表示。

对点电荷的电场，我们通常选无穷远处为零电势参考点。

如果我们根据选定的零电势点，确定电场中 A 点的电势为 φ_A，B 点的电势为 φ_B，则 A、B 两点间的电势差就表示为

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

根据电势差 U_{AB} 的计算方法，电场中某点的电势，等于单位正电荷由该点移动到参考点(零电势点)时，电场力所做的功。

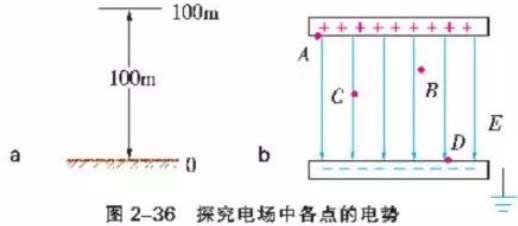


图 2-36　探究电场中各点的电势

案例分析

案例　在图 2-36b 所示的匀强电场中，带电量 $q = 4 \times 10^{-9}$C 的点电荷由极板上 A 点移至 B 点时，电场力做的功为 8×10^{-8}J；由 B 点移至 C 点，电场力做的功为 10^{-7}J；由 C 点移至极板上 D 点，电场力做的功为 6×10^{-8}J。问 A、B、C、D 各点的电势分别为多大？

请根据公式 $U_{AB} = \varphi_A - \varphi_B$ 自己完成计算。

任意两点间的电势差与零电势点的选择有关吗？

各点的电势与零电势点的选择有关吗？

多学一点　电场的等势面

由于电荷在匀强电场中的运动与重力作用下物体的运动相似，仿照地图上常用等高线表示地形的高低的做法，我们也可以

在匀强电场中采用等电势面来表示电场中各点电势的高低(图2-37)。物理学中把电场中电势相等的点构成的面叫做**等势面**(equipotential surface)。同一等势面上任意两点间的电势差为零,所以,在同一等势面上移动电荷时,电场力不做功。

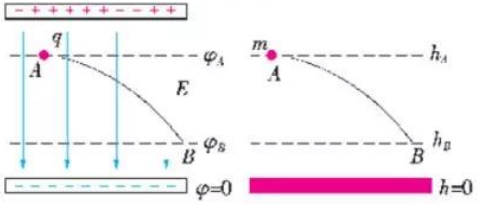


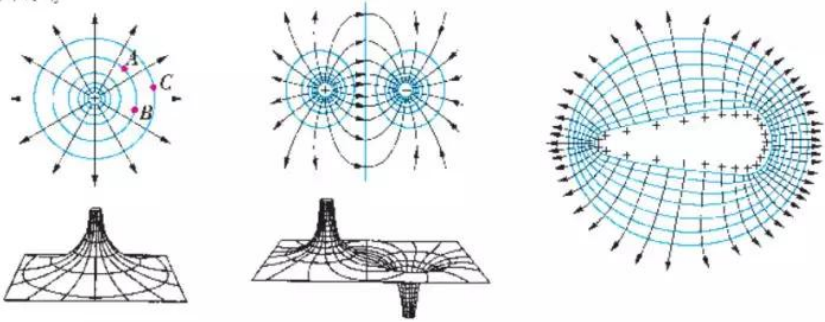
图2-37 等势面与等高线

在静电平衡时,因为导体表面的电荷不再移动,导体各处的电势一定相等,故此时导体表面是一个等势面,导体是一个等势体。前面我们已经知道,在导体表面附近,电场线垂直于表面,因此,等势面一定跟电场线垂直,即跟场强的方向垂直。

请你用反证法证明:电场线一定跟等势面垂直,并且由电势高的等势面指向电势低的等势面。

在定量研究电场时,由于测量电势比测量电场强度容易,所以常常先测绘出电场的等势面的形状和分布,再根据电场线跟等势面垂直的关系,绘出电场线的分布,就可以知道电场的情况。例如,在设计示波管的电子枪、静电加速器的加速管时,为了聚焦电子束,对阴极和阳极的形状、大小等都有一定技术要求。设计人员往往根据实验测绘出的等势面的形状和分布来进行设计和调整。

常见的几种电场的等势面和重力场中的等高线对比如图2-38所示。



a 点电荷电场的等势面与重力场等高线对比

b 等量异号点电荷电场的等势面与重力场等高线对比

c 带电导体周围的等势面

图2-38 各种等势面

请思考一下,图中几种电场的等势面是什么样的?

课堂作业与练习

1. 在某电场中，把带电量 $q=-5\times10^{-9}$C 的点电荷由 A 点移动到 B 点，电场力所做的功为 1×10^{-7}J，A、B 两点间的电势差 U_{AB} 是多大？B、A 两点间的电势差 U_{BA} 是多大？

2. 在图 2-39 所示的匀强电场中，如果 A 板接地，M、N 两点中，哪一点的电势高？电势是正值还是负值？如果 B 板接地，哪一点的电势高？电势是正值还是负值？取大地的电势为零。

3. 电荷的电势能的变化总是等于电场力对电荷所做的功。在正电荷 Q 的电场中（图 2-40），把正电荷 q 从 A 点移到 B 点，电场力的方向与电荷移动的方向相同，电场力对电荷 q 做什么功？电势能怎样变化？在正电荷 Q 的电场中，负电荷 q 的电势能如何变化？你能得出什么结论？

4. 如图 2-41 所示，M、N 为电场中两个等势面，PQ 直线是其中的一条电场线，则下列说法中正确的是

   A. $E_P<E_Q$

   B. 正电荷置于 P 点时电势能大于置于 Q 点时的电势能

   C. $U_P<U_Q$

   D. 负电荷由 Q 点移动到 P 点时电场力做正功

5. 电场中 A、B 两点的电势 $\varphi_A=900$V，$\varphi_B=-300$V。把电荷 $q=-1.5\times10^{-7}$C 由 A 点移到 B 点，电场力做了多少功？电势能是增加还是减少？增加或减少了多少？

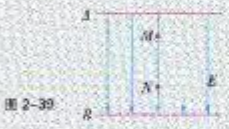


图 2-39



图 2-40



图 2-41

周南物理段石峰

2.4

电容器 电容

电容器

在示波管中，当给偏转电极两极加电压或电势差，两极板上就有电荷积累。因此，偏转电极的两极板实际上相当于一个储存电荷和电能的装置。物理学中，把能储存电荷和电能的装置叫做电容器(capacitor)。电容器(图 2–42)是电气设备中的一种重要元件，在生产和生活中有着广泛应用。两个正对的平行金属板中间夹上一层绝缘物质(例如空气、聚苯乙烯、云母等)，就组成一个最简单的电容器，叫做平行板电容器。这两个金属板叫做电容器的极板。因此，示波管中的偏转电极的两极板可近似看作一个平行板电容器。实际上，任何两个彼此绝缘又相隔很近的导体，都可以看成是一个电容器。

实验探究 观察电容器的放电过程

参照图 2–43 接好电路，图中 C 为标有“1000μF”、耐压 10V 以上的电解电容，H 为手电筒小灯泡。调节滑动变阻器，用单刀双掷开关将一定电压加在电容器上，两个极板就分别带上等量的异种电荷。这个过程叫做**充电** (charging)。在电容器充电的过程



图 2–42 各种电容器

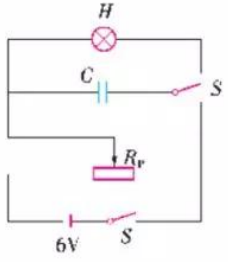


图 2–43 电容器充电、放电电路图

中，回路中有短暂的充电电流通过。充电后，断开电容器与电源的连接，两个极板上都储存有电荷，两极板间有电场存在。

然后，用单刀双掷开关让小灯泡与电容器构成闭合回路，两极板上的电荷就相互中和，电容器最终就不再带电。这个过程叫做**放电**(discharging)。放电电流会使小灯泡闪亮一下。

再调节滑动变阻器改变加在电容器上的电压，重新完成上述充电和放电过程。注意观察电容器放电过程中小灯泡的发光情况。

结合上述实验，思考和了解照相机闪光灯的工作原理。

比较两次实验中小灯泡闪光的亮度和持续时间的差异，你能够得出什么结论？

固定滑动变阻器阻值，选择一个比 1000μF 大或小一些、耐压仍在 10V 以上的电解电容器进行实验。比较不同的电容器在充电电压相同时，放电过程中小灯泡闪光的亮度和持续时间的差异。

电容

电容器到底储存了多少电荷？在以上实验中，充电电压越高，电容器放电时小灯泡发光越亮、持续时间越长，说明电容器储存的电荷越多。精确实验表明对于同一个电容器，每个极板所带的绝对电荷量 Q 跟电容器两极板间的电压或电势差 U 成正比，用 C 表示比例系数。对于一个电容器来说，这个比例系数是一个常量，即

$$Q = CU$$

上述实验还表明，不同的电容器，即使两极板间的电压或电势差相同，电容器储存的电荷也不相同。因此，对于不同的电容器，这个比例系数 C 一般是不同的。可见，这个比例系数反映了电容器储存电荷的本领。对于一定的电容器，可以用下式确定其比例系数

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

物理学中把电容器所带的电荷量 Q 与电容器两极板间的电势差 U 的比值，叫做电容器的电容(capacitance)。电容器的电容在数值上等于使两极板间的电势差为 1V 时，电容器上所储存的电荷量。

在国际单位制中，电容的单位是**法拉**(farad)，简称**法**，符号是 F。如果一个电容器带 1C 的电荷量时，两极板间的电势差是 1V，

电容器的电容、电势差可以分别与容器的容量、容器中液面的高度类比。图 2-44 说明，要使两容器中液面的高度相同，横截面积大的容器需要的液体多。



图 2-44　不同容器的容积

这个电容器的电容就是1F。法拉这个单位太大，实际中常用较小的单位：微法(μF)和皮法(pF)。它们的换算关系为：

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

常用电容器

从构造来看，常用的电容器可以分为固定电容器和可变电容器(图2–45)。

固定电容器的电容是固定不变的，常用的有聚苯乙烯电容器和电解电容器。聚苯乙烯电容器是在两层锡箔或铝箔中间夹以聚苯乙烯薄膜，卷成圆柱体制成的(图2–46)。改变锡箔或铝箔的面积，就可以制成不同电容的聚苯乙烯电容器。

电解电容器(图2–47)是用铝箔作为一个极板，用铝箔上很薄的一层氧化膜作为电介质，用浸渍过电解液的纸作为另一个极板制成的。由于氧化膜很薄，所以电容较大。电解电容器的极性是固定的，使用时不能接错。

可变电容器由两组铝片组成(图2–48)，它的电容是可以改变

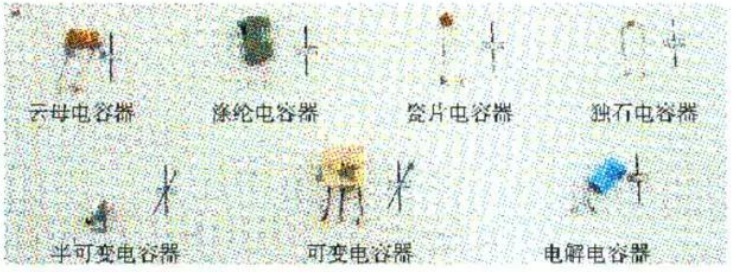


图2–45 各种电容器

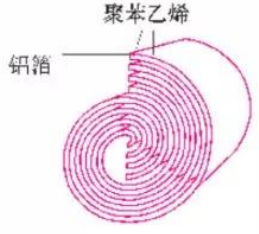


图2–46 聚苯乙烯电容器内部结构示意图

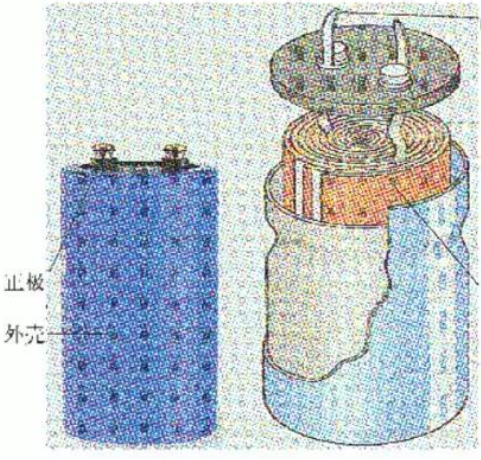


图2–47 电解电容器

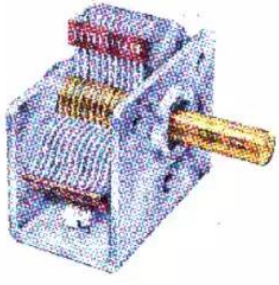


图2–48 可变电容器

的。固定的一组铝片叫做定片，可以转动的一组铝片叫做动片。转动动片，就可以使两组铝片的正对面积发生变化，电容就随着改变。

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

多学一点

在实验室里，我们常常给一个绝缘导体带电，说明单个导体也具有电容。单个导体为什么也具有电容呢？原来单个导体与大地构成了一个电容器，其电介质是空气，空气的介电常数为 ε_0。如果这个导体与大地之间的电势差为 U，所带电荷量为 Q，则我们说这个导体的电容为 $C = Q/U$。如果实验室中的球形金属导体的半径为 R，其电容为

$$C = \frac{\varepsilon_0 R^2}{k}$$

在研究库仑定律时，我们知道库仑在没有办法确定电荷量的情况下，采用两个半径相同的金属球接触而等分电荷量的方法，从而进行把握实验。现在，我们可以根据两个金属球的电容相等来说明库仑方法的正确性。

信息时代 无线城

上一章我们使用过感应起电机。感应起电机上有两个内外表面都贴有金属箔的瓶子，这种瓶子叫做莱顿瓶。莱顿瓶是用来储存电荷的，实际上就是电容器。

莱顿瓶是由德国物理学家克莱斯特(E. G. Kleist)和荷兰莱顿大学的物理学家穆欣布罗克(P. Musschenbrock)于 1745 年、1746 年几乎同时发明的。

有一次，克莱斯特用传导的方法给装有钉子的玻璃瓶充电。当他的一只手拿着玻璃瓶，另一只手接触铁钉时，他感到肩膀和手臂受到了一下猛击。

穆欣布罗克在做电学实验时，看到好不容易使带电体所带上的电很快在空气中消失，便想找出一种保存电的办法。有一次，他用丝线吊起一支枪管来接收从摩擦起电机玻璃球传来的电。他在枪管的一端吊一根黄铜线，铜线的下端放在一只盛有水的玻璃瓶中。穆欣布罗克让助手一只手拿着玻璃瓶，同时自己使劲转动起电机。助手不慎将另一只手碰到枪管上，感到一次强烈的击，大喊起来。穆欣布罗克与助手互换位置，自己一手拿瓶，另一手去碰枪管，也遭到电击。

克莱斯特和穆欣布罗克的实验表明，把带电体放在玻璃瓶中可以将电保存起来。后来人们把这个蓄电的瓶子叫做“莱顿瓶”。但是，当时克莱斯特并不清楚装有钉子的玻璃瓶为什么能够保存电荷；穆欣布罗克也不知道电荷是保存在瓶子上还是保存在瓶内的水中。莱顿瓶几经改进后，瓶内外表面都贴上金属箔，瓶盖上插一根金属杆，杆上端装一金属球，下端用金属链子与瓶内表面接触。莱顿瓶放电时产生的电火花可以点燃火药、氢气等。莱顿瓶的出现为进一步研究电现象提供了有力的手段。

其实，莱顿瓶就是一个同轴柱形电容器。按照克莱斯特和穆欣布罗克的实验，握瓶的手是圆柱形电容器的正极板，水和铁钉（或铜线）是负极板，电介质是玻璃。瓶中盛水并不能够改变其电容的大小，只是起到让瓶盖上插的金属杆与瓶内表面金属箔连接的作用。改进后的莱顿瓶内外表面都贴上金属箔，两金属箔分别构成两个极板，电介质是玻璃。



图 2-49 莱顿瓶

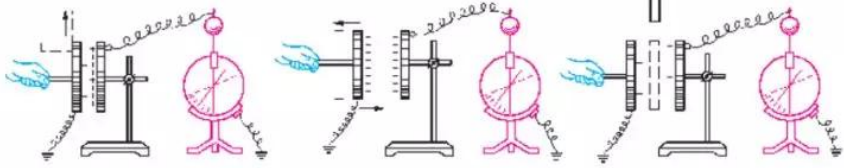
课题研究

探究影响平行板电容器电容的因素

参照图 2-50 的实验装置和实验操作进行探究。用摩擦过的玻璃棒或橡胶棒给与静电计相连的极板带电。在保持极板上的电荷量 Q 不变的条件下，分别改变两极板的正对面积 S、两极板间的距离 d、两极板间的电介质，用静电计测量已充电的平行板电容器两极板间的电势差 U。通过不同情况下 U 的大小来说明电容 C 的大小跟介电常数 ε、正对面积 S 及两极板间的距离 d 的关系。

静电计是测量电势差的仪器。从其指针的偏转角度就可以测出两个导体间的电势差。

电容器极板间充满电介质时电容增大的倍数，叫做电介质的介电常数，用 ε 来表示。



a 保持 Q 和 d 不变，研究 S 与 C 的关系　b 保持 Q 和 S 不变，研究 d 与 C 的关系　c 研究电介质与 C 的关系

图 2-50 探究影响平行板电容器电容的因素

家庭作业与活动

1. 对电容 $C = Q/U$，下列说法中正确的是
   A. 一只电容器充的电荷量越多，电容增加得越大
   B. 对于固定的电容器，它所充电荷量跟它两极板间所加电压的比值保持不变
   C. 可变电容器充的电荷量跟加在两极板间的电压成正比
   D. 由 $C = Q/U$ 知，如果一个电容器没有电压，就没有充电荷量，也就没有电容
2. 一个电容器的电容是 $1.5 \times 10^{-2}\mu F$，把它的两极接在 90V 的电源上，电容器每个极板所带的电荷量是多少？
3. 有一个电容器，如果使它带的电荷量增加 $5 \times 10^{-8}C$，两极板间的电势差就增大 30V，这个电容器的电容多大？
4. 连接在电池两极的平行板电容器，当两极板间距离减小时
   A. 电容器的电容 C 增大
   B. 电容器的带电量 Q 增大
   C. 电容器两板间的电压增大
   D. 电容器两板间的场强 E 增大
5. 两块平行金属板带等量异号电荷，要使两板间电压加倍，两板间场强减半，可采用的办法有
   A. 两板电量加倍，间距变为原来的 4 倍
   B. 两板电量加倍，间距变为原来的 2 倍
   C. 两板电量减半，间距变为原来的 4 倍
   D. 两板电量减半，间距变为原来的 2 倍

2.5 电子束在示波管中的运动

电势差与电场强度的关系

电场强度和电势差都是描述电场性质的物理量，两者必然有内在的联系。

为了研究电势差与电场强度之间的关系，我们以匀强电场为例进行分析。图 2-51 表示某一匀强电场的电场线分布情况。设 A、B 两点间的距离为 d，电势差为 U，场强为 E。把正电荷 q 由 A 点移动到 B 点，电场力所做的功 $W = Fd = qEd$，而 $W = qU$，可见

$$U = Ed$$

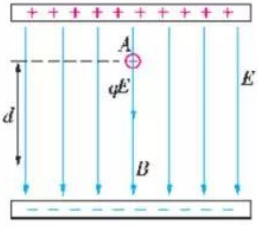


图 2-51

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

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

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

请证明：电场强度的两个单位 N/C 和 V/m 是等价的。

请思考：沿什么方向的电势降落最快？

电子束在示波管中的运动规律

带电粒子在电场中要受到电场力的作用，产生加速度，速度的大小和方向都会改变。根据前面的研究，现在我们能够弄清楚示波器的工作原理了。

分析论证

设电子枪阴极与阳极之间的电压为 U，偏转电极 XX' 不加电压，偏转电极 YY' 的电压为 U'，则电子运动轨迹如图 2-52 所示。

下面分别研究电子在电子枪中、在偏转电极 YY' 中和离开偏

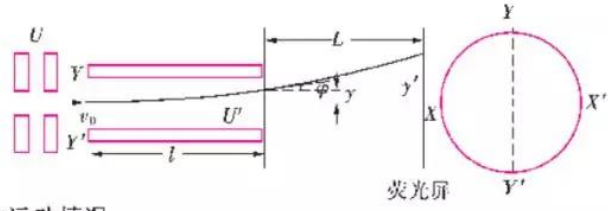


图 2-52

转电极后的运动情况。

1. 电子在电子枪中的运动。

为简化起见，我们假定电子枪阴极与阳极之间的电场可看成匀强电场，逸出金属丝附近电子的速度为零，则电子从小孔水平发射出的速度 v_0 可以由动能定理计算。因为 $W = qU$，$E_k = mv_0^2/2$，由 $W = E_k - 0$ 得

$$v_0 = \sqrt{\frac{2qU}{m}}$$

2. 电子在偏转电极中的运动。

电子以速度 v_0 进入偏转电极 YY' 之间的匀强电场后，如果偏转板的长度为 l，两板距离为 d，则电子在水平方向上做匀速直线运动，速度为 v_0；电子在竖直方向上做初速度为零的匀加速运动，加速度为 $a = F/m = qE/m = qU'/md$。电子经过时间 $t = l/v_0$ 离开偏转电极 YY'，在竖直方向上偏移 y，竖直方向上的分速度为 v_y，离开偏转电场时的偏转角为 φ，即

$$y = 0 + \frac{1}{2}at^2 = \frac{1}{2} \cdot \frac{qU'}{md} \left(\frac{l}{v_0}\right)^2 = \frac{l^2U'}{4dU}$$

$$v_y = at = \frac{qU'}{md} \cdot \frac{l}{\sqrt{\frac{2qU}{m}}} = \frac{lU'}{d}\sqrt{\frac{q}{2mU}}$$

$$\tan\varphi = \frac{v_y}{v_0} = \frac{lU'}{2dU}$$

3. 电子离开偏转电极后的运动。

电子离开偏转电极 YY' 后不再受电场力，做匀速直线运动。如果偏转电极 YY' 与荧光屏的距离为 L，则电子打在荧光屏上的亮斑将在竖直方向上发生偏移 y'。

请自己推导出 $y' = \dfrac{lU'\left(L + \dfrac{1}{2}l\right)}{2dU}$。

如果 $U' = U'_{max}\sin\omega t$，亮斑在荧光屏上将怎样运动？

观察在正弦规律变化的电场中电子束的偏转

把示波器的扫描范围旋钮置于第一挡(10—100Hz),亮斑将以一定周期在水平方向匀速地由一侧向另一侧来回移动;把衰减调节旋钮置于"∞"挡,即由机内为偏转电极 YY' 之间提供竖直方向按照正弦规律变化的电压 U。

调节扫描微调旋钮,就可使屏上出现完整的正弦曲线。调节Y增益旋钮和X增益旋钮,使曲线形状沿竖直或水平方向发生变化,调节到你认为合适为止。

把同步极性选择开关置于"+"位置,正弦曲线从正半周开始。观察示波器荧光屏上的图线(图 2-53)。

把同步极性选择开关置于"−"位置,正弦曲线从负半周开始。观察示波器荧光屏上的图线(图 2-54)。

请与你的分析和推测结果进行比较,看看是否一致。

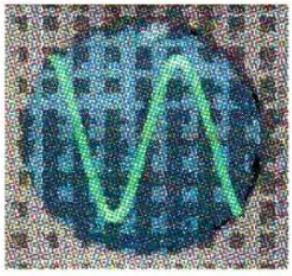


图 2-53 正弦曲线从正半周开始

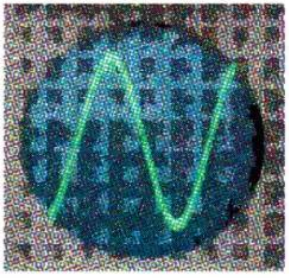


图 2-54 正弦曲线从负半周开始

STS 范德格拉夫静电加速器

范德格拉夫静电加速器(Van de Graaff generator and accelerator)主要用于加速带电粒子,其基本原理如图 2-55 所示。高压容器中充有绝缘气体,电荷源实际上是一个有一定电压的电源,它通过导体与一排指向电荷传输带的金属针(电荷喷射针)相连。金属针引起周围气体电离,产生正负离子。如果金属针排斥正离子,正离子就附着在电荷传送带上。这些正电荷传到上部的一排金属针(电荷收集器)处时,由于电荷要分布在导体的表面,正电荷就不断积累在金属球壳外表面。因此,球壳与地面的电势差就越来越大,产生静电高压。最后,将离子引入加速管,离子就像位置很高的小球在重力场中下降,便获得很大的动能。加速管的加速原理与示波管电子枪的原理一样,经过加速管多级加速的高速带电离子可供原子核反应实验之用。

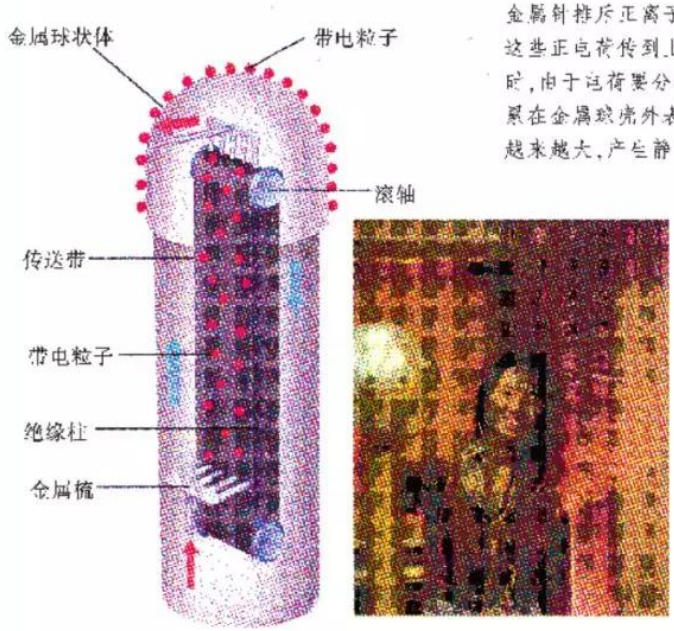


图 2-55

家庭作业与活动

1. 已知处于电场强度大于 3×10^6V/m 的电场中的空气将被击穿而发生放电现象。现在有一片带电的乌云距离地面 300m，发生闪电时乌云与地面间的电势差至少有多大？

2. 两块带电的平行金属板相距 10cm，两板间的电势差为 9.0×10^3V，其间板间与两板等距离处有一粉尘块，带有 -1.6×10^{-8} C 的电荷量。这粉尘块受到的电场力是多大？这粉尘块在电场力的作用下运动到带正电的金属板，电场力所做的功是多少？

3. 如图 2-56 所示是一个示波管工作原理图，电子经加速后以速度 v_0 垂直进入偏转电场，离开电场时偏转量是 h。两平行板间的距离为 d，电势差为 U，板长为 L。为单位电压引起的偏移量（h/U）叫做示波管的灵敏度，为了提高灵敏度，可采用下列办法中的



图 2-56

A. 增大两极板间电势差 U

B. 尽可能使板长 L 做得短些

C. 尽可能使两板板间距离 d 减小些

D. 使电子入射速度 v_0 大些

4. 如图 2-57 所示，电子在加速电压 U_1 作用下从户板中间小孔射出，进入平行板电容器间的电场，在偏转电压 U_2 作用下，偏转一段距离。现在 U_1 加倍，要想使电子的运动轨迹不发生变化，应该

A. 使 U_2 也加倍

B. 使 U_2 变为原来的 4 倍

C. 使 U_2 变为原来的 $\sqrt{2}$ 倍

D. 以上三种方法都不行

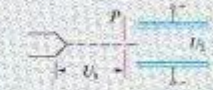


图 2-57

5. 让一价氢离子、一价氦离子和二价氦离子的混合物经同一加速电场由静止开始加速，然后在同一偏转电场中偏转，它们会分为一股吗？说明理由。

周南物理段石峰

2.x

第 2 章家庭作业与活动

A组

1. 如图 2–58 所示，电场中的一条电场线为直线，a、b 为这条直线上的两点，则
   A. a 点场强必大于 b 点场强
   B. a 点电势必高于 b 点电势
   C. 把负电荷由 b 点静止释放，不计重力时，一定向 a 点做匀加速直线运动
   D. 一负电荷从 a 点向 b 点运动，它的电势能一定增加



图 2–58

2. 如图 2–59 所示，三个质量相等，分别带正电、负电和不带电的小球，从平行板电场中的 P 点以相同初速度垂直于电场 E 进入电场，它们分别落到 A、B、C 三点，则可判断
   A. 落到 A 点的小球带正电，落到 B 点的小球不带电
   B. 三个小球在电场中的运动时间相等
   C. 三个小球到达正极板时的动能关系是 $E_{kA} > E_{kB} > E_{kC}$
   D. 三个小球在电场中运动的加速度关系是 $a_A < a_B < a_C$

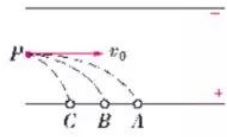


图 2–59

3. 如图 2–60 所示，在粗糙水平面上固定一点电荷 Q，在 M 点无初速度释放一带有恒定电量的小物块，小物块在 Q 的电场中运动到 N 点静止，则从 M 点运动到 N 点的过程中
   A. 小物块所受电场力逐渐减小
   B. 小物块具有的电势能逐渐减少
   C. M 点的电势一定高于 N 点的电势
   D. 小物块电势能变化量的大小一定等于克服摩擦力所做的功



图 2–60

4. 在水深超过 200m 的深海，光线极少，能见度极低。有一种电鳗具有特殊的适应性，能通过自身发出生物电，获取食物，威胁敌害，保护自己。若该电鳗的头尾相当于两个电极，它在海水中产生的电场强度达到 10^4V/m，可击昏敌害；身长 50cm 的电鳗，在放电时产生的瞬间电压可达
   A. 10V　　B. 500V
   C. 5000V　　D. 10000V

5. 离子发动机飞船，其原理是用电压 U 加速一价惰性气体离子，将它高速喷出后，飞船得到加速；在氦、氖、氩、氪、氙中选用了氙，理由是用同样的电压加速，它喷出时
   A. 速度大　　B. 动量大
   C. 动能大　　D. 质量大

6. 传感器是一种采集信息的重要器件，如图 2–61 所示的是一种测定压力的电容式传感器，当待测压力 F 作用于可动膜片电极上时，下列说法中正确的是
   ① 若 F 向上压膜片电极，电路中有从 a 到 b 的电流
   ② 若 F 向上压膜片电极，电路中有从 b 到 a 的电流
   ③ 若 F 向上压膜片电极，电路中不会出现电流
   ④ 若电流表有示数，则说明压力 F 发生变化
   ⑤ 若电流表有示数，则说明压力 F 不发生变化

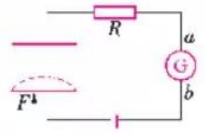


图 2–61

A. ②④　　B. ①④

C. ③⑤　　D. ①⑤

7. 1999 年 7 月 12 日，日本原子能公司所属敦贺湾核电站由于水管破裂导致高辐射冷却剂外流，在检测此次重大事故中应用了非电量变化（冷却剂外泄使管中液面变化）转移为电信号的自动化测量技术。图 2-62 是一种通过检测电容器电容的变化来检测液面高低的仪器原理图。容器中装有导电液体，是电容器的一个电极，中间的芯柱是电容器的另一个电极，芯柱外面套有绝缘管（塑料或橡皮）作为电介质，电容器的两个电极分别用导线接在指示器上，指示器上显示的是电容的大小，但从电容的大小就可知容器中液面位置的高低，为此，下列说法中正确的是

A. 如果指示器显示出电容增大了，则两电极正对面积增大，必为液面升高

B. 如果指示器显示出电容减小了，则两电极正对面积增大，必为液面升高

C. 如果指示器显示出电容增大了，则两电极正对面积减小，必为液面降低

D. 如果指示器显示出电容减小了，则两电极正对面积增大，必为液面降低

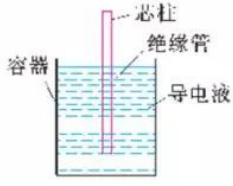


图 2-62

8. 图 2-63 中 A、B、C、D 是匀强电场中一正方形的四个顶点。已知 A、B、C 三点的电势分别为 $\varphi_A = 15\text{V}$，$\varphi_B = 3\text{V}$，$\varphi_C = -3\text{V}$，由此可得 D 点电势 $\varphi_D =$ _____V。

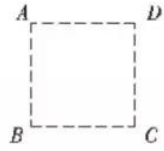


图 2-63

9. 密立根油滴实验进一步证实了电子的存在，揭示了电荷的非连续性。如图 2-64 所示是密立根油滴实验的原理示意图，设小油滴质量为 m，调节两板间电势差为 U，当小油滴悬浮不动时，测出两板间距离为 d。可求出小油滴的带电量 $q =$ _____。

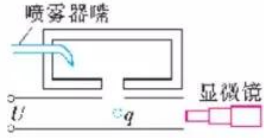


图 2-64

B 组

1. 如图 2-65a 所示，在示波管中如果偏转电极 X 和 X' 没有加电压，电子离开偏转电极 Y 和 Y' 后将沿直线前进，打在荧光屏上产生亮斑。这个亮斑在竖直方向上发生偏移，改变加在偏转电极 Y 和 Y' 上的电压，亮斑在竖直方向上的位置也随着改变。

(1) 如果只在 Y 和 Y' 间加上按正弦规律变化的电压 $U = U_m \sin\omega t$（电子在极板间的运动时间极短），则亮斑在荧光屏上的运动为

A. 匀速直线运动

B. 匀加速直线运动

C. 简谐运动

D. 加速度随时间变化的曲线运动

(2) 如果只在 X 和 X' 间加上如图 2-65b 所示的电压（电子在极板间的运动时间极短），

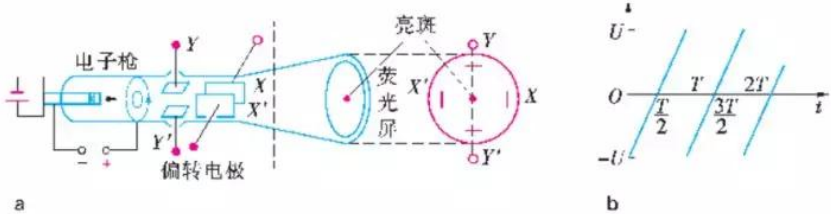


图 2-65

则在一个周期内亮斑在荧光屏上的运动为

A. 静止　　B. 匀速直线运动

C. 匀加速直线运动　D. 类平抛运动

(3) 如果在偏转电极 Y 和 Y'、X 和 X' 上同时各加上(1)、(2)小题所描述的电压(且两种情况所描述的电压的周期相等),则亮斑在荧光屏上的运动轨迹为

A. 直线

B. 正弦或余弦曲线

C. 抛物线

D. 椭圆

2. 控制电子枪产生的电子束到每秒只通过几个电子,所产生的单个闪烁现象可用光电管探测(图2-66a),然后在探测器位置处放置收集电子的金属瓶(图2-66b)。经一定时间金属瓶将获得足以测量出的电荷,从而可确定每秒射入的电量,进而测得一个电子的电量。如果电子束每秒通过 1×10^{5} 个电子,测得金属瓶积聚的电量为 8×10^{-12} C,则这段实验时间有多长?



图 2-66

3. 一个质量为 m、电荷量为 $+q$ 的小球,用丝线悬挂在水平方向的匀强电场中,场强为 E。小球平衡时,悬线与竖直方向间夹角 $\alpha=30°$,如图2-67所示。若将匀强电场 E 的方向逆时针方向转过角度 $\beta=45°$,小球重新达到平衡时悬线与竖直方向间夹角为多大?

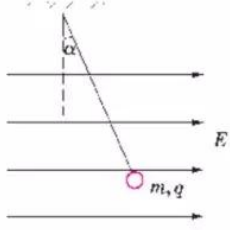


图 2-67

4. 有三根长度皆为 $l=1.00$m 的不可伸长的绝缘轻线,其中两根的一端固定在天花板上的 O 点,另一端分别拴有质量皆为 $m=1.00\times10^{-2}$ kg 的带电小球 A 和 B,它们的电荷量分别为 $-q$ 和 $+q$,$q=1.00\times10^{-7}$ C。A、B 之间用第三根线连接起来。空中存在大小为 $E=1.00\times10^{6}$ N/C 的匀强电场,场强方向沿水平向右,平衡时 A、B 球的位置如图2-68所示。现将 O、B 之间的线烧断,由于受到空气阻力,A、B 球最后会达到新的平衡位置。问最后两球的机械能与电势能的总和与烧断前相比改变了多少(不计两带电小球相互作用的静电力)?

5. 真空中有一个大平行板电容器,接在电压 $U=10^{4}$ V 的电源上。在高电势板附近置有 α 粒子源,它在1s内能向另一极板上每平方厘米面积垂直发射 $N=10^{13}$ 个粒子。粒子离开发射源时速度为零。试求 α 粒子在极板上产生的压强。已知 α 粒子质量 $m=6.68\times10^{-27}$ kg,电量 $q=3.2\times10^{-19}$ C。

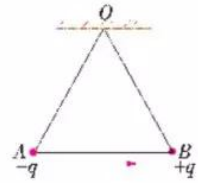


图 2-68

6. 图2-69是静电分选器的原理示意图。将磷酸盐和石英的混合颗粒由传送带送至两个竖直的带电平行板上方,颗粒经漏斗从电场区域中央处开始下落,经分选后的颗粒分别装入 A、B 桶中。混合颗粒离开漏斗进入电场时磷酸盐颗粒带正电,石英颗粒带负电,所有颗粒所带的电量与质量之比均为 10^{-5} C/kg。已知两板间的距离为10cm,颗粒在电场中下落的竖直高度为50cm。设颗粒进入电场时的初速度为零,颗粒间的相互作用力不计,如果要使两种颗粒离开两极板间的电场区域时不接触到极板而且有最大

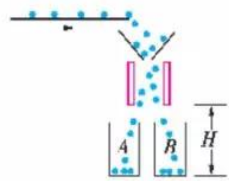


图 2-69

的偏转量(g取10m/s²)：

(1) 求两极板间所加的电压。

(2) 若带电平行板的下端距A、B桶底的高度为H=1.3m，求颗粒落至桶底时的速度大小。

7. 喷墨打印机的结构简图如图2-70所示，其中墨盒可以发出半径约为1×10^{-5}m的墨汁微滴，此微滴经过带电室时被带上负电，带电的多少由计算机按字体笔画最低位置输入信号控制。带电后的微滴以一定的初速度进入偏转电场，带电微滴经过偏转电场发生偏转后打到纸上，显示出字体。无信号输入时墨汁微滴不带电，径直通过偏转板而注入回流槽流回墨盒。设偏转板板长1.6cm，两板间的距离为0.50cm，偏转板的右端距纸3.2cm。若一个墨汁微滴的质量为1.6×10^{-10}kg，以20m/s的初速度垂直于电场方向进入偏转电场，两偏转板间的电压是8.0×10^{3}V，若墨汁微滴打到纸上点距原射入方向的距离是2.0mm，求这个墨汁微滴通过带电室带的电量。不计空气阻力和重力，可以认为偏转电场只局限在平行板电容器内部，忽略边缘电场的不均匀性。为了使纸上的字体放大10%，请你分析提出一个可行的方法。

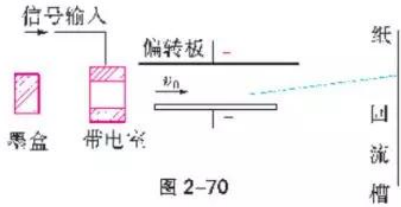


图2-70

8. 静止在太空中的飞行器上有一种装置，它利用电场加速带电粒子，形成向外发射的高速粒子流，从而对飞行器产生反冲力，使其获得加速度。已知飞行器质量为M，发射的是二价氧离子，发射粒子的功率恒为P，加速电压为U，每个氧离子的质量为m，单位电荷的电量为e。不计发射氧离子后飞行器质量的变化，求：

(1) 射出的氧离子速度。

(2) 每秒射出的氧离子数。

(3) 射出离子后飞行器开始运动时的加速度。

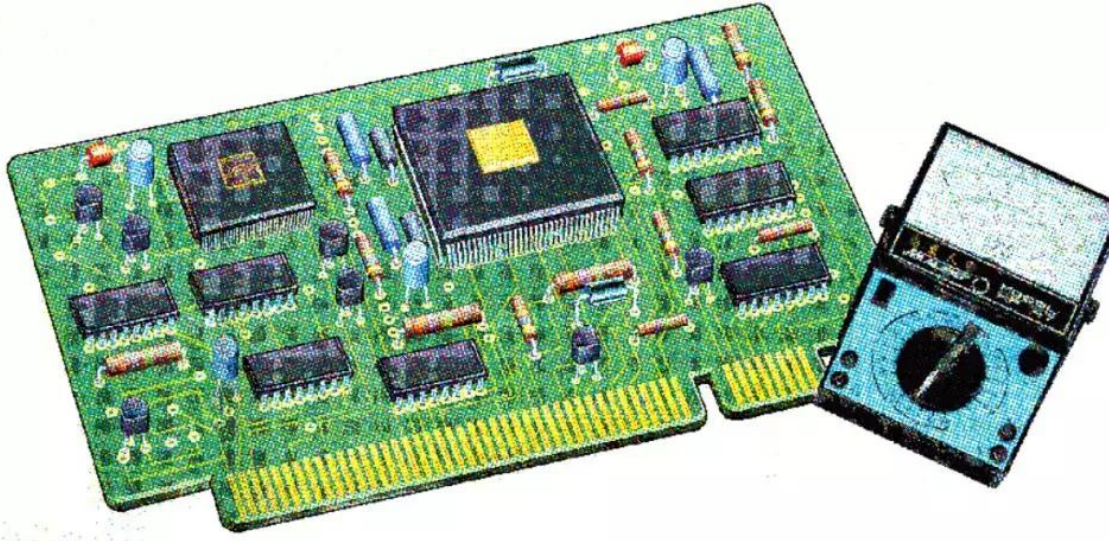


图 3-1　印刷电路与集成电路

第3章
从电表电路到集成电路

电路(electric circuit)跟我们的生活息息相关。复杂电路都是由简单电路组成的。**集成电路**(integrated circuit)是将电路元件及其相互间的连线，通过半导体工艺制成的结构紧密的电路系统。

3.1 学会使用多用电表

流表和电压表
实践，设计制作

在初中，我们学习电学测量时，都是分
来测量电路中的电流和电压的。人们经过

了一种既能测量电流、电压，又能测量电阻等多功能、多量程的仪表——多用电表（曾叫万用电表）。

磁电式多用电表的表头中，安装有永久磁铁和线圈。线圈通过电流后，在磁场的作用下发生转动，并带动指针偏转，我们便可以根据指针偏转的角度，判断电流的大小。

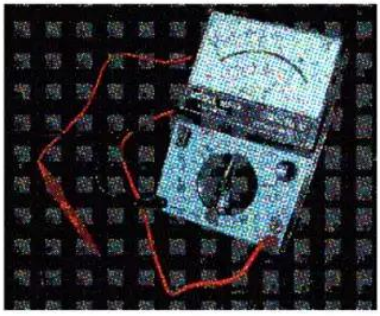


图 3-2　磁电式多用电表

认识多用电表

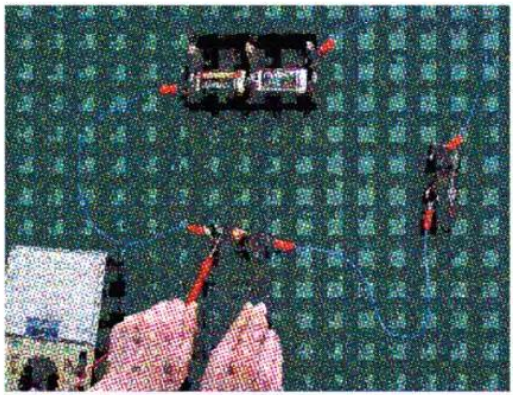
请结合磁电式多用电表实物，仔细观察图 3-2 中多用电表的面板，对照说明书，了解它能测量哪些电学量。

多用电表由一个小量程的电流表（俗称表头）和电路元件组成。其面板的上半部为表盘，分别标有电压、电流和电阻的刻度线，用于读取有关电学量的测量值。面板中央的定位螺丝为机械调零旋钮，用于调节指针的“0”位。面板下半部中间的旋钮是功能选择开关，周围标有各种测量功能及量程。其中“$\underline{V}$”表示直流电压挡，“$\tilde{V}$”表示交流电压挡，“mA”表示直流电流挡，“Ω”表示电阻挡。面板右边有一个电阻挡的调零旋钮。面板的下方有两个标有“+”、“−”号的插孔，用于插红、黑测试表笔。

使用多用电表

使用多用电表前，应检查指针是否停在刻度线左端的“0”位置。如果没有停在“0”位置，要用螺丝刀轻轻转动机械调零旋钮，使指针指零。再将红、黑测试表笔分别插入“+”、“−”插孔。

测量时，要根据所需测量的电学量，将功能选择开关旋转到相应的测量挡位和量程上。读数时，要读取跟功能选择开关挡位相应的刻度值。测量结束后，要将功能选择开关旋转到交流电压挡的最大量程处或“off”处，以保护多用电表。



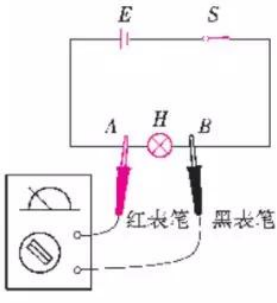


图 3-3　测量直流电压

测量直流电压

实验要求：

学会用多用电表测量直流电压。

实验步骤：

(1) 将功能选择开关旋转到直流电压挡。

(2) 根据待测电压的估计值选择量程。如果难以估测待测电压值，应按照由大到小的顺序，先将选择开关旋转到最大量程上试测，然后根据测量出的数值，重新确定适当的量程再进行测量。

(3) 测量时，用红、黑测试表笔使多用电表跟小灯泡 H 并联，注意使电流从“+”插孔流入多用电表，从“−”插孔流出多用电表，检查无误后再闭合开关 S，如图 3-3 所示。

(4) 根据挡位所指的量程以及指针所指的刻度值，读出电压表的示数。

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

测量直流电流

实验要求：

学会用多用电表测量直流电流。

我们已经有了用多用电表测量直流电压的经验，如何用它测量电路中的直流电流呢？请参照图 3-4 拟定实验步骤，进行测量并做好记录。

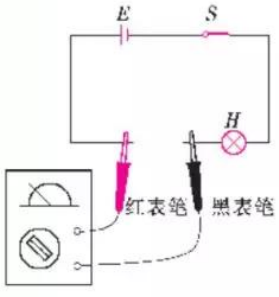
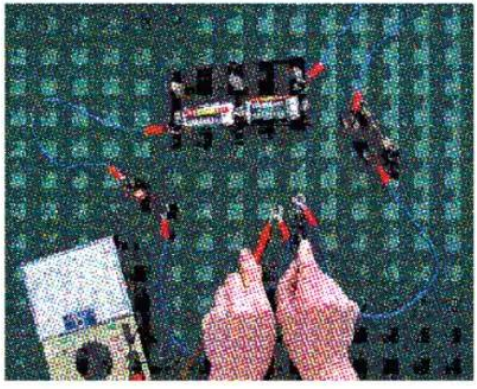


图 3-4 测量直流电流

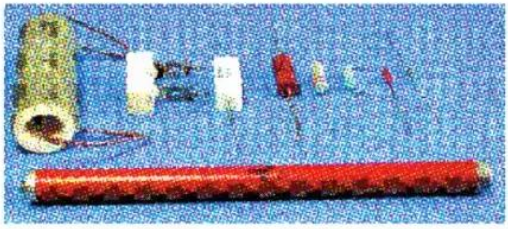


测量导体的电阻

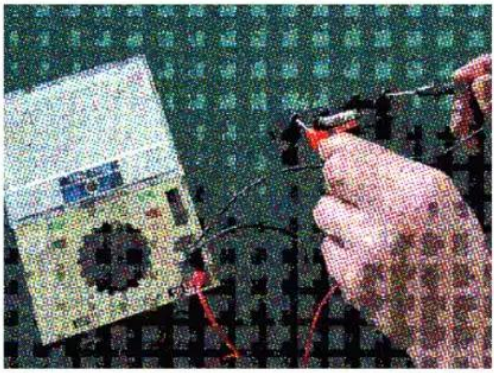
实验要求：

学会用多用电表测量导体的电阻。

图 3-5a 中是一些待测电阻。参照图 3-5b，试用多用电表分别测出几个电阻的阻值。



a 各种电阻



b 用多用电表测电阻的阻值

图 3-5

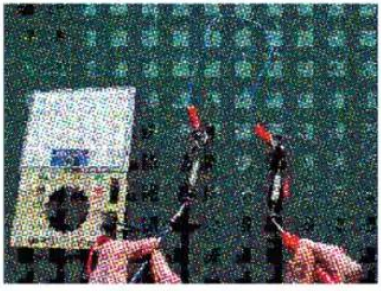
请思考，选择好量程后，如何用电阻挡的调零旋钮把指针调到电阻刻度线的“0”位置上？

改变电阻挡的量程时，需要重新调整电阻挡调零旋钮。电阻挡有若干个量程挡位，分别标有×1、×10、×100、……，意思是指针示数乘以相应的倍率，就是所测得的电阻值。

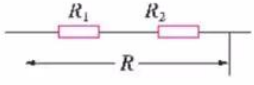
用多用电表测出图 3-6 中所示的串联和并联电阻的总阻值，并做好记录，你发现了什么？

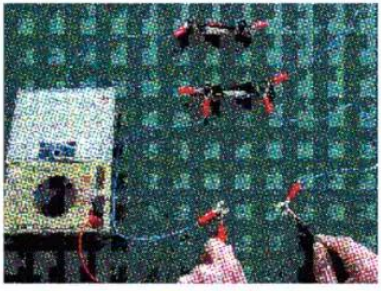
用多用电表测量电阻时，电表内部提供电源。黑表笔与表内电源的正极相连，红表笔与负极相连。

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



a 用多用电表测串联电阻的总阻值





b 用多用电表测并联电阻的总阻值

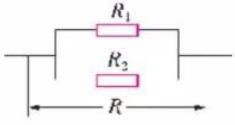


图 3-6

判断二极管的正负极

实验要求：

用多用电表判断二极管的极性。

目前广泛使用的二极管(diode)是晶体二极管(crystal diode)。它是用半导体材料制成的电子元件。二极管有两根引线，一根叫正极，一根叫负极(图 3-7)。

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

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

请思考一下，使用多用电表怎样判断二极管的正负极？



图 3-7 晶体二极管和它的符号

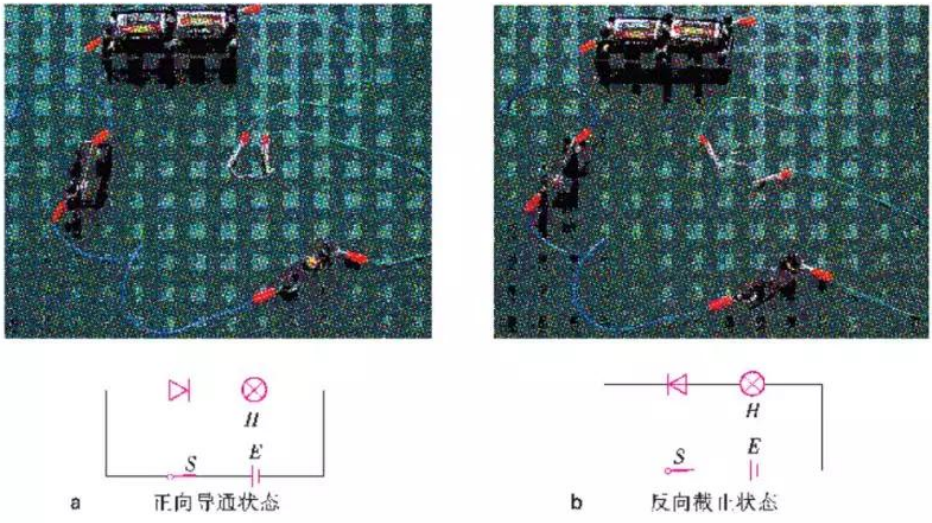


图 3-8 探究二极管特性的实验

信息浏览

数字式多用电表

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

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



图 3-9

智能多用电表

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

使用智能多用电表测量有关电学量时，不需要进行任何调节，测量会自动进行，测量结果以数字形式显示。这种多用电表使用十分方便，人们戏称它为“傻瓜万用表”。



图 3-10

家庭作业与活动

1. 图 3-11 是电阻表的刻度盘，跟电流表相比，它有哪些特点？
2. 测量你身体的电阻值。测量时用“×1k”挡量程，双手分别紧紧捏住红、黑表笔的金属触针即可。
3. 测量一枝铅笔芯的电阻。先估计一下它的阻值，然后再测量，看你估计得是否准确？



图 3-11

课题研究

用多用电表的欧姆挡粗测电容器的电容

用高电阻挡“×10k”，将红、黑表笔分别与电容器两端引线接触，观察表针偏转幅度，参考下表提供的关于电容大小与表针偏转幅度的对应关系，可以很快地判断 0.01—1μF 电容器的电容。

C/μF	0.01	0.022	0.047	0.1	0.2	0.5	1
0—100 刻度	1	3	4	8	15	32	54

若粗测电解电容器电容，可用“×1k”挡，但要注意黑表笔接电容器的正极。

请你参考上面的介绍做一做，查找资料，分析为什么表针偏转幅度越大，电容越大？

再想一想，怎样用多用电表判断电解电容器的正负极和判断电容器是否断路或漏电？把你的想法说出来与同学交流，并一起做做看。

3.2

探究电流、电压和电阻的成因

电流是怎样形成的

自来水管中的水朝一定方向流动，形成“水流”(图 3-12)。与此类似，导体中的电荷朝一个方向移动就会形成“电荷流”，我们称它为电流。

为了反映电流的强弱，物理学把流过导体某一横截面积的电荷量 Q 跟所用时间 t 的比值 I 叫做**电流**(current)，即

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

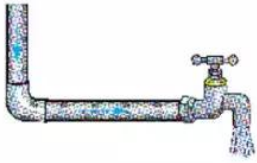


图 3-12 自来水管中的水流

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

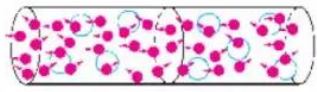
电流是有方向的，通常规定正电荷定向移动的方向为电流的方向。

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

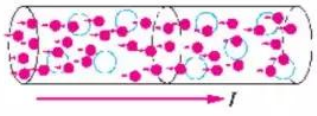
一般情况下，金属导体中的自由电子大约以 10^5 m/s 的速率做永不停息的无规则热运动(图 3-13a)。

请讨论，自由电子的热运动为什么不形成电流？

当金属导线与电源连接，构成闭合回路时，自由电子就会在电源正负极间所产生的电场作用下，发生定向移动，形成电流。可见，自由电子是在电场力的作用下发生定向移动的(图 3-13b)。



a 自由电子的无规则热运动



b 自由电子在电场力作用下定向移动

图 3-13

分析论证

下面从金属导体的微观结构分析电流的成因。如图 3-14 所示，假设金属导体的横截面积为 S，导体中每单位体积的自由电子数为 n，每个自由电子的电荷量为 q，自由电子定向移动的平均速

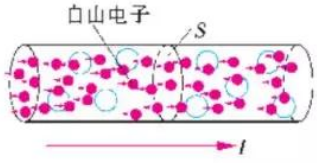


图 3-14　定向运动的自由电子形成电流

率为 v，那么，请你写出在时间 t 内通过该横截面的电荷量的表达式 Q =_____。将这个表达式代入 $I = \frac{Q}{t}$，再请你写出通过该导体的电流的表达式 I =_____。

案例分析

案例　现有一铜导线，横截面积为 1mm²。若通过该铜导线的电流为 2.4A，单位体积的自由电子数为 $8.4 \times 10^{28}\ \mathrm{m^{-3}}$。求自由电子定向移动的平均速率。

分析　根据 $I = nqvS$，我们可以得到 $v = \frac{1}{nqS}$，式中 q 是电子的电荷量为 1.6×10^{-19} C。将数据代入 v 的表达式，便可以算出自由电子定向移动的平均速率。

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

电压是怎样形成的

根据电流形成的机理，电荷是在电场力的作用下才发生定向移动的。由于我们规定正电荷定向移动的方向为电流的方向，而正电荷在电场力的作用下总是从电势高处向电势低处运动，因此，沿着电流方向的电势逐渐降低，故沿电流方向上的任意两点间都有电势差，电势差就是**电压**(voltage)。

实验探究　**电路中电势变化的规律**

参照图 3-15 选择器材，连接电路，先在断开电路的情况下，用多用电表测出 R_{ea}、R_{ab}、R_{bc}、R_{cd} 的电阻值，然后接通电路，沿着电流方向，用多用电表测量电势差 U_{ea}、U_{ab}、U_{bc}、U_{cd}。最后，把测量结果

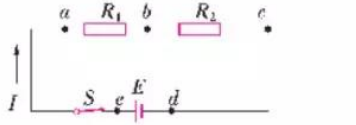


图 3-15　研究电势变化的电路图

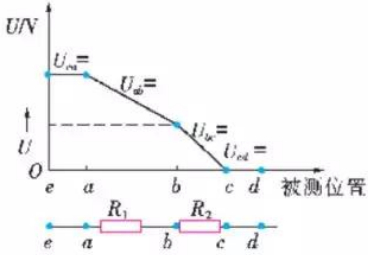


图 3-16　电路中电势变化图线

标在图 3–16 中，并分析电势变化的趋势。

实验表明，沿着 e、a、b、c、d，电流方向的电势是逐渐降低的。

电阻是怎样形成的

在金属导体中，除了有大量的自由电子之外，还有晶体结构点阵（图 3–17）上的金属原子或失去一些核外电子的金属原子，我们把它们叫做**原子实**（atomic kernel）。

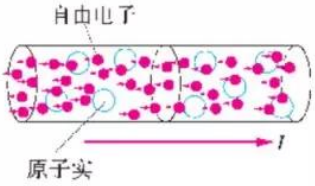


图 3–17

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

由此可见，自由电子与晶体点阵上的原子实碰撞，形成对电子定向运动的阻碍作用，是“电阻”产生的根本原因，也是电阻元件在通电时发热的原因。

实验探究　金属电阻与原子实振动强弱的关系

把一个废白炽灯泡的玻璃外壳小心地去掉，取一段几厘米长的钨丝接在灯丝支架上，跟一个 1.5V 电源和一个电流表接成串联电路，先测出通过钨丝的电流，然后用酒精灯加热灯丝，观察电流表指针的变化。

根据实验，分析温度升高时灯丝的电阻变化的原因。

实验表明，一个纯金属电阻，其阻值随温度变化比较规则，当温度的变化范围不大时，电阻与温度之间存在如下线性关系：

$$R = R_0 (1 + \alpha t)$$

式中 R 表示金属在 t ℃时的电阻，R_0 表示金属在 0 ℃时的电阻值，α 叫做电阻的温度系数。

课后作业与活动

1. 导线中的电流是 10^{-8}A，导线的横截面积为 1mm²。那么：
   （1）在 1s 内，有多少个电子通过导线的横截面（电子电量 $e = 1.6\times10^{-19}$ C）？
   （2）自由电子的平均移动速率是多大（设导体每立方米内有 8.5×10^{28} 个自由电子）？
   （3）自由电子沿导线移动 1cm，平均要多少时间？
2. 在一次闪电形成过程中，流动的电荷量大约是 300C，持续的时间大约是 0.005s，那么所形成的平均电流强度为多大？这些电荷如果以 0.5A 的电流强度流过灯泡，则可供灯泡照明多长时间？

3.3 探究电阻定律

在初中物理中我们就知道，**电阻**(resistance)是导体的一种性质，它的大小跟导体的长度、横截面积和导体的材料有关。它们之间到底有怎样的关系呢？

电阻定律

实验探究 探究电阻定律

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

请利用图 3-18 所示的器材，设计实验方案，拟定实验步骤，研究导体的电阻跟它的长度、横截面积和材料之间的定量关系。

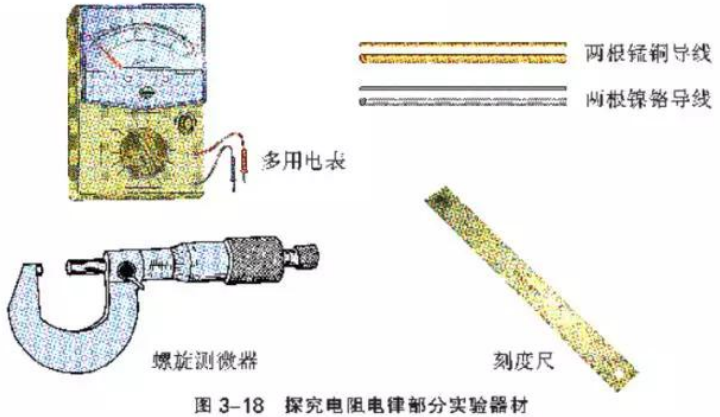


图 3-18 探究电阻电律部分实验器材

请将实验中测量的数据填入下表。

实验序号	材料	长度/m	横截面积/m^2	电阻/Ω
1	锰铜导线	L_1=	S_1=	R_1=
2	锰铜导线	L_2=	S_2=	R_2=
3	镍铬导线	L_3=	S_3=	R_3=
4	镍铬导线	L_4=	S_4=	R_4=

分析表中的数据，不难得出以下结论：

对同种材料的导体而言，导体的电阻跟它的长度成正比，跟它的横截面积 S 成反比，即

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

引入比例系数 ρ，可将上式写成

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

对于不同的材料，上式中的 ρ 是不同的。因此，ρ 反映了材料的导电性能，我们把它叫做材料的**电阻率**(resistivity)。对同一种材料而言，它是一个不变的物理量。

上式所反映的规律叫做**电阻定律**(law of resistance)。

请利用你的实验数据，分别计算出锰铜、镍铬导线的电阻率 ρ。并导出电阻率在国际单位制中的单位。

几种导体材料在温度20℃时的电阻率

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

多学一点 金属电阻率与温度的关系

为什么在导体材料电阻率的表格中要标明是 20 ℃下的电阻率呢？

实验表明，纯金属的电阻率随温度的变化与纯金属电阻一样，也比较有规则。当温度的变化范围不大时，电阻率与温度之间近似地存在着如下的线性关系：

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

式中 ρ 表示温度为 t℃时的电阻率，ρ_0 表示 0℃时的电阻率。不同材料的 α 是不同的，大多数纯金属的 α 值近似为 0.004/℃。

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

探究电阻的串联、并联和混联

在初中物理中，我们已初步了解了用电器串联、并联的一些特点，并对它们的电流和电压进行了定量研究。下面我们进一步

研究串联、并联电路中总电阻变化的定量规律。

分析论证

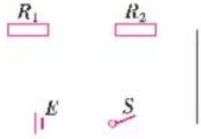


图 3-19　电阻串联电路图

在图 3-19 所示的串联电路中，设通过电阻 R_1、R_2 的电流为 I，R_1、R_2 两端的电压分别为 U_1、U_2，$R_{总}$ 为 R_1、R_2 串联后的总电阻，它又叫做 R_1、R_2 串联的等效电阻。

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

$$R_{总} = R_1 + R_2$$

假如将 n 个电阻串联，则

$$R_{总} = \sum_{i=1}^{n} R_i$$

数学中常用符号 $\sum$ 表示求和，即

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

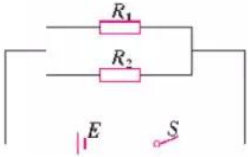


图 3-20　电阻并联电路图

在图 3-20 所示的并联电路中，设 R_1 和 R_2 两端的电压为 U，$R_{总}$ 为 R_1、R_2 并联后的总电阻。

请你导出 $R_{总}$ 跟 R_1、R_2 的关系式

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

将上式推广到 n 个电阻并联的情况，则可得

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

请你将分析论证的结果，与第一节中用多用电表测串联和并联电阻的阻值的结果相比较，它们相吻合吗？为什么？

对于图 3-21 所示的混联电路，我们可以用等效电路的方法来处理。首先将 R_1、R_2 按照并联关系计算出它们并联后的等效阻值 R'，再把原电路等效为图 3-22 所示的电路，这是一个 R'、R_3 的串联电路。这样就可以计算混联电路的总电阻。

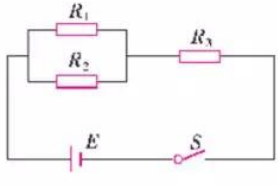


图 3-21　电阻混联电路图

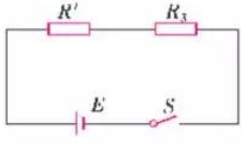


图 3-22　等效电路图

STS 超导现象

1911 年，荷兰物理学家昂内斯(H. Q. Onnes)发现，水银的电阻率并不像预料的那样随温度的降低逐渐减小，当温度降到 4.15K(−269℃)附近时，水银的电阻会突然降到零。某些金属、合金和化合物，在温度降到绝对零度(−273.15℃)附近某一特定温度时，它们的电阻率会突然减小到无法测量，这种现象叫做超导现象(superconductivity)，能够发生超导现象的物质叫做超导体(superconductor)。超导体由正常状态转变为超导状态的温度，称为这种物质的转变温度(或临界温度)T_c。现已发现，大多数金属元素以及数以千计的合金、化合物，都在不同条件下显示出超导性。例如，铝、锌和铅的转变温度分别为 0.012K、0.75K 和 7.193K。

经典物理理论对超导现象产生的原因无法解释。为了从微观上对这一现象进行解释，固体物理学家花费了近半个世纪的心血。直到 1957 年，巴丁(J. Bardeen)、库珀(L. N. Cooper)和施里弗(J. R. Schrieffer)才建立了超导理论(BCS 理论)。为此，他们荣获 1972 年诺贝尔物理学奖。

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

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

阻碍超导现象大规模应用的主要困难是所要求的低温。如果能得到在室温下发生超导现象的材料，就会使世界工业发生巨大的变化。到 1992 年初，人们已经开发出 70 多种超导氧化物，将超导转变温度提高到 125K 左右。科学家把氧化物超导体叫做高温超导体。我国在新的高温超导材料方面的研究已走在世界的前列。

家庭作业与活动

1. 用横截面积为 0.63mm²、长 200m 的铜丝绕制一个线圈。这个线圈允许通过的最大电流是 8.0A。它两端最多能加多大的电压？
2. 有一根长 1.22m 的合金铜丝，横截面积为 0.10 mm²。在它两端加 0.60V 电压时，通过它的电流正好是 0.10A。试问这根合金铜丝可能是由哪种材料制成的？
3. 有一金属丝，长 1m，电阻为 15Ω，现将金属丝两端连接成一闭合圆环(图 3-23)，在圆环上取 P、Q 两点。已知 P、Q 间的短圆弧长 20cm，求 P、Q 间的电阻值。

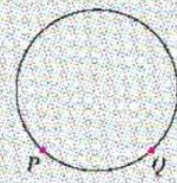


图 3-23

课题研究

实验探究铅笔芯的电阻

取一只多用电表、一把直尺、一个螺旋测微器，请你设计实验，结合查阅文献资料的方法研究下列问题。

(1) 验证电阻定律。

(2) 了解铅笔芯的主要组成成分，通过实验比较“2B”、“HB”、“H”三种型号的铅笔芯，探究哪种铅笔芯导电性能最好，为什么？

(3) 将铅笔芯放在点燃的酒精灯上加热，并在加热过程中测量它的电阻，你发现了什么？说出其原因。

3.4 多用电表电路分析与设计

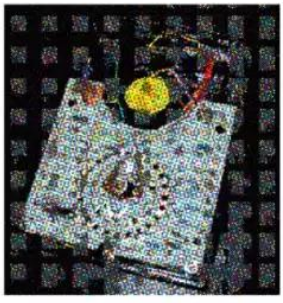


图 3-24　多用电表电路板

多用电表既能测电压，又能测电流，还能测电阻，而且具有多个量程。它是怎样实现这些功能的呢？

图 3-24 是多用电表的电路板。多用电表的各种功能都是通过其内部的电路转换实现的。本节先研究多用电表测量电压和电流的电路。

多用电表测电压电路的分析与设计

多用电表表头是一个小量程电流表，其原理将在第 5 章中学习。一般微安电流表的内阻 R_g 为几百欧姆到几千欧姆，它的满偏电流 I_g（指针偏转到最大刻度时的电流）为几微安到几十微安。由欧姆定律可知，它能承受的最大电压 U_g 仅为几毫伏到几十毫伏。

多用电表到底是怎样测量电压的呢？

分析论证

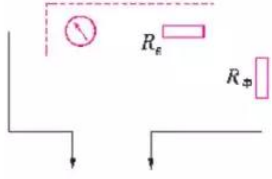


图 3-25

有一个电流表，其 $I_g = 50\mu A$，$R_g = 1000\Omega$。怎样将它改装成一个量程为 0—5V 的电压表？根据串联电阻具有分压作用，是否可以将一个电阻串联在表头电路中来解决这个问题呢？

让我们就这个问题做一分析计算。如图 3-25 所示，设跟表头串联的电阻为 $R_串$。要用跟 $R_串$ 串联后的表头去测量 5V 的电压，又要保证通过表头的满偏电流仍然为 I_g，那么，$R_串$ 的电阻值应该多大呢？

由 $I_g R_g = U_g$ 可知

$$U_g = 50\text{mV}$$

再由 $I_g(R_g + R_串) = U$ 可得

$$R_串 = \frac{U - U_g}{U_g} \cdot R_g = \left(\frac{U}{U_g} - 1\right) R_g = (100 - 1) R_g = 9.9 \times 10^4\ \Omega$$

在上式中，U/U_g 叫做电压量程的扩大倍数，一般用 n 表示，即

$$n = \frac{U}{U_g} = 100$$

通过上面的分析计算可知，虽然多用电表表头的 I_g 很小（如 50μA），能承受的电压 U_g 也很小（如 50mV），只要串联一个大的电阻（如 $9.9\times10^4\ \Omega$），换上新的刻度盘（如 0—5V），就可以利用它来测量较大的电压（如 0—5V）。

现有一电流表（$I_g = 50\mu A$，$R_g = 2000\Omega$），要将其改装成双量程的电压表（0—10V、0—50V）。请设计电路，画出电路图，并参照电路图进行计算。

多用电表测电流电路的分析与设计

多用电表表头的量程 I_g 很小，它是怎样实现测量较大电流 I 的功能的呢？

请用并联电路的有关知识，仿照改装电压表的思路和方法，通过分析和计算，画出相应的电路图。

多学一点 测量小量程电流表的内阻

小量程电流表的满偏电流 I_g，可以从刻度盘上直接读出。怎样测出它的内阻 R_g 呢？

R_g 可以用“半偏法”实验测出。在图 3-26 所示的电路中，R 为电位器，$R_{箱}$ 为电阻箱。闭合电键 S_1，调节 R 的值，使电流表指针偏转到满刻度（注意不要超过 I_g，以免烧坏表头）。再闭合电键 S_2，调节 $R_{箱}$ 的阻值，使电流表指针偏转到正好是 $I_g/2$ 的位置（这就是“半偏法”名称的由来）。计算可得

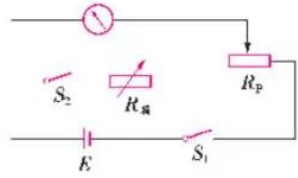


图 3-26 半偏法测表头内阻的电路图

$$R_g = \frac{R_{箱}}{1-\frac{R_{箱}}{R}}$$

当 $R \gg R_{箱}$ 时，可以近似认为 $R_g = R_{箱}$。因此，读出电阻箱的示数，就知道电流表的内阻 R_g。

实践作业与活动

1. 图 3-27 所示为有两个量程的电压表，当使用 a、b 两端点时，量程为 10V；当使用 a、c 两端点时，量程为 100V。已知电流表的内阻 R_g 为 500Ω，满偏电流 I_g 为 1mA，求 R_1 和 R_2 的电阻值。
2. 一个内阻为 100Ω 的电流表，允许通过的最大电流为 500μA。如果把它改装成量程为 2.5A 的电流表，应怎样改装？
3. 图 3-28a 所示为电阻表的电路原理图，G 为满偏电流 $I_g = 200\mu A$ 的电流表，表头内阻为 R_g，R_0 为定值电阻，R_P 是调零电阻，表内电源电动势 $E = 1.5V$，内阻为 r。图 3-28b 是表盘的电阻刻度，B 为 A、C 的中点。试分别确定 A、B、C 三点刻度的电阻值。
4. 有一个小量程的电流表，现要将它改装成符合以下要求的多用电表：
   (1) 改装后的多用电表要既能测电压，又能测电流。
   (2) 改装后的多用电表都是多量程的（量程的大小和多少，由你自己设定）。

   请画出完整的改装多用电表的电路图。有兴趣的同学还可以设计制作一个符合上述要求的多用电表。

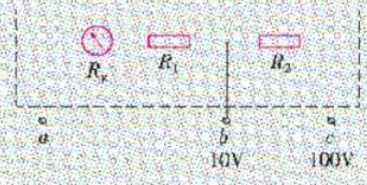


图 3-27

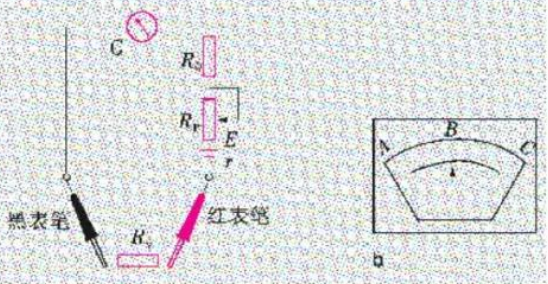


图 3-28

课题研究

设计改装双功能双量程电表

用一个小量程电流表，设计一个既能测量电压，又能测量电流的双功能双量程电表。要求：电压挡两个量程为 0—5V 和 0—10V，电流挡两个量程为 0—0.6A 和 0—3A。请画出电路图并实际安装。

3.5 逻辑电路与集成电路

逻辑电路

现代信息技术把我们带进了“数字时代”。人们把一条条信息转换成一串串由“0”、“1”组成的二进制数据，通过电路的“断”、“通”来传达信息和储存信息。完成这种功能的电路就是数字电路。**数字电路**(digital circuit)又称逻辑电路，它是由三种最基本的门电路构成的。

在门电路中，通常规定“断”为“0”，“通”为“1”。

“与”门电路

图 3-29 是一个简单的“与”门(AND gate)电路，电源通过电键 A 与 B 控制灯泡 H。

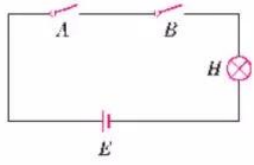


图 3-29 简单“与”门电路图

如果我们规定电路中开关断开和灯泡熄火用“0”表示，开关闭合和灯泡发光用“1”表示，这样，开关状态与灯泡状态 Z 的关系可以用右表表示。

符号“&”表示“和”、“与”，就是英文“and”的意思。

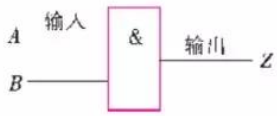
“与”门电路状态表

A	B	Z
0	0	0
0	1	0
1	0	0
1	1	1

可见，要使灯泡发光，必须满足 A 与 B 两只开关同时闭合的条件。“与”门电路反映了这样的逻辑关系：

$$Z = A \times B$$

我们把“与”门电路表示为



对于“与”门电路，只要一个输入端输入为“0”，则输出端一定是“0”；反之，只有当所有输入都同时为“1”，输出才是“1”。

“或”门电路

图 3-30 是一个简单的“或”门(OR gate)电路，电源通过开关 A 或 B 向灯泡 H 供电。

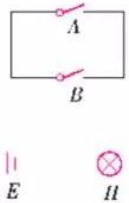


图 3-30 简单“或”门电路图

按照门电路中的通、断符号规定，请你完成“或”门电路状态表。

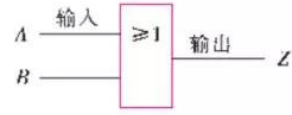
"或"门电路状态表

A	B	Z
0	0	
0	1	
1	0	
1	1	

可见，要使灯泡发光，只要开关 A 和 B 中有一个闭合就满足条件。"或"门电路反映了这样的逻辑关系：

$$Z = A + B$$

我们把"或"门电路表示为



符号"≥1"表示A、B输入数字之和必须大于或等于1。

对于"或"门电路，只要有一个输入端输入为"1"，则输出一定是"1"；反之，只有当所有输入都为"0"时，输出才是"0"。

"非"门电路

图 3-31 是一个简单的"非"门(NOT gate)电路。开关 A 控制灯泡 H。

按照门电路中的通、断符号规定，请完成"非"门电路的电路状态表。

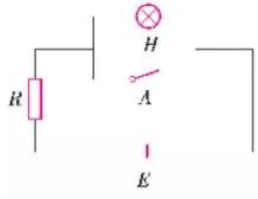


图 3-31 简单"非"门电路图

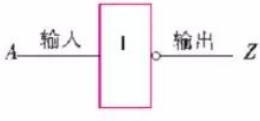
"非"门电路状态表

A	Z
0	
1	

可见，当开关 A 闭合时，灯泡 L 反而不亮，而开关 A 断开时，灯泡却发光。"非"门电路反映了这样的逻辑关系：

$$Z = \overline{A}$$

我们把"非"门电路表示为：



对于“非”门电路，当输入为“0”时，输出总是“1”；当输入为“1”时，输出反而是“0”。即输入跟输出恰好相反，“非”门电路也称为反相器。

逻辑电路的应用

案例分析 1 安全恒温器

在电热水器中，常用“与”门电路控制对水箱中水加热的过程。“与”门电路的两个输入端分别接上一个水位传感器和水温传感器，只有当水箱充满水，而且水温低于某一温度时，“与”门电路的输出端才给电热水器开关输入一个导通信号，电热水器的加热开关才会接通电源，对水箱中的水进行加热。

案例分析 2 车门报警器

案例 图 3-32 是一个应用某逻辑电路制作的简单车门报警电路图。图中的两个按钮开关 S_1、S_2 分别装在汽车的两道门上。只要其中任何一个开关处于开路状态，发光二极管（报警灯）就发光。请你根据报警装置的要求，列表分析开关状态与发光二极管的发光状态，并指出是何种门电路，在图中画出这种门电路的符号。

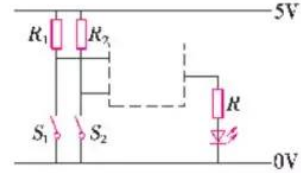


图 3-32 车门报警用的逻辑电路图

分析 驾驶员离开汽车时，两个车门均处于关闭状态，跟两个车门对应的开关 S_1 和 S_2 均闭合，这时发光二极管不会发光报警。为什么这时发光二极管不发光呢？原来 S_1 和 S_2 闭合后，电流不通过发光二极管。当有其他人打开了某一个门时，S_1 或 S_2 就处于断开状态，这时就有电流通过发光二极管，使其发光报警。可见，这一装置实际上是一个“或”门电路。

集成电路

自 20 世纪初真空电子管发明以来，电子器件的发展经历了

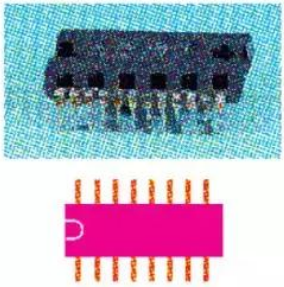


图 3-33　包含数千个晶体二极管和三极管的集成电路芯片

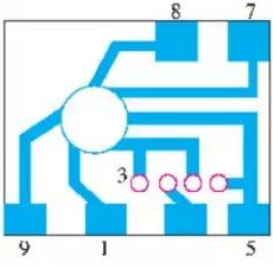
五代。第一代为电子管，第二代为晶体管，第三代为集成电路，第四代为大规模集成电路，第五代为超大规模集成电路。集成电路（图 3-33）的诞生，使电子技术出现了划时代的革命。它是现代计算机技术的硬件基础，也是微电子技术发展的里程碑。集成电路是将三极管、二极管（crystal triode）、电阻和电容等元件，按照电路结构的要求制作在一小块半导体材料上，形成一个完整的、具有一定功能并经过封装而制成的电路。

集成电路跟由分立元件组装的普通电路相比，具有重量轻、体积小、性能好和省电等多项明显优势。所以，电子产品的集成化已成为现代电子技术发展的必然趋势。

集成电路应用举例

音乐集成电路是一种乐曲发生器，它可以向外发送事先存储的乐曲，具有外接元件少、价格低、功能全、使用方便等优点，因此在家用电器、时钟和玩具等方面有着广泛的应用。

目前，音乐集成电路已有许多系列，有的为单乐曲，有的为双乐曲，而且在控制功能上也各不相同。此外，各种中文语言集成电路也已问世。音乐和语言集成电路虽然品种繁多，但它们的基本电路和工作原理大多是相同的（图 3-34）。



a 印制电路板

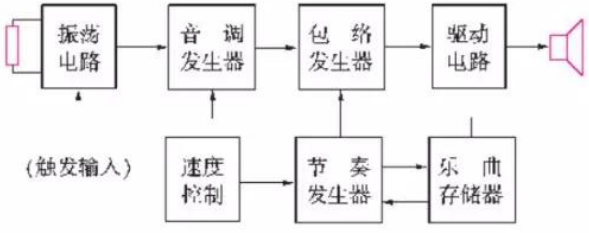
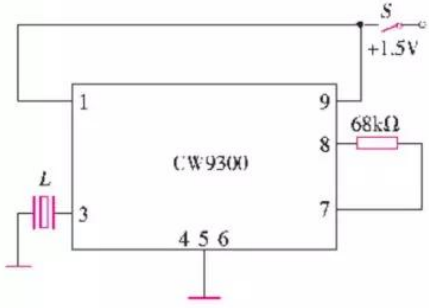


图 3-34　音乐集成电路基本原理框图



b 原理图

图 3-35

CW9300 是音乐集成电路中的一种（图 3-35）。它存储的乐曲种类很多，使用灵活，因而用途极广，可在玩具、电话、门铃、钟表及仪表中做发声装置。

图中 L 为发声元件，一般采用 HTD-20 或 HTD-27 压电陶瓷片，S 是常开式按钮开关，按下 S 就可以听到悦耳的乐曲。

3.x

第3章家庭作业与活动

A组

1. 导线中的电流为10A，20s内有多少个电子通过导体的横截面？
2. 长度相同的两段纯铜丝 a 和 b，它们的横截面积之比 $S_a:S_b=1:2$。在每一铜丝两端都加以相同的电压 U，这时两铜丝中自由电子的定向运动速度之比为多少？
3. 图3-36所示电路中，R_0 是已知的，要使 AB 间的总电阻恒等于 R_0，则 R_1 的电阻值是多大？

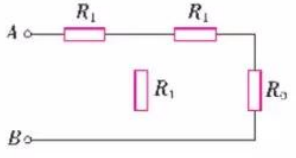


图3-36

4. 将图3-37改画成常见的串、并联电路，并求出 S 断开及闭合时，A、B 间的总电阻。

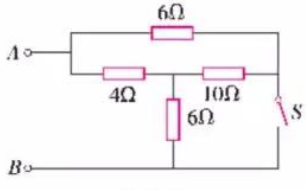


图3-37

5. 电流表的内阻是400Ω，量程是200μA。将它改装成量程为10V的电压表时，应串联多大的分压电阻？将它改装成量程为1A的电流表时，应并联多大的分流电阻？
6. 图3-38所示的是有两个量程的电流表。当使用 a、b 两端点时，量程为1A；当使用 a、c 两端点时，量程为0.1A。已知表头的内阻 R_g 为200Ω，满偏电流 I_g 为2mA，求 R_1 和 R_2。

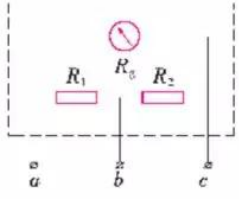


图3-38

B组

1. 把两个完全相同的电阻串联后，接上9V电压。用多用电表的0—5V挡去测量其中一个电阻两端的电压时，示数为4.2V。如果用多用电表的0—15V挡去测量，则测得该电阻两端的电压应该是多大（提示：多用电表在不同量程时的内阻不同）？
2. 一只量程为0.6A的电流表，其刻度盘如图3-39所示。现在此电流表的两端并联一个电阻，其阻值等于该电流表内阻的1/2，使之成为一只新的电流表，请在刻度盘上标出新的刻度。

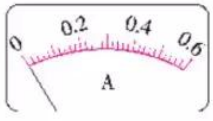


图3-39

3. 图3-40为多用电表电阻挡的原理示意图，其中电流表的满偏电流为300μA，内阻 R_g 为100Ω，调零电阻最大阻值 $R_P=50\text{k}\Omega$，串联的固定电阻 $R_0=50\Omega$，电源的电动势 $E=1.5\text{V}$，用它测量电阻 R_x，能准确测量的阻值范围是多大？

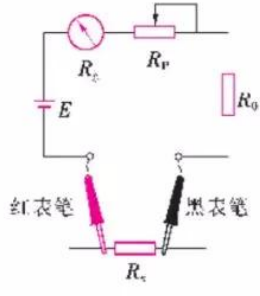


图3-40

第 4 章
探究闭合电路欧姆定律

在第 3 章中，我们研究了多用电表测量电压和电流时表内电路的设计原理，这些电路均未涉及电源。通常，把不涉及电源的电路叫做**部分电路** (partial circuit)，把含有电源的**闭合电路**(closed circuit)叫做**全电路**。

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

本章将通过实验探究和分析论证，研究电源的性质与作用；探究闭合电路中各电学量相互制约的规律——闭合电路欧姆定律；再用这一规律分析多用电表的欧姆挡电路，并解决有关的实际问题；最后分析闭合电路中能量的转化与守恒问题。

4.1 探究闭合电路欧姆定律

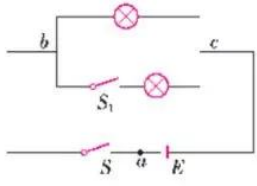


图 4-1　测量路端电压电路图

路端电压(terminal voltage)，通常指电源向某一电路供电，电流流进和流出的两端点之间的电压，或外电路两端的电压。

从部分电路到闭合电路

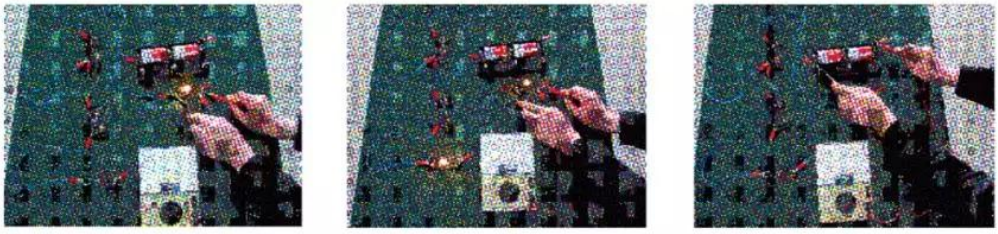
实验探究 1　用多用电表测量路端电压

请参照图 4-1 所示的电路选择器材，连接电路(图 4-2)，并按下面的实验步骤进行操作。

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

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

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



a b c

图 4-2 实测路端电压

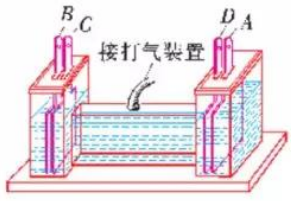
实验表明，U_{bc} 和 U'_{bc} 均比 U_{ac} 小，且 U'_{bc} 更小，这是什么原因呢？

有同学认为，上述结果是因为导线有电阻，电流通过导线有电势降落造成的。也有同学认为，上述结果是因为电流通过电源内部有电势降落所致。你的看法是什么？能否用实验来证明你的看法正确呢？

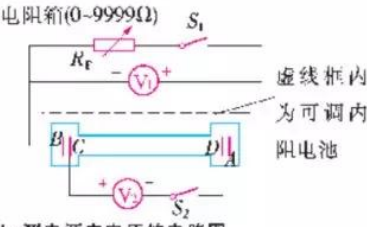
实验探究 2 测电源内部的电压

图 4-3a 是一种可调内阻的化学电池。A、B 为电池的正、负极，C、D 为靠近正、负极的两个探极，以便测量电池内部的电压。向电池内打气，可以改变电解质溶液液面的高低，从而改变电池的内电阻。可调内阻电池的内阻一般较大。图 4-3b 是实验电路图。下面向你提供某小组同学利用这个装置进行实验所收集的数据记录，供你参考。同时，请你参照图 4-3 进行实验，并仿照下面的表格填写你所收集到的实验数据。你得出的结论是什么？

做这个实验，最好用内阻很大的数字式电压表或多用电表的电压挡。



a 可调内阻电池结构示意图



b 测电源内电压的电路图

图 4-3

实验数据记录

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

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

电源的作用——电动势

分析论证

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

E 是表示电源特性的一个重要物理量，它的物理意义是什么呢？

如图 4–3 所示，由于电源两端有电压，在外电路中，正电荷在电场力的作用下，由电源的正极向电源的负极做定向移动，从而形成了电流（在金属导体中是电子由负极向正极移动）。

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

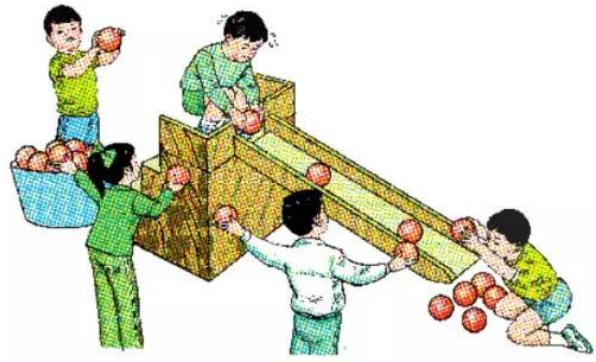


图 4–4　小朋友不断地把小球从地面搬至滑梯上

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

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

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

$$qU_{外} + qU_{内} = W_{非}$$

从前面的实验中已经知道 $E = U_{外} + U_{内}$，

由此，我们可以得出

$$E = \frac{W_{非}}{q}$$

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

信息浏览

常见的化学电池、太阳能电池、温差电池、核电池等都是电源。最早的电池是伏打发明的“伏打电堆”。近代电子工业和航天工业的发展，促进了新型电池的研制。1941年法国人安德烈研制出银锌电池；1958年美国人培根研制出高功率氢燃料电池，它后来被成功地用于美国“阿波罗”号登月飞船中；20世纪70年代前半期，美、法、日等国家研制出高能量锂电池。

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

闭合电路欧姆定律

上述实验探究和分析论证均表明，电源的电动势等于闭合电路中内、外电压之和，即

$$E = U_{外} + U_{内}$$

由部分电路欧姆定律，可以导出

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

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

案例分析

案例 用一只高阻值的电压表和电阻箱，可以测出电源的电动势和内阻。按图4-5所示连接电路，先闭合S_1，从电压表中读得$U_1 = 2\text{V}$；再闭合S_2，改变电阻箱的电阻，当$R = 24\Omega$时，$U_2 = 1\text{V}$。请根据上述数据计算电池的电动势E和内阻r？

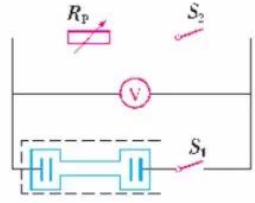


图4-5

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

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

开关S_2闭合时，干路中电流为

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

而电动势为

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

代入有关数据解得内阻$r = 24\Omega$。

课后作业与测试

1. 图 4-6 所示的是两个电池外壳的说明文字.上述进口电池的电动势是_____V；上述国产电池最多可放出_____mAh 的电量，若该电池平均工作电流为 0.03A，则最多可使用_____h. 图中还提供了哪些信息？你能说出这些信息的物理意义吗？



某型号进口电池
RECHARGEABLE
1.2V 600mAh
STANDARD
CHARGE
15h at 50mA

某型号国产电池
GNY0.6(KR——AA)
1.2V 600mAh
RECHARGEABLE
STANDARD CHARGE
15h at 60mA

图 4-6

2. 某同学在图 4-7 所示的研究闭合电路欧姆定律的实验中，保持电池内阻不变，改变 R 的阻值，记录了八次实验数据如下表，请利用这些数据算出此电源的电动势 E = _____V，内阻 r = _____Ω.

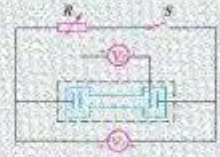


图 4-7 可测内阻电池电路图

R/Ω	2	5	10	20	25	30	40	50
$U_外$/V	0.14	0.32	0.57	0.89	1.03	1.10	1.24	1.37
$U_内$/V	1.94	1.75	1.50	1.18	1.04	0.97	0.83	0.71

3. 观察某手机用的电池板，上面标出的容量、电压各是多少？了解该手机电池充满电后能连续工作多少小时？估算出手机工作时电流大约是多大？

4. 如图 4-8 所示，若在可测内阻电池的两个接线上，并联一只几欧姆的电阻 R，则电源的电动势

A. 变大　　B. 变小

C. 不变　　D. 无法判断



图 4-8

5. 闭合电路的欧姆定律与初中学过的部分电路欧姆定律之间，既有区别又有联系，请你完成下表.

比较项目	公式	式中各物理量的含义	适用范围	联系
部分电路欧姆定律				
闭合电路欧姆定律				

周南物理段石峰

4.2

测量电源的电动势和内阻

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

测量电路的分析与设计

图 4-9 是一个用伏安法测电源电动势和内阻(internal resistance)的电路。

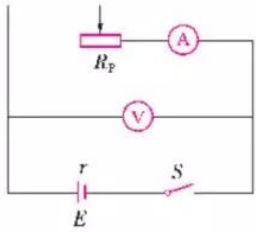


图 4-9

这个电路的设计思想是，不需要通过测 $U_{内}$，只需改变 R_P 值测 $U_{外}$ 和通过电源的电流 I，由闭合电路欧姆定律建立方程组

$$E = U_1 + I_1 r$$

$$E = U_2 + I_2 r$$

便可求出电源的 E 和 r。

如果只有一只电压表、一个电阻箱(或几个已知阻值的定值电阻)、待测的干电池和若干导线，请思考应设计怎样的电路来测 E 和 r？

如果现有一只电流表、一个电阻箱(或几个已知阻值的定值电阻)、待测干电池和若干导线，请探讨应设计怎样的电路来测 E 和 r？

你还能选用不同的器材，设计出其他的电路吗？

数据处理方法讨论

分析论证　数据处理的方法

以“伏安法”测量电源的电动势和内阻为例，改变滑动变阻器

的阻值 R_P，可以得到若干组 I 和 $U_{外}$ 的数据，填入下表。

实验序号	1	2	3	4	5	6
I/A	I_1	I_2	I_3	I_4	I_5	I_6
$U_{外}$/V	U_1	U_2	U_3	U_4	U_5	U_6

如何科学地处理这些实验数据呢？

处理方法一：通过上述方程组，求出几组 E、r 值，再求其平均值。请你说出这样处理数据的目的是什么。

处理方法二：在坐标纸上，以 I 为横坐标，U 为纵坐标，选取适当比例，用测得的 I 和 $U_{外}$ 值，画出 $U-I$ 图像。由于 $U=E-Ir$ 中的 E、r 是确定值，U 与 I 是一次函数关系，故 $U-I$ 应是一条直线。因实验误差，实测数据的点不会严格地分布在同一条直线上。我们可以根据坐标纸上点的分布情况，用直尺画出一条光滑的直线，如图 4–10 所示。

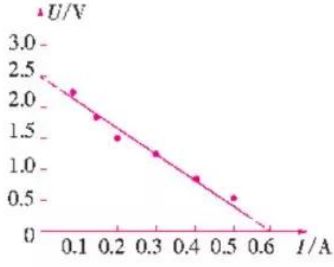


图 4–10

请讨论：应怎样画这条直线？怎样利用这条直线，获得 E 和 r 的值？这样做有什么好处？

实测电源的电动势和内阻

请参照上述方法，拟定实验步骤，进行实验，将测得数据填入下表，并在图 4–11 中的坐标纸上画出 U–I 图像，测算出一节干电池的电动势 E 和内阻 r。

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

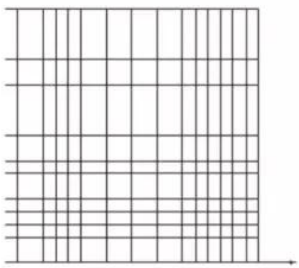


图 4–11

多学一点　电池组

用电器在额定电压和额定电流下才能正常工作。为了使用电器正常工作，必须配有合适的电源。然而，任何一个电池都有一定的电动势和允许通过的最大电流。为此，必须将若干个电池组成电池组，以适应不同规格用电器的需要。通常都是用相同的电池组成电池组。

如图 4–12a 所示，设每个电池的电动势为 E，内阻为 r，若将 n

个电池的正极和负极依次连接起来，便组成了串联电池组。由于每个电池正极的电势比它负极的电势高 E，因此，串联电池组正极的电势比它负极的电势高 nE，整个串联电池组的电动势和内阻分别为：

$$E_{串} = nE,\ r_{串} = nr$$

串联电池组适用于用电器的额定电压高于单个电池的电动势的情况。但必须注意：用电器的额定电流应小于单个电池允许通过的最大电流。

如图 4–12b 所示，设每个电池的电动势为 E，内阻为 r，若将 n 个电池的正极和正极相连接，负极和负极相连接，便组成了并联电池组。并联电池组正负极间的电动势等于每个电池正负极间的电动势，并联电池组的内阻为 n 个电阻 r 的并联电阻 $r_{并}$，即

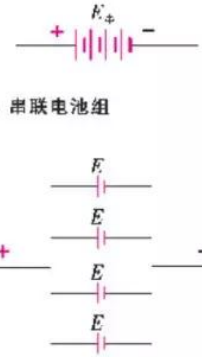
$$E_{并} = E,\ r_{并} = \frac{r}{n}$$

并联电池组适用于用电器的额定电流比单个电池允许通过的最大电流大的情况。

有时还需要把几个串联电池组再并联起来组成新的电池组，这种新的电池组叫做混联电池组。

想一想，在什么情况下要使用混联电池组？

请同学们找几个相同的干电池，把它们分别组成串联电池组和并联电池组，用多用电表测一测电池组的电动势。



a 串联电池组

b 并联电池组

图 4–12

课题研究

用电势差计测电源的电动势

在一般情况下，常用电压表或多用电表直接测量电源的电动势。电源总是有内阻的，当有电流通过时，内阻上必然有电势降落，因而测出的值仍为路端电压。采用电势差计测量电源的电动势，可以避免电源内阻的影响。

如图 4–13 所示，E 为供电电源，E_s 为标准电源，E_x 为待测电源，R_P 是限流电阻，r_0 是小量程电流表保护电阻。

测量时，首先闭合 S_1，电阻丝 AB 上有一定的电势降落。接着将 S_2 合到“1”位置，改变电阻丝 AC 的阻值，使检流计指针指零，即电势差计平衡，$E_x = U_{AC} = IR_{AC}$；再将 S_2 转换到“2”位置，改变 AC 的阻值，使电势差计再次达到平衡，$E_s = U_{AC'} = IR_{AC'}$。两式相比，可得

$$\frac{E_x}{E_s} = \frac{IR_{AC}}{IR_{AC'}}$$

因为

$$\frac{R_{AC}}{R_{AC'}} = \frac{\overline{AC}}{\overline{AC'}}$$

故

$$E_x = \frac{AC}{AC'}E_s$$

请你参照图 4–13，选择器材，安装电路，进行实验。讨论当电势差计平衡时，为什么检流计的指针指零？

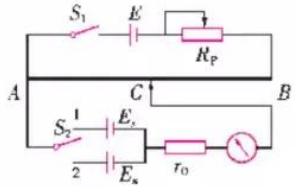


图 4–13

实验作业与活动

1. 在测定电源电动势和内阻的实验中，为提高实验效果而且又不会损坏仪器，应选择下列电源中的

A. 内阻较大的普通干电池

B. 内阻较小的普通蓄电池

C. 小型交流发电机

D. 小型直流发电机

2. 在用电压表、电流表测两节干电池串联的电动势和内阻时，除备有被测电池、电键和足量导线外，还有下列仪器可供选择：

(A) 电流表$(\widetilde{A}_1)$(0–0.6A)

(B) 电流表$(\widetilde{A}_2)$(0–3A)

(C) 电压表(V_1)(0–3V)

(D) 电压表(V_2)(0–15V)

(E) 滑动变阻器R_{P1}(20Ω,2A)

(F) 滑动变阻器R_{P2}(1750Ω,3A)

应该选用的仪器是（写出前面的字母）_____。

一个学生用以上仪器测得如下表中的数据，在图4–14所示的坐标纸上画出U–I图像，从图中可得出电源电动势为_____V，内阻为_____Ω。

实验序号	1	2	3	4	5	6
U/V	2.70	2.50	2.30	2.00	1.80	1.62
I/A	0.08	0.16	0.25	0.36	0.45	0.50

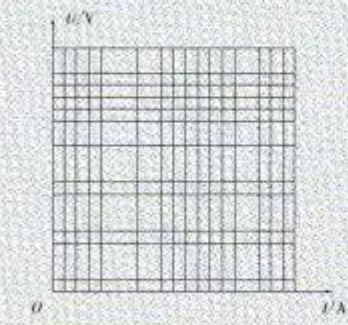


图4–14

3. 图4–15所示的电路中，R_1、R_2为标准电阻，测定电源电动势和内阻时，如果偶然误差可以忽略不计，则电动势的测量值比真实值_____，内阻的测量值比真实值_____。测量误差产生的原因是_____。

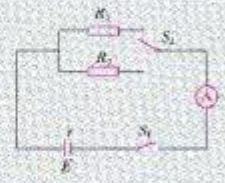


图4–15

4. 找一个晶体管收音机，打开后背盖看看有几节干电池，它们是怎样连接的？算一算，该收音机的电源电压是多少。

周雨物理段石峰

4.3 典型案例分析

闭合电路欧姆定律是一个重要的电学规律，在生活、生产和科学研究中有着广泛的应用。例如，在设计生产和维修保养许多电学器件和仪表时，经常需要运用闭合电路欧姆定律来分析或排除故障。

案例分析 1

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

图 4-16 是多用电表电阻挡的电路图。设表头的满偏电流为 I_g，内阻为 R_g；电池的电动势为 E，内阻为 r；可变电阻为 R_P（调零电阻）。因此欧姆表的内阻为 $r + R_g + R_P$。

当红、黑表笔相接时（图 4-16a），相当于被测电阻 $R_x = 0$。调节调零电阻 R_P 的阻值，使表头的指针指到满刻度。在刻度盘上，把指针所指的电流满偏的位置，定为电阻刻度的“0”点。

当红、黑表笔不接触时（图 4-16b），相当于被测电阻 $R_x \to \infty$，电表中没有电流，表头的指针不偏转，把指针所指的位置定为电阻刻度的“∞”点。

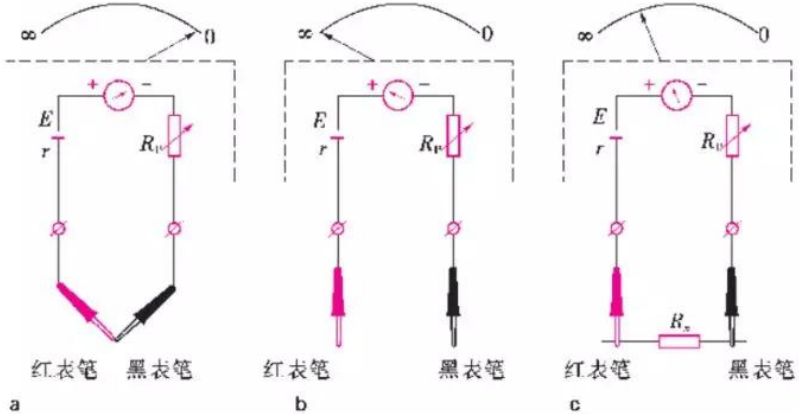


图 4-16

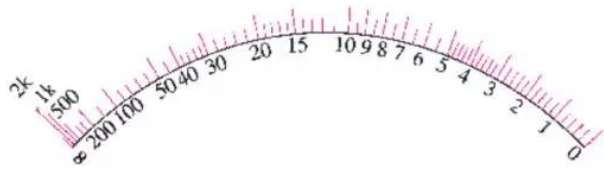


图 4–17　欧姆表的刻度盘

当红、黑表笔间接入被测电阻 R_x 时(图 4–16c),通过表头的电流

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

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

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

由此可见,电流 I 随着被测电阻 R_x 的改变而变化。每个 R_x 值都对应着一个 I 值。如果在刻度盘上直接标出与 I 值对应的 R_x 值(图 4–17),就可以直接读出被测电阻的阻值了。

欧姆表刻度盘上的刻度为什么是不均匀的?

是否每次测量电阻时,都要先调节调零电阻 R_P?

案例分析 2

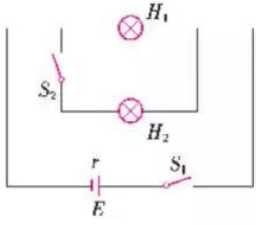


图 4–18

案例　如图 4–18 所示,电源的电动势为 3 V,内阻为 1 Ω,两个相同的小灯泡 H_1 和 H_2 的额定电压均为 2.5 V,额定电流均为 0.3 A。

(1) 闭合开关 S_1,试计算 H_1 中的电流和加在 H_1 上的电压。

(2) 闭合开关 S_2,再闭合 S_1,试计算 H_2 中的电流和加在 H_2 上的电压。

有同学做了如下解答:

(1) 小灯泡 H_1 和 H_2 的电阻均为

$$R = \frac{2.5}{0.3}\ \Omega \approx 8.3\ \Omega$$

干路中电流 $I = \dfrac{E}{R + r} = \dfrac{3}{8.3 + 1}\ \text{A} \approx 0.32\ \text{A}$

小灯泡 H_1 上的电压即为路端电压

$$U = E - Ir = (3 - 0.32 \times 1)\ \text{V} = 2.7\ \text{V}$$

(2) 因小灯泡 H_2 与小灯泡 H_1 并联，小灯泡 H_2 上的电压 $U=2.7\text{V}$，

小灯泡 H_2 中的电流 $I_2=\dfrac{U}{R_2}=\dfrac{2.7}{8.3}\text{ A}\approx 0.33\text{ A}$

你认为这位同学的解答正确吗？为什么？

请把你的想法说出来，并与同学进行交流。再把你的解答过程写出来。

案例分析 3

案例 在图 4–19 所示的电路中，R_1、R_2、R_3 和 R_4 都是定值电阻，R_P 是可变电阻，电源的电动势为 E，内阻为 r。设电流表的示数为 I，电压表的示数为 U，闭合开关 S，当 R_P 的滑片 P 向 a 端移动时

A. I 变大，U 变小

B. I 变大，U 变大

C. I 变小，U 变大

D. I 变小，U 变小

分析 当滑片 P 向 a 端移动时，R_P 减小，外电路总电阻也随着减小。由 $I=\dfrac{E}{R+r}$ 知，电路中的总电流 I 增大。由 $U=E-Ir$ 知，路端电压 U 减小，即电压表的示数减小。同时，I 的增大使 R_1 与 R_2 两端的电压增大，而 $U=U_1+U_{ab}+U_3$，则 U_{ab} 必减小，通过 R_2、R_4 和电流表的电流也减小，所以选项(D)正确。

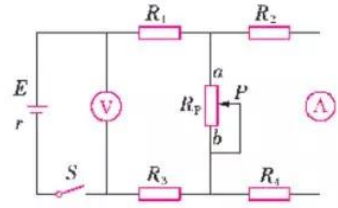


图 4–19

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

课题研究

关于用电高峰的调查研究

随着夜幕的降临，用电逐渐达到高峰，电灯也没有平常亮了；可是到了夜深人静时开灯，电灯却比平常亮，有时甚至会烧坏灯泡。

你怎样解释这个现象？

请对你所在社区的用电高峰情况做一调查，并向有关部门提出改进的建议。

课后作业与检测

1. 关于欧姆表及其使用中的问题，下列说法中正确的是
   A. 接表内电源负极的应是黑表笔
   B. 换挡后，都要重新调节调零电阻，使指针指到高刻度
   C. 表盘上标明的电阻阻值刻度是均匀的
   D. 表盘刻度最左边表示的电阻阻值为零

2. 图 4-20 所示的是把量程为 3 mA 的电流表改装成欧姆表的结构示意图，其中电池电动势 $E = 1.5$ V。经改装后，若将原电流表 3 mA 刻度处的刻度值定为"0"位置，则 2 mA 刻度处应标示 _____ Ω，1 mA 处应标示 _____ Ω。

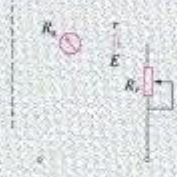


图 4-20

3. 若用 E 表示电源电动势，U 表示外电路电压，U' 表示内电路电压，R 表示外电路总电阻，r 表示内电路电阻，I 表示干路电的电流大小，考察下列各关系式

① $U' = IR$　② $U' = E - U$　③ $E = U + Ir$

④ $I = \dfrac{E}{R + r}$　⑤ $U = \dfrac{ER}{R + r}$　⑥ $U = E + Ir$

上述关系式中成立的是

A. ①②③④　B. ②③④⑤
C. ①④⑤⑥　D. ①③⑤⑥

4. 如图 4-21 所示，灯 H_1 与灯 H_2 的电阻相同，当滑动变阻器 R_0 的滑片 P 向上移动时，两灯亮度变化的情况是
   A. 灯 H_1 变亮，灯 H_2 变亮
   B. 灯 H_1 变暗，灯 H_2 变亮
   C. 灯 H_1 变暗，灯 H_2 变暗
   D. 灯 H_1 变亮，灯 H_2 变暗

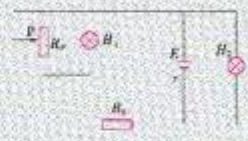


图 4-21

5. 图 4-22 中每节电池的电动势为 1.5 V，内阻为 0.3 Ω，$R_1 = R_2 = R_3 = R = 4$ Ω，求电压表和电流表的示数。

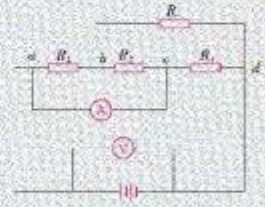


图 4-22

周南物理段石峰

4.4 电路中的能量转化与守恒

能量转化与守恒定律是自然界的普遍规律。本节将在初中物理的基础上，对闭合电路中能量的转化与守恒做一些具体的分析。

电功与电热关系的分析

电功的普遍表达式

分析论证

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

由前面学过的知识知道，电场力对电荷 q 所做的功为 $W = qU$，而 $I = \frac{q}{t}$，所以

$$W = UIt$$

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

请根据电功的公式推导出**电功率**(electric power)的计算公式：

$$P = _____$$

电功与电热

分析论证

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

$$Q = I^2Rt$$

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

为什么电流通过导体会发热呢?你能用导体电阻的微观机理进行解释吗?

单位时间内电流通过导体发热的功率通常叫做**热功率**,其表达式为

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

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

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

请思考并讨论:

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

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

案例分析

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

分析 由于电路中有电动机,所以,本题属非纯电阻电路问题。电动机产生的热量是由线圈产生的,根据 $Q = I^2Rt$ 可算出通过线圈的电流 I;再根据电功率的有关公式,可算出电动机的输入功率,将输入功率减去转化为内能的功率,就是电能转化为机械能的功率了。

请按上述分析过程,完成有关计算。

闭合电路中的能量转化与守恒

分析论证

根据闭合电路欧姆定律，$E = U + U_{内}$，如果在其两边同时乘以电流 I，则变为

$$EI = UI + U_{内}I$$

上式中，EI 表示电源提供的电功率，UI 表示外电路上消耗的电功率，$U_{内}I$ 表示内电路上消耗的电功率。这说明电源提供的电能，一部分消耗在外电路上，转化为其他形式的能；另一部分消耗在内电路上，转化为内能，而总的能量是守恒的。它完全符合能量转化和守恒定律。

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

电源的总功率为

$$P_{总} = EI$$

电源的输出功率为

$$P_{出} = UI$$

电源的效率为

$$\eta = \frac{UI}{EI} \times 100\% = \frac{U}{E} \times 100\%$$

案例分析

案例 如图 4–23 所示，已知发电机的内阻 $r = 0.1\ \Omega$，电路中导线的电阻 $r' = 0.2\ \Omega$，负载电阻 $R = 22\ \Omega$，电路中电流 $I = 10\ \text{A}$。求：(1)负载两端的电压；(2)外电路上的电压；(3)发电机的电动势；(4)整个外电路上消耗的功率；(5)负载上消耗的功率；(6)导线上消耗的功率；(7)发电机内部消耗的功率；(8)发电机的功率。

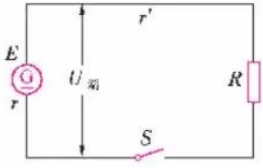


图 4–23

分析 负载两端的电压可由电流 I 和负载电阻 R 求得，即

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

请自行完成其余部分的分析和计算。

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

多学一点　电源的最大输出功率

在实际使用电源时，我们所关心的是如何充分利用电源，让电源输出的功率最大。那么，使电源输出功率最大的条件是什么呢？

由 $P_{外电}=I^2R=\left(\dfrac{E}{R+r}\right)^2R=\dfrac{E^2}{\dfrac{(R-r)^2}{R}+4r}$

分析上式可知，当 $R=r$ 时，才有最大输出功率，即 $P_{max}=\dfrac{E^2}{4r}$。

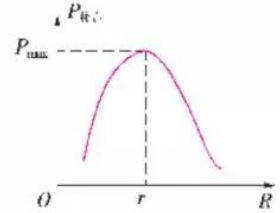


图 4-24

电源的输出功率与外电路总电阻的关系可以用图 4-24 所示的 $P_{输出}$-R 图像表示。

我们还可以通过电源输出功率与路端电压的关系来讨论电源的最大输出功率的条件。

$$P_{输出}=UI=U\left(\frac{E-U}{r}\right)=-\frac{1}{r}U^2+\frac{E}{r}U=-\frac{1}{r}\left(U-\frac{E}{2}\right)^2+\frac{E^2}{4r},$$

我们可以得出，当 $U=\dfrac{E}{2}$ 时，电源有最大输出功率，即 $P_{max}=\dfrac{E^2}{4r}$。

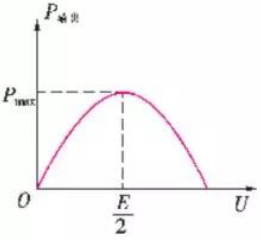


图 4-25

电源输出功率与路端电压的关系可以用图 4-25 所示的 $P_{外电}-U$ 图像表示。

电源的效率表示闭合电路中能量的有效利用效率。

$$\eta=\frac{U}{E}=\frac{U}{U+U_{内}}=\frac{R}{R+r}=\frac{1}{1+\dfrac{r}{R}}$$

当 $R=r$ 时，$\eta=50\%$。

家庭作业与活动

1. 试证明：
   (1) 在纯电阻电路中，串联电路上消耗的总功率 $P=UI$ 等于各个电阻上消耗的热功率之和。
   (2) 在纯电阻电路中，并联电路上消耗的总功率 $P=UI$ 等于各个电阻上消耗的热功率之和。
2. 如图 4-26 所示，电源的电动势是 6 V，内阻是 0.5 Ω，小电动机 M 的线圈电阻为 0.5 Ω，限流电阻 R_0 为 3 Ω，若电压表的示数为 3 V，试求：
   (1) 电源的功率和输出功率。
   (2) 电动机消耗的功率和电动机输出的机械功率。电动机在工作时，每分钟消耗多少电能？产生多少电热？

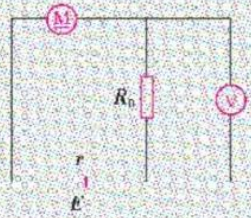


图 4-26

4.x

第 4 章家庭作业与活动

A组

1. 我国北京正负电子对撞机的储存环是周长为 240 m 的近似圆形轨道。当环中的电流是 10 mA 时(设电子的运动速度是 3×10^7 m/s),则在整个环中运行的电子数目为(电子电量 $e=1.60\times10^{-19}$ C)

   A. 5×10^{11}　　B. 5×10^{10}

   C. 1×10^{2}　　D. 1×10^{4}

2. 如图 4-27 所示,甲、乙两地相距 6 km,两地间架设两条电阻都是 6 Ω 的导线。当两条导线在甲、乙两地间的某处发生短路时,接在甲地的电压表的示数为 6 V,电流表的示数为 1.2 A,则发生短路处距甲地_____km。

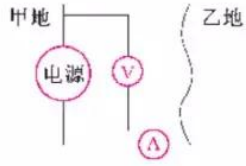


图 4-27

3. 在自动恒温装置中,某种半导体材料的电阻率与温度的关系如图 4-28 所示,这种材料具有发热和控温双重功能。回答下列问题:

   (1) 通电后,其电功率

   A. 先增大后减小　　B. 先减小后增大

   C. 一直不变　　D. 无法确定

   (2) 当其产生的热量与散发的热量相等时,温度保持在

   A. t_1

   B. t_2

   C. t_1 至 t_2 的某一值上

   D. 大于 t_2 的某一值上

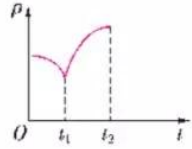


图 4-28

4. 太阳能汽车是利用太阳能电池将太阳能直接转化为电能,再利用电动机驱动汽车的一种新型汽车,目前正处在实验阶段。实验车的形状都比较怪,有一个几乎布满全部车身的太阳能电池板,还有流线型的外形,仅有的一位乘员(驾驶员)拥有的空间也极为有限。今后随着太阳能电池板效率的提高和轻型高强度车体材料的出现,实用型太阳能汽车必将会出现在我们的生活中。某辆实验车,太阳能电池板的总面积 $S=8$ m^2,电池组提供的电压 $U=120$ V,提供给电动机的工作电流 $I=10$ A,电动机内阻 $R=2\Omega$,太阳光照射到电池板单位面积上的辐射功率 $P_0=1$ kW/m^2,已知电动机的效率 $\eta=90\%$,在水平路面行驶时车受到的阻力 $f=150$ N。那么,这辆实验车在该路面上行驶的最大速率为_____,它所用的太阳能电池板的效率为_____。

5. 某居民家中的电路如图 4-29 所示,开始时各部分工作正常。将电饭煲的插头插入三孔插座后,正在烧水的电热水壶突然不能工作,但电灯仍正常发光;拔出电饭煲的插头,把试电笔分别插入插座的左、右插孔,氖管均能发光,则

   A. 仅电热壶所在的 C、D 两点间发生了断路故障

   B. 仅电热壶所在的 C、D 两点间发生了短路故障

   C. 仅导线 A、B 间断路

   D. 因为连接插座的导线接地,所以发生了上述故障

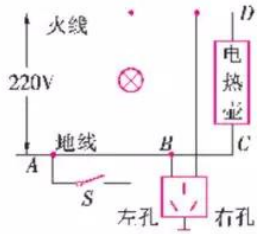


图 4-29

6. 微型吸尘器的直流电动机内阻一定，当加上0.3 V的电压时，通过的电流为0.3 A，此时电动机不转。当加在电动机两端的电压为2.0 V时，电流为0.8 A，这时电动机正常工作，则吸尘器的效率为多大？

7. 如图4-30所示，一网络式电路，每个电阻均为$R = 100\ \Omega$，问C、D间应接入多大电阻才能使A、B间的总电阻与"格子"数目无关？若该电路接上380 V恒定电源，则电源输出功率为多大？

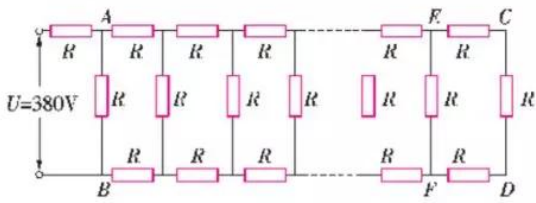


图4-30

8. 图4-31中有A、B、C三个接线柱，A、B之间接有内阻不计的10 V电源，手头有四个组值完全相同的电阻，将它们适当组合，接在A、C和C、B之间，构成一个电路，使A、C间的电压为6 V，C、B间电压为4 V。试设计两种方案，画出电路图。

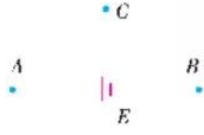
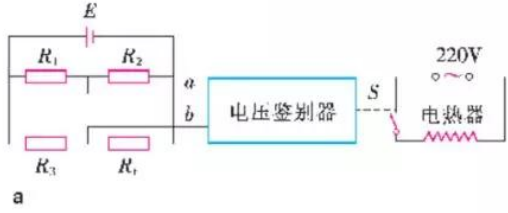


图4-31

B组

1. 如图4-32所示，图a为在温度为10 ℃左右的环境中工作的某自动恒温箱原理简图，箱内的电阻$R_1 = 20\ \text{k}\Omega$，$R_2 = 10\ \text{k}\Omega$，$R_3 = 40\ \text{k}\Omega$，R_t为热敏电阻，它的电阻随温度变化的图像如图b所示。当a、b端电压$U_{ab} < 0$时，电压鉴别器会令开关S接通，恒温箱内的电热丝发热，使箱内温度提高；当$U_{ab} > 0$时，电压鉴别器使S断开，停止加热，恒温箱内的温度恒定在　　℃。



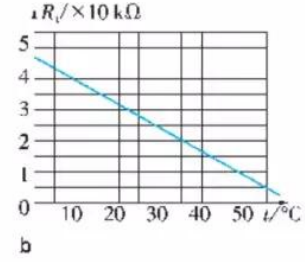


图4-32

2. 如图4-33所示为千瓦级质子交换膜燃料电池组性能图谱，其工作条件是：以H_2与O_2作为反应气体，控制电池温度，保持H_2与O_2的压强。根据该图回答下列问题：

(1) 该电池组稳定后的内阻r大小约为多少？

(2) 当输出电流大于40 A时，电池的输出功率范围是_____kW。

(3) 当电池的输出功率为1 kW时，相当于电动势为多大的普通电池？

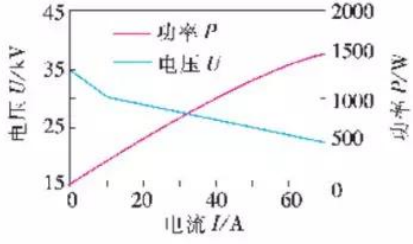


图4-33

3. 如图4-34所示，用电学方法测水流对小球的作用力F，质量为m的小铅球P系在细金属丝下面，悬挂在O点，BC为在水平方向上固定的一根粗细均匀的电阻丝，C端在O点正下方，且OC长为h，BC长为l，BC与金属丝接触良好，接触点为D，不计接触点D处的摩擦和金属丝

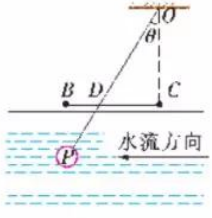


图4-34

电阻。将小铅球 P 放入水平流动的水中时，球向右摆起一定的角度 θ，水流速度越大，θ 越大。现取一电动势为 E、内阻不计的电源和一只电压表，用这些器材连成测量电路，使水不流动时，电压表示数为零，水流速度增大时，电压表示数越大。请画出电路图（B、C、O 均可接线）。若小球平衡时，电压表示数为 U，请用 m、l、h、E、U 表示 F。

4. 如图 4–35 所示，P 是一根表面均匀地镀有很薄的发热电阻膜的长陶瓷管（其长度 L 为 50 cm 左右，直径 D 为 10 cm 左右），镀膜材料的电阻率 ρ 已知，管的两端有导电箍 MN。现给你米尺、电流表Ⓐ、电压表Ⓥ、电源 E、滑动变阻器 R_p，电键 S 和导线若干，请设计一个测定膜层厚度 d 的实验方案。

（1）需测定的物理量是_____。

（2）画出测量电路图；

（3）计算膜层厚度的公式是_____。

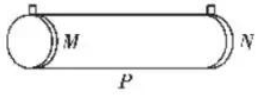


图 4–35

5. 某同学按图 4–36 所示电路进行实验，实验时该同学将滑动变阻器的滑片 P 移到不同位置时，测得各电表的示数如下表所示。将电压表内阻看作无限大，电流表内阻看作零。

（1）电路中 E、r 分别为电源的电动势和内阻，R_1、R_2、R_3 为定值电阻，在这五个物理量中，可根据下表中的数据求得的物理量是（不要求具体计算）_____。

（2）由于电路发生故障，发现两电压表示数相同了（但不为零），若这种情况的发生是由用电器引起的，则可能的故障原因是_____。

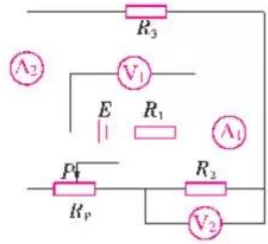


图 4–36

实验序号	A_1 示数/A	A_2 示数/A	V_1 示数/V	V_2 示数/V
1	0.60	0.30	2.40	1.20
2	0.44	0.32	2.56	0.48

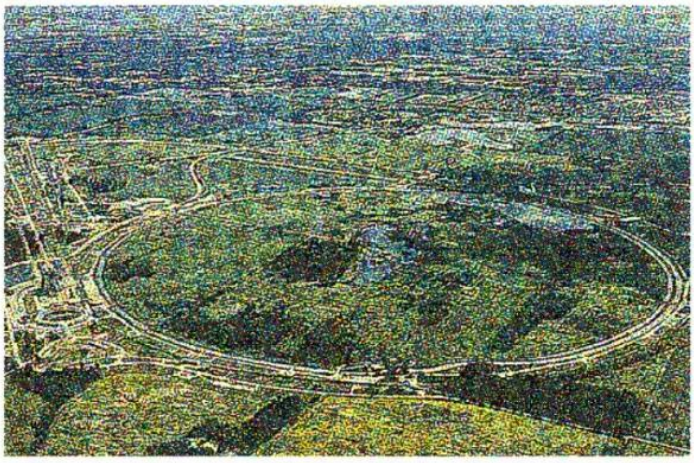


图 5–1　美国费米实验室的回旋加速器

第 5 章
磁场与回旋加速器

人类从发现天然磁石吸铁的特性开始，研究了磁现象的规律，揭示了安培力、洛仑兹力和物质磁性的本质，并利用这些规律发明了指南针、收音机、录音机、录像机、电视机、计算机磁盘驱动器和回旋加速器（图 5–1）等。

本章首先介绍人类对磁现象研究的成果以及磁性材料在现代社会生活中的广泛应用，然后通过实验探究和分析论证，定量研究安培力和洛仑兹力。以带电粒子在匀强磁场中的运动规律为基础，学习洛仑兹力在现代科学技术中的一些重要应用。

5.1 磁与人类文明

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

电荷周围存在电场，电荷之间是通过电场产生相互作用的。磁体周围存在**磁场**（magnetic field），磁极之间的相互作用是通过磁场发生的。从形式上看，磁体既指本身就具有磁性的物体（如磁铁、地球等），也指通电的导线或线圈。

改变人类活动的发明

指南针（compass）是我国著称于世的四大发明之一。指南针的发明，是建立在对物质磁性的研究基础之上的。远在春秋战国时

期，我国古人对天然磁石（古称“慈石”，就是磁铁矿，主要成分是Fe_3O_4）就有了一些认识，并开始用于寻找铁矿。

公元前4世纪的《鬼谷子·谋篇》中的记述表明，我国古人已发现了磁石指向南北的特性，并发明了指示方向的司南勺。司南勺最终发展为指南针。《史记·封禅书》和《淮南子·万毕术》中的记载表明，当时人们已经发现了磁石同名磁极相斥、异名磁极相吸的现象。

指南针一经发明，很快就被应用于航海业。明代伟大的航海家郑和曾用罗盘（把指南针装配在方位盘上构成的仪器）导航，率领庞大的船队7次大规模远航，访问了亚非30多个国家，最远到达红海和非洲东岸。中国的指南针大约是在公元12世纪末到13世纪初，由海路传入阿拉伯，再传到欧洲。指南针的传播，正如英国哲学家培根所说的那样，在促进人类航海事业发展和改变整个世界面貌上产生了巨大的影响。

查阅有关资料，讨论我国磁现象研究对改变人类社会文明的巨大作用。

通过上网查阅资料，了解现代轮船上是否还利用指南针导航。

西方国家在古希腊罗马时期，也发现了天然磁石吸铁的性质。在神话传说中，牧羊人玛格内斯（Magnes）因为鞋底的铁钉和手杖的铁尖被大地牢牢地吸住，受困于克里特岛的艾达山上，从而发现了天然磁石。

我们生活在天然磁场——地磁场

指南针为什么会指南？这在古代曾是一个不解之谜，直到1600年英国宫廷医生古尔伯特（W. Gilbert）才对此做出了科学的解释。

原来，地球本身是一个巨大的磁体，地球周围存在着磁场，这个磁场叫做**地磁场**（geomagnetic field），指南针在地磁场的作用下发生偏转而指示方向。地磁场的南磁极（S极）在地球的北端（西经100.5°，北纬75.5°的北美洲帕里群岛附近），北磁极（N极）在地球的南端（东经139.9°，南纬66.6°的南极洲威尔斯附近）。

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

中国古人在利用地磁场制造指南针的实践中，首次发现了**磁倾角**（magnetic dip）。而西方国家直到16世纪才发现。磁倾角就是地球表面任一点的地磁场方向跟水平方向之间的夹角。

思考讨论：指南针为什么能够指南、指北？地球的南北极与指南针的南北极有什么不同？

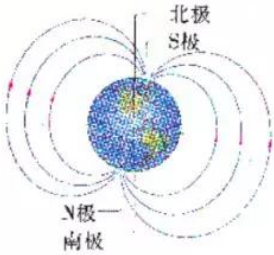


图5-2 地磁场示意图

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

科学家发现，地球的磁场会发生“磁极倒转”，即现在位于地球北端的S极会转到地球南端去，而位于地球南端的N极则会转到地球北端去。

1906年，法国科学家布容在考察法国西马夫中央山脉地区的火山岩时，意外地发现，那里的岩石具有与现代地磁场相反的磁性。

据研究，在近450万年中，地磁场可分为四个极性不同的时期：从现在到69万年前，地磁场的方向基本和现在一样，称为“布容正向期”；69万年前到253万年前，地磁场方向和现在正好相反，称为“松山反向期”；253万年前到332万年前，地磁场的方向又和现在相同，称为“高斯正向期”；332万年前到450万年前，地磁场方向又和现在相反，称为“吉尔伯特反向期”。

关于地磁场会发生“磁极倒转”的原因说法不一。有人认为，这可能是巨大陨石与地球发生猛烈撞击的结果；也有人认为，银河系本身是一个磁场，使地磁场的极性类似于罗盘中的指南针，随着银河磁场的方向而发生变化……你怎样认为呢？

查阅资料，了解地磁场的成因、空间分布以及太阳活动对它的影响，了解地磁场与天文、地质、气象、采矿、航行和通信技术等方面的密切关系。

揭示电与磁联系的第一个实验

巴伐利亚的悬赏征文

英国物理学家吉尔伯特在把电现象和磁现象进行比较之后断言，电和磁是两种截然不同的现象。库仑根据电荷可以从一个物体传到另一个物体，而磁（库仑称为磁荷）似乎永远固着于磁极等事实，也宣称电和磁不可能相互转化。

为什么天然磁石和人造磁铁都能产生磁场？人类很早就发现电和磁之间有许多相似性。但是，直到19世纪初，一些科学家还断言：电和磁除了表面上的一些相似性之外，两者在本质上没有任何联系。

然而，许多现象又不断揭示了电和磁可能存在某种联系。我国东汉时代的王充在《论衡》中就已经把电和磁的吸引现象联系在一起加以叙述，所谓“顿牟掇芥，磁石引针”。1731年，一名英国商人发现，雷电过后，他的一箱新刀叉竟显示出磁性。1751年，富兰克林发现，在莱顿瓶放电后，缝纫针被磁化了。19世纪初，戴维（H. Davy）还观察到磁铁能够吸引或排斥炭棒电极之间的弧光。这些现象和实验结果，不断吸引着一些物理学家的注意力。

1774年，德国巴伐利亚电学研究院提出了一个悬赏征文题目：“电力和磁力是否存在着实际的和物理的相似性？”

激动人心的实验

吉尔伯特和库仑的断言，虽然影响了一些人对电磁联系的探究，但是，丹麦物理学家奥斯特（H. C. Oersted）受康德（I. Kant）哲



图 5-3 奥斯特实验

奥斯特后来写道："几年以前某些非常有名的物理学家仍想在电路断开时使磁针移动位置，但毫无结果。"也就是说，他们希望用接在电池正极的导线一端去推动或吸引磁针。奥斯特认为："我们应该检验电是否以其最隐蔽的方式对磁体有所影响。"事实上，他认为，电与磁的联系实际上是电流与磁的联系。

学思想的影响，确信电、磁、光、热和机械运动等自然现象之间存在着内在联系，坚信电与磁的转化不是不可能，关键是要找到它们之间的转化条件。

奥斯特跟其他许多物理学家一样，一开始也推测：如果通电导线的直径再小一些，就有可能发出光来。当导线的直径缩小到一定程度时，电流或许会产生磁效应。但是，很细的通电导线的一端并没有把小磁针吸过去或推开(图 5-4)。显然，这一猜想是错误的。

1819 年冬到 1820 年春，奥斯特抛弃了原来的猜想，认为如果电流能够产生磁效应的话，很可能像电流通过导线时产生的热和光那样向四周散射，是一种侧向作用。所以要考察电流的磁效应时，应把小磁针放在通电导线的上下左右来观察。

1820 年 4 月的一天晚上，奥斯特在讲课中安排了一个演示实验：用一个小的伏打电池，让电流通过很细的铂丝，铂丝下放置了一个封闭在玻璃罩中的小磁针。他果断地把导线与小磁针都沿南北方向放置，接通电源。奇迹发生了，小磁针果然向垂直于导线的方向偏转过去了。

有一个实验，它把应用机械观的巨大困难揭露出来了。这个实验初听起来是很奇怪的，它是奥斯特约在 120 年前所做的……这个实验之所以重要，一是因为它表明了在两种外观上完全不同的现象，即磁和电流之间的关系。更重要的是，磁极和通过电流的导线的一小部分之间的作用力，不是在沿连接金属线和针的直线上……

——爱因斯坦

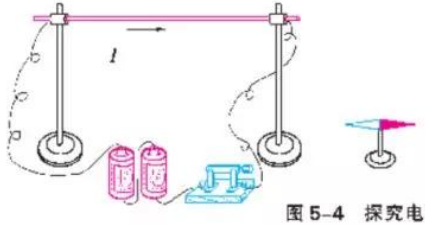


图 5-4 探究电流的磁效应

奥斯特在此后的三个多月中，做了大量的实验。他不仅证实了电与磁之间的相互联系，而且发现了电与磁之间的作用，是一种与电流方向垂直的"旋转力"，这是对机械的"中心力"观点的一次挑战。

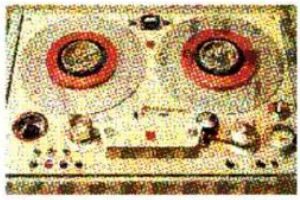


图 5-5　软磁性材料的应用



图 5-6　硬磁性材料的应用

磁性材料的非凡功能

形形色色的磁性材料

随着社会的进步，磁性材料同生产和生活的关系越来越紧密。收音机的天线磁棒，录音机的磁头、磁带，录像机的录像带，电子计算机上用的磁盘，磁电式仪表、扬声器、话筒、永磁电机的磁铁等，它们都是由磁性材料做成的。

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

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

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

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

探究计算机磁盘及磁盘驱动器的工作原理

请观察计算机磁盘及磁盘驱动器的结构(图 5-7)，分析它们的工作原理。

计算机磁盘是在盘片上均匀地涂上一层极薄的磁性材料构成的，盘片按指定格式被磁化，就成了能保存信息的磁盘。盘片是软塑料薄膜的为软磁盘，盘片是硬的铝片或陶瓷片的为硬磁盘。磁盘在使用前先要进行格式化(将磁盘划分为若干磁道和扇区)，以帮助找到记录的位置。

为什么计算机磁盘可以保存信息呢？磁盘表面可以看成是由一系列杂乱无章的“小磁体”构成，因此，一般情况下磁盘不显示磁性(详见本章第 3 节有关“分子电流假设”的内容)。磁盘上某一区域被磁化后，这些“小磁体”就有序地排列，从而这一区域在宏观上就显示磁性。不同的排列对应不同的信息。当向磁盘“写”信

计算机把信息都储存在内外存储器中。外存主要是磁盘、磁带和光盘。在存储器中，信息是以“0”、“1”形式存放的。一个数据或一条指令放在一个存储单元。存储器中存储单元的个数就是存储容量，以 K 或 M 为单位。1K 是 2^{10}。2^{20} 称为 1M，约等于 1000K 个存储单位。G 是更大的单位，1G=1000M。一张普通软磁盘的存储量为 1.38M，约有 1447034 个存储单元。

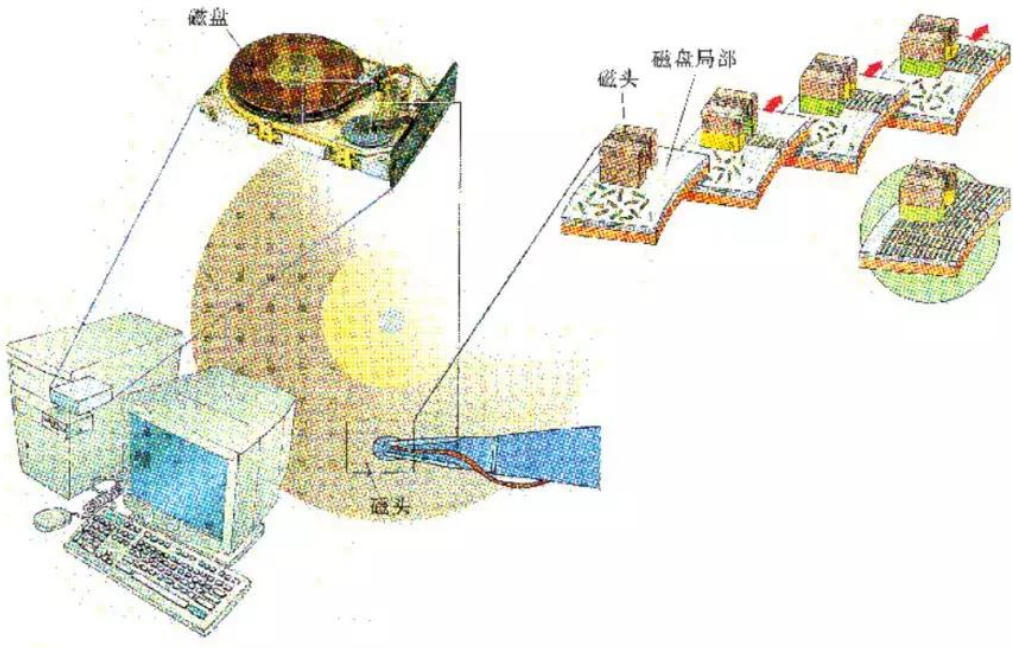


图 5-7 计算机磁盘工作原理示意图

息时，计算机电路就给磁头线圈提供包含信息的电流，这一电流会产生包含信息的磁场。磁盘上的磁性材料按包含信息的磁场磁化，便在磁盘上保存了所需要的信息。

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

仔细观察磁盘的结构，分析磁盘磁头的“读/写”孔在哪里。为什么磁盘上必须有一个驱动主轴孔？

在磁头线圈提供包含信息的磁场下，磁盘上的磁性材料发生了什么变化？磁盘是怎样把信息保存起来的？

根据对磁盘被“写”入信息过程的分析，讨论计算机是怎样从磁盘上“读”出信息的。

一般计算机光盘的工作原理与磁盘相同吗？

信息浏览 信用卡和IC卡

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

IC卡又称“智能卡”，卡内装有一个集成电路芯片，芯片里既有微处理器，又有存储器和相应的接口电路，因而它具有数据存储和运算处理的能力，而且存储量大。我们平时使用较多的是磁卡，它与IC卡不同。磁卡是一种带有磁条的特殊塑料卡，它的存储容量一般只有几十至几百个字节，远不如IC卡。磁卡的最大缺点是防伪和安全性较差，而IC卡则较为安全。由于磁卡的制作成本低且不复杂，目前流通最广的还是磁卡。

请收集一些信用卡和IC卡，加以识别，并思考：怎样将持卡人的资料记录到信用卡的磁带上？

STS 核磁共振的医学应用

目前在医学诊断方面最受重视的是核磁共振断层成像技术（MRI）。MRI是英文Magnetic Resonance Imaging的缩写。这种技术是将受测的人体某一部分置于扫描磁场中，并将高频变化磁场同时作用于其上。扫描过程中，扫描位置的人体组织的原子核（目前还是主要利用人体中含量很高的氢核）的相应频率跟高频变化磁场的频率相等时，类似于收音机的调谐，就实现了核磁共振。这时，该人体组织的原子核就从高频变化的磁场中显著地吸收能量，从而产生显著增强的磁信号，因此可以获得该人体组织氢元素的浓度分布信息。计算机把这些信息存储起来，并转换成为图像。医生根据图像分析，就可以诊断该人体的组织是否发生了病变。

家庭作业与活动

1. 用磁铁、水、酒精和烧杯等器材，设计一个实验，探究水、酒精和空气等物质对磁铁磁性的影响。将结果与其他同学的结果进行比较。
2. 为了研究铁和铁锈的磁性，有人做了一个实验。他在两个相同的纸杯中分别放入等量的（几小勺）铁屑。一个纸杯中注入水。一个多小时后，将杯中的水倒掉，让其干燥。第二天，他把硬纸板分别盖在两纸杯上，然后用同一条形磁铁分别在硬纸板上吸铁屑和铁锈，比较收集到的铁屑和铁锈的质量。请分析，他会得到什么结果？你自己也可以做一做，看看你的分析对不对。
3. 查阅资料，了解明代伟大的航海家郑和利用罗盘导航，访问了亚非哪些国家。
4. 应用奥斯特的实验结果，解释英国商人的一箱新刀叉在雷电过后，竟带上了磁性的现象。

5.2

怎样描述磁场

磁感线是人们描述磁场分布、强弱等引入的假想的曲线，它实际是不存在的。物理学家用电场线和磁感线来分析电磁场的问题，既形象又方便，甚至可以借鉴流体力学的方法(通量或流量)来研究电磁场的问题。但是，用细铁屑显示的并不是磁感线，它只是形象地说明了磁感线或磁场的分布情况。

磁场的形象描述

在初中物理中我们学过，在磁场中可以用磁感线来形象地描述空间磁场的分布情况。磁感线是在磁场中人为地画出的一些有方向的曲线，在这些曲线上，每一点的切线方向都在该点磁场的方向上(图 5-8)。

磁场磁感线的分布情况可用一个实验来加以说明。图 5-9 是用细铁屑显示的条形磁铁外部空间磁感线的分布情况。

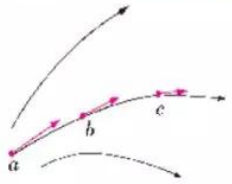


图 5-8 磁感线

探究磁感线的分布

把条形磁铁按照图 5-10 所示的方位置于一块水平玻璃板下，在玻璃板上均匀地撒一层细铁屑。轻轻敲击玻璃板，铁屑就在磁场作用下转动。铁屑静止时的排列，就显示出磁感线的分布情况(图 5-11)。

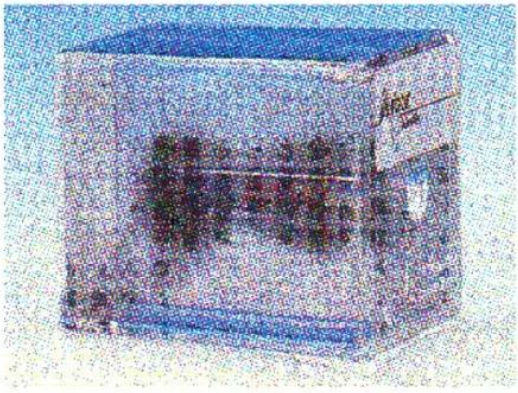


图 5-9 磁感线的空间分布

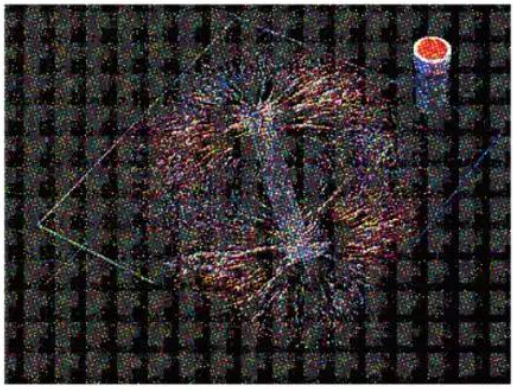


图 5-10 显示条形磁铁磁感线的分布

通过这种方法，也可以显示近距离两个条形磁铁异名磁极间磁场的磁感线分布情况(图 5-12)。

请讨论磁感线分布与磁场强弱的关系。

近距离两个条形磁铁异名磁极间的磁场分布有什么特点？

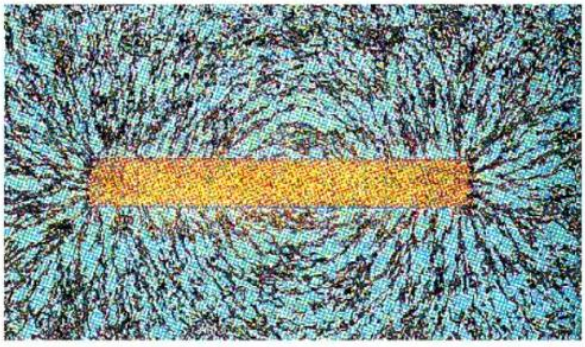


图 5-11　条形磁铁磁感线的分布

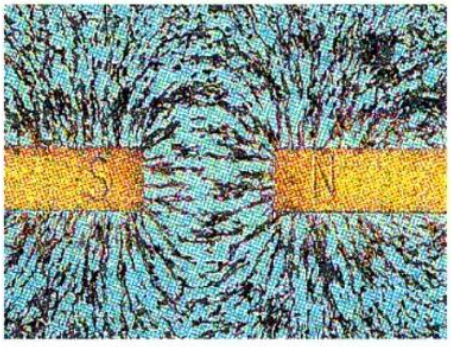


图 5-12　异名磁极间磁感线的分布

为什么细铁屑会显示磁场的磁感线分布？这是因为当细铁屑处于磁场中时就会被磁化，成为一个个小磁针并按照一定的规律排列和取向，这说明磁场是有方向的。物理学中规定，在磁场中的任一点，小磁针北极所受磁场力的方向（也就是小磁针静止时北极所指的方向），就是那一点磁场的方向。

借用铁屑分布，我们可以发现，磁感线越密的地方，磁场越强。条形磁铁两极附近的磁感线比较密，磁场比较强；条形磁铁中部磁感线比较稀疏，磁场比较弱。

在近距离两个条形磁铁异名磁极的中间，呈现出均匀的、平行的铁屑分布线。这个区域里的磁感线从 N 极指向 S 极，并均匀分布。如果在磁场的某一区域里，磁感线的间距相等、相互平行且指向相同，这个区域的磁场就是**匀强磁场**（uniform magnetic field）。匀强磁场是最简单但又很重要的磁场，在电磁仪器和科学实验中有着很重要的应用。

磁场的定量描述

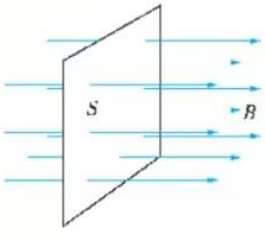


图 5-13

为了定量描述磁场各处的强弱，并借用磁感线分布的疏密，我们引入一个新的物理量——**磁通量**（magnetic flux）。

设在匀强磁场中有一个与磁感线方向垂直的平面（图 5-13），若穿过该平面的磁感线有 Φ 条，我们就称穿过这个平面的磁通量为 Φ。

可见，磁感线越密的地方，磁场越强，穿过单位面积的磁感线的条数越多。在图 5-13 中，设垂直于磁感线的平面的面积为 S，穿过的磁通量为 Φ，则磁场的强弱可以用 Φ/S 来表示。

物理学中，把**磁感线垂直穿过某单位面积上的磁通量叫做磁感应强度**(magnetic induction)，用 B 表示。磁场中某处磁感应强度的大小表示该处磁场的强弱，即

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

磁感应强度是有方向的，因此磁感线也有方向。磁场空间各点磁感应强度的方向与磁感线的方向一致。在国际单位制中，磁通量的单位是韦伯(weber)，简称韦，符号是 Wb；面积单位是平方米，符号是 m^2；磁感应强度的单位是特斯拉(tesla)，简称特，符号是 T，则

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

测定磁场中各点的磁感应强度

利用计算机、磁感应强度传感器、数据采集器和数据处理软件，我们可以直接测定磁场中各点的磁感应强度。

参照图 5-14，用此装置测定条形磁铁外部各点的磁感应强度的大小。将条形磁铁平放在方格纸上，要求在条形磁铁的两极附近和两侧附近各选择一些点进行测定，把测得的数据填在你设计的表中。分析空间各点的磁感应强度情况，判断各处磁场的特点。再与用细铁屑来显示的磁场分布进行对比，你会得到怎样的结论？

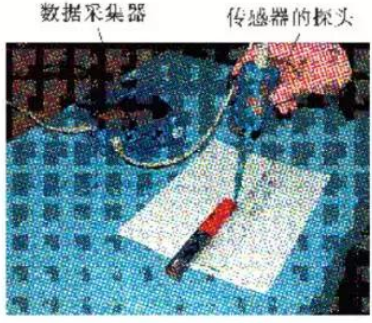


图 5-14 测定条形磁铁周围的磁感应强度

多学一点

如果平面跟磁场方向不垂直，我们可以作出它在垂直于磁场方向上的投影平面。从图 5-15 中可以看出，同一个平面，当它跟磁场方向垂直时，穿过它的磁感线最多，磁通量最大；当它跟磁场方向平行时，没有磁感线穿过，即穿过的磁通量为零。这样就产生一个问题，此处磁场到底是强还是弱？因此，物理学中要求，在确定磁场中各处磁感应强度时，必须把平面 S 投影到垂直于磁场的方向上，从而计算出磁感应强度。

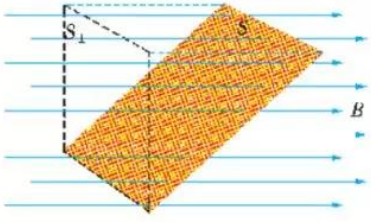


图 5-15 磁通量的确定

知识拓展

人体、天体和空间的磁场

磁场名称	磁场强度/T	磁场名称	磁场强度/T
正常人的心磁场	约10^{-10}	永久磁铁磁场	10^{-2}—10^{2}
正常人的脑磁场	约5×10^{-13}	地球表面磁场	10^{-5}—10^{-4}
地球磁场	约5×10^{-5}	一般水磁体磁场	0.4—0.7
太阳一般磁场	约10^{-2}	电视、显示器荧光屏中的磁场	0.8—1.4
太阳黑子磁场	10^{-1}—1.0	原子核表面磁场	约10^{11}
马蹄磁场	约10^{-1}		

新题作答与答疑

1. 请判断下列说法是否正确：
   (1) 空间各点磁场的方向就是该点磁感线的切线方向。
   (2) 磁感线越密，该处磁通量越大。
   (3) 磁感线越疏，该处磁感应强度越大。
   (4) 近地高空行驶着的两个条形磁铁异名磁极间的磁场是匀强磁场。
   (5) 铁屑在磁场中排示的就是磁感线。
   (6) 磁通量为零并不说明磁感应强度为零。

2. 如图 5-16 所示，线圈 $ABCD$ 面积为 $0.4a^2$，匀强磁场的磁感应强度 $B=0.1$ T，方向为 x 轴正方向。在线圈由图示位置绕 z 轴向下转过 60° 的过程中，通过线圈的磁通量改变_____Wb。

3. 如图 5-17 所示，在水平虚线下方有磁感应强度为 $2B$，方向水平向右的匀强磁场。下方有磁感应强度为 B，方向水平向左的匀强磁场。边长为 l 的正方形线圈放置在两个磁场中，线圈平面与水平虚线成 α 角，线圈分处在两个磁场中的面积相等，则穿过线圈平面的磁通量的大小为

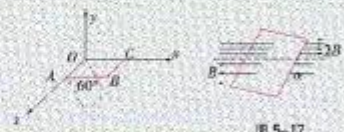


图 6-16

图 5-17

4. 如图 5-18 所示，在条形磁铁外套有 A、B 两个大小不同的圆环，穿过 A 环的磁通量 Φ_A 与穿过 B 环的磁通量 Φ_B 相比较

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

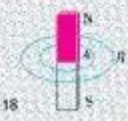


图 5-18

周南物理段石峰

课题研究

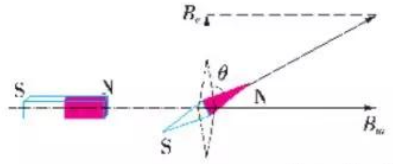
估测磁感应强度

沿自由小磁针在地面静止的位置所作的竖直平面叫做地磁子午面。当有其他磁场影响时，磁针就会偏离原来所在的地磁子午面。这时，我们可以根据小磁针偏离原磁子午面的偏角大小来估测其他磁场的磁感应强度。

地磁场的磁感应强度的水平分量 B_e 随纬度的不同而不同，以下列出我国几个地区的 B_e 值。

地　名	北京	沈阳	兰州	上海	武汉	成都	广州
水平磁感应强度/$\times10^{-4}$T	0.289	0.277	0.312	0.333	0.343	0.356	0.375

请你上网、到图书馆或有关单位调查当地的水平磁感应强度，然后参照图 5-19 进行实验，收集数据，估测出图中条形磁铁轴线上各点的磁感应强度。



$B_m = B_e\tan\theta$

图 5-19

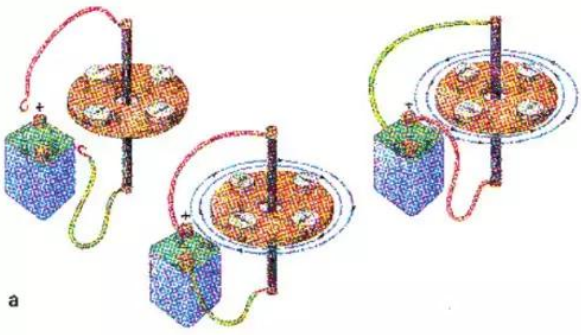


图 5-20　显示通电直导线周围的磁场分布

5.3

探究电流周围的磁场

探究电流的磁场分布

观察直线电流磁场的分布

让一直导线垂直穿过一块水平硬纸板(图 5-20a)。将小磁针放置在水平硬纸板各处,接通电源。观察小磁针在各处的指向,并把指向画在纸板上相应的位置。由此,你可以对直线电流磁场的磁感线的分布和方向做出初步判断。

大量实验表明,直线电流磁场的磁感线是一些以导线上各点为圆心的同心圆,这些同心圆都在跟导线垂直的平面上(图 5-20b)。改变电流的方向,各点的磁场方向都反向,即磁感线的方向随之改变。

直线电流的方向跟它产生的磁场的磁感线方向之间的关系,可以用**安培定则**(Ampere's rule),也叫**右手螺旋定则**(right-hand rule)来判断(图 5-21)。请你看图把安培定则的内容概括出来。

如果奥斯特没有将导线和小磁针都南北指向平行放置,他会发现电流的磁效应吗?



图 5-21　(直流电流的磁场方向)右手螺旋定则

探究通电线圈的磁场

在奥斯特发现电流的磁效应之后,安培又研究了通电线圈产生的磁场。



图 5-22 通电螺线管的磁场分布



图 5-23 测定通电螺线管内部的磁感应强度

通电螺线管磁场的磁感线分布如图 5-22 所示。螺线管(solenoid)通电以后，就像一根条形磁铁，一端相当于北极，另一端相当于南极。改变电流的方向，它的南北极就对调。通电螺线管外部磁感线和条形磁铁外部的磁感线相似，也是从北极出来，进入南极。

通电螺线管内部也有磁场。如果通电螺线管很长，螺线管内中间部分的磁感线跟螺线管的轴线平行，方向由南极指向北极，并和外部的磁感线连接，形成一条闭合曲线。因此，长通电螺线管内中间部分的磁场近似为匀强磁场。在科学研究和生产中，我们经常利用长通电螺线管来提供匀强磁场。



图 5-24 确定通电螺线管内部磁场方向的方法

请参照图 5-23 利用计算机、磁感应强度传感器、数据采集器和数据处理软件，测定通电螺线管内部各点的磁感应强度。把测得的数据填在你设计的表中。分析长通电螺线管内中间部分是否为匀强磁场。

通电螺线管的电流方向跟它产生的磁场的磁感线方向之间的关系，也可用安培定则来判断。请你看图 5-24，把判断通电螺线管内部的磁感线方向的方法总结出来。

环形电流磁场的磁感线分布如图 5-25 所示。环形电流磁场的磁感线是一些围绕环形导线的闭合曲线。在环形导线的中心轴线上，磁感线和环形导线的平面垂直。

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



图 5-25 环形电流的磁场分布

周南物理段石峰

多学一点

物理学研究表明，通电长直导线中部周围空间的磁场呈以导线为轴线的同心圆柱分布。导线中的电流越大，导线周围空间的磁感应强度就越大，即磁感应强度 B 跟通过导线的电流 I 成正比。在导线电流一定的情况下，距导线越远的地方，磁感应强度越小，即空间各点磁感应强度 B 跟该点距导线的距离 r 成反比。如果用 k_1 表示比例常数，则我们可以用公式表示它们之间的关系

$$B = k_1 \frac{I}{r}$$

研究还表明，通过螺线管的电流越大，螺线管内部匀强磁场的磁感应强度越大，即磁感应强度 B 跟通过导线的电流 I 成正比；螺线管单位长度内的匝数越多，螺线管内部匀强磁场的磁感应强度越大，即磁感应强度 B 跟螺线管单位长度内的匝数 n 成正比。如果用 k_2 表示比例常数，则我们可以用公式表示它们之间的关系为

$$B = k_2 n I$$

安培为了解释奥斯特实验，把磁的本质归结为电流，认为所有电磁作用都是电流与电流的作用。他把这种作用力称为“电动力”。他希望仿照牛顿力学的理论结构来建立电磁理论体系，他把这种理论称为“电动力学”。因此，麦克斯韦把安培称为“电学中的牛顿”。



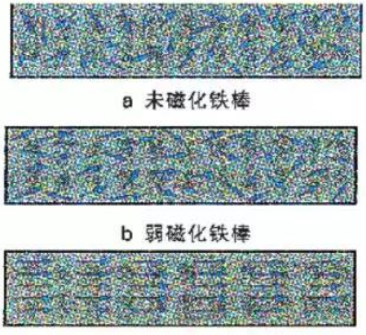
图 5-26　分子电流示意图

探究磁现象的本质

奥斯特的发现在整个科学界引起极大的震动。1820 年 9 月，德国物理学家阿拉果(D. F. J. Arago)向法国科学院报告了奥斯特的发现，法国物理学家安培对此做出了异乎寻常的反应。安培猜想，磁铁和电流都能产生磁场，磁铁的磁场和电流的磁场是否有相同的起源呢？

安培最初设想，铁棒被磁化后，铁棒中的铁分子将会产生电流，它们的电流都环绕铁棒的轴做同心圆运动。后来，安培的朋友菲涅耳(A. J. Fresnel)指出，这一设想与真实磁铁的情况相矛盾。

请讨论，菲涅耳指出的矛盾可能是什么？



a 未磁化铁棒

b 弱磁化铁棒

c 强磁化铁棒

图 5-27　铁棒的磁化示意图

最终，安培提出了著名的**分子电流假设**(molecular current hypothesis)。他认为，在原子、分子等物质微粒的内部存在着一种环形电流——分子电流，分子电流使每个物质微粒都成为微小的磁体，分子的两侧相当于两个磁极(图 5-26)。

安培的假设能够解释一些磁现象。例如，一根铁棒，在未被磁

化的时候，内部各分子电流对应的“小磁体”的取向是杂乱无章的（图 5-27a），它们的磁场互相抵消，对外界不显磁性。

当铁棒受到外界磁场的作用时，各分子电流对应的“小磁体”的取向变得大致相同甚至完全相同（图 5-27b，图 5-27c），铁棒被磁化，两端对外界显示出较强的磁作用，形成磁极。磁体受到高温或猛烈敲击就会失去磁性，这是因为这时“小磁体”的取向又变得杂乱无章了。

安培的分子电流假设揭示了磁性的起源，它使我们认识到磁铁的磁场和电流的磁场一样，都是由电荷的运动产生的。

信息浏览 生物磁

放飞的鸽子在离家数千里之外会回到原地，海龟为了产卵也会洄游数千里，候鸟更是每年都要迁徙而不会迷航，还有一种细菌具有沿地磁场游动的特性……这是什么原因呢？人们推测这些生物有着依靠地磁场来导航的本能。经研究知道，在鸽子的头部发现了带磁性的 Fe_3O_4 微粒，在具有沿地磁场游动特性的细菌体中找到了沿细菌体轴线排列着的 Fe_3O_4，在蝙蝠、黄蜂、蜗螺和甲壳类动物中都观测到了微量的 Fe_3O_4，这些生物体中的磁性微粒构成了生物体的生物磁。

人体内也有生物磁。人体的生物磁主要是通过两种途径产生的，一是由于人体内存在 Fe_3O_4 磁性微粒而形成一个微弱磁场。Fe_3O_4 微粒主要集中在人的肺部，这是由于外界空气或食物中的磁性粒子的吸入或吞入引起的。二是由于人体生物电流产生的磁场。人体内部各处都存在着生物电流，如心电、脑电、肌肉电和神经电等，因此，人体中也存在着相应的心磁、脑磁、肌肉磁和神经磁等。

人们利用生物电流在人体表面流动时产生的电流分布得出了人体的心电图、脑电图等，再利用电和生理活动的相关性，进行健康检查和疾病诊断。

人体生物电流产生的生物磁是相当微弱的，人体中最强的生物电流是心电流，所以最强的人体生物磁信号是心磁信号。心磁信号的幅度大约为 5×10^{-11} T，作为比较，地磁场为 3×10^{-5}—5×10^{-5} T，可见，人体最强的心磁比地磁场还要弱 100 万倍；脑磁、神经磁的大小是心磁的 1%—10%。

课后作业·巩固提高

1. 结合奥斯特、安培的科学猜想的实化过程，讨论科学猜想在科学研究中的作用，分析怎样判断科学猜想的正确性。猜想一下，两根通有同方向电流、互相平行放置的导线间会产生什么现象？通过实验或结合前中学过的知识进行分析推理，说明你的猜想是否正确。

2. 如图 5-28 所示，当电流通过线圈时，磁针的南极指向读者，试确定线圈中电流的方向。



图 5-28

3. 如图 5-29 所示，小磁针静止在通电螺线管的内部，请分别标出通电螺线管和小磁针的南北极。

4. 把小磁针放在磁场中，磁场的磁感线如图 5-30 所示，说明该磁场的特点，小磁针将怎样转动？停在哪个方向？

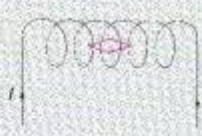


图 5-29

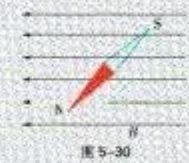


图 5-30

5. 把一个面积为 $5\times10^{-2}\ m^2$ 的单匝矩形线圈放在磁感应强度为 2×10^{-2} T 的通电螺线管中，当线圈平面与磁场方向垂直时，穿过线圈的磁通量多大？

6. 将面积为 $0.4\ m^2$ 的导线环置入通电螺线管中部，环面与磁场方向垂直。已知穿过导线环的磁通量为 2.0×10^{-3} Wb，求导线环处磁场的磁感应强度。

周南物理段石峰

5.4 探究安培力

在初中物理中我们已经知道，通电导线在磁场中将受到磁场力的作用（图 5-31）。磁场对电流的作用力称为**安培力**(Ampere force)。

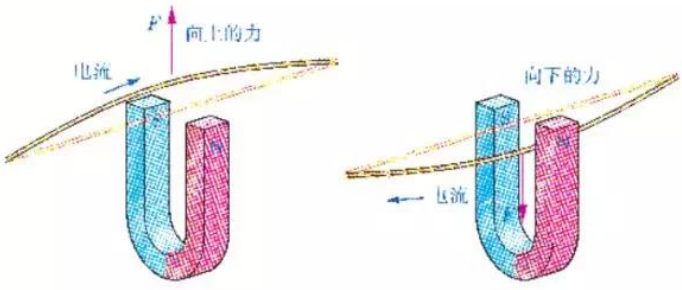


图 5-31 磁场对电流的安培力



安培(A. M. Ampere, 1775—1836)，法国物理学家。1820年4月，当他获悉奥斯特发现电流的磁效应后，敏锐地意识到它的重要意义，第二天就重复了奥斯特的实验，并思考：既然电流能够产生磁场，那么电流在磁场中又会怎样呢？安培以极精巧的实验和高超的数学技能，经过反复研究，确定了磁场对电流作用力的规律，为了纪念他在这方面的杰出贡献，物理学中把这种力称为安培力。

安培力的应用十分广泛。电流表、电动机等都是利用磁场对电流的安培力制成的。

用电流表做实验时你是否想过：为什么电流表的接线不能接反？为什么通过电流表的电流越大，指针偏转的角度就越大？

你在做电动机实验时，是怎样使电动机反转的？又是怎样使电动机的转速加快或减慢的？

要搞清这些问题，就必须进一步探究安培力的方向和大小。

实验探究 1 安培力的方向

图 5-32 所示的实验装置可用来探究安培力的方向。

1. 猜想：若将实验装置接通电源，可能发生什么现象？猜想之后试一试，看看你的猜想是否正确。

2. 制定计划：你准备怎样进行实验，如怎样改变电流方向，怎样改变磁感应强度的方向等等。

3. 得出结论：把你所观察到的方向加以分析，你认为安培力的方向跟电流方向、磁感应强度方向之间存在什么关系？请写出你的结论，以及看图 5-33

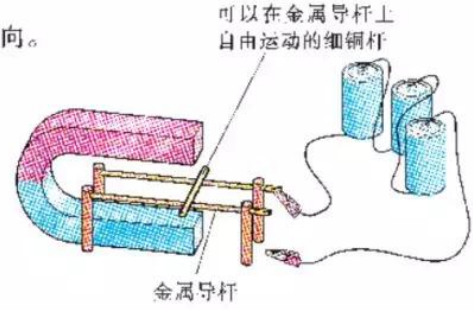


图 5-32 探究安培力的实验装置

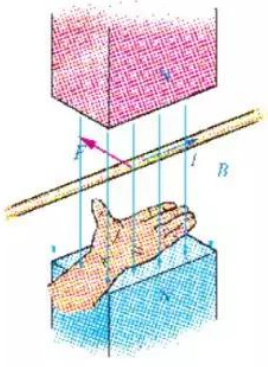


图 5-33　左手定则

总结出的判断安培力、电流和磁感应强度三者方向的方法。

假如你总结的方法正确，那么，你就总结出了物理学中把它叫做**左手定则**(left-hand rule)的方法。

实验探究 2　安培力的大小

要探究安培力的大小，就要有测量安培力的仪器。实验室的电流天平就是这种仪器。请对照实物，参阅以下说明，了解电流天平(图 5-34)的结构、原理和使用方法。

关于电流天平的说明

一、结构

二、原理

分别给电流天平的 E 形导线和螺线管通电。当磁场方向和 E 形导线中的电流方向如图 5-35 所示时，*CD* 段导线就受到一个向下的安培力，横臂右端因安培力而向下倾斜。在横臂的左端加上适当的钩码，使天平恢复平衡。电流天平横臂左右端相等，导线 *CD* 受到的安培力的大小就等于左端钩码的重力。

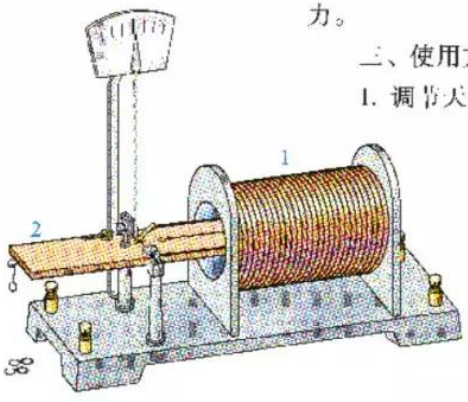
三、使用方法

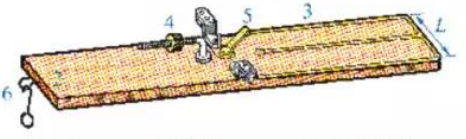
1. 调节天平的调平螺母，使天平平衡。

2. 给 E 形导线和螺线管通电，使 E 形导线 *CD* 段受到的安培力方向向下。

3. 通过改变螺线管的电流大小来改变磁感应强度的大小(注意：螺线管内的磁感应强度与通过螺线管的电流成正比)。

4. 在左端的挂钩上挂上适当的钩码，使天平恢复平衡。





1. 螺线管　　2. 横臂　　3. E 形导线
4. 调平螺母　　5. 转换开关　　6. 挂钩

图 5-34　电流天平结构示意图

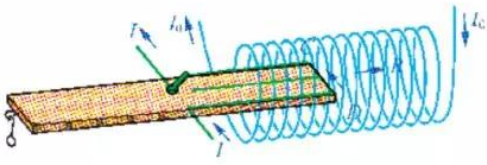


图 5-35　电流天平工作原理示意图

提出问题 F 跟 I、L、B 之间存在怎样的关系

既然安培力 F 是磁场对通电导体的作用力，那么它的大小就很可能跟电流 I、导线长度 L、磁感应强度 B 有关。

制定计划 在用实验研究 F 与 I、L、B 的关系之前，请讨论以下几个问题。

1. 用怎样的电路来控制和改变 E 形导线中电流的大小？
2. 如何改变磁场中受力的通电导线的长度？
3. 用怎样的电路来控制和改变螺线管中磁感应强度 B 的大小？

请设计测量电路，画出电路图（电流天平可用方框表示），检查图 5-36 中的实验器材，看有无缺漏，再用导线参照你画的电路将实验器材连接起来。

运用控制变量法，拟定实验步骤，进行实验，测定安培力的大小。

通过实验探究，你得出的结论是什么？你对这一实验方案和探究过程还有哪些思考？

精确的实验表明，通电导线在磁场中受到的安培力的大小，跟导体长度 L、导体中的电流 I、磁感应强度 B 都成正比。用公式表示为

$$F = kBIL$$

在国际单位制中，$k = 1$，上式可表示为

$$F = BIL$$

上式中，磁感应强度 B 的单位为 T，电流 I 的单位为 A，导线长度 L 的单位为 m，安培力 F 的单位为 N。

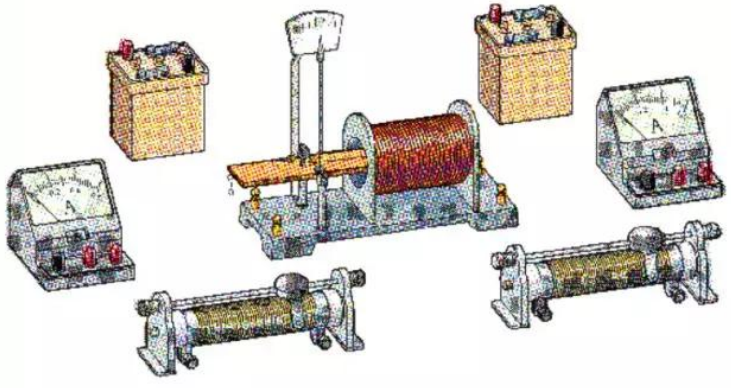


图 5-36 用电流天平探究安培力的主要实验器材

下表是用电流天平测量安培力时测得的两组数据。由表中数据，你能否找出安培力 F 与电流 I 和磁感应强度 B 的关系？

第一组数据

导线的有效长度 $L = 4\times10^{-2}$ m，螺线管中的磁感应强度 $B = 5\times10^{-3}$ T。

序号	I/A	F/N
1	0.5	1.0×10^{-4}
2	1.0	2.0×10^{-4}
3	1.5	3.0×10^{-4}
4	2.0	4.0×10^{-4}
5	2.5	5.0×10^{-4}

第二组数据

导线的有效长度 $L = 4\times10^{-2}$ m，导线中的电流 $I = 2$ A。

序号	B/T	F/N
1	2.5×10^{-3}	2.0×10^{-4}
2	5.0×10^{-3}	4.0×10^{-4}
3	7.5×10^{-3}	6.0×10^{-4}
4	10.0×10^{-3}	8.0×10^{-4}
5	12.5×10^{-3}	10.0×10^{-4}

物理学中，也常用安培力 F 跟电流 I 和导线长度 L 的乘积 IL 的比值来定义磁感应强度 B，即

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

并规定：通电导线的长度为 1m，通过的电流为 1A，导线受到的作用力为 1N 时，该导线所处磁场的磁感应强度为 1T。

案例分析

案例 某同学在实验室里，用电流天平测算通电螺线管中的磁感应强度，他测得的数据记录在下表中，请你算出通电螺线管中的磁感应强度 B。

CD 段导线长度/m	4.0×10^{-2}
天平平衡时钩码重力/N	4.0×10^{-5}
通过 E 形导线的电流/A	0.5

分析 由题知 $I = 0.5\,\mathrm{A}$，$G = 4.0\times10^{-5}\,\mathrm{N}$，$L = 4.0\times10^{-2}\,\mathrm{m}$。

电流天平平衡时，导线所受安培力的大小等于钩码的重力，即 $F = G$。由此可得

$$B = \frac{F}{IL} = \frac{4.0\times10^{-5}}{0.5\times4.0\times10^{-2}}\mathrm{T} = 2.0\times10^{-3}\mathrm{T}$$

通电螺线管中的磁感应强度为 $2.0\times10^{-3}\,\mathrm{T}$。

多学一点

在使用电流天平探究安培力时，保持磁感应强度和磁场方向都不变，并使电流方向与磁场方向相互垂直。在这种情况下得出的公式 $F = BIL$ 仅适用于匀强磁场中的通电导体，而且电流方向要跟磁场方向垂直。

若导体中电流方向与磁场方向成 θ 角，怎样计算安培力呢？

首先，让我们来做一个实验。如图 5-37 所示，当电流方向与磁场方向平行，即 θ 为 0°时，观察导体的受力情况。

实验表明，此时导体不受安培力的作用。

我们已经知道，当电流方向与磁场方向垂直，即 $\theta = 90°$ 时，$F = BIL$；当 $\theta = 0°$ 时，$F = 0$。那么，当 $0 < \theta < 90°$ 时，就可以把 B 分解为平行于电流方向的分量 $B_1 = B\cos\theta$ 和垂直于电流方向的分量 $B_2 = B\sin\theta$（如图 5-38 所示）。B_1 对通电导体没有力的作用，只有 B_2 才会对通电导体产生安培力，因此

$$F = BIL\sin\theta$$

讨论与思考：如果通电导体处在非匀强磁场中，你用什么思路和方法来处理问题呢？

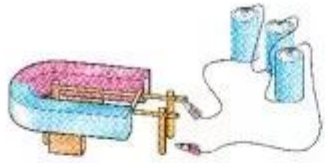


图 5-37 探究电流方向与磁场方向的关系



图 5-38 磁感应强度的分解

课后作业与活动

1. 观察电流表的内部结构(图 5-39),说明为什么使用电流表测量电流,想一想,电流表能不能反接?为什么?

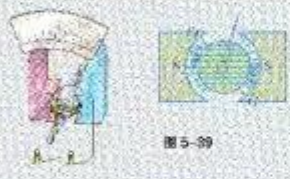


图 5-39

2. 请根据图 5-40 各图中给出的条件,运用左手定则,在图中标出相应物理量的方向.



图 5-40

3. 在赤道附近沿东西方向放置着一根导体.若通以由西向东的电流,则此导体所受安培力的方向为

A. 向上　　B. 向下

C. 向南　　D. 向北

4. 下列说法中正确的是

A. 电荷在某处不受电场力作用,则该处电场强度一定为零

B. 一小段通电导体在某处不受安培力作用,则该处磁感应强度一定为零

C. 当置于匀强磁场中的导体长度和电流大小一定时,那么导体所受的安培力大小也是一定的

D. 在磁感应强度为 B 的匀强磁场中,长为 L、电流为 I 的一小段导体所受的安培力的大小,介于零和 BIL 之间

5. 在探究安培力的大小与哪些因素有关的实验中,为什么要用两个独立的电路?它们各有什么作用?在实验中,你是如何调控电流的?又是怎样改变磁感应强度的?

6. 电磁炮是一种理想的兵器,它的主要原理如图 5-41 所示.1982 年澳大利亚国立大学制成了能把 2.2g 的弹体(包括金属杆 EF 的质量)加速到 10km/s 的电磁炮(常规炮弹的速度约为 2km/s).若轨道宽 2m,长为 100m,通过的电流为 10A,试问轨道对 EF 所加匀强磁场的磁感应强度和磁场的最大功率有多大(轨道摩擦不计)?



图 5-41



图 5-42

7. 如图 5-42 所示,AB、CD 为两根平行的导体,当导体中通以同方向的电流时,会出现什么情况?请做一下实验,并说明其中的道理.

8. 在导出安培力的一般公式 $F = BIL\sin\theta$ 时,采取了分解 B 的方法(见图 5-38).能否用分解 I 的办法来推导这个公式?为什么?

周南物理段石峰

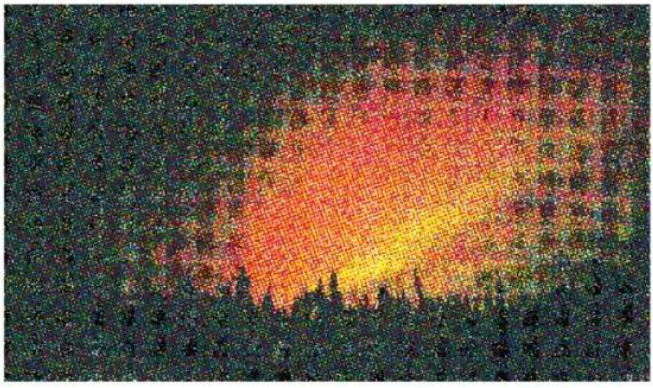


图 5-43　色彩绚丽的极光

5.5 探究洛仑兹力



洛仑兹　(H. A. Lorentz, 1853—1928)，荷兰物理学家，经典电子论创始人。他的研究范围很广。他关于光谱线在磁场中发生分裂的预言，于1896年为荷兰物理学家塞曼 (P. Zeeman, 1865—1943)用实验所证实。次年，洛仑兹提出了有关的理论。他与塞曼因此而共获1902年诺贝尔物理学奖。

你知道极光吗？极光常出现在地球的南极和北极地区。科学研究告诉我们，极光与地磁场对来自太空的高速带电粒子的作用有关。

我们知道，磁场对通电导体有安培力的作用，而电流是由电荷的定向移动形成的。由此可以推断：磁场对通电导体的安培力，是由作用在运动电荷上的力引起的。

早在1892年，荷兰物理学家洛仑兹就研究了磁场对运动电荷的作用力的问题。为纪念洛仑兹对物理学的贡献，物理学中将这种力称为**洛仑兹力**(Lorentz force)。

实验探究　洛仑兹力的方向

取一只阴极射线管，用感应圈作电源，将高电压加在它的阴极和阳极间(图 5-44a)。这时，在阴极和阳极间高电压的作用下，从阴极发射出来电子束，打到荧光屏上，发出荧光，显示出电子束的运动径迹。

请观察与思考：

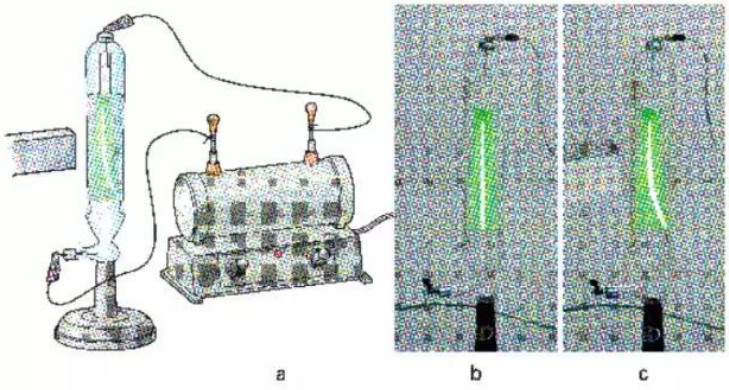


图 5-44 探究洛仑兹力的实验装置

1. 在没有外加磁场时，电子束的运动径迹是怎样的（图 5-44b）？

2. 将磁铁靠近阴极射线管，电子束的运动径迹有没有变化（图 5-44c）？怎样变化？

3. 改变磁场方向，电子束运动径迹又将怎样变化？

通过实验观察，你能得出什么结论？

我们知道，安培力的方向是跟电流方向和磁场方向垂直的。由此可推断，洛仑兹力的方向也应跟电荷运动方向和磁场方向垂直。

如果运动电荷是负电荷，你该怎样运用左手定则来判断图 5-45 中 q 受到的洛仑兹力的方向呢？

1897 年，英国物理学家汤姆生（J. J. Thomson）通过实验确定了从阴极射线管的阴极发出的射线是高速运动的电子束。

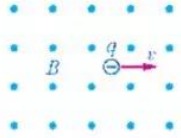


图 5-45 确定洛仑兹力的方向

1892 年，洛仑兹用电磁场理论推出了电场和磁场对运动电荷作用力的表达式：$f=q(E+vB)$。这里面同时包括了电场力和磁场力，因此通常将这两者合在一起叫做洛仑兹力。本书仅将其中的磁场力叫做洛仑兹力，是上式当 $E=0$ 时的特例。

分析论证 洛仑兹力的大小

理论推导洛仑兹力大小的公式

图 5-46 是运动电荷形成电流的示意图。导体放在垂直于纸面向里的磁感应强度为 B 的磁场中，v 为电荷 q 的定向移动速度，N 为长度 L 的导体中的运动电荷数。为推导出运动电荷 q 受到的洛仑兹力 f 的公式，先请讨论以下问题：

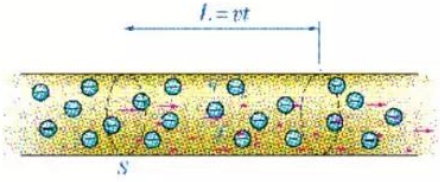


图 5-46 导体中运动电荷受到的洛仑兹力

在时间 t 秒内，有多少电荷通过导体的某一横截面？电流的表达式是什么？

你可以采用哪些方法来改变作用于电子束的磁场强弱？

调节感应圈加在阴极射线管两个电极上的电压，就可改变电子束的运动速度。电压越高，电子束的运动速度就越大。

请利用公式 $F = BIL$，导出磁场对运动电荷的洛仑兹力 f 的如下表达式。

$$f = qvB$$

上式中各物理量的单位依次是 N、C、m/s、T。

实验验证洛仑兹力的大小跟 v 和 B 的关系

由洛仑兹力的公式可知，洛仑兹力的大小跟电荷的运动速度和磁感应强度 B 成正比。

让我们仍用图 5-44 所示的装置进行验证：

1. 保持电子束的运动速度不变，改变作用于电子束的磁场强弱，比较电子束的弯曲程度。

2. 保持磁场强弱不变，改变电子束的运动速度，比较电子束的弯曲程度。

实验的结果与理论推导的结论是否一致？

研究带电粒子在磁场中的运动

当一个带电粒子垂直射入匀强磁场时，它将受到洛仑兹力的作用，从而偏离原来的运动方向。那么，它的运动径迹会是什么样呢？

实验探究

先请同学们对带电粒子在匀强磁场中做怎样的运动开展讨论，并在讨论的基础上提出猜想。然后再用图 5-47 所示的洛仑兹力演示仪进行研究。洛仑兹力演示仪是一个特制的电子射线管，管内下方的电子枪射出的电子束，可以使管内的低压水银蒸气（或氢气）发出辉光，从而显示出电子的运动径迹，匀强磁场是由管外两只平行的通电环形线圈产生的。

请仔细观察，当管外未加磁场时，电子的运动径迹是怎样的（图 5-47a）？在管外加上匀强磁场，电子束的运动径迹又是怎样的（图 5-47b）？

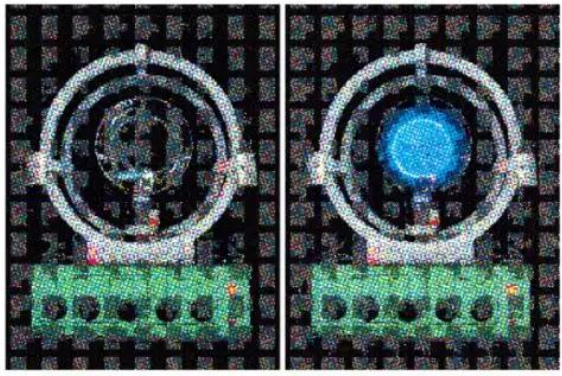
你的猜想与演示结果相同吗？这个实验进一步证明，我们关于洛仑兹力方向的推断是正确的，即洛仑兹力的方向跟电荷运动方向垂直。

请讨论以下问题：

1. 带电粒子做匀速圆周运动的向心力是由什么力提供的？

2. 洛仑兹力对带电粒子做功吗？为什么？

3. 为什么带电粒子只能在图示的平面内运动？



a 无磁场时电子束的径迹　　b 有磁场时电子束的径迹

图 5-47　用洛仑兹力演示仪研究洛仑兹力

多学一点　推导带电粒子的轨道半径和周期

带电粒子在匀强磁场中做匀速圆周运动的向心力是由洛仑兹力提供的。请你运用学过的牛顿运动定律以及有关匀速圆周运动的知识，推导带电粒子在匀强磁场中做匀速圆周运动的轨道半径 r 和周期 T 的公式：

$$r = \frac{mv}{Bq}$$

$$T = \frac{2\pi m}{Bq}$$

其中，m 和 q 分别是带电粒子的质量和电量，v 为粒子的运动速度，B 为匀强磁场的磁感应强度。请讨论：

1. 带电粒子进入匀强磁场，若保持其质量 m 和电量 q 均不变化，那么它的轨道半径仅跟什么因素有关？

2. 带电粒子做匀速圆周运动的周期跟粒子的运动速度和轨道半径是否有关？

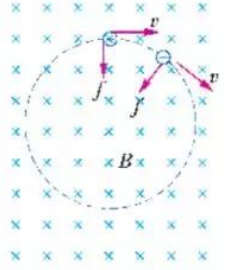


图 5-48　带电粒子在磁场中的运动

这两个公式很重要，它们将在下一节介绍的回旋加速器和质谱仪等现代高科技设备中得到重要的应用。

自主阅读　地磁场与极光

地磁场的范围从地球表面向外延伸达 6×10^4km 之远，它对来自太空的由质子、电子、α 粒子等组成的高能粒子流具有阻挡作用，可使地球上的生物免受伤害（图 5-49）。在两个磁极地区，即北纬和南纬 65°—75°的地区，有许多高能粒子被射向地球的表面，如图 5-50 所示。它们速率以 2000km/s 的高速击向大气层，并与大气中的氧分子和氮分子剧烈碰撞，使原来处于分子或原子状态的这些分子获得能量后，其激发的能量就以光的形式发射出来，从而形成了绚丽多彩的极光。

请思考：地磁场的洛仑兹力在这里是怎样起作用的？

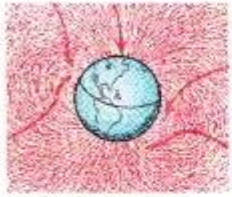


图 5-49　地磁场与宇宙射线

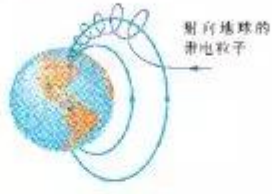


图 5-50　带电粒子射向地球两极

课题作业与活动

1. 如图 5-51 所示，ab 是一弯管，其中心线是一段半径为 R 的圆弧，置于匀强磁场中。有一束粒子对准 a 端射入弯管，粒子有不同的质量、不同的速度，但都是一价正离子，则能沿中心线通过弯管的粒子必须是
   A. 速度大小一定的粒子
   B. 质量大小一定的粒子
   C. 动量大小一定的粒子
   D. 能量大小一定的粒子



图 5-51

2. 一初速度为零的带电粒子，经过电压为 U 的电场加速后垂直进入磁感应强度为 B 的匀强磁场中，已知粒子的质量为 m，电荷量为 q，求带电粒子所受到的洛仑兹力和轨道半径。
3. 一质量为 m，电荷量为 q 的带电粒子在磁感应强度为 B 的匀强磁场中做圆周运动，其效果相当于一环形电流。求此环形电流 I。
4. 如图 5-52 所示，在一个同时存在着相互垂直的匀强磁场和匀强电场的空间，有一质量为 m 的带电微粒系于一绝缘线的一端，绝缘线长 L，另一端固定于 O 点，带电微粒以角速度 ω 在水平面内做匀速圆周运动，绝缘线与竖直方向的夹角 θ=30°角，线中张力为零，试问：
   (1) 微粒的电荷量和电性、磁场的强度的大小和方向如何？
   (2) 如突然撤去磁场，带电微粒将做怎样的运动？线中张力多大？

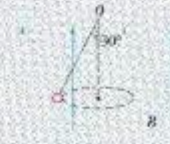


图 5-52

周南物理段石峰

5.6

洛仑兹力与现代科技

洛仑兹力在现代科技中有着广泛的应用。回旋加速器、质谱仪、电子显微镜等现代高科技仪器设备中，都用洛仑兹力来控制电荷的运动。



劳伦斯（E. O. Lawrence，1901—1958），美国物理学家。因发明回旋加速器并用它产生了人工放射性同位素而荣获1939年的诺贝尔物理学奖。图片中劳伦斯拿着他制作的回旋加速器。

回旋加速器

什么是加速器

加速器(accelerator)是使带电粒子获得高能量的设备。科学家在探索物质的微观结构时，通常要用很高能量的带电粒子去轰击各种原子核，以观察它们的变化。早期的加速器被称为“原子击碎机”。

图5-1是美国费米实验室的回旋加速器的外景图，该加速器的直径达2km，可将质子的能量加速到500GeV。

从直线加速器到回旋加速器

从物理学的角度，如何使带电粒子获得较高的能量呢？一个最基本的原理是，让带电粒子在电场中受力被加速，从而提高它的能量。

早期制成的加速器是用高压电源的电压来加速带电粒子的。由于实际所能达到的电压是有限制的，因此粒子能量最高只能达到约10MeV。为了进一步提高粒子的能量，科学家制成了直线加速器，让带电粒子在多级电场的作用下进行多次加速，这就导致整个加速器延伸得非常长。能否在较小的空间范围内让粒子受到电场的多次加速呢？

1930年，劳伦斯巧妙地应用带电粒子在磁场中的运动特点，发明了回旋加速器，解决了这一难题。

$1eV = 1.6 \times 10^{-19}\,J$
$1MeV = 10^{6}\,eV$
$1GeV = 10^{9}\,eV$
$1TeV = 10^{12}\,eV$

为了发现新事物，你必须做出新事物。

——李西腾伯格
(G. C. Lichtenberg)

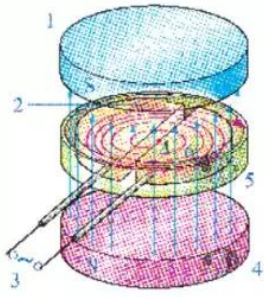


图 5-53　回旋加速器主要部件

1. 上磁极　2. 静电偏转板
3. 高频电源　4. 下磁极
5. 真空室　6. D 形盒

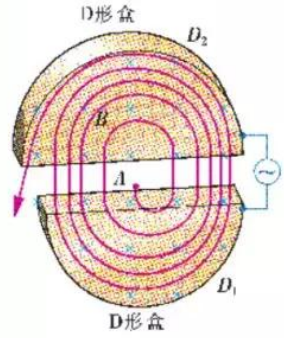


图 5-54　回旋加速器工作原理图

分析论证　回旋加速器的原理

图 5-53 是回旋加速器的主要部件示意图。其核心部分是两个 D 形金属扁盒，它们之间有一间隙，间隙中心 A 处是粒子源。D 形盒装在真空室内，磁场方向垂直于 D 形盒的底面。D 形金属扁盒屏蔽了外电场，确保盒内的带电粒子在匀强磁场中做匀速圆周运动。

两个 D 形盒分别与高频电源的两极相连，使间隙中产生交变电场，加速带电粒子。

要了解回旋加速器的工作原理，先请讨论劳伦斯发明回旋加速器时考虑过的两个问题：

1. 带电粒子在匀强磁场中做匀速圆周运动的半径与速率增大时，它的运动周期 T 是否变化？为什么？

2. 要保证粒子每次经过 D 形盒的间隙时，都能受到合适的电场力而被加速，高频电源的频率应符合怎样的要求？

回旋加速器工作时，从 A 处粒子源（如图 5-54）发出的带正电的粒子，以速率 v 垂直于磁场方向进入 D_1，粒子受洛仑兹力的作用，在 D_1 中做匀速圆周运动。经过半个周期，粒子回到 D_1 的边缘，间隙中的电场使它获得一次加速。然后，该粒子以较大的速率进入 D_2 做匀速圆周运动。由于粒子的轨道半径跟它的速率成正比，因而该粒子在 D_2 中所做圆周运动的半径有所增大。当它到 D_2 边缘时，高频电源正好使间隙处的电场与刚才反向，它又一次获得加速。如此继续下去，粒子将沿着图示的螺旋线运动，速率和能量不断增大。当达到预期的速率时，用静电偏转板将高能粒子引出，用于科学研究。

信息浏览　加速器的创新发展

普通回旋加速器是劳伦斯发明的。在这种加速器中，磁场是匀强的，加速电场的频率是不变的。由于相对论效应，粒子在加速过程中，能量的提高会引起它质量的增大，从而导致回旋周期变大，使粒子的回旋频率与加速电场的交变频率不再同步，因而粒子得不到持续的加速。这种加速器只能将质子的能量加速到 25MeV 左右。

为了得到更高能量的粒子，60 多年来，科学家们坚持不懈地进行研究，不断地对回旋加速器做出改进。加速器发展到今天，经历了三次革命。

加速器发展的主要动力是粒子物理学实验的需要，粒子物理学推动了加速器理论和技术的进步。



图 5-55 北京正负电子对撞机 BEPC



图 5-56 画家李可染为“相对论性重粒子碰撞”国际学术研讨会所作的国画

1945 年，科学家对高频加速电场的频率进行调变，研制成同步回旋加速器。这种回旋加速器能将质子的能量加速到 1GeV。

20 世纪 50 年代，科学家研制出磁场呈某种分布的回旋加速器，它能使不同质量的粒子在不同半径的轨道上回旋频率保持不变。这种加速器可以将质子的能量加速到 10GeV 的数量级。

20 世纪 60 年代，科学家运用对撞可使加速粒子能量得到充分利用的原理建成了一个直径大约 1m 的对撞机，从此开创了加速器发展的新纪元。

我国 1989 年研制成的北京正负电子对撞机（图 5-55），能使电子能量达到 2×2.8GeV。现代的高能加速器基本上都是对撞机，它们把产生高能反应的等效能量提高到 10—1000TeV。

从 20 世纪 30 年代至今，加速器的能量提高了 9 个数量级，每单位能量的造价降低了约 4 个数量级，全世界有多位科学家因此获得了诺贝尔物理学奖。

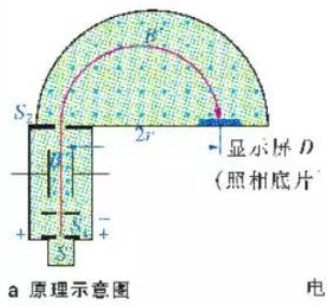
要想知道更多内容，可浏览网站 http://www.ihep.ac.cn，或查阅《加速器与科技创新》（谢家麟编著，清华大学出版社与暨南大学出版社 2000 年联合出版）。

质谱仪

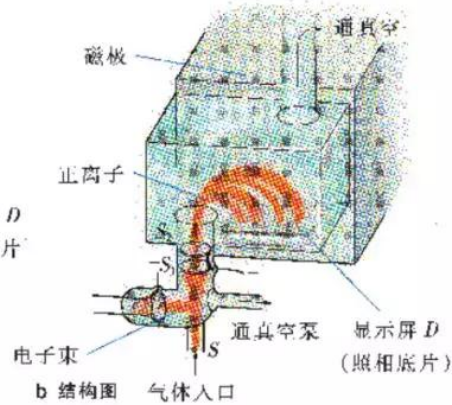
质谱仪是科学研究中用来分析同位素和测量带电粒子质量的精密仪器。

图 5-57a 是质谱仪的原理示意图，图 b 是它的结构图。从离

质谱仪最初是由 J·J·汤姆生的学生阿斯顿（F. W. Aston）设计的。他用质谱仪首先得到了 ^{20}Ne 和 ^{22}Ne 的质谱线，从而证实了同位素的存在。



a 原理示意图



b 结构图

图 5-57 质谱仪

子源 S 产生的离子经电场加速后，由小孔 S_1 进入一个速度选择器，再经小孔 S_2 进入匀强磁场 B'，受洛仑兹力作用做匀速圆周运动，最后打到显示屏 D 上。如果离子(带电粒子)的电量相同而质量不同，那么它们进入磁场后将沿着不同的半径做圆周运动。(想一想：为什么？)因此，那些原子序数相同而原子量不同的同位素离子，将在显示屏上按质量大小排列成若干细条状谱线，每一条谱线对应于一定的质量，故称"质谱仪"。利用质谱仪对某种元素进行测量，可以准确地测出各种同位素的原子量。

请讨论：

1. 如图 5-57a 所示，速度选择器是由相互垂直的匀强电场和匀强磁场叠加而成的。现设其中产生电场的两平行板间电压 $U = 300\text{V}$，平行板间距离 $d = 5\text{cm}$，垂直于电场的磁感应强度 $B = 60 \times 10^{-4}\text{T}$。

请计算一下，从小孔 S_1 进入速度选择器的粒子具有怎样大小的速度，才能顺利通过小孔 S_2？为什么带电粒子在进入匀强磁场 B' 前，先要经过速度选择器？

2. 带电粒子的电荷和质量是它的最基本属性，而这两个量的比值，即"比荷"，在科学研究中有很重要的意义。用质谱仪可以测算出带电粒子的比荷，请你分析怎样用质谱仪测算比荷？

STS

彩色电视机

当今时代，彩色电视机已进入千家万户，丰富着人们的文化生活。彩色电视机为什么能显示色彩缤纷的活动图像呢？

彩色电视机的内部结构如图 5-59 所示，显像管是它的核心部件。这是一个真空电子管，它前端是荧光屏，后端有电子枪。荧光屏上有数百万个荧光块，每一块中含有红、绿、蓝三种颜色的荧光粉。当电子枪发射的高速电子束击中一个荧光块时，其中的荧光粉就受激发光。红、绿、蓝是色光中的三基色，把它们按一定比例混合，就能获得各种色光。彩色电视机利用这一原理，让各个荧光块按图像信号的要求分别显示出不同颜色、不同强度的光，我们就看到了丰富多彩的颜色。

套在显像管颈部的偏转线圈，用来产生偏转磁场，控制高速电子束的运动，让它在荧光屏上按同步信号的要求进行扫描。

电视台发送出来的电视信号，包含着声音信号、同步信号和图像信号。电视机收到电视信号后，经接收电路调谐(选台)并将信号分解：声音信号经处理送往扬声器；同步信号由同步电路分解成两部分，一部分是水平控制信号，另一部分是垂直控制信号，送到偏转线圈，调控偏转磁场；图像信号经彩色解码器处理，作为颜色和亮度信号，发送到电子枪，控制电子束的强度。

电子枪发射出来的电子束在偏转磁场的洛仑兹力控制下，在荧光屏上一行一行地扫描。由于偏转线圈受到同步信号的控制，电子束就能打到荧光屏上正确的位置，使得荧光屏上显示出来的图像就是电视台传输出来的电视图像。

电视发送和接收系统是一个十分复杂的系统，它是 50 多年来电视机理论研究和技术创新的结晶。

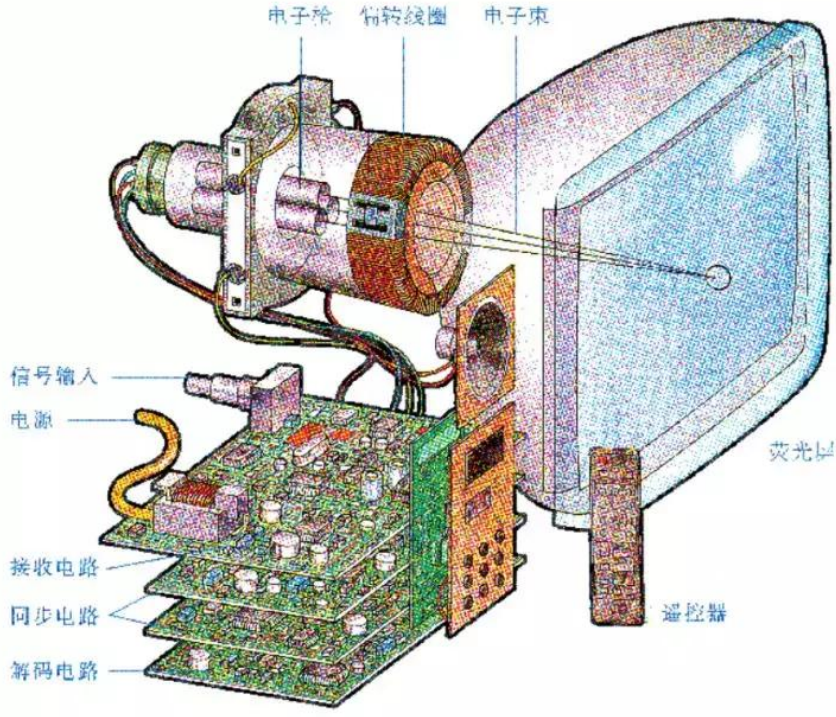


图 5-59 彩色电视机的内部结构

如果你对此感兴趣，可去查阅有关的书籍和资料。

电子显微镜

生物学、医学、材料科学等领域的研究，都要使用电子显微镜。它能使人们观察到纳米量级的微观世界，现代的扫描隧道显微镜，甚至达到了能分辨原子大小的水平。

电子显微镜是用电子束来代替光束，用磁透镜代替光学透镜工作的。图 5-60 是电子显微镜原理示意图。照射在样品上的电子束，经磁透镜放大成像，再投射在荧光屏上观察或照相。图 5-61 是电子显微镜实物照片。图 5-62 是用电子显微镜拍摄的生物细胞照片。

2003 年，人类受到了 SARS 的严重威胁。SARS 是英语 Severe Acute Respiratory Syndrome 的缩写，

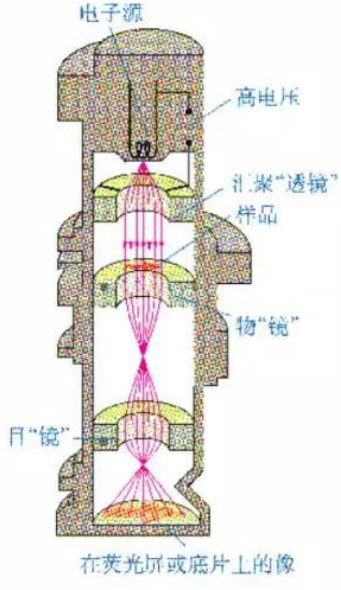


图 5-60 电子显微镜原理示意图

意思是"严重急性呼吸综合征",我国称之为"非典型肺炎",简称"非典"。在与"非典"的斗争中,病毒学家使用电子显微镜找到了"非典"病毒颗粒,是一种新型的"冠状病毒",为研究与防治 SARS 供给了贡献。



图 5-61　电子显微镜



图 5-62　生物细胞照片

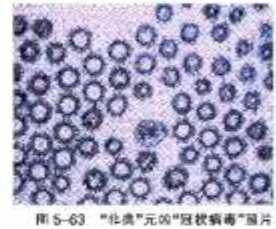


图 5-63　"非典"元凶"冠状病毒"照片

课后作业与活动

1. 电子 e 以垂直于匀强磁场的速度 v，从 a 点进入长为 d、宽为 L 的磁场区域，偏转后从 b 点离开磁场，如图 5-64 所示，若磁场的磁感应强度为 B，那么

A. 电子在磁场中的运动时间 $t=d/v$

B. 电子在磁场中的运动时间 $t=\sqrt{d^2+L^2}/v$

C. 洛仑兹力对电子做的功是 $W=BevL$

D. 电子在 b 点的速度值也为 v



图 5-64

2. 三个速度不同的同一种带电粒子，沿同一方向从图 5-65 长方形区域的匀强磁场上边缘射入，当它们从下边缘飞出时，对入射方向的偏角分别为 90°、60°、30°，则它们在磁场中的运动时间之比为

3. 一个质子 1、2、3 分别以大小相等、方向如图

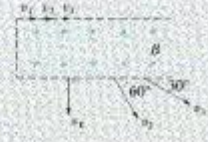


图 5-65

周南物理段石峰

5-66 所示的初速度 v_1、v_2 和 v_3 经过平板 MN 上的小孔 O 射入匀强磁场，磁场方向垂直纸面向里，整个装置放在真空中，且不计重力。这三个质子打到平板 MN 上的位置到小孔 O 的距离分别是 s_1、s_2 和 s_3，则

A. $s_1 < s_2 < s_3$　　B. $s_1 > s_2 > s_3$

C. $s_1 = s_3 > s_2$　　D. $s_1 = s_3 < s_2$

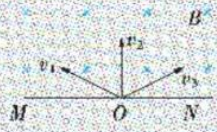


图 5-66

4. 如图 5-67 所示，不同速度的正离子、负离子，中子由 a 孔进入匀强磁场中，分别由不同出口飞出。问：

(1) 由不同出口飞出的各是哪一种粒子？

(2) 同种粒子由不同出口飞出时的速度之比各是多少？

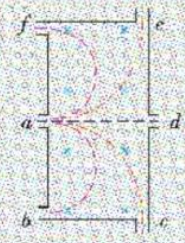


图 5-67

课题研究

洛仑兹力在现代科技中的应用研究

请上网或去图书馆查阅有关洛仑兹力在现代科技中应用的资料，撰写一篇科学报告。

5.x

第 5 章家庭作业与活动

A组

1. 如图 5-68 所示，条形磁铁静止在水平桌面上，当其斜上方的直导线通以垂直纸面向里的电流时

A. 磁铁对桌面的压力变大

B. 磁铁受到向左的摩擦力

C. 磁铁对桌面的压力变小

D. 磁铁受到向右的摩擦力



图 5-68

2. 19 世纪 20 年代，以塞贝克(T. J. Seebeck)为代表的科学家已经认识到：温度差会引起电流。安培考虑到地球自转造成了太阳照射后地球正面与背面的温度差，从而提出如下假设：地球磁场是由绕地球的环形电流引起的，该假设中的电流方向是

A. 由西向东垂直磁子午线

B. 由东向西垂直磁子午线

C. 由南向北沿磁子午线

D. 由赤道向两极沿磁子午线方向

(注：磁子午线是地磁场 N 极与 S 极在地球表面的连线)

3. 图 5-69 是一种测量磁感应强度的简易装置的示意图，虚线框内有垂直于纸面的匀强磁场，矩形线圈匝数为 N，$ab = dc = L_1$，$bc = ad = L_2$。当线框不通电流时，弹簧测力计的示数为 T_1；当线框中通入沿逆时针方向的恒定电流 I 时，弹簧测力计的示数为 $T_2(T_2 > T_1)$，则磁感应强度 B 的大小为_____，磁场方向垂直纸面向_____。

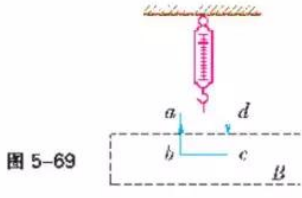


图 5-69

4. 如图 5-70 所示为一种利用电磁原理制成的充气泵的结构示意图，其工作原理类似打点计时器。当电流从电磁铁的接线柱 a 流入，吸引小磁铁向下运动时，下列选项中正确的是

A. 电磁铁的上端为 N 极，小磁铁的下端为 N 极

B. 电磁铁的上端为 S 极，小磁铁的下端为 S 极

C. 电磁铁的上端为 N 极，小磁铁的下端为 S 极

D. 电磁铁的上端为 S 极，小磁铁的下端为 N 极

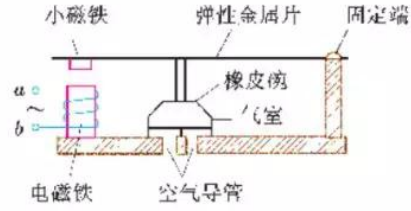


图 5-70

5. 20 世纪 40 年代，我国物理学家朱洪元提出：电子在加速器中做匀速圆周运动时会发生“同步辐射光”，光的频率是电子回转频率的 n 倍。设同步辐射光频率为 f，电子质量为 m，电荷量为 e，则加速器磁场的磁感应强度 B 的大小为_____。若电子的回转半径为 R，则它的速率为_____。

6. 磁场具有能量，磁场中单位体积所具有的能量叫做能量密度，其值为 $\frac{B^2}{2\mu}$，式中 B 是磁感应强度，μ 是磁导率，在空气中 μ 为一已知常量。为了近似测得条形磁铁磁极端面附近的磁感应强度 B，一学生用一根端面面积为 S 的条形磁铁吸住一相同面积的铁片 P，再用力将铁片与磁

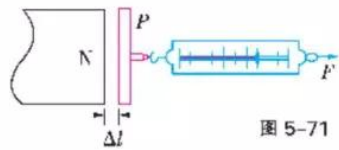


图 5-71

铁拉开一段微小的距离 Δl，并测出拉力 F，如图 5-71 所示。因为 F 所做的功等于间隙中磁场的能量，所以由此可得磁感应强度 B 与 F、S 之间的关系为 $B=$ _____。

7. 磁流体发电技术是目前世界上正在研究的新兴技术，它可把气体内能直接转化为电能。如图 5-72 所示是磁流体发电机的模型。匀强磁场的磁感应强度为 B，平行金属板 a、b 相距为 d，将一束等离子体（高温下电离的气体，含有大量带正电和负电的微粒）喷射入磁场，便可在 a、b 两板间产生电压，在外电路负载中获得电流。

（1）试说明磁流体发电机的原理。

（2）若等离子体以速度 v 垂直射入磁场，外电路负载电阻为 R_0，不计等离子气体的电阻，则此发电机的电动势 E 和总功率 P 为多大？

（3）若等离子体束的横截面积为 S，每立方米中含有 n 对一价正负离子，且 a、b 板足够长，改变外电路电阻，则电路中可能达到的最大电流为多大？

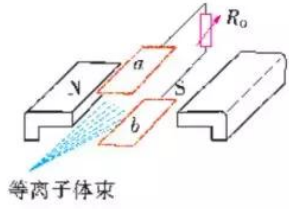


图 5-72

B组

1. 如图 5-73 所示是一种电磁泵，泵体是一个长方体，端面是一个边长为 δ 的正方形。ab 长为 l，上下两面接在电源上，电压为 U（内阻不计）。磁感应强度为 B 的磁场指向 $dfec$ 面，液体电阻率为 ρ，密度为 D（液体原来不导电，在泵头通入导电剂后才导电）。求：

（1）最大抽液高度。

（2）每秒抽液的质量。

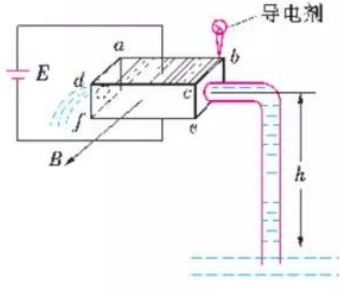


图 5-73

2. 某人在研究长直导线周围的磁场时，为增大电流，用多根导线捆在一起代替长直导线，不断改变多根导线中的总电流 I 和测试点与直导线的距离 r，测得下表所列数据：

r/m \ I/A \ B/T	5.0	10.0	20.0
0.020	4.98×10^{-5}	10.32×10^{-5}	19.73×10^{-5}
0.040	2.54×10^{-5}	5.12×10^{-5}	9.95×10^{-5}
0.060	1.63×10^{-5}	3.28×10^{-5}	6.72×10^{-5}
0.080	1.28×10^{-5}	2.57×10^{-5}	5.03×10^{-5}

由上述数据可得出磁感应强度 B 与电流 I 及距离 r 的关系式为 _____。

3. 质谱仪是一种测定带电粒子质量和分析同位素的重要工具，它的构造如图 5-74 所示。设离子源 S 产生离子，离子产生出来时速度很小，可以看作速度为零。产生的离子经过电压为 U 的电场加速后，进入一平行板电容器 C 中，电场 E 和磁场 B_1 相互垂直，具有某一速度的离子将沿图中虚直线穿过两板间的空间而不发生偏转，而具有其他速度的离子发生偏转。最后离子再进入磁感应强度为 B_2 的匀强磁场，沿着半圆周运动，到达记录它的照相底片上的 P 点，根据以

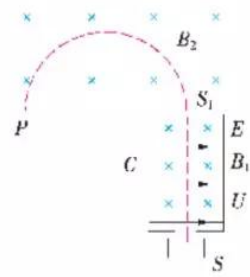


图 5-74

上材料回答下列问题：

(1) 证明能穿过平行板电容器 C 的离子具有的速度为 $v=\dfrac{E}{B}$。

(2) 若测得 P 点到入口 S_1 的距离为 x，证明离子的质量 $m=\dfrac{qB_2^2x^2}{8U}$。

4. 图 5-75 为一种可用于测量电子电荷量 e 与质量 m_e 比值 e/m_e 的阴极射线管，管内处于真空状态，图中 L 是灯丝，当接上电源时可发出电子，A 是中央有小圆孔的金属板，当 L 和 A 间加上电压时（其电压值比灯丝电压大很多），电子将被加速并沿图中虚直线所示的路径到达荧光屏 S 上的 O 点，发出荧光。P_1、P_2 为两块平行于虚直线的金属板，已知两板间距为 d，在虚线所示的圆形区域内可施加一匀强磁场，已知其磁感应强度为 B，方向垂直纸面向外。a、b_1、b_2、c_1、c_2 都是固定在管壳上的金属引线。E_1、E_2、E_3 是三个电压可调并可读出其电压值的直流电源。

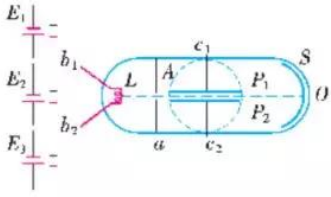


图 5-75

(1) 试在图中画出三个电源与阴极射线管的有关引线的连线。

(2) 导出计算 e/m_e 的表达式，要求用应测物理量及题给已知量表示。

5. 如图 5-76 所示，两个共轴的圆筒形金属电极，外电极接地，其上均匀分布着平行于轴线的四条狭缝 a、b、c、d，外筒的外半径为 r_0，在圆筒之外的足够大的区域中有平行于轴线方向的均匀磁场，磁感应强度的大小为 B，在两极间加上电压，使两圆筒之间的区域内有沿半径向外的电场。一质量为 m、电荷量为 $+q$ 的粒子，从紧靠内筒且正对狭缝 a 的 S 点出发，初速为零。如果该粒子经过一段时间的运动之后恰好又回到出发点 S，则两极之间的电压 U 应为多大（不计粒子的重力，整个装置在真空中）？

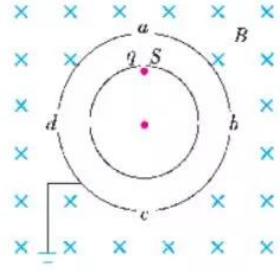


图 5-76

总结与评价　课题研究成果报告会

亲爱的同学：

祝贺你即将完成物理 3-1 的学习。在那些激动人心的探索活动中，你和你的同学经受了困难的考验，也享受了成功的喜悦。在学完本书后，你一定想让同学们分享自己的研究成果，那么，就让我们开一个“课题研究成果报告会”吧！

你可以把你平时做过的最满意的课题拿来，再做进一步的研究，取得更有意义的成果，到这个报告会上去展示；你也可以从下面的研究课题示例中，选择你感兴趣的课题，自己一人或与同学合作进行研究。当然，你还可以自选其他课题进行研究。

在这个报告会上，也许没有宏篇大论，也许没有什么重大发明。但这里展示的成果，铭刻着你们的勤奋，凝聚着你们的心血……这里，最可贵的是真实！

简单就是美丽，巧妙就是智慧！

这个“课题研究成果报告会”，将让你的智慧放出灿烂的火花，让你的才智得到充分的展示！

研究课题示例

静电与现代科技

通过查阅图书资料和上网查询等方式，调查静电与现代科技中应用或预防静电的事例，写出调查报告。

探究半导体二极管的伏安特性曲线

这里要你选择仪器，设计一个实验，来探究半导体二极管的伏安特性曲线。最好能与电阻的特性曲线进行一下比较。

利用集成块设计一个简单实用的装置

这是一项非常有意义的活动。你需要阅读关于集成电路的书籍和资料，你还需要更多的电路知识。如果你能按自己的设计制成一件成品，予以展示，一定会受到同学们的欢迎。

超导应用的现状和前景

近年来，超导特别是高温超导，研究进展很快，并已在科技中得到应用，如应用超导进行受控热核反应的实验。研究这方面的资料，可以拓展我们的视野，感受现代科技的魅力。

电视显示技术的新进展

近年来，家用电器市场上出现了许多新型电视机，如液晶显示电视机、等离子电视机、背投电视机等。了解这些电视机的显像原理是很有意义的。你对此感兴趣吗？你愿意做一些调查和探究吗？

探究静电屏蔽现象

静电屏蔽是一种很有趣的现象。例如，在金属网罩内放一只小鸟，再用感应起电机或感应圈使网罩带电，无论网罩上电压多高，小鸟都安然无恙。你愿意试一试吗？你能用学过的知识解释这一现象吗？

评价表

课题名称：

姓名：　　完成日期：

合作者：

1. 课题设计思路：	2. 课题研究过程：
3. 收集的主要资料或证据：	4. 分析论证：
5. 研究成果和结论：	

6. 自我评价：

我在课题研究中的表现：　　我对小组研究的贡献是：　　我擅长的是：

我在研究中遇到的困难是：　　我在这些方面应该做得更好：

自我评价等级(在评价的等级上画圈)：

A级(优秀)　B级(良好)　C级(合格)　D级(低于标准)

7. 小组评语：

建议从成果的科学性、创造性、实践性，以及从参与课题研究的热情和态度、克服困难的勇气、团队合作精神等方面进行评价。

8. 老师评语：

建议从成果的科学性、创造性、实践性，以及从参与课题研究的热情和态度、克服困难的勇气、团队合作精神等方面进行评价。