经全国中小学教材审定委员会2005年初审通过

普通高中课程标准实验教科书

物理

WULI

选修 3-2



教育科学出版社
·北 京·

微信公众号：电子课本大全

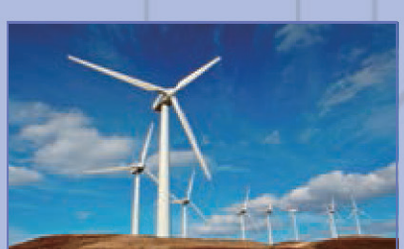
物理选修3-2扉页.indd 1 2015.12.28 3:19:00 PM

目录

第一章　电磁感应

1. 电磁感应的发现……2
2. 感应电流产生的条件……6
3. 法拉第电磁感应定律……8
4. 楞次定律……13
5. 电磁感应中的能量转化与守恒……18
6. 自感……22
7. 涡流（选学）……25

本章小结……28
习题……29



第二章　交变电流

1. 交变电流……32
2. 描述交流电的物理量……35
3. 示波器的使用……39
4. 电容器在交流电路中的作用……42
5. 电感器在交流电路中的作用……45
6. 变压器……47
7. 电能的输送……52

本章小结……56
习题……57



第三章　传感器

1. 传感器……60
2. 温度传感器和光传感器……63
3. 生活中的传感器……68
4. 简单的光控和温控电路（选学）……72

本章小结……78
习题……79

附录　中英文索引……80



微信公众号：电子课本大全

第一章 电磁感应

- 电磁感应的发现
- 感应电流产生的条件
- 法拉第电磁感应定律
- 楞次定律
- 电磁感应中的能量转化与守恒
- 自感
- 涡流（选学）

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.

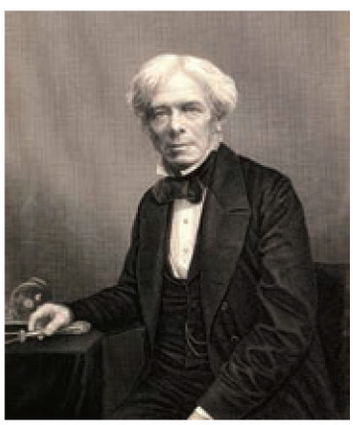
——引自《力学以外的世界》



微信公众号：电子课本大全

1 电磁感应的发现

奥斯特实验的启迪



法拉第（M.Faraday，1791—1867）

1820年，奥斯特从实验中发现了电流的磁效应，引起了科学界广泛的关注，形成了对电磁现象研究的热潮．安培（Andre Marie Ampere，1775—1836）、毕奥（Jean-Baptiste Biot，1774—1862）、萨伐尔（Felix Savart，1791—1841）等人相继在电磁学研究上取得了卓越成果．不少物理学家根据对称性的思考提出，既然电能产生磁，是否也存在逆效应，即磁产生电呢？在这种思想推动下，安培等人曾做过不少实验，但都没有取得什么结果．

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

小资料

科拉顿的遗憾

在磁生电的历史性探索中，最遗憾的算是瑞士科学家科拉顿（Daniel Colladon，1802—1893）了．1825年，他做了一个原本是可以发现电磁感应现象的实验，但遗憾的是他却将这个机会错过了．他把磁铁插入一个线圈，用放在导线旁的小磁针的偏转来显示闭合的线圈中是否会产生感应电流．但是为了避免磁铁影响小磁针的偏转，他却小心地把小磁针放在隔壁的房间里了．科拉顿万万没想到，在他将磁铁插入线圈中和从线圈中取出的一刹那，磁生电现象已经发生了，只是当他跑到隔壁房间时，看到的却是静止在原来位置上的小磁针，这就是著名的“科拉顿遗憾”．

电磁感应现象的发现

为了实现“磁生电”的理想，法拉第经历了长达10年的探索，终于获得了成功．1831年8月29日，法拉第设计了一个新实验：他在一个软铁环上绕了两个线圈，一个与电池相连，另一个线圈旁边放置一个检测电流的装置（图1-1-1）．他发现当电池被接通时，小磁针产生了偏转，但不久又回复到零；当线圈与电池断开时，小磁针向反方向偏转，随即又回复到零．他敏锐地抓住这个短暂的电流，立刻意识到过去失败的原因在于一直在稳定的磁场中去寻找电流．法拉第走出了这个误区，接下来进行了许多实验，证实了“磁生电”现象的存在．

1831年11月24日，他向英国皇家学会提交了一篇论文，报告了他的重大发现．论文中将“磁生电”的现象分

微信公众号：电子课本大全

为五类：（1）变化中的电流；（2）变化中的磁场；（3）运动中的恒定电流；（4）运动中的磁铁；（5）运动中的导线．他把这些现象正式定名为**电磁感应**（electromagnetic induction）．由电磁感应现象产生的电流叫**感应电流**（induction current）．



图 1-1-1　法拉第做实验时用过的线圈

电磁感应规律的发现及其对社会发展的意义

法拉第在发现感应电流之后，通过大量的实验，又归纳总结出电磁感应的规律，并发明了人类历史上第一台感应发电机．

电磁感应的发现，使人们发明了发电机，把机械能转化成电能，从而大规模地利用煤和石油内部蕴藏的化学能和风力、水力资源中蕴藏的机械能；电磁感应的发现，使人们发明了变压器，解决了电能远距离传输中能量大量损耗的问题，满足了实际生产、生活中的各种需要；电磁感应的发现，使人们制造出了结构简单的感应电动机，反过来把电能转化成机械能．这样，电磁感应就为发电、输电和用电等技术创新全面地提供了条件，使人类迈进了电气化时代．

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

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

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

电磁感应的发现不仅对物理学和现代技术的发展作出了划时代的贡献，而且对整个现代文明的发展有着深刻的影响．

物理学与其他自然科学一样，必须以实验事实为基础．如何才能取得精确、真实的实验事实呢？除了实验设计、实验仪器的制作和选择外，非常重要的就是坚持不懈地反复实验．法拉第之所以能够发现电磁感应定律与其坚持不懈、锲而不舍地反复实验密切相关．

微信公众号：电子课本大全

小资料

法拉第的电流计

法拉第时代的电流计并不像我们现在使用的电流表这样小巧方便，图1-1-2中是一个例子．用小磁针作为指针，为了抵消地磁场的影响，在一根直杆两端各固定一个小磁针，让两者磁极方向相反[图(a)]．将这个用两个小磁针制作的装置悬挂在一条线上，使得下端的磁针受电流的磁场力的作用后可以发生偏转．下端的磁针恰好置于两只线圈中间[图(b)]，将线圈接入待测电路，一旦线圈有电流通过，磁针便受力偏转，同时悬线产生扭力矩，最后磁针停止转动，并保持静止．这时扭力矩与磁场力的力矩平衡．由此，根据磁针转过角度的大小，可以得出电流的大小．

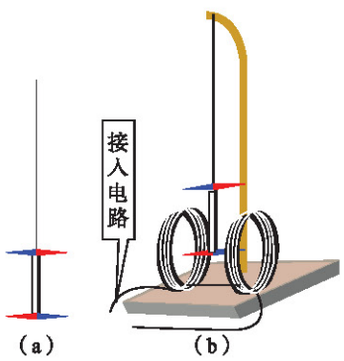


图1-1-2 法拉第的电流计

发展空间

课外阅览

杰出的物理学家法拉第

法拉第出生于伦敦郊区的一个贫穷家庭，少年时失学，1804年进印刷厂当童工，利用工作中装订书籍的机会学到不少科学知识．业余时间，他用省吃俭用的钱购买器具，动手做实验．1812年，法拉第得到一次机会，到当时英国著名化学家戴维的实验室做些洗刷瓶子之类的工作．

1813年，22岁的法拉第正式当上了戴维的助手，进入了他梦寐以求的科学殿堂．1816年到1819年，他进行独立的化学研究并取得了一些成果，成为小有名气的化学家．在电磁感应定律发现以前，人们进行电学实验时，可以依赖的电源只能是伏打电池，而伏打电池一对电极间只能提供不足1 V的电压，这就从根本上限制了电能的实际应用．

1820年，奥斯特关于电流磁效应的实验，在英国物理学界引起强烈的反响．法拉第对这一发现非常重视，并于1822年开始积极投入电磁现象的研究．通过对电流磁效应的仔细分析，法拉第提出一个问题：既然电流能产生磁效应，那么，反过来磁能否产生电流？从此，法拉第开始了“磁生电”的科学实验工作．

法拉第经过长达10年的实验、失败、再实验，终于在1831年夏取得了突破性的进展．1831年8月29日到同年10月17日，法拉第进行了一系列基于磁场变化或导体相对于磁场运动而产生电流的实验，这时法拉第已经十分清楚，他用实验证实了感应电流的存在．11月24日，他向英国皇家学会提交了一篇论文，报告了他的重大发现，并把这些现象正式定名为“电磁感应”．

麦克斯韦对法拉第所做工作的一段论述使我们深受启发：

微信公众号：电子课本大全

“在他（法拉第）发表了的研究报告中，我们发现这些观念是以一种更适合于一门正在形成中的科学的语言表述的……”

“法拉第既告诉我们他成功的经验，也告诉我们他不成功的经验；既告诉我们他正确的想法，也告诉我们那些不成熟的想法. 在归纳能力方面远不及他的读者，感到的共鸣甚至多于钦佩，并且会引起这样一种信念：如果自己有这样的机会，那么也将会成为一个发现者.”

在长达42年（1820—1862）的科学生涯中，法拉第坚持每天写科学日记，对当天的实验情况作详细记录，既记录了成功，也记录了失败. 他把这些日记遗赠给皇家研究院，为纪念他发现电磁感应定律100周年，后人将他的日记整理后，于1932年出版. 全书共七大卷，3236页，这是他留给人类的一笔宝贵的思想财富，其中三大卷《电学的实验研究》成为电磁学史上的鸿篇巨著.

除电磁感应之外，法拉第的学术成就还包括在电动机、发电机、电的同一性、电荷守恒、电介质、顺磁性和抗磁性、磁光效应以及电解定律等许多方面. 他是19世纪伟大的物理学家和哲学家. 之所以如此，除了个人的非凡才能和执著精神外，造就他深邃洞察力、丰富直觉和巧妙物理构思的是一种基本的科学信念，这就是关于自然力统一的思想和近距作用观点的场论思想. 他的实验研究都是在寻找联系，寻求统一解释. 他努力寻找电与磁、电磁场与物质、电磁能与机械能之间可能的相互影响，并试图提供统一的解释. 他还曾经寻找电与光、磁与光之间的种种联系，有一些虽没有重要结果，但后来却被证实是正确的. 法拉第的一生是在自然力统一的思想指引下探索自然奥秘的一生.

法拉第在物理和化学领域取得的具有重大影响的成果有十多项. 其中关于“场”的概念的提出，可以说是他最杰出、最重要的贡献. 而且，他还利用铁屑巧妙地描绘出了磁场的形象.

1831年，发现电磁感应后，法拉第的声名享誉国内外，数不清的花环与荣誉扑面而来. 但所有这些，一点也没有改变法拉第的生活方式与思想习惯. 他依然像当年那个学徒工那样为人质朴，待人诚恳，过着俭朴的生活，全心全意地把毕生精力和聪明才智奉献给社会. 成名之后，他热心主办通俗的科学讲座，希望科学能像当年在他心中激起崇高的理想那样，被一代代传承下去.

法拉第在一生的科学实践活动中，始终表现出坚忍不拔的精神和严谨求实的科学态度，他认为做实验就好像是与自然的直接对话，因此，做起实验来总是以特有的执著和忘我精神，废寝忘食，百折不挠. 有一次在实验中试管爆炸，伤到了眼睛，他缠上纱布仍旧继续做实验.

1867年8月25日，法拉第在伦敦与世长辞. 临终前，他嘱咐丧事从简，不立纪念碑，表现了一个科学家的崇高精神.

法拉第是不朽的！

物理在线

通过上网查询等方式收集资料.

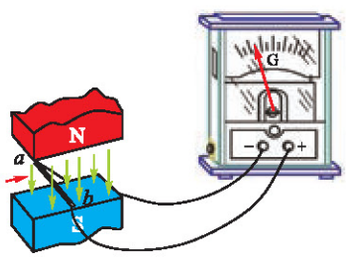
1. 了解1822年到1831年，还有哪些科学家在寻找感应电流的活动中进行了比较有成效的工作. 了解机遇是怎样来到了他们身边，却又擦肩而过的.

2. 了解法拉第是怎样走进科学世界的. 作为一个科学家，他的性格和科学思想有什么特点？

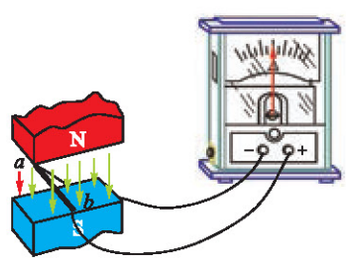
微信公众号：电子课本大全

2 感应电流产生的条件

学了上一节内容后，你是否想过：感应电流的产生需要什么条件？感应电流和哪些因素有关？现在就让我们跟随法拉第的足迹探讨产生感应电流的条件.



（a）闭合电路的部分导体在磁极间左右运动



（b）闭合电路的部分导体在磁场中上下运动

图 1-2-1 导体在磁场中运动

导体在磁场中做切割磁感线的运动

实验探究

如图 1-2-1 所示，导体 *ab* 和电流计连接成闭合回路. 如图（a）、（b）所示，当导体 *ab* 在磁场中分别垂直于磁感线与沿着磁感线运动时，观察电流计指针的摆动情况，说明什么情况下能产生感应电流.

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

通过闭合回路的磁场发生变化

在法拉第的有些实验中，导体并没有做切割磁感线的运动，但闭合电路中出现了感应电流. 让我们模仿法拉第的实验来进行探究.

实验探究

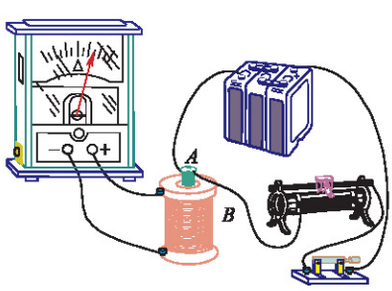


图 1-2-2

如图 1-2-2 所示，螺线管 *B* 套在螺线管 *A* 外边，螺线管 *A* 经过滑动变阻器和开关与电池相连构成直流电路；螺线管 *B* 接电流计构成闭合电路. 进行以下操作并观察电流计指针摆动的情况.

1. 接通开关.
2. 开关闭合后，电流稳定.
3. 断开开关.
4. 在开关闭合的情况下，分别以不同的速度推动滑动

微信公众号：电子课本大全

变阻器的滑动片.

5. 改变螺线管 B 的匝数，重复以上实验.

6. 将螺线管 A 放在螺线管 B 的正上方，并使两者的轴线互相垂直. 重复以上实验.

将观察结果填入下表.

观察 / 操作	电流计指针的摆动情况		
	螺线管 B 匝数少	螺线管 B 匝数多	螺线管 AB 相互垂直
开关接通瞬间			
电流稳定			
开关断开瞬间			
滑动片快速推动			
滑动片缓慢推动			

产生感应电流的条件

讨论交流

1. 上述实验中并没有导体在磁场中做切割磁感线的运动，但在接通或断开电源的瞬间，B 线圈却出现感应电流，这说明了什么？

2. 当开关闭合后，A 线圈电流稳定时，B 线圈中也存在磁场，但不出现感应电流，这说明了什么？

3. 同样的磁场变化，线圈的匝数多、就能产生明显的电流，而两个线圈相互垂直放置时不能产生感应电流，这又说明了什么？

概括以上三种情况，可以看出：感应电流的产生，不在于闭合回路所在处的磁场，而在于穿过闭合回路磁感线条数的变化，即磁通量的变化.

当磁场稳定时，通过线圈 B 的磁通量不发生变化，那么在此回路中就不会有感应电流. 在图1-2-1(a) 的实验中，磁场是稳定的，但在导线切割磁感线运动时，通过回路 $abcd$ 的磁通量发生变化（图 1-2-3），回路中就会产生感应电流. 看来磁通量的变化才是产生感应电流的关键.

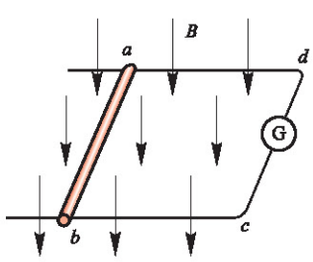


图 1-2-3

大量实验证实，穿过闭合电路的磁通量发生变化时，这个闭合电路中就有感应电流产生.

微信公众号：电子课本大全

练习与评价

1. 在图 1-2-4 所示的匀强磁场中有一个线圈. 保持线圈平面垂直于磁感线，当线圈在磁场中上下运动时[图(a)]，是否会在线圈中产生感应电流？当线圈在磁场中左右运动时[图(b)]，是否会在线圈中引起感应电流？如果线圈绕水平轴转动[图(c)]，是否会在线圈中产生感应电流？为什么？

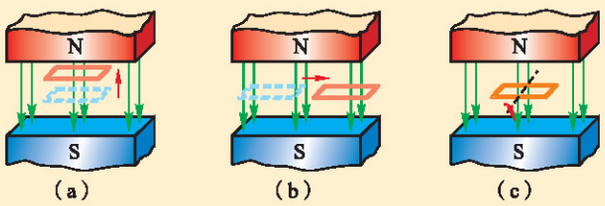


图 1-2-4 线圈在匀强磁场中的几种运动



图 1-2-5 线圈在匀强磁场中通过

2. 如图 1-2-5 所示，让闭合线圈由位置 1 匀速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？

3. 图 1-2-6 为生产中常用的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 的两端接在一起，构成一个闭合电路. 在断开开关 S 的时候，弹簧 K 并不能立即将衔铁 D 拉起，使触头 C 立即离开，而是过一小段时间后触头 C 才能离开. 延时继电器就是这样得名的. 试说明这种继电器的原理.

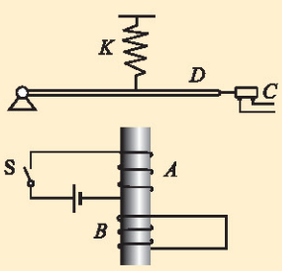


图 1-2-6

3 法拉第电磁感应定律

感应电动势

讨论交流

我们知道，在闭合电路中要形成电流，必须有电源电动势存在. 在电磁感应现象中出现了感应电流，是否也该有相应的电源电动势呢？

微信公众号：电子课本大全

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

闭合电路中电流的大小由电源电动势和电路的电阻决定. 当闭合电路中的电阻一定时，感应电动势越大感应电流也越大. 所以感应电流的强弱，可以反映感应电动势的大小.

在上一节的实验中，我们用不同的速度移动滑动变阻器的滑动片，让线圈A中的电流分别快速和缓慢地改变，可以观察到当线圈A中的电流变化快，即穿过线圈B的磁通量变化快时，线圈B中的感应电流就大，感应电动势也越大. 因此感应电动势的大小与磁通量的变化快慢有关.

在电磁感应现象里，不管电路是否闭合，只要穿过电路的磁通量发生变化，电路中就有感应电动势. 如果电路是闭合的，就有感应电流；如果电路是断开的，则不会形成感应电流，但感应电动势仍然存在.

法拉第电磁感应定律

讨论交流

怎样定量地表示穿过电路的磁通量变化的快慢呢？

回忆怎样描述运动的快慢以及速度变化的快慢，说说你的见解，你有什么新的发现？

设在一定的时间Δt之内穿过电路磁通量的变化为$\Delta\Phi$，则比值$\Delta\Phi/\Delta t$就能说明磁通量的变化快慢，这个比值叫做磁通量的变化率，数值上等于单位时间内磁通量的变化量.

精确的实验表明：**电路中感应电动势的大小，跟穿过这个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）.

设t_1时刻穿过闭合电路的磁通量为Φ_1，t_2时刻穿过闭合电路的磁通量为Φ_2，则在时间$\Delta t = t_2 - t_1$内磁通量的变化量为$\Delta\Phi = \Phi_2 - \Phi_1$，磁通量的变化率为$\dfrac{\Delta\Phi}{\Delta t}$，设感应电动势为$E$，则有

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

其中k为比例常数. 在国际单位制（SI）中，E的单位是伏

微信公众号：电子课本大全

特（V），Φ的单位是韦伯（Wb），t的单位是秒（s），比例常数$k=1$，则上式可写成

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

在实际应用中，为了获得较大的感应电动势，常常采用多匝线圈.

设产生感应电动势的线圈有n匝，且穿过每匝线圈的磁通量变化率都相同，由于n匝线圈可以看成是n个单匝线圈串联而成，因此整个线圈中的感应电动势是单匝线圈的n倍，即

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

导线切割磁感线产生的感应电动势

活动

如图 1-3-1 所示，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在线框平面上向右运动. 设cd的长度为L，在Δt时间内ab边由原来位置移到$a'b'$，试根据法拉第电磁感应定律求出导线切割磁感线时产生的感应电动势.

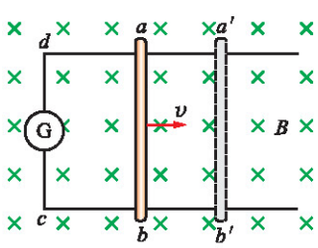


图 1-3-1　导线切割磁感线

根据法拉第电磁感应定律$E=\frac{\Delta\Phi}{\Delta t}$，我们可以得到闭合电路的感应电动势

$$E=BLv$$

当导体运动速度的方向与磁场方向有一夹角α（图 1-3-2）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，平行的分量不产生感应电动势，垂直分量为$v_\perp=v\sin\alpha$，产生的感应电动势为

$$E=BLv\sin\alpha$$

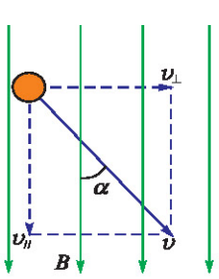


图 1-3-2　导体运动速度不垂直于磁场方向

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/秒（m/s）.

微信公众号：电子课本大全

【例题】在图1-3-1中，设匀强磁场的磁感应强度$B=0.2\,\mathrm{T}$，光滑导轨的宽度$L=0.30\,\mathrm{m}$，电阻$R=0.50\,\Omega$（线框电阻不计），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）为使导体棒ab保持向右匀速运动的外力大小；（4）外力做功的功率；（5）感应电流的功率.

【解】（1）感应电动势$E=BLv=0.20\times0.30\times5.0\,\mathrm{V}=0.30\,\mathrm{V}$；

（2）感应电流 $I=\dfrac{E}{R}=\dfrac{0.30}{0.50}\mathrm{A}=0.60\mathrm{A}$；

（3）因为导体棒匀速运动，故外力与安培力平衡，所以外力大小为$F=ILB=0.60\times0.30\times0.20\mathrm{N}=0.036\mathrm{N}$；

（4）外力做功的功率$P_{外}=Fv=0.036\times5.0\mathrm{W}=0.18\mathrm{W}$；

（5）感应电流的功率$P_{电}=I^2R=0.60^2\times0.50\mathrm{W}=0.18\mathrm{W}$.

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

练习与评价

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的运动，运动方向跟导线本身垂直，也跟磁感线垂直. 求导线上的感应电动势.

2. 有一个1 000匝的线圈，在0.4 s内穿过它的磁通量从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，把它跟一个电阻值为990 Ω的电阻串联组成闭合电路时，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）$\Delta\Phi=\dfrac{1}{2}Br^2\omega\Delta t$

4. 设人造地球卫星在赤道平面上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，又会对卫星的运行发生什么影响？（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：1Wb/s＝1V.

微信公众号：电子课本大全

发展空间

课外阅览

法拉第圆盘发电机

获得感应电流之后，法拉第进一步思考的问题是：如何用持续旋转的方法产生稳定电流．1831年10月28日，他做了一个旋转铜盘实验，其实验原理如图1-3-3所示．图中N、S表示大磁铁的两极，D为法拉第制备的铜圆盘，它可以绕轴在垂直于转轴的平面内旋转．实验时，他在一个电流计的两个接线柱上接上两个电刷，当铜盘旋转起来后，将两个电刷分别放在铜盘的各个部位，以测定产生感应电流的最佳位置．经过反复实验，法拉第发现电流产生的最佳位置在由圆盘心到边缘的半径上，只要圆盘保持恒速旋转，产生的电流就一直是稳定不变的．

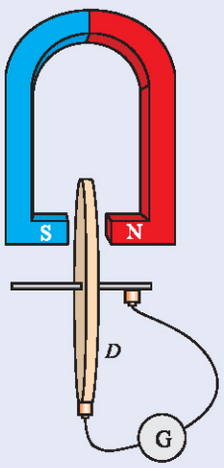


图1-3-3 法拉第圆盘实验

法拉第所利用的正是直流发电机的原理，他的实验装置也就是人类的第一台直流发电机．

磁带录音机

磁带录音机是电磁感应应用的一个例子，它主要由磁带、话筒、录放磁头、放大电路、扬声器、传动机构等部分组成．

普通的磁带是由氧化铁粉黏合在塑料薄膜带上制成的．录音机的录、放原理如图1-3-4所示．录音和放音磁头都是一个开有微小缝隙的电磁铁．录音时，话筒把声音的振动转换成音频电流．音频电流经放大电路放大，进入录音磁头的线圈中，在磁头的缝隙处产生随音频电流变化的磁场．磁带紧贴着磁头缝隙移动，磁带上的磁粉层被磁化，在磁带上就记录下声音的磁信号．

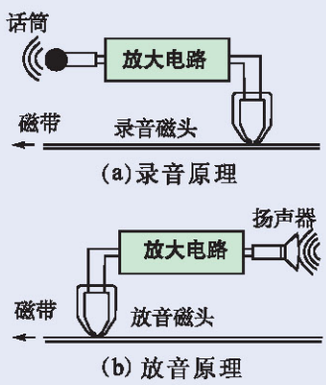


图1-3-4

放音是录音的逆过程．放音时，磁带紧贴着放音磁头的缝隙通过，磁带上变化的磁场使放音磁头线圈中产生感应电流，感应电流的变化跟记录下来的磁信号相同．这个电流经放大电路放大后，送到扬声器，扬声器把音频电流还原成声音．

在录音机里，录、放两种功能是合用一个磁头完成的．录音时磁头与话筒电路相连，放音时磁头与扬声器电路相连．录音过程利用了电流的磁效应，放音过程利用了电磁感应．

微信公众号：电子课本大全

4 楞次定律

在前面的实验中，大家是否注意到在不同的情况下感应电流的方向是不同的，感应电流的方向取决于哪些因素？究竟怎样判断感应电流的方向呢？

右手定则

观察思考

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 1-4-1 所示，把电源、滑动变阻器、开关和一个零点在刻度盘中央的电流计串联成实验电路. 实验中改变电源正、负极与电流计接线柱的连接，由此识别电流计的指针偏转方向与输入电流方向之间的关系.

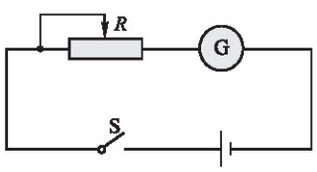


图 1-4-1

电流流入电流计情况	电流计指针偏转方向
电流从电流计左接线柱流入	
电流从电流计右接线柱流入	

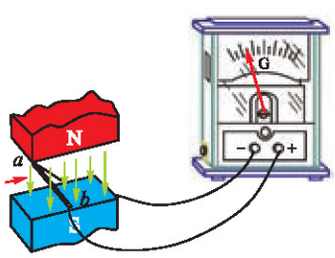


图 1-4-2　闭合电路的部分导体在磁极间左右运动

2. 按图 1-4-2 所示连成电路，图中 G 为电流计，*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计指针偏转的方向；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、导体切割磁感线运动方向和感应电流方向之间的关系.

在图 1-4-2 的情形中，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*.

用**右手定则**（right-hand rule）可以判断导线切割磁感线产生感应电流的方向.

右手定则：**将右手手掌伸平，使大拇指与其余并拢的四指垂直，并与手掌在同一平面内，让磁感线从手心穿入，**

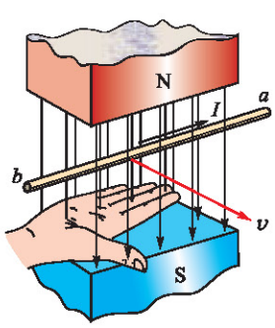


图 1-4-3　右手定则

微信公众号：电子课本大全

大拇指指向导体运动方向，这时四指的指向就是感应电流的方向，也就是感应电动势的方向，如图 1-4-3 所示.

那么，在导体没有运动而是由于磁场变化发生电磁感应的情况中，又该如何确定感应电流的方向呢?

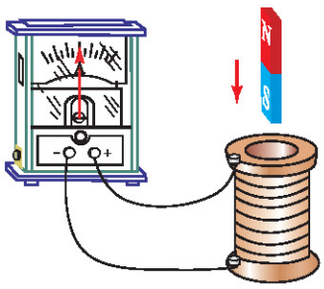
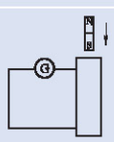
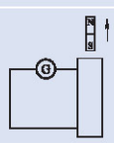
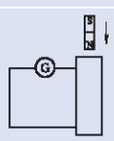
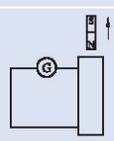


图 1-4-4 通过实验探究楞次定律

楞次定律

实验探究

如图 1-4-4 所示，将条形磁铁插入、拔出螺线管时，观察电流计指针偏转的方向，由此确定螺线管线圈中感应电流的方向. 并把结果与分析填入下表中.

操作	S 极插入	S 极拔出	N 极插入	N 极拔出
原磁场 B_0 方向				
原磁场通过螺线管磁通量的增减				
电流计指针偏转方向				
螺线管线圈绕向，感应电流方向图示				
感应电流的磁场 B' 的方向				

结果表明：感应电流的方向与原磁场的方向及原磁场通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 的方向相反；当 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 的方向相同.

物理学家楞次（H.F.E.Lenz，1804—1865）概括各种实验的结果，在 1834 年提出如下的结论：

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. 这就是**楞次定律**（Lenz law）.

讨论交流

怎样理解楞次定律中“阻碍”两个字的含义？谈谈你的看法.

微信公众号：电子课本大全

我们可以把利用楞次定律判断感应电动势和感应电流方向的方法归纳为 4 个步骤：

1．分辨引起电磁感应的原磁场 B_0 的方向．

2．确定 B_0 通过闭合回路磁通量的增减．

3．根据楞次定律，确定感应电流的磁场 B' 方向．

4．用安培定则（图 1-4-5）判断能够形成上述磁场 B' 的感应电流的方向．

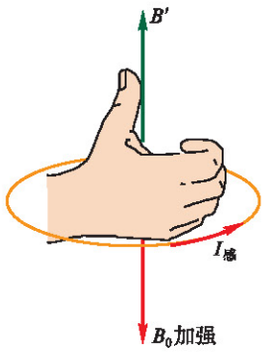


图 1-4-5　感应电流方向的判定

活动

导体切割磁感线运动产生感应电流，可用右手定则判断感应电流的方向，这是否符合楞次定律呢？

在图 1-4-6 中，导体沿图示速度方向运动．

1．根据楞次定律判定导体 ab 中感应电流的方向．

2．用右手定则判定导体 ab 中感应电流的方向．与楞次定律是否相一致？

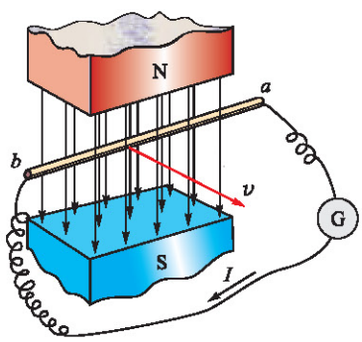


图 1-4-6　右手定则和楞次定律一致

应用右手定则只能判断在磁场中运动的一段导体中产生的感应电流的方向，但不能判断因磁场变化在闭合电路中产生的感应电流的方向．应用楞次定律可判断上述两种不同情况下产生的感应电流的方向，因此楞次定律是普遍适用的．

楞次定律的应用

利用楞次定律可以判断感应电流的方向．

【例题 1】在图 1-4-7 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计．若电流从左（右）侧流入电流计则电流计指针向左（右）侧偏转，试用楞次定律判定以下几个过程中电流计指针的偏转情况．

（1）开关 S 闭合．

（2）开关 S 闭合后，滑动变阻器滑动片 P 向左滑动．

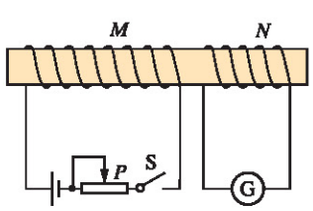


图 1-4-7

【解】（1）当开关 S 闭合时，线圈 M 中从右向左看为逆时针方向的电流从无到有，故其在铁芯中有水平向右的磁场逐渐增大，通过线圈 N 的磁通量增大，由楞次定律知线圈 N 中产生水平向左的磁场以阻碍磁通量的增大，再由安

微信公众号：电子课本大全

培定则可得电流计指针向左偏转.

（2）开关S闭合后，滑动变阻器滑动片P向左滑动时，其电阻变大，电流减小，故其在铁芯中有水平向右的磁场的减小，通过线圈N的磁通量减小，由楞次定律知线圈N中产生水平向右的磁场以阻碍磁通量变小，再由安培定则可得电流计指针向右偏转.

【例题2】 如图1-4-8所示，固定于水平桌面上的金属框架$cdef$，处在方向竖直向下的匀强磁场中，金属棒ab搁在框架上，可无摩擦滑动，此时$abed$构成一个边长为L的正方形．棒的电阻为r，其余部分电阻不计．开始时匀强磁场的磁感应强度为B_0．若从$t=0$时刻起，磁感应强度均匀增加，且磁感应强度的变化率$\frac{\Delta B}{\Delta t}=k$，设法保持棒静止，求：

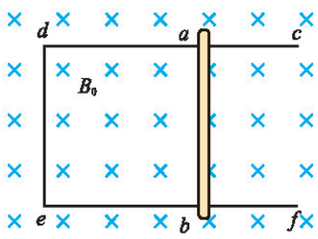


图1-4-8

（1）通过棒中的感应电流的大小，并在图上标出感应电流的方向.

（2）当$t=t_1$时，需加在棒上的垂直于棒的水平拉力为多大?

【解】（1）根据题意，$\frac{\Delta B}{\Delta t}=k$，而$E=\frac{\Delta \Phi}{\Delta t}=kL^2$，

所以根据已知条件k、L和r可得出$I=\frac{kL^2}{r}$.

在图1-4-8中，引发感应电流的磁场垂直纸面向内，由于磁感应强度增加，因此穿过$abed$的磁通量增加. 根据楞次定律，感应电流所产生的磁场应与原磁场的方向相反，为垂直纸面向外，再根据安培定则，$abed$的电流方向应是逆时针方向，因此通过棒ab的电流是从b到a.

（2）利用题目条件可知当$t=t_1$时，磁感应强度增加kt_1，所以这时磁感应强度为

$$B=B_0+kt_1$$

在这个磁场中棒ab会受到磁场的安培力

$$F_{安}=ILB=\frac{(B_0+kt_1)kL^3}{r}$$

为保持棒静止，应施加的外力

$$F_{外}=F_{安}=\frac{(B_0+kt_1)kL^3}{r}.$$

微信公众号：电子课本大全

练习与评价

1. 如图 1-4-9 所示，两个相同的铝制圆环中，一个有切口，固定在一根可以在水平面内自由转动的直杆上. 当磁铁磁极移近（不要碰到）完整的圆环时，圆环会随磁铁运动，好像被推动了；拉出磁极，圆环也跟过来. 同样操作对于另一个有切口的圆环，则没有反应. 试解释道理何在？

2. 如图 1-4-10 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. 这时螺线管中的电流产生磁场，试判断电流表指针的偏转方向.

3. 如图 1-4-11 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？为什么说各匝内的感应电动势是同方向的，总电动势是每一匝内的电动势之和？

4. 判断图 1-4-12 所示的各种情况下线圈内感应电流的方向.

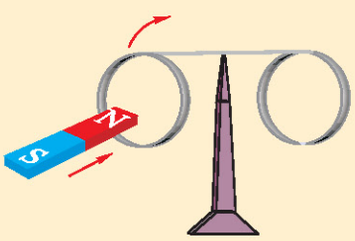


图 1-4-9

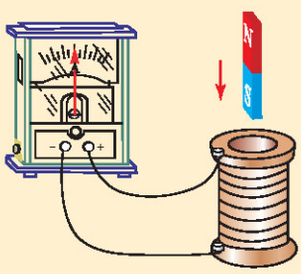


图 1-4-10

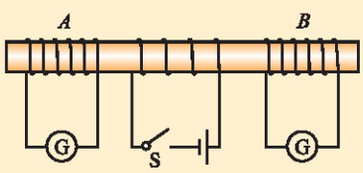
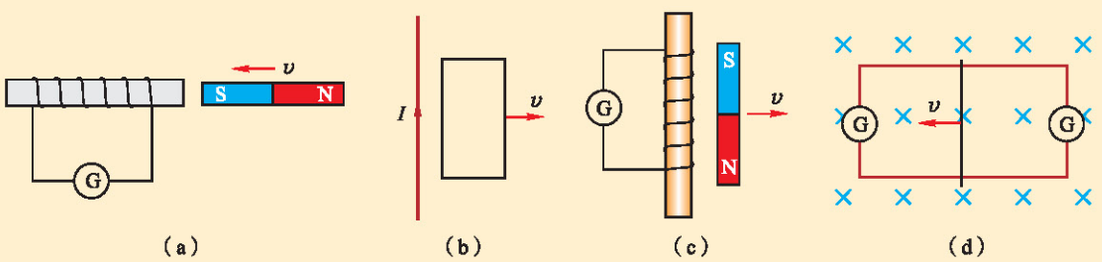


图 1-4-11



（a）　（b）　（c）　（d）

图 1-4-12

5. 图 1-4-13 表示一对同轴螺线管，图中线圈 A 中的电流方向用“·”和“×”表示，请画出线圈 A 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.

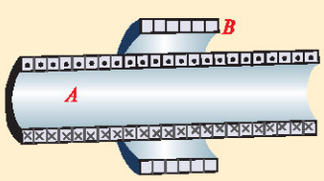


图 1-4-13　一对同轴螺线管

微信公众号：电子课本大全

5 电磁感应中的能量转化与守恒

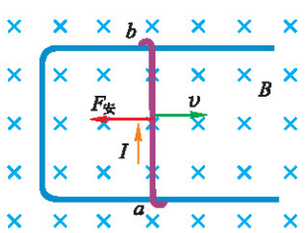


图 1-5-1 磁场对感应电流的安培力

能量守恒是自然界的一条普遍规律，在电磁感应现象中也不例外.

如图1-5-1所示，处在匀强磁场中的水平导轨上有一根与导轨接触良好的可自由滑动的直导线ab，当导线ab向右运动时，根据右手定则可确定，在ab内将产生由a向b的感应电流，有电流就会有焦耳热产生，这个能量是怎么来的呢?

我们知道，这个处在磁场中的带电导线必然受到安培力，根据左手定则可知，磁场对导线ab的安培力是向左的，它将阻碍导线的运动. 为了维持导线的匀速运动，必须有外力克服安培力做功，提供维持感应电流所需的能量.

如果没有外力使导线保持一定的运动速度，则在安培力作用下导线的运动速度会减小，动能将减小. 由此可见，在导线切割磁感线运动而产生感应电流时，电路中的电能来源于机械能. 是机械能借助于电磁感应实现了向电能的转化.

以下例题有助于我们定量地研究电磁感应中的能量转化.

【例题1】在图1-5-1中，设运动导线ab长为L，速度为v，匀强磁场的磁感应强度为B，闭合电路总电阻为R. 探究为了保持导线做匀速运动，外力所做的功$W_{外}$和感应电流的电功$W_{电}$的关系.

【解】运动导体产生的电动势

$$E = BLv$$

电路中感应电流

$$I = \frac{E}{R} = \frac{BLv}{R}$$

磁场对这个电流的作用力

$$F_{安} = ILB = \frac{B^2L^2v}{R}$$

微信公众号：电子课本大全

保持匀速运动所需外力

$$F_{外}=F_{安}=\frac{B^2L^2v}{R}$$

在Δt时间内，外力所做的功

$$W_{外}=F_{外}v\Delta t=\frac{B^2L^2v^2}{R}\Delta t$$

而此时间内，感应电流的电功是

$$W_{电}=I^2R\,\Delta t=\frac{B^2L^2v^2}{R}\Delta t$$

可见

$$W_{外}=W_{电}$$

由此，我们可以得到结论：在电磁感应中，产生的电能是通过外力克服安培力做功转化而来的，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.

【例题2】在倾角$\theta=30°$的斜面上，沿下滑方向铺两条平行的光滑导轨，导轨足够长，导轨的间距为$l=0.1\,\mathrm{m}$，两者的底端a和b用$R=0.04\,\Omega$的电阻相连，如图1-5-2所示．在导轨上垂直于导轨放有一根金属杆cd，其质量$m=0.005\mathrm{kg}$．今垂直于斜面加一匀强磁场B，当金属杆以$v=10\mathrm{m/s}$的速率匀速下滑时，R中感应电流的方向为从a到b，设导轨和金属杆cd的电阻都忽略不计，g取$10\mathrm{m/s^2}$，求：

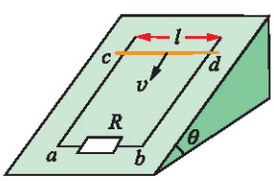


图1-5-2

（1）匀强磁场B的大小和方向.

（2）电流的功率$P_{电}$.

【解】（1）当金属杆匀速下滑时，重力所做的功完全用来克服安培力做功并进而转化为闭合电路的电能．在Δt时间内

$$W_{重}=mg\sin\theta\cdot v\Delta t$$

$$F_{安}=ILB=\frac{E}{R}\cdot L\cdot B=\frac{B^2L^2v}{R}$$

$$W_{安}=F_{安}\cdot v\Delta t=\frac{B^2L^2v^2}{R}\Delta t$$

根据$W_{重}=W_{安}$，解得磁感应强度大小为

$$B=\sqrt{\frac{mgR\sin\theta}{L^2v}}=\sqrt{\frac{0.005\times10\times0.04\times0.5}{0.1^2\times10}}\mathrm{T}=0.1\mathrm{T}$$

又因为安培力方向沿斜面向上，根据左手定则可知磁

微信公众号：电子课本大全

感应强度 B 方向垂直于斜面向上.

（2）根据能量守恒，电流的功率 $P_{电}$ 与机械功率相等，故

$P_{电}=mg\sin\theta\cdot v=0.005\times10\times0.5\times10\text{W}=0.25\text{W}$.

练习与评价

1. 如图 1-5-3 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.

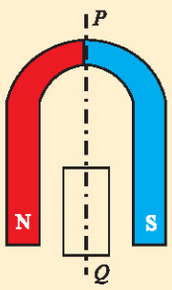


图 1-5-3 旋转实验

2. 如图 1-5-4 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落下，通过一匀强磁场，磁场方向垂直纸面向内，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）

3. 如图 1-5-5 所示，一水平放置的矩形线圈 $abcd$ 在磁体 N 极附近竖直下落，保持 bc 边在纸外，ad 边在纸内，由图中的位置Ⅰ经过位置Ⅱ到位置Ⅲ，这三个位置靠得很近. 在这个过程中，线圈中感应电流的方向（　　）

A. 沿 $abcd$ 流动

B. 沿 $dcba$ 流动

C. 由Ⅰ到Ⅱ是沿 $abcd$ 流动，从Ⅱ到Ⅲ是沿 $dcba$ 流动

D. 由Ⅰ到Ⅱ是沿 $dcba$ 流动，由Ⅱ到Ⅲ是沿 $abcd$ 流动

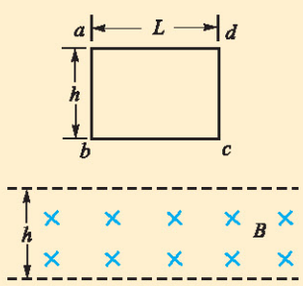


图 1-5-4

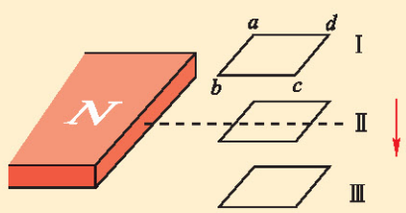


图 1-5-5

4. 为什么说楞次定律是能量守恒定律在电磁感应中的表现？

发展空间

课外阅览

反电动势

如图 1-5-6 所示，水平金属导轨 AB 和 CD 通过开关 S 和电池相连. 匀强磁场的磁感应强度

微信公众号：电子课本大全

垂直纸面向内，光滑导体杆 ab 同导轨 AB 及 CD 接触良好．当开关闭合后，电流从 a 到 b 流过导体，由左手定则可以判断，杆 ab 受到向右的安培力，在此力的作用下杆 ab 向右做加速运动．

由于杆 ab 切割磁感线运动，因而产生感应电动势 E'，根据右手定则，在杆 ab 上感应电动势 E' 的方向是从 b 到 a，同电路中的电流方向相反．在电路中与电流方向相反的电动势叫做**反电动势**（back electromotive force），杆 ab 中的感应电动势 E' 就是反电动势．这时总电动势等于电池电动势和反电动势之差．

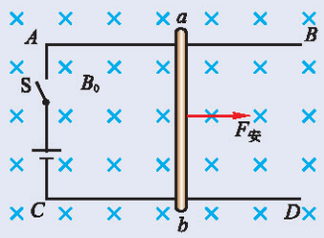


图 1-5-6　运动的通电导体

设杆 ab 长为 L，电路总电阻为 R，电池电动势为 E，磁感应强度为 B，杆 ab 运动速度为 u，反电动势 $E'=BLu$，电路中的电流 $I=\dfrac{E-E'}{R}$．可见反电动势的出现要抵消电源电动势的一部分作用，使电路中的电流减小，杆 ab 继续运动的动力减小．

与上面的例子一样，当电动机接通电源后，电动机中的通电线圈受磁场施加的安培力的力矩，发生转动．同时，线圈也会因为切割磁感线而产生感应电动势．由楞次定律可知，感应电动势的方向与令电动机线圈转动的电流方向相反，因此它是电动机运转时的反电动势．在电动机转子加速运动的过程中，反电动势 E' 逐渐增大，电流逐渐减小，动力矩也逐渐减小．而电动机带动负载工作，就承受着一个阻力矩，一旦动力矩减小到等于阻力矩时，E' 和电流均达到稳定，电动机带动负载正常运转．如果电动机工作中负载发生变化，比如负载增加，相当于阻力矩变得大于动力矩，电动机的转速就会减小，转速小了，切割磁感线的速度减小，反电动势 E' 也就变小了，反电动势减小会造成电动机的电流变大，电流的增加又使动力矩加大，直到与阻力矩相等，在新的条件下实现稳定工作．

电动机启动时，转子的速度还比较小，反电动势就很小，此时电路中电流是很大的．

电动机在转动状态下正常工作时，电流不大．当电动机转子因某种原因被卡住时，也就对应着图 1-5-6 中杆 ab 的速度 $u=0$，$E'=0$ 这种情况，由于电动机电路的直流电阻 R 很小，此时电路中电流最大，就相当于短路．若不立即切断电源，就会因为转子卡住时间过长，导致电动机被烧坏．

电动机运转中负载的增加也是有限度的，过大的负载等于将转子卡住，此时电动机不但不能工作，而且有被烧毁的危险．

含反电动势电路中的能量转化

在上述过程中，能量是如何转化的呢？

每当负载增加，电源要提供较大的电流，也就是需要提供较大的能量供电动机做功．我们将前面出现的电流公式改写为

$$IR=E-E'$$

两边同乘以 I，得到

$$I^2R=EI-E'I$$

此式表明，电源提供电能（功率为 EI）克服反电动势做功（功率为 $E'I$）并产生焦耳热（热功率为 I^2R），而其中克服反电动势的能量又通过电磁感应转化为运动导线或线圈的机械能．

微信公众号：电子课本大全

6 自 感

自感现象

如果一个线圈中电流发生变化，则线圈中电流产生的磁场也发生相应变化，那么这个磁场通过线圈自身的磁通量也就发生了改变．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？

观察思考

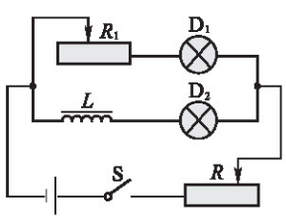


图 1-6-1 通电时的自感

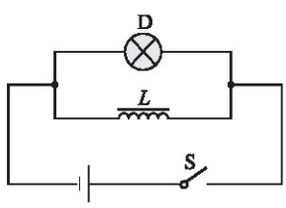


图 1-6-2 断电时的自感

1．如图 1-6-1 电路所示，先合上开关 S，调节变阻器 R_1 的电阻，使同样规格的两个灯泡 D_1 和 D_2 的明暗程度相同，再调节变阻器 R 使两个灯泡正常发光．然后断开开关 S．

再合上开关 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 1-6-2 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．

让我们对以上现象进行分析．在图 1-6-1 中重新接通电路以后，与电阻 R_1 串联的灯泡 D_1 立刻正常发光，而与线圈 L 串联的灯泡 D_2 不能马上亮起来，这是因为接通电源瞬间此支路的电流突然增大时，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 1-6-2 中电路断开的瞬间，通过线圈的电流突然减弱，穿过线圈的磁通量迅速减少，因而在线圈中产生较大的感应电动势．尽管这时电路已经断开，但线圈 L 和灯泡 D 组成闭合电路，在这个电路中仍有电流存在，所以灯泡在

微信公众号：电子课本大全

短时间内继续发光，延迟熄灭.

图 1-6-1 断电时，灯泡也会延迟熄灭，只是因为电源断开后，电路中有两个灯泡和一个电阻，所以电流迅速变小，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**，叫做**自感**（self- induction），在自感现象中产生的电动势叫做**自感电动势**（self- induction electromotive force）.

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

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

式中的比例系数 L 叫做线圈的**自感系数**（self -inductance），简称**自感**或**电感**. L 的大小反映出线圈的性质，同样的电流变化，L 越大，线圈产生的自感电动势越大.

自感系数是由线圈本身性质决定的，跟线圈的形状、体积、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.

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. 电感线圈（图 1-6-3）是交流电路中的重要元件，比如在日光灯电路中就不可缺少. 有时候，在电路中使用线圈而不希望发生自感现象，就要设法避免它的产生.

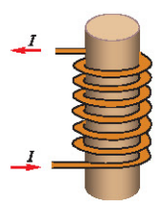


图 1-6-3　电感线圈

微信公众号：电子课本大全

活动

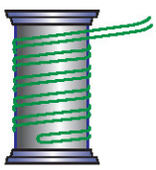


图 1-6-4　这样的电阻丝缠绕方式有什么优点

1. 如果我们要把很长的电阻丝绕在一个圆筒上，又不希望在电流变化时产生自感电动势，应该怎么办？

2. 如图 1-6-5 所示，把导线绕在一把锉刀上，一端接上电池，手执导线的另一端，在锉刀上来回划动就会产生较多的电火花.

缠绕导线的锉刀起到什么作用？怎样用自感现象来解释？



图 1-6-5　电火花小实验

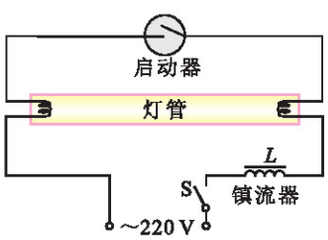
自感的典型应用——日光灯

自感现象在生活中有广泛应用，学校教室里使用的日光灯就是典型案例.

普通的日光灯电路如图 1-6-6（a）所示，由灯管、镇流器、启动器、导线和开关组成.

日光灯灯管的两端各有一个灯丝，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，涂在管壁上的荧光粉在紫外线的照射下发出可见光.

启动器也常称启辉器，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，另一个是用双金属片制成的U形动触片，动、静触片间不接触，有一个小缝隙，见图 1-6-7. 当开关闭合时，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动触片接触后，辉光放电消失，电流在接通的触点上产生的热量很少，所以动触片冷却收缩，使两个触片分离，电路自动断开.



（a）日光灯电路



（b）镇流器

图 1-6-6



图 1-6-7　日光灯启动器

微信公众号：电子课本大全

镇流器是一个有铁芯的自感系数很大的线圈. 在电路突然断开的瞬间，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，形成一个瞬时高电压，加在灯管两端，使灯管中的气体放电，日光灯被点亮.

日光灯点亮后的工作电压需低于 220 V，这时由于电感线圈对交流电有阻碍作用（详见第二章），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.

练习与评价

1. 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，镇流器起分压限流作用使灯管在较低的电压下工作

C. 镇流器维持灯管两端有高于电源的电压，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

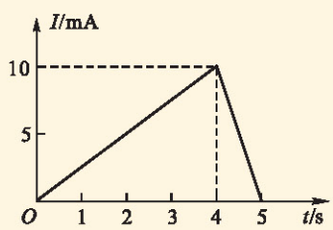


图 1-6-8

2. 日光灯正常发光时，摘掉启动器，灯还能不能正常发光？若有一启动器坏后摘了下来，开灯时，手持一小段带有绝缘皮的导线，一端插在启动器的接点上，另一端与另一个接点碰一下后迅速拿开，灯会不会亮？为什么？（为确保安全，请不要动手实验！）

3. 在自感系数为 100 mH 的线圈中，通入如图 1-6-8 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.

7 涡流（选学）

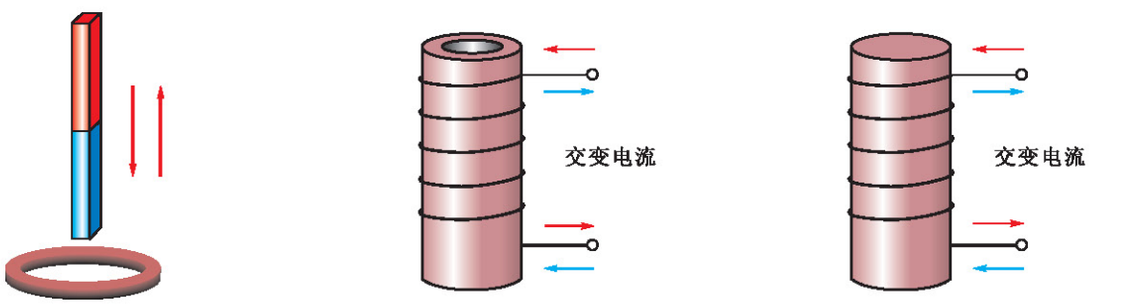
为什么变压器中用互相绝缘的硅钢片叠成的铁芯来代替整块硅钢铁芯？为什么当士兵探扫地雷时，要手持一个通有交变电流的长柄线圈扫过地面，这样就可以探测到有金属壳的地雷？……通过本节的学习你就能明白其中的道理.

微信公众号：电子课本大全

涡流

讨论交流

在图 1-7-1 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画出来吗？



（a）磁铁插入铜环或拔出　（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 1-7-1　涡流的形成

在（a）图中磁铁插入、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个圆环组成．绕在管外的线圈通上交变电流以后，穿过每个圆环的磁通量都发生变化，都产生环形感应电流．这样整个铜管内都有环形感应电流存在.

在（c）图中，铜柱又可以看成由许许多多个半径逐渐减小的圆管组成．每个圆管都能产生感应电流，因此整个圆柱体中都有沿同一方向环绕的环形感应电流.

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，很像水的旋涡，因此叫做**涡电流**（eddy current），简称**涡流**.

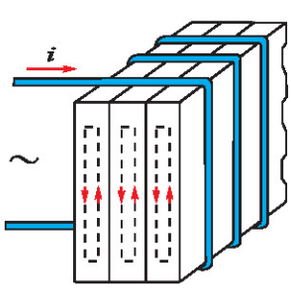


图 1-7-2　片状铁芯

金属块的电阻一般很小，不大的感应电动势就能在它内部形成强大的涡流，释放出大量的焦耳热，涡流的这种热效应对于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会使铁芯的温度升高，缩短线圈绝缘材料的寿命．涡流的热效应会消耗能量，使变压器、电动机的效率降低．为了降低涡流造成的损耗，变压器和电动机中的铁芯都不是整块金属，而是用许多相互绝缘的薄硅钢片叠合而成的．如图 1-7-2 所示，涡流被限制在狭

微信公众号：电子课本大全

窄的薄片之内，回路的横截面积很小，感应电动势就很小，铁芯采用硅钢片，是因为这种钢磁化性能好，而且比普通钢的电阻率大，涡流大为减弱，涡流损耗大大降低.

但是，事物都有两重性. 涡流有时有害，要加以防止，有时又可利用.

高频感应炉与电磁灶

图 1-7-3 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. 这种冶炼方法速度快，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.

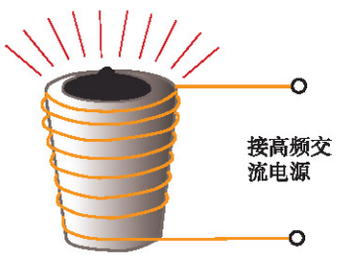


图 1-7-3　高频感应炉

电磁灶的结构如图1-7-4所示，当灶内的励磁线圈通有交变电流时，形成交变磁场，作用于铁磁材料制成的烹饪锅，使锅底产生涡流. 锅底有适当的电阻，产生焦耳热，使锅底发热. 电磁灶不存在一般电炉在热量传递过程中的损耗，热效率可以高达83%，耗电只有电炉的63%. 此外，它还具有使用方便、安全等优点.

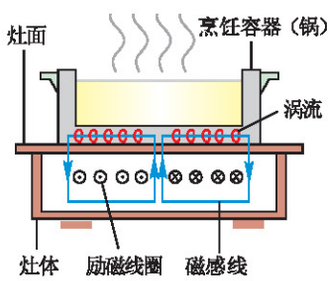


图 1-7-4　电磁灶

电磁阻尼

当导体在磁场中运动时，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**电磁阻尼**（electromagnetic damping）.

如图 1-7-5 所示，把用金属制成的摆，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的时间；电磁铁通电后，摆动很快就停下来了. 这是因为摆在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，因此摆在这种阻力的作用下，很快就停下来了.

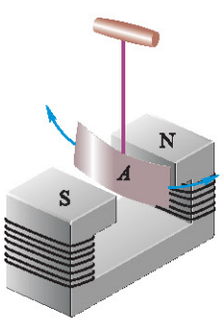


图 1-7-5

利用电磁阻尼，可以防止仪表中各种可动部分的振动.

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时，铝框内产生涡流，在电磁阻尼的作用下，线圈很快停止摆动，使指针能很快地稳定指到读数位置上. 如果电表不用时，特

微信公众号：电子课本大全

别是在携带搬运过程中，为了减少线圈与指针的剧烈摆动，还可以用导线将正、负接线柱短路．这样，线圈形成闭合的回路在磁场中摆动时出现感应电流，也产生电磁阻尼，既可避免指针因摆动剧烈而变形，还减小了轴承处的磨损．

练习与评价

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来探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，可以把放大了的音频电信号还原成声音．小型扬声器的内部构造如图 1-7-6 所示，说明扬声器是怎样工作的．（接线端加有与声音频率相同的电压信号）

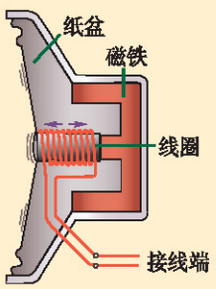


图 1-7-6

发展空间

物理在线

通过上网或查阅图书收集资料，了解电磁感应在生活和生产中的应用．

本章小结

1. 电磁感应现象　只要穿过闭合电路的磁通量发生变化，闭合电路中就会有电流产生．产生的电流叫感应电流．

2. 法拉第电磁感应定律　当穿过回路磁通量发生变化时，回路中就有感应电动势产生．感应电动势的大小，跟穿过这一回路的磁通量的变化率成正比，即

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

导体做切割磁感线运动时，在导线运动方向跟导线本身垂直，同时也跟磁感线方向垂直的情况下，产生的感应电动势的大小跟磁感应强度 B、导线长度 L、运动速度 v 的乘积成正比．即

$$E = BLv$$

微信公众号：电子课本大全

3．**楞次定律**　楞次定律是关于感应电流和感应电动势方向的规律．它说明：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．据此可以判断感应电流的方向．楞次定律实际上是能量守恒定律在电磁感应现象中的体现．

4．**自感**　自感是由于通过线圈本身的电流变化而引起的一种电磁感应现象．自感电动势E_L跟电流的变化率成正比，即

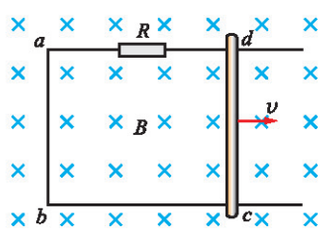
$$E_L = L\frac{\Delta I}{\Delta t}$$

式中的L叫做线圈的自感系数．

5．**涡流**　把金属块放入变化的磁场中，由于电磁感应，在金属块内部也要产生感应电流，这种电流叫涡流．

习　题

1．如图所示，导体cd在水平放置的光滑导线框上向右做匀速运动，线框中接有$R = 0.4\Omega$的电阻，置于磁感应强度$B = 0.1$ T的匀强磁场中，磁场方向垂直于纸面向内，设ab的长度$L = 0.4$ m，电阻$R_{cd} = 0.1\Omega$，运动速度$v = 5$ m/s，导体线框的电阻不计．



（第1题图）

（1）电路$abcd$中相当于电源的部分是_____，_____点相当于电源的正极．

（2）电源的电动势即产生的感应电动势$E =$_____V，电路$abcd$中的电流$I =$_____A．

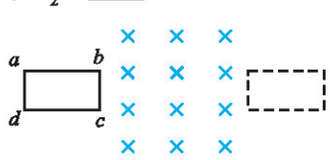
（3）导体cd所受安培力的大小$F_{安} =$_____N，方向_____，使导体cd向右匀速运动所需的外力$F_{外} =$_____N．

（4）外力做功的功率$P_{外} = Fv =$_____W．

（5）电源的功率$P = EI =$_____W．

（6）电源内部消耗的功率$P_1 =$_____W，电阻R上消耗的功率$P_2 =$_____W．

2．如图所示，一矩形线圈$abcd$置于磁感应强度为0.5 T的匀强磁场左侧，bc边恰在磁场边缘，磁场宽度等于线框ab边的长，$ab = 0.5$ m，$bc = 0.3$ m，线框总电阻为0.3Ω．当用0.6 N的力水平向右拉线框时，线框恰能以8 m/s的速度匀速向右移动．求：



（第2题图）

（1）线框移入和移出磁场过程中感应电动势和感应电流的大小和方向．

（2）线框穿过磁场的全过程中，外力对线框做的功．

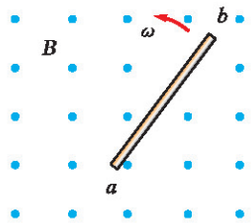
（3）在此过程中线框中产生的电能．

微信公众号：电子课本大全

3．在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的运动，运动方向跟导线本身垂直，也跟磁感线垂直．求感应电动势的大小．

4．如图所示，长为0.2 m的金属棒 ab 处于匀强磁场中，绕其端点 a 以 $\omega = 100$ rad/s 的角速度匀速转动，匀强磁场的磁感应强度 $B = 0.1$ T，则 ab 中感应电动势为多大？哪端电势高？

（提示：转动的直棒中点的速度为整个棒的平均速度）



（第4题图）

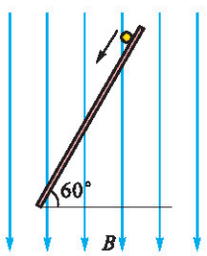
5．长为1 m的金属棒沿60° 角的斜面滑下，斜面处在方向竖直向下的匀强磁场中，如图所示．其中 $B = 0.1$ T，当金属棒的速度为1 m/s时，产生的感应电动势是多少？

6．在图中，线圈 M 和线圈 N 绕在同一铁芯上．请回答以下问题：

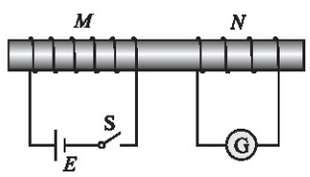
（1）当合上开关的一瞬间，线圈 N 里有没有感应电流？

（2）当线圈 M 里有恒定电流通过时，线圈 N 里有没有感应电流？

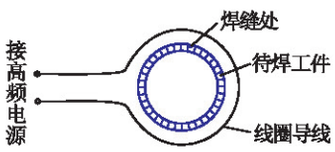
（3）当断开开关的一瞬间，线圈 N 里有没有感应电流？



（第5题图）



（第6题图）



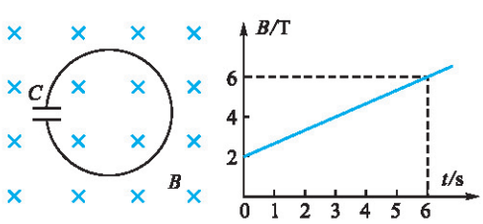
（第7题图）

7．如图所示是高频焊接原理示意图．当线圈中通以高频交流电时，待焊工件中就会产生感应电流，由于焊缝处电阻很大，感应电流产生的大量热量将缝两侧的金属熔化，待焊工件就焊接在一起了．我国生产的自行车架就是用这种办法焊接的．试定性地说明为什么交流电的频率越高，焊缝处放出的热量越多．

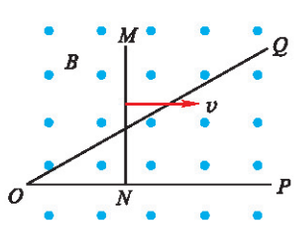
8．回路中有一个 $C = 60\mu$F 的电容器，已知回路的面积为 1.0×10^{-2} m^2，垂直穿过回路的磁场的磁感应强度 B 随时间 t 的变化图像如图所示，则 $t = 5$ s时，电容器上电荷量是多少？

9．如图所示，一“∠”形金属导轨与金属棒 MN 接触良好，$MN \perp PO$，整个框架平面与磁场方向垂直，处于磁感应强度为 B 的匀强磁场中．现将 MN 以速度 v 沿图示方向从 O 点开始匀速向右拉，$\angle POQ = 30°$，写出回路中感应电动势随时间变化的关系式．

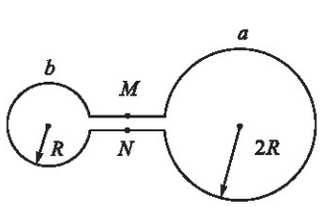
10．如图所示，用相同的均匀导线制成的两个圆环 a 和 b，已知 a 环半径是 b 环的两倍．若在 a 内存在着随时间均匀增强的磁场而 b 在磁场外时，MN 两端的电势差为 U，则当在 b 内存在着按相同规律变化的磁场而 a 又在磁场外时，MN 两端的电势差为多少？



（第8题图）



（第9题图）



（第10题图）

微信公众号：电子课本大全

第二章

交变电流

- 交变电流
- 描述交流电的物理量
- 示波器的使用
- 电容器在交流电路中的作用
- 电感器在交流电路中的作用
- 变压器
- 电能的输送

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.



微信公众号：电子课本大全

1 交变电流

交变电流

什么是交变电流？我们通过下面的实验来认识它.

观察思考

1. 如图 2-1-1 所示，先将手摇发电机模型与小灯泡连接成闭合电路，匀速转动手柄，可以观察到小灯泡亮度有何变化？这说明了什么？



图 2-1-1 手摇发电机

2. 将上述电路中的小灯泡换成零刻度居中的电流表，启用如图 2-1-2 所示的电机原理说明器. 缓慢、匀速转动手柄，可以看到电流表的指针如何摆动？这又说明了什么？

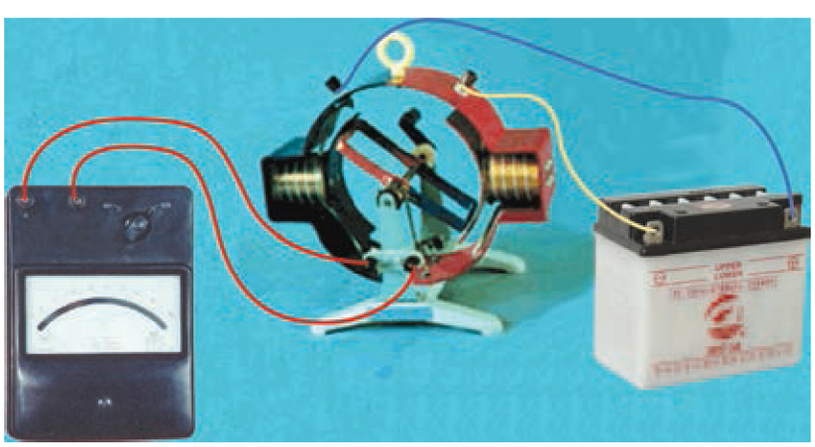


图 2-1-2 电机原理说明器

3. 用示波器观察电压的图形

将信号发生器的电压输出端与示波器的“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）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的特点？说明输入电压的大小和方向各是如何变化的？

微信公众号：电子课本大全

大小和方向都不随时间变化的电流，称为恒定电流[如图2-1-3（a）、（b）]；大小和方向随时间作周期性变化的电流，称为交变电流［如图2-1-3（c）－（f）］，简称交流电.

其中电流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**（sinusoidal alternating current），简称正弦交流电.

正弦交变电流是一种最简单、最基本的交变电流. 由发电厂发出的电流就是正弦交变电流.

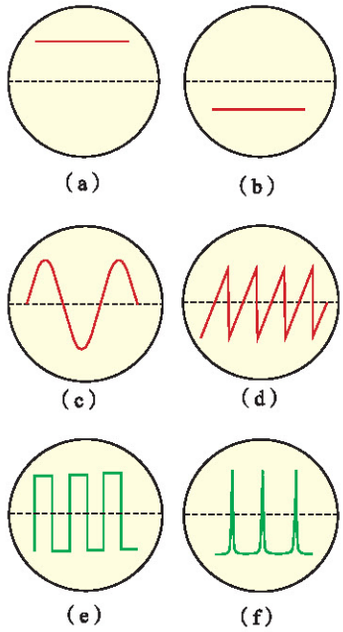


图2-1-3　在示波器上观察到的几种电压波形

正弦交变电流的产生和表述

前面手摇发电机匀速转动时产生的电流可看做是正弦交变电流. 它是怎么产生的?

理论探究

如图2-1-4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，线圈中将产生什么样的感应电动势?

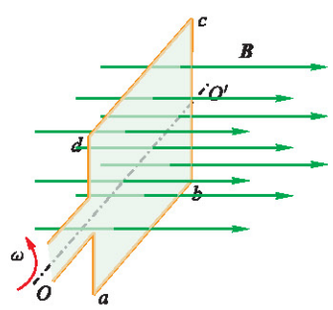


图2-1-4　矩形线圈在匀强磁场中匀速转动，线圈中产生感应电动势

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是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.

如图2-1-5所示，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 $v_1=v\sin\theta=v\sin\omega t$. 根据电磁感应定律，在 ab 边上产生的感应电动势的大小

$$e_{ab}=BL_1v\sin\omega t$$

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

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

如果把线圈的两端与外电路电阻相连，组成闭合电路

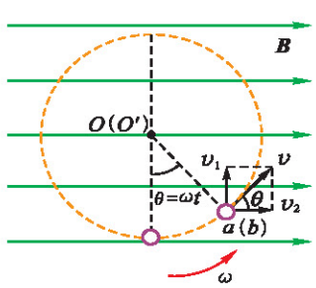


图2-1-5

微信公众号：电子课本大全

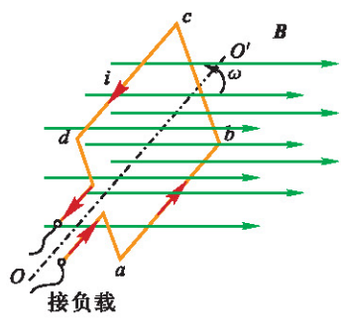


图 2-1-6

（图 2-1-6），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 变化的关系是

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

外电路两端的电压 u 随时间 t 变化的关系是

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

上式中 i、u 分别称为电流和电压的瞬时值．i、u 随时间变化的规律也可用图像表示．如图2-1-7所示是正弦交流电电流随时间变化的图像．

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．

$t = 0$ 时，$\theta = 0$，此时的感应电动势 $e = 0$，线框所在的平面称为中性面．

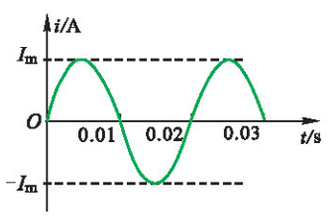
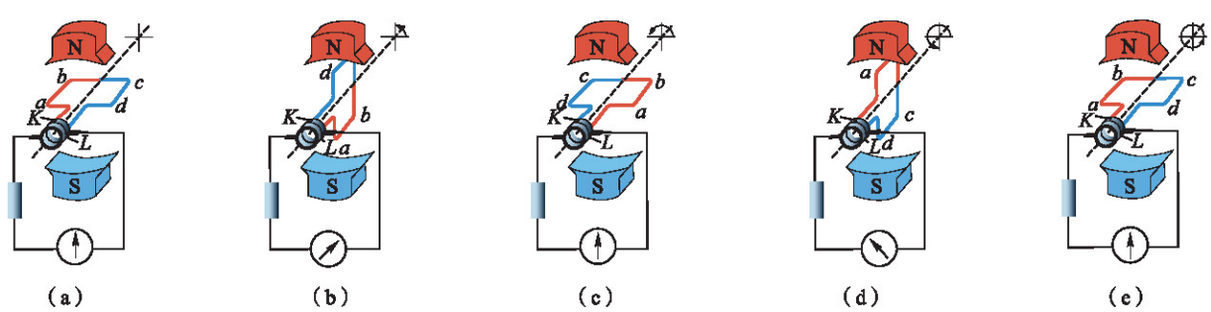


图 2-1-7　正弦交流电的电流图像

讨论交流

图 2-1-8 是交流发电机的示意图，线圈 ab 边连在金属滑环 K 上，cd 边连在滑环 L 上，导体制成的两个电刷分别压在两个滑环上，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）过程中，线圈中电流的大小和方向变化的情况．



（a）　（b）　（c）　（d）　（e）

图 2-1-8　交流发电机示意图

练习与评价

1．如图 2-1-9 所示，一线圈在匀强磁场中匀速转动，经过图示位置时（　　）．

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

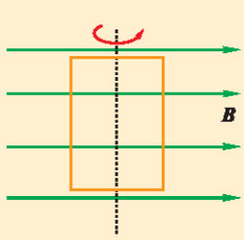


图 2-1-9

微信公众号：电子课本大全

2. 如图 2-1-10 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 0.01 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为多大？

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.

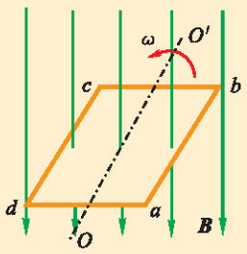


图 2-1-10

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、太阳能发电、地热发电、潮汐发电等多种方式，但作为发电机来说，其发电原理都相同，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. 图 2-1-11 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.

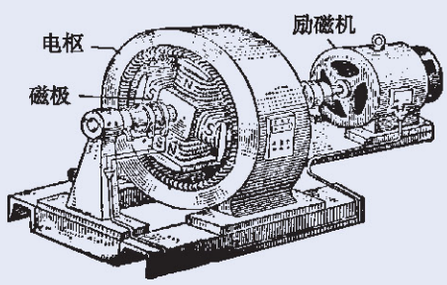


图 2-1-11　带励磁机的同步发电机

2 描述交流电的物理量

交流电的特征需要用哪些物理量来描述呢？

周期和频率

交变电流随时间作周期性变化. 周期和频率就是表征其

微信公众号：电子课本大全

变化快慢的物理量．作一次周期性变化所需的时间称为**周期**（period），用符号 T 表示，单位是秒（s）．在 1 s 时间内完成周期性变化的次数称为**频率**（frequency），用符号 f 表示，单位是赫兹（Hz）．周期和频率的关系是

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

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．线圈转动一周正好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

ω 又称为角频率.

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

因此正弦交流电的表达式还可写成

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

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

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），也有一些国家的为 60 Hz.

● 峰值　有效值

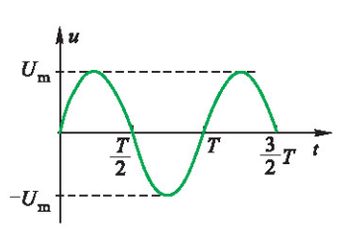


图 2-2-1

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 2-2-1 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，就要注意交变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“220 V”却并不是指峰值，而是有效值．那么什么是有效值呢?

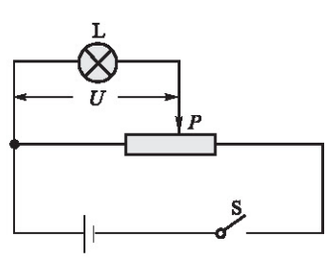


图 2-2-2　利用分压电路调节小灯泡的发光亮度

观察思考

使用学生电源的交流低压挡，接入滑动变阻器和一个小灯泡．闭合开关，调节滑动变阻器，小灯泡发光．用示波器观察电压波形并测出电压的峰值 U_{m}.

再用相同规格的另一个小灯泡，接入直流电源，连接成如图 2-2-2 所示的分压电路．闭合开关 S，调节滑动变阻

微信公众号：电子课本大全

器的滑动片P，观察小灯泡亮度的变化，直到小灯泡的亮度与接到交流电源上的小灯泡亮度相同时为止*. 再用直流电压表测出小灯泡两端的直流电压值U.

重复上述实验，用变阻器改变小灯泡两端的电压，每次都使两灯泡亮度相同，得出每次测出的U_m和U的比值，填入下表：

实验次序n	1	2	3	4	5
交流峰值U_m/V					
直流值U/V					
$\frac{U}{U_m}$					

如果交流电与某一直流电通过同一电阻，在相同的时间内所产生的热量相等，则这个直流电的电流和电压值，就分别称为相应交流电的电流和电压的**有效值**（effective value）. 因此，交电流的有效值是根据电流的热效应来规定的. 实验中两个相同的小灯泡发光亮度相同，说明在每次实验中交流电和直流电通过相同电阻时生热的效果相同. 用直流电压表测出的直流电压值就是相对应的交流电电压的有效值. 交变电流电压、电流的有效值分别用符号U、I来表示.

对不同的交变电流，有效值与峰值之间有不同的关系，理论和实验都表明，正弦交流电的有效值与峰值的关系是

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

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220 V，工农业生产所使用的动力电路电压是380 V，都是指有效值，相应的峰值分别是311 V和538 V.

交流电流表和电压表表盘上标示的数值是有效值，因此使用交流电表测出的数值是正弦交流电的有效值. 有效值也是描述交流电大小的物理量.

【例题】将一个小电容器接入220V正弦交流电路中，它的耐压值必须大于多少？

【解】交流电流的电压是220 V，即有效值是$U=220$ V，相应的峰值

* 仅靠人眼观察灯的亮度，从而确定两次生热的效果相同，是很不准确的. 这里只是说明原理，真正实验需要使用更准确的方法.

微信公众号：电子课本大全

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

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.

练习与评价

1. 我国家庭照明用的交流电的电压瞬时值随时间变化的规律是 $u = 311\sin 100\pi t$ V，它的电压有效值以及周期和频率各是多少？

2. 某些国家照明电路使用的正弦交变电流的频率为60 Hz，电压是110 V，写出它的电压瞬时值 u 随时间 t 变化的关系式.

3. 一个标有“36 V 100 W”字样的灯泡接在正弦交流电源上正常发光时，它的电压及通过它的电流的有效值各是多大？如果它还并联一个电容器，这个电容器的耐压值必须满足什么条件？

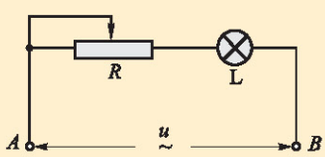


图2-2-3

4. 如图2-2-3所示，L是一个小灯泡，R是一个滑动变阻器，标有“10 Ω 1 A”字样，A、B两端接在电压为 u 的交流电源上. 在L和 u 分别为下面两种情况时，能否通过调节滑动变阻器而使灯泡L正常工作？

（1）$u = 28\sin 100\pi t$ V，L标有“12 V 12 W”字样；

（2）$u = 14\sin 100\pi t$ V，L标有“6 V 8 W”字样.

5. 如图2-2-4所示为一电流随时间变化的 $i - t$ 图像. 该电流的有效值为多大？

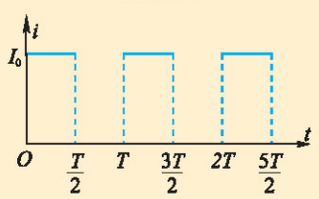


图2-2-4

发展空间

课外阅览

交流电的相与初相

我们在第1节探讨交流电的变化规律时，是假定在 $t = 0$ 时线圈平面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，因此得出感应电动势的瞬时值 $e = E_m \sin \omega t$. 更一般的情况，$t = 0$ 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，简称相，而 φ_0 称为初相位（分别简称相和初相）.

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，它不随时间而变化. 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.

微信公众号：电子课本大全

3 示波器的使用

我们已经见过老师使用示波器进行演示，现在让我们进一步认识示波器并使用它观察交流电的波形.

● 认识示波器面板上的旋钮



图 2-3-1　J2459 型示波器

下面以J2459型示波器为例（图2-3-1），认识示波器面板上的旋钮.

1．电源开关.

2．电源指示灯．开启电源开关，进行预热，这时指示灯亮.

3．辉度调节旋钮．用来调节图像亮度.

4．聚焦调节旋钮.

5．辅助聚焦调节旋钮．4与5两者配合使用，可使打到荧光屏上的电子束会聚成一个小亮斑.为保护荧光屏，亮斑亮度不能太大，可调节辉度调节旋钮，使它变暗.

6．竖直位移旋钮.

7．水平位移旋钮．6与7这两个旋钮可以调节图像的竖直和水平位置．可以尝试着调节它们，就能看到亮斑移动，注意最后要使亮斑仍回到中心.

8．Y增益调节旋钮.

9．X增益调节旋钮.8与9分别调节图像在Y方向和X方向的幅度.

10．衰减调节旋钮．它有1、10、100、1 000四个挡，表示输入信号衰减的倍数，“1”表示不衰减，“10”“100”“1 000”分别表示衰减为 $\frac{1}{10}$、$\frac{1}{100}$、$\frac{1}{1000}$.最右边的“$\sim$”符号表示机内提供正弦交流信号．把旋钮调到此处，可看到正弦交流电压波形.

11．扫描范围旋钮.用来调节扫描电压的频率范围，共

微信公众号：电子课本大全

在《物理 选修 3-1》中，我们了解了示波管的工作原理. 试着回忆一下，扫描电压是怎样的一种交流电压?

四个挡位，最低的是 10 ~ 100 Hz，即可以在 10 ~ 100 Hz 范围内调节，向右每拨一挡，频率范围增大 10 倍. 最右边是“外 X”挡，即不使用机内扫描电压，而使用外部输入的扫描电压.

12. 扫描微调旋钮. 在选定扫描范围内调节扫描频率.

13. 外部信号输入端，包括“Y 输入”、“X 输入”和“地”三个接线柱，其中“地”是公共端. 如果使用机内扫描，则不用“X 输入”.

14. 交直流选择开关，“DC”代表直流，“AC”代表交流.

15. 同步极性选择开关. 在观察正弦交流电时，改变同步选择开关，可使荧光屏上的电压波形从正半周开始或从负半周开始.

练习使用示波器

1. 在“Y 输入”和“地”间加直流电压，观察亮斑的移动.

把“交直流开关”扳到直流挡（DC）位置，扫描范围旋钮转到最右端“外 X”挡，衰减调节旋钮调到“100”挡. 用分压电路把直流电压加在“Y 输入”和“地”间，如图 2-3-2 所示，可以观察到亮斑向上偏移.

（1）调节“Y 增益”旋钮，观察亮斑偏移的距离发生变化，调节到亮斑移动距离适中为止.

（2）调节滑动变阻器的滑片，改变输入电压，观察亮斑移动距离的变化.

（3）改变输入电压的极性，可以观察到亮斑向下偏移.

（4）扳动“同步极性选择开关”，观察亮斑的偏移方向发生改变.

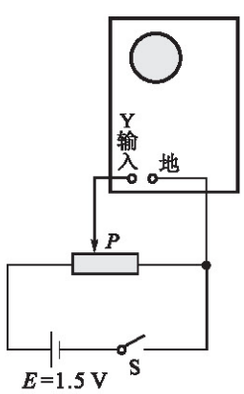


图 2-3-2 观察亮斑在竖直方向的偏移

2. 观察扫描.

（1）把图 2-3-2 中的直流电压改加到“X 输入”上，观察亮斑发生水平偏移. 调节“X 增益”旋钮，观察亮斑偏移的距离发生变化. 把“X 增益”旋钮顺时针转到 $\frac{1}{3}$ 处.

（2）撤去外加直流电压，把“扫描范围”旋钮置于最低挡，“扫描微调”旋钮逆时针转到底，可以观察到亮斑从左向右移动，并迅速返回左端.（这是机内锯齿波扫描电压在起作用）

微信公众号：电子课本大全

（3）调节“X增益”旋钮，可以观察到亮斑移动距离变化.

（4）改变扫描频率，荧光屏上的亮斑变成一条亮线.

3．观察正弦交流电压波形.

（1）把示波器的“扫描范围”旋钮调到第一挡（10～100 Hz），“衰减调节”旋钮调到第四挡（衰减1 000倍），“交直流选择开关”置于“AC”位置，在“Y输入”和“地”两个接线柱上各连接一个有良好绝缘柄的探针（或用多用电表的两表笔），把两探针分别插入照明电路二线插座的两孔中，再调节扫描微调旋钮，直到屏幕出现稳定的波形为止.

（2）观察机内的正弦信号波形．把示波器的“扫描范围”旋钮调到第一挡（10～100 Hz），“衰减调节”旋钮调到最右端的“∿”处，再调节扫描微调旋钮，直到屏幕出现稳定的波形为止.

（3）调节“Y增益”和“X增益”旋钮，观察波形的变化.

（4）扳动“同步极性选择开关”，观察荧光屏上的正弦曲线的变化.

4．观察其他交变电流的波形.

观察信号发生器输出的方波和锯齿波的波形．分别把低频信号发生器产生的方波和锯齿波信号输入端与示波器的“Y输入”和“地”接线柱相连，适当调节示波器有关旋钮，观察稳定的波形.

观察思考

1．示波器面板上的旋钮，除去电源开关以外，按功能分，大体上可以分为三类：第一类是调节屏幕上亮斑的大小、亮度等；第二类是控制水平方向位置、扩展程度等；第三类是控制竖直方向位置、扩展程度等．你能把图2-3-1所示的J2459型示波器面板上的按钮分别划入上述三类中吗？

2．如果不加任何扫描电压，分别把正弦交变电流的信号及方波信号输入到示波器的“Y输入”和“地”间，在示波器上看到的情景各是什么？

3．小明在示波器上观察正弦交流电的图形，通过一系列调节后在屏幕上看到一个完整的正弦波形，如图2-3-3（a）所示．小英走过来，只调节了一个旋钮，屏幕上的波形变成了两个正弦波形，如图（b）所示．你能判断出小英调节的是哪个旋钮，是如何调节的吗？

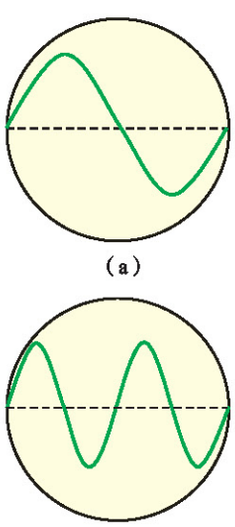


图2-3-3

微信公众号：电子课本大全

4 电容器在交流电路中的作用

因为电容器两极板间被绝缘介质隔开，所以若将电容器接在直流电源的两端，电路中不会有直流电通过．而当电容器接到交流电源的两端，情况又会怎样呢？让我们通过实验进行观察．

电容器对交流电的导通作用

观察思考

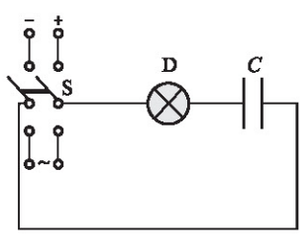


图2-4-1

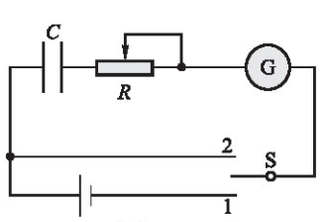


图2-4-2

1．图2-4-1中D为小灯泡，C为电容器，S为双刀双掷开关．把开关接到直流电源上，观察小灯泡的发光情况．再把开关接到交流电源上，观察小灯泡的发光情况．

以上两种情况下灯泡发光情况有何不同？这说明了什么？

2．如图2-4-2所示连接电路，其中G为不通电时指针位于表盘中央的演示用电流表，S是单刀双掷开关，R是滑动变阻器，先把开关S扳至1位置，观察电流表指针的偏转情况，经过一段时间再把开关S扳至2位置，观察电流表指针偏转情况．

在开关扳到1和扳到2的瞬间指针偏转方向相同吗？为什么在这两个瞬间，电路中会出现电流？

通过第2个实验可知，电路中也有电流通过，你能用本实验结果解释第1个实验的现象吗？

理论探究

为什么电容器能够导通交流电？

在《物理 选修3-1》中我们已经初步学习了关于电容器充放电的知识．下面我们再作进一步探究．

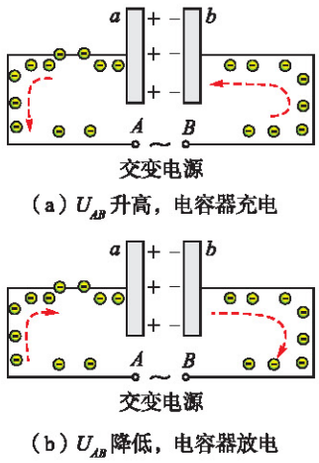
微信公众号：电子课本大全

如图2-4-3所示，将交变电压加在电容器两端（导线电阻可忽略不计）.

当A、B两端电压升高时，电容器充电，如图（a）所示. 若A端电势高于B端电势，则a、b两极板上的带电情况将如何变化？电路中的自由电子是如何运动的？充电电流i方向是怎样的？

当A、B两端电压降低时，虽然A端电势仍高于B端电势，但电容器开始放电，如图（b）所示. 此过程中a、b两极板上的带电情况如何变化？电路中的自由电子如何运动？放电电流i方向怎样？

当A、B两端电压反向升高、降低……如此反复，情况会怎样？



（a）U_{AB}升高，电容器充电

（b）U_{AB}降低，电容器放电

图2-4-3　电容器导通交流电的实质

电容器接入交变电路中时，由于两极板间的电压在周期性地变化，使电容器反复地充电和放电，虽然电容器的两极板间并没有电流通过，但在连接电容器和电源的电路中却形成交变电流. 这就是电容器导通交流电的实质.

当导线电阻不能忽略，或电路中还串联有其他用电器时，电容器仍然周期性地充电和放电，只是这种情况下电路电压会被电阻或其他用电器分担掉一部分，电容器两极板间的交变电压不再等于电路两端的交变电压了.

电容器对交流电的阻碍作用

电容器对交流电的导通能力是有限的. 换言之，电容器对交流电有一定的阻碍作用. 那么，它对交流电的阻碍作用可能跟哪些因素有关？

实验探究

1. 如图2-4-4所示，把电容器C和小灯泡D串联，再与另一完全相同的小灯泡D′并联，用交流信号发生器作电源. 交流信号发生器可以输出不同频率、不同电压的正弦交流信号. 闭合开关S和S′，可以观察到小灯泡D和D′的发光有何不同？为什么？

2. 断开S′，调节信号发生器输出的信号电压，使灯泡D发出不太强烈的光，然后保持电源输出的电压不变而改变信号的频率，观察频率升高或降低时灯泡亮度的变化.

3. 在频率、电压不变的条件下，用不同的电容器与小灯泡D串联，观察电容值不同时小灯泡亮度的变化情况.

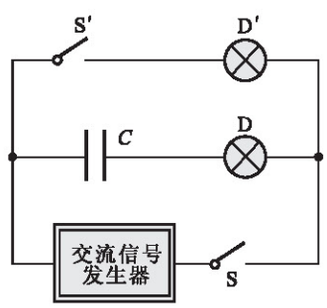


图2-4-4

观察结果：

在电容和电源输出电压不变的情况下，信号频率越大，

微信公众号：电子课本大全

小灯泡亮度越____；在信号频率和电源输出电压不变的情况下，电容越大，小灯泡亮度越_____.

由此你认为电容器对交流电的阻碍作用，可能与哪些因素有关？

由实验知道，电容器虽然可导通交流电，但对交流电有阻碍作用. 电容器对交流电的阻碍作用称为**容抗**（capacitive reactance）. 容抗的大小跟电容有关，电容越小，容抗越大；容抗大小还跟交流电的频率有关，频率越低，容抗越大.

电容器在电路中的作用可简单概括为“隔直流、通交流，频率越高，阻碍越小”.

电容器的容抗大小的公式是

$$X_C=\frac{1}{2\pi fC}$$

式中 f 是交流电的频率，C 是电容器的电容.

电容器具有容抗是由于极板充电带有电荷后，会产生阻碍电流的反向电压，从而对继续充电产生阻碍作用. 电容越大，在充电过程中两极间电压增长就越慢，对继续充电的阻碍作用就越小；交变电流的频率越高，即电流方向变化越快，电容器两极板间电压还来不及达到较高时，电流就已经反向，从而对继续充电的阻碍作用变小. 因此，电容越大，频率越高，容抗越小.

电容器在电子技术中的应用

在电子技术中，各类信号放大系统中常常需要把交流信号送到下一级，但要求各级之间直流互不干扰. 为此，可以在两级电路间串联一个电容器来阻止直流成分通过，如图 2-4-5 所示. 具有这种用途的电容器叫隔直电容.

传输的交流信号中除了有用的信息以外，还常常含有高频干扰信号，这时可利用电容器对高频电流阻碍作用小而对低频电流阻碍作用大的特性，在下级电路的输入端并联一个电容器，通过电容器可滤除高频干扰信号，如图 2-4-6 所示. 具有这种用途的电容器叫旁路电容.

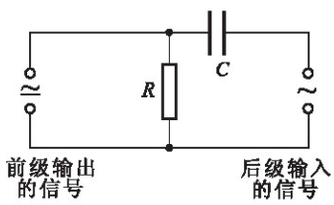


图 2-4-5 隔直电容：直流不能通过电容器 C，只能经电阻 R 形成回路

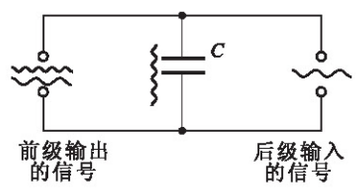


图 2-4-6 旁路电容：C 的电容较小，低频信号不能通过，但高频干扰信号可以通过

练习与评价

1. 如图 2-4-5 所示，若传输的信号是音频信号时，使用的隔直电容为 C_1；若传输的信号是视频信号时，使用的隔直电容为 C_2. 则 C_1 和 C_2 相比，哪个较大？为什么？已知视频信号频率远大于音频信号频率.

2. 如图 2-4-5 所示，经隔直电容 C 后的输入信号中除了有用的信号以外，尚含有无用的高频成分，为去掉无用的高频成分，可以再加一个旁路电容 C'.

（1）在图 2-4-5 中画出所加的旁路电容 C'.

（2）C 与 C' 相比，哪一个较大？为什么？

微信公众号：电子课本大全

发展空间

课外阅览

分布电容

在交流电路中，除了专门制作的电容器具有电容以外，电路中各部分导体之间也具有一定的电容，例如两根输电线就是两个相互绝缘的导体，也构成一个电容器．任何一个跟地绝缘的导体，与大地也都构成电容器．这些无处不在的电容，称为分布电容．

分布电容通常都很小，在许多情况下可以忽略不计，然而在某些情况下，影响却很大．如在远距离输电过程中，由于分布电容的存在，造成输电过程中电能的大量闲置．在电子技术中，分布电容所造成的影响很值得关注．分布电容有时会严重影响电路的性能，在微电子电路中，落在元器件上的一些尘埃就可能引起分布电容的较大变化，影响电子仪器的性能．这也是计算机和精密电子仪器工作时要求净化环境的重要原因．

5 电感器在交流电路中的作用

电阻可以忽略的电感线圈称为纯电感元件或电感器．在恒定电流电路中电感器相当于一段电阻很小的导线，在交流电路中它将起什么作用呢？

电感器对交流电的阻碍作用

观察思考

1．将带铁芯的电感器L和灯泡D串联，再与另一完全相同的灯泡D′并联，接在以交流信号发生器为电源的两端，如图2-5-1所示．闭合开关S和S′，观察两个灯泡发光的亮度有何不同？

2．只闭合开关S，调节信号发生器输出的信号电压，使灯泡D发出不太强烈的光，然后保持电源输出的电压不变而改变信号的频率，观察频率升高或降低时灯泡亮度的

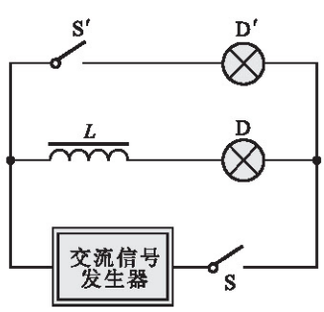


图 2-5-1

微信公众号：电子课本大全

变化.

3. 把电感器的铁芯抽出，再闭合开关 S，观察灯泡的亮度变化情况.

4. 保持其他条件不变，换用匝数不同的电感器，观察亮度的变化.

观察结果：

在电感和电源电压不变的情况下，信号频率越大，小灯泡亮度越_____；

在信号频率和电源输出电压一定的情况下，电感越大，小灯泡亮度越_____.

由观察到的现象，你认为电感对交流电的阻碍作用可能与哪些因素有关？

从上面实验中可知，电感器对交流电有阻碍作用. 阻碍作用的大小可用**感抗**（inductive reactance）表示. 实验和理论分析都表明线圈的电感（即自感系数 L）越大，交流电的频率越高，对交流电的阻碍作用越大，即感抗也越大.

电感器在电路中的作用可简单概括为“通直流、阻交流”，频率越高，阻碍越大.

电感器的感抗大小的公式是

$$X_L = 2\pi fL$$

式中 f 是交流电的频率，L 是电感器的电感.

感抗的形成是因为交变电流通过线圈时，由于自感的作用产生了自感电动势，自感电动势要阻碍电流的变化，这样就形成了对电流的阻碍作用. 线圈的电感大，电流的变化快（频率越高），线圈产生的自感电动势就大，对电流的阻碍作用也就越大，即感抗也越大.

电感器在电子技术中的应用



图 2-5-2 几种常见的电感器

电感器通直流、阻交流的特性，在实际中有着广泛的应用.

电子技术中的扼流圈就是利用电感对交流电的阻碍作用制成的. 常用的扼流圈有两类：一类是低频扼流圈，一般都是用电阻较小的绝缘导线绕在闭合的铁芯上，匝数很多，达到几千甚至上万匝，自感系数一般为几十亨. 由于电感较大，因此对低频交流电也能产生较大的感抗，线圈的电阻较小，对直流电阻碍作用可忽略，这种线圈可用来“通直流、阻交流”. 另一类是高频扼流圈，它的作用主要是“通低频、阻高频”. 这类扼流圈一般匝数较少，如几百匝或更少，可以绕在铁氧体磁棒上，或绕在空心绝缘体制成的轴上，自感系数只有几十毫亨或更小.

铁氧体是一种类陶瓷性材料，它的最重要特性是高磁导率和高电阻率. 在涉及高频交变电流的电感器、变压器、天线以及计算机存储器等电子设备中，都有广泛的应用.

练习与评价

1. 你见过哪些电感器？它们都用在哪些地方，分别起什么作用？
2. 高频扼流圈与低频扼流圈相比较，有哪些不同？

微信公众号：电子课本大全

发展空间

课外阅览

电感器与电容器的配合使用

在电子技术中，常将电感器和电容器配合使用，设计成不同性能的LC电路.

如图2-5-3所示是交变电流经整流后用来产生直流电所使用的一种滤波电路. 正弦交变电流经整流后的波形一般是脉动直流电，它包含有直流成分，也有交流成分，我们需要的是直流成分，应把交流成分滤去. 由扼流圈L、电容器C_1和C_2组成Π形滤波器. 扼流圈L阻碍交流成分通过，而旁路电容器C_1给交流成分提供了通道，通过L后的电流仍会有交流成分存在，电容器C_2再次给它们提供了旁路，这样流向负载的电流就是很接近稳定直流的电流了.

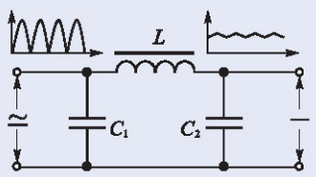


图2-5-3　Π形滤波电路

图2-5-4所示是电视机中图像信号放大电路中的一部分，前级输出的信号中，直流成分通过电阻R，交流信号通过电容器C，但电阻既能通过直流，也能通过交流，会有一些交流信号通过电阻R损失掉，在R上方串联上一个高频扼流圈L，使得高频成分难以从R上通过，这样后级的信号中高频成分就会更丰富，因此L称为高频补偿电感.

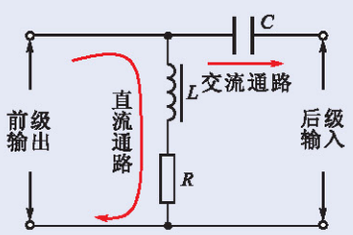


图2-5-4　电视图像放大电路(部分)

此外，无线电发射和接收技术中还用电感L和电容C组成LC振荡电路. LC振荡电路是一种有着广泛应用的基础电路.

6 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

变压器(transformer)包括三个基本组成部分：一个铁芯及两组线圈. 常用的电力变压器和一般低频变压器的铁

微信公众号：电子课本大全

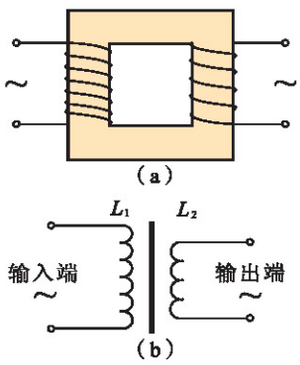


图 2-6-1 变压器模型与符号

芯都是由涂有绝缘漆的硅钢片叠合成闭合的形状. 两组线圈中的一组与电源相连，称为**原线圈**（primary coil），也叫初级线圈；另一组接负载，称为**副线圈**（secondary coil），也叫次级线圈. 图 2-6-1（a）是变压器的模型示意图，在电路中它的符号如图（b）所示.

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通量，交变的磁通量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. 当副线圈闭合时，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.

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

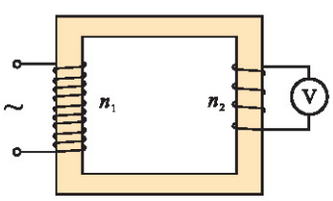


图 2-6-2

器材：可拆变压器、学生电源、交流电表.

实验步骤：在变压器原线圈输入 4～8 V 的交流电压，在副线圈接上交流电压表，如图 2-6-2 所示. 先保持原线圈匝数不变，改变副线圈的匝数，观察电压表的示数；再保持副线圈匝数不变，改变原线圈的匝数；观察电压表的示数. 在原线圈两端输入不同的电压多做几次.

将实验数据填入下表中.



图 2-6-3 可拆变压器

次数	n_1/匝	n_2/匝	$\frac{n_1}{n_2}$	U_1/V	U_2/V	$\frac{U_1}{U_2}$
1						
2						
3						

分析表中的数据你能得出 $\frac{U_1}{U_2}=\frac{n_1}{n_2}$ 的关系吗?

注意：

1. 连接电路后，要由同组同学分别独立检查，再请老师确认，方可接通电源.

2. 使用交流电压表测定副线圈的电压时，先用最大量程挡位试测，确定电压的大致数值后，再选用适当的挡位进行测量.

微信公众号：电子课本大全

实际的变压器的情况比较复杂，我们只讨论在忽略漏磁（认为原、副线圈电流产生磁场的磁感线都集中在铁芯内），忽略原、副线圈的电阻及变压器本身其他一切能量损耗的理想情况下，变压器原、副线圈两端的电压和匝数的关系.

理论和实验都表明，理想变压器的原、副线圈电压和匝数有以下关系：

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

即理想变压器原、副线圈两端的电压跟它们的匝数成正比.

从上式可知，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，这种变压器叫降压变压器.

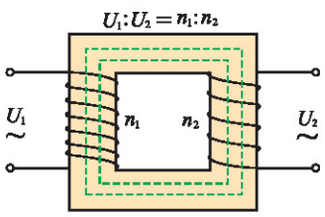


图 2-6-4　理想变压器中，原、副线圈电流产生的磁场的磁感线都集中在铁芯内，且没有能量损耗

电流与匝数的关系

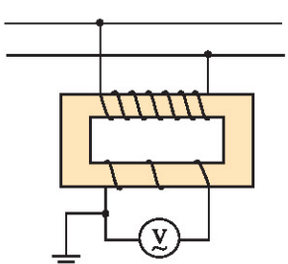
在理想情况下，因为变压器本身不消耗能量，时间 t 内从输入端输入的电能应该等于从输出端输出的电能，即

$$I_1U_1t=I_2U_2t$$

根据上述电压与匝数的关系可知，当变压器在额定负载运行时，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

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

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，而匝数较少的线圈则使用较粗的导线绕制.



（a）原理图

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，它也是一种变压器，常用的有电压互感器和电流互感器.

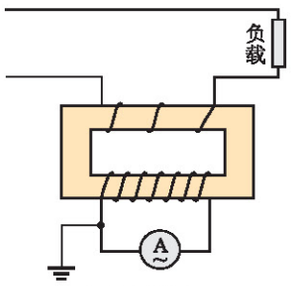
电压互感器是一种降压变压器，它的初级并联在高压交流线路上，次级则与交流电压表相连，如图 2-6-5（a）所示. 由于它的原、副线圈的匝数比是已知的，因此输入电压



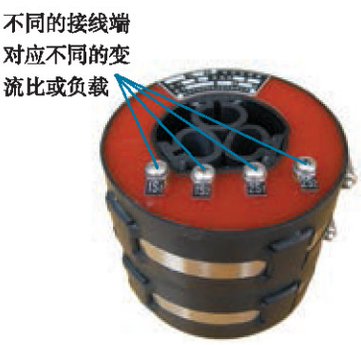
（b）实物图

图 2-6-5　电压互感器

微信公众号：电子课本大全



（a）原理图



（b）实物图

图 2-6-6　电流互感器

U_1 与次级输出电压 U_2 之比也是已知的（$U_1 : U_2 = k$，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，就可以算出高压线的电压值.

为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，必须确保副线圈接地.

电流互感器的主要作用是把大电流变成小电流，它是一种升压变压器，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 2-6-6（a）所示. 电流互感器的铭牌上都标明变流比（$I_1 : I_2 = k$），只要读出交流电流表的示数，再根据变流比就可以算出通过负载的电流值.

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允许副线圈开路，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.

练习与评价

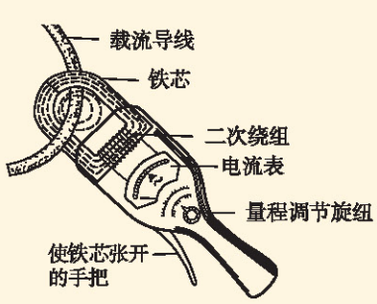
1. 一台电子仪器使用的电源变压器，初级接 220 V 交流电源，输出电压为 17 V，已知初级线圈共 3 100 匝，求次级线圈的匝数.

2. 变压器电压较高的线圈所用的导线较细，电压较低的线圈所用的导线较粗，这是为什么？

3. 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？

4. 变压器初级线圈接在交流电源上，如果次级线圈不接负载，这时的初级线圈可以看做一个纯电感，通过初级线圈的电流是否为零？如果不为零，电流大小由哪些因素决定？

5. 钳形电流表是一种测量交流电流的仪表，其结构和外形如图 2-6-7 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 2-6-7　钳形电流表

微信公众号：电子课本大全

发展空间

课外阅览

关于理想变压器的电压与匝数关系的理论探究

如图 2-6-4 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，通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（$\frac{\Delta\Phi}{\Delta t}$）也是相等的，每匝线圈产生的感应电动势 $E_0=\frac{\Delta\Phi}{\Delta t}$ 也都相等，则原、副线圈产生的感应电动势分别为

$$E_1=n_1E_0$$
$$E_2=n_2E_0$$

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.

$$U_1=E_1$$
$$U_2=E_2$$

由此可得

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

在理想情况下. 变压器原、副线圈两端的电压跟它们的匝数成正比.

理想变压器与变压器的损耗

理想变压器是一种理想化模型，一方面它忽略了漏磁现象，认为初级线圈和次级线圈中的电流产生的磁场的磁感线都在铁芯内，没有从铁芯外穿过而闭合的情况. 在这种情况下，穿过每一匝线圈（不论是初级线圈还是次级线圈）的磁通量的变化率都相等，从而可以得出各线圈的感应电动势跟线圈的匝数成正比的结论. 另一方面它忽略了变压器的各种损耗，只有这样，才能得出线圈两端电压跟它的感应电动势大小相等的结论.

实际变压器都是有损耗的. 变压器的损耗可以分成铜损和铁损两类. 铜损指的是绕制线圈的导线电阻所造成的损耗，铁损则指铁芯所造成的损耗. 减少铜损的主要措施是减小导线的电阻，例如使用电阻率较小的材料制作导线、适当增大导线的横截面积等. 铁损又可分为两部分，一部分是“涡流损耗”，指的是由于铁芯中涡流的存在而生热造成的能量损耗. 为了减少涡流损耗，变压器的铁芯不用整块软铁制作，而是使用厚度为 0.35 ~ 0.5 mm 的硅钢片涂上绝缘漆后叠合而成，这样涡电流被限制在狭小的范围内流动，电阻大大增加，涡流则减小很多，从而涡流损耗大大降低. 另一部分铁损称为“磁滞损耗”，这是由于铁芯在反复磁化的过程中，其内部物质微粒因发生“内摩擦”而造成的损耗，减小磁滞损耗的措施主要是使用磁滞损耗较小的材料制作铁芯.

交变电流的频率越高，铁芯中磁场变化就越快，铁损也就越大. 在高频变压器中，往往使用铁氧体作铁芯，这是因为铁氧体的电阻率更大，而且磁滞也可以很小.

根据能量守恒，实际变压器的输出功率等于其输入功率减去损耗的功率，其输出功率跟输入功率的比值，称为变压器的效率. 大型电力变压器的效率都很高，可达 99% 甚至更高，但小型变压器的效率则要低很多.

微信公众号：电子课本大全

7 电能的输送



图 2-7-1 通过大规模铺设输电线网，实现“西电东输”

发电站中的发电机能把天然存在的能量资源（水能、化学能等）转化成电能. 为了方便利用这些资源，发电站要建在靠近这些资源的地方，而用电的地方却分布很广，有的地方离发电站很远很远. 例如，我国西部地区有丰富的水力资源，而用电集中地区却大部分分布在东南沿海和工业发达地区，“西电东输”工程建有很多条远距离输电线路，将从西部地区发出的电能源源不断地输送到东部地区.

把电能从发电站输送到用电地点，往往需要经过很长的路途，由于输电导线内电流的热效应，必然有一部分电能转化成内能，导线越长损失的电能就越多，因此远距离输电必须考虑如何减少输电过程中的能量损失问题.

● 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少输电线上的能量损耗？

2. 远距离输电过程中，输电线加在负载两端的电压与输电线两端的电压是否相等？哪些因素影响这两个电压的差值？

如图 2-7-2 所示，由于导线自身存在着电阻 r，导致输电过程中存在着电压损失 $U_{损}$，$U_{损}=Ir$.

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

微信公众号：电子课本大全

率损耗 $P_{损}=I^2r$．可以看出，无论是电压损失 $U_{损}$还是功率损耗$P_{损}$，都和输电线的电阻r及电流I有关，其中电能损耗$P_{损}$受电流I的影响更为显著．故输电线路应力求电阻r及电流I尽可能的小．

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为材料，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，所以要减小电阻r，只能通过增大导线的横截面积S来实现．例如，将10 000 kW的电能输送到10 km以外的地方，若用220V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1 200 000 mm²，显然这样的导线太粗了！倘若真是采用这样的导线架设电路，一方面多耗费材料，另一方面也将给架设施工带来难度．

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 mm²就可以了．

因此，无论是从减小电压损失还是从减少能量损耗来讲，都要求使用高电压送电．

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费用也越高．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，选用适合的输电电压及相应的设计方案．

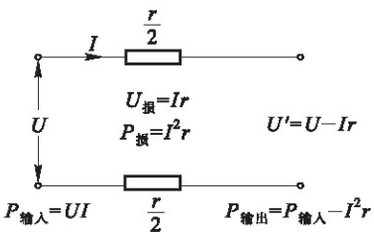


图 2-7-2

对于交流电来说，造成电压损失的原因除了电阻以外，还有电感和电容．交流电通过输电线时，要产生阻碍电流通过的自感电动势，它也是造成电压损失的原因之一．输电线与大地是绝缘的两个导体，构成电容器（即分布电容），交流电通过输电线时，这个电容也会造成电压损失．感抗和容抗统称为电抗，在高压输电线路上，电抗，特别是容抗造成的电压损失比电阻造成的电压损失还要大．要减小电抗造成的电压损失，只能用减小电流的方法．

● 远距离输电系统

目前世界各国都采用电网供电，还有些国家组成了跨国的地区性电网．图2-7-3是远距离输电的示意图．大型交流发电机发出的电压一般不适合远距离输电，因此要求在发电站附近，经变压器把电压升高到220 kV或更高的超高

微信公众号：电子课本大全

压，用输电线输送到远方．在用电集中地附近，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电压（380 V/220 V），分送到不同的用户使用．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．

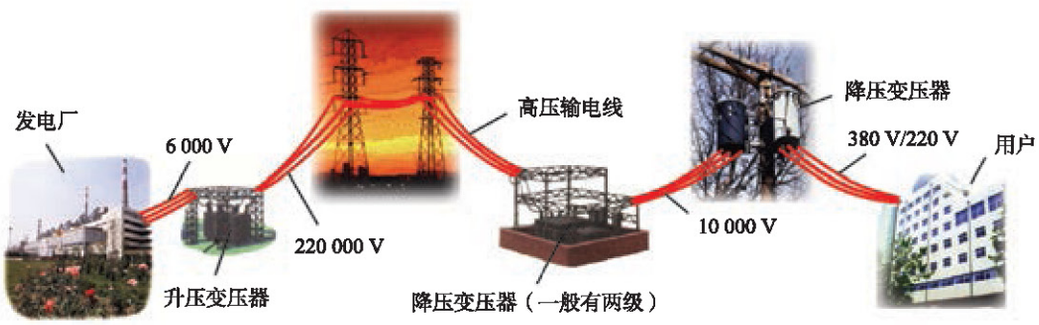


图 2-7-3　交流供电系统示意图

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10万千瓦以上、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．我国最高的超高压输电线路电压为 500 kV，世界上最高的输电电压已达 1 150 kV．

【例题】某小型发电站的发电机输出交流电压为500 V，输出电功率为 50 kW，如果用电阻为 3 Ω 的输电线向远处用户送电，这时用户获得的电压和电功率是多少？若要求输电线上损失的电功率是输电功率的 0.6%，则发电站要安装一个升压变压器，到达用户前再用降压变压器变为220 V供用户使用，不考虑变压器的能量损失，这两个变压器原、副线圈的匝数比各是多少？

【解】用 500 V 电压送电时示意图如图 2-7-4 所示，输电功率为 50 kW 时输电线上的电流

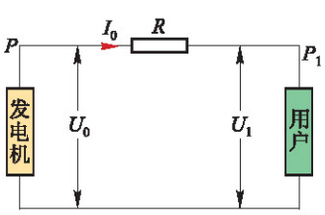


图 2-7-4

$$I_0 = \frac{P}{U_0} = \frac{50 \times 10^3}{500}\ \text{A} = 100\ \text{A}.$$

用户获得电压 $U_1 = U_0 - I_0R =$（500−100 × 3）V = 200 V，因此用户获得的功率 $P_1 = I_0U_1 = 2 \times 10^4$ W．

微信公众号：电子课本大全

改用高压输送时，示意图如图 2-7-5 所示.

要求 $P_{损}=0.6\% \times P$，即 $P_{损}=50 \times 10^3 \times 0.6\%\ \mathrm{W}=300\ \mathrm{W}$.

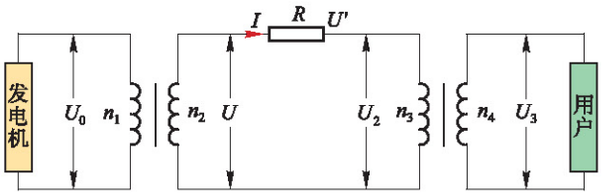


图 2-7-5

输电电流 $I=\sqrt{\dfrac{P_{损}}{R}}=\sqrt{\dfrac{300}{3}}\ \mathrm{A}=10\ \mathrm{A}$.

发电站升压后输电电压 $U=\dfrac{P}{I}=\dfrac{50\times10^3}{10}\ \mathrm{V}=5\,000\ \mathrm{V}$.

升压变压器匝数比 $\dfrac{n_1}{n_2}=\dfrac{U_0}{U}=\dfrac{500}{5\,000}=\dfrac{1}{10}$.

输电线上损失的电压 $U'=IR=10\times3\ \mathrm{V}=30\ \mathrm{V}$.

到达用户输入变压器电压

$U_2=U-U'=(5\,000-30)\ \mathrm{V}=4\,970\ \mathrm{V}$.

故降压变压器的匝数比 $\dfrac{n_3}{n_4}=\dfrac{U_2}{U_3}=\dfrac{4\,970}{220}=\dfrac{497}{22}$.

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、技术上的优势日益突显，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）.

微信公众号：电子课本大全

发展空间

物理在线

我国的高压直流输电

直流高压输电在我国尚处于起步阶段. 我国第一条超高压直流远距离输电线路于1990年8月建成投产，超高压直流输电线的始端起于离葛洲坝下游3.5 km的葛洲坝换流站，终点为上海附近的南桥换流站，全长1 052 km，电压等级为±500 kV.

我国三峡水利枢纽工程正在建设之中，建成后的三峡发电站将安装26台70万千瓦机组，装机总量达到1 820万千瓦，平均年发电量将达到847亿千瓦时，与其配套的还要建500 kV交流输电线路60条，±500 kV直流输电线路3条，这三条高压直流输电线路都起自三峡电站（在长江两岸不同的地点分别建三个换流站），终端则分别是江苏常州、上海和广东惠州. 待三峡工程以及整个工程完工，我国的电力供应状况将得到很大的改善.

这种直流输电方式，只是在中间的高压输电过程使用直流电，而在两头，即发电和用电都仍然是使用交流电. 其好处是大大减小了长距离输电过程中的损耗，并有利于解决互相连接过程中的问题，不足之处是目前换流设备（包括整流设备和逆变设备）的制造和维护都有一定的难度，费用也比较高，还有待进一步地研究解决. 相信今后直流输电技术必将不断提高，应用范围也会更加广泛.

如果你对我国的高压直流输电感兴趣，请通过因特网查询有关我国电力工业的发展情况.

本章小结

1. **交流电的产生及描述** 线圈在匀强磁场中匀速转动，可以产生按正弦规律变化的电动势，它随时间变化的规律是 $e=E_m\sin\frac{2\pi t}{T}$，式中 E_m 是电动势 e 的最大值，T 是周期.

周期 T 与频率 f 都是表示交流电变化快慢的物理量，两者的关系是 $T=\frac{1}{f}$.

2. **交流电的有效值** 有效值是常用来表示交流电大小的物理量，正弦交流电的电压和电流的有效值 U 和 I 与相应的峰值 U_m 和 I_m 间的关系为

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

3. **电容和电感对交流电的阻碍作用** 电容和电感对交流电都有阻碍作用，分别称为容抗和感抗，统称电抗. 电抗与电阻的不同，主要表现在与交流电的频率的关系上，电容是“通交流、隔直流，频率越高，阻碍越小”，而电感则相反，是“通直流、阻交流，频率越高，阻碍越大”.

4. **理想变压器** 变压器是能改变交流电电压的设备，它由闭合铁芯和原、副线圈构成.

微信公众号：电子课本大全

理想变压器两边的电压跟线圈的匝数成正比，即

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

理想变压器在额定负载情况下，原、副线圈的电流跟线圈的匝数成反比，即

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

5. 远距离输电　远距离输电过程中，在导线上有能量的损耗，还有电压损失，为有效地减少这些损耗，需采用高电压输电.

习　题

1．一个线圈在匀强磁场中匀速转动，转动轴方向与磁场方向垂直．下面的说法中正确的是（　　）.

A．穿过线圈的磁通量最大的时刻，磁通量变化最快

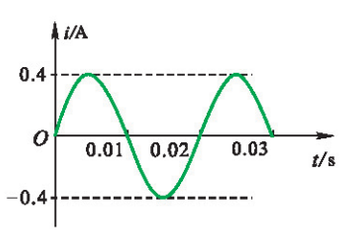
B．穿过线圈的磁通量最大的时刻，感应电动势最大

C．穿过线圈的磁通量变化最快的时刻，感应电动势最大

D．穿过线圈的磁通量为零的时刻，感应电动势为零

2．我国家庭用的交流电电压为 $u = 311\sin 100\pi t$ V，用交流电压表测出它的电压是多少？频率和周期各是多少？

3．如图所示是通过某用电器的电流图像，从图像可以看出通过该用电器的电流有效值为_____A，该交流电的频率是_____Hz.



（第 3 题图）

4．感抗和容抗统称电抗，电抗与电阻最大的不同是，电阻的大小跟交流电的频率无关，而电抗的大小则跟频率有关．交流电的频率越高，电容器的容抗越_____；电感器的感抗越_____.

5．有两个电感线圈，甲的匝数较多，而且有铁芯，乙没有铁芯，而且匝数较少．在电路中用作高频扼流圈的应是_____，用作低频扼流圈的应是_____.

6．有两个电容器，甲的电容是 10 μF，乙的电容是 50 pF．在电子线路中，用来传输高频信号的应是_____，用来传输低频信号的应是_____.

7．在把交流电经过单向导电器件整流成为直流电的电路中，为了滤去残余的交流成分，应在输出端并联“滤波电容”，用做滤波电容的电容器应选用电容量较大的还是较小的？为什么？

8．一个变压器，如果次级线圈两端不接负载，称为空载．在空载的情况下，通过与电源相连的初级线圈的电流是否等于零？如果不等于零，它的大小跟哪些因素有关？

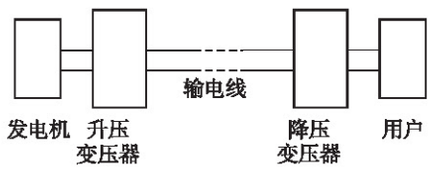
微信公众号：电子课本大全

9. 修理汽车使用的移动电灯的电压不能超过36 V，现有一个工人使用的灯泡标有“36 V 100 W”字样，通过一个变压器把 220 V 照明用电降压后给它供电.

（1）写出灯泡两端电压的瞬时值的表达式.

（2）已知它使用的变压器的次级线圈绕了 198 匝，初级线圈有多少匝？

10. 远距离输电线路的示意图如图所示. 若发电机的输出电压不变，则下列叙述正确的是（　　）.



（第 10 题图）

A. 升压变压器原线圈中的电流与用户用电设备消耗的功率无关

B. 输电线的电流只由升压变压器原副线圈的匝数比决定

C. 当用户用电器的总电阻减少时，输电线上损失的功率增大

D. 升压变压器的输出电压等于降压变压器的输入电压

微信公众号：电子课本大全

第三章 传感器

- 传感器
- 温度传感器和光传感器
- 生活中的传感器
- 简单的光控和温控电路（选学）

你知道机器也有“看”、“听”、“嗅”、“摸”的本领吗？是什么使机器具有这种本领呢？在自动化控制、遥控等现代技术中，是谁充当了机器的感觉器官？本章内容会帮你解开这些谜团.



微信公众号：电子课本大全

1 传感器



图 3-1-1 自动门

当你走进一座大楼时，大堂的自动门会因为“看到”你的出现而自动打开，幽暗楼道内的电灯会因为“听到”你的脚步声而自动发光.

有一种红外体温计，可以不接触人体，自动而且快速地测量人的体温. 公共场所的洗手间为了节约用水和避免病菌传染，安装了自动感应水龙头，人们只要把手伸到龙头下方，水就会自动流出来，拿开手水龙头会自动关闭.

电冰箱不时地接通、切断致冷电机，不仅可以自动保持冷冻室和冷藏室温度的稳定，还可节省电能.

汽车驾驶座前，各种仪表指示着水温、油量、车速；当车辆前端受到撞击时，安全气囊打开，可以保护人的身体免受伤害.

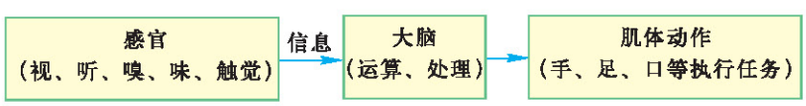
宇宙飞船返回着地前，在一定高度上会自动打开降落伞.

这一切都是如此美好，尽如人意！而这一切又是怎样实现的呢？它们都离不开一种探测装置——传感器.

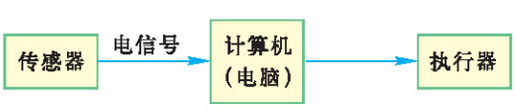
传感器

传感器（sensor）有时又被称做检测器、探测器或变换器. 在智能化的机器中，它相当于人的眼、耳、鼻、舌或手指等感官，给机器提供一些必要的信息. 通过下面两幅图表对比可以说明传感器的作用.

人的体力劳动：



自动化（智能化）机器工作：



传感器通常是把被测的非电信息，按一定规律转换成与之对应的电信息的器件或装置.

微信公众号：电子课本大全

在前面的举例中，自动门前装有光传感器，它能把接收到的光信息，转变成相应的电学量，从而去控制大门的开启和关闭；声传感器能把声转变成控制开灯的电学量；红外体温计把人体辐射的红外线的变化，转换成随体温变化的电学量.

传感器有一定的结构，一般由敏感元件和处理电路组成. 如图 3-1-2 所示.



图 3-1-2　传感器的结构框图

传感器各部分作用如下：

敏感元件　常见的敏感元件如力敏元件、光敏元件、热敏元件、磁敏元件、气敏元件等，它们能直接感受非电信息，如压力、光照、温度、磁场、气体等，并将这些信息变换成易于测量的物理量，形成电信号.

处理电路　由于敏感元件输出的信号幅度很小，而且容易混有干扰信息，不能直接用于控制. 通常设计了一类电路，把微小的信号进行放大，并除去干扰信号，使敏感元件输出的电信号转变成便于显示、记录、处理和控制的电学量（如电压、电流和频率等），这类电路就称为处理电路.

敏感元件的原理

敏感元件品种繁多，就其感知外界信息的原理而言，可分为如下几类.（1）物理类：基于力、热、光、电磁和声等物理效应；（2）化学类：基于化学反应的原理；（3）生物类：基于酶、抗体和激素等分子识别功能.

大多数传感器是以物理学中的各种效应和规律为基础工作的. 让我们通过实验，感受敏感元件是怎样把非电学量转变为电学量的.

实验探究

半导体热敏电阻的热敏特性

按照图 3-1-3 所示，将半导体热敏电阻连入电路中，多用电表的选择开关置于欧姆挡，把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，在欧姆挡上选择适当的倍率，观察热敏电阻

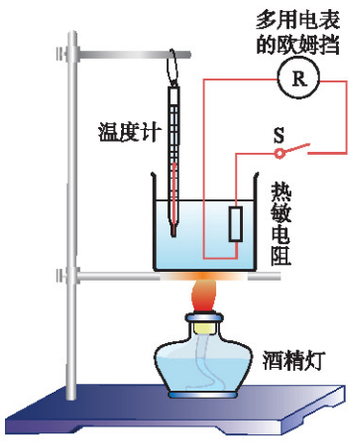


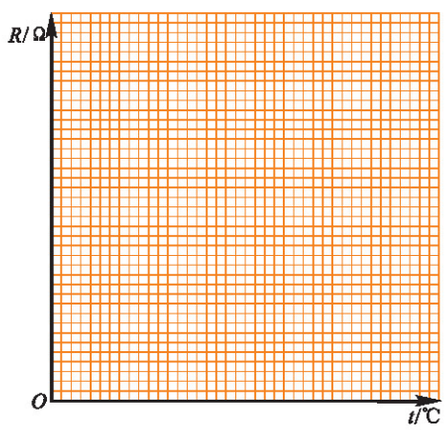
图 3-1-3

微信公众号：电子课本大全

的阻值. 然后分几次向烧杯中倒入少量热水，观察不同温度下热敏电阻的阻值.

根据实验所采用的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，把观测数据填入下表中，并画出电阻随温度变化的曲线. 分析你用的热敏电阻随着温度的升高，电阻值是变大了还是变小了.

次数	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
温度 t/℃										
电阻 R/ Ω										



结果分析：_____

_____

热敏电阻是用半导体材料制成的，它具有电阻随温度灵敏变化的特性，可以实现对温度的测量. 它是温度传感器的一个重要组成部分.

观察思考

如图3-1-4所示连接电路. 把磁铁靠近或远离干簧管，观察电路中所发生的现象. 你认为干簧管起了什么作用?

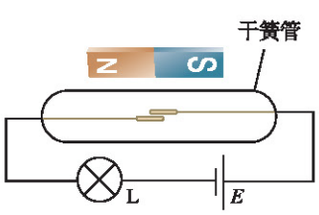


图 3-1-4 干簧管

干簧管是一种能感知磁场的敏感元件. 它由密封在玻璃管内的两个铁磁体簧片（通常是铁镍合金）构成. 玻璃管中通常充有氮气或惰性气体，也有的是真空的. 两个簧片相互交叠但其间保持一个缝隙. 簧片在磁场的作用下会磁化为异名磁极相对的磁铁. 当磁力大于簧片的弹力时，两者紧密地接触. 因此，干簧管串联在电路中就成为一个由磁场控制的开关.

微信公众号：电子课本大全

练习与评价

1. 什么叫传感器？它是由哪几部分组成的，各部分有什么作用？

2. 查阅有关资料，了解动圈式话筒的工作原理.

3. 图 3-1-5 是电容式液位计的原理图. 把一个圆柱形的金属电极用绝缘材料包裹起来作为探头，插入导电液体表面，导电的液体构成另一电极，用这样的装置，就能测量液面的高低. 图 3-1-6 是电容式话筒的原理图，膜片与固定电极构成一个电容器，用直流电源充电，当声波使膜片振动时，电容发生变化，电路中可以形成变化的电流，于是电阻 R 两端就输出了与声音变化规律相同的电压. 试分析这两个敏感元件的工作原理，它们改变电容的方式有何区别？

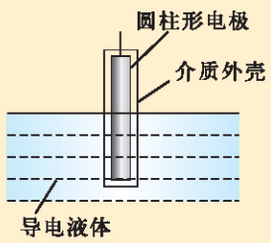


图 3-1-5　电容式液位计

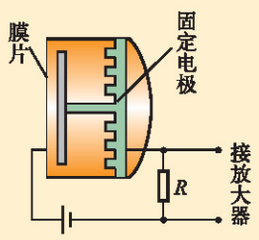


图 3-1-6　电容式话筒

2 温度传感器和光传感器

由于被测量的非电信息形形色色，所以人们不断创造出种类繁多的传感器，温度传感器和光传感器是最常用的两种传感器.

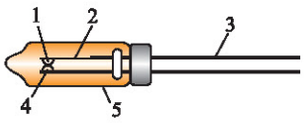
温度传感器

温度传感器中使用感温的敏感元件品种很多，例如热电偶、热双金属片、热电阻和热敏电阻等. 下面我们以热双金属片、热电阻和热敏电阻为例介绍几种温度传感器.

1. 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，在升高相同温度时，膨胀程度也不同，通常用“膨胀系数”表明材料的这种性质. 将两种膨胀系数相差较大的不同金属片焊

微信公众号：电子课本大全



1. 动触点　2. 双金属片　3. 引线
4. 静触点　5. 铅玻璃套

图 3-2-1　双金属热保护器结构示意图

小资料

固体膨胀系数

在压力不变的条件下，由于温度改变造成固体、液体或气体发生长度或体积变化的现象称为热膨胀．热膨胀的程度用膨胀系数表示，也常称为“热膨胀系数”．

固体的膨胀系数可以按体积、面积或长度（线度）的三种变化分别加以定义．线膨胀系数定义为温度每升高1℃单位长度固体的伸长量．

$$\alpha=\frac{1}{L}\left(\frac{\Delta L}{\Delta t}\right)_p$$

其中，下标p的意思是保持压强不变．按这个定义可以知道，一段在0 ℃长度为L_0的固体，当温度为t时，长度为

$$L'=L_0(1+\alpha t)$$

接或轧制成为一体后，温度升高时，由于两面金属膨胀程度不同，双金属片就会变形，因此热双金属片可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，可以用它来控制电路的通断，所以也常常用在温度控制装置中．例如日光灯启动器中的U形双金属片，就是热双金属片热敏性能的一种应用．

双金属热保护器是一种保护电机的温度传感器．它是一个封装起来的热双金属片，结构如图3-2-1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，对电机进行了保护．许多冰箱压缩机就是用这种装置进行保护的．

表 3-2-1　一些金属在室温条件下的线膨胀系数 $\alpha/10^{-6}$ ℃$^{-1}$

铝	金	银	铜	黄铜	钨	铁	铂
25	14.2	19	16.6	18～19	4.5	12.0	9.0

2. 热电阻传感器

用金属丝制作的感温电阻叫做热电阻．金属的电阻R与温度t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值的范围在$(3\sim6)\times10^{-3}$ ℃$^{-1}$．热电阻作为传感器的敏感元件，要求性能稳定，可在较大的温度范围内工作，因此对材料的选择有一定的要求，一般选用线性好（温度系数稳定，不因温度而改变）、温度系数较大的、加工比较容易的材料．比如铂做热电阻，可以适用于−200 ℃～+900 ℃的范围；而铜做热电阻，则以价廉而且线性好为特长，只是高温时易氧化，因此适用于较低的温度（−50 ℃～+150 ℃）条件下．

热电阻传感器不仅在工业上广泛用于测温，还可以用来测量流体的流量．使用时给电阻通电加热，并置于流体的通道上，如果流体的流动较快则热电阻被降温较多，电阻变小，根据电阻测出流速，再由管道的横截面可得出流量．

3. 热敏电阻传感器

半导体热敏电阻是一种新型元件，它分两类，一类是随温度升高而电阻减小的热敏电阻，用NTC符号表示；另

微信公众号：电子课本大全

一类是随温度升高而电阻增大的热敏电阻，用PTC符号表示．在上节的实验探究中，我们已对其中的一类进行了热敏特性的测量．

半导体热敏电阻对温度变化的响应很敏感，所以其灵敏度比金属热电阻高得多，可以反映温度的微小变化，常用于测温、温度控制或过热保护．

测温用的热敏电阻传感器结构很简单，如果使用环境是干燥的，可以不加保护层，而经密封的热敏电阻不怕湿气侵蚀，可以用于任何环境，

有一种特殊的NTC热敏电阻，在某个特定温度附近时电阻急剧变化，适用于制成热保护开关．将开关型的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，当热敏电阻的周围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．



图 3-2-2　一些 NTC 热敏电阻．NTC是Negative Temperature Coefficient 的缩写，意思是“负的温度系数”，泛指电阻随温度升高而急剧减小的半导体材料或元器件

光传感器

光传感器是测量光信号的传感器．

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．这就相当于让机器长上眼睛，可以感知光线的变化或场景变换，并作出反应．

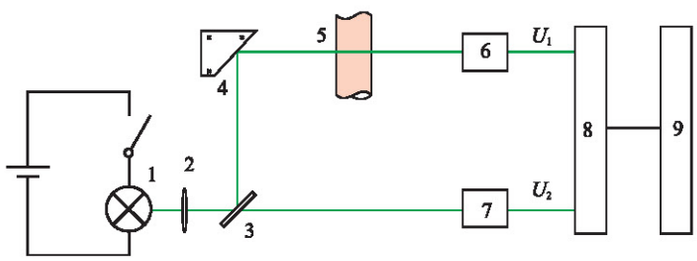
光传感器应用十分广泛，我们在研究物体运动时曾经使用的光电门，就是一种较为简单的应用．自动门和公共场所的非触摸式自动水龙头也是利用了红外光传感器．下面，我们介绍两种实用的光传感器．

在环境监测、火灾报警等装置中，通常靠监测烟尘浓度来工作．如图 3-2-3 为光电式烟尘浓度计原理图，光源 1 发出的光线经半透半反镜3，分成两束强度相等的光线．一路光线直接到达光电转换电路7上，产生作为被测烟尘浓度的参比信号．另一路光线经反射镜4穿过被测烟尘5到达光电转换电路 6 上，其中一部分光线被烟尘吸收或散射而衰减，烟尘浓度越高，光线的衰减量越大，到达光电转换电路6的光就越弱．两路光线分别转换成电压信号 U_1、U_2，如果 $U_1 = U_2$，说明被测的光路上没有烟尘；相反，如果 U_1、U_2 相

微信公众号：电子课本大全

差较大，说明烟尘较大. 因此可用两者之比，算出被测烟尘的浓度.

采用半透半反镜 3 及光电转换电路 7 作为参比通道的好处是：当光源的光强由于某种原因有所变化或因环境温度变化引起光电转换电路灵敏度发生改变时，都可造成电压的变化，这种并非被测信息造成的变化属于干扰，而在这个电路中，由于两个通道的结构完全一样，所以在最后运算 U_1/U_2 值时，上述干扰信号可自动抵消，减小了测量误差.

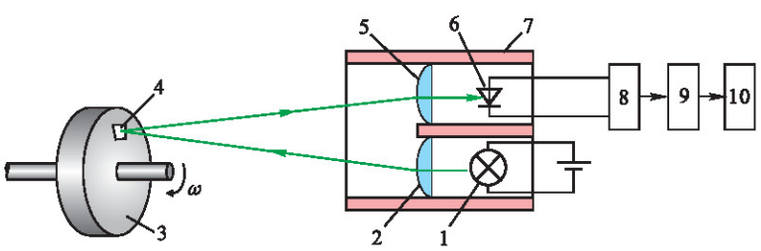


1. 光源　2. 聚光透镜　3. 半透半反镜　4. 反射镜　5. 被测烟尘
6、7. 光电转换电路　8. 运算电路　9. 显示器

图 3-2-3　光电式烟尘浓度计原理图

在工农业生产、交通运输等行业中经常需要进行机械转速的测量，目前较多地采用光电式转速表进行转数的测量. 光电式转速表测试装置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.

光电式转速表原理见图 3-2-4，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，接收的脉冲信号数量多少不同，经信号处理电路处理后，由显示器 10 显示出每分钟或每秒钟的转数即转速.



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

图 3-2-4　光电式转速表原理图



图 3-2-5　利用光敏二极管工作的光传感器实物图

微信公众号：电子课本大全

练习与评价

1. 热双金属片测温是利用了物质的什么性质？
2. 热电阻传感器是利用了物质的什么性质？
3. 半导体热敏电阻有几种？
4. 光作为一种非电信息，用什么方法能方便地转变成相应的电信息？
5. 人的眼睛是不是光敏元件？比较人眼与光传感器，说明结构上有何异同.

发展空间

小制作

利用温度传感器制作水开音乐告知器

下面介绍的水开音乐告知器，当水沸腾时能奏出一首动听的乐曲. 所用的材料易购易找，制作简单，使用方便，适合家庭使用.

1. 工作原理

图3-2-6为水开音乐告知器电路，感温开关SA的动触头（双金属片）受热时展开，当温度上升到一定值时，动触头与静触头接合，音乐集成块IC被触发，扬声器Y便发出乐曲.

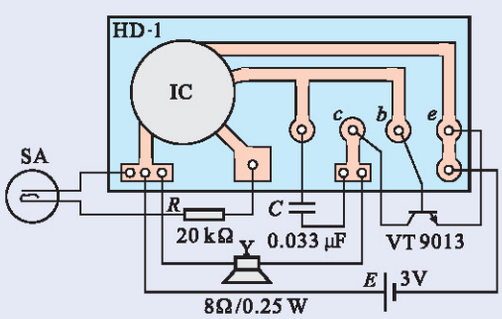


图 3-2-6　水开音乐告知器电路

2. 元件选择

（1）电阻 R 选择 20 kΩ.

（2）电容 C 选择 0.033 μF.

（3）VT 选用 9013 型晶体三极管.

（4）IC 选用 HD-1（或其他类型）音乐集成块.

（5）Y 选用“8 Ω　0.25 W”扬声器.

（6）感温开关 SA 用日光灯启动器来制作.

3. 制作与安装

（1）感温开关的制作：取出废旧日光灯启动器中的动静触片. 将它插入刚刚停止沸腾的水中，用镊子调整动静触片使两者刚好接触，然后取出吹干或烘干. 找一根废旧电视机或收音机的拉杆天线，将它全部拉出后，用钳子把第一节管的根部夹断，取出完整的第二节管作感温开关管. 找三个橡胶塞，把启动器的动静触片安装固定在管内（要密封），如图 3-2-7 所示.

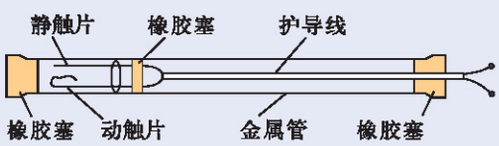


图 3-2-7　感温管结构

（2）安装方法：找一只外壳（如废旧门铃或袖珍收音机的外壳），将线路板和扬声器固定在其内部，感温管的一端插入并固定在外壳内，另一端（安装触片的一端）伸出外面.

4. 使用方法

烧水时，将感温管插入壶嘴内（入水部分不少于 70 mm）即可. 不用时要把感温管放在

微信公众号：电子课本大全

通风干燥的地方.

此电路静态时耗电很少，动态时耗电约为 80 mW.

课外阅览

CCD 图像传感器

伴随着数码相机、带有摄像头的手机等电子设备风靡全球，人类已经进入了全民数码影像的时代，每一个人都可以随时、随地、随意地用影像记录每一瞬间. 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，作用就像胶片一样，但它是把图像像素转换成数字信号. 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，能够引起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，将每一个点上因为光照而产生改变的大量电信号采集并且辨别出来，将光线照射导致的电信号变化转换成数字信号，使得其高效存储、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，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 图像传感器及相关设备.

物理在线

通过网络查询，了解除电阻效应和热膨胀效应之外，还有什么物理规律或物理性质可以应用于测温.

3 生活中的传感器

当今世界，传感器技术不仅广泛地应用在各种高科技和工农业生产领域中，而且应用于现代化家庭生活的方方面面，给人们带来越来越多的便利.

传感器在家用电器中的应用情况，见课后表 3-3-1. 其

微信公众号：电子课本大全

中使用最多的是温度传感器，其次是湿度、气体、光、磁、压力、烟雾、声敏等传感器．通过本节学习，同学们将对传感器在家用电器中的一些应用有初步的了解．

洗衣机中的传感器

洗衣机工作过程中，可以用适量的水，经过洗涤和漂洗等过程，清洁衣物，并甩去水分．要使洗衣机自动完成一系列过程，还要节电省水，不是件简单的事．目前，全自动洗衣机已实现了利用传感器和电脑技术对洗涤全过程进行检测和控制．近年流行的模糊洗衣机中的传感器，大致有以下几类．

（1）水位传感器：用来确定水位的高低和衣服吸水能力的大小．

（2）负载量传感器：用来检测洗涤物的多少．

（3）水温传感器：根据环境温度和水温，自动控制洗涤时间．

（4）布质传感器：通过自动感知衣服重量和吸水程度，感知衣服的质量，自动选择洗涤方式．

（5）洗涤粉传感器：测定洗涤粉的种类．

（6）脏污程度传感器：在洗衣桶的排水口处，有一红外光电传感器．使红外线通过水而进入另一侧的接收管，当水透明度低时，接收管获得的光能小，由此检测洗净度、漂净度．

（7）脱水（压电）传感器：从脱水桶喷射出来的水，作用到压电传感器上，可根据压力的变化，控制脱水动作．

这几个传感器收集到的信息，经微电脑综合推理判断后，便自动选择出最适当的水位、洗涤时间、洗涤动作以及洗涤温度等工作参数，并执行最佳的工作程序。

模糊洗衣机是“模糊家电”的一种．模糊家电就是揉入人们对家电使用的经验知识，并据此建立操作模式，在电脑的控制下可模仿人的思维作出操作判断的家用电器．其中操作模式的建立，利用了美国数学家扎德（La Zadeh）1965年提出的模糊集合理论，故而得名．

电冰箱中的传感器

电冰箱主要由制冷系统和控制系统两大部分组成，其中控制系统是用来保证电冰箱在各种使用条件下能够安全可靠地运行．控制系统主要包括：温度自动控制、除霜温度控制、过热及过电流保护等．在控制系统中，传感器起着非常重要的作用．

电冰箱运行时，由温度传感器组成的温控器按设定的冰箱温度自动接通和断开电路，控制制冷压缩机的启动与

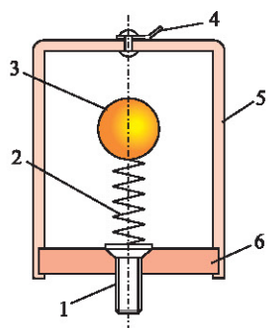
微信公众号：电子课本大全

负荷也叫“负载”，是动力（如电力）设备在运行时所产生、转换、消耗的功率. 例如发电机在运行时的负荷就是指当时所产生的功率为多少千瓦或千伏安数. 实际负荷与额定负荷相等时称为“满负荷”或“全负荷”；小于额定负荷时称为“低负荷”；超过额定负荷时则称为“过负荷”.

停止. 当给冰箱加热除霜时，由温度传感器组成的除霜温控器将会在除霜加热器达到一定温度时，自动断开加热器的电源，停止除霜加热. 当压缩机负荷过大、发生某些故障以及电压过低或过高不能正常启动时，都可能引起电动机电流的增大而烧坏电动机，这时过热及过电流保护装置会及时切断电源，对电动机实行保护.

家用报警器

居家生活中，煤气泄漏，会危及人身安全，需要加以防范. 我们可以利用气敏元件制作有害气体报警器和可燃气体报警器. 另外，家庭防盗也是居家安全的一项重要措施. 有一种敲击防盗报警器，它利用压电式传感器对门窗玻璃损毁产生反应，形成对报警装置的启动. 还有一种冲击防盗报警器，由冲击传感器和执行电路两部分组成. 冲击传感器的结构如图3-3-1所示. 在外壳的基板上固定一个螺栓，螺栓上有一个弹簧，弹簧的顶端焊有一个钢球，它们都是电的良导体，外壳也使用电的良导体制成. 在静止状态下，不论传感器置于何种状态，钢球和外壳呈断开状态不会导通，一旦传感器受到外力冲击，如砸、碰、撞、敲击、撬动时，则钢球受到扰动产生运动与外壳接通，便可触发执行电路，使报警装置开始工作.



1. 螺栓　2. 弹簧　3. 钢球
4. 焊片　5. 外壳　6. 绝缘基板

图3-3-1　冲击传感器的结构示意图

在我们的周围，到处都可以感受到传感器带来的好处. 电冰箱、洗衣机、微波炉、摄像机、煤气用具、电烤箱、防盗报警、消防感烟报警……许许多多的自动系统都采用了传感器，就更不要说现代交通工具汽车、火车、飞机……直至航天器和机器人了. 传感器用处太多太大了. 有种种传感器我们目前虽不能完全弄明白它的原理，但是我们已经享受了它给我们带来的许多便利.

传感器与人的感官

传感器不妨被认为是机器的感觉器官，我们不难把许多传感器与人的感觉器官对号入座.

光传感器和由它制成的录像头、监控探头，可以类比人的眼睛.

对有毒有害气体进行监控的化学和生物传感器，相当于人的鼻和舌等嗅觉、味觉器官.

微信公众号：电子课本大全

力学和振动传感器，以及温度传感器可以认为相当于人类的触觉器官，如手、足、皮肤等.

声传感器不妨认为是机器的耳朵.

有些传感器的测量内容，比如湿度、大气压，不是人体个别器官的功能，而是人的整体感觉所作出的判断.

当然也有一些传感器能承担人的感官所做不到的任务，比如在磁场、电场、超声、高温、低温和高压等环境中工作.

对于某些物理量的变化，如对电磁场及各种辐射等，人有时不知不觉，甚至在受到伤害时也无从察觉，而传感器却可以探测到. 可见传感器可以做得比人的感官更广泛、全面一些. 有一些探测工作，为了避免危及人的健康，尽管人类可以感知，但也尽量让传感器去做，以保护人类不受有害环境的伤害，比如对有害气体污染的探查.

另外，在有些探测活动中，传感器可以比人灵敏，或者可以报告更准确的结果，例如对温度、声、光等的探测传感器可以作出定量的报告；传感器可以全天候不间断地执行任务；传感器的反映是客观的，人的感受有时会受心理活动的干扰而作出不客观的判断. 比如，心情不同时人对冷、热的感觉会有不同；还比如瞳孔可以自动调节以适应环境，所以人眼对光亮度的感受也可以大不一样. 以上情况表明，传感器确实有“过人”之处.

但是，人也有人的优势. 由于人的感官与大脑紧密联系在一起，所以感知与分析判断是融为一体的，而且各种感官可以同时起作用，人作为一个整体，得到的是综合的信息，认识会更全面. 而且人可以联想到环境状况及历史情况，可以作出去伪存真的判断分析. 可见，综合与联想是人的优势.

另一方面，人脑的学习与记忆对感官能力也有影响. 比如一个老厨师对“火候”的掌握，经验使他可以把握得比年轻的初学者准确得多；熟练的炼钢工人仅用肉眼也可以判断炉温，绝不是老工人眼睛比年轻人亮，而是经验在起作用. 机器人可以尽可能多地吸纳人类的经验，但要真正达到人类的智能水平并不是件容易的事.

练习与评价

1. 你知道哪些家庭中最常用的传感器？统计你家中的传感器，说明它们为你的生活带来的方便.

2. 说说你最喜欢和最了解的家用传感器，写一篇文章与同学交流.

微信公众号：电子课本大全

发展空间

课外阅览

表 3-3-1 传感器在家用电器中的应用情况表

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									
彩色电视机				√		√			√						√
冰箱	√			√			√								√
洗衣机									√		√				√
室内空调机	√	√		√		√	√								
录像机				√		√	√		√	√		√		√	√
录音机				√						√		√		√	
食品加热器				√		√		√					√		
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				√					√						

4 简单的光控和温控电路（选学）

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，来实现如自动响铃、亮灯之类的动作？你可以选择下面的一个制作内容进行尝试，为了顺利地完成小制作，请阅读“小资料”.

微信公众号：电子课本大全

小资料

集成电路

集成电路又称IC，是在硅板上集合各种电子器件，实现某种特定功能的电路模块，它是电子设备中最重要的部分.

传感器中为了实现对信号的处理，需要一种放大器，M741就是一种具有放大功能的集成电路. 它的外观如图3-4-1所示，它有8个引脚，在电路图中用数字编号标出引脚的接法. 编号的规律是这样的：当我们将集成块引脚向下放在桌面上，可以看到它背上的字迹和标志. 在这个矩形的左下角有一个圆形凹点，该点下方为1号引脚，向右沿逆时针方向依次为2，3，4…直到1号脚的对面为8号为止.

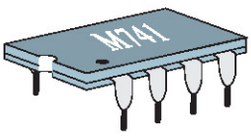


图3-4-1　集成电路块

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. 集成电路实验板（俗称“面包板”），它的外观如图3-4-2. 在表面的小孔下面，有可以夹持元件引线的弹性铜片夹. 这些铜片又被实验板背面的铜片按规律连通或相互绝缘. 连接的规律如图3-4-3，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. 除上下两行外，中间纵向各列的10个孔分为两组，上面5个连通，下面5个连通.

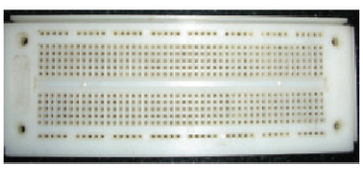


图3-4-2　集成电路实验板外观

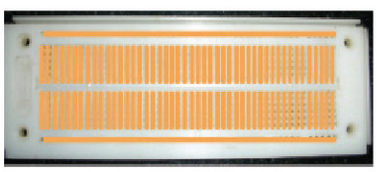


图3-4-3　集成电路实验板背面连接示意

光控自动照明电路

路灯晚上为我们照亮道路，天亮之后应当熄灭. 我们可以通过光线来实现自动控制，使电路在天亮时自动切断，天黑则自动导通. 电路原理图如图3-4-4所示（此电路中只用到“M741”的2，3，4，6，7这几个引脚），其中各元件参数如下.

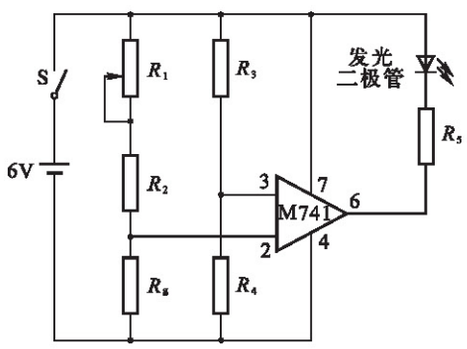


图3-4-4　光控自动照明电路

电位器 R_1：0~10 kΩ
电阻 R_2：14 kΩ
电阻 R_3：15 kΩ
电阻 R_4：15 kΩ
电阻 R_5：560 kΩ
光敏电阻 R_g

微信公众号：电子课本大全

按照图 3-4-4 连接电路，然后进行调试．调试的方法如下：将光敏电阻用黑纸包住使它不被光照亮，如果发光二极管不亮，则调节电位器R_1，直到发光二极管发光为止．然后将包裹光敏电阻的黑纸打开，看它是否熄灭，如果此时发光二极管不熄灭，则再调节电位器．反复使光敏电阻遮光或见光，直到可以实现发光二极管在光敏电阻有光照时熄灭，无光照时发光为止．此时发光二极管就相当于一个由环境明暗变化而自动控制的灯．

● 温控电熨斗

使用电熨斗时，必须控制电加热过程，以免过热损坏衣物．这就要求，电熨斗的温度低于指定值时电加热器供电加热，温度高于指定值时要将电源关闭．电路原理如图 3-4-5 所示，其中各元件参数大致与前面相同，所不同的只是调试的条件．请想一想，什么情况下应该让M741 将后面的电路接通，什么条件下应该把电路切断？电路中我们只是让讯响器（也叫声音警报器）发声代表电加热器通电．

比较电路图 3-4-4 和 3-4-5 可以看出，只要把光敏电阻R_g换成热敏电阻R_t，即可把光控电路改为温度控制的电路．同样的道理，我们还可以换用湿敏电阻实现湿度控制以制造电除湿设备，也可以换上光敏器件制成烟雾报警器用于防火监控或空气质量检测等．

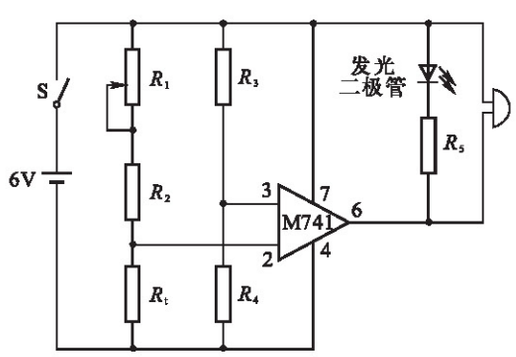


图 3-4-5　电熨斗的温控电路

微信公众号：电子课本大全

发展空间

走向社会

传感器应用情况调查

对生活、生产中用到传感器的情况作一个调查归纳，整理成调查报告．再选择你认为最主要、最有效益的一种作认真地分析，可以通过查找资料弄懂它的原理，调查并分析它的使用在技术、经济上带给人们的效益．

1．分组建议

（1）个人和家庭生活中的传感器．

（2）与交通运输相关的传感器．如道路、桥梁及交通工具（汽车、摩托车、轮船、飞机等），根据个人条件侧重某些方面进行调查、了解，可求助维护、修理人员．

（3）工业生产中的传感器应用，有条件找到自动化程度高的大工厂最好．

（4）参观当地科技馆．

（5）上网了解传感器的应用和原理等知识．

2．活动的开展方式

（1）制订计划，根据条件确定侧重点，准备调研．

（2）联系相关专业人士，约定活动日期．

（3）参观访问，收集资料，必要时到图书馆深入了解相关问题，做到至少了解一两种传感器的详细情况．

（4）个人整理成调研报告，并汇集成小组报告的形式．

（5）班内举行活动开展交流，除一般交流外，可推举重点报告人详细介绍．

小制作

用光敏电阻制作自动调光台灯

台灯的光线过强、过弱都会对人眼造成伤害．以下介绍的自动调光台灯是在普通调光台灯的基础上加装一光控电路，使其能根据周围环境照度（照度是描述被照面的照亮程度的物理量）自动调整台灯亮度．当环境照度较弱时，其亮度就大；当环境照度较强时，其亮度就小．该制作电路简单，适于自制．

1．工作原理．

自动调光台灯电路如图 3-5-6 所示．当开关 S_1 处于“手控”位置时，该台灯和普通调光台灯一样，双向可控硅 VS 的工作条件由 R_1、R_P 和 C 决定．调整 R_P 能改变 VS 的工作条件，从而调整台灯的亮度．当开关处于“光控”位置时，由 R_2 和光敏电阻 R_g 构成分压电路．当周围环境照度过低时，二极管 VD_1 右端电位升高，C 充电速度加快，灯泡 L 两端电压升高，亮度增强；反之，当周围环境照度变大则 R_g 阻值变小，灯泡两端电压降低，亮度减小，从

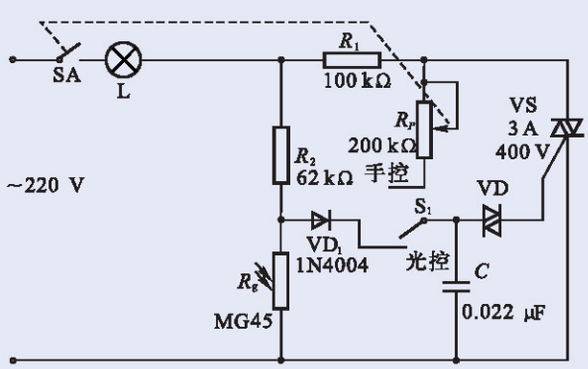


图 3-4-6　自动调光台灯电路图

微信公众号：电子课本大全

而完成自动调光功能.

2. 元件选择.

(1) 传感器 R_g 选用 MG45 光敏电阻.

(2) VS 选用 3 A/400 V 双向可控硅.

(3) VD_1 选用 1N4004 整流二极管.

(4) R_2 的取值应使台灯的开关 S_1 处在“光控”位置时，在黑暗环境里灯泡亮度适中.

(5) 其他元件如图标示，无特殊要求.

3. 制作与调试.

安装时应将光敏电阻 R_g 安装在台灯座侧后部，台灯光线照射不到的位置，以便其感受周围环境的照度. 开关 SA 装在台灯座的前端即可.

本电路简易，只要安装正确、元件无问题，不用调试即可正常工作.

课外阅览

1. 集成传感器

将传感器和各种信号处理电路制作在同一个芯片上，或封装在同一个壳内，就是集成传感器. 大规模集成电路技术的发展提供了这种可能性. 这种集成传感器有许多优点.

(1) 成本低. 完善的硅集成电路工艺可降低成本.

(2) 小型化. 多器件集中在一个芯片上，许多引线在芯片内连接，因此体积大为缩小.

(3) 性能提高. 因为附有温度补偿、信号放大等电路，而且集成度高，不易受环境干扰，所以性能大大提高.

(4) 外引线和焊点少，可靠性高.

(5) 增加接口灵活性，可根据需要在集成芯片内设计阻抗变换电路、电平变换电路等，以适应不同要求，便于同外电路连接，进行有效的传输.

(6) 功能强. 可以将多个同类传感器或多种不同类型传感器集成在一起，提高测量准确度、精确度. 还可以同时测多种参数并进行综合处理.

2. 智能传感器

这一概念来自宇宙航行的需要. 为了控制飞船和合理利用太阳能，就要了解飞船在太空的速度、姿态和位置等数据. 为了保证宇航员正常生活，还要控制舱内温度、气压、湿度、飞船运动加速度和空气成分等，再加上飞船执行科研实验任务和观察结果的需要等，飞船上需要大量的传感器. 如果传感器的信号都交给计算机处理，那对计算机要求太高，而飞船上不可能安装大型计算机. 因此，人们便设法使许多传感器不仅可以感知和传输，而且可以对信号进行必要的加工处理. 于是人们把一个或多个传感器和微型计算机制作在一块集成芯片上. 这样的传感器具有以下特殊功能.

(1) 传感器自身可以消除异常值和例外值，提供更全面、更真实的信息.

(2) 具有信号处理功能.

(3) 随机整定和自适应功能.

(4) 能有一定存储、识别和自诊断功能.

(5) 内含一些特定算法，并可根据需要改变.

机器人是靠自身动力和控制能力来实现各种功能的一种机器装置，它既可以接受人类指挥，又可以运行预先编排的程序，也可以根据以人工智能技术制定的原则纲领行动. 机器人

微信公众号：电子课本大全

是高级整合控制论、机械电子、计算机、材料和仿生学的产物，在工业、医学、农业、建筑业甚至军事等领域中均有重要用途.

表 3-4-1 机器人所用外界检测传感器的分类及应用

	感觉	检测内容	应用目的	传感器装置
视觉	明暗觉	光存在否，有无反射光，亮度	判断有无对象物体，检测通过的对象物体	光电管、光电晶体管、光电断流器
	色觉	物体或环境的色彩、颜色浓度	根据颜色识别物体，根据颜色选择作业	光电晶体管阵列，CCD图像传感器等
	位置觉	物体的平面位置、角度，到达物体的距离	物体空间位置，识别物体方向，检测物体移动	摄像管（光电摄像管、硅光导摄像管等）
	形状觉	物体的面、棱、顶点、二维形状、三维形状	提取物体轮廓，识别物体，提取物体固有特征	彩色TV摄像机、滤色器和彩色光电晶体管
触觉	接触觉	指尖和对象物体是否接触，接触位置，接触模型	决定位置，控制速度，探索和控制路径，识别物体姿态和形状，安全和异常停止	微型开关、光电传感器、针式接点、薄膜接点、电位计（触针）
	压觉	指尖和对象物的压力、握力、指面压力、压力分布	控制握力，测量物体弹性，对操作人员反馈，识别握持物体	压敏半导体、压电元件、导电橡胶、碳纤维应变针、感压高分子材料
	力觉	手腕、指尖、手指受到的力或转矩	控制作业力，限制作业，协调作业，控制手腕移动，伺服控制双向作用	应变针、负载单元、转矩检测器
	滑觉	在垂直于握持面方向物体的位移、旋转、由重力引起的变形	修正握力标准值，防止滑动，进行多层作业，测量物体的重量和表面特性	圆筒状光电旋转传感器、球形接点、旋转传感器、微型开关、振动检测器
接近觉		指尖和对象物体是否接近，接近距离，对象面的倾斜	控制位置，探索和控制路径，安全和异常停止	光传感器、超声波传感器、磁传感器、气压传感器
听觉		声音、超声波	语言控制（人机接口），移动控制	麦克风、超声波传感器
嗅觉		气体成分	化学成分探测	气体传感器、射线传感器
味觉		味道	化学成分探测	离子敏感器、pH计

在最近几年以及今后相当长一段时间内，人工智能材料和智能传感器的研究都是世人瞩目的科技领域. 虽然在人工智能材料及智能传感器的研究方面已向前迈出了重要一步，但是目前人们还不能随意地设计和创造人造思维系统，而只能处在实验室中开拓研究的初级阶段. 今后人工智能材料和智能传感器的研究内容主要集中在如下几个方面.

（1）利用微电子学，使传感器和微处理器结合在一起形成可实现各种功能的单片智能传感器，仍然是智能传感器的主要发展方向之一.

（2）微结构（智能结构）是今后智能传感器的重要发展方向之一.

微型技术是一个广泛的应用领域，它覆盖了微型制造、微型工程和微型系统等多种科学与多种微型结构. 微型结构是指在 1 μm～1 mm 范围内的产品，它超出了人们的视觉辨别能力. 在这样的范围内加工出微型机械或系统，不仅需要有关传统的硅平面技术的深厚知识，

微信公众号：电子课本大全

还需要对微切削加工、微制造、微机械、微电子四个领域的知识有一个全面的了解. 这四个领域是完成微型智能传感器系统设计的基本知识来源.

（3）利用生物工艺和纳米技术研制传感器功能材料，以此技术为基础研制分子和原子生物传感器是一门新兴学科，是21世纪的超前技术.

（4）完善智能器件原理和智能材料的设计方法，也将是今后几十年极其重要的课题.

本章小结

1. **传感器** 传感器是把外界的非电信息，按一定规律转换成与之对应的电信息的输出器件或装置. 它是利用以物理效应为主的各种效应来实现这种转换的. 一种效应通过巧妙构思，往往可以测量多种非电学量.

2. **温度传感器和光传感器** 温度传感器可以将温度高低用电信号表现出来，光传感器则可以将光的强弱及其变化用电信号表现出来，这两种传感器用途广泛，与我们的日常生活关系密切.

3. **传感器的应用** 无论农业、工业、交通运输还是日常生活中，传感器都得到了广泛应用. 例如环境监测、火灾报警、温度监控、自动照明等，都离不开各类传感器. 在与我们日常生活密切相关的家用电器中，也常常能见到传感器的身影.

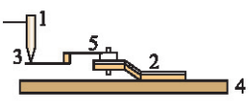
微信公众号：电子课本大全

习　题

1．各种温度传感器各有什么特点及用途？试举例说明．

2．铜电阻的阻值 R_t 与温度 t 的关系可用 $R_t = R_0(1+\alpha t)$ 表示．已知铜电阻的 R_0 为 50Ω，电阻温度系数 α 为 $4.28 \times 10^{-3}\,℃^{-1}$，求当温度为 100 ℃时的铜电阻值．

3．如图所示为一个电熨斗恒温调节控制装置示意图，试分析其工作原理，并回答：



1. 温控螺丝　2. 绝缘块
3. 电触头　4. 电熨斗底板
5. 双金属片

（第 3 题图）

（1）温度过高时，双金属片 5 左端会向___偏开．

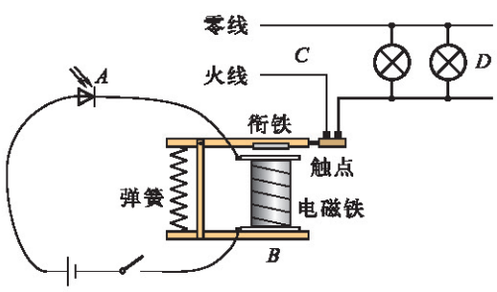
（2）需要熨烫耐高温的毛织品时，温控螺丝 1 要向___调节，而对于化纤材料，则要使 1 向____调节．（填“上”或“下”）

4．请举出几个例子说明光传感器的用途．

5．光敏二极管在各种自动化装置中有很多应用，街道的路灯自动控制开关就是其应用之一，图中所示为其模拟电路，其中 A 为光敏二极管，B 为电磁继电器，C 为照明电路，D 为路灯，试回答：

（1）在路灯自动控制电路中，光敏二极管的作用是_____．

（2）简述其“日出路灯熄，日落路灯亮”的工作原理．



（第 5 题图）

6．洗衣机中用哪些传感器？可分别检测出哪些量？

7．电冰箱中用哪些传感器来检测温度？

微信公众号：电子课本大全

附 录

中英文索引

（名词后面的数字是它第一次出现的页码）

B

变压器 transformer 47

C

传感器 sensor 60

D

电磁感应 electromagnetic induction 3
电磁阻尼 electromagnetic damping 27

F

法拉第电磁感应定律
Faraday law of electromagnetic induction 9
反电动势 back electromotive force 21
峰值 peak value 36
副线圈 secondary coil 48

G

感抗 inductive reactance 46
感应电动势
induction electromotive force 9
感应电流 induction current 3

L

楞次定律 Lenz law 14

P

频率 frequency 36

R

容抗 capacitive reactance 44

W

涡电流 eddy current 26

Y

右手定则 right-hand rule 13
有效值 effective value 37
原线圈 primary coil 48

Z

正弦交变电流 sinusoidal alternating current 33
自感 self-induction 23
自感电动势
self-induction electromotive force 23
自感系数 self-inductance 23
周期 period 36

微信公众号：电子课本大全