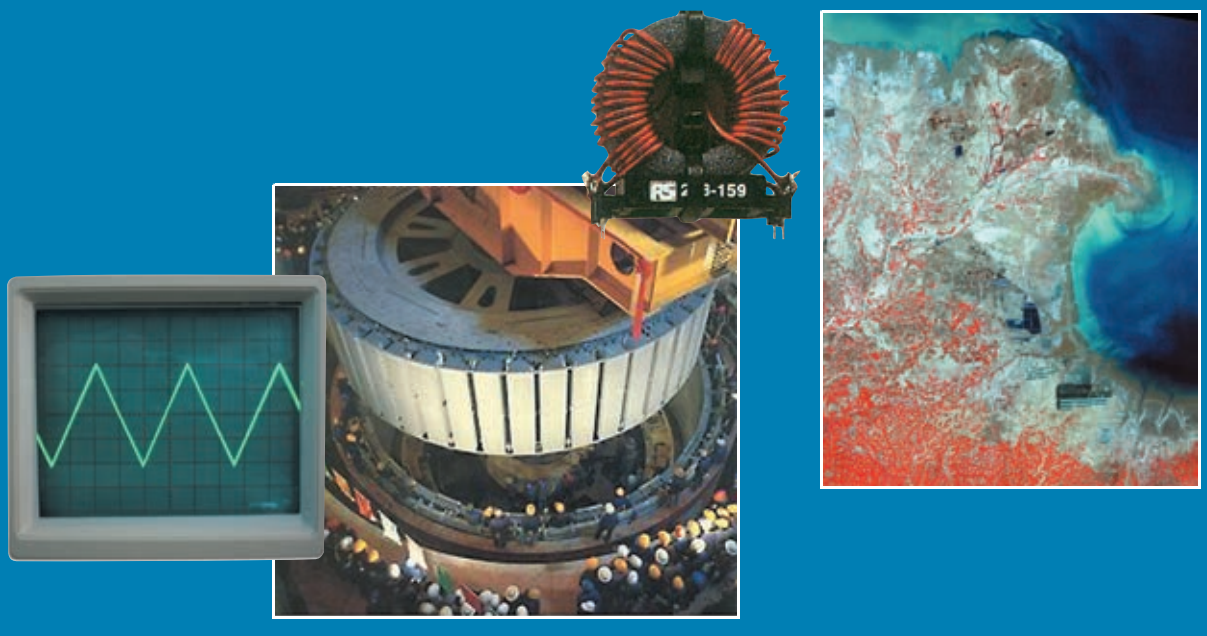
经全国中小学教材审定委员会 2004 年初审通过

普通高中课程标准实验教科书

物理 选修 3-2

PHYSICS

主编 束炳如 何润伟



上海科技教育出版社

亲爱的同学：

欢迎你选择学习《物理 3–2》！

从你打开物理课本起，你已经开始投身于一项激动人心的探索活动。让我们继续携手，度过这段美好的时光。

你周围发生的事情几乎都与物理学有关，文明社会的许多技术进步都源于对物理规律的理解和应用。学习物理可以使你从事科学事业的愿望得以实现，甚至可以使你成为“专家”。作为现代社会的公民，我们要学会用物理学知识解决生活、生产的许多问题。你将体会到物理学对人类文明社会进步的巨大影响。

你已经学习了《物理 1》和《物理 2》，又选学了《物理 3–1》，初步领略了物理学的魅力，基本了解了物理学的学习和研究方法。现在，你又跨进了《物理 3–2》的大门。这里，你将经历探究电磁感应现象的过程，体验科学思想和科学方法的威力；你将探究电磁感应的相关规律及其应用，了解科学与技术的力量。你还将了解现代社会几乎无处不在的传感器，体会科学技术对人类社会的影响。

为了让你在学习《物理 3–2》的过程中获得更大的成功，请浏览以下的本书栏目介绍。



图 2–1　流光溢彩的现代都市之夜

第 2 章

交变电流与发电机

现代都市之夜，华灯齐放，流光溢彩。街道上，车水马龙，路灯、车灯、霓虹灯、交通信号灯，汇成一条条光的彩虹。住宅区里，万家灯火，电视机播放着精彩的节目，空调机营造着温度适宜的

每章的开头都有一些情景，提出一些问题，让你明确本章研究的主要问题。

探究感应电流的方向

实验探究

实验装置如图 1–15 所示，用细线悬挂一个很轻的铝环，铝环可以自由摆动。

请观察：

当条形磁铁的一极（如图示的 N 极）向铝环靠近时，会出现什么现象？

当条形磁铁离开铝环时，又会发生什么现象？

将你的观察结果记录下来。

实验表明：条形磁铁的 N 极移近铝环时，铝环被排斥；条形磁铁的 N 极离开铝环时，铝环被吸引。

铝环是非铁磁性物体，它怎么会磁铁排斥和吸引的呢？



图 1–15　探究感应电流方向的实验

实验探究

这里将要求你提出问题，设计实验方案，动手做一些有趣的实验，进行科学探究。

多学一点　直流发电机

图 2–12 是直流发电机的示意图，发电机线圈的两端分别连到两个半圆形的滑环上。这两个滑环叫做换向器，它们固定在转轴上，与转子一起转动。

请思考：

在直流发电机中，线圈产生的感应电动势和外电路电压的波形相同吗？图 2–13 的图像描述的是哪一部分的电压变化？它是直流吗？图 2–12 中的半圆形滑环为什么叫做换向器？

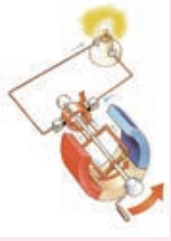


图 2–12　直流发电机示意图

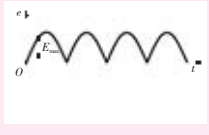


图 2–13　直流发电机发出的直流电波形

多学一点

这里有更多的奥秘，将进一步开阔你的视野。你如果有兴趣，可以作进一步的探索。

分析论证

在这里，你将经历分析、综合、应用数学工具进行推理，从而得出物理学规律和公式的过程，体会到高中物理理论思维的魅力。

探究变压器原、副线圈电压、电流与匝数的关系

分析论证

图 3–9 所示为理想变压器，设它的原、副线圈匝数分别为 n_1、n_2，电源加在原线圈上的电压为 U_1，副线圈输出的电压为 U_2。输出电压 U_2 与输入电压 U_1 有什么关系呢？

在原线圈中，当加上电压 U_1 时，会产生一个反电动势 E_1，它跟电压 U_1 的作用相反，对理想变压器而言，$E_1 = U_1$。副线圈中会产生感应电动势 E_2，对于理想变压器，感应电动势 E_2 与输出电压 U_2 相等，$E_2 = U_2$。

由电磁感应定律可知，理想变压器工作时，原、副线圈每一匝线圈中产生的感应电动势 E 的大小一样，原、副线圈产生的感应

课题研究

这里提供了一些课题供你选择研究，这种研究将使你的才智得到充分的展示。

课题研究

电磁式打点计时器的原理

在实验室管理员和老师的帮助下，从以下几个方面研究电磁式打点计时器的工作原理。

1. 阅读打点计时器的说明书，并观察打点计时器的铭牌，了解其主要技术参数。
2. 将打点计时器接入电路，观察其工作过程。尝试画出打点计时器的电路原理图，解释为什么打点计时器要使用交流电源，并推导出打点计时器的打点周期。
3. 在老师的帮助下，通过实验研究影响打点计时器打点周期稳定性的因素。
4. 总结打点计时器工作时都用到了哪些物理知识。

尽可能用你所学的物理知识分析你所了解的问题，并将你的研究过程写成研究报告。

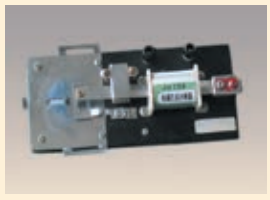


图 2–28 电磁式打点计时器

家庭作业与活动

这里为你提供了丰富多彩的学习活动，让你通过回顾进行自我评价，加深对知识的理解，提高解决有关问题的能力，体验到成功的喜悦。

家庭作业与活动

1. 你是否有这样的生活经验：一些家用电器的金属外壳，尽管跟电源之间绝缘良好，但用手触摸仍会感到“麻手”，甚至用测电笔测试时氖管也会发光！请解释其中的物理道理。
2. 日光灯正常工作时，日光灯管两端的额定电压要低于220 V，这多亏了那个跟灯管串联的镇流器。你知道其中的物理道理吗？
3. 只给你一只交流电流表，你能测出一只耐压在311 V以上的电容器的电容吗？请写出测量方法和原理。
4. 用多用电表不仅能测量直流电压、直流电流以及导体的电阻，还可以测量交流电压，有的多用电表还具有测电容器的电容量和电感器的电感量的功能。图2–27是某型号多用电表的面板图，框内文字是说明书摘录。

请在老师指导下，用多用电表测量照明电路的电压，测量一些电容器和电感器的电容量和电感量（自感系数）。

多用电表说明书摘录

1. 测量电容器的电容量。

（1）将多用电表旋转开关旋至交流10 V 挡。多用电表、待测电容器、10 V 交流（频率 50 Hz）电源接成串联电路。

（2）待指针稳定后，从电容刻度线读出电容量值。

2. 测电感器的电感量。

（1）将多用电表旋转开关旋至交流10 V 挡。多用电表、待测电感器、10 V 交流（频率 50 Hz）电源接成串联电路。

（2）待指针稳定后，从电感刻度线读出电感值。



图 2–27 多用电表

信息浏览、STS 栏目

这里为你提供了各种有趣、有用的资料，包括物理学史上的经典事例、科学家小故事等，它们反映了物理学与科学、技术、社会的紧密联系。你的视野将更开阔，你会更加热爱科学。

信息浏览

日光灯的灯光为什么会闪烁

日光灯发光柔和、明亮，而且节能。但是日光灯的灯光有闪烁现象，这是为什么呢？

日光灯的发光原理是受激发光。加在日光灯两端的电压使灯管内气体发出紫外线，照射到灯管内壁上，激发那里的荧光粉发光。日光灯所用的电源是 50 Hz 的交流，每秒有 100 个瞬间电压为零。在这些瞬间，管内气体不发紫外线，荧光粉不发光。因此，日光灯的灯光每秒要闪烁 100 次。

对人眼来说，每秒 100 次是一个很高的频率，因此我们通常不会觉察到这种闪烁。但是时间长了，对视力是有影响的。在需要有稳定照明的生产或科研场所，使用日光灯也是不利的。人们已经在电路等方面采取了措施，以减少日光灯的闪烁。

同样使用交变电流的白炽灯没有闪烁现象，这又是为什么呢？

白炽灯是利用电流的热效应，使灯丝达到高温状态而发光的，灯丝的温度不会随着电压的剧烈波动而波动，因此灯光不会闪烁。但白炽灯效率很低，绝大多数电能都转化成热能损耗掉了。

目 录



第 1 章 电磁感应与现代生活 6

1.1 电磁感应——划时代的发现 7

1.2 探究感应电流的方向 13

1.3 探究感应电动势的大小 18

1.4 电磁感应的案例分析 23

1.5 自感现象与日光灯 27

1.6 涡流现象与电磁灶 33



第 2 章 交变电流与发电机 40

2.1 怎样产生交变电流 41

2.2 怎样描述交变电流 48

2.3 探究电阻、电感和电容的作用 53

第 3 章　电能的输送与变压器　61

3.1　高压输电原理　62

3.2　变压器为什么能改变电压　68

3.3　电能的开发与利用　76

第 4 章　传感器与现代社会　83

4.1　传感器的原理　84

4.2　探究热敏电阻的温度特性曲线　88

*4.3　用传感器做实验　92

4.4　信息时代离不开传感器　97

总结与评价　课题研究成果报告会　104

研究课题示例　104

评价表　105





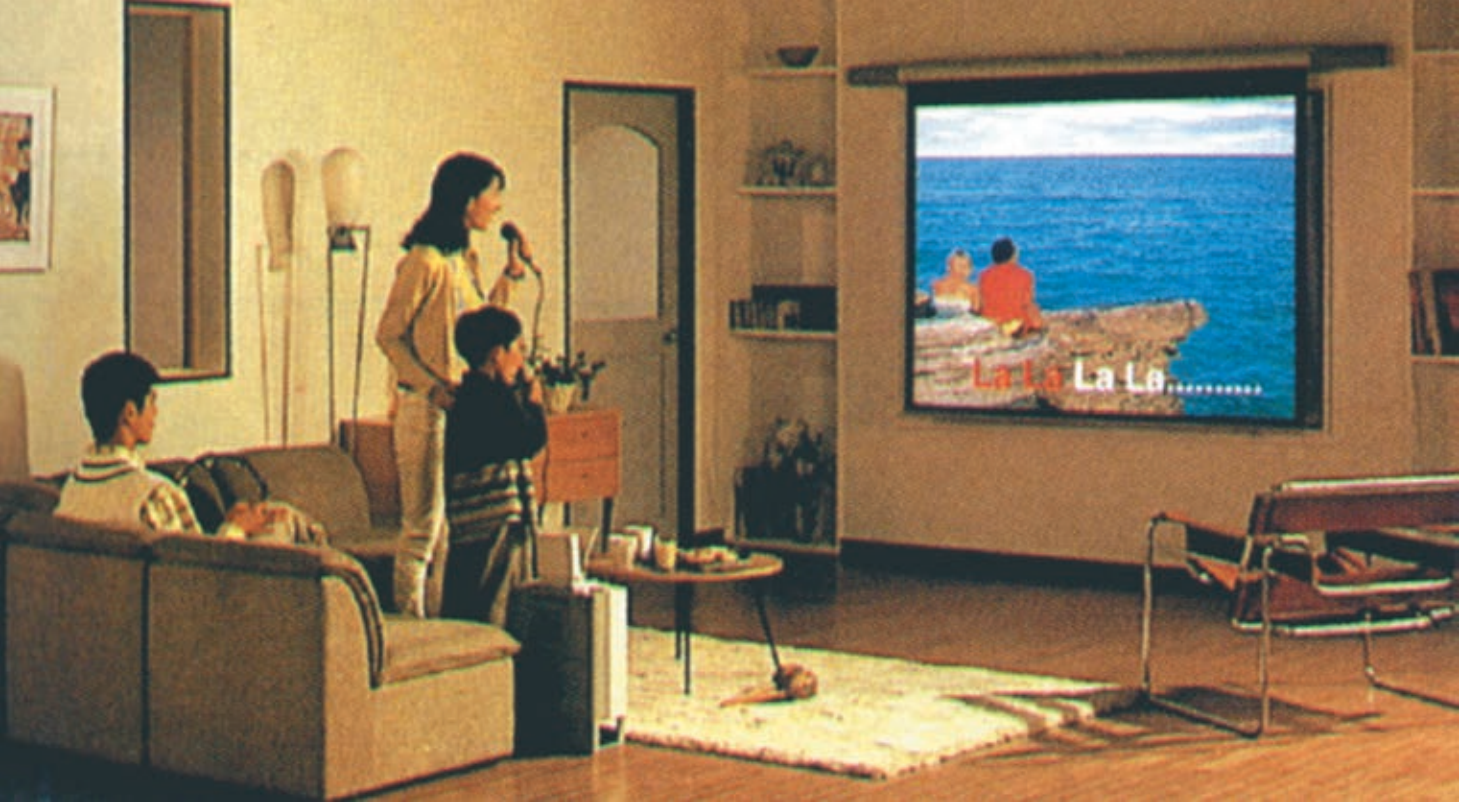


图 1–1　现代家庭中的电气设施

第 1 章
电磁感应与现代生活

法拉第电磁感应的发现，为后来工业的大发展奠定了基础。差不多一切实用上重要的电力机器，都是根据感应电流的原理制成的。

——丹皮尔

家，一个温馨舒适的地方。新颖的照明灯具，散发着柔和的光芒；电气化的厨房里，飘来阵阵的饭菜香；空调使你冬暖夏凉，为你营造一个舒适的环境；你或许正在客厅里，手握话筒，对着电视机大屏幕，一展歌喉，抒发着心中的向往……这一切都离不开电。电能已是人类利用能量的最主要形式。

在这幸福安宁的氛围中，你或许不会想到，一个物理学的发现，正在发挥着它神奇的作用，这个发现就是电磁感应现象。

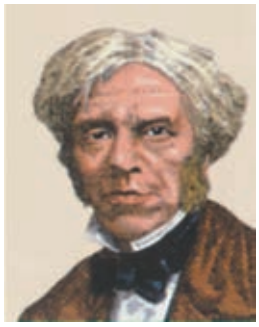
那么，人们经历了怎样的过程，才发现这个开启电能的金钥匙——电磁感应现象的呢？产生电磁感应的条件是什么？电磁感应是怎么把机械能转化为电能的？日光灯、电磁灶等是怎样利用了电磁感应原理的呢？

本章以生活中利用电能为背景，首先通过对电磁感应发现过程的再认识，进一步体验科学思想、方法的重要性和科学家崇高的科学精神；接着探究电磁感应的条件，理解电磁感应定律和楞次定律；最后介绍电磁感应的应用，体会电磁感应与现代生活的关系。

1.1

电磁感应——划时代的发现

奥斯特电流磁效应的发现和接踵而来的研究成果，极大地激励了英国学术界。1821 年，英国《哲学年鉴》要写一篇综述电流磁效应发现以来电磁发展概况的文章。法拉第在收集材料的过程中，对电磁学产生了浓厚的兴趣，经过法拉第不懈的努力，导致了划时代的发现——电磁感应。



法拉第（M. Faraday，1791—1867），19 世纪伟大的物理学家、化学家、发明家，电磁理论的奠基人。他发现了电磁感应现象，提出了场的概念和用力线描述场的方法。麦克斯韦曾说：“我们把法拉第首先看作是科学家中最有成效、最崇高的典型……他高尚简单而无戏剧性紧张情节的生活，将同他那使他名字不朽的发现一起永远铭刻在人们的记忆中。”

法拉第发现电磁感应的艰难历程

新课题的提出

传统的英格兰科学研究方法中有一种叫做对称思维的方法。既然电能转化为磁，那么磁也应该能转化为电。奥斯特、亨利（J. Henry）、科拉顿（T. D. Colladen）等当时著名的科学家，都曾对“将磁转变为电”进行过研究，但均未能取得实质性进展。时任英国皇家研究所实验室主任的法拉第从 1822 年起即致力于“把磁转变为电”的研究。他在一篇日记中写道：“从普通的磁中获得电的希望，时时激励着我从实验上去探求电流的感应效应。”

思维定势路漫长

法拉第开始进行“把磁转变为电”的实验研究时，想法比较简单。他的基本思路是：

既然恒定的电流能产生磁场，那么放在磁体旁边的导体也应能感应出电流；既然电荷可以感应出电荷，那么电流也应能感应出电流。

法拉第基于上述思路，在很长一段时间内，基本上做了如下两种类型的实验：一是将两根导线并列放置，将其中的一根导线通以电流，希望在另一根导线中感应出电流；二是在强磁体旁边放置导线或线圈，希望在导线或线圈中感应出电流。这两类实验都没有成功。他在一个铁环上绕了两个线圈（图 1–2），将其中一个线圈（原线圈）接在电池上，另一个线圈接电流计，也没有感应出电流；他不断增加电池的数量，将原线圈几乎烧坏了，还是感应不出电流。

探索之路如此漫长，时间已过去十年。法拉第在实验日记上记下了一次次的失败，也一次次地表达了他“把磁转变为电”的坚



图 1–2　法拉第做实验用的线圈

定信念。

偶然发现犹迷茫

著名哲学家凯特林说过一句很精辟的话:“摆脱陈旧规则和解决这一问题本身一样费劲。”

时至 1831 年 8 月 29 日,法拉第再次用图 1–2 所示的线圈做实验。图 1–3 是实验装置示意图,*A* 线圈两端与开关和电池组连接,*B* 线圈两端用导线连接,在导线下放一枚小磁针。法拉第发现,每当开关闭合或断开时,小磁针都突然跳动一下;将 *A* 线圈维持接通状态,小磁针则不动。

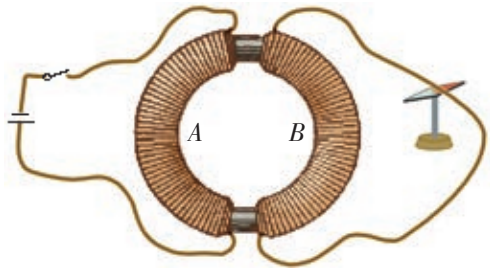


图 1–3　法拉第实验示意图之一

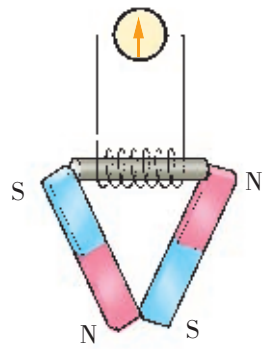


图 1–4　法拉第实验示意图之二

对于这次实验的评价,法拉第在给他朋友菲利浦斯的信中是这样写的:“我正再度忙于研究电磁学。我想,我捞到了一些好东西,可是没有把握;或许我花费了那么多劳动,捞到的不是一条鱼,而是一团水草。”

法拉第得到的何止是一条鱼!他的这个发现开辟了一个新时代。这不仅是 19 世纪最伟大的发现,也是整个科学史上最伟大的发现之一。

我不能不认为……关于磁电的这个发现是迄今为止所获得的最伟大的实验成果。这是法拉第成就的勃朗峰。

——丁铎尔

深入探究得真谛

法拉第的实验表明,只要原线圈的电流发生改变,另一线圈中就会感应出电流。

法拉第想:在上述实验中,铁心是必要的吗?他在一个木筒上绕两个用纱线包起来的导线线圈,将一个线圈与电池组、开关连接,另一个线圈与电流计相接。他发现,开关闭合或断开的瞬间,电流计的指针会偏转。

法拉第进一步想:*A* 线圈是必要的吗?直接用磁铁能否产生电流呢?

1831 年 9 月 24 日,法拉第做了如图 1–4 所示的实验。将两根条形磁铁成 V 形放置,在张开的两端(分别为 N、S 极)之间,放一根绕有线圈的圆铁棒,线圈与电流计连接。他发现当圆铁棒脱离或接触磁极的瞬间,电流计的指针发生偏转。

据说,法拉第在英国皇家学会上演示他的圆盘发电机时,一位贵妇人问:“先生,你发明这种玩意儿,又有什么用呢?”法拉第沉思片刻,答道:“夫人,新生的婴儿又有什么用呢!”

当时的英国首相皮尔仔细观看了他的直流发电机,并问法拉第它有何用?法拉第风趣地回答说:“我不知道,但是我敢担保你们政府终有一日要向它征税!”

1831年 10 月 17 日，法拉第在一个纸做的空心圆筒上，用 220 英尺铜线绕了 8 个线圈，再将这 8 个线圈串联或并联后与电流计连接，然后将一根条形磁铁以不同的速度插进空心圆筒内，观察电流计指针的偏转情况。

十年磨一剑。法拉第终于找到了开启电能宝库的“金钥匙”：“把磁转变为电”不是一种稳态效应，而是一种在变化、运动过程中才会出现的效应。他把“变化”、“运动”概括为：变化的电流、变化的磁场、运动的磁铁、在磁场中运动的导体等。

法拉第把这种由磁得到电的现象叫做**电磁感应现象**（electromagnetic induction）。在电磁感应现象中产生的电流叫做**感应电流**（induction current）。

为了获得持续的感应电流，1831 年 10 月 28 日，法拉第将一个铜圆盘放在永久磁铁的两极之间（图 1–5），再从铜盘的轴心和边上引出两根导线，转动圆盘，导线中就有了持续的电流。这就是世界上第一台“直流发电机”。



图 1–5　法拉第的圆盘发电机

请思考：

从法拉第发现电磁感应的艰难历程，你对于法拉第的这一伟大发现的研究思路、方法和精神，有什么体会和感想？

探究感应电流产生的条件

通过法拉第发现电磁感应的过程，你能归纳出产生感应电流的条件吗？

实验探究　产生感应电流的条件

请完成以下两个实验。实验中，要注意观察感应电流是在怎样的条件下产生的。

实验 1　用图 1–6 所示的装置进行实验。观察当条形磁铁插入或拔出线圈时，线圈中产生感应电流的情况。

请讨论：如图 1–7 所示，在条形磁铁插入线圈的过程中，线圈中的磁通量怎样变化？在拔出过程中，线圈中磁通量怎样变化？

在初中，我们知道图 1–8 所示的实验中，导体切割磁感线时也会产生感应电流。你能用磁通量变化产生感应电流来解释这个现象吗？

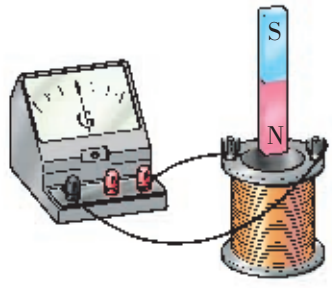


图 1–6　条形磁铁和线圈有相对运动，就会产生感应电流

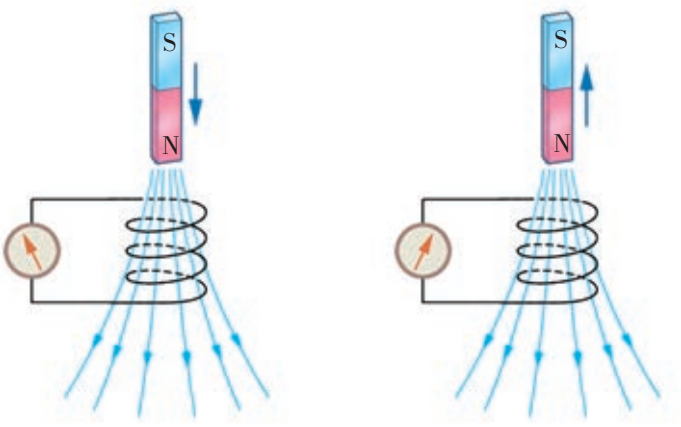


图 1–7　磁铁插入和拔出线圈时，线圈中的磁通量发生变化

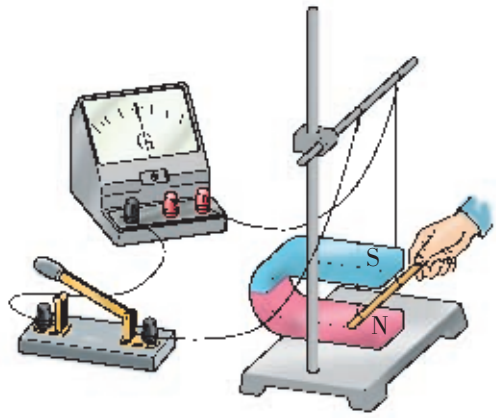


图 1–8　导体切割磁感线产生感应电流

实验 2　用图 1–9 所示的装置进行实验。这里有两个线圈，原线圈 *A* 通电后就是一个电磁铁，怎样做才能使副线圈 *B* 中产生电流？

不做实验，任何预测都没有意义。理论再好，没有实验，预测就没有任何实际意义。

——丁肇中

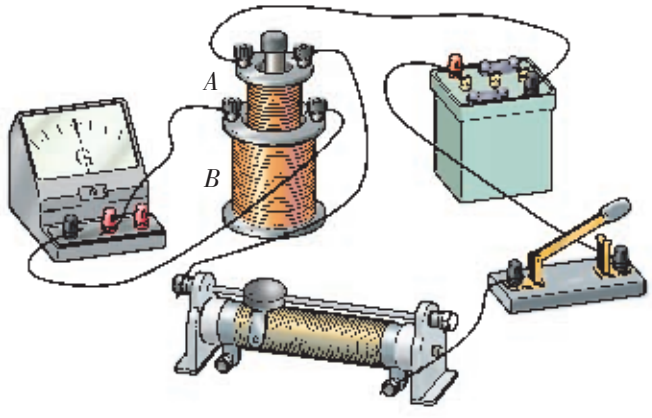


图 1–9　改变原线圈中的电流，在副线圈中产生感应电流

请记录：

在怎样的情况下，副线圈中有感应电流？感应电流是持续的吗？

请讨论：

1. 本实验与法拉第的哪一类实验相似？法拉第当初对该实验现象是怎样认识的？

2. 在开关闭合和断开的瞬间，副线圈 *B* 中的磁通量是怎样变化（增加或减少）的？请从磁通量变化的角度，总结出闭合电路中产生感应电流的条件。

大量事实表明：只要穿过闭合电路的磁通量发生变化，闭合电路中就会产生感应电流。

案例分析

案例　一线圈 $abcd$ 位于如图 1–10 所示的匀强磁场中。要使线圈中产生感应电流，应采取什么措施？

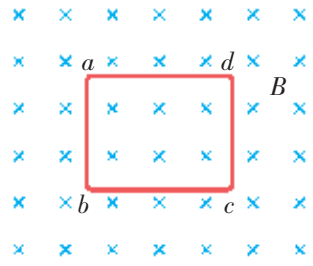


图 1–10　匀强磁场中的线圈

分析　使电路中产生感应电流的条件之一是电路必须闭合，本案例的线圈符合此条件。

使电路中产生感应电流的另一条件是穿过闭合电路的磁通量发生变化。那么怎样才能满足这个条件呢？

请根据以上分析，提出你的解决办法。

电磁感应使人类找到了机械能与电能之间转换的途径，为人类打开了通向电气化的大门。一批有才智的发明家，根据电磁感应原理设计制造出发电机、电动机、变压器等一批批造福人类的新机器，搭建了从城市到农村的输电网络，改变了人类的生活，促进了社会发展，引发了世界性的技术革命浪潮。

英国在 1840 年由电气技术导致的劳动生产率是 1770 年蒸汽技术导致的劳动生产率的 27 倍，是手工的 108 倍。在这 70 年中，劳动生产率平均每年提高 11.28%。

信息浏览

法拉第同时代的一些科学家对“磁生电”的探索

真理从安培眼皮下溜走

安培曾于 1822 年做了许多实验，其中的一个实验装置如图 1–11 所示。将一个铜质多匝线圈 A 固定在绝缘架上，另一单匝线圈 B 用细线悬挂起来，两者在同一平面内，然后在线圈 A 中通以强电流，另用一个强磁性磁铁接近线圈 B。安培认为，线圈 B 中应该感应出电流。

在实验过程中，在线圈 A 通电的瞬间，线圈 B 动了一下。由于安培缺乏思想准备，这一瞬间现象所包含着的真理，就从他的眼皮下溜走了。

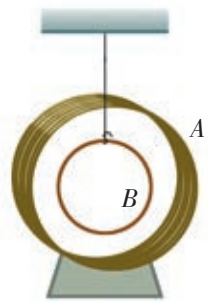


图 1–11　安培的实验



安培（A. M. Ampère，1775—1836），法国物理学家。对电磁学中的基本原理有重要发现，如安培定律、安培定则和分子电流假说等。

科拉顿跑失良机

1832 年，瑞士物理学家德拉里夫（A. A. de la Rive）的助手科拉顿将一个螺线管与电流计相连。为了避免强磁性磁铁的影响，他把电流计用长导线连着，放在另外一个房间。科拉顿没有助手，当他把磁铁投入螺线管中后，立即跑到另一个房间去观察。十分可惜，他未能来得及观察到电流计指针的偏转。后来有位科学家感叹道：“可怜的科拉顿，在跑来跑去中丢失了良机。”

追悔莫及的亨利

亨利当时是奥尔巴尼学院的教授，由于教学任务繁重，也没有专门的



亨利(J. Henry,1797—1878),美国物理学家。从事电磁学方面的研究工作,发明电磁继电器和感应线圈,设计了第一台电动机,发现了自感现象和变压器工作的基本定律。

实验室,他主要利用假期在学院的大厅里进行电学实验工作。

1829 年 8 月的暑假,亨利在考察绕有不同长度导线的电磁铁所产生磁力的大小时,意外地发现,当通电导线中电流被突然切断时,会产生强烈的电火花。当时亨利无法解释这个现象,这一重要发现被搁置下来了。

1830 年 8 月的暑假,亨利继续上次的实验。当电磁铁导线中突然通入强电流时,他发现电流计的指针向一个方向偏转;当电磁铁导线中电流突然消失时,电流计的指针反向偏转;电磁铁导线中电流保持稳定时,电流计的指针不偏转。亨利对这一现象感到很奇怪,但暑假结束了,只得停止实验。

到了 1832 年 6 月,亨利在杂志上看到了法拉第在 1831 年所做的电磁感应实验的简讯,立即痛苦地意识到法拉第的发现与自己两年前的发现相类似,他马上用自己的旧仪器进一步完善了过去的实验,并把自己前前后后做的实验做了一个总结,写成一篇论文。即使这样,在电磁感应现象的发现上,亨利只能屈居第二了。

家庭作业与活动

1. 请你查找电磁感应在生活和生产中应用的实例,写一份调查报告。
2. 如图 1–12 所示,在匀强磁场中有一个闭合的弹簧线圈。你能采取哪些措施使该线圈中产生感应电流?为什么?
3. 如图 1–13 所示,矩形线圈 $a\,b\,c\,d$ 位于通电长直导线附近,线圈平面跟导线位于同一平面,且线圈的两条对边跟导线平行。请你设计出尽可能多的方法,使矩形线圈中有感应电流产生。
4. 如图 1–14 所示,导线 $a\,b$ 和 $c\,d$ 互相平行,在下列情况中,使导线 $c\,d$ 中有感应电流产生的是

   A. 将开关 S 闭合或断开

   B. 开关 S 闭合后,将滑动变阻器的滑片 P 向右移动

   C. 开关 S 闭合后,将滑动变阻器的滑片 P 向左移动

   D. 开关 S 始终闭合,滑动变阻器的滑片 P 也不移动

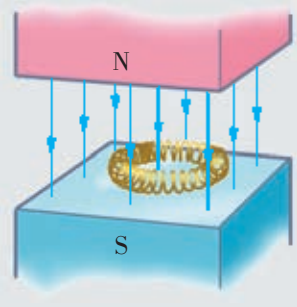


图 1–12

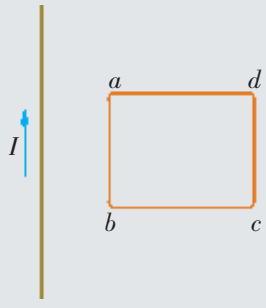


图 1–13

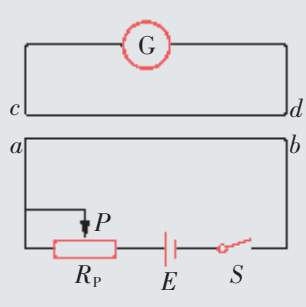


图 1–14

1.2 探究感应电流的方向

在探究电磁感应条件的实验过程中，你一定看到电流表的指针有时向右偏转，有时向左偏转。这说明，在不同情况下，感应电流的方向是不同的。

那么，感应电流的方向与哪些因素有关呢？

探究感应电流的方向

实验探究

实验装置如图 1–15 所示，用细线悬挂一个很轻的铝环，铝环可以自由摆动。

请观察：

当条形磁铁的一极（如图示的 N 极）向铝环靠近时，会出现什么现象？

当条形磁铁离开铝环时，又会发生什么现象？

将你的观察结果记录下来。

实验表明：条形磁铁的 N 极移近铝环时，铝环被排斥；条形磁铁的 N 极离开铝环时，铝环被吸引。

铝环是非铁磁性物体，它怎么会被磁铁排斥和吸引的呢？

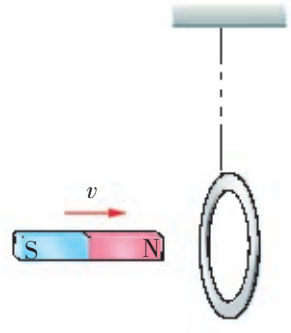


图 1–15　探究感应电流方向的实验

分析论证

上述实验磁铁相对于铝环运动的过程中，穿过铝环的磁通量发生了变化，铝环中产生了感应电流。感应电流也会产生磁场，磁场的方向与感应电流的方向有关。磁铁与铝环之间的排斥和吸引，都是缘于感应电流磁场对磁铁的作用。

请讨论：

1. 磁铁靠近铝环时，铝环中感应电流产生的磁场方向与磁铁的磁场方向相同还是相反？铝环中感应电流的方向如何？

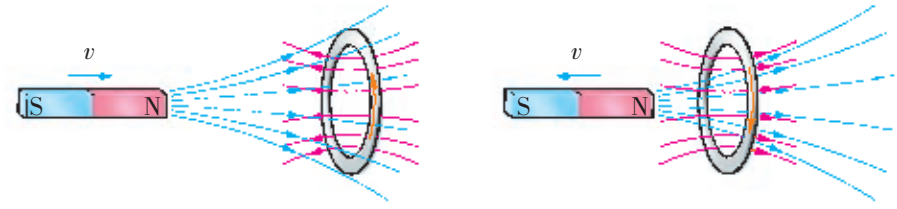
科学必须对观察到的现象进行分析，研究各种现象之间的本质关系，找出事物的变化规律。

2. 当磁铁离开铝环时，铝环中感应电流磁场的方向与磁铁的磁场方向相同还是相反？铝环中感应电流的方向如何？

由上面的分析可知：感应电流产生的磁场方向与条形磁铁的磁场方向有时相同，有时相反。这又是怎么回事呢？

对这个问题，需要对铝环中引起感应电流的磁通量的变化作进一步的分析。

图 1–16a 是条形磁铁靠近铝环时的情况，图 1–16b 是条形磁铁离开铝环时的情况。蓝色细线表示条形磁铁的磁感线；红色细线表示感应电流磁场的磁感线。



a 磁铁靠近铝环　　b 磁铁离开铝环

图 1–16　研究铝环中磁通量变化的示意图

请讨论：

1. 当磁铁靠近铝环时，穿过铝环的原磁通量是增大还是减小？感应电流产生的磁场对磁通量的变化是加强还是减弱？

2. 当磁铁离开铝环时，穿过铝环的原磁通量是增大还是减小？感应电流产生的磁场对磁通量的变化是加强还是减弱？

实验证明，当闭合电路中原磁场的磁通量增大时，感应电流的磁场跟原磁场方向相反，阻碍原磁场磁通量的增加；当闭合电路中原磁场的磁通量减小时，感应电流的磁场与原磁场方向相同，阻碍原磁场磁通量的减小。



楞次（Э. Х. Ленц，1804—1865），俄国物理学家。生于爱沙尼亚。1836 年起任圣彼得堡大学教授。除发现楞次定律外，还与焦耳各自独立地发现电流通过导体时的热效应定律——焦耳–楞次定律。

楞次定律

1834 年，俄国物理学家楞次对产生感应电流的许多实验事实进行分析研究，对感应电流的方向得出如下结论：

感应电流的磁场总要阻碍引起感应电流的磁通量的变化。这个结论叫做**楞次定律**（Lenz law）。

请讨论：

如何理解楞次定律中的“阻碍”两字？有人认为阻碍就是感应

电流产生的磁场跟引起感应电流的磁场方向相反；也有人认为阻碍就是不变化；还有人认为，阻碍就是阻止。请说说你的看法。

请思考：如何利用楞次定律判断感应电流的方向。

电磁感应中的能量转化

在探究楞次定律的实验中，我们已认识到：感应电流的磁场总要阻碍磁铁相对于铝环的运动。产生电磁感应的过程，是外力克服磁场力做功的过程。通过外力做功，磁铁运动的机械能转化为铝环的电能。

请讨论：为什么当磁铁靠近铝环时，它们总是相互排斥；当磁铁离开铝环时，它们总是相互吸引。是否会出现相反的情况呢？为什么？

案例分析

案例 1　如图 1–17 所示，有一个线圈从条形磁铁正上方下落，依次经过 a、b、c 三个位置。请用楞次定律判断线圈经过此三位置时感应电流的方向。

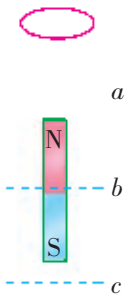


图 1–17

分析　用楞次定律判断电流的方向时，首先要明确研究对象。这里的研究对象是下落的线圈。条形磁铁周围的磁场分布是不均匀的，越近磁极，磁感应强度越强，磁铁中部可认为磁感线方向与磁铁轴线平行。当线圈从磁铁上方下落至 a 处的过程中，穿过线圈的磁通量在增大；在磁铁下方下落的过程中，穿过线圈的磁通量在减小。根据楞次定律，感应电流的磁场阻碍原磁场的变化，可以判断线圈中感应电流的方向。

解答　从线圈上方看感应电流的方向。在条形磁铁上方的 a 位置，磁场方向向上，线圈经过 a 位置时，穿过线圈的磁通量在增加。根据楞次定律，线圈中感应电流产生的磁场方向应向下（阻碍线圈中磁通量的增加）；用右手螺旋定则判断在该位置线圈中感应电流从上往下看是顺时针方向的。

线圈经 b 位置时，因该位置各点磁场方向平行，磁通量无变化，故无感应电流产生。

请你判断线圈经 c 位置时的感应电流方向。

案例 2　当闭合电路的一部分导体切割磁感线时，怎样确定感应电流的方向呢？在图 1–18 中，如果导体棒 AB 向右运动，感应电流的方向怎样？

分析 在图 1–18 所示的电路中，研究对象是导体棒 AB、导线和电流表组成的闭合电路。导体棒 AB 位于磁场中，因此磁场的部分磁感线穿过闭合电路。

设导体棒 AB 向右运动，穿过闭合电路中的磁通量将增加。根据楞次定律，导体棒 AB 上的感应电流方向应是从 A 指向 B。

用楞次定律可以判断导体切割磁感线所产生的感应电流方向。但英国电气工程学家弗莱明(J. A. Fleming)提出了另一种判断方法：

如图 1–19 所示，**伸开右手，使拇指跟其余四指垂直，并且都跟手掌在一个平面内。让磁感线垂直从手心进入，拇指指向导体运动的方向，其余四指指的就是感应电流的方向。**此方法叫做**右手定则**(right-hand rule)。

请你用右手定则判断图 1–18 导体棒 AB 中的感应电流方向，与用楞次定律判断的结果相同吗？如果导体棒 AB 向上或向下运动，有感应电流产生吗？如果做斜向运动呢？

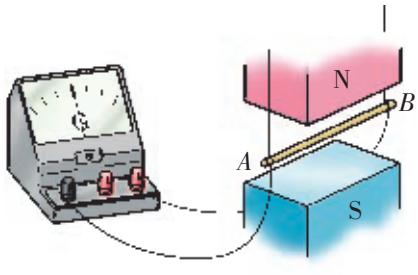


图 1–18 导体切割磁感线产生感应电流

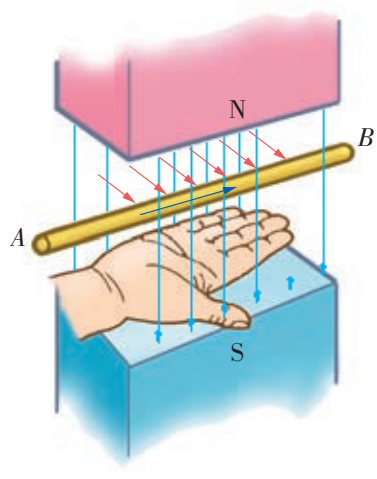


图 1–19 右手定则示意图

家庭作业与活动

1. 如图 1–20 所示，长直螺线管 b 置于金属环 a 的轴线上，螺线管各匝导线间有一定的距离。当在螺线管 b 中通以图示方向的电流，并使电流迅速增大时

A. 金属环 a 有缩小的趋势

B. 金属环 a 有扩大的趋势

C. 螺线管 b 有缩短的趋势

D. 螺线管 b 有伸长的趋势

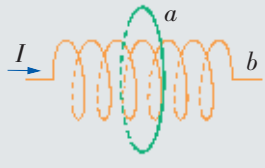


图 1–20

2. 如图 1–21 所示，P 为固定闭合电路的一段导

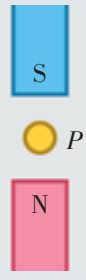


图 1–21

体的横截面。若使一对异性磁极相对 P 运动，并让 P 始终处于磁场中，则下列说法中正确的是

A. 磁极竖直向上运动时，P 中不产生感应电流

B. 磁极竖直向下运动时，P 中产生指向纸外的感应电流

C. 磁极向左运动时，P 中产生指向纸里的感应电流

D. 磁极向右运动时，P 中产生指向纸里的感应电流

3. 在一根长铁钉上用漆包线绕上两个线圈 A 和 B，将线圈 B 的两端接在一起，并把 CD 段漆包线拉直置于自制的小磁针上方，如图 1–22 所示。试判断用干电池给线圈 A 通电的瞬间，小磁针偏转的方向。做一下这个实验，看看你的判断与实验结果是否一致。

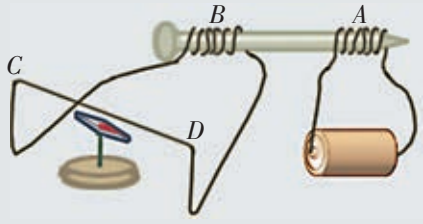


图 1–22

4. 请你按图 1–23 所示装置进行实验。A 和 B 都是很轻的铝环，环 A 是闭合的，环 B 是断开的，AB 之间的连接杆是绝缘的。当磁铁的任一极迅速接近 A 环时，你会看到什么现象？把磁铁从 A 环中迅速移开，又会看到什么现象？如果将磁铁迅速移近或离开 B 环，又会看到什么现象？请用所学的知识解释这些现象。

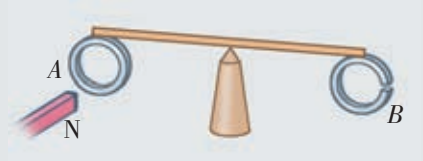


图 1–23

5. 如图 1–24 所示，有两个长度和粗细都相同的空心管子 A 和 B，竖直放置，A 管是导体，B 管是绝缘体。取两个同样的磁体，它们都能从任意一个管子的上端开口经过管内下落。若将这两个磁体分别在 A、B 管的上端开口处（同一高度）同时由静止释放，它们是否同时从管的底部开口掉出？为什么？请你设法做一下这个实验，看看你的判断是否正确。

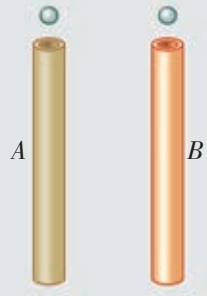


图 1–24

6. 超导是当今高科技热点之一。当一块磁体靠近超导体时，超导体中会产生强大的电流，对磁体有排斥作用，这种斥力可以使磁体悬浮在空中。超导磁悬浮列车就是运用了这个原理。关于这种磁悬浮，下列说法中正确的是

A. 超导体中电流产生的磁场方向与磁体的磁场方向相同

B. 超导体中电流产生的磁场方向与磁体的磁场方向相反

C. 超导体使磁体处于失重状态

D. 超导体对磁体的磁力与磁体受到的重力相平衡

7. 图 1–25 所示的实验装置也可以用来探讨感应电流的方向。请与同学讨论设计实验方案，进行实验，并分析归纳实验中所收集到的信息。

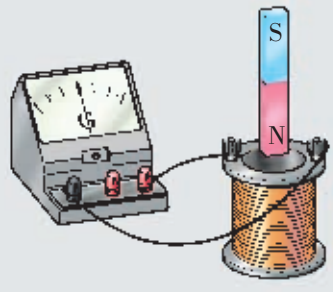


图 1–25

建议：实验时，必须先判明灵敏电流计指针偏转方向跟电流方向的关系；还要弄清楚螺线管线圈的绕向。

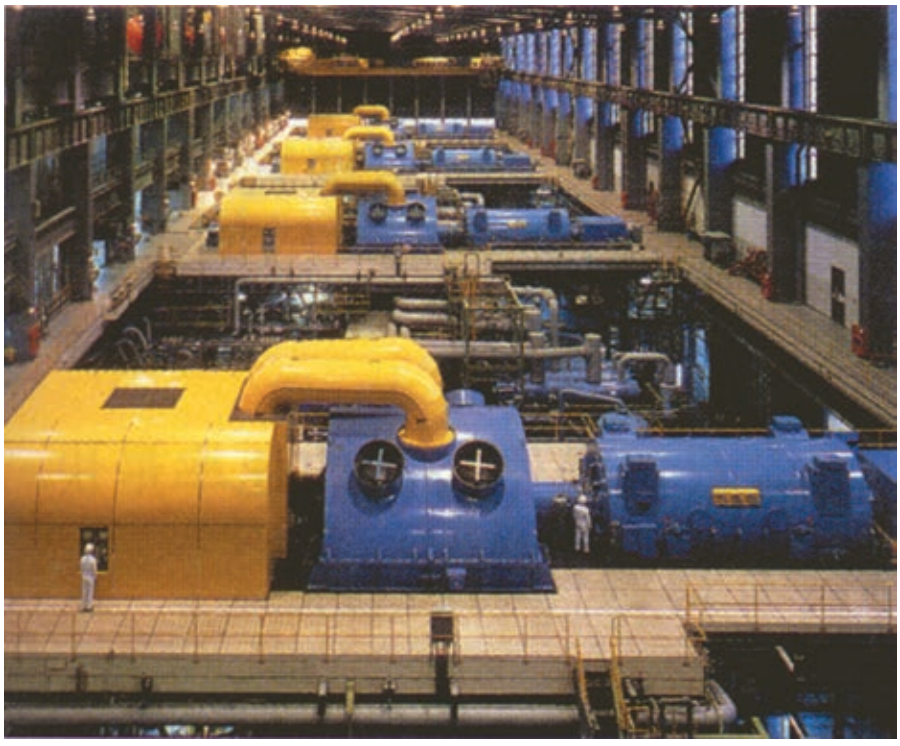


图 1–26　发电机组

1.3 探究感应电动势的大小

在电磁感应现象中，既然有感应电流产生，那么电路中一定有电动势。电磁感应现象中产生的电动势叫做**感应电动势**(induction electromotive force)。感应电动势的大小与哪些因素有关呢？

探究感应电动势的大小

只要穿过闭合电路的磁通量发生变化，电路中就会产生感应电动势。那么，感应电动势的大小与磁通量的变化存在怎样的关系呢？

实验探究　感应电动势大小与磁通量变化的关系

可从图 1–27 和图 1–28 所示的实验装置中任选一组进行实

验,通过灵敏电流计指针摆动的幅度可以大致判断感应电动势的大小;也可用 DIS 实验室装置(图 1–29)进行实验。你还可以选择其他的实验装置,或对图 1–27、图 1–28 所示的装置进行一番改造,以改进实验效果。

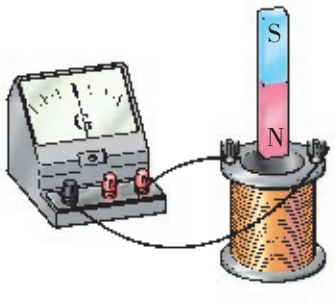


图 1–27　探究感应电动势大小的实验装置之一

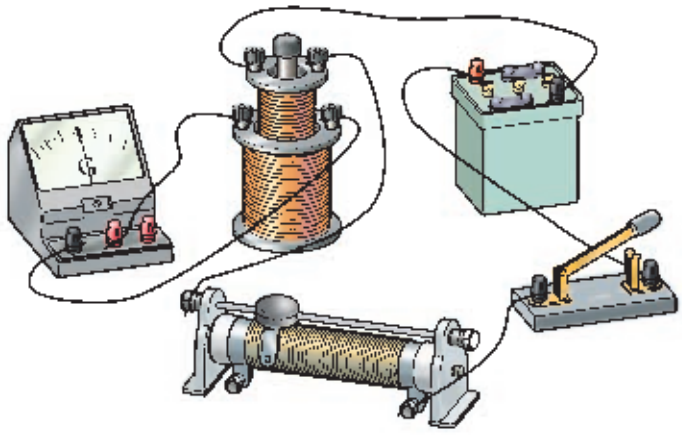


图 1–28　探究感应电动势大小的实验装置之二

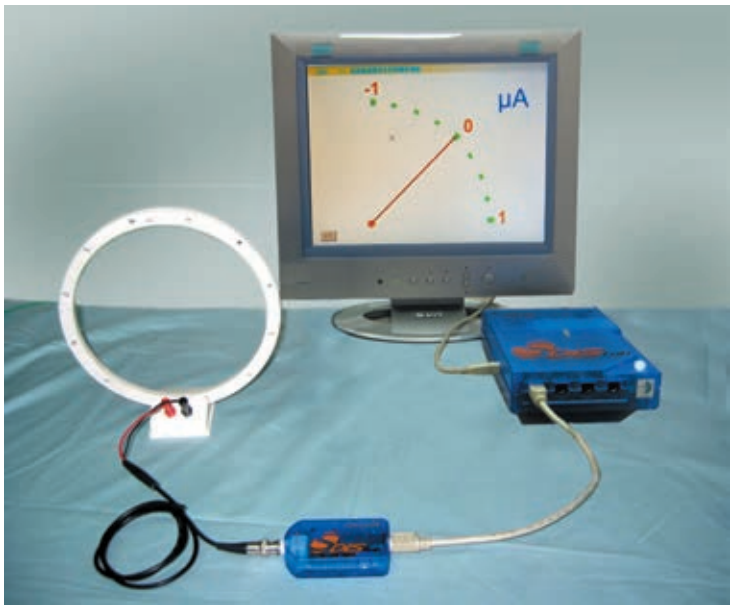


图 1–29　用 DIS 实验室装置探究感应电动势的大小

通过实验要研究以下几个问题:

1. 感应电动势的大小跟磁通量变化的大小有关吗?

2. 感应电动势的大小跟磁通量变化的快慢有关吗?

3. 磁场方向对感应电动势的大小是否有影响?

请设计记录表格,记录实验现象。

请将你的实验结果与同学交流讨论,得出结论。

法拉第电磁感应定律

实验结果表明，感应电动势的大小只跟穿过闭合电路中磁通量变化的快慢有关。

请思考："磁通量变化的大小"与"磁通量变化的快慢"有什么区别？

数学是其他一切科学的理想和模型。

——笛卡儿

精确的实验和理论分析证明：**闭合电路中感应电动势的大小，跟穿过这一电路的磁通量的变化率成正比**。这就是**法拉第电磁感应定律**。

用 E 表示感应电动势，$\frac{\Delta\Phi}{\Delta t}$ 表示磁通量的变化率，则法拉第电磁感应定律的数学表达式为

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

1845年，德国物理学家诺伊曼(F. E. Neumann)在法拉第工作的基础上，从理论上导出了感应电动势的定量表达式。5年后，法拉第又通过实验证明了这个表达式的正确性。

式中 k 是比例系数，它的值与式中各物理量所取的单位有关。在国际单位制中，磁通量的单位是 Wb，时间的单位是 s，感应电动势的单位是 V。

采用上述单位时，$k = 1$，法拉第电磁感应定律的表达式为

$$E = \frac{\Delta\Phi}{\Delta t} \tag{1}$$

在实际的电磁感应电路中，常常采用多匝线圈。多匝线圈可以看成是由许多单匝线圈串联而成的。设闭合电路是一个 n 匝线圈，且每匝线圈产生的感应电动势大小相等，则 n 匝线圈产生的感应电动势，就是单匝线圈感应电动势的 n 倍，即

$$E = n\frac{\Delta\Phi}{\Delta t} \tag{2}$$

这就是说，采用多匝线圈可以得到较大的感应电动势。

我们知道，感应电流是有方向的，感应电动势也是有方向的，感应电动势的方向跟感应电流的方向相同。

如果感应电动势是由于导体切割磁感线产生的，那么如何计算其大小呢？

分析论证　导体切割磁感线产生的感应电动势

如图 1–30 所示，在磁感应强度为 B 的匀强磁场中，有相距为

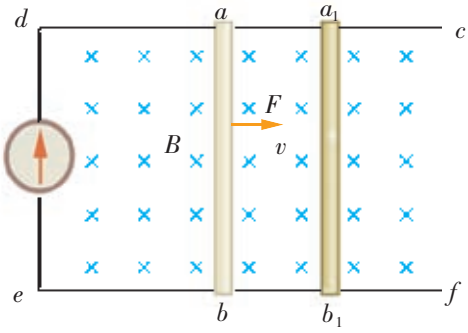


图 1–30　金属棒在导轨上移动，方向跟磁场方向垂直

1851年，法拉第在《论磁力线》一文中对电磁感应现象描述道："无论导线是垂直地还是倾斜地跨过磁力线，也无论是沿某一方向或沿另一方向，该导线都把所跨过的力线所示的力汇总起来……形成电流的力正比于所切割的磁力线数。"（注：文中的磁力线即我们现在所指的磁感线。）

L 的两平行金属导轨 dc 和 ef。d、e 间串联一电流表，两导轨所在平面跟磁感线垂直。一根金属棒搁在导轨上，棒与导轨垂直。设金属棒经时间 Δt 由位置 ab 以速度 v 匀速运动到位置 a_1b_1。求金属棒上产生的感应电动势大小。

电流表、金属导轨与金属棒构成一个闭合电路，穿过此电路的磁通量为

$$\Phi = BS$$

请讨论：当金属棒从 ab 位置运动到 a_1b_1 位置时，磁通量 Φ 变化了多少？磁通量的变化率多大？

请证明：金属棒切割磁感线所产生的感应电动势的大小是

$$E = BLv \tag{3}$$

(3)式说明，当导体沿着跟磁感线垂直的方向切割磁感线时，产生的感应电动势等于磁感应强度、导体切割磁感线部分的长度、导体运动速度这三者的乘积。

在国际单位制中，B、L、v 的单位分别是 T、m 和 m / s，E 的单位是 V。

如果导体运动方向与磁感线方向不垂直，那么怎样计算感应电动势大小呢？在图 1–31 中，圆点表示金属棒的横截面，棒的运动方向跟其自身方向垂直，但跟磁感线方向的夹角为 θ。

请证明：这时导体切割磁感线产生的感应电动势为

$$E = BLv\sin\theta \tag{4}$$

（1）式中的感应电动势，是由于电路的磁通量变化而产生的，又叫做感生电动势。（3）式中的感应电动势，是由于导体在磁场中运动而产生的，又叫做动生电动势。在一般情况下，对这两者不加区别，统称为感应电动势。

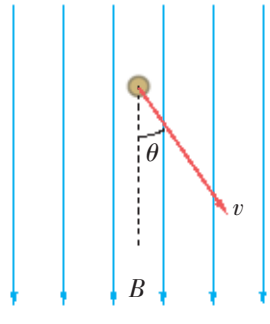


图 1–31　导体运动方向与磁感线方向不垂直

案例分析

案例 1 在图 1–30 中，设电流表相当于一个电阻值为 1 Ω 的电阻 R，磁场的磁感应强度 B 为 0.1 T，导轨间的距离 L 为 1 m，金属棒的电阻为 1 Ω，金属棒与导轨接触的两点间电阻和导轨电阻不计。金属棒在垂直于棒和磁场的恒力 F 的作用下，以 10 m/s 的速度从 ab 移动到 a_1b_1，移动距离是 0.5 m。

(1) 求金属棒上产生的感应电动势大小和方向。

(2) 求施加在金属棒上的外力 F 的大小。

(3) 分析在金属棒运动过程中能量的转化情况。

分析 从电磁感应的角度看，由于金属棒切割了磁感线，金属棒、导轨和电阻 R 所组成的闭合电路中有感应电流。由于金属棒中有感应电流通过，因而金属棒要受到安培力的作用。由左手定则可知，安培力的方向与使金属棒运动的外力 F 方向是相反的。

从电路的角度看，在闭合电路中有电流，必须有电源。金属棒在磁场中，做切割磁感线运动时相当于一个电源；金属棒中产生的感应电动势就是电源的电动势；金属棒与导轨接触的两点相当于电源的两极。金属棒与导轨 dc 接触的点相当于电源的正极，与 ef 接触的点相当于电源的负极。电阻 R 相当于外电路负载，金属棒的电阻相当于电源的内电阻 r。这样，我们可以画出图 1–30 的等效电路图(图 1–32)。

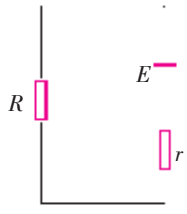


图 1–32

解答

根据上述分析，对于问题(1)、(2)，你能得出下列结果吗？

$$E = 1\ \text{V},\quad F = 0.05\ \text{N}$$

问题(3)，金属棒在外力 F 作用下运动，切割磁感线，产生感应电动势和感应电流。通过外力对金属棒做功将机械能转化为电能，电能在电阻 R 和金属棒上又转化为内能。

1.4

电磁感应的案例分析

案例分析

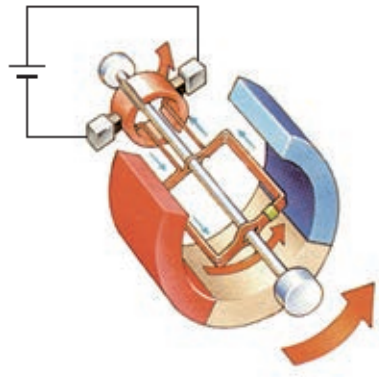


图 1–33　直流电动机工作原理图

案例 1　启动家用空调机时，室内的电灯往往会暗一下；正在转动的电风扇叶片，一旦被卡住，电风扇电动机的温度立刻上升，时间一久，便会发出一种焦糊味，十分危险。产生这些现象的原因是什么呢？

分析　电动机是把电能转化为机械能的装置。图 1–33 是直流电动机的工作原理图。

电动机转动时，线圈因切割磁感线，所以会产生感应电动势。线圈中产生的感应电动势跟加在线圈上的电压方向相反。我们把这个跟外加电压方向相反的感应电动势叫做**反电动势**。

如果用 $E_{反}$ 表示反电动势，U 表示外加电压，R 表示电动机回路（线圈和滑环等）的总电阻，I 表示电动机工作时的电流大小，显然，线圈中的电流为 $I = \dfrac{U - E_{反}}{R}$。

在具有反电动势的电路中，其功率关系为

$$IU - IE_{反} = I^2R$$

式中 IU 是电源供给电动机的功率（输入功率），$IE_{反}$ 是电动机输出的机械功率（输出功率），I^2R 是电动机回路中损失的热功率。

请讨论：

1. 电动机空载转动时跟带负载转动时的电流大小一样吗？

2. 转动中的电动机因故卡住不转动时，回路中的电流将如何变化？

3. 产生本案例所述现象的原因是什么？

案例 2　如图 1–34 所示，MN 和 PQ 为竖直方向的两平行长直金属导轨，间距 L 为 0.4 m，电阻不计，导轨所在平面与磁感应强度为 $B = 0.50$ T 的匀强磁场垂直。导轨两端分别接有滑动变阻器和阻值为 3.0 Ω 的电阻 R_1。质量为 6.0×10^{-3} kg、电阻为 1.0 Ω 的金属杆 ab 始终垂直于导轨，并与其保持光滑接触。当杆 ab 以速率 v 匀速下滑时，整个电路消耗的电功率 P 为 0.27 W。试求速率 v 和滑动变阻器接入电路部分的阻值 R_P，并分析能量转化的情况。

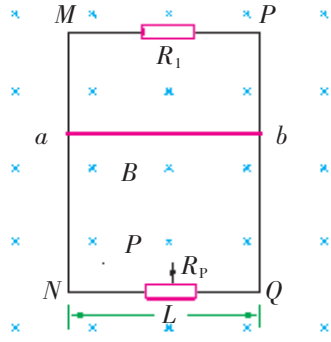


图 1–34

分析　从电磁感应的角度分析，金属杆、导轨和两电阻连成闭合回路，回路平面与匀强磁场垂直。当金属杆受重力作用沿导轨下滑切割磁感线时，其中产生从 a 流向 b 的感应电流，感应电流随金属杆下落的速度增大而增大。有感应电流通过的金属杆，在磁场中要受到向上的安培力的作用。力的大小随感应电流的增大而增大。也就是说，金属杆在磁场中受两个力的作用：重力，方向向下，大小不变；安培力，方向向上，大小随速度增大而增大。金属杆开始运动后的一段时间内，速度较小，安培力小于重力，金属杆受到的合力方向向下，杆的速度逐渐增大，感应电流增大，安培力也增大，合力逐渐减小，所以杆做的是加速度方向向下的变加速直线运动；经过一段时间，安培力与重力大小近似相等，合力与加速度近似为零，就可以认为杆以某个最大速度向下做匀速运动。我们研究的是杆做匀速运动时的情况。

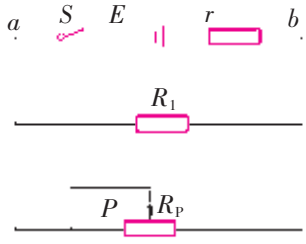


图 1–35

从电路的角度分析，金属杆相当于电路中的电源，电阻 R_1 和 R_P 组成并联的外电路，金属杆的电阻是电源内电阻。它们组成了图 1–35 所示的电路，图中 r 是电源内阻，即杆的电阻。

解答　设电路的总电阻为 R。当金属杆匀速运动速度为 v 时，它产生的感应电流为

$$I = \frac{E}{R} = \frac{BLv}{R} \tag{1}$$

感应电流在电阻上消耗的电功率

$$P = I^2 R \tag{2}$$

当金属杆匀速运动时，金属杆所受的重力 mg 和安培力 $F = BIL$ 平衡，即

$$mg = F = BIL \tag{3}$$

联立(1)(2)(3)式，并代入数据，可得到金属杆匀速运动时的速度

$$v = \frac{P}{mg} = \frac{0.27}{6.0\times10^{-3}\times10}\ \text{m/s} = 4.5\ \text{m/s}$$

因为 R 是由 R_1 与 R_P 并联，然后再与 r 串联的总电阻，则

$$R = r + \frac{R_1 R_P}{R_1 + R_P} \tag{4}$$

联立(1)(2)(4)式，代入数据，可得到滑动变阻器接入电路部分的电阻值

$$R_p = 6\ \Omega$$

在杆下落的过程中，重力对金属杆做正功，安培力对杆做负功。杆的重力势能减少，减少的势能一部分转化为动能，另一部分通过安培力做功转化为电能，电能又在金属杆和固定电阻，以及

滑动变阻器接入电路部分转化为它们的内能。当杆做匀速运动时，其不断减少的重力势能全部转化为电能，再转化为金属杆和上述电阻的内能，因此重力做功的电功率等于整个电路消耗的电功率。按此思路解题，可以使解题过程更简洁。请你试一试，体验用能量转化的观点分析问题的优点。

家庭作业与活动

1. 感应电动势的计算公式有 $E = n\dfrac{\Delta\Phi}{\Delta t}$ 和 $E = BLv$ 两个。这两个公式是完全相同的吗？在分析实际问题时，应该如何区分、使用这两个公式？

2. 如图 1–36 所示，O 点正下方有一个具有理想边界的磁场，一个铜环在 A 点由静止状态释放，向右摆到最高点 C。不考虑空气阻力，下列说法中正确的是

   A. A、C 两点在同一水平线上

   B. A 点高于 C 点

   C. A 点低于 C 点

   D. 铜环将做等幅摆动

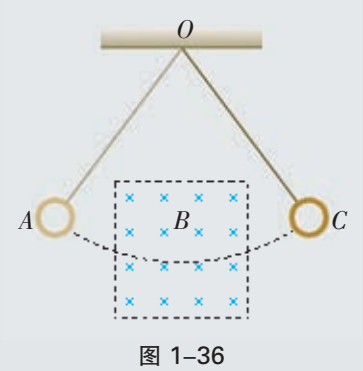


图 1–36

3. 图 1–37 是法拉第制作的世界上第一台发电机的结构原理图。把一个铜盘放在磁场里，使磁感线垂直穿过铜盘。转动铜盘，就可以获得持续的电流。试解释其原理。

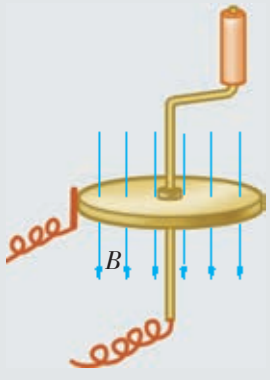


图 1–37

4. 如图 1–38 所示，在虚线圆周内有一均匀的磁场，其磁感应强度 B 正以 0.1 T/s 的变化率减小。在圆周内放一金属圆环，使圆环平面垂直磁场。已知此圆环半径为 0.1 m。

   (1) 圆环中产生的感应电动势多大？

   (2) 设圆环的电阻为 1 Ω，则圆环中的电流为多大？

   (3) 仍设圆环的电阻为 1 Ω，但在环上某处将圆环断开，并在断开形成的两端点间接入一个 4 Ω 的电阻，这两端点的电压为多大？

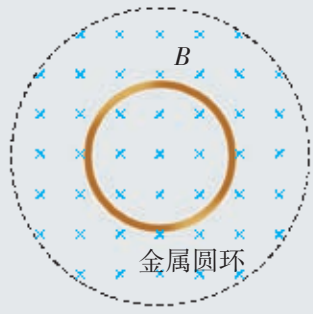


图 1–38

5. 已知某一区域的地下埋有一根与地表面平行的直线电缆。当电缆中通有变化的电流时，在其周围就有变化的磁场。我们在地面上用一个闭合试探线圈可探测电缆的确切位置、走向和深度。

   如图 1–39 所示，让线圈平面平行于地面进行测量，这时在地面上 a、c 两处测得试探线圈中的电动势为零，在 b、d 两处测得试探线圈中的电动势不为零。当线圈平面与地面成 45°夹角，且线圈平面的法线和 bd 在同一竖直平面上时，在 b、d 两处测得试探线圈中

的电动势为零。已知 a、b、c、d 恰好位于边长为 1 m 的正方形的四个顶点上，问：

(1) 地下电缆应该处在哪两点连线的正下方？

(2) 地下电缆离地表面的深度为多少？

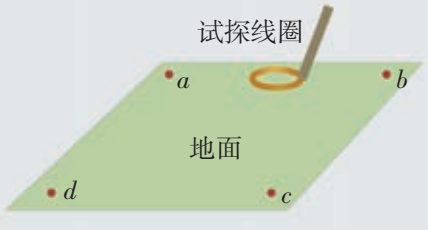
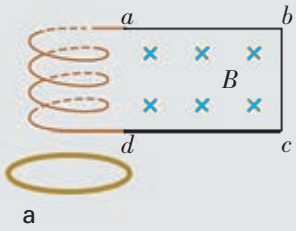
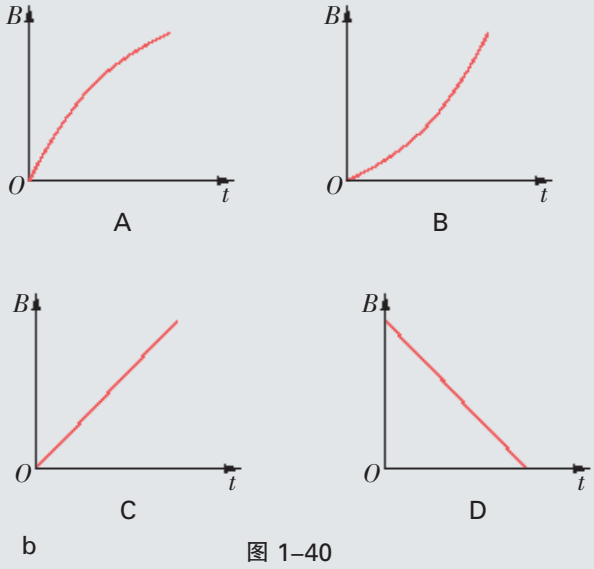


图 1–39

6. 如图 1–40a 所示，竖直放置的螺线管与导线 $abcd$ 构成闭合电路，电路所围区域内有方向垂直纸面向里的匀强磁场，螺线管下方水平桌面上有一个导体圆环。电路所围区域内磁场的磁感应强度按图 1–39b 中哪种图像所表示的方式随时间变化时，导体圆环将受到向上的磁场作用力？



a



b

图 1–40

7. 如图 1–41 所示，一弹簧上端固定，下端悬挂着一根磁铁。将磁铁托到某一高度后放开，磁铁便上下振动，经过一段时间才停下来。如果在弹簧下方放置一个固定的闭合线圈，使磁铁上下振动时穿过线圈，磁铁就会很快停下来。解释这个现象，并说明此现象中能量转化的情况。



图 1–41

8. 如图 1–42 所示，有一边长 $L = 0.1$ m 的正方形线圈 $abcd$，质量 $m = 10$ g，自高度 $h = 0.2$ m 处自由下落。下边 ab 进入匀强磁场后，线圈开始做匀速运动，直到其上边 dc 刚刚离开匀强磁场为止。此匀强磁场区域的宽度也是 L。求线圈在穿越匀强磁场的过程中产生的热能。取 $g = 10\ \mathrm{m/s^2}$。

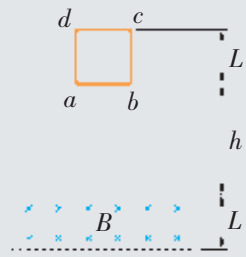


图 1–42

9. 如图 1–43 所示，在磁感应强度为 0.5 T 的匀强磁场中，让长为 0.2 m 的导体棒 MN 在无摩擦的框架上以 5 m/s 的速度向右匀速运动，电阻 $R_1 = R_2 = 2\ \Omega$，其他导体的电阻不计，则外力做功的功率有多大？感应电流的功率有多大？在 R_1 和 R_2 上消耗的功率有多大？检验一下：其中的能量转化是否符合守恒定律？

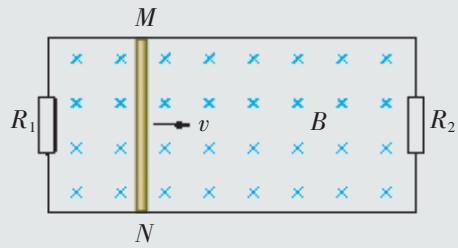


图 1–43

10. 有一台直流电动机，在 220 V 的电压下工作，电流为35 A。用它匀速提升质量为1400 kg的货物，在2 s内货物被提升1 m。

(1) 设电动机输出的能量全部用来提升货物，那么在这2 s内，电动机线圈产生的热能为多少(不计摩擦)？

(2) 这台电动机的效率为多大？

(3) 这台电动机线圈的电阻为多大？

11. 1992 年和 1996 年，人们在美国的航天飞机“阿特兰蒂斯”号上进行了一种卫星悬绳发电实验。航天飞机在赤道上空的圆形轨道上飞行，速度 7.5 km/s。地磁场在飞行轨道附近的磁感应强度 $B \approx 0.50 \times 10^{-4}$ T。从航天飞机发射出的一颗卫星，由一根长 $L = 20$ km 的金属悬绳与航天飞机相连，悬绳方向指向地心，电阻 $r \approx 800\ \Omega$，结果在悬绳两端产生了感应电动势。

(1) 这种悬绳发电实验的原理是什么？

(2) 悬绳上产生的感应电动势有多大？

1.5 自感现象与日光灯

日光灯是常用的照明灯具。它不仅发光效率比较高，而且发出的光自然、柔和。

日光灯电路是由哪些元件组成的？你知道这些元件的作用吗？

探究日光灯电路

技术资料表明，一支 40 W 的日光灯管，点亮它需要近千伏的电压(称为起辉电压)，而维持它的正常发光，只要 108 V 左右的电压(称为工作电压)。我国家庭电路的电压是 220 V。那么，在日光灯的电路中是怎么获得日光灯起辉电压的呢？

实验探究 1　研究日光灯电路

按图 1–45 连接日光灯电路，进行实验。

1. 闭合开关，观察日光灯的发光过程。

2. 断开开关，拆除起辉器和镇流器；再闭合开关，灯管还能发光吗？

3. 在图 1–45 所示电路中，用导线将灯管的两端与示波器的 Y 输入端连接。闭合开关，观察在灯管起辉发光过程中，示波器上



图 1–44　光线明亮的图书馆

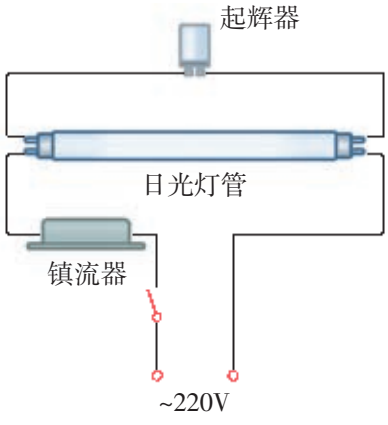


图 1–45　日光灯电路

的波形(图 1–46)。

你能估计出日光灯管起辉过程中,脉冲电压的最大值约是多少吗?



图 1–46　日光灯起辉过程中,灯管两端的电压波形　左端是灯管两端点亮时的波形,右端是正常发光时的波形。请注意两波形衔接处的脉冲波(示波器 Y 轴灵敏度为每格 200 V)。

由上面实验可知,日光灯电路的镇流器可以产生很高的瞬时电压。镇流器是一个带铁心的多匝线圈。它怎么会产生高电压的呢?让我们做进一步的研究。

探究自感现象

实验探究 2　探究电路闭合时线圈的自感现象

在如图 1–47 所示的电路中,L 是带铁心的线圈,A_1、A_2 是两只同样的灯泡。

1. 先闭合开关 S,调节 R_1 和 R_2,使 A_1、A_2 两只灯泡的亮度相同,再断开开关 S。

2. 再次闭合开关 S。请仔细观察,两只灯泡在电路接通瞬间的发光情况有什么不同?

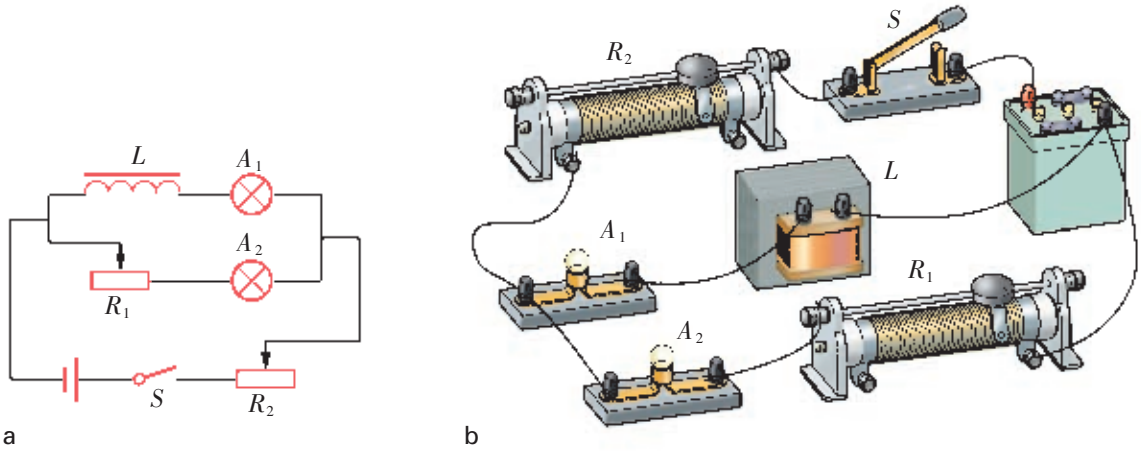


图 1–47　探究电路闭合时线圈的自感现象

实验探究 3　探究电路断开时线圈的自感现象

按照图 1–48 连接电路。闭合开关S,待灯泡 A 正常发光后,再断开电路。观察灯泡在电路断开瞬间的发光情况。

请注意:当开关断开时,灯泡和线圈组成了一个闭合电路。

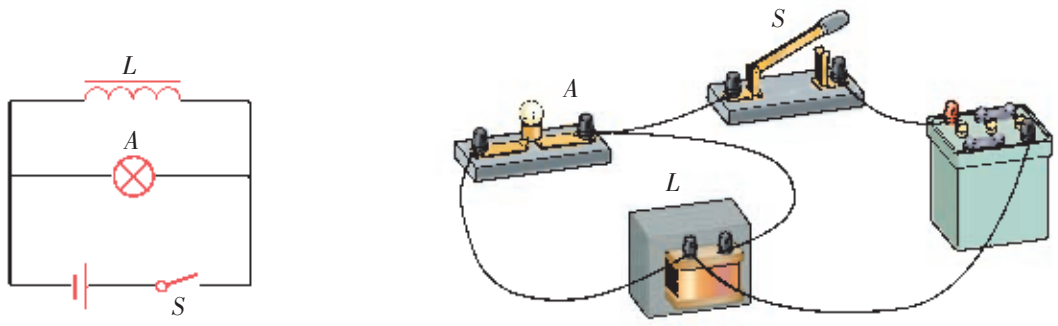


图 1–48　探究电路断开时线圈的自感现象

分析论证

我们先来分析电路接通瞬间,接有线圈 L 的灯泡开始发光较暗的原因。

在图 1–47 所示的电路中,电路闭合前,线圈中磁通量为零。在接通电路瞬间,线圈中的磁通量突然增加。根据电磁感应定律,只要线圈中的磁通量发生变化,线圈中就会产生感应电动势。根据楞次定律,线圈中的感应电动势阻碍线圈中电流的增大。这样,通过灯泡 A_1 的电流只能缓慢地增大,故灯泡开始发光较暗,直至线圈内磁通量不变化了,灯泡才正常发光。电阻所在的支路没有线圈,电路一接通,灯泡 A_2 立刻就正常发光。

理论和实验说明,线圈自身电流变化也会产生电磁感应。物理学中,把由于导体本身的电流发生变化而产生的电磁感应现象叫做**自感现象**(self–induction)。自感现象中产生的感应电动势叫做**自感电动势**(self–induction electromotive force)。

请分析实验探究 3 中开关断开时,灯泡不立即熄灭的原因。

在做图 1–48 所示的实验中,开关断开后,灯泡发光还能维持一段时间。那么,它的能量是从哪里来的呢?

这是因为,磁场这种物质是具有能量的。开关闭合时,线圈中的

由于亨利这个单位较大，技术上常用较小的单位毫亨(mH)和微亨(μH)。

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

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

例如，一个密绕 3000 匝的单层线圈，若线圈长 50 cm，横截面积是 10 cm^2，其自感系数约 23 mH。

信息浏览

日光灯管、起辉器和镇流器

日光灯管

如图 1–49 所示，日光灯管的两端各有一根灯丝，灯管内充有微量的氩和稀薄的水银蒸气，内壁上涂有荧光粉。灯管内的气体在起辉电压的作用下，从不导电变为导电，从而发出紫外线，射到荧光粉上，激发出可见光。灯管气体没有变为导电状态时，电阻

很大，可以视为断路；当管内气体变为导电状态后，电阻很小，可认为是纯电阻。

镇流器

如图 1–50 所示，镇流器是用漆包线密密绕制的线圈，线圈内是用硅钢片叠制的铁心。当线圈中的电流突然被切断时，它可以产生很高的电压。

起辉器

起辉器的结构如图 1–51 所示。充有氖气的玻璃泡壳内有两个金属电极，一个是不动的静触片，另一个是由双金属片构成的 U 形动触片。当两电极间加上电压时，在电极间产生电弧，使动触片受热膨胀伸展，与静触片接触，电弧便熄灭；电弧熄灭又使动触片的温度下降收缩，与静触片突然断开。所以起辉器实际上起着自动开关的作用。起辉器旁并联着一个电容器，它可减小动、静触片断开时产生的火花，避免烧坏触点。

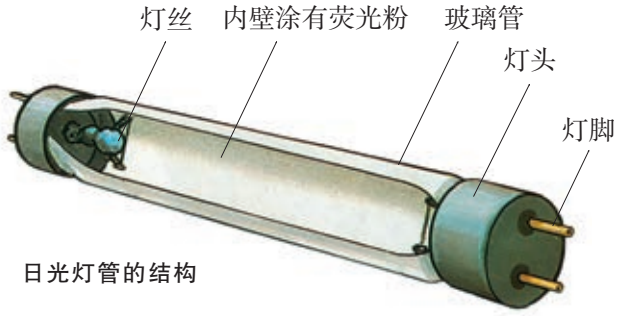


图 1–49　日光灯管的结构

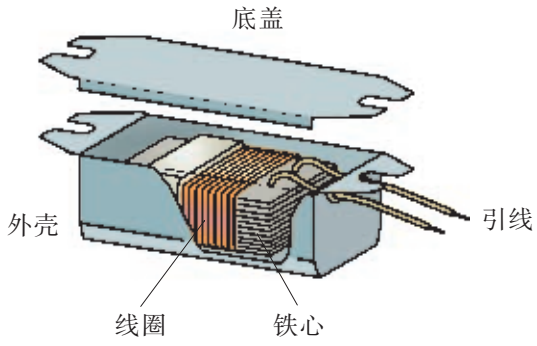


图 1–50　镇流器的结构

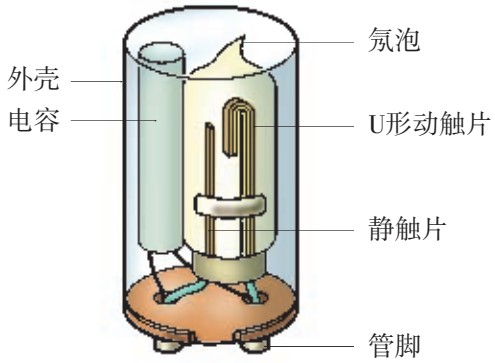


图 1–51　起辉器的结构

案例分析

案例　电子设备中常要用一种没有电感的精密电阻，它是用一根电阻线对折后绕制（双线并绕法）成的线圈，如图 1–52 所示。为什么这种结构的电阻会没有电感呢？

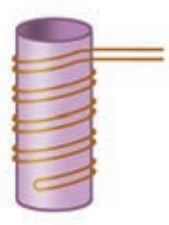


图 1–52　无电感电阻

分析　双线并绕的线圈相当于两个线圈一圈隔一圈地绕在同一个线圈架上。通电时，两个线圈中的电流方向正好相反，产生的磁场方向也相反。

请进一步分析，得出你的结论。

自感现象在电子技术中的应用极为广泛。利用线圈具有阻碍电流变化的特性，可以稳定电路中的电流。无线电设备中常用电

感器和电容器组合成谐振电路和滤波器等。

但在某些情况下，自感现象也是非常有害的。例如具有大自感线圈的电路断开时，电路中会产生很大的自感电动势，它会击穿线圈本身的绝缘保护，或者在电闸断开的瞬间产生强烈的电弧，以致烧坏电闸。在设计电路时，设计人员要想方设法避免这些情况的发生。

多学一点　互感现象

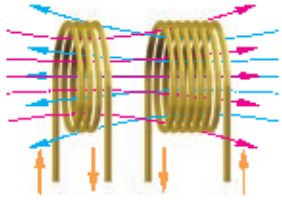


图 1–53　互感现象

若有两个线圈，如图 1–53 放置。线圈 1 中的电流变化时所产生的变化磁场，会在临近的线圈 2 中产生感应电动势；同样，线圈 2 中的电流变化时，也会在线圈 1 中产生感应电动势。这种现象叫做**互感**(mutual induction)。互感所产生的电动势叫做**互感电动势**(mutual induction electromotive force)，其大小为

$$E_1 = M\frac{\Delta I_2}{\Delta t}$$

$$E_2 = M\frac{\Delta I_1}{\Delta t}$$

式中 M 叫做互感系数，它是由线圈的几何形状、大小、匝数以及线圈之间的相对位置决定的。

互感现象有着广泛的应用，它是变压器的工作基础。利用两个线圈间的互感，可以传递交流信号而阻隔直流信号。图 1–54 是收音机中利用互感现象，将天线接收的无线电信号传递给调谐部分的接收电路。

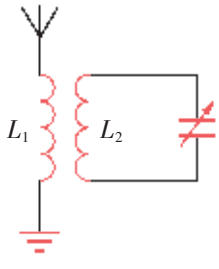




图 1–54　收音机的接收电路

家庭作业与活动

1. 在探究自感现象的实验中(图 1–48)，为了使现象明显，要选择电阻值比灯泡 A 灯丝阻值小得多的线圈。请分析这样做的原因。
2. 在日光灯正常发光后，取下起辉器，会影响灯管的发光吗？为什么？
3. 电容器两端的电压过高，电容器的绝缘层就会被破坏，变成导体，即电容器的两极连通。这称为电容器的击穿。这是日光灯启动器启动时常见的一种故障。请你分析为什么经常会出现这种故障。
4. 请从能量转化的角度谈谈对图 1–47 所示实验的认识。



图 1–55　有四个灶头的电磁灶

1.6

涡流现象与电磁灶

将金属锅放在电磁灶的绝缘面板上，接通电源，锅体的温度就会很快升高。这是怎么回事呢？

变压器和镇流器的铁心为什么要用一片片互相绝缘的薄硅钢片叠压而成？用整块的金属不是更省事吗？

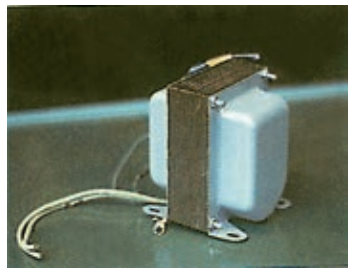


图 1–56　变压器的铁心都是用一片片的硅钢片叠压而成的

探究涡电流现象

分析论证

如图 1–57 所示，假设线圈中的铁心是用整块软铁制成的，则铁心的横截面可看作是由一圈圈闭合回路组成的。当线圈中通有交变电流时，铁心中这些回路的磁通量就会发生变化，从而在铁心内产生感应电流。这种感应电流呈涡旋状，叫做**涡电流**(eddy current)，简称涡流。

由于整块金属的电阻很小，所以涡电流常常很大。涡电流会引起铁心发热，这不仅损耗了大量的电能，而且还可能烧坏设备，

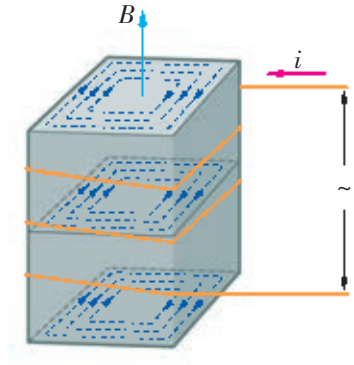


图 1–57　涡电流的产生

引起事故。变压器和镇流器的铁心通常用涂有绝缘漆的薄硅钢片叠压制成，而不是用一整块铁制成，其原因就是为了减小涡电流。

请分析思考：

为什么变压器和镇流器的铁心用硅钢片叠压而成，就可以有效地减小涡电流？

无火之灶——电磁灶

涡电流会使金属发热。电磁灶就是利用这个原理制成的。图 1–58 是某种型号电磁灶的部分解剖图。

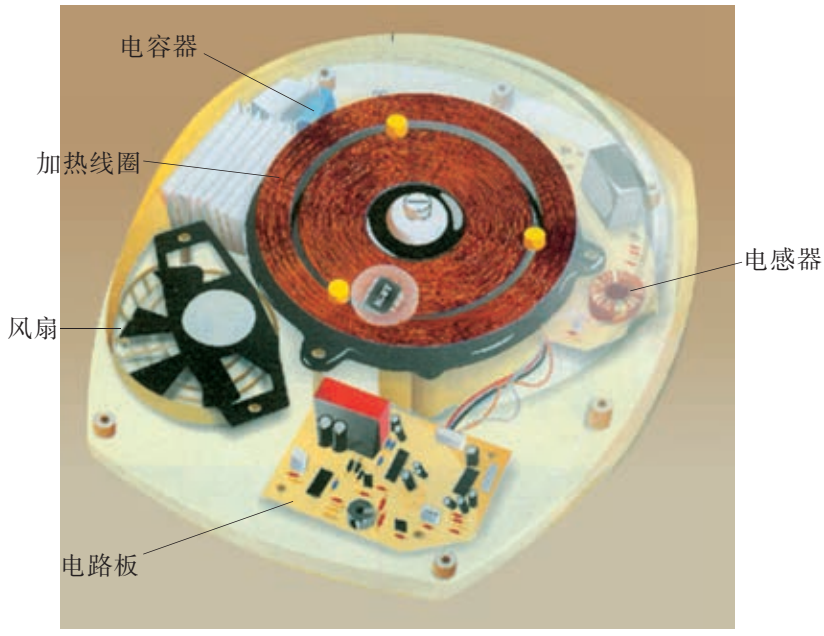


图 1–58　某种型号电磁灶的主要结构

常用的电磁灶有工频电磁灶和高频电磁灶。

工频电磁灶

工频电磁灶的结构如图 1–59 所示，它的励磁线圈和励磁铁心构成了工频励磁器。接通电源后，在两组线圈中分别通过 50 Hz 的电流 i_A 和 i_B，从而在锅体中产生涡流，涡流的电能在锅体的材料电阻上转化为热能以加热食品。同时，涡流又在磁场中受到电磁力的作用，可使锅体紧紧地吸附在灶面板上，避免产生振动而发出噪声。

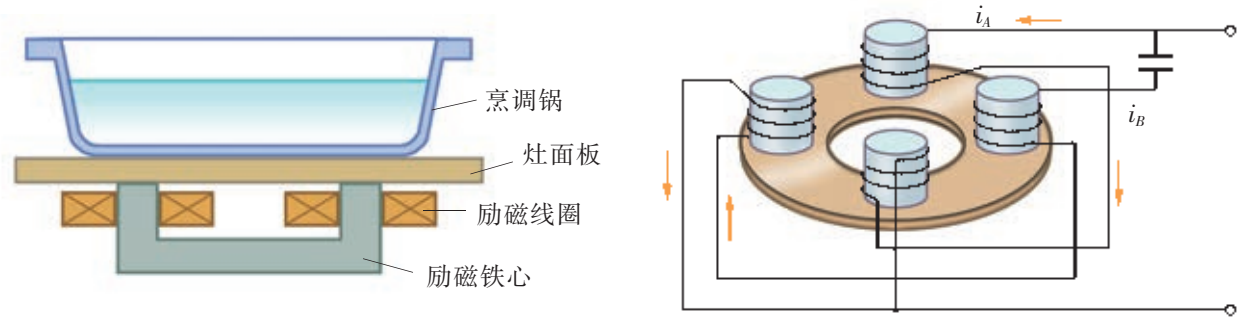


图 1–59　工频电磁灶的结构与原理示意图

高频电磁灶

图 1–60 是高频电磁灶的结构示意图。它由加热线圈、灶面板、控制保护电路三部分组成。接通电源后，50 Hz 的交变电流经过整流和滤波变为直流，然后通过电子开关的迅速导通和截止，使加热线圈中产生频率为 20 ~ 50 kHz 的高频振荡电流。高频电流产生高频磁场，从而在锅体内产生涡流，涡流导致锅体发热，加热食品。

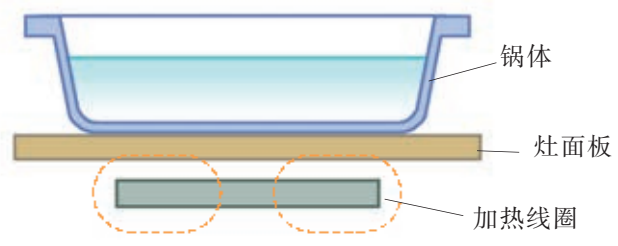


图 1–60　高频电磁灶的结构示意图

图 1–61 是目前常见的几种电磁灶。

利用涡电流转化的热能，还可提炼金属；利用涡电流在磁场中受到的电磁力，可制成电磁驱动设备和电磁阻尼设备。



平面电磁灶　　凹面电磁灶　　双灶头电磁灶

图 1–61　几种常见的电磁灶

信息浏览

安全检查报警器

乘坐飞机的乘客登机前都要接受安全检查。图1–62是一种手持式安全检查报警器。一靠近金属体，它就会发出报警声。这是为什么呢？

原来，在报警器内有一线圈，线圈中通有高频电流，因此线圈周围有着高频磁场。当报警器靠近金属体时，线圈的磁场在金属体中感应出涡电流，涡电流产生的磁场又会穿过线圈，改变线圈中的原磁场，使相关的电子设备产生报警声。

图1–63是安全检查报警门，有金属体通过门时，就会发出报警声。你能说出它的工作原理吗？





图1–62　手持式安全检查报警器



图1–63　安全检查报警门

STS

感应式电能表

感应式电能表是常用的记录电能消耗量的仪表，图1–64是家庭常用的单相感应式电能表。

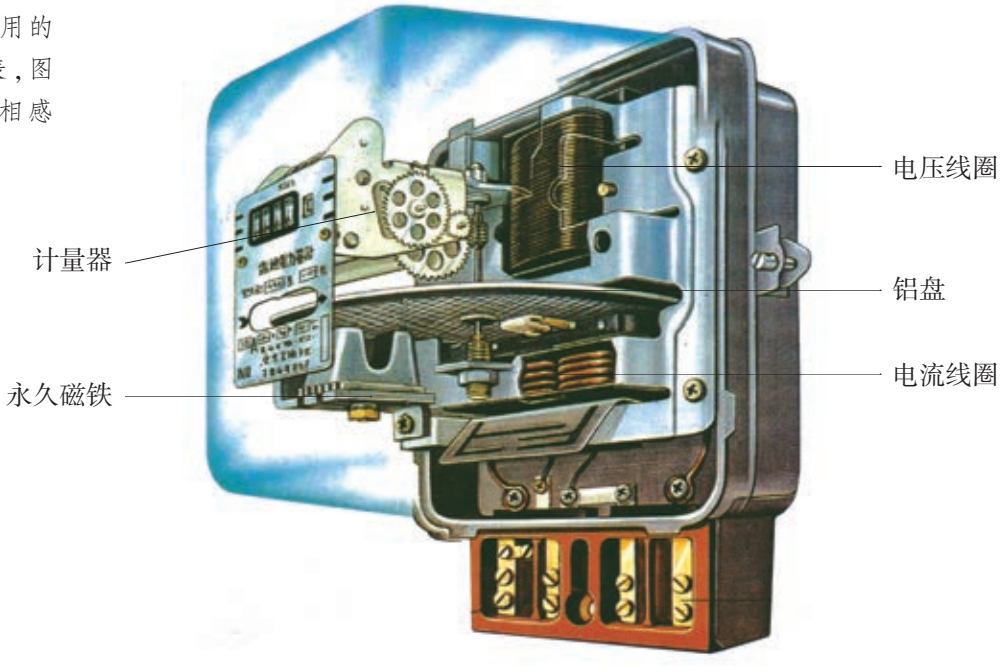


图1–64　感应式电能表

感应式电能表中有两组线圈——电压线圈和电流线圈。电压线圈与负载并联，电流线圈与负载串联。负载工作时，电压线圈和电流线圈产生的磁感线都穿过一个可以转动的铝盘，在铝盘中感应出涡电流。这涡电流又受线圈磁场力的作用，使铝盘发生转动。铝盘的转速与负载消耗的电功率有关，负载越大，转动越快。铝盘的转数和电能消耗量成正比。制造电能表时，已设定好每消耗 1 kW·h 电能的铝盘转数，即电能表常数。

通过蜗杆和齿轮，铝盘的转动传递给了计量器，计量器则按电能消耗量标度。

电能表中有一永久磁铁，它产生制动力矩。当转动力矩和制动力矩平衡时，铝盘匀速转动，其转速与负载消耗的电功率成正比。

感应式电能表结构比较复杂，误差相对也较大。随着科学技术的发展，人们利用微电子技术制造了一些其他形式的电能表，如图 1–65 所示。



图 1–65　各种形式的电能表

家庭作业与活动

1. 为什么变压器铁心都是用硅钢片叠制而成的，而电磁铁的铁心却用整根的软铁棒？
2. 强大的涡电流在金属内流动时，会释放大量的热能。工业上利用这种热效应，制成高频感应电炉来冶炼金属，其结构原理图如图 1–66 所示。请分析其工作原理。



图 1–66　高频电磁感应炉

3. 如图 1–67 所示，让一金属圆盘接近磁铁的两极，但不接触。使磁铁转动，圆盘也会跟着转动。这种现象称为“电磁驱动”。请你说明电磁驱动的原理。



图 1–67　电磁驱动

4. 实验室中测量直流电流和直流电压的电流表和电压表，线圈都是绕在一个铝制的长方体框架上的。请你思考为什么要用铝制框架。

1.x

第 1 章家庭作业与活动

1. 南极考察队的汽车在南极附近的水平路面上行驶，若考虑地磁场的作用，你认为车轮钢轴上会产生感应电动势吗？若能产生感应电动势，它的大小与哪些因素有关？若不能产生感应电动势，请说明理由。
2. 如图 1–68 所示，矩形线圈 A 自由落下，进入一个有界的匀强磁场。在线圈开始下落到线圈框上边刚好与磁场上边缘平齐的过程中，线圈中感应电流的方向如何？有哪些力对线圈做功？线圈中能量的转化情况如何？

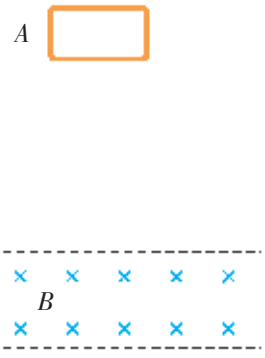


图 1–68

3. 一个有金属表面的人造地球卫星围绕地球赤道运行，地球磁场会在其表面上引起感应电流吗？若卫星绕地球两极运行又如何？

   如果围绕地球赤道运行的卫星上有感应电流产生，那么感应电流将对卫星的运动产生什么影响？
4. 一个 160 匝的小线圈，面积为 4 cm^2，电阻为 50 Ω。把线圈与阻值为 30 Ω 的电流表连接起来，然后把小线圈放到匀强磁场中。开始时线圈平面与磁场垂直，当把线圈迅速转到与磁场平行时，测得流过电流表的电量为 4×10^{-5} C，求线圈所在处的磁感应强度的大小。
5. 一台正在转动的电风扇突然卡住不转了，你认为可能会发生什么现象？
6. 如图 1–69 所示，两根相距 d = 0.20 m 的平行金属轨道固定在同一水平面内，并处于竖直方向的匀强磁场中，磁感应强度 B = 0.20 T。导轨上面横放着两根金属细杆，构成一矩形闭合电路。每根金属细杆的电阻 r = 0.25 Ω，电路中其余部分电阻不计。已知两金属细杆在拉力作用下沿导轨朝相反方向匀速平移，速度大小都是 v_0 = 5.0 m/s，不计轨道的摩擦。

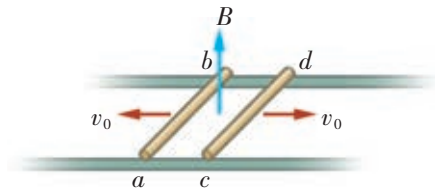


图 1–69

   (1) 求作用于每根金属细杆的拉力的大小。
   (2) 求两金属细杆在间距增加 0.40 m 的滑动过程中产生的总热量。
7. 如图 1–70 所示，一正方形线框由粗细均匀的轻质电阻丝围成，置于一个有边界的正方形磁场中，磁场方向垂直于线框平面，其边界与线框的边平行。现使线框以同样大小的速度沿上下左右四个方向平移出磁场，在这四种情况中，线框中产生的感应电流大小相同吗？ab 两点间的电压大小相等吗？外力做的功相同吗？请说明你的理由。

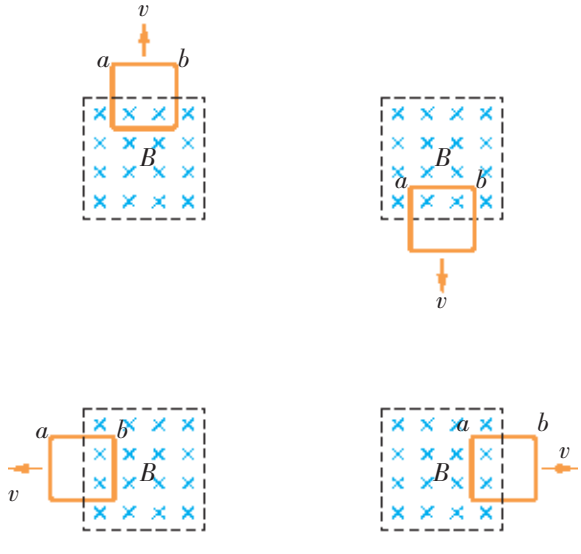


图 1–70

8. 如图 1–71 所示，ab、cd 是两根固定的光滑金属导轨，竖直放置，上面套有一根可滑动的金属细棒。整个装置放在磁感应强度 $B = 0.5$ T 的垂直于导轨平面的匀强磁场中。已知金属细棒长 $L = 10$ cm，电阻 $R = 0.2\ \Omega$，质量 $m = 20$ g，在开关 S 闭合之前使棒处于静止状态。电源电动势 $E = 1.5$ V，内阻 $r = 0.1\ \Omega$，导轨电阻和空气阻力不计，取 $g = 10$ m/s^2。现将开关 S 闭合，那么：

(1) 金属细棒能达到的最大速度为多大？

(2) 金属细棒达到最大速度后，电路中消耗的热功率为多大？电源消耗的功率为多大？金属细棒重力的功率为多大？

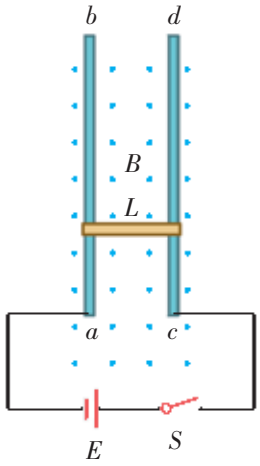
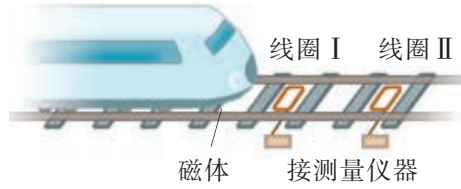
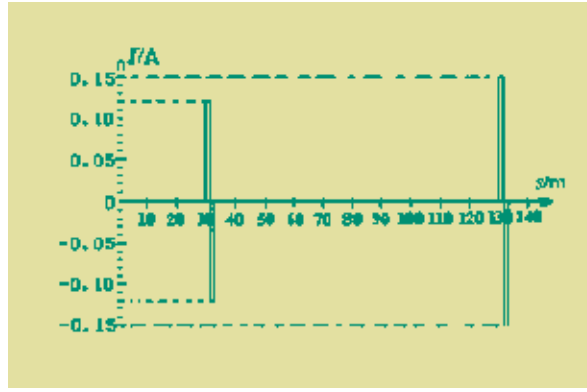


图 1–71

9. 为了测量列车运行的速度和加速度的大小，人们采用了如图 1–72a 所示的装置，它由一块安装在列车车头底部的强磁体和设置在轨道底下的一组线圈及电流测量记录仪（未画出）组成。当列车经过线圈上方时，线圈中产生的感应电流数据被记录下来，列车的加速度和速度就能根据这些数据求出。假设磁体端面磁场的磁感应强度 $B = 0.004$ T，且全部集中在端面附近，方向与端面相垂直。磁体的宽度与线圈宽度相同，都很小。线圈匝数 $n = 5$，长 $L = 0.2$ m，电阻 $R = 0.4\ \Omega$（包括引出线的电阻），记录下来的电流–位移图像如图 1–73b 所示。试计算在离 O（原点）30 m、130 m 处列车速度 v_1 和 v_2 的大小。



a



b

图 1–72

课题研究

从磁卡到感应卡

“一卡在手，走遍神州。”这句话生动地描述了现代生活与卡的密切关系。随着社会需求的增长，从最初的磁卡到 IC 卡，再到感应卡（非接触式 IC 卡），卡的智能化程度日益提高，卡的使用范围日益广泛。请你谈谈卡与哪些物理知识有联系，有怎样的联系。

研究动圈式话筒和动圈式扬声器

在教师指导下，研究动圈式话筒和动圈式扬声器的结构，讨论它们的工作原理，比较两者结构上的异同。动圈式扬声器可以当话筒使用吗？请试一试。



图 2–1　流光溢彩的现代都市之夜

第 2 章
交变电流与发电机

现代都市之夜，华灯齐放，流光溢彩。街道上，车水马龙，路灯、车灯、霓虹灯、交通信号灯，汇成一条条光的彩虹。住宅区里，万家灯火，电视机播放着精彩的节目，空调机营造着温度适宜的环境，电冰箱制出晶莹剔透的冰块，洗衣机在工作……每当我们享受这些现代物质文明成果时，你可曾想过，正是法拉第发现的电磁感应定律，开辟了人类通向电气化的道路。

在生产和生活中，供电系统使用的都是交变电流。那么，什么是交变电流呢？它是怎样产生的？发电机是怎样发电的？交变电流与直流电相比，具有哪些特点呢？

本章将从研究交变电流的产生开始，认识交变电流的特点，学习描述交变电流的方法，探究电阻、电感和电容等元器件在交流电路中的作用，并进一步认识交变电流与我们的生产、生活和社会的关系。





图 2–2　正在吊装的大型发电机的转子和定子

2.1

怎样产生交变电流

我们在《物理 3–1》中研究的是恒定电流，其特点是电路中的电流与电压的大小和方向都不随时间变化。电冰箱和空调机等家用电器使用的都是交变电流。图 2–3 是电冰箱和空调机铭牌的一部分，你能说出上面标示的“额定电压 220 V~”、“额定频率 50 Hz”等字样和符号的意义吗？那么，什么是交变电流呢？让我们用示波器来观测、研究交变电流。

方向不随时间而改变的电流叫做直流（direct current）；方向和大小不随时间而改变的电流叫做恒定电流。

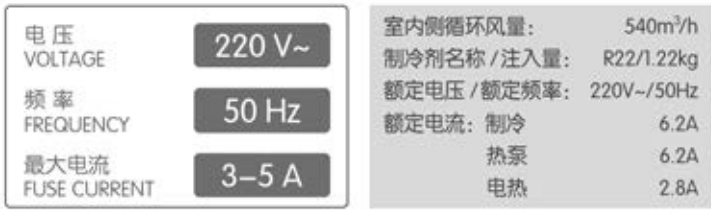


图 2–3　某种型号电冰箱和空调机铭牌的一部分

什么是交变电流

实验探究　用示波器观察交变电流

把恒定电流和交变电流先后输入图 2–4 所示的示波器，从示波器屏幕上观察恒定电流和交变电流的图像。

图 2–5 是恒定电流的电压与时间关系的图像，图 2–6 是交变电流的电压与时间关系的图像。请根据图像分析，恒定电流和交变电流的电压大小和方向与时间的关系各有什么特点？



图 2–4　示波器和学生电源

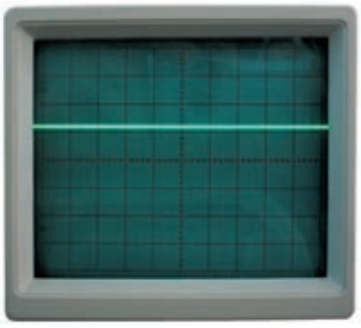


图 2–5　示波器显示的恒定电流的电压图像

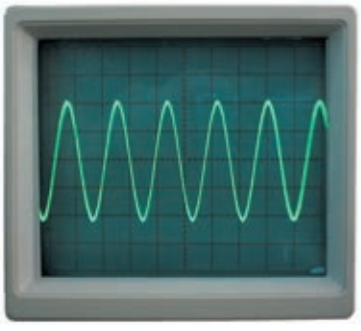


图 2–6　示波器显示的交变电流的电压图像

请思考：图 2–6 中的交变电流的电压图像跟数学中什么函数的图像相似？

在交变电流的电路中，交变电流的电流和电压，大小和方向都在随时间做周期性的变化。物理学中把**大小和方向都随时间做周期性变化的电流，叫做交变电流**（alternating current），简称交流。

图 2–6 所示的交变电流的电流和电压是按正弦函数规律变化的，这种电流叫做**正弦式交变电流**（sinusoidal current），简称正弦式电流。

电器产品的铭牌和技术资料中，常用字母“AC”或符号“~”表示交流；而用字母“DC”或符号“–”表示直流。

家庭电路和动力电路供给的交变电流是由交流发电机产生的。那么，交流发电机是怎样产生交变电流的？交流发电机的基本结构是怎样的？发电机产生的电能是由什么能转化而来的？

交流发电机

图 2–7 是教学用的交流发电机的结构和原理示意图。从图中可看出，它由可转动的线圈（电枢）和磁体两部分组成。线圈在磁场中转动时产生的感应电流经过滑环和电刷输出。

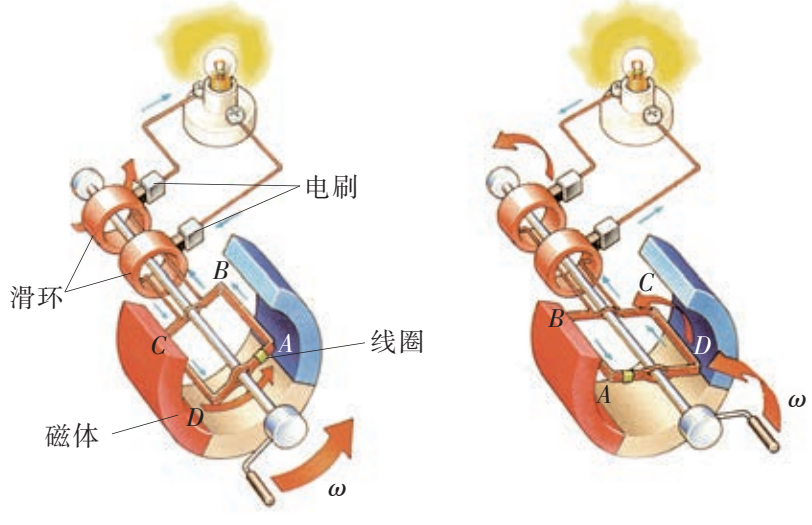


图 2–7　交流发电机的结构

分析论证　交流发电机的原理

交流发电机是怎样产生交变电流的呢？

定性研究

如图 2–7 所示，当线圈在外力驱动下匀速转动时，AB、CD 边因切割磁感线而产生感应电动势，并通过滑环和电刷与外电路连接。由于线圈在磁场中不同位置时切割磁感线的速度不同，因而产生了大小和方向随时间不断变化的交变电流。

在发电机线圈转动一周的过程中，线圈在哪些位置感应电动势为零？在哪些位置感应电动势最大？在哪些位置感应电动势的方向会发生改变？

发电机在运转过程中，产生的电动势为零时线圈所处的位置叫做中性面。

图 2–8 是发电机线圈转动一周过程中的几个瞬时位置，请在图 2–9 的 e–t 图中，画出线圈转动一周，感应电动势随时间变化的一个可能的图像。



图 2–8　发电机线圈的几个瞬时位置

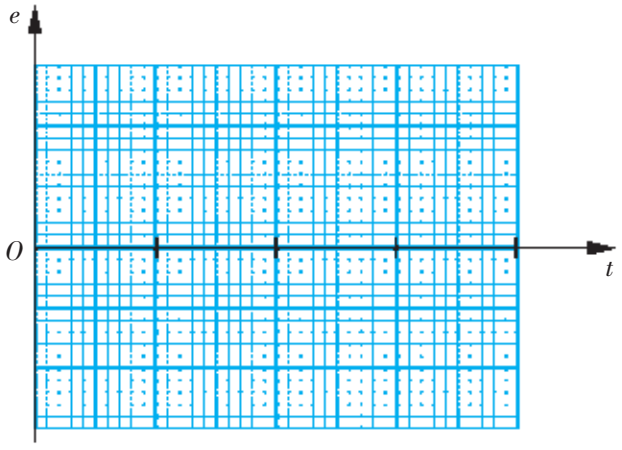


图 2–9　请画出发电机线圈的 e–t 图像

你能用磁通量变化率来解释发电机的发电过程吗？

定量研究

设发电机线圈的 AB 边和 CD 边长度是 L，BC 边和 DA 边的长度是 a。线圈在磁场中以角速度 ω 逆时针匀速转动，AB、CD 两条边转动的线速度是 v。匀强磁场的磁感应强度是 B。

在发电机线圈转动过程中，当线圈平面从与磁感线垂直的位置转过角度 θ 时（图 2–10），线圈中产生的感应电动势是

$$e = 2BLv\sin\theta \tag{1}$$

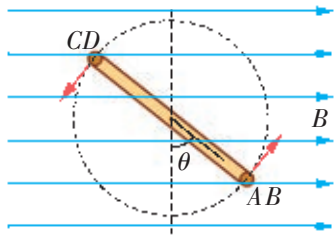


图 2–10　线圈平面从与磁感线垂直的位置转过角度 θ 时的正视图

请你推导出(1)式，并讨论(1)式的物理意义。

若从中性面开始计时，则 $E_{max} = 2BLv$，$\theta = \omega t$，代入(1)，得

$$e = E_{max} \sin \omega t \qquad (2)$$

式中 e 是感应电动势的瞬时值，E_{max} 是感应电动势的最大值。(2)式表明，发电机运转时，线圈中产生的感应电动势是按正弦规律变化的。

请讨论：

交流发电机发出的交流电周期 T 是多少？频率 f 是多少？它们与发电机线圈的转速 n 有什么关系？

旋转电枢式发电机和旋转磁极式发电机

前面所述的交流发电机都是线圈在磁场中旋转的发电机，这种发电机叫做旋转电枢式发电机。

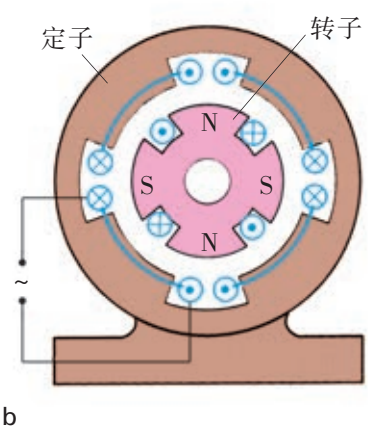
发电机中，可转动的部分叫做转子，固定的部分叫做定子。

在旋转电枢式发电机中，转子产生的电流必须经过裸露的滑环和电刷引到外电路。如果电压很高，就容易产生火花放电，可能烧坏发电机；而且电枢的大小也受到限制，线圈匝数不能很多。这种发电机能够提供的电压一般不超过 500 V。为了克服旋转电枢式发电机的上述缺陷，人们设计制造了旋转磁极式发电机。

图 2–11a 是旋转磁极式发电机的转子，图 2–11b 是这种发电机的原理图。转子上绕有线圈，通电后形成 N 和 S 极，定子内嵌有电枢线圈。当转子在外力带动下旋转时，转子磁场和电枢线圈就有了相对运动，即电枢线圈切割了磁感线，在线圈中便产生了感应电动势。这样转子转动一周，定子线圈上就感应出周期性变化的交变电动势。旋转磁极式发电机的电枢嵌在外壳内，占有的空间可以很大，它能提供几千伏到几万伏的电压，大型发电机都是旋转磁极式的。



a



b

图 2–11　旋转磁极式发电机的转子

多学一点　直流发电机

图 2–12 是直流发电机的示意图，发电机线圈的两端分别连到两个半圆形的滑环上。这两个滑环叫做换向器，它们固定在转轴上，与转子一起转动。

请思考：

在直流发电机中，线圈产生的感应电动势和外电路电压的波形相同吗？图 2–13 的图像描述的是哪一部分的电压变化？它是直流吗？图 2–12 中的半圆形滑环为什么叫做换向器？

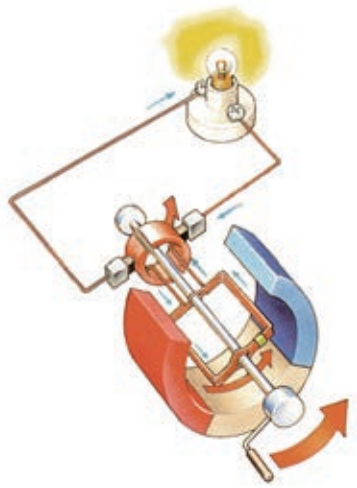


图 2–12　直流发电机示意图

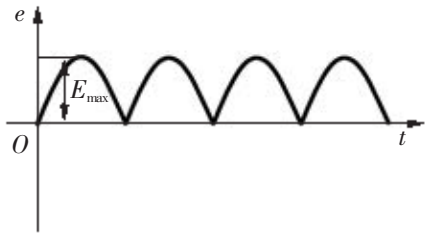


图 2–13　直流发电机发出的直流电波形

信息浏览

发电机发展简介

法拉第于 1831 年发现电磁感应现象后，即用旋转的铜盘得到了持续的感应电流，这实际上就是发电机的一个雏形。工程技术专家敏锐地意识到电对人类生活的意义，纷纷投身于电力开发、传输和利用的研究。

1832年，法国发明家皮克西(H. Pixii)制成第一台手摇发电机；世界上第一台直流发电机则是在 1834 年由美国的工程师达文波特(T. Davenport)在美国物理学家亨利的支持下制造的。从此，电力开始成为取代蒸汽动力的新能源。1867 年，德国工程师西门子(E. W. Siemens)制造了第一台自励式发电机，大大提高了发电的效率。

1880 年，爱迪生改进了西门子发电机，使它可以广泛地应用在家用照明上。1882 年，爱迪生建立的第一个火力发电站开始运行。

从法拉第发现电磁感应原理到爱迪生将电推广到工业生产的各个方面，大约经历了 50 年的时间。今天，世界进入了电气时代，生产和生活对电力的需求飞速增长，大容量发电机不断诞生。世界电机工业的一项新技术——发电机的定子和转子绕组都用水冷却的技术，即双水内冷技术，是由中国首先实施成功的。1958 年，上海电机厂制造出了单机容量为 12 MW 的世界上第一台双水内冷发电机。目前，我国自行制造的单机容量为 300 MW 的双水内冷发电机运行情况良好。国际上，俄罗斯、瑞典、瑞士、德国等国开发了 600 MW、800 MW 及 1300 MW 等更大容量的双水内冷发电机。



图 2–14　爱迪生自制的发电机，1886 年安装在爱尔兰一家纺织厂，持续使用了 27 年

交变电流的电能从哪里来

从能量转化的角度看，发电机是把机械能转变为电能的机器。那么，发电机的机械能是从哪里来的呢？

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

水力发电站是利用水的机械能驱动水轮机转动的；火力发电站是利用燃烧煤或其他燃料产生的高温高压蒸汽来驱动蒸汽轮机转动的；核电站是利用核反应堆产生的高温高压蒸汽来驱动蒸汽轮机转动的。

图 2–15 是目前常见的几种发电站。

请讨论：以目前常见的水力、火力和核能发电站为例，通过网

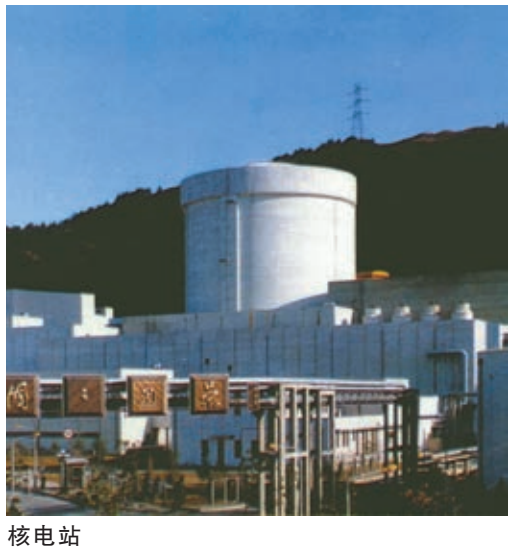
中国第一座商用火力发电厂是上海的乍浦路火电厂，于 1882 年 7 月 26 日正式发电，发电机组的容量为 12 kW，可点亮 19 盏弧光灯。仅比世界上最早的公用电厂晚 6 个月。



火力发电站



水力发电站



核电站

图 2–15　目前常见的几种发电站

络、图书等信息源，收集资料并加以分析整理，说明这几种发电站的工作流程、能量转化流向以及对社会和环境的影响。

你还知道哪些发电方式？它们用的是什么能源？请查阅相关资料，比较它们各自的特点。

家庭作业与活动

1. 图 2–16 所示的是交流发电机模型，采取哪些措施可以使得产生的电动势增大？

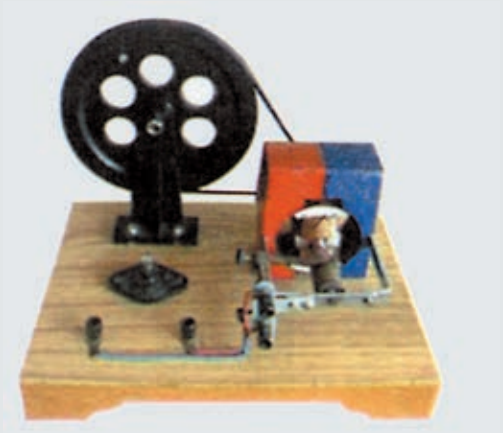


图 2–16　交流发电机模型

2. 一台发电机发出正弦式交变电流，其电动势的最大值为400 V，线圈匀速转动的角速度为314 rad/s。从中性面开始计时，试写出电动势瞬时值的表达式。电动势的有效值及周期分别是多少？在 1 s 内电流方向改变了多少次？
3. 你知道哪些发电方式？你对其中哪种发电方式感兴趣？你能从电磁感应原理的角度总结不同发电方式的共同点吗？
4. 有人说，在图 2–7 中，线圈平面转到中性面的瞬间，穿过线圈的磁通量最大，因而线圈中的感应电动势最大；线圈平面跟中性面垂直的瞬间，穿过线圈的磁通量为零，因而线圈中的感应电动势为零。这种说法对不对？为什么？
5. 设在图 2–10 中，矩形线圈的 AB 边长为 50 cm，在磁感应强度为 0.1T 的匀强磁场中匀速转动，AB 边和 CD 边的线速度均为 4 m/s。求线圈平面跟磁感线平行时，线圈中产生的感应电动势。若线圈与外电路连接后，全电路的总电阻值为 0.2 Ω，则线圈在此位置时，电路中电流的瞬时值为多大？
6. 一台交流发电机的转子线圈共有 n 匝，线圈框长为 l_1，宽为 l_2，转子的转动角速度为 ω，磁极间的磁感应强度为 B。根据以上条件你能推导出该发电机电动势最大值的表达式吗？现在知道有一种强永磁材料，叫钕铁硼，用它制成发电机的磁极，磁感应强度可增加到原来的 k 倍。如果保持发电机的结构尺寸和转子转动的角速度不变，要使产生的电动势不变，那么转子线圈需要多少匝？
7. 有一台发电机，其线圈的长与宽分别为10 cm和6 cm，内部匀强磁场的磁感应强度为 0.5 T。若要使这台发电机发出的电能够使家用电器正常使用，线圈应该有多少匝？（提示：请注意我国民用交变电流的周期和电压有效值。）
8. 阻值为 2 Ω 的矩形线圈，在匀强磁场中匀速转动，产生正弦式交变电流。已知从中性面转过 30°角时的感应电动势是 10 V，求线圈中电流的最大值。

课题研究

调查小型发电厂

参观当地的小型发电厂，了解发电过程，调查发电机的容量、居民用电和工业用电情况，以及发电厂环境保护的情况，写一份调查报告。

2.2 怎样描述交变电流

由于恒定电流的大小和方向不随时间变化，只要知道电路中电流或电压的数值，就可以定量描述了。而交变电流的大小和方向都随时间做周期性变化，需要用哪些新的物理量来描述呢？

用哪些物理量描述交变电流

周期和频率

为了描述交变电流周期性变化的规律，需要引入周期和频率的概念。交变电流完成一次周期性变化所需的时间，叫做交变电流的**周期**(period)，通常用 T 表示，单位是秒(s)。交变电流在 1 s 内完成周期性变化的次数，叫做交变电流的**频率**(frequency)，通常用 f 表示，单位是赫兹，简称赫，符号是 Hz。

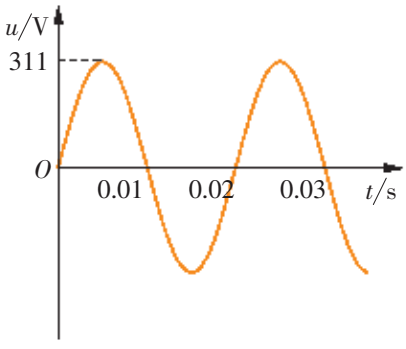


图 2–17　交变电流的周期和频率

请思考：根据周期与频率的定义，交变电流的周期与频率之间有什么关系？

你能指出图 2–17 中交变电流的周期和频率吗？

我国工业和照明用的交变电流的周期为 0.02 s，频率是 50 Hz。

这种交变电流的方向每秒改变多少次？

最大值和有效值

由于交变电流的电动势、电压和电流都在随时间而变化，要精确描述交变电流，就必须给出它们在任意时刻的数值。交变电流的电动势、电压和电流在某一时刻的数值，叫做交变电流的瞬时值，通常分别用小写字母 e、u、i 表示。交变电流的最大值是它在一个周期内所能达到的最大数值，分别用 E_{max}、U_{max}、I_{max} 表示。

请指出图 2–17 所示交流电压的最大值。

交变电流的瞬时值和最大值在电路设计和分析中有重要的意义，分析电路的工作状态、耐压性能时都要用到。

但在实际生产中又常用有效值来描述交变电流。交变电流的电动势、电压和电流的有效值常用大写字母 E、U、I 表示。

交变电流的有效值是怎样规定的呢？

物理学中规定，给阻值相等的两个电阻器分别通以恒定电流和交变电流，如果在相同的时间内产生的热量相等，就把这一恒定电流的数值叫做这一交变电流的有效值。

理论和计算表明，正弦式交变电流的有效值等于其最大值的 $\frac{1}{\sqrt{2}}$ 倍，即

$$E = \frac{1}{\sqrt{2}} E_{max} \approx 0.707\, E_{max}$$

$$U = \frac{1}{\sqrt{2}} U_{max} \approx 0.707\, U_{max}$$

$$I = \frac{1}{\sqrt{2}} I_{max} \approx 0.707\, I_{max}$$

通常说到交变电流的电流或电压，都是指有效值，例如我国家庭电路的电压 220 V，指的便是有效值。各种使用交变电流的电器的铭牌所标的额定电压和额定电流，都是指有效值。交流电流表和交流电压表也是按有效值来制作刻度盘的，它们的示数也都是有效值。

请思考：耐压值为 450 V(DC)的电容器(图 2–18)能否接入电压为 450 V 的交流电路？

图 2–17 所示交流电压的有效值是多少？

最大值和有效值、周期和频率都是描述交变电流的物理量。在交流电器的铭牌上，一般必须注明所用交变电流的有效值和频率等参数。



图 2–18　电容器上标注的耐压值

信息浏览

日光灯的灯光为什么会闪烁

日光灯发光柔和、明亮，而且节能。但是日光灯的灯光有闪烁现象，这是为什么呢？

日光灯的发光原理是受激发光。加在日光灯两端的电压使灯管内气体发出紫外线，照射到灯管内壁上，激发那里的荧光粉发光。日光灯所用的电源是 50 Hz 的交变电流，每秒有 100 个瞬间电压为零。在这些瞬间，管内气体不发紫外线，荧光粉不发光。因此，日光灯的灯光每秒要闪烁 100 次。

对人眼来说，每秒 100 次是一个很高的频率，因此我们通常不会觉察到这种闪烁。但是时间长了，对视力是有影响的。在需要有稳定照明的生产或科研场所，使用日光灯也是不利的。人们已经在电路等方面采取了措施，以减少日光灯的闪烁。

同样使用交变电流的白炽灯没有闪烁现象，这又是为什么呢？

白炽灯是利用电流的热效应，使灯丝达到高温状态而发光的。灯丝的温度不会随着电压的剧烈波动而波动，因此灯光不会闪烁。但白炽灯效率很低，绝大多数电能都转化成热能损耗掉了。

怎样用数学方法描述交变电流

正弦式交变电流可以用图像和函数表达式两种方法来描述。

用图像描述

家庭电路电压的最大值是 311 V，频率是 50 Hz。

请你在图 2–19 的坐标纸上描画出两个周期内家庭电路电压的 u–t 图像。

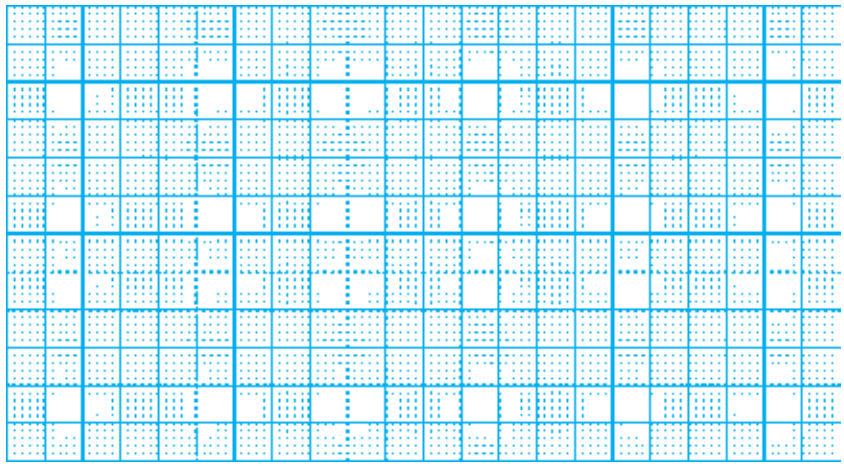


图 2–19　请画出家庭用电的 u–t 图像

用函数式描述

正弦式交变电流的电压 u、电流 i 的函数表达式为

$$u = U_{max} \sin \omega t \qquad i = I_{max} \sin \omega t$$

式中的 ω 是正弦函数每秒变化的弧度数，称为角频率，单位是弧度/秒(rad/s)。它与交变电流的频率 f 和周期 T 的关系是

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

请写出图 2–19 中你所描画的家庭电路电压 u–t 图像的函数表达式。

多学一点　正弦式交变电流有效值的推导

“等效”方法是处理变化量的重要方法。

图 2–20 中有两种频率和电流最大值都相同的正弦式交变电流，它们的电流有效值是否相同呢？

可以看出，在一个周期内，两图像中 OA 段跟 $C'D'$ 段、AB 段跟 $O'A'$ 段、BC 段跟 $A'B'$ 段、CD 段跟 $B'C'$ 段曲线变化情况均相同，所以两交变电流的变化情况总体是相同的，不同的只是有一个时间差。如果让它们通过相同的电阻 R，则它们在一个周期 T

内具有相同的热效应，即具有相同的电流有效值 I。

使两种交变电流分别通过两只阻值相同的电阻 R，它们的瞬时功率之和为

$$P = (I_{max}\sin\omega t)^2 R + (I_{max}\cos\omega t)^2 R = I_{max}^2 R$$

因为 I_{max} 与 R 是不变的，所以两种交变电流的瞬时功率之和是不变的，它们在一个周期内产生的热量是

$$Q = PT = I_{max}^2 RT$$

一个周期内，每个交变电流产生的热量是

$$Q_1 = Q_2 = I^2 RT$$

$$Q_1 + Q_2 = Q$$

$$2I^2 RT = I_{max}^2 RT$$

$$I = \frac{I_{max}}{\sqrt{2}}$$

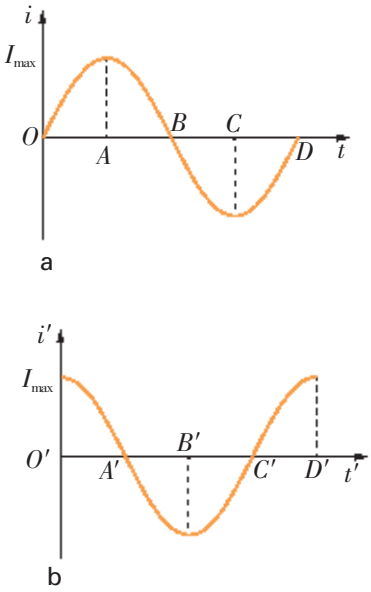
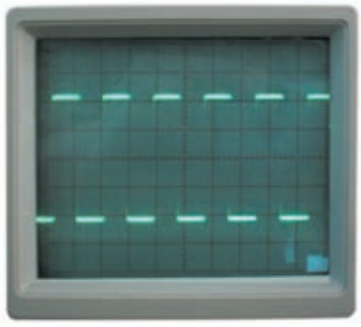


图 2–20　交变电流有效值的推导

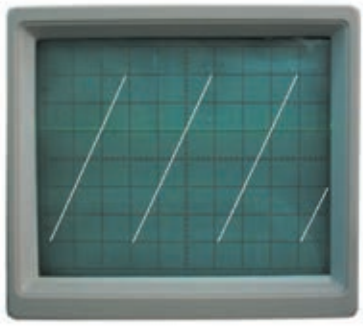
信息浏览

其他几种波形的交变电流

正弦式交变电流是一种最简单、最基本的交变电流。电力系统中大都是正弦式交变电流，



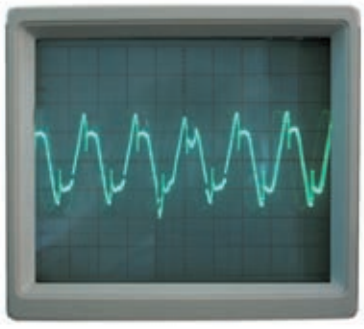
计算机、回旋加速器中矩形脉冲电压的波形



示波器中的锯齿波波形



三角波，它经过整形可以转换成矩形波、尖脉冲等



正弦式交变电流经过电感等元件可能发生畸变，会产生图示波形

图 2–21　其他几种交变电流的波形

电子技术中常用到其他形式的交变电流。图 2–22 所示几个图像中的交变电流随时间的变化并不遵循正弦函数的变化规律，但也是交变电流。

理论计算表明，任何一个非正弦式交变电流经分解后都可以成为许多不同频率的正弦式交变电流的叠加。

请大致描述一下图 2–21 中各种交变电流的大小和方向是如何变化的。

家庭作业与活动

1. 关于普通家庭用的交变电流，下列说法中不正确的是
   A. 可以用直流电表来测量交变电流的最大值
   B. 可以用直流电表来显示交变电流的瞬时值随时间变化的规律，并可做相应的观察和记录
   C. 可以用示波器来显示交变电流随时间变化的图像
   D. 交变电流只能做理论计算，无法实际测量或显示
2. 下面关于交变电流的说法中正确的是
   A. 交流电器设备上所标的电压和电流值是所用交流的峰值
   B. 用交流电流表和电压表测定的读数值是交流的瞬时值
   C. 给定的交流电数值，在没有特别说明的情况下都是指有效值
   D. 跟交变电流有相同热效应的直流电流的有关数值是交变电流的有效值
3. 请列举日常生产和生活中能感受到交变电流大小和方向在变化的实例。
4. 我国家庭电路的交流电压是 220 V，动力供电线路的电压是380 V，它们的有效值、最大值各是多少？
5. 一交变电流的电流瞬时值 $i = 5\sin 100\pi t$(A)，则它的最大值为_____A，有效值为_____A，周期为_____s，频率为_____Hz。
6. 图 2–22 是一个按正弦函数规律变化的交变电流的电流图像，请根据图像求出它的周期、频率和最大值，并写出电流的函数表达式。



图 2–22

7. 请你在网上收集有关各种波形交变电流应用实例的资料，并与同学开展交流。

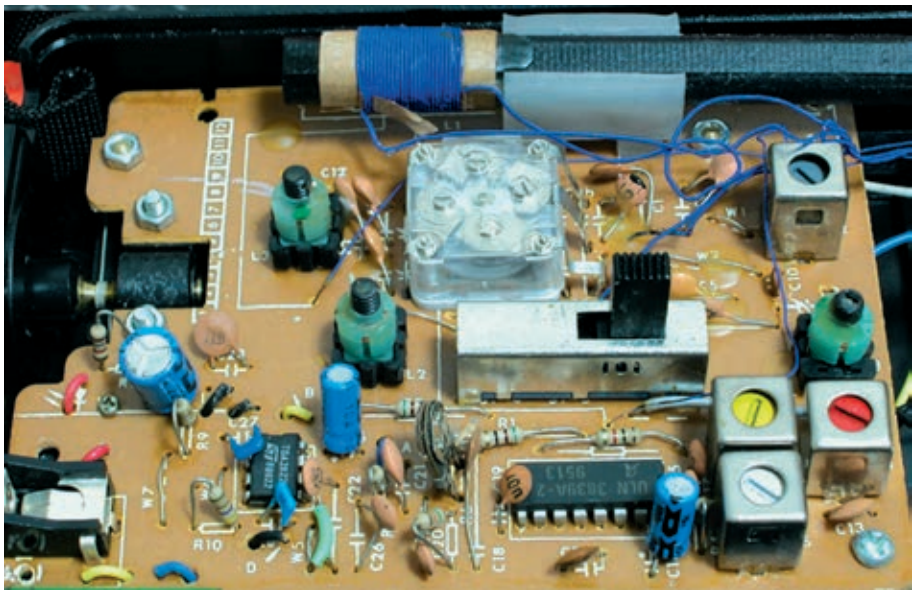


图 2–23　收音机电路板上的电阻器、电感器和电容器

2.3

探究电阻、电感和电容的作用

在实际电路中，总是分布着各种元器件。例如，在图 2–23 所示的半导体收音机电路板上，不仅有我们熟悉的电阻器，还有电容器、电感器等元器件。在电力系统中，各种电气设备都具有电阻的特性，有的还具有电感器、电容器的特性。那么，这些元器件对交变电流的作用是怎样的呢？

电阻器对交变电流的作用

我们知道，电阻器能让直流通过，但对直流有阻碍作用。那么，电阻器对交变电流的作用又如何呢？

实验探究 1　电阻器对交变电流的作用

图 2–24 是探究电阻器对交变电流作用的实验器材和电路图。*A*、*B* 两灯泡的规格相同，实验中使用的交流电压和直流电压相等。

按电路图连接电路，进行实验，观察并思考：



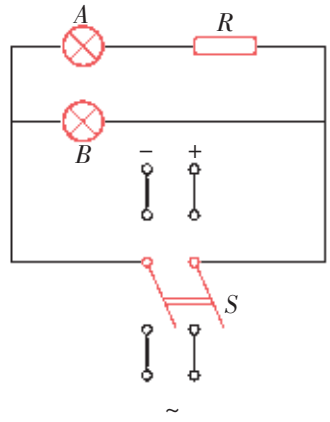


图 2–24　探究电阻器对交变电流的阻碍作用

当电路开关 S 扳向交流电源时，两只灯泡的亮度是否相同？这说明什么问题？

将开关 S 分别扳向直流电源和交流电源，比较这两种情况下灯泡 A 的亮度有没有变化。这又说明什么问题？

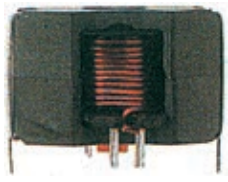
实验和理论分析都证明，电阻器对交变电流的阻碍作用跟对直流的阻碍作用相同。

电感器对交变电流的作用

在物理学中，绕在磁棒上的线圈、日光灯电路中的镇流器、电动机的转子或定子线圈等，叫做电感器，简称电感。图 2–25 所示的是电工和电子技术中几种常见的电感器。



普通的电感器



低频扼流圈



变压器



高频扼流圈





电机

图 2–25　电感器

电感器在交流电路中有什么作用呢？

实验探究 2　电感器对交变电流的作用

1. 探究电感器对交变电流的阻碍作用

图 2–26 是实验所用的器材和电路图。*A*、*B* 两灯泡的规格相同，实验中保持交流电压和直流电压相等。



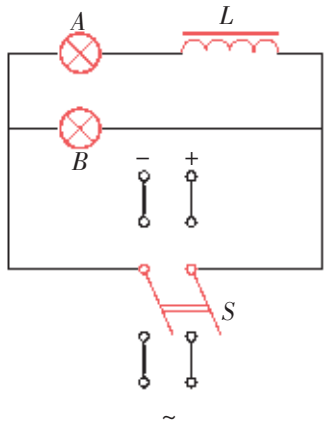


图 2–26　探究电感器对交变电流的阻碍作用

按电路图连接电路，进行实验，观察并思考：

当开关 *S* 扳向交流电源时，灯泡 *A* 是否发光？它跟灯泡 *B* 的亮度是否相同？这说明什么问题？

当开关 *S* 分别扳向交流电源和直流电源，比较这两种情况下灯泡 *A* 的亮度有没有变化。这又说明什么问题？

2. 探究不同电感器对交变电流的阻碍作用

用电感量不同的几种电感器进行实验。

观察灯泡 *A* 的亮度变化。

这说明电感器对交变电流的阻碍作用跟它的电感量有什么关系？

3. 探究电感器对不同频率交变电流的阻碍作用

用低频信号发生器向电感器输入正弦式交变电流，用双踪示波器显示电感器两端的电压波形和通过电感器的电流波形。

观察并思考：在输入电压最大值不变的情况下，提高交变电流的频率，其电流最大值会有什么变化？

实验和理论分析都证明，电感器能让交变电流通过，但对交变电流有阻碍作用。电感器的电感量越大，其阻碍作用越大；通过的交变电流频率越高，阻碍作用也越大。

双踪示波器是示波器的一种，它有两个 Y 输入。使用时可同时输入两个待测信号，屏幕上也同时显示两个信号的图像信息，供测量和对比研究。

电容器对交变电流的作用

我们已经知道，直流不能通过电容器。那么，交变电流能否通过电容器呢？电容器对交变电流的作用是怎样的呢？

请你设计实验，进一步探究电容器在交流电路中的作用。在实验中观察并思考：

1. 怎样用实验证明电容器能让交变电流通过，同时又对交变电流有阻碍作用？

2. 不同电容量的电容器，对交变电流的阻碍作用是否相同？

3. 改变交变电流的频率，电容器对交变电流的阻碍作用有何变化？

将你在实验中得到的结论记录下来，并与同学交流。

实验和理论分析都证明，电容器能让交变电流通过，但对交变电流有阻碍作用。电容器的电容量越大，其阻碍作用越小；通过的交变电流频率越高，阻碍作用也越小。

多学一点

电感器的感抗和电容器的容抗

感抗

电感器对交变电流所起的阻碍作用的大小，用**感抗**(inductive reactance)来表示。

感抗的符号是 X_L，单位是欧姆，与电阻的单位相同。感抗的计算公式是

$$X_L = 2\pi fL$$

式中 f 是交变电流的频率，L 是电感器的电感量(自感系数)。

在只有电感器的电路中，欧姆定律的表达式为

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

容抗

电容器对交变电流所起阻碍作用的大小，用**容抗**(capacitive reactance)来表示。

容抗的符号是 X_C，单位也是欧姆。容抗的计算公式是

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

式中 C 为电容器的电容量。

在只有电容器的电路中，欧姆定律的表达式为

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

请计算：要使一个电容器对频率为 50 Hz 的交变电流产生约 670 Ω 的容抗，其电容量要多大？

电阻器的电阻、电感器的感抗和电容器的容抗，统称为**阻抗**(impedance)。

怎样计算交流电路的电功率

我们已经知道，直流电路的电功率 $P = UI$，那么，怎样计算交流电路的电功率呢？

理论和实验都证明，交流电路电功率的计算公式是

$$P = UI\cos\varphi$$

在上式中，电路电压和电流的乘积 UI 叫做**视在功率**(apparent power)，用大写字母 S 表示，其国际单位制单位是伏安(V·A)或千伏安(kV·A)。视在功率并不表示电路对外做功的能力。

P 是电流对外做功的功率，叫做**有功功率**(active power)，其国际单位制单位是瓦特(W)或千瓦(kW)。有功功率是电路实际消耗的功率。

有功功率跟视在功率的比值叫做**功率因数**(power factor)，用一个余弦函数值 $\cos\varphi$ 表示。

$$\cos\varphi = \frac{\text{有功功率}}{\text{视在功率}} = \frac{P}{S}$$

在实际生产中，提高用电器的功率因数有着很重要的意义。

提高功率因数，可以充分发挥电力设备(如发电机、变压器等)的潜力。功率因数高，表示有功功率占额定视在功率的比例大，发电机输出的电能被充分利用。例如，发电机的容量(最大功率)若为 15 000 kV·A，当电力系统的功率因数由 0.6 提高到 0.8 时，就可以使发电机实际发电能力提高 3000 kW。

功率因数是交流电路的重要技术数据之一。功率因数的高低，对于提高电气设备的利用率和分析研究电能消耗具有十分重要的意义。我国规定，在工厂用电中，功率因数不得低于 0.85。

日光灯镇流器的功率因数约 0.5，三相电动机的功率因数约在 0.8～0.92。

家庭作业与活动

1. 你是否有这样的生活经验：一些家用电器的金属外壳，尽管跟电源之间绝缘良好，但用手触摸仍会感到“麻手”，甚至用测电笔测试时氖管也会发光！请解释其中的物理道理。
2. 日光灯正常工作时，日光灯管两端的额定电压要低于220 V，这多亏了那个跟灯管串联的镇流器。你知道其中的物理道理吗？
3. 只给你一只交流电流表，你能测出一只耐压在311 V以上的电容器的电容吗？请写出测量方法和原理。
4. 用多用电表不仅能测量直流电压、直流电流以及导体的电阻，还可以测量交流电压，有的多用电表还具有测电容器的电容量和电感器的电感量的功能。图2–27是某型号多用电表的面板图，框内文字是说明书摘录。

请在老师指导下，用多用电表测量照明电路的电压，测量一些电容器和电感器的电容量和电感量（自感系数）。

多用电表说明书摘录

1. 测量电容器的电容量。

（1）将多用电表旋转开关旋至交流10 V挡。多用电表、待测电容器、10 V交流（频率50 Hz）电源接成串联电路。

（2）待指针稳定后，从电容刻度线读出电容量值。

2. 测电感器的电感量。

（1）将多用电表旋转开关旋至交流10 V挡。多用电表、待测电感器、10 V交流（频率50 Hz）电源接成串联电路。

（2）待指针稳定后，从电感刻度线读出电感量值。



图 2–27　多用电表

课题研究

电磁式打点计时器的原理

在实验室管理员和老师的帮助下，从以下几个方面研究电磁式打点计时器的工作原理。

1. 阅读打点计时器的说明书，并观察打点计时器的铭牌，了解其主要技术参数。

2. 将打点计时器接入电路，观察其工作过程。尝试画出打点计时器的电路原理图，解释为什么打点计时器要使用交流电源，并推导出打点计时器的打点周期。

3. 在老师的帮助下，通过实验研究影响打点计时器打点周期稳定性的因素。

4. 总结打点计时器工作时都用到了哪些物理知识。

尽可能用你所学的物理知识分析你所了解的问题，并将你的研究过程写成研究报告。

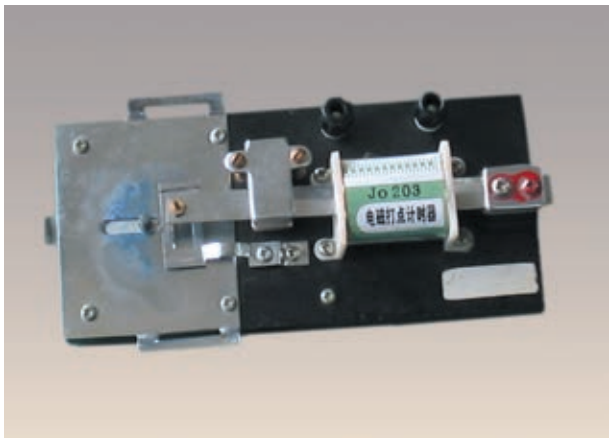


图 2–28　电磁式打点计时器

2.x

第 2 章家庭作业与活动

1. 我们知道，直流是导体内部自由电子沿某一方向运动而形成的，那么，自由电子做什么样的运动才会形成按正弦规律变化的交变电流呢？
2. 图 2–29 画出了示波器上显示的六种电流随时间变化的图像，其中属于交变电流的是_____，属于正弦式交变电流的是_____。

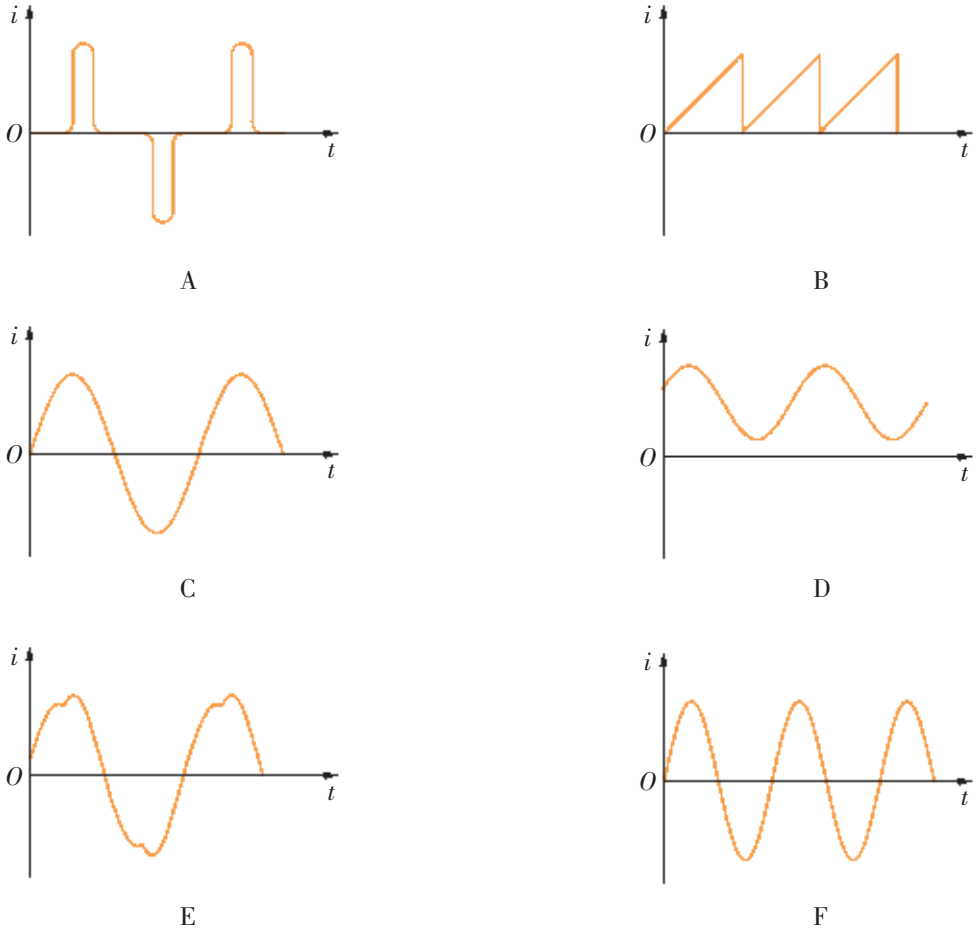


图 2–29

3. 当加于一般日光灯两端的电压增大到 200 V 时日光灯就能发光，如电压降到约 114 V 时就会熄灭。设一盏日光灯接在电压为 220 V 的家庭电路中，试计算日光灯每次发光的延续时间。
(arcsin 0.64 = 40°, arcsin 0.37 = 21.6°)
4. 图 2–30 为某正弦式交变电流的图像，求其最大值、周期和频率，并写出该电流的瞬时表达式。

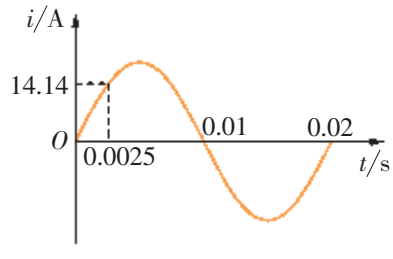


图 2–30

5. 测电笔检测交流电路时，氖管两端的交流电压 $u = 50 \sin 314t$ (V)。已知氖管两端电压必须达到 $25\sqrt{2}$ V 时才能发光，则此测电笔氖管在一个周期内发光的总时间为多长？通电 1 min 内，氖管发光的次数是多少？

6. 在一个长直螺线管的两个接线端 a、b 上接一个 $i = 5\sin 50\pi t$ (A)的交变电流，一个电子沿螺线管的中心轴飞入螺线管内(图 2–31)，那么该电子的运动情况将会是

A. 在螺线管内做曲线运动

B. 电子沿螺线管中心轴做匀速直线运动

C. 电子沿螺线管中心轴先是加速前进，然后减速前进，接着又加速前进，再减速前进，如此反复地变速前进

D. 电子偏离中心轴

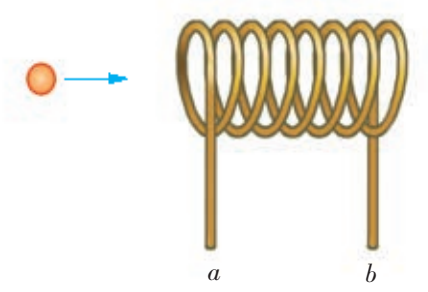


图 2–31

7. 教室中和家庭中的电风扇，都可以调节快慢(图 2–32)。要调节快慢，就要改变电动机的电流。风扇一般用交变电流，要改变电流的大小，可以用电感器。请在老师的指导下，拆解一只吊扇的调速器，研究它是通过什么作用调节吊扇快慢的。

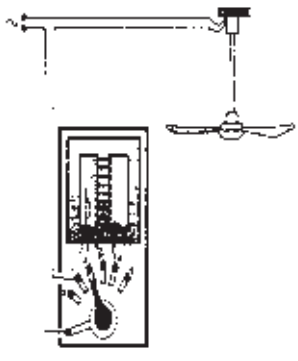


图 2–32

8. 两只相同的电阻，分别通以正弦式交变电流和方波形交变电流，两种交变电流的最大值相等，波形如图2–33所示。在正弦式交变电流的一个周期内，正弦式交变电流在电阻上产生的焦耳热Q_1与方波交变电流在同样大小的电阻上产生的焦耳热Q_2之比$Q_1 : Q_2$是多少？

9. 如图 2–34a 所示为一交变电流的 U–t 图像：

(1) 写出交流电压瞬时值的表达式；

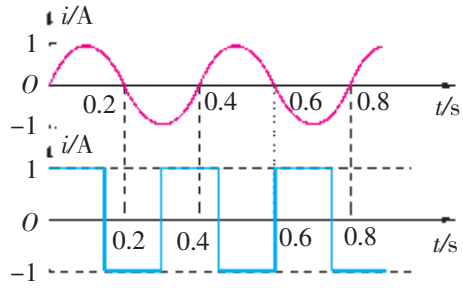


图 2–33

(2) 将此电压加在图b所示的回旋加速器上，给氘核加速，那么必须给加速器加一磁感应强度为多大的磁场？

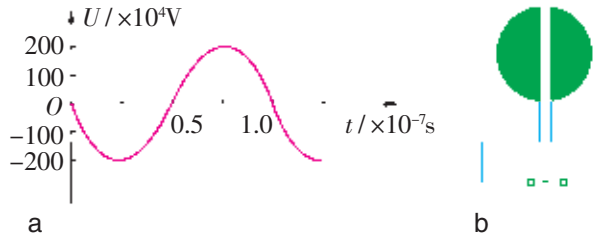


图 2–34

10. 有一种自行车上照明用的车头灯(图 2–35)，是通过自行车带动小型交流发电机供电的。图2–36是这种发电机的结构示意图。图中转轴的一端装有一对随轴转动的磁极，另一端装有半径 $r_0 = 1.0$ cm的摩擦小轮。电枢线圈绕在固定的U形铁心上，设线圈有800匝，线圈框横截面积$S = 20\ \text{cm}^2$。旋转磁极的磁感应强度$B = 0.010$ T。

自行车车轮半径是35 cm，车头灯电阻为10 Ω，线圈总电阻40 Ω，车头灯正常工作时的电流 60~70 mA。当自行车车轮转动的角速度为8 rad/s时，车头灯是否正常工作？设摩擦小轮与自行车车轮间无相对滑动。



图 2–35　自行车车头灯

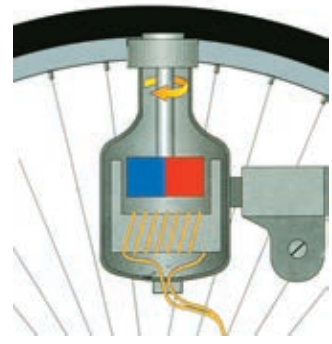


图 2–36　车头灯发电机结构示意图