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

选择性必修

第二册



教育科学出版社
ESPH

普 通 高 中 教 科 书

物理

选择性必修

第二册



教育科学出版社

·北 京·

主　　编　陈熙谋　吴祖仁
本册主编　张增常
本册编者　蓝坤彦　杨正波　宋学平　李　轶

目录

第一章　磁场对电流的作用



1. 安培力 …… 2
2. 安培力的应用 …… 8
3. 洛伦兹力 …… 12
4. 洛伦兹力的应用 …… 19

反思 · 小结 · 交流 …… 25
本章复习题 …… 27

第二章　电磁感应及其应用



1. 楞次定律 …… 30
2. 法拉第电磁感应定律 …… 36
3. 涡流　电磁阻尼　电磁驱动 …… 42
4. 自感 …… 48

反思 · 小结 · 交流 …… 52
本章复习题 …… 53

第三章　交 流 电



1. 交变电流 …… 56
2. 正弦交变电流的描述 …… 62
3. 变压器 …… 68
4. 电能的传输 …… 74

反思 · 小结 · 交流 …… 80
本章复习题 …… 81

第四章　电磁振荡与电磁波



1. 电磁振荡 …… 84
2. 电磁波 …… 87
3. 电磁波谱 …… 91
4. 无线电波的发射、传播与接收 … 95
5. 无线电波与移动互联网 …… 102

反思 · 小结 · 交流 …… 107
本章复习题 …… 108

第五章　传 感 器



1. 认识传感器 …… 110
2. 常见传感器的工作原理 …… 115
3. 传感器的应用举例 …… 121
4. 自制简单的控制电路 …… 128

反思 · 小结 · 交流 …… 131
本章复习题 …… 132

附录　中英文索引 …… 134
后记 …… 135



电和磁的实验中最明显的现象是，处于彼此距离相当远的物体之间的相互作用。因此，把这些现象化为科学形式的第一步就是，确定物体之间作用力的大小和方向。

——麦克斯韦

第一章

磁场对电流的作用

主题一　磁场对通电导线的作用力

- 安培力
- 安培力的应用

主题二　磁场对运动电荷的作用力

- 洛伦兹力
- 洛伦兹力的应用

你知道信鸽是如何千里寻巢的吗？为什么在暴风雨天气或出现日食的日子它会迷路？磁悬浮列车是依靠什么悬浮的？绚丽的极光是如何产生的？

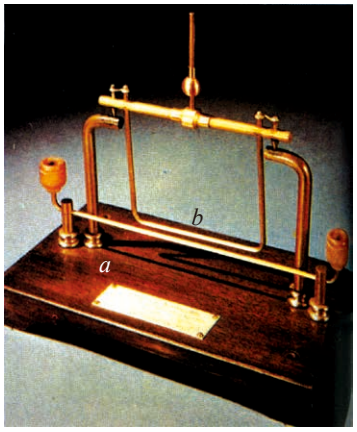
大到天体，小到粒子，磁现象无处不在，本章我们将探究磁的奥秘，帮你解开这些谜团。

奥斯特发现了电流的磁效应，安培研究了磁场对通电导线的作用力，洛伦兹研究了磁场对运动电荷的作用力，他们的研究成果极大地推进了电磁学的发展，为人们利用磁场提供了有力的理论依据。

1 安培力

我们已经知道，通电导线在磁场中受到磁场力作用，这个磁场力叫作安培力。决定安培力方向和大小的因素是什么？

认识安培力

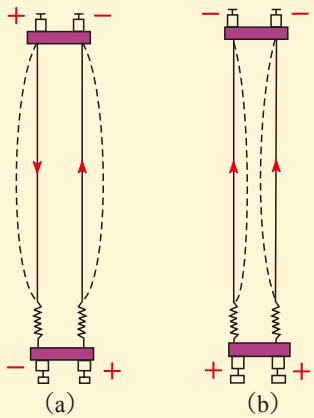


▲ **图1-1-1** 安培进行安培力实验用过的实验装置

通电导线在磁场中受到力的作用是安培（A.M.Ampère）于 1820 年首先发现的，后来人们为纪念安培的贡献，把磁场对通电导线的作用力称为**安培力**（Ampère force）。如图 1-1-1 所示是当年安培用过的实验装置。他研究的是两根平行的通电导线间的相互作用力，而其实质是 a 导线中的电流产生的磁场对通电导线 b 的作用力以及 b 导线中的电流产生的磁场对通电导线 a 的作用力。

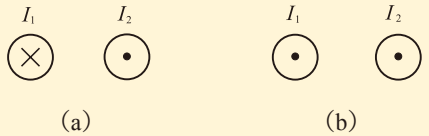
我们可以模拟安培当年的实验。

活动



▲ **图1-1-2** 通电导线之间的相互作用力

有两根相互平行、距离很近的通电直导线，如图 1-1-2 所示。分别给导线通以相反或相同的电流，观察发生的现象，并在图 1-1-3 的俯视图中分别标出两根导线所受安培力的方向。



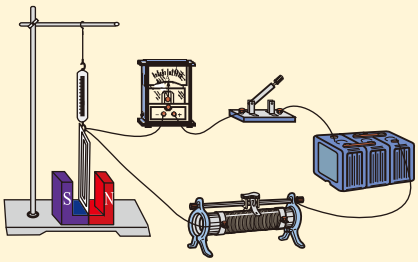
▲ **图1-1-3** 观察并标出两根通电导线所受安培力的方向

安培力的方向

通电导线在磁场中所受安培力的方向与哪些因素有关？如何判断？我们先通过下面的实验，对通电导线与磁场方向垂直的情况进行探究。

实验探究

如图 1-1-4 所示安装、连接好实验器材，实验中线框平面与磁场方向垂直放置，线框短边在磁场内。



▲ **图1-1-4**　探究安培力的方向与哪些因素有关

为了获得明显的实验效果，常常把线框做成多匝线圈。

1. 在闭合开关前先观察并记录磁场方向、电流方向以及弹簧测力计的读数 F_0。

2. 接通电源，待线框平衡后观察弹簧测力计读数 F，并与 F_0 比较。

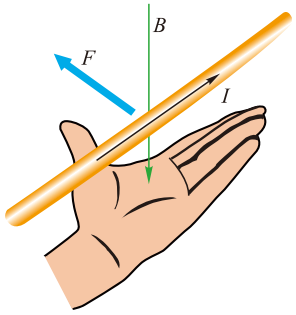
3. 改变电流方向，接通电源，平衡后观察弹簧测力计读数，与 F_0 比较。

4. 改变磁场方向，重复步骤 2、3。

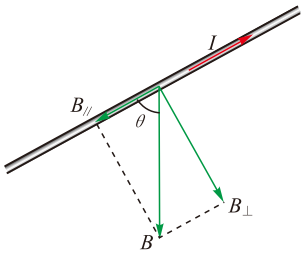
将上述观察结果填入下表。

磁场方向	N极在右，S极在左		N极在左，S极在右	
电流方向	向外	向里	向外	向里
F 与 F_0 比较（“大于”或“小于”）				
安培力的方向				

经过上述实验可以得出，通电导线在磁场中所受安培力的方向，可用**左手定则**（left-hand rule）判定：伸出左手，四指并拢，使大拇指和其余四指垂直，并且都跟手掌在同一平面内，让磁感线垂直穿过手心，四指指向电流方向，则大拇指所指方向就是通电导线所受安培力的方向，如图 1-1-5 所示。



▲ **图1-1-5**　左手定则



▲ 图1-1-6 通电导线与磁场方向间夹角为θ

如果通电导线不与磁场方向垂直，而是与磁场方向间夹角为 θ，如图 1-1-6 所示，可把磁感应强度 B 分解为垂直导线方向与平行导线方向的两个分量 $B_{\perp}$ 和 $B_{//}$，$B_{//}$ 对通电导线没有作用力，只有 $B_{\perp}$ 对安培力有贡献。当我们运用左手定则判定安培力方向时，应使 $B_{\perp}$ 垂直穿入手心，这时通电导线所受安培力的方向仍垂直于磁场方向，也垂直于电流方向，即安培力的方向总是垂直于磁场方向与电流方向所在的平面。

当通电导线与磁场方向平行时，导线与磁场方向夹角是 0 °（或 180 °），它受到的安培力为零。

安培力的大小

左手定则可以判定安培力的方向，那么，安培力的大小如何确定呢？它跟哪些因素有关？

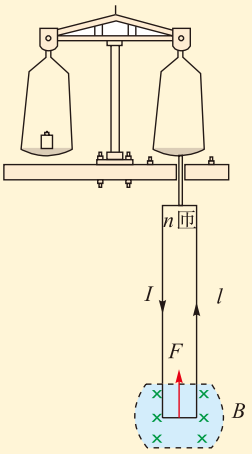
实验探究

如图 1-1-7 所示为电流天平，可以用来测量安培力的大小。

1. 在天平的右盘下悬挂线圈，线圈下端处于磁场中，且线圈平面与磁感线垂直。当线圈没有通电时，往天平左盘放适量砝码 m_0，使天平处于平衡状态，记录下 m_0 的数值。

2. 给线圈通以某一方向的电流，根据天平的倾斜，调整左盘砝码的数量，使天平重新达到平衡状态，并记录下此时砝码的质量 m，填在表格中。

3. 测量此时电流的大小 I 及磁场中导线框短边的长度 L，记录在下表中。



▲ 图1-1-7 电流天平

通电前砝码的质量m_0/ kg							
通电后砝码的质量m/kg							
安培力的大小F=（m_0-m）g/N							
电流I/A							
线框短边长L/m							

4. 改换另外的线圈，重复以上步骤。

5. 根据《物理 必修 第三册》中学习过的磁感应强度的定义，求出磁感应强度 B 的大小，并比较各次实验所得的结果，看看所测得的 B 值在误差范围内是否相等。

如果线圈为n匝，每匝处于磁场中的长度为l，则$L=nl$。

精确的实验表明，当通电导线与磁场方向垂直时，磁场对通电导线的安培力 F 的大小与导线中的电流 I、导线长度 L 和磁感应强度 B 成正比，用公式表示为

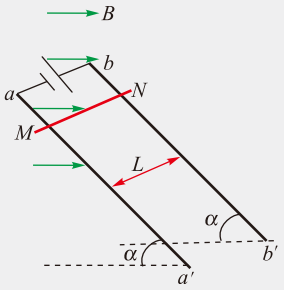
$$F=ILB$$

式中，I 的单位为安（A），L 的单位为米（m），B 的单位为特（T），F 的单位为牛（N）。

不难看出，当通电导线与磁场方向平行时，导线不受安培力；当导线与磁场方向的夹角为 θ 时，安培力的大小为 $F = ILB_{\perp}=I\,LB\sin\theta$。

例题示范

问题　如图1-1-8所示，aa' 和bb'是两条相互平行的导电轨道，相距为$L = 0.2$ m，轨道平面与水平面的夹角为$\alpha = 37°$，处于方向水平向右的匀强磁场中，一根质量为$m = 0.2$ kg的金属棒MN放在导轨上，它与导轨间的摩擦可以忽略不计。



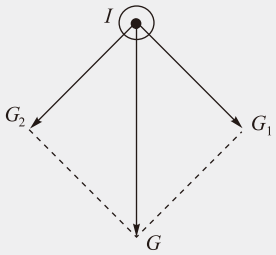
▲ 图1-1-8

（1）当金属棒中的电流为I = 5 A时，金属棒在导轨上保持静止，磁场的磁感应强度为多少？

（2）金属棒中的电流不变，要保持它在导轨上静止不动，并且使所加的磁场的磁感应强度最小，磁场方向应如何调整？最小的磁感应强度$B_{\min}$是多少？

分析　（1）当磁场方向水平向右时，金属棒受到的安培力方向竖直向上，它应与重力大小相等。

（2）为了方便分析，画出金属棒的截面图。如图 1-1-9 所示，把重力沿斜面方向和垂直斜面的方向进行分解，安培力只要与其沿斜面的分力 G_1 大小相等、方向相反即可。根据安培力的方向，利用左手定则就可以确定磁场的方向。



▲ 图1-1-9

解　（1）当磁场方向水平向右时，根据左手定则判定所受安培力方向竖直向上，其大小等于重力则可平衡，由平衡条件可得

$$BIL = mg$$

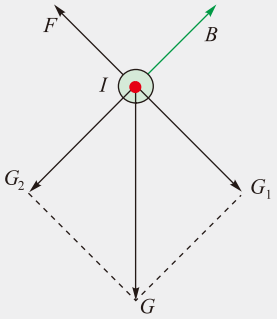
解得 $$B=\frac{mg}{IL}=\frac{0.2\times9.8}{5\times0.2}\ \mathrm{T}=1.96\ \mathrm{T}$$

（2）把重力沿斜面方向及垂直斜面方向分解，如图 1-1-10 所示，其中

$$G_1=mg\sin\alpha$$

斜面的支持力与G_2平衡，安培力F只要与G_1平衡即可。利用左手定则可以判定，磁场方向垂直斜面向上，其大小

$$B_{\min}=\frac{mg\sin\alpha}{IL}=\frac{0.2\times9.8\times0.6}{5\times0.2}\ \mathrm{T}\approx1.18\ \mathrm{T}$$



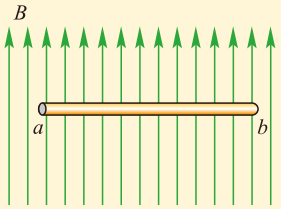
▲图1-1-10

拓展 安培力的方向与磁场方向、电流方向有关，这里涉及的是三维空间里的位置关系。在图1-1-10中，电流方向是垂直纸面向外的，而安培力的方向与电流方向垂直，因此安培力的方向一定在纸面内。即使磁场方向不在纸面内，安培力的方向仍然在纸面内；但如果磁场方向与纸面存在夹角，则所需的磁感应强度B的值将比较大。

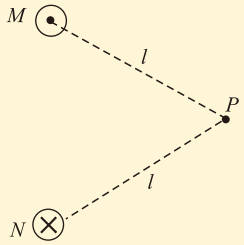
自我评价

1. 如图 1-1-11 所示，有一条与磁场方向垂直、长度为 2 m 的通电直导线 ab，导线 ab 中的电流方向由 a 向 b，试判断 ab 受到的安培力的方向。

2. 如图 1-1-12 所示，两根垂直纸面且相互平行放置的直导线 M 和 N，通有大小相等、方向相反的电流 I。对于在纸面上与 M、N 导线距离都等于 l 的点 P，电流在该点产生的磁场方向如何？说说理由。M 导线受到的安培力方向又怎样？



▲图1-1-11



▲图1-1-12

3. 在图 1-1-4 的实验装置中，线框平面与磁场方向垂直，线圈底边受到的安培力方向竖直向上，大小为 F_0。

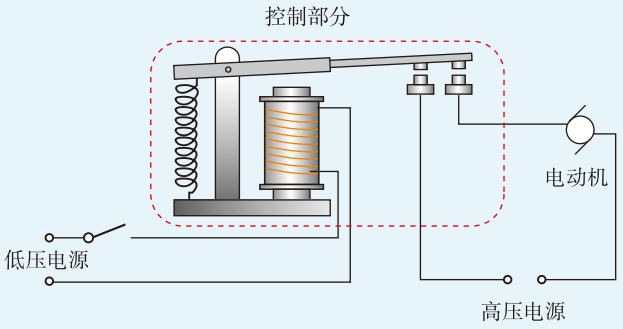
（1）保持其他条件不变，只是将磁铁以过它中心的竖直线为轴转 30° 角，线圈底边所受的安培力的方向是否仍为竖直向上？大小等于多少？

（2）保持其他条件不变，使磁铁 S 极一边（左边）稍稍抬高一点，而 N 极一边（右边）仍与铁架台底部接触，则线圈底边所受的安培力的方向是否仍竖直向上？大小是否变化？

发展空间

实验室

图 1-1-13 是一个利用电磁继电器进行控制的电路，其高压工作电路的通断由低压电路的通断来控制，这种设计有利于安全操作。请你利用电磁继电器设计并安装一个自动控制电路。



▲ 图1-1-13

课外阅览

电学中的牛顿——安培

安德烈·玛丽·安培（André Marie Ampère，1775—1836），法国物理学家，在电磁作用方面的研究成就卓著，对数学和化学也有贡献。电流的国际单位安培即以其姓氏命名。1775 年 1 月 22 日，安培出生于里昂一个富商家庭。1802 年安培在布尔让 - 布雷斯中央学校任物理学和化学教授；1808 年被任命为法国帝国大学总学监，此后一直担任此职；1814 年被选为帝国学院数学部成员；1819 年主持巴黎大学哲学讲座；1824 年担任法兰西学院实验物理学教授。安培的主要科学成就如下所列，其中最主要的是 1820 ~ 1827 年间对电磁作用的研究。

1. 安培对电磁作用进行研究取得的成就：（1）发现了安培定则；（2）发现电流的相互作用规律；（3）发展测电技术的第一人，发明了电流计；（4）提出分子电流假说；（5）总结了电流元之间的作用规律——安培定律。

2. 安培在数学和化学方面的贡献：他研究过概率论和积分偏微分方程；几乎与 H. 戴维同时认识元素氯和碘，导出过阿伏伽德罗定律，论证过恒温下体积和压强之间的关系，还试图寻找各种元素的分类和排列顺序。

安培将他的研究综合在《电动力学现象的数学理论》一书中，成为电磁学史上一部重要的经典论著。麦克斯韦称赞安培的工作是“科学上最光辉的成就之一”，还把安培誉为“电学中的牛顿”。

1836 年 6 月 10 日，安培于马赛去世。在他的一生中，只有很短的时期从事物理工作，可是他却能以独特的、透彻的分析，论述通电导线的磁效应，因此他被称为电动力学的先创者，是当之无愧的！

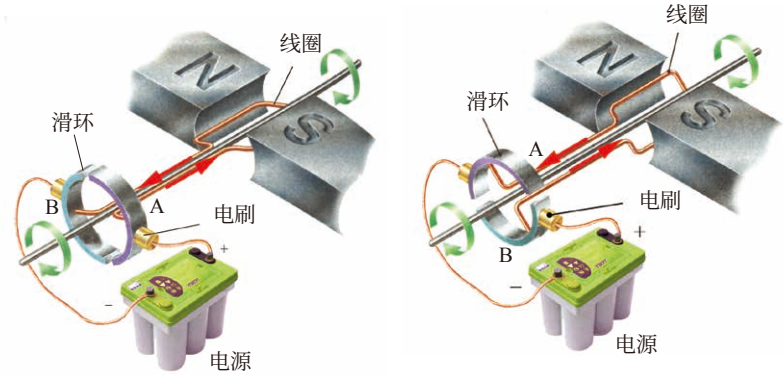
2 安培力的应用

安培力的发现不仅进一步指出了电与磁的相互联系，而且它的做功可以将其他形式的能与电能进行转化，这为技术革新提供了重要支持。想一想，身边哪些电器工作时有安培力在起作用？

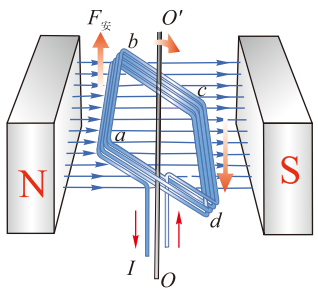
直流电动机

电动机是安培力的一个重要应用。电动机使电能转化为机械能，是引发 19 世纪第二次工业革命的因素之一。

图 1-2-1 给出一个直流电动机的工作模型，它由磁场（磁体）、转动线圈、滑环、电刷等组成，由直流电源供电。其中，滑环分成两个半圆环 A 与 B，它们相互绝缘。当电流由 A 流入时，则从 B 流出；当电流由 B 流入时，则从 A 流出。因此，滑环在其中起了一个换向器的作用。当线圈通电后，由于受到安培力的作用（图 1-2-2），线圈在磁场中旋转起来，并且每转半圈，线圈内电流方向就变换一次，从而可以连续转动。这就是直流电动机的工作原理。



▲ 图1-2-1 直流电动机



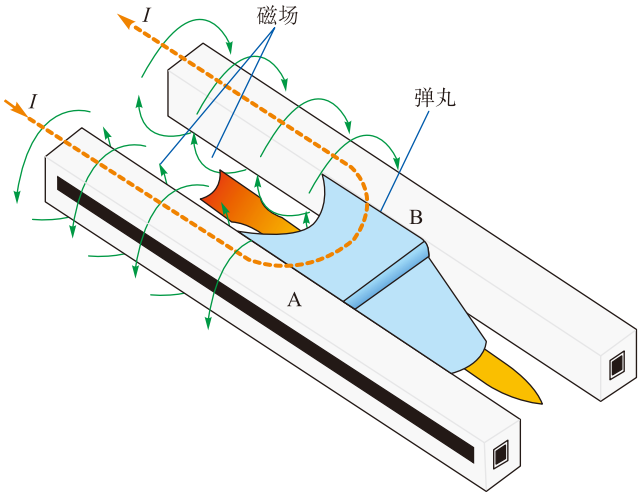
▲ 图1-2-2 通电线圈在磁场中受到一对安培力的作用

除直流电动机外还有交流电动机，实际应用的交流电动机有多种形式，结构各不相同，但都是利用安培力做功把电能转化为机械能。家用的电风扇、洗衣机、抽油烟机等使用的都是交流电动机。

电磁炮

电磁炮，也叫作轨道炮，是利用电磁系统中的安培力发射弹丸的一种先进的动能杀伤性武器，它分为电磁轨道炮、电磁线圈炮和重接炮三类。下面我们来了解电磁轨道炮的原理。

图 1-2-3 是一个简单的电磁轨道炮发射的基本原理图，其中两条平行的金属导轨 A 和 B 充当传统火炮的炮管，弹丸放置在两导轨间，它与两导轨间接触良好且摩擦很小。当两导轨接入电源时，强大的电流 I 从导轨 A 流入，经弹丸从另一导轨 B 流回，两导轨中的强电流在两导轨间产生强磁场，磁场方向竖直向上。利用左手定则可以判定，弹丸受到的安培力方向水平向右，它将在导轨上以很大的加速度做加速运动，最终高速发射出去。



▲ **图1-2-3**　电磁轨道炮的原理示意

电磁炮弹的发射不靠火药的燃烧，不用推进剂，所以炮弹的体积只是传统 120 毫米火炮炮弹的约八分之一，重量约是其十分之一，这样可显著提高武器系统的携弹量，减少后勤负担。炮弹不装用作推进剂的炸药，也减少了炮弹在制造、运输、储存过程中的安全隐患。

电磁炮没有圆形炮管，弹丸体积小，重量轻，使其在飞行时的空气阻力很小，因而它的发射稳定性好，初速度大，射程远。由于电磁炮的发射过程全部由计算机控制，弹头又装有激光制导或其他制导装置，所以具有很高的射击精度。

讨论交流

可以看出来，电磁炮的原理并不复杂，为什么在过去的实战中我们很少见到它的身影呢？它的主要技术难点会在哪里？

作为发展中的高技术兵器，电磁炮的军事用途十分广泛，但也存在不少技术上的困难，主要是要求电源在极短的时间里为电磁炮提供巨大的能量，因此必须附有复杂的储能设备及转换开关。如果要把电磁炮应用到车辆、舰船等移动发射装置上，技术难度更高。

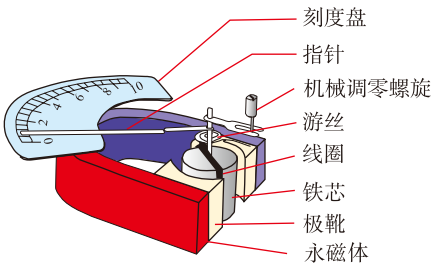
我国对电磁轨道武器的研究和试验起步较晚，但进展很快，已在一些核心关键技术的研究上取得显著成就，处于世界领先水平。

磁电式电流表

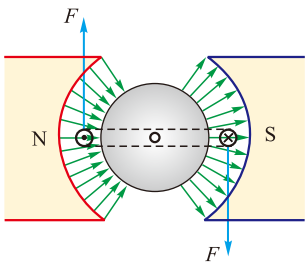


▲ **图1-2-4** 实验室里的电流表

磁电式电流表是利用通电线圈在磁场中受到安培力作用的原理制成的，我们在实验室里经常使用的电流表（图1-2-4）和电压表都是磁电式电流表改装而成的。这种电流表的内部结构如图 1-2-5 所示，蹄形永磁体的两个磁极各加一个软铁制的极靴，它们的中心固定一个圆柱形的软铁芯，在极靴与铁芯之间形成均匀的空隙，空隙中是磁感线均匀地沿着径向分布的磁场。这种磁场叫作辐向磁场，其特点是：磁场内同一圆周上的任何位置，磁感应强度的大小都相等，方向总是沿半径方向，如图 1-2-6 所示。在空隙间安装有用漆包细铜线绕制的线圈，它连接在转轴上，可以绕轴转动，待测的电流就从其中通过。转轴上附着指



▲ **图1-2-5** 磁电式电流表的结构



▲ **图1-2-6** 极靴与铁芯之间的磁场对线圈施加一对安培力，使线圈顺时针偏转

针，轴的上、下两端各连有一盘游丝（即螺旋弹簧，图1-2-5中只画出上边的游丝），它们的绕向相反（一个顺时针，一个逆时针）。所以在未通入电流时，线圈静止在平衡位置，这时指针应停在刻度盘的零刻度线处，如果有偏差，可以通过机械调零螺旋来调节。

当有待测电流通过线圈时，磁场就对线圈产生安培力，使它偏转。线圈偏转时，游丝发生形变，产生的弹力，阻止线圈继续偏转。线圈偏转的角度越大，游丝的形变越厉害，弹力就越大，当弹力和安培力的作用使线圈达到平衡时，指针所指的位置就反映出待测电流的大小。经过标准电流计量仪器校准和标定之后，就可以直接从指针位置读出待测电流的值。

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

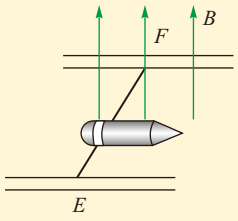
物理学的发展不仅改变着人们的自然观、世界观，也升华了人们对人与自然、人与社会的认识。与此同时，它的应用也极大地改变着我们的生活，推动人类文明的进步。

自我评价

1. 简述电动机、电磁轨道炮和磁电式电流表中的能量转化关系。

2. 图1-2-6中辐向磁场在什么地方存在？它的特点是什么？为什么线圈在辐向磁场中受到的安培力与电流成正比？

3. 电磁炮是一种理想的兵器，它的主要原理如图1-2-7所示，利用这种装置可以把质量为2.0 kg的弹体（包括金属杆EF的质量）加速到6 km/s。若这种装置的轨道宽2 m，长为100 m，通过的电流为5×10^6 A，求轨道间所加匀强磁场的磁感应强度大小。（轨道摩擦不计）



▲ 图1-2-7

发展空间

课外阅览

电 磁 弹 射

电磁弹射是指利用电磁能来推动物体向外运动的驱动方式，如图1-2-8所示。电磁弹射的原理与电磁炮相同，但具体要求不同：电磁炮发射的物体质量小但发射速度很快，而电磁

弹射发射的物体质量大而发射速度相对较慢。目前所说的电磁弹射，主要是指在航空母舰不长的甲板上，应用安培力把舰载飞机加速到起飞速度的过程。那么，相对于传统的蒸汽弹射，电磁弹射有哪些优势？电磁弹射的技术难点是什么？

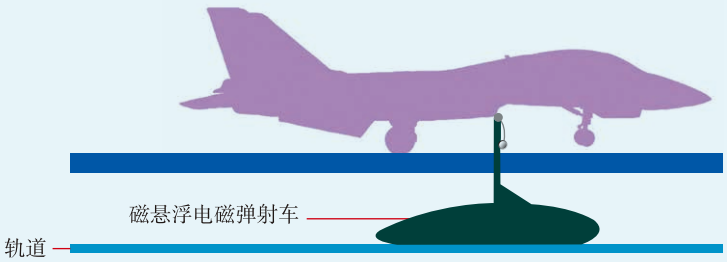
储能、弹射控制、直线电机等是电磁弹射要克服的主要技术困难。

每一次电磁弹射持续时间不到 3 s，但峰值功率高达上百兆瓦，这就需要一个储能设备将航母电站输出的电能储存起来，瞬间释放。储能技术的难点在于需要找到能量密度很高的储能方式，否则如果储能装置本身体积和质量超标，就不能满足上舰使用的要求。

电磁弹射需要精确控制弹射末速度和弹射过程中的加速度，这对直线电机的实时反馈控制以及对各种信息的组网、交互与处理等弹射控制技术，提出了巨大的挑战。

直线电机是弹射器的执行部分，它的动子和定子无机械接触，仅靠电磁感应原理产生的电磁力实现电能到动能的转换。直线电机技术的难点在于要尽可能提高它的功率密度和能量效率，并且具备海洋环境适应能力。

以往的蒸汽弹射器通过机械方法控制注入汽缸的蒸汽，无法精确控制推力，在弹射过程中推力的峰谷值比电磁弹射大，这会造成舰载机因不稳定的推力而受力不均，进而可能使机体受损。而电磁弹射更可控，更平稳，可大幅减小对舰载机和各部件的冲击，有利于飞机结构的设计，并可使机体的使用寿命延长 31%，也能缓解飞行员的身心压力。电磁弹射的最大弹射能力高达 122MJ，比蒸汽弹射器高出约 29%，可以弹射质量更大的舰载机。



▲ **图1-2-8** 电磁弹射

3 洛伦兹力



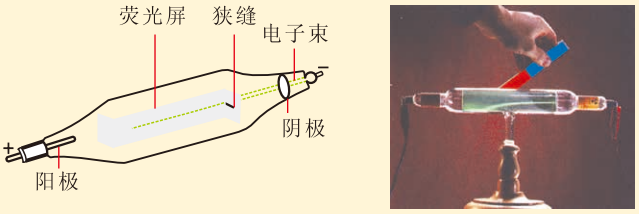
到北极看极光（图 1-3-1），这是目前出境旅游的一个热门项目。为什么北极附近会出现这种奇异的光芒？下面我们通过实验来探索这种现象的内在机理。

◀ **图1-3-1** 极光

初识洛伦兹力

观察思考

如图 1-3-2（a）所示，一个阴极射线管的两个电极之间加上高电压后，就会在旁边的荧屏上看到一条亮线。它是电子在高电压的作用下加速运动射到荧光屏上引起的，显示出了电子运动的路径。当把一根条形磁体的 N 极放到阴极射线管的近旁时［图 1-3-2（b）］，你会看到什么现象？把磁体的极性调换一下，用条形磁体的另一个磁极放到阴极射线管的近旁，你又看到了什么现象？



▲ **图1-3-2**　带电粒子在磁场中的偏转

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

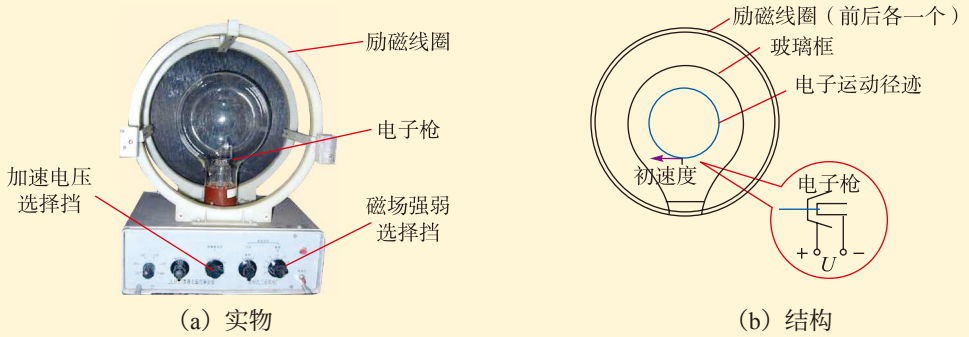
运动电荷在磁场中受到的磁场力，称为**洛伦兹力**（Lorentz force）。

利用洛伦兹力控制带电粒子偏转在实际中有很多重要应用。在传统的电视显像管中，就是利用特殊线圈产生的磁场控制电子偏转、扫描出画面。当宇宙射线射向地球时，地磁场对带电粒子的洛伦兹力会使射线发生偏转，向地球两极聚集，并作用于大气层中的原子，从而发出奇异的光芒，这就是极光。

洛伦兹力的方向

观察思考

如图 1-3-3 所示的装置是洛伦兹力演示仪。玻璃泡内的电子枪（包括阴极及加速电极）发射出阴极射线，使玻璃泡内的低压汞蒸气发出辉光，从而可以显示



（a）实物　　（b）结构

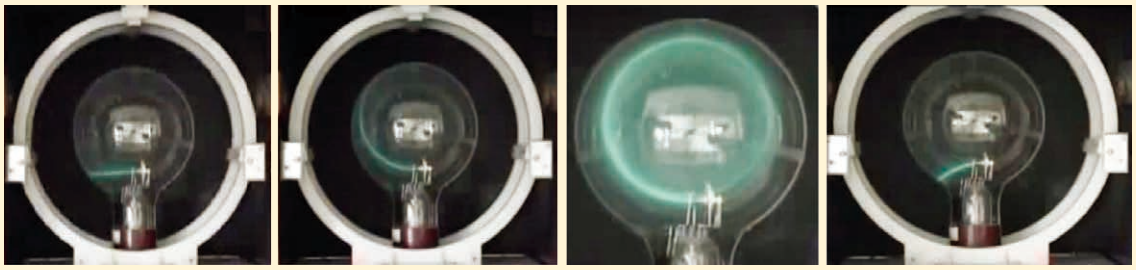
▲ **图1-3-3**　洛伦兹力演示仪

出电子的轨迹。

1. 当没有磁场时，观察电子的运动轨迹，你看到了什么？如图 1-3-4（a）所示。

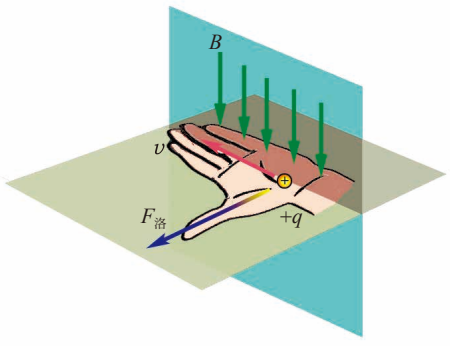
2. 外加一磁场，使电子束垂直射入磁场，它的运动轨迹是怎样的？逐渐加大磁感应强度，电子的运动轨迹会有什么变化？如图 1-3-4（b）（c）所示。

3. 改变磁场方向，观察电子的运动轨迹，又会有什么特点呢？如图 1-3-4（d）所示。



（a）　（b）　（c）　（d）

▲ **图1-3-4**　阴极射线的轨迹



▲ **图1-3-5**　左手定则

由以上实验现象可知，当没有磁场时，电子的运动轨迹是直线；当外加一个与电子初速度方向垂直的匀强磁场时，在磁感应强度大小合适的情况下，电子的运动轨迹是圆周，即电子做匀速圆周运动。做匀速圆周运动的电子受到的向心力始终与速度方向垂直，由此可以判断，这时电子受到的洛伦兹力的方向与电子运动方向垂直，也与磁场方向垂直。

这种情况下，带电粒子在磁场中所受洛伦兹力的方向，同样可以用左手定则判断，如图 1-3-5 所示：伸出左手，四指并拢，使大拇指和其余四指垂直，并且都跟手掌在同一平面内，让磁感线垂直穿过手心，四指指向正电荷的运动方向（即电流方向），则大拇指所指方向

就是正电荷所受洛伦兹力的方向。

若在磁场中运动的是带负电荷的粒子，应用左手定则时，四指应指向该粒子运动方向的反方向。

洛伦兹力的大小

理论探究

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

电流是电荷的定向运动形成的。当导线静止时，导线中正的自由电荷的定向运动方向与电流方向一致，这些自由电荷由于定向运动而受到的洛伦兹力的方向也都与导线所受安培力的方向一致，因此，静止的通电导线内所有自由电荷受到的洛伦兹力的总和，在数值上应该与导线受到的安培力相等。

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

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

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

$$F=ILB=neSvBL$$

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

$$NF_{洛}=neSvBL=NevB$$

$$F_{洛}=evB$$

更一般的情况，电荷量为 q 的电荷，在磁感应强度大小为 B 的匀强磁场内运动，如果运动方向与磁场方向垂直，则它受到的洛伦兹力的大小可以表示为

$$F_{洛} = qvB$$

如果电荷的运动方向与磁场方向间的夹角为 θ，电荷受到的洛伦兹力大小为

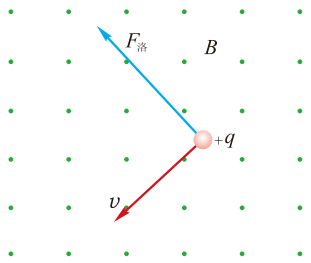
$$F_{洛} = qvB\sin\theta$$

当电荷的速度方向和磁场方向平行时，运动电荷所受洛伦兹力为零。

带电粒子在匀强磁场中的运动

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

我们已经知道，带电粒子在匀强磁场中运动所受的洛伦兹力，方向垂直于磁场方向和粒子运动方向所决定的平面。这就是说，洛伦兹力的方向总跟粒子运动的速度方向垂直，所以洛伦兹力对运动电荷不做功，它不会改变带电粒子速度的大小，只改变粒子运动的方向。



▲图1-3-6　一个垂直于磁场方向运动的正点电荷受到的洛伦兹力

如图 1-3-6 所示，一个带正电荷 q 的粒子，在磁感应强度为 B 的匀强磁场中，以垂直于磁场的方向运动，粒子所受洛伦兹力大小恒为 $F_{洛} = qvB$，方向总跟速度方向垂直，则它将做匀速圆周运动，设圆周半径为 R，根据洛伦兹力公式和向心力公式，有

$$F_{洛} = qvB = m\frac{v^2}{R}$$

带电粒子在洛伦兹力作用下做圆周运动的半径是

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

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

带电粒子做圆周运动的周期是

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

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

例题示范

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

分析　因为电子的速度方向与磁场方向垂直，故可以直接用公式 $F_{洛}=evB$ 求洛伦兹力的大小。

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

则电子受到的洛伦兹力大小为

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

而电子在地面受到的重力大小

$$G=mg=8.9\times10^{-30}\text{N}$$

故电子受到的洛伦兹力与重力之比为

$$\frac{F_{洛}}{G}=5.4\times10^{17}$$

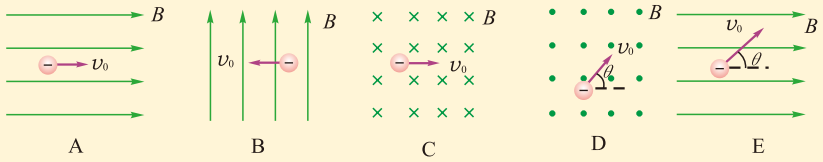
可见 $F_{洛}$ 远远大于 G，因此在有关问题中电子的重力可忽略。

拓展　如果带电粒子的速度方向不与磁场方向垂直，粒子的运动轨迹又会是怎样的呢？

我们可以把粒子的速度 v 沿磁场方向及垂直于磁场方向分解为 $v_{\perp}$ 和 $v_{/\!/}$，在磁场方向上，粒子不受洛伦兹力，它做匀速直线运动；在垂直磁场的平面内，它受到指向圆心的洛伦兹力，做匀速圆周运动。这两个分运动合成后，会是怎样的运动？你能想象出来吗？

自我评价

1. 若电子运动的速率 $v_0=3.0\times10^6\text{m/s}$，匀强磁场的磁感应强度 $B=0.1\text{T}$，请分别计算在图1-3-7所示各种情况下运动电子受到的洛伦兹力的大小，并在图中标明或说明洛伦兹力的方向（图中 $\theta=30°$）。



▲ 图1-3-7

2. 运动电荷进入匀强磁场，且只受磁场作用时，下列说法正确的是（　　）

A. 运动电荷若受磁场力，磁场力一定对运动电荷不做功

B. 运动电荷若受磁场力，磁场力大小一定不变

C. 运动电荷的速度大小一定不变，方向一定改变

D. 运动电荷的动能一定不变

3. 电子以 1.6×10^{6} m/s 的速度垂直射入 $B=2.0\times10^{-4}$ T 的匀强磁场中，求电子做圆周运动的轨道半径和周期。

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

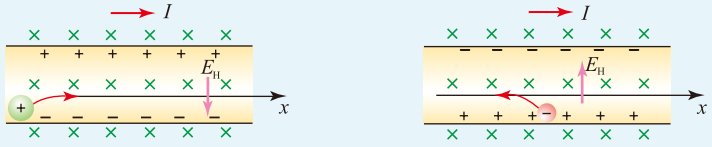
5. 关于电场、磁场与电荷之间的关系，四位同学有不同的认识。甲认为：电荷在电场中和在磁场中一定受场的作用力；乙认为：电荷在电场中一定受电场力的作用，电荷在磁场中不一定受磁场力作用；丙认为：电荷周围一定有电场和磁场；丁认为：电荷周围一定有电场，不一定有磁场。你认为哪种认识对？说说理由。

发展空间

课外阅览

霍尔效应

如图 1-3-8 所示，处于均匀磁场中的一段载流导体，已知电流的方向沿 x 轴正方向，故正的自由电荷沿 x 轴正方向运动，而负的自由电荷沿相反方向运动，每种电荷受洛伦兹力作用都将朝导体的上表面偏转。现在我们假设只有带正电的自由电荷存在，那么导体的上表面将带正电，下表面因缺少正电荷将带负电。由于这些正、负电荷的分离与积累，在导体内就会形成一电场，这种现象首先是由当时还是大学生的霍尔（E.H.Hall，1855—1929）于 1879 年发现的，称为**霍尔效应**。



（a）如果定向运动的是正电荷，导体内将会形成一个方向向下的电场　　（b）如果定向运动的是负电荷，导体内将会形成一个方向向上的电场

▲ 图1-3-8

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

1980 年，冯·克利青（K.von.Klitzing）发现了量子霍尔效应，这是凝聚态物理学领域最重要的发现之一，他因此荣获了 1985 年度的诺贝尔物理学奖。而斯托默（H.L.Stormer）、崔琦（D.C.Tsui）和劳夫林（R.B.Laughlin）因具有分数电荷激发的新型量子流体的发现（即所谓分数量子霍尔效应）获得了 1988 年度的诺贝尔物理学奖。

由清华大学薛其坤院士领衔，清华大学物理系和中国科学院物理研究所联合组成的实验团队近年取得重大科研突破，在磁性掺杂的拓扑绝缘体薄膜中，从实验上首次观测到量子反

常霍尔效应。这一重大发现将会加速推进信息技术革命，研制出极低能耗的电子器件。

物理在线

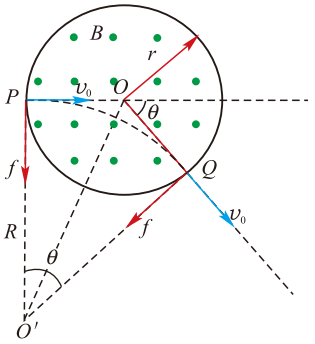
上网查找资料或查阅图书，了解地磁场与极光的关系，认识带电粒子在电场和磁场中偏转的原理及其在科学技术中的应用。

4　洛伦兹力的应用

一个带电粒子在洛伦兹力作用下做匀速圆周运动，会对我们的生活产生多大影响呢？现实中，用洛伦兹力控制电荷运动，在现代科技领域有着广泛应用。

利用磁场控制带电粒子运动

设在真空条件下，匀强磁场限定在一个圆形区域内，该圆形的半径为 r，磁感应强度大小为 B，方向如图 1-4-1 所示。一个质量为 m、电荷为 q、速度大小为 v_0 的带正电粒子，沿磁场区域的直径方向从 P 点射入磁场，粒子在洛伦兹力作用下，在磁场中以半径 R 绕 O' 点做匀速圆周运动。粒子从 Q 点射出磁场时，速度大小仍是 v_0，但速度方向已发生了偏转。设粒子射出磁场时的速度方向与射入磁场时相比偏转了 θ 角，由图中所示的几何关系可以看出

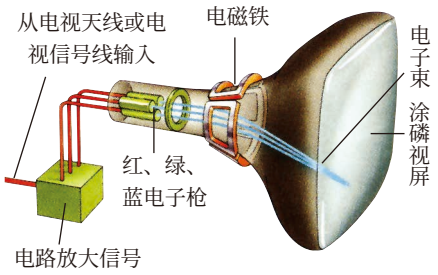


▲ **图1-4-1**　带电粒子在磁场中的偏转

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

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

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



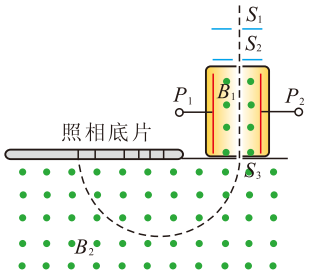
▲**图1-4-2** 显像管中的电子束在磁场中的偏转

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

利用磁场控制粒子的运动方向的特点是：只改变带电粒子的运动方向，不改变带电粒子的速度大小。图 1-4-2 所示的是早期电视机使用的显像管，它就是利用随电视信号变化的磁场控制电子束的运动路径。

质谱仪

电荷量、质量是带电粒子的两个最基本的参量，带电粒子的电荷量与质量之比，叫作比荷。比荷的测定对研究带电粒子的组成和结构具有重大意义。测定带电粒子比荷的仪器叫作**质谱仪**（mass spectrometer）。汤姆孙正是通过巧妙的实验测量了阴极射线粒子的比荷，从而发现了电子。



▲**图1-4-3** 质谱仪中S_2与S_3之间的装置又叫作**速度选择器**，它要求$E\perp B_1$且E的方向向右时，B_1垂直纸面向外；若E反向，B_1也要反向

图 1-4-3 是一种质谱仪的原理图，离子源（在狭缝 S_1 上方，图中未画出）产生的带电粒子经狭缝 S_1 与 S_2 之间的电场加速后，进入由 P_1 和 P_2 两平行金属板产生的场强为 E 的匀强电场，及与电场方向垂直、磁感应强度为 B_1 的匀强磁场区域，再通过狭缝 S_3 垂直进入磁感应强度为 B_2 的匀强磁场区域，在洛伦兹力的作用下带电粒子做半个圆周运动后打到照相底片上，形成一个细条纹。测出条纹到狭缝 S_3 的距离 L，就得出了粒子做圆周运动的半径 $R=\frac{L}{2}$，根据 $R=\frac{mv}{B_2q}$，只要知道带电粒子的速度 v 和磁感应强度 B_2，就可以得出粒子的比荷。

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

讨论交流

在对图 1-4-3 装置的分析中，我们已经知道$\frac{q}{m}$与 L 存在一一对应关系的前提

是 v 一定。仪器的结构 S_1、S_2、S_3 在同一直线上，粒子进入 B_2 区域之前必须做直线运动。

请讨论下面的问题：

1. 在 S_2、S_3 之间的带电粒子受到哪些力的作用？这些力的大小如何？（重力不计）

2. 已知 P_1 与 P_2 间的磁场方向垂直纸面向外，要保证从 S_2 进入的粒子能从 S_3 穿出，P_1 与 P_2 间的电场方向是从左向右还是从右向左？为什么？

3. 已知 P_1 与 P_2 间的磁感应强度大小为 B_1，电场强度的大小为 E，满足什么条件的粒子才可能从狭缝 S_3 射出？

4. 为什么把该装置称为速度选择器？

带电粒子在速度选择器中所受的电场力与洛伦兹力都沿水平方向，只有二者平衡，粒子才能沿直线运动，通过狭缝 S_3。即

$$qE=qvB_1$$

这就是说，只有 $v=\dfrac{E}{B_1}$ 的粒子才能从狭缝 S_3 射出。通过改变 E 和 B_1 的大小，就可以控制进入磁场偏转区域的粒子的速度大小。这也是把质谱仪中的这一部分装置称为速度选择器的原因。

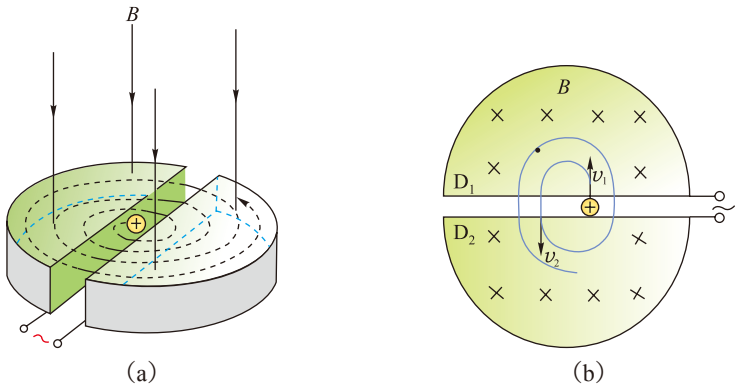
回旋加速器

1928 年前后，人们纷纷寻找更好的加速粒子的方法。当时实验室普遍采用的直线加速器需要很高的电压才能使粒子获得较大的速度，可是电压越高，对绝缘的要求也越高，否则仪器就会被击穿。如果改用多次加速，加速器的长度又会变得很长，也是困难重重。

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

回旋加速器的核心部分为 D 形盒，它的形状有如扁平的盒子沿直径剖开成为两半。每一半都像字母“ D ”的

形状，因而得名。如图 1-4-4（a）所示，两 D 形盒之间留有窄缝，中心附近放置离子源（如质子、氘核或 α 粒子源等）。在两 D 形盒间接上交流电源（其频率的数量级为 10^6Hz），于是在缝隙里形成一个交变电场。由于电屏蔽效应，在每个 D 形盒内部的电场很弱，可以忽略。D 形盒装在真空容器里，整个装置放在巨大的电磁铁两极之间的强磁场中，磁场的方向垂直于 D 形盒的底面。



▲ **图1-4-4** 回旋加速器原理

讨论交流

两个 D 形盒之间的电场承担了对粒子加速的重任。它的场强要怎样变化，才能使加速效果最好？

狭缝很窄，粒子在狭缝中做加速运动经历的时间很短，可以忽略。

现在我们来考虑粒子运动的情况，如图 1-4-4（b）所示，设想正当 D_2 的电势较高的时候，一个带正电的粒子从粒子源发出，它在缝隙中被加速，以速率 v_1 进入 D_1 内部的无电场区，在这里，粒子在磁场的作用下做半径为 $R_1=\frac{mv_1}{qB}$ 的圆周运动，经过半个圆周后再次回到缝隙。如果在此期间缝隙间的电场恰好反向，粒子通过缝隙时又被加速，以较大的速率 v_2 进入 D_2 内部的无电场区，在其中做半径为 $R_2=\frac{mv_2}{qB}$ 的圆周运动，绕过半个圆周后再次回到缝隙……虽然 $R_2>R_1$，但绕过半个圆周所用的时间都是一样的，它们都等于带电粒子做圆周运动的周期的一半，即 $\frac{T}{2}=\frac{\pi m}{qB}$，所以尽管粒子的速率与圆周运动半径一次比一次

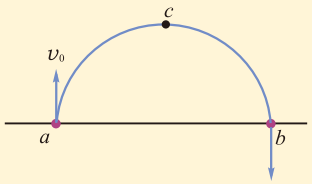
增大，只要缝隙中的交变电场以$T=\frac{2\pi m}{qB}$的不变周期往复变化，便可保证粒子每次经过缝隙时受到的电场力都是使它加速的。这样，不断被加速的粒子将沿着曲线轨迹逐渐趋于 D 形盒的边缘，在这里达到预期的速率后，用特殊的装置将它们引出。

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

利用带电粒子在磁场中受的洛伦兹力控制粒子的运动，不仅仅只是以上一些实例，轻核的聚变实验中，就是利用洛伦兹力来控制轻核的。虽然人类对洛伦兹力的认识有 100 多年的历史，但是对它的利用的探索还远未结束。

自我评价

1. 如图 1-4-5 所示，一带正电粒子，从 a 点以垂直磁场方向的速度 v_0 进入磁感应强度为 B 的匀强磁场，沿着半圆 acb 运动，从 b 处飞出磁场，已测得半圆直径 ab 长度为 l，请在图上画出磁场方向，并求带电粒子比荷$\frac{q}{m}$的数值。



▲图1-4-5

2. 关于回旋加速器，下述说法中正确的是（　　）

A. 电场和磁场交替使带电粒子加速

B. 电场的作用是使带电粒子加速，动能增大

C. 磁场的作用是使带电粒子在磁场中回旋，获得多次被加速的机会

D. D 形盒的半径越大，射出的带电粒子获得的能量越大

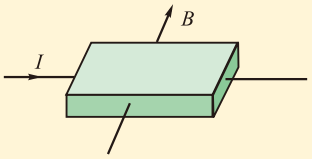
3. 长方体金属块放在匀强磁场中，有电流通过金属块，如图 1-4-6 所示，则下面说法中正确的是（　　）

A. 金属块上、下表面电势相等

B. 金属块上表面电势高于下表面电势

C. 金属块上表面电势低于下表面电势

D. 无法确定上、下表面电势高低



▲图1-4-6

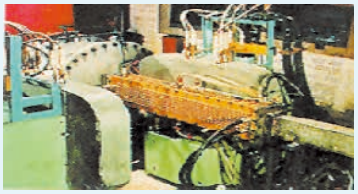
发展空间

课外阅览

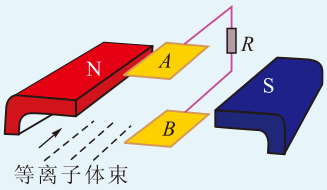
把气体加热到一定温度，气体原子中一部分电子脱离原子核的束缚而发生电离，产生大量的自由电子和带电的正离子。由于气体中正、负电荷总数相等，高温气体虽含有大量自由电子和正离子，但总体上不显电性，这种特殊的气体叫作**等离子体**。

磁流体发电机

磁流体发电机是目前正在开发的一种发电机，如图1-4-7所示。磁流体发电的原理如图1-4-8所示，把等离子体喷入磁场，带电粒子就会发生偏转，正离子聚集到B板，自由电子聚集到A板，A、B间产生一定的电势差，就成为磁流体发电机。在A、B之间接上负载R，就可产生电流。目前，1MW的磁流体发电机已进行运行试验。



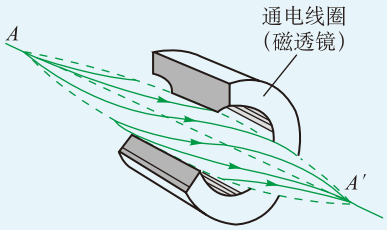
▲ **图1-4-7** 磁流体发电机试验台



▲ **图1-4-8** 磁流体发电机原理示意图

磁 聚 焦

透镜可以使发散的光束会聚成一点，磁场在一定条件下也可以使发散的粒子束会聚到一点，这就是磁聚焦。如图1-4-9所示是利用长线圈产生的匀强磁场实现磁聚焦的，其中的通电线圈内部的磁场是匀强磁场，磁场方向沿其轴线方向。设想A点处发射出一束很窄的带电粒子束，其中的粒子的速度v可以认为大小都相等，它们与磁感应强度B的夹角θ都不大。把速度v沿磁场方向和垂直于磁场方向分解，则



▲ **图1-4-9** 磁聚焦原理示意图

$$v_{//}=v\cdot\cos\theta\approx v$$

$$v_{\perp}=v\cdot\sin\theta\approx v\theta$$

由于所有粒子的$v_{//}$都相等，它们沿轴线方向的分运动是速度相等的匀速直线运动；粒子的$v_{\perp}$不相等，它们在垂直于轴线的平面内做匀速圆周运动，其轨道半径各不相同，但周期都相同。图中示意性地表示各粒子分别做不同半径的螺旋线运动，经一个周期后又会聚于A'点，它相当于透镜的焦点。

在实际中更多的是利用短线圈产生的非匀强磁场实现聚焦。例如，电子显微镜就是以电子束代替光束“照射”的，其中磁透镜起着重要的作用。

感悟 · 启迪

你知道“电学中的牛顿”吗？这是创建电磁场理论的伟大物理学家麦克斯韦对安培的评价。安培将实验和理论相结合，揭示了电和磁的关系，为电磁场理论的建立做了奠基性的贡献。

但是，安培却是一位自学成才者。那么从安培身上我们应该得到什么启示呢？

一是勤奋学习，博览群书，广泛涉及数学、物理、化学、哲学等领域，铸成卓越学者应具备的专业素养；二是保有对科学研究的敏感性，具备不懈追求、勇于探索的科学品格和广泛合作的科学精神。同学们，深入了解电磁学的发展史，你一定会获得更多的启示。

反思 · 小结 · 交流

• 学后反思

1. 磁场是一种物质，它对其他物质的作用主要表现为两种 ：对通电导线的安培力和对运动电荷的洛伦兹力。二者有联系，但也有重要的区别。充分理解这些联系和区别，有助于正确地认识这个既有内在联系又复杂的世界。

2. 左手定则表达了电流方向、磁场方向、受力方向之间的空间关系，通过一个简单的手势，即可帮助我们弄清关联的几个矢量的立体图像。想一想，我们还学过哪些类似的法则？

3. 电动机、电磁炮都是通过安培力做功而获得动能，但洛伦兹力对运动电荷不做功。从能量的角度，该如何看待安培力和洛伦兹力的联系与区别？

4. 通过本章的学习，你大概对科学 · 技术 · 社会 · 环境的关系有了更深入的认识。进入 19 世纪，物理学取得了重大进展，电磁领域的一系列重大发现，把电和磁联系在一起。安培力和洛伦兹力在理论上获得突破以后，很快就在技术上得到应用，从而推动了社会的进步，改变了人们的生活。

• 自主小结

1. 安培力的受力物体是什么？安培力的方向与电流方向、磁场方向三者间满足怎样的关系？安培力的大小怎样计算？

2. 洛伦兹力的受力物体是什么？洛伦兹力的方向与电荷的运动方向、磁场方向三者间满足怎样的关系？洛伦兹力的大小怎样计算？

3. 在什么条件下通电导线中所有自由电荷由于定向运动而受到的洛伦兹力的总和，在

数值上等于该导线受到的安培力？怎样由安培力出发推导出洛伦兹力的表达式？

4. 举例说明，安培力有哪些应用？洛伦兹力有哪些应用？

5. 什么是辐向磁场？为什么磁电式电流表中可绕轴转动的线圈受到的安培力与通过的电流成正比？

6. 说明速度选择器的原理，质谱仪是怎样测量带电粒子的比荷的？

7. 说明回旋加速器的原理，为什么回旋加速器的 D 形盒的直径越大，粒子经加速后的动能越大？

• 相互交流

1. 在电流方向与磁场方向不垂直（成 θ 角）时，怎样运用左手定则判定安培力的方向？在带负电的粒子的运动方向与磁场方向不垂直（成 θ 角）时，怎样运用左手定则判定洛伦兹力的方向？

2. 如果一个带电粒子通过某一区域时，能否通过粒子有无偏转来判断该区域有无磁场？为什么？

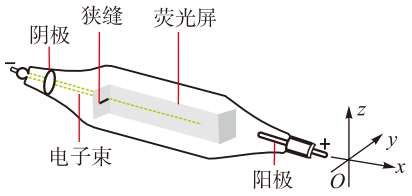
3. 安培力与洛伦兹力有哪些相同之处？有哪些不同之处？

4. 带电粒子满足什么条件时在匀强磁场中做圆周运动？如何确定轨迹圆心的位置及半径的大小？做圆周运动的周期大小与哪些因素有关？

5. 回旋加速器中，初速度为零的带电粒子被加速的次数与最大动能之间存在着怎样的关系？

本章复习题

1. 如图所示是阴极射线管的示意图。接通电源后，带负电的电子由阴极沿 x 轴正方向射出，在荧光屏上会看到一条亮线。要使荧光屏上的亮线向下（z 轴负方向）偏转，则下列措施中可采用的（　　）



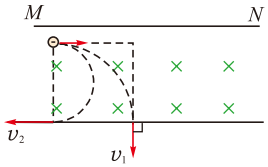
▲第1题图

A. 加一磁场，磁场方向沿 z 轴负方向
B. 加一磁场，磁场方向沿 y 轴正方向
C. 加一电场，电场方向沿 z 轴负方向
D. 加一电场，电场方向沿 y 轴正方向

2. 关于安培力和洛伦兹力，下列说法中正确的是（　　）
A. 洛伦兹力是磁场对运动电荷的作用，安培力是磁场对通电导线的作用
B. 洛伦兹力的方向与带电粒子运动方向有关，安培力的方向与电流的方向有关
C. 两种力的方向均可用左手定则判断
D. 洛伦兹力对运动电荷一定不做功，安培力是所有运动电荷所受洛伦兹力的总和，因此安培力也不做功

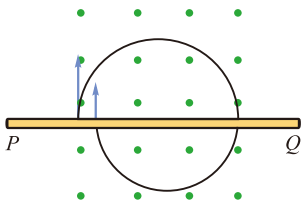
3. 电荷量为 $-q$ 的粒子，在匀强磁场中运动，下列说法中正确的是（　　）
A. 只要速度大小相同，所受的洛伦兹力就相同
B. 如果把 $-q$ 改为 $+q$，速度反向，大小不变，则洛伦兹力大小、方向均不变
C. 只要带电粒子在磁场中运动，它一定受到洛伦兹力作用
D. 带电粒子受到的洛伦兹力越小，则该磁场的磁感应强度越小

4. 如图所示，两电子从同一处先后沿垂直于磁场的方向（MN 方向）射入两平行平面间的匀强磁场区，它们分别以 v_1、v_2 的速率射出磁场，求 v_1 与 v_2 之比及通过匀强磁场所需时间之比。



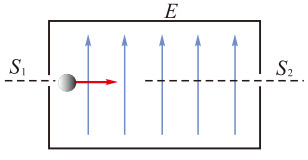
▲第4题图

5. PQ 是匀强磁场里的一片薄金属片，其平面与磁场方向平行，一个粒子从某点以垂直于 PQ 的速度射出，动能是 E，该粒子在磁场中的运动轨迹如图所示。今测得它在金属片两边的轨道半径之比是 10∶9，若在穿越金属板的过程中粒子受到的阻力大小及电荷量恒定，则：
(1) 该粒子第一次穿过金属片，动能减少了多少？
(2) 该粒子最多能穿过金属片几次？



▲第5题图

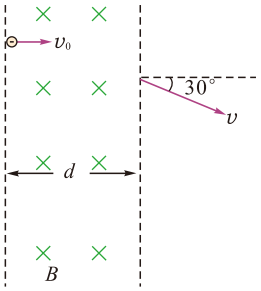
6. 如图所示，在两平行板间有电场强度为 E 的匀强电场，方向向上。一带电荷量为 q 的负离子（重力不计），垂直电场方向以速度 v 从缝 S_1 飞入两板间，为了使粒子沿直线飞出缝 S_2，应在垂直纸面加一个什么方向的磁场？其磁感应强度为多大？



▲第6题图

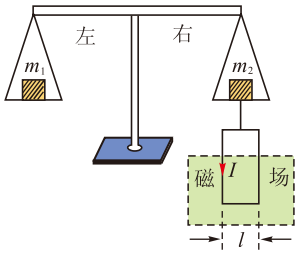
7. 如图所示，一束电子（电荷量为 e）以速度 v_0 垂直于磁场方向射入磁感应强度为 B、宽度为 d 的匀强磁场中，穿越磁场后出射时的速度方

向与电子原来入射方向的夹角是 30 °，则电子的质量是多大？穿越磁场的时间是多少？



▲ 第7题图

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



▲ 第8题图

（1）磁场方向是垂直纸面向里，还是向外？说明理由；

（2）求磁感应强度 B 的大小；

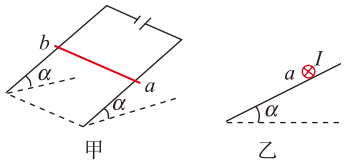
（3）仅仅使磁场反向和仅仅使电流方向变化，两者是否等效？

9. 如图甲所示，在水平地面上固定一对与水平面倾角为 α 的光滑平行导电轨道，轨道间的距离为 l，两轨道底端的连线与轨道垂直，顶端接有电源。将一根质量为 m 的直导体棒 ab 放在两轨道上，且与两轨道垂直。已知通过导体棒的恒定电流大小为 I，方向由 a 到 b，图乙为图甲沿 $a \to b$ 方向观察的平面图。若重力加速度为 g，在轨道所在空间加一竖直向上的匀强磁场，使导体棒在轨道上保持静止。

（1）请在图乙所示的平面图中画出导体棒受力的示意图；

（2）求出磁场对导体棒的安培力的大小；

（3）如果改变导轨所在空间的磁场方向，试确定使导体棒在轨道上保持静止的匀强磁场磁感应强度 B 的最小值及其方向。



▲ 第9题图



在法拉第多产生涯中，这一最重大的伟大发现不仅改变了人类对自然世界的观点，而且还通过新技术推进了人类的文明，随着时间的推移，电与磁相互渗透在称之为电磁学的学科中。很快，由在强大的磁场中旋转巨大的线圈所制成的发电机在庞大蒸汽机推动下，产生的电流给世界带来了光明，从而引起了一场新的技术革命。

——引自《力学以外的世界》

第二章

电磁感应及其应用

主题一　电磁感应的规律

- 楞次定律
- 法拉第电磁感应定律

主题二　电磁感应的应用

- 涡流　电磁阻尼　电磁驱动
- 自感

三峡发电站是我国最大的水电站，共安装有26台巨型发电机，总装机容量1820万千瓦。高铁是中国的名片，飞驰的高速列车由铁路两旁林立的输电线为它提供必需的电能。

三峡发电站的电是怎么发出的？这些电有什么特点？它又是怎么传输给高速行驶的列车的呢？这些都与电磁感应密切相关。

电磁感应现象的发现具有重大的意义，这不仅在于它是19世纪物理学最伟大的成就，也不仅在于它揭示了电、磁现象之间的相互联系和转化，为能量的传递与利用开辟了新的方法，以及依据它而建立的一个新的学科，更在于它的发现过程所呈现的人文精神，及其为物理学所提供的经典的物理思维过程和实验方法。

电磁感应现象是电磁学的重大发现之一，它进一步揭示了电与磁的密切联系，使利用磁场将其他形式的能量转化为电能成为可能。那么感应电流的方向如何判断？感应电动势的大小由什么决定？电磁感应有哪些应用？在本章的学习过程中，同学们会逐一弄清楚这些问题，并理解这些规律的内在含义。

1 楞次定律

我们已经知道，只要穿过闭合导体回路的磁通量发生变化，闭合导体回路就有感应电流产生。那么感应电流的方向由哪些因素决定？怎样判断感应电流的方向呢？

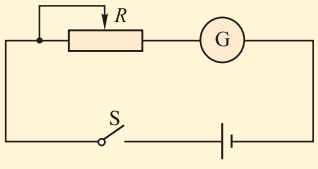
我们利用几个实验来研究一下这个问题。

右手定则

观察思考

我们可以通过实验观察导体切割磁感线运动的情况下感应电流的方向。

1. 如图 2-1-1 所示，把电源、滑动变阻器、开关和一个零刻度线在刻度盘中央的电流表串联成实验电路。实验中改变电源正、负极与电流表接线柱的连接，由此识别电流表的指针偏转方向与输入电流方向之间的关系。



▲ 图2-1-1

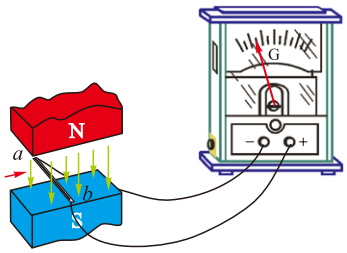
电流流入电流表情况	电流表指针偏转方向
电流从电流表左接线柱流入	
电流从电流表右接线柱流入	

2. 按图 2-1-2 所示连接成电路。图中 G 为电流表，*ab* 为一段直导线，观察导体 *ab* 在匀强磁场中向左和向右运动时电流表指针偏转的方向；然后再将匀强磁场的方向反过来，重复上述过程。分析磁场方向、导体切割磁感线的运动方向和感应电流方向之间的关系。

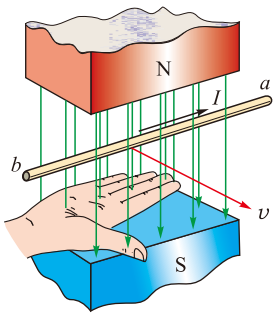
在图 2-1-2 中，导体 *ab* 向右运动时，回路中的电流沿顺时针方向，在 *ab* 段电流从 *b* 流向 *a*；导线 *ab* 向左运动时，回路中的电流沿逆时针方向，在 *ab* 段电流从 *a* 流向 *b*。

对于这种情况，可以用**右手定则**（right-hand rule）判断导线切割磁感线产生感应电流的方向：伸开右手，使大拇指与其余并拢的四指垂直，并与手掌在同一平面内，让磁感线垂直从手心穿入，并使拇指指向导线运动的方向，这时四指所指的方向就是感应电流的方向，如图 2-1-3 所示。这种情况下，导线 *ab* 就是电路中的电源，*ab* 中的电流方向，也就是电动势的方向。

右手定则只适用于判定导线切割磁感线运动而产生感应电流的情况，还需要继续寻找更普遍的判定感应电流方向的方法。



▲ **图2-1-2**　闭合电路的部分导体在磁场中线左右运动



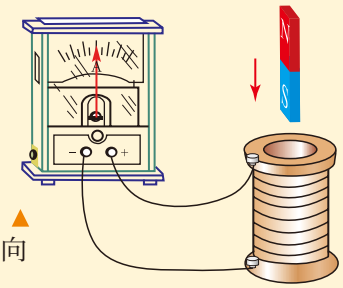
▲ **图2-1-3**　右手定则

楞次定律

我们可以对磁场变化产生电流的情况进行实验研究。

实验探究

1. 如图 2-1-4 所示，将条形磁铁插入、拔出螺线管时，观察电流表指针偏转的方向，由此确定螺线管中感应电流的方向，并把结果与分析填入表 2-1-1 中。

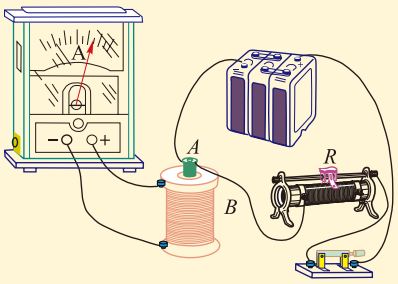


▲ **图2-1-4**　通过实验探究感应电流的方向

表2-1-1

操作	S极向下插入	S极向上拔出	N极向下插入	N极向上拔出
原磁场（B_0）的方向				
原磁场（B_0）穿过螺线管磁通量的增减				
电流表指针偏转方向				
螺线管线圈绕向，感应电流方向图示				
螺线管内感应电流的磁场（B'）的方向				

2. 如图 2-1-5 所示，把线圈 B 与电流表连接成闭合回路，把线圈 A 与电池、开关及滑动变阻器连接起来，并把线圈 A 插入线圈 B 中。在闭合开关、断开开关，移动滑片使滑动变阻器 R 阻值变大、变小的过程中，均可观察到电流表指针发生偏转，说明线圈 B 中产生了感应电流。



▲ 图2-1-5

3. 根据电流表指针偏转的方向，可以确定 B 线圈中感应电流的方向。记下线圈 A、B 的绕线方向。按表 2-1-2 所示进行操作，并把所得结果填入表内的相关栏目中。

表2-1-2

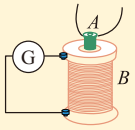
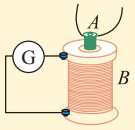
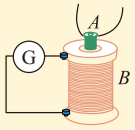
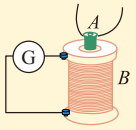
操作	开关闭合	开关断开	变阻器R变大	变阻器R变小
A线圈内部的磁场（B_0）方向				
穿过B线圈的磁通量的增减				
电流表指针偏转方向				
B线圈中感应电流方向				
B线圈内部感应电流的磁场（B'）方向				

表 2-1-1 和表 2-1-2 两个实验的结果表明：感应电流的方向与原磁场的方向及原磁场穿过线圈的磁通量增减有关。当引起感应电流的原磁场（B_0）穿过螺线管的磁通量增加时，感应电流的磁场（B'）方向与原磁场（B_0）方向相反；当引起感应电流的原磁场（B_0）穿过螺线管的磁通量减小时，感应电流的磁场（B'）方向与原磁场（B_0）方向相同。

物理学家楞次（H.F.E.Lenz，1804—1865）认真研究了各种情况，总结得出了关于感应电流方向的规律，后人把它称为**楞次定律**（Lenz law）：

感应电流具有这样的方向，即感应电流的磁场总是要阻碍引起感应电流的磁通量的变化。

由于回路上有电阻，感应电流产生后，要消耗电能，转化为焦耳热。那么消耗的电能从何而来呢？

在表 1 的实验中，我们插入或抽出磁铁时要克服阻

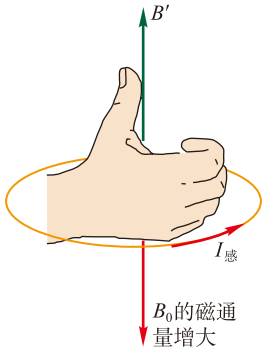
力做功（插入时要克服斥力，抽出时要克服吸力），做功的过程要消耗能量，转化为回路中的电能。所以楞次定律是能量守恒定律在电磁感应中的具体表现。

讨论交流

怎样理解楞次定律中“阻碍”两个字的含义？可以从相对运动的角度或能量转化的角度等谈谈你的看法。

我们可以把利用楞次定律判断感应电流（感应电动势）方向的方法归纳为 5 个步骤：

1. 明确研究对象是哪一个闭合回路。
2. 明确引起电磁感应的、穿过该闭合回路的磁场（B_0）的方向。
3. 确定原磁场（B_0）穿过该闭合回路的磁通量是增大还是减小。
4. 根据楞次定律，确定该闭合回路内感应电流的磁场（B'）的方向。
5. 利用安培定则（图 2-1-6）判断能够形成上述磁场（B'）的感应电流的方向。



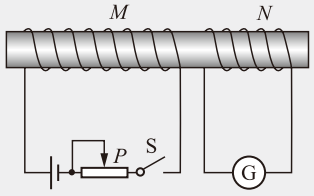
▲ 图2-1-6　感应电流方向的判断

楞次定律的应用

下面举例说明怎样应用楞次定律。

例题示范

问题1　在图 2-1-7 中，线圈 M 和线圈 N 绕在同一铁芯上，线圈 M 的电路中串联着电池、开关与滑动变阻器，线圈 N 的电路中串联着电流表。若电流从左侧（右侧）流入电流表则电流表指针向左（右）偏转，根据楞次定律



▲ 图2-1-7

判定以下几个过程中电流表指针的偏转情况。

（1）开关 S 闭合后的短暂过程；

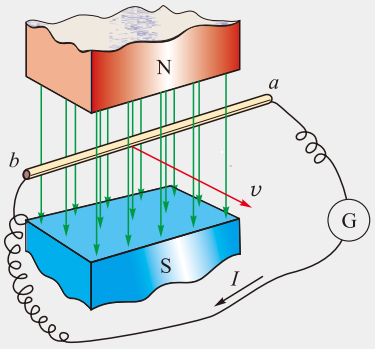
（2）开关 S 闭合后，滑动变阻器滑片 P 向左滑动的过程。

分析 由于线圈 M 和 N 绕在同一铁芯上，当线圈 M 中电流变化时，铁芯中的磁场随之发生变化，穿过线圈 N 的磁通量变化，从而在线圈 N 与电流表构成的闭合回路中产生感应电流。弄清线圈 N 内部的原磁场方向，以及穿过线圈 N 的磁通量是增加还是减少，是判断电流表中电流方向的两个关键要素。

解 （1）在开关 S 闭合后的短暂过程中，线圈 M 中的电流从无到有，用安培定则判定，铁芯中水平向右的磁场增大，穿过线圈 N 的磁通量增加，由楞次定律知线圈 N 内部由感应电流产生的磁场方向向左，再由安培定则可判定感应电流流过电流表使其指针向左偏转。

（2）开关闭合后，滑动变阻器滑片 P 向左滑动的过程中，其电阻变大，电流减小，故其在铁芯中水平向右的磁场减小，穿过线圈 N 的磁通量减小，由楞次定律知线圈 N 内部由感应电流产生的磁场方向向右，感应电流使得电流表指针向右偏转。

问题2 在图 2-1-8 中，导体 ab 与电流表用导线连接成闭合回路，ab 沿图示方向运动，请用楞次定律判定导体 ab 中的感应电流方向。



▲ **图2-1-8** 右手定则与楞次定律一致

分析 把导体 ab 与电流表及导线组成的闭合导体回路作为研究对象，明确穿过该回路的原磁场方向以及穿过它的磁通量是增加还是减少，就可以运用楞次定律判定感应电流的方向。

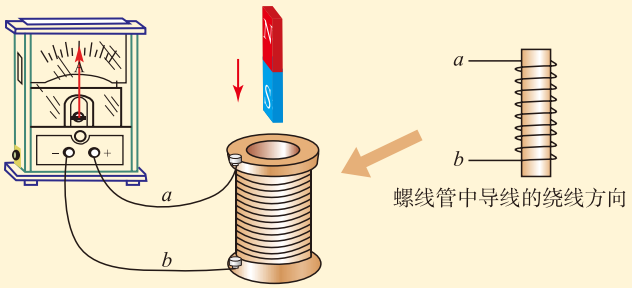
解 穿过该闭合回路的原磁场方向向下，且磁通量在逐渐减少。根据楞次定律判定，穿过该回路的感应电流的磁场方向向下，用安培定则判定该回路中感应电流方向为顺时针方向（俯视），即导体 ab 中感应电流的方向为从 b 到 a。

拓展 用楞次定律所得的结果与用右手定则判定导体 ab 中感应电流的方向一致，说明右手定则与楞次定律并无矛盾。一般来说，当闭合回路中有部分导体在做切割磁感线的运动时，也可以运用楞次定律判定感应电流的方向，但可能运用右手定则更为简便。

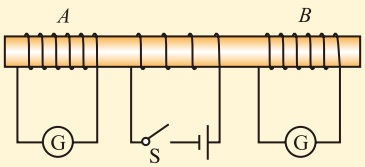
自我评价

1. 如图 2-1-9 所示，将条形磁铁插入螺线管中，回路中产生了感应电流，使电流表指针偏转，试判断电流表指针的偏转方向。

2. 如图 2-1-10 所示，当 S 接通或断开时，线圈 A、B 中分别产生了什么方向的感应电流？

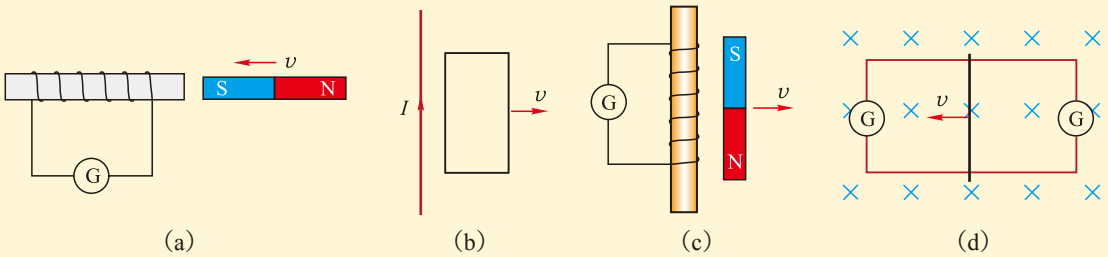


▲ 图2-1-9



▲ 图2-1-10

3. 判断如图 2-1-11 所示的各种情况下线圈内感应电流的方向。

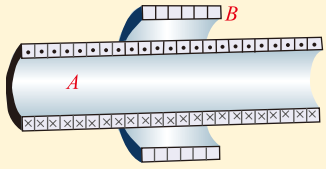


(a)　(b)　(c)　(d)

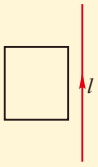
▲ 图2-1-11

4. 图 2-1-12 表示一对同轴螺线管，图中线圈 A 中的电流方向用“·”和“×”表示，请画出两条线圈 A 磁场的磁感线，再分析如果线圈 A 中的电流增大或减小，则线圈 B 中的感应电流分别为什么方向（用“·”或“×”表示）。

5. 在线框附近放置一根与其共面的长直通电导线，电流方向如图 2-1-13 所示。当线圈中产生顺时针方向的感应电流（垂直纸面向里看）时，导线中的电流如何变化？



▲ 图2-1-12　一对同轴螺线管



▲ 图2-1-13

2 法拉第电磁感应定律

楞次定律解决了电磁感应现象中感应电流方向的问题，那么感应电流的大小由什么确定？它又存在什么规律呢？

感应电动势

讨论交流

我们已经知道，电路中存在稳定电流的条件是要有电源提供电动势，即有非静电力做功，把其他形式的能量转化为电能。在电磁感应现象中，穿过闭合回路的磁通量发生变化，回路中就有感应电流产生，这是否说明在闭合回路中，也有电动势存在呢？

穿过闭合回路的磁通量发生了变化，闭合回路中就会产生感应电流，这说明电路中一定存在一种由电磁感应产生的电动势，这种电动势叫作**感应电动势**（induction electromotive force）。

在直流电路中，电流的大小由电源的电动势和电路的电阻决定。同样，在电磁感应现象中，闭合回路中的感应电流也由感应电动势和回路的电阻决定。如果回路没有闭合，只要穿过回路的磁通量发生变化，虽然没有感应电流产生，但感应电动势依然存在。可见，感应电动势是比感应电流更为重要的物理概念。

电磁感应定律

对于同一个闭合回路，由于回路的电阻保持不变，因

此感应电流与感应电动势成正比，我们往往通过测量感应电流的大小间接地了解感应电动势的大小。

观察思考

如图 2-2-1，把磁铁的某一磁极向线圈中插入、从线圈中抽出，或静止地放在线圈中。观察电流表指针的变化，把观察到的现象记录在下表的表格中。

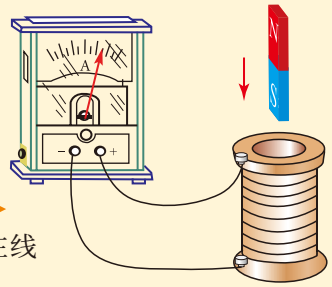


图2-2-1　磁铁插入、抽出或停在线圈中，电流表指针摆动幅度如何？

磁铁的动作	指针摆动幅度的大小	磁铁的动作	指针摆动幅度的大小
N极缓慢插入线圈		S极缓慢插入线圈	
N极快速插入线圈		S极快速插入线圈	
N极停留在线圈中		S极停留在线圈中	
N极缓慢从线圈中抽出		S极缓慢从线圈中抽出	
N极快速从线圈中抽出		S极快速从线圈中抽出	

你能否从实验记录中，找出影响感应电流大小的因素？利用我们学习的速度与加速度的定义的方式表述它。

在上述实验中，我们快速改变穿过线圈的磁通量时，电流表指针偏转角度大，说明感应电流大；缓慢改变线圈的磁通量时，电流表指针偏转角度小，说明感应电流小。也就是说，感应电动势的大小与磁通量的变化快慢有关。精确的实验表明：

电路中感应电动势的大小，跟穿过这一电路的磁通量的变化率成正比。这一规律被后人称为**法拉第电磁感应定律**（Faraday law of electromagnetic induction）。

如果 t_1 时刻穿过闭合回路的磁通量为 Φ_1，t_2 时刻穿过闭合回路的磁通量为 Φ_2，则在时间 $\Delta t=t_2-t_1$ 内，磁通量的变化 $\Delta\Phi=\Phi_2-\Phi_1$，在 Δt 足够短的情况下，磁通量的变化率就是 $\dfrac{\Delta\Phi}{\Delta t}$。用 E 表示闭合回路中的感应电动势，那么法拉第电磁感应定律就可以表示为

$$E = k\frac{\Delta\Phi}{\Delta t}$$

其中 k 为比例常数。在国际单位制（SI）中，电动势的单位是伏（V）、磁通量的单位是韦伯（Wb）、时间的单位是秒（s），这时 k=1，则上式可写成

$$E = \frac{\Delta\Phi}{\Delta t} \quad (1)$$

虽然（1）式不是法拉第亲自给出的，但由于他在电磁学领域的重大贡献，人们将这一荣誉归于他。

实际应用中，为了获得较大的感应电动势，常常采用多匝线圈。如果闭合电路是一个 n 匝线圈，且穿过每匝线圈的磁通量总是相同的，由于这样的线圈可以看成是由 n 个单匝线圈串联而成的，所以整个线圈中的感应电动势是单匝线圈的 n 倍，即

$$E = n\frac{\Delta\Phi}{\Delta t} \quad (2)$$

（1）式和（2）式一般只表示感应电动势的大小，不涉及正负，计算时 $\Delta\Phi$ 应取绝对值。方向由楞次定律判断。

例题示范

问题 设图 2-2-1 中线圈的匝数为 100 匝，假设任何时刻穿过各匝线圈的磁通量都相同。在 0.6 s 内把磁体的一极插入线圈中，这段时间内穿过每匝线圈的磁通量由 0 增加到 1.8×10^{-5}Wb，这一过程中线圈产生的感应电动势多大？

分析 由题意知，“这一过程”中穿过每匝线圈的磁通量由 0 增加到 1.8×10^{-5}Wb，所用的时间 0.6 s，即 $\Delta\Phi = 1.8\times10^{-5}\text{Wb} - 0 = 1.8\times10^{-5}\text{Wb}$，$\Delta t$=0.6 s，可以直接运用法拉第电磁感应定律求得感应电动势的大小。

解 根据法拉第电磁感应定律，100 匝线圈产生的感应电动势大小为

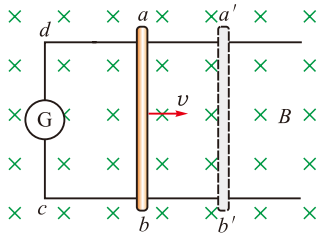
$$E = n\frac{\Delta\Phi}{\Delta t} = 100\times\frac{1.8\times10^{-5}}{0.6}\text{V} = 3\times10^{-3}\text{V}$$

拓展 实验操作过程中，磁通量的变化不可能是完全均匀的。可能有时快些，有时慢些，因此我们在此题算出的磁通量的变化率实际上是这段时间内变化率的平均值，所求的感应电动势也是这段时间内感应电动势的平均值。

导线切割磁感线的感应电动势

图 2-1-2 中的导体切割磁感线运动时，感应电动势跟哪些因素有关呢？

我们用图 2-2-2 所示的情景来讨论这一问题。图中矩形金属线框 $abcd$ 处于磁感应强度为 B 的匀强磁场中，线框平面跟磁感线垂直，ab 边以速度 v 在线框平面内向右运动。设 cd 的边长为 L，在 Δt 时间内 ab 边由原来的位置移到 $a'b'$，根据法拉第电磁感应定律 $E=\dfrac{\Delta\Phi}{\Delta t}$，我们可以得到闭合回路中的感应电动势



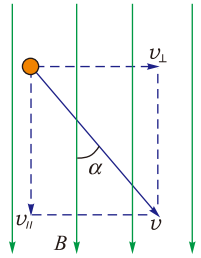
▲ 图2-2-2　导体做切割磁感线运动

$$E=\frac{B\Delta S}{\Delta t}=\frac{BLv\Delta t}{\Delta t}=BLv$$

当导体运动速度方向与磁场方向有一夹角 α（图 2-2-3）时，我们可以将速度分解为垂直和平行于磁场方向的两个分量，平行分量不产生感应电动势，垂直分量为 $v_\perp=v\sin\alpha$，产生的感应电动势大小为

$$E=BLv\sin\alpha$$

在国际单位制（SI）中，以上两式中 E、B、L、v 的单位分别是伏特（V）、特斯拉（T）、米（m）和米每秒（m/s）。



▲ 图2-2-3　导体运动速度不垂直于磁场方向

例题示范

问题　在图 2-2-2 中，设匀强磁场的磁感应强度 $B=0.20\ \mathrm{T}$，光滑导轨的宽度 $L=0.30\ \mathrm{m}$，导体棒 ab 电阻 $R=0.50\ \Omega$（其余电阻不计），向右匀速运动的速度 $v=5.0\ \mathrm{m/s}$，求：

（1）感应电动势的大小；（2）感应电流的大小；（3）使导体棒 ab 保持向右匀速运动所需施加的外力大小和方向；（4）外力做功的功率；（5）感应电流的功率。

分析　图 2-2-2 中，导体棒向右垂直切割磁感线，导体棒就成了“电源”，它和线框及电流表构成闭合回路，产生感应电流。从能量的角度分析，外力做功把其他形式的能转化为电能，当电流通过电阻时，电能又转化为内能。

解　（1）导体棒运动的过程中，由法拉第电磁感应定律得，导体棒产生的感应电动势

$$E = BLv = 0.20\times0.30\times5.0\ \text{V} = 0.30\ \text{V}$$

（2）由闭合电路欧姆定律知，回路中的感应电流

$$I = \frac{E}{R} = \frac{0.30}{0.50}\text{A} = 0.60\text{A}$$

（3）因为导体棒匀速运动，外力与安培力平衡，所以外力大小为

$$F = ILB = 0.60\times0.30\times0.20\text{N} = 0.036\text{N}，\text{方向向右}$$

（4）外力做功的功率

$$P_{外} = Fv = 0.036\times5.0\ \text{W} = 0.18\text{W}$$

（5）感应电流做功的功率

$$P_{电} = I^2R = 0.60^2\times0.50\ \text{W} = 0.18\ \text{W}$$

拓展 想一想，为什么外力做功的功率 $P_{外}$ 会等于感应电流做功的功率 $P_{电}$？若改变题中条件，能使这两个功率不相等吗？

在本题中，产生的电能是通过外力克服安培力做功消耗的机械能转化而来的，外力做了多少功，就有多少电能产生。而这些电能又通过感应电流做功，转化为其他形式的能量，由于这个电路中只有电阻，电能全部转化为内能，即焦耳热，因此外力做功的功率等于电路中产生的焦耳热的功率。

如果 ab 棒做加速运动，则外力做功消耗的能量有一部分转化为棒的动能，外力做功的功率 $P_{外}$ 就会大于电流做功的功率 $P_{电}$。

自我评价

1. 在磁感应强度为 0.4 T 的匀强磁场中，长度为 25 cm 的导线以 6 m/s 的速度做切割磁感线运动，运动方向跟导线本身垂直，也跟磁感线垂直。求导线上产生的感应电动势的大小。

2. 有一个 1000 匝的线圈，在 0.4s 内穿过每匝线圈的磁通量从 0.02 Wb 增加到 0.09 Wb，求线圈中的感应电动势。如果线圈的电阻是 10Ω，把它跟一个电阻值为 990Ω 的电阻串联组成闭合回路时，通过该电阻的电流是多大？

3. 下面几个计算磁通量变化量的公式，分别对应什么情形？请加以说明。

（1）$\Delta\Phi = L^2\Delta B$ 或 $\Delta\Phi = L_1L_2\Delta B$；

（2）$\Delta\Phi = \pi r^2\Delta B$；

（3）$\Delta\Phi = BLv\Delta t$；

（4）$\Delta\Phi = \frac{1}{2}Br^2\omega\Delta t$。

4. 设人造地球卫星在赤道平面内绕地球做匀速圆周运动，它的金属表面是否会由于地磁场的感应而产生电流？如果它是绕地球通过南北极的平面运转，情况又怎样？如果有感应电流，又会对卫星的运行产生什么影响？（忽略磁偏角的影响）

5. 磁通量变化率的单位为 Wb/s，电动势的单位为 V。试证明：1 Wb/s = 1 V。

发展空间

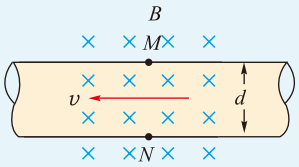
课外阅览

电磁流量计

电磁流量计是 20 世纪五六十年代随着电子技术的发展而迅速得以应用的新型流量测量仪表，其外形如图 2-2-4 所示，其原理如图 2-2-5 所示。



▲ 图2-2-4　电磁流量计



▲ 图2-2-5　电磁流量计的原理

电磁流量计由磁路系统、测量导管、电极、外壳、衬里和转换器等部分组成，它是电磁感应原理的具体应用。

磁路系统：其作用是产生均匀的稳定或交变磁场。稳定磁场用永久磁铁来实现，其优点是结构比较简单，受交变磁场的干扰较小，但由于导管内的电解质液体极化，导致两电极之间内阻增大，严重影响仪表正常工作。而且当管道直径较大时，大体积的永久磁铁十分笨重，经济上不合算，所以电磁流量计一般采用交流电激励的交变磁场。

测量导管：其作用是让被测导电性液体通过。为了不使磁感应强度受到影响，测量导管由不导磁、低导电率、低导热率和具有一定机械强度的材料制成，一般选用不导磁的不锈钢、玻璃钢、高强度塑料、铝等。

电极：其作用是引出跟被测量成正比的感应电动势信号。电极一般用不导磁的不锈钢制成，且被要求与衬里齐平，以便流体通过时不受阻碍。它的安装位置宜在管道的垂直方向，以防止沉淀物堆积在其上而影响测量精度。

外壳：由铁磁材料制成，是励磁线圈的外罩，并隔离外磁场的干扰。

衬里：在测量导管的内侧有一层完整的电绝缘衬里。它直接接触被测液体，其作用是增加测量导管的耐腐蚀性，防止感应电动势被金属测量导管管壁短路。衬里材料多为耐腐蚀、耐高温、耐磨的聚四氟乙烯塑料、陶瓷等。

转换器：由液体流动产生的感应电动势信号十分微弱，受各种干扰因素的影响很大，转换器的作用就是将感应电动势信号放大，转换成统一的标准信号并抑制主要的干扰信号。

电磁流量计的管道内没有任何阻碍流体流动的结构，所以常被用来测量高黏度及强腐蚀性流体的流量。它的优点是测量范围宽、反应快、易与其他自动控制装置配套使用。

物理在线

地球周围存在着磁场，那么我们能不能利用地磁场发电呢？其中的原因是什么？请通过上网查询等方式收集资料，了解这一问题的答案。

3 涡流 电磁阻尼 电磁驱动



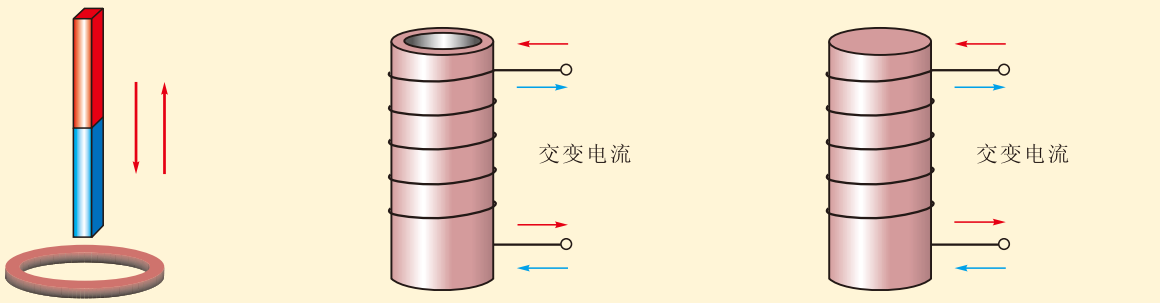
▲ 图2-3-1 金属探测仪

安保检查不仅是海关、机场、高铁、汽车站等场所的重要安保环节，而且还成了高考中维护考场纪律的手段。图 2-3-1 是对人身进行安保检查的手持式金属探测仪。这些探测仪为什么能检测出隐藏的金属器件呢？通过本节的学习你就能明白其中的道理。

涡流

讨论交流

在如图 2-3-2 所示的铜环、铜管、铜柱上会出现感应电流吗？你能用图把感应电流示意性地画出来吗？



(a) 磁铁插入或拔出铜环 (b) 铜管外缠上绝缘导线，并通以交变电流 (c) 铜柱外缠上绝缘导线，并通以交变电流

▲ 图2-3-2 涡电流的形成

在（a）图中，当磁铁插入、拔出铜环时，穿过铜环的磁通量发生了变化，铜环中将产生沿着铜环的环形感应电流。

在（b）图中的铜管的横截面是圆环，因此，铜管可以看成由许多圆环组成。绕在管外的线圈通上交流电以后，穿过每个圆环的磁通量都发生了变化，都产生了环形感应电流，这样整个铜管内部都有环形感应电流存在。

在（c）图中，铜柱又可以看成由许多半径逐渐变化

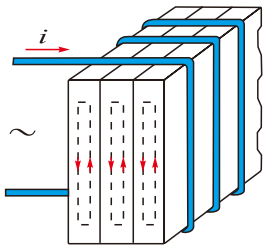
的铜管组成，每个铜管都能产生感应电流，因此整个铜柱都有沿着同一方向环绕的环形电流。

由于电磁感应，在大块金属中会形成感应电流，电流在金属块内组成闭合回路，很像水的漩涡，因此叫作**涡电流**（eddy current），简称涡流。

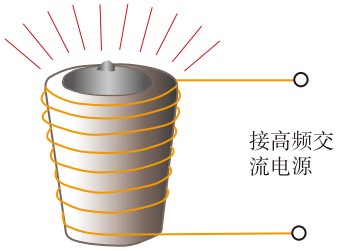
大块金属沿涡流路径的电阻一般很小，不大的感应电动势就能在它内部形成强大的涡电流，释放出大量的焦耳热。涡流的这种热效应对于通交变电流、有铁芯的装置如变压器、电动机等的运行是有害的，这是由于涡流产生的热不但会消耗很多能量，而且会使铁芯的温度升高，缩短线圈绝缘材料的寿命甚至酿成灾祸。为了降低涡流造成的损耗，变压器和电机中的铁芯都不用整块金属，而是用许多相互绝缘的薄硅钢片叠合而成的，如图 2-3-3 所示。

但是，事物都具有两面性，涡流有时有害，要加以限制，有时又可以利用，比如高频感应炉和电磁炉。

图 2-3-4 是冶炼金属的高频感应炉的示意图，这种电炉利用涡流熔化金属。冶炼锅内装入被冶炼的金属，让高频交流电通过炉外缠绕的线圈，被冶炼的金属内部就产生很强的涡流，从而产生大量的热使金属熔化。这种方法速度快，温度容易控制，能避免有害杂质混入被冶炼的金属中，适于冶炼特种合金和特种钢。



▲ **图2-3-3**　片状铁芯



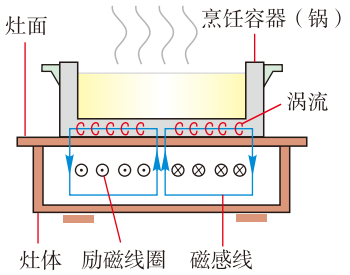
▲ **图2-3-4**　高频感应炉

观察思考

如图 2-3-5 所示，将铁制平底锅放在电磁炉的绝缘面板上，接通电源，锅体的温度会很快升高，烹饪出可口的菜肴。这是怎么回事呢？



图2-3-5　放在电磁炉上的铁制锅



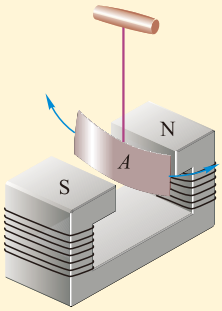
▲ 图2-3-6 电磁炉

电磁炉的结构如图 2-3-6 所示，当灶内的励磁线圈通有交变电流时，形成交变磁场，交变的磁感线从铁磁材料制成的烹饪锅的锅底穿过，使锅底产生涡流，从而发热。电磁炉在热量转化过程中的损耗低，热效率可以高达 83%，耗电只有普通电炉的 63%。此外，它还具有使用方便、安全等优点。

电磁阻尼和电磁制动

当闭合电路中的一部分导体在磁场中做切割磁感线的运动时，导体中会产生感应电流，感应电流使导体受到安培力，安培力总是阻碍导体的运动，这种现象叫作**电磁阻尼**（electromagnetic damping）。

活动



如图 2-3-7 所示，把金属制成的摆，悬挂在电磁铁的两极之间，并使之摆动。当电磁铁不通电时，摆的运动能维持较长时间；电磁铁通电后，摆动很快就停下来了，这是为什么呢？

图2-3-7 磁场中的金属摆

摆在不均匀的磁场中运动会产生涡流。根据楞次定律，这种涡流产生的磁场总是要阻碍摆在磁场中的运动，因此在这种阻力的作用下，摆会很快停下来。

在磁电式电表中，一般将线圈绕在一个轻铝框上，这样线圈通电后受力，带动指针和铝框一起转动，铝框内产生涡流，在电磁阻尼的作用下，线圈很快停止摆动，使指针能很快稳定指到读数位置上。如果电表不用时，特别是在携带搬运过程中，为了减少线圈与指针的剧烈摆动，可以用导线将正、负接线柱短路。这样，线圈形成的闭合回路在磁场中摆动时出现感应电流，产生电磁阻尼，既可避免指针因摆动剧烈而变形，又减小轴承处的磨损。

电动列车在铁轨上高速行驶，到达停靠站点时要进行制动，如果采用传统的机械制动，制动片与车轮的摩擦会产生大量热量，而且部件磨损严重，如果采用电磁制动则优点多多。所谓电磁制动，与电磁阻尼本质上是相同的，即在要进行制动时，电动机与电源断开，并把电动机的线圈与制动电路连接成闭合回路，列车前进时带动电动机线圈转动，而产生感应电流，磁场对它的安培力起着制动的作用，列车前进的动能转化为电能，不但减少了机械磨损，而且还可以用这部分能量给蓄电池充电。目前电动列车已经普遍使用了电磁制动这项技术。

电磁驱动

讨论交流

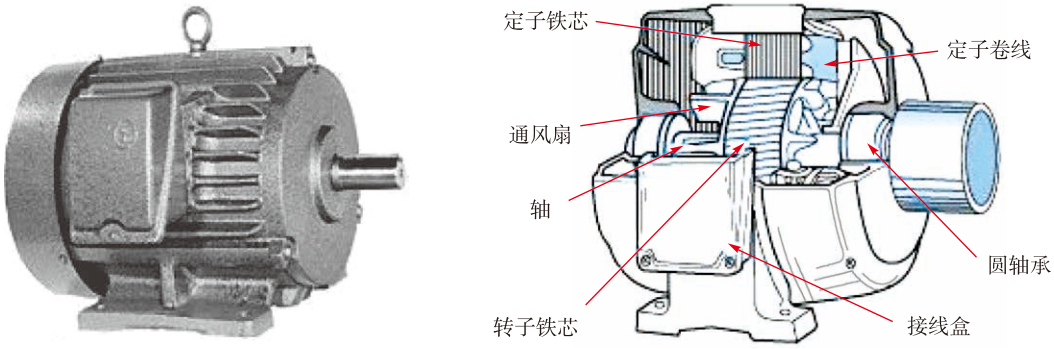
如图 2-3-8 所示，把蹄形磁体的两极靠近一个金属圆盘，但不接触。当磁体绕轴转动时，圆盘也绕轴转动起来。为什么会发生这样的现象？



▲ 图2-3-8　电磁驱动

在图 2-3-8 中，当磁体转动起来后，圆盘中产生涡流，磁场对此涡流所施加的安培力阻碍它与磁体的相对运动，因而圆盘跟着磁体运动起来（但转速要低于磁体的转速），这种感应电流受到安培力使物体运动的现象称为电磁驱动。

感应电动机是应用电磁驱动的一个典型实例。如图 2-3-9 所示为常用交流感应电动机的外形和内部结构，它由定子和转子两大部分组成，定子铁芯上嵌有线圈，通有三相交流电（或单相但经过裂相后的交流电），在其内部产生旋转磁场；转子铁芯的边缘有一排孔洞，嵌入铜条，铜条的两端用短路环焊接起来，形成如“鼠笼”的形状，它起着线圈的作用。在旋转磁场作用下，“鼠笼”中产生感应电流，它受到磁场的安培力作用随磁场的旋转而转动



（a）外观图　　（b）内部结构图

▲ **图2-3-9**　感应电动机

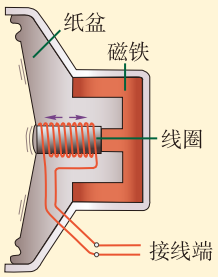
起来，只是比磁场的转速要低，因此这种电动机又称为“异步电动机”。这类电动机的结构简单、坚固耐用、运行可靠、效率较高、维护方便、价格低廉、维修成本低、使用寿命长，因此使用的场合非常广泛，在日常生活、工厂矿山、港口码头、广大农村等都能见到它的身影。

由于电磁驱动可以不直接接触，而解决空间的能量传递问题，具有可控性强、驱动力输出精度高、能量损耗小等优势，近年来在生物医学、农业、航空、航天、国防等许多领域有着日趋广阔的应用，并已成为高铁、磁悬浮等新技术应用的动力形式。

自我评价

1. 宇航员飞到某一个不熟悉的行星上，他们想用一个灵敏电流表和一个线圈测一下行星周围是否有磁场，应当怎么办？

2. 音箱设备中的扬声器，也可以作为话筒使用。小型扬声器的内部构造如图 2-3-10 所示，其中线圈松松地套在永磁铁的一个磁极上，它的左端与纸盆相连。当对着纸盆说话时，从线圈可以输出音频信号电流。请简要说明它的工作原理。

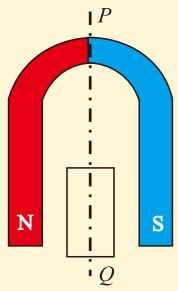


▲ **图2-3-10**　扬声器

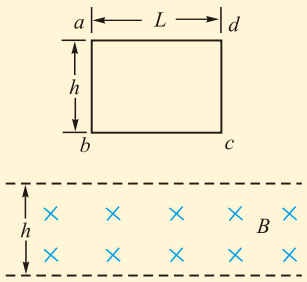
3. 如图 2-3-11 所示，把一个闭合线圈放在蹄形磁体的两极之间，蹄形磁体和闭合线圈都可以绕 PQ 轴转动。当转动蹄形磁体时，线圈也跟着转动起来，解释这种现象，并说明线圈转动的能量从何而来。

4. 如图 2-3-12 所示，电阻为 R 的矩形导线框 $abcd$，边长 $ab=h$，$ad=L$，质量为 m。此线框从某一高度处自由下落，通过一匀强磁场，磁场方向垂直纸面向里，磁场区域的宽度为 h。若线框恰好以恒定速度通过磁场，线框中产生的焦耳热等于多少？（不计空气阻力）

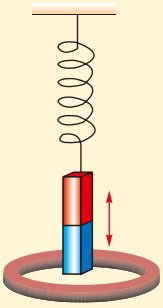
5. 一轻质弹簧上端固定，下端悬挂一条形磁铁。一次在磁铁下方固定一闭合线圈（图 2-3-13），另一次不放线圈，然后将磁铁下拉相同的距离后释放。你认为两次磁体振动的时间有区别吗？为什么？



▲ 图2-3-11



▲ 图2-3-12



▲ 图2-3-13

发展空间

课外阅览

摆式电涡流调谐质量阻尼器

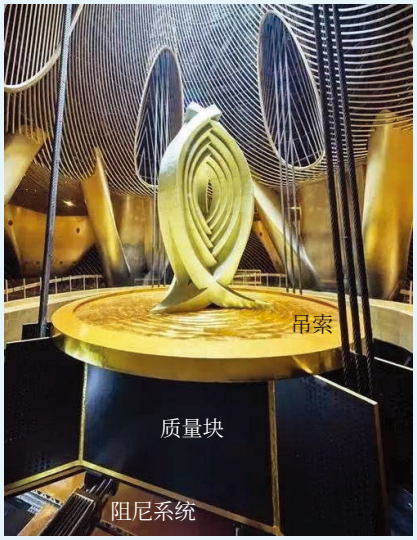
楼层越高风越大，超高层建筑的高层区域，风速比地面大 5 ~ 6 级。风速较大时，建筑会产生晃动，使人有眩晕的感觉。那么总高度达到 632 m 的上海中心大厦，有什么防震防晃的“秘密武器”呢？它就是世界首创的摆式电涡流调谐质量阻尼器（图 2-3-14）。

摆式电涡流调谐质量阻尼器位于上海中心大厦的 125 层，由吊索、质量块、阻尼系统、主体结构保护系统等四部分组成。质量块重达 1000 t，是目前世界上最重的摆式阻尼器质量块，它由 12 根长 25 m 的钢索吊住。在质量块下方，圆盘状的磁场源与金属板构成了电涡流阻尼系统。

质量块和吊索构成一个巨型复摆，建筑产生晃动时，它与主体结构做相同的晃动，由于阻尼系统的作用，这种晃动会在质量块中产生涡流，受到电磁阻尼作用，抵消大楼晃动，减少质量块的振幅，消耗风振输入的能量。

相比传统的阻尼器，这种新型阻尼器实现了阻尼系统与质量块的柔性连接、阻尼比的灵活调节，使阻尼性能大幅提高。

消能减振技术可用于磁悬浮工程、建筑、桥梁等领域，减轻建筑振动对建筑物产生的伤害。



▲ **图2-3-14**　阻尼器上部是一尊巨型雕塑——上海慧眼

4 自 感

前面我们学过，一个线圈通电或断电的瞬间，另一个与之靠近的线圈中会出现感应电流，这是互感现象。当一个线圈自身电流发生变化时，由此产生的磁场变化也会导致穿过线圈自身的磁通量改变，是不是在线圈自身回路中也要产生感应电动势和感应电流呢？

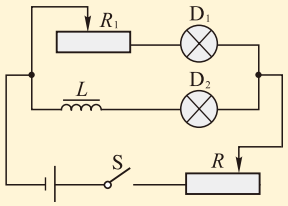
自感现象

观察思考

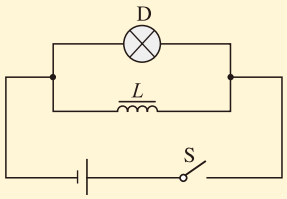
1. 如图 2-4-1 电路所示，先闭合开关 S，反复调节变阻器 R_1 及 R 的电阻，使同样规格的两个灯泡 D_1 和 D_2 都正常发光。然后断开开关 S。

再次闭合开关 S，重新接通电路。观察两个灯泡亮度的变化。用电磁感应的知识分析一下，实验现象说明了什么？

2. 如图 2-4-2 电路所示，把灯泡 D 和带铁芯的线圈 L 并联在直流电路中，接通电路。待灯泡 D 正常发光后，断开电路，观察灯泡 D 亮度的变化。



▲ 图2-4-1 通电时的自感



▲ 图2-4-2 断电时的自感

让我们对以上现象进行分析。在图 2-4-1 中重新接通电路以后，与电阻 R_1 串联的灯泡 D_1 立即正常发光，而与线圈 L 串联的灯泡 D_2 明显有个延时过程，即它慢慢地变亮，

最后亮度与 D_1 相同。这是因为接通电源后的短暂过程中，此支路的电流从零开始增大，根据楞次定律，穿过线圈自身磁通量的变化产生的感应电动势会阻碍电流的增加，所以通过灯泡 D_2 的电流逐渐增加，D_2 慢慢亮起来。

在图 2-4-2 中电流断开的瞬间，通过线圈中的电流突然减小，穿过线圈的磁通量迅速减小，因而在线圈中产生较大的感应电动势。尽管这时灯泡 D 与直流电源已经断开，但线圈 L 和灯泡 D 仍组成闭合回路，在这个回路中仍有感应电流存在，所以灯泡在短时间内继续发光，延迟熄灭。

图 2-4-1 中断电时，灯泡也会延迟熄灭，只是因为电源断开后，回路中有两个灯泡和一个电阻，所以感应电流迅速变小，灯泡延迟熄灭的现象不明显。

从以上实验可以看出，当导体线圈中电流发生变化时，导体线圈本身也产生感应电动势。

这种**由于导体线圈本身的电流发生变化而引起的电磁感应现象**，叫作**自感**（self-induction），在自感现象中产生的电动势叫作**自感电动势**（self-induction electromotive force）。

讨论交流

你能说出发生自感现象的过程中，能量是如何发生转化的吗？

在图 2-4-1 及图 2-4-2 闭合开关开始通电的过程中，通过线圈支路的电流激发了磁场，一部分电能转化为磁场能储存在线圈的磁场中。断开开关后，磁场能又转化为电能，通过灯泡释放出来，转化为热和光消耗掉。

自感系数

和一般的电磁感应一样，自感电动势跟穿过线圈的磁通量的变化率成正比。实验表明，在自感现象中磁通量的变化率又跟线圈中的电流的变化率成正比。因此，自感电动势 E_L 跟电流的变化率$\frac{\Delta I}{\Delta t}$成正比，即

自感系数是由线圈本身决定的，跟线圈的形状、直径、匝数等因素有关。横截面积越大，匝数越多，它的自感系数就越大。另外有铁芯时线圈的自感系数，比没有铁芯时要大得多。

$$E_L = L\frac{\Delta I}{\Delta t}$$

式中的比例系数 L 叫作线圈的**自感系数**（self-inductance），简称自感或电感。

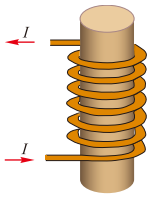
自感系数的单位是**亨利**，简称亨，符号是 H。如果通过线圈的电流在 1 s 内改变 1 A 时，产生的感应电动势为 1 V，这个线圈的自感系数就是 1 H。

因为亨利这个单位较大，常用的较小单位有毫亨（mH）和微亨（μH）。

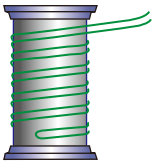
$1\text{mH} = 10^{-3}\text{H}$　　$1\mu\text{H} = 10^{-6}\text{H}$

自感现象在各种电器设备和无线电技术中有广泛的应用。自感线圈（图 2-4-3）是交流电路的重要元件。有时候，在电路中使用线圈而不希望发生自感现象，就采用双线绕法（图 2-4-4），避免它的产生。

为什么采用双线绕法的线圈不产生自感电动势?



▲ 图2-4-3　自感线圈

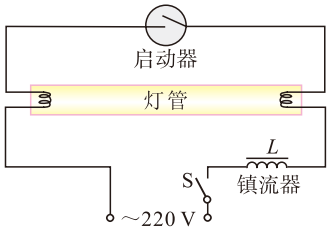


▲ 图2-4-4　双线绕法

自感现象的应用——日光灯

日光灯是常用照明灯具之一，它所消耗的电功率仅为相同亮度白炽灯的$\frac{1}{5}\sim\frac{1}{3}$，普通的日光灯由灯管、镇流器、启动器、导线和开关组成，如图 2-4-5（a）所示。

日光灯管的两端各有一段灯丝，灯管内充有微量的惰性气体和稀薄的汞蒸气，灯管内壁上涂有荧光粉。在高压激发下，两个灯丝之间的气体在导电时能发出紫外线，荧

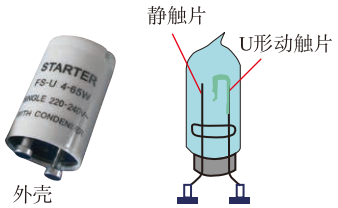


（a）日光灯电路



（b）镇流器

▲ 图2-4-5



▲ 图2-4-6　日光灯启动器

光粉受到紫外线的照射发出可见光。荧光粉的种类不同，发光的颜色也不一样。

启动器也称启辉器，是一个充有氖气的小玻璃泡，里面有两个电极，一个是固定不动的静触片，一个是用两种不同的金属薄片铆合而成的 U 形动触片，动、静片间不接触，有一小缝隙，见图 2-4-6。当开关闭合后，电源电压全部加在启动器的两极之间，使氖气放电而发出橙红色的辉光，辉光产生的热量使动触片膨胀变形，与静触片接触，把电路接通。灯管两端的灯丝开始发光，发光的灯丝可以对灯管内气体进行短暂的预热。启动器内动触片与静触片接触后，辉光放电消失，电流在启动器内产生的热量很少，所以动触片冷却收缩，使两个触片分离，电路自动断开。

镇流器是一个有铁芯的自感系数很大的线圈，如图 2-4-5（b）所示，在电路断开的瞬间，由于镇流器中的电流急剧减小，会产生很高的自感电动势，这个自感电动势与电源电压加在一起，形成一个瞬时高压，加在灯管两端，使灯管中的气体放电，日光灯被点亮。

带铁芯的镇流器加启动器，作为日光灯的附件使用多年，但由于体积大而笨重，现在已经逐渐被更轻巧的电子器件代替。日光灯本身也正处在被更节能环保高效的灯具替代的过程之中。

日光灯点亮后的工作电压需低于 220V，这时由于电感线圈对交流电有阻碍作用，镇流器又起着降压限流的作用，可以保证日光灯的正常工作。

自感现象也有不利的一面。在自感系数很大而电流又很强的电路（如大型电动机的定子绕组）中，切断电路的瞬间，由于电流在很短的时间内发生很大的变化，会产生很高的自感电动势，使开关的闸刀和固定夹片之间的空气电离而变成导体，形成电弧。这会烧坏开关，甚至危及工作人员的安全。因此，切断这类电路时必须采用特制的安全开关。常见的安全开关是将开关放在绝缘性良好的油中，防止电弧的产生，保证安全。

自我评价

1. 如图 2-4-7 所示，电灯 A 和 B 正常工作时的电阻与定值电阻的阻值相同，均为 R，L 是自感系数很大的线圈。当 S_1 闭合，S_2 断开且电路状态稳定时，A、B 亮度相同，再闭合 S_2，待电路状态再次达到稳定后将 S_1 断开，下列说法正确的是（　　）

A. B 灯立即熄灭

B. A 灯将比原来更亮一些后再熄灭

C. 有电流通过 B 灯，方向为 $c \rightarrow d$

D. 有电流通过 A 灯，方向为 $a \rightarrow b$

2. 日光灯电路主要由镇流器、启动器和灯管组成，在日光灯正常工作的情况下，以下说法正确的是（　　）

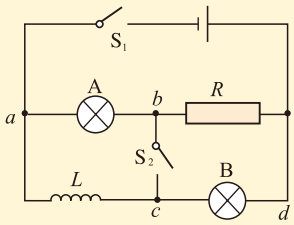
A. 灯管点亮发光后，启动器中两个触片是分离的

B. 灯管点亮发光后，镇流器与灯管串联，使灯管在较低电压下工作

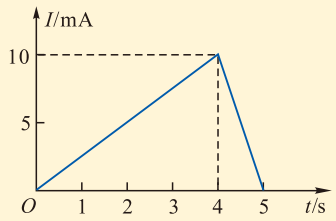
C. 镇流器维持灯管两端电压高于电源的电压，使灯管正常工作

D. 镇流器为日光灯的点亮提供瞬时高电压

3. 在自感系数为 100 mH 的线圈中，通入如图 2-4-8 中所示规律变化的电流。求在每个变化阶段线圈中自感电动势的大小，并说明前 4 s 和第 5 s 内电动势的方向有何关系。



▲ 图2-4-7



▲ 图2-4-8

反思 · 小结 · 交流

• 学后反思

1. 楞次定律的发现是概括和归纳思维方法应用的典型范例。在法拉第等人工作的基础上，楞次找到了感应电流的方向与穿过闭合回路磁通量的变化之间的联系，从而用简洁的语言描述了二者的关系。同样，法拉第电磁感应定律，不去寻找感应电流与磁通量变化率的关系，而是抓住感应电动势这一更本质的概念，建立了它与磁通量变化率的关系，用更简洁的数学语言建立了二者的定量关系。

2. 感应电流（涡流也是感应电流）的发现使我们的世界进入了电气化的时代，生产力得到极大提高，人民的生活和社会结构都发生了深刻的变化。但任何事物都有两面性，感应电流也有有害的一面。我们应设法防止或减轻危害，趋利避害永远是我们努力的方向。

• 自主小结

1. 判定感应电流的方向有哪些方法？

2. 哪些情况能使得穿过闭合回路的磁通量发生变化？

3．计算感应电动势的公式$E=n\frac{\Delta\Phi}{\Delta t}$和$E=BLv$，有什么区别与联系？

4．导线切割磁感线时产生感应电动势的公式中，有哪几个矢量？它们的方向满足怎样的关系？

5．满足什么条件，$\frac{\Delta\Phi}{\Delta t}$才能称为磁通量的变化率？如果不满足这个条件，公式$E=n\frac{\Delta\Phi}{\Delta t}$是否能用？如果能用，求出来的是什么？

6．什么是自感系数？它的大小与哪些因素有关？

7．通电自感和断电自感发生的过程中，自感电动势的方向与电流方向的关系如何？能量转化关系如何？

8．什么是涡流？各举几个例子，说明如何利用涡流及如何减小涡流的危害。

9．什么是电磁驱动和电磁制动？这两个过程中能量发生了怎样的转化？

• 相互交流

1．请说说用楞次定律判断感应电动势和感应电流方向的 5 个步骤。

2．本章学习结束了，谈谈你对磁通量 $\Phi=B\cdot S$ 中 S 的理解。

3．断电自感的实验中，什么条件下，断开开关时灯会闪亮一会儿再熄灭？

4．电磁感应在生活中既有有利的一面，也有有害的一面。以此为题，谈谈对科学知识与人类生活关系的看法。

本章复习题

1．楞次定律中“阻碍”的含义是指（　　）

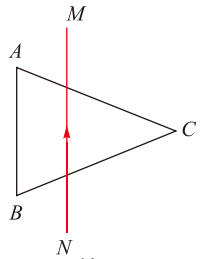
A．感应电流形成的磁场方向与引起感应电流的磁场方向相反

B．感应电流形成的磁场只是阻碍引起感应电流的磁场的增强

C．感应电流形成的磁场只是阻碍引起感应电流的磁场的减弱

D．当引起感应电流的磁场增强时，感应电流的磁场方向与其相反；当引起感应电流的磁场减弱时，感应电流的磁场方向与其相同

2．如图所示，三角形线框与长直导线彼此绝缘，线框被导线分成面积相等的两部分，在 MN 接通图示方向电流的瞬间，线框中感应电流的方向是（　　）



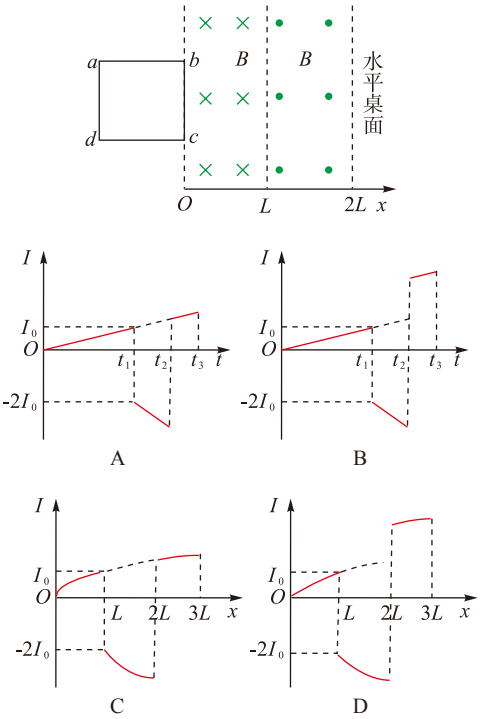
▲ 第2题图

A．无感应电流　　B．$A\to B\to C$

C．$C\to B\to A$　　D．条件不足，无法判断

3．如图所示，在一有界区域内，存在着磁感应强度大小均为 B，方向分别垂直于光滑水平桌面向下和向上的匀强磁场，磁场宽度均为 L，边长为 L 的正方形框 $abcd$，其中 bc 边紧靠磁场边缘置于桌面上，使线框从静止开始沿 x 轴正方向匀加速通过磁场区域，若以逆时针

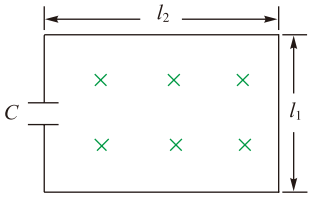
方向为电流的正方向，能反映线框中感应电流变化规律的是图（　）



▲第3题图

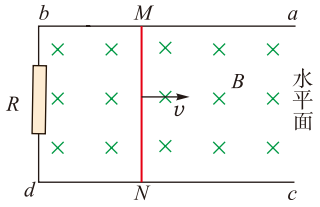
4. 一根直导线长 0.1 m，在磁感应强度为 0.1 T 的匀强磁场中以 10 m/s 的速度匀速运动，求导线中可能产生的感应电动势。

5. 在匀强磁场中，有一个接有平行板电容器的导线回路，如图所示，已知电容 C=30 μF，回路的长和宽分别为 l_1=5 cm，l_2=8 cm，磁感应强度的变化率为 5×10^{-2} T/s，则电容器上极板带正电荷还是负电荷？电荷量是多少？



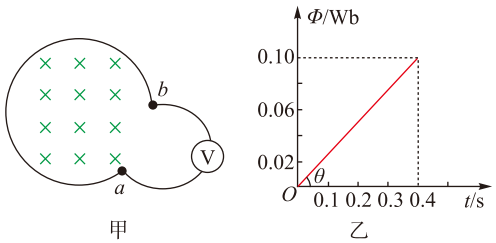
▲第5题图

6. 如图所示，两根相距为 l 且水平放置的平行金属直导轨 ab、cd，b、d 间接有一定值电阻 R，导轨电阻忽略不计。MN 为放在 ab 和 cd 上的一根金属棒，与 ab 垂直，其电阻也为 R。整个装置处于磁感应强度大小为 B、方向竖直向下的匀强磁场中，现对 MN 施力使它沿导轨以速度 v 向右匀速运动。则 MN 两端电压是多少？在图中标出回路中电流的方向。



▲第6题图

7. 设如图甲所示的线圈为 50 匝，它的两个端点 a、b 与内阻很大的电压表相连，线圈内磁通量变化的规律如图乙所示。



▲第7题图

(1) a、b 两点哪点电势高？

(2) 电压表示数多大？

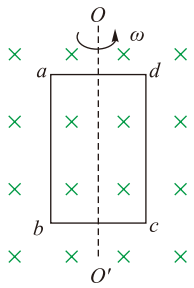
8. 如图所示，在磁感应强度为 B 的匀强磁场中有一个面积为 S 的矩形线圈绕垂直于磁感线的对称轴 OO' 以角速度 ω 匀速转动。

(1) 穿过线框磁通量的变化率何时最大？最大值为多少？

(2) 当线框由图示位置转过 60 °的过程中，平均感应电动势为多大？

(3) 线框由图示位置转到 60 °时瞬时感应电动势为多大？

(4) 如果线框绕 ab 转动，电动势最大值又是多少？



▲第8题图



现代电工技术由法拉第的发现开始，当初毫无用处的新生婴儿已经成长为一位非凡的天才，以惊人的方式改变着人类的生活和地球的面貌。如此成就，也许他那自豪的父亲法拉第也始料未及。

——费曼

第二章

交流电

主题一　交变电流的产生与描述

- 交变电流
- 正弦交变电流的描述

主题二　交变电流的输送

- 变压器
- 电能的传输

交变电流的出现，使电深入到人类生活的方方面面，把人类社会带进了“电气化时代”，促进了物质文明的高度发展。

本章我们从最基本的正弦交变电流出发，认识交变电流的产生、描述与远距离输送方式。

1 交变电流

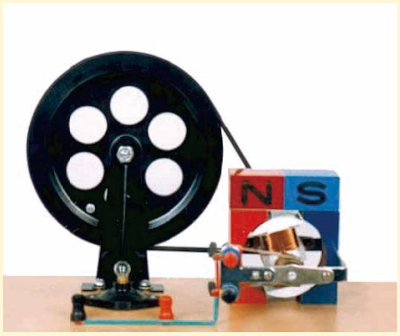
我们家庭里的电视机、空调、电冰箱、洗衣机、微波炉、电热水器等用电器使用的都是交变电流。那么，什么是交变电流？它是怎样产生的？如何描述它？

认识交变电流

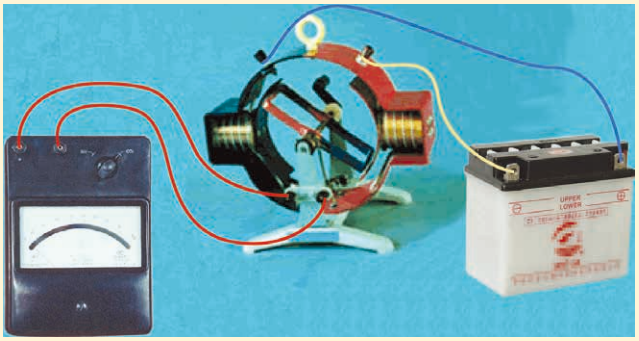
观察思考

1. 如图 3-1-1 所示，先将手摇发电机与小灯泡连接成闭合电路，快速转动手柄，可以观察小灯泡发光，慢慢降低手柄的转速，它的亮度有何变化？这说明了什么？

2. 将电机原理说明器与零刻度线居中的电流表相连，如图 3-1-2 所示。缓慢、匀速转动手柄，可以看到电流表指针如何摆动？这又说明了什么？



▲ **图3-1-1** 手摇发电机



▲ **图3-1-2** 电机原理说明器

3. 用示波器观察电压的图形。

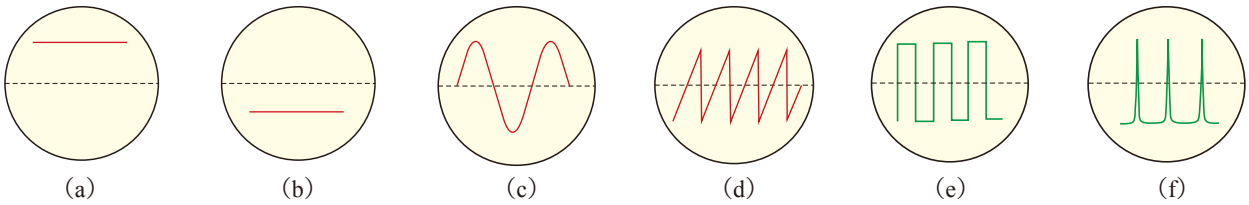
将信号发生器的电压输出端跟示波器的“Y 输入”和“地”端连接。当没有信号输入时，示波器屏幕上显示一条位于中间的水平直线。当有信号输入时，示波器屏幕上显示的图形反映电压随时间变化的规律，由此可以推测电路中电流随时间变化的规律。

信号发生器是一种能产生各种电压（或电流）信号的仪器。

分别输入信号发生器产生的不同电压信号，观察示波器屏幕上显示的不同图形。这些图形有什么不同？这说明输入电压大小和方向各是如何随时间变化的？

大小和方向都不随时间变化的电流，称为恒定电流［图 3-1-3（a）（b）］。大小和方向都随时间做周期性变化的电流叫作交变电流，简称交流电（AC），其中电流的大小和方向都随时间按正弦函数规律变化的交变电流称为正弦交变电流［图 3-1-3（c）］，简称**正弦交流电**（sinusoidal alternating current）。它是一种最简单、最基本的交变电流。由发电厂发出的、我们家庭里使用的电流都是正弦交流电。

图 3-1-3 中的（d）（e）（f）分别称为锯齿波电流、方波电流及尖脉冲电流。



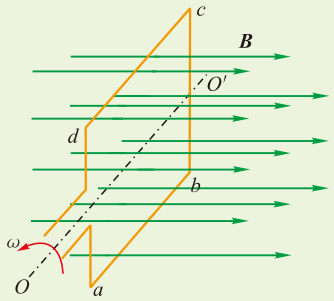
▲ **图3-1-3**　在示波器上观察到的几种电流波形

正弦交流电的产生和变化规律

前面手摇发电机匀速转动时产生的电流可以看成是正弦交流电，它是怎么产生的？

理论探究

如图 3-1-4 所示，将手摇发电机磁极间的磁场视为磁感应强度为 B 的匀强磁场，方向水平向右；线圈简化为单匝矩形线圈 $abcd$，线圈的边长分别为 $ab = L_1$，$bc = L_2$。设线圈 $abcd$ 绕水平的中心轴 OO' 沿逆时针方向以角速度 ω 匀速转动，线圈中产生的感应电动势随时间变化的规律是怎样的？



▲ **图3-1-4**　矩形线圈在匀强磁场中匀速转动，线圈中产生按正弦规律变化的感应电动势

在线圈匀速转动的过程中，ab 边和 cd 边要切割磁感线而产生感应电动势，由于这两边的运动速度始终大小相等而方向相反，所以两边产生的感应电动势大小相等，回路 $abcd$ 中总的感应电动势

$$e = 2e_{ab}$$

现在我们研究ab边切割磁感线产生的感应电动势。

图 3-1-5 中的小圆圈是图 3-1-4 中 ab 边的截面，从最下方的位置出发，经过时间 t，ab 边绕轴 OO' 转过的角度 $\theta = \omega t$，此时速度v的方向如图中所示，v与磁场方向垂直的分量$v_1 = v\sin\theta = v\sin\omega t$，根据法拉第电磁感应定律，在 ab 边上产生的感应电动势的大小

$$e_{ab} = BL_1 v\sin\omega t$$

而

$$v = \omega \cdot \frac{L_2}{2}$$

由此可得

$$e = 2e_{ab} = BL_1L_2\omega\sin\omega t$$

设 S 为矩形线圈 $abcd$ 的面积，$S = L_1L_2$。考虑到发电机实际线圈的匝数为 N，并令 $E_m = NBS\omega$，则

$$e = E_m\sin\omega t$$

$t = 0$ 时，$\theta = 0$，此时的感应电动势 $e = 0$，线框所在的平面与磁场垂直，称为**中性面**。

如果把线圈的两端与外电路相连，组成闭合回路，如图3-1-6所示，电路中将产生按正弦规律变化的交变电流，其电流 i 随时间 t 的变化关系是

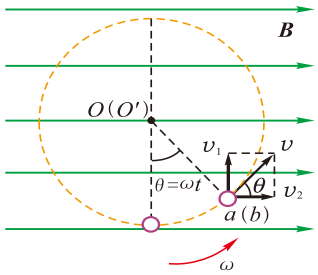
$$i = I_m\sin\omega t$$

外电路两端的电压 u 随时间 t 的变化关系是

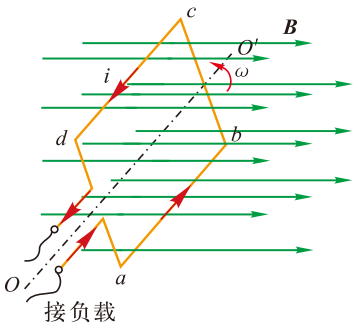
$$u = U_m\sin\omega t$$

上式中 i、u 分别称为电流和电压的瞬时值。i（或 u）随时间变化的规律也可以用图像表示，如图 3-1-7 所示。

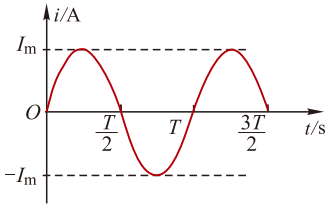
由此可见，闭合矩形线圈在匀强磁场中绕垂直于磁场方向的轴匀速转动时，线圈中产生的感应电流是正弦交流电。交流发电机就是根据这个原理制成的。



▲ 图3-1-5



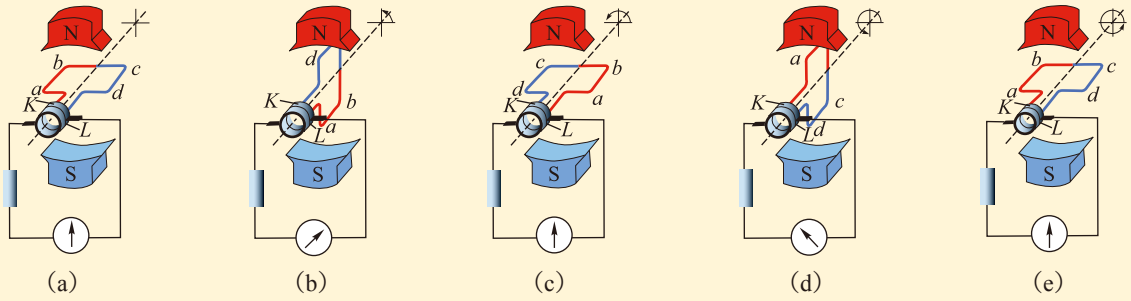
▲ 图3-1-6



▲ 图3-1-7 正弦交流电的电流图像

讨论交流

图 3-1-8 是交流发电机的示意图，磁极间的磁场可视为匀强磁场，线圈 *ab* 边与金属滑环 *K* 相连，*cd* 边与金属滑环 *L* 相连，由固定的导体制成的两个电刷分别压在两个金属滑环上并保持良好接触，线圈在转动时可以通过滑环和电刷保持与外电路连接。讨论当线圈从（a）→（b）→（c）→（d）→（e）的运动过程中，通过电流表的电流大小和方向变化的情况。



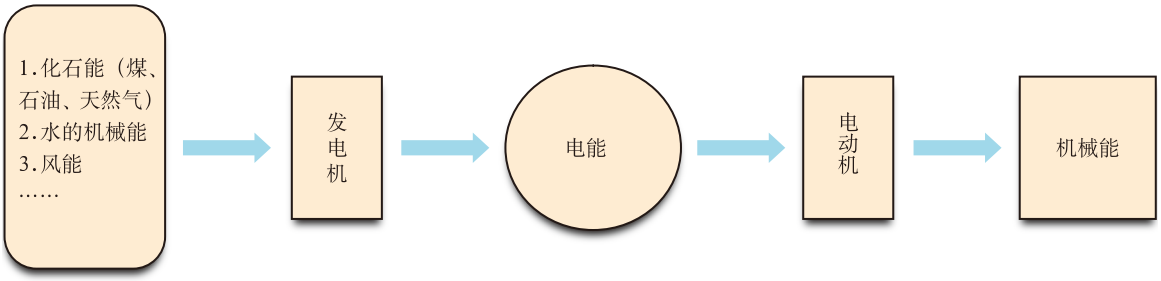
▲ **图3-1-8**　交流发电机示意图

发电机与电动机中的能量转化

发电机是把机械能转化为电能的装置。目前我国的发电方式主要有火力发电、水力发电、风力发电、太阳能发电、核能发电等。火力发电一般是指利用石油、煤炭和天然气等燃料燃烧时产生的内能来加热水，使水变成高温高压的水蒸气，然后再由水蒸气推动燃气轮机转动，带动发电机发电，它是我国目前主要的发电方式。核能发电的原理与火力发电一样。水力发电和风力发电则是由水和风推动水轮机和风力发动机，带动发电机发电，是把水和风的机械能转化为电能。太阳能发电又称光伏发电，它直接利用半导体材料制成的光电池把光能转化为电能。

电动机能够有效地将电能转化成机械能，让人类的工业生产和家庭生活实现机械化、自动化，大大减轻了人们在工作和生活中的劳动负担。全世界发电量的一大部分是通过电动机做功转化为机械能（图 3-1-9）。交通领域以前一直是消耗化石能源的大户，也是造成大气污染的重要原因，由于电动机具有高效易控、清洁无污染等特点，世界

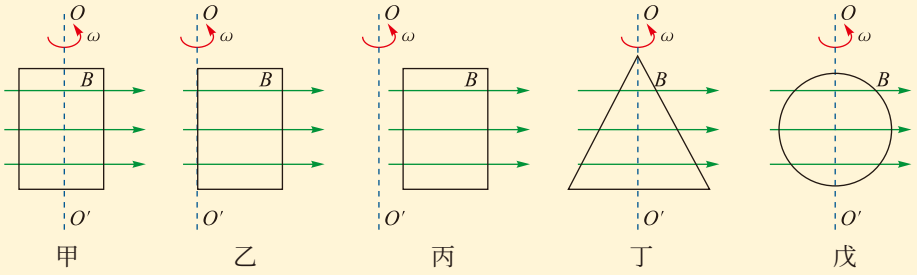
上很多国家都确立了以电动自行车和电动汽车逐渐取代传统机动车的方针。



▲ 图3-1-9　发电机与电动机的能量转化

自我评价

1. 如图 3-1-10 甲、乙、丙、丁、戊所示，把 5 个面积相同的线圈放入同一匀强磁场中（磁场区域足够大），绕不同的轴转动，在转动过程中感应电动势的最大值是否相同？为什么？



▲ 图3-1-10

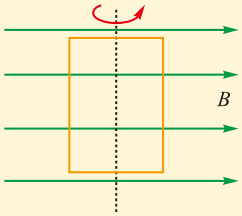
2. 如图 3-1-11 所示，一线圈在匀强磁场中转动，经过图示位置时刻（　　）

A. 穿过线圈的磁通量最大，磁通量的变化率最大

B. 穿过线圈的磁通量最大，磁通量的变化率最小

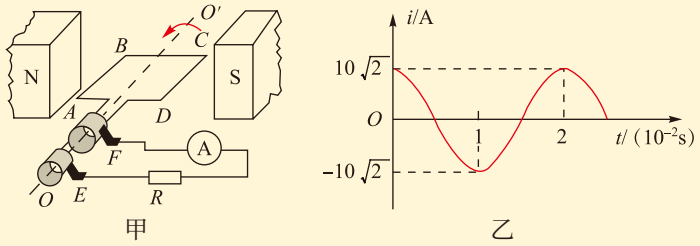
C. 穿过线圈的磁通量最小，磁通量的变化率最大

D. 穿过线圈的磁通量最小，磁通量的变化率最小



▲ 图3-1-11

3. 图 3-1-12 甲是小型交流发电机的示意图，两磁极 N、S 间的磁场可视为水平方向的匀强磁场，Ⓐ为电流表。线圈绕垂直于磁场的水平轴 OO' 沿逆时针方向匀速转动，从图甲所示位置开始计时，产生的交变电流随时间变化的图像如图乙所示。以下判断正确的是（　　）



▲ 图3-1-12

A. Ⓐ必须用交流电流表

B. 线圈转动的角速度为 50π rad/s

C. $t = 0.01$ s 时，线圈平面与磁场方向平行

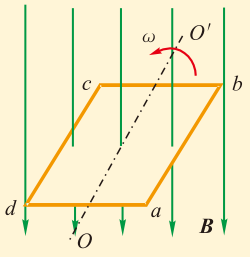
D. $t = 0.02$ s 时，电阻 R 中电流的方向自右向左

4. 如图 3-1-13 所示，单匝线圈 ab 边长为 20 cm，bc 边长为 10 cm，绕垂直于磁场方向的轴 OO' 匀速转动，转速为 50 r/s，设磁感应强度 B 为 0.1 T。求：

（1）线圈中感应电动势的最大值 E_m；

（2）当 $t = 0.01$s 时，线圈中感应电动势的值；

（3）根据表达式 $E_m = NBS\omega$，说明交流发电机的 E_m 与哪些因素有关。



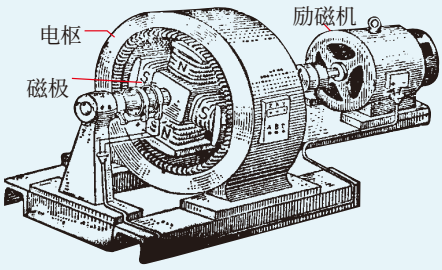
▲图3-1-13

发展空间

课外阅览

发电设备

发电可分为火力发电、水力发电、核能发电、风力发电、地热发电、潮汐发电等多种方式，但对于发电机来说，其原理都相同，都是根据电磁感应现象，利用线圈切割磁感线而产生正弦交变电流。它们的结构也大体相似，主体结构分为定子和转子两大部分。具体地讲，可依据定子和转子装置的不同将发电设备分为两大类，一类称为旋转电枢式，即定子是产生磁场的装置，而转子是产生感应电流的线圈（称为电枢），简单地说就是磁场不动而线圈转动；另一类称为旋转磁场式，即转子是产生磁场的装置，而定子是产生感应电流的线圈，也就是说磁场旋转而线圈不动。大多数同步发电机都采用旋转磁场式，大型旋转磁场式发电机的转子都是电磁铁，有的只有一对磁极（N、S 极），也有的有两对或多对磁极。如图 3-1-14 所示是一种带励磁机的同步发电机，它的转子就有两对磁极，工作时，只要转子的转速稳定在 25 r/s，定子绕组中产生的交变电流的频率就是 50 Hz。



▲图3-1-14　带励磁机的同步发电机

交流与直流之争

在物理学中电学发展史上，曾经有过一场关于使用“交流电”还是使用“直流电”的激烈争论。提倡使用“直流电”的代表人物是大名鼎鼎的发明家爱迪生；而主张改用“交流电”的代表人物则是比爱迪生小 9 岁的后起之秀——特斯拉。

发电机发明以后，电能就在工农业生产和日常生活的各个方面得到了广泛的应用。起初是采用“直流电”的方式输电和供电，由于输电的电压较低，在输电线路上的热损失较大，因此每一平方英里的地区就需要一个单独的直流发电机供电，而且还要使用大

量较粗的铜线。为了解决上述的缺点，特斯拉发明了以交流发电机供电的“交流多相电力传输系统”，由于使用变压器以高电压、低电流的方式输电，就大大地降低了输电线路上的热损失，实现了远距离输电，从而不需要大量分散的单机供电，输电导线的截面也大大地减小了。

从科学和实用的角度来看，使用“交流电”显然比使用“直流电”优越，可以大幅度地降低供电的成本。因此，特斯拉的发明得到了一位富有的发明家兼金融家威斯丁豪斯的支持，他付给了特斯拉 100 万美元的专利费，为研制开发提供了资金，并开设了“特斯拉电气公司”。但是多年来爱迪生的公司一直是投资开发直流供电系统的，不甘心就此让位给交流供电系统，于是与特斯拉展开了一场激烈的竞争。但是，爱迪生所采用的竞争方式是不科学的，他和他的支持者们诬蔑说：“使用交流电比直流电危险得多。”为了证明使用交流电的安全性，特斯拉专门举行了记者招待会，他让交流电从“特斯拉线圈”通过他的身体点亮了灯，记者们看得入了迷，纷纷承认交流供电的优越性。最终这场竞争以特斯拉的胜利而结束。从此“交流供电系统”广为社会采用。

2 正弦交变电流的描述

正弦交变电流应用非常广泛，它的电流、电压等随时间变化的规律是正弦函数的规律，与我们以前学习过的简谐运动和简谐波有类似之处。是否也应该引入一些特征物理量来描述它们呢？

周期和频率

交变电流随时间做周期性变化，周期和频率就是表征其变化快慢的物理量。做一次周期性变化所需的时间称为**周期**（period），用符号 T 表示，单位是 s。完成周期性变化的次数与所用时间的比称为**频率**（frequency），用符号 f 表示，单位是 Hz。周期和频率的关系是

$$T=\frac{1}{f} \text{ 或 } f=\frac{1}{T}$$

由前一节的学习我们知道，闭合线圈在匀强磁场中匀速转动，就产生正弦交流电。线圈转动一周所需的时间是正弦交流电的一个周期 T，如果线圈转动的角速度为 ω，则

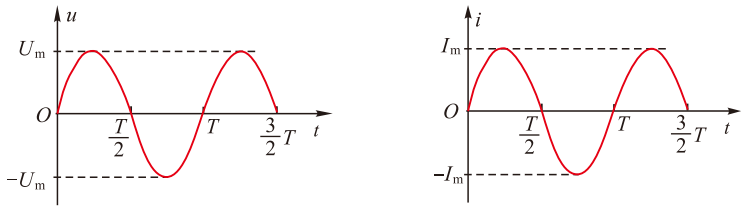
$$\omega = \frac{2\pi}{T} = 2\pi f$$

因此正弦交流电的表达式还可以写成

$$i = I_{\mathrm{m}}\sin\frac{2\pi}{T}t = I_{\mathrm{m}}\sin 2\pi f t$$

$$u = U_{\mathrm{m}}\sin\frac{2\pi}{T}t = U_{\mathrm{m}}\sin 2\pi f t$$

根据上述正弦交流电的表达式，可以画出正弦交流电随时间变化的图像，如图 3-2-1 所示。



▲ **图3-2-1**　正弦交变电流的电压、电流随时间变化的图像

电力系统提供的正弦交流电的频率称为工频。我国使用的频率标准为 50 Hz（相应周期为 0.02 s），也有一些国家为 60 Hz。因此，在不同国家和地区使用电气设备时要注意电源频率是否与之匹配。

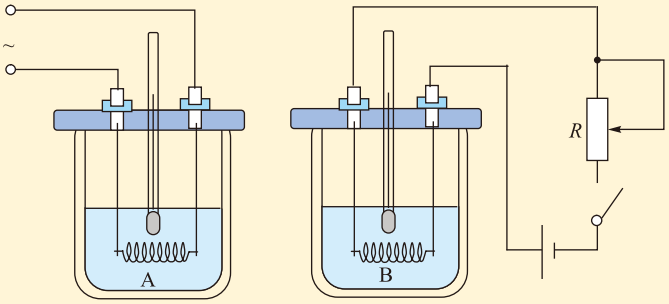
峰值　有效值

正弦交流电表达式中的 U_{m} 和 I_{m} 分别称为电压和电流的**峰值**（peak value），分别表示了在一个周期内电压和电流所能达到的最大值，如图 3-2-1 所示。

峰值是表示交流电大小的物理量，它在实际中有着重要意义，例如电容器、二极管等元器件在交流电路中使用时，就要注意交流电压的峰值不能超过它们所能承受的电压，否则就有被击穿而损坏的危险。然而，平时我们说的“ 220V ”却并不是指峰值，而是有效值，那么什么是有效值呢？让我们先观察一个实验。

观察思考

如图 3-2-2 所示，两个相同的密闭的容器 A 和 B，内部盛有质量相同的同种液体（例如煤油或水），液体中各有一个阻值相等的电阻丝（例如都等于 5Ω），



▲ 图 3-2-2

盖紧上盖并各插入一支温度计。A 容器中的电阻丝接到交流电源两端，通以交变电流；B 容器中的电阻丝则与直流电源、滑动变阻器及开关连接成闭合电路。闭合开关，调节滑动变阻器，即调节通过 B 容器中电阻丝的电流，直到两支温度计能在相同的时间里升高相同的温度。这说明通过 A 中电阻丝的交流电与通过 B 中电阻丝的直流电，在相等的时间里产生的热量相等，或者说，通过 A 中电阻丝的交流电与通过 B 中电阻丝的直流电在热效应上相等。

用示波器观察 A 中电阻丝两端交流电电压波形并测出电压的峰值 U_m，用直流电压表测出 B 中电阻丝两端直流电压的数值 U，则称电压 U 为该交流电压的有效值。

如果交流电与某一直流电通过同一电阻，在交流电的一个周期内产生的热量相等，则这个直流电的电流和电压值，就分别称为相应交流电电流和电压的有效值。

因此，交流电的有效值是根据电流的热效应来规定的。交流电电压、电流的有效值分别用符号 U、I 来表示。

对不同的交流电，有效值与峰值之间有不同的关系。理论和实验研究都表明，正弦交流电的峰值和有效值之间的关系是

$$U=\frac{U_m}{\sqrt{2}}\approx 0.707U_m,\quad I=\frac{I_m}{\sqrt{2}}\approx 0.707I_m$$

我们平常所说的交流电的电压和电流值，指的都是有效值。例如我国家庭使用的交流电电压是 220V，工农业生产所使用的动力电路电压是 380V，都是指有效值。相应的峰值分别是 311V 和 537V。

交流电流表和交流电压表表盘上标示的数值是有效值，它只适用于测量正弦交流电。有效值也是描述交流电大小的物理量。

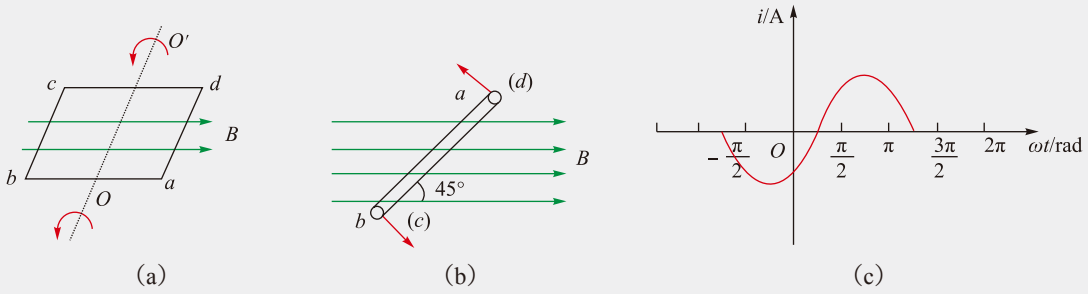
要得到交流电通过电阻 R 时，在时间 t 内产生的热量 Q，可以直接用焦耳定律公式

$$Q = I^2Rt$$

来计算，式中的 I 是交流电电流的有效值。计算消耗的电功率，也可以用公式 $P = IU$ 进行计算，其中 I、U 均为有效值。

例题示范

问题　图 3-2-3（a）是 220V 交流发电机的原理图。一矩形线圈 $abcd$ 放置在匀强磁场中，并绕过 ab、cd 中点的轴 OO' 以角速度 ω 逆时针匀速转动。若以线圈平面与磁场夹角 $\theta = 45°$ 时［图 3-2-3（b)］为计时起点，并规定当电流自 a 流向 b 时电流方向为正，得到的电流随“角度”变化的图像如图 3-2-3（c）所示（注意：图中横坐标不是时间 t，而是 ωt)。



▲ 图3-2-3

（1）将一个小电容接入 220V 正弦交流电路中，它的耐压值必须多大？

（2）写出图（c）所示的电流 i 的表达式。

分析　（1）电容器的耐压值是能够承受的电压的最大值，而 220V 是有效值，所以要根据有效值计算出峰值；

（2）结合题意和图 3-2-3（c）可以看出，从开始计时（$t = 0$）起，必须再经过 45°，才能到达中性面。

解　（1）由前面分析可知，交流电的电压是 220 V，即有效值是 U=220 V，相应的峰值

$$U_m = \sqrt{2}\ U = 220\ \sqrt{2}\ \text{V} \approx 311\ \text{V}$$

电容器工作过程中所承受的电压最大值为 311 V，因此它的耐压值必须大于

311 V。

（2）根据图 3-2-3（c）和前面计算可知电流的表达式为

$$i=I_{\mathrm{m}} \sin\left(\omega t-\frac{\pi}{4}\right) \mathrm{A}$$

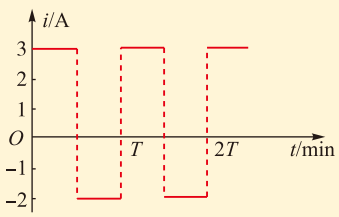
拓展 如果用交流电压表测量该发电机两端的电压，交流电压表刻度盘上的示数是多少？

我们中学实验室使用的交流电压表（或交流电流表）都是由磁电系测量机构与整流电路组合而成的整流式仪表，它所指示的是交流电压（或交流电流）的平均值，而在工程技术中通常需要测量交流电压或电流的有效值，为了满足这一需要，多用表交流电压（或电流）的标度尺是按正弦交流电压或电流的有效值来标刻的。因此，这个交流电压表的示数是 220 V。

其他类型的交流电表，虽然原理有差别，但刻度盘上标注的也都是有效值。

自我评价

1. 我国交流电的周期和频率是多少？1 s 内电流的方向改变多少次？
2. 关于交变电流，下列说法正确的是（　　）
   A. 电气设备上，标示的交流电的电压与电流的值都是有效值
   B. 用交流电流表和交流电压表对交流电测量时，其读数是交流电的有效值
   C. 交流电的周期和频率互为倒数关系
   D. 跟交流电有相同热效应的恒定电流的值是交流电的有效值
3. 有一个电热器，工作时的电阻为 100 Ω，接在电压为 $u=10\sqrt{2}\sin\omega t$ V 的交流电源的两端，该电热器消耗的电功率是多少？
4. 一根电阻丝接入 100 V 的直流电，1 h 内产生的热量为 Q，同样的电阻丝接入正弦交流电路中，2 h 内产生的热量也是 Q，则该交流电电压的峰值为（　　）
   A. 141.4 V　　B. 100 V
   C. 70.7 V　　D. 282.8 V
5. 有一电容器能耐压 180 V，能否接在 180 V 的交流电路上？为什么？
6. 图 3-2-4 是某一交变电流的 i - t 图像，请根据该图计算出这一交变电流的有效值。



▲ 图3-2-4

发展空间

课外阅览

相　　位

感应电动势的瞬时值 $e=E_m\sin\omega t$，只是发电机线圈平面在 $t=0$ 时位于与磁场垂直的位置（这时线圈所处的平面称为中性面）的一种特殊情况。更一般的情况下，$t=0$ 时线圈平面并不与磁场方向垂直，而是与中性面有一个夹角 φ_0，则一般情况下的感应电动势的瞬时值表达式是 $e=E_m\sin(\omega t+\varphi_0)$。这里的 $\omega t+\varphi_0$ 是一个角度值，称为这个交流电的**相位**（phase），简称相；而 φ_0 称为初相位，简称初相。

设两个交变电动势分别为 $e_1=E_m\sin(\omega t+\varphi_{01})$，$e_2=E_m\sin(\omega t+\varphi_{02})$，不难看出，它们的峰值和频率都相同，只是初相不同。这两个交变电动势的相位 φ_1 和 φ_2 都是随时间变化的，但它们的相位之差 $\varphi_1-\varphi_2=\varphi_{01}-\varphi_{02}$ 是一个常量，等于两个初相之差，不随时间而变化。可以说，这两个交变电动势的变化规律是相同的，只是变化步调不同，因此，在频率相同的情况下，初相是描述变化步调的物理量。如果两个频率相同的交流电的相位差是 π 或 π 的奇数倍，则称它们为反相；如果它们的相位差是 0 或 2π 的整数倍，则称它们为同相。

相位是描述交流电特性的一个重要参量。

三相交流电

当一个线圈在匀强磁场中匀速转动时，电路里只产生一个交变电动势，这时发出的交流电叫作单相交变电流。如图 3-2-5 所示，在转子铁芯上固定着三个相同的线圈 AX、BY、CZ，始端是 A、B、C，终端是 X、Y、Z。三个线圈平面互成 120° 角，转子在磁场中匀速转动，就产生三个交变电动势，它们的峰值和频率都相同，但相位互差 120°，称为三相交流电。

如果以图中所示位置为起点，这三个电动势可以分别表示为

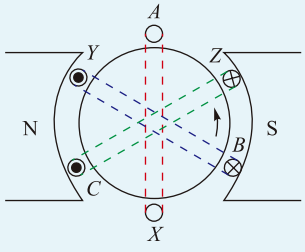
$$e_A=E_m\sin\omega t$$

$$e_B=E_m\sin\left(\omega t-\frac{2\pi}{3}\right)$$

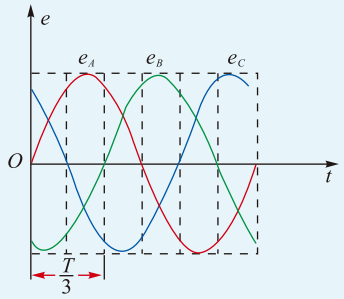
$$e_C=E_m\sin\left(\omega t-\frac{4\pi}{3}\right)$$

它们随时间变化的图像如图 3-2-6 所示。

在三相交流电动机中，定子也有三组线圈，互成 120° 角，通以三相交流电，就能在中间产生旋转磁场，从而在转子线圈中产生感应电流，线圈受到磁场的安培力作用，电动机就转动起来了，这就是我们在前面学习过的电磁驱动。



▲ **图3-2-5**　三相发电机示意图



▲ **图3-2-6**　三相发电机的电动势

3 变压器



▲ 图3-3-1 变压器

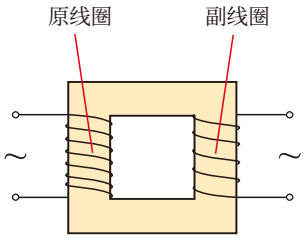
交流电之所以得到广泛应用，一个重要原因就是它便于通过变压器（图 3-3-1）改变电压，满足各种实际的需要。变压器的结构是怎样的？它为什么能改变交流电的电压呢？

变压器的结构与原理

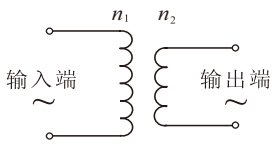
电能在输送的过程中，有时要升高电压，有时又要降低电压。升降电压的核心装置是变压器，变压器在改变电压的过程中，对所传输的电能有影响吗？

最简单的**变压器**（transformer）是由闭合铁芯和绕在铁芯上的两个线圈组成的（图 3-3-2）。铁芯由涂有绝缘漆的硅钢片叠加而成，线圈一般用高强度的漆包线绕制。

一个线圈与交流电电源连接，叫作**原线圈**（primary coil），也叫初级线圈；另一个线圈与负载连接，叫作**副线圈**（secondary coil），也叫**次级线圈**。在电路中，变压器的符号如图 3-3-3 所示。



▲ 图3-3-2 变压器示意图



▲ 图3-3-3 变压器的符号

当变压器的原线圈加上交变电压时，原线圈中的交变电流在铁芯中激发交变的磁场，交变的磁感线穿过原线圈也穿过副线圈，在原、副线圈中都产生感应电动势。当副线圈与负载连接组成闭合回路时，在副线圈中就会有交流电通过。这样，虽然原、副线圈并不相连，电能却从原线

圈通过磁场传输给副线圈。这种现象称为互感，它是变压器工作的基础。

变压器原线圈的端电压与副线圈的端电压之间有什么关系呢？

变压器的电压与匝数的关系

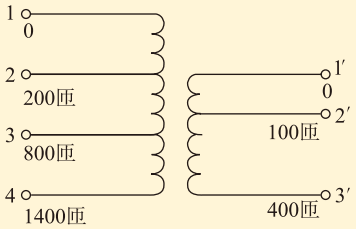
实验探究

器材

可拆变压器、学生电源、交流电表。可拆变压器是专为教学设计的仪器，它的外形如图 3-3-4 所示，其中左边线圈中间有两个抽头，右边线圈中间有一个抽头。它的结构如图 3-3-5 所示，把各接线柱从左到右分别标为“1、2、3、4”及“1′、2′、3′”。把交流电源接到左边线圈两个接线柱上（比如 1、4 两接线柱，即加到 1400 匝线圈两端），即可在副线圈得到三组不同的输出电压。



▲ 图3-3-4　可拆变压器



▲ 图3-3-5

实验步骤

为安全起见，利用学生电源在变压器原线圈 1、4 两接线柱间输入较低的交流电压（如 10 ~ 16V），利用交流电压表分别测量不同端点间的电压，填入下表中。

注意：不可把 220V 电压加在除 1400 匝外的其他各线圈两端。

在原线圈 1、4 两接线柱间输入不同的电压，重复以上测量，并填入表格中。

接线端		1、2	2、3	1、3	2、4	1、4	1′、2′	2′、3′	1′、3′
匝数n		200	600	800	1200	1400	100	300	400
1	电压U/V								
	$\frac{U}{n}$比值/V								

续表

接线端		1、2	2、3	1、3	2、4	1、4	1′、2′	2′、3′	1′、3′
匝数n		200	600	800	1200	1400	100	300	400
2	电压U/V								
	比值$\frac{U}{n}$/V								
3	电压U/V								
	比值$\frac{U}{n}$/V								

分析表中的数据，你能得出什么结论？

每次实验都表明，变压器的原、副线圈两端电压 U 和匝数 n 有以下关系：

$$\frac{U_1}{U_2}=\frac{n_1}{n_2}$$

更一般的结论是，变压器的各组线圈的电压 U 与匝数 n 之比都为一个常量，即

$$\frac{U}{n}=C\ （C\text{为常量}）$$

严格满足这个关系的变压器，称为**理想变压器**。

理想变压器是一种理想模型，它忽略的次要因素主要有两个：①忽略漏磁，即认为交变电流产生的磁场的磁感线全部都在铁芯内；②忽略一切能量损耗。

理论探究

如果理想变压器的原线圈匝数为 n_1，输入电压为 U_1；副线圈匝数为 n_2，输出电压为 U_2，则输入电压和输出电压之间，满足怎样的关系呢？可以从理论推导出来吗？

如前面图 3-3-3 所示，设变压器原线圈的匝数为 n_1，感应电动势为 E_1，端电压为 U_1，电流为 I_1；副线圈匝数为 n_2，感应电动势为 E_2，端电压为 U_2，电流为 I_2。在理想情况下，由于忽略了漏磁，因此，穿过每匝线圈的磁通量都相等。当电流变化时，穿过每匝线圈的磁通量的变化率 $\left(\frac{\Delta\Phi}{\Delta t}\right)$ 也都相等，因此每匝线圈产生的感应电动势

$E_0 = \frac{\Delta\Phi}{\Delta t}$ 也相等。则原、副线圈产生的感应电动势分别为

$$E_1 = n_1 E_0$$

$$E_2 = n_2 E_0$$

因为忽略了原、副线圈的电阻，因此加在原线圈两端的电压 U_1 总是跟它产生的感应电动势 E_1 大小相等，而副线圈的输出电压 U_2 就等于它的感应电动势 E_2，即

$$U_1 = E_1$$

$$U_2 = E_2$$

由此可得

$$\frac{U_1}{U_2} = \frac{n_1}{n_2}$$

也就是说，**理想变压器原、副线圈两端的电压跟它们的匝数成正比**。

对于实际的变压器来说，电流通过变压器线圈时会发热；铁芯在交变磁场的作用下也会发热；此外，交变电流产生的磁场也不可能完全局限在铁芯内。所以变压器工作时有能量损失，上面的关系式并不严格成立。

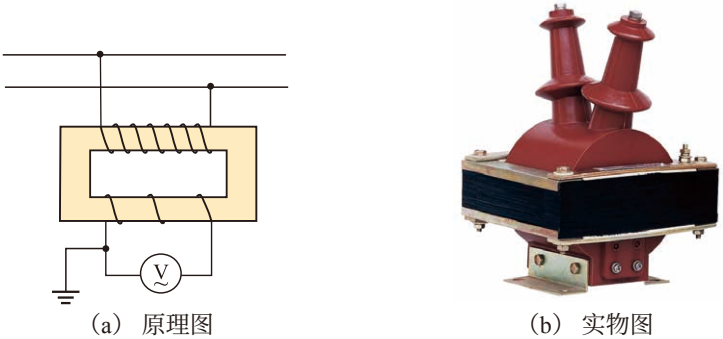
由上式可知，当 $n_2 > n_1$ 时，$U_2 > U_1$，变压器使电压升高，这种变压器叫作升压变压器；当 $n_2 < n_1$ 时，$U_2 < U_1$，变压器使电压降低，这种变压器叫作降压变压器。

一般大型电力变压器在满负荷情况下的效率可达90%甚至更高，按理想变压器计算，误差不大。

电压互感器和电流互感器

互感器主要与交流测量仪表配合使用，它是一种变压器，常用的有电压互感器和电流互感器。

电压互感器是一种降压变压器，它的初级并联在高压交流线路上，次级则与交流电压表相连，它的原理及实物如图 3-3-6 所示。由于它的原、副线圈匝数比已知，因此



（a）原理图　　（b）实物图

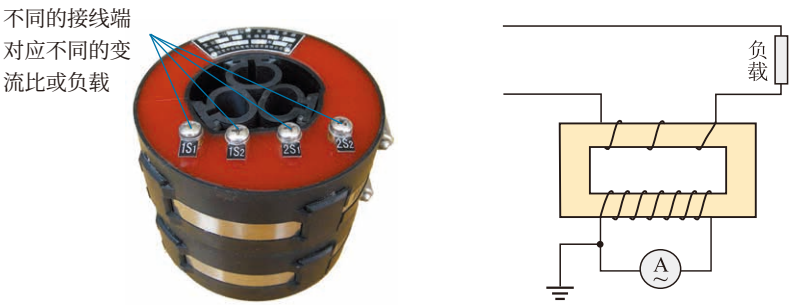
▲ **图3-3-6**　电压互感器

输入电压 U_1 与次级输出电压 U_2 之比也就已知（$U_1 : U_2 = k$，称为**变压比**，它的数值标注在电压互感器的铭牌上），只要根据电压表测出的 U_2 值和铭牌上的变压比，就可以算出高压线两端的电压值。

为了防止高低压线圈间以及高压线圈与铁芯间的绝缘部分被击穿而造成触电事故，副线圈必须接地。

电流互感器的主要作用是将大电流变成小电流，它是一种升压变压器，外形如图 3-3-7（a）所示。它的原线圈串联在被测交流电路中，副线圈与交流电流表相连，如图 3-3-7（b）所示，根据已测得电流 I_2 和铭牌上标注的变流比（$I_1 : I_2$），就可以算出被测电路中的电流。

为了安全，电流互感器使用时必须确保副线圈接地。此外，电流互感器在使用时绝对不许将副线圈开路，如果开路，副线圈两端将产生很高的电压，对人非常危险，同时还会造成铁芯过热而烧坏互感器。



（a）实物图　　（b）原理图

▲ **图3-3-7**　电流互感器

活动 | 自制简易变压器

利用手边的材料自制一个简易的变压器，测算原副线圈匝数之比与电压之比的关系。根据实验数据，思考数据背后的原因。

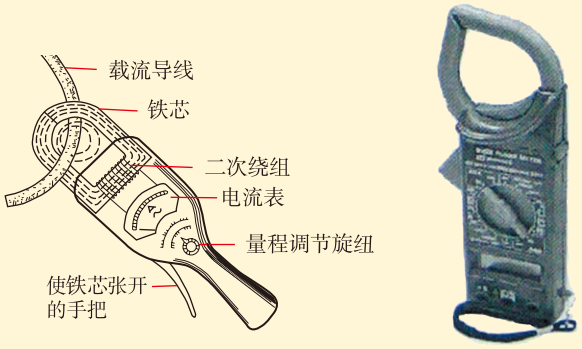
自我评价

1. 要使一电子设备正常工作，需向它提供 17 V 的交流电压。现有一电源变压器，输入电压为 220 V，初级线圈的匝数为 3100 匝，如果恰能提供此设备需要的电压，那么它的次级线圈是多少匝？

2. 电压互感器的初级线圈与次级线圈相比较，哪个线圈的匝数较多？哪个线圈的导线

较粗？电流互感器的初级线圈与次级线圈相比较，哪个线圈的匝数较多？哪个线圈的导线较粗？

3. 钳形电流表是一种测量交流电的仪器，其结构和外形如图 3-3-8 所示，试说明其测量交流电流大小的原理。



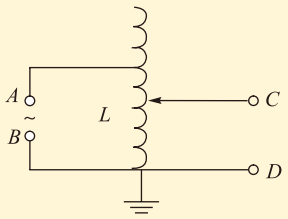
（a）结构图　　（b）外形图

▲ **图3-3-8**　钳形电流表

4. 如图 3-3-9 所示为自耦变压器的示意图，其中 L 为一个绕在闭合铁芯上的线圈，共有 1500 匝。它的下端点接地，并连接着输入端 B 和输出端 D，另一输入端 A 固定在线圈某处，而另一输出端 C 则可以在线圈上滑动。

（1）要求在 A、B 间输入 220 V 交变电压，在 C、D 间的输出电压在 0 ~ 250 V 间连续可调。A、B 间线圈匝数是多少？

（2）若输入电压降至 210 V，输出电压要求为 220 V，连接在 C、D 输出端间的线圈应为多少匝？



▲ **图 3-3-9**　自耦变压器示意图

发展空间

课外阅览

理想变压器电流与匝数的关系

在理想情况下，因为变压器本身不消耗能量，也就是认为变压器的输入功率和输出功率相等，即

$$I_1U_1 = I_2U_2$$

又因为电压与匝数的关系为

$$\frac{U_1}{U_2} = \frac{n_1}{n_2}$$

由以上两式可知，理想变压器原、副线圈中通过的电流 I_1、I_2 与它们的匝数 n_1、n_2 满足以下关系

$$\frac{I_2}{I_1}=\frac{n_1}{n_2}$$

这就是变压器工作时，原、副线圈中电流之间的关系。可见，**变压器工作时，原线圈和副线圈中的电流跟线圈的匝数成反比**。

由上式不难看出，变压器电压较高的一边电流较小，而电压较低的一边电流较大，因此变压器中匝数较多的线圈可用较细的导线绕制，而匝数较少的线圈需用较粗的导线绕制。

4 电能的传输

“西电东送”是“西部大开发”的重点工程。我国煤炭资源主要分布在西部和北部地区，水能资源主要集中在西南地区，东部地区的一次能源资源匮乏，用电负荷却相对集中。能源资源与电力负荷分布的不均衡性决定了西电东送的必要性。目前，主要采用高压输送交流电。那么，为什么要采用高压输电呢？

电能输送中的电压损失和电能损耗

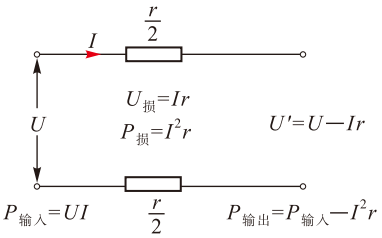
讨论交流

1. 远距离输电过程中，在输电线上为什么会有能量损耗？采用哪些措施可以减小输电线上的能量损耗？

2. 远距离输电过程中，发电厂输出的电压、输电线上损失的电压与用户得到的电压存在什么样的关系？它们受哪些因素影响？

如图 3-4-1 所示，由于导线自身存在着电阻，导致输电过程中存在着电压损失 $U_{损}$，$U_{损}=I\cdot r$。

电能损耗是电能输送中最受关注的问题，它与时间有关（$W = Pt$），在相同时间内电能损耗取决于功率损耗。功率损耗 $P_{损} = I^2r$。可以看出，无论是电压损失，还是功率损失，都与输电线的电阻 r 和电流 I 有关，其中电能损耗受电流 I 的影响更为显著，故输电线路要求线路电阻 r 和电流 I 尽可能小。



▲ 图3-4-1

设导线的总长度为 l，横截面积为 S，根据电阻定律可知 $r = \rho \dfrac{l}{S}$。由于导线一般选用铝材料，因而 ρ 是确定的，在输电距离一定的情况下，导线长度 l 也是确定的，所以要想减小电阻 r，只能通过增大横截面积 S 来实现。

例如将 10 000 kW 的电功率输送到 10 km 以外的地方，若用 220 V 电压输电，并使电能损耗为要输送电能的 10%，不难算出所用导线的横截面积应为 1.2 m^2。显然这样的导线太粗了！倘若真是采用这样的导线架设输电电路，一方面耗费材料，另一方面也将给架设施工带来极大的难度。

在输送功率一定的情况下，减小电流 I 可以通过提高输电电压 U 来实现。在上例中，如果用 22 kV 的电压输电，即将电压提高了 100 倍，电流就减小为原来的 $\dfrac{1}{100}$，因 $P_{损} \propto I^2$，所以功率损耗减小为原来的 $\dfrac{1}{10000}$，这样如果仍要把输电过程的电能损耗控制在 10%，输电线路的电阻可以稍大一些，导线的横截面积只需要 120 mm^2 就可以了。

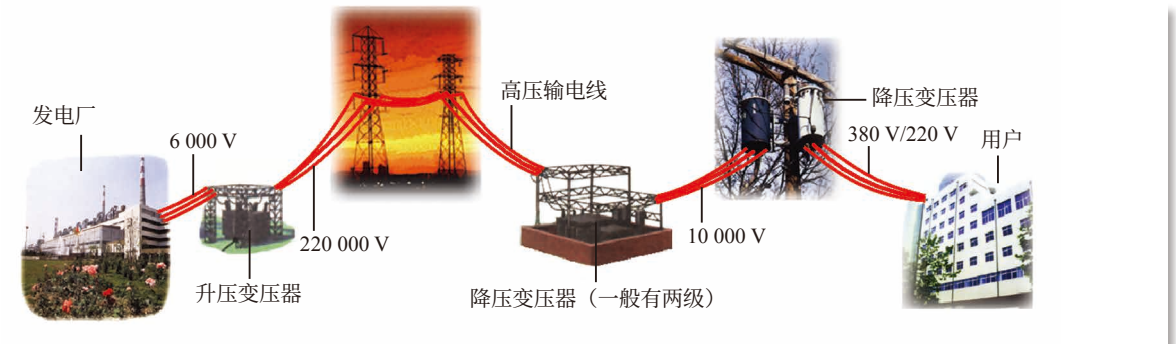
因此，无论是从减小电压损失还是从减小能量损耗来讲，都要求使用高压送电。

实际上各国在远距离输电时都采用高电压，而且输送功率越大，距离越远，电压就越高。当然，也不是电压越高越好，电压越高，线路以及变压器等设备的绝缘要求也越高，从而修建和维护输电线路及相应设备的成本也越高。在实际中，要综合考虑各种因素，包括距离的远近、输送功率的大小、建造和维护设备方面的技术问题，选用合适的输电电压及相应的设计方案。

我们这里只考虑导线的电阻造成的电压损失，是一种很粗略的算法，在交流输电过程中，由于电感和电容（特别是分布电容）的存在，也要造成电压损失。

远距离输电系统

目前世界各国都采用电网供电，有些国家还组成了跨国的地区性电网，图 3-4-2 是远距离输电的示意图。大型交流发电机输出的电压一般不适合远距离输电，因此要在发电站附近，经变压器把电压升高到 220 kV 或更高的超高压（或特高压），用输电线送到远方。在用电集中的地方，将电压先在一次高压变电所降到 110 kV，再由二次高压变电所降至 10 kV，其中一部分送到需要高压的地方，另一部分送到低压变电所，经配电变压器降至低压（380 V/220 V），分送给不同的用户使用。对于大型工矿企业等用电集中的地方，一般有单独的供电系统，即直接用输电线把高压电送到企业，再由企业自己的配电设备进行分配。



▲ **图3-4-2** 交流供电系统示意图

我国家庭用户电压为 220 V，称为低压线路，一般输电距离都控制在几百米范围内，输送功率在 100 kW 以内。输电距离在 20 km 以内的输电电压一般用 35 kV，这就是高压线路。输送功率在 10 万 kW 以上，输电距离超过 500 km 时，输电电压往往超过 220 kV，这称为超高压线路。1000 kV 以上电压等级，称为特高压。“十二五”期间，在新疆建设了我国电压等级最高的输电线路——1100 kV 高压输电工程。世界上最高的输电电压已达 1150 kV。

例题示范

问题　发电机的端电压为220 V，输电功率为110 kW，若要保证用户至少获得100 kW电功率，则输电导线电阻不得大于多少Ω？若用一个升压变压器升压至5500 V后进行输电，则输电导线电阻不得大于多少Ω？

分析　计算一段导线的电阻，必须知道与导线电阻有关的电流、电压、功率等，先根据输送功率与导线上允许损耗的数量求出输电电流，再计算导线电阻。

解　由电功率公式$P=UI$可知，220 V电压的输送电流

$$I_1=\frac{P}{U_1}=\frac{110000}{220}\ \text{A}=500\ \text{A}$$

而输电线上损失的功率最多为

$$P_{损}=(110-100)\ \text{kW}=10\ \text{kW}$$

所以输电线的电阻

$$R_1\leq\frac{P_{损}}{I_1^2}=\frac{10000}{(500)^2}\ \Omega=0.04\ \Omega$$

当输送电压变为U_2=5500 V后，输电电流为

$$I_2=\frac{P}{U_2}=\frac{110000}{5500}\ \text{A}=20\ \text{A}$$

所以输电线的电阻

$$R_1\leq\frac{P_{损}}{I_2^2}=\frac{10000}{(20)^2}\ \Omega=25\ \Omega$$

直流输电

在电力工业发展的初期，直流输电与交流输电几乎被同时提出来，但随着三相交流发电机、变压器、感应电动机的发明和完善，交流输电系统在经济、技术上的优势日益凸显，在实际中取得了主导地位而被广泛采用。然而随着电力工业的发展，交流输电呈现出一定的局限性。如当交流输电功率很大时，电感、电容引起的电压及电能损失很大；同一电网供电的发电机同步运行，技术上存在困难等。所以现在有些大功率输电线路已经开始采用直流输电。

当前的直流输电，只有高压输电这个环节使用直流。发电机发出的交流电，通过变压器升高电压，然后使用整流设备使它成为直流电，用输电线把高压直流电输送出去。到了用电地点附近，再使用逆变器把直流电变回到交流电，并通过变压器降压后供用户使用（整流和逆变统称为换流）。

自我评价

1. 远距离输电采用高压电，为什么能减小输电线上的能量损耗？

2. 电网供电有哪些好处？众多交流发电机组向同一电网供电，对它们发出的交流电有什么要求？

发展空间

课外阅览

无线充电

电能的传输，必须依赖导线吗？答案是否定的。

无线充电，又称为感应充电或非接触式充电，是一种新型的充电方式。它利用近场感应，可以将能量传送至需充电的设备，对电池进行充电。由于无线充电器与充电设备之间通过电感耦合来传送能量，因此二者之间不需要导线的连接（图 3-4-3）。



▲ 图3-4-3

目前无线充电的方式主要有如下三种。

1. 电磁感应式充电。这种方式的原理类似于变压器。如果初级线圈接一定频率的交流电，通过电磁感应将在次级线圈中产生一定的电流，从而实现了能量从发送端到接收端的转移。这是目前最为常见的无线充电方式。

2. 磁场共振式充电。当能量发送装置和能量接收装置的磁场调整到相同频率，或者说在一个特定的频率上共振时，它们就可以传递彼此的能量。这是一项尚在研发中的充电技术。

3. 无线电波式充电。这种方式类似于早期使用的矿石收音机，主要由微波发射装置和微波接收装置组成，它可以捕捉到从墙壁反射回的无线电波能量，在随负载做出调整的同时，保持稳定的直流电压。这种无线充电方式较为方便，技术也较为成熟，只需在插座处安装一个发送器，在低压产品上安装一个接收器即可。

我国电网的发展情况

电力系统中各种电压的变电所及输配电线路组成的整体，称为电力网，简称电网。它包含变电、输电、配电三个单元。电力网的任务是输送与分配电能，改变电压。

近年来，伴随着中国电力发展步伐不断加快，中国电网也得到迅速发展，电网系统运行电压等级不断提高，网络规模也不断扩大，全国已经形成了东北电网、华北电网、华中电网、华东电网、西北电网和南方电网 6 个跨省的大型区域电网，并基本形成了完整的长距离输电电网网架。

“十一五”时期，是中国电网建设继往开来的重要 5 年，一大批重大输电工程开工建设。其中，海南联网、呼辽直流、新疆与西北联网以及特高压交、直流等一批高等级、长距离、大容量的输电工程已建成投产，开启了中国大电网时代，增强了跨区电力传送能力。2009 年底全国跨区电力传送能力超过 2500 万 kW，全年跨区交易电量达到 1213 亿 kWh，比 2005 年增长 51.1%。中国电网规模已超过美国，跃居世界首位。

同时，中国智能电网建设步伐加快，特高压电网工程进展顺利。1000 kV 晋东南—南阳—荆门特高压交流试验示范工程顺利通过国家验收，标志着特高压已不再处于“试验”和“示范”阶段。

2011 年 10 月，皖电东送淮南至上海特高压交流输电示范工程获国家核准，成为继晋东南—南阳—荆门输电工程后全国第二条获准建设的特高压交流输电项目。2011 年，中国坚强智能电网（图 3-4-4）进入全面建设阶段，在示范工程、电动汽车充换电设施、新能源接纳、居民智能用电等方面大力推进。

目前电网建设已成为中国电力建设的主要方向，前景诱人。在未来几年中，中国电网投资规模持续扩张，将全面建成统一的坚强智能电网，初步实现建设世界一流电网的目标。



▲ **图3-4-4**　智能电网是电力建设的重要方向



反思·小结·交流

• 学后反思

1. 简谐运动、简谐波、正弦交流电，它们有着本质的区别，但均蕴含着随时间按正弦规律变化的物理量，因此我们可以用相似的特征物理量来描述：振幅（峰值）、频率、周期（波长）、相位。匀速圆周运动的投影是简谐运动，而线圈在匀强磁场中做匀速圆周运动产生正弦交流电，从中我们可以看到，事物之间存在着紧密的联系。

2. 交变电流真正深入到我们生活的方方面面，是在变压器、电动机等设备出现之后。科学与技术之间是相互促进的关系，而科学和技术的进步又推动了生产力的发展和人类生活水平的提高，进而促进了社会的进步。

• 自主小结

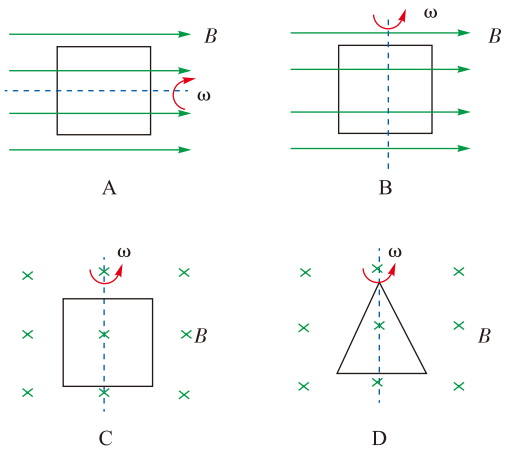
1. 推导矩形线圈在匀强磁场中匀速转动，产生的电动势随时间变化的规律。
2. 描述正弦交流电的物理量有哪些？这些物理量分别表示什么？
3. 什么是交流电的有效值？正弦交流电的有效值与峰值之间有什么关系？
4. 简述发电机和电动机工作过程中能量的转化过程。
5. 理想变压器是一种理想模型，在建立这个模型的过程中，突出的主要因素是什么？忽略的次要因素有哪些？为什么只有理想变压器才严格地满足电压与匝数的正比关系？
6. 为什么远距离输电必须要用高压输电？

• 相互交流

1. 为什么世界各地都采用电网供电的模式？
2. 为什么绝大多数工厂和家庭均使用交流电？
3. 为什么说发电机、变压器、电动机等设备的诞生及相应技术的提高，是第二次工业革命的基础和动力？

本章复习题

1. 在下列四幅图中，哪些情况下线圈中产生了正弦交流电 (　　)



▲第1题图

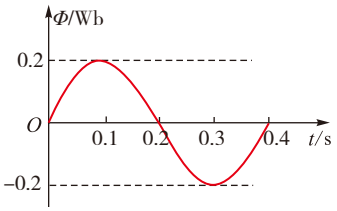
2. 矩形线圈的匝数为 50 匝，在匀强磁场中绕垂直于磁场的轴匀速转动，穿过每一匝线圈的磁通量随时间变化的规律如图所示，下列结论正确的是 (　　)

A. 在 $t = 0.1$ s 和 $t = 0.3$ s 时，电动势最大

B. 在 $t = 0.2$ s 和 $t = 0.4$ s 时，电动势改变方向

C. 电动势的最大值是 157 V

D. 在 $t = 0.4$ s 时，穿过每一匝线圈的磁通量变化率最大，其值为 3.14 Wb/s



▲第2题图

3. 理想变压器原、副线圈匝数比为 10 ∶ 1，以下说法中正确的是 (　　)

A. 穿过原、副线圈每一匝磁通量之比是 10∶1

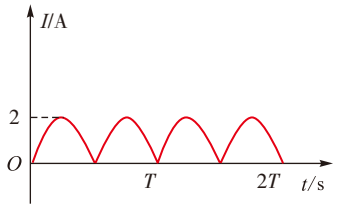
B. 穿过原、副线圈每一匝磁通量的变化率相等

C. 原、副线圈每一匝产生的电动势峰值之比为 10 ∶ 1

D. 满负荷正常工作时原、副线圈的输入、输出功率之比为 1 ∶ 1

4. 一电阻接在直流电源上，通过 4 A 的电流时热功率为 P，若换接正弦交流电，它的热功率变为 $\frac{P}{2}$，则该交流电电流的峰值为多少？

5. 如图所示为正弦交变电流经过整流后的图像，求该电流的有效值。



▲第5题图

6. 内阻不计的交流发电机产生的电动势 $e = 10\sin 50\pi t$ V，接有负载电阻 $R = 10$ Ω，现在把发电机的转速增加一倍，求负载消耗的功率。

7. 输送功率为 P，输送电压为 U，输电线电阻为 R，用户得到的电压为 U'，则输电线损失功率和用户得到的功率各是多少？

8. 发电机的转子线圈是匝数为 100 匝、边长为 20 cm 的正方形线圈，将它置于磁感应强度 $B = 0.05$ T 的匀强磁场中，绕着垂直于磁感线方向的轴以 $\omega = 100\pi$ rad/s 的角速度转动，当线圈平面跟磁场方向垂直时开始计时，线圈和外电路的总电阻 $R = 10$ Ω。

(1) 写出交变电流瞬时值的表达式；

(2) 线圈从计时开始，转过 $\frac{\pi}{3}$ 过程中通过线圈某一截面的电荷量为多少？

(3) 每秒钟产生多少焦耳热？

9. 某发电站的输出功率为 10^4 kW，输出电压为 4 kV，通过理想变压器升压后向 80 km 远处供电。已知输电导线的电阻率为 $\rho = 2.4\times10^{-8}\ \Omega\cdot$m，导线横截面积为 1.5×10^{-4} m^2，输电线路损失的功率为输出功率的 4%，求：
(1) 升压变压器的输出电压；
(2) 输电线路上的电压损失。



第四章

电磁振荡与电磁波

主题一　电磁波的产生

- 电磁振荡
- 电磁波

主题二　电磁波的应用

- 电磁波谱
- 无线电波的发射、传播与接收
- 无线电波与移动互联网

拥有“千里眼”“顺风耳”的青铜纵目面具，寄托了古人与远方交流的愿望。

今天，利用无线电广播、无线电通信传递信息，对人造卫星、导弹、宇宙飞船进行遥控，已成为现实。建于贵州的 500 m 口径球面射电望远镜（FAST），利用电磁波，可以对遥远宇宙的暗物质和暗能量进行探索。

现代社会中，人们的生活离不开电磁波。如果说电是现代文明的标志，那么电磁波就是现代文明的重要基础。

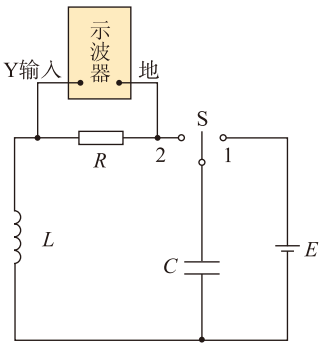
1 电磁振荡

机械波是由机械振动产生的，那么电磁波是怎样产生的呢？

LC振荡电路和振荡电流

观察思考

把自感线圈 L、可变电容器 C、示波器、电池组 E、小电阻 R 和单刀双掷开关 S 按照图 4-1-1 连接成电路，先把开关 S 扳到 1，给电容器充电，稍后再扳到 2，让电容器通过线圈放电。在示波器的屏上你观察到的小电阻 R 两端的电压随时间变化的图像是什么曲线？由此可推测，电路中电流随时间变化的图像是什么曲线？调节电容器电容大小，显示屏上的图像如何变化？它与以前学过的哪些物理量随时间变化的图像相似？



▲ **图4-1-1** 振荡电路

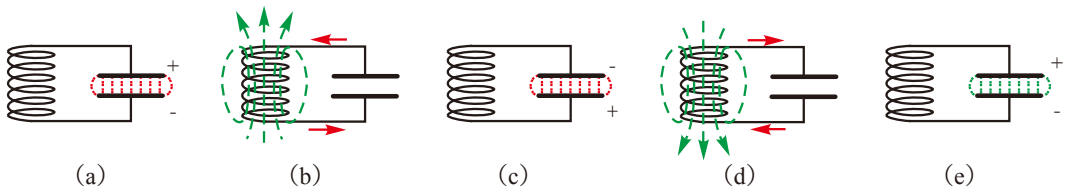
在图 4-1-1 中，从开关 S 由 1 扳到 2、电容器通过线圈放电开始，电流随时间变化的曲线是正弦（或余弦）曲线，这表明电流随时间变化的规律与家庭电路所用的交流电相同，只是电流变化的频率要高得多。（请同学们动手做做看，频率大概在什么范围？）

大小和方向都随时间做周期性迅速变化的电流称为**振荡电流**（oscillatory current），能够产生振荡电流的电路叫作**振荡电路**（oscillatory circuit）。

由线圈 L 和电容器 C 组成的电路是最简单的振荡电路，称为 LC 振荡电路。

LC 振荡电路中的振荡电流是怎样产生的呢？

把开关扳到线圈一边的瞬间［图 4-1-2（a）］，也就是已经充电的电容器要开始放电的前一瞬间，电路中没有电流，线圈中没有磁场，电容器两极板上的电荷量最多，两极板间的电场最强，电路里的能量全部以电场能的形式储



▲ 图4-1-2　电磁振荡

存在电容器中。

电容器开始放电后，线圈中有了放电电流，由于电感线圈对交变电流的阻碍作用，放电电流不能立刻达到最大值，而是由零逐渐增大，线圈产生的磁场逐渐增强，与此同时，电容器里的电场逐渐减弱，电场能逐渐转化为磁场能。放电完毕时，电场能全部转化为磁场能［图 4-1-2（b）］。

电容器放电完毕，由于线圈的自感作用，电流并不立即消失，仍保持原来的方向继续流动，电容器被反向充电，电容器两极板带上相反的电荷，且电荷量逐渐增大。在这个过程中，由于电流逐渐减小，线圈的磁场逐渐减弱，电容器里的电场逐渐增强，磁场能逐渐转化为电场能。充电完毕时，磁场能又全部转化为电场能［图 4-1-2（c）］。

此后电容器再放电，再充电［图 4-1-2（d）（e）］，这样不断地充电和放电，电路中就出现了周期性变化的振荡电流。电场和磁场周期性的相互转变的过程也就是电场能和磁场能周期性相互转化的过程，这与机械振动（如弹簧振子和单摆的振动）中势能和动能的相互转化相似，我们把这种现象叫作**电磁振荡**（electromagnetic oscillation）。

无阻尼振荡和阻尼振荡

由于电路中有电阻，电路中的能量有一部分要转化成内能，还有一部分能量以“电磁波”的形式辐射到周围空间去了。这样，振荡电路中的能量逐渐损耗，振荡电流的振幅逐渐减小，直到停止振荡。这种振荡叫作**阻尼振荡**（damped oscillation）。阻尼振荡电流随时间变化的图像如图 4-1-3（a）所示。

在电磁振荡中，如果没有能量损失，振荡将永远持续下去，振荡电流的振幅应该永远保持不变。这种振荡叫作

《物理　选择性必修第一册》第二章第5节“阻尼振动”。

无阻尼振荡（undamped oscillation）。无阻尼振荡中电流随时间变化的图像如图 4-1-3（b）所示。给阻尼振荡的电路周期性地补充一定的能量，让补充的能量等于损失的能量，则阻尼振荡就变成了无阻尼振荡。



（a）阻尼振荡　　（b）无阻尼振荡

▲ **图4-1-3**　阻尼振荡和无阻尼振荡

电磁振荡的周期和频率

与机械振动类似，电磁振荡完成一次周期性变化需要的时间叫作周期。1 s 内完成周期性变化的次数叫作频率。

振荡电路里发生无阻尼振荡时的周期和频率叫作振荡电路的**固有周期**（natural period）和固有频率，简称振荡电路的周期和频率。

理论和实验表明，LC 振荡电路的周期 T 和频率 f 跟电感线圈的电感 L 和电容器的电容 C 的关系是

$$T = 2\pi\sqrt{LC}, \quad f = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}}$$

式中的 T、L、C、f 的单位分别为秒（s）、亨利（H）、法拉（F）和赫兹（Hz）。

由上述公式可知，可以改变电容器的电容 C 或线圈的电感 L 来改变振荡电路的频率。例如，收音机、电视机中用于调台的调谐电路就是通过调节可变电容器的电容来改变周期和频率的。

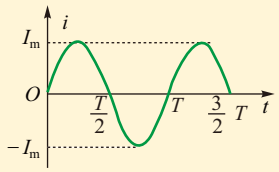
自我评价

1. 图 4-1-4 所示是图 4-1-1 中通过小电阻 R 中的电流随时间变化的图像，请定性描述 0 到 $\frac{T}{2}$ 这段时间内电容器上电荷量的变化及能量的转化。

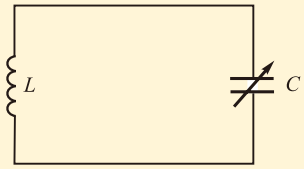
2. 某 LC 振荡电路的电感是 4 μH，电容是 64 pF，求该振荡电路的固有频率。

3. LC 振荡电路中线圈的电感为 2 μH，要产生 7.5 MHz 的振荡电流，应选用多大电容的电容器？

4. 如图 4-1-5 所示，可变电容器的最大电容是 300 pF，要获得最低频率是 500 kHz 的振荡电流，线圈的电感应当多大？如果可变电容器动片完全旋出时电容变为 30 pF，这时可产生多大频率的振荡电流？



▲ 图4-1-4



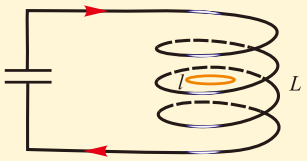
▲ 图4-1-5

2 电磁波

通过上一节的学习，我们知道振荡电路中的能量有一部分要转化成内能，还有一部分能量以“电磁波”的形式辐射到周围空间去了，那么什么是电磁波？它是怎么产生的？电磁波有什么特点？

讨论交流

在通有振荡电流的线圈 L 中，放一个小闭合导线回路 l，如图 4-2-1 所示。回路中会出现电流吗？若出现电流，那么是什么力推动电荷做定向运动形成电流的？



▲ 图4-2-1　回路中电流的出现

麦克斯韦电磁理论的两个基本假设

19 世纪 60 年代，英国物理学家麦克斯韦（图 4-2-2）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。这一理论有以下两个基本假设。



▲ 图4-2-2　麦克斯韦
（James Clerk Maxwell，1831—1879）

1. 变化的磁场能够在周围空间产生电场

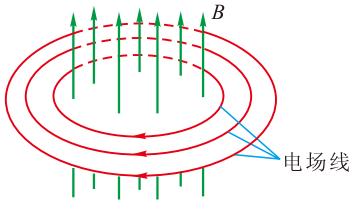
由法拉第电磁感应定律可知，若在变化的磁场中放一个闭合回路，闭合回路中产生感应电流。要产生电流必须要有使电荷做定向移动的电场存在，在这个闭合电路中，没有其他电源，因此麦克斯韦认为，这个电场是由于磁场的变化而产生的。麦克斯韦指出，闭合回路的存在只是提供了观测电场存在的手段，不管闭合回路存在与否，只要有变化的磁场存在，它的周围就产生电场，如图 4-2-3 所示。

根据理论研究，麦克斯韦进一步指出，磁场随时间变化越快，产生的电场越强；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**电荷**或由**变化的磁场**产生，前者称为静电场，后者称为感应电场。

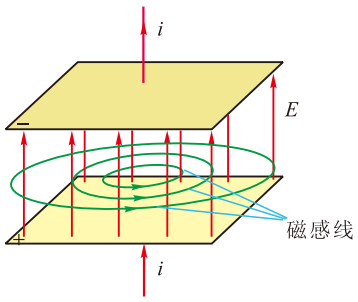
2. 变化的电场能够在周围空间产生磁场

麦克斯韦研究了电现象和磁现象的区别和联系，指出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，在 LC 振荡电路中，当电容器充放电时，不但导线中的电流要产生磁场，而且在电容器内部，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 4-2-4 所示。若电场随时间变化快，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。

想一想，如果磁场随时间均匀变化，会是怎样的情形？



▲ **图4-2-3** 变化的磁场能够产生电场（B 增大时的情形）



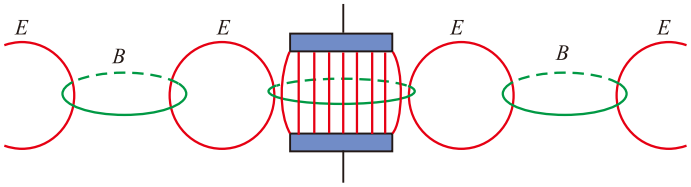
▲ **图4-2-4** 变化的电场能够产生磁场（E增大时的情形）

麦克斯韦根据上述两个基本假设，得出进一步的推论：如果在空间某区域有不均匀变化的电场，那么这个变化的电场就在它周围空间引起变化的磁场，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

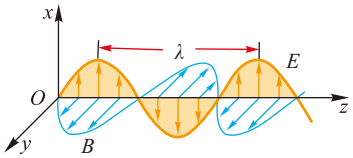
上述由变化的电场和磁场交替产生而形成的电磁场由近及远传播。这种变化的电磁场在空间中的传播形成了**电磁波**（electromagnetic wave），如图 4-2-5 所示。



▲ **图4-2-5**　电磁波的产生

电磁波虽然与机械波一样都有波的特点，但两者却有着本质的区别：机械波是质点的机械振动的传播，它必须在介质中传播；而电磁波是电磁场的传播，传播过程不需要介质，可以在真空中传播。从图 4-2-5 可以看出电磁波的电场和磁场的方向都与传播方向垂直，所以电磁波是横波。它在传播的过程中频率不变，始终与振荡电路的频率相同，在真空中的波速等于光速 c。

如图 4-2-6 所示的是沿 z 轴方向传播的电磁波，其电场 E 沿 x 方向，磁场 B 沿 y 方向，它们都与传播方向垂直。在同一位置，E 和 B 都随时间按正弦规律变化，并且同时到达最大，同时减为零。



▲ **图 4-2-6**　沿 z 轴传播的电磁波

赫兹实验证实了电磁波的存在

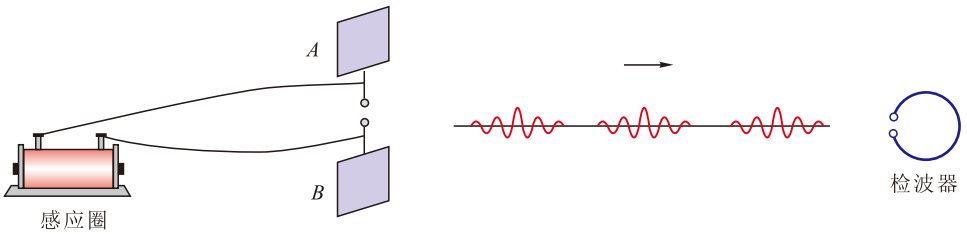
麦克斯韦在 1865 年从理论上预见了电磁波的存在，并计算出其传播速度等于光速，由此麦克斯韦认为光是电磁波的一种形态。1888 年，德国物理学家赫兹（图 4-2-7）第一次用实验证实了电磁波的存在。

赫兹所做的电磁波发射与接收实验如图 4-2-8 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，



▲ **图4-2-7**　赫兹（Heinrich Rudolf Hertz，1857—1894）

这火花是放电电流形成的，同时有电磁波向外传播。在一定距离外，放置了一个检波器，它是用导线连接的两个距离较近的铜球。结果检波器接收到了电磁波，表现为检波器的两铜球间，也有火花产生。



▲ 图4-2-8 赫兹实验

赫兹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。

电磁波的波长λ、波速v和周期T、频率f的关系与机械波一样，由下式表示

$$\lambda = vT = \frac{v}{f}$$

电磁波在真空中的传播速度$v = c \approx 3\times10^8$ m/s。

麦克斯韦理论在物理学发展史上的意义

麦克斯韦总结了电磁学研究先驱们的工作，在两个基本假设的基础上，建立了电磁场方程，预言了电磁波的存在，把电磁学发展成为完整的、优美的理论体系，统一了人们对电磁和光现象的认识，为电和磁的利用奠定了理论基础。麦克斯韦电磁理论是继牛顿建立经典力学体系之后的又一次对自然现象认识的伟大综合。它为深入研究物质的电磁结构及客观性质提供了理论工具，同时，正是这个理论为现代电力工业、现代电子、无线电技术、通信技术等奠定了基础，使得电和磁的应用进入到现代社会生活的各个方面。

爱因斯坦对这个理论赞叹不已，做出了高度评价：这

是个从超距作用过渡到以场作为基本变量，以至引发一场革命的理论。从麦克斯韦开始，人们认识到场是物质存在的一种基本形式，它是客观存在的，而不仅是人为的数学概念，这大大扩展了人们对自然界的认识和对整个自然科学的视野。

麦克斯韦理论中的一个重要结论是光在真空中的速率是一个常量，与参考系无关。爱因斯坦就是根据这一结论提出了光速不变原理，而于 1905 年建立了狭义相对论。狭义相对论与量子理论一起开创了现代物理学的新纪元。

自我评价

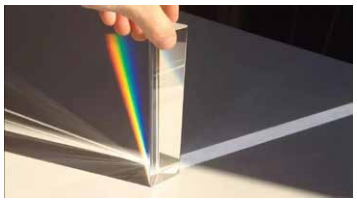
1. 麦克斯韦电磁场理论的两个基本假设是什么？
2. 机械波与电磁波的区别有哪些？
3. 我国第一颗人造地球卫星采用 20.009 MHz 和 19.995 MHz 的频率发射电磁波信号，求这两种频率的电磁波在真空中的波长（光速取 2.9979×10^8 m/s）。

3 电磁波谱

电磁波的波长和频率有一个很宽的范围。把无线电波、红外线、可见光、紫外线、X 射线、γ 射线等，按波长（或频率）排列起来，就形成了**电磁波谱**（electromagnetic wave spectrum）（见图 4-3-5）。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。

观察思考

我们学习过光的色散，知道一束白光可以分解为七种不同频率的色光（图 4-3-1）。那么，电磁波按频率不同可以分为哪些不同的成分呢？



▲ 图4-3-1 色散

可见光

作用于我们的眼睛并引起视觉的电磁波，叫作可见光。可见光的波长范围为 400 ～ 760 nm，它包含赤、橙、黄、绿、青、蓝、紫七种颜色，其中紫光的频率最高，红光的波长最长。我们看到的世界五彩斑斓，正是由各种色光组成的。

无线电波

无线电波波长从几毫米到几十千米，它对我们的生活十分重要，其波段划分及主要用途如表 4-3-1 所列。

表4-3-1 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 ~ 3 000 m	10 ~ 100 kHz	超远程无线电通信和导航
中波		3 000 ~ 200 m	100 ~ 1 500 kHz	无线电广播和电报通信
中短波		200 ~ 50 m	1 500 ~ 6 000 kHz	
短波		50 ~ 10 m	6 ~ 30 MHz	
微波	米波	10 ~ 1 m	30 ~ 300 MHz	无线电广播、电视、导航
	分米波	10 ~ 1 dm	300 ~ 3 000 MHz	电视、雷达、导航
	厘米波	10 ~ 1 cm	3 ~ 30 GHz	
	毫米波	10 ~ 1 mm	30 ~ 300 GHz	

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

红外线

红外线是在1800年被发现的。当时英国的物理学家赫歇耳（William Herschel，1738—1822）利用温度计在日光光谱红端以外观察到增温现象，确定存在一种眼睛看不见的射线。

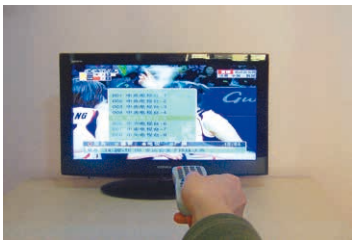
波长位于微波和可见光之间的电磁波称为红外线。红外线的波长范围为 760 ～ 10^6nm。 红外线不能直接引起视觉，但能给人以“热”的感觉。

红外线的频率与固体物质分子的固有频率很接近，容易引起固体物质分子共振，使红外线电磁场的能量转变成物质的内能。因此，可以利用红外线加热和烘干物

体，进行某些医疗、保健等工作。

遥控器发出的红外线脉冲信号，可以用来遥控电视机（图 4-3-2）、电风扇和空调机等。

一切动物以及墙壁、地面、车辆、飞机等物体都在不停地发射红外线，物体温度越高，其辐射出的红外线越强。利用电子仪器对接收到的红外线信号进行分析，就可以探知被测物体的特征，这种技术叫作红外线遥感。



▲ **图4-3-2**　用遥控器选择电视节目

紫外线

紫外线是一种波长比波长最短的可见光（紫光）还短的电磁波。一切高温物体都能够发射紫外线，如太阳、弧光灯发出的光就包含紫外线。紫外线的波长范围为 60 ～ 400 nm，与红外线一样，紫外线不能直接引起视觉。

紫外线能杀死多种细菌，常用于医院和食品消毒。被紫外线照射的某些物质会发出荧光，荧光灯和杀害虫的黑光灯都是用紫外线来激发荧光的，紫外线的这种荧光作用还能用来做防伪标志。紫外线有助于人体合成维生素 D，但过量的紫外线照射会使皮肤粗糙，甚至诱发皮肤癌。

1801 年，里特（Johann Wilhelm Ritter，1776—1810）发现在太阳光谱紫端的外面一段，能够使含有氯化银的底片感光，因而首次发现了紫外线的存在。

X射线

X 射线是一种波长比紫外线还短的电磁波。它的穿透能力很强，能使包在黑纸里的照相底片感光。在工业上可用于检查工件内部是否有砂眼、裂纹等缺陷；在医学上可用来透视人体，检查体内的病变和骨骼情况。图 4-3-3 是伦琴为他的夫人拍下的照片，这也是世界上第一张 X 射线照片。

X射线又叫伦琴射线，是德国物理学家伦琴（Wilhelm Konrad Rotgen，1845—1923）在1895年发现的。



▲**图4-3-3**　1895年12月22日，伦琴在实验室为他的夫人拍下了世界上第一张X射线照片

γ 射线

比 X 射线波长更短的电磁波，那就是 γ 射线，它来自宇宙射线或某些放射性元素衰变的过程。γ 射线的波长

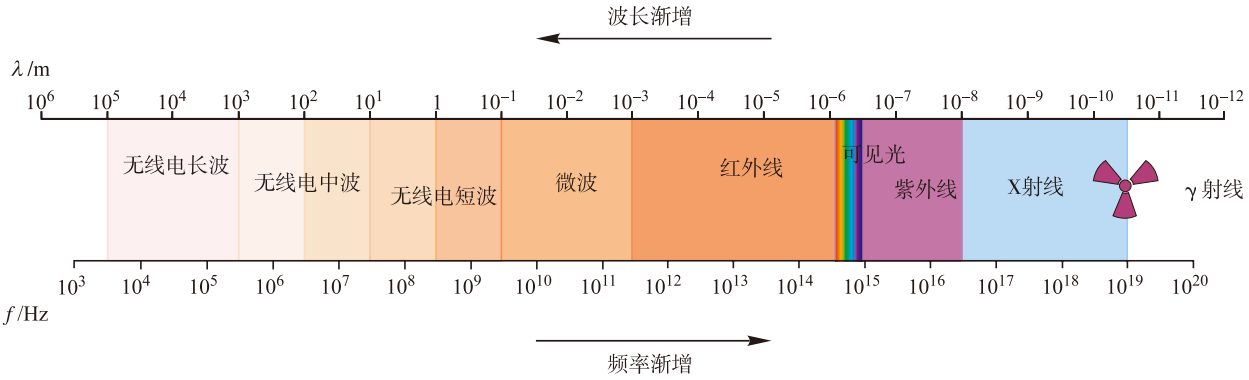


▲ 图4-3-4 辐射警告标志

范围为 10^{-7} ～ 10^{-2} nm。γ 射线的穿透能力比 X 射线更强，因此，工业上常用它来进行探伤；医学上，则利用其强穿透能力来杀死病态细胞，治疗某些疾病，例如癌症等，因而有 γ 刀之称。

γ 射线对人体正常细胞有很强的破坏作用。因此，在 γ 射线可能出现的地方，必须提出警告，严加防护（图 4-3-4）。

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 4-3-5 所示。其中最长的波长是最短波长的 10^{21} 倍以上，各个波段都有重叠，不能严格区分。



▲ 图4-3-5 电磁波谱

自我评价

1. 根据电磁波谱，指出波长为 4687 m、6.2×10^{-7} m 和 2×10^{-6} m 的电磁波分别为哪种类型的电磁波。

2. 中央人民广播电台利用的一种无线电波的频率是 720 kHz，而一种宇宙射线的频率是 3×10^{22} Hz，这些电磁波的波长各是多少？

发展空间

课外阅览

电磁辐射污染

LC 电路振荡时，有一部分能量以电磁波的形式辐射出去，这就是电磁辐射。手机、电脑、电视、微波炉都存在电磁辐射。学习了电磁波谱后我们知道，电磁辐射无处不在，与我们“形影相随”。不过，只有当它的能量超过一定的限度造成污染，才会出现负面效应，这就是电

磁辐射污染（有人称之为“第五大公害”）。

地球上电磁辐射污染的来源主要分为天然辐射和人为辐射两种。

天然辐射是由大气中的某些自然现象引起的，比如大气中由于电荷的积累而产生的放电现象；也可以是来自太阳辐射和宇宙的电磁波源。这种电磁污染除了对人体、地面物体等产生直接的破坏外，还会在很大范围内产生严重的电磁干扰，尤其对短波通信的干扰最为严重。

人为辐射是指人工制造的各种电路系统、电气和电子设备产生的电磁辐射。人为辐射按频率不同可分为工频场源和射频场源。工频场源主要是指大功率输电线路的电磁辐射污染，如大功率电机、变压器等产生的电磁场，它们并不是以电磁波的形式向外辐射，主要对近场区域产生电磁干扰。射频场源是指无线电、电视等各种射频设备工作时产生的电磁辐射和电磁感应，这类人为辐射源的频率范围宽、影响区域大，对近场工作人员危害也较大，因此已成为电磁污染环境的主因。

长期处于高电磁辐射环境，会对人体产生不良影响。有研究认为，电磁辐射污染极可能是造成儿童患白血病的原因之一；也能够诱发癌症并加速癌细胞的增殖；会影响人的生殖系统，诱发自然流产和胎儿畸形，导致儿童智力残缺；损害人体的心血管系统。另外，长期面对计算机屏幕，会对人的视觉系统造成伤害。

不过，我们也不必杞人忧天，在绝大多数情况下，电磁辐射污染的影响是有限的。

物理在线

1. 目前已有一些品牌的手机可以与电视机“对话”，替代了遥控器的角色。那么，传统的电视遥控器会消失吗？“新型”遥控器是怎么工作的？请你利用图书馆或互联网查询资料，了解这一技术的原理及其发展趋势。

2. 传统炊具是通过燃烧燃料或电流的热效应，将释放的热量经锅体传递给食物，从而达到加热的目的。微波炉的工作方式则完全不同。请你利用图书馆或互联网查询资料，了解微波炉的工作原理及其使用注意事项。

4　无线电波的发射、传播与接收

在《物理 必修 第三册》及本章前三节的学习中，我们了解了电磁波的产生原理，它有宽广的频率和波长范围。其中，人们常用无线电波来传递文字、声音、影像等各种类型的信息。那么，怎样才能让无线电波发射得更远？它在传播过程中有什么特点？如何有效地接收无线电波？

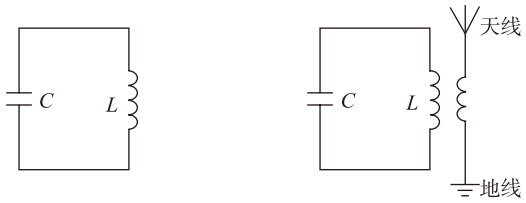
无线电波的发射

在技术上，通常用振荡电路产生电磁振荡，如图4-4-1（a）所示的 LC 振荡电路，它所产生的电场主要集中在电容器两极板之间，磁场主要集中在电感线圈内部，电场能和磁场能互相转化，周围空间的电磁场很弱，不能有效地发射电磁波。

怎样才能有效地发射无线电波呢？必须具备以下两个条件。

第一，振荡电路产生的电场和磁场必须分布到广大的开放空间中，才能有效地把电磁场的能量传播出去。

常用的方法，是把 LC 振荡电路耦合（即感应）到另一个发射电路中，如图 4-4-1（b）所示。发射电路的电容器的两个极板分开到很远，并且变成了两根直线，向下的接入大地，称为地线，向上的高高伸向天空，称为天线。这样，振荡过程中的电场能和磁场能就分布在更广大的空间中，从而它激发的电磁波就可以传向远方。



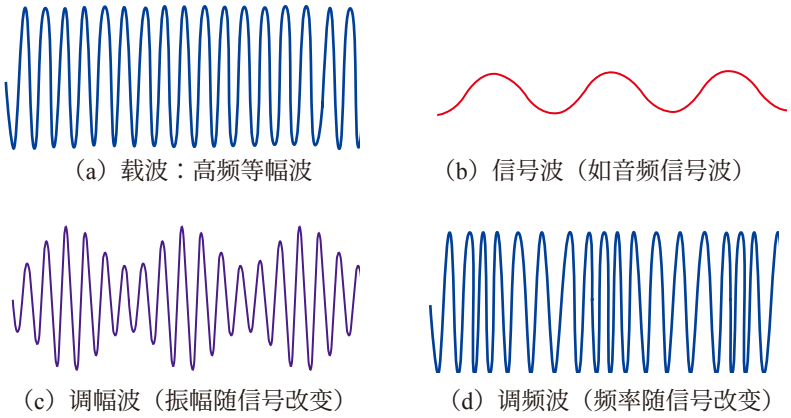
（a）LC振荡电路　　（b）LC振荡电路和发射电路

▲ **图4-4-1**　开放的发射电路能把电磁波发射到远方

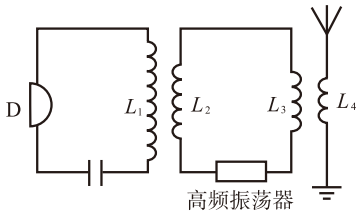
第二，要有足够高的振荡频率。研究表明，频率越高，振荡电路向外发射电磁波的本领越强。由振荡频率公式 $f=\dfrac{1}{2\pi\sqrt{LC}}$ 可知，采取措施使 L、C 的值减小，使频率升高，将有利于电磁波的发射。

发射电磁波是为了利用它来传递某种信号，这种信号是加在高频等幅电磁波上发射出去的，这种用来“运载”信号的高频等幅波，通常叫作**载波**（carrier wave）[图 4-4-2（a）]。把传递的信号“加”到载波上的过程叫作**调制**（modulation），常用的调制方法有调幅和调频两种。使高频振荡的振幅随信号而变的叫作**调幅**（amplitude

modulation）［图 4-4-2（c）］，使高频振荡的频率随信号而变的叫作**调频**（frequency modulation）［图 4-4-2（d）］。图 4-4-3 是无线电广播中进行调幅广播的示意图。图中 D 是麦克风，它把声波变成相应的音频电流［图 4-4-2（b）］。这个电流通过线圈 L_1 使线圈 L_2 产生感应电流，振荡器产生的高频振荡电流的振幅就会随音频电流的波形而改变［图 4-4-2（c）］。调幅后的电流流过 L_3 使 L_4 产生感应电流，则载有音频信号的电磁波就从发射电路中发射出去了。



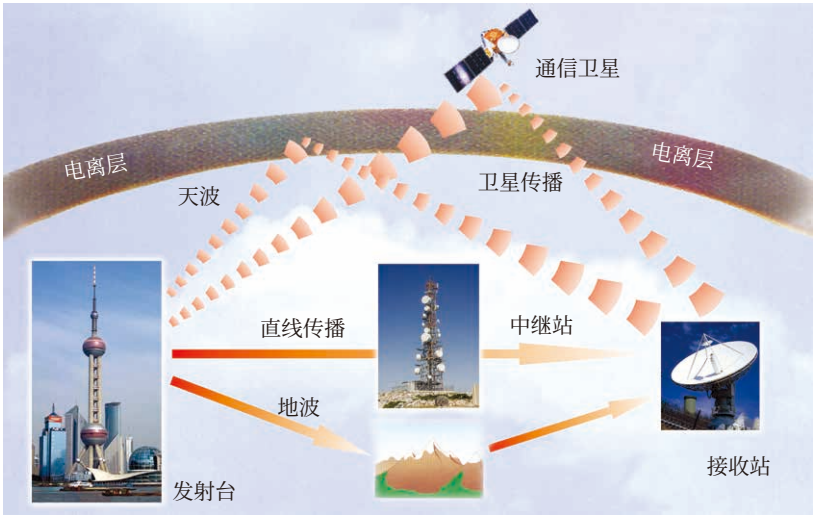
▲ **图4-4-2**　调幅与调频



▲ **图4-4-3**　无线电广播调幅装置

无线电波的传播

发射出去的波长不同的无线电波，传播方式不同，无线电波有三种主要传播方式（图 4-4-4）。



▲ **图4-4-4**　无线电波传播的多种方式

1. 地波

沿地球表面空间传播的无线电波叫作地波。由于地面上有高低不平的丘陵山峰和房屋等障碍物的阻挡，所以只有能绕过这些障碍物的无线电波，才能被各处接收到。根据波的衍射条件可知，当波长大于或与障碍物的尺寸相当时，波可以绕过障碍物继续传播。长波、中波和中短波可用地波传播，但短波和微波则不宜用地波传播。

由于地面的吸收，地波在传播过程中能量损失较大，因此地波不能传得很远，一般只在几百千米范围内。

《物理 选择性必修 第一册》第三章第 5 节“机械波的衍射”。

2. 天波

依靠电离层的反射来传播的无线电波叫作天波。

地球被厚厚的大气层包围着，在距地表 50 千米到几百千米范围内的大气，一部分气体分子由于受到太阳光的照射而发生电离，成为带正电的离子和自由电子，这层大气叫作电离层。

实验证明，波长短于 10 m 的微波，将穿过电离层而进入太空；波长超过 3 000 m 的长波，基本会被电离层吸收掉。波长在这二者之间的电磁波，波长越短，电离层对它吸收得越少而反射得越多。可见，短波最适宜以天波的形式传播，可以传播到几千千米外的地方。

3. 直线传播

微波又叫超短波，它既不能以地波的形式传播，又不适宜以天波的形式传播。微波的传播形式跟光一样，是沿直线传播的。这种沿直线传播的电磁波叫作空间波或视波。

地球表面是球形的，微波沿直线传播时能够传播的距离不大，一般只有几十千米。在远距离通信时，要设立中继站。由某地发射出去的微波，被中继站接收，并加以放大，再传向下一站，把信号传到远方。直线传播方式受大气的干扰小，能量损耗小，所以接收到的信号较强而且比较稳定。电视、雷达采用的都是微波。

另外，还可以用卫星作为中继站传送微波。地球同

查一查手机通信所用的无线电波的波长。

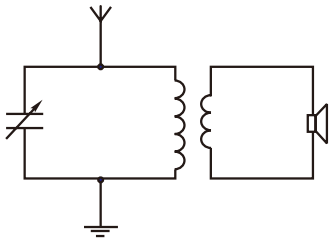
步通信卫星静止在赤道上空约 36 000 km 高的地方，用它来做中继站，可以使无线电信号跨越大陆和海洋。只要有 3 颗均匀分布的同步卫星，微波信号就可以传遍除两极等少部分地区外的世界各地。

无线电波的接收

由无线电发射机发射出来的电磁波，在空间传播中遇到导体时，就会在导体里感应出振荡电流。这种感应电流的能量是从电磁波里获得的，它的频率和激起它的电磁波的频率相同，它的振幅和电磁波的强弱有关。

无线电技术中用来接收电磁波的导体叫作接收天线，它在电磁波的影响下产生了感应电流。空间中，存在着由无数的无线电台发送的各种频率的电磁波。从中选出所需的无线电波的操作一般叫作“选台”，选台的目的就是使我们需要的电磁波在接收电路中激起的感应电流最强，而我们不需要的电磁波激起的感应电流很弱，不产生明显影响。

当振荡电路的固有频率与传播来的电磁波的频率相等时，电路中激起的感应电流就最强。这种现象叫作**电磁谐振**，也称为电谐振。使接收电路产生电谐振的过程叫作**调谐**（tuning），能够调谐的接收电路叫作调谐电路。我们可以在如图 4-4-5 所示的调谐电路中，通过改变电容器的电容来改变电路的固有频率，使它跟某一个电台发射的频率相同，则这个频率的电磁波在调谐电路里激起的感应电流最强，这样我们就选出了这个电台，并获得该电台所发射电磁波中携带的信号。



▲ **图4-4-5**　调谐电路与无线电波的接收

在我们的生活中，收音机、电视、雷达、手机等都是常见的接收无线电波的设备。

太空中的脉冲星等星体也在发射无线电波，接收它们的无线电波信号，可以帮助我们认识和了解宇宙。本章首页图，是世界上最大口径的射电望远镜 FAST。它建于我国贵州省黔南布依族苗族自治州平塘县克度镇的喀斯特洼坑中，是我们“聆听”遥远宇宙声息的“耳朵”。

宇宙空间混杂各种辐射，遥远的信号像雷声中的蝉鸣，没有超级灵敏的“耳朵”，根本就分辨不出来。

——南仁东

活动

请通过图书馆或互联网查找资料，制作一个简易的无线电发射装置。

自我评价

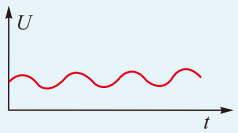
1. 有效发射电磁波要满足哪两个条件？
2. 无线电波的传播有哪些方式？
3. 什么是电磁谐振现象？
4. 请通过查阅资料，了解我国 500 m 口径球面射电望远镜的建成过程及其意义。

发展空间

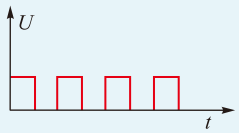
课外阅览

模拟信号与数字信号

在通信设备中，模拟信号和数字信号是传输信号的两种形式。模拟信号指的是在时间上连续的，数值幅度也是连续变化的信号，如图 4-4-6 所示。传统的音频信号、视频信号，都是模拟信号。数字信号是指时间上离散、数值幅度固定不变的信号，它通过电压脉冲的变化（如用高电压和低电压分别代表 1 和 0）来表示要传输的数据，如图 4-4-7 所示。



▲图4-4-6　模拟信号波形



▲图4-4-7　数字信号波形

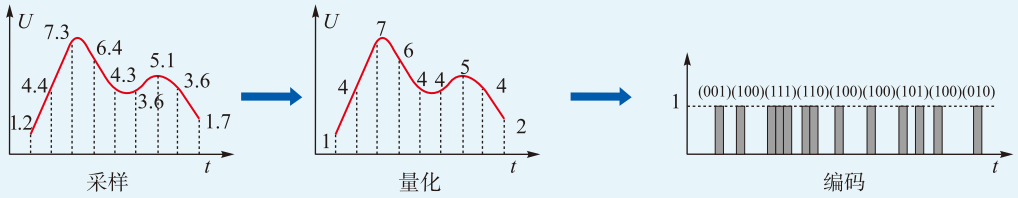
利用模拟信号进行通信，先要把原始信息转换成几乎“一模一样”的波动电信号（“模拟”因此而得名），再以有线或无线的方式传输出去。电信号被接收下来后，通过接收设备还原。

100 多年来，无论是有线相连的电话、传真，还是无线发送的广播、电视，很长的时间内都是用模拟信号来传递信息的。模拟信号同原始信息在波形上几乎“一模一样”，似乎应该达到很好的传输效果。然而事实恰恰相反，过去我们打电话时常常遇到听不清、杂音大的现象；广播电台转播的交响乐跟现场乐队的演奏效果相比，总有较大差距；电视图像也时有雪花点闪烁。这是什么原因呢？

原来，信号在传输过程中要经过许多处理和转送，这些设备难免要产生一些噪声和干扰。如果是有线传输，线路附近的电气设备也要产生电磁干扰；如果是无线传送，则更加“开放”，天空中的各种干扰根本无法躲避。这些干扰很容易引起信号失真，也会带来一些噪声。这些失真和附加的噪声会随着传输距离的增加而积累起来，而受损后的模拟信号几乎不可能再次被还原，这影响了信息传输的质量。

20 世纪 70 年代后，人们逐渐掌握了利用数字信号进行通信的技术。数字信号通信与模拟信号通信有什么不同呢？

把原始信息转换成数字信号，一般要经过采样、量化和编码这样三个过程，如图 4-4-8 所示。采样是指每隔一小段时间，取原始信息的一个值。采样以后要进行量化，把取得的样值“四舍五入”，进行分级。最后就是编码，把量化后的值分别编成仅由“0”和“1”两个数字组成的序列，由脉冲信号发生器生成相应的数字信号。这样就可以用数字信号进行传送了。



▲ 图4-4-8　原始信息转化为数字信号的过程

在上面的转化过程中，我们不是取原始信息的全部值，而是隔一段时间取一个样值，这样似乎损失了一些信息。但由于采样时我们把时间间隔取得非常短（比如每秒 8000 次），量化时分的级很密集（比如分为 256 级），编码时的二进制数足够大（比如采取 24 位二进制数进行编码），信息损失其实很少。目前的高保真音频、高清视频都采用的是数字信号处理技术。

比起模拟信号，数字信号具有巨大的优势。

首先，数字信号的抗干扰能力特别强。它只有两种状态，即 1 和 0。如果它受到了干扰，使得我们在某时收到了一个 0.9，那么我们有几乎绝对的把握认为原来的信号应该是 1，进而予以恢复，由此极大地提升了通信质量。

其次，目前广泛使用的计算机处理的信号是数字信号。在通信上使用数字信号，就可以很方便地将计算机与通信结合起来，将计算机处理信息的优势用于通信事业，也可以很方便地借助互联网进行信息传递。

再次，数字信号便于存储。信息一旦数字化，可以用 CD、VCD、DVD、磁盘乃至网络云盘进行贮存，容易实现无损复制。

此外，数字通信可以兼容电话、电报、数据和图像等多类信息的传递，能在同一条线路上传送电话、有线电视、计算机等多种信号。数字信号还便于加密和纠错，具有较强的保密性和可靠性。

可以说，目前几乎所有复杂的信号处理都离不开数字信号。

物理在线

《物理 必修 第一册》中曾提到，在运动中需要弄清这三个问题：我在哪里？我要去的地方在哪里？选哪条路线最佳？今天，手机和车载导航仪中均配备了卫星定位系统，这三个问题已不再困扰我们。学习了无线电波的发射、传播和接收的相关内容，你对卫星定位系统有更深入的认识吗？

请利用图书馆或上网查找资料，进一步了解它的工作原理。

5 无线电波与移动互联网

你一定听说过“移动互联网”，它与我们上一节学习的无线电波有什么关系呢？

电磁波与信息技术的演变



▲ **图4-5-1** 人类用眼睛获取信息

获取、表达、存储和传递，都属于信息技术的核心内容。

人类自诞生之日起，便是通过电磁波获取信息——眼睛接收可见光，形成视觉（图 4-5-1），使人认识周围的世界，探知寥廓的星空。

从出现语言、造型绘画、结绳记事到创造文字，在信息表达上的每一次进步，都推动着人类文明向前发展——从蒙昧到开化，从混沌到有序。

口口相传，或许是人类最早的信息传递方式。纸和印刷术的发明使信息得以大量流通，书籍、报纸、杂志因此发展起来。那时，信息以纸为载体，只是舟车迟缓，千里家书春时发出，送到家人手中可能已是入夏时节。

除了烽火传军情、八百里加急、飞鸽传书等少量的紧急通信方式外，古代的长距离信息传递，一直停留在邮亭驿站的人工搬运中，蹉跎了千年（图 4-5-2）。1895 年，波波夫和马可尼的无线电报机的问世，开创了无线通信的先河（图 4-5-3）。自此，利用电磁波传递信息的方式如燎原



▲ **图4-5-2** 邮筒是古老信息传递方式的传承



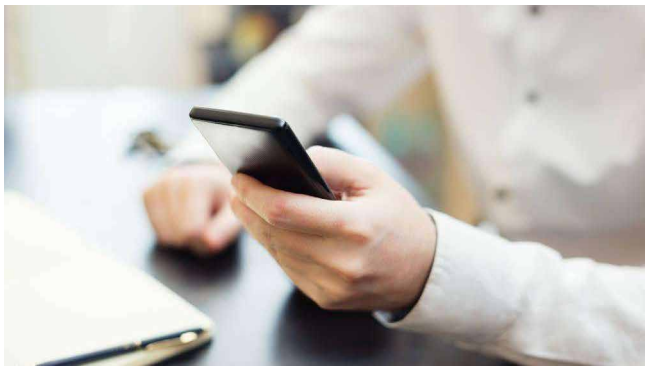
▲ **图4-5-3** 人们用发行邮票的方式，纪念波波夫和马可尼的伟大贡献

之火，蓬勃发展。

100 多年中，电视从无线发展为有线，电话从有线发展为无线，电报已消亡……。世纪之交，互联网走进我们的生活。开始时，主要的上网设备是个人计算机（图 4-5-4），它通过网线、光缆相互连接。而 20 年之后，情况发生了变化（图 4-5-5）。



▲ **图4-5-4**　以前的主要上网方式



▲ **图4-5-5**　今天的主要上网方式

今天，人类迈入移动互联时代。我们借助电磁波，可以随时随地获取和发送信息，不再受制于双绞线或光缆的束缚。移动互联网，深刻地改变了当代社会的工作方式、生活方式和学习方式。

蜂窝系统

据统计，2017 年末我国手机用户达到 141749 万户，手机普及率上升至 102.5 部 / 百人；全年互联网上网人数 7.72 亿，其中手机上网人数 7.53 亿，移动互联网接入流量 246 亿 GB。手机已不仅仅是语音通话的工具，它还是一个移动的网络终端，成为我们工作、生活不可或缺的一部分。

讨论交流

手机是怎样实现彼此通信的呢？你听说过蜂窝系统吗？

每一部手机都相当于一个无线电台，将各种信息转变为电信号发射到空中；同时它又相当于一个收音机，捕捉

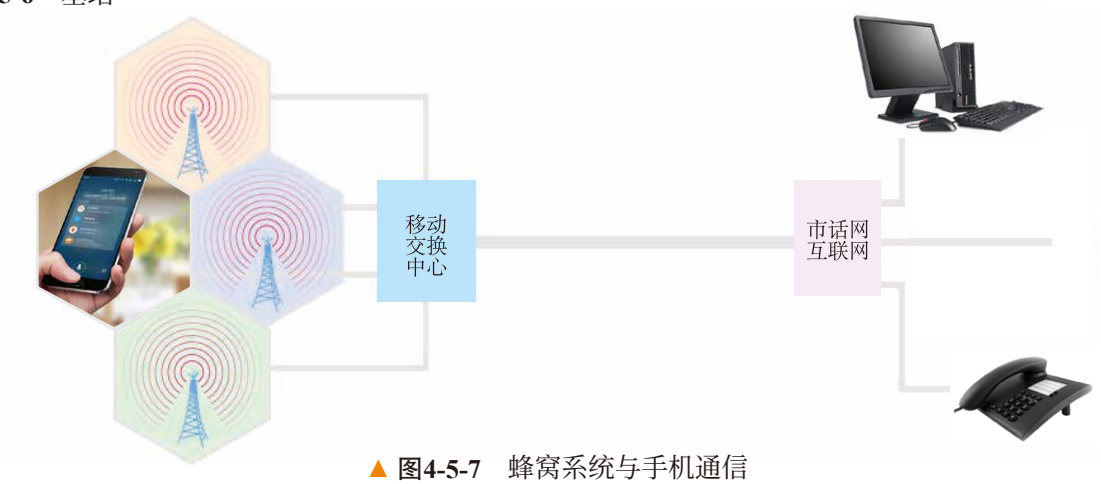


▲ 图4-5-6 基站

空中的无线电波，使用户接收到信息。

为了便于携带，手机体积一般都不大，发射功率很小，它的天线也很简单，接收无线电波的灵敏度不高。要让手机与其他网络终端实现信息传递，就需要借助大型的固定无线电台来转接，这样固定的无线电台就是基站，如图 4-5-6 所示。

为了最充分地利用资源，每一个基站的工作范围经过合理调配后呈正六边形，排列起来像蜂窝一样，这就是“蜂窝系统”名字的由来（图 4-5-7）。



▲ 图4-5-7 蜂窝系统与手机通信

基站与移动交换中心连接。移动交换中心是一个庞大的信息枢纽，它对每一条信息进行分拣、处理、传递，并承担着移动通信网络与固定电话网、互联网的连接。



▲ 图4-5-8 无线路由器

网络协议

除了利用通信运营商提供的无线网络外，如果用无线路由器（图 4-5-8）搭设了无线局域网，手机也可以通过登陆无线局域网的方式连接互联网，这样的技术叫作 Wi-Fi（图 4-5-9）。



▲ 图4-5-9 Wi-Fi标志

讨论交流

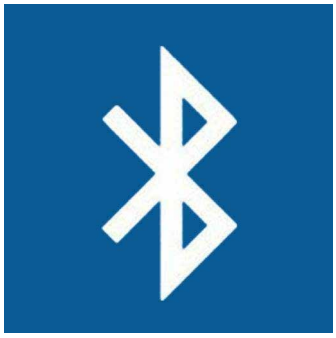
你使用过 Wi-Fi 吗？它是怎样实现短距离的高速无线数据传输的？

从无线路由器的形状，我们可以猜测一二，它也相当于一个无线电台，通过发射和接收无线电波来帮助手机、平板电脑、笔记本电脑等设备实现数据传输。

不过，连接 Wi-Fi 的设备很多，类型也不一样，怎样才能保证设备间建立起联系，并且数据传输无误呢？这就需要无线路由器以及与它相连的手机等各种设备遵守一个共同的约定，按照一定的标准行事。比如双方约定好这些问题 ：接头暗号是什么？数据打多大的包？怎么加密？怎么确定接收完数据了？用多大频率的电磁波传递数据？等等。

这样的约定叫作协议或标准，例如，Wi-Fi 技术的协议叫作 IEEE 802.11。事实上，互联网能实现数以十亿计的各类设备间的畅通交流，正是建立在共同遵从大量协议的基础上。

随着技术的不断发展，设备之间信息传递的方式不断增多，已经可以实现手机与智能卡的数据交换。除了 Wi-Fi 外，蓝牙（图 4-5-10、图 4-5-11）和近场通信（NFC，图 4-5-12）等也是我们常能听到的“ 热词 ”，它们都蕴含巧妙的技术设计。



▲ **图4-5-10**　蓝牙标志



▲ **图4-5-11**　可以通过蓝牙方式与手机连接的耳机



▲ **图4-5-12**　利用近场通信技术，手机可以用作公交卡

用电磁波传递二进制数据

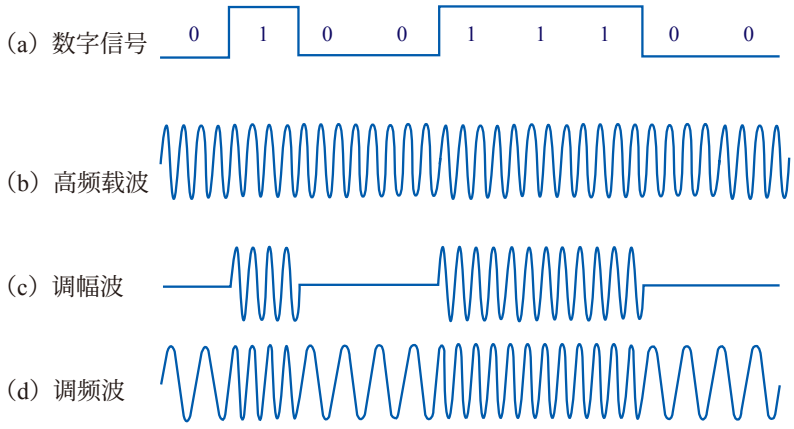
虽然各个设备之间依照协议做好了交换数据的准备，但倘若没有物理层面的桥梁，一切规划不过是空中楼阁。

在上一节，我们知道，可以将信息通过调制加载到载

波上发射出去，在接收端通过调谐进行接收，进而解调，实现信息的传输。那么，移动互联网中的无线通信，是怎样的情形呢？

方式是相似的。不过无论是智能手机、平板电脑还是个人计算机，处理的信号都是用幅度恒定的脉冲电压来表示的数字信号，它包含二进制数据，如图 4-5-13（a）所示。用这样的信号对载波［图 4-5-13（b）］进行调制后，形成的波形如图 4-5-13（c）（d）所示。

把这些调幅波或调频波发射出去，二进制数据也可以插上翅膀，飞向远方。



▲ 图4-5-13

活动

查阅相关的技术资料，了解 Wi-Fi、蓝牙、NFC 等无线通信方式的工作原理。它们用来传递数据的无线电波的频段是什么？

当今世界，信息技术创新日新月异。利用导航软件，出行路线一目了然；居家休闲，足不出户便可“云游”博物馆……随着数字中国建设的深入推进，数字技术得到了广泛应用，万物互联，点亮了数字生活。放眼未来，移动互联网还会有怎样的发展？物联网会怎样改变世界？

或许一切超乎我们的想象，正如 100 多年前认为“如果要利用电磁波进行无线通信，那非得有一面和欧洲大陆面积差不多大的巨型反射镜才行”的赫兹，想象不到今天移动互联网带来的精彩一样。

感悟 · 启迪

人类在用视觉认识世界的漫长历史中形成一个经典观念：物质是看得见、摸得着的客观存在。科学实验突破了人的感知，发现了看不见的空气，窥探到物质内部的分子、原子、电子以及宇宙深处的茫茫天体。最令人深思的恐怕还是电磁场的发现，场物质的发现不仅带来新的世界观，电磁场和电磁波技术还带给人类灿烂的物质文明。由此我们可以得到这样的启示：人的感知是有限的，但人类的智慧和创造力是无限的，重要的是不断地学习、研究和探索。

反思 · 小结 · 交流

• 学后反思

1. 法拉第在电磁学的研究中做出了重大贡献，但数学不是他的强项，他无法建立完整的理论。麦克斯韦总结了前人的大量成果，进行了严密的逻辑推理，运用科学的数学语言，建立了完整的电磁场理论，预言了电磁波的存在。赫兹用实验证实了电磁波存在，从而开启了现代信息技术高速发展的大门。由此，对于理论和实验的关系，你是否有更深入的认识和理解呢？

2. 电磁场是一种物质，从这个意义上说，电磁波是物质的传播，这与机械波有本质上的不同。但电磁波与机械波一样，都能传播能量和信息，人们利用电磁波，也主要是用它来传播能量和信息，你能举出生活中的实际例子吗？

• 自主小结

1. 写出 *LC* 振荡电路周期和频率的表达式。

2. 麦克斯韦是怎样从人类已经掌握的知识出发，经过逻辑推理而做出关于电磁场理论的两个基本假设的？

3. 电磁波与机械波的不同与相同之处有哪些？

4. 说出红外线、紫外线等几种主要电磁波的特点及应用。

5. 我们生活的空间中，有无数电磁波在传播，如何从中选出我们想要接收的那一种呢？

6. 有许多极具创造性的思维（或发现）使电磁波得以广泛应用。说出你最欣赏的几条，并说明理由。

• 相互交流

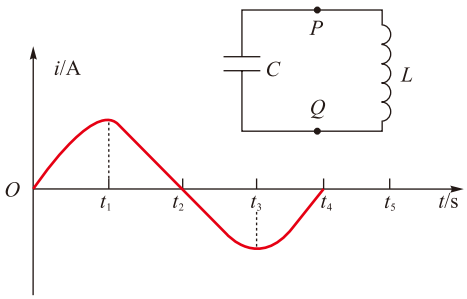
1. 有同学说，只要让磁场（或电场）快速变化就能发射电磁波，你认为对吗？有同学说，任何一次短时间的放电，包括自然界的闪电、工人电焊产生的电弧等，都会发射电磁波，你认为对吗？为什么？

2. 科技上的每一次进步都会对人们的生活产生巨大的影响。现在的生活中有没有这样的例子？

本章复习题

1. 下列说法正确的是（　）
   A. 所有电磁波产生的机理都是一样的
   B. 光波也能传递信息
   C. 在真空中，红光比紫光的速度大
   D. 电磁波就是指无线电波

2. 如图所示是 LC 振荡电路和通过点 P 的电流随时间变化的规律。若把流过点 P 向右的电流规定为正方向，那么（　）
   A. 在 $t_1 \sim t_2$ 内，电容器 C 在充电
   B. 在 $t_1 \sim t_2$ 内，电容器 C 的上极板带正电
   C. 在 $t_1 \sim t_2$ 内，磁场能正在转化为电场能
   D. 在 $t_1 \sim t_2$ 内，点 Q 的电势比点 P 高



▲ 第2题图

3. 雷达是利用无线电波来测定物体位置的设备，它有一个可以转动的天线，能朝一定方向发射无线电脉冲，每次发射持续的时间短于 1 μs，发射出去的无线电波遇到障碍物后反射回来被天线接收。根据从发射到接收的时间间隔，可以确定障碍物的距离；再根据发射无线电波的方向和仰角，便可以确定障碍物的位置了。有一个雷达站正在跟踪一架飞机，此时飞机正朝着雷达站方向匀速飞来。某一时刻雷达发出一个无线电脉冲，经 200 μs 后收到反射波；隔 0.9 s 后再发出一个脉冲，经 198 μs 后收到反射波。求该飞机的飞行速度。

4. 某电磁波发射装置中的电感和电容均是可调的，电容器的电容调节范围是 $C \sim 4C$，它发射的电磁波波长的范围是 $\lambda \sim 4\lambda$，求该装置电感的最大值和最小值。

5. 赫兹实验中，为什么需要把接收器的两个金属球调节到合适的距离，才有明显现象？

6. 为什么正在收听节目的收音机，经过正在进行电焊操作的位置附近时会听到嘈杂声？

7. 电视遥控器不正对电视机，也能控制电视机，你能给出合理的解释吗？

8. 电磁波的不同波段对人类的意义不同，人类利用它服务自己的同时，也要防止受到它的伤害，谈谈你对这种现象的理解。

9. 请利用互联网查找有关北斗导航系统以及我国建立数字强国的相关资料，写一篇关于我国在经济建设中如何开发与利用电磁波的文章。



科学成就是由一点一滴积累起来的，唯有长期的积聚才能由点滴汇成大海。

——华罗庚

第五章

传 感 器

主题一　传感器及其原理

- 认识传感器
- 常见传感器的工作原理

主题二　传感器的应用

- 传感器的应用举例
- 自制简单的控制电路

我们为什么能看到周围五彩缤纷的世界，能听到自然界美妙的声音，能嗅出物体的气味，能感知环境的冷暖和尝出各种不同的味道？那是由于我们身上存在着视觉、听觉、嗅觉、触觉和味觉等感觉器官，它们能感知和接收外界信息，并将这些信息通过神经传递给大脑，从而感知外界的事物。这些器官就是一种特殊的传感器。

你知道为什么旋转手机时，屏幕会自动旋转并切换长宽比例，周围光线变化时，屏幕亮度会自动调整吗？本章内容会帮你解开这些谜团。

1 认识传感器



▲ 图5-1-1 自动门

暑期期间小明一家自驾到外地游玩，晚上入住一家宾馆。他们刚到宾馆门口，大门就自动打开（图 5-1-1）；办理好入住手续，走到幽暗的楼道，电灯自动亮起来；来到餐厅洗手间，手一伸到水龙头下方，水就自动流出来，手移开后水龙头又自动关闭。

这一切是怎么实现的呢？你知道其中的原因吗？其实，它们都离不开一种探测装置——传感器。

什么是传感器

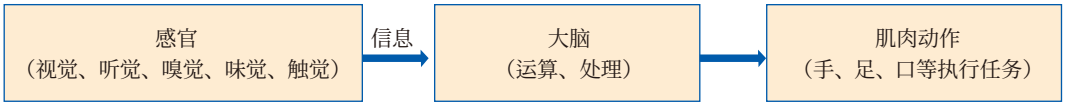
传感器（sensor）是把被测的非电信息，按一定规律转换成与之对应的电信号的器件或装置，有时又被称为探测器或变换器，图 5-1-2 是各式各样的传感器。



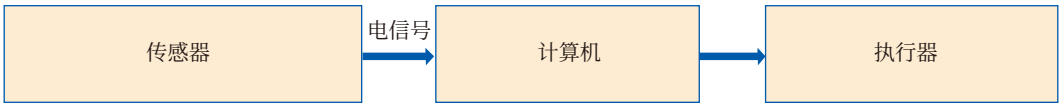
▶ 图5-1-2 各式各样的传感器

在智能机器中，传感器相当于人的眼、耳、鼻、舌或手等感觉器官，从外界获取一些必要的信息并提供给机器。

对比图 5-1-3 和图 5-1-4，可以更清晰地认识传感器的作用。



▲ **图5-1-3**　人体的活动

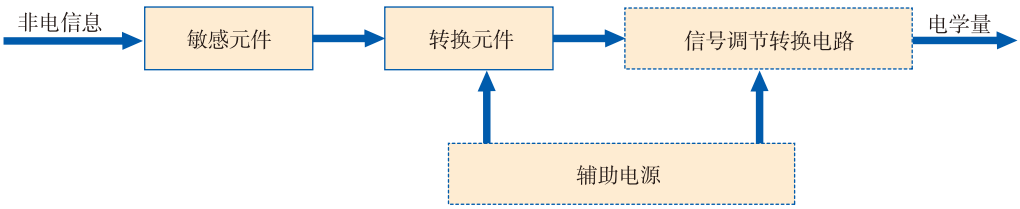


▲ **图5-1-4**　自动化（智能化）机器工作

小明住宿的宾馆大门为什么能“看”到客人而自动开门？那是因为门的上方装有红外线传感器，它能把接收到的红外信息，转变成相应的电学量，从而去控制大门的开启和关闭。为什么楼道的灯能“听”到脚步声而自动亮灯？那是因为楼道中安装有声传感器，它能把声转变成控制开灯的电学量。为什么水龙头能自动打开和关闭？同样是因为水龙头旁边装有红外线传感器，它能把人手上发出的红外线转变成控制水龙头打开和关闭的电学量。

传感器的结构

通常传感器由敏感元件和转换元件组成，有时也将信号调节转换电路、辅助电源作为传感器的组成部分，如图 5-1-5 所示。



▲ **图5-1-5**　传感器的结构

敏感元件　常见的敏感元件包括力敏元件、光敏元件、热敏元件、磁敏元件、气敏元件等，它们能直接感受诸如压力、光照、温度、磁场、气体等非电信息，并将这些信息变换成易于测量的物理量。如应变式压力传感器的弹性膜片就是敏感元件，它的作用是将压力转变成膜片的形变。

敏感元件种类繁多。下面我们来研究光敏电阻和干簧管两种敏感元件，看看它们是如何感受被测信息的。

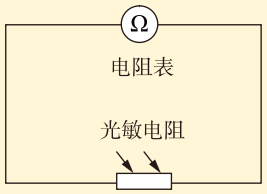
光敏电阻通常是用硫化镉或硒化镉等半导体材料制成的，为了增加灵敏度，两电极常做成梳状，并封装在具有透光镜的密封壳体内，如图 5-1-6 所示。



▲ 图5-1-6　光敏电阻

观察思考

按如图 5-1-7 所示的电路图，将多用表的选择开关置于电阻挡（注意选择适当的倍率），两支表笔分别与光敏电阻的两端相连，把光敏电阻连入电路中。在室内自然光的照射下，电阻值约多大？用手将光敏电阻的透光窗口遮住时电阻值又是多少？阳光直接照射时呢？



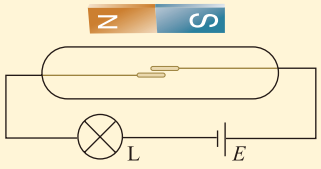
▲ 图5-1-7　观察光敏电阻的特性

光敏电阻的阻值随着光照强弱变化而变化。无光照射时，载流子极少，导电性能不好；随着光照的增强，载流子增多，导电性变好。因此，光敏电阻能够把光照强弱这个光学量转换成电阻这个电学量。

干簧管是一种能够感知磁场的敏感元件，它由密封在玻璃管内的两个软磁体（通常是铁镍合金）簧片构成。两个簧片相互交叠且中间保持一定缝隙，玻璃管中通常是真空的，或者充有氮气或惰性气体。

观察思考

按图 5-1-8 连接电路，把磁铁靠近或远离干簧管，观察会发生什么现象。你认为干簧管起了什么作用？



▲ 图5-1-8　干簧管

干簧管的两个簧片在磁场的作用下会磁化，靠近的两

端成为异名磁极，相互吸引。当磁场力大于簧片的弹力时，两簧片紧密接触。所以，串联在电路中的干簧管就成了一个由磁场控制的开关，控制电路的通与断。

转换元件　又称传感元件，通常不直接感受被测量，而是将敏感元件输出的物理量转换成电学量。如应变式压力传感器的应变片，它的作用是将弹性膜片的形变转换成电阻值的变化。

并不是所有的传感器都包括敏感元件和转换元件两部分，有些简单的传感器只有敏感元件（兼转换元件），它感受到被测量时直接输出电学量，如热电偶、热敏电阻、光敏电阻等。

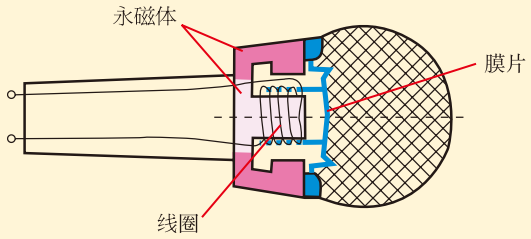
信号调节转换电路　由于转换元件输出的信号一般都很弱，容易混有干扰信号，因此需要有信号调节转换电路对其进行放大、消除干扰，使转换元件输出的电信号转换成便于显示、记录、处理和控制的电学量。

传感器的分类

传感器的种类繁多，有的传感器可以测量多种参数，而有时对于一种物理量又可用多种类型的传感器来测量，因此传感器有很多分类方法。按感知外界信息及变换效应的不同，可将其分为物理传感器、化学传感器和生物传感器。物理传感器利用了力、热、光、电磁和声等物理效应；化学传感器利用了化学反应的原理检测物质的种类和浓度；生物传感器是利用酶、抗体和激素等分子识别功能进行工作的传感器。

自我评价

1. 什么是传感器？它由哪几部分组成？各部分有什么作用？
2. 传感器有哪些分类方法？在实际应用中，传感器是如何命名的？
3. 图 5-1-9 是动圈式话筒的构造示意图。根据电磁感应原理，说明动圈式话筒是怎样把声音信号转换成电信号的。



▲ 图5-1-9　动圈式话筒的构造示意图

发展空间

课外阅览

动 作 捕 捉

动画片中一些虚拟角色的动作、表情都与真人非常相似（图 5-1-10），这是怎么做到的呢？这与拍摄过程中使用了动作捕捉技术有关。



▲ 图5-1-10　电影中的虚拟角色与动作捕捉拍摄对比

动作捕捉是指测量、跟踪、记录人体在三维空间中的运动轨迹。拍摄时演员必须穿戴布满传感器的特殊服装（图 5-1-11），在架设有大量特殊摄影机和灯光的片场中采集面部表情、肢体动作等，然后把这些动作同步到电脑中的虚拟角色上，使虚拟角色的动作和真人几无差别，达到逼真、自然的效果。



▲ 图5-1-11　布满传感器的特殊服装

动作捕捉系统由硬件和软件两大部分构成。硬件一般包含信号发射与接收传感器、信号传输设备以及数据处理工作站等；软件一般包含系统设置、空间定位定标、运动捕捉以及数据处理等功能模块。信号发射传感器通常位于运动物体的关键部位（例如人体的关节处），

它持续发出的信号由接收传感器接收后，通过信号传输设备进入数据处理工作站，在软件中进行运动分解计算，就得到连贯的三维运动数据，包括运动目标的三维空间坐标、人体关节的运动参数等。由这些数据生成三维骨骼动作数据，就可以用来驱动动画做出类似的骨骼动作了。

动作捕捉技术在三维动漫及影视制作、交互体验式游戏（图 5-1-12）、体育训练（图 5-1-13）、医疗康复、机器人等众多领域有着广泛的应用。



▲ **图5-1-12**　交互体验式游戏



▲ **图5-1-13**　利用动作捕捉技术进行高尔夫球训练

2　常见传感器的工作原理

传感器处于研究对象与测控系统的接口位置，是感知、获取与检测信息的窗口。一切科学实验和生产过程，特别是自动检测和自动控制系统，都要通过传感器获取信息，将其转换为容易传输和处理的电信号。

那么，传感器是如何把采集到的信息转换为电信号的呢？下面我们以温度传感器、光传感器和力传感器为例来说明其工作原理。

温度传感器

温度传感器是一种将温度变化转换成电学量变化的装

置。它使用的感温敏感元件种类很多，常见的有热敏电阻、热电阻、热双金属片和热电偶等。

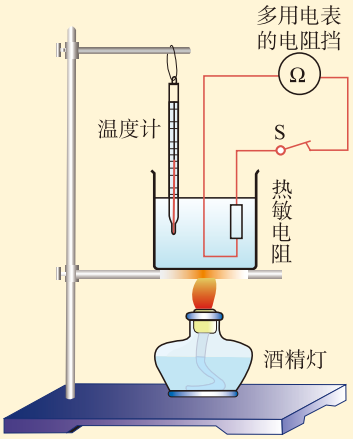
1. 热敏电阻温度传感器

有些半导体材料的电阻率对温度的变化特别敏感，热敏电阻就是利用这一特性制成的。

实验探究 | 热敏电阻的温度特性

按照图 5-2-1 所示，将热敏电阻连入电路中，多用电表的选择开关置于电阻挡，两支表笔分别与热敏电阻的两端相连。将热敏电阻放入盛有适量冷水并插有温度计的烧杯中，在电阻挡上选择适当的倍率，测量热敏电阻的阻值。

根据实验所用热敏电阻的温度参数，在允许范围内选取 10 个不同的温度点，通过添加冷水、热水或酒精灯加热的方式达到各点温度，把观测数据填入表 5-2-1 中。

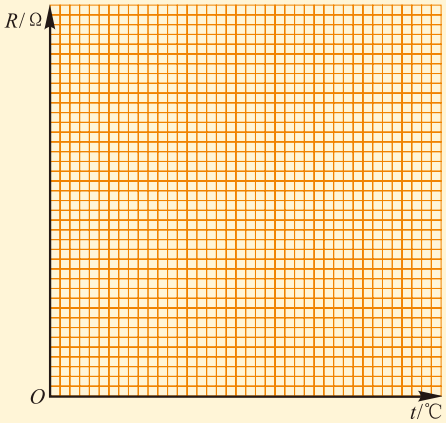


▲ 图5-2-1 探究热敏电阻的温度特性

表5-2-1

序号	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
温度 /℃										
电阻/Ω										

根据表 5-2-1 的实验数据，在图 5-2-2 中画出热敏电阻的阻值随温度变化的曲线。



▲ 图5-2-2 热敏电阻的温度特性曲线

分析以上热敏电阻阻值随温度变化的曲线，它有什么规律？你得出什么结论？

利用热敏电阻的阻值随温度灵敏变化的特性，可以实现对温度的测量、控制或进行过热保护。

按其电阻随温度变化特性的不同，热敏电阻可分为两类：一类是阻值随温度升高而减小的，称为负温度系数热敏电阻，用 NTC（Negative Temperature Coefficient 的缩写）表示；另一类是阻值随温度升高而增大的，称为正温度系数热敏电阻，用 PTC（Positive Temperature Coefficient 的缩写）表示，如图 5-2-3 所示。



（a）正温度系数热敏电阻



（b）负温度系数热敏电阻

▲ **图5-2-3**　各种热敏电阻

有一种特殊的 NTC 热敏电阻，它在某一特定温度附近电阻会急剧减小，适用于制成热保护开关。将这种热敏电阻埋设在被测物中，并与继电器串联，给电路加上恒定电压，当热敏电阻周围的介质温度升到一定数值后，电路中的电流可以由十分之几毫安突变为几十毫安，引起继电器动作，从而实现温度控制或过热保护。

2. 热电阻温度传感器

用金属丝制作的感温电阻称为热电阻。金属的电阻与温度的关系是

$$R = R_0（1 + \theta t）$$

其中，θ 为温度系数，R_0 是 $t = 0$ ℃时导体的电阻。常用的热电阻材料有铂和铜，θ 值的范围为（3 ～ 6）$\times 10^{-3}$℃ $^{-1}$。以热电阻作为传感器的敏感元件，要求温度系数稳定（不因温度而改变），可在较大的温度范围内工作。比如用铂做的热电阻，可适用于 -200℃～ +900 ℃的范围；而用铜做的热电阻，虽然价廉、线性好，但是高温时易氧化，所

以适用于 -50℃～ +150℃的较低温度范围。

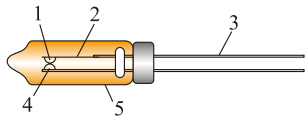
热电阻传感器不仅广泛用于测温，还可用来测量流体的流量。使用时给热电阻通电加热，并置于流体的通道上，如果流体的流动较快，则热电阻降温较多，电阻变小。根据电阻测出流速，再由管道的横截面积可计算出流量。

3. 热双金属片温度传感器

金属会因温度升高而膨胀，不同的金属材料，在升高相同的温度时，膨胀程度不同。通常用“膨胀系数”描述材料的这种性质，表 5-2-2 是一些金属材料在室温条件下的线膨胀系数。将两种膨胀系数相差较大的不同金属片焊接或轧制成一体后，当温度升高时，由于两边金属片膨胀程度不同，双金属片就会发生形变，所以热双金属片可以作为温度的敏感元件。针对热双金属片对温度的感知表现为形变的特性，可用它来控制电路的通断，因此热双金属片常用在温度控制装置中。

表5-2-2 一些金属在室温条件下的线膨胀系数/$10^{-6}℃^{-1}$

铝	金	银	铜	黄铜	钨	铁	铂
25	14.2	19	16.6	18～19	4.5	12	9



1.动触点 2.双金属片 3.引线
4.静触点 5.铜玻璃套

▲ **图5-2-4** 双金属热保护器结构示意图

双金属热保护器是一种保护电机的温度传感器。它的核心部分是一个封装起来的热双金属片，结构如图 5-2-4 所示。它可以埋设在电机绕组内，直接对电机绕组的温度进行测控。当电机绕组的温度过高时，保护器内的双金属片产生形变，使动触点与静触点断开，从而切断电源，保护电机。许多冰箱压缩机就是用这种装置进行保护的。

光传感器

有些金属或半导体材料，在电路中受到光照时，可以产生电流或电压，实现光信号向电信号的转化。选用这种材料做敏感元件，便可制成光传感器。

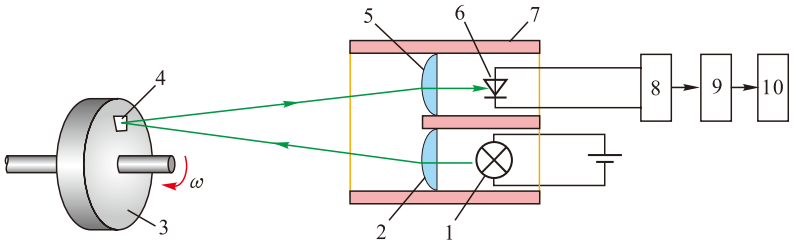
光传感器应用十分广泛，我们在研究物体运动时曾经

使用的光电门，就是一种较为简单的应用。自动门和公共场所的非触摸式自动水龙头也是利用了红外线传感器，在环境监测、火灾报警等装置中，通常利用光传感器监测烟尘浓度。

《物理　必修　第一册》第一章第三节“位置变化的快慢与方向——速度”。

在工农业生产、交通运输等行业中经常需要测量机械的转速，目前较多地采用光电式转速表进行测量。它可以与被测工件保持一定距离，进行非接触的测量，而且反应迅速准确，能测量很高的转速，又不影响被测工件的工作。

光电式转速表原理如图 5-2-5 所示，光源 1 发出的光线经透镜 2 会聚成平行光束照射到被测旋转物 3 上，光线被事先粘贴在旋转物体上的反光纸 4 反射回来，经透镜 5 聚焦落在光敏二极管 6 上，它产生与转速对应的电脉冲信号，转速快慢不同，单位时间内接收的脉冲信号数量不同，经信号处理电路处理后，可由显示器 10 显示出每分钟或每秒钟转过的圈数。



1. 光源　2、5. 透镜　3. 被测旋转物　4. 反光纸　6. 光敏二极管（敏感元件）
7. 遮光罩　8. 放大、整形电路　9.频率计电路　10.显示器

▲ **图5-2-5**　光电式转速表的原理

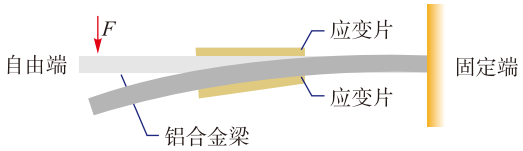
力传感器

力传感器是一种把力学量转换为电学量的装置。常用的力传感器是由铝合金梁和应变片组成的应变式力传感器，如图 5-2-6 所示。应变片是一种敏感元件，多用半导体材料制成，分别贴在梁的上、下表面，如图 5-2-7 所示。梁的一端固定，另一端为自由端。

在梁的自由端施加向下的压力时，梁发生弯曲，上表面拉伸，上应变片的电阻变大；下表面压缩，下应变片的电阻变小。压力越大，弯曲形变越大，两个应变片的电阻



▲ 图5-2-6 应变式力传感器



▲ 图5-2-7 应变式力传感器的原理

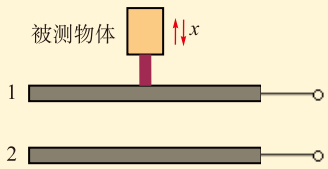
变化就越大。使应变片中通过的电流保持恒定，这时上应变片两端的电压变大，下应变片两端的电压变小。把这个电压的差值输出，压力越大，输出的电压差值也就越大。如果力的方向向上，则上、下应变片的电阻变化正好相反，电压差值为负。

应变式力传感器经常用于电子秤称重，也可用来测量其他各种力。我们在《物理 必修 第一册》“用力传感器探究作用力与反作用力的关系”的实验中使用的就是这种传感器。

自我评价

1. 如果有三个失去标记的元件，分别是定值电阻、热敏电阻和光敏电阻。现有几节干电池和一个多用电表，如何区分它们？

2. 图 5-2-8 是电容式位移传感器的原理图，1 为与被测物体相连的动极板，2 为平行板电容器的静止极板（一般称为定极板），1 和 2 之间充满空气的间隙随着物体的位移而发生改变。请说明它的工作原理。

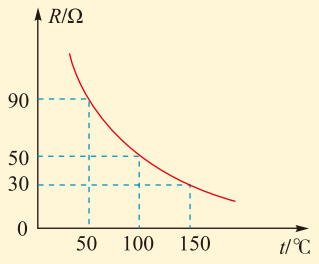


▲ 图5-2-8 电容式位移传感器

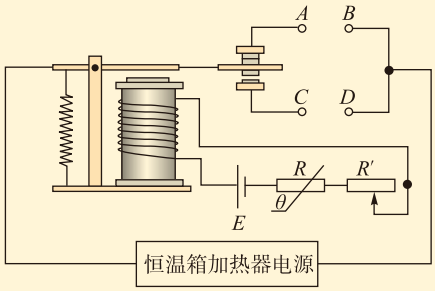
3. 如图 5-2-9 所示，图甲为热敏电阻的 R-t 曲线，图乙为用此热敏电阻 R 和继电器组成的一个简单恒温箱温控电路，继电器线圈的电阻为 150 Ω。当线圈中的电流大于或等于 20 mA 时，继电器的衔铁被吸合。为继电器线圈供电的电池的电动势 E = 6 V，内阻忽略不计。

（1）试分析应该把恒温箱内的加热器接在 A、B 端还是 C、D 端？

（2）如果要使恒温箱内的温度保持在 100 ℃，可变电阻 R' 应该调为多少？



甲 热敏电阻的 R-t 曲线



乙 简单恒温箱温控电路

▲ 图5-2-9

发展空间

课外阅览

CCD图像传感器

随着数码相机、智能手机等电子设备风靡全球，人类已经进入全民数码影像时代，每个人都可以随时、随地、随意地用影像记录每一个瞬间。带领我们进入如此五彩斑斓世界的，就是美国科学家威拉德·博伊尔（Willard S.Boyle）和乔治·史密斯（George E.Smith）于1969年发明的CCD（电荷耦合器件）图像传感器。这两位科学家也因此与华裔科学家高锟分享了2009年诺贝尔物理学奖。

CCD图像传感器是一种数字传感器，能够把光学影像转化为数字信号，作用就像胶片把光学影像用化学物质记录下来一样。它应用了爱因斯坦有关光电效应理论的结果，即光照射到某些物质上，能够使物质的电性质发生变化，从而将图像的光信号转变为电信号。它采用一种高感光度的半导体材料，在很短的时间内，将每个点上因为光照而产生改变的大量电信号采集并辨别出来，将光线照射导致的电信号变化转换成数字信号，使高效存储、编辑、传输都成为可能。

CCD图像传感器是数码相机的电子眼，它取代了胶片，革新了摄影术，电子化地将光信息记录下来，极大地方便了对图像的处理和发送。无论是大海中的深邃之地，还是宇宙中的遥远之处，它都能给我们带来水晶般清晰的影像。

如今，CCD图像传感器除了大规模应用于数码相机外，还广泛应用于摄像机、扫描仪、智能手机摄像头以及工业领域等。此外，在医学中为诊断疾病或进行显微手术等而对人体内部进行的拍摄中，也大量应用了CCD图像传感器。

物理在线

我们的生活已经离不开手机。请通过网络查询，了解手机中使用了哪些传感器，各有什么功能。

3　传感器的应用举例

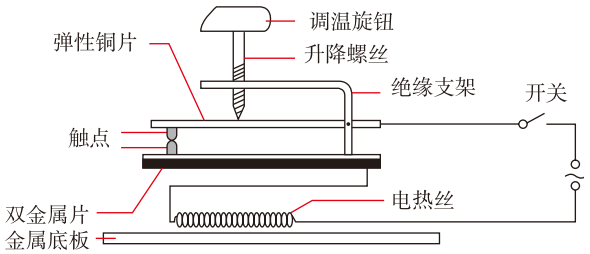
传感器的应用极其广泛。大到宇宙飞船、人造卫星、工农业生产，小到普通家用电器、电动玩具等，传感器无处不在，给社会生活带来诸多的进步和便利。你家里有哪些地方用到了传感器？它们都是什么类型的传感器呢？

温度传感器的应用——电熨斗

电熨斗是居家生活的必备电器（图 5-3-1）。使用电熨斗时，当金属底板温度达到设定温度后就不再升温，当底板温度降低到一定温度时又会继续加热，也就是说，底板总能保持在一定温度范围内。在熨烫不同材质的衣物时，还可以设定不同的温度范围。那么，它是如何设定和控制温度的呢？



▲ 图5-3-1　电熨斗



▲ 图5-3-2　电熨斗的结构

图 5-3-2 是电熨斗的结构图，其设定和控制温度都是依靠热双金属片温度传感器来实现的。双金属片中，上层金属的热膨胀系数大于下层金属的热膨胀系数。常温时，双金属片端点的触点与弹性铜片上的触点相接触。通电时，电热丝发热并将热量传给电熨斗底部的金属底板，熨烫衣物。随着通电时间的增加，底板的温度升高到设定温度时，与底板固定在一起的双金属片受热向下弯曲，两触点分离，电路断开，底板的温度不再升高。由于散热，底板的温度逐渐降低，双金属片的形变逐渐恢复；当温度降至某一值时，两触点又重新接触，电路再次接通，底板的温度又开始升高。如此往复，使温度保持在一定的范围内。

旋转调温旋钮的升降螺丝，即可设定温度。当调温旋钮上调时，弹性铜片的形变减小，双金属片只需稍微下弯触点即可分离，显然这时底板温度较低。当调温旋钮下调时，弹性铜片的形变增大，双金属片必须较大程度下弯，才能使两个触点分离，这时底板的温度较高。

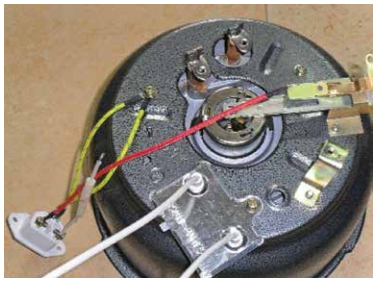
温度传感器的应用——电饭锅

用电饭锅（图 5-3-3）煮饭，按下手动开关后，就不必实时查看进度，电饭锅会自行完成整个烹煮过程。这一功能是通过温度传感器实现的。

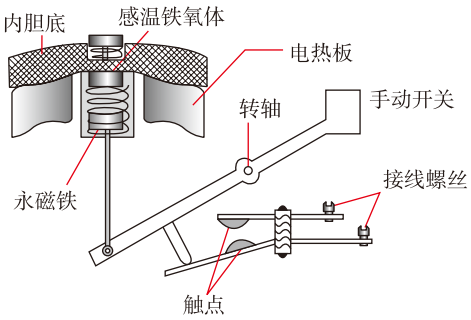
传统电饭锅的结构如图 5-3-4 所示，它的加热控制部分一般由感温铁氧体、永磁铁和弹簧组成，位置在发热盘中央。感温铁氧体是氧化锰、氧化锌和氧化铁粉末混合烧结而成的，它的特点是：常温下具有铁磁性，能够被磁体吸引，但是温度升高到 103℃时，就失去了铁磁性，不能吸引磁体了。这个温度在物理学中称为该材料的“居里温度”或“居里点”。



▲ 图5-3-3　电饭锅



（a）位于底部的加热控制部分



（b）结构

▲ 图5-3-4　传统电饭锅的结构

讨论交流

1. 煮饭时为什么要先按下手动开关？松手后手动开关是否会恢复到如图 5-3-4（b）所示的状态，为什么？

2. 水沸腾后锅内温度大约为多少摄氏度，为什么？

3. 饭熟后，水分被大米吸收，锅底的温度会有什么变化？这时电饭锅会自动发生什么动作？

4. 如果用电饭锅烧水，会发生什么现象，能否自动断电？

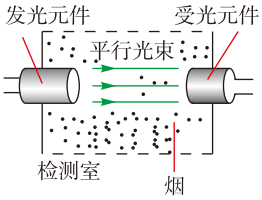
正是感温铁氧体的铁磁性随温度变化的特点，保证了加热电路在温度过高时自动断开，使我们可以“放任”电饭锅自行烹煮，而不必担心糊锅。

光传感器的应用——火灾报警器

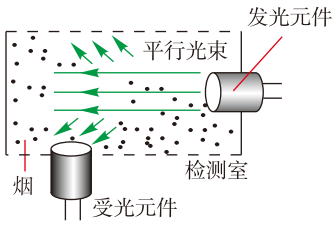
会议室、酒店房间等许多密闭空间的天花板上都安装有火灾报警器，光电式烟雾报警器是最为常见的一种火灾报警器。它是利用光散射的原理探测火灾初期产生的烟雾浓度，从而发出报警信号的。如图 5-3-5 所示，烟雾报警器带孔的罩子内装有发光元件和受光元件，根据其结构特点一般可分为遮光型和散射型两种。



（a）天花板上的烟雾报警器



（b）遮光型



（c）散射型

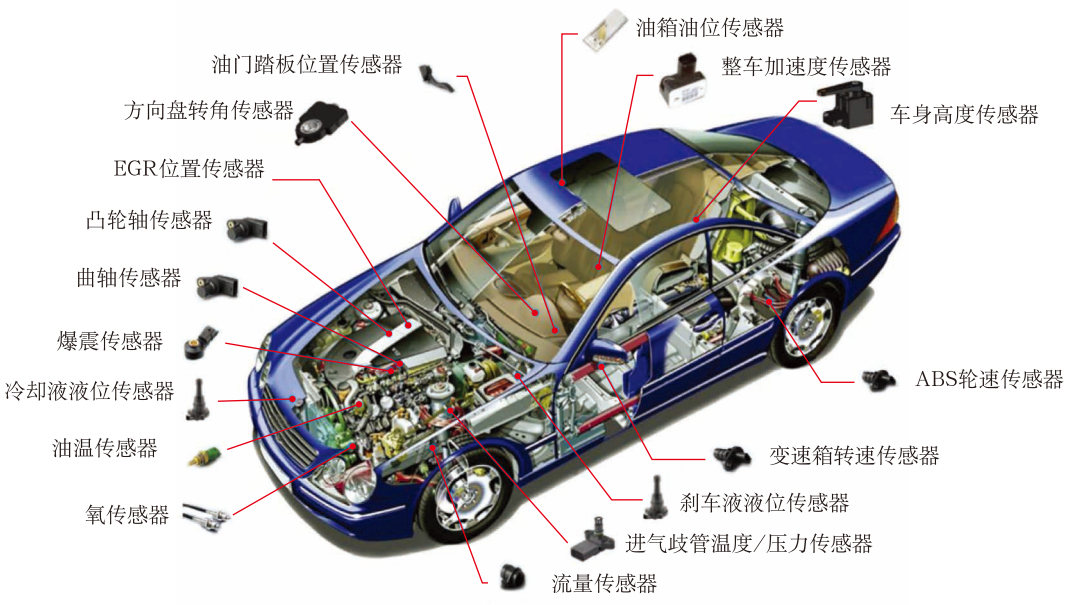
▲ **图5-3-5** 光电式烟雾报警器

遮光型光电式烟雾报警器的发光元件和受光元件是正对的。正常情况下，发光元件发出的光通过透镜聚焦成平行光照射到受光元件上，将其转换成电信号，使整个电路维持在正常状态，不发出警报。发生火灾时烟雾通过罩孔进入检测室，光被烟雾粒子反射或散射，照射到受光元件上的光强明显减弱，破坏了电路的正常状态，由此发出报警信号。

散射型光电式烟雾报警器中，发光元件和受光元件不是正对的。正常情况下，发光元件发出的光通过透镜聚焦成平行光，不能照射到受光元件上，电路维持正常状态。而发生火灾时，光经烟雾反射或散射照射到受光元件上，由此发出报警信号。

各种传感器的应用——汽车

安全、舒适、无污染一直是汽车生产厂家和用户共同追求的目标，而实现这些目标的关键在于汽车的电子化和智能化，其先决条件则是各种信息的及时获取，这势必要求在汽车中大量使用各种传感器，如图 5-3-6 所示。



▲ **图5-3-6**　汽车中的传感器

目前，一辆普通轿车上安装几十到近百个传感器，而配置较高的车型上的传感器数量可多达几百个。这些传感器可以感受到汽车行驶过程中的各种工况信息，如车速、各种介质的温度、发动机转速等，并将这些信息按一定规律转换成电信号或其他所需形式的信号，进而对汽车的温度、压力、位置、速度、加速度、转速、流量、光亮度、干湿度、距离、振动等信息进行实时、有效地监控，从而使汽车工作在最佳状态。各种传感器主要应用于汽车的发动机控制系统、底盘控制系统和车身控制系统，具体如表 5-3-1 所示。

表5-3-1　汽车用到的传感器

控制系统	子控制系统	所用的主要传感器
发动机	电子燃油喷射系统	温度、压力、位置、转速、流量、爆震、车速、旋转位移、液位、力矩、氧传感器等
底盘	电子自动变速控制系统	车速、位移、油温、节流阀传感器等
	电子控制悬架系统	车高、车速、航角、方位、加速度、转向盘转角传感器等
	电子控制动力转向系统	车速、转向、转速、油压、扭矩传感器等
	防抱死制动系统	轮速、压力、加速度、振动传感器等
车身	安全气囊系统	加速度、碰撞（前后和侧向）传感器等
	防撞警告系统	接近、红外热成像、超声阵列、距离传感器等
	自动空调系统	低压开关、温度开关、压力、湿度传感器等

续表

控制系统	子控制系统	所用的主要传感器
车身	环境检测系统	温度、气压、风量、风向、日照、雨量、气体（CO、NO、CO_2）传感器等
	导航系统	罗盘、陀螺仪、车速、方向盘转角传感器等

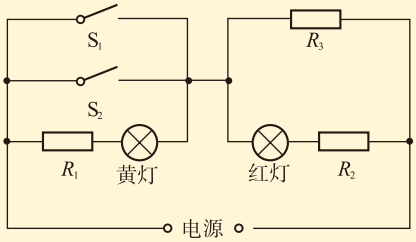
自我评价

1. 如图 5-3-7 所示是电饭煲的电路图，S_1 是一个控温开关，手动闭合后，温度达到居里点（103 ℃）时，会自动断开。S_2 是一个自动控温开关，当温度低于 70℃时，会自动闭合；温度高于 80 ℃时，会自动断开。红灯是加热时的指示灯，黄灯是保温时的指示灯。分流电阻 $R_1=R_2=500\ \Omega$，加热电阻丝 $R_3=50\ \Omega$，指示灯电阻不计。

（1）分析电饭煲的工作原理；

（2）计算加热和保温两种状态下，电饭煲消耗的电功率之比。

2. 许多楼道灯具有这样的功能：天黑时，出现声音它就开启，而在白天，即使有声音它也没反应。这种“聪明”的楼道灯电路中接入了哪几种传感器？



▲ 图5-3-7　电饭煲的电路图

发展空间

课外阅览

表5-3-2　传感器在家用电器中的应用

家用电器名称	传感器														
	温度传感器						湿度传感器	气体传感器	光传感器	磁传感器	压力传感器	转速传感器	烟雾传感器	声敏传感器	接触传感器
	压力式	双金属	热电偶	热敏电阻	感温铁氧体	温度保险丝									
彩色电视机				√		√			√						√
冰箱	√			√			√								√
洗衣机									√		√				√
室内空调机	√	√		√		√	√								
录像机				√		√	√		√	√		√		√	√

续表

家用电器名称	传感器													
	温度传感器						湿度传感器	气体传感器	光传感器	磁传感器	压力传感器	转速传感器	烟雾传感器	声敏传感器	接触传感器
	压力式	双金属	热电偶	热敏电阻	感温铁氧体	温度保险丝									
录音机				√						√		√		√	
计算机				√					√						
抽油烟机								√							
煤气用具	√							√							
电烤箱	√			√				√					√		
灭蚊器				√											
微波炉				√			√	√	√						
报警器				√				√	√	√	√		√	√	√
电饭锅		√			√	√									
照相机									√						
电熨斗	√		√	√											√
电风扇				√					√						

走向社会

对生产生活中用到传感器的情况做一个调查，可以按照如下主题分组：

（1）个人和家庭生活中用到的传感器；

（2）道路、桥梁及交通工具（汽车、摩托车、轮船、火车、飞机）等与交通运输相关的传感器；

（3）工业生产中用到的传感器；

（4）机器人中用到的传感器。

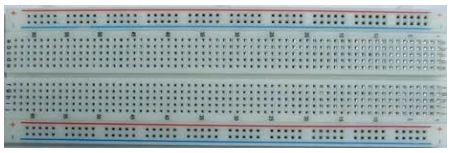
可通过实地参观考察、访谈专业人士、到图书馆或上网收集资料等方式，汇集相关信息，形成小组调研报告，在班内开展汇报交流活动。

4 自制简单的控制电路

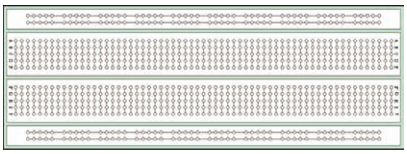
◎实验板

制作电子电路过程中，由于元件的种类和参数不同，在选择时可能需要变更，因此，在电路板上进行焊接前，要利用临时的实验板进行组装调试。实验板俗称“面包板”，它的外观如图 5-4-1 所示。在表面的小孔下面，有可以夹持元件引线的弹性铜片夹。这些铜片又与实验板背面的铜片按规律连通或相互绝缘，连接规律如图 5-4-2 所示，上下两行分别连在一起，一般用作与电源正负极相连的节点。中间纵向各列的 10 个孔分成两组，上面 5 个连通，下面 5 个连通，中央有一条凹槽，是专门为集成块设计的，方便集成块的组装与拆卸。

在了解了一些传感器的知识之后，你是否想自己动手完成一些简单制作，来实现自动控制？本节提供了两个实验，同学们可以根据自己的兴趣和器材条件选择进行尝试。为了顺利地完成小制作，请先在“实验板”上组装调试完成。



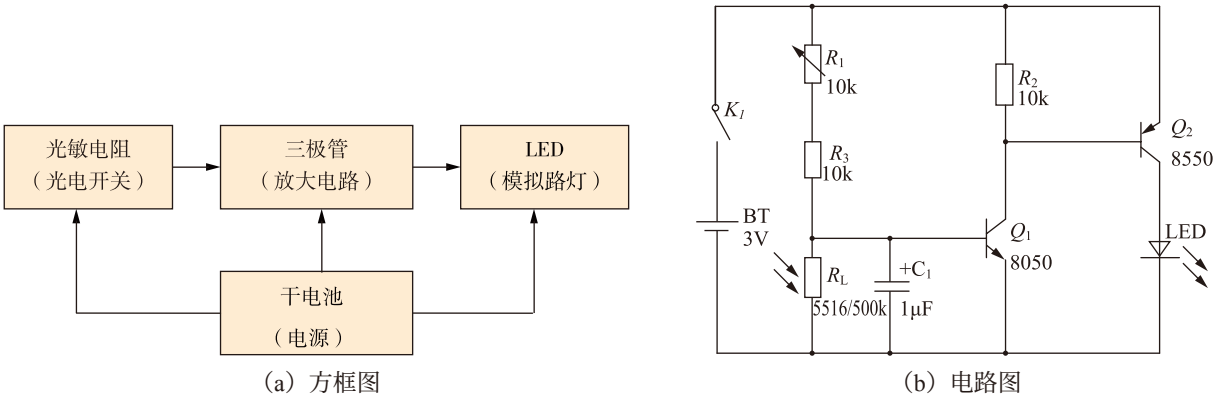
▲ 图5-4-1 实验板外观



▲ 图5-4-2 实验板背面的连线

光控LED灯

马路两边的路灯为什么能在天色暗到一定程度时自动开启，而在天亮时自动关闭呢？下面提供了一种模拟路灯工作过程的光控 LED 灯，其方框图和电路图如图 5-4-3 所示。



（a）方框图　　（b）电路图

▲ 图5-4-3 光控LED灯

图中 LED 为发光二极管，用来模拟路灯；Q_1 为 NPN 型三极管，起到开关和放大的作用；Q_2 为 PNP 型三极管，起到二级放大驱动发光二极管发光的作用，R_L 为光敏电阻，

R_1 为可调电阻，R_2、R_3 为限流、保护电阻，防止支路电流过大。

有光照的情况下，光敏电阻的阻值只有几欧到几十欧，Q_1 的基极与发射极间电压小，不能导通；Q_2 的发射极与基极间的电压也较小，也不能导通，所以 LED 不会发光。无光照时，光敏电阻的阻值会达到 MΩ 量级。Q_1 的基极与发射极的电压大，导通，Q_2 的发射极与基极间的电压较大，导通，于是 LED 发光。

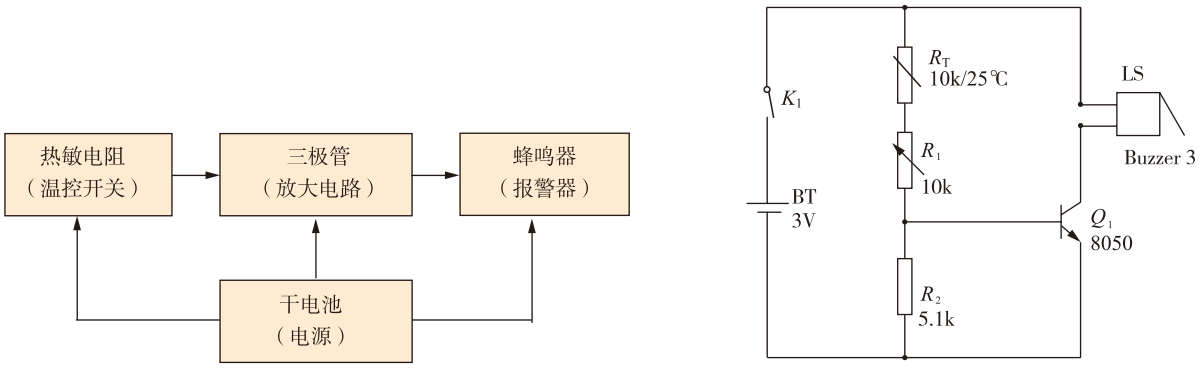
讨论交流

1. 按结构的不同，三极管可分 NPN 型和 PNP 型。对于这些名词，同学们一定比较陌生吧？请先查阅资料，再在小组里讨论它们的导通条件。

2. 要想在天更暗时路灯才会亮，应该把 R_1 的阻值调大一些还是调小一些？为什么？

温度报警器

图 5-4-4 是一种温度报警器的方框图和电路图。R_T 为热敏电阻，常温下阻值约为 2 kΩ，温度升高时阻值减小。R_1 为可调电阻，最大阻值 10 kΩ。Q_1 为 NPN 型三极管，起到开关和放大的作用。R_2 为定值电阻，通过其分压控制 Q_1 通断。LS 为有源蜂鸣器，有直流通过即可发出鸣叫声。



（a）方框图　　（b）电路图

▲ **图5-4-4**　温度报警器

接通电源后，先调节 R_1 使蜂鸣器在常温下不发声。再用热水使热敏电阻的温度升高，到达某一温度时蜂鸣器就会发出报警声。

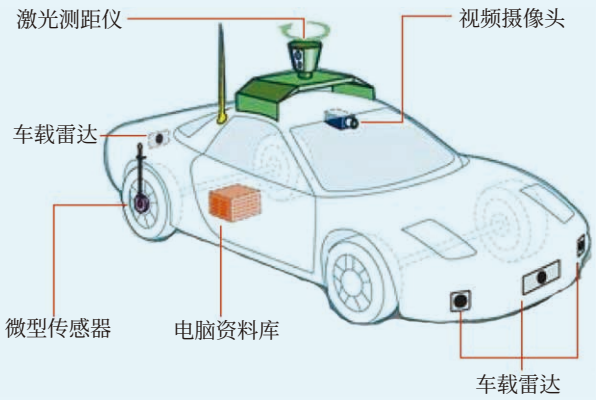
请说明这个电路的工作原理。想一想，怎样使热敏电阻在感测到更高的温度时才报警？

发展空间

课外阅览

无人驾驶汽车

无人驾驶汽车是一种通过车载传感系统感知道路环境，自动规划行车路线并控制车辆到达预定目标的智能汽车。其实质是轮式移动机器人，主要依靠车内的以计算机系统为主的智能驾驶仪来实现无人驾驶，结构示意图如图 5-4-5 所示。这个机器人要接管真人的驾驶任务，必须具备眼睛、大脑和手脚三个子系统。“眼睛”是环境感知系统，负责感知车辆周围环境，并将数据传输给“大脑”。“大脑”是 CPU，它利用由代码实现的算法控制车辆，向“手脚”发出最佳驾驶指令。“手脚”是电传系统，根据算法给出的信号操控机械装置，从而操控车辆做各种动作，使车辆能够安全、可靠地在道路上行驶。



▲ **图5-4-5** 无人驾驶汽车结构示意图

从 20 世纪 70 年代开始，美国、英国、德国、日本等国家开始进行无人驾驶汽车的研究，在可行性和实用性方面都取得了突破性进展。我国自 20 世纪 80 年代开始进行无人驾驶汽车的研究，国防科技大学在 1992 年成功研制出中国第一辆真正意义上的无人驾驶汽车。2005 年，首辆城市无人驾驶汽车在上海交通大学研制成功。2011 年 7 月，由一汽集团与国防科技大学共同研制的无人驾驶汽车完成了从长沙到武汉 286 km 的高速全程无人驾驶试验。2015 年 12 月初，无人驾驶汽车在北京进行全程自动驾驶测跑，实现多次跟车减速、变道、超车、上下匝道、调头等复杂驾驶动作，完成了从进入高速公路到驶出高速公路等不同道路场景的切换，最高时速达 100 km。



▲ **图5-4-6** 无人驾驶汽车路测图

感悟 · 启迪

传感器不属于传统的基础物理的内容，为什么被编入现行的高中物理教材并成为一章呢？

历史上科学与技术曾是两个完全不同的领域，随着科学技术的不断发展，二者逐渐交叉和融合。当今世界，不仅是各类应用研究，而且物理、化学、生命科学等传统基础学科的研究也都建立在高精尖实验技术的基础上，科学研究与技术创新的界限日趋模糊，科学家也是发明家的实例不胜枚举。与此相适应的是教育理念和课程模式的创新，集科学、技术、工程、数学为一体的STEM教育正在纷纷进入发达国家的校园，改变着课程内容和学习方式。

正在兴起的第四次工业革命浪潮中，人工智能、机器人已跻身技术主流，离我们越来越近。基于这样的一些事实，同学们对前面提出的问题或许就自有感悟了。



反思 · 小结 · 交流

• 学后反思

我们的社会已经进入信息化时代，人工智能的发展突飞猛进。传感器是感知世界的重要手段，作用不可替代。它融合了不同的学科、不同的领域，正处于创新发展的时期。同学们应在基础教育阶段，打下坚实的基础，今后发挥自己的聪明才智，争取为社会的发展、人类的进步做出更大的贡献。

• 自主小结

1. 什么是传感器？它由哪几部分构成？如何分类？
2. 温度传感器和力传感器的工作原理是什么？
3. 传感器在生活中有哪些应用？

• 相互交流

1. 请列举生活中常见的传感器，它们各属于哪一类？
2. 目前智能家居、智能汽车、智能机器人的发展超乎想象，未来还可能出现哪些智能产品？它们会用到哪些传感器？

本章复习题

1. 用遥控器调换电视机频道的过程中，起关键作用的是传感器把电磁波信号转化为电信号，下列装置中有这类传感器的是（　　）

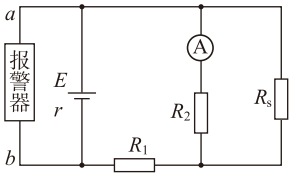
A. 红外报警装置

B. 走廊照明灯的声控开关

C. 自动洗衣机中的压力传感装置

D. 电饭煲中控制加热和保温的温控器

2. 如图所示是一种火灾报警器的部分电路示意图，其中 R_s 是半导体热敏材料制成的传感器，其阻值随温度升高而减小。值班室的显示器为电路中的电流表，a、b 之间接报警器。当传感器 R_s 所在处出现火情时，通过显示器的电流 I、报警器两端的电压 U 将如何变化（　　）



▲ 第2题图

A. I 变大，U 变大　　B. I 变大，U 变小

C. I 变小，U 变大　　D. I 变小，U 变小

3. 下面几种情况，是否用到了传感器？如果用到了，说明是哪类传感器。

(1) 路灯、江海里的航标夜晚亮，白天熄灭；

(2) 电梯的两门靠拢接触到人体时，门会自动打开而不会夹伤人；

(3) 电饭煲能自动加热和保温而不会把饭烧焦；

(4) 将自己的银行卡插进自动取款机里可以取钱，而不必麻烦银行工作人员。

4. 如图所示，图甲是一种测量血压的压力传感器工作的示意图。薄金属片 P 固定有 4 个电阻片 R_1、R_2、R_3、R_4（图乙），左边是它的侧面图，其中的圆弧形代表人的胳膊。四个电阻片连接成的电路如图丙所示。

(1) 开始时金属片中央 O 点未加任何压力，要使电压表示数为零，4 个电阻应满足什么关系？

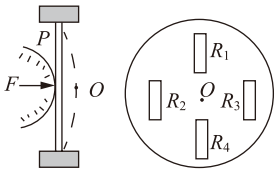
(2) 当 O 点加一个压力 F 后发生形变，这时 4 个电阻片也随之发生形变，形变后各电阻的大小如何变化？A、B 两点哪点的电势较高？

(3) 请解释它为什么能测量血压。

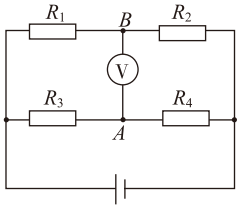




甲 血压计工作示意图



乙 压力传感器示意图



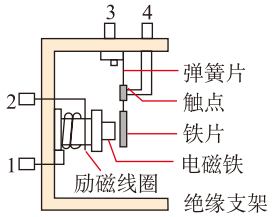
丙 压力传感器电路图

▲ 第4题图

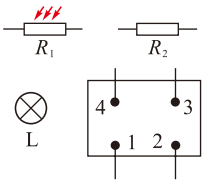
5. 北京奥运会帆船比赛在青岛举行，赛事采用风力发电给蓄电池充电，为路灯提供电能。用光敏电阻作为传感器控制路灯的开关，实现自动控制。光敏电阻的阻值随照射光的强弱而变化，作为简化模型，可以近似认为，照射光较强（如白天）时电阻几乎为零；照射光较弱（如黑天）时电阻接近于无穷大。利用光敏电阻作为传感器，借助电磁开关，可以实现路灯自动在白天关闭、夜晚点亮。电磁开关的内部结构如图所示。1、2 接线柱之间是励磁线圈，3、4 接线柱分别与弹簧片和接触点连接。当励磁线圈中电流大于 50 mA 时，电磁铁吸合铁片，弹簧片和触点分离，3、4

断开；当电流小于 50 mA 时，3、4 接通。励磁线圈中允许通过的最大电流为 100 mA。

请利用光敏电阻 R_1、灯泡 L（额定功率 40 W，额定电压 36 V）、保护电阻 R_2、电磁开关、蓄电池（电压 36V，内阻很小）、开关 S、导线若干，设计一个自动控制路灯的电路。画出电路原理图，部分器材的符号如图所示。



电磁开关的内部结构



部分器材的符号

▲ 第5题图

附　录

中英文索引

（名词后面的数字是它第一次出现的页码）

A

安培力 Ampère force 2

B

变压器 transformer 68

C

传感器 sensor 110

D

电磁波 electromagnetic wave 89

电磁波谱 electromagnetic wave spectrum 91

电磁场 electromagnetic field 89

电磁阻尼 electromagnetic damping 44

电磁振荡 electromagnetic oscillation 85

F

法拉第电磁感应定律 Faraday law of electromagnetic induction 37

峰值 peak value 63

副线圈 secondary coil 68

G

感应电动势 induction electromotive force 36

固有周期 natural period 86

H

回旋加速器 cyclotron 21

L

洛伦兹力 Lorentz force 13

楞次定律 Lenz law 32

P

频率 frequency 62

T

调幅 amplitude modulation 96

调频 frequency modulation 97

调谐 tuning 99

调制 modulation 96

W

涡电流 eddy current 43

无阻尼振荡 undamped oscillation 86

Y

右手定则 right-hand rule 31

原线圈 primary coil 68

Z

左手定则 left-hand rule 3

质谱仪 mass spectrometer 20

自感 self-induction 49

自感电动势 self-induction electromotive force 49

自感系数 self-inductance 50

正弦交流电 sinusoidal alternating current 57

周期 period 62

振荡电流 oscillatory current 84

振荡电路 oscillatory circuit 84

阻尼振荡 damped oscillation 85

载波 carrier wave 96

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。马惠英、洪安生、吴江滨、田海霞、顾俊琪、丁骏等同志参与了原教科书的编写；李勇强、李友兴、林辉庆等同志审阅了本书修订稿的部分章节；在复审阶段，徐晓东、李梁、寇大武、周永康、周永杰、马卉、杨志强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

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　选择性必修　第二册

WULI　XUANZEXING　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
天津市光明印务有限公司印装
开本：890毫米×1240毫米　1/16　印张：8.75
2021年1月第1版　　2022年12月第4次印刷

ISBN 978-7-5191-2326-0
定价：10.10元
批准文号：京发改规〔2016〕13号　价格举报电话：12315
图书出现印装质量问题，本社负责调换。