

经全国中小学教材审定委员会  
2004年初审通过

普通高中课程标准实验教科书

# 物理

选修 3-2

人民教育出版社 课程教材研究所 编著  
物理课程教材研究开发中心



人民教育出版社

普通高中课程标准实验教科书

# 物 理

选修 3-2

人民教育出版社 课程教材研究所  
物理课程教材研究开发中心 编著

# 目 录

第四章 电磁感应	1
1 划时代的发现	2
2 探究电磁感应的产生条件	5
3 楞次定律	9
4 法拉第电磁感应定律	15
5 电磁感应规律的应用	19
6 互感和自感	22
7 涡流 电磁阻尼和电磁驱动	26



第五章 交变电流	30
1 交变电流	31
2 描述交变电流的物理量	34
3 电感和电容对交变电流的影响	36
4 变压器	39
5 电能的输送	44



第六章 传感器	50
1 传感器及其工作原理	51
2 传感器的应用（一）	55
3 传感器的应用（二）	59
4 传感器的应用实验	64
附 一些元器件的原理和使用要点	66



课题研究 怎样把交流变成直流	69
----------------	----



“法拉第先生，它(电磁感应)到底有什么用呢？”

“啊，阁下，也许要不了多久你就可以对它收税了。”

——英国财政大臣格拉斯与法拉第的对话

## 第四章

## 电磁感应



三峡电厂一台发电机的转子

朝辞白帝彩云间，千里江陵一日还。

两岸猿声啼不住，轻舟已过万重山。

这首耳熟能详的唐诗，曾给我们带来多少愉悦和幻想呀！如今，诗人笔下的三峡，不仅风景秀丽依然，更在为祖国的建设做着巨大的贡献。三峡电厂共安装26台巨型发电机，总装机容量1820万千瓦。千年流淌的滚滚长江，正在焕发着青春。

电厂里巨大的发电机怎么会发出电来？电网中电压的高低跟什么因素有关？如何控制？

这些都是这一章我们要学习的内容。

## 1

## 划时代的发现

**奥斯特梦圆“电生磁”** 电磁感应现象的发现是与电流磁效应的发现密切相连的。在19世纪20年代之前的漫长岁月里，电和磁的研究始终独立地发展着。尽管18世纪中叶人们就曾发现雷电能使刀叉、钢针磁化，莱顿瓶(最原始的电容器)放电可使缝衣针磁化等现象，但包括库仑在内的众多物理学家仍然认为电与磁是互不相关的。

到了18世纪末，人们开始思考不同自然现象之间的联系。例如，摩擦生热表明了机械运动向热运动的转化，而蒸汽机则实现了热运动向机械运动的转化。于是，一些独具慧眼的哲学家如康德(I. Kant, 1724—1804)等，提出了各种自然现象之间相互联系和相互转化的思想。深受其影响的奥斯特相信电与磁之间可能存在着某种联系。1803年奥斯特指出：“物理学将不再是关于运动、热、空气、光、电、磁以及我们所知道的各种其他现象的零散的罗列，我们将把整个宇宙纳在一个体系中。”

然而，奥斯特寻找电与磁相互联系的实验研究并未很快成功。

机遇总是青睐那些有准备的头脑。

在1820年4月的一次讲演中，奥斯特碰巧在南北方向的导线下面放置了一枚小磁针。当电源接通时，小磁针居然转动了！听众中大概没有人注意到这个现象，但由于奥斯特一直惦记着电与磁的联系，这个现象使他振奋。随后的实验证明，电流的确能使磁针偏转。这种作用称为电流的磁效应。

电流的磁效应显示了载导体对磁针的作用力，揭示了电现象与磁现象之间存在的某种联系。奥斯特的思维和实践突破了人类对电与磁认识的局限性。



图4.1-1 小磁针一定受到载流导线对它的作用力!

**法拉第心系“磁生电”** 奥斯特发现的电流磁效应，震动了整个科学界，它证实电现象与磁现象是有联系的。有关电与磁关系的崭新研究领域突然洞开在人们面前，激发了科学家们的探索热情。一个接一个新的发现，像浪潮一样冲击着欧洲大陆，也激励着英国的科学界。

电流磁效应的发现引起了这种对称性的思考：既然电流能够引起磁针的运动，那么为什么不能用磁铁使导线中产生电流呢？



法拉第(M. Faraday, 1791—1867)

人们早就认识了磁化现象，知道磁体能使附近的铁棒产生磁性。人们还知道，带电体能使它附近的导体感应出电荷来。英国科学家法拉第敏锐地觉察到：磁与电之间也应该有类似的“感应”，并在1822年的一篇日记中留下了“由磁产生电”这样闪光的思想。

法国物理学家安培也曾将恒定电流或磁铁放在导体线圈附近，试图“感应”出电流，种种尝试均无所获。瑞士人科拉顿的实验研究也遗憾地与成功擦肩而过。只有法拉第依然魂牵梦绕，就像他后来所说的那样：“从通常的磁获得电的希望，曾在各个时期促使我通过实验进行考察……”

然而道路并不平坦。他于1822年12月、1825年11月和1828年4月做过三次集中的实验研究，然而均以失败告终。原因在于，法拉第认为，既然奥斯特的实验表明有电流就会有磁场，那么有了磁场就一定会有电流。于是，他在这些实验中使用恒定电流产生的磁场，看看这样的磁场是不是会在某个电路中产生感应电流。

多次失败后，1831年8月29日，他终于发现了电磁感应现象：把两个线圈绕在同一个铁环上(图4.1-2)，一个线圈接到电源上，另一个线圈接入“电流表”，在给一个线圈通电或断电的瞬间，另一个线圈中也出现了电流。寻找10年之久的“磁生电”的效应终于被发现了。成功属于坚持不懈的有心人！



图4.1-2 法拉第用过的线圈

法拉第从此茅塞顿开，立即领悟到，“磁生电”是一种在变化、运动的过程中才能出现的效应。于是他设计并动手做了几十个实验，深藏不露的各种“磁生电”的现象喷涌而出。法拉第把引起电流的原因概括为五类，它们都与变化和运动相联系，这就是：变化的电流、变化的磁场、运动的恒定电流、运动的磁铁、在磁场中运动的导体。他把这些现象定名为电磁感应(**electromagnetic induction**)，产生的电流叫做感应电流(**induction current**)。

电磁感应的发现使人们对电与磁内在联系的认识更加完善，宣告了电磁学作为一门统一学科的诞生。当奥斯特发现电流的磁效应时，法拉第曾赞扬道：“它突然打开了科学中一个黑暗领域的大门，使其充满光明。”看来这样的荣誉应由他们共享。

## 科学足迹

### 一、科学发现的启迪

诺贝尔奖获得者汤川秀树曾说，对以往知识的熟知和对新鲜事物及其发展前景的敏感，是一个人的创造力的源泉。奥斯特在18世纪末和19世纪初去德国、法国游学时，与当时欧洲的科学家进行了广泛的交流，这无疑使他扩展了科学视野。法拉第应《哲学杂志》之约，自1821年夏天开始撰写题为《电磁学的历史概要》的述评，于是他认真研究了奥斯特、安培等人的工作，阅读了大量文献。他正是从这时开始了寻求电磁感应的智力思考和实验探索。这不正是“对以往知识的熟知和对新鲜

事物及其发展前景的敏感”吗？

历史表明，科学研究的真正魅力在于它的非功利性，然而大多数具有社会责任感的科学家都会将自己的发现、发明与人类的利益和命运联系起来。法拉第发现电磁感应之后，曾为此举行一次科学普及讲座，当时在场的英国财政大臣问道：“它到底有什么用呢？”法拉第认真地回答说：“啊，阁下，也许要不了多久你就可以对它收税了。”这段话后来成为关于科学成就与经济发展、社会进步关系的千古美谈。

科学史上许多重要的发现和发明，常被人们有意无意地罩上神秘的光环，似乎科学家都是能呼风唤雨的魔术师。但是我们在这里看到，具有闪光思维的奥斯特和法拉第，在做出伟大发现的过程中也受着历史局限性的束缚，也有过“可笑”的疏忽与失误。他们是伟大的，但并不是高不可攀的。麦克斯韦曾就法拉第的著作说道：“他既告诉我们成功的经验，也告诉我们不成功的经验，既告诉我们那些成熟的想法，也告诉我们那些粗糙的想法。读者的能力可能远不及他，但是感到的共鸣却常常多于钦佩，并且会引起这样一种信念：如果自己有这样的机会，也会成为一个发现者。”

## 二、伟大的科学家法拉第

法拉第出生于英国的一个铁匠家庭，曾经在装订工厂当过学徒。他利用这个条件，读了很多科学书籍，从中获得了丰富的知识。他喜欢做实验，还积极参加科学报告会。1813年，22岁的法拉第毛遂自荐，成了著名化学家戴维的助理实验员。

法拉第生活的时代，正值第一次工业革命完成。蒸汽机的应用催生了资本主义大工业，人类进入了工业文明时代，电力应用的前景已经初见端倪。这是一个需要巨人并产生巨人的时代。法拉第看到，伏打电池昂贵、产生的电流小，而自然界中的天然磁石比较丰富。如果可以由磁产生电，就能获得廉价的电力。他说：“我因为对当时产生电的方法感到不满意，因此急于发现磁与感应电流的关系，觉得电学在这条路上一定可以充分发展”。

法拉第能够发现电磁感应现象，是因为他坚信各种自然现象是相互关联的，各种自然力是统一的、“不可毁灭的”、可以互相转化的。法拉第通过广泛的实验研究，寻找电与磁、电与化学、光与磁、电磁场与物质等的可能联系，试图描绘一幅统一的物理世界的图画。法拉第还几次试图从实验上发现重力与电、重力与热之间可能存在的关系。他指出：“有一个古老而不可改变的信念，即自然界的一切力都彼此有关，有共同的起源，或者是同一种基本力的不同表现形式。这种信念常常使我想到了在实验上证明重力与电力之间联系的可能性。”在类似思想的指引下，现代物理学家仍在不懈地探索自然界不同相互作用的统一的规律。

法拉第还认为，电磁相互作用是通过介质来传递的，并把这种介质叫做“场”，他以惊人的想像力创造性地用“力线”（即现代物理学说的磁感线和电场线）形像地描述“场”的物理图景。

法拉第在一生的探索中遭遇了多次失败。在他当年的日记中，“未显示作用”“毫无反应”“不行”等词语，记录着艰苦的探索历程。几十年的经历使他在晚年感叹道：“……就是最有成就的科学家，得以实现的建议，



猜想、愿望和初步判断，也不到十分之一”。

法拉第谢绝了皇家学会会长、皇家研究院院长、伦敦大学教授等职位和头衔，也不肯接受贵族爵位。1867年8月25日，法拉第坐在书房的椅子上平静地离开了人世。他的学生和好友丁铎尔(J. Tyndall, 1820—1893)在《作为一个发现者的法拉第》一书中感慨地写道：“在他的眼中，华丽的宫廷和布拉顿高原上的雷雨比起来，算得了什么？皇家的一切器具，和落日比较起来，又算什么？我之所以说出雷雨和落日，因为这些现象在他的心里，都可以挑起一种狂喜……”

法拉第把一生献给了科学事业。生活在电气化时代的我们，应该永远缅怀他。

阅读这篇文章后，可以谈谈你对以下问题的看法。

1. 科学家对自然现象、自然规律的某些“信念”，在科学发现中起着重要作用吗？
2. 教科书、科学论文等，是不是应该把科学发现中的失败与挫折也表现出来？

### 问题与练习

1. 学习初中物理时，你做过的哪些实验说明电现象与磁现象之间是有联系的？
2. 通过初中物理的学习，你认为电路中产生感应电流的条件是什么？

## 2

### 探究电磁感应的产生条件

我们在初中已经学过，当闭合电路的一部分做切割磁感线的运动时，电路中会产生感应电流(图4.2-1)。还有哪些情况可以产生感应电流？

#### 实验观察

1. 向线圈中插入磁铁，把磁铁从线圈中抽出

如图4.2-2，把磁铁的某一个磁极向线圈中插入、从线圈中抽出，或静止地放在线圈中。

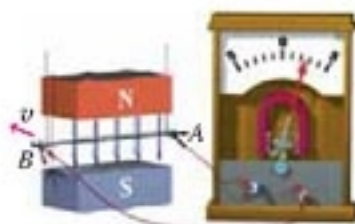


图4.2-1 导体切割磁感线，产生感应电流。



图4.2-2 磁铁插入、抽出或停在线圈中时，电流表指针如何动作？



观察电流表的指针，把观察到的现象记录在下面的表格中。

磁铁的动作	表针的摆动方向	磁铁的动作	表针的摆动方向
N极插入线圈		S极插入线圈	
N极停在线圈中		S极停在线圈中	
N极从线圈中抽出		S极从线圈中抽出	

在这个实验中，什么情况下能够产生感应电流？

### 2. 模仿法拉第的实验

如图4.2-3，线圈A通过变阻器和开关连接到电源上，线圈B的两端连到电流表上，把线圈A装在线圈B的里面。我们观察，下面几种情况下线圈B中是否有电流产生。

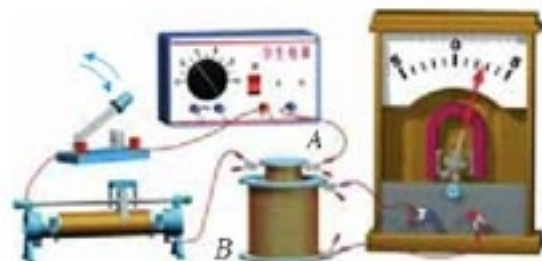
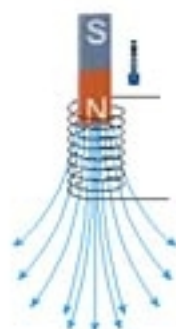


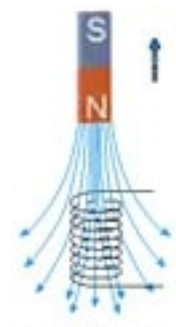
图4.2-3 用开关或变阻器控制一个线圈中的电流，能够在另一个线圈中产生感应电流吗？

开关和变阻器的状态	线圈B中是否有电流
开关闭合瞬间	
开关断开瞬间	
开关闭合时，滑动变阻器不动	
开关闭合时，迅速移动滑动变阻器的滑片	

归纳以上四项实验观察的结果，你能得出什么结论？



甲 磁场变强

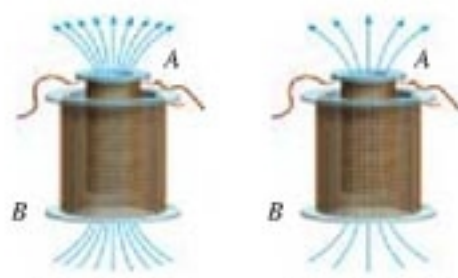


乙 磁场变弱

图4.2-4 由于磁铁的插入与抽出，线圈中磁场的强弱在变化。

**分析论证** 在上面第1个实验中，磁铁插入线圈时，线圈中的磁场由弱变强；磁铁从线圈中抽出时，线圈中的磁场由强变弱(图4.2-4)。这两种情况下线圈中有感应电流。

在上面第2个实验中，由于迅速移动滑动变阻器的滑片(或由于开关的闭合、断开)，线圈A中的电流迅速变化，产生的磁场的强弱也在迅速变化(图4.2-5)，又由于两个线圈套在一起，所以通过线圈B的磁场强弱也在



甲 磁场变强

乙 磁场变弱

图4.2-5 由于线圈A中电流的变化，线圈B中的磁场也在变化。

迅速变化。这种情况下线圈  $B$  中也有感应电流。

除了以上两个实验外，还要分析图4.2-1的实验，它可以简化为图4.2-6的示意图。从中可以看出，当导体棒  $AB$  在金属导轨上向右运动时，虽然磁场的强弱没有变化，但是导体棒切割磁感线的运动使闭合电路包围的面积在变化。这种情况下“线圈” $EFAB$ 中同样会有感应电流。

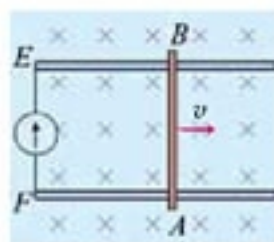


图4.2-6 由于导线做切割磁感线的运动，闭合电路包围的面积在变化。

**归纳结论** 从上面几个事例可以看出，产生感应电流的条件与磁场的变化有关系，也就是说，与磁感应强度的变化有关系；另外，与闭合电路包围的面积也有关系。由于闭合电路的面积与垂直穿过它的磁感应强度的乘积叫做磁通量，所以我们可以用磁通量来描述感应电流的产生条件。

以上实验及其他事实表明：只要穿过闭合电路的磁通量发生变化，闭合电路中就有感应电流。

### 做一做

#### 摇绳能发电吗？

把一条大约10 m长电线的两端连在一个灵敏电流表的两个接线柱上，形成闭合电路。两个同学迅速摇动这条电线，可以发电吗？简述你的理由。

你认为两个同学沿哪个方向站立时，发电的可能性比较大？试一试。



图4.2-7 摇绳能发电吗？

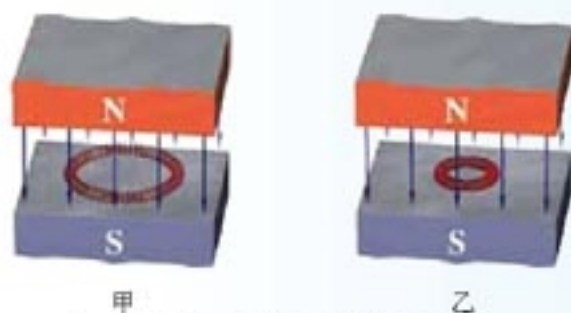
### 问题与练习

- 图4.2-8所示的匀强磁场中有一个矩形闭合导线框。在下列几种情况下，线框中是否产生感应电流？
  - 保持线框平面始终与磁感线垂直，线框在磁场中上下运动(图甲)。
  - 保持线框平面始终与磁感线垂直，线框在磁场中左右运动(图乙)。
  - 线框绕轴线  $AB$  转动(图丙)。



图4.2-8 闭合线框中是否产生感应电流？

2. 如图4.2-9, 磁场中有一个闭合的弹簧线圈。先把线圈撑开(图甲), 然后放手, 让线圈收缩(图乙)。线圈收缩时, 其中是否有感应电流? 为什么?



甲 乙  
图4.2-9 弹簧线圈收缩时有感应电流吗?

3. 如图4.2-10所示, 让闭合线圈由位置1通过一个匀强磁场运动到位置2。线圈在运动过程中什么时候有感应电流, 什么时候没有感应电流? 为什么?



图4.2-10 什么时候线圈中有感应电流?

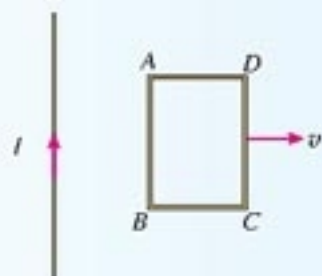
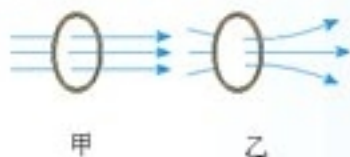


图4.2-11 线圈中有没有感应电流?

4. 矩形线圈 $ABCD$ 位于通电长直导线附近(图4.2-11), 线圈与导线在同一个平面内, 线圈的两个边与导线平行。在这个平面内, 线圈远离导线移动时, 线圈中有没有感应电流? 线圈和导线都不动, 当导线中的电流 $I$ 逐渐增大或减小时, 线圈中有没有感应电流? 为什么?

注意: 长直导线中电流越大, 它产生的磁场越强; 离长直导线越远, 它的磁场越弱。

5. 把一个铜环放在匀强磁场中, 使环的平面跟磁场方向垂直(图4.2-12甲)。如果使环沿着磁场的方向移动, 铜环中是否有感应电流? 为什么? 如果磁场是不均匀的(图4.2-12乙), 是否有感应电流? 为什么?



甲 乙  
图4.2-12 铜环中有没有感应电流?



图4.2-13 哪种情况可在线圈B中观察到感应电流?

6. 某实验装置如图4.2-13所示, 在铁芯 $P$ 上绕着两个线圈 $A$ 和 $B$ , 如果线圈 $A$ 中电流 $i$ 与

时间  $t$  的关系有图4.2-14所示的甲、乙、丙、丁共4种情况。在  $t_1 \sim t_2$  这段时间内，哪种情况可以在线圈  $B$  中观察到感应电流？

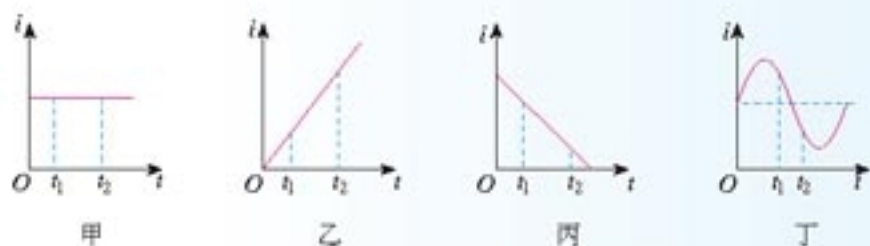


图4.2-14 线圈  $A$  中电流的4种情况

7. 如图4.2-15所示，固定于水平面上的金属架  $CDEF$  处在竖直向下的匀强磁场中，金属棒  $MN$  沿框架以速度  $v$  向右做匀速运动， $t=0$  时，磁感应强度为  $B_0$ ，此时  $MN$  到达的位置恰好使  $MDEN$  构成一个边长为  $l$  的正方形。为使  $MN$  棒中不产生感应电流，从  $t=0$  开始，磁感应强度  $B$  应怎样随时间  $t$  变化？请推导这种情况下  $B$  与  $t$  的关系式。

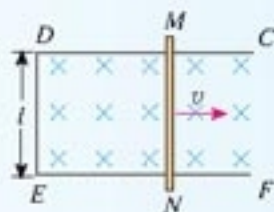


图4.2-15 金属棒  $MN$  在金属架上向右匀速运动

# 3

## 楞次定律

在关于电磁感应的实验中，也许你已经注意到，不同情况下产生的感应电流的方向是不同的。那么，感应电流的方向由哪些因素决定？遵循什么规律？下面通过实验来探究这个问题。

### 实验

在第2节图4.2-2的实验中，我们通过磁铁跟闭合电路之间的相对运动来改变穿过闭合电路的磁通量。条形磁铁的  $N$  极或  $S$  极插入闭合线圈时，线圈内磁通量增加，抽出时，线圈内磁通量减少。

现在重复这个实验，不过这次不是研究感应电流的产生条件，而是用草图记录感应电流的方向、磁铁的极性和运动方向，以便从中找出它们之间的关系。

建议在纸上画出几个类似图4.3-1的草图，分别标出不同情况下磁铁的  $N$ 、 $S$  极，磁板的运动方向，感应电流的方向。为了判断感应电流的方向，事先要弄清线圈导线的绕向，及电流方向、指针摆动的方向与电流表的红、黑接线柱的关系。

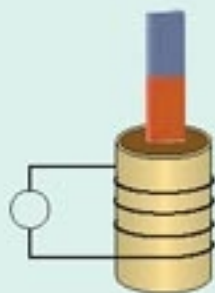


图4.3-1 记录实验情况的草图

某同学的实验记录如图4.3-2所示。条形磁铁在线圈内的运动，无非是 N 极或 S 极插入、N 极或 S 极抽出这样四种情况，因此，可以认为他的记录是完整的，没有遗漏。

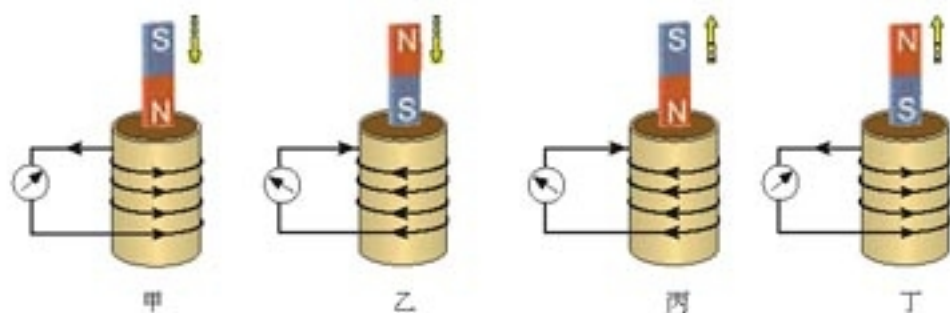


图 4.3-2 研究感应电流方向的实验记录

我们将设法根据图4.3-2说出感应电流的方向跟线圈内磁通量的变化有什么关系。当我们很难概括这两者的关系时，是不是可以通过一个“中介”——“**感应电流的磁场**”来表述这种关系？

磁铁磁场的变化在线圈中产生了感应电流，而感应电流本身也能产生磁场，这里所谓的“中介”就是感应电流本身产生的磁场。**感应电流的磁场**方向既跟感应电流的方向有联系，又跟引起磁通量变化的磁场有联系。

下面用表格来比较图4.3-2中的信息。由于这几幅图标出了感应电流的方向，所以根据右手螺旋定则就能判定**感应电流的磁场**方向。

表 1 中的实验结果已经填上了，请你填写表 2 中的实验结果。

磁铁插入时磁通量增加，抽出时减少。

既然产生感应电流的条件是磁通量的变化，以下我们就说“磁通量增加（或减少）”，而不再说“磁铁插入（或抽出）”。

表 1 线圈内磁通量增加时的情况

图号	磁场方向	感应电流的方向	感应电流的磁场方向
甲	磁场方向向下	逆时针(俯视)	向上
乙	磁场方向向上	顺时针(俯视)	向下

表 2 线圈内磁通量减少时的情况

图号	磁场方向	感应电流的方向	感应电流的磁场方向
丙			
丁			

比较表 1 中的数据。当线圈内磁通量增加时，**感应电流的磁场**是有助于磁通量的增加，还是阻碍了磁通量的增加？

比较表 2 中的数据。当线圈内磁通量减少时，**感应电流的磁场**是有助于磁通量的减少，还是阻碍了磁通量的减少？

你能把这两条结论进一步概括成一句话吗？

1834年，物理学家楞次(H. F. E. Lenz, 1804—1865)在分析了许多实验事实后，用一句话巧妙地表达了以下结论。

感应电流具有这样的方向，即感应电流的磁场总要阻碍引起感应电流的磁通量的变化。这就是楞次定律(Lenz law)。

如果照图4.2-3那样，利用开关的通断来改变磁通量，感应电流的方向遵循同样的规律。有兴趣的同学可以通过实验试一试。

### 思考与讨论

当手持条形磁铁使它的一个磁极靠近闭合线圈的一端时，线圈中产生了感应电流，获得了电能。从能量守恒的角度看，这必定有其他形式的能在减少，或者说，有外力对磁体—线圈这个系统做了功。

你能不能用楞次定律做出判断，手持磁铁运动时我们克服什么力做了功？

**楞次定律的应用** 用楞次定律可以判定感应电流的方向。下面我们通过实例来了解处理这类问题的思路。

**例题1** 法拉第最初发现电磁感应现象的实验如图4.3-3所示。软铁环上绕有 $M$ 、 $N$ 两个线圈，当 $M$ 线圈电路中的开关断开的瞬间，线圈 $N$ 中的感应电流沿什么方向？

**分析与解答** 首先明确，我们用楞次定律研究的对象是线圈 $N$ 及电流表组成的闭合电路。

线圈 $M$ 中的电流在铁环中产生的磁感线是顺时针方向的，这些磁感线穿过线圈 $N$ 的方向是向下的，即线圈 $N$ 中原磁场 $B_0$ 的方向是向下的。

开关断开的瞬间，铁环中磁场迅速减弱，线圈 $N$ 中的磁通量减少。

感应电流的磁场 $B_i$ 要阻碍磁通量的减少，所以， $B_i$ 的方向与 $B_0$ 的方向相同，即线圈 $N$ 中 $B_i$ 的方向也是向下的。

根据右手螺旋定则，由 $B_i$ 的方向判定，线圈 $N$ 中感应电流 $I_i$ 应沿图示的方向。

运用楞次定律判定感应电流方向的思路，可以概括为以下方框图。这个方框图不仅概括了根据楞次定律判定感应电流方向的思路，同时也描述了磁通量变化、磁场方向、感应电流方向三个因素的关系，只要知道了其中任意两个因素，就可以判定第三个因素。

一个实验结论形成后，我们常常需要从理论上审视它，它不应该跟已有的理论相矛盾。否则，或者是过去的理论存在问题，或者是这个实验有问题。

这也是一种形式的评估。

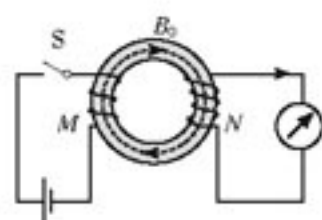


图4.3-3 判断线圈 $N$ 中的电流方向

注意：铁环并不是必须的，没有铁环，电磁感应现象仍然发生，只是线圈中的电流弱些。



这个框图只供参考,很多情况下同学们都可以作出自己的框图,以理清思路或明确概念、规律间的关系。

**例题2** 如图4.3-4所示,在长直载流导线附近有一个矩形线圈  $ABCD$ , 线圈与导线始终在同一个平面内。线圈在导线的一侧左右平移时,其中产生了  $A \rightarrow B \rightarrow C \rightarrow D \rightarrow A$  方向的电流。已知距离载流直导线较近的位置,磁场较强。请判断:线圈在向哪个方向移动?

**分析与解答** 选择矩形线圈为研究对象,画出载流直导线一侧的磁感线分布图(图4.3-5),磁感线方向垂直纸面向里,用“ $\times$ ”表示。

已知矩形线圈中感应电流的方向是  $A \rightarrow B \rightarrow C \rightarrow D \rightarrow A$ , 根据右手螺旋定则,感应电流的磁场方向是垂直纸面向外的(即指向读者的,用矩形中心的圆点“ $\cdot$ ”表示)。

根据楞次定律,感应电流的磁场应该是阻碍线圈内磁通量变化的。现在已经判明感应电流的磁场从纸面内向外指向读者,是跟原来磁场的方向相反的。因此线圈移动时通过它的磁通量一定是在增加。这说明线圈在向左移动。

**右手定则** 我们用楞次定律进行分析,看一看当闭合导体的一部分做切割磁感线运动时,怎样判定感应电流的方向。

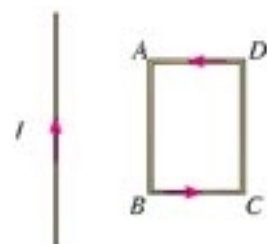


图 4.3-4 判断线圈移动的方向

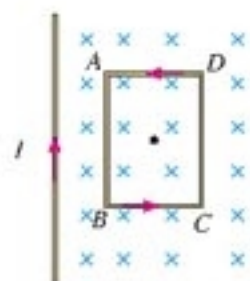


图 4.3-5 线圈附近磁场的特点是左边强、右边弱。

### 思考与讨论

在图4.3-6中,假定导体棒  $AB$  向右运动。

1. 我们研究的是哪个闭合电路?
2. 当导体棒  $AB$  向右运动时,穿过这个闭合电路的磁通量是增大还是减小?
3. 感应电流的磁场应该是沿哪个方向的?
4. 导体棒  $AB$  中的感应电流是沿哪个方向的?

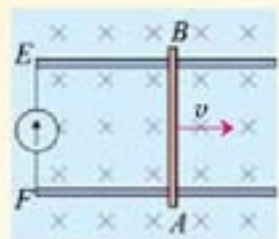


图4.3-6 这种情况下怎样判定感应电流的方向?

可以用右手的手掌和手指的方向来记忆导线切割磁感线时产生的感应电流的方向，即：伸开右手，使拇指与其余四个手指垂直，并且都与手掌在同一个平面内；让磁感线从掌心进入，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。这就是判定导线切割磁感线时感应电流方向的右手定则(right-hand rule)。

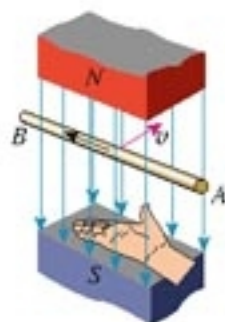


图 4.3-7 右手定则

### 问题与练习

1. 超导体的电阻为零，如果闭合的超导电路内有电流，这个电流不产生焦耳热，所以不会自行消失。现有一个固定的超导体圆环如图 4.3-8 甲所示，此时圆环中没有电流。在其右侧放入一个条形永磁体(4.3-8 乙)，由于电磁感应，在超导体圆环中产生了电流，电流的方向如何？



甲 永磁体移入之前 乙 永磁体移入之后

图 4.3-8 超导圆环内的电流

2. 如图 4.3-9 所示，导线  $AB$  与  $CD$  平行。试判断在闭合与断开开关  $S$  时，导线  $CD$  中感应电流的方向。

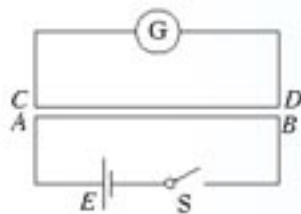


图 4.3-9 判断  $CD$  中感应电流的方向

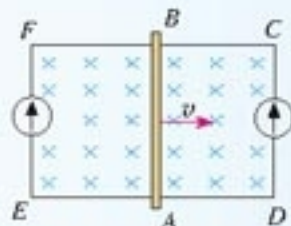


图 4.3-10 判断  $CD$  中感应电流的方向

3. 在图 4.3-10 中  $CDEF$  是金属框。当导体  $AB$  向右移动时，请用楞次定律判断  $ABCD$  和  $ABFE$  两个电路中感应电流的方向。我们能不能用这两个电路中的任一个来判定导体  $AB$  中感应电流的方向？
4. 如图 4.3-11 所示，在水平放置的条形磁铁的  $N$  极附近，一个闭合线圈向下运动并始终保持水平。在位置  $B$ ， $N$  极附近的磁感线正好与线圈平面平行。试判断线圈在位置  $A$ 、 $B$ 、 $C$  时感应电流的方向。

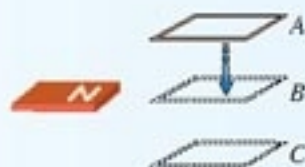


图 4.3-11 判断线圈内感应电流的方向

5. 在图 4.3-12 中，线圈  $M$  和线圈  $P$  绕在同一个铁芯上。
  - (1) 当闭合开关  $S$  的一瞬间，线圈  $P$  里有没有感应电流？
  - (2) 当线圈  $M$  里有恒定电流通过时，线圈  $P$  里有没有感应电流？



- (3) 当断开开关  $S$  的一瞬间，线圈  $P$  里有没有感应电流？  
 (4) 在上面三种情况里，如果线圈  $P$  里有感应电流，线圈  $P$  的哪一端相当于条形磁铁的  $N$  极？

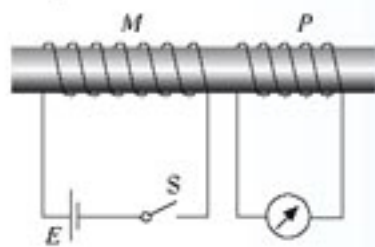


图 4.3-12 线圈  $P$  中有没有感应电流？



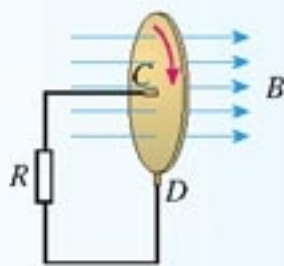
图 4.3-13 磁极移近或远离圆环会产生什么现象？

6. 图 4.3-13 中的  $A$  和  $B$  都是很轻的铝环，环  $A$  是闭合的，环  $B$  是断开的。用磁铁的任意一极去接近  $A$  环，会产生什么现象？把磁铁从  $A$  环移开，会产生什么现象？磁极移近或远离  $B$  环时，又会产生什么现象？解释所发生的现象。  
 7. 1831 年 10 月 28 日，法拉第在一次会议上展示了他发明的圆盘发电机。它是利用电磁感应的原理制成的，是人类历史上的第一台发电机。据说，在法拉第表演他的圆盘发电机时，一位贵妇人问道：“法拉第先生，这东西有什么用呢？”法拉第答道：“夫人，一个刚刚出生的婴儿有什么用呢？”

图 4.3-14 乙是这个圆盘发电机的示意图：铜盘安装在水平的铜轴上，它的边缘正好在两磁极之间，两块铜片  $C$ 、 $D$  分别与转动轴和铜盘的边缘接触。使铜盘转动，电阻  $R$  中就有电流通过。



甲



乙

图 4.3-14 法拉第的圆盘发电机

- (1) 说明圆盘发电机的原理。  
 (2) 圆盘如图示方向转动，请判断通过  $R$  的电流方向。

# 4

## 法拉第电磁感应定律

穿过闭合电路的磁通量发生变化，电路中就有感应电流。既然闭合电路中有感应电流，电路中就一定有电动势。如果电路没有闭合，这时虽然没有感应电流，电动势依然存在。在电磁感应现象中产生的电动势叫做**感应电动势(induction electromotive force)**。产生感应电动势的那部分导体就相当于电源。

感应电动势的大小跟哪些因素有关呢？

在用导线切割磁感线产生感应电流的实验中，导线运动的速度越快、磁体的磁场越强，产生的感应电流就越大；在向线圈中插入条形磁铁的实验中，磁铁的磁场越强、插入的速度越快，产生的感应电流就越大。这些经验向我们提示，感应电动势可能与磁通量变化的快慢有关，而磁通量变化的快慢可以用磁通量的变化率表示。

**电磁感应定律** 在法拉第、纽曼(F. E. Neumann, 1798—1895)、韦伯(W. E. Weber, 1804—1891)等人工作的基础上，人们认识到：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，这就是**法拉第电磁感应定律(Faraday law of electromagnetic induction)**。

如果时刻  $t_1$  穿过闭合电路的磁通量为  $\Phi_1$ ，时刻  $t_2$  穿过闭合电路的磁通量为  $\Phi_2$ ，则在时间  $\Delta t = t_2 - t_1$  内，磁通量的变化量为  $\Delta\Phi = \Phi_2 - \Phi_1$ ，磁通量的变化率就是  $\frac{\Delta\Phi}{\Delta t}$ 。用  $E$  表示闭合电路中的感应电动势，那么电磁感应定律就可以表示为

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

式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)。

闭合电路常常是一个匝数为  $n$  的线圈，而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，因此整个线圈中的感应电动势是单匝线圈的  $n$  倍，即

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

**导线切割磁感线时的感应电动势** 根据法拉第电磁感应定律，只要知道磁通量的变化率，就可以算出感应电动势。常见的一种情况是，导线做切割磁感线运动而使磁通量变化，这时法拉第电磁感应定律可以表示为一种更简单、更便于应用的形式。

如图4.4-1所示，把矩形线框  $CDMN$  放在磁感应强度为  $B$  的匀强磁场里，线框平面跟磁感线垂直。设线框可动部分  $MN$  的长

这几个公式只表示感应电动势的大小，不涉及它的正负，计算时  $\Delta\Phi$  应取绝对值。至于感应电流的方向，可以用上节学到的楞次定律去判定。

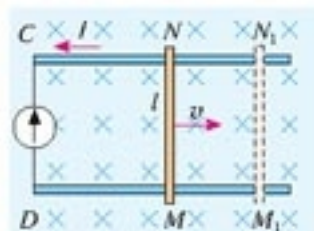


图4.4-1 计算导线切割磁感线时的感应电动势

度为  $l$ ，它以速度  $v$  向右运动，在  $\Delta t$  时间内，由原来的位置  $MN$  移到  $M_1N_1$ ，这个过程中线框的面积变化量是

$$\Delta S = lv\Delta t$$

穿过闭合电路的磁通量的变化量则是

$$\Delta\Phi = B\Delta S = Blv\Delta t$$

根据法拉第电磁感应定律， $E = \frac{\Delta\Phi}{\Delta t}$ ，由此求得闭合电路的感应电动势

$$E = Blv \quad (3)$$

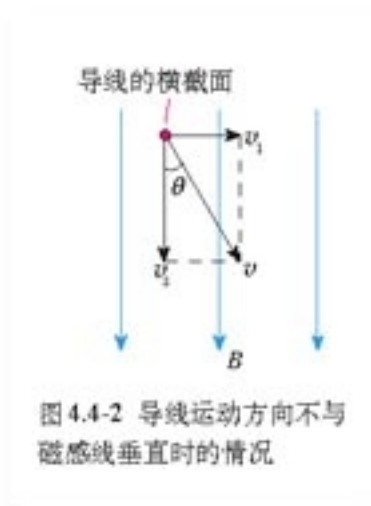
在国际单位制中， $B$ 、 $l$ 、 $v$  的单位分别是特斯拉(T)、米(m)、米每秒(m/s)， $E$  的单位是伏(V)。

如果导线的运动方向与导线本身是垂直的，但与磁感线方向有一个夹角  $\theta$  (图4.4-2)，速度  $v$  可以分解为两个分量：垂直于磁感线的分量  $v_1 = v\sin\theta$  和平行于磁感线的分量  $v_2 = v\cos\theta$ 。后者不切割磁感线，不产生感应电动势。前者切割磁感线，产生的感应电动势为

$$E = Blv_1$$

考虑到  $v_1 = v\sin\theta$ ，因此

$$E = Blv\sin\theta \quad (4)$$

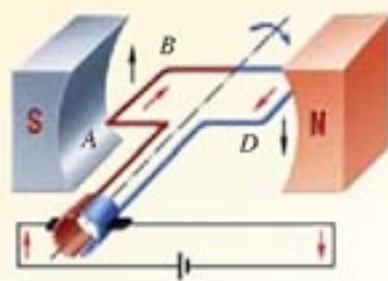


**反电动势** 我们在初中学过了直流电动机的原理，它是由于通电导线在磁场中受到了安培力而产生了运动。学过了电磁感应现象以后，我们可以从另外一个角度审视这个问题。

### 思考与讨论

在图4.4-3中，电源在电动机线圈中产生的电流的方向以及AB、CD两个边受力的方向都已经标出。

现在的问题是，既然线圈在磁场中转动，线圈中就会产生感应电动势。感应电动势是加强了电源产生的电流，还是削弱了它？是有利于线圈的转动，还是阻碍了线圈的转动？



电动机转动时，线圈中也会产生感应电动势，这个感应电动势总要削弱电源电动势的作用，我们把这个电动势称为反电动势。它的作用是阻碍线圈的转动。如果要使线圈维持原来的转动，电源就要向电动机提供能量。这正是电能转化为其他形式能的过程。

如果电动机工作中由于机械阻力过大而停止转动，这时没有了反电动势，电阻很小的线圈直接连在电源的两端，电流会很大，时间长了很可能把电动机烧毁。所以，如果电动机由于机械故障停转，要立即切断电源，进行检查。

### 做一做

如图4.4-4，将玩具电动机通过开关、电流表接到电池上。闭合开关S，观察电动机启动过程中电流表读数的变化。怎样解释电流的这种变化？

在电动机上加一定的负载，例如用手轻触转子的轴，观察电流表读数的变化并做出解释。

电动机启动时的电流与正常工作时的电流不同，有负载时与空载时的电流不同。这在技术上会引起什么问题？如果有问题，应该沿什么途径解决？



图4.4-4 观察电动机启动过程中电流的变化

### 问题与练习

- 关于电磁感应，下述说法正确的是什么？
  - 穿过线圈的磁通量越大，感应电动势越大。
  - 穿过线圈的磁通量为零，感应电动势一定为零。
  - 穿过线圈的磁通量的变化越大，感应电动势越大。
  - 穿过线圈的磁通量变化越快，感应电动势越大。
- 有一个1 000匝的线圈，在0.4 s内通过它的磁通量从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10 Ω，把一个电阻为990 Ω的电热器连接在它的两端，通过电热器的电流是多大？
- 当航天飞机在环绕地球的轨道上飞行时，从中释放一颗卫星，卫星与航天飞机保持相对静止，两者用导电缆绳相连，这种卫星称为绳系卫星，利用它可以进行多种科学实验。

现有一颗绳系卫星在地球赤道上空沿东西方向运行，卫星位于航天飞机正上方，它与航天飞机间的距离是20.5 km，卫星所在位置的地磁场为 $B = 4.6 \times 10^{-5} \text{ T}$ ，沿水平方向由南向北。如果航天飞机和卫星的运行速度是7.6 km/s，求缆绳中的感应电动势。

- 动圈式扬声器的结构如图4.4-5所示。线圈圆筒安放在永磁体磁极间的空隙中，能够自由运动。随声音变化的电流通进线圈，安培力使线圈运动，纸盆与线圈连接，随着线圈振动而发声。

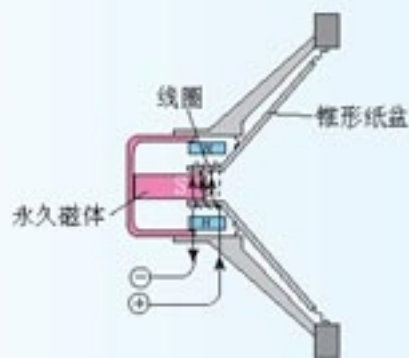


图4.4-5 动圈式扬声器

这样的扬声器能不能当做话筒使用？也就是说，如果我们对着纸盆说话，扬声器能不能把声音变成相应的电流？为什么？

5. 如图 4.4-6, 矩形线圈在匀强磁场中绕  $OO'$  轴转动时, 线圈中的感应电动势是否变化? 为什么? 设线圈的两个边长分别是  $L_1$  和  $L_2$ , 转动时角速度是  $\omega$ , 磁场的磁感应强度为  $B$ 。试证明: 在图示位置时, 线圈中的感应电动势为

$$E = BS\omega$$

其中  $S = L_1L_2$  为线圈面积。

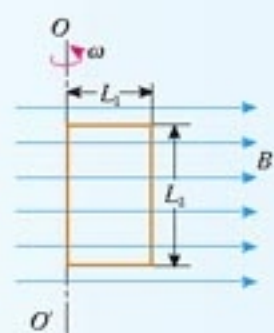


图 4.4-6 证明线圈此时的感应电动势为  $BS\omega$

6. 如图 4.4-7 所示,  $A$ 、 $B$  两个闭合线圈用同样的导线制成, 匝数均为 10 匝, 半径  $R_A = 2R_B$ , 图示区域内有匀强磁场, 且磁感应强度随时间均匀减小。

- (1)  $A$ 、 $B$  线圈中产生的感应电动势之比  $E_A : E_B$  是多少?  
 (2) 两线圈中感应电流之比  $I_A : I_B$  是多少?



图 4.4-7 两线圈中感应电动势之比、感应电流之比各是多少?

7. 图 4.4-8 是电磁流量计的示意图。圆管由非磁性材料制成, 空间有匀强磁场。当管中的导电液体流过磁场区域时, 测出管壁上  $MN$  两点间的电动势  $E$ , 就可以知道管中液体的流量  $q$ ——单位时间内流过管道横截面的液体的体积。已知管的直径为  $d$ , 磁感应强度为  $B$ , 试推出  $q$  与  $E$  关系的表达式。假定管中各处液体的流速相同。

电磁流量计的管道内没有任何阻碍流体流动的结构, 所以常用来测量高黏度及强腐蚀性液体的流量。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。



甲: 从圆管侧面看

乙: 对着液体流来的方向看

图 4.4-8 电磁流量计的示意图

# 5

## 电磁感应规律的应用

学过楞次定律和法拉第电磁感应定律之后，我们对电磁感应现象的认识就可以深入一些了。

**电磁感应现象中的感生电场** 电路中电动势的作用实际上是某种非静电力对自由电荷的作用。例如，电池中电解液与两极板的化学作用使两极板分别带了正负电荷，这种化学作用就是我们所说的“非静电力”。

如图4.5-1，一个闭合电路静止于磁场中，由于磁场强弱的变化，闭合电路内产生了感应电动势。这种情况下，哪一种作用扮演了非静电力的角色？

英国物理学家麦克斯韦认为，磁场变化时会在空间激发一种电场。如果此刻空间存在闭合导体，导体中的自由电荷就会在这种电场的作用下做定向运动，产生感应电流，或者说导体中产生了感应电动势。在这种情况下，所谓的非静电力就是这种感生电场(**induced electric field**)对自由电荷的作用。

假定导体中的自由电荷是正电荷，它们定向运动的方向就是感生电流的方向，也就是感生电场的方向。因此实际问题中我们常要由磁场的方向和强弱变化的情况来判断感生电场的方向，或者相反。这时就要根据楞次定律用右手定则来确定它们之间的关系。

**例题** 现代科学研究中常要用到高速电子，电子感应加速器就是利用感生电场使电子加速的设备。它的基本原理如图4.5-2所示，上、下为电磁铁的两个磁极，磁极之间有一个环形真空室，电子在真空室中做圆周运动。电磁铁线圈电流的大小、方向可以变化，产生的感生电场使电子加速。上图为侧视图，下图为真空室的俯视图，如果从上向下看，电子沿逆时针方向运动。

当电磁铁线圈电流的方向与图示方向一致时，电流的大小应该怎样变化才能使电子加速？

**分析与解答** 电子带负电，它在电场中

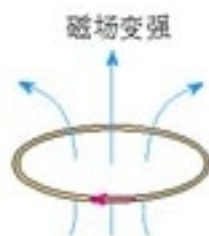


图4.5-1 磁场变化时产生了感应电动势，谁是非静电力？

如果感应电动势是由感生电场产生的，它也叫作“感生电动势”。

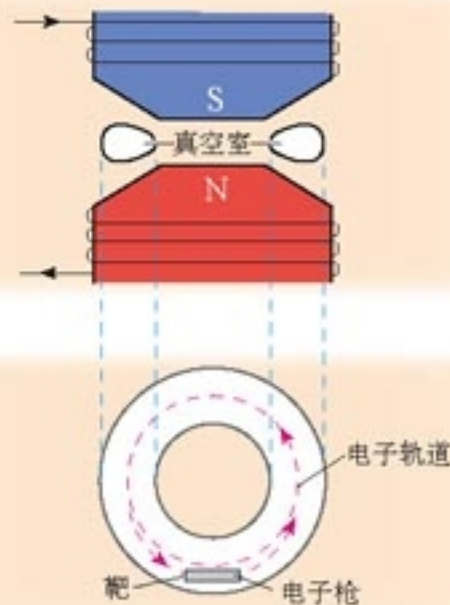


图4.5-2 电子感应加速器

受力的方向与电场方向相反。本题中电子沿逆时针方向运动，所以为使电子加速，产生的电场应沿顺时针方向。

在图4.5-2中，磁场方向由下向上。根据楞次定律，为使真空室中产生顺时针方向的感生电场，磁场应该由弱变强。也就是说，为使电子加速，电磁铁中的电流应该由小变大。

**电磁感应现象中的洛伦兹力** 导体切割磁感线的运动也会产生感应电动势。这种情况下磁场没有变化，空间没有感生电场，所以产生感应电动势的机理与上述情况有所不同。

### 思考与讨论

如图4.5-3，导体棒 $CD$ 在均匀磁场中运动。

1. 自由电荷会随着导体棒运动，并因此受到洛伦兹力。导体棒中自由电荷相对于纸面的运动大致沿什么方向？为了方便，可以认为导体棒中的自由电荷是正电荷。

2. 导体棒一直运动下去，自由电荷是否总会沿着导体棒运动？为什么？

3. 导体棒哪端的电势比较高？

4. 如果用导线把 $C$ 、 $D$ 两端连到磁场外的一个用电器上，导体棒中的电流是沿什么方向的？

以上讨论不必考虑自由电荷的杂乱无章的热运动。

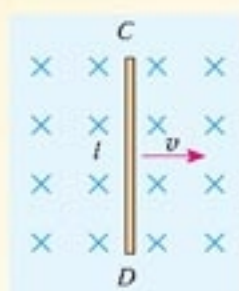


图4.5-3 做切割磁感线运动的导体棒

一段导线在做切割磁感线的运动时相当于一个电源，通过上面的分析可以看到，这时的非静电力与洛伦兹力有关。

在图4.3-6中，由于导体棒运动产生感应电动势，因而在电路中有电流通过，于是导体棒在运动过程中受到安培力的作用。不难判断，安培力的方向与推动导体棒运动的外力的方向是相反的。这时即使导体棒做匀速运动，推动力也要做功。

如果感应电动势是由于导体运动而产生的，它也被称为“动生电动势”。

### 问题与练习

1. 在国庆50周年盛典上，我国的“飞豹FBC-1”型歼击轰炸机在天安门上空沿水平方向自东向西呼啸而过。该机的翼展为12.7 m，北京地区地磁场的竖直分量为 $4.7 \times 10^{-5} \text{T}$ ，该机飞过天安门时的速度为声速的0.7倍，求该机两翼尖间的电势差。哪端

的电势比较高？

2. 如图4.5-4甲，100匝的线圈（为表示线圈的绕向，图中只画了2匝）两端A、B与一个电压表相连。线圈内有指向纸内方向的磁场，线圈中的磁通量在按图乙所示规律变化。

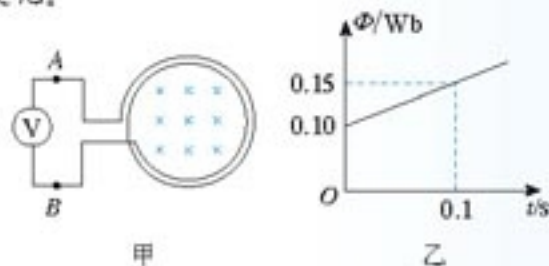


图4.5-4 电压表读数是多少？

- (1) 按图乙所示的规律，电压表的读数应该等于多少？

(2) 请在线圈位置上标出感应电场的方向。

(3) A、B两端，哪端应该与电压表标+号的接线柱（或红接线柱）连接？

3. 设图4.5-5中的磁感应强度  $B = 1 \text{ T}$ ，平行导轨宽  $l = 1 \text{ m}$ ， $MN$ 、 $PQ$  金属棒均以  $1 \text{ m/s}$  速度贴着导轨向右运动， $R = 1 \Omega$ ，其他电阻不计。

(1) 运动的导线会产生感应电动势，相当于电源。用电池等符号画出这个装置的等效电路图。

(2) 通过  $R$  的电流方向如何？大小等于多少？

(3) 通过  $MN$ 、 $PQ$  金属棒的电流各沿什么方向？

4. 如图4.5-6，单匝线圈  $ABCD$  在外力作用下以速度  $v$  向右匀速进入匀强磁场，第二次又以速度  $2v$  匀速进入同一匀强磁场。求：

(1) 第二次与第一次线圈中最大电流之比；

(2) 第二次与第一次外力做功的最大功率之比；

(3) 第二次与第一次线圈中产生热量之比。

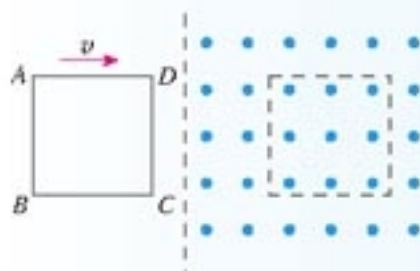


图4.5-6 单匝线圈在外力作用下匀速进入匀强磁场

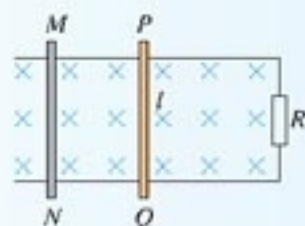


图4.5-5 导体  $MN$  和  $PQ$  以相同速度向右运动



# 6

## 互感和自感

**互感现象** 在法拉第的实验中(图4.1-2)，两个线圈之间并没有导线相连，但当一个线圈中的电流变化时，它所产生的变化的磁场会在另一个线圈中产生感应电动势。这种现象叫做互感(**mutual induction**)，这种感应电动势叫做互感电动势。

利用互感现象可以把能量由一个线圈传递到另一个线圈，因此在电工技术和电子技术中有广泛的应用。变压器就是利用互感现象制成的。

互感现象是一种常见的电磁感应现象，它不仅仅发生于绕在同一铁芯上的两个线圈之间，而且可以发生于任何两个相互靠近的电路之间。在电力工程中和电子电路中，互感现象有时会影响电路的正常工作，这时要设法减小电路间的互感。

**自感现象** 当一个线圈中的电流变化时，它产生的变化的磁场不仅在邻近的电路中激发出感应电动势，同样也在它本身激发出感应电动势。这种现象称为自感(**self-induction**)，由于自感而产生的感应电动势叫做自感电动势。

磁性天线



图4.6-1 收音机里的“磁性天线”利用互感现象把广播电台的信号从一个线圈传送到另一个线圈。

关于变压器，下一章里还有比较深入的讨论。

### 演示

在图4.6-2的电路中，两个灯泡 $A_1$ 和 $A_2$ 的规格相同， $A_1$ 与线圈 $L$ 串联后接到电源上， $A_2$ 与可变电阻 $R$ 串联后接到电源上。

先闭合开关 $S$ ，调节电阻 $R$ ，使两个灯泡的亮度相同，再调节可变电阻 $R_1$ ，使它们都正常发光，然后断开开关 $S$ 。

重新接通电路。注意观察，在开关闭合的时候两个灯泡的发光情况。

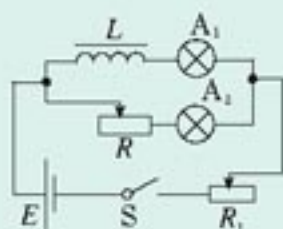


图4.6-2 两个灯泡能够同时亮起来吗？

在图4.6-2的电路中，接通电源的瞬间，电流增加，线圈 $L$ 中产生感应电动势。根据楞次定律，感应电动势会阻碍电流的增加(图4.6-3)，所以灯泡 $A_1$ 较慢地亮起来。

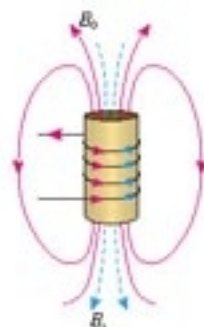


图4.6-3 感应电动势阻碍电流的增加

演示

按图 4.6-4 连接电路。先闭合开关使灯泡发光，然后断开开关。注意观察开关断开时灯泡的亮度。

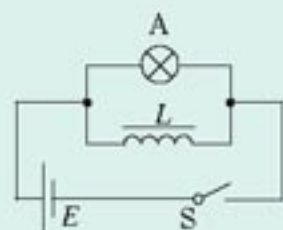


图4.6-4 开关断开时观察灯泡的亮度

思考与讨论

1. 电源断开时，通过线圈  $L$  的电流减小，这时会出现感应电动势。感应电动势的作用是使线圈  $L$  中的电流减小得更快些还是更慢些？
2. 产生感应电动势的线圈可以看做一个电源，它能向外供电。由于开关已经断开，线圈提供的感应电流将沿什么途径流动？
3. 开关断开后，通过灯泡的感应电流与原来通过它的电流方向是否一致？
4. 开关断开后，通过灯泡的感应电流是否有可能比原来的电流更大？为了使实验的效果更明显，对线圈  $L$  应该有什么要求？

做一做

用电流传感器可以清楚地演示自感对电路中电流的影响，不一定要用两个灯泡做对比。

电流传感器的作用相当于一个电流表，本书就用电流表的符号表示。它与电流表的一个重要区别在于，传感器与计算机相结合能够即时反映电流的迅速变化，并能在屏幕上显示电流随时间变化的图象。

1. 按图 4.6-5 甲连接电路，可以看到，开关闭合时电流是逐渐增大的。为了说明这一点，可以拆掉线圈（图 4.6-5 乙）再测一次，看看两次测得的电流—时间图象有什么不同。
2. 将线圈  $L$  与电阻  $R$  并联后接到电池的两端（电路与图 4.6-4 相仿），可以看到，开关断开前后通过电阻  $R$  的电流方向不同。

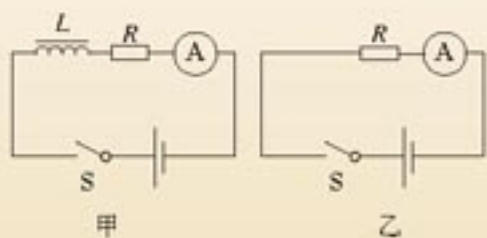


图 4.6-5 显示通电时线圈对电流影响的实验

变压器、电动机等器材都有很大的线圈，当电路中的开关断开时会产生很大的自感电动势，使得开关中的金属片之间产生电火花，烧蚀接触点，甚至引起人身伤害。因此，电动机等大功率用电器的开关应该装在金属壳中。最好使用油浸开关，即把开关的接触点浸在绝缘油中，避免出现电火花。



图4.6-6 含有电感的电路在断开时会产生电火花

**自感系数** 自感电动势也是感应电动势，同样遵从法拉第电磁感应定律，也就是说，它的大小正比于穿过线圈的磁通量的变化率，即

$$E \propto \frac{\Delta \Phi}{\Delta t}$$

实验表明，磁场的强弱正比于电流的强弱，也就是说，磁通量的变化正比于电流的变化，因此也可以说，自感电动势正比于电流的变化率，即

$$E \propto \frac{\Delta I}{\Delta t}$$

写成等式，就是

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

式中  $L$  是比例系数，它与线圈的大小、形状、圈数，以及是否有铁芯等因素有关，叫做自感系数，简称自感或电感。电感的单位是亨利 (henry)，简称亨，符号是 H。常用的单位还有毫亨 (mH)、微亨 ( $\mu\text{H}$ )。



- 甲 在铁芯上绕几千匝的线圈，电感有几个亨利。
- 乙 空芯线圈，电感有几十毫亨。
- 丙 一条导线弯几匝，电感有几个微亨。

图 4.6-7 不同的线圈，电感大小不同。

**磁场的能量** 在图 4.6-4 的实验中，开关断开后，灯泡的发光还能维持一小段时间，有时甚至会比开关断开之前更亮。这时灯泡的能量是从哪里来的？

电源断开以后，线圈中的电流不会立即消失，这时的电流仍然可以做功，说明线圈储存了能量。线圈中有电流，有电流就有磁场，能量很可能储存在磁场中。当开关闭合时，线圈中的电流从无到有，其中的磁场也是从无到有，这可以看做电源把能量输送给磁场，储存在磁场中。

当然，这里关于磁场能量的讨论还只是一个合理的假设。有关电磁场能量的直接实验验证，要在我们认识了电磁波之后才有可能。

当线圈刚刚接通电源的时候，自感电动势阻碍线圈中电流的增加；当线圈中已经有了电流而电源断开或电流变弱的时候，自感电动势又阻碍线圈中电流的减少。线圈的自感系数越大，这个现象越明显。有时我们借用力学中的术语，说线圈能够体现电的“惯性”。

### 问题与练习

1. 图4.6-8是一种延时继电器的示意图。铁芯上有两个线圈A和B。线圈A跟电源连接，线圈B两端连在一起，构成一个闭合电路。在断开开关S的时候，弹簧K并不会立刻将衔铁D拉起而使触头C(连接工作电路)离开，而是过一小段时间后才执行这个动作。延时继电器就是这样得名的。

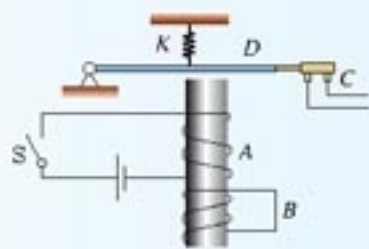


图4.6-8 延时继电器

- (1) 请解释：当开关S断开后，为什么电磁铁还会继续吸住衔铁一段短时间？  
 (2) 如果线圈B不闭合，是否会对延时效果产生影响？为什么？

2. 李辉用多用表的欧姆挡测量一个变压器线圈的电阻，以判断它是否断路。刘伟为了使李辉操作方便，用两手分别握住线圈裸露的两端让李辉测量。测量时表针摆过了一定角度，李辉由此确认线圈没有断路。正当李辉把多用表的表笔与被测线圈脱离时，刘伟突然惊叫起来，觉得有电击感。李辉很奇怪，用手摸摸线圈两端，没有什么感觉，再摸摸多用表的两枝表笔，也没有什么感觉。这是什么原因？



图4.6-9 刘伟为什么会有电击的感觉？

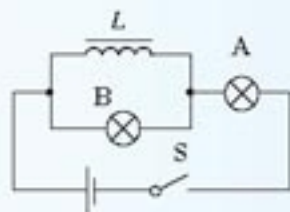


图4.6-10 分析开关S闭合与断开时两灯泡亮度变化情况

3. 如图4.6-10所示， $L$ 是自感系数很大的线圈，但其自身的电阻几乎为零。A和B是两个相同的小灯泡。  
 (1) 当开关S由断开变为闭合时，A、B两个灯泡的亮度将如何变化？  
 (2) 当开关S由闭合变为断开时，A、B两个灯泡的亮度又将如何变化？  
 在老师的指导下做一做这个实验，以检验你的预测。

# 7

## 涡流 电磁阻尼和电磁驱动

**涡流** 当线圈中的电流随时间变化时，由于电磁感应，附近的另一个线圈中会产生感应电流。实际上，这个线圈附近的任何导体中都会产生感应电流(图4.7-1)。如果用图表示这样的感应电流，看起来就像水中的旋涡，所以把它叫做涡电流，简称涡流(eddy current)。

像其他电流一样，金属块中的涡流也要产生热量。如果金属的电阻率小，则涡流很强，产生的热量很多。

用来冶炼合金钢的真空冶炼炉，炉外有线圈，线圈中通入反复变化的电流，炉内的金属中产生涡流。涡流产生的热量使金属熔化。利用涡流冶炼金属的优点是整个过程能在真空中进行，这样就能防止空气中的杂质进入金属，可以冶炼高质量的合金。

电动机、变压器的线圈都绕在铁芯上。线圈中流过变化的电流，在铁芯中产生的涡流使铁芯发热，浪费了能量，还可能损坏电器。因此，我们要想办法减小涡流。途径之一是增大铁芯材料的电阻率，常用的铁芯材料是硅钢，它的电阻率比较大。另一个途径就是用互相绝缘的硅钢片叠成的铁芯来代替整块硅钢铁芯。

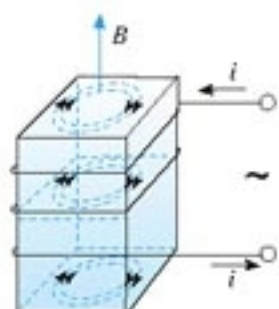


图 4.7-1 线圈中的电流变化时，导体中会产生涡流(图中用虚线表示)。



图 4.7-2 真空冶炼炉

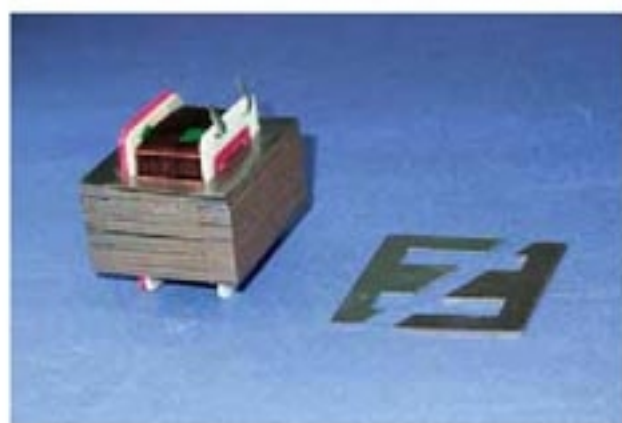


图 4.7-3 用硅钢片做变压器的铁芯



图 4.7-4 自制金属探测器

探测地雷的探雷器是利用涡流工作的。士兵手持一个长柄线圈在地面扫过，线圈中有变化着的电流。如果地下埋着金属物品，金属中会感应出涡流，涡流的磁场反过来影响线圈中的电流，使仪器报警。这种探雷器可以用来探测金属壳的地雷或有较大金属零件的地雷。

机场的安检门可以探测人身携带的金属物品，道理是一样的。

### 思考与讨论

#### 分析电表线圈骨架的作用

如图4.7-5,一个单匝线圈落入磁场中,分析它在图示位置时感应电流的方向和所受安培力的方向。安培力对线圈的运动有什么影响?

磁电式仪表的线圈常常用铝框做骨架,把线圈绕在铝框上(图4.7-6)。假定仪表工作时指针向右转动,铝框中的感应电流沿什么方向?由于铝框转动时其中有感应电流,铝框要受到安培力。安培力是沿什么方向的?安培力对铝框的转动产生什么影响?使用铝框做线圈骨架有什么好处?

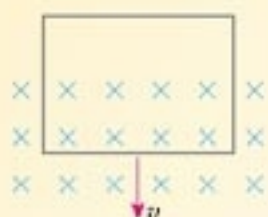


图4.7-5 研究线圈中的感应电流和它所受的安培力



图4.7-6 为什么用铝框做线圈骨架?

**电磁阻尼** 当导体在磁场中运动时,感应电流会使导体受到安培力,安培力的方向总是阻碍导体的运动,这种现象称为电磁阻尼(**electromagnetic damping**)

#### 做一做

取一只微安表,用手晃动表壳,观察表针相对表盘摆动情况。  
用导线把微安表的两个接线柱连在一起,再次晃动表壳,表针相对表盘的摆动情况与刚才有什么不同?怎样解释这种差别?



图4.7-7 微安表的表头在运输时应该把两个接线柱连在一起

连接两个接线柱的导线

#### 演示

如图4.7-8,一个铝框放在蹄形磁铁的两个磁极间,可以绕支点自由转动。转动磁铁,观察铝框的运动。怎样解释铝框的运动?



图4.7-8 怎样解释铝框的运动?

**电磁驱动** 如果磁场相对于导体转动，在导体中会产生感应电流，感应电流使导体受到安培力的作用，安培力使导体运动起来，这种作用常常称为电磁驱动。

交流感应电动机就是利用电磁驱动的原理工作的。按图4.7-9配置的三个线圈连接到三相电源<sup>①</sup>上，就能在线圈中间产生特殊的磁场。这个磁场就像图4.7-8中旋转的蹄形磁铁的磁场一样。于是，磁场中的导线框也就随着转动。



图 4.7-9 这样配置的线圈，连接到三相电源时能产生旋转的磁场。



图 4.7-10 一种交流感应电动机的结构

### 问题与练习

1. 有一个铜盘，轻轻拨动它，能长时间地绕轴自由转动。如果在转动时把蹄形磁铁的两极放在铜盘边缘，但并不与铜盘接触（图4.7-11），铜盘就能在较短的时间内停止。分析这个现象产生的原因。
2. 如图4.7-12所示，弹簧上端固定，下端悬挂一个磁铁。将磁铁托起到某一高度后放开，磁铁能上下振动较长时间才停下来。如果在磁铁下端放一个固定的闭合线圈，使磁铁上下振动时穿过它，磁铁就会很快地停下来。分析这个现象的产生原因，并说明此现象中能量转化的情况。



图 4.7-11 磁铁能使铜盘较快停下来。



图4.7-12 线圈能使磁铁的振动较快地停下来。



图 4.7-13 铝管不同，磁体下落的速度也不同。

<sup>①</sup>至于什么是三相电源，这里无需深入了解。如果有兴趣，可以参看《物理选修2-1》的相关章节。

3. 在科技馆中常看到这样的表演：一根长1 m左右的空心铝管竖直放置(图4.7-13甲)，把一枚磁性很强的小圆柱形永磁体从铝管上端放入管口，圆柱直径略小于铝管的内径。根据一般经验，小圆柱自由落下1 m左右的时间不会超过0.5 s，但把小圆柱从管口放入管中后，过了许久它才从铝管下端落下。小圆柱在管内运动时，没有感觉到它跟铝管内壁发生摩擦，把小圆柱靠着铝管，也不见它们相互吸引。是什么原因使小圆柱在铝管中缓慢下落呢？如果换用一条有裂缝的铝管(图乙)，圆柱在铝管中的下落就变快了。这又是为什么？
4. 人造卫星绕地球运行时，轨道各处的地磁场的强弱并不相同，因此，金属外壳的人造地球卫星运行时，外壳中总有微弱的感应电流。分析这一现象中的能量转化情形，它对卫星的运动可能产生怎样的影响？
5. 如图4.7-14，水平放置的绝缘桌面上有一个金属圆环，圆心的正上方有一个竖直的条形磁铁。请通过分析形成以下结论：把条形磁铁向水平方向移动时，金属圆环将受到水平方向运动的驱动力，该驱动力的方向跟条形磁铁运动的方向相同。

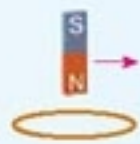


图4.7-14 金属圆环受到和磁铁运动方向相同的驱动力

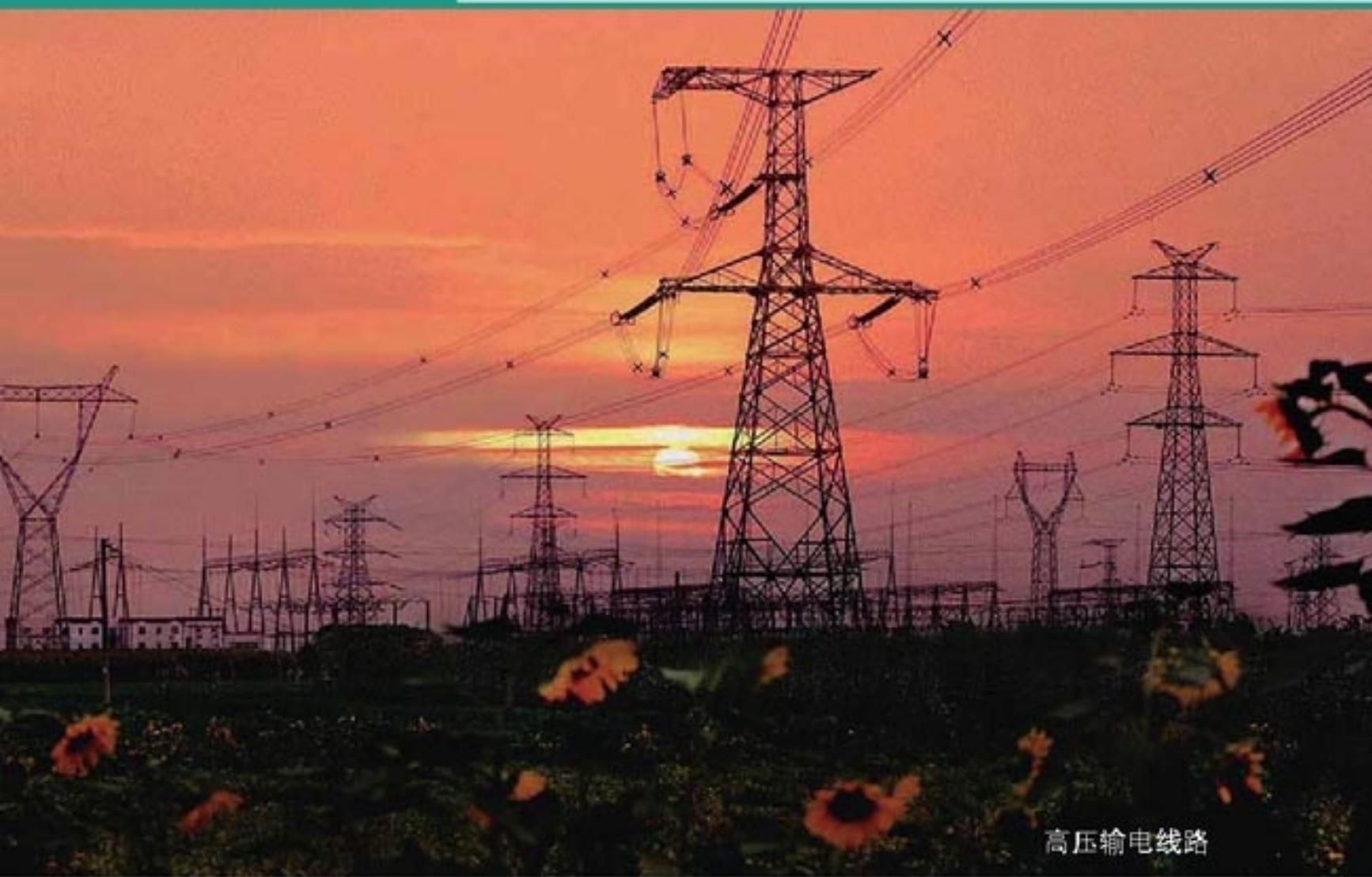


把高压电流在能量损失较小的情况下通过普通电线输送到迄今连想也不敢想的远距离，并在那一端加以利用……这一发现使工业几乎彻底摆脱地方条件所规定的一切界限，并且使极遥远的水力的利用成为可能，如果在最初它只是对城市有利，那么到最后它终将成为消除城乡对立的 strongest 有力的杠杆<sup>①</sup>。

——恩格斯

## 第五章

## 交变电流



高压输电线路

公路旁、旷野上，坚实的钢架托着、吊着粗大的金属线，仿佛由天际而来，向天际而去……

这些由发电厂、变电站而来的输电线，将电能输送到乡村、工厂，输送到千家万户。电，每时每刻都在为人类做着巨大的贡献。

来自发电厂的电有什么特性？我们怎样才能更好地利用它？这一章我们就来学习与此相关的内容。

<sup>①</sup> 引文摘自《马克思恩格斯选集》第35卷第446页，人民出版社1971年第1版。

# 1

## 交变电流

利用电压传感器（或电流传感器）可以在荧光屏上绘出电压（或电流）随时间变化的图象。这样的图形在电工技术和电子技术中常常叫做“波形图”。

### 演示

用电压传感器（或电流传感器）先观察电池供给的电压（或电流）的波形，再观察学生电源交流档供给的电压（或电流）的波形<sup>①</sup>。

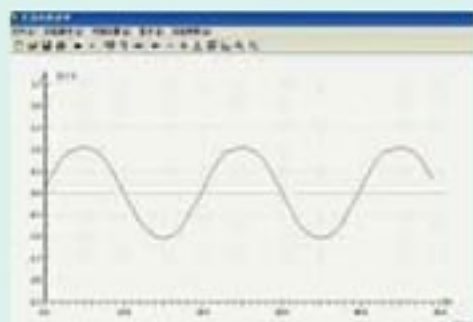


图 5.1-1 交流电压随时间变化的图象

**交变电流** 家庭电路中的电流，它的大小和方向都随时间做周期性的变化，这样的电流叫做交变电流（**alternating current**），简称交流（**AC**）。方向不随时间变化的电流称为直流（**direct current**，**DC**）。电池供给的电流，大小和方向都不随时间变化，所以属于直流。交变电流经过电子电路的处理，也能变成直流，学校实验室的学生电源就有这种功能。

交变电流在生活和生产中有广泛的应用。

### 做一做

把两个发光颜色不同的发光二极管并联，注意使两者正负极的方向不同，然后连接到教学用发电机的两端（图5.1-2）。转动手柄，两个磁极之间的线圈随着转动。观察发光二极管的发光情况。

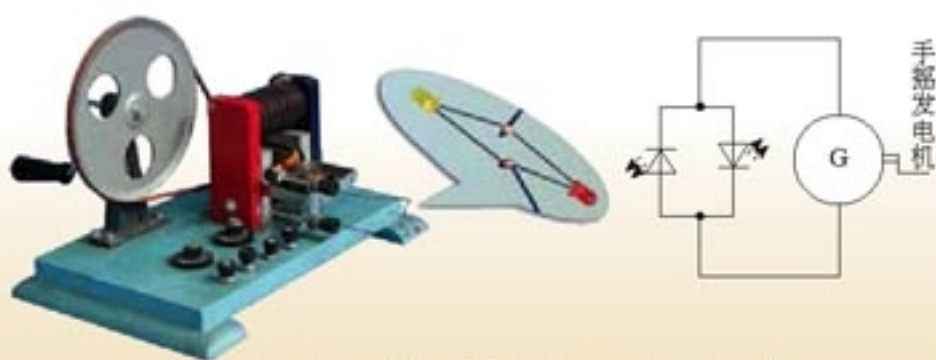


图 5.1-2 教学用发电机能够产生交变电流

实验现象说明了什么？

**交变电流的产生** 教学用发电机产生的电流，大小和方向都在不断地变化，是一种交变电流。

图 5.1-3 是交流发电机的示意图。为了清楚，图中只画出了一匝线圈。线圈的 *AB* 边连在金属滑环 *K* 上，*CD* 边连在滑环 *L* 上；导体做的两个电刷 *E*、*F* 分别压在两个滑环上，线圈

<sup>①</sup> 这个实验也可以用示波器来做。

在转动时可以通过滑环和电刷保持与外电路的连接。

图 5.1-3 甲、丙中线圈所在的平面称为“中性面”。

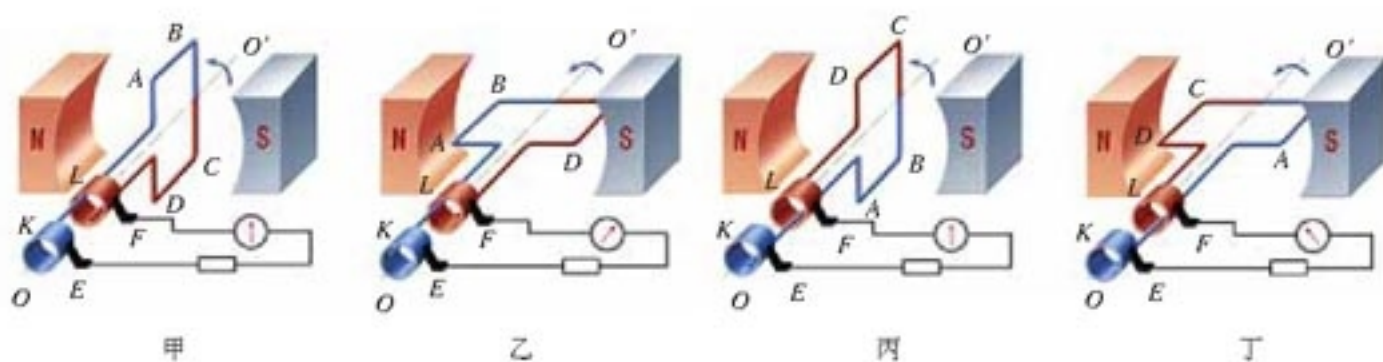


图 5.1-3 交流发电机的示意图

假定线圈沿逆时针方向匀速转动，如图 5.1-3 甲至丁。我们考虑下面几个问题。

1. 图 5.1-3 中，在线圈由甲转到乙的过程中， $AB$  边中电流向哪个方向流动？
2. 在线圈由丙转到丁的过程中， $AB$  边中电流向哪个方向流动？
3. 当线圈转到什么位置时线圈中没有电流，转到什么位置时线圈中的电流最大？
4. 大致画出通过电流表的电流随时间变化的曲线，从  $E$  经过负载流向  $F$  的电流记为正，反之为负。在横坐标上标出线圈到达甲、乙、丙、丁几个位置时对应的时刻。

**交变电流的变化规律** 从图 5.1-1 看出，学生电源中的交变电流似乎在按照正弦函数的规律变化。实际情况正是如此。

对于图 5.1-3 所示的发电机，根据法拉第电磁感应定律可以导出，它的电动势  $e$  随时间变化的规律为

$$e = E_m \sin \omega t \quad (1)$$

式中  $E_m$  是个常数，表示电动势可能达到的最大值，叫做电动势的峰值 (**peak value**)， $\omega$  是发电机线圈转动的角速度。

由于图 5.1-3 所示发电机的电动势按正弦规律变化，所以当负载为电灯等用电器时，负载两端的电压  $u$ 、流过的电流  $i$ ，也按正弦规律变化，即

$$u = U_m \sin \omega t \quad (2)$$

$$i = I_m \sin \omega t \quad (3)$$

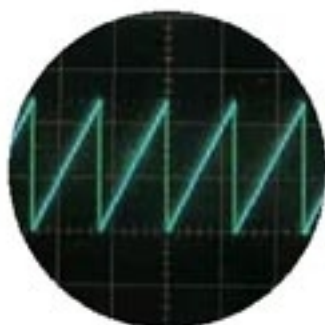
式中  $U_m$  和  $I_m$  分别为电压和电流的峰值，而  $e$ 、 $u$ 、 $i$  则是这几个量的瞬时值。

这种按正弦规律变化的交变电流叫做正弦式交变电流，简称正弦式电流 (**sinusoidal current**)。

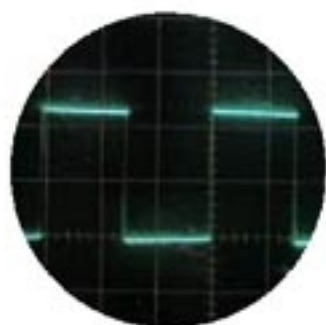
正弦式电流是最简单又最基本的交变电流。电力系统中应用的大多是正弦式电流。在电子技术中也常遇到其他形式的交流，如图 5.1-4 所示。



甲：家庭电路中的正弦式电流



乙：示波器中的锯齿形扫描电压



丙：电子电路中的矩形脉冲

图5.1-4 几种交变电流的波形

## 科学漫步

### 交流发电机

发电厂里的交流发电机的构造比图 5.1-2 复杂得多，但是基本组成部分也是两部分，即产生感应电动势的线圈（通常叫做电枢）和产生磁场的磁体。电枢转动，磁极不动的发电机，叫做旋转电枢式发电机。如果磁极转动，电枢不动，线圈中同样会产生感应电动势，这种发电机叫做旋转磁极式发电机。不论哪种发电机，转动的部分都叫转子，不动的部分都叫定子。

旋转电枢式发电机，转子产生的电流必须像图 5.1-3 那样经过裸露的滑环和电刷引到外电路。如果电压很高，可能发生火花放电，滑环和电刷很快会烧坏。同时，转动的电枢无法做得很大，线圈匝数也不可能很多，所以产生的感应电动势也不能很高。这种发电机产生的电压一般不超过 500 V。旋转磁极式发电机克服了上述缺点，能够产生几千伏到几万伏的电压，输出功率可达几百兆瓦。所以大多数发电机都是旋转磁极式的。

发电机的转子由蒸汽轮机、水轮机等带动。蒸汽轮机、水轮机等将机械能传递给发电机，发电机将机械能转化为电能，输送给外电路。



实际的交流发电机组

## 问题与练习

1. 让一个蹄形磁铁靠近白炽灯，观察灯丝，可以看到什么现象？这是什么原因造成的？

- 有人说，在图 5.1-3 中，线圈平面转到中性面的瞬间，穿过线圈的磁通量最大，因而线圈中的感应电动势最大；线圈平面跟中性面垂直的瞬间，穿过线圈的磁通量为零，因而感应电动势为零。这种说法对不对？为什么？
- 图 5.1-3 中，设磁感应强度为  $0.01\text{ T}$ ，单匝线圈  $AB$  边长为  $20\text{ cm}$ ，宽  $AD$  为  $10\text{ cm}$ ，转速  $n$  为  $50\text{ r/s}$ ，求线圈转动时感应电动势的最大值。
- 一台发电机在产生正弦式电流。如果发电机电动势的峰值为  $E_m = 400\text{ V}$ ，线圈匀速转动的角速度为  $\omega = 314\text{ rad/s}$ ，试写出电动势瞬时值的表达式。如果这个发电机的外电路只有电阻元件，总电阻为  $2\text{ k}\Omega$ ，电路中电流的峰值为多少？写出电流瞬时值的表达式。
- 如图 5.1-5 所示， $KLMN$  是一个竖直的矩形导线框，全部处于磁感应强度为  $B$  的水平匀强磁场中，线框面积为  $S$ ， $KL$  边水平，线框绕某竖直固定轴以角速度  $\omega$  匀速转动。在  $KL$  边与磁场方向到达  $30^\circ$  角的时刻（图示位置），导线框中产生的瞬时电动势  $e$  的大小是多少？标出线框此时电流的方向。已知线框按俯视图的逆时针方向转动。

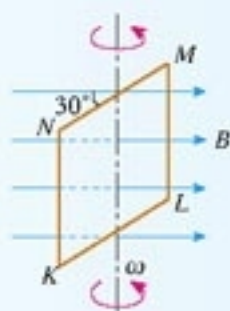


图 5.1-5 线框绕竖直轴以角速度  $\omega$  匀速转动

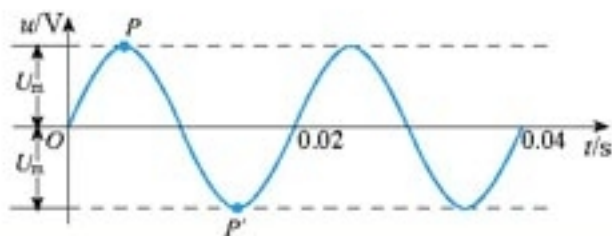
## 2

### 描述交变电流的物理量

从上节已经看到，交变电流的大小和方向都随时间变化，谈到它的电流或电压时要区分它的峰值和瞬时值。此外，还有几个物理量，在描述交变电流时也常用到。

**周期和频率** 与任何周期性过程一样，交变电流也可以用周期或频率表示其变化的快慢。在图 5.1-3 中，线圈转动一周，电压、电流都发生一次周期性变化。我们把交变电流完成一次周期性变化所需的时间，叫做它的周期（**period**），通常用  $T$  表示，单位是秒。

图 5.2-1 这个交流的周期是多少？频率是多少？



交变电流在 1s 内完成周期性变化的次数叫做它的频率 (frequency)，通常用  $f$  表示，单位是赫兹 (hertz)，简称赫，符号是 Hz。频率是供电质量的重要指标。根据定义可以知道，周期和频率互为倒数，即

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

根据三角函数的知识可以知道，在  $i = I_m \sin \omega t$  的表达式中， $\omega$  等于频率的  $2\pi$  倍，即  $\omega = 2\pi f$ 。

请参阅《数学4必修》。

**峰值和有效值** 交变电流的峰值  $I_m$  或  $U_m$  是它能达到的最大数值，可以用来表示电流的强弱或电压的高低。例如，把电容器接在交流电路中，就需要知道电压的峰值。电容器所能承受的电压要高于交流电压的峰值，否则电容器就可能被击穿。

### 思考与讨论

如图 5.2-2 的电流  $i$  通过一个  $R = 1 \Omega$  的电阻。它不是恒定电流。

1. 怎样计算通电 1 s 内电阻  $R$  中产生的热量？
2. 如果有一个大小、方向都不变的恒定电流通过这个电阻  $R$ ，也能在 1 s 内产生同样的热，这个电流是多大？

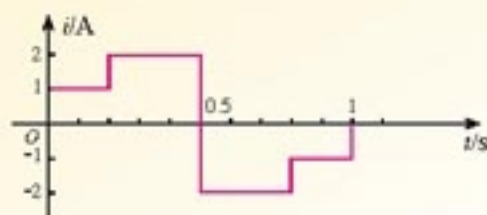


图 5.2-2 某种交变电流的波形

让交流与恒定电流分别通过大小相同的电阻，如果在交流的一个周期内它们产生的热量相等，而这个恒定电流是  $I$ 、电压是  $U$ ，我们就把  $I$ 、 $U$  叫做这个交流的有效值 (effective value)。例如某一交流通过一段电阻丝，在一个周期内产生的热量为  $Q$ ，如果改用 3 A 的恒定电流通过这段电阻丝，在相同的时间内产生的热量也是  $Q$ ，那么，这个交变电流的有效值就是 3 A。交流电压的有效值可以用同样的方法来确定。

理论计算表明，正弦交变电流的有效值  $I$ 、 $U$  与峰值  $I_m$ 、 $U_m$  之间有如下关系

$$I = \frac{I_m}{\sqrt{2}} = 0.707 I_m$$

$$U = \frac{U_m}{\sqrt{2}} = 0.707 U_m$$

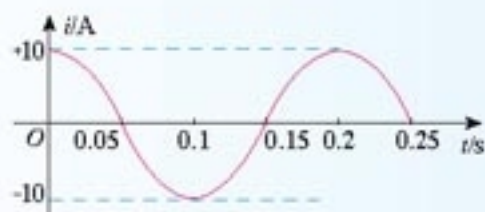
从有效值的定义看，“有效”指的是电流热效应的等效。

人们通常说家庭电路的电压是 220 V，指的便是有效值。使用交流的电气设备上，标出的额定电压和额定电流都是有效值，一般交流电压表测量的数值也是有效值。以后提到交变电流的数值，凡没有特别说明的，都指有效值。

### 问题与练习

1. 我国电网中交变电流的周期是0.02 s，1 s内电流方向发生多少次改变？
2. 一个电容器，当它的两个极板间的电压超过10 V时，其间的电介质就可能被破坏而不再绝缘，这个现象叫做电介质的击穿，这个电压叫做这个电容器的耐压值。能否把这个电容器接在交流电压是10 V的电路两端？为什么？
3. 一个灯泡，上面写着“220 V 40 W”。当它正常工作时，通过灯丝电流的峰值是多少？
4. 图5.2-3是一个正弦式电流的波形图。根据图象求出它的周期、频率、电流的峰值、电流的有效值。

图5.2-3 某正弦式电流的图象



5. 有一个电热器，工作时的电阻为 $50\ \Omega$ ，接在电压为 $u = U_m \sin \omega t$ 的交流电源上，其中 $U_m = 311\ \text{V}$ ， $\omega = 100\pi\ \text{s}^{-1}$ 。该电热器消耗的功率是多大？

## 3

### 电感和电容对交变电流的影响

#### 演示

如图5.3-1，把带铁芯的线圈 $L$ 与小灯泡串联起来，先把它们接到直流电源上，再把它们接到交流电源上。取直流电源的电压与交流电压的有效值相等。观察两种情况下灯泡的亮度。

这个实验说明了什么？

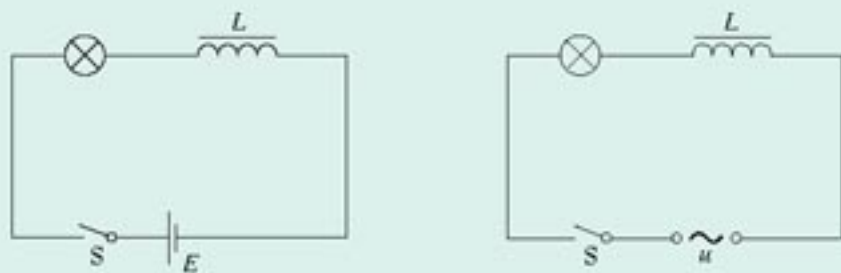


图5.3-1 对比两种情况下灯泡的亮度

**电感对交变电流的阻碍作用** 在直流电路中，当电压一定时，影响电流强弱的只是电阻。但在交流电路中，电感对交变电流也有阻碍作用，阻碍作用的大小用感抗来表示。实验和理论分析都表明，线圈的自感系数越大、交流的频率越高，电感对交流的阻碍作用就越大，也就是说，线圈的感抗就越大。

扼流圈是电工技术和电子技术常用的元件，它利用了电感对交流的阻碍作用。

扼流圈分为两种，一种是低频扼流圈，线圈绕在铁芯上，匝数为几千甚至超过一万，自感系数为几十亨。即使交流的频率较低，例如家庭电路中的交流，这种线圈产生的感抗也很大。由于线圈是用铜线绕制的，对直流的阻碍作用较小，所以这种扼流圈可以用来“通直流，阻交流”。

另一种是高频扼流圈，线圈有的绕在铁氧体芯上，有的是空心的，匝数为几百或几十，自感系数为几毫亨。这种扼流圈只对高频交变电流有较大的阻碍作用，对低频交变电流的阻碍作用较小，对直流的阻碍作用更小，因此可以用来“通低频、通直流，阻高频”。



图 5.3-2 扼流圈

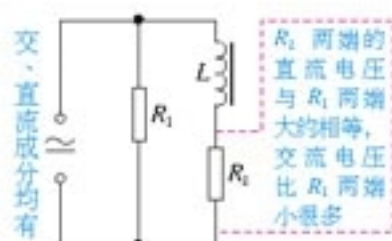


图 5.3-3 低频扼流圈用来“通直流，阻交流”

**演示**

如图 5.3-4，把白炽灯和电容器串联起来，先把它们接到直流电源上，再把它们接到交流电源上。观察灯泡的发光情况。

这个实验说明了什么？



图 5.3-4 交流能够通过电容器

**交变电流能够通过电容器** 直流不能通过电容器，这是容易理解的，因为电容器的两个极板被绝缘介质隔开了。



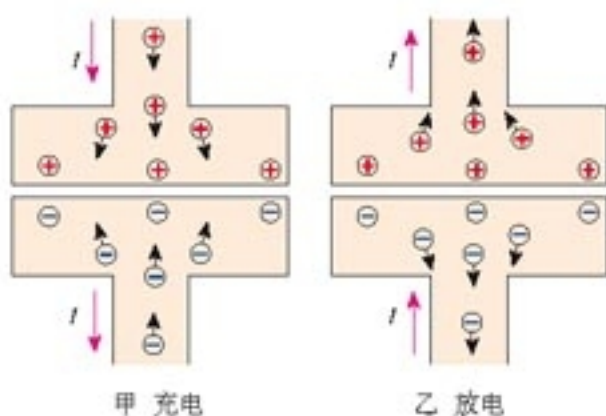


图 5.3-5 电容器充电和放电的示意图

甲 充电

乙 放电

金属中的电流是由负电荷的定向移动引起的，它等效于正电荷向相反方向的移动。图中用到了这种等效画法。

当电容器接到交流电源的两端时，实际上自由电荷也没有通过两极板间的绝缘介质。不过，瞬时电压在不断变化，当电压升高时，电容器充电，电荷向电容器的极板上聚集，形成充电电流；当电压降低时，电容器放电，电荷从极板上退出，形成放电电流（图 5.3-5）。电源加在两极板上电压的大小和正负在不断地变化，电容器交替地进行充电和放电，电路中就有了电流，表现为交流“通过”了电容器。

**电容器对交变电流的阻碍作用** 在图 5.3-4 的实验中，如果把电容器从电路中取下来，使灯泡直接与交流电源相连，灯泡要比接有电容器时更亮。这表明电容也有对交流的阻碍作用。

电容对交流阻碍作用的大小用容抗表示。实验和理论分析都表明，电容器的电容越大，交流的频率越高，电容器对交流的阻碍作用就越小，也就是说，电容器的容抗就越小。

### 说—说

有些电源输出的电流既有交流成分又有直流成分，而我们只需要稳定的直流，不希望其中混有太多的交流成分，这时可以采用图 5.3-3 的电路。现在我们又知道，电容具有“隔直流、通交流”的作用，如果同时使用电感和电容器，是不是可以使负载电阻  $R_L$  上的交流成分更少？

试着在图 5.3-3 的基础上画出这样的电路图。

为了尽量减少  $R_L$  上的交流成分，应该怎样选择线圈的自感和电容器的电容？

使用 220 V 交流电源的电气设备和电子仪器，金属外壳与电源之间都有良好的绝缘。但是，有时候用手触摸外壳仍会感到“麻手”，用试电笔测试时氖管也会发光，这是为什么？

原来，与电源相连的机芯和金属外壳可以看做电容器的两个极板，电源中的交变电流能够“通过”这个“电容器”。虽然这一点点“漏电”一般不会造成人身伤害，但是为了确保安全，电气设备和电子仪器的金属外壳都应该接地。

电容不仅存在于成型的电容器中，也存在于电路的导线、元件及机壳间。有时候这种电容的影响是很大的，当交流的频率很高时更是这样。

同样，电感也不仅存在于成型的线圈中。下面将要讲到远距离输电，输电线的电感和电容都很大，它们造成的损失常常比电阻造成的还要大。

### 问题与练习

- 如图 5.3-6 所示，交流电流表  $A_1$ 、 $A_2$ 、 $A_3$  分别与电容器、线圈  $L$  和电阻  $R$  串联后接在同一个交流电源上，供电电压瞬时值为  $u_1 = U_m \sin \omega_1 t$ ，三个电流表各有不同的读数。现换另一个电源供电，供电电压瞬时值为  $u_2 = U_m \sin \omega_2 t$ ， $\omega_2 = 2\omega_1$ 。改换电源后，三个电流表的读数是否变化？如果有变化，是增大还是减小？为什么？
- 在电子技术中，声音、图像等信号都要变成交变电流来处理。微弱的信号电流往往需要经过几级放大。在某级放大之后，要把信号送到下一级，但两级的直流工作状态不能相互影响。这时可以在两级之间接入图 5.3-7 所示的电路，图中的电容称为耦合电容。说一说，这个电路怎样起到了“隔直流、通交流”的作用。
- 在电子技术中，从某一装置输出的交流常常既有高频成分，又有低频成分。如果只需要把低频成分送到下一级装置，可以在下一级电路的输入端并联一个电容器（图 5.3-8）。这样，进入下一级的高频成分就很少了。这种电容器叫做高频旁路电容器。说一说，这个电容器怎样起到高频旁路的作用。

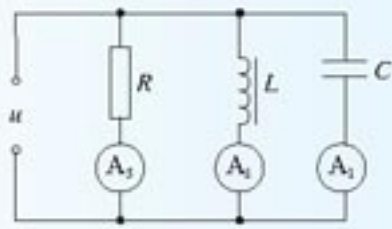


图 5.3-6 电流表如何变化？

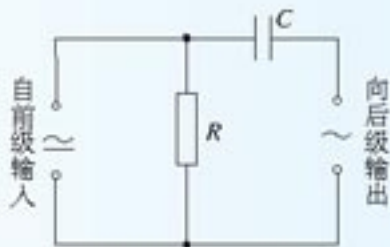


图 5.3-7 耦合电容

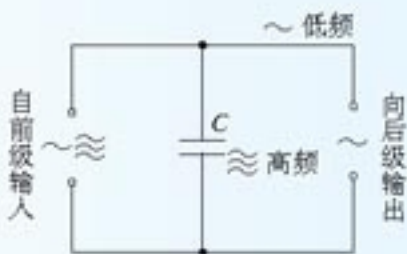


图 5.3-8 高频旁路电容器

## 4

### 变压器

#### 思考与讨论

把两个没有导线相连的线圈套在同一个闭合铁芯上，一个线圈连到交流电源的两端，另一个线圈连到小灯泡上（图 5.4-1）。小灯泡可能发光吗？说出你的道理。

连接电路，接通电源，看看你的判断对不对。

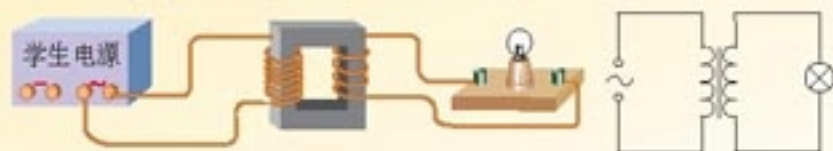


图 5.4-1 小灯泡会亮吗?

**变压器的原理** 变压器是由闭合铁芯和绕在铁芯上的两个线圈组成的(图 5.4-2)。一个线圈与交流电源连接,叫做原线圈(primary coil),也叫初级线圈;另一个线圈与负载连接,叫做副线圈(secondary coil),也叫次级线圈。

互感现象是变压器工作的基础。电流通过原线圈时在铁芯中激发磁场,由于电流的大小、方向在不断变化,铁芯中的磁场也在不断变化。变化的磁场在副线圈中产生感应电动势,所以尽管两个线圈之间没有导线相连,副线圈也能够输出电流。

在输入电压一定时,原线圈、副线圈取不同的匝数,副线圈输出的电压也不一样,变压器由此得名。

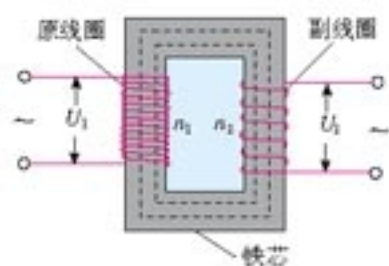


图 5.4-2 变压器的示意图

实验

探究变压器线圈两端的电压与匝数的关系

根据前面“思考与讨论”中看到的现象,以及你对变压器原理的理解,你认为线圈两端的电压与线圈的匝数可能有什么关系?能不能简单地说,线圈的匝数越多,它两端的电压就越高?也许两个线圈的匝数都对副线圈两端的电压有影响?也许……



甲 可拆变压器零部件



乙 组装后的变压器

图 5.4-3 教学用可拆变压器

可以利用教学用的可拆变压器进行探究。可拆变压器能方便地从不同接线柱上选取不同匝数的线圈(图5.4.3)。

探究时要注意下面几点。

1. 先写出操作步骤，画出电路图。

建议先保持原线圈的匝数不变，改变副线圈的匝数，研究其对副线圈电压的影响。然后再保持副线圈的匝数不变，研究原线圈的匝数对副线圈电压的影响。

电路图上要标出两个线圈的匝数、原线圈欲加电压的数值。要事先推测副线圈两端电压的可能数值。操作前要画好记录数据的表格。

2. 连接电路后要由同组的几位同学分别独立检查，然后请老师确认。只有这时才能接通电源。

3. 为了人身安全，只能使用低压交流电源，所用电压不要超过12 V；不要用手接触裸露的导线、接线柱。

4. 为了多用电表的安全，使用交流电压挡测电压时，先用最大量程挡试测，大致确定被测电压后再选用适当的挡位进行测量。

5. 得出探究的结果后，要力求用准确而精练的语言把它表述出来。如果可能，最好用数学式来表述。

**电压与匝数的关系** 实验和理论分析都表明，原、副线圈的电压之比，等于两个线圈的匝数之比，即

$$\frac{U_1}{U_2} = \frac{n_1}{n_2} \quad (1)$$

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。所以，变压器工作时有能量损失。没有能量损失的变压器叫做理想变压器。(1)式只适用于理想变压器。但是，实际上变压器的效率都是比较高的，特别是电力设备中的巨大变压器，在满负荷工作时效率可以达到90%以上。所以，在中学物理的计算中应用(1)式是没有问题的。

实际应用中需要改变交流电压的场合是很多的。大型发电机发出的交流，电压为几万伏，而远距离输电却需要几十万伏以上的电压。各种用电设备所需的电压也不相同。电灯、电饭锅、洗衣机等家用电器需要220 V的电压，机床上的照明灯需要36 V或24 V的安全电压。一般半导体收音机的电源电压不超过10 V，而电视机显像管却需要10 kV以上的高电压。由于有了变压器，交流的电压容易改变，所以交流得到了广泛的应用。

理想变压器也是一个理想化模型。

如果副线圈的电压比原线圈的电压低，这样的变压器叫做降压变压器，反之则叫升压变压器。



甲 变电站的大型变压器



乙 街头变压器



丙 半导体收音机中的小变压器

图 5.4-4 变压器

## 科学漫步

### 互感器

交流电压表有一定的量度范围，它的绝缘能力也有限，不能直接测量过高的电压。用变压器把高电压变成低电压再接到交流电压表上，这个问题就解决了（图 5.4-5）。这样的变压器叫做电压互感器。为了安全，互感器的铁壳和副线圈应该接地。

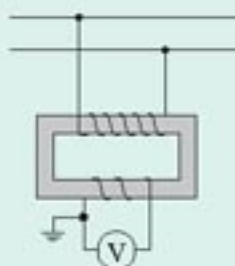


图 5.4-5 电压互感器

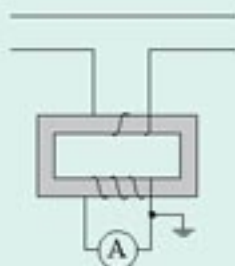


图 5.4-6 电流互感器

另外，也可以把变压器上原线圈的匝数做得较少，而副线圈的匝数做得较多，这时副线圈的电流比原线圈的电流小。如果把原线圈串联在电路中，副线圈的两端接在普通的交流电流表上，就可

以测量很大的电流了。这样的变压器叫做电流互感器（图 5.4-6）。

测量电流时要把电路断开，把电流表串联到电路中，不方便。有一种钳式电流表，按下手柄时，它的铁芯可以分开，把被测的载流导线放入后，松开手柄，铁芯闭合。导线中的交流在铁芯中产生交变磁场，电流表与套在铁芯上的线圈相连，可以间接得知导线中的电流。被测导线—铁芯—线圈也构成一个互感器，不过它的原线圈只有一匝！钳式电流表使用方便，但测量准确度较差，多用于大电流的估测。



甲 配电板的背面



乙 配电板的正面

图 5.4-7 互感器常常安装在配电板的背面



图 5.4-8 钳式电流表

**问题** 如果图 5.4-6 中电流互感器的效率是 100%，请推导两个线圈中电流之比与它们的匝数之比的关系。

### 问题与练习

1. 变压器为什么不能改变恒定电流的电压？
2. 为了安全，机床上照明电灯用的电压是 36 V，这个电压是把 380 V 的电压降压后得到的。如果变压器的原线圈是 1 140 匝，副线圈是多少匝？
3. 当变压器一个线圈的匝数已知时，可以用下面的方法测量其他线圈的匝数：把被测线圈作为原线圈，用匝数已知的线圈作为副线圈，通入交流，测出两线圈的电压，就可以求出被测线圈的匝数。已知副线圈有 400 匝，把原线圈接到 220 V 的线路中，测得副线圈的电压是 55 V，求原线圈的匝数。
4. 变压器线圈中的电流越大，所用的导线应当越粗。街头见到的变压器是降压变压器，假设它只有一个原线圈和一个副线圈，哪个线圈应该使用较粗的导线？为什么？
5. 图 5.4-9 是街头变压器通过降压给用户供电的示意图。变压器的输入电压是市区电网的电压，负载变化时输入电压不会有大的波动。输出电压通过输电线输送给用户，输电线的电阻用  $R_0$  表示，变阻器  $R$  表示用户用电器的总电阻，当用电器增加时，相当于  $R$  的值减小（滑动片向下移）。当用户的用电器增加时，图中各表的读数如何变化？

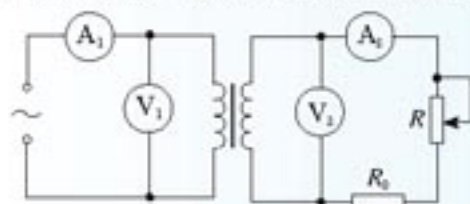


图 5.4-9 用电器增加时各表读数如何变化？

# 5

## 电能的输送

为了合理地利用自然资源，水电站要建在水库大坝上，以煤为燃料的火电站最好建在煤矿附近。但是用电的地方可能距离很远，因此常常要把电能输送到远方。用导线把电源和用电设备连起来，就可以输送电能了，这是电能的一个突出优点。

输送电能的基本要求是可靠、保质、经济。

可靠，是指保证供电线路可靠地工作，少有故障。保质，就是保证电能的质量——电压和频率稳定。各种用电设备都是按照一定的工作电压设计的，电压过低或过高，用电器都不能正常工作，甚至损坏。使用交流的用电器还要求频率稳定。经济，则是指输电线路建设和运行的费用低，电能损耗少。

以下重点讨论怎样在输电过程中减少电能的损失。

**降低输电损耗的两个途径** 设输电电流为  $I$ ，输电线的电阻为  $r$ ，则输电线上的功率损失为  $\Delta P = I^2 r$ 。据此，可以有两个途径来减少输电损失。

一个途径是减小输电线的电阻。在输电距离一定的情况下，为了减小电阻，应当选用电阻率小的金属材料，例如铜、铝来制造输电线。此外，还要尽可能增加导线的横截面积。

但是，导线横截面积的增加是有一定限度的。过粗的导线会耗费太多的金属材料，而且输电线太重、太粗也给铺设工作带来困难。

另一个途径是减小输电导线中的电流。让我们讨论下面的问题。



图5.5-1 远距离的输电线大多是多股导线绞合而成的。有一种绞合线，中心是钢线，它的机械强度大；周围是铝线，它的电阻小、重量轻。

### 思考与讨论

假定输电线路中的电流是  $I$ ，两条导线的总电阻是  $r$ 。在图5.5-2中，导线的电阻集中画为一个电阻  $r$ ①。

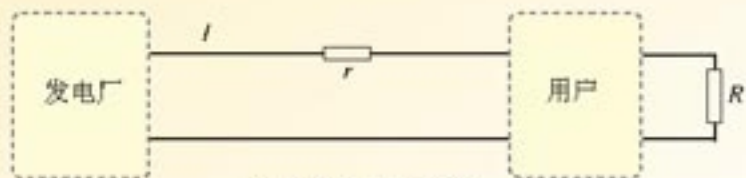


图5.5-2 输电电路图

由于导线具有电阻，用户一方的电压低于电厂输送的电压。但是，实际输电线路损失的电压不会太大，所以在粗略的估算中，无论是电厂一方计算输出的功率还是用户一方计算输入的功率，如果要用到电压，可以取同一个值  $U$ 。

① 实际上电厂供给的电能要经过多次转换才能到达用户（见图5.5-3），这里只讨论原理，所以把问题简化了。

1. 怎样计算输电线路损失的功率?
2. 在输电电流一定的情况下, 如果线路的电阻减为原来的一半, 线路上损失的功率减为原来的几分之一? 在线路电阻一定的情况下, 如果输电电流减为原来的一半, 线路上损失的功率减为原来的几分之一?
3. 通过第2步的两项计算, 你认为哪个途径对于降低输电线路的损耗更为有效?
4. 怎样计算用户消耗的功率 $P$ ?
5. 在保证用户的电功率的前提下, 怎样才能减小输电电流?

远距离输电时, 为了降低输电线路中的损耗, 就要减小输电电流; 为了减小输电电流, 同时又要保证向用户提供一定的电功率, 就要提高输电电压。现代远距离输电的电压都很高。目前我国远距离送电采用的电压有 110 kV、220 kV、330 kV, 输电干线已经采用 500 kV 的超高压, 西北电网的电压甚至达到 750 kV。

输电电压也不是越高越好。电压越高, 对输电线路绝缘性能的要求就越高, 线路修建费用就会增多。输电电压越高, 变压器上的电压也越高, 对变压器的要求也相应提高。实际输送电能时, 要综合考虑各种因素, 如输送功率的大小、距离的远近、技术和经济要求等, 依照不同情况选择适合的输电电压。

**电网供电** 一般发电机组输出的电压在十千伏上下, 不符合远距离送电的要求。因此, 要在发电站内用升压变压器, 升压到几百千伏后再向远距离送电。到达数百千米甚至数千千米之外的用电区之后, 先在“一次高压变电站”降到一百千伏左右, 在更接近用户的地点再由“二次变电站”降到十千伏左右。然后, 一部分电能送往大量用电的工业用户, 另一部分经过低压变电站降到 220 V/380 V, 送给其他用户。

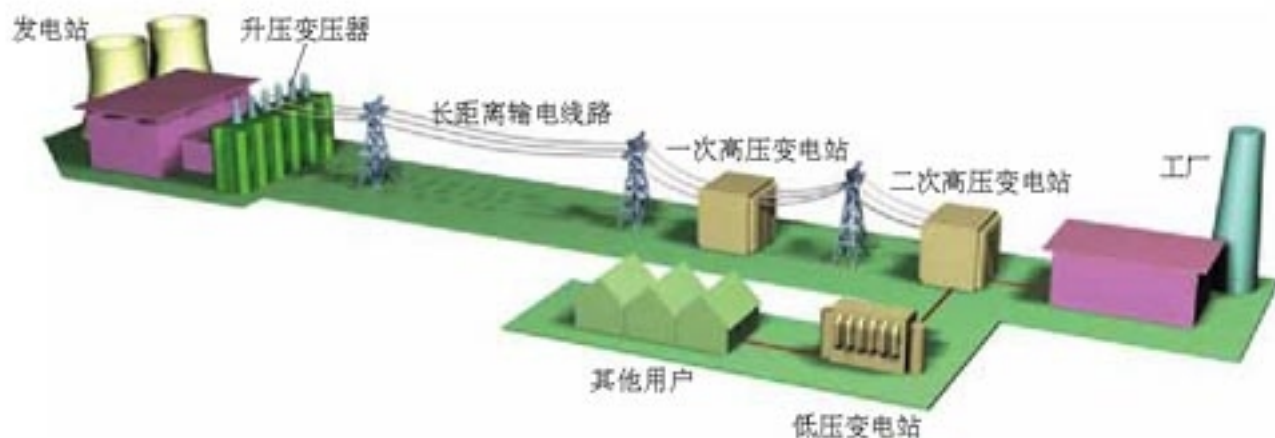


图 5.5-3 输电过程示意图

现在世界各国都不采用一个电厂与一批用户的“一对一”的供电方式, 而是通过网状的输电线、变电站, 将许多电厂和广大用户连接起来, 形成全国性或地区性的输电网络, 这



就是电网。

采用电网送电，是输电技术的重要发展。这样可以在一次能源产地使用大容量的发电机组，降低一次能源的运输成本，获得最大的经济效益。电网可以减少断电的风险，调剂不同地区电力供需的平衡，保障供电的质量。使用电网，可以根据火电、水电、核电的特点，合理地调度电力，这就使得电气化社会的主要能源——电力的供应更加可靠，质量更高。

## 科学漫步

### 输电新技术

#### 直流输电

人类历史上最早的输电线路是直流的。开始时输电电压只有 100 V，后来逐步提高，到 1885 年提高到 6 kV。但是，制造高电压、大功率的直流发电机很困难，又不能直接给直流升压，而远距离输电需要高电压。这限制了直流输电的发展。另一方面，19 世纪 80 年代末发明了三相交流发电机和变压器，特别是发明了结构简单、运行可靠、价格便宜的感应电动机，交流的应用范围进一步扩大。与这种情况相适应，交流输电获得了长足发展。

但是，交流输电时，导线不但有电阻，还有线路的电感、电容产生的感抗和容抗。一组输电线一般是两条、三条，有时还要多一些，这些导线之间、导线与大地之间具有电感和电容。跨过海底的电缆、穿过城市中的地下电缆，绝缘层内的金属线芯与大地或水等复杂结构的作用也相当于电感和电容。当电缆很长时，电感和电容产生的电抗会使交流输电线路无法工作。这时只能用直流输电。在导线粗、线路长的情况下，感抗和容抗的作用会超过电阻，而导线对稳定的直流只有电阻，没有感抗和容抗。

交流输电还有其他问题。设想甲、乙两台交流发电机为同一线路供电。假如甲发电机在某时刻的瞬时电压达到峰值，乙也刚好达到峰值，但正负恰好与甲相反，于是，两者在线路中互相抵消，电路无法工作，甚至会损毁设备。所以，要使输电线路正常工作，为同一电网供电的所有发电机都必须同步运行，即同时达到正的最大值、同时达到负的最大值。要使电网内许多发电机同步运行，技术上是很困难的。直流输电就不存在同步问题。

现代的直流输电，只在输电这个环节使用直流，发电机产生的仍是交流，用户使用的也主要是交流。因此，在送电端有专用的“整流”设备将交流变换为直流，在用户端也有专用的“逆变”设备再将直流变换为交流。制造大功率的整流和逆变设备在过去有很大困难，目前已经逐步解决，因此直流输电技术也有所发展。

我国继三峡至常州正负 500 kV 直流输电工程之后，又于 2004 年 6 月 6 日正式投产了三峡至广东正负 500 kV 直流输电工程。这条输电线路长达 940 km，输电功率达  $3 \times 10^6$  kW。它的建成，实现了华中与华南电网的互联，“西电东送”的全国联网战略目标又向前推进了一大步。



超导电缆基本结构

### 超导电缆输电

减小输电线路的电阻是降低输电损失的重要途径。

许多导体在温度特别低时电阻可以降到零,这个现象叫做超导现象。例如,铝在 $1.39\text{ K}(-271.76\text{ }^{\circ}\text{C})$ 、铅在 $7.20\text{ K}(-265.95\text{ }^{\circ}\text{C})$ 以下,都能出现超导现象。近年来已经开发出一些“高温”超导材料,它们在 $100\text{ K}(-173\text{ }^{\circ}\text{C})$ 左右电阻就能降为零。

由于目前保持低温的主要方法是利用液态氮甚至液态氦,所以超导体输电还处于试验阶段。上图是一种超导电缆的结构。

2004年4月,我国云南昆明普吉变电站三相交流 $33.5\text{ m}$ 、 $35\text{ kV}/2\text{ kA}$ 超导电缆系统成功实现并网试运行。这标志着继美国、丹麦之后,我国成为世界上第三个将超导电缆投入电网运行的国家。

近期内,高温超导电缆在以下几个方面可能有比较大的优势:一是在城市大厦群中,原来的常规电缆容量不够,又没有更大的增设空间;二是在金属冶炼等大电流、短距离、小空间的应用场合;三是用来制造发电厂或变电站内大电流的传输母线。这些情况下,都可以在原有的电缆管道内把旧电缆更换为超导电缆,使供电容量提高三至五倍。



我国实用型超导电缆并网输电

## STS

### 大面积停电引发的思考

#### 美、加、英发生重大停电事故

“8月14日,美国东北部和加拿大部分地区发生大面积停电事件。纽约市当晚发生60起火灾。长达29小时的停电使纽约损失10.5亿美元。8月28日傍晚,英国伦敦和英格兰东南部部分地区也发生两个多小时的重大停电事故,约25万人被困在地铁中。12月20日晚,美国加利福尼亚州的旧金山市又出现大面积停电,导致全城约三分之一的用户断电。”

以上是新华社评出的2003年十大国际新闻中的第五条。下面是关于这些地区停电情景的新闻摘录。

“在纽约，成千上万乘客被困在漆黑的地铁隧道里。办公楼内电梯停运、空调没法运转，许多上班的人和商场内的顾客陷入恐慌，不顾一切地冲到曼哈顿的各条大街上。公路堵塞，公共汽车无法运营。当时气温高达 $33^{\circ}\text{C}$ ，但由于公路被堵，他们只好忍耐酷热步行回家。想给家人通告一下吧，可是，移动电话网络也中断了，原因很简单，成千上万的人同时用手机打电话！总之，城市生活的方方面面都被完全打乱，全市在很长一段时间内没有汽车、火车、地铁在运行。”

“危机就是商机，美加大停电给当地人带来了混乱和恐慌，同时也激活了备用发电机市场。人们纷纷赶往五金店购买应急发电机，生意立刻红火起来。”

大面积停电事故频繁出现，已为各国电网安全问题敲响警钟。

美国媒体认为，这次北美洲有史以来最大规模的停电，暴露了全美电网的脆弱不堪，需要对整个国家供电系统进行全面整修。

《日本经济新闻》的社论认为，美国没有建立起一旦停电时最低限度的安全防护系统。应该考虑发挥燃料电池及太阳能电池等小型、分散电源的作用。这次北美停电事故向全世界表明了完全依靠大规模电力的现代文明的脆弱的一面。

俄报认为美国没有统一的电力系统和调度中心，也没有完善的备用电力系统，这是造成大面积停电的重要原因。

从另一方面看，应对突发事件的预案和相应的训练近两年来得到了重视，这在停电事故中发挥了重大作用。在纽约，警方曾就如何疏散困在地铁通道和高楼大厦里的人员，进行了几个月的训练。从克利夫兰到底特律，休假的警察按照预先拟

订的程序被紧急召回，引导车辆在没有红绿灯的情况下穿行于城市各条街道。警察、消防人员和紧急情况处理人员在这次危机中表现良好，原因之一是他们对突发事件做了全面准备。

#### 问题

1. 当遇到一些突发事件时，你认为应该如何应付？
2. 通过以上事例，以及你对科学技术与社会关系的体会，你认为人类有必要在这样大的程度上依赖技术吗？



城市的运转依靠强大的电力，一旦出现故障该怎么办？

## 问题与练习

以下各题都不考虑电感和电容的影响。

1. 输送 4 800 kW 的电功率，采用 110 kV 高压输电，输电导线中的电流是多少？如果用 110 V 电压输电，输电导线中的电流是多少？

我们在初中曾经做过类似的题目，那时是用直流的知识来处理的。在纯电阻的交流电路中，同样有  $U = IR$  和  $P = UI$ ，想想看，这里的  $U$  和  $I$  的含意与初中有什么不同？

2. 以下是一段关于输电线损失功率的推导。

将电能从发电站送到用户，在输电线上会损失一部分功率。设输电电压为  $U$ ，则功率损失为

$$P_{\text{损}} = UI \quad (1)$$

而

$$U = Ir \quad (2)$$

将(2)式代入(1)式，得到

$$P_{\text{损}} = \frac{U^2}{r} \quad (3)$$

由(3)式可知，要减小功率损失  $P_{\text{损}}$ ，就应当用低压送电和增大输电线的电阻  $r$ 。这段推导错在哪里？

3. 从发电站输出的功率为 200 kW，输电线的总电阻为 0.05  $\Omega$ ，用 110 V 和 11 kV 两种电压输电。试估算两种情况下输电线上由电阻造成的电压损失。
4. 如果用 220 V 和 11 kV 两种电压来输电，设输送的电功率、输电线上的功率损失、导线的长度和电阻率都相同，求导线的横截面积之比。
5. 一座小型水电站，用总电阻是 0.5  $\Omega$  的输电线把电输送给用户，水电站输出的电功率是 20 kW。假如用 250 V 的电压输电，估算输电导线上的功率损失和用户得到的功率。假如输电电压改成 500 V，输电线上的功率损失和用户得到的功率又各是多少？
6. 某水电站发电机的输出功率为 100 kW，发电机的电压为 250 V。通过升压变压器升高电压后向远处输电，输电线总电阻为 8  $\Omega$ ，在用户端用降压变压器把电压降为 220 V。要求在输电线上损失的功率控制为 5 kW（即用户得到的功率为 95 kW）。请你设计两个变压器的匝数比。为此，请你计算：
- (1) 降压变压器输出的电流是多少？输电线上通过的电流是多少？
  - (2) 输电线上损失的电压是多少？升压变压器输出的电压是多少？
  - (3) 两个变压器的匝数比各应等于多少？

没有今日的基础科学，就没有明日的科技应用。

——李政道<sup>①</sup>

## 第六章 传感器



“勇气号”火星探测器

在经历了六个多月的太空旅程之后，美国“勇气号”火星探测器于北京时间2004年1月4日12时35分成功登陆火星。4日下午5时42分，地面控制人员用英国摇滚乐队披头士的歌曲《早上好、早上好》，唤醒了远在火星上的“勇气号”。第二天，“勇气号”在地面控制下展开了太阳电池板，开始为自己充电。

远离我们亿万公里之遥的小小探测器为什么能如此听话地“任人摆布”？人们又是如何操控它的？

其实人们不必直接接触，就可以控制一些机器。例如用红外线遥控器控制电视的开关；用日光的明暗控制路灯的开关；用声音的强弱控制走廊内照明灯的开关等。要想知道这些自动控制的道理，就要学习一些有关传感器的知识。

<sup>①</sup> 李政道（1926— ），美籍华裔物理学家，1957年与杨振宁共同获得诺贝尔物理学奖。引文见《中国国家自然科学基金会十年纪念会议上的讲话》，科学导报1992年10月。

# 1

## 传感器及其工作原理

### 演示

如图6.1-1,小盒子A的侧面露出一个小灯泡,盒外没有开关,但是把磁铁B放到盒子上面,灯泡就会发光,把磁铁移走,灯泡熄灭。

盒子里有什么样的装置,才能出现这样的现象?

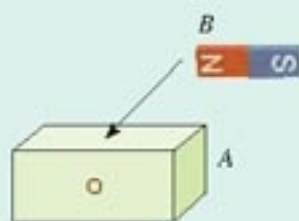


图6.1-1 盒子里有什么装置?

**什么是传感器** 电子电路中常用到一种称为“干簧管”的元件(图6.1-2),它的结构很简单,只是玻璃管内封入的两个软磁性材料制成的簧片。当磁体如图6.1-2所示靠近干簧管时,两个簧片被磁化而接通,所以干簧管能起到开关的作用,操纵开关的是磁场这只看不见的“手”。干簧管是一种能够感知磁场的传感器。

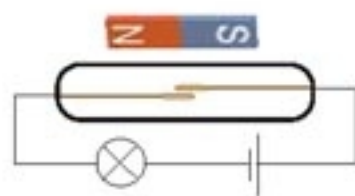


图6.1-2 干簧管

大家都会使用普通的温度计,但是在很多情况下它却不能满足我们的需求。例如医疗和防疫需要一种快速、准确而又与被测者身体没有接触的体温测试仪,化工厂的控制室内要同时知道相距较远的若干个反应器中的温度,气象站要把一天中气温的变化连续地记录下来,孵化器要在达到设定的温度时切断加热器的电源……

现代技术中,传感器(sensor)是指这样一类元件:它能够感受诸如力、温度、光、声、化学成分等非电学量,并能把它们按照一定的规律转换为电压、电流等电学量,或转换为电路的通断。把非电学量转换为电学量以后,就可以很方便地进行测量、传输、处理和控制了。

为了制作传感器,需要一些元器件,下面来看几个实际的例子。



图6.1-3 各种传感器

**光敏电阻** 有一些物质，例如硫化镉，电阻率与所受光照的强度有关。把硫化镉涂敷在绝缘板上，在其表面再用银浆涂敷两个互不相连的栅状电极（图 6.1-4），这样就制成了一个光敏电阻。硫化镉表面受到的光照强度不同时，两个电极间的电阻也不一样。



图6.1-4 光敏电阻

### 实验

将一只光敏电阻接到多用电表的两端，电表置于倍率为100的欧姆挡（图6.1-5）。在室内自然光的照射下，电阻值约有多大？用手掌遮光时电阻值又是多少？用阳光直接照射呢？

换用一只普通的电阻，小心地把电阻器表面的漆层除去一些，使里面的导电膜露出来接受光照。重做上述实验，结果相同吗？



甲 光敏电阻在暗环境中，电阻值很大



乙 强光照射下，电阻值很小

图6.1-5 观察光敏电阻的特性

光敏电阻在被光照射时电阻发生变化，原因是：硫化镉是一种半导体材料，无光照时，载流子极少，导电性能不好；随着光照的增强，载流子也增多，导电性变好。

光敏电阻能够把光照强弱这个光学量转换为电阻这个电学量。

## 科学漫步

### 半导体的导电机理

金属中有很多可以自由移动的电子，所以金属能够导电。半导体为什么能够导电？单晶硅是一种常用的半导体材料。我们以它为例做些浅显的解释。

图6.1-6是硅原子排列的示意图，每个原子的最外层有4个电子。由于热运动或其他原因，其中极少数电子可能获得较大的能量，挣脱原子的束缚而成为自由电子。这样，在原来的地方就留下一个空位，称为“空穴”，空穴相当于一个正电荷。当这个空穴由附近原子中的电子来填补时，就出现了一个新的空穴，这种变化相当于空穴在移动。

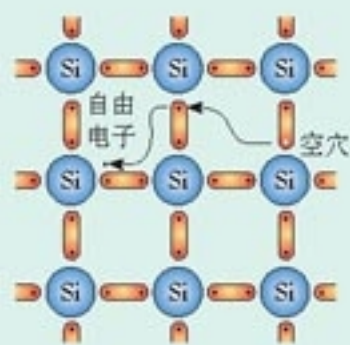


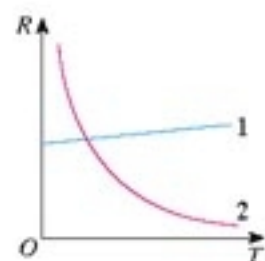
图6.1-6 半导体靠其中自由移动的电子和空穴来导电

如果有了外电场，自由电子和空穴会向相反的方向做定向移动，于是在半导体中形成了电流。自由电子和空穴都叫做载流子(carrier)。

当半导体材料受到光照或者温度升高时，会有更多的电子获得能量成为自由电子，同时也形成更多的空穴，于是导电能力明显增强。

**热敏电阻和金属热电阻** 除了光照以外，温度也能明显地影响金属导体和半导体材料的导电性能。

金属的电阻率随温度的升高而增大(图6.1-7中的图线1)。用金属丝可以制作温度传感器，称为热电阻。常用的一种热电阻是用铂制作的，曾在《物理选修3-1》的第二章第6节做过介绍。与金属不同，有些半导体在温度上升时导电能力增强(图6.1-7中的图线2)，因此可以用半导体材料制作热敏电阻。有一种热敏电阻是用氧化锰等金属氧化物烧结而成的，它的电阻随温度的变化非常明显。与热敏电阻相比，金属热电阻的化学稳定性好，测温范围大，但灵敏度较差。



1. 金属导线 2. 热敏电阻

图6.1-7 电阻—温度特性图线

热敏电阻或金属热电阻能够把温度这个热学量转换为电阻这个电学量。

### 实验

将多用电表调到欧姆挡上(注意选择适当的倍率)，然后仿照图6.1-5所示的方法，将一只热敏电阻连接到多用电表的两端。

分别用手和冷水去改变热敏电阻的温度，观察电阻值的变化情况。

### 说—说

如图6.1-8，当被测物体在左右方向发生位移时，电介质板随之在电容器两极板之间移动。如果测出了电容的变化，就能知道物体位置的变化。用什么方法可以检测电容的变化？

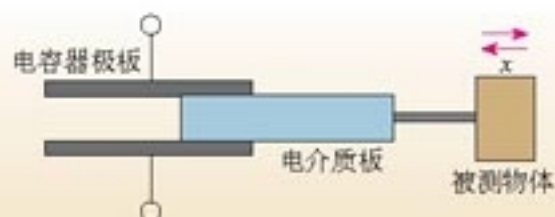


图6.1-8 电容式位移传感器

电容式位移传感器能够把物体位移这个力学量转换为电容这个电学量。



**霍尔元件** 在一个很小的矩形半导体（例如砷化镓）薄片上，制作4个电极E、F、M、N，它就成了一个霍尔元件（图6.1-9）。在E、F间通入恒定的电流I，同时外加与薄片垂直的磁场B，则薄片中的载流子就在洛伦兹力的作用下，向着与电流和磁场都垂直的方向漂移，使M、N间出现了电压，称为霍尔电压 $U_H$ 。

可以证明<sup>①</sup>

$$U_H = k \frac{IB}{d}$$

式中d为薄片的厚度，k为霍尔系数，它的大小与薄片的材料有关。

一个霍尔元件的d、k为定值，再保持I恒定，则 $U_H$ 的变化就与B成正比。

霍尔元件能够把磁感应强度这个磁学量转换为电压这个电学量。

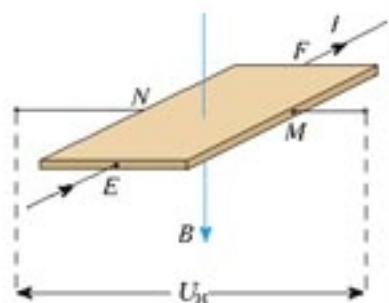


图6.1-9 霍尔元件的工作原理

### 做一做

取一个图6.1-10所示的霍尔元件，从相对的两个电极接出两条导线，与限流电阻及电流计串联后接到干电池上。调整电阻使通入的电流约为10 mA。将另一对电极接到数字式多用表的200 mV直流电压挡上。

将永磁体的一个磁极逐渐靠近霍尔元件的工作面，即写有字符的表面，观察是否出现霍尔电压以及这个电压怎样变化。用另一个磁极去接近，又会看到什么现象？改变磁感线与霍尔元件工作面的夹角，再次观察这个电压的变化。

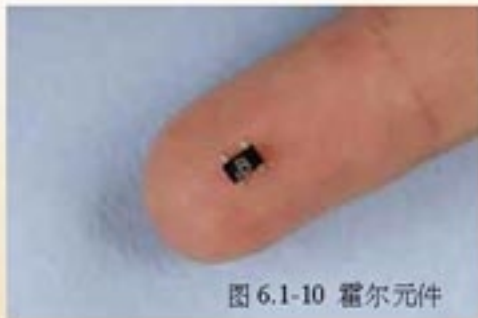


图6.1-10 霍尔元件

### 问题与练习

- 图6.1-11是两种电感式微小位移传感器的原理图。图甲中，1是待测的物体，2是可以平移的软铁芯，3是固定的软铁芯，2、3之间的空气间隙随着物体的位移改变，铁芯3上绕有线圈4。乙图中，3是空心线圈，1是待测的物体，软铁芯2插在线圈3中并且可以随着物体1在线圈中平移。

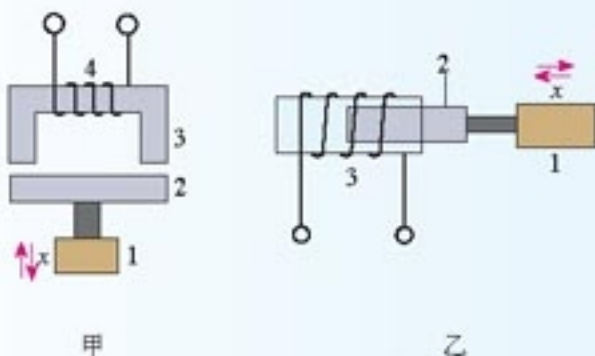


图6.1-11 电感式位移传感器

说明它们的工作原理，并尝试设计与线圈3或线圈4相连的电路。

<sup>①</sup>关于这个公式的推导，在《物理选修3-1》的“课题研究”中有提示。

2. 按照你对以下几种传感器的理解填写下面的表格。必要时可以查询资料或向内行人请教。

传感器名称	输入（感受）的物理量或化学量	输出的物理量	可能的工作原理
气体压强传感器			
硅光电池			
光电二极管			
湿敏电阻			
话筒			
加速度传感器			
测速发电机			
热电偶			
酒精气体传感器			

## 2

### 传感器的应用(一)

一般说来，传感器输出的电信号相当微弱，难以带动执行机构去实现控制动作，因此要把这个电信号放大。如果需要远距离传送，可能还要把它转换成其他电信号以抵御外界干扰。

从传感器获得信号后，可以用指针式电表或液晶板等显示测量的数据；也可以用来驱动继电器或其他元件，来执行诸如打开管道的阀门、开通或关闭电动机等动作；还可以由计算机对获得的数据进行处理，发出更复杂的指令。

概括起来，传感器应用的一般模式可用图 6.2-1 表示。

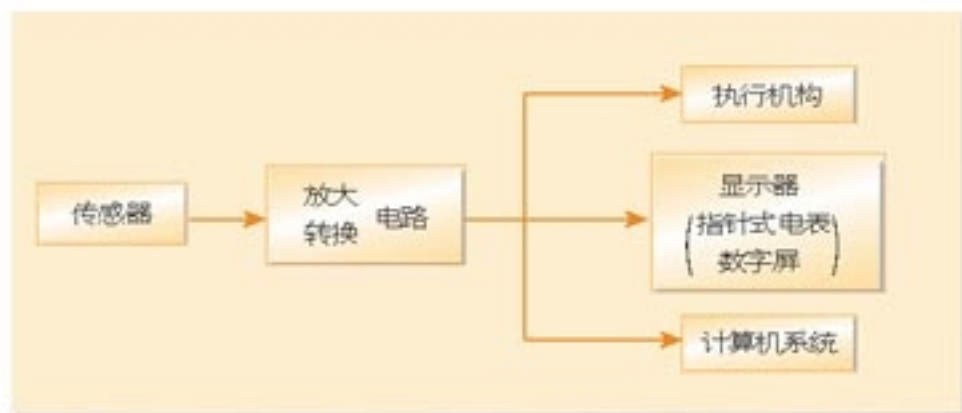


图 6.2-1 传感器应用的一般模式

下面是几个应用的实例。

**力传感器的应用——电子秤** 我们经常见到电子秤，小的用来称量食品的重量，大的可以称量汽车、火车的重量。它所使用的测力装置是力传感器。常用的一种力传感器是由金属梁和应变片组成的，如图 6.2-2 所示。应变片是一种敏感元件，现在多用半导体材料制成。这种传感器的工作原理如图 6.2-3 所示：弹簧钢制成的梁形元件右端固定，在梁的上下表面各贴一个应变片，在梁的自由端施力  $F$ ，则梁发生弯曲，上表面拉伸，下表面压缩，上表面应变片的电阻变大，下表面的电阻变小。 $F$  越大，弯曲形变越大，应变片的电阻变化就越大。如果让应变片中通过的电流保持恒定，那么上面应变片两端的电压变大，下面应变片两端的电压变小。传感器把这两个电压的差值输出。力  $F$  越大，输出的电压差值也就越大。



图 6.2-2 应变式力传感器

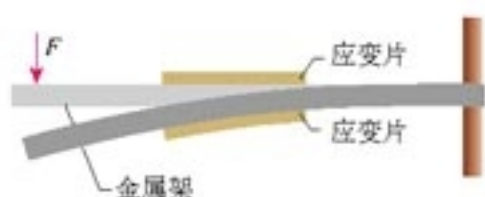


图 6.2-3 应变片测力原理

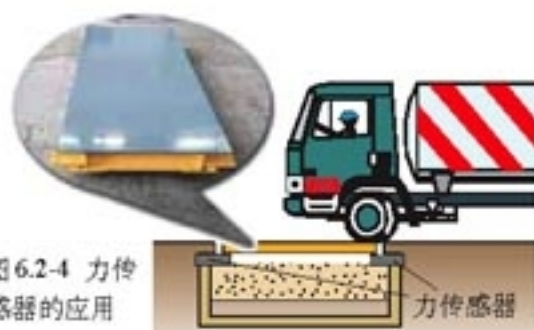


图 6.2-4 力传感器的应用

除了重力之外，应变式力传感器也用来测量其他各种力，如汽车和卷扬机的牵引力等。《物理 1 必修》课本中“用传感器探究作用力和反作用力的关系”的实验使用的就是这种传感器。应变片能够把物体形变这个力学量转换为电压这个电学量。

**声传感器的应用——话筒** 话筒是一种常用的声传感器，类型虽多，但其作用都是将声信号转换为电信号。

一般会场用的大多是动圈式话筒（图 6.2-5）。你可以根据电磁感应的原理说明它是怎样把声信号转换成电信号的。

电容式话筒的保真度比动圈式话筒好，其工作原理如图 6.2-6 所示。 $Q$  是绝缘支架，薄金属膜  $M$  和固定电极  $N$  形成一个电容器，被直流电源充电。当声波使膜片振动时，电容发生变化，电路中形成变化的电流，于是电阻  $R$  两端就输出了与声音变化规律相同的电压。

盒式录音机、声控玩具等使用的是驻极体<sup>①</sup>话筒，它的特点是体积小、重量轻、价格便宜、灵敏度高。驻极体话筒由内部的驻极体塑料薄膜感受声波，工作原理与电容式话筒类似，工作电压为 3~6 V。

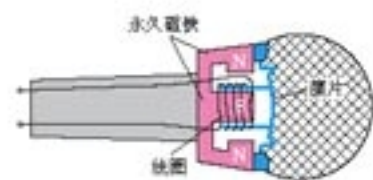


图 6.2-5 动圈式话筒的构造

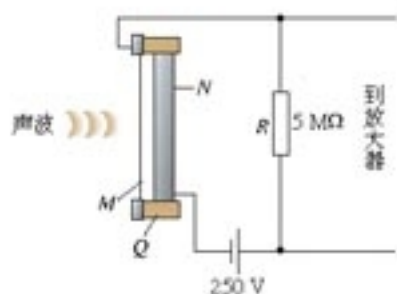


图 6.2-6 电容式话筒原理

<sup>①</sup>将电介质放入电场中，在前后两个表面上会分别出现正电荷与负电荷，这个现象称为极化。极化现象与介质在磁场中的磁化现象十分相似。某些电介质在去掉外加的电场后，仍然会长期保持被极化的状态，这种材料称为驻极体。

### 演示

按照图6.2-7连接驻极体话筒的工作电路。话筒的输出端经过隔直流电容器接到示波器。

轻敲音叉，使其靠近话筒，观察荧光屏上的波形，再对着话筒说话，比较其与音叉波形的区别。

通过以上实验，体会话筒把声信号转变为电信号的过程。

话筒的作用也可以通过电压传感器用计算机演示。

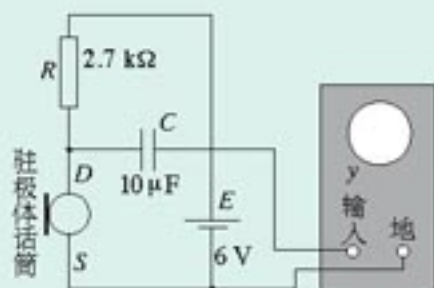


图 6.2-7 用示波器观察话筒的工作

**温度传感器的应用——电熨斗** 电熨斗在达到设定的温度后就不再升温，当温度降低时又会继续加热，使它总与设定的温度相差不多。在熨烫不同的织物时，设定的温度可以不同。进行这样的控制，靠的是温度传感器。

### 实验

取一个报废的日光灯启动器，去掉外壳，敲碎玻璃，可以看到一个U形的双金属片。双金属片的旁边有一根直立的金属丝，两者构成一对触点。常温下触点是分离的。用火靠近双金属片，双金属片的形状发生变化，与金属丝接触；把火焰移开，双金属片逐渐恢复原状，两个触点分离。

把这个启动器用做温控开关，可以控制小灯泡的亮和灭。



图 6.2-8 日光灯启动器中的双金属片

电熨斗为什么能够自动控制温度？原来它也装有双金属片温度传感器。这种传感器的作用是控制电路的通断。

图6.2-9为电熨斗的结构图。图中双金属片上层金属的膨胀系数大于下层金属。

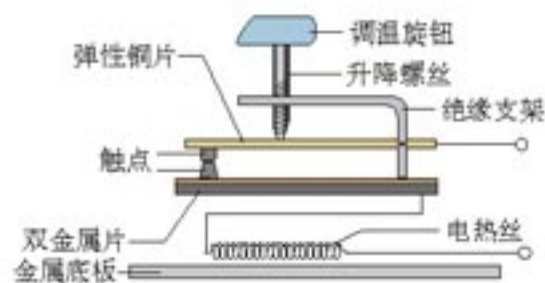


图 6.2-9 电熨斗的结构

### 思考与讨论

常温下，图6.2-9中电熨斗的上下触点应当是接触的还是分离的？当温度过高时双金属片将怎样起作用？

熨烫棉麻衣物需要设定较高的温度，熨烫丝绸衣物需要设定较低的温度。这是如何利用调温旋钮来实现的？

### 问题与练习

1. 图6.2-10表示某种电冰箱内温度控制器的结构。钢制的测温泡1、细管2和弹性金属膜盒3连通成密封的系统，里面充有氟甲烷和它的蒸气，构成了一个温度传感器。膜盒3为扁圆形（图中显示它的切面），右表面固定，左表面通过小柱体与弹簧片4连接。盒中气体的压强增大时，盒体就会膨胀。测温泡1安装在冰箱的冷藏室中。5、6分别是电路的动触点和静触点，控制制冷压缩机的工作。拉簧7的两端分别连接到弹簧片4和连杆9上。连杆9的下端是装在机箱上的轴。凸轮8是由设定温度的旋钮（图中未画出）控制的，逆时针旋转时凸轮连杆上端右移，从而加大对弹簧7的拉力。
- (1) 为什么当冰箱内温度较高时压缩机能够自动开始工作，而在达到设定的低温后又自动停止工作？
- (2) 为什么用凸轮可以改变设定的温度？

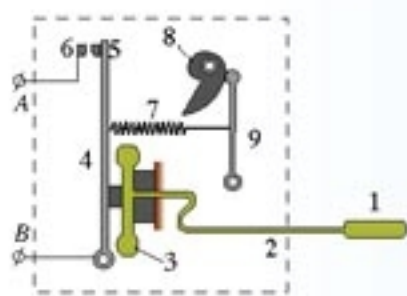


图6.2-10 电冰箱温控器的结构

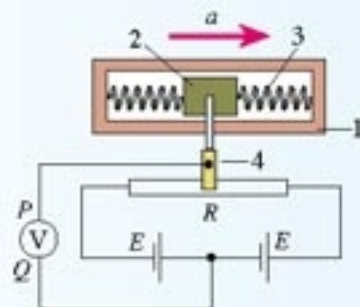


图6.2-11 自制加速度计

2. 某同学设计了一个加速度计，如图6.2-11所示。具有一定质量的滑块2可以在光滑的框架1中平移，滑块两侧用弹簧3拉着； $R$ 为滑动变阻器，4是滑动片，它与电阻器任一端间的电阻值都与它到这端的距离成正比。这个装置实际上是一个加速度传感器。

两个电池 $E$ 的电压相同。按图连接电路后，电压表指针的零点调在中央，当 $P$ 端的电势高于 $Q$ 端时，指针向零点右侧偏转。

你认为他的设计在原理上可行吗？这个装置能否同时测出加速度的大小和方向？将框架固定在运动的物体上，当物体具有图示方向的加速度 $a$ 时，电压表的指针将向哪个方向偏转？

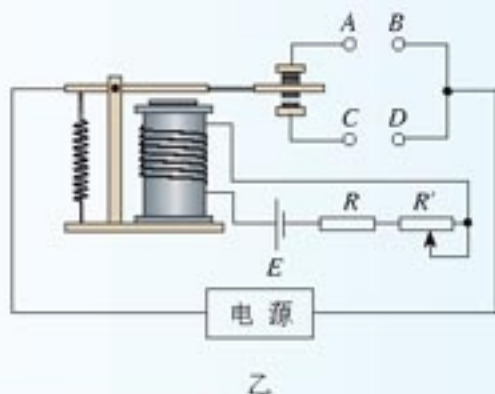
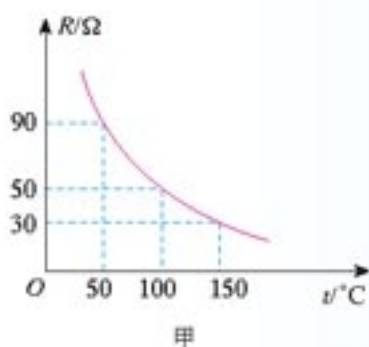


图6.2-12 简单的恒温箱温控电路

3. 如图 6.2-12 所示, 图甲为热敏电阻的  $R-t$  图象, 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  $150\ \Omega$ 。当线圈中的电流大于或等于  $20\ \text{mA}$  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  $E=6\ \text{V}$ , 内阻可以不计。图中的“电源”是恒温箱加热器的电源。

- (1) 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  $100\ ^\circ\text{C}$ , 可变电阻  $R'$  的值应调节为多少?

# 3

## 传感器的应用(二)

**温度传感器的应用——电饭锅** 电饭锅中也应用了温度传感器, 它的主要元件是感温铁氧体。感温铁氧体是用氧化锰、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, 但是温度上升到约  $103\ ^\circ\text{C}$  时, 就失去了铁磁性, 不能被磁体吸引了。这个温度在物理学中称为该材料的“居里温度”或“居里点”。

### 演示

取一块电饭锅用的感温铁氧体, 使它与一块小的永磁体吸在一起。用功率较大的电烙铁给铁氧体加热, 经过一段时间后会发生什么现象?

感温铁氧体可以用收音机中的磁棒代替。这种磁棒也是铁氧体, 居里点也是比  $100\ ^\circ\text{C}$  略高一些。

电饭锅的结构如图 6.3-1 所示。

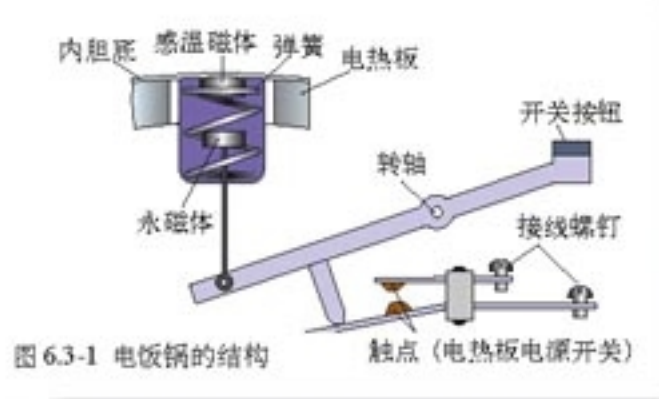


图 6.3-1 电饭锅的结构

### 思考与讨论

1. 开始煮饭时为什么要压下开关按钮? 手松开后这个按钮是否会恢复到图示的状态? 为什么?

2. 煮饭时水沸腾后锅内是否会大致保持一定的温度？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？这时电饭锅会自动地发生哪些动作？
4. 如果用电饭锅烧水，能否在水沸腾后自动断电？

**温度传感器的应用——测温仪** 应用温度传感器可以把温度转换成电信号，由指针式仪表或数字式仪表显示出来。由于电信号可以由测温地点传输到其他地点，所以应用温度传感器可以远距离读取温度的数值，这是把非电学量转变为电学量的一大优点。

图 6.3-2 是几种常见的测温仪，测温元件可以是热敏电阻、金属热电阻、热电偶等，还可以是红外线敏感元件<sup>①</sup>等。



图 6.3-2 各种数字式温度计

**做一做**

有些数字式多用表具有测温功能，所附温度传感器是与多用表配套使用的。按照使用说明书将它们连接起来，测量一杯水的温度，并且与水银温度计的测量结果对比。

还可以如图 6.3-3 所示，将微机辅助实验系统所配的温度传感器与计算机连接，利用计算机的数据采集、处理和绘图的功能，观测一杯热水自然冷却过程中温度变化的特点。

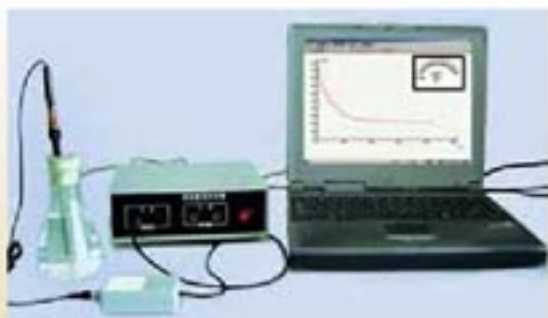


图 6.3-3 用传感器观测温度的变化

**光传感器的应用——鼠标器** 光传感器的应用也是十分广泛的，我们先来研究计算机的鼠标器。

<sup>①</sup>物体的温度不同，发射红外线的情况也不相同，因此利用红外线敏感元件可以实现无接触测温。

机械式鼠标器的内部结构如图 6.3-4 甲所示。两个滚轴分别装有码盘，码盘的边缘开有许多等间距的小齿；码盘两侧分别装有红外发射管 (LED) 及红外接收管，两个红外接收管就是两个光传感器 (图 6.3-4 乙)。



图 6.3-4 机械式鼠标器的主要结构

当鼠标器在桌面上移动时，滚球的运动通过滚轴带动两个码盘转动，红外接收管就收到断续的红外线脉冲，输出相应的电脉冲信号。计算机分别统计  $x$ 、 $y$  两个方向的脉冲信号，处理后就使屏幕上的光标产生相应的位移。

### 做一做

打开一只机械式鼠标器，对照图 6.3-4 认识它的主要结构和各部分的运动方式，找到其中的光传感器。

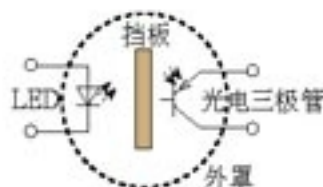
**光传感器的应用——火灾报警器** 许多会议室和宾馆房间的天花板上都装有火灾报警器。

有一种火灾报警器是利用烟雾对光的散射来工作的。如图 6.3-5，带孔的罩子内装有发光二极管 LED、光电三极管<sup>①</sup>和不透明的挡板。平时，光电三极管收不到 LED 发出的光，呈现高电阻状态。烟雾进入罩内后对光有散射作用，使部分光线照射到光电三极管上，其电阻变小。与传感器连接的电路检测出这种变化，就会发出警报。

图 6.3-5 烟雾散射式火灾报警器



甲 天花板上的火灾报警器



乙 结构和原理

①光电三极管也是一种晶体管，它有三个电极。当光照强弱变化时，电极间的电阻随之变化。



## 实验

## 测量光照的强度

把光敏电阻、多用表的直流电流挡和干电池按照图6.3-6甲连成电路，这样就能对光照的强度进行比较性测量。光敏电阻受到的光照越强，电路中的电流越大。

白天，将它放在教室中适合阅读的地方，记下电流表的读数。晚上，用它来检测灯光对书桌的照明。比较两者的差别。

还可以按照图6.3-6乙，把光敏电阻 $R$ 的引脚穿过硬泡沫塑料板 $Z$ 而固定，再罩上内壁涂黑、长度足够的遮光筒 $T$ ，避免杂散光的干扰。然后分别把不同的光源 $L$ （如蜡烛、几种不同功率的白炽灯泡、日光灯管等）都放在与光敏电阻相同距离（例如1 m）的位置，比较它们的亮度。

这个实验也可以用硅光电池来做。由于光电池在受到光照时可以自己产生电动势，所以电路中不用电源。

想一想，怎样用图6.3-6的装置来制作一个摄影用的曝光表？

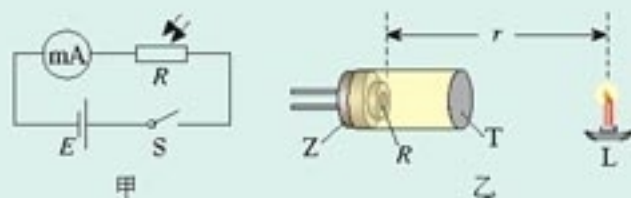


图 6.3-6 用光敏电阻比较光照的强弱

## 科学漫步

## 机器人

1920年，捷克斯洛伐克作家卡佩克在一本科幻小说中构思了一个机器人，名字叫Robot。他可以不吃不喝，却能不知疲倦地工作，展现了人类持续多年的一种愿望。

1947年世界上第一个机器人在美国诞生，这是一台为反应堆搬运核燃料的简单机器，代替人从事危险的工作。此后由于现代制造业的需求，有关机器人的研究迅速发展起来。

我们常常根据机器人的结构和功能把他们粗略地分为几代。第一代机器人只能按照编好的程序，由内部的计算机安排它的动作，对外界没有感知，例如汽车生产线上用于点焊的机器人。第二代机器人有了感觉，它的身上安装了传感器，起到人的感官的作用。例如利用光传感器能让机器人沿着地面上画出的白色轨迹运动，利用图像传感器能让机器人产生视觉来识别烧杯和铁块。当它的手拿着烧杯时，力传感器会使手指感知压力和滑动，从而既能拿住又不会捏碎。第三代是智能机器人，是人们梦寐以求的，也正是当前在努力发展的。它以人工智能理论和现代信息技术为基础，能够自主地从经验中学习，不断完善自身的程序，增强自己的功能。

机器人的种类很多，应用最广泛的是工业机器人，它们大多数是第一代机器人。目前全世界已经有约100万台工业机器人在使用中，它们把人从繁重的体力劳动和危险的环境中解放出来，极大地提高了生产率。

第二类是服务机器人，用于清洁、加油、导盲、抢险等方面。它们大多数是第二代机器人，具有一个移动平台，其上有操作臂，还安装了触觉、视觉、听觉及超声测距等传感器，能够识别周边的环境、判断自己的运动。医疗机器人是近几年来发展迅速的一个新的领域。医疗机器人能够帮助医生做复杂的手术，减轻了人的疲劳，保证了手术的精确和成功。空间机器人是最复杂、最昂贵的机器人，用于探测太空。它们的典型代表是“勇气号”火星探测器。

需求促进了机器人技术和产业的发展。展望21世纪，机器人将与20世纪计算机的普及一样，深入地应用到各个领域。21世纪的前20年，是机器人应用从制造业领域走向非制造业的重要时期，也是智能机器人发展的关键时期。1986年我国启动了“863”高技术发展计划，机器人技术是其中一个重要的主题。在水下、空间、核工业等一些特殊机器人的制造方面，我国取得了很多有特色的研究成果。



研究人员正把机器人探  
险者置入胡夫金字塔

### 问题与练习

- 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，即使有声音它也没有反应。
  - 它的控制电路中接入了哪几种传感器？
  - 从这几种传感器来的信号，通过一个门电路后，进入执行电路。应该使用哪种门电路？
- 当前大量使用的磁敏器件是霍尔元件与集成电路制在一起的磁传感器，它有以下两种。
  - 一种是“线性”的。它将霍尔元件和放大器集成在一个芯片内，其输出的电压与感受到的磁感应强度成正比地连续变化。请你提出一种方案，利用它来测量电流的大小。
  - 另一种是“开关型”的，当磁场强到一定程度时它才会输出高电平，而在磁场弱到一定程度时输出低电平<sup>①</sup>（或者相反），也就是说，它只能在高、低电平之间跃变。请你提出一种方案，利用它来测量物体的转速。

<sup>①</sup>在逻辑电路中，常把电势的高低叫做“电平”的高低，“输出低电平”的意思是，输出端处于低电势的状态。

# 4

## 传感器的应用实验

本节提供了两个实验,同学们可以根据兴趣和条件从中选择一个。只有自己动手进行组装和调试,才会对传感器的作用有更深切的体会。

传感器的工作离不开其他电子元件。在初中课程和《物理选修3-1》中同学们已经学习过诸如二极管、门电路等的特性。但那些知识对于电子技术方面的制作来说是不够的,所以本书后面附上了一些常用电子元件的原理和使用要点,同学们可以在实验前学习,也可以在实验中查阅。当然,要想更好地应用传感器,还要在更多的资料中找到自己需要的知识和信息。

**实验1 光控开关** 怎样能够在天色暗到一定程度时让路灯自动开启,而在天明时自动熄灭?现在提供两种模仿的光控开关电路。

我们使用型号为74LS14的集成块,它里面有6个非门,实验时只使用其中的一个。74LS14的引脚如图6.4-1所示,实验电路如图6.4-2所示。这种非门由于性能特别,称为斯密特触发器<sup>①</sup>。当加在它的输入端A的电压逐渐上升到某个值(1.6V)时,输出端Y会突然从高电平跳到低电平(0.25V),而当输入端A的电压下降到另一个值的时候(0.8V),Y会从低电平跳到高电平(3.4V)。斯密特触发器可以将连续变化的模拟信号转换为突变的数字信号,而这正是进行光控所需要的。

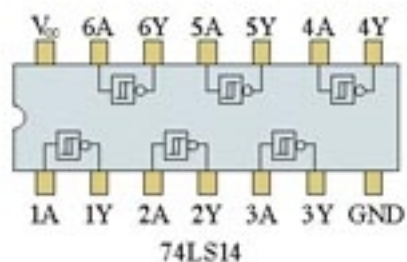
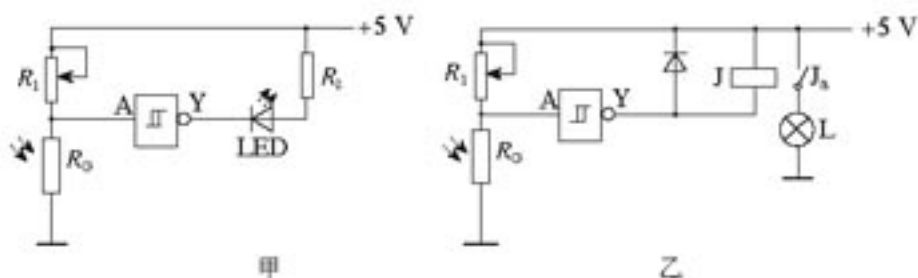


图 6.4-1 集成斯密特触发器引脚图

图6.4-2甲所示的光控电路用发光二极管LED模仿路灯,  $R_0$ 为光敏电阻,  $R_1$ 的最大电阻为51 k $\Omega$ ,  $R_2$ 为330  $\Omega$ 。电路原理比较简单,请同学们自行分析<sup>②</sup>。

图 6.4-2 光控开关电路



要想在天更暗时路灯才会点亮,应该把  $R_1$  的阻值调大些还是调小些?说明这样做的道理,然后试一试,看看你想的对不对。

由于集成电路允许通过的电流比较小,要用白炽灯泡模仿路灯,就要使用继电器来启闭

① 斯密特触发器是具有特殊功能的非门,常用符号  $\square$  表示。

② 符号  $\perp$  表示接机壳。没有金属机壳时可把这些点连在同一条导线上,这条导线称为母线。

另外的供电电路。如图 6.4-2 乙，灯泡可用“6 V 0.3 A”的，继电器可以使用 HRS1H-S 型微型继电器以便能够插在实验板上。图中 J 为继电器的线圈，工作电压为 5 V， $J_1$  为它的常开触点。为了防止继电器释放衔铁时线圈中的自感电动势损坏集成电路，必须给线圈并联一只二极管，以提供自感电流的通路。

自从初中学过直流电路的知识后大家就已经形成一个观念：电路只有“闭合”才能形成电流。研究图 6.4-2 后应该出现这样的疑问：使二极管发光和使继电器动作的电流是怎样构成通路的？难道是由电源的正极“+5 V”经过二极管（或继电器 J），再经过光敏电阻  $R_0$  到达电源负极而形成通路吗？不是的，通过电阻  $R_0$  的电流不可能达到这样大的数值。

实际上，集成块 74LS14 还有电源正极的接点  $V_{CC}$  和共同接地点 GND（图 6.4-1），电源通过这两点向发光二极管或继电器提供了工作电流。与物理学中的电路图不同，在涉及门电路的电路图中，我们表示的是电路中的逻辑关系，通常不把电流的通路完整地画出来。

**实验2 温度报警器** 图 6.4-3 是一个温度报警器的电路图。 $R_T$  为热敏电阻，常温下阻值为 2 k $\Omega$  左右，温度升高时阻值减小。 $R_1$  为可变电阻，最大阻值选 1 k $\Omega$  比较合适。蜂鸣器可以选用 YMD 或 HMB 型，当它两端的直流电压为 4~6 V 时会发出鸣叫声。

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上升，到达某一温度时就会发出报警声。

请你说明这个电路的工作原理。想一想：怎样能够使热敏电阻在感测到更高的温度时才报警？试一试，看你想的对不对。

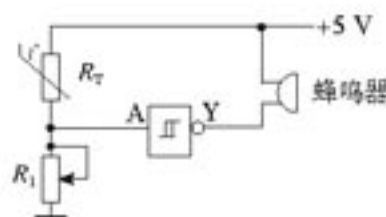


图 6.4-3 温度报警电路

### 问题与练习

- 图 6.4-4 是一个简单的磁控防盗报警装置。门的上沿嵌入一小块永磁体 M，门框内与 M 相对的位置嵌入干簧管 H，并且将干簧管接入图示的电路。睡觉前连接好电路，当盗贼开门时，蜂鸣器就会叫起来。

请说明它的工作原理，最好通过实验模拟这个电路的工作。

- 可以用型号为 74LS14 的非门集成电路（见图 6.4-1）、发光二极管和限流电阻来组成一个逻辑电平检测器，电路如图 6.4-5 所示。使用时，将检测器的输入端 A 接到被测点。

请分析：当被测点为高电平时，LED 是否发光？低电平时呢？说出道理。

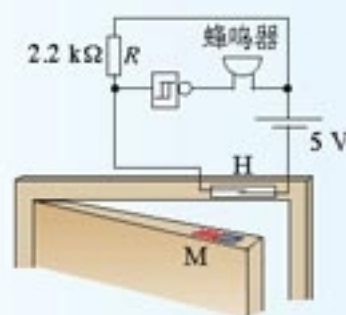


图 6.4-4 防盗报警电路

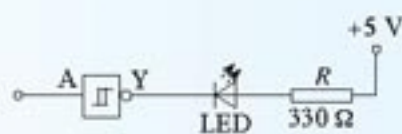


图 6.4-5 电平检测器

最好实际试验一下：按照图 6.4-5 在集成电路实验板上连接电路，然后将 A 端先后接到本电路电源的正、负极上，看看能否正确检测出高、低两种电平。

3. 请你设计一个电热水器的控制方案。要求水烧开时自动断电，而在水温低于沸点约  $10\text{ }^{\circ}\text{C}$  时又自动加热。同时还要有手动开关，必要时可以在任何温度下立即加热。
4. 调查研究：你的家庭、学校和附近的公共设施中，有哪些地方使用了传感器？这些传感器各是什么类型的？各起了什么作用？它们为我们提供了哪些方便？带来了哪些经济效益？写出一篇文章，并且配图说明。如果做成计算机的演示文稿就更好了。

## 附 一些元器件的原理和使用要点

使用传感器时，除了电阻、电容外，还要用到其他一些元器件。在初中和《物理选修 3-1》的学习中，大家已经对它们有了一些接触，但为了做好传感器的实验，对这些元器件还要有一些深入的了解。

**晶体管** 中学物理实验中常用的晶体管有普通二极管、发光二极管。

**普通二极管** 我们已经学习过，它具有单向导电性，在电子电路中有多种作用。

**发光二极管** 发光二极管除了具有单向导电性外，导电时还能发光。它小巧玲珑、颜色鲜艳，又很省电。许多家用电器上都使用发光二极管做指示灯。普通的发光二极管是用磷化镓或磷砷化镓等半导体材料制成的，直接将电能转化为光能。



图 6.5-1 发光二极管

### 实验

#### 检测发光二极管

按照图 6.5-2 连接电路使发光二极管工作。电源为  $3\text{ V}$  的电池组，串联的限流电阻  $R$  可取  $220\ \Omega$  或  $270\ \Omega$ 。接通开关，二极管就会发光，这时通过它的电流约为几毫安。如果将电源改为  $1.5\text{ V}$ ，二极管就不发光了，因为这类发光二极管正向导通电压大于  $1.8\text{ V}$ 。

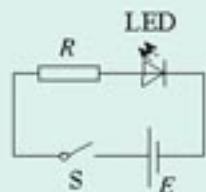


图 6.5-2 发光二极管的工作电路



图 6.5-3 用欧姆表检测发光二极管

可以用多用电表的电阻挡来检测发光二极管。取  $R \times 10$  倍率的电阻挡。如果多用电表该挡使用的电池电压为  $3\text{ V}$ ，可以直接使用；如果表内该挡所用电池为  $1.5\text{ V}$ ，则需外接一节干电池，如图 6.5-3 所示。用黑表笔接发光管的正极、红表笔接负极，会看到什么现象？改用红表笔接发光管的正极，又会看到什么现象？

**逻辑集成电路** 实用的逻辑电路是由若干个三极管和电阻组成的，它们常常制作在很小的硅片上，封装后留出引脚，这就是集成电路块，外形如图 6.5-4 所示。逻辑电路中最基本、最简单的是门电路。

**演示**

**测试与非门**

型号为 74LS00 的集成电路块里封装了四个 2 输入端的与非门电路，它们是各自独立的，但由同一个电源供电，其引脚如图 6.5-5 甲所示。取其中任意一个与非门，按照图 6.5-5 乙连接电路，并且将标有  $V_{cc}$  和 GND 的引脚分别接到  $5\text{ V}$  电源的正负极（图中未画出）。

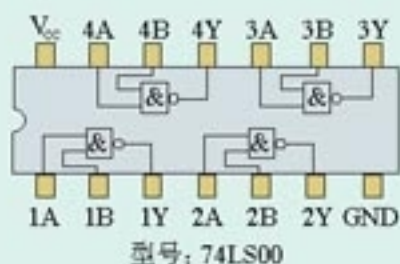
通常取接地端即电源的负极作为参考点，电势定为零。

开关  $S_1$ 、 $S_2$  的作用是分别改变 A、B 两个输入端的电平，高电平 ( $5\text{ V}$ ) 代表“1”，低电平 ( $0\text{ V}$ ) 代表“0”。电压表用来显示输出端 Y 的电平。

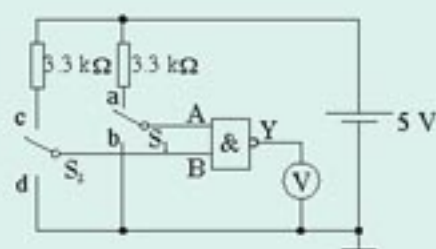
我们利用图 6.5-5 乙的电路来测试与非门。



图 6.5-4 集成电路块



甲



乙

图 6.5-5 集成块 74LS00 的接线和测试

依次使两个输入端取表 1 所列的几种电平，结果发现电压表只有两种读数，即 \_\_\_\_\_  $\text{V}$  和 \_\_\_\_\_  $\text{V}$ ，它们分别代表输出端的 \_\_\_\_\_ 电平和 \_\_\_\_\_ 电平。将每一种情况下输出端的逻辑状态填入表 1 的表格中。

由以上测试可以知道，与非门的逻辑功能是：只有当它的两个输入端都是 \_\_\_\_\_ 时，输出端才是 \_\_\_\_\_，其他情况下输出端都是 \_\_\_\_\_ ①。

利用类似的方法也能测试其他逻辑电路的功能。

表 1

与非门的真值表

IN		OUT
A	B	Y
0	0	
0	1	
1	0	
1	1	

①关于与非门的作用，可以复习《物理选修 3-1》第二章第 10 节“问题与练习”中的第 4 题。

**集成电路实验板** 有些实验的电路比较复杂，使用的元件比较多。一种组装方法是把元件焊接在事先制作的印制电路板上，借助板上制好的各种条形铜箔，把元件连接成所需的电路。



甲 上面

乙 下面

图 6.5-6 集成电路实验板

另一种组装方法是使用集成电路实验板（俗称面包板）。它由塑料制成，上下两面的结构如图 6.5-6 所示。板的上面有许多整齐排列的小插孔，分布在凹槽的两侧。每个孔内都有一个用来夹持元件引线的铜爪，它们由若干条形铜片按一定的规律连接起来，揭去板的下面的塑料膜，就能看清楚了。其中标有 X 的一行小孔是用整条铜片连通的，通常用来连接电源的正极。标有 Y 的一行小孔也是用整条铜片连通的，通常用来连接电源的负极（接地端）。其余的孔则是每五个为一组纵向连通，例如第 1 列的 A、B、C、D、E 五个孔连通，F、G、H、I、J 五个孔连通。

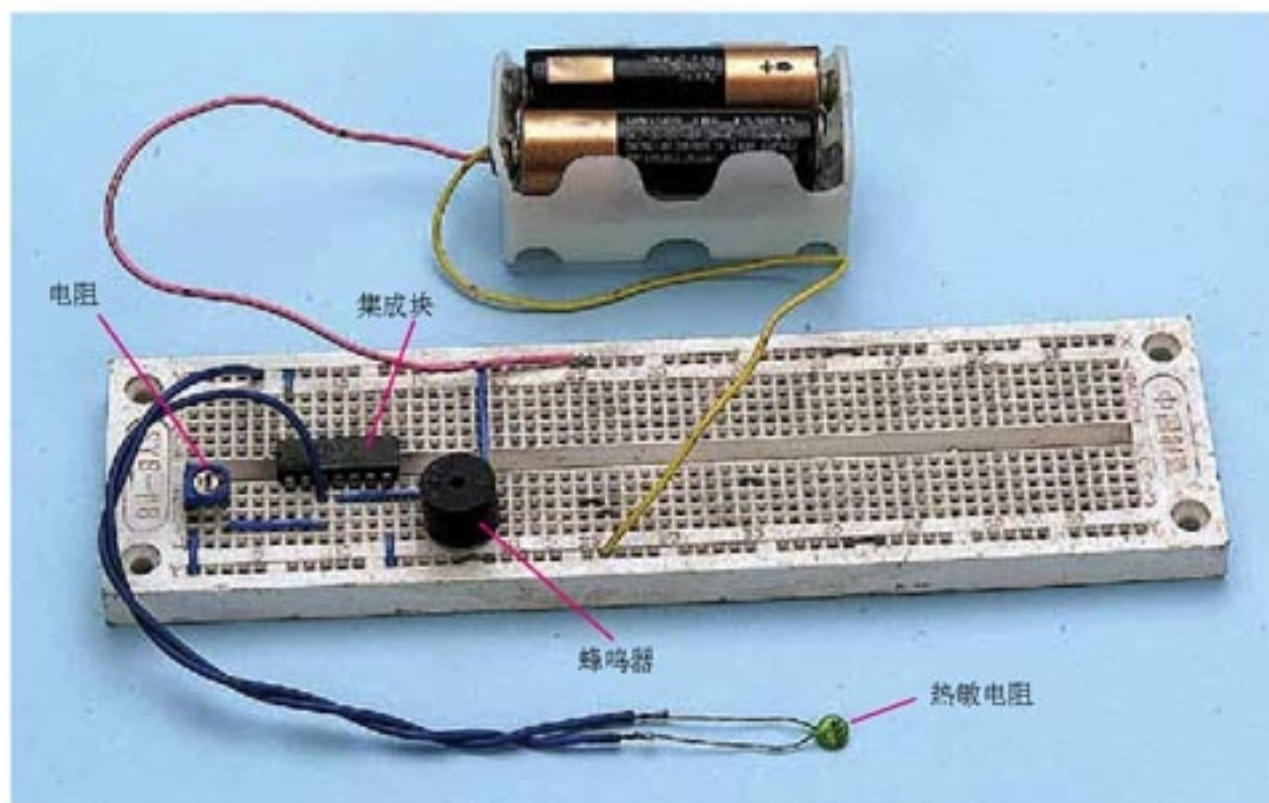


图 6.5-7 在实验板上连接电路的实例（图 6.4-3 的温度报警电路）

使用实验板时，集成电路块要跨在凹槽之上，让它两侧的引脚分别插入 E、F 等孔。其余的元件按照电路的结构插入合适的孔中，并且让应该连接在一起的引脚插入同一组的五个孔就可以了，不需要焊接，也不需要接线柱。图 6.5-7 是一个连接好的电路。

## 课题研究 怎样把交流变成直流

电网供给的是交变电流，但许多家用电器和生产设备都要使用直流，例如，电解、电镀、蓄电池充电、使用直流电动机等。然而，为完成这些工作所需的直流仅由电池来提供是不合适的。一方面要考虑用电器的具体要求；另一方面要考虑经济效益等问题。当需要提供较高的电压和较大的电流时，人们希望把电网送来的大功率、廉价的交变电流转换成直流。那么，用怎样的方法来实现这种转换呢？

整流器可以将交流转换成直流。

需要研究的问题

- 打开一个小型整流电源的外壳，看它里面是由哪些元件组成的，研究电路的构成。

- 利用一个小变压器（例如 220 V 变 6 V 的变压器）和一只整流二极管（例如型号 1N4007）接成最简单的半波整流电路（图课 2），用 1 k $\Omega$  的电阻器做负载。用电压表测量输出电压，用示波器（或电压传感器）观察输出的波形，与整流前的交流做对比（图课 3）。

- 改用 4 只二极管接成桥式整流电路，看它输出的波形与半波整流有什么不同。

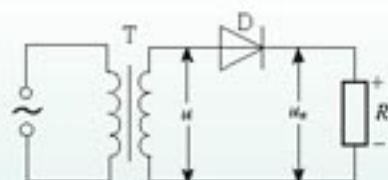
- 接入大容量电容器（例如 470  $\mu$ F / 16 V）进行滤波，看输出的波形有什么变化。

- 改变输出电流的大小，看输出端的电压有什么变化。

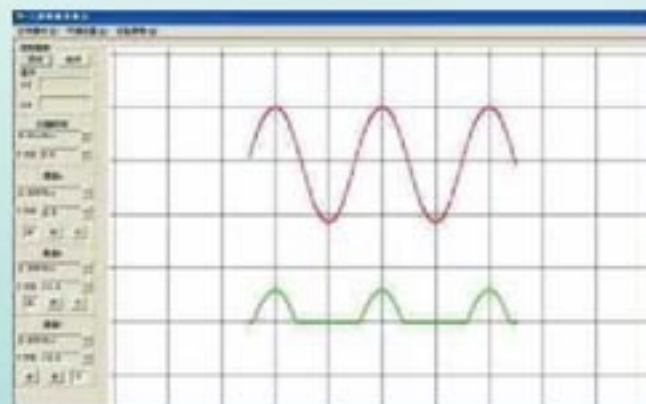
- 读懂说明书或铭牌上所写的技术参



图课 1 常见的交流变直流的设备



图课 2 半波整流电路



图课 3 整流前后的电压波形



数，识别输出端的电压大小和正负极，会与用电器正确连接和匹配。

- 接入三端集成稳压电路块（例如型号 7806），装成直流稳压电源。

.....

还可以研究以下问题

根据你能看到的参考书和网上资料，调查和搜集生活、生产中电磁感应的应用，电能的传输，传感器的应用等。可以研究下面的一两个问题，也可以自己设定其他研究课题。

- 研究磁卡阅读器、录音机、录像机的原理。
- 调查电力生产中的安全规则。
- 调查并分析某种传感器的工作原理、技术意义、经济效益。
- 变压器在电网中是如何实现电压的改变和能量传输的？

.....

## 后 记

根据《基础教育课程改革纲要（试行）》的精神，我们按照《普通高中物理课程标准（实验）》的要求编写了共同必修及其他三个系列的全套教科书，本册经全国中小学教材审定委员会2004年初审通过，供普通高中试用。

这套教科书在编写中，得到了诸多教育界前辈和各学科专家学者的热情帮助和大力支持。在本套教科书同课程改革实验区的师生见面时，我们特别感谢担任教科书总顾问的丁石孙、许嘉璐、叶至善、顾明远、吕型伟、王梓坤、梁衡、金冲及、白春礼、陶西平同志，感谢担任教科书编写指导委员会主任委员的柳斌同志和编写指导委员会委员的江蓝生、李吉林、杨焕明、顾泠沅、袁行霈等同志。

这套书的编写者以教育部物理课标组的核心成员为基础，由高校教师、中学教师和出版社的编辑人员三结合组成。共同必修部分和三个选修系列的编写小组分别起草，然后全体编写人员反复讨论、相互修改，因此，本书是编写组集体创作的成果。

在本书的编写过程中，由刘彬生、汪维澄组成的实验研究小组做过了全书所有的实验，检验和改进书稿中的实验部分；由黄恕伯、李友安、叶柯、毛宗致组成的习题研究小组筛选和设计了全书的“问题与练习”。

张同恂、董振邦、窦国兴、扈剑华在编写的不同阶段审阅了书稿，提出了重要修改意见。

我们还要感谢使用本套教材的实验区的师生们。希望你们在使用本套教材的过程中，能够及时把意见和建议反馈给我们，对此，我们深表谢意。让我们携起手来，共同完成教材建设工作。

我们的联系方式如下：

电 话：010-58758389

E-mail: jcfk@pep.com.cn

网 址：http://www.pep.com.cn

人民教育出版社 课程教材研究所  
物理课程教材研究开发中心  
2004年12月

### 谨向为本书提供照片的人士和机构致谢

封面，中国图片网/第四章章首图，中国图片网/4.6-1，朱京/4.6-5，孙新/4.7-4，中国图片网/4.7-7，张颖/第五章章首图，中国图片网/5.1-2，张颖/5.4-3，朱京/5.4-7，彭征/52页下图，中国图片网/53页图，新华网/6.1-2，朱京/6.1-3，朱京/6.1-4，朱京/6.1-5，朱京/6.1-10，朱京/6.2-2，朱京/6.3-2右图，朱京/6.3-2左图，张颖/6.3-3，房宁慧/6.3-4，朱京/69页图，中国图片网/6.5-1，朱京/6.5-3，朱京/6.5-4，朱京/6.5-6，朱京/6.5-8，张颖/6.5-9，朱京/图课1，朱京