国家教材委员会专家委员会审核通过
2019

普通高中教科书

物理

必修

第三册



教育科学出版社
ESPH

普 通 高 中 教 科 书

物理

必修

第三册



教育科学出版社

·北 京·

主　　编　陈熙谋　吴祖仁
本册主编　陈熙谋　洪安生
本册编者　（按姓氏笔画排序）
边　良　朱行建　刘　锋　肖伟华
张福林　张增常　陶昌宏　蓝坤彦

出 版 人　李　东
责任编辑　莫永超
版式设计　李勤学　郝晓红
责任校对　贾静芳
责任印制　叶小峰

普通高中教科书

物理　必修　第三册

WULI　BIXIU

教育科学出版社出版发行
（北京·朝阳区安慧北里安园甲9号）
邮编：100101
市场部电话：010-64989009　010-64891796（传真）
编辑部电话：010-64989537　010-64989519（传真）
总编室电话：010-64981290　出版部电话：010-64989487
编辑部邮箱：wuli@esph.com.cn
网址：http：//www.esph.com.cn
各地新华书店经销
广西广大印务有限责任公司印装
开本：890毫米×1240毫米　1/16　印张：10.75
2020年2月第1版　　2023年1月第7次印刷

ISBN 978-7-5191-2159-4
定价：12.10元
图书出现印装质量问题，本社负责调换。

目录



第一章　静电场

1. 电荷　电荷守恒定律 …… 2
2. 库仑定律 …… 8
3. 静电场　电场强度和电场线 …… 14
4. 电场力的功　电势能 …… 21
5. 电势　电势差 …… 27
6. 电势差与电场强度的关系 …… 34
7. 静电的利用和防护 …… 39
8. 电容器　电容 …… 45
9. 带电粒子在电场中的运动 …… 52

反思·小结·交流 …… 58

本章复习题 …… 59



第二章　电路及其应用

1. 电流　电压　电阻 …… 62
2. 实验：练习使用多用电表 …… 67
3. 电阻定律　电阻率 …… 69
4. 实验：测量金属的电阻率 …… 75
5. 实验：描绘*I*-*U*特性曲线 …… 79
6. 电源的电动势和内阻
   闭合电路欧姆定律 …… 84
7. 实验：测量电池的电动势和内阻 …… 91
8. 焦耳定律　电路中的能量转化 …… 95
9. 家庭电路 …… 102

反思·小结·交流 …… 110

本章复习题 …… 111



第三章　电磁场与电磁波初步

1. 磁场　磁感线 …… 114
2. 磁感应强度　磁通量 …… 119
3. 电磁感应现象及其应用 …… 125
4. 电磁波的发现及其应用 …… 132
5. 微观世界的量子化 …… 138

反思·小结·交流 …… 141

本章复习题 …… 142



第四章　能源与可持续发展

1. 能量　能量守恒定律 …… 144
2. 能源 …… 149
3. 环境保护与可持续发展 …… 154

反思·小结·交流 …… 159

本章复习题 …… 159

附录　长度的测量及其测量工具的选用 …… 160

附录　中英文索引 …… 167

后记 …… 168



第一章

静 电 场

主题一　电荷间的相互作用

- 电荷　电荷守恒定律
- 库仑定律

主题二　电场的描述

- 静电场　电场强度和电场线
- 电场力的功　电势能
- 电势　电势差
- 电势差与电场强度的关系

主题三　静电的应用

- 静电的利用和防护
- 电容器　电容
- 带电粒子在电场中的运动

疾风暴雨，电闪雷鸣，此时如果你正走在田间小路上，会有什么样的危险？在北方寒冷的冬季，你匆匆归来，抬手伸向家门的金属把手，是否也曾被突如其来的电击所惊吓？在黑暗的房间里脱下毛衣时，你是否看到过电火花闪耀，并听到“啪啪”的声响？这些现象有联系吗？

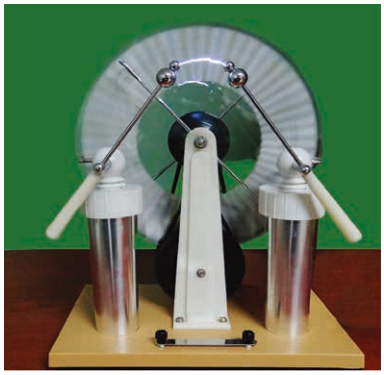
它们都是静电现象。我们如果掌握了静电的相关知识，就可以防止它对人的伤害，并使它为人类服务。广泛使用的静电复印机、用于保护环境的静电除尘器……都是对静电的利用。

下面就让我们系统地认识静电吧！

1 电荷 电荷守恒定律

本章首页的图片，是天空中的云层向大地放出闪电瞬间的情形。放电的同时，伴随着巨大的声响，即所谓的“电闪雷鸣”。

自古以来，人们对闪电十分敬畏，并由此形成了许多神话传说。现在人们已经清楚，这是天空中的静电现象。在科技馆里，可以模拟出令人震撼的闪电过程；而在学校的实验室里，我们也可以利用感应起电机制造出小型的“人工闪电”，如图1-1-1所示。其实，如图1-1-2和图1-1-3所示的我们在初中已经学习过的摩擦起电现象，跟天空中的轰雷掣电，在本质上是相同的。



▲ **图1-1-1** 实验室里的“人工闪电”



▲ **图1-1-2** 用丝绸摩擦过的玻璃棒能吸引轻小物体



▲ **图1-1-3** 把彩色塑料袋剪成细长条并捆紧，用手捋几下，就成了一束“塑料花”

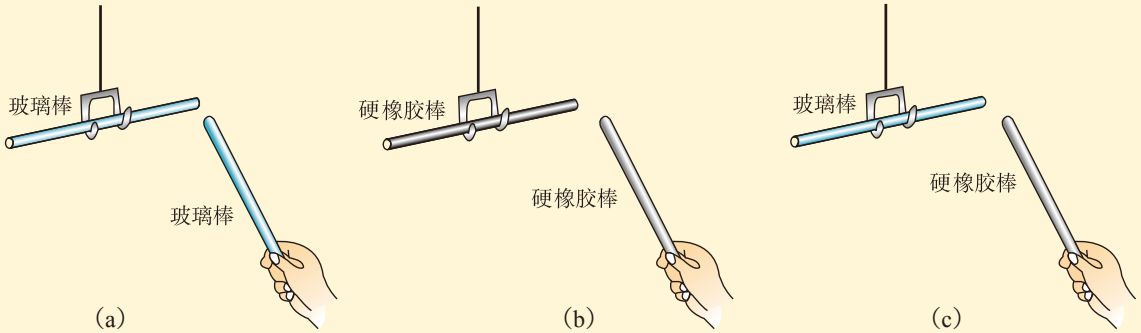
摩擦起电 两种电荷

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

4. 把用丝绸摩擦过的玻璃棒及用毛皮摩擦过的硬橡胶棒分别悬挂起来，用任意一个带电体分别接近它们，你能看到带电体既与玻璃棒排斥又与硬橡胶棒排斥的情况吗？这说明了什么？说说你的看法。

大量电荷相互作用的实验表明，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。电荷的多少叫作**电荷量**（electric quantity），常简称为**电荷**。在国际单位制中，电荷量的单位是库仑，简称库，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。

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

◎**正负电荷**

美国科学家富兰克林（B. Franklin，1706—1790）在1747年把用丝绸摩擦过的玻璃棒所带的电荷叫作**正电荷**，把用毛皮摩擦过的硬橡胶棒所带的电荷叫作**负电荷**。

◎**元电荷**

一个电子所带电荷量的绝对值为$1.6\times10^{-19}C$，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。

摩擦起电的解释

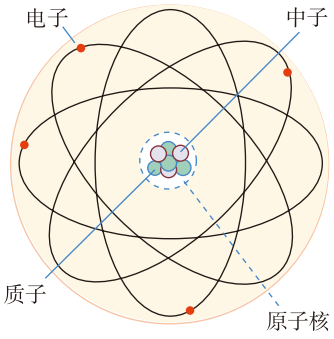
讨论交流

丝绸和玻璃棒（毛皮和硬橡胶棒）本来都不带电，经过相互摩擦就带电了，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？如果是，那么是怎样变化的？谈谈你的看法。

我们已经知道，物质是由原子组成的，原子由带正电的原子核和带负电的电子构成，如图1-1-5所示。一般情况下，原子核所带电荷总量与电子所带电荷总量相等，因此物体通常对外不显电性。

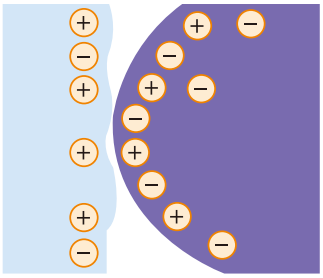


▲ **图1-1-5**　原子模型

◎导体和绝缘体

常见物体中，容易导电的物体称为**导体**，很不容易导电的物体称为**绝缘体**。而金属导体原子的外层电子很容易脱离原子核的束缚，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，基本不存在自由电子。绝缘体也常称为“电介质”或“介质”。

不同种类的两个不带电的物体相互摩擦之后会带电，是因为两物体相互摩擦时，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，如图1-1-6所示。同样的道理，得到电子的物体就显示出带负电，而且相互摩擦后两个物体所带的电荷必然等量异号。



▲ 图1-1-6 电荷的转移

电荷守恒定律

大量实验表明，**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）。

发展空间·课外阅览“电荷守恒定律的现代表述”。

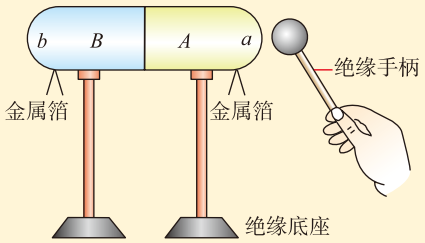
电荷守恒定律是自然界的基本规律之一。事实证明，它对现代科学实践领域也具有重大意义。

静电感应

活动

将一对固定在绝缘底座上的枕形导体 A 与 B 紧紧靠在一起，这时它们都不带电，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，如图1-1-7所示，观察枕形导体 A 与 B 下方的金属箔，你会看到什么现象？



▲ 图1-1-7 静电感应

2. 保持 B 和 A 接触，移开带电导体球，你会看到什么现象？

3. 恢复带电导体球的位置（即靠近 a 端但不接触），将枕形导体 B 与 A 分开，观察枕形导体 A 与 B 下方的金属箔，你会看到什么现象？

4. 如果此时再移开带电导体球，你估计会发生什么现象？做一做，你的设想对吗？

5. 将枕形导体 A 与 B 再紧靠在一起（接触），你又看到什么现象？试着用原子结构模型解释以上现象。

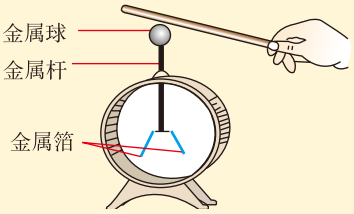
在上面的实验中，当带电导体球靠近不带电的枕形导体时，由于同种电荷相互排斥、异种电荷相互吸引，导体中可以自由移动的电荷将会重新分布，以至于枕形导体靠近带电导体球的 a 端将带上与带电导体球电性相反的电荷，而远离带电导体球的 b 端带上与带电导体球电性相同的电荷，这种现象称为**静电感应**（electrostatic induction）。保持带电导体球不动，将枕形导体分开后，导体 A 与导体 B 就会带上等量的异种电荷。

观察思考

如图1-1-8所示的装置叫作验电器，观察它的结构，了解其工作原理，思考下列问题：

1. 不带电的验电器的两个金属箔片是合拢的，当带电体靠近而没有接触它的金属小球时，两箔片就会张开，这是为什么？

2. 怎样借助于验电器判断上一个“活动”中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1-1-8**　把用丝绸摩擦过的玻璃棒靠近验电器的金属小球，也能使验电器下面的金属箔片张开

当带正电的玻璃棒靠近验电器的金属球时，会发生静电感应，金属杆上端的金属球带负电，下端的金属箔片带正电，两片带正电的金属箔片由于相互作用而张开。

将带正电的玻璃棒接触验电器的金属球，验电器就带上了正电，再将待检验的带电体靠近验电器的金属球，

如果它的金属箔片张开角度变大，则它带的是正电荷，反之，则带的是负电荷。

自我评价

1. 甲、乙两个金属小球相互作用。已知甲球带正电荷，在下面两种情况下，判断乙球是否带电，如果带电，带哪种电荷？

（1）两小球相互排斥；

（2）两小球相互吸引。

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. 如图1-1-7所示，带电小球靠近（不接触）枕形导体的一端，下面的金属箔片都张开，这种现象叫作“静电感应”，而不能叫作“感应起电”，为什么？

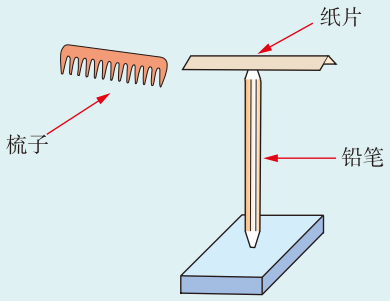
4. 使18世纪电学家们感到困惑的一个现象是所谓的“吸引—接触—排斥”现象：将带电棒移近一悬挂在绝缘线上的轻质导体小球，可观察到球被吸引，若小球与棒接触后，它就立即被弹开。你如何解释这一现象？

发展空间

实验室

1. 自制一个静电验电器：把一张薄纸片剪成长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1-1-9）。铅笔尖要稍插入纸片中，但不要戳破它，使纸片能自由转动。将一把梳子在头发或羊毛织品上摩擦，使之带电，并将它靠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. 中国科技馆中有一个实验项目：实验员站在绝缘地板上，用手摸范德格拉夫起电机（Van der Graaff generator）的金属球，随着对地电压的升高，她的头发会竖起来（图1-1-10）！你知道这是为什么吗？



▲ 图1-1-9　自制验电器



▲ 图1-1-10

课外阅览

电荷守恒定律的现代表述

近代物理实验发现，在一定条件下，带电粒子可以产生和湮没。例如，一个光子在一定条件下可以产生一个正电子和一个负电子；一对正、负电子相遇时可以同时湮没，转化为光子。不过在这些情况下，带电粒子总是成对产生或湮没，两个粒子电荷量相等但电性相反，而光子不带电，所以电荷的代数和仍保持不变。因此，电荷守恒定律现在的表述是：**一个与外界没有电荷交换的系统，电荷的代数和保持不变**。它是物理学中重要的基本规律之一。

带电体为什么能吸引绝缘体

绝缘体内部基本没有可以自由移动的电荷，每个分子也是电中性的，但分子内的正、负电荷分布一般不均匀，使得分子的一端显正电性，另一端显负电性。平时这些分子是杂乱无章的，对外不显电性。把它放在带电体旁边时，绝缘体内的分子在带电体的作用下按照一定的规则排列，使得靠近带电体的一端带有与带电体电性相反的电荷，从而产生相互吸引的作用（这与铁质物体在磁体附近被磁化的现象相似）。

感应起电机是怎么起电的

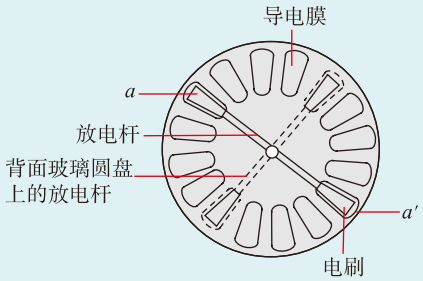
如图1-1-11所示是一台手摇感应起电机，它的核心部件是两个玻璃圆盘，套在同一根轴上。手柄通过传动装置带动两个圆盘朝相反的方向旋转。圆盘靠外一侧贴有若干对扁圆形的导电膜，两边各有一根放电杆，放电杆的上端制成球形。使两根放电杆上端的两个金属小球分开一定的距离，用手摇动手柄，很快就会看到两金属小球间发生火花放电，同时会听到“啪啪”声。你知道它是怎么起电的吗？



▲ **图1-1-11**　手摇感应起电机

图1-1-12所画出的是感应起电机的一个玻璃圆盘，在它的外侧有一根金属导电杆，两端安有由软金属丝制成的电刷，它固定在与水平面成45°角的位置上，并与另一盘面的金属导电杆垂直。金属导电杆把玻璃圆盘上的两个导电膜（图中的 a 和 a'）连接在一起。由于对面玻璃圆盘上与 a 和 a' 相对的导电膜上带有很少量的电荷［这是由于大气中有许多带电粒子（例如宇宙射线粒子等），它们与导电膜的

碰撞使导电膜带少量电荷］，于是导电膜 a 和 a' 发生静电感应，电荷重新分布。当圆盘转过一个小角度时，a 和 a' 跟电刷分离，不再通过金属导电杆连接在一起，这样它们就分别带上了等量异种电荷。等它们转过90°角时，就会使对面那一对由导电杆连接的导电膜发生静电感应，经过不断地旋转，所有导电膜都带上了电荷。至于这些电荷是怎么积累并转移到两个放电小球上去的，我们将在后面的章节中介绍。



▲ 图1-1-12 感应起电机的原理

2 库仑定律

电荷间的相互作用力遵从什么规律呢？受牛顿力学取得的巨大成就的启迪，物理学家们开始认真思考和探究电荷间的相互作用力的问题。

探究影响点电荷之间相互作用力的因素

讨论交流

两个带电体之间存在相互作用力，力的大小可能和哪些因素有关呢？

你可能会认为，跟带电体的形状、所带电荷的多少以及电荷的分布等都有关系。面对如此复杂的问题，我们该怎么研究呢？

实际问题一般比较复杂。物理学研究问题时，往往抓住主要矛盾，忽略次要因素，建立理想化的物理模型，这是物理学的重要研究方法。在力学中我们已经建立了质点这个理想模型，在电学中是否也可以建立类似的理想模型呢？

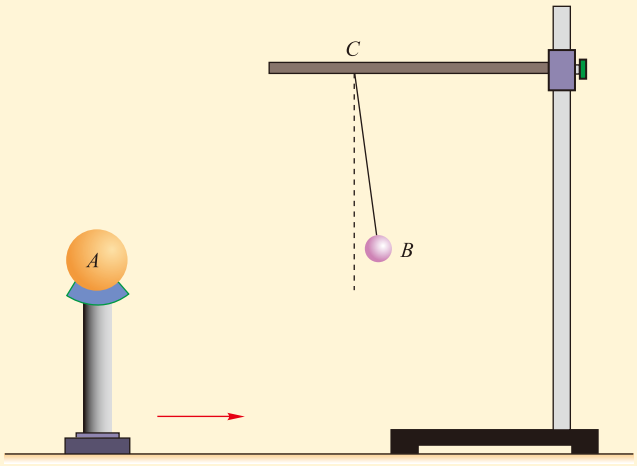
当一个带电体本身的大小比它到其他带电体的距离小很多，以至在研究它与其他带电体的相互作用力时，该带电体的形状、大小以及电荷在其上的分布状况均可忽略，可将它看作一个带电的点，这样的电荷称为**点电荷**（point charge）。

点电荷这个模型忽略的次要因素是什么？突出的主要因素是什么？

这样，研究带电体间的相互作用力，便可以从研究两个点电荷的相互作用力开始。

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 用绝缘丝线悬挂在玻璃棒上的 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，慢慢靠近带电小球 B。



▲ **图1-2-1**　两个带正电小球的相互作用

1. 球 A 向右移动的过程中，小球 B 的悬线逐渐偏离竖直方向，这说明小球 B 所受作用力的大小在逐渐变化。你观察到的 A、B 间距与悬线偏离竖直方向的偏角是怎样的一种关系？

2. 保持 A、B 之间的距离不变，改变球 A 的电荷量，你观察到的 Q_A 与悬线偏离竖直方向的偏角是怎样的关系？保持球 A 的电荷量不变，改变 B 的电荷量，你观察到的 Q_B 与偏角是怎样的关系？这表明 A、B 之间的相互作用力与两个带电体的电荷量是怎样的关系？

这个实验中，两个带电球体能看作点电荷吗？

实验探究结果表明：带电体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（图 1-2-2）于 1785 年在前人工作的基础上，通过实验分析，特别是利用灵敏的扭秤（图 1-2-3）进行了



▲图 1-2-2 库仑(C.A.Coulomb, 1736—1806)，法国物理学家

精确的研究，归纳得到在真空中的两个静止点电荷之间相互作用力的规律。这一规律现在一般表述为：**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。**这就是**库仑定律**（Coulomb law）。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

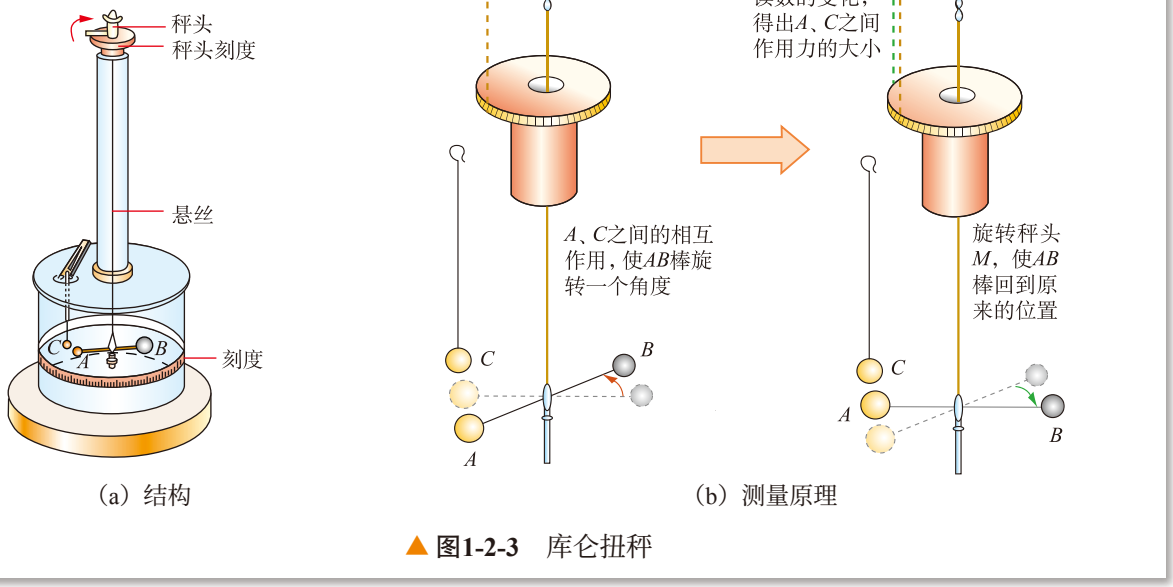
$$F = k\frac{Q_1 Q_2}{r^2}$$

式中的 k 是一个比例常量，叫作**静电力常量**（electrostatic force constant）。在上式中如果各个物理量都采用国际单位制单位，即电荷量的单位用库仑（C），力的单位用牛顿（N），距离的单位用米（m），则由实验得出

$$k = 9.0\times10^9\ \mathrm{N\cdot m^2/C^2}$$

电荷之间的这种作用力叫作静电力或库仑力。从库仑定律我们还可以得出，点电荷之间的静电力遵守牛顿第三定律。

库仑扭秤只能研究同种电荷间的斥力作用与距离的关系，而不能研究两个异种电荷间的引力作用，为此，库仑还做了电摆的实验。电摆的原理比较复杂，这里不作介绍。



（a）结构　　（b）测量原理

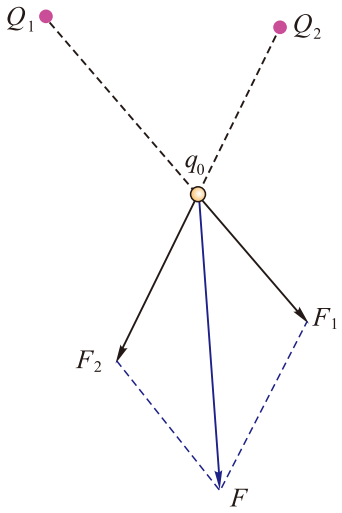
▲图1-2-3 库仑扭秤

库仑定律的初步应用

库仑定律讨论的是两个点电荷之间的静电力。当空

间中有两个以上的点电荷时，怎么确定一个点电荷所受到的静电力呢？

事实表明：两个点电荷之间的作用力不因第三个点电荷的存在而有所改变。因此，两个或两个以上点电荷对某一个点电荷的作用力，等于各点电荷单独对这个点电荷的作用力的矢量和。如图 1-2-4 所示，Q_1、Q_2 对 q_0 的静电力分别为 F_1、F_2，q_0 所受到的力为 F_1 和 F_2 的矢量和 F，这称为静电力的叠加。



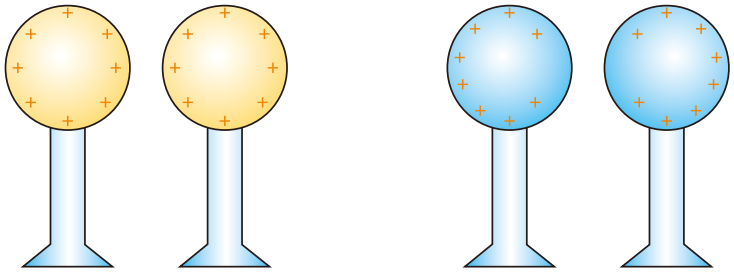
▲ **图1-2-4**　静电力的叠加

讨论交流

在研究两个电荷均匀分布的带电介质球体的相互作用时，如果二者间距离不满足远大于球直径的条件，这两个球形带电体能否看作点电荷？

在研究两个带电导体球之间的相互作用时，如果二者距离不满足远大于球直径的条件，这两个球形带电导体，能否看作点电荷？为什么？

研究证明，如果两个介质球带有电荷，并且电荷均匀分布，不论是否满足二者间的距离远大于球的直径，都可以看作电荷集中于球心处的点电荷。两个带电的导体球，如果不满足二者间的距离远大于球的直径的条件，就不能看作电荷集中于球心处的点电荷，这是因为导体上有很多自由电荷，它们之间发生相互作用，使电荷在球体上的分布不均匀，如图1-2-5所示。



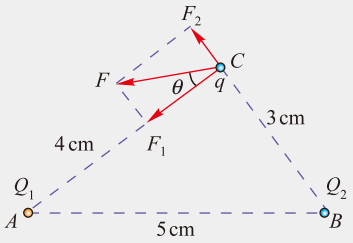
（a）两个介质球上电荷均匀分布　　（b）两个导体球上电荷由于相互作用而分布不再均匀

▲ **图1-2-5**　相互靠近的带电介质球与导体球

例题示范

问题 在真空中，两点电荷A、B的电荷量分别为$Q_1=-9\times10^{-5}\text{C}$和$Q_2=2.7\times10^{-5}\text{C}$，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$q=1.0\times10^{-9}\text{C}$，求点电荷$C$受到的静电力。

分析 根据题意画出如图1-2-6所示的示意图，由几何关系可知，AC与BC垂直。点电荷C同时受到点电荷A和点电荷B的静电力F_1和F_2，力的方向如图所示。只要分别求出F_1和F_2，它们的合力就是点电荷C受到的静电力。



▲ 图1-2-6

解 点电荷C受点电荷A的静电力大小为

$$F_1=k\frac{Q_1q}{r_1^2}=9.0\times10^9\times\frac{9\times10^{-5}\times1.0\times10^{-9}}{(4\times10^{-2})^2}\text{N}\approx0.51\text{N}$$

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

$$F_2=k\frac{Q_2q}{r_2^2}=9.0\times10^9\times\frac{2.7\times10^{-5}\times1.0\times10^{-9}}{(3\times10^{-2})^2}\text{N}\approx0.27\text{N}$$

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受到的静电力大小为

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

方向与CA边夹角为θ，如图1-2-6所示，且

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

拓展 两个不能看作点电荷的带电体，可以把它们分成很多小的部分，只要分得足够小，每一部分都可以看成点电荷，这两个带电体的相互作用力就是这些点电荷相互作用力的矢量和。这样原则上就能求任意两个带电体间的相互作用力了。

自我评价

1. 关于库仑定律，下面的说法中正确的是（　　）

A. 库仑定律只适用于很小的电荷，因为只有很小的电荷才是点电荷

B. 根据$F=k\frac{Q_1Q_2}{r^2}$，当两电荷间的距离趋近于零时，它们之间的静电力将趋于无穷大

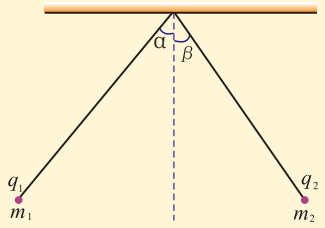
C. 若点电荷 q_1 的电荷量大于点电荷 q_2 的电荷量，则 q_1 对 q_2 的静电力大于 q_2 对 q_1 的静电力

D. 两个点电荷之间的库仑力遵从牛顿第三定律

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，则两电荷之间的作用力是原来两电荷之间作用力的几倍？

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1-2-7所示，两条不等长的细线一端拴在同一点上，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_2，两小球处于同一水平面时恰好静止，且 $\alpha>\beta$，则造成 α、β 不相等的原因是什么？



▲ 图1-2-7

5. 已知氢原子核的质量为 1.67×10^{-27} kg，电子的质量为 9.1×10^{-31} kg，它们分别带有正电和负电，电荷量都是一个元电荷，电子与原子核的距离为 0.53×10^{-10} m。试分别计算它们之间的万有引力以及库仑力的大小，并说明为什么我们处理微观粒子问题时可以忽略万有引力的影响。

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里斯特利（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。富兰克林请普里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，普里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，普里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。"但是普里斯特利没有做进一步的研究，也没有对电的斥力做出猜测。

1769年，英国爱丁堡大学的约翰·罗比森（John Robinson，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。卡文迪许指出：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±3.1）×10^{-16}。

感悟 · 启迪

- 相互作用是认识物质世界的窗口，是研究问题的切入点。
- 人们的认识总是要经过从简单到复杂、从表面到本质、从定性到定量的漫长而曲折的过程。
- 对电现象的认识就是如此：远古时代，人们就根据相互作用而认识到电的存在。到了18世纪，通过对大量的电荷间相互作用的观察和实验，人们认识到世界上有且只有两种电荷；同种电荷相互排斥，异种电荷相互吸引。又过了几十年，第一个关于电荷间相互作用的定量规律——库仑定律才问世，从此电学的研究进入了定量的阶段。

3 静电场 电场强度和电场线

在初中的学习中，我们已经知道磁体周围存在着磁场，磁体间是通过磁场相互作用的。那么，电荷周围是否也存在着类似的场——“电场”呢？

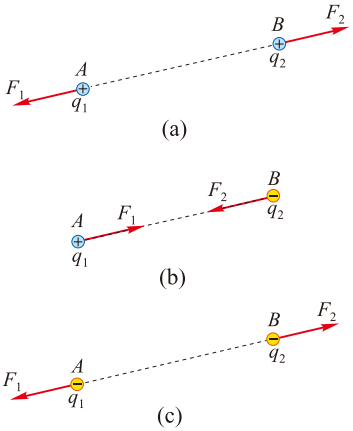
静电场

讨论交流

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，这种力的作用叫作接触作用。

然而，电荷之间的相互作用却可以发生在不接触的带电体之间，那么这个力是怎样产生的呢？

英国物理学家法拉第认为，电荷在它周围空间产生**电场**（electric field），电荷与电荷之间的相互作用力就是通过电场而发生的。具体地说，如图 1-3-1 所示，带电体 A 在其周围产生电场，位于此电场中的带电体 B 受到带电体 A 的电场施加的力；同样，带电体 B 在其周围也产生电场，位于此电场中的带电体 A 也受到了带电体 B 的电场施加的力。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**　电荷周围产生电场，电荷间通过电场发生相互作用

现代物理实验和实践证明了场的存在，它是物质存在的一种形态。场和由实物粒子构成的物质一样，存在着相互作用，并且都具有能量。但二者也有很大的不同，例如由实物粒子构成的物体占有一定的空间，有具体的位置，场则弥散在空间中；两个物体不能同时占据空间的同一位置，而不同的场可以同时存在于同一空间。

电场强度

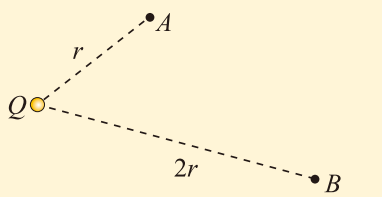
对于电场这种物质，如何认识它？如何描述它？

电场对置于其中的电荷有力的作用，因此可以从相互作用的角度去认识电场。为了研究问题的方便，需要在电场中引入一个电荷。这个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，即不影响原电场的分布；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 点放置带不同量正电的检验电荷，若电荷



▲ **图1-3-2**　点电荷 Q 产生的电场

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，并填入以下两表。

检验电荷的电荷量 q	q_0	$2q_0$	$3q_0$	…	nq_0
检验电荷在 A 点受力大小 F	F_0				
电场力与电荷量的比 $\frac{F}{q}$					

检验电荷的电荷量 q	q_0	$2q_0$	$3q_0$	…	nq_0
检验电荷在 B 点受力大小 F'	F_0'				
电场力与电荷量的比 $\frac{F'}{q}$					

关于“能不能用检验电荷所受到的电场力来表征某点电场的性质”的问题，你有答案了吗？为什么？你打算怎样表征电场在该点的性质？

如果电场是由某个带电体产生的，那么该带电体所带的电荷也常称为**场源电荷**，或简称源电荷。

可以看出，检验电荷所受的电场力，不仅与它在电场中所处位置有关，还与它本身所带的电荷量有关。因此，不能直接用检验电荷所受的电场力表示各处电场的性质。实验表明，在电场中的同一点（如与场源电荷距离为 r 的 A 点），检验电荷所受的电场力 F 与该电荷的电荷量 q 的比 $\frac{F}{q}$ 是一个跟 q 无关的量，它仅由该电荷在电场中的位置确定，反映了该点电场的性质。在电场中的另一点（如与场源电荷距离为 $2r$ 的 B 点），检验电荷所受的电场力 F' 与该电荷的电荷量 q 的比 $\frac{F'}{q}$ 跟 $\frac{F}{q}$ 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，表征了电场的性质。

研究表明，任何带电体所产生的电场，在某一位置的检验电荷所受电场力与电荷量的比表征了电场在该点的性质。我们把这个比称为该点的**电场强度**（electric field strength），简称**场强**。用 E 表示电场强度，则有

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

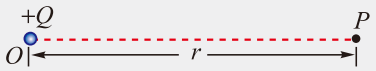
在国际单位制中，电场力的单位是牛（N），电荷量的单位是库（C），所以电场强度的单位是牛（顿）每库

（仑），符号为 N/C。

电场强度是一个矢量，电场中某一点场强的数值等于单位电荷在该点所受电场力的大小，它的方向就是位于该点的正电荷受力的方向。

例题示范

问题　如图1-3-3所示，真空中有一个电荷量为+Q的点电荷位于图中的O点，P点与它的距离为r，请根据库仑定律及场强定义推导出P点场强大小的表达式，并确定P点电场强度的方向。



▲ 图1-3-3

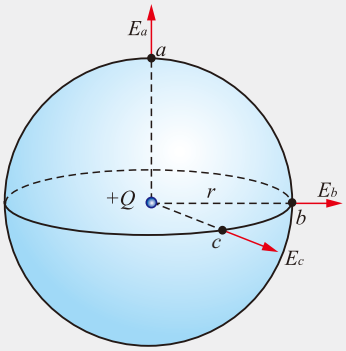
分析　设想引入一个检验电荷 q，把它放在 P 点，可以根据库仑定律得出它受到的静电力 F，再根据电场强度的定义，即可得出 P 点的场强大小和方向。

解　若电荷量为 $+q$ 的检验电荷放在 P 点，根据库仑定律，它受到的电场力大小为$F=k\dfrac{Qq}{r^2}$，方向沿OP的方向。

根据电场强度的定义，P 点处的电场强度大小为$E=\dfrac{F}{q}=k\dfrac{Q}{r^2}$，其方向为带正电的检验电荷受到的电场力的方向，即沿 OP 方向。

拓展　1. 从上面的解答过程不难看出，我们虽然用到了检验电荷 q，但点电荷 $+Q$ 所产生电场在 P 点的场强大小与检验电荷 q 无关，它的大小只与场源电荷的电荷量 Q 及 P 点到场源电荷的距离 r 有关。

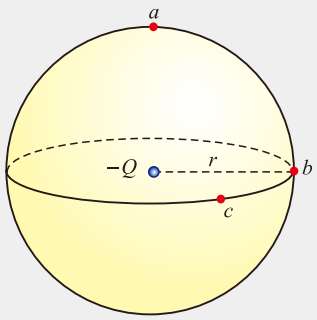
2. 与点电荷+Q的距离为r的点都在以Q为球心，以r为半径的球面上，如图1-3-4所示，所有这些点的场强方向都沿半径方向向外，场强大小都相等，为$E=k\dfrac{Q}{r^2}$。



▲ 图1-3-4

与点电荷 -Q的距离为 r 的点也都在以 -Q 为球心，以r 为半径的球面上，如图1-3-5所示。所有这些点的场强方向都沿半径方向向里，场强大小都相等，为$E=k\dfrac{Q}{r^2}$。

图1-3-5标出了a、b、c三点，你可以试着画出这三点的场强方向。

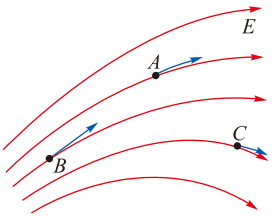


▲ 图1-3-5

电场线

讨论交流

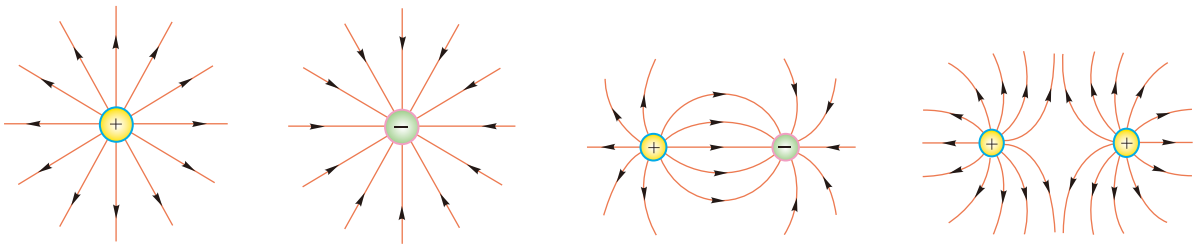
一般来说，电场中各点的场强大小各不相等，场强方向也各不相同，我们有没有办法形象地描述它们呢？



▲ **图1-3-6** 电场线

在初中我们学习过磁场，磁场中各点的方向一般各不相同，可以用磁感线来描述。同样我们也可以用电场线来形象地描述电场。

世界上第一个想到这个问题的是19世纪的英国物理学家法拉第。他创造性地在电场中引入**电场线**（electric field line），用它形象地描述电场。电场线是这样一种线：它每一点的切线方向都与该点的场强方向一致，图1-3-6中画出了某电场局部的几条电场线，*A*、*B*、*C*三点的场强方向如箭头所示，它们都是电场线在该点的切线方向。电场线的疏密反映了不同位置场强的大小，*A*、*B*、*C*三点相比较，*B*点的场强最大而*C*点的场强最小。图1-3-7为几种典型电场的电场线在平面上的分布情况。



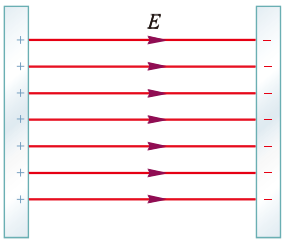
（a）正点电荷　（b）负点电荷　（c）两个等量异种电荷　（d）两个等量正电荷

▲ **图1-3-7** 几种典型电场的电场线分布

从电场线的分布可以看出：

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；在没有电荷的地方，电场线不能中断；任意两条电场线不能相交，因为同一个位置电场强度的方向只能有一个。

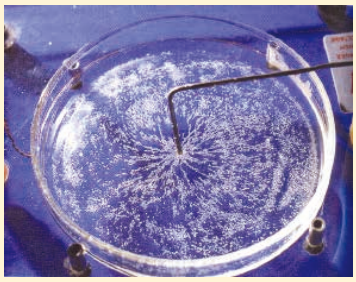
在图1-3-8中，彼此靠近的带等量异种电荷的平行金属板之间的电场线（除边缘部分外）是相互平行且均匀分布的，表明各点场强的大小和方向都相同，这样的电场叫作**匀强电场**（uniform electric field）。



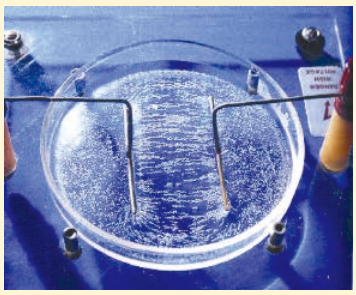
▲ **图1-3-8**　匀强电场

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，就像我们在初中用铁屑来模拟磁感线一样。



▲ **图1-3-9**　模拟点电荷电场的电场线



▲ **图1-3-10**　模拟匀强电场的电场线

用3～5 mm厚的透明有机玻璃制成一个框架，中间放置一个培养皿，两边架子上有两个接线柱能固定电极，用铜箔及直铁丝制成点电荷电极和平行板电极。

1. 模拟点电荷电场的电场线（图1-3-9）

（1）向培养皿内倒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1-3-10）

（1）换用两个平行板电极，两极之间的距离为板长的$\frac{1}{4}$～$\frac{1}{3}$，两极分别与起电机的两个电极连接。

（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。

自我评价

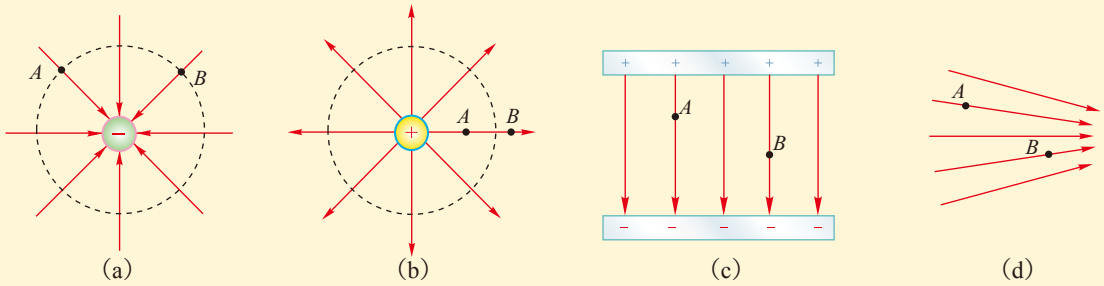
1. 把一个电荷量为10^{-8} C的带负电的点电荷放在电场中的某点，它受到的电场力大小为3×10^{-6} N，方向向东。求该点电场强度的大小和方向。

2. 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 所受电场力大小是多少？此时 Q 在 P 点产生的电场的场强大小是多少？方向如何？

（2）若在 P 点不放任何检验电荷，则 Q 产生的电场在 P 点的场强大小是多少？方向又如何？

3. 图1-3-11是某四个电场中的电场线分布图，其中 A、B 两点的电场强度相同的是哪一个或几个电场？



▲ 图1-3-11

4. 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？

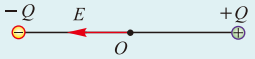
发展空间

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，空间中某一点的场强等于各个电荷单独存在时该点的场强的矢量和。这个结论叫作电场的叠加原理。

例如，真空中有电荷量分别为 $+Q$、$-Q$ 的两个点电荷，二者相距为 r，两点电荷连线中点 O 处的电场强度的大小和方向如何？



▲ 图1-3-12

我们知道，两个点电荷的电场在 O 处的场强大小相等，方向相同，根据电场的叠加原理可得 $E=k\dfrac{Q}{\left(\frac{r}{2}\right)^2}+k\dfrac{Q}{\left(\frac{r}{2}\right)^2}=\dfrac{8kQ}{r^2}$，该处的场强方向指向负电荷，如图 1-3-12 所示。

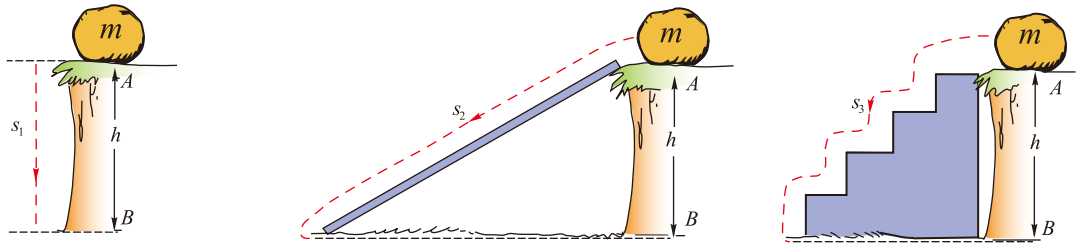
利用点电荷产生的电场强度的公式和电场叠加原理，原则上我们可以确定带电体周围任意点的电场强度的大小和方向。

4　电场力的功　电势能

上一节中，我们研究了电场对电荷的作用力，这是电场与实物相互作用的一种表现。我们定义了电场强度，这是从相互作用的角度去认识电场。下面我们将研究在电场中移动电荷时电场力的做功情况，从能量的角度去认识和描述电场。

电场力做功的特点

我们知道，当物体的高度发生变化时，重力会对物体做功，对同一物体，重力做功与路径无关，只与物体起点和终点的高度差有关。如图1-4-1所示，把质量为m的物体沿着不同路径从A移到B，重力做功是相等的。在静电场中移动电荷，电场力也要做功，电场力做功是否也具有这样的特点？



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

▲ **图1-4-1**　重力做功与路径无关

讨论交流

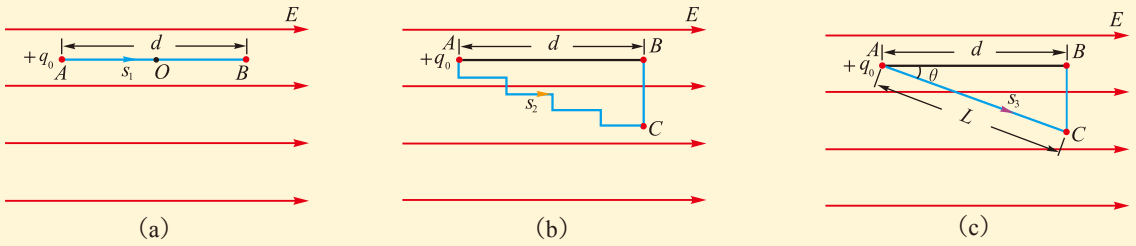
图 1-4-2（a）（b）（c）分别表示匀强电场（场强为 E）中的 $+q_0$ 电荷沿不同的路径从 A 运动到 B 的情形。

1. 沿直线 s_1 从 A 到 B；

2. 沿折线 s_2 从 A 经过 C 到 B；

3. 沿折线 s_3 从 A 经过 C 到 B。

三种情况下电场力做的功相等吗？



▲ **图1-4-2** 沿不同的路径移动电荷

电荷$+q_0$在匀强电场中受到的电场力是恒力，其大小为 $F = q_0E$，方向沿AB方向。电荷沿直线 s_1 从 A 到 B 的过程中，电场力做功 $W_1=q_0Ed$。电荷沿折线 s_2 从 A 到 B 的过程中，凡移动路线与电场线平行的部分，电场力做功，而与电场线垂直的部分，电场力不做功，因此这个过程中电场力做的总功 $W_2= W_1 = q_0Ed$。电荷沿折线 s_3 从 A 经 C 再到 B 的过程中，AC 段与电场线成一角度，而 CB 段与电场线垂直，只有沿 AC 段运动时电场力做功，不难看出，电场力做的功 $W_3=W_1=q_0Ed$。

即使电荷沿着更复杂的曲线运动，我们也可以把运动路径分成很多小段，每一小段都可以看作一段斜线。可以证明，只要起始位置是 A、终止位置是 B，电场力做的功总等于 q_0Ed。这就是说，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。

更深入的研究和实验证实，上述结论对任意静电场都适用。

可见，在静电场中，电场力做功与重力做功情况相似，由此我们可以把静电场和重力场加以类比，从能量的角度去认识静电场。

◎**科学思维·类比**

如果甲、乙两个对象之间存在着某些方面的相似，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。这样的推理过程称为**类比**，它是人们认识客观世界的一种思维方法。

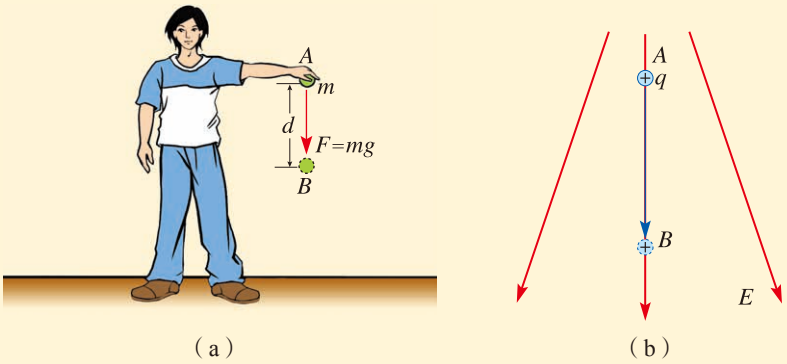
利用类比推理得到的结果需要接受实验的检验，而且特别要注意两对象之间可能存在的本质差异。

电势能

讨论交流

如图1-4-3（a）所示，在地面附近，物体从 A 运动到 B 的过程中，由于重力做功，物体的动能增加，增加的动能从何而来？

如图1-4-3（b）所示，在静电场中，正电荷从 A 运动到 B 的过程中，由于电场力做功，电荷的动能增加，增加的动能从何而来？



▲ **图1-4-3**　电场力做功与重力做功的比较

在地面附近，物体的运动可以认为是在重力场中运动，重力做正功，物体的动能增加，同时重力势能减少，是重力势能转化为了动能。与此类似，在静电场中，正电荷从 A 运动到 B 的过程中，电场力做正功，电荷的动能增加，增加的动能应该是由某种势能转化而来的。这种势能叫作静电势能，简称**电势能**（electric potential energy），用符号 E_p 表示。

电势能是放入电场中的电荷与电场组成的系统共有的，它既与电荷有关，也与电场有关。例如，电荷 q 位于电场中A点时具有的电势能为 E_{pA}，位于 B 点时具有的电势能为 E_{pB}；而另一个电荷 q' 位于电场中A点时具有的电势能为 E'_{pA}，位于 B 点时具有的电势能为 E'_{pB}。

电势能与重力势能一样是标量，没有方向。它的单位也与重力势能相同，在国际单位制中，它的单位是焦耳，简称焦，用符号表示为 J。

“物体的重力势能”是一种简单通俗的说法，实际上是指物体与地球组成的系统的重力势能。

同样，“电荷的电势能”实际上是指电荷与电场组成的系统的电势能。

电场力做功与电势能变化的关系

讨论交流

在图1-4-3（a）中，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？

在图1-4-3（b）中，在静电场中从 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？

在地球附近，重力做的正功等于物体重力势能的减少，如果重力做负功，则负功的多少等于物体重力势能的增加。与此类似，在静电场中移动电荷，电场力做功，电荷的电势能也会发生变化，可以用电势能的变化表示这一过程电场力所做的功。设电荷 q 在电场 A、B 两点所具有的电势能分别为 E_{pA} 和 E_{pB}，把该电荷从 A 点移到 B 点，电场力对电荷所做的功为 W_{AB}，则

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

可以看出，把电荷从 A 点移到 B 点，如果电场力做正功，电荷的电势能减少；反之，如果电场力做负功，电荷的电势能增加。

电势能与重力势能都是势能，但电势能不属于机械能。

重力势能具有相对性，它的大小与零势能位置的选择有关。类似地，电荷在静电场中的电势能也具有相对性。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。例如，如果选择 B 点为参考点，电荷在 B 点的电势能 $E_{pB}=0$，则有

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

这表示，电荷在电场中某点的电势能的大小等于将电荷从该点移到零电势能位置电场力所做的功。在物理学中，通常取无穷远处或大地为零电势能的位置。

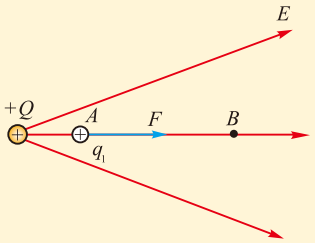
发展空间·课外阅览“两个点电荷相互作用的电势能为什么要取无穷远处为零点”。

尽管静电场与重力场有很多相似之处，但是二者有很大的区别。例如，在同一电场中，在固定的两点间移动一个正电荷和移动一个负电荷，电势能的变化是相反的。

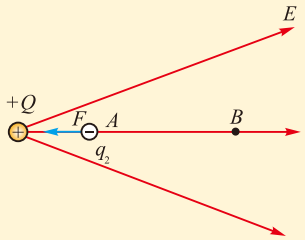
讨论交流 | 电场力做功，电势能如何变化？

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 点时的电势能大还是小？

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 点时的电势能大还是小？



▲ 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

在正电荷形成的电场中，把正电荷 q_1 从 A 点沿电场线方向移到 B 点，电场力做正功，电势能减少；把负电荷 q_2 从 A 点沿电场线方向移到 B 点，电场力做负功，电势能增加。

例题示范

问题　某电场中有A、B、C三点，把一个电荷量为 q 的正电荷从 A 点移到 B点的过程中，电场力做功 5×10^{-9}J，再从 B 点移到 C 点，电场力做功 -8×10^{-9}J。

（1）在从 A 点经过 B 点移到 C 点的整个过程中，该电荷的电势能是增加还是减少了？变化量是多少？

（2）以 B 点为电势能零点，该电荷位于 A 点以及 C 点的电势能各是多少？

（3）如果把电荷量为 $-q$ 的电荷从 A 点经过 B 点移到 C 点，该电荷的电势能是增加还是减少了？变化量是多少？

分析　电场力的功与电势能都是标量，相加即为求代数和。电场力所做的功等于电势能的减少量，求出电场力所做的总功，就知道电势能如何变化了。

解　（1）整个过程中，电场力做的总功为

$$W = W_1 + W_2 = 5\times10^{-9}\text{J} + (-8\times10^{-9}\text{J}) = -3\times10^{-9}\text{J}$$

这说明过程中该电荷的电势能增加了3×10^{-9}J。

（2）以 B 点为电势能零点，该电荷位于 A 点时的电势能为 $E_{pA}=5\times10^{-9}\text{J}$，位于 C 点时的电势能为 $E_{pC}=W_{CB}=-W_{BC}=8\times10^{-9}\text{J}$。

（3）如果被移动的电荷由 q 变成 $-q$，所受的电场力方向与正电荷所受的电场力方向相反，位移相同时电场力做的功与原来的数值相等而正负号相反，整个过程中电场力所做的总功为 $W'=-W=3\times10^{-9}\text{J}$，即电荷的电势能减少了 $3\times10^{-9}\text{J}$。

拓展 关于电势能，有两点需要注意：①电势能是电场与电荷组成的系统共有的，同一个电场中的同一个位置，放置正电荷和负电荷，电势能的正负号是相反的。②电势能与电势能零点的选取有关，因此它只具有相对意义，即相对于电势能零点而言具有多少电势能。但电荷在电场中某两点间移动的过程中，电势能的变化与电势能零点的选取无关，它与在这两点间移动的过程中电场力所做的功数值相等。

自我评价

1. 重力做功与静电力做功，有哪些相同的地方？

2. 重力势能是谁具有的？它的变化由什么决定？电势能是谁具有的？它的变化由什么决定？

3. 电荷量为 q 的正电荷位于电场中 A 点时，具有的电势能为 $6.0\times10^{-8}\text{J}$；移到 B 点后，具有的电势能变为 $-4.0\times10^{-8}\text{J}$。这个过程中，电场力所做的功是多少？如果把电荷量为 $-2q$ 的点电荷放到 A 点，具有的电势能是多少？把它从 A 点移到 B 点电场力要做多少功？

4. 电场中的一条电场线上有 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？

发展空间



课外阅览

两个点电荷相互作用的电势能为什么要取无穷远处为零点

一个电荷位于另一个点电荷产生的电场中，系统具有电势能，也可以看作是这两个点电荷相互作用的电势能。

设这两个点电荷的电荷量分别为 q_1 和 $-q_2$，当它们之间的距离为无穷远时，它们之间的相互作用力为零。若我们以这时的电势能为零，使它们间的距离靠近，这个过程中相互作用的静电引力要做功，做功的数值等于减少的电势能。由于这个过程中电荷间的相互作用力是变力，计算电场力的功需要用到高等数学的知识，在这里我们不去真正进行计算，而是直接

列出所得到的结果：在这两个点电荷从相距无穷远到相距 r 的过程中，电场力做的功为

$$W_{\text{电场力}}=k\frac{q_1q_2}{r}$$

则得到这两个点电荷相距为r时的电势能为

$$E_{\text{p}}=-k\frac{q_1q_2}{r} \qquad ①$$

如果不以二者相距无穷远时的电势能为零，而是以二者相距为 b 时的电势能为零，那么二者相距无穷远时的电势能就等于$E_{\text{p无穷远}}=k\frac{q_1q_2}{b}$，二者相距为$r$时的电势能为

$$E_{\text{p}}'=-k\frac{q_1q_2}{r}+k\frac{q_1q_2}{b} \qquad ②$$

①式与②式相比较，显然①式要简单得多。正因为如此，在涉及有关两个点电荷相互作用的电势能时，都以二者相距无穷远处为电势能零点。

任意两个带电体，在相距很远时，一般都可以看作两个点电荷，因此我们才说：一般情况下，讨论两个带电体相互作用的电势能时，都以二者相距无穷远处为电势能零点。

5　电势　电势差

通过上一节的学习我们知道，电荷在静电场中具有电势能，我们应当怎样从能量的角度去描述静电场的这种性质呢？

电势

从物质间的相互作用出发，我们从检验电荷在电场中某点所受的电场力入手，定义了电场强度这个物理量。类似地，从能量的角度出发，我们是否也可以定义另一个描述电场性质的物理量？

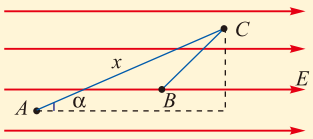
讨论交流

1. 在如图1-5-1所示的匀强电场中，规定 C 点为电势能零点，把检验电荷q_0从 A 点移到 C 点，写出电场力所做的功W_0的表达式。

把检验电荷 q_0 从 B 点移到 C 点，电场力所做的功还是 W_0 吗？

2. 根据电场力做功与电势能变化的关系，写出电荷在A点时具有的电势能。（以C点为电势能零点）

3. 如果把电荷量 $2q_0$、$3q_0$、…、nq_0 的检验电荷从 A 点移到 C 点，请填写下表中的相关量。



▲ **图1-5-1** 在匀强电场中电场力的功

检验电荷的电荷量q	q_0	$2q_0$	$3q_0$	…	nq_0
电荷从 A 点移到 C 点，电场力所做的功 W	W_0				
电荷在 A 点具有的电势能 E_{pA}					
电荷在 A 点具有的电势能与电荷量的比 $\frac{E_{pA}}{q}$					

检验电荷的电荷量 q	q_0	$2q_0$	$3q_0$	…	nq_0
电荷从 B 点移到 C 点，电场力所做的功 W'	W_0'				
电荷在 B 点具有的电势能 E'_{pB}					
电荷在 B 点具有的电势能与电荷量的比 $\frac{E'_{pB}}{q}$					

仔细研究以上两个表格，你发现了什么？

研究表明，在电场中的同一点，不同电荷所具有的电势能不同，但是电荷的电势能与其电荷量的比是一个定值；在电场中的不同点，这个比值一般不同；在这个比值较大的地方，相同的电荷所具有的电势能较大。可见，这个比值从能量的角度描述了静电场中该位置的性质。可以证明，这个结论对任何静电场都适用。物理学中把**电荷在电场中某一点的电势能与它的电荷量的比**，定义为该点的**电势**（electric potential），用符号 φ 表示，即

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

电势是标量，没有方向。在国际单位制中，电势的单位是伏特，简称伏，符号是V。

可以看出，电场中某点的电势，在数值上等于单位正电荷在该点所具有的电势能。

◎**类比**

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

电场中某一点的电势的数值与零电势点的选取有关，只具有相对意义。零电势点的选取视研究问题的方便而定。理论研究中通常选取无穷远处的电势为零，实际中通常选取大地的电势为零。

◎零点

根据电势与电势能的关系$E_p = q\varphi$可知，确定了电势能零点也就确定了电势的零点。

电势差

我们规定电场中 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

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

不难得出：　　$U_{AB} = -U_{BA}$

由于$\varphi = \frac{E_p}{q}$，则$U_{AB} = \frac{(E_{pA} - E_{pB})}{q}$，而$E_{pA} - E_{pB} = W_{AB}$，因此

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

即电场中两点间的电势差等于在这两点间移动电荷的过程中电场力所做的功 W_{AB}与被移动的电荷 q 的比。

电势差和电势一样，也是标量。在国际单位制中，电势差的单位也是伏特，简称伏，符号是 V。如果在电场中 A、B 两点之间移动电荷量为 1C 的正电荷，电场力所做的功为 1J，那么 A、B 两点之间的电势差就是 1V，即 1V = 1J/C。

在电路中，两点间的电势差通常称为这两点间的**电压**，这是我们已经熟知的名词。

由于电势和电势差都与检验电荷无关，而只与场中位置有关，所以它们描述了电场本身的性质。

电势和电势差的正负

电势的正负是与零电势点相比较而言的，某点的电势为正，即表示该点电势比零点高，正电荷放在该点，电势能比放在零点时的电势能大。反之，如果某点的电势为负，就表示该点电势比零点低，正电荷放在该点，电势能比放在零点时的电势能小。

◎类比

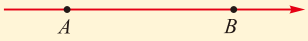
无论取山脚处地面高度为零还是取海平面高度为零，对一座山而言，山顶与山脚的高度差是不变的。

A、B 两点间的电势差如果为正，则表示A点电势高于B点，正电荷从 A 点移到 B 点的过程中，电场力做正功。反之，电场力做负功。

要注意，某点电势的正负，与零电势点的选取有关，若改变零电势点的位置，原来电势为正的，有可能变为负的，反之亦然。但两点间电势差的正负及数值，都与零电势点的选取无关。

讨论交流

如图1-5-2所示是静电场中的一条电场线以及它上面的两个点 A、B。



▲ 图1-5-2

1. 把正电荷 $+q$ 从 A 点移到 B 点，电场力做正功还是负功？A、B 两点哪一点电势较高？

2. 把负电荷 $-q$ 从 A 点移到 B 点，电场力做正功还是负功？A、B 两点哪一点电势较高？

3. 如果这是一个正点电荷电场的电场线，那么场源电荷离 A 点近一些还是离 B 点近一些？

4. 如果这是一个负点电荷电场的电场线，那么场源电荷离 A 点近一些还是离 B点近一些？

通过对以上几个问题的讨论，我们可以得出一个结论：沿电场线方向，电势逐渐降低。

例题示范

问题 在电场中把 $q=2.0\times10^{-9}$C 的电荷从 A 点移到 B 点，电场力做了1.0×10^{-7}J 的正功，再把该电荷从 B 点移到 C 点，电场力做了 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为零电势点，求 A 点和 B 点的电势；

(3) 比较电荷 q 在 A、B、C 三点的电势能大小。

分析 根据“两点间的电势差等于在这两点间移动电荷的过程中电场力所做的功 W 与被移动的电荷 q 的比”，可以求出两点间的电势差。如果这两点中某一

点的电势为零，则另一点的电势可以方便地求出。电势 φ 与电荷量 q 的乘积即为电势能。

解　（1）两点间的电势差等于电荷在这两点间移动过程中电场力所做的功与电荷量的比，因此

$$U_{AB}=\frac{W_{AB}}{q}=\frac{1.0\times10^{-7}}{2.0\times10^{-9}}\ \mathrm{V}=50\ \mathrm{V}$$

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

又根据两点间的电势差等于这两点电势之差，得到

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

（2）选C点为零电势点时，由

$$U_{AC}=\varphi_A-\varphi_C=\varphi_A-0=-150\ \mathrm{V}$$

$$\varphi_A=-150\ \mathrm{V}$$

$$U_{AB}=\varphi_A-\varphi_B=-150\ \mathrm{V}-\varphi_B=50\ \mathrm{V}$$

$$\varphi_B=-200\ \mathrm{V}$$

（3）根据$E_p=q\varphi$，而 $\varphi_C>\varphi_A>\varphi_B$，$q$为正值，所以$E_{pC}>E_{pA}>E_{pB}$。

拓展　若选 B 为零电势点，U_{AB}、U_{BC}和 U_{AC}是否变化？电荷在某点的电势能大小与零电势点的选择有关吗？还有其他方法求 U_{AC}吗？

两点间的电势差与零电势点的选取无关。已知在两点间移动电荷所做的功，利用公式 $W_{AB}=qU_{AB}$ 可以很方便地计算出两点的电势差，而不必考虑电场的具体分布情况。

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，电场中各点的电势是否也可以有类似的方法形象化地描述呢？

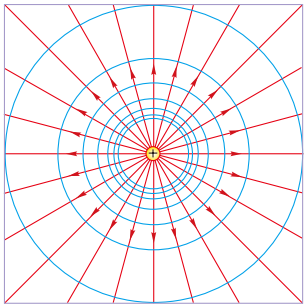
电场中电势相等的各点构成的曲面，叫作**等势面**（equipotential surface）。若规定相邻等势面的电势差相等，画出一系列的等势面，就可以形象地描述电场中各点

电势的分布情况。

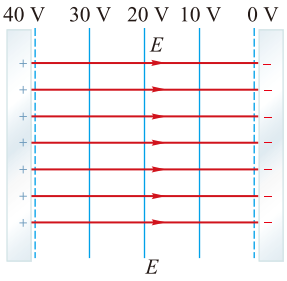
同一等势面上任何两点之间的电势差为零。根据 $W_{AB} = qU_{AB}$ 可知，在同一等势面上任何两点之间移动电荷时，电场力不做功。

等势面与电场线一定是处处垂直。因为如果不垂直，电场强度沿着等势面的分量就不等于零，在等势面上移动电荷时，电荷受到的电场力就要做功，而这与电场力不做功是矛盾的。

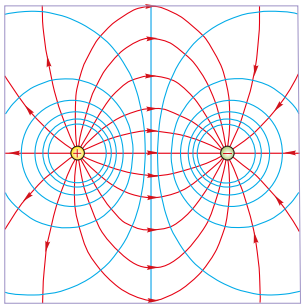
图1-5-3至图1-5-6是几种电场的电场线（红线）与等势面（蓝线），图中相邻两个等势面之间的电势差相等。



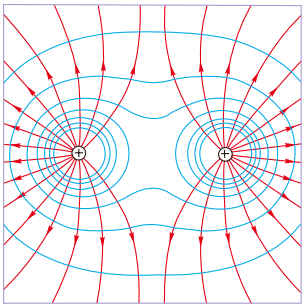
▲ **图1-5-3** 正点电荷电场的等势面



▲ **图1-5-4** 匀强电场的等势面



▲ **图1-5-5** 等量异种电荷电场的等势面



▲ **图1-5-6** 等量同种电荷电场的等势面

讨论交流

1. 如图1-5-3至图1-5-6所示的四个不同电场等势面的立体图景是什么样的？
2. 不同的等势面能够相交吗？为什么？

注意： 等势面是一个空间立体概念，图1-5-3至图1-5-6实际上画的是一个平面上的等势线图，根据它们可以想象出空间的等势面形状，有时也把这样的图称为等势面图。

不同的等势面不能相交，因为电场中同一点的电势数值不可能有两个。

知道了一个电场的电场线分布，就可以根据电场线与等势面垂直的关系，画出等势面的分布情况。实际上，在静电场中电势比电场强度容易测量，研究电场的分布情况时，往往是先根据测出的电势数据画出等势面的形状和分布情况，然后再利用等势面画出电场线的分布情况，这样，空间中电场的分布就清楚了。

自我评价

1. 电荷量为 40μC 的正电荷和电荷量为 30μC 的负电荷，放在电势为零的点上具有的电势能各为多少？放在电势为 -100V 的点上，它们具有的电势能各为多少？

2. 将电荷量为6×10^{-6} C的正电荷从 A 点移到B点，克服电场力做功3×10^{-5} J，电势能是增加还是减少了？变化量是多少？若以 A 点电势为零，则 B 点电势是多少？

3. 将电荷量为6×10^{-6}C的负电荷从 C 点移到 D 点，克服电场力做功3×10^{-5}J，电势能是增加还是减少了？变化量是多少？若以 D 点电势为零，则 C 点电势是多少？

4. 某电场中已知 A、B 两点间的电势差U_{AB}=100 V，B、C 两点间的电势差U_{BC}=-150 V，A、B、C 这三点中哪点的电势最高？哪点的电势最低？最高点与最低点间的电势差是多少？

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，1eV是在电势差为 1V 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 = -1.6×10^{-19}C，试证明：1eV= 1.6×10^{-19}J。

发展空间

实验室

描绘平面上的等势线

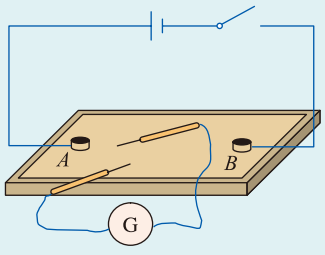
实验器材：直流电源、带探针的灵敏电流表、导电纸、复写纸、白纸、木板、金属螺杆和螺母两套、铜制电极两个、开关及导线若干。

实验步骤：1. 在木板上固定两枚金属螺杆，依次把白纸、复写纸、导电纸（导电的一面朝上）穿过螺杆平铺在木板上，用图钉把纸张固定，再把铜制电极套在螺杆上，并用螺母固定，如图1-5-7所示。

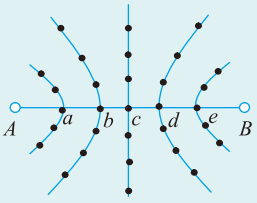
2. 两个电极与电源、开关用导线连接成闭合电路。在两个电极的连线上取间隔大致相等的5个点，分别标注为 a、b、c、d、e。用探针把它们的位置通过复写纸记录在最下面的白纸上，作为测量的基准点。

3. 把两个探针通过导线分别连接到灵敏电流计的两个接线柱上，用其中的一个探针接触基准点中的一个，如 a 点，再用另一个探针试触导电纸上的各个位置，凡灵敏电流计指针不偏转的点，即为与该基准点电势相等的点，把这些点的位置用探针通过复写纸记录在白纸上。最后把这些电势相等的点用一条平滑的曲线连接起来，即为一条等势线。

再换一个基准点，用同样的方法描绘另一条等势线。直到把通过各基准点的等势线都描绘出来，大致如图1-5-8所示。



▲ **图1-5-7**　实验装置

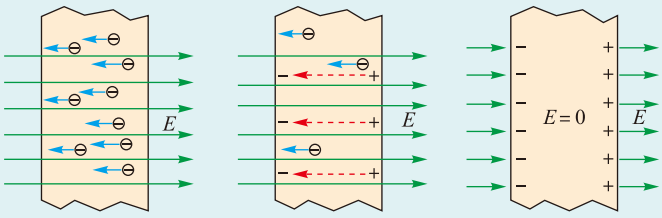


▲ **图1-5-8**　描绘出的等势线

课外阅览

静电屏蔽

我们知道，处于静电场中的导体会发生静电感应。如图1-5-9所示，把金属导体放在静电场中，金属内部的自由电子在电场力作用下会发生定向移动，使金属导体的左右两个面带等量异种电荷。导体带电后，导体上的感应电荷会在导体内产生一个附加电场，这个电场与外电场方向相反。当导体上的电荷分布达到相对静止时，分析可知，这时导体内的电场强度处处为零，达到“静电平衡”状态。处于静电平衡状态的导体，电荷分布在外表面上，导体是个等势体。虽然处在电场中，但是导体内部的场强为零，就好像导体把外电场遮住一样，而使内部物体不受任何外电场的影响，这种现象叫作“静电屏蔽”。技术上，静电屏蔽有广泛的用处。



▲ 图1-5-9

实际应用中，利用金属壳体或金属网罩同样可以达到类似的静电屏蔽效果。

静电屏蔽使金属导体壳内的仪器或工作环境不受外部电场影响；使金属壳体或网罩接地，也可使内部电场不对外部电场产生影响。有些电子器件或测量设备为了免除静电干扰，都要实行静电屏蔽，如室内高压设备罩上接地的金属罩或较密的金属网罩；电子管用金属管壳；电测量仪器中某些连接线的绝缘层外包有一层金属丝网作为屏蔽。

6 电势差与电场强度的关系

利用电场强度可以计算电场对电荷的作用力，利用电势差可以计算在电场中移动电荷时电场力所做的功。正如功与力联系紧密一样，电势差与电场强度也存在密切关系。

匀强电场中电势差与电场强度的关系

理性探究

如图1-6-1所示，设在场强为 E 的匀强电场中，沿电场线方向有 A、B 两点，距离为 d，电势差为 U_{AB}。电荷量为 $+q$ 的点电荷从 A 移到 B，根据功的定义，电

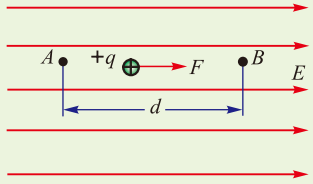
场力所做的功

$$W_{AB}=Fd=qEd$$

这个功也可以用电势差计算

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

比较两式，你可以得到什么关系？



▲ **图1-6-1**　电势差与电场强度的关系

由上述推导过程可知，

$$E=\frac{U_{AB}}{d}$$

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；场强的大小在数值上等于沿场强方向单位距离上的电势差。

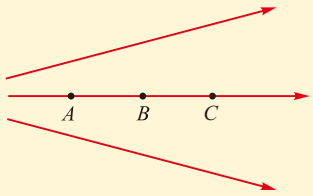
从上述公式，我们得到了场强的另一个单位是V/m。

由于1V×1C = 1J = 1N×1m，所以1 V/m = 1 N/C，即这两个场强的单位是相同的。

讨论交流

1. 如图1-6-2所示，在一个非匀强电场中，某一条电场线上有 A、B、C 三点，且 $AB=BC$，你能比较 A、B 间的电势差 U_{AB} 和 B、C 间的电势差 U_{BC} 的大小吗？

2. 如果 φ_A=10V，φ_C = 4V，则 B 点的电势 φ_B 等于7V吗？



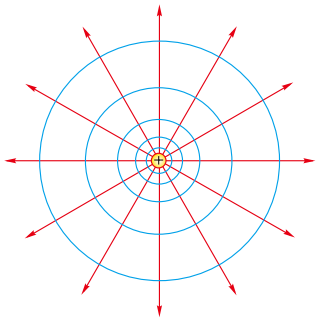
▲ **图1-6-2**　非匀强电场

3. 大致画出过 A 点和 B 点的等势面；如果要求相邻等势面之间的电势差相等，且 A、B 两点间没有另一个等势面，那么在 B 点右侧的另一个等势面应该画在哪里？

等势面的疏密与电场强度大小的关系

我们按照相邻等势面之间电势差相等的约定，画出正点电荷电场中各个等势面，如图1-6-3所示。

可以看出，在电场线越密的地方，相邻等势面的间距越小，即等势面越密。公式 $E=\frac{U}{d}$ 虽然只适用于匀强电场的场强与电势差的关系，但“等势面越密的地方场强越大”的结论适用于各种电场。



▲ **图1-6-3**　点电荷电场的电场线和等势面

例题示范

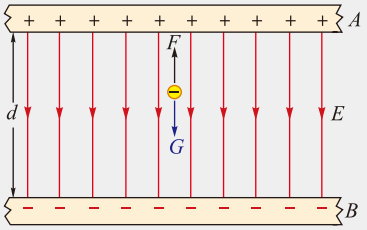
问题 如图1-6-4所示，把水平放置的两块较大的平行金属板分别连接到电源的正负极上，两板间是匀强电场。已知两极板间相距5cm，有一质量为1.0×10^{-9}kg、带负电的液滴悬浮其中，其电荷量为5.0×10^{-12}C。若不考虑空气浮力，要使液滴处于平衡状态，问：

（1）两金属板间应加多大的电势差？

（2）哪一块金属板的电势较高？



▲ **图1-6-4** 带电平行金属板间的液滴



▲ **图1-6-5** 带电液滴在匀强电场中的平衡

分析 两平行带电金属板间的电场是匀强电场，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，必须使这两个力大小相等而方向相反。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1-6-5所示。

解 （1）假设A、B两极板间的电势差为U，则匀强电场的电场强度$E=\dfrac{U}{d}$，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$m=1.0\times10^{-9}$kg，$d=5.0\times10^{-2}$m，$q=5.0\times10^{-12}$C，代入上式即得

$$U=\frac{1.0\times10^{-9}\times9.8\times5\times10^{-2}}{5.0\times10^{-12}}\text{V}=98\text{V}$$

（2）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。

拓展 如果液滴所在位置距离A板2cm，当把A板接地时，液滴所在位置的电势是多高？当把B板接地时，液滴具有的电势能又是多大？

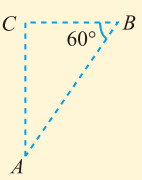
液滴在电场中所受到的电场力由场强决定，而A、B间的匀强电场场强大小由A、B间的电势差及A、B间的距离决定，与哪一极板接地无关。

自我评价

1. 两块平行金属板间的电势差是60 V，两板间距离是3 cm，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，当其电势差为200 V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。

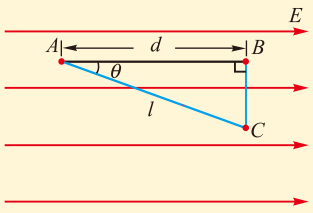
3. 如图1-6-6所示，A、B、C三点都在匀强电场中，已知$AC \perp BC$，$\angle ABC = 60°$，$BC = 20$ cm。把一个电荷量为$q = 10^{-5}$ C的正点电荷从 B 移到 C，电场力做功为零；从 C 移到 A，电场力做功为4×10^{-3} J，求该匀强电场的场强大小和方向。



▲ 图1-6-6

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场强大小吗？

5. 如图1-6-7所示，匀强电场场强$E=2 \times 10^4$ V/m，沿电场线方向 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。



▲ 图1-6-7

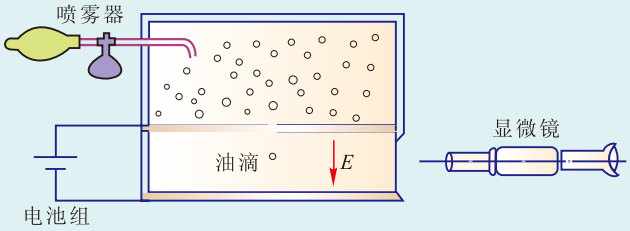
有同学认为$U_{AC} = U_{AB} = Ed = 800$ V；有同学认为$U_{AC} = Ed/\cos\theta \approx 924$ V。你认为哪个答案正确？为什么？

发展空间

物理在线

密立根油滴实验

美国物理学家密立根（R.A.Millikan，1868—1953）于1910年利用如图1-6-8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方的空间。两平行金属板中的上板有一小孔，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。密立根用上述方法对大量油滴进行测定，发现各个油滴所带电荷量都是某一最小电荷量的整数倍。他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。关于密立根的实验，请查询互联网进行了解。



▲ 图1-6-8

课外阅览

地球周围空间的电场

我们知道，地球周围空间存在着磁场，其实，也同时存在着电场。地球被大气层包围着，来自太阳的紫外线和外层空间的宇宙射线把高空大气分子和原子电离成自由电子和正离子；同时，地球上空的雷电活动，不断产生正电荷和负电荷，雷雨里剧烈的对流作用推动正电荷不断地注入上层大气，雷雨时的闪电活动又不断地将电子推向地球，这样，地球表面带有负电荷。

测量结果表明：地球表面附近的电场方向垂直指向地球表面；在晴天情况下，其数值约为 $E = 100\ \mathrm{V/m}$，而地球表面上的电荷密度是 $-8.85 \times 10^{-10}\ \mathrm{C/m^2}$。由此可计算得知，地球表面上携带的负电荷总量为 $4.51 \times 10^5\ \mathrm{C}$。

地球本身带负电，其周围空间存在电场，离地面 $H = 50\ \mathrm{km}$ 处与地面之间的电势差约为 $U = 3.0 \times 10^5\ \mathrm{V}$。由于电场的作用，地球处于放电状态，但大气中频繁发生的雷暴闪电又对地球充电，保持了地面负电荷的稳定性，从而保证了地球周围电场基本恒定不变。

需要指出的是，地球周围电场强度的迅速变化可引起植物的生理、生化变化，进而促进作物的生长。自然界中的植物生长以及病害的发生频率都要受到地球周围电场的影响。

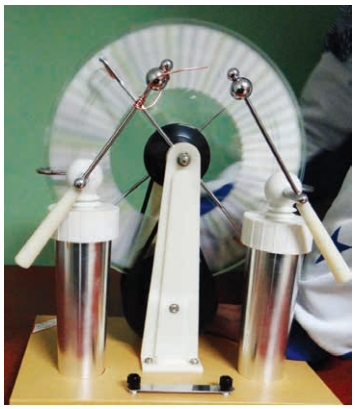
感悟 · 启迪

- 电场弥散在空间中，而且在空间的不同位置一般不同，要描述它就要定义一些物理量，我们分别从相互作用和能量的角度定义了电场强度和电势这两个物理量，从不同的角度描述电场。
- 我们还进一步研究了形象描述电场的方法，知道了电场线和等势面之间的关系。要注意场强和电势的区别。比如，场强是矢量，而电势是标量；电场中某点电势的高低与零电势点的选取有关，而场强的大小是客观存在的；电场线是人为引入的假想的线，而等势面是客观存在的曲面；沿等势面移动电荷电场力不做功，沿电场线移动电荷电场力必做功，等等。

7　静电的利用和防护

北方干燥冬天里无处不在的“电击”，超市里捻不开的塑料购物袋，用梳子越梳越“毛”的长发……这些都是我们常见的静电现象。你听说过由静电产生的火花引发的火灾或爆炸吗？你知道闪电击中房屋或人体会造成多么严重的伤害吗？

如图1-7-1所示是我们前面接触过的感应起电机，用它可以模拟闪电的形成，那是由于电荷积累过多而产生很高的电压（电势差），导致空气被击穿而形成的瞬时放电。现在我们给它的一个金属小球装上一个金属尖端，快速转动手柄，却再也看不到火花放电的现象了，这是为什么？由此你能联想到什么实际应用吗？



▲ **图1-7-1**　给金属球安装一个金属尖端

静电

讨论交流

静止的电荷称为静电。结合电场的相关知识，你能解释静电的产生机理吗？静电有什么特点？

物体带电后，其周围会产生电场，电场中电势不同的两点间存在电压。一般物体相互摩擦后所带的电荷量很少，只有微库量级，但是形成的电压却很高。人在地毯上行走，人体对地的静电电压可高达万伏；脱下的化纤布料衣服与人体之间的静电电压可达数万伏。电压高到一定程度，就会击穿周围的空气而发生火花放电，如果电流通过人体，就会产生电击的感觉。日常生活中像衣物使人体受到电击的这类静电现象，由于带电量很少，放电的时间很短，释放的能量不多，一般不会对人体造成伤害。

带电体的绝缘性能越好，电荷越容易积累，产生的电

压就会越高。同时，绝缘性能越好的物体一旦带上静电，电荷的泄漏速度越慢，其危害性就越大。

静电的利用

讨论交流

1. 班级在布置元旦晚会的会场，需要把气球布置到墙上和黑板上，你有什么好办法吗？

2. 你知道物理实验所用的电火花打点计时器的打点原理吗？

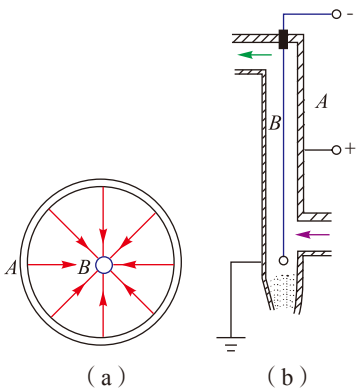
静电有可利用的一面。

利用静电在物体上喷涂液体或固体涂料，即静电喷漆，如图1-7-2所示。这种喷漆技术的原理，是设法使雾化的油漆液滴或固体涂料的细小颗粒飞离喷嘴时带上同种电荷，在电场力作用下飞向作为电极的工件，由于同种电荷的排斥作用，就能够比较均匀地沉积于工件表面。静电喷涂具有效率高、质量好的优点。

静电除尘是工业生产中处理烟尘的重要方法。如图1-7-3（a）所示是静电除尘的原理图。除尘装置由金属管 A 和悬挂在管中心的金属导线 B 组成，如图 1-7-3（b）所示。工作时，使中心的金属导线 B 带负电，金属管 A 接地，A、B 之间产生如图（a）所示的强电场，距 B 越近，电场越强。导线 B 附近的气体分子被强电场电离，形成电子和正离子，电子在向正极 A 运动的过程中，使烟尘中的颗粒带上负电。



▲ 图1-7-2　静电喷涂



▲ 图1-7-3　静电除尘

这些带电颗粒在静电力作用下被吸附到正极 A 上，最后在重力作用下落入下方的漏斗中。经过这样的除尘处理，原本饱含烟尘的气体就可能达到排放标准，满足环保要求。

静电在激光打印机中扮演着重要角色。激光打印机的工作过程如图1-7-4所示。

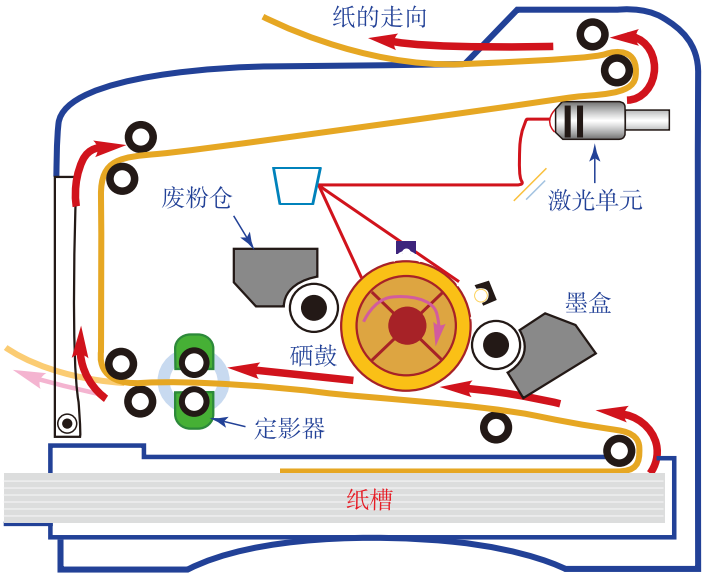


图1-7-4　激光打印机的结构和工作原理

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；硒鼓旋转时，被喷射电子，带上负电荷。

当前的激光打印机中，多用有机光导体（OPC）代替半导体硒。

3. 根据微处理器接收到的指令，光射到硒鼓的部分表面。被光照的部分，硒变成半导体，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，吸引不带电的墨粉。墨粉中含有碳粒，硒鼓上带的墨粉越多，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. 打印纸穿过定影器的加热压辊，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。

除上述应用外，静电屏蔽、静电复印、静电植绒等也都利用了静电。

静电的危害

讨论交流

你知道为什么用化纤布料制成的衣物容易吸附灰尘吗？

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。



▲ 图1-7-5 云层向地面的放电

1. 雷雨云的雷鸣电闪。全球平均每秒钟有100余次雷电，如图1-7-5所示的云层向地面的放电，有可能造成人畜伤亡、击毁树木房屋、造成停电事故、酿成飞行事故、引发森林大火、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。早期，曾在外科手术台上发生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. 静电放电还可以击穿集成电路和精密的电子元件。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。

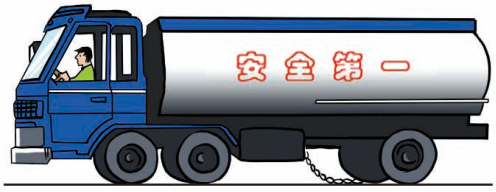
另外，工业中静电产生的危害十分巨大。下表所示的是一些工业领域中的静电带来的麻烦。

静电在工业中的危害	
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。
塑料工业	使片材或薄膜收卷不齐，影响品质。
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。
纺织工业	造成根丝飘动、缠花断头、纱线纠结。
煤炭工业	引起瓦斯爆炸，导致矿井报废，甚至造成人员伤亡。

静电危害的防治

静电引起的危害给人类带来巨大的损失，因此预防静电可能产生的各种危害已受到各界的高度关注。人们认识到，完善有效的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。

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，这样可以把多余的电荷引入大地，避免静电积累。大型油罐要有多条接地线；油罐车下部拖的一条铁链（图1-7-6），就是接地线。在地毯中夹杂直径0.05～0.07 mm 的不锈钢丝导电纤维，消除静电的效果很好。在生产服装面料时，加入少量导电纤维，就能把人体积累的电荷导走，从而避免脱衣服时产生电火花。



▲ **图1-7-6**　铁链拖地疏导电荷

2. 调节空气的湿度也是防治静电危害的有效办法。空气的湿度增大后，原来绝缘体的表面变得潮湿，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。

4. 给导体加一个金属尖端，就能把积累的电荷由尖端放走，这称为尖端放电。在本节的开始，我们给感应起电机的金属小球加一个尖端，便不会产生放电火花，就是这个道理。避雷针（图1-7-7）必须良好接地，可以利用尖端放电，把云层上的电荷与大地上的电荷中和，避免建筑物遭到雷击。

你还知道哪些静电的应用？你还知道哪些静电的危害？你曾经怎样处理过静电的危害？



▲ **图1-7-7**　避雷针

自我评价

1. 了解电厂烟囱的烟尘排放情况，简述静电除尘原理。
2. 空气湿度为什么会对静电影响很大？
3. 通过上网查询资料，回答问题：为什么加油站附近不允许使用手机？

发展空间

课外阅览

避雷针的故事

可以保护建筑物免受雷击伤害的避雷针，是美国科学家富兰克林（图1-7-8）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。



▲ **图1-7-8** 富兰克林

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时，却遭到一些人的反对和歪曲。

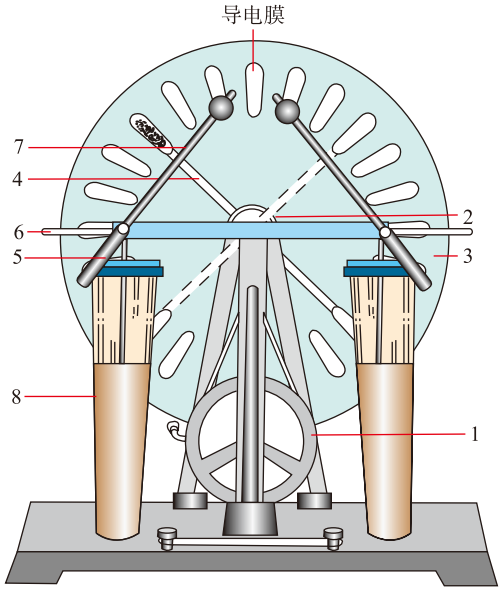
反对首先来自教会。教会认为雷电是神表示的愤怒，不允许人们干涉它们的破坏力。但一场挟有雷电的狂风过后，大教堂着火了；而装有避雷针的高层房屋却平安无事。事实教育了人们，使人们相信了科学。避雷针发明100多年后，费城盖了一座教堂，教会也害怕遭雷击，去请教爱迪生要不要装避雷针，爱迪生说："雷公也有疏忽大意的时候，你们说要不要装？"结果该教堂还是装上了避雷针。

避雷针相继传入英国、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。虽然英王企图用王室法令来改变自然法则，但他不可能成功。

8　电容器　电容

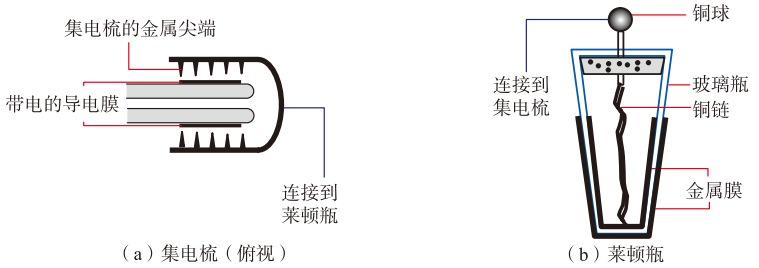
如图1-8-1所示是我们前面使用过的手摇感应起电机的结构，我们在“发展空间”里已经说明了它的电荷是怎样产生的。那么，它产生的电荷又是怎么收集和储存的呢？

这里起关键作用的是集电梳和莱顿瓶。如图 1-8-2 所示，集电梳位于玻璃圆盘转轴所在平面的两侧，呈平放的 U 形从外面包围着玻璃圆盘上的导电膜，并有一排由金属制成的尖形“梳齿”，正对着导电膜。当已经带电的导电膜经过集电梳时，就会通过“尖端放电”而使电荷转移到集电梳上，最终储存在两边的莱顿瓶中。莱顿瓶是在玻璃瓶的内、外两侧各贴一层导电膜制作而成，其作用是储存电荷及电能，类似这样的装置称为电容器。



1.手柄皮带轮　2.传动皮带轮　3.玻璃圆盘
4.电刷及导杆　5.放电杆手柄　6.集电梳
7.放电杆　8.莱顿瓶

▲ **图1-8-1**　感应起电机



▲ **图1-8-2**　集电梳和莱顿瓶

“电容器”这个词，大家可能有所耳闻，下面我们来认识它。

电容器



▲ 图1-8-3 照相机上的闪光灯

电容器（capacitor）是储存电荷和电能的元件，它在电子、电工技术和人们的日常生活中都有广泛的应用。

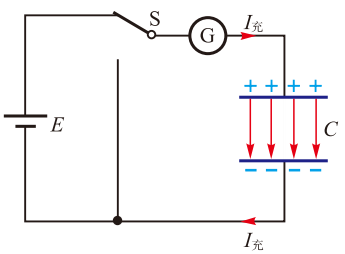
如图1-8-3所示，照相机工作时电池对机内大容量电容器充电，使电容器储存了电能，照相时电容器通过闪光灯瞬时放电，从而发出强烈而耀眼的闪光。大型激光器的能量也是来源于大容量电容器的瞬时放电。

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，两块彼此隔开平行放置的金属板构成一个最简单的电容器，叫作平行板电容器。这两块金属板称为电容器的两极。两块金属板之间可以放置不同的绝缘介质。其他电容器都可以看作平行板电容器的变形，例如最早的电容器——莱顿瓶的玻璃就是绝缘介质，而镀在玻璃瓶里侧和外侧的金属膜就是它的两极。

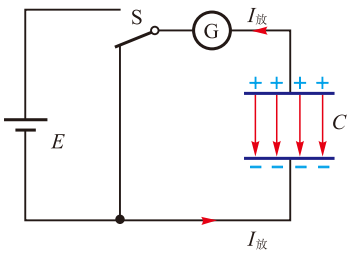
电容器工作时，它的两块金属板的相对表面总是分别带上等量异种电荷 $+Q$ 和 $-Q$，一般就把任意一块极板所带电荷量的绝对值，叫作电容器所带的电荷量，用 Q 表示。这时两板间有一定的电势差，用 U 表示。

按图 1-8-4 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，这个过程叫作电容器充电。充电后，两极板带电，极板间就有了电场，两板间有了一定的电势差。

充电完毕后，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，这个过程叫作电容器放电，如图1-8-5所示。放电后，两极板间电场消失，它们之间就没有电势差了。



▲ 图1-8-4 电容器充电



▲ 图1-8-5 电容器放电

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。

电容器的电容

讨论交流

设平行板电容器两个极板的正对面积和距离一定，讨论以下问题：

1. 电容器两极板之间的场强与电容器的带电量有什么关系？

2. 电容器两极板之间的电势差与场强有什么关系？

3. 你能通过推理，得出电容器两极板之间的电势差与电容器带电量的关系吗？

平行板电容器两极板带上等量异种电荷后，两极板间的电场可以看作匀强电场。不难想象，电容器所带的电荷量越多，板间电场的场强越大；由于两板间距离保持一定，场强越大，则两板间的电势差也越大。

利用物理量间的联系，先定性分析，确定研究方向；然后进行定量研究，确定物理量间的关系，这是物理上常用的科学思维方法。

描述电容器储存电荷能力的物理量叫作电容器的电容量，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 $\frac{Q}{U}$ 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 C，表达式为

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

从上面的定义式可知，电容器的电容在数值上等于两极板间的电势差为 1V 时电容器所带的电荷量。也就是说，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。

在国际单位制中，电容的单位是法拉，简称法，符号

是 F。

$$1F = 1C/V$$

法拉是一个较大的单位，实际中常用较小的单位微法（μF）和皮法（pF）。

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

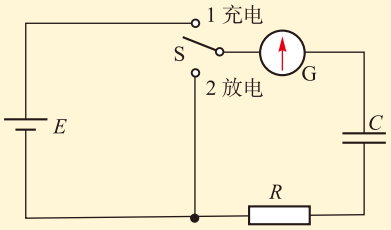
$$1pF = 10^{-6}\mu F = 10^{-12}F$$

电容的单位**法拉**，是用物理学家法拉第的名字命名的。

实验：观察电容器的充放电现象

实验探究

按图 1-8-6 所示连接电路，其中 *C* 是电容器，*E* 是直流电源，S 是单刀双掷开关。*R* 是电阻，它的作用是为了防止充放电时电流过大而损坏电流表。G 是灵敏电流表，它的零刻度线位于刻度盘的中间。



▲ **图1-8-6** 观察电容器的充放电现象

1. 把开关 S 扳到 1，观察电容器充电时的电流方向及电流变化情况。

2. 把开关 S 扳到 2，观察电容器放电时的电流方向及电流变化情况。

3. 如条件许可，可以把电路中的灵敏电流表换成一个电流传感器，并与计算机连接。运行相关程序，重复上面的实验步骤，可在计算机显示屏上观察到电容器充电和放电过程中电流随时间变化的图像。

讨论交流

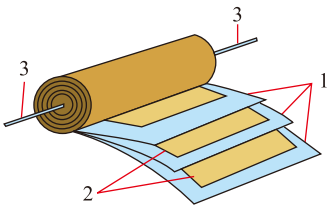
1. 电容器的充电电流和放电电流，与我们初中学习过的恒定电流有什么不同？为什么会有这样的不同？

2. 如果没有可用于测量电流的电流表或电流传感器，你能想出哪些方法，可以定性地观察到电容器的充放电现象？

常见的电容器

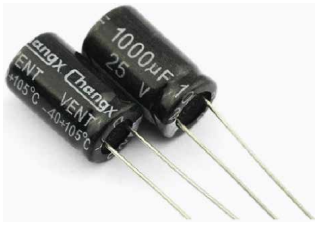
最简单的电容器是平行板电容器，它的电容的大小与两极板正对面积成正比，与两板间距离成反比，还与两板间的电介质有关。其余各种电容器，都可以看作平行板电容器的变形，可以通过增大正对面积、减小极板间距离以及插入介电常数更高的介质的方法增大电容。

常用的电容器种类很多，如图 1-8-7 至图1-8-9所示的是其中的一部分。

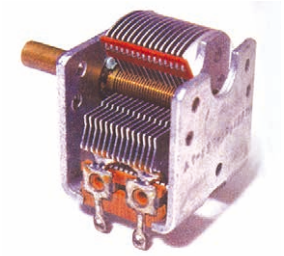


1.电容器纸　2.铝箔或锡箔电极　3.引线

▲ **图1-8-7**　纸质电容器



▲ **图1-8-8**　电解电容器



▲ **图1-8-9**　可变电容器

纸质电容器的构造如图1-8-7所示。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，便形成了纸质电容器。

电解电容器如图1-8-8所示，它利用电解现象在铝膜上产生的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。电解电容器的两极有固定的极性，使用时注意不要接反了。

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。

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作定片，可以转动的一组金属片叫作动片。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，如图1-8-9所示是空气介质的可变电容器。转动动片，两组金属片的正对面积发生变化，电容就会随着改变。

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，这个极限电压叫作击穿电压。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

云层与大地也构成了一个巨大的电容器。你见过它的放电现象吗？

承受的最大电压，它比击穿电压要低许多。

在电路图中，常用的电容器符号如图1-8-10所示。



▲ 图1-8-10 不同电容器的表示符号

自我评价

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，两极板间电势差为200 V。若使其电荷量再增加2×10^{-4}C，这时它的电容量是多少？两极板间的电势差是多少？（假设以上变化过程中两极板间电压均小于击穿电压）

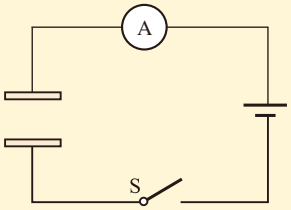
3. 一个平行板电容器充电后，把电源断开，再用绝缘工具把电容器两极板间的距离拉大一些，保持两极板的正对面积不变。则：

（1）电容器的电容是否变化？如果变化，是变大还是变小？

（2）电容器的带电量是否变化？如果变化，是变大还是变小？

（3）电容器两板间的电压是否变化？如果变化，是变大还是变小？

4. 一个平行板电容器与电源及电流表A连接如图1-8-11所示，其中电流表的零刻度线位于表盘正中，当有电流流过时，指针向电流流入的那一边偏转。则：



▲ 图1-8-11

（1）闭合开关S后的短暂时间里，电流表的指针如何偏转？

（2）经过一段时间，电流表的指针将恢复指向“0”，再断开开关S，电流表的指针如何偏转？为什么？

5. 通过上网查阅资料，了解电容器在照相机闪光灯中的作用。

发展空间

物理在线

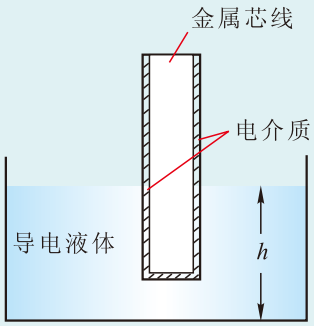
电容式传感器

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。这种用途的电容器叫作电容式传感器（图1-8-12）。



▲ 图1-8-12 各种电容式传感器

图 1-8-13是测定液面高度 h 的电容式传感器的原理图。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



▲ **图1-8-13**　测定液面高度的电容式传感器原理图

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。

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。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。

关于传感器，本套教科书在后续课程中还将专门介绍。同学们也可在网上查询其他传感器的用途。

超级电容器

超级电容器是在20世纪60至70年代率先在美国出现，并于80年代实现市场化的一种新型的储能器件。它兼具普通电容器的大电流快速充放电特性与电池的储能特性，弥补了普通电容器与电池在单位质量存储的能量和输出功率上的短板。超级电容器被认为是能量储存的一次革命，并将会在某些领域取代传统蓄电池。

超级电容城市客车是一种“零排放”电车，它没有传统电车的“辫子”，它与传统电车的不同之处就在电车的底部。借助底部安装的超级电容器放电进行工作，电车可以通过车顶的充电设备——集电弓，从充电站的电缆上实现几十秒“快速充电”，补充能量，然后继续行驶。

在2010年上海世博会期间，超级电容公交车（图1-8-14）在园区内安全行驶里程共计120万千米。此外，在上海市的11路公交线路上，超级电容城市客车已安全运行了多年。新一代“升级版”超级电容车与老款车相比，续行里程大幅提高，在不开空调的情况下，充一次电可以行驶15千米。这一技术突破，为超级电容车的推广奠定了基础。

关于超级电容器的更多信息，请通过互联网进行了解。



▲ **图1-8-14**　上海世博会上零排放的超级电容器公交车

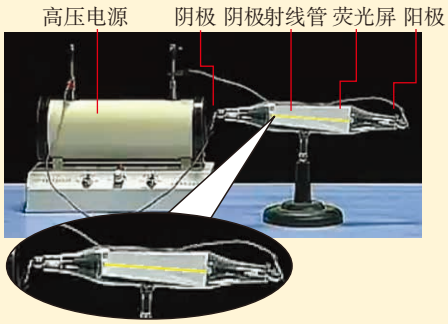
9 带电粒子在电场中的运动

电场对电荷有力的作用，带电粒子受电场力将产生加速度，它的速度大小和方向就可能发生改变。在这一节，我们将研究带电粒子在电场中的运动问题。

这里所说的带电粒子，是指电子、质子和各种离子等微观粒子，由于它们在电场中所受的电场力远大于重力，所以研究它们在电场中的运动时，重力可以忽略。

带电粒子的加速

观察思考



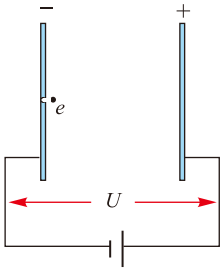
▲ **图1-9-1** 观察阴极射线中带电粒子的运动

阴极射线管是一个抽成真空的玻璃管，如图1-9-1所示，它的左边有一个能发射电子的阴极，右边是阳极。把它们分别与高压电源的负极和正极连接，可以从荧光屏上看到一条亮线，这就是电子在管内的运动径迹。观察这一现象，思考以下问题：

1. 为什么要在管内设置荧光屏？

2. 通过观察到的径迹，你认为电子在管内做的是什么运动？

设置荧光屏是为了观察到电子的运动径迹。我们看到电子的运动径迹是一条直线，这说明电子在管内做的是直线运动。



▲ **图1-9-2** 带电粒子在电场中加速

当阴极射线管的两极分别与高压电源的两极连接后，阴极和阳极就分别带上负电荷和正电荷，在管内形成了静电场。我们把它简化为如图1-9-2所示的情形，两板间电压为U，电子从阴极逸出，忽略其初速度，受静电力作用，由静止开始做加速运动。如果是匀强电场，电子做的是匀加速直线运动，如果是非匀强电场，电子做的是变加速运

动。设其质量为 m、带电量为 $-q$，它到达阳极板时的速度大小为 v，这一过程中静电力对粒子做功

$$W = qU$$

根据动能定理，得

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

解得

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

讨论交流

1. 上述问题中，还有其他方法计算电子到达正极板的速度大小吗？

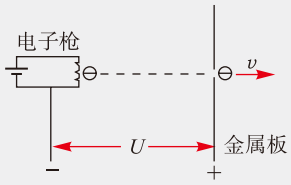
2. 平行金属板之间的电场是匀强电场，对于非匀强电场，以上方法是否适用？

3. 电子到达阳极的运动过程中，它的电势能如何变化？从能量转化的观点出发，如何解释这种变化？

如果是匀强电场，可以先利用牛顿运动定律求出电子的加速度，再运用运动学公式求出它的末速度，但这一方法对非匀强电场不适用。电子运动过程中，电势能逐渐减少，而动能逐渐增加。

例题示范

问题　示波管中电子枪的原理如图1-9-3所示。经过电流对电子枪的金属丝加热，电子从电子枪中逸出，并在电场力作用下，从金属板小孔中飞出，已知电子从小孔飞出时的速度 $v = 4.0\times10^{7}\text{m/s}$，电子的质量 $m = 0.9\times10^{-30}\text{kg}$，电荷量 $e = 1.6\times10^{-19}\text{C}$，不计电子的初速度，求加速电压 U。



▲ 图1-9-3

分析　电子枪与金属板间的电场是非匀强电场，电子初速为零，在电场力作用下做变速直线运动，可以用动能定理解决问题。

解　在电场中，电场力对电子做功 eU，电子的动能增加。根据动能定理

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

所以 $U=\dfrac{mv^2}{2e}=\dfrac{0.9\times10^{-30}\times(4\times10^{7})^2}{2\times1.6\times10^{-19}}\text{V}=4.5\times10^{3}\text{V}$

拓展 1. 初速为零的带电粒子在匀强电场中只受电场力的运动一定是直线运动，那么初速为零的带电粒子在非匀强电场中只受电场力的运动还一定是直线运动吗？

2. 初速为v_0（$v_0\neq0$）、质量为m、电荷量为q的带电粒子，经过电势差为U的电场加速，能否用动能定理求它的末速度的大小？

带电粒子在匀强电场中的偏转

观察思考

如果在图1-9-1所示的阴极射线管靠左侧的位置，加上一个沿竖直方向的匀强电场，可以观察到电子束不再沿直线运动，而是向下或向上偏转。改变电场的方向，观察电子束的偏转方向是否发生变化。请思考下列问题：

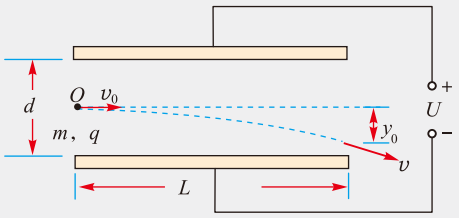
1. 电子在匀强电场内的运动轨迹为什么不是直线而是曲线？你能运用牛顿定律加以解释吗？

2. 电子如果以一定的初速度垂直于电场方向射入匀强电场中，只在电场力的作用下的运动，与我们在力学中学习过的哪种运动规律类似？

带电粒子在电场中的运动情况与其受力以及初始状态有关。当带电粒子沿垂直电场线方向进入匀强电场时，在电场力作用下产生的加速度与初速度方向垂直，因此做曲线运动。应用牛顿运动定律及运动学知识，可以求解粒子的运动情况。

例题示范

问题 如图1-9-4所示，一对平行金属板长为L、宽为d，分别带有等量正负电荷，两板间电势差为U。一束带电荷量为q、质量为m的带电粒子从左边两板正中O点沿平行于两板的



▲ 图1-9-4 带电粒子在匀强电场中的偏转

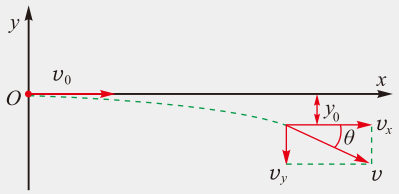
方向射入，初速度大小为v_0，从右边射出。求：

（1）粒子束射出电场时的速度v；

（2）粒子束射出电场时沿电场线方向位移y_0的大小。

分析　两平行带等量异种电荷的金属板间的电场是匀强电场，粒子受到电场力是恒力，即粒子的加速度保持不变。

如图1-9-5所示，以O为原点，v_0方向为x轴正方向，竖直向上为y轴正方向，建立直角坐标系。



▲ **图1-9-5**　建立直角坐标系

把末速度正交分解为v_x和v_y，v与x轴的夹角为θ，如图所示。

粒子沿x方向不受力，做匀速运动，速度大小为v_0；沿y方向受到恒力作用，做初速度为零的匀加速运动。

解　粒子加速度方向沿$-y$方向，大小为

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

在电场中的运动时间

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

根据运动学规律 $v_x=v_0$，$v_y=at=\frac{Uq}{dm}\cdot\frac{L}{v_0}$

则末速度的大小 $v=\sqrt{v_x^2+v_y^2}=\sqrt{v_0^2+\frac{U^2q^2L^2}{d^2m^2v_0^2}}$

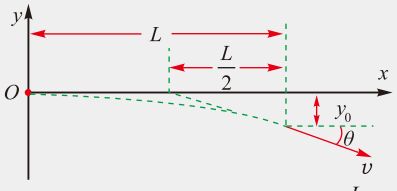
末速度v与x方向的夹角为θ，$\tan\theta=\frac{v_y}{v_x}=\frac{UqL}{dmv_0^2}$

沿$-y$方向的位移大小$y_0=\frac{1}{2}at^2=\frac{UqL^2}{2dmv_0^2}$

拓展　我们把上面表示$\tan\theta$的式子稍加变形，即

$$\tan\theta=\frac{UqL}{dmv_0^2}=\frac{UqL^2}{2dmv_0^2}/\frac{L}{2}=\frac{y_0}{L/2}$$

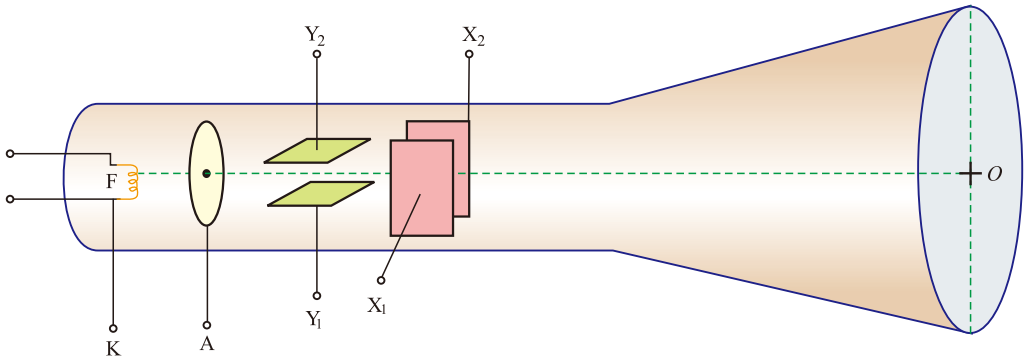
它的物理意义是：在图1-9-5中，表示末速度v的线段反向延长，与x轴交于$\frac{L}{2}$处，如图1-9-6所示。



▲ **图1-9-6**　v的反向延长线过$\frac{L}{2}$点

也可以说，垂直于电场线方向射入匀强电场中的带电粒子，就好像先沿直线前进，到$\frac{L}{2}$处偏折θ角再沿直线飞出电场。

利用电场使带电粒子偏转，在技术上有很多应用。以前示波器中的显示仪器——示波管就是利用电场来控制电子束的路径，从而可以把信号显示在屏幕上。图1-9-7是示波管的原理图，其中K为阴极，A为阳极，它们分别接在高压电源的负极和正极上，中间构成加速电场。经灯丝F的加热，阴极释放出电子，电子经电场加速后从阳极中间的小孔飞出，若没有其他作用，它们都将打到右侧荧光屏的中央O点，从而形成一个亮斑。Y_1、Y_2和X_1、X_2是两对垂直放置的偏转电极，分别控制电子束沿竖直方向和水平方向的偏转，从而电子束有可能打到荧光屏的各个位置。

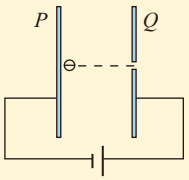


▲ 图1-9-7　示波管原理

自我评价

1. 计算带电粒子在电场中的运动问题时，一般都不需要考虑重力的影响，这是为什么？

2. 如图 1-9-8 所示，平行板电容器与电源相连，在极板 P 附近有一电子，受电场作用，从静止开始加速运动，并由 Q 板的小孔射出。已知电子的质



▲ 图1-9-8

量为 m，电荷量为 e，电源两极间电压为 U，两极板之间的距离为 d。

（1）计算电子在两极板之间运动的加速度；

（2）计算电子从 Q 板小孔中射出时的速度大小；

（3）如果增大两极板之间的距离，仍保持极板平行，讨论：电子在两极板之间的运动时间、加速度和到达小孔的速度是否发生变化？

3. 如图 1-9-9 所示，从电子枪 O 逸出的电子，初速度可以认为是零，电子通过小孔 A、B，最终打在 C 板上。

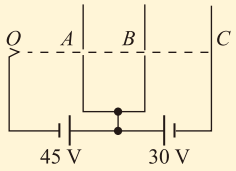
（1）描述电子在 OA 间、AB 间、BC 间的运动情况；

（2）电子通过小孔 A、B 时的动能分别是多少电子伏？电子打在 C 板上时的动能是多少电子伏？

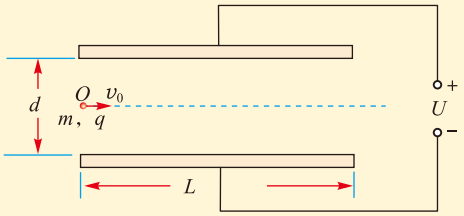
4. 如图 1-9-10 所示，一对水平放置的平行金属板长为 L、间距为 d，接在直流电源两极间，电压为 U。一束质量为 m、电荷为 q 的带电粒子经加速电场（图中未画出）加速后，沿水平方向从两板正中的 O 点射入。

（1）要想让所有的粒子都能从右侧飞出，粒子射入电场的初速度要满足什么条件？

（2）相应的加速电场的电压应满足什么条件？



▲ 图1-9-9



▲ 图1-9-10

感悟 · 启迪

静电场看不见，摸不着，却与人类关系密切。我们可以利用静电场对导体的作用，可以利用静电场对带电粒子的作用，可以利用静电场的能量，等等。诚然，静电也有危害，人类对于自然界的研究和利用，总是趋利避害，为我所用。

反思·小结·交流

• 学后反思

1. 进入电学的学习以来，我们对于物质的认识又进了一步，除了以前熟知的由实物粒子构成的物质以外，还有另一类弥散在空间的物质——场。场虽然谈不上质量，却具有能量，能够对其他物质有相互作用。我们学习了描述静电场的两个重要的物理量，以及形象描述电场的电场线和等势面。后面我们还将学习磁场，那时你对物质的认识会更进一步深入。

2. 18世纪后半期，以库仑定律的发现为标志，电学研究进入定量阶段，而精确的定量研究离不开精密的测量工具，库仑扭秤功不可没。

• 自主小结

1. 摩擦起电和感应起电的物理过程有什么不同？在起电过程中，电子具有什么作用？

2. 元电荷、点电荷和检验电荷，它们有什么区别？在学习静电知识时，它们具有什么作用？

3. 怎样研究和认识电场？电场具有什么性质？怎样描述这些性质？

4. 点电荷在真空中的相互作用力遵循什么规律？如果带电体不能看成点电荷，怎样计算它们之间的相互作用力？

5. 在静电场中，引入电场强度和电势（电势差），具有什么意义？

6. 电容器的电容是由什么决定的？电容器的带电量与什么有关？电容器有什么用处？

• 相互交流

1. 带电粒子在电场中运动，在什么情况下沿直线运动？在什么情况下会发生偏转？

2. 讨论以下内容：电荷与电场的关系；电场强度与电势差的关系；电场力做功与电势能变化的关系；电场线与等势面的关系；电场线和等势面的特点。

3. 讨论以下内容：比较场强大小的方法；比较电势高低的方法；比较电荷电势能大小的方法；确定电场力做功正负的方法；确定电场中一点电势正负的方法。

4. 学习了“静电场”一章，我们在科学思维方法上有哪些收获？

本章复习题

1. 把两个同种电荷之间的距离增大一些，电场力做正功还是负功？把两个异种电荷之间的距离增大一些，电场力做正功还是负功？

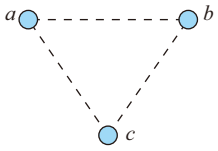
2. 有人说，如果电场线是直线，那么电场线就是带电粒子的运动轨迹，你同意这种说法吗？在什么情况下，带电粒子的运动轨迹与电场线才能是重合的？

3. 两个半径相同的金属小球可以视为点电荷，带电量之比是1∶5，当它们相距 r 时作用力大小为 F；若把它们互相接触后再置于原来的位置上，它们之间作用力大小可能为是多大？写出你的推理过程。

4. 如图所示，三个点电荷 a、b、c 位于等边三角形的三个顶点上，a 和 c 带正电，b 带负电，$q_a = q_c = 1.6\times10^{-6}$C，$q_b = -0.8\times10^{-6}$C，每一个点电荷都可以看作处于另外两个点电荷的电场中，受到另外两个点电荷的作用力。已知三角形的边长是4 cm，求：

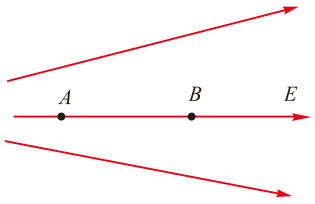
   （1）点电荷b和c受到的电场力分别是多大？

   （2）点电荷b所处位置的电场强度是多大？方向如何？



▲ 第4题图

5. 一个点电荷电场局部的电场线如图所示，一个带负电的粒子仅在电场力作用下从 A 点运动到 B 点，这一运动过程中，粒子的速度如何变化？加速度如何变化？电势能如何变化？



▲ 第5题图

6. 一个带电粒子的带电量$Q = 3.2\times10^{-6}$C，在电场中仅在电场力作用下由A点运动到B点，它的动能减少了10J。

   （1）这一过程电场力对粒子做了多少功？是正功还是负功？

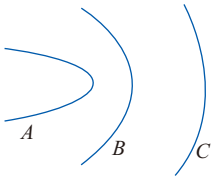
   （2）这一过程粒子的电势能变化了多少？是增加还是减少？

   （3）证明：在只有电场力做功的情况下，粒子的动能与电势能之和是个定值。

7. 如图所示，静电场中有三个等势面A、B、C，电势分别为$\varphi_A = 5.0\times10^{3}$V，$\varphi_B = 0$，$\varphi_C = -4.0\times10^{3}$V，一个电荷量$q = 3.2\times10^{-6}$C的带电粒子在等势面$A$上的动能是$E_{kA} = 3.2\times10^{-2}$J，它仅在电场力作用下运动，先后通过等势面$B$和$C$。

   （1）粒子在等势面 B 和 C 上的动能分别是多少？

   （2）粒子从等势面 A 运动到等势面 C，电场力所做的功是多少？



▲ 第7题图

8. 将一个电荷量为-2×10^{-8}C的点电荷，从零电势点 O 移到 M 点需克服电场力做功6×10^{-8}J，若将该电荷从 M 点再移至 N 点，电场力做功2.5×10^{-7}J。求：

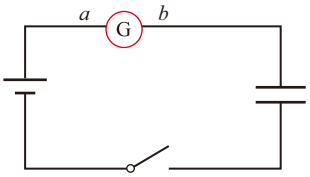
   （1）M 点和 N 点的电势 φ_M 和 φ_N；

   （2）M、N 两点间的电势差 U_{MN}。

9. 如图所示，平行板电容器两极板与电源两极相连，G为灵敏电流表。闭合开关并达到稳定后，在下列操作过程中，是否有电流流过电流表？如果有，电流的方向是从a到b，还是从b到a？

   （1）将电容器两极板的距离拉大一些；

   （2）将电容器两极板的正对面积错开一些。

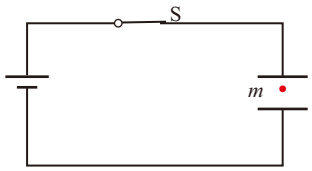


▲ 第9题图

10. 如图所示，水平放置的平行金属板与电源相连，板间有一质量为m的带电微粒，开关S处于闭合状态，微粒恰好处于静止状态。进行下列操作，微粒还能保持静止吗？如果不能，它将怎样运动？

(1) 保持开关一直闭合，保持两极板水平并拉大它们之间的距离；

(2)（选做）先断开开关，再保持两极板水平并拉大它们之间的距离。



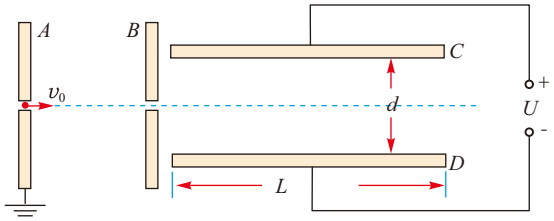
▲ 第10题图

11. 如图所示，一对平行金属板A、B竖直放置，其中A板接地，B板电势为$+\varphi$。另一对平行金属板C、D水平放置，板长为L、间距为d，两板间电压为U。质量为m、电荷为$-q$的带电粒子以初速度v_0从A板中心的小孔射入，从B板中心的小孔射出，最终从C、D板的右侧射出。

(1) 带电粒子从B板中心射出时的速度v''多大？

(2) 带电粒子在C、D间的运动过程是向上偏转还是向下偏转？

(3) 带电粒子从C、D板的右侧射出时，偏离图中水平虚线多远？

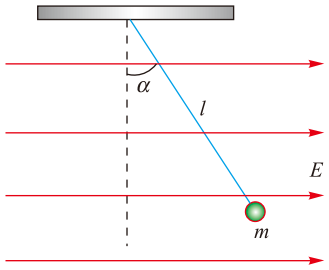


▲ 第11题图

12. 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：

(1) 小球带何种电荷？

(2) 小球所带的电荷量是多少？



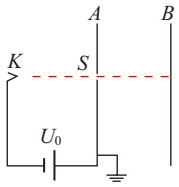
▲ 第12题图

13. 如图所示，一对竖直放置的平行金属板A、B构成电容器，电容为C。电容器的A板接地，板的中间上有一小孔S。被加热的灯丝K不断地向外发射电子，电子经过电压为U_0的电场加速后通过小孔S，能够打在B板上。设电子的电荷量为e，质量为m，到达B板的电子都被B板吸收，电子从灯丝发射的初速度不计。随着电子的射入，两极板之间的电势差逐渐增加，最终使电子无法打在B板上。求：

(1) 当B板吸收了N个电子时，A、B两极板之间的电势差；

(2) A、B两极板之间可达到的最大电势差U_m；

(3) 达到最大电势差时电容器的带电量Q。



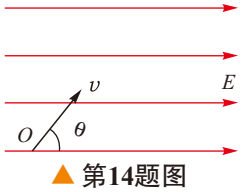
▲ 第13题图

14. 一个带电荷量为$-q$的油滴，从O点以速度v射入方向水平向右的匀强电场中恰好做直线运动，v的方向与电场方向成θ角。已知油滴的质量为m，求：

(1) 电场强度E为多少？

(2) 油滴运动到最高点（未离开电场区域）时与O点的竖直距离是多大？

(3) O点和最高点之间的电势差是多少？



▲ 第14题图



第二章

电路及其应用

主题一　电路的主要物理量及其测量

- 电流　电压　电阻
- 实验：练习使用多用电表
- 电阻定律　电阻率
- 实验：测量金属的电阻率
- 实验：描绘I–U特性曲线

主题二　电路中的能量转化与守恒

- 电源的电动势和内阻　闭合电路欧姆定律
- 实验：测量电池的电动势和内阻
- 焦耳定律　电路中的能量转化

主题三　家庭电路及安全用电

- 家庭电路

工厂里飞速运转的机器，农田里抗旱排洪的水泵，港口上高高耸立的塔吊，铁轨上飞驰而过的列车……

仓库货架旁边搬运货物的叉车，银行职员面前快速运算的电脑，办公桌旁忙碌的打印设备，温馨家里的彩电、冰箱、洗衣机……

高楼里上下往返的电梯，楼道里驱走黑暗的灯具……

无人驾驶汽车顺应于红绿灯的指挥，智能手机对用户的指令做出快速响应……

林林总总，哪一件不是电流在大显神通？天上地下，哪一处离得开电路的鼎力相助？

1 电流 电压 电阻

关于电路，我们在初中已经有了不少了解，下面让我们在原有的基础上更进一步。

温故而知新

讨论交流

请回忆并整理，初中学过哪些有关电路的知识。什么是电流、电压和电阻？怎样测量它们？

1. **电路**（electric circuit）至少由电源、用电器、导线和开关四部分组成。通路、断路、短路是电路的三种状态，其中短路是必须避免出现的。电路元件有串联和并联两种最基本的连接方式。

2. 电流是自由电荷的定向移动形成的。某段时间内通过导体截面的电荷量 q 与通电时间 t 的比叫作**电流**（electric current），用 I 表示，则

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

在国际单位制中，电流的单位是**安培**，简称安，符号是 A。测量电流使用电流表，它必须串联在被测量的电路中，这是因为串联电路中电流处处相等。

3. **电压**（voltage）是形成电流的必要条件，在国际单位制中它的单位是伏特，简称伏，符号是 V。测量电压使用电压表，它必须与被测量电路并联，这是因为并联电路各支路电压相等。

4. 德国物理学家欧姆通过实验发现，对于金属导体以及酸、碱、盐的水溶液而言，它两端的电压 U 与通过的电

◎ **电流**

“电流”这个词有两种含义：一是电荷的定向流动的过程，二是衡量这一过程的“强弱”，数值上即单位时间内通过导体截面的电荷量。

安培是国际单位制（SI）的七个基本单位之一。

流 I 成正比，即

$$\frac{U}{I}=\text{常量}$$

这个常数反映了该导体的性质，被定义为导体的**电阻**（resistance），用字母 R 表示，即 $R=\frac{U}{I}$。在国际单位制中，电阻的单位是欧姆，简称欧，符号是 Ω。测量电阻一般采用“伏安法”。

欧姆定律一般表述为：**通过导体的电流 I 跟它两端的电压 U 成正比，跟它的电阻 R 成反比**，用公式表示是

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

恒定电场与恒定电流

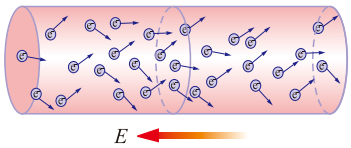
我们已经知道，电荷的定向移动形成电流，但导体中的自由电荷为什么会定向移动呢?

这是因为在导体内部存在一种类似于静电场那样的电场，这种电场是由于电源的作用在电路的不同部位聚集了一定的电荷而形成的，它的方向处处沿着导体中电流的方向。这些聚集的电荷并不固定，随着电流的流动也在流动，但它们在电路中的分布不随时间的变化而变化。这些聚集的电荷在导体内产生的电场的性质类似于静电场，我们把它称为**恒定电场**（steady electric field）。电荷在恒定电场内受到的电场力，仍称为静电力。

在恒定电场的作用下，导体中的自由电荷沿电场线方向加速，同时在运动过程中又不断地与导体内不能自由移动的粒子发生碰撞而减速（图 2-1-1）。从宏观上看，这些自由电荷定向移动的速率保持不变，即电流的大小保持不变，这种电流称为**恒定电流**（electric current）。

当在恒定电场作用下导体中形成恒定电流时，其内部的恒定电场保持不变，导体两端的电势差（即电压）也是恒定的。

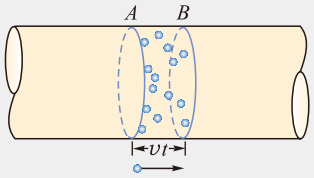
当导体内没有电场时，导体中的大量自由电荷不停地做无规则热运动，自由电荷向各个方向上运动的机会相等，因此在任何一段时间内，对于导体内的任一横截面，从两侧穿过该截面的自由电荷数大致相等。从宏观上看，导体内的自由电荷没有定向运动，也就没有电流。



▲ **图 2-1-1**　自由电子运动的模拟图像

例题示范

问题 如图 2-1-2 所示，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。导体内部存在恒定电场，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。



▲ **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

（1）请根据电流的定义求出该导体中通过的电流大小。

（2）如果该导体的电阻为 R，求它两端的电压大小。

分析 电流等于通过导体截面的电荷量与通电时间的比，设在 t 时间内通过导体内某截面的电荷是 Q，它应该等于横截面积为 S、长度为 vt 的柱体内的所有自由电荷所带的总电荷量。

解 （1）根据电流的定义

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

（2）根据欧姆定律，该导体两端电压

$$U=IR=nSvqR$$

拓展 （1）在存在着恒定电流的导体中，自由电荷定向移动的速率是很小的，一般只有 10^{-5}m/s 的数量级。但电场的传播速度等于光速，在我们实验室的小范围内，电场的传播可以认为是不需要时间的，一个原来不闭合的电路，在闭合开关的瞬间，导体中的电场就立即形成，从而有了电流的流动。

（2）当我们说 A、B 两点的电势差时，如果 A 点电势高于 B 点电势，则为正值，反之，如果 A 点电势低于 B 点电势，则为负值。但我们用“电压”这个词时，往往不指明是哪两点的电势差，而只说“两端电压”，这时指的就是绝对值了。

有兴趣的同学可以计算一下，在一条横截面积为 1mm^2 的铜导线内通有 1A 电流时，导体内自由电子定向运动的平均速率是多大？（已知铜导线内自由电子的密度为 8.4×10^{28} 个 $/\text{m}^3$）

认识多用电表

我们初中已经学习过用电流表测电流和用电压表测电压的方法。在技术领域、电工操作和实验室中，人们更常用多用电表来测量这些物理量。

多用电表具有多种功能，比较简单的多用电表可以测量电流、电压、电阻等（电流和电压又分直流和交流）。图 2-1-3 是常用的指针式多用电表和数字式多用电表。二者的

不同在于指针式电表是根据指针指示的位置读取数据，而数字式电表则直接把测量的结果在显示屏上用数字显示出来。

这两类多用电表都有一个选择开关，开关的周围分为若干区域，例如图 2-1-3（a）所示的指针式多用电表分为四个区域，分别是直流电流（DC mA）、直流电压（DC V）、交流电压（AC V）和电阻（Ω），每个区域内又分为若干个量程。把选择开关旋转到电流挡或电压挡的某个量程的位置，它就是电流表或电压表。测量直流时需要注意把红表笔接高电势（即电源的正极）一边，黑表笔接低电势（即电源的负极）一边，使电流从红表笔流入，经表头后从黑表笔流出。



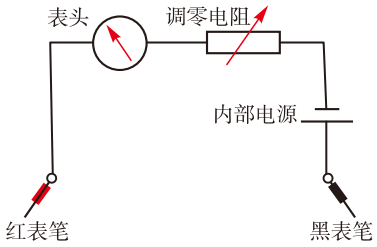
（a）



（b）

▲ 图 2-1-3

选择开关旋转到电阻区域的某个量程处，它就是一个测量电阻的表，称为电阻表（或欧姆表），这时表内部有电池作为电路的电源，如图 2-1-4 所示。表内部电源的正极接黑表笔，负极则通过调零电阻、表头接到红表笔。使用前先把两支表笔短接（直接接触），对于表头内部来说，电流仍是从红表笔一端流入而流向黑表笔一端，这时可看到指针偏转到表盘右侧接近满偏处。调整电阻挡调零旋钮（如标有Ω的旋钮），即调节图 2-1-4 中的调零电阻的阻值，使得指针指示电阻挡刻度线的零位置（最右边），再用两支表笔分别接触待测电阻的两端，待表的指针稳定下来后读取数据，把该数值乘以相应的倍率，即得到待测电阻的阻值。如果指针偏转的角度过大或过小，应该旋转选择开关以改变倍率，重新把两表笔短接进行电阻调零，然后再进行测量。如果测量时指针稳定下来后处于靠近表盘中间的位置，则测量结果比较准确。



▲ 图 2-1-4　电阻表的原理

自我评价

1. A、B 两根材料相同的导线，长度相同，A 的横截面积是 B 的横截面积的 2 倍。

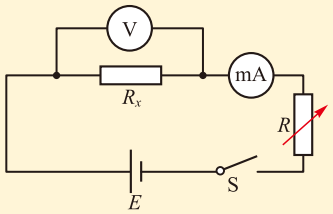
（1）把它们串联在电路中，通过它们的电流大小分别是 I_A 和 I_B，它们内部自由电子移动的平均速率分别是 v_A 和 v_B，则 $I_A : I_B$ 及 $v_A : v_B$ 各是多少？

（2）把它们并联在电路中，它们两端的电压大小分别是 U_A 和 U_B，它们内部恒定电场的场强分别是 E_A 和 E_B，则 $U_A : U_B$ 及 $E_A : E_B$ 各是多少？

2. 请总结恒定电场与静电场的异同。

3. 图 2-1-5 为用伏安法测量电阻的原理图。图中Ⓥ为电压表，内阻为 4000Ω；Ⓐ为电流表，

内阻为 50Ω；E 为电源，R 为电阻箱，R_x 为待测电阻，S 为开关。闭合开关后电压表示数 $U=1.6\,\mathrm{V}$，电流表示数 $I=2.0\,\mathrm{mA}$。

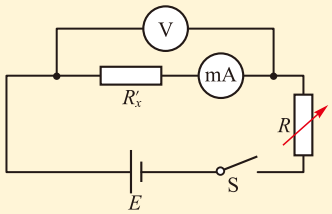


▲图 2-1-5

（1）我们把 U 与 I 的比值称为 R_x 的测量值，即 $R_{x测}=\dfrac{U}{I}$，试求出该值的大小。

（2）实际上 U 与 I 的比值是 R_x 与电压表并联后的总电阻，请据此求出 R_x 的真实值。

4. 图 2-1-6 是另一种伏安法测电阻的电路，如果闭合开关后两电表示数仍为 $U=1.6\,\mathrm{V}$，$I=2.0\,\mathrm{mA}$。请按照上题的思路，分别求出待测电阻 R_x 的测量值与真实值。



▲图 2-1-6

5. 下面关于多用电表的说法中正确的是（　　）

A. 多用电表是电压表、电流表、电阻表共用一个表头改装而成的

B. 用多用电表测电压、测电流、测电阻时，0 刻度线都位于表盘的右侧

C. 用多用电表测电压、测电流、测电阻时，外面电路都必须有电源

D. 用多用电表测电压、测电流及测电阻时，电流都是从红表笔流入，经表头后从黑表笔流出

发展空间

课外阅览

多用电表的原理

多用电表内部只有一个表头（即灵敏电流表），它的量程大约几百微安（μA），电阻约100Ω。它是怎样做到能测量不同的电压和电流的呢？

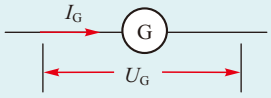
举一个例子：一个灵敏电流表的量程$I_G=300\ \mu\mathrm{A}$、电阻$R=100\ \Omega$的表头，当通过它的电流达到最大时，它两端的电压为$U_G=I_GR=300\times100\ \mu\mathrm{V}=0.03\ \mathrm{V}$，即它实际上也是一块量程为$U_G=0.03\ \mathrm{V}$的电压表，如图2-1-7所示。

（1）现在要把它改装成量程为 $U=3\mathrm{V}$ 的电压表，怎么办？

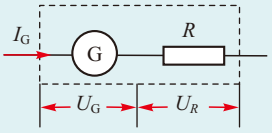
如图 2-1-8 所示，给表头串联一个电阻 R，当通过表头的电流达到最大即 I_G 时，表头两端电压仍等于 U_G，电阻 R 两端电压为 U_R，则改装后的电压表量程 $U=U_G+U_R$，则 $U_R=U-U_G$，电阻 R 的阻值 $R=\dfrac{U-U_G}{I_G}$，代入数值可得 $R=9900\,\Omega$。

（2）现在要把它改装成量程为 $I=3\mathrm{A}$ 的电流表，怎么办？

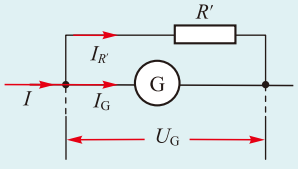
如图 2-1-9 所示，给表头并联一个电阻 R'，当表头两端的电压达到最大 U_G 时，电阻 R' 两端电压也等于 U_G。通过表头的电流等于 I_G 时，通过电阻 R' 的电流为 $I_{R'}$，则 $I_{R'}=I-I_G$，电阻 R' 的阻值 $R'=\dfrac{U_G}{I-I_G}$，代入数值可得 $R'=0.01\,\Omega$。



▲图 2-1-7 多用电表的表头



▲图 2-1-8 改装成大量程电压表



▲图 2-1-9 改装成大量程电流表

多用电表的选择开关的作用就是把表头与不同的电阻串联或并联，从而使它成为不同量程的电压表或电流表。

多用电表内部还有一块或两块电池，这是用来测量电阻时作为电源使用的，其原理如图2-1-4所示。

2 实验：练习使用多用电表

在上一节，我们已经了解了多用电表的原理和基本结构。现在让我们用它来进行实际测量。

认识和调整指针式多用电表

1. 找到中心位置的选择开关，看看它的周围分哪几个区域，各有哪几个量程。

2. 观察多用电表上方的表盘，包括指针和刻度，看它有几条刻度线，分别对应着哪些测量区域。要注意指针是否指零，如果有偏差，可以用螺丝刀旋转“指针定位旋钮”（位于指针的转轴处），将指针旋至左边零位置。

3. 把选择开关旋转到电阻挡某一量程处，将两支表笔直接接触，观察指针指在何处，再调节“电阻调零旋钮”，使指针指到电阻的零刻线处。

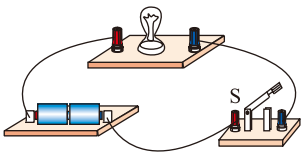
测量电阻

1. 先选择电阻挡的某一挡位，例如“×100”挡，进行“电阻调零”，使指针指到电阻的零刻线处。

2. 分别用两支表笔接触待测电阻的两端，观察指针指示的位置。如果偏转角度过大或过小，应改变量程，每次改变量程后都要重新进行“电阻调零”，再正确测量并读取数据，然后乘以相应的倍率，即得到待测电阻的阻值。

注意：待测量的电阻必须脱离电源，测量时不要两只手同时接触电阻的两端。

测量通过小灯泡的电流及它两端的电压



▲ 图 2-2-1

1. 用干电池作电源，连接小灯泡电路，如图 2-2-1 所示。

2. 断开开关 S，把电表的选择开关旋转至直流电流挡适当的量程，用两支表笔分别接触开关的两个接线柱，观察指针偏转情况，读取并记录数据。

3. 闭合开关 S。把电表的选择开关旋转至直流电压挡适当的量程，用两支表笔分别接触小灯泡的两个接线柱，观察指针偏转情况，读取并记录数据。

注意：测量电流或电压时，应该让红表笔接到电势较高的一端。多用电表使用完毕后，应该把选择开关置于 OFF 挡或交流电压的最高挡。

判断二极管的正负极

把多用电表的选择开关扳到电阻挡适当量程，让两支表笔分别接触二极管的两根引线，然后变换两表笔的位置再次与二极管的两根引线接触。根据两次指针的偏转情况即可确定二极管的正极和负极。

注意：黑表笔与表内电池的正极相连，红表笔与表内电池的负极相连。

自我评价

1. 在使用多用电表测量导体电阻的操作过程中，有一位同学测量前对电表进行了正确的调节，但当他将两只表笔分别接触待测电阻的两端时，为了使表笔与电阻的接触更紧密，用两只手分别把表笔与电阻的引线握住。他这样做有什么问题？

2. 甲、乙两位同学用两只多用电表测电阻，他们都把选择开关旋到“×100”的电阻挡并能正确操作。他们在测同一电阻时，都发现电表指针偏转较小，这时甲同学把选择开关旋到“×1k”挡，乙同学把选择开关旋到“×10”挡，并立刻去测电阻。他们的共同错误是什么？哪位同学选择的挡位正确？

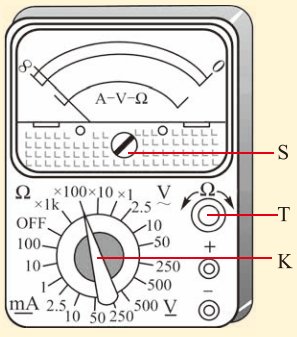
3. 如图 2-2-2 所示是用多用电表的直流电压挡（0 ~ 50 V）、直流电流挡（0 ~ 100 mA）和电阻挡（×100）分别测量电压、电流、电阻时指针的指示情况。请读出所测得的三个数据。

4. 用如图 2-2-3 所示的多用电表测量电阻，要用到选择开关 K 和两个部件 S、T。请回答下面问题：

（1）首先要做的是旋动哪个部件？达到什么目的？



▲ 图 2-2-2



▲ 图 2-2-3 多用电表

（2）将 K 旋转到图示位置，正式测量之前要做的是什么？

（3）以上操作完成之后，将两表笔分别与待测电阻相接，发现指针偏转角度过小，应该怎样继续操作？

5. 使用多用电表的电阻挡，可以粗略检测电容器。首先把多用电表的选择开关旋转到“Ω×100”位置，用两表笔同时分别接触电容器的两极。

（1）如果发现电表指针完全不发生偏转，这说明了什么？

（2）如果发现电表指针偏转到接近刻度盘右侧“0”刻线附近，并且保持这种状况不变，这又说明了什么？

发展空间

实验室

使用多用电表查找电路发生断路的故障点

在电学实验中，断路是常见的电路故障，这时闭合开关，电路中没有电流通过，用电器不工作。

使用多用电表可以方便地找到故障所在。使用多用电表的电压挡，选择适当的量程后，分别去测量某段电路两端的电压，若电压不为零，则说明这两个端点分别与电源的两极连通，断路点就在这段电路中，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电阻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。

3　电阻定律　电阻率

在一个电路中，如果电源不变，要改变电流的大小，有什么办法呢？我们首先想到的是改变连入电路的电阻。那么，导体的电阻是由哪些因素决定的呢？用什么方法可以方便地改变连入电路的电阻？

我们在初中已经学过，金属导体的电阻跟它的长度、横截面积有关。长度越长，电阻越大；横截面积越大，电阻越小。此外，导体的电阻还跟材料及温度有关。这一节，我们将在初中学习的基础上，探究导体的电阻与导体的长度及横截面积之间的定量关系。

电阻定律

实验探究 | 探究导体的电阻跟它的长度及横截面积之间的定量关系

准备若干不同粗细、不同长度，同种材料制成的导线（如镍铬合金线），分别用多用电表的电阻挡测量它们的电阻 R，用刻度尺测量它们的长度 l，用千分尺测量它们的直径 d，再根据公式 $S=\frac{\pi d^2}{4}$ 求出它们的横截面积 S。把所得的数据填入下面的表格中，并在坐标纸上以电阻 R 为纵轴、以 $\frac{l}{S}$ 为横轴建立直角坐标系，根据所得的数据描点作出 $R-\frac{l}{S}$ 图像，看看该图像是否为一条过坐标原点的直线。

导线	电阻 R/Ω	长度 l/m	直径 d/mm	横截面积 S/mm^2	$\frac{l}{S}$
1					
2					
……					

讨论交流

上述实验的结果说明了什么？它符合我们以往对电阻大小的认识吗？

上述实验也可以采用“控制变量法”，即实验分两步进行：第一步，测量若干段横截面积相同而长度不同的同种材料导线的电阻；第二步，测量若干段长度相同而横截面积不同的同种材料导线的电阻。

多次实验可以得出结论：导体的电阻 R 与 $\frac{l}{S}$ 成正比，即 $R\propto\frac{l}{S}$，写成等式为

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

这就是说，**导体的电阻 R 跟它的长度 l 成正比，与它的横截面积 S 成反比**，这就是**电阻定律**。

我们在初中学过，n 个相同的电阻 r 串联，总电阻 R 为 r 的 n 倍；n 个相同的电阻 r 并联，总电阻 R 为 r 的 $\frac{1}{n}$，这些都是可以根据电阻定律得出的结果。

电阻率

由上面的实验结论可知，对于同种导体材料而言，其电阻 R 与 $\frac{l}{S}$ 的比值 k 是一个常量，它与导体的长度 l、横截面积 S 等无关。在物理学中，将这一比值称为该种导电材料的**电阻率**（resistivity），用字母 ρ 表示，电阻定律可写成

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

电阻率 ρ 是表征材料导电性质的物理量，其国际单位制单位是欧·米（Ω·m），它在数值上等于由该种材料制成的单位长度、单位横截面积的导体的电阻。例如金属铝的电阻率为 $2.7\times10^{-8}\Omega\cdot\mathrm{m}$，就表示长度为 1m、横截面积为 $1\mathrm{m}^2$ 的铝制柱体的电阻为 $2.7\times10^{-8}\Omega$。

下表给出了几种常见导体材料的电阻率。

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	2.9×10^{-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，常用作电路中的导线；铁的电阻率大约是铝的电阻率的 5 倍，但铁的强度大，在远距离输电时，常用铁作芯线，外面则用铝线，制成多股绞合输电线；银的电阻率更小，但它比较昂贵，只用做某些精密电路中连接导线的镀层。电阻率较大的合金材料常用做电阻器或电热器中的电阻丝。

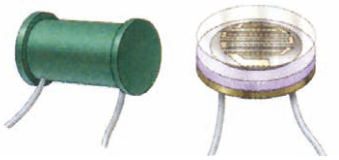
各种材料的电阻率都随温度变化而变化，一般情况下，金属的电阻率随温度的升高而增大。利用金属的电阻

镀银的导线一般用在高频交流电路中。

率随温度变化的规律可以制成电阻温度计，用来测量温度。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，这种元件统称为电阻器，通常也简称为电阻。其中电阻不能调节且电阻值随温度变化较小的称为定值电阻，电阻可调节的称为变阻器。

不同材料的电阻率差别很大。导体的电阻率很小，为（10^{-8} ~ 10^{-6}）Ω·m；绝缘体的电阻率一般都很大，为（10^{8} ~ 10^{18}）Ω·m；导电性能介于导体和绝缘体之间的，称为半导体，其电阻率为（10^{-5} ~ 10^{6}）Ω·m。

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（图 2-3-1），用在测量温度、光强及各种自动控制设备之中。在现代电子技术中，半导体材料有着极其广泛的应用。



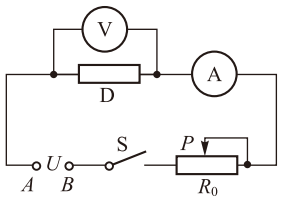
热敏电阻　　光敏电阻

▲ 图 2-3-1

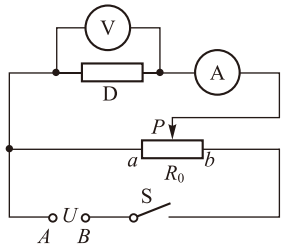
限流电路和分压电路

活动

串联电路的基本特点是电流处处相等，并联电路的基本特点是各支路电压相等。请你从这两个特点出发，推导串联电路和并联电路总电阻与分电阻的关系。



▲ 图 2-3-2　限流电路



▲ 图 2-3-3　分压电路

导体串联与并联的规律，我们在初中已经学过：阻值分别为 R_1 与 R_2 的两个电阻串联，其总电阻 $R_{串}=R_1+R_2$；阻值分别为 R_1 与 R_2 的两个电阻并联，其总电阻 $R_{并}$ 满足 $\frac{1}{R_{并}}=\frac{1}{R_1}+\frac{1}{R_2}$。

滑动变阻器是通过改变连入电路中的电阻丝的长度而改变连入电路中电阻的仪器。在电路中，滑动变阻器有两种常见的用法。

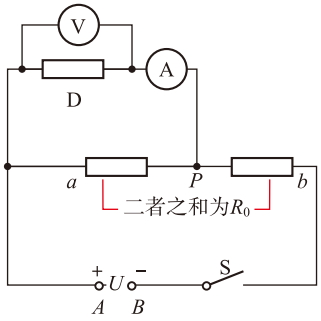
许多物理实验和实际生产过程，常常需要使电流或电压在一定范围内连续变化。例如，为了测定一个元件的

I–U 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 2-3-2 所示的限流电路或如图 2-3-3 所示的分压电路。

活动

1. 画出图2-3-2和图2-3-3这两个电路中流过变阻器的电流方向。
2. 为了安全，闭合开关之前，滑动变阻器的滑片P应该放置在哪一端？

上面两种电路的不同在于滑动变阻器的接入方式。限流电路中，滑动变阻器是串联在电路中的，这是我们在初中学过的方法；而在分压电路中，滑动变阻器的三个接线柱分别连在不同的位置，它的电阻丝 R_0 以滑片 P 为界分成 aP 和 Pb 两部分，其中 Pb 是串联在干路中的，aP 是一个并联的支路，其等效电路如图 2-3-4 所示。



▲ **图 2-3-4**　分压电路的等效电路

讨论交流

在上述限流电路和分压电路中，若 A、B 两点间的电压恒为 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 $0 \sim U$。

使用滑动变阻器之前，要弄清楚它的最大电阻值和允许通过的最大电流值。使用时通过滑动变阻器的电流不得超过最大电流值。

自我评价

1. 一块均匀的长方体样品，长为 a，宽为 b，厚为 c。沿长度方向测得电阻为 R，则该样品的电阻率是多少？若改为沿宽度方向测量，电阻是多少？

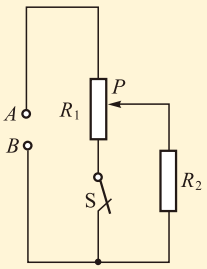
2. 两根完全相同的金属裸导线甲和乙，如果把甲均匀拉长到原来的 2 倍，把乙对折并成一根使用，求它们电阻之比。

3. 一卷铝导线，横截面积为 1 mm^2。在 27℃时，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？

4. 如图 2-3-5 所示，滑动变阻器的最大电阻 $R_1 = 200\ \Omega$，定值电阻 $R_2 = 300\ \Omega$，AB 间电压稳定保持 $U = 8$ V。闭合开关 S。

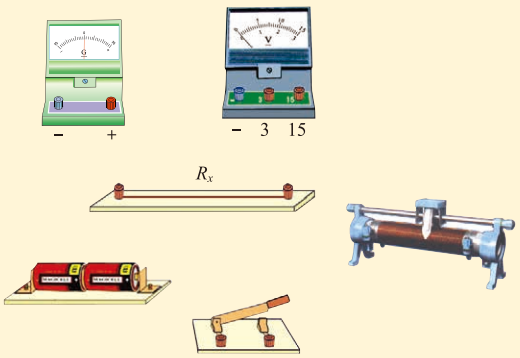
（1）把滑片 P 移到什么位置，R_2 两端的电压最高？最高值是多少？

（2）把滑片 P 移到什么位置，R_2 两端的电压最低？最低值是多少？



▲ 图 2-3-5

5. 图 2-3-6 为用伏安法测量 R_x 电阻的实验器材实物图，请先画出实验的电路图，然后按照电路图用笔画线代替导线把图中实物连接成实验电路（要求使用图中所有器材，其中电压表选用 0 ~ 3 V 的量程）。



▲ 图 2-3-6

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，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，340m 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。2017 年 1 月 9 日，中国科学院物理研究所赵忠贤院士获国家最高科学技术奖。超导长达百余年的研究史中，关于高温超导有两次重大突破，赵忠贤及其合作者都取得了重要成果，分别是：1987 年独立发现液氮温区高温超导体，2008 年以后发现系列 50K 以上铁基高温超导体并创造了 55K 的纪录。

4　实验：测量金属的电阻率

实验设计

根据电阻定律$R=\rho\frac{l}{S}$，可得$\rho=\frac{RS}{l}$。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。

实验探究

如何选择待测金属材料呢？一般常用的金属导线有铜线、铝线以及合金导线，铜和铝的电阻率都很小，要得到几欧至十几欧之间的电阻，需要很细或很长的导线；而合金材料的电阻率较大，常用的有康铜、镍铬合金等。康铜是实验室中制作定值电阻、滑动变阻器的材料，而镍铬合金是电炉丝的常用材料，选择它们作为测量对象不必很长或很细，比较方便。

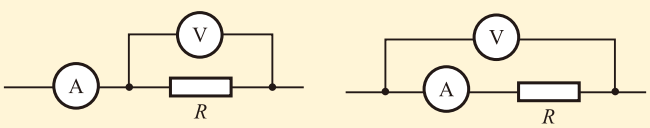
金属丝的长度l可以用刻度尺测量，金属丝的横截面直径d可以用螺旋测微器（千分尺）测量，根据测得数据可以计算出横截面积。

金属丝的电阻可以使用多用电表直接测量，但多用电表的电阻挡测量精确程度较低，一般只适合大致估测其数量级。中学实验室中较精确的测量通常采用伏安法，即用电压表测量电阻两端的电压U，用电流表测量通过电阻的电流I，再根据电阻的定义$R=\frac{U}{I}$计算出电阻值。

附录“长度的测量及其测量工具的选用”

螺旋测微器又称千分尺，是一种分度值可达$\frac{1}{1000}$cm的长度测量工具，它的原理及具体用法见本书附录。

如图2-4-1所示就是采用伏安法测量金属丝电阻的两种电路图。二者的不同在于（a）图中电压表与待测电阻并联，而电流表串联在干路上，这称为电流表外接法；（b）图则是电流表与待测电阻串联，再把电压表与这段串联电路并联，这称为电流表内接法。



（a）电流表外接　　（b）电流表内接

▲ **图2-4-1**　伏安法测电阻的两种电路

讨论交流

1. 如果电流表和电压表都是理想电表，即电流表的内阻 R_A 为零，电压表的内阻 R_V 为无穷大，电流表内接法和外接法两种电路的测量结果有区别吗？

2. 因为电流表和电压表都不是理想电表，测量电阻时要产生误差。

（1）电流表外接法引起测量误差的原因是什么？电流表内接法引起测量误差的原因是什么？

（2）两种电路的测量结果，比电阻的真实值偏大还是偏小？

（3）根据以上分析，实际的电流表和电压表，内阻越大测量结果越精确，还是内阻越小测量结果越精确？

使用电流表外接法时，电流表测得的数值包括了流过电压表的电流，比流过待测电阻的电流要大，因此测量结果比真实值偏小；使用电流表内接法时，电压表测得的数值包括了电流表两端的电压，比待测电阻两端的电压要大，因此测量结果比真实值偏大。

实际测量时，为了使测量结果更准确，要根据待测电阻的大小与电流表、电压表内阻的大小的比较结果选择接法。一般来说，当待测电阻 R_x 远小于电压表本身的电阻 R_V 时，采用电流表外接法误差较小；当待测电阻 R_x 远大于电流表本身的电阻 R_A 时，采用电流表内接法误差较小。

更准确的标准是：当 $R_x \ll \sqrt{R_A \cdot R_V}$ 时，采用电流表外接法；当 $R_x \gg \sqrt{R_A \cdot R_V}$ 时，采用电流表内接法。

由于实验时需要改变待测电阻两端的电压，从而改变通过电阻的电流，多测几组数据，因此电路中需要接入滑动变阻器。滑动变阻器的接法也有两种，如上一节图 2-3-2 所示的限流电路和图 2-3-3 所示的分压电路。

讨论交流

1. 中学物理实验室使用的直流电压表选0～3 V挡时内阻约3 kΩ，选0～15 V挡时内阻约15 kΩ；直流电流表内阻约0.1 Ω。根据你实验时待测电阻的大约数值，你认为测量时采用电流表外接法好还是采用电流表内接法好？

2. 如果希望在尽可能大的范围内改变待测电阻两端的电压，滑动变阻器的接法应该采用限流电路还是分压电路？

实验操作

1. 用螺旋测微器测出金属丝的直径 d，用 $S=\pi\left(\frac{d}{2}\right)^2$ 计算出金属丝的横截面积 S。

2. 用刻度尺测量导体的长度 l。

注意：测量时要先把金属丝接入电路并拉直，然后用刻度尺量出它接入电路的长度。

3. 用伏安法测量导体电阻 R（如果条件允许，可以先用欧姆表粗略测量待测电阻的阻值，然后根据测量值选择电流表的接法），按图 2-3-2 或图 2-3-3 连接电路，闭合开关，移动滑动变阻器的滑片，看看它对电流、电压是否具有良好的调节效果，并确定测量电路。

测出金属丝两端的电压 U 和通过的电流 I，并计算出金属丝的电阻 R。多测几组数据，求出电阻 R 的平均值。也可以根据测得的多组数据在坐标系上描点，作出 U-I 图像，通过图像的斜率求出电阻 R 的值。测量完毕后，断开开关并拆下器材回归原位。

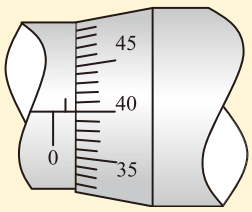
4. 由 $\rho=\frac{RS}{l}$ 计算出金属丝的电阻率。

如果使用柔软的铜导线，测量其直径可以采用初中学习过的累积法，即把细铜丝密绕在一支铅笔或其他柱状物体上，用刻度尺测量 n 匝直径的和，再除以匝数即得到铜丝的直径。

注意：电流不能太大，通电时间不能过长，以免温度升高影响测量的准确度。

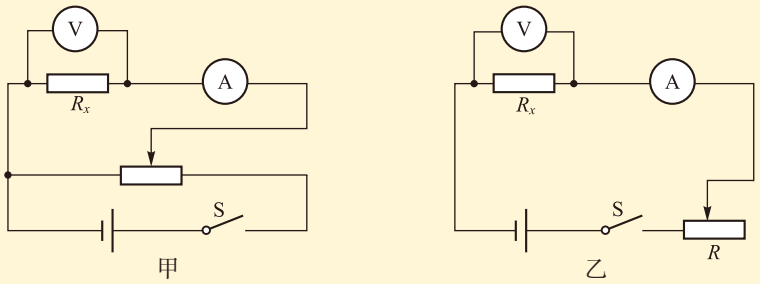
自我评价

1. 在测定金属电阻率的实验中，需要使用螺旋测微器测量金属导线的直径，图 2-4-2 是某次测量时仪器的示数情况，请你读出其测量值。



▲ 图 2-4-2

2. 图 2-4-3 中的甲和乙是测量金属丝电阻 R_x 的两种电路，其主要区别是下半部分滑动变阻器的连接方法不同，甲称为“分压电路”，乙称为“限流电路”。

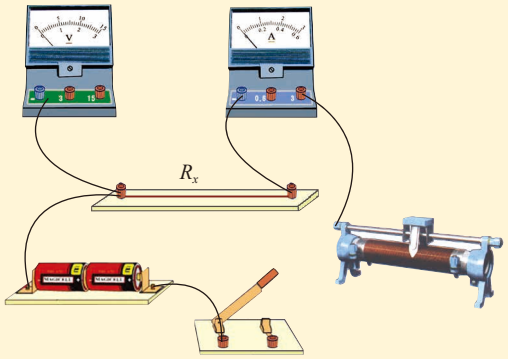


▲ 图 2-4-3

（1）要想待测电阻 R_x 两端电压能从零开始连续变化，应选用哪一种电路？

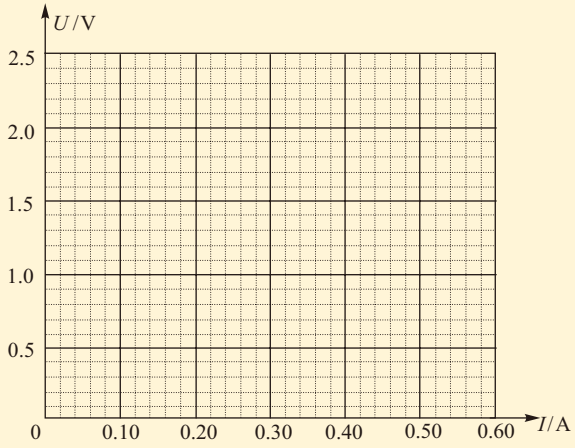
（2）选用上面那一种电路时，滑动变阻器的总电阻 R 与待测电阻 R_x 相比较，哪一个的电阻应小一些？

3. 图 2-4-4 是测量金属丝电阻 R_x 的实验器材实物图，已经连接了部分导线，只差两条导线，请你用笔画线把这两条导线连上，并说明它是图 2-4-3 中的哪一种电路。



▲ 图 2-4-4

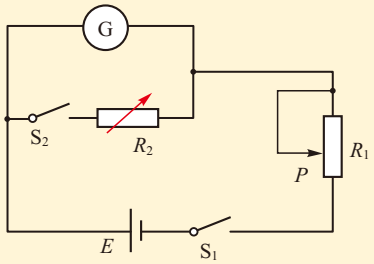
4. 在坐标纸上建立 U-I 坐标系，如图 2-4-5 所示。请把下面表格中的实验数据标注在图中的坐标系上，再把各数据点连接 U-I 图线，并根据图线求出金属丝的电阻 R_x 的值。（保留两位有效数字）



▲ 图 2-4-5

次数	1	2	3	4	5	6	7
U/V	0.10	0.30	0.50	0.70	1.00	1.50	2.00
I/A	0.020	0.060	0.110	0.160	0.220	0.340	0.460

5. 如图 2-4-6 所示为使用半值法测量电流表内阻的实验电路图，其中 G 为待测电流表，它的内阻大约是几十欧，量程为 0 ~ 30 mA。电源 E 两端电压约 9V，R_1 为滑动变阻器，R_2 为可读出电阻数值的电阻箱，阻值范围为 0 ~ 999.9 Ω。首先断开开关 S_2，只闭合开关 S_1，调节 R_1，使得电流表 G 满偏（表针指到 30 mA）。保持滑片



▲ 图 2-4-6 半值法测电流表内阻

P 的位置不动，闭合开关 S_2，调节 R_2，使得电流表 G 半偏（表针指到 15 mA），读出电阻箱 R_2 的电阻值 R，则电流表 G 的内阻即为 R。

回答以下问题：

（1）滑动变阻器 R_1 的最大阻值至少为多少？

（2）测量值 R 比电流表内阻的真实值偏大还是偏小？为什么？

（3）这种方法只适合测量阻值较小的电阻，为什么？

5 实验：描绘 *I-U* 特性曲线

测量多组某电学元件两端的电压 U 及通过它的电流 I 的值，把这些数值记录在以电压 U 为横轴、以电流 I 为纵轴的坐标系上，并把这些数据点连接成一条线，即为该元件的 *I-U* 特性曲线，这是研究元件电学特性的一种重要方法。

我们已经知道，金属导体遵守欧姆定律，即在温度一定的条件下，其 *I-U* 特性曲线是一条过原点的直线。下面我们通过实验描绘小灯泡的 *I-U* 特性曲线，看看它是什么形状。你可以分析其中的原因吗？

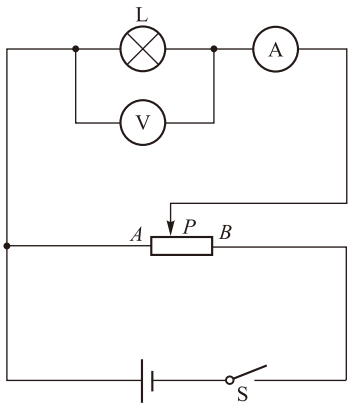
x–t图像、v–t 图像、F–x 图像、$R-\frac{l}{S}$图像……想一想，到现在我们一共学习了哪些图像？

实验设计

设计实验电路时，可以把它分为测量电路和控制电路两部分。

1. 测量电路：用电流表测量通过小灯泡的电流，用电压表测量小灯泡两端的电压。由于小灯泡的电阻远小于电压表的内阻，实验时采用电流表外接法。

2. 控制电路：利用两节干电池作为电源，使用滑动



▲ 图 2-5-1

变阻器改变通过小灯泡的电流和它两端的电压。实验时，我们希望小灯泡两端的电压在零至额定电压之间变化，因此控制电路中滑动变阻器采用分压接法。

测量时，为了便于描点和分析，一般让电压表每次读数的变化量相等。电源两极间的电压要稍高于小灯泡的额定电压。

综上所述，实验电路如图 2-5-1 所示。

实验操作

1. 如图 2-5-1 所示连接电路。

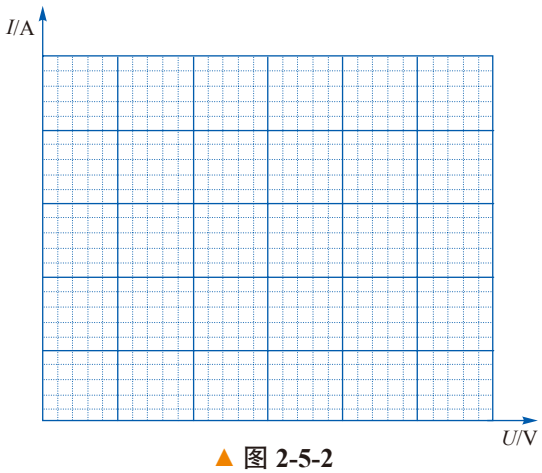
2. 将滑动变阻器的滑片 P 置于 A 端，使小灯泡 L 两端的电压为零，检查电路无误后，闭合开关 S。

3. 将滑片 P 逐渐向 B 端移动，让电压表每次读数的变化量相等，直到达到小灯泡的额定电压。读出若干组电压表的示数 U 及相应的电流表的示数 I，记录在下面的表格中。

U/V														
I/A														

4. 断开开关 S，拆除电路，整理器材。

5. 如图 2-5-2 所示，在坐标纸上建立平面直角坐标系。以纵坐标表示电流 I，横坐标表示电压 U，根据实验得到的数据在坐标系上描点，并用平滑曲线连接起来，便得到小灯泡的 I-U 特性曲线。



▲ 图 2-5-2

结论分析

讨论交流

1. 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？

2. 根据你得到的实验数据，由 $R=\frac{U}{I}$ 计算小灯泡的电阻。以电阻 R 为纵坐标，电压 U 为横坐标，作出小灯泡的电阻随电压变化的曲线。你能发现什么特点？

3. 我们如果要通过实验描绘一个定值电阻的*I*-*U*特性曲线，要求加在定值电阻两端的电压不要太大，每次通电时间要尽可能短，读数完毕立即切断电源。这样做的目的是什么？

导体的电阻都与温度有关。金属导体的电阻（某些合金除外），是随温度的升高而增加的。当小灯泡两端电压达到额定电压而正常发光时，灯丝温度会达到 2000 ℃左右。从室温（20 ℃左右）升高到 2000 ℃左右的过程中，灯丝电阻的变化明显。我们通过实验描绘定值电阻的 I-U 特性曲线时，由于所加电压不太高，通过的电流不太强，而且每次通电时间很短，其温度可以认为保持不变，或者变化不大，从而由于温度的变化而引起的电阻改变可以忽略，因此其 I-U 特性曲线是一条直线，也正因为如此，才称其为“定值电阻”。

定值电阻用金属材料制作，它们的电阻率随温度的变化不敏感。半导体材料的电阻率随温度的变化非常敏感，适于用作热敏电阻等。

能否根据小灯泡的*I*-*U*特性曲线不是一条过坐标原点的直线，就认为小灯泡的灯丝不遵守欧姆定律？

自我评价

1. 有一个电学元件，测得其两端电压和通过电流的对应值如下表所示，请据此画出该元件的*I*-*U*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

2. 某同学在探究规格为“6V 3W”的小灯泡*I*-*U*特性曲线的实验中：

（1）在小灯泡接入电路前，使用多用电表直接测量小灯泡的电阻，则应将选择开关旋至哪个挡进行测量？（　　）

A. 直流电压 10V　　B. 直流电流 5mA

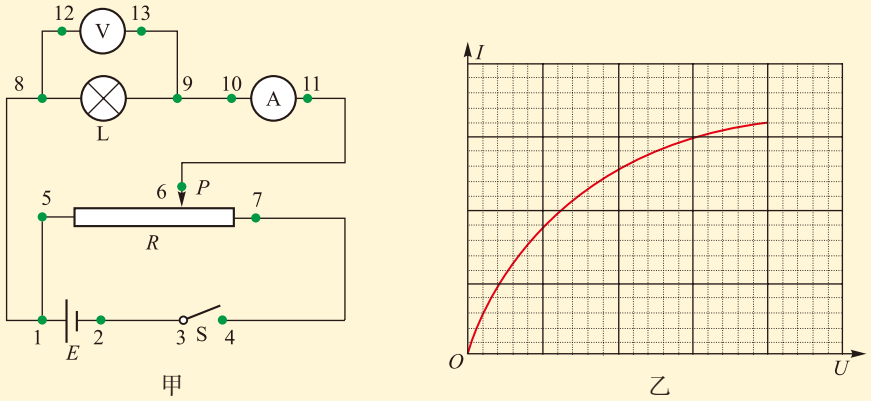
C. 电阻 ×100　　D. 电阻 ×1

（2）该同学采用如图 2-5-3 甲所示的电路进行测量。图中 *R* 为滑动变阻器（阻值范围 0~20Ω，额定电流 1.0A），L 为待测小灯泡，Ⓥ为电压表（量程 6V，内阻 20kΩ），Ⓐ为电流表（量程 0.6A，内阻 1Ω），*E* 为电源（两极间电压 8V），S 为开关。

①在实验过程中，开关 S 闭合前，滑动变阻器的滑片 *P* 应置于哪一端？

②在实验过程中，已知各元器件均无故障，但闭合开关 S 后，无论如何调节滑片 *P*，电压表和电流表的示数总是调不到零，其原因可能是哪一条导线没有连接好？（图甲中的绿色小圆点表示接线点，并用数字标记，请用图甲中的数字说明存在断路的导线，如“2 点至 3 点的导线”）

③排除故障后进行实验，该同学描绘出的小灯泡的 *I*–*U* 特性曲线如图 2-5-3 乙所示，则可以看出小灯泡的阻值随着两端电压的增大而怎样变化？原因是什么？



▲ 图 2-5-3

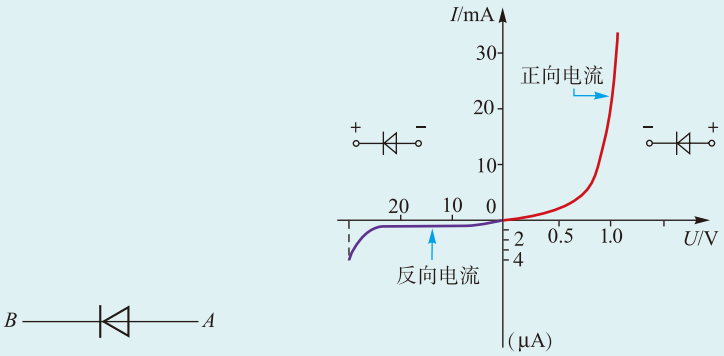
发展空间

课外阅览

二极管的 *I*-*U* 特性曲线

二极管是用半导体材料制成的一种电子元件，一般用如图 2-5-4（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。

实验测得二极管在某一温度下的 *I*–*U* 特性曲线如图 2-5-4（b）所示，你从图中可以得出二极管具有一些什么特性？



（a）二极管的符号　　（b）二极管的伏安特性曲线

▲ 图 2-5-4

二极管的 I-U 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 I-U 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。

感悟 · 启迪

《论语》有云：“工欲善其事，必先利其器。”这句话用来描述科学研究，恰如其分。严谨的科学研究离不开精密的测量工具。长度的测量是基本的测量之一，刻度尺是测量长度的基本工具。要想测量更精确，就必须获得更精细的刻度。但受制于人眼的分辨能力，刻度尺的分度值一般是1 mm。也就是说，用普通刻度尺进行测量，其读数只能准确到毫米位，再下一位只能靠估读，而估读的结果是不准确的。

感谢前人的创造发明，他们利用并不复杂的螺旋放大的原理，制成了螺旋测微器，一下子把测量精度提高了两个数量级，即把分度值提高到 0.01 mm。当然，只是长度测量精度的提高是不够的，各种物理量的测量，例如用于测量电学量的各种电表，其精度都需要提高。

发明与创造也许并不那么高深玄奥，只是需要执着的思考和一点灵感，在将来你是不是也能提出更多的创意，做出更大的贡献呢？

6 电源的电动势和内阻 闭合电路欧姆定律

一天晚上，小聪和几个同学正聚精会神地玩着新买来的玩具——无人机。飞了几个来回，正在兴头上，小飞机却飞不起来了。小明说：“是电池没电了。”小聪把电池拆下来就想随手扔进废旧电池回收箱，小明却说：“先别扔，放在电子钟上还能再用一段时间。”小聪不明白：既然没电了，小飞机不能用了，为什么放在电子钟上还能用一段时间呢？

电池

活动

1. 收集常见的电池

生活中有各种各样的电池，大家可以收集一下。如图2-6-1所示的是一些常见的电池，它们大小不同，形状各异，但是它们有一个共同的功能：为我们的各种用电设备提供电能。



▲ 图 2-6-1 各式各样的电池

2. 测量电池两端的电压

用电压表分别测一测1号电池、5号电池、7号电池、蓄电池、手机电池正负极之间的电压，你有什么发现？

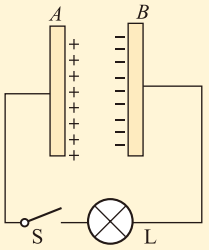
家里的用电器，比如电冰箱、电视机、计算机、热水器等，它们的电源在哪里？电能是怎样传输的？有哪些类型的电源？

观察思考

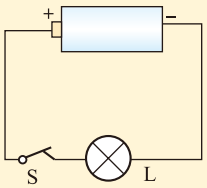
如图 2-6-2（a）所示，两个导体 A、B 构成一个电容器，充电后二者之间存在一定的电势差。把小灯泡 L 与两个导体连接起来，闭合开关，你会看到怎样的现象？

如果 A、B 是两块平行金属板，小灯泡不会发光。你应该能够想象到，小灯泡中会有电流流过，同时导体之间的电势差急剧减小。当电势差为零时，电流也变为零。这个放电电流持续的时间很短，等不到灯丝温度升高电流就停止了。但如果我们用一个大容量的电容器（如超级电容器）做实验，是可以看到小灯泡发光的，但它的亮度会慢慢减弱，直到完全熄灭。这说明了什么？

如果用电池替代这个电容器，如图 2-6-2（b）所示，闭合开关，会看到灯泡持续发光，这说明电路中有了持续的电流。这里电池起了什么作用呢？



（a）



（b）

▲ 图 2-6-2

电源　电动势和内电阻

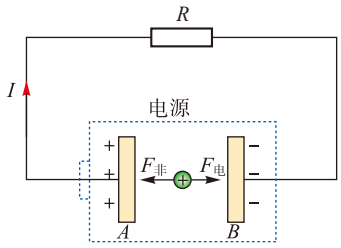
电池通过化学反应，不断地把正电荷从电势较低的负极移到电势较高的正极（或把负电荷从正极移到负极），从而维持电池两极间恒定的电势差，也就使得电路中有恒定电流存在，灯泡得以持续发光。从能量转化的角度来说，电池是将化学能转化为电势能（简称电能）的装置。其他类型的电源，如光电池、发电机等，也都是将其他形式的能转化为电能的装置。

我们把所有能提供电能的装置称为**电源**（power source），其中像电池这样把化学能转化为电能的电源称为化学电源。

图 2-6-2（b）中的干电池就是一种常用的化学电源，它与小灯泡、导线、开关组成了一个最简单的电路。这个电路可以分成两部分：电源的正、负极以外的部分，包括导线、用电器及开关在内，称为外电路，外电路两端的电压，即电源两极间的电压，称为**路端电压**；而电源内部称

为内电路，合起来称为闭合电路，也称全电路。

为了更清楚地说明内电路中的一些问题，我们把闭合电路画成如图 2-6-3 所示的情形，并假定电路中定向移动的电荷都是正电荷。正电荷在外电路中从电源的正极流向负极，靠的是恒定电场中电场力的作用。在内电路中，正电荷从负极流向正极。内电路中也存在恒定电场，由于正极的电势高于负极，因此电场的方向是从正极指向负极，正电荷受到的电场力 $F_{电}$ 的方向与它定向运动的方向相反，这里必有另外一种力存在，它的方向与电场力的方向相反，我们把这种力称为非静电力 $F_{非}$。对于电池这类化学电源而言，非静电力是由于化学反应而产生的。其他类型的电源，非静电力的产生原因各不相同，但都不是静电力。



▲ 图 2-6-3

设电路中流过的恒定电流为 I，在时间间隔 t 内，流过电路中任一截面的电荷量都是 $q=It$。在这个过程中，电源内的非静电力要把电荷 q 从负极移到正极，就必须克服电场力做功，或者说非静电力要做功 $W_{非}$。若流过截面的电荷量变为 $2q$、$3q$、…，非静电力所做的功也相应地变为 $2W_{非}$、$3W_{非}$、…，就是说，非静电力所做的功 $W_{非}$ 与流过的电荷 q 成正比，即 $W_{非} \propto q$。其比值与电荷量无关，而是由电源本身的性质决定，我们把**非静电力在电源内部将正电荷从电源负极移到正极所做的功 $W_{非}$ 与电荷量 q 的比**称为电源的**电动势**（electromotive force），用符号 E 表示，即

$$E=\frac{W_{非}}{q}$$

电动势的国际单位制单位是伏特，简称伏，符号为 V。

电动势是表征电源内非静电力做功本领的物理量，它在数值上等于电源把单位正电荷经电源内部从负极移到正极的过程中非静电力所做的功。

在闭合电路的内电路部分，即电源内部也存在电阻，我们称为内电阻，简称**内阻**（internal resistance）。

几种电池的电动势

电源名称		电动势 E / V
铅蓄电池		2.0
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

注意：电动势与电场强度的常用符号都是 E，请根据前后文把它们区分开来。

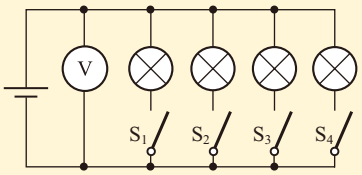
闭合电路欧姆定律

活动　|　探究小灯泡变暗的原因

1. 按图2-6-4所示连接电路，逐次闭合开关，观察随着点亮灯泡个数的增加，灯泡亮度有什么变化。想一想，灯泡亮度变化的原因可能是什么？

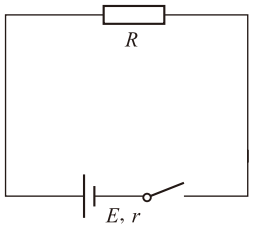
2. 再逐次断开开关，观察随着点亮灯泡个数的减少，灯泡亮度有什么变化，并注意电压表的示数有什么变化。电源两极间电压是恒定不变的吗？你能推测电压表示数变化的原因吗？

3. 如果电源没有内阻，会有这种现象吗？



▲ **图 2-6-4**　观察干电池两端电压随负载的变化而变化

如图 2-6-5 所示的闭合电路中，电源电动势为 E、内电阻为 r，外电路电阻为 R，当开关断开时，其路端电压 U 等于电源的电动势 E；当开关闭合时，有电流 I 通过，内部电势降落为 Ir，这时路端电压 U 小于电动势 E，它们满足的关系是



▲ **图 2-6-5**

$$U = E - Ir \qquad (A)$$

（A）式表示了闭合电路中路端电压、电源的电动势以及内部电势降落之间的关系。在外电路只接有电阻元件的情况下，通过电路的电流 $I = \frac{U}{R}$，代入（A）式整理后可得到

$$I = \frac{E}{R + r} \qquad (B)$$

（B）式表示：**在外电路只接有电阻元件的情况下，通过闭合电路的电流大小跟电源的电动势成正比，跟内外电阻之和成反比**，这就是**闭合电路欧姆定律**（Ohm law of closed circuit）。

（A）式和（B）式都是闭合电路内在规律的表述形式，但适用范围有所不同。（B）式仅适用于外电路只接有电阻元件的情况；对于外电路接有诸如电动机、电解池等用电器的情况，（A）式仍然适用，不过这时的路端电压 $U \neq IR$。

讨论交流

1. 电动势和电压的单位都是伏特（V），你认为二者之间有哪些不同？

2. 电源两极间的电压称为路端电压，路端电压随着外电路电阻的变化而变化，什么时候路端电压最高？最高等于多少？

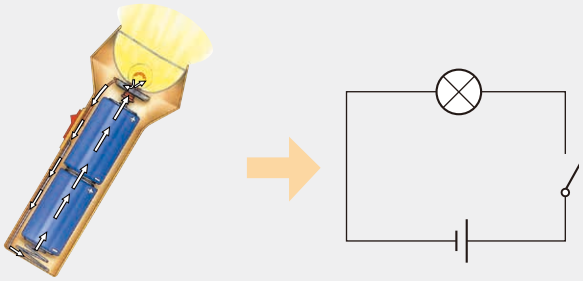
3. 路端电压什么时候最小？最小值是多少？这种状态允许出现吗？

断路时的路端电压等于电动势，这给了我们一种测量电源电动势的方法，有时也把它称为电源电动势的操作性定义。

就某个具体的电源来说，在一段时间内电动势 E 和内阻 r 可以认为是一定的。由公式 $U = E-Ir$ 可知，当外电阻 R 增大时，电路中电流 I 减小，因而内电路的电势降落 Ir 减小，则路端电压 U 增大。当外电路断开时，电流 $I = 0$，路端电压 U 的数值最大，其最大值 $U_m = E$。这就是说，**断路时的路端电压等于电源的电动势**。

例题示范

问题 如图 2-6-6 所示是手电筒的电路图。老式的手电筒是把两节 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 2.5V，额定电流为 0.3 A，按下开关后，小灯泡正常发光。



▲ **图 2-6-6** 手电筒电路

注意：电池串联时的总电动势等于各电池电动势之和，总内阻等于各电池内阻之和。

（1）手电筒不工作时，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 3V ？

（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？

分析 手电筒不工作时，电路断开，路端电压等于电源的电动势。小灯泡工作时，由于干电池有内阻，内电路上有电势降落，路端电压要小于电动势。根据部分电路欧姆定律及闭合电路欧姆定律，可以求得小灯泡工作时的电阻以及干电池组的内电阻。

解　（1）断路时电源两极间的电压为电源的电动势即 3.0 V。小灯泡工作时电路中有电流通过，由于电源有内阻，内部有电势降落，因此它的额定电压比电源电动势要小。

（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。根据部分电路欧姆定律

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

由于路端电压 $U=E-Ir$，可计算出电源的内电阻

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

本节开头小聪的疑问，你明白了吗？

拓展　干电池长时间使用后，内电阻会显著增大，通过用电器的电流显著减小，用电器不能正常工作，这就是一般意义上的“电池没电了”。但如果这种旧电池用到电子钟上，由于电子钟的额定电流很小，虽然旧电池的内电阻增大明显，但电池内部的电势降落（Ir）却增大不多，路端电压也下降不多，仍能使电子钟正常工作一段时间。

自我评价

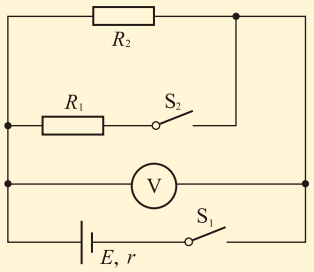
1. 把铜板和锌板放在稀硫酸溶液中，就制成了“伏打电池”，它的电动势是 1.1V。这种电池在断路时的路端电压是多少？如果通过电池的电流是 20mA，在 10s 内有多少化学能转化为电能？这些电能是否全部消耗在外电路？为什么？

2. 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？

3. 如图 2-6-7 所示，已知电源电动势 $E=6.0\text{V}$，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 2-6-7

发展空间

课外阅览

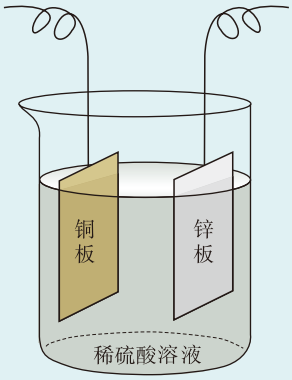
伏打电池

人类历史上第一个电池是意大利物理学家伏打（Volta，1745—1827）发明的，通常称为

伏打电池。他是在伽伐尼的启发下投入到电流的研究中并取得成功的。

伽伐尼是一位生物学家，他经常利用电击研究生物的反应。一次偶然的机会，他在解剖青蛙时观察到还没有给青蛙通电，只是碰触了青蛙的神经，它的腿部肌肉就会发生痉挛，他认为这是生物体内产生的电。但伏打并不认同这种说法，他认为是金属或木炭组合而产生的。二人都坚持自己的信念并进行了深入的研究，而且都取得了骄人的成绩：伽伐尼成为“电生理学”的开山鼻祖，伏打则研制成功了人类历史上第一个电池，树立了电应用的一个里程碑。

伏打电池的结构如图 2-6-8 所示，一块铜板和一块锌板同时浸在稀硫酸溶液中，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 2-6-8** 伏打电池的原理

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。

在伏打之前，人们只能应用起电机，通过旋转使电荷积累，再将电荷存放在莱顿瓶中，以供使用，这种方式相当麻烦，所得的电量也受限制。伏打电池的发明改进了这些缺点，它成为第一个可以持续提供电能的装置，是电气化文明起步的重要标志，它带动了后续电学相关研究的蓬勃发展，最终导致了第二次产业革命并改变人类社会的结构。

物理在线

电　源

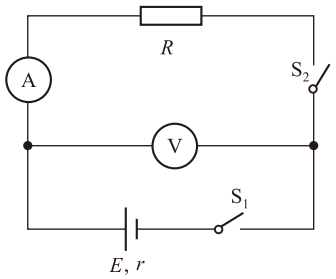
电源是把其他形式的能量转化为电能的装置，常见的电源有化学电池和发电机等。化学电池是把化学能转化为电能的装置，分为原电池和蓄电池两大类。原电池放电完毕即被废弃，如收音机用的干电池。蓄电池使用前需要先充电，即先把电能转化为化学能储存起来，使用时储存的化学能又转化为电能，这种电池可反复使用多次。

新型电池的发展十分迅速，请通过网络调查电源的种类及目前的发展情况。

7 实验：测量电池的电动势和内阻

从理论上来说，电池的电动势可以通过测量断路时的路端电压而得到。如图 2-7-1 所示，只闭合开关 S_1，电压表的示数是否就准确地等于电池的电动势呢？

答案是否定的，因为只要电压表有示数，就说明电池中有电流通过，即不满足“断路”这个条件。对于导体的电阻，通常我们用伏安法也就是根据部分电路欧姆定律来测量，但要用这种方法直接测电池的内电阻就非常困难，怎么办？



▲ 图 2-7-1

数字式电压表本身的电阻很大，可以达到10k Ω以上，把它直接接在电池两极间，通过的电流很小，其示数可以看作电池的电动势。

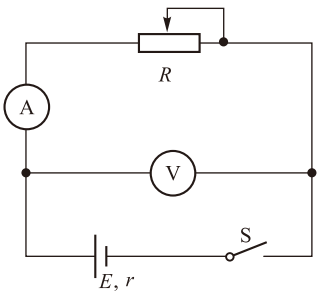
实验设计

我们可以利用闭合电路欧姆定律来同时测量电池的电动势和内电阻。

方法 1：如图 2-7-2 所示的电路中，通过改变外电路电阻 R，测量出路端电压 U 和通过干路的电流 I 的两组数据 U_1、I_1 和 U_2、I_2，根据闭合电路欧姆定律，可以列出下面的二元一次方程组：

$$\begin{cases} E=U_1+I_1r \\ E=U_2+I_2r \end{cases}$$

从中可以解出 $E=\dfrac{I_1U_2-I_2U_1}{I_1-I_2}$，$r=\dfrac{U_2-U_1}{I_1-I_2}$。

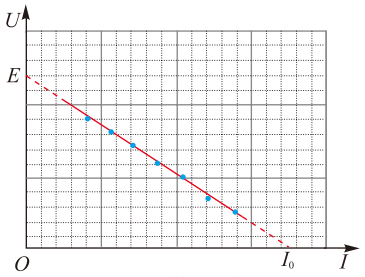


▲ 图 2-7-2

方法 2：闭合电路欧姆定律可以变换形式写成

$$U=-Ir+E$$

其中 r、E 分别是电池的内电阻和电动势，对于同一个电池在较短的实验过程来说可看作常量；而对于不同的几次测量来说，I、U 的值各不相同，是变量。所以上式可以看作 U 与 I 的一次函数的表达式，它的 U-I 图像是一条直线。



▲ 图 2-7-3 闭合电路的 *U-I* 图像

以 *I* 为横坐标、*U* 为纵坐标建立直角坐标系，根据多组 *I*、*U* 的测量数据在坐标系中描点，可以看到这些点大致呈直线分布。如果发现个别数据点明显偏离这条直线，应该把它剔除。用直尺画一条直线，使尽可能多的点落在这条直线上，不在这条直线上的点能大致均衡地分布在直线两侧。这一直线就较好地描述了这一闭合回路中 *U-I* 关系，如图 2-7-3 所示。

这条直线与 *U* 坐标轴的交点表示 $I=0$，属于断路的情况，这时的电压 *U* 等于电池的电动势。直线与 *I* 坐标轴的交点表示 $U=0$，属于短路的情况，根据短路电流 I_0 与电池内阻 *r*、电动势 *E* 的关系 $r=\frac{E}{I_0}$，可以求出电池的内电阻。不难发现，内电阻 *r* 的值为图线“斜率”的绝对值。

讨论交流

1. 你认为用解方程组的方法和图像法来求电池的电动势和内电阻，哪一种方法更好？为什么？

2. 除了测量干路电流和路端电压，即同时使用电流表和电压表的实验方案外，你还能设计出其他的方案吗？

如果只有电流表或只有电压表，还需要增加什么仪器？你将如何测量？试分别画出实验电路图，说明实验步骤。

测两组 *U*、*I* 数据解方程组的方法，操作起来简单，但误差可能很大，这是测量时的偶然误差造成的。测得多组数据后描点作图像的方法，由于数据较多，某些错误的数据点可以看出来并排除，最后求出的是平均值，可以把测量时偶然误差的影响降到较小。

实验操作

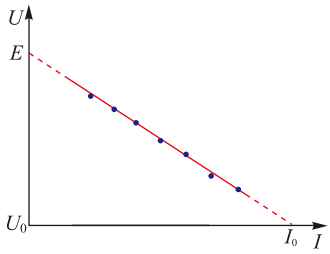
按图 2-7-2 所示连接电路，将滑动变阻器 *R* 的阻值调到最大，闭合电路，分别测出 *U* 和 *I*，然后逐渐调小 *R* 值，测出多组 *U* 和 *I* 的值，把数据记录在表格中。

以 *U* 为纵坐标，*I* 为横坐标建立 *U-I* 坐标系，将得到

的实验数据在坐标系中描点，用直尺将点拟合成一条直线（剔除个别明显错误的数据）。根据 U 坐标轴的截距得到电池电动势 E，根据直线的斜率（的绝对值）得到内电阻 r。

实验技巧

在实验时，如果我们测量的电源内电阻较小，则在 U-I 坐标系中得到的图线的倾斜度很小，与 I 坐标轴的交点将延伸很远。我们可以把横坐标轴上移，即 U 坐标轴的起点不从 0 取起，根据测量数据可以从 U_0（如 1.0V）取起。这时我们可以得到如图 2-7-4 所示的图线。



▲ 图 2-7-4

图线中，U 坐标轴上的截距仍然表示电源电动势 E，图线的“斜率”（绝对值）仍然表示电池的内电阻 r。但是图线与横坐标的交点不再是短路电流，而是电压为 U_0 时对应的电流。因此，电池的内电阻的计算式为

$$r = \frac{E - U_0}{I_0}$$

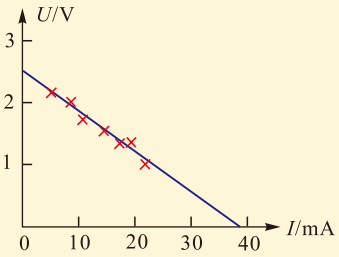
想一想，为什么计算式变成了这样？

自我评价

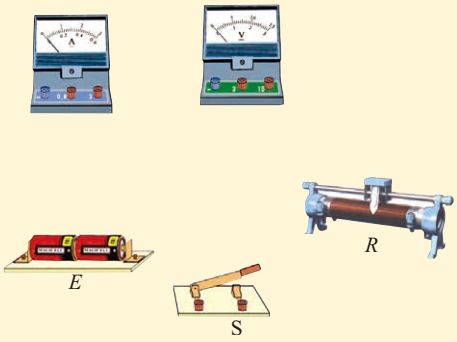
1. 利用如图 2-7-2 所示的电路可以测出电池的电动势和内电阻。当滑动变阻器的滑片在某一位置时，电流表和电压表的示数分别是 0.20A 和 1.98V。把滑动变阻器的滑片移到另一个位置时，电流表和电压表的示数分别是 0.40A 和 1.96V。求电池的电动势和内阻。

2. 图 2-7-5 是某同学通过实验测出的闭合电路的路端电压 U 随干路电流 I 变化的关系图像，试根据此图像求出电池的电动势和内电阻。

3. 如图 2-7-6 所示是测量两节干电池组成的串联电池组的电动势和内电阻的实验器材，请用笔画线代替导线将它们连接成实验电路。

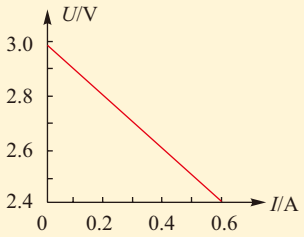


▲ 图 2-7-5



▲ 图 2-7-6

4. 在以上第 3 题中，根据实验测得的数据，在 U-I 坐标系中描点，得到如图 2-7-7 所示的图线，则每节干电池的电动势 E 和内电阻 r 各是多少？（发展空间 • 课外阅览“电池的串联与并联　电池组”）实验的测量值与真实值相比偏大还是偏小？为什么？



▲ 图 2-7-7

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。

n 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

$$E_{总}=nE_0,\quad r_{总}=nr_0$$

应注意，电池串联时，各电池之间的极性应正、负相连。

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

$$E_{总}=E_0,\quad r_{总}=\frac{r_0}{n}$$

应注意，电池并联时，极性相同的连接在一起，正、负极绝不能接反。

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。例如一节 1 号干电池的输出电流一般不应大于 0.3A，如果使用的用电器要求通过的电流是 1.0 A，则可以使用四节干电池组成的并联电池组作为电源，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。

原则上不同型号的电池不适合组成电池组。同型号电池有的新，有的旧，也不适合组成电池组。

8 焦耳定律　电路中的能量转化

我们已经知道，电源是把其他形式的能量转化为电能的装置。当电流流过电源内部时，由于内电阻的存在，要消耗一部分能量，这部分能量转化为什么形式的能量呢？在外电路，是否也要消耗电能并转化为其他形式的能量？转化过程中，各部分能量之间有什么关系？

电功　电功率

在外电路，电流通过用电器时，电能转化为其他形式的能量。例如电炉通电时，电能转化为光能和内能；电动机通电时，电能转化为机械能；给蓄电池充电时，电能转化为化学能……我们已经知道，电能转化为其他形式能量的过程就是电流做功的过程，电流做功的多少等于电能转化为其他形式能量的数量。

当自由电荷在电场力的作用下发生定向运动时，导体中就出现了电流。电荷在导体内运动的过程中，电场力会对自由电荷做功。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

$$W = UIt$$

第一章第5节“电势　电势差”。

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、通电时间 t 三者的乘积**，这就是电功。电功实质上是导体中的恒定电场对自由电荷的电场力所做的功。

电流所做的功 W 与做这些功所用时间 t 的比叫作**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，一段电路上消耗的电功率 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，简称焦，符号是 J；电功率的单位是瓦特，简称瓦，符号为 W，1W=1J/s。

注意：通常斜体的字母 *W* 表示物理量电功（功），而正体的字母W表示电功率的单位瓦。我们手写时难以区分正体和斜体，要从前后文去甄别。

焦耳定律　热功率

讨论交流

1. 电场力对电荷做功，能量是如何转化的？
2. 电路中消耗的电功率一定等于热功率吗？

在真空中，仅在电场力的作用下，正电荷由电势高处加速流向电势低处，负电荷则由电势低处加速流向电势高处，电场力对正负电荷均做正功，带电粒子速度增大，它的电势能减少，减少的电势能转化为运动电荷的动能。

在通电的金属导体中，电能转化的情形比在真空中运动的情况要复杂。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振动。在电场力作用下，正离子不发生定向运动，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。这些碰撞对电流起了阻碍作用，这是金属导体有电阻的通俗解释。从能量的角度看，这些碰撞过程把电子加速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。正是这种自由电子与正离子的碰撞过程，将电能转化为内能，即电流通过电阻而生热。



▲ **图2-8-1**　焦耳（Joule，1818—1889）

英国物理学家焦耳（图 2-8-1）通过大量实验研究了电流通过导体生热的现象，并得出**电流通过电阻产生的热量 *Q* 跟电流 *I* 的二次方成正比、跟导体的电阻 *R* 成正比、跟通电时间 *t* 成正比**的结论，这就是**焦耳定律**（Joule

law），用公式表示是

$$Q = I^2Rt$$

电流通过电阻而产生的热称为**焦耳热**（Joule heat）。

电流通过电阻所产生的热量 Q 与产生这些热量所用时间 t 的比叫作热功率，它在数值上等于单位时间内电流通过电阻所产生的热量。由上式可得热功率为

$$P_{热} = \frac{Q}{t} = I^2R$$

电流通过电阻生热的现象称为电流的热效应，它在实际生产、生活中有很广泛的应用。例如工业上的冶炼金属淬火工艺等，日常生活中用的电暖气、电炉、电熨斗、电饭锅等都利用了电流的热效应。图 2-8-2 是一些生活中常见的电热器。



（a）电饭煲



（b）电熨斗



（c）电热水器



（d）电暖气

▲ **图 2-8-2**　一些常见的电热器

并不是所有电路中外电路消耗的电能都全部转化为内能，例如电流通过电动机，电能主要转化为机械能；电流通过电解槽，电能主要转化为化学能，等等。电动机、电解池等用电器也有电阻，因此在工作过程中也要产生焦耳热，热功率的计算公式仍然是 $P_{热} = I^2R$，而计算消耗的电功率的公式则是 $P_{电} = UI$。

这就是说，外电路消耗的电功率 $P_{电}$ 一般情况不等于热功率 $P_{热}$，而是大于热功率。只有在电能全部转化为内能的情况下，消耗的电功率才等于热功率。

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，例如电动机工作时由于有电阻而产生的焦耳热使机器的温度升高、导线绝缘皮老化，既浪费能量又损耗机器的使用寿命。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有可能将电器烧坏，甚至引起火灾，

必须注意避免。

电路中的能量转化

我们知道，在电源内部，通过各种作用，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，等等。

同时，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电路时，电流通过电源的过程中，由于内阻的存在会使电源发热而消耗一部分电能，其余部分的电能向外电路输出。

在外电路中，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，还有一部分转化为内能，这时 $P_{电}=P_{热}+P_{其他}$，热功率只占电功率的一小部分。

我们已知电源的电动势 E 等于路端电压 U 与内部电势降 Ir 之和，即 $E=U+Ir$，等式两边都乘以电流 I，得

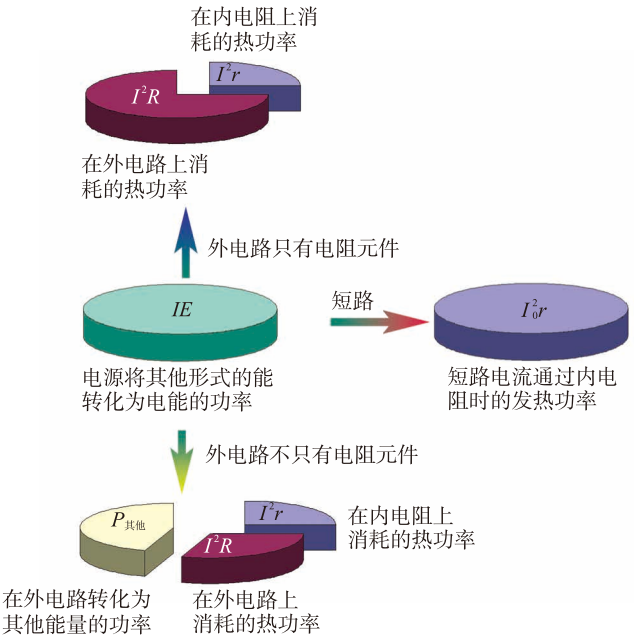
$$IE=IU+I^2r$$

这个式子可以描述闭合电路中的能量转化情况。它的物理意义是：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（图 2-8-3）。

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。



▲ **图 2-8-3**　不同情况下电路中的能量转化

例题示范

问题　一台电动机，线圈电阻是 $R=0.4\Omega$，当它两端所加的电压为 U=220V 时，通过的电流是 $I=5\text{A}$。这台电动机每分钟有多少电能转化为机械能？

分析　本题涉及三个不同的功率：电动机消耗的电功率 $P_{电}$、电动机发热的功率 $P_{热}$、转化为机械能的功率 $P_{机}$。三者遵从能量守恒定律，即 $P_{电}=P_{热}+P_{机}$，只要求出 $P_{电}$和 $P_{热}$，即可求出 $P_{机}$，再乘以时间就得出最后结果。

解　由焦耳定律可知，电动机发热的功率为

$$P_{热}=I^2R$$

电动机消耗的电功率，通常也称为电动机的输入功率

$$P_{电}=IU$$

因此可以得到电能转化为机械能的功率

$$P_{机}=P_{电}-P_{热}=IU-I^2R$$

根据功率和功的关系，电动机每分钟由电能转化的机械能为

$$W=P_{机}t=IUt-I^2Rt$$

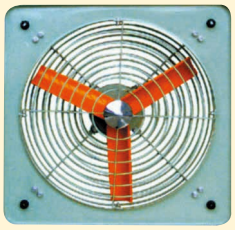
代入数据，计算得　　$W=6.54\times10^4\text{J}$

拓展　像电动机这样的用电器，电流流过用电器做功，既产生焦耳热，同时也转化为其他形式的能。此时电路中的电流 I 不能直接用用电器两端的电压 U 除以用电器的电阻 R 得到。

自我评价

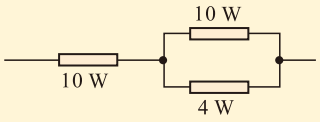
1. 一个电阻为 20Ω 的导体，每当它通过 3C 的电荷时，电流做功 36J，那么此导体两端所加电压是多少，通过 3C 的电荷量所需的时间是多少？

2. 如图 2-8-4 所示是规格为“220V 36W”的排风扇，线圈电阻为 40Ω，接上 220V 电压后，排风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 2-8-4 排风扇

3. 三个阻值相同，但允许消耗的最大功率不同的电阻如图 2-8-5 所示连接，各自允许消耗的最大功率分别是 10W、10W、4W。电路工作时，求它们实际消耗的功率之比。

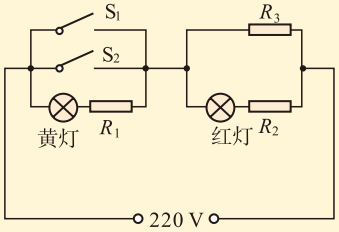


▲ 图 2-8-5

4. 如图 2-8-6 所示是某型号电饭煲的电路图。S_1 是一个限温开关，手动闭合，此开关在锅体内温度达到居里点（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。限流电阻 $R_1=R_2=500\Omega$，加热电阻丝 $R_3=50\Omega$，两灯电阻均不计。

（1）手动闭合开关 S_1 后，电饭煲进入煮饭的加热过程，请说明两个指示灯中的哪一个发光，并计算加热电阻此时消耗的电功率。

（2）若开始时没有手动闭合开关 S_1，电饭煲进入保温过程，在 S_2 也没有闭合的情况下，两个指示灯中的哪一个发光，并计算加热电阻此时消耗的电功率。



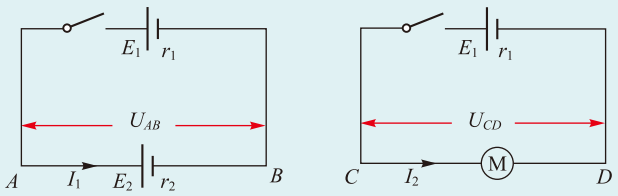
▲ 图 2-8-6

发展空间

课外阅览

含有反电动势的电路

图 2-8-7（a）和（b）分别是给蓄电池充电的电路及带动直流电动机的电路，它们的共同特点是电源输出的电能只有一部分转化为内能，而其余部分则分别转化为化学能和机械能。图中的 A、B 间及 C、D 间的电路，其两端电压与通过的电流的比值，都不等于这段电路的电阻，即 $\frac{U_{AB}}{I_1}\neq R_{AB}$，$\frac{U_{CD}}{I_2}\neq R_{CD}$。

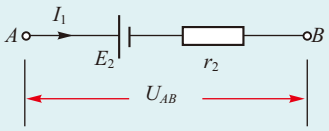


（a）给蓄电池充电的电路　　（b）给电动机供电的电路

▲ 图 2-8-7 电能不全部转化为内能的电路

上面的 AB 和 CD 两段电路，为什么从形式上不符合欧姆定律 $\frac{U}{I}=R$ 呢？这是因为这两段电路除了电阻以外，还含有“反电动势”。

首先看（a）图的 AB 段电路，被充电的蓄电池具有电动势 E_2，正电荷在它内部受到的电场力方向是从 $A\rightarrow B$，非静电力则是从 $B\rightarrow A$，它与正电荷定向运动的方向相反，因此该电动势 E_2 称为反电动势。同时，该蓄电池还具有内阻 r_2，图 2-8-8 是 AB 段电路的等效电路图，在图中 E_2 和 r_2 分开来画，其中 E_2 是一个只有电动势而没有内阻的“理想电源”，r_2 是一只电阻，它的阻值等于该电池内阻。从这个图上可以看出，内电阻 r_2 两端的电压不是 U_{AB}，而是 $U_{r2}=U_{AB}-E_2$，根据欧姆定律，有 $r_2=\frac{U_{r2}}{I_1}=\frac{U_{AB}-E_2}{I_1}$。



▲ **图 2-8-8**　AB 段的等效电路

图 2-8-7（b）所示的电动机电路中，当电动机转动起来后，也要产生反电动势，因此 CD 段的等效电路图也是图 2-8-8。我们把 AB 和 CD 这两段电路都称为“含有反电动势的电路”，对于一段含有反电动势的电路，欧姆定律应该改写为 $I=\frac{U-E_{反}}{R}$，它也称为含有反电动势的电路的欧姆定律。

感悟 · 启迪

- 自从学习电学以来，你是不是觉得有点困难？这主要是概念多而且抽象，还有很多特别容易混淆的地方，例如单位是伏特的物理量就有电势、电势差、电压、电动势四个，怎么区分它们呢？
- 其实，从能量的角度区分它们并不难：电动势是描述电源通过非静电力做功而将其他形式的能量转化为电能的能力的物理量；电压，即电势差，是描述静电力移动电荷做功而把电能转化为其他形式能量的能力的物理量；电势则是从电荷与电场组成的系统所具有能量的角度描述电场的物理量。
- 你还可以尝试着从能量转化与守恒的观点总结电路各部分的作用。再进一步，你还可以用这一观点审视各种生产活动，看看人们是怎样设法更有效地转化和利用自然界的能量，使它们更好地为人类服务。

9 家庭电路

改革开放以来，我国经济持续高速发展，人民生活条件不断改善，家庭用电量也随之大幅度增加，安全用电与节约用电的问题日趋凸显。在初中，我们已经学习了一些关于家庭用电的知识。下面让我们在此基础上，结合前面所学的电学内容，深入讨论几个问题。

输电线横截面积与允许通过电流的关系

讨论交流

我们在前面学习直流电路的内容时，导线的电阻一般都予以忽略。那么在家庭电路中，输电线（即导线）的电阻是否也同样可以忽略呢？



▲ **图 2-9-1** 家居装修中，在地面和墙面铺设的电线可达上百米

某个物理量是否能够忽略，取决于所研究的问题，要具体问题具体分析。

家庭电路的输电线一般比较长，即使只考虑用户电能表以内的部分，长度在几十米甚至更长的也很常见（图 2-9-1）。虽然其电阻与用电器相比还是比较小的，但它在通电过程中仍然要产生一定的焦耳热，从而使得温度升高。再加上室内的输电线都要有绝缘外皮，很多还穿在金属或塑料管中，暗埋在墙内或地板下，散热条件很差，如果温度升高过多，就会造成绝缘外皮的老化，导致绝缘性能下降，从而造成漏电，容易发生人身伤害事故。如果温度升高过快，还可能造成电线起火，引发火灾事故。根据 $R=\rho\frac{l}{S}$ 我们知道，对于长度一定的导线来说，横截面积越小，电阻越大，因此对于某种规格的导线，其允许通过的电流要有所限制，否则导线上积累的焦耳热将带来危害。下表是常用的几种塑料外皮铜芯导线的横截面积、直径及允许通过的电流数值。

不同规格铜芯导线允许通过的电流

横截面积/mm^2	直径/mm	25℃时的载流量/A
1.5	1.38	18
2.5	1.78	26
4	2.25	38
6	2.76	44
10	1.30×7	80

注：载流量较大的导线常用多股铜线，例如横截面积为10 mm^{2}的导线就是7股，每股直径为1.30 mm。

表中的载流量是指一般情况下允许通过的电流。在实际应用中还要考虑很多因素，例如输电线所处环境对散热的影响，电线是单独架空布设还是几根线一起穿在同一管子中并埋于墙内，以及环境的温度，等等。

例题示范

问题　小明经过一番努力，终于把家里的主要电器工作时消耗的电功率情况基本摸清：空调柜机 2800 W，挂机 1200 W×2，微波炉 1500 W，电磁炉 2000 W，洗衣机 300 W，电冰箱 120 W，电视机 100 W×2，台式电脑 150 W，照明灯具 130 W，其他不常用的如电熨斗、电吹风、吸尘器等未计入。请计算一下，他家的主输电线的横截面积应该选用多大的？

分析　假定上述各种用电器同时启用，根据所有用电器消耗的总功率，可以计算出干路的电流，再根据电流大小选择应选用的导线横截面积。

解　上述所有用电器同时启动时消耗的总功率

$$P = 9600\ \mathrm{W}$$

干路的电流

$$I = \frac{P}{U} = \frac{9600}{220}\mathrm{A} = 43.6\mathrm{A}$$

从上表中查到，应该使用横截面积为 6 mm^2 的铜导线。

拓展　(1) 上面的计算，是把所有用电器都当作全部生热的电阻元件对待并按照恒定电流的规律计算的。而实际上，空调机、冰箱、洗衣机等电器内部都有电动机，凡有电动机的都不能看作全部生热的电阻元件，并且家庭电路是交流电路，因此这种算法只具有估算的性质。

(2) 上述用电器一般情况下是不大可能同时都工作的，特别是微波炉和电磁炉，它们的工作时间都很短，因此使用横截面积为 6 mm^2 的铜导线绰绰有余。

有关安全用电的几个问题

电能的应用极大地提高了生产力，也改变了人类的

生活，可以说现代人已经离不开电了。但电能的使用也有可能会出现危险，以至造成生命财产的损失，你已经掌握了哪些安全用电的知识呢？

我们在初中已经学习过一些安全用电的知识，如下表所示。

安全用电知识	
	①为了人体的安全，要做到：不接触低压带电体，不靠近高压带电体，不损坏绝缘层，不弄湿用电器。这里说的低压带电体，是指500 V以下、安全电压以上的带电体；高压带电体则是指1000 V或更高电压的带电体。必须接触带电体时，应该使带电体的电压在安全电压范围内。
	②如果发生触电事故，应首先切断电源开关，使触电者脱离电源后再进行抢救。
	③应避免电流过载，及时更换老旧设备和有破损的电线，防止电线过热而发生火灾。
	④雷雨天应注意防雷击。

在日常用电过程中严格遵守这些安全原则的同时，你或许会萌生疑问并试图刨根问底：这些安全用电原则背后隐含着什么知识？下面，我们对几个问题进行较为深入的探讨。

讨论交流

多高的电压对人体是安全的？

涉及人体的问题往往比较复杂。人体是导体，但人体电阻的个体差异很大，即不同的人，在不同环境中的电阻值有着巨大差别。一般来说，人体的电阻可分为体内电阻和体表（即皮肤）电阻两部分。其中体内电阻大约 500Ω，受环境影响较小；而体表电阻则受环境影响较大，在极端恶劣的情况下（例如皮肤浸在水中），体表电阻可降至零，人体总电阻只有约 500Ω。当人体触电时，靠自身的力量能摆脱电源的电流值是 30mA 以下，在这种情况下，保证人体安全的电压值为

$$U = IR = 0.03 \times 500\ \text{V} = 15\ \text{V}$$

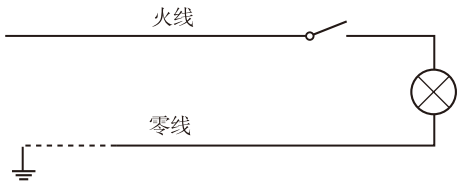
我国的安全电压国家标准规定的安全电压等级共 5 级，分别为 42V、36V、24V、12V、6V，适用于不同场

合。其中36V是一般情况下使用的标准；特别恶劣的情况，如在金属容器内、特别潮湿处等特别危险环境中使用的手持照明灯就要采用更低电压12V；水下等作业场所的手持照明灯具应采用最低电压6V。

讨论交流

零线就一定是安全的吗？

正确安装的家庭电路中，入户的零线（中性线）在户外已经与大地连接，因此它对地的电压是零，对人体来说是安全的。图2-9-2是只画了一只电灯的连接电路，按照规定，开关接在火线上，零线在户外低压变压器处与地连接。当开关断开时，零线是安全的；当开关闭合时，电灯点亮，电流通过电灯，零线对地电压仍然是零，仍是安全的。但如果出现特殊情况，造成零线与大地的连接断开（如图中虚线的部分断开），恰好开关又处于闭合状态，此时灯不能被点亮，而零线就与火线连接在一起了，它对地的电压就不再是零，而变成了220V。这时的零线实际上已变成火线，人如果站在地面而身体的某个部分接触到零线，就会发生触电事故。



▲ **图2-9-2**　家庭电路中的电灯连线

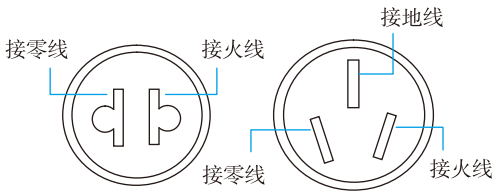
注意：零线与火线都是输电线，与电网连接，有电流通过；地线是建筑物预设的保护性设施，一般情况下没有电流通过。

讨论交流

家庭电路中有哪些安全防护设施？

（1）安装可靠的接地线

我国家庭电路使用的电压是220V，高于安全电压。家用电器中有的外壳是金属的，正常情况下它不带电，但电器使用时间较长以后，绝缘外皮老化、磨损等情况时有发生，有可能造成电器的金属外壳带电，因此电器的金属外壳必须有安全可靠的接地线。现代房屋在设计和建造时，都预埋了可靠的接地线，并把它引入到每个房间中。



（a）二眼插座　　（b）三眼插座

▲ **图 2-9-3**　我国家庭电路中的插座连线

家用电器一般都是通过插头和插座接入电路的。我国的插座和插头分为两类，一类是二眼插座和插头，一类是三眼插座和插头，如图 2-9-3 所示。其中二眼插座的两个孔的直边是平行的，左边接零线，右边接火线。三眼插座上面的孔较大，接地线；下面两个孔是倾斜的，左边接零线，右边接火线，这样就可避免插错。

在接地线连接良好的情况下，电器的金属外壳与地的电势相等，人就不会发生触电事故了。

（2）过载保护与漏电保护

几十年前，我们还大量使用闸刀开关和保险丝，其中闸刀开关是家庭电路的总开关，当需要检修电路等情况出现时，拉开闸刀开关即切断电源。保险丝是由于短路或其他原因造成电流过大时对电路进行保护的重要元件。它串联在总干路中，一旦出现电流过载的情况，保险丝会由于过热而熔断，从而切断电路，避免灾害的发生。

但随着时代的进步，目前除了一些偏远地区外，广大新建住宅已经不再使用闸刀开关和保险丝了，代替它们的是**断路器**（circuit breaker）。家庭电路中使用的是低压断路器，又名自动空气开关，它代替闸刀开关控制电路的通断，还兼有防止电流过大以及漏电保护等多种功能，是低压配电网中一种重要的保护电器。



▲ **图 2-9-4**　低压断路器

如图 2-9-4 所示是一种低压断路器的外形图，把它串联在电路中，当出现短路或其他原因造成电路中电流过大时，它会自动断开电路，图正中间的扳手会跳下来，这就是过载保护。当检修完毕后，需要人工把扳手扳上去，电路才会重新接通。

当电器出现漏电时，会有漏电电流经某种渠道流过，只要漏电电流达到一定程度，断路器也会自动断开，这就是漏电保护。但如果电器只是内部电线的绝缘外皮损坏而使得电器的金属外壳带电，且金属外壳的接地线并没有连接好，由于金属外壳与地仍有绝缘物，则不会形成漏电电流。此时金属外壳成为带电体，对人来说是很危险的。人站在地面上，如果身体的某个部分碰触到带电的金属外壳，

就会发生触电，有电流经人体流向大地，这时断路器会及时切断电源，从而保护人身安全。

低压断路器有很多种型号，具体使用哪一种，需要专业的电工知识，可以请教专业技术人员或者查阅专业书籍，不可盲目行事。

节约用电

讨论交流

有人认为，电能不便于储存，对于发电和用电，不是“边用边发”吗？发出来的电如果不进行利用，就只能浪费掉了。同时，发电与用电是“生产—消费”的关系，消费能力的不断发掘与生产力的日益提高，将形成相互促进的良性循环。因此，不存在节约用电的必要性。对于这种说法，你怎么看？

你在日常生活中有哪些节约用电的措施？

电能是采用一定的方法把其他形式的能量转化而来的。大型发电厂大都建在远离城市和居民区的地方，例如大型火力发电厂大多建在煤炭开采区或油气源附近，水力发电站更是建在激流汹涌的大江大河之旁，核电站则多建在沿海等多水地区，它们发出的强大电流转变成高压后输入电网，再经过漫长的输电线路输送到用户处，为了建设这些设施，需要投入大量的人力物力。而这些还都是前期成本，建成后的发电厂在发电的过程中，还有巨大的消耗，巨大的电网也需要精心维护。古人讲，一茶一饭，当思来之不易。我们使用的电能，又何尝不是如此？

我们国家虽然电力工业取得了巨大发展，但仍是发展中国家，用电量很高，电力供应仍显不足，每年炎热的夏季，城市居民用电量大增，无奈之下常常需要减少工业用电量，以致一些工厂不得不减少生产。如果我们每个人都注意节约用电，把省下来的电力用来发展生产，对社会的进步将是幸事。

关于节电，我们可以努力做到以下几点。

勤俭节约、艰苦奋斗是中华民族的传统美德；从我做起，从小事做起，是我们应遵循的行动规范。

电力系统中各种电压的变电所及输电线路组成的整体，称为**电网**，它把众多的发电机组以及更多的用户连接在一起。总发电量是根据用电量而自动调节的，当用电量减少时，它会自动发出指令暂时关闭部分发电机组或减少发电机组消耗的能源，从而减少发电量；当用电量增加时，则开启更多的发电机组或增加发电机组消耗的能源，从而增加发电量。



▲ 图 2-9-5 电器上的节能标识

1. 尽量使用节能的电器。例如对于照明灯具，应鼓励开发和使用高效节能的产品，用 LED 灯代替发光效率极低的白炽灯是措施之一。又如我们可以选购和使用更为节能环保的电器（图 2-9-5）等。

2. 合理使用空调。空调是能耗较大的家用电器，夏季必须使用空调的时候，不妨把温度设置得稍微高一些；冬季使用空调的时候，不妨把温度设置得低一点，这就会降低空调的耗电，并且有利于健康。

3. 较长时间不使用的电器，请关闭电源。电脑、电视机等电器处于“待机”状态时，显示器的屏幕虽然是黑的，但电器内部有些部分仍然通着电，在继续消耗电能。如果长时间不使用，建议把它们的电源开关关掉。

此外，你还能想到哪些节约电能的办法呢？拿出来跟大家分享吧！

自我评价

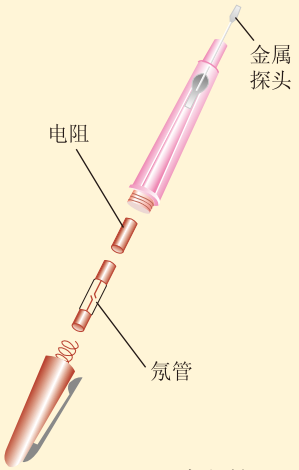
1. 小云家的电能表的型号是“DDS 1129 10(40)A”，通过查找资料得知，其中的“10(40)A”的含义是：此表可用于“额定电流”值为 10 A 左右的范围准确计量，使用中最大电流不应超过 40 A。

（1）通过电能表的电流恰好为 10 A 时，家庭消耗的电功率是多少？

（2）连接到电能表上的进户输电线应该使用多大横截面积的铜导线？

2. 我国制定的安全电压标准为什么要分为 5 个级别？

3. 图 2-9-6 是验电笔的结构图，用手握住验电笔并且接触一端的金属挂钩，将它的另一端的金属探头插到电源插孔中。如果氖管发光，说明这是火线；如果氖管不发光，说明这是零线。



▲ 图 2-9-6 验电笔

（1）为什么接触零线氖管不发光？

（2）接触火线，氖管发光时，是否有电流通过人体？人体有没有触电的感觉？为什么？

4. 有人说：发电厂已经把电发出来了，如果不用就白白浪费掉了，因此不需要节电。你怎么评价这个说法？

发展空间

课外阅览

照明灯具节能化

照明要消耗大量的电能，据测算，中国照明用电约占全社会用电量的 12%。随着社会的进步与人们生活水平的提高，对照明的需求也逐步增加，在不降低照明需求的前提下，节约能源就要从照明灯具上多想办法。

仅从家庭和学校教室的照明而言，灯具大体经历了以下四个阶段（图 2-9-7）。

①白炽灯：是最早出现的电灯，它是由电流通过灯丝加热至白炽状态产生光的一种光源。一般认为是爱迪生（Thomas Alva Edison，1847—1931）发明了白炽灯，使用至今已有约 130 年的历史。它便宜，使用方便，发出的光与太阳光接近，对人的眼睛有利，但它的发光效率很低，它所消耗的电能只有约 2% 可转化为光能，而其余部分都以内能的形式散失了。正是从节能的目的出发，我国从 2011 年开始了逐渐淘汰白炽灯的计划，2016 年 10 月 1 日起，禁止销售和进口 15 W 及以上普通照明用白炽灯。

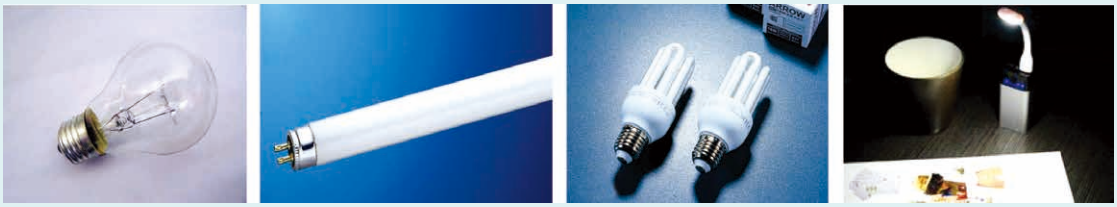
②荧光灯：又称日光灯，它属于气体放电光源，传统的荧光灯利用低气压的汞蒸气在通电后释放紫外线，从而使荧光粉发出可见光，一般需要配备镇流器和电容器。它的发光效率可以达到白炽灯的 5 倍，但价格较贵，虽比白炽灯节能，但仍不能满足人们的要求。

③节能灯：又称为省电灯泡、电子灯泡、紧凑型荧光灯及一体式荧光灯，它是指将荧光灯与镇流器组合成一个整体的照明设备。它体积小，结构紧凑，可以直接取代白炽灯使用，发光效率和使用寿命都优于白炽灯。但废旧节能灯对环境的危害比较严重，每只报废的节能灯中的有害物质可污染 180 t 水及五六亩土壤，废旧节能灯的处理和回收问题受到重视。

④LED 灯：LED 是英文 light emitting diode（发光二极管）的缩写，是一种能够将电能直接转化为可见光的固态半导体器件。LED 的心脏是一个半导体的晶片，晶片附在一个支架上，一端连接电源的负极，另一端连接电源的正极，整个晶片被环氧树脂封装起来。

LED 灯是新型绿色环保光源，使用过程中不产生有害物质，光谱中没有紫外线和红外线，废弃物可回收，没有污染，不含汞元素，可以安全触摸，属于典型的绿色照明光源。LED 的电光转换率接近 100%，在相同照明效果下比传统光源节能 80% 以上。LED 的寿命长，它为固体冷光源，环氧树脂封装，抗震动，灯体内也没有松动的部分，不存在灯丝发光易烧、热沉积、光衰等缺点，使用寿命可达 6 万 ~10 万小时，是传统光源使用寿命的 10 倍以上。

随着人们节能意识的提高、技术的发展和工艺的改进，LED 光源的应用将更为广泛。



▲ **图 2-9-7**　不同时代的电光源

反思·小结·交流

• 学后反思

1. 这一章，我们用到的电路元器件与初中阶段的描述有什么区别？

2. 关于电路及其应用的学习，我们用到了哪些科学思维方法？

• 自主小结

1. 关于电流、电压、电阻，你在哪些方面比初中的学习更深入了？

2. 为什么电阻率是反映导电物质特性的物理量？如何测量导体的电阻率？金属的电阻率与什么因素有关？

3. 部分电路欧姆定律和闭合电路欧姆定律有哪些不同？

4. 什么是导体的 *I*-*U* 特性曲线？如何描绘小灯泡的 *I*-*U* 特性曲线？如何根据 *I*-*U* 特性曲线求导体在某一状态下的电阻？如何理解线性元件和非线性元件？

5. 滑动变阻器是通过改变什么而改变连入电路中的电阻的？在分压电路和限流电路中滑动变阻器的连接方法有什么不同？实验中如何选择分压电路或限流电路？

6. 用伏安法测电阻时，根据什么选择电流表外接或电流表内接？

7. 什么是电源的电动势？ 电动势与电压的单位都是伏特，它们在哪些方面有什么不同？

8. 如何测量电源的电动势和内电阻？实验方案是什么？

9. 为什么说闭合电路欧姆定律是能量守恒定律在电路中的具体表现？在电源内部发生着怎样的能量转化过程？在外电路，消耗的电功率在什么情况下等于其产生焦耳热的功率，在什么情况下大于产生焦耳热的功率？

10. 多用电表能测量哪些物理量？如何使用多用电表测量通过导体的电流、导体两端的电压以及导体的电阻？

11. 家庭电路中的火线、零线，跟干电池的正极、负极是一回事吗？地线跟零线是一回事吗？

12. 为什么要养成节电的习惯？你在日常生活中有哪些节电的措施？

• 相互交流

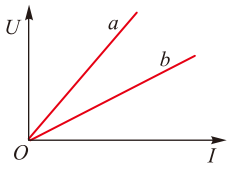
1. 为了研究各种电路元器件的导电性能，我们描绘了 *I*-*U* 特性曲线；为了测量电源的电动势和内电阻，我们作出了电路的 *U*-*I* 图像。二者有什么相同和不同之处？

2. 技术日新月异，各种类型的电热器不断涌现。有哪些新型电热器的工作原理不再是焦耳定律？请与同学交流。

本章复习题

1. 在电解液中，若 2s 内沿相反方向通过某截面的正、负离子的电量均为 2C，则电解液中的电流为多大？若在 1s 内共有 5×10^{18} 个二价正离子和 1.0×10^{19} 个一价负离子通过某截面，那么通过这个截面的电流为多大？

2. 由如图所示的两导体 a、b 的 U-I 特性曲线可以断定（　　）



▲第2题图

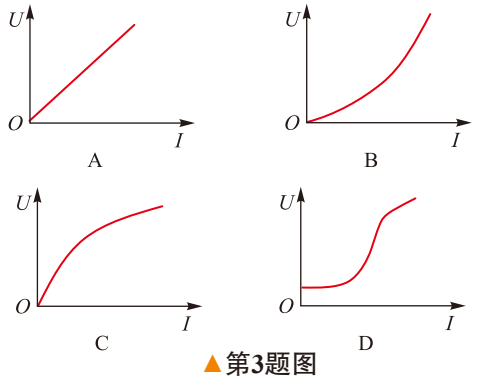
A. 导体 a 的电阻比 b 大

B. 导体 b 的电阻比 a 大

C. 导体 a 的电阻率一定比 b 大

D. 导体 b 的电阻率一定比 a 大

3. 一个标有“220 V　60 W”的白炽灯泡，两端的电压由零逐渐增大到 220 V。在此过程中，灯泡两端的电压 U 和通过灯泡的电流 I 的关系图线是图中的哪一个？（　　）



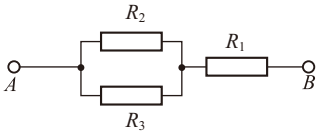
▲第3题图

4. 两只电阻，$R_1=8\Omega$，$R_2=2\Omega$。

(1) 把它们串联在电路中，求它们消耗的电功率之比；

(2) 把它们并联在电路中，求它们消耗的电功率之比。

5. 如图所示，AB 两端的电压恒定，$R_1:R_2:R_3=1:2:3$，求：



▲第5题图

(1) R_2 与 R_3 消耗的电功率之比；

(2) R_2 与 R_3 消耗的总电功率与 R_1 消耗的电功率之比。

6. 两根完全相同粗细均匀的金属裸线，如果把其中的一根均匀拉长到原来的两倍，称为 A；把另一根对折后并在一起使用，称为 B。把 A 与 B 串联在电路中，消耗的电功率之比是多少？把 A 与 B 并联在电路中，消耗的电功率之比又是多少？

7. 一个电池组，测得它的开路电压为 9.0 V，短路电流为 2.4 A，若将该电池组与一阻值为 20 Ω 的电阻器连成一闭合电路，则它的路端电压是多少？

8. 一只量程为 0～15 V 的电压表，串联一个 3 kΩ 的电阻后，再去测量实际电压为 15 V 的路端电压时，电压表示数为 12 V，那么这只电压表的内阻是多少欧？用这个串联着 3 kΩ 电阻的电压表测量某段电路两端电压时，电压表的示数为 4 V，则这段电路两端的电压实际为多少？

9. 有一个直流电动机，在它两端施加 0.2 V 的电压时，电动机不转，测得流过电动机的电流是 0.4 A；若在电动机两端加上 2.0 V 的电压，电动机正常工作，工作电流是 1.0 A。求该电动机在 1 min 内：

(1) 电源输入给电动机的功率为多少？

(2) 电动机消耗的电能为多少？

(3) 电动机线圈产生的热量为多少？

(4) 电动机有多少电能转化为机械能？

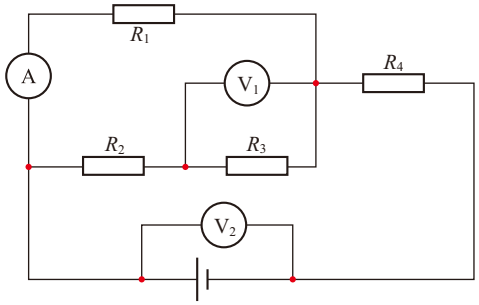
10. 如图所示，电源的电动势 $E=4$V，电阻 $R_1=4\Omega$，$R_2=2\Omega$，$R_3=R_4=6\Omega$，已知电流表 A 的示数为 0.3A。电表均为理想电表，求：

(1) 流过电阻 R_2 和 R_3 的电流是多大？

(2) 流过 R_4 的电流是多大？

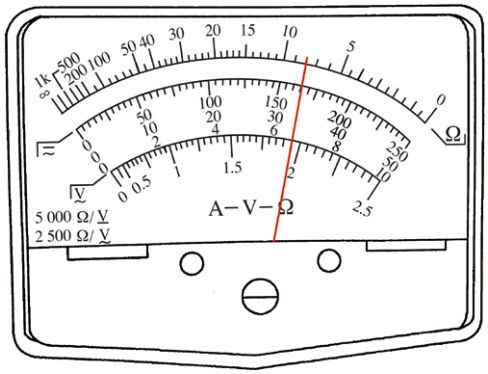
(3) 电压表 V_1 和 V_2 的示数各是多少？

(4) 电源的内电阻 r 是多大？



▲第10题图

11. 如图所示为一个多用电表的表盘及表针指示情况。



▲第11题图

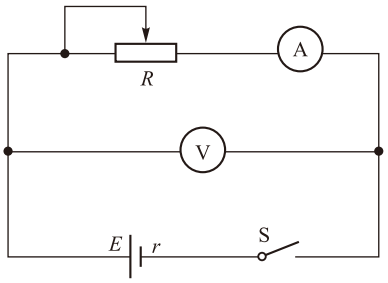
(1) 如果使用的是直流电压 10V 挡，则测量的电压是多少？

(2) 如果使用的是直流电流 100mA 挡，则测量的电流是多少？

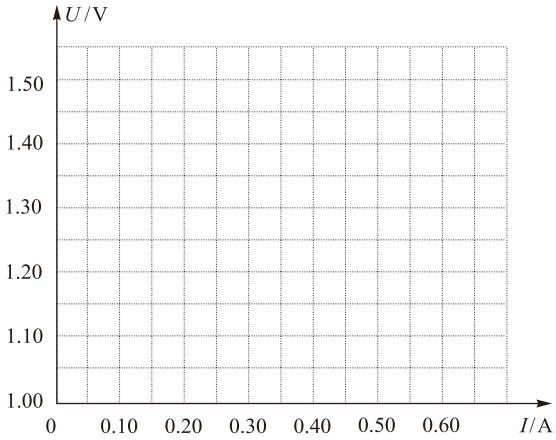
(3) 如果使用的是电阻“×100”挡，则测量的电阻是多少？

12. 用电流表和电压表测量电池的电动势 E 和内电阻 r，所用电路如图 (a) 所示，一位同学测得的 6 组数据如下表所示。

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



(a)



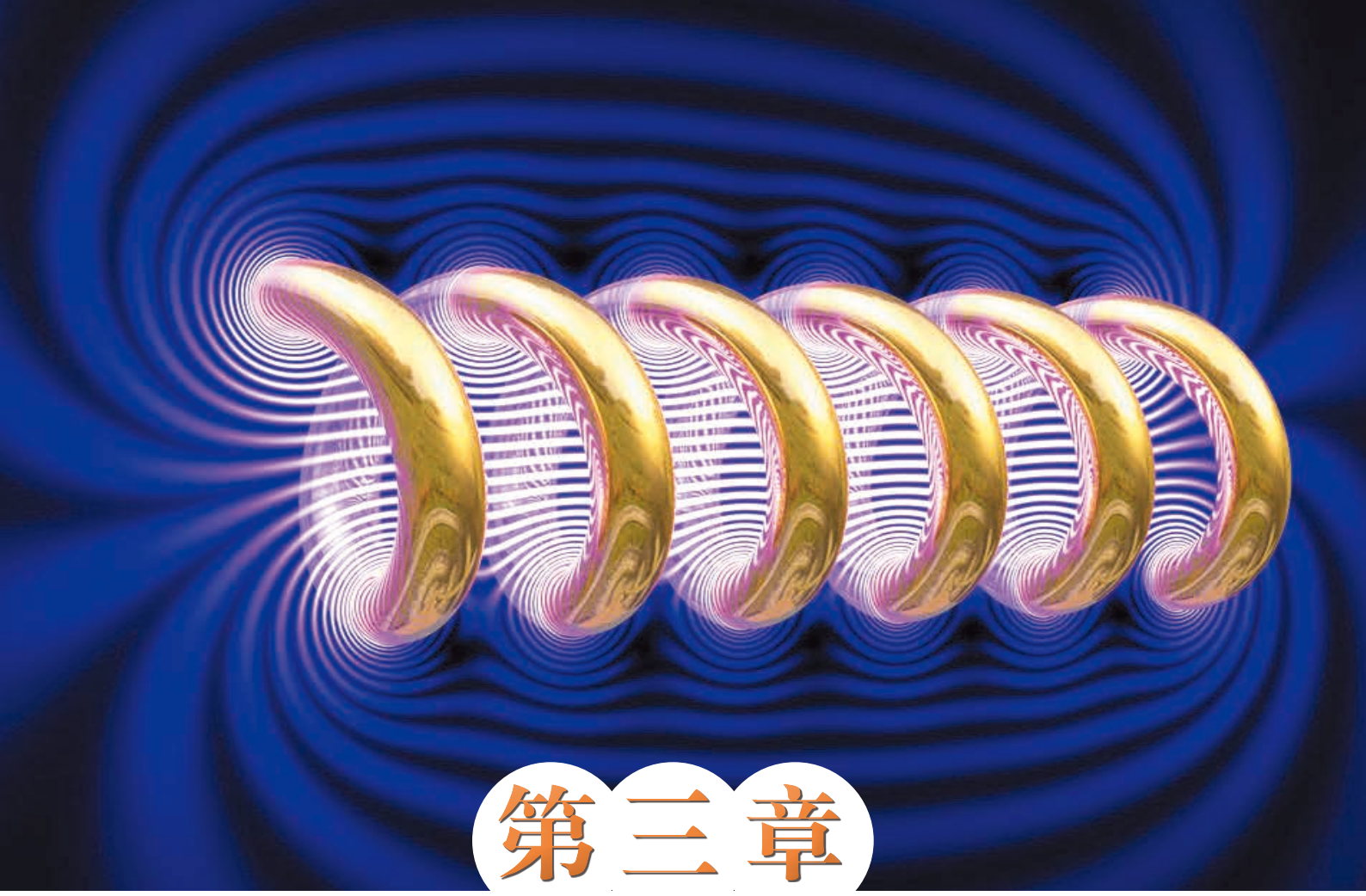
(b)

▲第12题图

(1) 试根据这些数据在图 (b) 中作出 U-I 图线。

(2) 根据图线求出电池的电动势 E 及内阻 r。

(3) 若不作出图线，只选用其中两组 U 和 I 的数据，用公式 $E=U+Ir$ 列方程求 E 和 r，这样做可能得出误差很大的结果，其中选用哪两组数求得的 E 和 r 误差最大？为什么？



第三章

电磁场与电磁波初步

主题一　磁场的基本概念

- 磁场　磁感线
- 磁感应强度　磁通量

主题二　电磁场和电磁波

- 电磁感应现象及其应用
- 电磁波的发现及其应用

主题三　微观世界的量子化

- 微观世界的量子化

看不见，摸不着，它却可以间接显现；

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

对它的认识与利用，改变了人类的活动方式，使人类社会进入了一个新的时代……

1 磁场 磁感线

沙漠中徒步旅行的探险者、大洋中掌控方向的舵手，他们靠什么识别方向？是我国古代四大发明之一的指南针，也就是磁针。

磁现象的应用既久远又广泛，下面我们就从磁场开始学习吧！

我国古代对磁现象的认识及应用

远在春秋时期，古人就已发现天然磁石具有吸引铁的性质，如同慈母召子，故又把磁石称为“慈石”。人们还发现任何磁体，不管形状如何都有两个位置磁性最强，称为磁体的两个极，它们有指示南北方向的本领。

我国北宋时期学者沈括的代表作《梦溪笔谈》中记载：“方家以磁石磨针锋，则能指南，……”我们的祖先将磁化的钢针支撑在一个刻有方位的盘中，使之可以自由转动，用来指示方向，从而发明了指南针（罗盘针），并很快将之用于航海。它成为郑和在 1405—1433 年间七下西洋的有力保障，是我国古代对世界文明的重要贡献之一。

在罗盘针发明 100 多年后，通过丝绸之路来到中国的阿拉伯人、波斯人学会了使用指南针，并将它传入欧洲，使哥伦布远航美洲、麦哲伦环球航行成为可能。如图 3-1-1 所示是哥伦布船队所用的指南针。



▲ **图3-1-1** 哥伦布用过的指南针

古人很早就发现磁石能治疗一些疾病，《史记》中就有磁石独具疗效的记载，《本草纲目》中更详细记载了磁石能治疗的多种疾病。

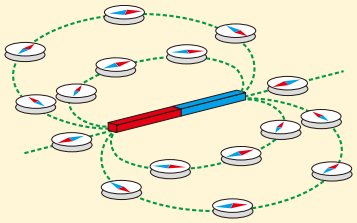
磁场与磁感线

在初中物理学习中，我们已经知道磁体周围分布着**磁场**（magnetic field），一切磁相互作用都是通过磁场实现的。那么，磁体周围磁场的强弱和方向是怎样的呢？

观察思考

1. 在桌面上放置一个磁铁，再把一个小磁针放在它附近的不同位置，观察小磁针在不同的位置处的指向。

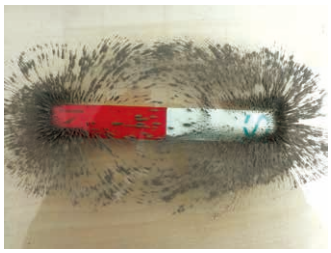
2. 如图3-1-2所示，在条形磁铁的周围放一些小磁针，观察小磁针静止后N极、S极的指向。它们各不相同，但总体来说有一定的规律。



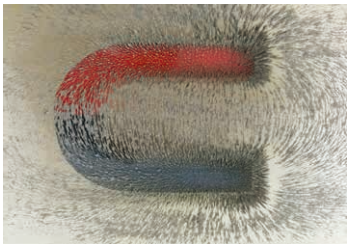
▲ **图 3-1-2**　条形磁铁周围“小磁针”的指向

3. 将一个薄的塑料板平放在条形磁铁或蹄形磁铁上面，在塑料板上撒一些铁屑，用手轻轻敲击塑料板，观察铁屑的分布。想一想，为什么轻轻敲击塑料板，上面的铁屑会有规则地排列？它们的分布图样反映了什么？

塑料板上的铁屑在磁场中被磁化成了小磁针，在敲击塑料板的过程中，这些小磁针短暂离开板面，从而摩擦力的影响消除，它们按照磁场的方向有序地排列，图3-1-3 就是我们看到的情况。



（a）铁屑在条形磁铁周围的排列情形



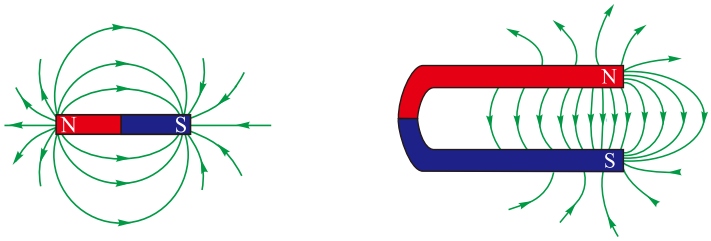
（b）铁屑在蹄形磁铁周围的排列情形

▲ **图3-1-3**

与用电场线来描绘电场一样，人们也用**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3-1-4 就是相应的条形磁铁与蹄形磁铁周围的磁感线。

◎**磁场的方向**

人们规定，小磁针N极的受力方向就是该处磁场的方向。

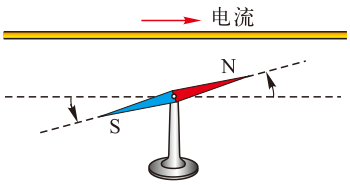


（a）条形磁铁周围的磁感线　　（b）蹄形磁铁周围的磁感线

▲ 图3-1-4

磁场和电场一样，是一种物质。磁体和电流在自己周围空间会产生磁场，而磁场的基本特性就是对处在它里面的磁极或电流有力的作用，这些作用是通过磁场来传递的。

安培定则



▲ 图3-1-5　奥斯特的发现

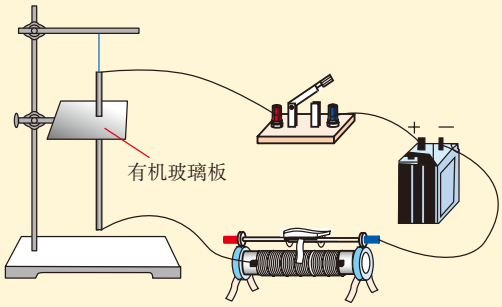
在初中物理中我们已经知道电流周围存在着磁场，这是奥斯特的伟大发现，图 3-1-5 是奥斯特实验的示意图。我们仍可以用铁屑来观察电流周围磁场的分布情况。

观察思考

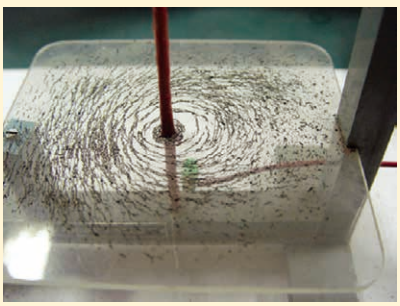
如图3-1-6所示，连接好电路，把铁屑均匀地撒在有机玻璃板上，并在板上放置若干小磁针，接通电路后，轻敲有机玻璃板，观察铁屑的分布和小磁针的指向。改变电流方向，观察小磁针指向的变化。

（1）你能否画出玻璃板表面的磁感线的形状（图 3-1-7），并说出它们的特征。

（2）电流方向改变后，小磁针的指向有没有变化？这说明了什么？

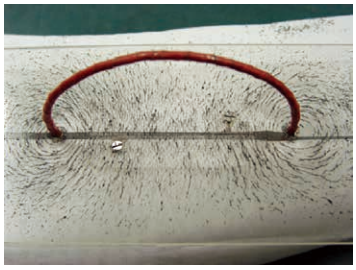


▲ 图3-1-6　观察通电导线周围的磁感线

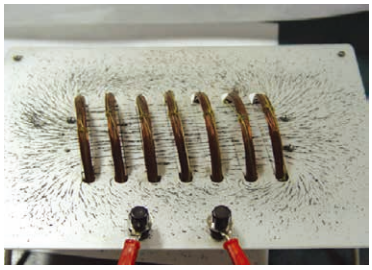


▲ 图3-1-7　有机玻璃板上的铁屑分布

用同样的方法我们可以观察到环形电流和通电螺线管周围磁感线的分布情况，如图 3-1-8 和图 3-1-9 所示。

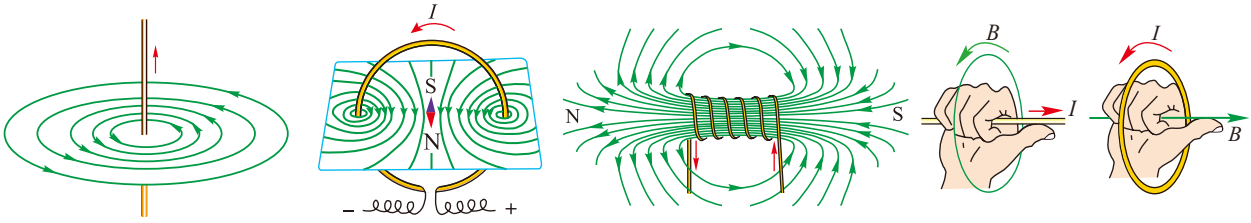


▲ **图3-1-8**　铁屑显示的环形电流磁场的情形



▲ **图3-1-9**　铁屑显示的通电螺线管磁场的情形

可以得出，上述电流周围的磁感线如图 3-1-10（a）（b）（c）所示。磁感线的方向与电流方向之间的关系可以由**安培定则**（Ampere rule, 也叫作右手螺旋定则）判定：如图 3-1-10（d）所示，用右手握住通电导线，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；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电流轴线上磁感线的方向。



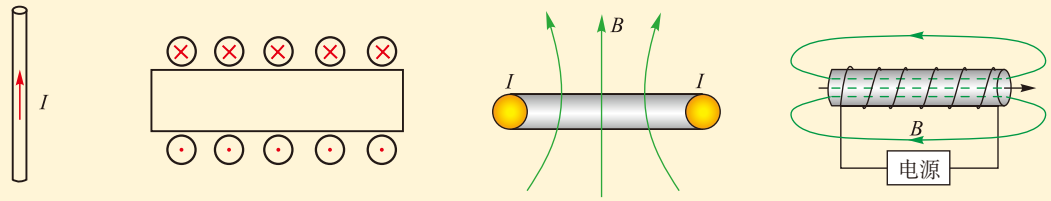
（a）通电直导线的磁感线　（b）环形电流的磁感线　（c）通电螺线管的磁感线　（d）安培定则

▲ **图3-1-10**

电流磁场的发现，为人类利用磁场开辟了更广阔的前景。由于电流磁场具有可控的特点，所以在实际应用中占有更重要的地位。磁悬浮列车、电磁起重机、发电机以及自动控制的电磁装置等都离不开电流的磁场。

自我评价

1. 图 3-1-11 中的（a）（b）两图已经标出了通电导线中的电流方向，请画出几条磁感线并标明方向，（c）（d）两图中已经画出了通电导线周围磁场的几条磁感线，请标明通电导线中的电流方向。

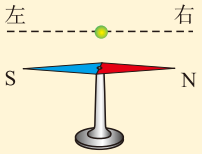


（a）通电直导线　（b）通电螺线管剖面图　（c）单匝通电线圈剖面图　（d）通电螺线管

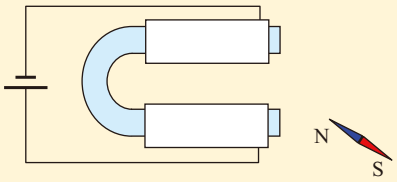
▲ 图3-1-11

2. 一束带电粒子沿着图3-1-12中虚线所示的水平方向飞过，其下方原本静止的小磁针的S极向纸内偏转，那么这束带电粒子所带的电性及飞行方向有哪几种可能？

3. 图3-1-13是一个蹄形电磁铁，通电后它旁边的小磁针静止的位置如图所示，请你画出通电导线的绕法。



▲ 图3-1-12



▲ 图3-1-13

4. 比较静电场的电场线与磁场的磁感线，它们有哪些相似之处？有哪些不同之处？

发展空间

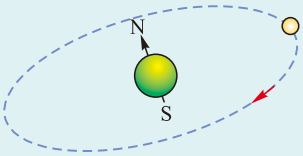
课外阅览

磁现象的电本质

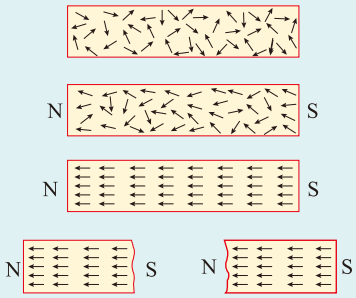
人类早在发现电现象的同时就发现了磁现象，但是直到1820年奥斯特发现了电流的磁效应后才揭示了电与磁的相互联系。安培等人的进一步研究扩大了人类对电与磁的认识。他不仅获得了磁场对通电导线作用的规律，而且还从磁体和通电线圈的等效性实验进一步提出了“分子电流”假说。他认为在原子、分子内部总存在一种环形电流——分子电流，分子电流使其两侧相当于两个磁极。安培把磁体的磁场和电流的磁场都归结为电流的作用，揭示了磁的本质。虽然在安培的时代还不知道原子和分子的存在，但安培的分子电流假说却是正确的。现代物理研究表明：物质是由分子和原子组成的，原子核外的电子在不停地绕核运动的同时，还存在“自旋”，电子的运动在周围空间产生磁场（图3-1-14）。

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，如果这个原子内部若干小磁体有共同的取向。那么这个原子就等价于大一点小磁体，如果组成物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呈现磁性，取向越一致，磁性就越强。如果物质的内部“小磁针”取向完全混乱，则整体上不显磁性（图3-1-15）。



▲ 图3-1-14　电子运动形成的磁场等价于一个“小磁针”的磁场

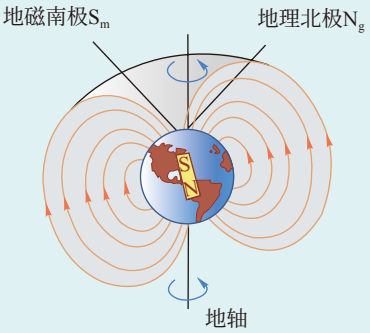


▲ 图3-1-15　物质微观结构的变化与磁性的形成

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，无规则运动加剧，破坏了原子磁性的规则取向。

地　磁　场

地球是一个大的磁体，地球内部和外部都存在着磁场。地磁场的存在对地球上的生命起着重要的保护作用。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，地磁场的南极用S_m表示。地磁南、北极的连线S_mN_m偏离地轴约为11.5°。正是由于地理北极与地磁南极不重合，使得各地指南针N极指示的方向并不是地理上的正北方向，它与正北方向的偏角称为磁偏角。磁偏角的数值在地球上不同的地方是不同的。不仅如此，由于地球磁极的缓慢移动，同一地点磁偏角的数值也在缓慢变化。磁偏角的发现对于科学的发展和指南针的精确定位都很重要。磁针静止时与水平面也成一定角度，这个角度称为磁倾角，地球上不同地点的磁倾角也各不相同。再者，地磁场的变化可以用来勘探矿床——不同的岩石和矿物具有强弱不同的磁性，如果把他们聚在一起，形成矿床，那么必然会对附近区域的地磁场产生干扰使得地磁场出现异常。对磁场异常的区域进行分析和进一步勘探，往往可以发现未知的矿藏或者特殊的地质结构。



▲ 图3-1-16　地磁场

2　磁感应强度　磁通量

码头上的电磁铁能吸起成吨的钢铁，实验室的磁铁只能吸引铁钉这类较小的物体。通过初中物理的学习我们也知道，一根条形磁铁的不同位置，吸引铁质物质的

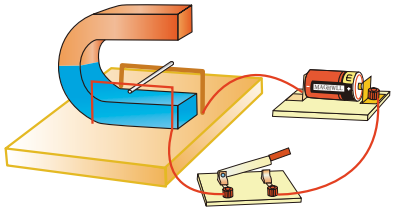
能力并不相同，这就说明，磁体产生的磁场中不同位置的磁性有强弱之分。除了磁感线外，怎样更精确地描述磁场的强弱和方向呢？

磁感应强度

讨论交流

在本书第一章关于电场性质的学习中我们知道，电场强度是描述电场性质的物理量，它是矢量，人们规定放入电场中的正电荷的受力方向，就是该点电场强度的方向。电场强度E的大小等于放入其中的检验电荷受到的电场力F与电荷量q的比，即$E=\frac{F}{q}$。

我们能否将磁场与电场类比，也找到一个描述磁场强弱和方向的物理量呢？这个物理量的方向如何规定？它的大小又如何确定呢？



▲ 图3-2-1

为什么描述磁场强弱和方向的物理量不叫磁场强度呢？这是因为人们已经先将另外一个物理量叫作磁场强度了。

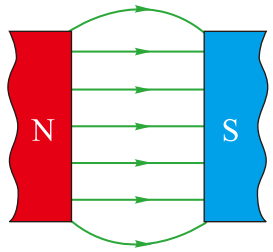
这个物理量就是磁感应强度 B，它的方向就是我们前面已经学过的小磁针 N 极的受力方向，即磁场方向。我们是否可以类比电场强度 E 的定义方法来定义磁感应强度呢？初中物理的实验告诉我们，通电导线在磁场中受到磁场力 F，与电流 I 和导线长度 L 都有关，如图 3-2-1 所示。

电场强度 E 之所以用电荷受到的电场力 F 与电荷量 q 的比定义，是因为 $F \propto q$，该比值与放入的电荷 q 无关，它是反映电场性质的物理量。那么，在磁场中的通电导线受到的磁场力 F 与 IL 的比是否与导线中的电流 I 以及它的长度 L 都无关？能否反映磁场的性质呢？

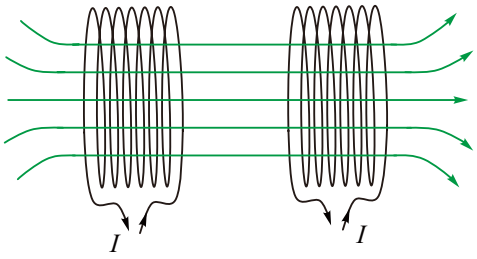
一般来说，磁场中不同的位置磁场的强弱和方向各不相同，把一段通电导线分成很多个长度相等的小段，这些小段受到的磁场力也各不相同。我们无法测量非常短的一小段通电导线受到的磁场力，只能测量一段较长的通电导线受到的磁场力。要想了解 $\frac{F}{IL}$ 是否与 I、L 的大小无关，就必须在一个“均匀”的磁场中进行实验，并且使待测量的通电导线与磁场方向垂直。

这样“均匀”的磁场就是匀强磁场，它指的是磁场中

的某个区域，该区域中各点的磁场强弱和方向都相同，或者说该区域内磁感线相互平行且间距相等。如图 3-2-2 所示两个永磁体的异名磁极间的区域，如图 3-1-10（c）所示的通电螺线管内部的磁场，两个平行放置的、相距较近的通电线圈间的磁场（图 3-2-3）都可以认为是匀强磁场。图 3-1-4（b）所示的蹄形磁体两极之间的磁场，并不是严格的匀强磁场，但在我们做实验时，受力的那段通电导线所在的位置，各处的磁场强弱和方向可看作都基本相同。



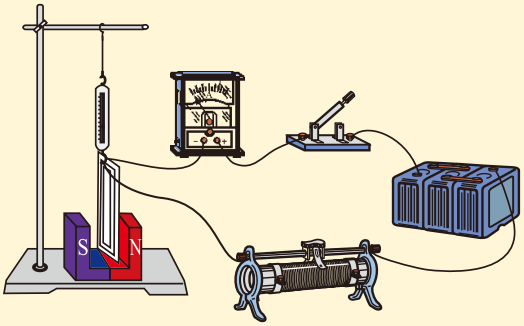
▲ **图3-2-2**　永磁铁两异名磁极间的磁场可认为是匀强磁场



▲ **图3-2-3**　两个通电线圈间的磁场

实验探究

如图3-2-4所示连接实验器材，使线框平面与磁场方向垂直，线框下方的短边位于蹄形磁体的两极之间。



▲ **图3-2-4**　实验装置图

为了获得明显的实验效果，也可以考虑采用多匝线框。

如果线框的匝数为n，每匝线框中的电流为I_1，则通过的电流应记为nI_1。

1. 在接通电路前先观察并记录弹簧测力计的读数F_{01}和线框在磁场中的短边的长度L_1。

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，$|F_1 - F_{01}|$的物理意义是什么？

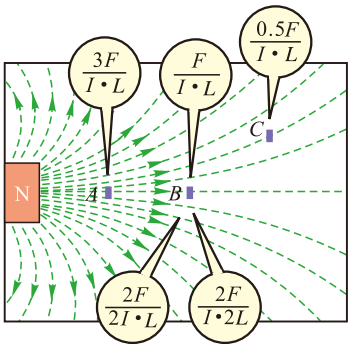
如果磁场的范围不够大，可以用几个相同的蹄形磁体并起来。

3. 更换短边长度不同的线框（保持短边在磁场中的位置不变），改变电流大小，重复上述步骤。

4. 在下表中列出$I_i \cdot L_i$与$|F_i - F_{0i}|$（$i = 1, 2, 3, \cdots, n$）的对应关系。

$I_i \cdot L_i$/（A·m）								
$\lvert F_i - F_{0i} \rvert$/N								
$\dfrac{\lvert F_i - F_{0i} \rvert}{I_i \cdot L_i}$								

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，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，可知此时线框所受磁场力$F=mg$，由此可求得导线所在位置的磁感应强度。



▲ **图3-2-5** 磁场中不同点的磁感应强度

分析实验数据可以发现，在匀强磁场中，在导线与磁场方向垂直的情况下，虽然L_i、$\lvert F_i - F_{0i} \rvert$和$I_i$在变化，但是磁场力$F$跟电流$I$和导线长度$L$乘积的比是一个定值，与导线的长度、通过导线的电流无关。因此，我们可以用这个比来描述磁场的性质，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。

1T=1N/（A·m），普通永磁体的磁极处磁感应强度约为0.4～0.8T，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1000T，而产生的稳定磁场的最大磁感应强度为37T。

还有一点需要说明：对于非匀强磁场来说，公式$B = \dfrac{F}{IL}$中的L只有在非常短的情况下，F与IL的比值才等于该位置的磁感应强度。如图3-2-5所示的就是某磁极附近不同位置的磁感应强度的分布情况。

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
老式电视机内的偏转磁场	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}

例题示范

问题　在赤道表面附近一个较小的范围内的地磁场可看成是沿南北方向的匀强磁场，如果赤道上有一段沿东西方向架在跨度20m的电线杆间的直导线，当通有大小为30A、方向由西向东的电流时，这段通电导线受到磁场给它的力为3×10^{-3}N，求此处地磁场的磁感应强度。

分析　因电流方向与磁场方向垂直，并且可以看作匀强磁场，故可以直接使用磁感应强度的定义式求出导线所在位置地磁场的磁感应强度。

解　磁感应强度是矢量，其方向近似指向北方。其大小

$$B=\frac{F}{IL}=\frac{3\times10^{-3}}{30\times20}\mathrm{T}=5\times10^{-6}\mathrm{T}$$

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，我们引进一个磁通量的概念。如图3-2-6（a）所示，在磁感应强度为B的匀强磁场中，有一块垂直于磁感线方向的面积为S的平面，我们定义BS为穿过这个面的**磁通量**（magnetic flux），简称磁通，用Φ表示，即

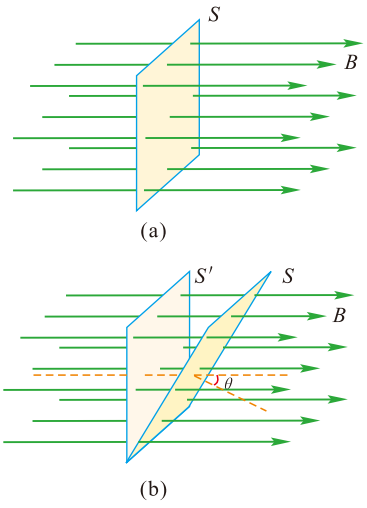
$$\Phi=BS$$

在国际单位制中，磁通量的单位是**韦伯**，简称**韦**，符号是Wb，1Wb=1T·m^2。由于$B=\frac{\Phi}{S}$，因此，磁感应强度B又叫作磁通密度，单位为Wb/m^2，1T=1Wb/m^2。

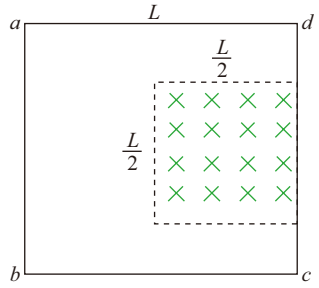
在如图3-2-6（b）所示的匀强磁场中，面积为S的平面的垂线与磁场方向的夹角为θ，平面S'是平面S在垂直磁场方向上的投影，显然穿过S、S'的磁通量相同。根据这个道理我们可以计算出穿过平面S的磁通量，由图得出

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

需要注意的是：（1）公式$\Phi=BS'=BS\cos\theta$只适用于线框处于匀强磁场的情况，如果线框内部的磁场是非匀强磁



▲图3-2-6　磁通量



▲ **图3-2-7** 正方形线框内部只有部分区域存在磁场

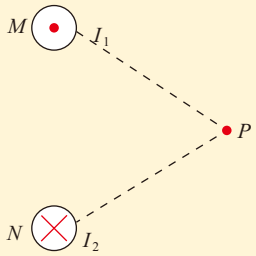
场，则必须把它分成若干小的区域，若每一个小区域内的磁场可以看作匀强磁场，则可以分别计算穿过各小区域的磁通量，再把它们加起来即为穿过线框的磁通量。如图 3-2-7 所示，边长为 L 的正方形线框内只有部分区域存在磁场，磁感应强度大小为 B，方向与平面垂直，则穿过它的磁通量是 $\Phi=BS'=BL^2/4$。

（2）如果线框有 n 匝，穿过每匝线框的磁通量为 Φ，则穿过整个线框的磁通量为 $n\Phi$。

自我评价

1. 一段长为 L 的通电导线位于某匀强磁场中，通过它的电流大小为 I，它受到的磁场力大小为 F。该匀强磁场的磁感应强度的大小一定等于 $\frac{F}{IL}$ 吗？如果不等于 $\frac{F}{IL}$，它可能比 $\frac{F}{IL}$ 大还是比 $\frac{F}{IL}$ 小？为什么？

2. 两根通电直导线 M 和 N 都垂直于纸面放置，通过的电流 I_1 和 I_2 大小相等而方向相反，如图 3-2-8 所示。P 点是纸面内距离 M、N 相等的一点，这两个电流产生的磁场在 P 点的磁感强度分别为 B_1 和 B_2，请在图上画出表示 B_1 和 B_2 的箭头，以及它们的合矢量 B 的箭头。



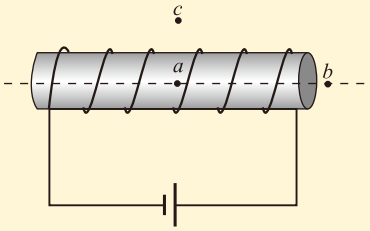
▲ **图3-2-8**

3. 把一个面积为 $5.0\times10^{-2}\text{m}^2$ 的线圈放在某匀强磁场中，当线圈平面与磁场垂直时，穿过线圈的磁通量为 $1.0\times10^{-3}\text{Wb}$。

（1）该磁场的磁通密度是多少？

（2）上述线圈从与磁场方向垂直的初始位置转动到与磁场方向成 60° 的位置，穿过线圈的磁通量以及该磁场的磁通密度各是多少？

4. 如图 3-2-9 所示为一个电磁铁。a 位于铁芯内部的中心，b 位于铁芯的中轴线上，c 则位于铁芯的上方。这三点中，哪一点的磁感应强度最大？哪一点的磁感应强度最小？你是根据什么判定的？



▲ **图3-2-9**

发展空间

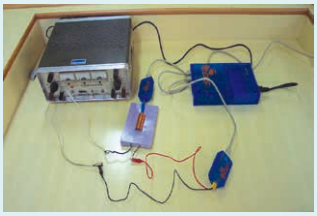
实验室

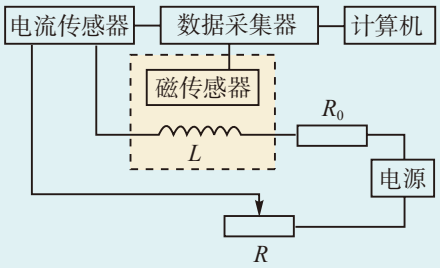
用传感器测量磁感应强度

我们已经看到，使用普通的仪器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（图3-2-10），磁传感器测量端放在螺线管内的某一位置。



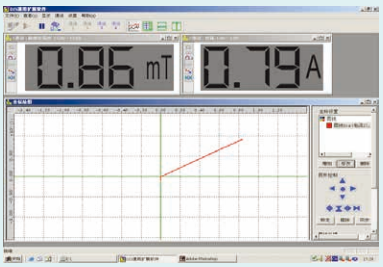


▲ **图3-2-10**　用传感器测磁感应强度

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片，改变线圈中的电流大小，得出一条实验图像，如图3-2-11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，则数字窗口的计数呈现稳定显示，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3-2-11**　螺线管中的磁感应强度

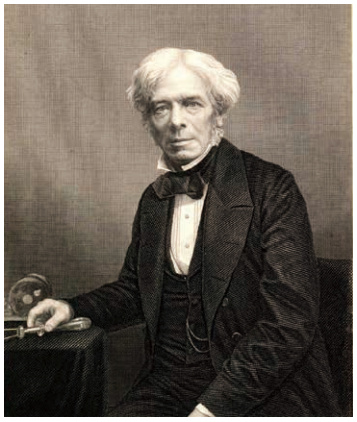
3　电磁感应现象及其应用

现代人们的生活已经离不开电了，照明的电灯、制冷的空调、储存食物的冰箱、用于娱乐学习的彩电……它们所用的电能都是由哪里来的呢？都是发电厂发出来的。而发电厂里的发电机是根据什么原理工作的呢？这就是我们这一节要学习的内容。

奥斯特实验的启迪

1820 年，奥斯特发现了电流的磁效应，引起了科学界的广泛关注，形成了对电磁现象研究的热潮。安培（Andre

Marie Ampere，1775—1836）等人相继在电磁学研究上取得了卓越成果。不少物理学家根据对称性的思考提出，既然电能产生磁，是否也存在逆效应，即磁产生电呢？在这种思想推动下，安培等人曾做过不少实验，但都没有取得什么结果。



▲ **图3-3-1** 法拉第（M.Faraday，1791—1867）

1830 年，美国科学家亨利在研究绕有不同长度导线的电磁铁所产生的磁力大小时，曾在通电与断电瞬间，观察到了与不通电线圈相连的电流表指针偏转的现象。但由于新学期的开始，他终止了研究，错过了发现这一成果的机会。

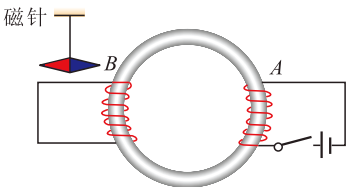
1821 年，法拉第（图 3-3-1）正在进行化学研究，他的导师要求他撰写一篇文章，综述电磁学研究进展的概况。在收集资料的过程中，他发现这个领域不仅成果丰硕，而且意义非凡，这激发起法拉第对“磁生电”这一重大课题研究的巨大热情，使他把注意力转移到这方面的研究上来。

电磁感应现象的发现



▲ **图3-3-2** 法拉第做实验时使用的线圈

为了实现“磁生电”的理想，法拉第经历了长达 10 年的探索，终于获得了成功。1831 年 8 月 29 日，法拉第设计了一个新实验：他在一个软铁环上绕了两个线圈（图 3-3-2），一个与电池相连，另一个连接着检测电流的装置（图 3-3-3），他发现右边的电路接通时，左边用于检测电流的小磁针发生了偏转，但不久又恢复到零；当右边的电路断开时，左边的小磁针向反方向偏转，随即又恢复到零。他敏锐地抓住这个短暂的电流，立刻意识到过去失败的原因在于一直在稳定的磁场中去寻找电流。法拉第走出了这个误区，接下来进行了许多实验，证实了“磁生电”现象的存在。



▲ **图3-3-3** 法拉第实验原理

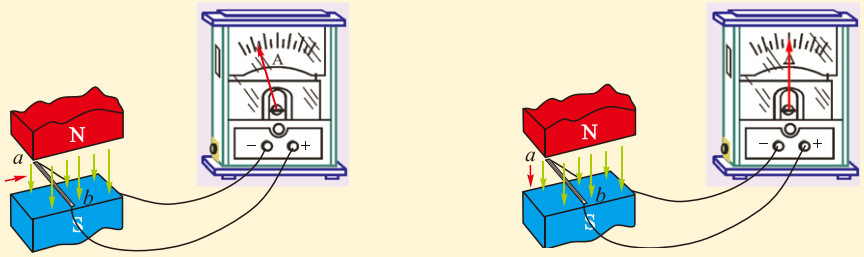
1831 年 11 月 24 日，他向英国皇家学会提交了一篇论文，报告他的重大发现。论文将“磁生电”的现象分为五类：（1）变化中的电流；（2）变化中的磁场；（3）运动中的恒定电流；（4）运动中的磁铁；（5）运动中的导线。他把这些现象命名为**电磁感应**（electromagnetic induction），由电磁感应现象产生的电流叫作**感应电流**（induction current）。

感应电流产生的条件

根据法拉第将“磁生电”归纳的五类现象，我们可以通过实验探究、归纳总结感应电流产生的条件。

实验探究

如图3-3-4所示，导体*ab*和电流表连接成闭合回路。当导体*ab*在磁场中分别垂直于磁感线和沿着磁感线运动时，观察电流表指针的摆动，分析什么情况下会产生感应电流。



（a）闭合电路的部分导体在磁极间左右运动　　（b）闭合电路的部分导体在磁场中上下运动

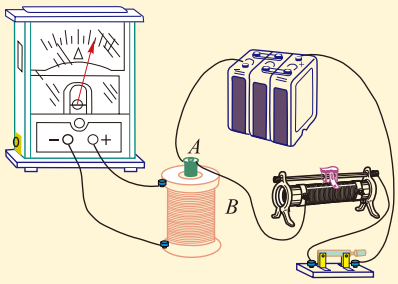
▲ **图3-3-4**　导体在磁场中运动

实验表明：当闭合电路的一部分导体在磁场中做切割磁感线运动时，电路中有感应电流产生。

在法拉第的有些实验中，导体并没有切割磁感线的运动，但闭合电路中也出现了感应电流。让我们模仿法拉第的实验，对这些情况进行探究。

实验探究

我们通过图3-3-5来模仿法拉第的实验进行探究。线圈*A*通过变阻器和开关连接到电源上，构成直流电路，线圈*B*的两端连接在电流表上，线圈*A*放在线圈*B*内。



▲ **图3-3-5**　模仿法拉第进行实验的装置

操作观察	电流表指针偏转情况		
	*A*全部在*B*中	*A*在*B*的正上方	*A*、*B*相互垂直
开关接通瞬间			
电流稳定			
开关断开瞬间			
滑动变阻器电阻减小			
滑动变阻器电阻增大			

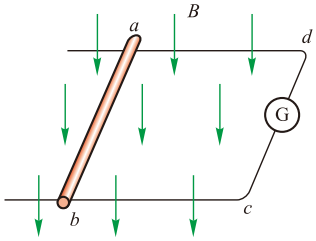
在这个实验中，你能归纳出哪些规律？

讨论交流

1. 在图3-3-4的实验中，出现感应电流的操作是哪些？它们有什么共同点？

2. 在图3-3-5的实验中，当开关闭合后，*A*线圈电流稳定时，*B*线圈中也存在磁场，但不产生感应电流，这说明了什么？

3. 在图3-3-5的实验中，*A*、*B*相互垂直时不能产生感应电流，这又说明什么？你能概括出以上三种情况共同的规律吗？



▲ **图3-3-6** 导体切割磁感线运动，回路面积发生变化，从而穿过回路的磁通量发生了变化

两个线圈相互不连通，也没有相对运动，*B* 线圈中的电流是靠“感应”而产生的。引起“感应”的必要条件是穿过 *B* 线圈的磁通量发生了变化。

图 3-3-6 是对图 3-3-4（a）实验过程的分析。其中磁场是稳定的，但是导线切割磁感线运动时，回路 *abcd* 的面积也要变化，从而穿过它的磁通量发生了变化，回路中产生了感应电流。

以上实验及其他大量事实表明：**只要穿过闭合导体回路的磁通量发生变化，闭合导体回路中就有感应电流产生。**

电磁感应规律的发现对社会发展的意义

法拉第在发现电磁感应现象之后，通过大量的实验，又归纳总结出电磁感应的规律，并发明了人类历史上第一台感应发电机（图 3-3-7）。

发电机利用电磁感应的原理，能够把机械能转化为电能，扩大了人们利用能源的途径；变压器的发明则解决了电能远距离传输中能量大量损耗的问题，使电能大规模应用成为可能；感应电动机的出现，又把电能转化为机械能，把人们从繁重的体力劳动中解脱出来，使人类进入了电气时代。



▲ 图3-3-7　法拉第发电机

电磁感应还被广泛地应用于各种电路控制器件、传感器、电子技术和信息技术之中，为生产、生活和科研等各个领域的电气化、自动化、信息化奠定了基础。

电磁感应的发现，是继牛顿发现天上、地上物体之间运动相互联系之后物理学的又一伟大发现。这一发现，对于人们认识物质世界及其统一性，在科学思想和科学方法的发展和创新等方面，有着深刻的意义。同时，电磁感应发现的漫长曲折过程有着宝贵的哲学意义，它告诫、启发人们应该以联系和变化的观点去认识物质世界。

法拉第在研究电磁感应等电磁现象中，从磁性存在的空间分布逐渐提炼出“场”的科学创新思想。而电磁感应暗示着变化的磁场可产生电场，在此基础上，麦克斯韦建立了电磁场理论，并预言了电磁波的存在，从而为信息时代的到来奠定了基础。

自我评价

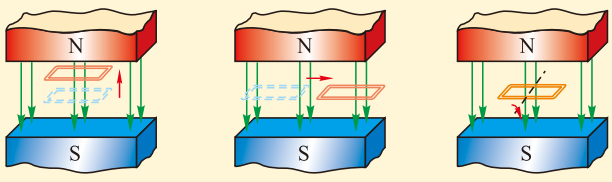
1. 一个闭合线圈位于两异名磁极间的匀强磁场中，下面几种情况，线圈中是否产生感应电流？为什么？

（1）线圈沿磁场方向上下运动，如图 3-3-8（a）所示；

（2）线圈垂直于磁场方向向右运动，运动范围在匀强磁场内，如图 3-3-8（b）所示；

（3）线圈垂直于磁场方向向右运动，从匀强磁场中移到磁场外；

（4）线圈绕垂直于磁场的转动轴转动，如图 3-3-8（c）所示。



(a)　(b)　(c)

▲ 图3-3-8　闭合线圈在匀强磁场中运动

2. 一根直导线位于竖直方向，通有恒定电流 I，它的右边有一个闭合线圈 $abcd$，如图 3-3-9 所示。当线圈做下面几种运动时，线圈中是否有感应电流产生？为什么？

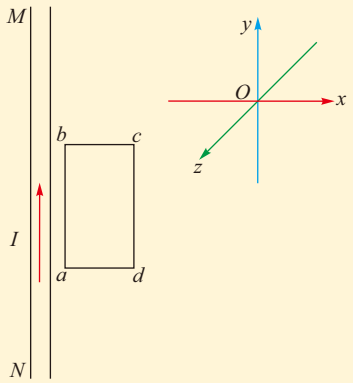
（1）线圈沿图中 y 轴方向平行移动；

（2）线圈沿图中 x 轴方向平行移动；

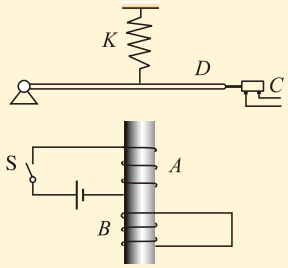
（3）线圈以 ab 边为轴，cd 边向纸里的方向转动 90° 角；

（4）线圈以 ad 边为轴，bc 边向纸里的方向转动 90° 角。

3. 如图 3-3-10 所示为生产中使用的一种延时继电器的示意图。铁芯上绕有 A、B 两个线圈，线圈 A 跟电源连接，线圈 B 的两端接在一起，构成一个闭合回路。在断开开关 S 的时候，弹簧 K 并不能立即将衔铁 D 拉起，使触头 C 离开，而是要过一小段时间后触头 C 才能离开，“延时继电器”就是这样得名的。试说明这种继电器的原理。



▲ **图3-3-9** 闭合线圈在通电直导线旁运动



▲ **图3-3-10** 延时继电器示意

发展空间

课外阅览

“平凡的”法拉第

法拉第于 1791 年 9 月 22 日出生于伦敦郊区一个铁匠家庭，自小家境贫寒，小学尚未毕业，迫于生活，13 岁时便在一家书店当学徒，后来成为书籍装订工，整天与书打交道。勤奋好学的法拉第通过三种途径在艰难的环境里学习：一是努力阅读他装订的书；二是加入当时一位热心传播知识的人组织的“伦敦哲学研究会”，这位组织者经常请人在自己家中介绍人们感兴趣的新知识，允许研究会成员阅读自己的藏书；三是听英国皇家学会定期为公众讲述科学的讲座。通过这些途径，年轻的法拉第走上了与众不同的科学探索之路。

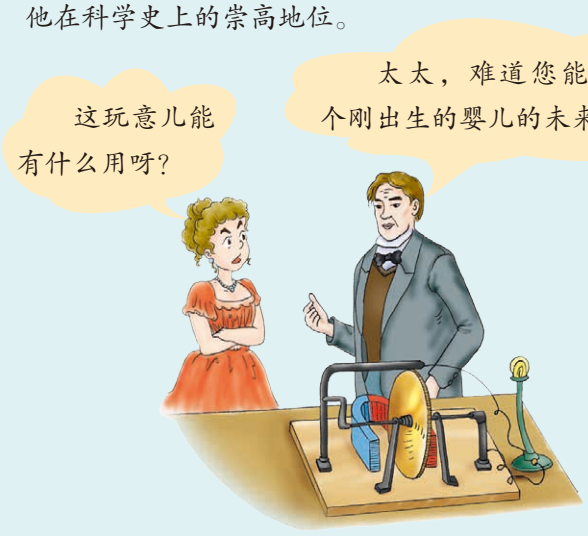
21 岁那年，他有机会旁听了英国化学家戴维在伦敦皇家学院所做的系列化学演讲，他细心记笔记，并将演讲内容全部整理出来，开始了解大科学家的治学内容和方法，并对科学研究产生越来越浓厚的兴趣。一天他写了两封信，当晚送到了伦敦皇家学院，一封给院长，一封给戴维，在给戴维的信中还附上他所整理的听戴维讲演的笔记（这本笔记至今还收藏在伦敦皇家学院）。信中他表达了有志于科学事业的迫切心情。戴维很赏识法拉第的才学，推

荐他到伦敦皇家学院一个实验室当助理研究员，在戴维指导下，从事化学研究。由于全身心投入，他在化学方面的研究取得很多成果，1823 年便担任实验室主任，1824 年被正式选为英国皇家学会会员。

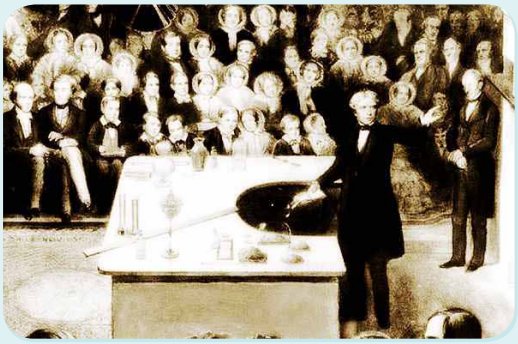
法拉第的思想非常深刻，富有创造性和高度的想象力。他能不借助数学语言而洞察客观事实的本质，从而弥补了他数学功底的不足。他以一系列重大科学发现和技术应用而著称于世。法拉第的成功一方面是正好处于 19 世纪前半叶，这是电磁学研究蓬勃发展的时期，实验研究有广阔的天地；但更主要的是他为追求科学真理，抓住了这一大好机遇，并且具有勤奋刻苦、坚忍不拔的精神。他认为做实验就是与自然的直接对话，因此工作起来废寝忘食，遇到困难百折不挠。在他勤奋实验的 40 年间，他坚持记下了 3000 多页实验日记，内容包括几千幅插图和大量实验条目等，其最后一条的编号是 No.16041。这七卷本日记（1832—1836 年出版）以及三卷本的《电学实验研究》（1839 年、1844 年和 1855 年出版）和一卷《化学和物理实验研究》（1859 年出版）是法拉第一生最重要的著作，记录了他的成功和失败，是他留给后人的宝贵财富。

法拉第的一生之所以能对科学做出如此巨大的贡献，除了他的刻苦努力和富于创造精神外，更主要的是他具有唯物主义的物理观和辩证法思想。法拉第说过：“自然科学家应当是这样一种人：他愿意倾听每一种意见，却要自己下决心做出判断。他应当不被表面现象所迷惑，不对每一种假设有偏爱，不属于任何学派，在学术上不盲从大师。他应该重事不重人。真理应当是他的首要目标。如果有了这些品质，再加上勤勉，那么他确实可以有希望走进自然的圣殿。”这就是法拉第为科学事业做出巨大贡献的真实写照。

法拉第淡泊名利、洁身自爱的高尚品德和情操也成为后人学习的楷模，他自幼生活贫困，进入科学界后一直靠工资度日，十分清贫。他发明很多，但从不申请专利。他拒绝企业咨询的优厚报酬和巨额赠款，也拒绝了皇家学会的高官厚禄，不愿出任英国皇家学会会长，拒绝接受爵士称号。他一再表达的意愿是“我必须保持平凡的法拉第以终”（图 3-3-11、图 3-3-12），把追求科学真理和献身科学事业作为终身的最高目标。1867 年 8 月 25 日，法拉第因病去世，享年 76 岁。他的遗体被安葬在伦敦西敏寺公墓的牛顿墓旁，这也向世人显示了他在科学史上的崇高地位。



▲ **图3-3-11**　关于探讨发电机未来的小故事



▲ **图3-3-12**　演讲中的法拉第

4 电磁波的发现及其应用

电磁波的发现极大地改变了我们的生活。它不仅是信息的载体，也是能量传递的一种方式，还是我们探索宇宙的重要工具。那么电磁波是怎么被发现和产生的呢？

电磁场

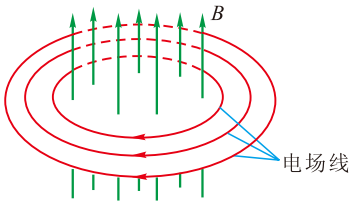


▲ **图3-4-1** 麦克斯韦（Maxwell，1831—1879）

19 世纪 60 年代，英国物理学家麦克斯韦（图 3-4-1）在法拉第等人研究成果的基础上，进行总结，并加以发展，提出了系统的电磁理论。这一理论有两个基本假设。

1. 变化的磁场能够在周围空间产生电场

由法拉第电磁感应定律可知，若在变化的磁场中放一个闭合回路，并且该回路平面不与磁场平行，闭合回路中就会产生感应电流。在这个闭合回路中，没有传统意义上的电源，因此麦克斯韦认为，这是由于磁场的变化而产生的电场作用的结果。麦克斯韦指出，闭合回路的存在只是提供了观测电场存在的手段，不管闭合回路存在与否，只要磁场在变化，它的周围就会产生电场，如图 3-4-2 所示。

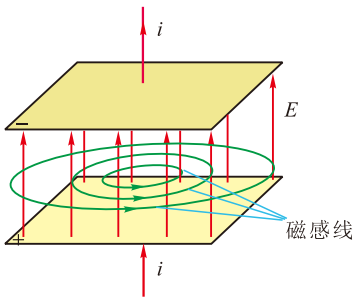


▲ **图3-4-2** 变化的磁场能够产生电场（*B*增大时的情形）

根据理论研究，麦克斯韦进一步指出，磁场随时间变化快，产生的电场强 ；磁场随时间的变化不均匀时，产生变化的电场 ；稳定的磁场周围不产生电场。这意味着电场可由两种方式产生 ：由**电荷**或由**变化的磁场**产生。

2. 变化的电场能够在周围空间产生磁场

麦克斯韦研究电现象和磁现象的区别和联系时，认为既然变化的磁场可以在周围空间产生电场，那么变化的电场也可以在周围空间产生磁场。麦克斯韦认为，当电容器 *C* 充电或放电时，不但导线中的电流要产生磁场，而且在电容器内，由于两极板电荷的变化使电场发生变化，而这变化的电场也要产生磁场，如图 3-4-3 所示。若电场随时



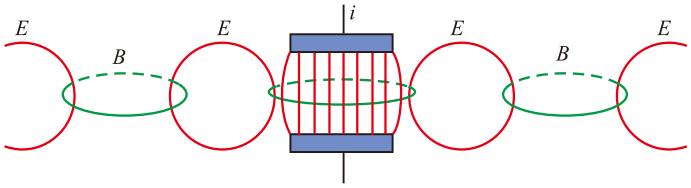
▲ **图3-4-3** 变化的电场能够产生磁场（*E*增大时的情形）

间变化快，则产生的磁场强；若电场随时间的变化不均匀，则会产生变化的磁场。稳定的电场周围不产生磁场。

麦克斯韦根据上述两个基本假设，进一步指出：如果在空间某区域有随时间不均匀变化的电场，那么这个变化的电场就在它周围空间产生变化的磁场；这个变化的磁场又在它周围空间引起变化的电场……于是，变化的电场和变化的磁场交替产生，形成不可分割的统一体，称为**电磁场**（electromagnetic field）。

电磁波和电磁波谱

上述由变化的电场和磁场交替产生而形成的电磁场是由近及远传播的，这种变化的电磁场在空间的传播称为**电磁波**（electromagnetic wave）（图 3-4-4）。



▲ **图3-4-4**　电磁波的产生

讨论交流

小聪用塑料梳子梳理头发，梳子带上了电荷。当她来回抖动梳子时，电荷随之运动。根据麦克斯韦的电磁理论，你认为空间有变化的电场和磁场吗?梳子在向外发射电磁波吗?

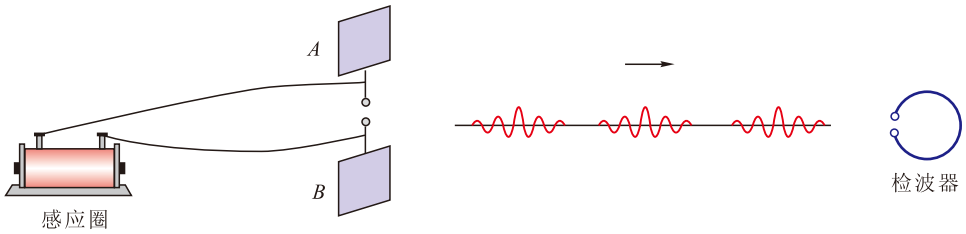
小聪来回抖动带有电荷的梳子，在空间就会形成变化的电磁场，从而产生电磁波。一切往复运动的电荷，或者更普遍地说，做变速运动的电荷都会在空间产生电磁波。

麦克斯韦在 1865 年从理论上预见了电磁波的存在，并计算出其传播速度等于光速，由此他认为光是电磁波的一种形态。1888 年，德国物理学家赫兹第一次用实验证实了电磁波的存在。

赫兹所做的电磁波发射与接收实验如图 3-4-5 所示，感应圈所产生的高电压会在两个靠近的铜球间激起火花，

这电火花就是做变速运动的电荷产生的，它产生电磁波向外传播，可以由检波器接收，表现为检波器的两铜球间也产生了电压，从而也有电火花产生。

赫兹还运用自己精湛的实验技术测定电磁波的波长和频率，得到了电磁波的传播速度，证实了这个速度等于光速。赫兹还用实验证明，电磁波跟所有波动现象一样，能产生反射、折射、干涉、衍射等现象，从而证实了麦克斯韦的电磁场理论，为后人利用电磁波传递信息开辟了道路。为了纪念他，人们把频率的单位称为赫兹。



▲ **图3-4-5** 赫兹的实验

电磁波在真空中传播的速度 $c=3.0\times10^8\text{m/s}$，如果用 λ 表示它的波长，f 表示它的频率，则这三个物理量间的关系是

$$c=\lambda f$$

电磁波的波长和频率有一个很宽的范围。不同波长的电磁波的性质可以有很大差异，用途也各不相同。其中一部分称为无线电波，主要用于通信、广播和电视等方面，它的波长较长，频率较低。还有一部分电磁波能作用于我们的眼睛引起视觉，因此叫作可见光，可见光波长范围为 400 ~ 760 nm。在可见光之外还存在着看不见的红外线、紫外线。此外，还有一部分波长极短，频率极高的电磁波，如 X 射线、γ 射线等，可用于育种和医疗等不同领域。我们按波长（或频率）的顺序把所有电磁波排列起来，称之为**电磁波谱**（electromagnetic wave spectrum）（图 3-4-6）。

这里所说的波长，都是指电磁波在真空中传播时的波长。

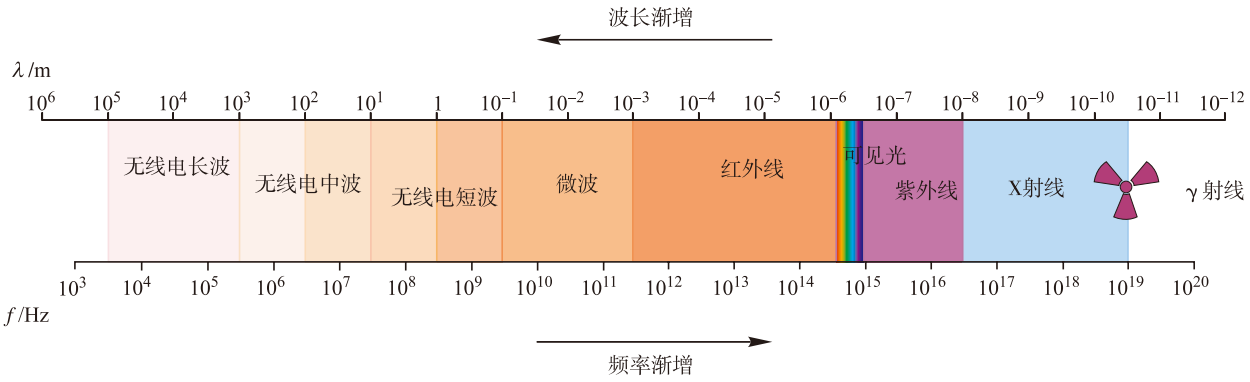
无线电波的波长从几毫米到几十千米，是对我们的生产和生活十分重要的一个波段，现将其波段更细的划分及主要用途列在下表中。

各个波段的无线电波及其用途

波　段		波　长	频　率	主要用途
长　波		30 000～3 000m	10～100kHz	超远程无线电通信和导航
中　波		3 000～200m	100～1 500kHz	无线电广播和电报通信
中短波		200～50m	1 500～6 000kHz	
短　波		50～10m	6～30MHz	
微波	米　波	10～1m	30～300MHz	无线电广播、电视、导航
	分米波	10～1dm	300～3 000MHz	电视、雷达、导航
	厘米波	10～1cm	3～30GHz	
	毫米波	10～1mm	30～300GHz	

注：表中kHz代表千赫，MHz代表兆（10^6）赫，GHz代表吉（10^9）赫。

无线电波、红外线、可见光、紫外线、X 射线、γ 射线等合起来，构成了范围非常广阔的电磁波谱，如图 3-4-6 所示。其中最长波长是最短波长的 10^{21} 倍以上，各个波段都有重叠，不能严格区分。



▲ **图3-4-6**　电磁波谱

电磁波的应用

电磁波的应用粗略地划分，主要包括两个方面：一是利用电磁波传递信息，二是利用电磁波的能量。

用电磁波传递信息是继语言的出现、文字的创造之后，人类文明的又一次重大进步。1844 年，电报的发明揭开了电信的序幕；今天，电信网、广播网和互联网将计算机和智能手机等终端连在一起，让我们进入一个“万物互联”的时代（图 3-4-7）。



▲ 图3-4-7 “万物互联”

电磁波可以通过电缆、光缆进行有线传输，也可以实现无线传输。电磁波的频率越高，相同时间内传递的信息量越大。光的频率比无线电波的频率高得多，因此光缆可以传递更多的信息。

电磁波在信息传播层面的应用极大地丰富了人们的生活，拉近了人与人间的距离，改变了人们的生活方式，让电子商务、远程控制等新事物成为现实。

人类除了主动发射各种电磁波之外，还接收和研究自然界物体发射的各种（可见光及非可见光波段）电磁波，以探索未知的世界。例如，遥感技术就是从人造地球卫星上接收地球表面及浅层地下发射的电磁波，进行测绘、勘探和研究；接收来自太空各种星体的电磁波，是天文学研究的重要手段。图 3-4-8 是中国的“天眼”FAST，这款口径达 500m 的球面射电望远镜，是我国具有自主知识产权的作品。它是目前全世界最大的、也是性能最先进的射电望远镜，主要用于寻找暗物质、暗能量和收集宇宙中的各种信号，揭示宇宙的奥秘。



▲ 图3-4-8 “天眼”

电磁波不仅仅是信息传播的载体，也是能量传输的方式。随着科技的发展，它本身所携带的能量也正被我们开发和利用。

太阳光是大自然馈予我们的最常见、最普遍的电磁波能量，这种清洁能源，被我们通过不同装置转化为电能或内能。

关于电磁波的能量，不得不提到一种常见的烹饪器具——微波炉（图 3-4-9）。它的微波发生器产生微波，微波以 2 450MHz 的振荡频率穿透食物。当微波被食物吸收时，食物内的极性分子（如水、脂肪、蛋白质、糖等）即以每秒钟 24 亿 5000 万次的频率快速振荡，这种振荡的宏观表现就是食物被加热了。



▲ 图3-4-9　微波炉

电磁波的能量除了服务于我们的日常生活外，也用于军事，如微波定向能武器、激光武器等。

自我评价

1. 试各举一个例子说明以下两个问题：

（1）变化的电场能产生磁场；

（2）变化的磁场能产生电场。

2. 什么是电磁波？试说明什么情况能产生电磁波？

3. 可见光是一种电磁波，已知可见光在真空传播时的波长范围为 400nm 到 700nm，请计算可见光的频率范围。

4. 激光测距是精确地测量长度的方法。为了准确地测量地球与月球间的距离，我们把一个可反射激光的装置放置在月球上，从地球对着它发射一束激光，记录下从发射到接收到月球反射回来的激光的时间间隔约为 2.56s。激光在真空中传播的速度 $c=2.998\times10^{8}$m/s，试通过计算确定地球到月球间的距离为多少。

发展空间

课外阅览

电磁辐射污染

电磁辐射有许多应用，但是，我们也不能忽视电磁辐射的负面效应，那就是电磁辐射污染（有人称之为“第五大公害”）。其主要表现为以下两个方面：

1. 电磁干扰。电磁辐射场强过大，可能干扰飞机的起降与飞行，干扰心脏起搏器的工作、精密仪器的使用等。在某些特定场合，产生较强电磁辐射的电器（例如手机）必须停用。

2. 电磁辐射对人体的伤害。过强或过长时间的紫外辐射、微波辐射、X 射线或 γ 射线的作用，会对人体（眼睛、皮肤、血液、神经系统、生殖系统等）造成危害。在存在强电磁辐射的场合，必须注意防护，例如设置防护墙，穿戴预防电磁辐射的衣帽、眼镜及其他用品等。

5 微观世界的量子化

20 世纪初，确切地说是从 19 世纪的最后几年开始，物理学发展到一个崭新的阶段，一般称为近代物理，其理论基础是相对论和量子力学。

狭义相对论的研究对象是物体运动速度接近光速的领域。它颠覆了传统的时空观，认为时间和长度、质量等都与运动速度有关。质能方程 $E = mc^2$ 建立了质量与能量的联系，认为质量和能量都是物质存在的形式。而牛顿力学只是相对论在运动速度远低于光速情况下的一种近似。

量子力学的研究对象是微观世界。在这个全新的研究领域，微观粒子表现出与宏观世界迥然不同的性质。下面只粗略地谈谈波粒二象性和能量量子化这两个问题，使同学们对近代物理的博大精深有所了解。

《物理 必修 第二册》第五章“经典力学的局限性与相对论初步”。

波粒二象性

关于光的本性的讨论很早就开始了，在 17 世纪，牛顿主张微粒说，即光是很小的高速运动的粒子流，而惠更斯则认为那是一种波，当时他们都没有确切的证据证明自己的观点。19 世纪初，光的干涉和衍射现象在实验中被观察到，而干涉和衍射现象是波动特有的现象，于是波动说占据了统治地位，后来麦克斯韦更进一步说明光是一种电磁波。但到了 19 世纪末，包括光电效应等现象证明了光具有粒子性。爱因斯坦为了解释光电效应，提出了光子说，他认为在空间传播的光是不连续的，而是一份一份的，每一份叫作一个光量子，简称光子。

波动和粒子，在宏观世界里是完全不同的：波是连续的，粒子是分离的。但光既具有波动性，又具有粒子性，可以说光既是电磁波，也是光子流，它是具有“波粒二

最早提出量子理论的是普朗克，他在研究热辐射的规律时，发现电磁波的发射和吸收都是不连续的，他把每一份的能量叫作能量子，它的大小为

$$\varepsilon = h\nu$$

其中 h=6.626 × 10^{-34}J·s，称为普朗克常量，ν 为波的频率。

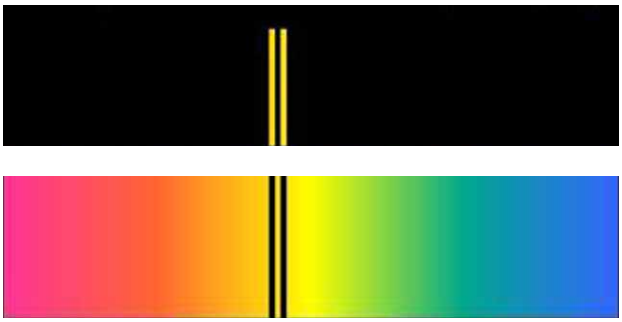
象性”的电磁性物质。光子的静止质量为零，也不带电，它只能以光速运动，它是一份一份的，但它具有波长和频率。

波粒二象性并不只是光才有的特性，而是微观世界的共性。实验已经证明电子、质子等实物粒子同样具有波动性。宏观物体的波动性我们检测不到。

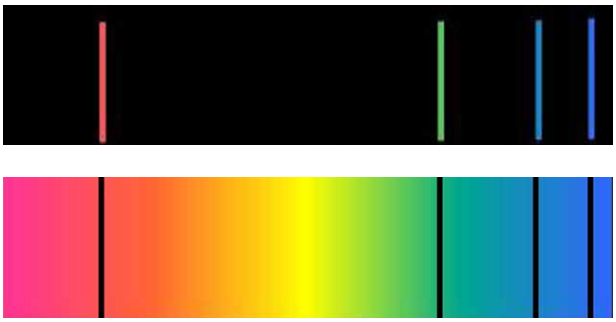
能量量子化

能量是一份一份的、不连续的，这在微观世界里是普遍的。

往酒精灯的火焰上撒一些食盐（氯化钠），会看到火焰的颜色变成黄色，这是金属钠原子发出的光，经光谱检验，它是两条分立的谱线，位于可见光的黄色部分，如图 3-5-1 所示。同样，氢原子的光谱在可见光范围内也只有四条分立的明线，如图 3-5-2 所示。

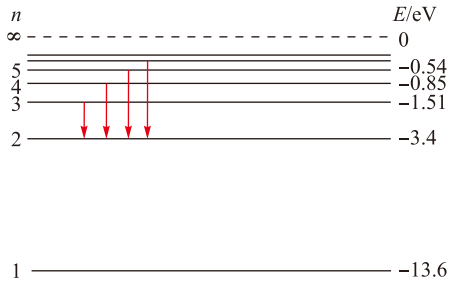


▲ **图3-5-1**　钠原子的光谱



▲ **图3-5-2**　氢原子的光谱

根据量子力学的理论，原子的能量是量子化的，即一系列不连续的值，这些不连续的、量子化的能量值称为**能级**（energy level）。通常情况下，原子处于能量最低的状态（称为基态），这是最稳定的状态，在某些情况下（例如受到高速运动的电子的撞击等），可能会变到能量较高的状态（称为激发态）。图 3-5-3 是氢原子的能级示意图，左边的数字是标明序号的，称为量子数，右边是它的能量值。可以看出，它的能量取值不是任意的，而是只能取分立的若干个数值。当氢原子的能量发生变化时，只能从某个能级“跳



▲ **图3-5-3**　氢原子的能级示意图

跃”到另一个能级，这个过程称为跃迁。从较低的能级跃迁到较高的能级，必须吸收能量；反之，则要释放出能量。这两个过程中吸收或释放出的能量都等于两能级的能量差，图中画出的四个箭头分别表示它从 n=3，4，5，6 的能级跃迁到 n=2 的能级的情况，这些过程中释放出的能量就是所发射的光子的能量，这些光子分别对应着图 3-5-2 中氢原子光谱在可见光范围内的四条明线。

波粒二象性和能量量子化，是微观世界的奇异性质，它颠覆了人类几千年来观察身边自然现象而形成的既有观念。然而这样的对物质世界认识的不断进步正是物理学的发展轨迹。

物理学的发展对整个人类社会的影响极为深刻和广泛。它不但提供了诸多普适性的原理、规律，而且从思想方法上给人类以启迪，使得包括社会科学在内的各个学科蓬勃发展，推动了技术的变革，极大地提高了生产力，创造了巨大的财富，从而深刻地改变了人类社会。

科学研究没有穷尽，未知的领域总是大于已知的领域，前面有更多的问题等待人们去探索、去研究。

感悟 · 启迪

- 你是否觉得电磁波很神奇？它无影无踪、无色无味，看不见、摸不着，却无处不在；它种类繁多，杂陈相处，却各司其职，互不妨碍；它不借助任何媒介，却穿越宇宙，速度奇快。靠着它，地球各个角落实现了互联互通；靠着它，遥测、遥感、遥控成为可能；靠着它，探索宇宙的航天员才可以从深邃的太空向家人道声平安；靠着它，飞机、汽车的无人驾驶才成为现实……

- 我们很早就知道物理学是一门以实验为基础的科学，但第一位向人类引荐电磁波的却是理论物理学家麦克斯韦。只可惜天不假年，这位先贤在有生之年未能见到他自己推荐的这位神秘客人，更没有想到这位客人给人类社会带来如此大的变化。全人类都会永远铭记这位伟大的科学家，也从他身上学习到勤奋努力的优秀品质，领悟到严密的逻辑推理、深厚的数学功底在科学研究中所起的重要作用。

反思·小结·交流

• 学后反思

1. 对“场”这种物质，我们的认识又进了一步：电荷周围的电场、电流周围的磁场，都是客观存在的物质，它们之间是相互联系的——当电场变化时会产生磁场；当磁场变化时，就会产生电场。这种交替产生的、变化的电场和磁场向外传播，就形成了电磁波，它携带着信息和能量，传向远方。电场和磁场，都是统一的电磁场的组成部分。

2. 科学的发展、技术的改进、生产力的提高、生活的改善、社会的进步，它们既紧密联系，又相互影响和促进。这一切，在电磁学研究取得重大进展之后突飞猛进。

• 自主小结

1. 电流周围存在着磁场，直导线、环形导线、通电螺线管，是三种常见的用于产生磁场的载流导线。

（1）这三种通电导线周围的磁场的磁感线各是怎样分布的？磁感线的方向与电流方向之间存在着怎样的关系？

（2）所有电流周围磁场的磁感线的共同点是什么？它与静电场的电场线有什么不同？

2. 把一段通电导线放在匀强磁场中，可以通过测量它受到的磁场力 F 而测得到该匀强磁场的磁感应强度。除了力 F 以外，还需要测量哪些物理量，需注意什么问题？如果是非匀强磁场，上述方法是否适用？为什么？

3. 什么是电磁波？电磁波是怎么产生的？

4. 相对论和量子力学各适用于什么场合？

• 相互交流

1. 电磁波首先由麦克斯韦从理论上推导而预言它的存在，而后才经赫兹实验得到验证。通过这段史实的学习，你对于理论与实验的关系有什么认识？

2. 电磁波的应用非常广泛，请尽可能多地列举出你所知道的电磁波的应用实例。

本章复习题

1. 有磁性的物体称为磁体，这里的“有磁性”指的是什么？
2. 天然磁体都有两个磁极，一块形状不规则的磁性物体，怎样确定它两个磁极的位置？这两个磁极根据什么来命名？
3. 通电螺线管中间插入一个铁芯，磁性会大大增强，这是为什么？
4. 磁感应强度的方向和大小各是怎么定义的？
5. 什么是匀强磁场？举例说明哪些地方存在着匀强磁场。
6. 在磁感应强度B=0.2T的匀强磁场中，一个线圈的面积S=2×10^{-4}m^2，当它与磁场方向垂直时，穿过该线圈的磁通量是多少？若该线圈与磁场方向成60 °角，穿过该线圈的磁通量变为多少？
7. 一个蹄形磁铁如图所示放置，一个闭合线圈从N极套入，最后从S极出来，即从图中P位置处开始到图中Q位置处的过程中，穿过该线圈的磁通量如何变化？



▲第7题图

8. 麦克斯韦的理论认为电场与磁场间存在着怎样的联系？在什么情况下可能会有电磁波存在？电磁波在真空中传播时的速度是多大？
9. 根据电磁波谱，波长为4 687m和2×10^{-6}m的电磁波分别为哪种类型的电磁波？



第四章

能源与可持续发展

主题一　能量守恒定律

- 能量　能量守恒定律

主题二　能源、环境与可持续发展

- 能源
- 环境保护与可持续发展

科学技术的发展、社会的进步、人类生活的改善，都离不开能源的消耗。

过度的能源消耗必然会破坏环境。我们只有一个地球，它是全人类共同的、唯一的家园。

如何做到真正的可持续发展，是全人类共同面临的现实而紧迫的问题。

1 能量 能量守恒定律

你听说过永动机吗？

历史上有很多“聪明”的人耗费大量的精力和时间，力图发明一种不使用任何动力就能一直运转并为人类做功的机器，也就是所谓的永动机。永动机的狂热追随者们无一例外都以失败告终。这是为什么呢？其实很简单，那是因为他们违背了一条自然界最基本的规律——能量守恒定律。

机械能的守恒与不守恒

讨论交流

回忆我们学习过的机械能守恒定律，想一想：对于由几个物体组成的系统而言，满足什么条件，该系统的机械能守恒？在什么情况下，该系统的机械能就不守恒了？

在不守恒的情况下，该系统的机械能是增加了还是减少了？如果是减少了，这减少的能量到哪里去了呢（图4-1-1和图4-1-2）？



▲ 图4-1-1 箭的机械能最终哪里去了



▲ 图4-1-2 落石的机械能哪里去了

对于由几个物体组成的系统来说，系统的机械能守恒的条件是：只有重力或弹力做功。这就是说，除了这些力做功以外，如果还有其他力做功，则该系统的机械能就不守恒。这里的其他力，可以分成两类，一类是系统以外的物体对系统内物体的作用力，简称外力；另一类则是系统

内的物体间除重力或弹力外的其他相互作用力，例如滑动摩擦力，简称为其他内力。

如果一个系统除重力或弹力以外，还有外力做功，系统的机械能就会发生变化：如果外力做正功，系统的机械能增加，反之则系统的机械能减少。如果一个系统除重力或弹力以外，还有其他内力（如滑动摩擦力）做功，由于一对相互作用的滑动摩擦力所做功之和一定是负值，因此系统的机械能会减少，同时有热量产生（称为摩擦生热）。精确的研究证明，系统机械能的减少量等于所生成的热量，也可以说减少的机械能转化成了内能。

能量的分类

讨论交流

除了机械能和内能以外，你还知道哪些能量？这些能量是按照什么进行分类的？

我们在力学中，讨论和研究的是宏观物体的运动，对应的能量是机械能。在热学中，我们讨论和研究的是由大量微观粒子（分子）组成的热力学系统，对应的能量主要是内能（包括分子动能和分子势能）。在电磁学中，我们讨论和研究的是电场、磁场及其与电荷、电流的相互作用，对应的能量主要是电磁能。这样看来，在不同的学科领域主要讨论的是某一种能量。所谓不同的学科领域，是指研究对象的不同，因此也可以说能量是根据我们的研究对象划分的。

不同的学科领域，研究的是物质不同的运动形式，这说明能量的形式与物质的运动形式直接相关：机械运动对应着机械能；热运动，即分子的无规则运动对应着内能；电磁运动对应着电磁能；化学变化，即原子的外层电子变动，对应着化学能；原子核的变化对应着核能；等等。

这两种不同的说法是一致的，能量是根据学科领域，

即根据研究对象不同而划分的，也是根据物质的运动形式来划分的。

能量守恒定律

讨论交流

1. 你所知道的各种能量转化的实例有哪些？

2. 在各种能量相互转化的过程中，能量是否有可能凭空增加或有可能一部分消失？

到了 18 世纪末 19 世纪初，工业革命已经取得巨大的成果，生产力已经有了显著提高，包括物理学在内的整个自然科学进入一个蓬勃发展的新时期。不断发现各种自然现象之间的普遍联系和转化，成为这一时期自然科学发展的特点。例如，1786 年意大利的伽伐尼发现了“动物电”的现象，即生命现象与电现象间的联系。很快另一位意大利科学家伏打发明了电池，进而人们又利用伏打电池作电源电解硫酸铜水溶液而发生化学反应，这是电运动与化学现象之间的联系和转化。再后来，利用热电偶产生电流以及电流通过导体生热的现象，揭示了电与热之间的联系和转化。1820 年，丹麦物理学家奥斯特发现了电流的磁效应；1831 年，英国物理学家法拉第发现了电磁感应现象，从而揭示了电与磁之间的联系与转化。而摩擦生热的现象早已为人们所熟知。正是这一系列的发现使人们认识到不同的自然现象，即物质的不同运动形式之间是有联系的，是可以相互转化的，其中很多人已经朦胧地认识到，在转化过程中有某个物理量是保持不变的，这就是能量守恒定律的思想萌芽。

然而从这种思想萌芽到能量守恒定律的建立，又经过了许多年。这期间不只是物理学家，而是各学科的科学家们共同努力，他们先定性后定量地研究了各种自然现象相互转化的规律。特别是英国物理学家焦耳在长达 40 年的时间里进行了四百多次实验，准确地测出了“热功当量”的数值，即机械能与内能间相互转化的定量关系，

◎热功当量

焦耳所处的时代，人们认为功与热量是不相关的两件事，它们各有不同的单位，其中热量的单位是卡路里，简称卡。焦耳认为要产生一定数量的热量，需要做功的数值是确定的，他经过40年的不懈努力，成功地测得要产生1卡的热量，要做功的数值，称其为“热功当量”，即

1卡＝4.1840焦

现在人们已经认识到，热量和功都是能量变化的量度，并无本质的差别，就统一使用焦（J）作为单位，热功当量一词也不再使用了。

为能量守恒定律奠定了坚实的实验基础。1847 年，亥姆霍兹第一次提出了能量守恒定律。

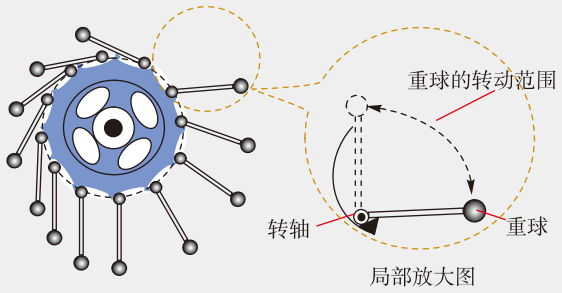
能量既不会凭空产生，也不会凭空消失，它只能从一种形式转化为另一种形式，或者从一个物体转移到另一个物体，在转化或转移的过程中其总量不变。这就是**能量守恒定律**（law of conservation of energy）。

能量守恒定律不只是物理学的基本规律，而且是包括生命科学在内的整个自然科学的基本规律，它的发现被认为是 19 世纪自然科学的三个伟大发现之一。

能量守恒定律建立之后，物理学以至自然科学的每一个理论，首先都必须经受它的检验。永动机之所以不可能成功，就在于它违背了这条基本规律，企图不消耗任何能量而做功。

例题示范

问题　如图4-1-3所示是历史上很有名的一个永动机的设计图，轮子边缘安装着若干个转轴，每个转轴处都连接着一根直杆，杆的另一端安有一个较重的小球。特殊的设计使得小球只能在大约90°的范围内转动。按照设计者的想法，右边的小球伸出去较远而左边的小球比较靠近转轴，因此右边小球所受重力的力臂大于左边小球所受重力的力臂，装置不能平衡，会在重力的作用下沿顺时针方向转动，并且永不停止。但实际上，用力拨动使其开始转动以后，它只能转不多的几圈就停止下来。



▲ **图4-1-3**　一个永动机的设计

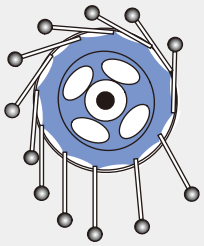
（1）请说明：是什么原因使它停止下来？

（2）在它停止转动之后，是处于平衡状态的，这时各小球大概在什么位置？为什么能够平衡？

分析　从能量守恒的角度，似乎很容易解释：转动过程中要克服摩擦及空气阻力而做功，从而消耗能量，开始转动时的初始动能一旦消耗完了，就会停下来。但设计者的想法似乎很有道理，关键是要说明它停止在什么位置，为什么不再继续转动了。

解　（1）使它停止下来的原因是摩擦阻力做功而消耗机械能，当它开始具有的初动能消耗完时，就停止转动。

（2）停止下来的位置处于平衡状态，它大概如图4-1-4所示，其中转轴处于最右侧的杆与小球大致处于竖直向上的位置，它将要向右翻倒而未翻倒，所有小球所受重力与力臂的乘积的代数和与转轴处受到的静摩擦力与其力臂的乘积，恰好相等，处于转动平衡状态——初中物理中把这种状态叫作杠杆平衡。



▲图4-1-4 停止时的位置

拓展 永动机的诱惑力太大，一直以来都有人为研制永动机耗费了大量的心血和精力，然而无一成功，这使一些有识之士意识到，永动机是不可能制成的。1775 年法国科学院就决定不再刊载有关永动机的通讯，不再审查一切关于永动机的设计。到了19世纪中期，随着能量守恒定律的确立，人们终于从理论上找到永动机不可能成功的根据。按理说，研制永动机的闹剧早就该收场了，但事实是，永动机的发明者仍然前赴后继，顽强地奋斗着，一直持续到现在。当然，其中不乏以此沽名钓誉、诈骗钱财的骗子，但也有一些是抱着为人类造福的美好理想的“好人”，包括一些民间发明家。他们无视科学，花费了大量宝贵的时间、金钱、精力来坚持不懈地寻找这样一种不存在的事物，不能不令人扼腕叹息。

自我评价

1. 你知道哪些能量的形式？能量是根据什么进行分类的？

2. 你的家庭在日常生活中涉及哪些能量转化的过程？其中做饭以及冬季取暖时，是什么能量转化为内能的？

3. 能量守恒定律与机械能守恒定律之间是什么关系？这两个定律有哪些不同？

发展空间

课外阅览

能量守恒定律的发展

能量守恒定律的确立是在 19 世纪中期，大概在 1850 年前后，这一定律已经被科学界普遍承认和接受。它不但是物理学的基本定律，也是整个自然界最重要的基本规律之一。那时，能量守恒定律和质量守恒定律是并行的两大定律，在各种运动和变化过程中，物质的总量和能量的总量分别守恒。

但在进入 20 世纪以后，物理学的研究进入一个新的阶段，人们发现高速运动的物体质量会随速度而变化，爱因斯坦的狭义相对论认为质量和能量都是物质的存在形式，他用质能方程 $E=mc^2$ 把质量和能量联系了起来，其中 E 是物体具有的能量，m 是物体的质量，c 是光速。当物体的质量发生变化时，其能量按上面的关系发生相应的变化，反之亦然，即物体能量的变化 ΔE 与其质量的变化 Δm 满足关系式 $\Delta E=\Delta mc^2$。

这样就把能量守恒定律和质量守恒定律二者统一了起来，我们现在所说的能量守恒定律，实际上就是能量和质量守恒定律。

有人说，一对正、负电子的湮灭说明了质量守恒定律不再成立，这个观点正确吗？

能量和质量守恒定律得到了实验的证实。例如，一个电子和另一个正电子相遇时，会发生“湮灭”，即这一对正、负电子会“消失”而转化为一对光子，而光子是没有静止质量的。这里就发生了质量减少而能量增加的情形，但它们的总量，即质量和能量的总量仍是守恒的。

人们在研究放射性元素的 β 衰变的开始阶段，曾经认为该放射性原子核放出电子而自身变成另一种原子核，这过程中有质量亏损，亏损的质量根据质能方程得出的能量数应该等于电子增加的能量，但在精确计算后发现仍亏损了一部分能量。这个问题曾经令科学界困惑了几十年，一些人认为能量守恒定律不成立了，而另一些人则坚信能量守恒定律是正确的，只是我们还没有找到亏损的那部分能量到哪里去了而已。有人预言可能是在 β 衰变的过程中，原子核除了放出电子以外，还放出了一种我们未曾探测到的粒子，并命名为中微子。经过众多科学家的不懈努力，中微子终于在 1956 年被美国莱因斯和柯万在实验中直接观测到，莱因斯因此于 1995 年获得了诺贝尔物理学奖。

2 能　源

既然各种形式的能量可以相互转化，并且转化过程中总量保持不变，为什么我们还要节约能源呢？

能量的品质

讨论交流

自然界的各种能量是可以相互转化的，为什么我们说不同的能量有品质高低的不同？

能量可以从一种形式转化为另一种形式，也可以从一个物体转移到另一个物体，但能量的转化和转移都是需要一定的条件的。在自然界，一切自发的过程都有一定的方向性，例如：①地球表面的水都是从高处流向低处，除非由于某种作用而使水具有一定的向上的初速度，从能量转化的观点看，水从高处流向低处，是重力势能转化为动能的过程；②热量总是从高温物体传向低温物体，或从物体的高温部分传向低温部分，除非有外界的某种作用存在（例如人类使用空调机可以使热量从温度较低的室内传向温度较高的室外，如图 4-2-1 所示）；③做功消耗的机械能可以全部转化为内能，例如摩擦生热的过程就是如此，但不能把耗散在空间的内能全部收集起来并重新全部转化为机械能；等等。



▲ **图 4-2-1** 夏季，空调机可以将热量从温度较低的室内搬运到温度较高的室外，但这需要消耗电能

从人类对能量的利用的角度看，能量是有品质高低之分的，内能（热能）是品质最低的能量。人类在生产、生活、科学研究等活动中消耗的各种能量，最终都将转化为内能而散失到周围的环境中，从而很难再次被人类利用。

能源　能源的分类

讨论交流

什么是能源？能源是根据什么进行分类的？

人类的各种活动，包括维持自身的生存在内，都需要消耗能量。我们把能够提供人类所需能量的自然资源称为**能源**（energy source）。虽然任何物质都具有能量，但只有比较集中而又较容易转化的物质和可以直接利用的能量资源才是常用的能源。

能源有多种不同的分类方法。

一次能源和二次能源　一次能源又称为初级能源，是指那些直接取自自然界的未经加工、转换的能源，如原煤、原油、天然气、生物燃料、水流、风力（图 4-2-2）、太阳能、地热能、海洋能等。二次能源是指由一次能源经过加工、



▲ 图4-2-2　风能发电场

转换而形成的能源，如由原煤而生成的焦炭、煤气，由原油提炼而成的汽油、航空煤油，由各种形式的发电站产生的电能，生产出来的高压蒸气、热水等。

可再生能源和非再生能源　一次能源中有些具有天然的自我恢复能力，称为可再生能源，如风能、水流能、太阳能、地热能等。而另外使用更多的能源在短期内是无法再生的，它们数量有限，越用越少，如煤炭、石油、天然气等都是非再生能源。煤炭、石油、天然气等都是古代的生物经过地质变动深埋在地下，经过亿万年才生成的，又称为化石能源。它们是远古时代的太阳能而以生物能形式固化下来，又经过地质作用而保存到今天，这些化石能源恰恰是今天人类利用的主要能源。

传统能源和新能源　如果把瓦特改良蒸汽机作为工业革命的开端，至今已经过去了 200 多年，这期间人类生产、交通、生活中使用的能源主要是煤炭、石油、天然气，即化石能源，它们被称为传统能源。而最近才开始大规模开发利用的能源，则称为新能源。其实新能源中的很多能源并不“新”，例如水流能、风能、太阳能、地热能等，人类很早就已经在利用，但只是作为辅助能源而存在，直到最近才开始重视并大规模开发利用。其中利用水流能建立大型发电站，把水流能转化为方便使用的电能，开始于 19 世纪后期，至今不过 100 多年。而大规模开发利用风能、太阳能等是近几十年的事。

真正的新能源是核能。人类开始认识核能可以说是从1896年法国物理学家贝克勒尔发现放射性元素开始的，而真正利用核能则要晚很多年。第二次世界大战后期，原子弹研制成功并被使用，而第一座利用核能进行发电的电站，是20世纪50年代建成的。

解决能源问题的出路

讨论交流

我们经常会听到“能源危机”的说法，你怎么看能源危机？解决能源危机的出路在哪里？

截至目前，人类消耗的能源仍以化石能源为主。不管是煤炭、石油还是天然气，它们在地球上储存的数量都是有限的，虽然对于地球上的化石能源到底还能用多少年，科学家们仍有诸多不同的意见和争论，但它们总有用完的一天却是不争的事实。人类的出路何在？

一方面是节流，另一方面是开源。

节流，就是减少消耗。要改进技术来减少能耗，要做到消耗更少的能源而生产出更多更好的产品。人们日常生活中也要注意节约能源，减少不必要的消耗（图4-2-3）。



▲ **图4-2-3** 常在家用电器上见到的中国能效标识

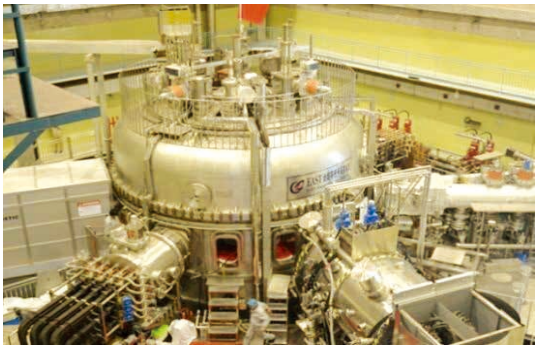
更主要的是开源，即开发新能源，以替代传统能源。新能源中包括那些可再生能源，例如太阳能、风能、水流能、海洋能、地热能等。这里要特别说说核能。

原子核发生变化时能释放出巨大的能量，而这种可以释放巨大能量的核反应又可以分为两类，一类是较重的原子核发生裂变，即分裂成两个或多个较小的原子核时的反应。目前核电站以及核舰船等民用核设施应用的就是这种核裂变反应。核裂变反应常用的原料是铀或钚，但铀或钚也属于不可再生能源，同样是用一点就少一点，因此仍不能从根本上解决能源危机问题。

另一类可以释放更巨大能量的核反应是轻核的聚变，如氢核与氘核（氢的一种同位素）聚合成一个氦核的反应。

恒星（包括太阳）内部进行的就是这类核反应，这种核反应必须在极高的温度和压强下才能进行，因此人们把这种核反应称为热核反应。人类到目前为止还只能在核弹（原子弹）爆炸时才能获得满足大规模热核反应的条件，也就是只能在氢弹爆炸时才能产生大规模热核反应。氢弹爆炸是毁灭性、不可控的，因此人类不需要氢弹，而需要可控的热核反应，这正是目前全世界科学家在努力研究的最重大课题之一（图 4-2-4）。如果能够攻克这个难题，真正实现可控热核反应，就将从根本上解决能源的问题。这是因为海水中存在着大量的氘和氚，它们将在很长的时间里为人类提供取之不尽的能源。

也就是说，氢弹需要原子弹来“引爆”。



▲ **图4-2-4**　我国热核聚变实验装置EAST

自我评价

1. 请举出实际生活中的例子，说明自然界自发的宏观过程具有一定的方向性。

2. 你怎样理解“从人类利用能量的角度说，内能（热能）是品质最低的能量”？

3. 各种能量可以相互转化，并且在转化的过程中总量守恒，为什么我们还要强调节约能源呢？

4. 我国鼓励研发生产新能源汽车，对于购买新能源汽车也给予政策的优惠。什么样的汽车叫新能源汽车？为什么要鼓励发展新能源汽车？新能源汽车真的不污染环境吗？

发展空间

课外阅览

太　阳　能

太阳能是指来自太阳的辐射能量，即通过太阳光照射而传递到地球表面的能量。人类需要的能量绝大部分都直接或间接来自太阳。植物通过光合作用释放氧气、吸收二氧化碳，并把太阳能转变成化学能在植物体内贮存下来。煤炭、石油、天然气等化石燃料也是由古代埋在地下的动植物经过漫长的地质年代演变形成的，它们都是远古时代的太阳能储存下来的，风能、水流能、波浪能等也都是吸收太阳能后转化而来的，因此广义的太阳能所包括的范围非常大，狭义的太阳能则限于太阳辐射能的光热、光电和光化学的直接转换。

太阳内部进行着不间断的核聚变反应，释放出大量的能量并向外辐射。太阳辐射到地球大气层的能量仅为其总辐射能量的22亿分之一，但已高达173×10^{17}W，也就是说太阳每秒钟照射到地球上的能量就相当于500万吨煤燃烧释放的能量。每年到达地球表面上的太阳辐射能约相当于130万亿吨煤燃烧释放的能量，其总量属现今世界上可以开发的最大能源。

太阳能除了数量巨大以外，其优点还有普惠（没有地域的限制）、无害和长久（至少还可以用几十亿年）。

照射到地球上的太阳能总量虽然很多，但单位面积上接收到的功率却不高，地球表面某一点24h的年平均辐射强度为0.20kW/m^2，若按全年日夜平均，只有200W左右。这正是太阳能的一个缺点，此外，它还受昼夜、冬夏和天气等多种因素的影响，在利用太阳能时，想要得到一定的转换功率，往往需要面积相当大的一套收集和转换设备，造价较高。

3 环境保护与可持续发展

为什么发展是硬道理？发展是否必然导致能源消耗的增加？

发展与能源消耗

人类社会总体来说是向前发展的。社会的发展首先是生产力的发展，经济是基础，只有劳动生产率提高了，创造出更多的财富，人类自己才能在物质生活上得到改善，也才有更多的闲暇时间从事文学艺术创作、获得精神方面的享受和满足。当然，社会的发展不只是生产力的发展，还包括社会结构的进步、相互关系的调整、人类自身生活方式的改变、生活水平的提高等等。

人类的所有活动都要消耗能源，以提高生产力为基础的社会发展，是否一定要引起能源消耗的增加呢？这个问题是复杂的，它首先与不同的地区、不同的国家、不同的发展阶段等都有关系。

西方发达国家已经经历了三次重大的科技革命：第一次是18世纪开始的以蒸汽技术为代表的革命，也称为第

一次工业革命；第二次是指 19 世纪后期开始的以电力技术为代表的革命，也称为第二次工业革命；第三次则是指开始于第二次世界大战以后的科技领域里的又一次重大飞跃，它以原子能、电子计算机、空间技术和生物工程的发明和应用为主要标志，涉及信息技术（图 4-3-1）、新能源技术、新材料技术、生物技术、空间技术和海洋技术等诸多领域。这次科技革命不仅极大地推动了人类社会经济、政治、文化领域的变革，而且也影响了人类的生活方式和思维方式，使人类社会向更高层次发展。



▲ **图4-3-1**　信息技术将世界连接成“地球村”

第一次科技革命使人类从农业社会进入到工业社会，生产力得到跨越式的提高，相应的能源的消耗也大幅度增加，开始主要是煤炭，后来逐渐转变为以石油和天然气为主。第二次科技革命则使人类进入电气化时代，生产力得到更大的提高。电能使用方便，并且特别有利于实现自动控制和远距离操控，但电能属于二次能源，长期以来仍以火力发电为主，即仍要消耗大量的化石能源而转化为电能，因此这个时期能源的消耗仍然是增加的。进入第二次科技革命以后，特别是第三次科技革命以后，随着技术水平的提高，以及人类对能源消耗问题的重视，各国更加注意减少能源的消耗，大力开发节省能源的新技术和新产业，从而生产力的提高不再单纯依赖于能源消耗的增加，使发展生产力的同时减少能源的消耗成为可能。

但更多的发展中国家处于相对落后的发展阶段，他们有的还处于农业社会，有的正处在工业化和电气化的进程之中，技术能力和水平低下、设备落后、资金缺乏，生产力的发展很大程度上还严重依赖于能源的大量消耗。

我国虽然地域广阔、资源丰富，但人均占有资源并不高，有很多方面低于世界的平均水平，而且自 19 世纪以来屡受列强欺凌，饱受战乱之苦，经济落后，生产力水平很低。改革开放以来，我国经济得到快速发展，但仍属于发展中国家的行列，发展生产力与能源消耗过大的矛盾长期尖锐地存在。

环境保护与可持续发展

讨论交流

什么是可持续发展？为什么可持续发展与能源有关？为什么可持续发展与环境保护有关？

发展离不开能源，如果消耗的能源仍然是以化石能源为主的非再生能源，它们会越用越少，直到枯竭，这样就谈不上可持续发展。只有大量开发利用可再生能源，逐步减少不可再生能源的消耗，才是人类的出路所在。

地球是全人类的共同家园。在浩渺的宇宙中，地球非常独特，它给我们创造了几乎完美的生存环境：它体积适中，其引力恰好能维持大气层不致逃逸，而且大气层中近五分之一为氧气，可供动植物以及人类呼吸之用；它距离太阳远近适中，使得地球上冷热适宜，在地表存在着大量的液态水；它还有着较强的磁场，使得能给我们造成伤害的宇宙射线被阻拦在外……更重要的是地球是个绿色的星球（图 4-3-2），数量众多、种类繁多的植物把世界装扮得五彩缤纷，造就了适合人类生存的环境。如果我们赖以生存的环境被破坏，将是怎样一幅可怕的情景：地球变得酷热难耐，两极的冰雪全部融化，陆地几乎全部被淹没，人类将失去赖以生存的土地；地球严重干旱，土地完全荒漠化，地球失去绿色，人类无以生存……这些出现在科幻作品中的场景，并不是耸人听闻，而是在警示人们，如果真的肆意破坏环境，最后毁灭的是人类自己。



▲ **图4-3-2** 绿色的星球

环境污染与能源的大量消耗有着密切的关系。化石燃料的燃烧产生大量的二氧化碳，二氧化碳是具有温室效应的气体，自第一次工业革命以来，大气中二氧化碳含量大幅提高，地球的平均温度已经上升，这就是所谓的全球气候变暖。气候变暖致使两极和高山地带的冰雪融化（图 4-3-3），海平面上升，灾害性极端天气变得频繁……此外，化石燃料燃烧过程中，其含有杂质生成的二氧化硫、一氧化氮以及由于不完全燃烧而生成的一氧化碳等气体的危害

也相当严重。

核能是真正的新能源。目前使用的核裂变材料——铀和钚——数量是有限的，不可再生，但单位质量的核材料能够释放的能量比燃料燃烧释放的化学能要高几百万倍，按目前的使用情况看，地球上的铀和钚可以供人类使用上千年。利用核能的过程中不排放温室气体和其他有毒气体，对环境的污染小。但是其安全性遭到很多人的诟病，这与人类历史上几次大的核事故有关，极严重的事故有两起，一是 1979 年美国三里岛压水堆核电站事故，二是 1986 年苏联切尔诺贝利石墨沸水堆核电站事故，其中后者影响巨大而深远。事后查明，这两起事故都是人为因素造成的。可以认为，只要加强安全措施，规范操作过程，核能仍是安全的能源。2011 年 3 月，里氏 9.0 级超强地震导致日本福岛县两座核电站反应堆发生故障（图 4-3-4），虽未造成更严重的事故，却引发了人们对核安全的更大担忧以及对核能应用的更深入严肃的思考和讨论。目前多数国家，包括我国在内，经过评估后仍然坚持谨慎地发展核能的政策，但都强调更科学的安全措施和更严格的管控制度。相信人类能够驾驭这个凶猛的怪兽，使之造福于人类。



▲ **图4-3-3**　融化的冰山



▲ **图4-3-4**　福岛核电站

环境的破坏不只与能源的过量消耗有关，很多人类的活动都会破坏环境。例如：过量地围湖造田，造成遇雨即涝；过量地使用化肥，造成土壤板结；过量地捕捞，造成水产资源枯竭；过量地使用制冷剂，造成臭氧层出现空洞，太阳光中的紫外线无阻挡地进入大气层，伤害人类；过量地砍伐森林，造成气候恶化，土地沙化，水土流失；等等。看来保护我们的地球家园，任重而道远，需要全人类长期共同努力。

自我评价

1. 怎样才能做到既发展生产力，又减少能源的消耗？
2. 能源的过度消费，会对环境造成怎样不利的影响？
3. 我们自己在保护环境方面能做些什么？

发展空间



课外阅览

西电东送

“西电东送”工程是西部大开发的标志性工程，也是西部大开发的骨干工程。“西电东送”指开发贵州、云南、广西、四川、内蒙古、山西、陕西等西部省区的电力资源，将其输送到电力紧缺的广东、上海、江苏、浙江和京津唐地区。

我们国家地域辽阔，能源资源分布极不均匀，煤炭资源的 69% 集中在“三西”地区（即山西、陕西和内蒙古西部）和云南、贵州，水能资源的 77% 分布在西南和西北地区。经济较发达的东部沿海地区能源资源匮乏，用电负荷却相对集中。开发西部的水电和煤炭资源，实施“西电东送”是中国电力工业发展的必然选择，是变西部资源优势为经济优势，满足东部地区电力需求，促进东、西部地区协调发展的重要举措。

“西电东送”形成北、中、南三路送电线路。北线由内蒙古、陕西等省区向华北电网输电，尤其向京津唐地区送电；中线由四川、重庆等省市向华中、华东电网输电；南线由云南、贵州、广西等省区向华南输电。

感悟 · 启迪

很多事物都有两面性，处于矛盾之中。人类要提高自己的生活水平，就必须发展生产力，而一切人类的活动都必须消耗能量，过度的能量消耗就会造成能源枯竭、环境破坏，最终危及人类自身的生存空间。所以必须找到一个合理的平衡点，既要保持一定的增长速度，不断改善生活水平，又要降低能源的消耗，以便真正做到可持续发展。“绿水青山就是金山银山。”让我们都从自己做起，节约能源，过简约的生活，与大自然和谐共处吧！

反思·小结·交流

1. 能量转化的实质是什么？能举个例子予以说明吗？
2. 能量和能源有什么不同？
3. 你怎样理解可持续发展？
4. 能源和环境有什么关系？能源和可持续发展有什么关系？
5. 请写一篇你打算如何节约能源和保护环境的小论文，并与身边的人交流。

本章复习题

1. 化石能源包括哪些？为什么它们属于不可再生能源？
2. 围湖造田既可扩大耕地，增产粮食，也会破坏生态环境，给人类造成灾害，对此谈谈你的看法。
3. 有一位老人，他前半生砍树，后半生种树，这反映了我们国家在什么问题上的变化？
4. 地球大气上界垂直于太阳光线的单位面积在单位时间内所受到的太阳辐射的总能量，称为太阳常数。因观测方法和技术不同，得到的太阳常数值不同。世界气象组织（WMO）1981年公布的太阳常数值是1368W/m^2。太阳辐射在穿过大气层的过程中，由于大气对太阳辐射的吸收、反射和散射等作用，到达地面时的辐射强度会大大降低。此外如果有云层，其阻碍作用会更加强烈，因此各地地面接收到的太阳辐射相差较大。如果某地某段时间内到达地面的太阳辐射只有太阳常数的40%，在该地面处垂直于太阳光线放置一块面积为1m^{2}的太阳能电池板，如果该电池板接收太阳辐射把光能转化为电能的效率为80%，请你计算一下，1小时内它能产生多少电能？

附录 长度的测量及其测量工具的选用

长度测量是基本测量之一，在我们生活、生产、科研等各种社会活动中，几乎都离不开长度的测量。

测量所需要达到的精度是由实际需要所决定的，而能够达到的精度则是由使用的测量工具所决定的。

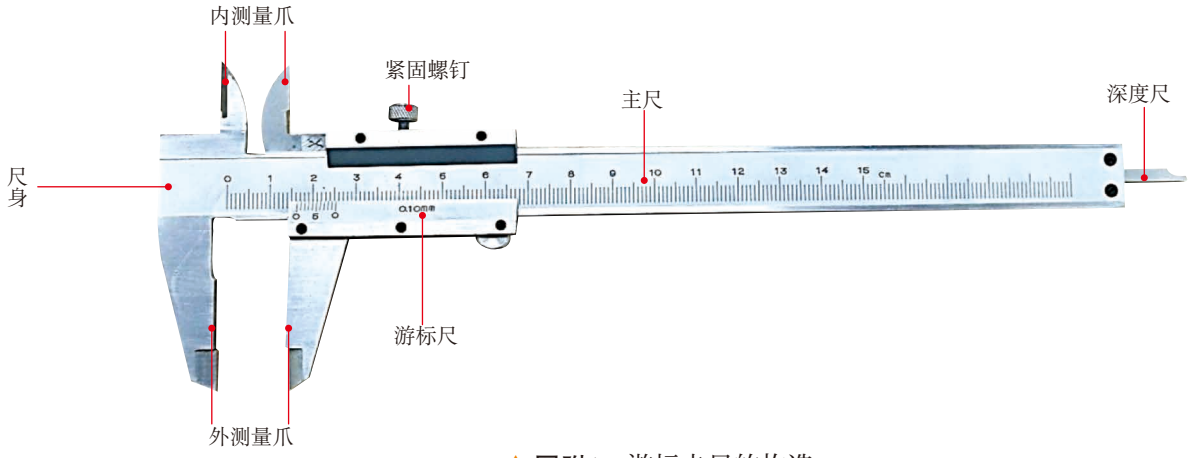
在初中已经学习过最常用的测量工具——刻度尺，每种刻度尺的量程（最大测量范围）和分度值（最小刻度值）各不相同，以适应不同的需求。用肉眼直接观察的刻度尺，受眼睛分辨能力的限制，最小分度值一般是 1mm，因此它难以满足要求更精确的场合。

下面我们认识两种常用的测量长度的精密工具。

游标卡尺

一、游标卡尺的构造

图附 1 是一种游标卡尺，它的核心部件是分度值为 1mm 的主尺和一个可以在主尺上滑动的游标尺。主尺的左端上、下分别固定着内、外两个测量爪的左半边，而两个测量爪的右半边则是随着游标尺移动的，当游标尺滑动到最左端时，游标尺的“ 0 ”刻线与主尺的“ 0 ”刻线对齐，并且内、外两对测量爪的刀口也并拢在一起，如图附 2 所示。随游标尺移动的还有隐身在主尺背后的深度尺，以及其上方的紧固螺钉。



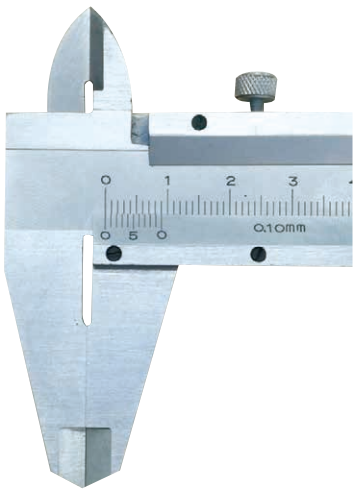
▲ 图附1　游标卡尺的构造

游标尺的刻度决定了它的精度，常用游标卡尺按其精度可分为 3 种 ：0.1mm、0.05mm 和 0.02mm。

二、精度为0.1mm的游标卡尺的工作原理

1. 刻度规则

主尺的最小刻度值是 1mm ；游标尺上有 10 个小的等分刻度，总长 9mm，每一分度为 0.9mm，比主尺上的最小分度相差 0.1mm。量爪并拢时尺身和游标的零刻度线对齐，它们的第一条刻度线相差 0.1mm，第二条刻度线相差 0.2mm，……，第十条刻度线相差 1mm，即游标的第十条刻度线恰好与主尺的 9mm 刻度线对齐。



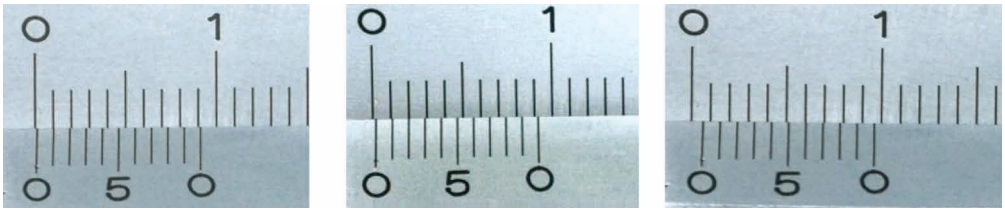
▲ 图附2　游标尺的起始位置

当量爪间所量物体的线度为 0.1mm 时，游标尺向右应移动 0.1mm。这时它的第一条刻度线恰好与主尺的 1mm 刻度线对齐。同样当游标的第五条刻度线跟主尺的 5mm 刻度线对齐时，说明两量爪之间有 0.5mm 的宽度，依次类推。

2. 游标卡尺的精度 = 主尺最小刻度 ÷ 游标尺上的格数

3. 读数规则

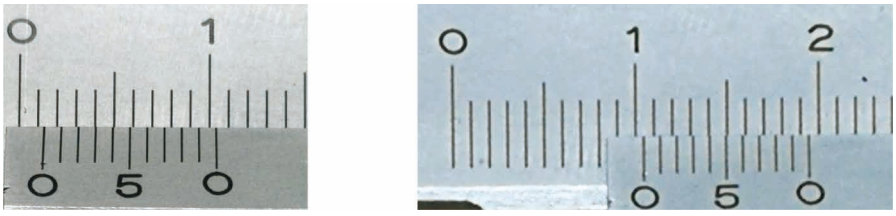
（1）被测物尺寸小于 1mm 时，读数 = 游标尺上（与主尺刻度线对齐）的刻线数 n × 精度（见图附 3）



1×0.1mm=0.1mm　　2×0.1mm=0.2mm　　6×0.1mm=0.6mm

▲ 图附3　被测物尺寸小于1mm的读数

（2）被测物尺寸大于 1mm 时，读数 = 主尺读数 + 游标尺读数 = 主尺读数 + n × 精度（见图附 4）



1mm+3×0.1mm=1.3mm　　10mm+4×0.1mm=10.4mm

▲ 图附4　被测物尺寸大于1mm时的读数

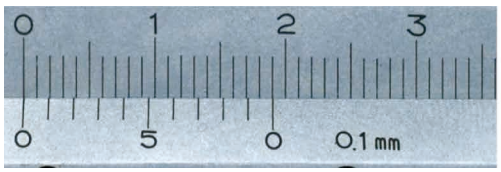
读法：

A. 先读整数——看游标零线的左边，尺身上最靠近的一条刻线的数值，读出被测长度的整数部分；

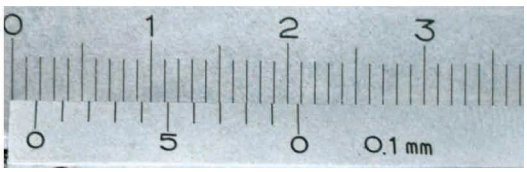
B. 再读小数——看游标零线的右边，数出游标第几条刻线与尺身的数值刻线对齐，读出被测尺寸的小数部分（即游标读数值乘以其对齐刻线的顺序数）；

C. 得出被测长度——把上面两次读数的整数部分和小数部分相加，就是游标卡尺的所测长度。

4. 精度为 0.1mm 的游标卡尺的另一种刻度方法及读数（见图附 5）



精度=1 mm ÷ 10=0.1 mm



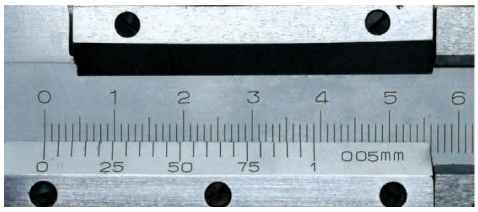
读数：1 mm+7 × 0.1 mm=1.7 mm

▲ **图附5** 精度为0.1mm的游标卡尺的另一种刻度方法

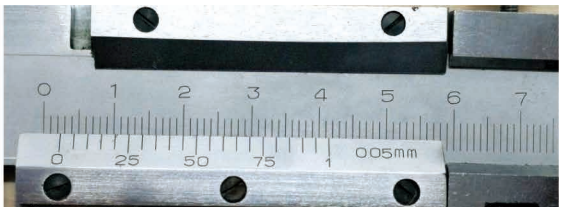
三、精度为0.05mm、0.02mm的游标卡尺的刻度及读数

它们的工作原理和使用方法与精度为 0.1mm 的游标卡尺相同。

1. 精度为 0.05mm 的游标卡尺的刻度及读数（见图附 6）



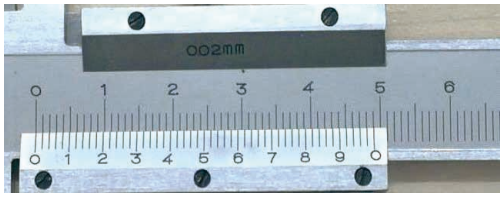
精度=1mm ÷ 20=0.05 mm



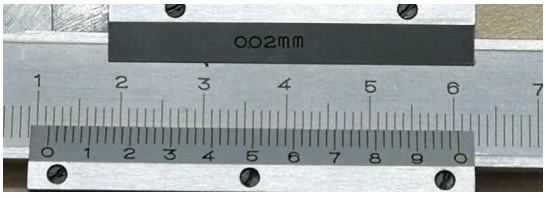
读数：2 mm+9 × 0.05 mm=2.45 mm

▲ **图附6** 精度为0.05 mm的游标卡尺的刻度及读数

2. 精度为 0.02mm 的游标卡尺的刻度及读数（见图附 7）



精度=1mm ÷ 50=0.02mm



读数：11mm+24 × 0.02mm=11.48mm

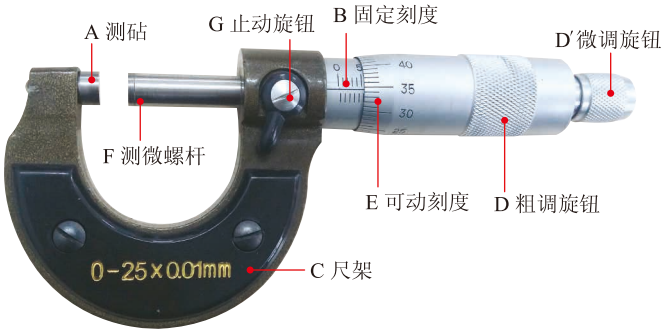
▲ **图附7** 精度为0.05 mm的游标卡尺的刻度及读数

螺旋测微器

螺旋测微器的结构如图附 8 所示，尺架左边固定着测砧，右边固定着一段主尺，上有固定刻度，其水平横线上方的刻度以 mm 为单位，下方的刻线恰位于上方刻度的正中，即下方的刻线分别对应着 0.5mm、1.5mm、2.5mm……主尺中部是空的，固定着一个精密螺母，可转动的刻度尺以及左边的测微螺杆都与精密螺杆连在一起。

一、螺旋测微器工作原理

螺旋测微器是依据螺旋放大的原理制成的，即螺杆在螺母中旋转一周，螺杆便沿着旋转轴线方向前进或后退一个螺距的距离。因此，沿轴线方向移动的微小距离，就能用圆周上的读数表示出来。



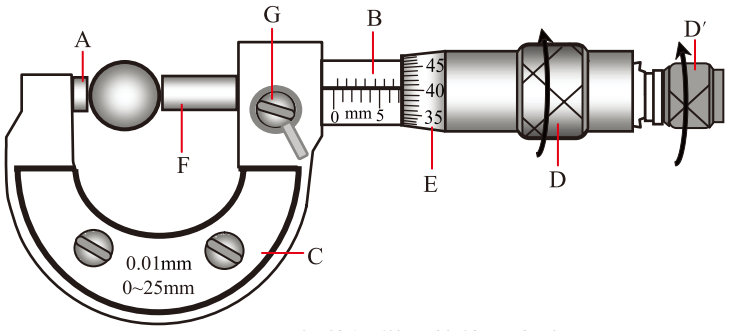
▲ **图附8**　螺旋测微器的结构

螺旋测微器的精密螺纹的螺距是 0.5mm，可动刻度尺上有 50 个等分刻度，可动刻度旋转一周，测微螺杆可前进或后退 0.5mm，因此旋转每个小分度，相当于测微螺杆前进或后退$\frac{0.5}{50}$mm= 0.01mm。可见，可动刻度每一小分度表示 0.01mm，所以螺旋测微器可准确到 0.01mm，也称为千分尺。

二、螺旋测微器的使用方法（见图附 9）

（1）使用前应先检查零点：缓缓转动微调旋钮（D′），使测杆（F）和测砧（A）接触，到棘轮发出声音为止，此时可动尺（活动套筒）上的零刻线应当和固定套筒上的基

准线（长横线）对正，否则有零误差。



▲ 图附9　螺旋测微器的使用方法

（2）左手持尺架（C），右手转动粗调旋钮（D）使测杆（F）与测砧（A）间距稍大于被测物，放入被测物，转动保护旋钮（D′）到夹住被测物，直到棘轮发出声音为止，拨动止定旋钮（G）使测杆固定后读数。

三、螺旋测微器的读数方法

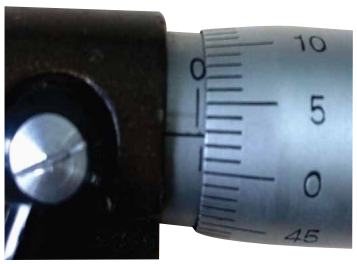
（1）先读固定刻度的整数部分；

（2）再读半刻度，若半刻度线已露出，记作 0.5mm；若半刻度线未露出，记作 0.0mm；

（3）再读可动刻度（注意估读）；

（4）被测物体的长度（或直径）= 固定刻度读数 + 可动刻度读数。

例：如图附 10 所示的情况，读数为 0.5mm + 0.028mm = 0.528mm。



▲ 图附10

使用螺旋测微器的注意事项如下：

测量时，注意要在测微螺杆快靠近被测物体时应停止使用粗调旋钮，而改用微调旋钮，避免产生过大的压力，既可使测量结果精确，又能保护螺旋测微器。

在读数时，要注意固定刻度尺上表示半毫米的刻线是否已经露出。

读数时，千分位有一位估读数字，不能随便扔掉，即使固定刻度的零点正好与可动刻度的某一刻度线对齐，千分位上也应读取为“ 0 ”。

当测砧和测微螺杆并拢时，可动刻度的零点与固定刻度的零点不相重合，将出现零点误差，应加以修正，即在最后测长度的读数上去掉零误差的数值。

普通刻度尺的最小刻度值是1mm，游标卡尺则提高到0.1～0.02mm，螺旋测微器又把它提高到0.01mm，就是说，用机械放大的方法，就可以把测量精度提高两个数量级，这是了不起的成绩。再要提高到更高的精度，就不能单纯依靠机械放大了，现在有了超声波测距仪和激光测距仪等，可以把测量精度提高到更高的程度。让我们继续学习物理吧，它会让你的知识宝库更加丰富，让你变得更加聪明和有力量！

实验：使用游标卡尺和螺旋测微器测长度

1. 认识和使用游标卡尺

（1）认识游标卡尺的各部件，特别注意游标尺相邻两条刻线间的距离与主尺相邻两条刻线间距离的关系。

（2）把游标尺推到最左端，观察游标尺“0”刻线与主尺“0”刻线对齐时，游标尺各刻线与主尺相应刻线间的关系。

（3）使用游标卡尺测量几种不同金属导线的直径，记录测得的结果。

（4）使用游标卡尺测量几种不同容器或管材的内径，记录测得的结果。

（5）使用游标卡尺测量几种不同容器的深度，记录测得的结果。

2. 认识和使用螺旋测微器

（1）认识螺旋测微器的结构，旋转螺旋尺，使它两个砧相接触，观察螺旋刻度的“0”刻线是否与主尺的“0”刻线对齐；沿逆时针方向旋转螺旋尺，观察螺旋尺转动一周，主尺刻度变化情况。

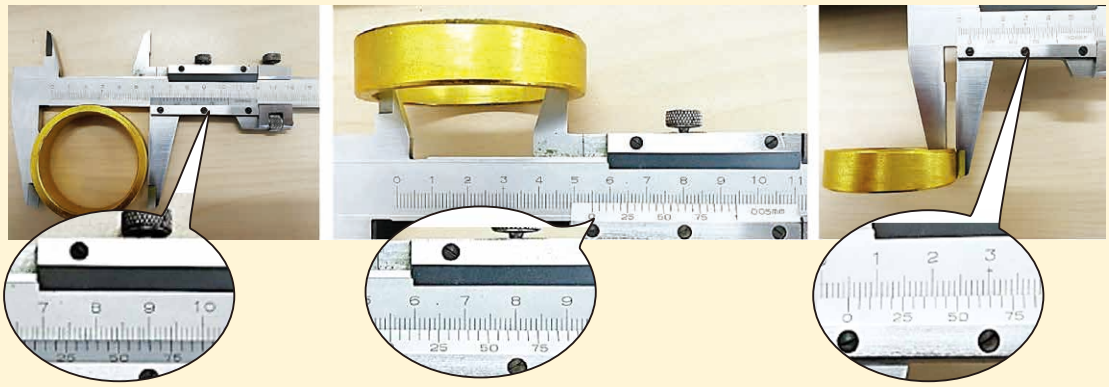
（2）使用螺旋测微器测量头发丝的直径，记录所得的结果。

（3）使用螺旋测微器测量不同的电线的直径，记录所得的结果。

自我评价

1. 有人把游标卡尺的读数规则总结成两句口诀：大数看主尺，小数看游标。你怎么理解它？

2. 小明用游标卡尺测量一个金属环的外径、内径以及壁厚，如图附11所示。



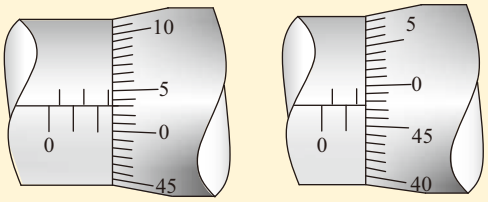
▲ **图附11**　用游标卡尺测金属环的外径、内径及壁厚

（1）请分别读出三次测量的结果。

（2）利用前两次的结果计算出它的壁厚，与实际测量结果进行比较，看有没有微小的差别。如果有，请分析可能的原因。

3. 有人学习了螺旋测微器读数的注意事项，总结成两句口诀：主尺注意零点五，辅尺切记要估读。你怎么理解它？

4. 请读出图附12中螺旋测微器的读数。



▲ 图附12

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

安培定则 Ampere rule 117

B

闭合电路欧姆定律 Ohm law of closed circuit 87

C

磁场 magnetic field 115
磁感线 magnetic induction line 115
磁感应强度 magnetic induction 122
磁通量 magnetic flux 123

D

等势面 equipotential surface 31
点电荷 point charge 9
电容器 capacitor 46
电容 capacitance 47
电荷量 electric quantity 3
电场 electric field 15
电场力 electric field force 15
电场强度 electric field strength 16
电场线 electric field line 18
电势能 electric potential energy 23
电势 electric potential 28
电势差 electric potential difference 29
电路 electric circuit 62
电流 electric current 62
电动势 electromotive force 86
电功率 electric power 95
电磁感应 electromagnetic induction 126
电磁场 electromagnetic field 133
电磁波 electromagnetic wave 133
电磁波谱 electromagnetic wave spectrum 134
电荷守恒定律 law of conservation of charge 4
电压 voltage 62
电源 power source 85
电阻率 resistivity 71
断路器 circuit breaker 106

G

感应电流 induction current 126

H

恒定电流 electric current 63
恒定电场 steady electric field 63

J

静电感应 electrostatic induction 5
静电力常量 electrostatic force constant 10
静电场 electrostatic field 15
检验电荷 test charge 15
焦耳定律 Joule law 96
焦耳热 Joule heat 97

K

库仑定律 Coulomb law 10

N

内阻 internal resistance 86
能级 energy level 139
能源 energy source 150
能量守恒定律 law of conservation of energy 147

Y

匀强电场 uniform electric field 19

后　记

为全面落实立德树人根本任务，着力发展学生的核心素养，根据《普通高中课程方案（2017 年版）》的精神，我们按照《普通高中物理课程标准（2017 年版）》对高中物理教科书进行了全面修订。

本书在修订过程中，保留了原教科书的部分内容，并得到了许多专家、学者和老师的指导与帮助。孟卫东、任陇生、王永生、马宇澄、王瑜等同志参与了原教科书的编写；王城、边文凯等同志为本书的修订进行了前期的研究；蔡铁权等同志审阅了本书修订稿的部分章节；在复审阶段，曹会、李友兴、杜一平、郑世彬等同志对教科书进行了审读和试教，并提出了宝贵意见。在此，我们对所有关心、支持本书编写与修订的专家、学者和老师表示衷心的感谢。

本书选用了一些图片和文字资料，对相关作者和出版社，我们一并表示诚挚的谢意。

编者

2019 年 2 月