经全国中小学教材审定委员会2004年初审通过

普通高中课程标准实验教科书

物理

WULI

选修 3-1



教育科学出版社
ESPH

微信公众号：电子课本大全

目录

第一章　静电场

1. 电荷　电荷守恒定律……2
2. 库仑定律……7
3. 电场　电场强度和电场线……10
4. 电势能　电势与电势差……16
5. 匀强电场中电势差与电场强度的关系　示波管原理……23
6. 电容器和电容……29
7. 静电的应用及危害……34

本章小结……38
习题……39



第二章　直流电路

1. 欧姆定律……42
2. 电阻定律……46
3. 电阻的串联、并联及其应用……50
4. 电源的电动势和内阻　闭合电路欧姆定律……55
5. 学生实验：测量电源的电动势和内阻……61
6. 焦耳定律　电路中的能量转化……63
7. 学生实验：练习使用多用电表……67
8. 逻辑电路和控制电路……71

本章小结……75
习题……76

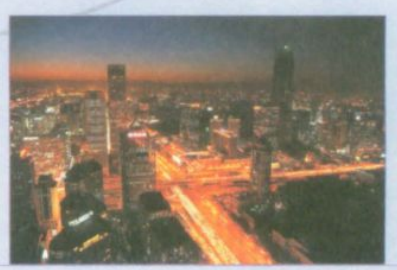


第三章　磁场

1. 磁现象　磁场……80
2. 磁场对通电导线的作用——安培力……84
3. 磁感应强度　磁通量……89
4. 磁场对运动电电荷的作用——洛伦兹力……94
5. 洛伦兹力的应用……98

本章小结……104
习题……105

附录　中英文索引……107



微信公众号：电子课本大全

第一章 静电场

- 电荷　电荷守恒定律
- 库仑定律
- 电场　电场强度和电场线
- 电势能　电势与电势差
- 匀强电场中电势差与电场强度的关系　示波管原理
- 电容器和电容
- 静电的应用及危害

你见过疾风暴雨中的闪电吗？当你梳头或脱毛衣时曾听到过放电的声响或看到过电火花吗？当你从干燥的地毯上走过，手碰到金属把手时，你有过被电击的感觉吗？这些现象都是由“静止电荷”所引起的，称为静电现象．静电，就在我们身边……

让我们一起走进电的世界，探索其中的奥秘！



微信公众号：电子课本大全

1 电荷 电荷守恒定律

在初中物理中我们学过，经过摩擦的物体能够吸引轻小物体，人们就说该物体带了电，带有电荷的物体叫做带电体．通过摩擦使物体带电的方法称为摩擦起电．

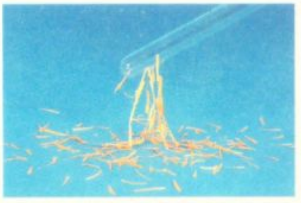


图 1-1-1 用丝绸摩擦过的玻璃棒能吸引轻小物体

摩擦起电 两种电荷

活动

实验 1：能“粘”在墙上的塑料袋．如图 1-1-2 所示，用手搓几下塑料袋往墙上一靠，就“粘”在墙上了，有时几天也不会掉下来，你相信吗？动手试一试．



图 1-1-2 能“粘”在墙上的塑料袋

实验 2：制作一朵美丽的塑料花．把一个彩色塑料袋裁剪成许多细条，一头用线捆住．一手拽着捆把，另一手将细条捋几下，这些细条就会盛开成一朵“花”了（图 1-1-3）．



图 1-1-3 塑料花

观察思考

1. 将两根用丝绸摩擦过的玻璃棒相互靠近，如图 1-1-4（a）所示，你会看到什么现象？

2. 将两根用毛皮摩擦过的硬橡胶棒相互靠近，如图 1-1-4（b）所示，你会看到什么现象？

3. 将用丝绸摩擦过的玻璃棒与用毛皮摩擦过的硬橡胶棒相互靠近，如图 1-1-4（c）所示，你会看到什么现象？

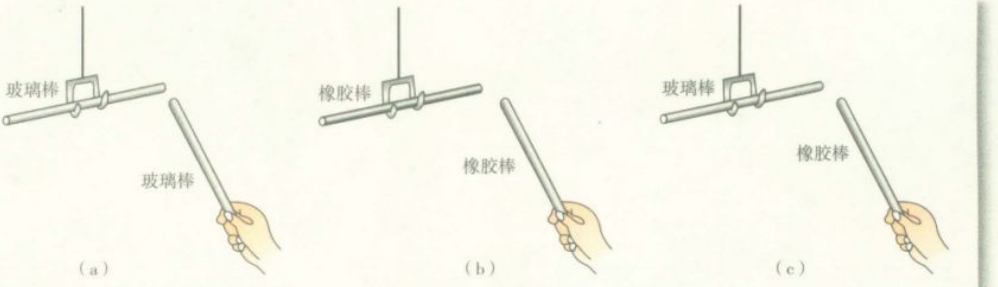


图 1-1-4 电荷间的相互作用

微信公众号：电子课本大全

4. 任意更换与玻璃棒或硬橡胶棒摩擦的物质种类，并让摩擦后的玻璃棒或硬橡胶棒相互靠近，你看到的现象无非只有两种情况，这说明了什么？说说你的看法.

大量实验表明，自然界只存在两种电荷：正电荷和负电荷. 同种电荷相互排斥，异种电荷相互吸引. 电荷的多少叫做**电荷量**（electric quantity），常简称为电量. 在国际单位制中，电荷量的单位是**库仑**，用字母 C 表示. 通常正电荷的电荷量用正数表示，负电荷的电荷量用负数表示.

1 C 的电荷量很大. 常用的电荷量单位还有微库（μC）和纳库（nC）. $1\ \mu C = 10^{-6}\ C$，$1\ nC = 10^{-9}\ C$.

小资料

正负电荷

美国科学家富兰克林在 1747 年把丝绸摩擦过的玻璃棒所带的电荷叫做正电荷，毛皮摩擦过的硬橡胶棒所带的电荷叫做负电荷.

摩擦起电的解释

讨论交流

丝绸和玻璃棒（毛皮和硬橡胶棒）本来都不带电，经过摩擦就带电了，这些电荷是从哪里来的？

1. 是创造出来的吗？如果是，那么是由谁创造的？

2. 是物体自身微观结构变化引起的吗？是怎样引起的？

谈谈你的想法.

实体物质是由分子（原子）组成的，分子又是由原子构成的，而原子则是由带正电的原子核和围绕原子核运动的带负电的电子构成（图 1-1-5）. 原子核由带正电的质子和不带电的中子构成. 质子的电荷量和电子的电荷量等值异号. 一般情况下，原子内的电子总数等于原子核内的质子总数，因而通常物体或者物体的任何一部分都不显电性.

常见物质又可粗略地分成导体和绝缘体两类. 金属导体中带正电的原子核对内层电子有较强的束缚，而原子的外层电子可以在一定条件下脱离原子，在导体内部自由地运动，成为自由电子. 绝缘体内部由于电子受原子核很强的束缚，基本上不存在自由电子.

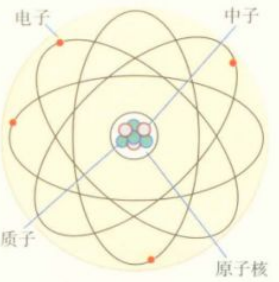


图 1-1-5 原子模型

微信公众号：电子课本大全

材料不同的两个不带电的物体互相摩擦之后会带电，是因为两物体互相摩擦时，一个物体的原子中有一些外层电子挣脱原子核的束缚并转移到另一个物体上去，所以总体效果是一个物体失去电子，另一个物体得到电子．失去电子的物体内部正电荷的总量大于负电荷的总量，因而显示出带正电．同样的道理，得到电子的物体就显示出带负电，而且两者的电荷量必然等值异号．

静电现象都可用原子结构模型进行解释．

小资料

元电荷

一个电子所带电荷量的绝对值为1.6×10^{-19}C，它是电荷的最小单元，称为元电荷，记作$e=1.6\times10^{-19}$C．

实验发现，任何带电体所带电荷量都是元电荷的整数倍．

电荷守恒定律

大量实验事实表明：**电荷既不能被创造，也不能被消灭，它们只能从一个物体转移到另一个物体，或者从物体的一部分转移到另一部分**．也就是说，在任何自然过程中，电荷的代数和是守恒的．这就是通常所说的**电荷守恒定律**（law of conservation of charge）．

电荷守恒定律是物理学中最重要的基本定律之一．现代科学实践证明，微观过程也普遍遵守电荷守恒定律．

静电感应与感应起电

活动

将一对有绝缘底座的枕形导体A与B紧紧靠在一起，这时它们并不带电，所以贴在导体下端的金属箔是闭合的．

1. 将带有电荷的绝缘导体球靠近枕形导体A但不接触（图1-1-6），观察枕形导体A与B下方的金属箔，你看到什么现象？

2. 将枕形导体A与B分开，观察枕形导体A与B下方的金属箔，你看到什么现象？

3. 如果再移去绝缘导体球，你估计会发生什么现象？做一做，你的设想对吗？

4. 将枕形导体A与B再靠在一起（接触），你又看到什么现象？

试用原子结构模型解释以上现象．

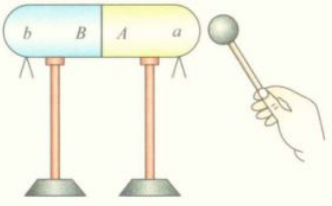


图1-1-6　感应起电

微信公众号：电子课本大全

在上面的实验现象中，当带电导体球靠近不带电的枕形导体时，由于同种电荷相互排斥、异种电荷相互吸引，导体中可以自由移动的电荷将会发生运动，以至于枕形导体靠近带电导体球的 a 端将带上与带电导体球电性相反的电荷，而远离带电导体球的 b 端带上与带电导体球电性相同的电荷，这种现象称为**静电感应**（electrostatic induction）. 保持带电导体球不动，将枕形导体分开时，导体 A 与导体 B 就会带上等量的异种电荷. 这种利用静电感应使导体带电的方法称为感应起电.

讨论交流

如图1-1-7所示的装置叫做验电器，观察它的结构，了解其工作原理.

怎样借助于验电器判断感应起电的枕形导体 A 与 B 所带电荷的电性？还需要哪些器材？操作步骤如何？试试看.

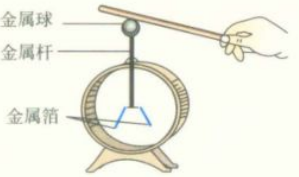


图 1-1-7 用丝绸摩擦过的玻璃棒能使验电器的金属箔张开

练习与评价

1. 先让验电器带上少量正电荷，然后拿一个带负电的带电体逐渐接近验电器的金属球（但不接触），可以看到这样的现象：金属箔张开的角度先是减小，以至闭合，然后又张开了. 试解释这个现象.

2. 不带电的金属导体 A 与带正电的金属导体 B 接触之后也带正电，原因是（　　）.

A. B 有部分正电荷转移到 A 上

B. A 有部分正电荷转移到 B 上

C. A 有部分电子转移到 B 上

D. B 有部分电子转移到 A 上

3. 把两个相同的金属小球接触一下再分开一小段距离，发现两球之间相互排斥，则这两个金属小球原来的带电情况可能是（　　）.

A. 两球原来带有等量异种电荷

B. 两球原来带有同种电荷

C. 两球原来带有不等量异种电荷

D. 两球中原来只有一个带电

4. 使18世纪电学家们感到困惑的一个现象是所谓的吸引—接触—排斥现象，即将带电棒移近一悬挂在绝缘线上的轻质导电小球，可见球被吸引. 若小球与棒接触后，它就立即被排开. 你将如何解释这一现象.

微信公众号：电子课本大全

发展空间

课外阅览

历史上的静电实验

1747年7月11日，美国科学家富兰克林（B.Franklin，1706—1790）写信给一位名叫考林森的英国物理学家，向他报告一年来的实验结果．在这封信中富兰克林描述了一个实验．他让A、B两人分别站在绝缘的箱子上，A摩擦一支玻璃管，然后让B用肘部接触这个玻璃管，并让A、B分别与站在地上的第三个人C相互靠近，结果A与C，B与C之间都有火花．这说明A、B两人都带电了．重复这个实验，而且让A、B带电之后，先相互接触，然后再与第三个人C靠近，结果都没有火花，这说明A、B两人在相互接触后都不带电了．为了解释这种现象，他提出了电的“单流质”假说：设想存在着一种有质量的电流质，可以毫无阻碍地渗透到各种物体之中．在起电过程中，一定量的电流质转移到一个物体中，该物体的电流质就超过正常量，就说物体带正电，用“+”号表示；电流质少于正常量，就说物体带负电，用“−”号表示．虽然富兰克林电的“单流质”假说并不正确，但他创造的“正电”和“负电”的术语仍沿用至今．

莱顿瓶的发明使人们第一次有办法得到很多电荷，并对其性质进行研究．1746年，就是上面提到的物理学家考林森，通过邮寄向美国费城的富兰克林赠送了一只莱顿瓶，并在信中向他介绍了使用方法．这直接促使了1752年富兰克林进行著名的费城风筝实验．他用风筝将“天电”引了下来，把“天电”收集到莱顿瓶中，从而弄明白了“天电”和“地电”原来是一回事．18世纪后期，贝内特发明了验电器，这种仪器一直沿用到现在，科学家使用了验电器后，使静电现象的研究工作向前迈进了一大步！

实验室

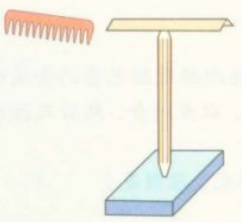


图 1-1-8　自制验电器

1. 自制一个静电验电器．把一张薄卡片剪成长 10 cm、宽 2 cm 的长方形．沿长的方向对折，把它平衡地放在铅笔尖上（图 1-1-8）．铅笔尖要稍插入卡片中，但不要戳破它，使卡片能自由地转动．把一个梳子在头发或羊毛织品上摩擦，使之带电，并使它接近这一验电器的一端．观察发生的现象，并试着对这一现象进行解释．

2. 把支在绝缘座上的不带电的导体A移近带电体B，用手指接触一下A，然后移开手指，握住绝缘座移开导体A，导体A就带电了．如果带电体B原来带正电，导体A将带什么电？做这个实验并作出解释．实验时可用验电器来检查导体A是否带电和带什么电．

3. 中国科技馆中有一个实验项目，实验员站在绝缘地板上，用手摸已经起电的范德格拉夫起电机（Van der Graaff generator）的金属球，随着对地的电压升高，她的头发会竖起来（图 1-1-9）！你知道这是为什么吗？



图 1-1-9

微信公众号：电子课本大全

2 库仑定律

探究影响点电荷之间相互作用的因素

讨论交流

带电物体之间存在相互作用力，这个力的大小可能和哪些因素有关呢？

跟带电物体所带电荷量的多少有关吗？跟带电物体的形状有关吗？还是跟带电物体间的距离有关？……

1. 你有没有感觉到问题的复杂性，你认为是否可以对问题进行简化？谈谈你的看法.

2. 怎样探究电荷之间的相互作用力和哪些因素有关？

许多物理问题都很复杂，科学研究总是从最简单的情形入手. 建立理想模型就是常用的简化方法.

当一个带电体本身的线度比它到其他带电体的距离小很多，以至在研究它与其他带电体的相互作用时，该带电体的形状以及电荷在其上的分布状况均无关紧要，该带电体可看做一个带电的点，这样的电荷称为**点电荷**（point charge）. 点电荷就是一个理想化的物理模型.

实验探究

如图 1-2-1 所示，把一个带正电荷 Q_A 的球体 A 放在可以水平移动的绝缘支座上. 再把一个带正电荷 Q_B 的小球 B 用绝缘丝线挂在玻璃棒上的 C 点（使两个球心在同一水平线上）. 让绝缘支座载着带电球 A 由左边较远处逐渐向右移动，慢慢靠近 B. 实验显示：

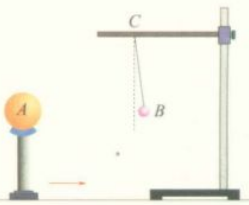


图 1-2-1 两个带正电小球的相互作用

1. 球体 A 向右移动的过程中，小球 B 的悬线逐渐偏离竖直方向，显示小球 B 所受作用力的大小在逐渐变化. A、B 之间的距离越小，偏角越_____，表示小球 B 受到的作用力越_____.

微信公众号：电子课本大全



库仑（C.A.Coulomb，1736—1806），法国物理学家

2. 保持A、B之间的距离不变，改变A球的电荷量，Q_A越大，悬线偏离竖直方向的偏角越_____；保持A球的电荷量不变，改变B的电荷量，Q_B越大，偏角越_____．表明A、B之间的相互作用力与电荷量有关，电荷量越大，相互作用力越_____．

实验探究结果表明：电荷之间的相互作用力随电荷量的增大而增大，随它们之间距离的增大而减小．

● 库仑定律

库仑于1785年在前人工作的基础上，通过大量实验分析，归纳得到在真空中的两个静止点电荷相互作用力的规律．如果用Q_1、Q_2表示两个点电荷的电荷量，用r表示它们之间的距离，用F表示它们之间的相互作用力，则

$$F = k\frac{Q_1 Q_2}{r^2}$$

式中的k是一个比例常量，叫做**静电力常量**（electrostatic force constant）．在上式中如果各个物理量都用国际制单位，即电荷量的单位用C，力的单位用N，距离的单位用m，则由实验得出

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

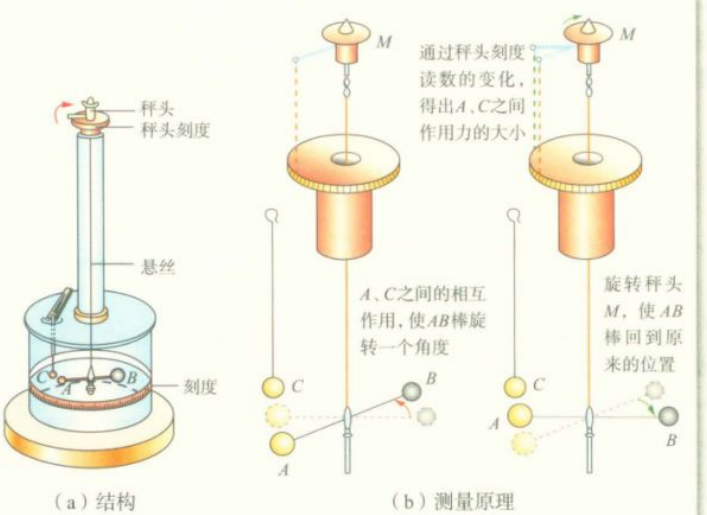
这一规律现在可以表述如下：**真空中两个静止的点电荷之间的作用力（斥力或引力）与这两个电荷所带电荷量的乘积成正比，与它们之间距离的平方成反比，作用力的方向沿着这两个点电荷的连线**．这个规律被称为**库仑定律**（Coulomb law），电荷之间这种作用力叫做静电力或库仑力．从库仑定律我们还可以得出，点电荷之间的静电力遵循牛顿第三定律．

库仑定律讨论的是两个点电荷之间的静电力．当空间

小资料

18世纪中期，物理学家既没有度量带电体所带电荷量多少的方法，也没有测量电荷之间非常小的相互作用力的工具．

法国人库仑凭着物理学家敏锐的直觉，断定一个带电金属球与另一个半径、材料完全相同的不带电的金属球接触后再分开，每球的带电量应是原带电球电荷量的一半，从而巧妙地解决了金属球所带电量成倍变化的问题．库仑还发明了扭秤，非常准确地测量出了物体间的静电力，即使它们仅带少量的电．



（a）结构　　（b）测量原理

图1-2-2　库仑扭秤

微信公众号：电子课本大全

有两个以上的点电荷时，怎么确定一个点电荷q_0所受到的静电力呢？如图1-2-3中，Q_1、Q_2对q_0的静电力分别为F_1、F_2，则q_0所受到的力为F_1和F_2的矢量和F.

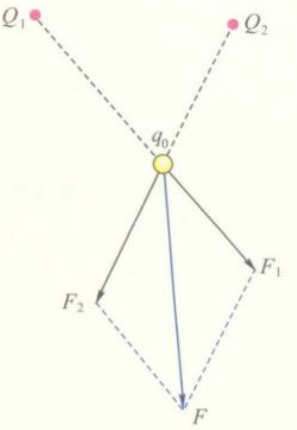


图1-2-3 静电力的叠加

【例题】在真空中，两点电荷A、B的电荷量分别为$Q_1=-9\times10^{-5}$C和$Q_2=2.7\times10^{-5}$C，彼此相距5 cm，现在距A电荷$r_1=4$ cm、距B电荷$r_2=3$ cm处放置点电荷C，其电荷量为$q=1.0\times10^{-9}$C，求点电荷C所受两点电荷的静电力.

【解】点电荷C受点电荷A的静电力大小为

$$F_1=k\frac{Q_1q}{r_1^2}=9.0\times10^9\times\frac{9\times10^{-5}\times1.0\times10^{-9}}{(4\times10^{-2})^2}\text{N}\approx5.1\times10^{-1}\text{N}$$

方向沿CA从C指向A.

点电荷C受点电荷B的静电力大小为

$$F_2=k\frac{Q_2q}{r_2^2}=9.0\times10^9\times\frac{2.7\times10^{-5}\times1.0\times10^{-9}}{(3\times10^{-2})^2}\text{N}\approx2.7\times10^{-1}\text{N}$$

方向从C沿BC的延长线斜向上.

由几何关系知$F_1\perp F_2$，所以点电荷C所受两点电荷的静电力大小为

$$F=\sqrt{F_1^2+F_2^2}=\sqrt{0.51^2+0.27^2}\text{N}\approx0.58\text{N},$$

方向与CA边夹角θ如图1-2-4所示，且

$$\tan\theta=\frac{F_2}{F_1}=\frac{0.27}{0.51}\approx0.53.$$

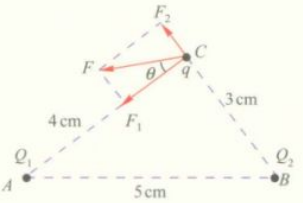


图1-2-4

练习与评价

1. 查阅有关资料，试比较氢原子中电子与原子核之间的静电力和万有引力的大小.

2. 真空中有两点电荷Q_1、Q_2相距r，若将Q_2的电荷量增加为原来的3倍，并将两点电荷间的距离减为原来的一半，则在前后两种情况下，两电荷之间的作用力之比为（　　）.

A. 1∶16　　B. 1∶12　　C. 12∶1　　D. 6∶1

3. A、B两个点电荷，在真空中相距10 cm，A的电荷量是B的电荷量的10倍，B受到A对它的库仑力是0.1 N，则A受到B对它的库仑力是多大？

4. 如图1-2-5所示，两条不等长的细线一端拴在同一点，另一端分别拴两个带同种电荷的小球，电荷量分别是q_1、q_2，质量分别为m_1、m_2，当两小球处于同一水平面时恰好静止，且$\alpha>\beta$，则造成α、β不相等的原因是（　　）.

A. $m_1<m_2$　　B. $m_1>m_2$　　C. $q_1<q_2$　　D. $q_1>q_2$

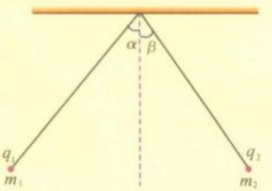


图1-2-5

微信公众号：电子课本大全

发展空间

课外阅览

探索平方反比关系的历程

库仑的发现首先获得世人的承认，然而电荷之间的相互作用力的规律在早些时候已有研究.

1766年，富兰克林在写给他在英国的朋友普利斯特利（J.Priestley，1733—1804）的信中，介绍了他在实验中的发现：放在金属杯中的软木球完全不受金属杯电性的影响. 富兰克林请普利斯特利帮他重复做一下这个实验，并加以解释. 1766年12月21日，普利斯特利从一系列实验中证明：当中空的金属容器带电时，除了靠近开口的地方外，金属容器的内表面上没有任何电荷，在内部也没有任何电力. 由此，普利斯特利提出了一个卓越的猜测："我们可否认为电的吸引力遵从与万有引力相同的规律，即与距离的平方成反比的类似的规律呢？因为容易证明，假若地球为一球壳，则置于其中的物体受到一侧的引力将不会大于另一侧的引力."但是普利斯特利没有作进一步的研究，也没有对电的斥力作出猜测.

1769年，英国爱丁堡大学的约翰·罗比森（John Robison，1739—1805）用直接的实验推测了平方反比关系，他确定了同种电荷的斥力反比于电荷间距的2.06次幂；异种电荷的吸引力反比于电荷间距的幂次小于2.

1773年，英国物理学家卡文迪许（H.Cavendish，1731—1810）曾做过一个实验：将两个金属半球壳盖在一个金属球上，使整个系统带电. 然后，将两个半球壳移开，发现内部的金属球不带电，而两个半球壳带电. 这表明电荷分布在导体的外表面上. 卡文迪许得出：如果电力与距离成反比的方次偏离2，则内球表面将有电荷，其数量跟电力随距离成反比的方次偏离2的偏差δ有关系. 他将这个实验重复了多次，确定电力服从平方反比定律，指数偏差δ不超过0.02. 卡文迪许的实验是现代精确验证电力平方反比定律的起点.

时至今日，科学家们还在不懈地进行着这类精确验证平方反比定律的实验. 1971年确定库仑力服从平方反比定律的指数偏差δ不超过$(2.7 \pm 3.1) \times 10^{-16}$.

3 电场 电场强度和电场线

●电 场

用手推桌子，手和桌子直接接触；马拉车，套在马身上的绳子和车直接接触……在这些例子中，力都是存在于直接接触的物体之间的，这种力的作用叫做接触作用. 然

微信公众号：电子课本大全

而电荷之间的相互作用力却可以发生在不接触的物体之间.

那么这个力究竟是怎样发生的呢?

英国物理学家法拉第（M.Faraday，1791—1867）认为，电荷周围都存在**电场**（electric field），电荷与电荷之间的相互作用力就是通过它们的电场而发生的. 具体地说，带电体1在其周围产生电场，放在此电场中的带电体2受到带电体1的电场施加的力；同样带电体2在其周围也产生电场，放在此电场中的带电体1也受到带电体2的电场施加的力，如图1-3-1所示. 电场对电荷的作用力称为**电场力**（electric field force），本章只研究静止电荷周围产生的电场，称为**静电场**（electrostatic field）.

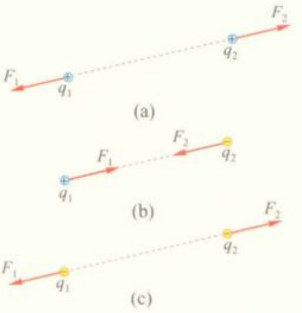


图1-3-1 电荷周围空间存在电场，电荷间通过电场发生相互作用

现代科学实验和实践证明了场的存在，它也是物质存在的一种形式.

电场强度

电场的基本性质之一是对处在其中的电荷有力的作用. 因此要研究电场的力的性质，就必须引入一个电荷，并测量电场对它的作用力. 此电荷的电荷量要充分小，放入电场之后不改变产生电场的带电体上的电荷分布，即不影响对原电场的研究；体积要充分小，可视为点电荷，在电场中的位置可以准确描述. 在物理学中，这样的电荷称为**检验电荷**（test charge）.

讨论交流

1.如何描述电场的性质？能不能用检验电荷所受到的力来表征电场的性质呢？谈谈你的看法.

2. 以点电荷Q形成的电场为例（图1-3-2），分别在与点电荷Q距离为r的A点和与点电荷Q距离为$2r$的B点放置不同电荷量的正检验电荷，若电荷量为q_0的检验电荷在A点所受电场力大小为F_0，根据库仑定律求出电荷量不同的其他检验电荷所受的电场力并填入下表：

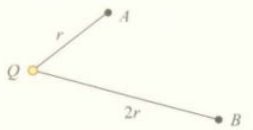


图1-3-2 点电荷Q产生的电场

检验电荷的电荷量	q_0	$2q_0$	$3q_0$	…	nq_0
检验电荷在A点受力大小F	F_0				
检验电荷在B点受力大小F'					

微信公众号：电子课本大全

你认为能不能用检验电荷所受到的力来表征电场在某点的性质？为什么？你打算怎样表征电场在该点的性质？

可见，检验电荷所受的电场力，不仅与所处位置有关，还与检验电荷本身所带的电荷量有关．因此，不能直接用检验电荷 q 所受的电场力表示各处电场的性质．

但是对于一般的电场，实验表明在电场中的同一点（如距离电荷中心 r 的 A 处），电荷所受的电场力 F 与该电荷的电荷量 q 的比值 $\frac{F}{q}$ 是一个与 q 无关的量，它仅由该电荷在电场中的位置确定，反映了该处电场的性质．在电场中的另一点（如距离电荷中心 $2r$ 的 B 处），电荷所受的电场力 F' 与该检验电荷的电荷量 q 的比值 $\frac{F'}{q}$ 与 $\frac{F}{q}$ 不一定相同．可见，这个比值反映了电场中不同位置场的强弱，表征了电场的力的性质．

研究表明，任何带电体所形成的电场都能用检验电荷所受电场力与电荷量的比值 $\frac{F}{q}$ 表征其电场的力的性质．我们把这个比值称为该处的**电场强度**（electric field strength），简称**场强**．用 E 表示电场强度，则有

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

如果电场是由某个带电体激发产生的，那么该带电体所带的电荷也常称为场源电荷，或源电荷．

在国际单位制中，电场力的单位是牛（N），电荷量的单位是库（C），所以电场强度的单位是牛（顿）每库（仑），符号为 N/C．

电场强度是一个矢量，电场中某一点场强的值等于在该点的电荷所受电场力的大小与其电荷量的比值，它的方向就是位于该点的正电荷受力的方向．

一般地说，不同点的场强大小有所不同，场强的方向也有所不同，这说明电场具有一定的空间分布．只要知道检验电荷的电荷量及其在空间某一点所受的电场力，就可以了解该点电场的情况．反之，如果知道了某点的电场强度 E，就可以由公式 $F=qE$ 来计算电荷 q 在该点所受的电场力．

微信公众号：电子课本大全

活动

研究点电荷电场的场强

1. 如图 1-3-3 所示，真空中有一个电荷量为 $+Q$ 的点电荷，则距其为 r 的 P 点的场强大小为_____. 这个公式就是点电荷场强的表达式.



图 1-3-3

2. 从点电荷 $+Q$ 所产生电场场强的表达式中，可看出场强与产生电场电荷的电荷量_____（“有关”或“无关”），与 P 点到 $+Q$ 的_____有关，而与检验电荷_____（“有关”或“无关”）.

3. 点电荷周围各点的场强大小与_____成正比，而与_____成反比.

4. 到点电荷 $+Q$ 距离为 r 的点（这些点在半径为 r 的球面上，如图 1-3-4 所示），场强大小是_____，方向为_____. 在图 1-3-4 中画出 a、b、c 三点场强的方向.

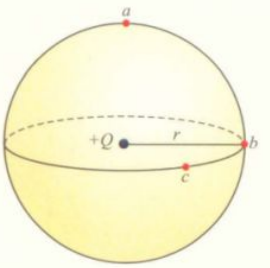


图 1-3-4

5. 在点电荷 $-Q$ 所产生的电场中，场强的方向是怎样的呢？在图 1-3-5 中画出 a、b、c 三点场强的方向.

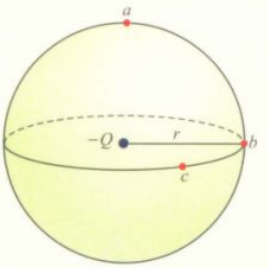


图 1-3-5

电场线

讨论交流

在金属球上装上一束很轻的细丝线（称为“验电羽”），用感应起电机使金属球带电，可以看到验电羽在电场的作用下呈一定形状分布，如图 1-3-6 所示.

是否可以像初中物理中用磁感线对磁场进行描述一样，在电场中也引入相应的形象化描写电场的“电场线”？


图 1-3-6 验电羽

19 世纪，英国物理学家法拉第创造性地在电场中引入**电场线**（electric field line），用它来形象化地描述电荷周围的电场. 电场线是这样一种线：它每一点的切线方向都和该处的场强方向一致，某一区域电场线的疏密反映了这一区域电场强度的大小（图 1-3-7）. 图 1-3-8 为几种典型电场的电场线分布.

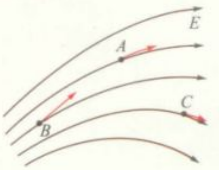


图 1-3-7 电场线

微信公众号：电子课本大全

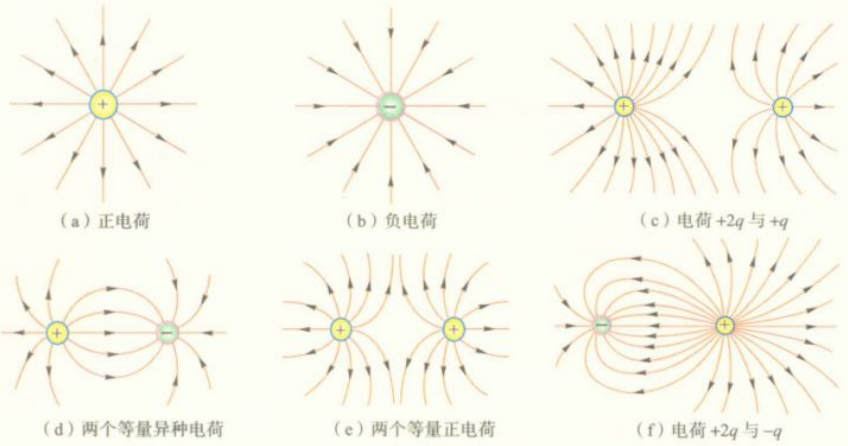


图 1-3-8　几种典型电场的电场线分布

从电场线的分布图可以得出电场线有如下特点：

1. 在静电场中，电场线起始于正电荷，终止于负电荷或无穷远处；或者起始于无穷远处，终止于负电荷；电场线不闭合.

2. 任何两条电场线都不会相交（这是因为电场中每一点的场强只能有一个确定的方向）.

3. 电场强度较大的地方电场线较密，电场强度较小的地方电场线较疏.

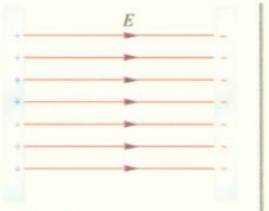


图 1-3-9　匀强电场

在图 1-3-9 中，彼此靠近的平行的带等量异种电荷的金属板之间的电场线是相互平行而且均匀分布的，表明各点场强的大小和方向都相同，这样的电场叫做**匀强电场**（uniform electric field）.

活动

用木屑模拟电场线

电场线是一种用来描述电场的假想几何图线，实际电场中并不存在电场线，但可以借助于一些看得见的媒介进行模拟，就像我们在初中物理中用铁屑来模拟磁感线一样.

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

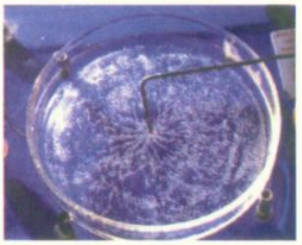


图 1-3-10　模拟点电荷电场的电场线

1. 模拟点电荷电场的电场线（图 1-3-10）

（1）将电场线演示盘放在实物投影仪上，培养皿内倒

微信公众号：电子课本大全

入蓖麻油并将适量干燥木屑尽可能均匀地撒在油面上.

（2）将一个点电荷电极放在培养皿中央并接到起电机的一个电极上.

（3）缓慢地加速转动起电机，即可看到木屑沿电场线方向排列起来.

2. 模拟匀强电场的电场线（图 1-3-11）

（1）换用两个平行板电极，两极之间的距离约为板长的 1/4～1/3，两极分别接通起电机的两个电极.

（2）缓慢地加速旋转起电机，即可看到模拟的匀强电场的电场线.

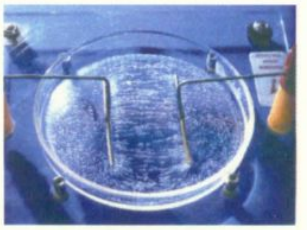


图1-3-11 模拟匀强电场的电场线

练习与评价

1. 把检验电荷放入电场中的不同点 a、b、c、d，测得的检验电荷所受电场力 F 与其电荷量 q 之间的函数关系图像，如图 1-3-12 所示，则 a、b、c、d 四点场强大小的关系为（　　）.

A. $E_a>E_b>E_c>E_d$　　B. $E_a>E_b>E_d>E_c$

C. $E_d>E_a>E_b>E_c$　　D. $E_c>E_a>E_b>E_d$

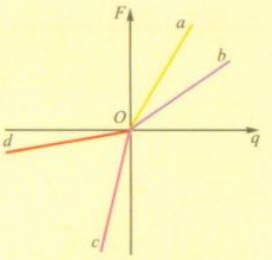


图 1-3-12

2. 在 x 轴上，坐标原点 $x=0$ 处放置一个电荷量为 $+Q$ 的点电荷，在 $x=4$ cm 处放置一个电荷量为 $-9Q$ 的点电荷，在两点电荷的连线上放置一个电荷量为 $+q$ 的检验电荷. 试确定检验电荷在 x 轴上的哪一区间内所受合力方向沿 x 轴负方向. 这一区间内两点电荷电场的合场强方向如何?

3. 把 $q_1=-1.0\times10^{-9}$ C 的检验电荷放入点电荷 Q 产生的电场中的 P 点，测得 q_1 所受电场力大小为 1.0×10^{-6} N. 则：

（1）若移走 q_1，而在 P 点放置一个 $q_2=+2.0\times10^{-8}$ C 的点电荷，则 q_2 所受电场力大小为_____N，此时 Q 在 P 点产生的电场的场强大小为_____N/C，方向与将 q_1 放在 P 点时的场强方向_____（“相同”或“相反”）；

（2）若在 P 点不放任何检验电荷，则 Q 在 P 点产生的场强大小为_____N/C，方向与将 q_1 放在 P 点时的场强方向_____（“相同”或“相反”）.

微信公众号：电子课本大全

发展空间

课外阅览

电场叠加原理

由实验和关于场的理论都可以得出，“场”这种物质存在形式不同于实物的一个特点是：多个场可以存在于空间同一位置. 当空间存在多个电荷时，它们在某一点形成的场强等于各个电荷单独存在时在该点的场强的矢量和. 这个结论叫做电场的叠加原理.

【例题】真空中有电荷量分别为$+Q$、$-Q$的点电荷，两电荷相距为r，试求两点电荷连线中点处的电场强度的大小.

【解】两个点电荷在连线中点处的场强大小相等，方向相同，根据电场的叠加原理可得

$$E=k\frac{Q}{(r/2)^2}+k\frac{Q}{(r/2)^2}=\frac{8kQ}{r^2}$$

连线中点处的场强方向指向负电荷（图1-3-13）.

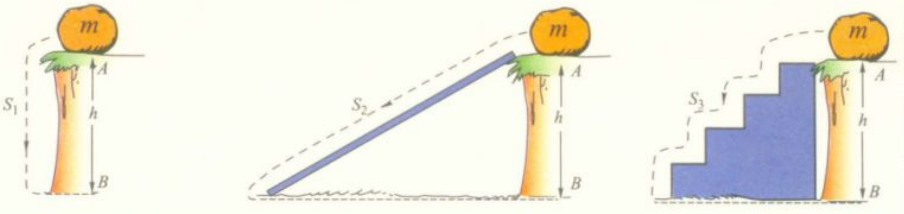
利用点电荷产生的电场强度的公式和电场叠加原理，原则上我们可以确定带电体周围任意点的电场强度.



图1-3-13

4 电势能 电势与电势差

电场力做功的特点



（a）物体沿竖直方向向下运动　（b）物体沿斜面向下运动　（b）物体沿曲折路径向下运动

图1-4-1 重力做功与路径无关

微信公众号：电子课本大全

物体在地球上运动且高度发生变化时，重力会对物体做功. 图1-4-1中质量为 m 的物体沿三条不同的路径从 A 到 B，重力做的功是相等的，这说明重力做功与路径无关，只与物体的质量以及起点和终点的位置有关. 电荷在电场中运动时电场力也要做功，其做功是否也具有这样的特点？

讨论交流

图 1-4-2（a）（b）（c）分别表示匀强电场（场强为 E）中的 $+q_0$ 电荷沿不同的路径从 A 到 B.

1. 沿 s_1 电场力做的功是多少？
2. 沿 s_2 电场力做的功是多少？
3. 沿 s_3 电场力做的功是多少？

三种情况下电场力做的功相等吗？

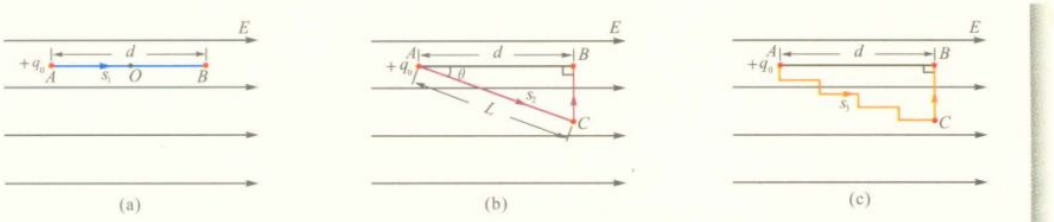


图 1-4-2 沿不同路径移动电荷电场力做功多少的比较

由以上讨论可以看出，在匀强电场中，电场力做功只与移动电荷的电荷量以及起点和终点的位置有关，而与路径无关，上述结论也适用于任意静电场.

可见，在静电场中，电场力做功与重力做功情况非常相似，由此我们可以把静电场和重力场加以类比.

方法论提示

类 比

类比是人们认识客观世界的一种思维方法，通常是指甲、乙两个对象之间存在着某些方面的相似，例如都具有 A、B 性质. 而因为甲对象还有 C、D 等性质，进而推论出乙对象可能也存在 C、D 等相似的性质.

利用类比推理得到的结果需要接受实验的检验，而且特别要注意两对象之间可能存在的本质差异.

电势能

地球上的物体受重力作用，移动物体时，重力做功与路径无关，只由物体的始末位置决定；在静电场中，电荷受电场力作用，移动电荷时，电场力做功也与路径无关，而由始末位置决定. 物体在地球上具有重力势能，实验表明：

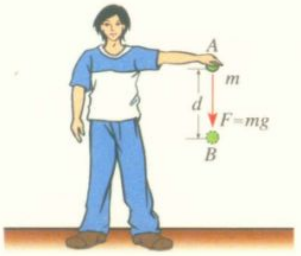
微信公众号：电子课本大全

电荷在静电场中也具有势能. 这个势能叫做静电势能，简称**电势能**（electric potential energy），用符号 E_p 表示.

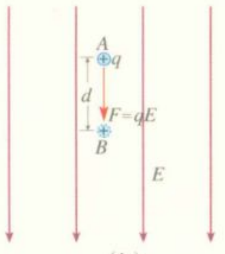
讨论交流

如图 1-4-3（a）所示，物体在地面附近从 A 下降到 B 或从 B 上升到 A 时，重力做功与物体重力势能的变化有什么关系？

如图 1-4-3（b）所示，在匀强电场中从 A 到 B 或从 B 到 A 移动电荷时，电场力做功与电荷电势能的变化又有什么关系？



（a）



（b）

图 1-4-3 电场力做功与重力做功的比较

类似于重力做功与物体重力势能变化的关系，设电荷在电场 A、B 两点所具有的电势能分别为 E_{pA} 和 E_{pB}，电荷从 A 点到 B 点，电场力对电荷所做的功为 W_{AB}，等于始点的电势能减去终点的电势能，即

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

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

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

$$E_{pA}=W_{A\infty}$$

在国际单位制中，电势能的单位是焦耳（J）.

电势能是能量的一种形式，电荷的电势能是由电荷和电场共有的，就像重力势能由物体和地球共有一样，平时我们说某电荷的电势能只是一种简略的说法.

尽管静电场与地球表面存在的重力场有很多相似之处，但是也有很大的区别. 例如在同一电场中，在固定的两点间移动电性相反的电荷，电荷电势能的变化是相反的.

微信公众号：电子课本大全

讨论交流

电场力做功，电势能如何变化

如图1-4-4所示，在点电荷+Q形成的电场中，将一个正电荷q_1从A点移动到B点，电场力做正功还是做负功？q_1在B点时的电势能比在A点的电势能大还是小？

如图1-4-5所示，如果将一个负电荷q_2从A点移动到B点，电场力做正功还是做负功？q_2在B点时的电势能比在A点的电势能大还是小？

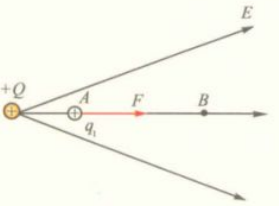


图1-4-4 电场力对正电荷做功

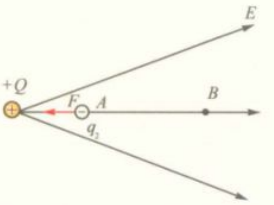


图1-4-5 电场力对负电荷做功

电势与电势差

讨论交流

1. 在静电场中搬运电荷，电场力要做功，电荷与电场共有的电势能发生变化，我们应当怎样描述静电场的能的性质呢？能用检验电荷所具有的电势能来描述吗？说说你的看法.

2. 类比电场强度概念建立的过程，你得到什么启示？

3. 在图1-4-2中，若将电荷量为q_0的检验电荷从A点移到B点时电场力所做的功为W_0，请将电荷量分别为$2q_0$、$3q_0$…的电荷从A点移到B点时的相关量填入下表：

检验电荷的电荷量	q_0	$2q_0$	$3q_0$	…	nq_0
电荷从A点移到B点时电场力所做的功	W_0				
电荷在A、B两点电势能的变化$E_{pA}-E_{pB}$					
电荷在A、B两点电势能的变化（$E_{pA}-E_{pB}$）与电荷量的比值					

你打算怎样描述静电场的能的性质？

微信公众号：电子课本大全

在静电场中沿不同路径把电荷 q 从 A 点移到 B 点，电势能变化（$E_{pA}-E_{pB}$）与电荷量 q 成正比，其比值是一个与 q 无关，只与 A、B 两点位置有关的量．可以用公式表示为

$$\frac{(E_{pA}-E_{pB})}{q}=\frac{E_{pA}}{q}-\frac{E_{pB}}{q}=\text{定值}$$

式中 $\frac{E_{pA}}{q}$、$\frac{E_{pB}}{q}$ 分别是检验电荷在 A、B 两点的电势能与检验电荷电荷量的比值．可以证明，$\frac{E_p}{q}$ 是一个与检验电荷无关、而只与场中位置有关的量，它反映了静电场各点的能的性质．我们把它定义为**电势**（electric potential），用符号 φ 表示，即

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

重力势能 E_p 与物体质量 m 的比值 $\frac{E_p}{m}$，是否也是一个与物体质量无关、只与重力场中位置有关的量？

我们规定 A、B 两点的电势之差 $\varphi_A-\varphi_B$ 为 A、B 两点的**电势差**（electric potential difference），用符号 U_{AB} 表示，即

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

由于电势是一个与检验电荷无关，而只与场中位置有关的物理量，所以电势差也只跟电场中这两点的位置有关，而与是否存在检验电荷无关．电势与电势差都是标量．在国际单位制中，电势与电势差的单位为伏特，简称伏，符号是 V．如果 1 C 的正电荷在电场中由一点移到另一点，电场力所做的功为 1 J，这两点间的电势差就是 1 V，即有 1 V=1 J/C．电势差通常也称为电压．

由上式不难得出

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

当我们知道了把电荷 q 从 A 点移到 B 点的过程中电场力所做的功，就可求出 A、B 两点的电势差．反之，当知道电场中 A、B 两点的电势差，就可求出在 A、B 两点间移动电荷 q 电场力所做的功．

$$W_{AB}=qU_{AB},\quad W_{BA}=qU_{BA}$$

因为 $W_{AB}=-W_{BA}$，所以 $U_{BA}=-U_{AB}$．

若选取了一个参考点（令这点的电势为零），则电场中各点的电势值就可由该点与参考点的电势差来确定．比如

微信公众号：电子课本大全

在上式中若取B点为参考点，则A点的电势φ_A，就等于A点与B点的电势差U_{AB}. 由此可知：**场中某点的电势数值上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.**

根据电势与电势能的关系$E_p = q\varphi$可知，确定零电势点也就确定了电势能零点.

【例题】在电场中把电荷$q = 2.0 \times 10^{-9}$C从A点移到B点，电场力做了1.0×10^{-7}J的正功，再把q从B点移到C点，电场力又做了4.0×10^{-7}J的负功.

（1）求AB间、BC间和AC间的电势差.

（2）若选C为参考点，求A点和B点的电势.

（3）若选B为参考点，求A点和C点的电势. 两点间的电势差是否变化?

【解】（1）$U_{AB} = \dfrac{W_{AB}}{q} = \dfrac{1.0\times10^{-7}}{2.0\times10^{-9}}\ \text{V} = 50\ \text{V}$

$$U_{BC} = \frac{W_{BC}}{q} = \frac{-4.0\times10^{-7}}{2.0\times10^{-9}}\ \text{V} = -200\ \text{V}$$

而
$$\begin{aligned} U_{AC} &= \varphi_A - \varphi_C \\ &= \varphi_A - \varphi_B + \varphi_B - \varphi_C \\ &= U_{AB} + U_{BC} \\ &= 50\ \text{V} - 200\ \text{V} \\ &= -150\ \text{V} \end{aligned}$$

（2）选C点为零电势点时，由

$$\begin{aligned} U_{AC} &= \varphi_A - \varphi_C \\ &= \varphi_A - 0 \\ &= -150\ \text{V} \end{aligned}$$

得 $\varphi_A = -150\ \text{V}$

而
$$\begin{aligned} U_{AB} &= \varphi_A - \varphi_B \\ &= -150\ \text{V} - \varphi_B \\ &= 50\ \text{V} \end{aligned}$$

故 $\varphi_B = -150\ \text{V} - 50\ \text{V} = -200\ \text{V}$

（3）选取B点为零电势点时，同理可求出$\varphi_A = 50\ \text{V}$，$\varphi_C = 200\ \text{V}$，$U_{AC} = -150\ \text{V}$不变.

由上例可知，电场中某点电势的值与零电势点的选取有关，但是两点间的电势差与零电势点的选取无关.

零电势点的选取取决于所研究问题的需要和方便. 在理论上对于有限大的带电体常选无穷远处的电势为零；而实际中常选地球的电势为零，因此，电场中任何接地点的电势都等于零.

微信公众号：电子课本大全

练习与评价

1. 电场中一条电场线上有 A、B 两点，电荷量为 q 的正电荷在 A 点时的电势能比它在 B 点时的电势能大，则电场线的方向是由 A 指向 B，还是由 B 指向 A？

2. 已知电场中 A、B 两点的电势 $\varphi_A > \varphi_B$，负电荷放在 A、B 哪一点时具有较大的电势能？

3. 电荷量为 40 μC 的正电荷，放在电势为零的点上具有的电势能等于多大？电荷量为 30 μC 的负电荷，放在电势为零的点上具有的电势能等于多大？

4. 匀强电场中各处的电场强度的大小都相等，方向都相同，那么匀强电场中各点的电势是否也都相等呢？

5. 在研究微观粒子时常用电子伏特（简称电子伏，符号 eV）作为能量的单位，1 eV 是在电势差为 1 V 的两点间移动一个电子时电场力所做的功. 已知电子的电荷量 $e = -1.6 \times 10^{-19}$ C，试证明：$1\ \text{eV} = 1.6 \times 10^{-19}$ J.

发展空间

课外阅览

等势面

用电场线能够形象化地描述电场中电场强度的大小和方向，电场中各点电势的大小是否也可以形象化地描述呢？

电场中电势值相等的各点构成的曲面，叫做等势面（equipotential surface）. 若规定相邻等势面的电势差相等，画出一系列的等势面，就可形象地描述电场中各点电势的分布情况.

1. 在点电荷 $+Q$ 产生的电场中（图 1-4-6），等势面为什么是同心球面？离点电荷较近的球面上的电势较高，还是离点电荷较远的球面上的电势较高？如果将正电荷换成负电荷，等势面还是同心球面吗？此时哪个球面上的电势较高？

2. 匀强电场的等势面（图 1-4-7）为什么是与电场线垂直的平面？如果等差值地画出等势面，匀强电场的等势面应是怎样的？

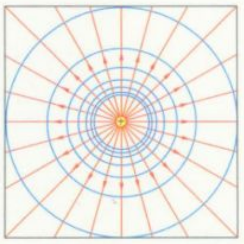


图 1-4-6 一个正的点电荷电场的等势面

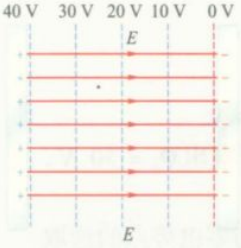


图 1-4-7 匀强电场的等势面

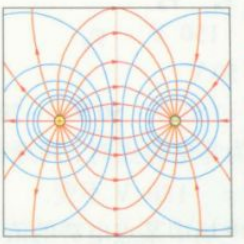


图 1-4-8 两个等量异种点电荷形成的电场的等势面

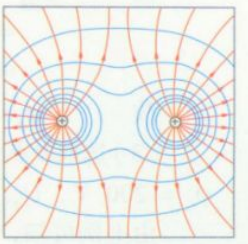


图 1-4-9 两个等量正点电荷形成的电场的等势面

由图可知：匀强电场中，电场线与等势面都是均匀分布的，其他电场中，电场线越密，等势面也越密，电场越强. 进一步的研究还发现：电场线与等势面处处垂直；电场线的方向就是电势降落最快的方向.

微信公众号：电子课本大全

5 匀强电场中电势差与电场强度的关系 示波管原理

● 匀强电场中电势差与电场强度的关系

电场强度是从电荷受力的侧面描写电场性质的物理量，而电势则是从移动电荷电场力做功的侧面描写电场性质的物理量，它们之间有什么联系呢？

理论探究

以匀强电场为例研究电势差和电场强度的关系

1. 沿电场线方向电势的变化

如图1-5-1所示，设匀强电场E中，沿电场线方向有A、B两点，距离为d，电势差为U_{AB}. 正电荷q从A移到B，电场力所做的功

$$W_{AB}=Fd=qEd\ ,\ W_{AB}=qU_{AB}$$

所以可得 $U_{AB}=Ed\ ,E=\dfrac{U_{AB}}{d}$

又因为$W_{AB}>0$，所以$U_{AB}>0$，则$\varphi_A>\varphi_B$.

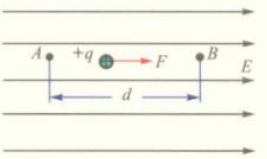


图1-5-1 电势差与电场强度的关系

由此可知，在匀强电场中，两点间的电势差等于场强与这两点间沿电场线方向的距离的乘积；场强的大小等于沿场强方向每单位距离上的电势差；沿电场线的方向电势越来越低.

在非匀强电场中，沿电场线方向，电势也是逐渐降低的.

从公式$E=\dfrac{U_{AB}}{d}$，我们得出的场强单位是V/m.

由于1 V × 1 C =1 J = 1 N × 1 m，所以1 V/m = 1 N/C，即这两种场强单位是相同的.

2. 沿垂直电场线方向电势的变化

如果沿垂直电场线的方向把电荷q从C点移到D点，由于电荷的位移方向与受力方向垂直，电场力不做功，$U_{CD}=0$，所以C、D两点的电势相等，且在垂直于电场线的同一平面内.

微信公众号：电子课本大全



图 1-5-2

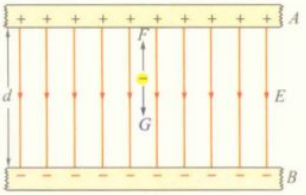


图1-5-3 带电液滴在电场中的平衡

【例题】如图1-5-2所示，水平放置的两平行金属板间有一匀强电场. 已知两极板间相距5 cm，有一质量为1.0×10^{-9} kg、带负电的液滴悬浮其中，其电荷量为5.0×10^{-12}C. 若不考虑空气浮力，要使液滴处于平衡状态，问：

（1）两极板间应加多大的电势差？

（2）哪块极板的电势较高？

【分析】液滴在匀强电场中受到电场力和重力的作用. 要处于平衡状态，必须使这两个力成为平衡力. 为使电场力方向竖直向上，根据液滴带负电的条件，电场线的方向必须竖直向下，如图1-5-3所示.

【解】假设A、B两极板间的电势差为U，则匀强电场的电场强度

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

液滴所受的电场力

$$F=qE=\frac{qU}{d}$$

液滴所受的重力为

$$G=mg$$

根据二力平衡条件，可以列出

$$\frac{qU}{d}=mg$$

可见A、B两极板间的电势差

$$U=\frac{mgd}{q}$$

已知$m=1.0 \times 10^{-9}$ kg，$d=5.0 \times 10^{-2}$ m，$q=5.0 \times 10^{-12}$C，代入上式即得

$$U=\frac{1.0\times10^{-9}\times 9.8\times5\times10^{-2}}{5.0\times10^{-12}}\text{V}=98\text{V}$$

因为电场线方向竖直向下，因此A极板应带正电，其电势较高.

● 示波管原理

示波器是一种可以显示电信号随时间变化情况的仪器，它的核心部件是示波管. 示波管实质上是一个阴极射线管，下面我们来了解它的工作原理.

微信公众号：电子课本大全

观察思考

阴极射线管常用于示波器的视频显示. 图1-5-4是阴极射线管中电子运动的径迹.

1. 猜一猜，电子在管中做怎样的运动？为什么？

2. 图1-5-5是一种简化的阴极射线管的装置示意图，若在阴极射线管阴极和阳极间加上直流高电压，并将管内一对水平的平行金属板（偏转电极）分别接在另一直流高压电源的正负极上，电子从阴极射出后的运动可以分为几个阶段？各是什么运动？

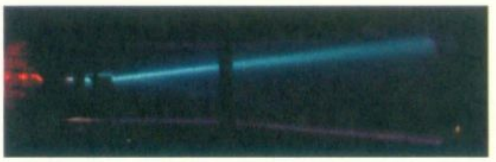


图1-5-4 阴极射线的偏转

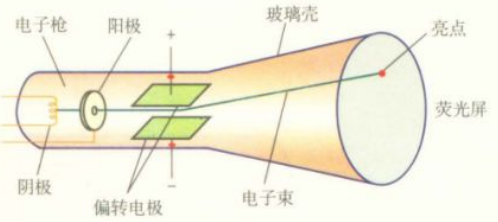


图1-5-5 阴极射线管的结构示意图

电子在图1-5-5所示的阴极射线管中的运动可分为三个阶段.

1. 电子在电场中加速

由于在阴、阳两极间形成了方向由阳极指向阴极的电场，所以阴极中的电子受到一个由阴极指向阳极的电场力的作用，两极间的电压越高，两极间的场强越大，电子受到的电场力越大. 当这个电场力大到一定程度，电子便摆脱原子核的束缚，从原子中挣脱出来.

脱离阴极的电子在电场力的作用下加速，由于电场力对电子做正功，电子动能增大. 阴极和阳极间的电压越高，电场越强，电子在穿过阳极小孔时获得的速度越大. 许多电真空仪表以及电视机显像管发射和加速电子就应用了这样的原理，装置的这一部分称为“电子枪”.

2. 电子在匀强电场中偏转

加速后的电子进入水平平行金属板间的匀强电场，电子所受电场力的方向（在图1-5-5中向上）与电场强度的方向相反，与其水平初速度方向垂直，因此电子在水平方向上保持初速度 v_0 不变做匀速直线运动，在竖直方向做初速度为零的匀加速运动，故电子的运动类似于重力场中物体的平抛运动，在电场中向上偏转. 偏转电极所加电压越大，电场越强，电子飞出电场时的偏转角度就越大.

微信公众号：电子课本大全

3. 电子飞出平行金属板后做匀速直线运动

当电子飞出平行金属板所形成的偏转电场后，不再受电场力的作用，因此它保持偏转角度不变，做匀速直线运动，直到打在荧光屏上，显示出荧光亮点.

● 实验观察：带电粒子在电场中的偏转

通常实验室里的示波管与上述阴极射线管的原理是一样的，只不过管内多了一对水平偏转电极，如图 1-5-6 所示.

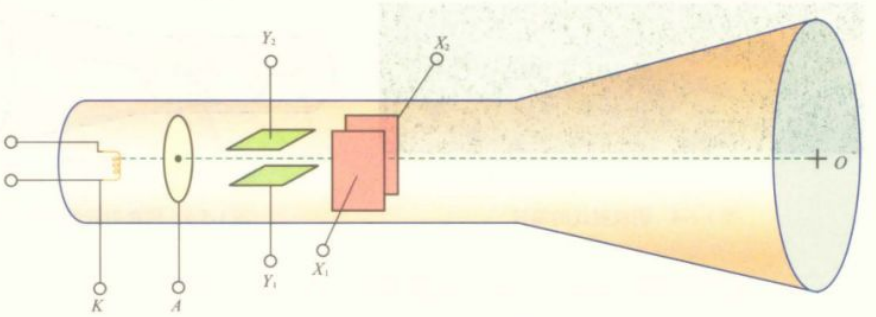


图 1-5-6　示波器中的阴极射线管有水平和竖直两个方向上的两对偏转电极

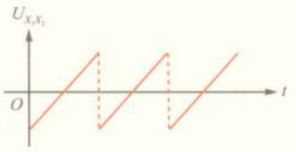


图 1-5-7

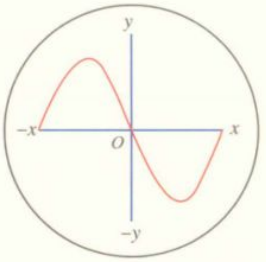


图 1-5-8　正弦波形的观察

如果在两对偏转电极上所加电压为零，则电子束在荧光屏上产生的亮斑将出现在屏的中央 O 处. 如果只在偏转电极 Y_1、Y_2 上加一稳定电压，电子束将沿 y 方向发生偏转，亮斑将出现在荧光屏上以 O 为原点的直角坐标系的（0，$+y$）或（0，$-y$）处.

如果只在偏转电极 X_1、X_2 加一个稳定电压，电子束将沿 x 方向发生偏转，亮斑将出现在荧光屏上 x 轴的（$+x$，0）或（$-x$，0）点. 如果在偏转电极 X_1、X_2 和 Y_1、Y_2 上均加了一定的电压，则亮斑既偏离 y 轴，又偏离 x 轴.

如果加在 X_1、X_2 上的电压随时间按图 1-5-7 所示的规律周期性地变化，则亮斑将在荧光屏的平面内运动，它可显示出加在 Y_1、Y_2 上的电压随时间变化的图形. 如果加在 Y_1、Y_2 上的电压随时间以正弦函数变化，则示波器显示的图形如图 1-5-8 所示.

微信公众号：电子课本大全

练习与评价

1. 两块金属板间的电势差是 60 V，两板间距离是 3 cm，问两板间匀强电场的电场强度是多少？

2. 相距为 4 cm 的水平放置的两块平行金属板上，加上 200 V 电压时，可使一个质量为 10^{-8} kg 的带电油滴在两板间处于平衡状态．求油滴的电荷量．

3. 为使相距为 10 cm 的平行金属板间形成一个场强 $E=10^4$ V/m 的匀强电场，两板上必须加上多大电压？如果将带有电荷量为 -1.6×10^{-10}C 的尘埃，从两板的正中间移到带正电的金属板，电场力做了多少功？

4. 科学测试表明，地球表面附近空间有一个垂直于地面的电场，从地面开始，每升高 10 m，电势约增高 1000 V．根据这些资料你能判断地球表面附近该电场的方向和大小吗？

5. 如图 1-5-9 所示，匀强电场场强 $E=2\times10^4$V/m，沿电场线上 A、B 两点间距离 $d=4$ cm，BC 垂直于电场线，$\theta=30°$，求 A、C 两点间的电势差．

有同学认为 $U_{AC}=U_{AB}=Ed=800$V；有同学认为 $U_{AC}=Ed/\cos\theta\approx924$V．你认为哪个答案正确？为什么？

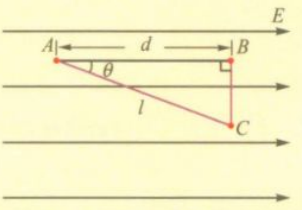


图1-5-9 电势差与电场强度的关系

发展空间

课外阅览

对示波管原理的定量研究

设阴极与阳极间的电压为 U_1，电子的电荷量为 e，质量为 m，偏转电极间的电压为 U_2，电极间的距离为 d，极板长度为 l，极板右端到荧光屏的距离为 L（$L\gg l$）．试研究下列物理量与哪些因素有关．

（1）电子加速后的速度 v_0．

（2）电子飞出偏转电极后的偏转角度．

（3）电子打在荧光屏上的侧向位移．

我们仍分三个阶段来研究：

（1）如图1-5-10所示，电子从阴极到阳极运动过程中，电场力所做的功

$$W=eU_1$$

根据动能定理，$W=\Delta E_k=\frac{1}{2}mv_0^2$

综合可得：

$$v_0=\sqrt{\frac{2eU_1}{m}}$$

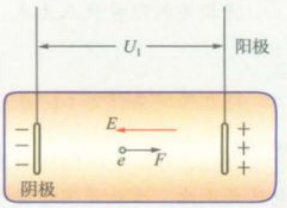


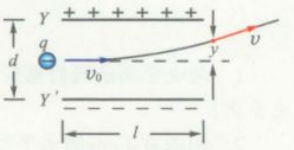
图 1-5-10 电子加速原理

式中，e、m 是一定的，可知电子加速后的速度 v_0 受加速电压调节，U_1 越大，v_0 越大．

（2）如图1-5-11所示，电子进入偏转电极后，水平方向不受外力作用仍做匀速运动，在

微信公众号：电子课本大全

两极中所经历的时间 $t=\dfrac{l}{v_0}$.



由于偏转电极间有方向竖直向下的电场，场强为 $E=\dfrac{U_2}{d}$，所以电子受竖直向上的电场力作用而加速，其加速度

$$a=\frac{F}{m}=\frac{eE}{m}=\frac{eU_2}{md}$$

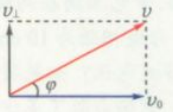


图1-5-11 带电粒子在匀强电场中偏转

由于竖直方向的初速度为零，加速度恒定，所以当电子飞出偏转电场时，其在竖直方向上获得的速度为

$$v_\perp=at=\frac{eU_2}{md}\cdot\frac{l}{v_0}$$

电子飞出电场时的偏转角的正切函数为 $\tan\varphi=\dfrac{v_\perp}{v_0}=\dfrac{elU_2}{mdv_0^2}$，

将 $v_0=\sqrt{\dfrac{2eU_1}{m}}$ 代入，可得

$$\tan\varphi=\frac{lU_2}{2dU_1}$$

不难看出，对给定的阴极射线管（l、d一定），电子偏转的角度只与所加偏转电压和加速电压有关.

（3）如图1-5-12所示，电子飞出偏转电场后，沿偏转角方向做匀速直线运动. 由于 $L\gg l$，因此电子在偏转电场内竖直方向的偏转距离 y 与荧光屏上光点的侧向位移相比要小得多，可以忽略不计. 因此可近似认为光点相对荧光屏中心偏离的距离为

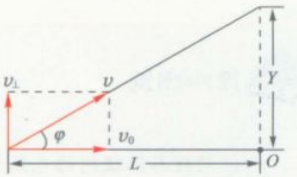


图1-5-12 电子在竖直方向上的侧向位移

$$Y=L\tan\varphi$$

将相关物理量代入上式，可得 $Y=\dfrac{lLU_2}{2dU_1}$.

即在给定条件下（l、d、L一定），$Y=k\dfrac{U_2}{U_1}$.

可见，对给定的阴极射线管，加速电压调定以后，荧光屏上光点的侧向位移与所加偏转电压成正比. 这就是用示波管测量与显示信号电压的原理.

密立根油滴实验

美国物理学家密立根于1910年利用如图1-5-13所示的实验装置，确定了电荷量的不连续性，并测定了元电荷的数值. 图中雾状小油滴被喷到水平放置的两块平行金属板上面的空间. 上板有一个小孔，当油滴穿过小孔进入两板间的空间后，通过显微镜可测出在两板间不加电压时油滴下降的速率，从而算出油滴质量 m. 再用X射线照射两板间的空气使之电离，从而使油滴带上微小的电荷量 q. 在两金属板上加电压并进行调节，使油滴受到的电场力等

微信公众号：电子课本大全

于它所受的重力，油滴达到平衡．根据 $qE=mg$，就能求出油滴所带电荷量 q．用上述方法对许多油滴进行测定，发现各个油滴所带电荷量都是某一最小电荷量的整数倍．密立根断定这一最小电荷量就是电子的电荷量，经过计算得出其数值为 1.602×10^{-19} C．

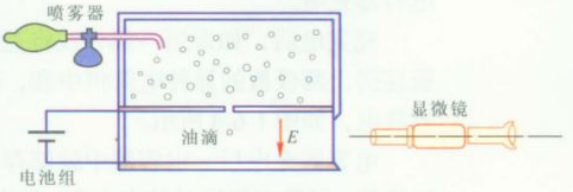


图 1-5-13　密立根油滴实验

6 电容器和电容

● 电容器

电容器（capacitor）是储存电荷和电能的元件，它在电子、电工技术中有广泛的应用．莱顿瓶（图 1-6-1）就是一种最早为人们所设计、利用的电容器，富兰克林曾经利用它储存风筝传递过来的雷电的电荷．



图 1-6-1　莱顿瓶

如图1-6-2所示，照相机工作时电池对机内大容量电容器充电，使电容器储存了电能，然后电容器通过闪光灯放电，从而发出强烈而耀眼的闪光．



图 1-6-2　照相机上的闪光灯

任何两个彼此绝缘又互相靠近的导体都可以看成一个电容器，而由两块彼此隔开平行放置的金属板可构成最简单的电容器，叫做平行板电容器．这两块金属板称为电容器的两极．两块金属板之间也可以放置绝缘介质．

电容器工作时，它的两块金属板的相对表面总是分别带上等量异种电荷 $+Q$ 和 $-Q$，一般就把任意一块极板所带

微信公众号：电子课本大全

电荷量的绝对值，叫做电容器的电荷量，用Q表示；这时两板间有一定的电势差，用U表示.

按图1-6-3所示连接电路（图中C表示电容器），电源E将使电容器的两极板带上等量异种电荷，这一个过程叫做电容器充电.

充完电后，如果用一根导线将充好电的电容器的两极板连接，两极板的异种电荷将中和，这一个过程叫做电容器放电，如图1-6-4所示.

电容器充电后，电容器中就储存了电能. 将电容器两极连接，异种电荷通过放电中和，储存的电能就释放出来，转化为其他形式的能量，例如发光、发热等.

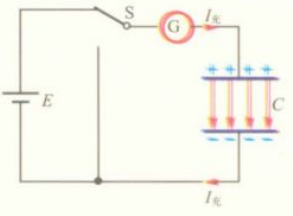


图1-6-3 电容器充电

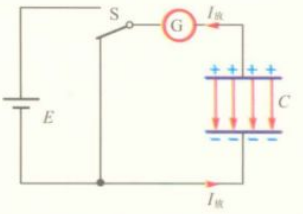


图1-6-4 电容器放电

电容器的电容

描述电容器储存电荷能力的物理量叫电容器的电容量，通常也简称**电容**（capacitance）. 不同的电容器储存电荷的能力不同. 给电容器两极板充上电荷量Q，两极之间有电势差U，实验表明电容器所带电荷量Q与两极间电势差U成正比. 两极间电势差U越大，两极板上所带电荷量Q越多. 比值$\frac{Q}{U}$则是与电荷量、电势差无关的量，它反映了电容器储存电荷的能力，因此我们将它定义为电容器的电容，表达式为

这里所说的Q，是指给电容器充电后，一个极板上所带电荷量的绝对值.

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

从定义式可知，电容器的电容量在数值上等于两极板间的电势差为1 V时，电容器所带的电荷量. 就是说，电容器的电容C越大，表明在两极板电势差一定的情况下，它可储存的电荷量越多.

微信公众号：电子课本大全

在国际单位制中，电容的单位是**法拉**，简称**法**，符号是F.

$$1\ \mathrm{F} = 1\ \mathrm{C/V}$$

法拉是一个很大的单位，实际上常用较小的单位微法（μF）和皮法（pF）.

$$1\mu\mathrm{F} = 10^{-6}\ \mathrm{F}$$

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

● 平行板电容器的电容

实验探究

平行板电容器的电容与哪些因素有关?

1. 如图1-6-5所示，把平行板电容器的一个极板固定在绝缘支架上，用手握住另一极板的绝缘柄，使两极板相距10cm左右，两极板分别与静电计的金属球和金属外壳相连，静电计外壳接地（此时静电计指针的偏转程度显示两极板间的电势差）.

进行这一实验探究时，注意实验的内容和条件，注意观察物理现象，注意分析物理现象说明的规律性的内容.

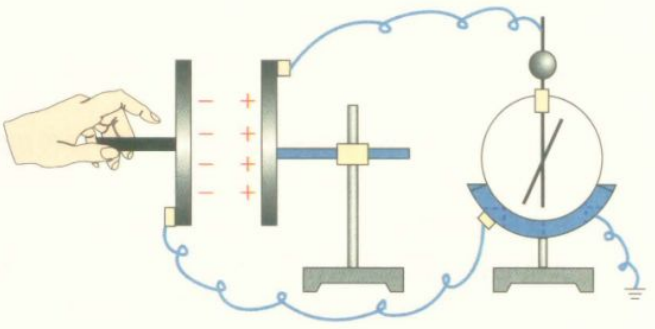


图1-6-5 探究决定电容大小的因素

2. 给平行板电容器充电，可观察到静电计的指针偏转一定角度，说明电容器充电后，两极板间存在一定的电势差.

3. 使两极板间距离减小，可观察到静电计指针的偏角变小，说明当电荷量不变时，如果两极板间距离减小，两板间电势差就随之减小. 根据公式$C=\frac{Q}{U}$，可知这时电容C增大. 如果使两极板间距离增大，则可看到相反的结果.

4. 保持极板所带电荷量及两极板间距不变，将两板平行

微信公众号：电子课本大全

小资料

不导电的物质叫做电介质（也叫做绝缘体）．但加在电介质上的电压高到一定程度时，电介质的内部结构发生变化，由绝缘体变为导体，叫做“被击穿”．使电介质变为导体（被击穿）的最低电压叫做击穿电压．

地错开，使两板正对面积减小，可观察到静电计指针偏角变大，说明此时两板间电势差变大．根据公式$C=\frac{Q}{U}$，可知电容变小了．使两极板正对面积增大，则可看到相反的结果．

5. 保持极板所带电荷量、两极板间距及正对面积不变，将一块有机玻璃插到两板之间，可观察到静电计的偏角变小，说明此时两极板间的电势差减小．根据$C=\frac{Q}{U}$可知插入有机玻璃板后，电容器电容变大了．将有机玻璃抽出，则可见到相反的结果．

以上现象说明，平行板电容器的电容与两板间距离、两板正对面积以及两极间的介质有关．

归纳以上实验可以得到结论：平行板电容器的两板之间的正对面积S越大，电容C越大；板间距离d越大，电容C则越小；插入电介质后电容C增大．

● 常用电容器



图 1-6-6　常用电容器

常用的电容器种类很多，如图 1-6-6 所示．

纸质电容器是在两层铝箔间夹入在石蜡中浸过的纸，然后再卷成一个圆柱体形状的电容器．云母电容器使用云母片作为电介质．

电解电容器利用电解现象在铝膜上产生一层很薄的氧化绝缘层作为电介质，因为介质层很薄，所以电解电容器的电容量可以做得很大．它的两极有固定的极性．

纸质电容器和电解电容器的电容都是固定的．其他常见的固定电容器还有云母电容器、陶瓷电容器等．



图 1-6-7　可变电容器

还有一种电容可变的电容器，它由两组金属片组成，固定不动的一组金属片叫做定片，可以转动的一组金属片叫做动片．定片和动片之间的电介质，可以是空气，也可以是某种绝缘介质．转动动片，两组金属片的正对面积发生变化，电容就随着改变，如图 1-6-7 所示．

加在电容器两极间的电压不能超过某一限度，超过这一限度，绝缘介质将被击穿，致使电容器损坏，这个极限电压就是上面“小资料”中提到的击穿电压．电容器上一般都标明了电容量和额定电压的数值，电容器的额定电压是指电容器正常工作所能承受的电压，它比击穿电压要低许多．

微信公众号：电子课本大全

练习与评价

1. 一电容器的电容是 50 pF，两极板间的电压是 30 V．求电容器所带的电荷量．

2. 有一电容器，带电荷量为 2×10^{-4} C 时，两板间电势差为 200 V．若使其电荷量再增加 2×10^{-4} C，这时它的电容量为_____F，两板间的电势差为_____V．

3. 通过上网查阅资料，了解电容器在照相机闪光灯中的作用．

*4. 练习使用闪光灯照相．

发展空间

课外阅览

电容式传感器

电容器的电容取决于极板面积、极板间距离以及极板间的电介质这几个因素．如果某一个物理量（如角度 θ、位移 x、深度 h 等）的变化，能够引起上述某个量的变化，从而引起电容的变化，那么通过测定电容就可以确定上述物理量的变化．作这种用途的电容器叫做电容式传感器．

图 1-6-8 是测定液面高度 h 的电容式传感器原理图．在金属芯线外面涂上一层电介质，放入导电液体中，金属芯线和液体构成电容器的两个极．液面高度发生变化时，引起正对面积 S 发生变化，从而使电容 C 发生变化．测定 C 的变化，就可以知道液面高度 h 的变化．

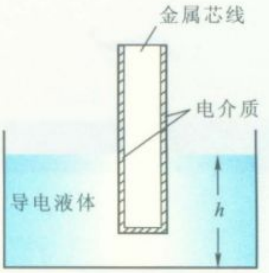


图 1-6-8 测定液面高度的电容传感器原理图

各种各样的传感器，绝大多数是依据各种物理原理和物理效应设计而成的．它们的功能是把非电学物理量(如位移、速度、压力、温度、湿度、流量、声强、光照度等)转换成电学量(如电压、电流等)．这是因为电学量测量起来精确、方便，而且能输入计算机进行计算和处理．以后本课程（选修 3-2）还将专门介绍．各种传感器是自动控制系统中不可缺少的元件，而且已经渗透到太空开发、环境保护、交通运输以及家庭生活等许多领域．


图 1-6-9 各种电容传感器

同学们可在网上查询其他传感器的用途．

电容器的储能

对一个具有固定电容量的电容器来说，未充电时电容器所带电荷量为零，两极板间的电势差为零，极板间不存在电场．因而电容器也就没有储存电能．当电容器充电后，设所带电荷量为 Q，两极板间的电势差为 U，则板间储存了电能．储存的能量可利用 $u-q$ 图像进行推导．由于电容器的电容 C 是不变的，两极板间的电势差 $u=\frac{q}{C}$，即 u 正比于电容器所

微信公众号：电子课本大全

带电荷量，所以 $u-q$ 图像是通过坐标轴原点的一条直线（图 1-6-10）. 该直线的斜率等于电容量的倒数 $1/C$；直线跟 q 轴所夹的面积在数值上等于充电时电源对电容器做的功 W，也就等于电容器内储存的能量.

于是，对一个具有固定电容量的电容器来说，$E=W=\frac{1}{2}QU=\frac{Q^2}{2C}$，电容器储存的能量为 $\frac{Q^2}{2C}$.

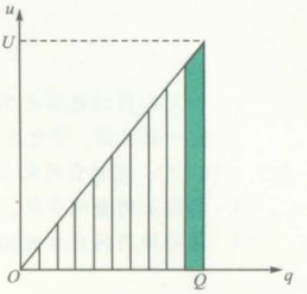


图 1-6-10　电容器储能示意图

7 静电的应用及危害

静电是自然界中普遍存在的物理现象，它既可以为人类所利用，造福人类，也可以给人类造成麻烦，甚至危害.

● 静电的应用

静电可以被人们利用. 如利用静电在物体上喷涂液体或固体涂料，即静电喷涂. 它的原理是设法使精细的油漆液滴飞离喷嘴时带上同种电荷，彼此排斥，并在电场力的作用下飞向作为电极的工件，这样就能比较均匀地沉积于工件表面. 另外，静电屏蔽、静电除尘器、静电复印机、激光打印机等都用到了静电现象.

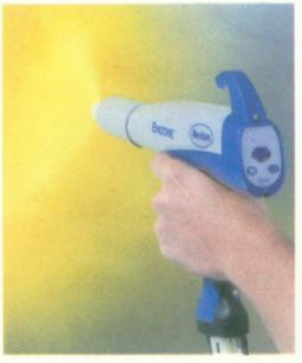


图 1-7-1　静电喷涂

激光打印机

静电对于激光打印机的工作是非常重要的，它是利用正、负电荷互相吸引的原理制成的. 激光打印机的工作过程如图 1-7-2 所示.

微信公众号：电子课本大全

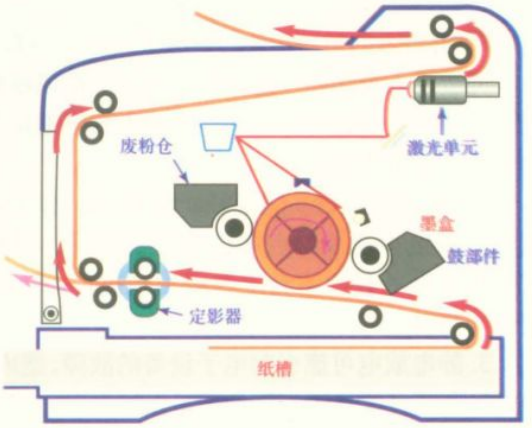


图 1-7-2

1. 计算机传送指令给激光打印机的微处理器. 微处理器依照指令控制光源的目标和持续时间.

2. 在打印机内部，有一个表面覆盖了一层光敏半导体硒的圆柱体，称为“硒鼓”. 在不受光照时，硒是绝缘体，当硒鼓旋转时，被喷射电子，带上负电荷.

3. 根据微处理器接收到的指令，光射到硒鼓的部分表面. 被光照到的部分，硒变成导体，电荷被导走，不再带电. 由此，在硒鼓上留下了带负电的“静电潜像”.

4. 在硒鼓滚动的过程中，“静电潜像”吸引不带电的墨粉. 墨粉中含有碳粒，硒鼓上带的电荷越多，印出的黑色越浓.

5. 打印纸在一个电极的作用下携带正电荷，受到硒鼓滚压后“吸走”了鼓上的墨粉（即图像）.

6. 打印纸穿过加热压辊，纸上的墨粉熔化后被牢固地黏结在纸上.

7. 硒鼓返回黑暗中，成为绝缘体. 表面被重新喷射电子，准备下一次打印.

● 静电的危害

静电有时也给人类生活和生产带来很多危害和麻烦. 由于静电极易产生并且能形成较高的电压，因此静电危害极为常见. 以下从两个方面进行说明.

微信公众号：电子课本大全

常见的静电危害



图 1-7-3 雷电

1. 雷雨云的雷鸣闪电. 全球大约每秒钟有100余次雷电，可造成人畜伤亡、击毁树木房屋、造成停电事故、造成飞行事故、引起森林大火、干扰无线电通信等，每年都给人类造成巨大损失.

2. 在存放易燃易爆品或产生粉尘、油雾较多的生产场所，静电火花极易点燃这些易燃物质，引起爆炸和火灾，甚至在外科手术台上也曾出现过静电火花引发的乙醚爆炸事件.

3. 静电放电可能引起电子设备的故障，造成电磁干扰. 静电放电还可能导致火箭和卫星发射失败，干扰航天飞行器的运行.

4. 静电放电可以击穿集成电路和精密的电子元件，或者促使元件老化，降低生产成品率. 在电子计算机的机房中，人体带电可能妨碍电子计算机正常运行.

工业中的静电危害

1. 电子工业：吸附灰尘，造成集成电路和半导体元件的污染，降低成品率.

2. 胶片和塑料工业：使胶片或薄膜收卷不齐；胶片、CD 塑盘沾染灰尘，影响品质.

3. 造纸印刷工业：纸张收卷不齐，套印不准，吸污严重，甚至纸张黏结，影响生产.

4. 纺织工业：造成根丝飘动、缠花断头、纱线纠结等危害.

● 静电危害的防止

静电引起的灾害给人类带来巨大的损失，因此防治静电可能产生的各种危害已受到各界的广泛关注. 人们认识到，完善有效地防静电工程要依照不同企业和不同作业对象的实际情况，制订相应的对策和措施. 例如：



图 1-7-4 铁链拖地疏导电荷

1. 要尽快导走多余电荷，避免静电积累. 最简单而又最可靠的办法是用导线把设备接地，这样可以把电荷引入大地，避免静电积累. 大型油罐要有很多条接地线；油罐车的下部拖一条铁链，它就是车的一条接地线.

微信公众号：电子课本大全

2. 调节空气的湿度也是防止静电危害的有效方法. 空气的湿度增大后，原来绝缘体的表面会变得潮湿，从而成为导体，一些地方积累的电荷容易随时放出，无法进一步积累. 潮湿的天气里不容易做好静电实验，也是这个道理.

3. 在易燃易爆气体和粉尘聚集的场所保持良好的通风、消除静电火花的引爆条件也是十分重要的防静电措施.

发展空间

课外阅览

避雷针的故事



富兰克林（B.Franklin，1706—1790），美国科学家

可以保护建筑物免受雷击伤害的避雷针，是富兰克林发明的，当他发现了闪电和莱顿瓶放电本质上相同之后，马上想到利用尖端放电原理将天空中威力巨大的雷电引入地面，以避免建筑物被雷击. 1750年7月，富兰克林在给考林森的信中最先提出了避雷针的设想；1753年，富兰克林在他自己印刷发行的历书中详细介绍了避雷针的制作、安装方法；1754年，捷克科学家吉韦茨制造了第一个避雷针；1760年，富兰克林在费城的一座大楼上也竖起了一根避雷针，效果十分显著，费城各地竞相仿效，到1782年，全城已装了400根避雷针.

避雷针是电学研究给人类带来的一项有实际应用价值的发明，200余年来，它不知为人类避免了多少次生命和财产的损失. 但在避雷针刚开始使用的时候，却遭到一些人的反对和歪曲.

反对首先来自教会，教会认为雷电是神表示的愤怒，不允许人们干涉它们的破坏力，但一场挟有雷电的狂风过后，大教堂着火了；而装有避雷针的高层房屋却平安无事. 事实教育了人们，使人们相信了科学. 避雷针发明100多年后，费城盖了一座教堂，教会也害怕遭雷击，去请教爱迪生要不要装避雷针，爱迪生说："雷公也有疏忽大意的时候，你们说要不要装？"结果该教堂还是装上了由富兰克林发明的避雷针.

避雷针相继传到英国、德国、法国，最后普及到世界各地. 我们都知道，避雷针的尖端有利于将雷电引入地下，但富兰克林的英国对手认为避雷针的顶端应做成球形，1780年，英王乔治三世颁布了一道王室御令，要求英国所有避雷针的顶端都要做成球形而不是尖端. 国王荒唐的决定引起了全国混乱，国王甚至示意持反对意见的皇家学会会长辞职. 虽然英王企图用皇室法令来改变自然法则，但据我们所知，他没有成功.

微信公众号：电子课本大全

本章小结

1. **电荷守恒定律** 电荷既不能被创造，也不能被消灭，它们只能从一个物体转移到另一个物体，或者从物体的一部分转移到另一部分.

电子所带电荷量的绝对值 e 称为元电荷. $e = 1.6 \times 10^{-19}\,\mathrm{C}$. 自然界任何带电体所带的电荷量都是元电荷的整数倍.

2. **库仑定律** 真空中两个静止的点电荷之间的作用力，与这两个电荷所带电荷量的乘积成正比，与它们的距离的平方成反比，即 $F = k\dfrac{Q_1 Q_2}{r^2}$，作用力的方向沿着这两个点电荷的连线. 点电荷之间的静电力遵循牛顿第三定律.

点电荷是一个理想化的模型，在一定条件下可以忽略带电体的形状和大小，把带电体看成一个带电的点.

3. **电场** 电场是客观存在的一种物质，电荷间的相互作用是通过电场传递的. 电场对放在其中的电荷有力的作用，电荷在电场中具有电势能.

4. **电场强度** 它从力的角度反映电场的性质，是矢量. 其方向为正检验电荷的受力方向，其大小为 $E = \dfrac{F}{q}$. 点电荷 q 在电场中受到的电场力 $F = qE$. 点电荷周围产生的电场的场强大小为 $E = k\dfrac{Q}{r^2}$.

5. **电势能** 电荷在电场中具有的势能叫做电势能. 电场力做功与移动路径无关，在静电场中移动电荷，电场力做正功时电势能减小，电势能转化为其他形式的能；电场力做负功时，电势能增加，其他形式的能转化为电势能. 电场力做功与电势能变化的关系是 $W_{AB} = E_{pA} - E_{pB}$.

6. **电势、电势差** 从能量的角度反映电场性质的物理量，都是标量. 电势的定义为 $\varphi = \dfrac{E_p}{q}$. 电势差的定义为 $U_{AB} = \varphi_A - \varphi_B$；$U_{AB} = \dfrac{E_{pA}}{q} - \dfrac{E_{pB}}{q} = \dfrac{W_{AB}}{q}$. 通常选取无穷远或地球为零电势点.

7. **匀强电场中电势差与电场强度大小的关系** 匀强电场中，沿电场线方向相距为 d 的两点间的电势差 U 与场强的关系为 $U = Ed$.

8. **电场线** 为直观反映电场分布情况而人为画出的曲线. 它的疏密可以形象地表示电场的大小，线上任一点的切线方向为该点电场强度的方向，沿电场线方向电势逐渐降低.

9. **电容（量）** 反映电容器储存电荷能力的物理量，电容的定义式为 $C = \dfrac{Q}{U}$. 平行板电容器的电容与两板之间的距离、正对面积以及介质材料有关. 电容器种类繁多，在电子技术中有广泛应用.

10. **静电的利用和危害** 防止静电危害的基本原理是防止电荷大量积累，用各种办法把积累的电荷导走.

微信公众号：电子课本大全

习 题

1. 物体带电荷量不可能是（ ）

A. 1.6×10^{-19} C　　B. 3.2×10^{-19} C

C. 4.8×10^{-19} C　　D. 6.0×10^{-19} C

2. 下列关于点电荷的说法正确的是（ ）

A. 点电荷所带的电荷量一定是 1.6×10^{-19} C

B. 实际存在的带电体都是点电荷

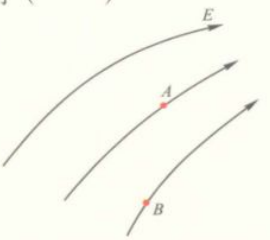
C. 点电荷是理想化的物理模型

D. 带电金属球不能看成是点电荷

3. 真空中有两个点电荷，它们间的静电力是 F，如果保持它们之间的距离不变，将两个点电荷的电荷量都增大为原来的 2 倍，则它们之间静电力的大小等于（ ）

A. $4F$　　B. $2F$　　C. $F/2$　　D. $F/4$

4. 如图所示，所画的曲线是某电场的三条电场线，其中有 A、B 两点，下列说法正确的是（ ）



（第 4 题图）

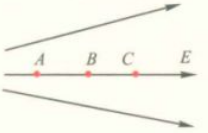
A. 由 $E = F/q$ 可知，在 A 点放入的电荷电荷量越大，A 点的场强越小

B. B 点场强大于 A 点场强

C. A 点场强大于 B 点场强

D. 有同一条电场线通过 A、B 两点

5. 点电荷产生的电场的电场线如图所示，关于 A、B、C 三点的电场强度的关系说法正确的是（ ）.



（第 5 题图）

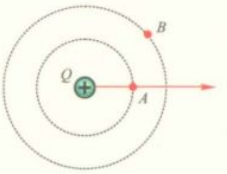
A. A 点的场强大于 C 点场强

B. C 点的场强小于 B 点场强

C. A、B 两点场强相等

D. 三点的场强都不相等

6. 如图所示，在点电荷 Q 形成的电场中，正电荷 q 从 A 移到 B. 在此过程中，下列说法正确的是（ ）



（第 6 题图）

A. 电场力对电荷做正功

B. 电场力对电荷做负功

C. 电场力对电荷可能不做功

D. 由于不知道移动的路径，因此无法确定电场力是否做功

7. 电荷量为 q 的电荷在电场中由 A 点移到 B 点时，电场力做功 W，由此可算出两点间的电势差为 U，若让电荷量为 $2q$ 的电荷在电场中由 A 点移到 B 点，则（ ）

A. 电场力做功仍为 W

B. 电场力做功为 $W/2$

C. 两点间的电势差仍为 U

D. 两点间的电势差为 $U/2$

8. 一电荷在电场中从静止开始并只在电场力作用下运动，则它一定（ ）

微信公众号：电子课本大全

A. 向场强较小的地方运动
B. 向电势较低的地方运动
C. 向电势能较小的地方运动
D. 沿某条电场线运动

9. 关于电容器的电容，下列说法中正确的是（　　）.
A. 电容器所带电荷量越多，电容越大
B. 电容器两板间电压越低，其电容越大
C. 电容器不带电时，其电容为零
D. 电容器的电容只由它本身的特性决定

10. 氢原子的原子核为一个质子，原子核外电子如果距质子 0.53×10^{-10} m，则它们之间的相互作用力大小是 _____ N.

11. 有 A、B 两个电荷，所带电荷量分别是 Q 和 $2Q$，电荷 A 对电荷 B 的作用力是 F_B，电荷 B 对电荷 A 的作用力是 F_A，则 F_A ∶ F_B = _____ ；若电荷 B 的电荷量加倍，则 F_A ∶ F_B = _____.

12. 在电场中某点放一个点电荷，其电荷量是 $+2.0 \times 10^{-6}$ C，受到的电场力是 1.0×10^{-3} N，方向向右，则该点的电场强度大小为_____N/C，若在该点改放一个电荷量为 -1.0×10^{-6} C的点电荷，则该点的电场强度方向_____.



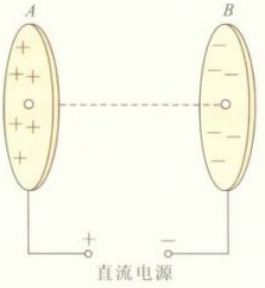
（第14题图）

13. 在研究微观粒子的问题时，经常用 eV 来作为能量的单位，有一个原本静止的电子经过电场加速后，获得了 3.2×10^4 eV的动能，则该加速电场两端的电势差是_____ V.

14. 如图所示，q_1、q_2、q_3 分别表示在一条直线上的三个点电荷，已知 q_1 与 q_2 之间的距离为 l_1，q_2 与 q_3 之间的距离为 l_2，$l_2 = 2l_1$，且每个电荷都处于平衡状态.

（1）如 q_2 为正电荷，则 q_1 为_____电荷，q_3 为_____电荷.

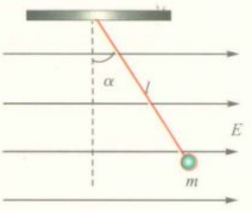
（2）q_1、q_2、q_3 三者电荷量大小之比是_____ ∶ _____ ∶ _____.



（第15题图）

15. 静电加速器是一种利用电场来加速带电粒子、增大粒子能量的装置. 如图所示，把平行金属板 A、B 连接在电压为 U 的直流电源两极间，使 A、B 带电. 带电粒子通过 A、B 板间的电场时就被加速. 如果 A、B 板间的电压 $U = 1$ MV，当带正电的质子从 A 板中心的小孔进入电场（初速为零），从 B 板中心的小孔穿出时，如果质子在运动过程中只受电场力作用，那么质子得到的动能是多大？质子穿出时的速度是多大？（$m_{质子} = 1.67 \times 10^{-27}$ kg）

16. 如图所示，一条长为 l 的细线，上端固定，下端拴一质量为 m 的带电小球. 将它置于一匀强电场中，电场强度大小为 E，方向水平向右. 已知当细线离开竖直位置的偏角为 α 时，小球处于平衡状态. 试问：



（第16题图）

（1）小球带何种电荷？

（2）小球所带的电荷量是多少？

微信公众号：电子课本大全

第二章 直流电路

- 欧姆定律
- 电阻定律
- 电阻的串联、并联及其应用
- 电源的电动势和内阻　闭合电路欧姆定律
- 学生实验：测量电源的电动势和内阻
- 焦耳定律　电路中的能量转化
- 学生实验：练习使用多用电表
- 逻辑电路和控制电路

在幽深寥廓的夜空，点点闪闪的灯光，使星辰都黯然失色．你知道吗？这里有各种各样的电路，是其中的电流带来了人间的光明．



微信公众号：电子课本大全

1 欧姆定律

无论是大型的输电网络，还是家用电器内部的线路，都是由各种电路组合而成的. 本章我们要学习的直流电路知识是认识电路的工作过程的重要基础.

在初中阶段大家已经学习了不少关于电路方面的知识，现在我们将在原有的基础上进一步学习，深入探讨一些电路问题.

● 电 流

当导体内没有电场时，导体中的大量自由电荷不停地做无规则热运动，自由电荷向各个方向上运动的机会相等，因此在任何一段时间内，对于导体内的任一横截面，从两侧穿过该截面的自由电荷数大致相等. 从宏观上看，导体内的自由电荷没有定向运动，也就是没有电流.

我们已经知道电流是电荷的定向运动形成的，那么什么条件下才能形成电流呢?

要在导体中形成电流，首先必须要有可自由运动的电荷，称为**自由电荷**（free electric charge). 金属中的自由电荷是**自由电子**（free electron)；在电解质溶液（酸、碱、盐类的水溶液）中的自由电荷则是可自由运动的正负离子.

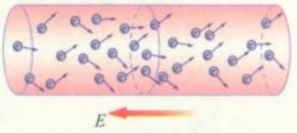


图 2-1-1 自由电子运动的模拟图像

形成电流的另一个条件是导体内存在电场. 在电场中，自由电荷受电场力作用形成定向运动，如图2-1-1所示. 正电荷和负电荷受力的方向相反，它们将向相反方向运动. 我们规定正电荷的定向运动方向为电流方向.

在金属导体中，电流方向与自由电子定向运动方向相反. 在电解质溶液中，电流的方向与正离子定向运动的方向相同，与负离子定向运动的方向相反.

通过导体横截面的电荷量 q 跟通过这些电荷所用时间 t 的比值，叫做**电流**（current），用符号 I 表示，即

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

“电流”这个词有两种含义：一是电荷的定向运动的过程；二是衡量这一过程的“强弱”，即单位时间内通过导体横截面的电荷量.

在国际单位制中，电流的单位是**安培**，简称**安**，符号是A. 如果1 s内通过导体横截面的电荷量是1 C，则导体

微信公众号：电子课本大全

中的电流为 1 A. 电流的常用单位还有毫安（mA）和微安（μA）等.

$$1\ \text{mA} = 10^{-3}\ \text{A}$$

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

方向不随时间改变的电流叫做**直流**（direct current），方向和强弱都不随时间改变的电流叫做**恒定电流**（steady current）. 我们通常所说的直流大多指恒定电流.

讨论交流

既然导体中的电流是自由电荷在电场作用下的定向运动，我们是否可以找出电流与描述导体内部自由电荷定向运动的相关物理量之间的定量关系呢?

设一段粗细均匀的导体的横截面积为 S，导体每单位体积内的自由电荷数为 n，每个自由电荷所带的电荷量为 q. 导体内部存在电场，自由电荷在电场作用下定向运动形成电流，设自由电荷沿着导体定向运动的平均速率为 v. 你能从图 2-1-2 得到启示，求出导体中的电流吗?

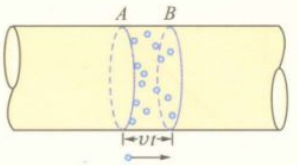


图 2-1-2 在 A、B 两截面所夹的圆柱体内的自由电荷，在时间 t 内可以全部通过横截面 B

● 欧姆定律 电阻

在一段导体的两端加上电压，导体内部就存在电场. 导体内部的自由电荷就会在电场的作用下发生定向运动形成电流. 在同一段导体两端加上不同的电压，导体中的电流也就不同. 通过导体的电流 I 跟导体两端的电压 U 成正比，即 $I \propto U$，或 $U \propto I$.

电压 U 和电流 I 的比值是一个跟导体本身性质有关的量，我们称之为**电阻**（resistance），用 R 表示.

将 $U \propto I$ 写成等式为

$$U = IR \text{ 或 } I = \frac{U}{R}$$

这一规律是德国物理学家欧姆（Georg Simon Ohm，1787—1854）发现的，后人将它称为**欧姆定律**（Ohm law）.

在相同电压作用下，导体的电阻越小，通过导体的电流越大；而导体的电阻越大，通过导体的电流则越小. 因此，电阻反映导体对电流的阻碍作用.

微信公众号：电子课本大全

在国际单位制中，电阻的单位是**欧姆**，简称欧，符号是 Ω. 如果在某一段导体两端加电压 1 V，通过导体的电流是 1 A，则该段导体的电阻就是 1Ω，1Ω=1 V/A. 常用的电阻单位还有千欧（kΩ）和兆欧（MΩ）等.

$$1\,k\Omega = 10^3\,\Omega$$
$$1\,M\Omega = 10^6\,\Omega$$

● 伏安特性曲线

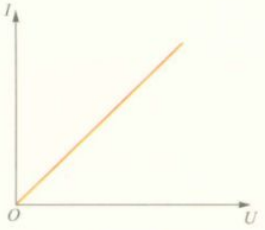


图 2-1-3　金属导体的伏安特性曲线

通过某种电学元件的电流随电压变化的实验图线，叫做这种元件的伏安特性曲线.

对于金属导体，当温度不变时，如欧姆定律所表述的，电流跟电压成正比，其伏安特性曲线是通过坐标原点的直线，其电阻为定值，如图 2-1-3 所示. 具有这种伏安特性曲线的电学元件称为线性元件.

欧姆定律是在金属导体的基础上总结得出的，对其他导体是否适用，需要经过进一步的实验检验. 实验表明，除金属外，欧姆定律对电解质溶液也适用，但对气态导体，如日光灯管中的气体，以及某些导电器件，如晶体管等并不适用. 在这种情况下，其伏安特性曲线不是直线，这种电学元件称为非线性元件.

根据实验测出的伏安特性曲线，可以判断导电元件的导电特性.

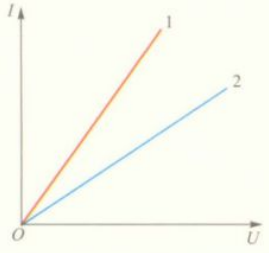


图 2-1-4　两种线性元件的伏安特性曲线

讨论交流

根据实验数据绘出的两个导电元件的伏安特性曲线如图 2-1-4 所示，从图中你可以得出什么结论？

● 学生实验：描绘小灯泡的伏安特性曲线

想一想，小灯泡的伏安特性曲线可能是什么形状？要描绘小灯泡的伏安特性曲线，需要哪些实验器材？如何设计实验电路？

微信公众号：电子课本大全

实验操作

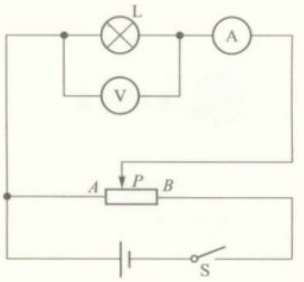


图 2-1-5

1. 如图 2-1-5 所示连接电路.

2. 将滑动变阻器的滑动片 P 置于 A 端，使小灯泡 L 两端的电压为零，检查电路无误后，闭合开关 S.

3. 将滑动片 P 逐渐向 B 端移动，即逐渐增大小灯泡 L 两端的电压.

4. 读出几组相应的电压表、电流表的示数 U、I，记录在表格中：

U/V								
I/A								

5. 断开开关 S，拆去实验电路，整理好实验器材.

6. 在坐标纸上建立一个平面直角坐标系，纵轴表示电流 I，横轴表示电压 U，根据实验得到的数据描点，并用平滑曲线连接起来，便得到小灯泡的伏安特性曲线.

讨论交流

根据实验数据描绘的图线有什么特点？为什么会出现这种情况？

练习与评价

1. 在示波管中，电子枪 2 s 内发射 6×10^{13} 个电子，则示波管中电流大小约为（　　）.

A. 4.8×10^{-6} A　　B. 3×10^{13} A

C. 9.6×10^{-6} A　　D. 3×10^{-6} A

2. 两电阻 R_1、R_2 的伏安特性曲线如图 2-1-6 所示，可知两电阻大小之比 $R_1 : R_2$ 等于（　　）.

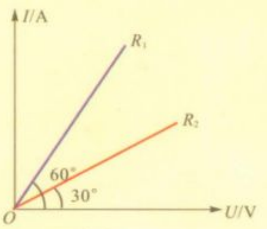


图 2-1-6

A. 1 : 3　　B. 3 : 1　　C. $1 : \sqrt{3}$　　D. $\sqrt{3} : 1$

3. 一段导体两端电压是 4 V，在 2 min 内通过导体横截面的电荷量是 15 C，这段导体的电阻 $R =$ _____ Ω.

4. 电子绕核运动可等效为一个环形电流，设氢原子中的电子以速率 v 在半径为 R 的圆轨道上运动，用 e 表示电子的电荷量，则其等效电流 $I =$ _____.

5. 有一个电学元件，测得其电压和电流的对应值如下表所示，请据此画出该元件的伏安特性曲线，并指出该元件是线性元件还是非线性元件？为什么？

U/V	2.18	4.36	8.71	13.08	17.45	21.80	25.75
I/mA	0.5	1.0	2.0	3.0	4.0	5.0	6.0

微信公众号：电子课本大全

发展空间

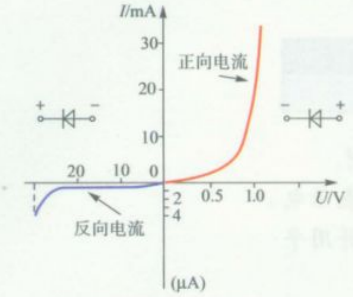
课外阅览

二极管的伏安特性曲线

二极管是用半导体材料制成的一种电子器件，一般用如图 2-1-7（a）所示的符号表示．它有两根引线，引线 A 是二极管的正极，引线 B 是二极管的负极．



（a）二极管的符号



（b）二极管的伏安特性曲线

图 2-1-7

实验测出二极管的伏安特性曲线如图 2-1-7（b）所示，你从图中可以得出二极管具有一些什么特性？

二极管的伏安特性曲线表明：

1. 二极管加正向电压，即引线 A 接电源正极、引线 B 接电源负极时，二极管将导通．施加较小的电压，亦可使通过二极管的电流较大．正向伏安特性曲线不是过原点的直线，说明二极管是非线性元件．

2. 二极管加反向电压（不太高），即引线 A 接电源负极、引线 B 接电源正极时，二极管将处于截止状态，通过二极管的电流很小（对于硅二极管，只有几微安）．

3. 当二极管上加了较高的反向电压时，二极管的反向电流才急剧变大，二极管将被击穿，此时的电压称为击穿电压．通常二极管工作时所加的反向电压低于击穿电压．

2 电阻定律

导体的电阻是导体本身的一种性质，它的大小取决于哪些因素呢？

● 学生实验：探究决定导体电阻的因素

讨论交流

导体总有一定的长度和横截面积，构成导体的材料也可能不同．那么，导体的电阻与其长度、横截面积及构成它的材料有关吗？

微信公众号：电子课本大全

要解决这一问题，你打算如何进行实验探究？如何测量导体（如金属丝）的长度、横截面积和电阻呢？

我们可以假设导体的电阻与这几个因素均有关，进而用控制变量的方法进行实验探究.

首先，改变导体的长度，其他条件不变，测出导体的电阻，探究导体的电阻与长度的关系.

其次，改变导体的横截面积，其他条件不变，测出导体的电阻，探究导体的电阻与横截面积的关系.

最后，改变构成导体的材料，其他条件不变，测出导体的电阻，看看不同材料导体的电阻是否相同.

实验操作

1. 导体横截面积的测量

将金属丝紧密地并排绕制成一个线圈，按如图2-2-1所示的方式用刻度尺测出它的宽度，除以圈数，便得出金属丝的直径，进而算出横截面积. 金属丝的直径也可用螺旋测微器直接测量.

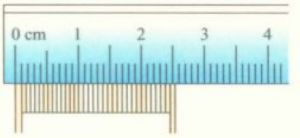


图2-2-1

2. 导体长度的测量

把金属丝拉直，用刻度尺量出它的长度.

3. 导体电阻的测量

按图2-2-2连接电路，闭合开关，测出金属丝两端的电压和通过的电流，根据欧姆定律算出金属丝的电阻. 移动滑动变阻器的滑动片，多测几组数据，求出电阻R的平均值.

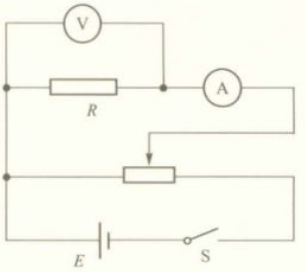


图2-2-2

电阻定律

大量实验表明，在维持导体两端电压不变的情况下，用材料和横截面积相同，但长度不同的导体做实验，通过的电流与导体的长度成反比；用材料和长度相同，但横截面积不同的导体做实验，通过的电流与横截面积成正比；用长度和横截面积都相同，而材料不同的导体做实验，通过的电流一般各不相同.

可见，同种材料的导体，其电阻R与它的长度l成正比，与它的横截面积S成反比；导体电阻与构成它的材料有关. 这就是**电阻定律**. 写成公式，则是

微信公众号：电子课本大全

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

电阻率

上式中的ρ是一个比例系数，由导体的材料决定，它是一个反映材料导电性能的物理量，称为材料的**电阻率**（resistivity）. 横截面积和长度都相同的不同材料的导体，电阻率越大，其电阻也越大. 材料的电阻率在数值上等于由这种材料制成的长为 1 m、横截面积为 1 m^2 的导体的电阻. 从上述公式可以看出，电阻率的单位是欧姆·米，符号为Ω·m.

表 2-2-1 给出了几种常见导体材料的电阻率.

表 2-2-1 几种常见导体材料在 27 ℃时的电阻率

材 料	ρ/（Ω·m）
银	1.6×10^{-8}
铜	1.7×10^{-8}
铝	2.7×10^{-8}
钨	5.7×10^{-8}
汞	9.8×10^{-8}
铁	1.0×10^{-7}
碳	3.5×10^{-5}
锰铜合金（Cu85%，Ni3%，Mn12%）	4.4×10^{-7}
康铜（Cu54%，Ni46%）	5.0×10^{-7}
镍铬合金（Ni67.5%，Cr15%，Fe16%，Mn1.5%）	1.0×10^{-6}

从表中可知，铝和铜的电阻率较小，常用做电路中的连接导线；银的电阻率最小，由于它比较昂贵，只用做某些精密电路中连接导线的镀层. 电阻率较大的材料常用做电阻器或电热器中的电阻丝.

各种材料的电阻率都随温度而变化，金属的电阻率随温度的升高而增大. 利用金属的电阻率随温度的变化规律可以制成电阻温度计，用以测量温度.

在各种电路中，常常需要接入一种元件，它具有确定的或在一定范围内可调的电阻值，用于调节、控制电路中的电流、电压等物理量，这种元件称为电阻器，通常也简称为电阻.

微信公众号：电子课本大全

讨论交流

给你一条金属丝，如何测量该种金属的电阻率？

根据电阻定律$R=\rho\frac{l}{S}$，可得电阻率$\rho=\frac{RS}{l}$. 因此，测出金属丝的横截面积S、长度l和电阻R，就可求得该种金属的电阻率ρ.

导体、绝缘体和半导体

电阻定律适合于任何均匀的柱体材料，只是不同材料的电阻率差别很大. 导体的电阻率很小，大约为$10^{-8}\sim10^{-6}\ \Omega\cdot m$；绝缘体的电阻率一般都很大，约为$10^{8}\sim10^{18}\ \Omega\cdot m$；有些材料的导电性能介于导体和绝缘体之间，称为半导体，其电阻率约为$10^{-5}\sim10^{6}\ \Omega\cdot m$.

良好的绝缘体有陶瓷、塑料、橡胶等，利用其电阻率很大的特点，常用于需要隔绝导电的地方，如固定导线的绝缘子、导线的保护层或用电器的外壳等.

典型的半导体材料有锗、硅、砷化镓、锑化铟等. 许多半导体材料的导电性能随外界条件的改变而发生灵敏的变化. 人们利用半导体的电阻率随温度、光照等变化的特性制成了热敏电阻、光敏电阻等（如图2-2-3所示），用来测量温度、光强和制造各种自动控制设备. 在现代化技术中，半导体材料得到了极其广泛的应用.

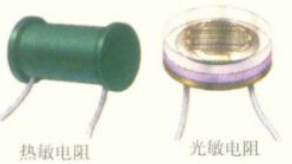


图2-2-3

练习与评价

1. 一块均匀的长方体样品，长为a，宽为b，厚为c，如图2-2-4所示. 沿AB方向测得电阻为R，则样品的电阻率为 _____，沿CD方向的电阻为 _____.

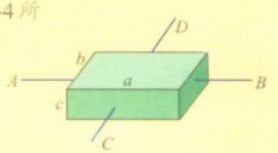


图2-2-4

2. 两根完全相同的金属裸导线，如果把其中的一根均匀拉长到原来的2倍，把另一根对折，然后给它们加上相同的电压，则在同一时间内，通过它们横截面的电荷量之比为（　）.

A. 1∶4　　B. 1∶8　　C. 1∶16　　D. 16∶1

3. 一卷铝导线，横截面积为1 mm². 在27℃下，当这卷导线两端电压为54 V时，通过导线的电流为2 A，这卷导线有多长？

微信公众号：电子课本大全

发展空间

课外阅览

超导现象

1911年，荷兰莱顿大学的卡末林-昂内斯（Kamerlingh-Onnes，1853—1926）意外地发现，将汞冷却到-268.98℃时，其电阻会突然消失. 后来他又发现许多金属和合金都具有低温下失去电阻的特性，称为超导态. 卡末林-昂内斯因此获得了1913年的诺贝尔物理学奖. 此后，人们把处于超导态的导体称为“超导体”.

导体的电阻在一定的低温下会突然消失，被称为零电阻效应，实现这一转变的温度被称为临界温度. 导体没有了电阻，电流流经超导体时就不会发生热损耗，可以毫无阻碍地在导线中形成强大的电流.

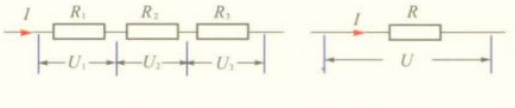
我国科学家对超导现象的研究做出了巨大贡献. 2001年4月，340 m铋系高温超导线在清华大学应用超导研究中心研制成功，并于年末建成第一条铋系高温超导线材生产线. 2001年5月，北京有色金属研究总院采用自行设计研制的设备，成功地制造出国内最大面积的高质量双面钇钡铜氧超导薄膜，达到国际同类材料的先进水平. 2001年7月，香港科技大学宣布成功开发出全球最细的纳米超导线. 目前，我国科研人员通过实验实现的超导临界温度已提高到-120℃.

3 电阻的串联、并联及其应用

任何复杂的电路都是由各种电学元件通过不同方式连接组成的，其中最基本的两种连接是**串联**（series connection）和**并联**（parallel connection）. 下面我们分别研究在电阻串联和并联时电路的特性及其应用.

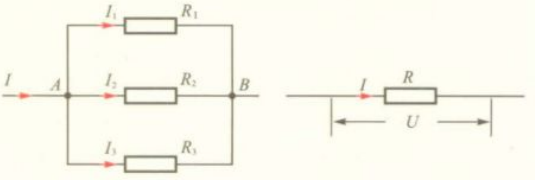
● 电阻的串联与并联

电阻的串联就是把各个电阻依次首尾连接起来，构成的串联电路如图2-3-1所示. 电阻的并联就是把各个电阻并列地连接在一起，构成的并联电路如图2-3-2所示.



（a）电阻的串联　（b）等效电阻

图2-3-1　电阻的串联



（a）电阻的并联　（b）等效电阻

图2-3-2　电阻的并联

微信公众号：电子课本大全

活动

在下表空白处填上适当的内容.

连接	性质	数学表达式	物理意义
串联	电流关系		
	电压关系		
	电阻关系		
	电压分配规律	$\frac{U}{R}=\frac{U_1}{R_1}=\frac{U_2}{R_2}=\frac{U_3}{R_3}=\cdots=\frac{U_n}{R_n}$	
并联	电流关系		
	电压关系		
	电阻关系		
	电流分配规律	$IR=I_1R_1=I_2R_2=I_3R_3=\cdots=I_nR_n$	

电压表和电流表的改装

讨论交流

现实生活中，人们要测量不同范围的电压值或电流值，也就是说需要有各种不同量程的电压表和电流表. 在实际生产中，通常只提供某一规格的灵敏的电流表（俗称“表头”）. 如何用它改装成不同量程的电压表和电流表呢?

根据串联分压的原理，将一个大电阻与表头串联进行分压，使加在表头两端的电压小一些，改装后就可以测量较大的电压.

根据并联分流的原理，将一个小电阻与表头并联进行分流，使通过表头的电流小一些，改装后就可以测量较大的电流.

【例题】有一个表头，内阻$R_g=120\ \Omega$，满偏电流$I_g=3\ \text{mA}$，如何把它改成量程是6 V的电压表?

【分析】所谓量程为6 V，就是当电压表两端所加电压$U=6\ \text{V}$时，通过表头的电流为满偏电流$I_g=3\ \text{mA}$，指针指向满刻度处，这里的标度就是6 V. 为此，就需要串联一

小资料

满偏电流是指针指向满刻度时通过电流表的电流，通常用I_g表示.

微信公众号：电子课本大全

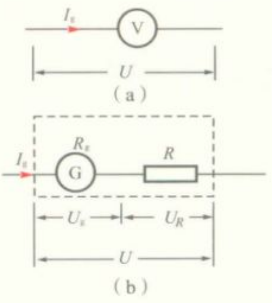


图 2-3-3 改装电压表

个分压电阻 R，R 两端的电压为 $U_R = U - U_g = U - I_g R_g$. 改装后电压表的电路如图 2-3-3（b）所示.

【解】 $U_g = I_g R_g = 3 \times 10^{-3} \times 120\ \text{V} = 0.36\ \text{V}$

$U_R = U - U_g = (6 - 0.36)\ \text{V} = 5.64\ \text{V}$

于是

$$R = \frac{U_R}{I_g} = \frac{5.64}{3 \times 10^{-3}}\ \Omega = 1\,880\ \Omega$$

即与表头串联一个 1 880 Ω的分压电阻，并将表头刻度盘按设计的量程进行刻度，即可达到目的.

● 限流电路和分压电路

在许多物理实验和实际生产中，常常需要使电流或电压在一定范围内连续变化. 例如为了测定一个元件的伏安特性，就需要连续调节加在该元件两端的电压.

为此，可采用如图 2-3-4 所示的限流电路或如图 2-3-5 所示的分压电路.

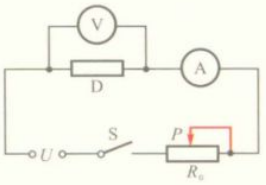


图 2-3-4 限流电路

在限流电路中，调节变阻器 R_0 的滑动片 P 的位置，可以控制通过器件 D 的电流，从而也改变加在器件两端的电压. 在分压电路中，调节变阻器 R_0 的滑动片 P 的位置，可以控制加在器件 D 两端的电压，从而也改变通过器件的电流.

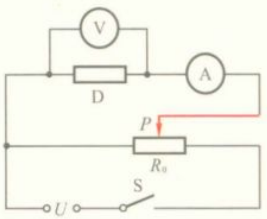


图 2-3-5 分压电路

讨论交流

在上述限流电路和分压电路中，若电源两极间的电压恒为 U，滑动变阻器的最大电阻为 R_0，器件 D 的电阻为 R，移动滑动变阻器的滑动片 P，器件 D 两端电压的变化范围分别是多少？

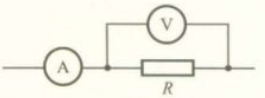
根据串联、并联电路的特点不难得出：在上述限流电路中，器件两端电压的变化范围是 $\frac{R}{R_0+R}U \sim U$；在上述分压电路中，器件两端电压的变化范围是 $0 \sim U$.

微信公众号：电子课本大全

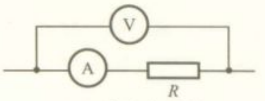
● 伏安法测电阻的两种电路

讨论交流

用电压表测出电阻两端的电压，用电流表测出通过电阻的电流，根据电阻的定义就可得出电阻值，这种方法常称为“伏安法”. 伏安法测电阻的电路有电流表外接和电流表内接两种，如图2-3-6所示. 这两种不同的电路，测量结果会相同吗？采用哪一种电路测量更合理呢？为什么？



（a）电流表外接



（b）电流表内接

图2-3-6 伏安法测电阻的两种电路

在电流表外接情形下，电压表测出的是电阻两端的电压，而电流表测出的是通过电阻以及电压表的电流之和，它略大于通过电阻的电流，由此得出的电阻值要小于电阻的真实值. 在电流表内接情形下，电流表测出的是通过电阻的电流，而电压表测出的是电阻以及电流表两端的电压之和，它略大于电阻两端的电压，由此得出的电阻值要大于电阻的真实值.

两种连接方法测量电阻都有系统误差. 如何减小这里的系统误差？我们应比较待测电阻与电压表、电流表的内阻的比例关系. 通常电流表的内阻很小，约几欧或不到1欧，电压表的内阻较大，约几千欧或几十千欧. 通过理论分析可知，待测电阻较小时，采用电流表外接方法测量误差较小，采用电流表内接方法测量误差较大，故此时应采用电流表外接方法测量. 而待测电阻较大时，采用电流表外接方法测量误差较大，采用电流表内接方法测量误差则较小，故此时应采用电流表内接方法测量.

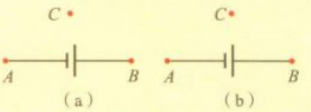
小资料

在《物理 必修1》的学习中我们已经知道，任何实际测量都存在误差.

误差可分为偶然误差和系统误差. 系统误差是由于测量原理或测量方法上的缺陷以及测量工具本身的固有误差等原因而引起的误差. 偶然误差则是在完全消除系统误差的理想情况下，由于各种偶然因素引起的误差. 系统误差只能通过改进测量仪器或测量方法来减小，偶然误差则可以通过多次测量取平均值的方法来减小.

练习与评价

1. 如图2-3-7所示，有A、B、C三个接线柱，A、B间接有输出10 V稳定电压的电源，手头有四个阻值完全相同的电阻，将它们适当组合，接在A、C和B、C之间，构成一个电路，使A、C间电压为6 V，B、C间电压为4 V，试设计两种方案，分别画在图2-3-7（a）（b）中.



（a） （b）

图2-3-7

微信公众号：电子课本大全

2. 某种位移传感器的工作原理如图2-3-8所示. 物体M在导轨上平移时，带动滑动变阻器的金属杆P，通过理想电压表（内阻非常大）显示的数据，来反映物体位移的大小x，则下列说法正确的是（　　）.

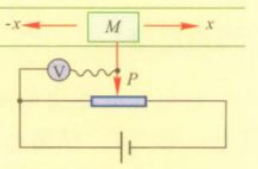


图2-3-8

A. 物体M运动时，电路中的电流会发生变化

B. 物体M运动时，电压表示数会发生变化

C. 物体M不动时，电路中没有电流

D. 物体M不动时，电压表没有示数

3. 已知满偏电流为200 mA、内阻为500 Ω的电流表，把它串联一个14.5 kΩ的电阻后，作为电压表使用，该电压表量程为_____V. 若用它测量某一电路两端电压时，电压表示数如图2-3-9所示，则电路两端电压为_____V.

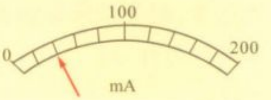


图2-3-9

4. 如图2-3-10所示，滑动变阻器的最大电阻$R_1 = 200\ \Omega$，$R_2 = 300\ \Omega$，AB间电压$U_{AB} = 8$ V. 当开关S断开时，移动滑动片P，R_2两端可获得电压值的范围是_____V. 当开关S闭合时，移动滑动片P，R_2两端可获得电压值的范围是_____V.

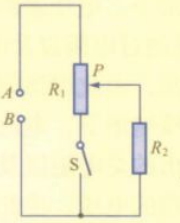


图2-3-10

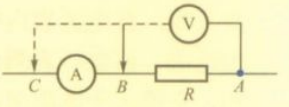


图2-3-11

5. 用伏安法测电阻，当对被测电阻的阻值一无所知而无法选择用何种接法时，可以采用试接的方法，如图2-3-11所示. 让电压表的一端接在A点，另一端先后接到B点或C点，注意观察两次电表的示数变化，再根据情况正确选择连接电路.

（1）若电流表示数有明显变化，而电压表示数无明显变化，说明待测电阻阻值_____（“较大”或“较小”），与电_____表阻值可比，应选电流表_____接的电路.

（2）若电压表示数有明显变化，而电流表示数无明显变化，说明待测电阻阻值_____（“较大”或“较小”），与电_____表阻值可比，应选电流表_____接的电路.

6. 图2-3-12为伏安法测量电阻的实验器材实物图，器材规格如下：

（1）待测电阻R_x（约100 Ω）；

（2）电流表（量程0～10 mA，内阻50 Ω）；

（3）电压表（量程0～3 V，内阻5 kΩ）；

（4）电池组；

（5）滑动变阻器（阻值0～15 Ω，允许最大电流1 A）；

（6）开关一个，导线若干条.

请根据器材的规格和实验要求，用笔画线代替导线连接实验电路.

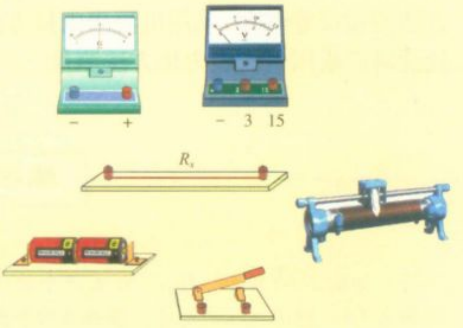


图2-3-12

微信公众号：电子课本大全

发展空间

实验室

有两个规格分别为“3 V 1 A”和“6 V 1 A”的小灯泡，同时接到12 V的电源上，要使两个小灯泡都能正常发光，可以将几个不同规格的电阻连接在电路中，你能不能设计出几种方案，并对这几种方案作出评价.

物理在线

1. 上网收集资料或查阅图书，总结较复杂的串、并联组合电路进行等效简化的常用方法（如电流分支法、等势法等）.

2. 如图2-3-13所示是一串串装饰用的五颜六色的小彩灯. 如果其中一个小彩灯的灯丝断了，同一串上的其他小彩灯照样发光. 令人惊奇的是，这一串串小彩灯是串联在一起的，请你想办法弄清其中的道理.



图 2-3-13 装饰用的小彩灯串

4 电源的电动势和内阻 闭合电路欧姆定律

一天晚上，小聪和几个同学在使用手电筒时发现，按一下开关，手电筒不亮！打开看看，小电灯泡没坏，也没有出现电路断路的情况；再用电压表直接接在干电池正负极间，测得的电压是1.3 V. 有电压为什么手电筒却不亮呢？

电源电动势

活动

在电路断开时，用电压表分别测量1号、2号、5号干电池两极间的电压和铅蓄电池两极间的电压. 从测量数据中，你能看到什么特点？想一想，电池两极间的电压是怎样形成的？

如图2-4-1（a）所示，如果两个导体之间有电势差，用导线把一个电阻（小灯泡）与这两个导体连接起来，电路中

微信公众号：电子课本大全

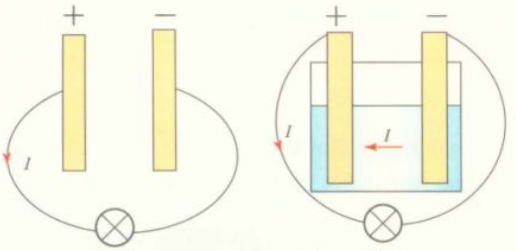


图 2-4-1 电源的作用

就有电流流过，同时导体之间的电势差将逐渐减小. 当电势差为零时，电流也就消失了. 若用电池替代这两个导体，如图 2-4-1（b）所示，电路中就会有持续的电流. 这是由于电池的作用：它通过化学反应，不断地移动电荷，从而维持电池两极间的电势差. 所以此时的电池实质上就是将化学能转化为电势能的装置. 其他类型的电源，如光电池、发电机，也都是将其他形式的能转化为电势能的装置.

电源将其他形式的能转化为电势能的特性可以用**电动势**（electromotive force）这个物理量来表征，它等于电源未接入电路时两极间的电势差，常用字母 E 表示.

不同电源的电动势一般是不同的，几种电池的电动势如表 2-4-1 所示.

表 2-4-1 几种电池的电动势

电源名称		电动势 E / V
铅蓄电池		2.0
硅光电池		约 0.5
银锌蓄电池		约 1.5
镍镉电池		1.2
氧化银电池		1.4～1.5
锂电池		1.5, 2.8, 3
纽扣电池	锌－空气电池	1.4
	碱锰电池	1.5
	锂－锰电池	3.0

● 电源的内阻

活动

探究小灯泡变暗的原因

1. 按图 2-4-2 所示连接电路，逐次闭合开关，观察灯泡亮度的变化. 用初中所学的知识，你能解释所看到的现象吗？想一想，灯泡亮度变化的原因可能是什么？

2. 在电池两极间并联一只电压表，想一想，闭合开关后电压表测得的电压与断路时测得的电压相等吗？试一试，测量的结果是什么？

3. 假定在干路中串联一只电阻 R_0，依次闭合开关，灯泡的亮度会变化吗？变化的原因是什么？由此你能得到什么启示？

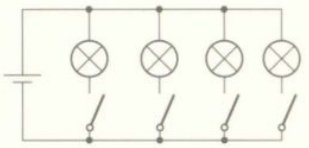


图 2-4-2 探究小灯泡变暗的原因

通过分析和推理，我们可以知道：电流通过电源内部，电源内部也是一段电路，也有电阻，它被称为电源的**内电阻**（internal resistance），简称内阻.

● 闭合电路欧姆定律

讨论交流

在初中物理中，我们一直忽略电源内阻，把电源看

微信公众号：电子课本大全

成理想电源，由此认为电源两端电压与电动势大小一样，外电路的电阻 R 就是整个电路的电阻，如图 2-4-3 所示.

考虑电源内阻后，整个电路的电流由什么确定？整个电路的欧姆定律应该是什么形式？

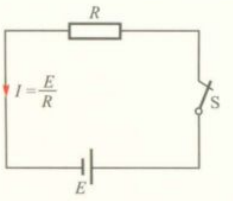


图 2-4-3 电源无内阻的电路

如图 2-4-4 所示，假设电源的电动势为 E、内阻为 r，把它连接到电路中，外电路的电阻为 R.

当电流流过电源内部时，在内电阻 r 上会有电势降落 Ir. 当电源是某种化学电池时，其内部可以等效画成如图 2-4-4 所示的情形，其中内电阻用电阻器的符号表示. 电流流过内电阻 r，产生的电势降落 Ir 等于内电阻 r 两端的电压，因此也把 Ir 称为电池的内电压 U'，即 $U'=Ir$.

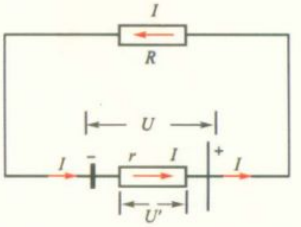


图 2-4-4 电池的内电压与外电压

在电源外部，电流由电源正极流向负极. 在外电路上也有电势降落 IR（R 是外电路电阻，简称外电阻），习惯上把它称为**路端电压**（terminal voltage）或外电压 U，即 $U=IR$. 电流在整个闭合电路上的电势降落为 $U+U'$. 在电源的作用下，电源两极间维持着一定的电势差. 当电路中没有电流时，两极间的电势差的数值等于电动势. 理论和实践可以证明，当电路中存在着电流时，电源电动势等于闭合电路总的电势降落之和，即

$$E=U+U'=U+Ir$$

因此，路端电压

$$U=E-Ir$$

又 $U=IR$，所以

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

上式表示：**在外电路为纯电阻的闭合电路中，电流的大小跟电源的电动势成正比，跟内、外电路的电阻之和成反比**，这个规律称为**闭合电路欧姆定律**（Ohm law of closed circuit）.

理论探究

在前面“探究小灯泡变暗的原因”的活动中，我们已经发现：当外电路电阻变化时，电路中的电流将发生变化，路端电压也就随之变化. 路端电压随外电路电阻增大而增大，随外电路电阻减小而减小. 学习了闭合电路欧姆定律后，你能通过理论分析得出这一结论吗？当外电路断开或短路时，情况又如何呢？

微信公众号：电子课本大全

就某个电源来说，在不长的时间内电动势E和内阻r可以认为是一定的．当外电阻R增大时，由$I=\frac{E}{R+r}$可知电流I减小，因而内阻两端的电压Ir减小．由$U=E-Ir$可知，这时路端电压U增大．相反，当外电阻R减小时，电流I增大，路端电压U减小．

当外电路断开时，$I=0$，$U=E$；当外电路短路时，$R=0$，短路电流$I_0=\frac{E}{r}$．



图2-4-5　手电筒电路

【例题】 如图2-4-5所示，常用的手电筒是把两节1号干电池串联起来作为电源，一节1号干电池的电动势是1.5 V．手电筒内的小灯泡的额定电压为2.5 V，额定电流为0.3 A．

（1）手电筒不工作时，想一想电源两端电压是多大？为什么小灯泡的额定电压是2.5 V，而不是3 V？

（2）算一算，小灯泡正常工作时的电阻多大，电池组的内电阻多大．

【解】（1）手电筒不工作时，电源断开，路端电压等于电源的电动势，即3 V．小灯泡工作时，由于干电池有内阻，通电时内阻上有电势降落，所以小灯泡的额定电压一定比电源电动势3 V小．

（2）根据小灯泡的额定电压、额定电流，我们可以知道小灯泡正常工作时的电阻．根据欧姆定律

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

由于路端电压$U=E-Ir$，可算出电源的内电阻

$$r=\frac{E-U}{I}=\frac{3-2.5}{0.3}\ \Omega\approx 1.7\ \Omega$$

小资料

几个电池串联组成电池组时，总电动势等于各电池的电动势之和，总内阻等于各电池内阻之和．如果由n节电动势为E_0、内阻为r_0的电池串联组成电池组，则总电动势和总内阻分别为

$$E=nE_0$$
$$r=nr_0$$

讨论交流

1. 用图像反映物理量间的变化关系是物理学研究的常用方法．闭合电路的路端电压与电流的关系图像（U–I图像）应是怎样的图线？

2. 由闭合电路的路端电压与电流的关系图像（U–I图像），可求出哪些物理量？图像反映出怎样的物理规律？

由$U=E-Ir$可知，闭合电路的路端电压与电流的关

微信公众号：电子课本大全

系图像（U–I图像）是一条倾斜直线，如图2-4-6所示．该直线与纵轴交点的值表示电源电动势E，与横轴交点的值表示电源短路时的电流值I_0，直线的斜率反映电源内阻r的大小．从图线不难发现，电流I增大时，路端电压$U_{外}$降低，但在任何情况下，都有$E = U_{外} + U_{内}$．

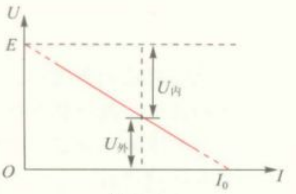


图2-4-6

干电池在使用较长时间后，其内阻已经变得很大，只要有很小的电流通过电池，就会在内阻上产生较大的电势降落，从而使其路端电压比电动势小许多．所以，这种电源已不能向外电路提供足够的能量．

在本节开始讲到的，手电筒中干电池两极间虽然有电压但不能使小灯泡发光就是这个道理．

练习与评价

1. 平时常说“干电池的电压是1.5 V”，你怎样理解这种说法？确切的说法应是怎样的？

2. 把铜板和锌板放在稀硫酸溶液中，就制成了“伏打电池”，它的电动势是1.1 V．这种电池在断路时的路端电压是多少？如果通过电池的电流是20 mA，在10 s内有多少化学能转化为电能？这些电能是否全部消耗在外电路？为什么？

3. 某电源在使用过程中，当通过它的电流大小有明显变化时，路端电压的变化并不明显，这是什么原因造成的？

4. 如图2-4-7所示，已知电源电动势$E = 6.0$ V，内阻$r = 0.5\ \Omega$，定值电阻$R_1 = 5.5\ \Omega$，$R_2 = 2.0\ \Omega$．求：

（1）开关S_1闭合而S_2断开时电压表的示数；

（2）开关S_1和S_2都闭合时电压表的示数．

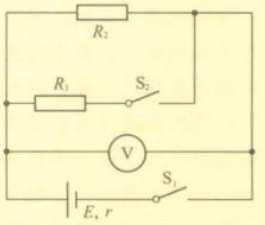


图2-4-7

5. 某太阳能电池的开路电压（断路时的路端电压）为480 mV，短路电流为6 mA．把它与一个阻值为120 Ω的电阻器连接成闭合电路，电路中的电流多大？

发展空间

实验室

1. 找两节旧干电池，放在手电筒内，观察手电筒内小灯泡的亮度（可能只能看到很弱的光，甚至只看到小灯泡有一点点发红），再把这两节干电池（或其中的一节）放在半导体收音机里做电源，试着听一听，可能会听到正常的声音．想一想，这是为什么？

2. 一节新的干电池和一节旧的干电池，先分别直接测量它们两极间的电压，然后都与小

微信公众号：电子课本大全

灯泡连接成闭合电路，发现两个小灯泡的亮度差别很大，这时再分别测量路端电压，看看二者的差别．想一想是什么原因．

3. 半导体收音机长时间收听以后，打开电源盒摸一摸，电池是否发热？一个手电筒长时间连续照明后，亮度有什么变化？打开后盖摸摸电池发热的情况．

4. 把手电筒或剃须刀上不能继续使用的电池换到半导体收音机上，试试效果，研究一套电池分级使用的节能办法．

课外阅览

伏打电池的原理

图 2-4-8 所示是意大利物理学家伏打（Volta，1745—1827）最早发明的电池，通常称为伏打电池，它是把一块铜板和一块锌板同时浸在稀硫酸溶液中制成的．由于锌这种金属的化学性质比较活泼，锌离子（正离子）比较容易溶解到稀硫酸溶液中（氧化反应），锌板上就留下较多负电荷，成为电池的负极．在铜板处，溶液中的正离子容易聚集到其表面，从铜板中获得电子（还原反应），因而铜板上带较多的正电荷，就成为电池的正极．锌板与稀硫酸溶液之间锌离子的溶解作用以及铜板与稀硫酸溶液之间正离子的沉积作用，是化学作用而不是静电力作用，我们称之为非静电力．

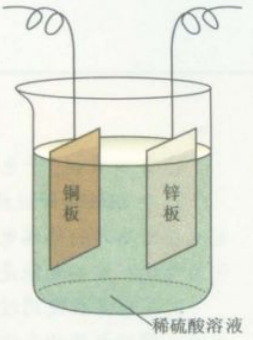


图 2-4-8　伏打电池原理图

当电池的正负极之间没有外接用电器时，锌板表面离子的溶解作用和铜板表面离子的沉积作用进行到一定程度就停止了．当电池的正负极之间接有用电器形成闭合回路时，锌板（负极）处的负电荷则会通过用电器流向铜板（正极），发生正负电荷的中和（这与正电荷从正极通过用电器流向负极等效）．电池内部的溶解和沉积作用将会源源不断地进行下去，把正电荷从负极经电池内部移向正极（把负电荷从正极经电池内部移向负极），从而在两极间维持稳定的电压，使电路中有稳定的电流．

物理在线

电　源

电源是把其他形式的能量转化为电能的装置，常见的电源有电池和发电机．化学电池是把化学能转化为电能的装置，分为原电池和蓄电池两大类．原电池放电完毕即被废弃，如收音机用的干电池．蓄电池使用前需要先充电，即先把电能转化为化学能储存起来，使用时储存的化学能又转化为电能，这种电池可反复使用多次．

新型电池的发展很快，请通过网络调查电源的种类及目前的发展情况．

微信公众号：电子课本大全

5 学生实验：测量电源的电动势和内阻

实验设计

从理论上来说，电源的电动势可以通过测量断路时的路端电压而得到，但在实验中很难实现．如图 2-5-1 所示，只闭合开关 S_1，电压表的示数是否就准确地等于电源的电动势呢？答案是否定的，因为只要电压表有示数，就说明电源中有电流通过，就不满足断路这个条件．再说测电阻，通常我们用伏安法测量导体的电阻，也就是应用部分电路欧姆定律来测电阻，但要用这种方法测电池的内电阻就困难了，因为电池的内电压很难直接测量．怎么办呢？

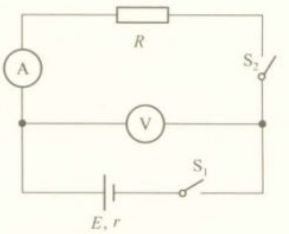


图 2-5-1

我们可以利用闭合电路欧姆定律来测量．如图 2-5-2 所示的电路中，通过改变外电路电阻 R，测量出 U、I 的两组数据，根据闭合电路欧姆定律列出二元一次方程组，从而解出电源的电动势 E 和内电阻 r．也可以测出更多组 U、I 的数据，作出 U–I 图像，利用图像求解电源的电动势和内电阻的值．

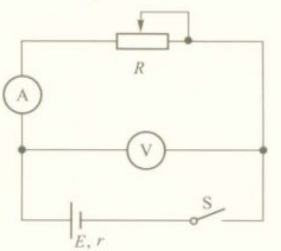


图 2-5-2

实验操作

按图 2-5-2 所示连接电路，将滑动变阻器 R 的阻值调到最大，闭合电路，分别测出 U 和 I，然后逐次调小 R 值，测出多组 U 和 I 的值，把数据记录在表格中．

以 U 为纵轴，I 为横轴，可以得到如图 2-5-3 所示的图像．从图像可知，图线的延长线与纵轴的交点坐标是电流为零时的路端电压，它等于电源的电动势 E；图线的延长线与横轴的交点坐标是路端电压为零时的电流，即短路电流 I_0，此时外电阻 $R = 0$．由闭合电路欧姆定律可知，电源的内阻为 $r = \dfrac{E}{I_0}$，即为图线的斜率（的绝对值）．

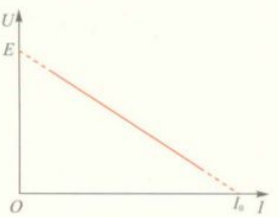


图 2-5-3

微信公众号：电子课本大全

讨论交流

1. 你认为解方程组的方法和图像法，哪种方法更好？

2.除了用测量电流和路端电压的实验方案外，你还能设计出其他的方案吗？若只给你电流表和电阻箱，你将如何测量？若只给你电压表和电阻箱，你又将如何测量？试分别画出实验电路图，说明实验步骤.

练习与评价

1. 图2-5-4是某同学通过实验测出的闭合电路的路端电压U与电流I之间的关系图，试根据此图求出电源的电动势和内阻.

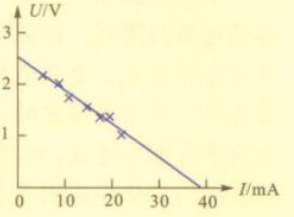


图2-5-4

2. 利用如图2-5-2所示的电路可以测出电池的电动势和内阻. 当滑动变阻器的滑动片在某一位置时，电流表和电压表的读数分别是0.20 A和1.98 V. 把滑动变阻器的滑动片移到另一个位置时，电流表和电压表的读数分别是0.40 A和1.96 V. 求电池的电动势和内阻.

3. 如图2-5-5所示是测量两节干电池组成的串联电池组的电动势和内阻的实验器材，请用笔画线代替导线将它们连接成实验电路.

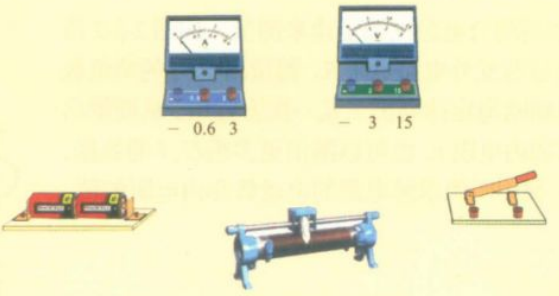


图2-5-5

发展空间

课外阅览

电池的串联与并联　电池组

一般电池的电动势都不大，允许通过的最大电流也有限. 因此在实际应用时常常把若干电池串联或并联起来，按一定方式组成电池组.

几个相同的电池串联组成串联电池组，设每个电池的电动势是E_0，内阻是r_0，n个这样的电池串联之后，总电动势和总内阻分别为

$$E_{总}=nE_0,\ r_{总}=nr_0$$

微信公众号：电子课本大全

应注意，电池串联时，各电池之间的极性应正负相连. 否则，总电动势就不是每个电池的电动势之和.

如果 n 个这样的电池组成并联电池组，总电动势和总内阻分别为

$$E_{总}=E_0,\ r_{总}=r_0/n$$

应注意，电池并联时，极性应相同，正、负极绝不能接反，否则电路内部将产生很大的电流.

串联电池组的好处是增大了电动势，适用于要求输出电压较高的情况. 例如一般手电筒的小灯泡的额定电压为2.5 V，而一节干电池的电动势只有1.5 V，因此把两节干电池串联作为电源使用，这样总电动势是3 V，输出电压就可以达到2.5 V了.

并联电池组不能增大电动势，但适用于要求输出电流较大的场合. 例如1节1号干电池的输出电流一般不应大于0.3 A，如果使用的用电器要求通过的电流是1.0 A，则可以使用4节干电池组成的并联电池组，这样通过每节电池的电流只有0.25 A，符合使用要求.

如果用电器的额定电压大于电池的电动势，并且额定电流也大于电池允许通过的最大电流，则可以采用混联电池组.

不同的电池串联使用，原则上是可以的，其总电动势等于各个电池电动势之和，总内阻也等于各电池内阻之和. 但内阻较大的电池会消耗更多的能量，内部电势降落较大，这样使用效果不一定理想.

不同的电池组成并联电池组，一般是不可以的，因为电动势较大的电池与电动势较小的电池并联，再与外电路电阻连接，将组成复杂电路，电动势较小的电池将处于充电状态，不但不能发挥电池的作用，反而要消耗另一个电池的能量. 电动势相同而内阻不同的电池并联，各支路电流不相等，内阻较大的电池在电路中发挥不了多大的作用.

6 焦耳定律 电路中的能量转化

现在我们换一个角度，从电场力做功和能量转化的角度来研究电路，使我们的认识更深入一步.

● 电功 电功率

自由电荷在电场力的作用下发生定向运动，导体中就出现电流. 电荷在导体中运动的过程就是电场力对自由电荷做功的过程. 设一段电路两端的电压为 U，通过的电流为 I，在时间 t 内通过这段电路任一横截面的电荷量 $q=It$，这相当于在时间 t 内将电荷 q 由这段电路的一端移动到另一端. 根据上一章所述，电场力移动电荷所做的功等于导体

微信公众号：电子课本大全

两端的电势差 U 和电荷 q 的乘积. 即

$$W = qU$$

将 $q = It$ 代入，得到

$$W = UIt$$

电场力移动电荷所做的功，简称电功. 上式表明电场力在一段电路上所做的功等于这段电路两端的电压 U 与电路中的电流 I 和通电时间 t 三者的乘积.

电流所做的功与做这些功所用时间的比值叫做**电功率**（electric power），它在数值上等于单位时间内电流所做的功. 用 P 表示电功率，则

$$P = \frac{W}{t} = UI$$

此式表明，一段电路上的电功率 P 等于这段电路两端的电压 U 和电路中电流 I 的乘积.

在国际单位制中，电压 U、电流 I 和通电时间 t 的单位分别是 V、A 和 s，由以上两式求出的电功 W 的单位是焦耳（J），电功率的单位是瓦特，简称瓦，符号为 W. 1 W = 1 J/s.

● 焦耳定律　热功率

电场力对电荷做功的过程，是电能转化为其他形式能量的过程. 在电场力的作用下，正电荷由电势高处流向电势低处，负电荷则由电势低处流向电势高处，电场力对正负电荷均做正功，电荷速度增大，电荷的电势能减少，减少的电势能转化为电荷的动能.

在通电的金属导体中，电能转化的情形比较复杂. 因为在金属中除了自由电子外，还有金属正离子，正离子仅在其平衡位置附近做微小振动. 在电场力作用下，正离子没有定向运动，而带负电的自由电子逆着电场方向做定向加速运动，并频繁地与正离子发生碰撞，把定向运动获得的动能不断转移给正离子，使正离子的热运动加剧. 总体来看，可以认为大量自由电子以某一平均速率做定向运动. 而通过自由电子与正离子的碰撞，将电能转化为金属导体的内能.

因此，在一段只有电阻元件的电路中，电场力所做的功 W 就等于电流通过这段电路时产生的热量 Q，即 $Q = W =$

微信公众号：电子课本大全

UIt. 根据欧姆定律 $U=IR$，电阻上产生的热量 Q 可写成

$$Q=I^2Rt$$

此式表明，**电流通过电阻产生的热量跟电流的二次方成正比，跟电阻值成正比，跟通电时间成正比**. 这个规律最初是英国科学家焦耳用实验直接得到的，通常称为**焦耳定律**（Joule law），电流通过电阻而产生的热量称为**焦耳热**（Joule heat）.

电阻通电所产生的热量与产生这些热量所用时间的比值叫做热功率，它在数值上等于单位时间内电阻通电所产生的热量. 由上式可得热功率为

$$P_{热}=\frac{Q}{t}=I^2R$$

电流的热效应在实际生产、生活中有很广泛的应用. 例如工业上用的电烙铁、电烤箱等，日常生活中用的电暖气、电炉、电熨斗、电饭锅等都是利用了电流的热效应. 图 2-6-1 给出了一些常见电热器的实物图片.



（a）电饭锅



（b）电熨斗



（c）电热水器

图 2-6-1 一些常见的电热器

在很多情况下，当我们需要把电能转化为内能以外的其他形式的能量时，电流产生的焦耳热是有害的，它使机器的温度升高，减少使用寿命. 有时电器的接线处接触不牢固，造成接触电阻很大，该处就会产生大量焦耳热而将电器烧坏，甚至引起火灾，必须注意避免.

● 电路中的能量转化

讨论交流

1. 在电源内部，能量是如何转化的？
2. 在外电路上，能量是如何转化的？
3. 电路的电功率一定等于热功率吗？
4. 你能从能量转化与守恒的角度来理解闭合电路欧姆定律吗？

微信公众号：电子课本大全

我们知道，电源是将其他形式的能转化为电能的装置. 在电源内部，通过各种作用，将其他形式的能转化为电能. 例如，在化学电池中，化学作用使化学能转化为电能；在发电机中，电磁作用使机械能转化为电能.

电源本身有一定的电阻. 例如，电池有内阻，发电机的线圈也有电阻. 当电源与外电路组成闭合回路时，电流通过电源会使电源发热而消耗一部分电能，其余部分的电能则向外电路输出.

在外电路上，电场力做功，将电源输出的电能转化为其他形式的能量. 例如，在纯电阻元件中，电流使电阻发热，电能全部转化为内能，电功率等于热功率，即 $P_{电}=P_{热}$；在电动机、电解槽等用电器中，电能要分别转化为机械能、化学能等，还有一部分转化为电阻的内能，这时 $P_{电}=P_{热}+P_{其他}$，电功率大于热功率.

根据闭合电路欧姆定律我们知道，若电源的电动势为 E，内阻为 r，当外电路为纯电阻 R 时，通过电路的电流

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

从而 $E=IR+Ir$，又因路端电压 $U=IR$，故有

$$E=U+Ir$$

等式两边都乘以电流 I，得

$$IE=IU+I^2r$$

这个式子的物理意义是：电源把其他形式的能量转化为电能的功率 IE，等于电源输出功率 IU 与电源内电路的热功率 I^2r 之和. 因此，闭合电路欧姆定律实质上是能量守恒定律在闭合电路中的具体体现.

当外电路电阻 R 为零（短路）时，路端电压 U 也等于零，这时的电流称为短路电流 I_0，此时有

$$I_0E=I_0^2r$$

可见，发生短路时，电源释放的能量全部在内电路中转化成内能. 这种状况很危险，尤其是对于一些内阻很小的电源（如铅蓄电池，其内阻只有大约零点零几欧），短路电流很大，即使是很短时间内的短路，也可能造成电源的损坏，甚至可能引起火灾. 这就是绝对不可以让电源短路的原因. 所以在实验结束时，应首先把连接电源的导线拆除，避免电源发生短路.

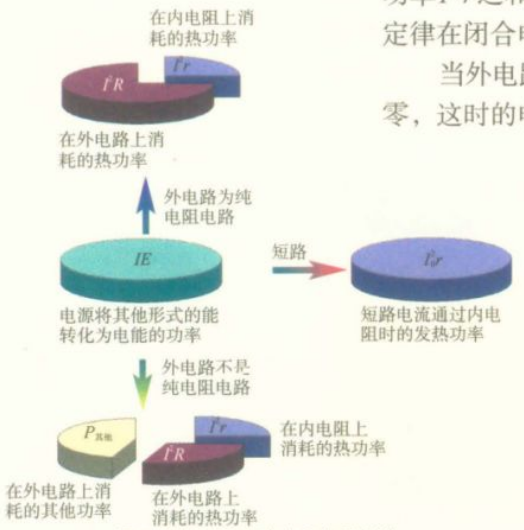


图 2-6-2 不同电路中的能量转化

微信公众号：电子课本大全

练习与评价

1. 如果白炽灯的灯丝断了，把灯丝搭上后仍可发光. 搭上后的灯跟原来的相比，在亮度上有何变化？一般搭上灯丝的灯使用寿命都不长，这是什么原因？

2. 一个电阻为 20 Ω 的导体，每当它通过 3 C 电荷量时，电流做功 36 J，那么此导体两端所加电压为_____V，通过3 C电荷量的时间为____s.

3. 如图 2-6-3 所示是规格为“220 V 36 W”的排气扇，线圈电阻为 40 Ω，接上 220 V 电压后，排气扇的发热功率和输出功率各多大？如果工作过程中，由于某种原因叶片被卡住，电机被烧坏，请说明电机被烧坏的原因.



图 2-6-3 排气扇

4. 如图 2-6-4 所示三个电阻的阻值相同，允许消耗的最大功率分别为 10W、10W、4W，此电路允许消耗的最大功率为多少？说明分析的过程.

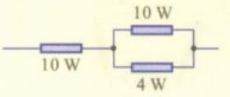


图 2-6-4

5. 如图2-6-5所示是电饭煲的电路图. S_1是一个限温开关，手动闭合，当此开关的温度达到居里点（103℃）时会自动断开. S_2是一个自动温控开关，当温度低于约 70℃时会自动闭合，温度高于80℃时会自动断开. 红灯是加热状态时的指示灯，黄灯是保温状态时的指示灯. 阻流电阻 $R_1 = R_2 = 500\ \Omega$，加热电阻丝 $R_3 = 50\ \Omega$，两灯电阻均不计.

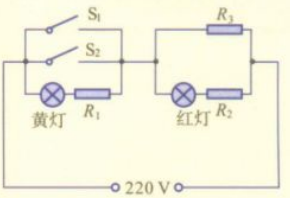


图 2-6-5

（1）请根据电路分析电饭煲煮饭的加热和保温过程.

（2）请简要回答，如果不闭合开关 S_1，电饭煲能将饭煮熟吗？

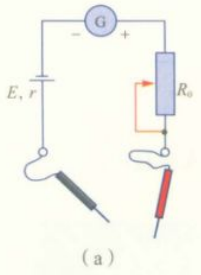
（3）请计算电饭煲在加热和保温两种状态下，加热电阻丝 R_3 消耗的功率之比.

7 学生实验：练习使用多用电表

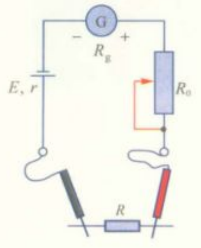
● 认识多用电表

在前面的实验中，我们已经接触过电流表和电压表，用它们可以分别测出电路中的电流和加在电路两端的电压. 另外，还有一种可用来直接测量电阻值大小的仪表，称为

微信公众号：电子课本大全



(a)



(b)

图 2-7-1 欧姆表原理图

欧姆表.

欧姆表的原理如图 2-7-1（a）所示，电池与表头 G 以及可变电阻 R_0 串联，并在两端各连接一支表笔. 测量时将两支表笔分别与待测电阻两端接触，如图 2-7-1（b）所示，表头将指示某一确定的刻度值 I，则待测电阻

$$R=\frac{E}{I}-(r+R_g+R_0)$$

这样根据电池的电动势 E、电池内阻 r、表头内阻 R_g、可变电阻 R_0 以及电流值 I，就可得到待测电阻值 R. 由于待测电阻的数值与电流表的示数是一一对应的，只要把表头的刻度盘改刻成相应电阻的数值，该装置就成为可以直接读出电阻值的欧姆表.

讨论交流

1. 把表头的刻度盘改刻成相应电阻的数值时，电流的零刻度处与满刻度处应分别对应刻多大的电阻值？

2. 根据上述待测电阻与电流的对应关系，想一想，欧姆表的刻度是均匀的吗？

将电流表、电压表和欧姆表共同使用一个表头，就成为**多用电表**（multimeter），也称为万用表. 图 2-7-2 是中学实验室常用的多用电表. 作为电流表使用时，表头并联有分流电阻，并联不同的分流电阻就成为不同量程的电流表. 作为电压表使用时，表头串联有分压电阻，串联不同的分压电阻，就成为不同量程的电压表. 作为欧姆表使用时，表头串联了电池和调零电阻. 当需要改变用途时，由盘面上的选择开关来切换.



图 2-7-2 多用电表

多用电表的上半部是表头. 表头的表盘上有电流、电压、电阻等多种刻度，其中最下面一行是交流电压表的刻度，最上面一行是欧姆表的刻度，这两个刻度是不均匀的，其余各种刻度都是均匀的，因此共用一条刻度线，但标有不同的数值. 表头的下部有一个定位螺丝 S，使用前，应先检查指针是否指在左边“0”刻度线处，如果有偏差，则用小螺丝刀旋动定位螺丝，使指针回到“0”刻度线处.

多用电表的下半部的中心部位是选择开关 K. 一般多用电表分为直流电压（V）、交流电压（V）、直流电流（A）、

微信公众号：电子课本大全

电阻（Ω）四个区域. 每个区域又有若干个量程或倍率，供使用时选择. 盘面上还有一个电阻挡的调零旋钮 T，下面两个插孔可插入红、黑表笔. 由于测量直流电压、交流电压、直流电流或电阻时，将电表接入电路的方式是不同的，因此测量时，选择开关绝不能用错.

● 练习使用多用电表

1. 用多用电表测量电流和电压

根据所需测量的电流或电压的大致数值把选择开关旋到适用的量程处，把多用电表串联或并联到电路中进行测量. 接入多用电表时要注意使电流从红表笔进入电表；从黑表笔流出电表，读数时要注意所选择的量程.

2. 用多用电表测量电阻

先把选择开关旋到电阻挡的适当倍率处；然后把两支表笔相互接触，调整电阻挡调零旋钮，使指针指在电阻挡的“0”刻度线处；再把待测电阻（待测电阻不能与其他电源或其他电阻相连接）的两端分别与两支表笔接触，读出指针的示数再乘以相应的倍率，即为所测电阻阻值. 如果指针偏转角度过小，指在表盘左侧刻度密集处，则应更换较大的倍率重新测量，但要注意，每转换一次选择开关，必须重新调整电阻挡的调零旋钮，使指针指在电阻挡“0”刻度线处.

3. 用多用电表判断二极管的正负极

首先选择电阻挡的适当量程，让两支表笔分别接触二极管的两根引线，然后变换两表笔位置再次与二极管的两根引线接触. 通过测量可知，电阻较小时接触黑表笔的一端是正极，另一端是负极（注意黑表笔与表内电池正极相连，红表笔与表内电池负极相连）.

各项测量完成后，均应把选择开关旋至“OFF”处或旋至交流电压的最大量程处. 若长期不用，应把表内电池取出.

小资料

二极管的非线性

用多用电表电阻挡“×100”和“×1k”两个量程，分别测量二极管的正向电阻，即使每次都调整了调零旋钮，两次的结果却大不相同. 这是因为二极管的电阻和测量电压有关，二极管是非线性元件，它两端的电压和通过的电流的比值不是一个常量.

练习与评价

1. 图 2-7-3 为多用电表的示意图，其中 S、K、T 为三个可调节的部件. 现用此电表测量一阻值约为 20 Ω～30 Ω 的定值电阻，完整的测量操作步骤如下：

（1）调节可调节部件____，使电表指针停在_____位置；

微信公众号：电子课本大全

（2）调节可调节部件 K，使它的尖端指向____位置；

（3）将红、黑表笔分别插入“+”、“−”插孔，笔尖相互接触，调节可调节部件_____，使电表指针指向_____位置；

（4）将红、黑表笔的笔尖分别接触电阻的两端，由表头指针读数乘以_____则得电阻值.

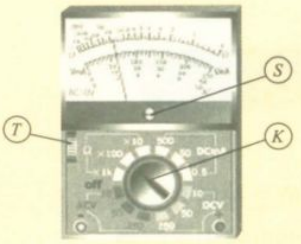


图 2-7-3

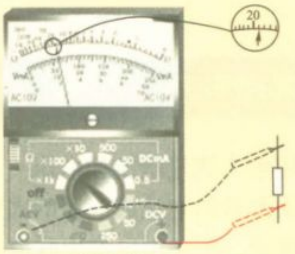


图 2-7-4

2. 在用多用电表测量一电阻的阻值时，电表的读数如图 2-7-4 所示，该电阻的阻值为_____Ω.

发展空间

实验室

用多用电表判断大容量电容器是否断路或者漏电

选择量程最大的电阻挡，将一支表笔同电容器的一端接触，用另一支表笔去接触另一端. 如果指针不动，说明电容器可能存在断路；如果指针有明显的偏移又逐渐回到电流零位置，说明电容器完好；如果指针偏移后不恢复零位置，说明电容器漏电；如果测得电阻为零，说明电容器短路——已经被击穿.

课外阅览

使用多用电表判断电路故障

在电学实验中，常见的电路故障是断路或短路，使用多用电表可以方便地找到故障点.

当发现路端电压不为零而电路中电流却为零，则说明电路中出现了断路故障. 这时可使用多用电表的电压挡，选择适当的量程后，分别去测量电路中某两点之间的电压，若电压不为零，则说明这两点与电源的连接完好，断路点就在这两点之间，逐步缩小检测的范围，就可以把断路的故障点找到. 也可以将电源断开后使用多用电表的欧姆挡逐段测量电路的电阻，若测得的电阻为无穷大，则说明该段电路中有断路点.

当发现电路中电流不为零而电压却为零，则说明电路中出现了短路的故障. 这时应首先将电源断开，用多用电表的欧姆挡逐段测量电路的电阻，若测得某段电路的电阻为零，则说明该段电路发生了短路.

微信公众号：电子课本大全

8 逻辑电路和控制电路

逻辑电路是计算机和自动化设备中的重要组成部分. 它是指输出与输入之间存在一定逻辑关系的电路. 最简单、最直观的逻辑电路是有触点的开关电路. 所谓有触点的开关是指由手动或继电器控制的开关.

先考虑由一个电源、一个开关和一个灯泡连接而成的简单回路, 如图2-8-1所示. 拨动开关作为输入A, 开关有两种状态: 接通和断开, 记为A的两个值, 其中1对应开关接通, 0对应开关断开. 灯泡作出反应, 作为输出P. 灯泡也有两种状态: 导通和熄灭, P也有两个值, 1对应灯泡导通, 0对应灯泡熄灭. 输出P和输入A的对应值见表2-8-1. 通常我们把这样的输入和输出取值的对应表称为真值表.

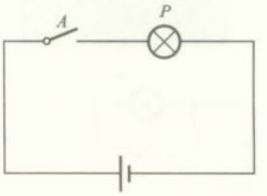


图 2-8-1 简单回路

表 2-8-1 输入和输出真值表

A	P
0	0
1	1

常见的逻辑电路

开关“与”电路

两个开关A和B串联, 并通过一个电源和一个灯泡P串联成一个回路, 如图2-8-2所示. 可以看出当开关A和B都断开或它们中仅有一个接通时, 灯泡都不会导通. 只有当A与B都接通时, 灯泡才会导通, 因而这种开关电路称为“与”电路. 有触点的开关组成“与”电路时是串联关系. 输出P和输入A、B的真值表见表2-8-2.

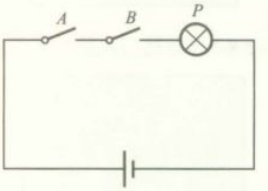


图 2-8-2 “与”电路

表 2-8-2 “与”电路真值表

A	B	P
0	0	0
1	0	0
0	1	0
1	1	1

开关“或”电路

两个开关A和B并联, 并通过一个电源和一个灯泡P组成如图2-8-3所示的电路. 当开关A和B都断开时, 灯泡P熄灭, 而当开关A或B任何一个接通或者两个都接通时, 灯泡就导通, 因而这种开关电路称为“或”电路. 有触点的开关组成“或”电路时是并联关系. 输出P和输入A、B的真值表见表2-8-3.

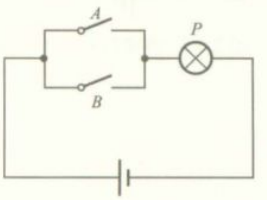


图 2-8-3 “或”电路

开关“非”电路

一个开关A如图2-8-4所示, 它跟灯泡P并联, 当A闭

微信公众号: 电子课本大全

表 2-8-3 “或”电路真值表

A	B	P
0	0	0
1	0	1
0	1	1
1	1	1

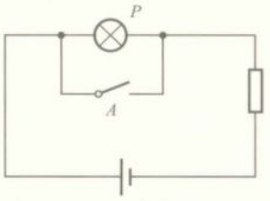


图 2-8-4 “非”电路

表 2-8-4 “非”电路真值表

A	P
0	1
1	0

表 2-8-5 自动门电路的真值表

A	B	P
0	0	0
1	0	1
0	1	1
1	1	1

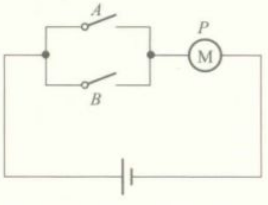


图 2-8-5 自动门的控制电路

合时，灯泡 P 不亮，当 A 断开时，灯泡 P 导通，这种逻辑关系的真值表如表 2-8-4 所示，不难看出，输入与输出的逻辑关系是相反的，这种电路可以称为“非”电路.

● 几个控制电路实例

以上我们认识的有触点的开关电路是三种最基本的逻辑电路，这些最基本的逻辑电路的各种组合可以构成许多更为复杂的逻辑电路. 这些逻辑电路不仅可以用来实现一定的控制需求，而且还可以用来进行复杂的运算，因而在自动控制技术和计算机技术中有着非常广泛的应用.

下面举几个简单的控制电路实例.

【例题 1】自动门控制电路.

设计一个可控制一扇门的自动控制电路，要求当人从门外走来要进门时，门会自动打开；当人从门内走来要出门时，门也会自动打开；当然同时有人从门外和门内走来时，门也会自动打开.

【解】设 A 表示人从门外走来启动的开关，$A=1$ 表示“开”，$A=0$ 表示“关”；B 表示人从门内走来启动的开关，$B=1$ 表示“开”，$B=0$ 表示“关”；P 表示自动门的执行电动机，$P=1$ 表示“门开”，$P=0$ 表示“门关”. 根据上述给定的工作条件，可列出输入 A、B 和输出 P 的真值表，见表 2-8-5.

从真值表可以看出，输入与输出相应的开关电路必定是“或”电路，两个开关 A、B 是并联的. 具体的电路如图 2-8-5 所示. 开关 A、B 可以是放于门下的脚踏开关；也可以是光控开关，由人的走动来阻断光线控制开关，两个开关并联. P 是一个执行电动机，当 A 或 B 接通时，启动电动机打开门. 关门的动作由其他执行机构操作.

【例题 2】举重裁判控制器.

举重比赛有三个裁判 A、B、C，其中 A 为主裁判，B 和 C 为副裁判. 当裁判认为杠铃已稳当举起时，就按一下自己面前的按钮. 只有当三个裁判同时按下自己面前的按钮，或者主裁判和一个副裁判同时按下自己面前的按钮，指示杠铃稳当举起的灯泡 P 才亮. 试设计这样一个电路.

【解】根据所给的工作条件，写出输入输出的真值表，见表 2-8-6. 从真值表可以看出输入按钮开关 B 和 C 并联，

微信公众号：电子课本大全

再与 A 串联，具体电路如图 2-8-6 所示.

【例题3】楼梯开关电路.

楼梯开关电路是在楼梯处使用的特殊控制电路. 楼下来人拨动楼下的开关，开启楼梯的灯，上楼之后可拨动楼上的开关关灯，楼下再来人仍然可以在楼下拨动开关再开灯，上楼后再在楼上关灯. 或者楼上来人也可拨动楼上开关开灯，下楼后再拨动楼下开关关灯.

【解】采用单刀双掷开关，可以将拨动开关的输入和灯亮或灭的输出之间的逻辑关系，用如图2-8-7所示的电路实现. 可以看出它符合所要求的工作条件.

表 2-8-6 裁判控制器真值表

A	B	C	P
0	0	0	0
1	0	0	0
0	1	0	0
0	0	1	0
0	1	1	0
1	1	0	1
1	0	1	1
1	1	1	1

● 用二极管实现“与”电路和“或”电路

虽然在计算机的外围执行设备和自动化设备中，有触点的开关电路有着许多应用，然而由于触点磨损，金属疲劳*以及运动部件的动作速度慢，使之可靠性较差，应用范围受到了限制. 在计算机及其他数字设备中广泛使用晶体二极管、三极管或集成电路等组成逻辑电路，它们没有运动部件，动作速度要比开关或继电器快百万倍以上，可靠性极高. “与”电路和“或”电路可以用二极管来实现，而“非”电路中须用三极管来实现.

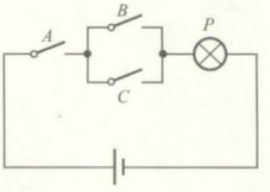


图 2-8-6 举重裁判控制电路

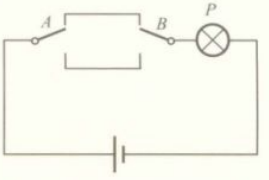


图 2-8-7 楼梯灯开关电路

● 集成电路

电子计算机中为了完成复杂的计算任务，自动化控制中为了完成复杂的控制任务，都需要用到许多逻辑电路，用它们来构成其中的编码器、译码器、多路选择器、数码比较器、触发器、寄存器、计数器、加减乘除运算器、存储器等. 第一台电子计算机诞生于1946年，它用了18 800个电子管，1 500 个继电器，整台电子计算机长 100 英尺（约 30.5 m），宽 3 英尺（约 0.914 m），重约 30 t，耗电功率 150 kW，运算速度达到每秒钟5 000次，其计算速度相当于手工计算的 20 万倍，比当时的机电计算机装置高出 1 000 倍.

1947 年，晶体三极管的发明给计算机提供了新的电子

* 金属疲劳是指固体金属在长时间反复受力后，造成原有的强度等物理性质衰弱，甚至产生龟裂、断裂的现象. 它是造成机械损坏的重要原因.

微信公众号：电子课本大全

器件. 晶体管和真空电子管相比较具有体积小、质量轻、寿命长、耗电少等优点，特别是它极快的状态转换速度更是提高运算速度的一大优点. 1956年研制成功的第一台晶体管计算机，成为第二代电子计算机的开端，其高速大型计算机的运算速度达到每秒几十万次到上百万次.

1958年研制出的第一个半导体集成电路，只有一个扩散晶体管、两个电阻和一个电阻-电容网络，共12个元件. 后来的集成电路是在一块连续的衬底材料上同时做出大量的晶体管、电阻等电路元件，并将它们连成电路，它的体积比结构最紧凑的分立元件电路小几个数量级，重量轻几个数量级. 这种微结构电路可靠性更高，成本更低廉.



图2-8-8 中国自主研发的超级计算机“天河一号”

20世纪70年代，人们已经可以在5.2 mm × 3.4 mm的基片上集成3.5万个元件，单片集成度可达60万个元件，集成密度达7 000~10 000个/mm^2.

1964年生产出的由混合集成电路作为主要电子器件的第三代电子计算机，运算速度达每秒几百万次. 1975年以后采用大规模和超大规模集成电路制成的第四代电子计算机，运算速度达每秒几百万次到几亿次.

今天，电子计算机的运算速度达到了每秒10^{15}次.

练习与评价

1. 如图2-8-9所示为楼梯照明电灯的电路图，其中S_1、S_2分别为楼上和楼下的开关. 要求拨动其中任一开关，都能改变电灯原来发光或熄灭的状态，在实际应用中最理想的方案是（　　）

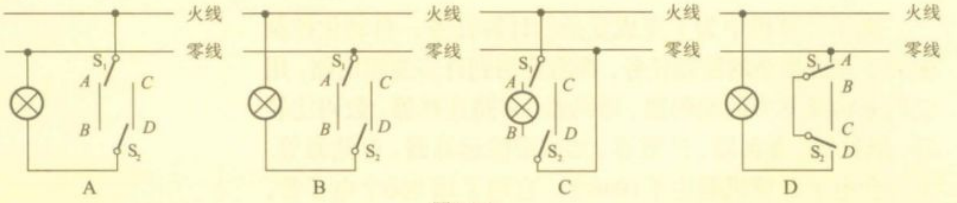


图2-8-9

2. 图2-8-10是一个温度控制电路，当热敏电阻所处的环境温度升高时阻值减小，电磁铁中的电流增大，吸引衔铁使触点A、B断开，加热电阻停止工作.

图中虚线框中的电路是什么逻辑电路？列出其真值表.

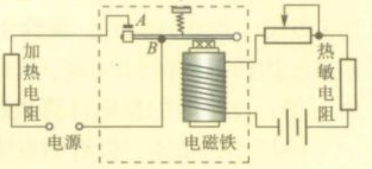


图2-8-10

3. 现有两个单刀双掷开关，还有红、黄、绿三盏灯和电源. 请设计一电路：若红灯亮时，黄灯和绿灯都不亮；若红灯灭时，黄灯和绿灯分别亮其中一盏，画出你设计的电路图.

微信公众号：电子课本大全

是电源的属性. 电动势等于外电路断开时电源两极间的电势差. 电源的路端电压U等于电动势E减去电流I与电源的内阻r的乘积，即$U=E-Ir$.

5. **闭合电路欧姆定律** 在外电路为纯电阻的闭合电路中，电流的大小跟电源的电动势成正比，跟内、外电路的电阻之和成反比，即$I=\dfrac{E}{R+r}$.

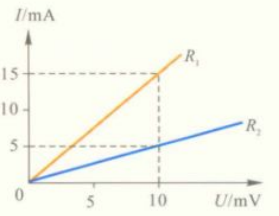
6. **电功率和热功率** 电流通过一段电路的电功率P，等于电路两端的电压U与通过电路的电流I的乘积，即$P=UI$. 电流通过电阻产生的热功率$P_{热}$等于通过电阻的电流I的平方与电阻R的乘积，即$P_{热}=I^2R$. 当电路中只有纯电阻时，电功率等于热功率.

7. **欧姆表和多用电表** 欧姆表是运用闭合电路欧姆定律直接测量电阻的电表. 多用电表可用来分别测量电阻、电压和电流等物理量.

8. **逻辑电路** 基本的逻辑电路有“与”电路、“或”电路和“非”电路.

习 题

1. 如图所示的图像中，两条直线分别对应着两个导体R_1与R_2.



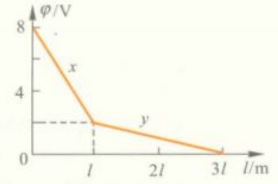
（第1题图）

（1）两导体的电阻之比$R_1:R_2$为____.

（2）若通过两个导体的电流相等（不为零）时，导体两端的电压之比$U_1:U_2$为____.

（3）若两个导体两端的电压相等（不为零）时，通过它们的电流之比$I_1:I_2$为____.

2. 两根材料相同的均匀导线x和y，x长l，y长$2l$，串联在电路上时沿长度方向的电势随位置的变化规律如图所示，则x、y两导线的横截面积之比是____.



（第2题图）

3. 对于三只电阻R_1（30 Ω 30 W）、R_2（10 Ω 40 W）和R_3（3 Ω 27 W），将它们串联时，消耗的总功率不能超过_____W，将它们并联时，消耗的总功率不能超过_____W.

4. 下列对电源电动势概念的认识中，正确的是（　　）

A. 电源电动势等于电源两极间的电压

B. 电源把越多的其他形式的能转化为电能，电动势就越大

C. 电动势和电压单位相同，所以物理意义也相同

D. 在闭合电路中，电动势等于路端电压与电源内部电势降落之和

微信公众号：电子课本大全

5. 如图所示为甲、乙两灯泡的 I–U 图像，根据图像，甲、乙两灯泡并联在电压为 220 V 的电路中，实际消耗的功率分别约为（　　）.

A. 15 W、30 W　　B. 30 W、40 W

C. 40 W、60 W　　D. 60 W、100 W

6. 如图所示，闭合电路，当滑动变阻器滑动片 P 移动时，电流表示数的变化情况是（　　）.

A. A_1、A_2 的示数同时增大，同时减小

B. A_1 的示数增大时 A_2 的示数减小，A_1 的示数减小时 A_2 的示数增大

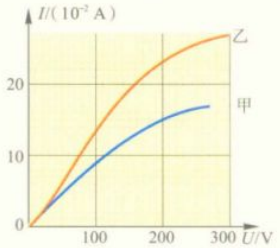
C. A_1 的示数总大于 A_2 的示数

D. A_1、A_2 示数的大小关系无法确定

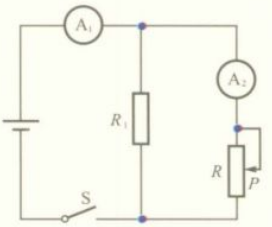
7. 如图所示电路中，电容器 C 上极板带正电，为了使该极板仍带正电且电荷量增大，下列方法中可采用的是（　　）.

A. 增大 R_1，其他电阻不变　　B. 增大 R_2，其他电阻不变

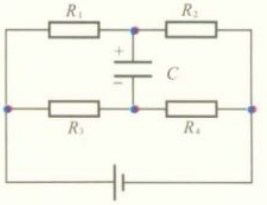
C. 增大 R_3，其他电阻不变　　D. 增大 R_4，其他电阻不变



（第 5 题图）



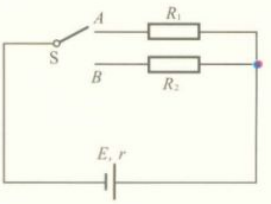
（第 6 题图）



（第7题图）

8. 一太阳能电池板，测得其开路电压为 800 mV，短路电流为 40 mA. 若将该电池板与阻值为 20 Ω 的电阻器连成一闭合电路，则它的路端电压多大?

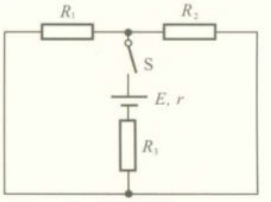
9. 如图所示电路中，当开关 S 接 A 点时，通过负载 R_1 的电流为 2 A，电源的输出功率是 10 W. 当开关 S 接 B 点时，通过负载 R_2 的电流为 1 A，电源的输出功率是 5.5 W. 求该电源的电动势 E 和内阻 r.



（第 9 题图）

10. 直径 $D_1 = 0.3$ mm的铅丝通以电流 $I_1 = 1.8$ A 时将被熔断，而直径 $D_2 = 0.6$ mm 的铅丝通以电流 $I_2 = 5$ A 时将被熔断，现用这两根等长的铅丝并联（相当两个电阻并联）作为保险丝，那么通以多大电流时电路会断开?

11. 图中开关 S 闭合时电源总功率为 40 W，输出功率为 37.6 W，电阻 $R_1 = 4\ \Omega$，电阻 $R_2 = 6\ \Omega$，电源内阻 $r = 0.6\ \Omega$，求电源电动势 E 及 R_3 的阻值大小.



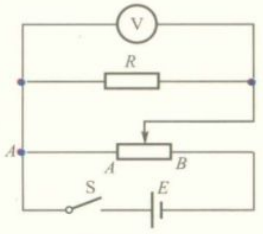
（第 11 题图）

微信公众号：电子课本大全

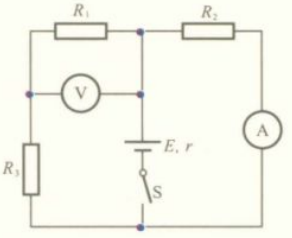
12. 如图所示，负载电阻 $R = 200\ \Omega$，电源电动势 $E = 8.0\ \text{V}$（内阻可以忽略不计）. 在这种情况下，选用 $R_{AB} = 100\ \Omega$、额定电流 100 mA 的变阻器分压，是否安全?

*13. 如图所示，理想电表与电阻 R_1、R_2、R_3 连接在电路中，已知 $R_3 = 4\ \Omega$，当开关闭合时，电流表的读数为 0.75 A，电压表的读数为 2 V. 由于某一电阻断路，使电流表的读数变为 0.8 A，电压表的读数变为 3.2 V，那么是哪一只电阻发生了故障? R_1、R_2 电阻各有多大? 电源电动势 E 和内阻 r 各有多大?

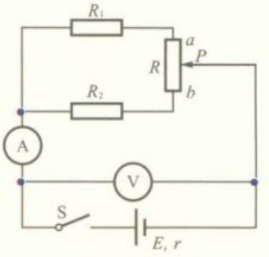
*14. 如图所示，$R_1 = 3\ \Omega$，$R_2 = 2\ \Omega$，电源电动势 $E = 6.3\ \text{V}$，内阻 $r = 0.5\ \Omega$，滑动变阻器的全阻值 $R = 5\ \Omega$，闭合电路，当滑动变阻器的滑动片 P 在 a、b 间滑动时，电压表和电流表示数的变化范围分别是多大?（电表为理想电表）



（第 12 题图）



（第 13 题图）



（第 14 题图）

微信公众号：电子课本大全

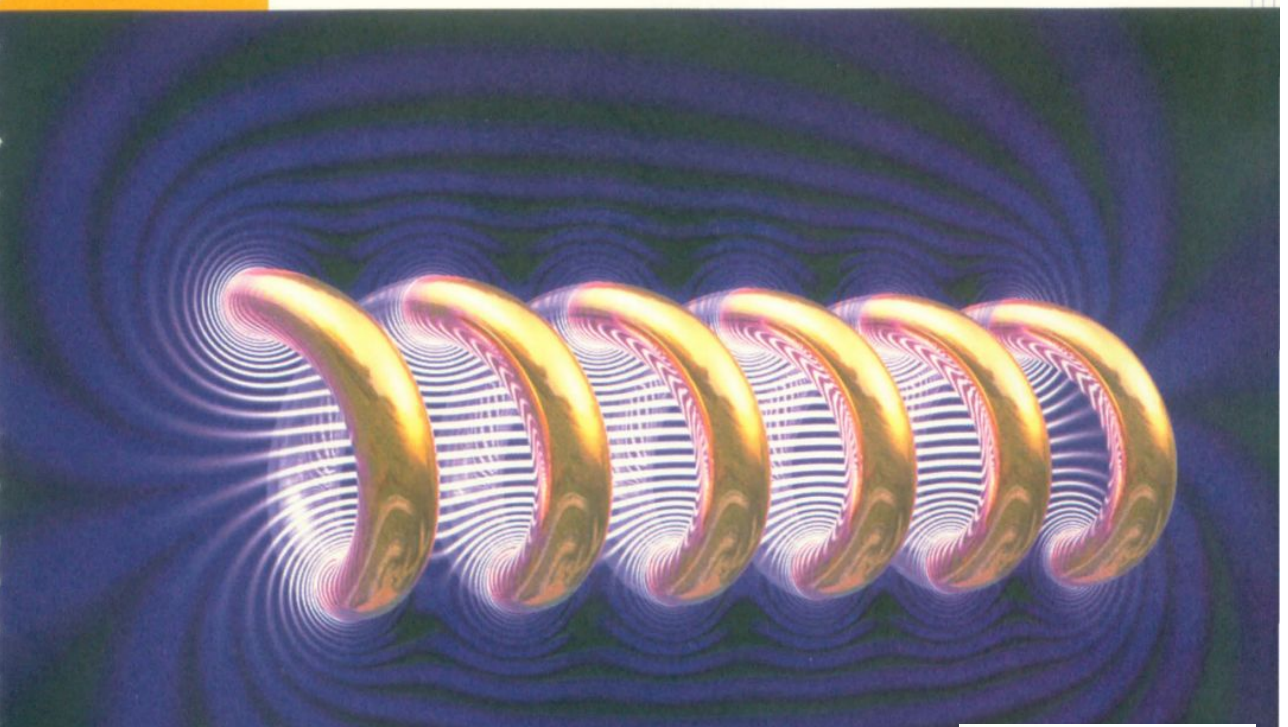
第三章 磁场

- 磁现象　磁场
- 磁场对通电导线的作用——安培力
- 磁感应强度　磁通量
- 磁场对运动电荷的作用——洛伦兹力
- 洛伦兹力的应用

看不见，摸不着，你却可以间接显现；

你无所不在，近至我们的身体、周围的生物、居住的地球，远至月球、太阳、各种天体乃至遥远的宇宙空间；

你支撑着新的相互作用，对你的认识与利用，改变了人类的活动方式，使人类社会进入了一个新的时代……



微信公众号：电子课本大全

1 磁现象 磁场

磁现象



（a）司南



（b）指南针

图 3-1-1 磁现象在古代文明中光彩夺目

人类对磁现象的认识与应用已有悠久的历史，随着科学技术的发展，对磁现象的研究及应用也不断发展．可以简述如下．

1. 我国古代对磁现象的认识及应用

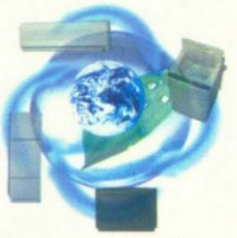
我们的祖先在春秋战国时期已发现天然磁石具有吸引铁的现象和指示南北方向的特征，这是最早发现并记载的磁体相互作用现象．

北宋时期我们的祖先发明了指南针，并很快用于航海．这是我国古代的四大发明之一．图3-1-1（a）所示为我国古代的指南仪器——司南，在其发明100多年后传入欧洲；图3-1-1（b）是哥伦布船队发现美洲新大陆时所用的指南针．

我们的祖先很早就发现磁石能治疗疾病，《史记》中就有磁石治疗疾病的记载，《本草纲目》中记载了磁石能治疗10多种疾病．



（a）电气化生产方式



（b）电气化生活方式

图 3-1-2 磁技术改变了人类社会的生产和生活

2. 电与磁的相互联系现象的发现及第二次产业革命

奥斯特发现的电流磁效应翻开了研究电与磁相互关系的新篇章．法拉第发现的电磁感应现象打开了电气化技术时代的大门，导致了人类历史上的第二次产业革命，大大促进了生产力以至整个社会的发展．你可曾想到这些伟大的变革竟然起源于一些我们熟悉的简单物理实验（如图3-1-3）！

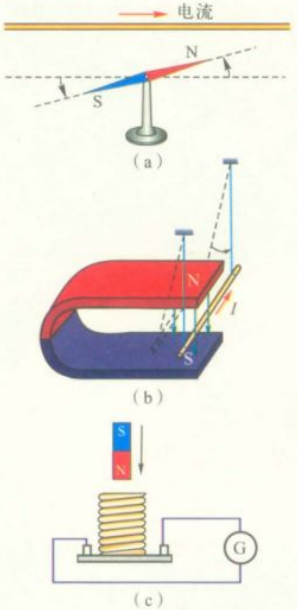


图 3-1-3 电与磁相互联系

3. 信息技术中的磁现象

某些磁性物质能够把磁场对它的作用记录下来，长久保

微信公众号：电子课本大全

存并在一定条件下复现. 于是，人们利用这种原理制成了各种信息的磁存储部件或设备，如磁带、磁盘、磁鼓、磁卡等（如图 3-1-4、图 3-1-5 所示）.

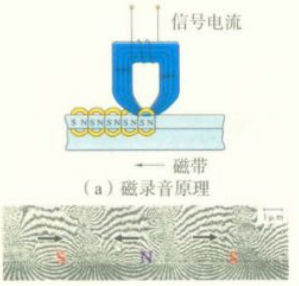


磁盘



磁卡和磁卡机

图 3-1-4 磁技术在信息时代大显神通



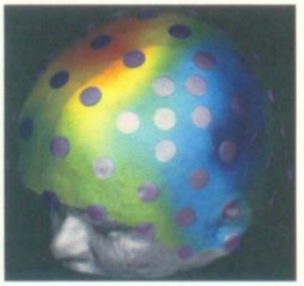
（b）录好的磁带的磁感线

图 3-1-5 磁带上的录音情形

4. 生物体中的磁现象

研究表明，磁现象广泛存在于生命活动之中，鸽子识归巢、候鸟辨迁途、海龟找“故乡”都可能与这些动物对地球磁场的敏感有关.

人体器官也存在磁性. 你听说过心磁图、脑磁图吗？它是人体器官的磁分布图像，用它可以进行疾病诊断. 图 3-1-6（b）是医院里使用的核磁共振断层成像装置. “磁”已走进医院，并造福人类！



（a）脑磁图检测



（b）核磁共振断层成像装置

图 3-1-6

磁 场

在初中物理中我们已经知道磁体周围有**磁场**（magnetic field），电流周围也有磁场，一切磁相互作用都是通过磁场来实现的，进一步认识磁场可以使我们更好地理解各种磁现象.

人们发现，用放置磁针或撒铁屑的方法可以显示磁场空间分布的特点，在这些现象的基础上，物理学家提出了用**磁感线**（magnetic induction line）来形象地描述磁场的方向和强弱. 磁感线是这样一些假想的有方向的曲线：曲线上每一点的切线方向为该点的磁场方向，曲线的疏密表示磁场的强弱，曲线疏的地方磁场弱，曲线密的地方磁场强.

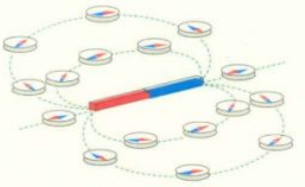
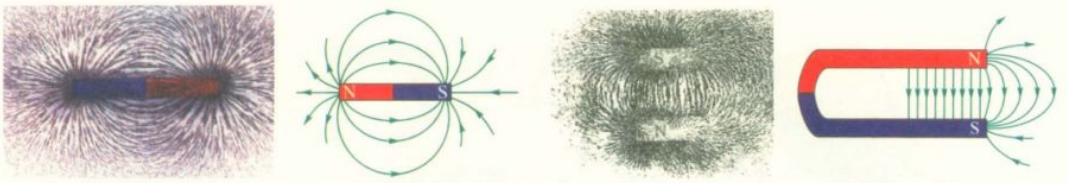


图 3-1-7 条形磁体周围“小磁针”的指向

微信公众号：电子课本大全

人们规定，在磁场中某一点小磁针N极所受磁力的方向，就是该点磁场的方向.

1. 磁体周围的磁场

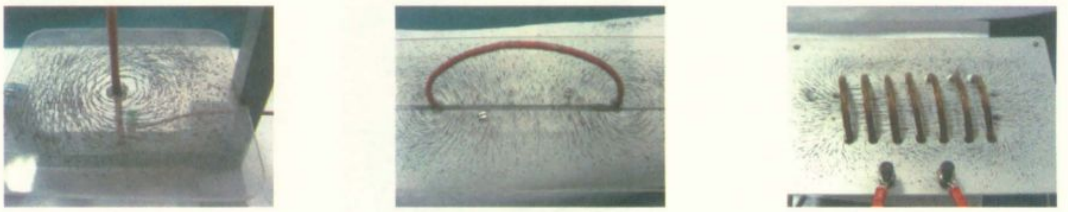


（a）铁屑在条形磁体周围的排列情形　（b）条形磁体周围的磁感线　（c）铁屑在蹄形磁体周围的排列情形　（d）蹄形磁体周围的磁感线

图 3-1-8

2. 电流周围的磁场

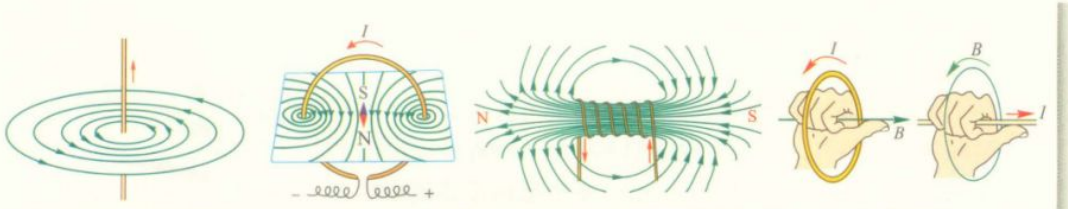
在通有电流的导线周围撒上铁屑，铁屑的有序排列就可以模拟出磁感线分布的情况，如图 3-1-9 所示.



（a）铁屑显示的直线电流的磁场的情形　（b）铁屑显示的环形电流的磁场的情形　（c）铁屑显示的通电螺线管的磁场的情形

图 3-1-9

在电流周围磁场的磁感线如图 3-1-10（a）（b）（c）所示. 磁感线的方向可以由**安培定则**（Ampère rule，也叫做右手螺旋定则）判定：如图 3-1-10（d）所示，如果右手弯曲的四指与环形电流的方向一致，伸直的拇指所指的方向就是环形导线轴线上磁感线的方向；如果右手握住导线，让伸直的拇指所指的方向与电流方向一致，则弯曲的四指所指的方向就是磁感线环绕的方向.



（a）通电直导线的磁感线　（b）环形电流的磁感线　（c）通电螺线管的磁感线　（d）安培定则

图 3-1-10

微信公众号：电子课本大全

练习与评价

1. 试在图 3-1-11 中画出磁感线或电流方向.

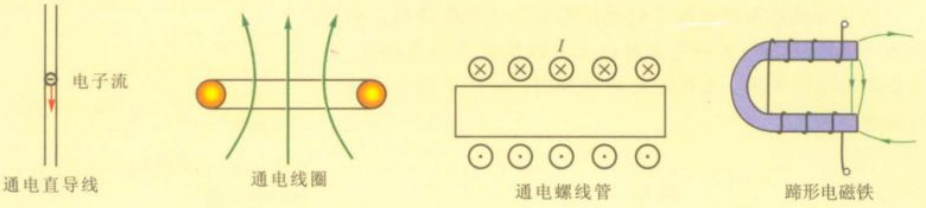


图 3-1-11

2. 如图3-1-12所示，一束带电粒子沿着水平方向平行地飞过磁针上方时，磁针的S极向纸内偏转，则这束带电粒子的飞行方向和电荷的正负可能是_____或_____.

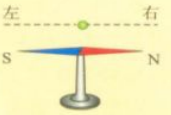


图 3-1-12

3. 图 3-1-13 为通电螺线管. A 为螺线管外一点，B、C 两点在螺线管的垂直平分线上，则下列说法正确的是(　　).

A. 磁感线最密处为 A 处，最疏处为 B 处

B. 磁感线最密处为 B 处，最疏处为 C 处

C. 小磁针在 B 处和 A 处 N 极都指向左方

D. 小磁针在 B 处和 C 处 N 极都指向右方

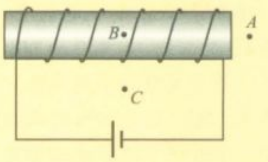


图 3-1-13

4. 比较电场线和磁感线，看看它们有什么相同和不同之处.

发展空间

课外阅览

磁现象的电本质

人类早在发现电现象的同时就发现了磁现象，但是直到1820年奥斯特发现了电流的磁效应后，才揭示了电与磁的相互联系. 安培等人的进一步研究扩大了人类对电与磁的认识. 他不仅获得了磁对电流作用的规律，而且他还从磁体和通电线圈的等效性实验进一步提出了“分子电流”假说. 他认为在原子、分子内部总存在一种环形电流——分子电流，分子电流使其两侧相当于两个磁极. 安培把磁体的磁场和电流的磁场都归结为电流的作用，揭示了磁的本质. 虽然在安培的时代还不知道原子和分子的存在，但安培的分子电流假说却是正确的. 现代物理研究表明：物质是由分子和原子组成的，原子核外电子在不停地绕核运动的同时，还不停地自转；电子的运动在周围空间会产生磁场.

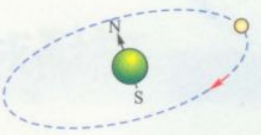


图3-1-14　电子运动形成的磁场等价为一个“小磁体”的磁场

为什么一般物体宏观上并不呈现磁性，而有的物质如磁铁却能呈现很强的磁性呢?

我们可以想象原子核外的每个电子运动形成的磁场等价为一个“小磁体”的磁场. 如果这个原子内若干小磁体有共同的取向，那么这个原子就等价于大一点的小磁体. 如果组成物

微信公众号：电子课本大全

体的无数原子产生的磁场有共同的取向，那么这个物体就在其空间显现磁性．取向越一致，磁性就越强．如果物质内部的“小磁体”取向完全混乱，则整体上不显磁性．

物质磁性还与微观粒子的热运动有关．实验证明，如果把一块磁铁加热到一定温度以上，磁铁就会失去磁性．这是因为温度升高，无规则热运动加剧，破坏了原子磁性的规则取向．

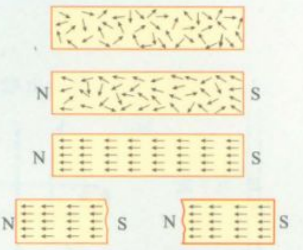


图3-1-15　物质微观结构的变化与磁性的形成

地磁场

地球是个大磁体，地球内部和外部都存在着磁场．

图3-1-16是地球外部磁场示意图，地轴的地理北极用N_g表示，地磁场南极用S_m表示．地磁南、北极的连线S_mN_m偏离地轴约为11.5°．

由图可以看出，在赤道附近，地磁场沿水平方向，在地磁南极和北极，地磁场沿竖直方向，在其他地方，地磁场与水平面成一定角度，这个角度称为磁倾角．如北纬45°的某地，磁倾角为73°．在地球表面附近，地磁场较弱．

关于地球磁场的来源，早期历史上曾有来自北极星的传说，到17世纪初人们认识到地球本身就是一个巨大的磁体，不过仍不清楚地磁场究竟是怎样产生的．由于地球内部结构较复杂，影响地球磁场的因素又很多，因此这方面的观测实验和理论方面的研究仍需要不断地进行．

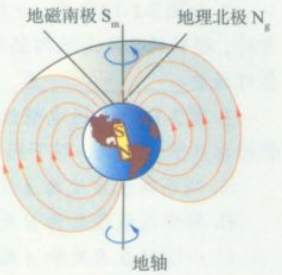


图3-1-16　地磁场

2 磁场对通电导线的作用——安培力

● 安培力

我们已经知道，电流（通电导线）能在其周围产生磁场．与此同时，如果把通电导线置于磁场中，它将受到力的作用．下面，我们通过实验，研究磁场对通电导线的作用．

微信公众号：电子课本大全

实验探究

如图3-2-1所示安装、连接实验器材，线框下端与磁场方向垂直放置.

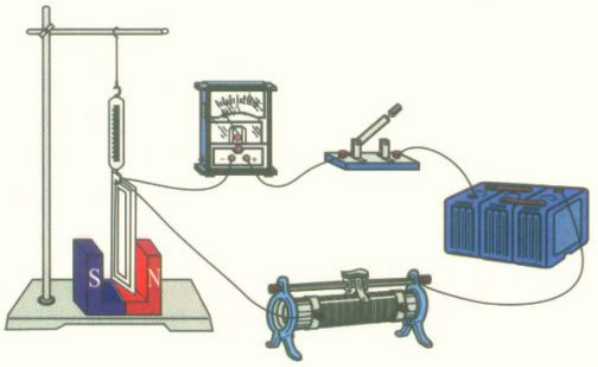


图3-2-1

如果为了获得明显的实验效果，也可以考虑把线框做成多匝线圈.

1. 在接通电路前先观察并记录下弹簧测力计的读数F_0.

2. 接通电路，调节滑动变阻器使电流表读数为I_1. 观察并记录弹簧测力计此时的读数F_1. 想一想，F_1-F_0的物理意义是什么?

3. 继续调节滑动变阻器使电流表读数为I_2，I_3，…，I_n. 观察并记录弹簧测力计相应的读数F_2，F_3，…，F_n.

4. 分别计算出F_2-F_0，F_3-F_0，…，F_n-F_0.

5. 列出I_i与F_i-F_0（$i=1$，2，3，…，n）的对应关系.

I_i/A							
F_i-F_0/N							

从中你能得出什么结果?

6. 紧挨着蹄形磁体再并排放上一个相同的蹄形磁体（相同的极性在同一侧）. 仍保持线框的竖直边在磁场区外. 重复上述2～5过程. 你从中又能得出什么结果?

实验表明，当通电导线与磁场方向平行时，导线不受力；当通电导线与磁场方向垂直时，磁场对通电导线有力的作用，力的大小与导线中的电流、导线长度和磁场强弱有关. 精确实验表明：通电导线与磁场方向垂直时，磁场对通电导线作用力的大小与导线长度和电流大小都成正比，

微信公众号：电子课本大全

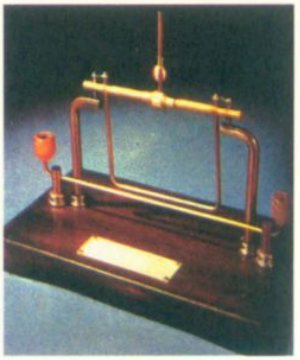


图 3-2-2　安培进行安培力实验用过的实验装置

即 $F \propto IL$，比例系数与导线所在位置的磁场强弱有关，用符号 B 表示（关于它的意义，下节将进一步介绍），则磁场对通电导线作用力的公式为

$$F = ILB$$

式中，I 的单位为安（A），L 的单位为米（m），F 的单位为牛（N）.

通电导线在磁场中受到的力的作用是安培（A.M. Ampère）于 1820 年首先发现的，为纪念安培的贡献，后来人们把磁场对通电导线的作用力称为**安培力**（Ampère force）. 图 3-2-2 所示就是当年安培进行安培力实验时用过的实验装置.

如何判断通电导线在磁场中所受磁场力的方向呢?

通电导线在磁场中所受安培力的方向，可用**左手定则**判定：伸出左手，四指并拢，使大拇指和其余四指垂直，并且都跟手掌在同一平面内，让磁感线垂直穿过手心，四指指向沿电流方向，则大拇指所指方向就是通电导线所受安培力的方向，如图 3-2-3 所示.

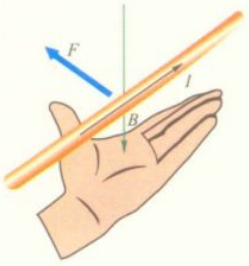


图 3-2-3　左手定则

通电导线在磁场中受到的安培力方向，既与电流方向垂直，又与磁场方向垂直，或者说安培力方向垂直于电流方向和磁场方向所确定的平面.

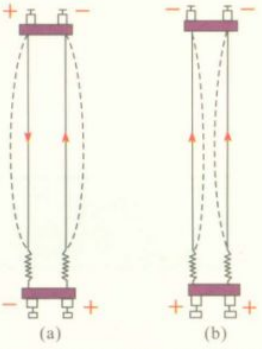


图 3-2-4　通电导线之间通过磁场发生相互作用

活动

将通电直导线放入磁场，磁场就会对通电直导线有安培力的作用. 如果有两条相互平行、距离很近的通电直导线，如图 3-2-4 所示，观察、分析所发生的现象，并在图 3-2-5 中标出导线所受安培力的方向.



图 3-2-5　平行通电直导线的相互作用力

● 电动机——安培力的重要应用

安培力一个最重要的应用是为电动机的发明提供了理论支持. 应用电动机使电能转化成机械能，是引发 19 世纪第二次工业革命的因素之一.

微信公众号：电子课本大全

图3-2-6给出一个直流电动机的工作模型，它由磁场（磁体）、转动线圈、滑环、电刷及电源组成. 其中，滑环分成两个半圆环 A 与 B，当电流由 A 流入时，则从 B 流出；当电流由 B 流入时，则从 A 流出. 因此，滑环在其中起了一个换向器的作用. 当线圈通电后，由于受到安培力的作用，线圈在磁场中旋转起来. 这就是电动机的工作原理.

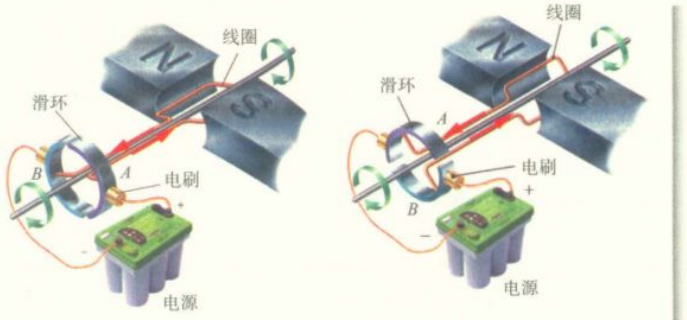


图 3-2-6　直流电动机

除直流电动机外还有交流电动机，实际的交流电动机有多种形式，结构比较复杂，但都是利用磁场对通电导体的作用把电能转化为机械能. 家用的电风扇、洗衣机、抽油烟机、吸尘器等使用的都是交流电动机.

练习与评价

1. 如图 3-2-7 所示，在地球赤道上方，有一条与磁场方向垂直、长度为 2 m 的通电直导线 ab，导线 ab 中的电流方向由东向西，试判断 ab 受到的安培力的方向.

2. 如图 3-2-8 所示，两根垂直纸面平行放置的直导线 M 和 N，通有大小相等方向相反的电流 I，在纸面上与 M、N 距离相等的 P 点处，M、N 导线在该点产生的磁场的方向如何？说说理由. M 导线受到的安培力方向又怎样？

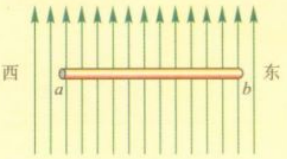


图 3-2-7

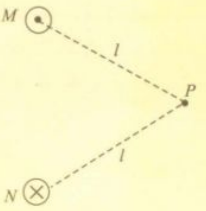


图 3-2-8

微信公众号：电子课本大全

发展空间

课外阅览

磁电式电流表

如图 3-2-9 所示，如果我们把一个可绕 OO' 轴转动的通电导线框放在一匀强磁场中．那么线框的 ab 边和 cd 边与磁场方向垂直，受安培力作用，会产生相对于 OO' 轴的转动力矩，从而使线框发生转动．这种由安培力产生的力矩叫做磁力矩．

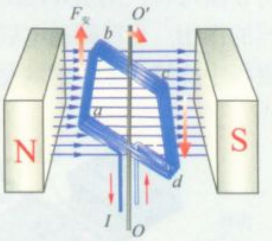


图 3-2-9　通电线圈在磁场中所受的力矩

磁电式电流表就是利用通电线圈在磁场中受到磁力矩作用的原理制成的．我们在实验中经常使用的电流表和电压表都是磁电式电表．这种电流表的内部结构如图 3-2-10 所示，给蹄形永磁体的两个磁极各加一个软铁制的极靴，它们之间有圆柱形的软铁芯．在极靴与铁芯之间形成一个均匀的空隙，空隙中是磁感线均匀地沿着径向分布的磁场，如图 3-2-11 所示．在空隙间装有用漆包细铜线绕制的线圈，它连接在转轴上，可以绕轴转动，待测的电流就从其中通过．转轴上附着指针，轴的上、下两端各连有一盘游丝（即螺旋弹簧，图 3-2-10 中只画出上边的游丝），它们的绕向相反（一个顺时针，一个逆时针）．所以在未通入电流时，线圈静止在平衡位置，这时指针应停在零点，指针的零点位置可以通过零点调整螺旋来调节．

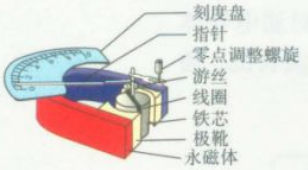


图 3-2-10　磁电式电表的结构

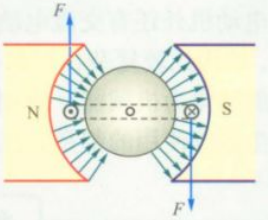


图3-2-11　极靴和软铁芯间的磁场对线圈产生顺时针偏转的磁力矩

当有待测电流通过线圈时，磁场就对线圈产生一个力矩，使它偏转．这个磁力矩的大小和待测的电流成正比．线圈偏转时，游丝发生形变，产生反方向的恢复力矩，阻止线圈继续偏转．线圈偏转的角度越大，游丝的形变越厉害，恢复力矩就越大，恢复力矩和线圈的偏转角成正比．当线圈平衡时，其所处的位置，也就是恢复力矩和磁力矩大小相等的地方，此时指针位置就反映出待测电流的大小．经过标准电流计量仪器校准和标定之后，就可以直接从指针位置读出待测电流的值．这就是磁电式电流表的简要工作原理．

磁电式电表的优点是灵敏度高，可以测出很弱的电流；缺点是对过载很敏感，如果通过的电流超过允许值，很容易把它烧坏．所以在使用时应特别注意．

微信公众号：电子课本大全

3 磁感应强度 磁通量

磁感应强度

讨论交流

在第一章关于电场性质的学习中我们知道，电场对其中的检验电荷的作用力 $F \propto q$，F 与 q 的比值是一个与检验电荷无关、只由电场性质决定的物理量，我们定义这个比值为电场强度，$E=\frac{F}{q}$. 我们能否将安培力与电场力进行类比，说明安培力公式中比例系数 B 的物理意义呢？

分析安培力实验（如图3-3-1）的有关数据，可以发现，在磁场中某一点（如 B 点），安培力与电流和导线长度乘积的比值是一个定值，与导线的长度、通过导线的电流无关；而在磁场中的不同点（A、B、C 点），安培力与电流和导线长度乘积的比值不相等，与所在位置的磁场强弱有关，因此，我们可以用这个比值来描述磁场的性质，把它称为**磁感应强度**（magnetic induction），用符号 B 表示，写成公式是

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

在国际单位制中，磁感应强度的单位是**特斯拉**，简称**特**，符号是T.

$$1\ \mathrm{T}=1\ \mathrm{N/(A\cdot m)}$$

普通永磁体的磁极附近的磁感应强度约为0.4 T～0.8 T，目前国际上大型实验室可产生的瞬间强磁场，其磁感应强度可达1 000 T，而产生的稳定磁场的最大磁感应强度为37 T.

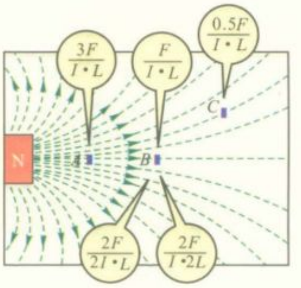


图 3-3-1 磁场中不同点的磁感应强度

微信公众号：电子课本大全

表 3-3-1　一些磁感应强度的大小

单位：T

原子核表面	约 10^{12}
实验室的强磁场	约 30
电视机内偏转磁场	约 0.1
地球表面	约 5×10^{-5}
人体表面（例如头部）	3×10^{-10}
磁屏蔽室内	3×10^{-14}

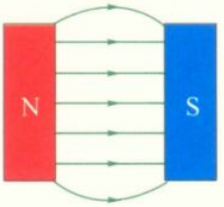


图 3-3-2　永磁体两个异名磁极间的磁场可认为是匀强磁场

磁感应强度 B 是矢量，磁场中某点的磁感应强度 B 的方向就是前面所述的该处的磁场方向.

在磁场的某个区域内，如果各点的磁感应强度大小和方向都相同，这个区域的磁场叫做**匀强磁场**（uniform magnetic field）. 在匀强磁场中，磁感线是一组平行而且等距的直线，如图 3-1-8（d）和图 3-3-2 所示.

已知磁感应强度的大小和方向，就可以求磁场对置于其中的通电导线的安培力.

如果通电导线与磁场方向成 θ 角，安培力如何计算？

如图 3-3-3 所示，可把磁感应强度 B 分解为垂直导线方向与平行导线方向的两个分量 $B_{\perp}$ 和 $B_{/\!/}$，$B_{/\!/}$ 对通电导线没有作用力，而 $B_{\perp}=B\sin\theta$. 这时通电导线所受安培力大小的计算公式是

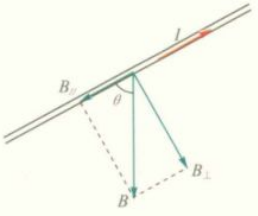


图 3-3-3　通电导线在磁场中受到力的作用

$$F = ILB_{\perp} = ILB\sin\theta$$

当通电导线和磁场方向平行时，导线与磁场方向夹角是 0°（或 180°），它受到的安培力是零.

【例题】在赤道上，地球表面附近的地磁场可看成是沿南北方向的匀强磁场，磁感应强度的大小是 5×10^{-6}T. 如果赤道上有一根沿东西方向架在跨度20 m的电线杆间的直导线，此时通有大小为 30 A、方向由西向东的电流. 算一算地磁场对这根导线施加了约多大的安培力？方向如何？

【解】由题意画出示意图，如图 3-3-4 所示.

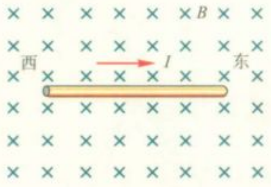


图 3-3-4

因电流方向与磁场方向垂直，故可以直接使用公式求出地磁场对这根导线施加的安培力 F.

$$F = ILB$$
$$= 30 \times 20 \times 5 \times 10^{-6}\,\mathrm{N}$$
$$= 3 \times 10^{-3}\,\mathrm{N}$$

借助左手定则，我们可以判定导线所受安培力的方向垂直导线向上.

微信公众号：电子课本大全

● 磁通量

在用磁感线描述磁场时，我们知道，磁感线越密集的地方磁场越强；反之，磁感线越稀疏的地方磁场越弱. 这就意味着磁感线的疏密程度与磁感应强度有联系，能否反映出它们之间的定量关系呢？

为此，我们需要引进一个磁通量的概念. 如图3-3-5(a)所示，在磁感应强度为 B 的匀强磁场中，有一块垂直磁感线方向的面积为 S 的平面，我们定义 BS 为通过这个面的**磁通量**(magnetic flux)，简称磁通，用 Φ 表示，它在数值上等于穿过这个面的磁感线条数. 有

$$\Phi = BS$$

在国际单位制中，磁通量的单位是**韦伯**，简称**韦**，符号是Wb. 1 Wb = 1 T · m^2.

由于 $$B = \frac{\Phi}{S}$$

因此，磁感应强度 B 又叫做磁通密度，单位为Wb/m^2. 1 T =1 Wb/m^2.

在如图3-3-5(b)所示的匀强磁场中，面积为 S 的平面的垂线与磁场方向的夹角为 θ，平面面积 S' 是平面面积 S 在垂直磁场方向上的投影，显然穿过 S、S' 的磁感线条数完全相同. 根据这个道理我们可以计算出穿过平面 S 的磁通量，由图得出

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

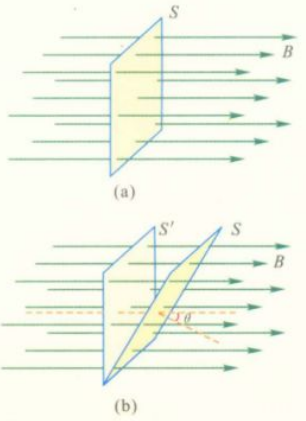


图 3-3-5 磁通量

● 利用安培力测定磁感应强度

活动

利用通电导线在磁场中受到的安培力与磁感应强度的关系就可以测定磁感应强度的大小. 实验装置如图3-3-6所示. 弹簧测力计下端挂一矩形导线框(为了使效果明显可以绕成矩形多匝线圈)，将矩形线框的短边置于蹄形磁体N极、S极间磁场中的待测位置.

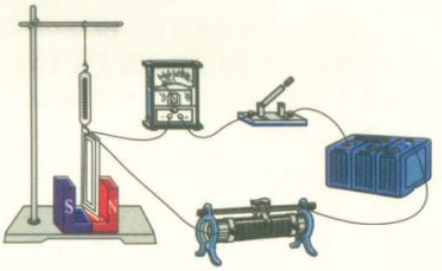


图 3-3-6 测量磁极间的磁感应强度

微信公众号：电子课本大全

为了使测量过程简单，①矩形线框所在的平面要与N极、S极的连线_____；②矩形线框的短边要全部放在N、S极之间的区域中，为什么？

当电路未接通时弹簧测力计的读数为_____，它表示的是_____.

接通电路开关，调节滑动变阻器的滑动片使电流表指针在某一数值I_1，此时弹簧测力计的读数F_1为_____.

由此得出磁场对矩形线框位于磁场中的一条边的作用力的大小为_____.

再测出线框在磁场中的这条边的长度为_____.（如果线圈匝数为N，这个长度应取多少？）

由$F = ILB$可以得出待测磁场的磁感应强度B = _____.

为了使测量更为精确，可把弹簧测力计换成精密天平. 把矩形导线框吊在天平的一臂，使天平平衡. 当接通电流，矩形导线框的一条边受到向下的安培力作用时，可在天平另一端加上砝码. 若当所加砝码重为mg（g为重力加速度）时，天平再次平衡，可知此时线框所受安培力$F = mg$，由此可求得导线所在处的磁感应强度.

练习与评价

1. 一小段长为L的通电直导线放在磁感应强度为B的磁场中，当通过它的电流为I时，所受安培力为F. 以下关于磁感应强度B的说法正确的是（　　）.

A. 磁感应强度B一定等于$\frac{F}{IL}$

B. 磁感应强度B可能大于或等于$\frac{F}{IL}$

C. 磁场中通电直导线受力大的地方，磁感应强度一定大

D. 在磁场中通电直导线也可以不受力

2. 把一个面积为$5.0 \times 10^{-2}\ m^2$的单匝矩形线圈放在匀强磁场中，当线圈平面与磁场方向垂直时，穿过线圈的磁通量是1.0×10^{-3} Wb，则磁场的磁通密度为_____. 若把0.5 m^2的导线环放入该匀强磁场中，环面与磁场方向垂直，则穿过这个导线环的磁通量为_____.

*3. 如图3-3-7所示，在同一水平面的两导轨相互平行，相距2 m，并处于竖直向上的匀强磁场中，一根质量为3.6 kg的金属棒放在导轨上，与导轨垂直. 当金属棒中的电流为5 A时，金属

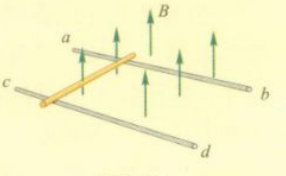


图3-3-7

微信公众号：电子课本大全

棒做匀速直线运动，当金属棒中的电流增加到8 A时，金属棒将获得2 m/s² 的加速度，则磁场的磁感应强度为多少？

*4. 如图3-3-8所示，线框面积为S，线框平面与磁感应强度为B的匀强磁场方向垂直，则此时穿过线框平面的磁通量为_____. 若使线框绕轴OO'转过60°，则穿过线框平面的磁通量变为_____. 若线框从初始位置绕OO'轴转过90°，则穿过线框平面的磁通量变为_____. 若线框从初始位置绕OO'轴转过180°，则这个过程中穿过线框平面的磁通量变化量为_____.

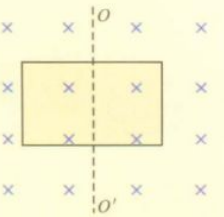


图3-3-8

发展空间

实验室

用传感器测量磁感应强度

我们已经看到，直接测量磁感应强度比较困难. 如果利用与计算机相连的传感器来测量，可以即时用图像表示出通电螺线管的磁感应强度与螺线管中电流的关系，还可以观察螺线管内各处磁感应强度大小都相等的事实.

测量所用到的器材有电流传感器、磁传感器、数据采集器、计算机、稳压电源、螺线管、滑动变阻器、导线等.

首先，把电流传感器与磁传感器分别接入与计算机相连的数据采集器，再将电流传感器、滑动变阻器R、限流电阻R_0、螺线管L和电源串联在电路中（如图3-3-9）. 磁传感器测量端放在螺线管内的某一位置.

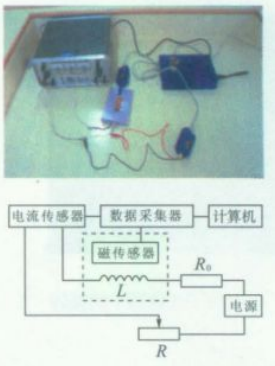


图3-3-9 用传感器测量磁感应强度

打开计算机的“坐标绘图”窗口，设置显示“电流–磁感应强度”图线，移动滑动变阻器的滑动片，改变线圈中的电流大小，得出一条实验图像，如图3-3-10所示.

如果保持电流不变，让磁传感器在螺线管内沿轴线移动，则数字窗口的读数呈现稳定显示，屏幕上画出一条水平线.

实验结果清楚地表明，电流–磁感应强度图像是一条过原点的直线，说明螺线管内的磁感应强度与螺线管中的电流成正比. 图3-3-10上方显示的数据是直线上最后一点电流和磁感应强度的值.

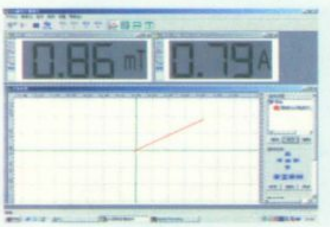


图3-3-10 螺线管中的磁感应强度

物理在线

上网查阅资料，了解地磁场的分布、变化及其对人类生活的影响.

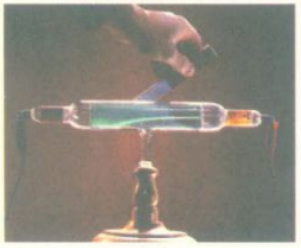
微信公众号：电子课本大全

4 磁场对运动电荷的作用——洛伦兹力

● 洛伦兹力



（a）



（b）

图3-4-1 带电粒子在磁场中的偏转

观察思考

如图3-4-1（a）所示，一个阴极射线管的两个电极之间加上高电压后，就会在旁边的荧光屏上看到一条亮线．它是电子在高电压的作用下加速运动射到荧光屏上引起的．它显示出了电子运动的路径．当把一个条形磁体的N极放到阴极射线管的近旁时［如图3-4-1（b）］，你看到了什么现象？把磁铁的极性调换一下，用条形磁体的另一个磁极放到阴极射线管的近旁，你又看到了什么现象？

我们在这个实验中发现：当条形磁体的磁极靠近阴极射线管时，荧光屏上的亮线发生了弯曲．这说明电子束的运动发生了偏转．也就是说，运动的电荷受到了一个与运动方向存在夹角的力，这个力就是磁场对运动电荷的作用力．偏转的方向不同，说明电子束受力的方向不同．

运动电荷在磁场中受到的磁场力，称为**洛伦兹力**（Lorentz force）．

利用洛伦兹力控制带电粒子偏转在实际中有很多重要应用．在传统的电视机显像管中，就是利用特殊线圈产生的磁场控制电子偏转，扫描出画面．当宇宙射线射向地球时，地磁场对带电粒子的洛伦兹力会使得射线发生偏转．



图3-4-2 极光是来自太阳的带电微粒在地磁场的作用下向地球两极聚集，并作用于大气层中的原子，发出奇异光芒的现象

理论探究

安培力是通电导线受到的力，容易测量，是否可以从安培力F得出洛伦兹力$F_{洛}$呢？

既然电流是电荷的定向运动形成的，那么，静止的通电导线在磁场中受到的安培力，在数值上等于大量定向运动电荷受到的洛伦兹力的总和．

微信公众号：电子课本大全

推理论证

有一段静止导线长L，横截面积为S，单位体积内含有的自由电子数为n，每个电子的电荷量是e，设在时间Δt内，自由电子沿导线移动了距离Δx，则电子定向移动的速率$v=\dfrac{\Delta x}{\Delta t}$，那么通过导线的电流就是

$$I=\frac{\Delta q}{\Delta t}=\frac{neS\,\Delta x}{\Delta t}=neSv$$

我们已经知道，若长度是L的通电导线与磁场方向垂直，通过的电流是I，在匀强磁场B中受到的安培力大小为

$$F=ILB=neSvBL$$

设每个电子受到的磁场力是$F_{洛}$，那么$F=NF_{洛}$，N是这段导线所含有的自由电子总数，$N=nSL$，所以

$$NF_{洛}=neSvBL=NevB$$

$$F_{洛}=evB$$

结论分析

1. e为电子所带电荷量，电荷量为q的运动电荷所受到的洛伦兹力可以表示为

$$F_{洛}=qvB$$

当电荷的速度方向和磁场方向平行时，运动电荷所受洛伦兹力为零.

2. 带电粒子在磁场中所受洛伦兹力的方向，同样可以用左手定则判断. 正电荷所受洛伦兹力的方向与B、v的关系可用图3-4-3表示，若带电粒子是负电荷，则受力方向与正电荷的受力方向相反.

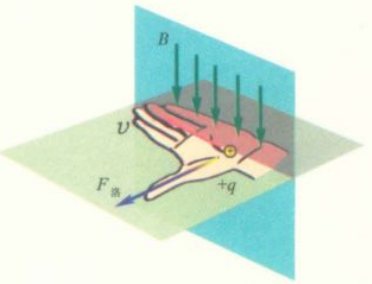


图3-4-3 左手定则

带电粒子在磁场中的运动

一个带电粒子，在磁感应强度为B的匀强磁场中以速度v垂直磁场方向开始运动，这个粒子在洛伦兹力作用下将做什么运动呢?

左手定则告诉我们，带电粒子在匀强磁场中运动所受的洛伦兹力，方向垂直于磁场方向和粒子运动方向所决定的平面.

微信公众号：电子课本大全

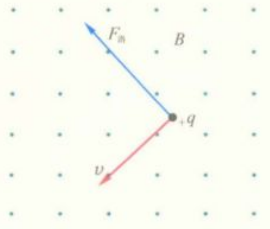


图3-4-4　一个运动的正的点电荷受到的洛伦兹力

也就是说，洛伦兹力的方向总跟粒子运动的速度方向垂直. 所以洛伦兹力对运动电荷不做功，它不会改变带电粒子速度的大小，只改变粒子运动的方向.

如图3-4-4所示，一个带正电荷q的带电粒子，在磁感应强度为B的匀强磁场中，以垂直于磁场的方向运动，粒子所受洛伦兹力大小恒为$F_{洛}=qvB$，方向总跟速度方向垂直. 我们通过力学的学习已经知道，如果一个物体只受一个垂直于运动方向且大小不变的力的作用，并且这个力始终在同一个平面内，则这个物体将做匀速圆周运动. 因此，带电粒子在匀强磁场中必定做匀速圆周运动，圆周运动的轨道平面与磁场方向垂直，其向心力就来自洛伦兹力.

带电粒子在匀强磁场中做圆周运动的轨道半径R和周期T是怎样的呢?

由力学中质点做匀速圆周运动的规律，我们知道其圆周半径由向心力和线速度大小决定. 设圆周半径为R，根据牛顿第二定律和向心力公式，有

$$F_{洛}=qvB=m\frac{v^2}{R}$$

带电粒子在洛伦兹力作用下做圆周运动的半径是

$$R=\frac{mv}{qB}$$

这一半径跟带电粒子的质量和速度大小成正比，跟匀强磁场的磁感应强度和粒子所带电荷量成反比.

带电粒子做圆周运动的周期是

$$T=\frac{2\pi R}{v}=\frac{2\pi m}{qB}$$

由公式可以看出带电粒子做匀速圆周运动的周期与运动速度、半径无关，这是带电粒子在匀强磁场中受洛伦兹力运动的一个特点.

【例题】电子以速率$v=3.0\times10^7\,\mathrm{m/s}$射入$B=1.0\,\mathrm{T}$的匀强磁场中，速度方向与磁场方向垂直. 试求该电子所受的洛伦兹力的大小，并与它在地面上受到的重力作比较.

【解】查物理常量表可知，电子的电荷量为$e=-1.6\times10^{-19}\mathrm{C}$，质量为$m=9.1\times10^{-31}\,\mathrm{kg}$.

该电子受到的洛伦兹力大小为

$$F_{洛}=evB=1.6\times10^{-19}\mathrm{C}\times3.0\times10^7\,\mathrm{m/s}\times1.0\,\mathrm{T}$$
$$=4.8\times10^{-12}\,\mathrm{N}$$

微信公众号：电子课本大全

而电子在地面受到的重力大小

$$G = mg = 8.9 \times 10^{-30}\ \mathrm{N}$$

电子受到的洛伦兹力与重力之比为

$$\frac{F_{洛}}{G} = 5.4 \times 10^{17}$$

可见 $F_{洛}$ 远远大于 G，因此在有关问题中重力可忽略.

练习与评价

1. 若电子运动的速率 $v_0 = 3.0 \times 10^6$ m/s，匀强磁场的磁感应强度 $B = 0.10$ T，请计算在图3-4-5所示各种情况下运动电子受到的洛伦兹力的大小，并在图中标明洛伦兹力的方向(图中 $\theta = 30°$).

F_A=_____，F_B=_____，F_C=_____，F_D=_____，F_E=_____.

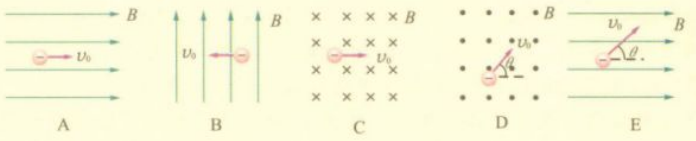


图 3-4-5

2. 运动电荷进入匀强磁场，且只受磁场作用时，下列说法正确的是（　　）

A. 运动电荷若受磁场力，磁场力一定对运动电荷不做功

B. 运动电荷若受磁场力，磁场力大小一定不变

C. 运动电荷的速度大小一定不变，方向一定改变

D. 运动电荷的动能一定不变

3. 电子以 1.6×10^6 m/s 的速度垂直射入 $B = 2.0 \times 10^{-4}$ T 的匀强磁场中，求电子做圆周运动的轨道半径和周期.

4. 质子（${}_1^1\mathrm{H}$）和α粒子（${}_2^4\mathrm{He}$）的电荷量比 $q_1 : q_2 = 1 : 2$，质量比 $m_1 : m_2$ 为 1 : 4，它们以相同速度进入同一匀强磁场中，在垂直磁场的平面内做匀速圆周运动，则它们的轨道半径 $R_1 : R_2$ 为_____，它们的运动周期 $T_1 : T_2$ 为_____.

*5. 关于电场、磁场与电荷之间的关系，四位同学之间有不同的认识. 甲认为：电荷在电场中和在磁场中一定受场的作用力；乙认为：电荷在电场中一定受电场力的作用，电荷在磁场中不一定受磁场力作用；丙认为：电荷周围一定有电场和磁场；丁认为：电荷周围一定有电场，不一定有磁场. 你认为哪种认识对，哪种认识不对，说说理由.

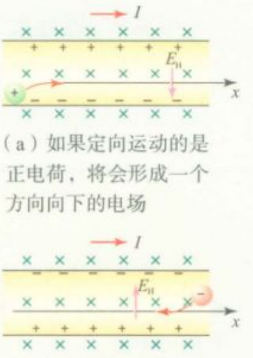
微信公众号：电子课本大全

发展空间

课外阅览

霍尔效应

考虑处于一均匀磁场中的一段载流导体，如图 3-4-6 所示，由于电流的方向沿 x 轴正方向，故正的自由电荷沿 x 轴正方向运动，而负的自由电荷沿相反方向运动．每种电荷受洛伦兹力作用都将朝导体的上表面偏转．现在我们假设只有带正电的自由电荷存在，那么导体的上表面将带正电，下表面因缺乏正电荷将带负电．由于这些正、负电荷的分离与积累，在导体内就会形成一电场．这种现象首先是由当时还是大学生的霍尔（E.H.Hall，1855—1929）于 1879 年发现的，称为霍尔效应．



（a）如果定向运动的是正电荷，将会形成一个方向向下的电场

（b）如果定向运动的是负电荷，将会形成一个方向向上的电场

图 3-4-6

利用霍尔效应可以制成多种测量器件，如测量磁感应强度的特斯拉计、测量电流的电流计、测量电功率的瓦特计和测量磁场方向的磁罗盘等．

1980 年，冯·克利青（K.von Klitzing）发现了量子霍尔效应，这是凝聚态物理学领域最重要的发现之一，因此荣获了 1985 年度的诺贝尔物理学奖；而斯托默（H.L.Stormer）、崔琦（D.C.Tsui）和劳夫林（R.B.Laughlin）因具有分数电荷激发的新型量子流体的发现（即所谓分数量子霍尔效应）获得了 1998 年度的诺贝尔物理学奖．

物理在线

上网收集资料或查阅图书，收集关于地磁场与极光的关系的资料，了解带电粒子在电场和磁场中偏转的原理及其在科学技术中的应用．

5 洛伦兹力的应用

我们已经知道，可以利用电场力的作用控制带电粒子运动．现在我们也可以利用磁场对带电粒子的洛伦兹力作用来控制带电粒子的运动．

微信公众号：电子课本大全

利用磁场控制带电粒子运动

设在真空条件下，匀强磁场限定在一个圆形区域内，该圆形的半径为r，磁感应强度大小为B，方向如图3-5-1所示．一个初速度大小为v_0的带电粒子（m，q），沿磁场区域的直径方向从P点射入磁场，粒子在洛伦兹力作用下，在磁场中以半径R绕O'点做匀速圆周运动，从Q点射出磁场时，速度大小仍是v_0，但速度方向已发生了偏转．设粒子射出磁场时的速度方向与射入磁场时相比偏转了θ角，由图中所示的几何关系可以看出

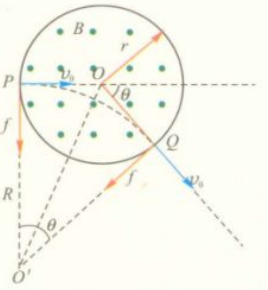


图3-5-1　带电运动粒子在磁场中的偏转

$$\tan\frac{\theta}{2}=\frac{r}{R}$$

式中匀速圆周运动的半径$R=\dfrac{mv_0}{Bq}$，所以上式可写为

$$\tan\frac{\theta}{2}=\frac{qBr}{mv_0}$$

可见，对于一定的带电粒子（m、q一定），可以通过调节B和v_0的大小来控制粒子的偏转角度θ.

利用磁场控制粒子的运动方向的特点是：只改变带电粒子的运动方向，不改变带电粒子的速度大小.

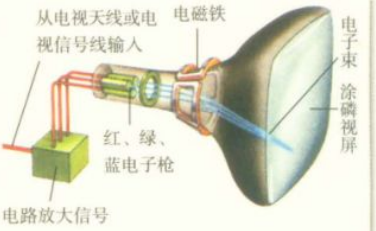


图3-5-2　显像管中的电子束在磁场中的偏转

质谱仪

电荷量、质量是带电粒子的两个最基本的参量，带电粒子的电荷量与质量之比，叫做比荷（也叫荷质比）．荷质比的测定对研究带电粒子的组成和结构具有重大意义．测定带电粒子荷质比的仪器叫做**质谱仪**（mass spectrometer）．J.J.汤姆孙正是通过巧妙的实验测量了阴极射线粒子的荷质比，从而发现了电子．图3-5-3是一种质谱仪的原理图．离子源（在狭缝S_1上方，图中未画出）产生的带电粒子经狭缝S_1与S_2之间的电场加速后，进入由P_1和P_2两平行金属板产生的场强为E的匀强电场，及与电场方向垂直、磁感应强度为B_1的匀强磁场区域．再通过狭缝S_3垂直进入磁感应强度为B_2的匀强磁场区域，在洛伦兹力的作用下带

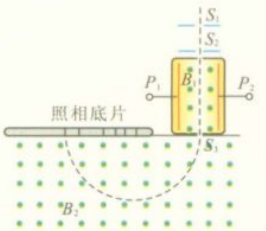


图3-5-3　质谱仪中S_2与S_3之间的装置又叫做速度选择器，它要求$E\perp B_1$且E方向向右时，B_1垂直纸面向外；若E反向，B_1也必须反向

微信公众号：电子课本大全

电粒子做半个圆周运动后打到底片上并被接收，形成一个细条纹，测出条纹到狭缝S_3的距离L，就得出了粒子做圆周运动的半径 $R=\frac{L}{2}$，根据$R=\frac{mv}{B_2q}$，只要知道带电粒子的速度v和磁感应强度B_2，就可以得出粒子的荷质比.

质谱仪在化学分析、原子核技术中有重要应用. 例如，利用质谱仪可检测化学物质或核物质中的同位素和不同成分. 质谱仪的发明者阿斯顿（F.M.Aston）因此荣获1922年度诺贝尔化学奖.

讨论交流

在对图3-5-3装置的分析中，我们已经知道q/m与L存在一一对应关系的前提是v一定. 仪器的结构S_1、S_2、S_3在同一直线上，粒子进入B_2区域之前必须做直线运动.

请讨论下面的问题：

1. 在S_1、S_2之间粒子的受力方向与它的运动方向是否在同一直线上？

2. 粒子经S_2进入并能从S_3穿出，它在S_2、S_3之间的运动是直线运动吗？

3. 粒子在S_2、S_3之间受几个力作用？（重力不计）

4. P_1、P_2之间的电场方向是从左向右还是从右向左？为什么？

5. 粒子在通过S_2、S_3之间做匀速直线运动的条件是什么？写出它的受力平衡关系_____.

6. 通过以上分析你知道怎样控制进入B_2区的粒子的速度吗？

带电粒子所受的电场力与洛伦兹力平衡，粒子才能沿直线S_2S_3进入B_2区. 即

$$qE=qvB_1$$

就是要求$v=\frac{E}{B_1}$. 只要适当改变E和B_1的大小就可以使不同速度的粒子进入B_2区.

微信公众号：电子课本大全

对于选定的一种粒子速度 $v=\frac{E}{B_1}$，就可以测出这种粒子的荷质比

$$\frac{q}{m}=\frac{v}{B_2R}=\frac{2E}{B_1B_2L}$$

上式中 E、B_1、B_2 和 L 都可以预先设定或通过实验测定，带电粒子的荷质比也就可以得出. 如果再知道粒子的电荷量，粒子的质量也就测出来了.

● 回旋加速器

1928 年前后，人们纷纷寻找加速粒子的方法. 当时实验室需要很高的电压才能通过直线加速使粒子获得较大的速度，可是电压越高，对绝缘的要求也越高，否则仪器就会被击穿.

1932 年美国物理学家劳伦斯（E.O.Lawrence，1901—1958）巧妙地利用带电粒子在磁场中的运动特点，发明了**回旋加速器**（cyclotron），解决了这个问题.

回旋加速器的工作原理如下.

回旋加速器的核心部分为 D 形盒，它的形状有如扁平的盒子沿直径剖开的两半，每半个都像字母“D”的形状，因而得名，如图 3-5-4（a）所示. 两 D 形盒之间留有窄缝，中心附近放置离子源（如质子、氘核或 α 粒子源等）. 在两 D 形盒间接上交流电源（其频率的数量级为 10^6 Hz），于是在缝隙里形成一个交变电场. 由于电屏蔽效应，在每个 D 形盒内部的电场很弱，可以忽略. D 形盒装在真空容器里，整个装置放在巨大的电磁铁两极之间的强大磁场中，磁场的方向垂直于 D 形盒的底面.

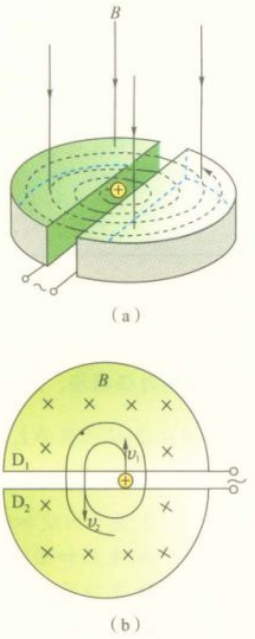


图 3-5-4　回旋加速器原理

现在我们来考虑离子运动的情况，如图 3-5-4（b）所示. 设想正当 D_2 的电势较高的时候，一个带正电的离子从离子源发出，它在缝隙中被加速，以速率 v_1 进入 D_1 内部的无电场区. 在这里，离子在磁场的作用下做半径为 $R_1=\frac{mv_1}{qB}$ 的圆周运动，经过半个圆周后回到缝隙. 如果在此期间缝隙间的电场恰好反向，粒子通过缝隙时又被加速，以较大的速率 v_2 进入 D_2 内部的无电场区，在其中做半径为

微信公众号：电子课本大全

$R_2=\frac{mv_2}{qB}$的圆周运动，绕过半个圆周后再次回到缝隙. 虽然$R_2>R_1$，但绕过半个圆周所用的时间都是一样的，它们都等于带电粒子做圆周运动的周期的一半，即$\frac{T}{2}=\frac{\pi m}{qB}$. 所以尽管粒子的速率与圆周运动半径一次比一次增大，只要缝隙中的交变电场以$T=\frac{2\pi m}{qB}$的不变周期往复变化，便可保证离子每次经过缝隙时受到的电场力都是使它加速的. 这样，不断被加速的离子将沿着螺线轨迹逐渐趋于D形盒的边缘，在这里达到预期的速率后，用特殊的装置将它们引出.

设D形盒的半径为R，则离子在回旋加速器中获得的最终速率为$v_m=BR\frac{q}{m}$，它受到磁感应强度B和D形盒半径R的限制. 要使离子获得更高的能量，就需要加大加速器的电磁铁的磁性和D形盒的直径. 10 MeV以上的回旋加速器中磁场B的数量级为1 T，D形盒的直径在1 m以上.

练习与评价

1. 如图3-5-5所示，一带正电粒子，从a点以垂直磁场方向的速度v_0进入磁感应强度为B的匀强磁场，沿着半圆acb运动，从b处飞出磁场，已测得半圆直径ab长度为l，则磁场方向为_____，带电粒子荷质比$\frac{q}{m}$为_____.

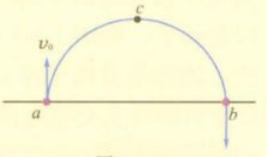


图3-5-5

2. 关于回旋加速器，下述说法中正确的是（　　）.

A. 电场和磁场交替使带电粒子加速

B. 电场的作用是使带电粒子加速，动能增大

C. 磁场的作用是使带电粒子在磁场中回旋，获得多次被加速的机会

D. D形盒的半径越大，射出的带电粒子获得的能量越多

3. 长方体金属块放在匀强磁场中，有电流通过金属块，如图3-5-6所示，则下面说法中正确的是（　　）.

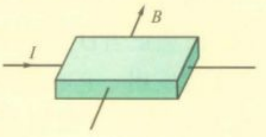


图3-5-6

A. 金属块上、下表面电势相等

B. 金属块上表面电势高于下表面电势

C. 金属块上表面电势低于下表面电势

D. 无法确定上、下表面电势高低

微信公众号：电子课本大全

发展空间

课外阅览

磁流体发电机

磁流体发电机是目前世界上正在研究开发的一种新型发电机.

磁流体发电的原理如图 3-5-7 所示. 把等离子体喷入磁场，带电粒子就会发生偏转，正离子聚集到 B 板，自由电子聚集到 A 板，A、B 间产生一定的电势差，就成为磁流体发电机. 在 A、B 之间接上负载 R，就可产生电流. 磁流体发电是一项新兴技术，1 MW 的磁流体发电机已进行运行试验.

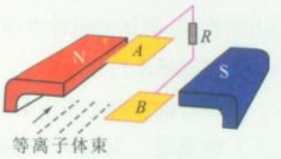


图3-5-7 磁流体发电机原理示意图



图 3-5-8 磁流体发电机试验台

把气体加热到一定温度，气体原子中一部分电子脱离原子核的束缚而发生电离，产生大量的带电的自由电子和正离子. 由于气体中正、负电荷总数相等，高温气体虽含有大量自由电子和正离子，但总体上不显电性，这种气体叫**等离子体**.

高能加速器和对撞机

在对物质微观结构的研究中，研究的物质结构越深入，所需要的能量就越高. 高能加速器和高能粒子对撞机可以把微观物质如氢原子核(质子)和带电的基本粒子如电子等加速到接近真空中的光速，使它们具有很高的能量，像枪弹一样进入所要研究的微观物质或粒子内部，或将这些微观物质轰击成碎片，以便研究其内部构造. 但是，如何控制带电的高能粒子束，使它们能沿着预定的轨道去轰击目标或者使两束带电粒子沿着预定的轨道相互碰撞(称为对撞)? 这就需要磁场了. 因为磁场对携带电荷的运动粒子存在洛伦兹力，只要调节产生洛伦兹力的磁场的强弱和方向，就可以控制带电粒子的运动方向.

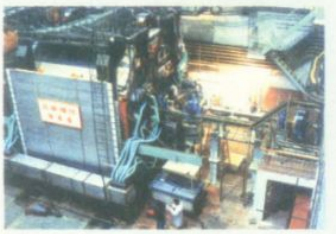


图 3-5-9 正负电子对撞机的探测器

图 3-5-9 所示是中国科学院高能物理研究所的北京正负电子对撞机的探测器——北京谱仪，它也是利用磁场来控制电子、正电子和其他带电粒子的运动.

物理在线

通过上网或查阅有关资料，了解电视显像管偏转线圈的结构，和同学讨论控制电子束偏转的原理.

微信公众号：电子课本大全

本章小结

1. **磁场** 磁体和电流在周围空间产生磁场. 磁场对处在磁场内的磁体和通电导线有磁场力的作用. 磁体和磁体之间、磁体和通电导线之间、通电导线和通电导线之间的相互作用，都是通过磁场来传递的.

2. **磁场的方向** 规定某点磁场的方向，就是位于该点的小磁针N极所受磁场力的方向.

3. **磁感线** 人们用来形象描述磁场分布的有方向的曲线叫做磁感线. 磁感线上任意一点的切线方向和该点的磁场方向一致. 磁感线密处磁场强，磁感线疏处磁场弱. 电流周围存在磁场，通电直导线和通电线圈周围的磁场方向可以用右手螺旋定则进行判定.

4. **磁感应强度** 磁感应强度 B 是定量描述磁场强弱和方向的物理量. 在磁场中，垂直于磁场方向的通电导线所受的安培力 F 跟电流 I 和导线长度 L 的乘积 IL 的比值，叫磁感应强度，即 $B=\dfrac{F}{IL}$. 某点磁感应强度的方向就是该点磁场的方向.

5. **磁通量** 穿过磁场中某一面积 S 的磁感线条数 Φ，叫做穿过这个面的磁通量，简称磁通. 在磁感应强度为 B 的匀强磁场中，穿过与磁场方向垂直、面积为 S 的平面的磁通量是 $\Phi=BS$. 磁感应强度 B 又叫做磁通密度.

6. **安培力** 磁场对处于场内的通电导线的作用力叫做安培力. 导线与磁场方向垂直时，安培力 $F=ILB$. F 的方向始终垂直于 B、I 所在的平面. 可用左手定则来确定.

7. **洛伦兹力** 磁场对运动电荷的作用力叫做洛伦兹力. 当电荷的运动方向与磁场方向垂直时，洛伦兹力 $F=qvB$. F 的方向可以用左手定则来确定. 由于 $F\perp v$，洛伦兹力对运动电荷不做功. 带电粒子在匀强磁场中做圆周运动时，洛伦兹力提供向心力；圆周运动的半径与带电粒子速度成正比；而圆周运动的周期与运动速度及半径无关.

微信公众号：电子课本大全

习 题

1. 试比较带电粒子受到的磁场力与电场力有哪些区别.

力	洛伦兹力	电场力
受力条件		
力的方向		
力的大小		
力的作用效果		

2. 关于安培力和洛伦兹力，下列说法中正确的是（　　）.

A. 洛伦兹力是磁场对运动电荷的作用，安培力是磁场对通电导线的作用

B. 洛伦兹力的方向与带电粒子运动方向有关，安培力的方向与电流的方向有关

C. 两种力的方向均可用左手定则判断

D. 洛伦兹力对运动电荷一定不做功，安培力是所有运动电荷所受洛伦兹力的总和，因此安培力也不做功

3. 电荷量为 $-q$ 的粒子，在匀强磁场中运动，下面说法中正确的是（　　）.

A. 只要速度大小相同，所受的洛伦兹力就相同

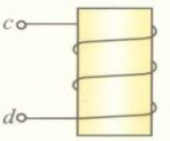
B. 如果把 $-q$ 改为 $+q$，且速度反向、大小不变，则洛伦兹力大小、方向均不变

C. 只要带电粒子在磁场中运动，它一定受到洛伦兹力作用

D. 带电粒子受到的洛伦兹力越小，则该磁场的磁感应强度越小



4. 一金属直棒 MN 两端接有细导线，悬挂于线圈上方，MN 与线圈轴线处于同一竖直平面内，如图所示，为使 MN 垂直纸面向外运动可以（　　）.



（第 4 题图）

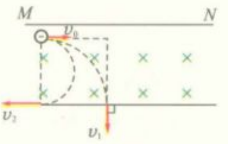
A. 将 a、c 端接在电源正极，b、d 端接在电源负极

B. 将 b、d 端接在电源正极，a、c 端接在电源负极

C. 将 a、d 端接电源正极，b、c 端接电源负极

D. 将 b、c 端用导线连接，a 端接电源正极，b 端接电源负极

5. 氘核（${}_1^2\mathrm{H}$）和 α 粒子（${}_2^4\mathrm{He}$）垂直 B 进入同一匀强磁场做圆周运动，已知它们的质量比 $m_1:m_2=2:4$，电荷量比 $q_1:q_2=1:2$. 轨道半径之比为 $R_1:R_2=1:2$，则它们进入磁场时的速率比 $v_1:v_2=$_____，它们做圆周运动的周期比 $T_1:T_2=$_____.



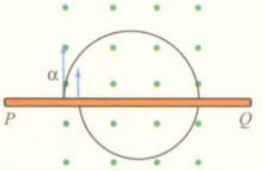
（第 6 题图）

6. 如图所示，两电子沿 MN 方向从同一处先后沿垂直于磁场的方向射入两平行平面间的匀强磁场区，它们分别以 v_1、v_2 的速率射出磁场，则 $v_1:v_2=$_____，通过匀强磁场所需时间之比 $t_1:t_2=$_____.

7. 图中 PQ 是匀强磁场里的一片薄金属片，其平面与磁场方向平行，一个粒子从某点以与

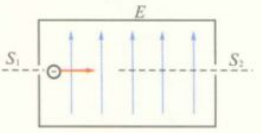
微信公众号：电子课本大全

PQ 垂直的速度射出，动能是 E，该粒子在磁场中的运动轨迹如图所示. 今测得它在金属片两边的轨道半径之比是 10 : 9，若在穿越金属板过程中粒子受到的阻力大小及电荷量恒定，则该粒子每穿过一次金属片，动能减少了_____，该粒子最多能穿过金属板_____次.



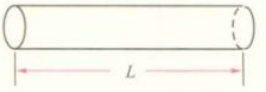
（第 7 题图）

8. 如图所示，在两平行板间有电场强度为 E 的匀强电场，方向向上，一带电荷量为 q 的负离子（重力不计），垂直电场方向以速度 v 从缝 S_1 飞入两板间，为了使粒子沿直线飞出缝 S_2，应在垂直纸面内加一个什么方向的磁场？其磁感应强度为多大？



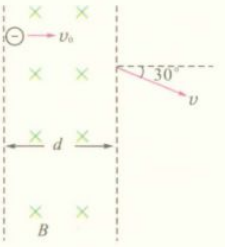
（第 8 题图）

9. 如图所示，一段静止的长为 L 的通电导线，设每米导线中有 n 个自由电荷，每个自由电荷的电荷量都为 q，它们定向移动的速度为 v，现加一匀强磁场，其方向垂直于导线，磁感应强度为 B，求磁场对这段导线的安培力 F 的大小（表达式）.



（第 9 题图）

10. 如图所示一束电子（电荷量为 e）以速度 v_0 垂直于磁场方向射入磁感应强度为 B，宽度为 d 的匀强磁场中，穿越磁场的速度方向与电子原来入射方向的夹角是 30°，则电子的质量是多大？穿越磁场的时间是多少？



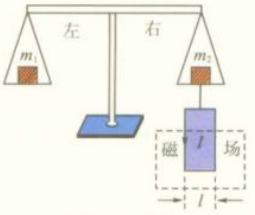
（第 10 题图）

11. 如图所示天平可以用来测定磁感应强度，天平的右臂下面挂有一个矩形线圈，宽为 l，共 N 匝，线圈的下部悬在匀强磁场中，磁场方向垂直纸面，线圈中通有电流 I（方向如图）时，在天平左、右两边加上质量分别为 m_1、m_2 的砝码，天平平衡；当电流反向（大小不变）时，右边再加上质量为 m 的砝码后，天平重新平衡.

（1）判断磁场方向是垂直纸面向里，还是向外？说明理由；

（2）求磁感应强度 B 的大小；

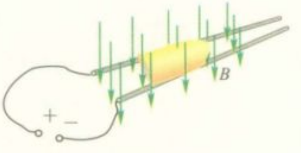
（3）仅仅使磁场反向和仅仅使电流反向是否等效？



（第 11 题图）

12. 根据磁场会对载流导体产生作用力的原理，人们研究出一种新型的发射炮弹的装置——电磁炮. 其原理如图所示，把待发射的炮弹放在匀强磁场中的两平行导电导轨上，给导轨通以大电流，炮弹作为一个载流导体在磁场作用下沿导轨加速运动，并以某一速度发射出去. 如果想提高这种电磁炮的发射速度，请从理论上说明可采取的方法.

13. 上网或查阅有关资料，通过对“场”的学习，加深对于世界的物质性和物质多样性的认识.



（第 12 题图）

微信公众号：电子课本大全

附 录

中英文索引

（名词后面的数字是它第一次出现的页码）

A

安培力 Ampère force 86

B

闭合电路欧姆定律 Ohm law of closed circuit 57
并联 parallel connection 50

C

磁场 magnetic field 81
磁感线 magnetic induction line 81
磁感应强度 magnetic induction 89
磁通量 magnetic flux 91
串联 series connection 50

D

点电荷 point charge 7
电场 electric field 11
电场力 electric field force 11
电场强度 electric field strength 12
电场线 electric field line 13
电动势 electromotive force 56
电功率 electric power 64
电荷量 electric quantity 3
电流 current 42
电容 capacitance 30
电容器 capacitor 29
电势 electric potential 20
电势差 electric potential difference 20
电势能 electric potential energy 18
电阻 resistance 43
多用电表 multimeter 68

H

恒定电流 steady current 43
回旋加速器 cyclotron 101

J

检验电荷 test charge 11
焦耳定律 Joule law 65
焦耳热 Joule heat 65
静电场 electrostatic field 11
静电感应 electrostatic induction 5
静电力常量 electrostatic force constant 8

K

库仑定律 Coulomb law 8

L

路端电压 terminal voltage 57
洛伦兹力 Lorentz force 94

N

内电阻 internal resistance 56

O

欧姆定律 Ohm law 43

Y

匀强磁场 uniform magnetic field 90
匀强电场 uniform electric field 14

Z

直流 direct current 43
质谱仪 mass spectrometer 99
自由电荷 free electric charge 42
自由电子 free electron 42

微信公众号：电子课本大全