

**高级中学
物理（甲种本）第三册
教学参考书**

人民教育出版社物理室 编

1987 年 1 月

目 录

前言	i
高中物理甲种本第三册的说明	ii
第一章 磁场	1
第一节 教学要求	2
第二节 教学建议	3
第三节 实验指导	9
第四节 习题解答	18
第五节 参考资料	30
第二章 电磁感应	35
第一节 教学要求	36
第二节 教学建议	37
第三节 实验指导	44
第四节 习题解答	51
第五节 参考资料	61
第三章 交流电	67
第一节 教学要求	68
第二节 教学建议	69
第三节 实验指导	75
第四节 习题解答	96
第五节 参考资料	114
第四章 电磁振荡和电磁波	120
第一节 教学要求	121
第二节 教学建议	122
第三节 实验指导	128
第四节 习题解答	137
第五节 参考资料	142

第五章 光的反射和折射	147
第一节 教学要求	148
第二节 教学建议	149
第三节 实验指导	159
第四节 习题解答	168
第五节 参考资料	187
第六章 光的波动性	193
第一节 教学要求	194
第二节 教学建议	195
第三节 实验指导	200
第四节 习题解答	211
第五节 参考资料	214
第七章 光的粒子性	221
第一节 教学要求	221
第二节 教学建议	222
第三节 实验指导	224
第四节 习题解答	226
第五节 参考资料	228
第八章 原子结构	231
第一节 教学要求	231
第二节 教学建议	232
第三节 习题解答	236
第四节 参考资料	239
第九章 原子核	244
第一节 教学要求	245
第二节 教学建议	245
第三节 实验指导	251
第四节 习题解答	254
第五节 参考资料	260

前言

为了帮助教师使用好高中物理（甲种本）第三册教材，我们编写了这本教学参考书。内容包括全书的说明，以及各章的教学说明和资料。

“高中物理（甲种本）第三册说明”对这教材的内容安排及编写这册课本的一些主要想法，作了概括的说明。

各章的教学说明和资料，包括教学要求、教学建议、实验指导、习题解答、参考资料五项内容，在“教学要求”中，对教学内容提出了具体的要求和说明，在“教学建议”中，对怎样进行教学提了参考性意见。在“实验指导”中，提出了演示实验，学生实验以及课外实验活动中应当注意的问题，还提供了简单仪器的自制方法和不同的实验方法，补充了一些实验内容，供教师选用。在“习题解答”中，给出了课本中全部练习和习题的解答，供教师参考。在“参考资料”中提供了一些可供教学参考的材料，有些材料也可在教学中引用。

全书的“教学建议”、“习题解答”、“参考资料”分别由北京工业学院附中王杏村（一、二章）、北京海淀区教师进修学校蒋宏涵（三、四章）、北京和平街一中王天謨（五一七章）、北京朝阳中学邵醒凌（八、九章）编写，“实验指导”分别由蒋宏涵（一一四章）、王天謨（五一七章）、邵醒凌（八、九章）编写。人民教育出版社杜敏编写其余部分并统稿，刘克桓复审。

欢迎教师对本书提出宝贵意见。

编者

高中物理甲种本第三册的说明

高中物理课本（甲种本）第三册，同前两册一样，是按照高中物理教学纲要（草案）的较高要求编写的。这册共有九章教材，第一章至第四章讲电磁学知识，第五章至第七章讲光学知识，第八章和第九章讲原子和原子核物理方面的知识。

这册教材的内容，同试用本比较，增加了几何光学和三相交流电的知识，调整了“电子技术基础”一章的内容，其他内容与试用本基本相同。

为使本册教材内容要求更适应学生的接受能力，使他们把基础知识掌握得更好些，本册教材对一些非主干知识放低了教学要求。

关于直线电流的磁场，只要求学生对这个磁场的磁感应强度的大小由哪些因素决定有所了解，而不要求用直线电流的磁场公式 $B = kI/r$ 进行计算，以免增大习题难度，加重学生负担。

关于电感和电容对交流电相位的影响，现象虽然容易演示，但道理不易说清。为便于教学，将这两项内容改为选讲。教学中只要求通过实验介绍现象，而不要求说明道理，使学生对这方面的知识有个一般的了解即可。

光的衍射。在中学阶段，很难讲清衍射条纹是如何产生的，这是因为多数学生理解不了为什么在干涉中把狭缝看作是单一光源，而在衍射中却把狭缝看作是无数光源的集合。本册教材只介绍了衍射现象及其产生的条件，而没有用波的叠加来分析衍射现象。

为便于教学和有助于学生能力的培养，本册教材在讲法和叙述上努力做到循序渐进，思路清楚。概念和规律的得出尽可能比较平易，易于为学生接受。例如，用位移电流的概念讲述电磁场，教学上困难较多，本册教材不再提出位移电流和传导电流的概念，力求使讲法深入浅出一些，变压器的输入电流随着输出电流而增大的道理，在中学很难讲清楚，而中学阶段讲变压器，主要是讲它的基本原理，没有必要深究这个问题，本册教材将这个内容删去。

在讲述电磁感应的知识时，紧紧把握磁通量变化这个线索。讲述感生电流产生的条件，注意启发和引导学生一步一步地分析问题。得出结论为了突出磁通量变化这个主要线索，楞次定律不再用能量守恒定律推导的办法，直接用磁通量变化的观点分析现象。对法拉第电磁感应定律先用磁通量变化率的观点表达一般结论，然后再讲切割磁力线的特殊情况。

用能量的观点分析现象，是研究物理问题时常用的方法之一。为了培养学生较深入地体会能量守恒定律在电磁现象中的应用，本册教材改变了过去将能量守恒问题夹在各节中分析的做法，单独设立一节专门分析电磁感应现象中能量的转化和守恒。

本册教材在讲解知识的同时，注意介绍认识客观事物的方法，以开阔学生的眼界，提高他们分析问题、解决问题的能力。

人类认识客观世界总是从片面到全面，从现象到本质，从宏观世界到微观世界，经过实践，认识，再实践，再认识而步步深入的。教材在介绍光的本性时，介绍了在认识上经历的辩证发展

过程，使学生对光的波动性和粒子性都有明确的印象。原子结构和原子核内容的介绍，也都按历史线索叙述，使学生一步步体会人类认识微观世界的方法和途径，理解所学的知识。

物理实验对物理学的发展起着很重要的作用。本册教材对在物理学史上起了重要作用的一些著名实验作了介绍，介绍的实验有：罗兰实验、赫兹实验、 α 粒子散射实验。还介绍了人们测量光速的几种方法。希望通过这些介绍，使学生了解实验在物理学中地位的重要，并通过学习前人设计实验时的巧妙构思，培养他们灵活运用知识，发展他们的思维能力。

本册教材的内容涉及近代物理学中的一些重大发现，讲述这些内容，使学生了解近代物理学中的科学观点，可以增长他们的见识，有助于培养辩证唯物主义的世界观。

“场”是物理学的基本概念。引入场的概念，使物理学获得很大的成就。教材中注意了培养学生用场的观点分析电磁现象，知道场的客观存在和这个概念的重要性，教材从稳定的电场和磁场到变化的电磁场，再到电磁波，强调了电磁波可以脱离电荷而独立存在，不需要别的物质做媒介而传播，并且具有能量，通过这样的讲解，逐步扩展学生对场的认识，使他们获得场是客观存在的具体印象。

客观世界是相互联系的统一整体。将表面上不同的现象联系起来，揭示出它们的共同本质，是物理学的伟大成果，物理学发展中已完成了几次大的统一。教材中介绍了电现象和磁现象的统一，光现象与电磁现象的统一，还介绍了把微观世界统一起来的波粒二象性，学生对这些内容有所认识，将有助于他们把知识联系起来，培养他们的综合能力。

质量守恒、电荷守恒、动量守恒和能量守恒是自然界普遍遵守的规律，对微观世界和宏观世界都适用。教材注意介绍在宏观、微观领域中这些规律的应用。人们对微观粒子相互作用的认识的发展，很大一部分归功于人们能自觉地用守恒定律来分析物理现象。通过教学，要使学生逐步体会到千变万化的物理世界中，在现象背后存在着规律。守恒定律就体现出变化的规律，要使学生体会到这一点，并培养学生重视用守恒定律来处理问题。

这册教材介绍的波粒二象性、能量量子化等，反映了微观世界的特有规律，体现了微观世界特有规律与宏观世界的不同。教学中要注意告诉学生，观念必须与认识对象相适应，不能用宏观世界得出的一般观念来看微观世界。

本册教材注意理论联系实际，联系现代科学技术。讲好联系实际的内容，可以巩固基本知识，开阔思路和眼界，提高运用知识的志趣和能力。根据实际情况，这册教材联系实际的内容有三种情况：

1. 基本知识的实际运用，对这部分内容，要讲清原理，弄清把基本知识应用于实际中去的思路。这类内容有：电流表工作原理，荷质比的测定和质谱仪，回旋加速器，自感现象的应用，变压器，电能的输送，感应电动机，光电效应等。教学中要注意不深究技术细节和枝叉问题。
2. 一般性说明原理（不宜过细分析）。这部分内容有：涡流，无线电波的发送和接收原理，光导纤维，显微镜和望远镜，薄膜干涉及其应用，红外线、紫外线、伦琴射线的应用，光谱分析，激光，放射性同位素及其应用，核反应堆，可控热核反应等。
3. 介绍性，这部分内容，大部分是阅读材料，如寻找磁单极子，直流输电，直线电机和悬浮列车，传真、电视和雷达，电子显微镜和射电望远镜，全息照相，偏振光和立体电影等。

这册教材的习题，难度同试用本大体相当，根据这册内容的特点，加强了联系实际的题目。为加强能力培养，安排了少量的改进或设计实际装置的题目，还安排了一些综合运用知识的题

目.

本册教材同前两册一样，安排了演示实验、学生实验和课外实验。高中物理教学仍然以实验为基础，对实验教学应予以足够的重视。

对演示实验，要尽量做给学生看。在实验设备不足的情况下，教师应尽可能地自制一些仪器设备，以保证教学效果。在学校的仪器设备允许的情况下，可以将一些演示实验让学生自己动手在课堂上做，以增加学生动手的机会。

对课外实验，虽不作要求，但应该鼓励学生做。有的课外实验活动，需要教师给予必要的指导和帮助。

高中物理甲种本第三册的教学内容可按每周 4 课时，全年共 112 课时讲授完。其中，第一章 13 课时，第二章 10 课时，第三章 16 课时，第四章 12 课时，第五章 17 课时，第六章 11 课时，第七章 4 课时，第八章 5 课时，第九章 9 课时；平时复习和机动时间 15 课时。

第一章 磁场

第一节 教学要求	2
第二节 教学建议	3
一、磁场及描述磁场的物理量	3
(一)磁感应强度和磁通量	4
(二)直线电流的磁场	5
二、安培力及其应用	5
(一)安培力的大小	5
(二)安培力的方向	6
(三)磁场对通电线的作用	6
(四)电流表的工作原理	7
三、洛伦兹力及其应用	7
(一)洛伦兹力的大小和方向	7
(二)带电粒子在磁场中的运动	8
(三)洛伦兹力在近代技术中的应用	8
第三节 实验指导	9
一、演示实验	9
(一)电流对磁针的作用 (奥斯特实验)	9
(二)磁场对电流的作用	9
(三)电流间的相互作用	10
(四)磁感应强度的方向	11
(五)通电直导线、环形电流、螺线管磁场的磁力线	11
(六)电流天平	12
(七)磁电式仪表的工作原理	13
(八)带电粒子在磁场中运动时的偏转	15
(九)电子束在匀强磁场中作圆周运动	16
二、学生实验	17
(一)观察磁铁对电流的作用	17
三、课外实验活动	17
(一)自制指南针	17
(二)验证环形电流的磁场	17
(三)验证通电螺线管的南北极	18
(四)观察磁化现象	18
第四节 习题解答	18
一、练习一	18
二、练习二	19

三、练习三	20
四、练习四	21
五、练习五	22
六、练习六	23
七、练习七	24
八、练习八	25
九、习题	26
第五节 参考资料	30
一、磁感应强度 B 的定义方法	30
二、公式 $B = k' \frac{I}{R}$ 的来源	30
三、在匀强磁场中，带电粒子的运动方向不和磁感应强度的方向垂直时其运动情况的分析	31
四、利用磁聚焦法测定电子的荷质比 e/m	32
五、奥斯特	34

第一节 教学要求

关于电学的知识，在本书第二册中讲了电场和稳恒电流的知识，在这册书中讲解磁场、电磁感应以及电磁场的知识。本章研究磁场以及磁场对电流的作用、磁场对带电粒子的作用。这些内容是电学的重要组成部分，也是学习电学后几章内容的基础。

本章教材分三个单元，第一单元包括第一节到第六节，是在复习初中的磁场知识基础上进一步阐明磁现象和电现象的统一性，介绍描述磁场的基本物理量——磁感应强度 B 。第二单元包括第七节到第九节，讲述磁场对电流的作用力及其在电表上的应用，第三单元包括第十节到第十三节，讲述洛伦兹力及其在科学技术中的一些应用。

教材在复习初中学过的有关知识的基础上，要求学生了解磁极和磁极之间，磁极和电流之间，电流和电流之间的相互作用都是通过磁场来传递的，从而使学生认识磁场是客观存在的物质。还要使学生了解，磁场可以用磁力线形象地描述。在教学中应加强安培定则的练习，使学生能够利用这个定则判断磁场的方向。

介绍磁现象的电本质，是为了使学生了解电流的磁场和磁铁的磁场有着共同的起源。为了使学生确信运动电能够产生磁场，教材介绍了罗兰实验。但在教学中不要求做这个实验，也不要求对实验的细节加以讨论。教材介绍了分子电流，但不要求对分子电流是如何形成的作深入的探讨。

磁感应强度描述了磁场的性质，是本章教材的重点内容。由于这个概念比较抽象，它也是教学上的一个难点。教学中，为使学生对磁感应强度有个基本认识，可在演示磁场对电流的作用力的基础上，引出 F 与 $I\ell$ 成正比的关系，再给出磁感应强度的概念。

介绍直线电流磁场的公式，是为了使学生知道直线电流磁场的磁感应强度大小跟什么因素有关系，使学生对这种磁场有具体的了解，不要求学生用公式进行定量的计算。安培力和洛伦兹力表示磁场对电流和运动电荷的作用，是电学中的重要规律，因此它们是教学的重点。为了使学生顺利学好后续课程，应该做好左手定则的练习，使学生掌握好安培力和洛伦兹力方向的判定。

带电粒子在匀强磁场中的运动在实际中有广泛的应用，是学习荷质比、质谱仪、回旋加速器等知识的基础。为使学生理解这一知识，复习好有关的力学知识是个关键。带电粒子做匀速圆

周运动的轨道半径公式和周期公式，要求学生能够理解公式的物理意义，而不要求学生记忆这两个公式（由于这两个公式推导过程所用的知识都是他们已经学过的，只要理解推导过程，推出公式并不困难）。

荷质比的测定和质谱仪、回旋加速是洛伦兹力的具体应用。要求学生了解测定荷质比的原理及其意义。在质谱仪和回旋加速器的教学中，主要介绍它们的原理。

由于高中阶段所介绍的有关磁场知识，如磁感应强度、磁通量、安培力、洛伦兹力等都是通过分析、推理和定量推导才得出的，因此，教材具有一定的难度。这就要求教师要尽量做好演示实验，尽量增加学生的感性知识。还要注意讲清分析问题的思路，使学生能够理解学的内容。

本章的教学要求是：

1. 理解磁场和磁力线的概念，能运用安培定则确定直线电流、环形电流以及通电螺线管的磁场的方向。
2. 了解磁现象的电本质和磁性材料的应用。
3. 理解磁感应强度和磁通量的概念。了解匀强磁场的特点。了解直线电流磁场的磁感应强度的计算公式。
4. 掌握计算安培力的公式和判断安培力方向的左手定则，了解匀强磁场对平面通电线圈的作用和磁电式仪表的工作原理。
5. 掌握洛伦兹力的计算公式，理解带电粒子在磁场中做匀速圆周运动的道理，了解质谱仪和回旋加速器的工作原理。

第二节 教学建议

本章教材的中心是研究磁场的特性及有关的规律，因此磁感应强度 B 是本章的中心概念，教学时，首先研究磁场的形象化描述，引出磁力线的概念。然后给出磁感应强度 B 的概念，并以此概念来展开全章教材，依次讲述磁场对电流和运动电荷的作用力的规律及其在实际中的种种应用。这样围绕着磁感应强度 B 这个中心概念，形成了本章的知识结构。

一、磁场及描述磁场的物理量

从第一节到第三节教材，大部分内容学生在初中均已学习过，可以在课堂上或在课前要求学生自己阅读课文。教师在课堂上应做好以下几个演示实验：

1. 磁极对磁极的作用；
2. 电流对磁极的作用（即奥斯特实验）；
3. 磁极对电流的作用；
4. 电流对电流的作用。磁力线的演示，可根据学生情况决定是否需要做。

在观察实验现象和自己阅读课文的基础上，引导学生思考和讨论以下几个问题：

1. 在什么条件下可以在空间出现磁场？
2. 在四个实验中，各种互相作用的实质是什么？
3. 磁场的方向是怎样规定的？
4. 安培定则的内容是什么？
5. 磁场的起源是什么？其根据是什么？

总之，要用问题来激发学生思维，尽量调动学生的学习积极性，在上述问题讨论基础上，根据学

生所反映的问题，教师的讲授应着重明确以下几点：

磁场的起源 教师通过对罗兰实验的分析和讲解，明确运动电荷是磁场的起源，从而使学生了解电流周围空间的磁场和磁体周围空间磁场具有相同的起源。

讲授这个内容的顺序可以这样安排：首先根据奥斯特实验明确电流是磁场的起源，然后提出磁体的磁场是否也是由电流引起的问题，教师对安培提出的分子电流的假说进行介绍，并且进一步说明这个假说完全符合近代原子的电结构学说（顺便对学生解释一下“假说”是一种推动科学发展的重要思维方法）。其次根据电流是由电荷的运动形成的，那么能否直接证明静止电荷一旦运动起来就会产生磁场呢？这时教师再提出罗兰实验，进行介绍和分析。罗兰实验在中学很难做成，不要求演示，但必须把这个实验的原理和结果给学生讲清楚。

磁场力问题 磁场对电流运动电荷要产生磁场力的作用，是一个实验事实，必须使学生深刻认识它的重要意义。磁极之间、磁极与电流之间、电流与电流之间的相互作用都是通过磁场来传递的。也就是说都是通过磁场对电流产生磁场力来实现的。教师可以重点讲授电流之间的相互作用，使学生理解上述观点。如果给平行的两根直导线分别通以电流 I_1 和 I_2 ，由于电流 I_2 处于电流 I_1 形成的磁场中，因而受到 I_1 的磁场的磁场力作用。同样，电流 I_1 处于电流 I_2 的磁场中，因而受到 I_2 的磁场力作用。所以电流 I_1 和 I_2 之间表现出的互相吸引或排斥，是通过它们的磁场而间接发生相互作用的。

磁场的方向 所谓磁场方向，实质上是指磁感应强度的方向，这和电场方向是指的电场强度方向相类似。在磁感应强度概念没有提出之前，应介绍根据磁场力的特性对磁场方向的规定：在磁场中，探测磁针的 N 极受的磁场力方向即磁场中该点的磁场方向。这种规定比利用磁场对电流或运动电荷的作用判定磁场方向要具体和简便得多，有利于磁力线概念的引入。

要明确向学生指出磁力线是一条闭合的曲线，能够形象地描述磁场的强弱和方向，磁力线并不是一种客观存在的线。磁力线上所画的箭头，表示的是磁力线的流向，而不代表磁场方向。磁力线上任一点的切线方向才是该点的磁场方向。如果已知磁力线的流向，根据上述方法可确定磁场方向。电流方向和磁力线方向之间有确定的关系，电流方向变化其磁力线方向也随之改变，安培定则是记忆和判断这种关系的方法。安培定则是初中学习过的知识，但仍然要通过一些例题的练习，使学生熟练掌握，这对于后续知识的学习是十分必要的。

（一）磁感应强度和磁通量

磁感应强度概念的建立是本章的重点。可用类比方法讲述，即从电场强度概念的建立引入建立磁感应强度概念的必要性。使学生明确磁场中某点磁感应强度的强弱可通过一个检验电流在该点受的磁场力的大小来描述。建议按以下步骤来安排教学：

通过演示实验使学生认识磁场对电流的作用力的零值条件和最大值条件，即当电流方向和磁场方向平行时（夹角为 0° 或 180° ），磁场力为零；当电流方向和磁场方向垂直时，磁场力具有最大值；当电流方向和磁场方向斜交时，磁场力介于零值与最大值之间。进而引导学生了解在研究磁场的强弱时，只有用磁场力的最大值进行比较，才能有确定的意义。

引导学生分析磁场力的最大值的决定条件。首先使学生认识在同一个磁场中某处的两根长度相同的直导线上通以相同电流，因条件完全相同，两根导线受的磁场力的最大值必然相等。如

果将此两直导线并联起来，并保证每根线通过的电流不变，则两根直导线受的磁场力最大值是一根直导线受力的两倍，由此可得： $F_{\text{最大}} \propto I$ ，如果将此两根直导线串联起来，并将它们全部置于磁场中，则整根导线受力也是一根导线受力的两倍，由此可得 $F_{\text{最大}} \propto \ell$ 。将上述两个结论合并可得：

$$F_{\text{最大}} \propto I\ell$$

可见，对磁场中某处 $\frac{F_{\text{最大}}}{I\ell}$ 是一个恒量，使学生认识到这个恒量可用来描述磁场的强弱，因此给这个比值取名叫磁感应强度。在这里可向学生指出，电场强度的定义也是利用电场力与电荷电量的比值。用比值定义物理量是物理学经常采用的方法。使学生了解这一点对于掌握物理概念是十分有用的。根据磁感应强度的定义式 $B = \frac{F_{\text{最大}}}{I\ell}$ ，使学生了解 B 的单位，并向学生明确 B 是矢量，要指出 B 的方向就是磁场方向，即磁针的 N 极受的磁场力方向，还要指出 B 的方向和 $F_{\text{最大}}$ 的方向是不同的，对这一点可让学生讨论练习二 2 来加深认识。还应告诉学生， B 矢量完全遵从平行四边形法则，可以进行合成或分解。在这里还应对匀强磁场的特点作一些介绍。

磁通量是一个重要物理量。在下一章讲电磁感应现象时，它是描述电磁感应规律的基本概念。首先要根据教材要求将磁通量的定义呈现给学生。使学生正确理解定义式 $\phi = BS$ 。对物理概念要抓住定义式来理解是十分重要的，其次要从磁力线角度来形象说明磁通量的物理意义。第三，要讲清 $\phi = BS \cos \theta$ 这一公式，可提出“如果所取的平面与 B 方向平行时则通过此平面的磁通量为多少？”的问题来研究，这个问题用磁力线能够很形象地说明，因为没有磁力线通过该平面，所以磁通量为零。然后再讨论“如果平面面积 S 与 B 方向既不平行又不垂直时磁通量应如何计算”的问题。因为通过面积 S 的磁力线条数等于通过面积 S 在垂直于磁力线方向的投影平面 S_n 上的磁力线的条数，又根据磁通量的定义式可得 $\phi = B \cdot S$ ，设平面 S 与 S_n 的夹角为 θ ，即 $S_n = S \cos \theta$ ，则 $\phi = B \cdot S \cdot \cos \theta$ 。最后介绍磁通量的单位及磁通密度的概念。

(二) 直线电流的磁场

这一节教材，是研究直线电流周围磁场的磁感应强度大小的决定条件。在定性演示实验的基础上，给出定量公式 $B = kI/r$ 。可以告诉学生，公式中各量采用国际单位制时， $k = 2 \times 10^{-7} \text{ N/A}^2$ 。在学过下一节教材后，可指导学生学习阅读材料，就可以了解 k 值的来源。虽在教学中不要求学生利用 $B = kI/r$ 进行计算，但用这个公式来对一些问题作定性分析，还是必要的，使用公式的条件必须给学生明确讲清楚。最后，应使学生了解虽然直线电流磁场、环形电流磁场、通电螺线管磁场的磁感应强度大小的计算公式不同，但均与电流强度成正比。

二、安培力及其应用

(一) 安培力的大小

根据磁感应强度的定义式可得安培力最大值的计算式为 $F = I\ell B$ 。本节重点讨论电流方向与磁场方向不垂直时安培力的计算式。设 I 与 B 的夹角为 θ ，我们以电流方向为基准，把 B 分解为平行于电流方向的分量 $B_{\parallel} = B \cdot \cos \theta$ 和垂直于电流方向的分量 $B_{\perp} = B \cdot \sin \theta$ 。由于分量 B_{\parallel} 对安培力无贡献，即对电流不产生作用力，所以电流受到的力完全由 B_{\perp} 来决定。则可得 $F = I\ell B_{\perp}$ ，因而 $F = I\ell B \sin \theta$ 。要使学生了解这一公式的适用条件，以及各量的单位。

(二) 安培力的方向

教学时应通过演示实验，使学生在了解安培力方向的基础上介绍左手定则。通过实验使学生认识安培力方向有如下特点：第一，安培力 F 的方向总是垂直于 I 与 B 所构成的平面，即 $F \perp I$ 和 $F \perp B$ 。第二，安培力 F 的方向由 I 和 B 两个量的方向共同决定，如果 I 和 B 其中一个量的方向变为原来方向的反方向， F 的方向也就变为原来方向的反方向。如果 I 和 B 两个量的方都变为原来方向的反方向，则 F 的方向不变，第三， I 、 B 、 F 三个量的方向关系如图 1.1 所示，可构成三维空间中正交坐标系。在了解上述三个特点之后提出如何记忆 I 、 B 、 F 三个量的方向关系的问题，可以让学生思考提出自己的记忆方法，然后介绍左手定则。教学时，应使学生注意当通电导线与磁场方向斜交时，如何判断安培力的方向。

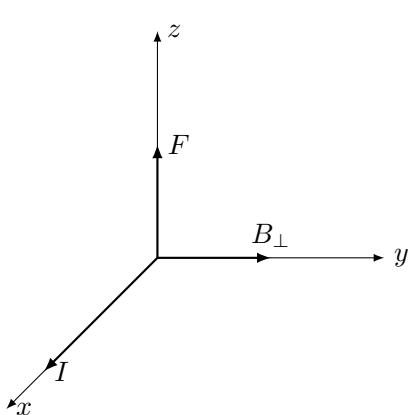


图 1.1

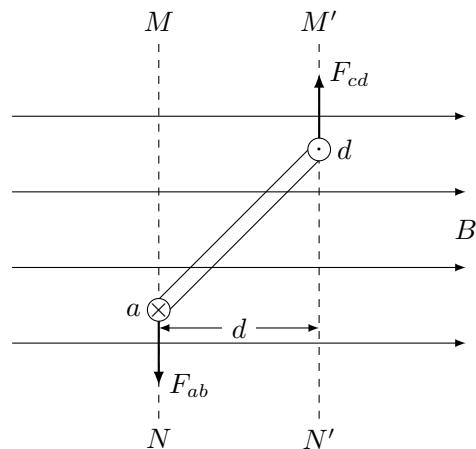


图 1.2

电流天平一节为选讲教材，可在讲完安培力大小和方向后，把电流天平作为一个实际例子进行介绍。

(三) 磁场对通电线的作用

可先让学生观察通电线圈在磁场中偏转或旋转的现象，引导学生分析线圈各边所受安培力的方向。然后启发学生回忆力偶及力偶矩概念。在此基础上引导学生定量研究安培力偶矩的大小，再进行分析。在图 1.2 中，因 F_{ab} 和 F_{cd} 大小相等、方向相反，又不在一条直线上，所以 F_{ab} 和 F_{cd} 形成一对力偶。两力作用线 MN 和 $M'N'$ 之间的垂直距离 d 为力偶矩的臂。根据力偶矩的定义可得安培力矩为 $M = F \cdot d$ ，如是可推导得

$$M = BIS \cos \theta$$

引导学生理解公式时应注意以下几点：

1. θ 角为线圈平面与磁力线的夹角。如果取线圈平面与中性面（垂直于磁场方向的平面）的夹角 α 来进行计算，则力偶的臂 $d = ad \cdot \sin \alpha$ 。因而安培力偶矩为 $M = BIS \cdot \sin \alpha$ 。
2. 如果线圈由 N 匝线圈串联组成，则 $M = NBIS \cos \theta = nBIS \sin \alpha$ 。
3. 上述安培力偶矩公式只适用于匀强磁场。

(四) 电流表的工作原理

首先要使学生明确利用永久磁铁的磁场使通电线圈偏转的现象制成的仪表叫磁电式仪表，并通过实物使学生了解电流表的构造。然后重点讲授磁铁与铁心之间的磁场特点，即磁场是均匀地辐向分布的，就是说所有磁力线的延长线都通过铁心的中心。不管线圈处于什么位置，线圈平面与磁力线之间的夹角都是零度。还要明确该磁场不是匀强磁场，但在以铁心中心为圆心的圆周上，各点的磁感应强度 B 的大小是相等的。这样，通电线圈受的安培力偶矩就由下式决定：即 $M_1 = NBIS$ 。电流表内的弹簧产生一个阻碍线圈偏转的力矩 M_2 。当 $M_1 = M_2$ 时，线圈就停止在某一偏角 θ 上，固定在转轴上的指针也转过同样的偏角 θ ，并指示刻度盘上的某一刻度。从刻度的指示数就可以测得电流强度。

下面再作一些定量的讨论。已知弹簧（游丝）产生的弹性力矩 M_2 与指针的偏转角 θ 成正比，即 $M_2 = k_2\theta$ ，其中 k_2 是由弹簧决定的恒量。由此可得 $NBIS = k_2\theta$ ，则

$$\theta = \frac{NBS}{k_2} \cdot I$$

从公式得出如下几点结论：

- 对同一个电表， N 、 B 、 S 和 k_2 为不变的量，则 $\theta \propto I$ 。可见 θ 与 I 一一对应，从而可以用指针偏转角度来测量电流强度 I 的值。
- 因为 $\theta \propto I$ ， θ 随 I 的变化是线性的，所以表盘的刻度是均匀的。
- 如果 $NBS > k_2$ ，只要有很小的电流值，偏转角 θ 的值就比较大。因此这种电流表的灵敏度较高。
- 指针最大偏角为 $\theta_{\text{最大}}$ 时，所测得的电流为满偏电流 I_g ，可得：

$$I_g = \frac{k_2}{NBS} \cdot \theta_{\text{最大}}$$

I_g 越小，要求 N 、 S 、 B 几个量都较大。而当线圈的匝数增大时，绕制线圈的导线长度也增大，则线圈的电阻即电流表的内阻 R_g 增大，可见，灵敏度大（即 I_g 小）的电流表其内阻 R_g 较大。

三、洛伦兹力及其应用

(一) 洛伦兹力的大小和方向

从产生安培力的微观本质的设想出发，再通过阴极射线管的演示实验来验证这个设想，使学生获得关于洛伦兹力的感性认识。在此基础上引导学生推导洛伦兹力公式。推导过程中应抓住以下两点：

- 磁场对电流的作用力（安培力），可看作是作用在每个运动电荷上的洛伦兹力的合力。这个观点是推导公式的出发点。
- 引导学生复习电流公式 $I = nqvS$ 的物理意义。抓住上述两点，按教材思路引导学生得到洛伦兹力大小的公式 $f = qvB \sin \theta$ 。然后应强调指出 $\sin \theta$ 对 f 大小的影响，即当 $\theta = 0^\circ$ 时 $f = 0$ ， $\theta = 90^\circ$ 时 $f = qvB$ 为最大值。这些结论对分析运动电荷在磁场中运动规律是重要的，洛伦兹力的方向仍然用左手定则判定，要注意讲清洛伦兹力的方向特点。

(二) 带电粒子在磁场中的运动

没有受到其他力作用的带电粒子，在磁场中的运动性质是由洛伦兹力来决定的。本节主要是研究一个带电粒子在匀强磁场中的运动。首先引导学生思考如果 v 与 B 的夹角 $\theta = 0^\circ$ 时，带电粒子作何种性质的运动。然后引导学生重点讨论当 $v_0 \perp B$ 时，带电粒子在匀强磁场中的运动。研究时应抓住以下几点：

1. 洛伦兹力的方向永远垂直于含有 v 与 B 的平面，而且由于 $v \perp B$ ，带电粒子只能在垂直于磁场的平面内运动。
2. 由于洛伦兹力的方向垂直于速度 v ，所以洛伦兹力不改变速度的大小，只改变速度的方向。从 $f = qvB$ 公式中可知，如果 q 、 v 、 B 都是恒量，则洛伦兹力的大小也不变，从中引导学生判断粒子的运动性质，并作演示实验验证。
3. 根据带电粒子作圆周运动时洛伦兹力起着向心力的作用，可得

$$qvB = \frac{mv^2}{r}$$

进而得出半径公式 $r = \frac{mv}{qB}$ 和周期公式 $T = \frac{2\pi m}{qB}$

4. 洛伦兹力对运动电荷不做功。这是洛伦兹力的重要特征。在讲解时还应结合练习七 6 的讨论，使学生能利用运动合成、分解的方法，定性地分析带电粒子的运动方向不和磁感应强度的方向垂直时粒子的运动情况。

(三) 洛伦兹力在近代技术中的应用

教材中主要介绍质谱仪和回旋加速器。

质谱仪 首先根据课本中质谱仪的装置示意图，介绍质谱仪的几个主要部件（电离室、加速电场、偏转磁场和显示器）及其作用，然后推导出荷质比公式

$$\frac{q}{m} = \frac{2U}{B^2 r^2}$$

1. 由于 U 、 B 、 r 均可通过实验测定，因而 q/m 是微观粒子的基本参量。这就使学生认识到可运用物理规律设计实验装置，通过宏观量的测定来测定微观量这样一种重要的物理方法。
2. 当被测粒子的电量 q 相同时，在 U 、 B 一定的条件下，不同质量的粒子在显示器上显示不同的谱线。如果已知电量，则可计算出它们的质量，质谱仪是十分精密的仪器，是测定带电粒子质量和分析同位素的重要工具。

回旋加速器 回旋加速器是利用电场对电荷的加速作用和磁场对运动电荷的偏转作用来获得高能粒子的装置。可在指导学生阅读课文后，重点讲清以下几点：

1. 使学生了解带电粒子在磁场中作匀速圆周运动和在电场中作匀加速直线运动的过程。
2. 使学生了解怎样使粒子每次通过电场时速度方向都和电场力方向相同。主要说明由于带电粒子在匀强磁场中作匀速圆周运动的周期 $T = \frac{2\pi m}{qB}$ 与速率和半径无关，所以只要交变电场的变化周期等于粒子的运动周期，就可以使粒子每次通过电场时都能得到加速。
3. 使学生了解粒子通过 D 形金属扁盒时，由于金属盒的静电屏蔽作用，盒内空间的电场极弱，所以运动粒子只受到洛伦兹力的作用而作匀速圆周运动。

4. 设 D 形盒的半径为 R , 则粒子获得的最大动能为

$$E_k = \frac{1}{2}mv_{\text{最大}}^2 = \frac{1}{2}\frac{q^2B^2}{m}R^2$$

可见由于装置的限制, 带电粒子在这种加速器中获得的能量也是有限制的. 还要进一步说明, 从相对论力学观点来看, 粒子的质量随着速度的增大而增大, 这样粒子运动的周期就不再是恒定的了. 因而交变电场的变化周期与粒子运动的周期不能同步, 这就使加速器工作条件受到了破坏, 进一步提高粒子的速率也就不可能了.

第三节 实验指导

一、演示实验

(一) 电流对磁针的作用 (奥斯特实验)

进行这个实验最好自制一个框架, 如图 1.3 所示. 底板可用一长 40 厘米宽 15 厘米的厚木板制成, 通电导线可用从旧输电线中拆出的粗单股铜线或铝线, 弯成图中所示的形状固定在底板上, 水平长直导线长度约 30 厘米, 高度视所用大磁针高度而定. 接线柱 A 、 B 分别与导线两端相接, 接线柱 C 和 B 相距 4 厘米, 两者之间可接 3A 保险丝, 导线两端经接线柱 A 、 C 与低压电源直流输出端相连, 低压直流电源应选输出电流大于 5A 的, 例如 J1201 型教学用低压电源. 如无低压电源, 可用 4 节一号干电池并联后作电源. 使用低压电源时, 电压可选 2—4V, 此时 B 、 C 间保险丝起限流保护电源作用. 该实验只宜瞬时通电. 如果能制作一个如图 1.4 所示的大容量电容器充放电装置, 利用电容器放电的瞬时大电流, 效果更理想. 其中 $10000 \mu\text{F}$ 16V 电解电容可用多个电容并联组成, 这个装置还可用于电流间相互作用等实验.

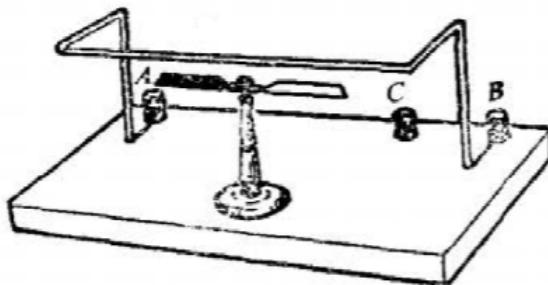


图 1.3

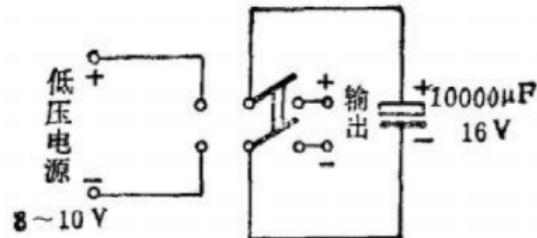


图 1.4

(二) 磁场对电流的作用

这个实验在初中阶段演示过, 若需重新演示, 可按以下几种方法进行.

方法一: 按图 1.5 制作一带有平行金属导轨的底座, 导轨两端与接线柱 A 、 B 相接, 用教学演示用的大蹄形磁铁置于导轨中间, 直裸铜线跨搭在两根导轨上, 电源可使用供电电流大于 5A 的低压直流电源, 或用由几节干电池组成的并联电池组, 也可用上一实验介绍的电容瞬时放电装置. 同样, 这个实验最好在导线中串有一段 3A 保险丝以保护电源. 如果金属导轨与直裸铜线所需粗铜线不易找到, 可以用从大容量电解电容器或油浸纸介质电容器中拆出的铝箔制做, 把铝箔卷在细竹棍 (毛笔笔杆) 上制做导轨. 直裸导线则可将铝箔卷在细竹棍上以后, 将竹棍抽出制成. 由于铝筒状导线质量极小, 一般用一节干电池即可获得满意效果.

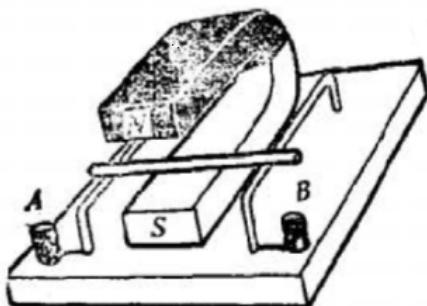


图 1.5

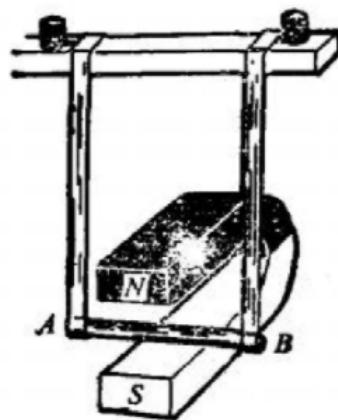


图 1.6

方法二：如想按课本图 1.2 所示装置进行实验，最好按图 1.6 所示将装置改进。图中上方是一根细木条，可固定在铁架台上。细木条上有两个接线柱，接线柱下固定着铜片。AB 是用铝箔卷成的铝筒，长 15 厘米左右。与铝筒连接的是两根铝箔带（宽 1.5 厘米），使铝筒、铝箔带接触良好，用胶粘牢。铝箔带上端绕在铜片上两三圈，以保证良好地接触。演示时，用一节干电池作电源，便可看见通电铝筒在磁场中发生明显偏转。最好制作两个这样的装置，便于以后演示电流间的相互作用。

若用铜棍与铜导线演示，则应选择能提供 5A 以上大电流的低压直流电源，且只宜瞬时接通。

(三) 电流间的相互作用

由于电流间相互作用力很小，实验所需的大电流（10A 以上）的低压电源又较难找到，在一般学校演示这个实验最好按下述方法进行。

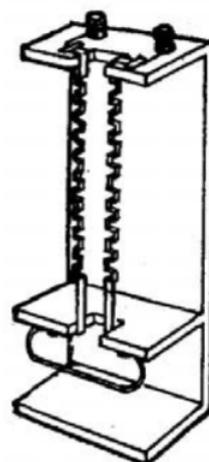


图 1.7

方法一：用两条宽 2 厘米左右的铝箔按图 1.7 甲所示方法压制成两条长 30 厘米的弯曲铝带作平行导线，固定在木架上，导线间相距 1 厘米左右为宜（图 1.7 乙）。电源可用 6V 蓄电池，通过瞬时短接来获得大电流。注意，只能瞬时短接。如果利用演示实验 1 中所述大电容放电装

置，效果更好，且不易损坏电源。

方法二：用演示实验 2 中所述的铝带与铝筒，将两个这样的装置平行放置。演示所用电源同上，演示相斥以相距 1 厘米为宜，相吸以相距 3 厘米为宜。以上两个实验若想用低压直流电源，应选 10A 输出电流的。实验时，要串一根长 4 厘米左右的 5A 保险丝以保护电源。实验时，仍要瞬时点接。

(四) 磁感应强度的方向

用十余个小磁针分布在条形磁铁或通电螺线管周围，即可观察到不同位置的小磁针北极取向不同，表示各点磁感应强度不同，这个方法简单，但由于只能放在桌面上，因此观察很不方便。

如果通过投影仪将指南针投影可提高可见度。这需要制作十余个指向透明的小磁针（图 1.8）（可以发动学生在课外小组活动时制作）。制作方法如下：将磁化的缝衣针（长 3 厘米左右）两枚分别对称平行地穿过按扣上的小孔（方法见课本第 364 页课外实验活动一“自制指南针”），用透明胶片剪成箭头与箭尾形状，并分别涂上红绿两色（不能用水彩色或广告色，可用彩色水笔或照相用的透明颜料），用胶粘在针的两端。小磁针底座用透明有机玻璃，中间支针可用较粗缝衣针。截取针尖部分（长 1.5 厘米），将其烧热后插在有机玻璃底座上，实验时，将磁针放在投影仪玻璃上，即可在屏幕上看到磁场中透明磁针南北极的指向。

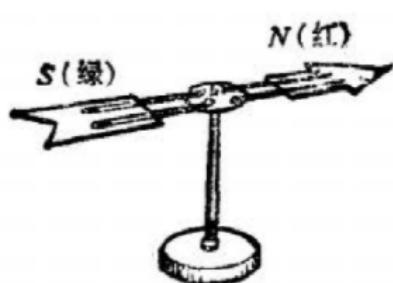


图 1.8

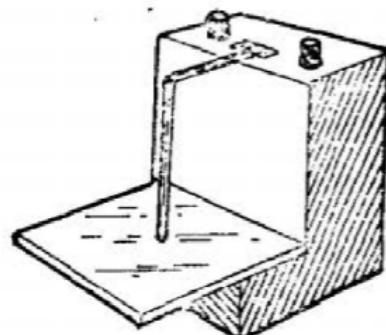


图 1.9

(五) 通电直导线、环形电流、螺线管磁场的磁力线

这三种电流磁场的磁力线演示，可以用现成演示仪器演示，其装置如图 1.9、图 1.10、图 1.11 所示。实验电源可用低压直流电源或 6V 蓄电池，通过滑线变阻器将电路电流控制在 3—5A 间。铁粉最好选用化学实验室中的还原铁粉，也可用经筛过的细铁屑。实验前，应将铁粉（屑）均匀撒在导线周围。通电后，轻敲板面，便出现磁力线形状。呈现磁力线形状后即应断电。

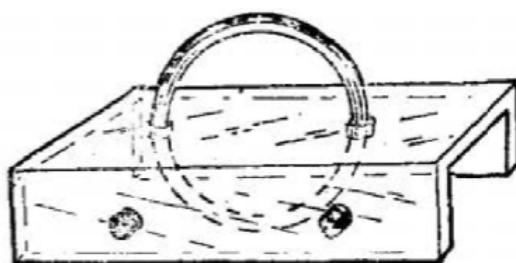


图 1.10

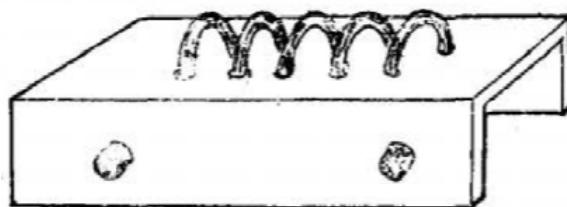


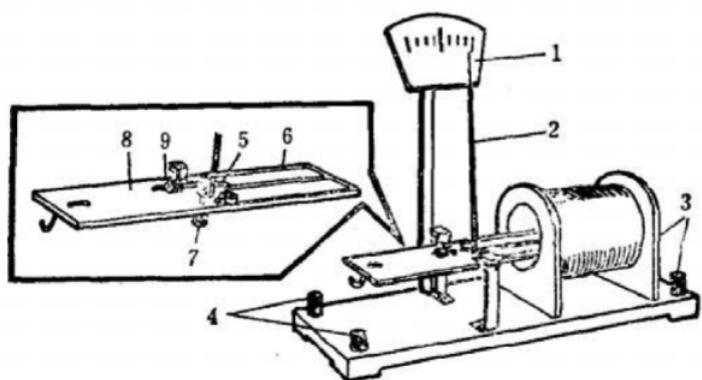
图 1.11

由于环形电流与螺线管磁力线演示器的板面是透明的，因而可以放在投影仪上进行投影。

以上装置自己制作亦不困难，直线电流磁场磁力线演示器主要是绕制一个矩形线圈，该线圈可用直径 0.3 毫米的漆包线绕制，尺寸为 20 厘米 \times 20 厘米左右，共绕 60 匝。环形电流磁场磁力线演示器也用相同直径的漆包线绕 60 匝左右，环的直径 5 厘米左右即可。安放线圈的底座可用有机玻璃制成（也可用普通窗玻璃条拼接后用胶粘成）。螺线管磁场磁力线演示器中，螺线管线圈仍用上述导线绕制，每 20 匝捆扎在一起，共五组，管直径 4—5 厘米，间距 1.5 厘米左右。底座仍用有机玻璃制作。

如果将这三个装置配以小磁针即可用来验证右手螺旋法则（安培定则）。

（六）电流天平



1. 刻度盘 2. 指针 3. 接线圈接线柱 4. 接 U 形导线接线柱
5. 转换开关 6. U 形导线 7. 平衡锤 8. 天平臂 9. 平衡螺丝

图 1.12

J2408 型电流天平如课本上图 1.28 所示，它主要由激磁线圈（管内产生被测匀强磁场）和横梁系统两部分组成（图 1.12）。激磁线圈内径 5.5 厘米，匝数约 500 匝，两端引线与靠近线圈一侧的接线柱连。横梁系统由铜箔板制成，中央两侧有黄铜制的刀口并兼作导电接点，铜箔板中央有一“7”形螺丝，水平部分螺母为横梁平衡螺母。固定在板上竖直部分下端螺母为配重螺母，用于调节天平灵敏度（越往下，横梁重心越低，平衡越好，但灵敏度越低）。左侧有一挂钩，用于悬吊砝码，右侧伸入线圈内部部分铜箔上形成“丁”字形导体，通过转换开关改变导体在磁场中受力部分（产生力矩部分）长度为 4 厘米或 2 厘米。

演示方法：电流天平主要用来演示一种测量磁感应强度的方法，即根据定义式 $B = \frac{F}{I\ell}$ 测量磁感应强度。演示前应使天平底座置于水平位置，并调节横梁平衡螺母使横梁平衡（指针指示中间零刻度），演示时应先接激磁电路。由于激磁绕组额定电流为 3A，电路中串有 3A 量程电流表用于监视。然后再接测量电路。电路连接如图 1.13 所示，通电导体长度可根据需要通过转换开关在 4 厘米或 2 厘米中选择一个，通电电流可由串联在电路中的安培计读出，受力大小可通过悬挂砝码使天平重新平衡的砝码质量求出，需要注意的是，测量之前应先通电观察一下，不悬挂砝码时指针偏转方向是否右端（伸入磁场部分）向下，否则应更换测量电路电源极性，以使电流受力方向改变。由于测量部分额定电流也是 3A，因而实验中电流取值也应限制在 3A 以下，其次，由于电流天平配置的砝码只有 20 毫克、40 毫克、60 毫克三种，所以在演示时，调好平衡后，悬挂 20 毫克砝码，再接通激磁电路，调节激磁电流，使天平恢复平衡，而后就不需再调，测量对象就是该激磁电流所产生的磁感应强度。

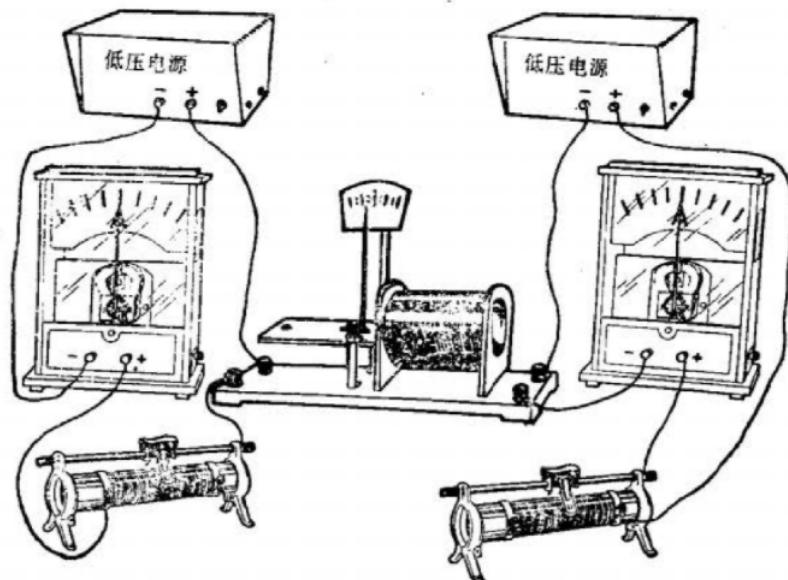


图 1.13

这个电流天平还可演示 $F \propto I$ 及 $F \propto \ell$ 的关系，也可演示激磁线圈内磁感应强度 B 与激磁电流成正比，不再赘述。使用电流天平前最好用酒精清洗刀口与刀口支承处，以使通电接触良好，使用后要把横梁从支承架上取下放好，以保护刀口。

(七) 磁电式仪表的工作原理

这个实验主要是演示通电线圈在磁场中所受力偶矩和这个力偶矩与游丝反力偶矩的平衡问题。磁电式仪表的幅向磁场及完整结构仍需用大幅教学挂图或模型说明。

线圈在磁场中受力偶矩的演示可以用 J2416 型电机原理说明器进行，实验装置如图 1.14 所示。激磁线圈所用电源可用 6V 蓄电池或低压直流电源（6—8V），通电线圈电路中串有变阻器，接在 6—8V 低压电源或蓄电池上，电路中电流控制在 3A 左右为好。

演示游丝反力矩的作用，需要自制一个教具，其结构包括磁铁轭、动圈绕组与底座三部分，见图 1.15。制作方法如下：磁铁轭需要从旧的扬声器（口径 4 英寸或 5 英寸，小一些也可）上拆下钡恒瓷（钡铁氧体）磁体，根据它的大小用 2 毫米厚的铁板弯成“U”形，并用胶把磁体按 1.15 甲粘在其上，磁体另一端面粘一块矩形铁片，并使两个磁体 N 、 S 极相对，间距 6—8 厘米，动圈绕组用硬泡沫塑料（可从仪器包装中找到）制成框架，其尺寸根据磁铁轭大小而定，其宽度应尽可能接近磁铁两极的距离。在框架上用直径 0.3 毫米漆包线绕 20 至 30 匝，在框架两端中央插入两根粗缝衣针作为转轴，用胶将线圈与转轴粘牢，线圈头尾部分先分别在前后转轴上紧绕 4—5 匝固定后，再弯制成大型游丝状，最后可用按钉将线头固定在底座木板上。在线框中央立一根用红色油漆涂过的塑料管作指针，磁铁轭两极也应分别涂上红、蓝两色油漆来表示 N 、 S 极。底座可用木板制，动圈支架可用薄铁皮或曲别针铁丝弯制成，底座宽度应恰好卡紧在磁铁轭下部，底座上动圈支架兼作导电接点，安装两个接线柱便于通电。装好后的仪器如图 1.15 乙所示。

实验时，可先将固定游丝的按钉拔下，使游丝自由。通电后可以发现，动圈将转至中性面，再固定游丝，通电后可以看到只转过一定角度。电流越大，偏转角度越大，从而说明了动圈式磁电仪表的原理。

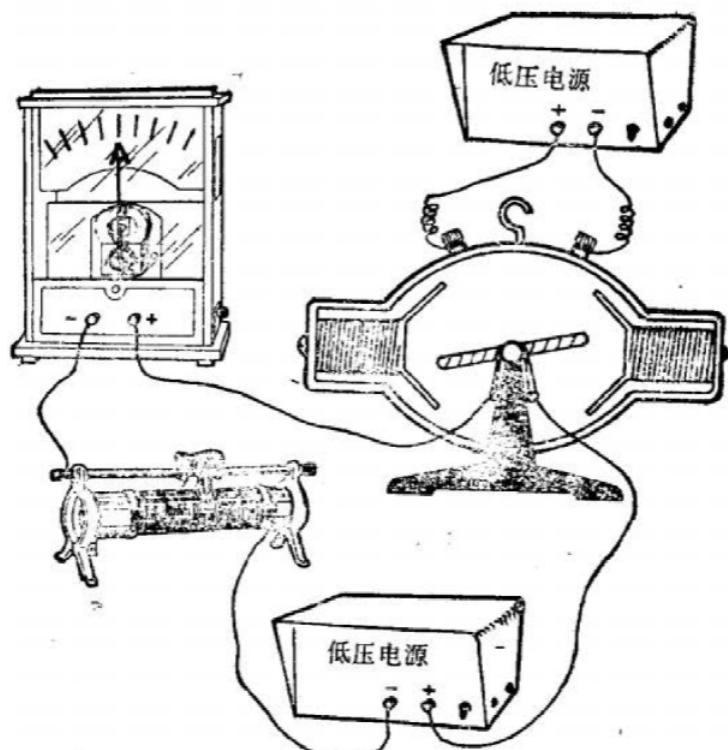


图 1.14

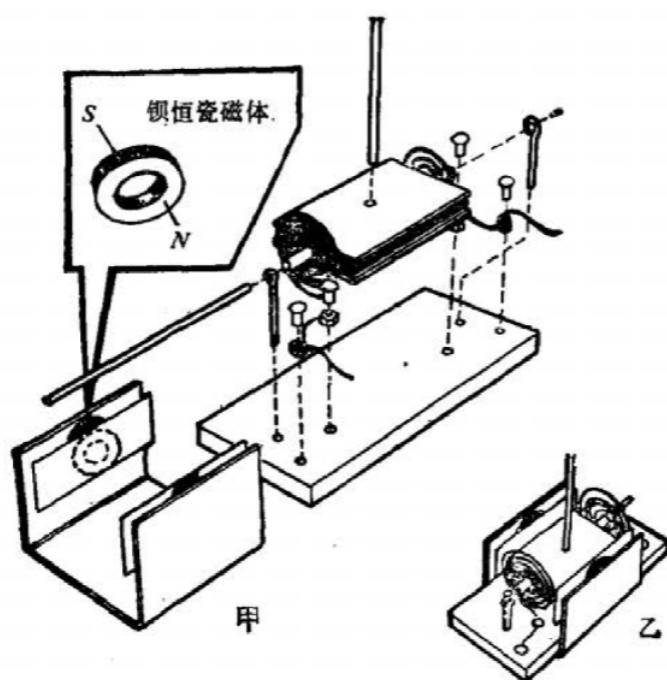


图 1.15

(八) 带电粒子在磁场中运动时的偏转

这个实验可以用多种方法进行演示.

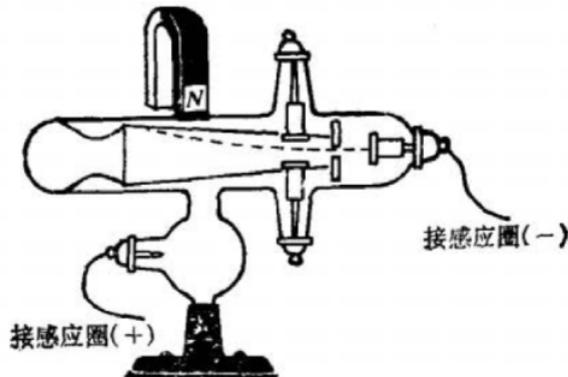


图 1.16

方法一：用 JYSI 型阴极射线管演示，将一台感应圈与低压直流电源（或蓄电池）产生高压加在阴极射线管两端。可以看到在荧光屏上呈现绿色光带，这是电子流撞击荧光屏而发出的，它表示电子流径迹。当用磁铁靠近射线中部时，阴极射线将发生偏转，如图 1.16 所示。反转磁场方向，射线也向相反方向偏转。这个实验也可以用一般的示磁效应阴极射线管进行，实验时，如果仅在阴极板附近有绿光而无光带出现，说明感应圈极性接反，应通过更换极性开关改变极性。

方法二：利用教学示波器荧光屏演示，先将 Y 增益逆时针旋到底，Y 轴衰减拨至 100 或 1000，扫描范围拨至外 X，X 增益也逆时针旋到底。开启电源后，调节亮度与聚焦，使光点圆而亮度适中并居于中心，再用磁铁靠近光点，就会发现光点发生位置变化，根据位置变化与磁极位置就可验证洛伦兹力的方向与左手定则。

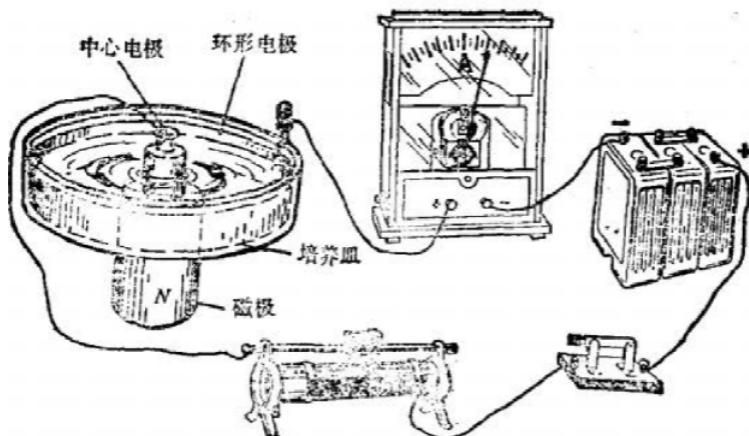


图 1.17

方法三：利用通电溶液中正负离子受洛伦兹力偏离原来径迹而带动液体转动来演示。实验装置如图 1.17 所示，所需器材在图中均已注明，置于扬声器磁铁上的玻璃培养皿（生物实验室中常用）的中央部分，置一旧的铜质砝码作为中心电极，紧靠玻璃培养皿器壁内侧，用紫铜片弯成一个环形电极。培养皿中倒入比重约为 $1.04\text{g}/\text{cm}^3$ 的硫酸铜溶液，深度为 0.5 厘米至 1 厘米，电流强度由变阻器控制，电流用安培计监视，一般控制在 0.5 至 0.6 安之间，电源可使用低压电源或 6V 蓄电池，实验时，在环形电极与中央电极间形成幅向电流。形成电流的正负离子在

洛伦兹力作用下（由于正负离子运动方向相反，故受洛伦兹力方向一致），带动液体围绕中央电极旋转，其旋转方向可由左手定则判定，为观察方便，可将培养皿与磁铁置于投影仪玻璃板上，在液面上撒一些碎纸屑，投影在屏幕上可使学生清楚看到旋转的液流。若改变电流方向或磁铁方向就可看到液流反转，从而说明带电粒子在磁场中的受力及其规律。

（九）电子束在匀强磁场中作圆周运动

实验要用磁场、电场作用力演示仪。该仪器目前有两种规格，即 J9283-1 型与 J9283 型。J9283 型是改进型，内部附有电源。J9283-1 型内部无电源，需要与 J1201 型低压电源（或有 9V 稳压输出的低压直流电源）及 J1205 型高压电源（或有 300V 高压直流及 6.3V 交流电压输出的其他高压电源）配合使用。

此仪器主要由演示球形电子射线管（威尔尼特电子管）与激磁线圈（亥姆霍兹线圈）组成。J9283 型磁场、电场演示仪外形如图 1.18 所示。电子管阴极在加热后经加速电压作用形成电子流射出，充满管内的低压惰性气体在电子流撞击下将放出紫色辉光，从而观察到电子流的径迹。两亥姆霍兹线圈互相平行，在两者中央平行平面附近将形成一个匀强磁场区。电子流在磁场作用下将受洛伦兹力作用，若电子流运动方向与线圈平面平行，将观察到电子流作匀速圆周运动的径迹。改变加速电压可改变电子运动速率，改变激磁电流可改变电子流所处磁场磁感应强度，从而可观察到电子圆运动半径与电子速度和磁感应强度的关系。

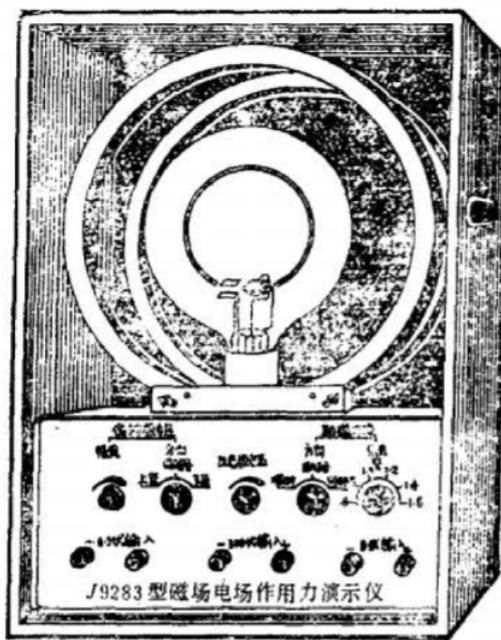


图 1.18

实验操作步骤如下：

- 先将加速极电压旋钮旋至 0（逆时针到底），励磁电流方向旋钮拨至“断路”，幅值旋钮拨至最小值“0.6A”，偏转板电压钮拨至“断路”（这是用于演示电场偏转的，此实验中不用偏转电压）。
- 接好电源后开启电源，预热 5 分钟。
- 缓慢调节加速电压旋钮，可以看到电子射线的紫色直线径迹。用手转动电子管，使径迹与线圈平面平行。

4. 拨动励磁旋钮至“顺时”位置，此时，线圈中通有 0.6A 励磁电流，其方向由线圈上符号标明为顺时针方向电流（正面看），此时可看到电子射线径迹发生弯曲。
5. 逐渐加大励磁电流，可以看到径迹逐渐变为圆形，由此清楚表明运动电子在磁场力作用下作匀速圆周运动。
6. 继续加大励磁电流（注意，使用 J1201 低压电源时，其稳压电流输出不要超过 1.2A），由于磁感应强度增大，电子射线圆径迹半径将减小，说明磁场越强，圆运动半径越小。
7. 固定励磁电流不变，改变加速电压大小，将看到电压越高，电子射线圆径迹半径越大，说明磁场不变时，带电粒子速度越大，其圆运动半径越大，从而定性地说明带电粒子在垂直磁场方向上运动时，其圆运动半径 $r = \frac{mv}{qB}$ 。

实验时必须注意以下两点：一定要在将加速电压钮逆时针旋到底再开启电源对灯丝预热 5 分钟，而后进行实验。实验完毕后仍应将加速电压钮逆时针旋到底，再关闭电源。其次在使用励磁线圈电流方向钮时，一定要将幅值钮旋回“0.6A”处再使用，防止大电流换切造成开关点电弧烧毁接点。

这个仪器还可定量研究验证洛伦兹力规律，亦可配合加速电压测定电子荷质比，请参阅本仪器有关说明。

实验中若需观察粒子速度方向与磁力线不垂直时出现的螺旋状径迹，只需用手慢慢旋动电子管即可。

二、学生实验

（一）观察磁铁对电流的作用

这个实验比较简单，最好在课本图 10.1 所示实验电路中串入变阻器和安培计。因为现在许多学校已改用低压学生电源，不再使用蓄电池作为学生实验电源，若采用课本上的电路，则实际上处于短路状态，往往将保险丝烧断。实验前，将电路电流调节至 2A 左右（输出电压 4.6V），断开电键，放好磁铁再进行实验。

在学生进行实验前，教师应作如下要求：首先是弄清实验原理，即将按左手定则判断导线受力方向的结果与实际通电后导线受力方向进行比较，这就需要先作出表格（可画图），其次要求学生观察清楚线圈绕制情况，确定出受力边框上导线电流流向。

在实验时，可以安排两个思考问题供学生思考：这个实验为什么要用多匝线圈代替单根导线进行实验？有人说，导线框通电后受磁场力才运动起来，可见力是物体运动的原因。这种说法对吗？为什么？

三、课外实验活动

（一）自制指南针

最好按前面演示实验 4 中所介绍的方法制做透明磁针。磁针底座可改为小木块。安装支持钢针时，可先在木块上用直径类似的小钉钉一个小孔，再将钢针底部插入固定，并用一点乳胶粘牢，底座也可用大橡皮，将钢针插在其上便可。

（二）验证环形电流的磁场

应让学生弄清线圈绕制方向与电流关系，电流从哪端流入，怎样在线圈中流动，弄清这一点对后面电磁感应有关线圈问题和实验很有好处。同时还要告诉学生用砂纸将漆包线两端漆皮

打去，露出铜金属光泽后才能通电，这一点许多学生并不懂得，实验中所采用的漆包线直径可选用直径 0.3 毫米左右的，最好绕 30 匝左右，通电时间亦不应过长，用低压直流电源要串一变阻器。

(三) 验证通电螺线管的南北极

在实验前要指导学生制做螺线管。螺线管直径应大一些，为使螺线管有一定的形状，需要先用硬卡片纸（或画报纸）制作一个稍粗的纸质圆筒。绕制时，可用直径 0.2—0.3 毫米的漆包线。固定漆包线头尾的方法如图 1.19 所示，图中的 A、B 是两根粗棉线，待漆包线绕紧后抽紧。螺线管绕制匝数在 30—40 匝之间即可。实验时，线头处漆皮也应用砂纸打去，并且不要长时间通电，以防止损坏电源。用低压直流电源，一定要加变阻器控制电流强度。

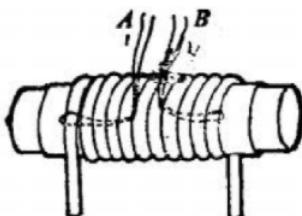


图 1.19

(四) 观察磁化现象

注意在做这个实验时，是要把磁铁靠近铁钉。对于实验现象，可作这样的解释：第一次用磁极一端（如 N 极）靠近时，铁钉被磁化，靠近磁铁端为异名磁极（如 S 极），吸引铁屑端为同名磁极（如 N 极）。小铁屑也被磁化，靠近铁钉一侧为异名磁极（如 S 极）。当移去磁铁时，少量铁屑粘在铁钉上是由于这部分铁屑都残留有剩磁，其极性不变。当用磁铁另一端（如 S 极）靠近钉子头的瞬间，由于铁钉磁化靠近铁屑端为同名磁极（S 极），而铁屑这一端由于原来剩磁磁极未变（还是 S 极），因而同名相斥而掉落下来了。在解释时，可以向学生说明，铁钉一般都是熟铁，是软磁性材料，而铁屑成分复杂，即使原来是软磁性的，由于切削过程的高温，将使内部碳成分集中在表面，表现出碳钢性质（硬磁性质），这就是铁屑磁化后有些剩磁较强的原因。

第四节 习题解答

一、练习一

1. 磁体的北极在磁场中所受的磁场力跟磁场方向同向，南极所受的磁场力跟磁场方向反向。课本图 1.12 是放在磁场中的小磁针，试根据小磁针所受的力说明，它将怎样转动以及静止在哪个方向。

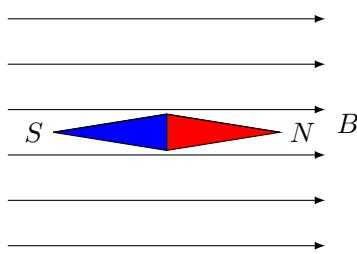


图 1.20

解答：根据磁针 N 极所受的磁场力的方向为磁场方向的规定，可知小磁针应顺时针转动。小磁针静止在跟磁力线平行的位置上（图 1.20）。

- 在课本图 1.13 中，当电流通过导线时，导线下面的磁针北极转向读者。试判断 AB 中电流的方向。

解答： AB 中的电流方向由 B 流向 A 。

- 在课本图 1.14 中，当电流通过线圈时，磁针的南极指向读者。试确定线圈中电流的方向。

解答： 电流沿顺时针方向流动。

- 试确定课本图 1.15 中电源的正极和负极。

解答： 电源右端为正极。

- 离开你向前运动的质子流产生的磁场是怎样的？向着你运动的电子流产生的磁场又是怎样的？

解答： 磁力线是在垂直于质子速度的平面上，并以质子流为中心的同心圆，磁力线的方向是顺时针的，电子流产生的磁场也是这样。

二、练习二

- 有人根据 $B = F/I\ell$ 提出：磁场中某处的磁感应强度 B 跟磁力 F 成正比，跟电流强度 I 和导线长度 ℓ 的乘积 $I\ell$ 成反比。这种提法有什么问题？错在哪里？

解答： 实验证明 F 跟 $I\ell$ 的乘积成正比，故 $\frac{F}{I\ell}$ 的比值在磁场中某处是一个恒量。这个比值决定了磁感应强度 B 的大小。所以 B 跟 F 成正比， B 跟 $I\ell$ 成反比这种提法是错的。

- 能不能用一小段通电导线在磁场中所受磁力的方向来定义磁感应强度的方向？讨论一下这个问题。

解答： 不能。因为在磁场中的某处一小段通电导线所受的磁力的方向还与电流方向有关。对于已知电流方向的通电导线，可以根据它在磁场中所受的磁力方向和其中的电流方向，来判断磁感应强度的方向。

- 长 10 厘米的导线，放入匀强磁场中，它的方向和磁场的方向垂直，导线中的电流强度是 3.0 安，受到的磁力是 1.5×10^{-3} 牛。求该处的磁感应强度。

解答：

$$B = \frac{F}{I\ell} = \frac{1.5 \times 10^{-3}}{3.0 \times 0.10} = 5.0 \times 10^{-3} \text{ T}$$

- 把矩形线圈 $abcd$ 放在匀强磁场中（图 1.21），线圈面积为 $5 \times 10^{-2} \text{ m}^2$ ，磁感应强度为 $2 \times 10^{-3} \text{ T}$ 。

(a) 当线圈平面与磁场方向垂直时，穿过线圈的磁通量是多少？

(b) 线圈平面从图所示的位置绕 OO' 轴转过 60° 时，穿过线圈的磁通量是多少？

解答：

(a) $\phi = BS = 2 \times 10^{-3} \times 5 \times 10^{-2} = 10^{-3} \text{ Wb}$

(b) $\phi = BS \cdot \cos \theta = 10^{-3} \times \cos 60^\circ = 5 \times 10^{-4} \text{ Wb}$

- 通电螺线管内部的磁感应强度大，还是管口外部的磁感应强度大？你是根据什么判断的？

解答： 通电螺线管内部的磁感应强度大，因为管内部的磁力线分布比管口外部要密一些。

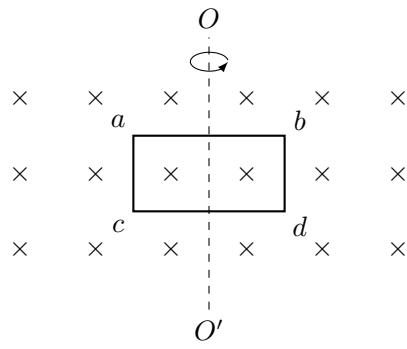


图 1.21

三、练习三

1. 图 1.24 表示一根放在磁场里的通电直导线，图中已分别标明电流、磁感应强度和安培力这三个量中两个的方向，试画出第三个量的方向。

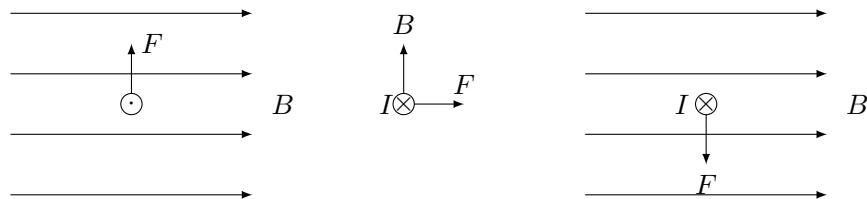


图 1.22

解答：答案如图 1.22 所示。在一般情况下，中图中 B 的方向是磁感应强度的垂直于电流、安培力分量的方向。

2. 试解释为什么两根平行直导线中通以相反方向电流时，它们互相推斥。

解答：如图 1.23 所示，根据安培定则和左手定则可得： I_1 的磁场 B_1 对 I_2 的安培力为 F_2 ， I_2 的磁场 B_2 对 I_1 的安培力为 F_1 ，所以电流方向相反的两平行通电直导线互相推斥。

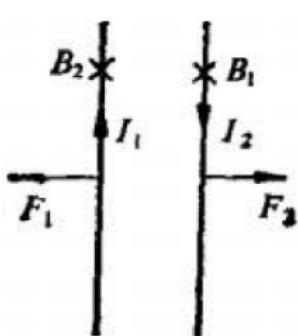


图 1.23

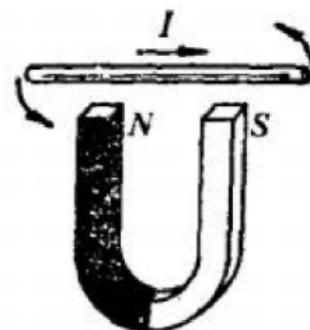


图 1.24

3. 如课本图 1.25 所示，把一根通电的直导线放在蹄形磁铁的两个磁极上方。导线可以自由移动和转动，如果电流的方向如图所示，导线将产生怎样的运动？

解答：通电直导线将在水平面里转动，右端转向纸里，左端转向读者（图 1.24），并向下移动。

4. 把 30 厘米的通电直导线放入匀强磁场中，导线中的电流强度是 2.0 安，磁场的磁感应强度是 1.2 特。求电流方向跟磁场方向垂直时导线所受的安培力。

解答：

$$F = I\ell B = 2.0 \times 0.30 \times 1.2 = 0.72\text{N}$$

5. 在磁感应强度是 4.0×10^{-2} 特的匀强磁场里，有一条和磁场方向相交成 60° 角、长 8 厘米的通电直导线 ab (图 1.25). 通电导线 ab 所受的安培力是 1.0×10^{-2} 牛，方向和纸面垂直指向读者，求导线里电流的大小和方向.

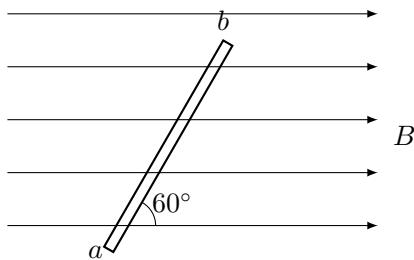


图 1.25

解答：

$$I = \frac{F}{\ell B \sin \theta} = \frac{1.0 \times 10^{-2}}{0.08 \times 4.0 \times 10^{-2} \times \frac{\sqrt{3}}{2}} \approx 3.6\text{A}$$

电流方向由 b 流向 a .

6. 一根长 2 米的直导线，通有 1 安的电流，把它放在 $B = 0.2$ 特的匀强磁场中，当导线与磁力线的夹角为 0° , 30° 和 90° 时，导线所受的安培力分别有多大？

解答：

$$F = I\ell B \sin \theta$$

- 当 $\theta = 0^\circ$ 时， $\sin 0^\circ = 0$, 所以 $F = 0$,
- 当 $\theta = 30^\circ$ 时， $F = 1 \times 2 \times 0.2 \times \frac{1}{2} = 0.2\text{N}$,
- 当 $\theta = 90^\circ$ 时， $F = 1 \times 2 \times 0.2 \times 1 = 0.4\text{N}$.

7. 如课本图 1.27 所示，在通电长导线的旁边放一个可以自由移动和转动的矩形通电线圈，线圈和导线在同一平面上，它的 a, c 两边和导线平行，试讨论一下线圈各边的受力情况，线圈在磁场中将怎样运动？

解答：根据安培定则可判定线圈所在平面的磁场方向是指向纸里。再根据 $B \propto \frac{1}{r}$ 和左手定则判定出线框各边受的安培力方向，即 a 边受的力 F_a 水平向左， b 边受的力 F_b 竖直向上， c 边受的力 F_c 水平向右， d 边受的力 F_d 竖直向下，因 $F_a > F_c$, $F_b = F_d$, 如图 1.26 所示，所以矩形线圈将沿着它自己所在的竖直平面向左平动。

四、练习四

1. 设图 1.29 所示的长螺线管内部 $B = 1.0 \times 10^{-2}$ 特。
 - (a) 与螺线管轴线平行的一条通电导线所受的力有多大？
 - (b) 如果 CD 的长度是 2 厘米，U 形导线中通过的电流强度是 1.0 安，导线所受的力有多大？
 - (c) 为了使电流天平保持平衡，在另一端要加多重的砝码？

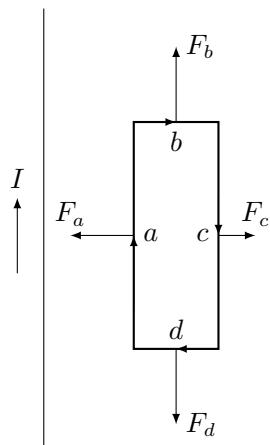


图 1.26

解答：

- 因为电流方向与磁场方向平行，所以 $F = 0$.
 - $F = I\ell B = 1.0 \times 0.02 \times 1.0 \times 10^{-2} = 2 \times 10^{-4}\text{N}$
 - $m = \frac{I\ell B}{g} = \frac{2 \times 10^{-4}}{10} = 2 \times 10^{-5}\text{kg}$
2. 你自己设计一种测量磁感应强度的仪器，并说明它的原理和测定方法.

解答：应用通电导线在磁场中受安培力的原理设计仪器安培力的大小可通过测量与它平衡的力测出. 测量这个与安培力平衡的办法有多种，可使用弹簧秤、天平等仪器.

五、练习五

- 如课本图 1.33 所示，把通电线圈放入永久磁铁的匀强磁场中.

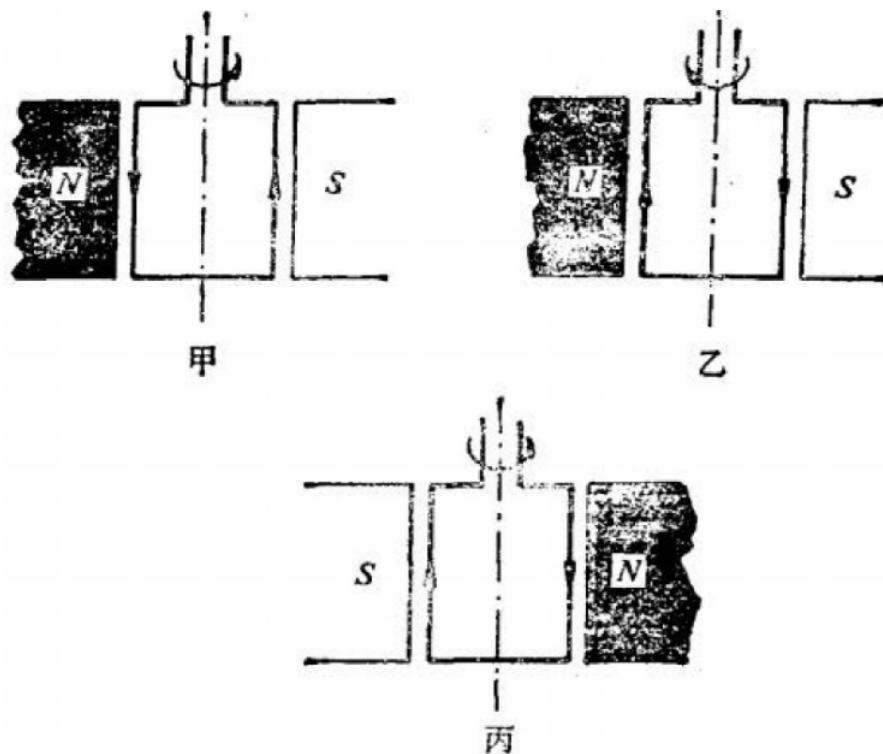


图 1.27

- (a) 图甲中, 线圈怎样转动?
 (b) 图乙中, 由上往下看线圈是顺时针转动的, 磁铁哪一边是 N 极? 哪一边是 S 极?
 (c) 图丙中, 由上往下看线圈是反时针转动的, 画出线圈中电流的方向.

解答:

- (a) 由上往下看线圈是反时针转动的 (图 1.27 甲).
 (b) 磁铁左边是 N 极, 右是 S 极 (图 1.27 乙).
 (c) 电流方向如图 1.27 丙所示.
 2. 有一个匝数为 10 匝的矩形线圈, 长为 25 厘米, 宽为 10 厘米, 放在 $B = 1.5 \times 10^{-3}$ 特的匀强磁场中, 通以 1.5 安的电流, 求它所受的最大的力偶矩.

解答:

$$M = NBIS = 10 \times 1.5 \times 10^{-3} \times 1.5 \times 0.25 \times 0.10 = 5.6 \times 10^{-4} \text{ N} \cdot \text{m}$$

3. 课本图 1.30 所示的放在磁场中的线圈, 当转到线圈平面跟磁力线垂直的位置时, 会不会立即停在这个位置上? 为什么? 定性地分析一下线圈在停下来之前的运动情况, 有什么办法可以使通电线圈不停下来而继续转动?

解答: 不会立即停在这个位置上. 因为线圈通过该位置时, 力偶矩虽然为零. 但由于线圈转动时的惯性, 使线圈能通过该位置. 线圈在停下来之前在这个位置附近振动. 如果在线圈通过该位置时改变电流方向, 则可使通电线圈不停下来而继续转动.

4. 电流表中通以相同的电流时, 指针的偏转角度越大, 表示电流表的灵敏度越高, 定性地分析一下, 有哪些因素会影响磁电式电流表的灵敏度.

解答: 由 $NBIS = k_2\theta$ 可得

$$\theta = \frac{NBS}{k_2}I$$

由此式可知, 影响灵敏度的有线圈匝数 N 、线圈面积 S 、磁感应强度 B 和由弹簧所决定的比例恒量 k_2 .

六、练习六

1. 如课本图 1.35 所示, 带电粒子以速率 v 射入匀强磁场. 分别标出带电粒子所受洛伦兹力的方向.

解答: 图甲洛伦兹力方向向上; 图乙方向向下; 图丙方向指向读者; 图丁方向指向纸里.

2. 一个带电粒子在空间中运动时没有发生偏转, 能不能说明这个空间中没有磁场? 为什么?

解答: 不能, 因为当带电粒子平行于磁场方向运动时, 磁场对带电粒子的作用力为零, 带电粒子不会发生偏转, 却有磁场存在.

3. 一个电子以速率 v 射入磁感应强度为 B 的匀强磁场中, 电子沿什么方向射入, 受到的洛伦兹力最大? 最大值是多大? 沿什么方向射入, 不受洛伦兹力作用?

解答: 电子沿垂直于磁感应强度方向射入时, 受到的洛伦兹力最大, 其最大值为 $f = evB$. 电子沿平行于磁感应强度方向射入时, 不受洛伦兹力.

4. 电子的速率 $v = 3.0 \times 10^8 \text{ m/s}$, 垂直射入 $B = 0.1$ 特的磁场中, 它受到的洛伦兹力是多大?

解答:

$$f = qvB = 1.6 \times 10^{-19} \times 3.0 \times 10^8 \times 0.1 = 5 \times 10^{-14} \text{ N}$$

5. 一个电子以 $1.2 \times 10^7 \text{ m/s}$ 的速率射入磁感应强度为 0.02 特的匀强磁场中。当速率 v 与磁感应强度 B 的夹角 θ 为 30° 和 60° 时，电子所受洛伦兹力分别是多大？

解答：根据 $f = evB \sin \theta$ ，由 $\theta_1 = 30^\circ$, $\theta_2 = 60^\circ$ 可得

$$f_1 = 1.6 \times 10^{-19} \times 1.2 \times 10^7 \times 0.02 \times 0.5 = 1.9 \times 10^{-14} \text{ N}$$

$$f_2 = 1.6 \times 10^{-19} \times 1.2 \times 10^7 \times 0.02 \times 0.87 = 3.3 \times 10^{-14} \text{ N}$$

6. 一电荷 q 在某一匀强磁场中运动，判断下面几种说法是否正确，并说明理由。

- (a) 只要速度的大小相同，所受的洛伦兹力就相同。
- (b) 如果速度不变，把电荷 q 改为 $-q$ ，洛伦兹力的方向将反向，但大小不变。
- (c) 如果速度不变，把 B 改为反向，洛伦兹力的方向将反向，但大小不变。

解答：

- (a) 不正确。因为 $f = qBv \sin \theta$, f 不仅与速度 v 有关系，而且与 q 、 B 、 θ 均有关系，即使 B 不变，电荷 q 是已知的，速度大小相同，所受的洛伦兹力也不一定相同。因为只要速度的方向发生变化，洛伦兹力也要随着改变。
- (b) 速度不变即速度大小和方向都不变。根据 $f = qBv \sin \theta$ 可知洛伦兹力大小不变，因 $-q$ 受力方向和 $+q$ 受力方向相反，可见受力方向将反向。故此说法是正确的。
- (c) 此说法正确。由于速度不变， f 仅与 B 有关。 B 大小不变， f 的大小也不变。根据左手定则可知，当 B 反向时，洛伦兹力的方向将反向。

七、练习七

1. 电子以 $1.6 \times 10^6 \text{ m/s}$ 的速率垂直射入 $B = 10^{-4}$ 特的匀强磁场中，求电子做圆周运动的轨道半径和周期。

解答：

$$r = \frac{mv}{qB} = \frac{0.91 \times 10^{-30} \times 1.6 \times 10^6}{1.6 \times 10^{-19} \times 10^{-4}} = 0.091 \text{ m} = 9.1 \text{ cm}$$

$$T = \frac{2\pi m}{qB} = \frac{2 \times 3.14 \times 0.91 \times 10^{-30}}{1.6 \times 10^{-19} \times 10^{-4}} = 3.6 \times 10^{-7} \text{ s}$$

2. 电子垂直射入 $B = 7.0 \times 10^{-4}$ 特的匀强磁场中，做圆周运动的轨道半径为 3.0×10^{-2} 米，求电子运动的速率。

解答：

$$v = \frac{qBr}{m} = \frac{1.6 \times 10^{-19} \times 7 \times 10^{-4} \times 3.0 \times 10^{-2}}{0.91 \times 10^{-30}} = 3.7 \times 10^6 \text{ m/s}$$

3. 能量是 5.3 兆电子伏的 α 粒子垂直进入磁感应强度是 1.0 特的匀强磁场中，试确定作用在 α 粒子上的洛伦兹力和 α 粒子的轨道半径。 α 粒子即氦核，质量为 6.6×10^{-27} 千克，带有两个基本电荷的正电。

解答：根据 $E_k = \frac{1}{2}mv^2$ 可得：

$$v = \frac{2E_k}{m} = \sqrt{\frac{2 \times 5.3 \times 10^6 \times 1.6 \times 10^{-19}}{6.6 \times 10^{-27}}} = 1.6 \times 10^7 \text{ m/s}$$

$$f = qvB = 2 \times 1.6 \times 10^{-19} \times 1.6 \times 10^7 \times 1.0 = 5.1 \times 10^{-12} \text{ N}$$

$$r = \frac{mv}{qB} = \frac{6.6 \times 10^{-27} \times 1.6 \times 10^7}{2 \times 1.6 \times 10^{-19} \times 1.0} = 0.33 \text{ m} = 33 \text{ cm}$$

4. 具有相同动能的质子、氘核和 α 粒子垂直进入同一匀强磁场，试比较这些粒子轨道半径的大小，氘核的质量为质子的两倍，带有一个基本电荷的正电。

解答：由 $E_k = \frac{1}{2}mv^2$, $r = \frac{mv}{qB}$ 可得

$$r = \frac{\sqrt{2E_k m}}{qB}$$

从此公式可知 α 粒子轨道半径和质子轨道半径相同；氘核的轨道半径是质子轨道半径的 $\sqrt{2}$ 倍。

5. 两个电子分别以速率 v 和 $2v$ 垂直射入匀强磁场中，经磁场偏转后，哪个电子先回到原来的出发点？

解答：因为电子在匀强磁场中的运动周期 $T = \frac{2\pi m}{2B}$ 与电子的速率无关，所以两个电子同时回到原来的出发点。

6. 在匀强磁场中，带电粒子的运动方向不和磁感应强度的方向垂直，它的运动径迹将是什么样的曲线？（只要求定性说明）

解答：将带电粒子的速度 v 分解为垂直于 B 的分量为 v_\perp 和平行于 B 的分量 v_\parallel 。因为 v_\parallel 与 B 平行不引起洛伦兹力，故粒子沿 B 方向作匀速直线运动。又因为 v_\perp 与 B 垂直，产生洛伦兹力 $f = qv_\perp B$ 。此力使粒子在垂直于 B 的平面内作匀速圆周运动，故粒子的运动是匀速直线运动和匀速圆周运动的合运动，其轨迹为一螺旋曲线。

八、练习八

1. 在图 1.37 中，设离子室 A 中产生的是钠离子，加速电压 $U = 705$ 伏，磁感应强度 $B = 3.85 \times 10^{-1}$ 特， $r = 5$ 厘米，求钠离子的荷质比。

解答：

$$\frac{q}{m} = \frac{2U}{B^2 r^2} = \frac{2 \times 705}{(3.85 \times 10^{-1})^2 \times (5 \times 10^{-2})^2} = 3.8 \times 10^6 \text{ C/kg}$$

2. 在图 1.37 所示的装置中，离子从小孔飘出时速度并不相同，因此经加速电场加速后，从缝 S_2 射出时速度也不相同，这对实验有一定影响。于是人们提出在缝 S_2 和 S_3 之间加一个速度选择器（课本图 1.38），其中 D_1 和 D_2 是两个平行金属板，分别连在电源的两极上，其间有一定的电场强度 E ；同时在这空间加有垂直于电场方向的磁场，磁感应强度为 B 。这时具有一定速度的带电粒子，从缝 S_2 垂直进入后，可以不发生偏转，由缝 S_2 射出；而具有其他速度的带电粒子都发生偏转，不能由缝 S_2 射出，为什么？这个一定的速度 v 有多大？

解答：设从 S_2 进入场的粒子电荷为 q (正或负) 则粒子受到方向相反的两个力，即电场力 $F = Eq$ 和洛伦兹力 $f = qvB$, 只有 $F = f$ 的粒子才不会发生偏转，这个速度 $v = E/B$.

3. 带电粒子带正电或者带负电，会不会影响速度选择器对它们的速度的选择？如果把图 1.38 中的电场方向改变为相反的方向，或者把磁场方向改变为相反的方向，速度选择器还能不能使用？如果把电场和磁场同时改变为相反的方向，还能不能使用？

解答：不论带电粒子带正电还是带负电，粒子在速度选择器中所受的电场力和洛伦兹力的方向总是相反的。因此，带电的正负不会影响速度选择器对它们的速度的选择。如果把电场方向改变为反方向或者把磁场方向改变为反方向，则速度选择器不能使用。因为这时洛伦兹力和电场力是同向的，粒子必将发生偏转。如果同时把电场和磁场方向改变为相反方向，则速度选择器还能使用。

九、习题

1. 照课本图 1.42 那样，把一根柔软的弹簧竖直地悬挂起来，使它的下端刚刚跟导电液体接触，给弹簧通入电流时，会发生什么现象？做一下这个实验，并解释所发生的现象。

解答：弹簧上下振动，电路交替通断。发生这种现象的原因是：弹簧通入电流时，弹簧各线圈中电流方向相同，线圈之间相互吸引，使弹簧收缩，则电路断开，当电路断开后，因电流消失，线圈之间互相作用消失，因而弹簧恢复原来状态，电路又被接通，这个过程反复出现，使得弹簧上下振动，电路交替通断。

2. 把一个可以绕水平轴转动的铝盘放在蹄形磁铁之间，盘的下边缘浸在导电液体中（图 1.28）。把转轴和导电液体分别接到直流电源的两极上，铝盘就会转动起来。为什么？用什么方法可以改变铝盘的转动方向？

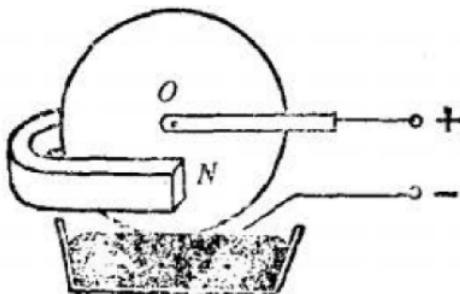


图 1.28

解答：在轴心 O 点到盘下边缘之间有电流。这个电流通过磁铁的磁场时，在安培力矩的作用下，盘转动起来，只要改变磁场方向或者电流方向，就可以改变铝盘转动方向。

3. 在玻璃皿中放入电解质溶液，在玻璃皿的中心放一个圆柱形电极，边缘放一个围环形电极，分别接在电池的两极上（图 1.29），如果把玻璃皿放在磁场中，液体就旋转起来。为什么？液体旋转的方向跟什么有关系？做一下这个实验，看你的判断是否正确？

解答：在玻璃皿的电解质溶液中形成辐向电流，电流方向由中心指向边缘。电解液的正、负离子受到相同方向的洛伦兹力作用，而使液体旋转起来。其旋转方向由磁场方向和电流方向所决定。

4. 下列说法中，哪些说法是正确的？

(a) 一小段通电导线放在磁感应强度为零的位置，所受的安培力一定等于零。

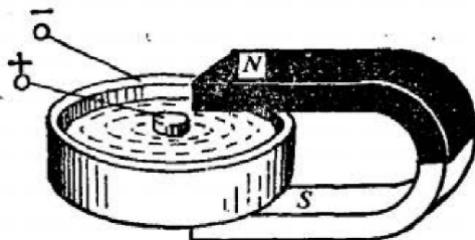


图 1.29

- (b) 一小段通电导线在磁场中某点不受磁场力的作用，该点的磁感应强度一定为零。
 (c) 一小段通电导线在磁场中所受安培力的方向、该点的磁感应强度的方向、电流的方向三者一定互相垂直。

解答：(a) 正确，(b) 不正确。因电流方向与磁感应强度方向平行时，通电导线不受磁场力作用，但磁感应强度不为零。(c) 不正确。安培力方向与 B 、 I 均垂直，但 I 与 B 方向可以不垂直。

5. 磁电式电流表中的磁场是均匀地辐向分布的，线圈两侧边所在位置的磁感应强度为 0.02 特。线圈是边长 1 厘米的正方形，共 100 匝，线圈每转 1° ，螺旋弹簧产生阻碍线圈偏转的力矩是 $2.5 \times 10^{-8} \text{ N} \cdot \text{m}$ 。线圈中电流强度为 5 毫安时，指针将偏转多少度？

解答：

$$\theta = \frac{NBSI}{k_2} = \frac{100 \times 0.02 \times 0.01 \times 0.01 \times 5 \times 10^{-3}}{2.5 \times 10^{-8}} = 40^\circ$$

6. 洛伦兹力对带电粒子是否做功？为什么？

解答：不作功。因为洛伦兹力方向与带电粒子运动方向永远垂直。

7. 利用学过的知识，想办法把下面的带电粒子分开：

- (a) 速度分别为 v 和 $3v$ 的电子；
 (b) 具有相同动能的质子和 α 粒子；
 (c) 荷质比不同的带正电的粒子。

解答：

- (a) 使电子垂直射入一个匀强磁场中，由于 $r = \frac{mv}{qB}$ ， v 不同 r 也不同，所以可将两电子分开。
- (b) 具有相同动能的质子和 α 粒子由于它们本身的质量不同而具有不同的速度。由 $v = \sqrt{\frac{2E_k}{m}}$ 可得 $v_H : v_\alpha = 2 : 1$ 。当它们垂直于电场方向射入匀强电场时，可以将它们分开。
- (c) 使粒子以极小的速度进入加速电场，再经过速度选择器，最后进入偏转磁场。由于 q/m 不同的粒子做匀速圆周运动的半径 r 不同，因此可以将它们分开。
8. 课本图 1.45 表示由 O 点发出的电子和正电子（质量和电量跟电子相同，但带的是正电荷）在匀强磁场中运动的径迹。哪些径迹是电子的，哪些径迹是正电子的？ a 、 b 、 c 三条径迹中，哪个粒子的能量最大，哪个最小？
- 解答：** a 、 b 、 c 三条径迹是电子的。 d 、 e 两条径迹是正电子的。能量大的电子速率大，速率大的电子在磁场中的偏转半径大，从图可知 c 径迹的电子能量最大， a 径迹的电子能量

最小.

9. 质子、氘核和 α 粒子由静止开始通过相同的电势差后垂直进入同一匀强磁场.

(a) 比较这些粒子的动能.

(b) 如果质子在磁场中的轨道半径为10厘米, 氘核和 α 粒子的轨道半径各有多大?

解答: 由 $\frac{1}{2}mv^2 = qU$ 可知, 质子和氘核的动能相等, α 粒子的动能是质子的动能的2倍. 由 $\frac{1}{2}mv^2 = qU$ 和 $r = \frac{mv}{qB}$ 可得

$$r = \frac{\sqrt{2U}}{B} \sqrt{\frac{m}{q}}$$

即

$$r\sqrt{\frac{q}{m}} = \frac{\sqrt{2U}}{B}$$

在本题中, U 、 B 都是恒量, 可知粒子的轨道半径 r 与其荷质比的平方根成反比. 用 e 和 m_H 分别表示质子的电荷和质量, 则

$$r_{\text{质}}\sqrt{\frac{e}{m_H}} = r_{\text{氘}}\sqrt{\frac{e}{2m_H}} = r_{\alpha}\sqrt{\frac{2e}{4m_H}}$$

即

$$r_{\text{氘}} = r_{\alpha} = \sqrt{2}r_{\text{质}} = 1.4 \times 10 = 14\text{cm}$$

10. 如课本图 1.46 所示, A 和 B 之间的距离为 0.1 米, 位于 A 点的电子的速度 $v_0 = 1.0 \times 10^7\text{m/s}$.

(a) 要使电子沿半圆周由 A 运动到 B , 求磁感应强度的大小和方向.

(b) 电子从 A 运动到 B 需要多长时间?

解答:

(a)

$$B = \frac{mv}{rq} = \frac{0.91 \times 10^{-30} \times 1.0 \times 10^7}{0.05 \times 1.6 \times 10^{-19}} = 1.1 \times 10^{-3}\text{T}$$

磁感应强度的方向垂直纸面指向纸内.

(b)

$$t = \frac{T}{2} = \frac{\pi m}{qB} = \frac{3.14 \times 0.91 \times 10^{-30}}{1.6 \times 10^{-19} \times 1.1 \times 10^{-3}} = 1.6 \times 10^{-8}\text{s}$$

11. 把课本图 1.38 所示的速度选择器加在图 1.37 所示装置的 S_2 和 S_3 之间, 已知速度选择器的电场强度为 E , 磁感应强度为 B_1 . 粒子从缝 S_3 进入磁感应强度为 B_2 的匀强磁场中, 做圆周运动的半径为 r . 求粒子的荷质比.

解答: 粒子进入磁场的速度 $v = E/B_1$, 半径 $r = \frac{mv}{qB_2} = \frac{mE}{qB_1B_2}$, 所以荷质比

$$\frac{q}{m} = \frac{E}{B_1B_2r}$$

12. 有一回旋加速器, 它的交变电压的频率为 12×10^8 赫, 半圆形电极的半径为 0.53 米. 加速氘核所需的磁感应强度要多大? 氘核的最大动能是多大? 已知氘核的质量为 3.3×10^{-27} 千克, 电量为 1.6×10^{-19} 库.

解答：

$$B = \frac{2\pi mf}{q} = \frac{2 \times 3.14 \times 3.3 \times 10^{-27} \times 12 \times 10^6}{1.6 \times 10^{-19}} = 1.5 \text{T}$$

$$E_k = \frac{m^2 v^2}{2m} = \frac{R^2 q^2 B^2}{2m} = \frac{0.53^2 \times (1.6 \times 10^{-19})^2 \times 1.55^2}{2 \times 3.3 \times 10^{-27}} = 2.62 \times 10^{-12} \text{J} = 16.3 \text{MeV}$$

说明： E_k 也可以这样求：

$$E_k = \frac{1}{2}mv^2 = \frac{1}{2}m(2\pi r \cdot f)^2$$

13. 目前世界上正在研究一种新型发电机，叫做磁流体发电机，它可以把气体的内能直接转化为电能。图 1.30 表示出了它的发电原理：将一束等离子体（即高温下电离的气体，含有大量带正电和带负电的微粒，但从总体来说呈中性），喷射入磁场，磁场中有两块金属板 1 和 2，这时金属板上就会聚集电荷，产生电压，说明金属放上为什么会聚集电荷。在磁极配置如图中所示的情况下，电路中的电流方向如何？

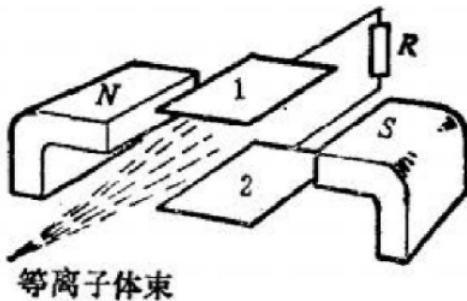


图 1.30

解答：正、负带电粒子通过磁场时受到洛伦兹力作用而发生偏转，并且正、负带电粒子受到的洛伦兹力方向相反。因此正、负带电粒子分别聚集在两块金属板上，带正电粒子聚集在金属板 2 上，带负电粒子聚集在金属板 1 上，故电路中电流方向由 2 经过电阻 R 流向金属板 1。

14. 图 1.31 表示两个平行金属板，它们之间的距离为 d ，分别接在电源的两极上。在两平行金属板当中的空间存在着彼此垂直的电场和磁场，电场强度为 E ，磁感应强度为 B 。从负极板的小孔射入一个电子，经过有电场和磁场同时存在的空间，并打在正极板上，射入电子的初速度为 v_0 ，方向跟竖直方向成 θ 角。求电子打在正极板上的速度的大小。

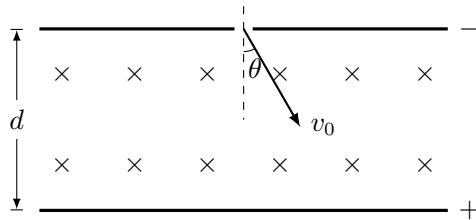


图 1.31

解答：电子经过有磁场和电场同时存在的空间时，同时受到电场力和洛伦兹力作用，其运动情况较复杂，但由于洛伦兹力对电荷不作功，电场力对电荷所作的功由电势差决定，因

此，可应用动能定理来处理。根据动能定理 $W = \Delta E$ ，可得

$$qU = \frac{1}{2}mv^2 - \frac{1}{2}mv_0^2$$

而 $U = Ed$ ，因此：

$$qEd = \frac{1}{2}mv^2 - \frac{1}{2}mv_0^2$$

整理后得

$$v = \sqrt{\frac{2qEd}{m} + v_0^2}$$

第五节 参考资料

一、磁感应强度 B 的定义方法

在常见的物理书中，磁感应强度 B 的定义方法有以下三种：

1. 根据磁场对通电导线的作用力 ($F = BI\ell$) 来定义， $B = \frac{F}{I\ell}$ (式中 F 为最大磁场力)，其方向由左手定则判定。
实际上，作用力的公式是一个矢量式 $\vec{F} = I(\vec{\ell} \times \vec{B})$ 。因而 B 的大小和方向均可由公式确定。但中学阶段不具备矢量求积的知识，所以方向用左手定则来确定。
2. 根据通电闭合线圈在磁场中受到的力矩 ($M = BIS$) 来定义， $B = \frac{M}{IS}$ (式中 M 为最大力矩)；其方向就是在线圈转到平衡位置时，线圈法线正方向的指向。
3. 根据磁场对运动电荷的作用力来定义， $B = \frac{f}{qv}$ (式中 f 为 B 与 v 垂直时的洛伦兹力)，其方向由左手定则判定。

二、公式 $B = k' \frac{I}{R}$ 的来源

了解公式 $B = k' \frac{I}{R}$ 的来源，就要了解毕奥-萨伐尔定律（简称毕萨定律）。定律的内容如下：电流元 $I d\ell$ 在真空中给定点处的磁感应强度 dB 的大小与电流元的大小成正比；与电流元和由电流元到该点的矢径 r 之间的夹角 θ 的正弦成正比；而与矢径的长度 r 的平方成反比，即：

$$dB = k \frac{Id\ell \sin \theta}{r^2}$$

式中 k 为比例系数，在国际单位制中，由实验可得 $k = 10^{-7} \text{ H/m}$ ，可令 $k = \frac{\mu_0}{4\pi}$ ，其中 $\mu_0 = 12.57 \times 10^{-7} \text{ H/m}$ ，叫真空磁导率。所以上述公式可写为：

$$dB = \frac{\mu_0}{4\pi} \cdot \frac{Id\ell \sin \theta}{r^2}$$

如图 1.32 所示，有一直导线通有电流为 I ，求距导线为 R 的 P 点处的磁感应强度 B 。

我们在导线上取一段电流元 $Id\ell$ ， $d\ell$ 到 P 点的矢径为 r ， P 点到直线电流的垂足为 O ，电流元到 O 点的距离为 R ，由毕萨定律可得电流元 $Id\ell$ 在 P 点的磁感应强度为：

$$dB = \frac{\mu_0}{4\pi} \cdot \frac{Id\ell \sin \theta}{r^2}$$

根据安培定则可知 dB 的方向垂直于纸面向里，由于所有电流元在 P 点所产生的磁感应强度方向相同，所以总的磁感应强度的大小就是各段所产生的磁感应强度 dB 的代数和。对于有

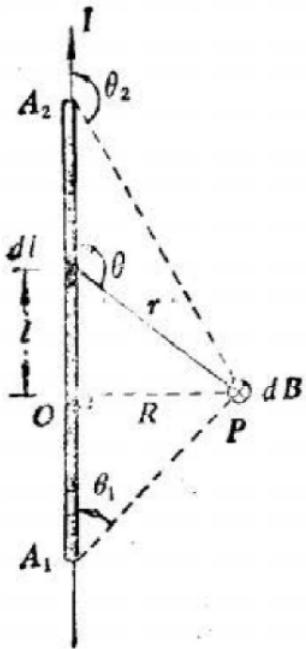


图 1.32

限的一段导线 A_1A_2 来说：

$$B = \int_{A_1}^{A_2} dB = \int_{A_1}^{A_2} \frac{\mu_0}{4\pi} \cdot \frac{I d\ell \sin \theta}{r^2} \quad (1.1)$$

由于式中 $d\ell$, r 和 θ 都是变量，在进行积分时，应把以上各变量用同一个自变量表示。由式 (1.1) 可知：

$$\ell = r \cdot \cos(\pi - \theta) = -r \cdot \cos \theta$$

$$R = r \cdot \sin(\pi - \theta) = r \cdot \sin \theta$$

消去 r 可得： $\ell = -R \cot \theta$ ，对此式微分： $d\ell = \frac{R d\theta}{\sin^2 \theta}$

将 $d\ell$, r 的表达式代入 (1.1) 式得：

$$B = \frac{\mu_0 I}{4\pi} \int_{A_1}^{A_2} \frac{\frac{R d\theta}{\sin^2 \theta} \cdot \sin \theta}{R^2} = \frac{\mu_0 I}{4\pi} \int_{A_1}^{A_2} \frac{\sin \theta d\theta}{R} = \frac{\mu_0 I}{4\pi R} (\cos \theta_1 - \cos \theta_2)$$

当导线为无限长时， $\theta_1 = 0$, $\theta_2 = \pi$. 所以无限长的通电直导线在距它为 R 处的磁感应强度为：

$$B = \frac{\mu_0 I}{4\pi R} (\cos 0 - \cos \pi) = \frac{\mu_0}{4\pi} \cdot \frac{I}{R} = k' \frac{I}{R}$$

其中 $k' = 2k = 2 \times 10^{-7} H/m$. 当导线长度 $L \gg R$ 时，可以用上式近似计算 B .

三、在匀强磁场中，带电粒子的运动方向不和磁感应强度的方向垂直时其运动情况的分析

这是本章练习七题 6 的内容，对此作如下定量讨论。如图 1.33 所示，一个电子的速度 v 与磁场 B 成任意角 θ . 我们可把 v 分解为平行于 B 的分量 $v_{||}$ 和垂直于 B 的分量 v_{\perp} ，其大小分

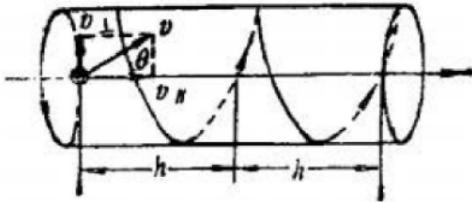


图 1.33

别为

$$v_{\parallel} = v \cdot \cos \theta, \quad v_{\perp} = v \cdot \sin \theta$$

如果只有 v_{\perp} 分量，电荷将在垂直于 B 的平面内作匀速圆周运动；如果只有 v_{\parallel} 分量，磁场对电荷无作用力。电荷将沿 B 方向（或相反方向）作匀速直线运动，当两个速度分量同时存在时，电荷将沿圆柱面作螺旋线运动，其螺线半径为

$$R = \frac{mv_{\perp}}{qB} = \frac{m}{q} \cdot \frac{v \sin \theta}{B}$$

电荷每回转一周所前进的距离叫做螺距 h ，其大小为：

$$h = v_{\parallel} \cdot T$$

因为 $T = \frac{2\pi m}{qB}$ ，所以 $h = \frac{2\pi m}{q} \cdot \frac{v \cos \theta}{B}$.

上述结果提供了一种最简单的磁聚焦原理，我们可以设想在匀强磁场中从某一点发射出一束很窄的带电粒子流，它们的电量为 q ，速度 v 差不多相等，且与磁感应强度 B 的夹角很小，则速度在平行和垂直于磁场上的分量为

$$v_{\parallel} = v \cdot \cos \theta \approx v, \quad v_{\perp} = v \cdot \sin \theta \approx v \cdot \theta$$

由于各粒子与磁场的夹角 α 不相同，所以 v_{\perp} 不同，在磁场力作用下，各粒子沿不同半径的螺旋线前进，但由于 $v_{\parallel} \approx v$ ，且周期 T 又相同。故其螺距为：

$$h = \frac{2\pi mv \cdot \cos \theta}{qB} \approx \frac{2\pi mv}{qB}$$

可见，它们的螺距也近似相等。这样，从某点发射出的带电粒子流，经过一个螺距 h 之后，又重新会聚于另一点。这与光束经过透镜后聚焦的现象有些类似，所以叫做磁聚焦现象。磁聚焦的原理在电真空器件中的应用比较广泛。在电子显微镜中，常用来聚焦电子束。

四、利用磁聚焦法测定电子的荷质比 e/m

利用磁场聚焦的方法，可以较精确地测定电子（或其他带电粒子）的荷质比 e/m 。这种方法的实验装置如图 1.34 所示。在抽真空的玻璃管中装有热阴极 K 和带有小孔的阳极 A ，并在 K 、 A 之间加纵向电压 U 。当电子从阴极 K 射出后，在电压 U 的作用下作加速运动，穿过小孔之后便形成一较细的电子束，在加速电压作用下电子所获得的动能

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

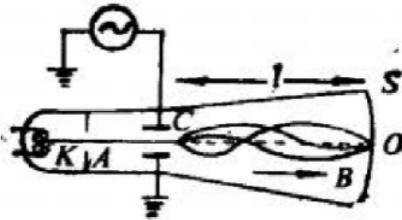


图 1.34

从而使得电子通过小孔后获得的速度

$$v = \sqrt{\frac{2eU}{m}}$$

电子以速度 v 进入电容器 C . 如果在电容器 C 上加不同的横向交变电压, 使不同时刻通过这里的电子发生不同程度的偏转, 又在电容器 C 和荧光屏 S 之间加一均匀纵向磁场 B , 则电子从 C 中出来之后在空间将作螺旋线运动, 并聚焦在螺距 $h = \frac{2\pi mv}{eB}$ 的地方. 若适当调整磁感应强度 B 的大小, 就可使电子流的焦点刚好落在荧光屏 S 上, 这样有:

$$L = h = \frac{2\pi mv}{eB}$$

将 v 代入整理后, 可得电子的荷质比为:

$$\frac{e}{m} = \frac{8\pi^2 U}{L^2 B^2}$$

上式右端各量都可以直接测定. 因而可以算出荷质比 e/m 的数值.

实验测得电子的荷质比 e/m 的绝对值

$$\left| \frac{e}{m} \right| = 1.759 \times 10^{11} \text{C/kg}$$

上述结果是在电子的速度远小于光速的情况下得到的. 实验表明, 电子的荷质比与其速度有关, 速度越大, 荷质比越小. 这说明电子的质量随速度的增大而增大. 这个结果是与相对论符合的, 根据相对论, 任何运动物体的质量 m 与速度 v 的关系为

$$m = \frac{m_0}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}}$$

式中 m_0 为 $v = 0$ 时的质量, 叫做静止质量. $c = 3 \times 10^8 \text{m/s}$ 为光在真空中的速度. 当 $v \ll c$ 时, m 与 m_0 差别不大, 只有当 v/c 接近 1 时, m 才有明显地增大. 所以根据相对论, 对同一种粒子来说 e/m 并不是常数, 而只有 e/m_0 才是常数, 由上式可得 e/m_0 与 e/m 之间的关系为

$$\frac{e}{m_0} = \frac{e}{m} \cdot \frac{1}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}}$$

由下表给出了电子的 e/m 的实验数据, 以及由它推算出来的 e/m_0 的数值, 可以看出电子的荷质比 e/m_0 确实接近常数. 因此带电粒子的荷质比的测定, 就成为证明爱因斯坦的相对论的正确性的实验依据之一.

v/c	e/m (10^{11} C/kg)	e/m_0 (10^{11} C/kg)
0.3173	1.661	1.752
0.3787	1.630	1.761
0.4281	1.590	1.760
0.5154	1.511	1.763
0.6870	1.283	1.767

五、奥斯特

丹麦物理学家奥斯特 (1777—1851) 在 1794 年入哥本哈根大学学习，攻读医学和自然科学，1799 年获哲学博士学位，1806 年任物理学教授，自然哲学教授。1829 年创建丹麦工业学院并任院长，1821 年被选为英国伦敦皇家学会会员，1823 年被选为法国科学院院士，他还是许多科学院和学会的成员。

奥斯特对物理学最大的贡献是发现了电流的磁效应，把电和磁联系了起来，这是他在 1820 年春的一次讲演中提出的。实际上，早在 1812 年在他所发表的论文中，就提出了电和磁之间存在着联系的问题。

奥斯特的发现，是他坚持探索电磁关系二十年不懈努力的结果。虽然一些发现都是在偶然的事件中产生的，但是“这样的偶然性只能被应当得到的人所碰上”（拉格朗日）。

此外，奥斯特还曾对化学亲合力等作了研究。他精密地测定了水的压缩系数值，论证了水的可压缩性。1823 年，他对温差电作出了成功的研究。他还对库仑扭秤作了重要的改进。

第二章 电磁感应

第一节 教学要求	36
第二节 教学建议	37
一、电磁感应现象	37
(一)感生电流产生的条件	37
(二)结论	38
(三)培养学生用实验研究问题的能力	39
二、楞次定律	39
(一)楞次定律的表述	39
(二)楞次定律的应用	40
三、法拉第电磁感应定律	40
四、直流电动机的反电动势 自感和涡流	42
(一)直流电动机的反电动势	42
(二)自感	43
(三)自感现象的应用	44
(四)涡流	44
第三节 实验指导	44
一、演示实验	44
(一)电磁感应现象	44
(二)楞次定律	46
(三)法拉第电磁感应定律的定性演示	46
(四)直流电动机的反电动势	47
(五)自感现象	47
(六)日光灯电路中起动器与镇流器的作用	49
(七)涡流现象	49
二、学生实验	50
(一)研究电磁感应现象	50
三、课外实验活动	51
(一)判断指南针的偏转方向	51
第四节 习题解答	51
一、练习一	51
二、练习二	53
三、练习三	54
四、练习四	55
五、练习五	56
六、练习六	57

七、习题	57
第五节 参考资料	61
一、由洛仑兹力所引起的电磁感应现象	61
二、产生动生电动势的能量来源	62
三、公式 $\mathcal{E} = B\ell v \sin \theta$ 和 $\mathcal{E} = \Delta\phi/\Delta t$ 的关系	63
四、接通和断开电路的暂态电流	64
五、法拉第	65

第一节 教学要求

这一章教材是以初中学过的电磁现象以及高中学过的电场、磁场等知识为基础，阐述电磁感应现象和电磁感应的基本规律。这些内容是电磁学的基础知识，也是学习交流电、电磁振荡和电磁波的基础。

本章教材可分为四个单元。课文的第一节为第一单元，讲述电磁感应现象。第二、三节为第二单元，讲述楞次定律。第四、五节为第三单元，讲述法拉第电磁感应定律和电磁感应现象中的能量转化问题。第六节至第九节为第四单元，讲述电磁感应现象中的几种特殊情况。

本章教材以法拉第电磁感应定律为中心，进一步揭示了电与磁的内在联系，因而法拉第电磁感应定律是这一章的重点。楞次定律及其应用，法拉第电磁感应定律的应用，是教学上的难点。

用磁通量的概念来概括和表达电磁感应现象的规律，是这一章的特点。教材是用磁通量的变化来叙述感生电流的产生条件和楞次定律，用磁通量的变化率来叙述法拉第电磁感应定律的。因此，理解磁通量的变化和磁通量的变化率的意义，了解它们之间的区别与联系，对于学好全章具有重要的意义。

研究感生电流产生的条件、判定感生电流的方向、确定感生电动势的大小，都是通过实验分析得出规律的。因此在教学中，做好实验是非常重要的。

用磁通量的变化来表述楞次定律，可适用于电磁感应现象的各种情况，因而具有普遍性。在教学中，要注意强调这一点。但是，对于由相对运动而产生感生电流的情形，用阻碍相对运动来表述楞次定律，用起来比较方便，特别是在分析电磁感应现象中的能量转化时要用到。因此，在教材中也注意了这种情况下楞次定律的表述。学习楞次定律要着重使学生学会运用这个定律来判断感生电流及其磁场的方向。学生已经学过用右手定则判断感生电流的方向，教学中应该使学生理解在由相对运动（导体切割磁力线）而引起的电磁感应现象中，用右手定则和用楞次定律来判断感生电流的方向，结果是一致的。

感生电动势是表示电磁感应现象的重要物理量，是电磁学的基本概念，应使学生掌握。教材不要求区别感生电动势和动生电动势，不要求学生掌握内电路中各点电势的高低。感生电动势的大小，教材表述为 $\mathcal{E} = k \frac{\Delta\phi}{\Delta t}$ ，而没有在等式的右边加上“-”号，这是因为，对一般学生，理解负号的意义比较困难。

能的转化和守恒定律，是普遍适用的客观规律。楞次定律和法拉第电磁感应定律也符合这一规律。教材只就由相对运动产生的电磁感应现象来分析能的转化和守恒问题，对于没有相对运动而磁场变化的情形，由于能的转化涉及场能，而没有加以分析。

直流电动机的反电动势是选讲教材，反电动势的概念在讲变压器时要用到。这节内容，可以

使学生知道电磁感应现象不是孤立发生的，通电线圈在磁场中受力而运动，同时就切割磁力线，产生电磁感应现象，出现反电动势。这个反电动势又反过来影响线圈中的电流和线圈受力情况、运动情况。这节内容对培养学生综合分析问题的能力是有好处的。如果课时允许，希望讲一下这节教材。

自感现象是电磁感应现象的特殊情况，这个内容是学习交流电、电磁振荡等内容的基础。教学中，要注意讲清自感系数的物理意义。在自感现象的应用中，要讲清日光灯的两个主要元件—起动器和镇流器的工作原理和作用。还可结合实际情况，补充讲解一些日光灯的使用维修知识。

涡流一节是选讲教材，使学生知道产生涡流的条件，对涡流的有利、有害两方面有所了解就可以了，不要求作进一步的讨论。

本章的教学要求是：

1. 理解电磁感应现象，掌握产生感生电流的条件。
2. 掌握楞次定律和右手定则，并会应用它们判断感生电流的方向。
3. 掌握法拉第电磁感应定律，并能用来计算有关感生电动势的问题。
4. 理解自感现象及其在实际中的应用，理解自感电动势的概念和自感系数的物理意义。

第二节 教学建议

一、电磁感应现象

这一单元研究感生电流产生的条件，是本章教材的起始课。教学时要注意从复习电生磁以及磁场对电流的作用这样一些电与磁相互联系的已有知识中提出问题，即引导学生研究如何利用磁场来获得电流的问题。同时可以简要介绍法拉第其人及其在物理学上的贡献，以激发学生的学习积极性。

（一）感生电流产生的条件

课本中安排了三个演示实验，它是本单元中研究感生电流产生条件的依据，也是后面研究楞次定律、法拉第电磁感应定律的基础。因此，认真做好三个演示实验，力争有较好的观察效果，是教学的关键。同时，要引导学生逐步从实验现象中总结出正确的结论，这不但是学生掌握概念和规律的需要，而且也有利于培养学生的抽象概括能力。

三个实验的观察重点不同。实验一是观察闭合电路的一部分导体在磁场中运动时产生感生电流的条件。这里要引导学生注意观察导体向上或向下运动和向左或向右运动的不同结果，从而了解“导体做切割磁力线运动”的含义。可以明确告诉学生，所谓切割磁力线的运动，就是导体运动速度的方向和磁感应强度的方向不平行，这也为推导 $\mathcal{E} = B\ell v \sin \theta$ 这一公式打下基础。实验二是进一步观察导体不动而磁铁运动时是否产生感生电流。从而使学生了解，只要导体和磁场之间发生切割磁力线的相对运动，闭合电路中就会产生感生电流，这里要强调相对运动必须是导体切割磁力线的，否则闭合电路中是没有感生电流的。实验三是研究导体静止在磁场中时能否获得感生电流的问题。在这个实验里，学生能观察到不论是线圈 A 电路的接通或断开还是变阻器滑动片的移动，线圈 B 电路中都出现感生电流。在观察实验现象的基础上，要引导学生分析上述现象的物理过程，在上一章的学习中，学生已经知道由电流所激发的磁场的磁感应强度 B 总是正比于电流强度 I 的，即 $B \propto I$ 是一个有普遍意义的关系。电路的闭合或断开控制了电流从无到有的变化，变阻器则是通过改变电阻来改变电流。而电流的变化必将引起磁场

的变化，线圈 B 中出现感生电流就是由穿过它所围面积的磁场变化所引起的。

(二) 结论

教材是在每个演示实验的后面，对实验现象加以分析，通过对三个实验的分析，逐步得出产生感生电流的条件，这就是：“不管是闭合电路的一部分导体做切割磁力线的运动，还是闭合电路中的磁场发生变化，穿过闭合电路的磁力线条数都发生变化，这时闭合电路中就有感生电流产生。”然后，再用磁通量的概念总结出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生电流这个一般条件。

处理这段教材时应注意以下几点：

通过提问学生来复习磁通量的概念，明确磁通量的定义式为 $\phi = BS \cos \theta$, θ 为面积 S 与垂直于磁感应强度方向平面的夹角。当 S 与 B 垂直时， $\phi = BS$ 。复习磁通量的概念之后，可向学生提出“根据磁通量的定义式来分析，使一个面积为 S 的闭合线圈中的磁通量发生变化，有哪几种方法”的问题，以使学生进一步明确通过一闭合面积的磁通量是由哪些因素决定的，同时为总结概括产生感生电流的条件打下基础。

利用磁通量概念概括产生感生电流的条件时，要注意强调磁通量的变化。教学时，可画出上述三个实验的示意图，并将它们的磁力线的分布在图上表示出来，如图 2.1 中甲、乙、丙所示。

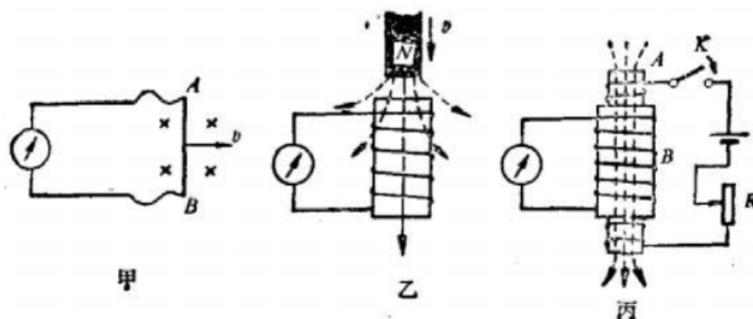


图 2.1

在图 2.1 甲中，闭合电路的一部分导体 AB 向右或向左运动时都作切割磁力线运动，通过闭合电路的磁力线条数发生了或增或减的变化。磁通量的变化量 $\Delta\phi = B\Delta S$ 。在图 2.1 乙中，当 N 极向下插入线圈时，由于离 N 极近处磁感应强度较大，使得线圈内部空间的磁感应强度变大。而线圈的面积不变，故通过线圈的磁通量增加，图 2.1 丙中，接通开关 K 的瞬间，线圈 A 中的电流由无到有，故磁感应强度由零开始增大，而线圈 A 的面积 S 不变，所以磁通量也由零开始增大。上面两个实验中，磁通量的变化 $\Delta\phi = \Delta B \cdot S$ 。通过上述分析，应使学生认识到：不论是导体作切割磁力线运动，还是磁场发生变化，实质上都是引起穿过闭合电路的磁通量发生变化。在此基础上给学生明确指出，产生感生电流的条件可以归结为“穿过闭合电路的磁通量发生变化”。

因为初中教材中只讲了切割磁力线的情况，给学生留下了一个先人为主的印象。又由于在某些情况下利用切割磁力线来分析感生电流比较方便，因此，学生习惯于利用切割磁力线来判断电磁感应现象，为了使学生对于用磁通量观点来判断电磁感应现象加深认识，可通过一些典型例题让学生进行讨论。例如课本中练习一 4 就可以放在课堂上处理。通过例题分析还应使学生认识到，掌握磁体和通电导体所产生的磁场的特点及磁力线在空间的分布情况，在判断感生

电流时也是十分重要的.

(三) 培养学生用实验研究问题的能力

在学校实验器材较全且学生水平比较整齐的情况下，可采取在课堂上学生随老师一起做实验的办法来组织这一节的教学，这样可对感生电流产生的条件获得深刻的印象.

二、楞次定律

楞次定律是确定感生电流方向的一般规律. 由于它的内容抽象，涉及到电与磁间复杂的相互关系，因此它是本章教材的一个难点.

试用本是从能量守恒定律出发，通过推理得出楞次定律的. 但是从能量守恒定律得出的是阻碍相对运动，要得出阻碍磁通量变化的表达，还需要进一步的讲解. 这就使楞次定律的得出显得不够轻快. 为了解决这个问题，本单元教材抓住了磁通量变化这个线索，尽可能简捷地引出楞次定律. 至于电磁感应现象中的能量守恒问题，放在第三单元中去讨论.

本单元的重点是使学生明确引起感生电流的磁通量的变化和感生电流所激发的磁场之间的关系. 为了解决这个问题，可先复习学生所学过的知识：

1. 磁通量的变化是产生感生电流的条件.
2. 根据电流的磁效应，感生电流一定会激发磁场，感生电流的方向与它所激发的磁场的方向间的关系可由右手定则来判定.

在上述知识基础上，再向学生提出“磁通量的变化与感生电流的磁场之间有什么关系”的问题，并通过实验引导学生来研究.

在利用课本图 2.2 所示的装置做实验时，要注意：

1. 明确线圈导线的绕向（实验用的线圈最好是实验者自己绕制的）.
2. 实验前，要用旧干电池来确定电流的方向与电流表指针偏转方向的关系.

实验时，最好能将磁铁磁场的磁通量的变化以及感生电流所激发的磁场的磁力线方向简明示出，使学生能顺利地找出二者之间的关系. 可将实验中观察到的现象填入下表.

	原磁场 方向	原 ϕ 变 化情况	感生电 流方向	感生电流磁 场 B 方向	B 与 ϕ 的关系	结论
N 极向上						
N 极向下						
S 极向上						
S 极向下						

为使学生更加形象地了解感生电流的磁场 B 和原磁场磁通中的关系，分析实验结果时要注意强调：原磁场的磁通量减少时，感生电流磁场与原磁场方向相同；原磁场的磁通量增加时，感生电流磁场与原磁场方向相反，然后使学生进一步认识，感生电流是通过其磁场与原磁场同方向或反方向来起到阻碍磁通量变化的作用的.

(一) 楞次定律的表述

楞次定律表述为：“感生电流具有这样的方向，就是感生电流的磁场总要阻碍引起感生电流的磁通量的变化.” 虽然这一表述是建立在实验的基础上，但为避免学生产生误解，要针对学生容易产生的误解作一些讲解. 学生往往把“阻碍原磁场的变化”理解为“阻碍原磁场”，从而得

出“感生电流的磁场必与原磁场的方向相反”，或者“感生电流的流向必与原来电流的流向相反”等错误结论。学生往往把“阻碍原磁场的变化”理解为“阻止原磁场的变化”，从而得出“有了感生电流，原磁场就不会变化了”或“感生磁场加原磁场等于稳恒磁场”等错误结论。在实际教学时，应根据学生的实际问题，有针对性的讲解，使学生真正理解楞次定律上述表述的意义。

教材通过分析磁铁和通电螺线管之间的磁极相互作用，提出了楞次定律的另一种表述，即导体和磁体发生相对运动时，感生电流总要阻碍相对运动。应该告诉学生，这是从不同角度表述同一个定律，而不是两个定律。

(二) 楞次定律的应用

这一节的教学，要使学生通过实例的分析，加深对楞次定律的理解。总结出用楞次定律判断感生电流方向的思路。应用楞次定律来判断感生电流方向的步骤是：

1. 明确原来磁场的方向。
2. 穿过闭合电路的磁通量是增还是减。
3. 根据楞次定律判定感生电流的磁场方向。
4. 利用安培定则来判定感生电流的方向。

教学时，切忌由教师将这几个步骤直接讲给学生，然后用这四个步骤来套例题。这种注入式的方法不利于学生思维的发展，也不利于调动学生的积极思维。思路应该让学生自己总结出来，在学生独立总结有困难时，教师可组织学生讨论“应用之一”得出解题思路。

“应用之二”的分析难度较大。关键是引导学生把第一步分析好。可分为：电键闭合时、电键打开时、变阻器滑动片向左移动时、向右移动时四种情况下感生电流方向的判断。让学生根据上述步骤进行判断后，再用实验演示进行验证。

“应用之三”的教学可先通过复习初中学过的右手定则来判断，然后用楞次定律的第一种表述来判断。引导学生进行比较，了解以下两点：

1. 用楞次定律和用右手定则来判定感生电流方向的结果是一致的。
2. 导体切割磁力线时，用右手定则判感生电流方向更为简便。

学生条件容许时，还可以引导学生用楞次定律的第二种表述来进行判断，这里的关键是根据导体的运动方向来判定感生电流受到的安培力的方向。然后根据安培力的方向和原磁场方向利用左手定则来判断感生电流方向。最后告诉学生，究竟用什么方法来判断感生电流方向，应根据题目的情况来决定，但以简便为原则，为了加深这种认识，可将练习二中的题3提到课堂作巩固练习。练习二中题6的实验应在课堂进行演示，或将仪器交给学生在课后进行观察。

三、法拉第电磁感应定律

本单元的教学，首先讲述法拉第电磁感应定律，然后对电磁感应现象中能量转化进行分析，使学生认识到电磁感应现象的规律不但有实验基础，而且能用能量转化和守恒定律这一普遍规律来认识，处理本单元教材应注意以下几点：

法拉第电磁感应定律是研究感生电动势大小的规律，感生电动势是反映电磁感应现象的重要物理量，要使学生理解感生电动势的概念。可以从图2.2两个电路的对比中使学生认识感生电动势，根据闭合电路的欧姆定律可知，闭合电路的电流是由电源的电动势决定的。图2.2甲电路中的线圈相当于电源，其电动势为感生电动势，线圈的导线电阻为电源内阻。*a*端电势高为正极，*b*端电势低为负极，可以画出图2.2乙的电路跟图2.2甲的情况类比，告诉学生对含有电磁

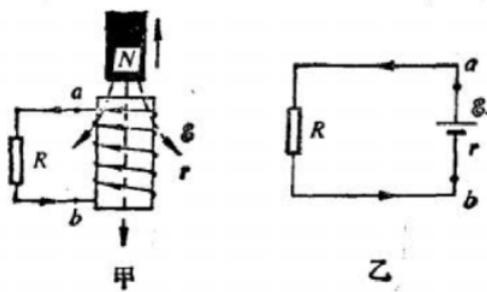


图 2.2

感应现象的闭合电路分析时，可首先画出如图 2.2 乙所示的电路。还应通过分析使学生了解到，电磁感应现象中感生电动势比感生电流更有本质意义。至于电路中出现的感生电流，只是在闭合电路中有感生电动势存在的必然结果，当电路不闭合时，也会产生电磁感应现象，这时并没有感生电流，感生电动势却仍然存在。

要向学生说明，感生电动势方向的判定要借助于感生电流方向的判定。即感生电动势的方向与闭合电路中感生电流的方向相同。如果电路没有闭合，也要将它想象为闭合的。

关于电磁感应定律，课本是按如下线索来安排教材的：

- 重新演示第一节中的三个实验，使学生了解到由于磁通量的变化快慢不同，直接观察到产生的感生电流大小不同。磁通量变化越快，感生电流越强，感生电动势越大。
- 提出用单位时间内磁通量的变化来定量描述磁通量的变化快慢。从而引出磁通量的变化率的概念。
- 由上述思路自然引出感生电动势大小由磁通量的变化率来决定的结论。即磁通量的变化率越大，感生电动势就越大。

按上述线索处理教材时，一是要使学生对演示实验的现象观察清楚。二是要讲清变化率的概念。教学时，可以列举速度由位移的变化率决定，加速度是速度的变化率，等等，通过用这些已有知识的类比来加深对变化率的理解。

讲解法拉第电磁感应定律的定量表达式时，要注意讲清比例常数 k ，可引导学生推导出 $1\text{Wb/s} = 1\text{V}$ ，从而得出 $k = 1$ 的结论，因此法拉第电磁感应定律的表达式为 $\mathcal{E} = \Delta\phi/\Delta t$ 。要使学生了解如果闭合电路是由 n 匝线圈串联组成，整个线圈的总电动势是单匝线圈的 n 倍，即 $\mathcal{E} = n\Delta\phi/\Delta t$ 。这里要注意说明，穿过每匝线圈的磁通量变化率是相同的。应明确指出，利用 $\mathcal{E} = \Delta\phi/\Delta t$ 进行定量计算，所得结果是 Δt 时间内的平均电动势。因为 Δt 是一个有限的时间间隔，在这个时间内磁通量的变化可以是不均匀的。如果在 Δt 时间内磁通量的变化是均匀的，则其变化率是恒定的，这时平均电动势和即时电动势相等。

利用 $\mathcal{E} = \Delta\phi/\Delta t$ 来研究导体做切割磁力线运动，可推导出计算感生电动势大小的公式为 $\mathcal{E} = Blv \sin\theta$ ，注意条件是 v 与 l 垂直。其中， θ 是 B 与 v 的夹角。不论从分解速度角度还是从分解磁感应强度角度来理解这个公式的意义，都是等价的。因为不论以速度 v 为基准把 B 分解为 B_{\parallel} 和 B_{\perp} ，还是以 B 为基准把 v 分解为 v_{\parallel} 和 v_{\perp} ，都会得出相同的结果。上式中如果速度 v 为即时速度，则求得的 \mathcal{E} 为即时电动势，如果速度 v 为平均速度，则电动势 \mathcal{E} 为平均电动势。切割磁力线运动产生的感生电动势的计算式虽然是 $\mathcal{E} = \Delta\phi/\Delta t$ 的一个特例，但在计算感生电动势时是一个十分重要的公式，必须使学生熟练掌握。当闭合电路所包围的面积 S 不变时，由

于磁场的变化而引起磁通量发生变化，其感生电动势大小的计算式为

$$\mathcal{E} = S \cdot \frac{\Delta B}{\Delta t}$$

这种将磁感应强度的变化率 $\Delta B/\Delta t$ 和感生电动势相联系的公式，也应要求学生有所了解。

讲完法拉第电磁感应定律后，可引导学生从 $\mathcal{E} = \Delta\phi/\Delta t$ 这一公式出发，对产生感生电动势的条件、大小和方向作一总结性分析，使学生理解公式中磁通量的变化量 $\Delta\phi$ 是产生感生电动势的条件，而感生电动势的方向是由磁通量的变化情况来决定，即是增加还是减少来决定的。感生电动势大小则是由 $\Delta\phi/\Delta t$ 来决定。

电磁感应现象中的能量转化问题在课本中是作为独立的一节来安排的，教师可通过复习提问，明确能量的转化可通过做功来实现。感生电动势的存在，意味着有其他形式的能转变成了电能，然后引导学生来分析课本中第一节的实验一和实验二，分析时，应注意：

1. 使学生定性了解机械能转化为电能的物理过程，要讲清使导体和磁场之间维持相对运动克服磁场所作的过程是机械能转化为电能的过程；闭合电路中的感生电流作功是电能转化为电路的内能等其他形式能量的过程。
2. 要说明楞次定律是与能量转化和守恒定律相符的。可以引导学生从反面来分析：假设感生电流方向与用楞次定律判断的方向正好相反，所得的结果是什么？引导学生来讨论这个问题。

在上述定性讨论基础上，利用课本中图 2.20 来定量研究电磁感应现象中的能量转化与守恒。定量讨论时，可按照物理过程提出一系列问题进行引导。例如， ab 导体作匀速运动时受到的安培力大小是多少？方向如何？导体受到的外力多大？外力克服安培力做功的表达式是什么？如果已知 \mathcal{E} ，在 Δt 时间内感生电流做功的计算式是什么？这两个功有什么关系？为什么？使学生在回答或讨论这些问题中得到结论。

发生电磁感应现象时常伴随着其他现象发生。当闭合电路（电阻已知）中产生感生电动势时，电路中出现感生电流，而感生电流的强弱又由欧姆定律所决定。感生电流在磁场中必将受到磁场力作用，可见通过感生电流可将电磁感应与电路、力学等知识联系起来，因此本单元要安排习题课，但题目不要选得过难，课本中作复习用的习题中的题 4 和题 5 可作习题课的例题处理。根据学生学习中存在的问题，教师也可以自选一些例题。

四、直流电动机的反电动势 自感和涡流

本单元内容是在电磁感应定律的基础上研究电磁感应现象的几种特殊情况。

(一) 直流电动机的反电动势

“直流电动机的反电动势”一节是选讲教材。处理这节教材时要注意以下几点：

让学生观察演示实验和直流电动机模型，了解其结构后，分析其转动原理。使学生了解通电线圈在磁场中受到的安培力矩是使线圈产生转动的动力矩，由负载和摩擦引起的力矩为阻力矩，当动力矩等于阻力矩时，线圈作匀速转动。

重点引导学生讨论直流电动机的线圈转动时所产生的感生电动势及其特点，可从导线作切割磁力线运动的角度，使学生了解在转动的线圈切割磁力线的边上产生感生电动势。这个电动势的大小与线圈转动的快慢有关（不需作出定量的分析）。感生电动势的方向，根据楞次定律来判断，方向与线圈中的电流方向相反。而电流方向和外加电压方向相同，故其感生电动势方向

与电压方向相反. 讲清线圈中感生电动势的上述特点后, 引导学生得出电流公式

$$I = \frac{V - \mathcal{E}}{R}$$

将此式变形为 $V = \mathcal{E} + IR$, 使学生了解电路中有反电动势存在时, 加在电路两端的电压 V 等于反电势 \mathcal{E} 跟线圈电阻上损失的电压 IR 之和.

利用能量观点分析直流电动机时, 应讲清以下两点:

1. 明确公式 $VI = \mathcal{E}I + I^2R$ 中各项的物理意义, 说明它是一个体现能量守恒的方程, 使学生进一步理解电功和电热不一定相等, 只有在纯电阻电路中电功才等于电热, 而象直流电动机这种存在反电动势的电路中电功是大于电热的.
2. 分析直流电动机的输入功率 (VI) 随负载的增大而增大时, 应按如下思路进行: 在外加电压 V 一定、直流电动机作匀速转动时, 安培力矩等于阻力矩; 当负载加大时阻力矩增大, 引起转速减小, 反电势 \mathcal{E} 随之减小, 根据公式 $I = \frac{V - \mathcal{E}}{R}$ 可知电流 I 增大. 再根据 $VI = I\mathcal{E} + I^2R$ 可得输入功率增大. 从而得出直流电动机的输入功率随负载的增大而增大.

为了加深学生对本节知识的理解, 可将课本 85 页习题中的题 10 作课堂例题引导学生进行讨论.

(二) 自感

自感是电磁感应现象中的一种重要特例, 在交流电路中起着重要作用. 处理这段教材时, 要注意以下几点:

做好课本中两个演示实验, 使学生认识到自感电动势的存在及其对电流的作用. 处理这个问题可以有两种不同的思路. 一种思路是先让学生观察实验现象. 然后根据电磁感应规律分析自感电动势的产生及其对电流的作用. 另一思路是先不让学生观察灯的亮度变化这一现象, 而是让学生根据实验装置利用电磁感应规律进行分析, 引导学生预测现象, 然后进行实验验证, 这种办法有利于将新知识较自然地纳入学生原有知识结构中去, 不管用哪一种思路, 都应紧扣产生电磁感应现象的一般规律——磁通量发生变化上, 突出产生自感现象的特殊条件. 处理时还可将课文中的实验图画成如图 2.3 的示意图来进行分析, 使学生明确了解自感电动势是由电路本身电流变化引起的磁通量变化而产生的. 自感电动势的作用是阻碍电流的变化, 要强调“变化”二字.

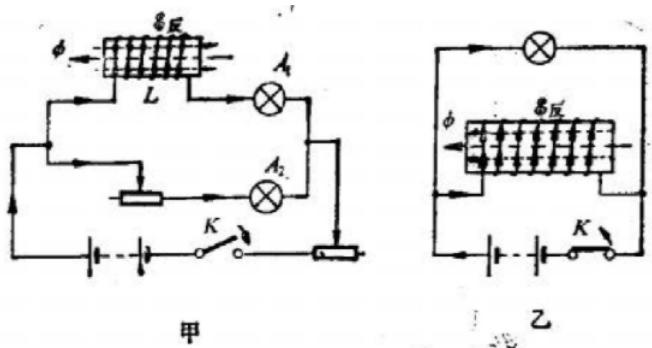


图 2.3

讲授自感电动势的计算公式时要注意: 根据电流磁场的磁感应强度 B 与电流强度 I 成正比, 推导出 $\Delta\phi \propto \Delta I$ 的关系. 由于自感电动势符合法拉第电磁感应定律, 可得 $\mathcal{E} \propto \frac{\Delta I}{\Delta t}$, 因而

得出 $\mathcal{E} = L \frac{\Delta I}{\Delta t}$.

要讲清自感系数 L 的物理意义及其决定因素与单位. 要向学生说明, 自感系数 L 是线圈等电路元件自身的属性, 它的大小完全由自感线圈本身的形状、大小、匝数来决定. 当线圈中插入铁心后, 线圈的 L 值将大大提高, 由于受铁的磁化特性的影响, L 值不再是个恒量, 而是随着电流的变化而变化的.

(三) 自感现象的应用

主要是介绍日光灯的知识. 日光灯是根据辉光放电原理制成的, 这一点在高中物理甲种本第二册中已经学习过, 在讲授日光灯的电路时, 要通过实物观察使学生了解电路结构和各部件的名称和作用. 重点要讲清起动器和镇流器的结构和作用. 讲起动器时可作一个双金属片, 演示其受热和冷却时的弯曲现象, 来帮助学生理解它的开关作用, 讲镇流器时应从自感现象来讲授它的作用. 在起动过程中, 镇流器产生瞬时高电压(可达 500—600 伏). 产生的原因是由于双金属片断开, 电路中的电流变化率 $\Delta I / \Delta t$ 很大, 电路中产生了一个很大的自感电动势. 当日光灯正常发光时, 镇流器起降压限流作用, 以维持灯管所需的一个较低的工作电压, 至于镇流器的限流作用, 很难从自感电动势的角度讲清, 待讲交流电路时, 可用感抗概念再作一些补充分析.

日光灯是学生很熟悉的灯具. 可在演示实验和观察实物后, 让学生自学课文. 然后分预热、起动、正常发光三个过程来讲授. 有条件的学校, 可组织学生进行日光灯安装的课外活动.

教学中, 还可介绍些日光灯的使用常识. 日光灯常见故障大体有: 管脚或开关接触不良、起动器接触不良或失效、灯管老化等. 镇流器较耐用, 如果其铁心松动, 则会发出“嗡嗡”声, 日光灯一般可使用 3000 小时以上, 但每通断一次对使用寿命有较大影响, 所以日光灯不宜频繁开关.

(四) 涡流

这一节是选讲教材, 要使学生了解块状金属在变化的磁场中或在磁场中运动时产生感生电流的现象叫涡流. 然后通过实例讲清如何避免涡流的有害作用及利用涡流获得大热量的应用. 结合练习六题 1 的演示实验及电流表表头中铝框的阻尼作用, 讲讲电磁阻尼的原理. 讲述时可将练习六 2 题的实验在课堂上进行演示, 然后让学生课后完成此作业.

第三节 实验指导

一、演示实验

(一) 电磁感应现象

电磁感应现象应演示三个实验, 这就是单根导线切割磁力线、磁铁插入闭合线圈内、原线圈通断电时副线圈内产生感生电流的现象. 现分别说明如下:

单根闭合直导线切割磁力线产生感生电流. 由于单根直导线切割磁力线时产生感生电动势太微小, 无法直接用演示灵敏电流计演示出来. 因此, 通常采用一个高倍数放大的直流放大器加接在灵敏电流计前. 将微弱电流放大后, 再通过直流放大器输出端接到灵敏电流计进行演示.

直流放大器的制作方法介绍如下. 图 2.4 所示分差放大电路制作较简单, 但放大倍数较小, 图 2.5 所示电路采用集成运放电路, 放大倍数较高, 可根据学校条件进行制作, 两种电路均可安装焊接在一块铜箔板上, 并和示教电表的其他附件一样, 安几个铜片接头. 使用时直接插接在电

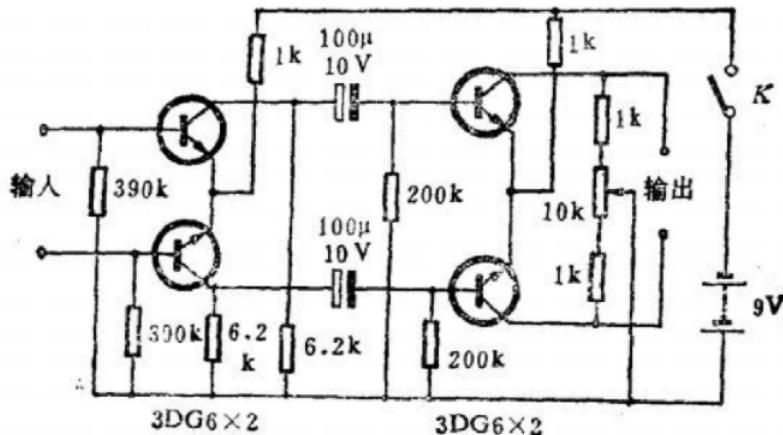


图 2.4

表附件接头上。在按图 2.4 电路装制放大器时，第一级的两个三极管和第二级的两个三极管应尽量配对使用，其 β 值选 40—70 的。图中 10k 电位器用以调节平衡，即将输出端接 J0401 型演示电表 200 微安检流计挡时，若指针偏离零位，可调节该电位器。此电路制建成后不需调整即可使用，按图 2.5 制作放大器时，最好用集成电路块的管座，以免因焊接不当造成集成块损坏。CA741 型集成块管脚排列已在图中画出，该电路放大倍数由 R_3 与 R_1 比值 R_3/R_1 决定，安装完毕后亦无需调整，接通电源后就能工作。 R_4 亦为调零电位器。电源可以用两个 6 伏积层电池。

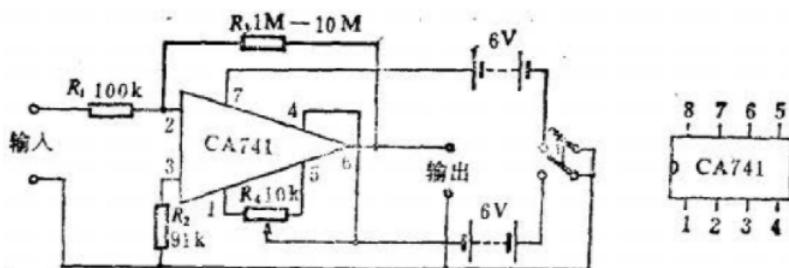


图 2.5

演示时，可将单根导线接在输入端，输出端与 J0401 型演示电表检流计挡接好（将检流计指针调成中心零位式）。接通电源后，再调节一下调零电位器，然后就可以将导线在蹄形磁铁中作切割运动，电表指针的偏转说明切割时导线中产生了感生电流，从指针偏转方向与导线切割方向的对应，可以说明右手定则。

磁铁相对于闭合线圈运动时产生感生电流的实验装置如课本图 2.2 所示，演示电表为 J0401 型检流计挡，所用线圈为原副线圈的副线圈。应分别演示条形磁铁插入、静止不动与拔出线圈时检流计指针摆动情况。在得出磁通量变化时线圈中会产生感生电流的结论后，还可让学生观察磁铁垂直于线圈平面在线圈外部附近运动时的情况，以启发学生思考如何研究通过线圈的磁通量有无变化的问题。

穿过闭合电路的磁场发生变化产生感生电流的演示装置如课本图 2.3 所示。所用仪器为 J0401 型演示电表 200 微安检流计挡，演示用原副线圈，J2354 型 10 欧滑动变阻器，6 伏蓄电池（或四节一号干电池，尽量不用低压电源，因其输出直流事实上是脉动电流，而稳压输出允许

电流又太小). 演示时, 应先将变阻器滑动端置于中间位置, 然后依次演示闭合电键瞬间、闭合电键后、打开电键瞬间以及通过变阻器滑动端滑动时、停止时是否造成线圈内磁场变化而引起感生电流. 再归纳出产生感生电流的条件.

(二) 楞次定律

这个定律的演示包括两个方面, 一是得出楞次定律的结论, 二是从物理实质的角度理解感生电流总是使自己产生的磁场反抗引起它的磁通量的变化原因, 第一个方面的演示, 按课本实验装置 (课本图 2.2). 演示时, 分别将条形磁铁 N 极插入、拔出与 S 极插入、拔出时情况加以分析. 进行实验前, 必须向学生说明线圈中电流流动方向与检流计指针偏转方向之间关系, 必要时可用一节电池串一几十千欧的电阻接在检流计上, 说明指针偏转方向与通入电表接线柱电流的关系. 按照有关规定, 当电流从正接线柱流入从负接线柱流出时电表指针为顺时针偏转 (观察者面对电表).

第二个方面的演示, 这里介绍两个方法.

1. 用楞次定律演示器演示, 其装置如课本上图 2.19 所示. 实验时, 为使现象显著, 可将两根条形磁铁的同名端捆在一起, 迅速插入闭环或拔出闭环. 用楞次定律分析闭环远离或跟随磁铁移动的原因: 闭环中磁通量若增加, 感生电流阻碍它的增加只有使闭环远离磁铁; 若闭环中磁通量减少, 感生电流阻碍它的减少只有使闭环跟随磁铁移动. 不论把磁铁插入开口环还是从开口环中拔出, 开口圆环总是不动, 是因为电路不闭合, 环中只有感生电动势产生而无感生电流.
2. 用图 2.6 所示装置演示, 其中线圈用 J2423 型可拆变压器 0—400 匝绕组, 铁心用其封闭铁心的条形铁心, 用粗铜丝焊成一个圆环并如图示悬挂起来, 电源可用 6 伏蓄电池或低压电源 6V 直流输出. 实验时连好电路, 在闭合电键瞬间铜环将被推出, 而在打开电键瞬间, 铜环将被吸入. 对这个现象, 用楞次定律可作很好的分析与说明.

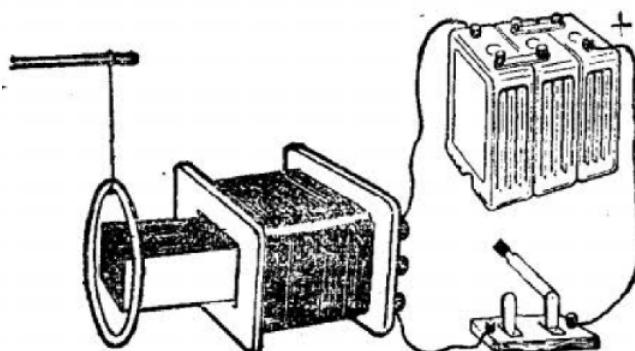


图 2.6

(三) 法拉第电磁感应定律的定性演示

这个定性实验分两个步骤进行.

1. 演示感生电动势大小与磁通量变化快慢有关. 实验时用 J2423 型可拆变压器红色线圈 0—800 匝绕组, 将其两端与 J0401 型演示电表 200 微安检流挡相接, 把条形磁铁分别以较慢与较快的速度插入线圈之中. 从所产生的感生电流的情况可以说明, 磁通量变化越快感生电动势越大这个定性关系.

2. 演示感生电动势的大小与线圈匝数有关，实验所用仪器如 1 所述。演示时，磁铁以一定速度分别插入 0—800 匝绕组线圈和 0—1400 绕组线圈中。通过检流计指针偏转的情况，可定性说明在穿过每匝线圈的磁通量变化率相同的情况下，线圈匝数越多产生感生电动势越大。分析这个现象时需要指出的是，从感生电流的大小判断感生电动势的大小，是以检流计为研究对象的。检流计内阻一定，两端电压越高，通过的电流越大，如果不接检流计，直接将线圈头尾接为闭合电路，这时，感生电动势虽随匝数增加而增大，但因每匝导线的电阻相同，匝数增加内阻也相应增大，可以证明，在线圈匝数多与少的两种情况下，感生电流的大小是一样的，在演示时，为了保证两次线圈中人磁铁的速度一样，可以在线圈底部垫一块泡沫塑料，使条形磁铁两次都从相同高度自由下落进入线圈之中。此种情况下，由于感生电流产生磁场对条形磁铁的阻力很小，可以略不计，而认为两种情况下磁铁运动快慢是一样的。

(四) 直流电动机的反电动势

这个实验可以用 J2418 型小型直流电动机（供学生组装用的）或任一种玩具电动机来演示。实验电路如图 2.7 所示。电源可用两节 1 号干电池串联。演示电流表用 J0401 型演示电表（直流 1 安挡），串入的变压器为 10 欧滑动变阻器。演示前应做好调整。先使变阻器串入电路部分的电阻为最大。闭合电键，调整变阻器阻值，使电动机电枢固定时电路总电流接近 1 安。演示时，先将电枢固定住不使它转动，这时电路中无反电动势，电流表中电流较大（接近 1 安）。然后再使电枢转动起来，可以看到电流表示数变小，这表明电路中出现了反电动势。在说明电动机输入功率、输出功率（转化为机械能）及电机线圈上的热功率时，可以用伏特计测出固定电枢不动时两端电压，用电流表测出电流值，再算出其线圈电阻（近似值）。在转动过程中再测出电压、电流值，分别计算 UI 值与 I^2R 值并进行比较，从而说明电动机工作时能量转化情况。

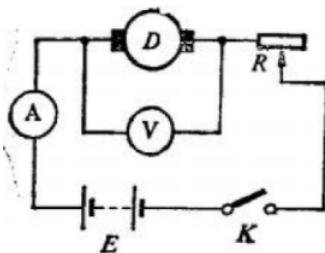


图 2.7

若要演示外加电压一定时电动机输入功率随阻力矩变化的实验，可以用 J1201 型教学用低压电源的稳压输出（6 伏，1 安），相应电动机应选用 6 伏的玩具电动机或者录音机用小直流电动机。注意，电路中不能再串联变阻器。如果仍用上面 J2418 型小型直流电动机模型，可以用 4V 蓄电池进行实验。实验时要接好伏特表与安培表，在接通电源后，在电枢转动正常时读出读数，然后用手指去阻碍电动机转轴转动，可以看到读数增大。分析此时输入功率、热功率及输出功率情况，可以说明电动机输入功率随负载变化而变化的情况。

(五) 自感现象

自感现象要演示两个方面的现象：通电瞬间的自感现象和断电瞬间的自感现象。分别介绍如下：

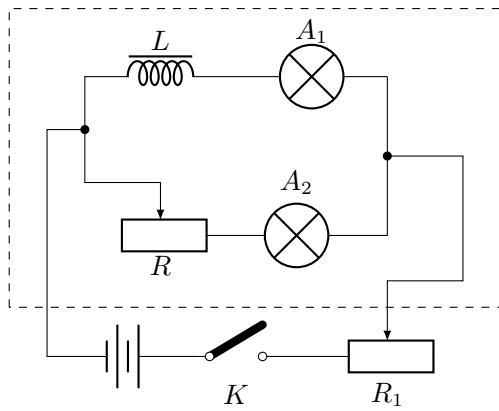


图 2.8

通电自感现象演示的电路如图 2.8 所示（课本图 2.25）。所用器材可有三种方案：

1. 用 J2425 型变压器原理说明器成套装置中的示教板，实验时，将示教板紧固在该变压器上紧固铁心用的螺丝上即可，该示教板上有几段导线是可换接的铜片，换接后可进行断电自感演示。 R 是该说明器的一个附件，为一线绕电位器，实验时，可将电阻 R 及两个灯座（也是附件）按图示电路接在示教板上，两个灯泡可选用 6—8 伏指示灯， L 为该变压器红色线圈 0—1600 匝绕组，实验时需将它们用导线接在示教板相应接线柱上，电源可用 J1201 型教学电源直流 12 伏输出， R_1 用 50 欧 1.5 安滑动变阻器（J2355 型）。
2. 选用 J2423 型可拆变压器 0—1400 匝绕组封闭铁心作为 L （直流电阻为 40 欧左右）， R 可选用 J2355 型 50 欧 1.5 安滑线变阻器（或 50 欧线绕电位器），灯泡仍可选用 6—8 伏指示泡，此时最好自制一个示教板。
3. 选用 20 瓦或 40 瓦日光灯镇流器，其电阻为 25 欧左右，故 R 仍可用 J2355 型 50 欧变阻器，灯泡可选用 2.5 伏或 3.8 伏手电筒用小电珠。2、3 方案中的电源与 R_1 同 1。

在演示前，先应闭合电键，调节 R_1 ，使与 L 串联的灯 A_1 灯丝由暗红转变为较白亮（因为实验时，小灯在这种情况下亮度变化对其电流变化的反应最显著）。然后调节 R ，使与 R 串联的灯 A_2 亮度与 A_1 相同。演示时，可以鲜明地看到，在闭合电键瞬间， A_2 是立即亮起来，而 A_1 是逐渐亮起来的，从而说明了线圈由于自感作用，其电流是逐渐增大的。

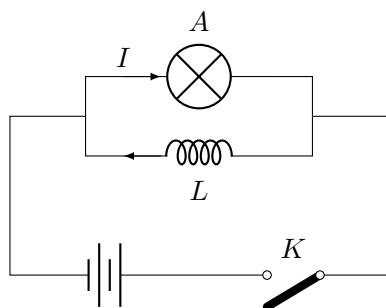


图 2.9

断电自感现象演示的电路如图 2.9 所示（课本图 2.26）。图中电感线圈可选用 J2423 型可拆变压器绿色线圈 0—400 匝绕组，灯 A 可用 6—8 伏指示灯，电源用 J1201 型教学低压电源直流 6 伏输出，若选用 J2425 型变压器原理说明器，则可用示教板上已备的电路，此时 L 用该变压器绿色线圈 0—400 匝绕组。由于绕组电阻只有 4 欧左右，通过电流 I_2 将远大于小灯通过电流 I_1 ，

因此当断开电键瞬间，由于自感现象，在由 L 与灯 A 组成的电路中， I_2 通过灯 A 形成回路而逐渐衰减，由于 I_2 比 I_1 大得多，灯 A 将比原来亮许多而再熄灭，注意此时通过灯 A 电流方向与原来 I_1 方向相反。这个实验也可以利用扩音机所用 25 瓦线间变压器 0—8 欧输出端绕组作为 L ，此时小灯改用 1.5 伏小电珠，电源电压降至 2 伏进行实验。

(六) 日光灯电路中起动器与镇流器的作用

演示日光灯起动器作用的电路比较简单，将拆去外罩的起动器与一只 220 伏 40 瓦白炽灯串联，把起动器氖管放在投影幻灯玻璃板上并固定好（或用其他幻灯机），将电路接入 220 伏照明电路，通过投影和氖管、电灯交替发光可以明显看出双金属片起的开关作用。为加强演示效果，可在起动器两端接一个交流 250 伏电压表，说明起动电压。

日光灯镇流器所起的两个作用可以分别作以下两个演示，首先演示断电瞬间，由于自感现象电感线圈两端产生高电压，实验电路如图 2.10 所示，镇流器可选用 8 瓦日光灯镇流器，氖管 A 用试电笔中的氖管（起辉电压 60—70 伏，日光灯起动器中氖管起辉电压在 100 伏左右），电源只用 1 节干电池，这样说服力强一些。在断开 K 瞬间，可以观察到氖管亮一下，表明氖管两端电压超过 60 伏以上，引起管中辉光放电。这一点与日光灯管内气体击穿导电道理是相同的。其次是演示镇流器降压限流作用。实验电路如图 2.11 所示，最好制成示教板，日光灯用 20 瓦的，灯 A 用 220 伏 60 瓦白炽灯。实验时，先闭合 K_1 ，使日光灯正常发光，然后再闭合 K_2 ，灯管仍发光，但亮度增加，表明镇流器与灯并联后，降压减小，再断开 K_1 ，灯管还发光，说明此时灯 A 电阻作用代替了镇流器的降压作用，如果断开 K_2 ，切断电源后，重新闭合 K_2 ，则灯管不能正常发光，说明电阻（灯 A ）不能代替镇流器所起的产生瞬时高压作用。

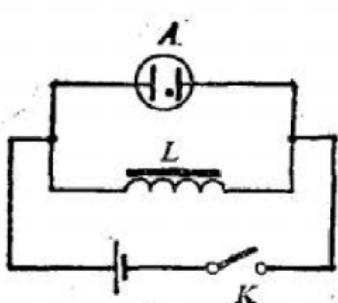


图 2.10

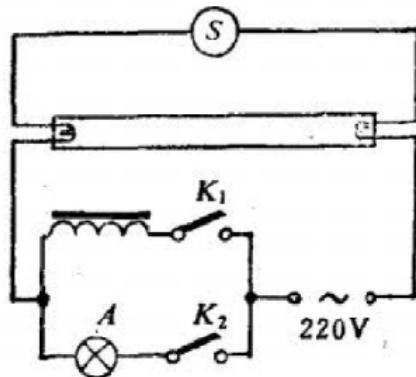


图 2.11

(七) 涡流现象

涡流现象实验主要是演示涡流的机械效应即电磁阻尼现象，课本上本章练习六第 1 题所述的就是这个实验所演示的现象，因而可以先做这个演示实验，再要求学生自己对现象作出分析，实验使用 J2425 型变压器原理说明器，其附件中有专为演示电磁阻尼准备的强弱两种阻尼摆。实验时，将绿色线圈（用 0—400 匝绕组）套在 U 型铁心上，装好两块极靴并使两者间相距 2 厘米左右，再将两个强、弱阻尼摆连同支架一起在固定条形铁心的卡板上安装好，并使阻尼摆摆动灵活且不与极靴相碰，如图 2.12 所示，演示时，先不通电，将两摆同时偏离平衡位置到相同角度，释放后可以看出两摆振动情况相同，且衰减很慢。然后再给线圈通电（电源可用 J1201 型低压电源直流 12 伏挡），这样在极靴间隙里存在一个较强的磁场。再将两摆拉到偏离平衡位置

相同角度，释放两摆后可以明显看到，整铝片制的强阻尼摆很快停止下来，而梳状铝片制的弱阻尼摆却能摆动较长一段时间。实验时因线圈中电流较大，通电时间不宜太长。

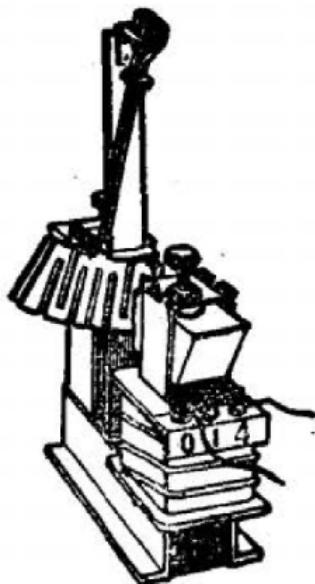


图 2.12

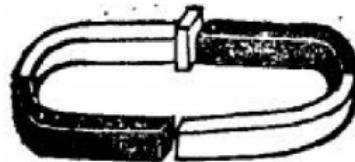


图 2.13

这个实验也可以将两块大型演示用蹄形磁铁异名磁极相对放置，在一对异名磁极间放置两片封闭磁铁磁路用的衔铁，另一对异名磁极间的空隙就形成一个较强的磁场（图 2.13）。用直径 0.3 毫米左右的漆包线绕制两个软弹簧，下端分别焊上同完整铜片制成的矩形铜片和梳状铜片，悬挂在物理支架上。实验时，先后使它们在磁铁异名磁极间隙中上下振动，比较它们所受阻尼的情况。

二、学生实验

(一) 研究电磁感应现象

实验电路如课本图 2.3 所示，实验器材除原副线圈外，检流计可用 J0408 型灵敏电流计，其量程为±300 微安（注意：早期生产的一些灵敏电流计规格很多，而且表盘刻度并不代表测量真实读数，只用于观察偏转多少）。电源可使用 J1202 型学生电源直流 4 伏挡，也可用 2 节干电池串联作为电源。滑线变阻器用 J2354 型 10 欧 2 安的。在教学中要注意以下几个问题：

- 从课本上这段教材写法上看，是一个探索性实验，安排在讲完第一节感生电流产生条件之后进行，通过实验归纳出判断感生电流方向的规律。如果这个实验在教学时这样安排的话，建议实验时先做条形磁铁插入与拔出的实验，然后再做原线圈通断电时的实验，使学生首先把精力集中在规律的归纳上，可不做课本上将通电线圈当作磁铁插入与拔出的实验。
- 这个实验需要实际认识线圈的绕向和检流计偏转方向与实际线圈中电流方向间关系。这使一些学生实验时感到困难，因而要加强实验辅导。与检流计指针偏转方向有关的问题在前面演示实验 2 中已作说明。
- 实验时注意引导学生掌握好四个环节。一是弄清实验两个内容的区别，二是弄清如何从电表偏转判断副线圈中感生电流方向，三是弄清通电原线圈中磁场方向，四是记录好实验现象，这个实验的现象尽可能要求学生用画图方法记录。对于他们来说，画图本身就是一种

能力训练，而且对学生理解课本上的一些示意图有好处。

三、课外实验活动

(一) 判断指南针的偏转方向

这个实验是利用感生电流的直线电流部分产生的磁场使小磁针偏转，要求学生先作判断，然后用实验证明，实验所用漆包线尽可能粗一些（如直径0.4—0.5毫米）。无漆包线时，也可用普通照明电路用的塑料皮多股导线。原副线圈匝数分别绕40匝左右，实验时需注意使铁心（小刀或铁钉）远离小磁针，以免通电时铁心磁场（比直线电流磁场强得多）引起小磁针偏转造成假象，还需注意通电时间要很短，否则电池会由于长时间处于短路状态而损坏。实验时，先想好电源接通与断开时应该产生的现象，再很快地接通电路，2—3秒钟就断开，以看出现象为准，实验时也可以自制一个小检流计：做一个小纸盒（以放下小磁针为准），在盒上用导线绕30匝左右，将两端按上一章课外实验指导中介绍的方法固定好。使用时，先将线圈平面调整到小磁针静止时所在的南北竖直面上，也按习惯给线头标上正负，使电流由正端流入时，小磁针顺时针偏转，就可接入电路进行实验了（图2.14）。

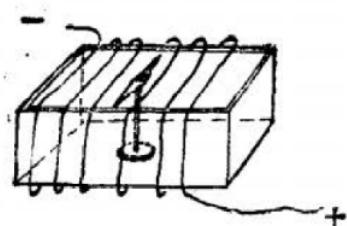


图 2.14

第四节 习题解答

一、练习一

1. 如图2.15所示，在磁场中有一个闭合的弹簧线圈，当图甲中人的双手离开后，线圈收缩（图乙），线圈收缩时，其中是否有感生电流？为什么？

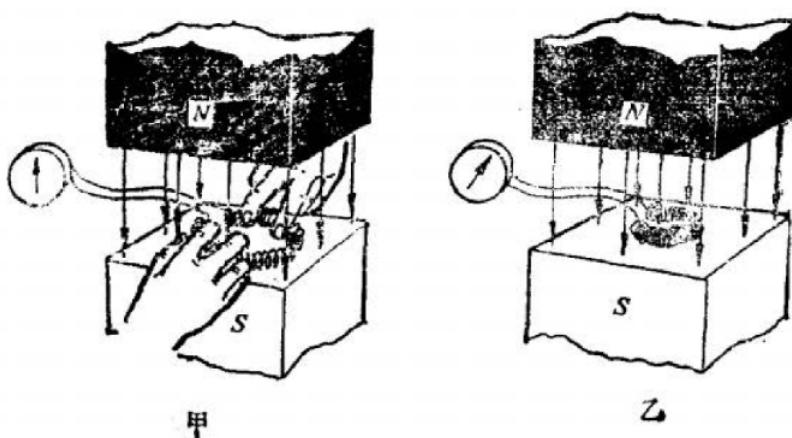


图 2.15

解答：如图所示，线圈置于匀强磁场中。虽然磁感应强度 B 是不变的，但是线圈在收缩过程中它的面积是减小的。所以穿过线圈的磁通量减少，故线圈中有感生电流。

2. 在课本图 2.6 所示的匀强磁场中有一个线圈板，线圈平面垂直于磁力线，当线圈框在磁场中上下运动时，是否会在线圈框中引起感生电流？当线圈框在磁场中左右运动时，是否会在线圈框中引起感生电流？为什么？

解答：穿过线圈框的磁通量 $\phi = B \cdot S_{\perp}$ ，只要线圈在匀强磁场中作平动，则 ϕ 不变，故线圈框上下运动或左右运动时，不会在线圈框中引起感生电流。

3. 如课本图 2.7 所示，线圈在匀强磁场中绕 OO' 轴转动时，线圈里是否有感生电流？为什么？

解答：穿过线圈的磁通量为 $\phi = B \cdot S_{\perp}$ ， S_{\perp} 为线圈面积在垂直于磁力线方向上的投影。当线圈转动时， S_{\perp} 是变化的，因此穿过线圈面积的磁通量是变化的，所以线圈里有感生电流产生。

4. 如图 2.16 所示，让闭合线圈由位置 1 通过一个匀强磁场运动到位置 2。线圈在运动过程中，什么时候有感生电流，什么时候没有感生电流？为什么？

解答：从闭合线圈的右边刚刚进入磁场开始，到线圈的左边刚好进入磁场为止的这一段运动过程中，由于磁通量不断增加，故线圈中有感生电流。从线圈的右边刚好离开磁场开始，到线圈的左边刚好要离开磁场为止，在这一段运动过程中，磁通量不断减少，线圈中也有感生电流。线圈左边开始进入磁场到线圈右边开始离开磁场的过程中，因为穿过线圈的磁通量不变，线圈中无感生电流。



图 2.16

5. 矩形线圈 $ABCD$ 位于通电直长导线附近（课本图 2.9），线圈跟导线同在一个平面内，且线圈的两个边与导线平行。在这个平面内，线圈远离导线平动时，线圈中有没有感生电流？线圈和导线都不动，当导线中的电流 I 逐渐增大或减小时，线圈中有没有感生电流？为什么？

解答：线圈远离导线平动时，线圈中有感生电流。因为通电长导线周围磁场的磁感应强度 $B \propto \frac{1}{r}$ ，即磁场的分布是距导线近处 B 大，距导线远处 B 小，所以线圈远离导线时，穿过线圈的磁通量减少。线圈和导线都不动，当导线中的电流 I 变化时，线圈中有感生电流，因为 $B \propto I$ ， I 变化要引起穿过线圈的磁通量变化。

6. 把一个铜环放在匀强磁场中，使环的平面与磁场的方向垂直（图 2.17 甲）。如果使环沿着磁场的方向移动，铜环中是否产生感生电流？为什么？如果磁场是不均匀的（图 2.17 乙），是否产生感生电流？为什么？

解答：甲图中铜环上没有感生电流，因为铜环的运动不引起穿过的磁通量变化。乙图中的环中有感生电流，因为环向右运动时，由于磁感应强度 B 分布变小，引起穿过回路的磁通量减少。

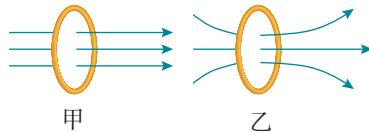


图 2.17

二、练习二

1. 在课本图 2.9 中, 当线圈远离通电导线而去时, 线圈中感生电流的方向如何?

解答: 线圈中感生电流方向为顺时针方向, 即 $B \rightarrow A \rightarrow D \rightarrow C \rightarrow B$ 的流向.

2. 如课本图 2.15 所示, 导线 AB 和 CD 互相平行. 试确定在闭合和断开开关时导线 CD 中感生电流的方向.

解答: 开关闭合时, 导线 CD 中感生电流方向由 D 流向 C . 开关断开时, 导线 CD 中感生电流由 C 流向 D .

3. 在图 2.18 中 $CDEF$ 是金属框, 当导体 AB 向右移动时, 试确定 $ABCD$ 和 $ABFE$ 两个电路中感生电流的方向. 应用楞次定律, 我们能不能用这两个电路中的任意一个来判定导体 AB 中感生电流的方向?

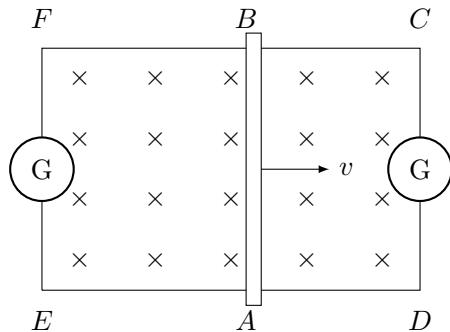


图 2.18

解答: 导体 AB 向右移动时, $ABCD$ 闭合电路中的磁通量减小, 而 $ABFE$ 闭合电路中的磁通量增大. 根据楞次定律可知, $ABCD$ 闭合电路中的感生电流是顺时针方向流动的, 而 $ABFE$ 闭合电路中的感生电流是逆时针方向流动的.

也可以根据右手定则判断出 AB 导体上的感生电流是由 A 流向 B , 把 AB 视为电源, 则 CD 和 FE 为两并联支路, 可得两个闭合电路中的感生电流方向和上述结果相同, 可以用两个电路中的任意一个来判定导体 AB 中的感生电流方向.

4. 在课本图 2.17 所示的电路中把滑动变阻器 R 的滑动片向左移动使电流减弱. 试确定这时线圈 A 和 B 中感生电流的方向.

解答: A 和 B 线圈中的感生电流的方向如图 2.19 所示.

5. 如课本图 2.18 所示, 把一个条形磁铁从闭合螺线管的右端插入, 由左端抽出, 在整个过程中, 螺线管里产生的感生电流的方向是否发生改变?

解答: 感生电流方向发生改变. 磁铁从右端插入时和由左端抽出时, 感生电流方向相反.

6. 课本图 2.19 中的 A 和 B 都是很轻的铝环, 环 A 是闭合的, 环 B 是断开的. 用磁铁的任一极来接近 A 环, 会产生什么现象? 把磁铁从 A 环移开, 会产生什么现象? 磁极移近或

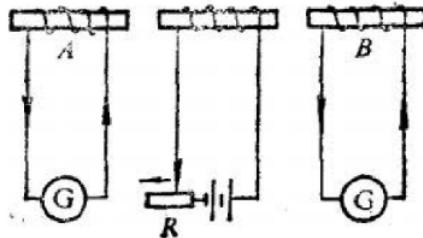


图 2.19

远离 B 环时，又会产生什么现象？用所学的知识解释这些现象。

解答：用磁铁的任一极来接近 A 环时， A 环均被推斥，运动方向和磁铁移动方向相同；把磁铁从 A 环移开时， A 环被磁铁吸引而随磁铁运动。磁铁移近或远离 B 环时，则 B 环静止不动。因为 A 环是闭合的，当磁铁接近或移开时， A 环中产生感生电流。当磁铁接近 A 环时， A 环对着磁铁的一侧形成与磁铁同名的磁极，因而 A 环被推开。当磁铁离开 A 环时， A 环对着磁铁的一侧形成与磁铁异名的磁极，因而 A 环被吸引， B 环不闭合，不产生感生电流，也就没有感生电流的磁场与磁铁发生相互作用，因此 B 环不因磁铁靠近或远离而产生运动。

三、练习三

1. 下列说法哪个正确？
 - (a) 电路中感生电动势的大小，跟穿过这一电路的磁通量成正比；
 - (b) 电路中感生电动势的大小，跟穿过这一电路的磁通量的变化量成正比；
 - (c) 电路中感生电动势的大小，跟穿过这一电路的磁通量的变化率成正比；
 - (d) 电路中感生电动势的大小，跟单位时间内穿过这一电路的磁通量的变化量成正比。

解答： (c)、(d) 的说法是正确的。

2. 试证明： $1V = 1Wb/s$ ； $1V = 1T \cdot 1m \cdot 1m/s$ 。

解答：

$$(a) \text{ 因为 } \phi = B \cdot S, B = \frac{F}{I\ell}, U = \frac{W}{q}, \text{ 可得:}$$

$$1Wb = 1T \cdot m^2 = 1 \frac{N}{A \cdot m} \cdot m^2 = 1 \frac{N \cdot s}{C} \cdot m = 1 \frac{J \cdot s}{C} = 1V \cdot s$$

所以： $1V = 1Wb/s$

(b)

$$1V = 1Wb/s = 1T \cdot \frac{m^2}{s} = 1T \times 1m \times 1m/s$$

3. 长 5cm 的导线在 0.02T 的匀强磁场中运动，运动的方向跟磁力线垂直，运动的速率 $v = 0.1m/s$ ，求感生电动势。

解答：

$$\mathcal{E} = B\ell v = 0.02 \times 0.05 \times 0.1 = 10^{-4}V$$

4. 在 0.4T 的匀强磁场中，长度为 25cm 的导线以 6m/s 的速率做切割磁力线的运动，运动方向跟磁力线成 30° 角，并跟导线本身垂直。求感生电动势。

解答：

$$\mathcal{E} = B\ell v \sin \theta = 0.4 \times 0.25 \times 6 \times \sin 30^\circ = 0.3 \text{V}$$

5. 50 匝的线圈，穿过它的磁通量的变化率为 0.5Wb/s ，求感生电动势。

解答：

$$\mathcal{E} = n \frac{\Delta\phi}{\Delta t} = 50 \times 0.5 = 25 \text{V}$$

6. 有一个 1000 匝的线圈，在 0.4 秒内穿过它的磁通量从 0.02 韦增加到 0.09 韦，求线圈中的感生电动势，如果线圈的电阻是 10 欧，把它跟一个电阻为 990 欧的电热器串联组成闭合电路时，通过电热器的电流是多大？

解答：

$$\begin{aligned}\mathcal{E} &= n \frac{\Delta\phi}{\Delta t} = 1000 \times \frac{0.09 - 0.02}{0.4} = 175 \text{V} \\ I &= \frac{\mathcal{E}}{R+r} = \frac{175}{990+10} = 0.175 \text{A}\end{aligned}$$

7. 课本图 2.23 是法拉第做成的世界上第一个发电机模型的原理图。把一个铜盘放在磁场里，使磁力线垂直穿过铜盘；转动铜盘，就可以获得持续的电流。试解释其作用原理。

解答：把铜盘视为从盘中心到盘边缘很多相同的条形导体并联组成。当铜盘转动时，每一根条形导体均切割磁力线而产生电动势。如果铜盘顺时针转动，根据右手定则可知电动势方向由盘中心指向边缘，即盘中心为负极，盘边缘为正极。因此可把转动的铜盘视作很多电动势相同的并联电源。

四、练习四

1. 在课本图 2.20 中，以一定速度向右拉动导体 ab ，如果导体 ab 的电阻增大，在相同的时间里，外力做的功是增大还是减小？为什么？

解答：以一定速度向右拉动导体 ab ，则外力跟安培力大小相等，故外力做功为 $W = I\ell Bv\Delta t$ ，因为 v 、 ℓ 、 B 、 Δt 均为不变量，所以当导体 ab 的电阻增大时，闭合电路中的电流 I 减小，故外力做的功要减小。

2. 在课本图 2.20 中，是快拉还是慢拉所需的功率多？为什么？

解答：根据 $P = I\mathcal{E} = \frac{\mathcal{E}^2}{R}$ ， $\mathcal{E} = B\ell v$ 可知，当快拉时导体 ab 切割磁力线的速度大，因而产生感生电动势大。故快拉时所需功率多。

3. 在课本图 2.20 中，导体 ab 刚开始受到恒力拉动时，它做什么运动？随后它的运动情况将如何变化？感生电动势和感生电流将如何变化？外力做的功产生了哪些效果？如果在导体 ab 还没拉出磁场时停止外力，情况又将怎样？（不考虑摩擦和空气阻力）

解答：导体 ab 在外力作用下开始运动后，受到两个力，一个是恒外力 F ，一个是安培力 $F_{\text{安}} = I\ell B$ ，两个力方向相反。根据牛顿第二定律可得

$$F - F_{\text{安}} = ma$$

因为

$$F_{\text{安}} = I\ell B = B \cdot \frac{\mathcal{E}}{R} \ell = B \frac{B\ell v}{R} \ell = \frac{B^2 \ell^2 v}{R}$$

所以

$$F - \frac{B^2 \ell^2 v}{R} = ma$$

即：

$$a = \frac{F}{m} - \frac{B^2 \ell^2 v}{Rm}$$

由此式可知：当起动时导体 ab 的速度 $v = 0$, 这时加速度 $a = F/m$ 为最大值, 故 ab 导体做加速运动. 随着 v 的增大, 加速度逐渐减小, 导体 ab 作变加速度运动, 在这个过程中, 感生电动势不断增大, 感生电流也随之增大, 这时外力做的功, 一方面使电路获得电能, 另一方面使导体 ab 的动能不断增加. 如果导体 ab 始终在磁场中运动, 当 $F_{\text{安}} = F$ 时, 加速度 $a = 0$, 导体 ab 将在磁场中作匀速直线运动. 如果在导体 ab 还没有被拉出磁场时就停止了外力的作用, 这时作用在导体 ab 上的只有安培力, 而且安培力的方向和 v 方向相反, 因而加速度方向也与 v 方向相反, 故导体 ab 将做减速运动, 这时感生电动势和感电流都开始减小, 安培力也不断减小, 因而加速度也不断减小. 只要导体 ab 始终在磁场中运动, 最后它将达到静止状态. 外力停止作用时导体 ab 所具有的动能, 在这个过程中全部转化为电路的电能, 而电能最终转化为电路的内能, 使电路温度升高.

五、练习五

1. 制造电阻箱时, 要用双线绕法, 如课本图 2.29 所示, 这样就可以使自感现象的影响减弱到可以略去的程度, 为什么?

解答: 双线绕法使得线圈中两组绕线电流方向相反. 因而电流所激发的磁场的合磁感应强度基本为零, 故线圈中基本无变化的磁通量, 可把自感现象的影响减弱到可以略去的程度.

2. 有一个线圈, 它的自感系数是 1.2 亨, 当通过它的电流在 1/200 秒内由零增加到 5.0 安时, 线圈中产生的自感电动势多大?

解答:

$$\mathcal{E}_{\text{自}} = L \cdot \frac{\Delta I}{\Delta t} = 1.2 \times \frac{50}{1/200} = 1.2 \times 10^3 \text{V}$$

3. 一个线圈的电流强度在 0.001 秒内有 0.02 安的变化时, 产生 50 伏的自感电动势, 求线圈的自感系数, 如果这个电路中电流强度的变化率变为 40A/s, 自感电动势是多大?

解答:

$$L = \frac{\mathcal{E} \cdot \Delta t}{\Delta I} = \frac{50 \times 0.001}{0.02} = 2.5 \text{H}$$

$$\mathcal{E} = L \frac{\Delta I}{\Delta t} = 2.5 \times 40 = 100 \text{V}$$

4. 试证明 $1\text{H} = 1\Omega \cdot \text{s}$.

解答: 因为 $L = \frac{\mathcal{E} \cdot \Delta t}{\Delta I}$, 所以

$$1\text{H} = 1 \frac{\text{V} \cdot \text{s}}{\text{A}} = 1\Omega \cdot \text{s}$$

5. 根据感生电动势 $\mathcal{E} = \frac{\Delta\phi}{\Delta t}$ 和 $\mathcal{E} = L \frac{\Delta I}{\Delta t}$, 证明 $L = \frac{\Delta\phi}{\Delta I}$, 并说明这个式子的物理意义.

解答: 因为 $\mathcal{E} = \frac{\Delta\phi}{\Delta t}$, $\mathcal{E} = L \frac{\Delta I}{\Delta t}$, 所以

$$\frac{\Delta\phi}{\Delta t} = L \cdot \frac{\Delta I}{\Delta t}$$

即: $L = \frac{\Delta\phi}{\Delta I}$

这个式子说明, 自感系数在数值上等于电流改变 1 安所产生的磁通量的变化量.

六、练习六

1. 如课本图 2.33 所示, A 是可以在电磁铁两磁极间摆动的铝片(或铜片). 电磁铁线圈没有通电时, 铝片可以摆动较长时间才停下来. 电磁铁线圈通电时, 铝片很快就会停下来. 解释这个现象.

这种现象叫做电磁阻尼, 在实际中有很多应用. 课文中讲的, 使电学测量仪表的指针很快地停下来, 就是电磁阻尼的应用. 电磁阻尼还常用于电气机车的电磁制动器中.

解答: 电磁铁通电时, 电磁铁两磁极之间产生磁场, 金属片 A 在两磁极间摆动时作切割磁力线的运动, 因而在金属片 A 中形成涡流. 涡流又受到磁场力作用, 由楞次定律可知, 这个磁场力是阻碍金属片 A 作切割磁力线的运动的, 所以金属片很快就会停下来.

2. 如课本图 2.34 所示, 把蹄形磁铁的两极靠近一个金属圆盘, 但不接触. 当磁铁绕轴转动时, 圆盘也绕轴转动起来, 解释这个现象.

这种现象叫做电磁驱动, 在实际中也有很多应用, 下一章要讲的感应电动机就是利用这个道理驱动的. 家庭中用的电度表, 汽车上用的电磁式速度表, 也利用这种电磁驱动.

解答: 当蹄形磁铁转动时, 相当于金属圆盘向反方向作切割磁力线的转动, 在金属圆盘里形成涡流. 根据楞次定律可知, 金属圆盘中的涡流受到的磁场力作用是阻碍圆盘和蹄形磁铁之间的相对运动的, 所以圆盘随磁铁一起转动, 但圆盘的转速要小于磁铁的转速.

七、习题

1. 在课本图 2.35 中, 条形磁铁以速度 v 向螺线管靠近, 下面哪种说法是正确的:

- (a) 螺线管中不产生感生电流;
- (b) 螺线管中产生感生电流, 方向如课本图 2.35 所示;
- (c) 螺线管中感生电流的方向与图中所示的方向相反.

解答: (b) 正确.

2. 在课本图 2.36 中, 线圈 M 和线圈 P 绕在同一铁芯上.

- (a) 当合上电键 K 的一瞬间, 线圈 P 里有没有感生电流?
- (b) 当线圈 M 里有稳恒电流通过时, 线圈 P 里有没有感生电流?
- (c) 当断开电键 K 的一瞬间, 线圈 P 里有没有感生电流?

在上面三种情况里, 如果线圈 P 里有感生电流, 指出线圈 P 的哪一端是 N 极.

解答:

- (a) 有感生电流, 线圈 P 右端为 N 极.
- (b) 没有感生电流.
- (c) 有感生电流, 线圈 P 左端为 N 极.

3. 宇航员飞到某一个不熟悉的行星上，他们想用一只灵敏电流表和一个线圈来探测一下行星周围是否有磁场，应当怎样办？

解答：将线圈和灵敏电流表串联，然后使线圈在星球表面运动（平动和转动），观察电流表指针是否发生偏转。如果有磁场，通过线圈的磁通量发生变化，电流表指针要发生偏转。如果不管线圈如何运动，电流表始终不显示有电流存在，则可断定行星周围没有磁场。

4. 如图 2.20 所示，在匀强磁场中有一个线圈。

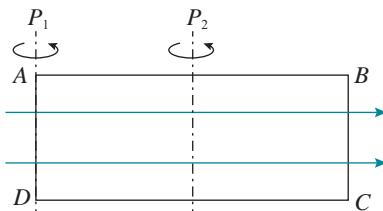


图 2.20

- 当线圈分别以 P_1 和 P_2 为轴按逆时针方向转动时（如图中箭头所示），感生电流的方向各是什么？
- 当转速恒定时，线圈以 P_1 和 P_2 为轴转动时，两种情况下感生电流的大小有何关系？
- 当转速恒定时，感生电动势的大小跟线圈面积有何关系？
- 设磁感应强度 B 为 1.5 特， AB 为 10 厘米， BC 为 4 厘米，转速为每秒 $120/2\pi$ 转，分别求出以 P_1 和 P_2 为转轴时感生电动势的最大值。

解答：

- 感生电流方向均为顺时针方向（即按 $B \rightarrow C \rightarrow D \rightarrow A \rightarrow B$ 方向流动）。
- 两种情况下感生电流的大小相等，变化规律相同。
- 以 P_1 为转轴，则 BC 边切割磁力线。图示线圈位置为起始时刻， t 秒后线圈平面与磁力线夹角为 θ ，设 $AB = L_1$, $BC = L_2$, 角速度为 ω ，根据感生电动势公式可得

$$\begin{aligned}\mathcal{E} &= BL_2 \cdot v \cdot \sin(90^\circ + \theta) \\ &= BL_2 \cdot L_1 \cdot \omega \cdot \sin(90^\circ + \theta) \\ &= BS\omega \cdot \cos \theta \\ &= BS\omega \cos \omega t\end{aligned}$$

当线圈平面与磁力线平行时， $\theta = 0^\circ$ ，则 \mathcal{E} 为最大值， $\mathcal{E}_m = BS\omega$ 。如果以 P_2 为转轴可得上述同样结果。可以证明上述结果与转轴的位置无关，可见当转速恒定时感生电动势的最大值跟线圈面积成正比。

$$(d) \mathcal{E}_m = BS\omega = 1.5 \times 0.1 \times 0.04 \times \frac{120}{2\pi} = 0.7V$$

5. 如图 2.21 所示，在磁感应强度为 0.5 特的匀强磁场中，让长为 0.2 米的导体 AB 在无摩擦的框架上以 5m/s 的速度向右滑动，如果 $R_1 = R_2 = 2$ 欧，其他导线的电阻不计，外力做功的功率有多大？感生电流的功率有多大？在电阻 R_1 和 R_2 上消耗的功率有多大？验证一下：能的转化是否符合守恒定律？

解答：导体 AB 作切割磁力线运动，其上产生感生电动势。所以导体 AB 可视为电源。 R_1 、

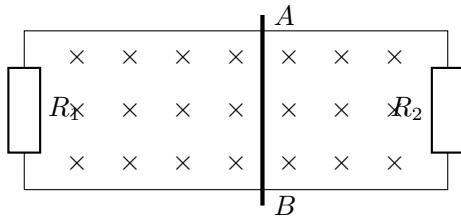


图 2.21

R_2 为外电路, 且 R_1 与 R_2 并联.

$$\mathcal{E} = Blv = 0.5 \times 0.2 \times 5 = 0.5V$$

$$I = \frac{\mathcal{E}}{R} = \frac{0.5}{1} = 0.5A$$

$$I_{R_1} = I_{R_2} = 0.25A$$

$$P_{\text{外}} = F \cdot v = Bl \cdot v = 0.5 \times 0.5 \times 0.2 \times 5 = 0.25W$$

$$P_{\text{电流}} = I \cdot \mathcal{E} = 0.5 \times 0.5 = 0.25W$$

$$P_{\text{热}} = I^2 R_1 + I^2 R_2 = 0.25^2 \times 2 + 0.25^2 \times 2 = 0.25W$$

计算结果表明, 外力克服安培力作功将机械能全部转化为电能, 在电路上电流作功将电能又全部转化为电阻上的内能, 上述计算结果证明能的转化是符合守恒定律的.

6. 如课本图 2.39 所示, 让铜线圈 A 自由落下, 并通过一段有匀强磁场的空间, 试定性说明线圈的运动情况. (不考虑空气阻力)

解答: 当线圈 A 未进入磁场时作自由落体运动, 其加速度 $a = g$. 当线圈 A 的下边进入磁场时线圈中有感生电流, 线圈 A 受到方向相反的重力和安培力作用, 故加速度 $a < g$. 当线圈 A 全部进入磁场后, 因只受重力作用, 线圈 A 向下运动的加速度 $a = g$. 当线圈的下边开始离开磁场时, 线圈中产生感生电流, 由于安培力的存在, 线圈的加速度 $a < g$. 当线圈全部离开磁场后, 线圈的加速度 $a = g$.

7. 弹簧上端固定, 下端悬挂一根磁铁. 将磁铁抬到某一高度后放开, 磁铁能上下振动较长时间才停下来. 如果在磁铁下端放一个固定的闭合线圈使磁铁上下振动时穿过它 (课本图 2.40), 磁铁就会很快地停下来, 试用能量观点来解释这个现象.

解答: 在没有闭合线圈时, 磁铁上下振动要不断克服空气阻力做功, 把原有的机械能转化为空气和磁铁的内能, 因而振幅逐渐减小, 最后会停下来. 如果在磁铁下方放一个固定的闭合线圈, 磁铁上下振动, 在闭合线圈中会产生感生电流. 根据楞次定律可知, 闭合线圈中感生电流的磁场总是阻碍线圈和磁铁之间的相对运动. 因此, 磁铁除了克服空气阻力做功外, 还要克服这种阻力做功, 把一部分机械能转化为闭合线圈中的电能, 这比起没有线圈, 只需克服空气阻力做功时, 机械能的消耗要快得多, 所以磁铁会较快地停下来.

8. 课本图 2.41 是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, 在拉开电键 K 的时候, 弹簧 S 并不能立即将衔铁 D 拉起, 从而使触头 C (连接工作电路) 立即离开, 过一段短时间后触头 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.

解答: 当拉开电键 K 时, 线圈 A 中电流发生由有到无的变化, 在线圈 B 中引起感生电流,

而且感生电流的磁场和原磁场方向相同. 这就使铁心仍处于磁化状态, 因而继续将衔铁吸住, 直到感生电流消失. 这时铁心失去磁性, 弹簧 S 将衔铁 D 拉起. 从而使触头 C 离开.

9. 如图 2.22 所示, 电源的电动势 $\mathcal{E} = 1.5$ 伏, 内电阻 $r = 0.5$ 欧, $AB = 0.5$ 米, AB 的电阻 $R = 0.1$ 欧, 框架的电阻不计, 磁感应强度为 0.5 特, 金属框对 AB 的滑动摩擦力为 0.25 牛.

- (a) 分析一下, 当电键 K 闭合后, 会发生哪些电磁现象?
- (b) 当 AB 的速度达到稳定时 (即速度为最大时), 电路中的电流强度是多大?
- (c) AB 的最大速度是多少?
- (d) 这时电源消耗的电能转化为什么形式的能? 通过计算验证一下: 能的转化是否符合守恒定律?

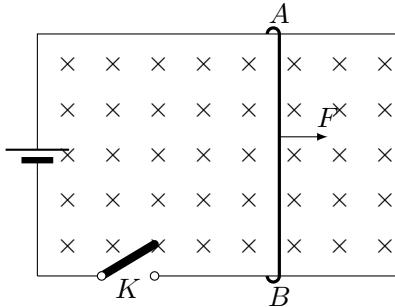


图 2.22

解答:

- (a) 当电键 K 闭合后会发生如下一些电磁现象: 其一是闭合电路中的电流在周围空间激发磁场; 其二是通电导体 AB 在磁场中受到安培力作用, 其方向如图中 F 所示; 其三是当导体 AB 开始运动后, 因切割磁力线而在其上产生感生电动势, 它的方向与 AB 中电流的方向相反.
- (b) 导体 AB 在运动过程中受安培力 F 和滑动摩擦力 f 的作用, 这两个力方向相反, 当 $F = f$ 时, 导体 AB 达到稳定. 因为 $F = BI\ell$, 所以 $BI\ell = f$.
因此

$$I = \frac{f}{B\ell} = \frac{0.25}{0.5 \times 0.5} = 1\text{A}$$

- (c) 因感生电动势为反电动势, 可得:

$$I = \frac{\mathcal{E} - \mathcal{E}_{\text{感}}}{R + r}$$

由于: $\mathcal{E}_{\text{感}} = B\ell v$, 所以

$$I = \frac{\mathcal{E} - B\ell v}{R + r}$$

因此, 可得

$$v = \frac{\mathcal{E} - I(R + r)}{B\ell} = \frac{1.5 - 1 \times (0.1 + 0.5)}{0.5 \times 0.5} = 3.6\text{m/s}$$

- (d) 这时电源消耗的电能一部分转化为电路中的内能, 使电阻发热. 另一部分通过导体克服摩擦力作功, 转化为内能. 注意, 这时导体 AB 达到速度稳定, 导体的动能无变化. 电源消耗的功率 $P = I\mathcal{E} = 1 \times 1.5 = 1.5\text{W}$

导体 AB 克服摩擦力作功而消耗的功率 $P' = f \cdot v = 0.25 \times 3.6 = 0.9\text{W}$

电路中电阻上消耗的功率为 $P = I^2(R+r) = 1^2 \times (0.1+0.5) = 0.6\text{W}$. 根据计算可知, 能的转化符合守恒定律.

第五节 参考资料

一、由洛伦兹力所引起的电磁感应现象

按照磁通量变化的原因不同, 可将电磁感应现象分为两种情况具体讨论. 一种是在稳定磁场中运动着的导体内产生的电动势. 另一种是导体不动, 因磁场变化而产生的电动势. 为了区别这两种情况, 可把前者叫动生电动势, 后者叫感生电动势. 引起这两种电动势的非静电力的来源是不同的, 动生电动势是由洛伦兹力所引起的. 而感生电动势是由感应电场力所引起的. 实验证明, 这两种电动势的大小和方向均用磁通量的观点来统一描述, 这就是法拉第电磁感应定律和楞次定律.

动生电动势的决定式, 可以从洛伦兹力来推导. 一般情况下, 当导线 L 在磁场 B 中以速度 V 运动时, 导线中单位正电荷在洛伦兹力 ($\vec{v} \times \vec{B}$) 作用下沿导线移动所做的功等于动生电动势 \mathcal{E} , 即

$$\mathcal{E} = \int_L (\vec{v} \times \vec{B}) \cdot d\vec{L}$$

我们以一特殊情况来讨论, 设 B 为一匀强磁场, L 为一段直导线, 而且 L 上各点 v 都相同, 上式积分运算变为

$$\mathcal{E} = (\vec{v} \times \vec{B}) \cdot \vec{L}$$

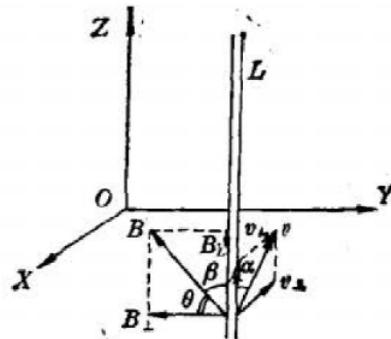


图 2.23

如图 2.23 所示, 我们把 V 和 B 分别沿着平行和垂直于导线 L 的方向进行正交分解可得

$$\vec{v} = \vec{v}_L + \vec{v}_\perp, \quad \vec{B} = \vec{B}_L + \vec{B}_\perp$$

这样, $\vec{v} \times \vec{B}$ 可以分解为以下四个分量:

$$\vec{v}_L \times \vec{B}_L, \quad \vec{v}_L \times \vec{B}_\perp, \quad \vec{v}_\perp \times \vec{B}_L, \quad \vec{v}_\perp \times \vec{B}_\perp$$

它们的每一个决定一个对单位正电荷的洛伦兹力的分量, \vec{v}_L 与 \vec{B}_L 之间夹角为零, 它们所引起的洛伦兹力分量为零. \vec{v}_L 与 \vec{B}_\perp 之间的夹角和 \vec{v}_\perp 与 \vec{B}_L 之间的夹角均为 90° , 它们引起的两个

洛伦兹力的分量均垂直于导线 L , 对电荷不做功. \vec{v}_\perp 与 \vec{B}_\perp 之间的夹角为 θ , 所引起的洛伦兹力的分量平行于导线 L , 对电荷做功, 只有洛伦兹力的这个分量才是产生电动势的非静电力, 其大小为

$$|\vec{v}_\perp \times \vec{B}_\perp| = v_\perp \cdot B_\perp \sin \theta$$

因此,

$$\mathcal{E} = (\vec{v} \times \vec{B}) \cdot \vec{L} = v_\perp \cdot B_\perp \cdot L \sin \theta$$

在一般情况下, \vec{v} 、 \vec{B} 与 \vec{L} 的夹角分别为 α 和 β , 如图 2.23 所示, 则有

$$\mathcal{E} = vBL \sin \alpha \cdot \sin \beta \cdot \sin \theta$$

当导线方向垂直于磁场方向, 速度方向又跟导线垂直, 即 L 垂直于 B 和 v 时, 可得

$$\mathcal{E} = vBL \sin \theta$$

这时 θ 等于 B 与 v 之间的夹角 (图 2.24). 这就是课本上的公式 2.4.

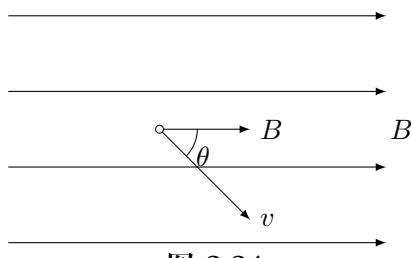


图 2.24

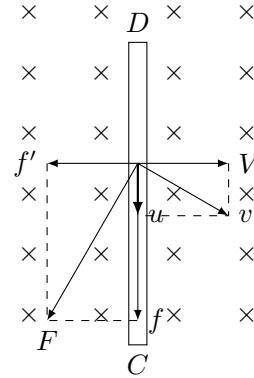


图 2.25

二、产生动生电动势的能量来源

在导体切割磁力线时, 动生电动势只可能存在于运动的这一段导体上. 而不动的那一段导体上没有电动势, 它只是提供电流的通路. 如果仅有一段导体在磁场中运动, 而没有回路, 在这一段导线上虽然没有感生电流, 但仍然可能有动生电动势. 在前一篇资料中讲过, 动生电动势是由洛伦兹力引起的.

我们知道, 洛伦兹力的方向总是跟电荷的速度方向垂直的, 也就是跟电荷的运动方向垂直, 所以洛伦兹力永远不对电荷做功. 而这里又说动生电动势是由洛伦兹力引起的, 两者是否矛盾? 其实这并不矛盾. 我们来全面考虑一下运动导体中电子的运动. 在运动导体中的电子, 不但具有导体本身的速度 V , 而且还有相对导体的定向速度 u , 它们的合速度为 v , 如图 2.25 所示, 正是由于电子的后一种运动构成了感生电流. 电子所受的总的洛伦兹力为

$$F = evB$$

它与合速度 v 垂直, 总的洛伦兹力不对电子做功. F 的一个分量是

$$f = eVB$$

它对电子做功，形成动生电动势；另一个分量是

$$f' = euB$$

它的方向与 V 方向相反，是阻碍导体运动的，从而做负功。可以证明，两个分量所做的功的代数和等于零。因此，洛伦兹力的作用并不提供能量，只是传递能量，即外力克服洛伦兹力的一个分量 f' 所做的功通过另一个分量 f 转化为感生电流的能量。

三、公式 $\mathcal{E} = B\ell v \sin \theta$ 和 $\mathcal{E} = \Delta\phi/\Delta t$ 的关系

课本中公式

$$\mathcal{E} = B\ell v \sin \theta \quad (2.1)$$

是作为一个特例从公式

$$\mathcal{E} = \frac{\Delta\phi}{\Delta t} \quad (2.2)$$

中推导而来的。这两个公式既有统一的一面，又有不同的特点，因此从对比中来分析两个公式不同的方面，有利于加深对公式的理解和正确地使用这两个公式。

从研究对象来看：公式 (2.1) 的研究对象是一段直导线。 \mathcal{E} 是这段直导线在磁场中运动时产生的电动势的大小， \mathcal{E} 是属于这段直导线的。公式 (2.2) 的研究对象是一个闭合回路， \mathcal{E} 是通过回路的磁通量变化时在回路中产生的电动势，一般说来 \mathcal{E} 属于整个闭合回路，如果没有附加条件，则不能求出回路各段的电动势。

从物理内容来看，公式 (2.1) 是研究导线在磁场中运动时产生的电动势，是动生电动势，它的产生是由洛伦兹力引起的。公式 (2.2) 是研究通过闭合回路磁通量变化时产生的电动势，引起磁通量变化有多种多样的原因，归纳起来不外有下述三种类型：

1. 回路在 B 一定的匀强磁场中运动（包括回路的平动，转动及回路变形，面积变化等），这样产生的是动生电动势。
2. 回路不运动但磁场随时间变化，这样产生的电动势是感生电动势。其本质是感应电场力充当非静电力。
3. 回路在磁场中运动，同时磁场也随着时间变化。这时产生的电动势是动生电动势与感生电动势之和。

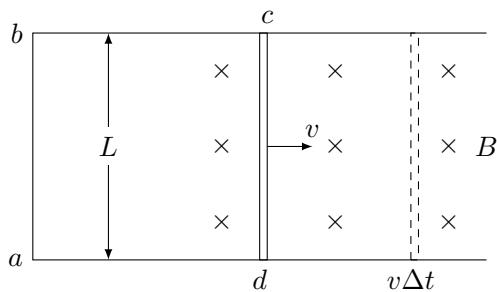


图 2.26

如图 2.26 所示，杆 cd 在导轨上匀速运动， L 、 v 均已知。磁感应强度 B 随时间均匀增大，即 $B = kt$ 。 t 时刻回路面积为 S 。则在 t 到 $t + \Delta t$ 这段时间内磁通量的变化

$$\Delta\phi = k(t + \Delta t)(S + Lv\Delta t) - ktS = ktLv\Delta t + kS\Delta t + kLv(\Delta t)^2$$

则电动势为：

$$\mathcal{E} = \frac{\Delta\phi}{\Delta t} = ktLv + kS + kLv\Delta t$$

在 Δt 很小时，可略去 $kLv\Delta t$ 这一项。 $ktLv$ 就是动生电动势 $\mathcal{E}_{\text{动}}$ ， kS 就是感生电动势 $\mathcal{E}_{\text{感}}$ 。如果杆不动，则 $\mathcal{E}_{\text{动}} = 0$ ，此时 $\mathcal{E} = \mathcal{E}_{\text{感}} = kS$ 。

从适用范围来看：公式 (2.1) 只适于求动生电动势，不能求感生电动势。公式 (2.2) 既可求动生电动势，又可求感生电动势，其适用范围较广。从公式 (2.2) 可推导公式 (2.1)，反之也可以从公式 (2.1) 推导公式 (2.2)，这说明了两个公式的统一性。但这种推导是有条件的，也就是必须保持磁场不随时间变化。一般说来，公式 (2.2) 是由实验得到的，不能由公式 (2.1) 导出。课本中强调公式 (2.2) 是有道理的。

四、接通和断开电路的暂态电流

为了理解课本中图 2.25 和图 2.26 的演示现象，必须研究由自感现象引起的、不能忽略的接通和断开电路时的暂态过程。

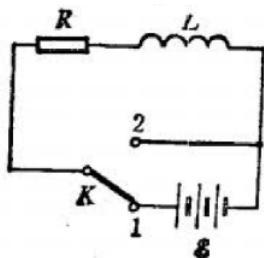


图 2.27

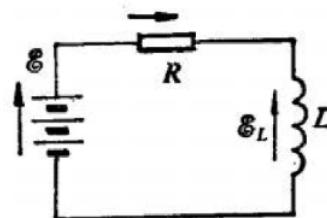


图 2.28

设一回路如图 2.27 所示，回路中包含电动势为 \mathcal{E} 的电源、电阻 R 、自感为 L 的线圈。将 K 合到 1 时，即将电源突然引入 RL 电路，电路可简化为图 2.28 所示，在这个电路中，变化的电流通过线圈 L 时产生的自感电动势为

$$\mathcal{E}_L = -L \frac{di}{dt}$$

因此，在任何时刻，电路中的总电动势为

$$\mathcal{E} + \mathcal{E}_L = \mathcal{E} - L \frac{di}{dt}$$

根据欧姆定律可得

$$\mathcal{E} - L \frac{di}{dt} = iR$$

即

$$L \frac{di}{dt} + iR = \mathcal{E}$$

这个方程的解为

$$i = \frac{\mathcal{E}}{R} \left[1 - \exp \left(-\frac{Rt}{L} \right) \right]$$

由此式可知，只有电路接通足够时间，在电路中才能建立起稳定电流，其值为 $i_0 = \mathcal{E}/R$ 。当电路接通时，电路中的电流 i 只能是逐渐地增加到 i_0 ，而且 L/R 的比值越大，增到 i_0 所需时间就越长。因此课本中图 2.25 的实验中，所用自感线圈的 L 越大，灯泡 A_1 的电阻 R 越小，电流增长越慢，演示效果就越好。

如图 2.27 所示. 当电流达到稳定值 i_0 后, 如果将 K 迅速拨到 2 的位置, 即将电源从电路中撤除, 此时电路中 $\mathcal{E} = 0$, 则电流的衰减由下述方程决定

$$L \frac{di}{dt} + iR = 0$$

这个微分方程的解为

$$i = \frac{\mathcal{E}}{R} \exp\left(-\frac{Rt}{L}\right)$$

或为

$$i = i_0 \exp\left(-\frac{Rt}{L}\right)$$

上述表明, 断开电源时, 暂态电流是按指数规律衰减的, 虽然电源已被切断, 但电路中的电流不立刻停止.

根据暂态电流的衰减规律, 我们来说明课本中图 2.26 的实验. 设自感线圈 L 的电阻为 R_0 , 灯 A 的电阻为 R , 因一般 $R_0 \ll R$, 因此可设 $R = nR_0$. 在电流稳定时, 如果通过 R 的电流为 I_1 , 通过 L 的电流为 I_2 . 因 L 与 R 并联, 则 $I_2 R_0 = I_1 R$, 可得 $I_2 = nI_1$. 当电源突然断开时, 原来通过 R 的 I_1 立即消失. 但是, 由于线圈 L 和灯泡 A 成为一个闭合电路, 从而有暂态电流 I' 存在. 显然,

$$I' = I_2 \cdot \exp\left(-\frac{Rt}{L}\right)$$

即

$$I' = nI_1 \exp\left(-\frac{Rt}{L}\right)$$

由此式可知, 通过灯泡 A 的电流 I' , 它的最大值 $I'_m = nI_1$. 因此在电路断开后的一个暂短时间内, I' 可以超过原来通过它的电流 I_1 , 从而灯泡亮度增加. 此后, 由于暂态电流随时间迅速衰减并趋于零, 灯泡才熄灭下来. 如果灯泡的电阻 R 小于线圈的电阻 R_0 , 则 $I_2 < I_1$, 断开后暂态电流从 I_2 开始衰减, 就不会有大于原来电流 I_1 的时候, 也就不会出现灯泡更亮的现象. 可见, 要做好这一演示实验, 必须使灯泡电阻 R 大于线圈电阻 R_0 , 而且 R/R_0 的值越大, 实验效果越好.

五、法拉第

法拉第 (1791—1867), 英国著名物调学家和化学家. 法拉第生于伦敦一个铁匠家庭, 由于家境贫苦, 12 岁就当报童, 后又当书店徒工, 他利用业余时间学习文化知识. 1812 年, 法拉第听了大化学家戴维的讲演以后, 产生了参加科学工作的愿望. 第二年在戴维的帮助下, 进入皇家学院实验室, 作戴维的助手. 1813 年随戴维出访和讲学, 受到了很好的锻炼和提高. 1825 年任英国皇家学院实验室主任, 1824 年被选为伦敦皇家学会会员, 他还是法国科学院院士, 1846 年他荣获伦福德奖章和皇家勋章.

法拉第在物理学方面的主要贡献是对电磁学进行了比较系统的实验研究. 他发现了电磁感应现象, 总结出了电磁感应定律, 他发明了电动机和发电机, 发现了电解定律, 建立了电场、磁场、力线等重要概念.

在他写成的《电学实验研究》的著作中, 收集了 3362 个条目, 详细地记述了他做过的实验, 总结出带有规律性的成果, 这是一部珍贵的科学文献.

法拉第在化学方面也做出了很大的贡献.

法拉第是靠自学成为科学家的。他在科学的征途上走了半个多世纪，实现了自己的献身于科学的诺言。

后人为纪念法拉第，用他的名字命名电容的单位，简称“法”。

第三章 交流电

第一节 教学要求	68
第二节 教学建议	69
一、交流电的基本知识	69
(一)交流电的产生	70
(二)交流电的变化规律	70
(三)表征交流电的物理量	70
二、交流电路的基本知识	71
(一)纯电阻电路	71
(二)纯电感电路与纯电容电路	71
三、变压器及交流电的整流与滤波	72
(一)变压器	72
(二)电能的输送	73
(三)交流电的整流与滤波	73
四、三相交流电和感应电动机	74
(一)三相交流电	74
(二)三相电路的连接	75
(三)感应电动机	75
第三节 实验指导	75
一、演示实验	75
(一)线圈在磁场中旋转产生交流电	75
(二)用示波器观察交流电的波形	76
(三)纯电阻电路中电阻的作用	77
(四)电感对交流电的阻碍作用	77
(五)在纯电感电路中, 电流强度跟电压成正比	78
(六)感抗与自感系数及交流电的频率有关	78
(七)交流电能够通过电容器, 电容对交流电的阻碍作用	80
(八)容抗跟电容和频率有关系	80
(九)三种交流电路中电流跟电压的相位关系	81
(十)交流电的有功功率与视在功率	85
(十一)用并联电容器的办法来提高功率因数	85
(十二)整流的演示	86
(十三)滤波的演示	87
(十四)变压器的构造与工作原理	88
(十五)高压输电	89
(十六)三相交流电的产生	90

(十七)星形接法与三角形接法的相电压与线电压	91
(十八)旋转磁场和感应电动机原理	92
二、学生实验	93
(一)用示波器观察交流电的波形	93
(二)用示器观察交流电的整流和滤波	93
(三)研究变压器的作用	94
三、课外实验活动	96
(一)自制测电笔	96
第四节 习题解答	96
一、练习 -	96
二、练习二	98
三、练习三	100
四、练习四	101
五、练习五	101
六、练习六	103
七、练习七	104
八、练习八	106
九、练习九	107
十、练习十	109
十一、习题	110
第五节 参考资料	114
一、我国电力工业发展的一些资料	114
二、交流电的平均值与有效值	116
三、变压器匝数的问题	117
四、特斯拉 (1856—1943)	118

第一节 教学要求

本章讲述交流电的性质、规律以及有关交流电的实际知识。这些知识，不仅是前面所讲的电学基础知识的具体运用，具有综合性，而且能够广泛联系实际，有较强的实用性，基于上述两个特点，本章知识对扩展学生的知识面，培养学生运用知识的能力是很有好处的。

本章教材可分为四个单元。第一单元包括第一节到第三节，讲述交流电的产生和变化规律，以及表征交流电的物理量。第二单元包括第四节到第八节，讲述交流电路的基本知识。第三单元包括第九节到第十二节，讲述变压器、整流、滤波。第四单元包括第十三节到第十五节，讲述三相交流电和感应电动机。

交流电的变化规律和表征交流电的物理量，是有关交流电的最基本的知识，是学习本章内容的基础，因而是本章的重点。

交流电的产生是建立在电磁感应知识基础上的。教学时要着重讲清线圈在磁场中转动时产生的电动势和电流方向的变化。要明确中性面的位置，知道线圈经过中性面时，电动势和电流的方向要改变。考虑到用切割磁力线来说明线圈中产生感生电动势和感生电流更便于理解，而且计算感生电动势也比较方便，因此这里是用一段导体切割磁力线来说明交流电的产生的。在教学时不要求用磁通量的变化对此作补充说明。

用图象可以形象地表示交流电的变化规律，在教学中应使学生熟悉图象：看到图象就能想象到交流电的变化情况；根据正弦交流电的三要素，能写出瞬时值表达式，会画出图象；反过来，根据图象，能确定三要素，知道相位超前或落后，写出瞬时值表达式。

交流电的最大值和有效值的关系，教学中只要求了解，不要求推导。交流电的相位，是描述某一时刻交流电所达到的状态的物理量，是比较抽象、难理解的概念。教学中可与机械振动中学过的相、相差的概念对比，并可具体分析两个装在同一转轴上、以恒定相差在匀强磁场中转动的线圈，比较它们的感生电动势变化规律的图象和表达式，帮助学生对相和相差的概念获得较具体的认识。

相、相差、电感和电容对交流电相位的影响、交流电的功率等内容，明显地表现出交流电的特点，这些内容虽然教学要求不高，却难于为学生所接受，属于选讲内容，讲述这些内容时，要通过演示实验加强感性认识，使学生在事实上承认交流电的特点。

本章讲述理想变压器的作用原理，不涉及实际变压器，由于变压器的输入电流随输出电流改变的道理在中学很难讲清楚，教学中不宜再补充讲解这个内容。

对三相交流电，要求学生明确知道三相电的三个电动势的相位关系，熟悉三相交流电的图象，电源的连接，课文只讲了星形连接，而把三角形连接安排在练习中，这是因为电源的三角形连接只用于负载相同的情况，一般人接触机会较少，教师认为有必要也可以在课堂上讲一讲。关于电源的连接，主要讲述线电压和相电压的关系。关于负载的连接，主要讲述线电流和相电流的关系。

感应电动机一节，教材中讲述了三相交流电产生旋转磁场的原理。这个问题讲起来要占用较多的时间，教师可根据实际情况灵活处理，时间紧可以不讲，相应的练习也可以不做。

为使学生对交流电的波形、整流、滤波有深刻的印象，同时练习示波器的使用，教材安排了两个学生实验：“用示波器观察交流电的波形”、“用示波器观察交流电的整流和滤波”。如果没有条件做分组实验，希望教师做好演示让学生观察，使学生看清波形，知道如何使用示波器。

这一章知识涉及的面较宽，但大多数知识都不作深入、细致的讨论。教学时应根据学生情况掌握教学要求的分寸。在介绍实用知识时，要着重讲清它的基本原理，不要过细地讲技术问题。

本章的教学要求如下：

1. 了解交流电产生的原理，掌握正弦交流电的变化规律。理解交流电的瞬时值、最大值、有效值、周期和频率等概念，理解相和相差的概念。
2. 了解纯电阻电路、纯电感电路、纯电容电路中电流与电压的关系。了解感抗和容抗。
3. 理解变压器的原理，掌握理想变压器的电压、电流公式，了解电能输送的原理。了解交流电的整流和滤波原理，知道常见的整流电路。
4. 了解三相交流电的产生和电路连接，了解感应电动机的工作原理。

第二节 教学建议

一、交流电的基本知识

这一单元讲述交流电的产生、交流电的变化规律和表征交流电的物理量，是这一章的核心知识，除有效值概念外，其他内容都是前面所学知识的综合运用。这一单元实际上是围绕交流电变化规律而展开的。

(一) 交流电的产生

初中已学过交流电的产生，这节教材带有复习性质。在教学中应注意这样几个问题：

着重从分析线圈的每边切割磁力线的情况出发，先弄清哪些边产生感生电动势，其方向怎样；然后弄清在旋转一周过程中，感生电动势在哪些位置为零，在哪些位置最大，在何处改变方向；最后讨论交流电的产生过程，使学生获得清晰、完整的物理图景。在这里可以配合演示实验，但作为高中学生，在已学完前面几章电学知识之后，应当注意训练他们的分析推理与想象能力。

本节教学可以提出“闭合线框中产生的感生电动势大小与哪些因素有关”的问题，让学生定性分析，以激发学生思考和进一步讨论的兴趣。

这一节提到的实际发电机，是介绍性的，可以通过出示挂图、照片或结合模型或小型发电机实物进行介绍，不要求太具体、细致。

这一节教材及下一节教材在编写上没有采取从磁通变化角度分析交流电产生的方法，这是因为对于切割情况产生感生电动势，用公式 $\mathcal{E} = B\ell v \sin \theta$ 讨论电动势比较方便。教学中不要求用 $\mathcal{E} = \Delta\phi/\Delta t$ 来讨论。

(二) 交流电的变化规律

这是本章也是本单元的重点教学内容。这一节教材是按以下三个层次展开的，第一个层次是从 $\phi_0 = 0$ 的简单情况出发进行定量讨论；同时引出交流电的瞬时值和最大值的概念。第二个层次讨论 $\phi_0 \neq 0$ 的情况，得出交流电的一般表达式，并引出正弦交流电的概念。第三个层次是从正弦交流电一般表达式出发，绘出正弦交流电图象的表达方法，这一节所用知识都是学生学过的物理与数学知识，教学中要注意复习有关的数学知识，使学生能够较好地把所学的数学知识迁移到物理中来。

在讲解交流电图象这部分内容时，主要难点在于学生不能正确地根据图象写出表达式或根据表达式画出图象。虽然学生在数学课中学习过正弦函数图象，但用来理解正弦交流电的变化，还需要着重讲述图象的物理意义。

(三) 表征交流电的物理量

教学要着重通过对交流电表达式的分析，并可与简谐振动作适当的类比来进行。这一节的重点内容是相与相差的概念。

有效值概念是建立在交流电与直流电（稳恒电流）在通过相同电阻时产生的热效应相当的基础上的，虽然有效值与最大值的关系并不要求在教学上加以推导，但要求学生能熟练换算。应使学生知道交流电表（电压表与电流表）测定的都是交流电的有效值。

相和相差的概念是这一节教学的重点与难点。为了使学生能够较好理解相和相差的概念，可以通过分析两个相同矩形线框（二线平面成一角度）绕同一转轴在匀强磁场中以相同角速度一起旋转的实例，让学生讨论两个线框中感生电动势的变化规律有何异同，并写出表达式，画出图象。在讨论中，学生容易得出它们的差异：在表达式中初相不同，同一时刻即时值不同，到达最大值时间有先后，而最大值、周期频率都相同。这样教师就容易引导学生认识，由 $\omega t + \phi_0$ 决定某一时刻 t 交流电的即时值，从上例来说，也就是反映了导线切割磁力线的角度不同。进而指出 $\omega t + \phi_0$ 这个相当于角度的量称为相。怎样定量反应它们到达最大值先后的差异呢？对于上述情况来说，当一个线框中的交流电到达最大值时，另一个还需转过一个角度 $\phi = \phi_2 - \phi_1$ 才

能到达最大值，从而使学生领会相差实质上反映两个交流电在变化过程中的步调存在时差。在此基础上再进一步给出一般定义，以及超前或滞后的概念。教学时应指出只有同频率的交流电才能比较变化过程中的相差，对不同频率的交流电是无法比较相差的。

二、交流电路的基本知识

这一单元主要是从电路角度说明交流电与稳恒电流的区别，使学生了解这些区别，是本单元教学的重要目的。为学生知识基础所限，这一单元主要是通过演示实验、定性分析介绍交流电路的基本知识，通过纯电感、纯电容电路建立容抗和感抗概念，了解容抗和感抗对交流电相位的影响，了解交流电的功率概念。这一单元重点是建立容抗和感抗概念。

(一) 纯电阻电路

这一节从知识上讲没有什么新内容，但课桌上安排了三个演示实验，目的是为后面研究纯电感电路和纯电容电路提供了研究方法，因而教学时应予以注意。第一个演示实验提出了通过实验研究电路中电压和电流有效值之间关系的方法，第二个演示实验提出了通过实验研究电路中电压和电流相位关系的方法。第三个实验则提出了研究交流电功率与电压、电流有效值关系的实验方法。同时，这三个实验也给学生提供了与后类似实验进行比较的感性知识。

(二) 纯电感电路与纯电容电路

这两节内容是本单元教学的重点。

做好演示实验是上好这两节课的重要保证。但教师应通过这两节课，重点使学生理解感抗 X_L 与频率 f 、自感系数 L 成正比及容抗 X_C 与频率 f 、电容 C 成反比的物理原因，防学生不加理解地死记两个关系式。教学中需要提醒学生，必须将频率、自感系数及电容等单位化为国际单位制主单位才能代入公式计算。

在解释电感对交流电产生的阻碍作用以及感抗和自感系数的关系时，要着重从电感的物理特性即由于电磁感应而产生自感电动势阻碍电流变化这一点说明，不宜进一步讨论自感电动势的方向和大小问题。

电感和电容对交流电相位的影响这一节是选学内容，教材只要求通过演示实验使学生认识在纯电感电路中电流落后电压 $\pi/2$ ，在纯电容电路中电流超前电压 $\pi/2$ 这两个结论，并使学生懂得在一段含电阻、电容与电感的交流电路中，不能简单套用直流电路的总电压、总电流等公式。

为了使学生对交流电路不能简单使用直流电路的有关总电压、总电流、总电阻公式有一个深刻印象，可以增加一个演示实验：实际测量一个电感（或电容）与电阻的串联电路上各部分的电压，通过实测，可明显看到 $U_{\text{总}} < U_L + U_R$ 。这说明交流电路上，串联各部分电压之和并不一定与总电压相同。这个实验可用一个 40W 日光灯镇流器与一个 40W 白炽灯串联后接入 220V 市电后进行。

“交流电的功率”这一节教材也是选学内容。教材通过演示实验建立有关交流电功率的几个概念，并不要求说明道理，主要是使学生对交流电功率的有关概念有一个初步了解。对电路中电压与电流有效值乘积 UI 大于电路实际功率 P 的现象，教学中不要求加以解释。

在进行本单元知识小结时，可以将三种纯电路从对电流阻碍作用、欧姆定律表达式、电流电压相差、有功功率等方面列表比较。学生情况较好的，可以由学生自己完成。

三、变压器及交流电的整流与滤波

本单元的重点是关于变压器的基本知识，在这一单元教学中仍需十分注意研究问题的方法。这一单元相当多的内容是属于学过知识的综合运用，因此有的问题要尽可能由学生讨论分析解决，也可以在学生自己阅读的基础上，教师抓住主要问题讲解并配合进行一些演示实验。

(一) 变压器

由于现行教材初中部分不讲变压器的知识，因而变压器的教学显得更加重要了。在进行本节教学时，应注意这样几个问题：

变压器的工作原理是建立在互感现象基础上的。可以按互感现象、变压器结构（主要是铁心作用）、定性分析工作原理这样的思路进行教学：先画出如图 3.1 甲所示的两个线圈，根据电磁感应现象介绍互感现象，然后在图中补画入铁心（图 3.1 乙）。说明铁心的增强磁通和使磁路闭合两个作用。线圈中加入铁心后，在相同电流情况下磁感应强度可比无铁心时大几千倍，然后讨论原线圈中通入交流电时的情况，最后应出示一些实际使用的变压器，包括心式（教学用演示万用变压器口字形铁心）和壳式（学生实验用的小变压器，山字形铁心），以加强学生的感性认识。

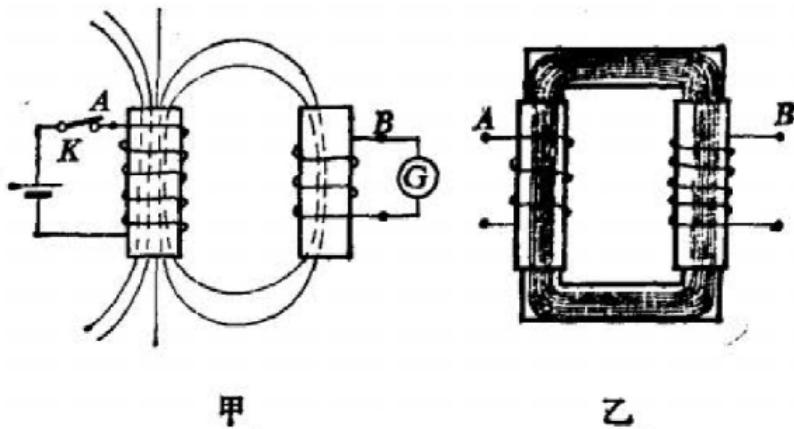


图 3.1

在讨论变压器变压比公式时，教师应注意，教材中并不强调严格的推导，在进行教学时，也不宜过分深究推导的严密性。对于“在原线圈中，感生电动势 \mathcal{E}_1 起着阻碍作用，跟加在原线圈两端电压 U_1 作用相反，是反电动势。原线圈的电阻很小，如果略去不计，则有 $U_1 = \mathcal{E}_1$ 。”这一段话，可以类比地举一个直流电动机接入直流电时，电源端电压与电动机电势似相等的例子来说明，不必展开讨论。如果在前面没有选讲反电动势这一节，可以通过一个直流电源向蓄电池充电的例子简要说明一下反电动势的概念。

为了加深学生对变压比公式的理解，在课堂上可以增加一个演示实验：利用一个教学演示用大型可拆式变压器（告诉学生初级匝数），并用大型示教交流电压表测量初级电压。用一根长两米左右的普通塑料电线，当场在铁心另一侧绕上二十余匝作副线圈，闭合好铁心，并另用一大型示教交流电压表与副线圈塑料电线两端相接，接入电源，由学生直接观察原副线圈电压比与匝数比。然后再打开铁心，继续增加匝数进行实验。做好这个实验有很多好处，很重要的一点是学生现场看到了变压器的线圈绕制，大大加深了对变压器的实际印象，对匝数比有了感性认识。

在讨论课本上电流比公式时，特别需要指出的是应从一般能量守恒出发，首先使学生明确，副线圈向负载提供的电能是由原线圈吸收电源能量后通过电磁感应现象转化而来的，如果不计转化过程中各项能量损失，应当有 $U_1 I_1 = U_2 I_2$.

在介绍几种常用变压器时，应出示实物，特别是自耦变压器的实物。而且对该变压器的滑动端与线圈是怎样接触的，应向学生介绍。将课本上图 3.27 调压变压器的示意图改为图 3.2 较好，因为实际调压器都兼有升降压作用。

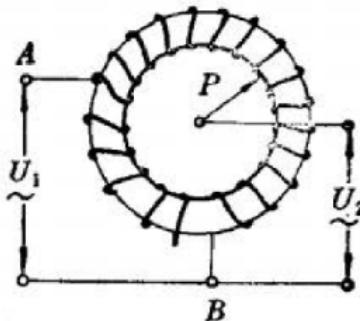


图 3.2

(二) 电能的输送

从知识讲，这一节是学过知识的综合运用。在进行本节教学时，主要地是应引导学生自己阅读与讨论，注意训练学生论述两种方案选择的理由。应使学生抓住技术理由与经济理由这两个方面考虑实际问题。在本节教学中，有些学生搞不清输送功率的含义，在求通过导线上电流时，往往将输送电压除以导线自身电阻当作通过输电导线上的电流。教在讲解时，应着重从建立物理模型和研究对象的角度进行说明，输电过程的最基本模型是由输送端（发电机等）、输电线及用户组成，如图 3.3 所示。从图中可以清楚地看出：

$$\text{输送端电压} = \text{导线损失电压} + \text{用户实际电压}$$

$$\text{输送功率} = \text{导线损失功率} + \text{用户实际获得功率}$$

换言之，输送电压与输送功率是以由导线、用户组成串联电路为研究对象的，而导线损失功率、导线损失电压是以导线为研究对象的，只有输送电流由于是串联电路，各部分都相同。造成前述错误的原因在于运用公式时，代入的各量并非是同一研究对象上相应的物理量。

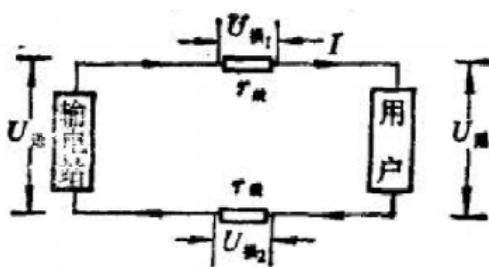


图 3.3

(三) 交流电的整流与滤波

这两节主要是介绍将交流电转变为直流电的一种方法。在讲述整流电路和滤波电路工作原理时，应充分运用学生已学过的知识，着重从分析方法上进行教学，同时尽量做好演示实验。

在讲述二极管整流电路时，注意使学生掌握以下两点分析方法：

1. 将二极管与负载电阻 R 串联，二极管处于正向导通时，可将二极管看作阻值远小于 R 的极小电阻，根据串联电路特点，电压主要分配在电阻 R 上，此时电流 I 可由电源电压和电阻 R 决定。当二极管反向截止时，可将二极管看作阻值远大于 R 的极大电阻，电压主要分配在二极管上，此时电流由电源电压与二极管反向电阻决定，显然几乎为零。
2. 判断二极管是正向导通还是反向截止要从二极管两极电势高低的比较进行判断，只有正极电势高于负极电势，极管才能导通。掌握了以上两点，几种整流电路的原理就容易理解了。由于桥式整流电路不大好画，学生也不易弄清四个二极管的接法，教师画时可以告诉学生简单的记忆方法：正负相连成两串（课本图 3.35 中 D_1 、 D_4 与 D_2 、 D_3 ），正正相连只能进 (D_3 、 D_4 正极)，负负相连只能出 (D_1 、 D_2 负极)，又进又出 (D_1D_4 , D_2D_3 正负相连处) 接交流。

在讲述滤波电路时，课本为了便于和后面检波电路衔接，首先讲述了脉动直流电可以分解为直流成分和若干交流成分。几种滤波电路的原理介绍主要是从电路分析角度进行解释的，教师在讲解时，可以在分析前或分析后简要指出电容与负载并联、电感与负载串联所起滤波作用的物理实质仍是电容的充、放电现象与线圈自感阻碍电流变化现象。

值得注意的是，在讲述整流电路时，由于电路比较复杂，有些学生始终弄不清电路究竟在讨论什么，因此教师在一开始讲半波整流到最后讲完整流滤波电路时，必须明确指出，整流器是一种换能电路，输入交流电，输出直流电。在每讲一种电路时，要先交待哪是交流电输入端，哪是直流电输出端，输出端正负极怎样，需要直流电的负载接在什么地方，最好每画一个图就用虚线框把这些标出来，如图 3.4 所示，使学生获得清晰的印象。

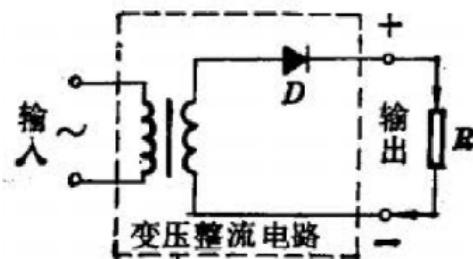


图 3.4

四、三相交流电和感应电动机

这一单元的内容是常识性的。因此，在教学时，尽可能处理得简捷一些。抓住主要教学要求，避免过多展开，另一方面要尽可能作好演示实验，以加深学生对某些结论的理解。

(一) 三相交流电

这一节主要是使学生了解三相交流电的产生，通过三相交流电的表达式和图象明确三相交流电的相差，了解三相四线制送电的道理。对于三相交流电的产生、表达式与图象，学生根据前面知识可以自己分析得出，有条件的学校可以演示一下三相交流电各相的波形。对于三相交流电，也可以通过实验使学生有个感性认识，将三相交流发电机的三相绕组分别与三只电流计连接起来，缓慢摇动发电机，通过观察现象可以得出：

1. 三相交流电最大值相同（电流计指针最大偏角相同）；

2. 三相交流电周期相同（指针摆动频率相同）；
3. 三相交流电的位相不同（各电流计指针偏转到最大角度的时刻不同）。

如果用示波器演示三相交流电各相的波形，可以看出三相之间的相差。对于三相四线制供电，最好能通过观察实际输电线路，以使学生尽可能结合实际了解如火线、地线与负载的接法这样一些密切结合实际的知识。

（二）三相电路的连接

这一节的教学，主要应使学生明确以下几点：

1. 电源星形接法时，相电压与线电压的概念及两者关系。
2. 负载星形接法时，加在负载上的电压为相电压。
3. 负载星形接法时只有三相负载相同，才能省略中性线。
4. 负载三角形接法时加在负载两端电压为线电压，此时相电流与线电流不等。

在讲解电源星形接法时，最好演示一下实际供电电路相电压与线电压的测量，既可弄清关系，也使学生获得实际知识。在教学中还应向学生指出，无论负载采取什么接法，每个负载上的电流均可根据前面讲过的知识求出，当然只能求纯电阻、纯电容或纯电感电路中的电流。

（三）感应电动机

这一节教材主要研究两个问题：

1. 在旋转磁场作用下，闭合导体环跟随转动这一感应电动机的原理。这一点，教师可以在演示实验基础上提出几个问题，由学生讨论解决。在讨论中应使学生明确，感生电流产生原因、方向判断、受力判断、转动方向及为什么存在转速差异等问题。至于转动平衡与平衡破坏时产生的现象不宜在课堂上讨论，可作为课外活动的讨论内容在课外进行。
2. 利用三相交流电产生旋转磁场的原理。这个道理分析起来并不复杂，只是较烦，关键是弄清线圈头尾和电流正负流向在图中的表达。至于实际感应电动机结构，出示一下实物或图片作一扼要介绍就可以了。

第三节 实验指导

一、演示实验

（一）线圈在磁场中旋转产生交流电

这个实验可以用 J2416 型电机原理说明器配合大型演示用灵敏电流计进行演示。若使用 J0401 型大型演示电表，则应先将选择扭扳至“G”挡，并将指针调至中央位置。由于电机说明器磁极由励磁线圈通电产生，因此需 6V 蓄电池或低压直流电源（J1201 型）供电，在实验时还需先将电刷位置调整到集电环整环部分，并保持良好接触如图 3.5 所示。演示时，要使转子线圈均匀地旋转，尽量使它的转动周期接近电表指针系统的自由振动周期。这时可以清楚看到，电表指针在中央零点左右摆动，说明圈中的感生电流是交流电。演示中，应注意使学生观察线圈在磁场中的位置与交流电瞬时值的关系，注意电流最大值时、电流换向时线圈平面所处位置。进一步提高转速可发现周期变短；再继续增大转速，指针将几乎不动了。从而使学生了解不能用磁电式电表直接测量交流电，也为后面讲简单收音机时，未经检波的高频调幅电流不能使耳机发声的原因作好感性知识的准备。

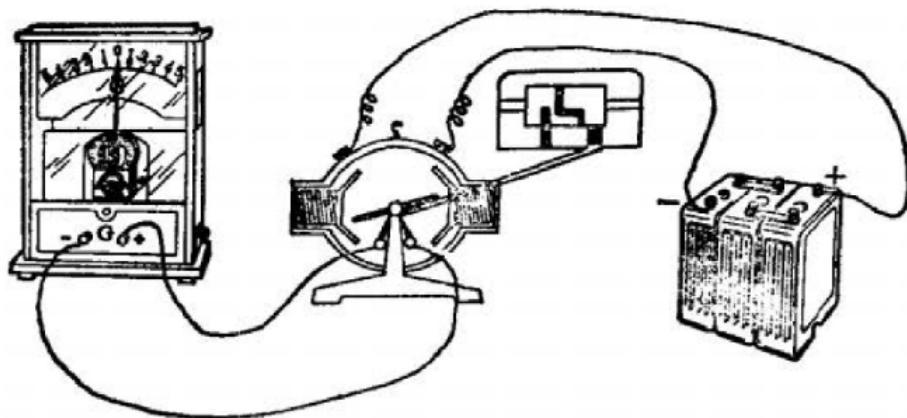


图 3.5

这个实验也可利用自制仪器代替。仪器制作方法与第一章实验指导中演示电流计工作原理中介绍方法相同，只是不需将线头留长绕制游丝及安装指针了，将线头漆皮除去后直接在转轴上紧绕 4—5 匝固定即可，转轴两端及其支架就是电源两端，实验时，用导线将这两端与大型灵敏电流计相连，并用万用支架附件固定卡将底座与桌子紧固，以防止整个装置滑动。为了使线圈旋转均匀稳定，可以用一段粗棉线在轴上绕两匝，两手拉紧两端，缓慢均匀地向一个方向移动，线圈就会均匀地旋转起来（图 3.6）。

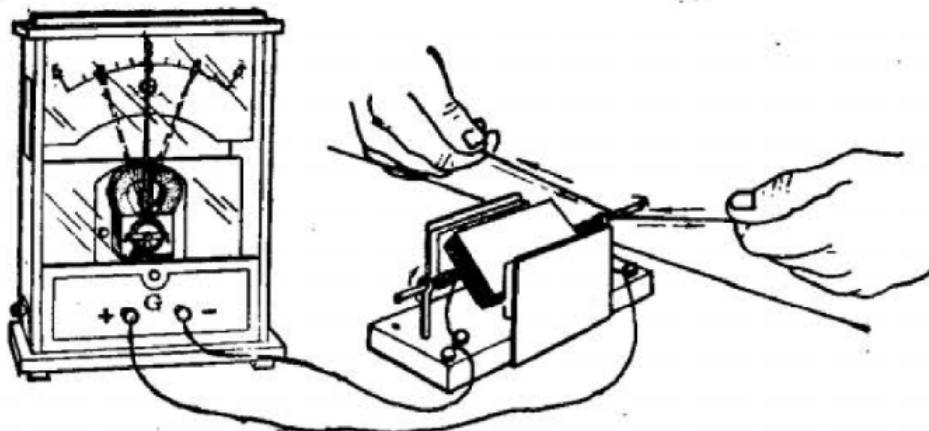


图 3.6

(二) 用示波器观察交流电的波形

配合正弦交流电图象的教学，可利用示波器观察照明电路的交流电波形。实验时，将低压交流电源（J1201 型）输出 2—4V 的交流低压，接至示波器 Y 输入端。示波器通电预热后调好亮度与聚焦，将 Y 衰减拨至 100(或 10) 挡，Y 增益调节至竖直亮线范围在屏上坐标格之内，扫描频率拨至 10—100Hz 挡，X 增益调节至亮线宽度也在屏幕方格范围之内，调节一下频率微调即可观察到稳定的正弦交流电波形，一般以出现两个完整波形效果较好。如果用 J2458 型教学示波器时，亮度较为理想，用其他各种型号的示波器也可。实验时，不要利用示波器观察手摇交直流发电机发出的交流电波形，因为此种发电机由于结构原因发出的交流电并不是正弦变化的交流电，且频率不易稳定、波形不好，效果不理想。

如果由于电网的原因，使交流电波形出现畸变，则可改用教学信号源输出的正弦交流信号。

(三) 纯电阻电路中电阻的作用

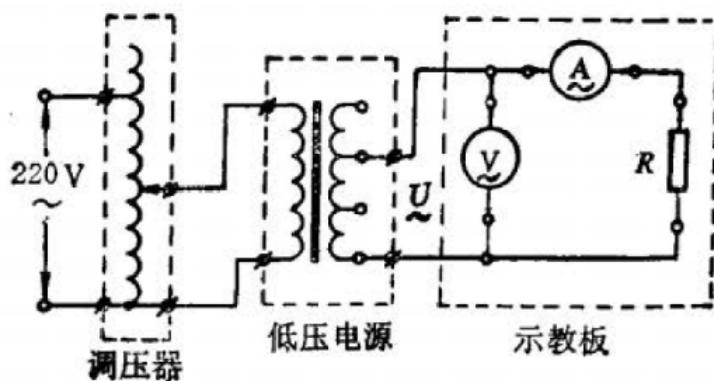


图 3.7

这个实验主要是为了和后面感抗、容抗相比较而进行演示的，因此需在数据选择上作些考虑，实验电路如图 3.7 所示。如果交流电压表与交流电流表都采用 J0401 型示教电表，其量程应选交流 25 伏与交流 1 安挡，电阻可选 J2355 型滑线变阻器（阻值 50 欧，额定电流 1.5 安）或阻值 30 欧左右、额定功率 10 瓦的线绕电阻，电源部分，可将 J1201 型低压电源接在一自耦调压变压器输出端，通过调整低压电源输入电压来控制低压电源交流（20 伏挡）的实际输出电压，以便于读数选择。实验时，先将变阻器阻值调整在 30 欧左右，调压器调压手柄位置调整在 50 伏位置左右。插上调压器电源，再开启低压电源的开关，观察伏特计示数。再调整调压器手柄位置，使伏特计示数分别取 5 伏、10 伏、15 伏、20 伏，读出相应电流值，即可验证交流电路中电阻仍服从欧姆定律。由于电阻取值 30 欧左右，其电流值变化在 0.2 至 0.7 安之间，演示效果较好。图 3.7 中右边虚线框所示部分可以作一示教板，图中输入端、伏特计符号两端、安培计符号两端及电阻符号两端均用固定接线柱。实验时，逐一接入，以加强演示效果。

(四) 电感对交流电的阻碍作用

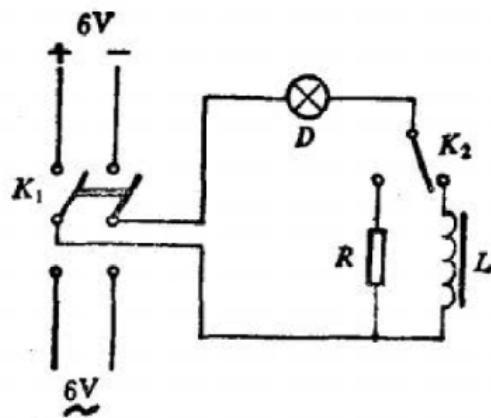


图 3.8

这个演示实验的电路如图 3.8 所示，可以做一个示教板。双刀双掷开关 K_1 ，单刀双掷开关 K_2 ，6—8 伏的小电珠 D ，灯座均固定在示教板上，在示教板上画出 R 、 L 位置并在两端引出接

线柱. L 可用 J2423 型可拆变压器 400 匝绕组 (绿色线圈). 使用时, 从变压器上拆下该线圈, 只在其中插上条形铁心部分, 再用导线将 400 匝绕组 (0、400 两个接线柱) 接入示教板, 这个绕组直流电阻约 3 欧. R 可用 J2354 型滑线变阻器 (10 欧, 2 安), 为便于对比, 实验前要将电阻调至 3 欧. 为加强演示直观效果, 直流电源用 6 伏蓄电池 (或四节新的 1 号干电池串联), 交流电源仍采用上一实验的办法, 将低压电源输入端接至调压器, 低压电源交流输出端拨至 8 伏挡, 再利用调压器调压控制 8 伏挡的实际输出电压.

实验时, 先将 K_2 拨至 R 端, 再将 K_1 分别拨至交流与直流电源, 观察到 D 的发光相同, 表明交流电压有效值与直流电电压相同. 然后将 K_1 拨至直流电源端, 将 K_2 多次重复接 R 与 L 端, 发现 D 发光相同, 说明线圈 L 在直流电路中所起作用与 R 相同. 最后将 K_1 拨至交流电源端, 再多次将 K_2 分别接于 R 与 L 端, 可看到由于电感线圈对交流电的阻碍作用而使 D 发光显著减弱, 说明了电感对交流电的阻碍作用.

(五) 在纯电感电路中, 电流强度跟电压成正比

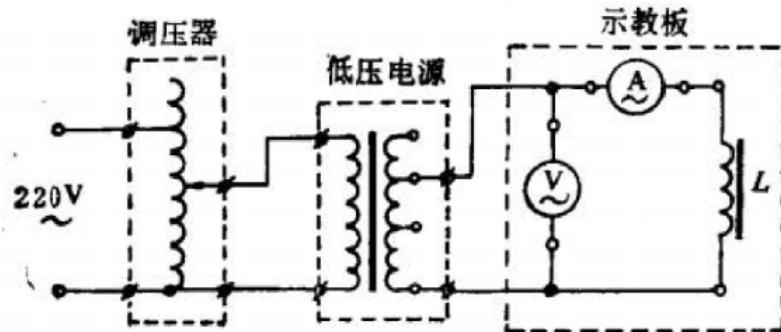


图 3.9

这个实验的演示较为困难. 首先是带有铁心的电感线圈的电感与通入的电流大小有关, 因而感抗亦随电流大小而变, 无铁心线圈电感量较大时, 其直流电阻又很难忽略. 中学的演示电源要用 50 赫兹低压电源, 又要受演示电表局限. 综合考虑上述因素, 实验可按下述方法进行: 实验电路如图 3.9 所示, 其中 L 仍用上一实验中所用 J2423 型可拆变压器 0—400 匝绕组, 但应装入闭合铁心, 伏特计用 J0401 示教电表交流 25 伏挡或 J0402 型示教电表交流 30 伏挡, 安培计使用 J0402 型电表交流 100 毫安挡. 电源仍采取低压电源输入电压由调压器控制的办法来控制低压输出 (仍拨在 20 伏挡) 实际电压. 实验时可取电压值为 5 伏、10 伏、15 伏进行读数, 相应电流值约为 16 毫安、32 毫安与 48 毫安左右. 由此说明纯电感电路中, 电流强度与电压成正比. 应向学生说明的是, 此实验中的感抗约 300 欧, 远大于自身电阻 3 欧, 因此主要阻碍作用的是感抗, 可将该电路看成纯电感电路.

(六) 感抗与自感系数及交流电的频率有关

实验电路可用图 3.9 所示电路, 只是将安培计换为一个 6—8V 小电珠. 实验时, 将输入电压调至 6V, 松开铁心紧固螺丝, 将铁心慢慢拉开, 可以明显看到小电珠逐渐明亮起来. 这表明由于铁心拉开, 自感系数变小, 感抗变小, 电路中电流变大.

演示感抗交流电频率有关, 需要一个变频电源, 下面介绍演示该实验的两种方法.

方法一: 自制一简易换流变频电源. 用一块双面铜箔板 (电路印制板), 加工成直径 2.5 厘

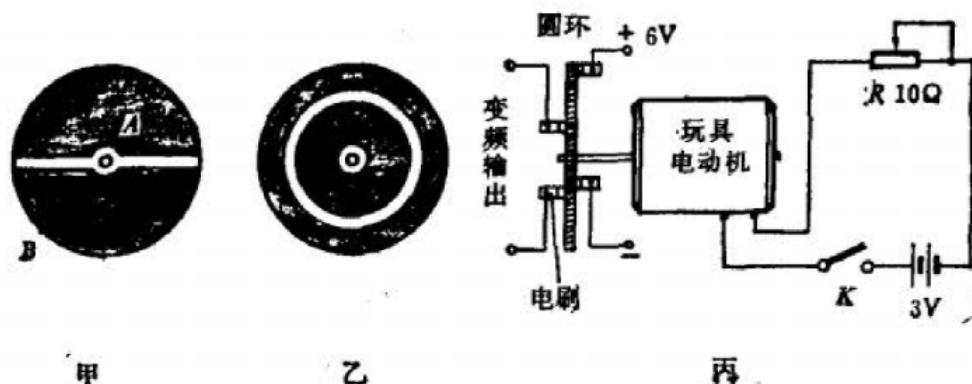


图 3.10

米左右的圆板，中央开一小孔，孔径由玩具直流电动机的转轴直径决定（略小于轴的直径）。铜箔板一面用喷漆（磁漆也可）画出两个半圆面，另一面画两个同心圆环如图 3.10 甲、乙阴影部分所示。待漆干透，将板浸入三氯化铁溶液中，使未涂漆部分铜箔腐蚀掉后，取出用清水洗净。板干燥后，除去漆皮，一面相当于集流环，另一面相当于换流半环。在 A、B 两点各钻一小孔，用导线将两半环分别与另一面里外圆环焊接好。再将玩具电动机轴与圆环中心孔套紧，将电动机固定在木底座上，并用弹性铜片（磷铜片）制四个电刷，分别固定在底座上并与半环、整环部分接触好，与里外整环相接触的电刷通过接线柱接 6 伏直流电源（取自电池或低压电源稳压输出），与两半环接触电刷处通过接线柱输出变频交流电，其波形为矩形波，电机部分通过变阻器（J2354 型 10 欧）与 3 伏直流电源相连，实验时，调节变阻器阻值，即可改变电机转速，从而改变输出交流电的频率。

在演示感抗与频率关系时，将 J2423 型变压器 100 匝绕组（闭合铁心）与 6—8 伏 0.1 安指示灯串联后接入这个变频电源。当电机转速增加时，小电珠发光减弱，表明电流减小，感抗增大，即频率越高，线圈感抗越大。

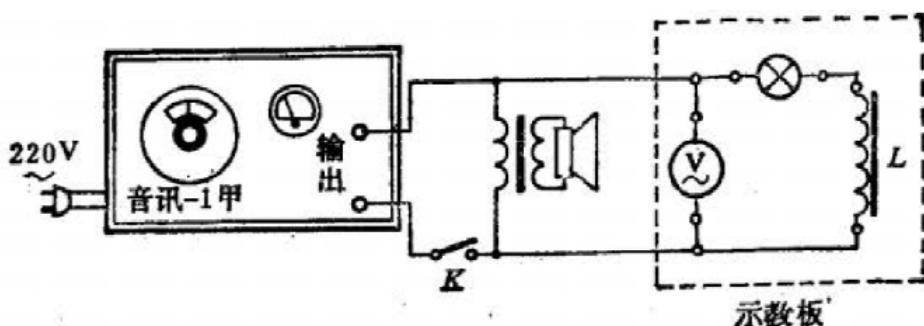


图 3.11

方法二：利用有功率输出的低频信号发生器如音讯-1 甲型、XFD-7A 型等作变频电源。将 J2423 型变压器 0—100 匝绕组（闭合铁心）与 6—8 伏 0.1 安指示灯串联后接在信号发生器功率输出端，输出电阻拨在“50 欧”挡。为了使学生了解到频率变化，可在输出端接一带有电子管收音机输出变压器（6P1 管所用）的喇叭，用音调高低说明频率高低，同时应并联一个大型演示电压表（J0401 型 25 伏交流挡），如图 3.11 所示。演示时，先将输出微调旋至输出最小（逆时针旋到底），频率调至 50 赫。开启电源后，预热两分钟，再接通 K，逐渐调节输出微调，直至

灯泡发光(不必太亮). 再调节频率, 使其逐步增高, 并略微调节一下输出微调以保证电压输出与原来相同. 此时, 喇叭发声音调变高说明频率变高、灯泡亮度减弱说明电流变小. 电压未变, 电路电流减小是由于感抗增大的缘故, 从而定性演示了感抗与频率的关系.

若无带功率输出的低频信号发生器, 可以用教学用信号源的低频信号输出接入 25 瓦扩音机的唱片输入端, 以代替变频电源. 实验时, 从扩音机 16 欧输出端输出交流信号. 特别要注意的是, 一定要在 16 欧输出端接一个 20 欧 2 安的滑线变阻器(用两个固定端)作假负载, 以免造成扩音机空载而被损坏. 由于教学信号源低频信号频率在 400 赫以上, 故电路中电感不宜过大, 否则感抗太大, 电流太小, 不好演示, 因此电感线圈可改用 J2423 型可拆变压器红色线圈的 0—200 匝绕组, 并且不用封闭铁心, 只将条形铁心插在线圈中使用, 小灯泡仍用 6—8V 的, 并可在电路中串入 100 毫安交流电流表(J0402 型). 在进行实验前, 应先将扩音机唱片音量控制旋钮旋至最小音量处(逆时针旋到底), 如果是电子管式的扩音机, 还应先开启扩音机预热 3 分钟, 然后再开启信号发生器, 逐渐旋动唱片音量钮, 观察输出电压升压是否正常, 并观察电路中灯泡亮度和电流计指示, 实验时也应将一带输出变压器的喇叭接在输出端作为频率变化的指示, 在利用扩音机作实验电源时, 其输出电压不宜超过 10 伏, 否则扩音机会因连续处于满负荷状态而损坏.

(七) 交流电能够通过电容器, 电容对交流电的阻碍作用

仍可做一示教电路板以加强直观性. 实验电路如图 3.12 所示, 图中 D 仍用 6—8 伏灯泡, 电容可用 200 微法、25 伏的两个电解电容负极与负极相连, 两个正极引线作为无极性电容的两端接入电路. 电源与实验方法同 4. 对现象应说明以下两点, 一是交流电路接入了电容器, D 发光表明交流电可以“通过”电容器, 而“通过”的物理实质是电容器充放电现象. 二是从 D 发光比直接接入交流电时弱, 说明电容对交流电有阻碍作用.

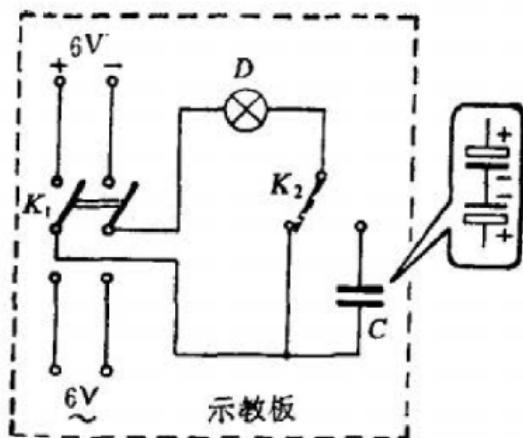


图 3.12

(八) 容抗跟电容和频率有关系

这个实验仍可利用上一个实验中的示教板. 将 K1 板向交流 6 伏端, K2 板向接电容端, 交流 6 伏端接线柱接入实验 6 方法一中所介绍的换流变频电源. 当改变直流电机转速时, 输出频率改变, 且频率越高, D 越亮, 表明容抗与频率有关, 即频率越高容抗越小, 若实验时再并联一个电容(仍用两个 200 微法 25 伏电解电容制成), 则可能在频率相同时, 电容越大, 灯泡越

亮. 定性演示了电容越大, 容抗越小的关系.

如果采用音讯-1 甲型等有功率输出的信号发生器, 或将教学信号源低频输入到 25 瓦扩音机代替信号发生器作为变频交流电源, 实验时使频率在几百至一千赫之间变化, 则电容应取小一些, 可将两个 20 微法、25 伏的电解电容两个同极相接串联当作一无极电容使用, 实验时输出电压仍以 10 伏以下为宜.

(九) 三种交流电路中电流跟电压的相位关系

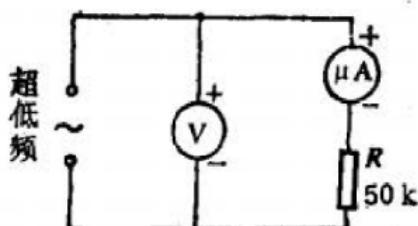


图 3.13

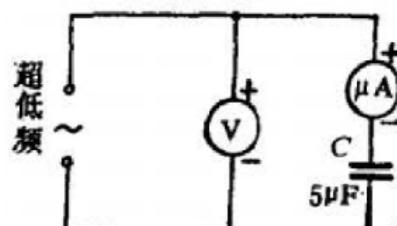


图 3.14

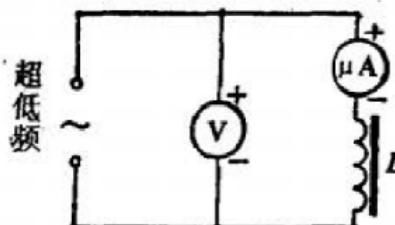


图 3.15

方法一：利用超低频电源与示教电表进行演示. 这三个实验的电路分别如图 3.13、图 3.14、图 3.15 所示, 所用伏特计均为 J0401 型演示电表直流 10 伏挡, 纯电阻与纯电容电路中所用微安表与纯电感电路中所用毫安表为 J0401 型演示电表直流 200 微安挡 (检流计) 和 100 毫安挡, 以上各表在使用前均需先调整指针下方的调零旋钮, 使指针位于中央零刻度. 在接入电路时必须注意电表“正”“负”接线柱接入位置正确 (图中均已标明). 图 3.13 中电阻 R 可用 50 千欧 1 瓦的碳膜电阻. 图 3.14 中电容为 5 微法, 可用几个耐压 63 伏或 160 伏的无极性电容并联而成, 也可将两个耐压 25 伏、10 微法的电解电容两个负极相接串联成无极性电容来代替. 图 3.15 中电感线圈可用 J2423 或 J2425 型可拆变压器的红色线圈 1400 匝或 1600 匝绕组 (闭合铁心使用). 接入超低频电源后, 都需要调整超低频电源的“调零”电位器, 使电表指针左右摆动幅度相同. 但纯电感电路中相差演示, 电流较大, 须用后面图 3.17 及图 3.18 所示的手动超低频电源才有较好效果. 为了演示方便, 可以将伏特表与微安表 (毫安表) 并列放置. 实验时就可看到, 在图 3.13 所示纯电阻电路中, 伏特表与微安表指针是同时左右摆动的, 表明纯电阻电路中电压与电流同相. 在演示纯电容电路和纯电感电路时, 以电表指针摆动到右端为准. 在演示图 3.14 所示的纯电容电路时, 可看到微安表指针总是先于伏特表指针到达右端的, 表明纯电容电路的电流超前于电压, 在演示图 3.15 所示的纯电感电路时, 可看到伏特表指针总是先于毫安表指针摆到右端, 这表明纯电感电路中的电压超前于电流. 但是, 在纯电感电路的演示中, 由于超低频频率太低 (约 0.3—0.5 赫), 即使电感较大, 感抗也不是很大, 而且线圈电阻不能忽略. 实验中, 只能看到伏特表先于毫安表指针摆到右端, 不能演示出相差 90°, 即差 1/4 周期.

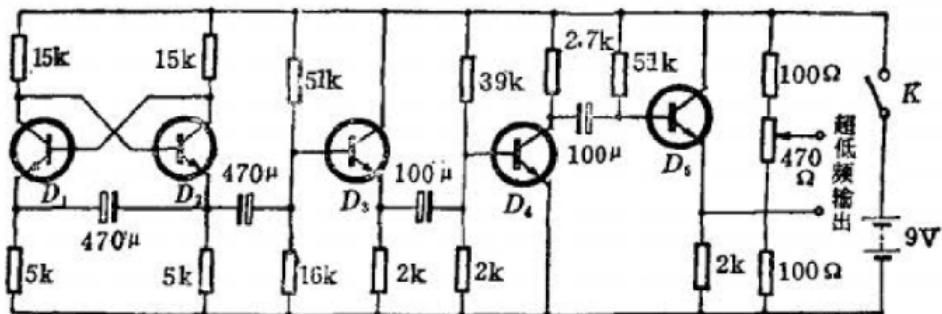


图 3.16

实验所用超低频电源可使用 J2464 型教学信号源的超低频输出。实验时，只需将频率旋钮拨至超低频挡开启电源开关，从低频输出接线柱端就可获得超低频信号，如需自制，可按图 3.16 所示电路制作，三极管均可使用 3DK 型，其中 D_1 与 D_2 尽可能挑选相同的 β 值和 I_{ceo} 值。电路由 D_1 与 D_2 组成振荡器产生三角波， D_3 为射极跟随， D_4 为一级电压放大，由 D_5 射极跟随器输出信号。信号波形不是严格的正弦波。此电路一般无需调整，因而制作与使用都较为方便。图中各元件规格已注明，电阻可用 1/4 瓦或 1/8 瓦的，电容耐压应在 16 伏以上，输出信号幅度 $U_{p-p} \geq 6$ 伏（容载）。

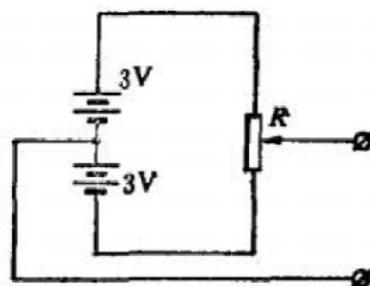


图 3.17

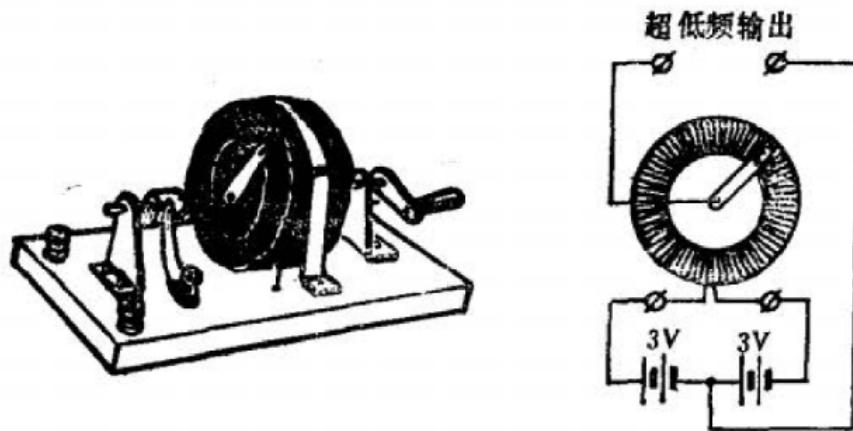


图 3.18

更简单的超低频电源，可以用一个学生实验用滑动变阻器按图 3.17 所示连接电路，用手均匀地来回拉动变阻器滑动端便会产生超低频信号。变阻器规格为 20 欧或 50 欧（额定电流大于 1 安）。或者在硬塑料管（直径 3 厘米左右，长 3 厘米左右）上，象图 3.18 那样用漆包电阻丝

(可从旧变阻器上拆出后，再涂以绝缘漆使用)密绕一周，涂清漆固定绕组，再将它固定在木座上。在穿过绕组中心孔的轴上安一旋转滑片，滑片另一端与电阻丝接触。注意应将电阻丝与滑片接触处的漆皮用砂纸打掉。电阻丝两端接串连电源，从电源正负串接处和滑片轴引出输出端。实验时，只要均匀摇动旋转滑片轴就可输出低频信号。若无硬塑料管，也可用硬纸板卷粘成圆筒，干透后涂几层清漆代替塑料管。

方法二：用信号发生器、电子开关与示波器观察。电子开关可将两路输入信号放大后按一定频率交替输出，送入示波器输入端后，荧光屏上交替出现两个信号波形，当交替频率足够高时，电子示波器光点的余辉作用和人眼的视觉暂留，使观察者“同时”看到两个信号的波形，形成双踪示波器。实验中，我们同时将纯电阻（或纯电容、纯电感）上的电压波形与电流波形显示在屏上，以观察电压与电流的相差，这三个实验的电路如图 3.19、3.20、3.21 所示，也应做成示教板，以加强演示的直观性。三个图中，470 欧电阻可用电位器，以便作适当调整，这是一个电流取样电阻，由于电子开关或示波器输入端均是高阻抗的电压输入端，因而一般利用示波器观察电流波形时，总是在电路中串联一个小电阻（对电路总阻抗而言小很多），利用电阻上电压与电流同相来观察电流波形。图 3.19 中 R 可取 10 千欧碳膜电阻，图 3.20 中 L 可取 8 瓦日光灯的镇流器，其电感约为 1.2 亨，也可用 J2423 型可拆变压器中红色线圈 0—800 匝绕组（闭合铁心），图 3.21 中 C 取 0.05 微法的纸介质电容。

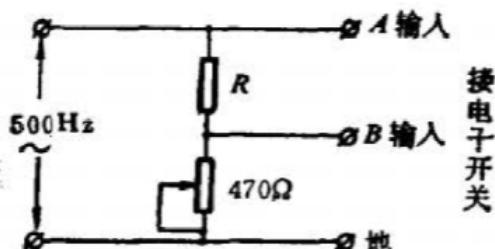


图 3.19

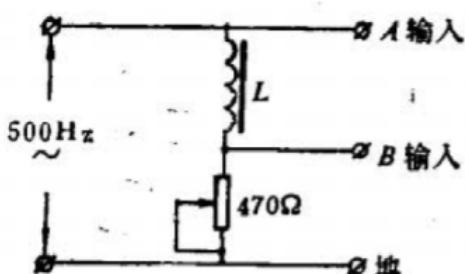


图 3.20

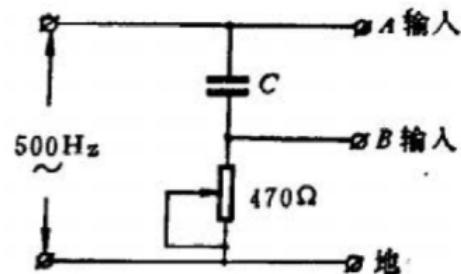


图 3.21

实验时，500 赫交流信号从 J2464 型（或其他低频信号发生器）教学信号源低频输出端获得。电子开关可使用 J2460 型教学用电子开关，示波器为 J2458 型教学示波器。实验接线示意图如图 3.22 所示。进行实验的步骤如下：

1. 开启示波器预热，面板上各控制器应调整为：Y 输入耦合开关拨至“AC”，Y 衰减钮拨至 10 或 1，Y 增益顺时针旋到底，X 扫描范围拨至“10—100Hz”。预热后调整好亮线位置与长度。
2. 开启电子开关前将面板各钮调整如下：频率范围“25—50kHz”；频率微调钮顺时针旋到底；

A 增幅与 B 增幅都逆时针旋到底（增幅最小位置）。开启电子开关后，将在示波器上观察到两条水平亮线，调节电子开关上的“相对位移”钮，使这两条亮线重合。

3. 开启低频信号发生器，面板上频率选择拨至“500Hz”，低频增幅钮顺时针旋到底（输出最大）。
4. 慢慢顺时针旋转电子开关面板上的“A 增幅”钮，这时示波器上将出现加在电路两端的 500Hz 正弦电压波形。慢慢顺时针旋转电子开关面板上的“B 增幅”钮，这时示波器上将同时出现电路中的电流波形（取样电阻上电压波形）。一般我们使电流波形幅度小于电压波形，以利比较。若增幅均感不足，可将示波器 Y 衰减拨至“1”。

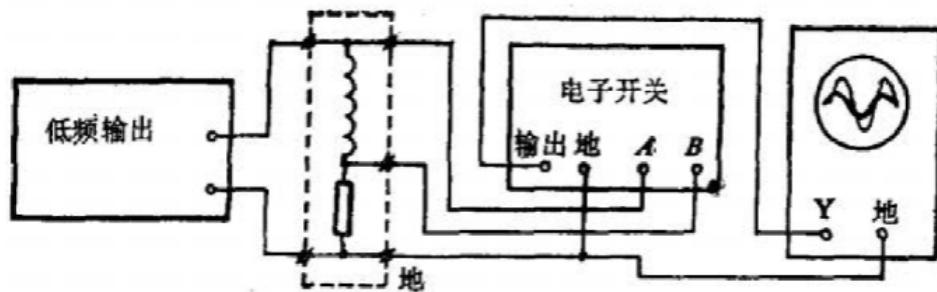


图 3.22

必须注意的是，出厂日期在 1982 年以前的 J2458 型教学示波器，X 偏转板与 Y 偏转板都是反接的，即 X 轴扫描自右向左，Y 轴显示为下正上负。Y 轴反接对本实验及后面三相交流电等需比较波形相位的实验无影响，但 X 轴反接将使相位比较必须从右向左看，即 X 轴正向向左，与习惯上我们画图时 X 轴正向向右相反，因而显示观察很不方便。在 1982 年以后生产的 J2458 型教学示波器，X 轴与 Y 轴偏转板均已改为正接，对本实验及后面相差演示实验就没有影响了。如果示波器 X 轴是反接的，在演示前应将示波器右侧盖板和下底盖板打开，对照示波器说明书电路图将电路板上 X 轴末级放大 6NI 电子管两个屏极通向示波管 X 偏转板的两根引线对调焊好，或直接将示波管管座上第 10、11 脚两根引线对调。

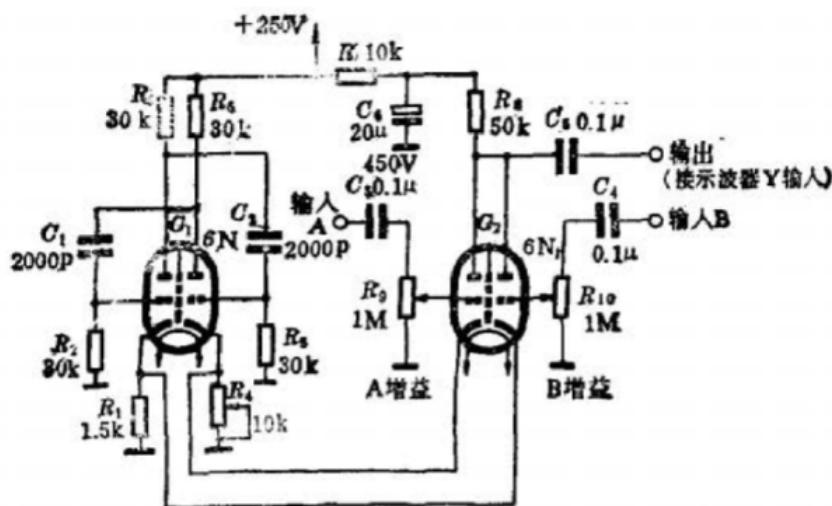


图 3.23

如果想自制一个电子开关，可参阅图 3.23 所示电路，这是一个效果较好且易于装制的电路，

该电路由 G_1 的两个三极管组成多谐振荡器，产生 10 千赫以上方波，用以轮流使 G_2 的两个三极管导通放大，输出两路信号至示波器，图中 R_4 为“相对位移”， R_9 与 R_{10} 分别为“A 增幅”与“B 增幅”。如欲改变开关频率，可以在 C_1 与 C_2 处加接双刀多掷开关，分别同时接入 200 皮法、2000 皮法、0.02 微法、0.2 微法电容，容量越大，开关频率越低。电路中各电阻均应使用 1/2 瓦以上的碳膜电阻，电容均应耐压 400 伏以上。电源可用教学用高压整流电源如 J1205 型，亦可自制。

(十) 交流电的有功功率与视在功率

由于教材并不深入从理论上讨论交流电的有功功率和视在功率，因此，需要强化这两个实验的直观感受性，用学生熟悉的照明电路来演示。演示时，教师应充分注意安全。实验电路分别如图 3.24 和图 3.25 所示，亦可做成示教板。

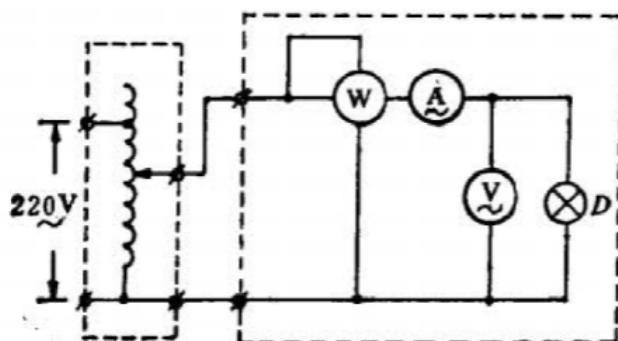


图 3.24

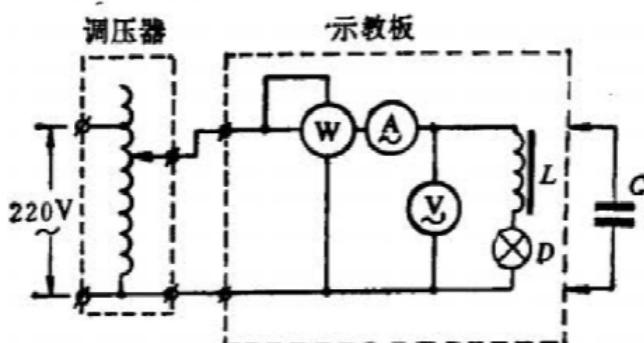


图 3.25

图中瓦特表为 J0404 型演示瓦特表，用 250 伏 1 安挡；伏特表为 J0401 型演示电表，用交流 250 伏挡（亦可用 J0402 型）；安培表为 J0402 型演示电表，用交流 1 安挡。两图中 D 可选用 220 伏、100 瓦的白炽电灯（使用 60 瓦电灯也可，但瓦特计改用 250 伏、0.5 安挡）。图中 L 可用 J2423 型可拆变压器红色线圈 0—800 匝绕（闭合铁心）。演示时，通过调压变压器控制输入电压为 200 伏，以便于读数与计算。在进行实验之前，教师应简单向学生说明瓦特计四个接线柱的用法。

(十一) 用并联电容器的办法来提高功率因数

实验电路用图 3.27 实验电路，只是再用一个日光灯电容器（4.75 微法、40 瓦日光灯用）或用几个耐压 450 伏以上的油浸纸介质电容并联为 5 微法的电容器组接入电感元件电路两端（注

意，操作时必须切断电源），在接入后可以看到瓦特表与伏特表读数未变，而安培表读数减小，从而表明功率因数的提高。实验后，可以向学生说明，在机关、工厂等大量使用日光灯的地方，按国家规定，必须接入电容以提高功率因数，日光灯电容器就是与日光灯电路配套进行生产的。

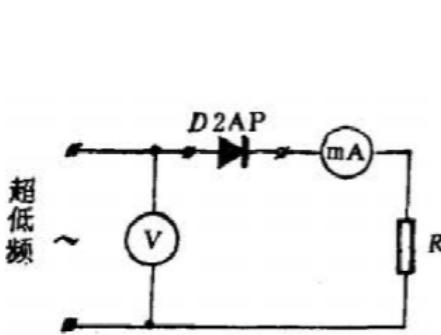


图 3.26

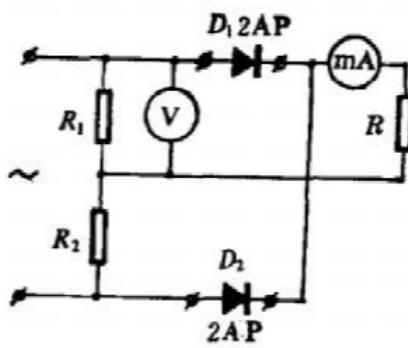


图 3.27

(十二) 整流的演示

方法一：实验电路如图 3.26 所示，图中伏特表用 J0401 型演示电表直流 10 伏挡。毫安表用 J0401 型演示电表直流 5 毫安挡，两个电表的指针均应调为中心零位式。负载电阻 R 由 1 千欧电位器与一个 500 欧电阻串联而成，电源采用前面实验 9 中所介绍的任一种超低频信号发生器，如使用晶体管电路的超低频电源（如 J2464 型教学信号源），则在演示前先调整一下“调零”旋钮，使指针两侧摆动幅度相同，同时调整一下 R 值，使毫安表指针摆动幅度合适。演示时，先将二极管 D 取下，暂时用导线连接，可以观察到未整流前，两表都左右摆动，说明输入交流电压，负载上获得的是交流电流。再将二极管 D 接入，看到毫安表单侧摆动，且有半个周期不动，表明负载中通过的是半波脉动直流电。而改变二极管 D 接法，又可看到毫安表指针向另一侧单侧摆动，表示负载中通过半波脉动电流方向与刚才相反。

全波整流的演示电路如图 3.27 所示，其中 R_1 与 R_2 均为 1 千欧电阻。实验时，可先分别接入 D_1 与 D_2 观察两个半波整流，然后同时接入 D_1 、 D_2 观察全波整流情况。亦可用同样方法演示桥式整流电路。

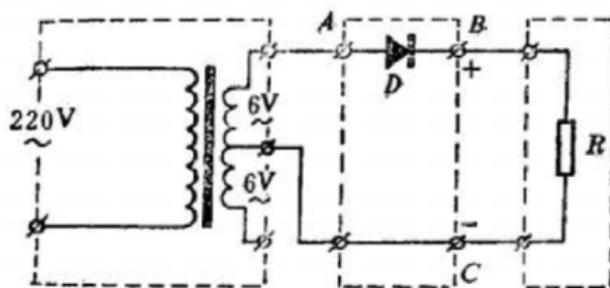


图 3.28

方法二：用示波器演示，此时演示的分别是整流前电压波形与整流后负载两端电压波形。电路如图 3.28 所示，为加强演示效果， R 可用 6—8V 小灯泡，二极管 D 应采用 2CZ 型的。整个装置分为电源部分（初级 220V，次级 6V 的小型变压器）、整流部分与负载部分，可制成三块分立的、相同高度示教板，并同时做好全波与桥式整流电路以及滤波电路的示教板，形成一套整

流滤波演示示教板组。实验前，先调整好示波器（J2458型），Y轴输入端用一金属屏蔽线制成探针，外皮金属导线两端分别安装夹头，为连接示波器地线端使用。中心导线两端一端安夹头，接示波器Y输入，另一端安一万用表用的探针或夹头。实验时，将地线夹头夹在C点，探针分别与A点、B点相接，就可对比地看到未整流的波形与整流后的波形。全波与桥式整流电路示教板如图3.29甲、乙所示，演示方法同上，但可分别断开其中任一二极管观察对比全波与半波的区别。

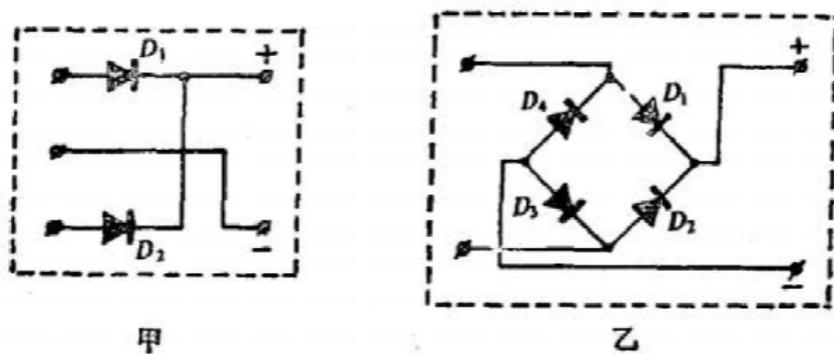


图 3.29

(十三) 滤波的演示

滤波的较好演示方法是利用示波器观察波形，实验器材与整流演示中方法二所用器材相同，另需准备一个100微法、16伏和一个1000微法、16伏的电解电容，J2423型可拆变压器（只使用0—100—400匝绕组、封闭铁心），以及一块 π 型滤波电路示教板，实验线圈如图3.30中所示。实验时先演示未接入滤波元件时情况，然后在负载R两端先后并入100微法与1000微法电容观察负载两端电压波形，在并入100微法电容时，可以明显看到如课本上图3.37所示波形，加大滤波电容时（1000微法），可以看到波形基本平滑。在这两次演示中，表示负载R的小灯泡始终发光，表明电路中仍有电流通过，但已是不含交流成分的直流电了。演示电感滤波时，可在负载与整流电路“正”输出端两个接线柱间先后接入可拆变压器100匝与400匝绕组，观察比较其波形。 π 型滤波器示教板上的电阻可用10欧滑动变阻器（J2354型）代替，两个滤波电容均可用470微法（或200微法）、16伏电解电容器：实验时，将示教板接在整流（任一种整流电路）与负载示教板之间即可演示，为加强演示效果，还可在负载两端接一带输出变压器的喇叭，通过喇叭发出交流“嗡”声的变化，了解滤波效果。

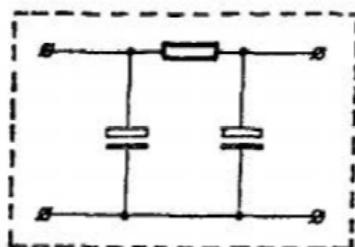


图 3.30

(十四) 变压器的构造与工作原理

这个演示实验可使用 J2423 型可拆变压器或 J2425 型变压器原理说明器，实验所用电表，可用 J0401 型演示电表，低压电源为 J1201 型。下面以用 J2423 型变压器为例说明实验步骤。

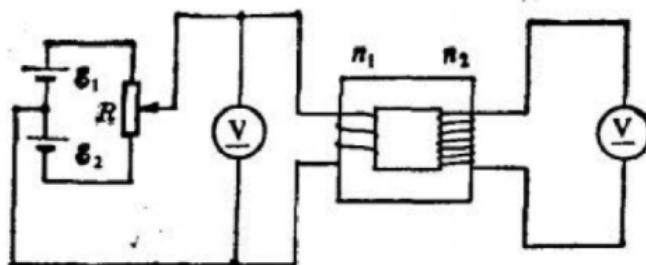


图 3.31

(1) 演示变压器是根据电磁感应现象制成的，它只能用来改变交流电压。实验电路如图 3.31 所示。变压器初级线圈用绿色线圈 0—400 匝绕组，次级线圈用红色线圈 800—1400 匝绕组 (600 匝)，电压表均使用电表的直流 10 伏挡，且均调节为中心零位式。电源 & 1 与 & 2 均用两节干电池 (一号) 串联而成，或用两节 2V 蓄电池，R 可用 20 欧滑动变阻器。演示时可以看到，只有滑动端移动时，次级电压表指针才有摆动。如果按一定周期移动变阻器滑动端，可以清楚地看到次级线圈中产生与初级线圈中频率相同的交变电动势。

(2) 演示变压器铁心的作用。实验装置同 (1)，演示时取下封闭铁心所用的条形铁心，以相同周期移动变阻器滑动端，可以从接次级线圈的电表指针摆动幅度看到比演示 (1) 时小得多，说明通过次级线圈的磁通量比封闭铁心时少得多。

这个演示也可直接将初级线圈接 20 伏交流低压 (可用 J1201 型低压电源)，次级线圈改用 0—200 匝绕组并接一个 6—8 伏指示灯，不用电表，从铁心闭合前后小灯亮度变化情况来说明铁心的作用。

(3) 演示变压器初次级线圈端电压之比等于线圈匝数之比。实验所用变压器初级用绿色线圈 0—400 匝绕组，接入 10 伏交流电压，用演示电表交流 25 伏挡测红色线圈 0—200 匝、0—800 匝及 600—1400 匝 (即 600 匝) 绕组的电压，可以在误差允许范围 (10%) 内验证初次级线圈端电压之比等于其匝数之比。演示时，为便于控制初级电压值大小，低压电源输入端应接一自耦调压变压器。

为加强演示的直观性，还可以将变压器红色线圈 0—1400 匝绕组直接接 220 伏照明电路 (次级绿色线圈不用拆下)。再准备一段长 3 米多的塑料外皮的多股导线，在铁心另一侧当堂绕 20 匝作为次级线圈，两端接演示电流表交流 25 伏挡。闭合铁心后，将初级线圈通电，读出电压表读数 (约 3 伏)。再将初级线圈断电，拆开铁心，次级线圈加绕 20 匝。重新闭合铁心，给初级线圈通电，再读出电压表上的读数 (约 6 伏)，从而比较鲜明地演示了变压器绕组上电压与其匝数成正比的规律。

(4) 演示变压器初、次级线圈中的电流与其匝数成反比。变压器初级线圈用绿色 0—400 匝绕组，次级线圈用红色 0—200 匝绕组，实验电路如图 3.32 所示。初级、次级电流表均接交流 1 安挡，两个灯泡均用汽车用 12 伏 20/8 瓦灯的 8 瓦灯丝部分。演示时，先接通 K_1 ，为便于对比，通电后调节调压器，使次级线圈中电流取一整值，如 0.4 安。然后再闭合 K_2 ，重新读出初、次

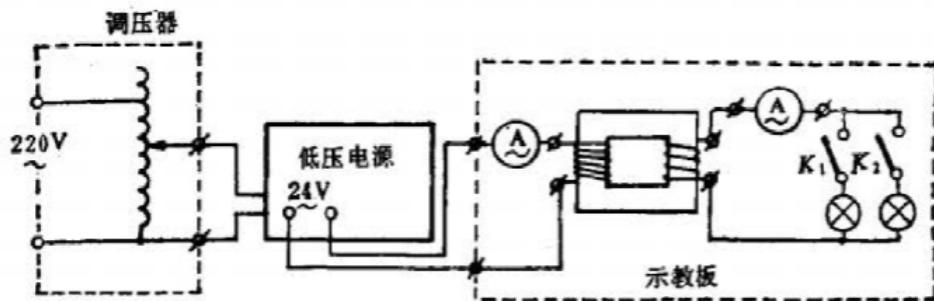


图 3.32

级线圈中的电流，可以在实验允许误差范围内，验证初、次级线圈中的电流与线圈匝数成反比的规律，在教学中还应将 K_1 与 K_2 都断开，此时初级线圈中电流并不为零，它相当于一个自感线圈，从而说明该规律是有一定适用条件的近似规律。这个实验还可说明次级线圈消耗的功率是由初级线圈通过电网吸收功率经电磁感应现象提供的。

(十五) 高压输电

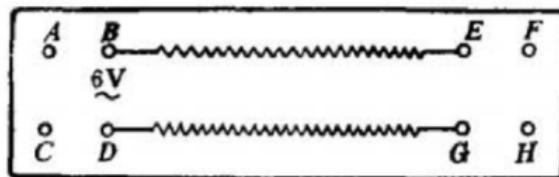


图 3.33

应先制作一如图 3.33 所示的示教板。图中 A, B, C, D, E, F, G, H 为 8 个接线柱， BE 与 DG 间分别用阻值为 10 欧左右的电阻丝（康铜丝或把 220 伏 500 瓦电炉丝拉直后截取），电阻丝应拉紧，另用一个 6—8 伏指示灯两端分别引出导线并安上夹头，再准备两个 J2423 型可拆变压器或者小型 220 伏、6 伏变压器（录音机等用的）。演示时，先从低压电源（如 J1201 型教学低压电源）引出 6 伏交流电，接至 B, D 两点，将指示灯两端分别夹在两电阻丝不同位置，可以看到，越远离输电端，导线上电压损失越大，灯越暗。然后按图 3.34 接入两个 J2423 型变压器，将灯接在 F, H 间， A, C 间接 6 伏交流电。可以明显地看到指示灯发光正常，并可用交流电压表（如 J0401 型演示电表交流 250 伏挡）去测试 B, D 间与 E, G 间电压，可以看出，相比之下电压损失很小。

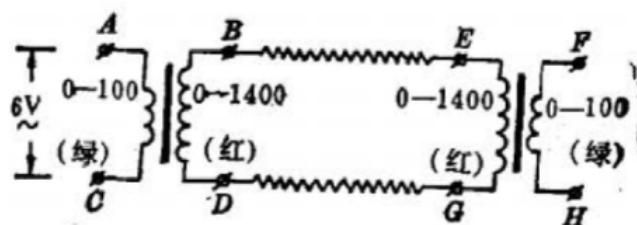


图 3.34

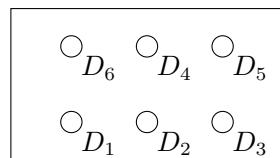


图 3.35

(十六) 三相交流电的产生

演示这个实验最好用 J2420 型手摇三相交流发电机。实验时将发电机输出端六个接线柱按星形接法接好，该机输出端接线柱排列情况如图 3.35 所示， D_1 、 D_2 、 D_3 分别为 A 、 B 、 C 三相线圈的头， D_4 、 D_5 、 D_6 分别为 A 、 B 、 C 三相线圈的尾，排列成如图情况是为了便于进行星形连接与三角形连接。星形接法只需将 D_6 、 D_4 、 D_5 端用铜片连在一起。用三个 J0401 型演示电流表的检流计挡依次接在 D_1 、 D_2 、 D_3 与公共端（零线）之间，并将三个表按 A 、 B 、 C 三相顺序放好，注意接线时电表的三个负接线柱接零线。演示前在该机底板下电池盒内先装入励磁用的四节干电池（6 伏），演示时应先接通励磁开关，再缓慢摇动手柄。注意不要使检流计超过满度电流，并尽可能使转子转动周期与电表指针系统周期接近，这样可以明显演示出三个电表指针依次摇动到右端。

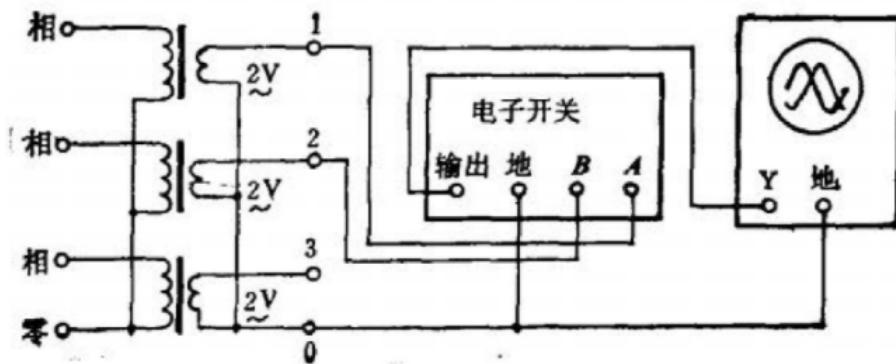


图 3.36

如果演示三相交流电的波形，最好让学生直接观察电网中三相交流电的波形，实验电路如图 3.36 所示。示波器为 J2458 型教学示波器，电子开关为 J2460 型教学用电子开关，三个降压变压器可用三个学生实验用低压电源（J1202 型）代替，实验前需要确定相序。按图接好电路后，把示波器的 Y 衰减拨至“10”，Y 增益钮顺时针旋到底（最大增益），扫描频率拨至“10—100”；使电子开关 A 增幅与 B 增幅钮反时针旋到底（最小增益），开关频率拨至“5k—50k”挡；将三个变压器初级线圈接入三相四线制电网。再调电子开关 A 增幅和示波器扫描微调，使示波器荧光屏显示出两个周期的波形。调电子开关 B 增幅与相对位移，使两个波形在屏上幅度相同，X 轴重合。然后观察 B 输出波形比 A 输出波形是否滞后 120° 。如果不是，可将该变压器初级线圈接线颠倒一下。同理，再将电子开关 B 输入端改接第三个变压器 2 伏输出端，调整后使其波形滞后 $A 240^\circ$ 。在确定好相序后，就可在课堂上进行演示了。需要说明的是，经上述方法调整的相序可能不是电网原来的相序。若想严格显示电网的相序，需要弄清三个变压器初次级头尾，或者使用教学用三相变压器，如 JYB-1 型变压器，由于电子开关只有两路，因而只能先后显示第一相与第二相、第一相与第三相的波形，如想同时演示三相波形，则需再用一台电子开关接在

上述电子开关与示波器之间，接法如图 3.37 所示。

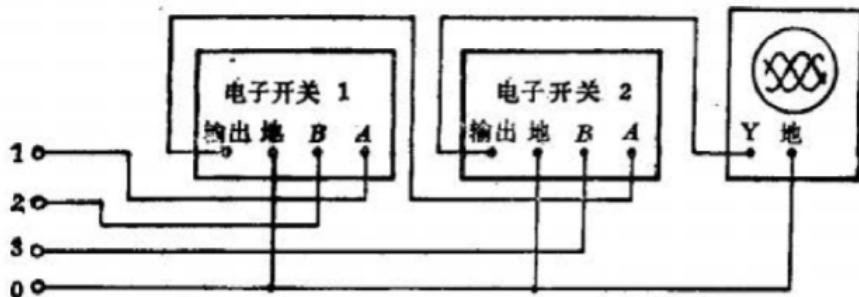


图 3.37

(十七) 星形接法与三角形接法的相电压与线电压

按图 3.38 所示，制作电源接法示教板和负载接法示教板。

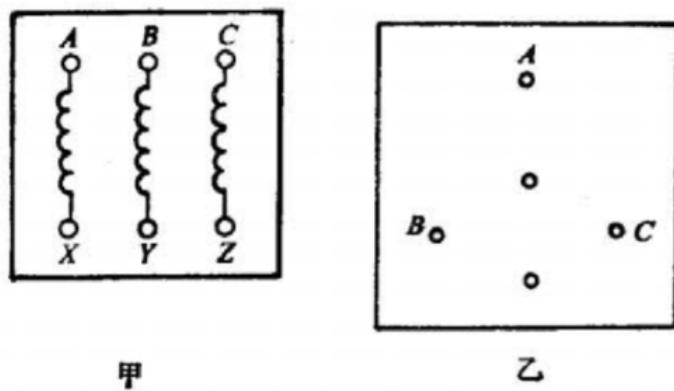


图 3.38

演示电源的两种接法时，可将 J2420 型手摇三相发电机三组线圈按头尾顺序与图 3.38 中甲示教板相应接线柱相接，或将演示实验 16 第二种方法所确定的三个变压器次级相序与头尾接入甲示教板中（相应电压拨至 6V 挡）。用 J0401 型演示电表交流 25 伏挡分别测出各组线圈两端电压。再先后按星形接法与三角形接法连接示教板上各接线柱，用伏特表分别测试这两种情况下的相电压与线电压得出相应结论。J2420 型手摇三相发电机在手轮转速为 120 转/分时，空载每相绕组电压在 12 伏左右。实验时，可请学生摇发电机，教师用电压表进行测量演示。

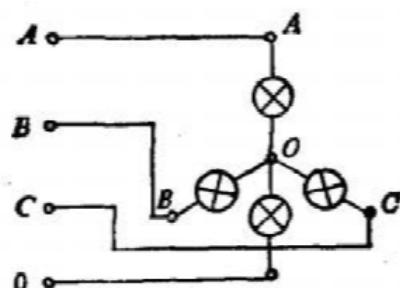


图 3.39

在演示三相四线制送电，负载星形接法相电压与线电压关系及三相负载平衡时中性线中电流为零的实验时，可以将 4 个 6—8 伏指示灯分别用较短的导线悬挂连接在图 3.38 所示乙示教

板相应接线柱上，并从甲示教板上接出三相四线制电源，如图 3.39 所示，摇动发电机或接通电源时，可以看到三相指示灯都亮了，只有串在中性线上的灯泡不亮，用 J0401 型演示电表交流 25 伏挡分别测出各相相电压与线电压，可以看出 $U_{\text{线}} = \sqrt{3}U_{\text{相}}$ 的关系。由于三相负载平衡，在除去串联在中性线上的小灯时，可以看出不影响三相负载用电，说明中性线上此时电流为零，可以省去。如果中性线上仍串联小灯，若除去其中任一相的负载灯泡，都可以看到串联在中性线上的小灯发光，另两相上灯光减弱，表明负载不平衡时中性线上电流不为零。如果接着再除去中性线上串联的小灯，则相当于另两相小灯串联接在线电压之间，此时，用伏特计可以测出每灯两端电压并与线电压值进行比较说明。

在进行负载作三角形连接演示实验时，可将三个小灯按三角形接法接在示教板上，但如果仍使用 6—8 伏指示泡，注意手摇发电机转速不要太高，三个变压器的电源应拨至 4 伏挡，以免烧毁小灯。

(十八) 旋转磁场和感应电动机原理

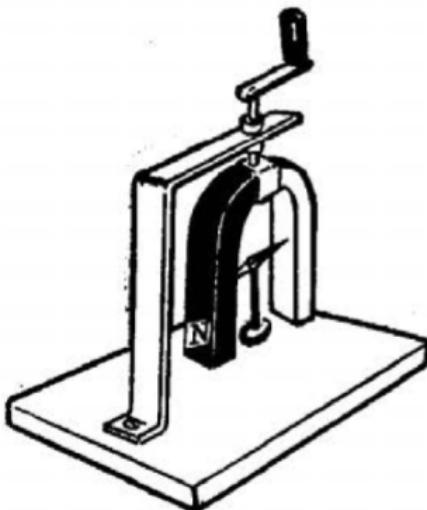


图 3.40

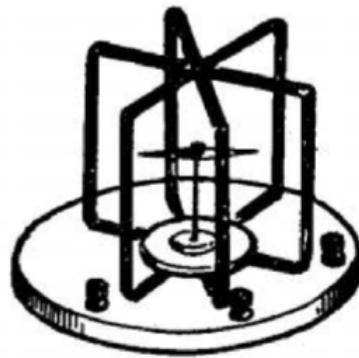


图 3.41

演示这个实验可用 J2421 型三相电机原理演示器，如果没有，自制也并不困难，装置主要由三部分组成，带支架的可旋转的蹄形磁铁，互成 120° 角的三相线圈及一指针式支架（附小磁针和铝框）。蹄形磁铁可用教学用蹄形磁铁，但需制作一夹具与轴连接，可参考图 3.40 所示装置。三组线圈均可用直径 0.3 毫米左右的漆包线绕成（300—400 匝），分别包上红、黄、绿三色胶带或布带，互成 120° 角安装在木底座上，将其接成星形，三个头与底座接线柱相接，如图 3.41 所示。可用长针固定在小木座上制成支架。小磁针可用教学用的小磁针或自制；封闭金属框可以用薄铜片焊成：一边中央开一小孔（略大于针直径），相对一边只需用圆头小钉冲出一小槽（不要穿透铜片），使用时安放在支架上，如图 3.42 所示。

演示分两个步骤进行。（1）将小磁针支在支架上放在可旋转的磁铁中间，旋转磁铁，将看到小磁针随之转动，表明了磁铁旋转产生旋转磁场。然后将小磁针放在三相线圈中，利用手摇三相发电机或上面介绍的通过三个变压器接入三相电网获得的低压三相交流电给三组线圈通电，就可发现小磁针也旋转，电源也可采用如图 3.43 所示裂相电源模拟三相交流电进行演示。图中 R 可将 10 欧 2 安（J2354 型）滑动变阻器调至最大值使用， C 可将两个 470 微法耐压 25 伏以

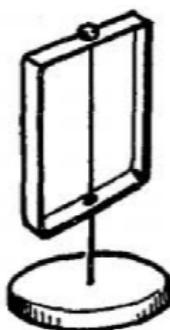


图 3.42

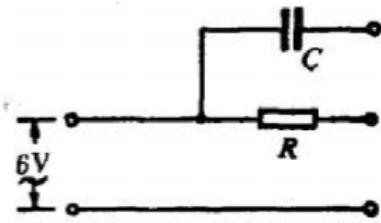


图 3.43

上电解电容器负极与负极相接串联后将两个正极接入电路，电源可使用 J1201 型或 J1202 型低压电源的交流 6 伏输出，或者用一降压小变压器与以上电路组装在一起使用。

(2) 将金属闭合导体（即铜片线框）支于支架上，先后放在可旋转磁铁和三相线圈中，旋转磁铁或通入三相电观察闭合导体的旋转情况，分别加以讨论。实验时还可反向旋转磁铁或任意更换三相电接入的两个线头位置，观察闭合导体与刚才旋转方向相反的情况。

二、学生实验

(一) 用示波器观察交流电的波形

这个实验要进行电学重要仪器操作技能的训练。在实际教学时，由于课本上对仪器的使用、有关实验内容都有较详细的说明，教师不宜在课堂上再详细讲解，可要求学生自己阅读，以培养学生独立学习新仪器使用方法的能力，还可以提出一些问题以引导学生阅读和操作，下面几个问题可供教学时参考：

1. 学生示波器 (J2459 型) 面板上调节旋钮和开关可分为三组，这三组分别控制什么？分别包括哪些旋钮和开关？各起什么作用？Y 衰减置于“ ∞ ”时是什么意思？
2. 如果被观察的信号电压幅度估计为 20 伏，Y 衰减应置于哪个位置？为什么？
3. 如果被观察信号频率是 200 赫，想观察到两个完整波形，扫描范围应置于哪个位置？为什么？调整扫描微调钮的目的是什么？
4. 学生信号源 (J2465 型) 可以输出哪几种频率的正弦低频信号？输出信号幅度由什么调节？一般我们所说低频信号是指哪一频率范围的信号？
5. 设计一个实验步骤，定量测出信号发生器 500 赫低频输出最大时的正弦交流电电压的最大值和有效值。

(二) 用示器观察交流电的整流和滤波

这个实验所用器材除 J2459 型学生示波器及学生用低压电源 (J1202 型) 外，所用元器件均可由 J2467 型 (或 J2467-1 型) 学生电子实验箱取出使用，课本上图 10-5 所示实验元件即为该型号电子实验箱中元件外形。但需注意此型号电子实验箱中电解电容耐压只有 10 伏，因而实验时，最好将课本上所说 6 伏交流电源改为 4 伏进行实验，以确保电容不被击穿。如果没有该型号的电子实验箱，各元件也可自制：二极管用 2CP 或 2CZ 型，电解电容可用耐压 16 伏、100 微法 (两个) 与 10 微法 (一个) 的，电阻可选用 200 欧及 1 千欧 1/4 瓦 (或 1/8 瓦) 碳膜电阻，各元件都可焊接在宽 2 厘米长 5 厘米的铜箔板上，铜箔板两端只保留 1.5 厘米长铜箔，中

间部分可用刀刻去。为便于接线，两端可直立焊接一段较粗的裸铜丝，导线系用两端均带夹子的短塑料多股导线，元件板中央可用白漆画出相应元件符号与正负极。

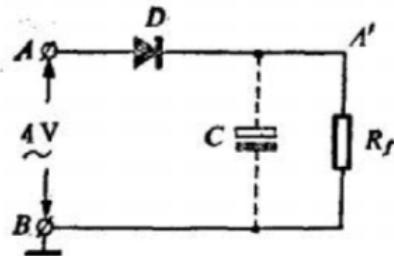


图 3.44

为使实验取得较好效果，可将实验步骤作如下改变：

- 先按图 3.44 所示电路在白纸上画出电路图，并将元件放好，用导线将元件连接起来。开启示波器，通过观察 A、B 两点输入交流波形将示波器调好，使屏上出现 3、4 个完整稳定波形。再观察 A'、B 两点向半波整流波形，先后在 A、B 间接入 10 微法与 100 微法电容器，观察电容滤波作用和不同电容的效果。要求学生在坐标纸上记录上述观察到的电压波形，并进行比较说明。
- 再按课本上图 10.4 所示电路实验观察 A''、B' 间电压波形。如果观察 C₁、C₂ 与 R 数值变化对滤波效果影响，则另需准备两个 5 微法 16 伏电解电容与 20 欧左右的电阻，才能得到较显著的效果。

在进行这个实验时，可能有的学生会提出不接负载时能否观察相应波形问题，教师可以从串联电路特点出发，说明示波器相当一个内阻极高（1 兆欧以上）的电压表，不接负载时，相当于二极管与电压表串联，此时电路正反向电阻相差不多，因而正反向电流接近，看到波形将几乎仍为交流波形。（实际上是二极管正向时，所加电压小于导通电压，对 2CP 管来说，这个电压约为 0.6 伏，是由二极管此时内阻很大而引起的，或者说是二极管的非线性特性造成的。）因而不接负载电阻 R_f 是不能观察整流效果的。可实际观察一下，以加深理解。

(三) 研究变压器的作用

做这个实验，每一组需要一块交流电压表，一块交流电流表，在学校实验室中，可用万用表交流 10 伏或 25 伏挡代替电压表，可用 J0414 型 500 毫安交流电流表。如果没有该型号交流电流表，可以用以下两种方法解决，一是将电路（初级或次级电路）中串入一个 1 欧 0.5 瓦精密电阻（RJJ 精密金属膜电阻，误差 ±1%）作为示波器的取样电阻，通过示波器测量电阻两端电压再换算为电流值。实验前需对示波器进行调整，使示波器 Y 衰减为 1、Y 增益顺时针旋到底（增益最大）时屏上 Y 轴上每一格相当 50 毫伏，实验时可将这个 1 欧取样电阻接在示波器 Y 输入与地接线柱间并固定好，相当于一个电流表串入电路，读出交流波形峰峰值 U_{PP}，按下式计算电流有效值（Y 衰减为 1 时）：

$$I = \frac{U_{PP}}{2\sqrt{2}R} \approx 0.35U_{PP}\text{mA}$$

或

$$I \approx 0.35 \times 50 \times Y_{PP}(\text{格数}) = 17.5Y_{PP}\text{mA}$$

这个方法虽然麻烦一些，但也使学生得到一个实际利用示波器作定量测试的机会，对提高学生使用示波器能力是有好处的。

另一种方法是将学生所用直流安培表加以改装，改装方法主要是在电表电路中接入两个 2AP 型晶体二极管，接法如图 3.45 所示，由于各种直流安培计表头内阻与满度电流不同，一般选满度电流小些的，如 3 毫安的表头。分流电阻详细计算方法可参考有关书籍，并需实际与标准表校准。由于二极管的非线性特性，刻度盘也是非线性的，一般可实测绘制刻度盘。

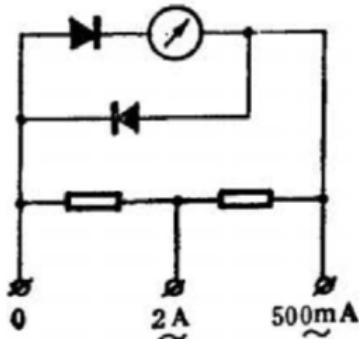


图 3.45

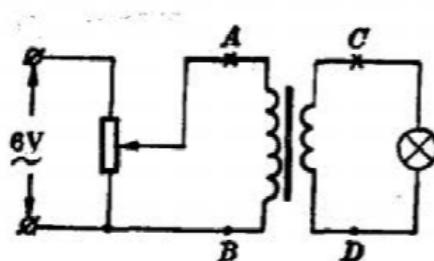


图 3.46

该实验所需其他仪器有 J1202 型学生电源，J2426 型小型变压器，J2354-1 型 10 欧 2 安滑线变阻器（四个接头可当分压器使用），2.5 伏及 6—8 伏指示灯各两个（连同灯座），实验电路如图 3.46 所示。实验按以下步骤进行：

(1) 首先观察变压器结构，该变压器有三组线圈，分别标有“II120T”，“II240T”、“III60T”，作降压变压器时，初级线圈用“II120T”即 120 匝绕组，额定电压为 4 伏。次级线圈用“III60T”即 60 匝绕组。作升压变压器时，初级线圈仍用“II120T”即 240 匝绕组。

(2) 按图 3.46 所示电路连接好实际电路，若进行升压实验，小灯泡应用 6—8 伏的；若进行降压实验，小灯泡应用 2.5 伏的。在接通电源之前，应将变阻器滑动端置于输出电压较小位置，接通电路，逐渐滑动变阻器滑动端，使小电灯发光（不要太亮）。

(3) 用万用表交流 10 伏挡分别测出初次级电压（即 AB 间与 CD 间电压），并作出记录。验证 $U_1 : U_2 = n_1 : n_2$ 。

(4) 断开 A 点，串入电流表（或在输入端并有取样电阻的示波器 Y 输入端），读出初级线圈电流值，而后接好 A 点，断开 B 点，再串入电流表测出次级线圈电流值，作出记录，验证 $I_1 : I_2 = n_2 : n_1$ 。计算 $U_1 I_1$ 与 $U_2 I_2$ 值，求出变压器效率 n 。

(5) 在次级电路小灯两端并联一个相同的小灯，重复步骤 (3) 与 (4)。

(6) 切断电源，将变压器从电路中取出，拆开铁心，装入另一线圈，准备作降压（或升压）实验。在装铁心时，注意两点：一是插铁心片时要交叉叠放，即一层按图 3.47 甲位置放，另一层按图 3.47 乙位置放，二是在铁心快装满时，最后几片铁心片的插入要十分小心，不要损坏线圈。可以先用小改锥在一侧铁心片与线圈间插入一些，使铁心片靠里挤紧，再将最后几片对正逐一插入，插一片，用改锥挤一次。同时，还可用小木锤轻轻敲击铁片，使铁片对正插入。最后用木锤将铁片敲击整齐，再装上外壳。

(7) 重复 (2) 至 (5) 步骤，进行实验。

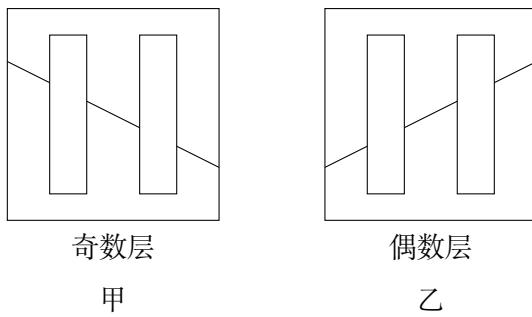


图 3.47

以上所设实验器材与实验步骤连同课本的问题可以根据学校情况印发实验提纲发给学生阅读，并要求学生画好实验记录表格再进行实验。如果时间允许，可在测电流时增加测空载时电流这一项内容。

三、课外实验活动

(一) 自制测电笔

这个课外制作，需向学生简单说明测电笔的工作原理，氖管是一种稀薄气体辉光放电管。在试电笔中氖管两极间加 60 伏左右电压，即可引起氖气放电，发出桔红色辉光，此时通过氖管的电流约几十微安，但两极电压增大时，管中电流相应增大而且增长较快，试电笔中，电阻起降压和限流作用，它的阻值可以通过以下方法估算出来：在测试火线时，人体一端与地相接，另一端（手）通过氖管与电阻串联接入火线，此时串联电路总电压为 220 伏，通过电流约几十微安（人体安全电流 1 毫安以下），氖管两端压降为 60 伏左右，因此降落在电阻器和人体电阻上的电压为 160 伏左右。由欧姆定律估算出电阻器和人体电阻的总电阻约为几兆欧。实际上人体电阻在几百千欧以下，因此，在试电笔使用过程中，在人体上降落的电压是很小的，是安全的。只有给学生讲清原理后，学生课外制作时才会懂得如何安全进行实验。

在具体进行这个小制作时，可以发动学生想办法把测电笔制作得更实用一些，例如利用废旧圆珠笔或钢笔套进行制作，不一定局限于课本上介绍的材料。测试笔与火线接触部分长金属探针最好套上一段塑料管，以免与其他导体或人体接触发生事故。

有些学生实验后可能提出这样的问题：为什么人体并没有和大地直接接触（如穿着胶鞋、站在木凳上）试电笔也能亮？这个问题可启发学生从人体与大地间是一个电容器，而测试的又是交流电这一点上进行思考。

第四节 习题解答

一、练习 -

- 有人说线圈平面转到中性面的瞬间，穿过线圈的磁通量最大，因而线圈中的感生电动势最大；线圈平面跟中性面垂直的瞬间，穿过线圈的磁通量为零，因而线圈中的感生电动势为零，这种说法对不对？为什么？

解答：这种说法是错误的。根据法拉第电磁感应定律，感生电动势的大小与穿过闭合回路的磁通量变化率成正比，而与磁通量大小无关。当线圈平面转到中性面时，虽然磁通量最大，但磁通量变化率为零，线圈中感生电动势也为零；而当线圈平面转到与中性面垂直位

置时，虽然磁通量为零，但磁通量变化率最大，因而线圈中感生电动势最大。

2. 在课本图 3.1 所示的实验中，在不改变 B 、 ℓ 和 v 的数值的情况下，你有什么办法来提高电动势的最大值？并说明所依据的原理。

解答：可以通过增加线圈匝数来提高电动势的最大值。因为线圈在切割磁力线的过程中，每匝线圈的感生电动势都相同， n 匝线圈是 n 个单匝线圈的串联，产生的感生电动势是单匝线圈的 n 倍。

3. 在课本图 3.1 所示的实验中，设 AB 边的长度为 20 厘米，线圈的宽 AD 为 10 厘米，磁感应强度 B 为 0.01 特，线圈的转数为 50 转/秒，求电动势的最大值，如果从线圈平面转过中性面 30° 角的瞬时开始计时，经过 0.01 秒时电动势的瞬时值是多大？

解答：用 ℓ 和 ℓ' 分别表示 ab 和 ad 的长度。当线圈平面与中性面垂直时，电动势最大，这时的电动势

$$\mathcal{E}_m = 2B\ell v$$

因为

$$v = \omega r = 2\pi n \frac{\ell'}{2} \quad (n \text{ 为转速})$$

所以

$$\mathcal{E}_m = 2B\ell 2\pi n \cdot \frac{\ell'}{2}$$

代入数据得

$$\mathcal{E}_m = 2 \times 3.14 \times 50 \times 0.01 \times 20 \times 10^{-2} \times 10 \times 10^{-2} = 0.06 \text{ V}$$

若从线圈平面转过中性面 30° 角瞬时开始计时，那么该交流电表达式

$$\begin{aligned} e &= \mathcal{E}_m \sin(\omega t + \phi_0) \\ &= 0.06 \sin\left(2\pi \times 50 \times t + \frac{\pi}{6}\right) \\ &= 0.06 \sin\left(100\pi t + \frac{\pi}{6}\right) \end{aligned}$$

因此经 0.01 秒时电动势瞬时值为

$$\begin{aligned} e &= 0.06 \sin\left(100\pi \times 0.01 + \frac{\pi}{6}\right) \\ &= 0.06 \sin\left(\pi + \frac{\pi}{6}\right) \\ &= -0.06 \sin \frac{\pi}{6} = -0.06 \times \frac{1}{2} = -0.03 \text{ V} \end{aligned}$$

4. 画出 $u = 30 \sin(\omega t + \pi/2)$ 伏的电压图象和 $i = 2 \sin(\omega t - \pi/4)$ 安的电流图象，以 ωt 为横轴。

解答：所求图象如图 3.48 甲、乙所示。

5. 课本图 3.1 是一个发电机模型，只能供课堂演示之用，如果你有兴趣，可约请几位同学，共同研究一下怎样在此模型的基础上加以改进，设计一个小发电机，如果感到知识不足，可自学或查阅有关电工学的书籍。

解答：说明：此题有关制作可参考前面实验指导部分有关内容。

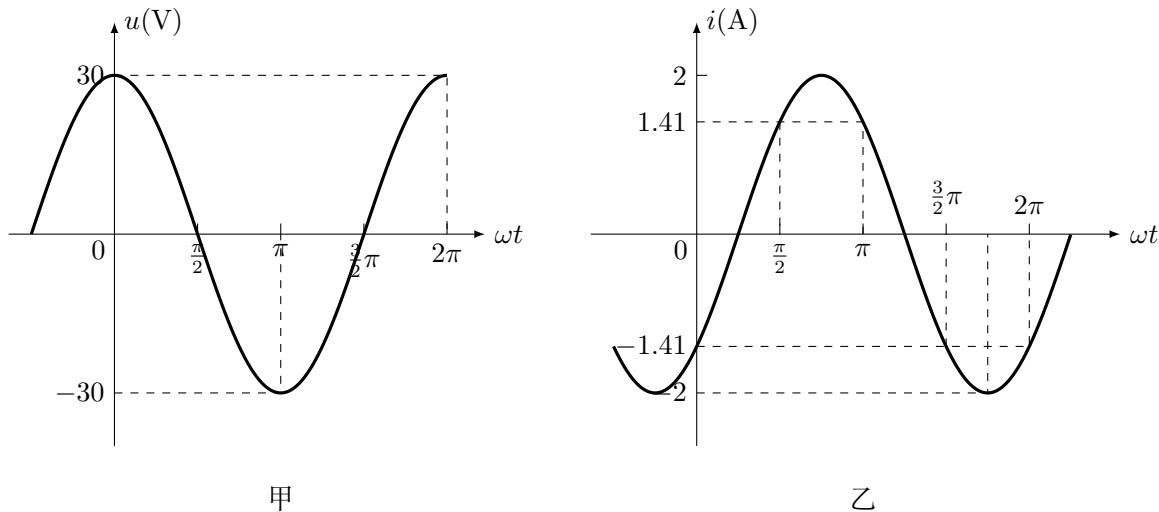


图 3.48

二、练习二

1. 有一个电容器，能耐压 250 伏，是否能接在 220 伏的交流电路上？为什么？

解答：耐压 250 伏的电容器不允许接在 220 伏的交流电路上。这是由于 220 伏交流电路上电压的最大值可达到有效值的 $\sqrt{2}$ 倍，即

$$U_m = \sqrt{2}U = \sqrt{2} \times 220 = 310\text{V}$$

把耐压 250 伏的电容器接入这个电路就有击穿并引起短路的可能。

2. 线圈转动的角速度 ω 也叫角频率（或圆频率），试就课本图 3.1 导出角频率 ω 跟周期 T 或频率 f 的关系式。

解答：线圈从课本图 3.1 中甲图位置匀速转到乙图所示位置，转过角度为 π ，经历时间为 $T/2$ ，故由角速度定义式可得

$$\omega = \frac{\theta}{t} = \frac{\pi}{T/2} = \frac{2\pi}{T}$$

又因 $f = 1/T$ ，所以

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

3. 已知： $u_1 = 220\sqrt{2} \sin(100\pi t + \pi/6)$ 伏， $u_2 = 380\sqrt{2} \sin(100\pi t + \pi/3)$ 伏，求这两个交流电压的最大值、有效值、周期、频率、角频率和初相。这两个电压哪个超前？相差是多大？

解答：由题目可知， $U_{m1} = 220\sqrt{2}$ 伏， $U_{m2} = 380\sqrt{2}$ 伏。

$$U_1 = \frac{U_{m1}}{\sqrt{2}} = 220\text{V}, \quad U_2 = \frac{U_{m2}}{\sqrt{2}} = 380\text{V}$$

$$\omega_1 = 100\pi\text{rad/s}, \quad \omega_2 = 100\pi\text{rad/s}$$

$$f_1 = \frac{\omega_1}{2\pi} = \frac{100\pi}{2\pi} = 50\text{Hz}, \quad f_2 = \frac{\omega_2}{2\pi} = \frac{100\pi}{2\pi} = 50\text{Hz}$$

$$T_1 = \frac{1}{f_1} = \frac{1}{50} = 0.02\text{s}, \quad T_2 = \frac{1}{f_2} = \frac{1}{50} = 0.02\text{s}$$

$$\phi_1 = \frac{\pi}{6}, \quad \phi_2 = \frac{\pi}{3}$$

因 $\phi_2 > \phi_1$, 所以 u_2 超前 u_1 , 相差

$$\Delta\phi = \frac{\pi}{6} - \frac{\pi}{3} = -\frac{\pi}{6}$$

即 u_2 超前 $u_1 \pi/6$

4. 有一正弦交流电, 频率是 50 赫, 有效值是 5 安, 初相是 $-\pi/2$. 写出瞬时值的表达式, 并画出图象.

解答:

$$I_m = \sqrt{2}I = \sqrt{2} \times 5 = 7.07 \text{ A}$$

$$\omega = 2\pi f = 2\pi \times 50 = 100\pi \text{ rad/s}$$

$$\phi_0 = -\frac{\pi}{2}$$

瞬时值表达式为

$$i = 7.07 \sin\left(100\pi t - \frac{\pi}{2}\right) \text{ A}$$

其图象如 3.49 图.

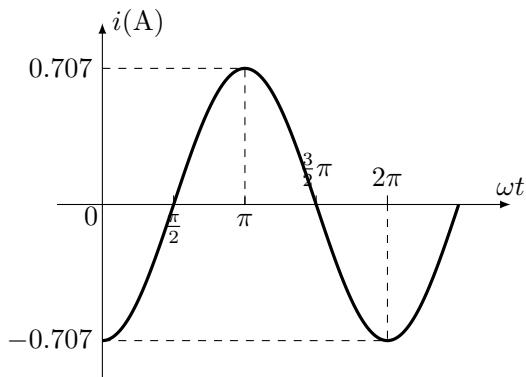


图 3.49

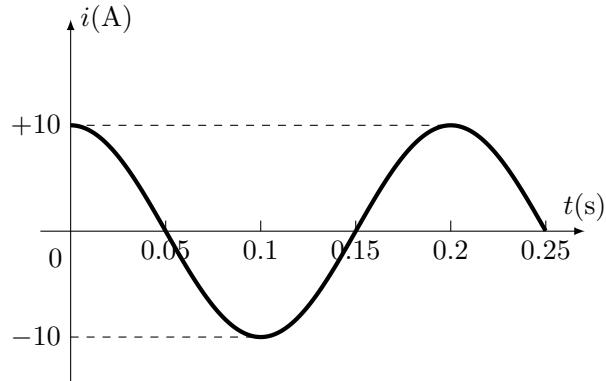


图 3.50

5. 图 3.50 是某一正弦交流电的图象. 根据图象求出最大值、有效值、周期、角频率和初相, 并写出瞬时值的表达式.

解答: $I_m = 10$ 安; $I = I_m/\sqrt{2} = 0.707 \times 10 = 7.07$ 安; $T = 0.2$ 秒;
 $\omega = \frac{2\pi}{T} = \frac{2\pi}{0.2} = 10\pi \text{ rad/s}$; $\phi_0 = -\frac{\pi}{2}$.

该交流电流瞬时值表达式为:

$$i = 10 \sin\left(10\pi t - \frac{\pi}{2}\right) \text{ A}$$

6. 课本图 3.10 是两个正弦交流电的图象, 哪个超前, 哪个落后? 超前或落后的角度是多大? 其中 ϕ_1 和 ϕ_2 的绝对值都是 60° .

解答: i_1 超前 $i_2 120^\circ$, i_2 落后 $i_1 120^\circ$.

三、练习三

1. 把“220V,40W”的灯泡接到照明电路中，通过灯泡的电流的最大值是多大？

解答：因为 $P = UI$ ，所以在额定电压 220V 情况下，通过灯泡的电流有效值

$$I = \frac{P}{U} = \frac{40}{220} = 0.18\text{A}$$

因此电流的最大值

$$I_m = \sqrt{2} \cdot I = \sqrt{2} \times 0.18 = 0.25\text{A}$$

2. 在电阻 R 的两端加交变电压 $u = 220\sqrt{2}\sin(\omega t + \phi)$ 伏， $R = 110$ 欧，写出电流瞬时值的表达式。

解答：

$$i = \frac{u}{R} = \frac{220\sqrt{2}}{110} \sin(\omega t + \phi) = 2\sqrt{2} \sin(\omega t + \phi)\text{A}$$

3. 在电阻为 500 欧的电阻丝中通以交流电，每秒钟产生 5 焦的热。求电流和电压的有效值和最大值，交流电的功率是多大？

解答：由焦耳定律 $\theta = I^2 R t$ 可得：交流电电流有效值

$$I = \sqrt{\frac{\theta}{Rt}} = \sqrt{\frac{5}{500 \times 1}} = 0.1\text{A}$$

电流最大值

$$i_m = \sqrt{2}I = 0.14\text{A}$$

所以电压有效值

$$U = I \cdot R = 0.1 \times 500 = 50\text{V}$$

电压最大值

$$u_m = \sqrt{2}U = 1.4 \times 50 = 70\text{V}$$

交流电功率

$$P = \frac{W}{t} = \frac{5}{1} = 5\text{W}$$

4. 把一个电热器接到 10 伏的直流电路中，每秒钟产生的热量为 Q 。现在把它改接到交流电路中，每秒钟产生的热量为 $Q/2$ ，求交流电压的最大值。

解答：对纯电阻电路而言，电路产生的热

$$Q = \frac{U^2}{R}t$$

接入直流电路时

$$Q = \frac{U^2}{R} \times 1$$

接入交流电路时

$$\frac{Q}{2} = \frac{(U_m/\sqrt{2})^2}{R}t = \frac{U_m^2}{2R}$$

两式相除可得: $U_m^2 = U^2$, 所以

$$U_m = U = 10\text{V}$$

即交流电压的最大值为 10 伏.

四、练习四

1. 一个线圈的自感系数为 0.6 亨, 电阻只有几欧姆, 把这个线圈接到 50 赫的交流电路中, 它的感抗是多大? 比较感抗和电阻的大小, 说明为什么可以略去电阻, 而认为它只有电感.

解答: 这个线圈对 50 赫交流电的感抗

$$X_L = 2\pi f L = 2\pi \times 50 \times 0.6 = 188\Omega$$

由于 $X_L \gg R$, 因此在电路中起主要作用的是感抗而不是电阻, 因而通常可以忽略电阻的作用而认为它只有电感.

2. 有一个高频扼流圈, 自感系数是 25 毫亨, 对于 1 兆赫的交流电, 它的感抗是多大? 对于 1 千赫的交流电, 它的感抗又是多大?

解答: 对 1 兆赫交流电的感抗

$$X_{L_1} = 2\pi f_1 L = 2\pi \times 10^6 \times 25 \times 10^{-3} = 157 \times 10^3 \Omega$$

对 1 千赫交流电的感抗

$$X_{L_2} = 2\pi f_2 L = 2\pi \times 10^3 \times 25 \times 10^{-3} = 157 \Omega$$

3. 一线圈的自感系数为 0.5 亨, 电阻可以忽略. 把它接到频率为 50 赫, 电压为 220 伏的交流电路中, 求通过线圈的电流.

解答:

$$I = \frac{U}{X_L} = \frac{U}{2\pi f L} = \frac{220}{2 \times 3.14 \times 50 \times 0.5} = 1.4\text{A}$$

4. 有一线圈, 电阻可略去不计. 把它接到 220 伏、50 赫的交流电路中, 测得通过线圈的电流为 2 安. 求线圈的自感系数.

解答: 因为

$$I = \frac{U}{X_L} = \frac{U}{2\pi f L}$$

所以

$$L = \frac{U}{2\pi f I} = \frac{220}{2\pi \times 50 \times 2} = 0.35\text{H}$$

五、练习五

1. 电容是 100 皮法的电容器, 对频率是 10^8 赫的高频电流和频率是 10^3 赫的音频电流, 容抗各是多大?

解答: 对 10^6 赫高频电流, 电容容抗

$$X_{C_1} = \frac{1}{2\pi f_1 C} = \frac{1}{2 \times 3.14 \times 10^6 \times 100 \times 10^{-12}} = 1.59 \times 10^3 \Omega$$

对 10^3 赫音频电流，容抗

$$X_{C_2} = \frac{1}{2\pi f_2 C} = \frac{1}{2 \times 3.14 \times 10^3 \times 100 \times 10^{-12}} = 1.59 \times 10^6 \Omega$$

2. 把电容为 5 微法的电容器接到 220 伏、50 赫的交流电路中，通过电容器的电流是多少？把电容器换为 0.05 微法的，通过的电流是多少？

解答：电容为 5 微法时，通过电容器的电流

$$\begin{aligned} I &= \frac{U}{X_C} = \frac{U}{\frac{1}{2\pi f C}} = U \cdot 2\pi f C \\ &= 220 \times 2\pi \times 50 \times 5 \times 10^{-6} = 0.345 \text{A} \end{aligned}$$

当电容器电容为 0.05 微法时，通过电流

$$\begin{aligned} I' &= \frac{U}{X'_C} = \frac{U}{\frac{1}{2\pi f C'}} = U \cdot 2\pi f C' \\ &= 220 \times 2\pi \times 50 \times 0.05 \times 10^{-6} \\ &= 3.45 \times 10^{-3} \text{A} = 3.45 \text{mA} \end{aligned}$$

3. 在有 220 伏、50 赫交流电源的地方，使用一个交流电流表可以测定电容器（耐压在 311 伏以上）的电容，说明测定的方法和原理。

解答：根据 $I = \frac{U}{X_C}$ 及 $X_C = \frac{1}{2\pi f C}$ 可得：

$$I = U \cdot 2\pi f C$$

式中， U 、 f 已知， I 为通过电容器的电流，可用交流电流表测出，因而 C 可由下式求出：

$$C = \frac{1}{2\pi f \cdot U}$$

4. 线圈的自感系数为 L ，电容器的电容为 C 。要使感抗和容抗相等，交流电的频率应该满足什么条件？

解答：对同一电源要使线圈感抗和电容容抗相等，应满足的关系是 $X_L = X_C$ ，即

$$2\pi f L = \frac{1}{2\pi f C}$$

因此电源频率应满足条件是

$$f^2 = \frac{1}{4\pi^2 LC}$$

即

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

六、练习六

1. 变压器能不能改变直流电的电压？说明理由。

解答：变压器是利用交流电通过线圈在铁心中产生交变磁通，从而使副线圈中引起感生电动势而完成变压作用的，对于稳恒电流，由于不会引起磁通变化，也就无法完成变压作用。因此，变压器不能改变直流电压。

2. 收音机中的变压器，原线圈有 1210 匝，接在 220 伏的交流电源上，要得到 5 伏、6.3 伏和 350 伏三种输出电压，三个副线圈的匝数各是多少？

解答：根据变压比公式可得

$$n_{\text{次}} = \frac{U_{\text{次}}}{U_{\text{初}}} \cdot n_{\text{初}}$$

5 伏绕组匝数

$$n_1 = \frac{U_1}{U_{\text{初}}} \cdot n_{\text{初}} = \frac{5}{220} \times 1210 \approx 28(\text{匝})$$

6.3 伏绕组匝数

$$n_2 = \frac{U_2}{U_{\text{初}}} \cdot n_{\text{初}} = \frac{6.3}{220} \times 1210 \approx 35(\text{匝})$$

350 伏绕组匝数

$$n_3 = \frac{U_3}{U_{\text{初}}} \cdot n_{\text{初}} = \frac{350}{220} \times 1210 \approx 1925(\text{匝})$$

3. 为了安全，机床上照明电灯用的电压是 36 伏，这个电压是把 220 伏的电压降压后得到的，变压器的原线圈是 1140 匝，副线圈是多少匝？用这台变压器给 40 瓦的电灯供电，原副线圈中的电流强度各是多大？

解答：由变压比公式 $\frac{U_1}{U_2} = \frac{n_1}{n_2}$ ，可得副线圈匝数

$$n_2 = \frac{U_2}{U_1} \cdot n_1 = \frac{36}{220} \times 1140 = 187(\text{匝})$$

当变压器副线圈向 40 瓦电灯供电时，通过副线圈的电流

$$I_2 = \frac{P}{U} = \frac{40}{36} \approx 1.1\text{A}$$

因为变压器的输出功率和输入功率相等，即 $P_{\text{原}} = P_{\text{副}} = 40$ 瓦，所以通过原线圈的电流

$$I_1 = \frac{P_{\text{原}}}{U_{\text{原}}} = \frac{40}{220} = 0.18\text{A}$$

或：由 $\frac{I_1}{I_2} = \frac{n_2}{n_1}$ ，可得：

$$I_1 = \frac{n_2}{n_1} \cdot I_2 = \frac{187}{1140} \times 1.1 = 0.18\text{A}$$

4. 利用变压器的原理可以测量线圈的匝数；用被测线圈作原线圈，用一个匝数已知的线圈作副线圈，通入交流电，测出两线圈的电压，就可以求出被测线圈的匝数，已知副线圈有 400 匝，把原线圈接到 220 伏的线路中，测得副线圈的电压是 55 伏，求原线圈的匝数。

解答: 设原线圈匝数为 n_1 , 副线圈匝数为 n_2 , 原线圈电压为 U_1 , 副线圈电压为 U_2 . 根据变压比公式 $\frac{U_1}{U_2} = \frac{n_1}{n_2}$, 可得

$$n_1 = \frac{U_1}{U_2} \cdot n_2 = \frac{220}{55} \times 400 = 1600(\text{匝})$$

5. 在图 3.28 所示的电压互感器的电路中, 为什么副线圈的匝数比原线圈的少? 在图 3.29 所示的电流互感器的电路中, 为什么副线圈的匝数比原线圈的多?

解答: 使用电压互感器是为了将被测的高电压转化成低电压, 根据变压器变压比公式可知, 副线圈匝数要比原线圈少得多. 而使用电流互感器是为了将被测的强电流转化为弱电流, 根据变流比公式 $I_1 : I_2 = n_2 : n_1$ 可知, 副线圈匝数比原线圈多得多 (事实上电流互感器的初级线圈只有一、二匝).

七、练习七

1. 在课文所给的例子中, 用 110 伏和 11 千伏的电压输电, 分别要用 96000mm^2 和 9.6mm^2 的铝导线. 如果不用铝导线, 而用铜导线, 导线的横截面积分别要多大?

解答: 根据题意, 导线的长度和电阻仍应与原来铝导线的相同. 根据电阻定律有:

$$R_{\text{铜}} = \rho_{\text{铜}} \cdot \frac{\ell_{\text{铜}}}{S_{\text{铜}}}, \quad R_{\text{铝}} = \rho_{\text{铝}} \cdot \frac{\ell_{\text{铝}}}{S_{\text{铝}}}$$

两式相除可得

$$\frac{S_{\text{铜}}}{S_{\text{铝}}} = \frac{\rho_{\text{铝}}}{\rho_{\text{铜}}}$$

所以,

$$S_{\text{铜}} = \frac{\rho_{\text{铜}}}{\rho_{\text{铝}}} \cdot S_{\text{铝}}$$

查课本第二册第 180 页电阻率表可知:

$$\rho_{\text{铜}} = 1.7 \times 10^{-8} \Omega \cdot \text{m}, \quad \rho_{\text{铝}} = 2.9 \times 10^{-8} \Omega \cdot \text{m}$$

所以, 用 110 伏输电时, 使用铜导线截面积应为:

$$S_1 = \frac{1.7 \times 10^{-8}}{2.9 \times 10^{-8}} \times 96000 = 56640\text{mm}^2$$

用 11 千伏输电时, 使用的铜导线截面积为:

$$S_2 = \frac{1.7 \times 10^{-8}}{2.9 \times 10^{-8}} \times 9.6 = 5.7\text{mm}^2$$

2. 从发电站输出的功率为 200 千瓦, 输电线的总电阻为 0.05 欧, 用 110 伏和 11 千伏的电压输电, 在这两种情况下, 在输电线上损失的电压各是多少伏? 输送到用户的电压各是多少伏? 在输电线上损失的功率各是多少千瓦?

解答: 输电线电阻与用户负载构成串联电路, 电路消耗功率为电站输出功率 200 千瓦.

因为 $P = U \cdot I$, 所以 $I = P/U$. 用 110 伏电压送电时, 电路电流

$$I_1 = \frac{200 \times 10^3}{110} = 1.82 \times 10^3 \text{A}$$

用 11 千伏电压送电时，电路电流

$$I_2 = \frac{200 \times 10^3}{11 \times 10^3} = 18.2\text{A}$$

(a) 用 110 伏电压送电时，输电线上损失电压

$$U_{\text{损}1} = I_1 \cdot R = 1.82 \times 10^3 \times 0.05 = 91\text{V}$$

用户电压

$$U_{\text{用}1} = U_1 - U_{\text{损}1} = 110 - 91 = 19\text{V}$$

输电线损失功率

$$P_{\text{损}1} = I_1^2 \cdot R = (1.82 \times 10^3)^2 \times 0.05\text{W} = 166\text{kW}$$

(b) 用 11 千伏电压送电时，输电线上损失电压

$$U_{\text{损}2} = I_2 \cdot R = 1.82 \times 0.05 = 0.91\text{V}$$

用户电压

$$U_{\text{用}2} = U_2 - U_{\text{损}2} = 11 \times 10^3 - 0.91\text{V} \approx 11\text{kV}$$

输电线损失功率

$$P_{\text{损}2} = I_2^2 \cdot R = 1.82^2 \times 0.05\text{W} \approx 0.017\text{kW}$$

3. 用 220 伏和 11 千伏两种电压来输电，输送的功率相同，在输电线上损失的功率相同，导线的长度和电阻率也相同，求导线的横截面积之比。

解答：本题应根据损失功率列式进行比较。设输送端电压为 U ，输送功率为 P ，导线电阻为 R ，导线长度为 ℓ ，电阻率为 ρ 、横截面积为 S 。由输送电压与输送功率求出通过导线电流： $I = P/U$ 。

由于导线上损失功率 $P = I^2R$ ，式中 $R = \rho \cdot \frac{\ell}{S}$ 。故损失功率可表示为

$$P = I^2R = \left(\frac{P}{U}\right)^2 \cdot \rho \frac{\ell}{S}$$

若分别以 220 伏和 11 千伏输电，有

$$P_{\text{损}1} = \left(\frac{P}{U_1}\right)^2 \cdot \rho \frac{\ell}{S_1}, \quad P_{\text{损}2} = \left(\frac{P}{U_2}\right)^2 \cdot \rho \frac{\ell}{S_2}$$

因为 $P_{\text{损}1} = P_{\text{损}2}$ ，所以

$$\left(\frac{P}{U_1}\right)^2 \cdot \rho \frac{\ell}{S_1} = \left(\frac{P}{U_2}\right)^2 \cdot \rho \frac{\ell}{S_2}$$

整理后可得：

$$\frac{S_1}{S_2} = \frac{U_2^2}{U_1^2} = \frac{(11 \times 10^3)^2}{220^2} = \frac{2.5 \times 10^3}{1}$$

即：用 220 伏和 11 千伏输电两种情况导线横截面积之比为 $2.5 \times 10^3 : 1$ 。

八、练习八

1. 图 3.33 中变压器副线圈 aO 间和 bO 间的交变电压都是 6 伏特. 当 D_1 导通而 D_2 截止时, 加在 D_2 上的反向电压的最大值是多大?

解答: 设图 3.51 中的 O 点为零电势点. 当变压器输出电压处于正半周最大值时, a 点电势为 $+6\sqrt{2}$ 伏, b 点电势为 $-6\sqrt{2}$ 伏, 由于 D_1 处于正向电压作用而导通, c 点和 a 点电势接近相同, 亦为 $+6\sqrt{2}$ 伏. 对二极管 D_2 而言, 其正极电势为 b 点电势为 $-6\sqrt{2}$ 伏, 而负极电势为 c 点电势 $+6\sqrt{2}$ 伏, 处于反向电压而截止, 这个反向电压为 $12\sqrt{2} \approx 17$ 伏 ($U_{cb} \approx 17$ 伏). 因此加在 D_2 上反向电压最大值可达 17 伏.

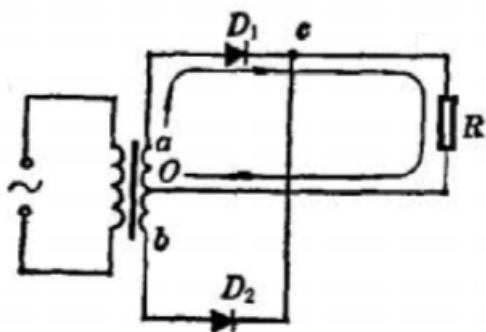


图 3.51

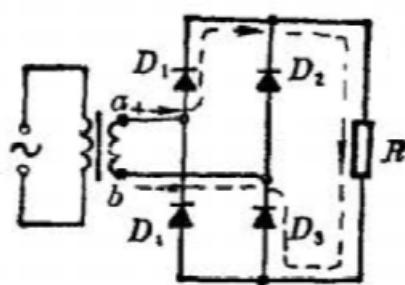


图 3.52

2. 课本图 3.40 是哪一种整流电路? 试用带箭头的线画出当 a 正 b 负时电流的通路.

解答: 这是桥式整流电路, a 正 b 负时电流通路如图 3.52 所示.

3. 课本图 3.41 中的信号是正弦交流电, 最大值为 1 伏, 直流电源的电动势为 4.5 伏. 画出负载 R 两端的电压波形, 如果二极管 D 反接, 负载 R 两端的电压又怎样? 直流电源的内电阻略去不计.

解答: 由于正弦交流电电压最大值为 1 伏, 而电源电动势为 4.5 伏, 因此无论正弦交流信号处于正半周还是负半周, 加在二极管两端的电压始终是正向电压, 处于导通状态. R 两端电压变化范围为 3.5 伏至 5.5 伏, R 两端电压波形如图 3.53 所示, 如果二极管反接, 则无论是交流信号的正半周还是负半周, 对二极管来说始终处于反向截止状态, 通过 R 的电流可认为是零, R 两端电压也是零.

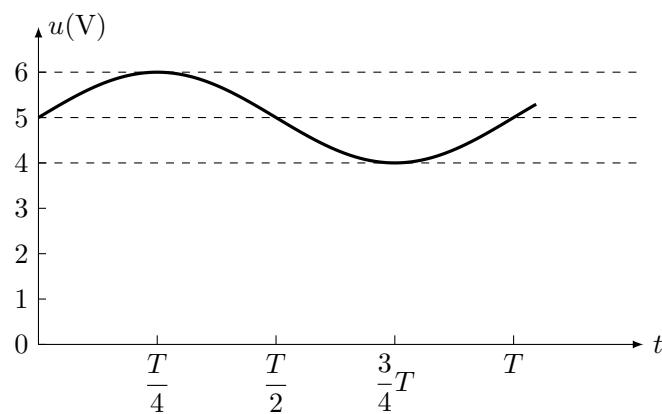


图 3.53

4. 在课本图 3.35 所示的桥式整流电路中, 如果二极管 D_1 的极性接反, 会发生什么现象? 如果二极管 D_1 已被击穿, 又会是什么现象? 说明理由, 并画出负载电阻上的电压波形.

解答: 二极管 D_1 极性接反电路如图 3.54 所示, 当交流电压处于正半周时, a 正 b 负, 由于 D_1 和 D_4 均处于反向电压作用之下, 各二极管与负载电阻 R 上都没有电流通过. 而当交流电压处于负半周时, 即 a 负 b 正, 此时 D_2 与 D_1 都处于正向电压作用之下导通, 造成 ab 两点短路, 因而将造成 D_2 与 D_1 因通过较大短路电流而烧毁, 严重时将烧毁变压器, R 上也没有电流.

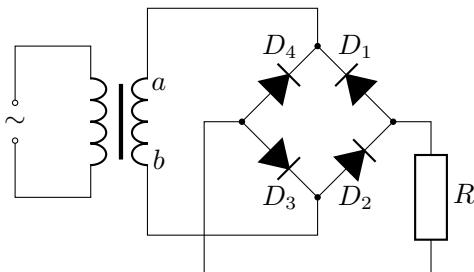


图 3.54

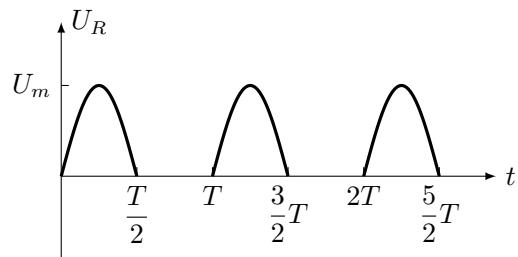


图 3.55

如果 D_1 被击穿, 相当于 D_1 被短路. 在交流电正半周, 即 a 正 b 负时, R 上将有电流通过. 而当交流电负半周, 即 a 负 b 正时, D_2 处于正向导通, 直接将 ab 两点短路. R 因两端电势相同, 而没有电流通过. 因此仍将出现烧毁 D_2 现象, 并有烧毁变压器可能. 负载 R 上的电压波形如图 3.55 所示.

九、练习九

1. 根据课本图 3.49 写出三相负载相同时的相电流的瞬时值的表达式, 并利用数学中学过的三角知识证明: 三个相电流之和在任何时刻都等于零.

证明: 相电流的瞬时值表达式分别为

$$i_a = I_m \sin \omega t$$

$$i_b = I_m \sin(\omega t - 120^\circ)$$

$$i_c = I_m \sin(\omega t - 240^\circ)$$

三个相电流之和

$$i_a + i_b + i_c = I_m \sin \omega t + I_m \sin(\omega t - 120^\circ) + I_m \sin(\omega t - 240^\circ)$$

根据三角函数和差化积公式

$$\sin A + \sin B = 2 \sin \frac{A+B}{2} \cdot \cos \frac{A-B}{2}$$

可得：

$$\begin{aligned}
 i_a + i_b + i_c &= I_m \sin \omega t + I_m [\sin(\omega t - 120^\circ) + \sin(\omega t - 240^\circ)] \\
 &= I_m \sin \omega t + 2I_m \sin \frac{(\omega t - 120^\circ) + (\omega t - 240^\circ)}{2} \cdot \cos \frac{(\omega t - 120^\circ) - (\omega t - 240^\circ)}{2} \\
 &= I_m \sin \omega t + 2I_m \cdot \sin(\omega t - 180^\circ) \cdot \cos 60^\circ \\
 &= I_m \sin \omega t + 2I_m \cdot (-\sin \omega t) \cdot \frac{1}{2} \\
 &= I_m \sin \omega t - I_m \sin \omega t = 0
 \end{aligned}$$

2. 在课本图 3.46 所示的三相四线制电路中，相电压是 220 伏。现有“220V,100W”的灯泡 90 盏，第一相安装 40 盏，第二相安装 30 盏，第三相安装 20 盏。求灯泡全接通时，各个相电流和线电流。

解答：在三相四线制电路中，相电流和线电流相同。因此，第一相电流

$$I_{\text{相 } 1} = I_{\text{线 } 1} = \frac{P}{U} \cdot n_1 = \frac{100}{220} \times 40 = 18.2 \text{ A}$$

第二相电流

$$I_{\text{相 } 2} = I_{\text{线 } 2} = \frac{P}{U} \cdot n_2 = \frac{100}{220} \times 30 = 13.6 \text{ A}$$

第三相电流

$$I_{\text{相 } 3} = I_{\text{线 } 3} = \frac{P}{U} \cdot n_3 = \frac{100}{220} \times 20 = 9.1 \text{ A}$$

3. 如果电源采用课本图 3.53 所示的三角形连接，线电压和相电压的关系是怎样的？设各相线圈的情况相同。

解答：这种情况下两根端线间电压和直接与这两端线相连的那一相电压相同（图 3.56 甲）。即线电压和相电压相同。

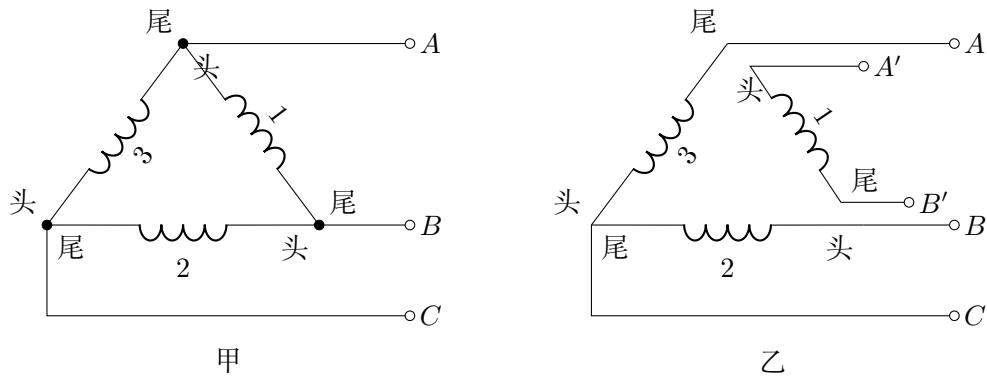


图 3.56

说明：能否这样连接取决于能否证明任一时刻 $u_{AB} = u_{AC} + u_{CB}$ 。实际上三角形连接是将各相线圈头尾相接的，为证明方便，我们先假定将第一相头尾与电路脱离开。如图 3.56 乙所示，那么

第一相头尾电压瞬时值为： $u_{AB} = U_m \sin \omega t$ 。

第二相与第三相头尾相接后 BA 两点电压（注意顺序）瞬时值为：

$$\begin{aligned}
 u_{BA} &= u_{BC} + u_{CA} \\
 &= U_m \sin(\omega t - 120^\circ) + U_m \sin(\omega t - 240^\circ) \\
 &= U_m [\sin(\omega t - 120^\circ) + \sin(\omega t - 240^\circ)] \\
 &= U_m \cdot 2 \sin(\omega t - 180^\circ) \cdot \cos 60^\circ \\
 &= U_m \cdot 2 \cdot (-\sin \omega t) \cdot \frac{1}{2} \\
 &= -U_m \sin \omega t
 \end{aligned}$$

$$u_{AB} = -u_{BA} = U_m \sin \omega t = U_{A'B'}$$

上式表明 AB 两点电压变化与 $A'B'$ 两点电压变化是完全相同的，即任一时刻 AB 两点电压与 $A'B'$ 两点电压相同，因此可以将 A 与 A' 点相接， B 与 B' 相接而形成电源的三角形连接。

十、练习十

1. 有一台感应电动机，铭牌上标有“220/380”“ \triangle/Y ”的字样。这表示这台电动机每相定于线圈的额定电压是 220 伏，如果线电压是 220 伏，定子线圈要连成三角形；如果线电压是 380 伏，定子线圈要连成星形，为什么？

解答：当定子线圈接成三角形时，加在每相定子线圈上的电压与供电电路的线电压相同，所以供电电路的线电压为 220 伏时，加在每相线圈上的电压也是 220 伏，就可使电机正常运转。如果供电电路的线电压是 380 伏，就需要把电动机定子线圈连成星形。这是因为，星形连接时，每相线圈的电压与供电电路线电压关系为 $U_{\text{线}} = \sqrt{3}U_{\text{相}}$ 。所以 $U_{\text{相}} = 380/\sqrt{3} = 220$ 伏，才可使电机正常运转。

2. 实验表明：只要把定子上任意两组线圈的电流互换一下，旋转磁场就向相反方向旋转。画出类似于课本图 3.56 的图，并加以分析说明。

解答：课本图 3.56 中， AX 绕组通以 i_{AX} ， BY 通以 i_{BY} ， CZ 通以 i_{CZ} 。那么产生磁场将沿逆时针方向旋转。现在，将某两个组定子绕组中通过的电流互换，例如将 BY 绕组中通以 i_{CZ} 电流，而 CZ 绕组中通以 i_{BY} 电流，则其旋转磁场情况如下：

- 在 $t = 0$ 时刻， AX 中电流为零； BY 中电流 i_{CZ} ，由 B 端流入、 Y 端流出； CZ 中电流 i_{BY} ，由 Z 端流入、 C 端流出。合成磁场方向如图 3.57 甲中虚线所示，其方向指向 X 。
- 在 $t = T/3$ 时刻， CZ 中电流为 $i_{BY} = 0$ ； AX 中电流 i_{AX} ，由 A 端流入、 X 端流出； BY 中电流 i_{CZ} 由 Y 端流入、 B 端流出，合成磁场方向如图 3.57 乙中虚线所示，其方向指向 Z 。

显然经过 $T/3$ ，合成磁场方向指向沿顺时针方向由 X 移至 Z ，转过 120° 。图 3.57 丙和丁中虚线分别表示在 $2T/3$ 及 T 时刻合成磁场情况，可以看出经过一个周期 T ，合成磁场也相应沿顺时针方向转过一圈。因此任意对调两个绕组中的电流，就可使旋转磁场方向改变转向。

3. 在课本图 3.54 所示的实验中，铝框总要比磁铁转得慢，即比旋转磁场转得慢，而不能跟磁

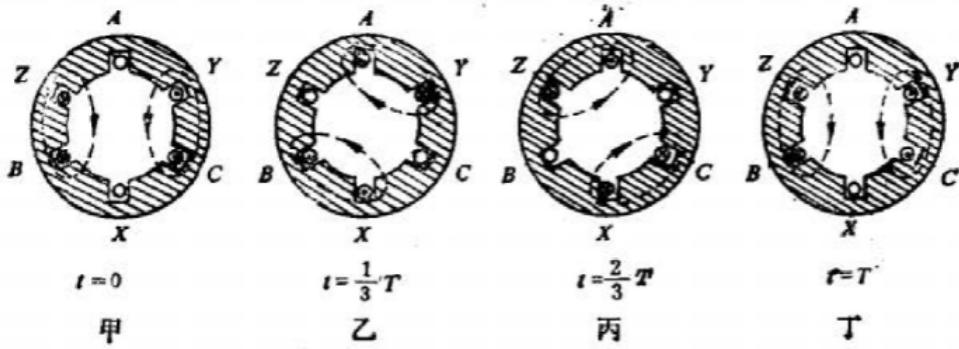


图 3.57

场转得一样快，即不能同步旋转，因此感应电动机也叫异步电动机，试说明铝框为什么不能跟磁铁同步旋转。

解答：使铝框转动的旋转力矩，是由于在铝框中产生的感生电流受到磁场力而引起的。因此，铝框与磁铁间有相对运动而发生切割磁力线现象是铝框转动的前提。如果某一瞬间铝框与旋转磁场同步转动，那么，铝框就不切割磁力线，感生电流也就消失了，所受磁场力矩随之消失。在阻力矩作用下，铝框转速会减小，铝框转速减小了，又会切割磁力线产生感生电流，且随着转速减小，电流逐步增大，铝框所受磁场力矩也将增大，直至转速减小到一定程度，使电磁力矩和阻力矩平衡，而使铝框维持匀速转动为止。这就是铝框转速永远小于磁场转速，不能同步旋转的道理。

十一、习题

- 把电阻和电容器串联在交流电路中，测得电阻上的电压为 30 伏，电容器上的电压为 40 伏。已知电阻的阻值为 200 欧，交流电的频率为 50 赫，求电容器的电容，这道题提供了一种用伏特表测定电容的方法。

解答：在交流电路中，任一瞬间通过串联电路各处的电流都是相同的。电路中电流的有效值为

$$I = \frac{U_R}{R} = \frac{30}{200} = 0.15 \text{ A}$$

对于电容器部分，可以看成一个纯电容电路，因而有：

$$I = \frac{U_C}{X_C} = \frac{U_C}{\frac{1}{2\pi f C}} = U_C \cdot 2\pi f C$$

$$C = \frac{I}{U_C \cdot 2\pi f} = \frac{0.15}{40 \times 2\pi \times 50} = 12 \times 10^{-6} \text{ F} = 12 \text{ mF}$$

- 把电阻和电容器并联在交流电路中，已知电阻的阻值是 500 欧，电容器的电容是 30 微法。当交流电的频率为 50 赫时，通过电阻和电容器的电流之比是多大？当交流电的频率是 500 赫时，电流之比又是多大？

解答：在交流电路中，并联各支路两端电压在任一瞬间都是相同的，因此设电阻与电容器两端电压为 U 。因为

$$I_R = \frac{U}{R}, \quad I_C = U \cdot 2\pi f C$$

所以

$$\frac{I_R}{I_C} = \frac{U/R}{U \cdot 2\pi f C} = \frac{1}{R \cdot 2\pi f C}$$

当电源频率为 50 赫时

$$\frac{I_R}{I_C} = \frac{1}{R \cdot 2\pi f C} = \frac{1}{500 \times 2\pi \times 50 \times 30 \times 10^{-6}} \approx 0.21$$

当电源频率为 500 赫时

$$\frac{I_R}{I_C} = \frac{1}{R \cdot 2\pi f C} = \frac{1}{500 \times 2\pi \times 500 \times 30 \times 10^{-6}} \approx 0.021$$

3. 变压器的原线圈为 1100 匝，副线圈为 180 匝，原线圈接到 220 伏的交流电路中，副线圈上并联了 3 个阻值都是 90 欧的用电器。如果原线圈允许通过的最大电流为 0.9 安，副线圈上最多还可以并联多少个阻值为 60 欧的用电器？

解答：根据变压比公式 $\frac{U_1}{U_2} = \frac{n_1}{n_2}$ 可得：副线圈电压

$$U_2 = \frac{n_2}{n_1} \cdot U_1 = \frac{180}{1100} \times 220 = 36V$$

根据变流比公式 $\frac{I_1}{I_2} = \frac{n_2}{n_1}$ 可得：副线圈允许通过的最大电流为

$$I_2 = \frac{n_1}{n_2} \cdot I_1 = \frac{1100}{180} \times 0.9 = 5.5A$$

3 个 90 欧的用电器并联在副线圈上，副线圈上通过的电流为：

$$I = \frac{U_2}{R_{\text{并}}} = \frac{36}{90/3} = 1.2A$$

副线圈还可增加负载电流

$$I' = I_2 - I = 5.5 - 1.2 = 4.3A$$

设还可并联 m 个 60 欧用电器，其总电流不超过 4.3 安。即

$$m \cdot \frac{U_2}{60\Omega} \leq I'$$

所以

$$m \cdot \frac{36}{60} A \leq 4.3A$$

即： $m \leq 7.17$ 。

因此，最多还可并联 7 个 60 欧的用电器。

4. 有一个教学用的可拆变压器，它的原副线圈外部还可绕线，现在要测定原副线圈的匝数。现有一根足够长的绝缘导线，还需要什么器材？简要说明实验原理。

解答：还需一块能测较高电压的交流电压表和一块可测几伏特的小量程电压表，将绝缘导线在副线圈（或原线圈）外部绕几十匝，将变压器重新组装好后，按原线圈规定电压接入电源，分别实测原线圈两端、副线圈两端和加绕线圈两端电压值，根据变压比公式就可以计算出原副线圈匝数。

由 $\frac{U_1}{U_2} = \frac{n_1}{n_2}$ 可得 $n_1 = \frac{U_1}{U_2} \cdot n_2$. 其中 U_1 、 U_2 可实测, n_2 为加绕线圈匝数, 便可求出原副线圈匝数.

注意: 实际上进行这个实验时, 需要根据所给变压器的 - 具体情况和要求测量的准确程度进行测量, 所用伏特计一般采用多量程的, 如万用表交流电压挡. 实验电源也可以用低压电源, 将低电压加在加绕线圈上进行测量, 如果仅有一块单量程较高电压的电压表, 也可以用如下方法测量:

将加绕线圈与原线圈 (或副线圈) 串联起来. 测出原线圈两端电压和串联绕组总电压, 由下式求出原线圈匝数.

$$\frac{U_{\text{原}}}{U_{\text{总}} - U_{\text{原}}} = \frac{n_{\text{原}}}{n_{\text{加}}}$$

5. 课本图 3.59 是电工常用的钳形电流表, 可以用来测定交变电流, 把钳口打开, 把被测的通电导线放在钳口中间 (右图), 交流电表就可以测出导线中的电流强度. 试说明钳形电流表的工作原理.

解答: 钳形电流表实际上是一种电流互感器, 用以测定强交流电电流. 当导线中有交变电流通过时, 在环绕导线的铁心中有变化磁通, 从而使绕在铁心上的线圈产生感生电流, 接在绕组两端的电流表即可读出读数. 通电导线中电流越大, 在铁心中磁通变化率就越大, 感生电流也就越大, 电流表的读数相应就越大, 这就是钳形电流表的工作原理.

6. 在课本图 3.35 所示的桥式整流电路中, 变压器原副线圈的匝数比等于 8, 原线圈接在 220 伏的交流电路中, 能不能选用最高反向工作电压为 50 伏的晶体二极管进行整流? 为什么?

解答: 副线圈两端电压

$$U_{\text{副}} = \frac{n_{\text{副}}}{n_{\text{原}}} \cdot U_{\text{原}} = \frac{1}{8} \times 220 = 27.5 \text{V}$$

在课本图 3.35 所示桥式整流电路中, 每个二极管承受的反向电压可从面分析得知:

在交流电压正半周时, D_1 与 D_3 导通, 这两个二极管两端电势可认为相同 (忽略二极管自身压降), 而 D_2 与 D_4 反向截止, 相当于跨接在 a, b 两点间, 因而其反向承受最大电压为变压器次级电压最大值. 同理可知 D_1 与 D_4 情况, 即

$$U_{km} = U_m = \sqrt{2} \cdot U_{\text{副}} = \sqrt{2} \times 27.5 = 38.9 \text{V} < 50 \text{V}$$

因此可以选用最高反向工作电压为 50 伏的晶体二极管进行整流.

7. 课本图 3.60 是电子技术中用到的限幅电路, 电池组的电动势都为 \mathcal{E} , 左端输入的是正弦交流电, 电压 u_1 的最大值为 $2\mathcal{E}$. 试画出右端输出的电压 u_2 的图象, 并分析说明理由. 电池组的内电阻略去不计.

解答: 右端输出电压 u_2 的图象如图 3.58 乙所示. 图甲表示输入端 u_1 的图象.

当 u_1 处于正半周时, 如果 $u_1 < \mathcal{E}$, 对 D_2 所在支路来说, 由于 D_2 始终处于反向电压作用, 因此 D_2 截止, 该支路被视为断路状态, 对于 D_1 所在支路来说, 由于 D_1 正极电势仍低于负极电势, 因而也处于截止状态, 所在支路也可视为断路状态, 因此 R 上几乎没有压降, u_2 与 u_1 电压变化相同. 如果 u_1 增大至 $u_1 > \mathcal{E}$, D_2 仍然受反向电压的作用, D_2 所在支路仍可视为断路状态, 而对 D_1 所在支路, 由于 D_1 正极电势大于负极电势, D_1 导通. R 两端电压为 $u_1 - \mathcal{E}$, R 中有电流通过. 而输出端电压由于电池组作用而基本维持与电动

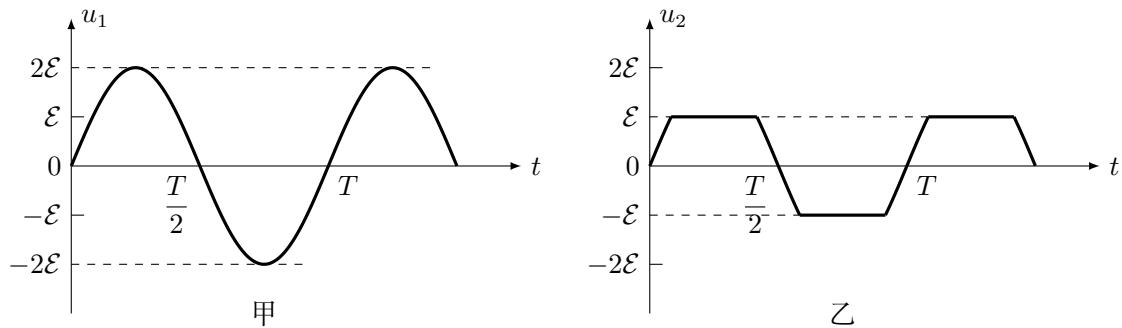


图 3.58

势 \mathcal{E} 相同。换言之，当正半周 $u_1 < \mathcal{E}$ 时，输出与输入相同，当 $u_1 > \mathcal{E}$ 时，输出端电压维持 \mathcal{E} 不变，从而起到限幅作用，同理可分析负半周情况。

8. 在课本图 3.46 所示的三相四线制照明电路中，设 A 相接通了 8 盏“220V,100W”的灯泡，B 相接通了 2 盏“220V,100W”的灯泡，C 相中没有接通灯泡，这时接通的灯泡都正常发光，因某种原因中性线断开了（在该图中 O 处断开），将会发生什么现象？说明理由。

解答：如果中性线断开，A 相与 B 相灯泡串联起来，串联电路两端电压将是线电压 380 伏，由于两组灯泡是串联，其电阻之比为

$$R_A : R_B = \frac{R}{8} : \frac{R}{2} = 1 : 4$$

式中 R 表示每一灯泡电阻，因而这两组灯泡电压分配之比

$$U_A : U_B = R_A : R_B = 1 : 4$$

所以 A 相灯泡两端电压为

$$U_A = \frac{1}{5} \times 380 = 76V$$

B 相灯泡两端电压为

$$U_B = \frac{4}{5} \times 380 = 304V$$

因此，B 相灯泡将因电压过高而烧毁。

由此可见，在三相四线制供电电路中，中性线在任何情况下不允许断开，以免造成用电器因电压变高而烧毁的现象发生。这也是中性线不允许安装开关和保险丝的原因。

9. 如课本图 3.61 所示，电源采用星形连接，负载采用三角形连接。电源的相电压是 220 伏，各相负载相同，阻值都是 110 欧，求通过各相负载的相电流和线电流。

解答：电源部分的线电压

$$U_{\text{线}} = \sqrt{3}U_{\text{相}} = \sqrt{3} \times 220 = 380V$$

负载电路是三角形连接，其相电压与线电压相同，

$$U'_{\text{相}} = U'_{\text{线}} = 220\sqrt{3} = 380V$$

负载相电流

$$I_{\text{相}} = \frac{U'_{\text{相}}}{R} = \frac{220\sqrt{3}}{110} = 3.46A$$

负载线电流

$$I_{\text{线}} = \sqrt{3} I_{\text{相}} = \sqrt{3} \times \frac{220}{110} \sqrt{3} = 6.00 \text{A}$$

10. 每一台电动机都有一定的额定功率。在实际中要根据负载的功率来选择电动机的功率，使电动机的额定功率等于或稍大于负载的功率，有一台水泵，抽水量 $Q = 0.03 \text{m}^3/\text{s}$ ，抽水高度 $h = 20 \text{m}$ ，效率 $\eta_1 = 0.55$ ，用一台感应电动机通过皮带传动来带动，皮带传动的效率 $\eta_2 = 0.8$ 。现有三台感应电动机，额定功率分别是 14 千瓦、20 千瓦、28 千瓦，应当选择哪一台？计算时取 $g = 10 \text{m/s}^2$ 。

解答：设电动机的功率为 P 。那么根据效率的意义可知有用功率

$$P_{\text{有}} = \eta_1 \cdot \eta_2 \cdot P$$

由于有用功率在单位时间内使一定量的水抽至高处增加水势能，因此

$$P_{\text{有}} = \frac{mgh}{t} = \frac{\rho V \cdot gh}{t} = \rho gh \cdot Q$$

所以

$$\begin{aligned} \eta_1 \cdot \eta_2 \cdot &= \rho \cdot g \cdot h \cdot Q \\ P = \frac{\rho \cdot g \cdot h \cdot Q}{\eta_1 \cdot \eta_2} &= \frac{1.0 \times 10^3 \times 10 \times 20 \times 0.03}{0.55 \times 0.8} = 13.6 \times 10^3 \text{W} = 13.6 \text{kW} \end{aligned}$$

所以应选用 14 千瓦的电动机来带动这台水泵。

第五节 参考资料

一、我国电力工业发展的一些资料

旧中国的电力工业极端落后。中国的火力发电始于 1882 年，在外国人建立的上海电光公司中安装了一台供应 16 盏弧光灯的发电机，水力发电始于 1912 年，在距云南昆明 40 公里的螳螂川上建成石龙坝水电站。从 1882 年到 1949 年的 68 年中，电力工业发展十分缓慢，到 1949 年全国发电量才达 43 亿千瓦时，均每人每年仅 8.6 千瓦时，全国发电设备容量仅 185 万千瓦，多数设备还残缺不全，不能正常运转，而且分布极不均衡，80% 以上集中在沿海省市。

建国以后，在党和政府的领导下，我国电力工业得到迅速发展。1986 年全年发电量达 4455 亿千瓦时，为 1949 年的 103.6 倍。现在每四天发电量就超过 1949 年一年的发电量。110 千伏以上高压输电线路 1949 年为 1937 公里，1983 年增加到 11.6 万公里，增长 59 倍，这在世界先进国家电力工业发展史上也是少有的。截止到 1983 年，我国现有发电设备容量达 7644 千瓦，相当于 1949 年的 41.3 倍，由建国初期居世界第 21 位跃升到第八位；发电量由第 25 位跃升到第六位，仅次于美国、苏联、日本、联邦德国和加拿大，大体达到了美国 1949 年、苏联 1963 年和日本 1970 年的水平。

1983 年全国水电装机容量已达 2416 万千瓦，是 1949 年 16 万千瓦的 151 倍。1986 年，全国水电发电量已达 932 亿千瓦时，是 1949 年 7.1 亿度的 131 倍。

截止到 1983 年，全国已有 500 千瓦以上的电厂 4315 座，其中装机容量在 10 万千瓦以上的水力发电厂 42 座，火力发电厂 128 座，全国形成六大电网（见后）。我国高压远距离输电从解放初的 35 千伏线路发展到大量建设 110 千伏、220 千伏、330 千伏超高压线路。近年又发展

到 500 千伏超高压线路，建成总长度 1594 公里。直流输电在我国过去是个空白，七十年代在上海市内进行了 31 千伏直流输电试验，八十年代开始在舟山建造 100 千伏直流输电试验工程，并着手兴建葛洲坝至上海的正负 500 千伏超高压工程。

多年来，我国为发展核电创造了必要的条件。目前正在兴建广东大亚湾核电站（装机容量为 180 万千瓦）和浙江秦山核电站（装机容量 30 万千瓦）。

在我国第七个五年计划（1986 年—1990 年）中，电力工业是能源工业发展的中心，要积极发展火电，大力开发水电，有步骤有计划地建设核电站。争取到 1990 年全国发电量达到 5500 亿千瓦时。

我国年发电量发展情况：

	1949 年	1952 年	1978 年	1983 年	1986 年
发电量 (亿千瓦时)	43.1	72.6	2565.5	3514	4455
	其中水电 7.1			其中水电 864	其中水电 932

1985 年若干省市发电量情况：

	北京	河北	河南	山西	辽宁	湖北
发电量 (亿千瓦时)	103.3	262.9	208.45	184.6	352.1	220.54

我国七大电网：目前我国六大电网已初具规模，这六大电网是：

1. 华北电网由京津唐、石邯、山西和内蒙呼包电网组成。“七五”计划期间，华北、西北电网将并联，再与东北电网并联，形成我国北部跨越九省两市的大型电网。西北电网由陕西、甘肃、天水、西宁地区电网合并成的陕甘青、宁夏石银青电网组成，这两个电网的装机容量均超过 500 万千瓦。1983 年初，西北电网和西南电网以 22 万伏线路并联。
2. 东北电网由原东电网主网发展而成。1981 年装机容量达 880 万千瓦，并入黑龙江东部及吉林延边的“佳鸡牡延”电后，容量可达 1000 万千瓦。
3. 华东电网在上海电网基础上发展起来的，由上海、江苏、安徽、浙江电网组成，已装机 990 多万千瓦，还将与山东电网、福建电网并联，“七五”计划期间，华东电网、华中电网将以 50 万伏线路并联，形成我国中部东西大跨区电网。
4. 华中电网由湖北、河南、湖南、江西电网组成，这四个电网装机容量均超过 1000 万千瓦。
5. 西南电网由四川、贵州、云南电网组成。
6. 另外，华南电网正在建设之中，它由广东、广西电网组成。目前已装机 300 多万千瓦。红水河梯级电站投产后，将形成近 2000 万千瓦电网。

根据“七五”计划，华中与华东，西南与华南，西北、华北和华中将在“七五”期间实行联网，到 2000 年，全国将实现大联网。

西藏、新疆与台湾在较长时间内仍将单独供电。

我国已建和在建的装机容量超过 100 万千瓦的大型水电站有三个：黄河上游的龙羊峡水电站，装机容量达 128 万千瓦，年发电量 60 亿千瓦时，坝高达 175 米，刘家峡水电站，装机容量达 116 万千瓦，年发电量 57 亿千瓦时，坝高达 147 米，正在兴建的我国最大水电站长江中游葛洲坝水电站，装机容量达 271.5 万千瓦，由 2 台 17 万千瓦与 19 台 12.5 万千瓦的发电机组组成，年发电量可达 140 亿千瓦时。

二、交流电的平均值与有效值

交流电的平均值与有效值概念在教学中易造成混淆。一个变化的物理量对时间取平均值究竟有没有意义，要看实际而定。对正弦交流电来说，其电流（或电压、电动势）按正弦规律变化，在一个周期内取平均值，显然为零，就失去其意义了。但在考虑电流的热效应时，由于瞬时功率 $P_i = i^2 R$ ，因而产生热量不是与电流平均值有关，而是与电流平方的平均值有关的，因此，交流电热功率的平均值是有意义的，它相当于某一直流电通电阻时产生热功率。由于

$$\sin^2 \omega t = \frac{1}{2} - \frac{1}{2} \cos 2\omega t$$

所以交流电瞬时功率为：

$$\begin{aligned} P_i &= i^2 R = I_m^2 \cdot R \cdot \sin^2 \omega t \\ &= I_m^2 \cdot R \cdot \left(\frac{1}{2} - \frac{1}{2} \cos 2\omega t \right) \\ &= \frac{I_m^2 R}{2} - \frac{I_m^2 R}{2} \cdot \cos 2\omega t \end{aligned}$$

上式中，后一项在一个周期内平均值为零，因此，在一个周期内，交流电平均功率为：

$$\bar{P} = \frac{I_m^2 R}{2} \quad (\text{最大瞬时功率的一半})$$

如果考虑一个直流电与其等效，即 $P = I^2 \cdot R$ ，就有 $P = \bar{P}$ 即：

$$I^2 \cdot R = \frac{I_m^2 \cdot R}{2}$$

所以

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

这个与交流电通过电阻时产生热功率等效的直流电流值 I ，称为交流电的有效值，同样可知电压有效值与电动势有效值分别为：

$$U = \frac{U_m}{\sqrt{2}}, \quad \mathcal{E} = \frac{\mathcal{E}_m}{\sqrt{2}}$$

从上面讨论知道，交流电有效值概念是从交流电热功率平均值与直流电热功率等效角度引入的。在另外一些场合下，例如整流电路中，交流电经过半波整流或全波整流，其电流变为单向波形，这时，交流电流（或电压）在 $T/2$ 时间内的平均值就显得很有意义了，这个平均值应为 $T/2$ 时间内通过的总电量与时间 $T/2$ 的比值，即

$$\begin{aligned} \bar{i} &= \frac{2Q}{T} = \frac{2}{T} \cdot \int_0^{T/2} I_m \sin \frac{2\pi t}{T} dt \\ &= \frac{2}{T} \cdot \frac{I_m T}{2\pi} \left[-\cos \frac{2\pi t}{T} \right]_0^{T/2} \\ &= \frac{I_m}{\pi} \cdot (1 + 1) = \frac{2}{\pi} \cdot I_m \end{aligned}$$

相应电压平均值为：

$$\bar{u} = \frac{2}{\pi} U_m$$

在讨论整流电路及有关计算时经常运用交流电电流平均值与电压平均值，由于日常情况下交流电均用有效值，这两个值的关系是：

$$\bar{i} = \frac{2\sqrt{2}}{\pi} I \approx 0.90I, \quad \bar{u} = \frac{2\sqrt{2}}{\pi} U \approx 0.90U$$

从以上讨论可知，需根据实际物理意义来理解交流电的平均值与有效值的具体含义。

三、变压器匝数的问题

变压器的铁心截面与初级匝数都是有一定要求的，不能简单地根据变压比公式随意选择。如果要将 220 伏市电变为 110 伏电压输出，可否用初级线圈为 2 匝，次级线圈为 1 匝的变压器呢？下面简单地作一讨论：

对变压器初级线圈来说，当外加电压 U 为正弦交流电时，线圈中的电流为正弦交流电流，这个电流将激起变压器铁心中的磁通变化。由于磁通变化又产生自感电动势 E ，它是一个反电动势，始终与外加电压相平衡，即 $E = U$ 。

设 $\phi = \Phi_m \sin \omega t$ （不考虑漏磁通），若初级线圈有 N 匝，则自感电动势即时值

$$\begin{aligned} e &= -N \cdot \frac{d\phi}{dt} = -N \frac{d}{dt} \Phi_m \sin \omega t \\ &= -N \Phi_m \omega \cos \omega t \\ &= N \cdot \Phi_m \omega \sin(\omega t - 90^\circ) \\ &= 2\pi f N \Phi_m \sin(\omega t - 90^\circ) \end{aligned}$$

式中 $2\pi f N \Phi_m$ 为自感电动势最大值，记作 E_m ，则自感电动势有效值为

$$E = \frac{E_m}{\sqrt{2}} = \frac{2\pi}{\sqrt{2}} f N \Phi_m \approx 4.44 f N \Phi_m$$

故外加电压有效值与频率 f 、匝数 N 、铁心中最大磁通 Φ_m 关系为

$$U = E \approx 4.44 f N \Phi_m = 4.44 f N B_m S$$

上式是电工计算时的一个重要关系式，由上式可以看到，当初级线圈所加电压 U 一定、频率 f 一定时，匝数 N 与 $B_m S$ 成反比，对各种材料的铁心，为防止磁饱和， B_m 有一定允许值，例如优质热轧硅钢片可取到 1.0—1.2 特，因此在铁心材料与截面 S 选定的情况下，初级线圈匝数可由上式计算出来，而并不是根据变压比公式随意选取的。

设计小型变压器要进行计算，计算主要依据以下三个公式：

铁心截面：由铁心材料、铁心形状及变压器设计功率决定，一般用下式计算：

$$S = \frac{K}{\sqrt{P_0}}$$

式中， K 根据铁心材料形状而定，数值一般取 1—2。对于热轧硅钢片， K 值取 1.25 至 1.5，对于冷轧硅钢片，质量好的可取小些，对于一般黑铁片 K 值可取为 2 左右。式中 P_0 单位为瓦， S 单位为 cm^2 。

初级线圈每伏匝数：由 $U = 4.44 f N B_m S$ ，得：

$$N = \frac{U}{4.44 f B_m S}$$

取 $f = 50\text{Hz}$,

$$N \approx \frac{0.0045}{B_m S} \cdot U(\text{匝})$$

每伏匝数

$$N_0 = \frac{N}{U} = \frac{0.0045}{B_m S} (\text{匝}/\text{伏})$$

式中, B_m 单位为 T , S 单位为 m^2 .

根据每伏匝数计算初次级线圈应绕匝数, 但次级线圈匝数要加 5%, 用来抵消阻抗损失.

导线截面直径

$$d = 1.13 \sqrt{\frac{I}{j}}$$

式中 I 为通过该绕组电流强度, 单位为安, j 为导线单位截面上允许通过的电流强度, 称电流密度, 一般 100 瓦以下变压器, j 取 2.5A/mm^2 , 100 瓦以上小型变压器 j 取 2A/mm^2 . 由上式求得导线直径 d 的单位为毫米.

不能根据变压比公式随意选取匝数, 还可以从另外一个角度进行粗浅解释. 对于理想变压器, 根据变流比公式可知, 次级电流越小, 初级电流也越小, 次级空载时, 初级电流并不为零, 这时相当一个自感线圈, 正是存在这个初级电流, 才能产生自感电动势(反电动势)与外电压平衡, 我们当然希望这个电流越小越好, 这样损失就少, 由纯电感电路 $I = \frac{U}{2\pi f L}$ 可知, 这需要线圈有足够大的自感系数, 并且满足 $X_L \gg R$ 的关系, 而自感系数 L 的大小是与铁心、匝数有关的. 匝数越多, 铁心越大, 自感系数越大. 因而变压器初级匝数铁心不是随意选取的. 另一方面也不是匝数越多越好, 铁心越大越好, 这是因为还有一个经济原则, 具体选择, 需根据理论作出计算.

四、特斯拉 (1856—1943)

特斯拉是美国的发明家, 1856 年 7 月 10 日生于南斯拉夫克罗地亚的斯米良, 1880 年毕业于布拉格大学, 1884 年在美国定居.

特斯拉在科学技术上的最大贡献是开创了交流电体系, 他发现了旋转磁场, 被称为迎来电力时代的天才. 1883 年在斯特拉斯堡工作时, 利用业余时间制成了第一台感应电动机. 十九世纪八十年代在爱迪生的推动下, 直流电已普遍使用. 但直流电动机价格昂贵、使用麻烦, 每 1 平方英里的范围内, 需要一个单独的发电机供电, 很不经济. 1885 年, 特斯拉出售了他的多相交流发电机、变压器和电动机的专利权, 触发了交流电体系和直流电体系的激烈竞争. 由于交流电既安全可靠, 又能用细导线实现远距离输电, 使交流电的应用得到了迅速发展.

特斯拉一生的发明很多: 发明了电话系统的增音器, 提出了无线电通讯的基本要素是天线、发射回路和接收回路. 他发明的特斯拉线圈, 广泛用于无线电、电视机中. 1900 年, 他还证明了大地能作导体. 他还发明了供医疗用的高频电热疗法, 等等, 总共获得 112 项美国专利. 他把出售专利获得的资金用于研究技术, 表现了科学家的良好品格. 他设想过科学的某些未来课题, 如对其他行星的通讯等, 在他留下来的笔记中, 有大量创造性的天才设想.

特斯拉在晚年经济上经常处于困境, 1943 年 1 月 7 日, 他孤独地在旅馆里去世. 有三位诺贝尔奖获得者在给他的祭文中说: “这位世上显赫的智者之一, 为现代技术发展的许多方面铺平了道路.”

南斯拉夫人民为纪念他，在贝尔格莱德修建了“特斯拉纪念馆”。在他诞生百年纪念时（1956年），国际电气技术协会将 M.K.S 制系统中的磁通量密度命名为“特斯拉”。

第四章 电磁振荡和电磁波

第一节 教学要求	121
第二节 教学建议	122
一、电磁振荡	122
二、电磁波	123
(一)电磁场的教学	123
(二)电磁波	124
(三)赫兹实验	125
三、电磁波的发射与接收	125
(一)电磁波的发送	126
(二)电磁波的接收知识	126
第三节 实验指导	128
一、演示实验	128
(一)用示波器观察振荡电路中的电磁振荡	128
(二)用示波器观察电磁振荡的周期跟电容和自感系数的关系	130
(三)电磁波的发射与接收(赫兹实验)	131
(四)调制	131
(五)电谐振和调谐	132
(六)检波	133
(七)简单收音机的构造和工作原理	134
二、学生实验	136
(一)安装简单的收音机	136
第四节 习题解答	137
一、练习一	137
二、练习二	138
三、练习三	140
四、练习四	140
五、习题	141
第五节 参考资料	142
一、电子学的发展和电子技术有关资料	142
(一)调制、调幅、调频与调频立体声广播	144
(二)麦克斯韦	145
(三)赫兹	146

第一节 教学要求

这一章在电场、磁场、电磁感应等知识的基础上，讲述电磁振荡和电磁波，以及无线电发射和接收的初步知识，是电学知识的继续，也是振动和波的知识的发展。这一章的知识又为以后认识光的电磁本质作准备。

本章内容既讲述基本知识又讲解实际应用，全章知识多是介绍性的，这是本章的特点，讲述基本知识时，应着重介绍主要之点。这一章的核心内容是麦克斯韦电磁场的理论。电磁波的实际应用中，需要解决许多实际技术问题，教材对解决发射与接收的主要问题——开放电路、调制、调谐和检波作了简要介绍，讲述时应着重介绍原理和解决问题的思路，不宜过多地涉及技术细节。

本章教材可分为三个单元。第一单元包括第一节和第二节，讲述电磁振荡的产生和 LC 振荡电路的周期和频率公式。第二单元包括第三节至第五节，讲述麦克斯韦电磁理论要点和电磁波的知识。第三单元包括第六节至第十二节，讲述电磁波应用技术初步知识和发展简况。

LC 回路可以产生振荡电流，要通过演示实验来使学生确信。电磁振荡的产生过程，要突出电场能和磁场能的相互转化。由于在中学不容易搞清楚 LC 回路中为什么电流最大时电压最小这类问题，而进一步深究会加重学生负担，在教学中不要过多探讨，对 LC 振荡电路的周期公式，应使学生掌握它的物理意义。由于在后面学习谐振时要用到改变电磁振荡周期的内容，要使学生切实理解电磁振荡的周期怎样随电容和感的改变而改变。

麦克斯韦电磁场的理论把电场和磁场统一起来，要让学生了解麦克斯韦理论的两个要点，这两个要点都是用场的观点分析得出的，虽然学生已经学过电场和磁场，但不熟悉用变化的场分析现象。要使学生明确由变化磁场产生电场跟是否有闭合电路无关，由变化的电场产生的磁场跟空间里存在电流而产生的磁场是一样的，但无需提出位移电流的概念。教材还指出了均匀变化的场产生稳定的场，非均匀变化的场产生变化的场，这是为讲电磁波作准备的。在分析时，要向学生说明什么是均匀变化的场和非均匀变化的场，以帮助学生理解怎样用变化的场分析有关现象。

在讲解电磁波的性质时，要突出它可以脱离电荷而独立存在、具有能量、不需要别的物质做媒质等特点。正是电磁波的这些特点，表明电磁场是客观存在的物质。赫兹实验证实了电磁波的存在，确立了光的电磁说。有条件的学校应尽量演示这个实验，使学生确信麦克斯韦理论的正确，也有助于认识电磁场的物质性。

麦克斯韦电磁理论在教学中之所以重要，还在于它在思想方法上给人们以重大的启示。许多重大发现的提出往往不是在其理论系统完成之时，而是在人们根据种种物理现象定性分析、深入思考并进行猜测之时，这是创造性思维的特点。这一章无论是麦克斯韦理论的提出，还是 LC 电路产生电磁振荡的物理过程，以及电磁波发送与接收过程的教学都要充分重视从人们是怎样提出和思考问题的角度进行教学，避免仅作一般知识介绍，这样会有利于进行创造能力的培养，对于掌握教材内容也是有益的。

本章安排的学生实验是“安装简单的收音机”，其目的是通过安装、调试，使学生确信接收原理，培养他们的动手能力，而不在于熟悉具体的线路。因此，只要求了解实验线路图中的可变电容器、二极管、三极管、耳机的作用，对线路中的其他元件的作用不要求讲解。

本章的教学要求是：

1. 了解电磁振荡产生的过程，掌握电磁振荡的周期和频率的公式.
2. 了解电磁场理论的要点，了解电磁波的产生和特点. 知道电磁场是一种物质形态. 知道赫兹实验.
3. 了解无线电发射和接收的基本原理，了解无线电传播的特性.

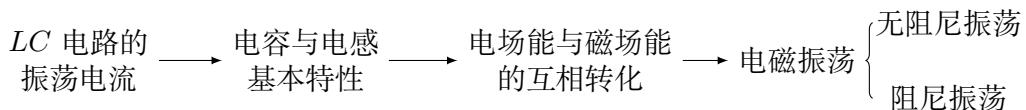
第二节 教学建议

一、电磁振荡

这一单元的教材中，首先安排了 LC 振荡电路的演示实验，以使学生获得 LC 振荡电路中产生振荡电流的初步感性知识，在此基础上运用电容器充放电现象与电感线圈的自感现象对 LC 电路产生振荡电流的物理原因作了定性分析，并进一步从能量转化角度突出指出了 LC 电路产生振荡电流的物理实质，由此引出了电磁振荡概念以及阻尼、无阻尼振荡概念，说明了在 LC 振荡电路中维持电磁振荡的条件，可以看出，教材的基本思路是：

物理现象 ——> 物理原因 ——> 物理实质 ——> 有关概念

教材的结构是：



在具体进行教学时，有多种教学方案可供选择，关键是要针对所教班级学生接受与理解能力。对于理解能力稍差的班级，可以突出物理现象的演示观察和着重从能量转化角度定性分析现象，同时适当复习电容与电感线圈的物理特性。还可与弹簧振子或单摆作些类比（参看练习答案），对于理解能力较强的班级，可以在复习电感线圈与电容器物理特性基础上，直接讨论一个电容器充电后向一个电感线圈放电可能产生的物理现象，例如可以先将一个充电电容器向一个电阻放电与一个充电电容器向一个电感线圈放电可能产生的现象作对比，着重讨论能量的转化情况。也就是采用设想电路——猜测现象——定性分析结论——演示观察这样一种教学结构。

在分析 LC 电路时，要复习电容器与电感线圈基本物理特性，要着重使学生领会：

1. 对电容器而言，两板间电压不能突变，即充放电都需要时间，这一点可以通过一些演示实验说明，也可以从放电电流 $i = \Delta Q / \Delta t = c \cdot \Delta U / \Delta t$ 分析说明。式中，若 $\Delta t = 0$ ，而 ΔQ 与 ΔU 是有限量，则 i 将无限大，这是不可能的，通过反面论证说明电压不能突变、充放电需要时间这一物理特性。
2. 对电感线圈而言，通过电感线圈的电流不能突变。这一点可以通过演示实验复习说明，也可从自感电动势 $\mathcal{E} = L \cdot \Delta i / \Delta t$ 分析说明。若 $\Delta t = 0$ ，因 Δi 为有限量，那么 \mathcal{E} 将无限大，这也是不可能的：因此在接通电路时，电流只能逐步增大；而当电路中存在电流时，也不能突然消失，只能逐步减小。换言之，电流变化需要时间。理解以上两点无论对于 LC 振荡电路的分析，还是对将来进一步学习都是重要的。

LC 振荡电路周期（频率）公式的教学，既可以先提出问题进行定性讨论并配合演示实验而后给出公式；也可以先进行演示实验，在对现象进行讨论的基础上给出公式。这一部分知识教学，应根据班级情况注意以下几个问题：

- 实际使用的 LC 振荡电路常是通过改变电容器电容或改变线圈电感来改变振荡周期的，因此需要复习一下决定电容器电容的因素和决定线圈电感的因素。教学时可适当出示可变电容器实物或作有关演示实验。
- 通常实用的 LC 振荡电路周期很短，为了表达方便，计算时多使用频率公式，这一点与单摆不同。同时由于公式中各量单位实际上都带有构成十进倍数成分数的词头，例如频率常以千赫、兆赫为单位，电容常以微法、皮法为单位，电感常以毫亨、微亨为单位，因此可以将书末附录三介绍给学生，要求学生在计算中能正确将上述单位换算为主单位，相应的算结果能用常用的单位表示；例如

$$10^5 \text{Hz} = 100 \text{k}\text{Hz}, \quad 10^{-5} \text{F} = 10 \text{m}\text{F}, \quad 10^{-6} \text{H} = 100 \text{m}\text{H}$$

使学生逐步熟悉我国法定计量制中有关单位的正确使用方法。

- 有些学生指数运算易出错，应通过例题指出运算方法，例如可将 $\sqrt{10^{-11}}$ 化为 $\sqrt{10 \times 10^{-12}}$ 进行计算。

二、电磁波

这一单元是本章的核心。教材包括麦克斯韦关于电磁场的两个重要理论推测，电磁波激发过程、电磁波的特点和电磁场的物质性、赫兹实验等内容。这一单元在知识理解上难点较多，最关键的是要理解“均匀变化磁场（或电场）产生稳定电场（或磁场），非均匀变化的磁场（或电场）产生变化的电场（或磁场）”这两句话的意义。理解了这两句话，对电磁波的产生及其特点就能较好理解和掌握了。

（一）电磁场的教学

可以分两步进行。第一步着重从问题的提出、考虑问题的方法角度重点进行麦克斯韦电磁场理论的两个要点的教学，对第一个理论要点即变化的磁场能够在周围空间产生电场，应突出麦克斯韦对穿过闭合线圈中磁通量变化而产生感生电流现象的思考，即在闭合线圈中驱使电荷作定向运动的原因是什么？在指出他认为是一种电场力作用，而且这种电场的存在与有无闭合线圈无关后，还应指出麦克斯韦的创造性更表现在他认为这种电场不同于静电场，是一种脱离电荷存在的涡旋电场，以使学生初步了解两类电场的区别，并为下一节讲电磁场可脱离电荷而存在作出铺垫，对第二个理论要点，可通过电和磁的对称提出来。在物理学发展史上，许多问题都是从对称角度提出的，这一点可以启发学生回忆学过的知识。例如奥斯特发现电生磁后，法拉第正是从对称角度出发提出磁生电的问题，经过十年努力终于发现了电磁感应现象（见教材第 51 页阅读材料）。在教材第 65 页阅读材料“寻找磁单极子”中，人们也是把电磁类比，从两者的对称性出发希望找到磁单极子。又如人们从永磁体出发，希望对称地找到永电体，在本世纪五十年代终于找到了这种永电体（现在称为驻极体），并广泛运用于技术中（如驻极体话筒等）。因此对称、类比地提出某种推测，是人们常用的一种思考方法。这一点，应通过教学使学生有所体会。

以上两个观点，学生是易于接受的，这一部分教学的困难在于第二步骤，即使学生充分领会和理解教材上关于均匀变化的磁场（或电场）产生稳定电场（或磁场），非均匀变化的磁场（或电场）产生变化电场（或磁场）的含义。为使学生易于理解，可以通过分析法拉第电磁感应定律表达式： $\mathcal{E} = \Delta\phi/\Delta t$ 加以说明。如果所教班级学生已在数学课中学过导数知识，这个问题比

较好处理。所谓均匀变化就是指按一次函数规律变化，设磁通量 $\phi = kt + b$ ，因此感生电动势 $\mathcal{E} = d\phi/dt = k$ ，为一与时间 t 无关的恒量，换言之，驱使电荷作定向运动的涡旋电场一定，这就是均匀变化磁场产生稳定电场的含义。若磁通量 ϕ 不是随时间均匀变化的，例如按正弦规律变化， $\phi = \Phi_m \sin \omega t$ ，那么感生电动势：

$$\mathcal{E} = \frac{d\phi}{dt} = \Phi_m \omega \cos \omega t$$

说明涡旋电场场强将随时间作余弦变化，这就是非均匀变化磁场产生变化电场的含义。

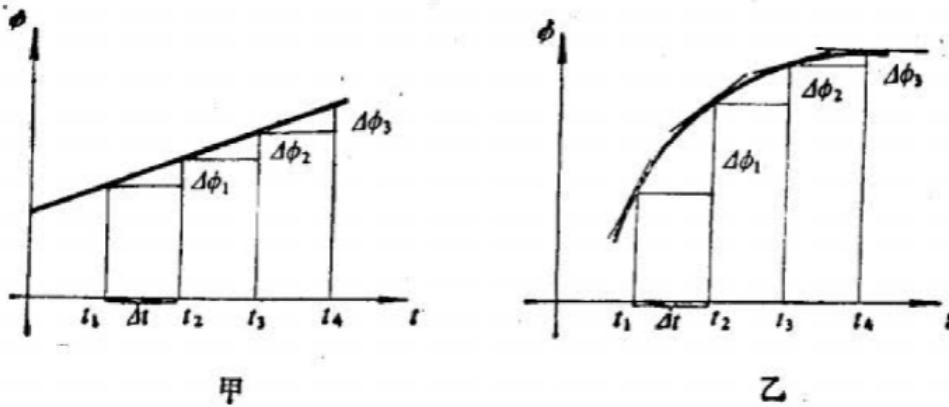


图 4.1

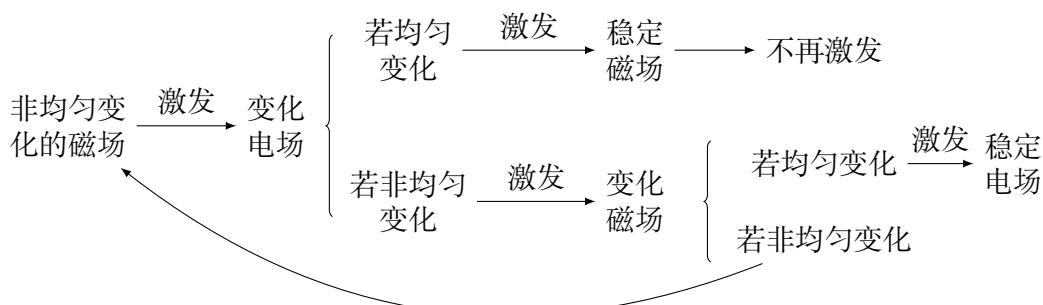
如果所教班级学生尚未学过导数知识，可以通过作图线的方法加以说明（图 4.1）。若 ϕ 是均匀变化的，即按一次函数变化，那么 $\Delta\phi/\Delta t$ 是定值，从图线上看斜率处处相同（图 4.1 甲），因而 \mathcal{E} 是定值，不随时间变化。而当 ϕ 作非均匀变化时，如图 4.1 乙所示，那么在不同时刻， $\Delta\phi/\Delta t$ 不同，图线表示出不同时刻图线斜率不同，说明 \mathcal{E} 将随时间而变化，也就是说产生的涡旋电场场强将随时间而变化。

在讨论清这个问题后，除了说明电磁场概念外，可以进一步引导学生思考，讨论和分析这个问题究竟有什么物理意义？鼓励学生去思考想象，或阅读教材发表意见。一般地可把这作为本节课教学的小结并为下一节课讲述电磁波做好准备。

（二）电磁波

这一节的教学，有三个主要内容：一是在上一节麦克斯韦两个理论要点的基础上讲述电磁波的产生过程，二是使学生初步形成电磁波的图景，三是使学生初步了解电磁波的物质性。

对第一点的教学，可在上面所提问题的基础上展开。使学生能够在头脑中形成如下分析推测的思路：



由此可推测得出，若过程中产生的始终是非均匀变化的磁场与电场，那么某处的这种非均匀变化磁场（或电场）将在周围空间由近及远激发起一系列电场和磁场，这就形成了电磁波的初步图景。在这个基础上可以指出：

1. 周期性变化的磁场（或电场）可以激发电磁波，在利用课本上图 4.6 分析电磁波产生过程时，应当注意指出，这个图只是说明电磁波传播的示意图，并不是空间电磁场某一时刻的电力线与磁力线真实分布情况。
2. 这种周期性变化的磁场（或电场）可以利用 LC 振荡电路在振荡时电容或线圈中的电场和磁场获得。
3. 振荡电路中电荷作快速振动是产生周期性变化电场（或磁场）的根本原因。因此一切电荷作快速振动时都会激发电磁波。 LC 振荡电路仅是激发电磁波的一种方法。

对于第二点的教学，应通过对课本上图 4.7 的分析明确以下三个特点，从而使学生获得正确的电磁波图景：

1. 电磁波在空间传播时，在任一位置上（或任意时刻）电场强度方向、磁感应强度方向和传播方向三者互相垂直，即 E 、 B 、 v 矢量在空间中互相垂直。
2. 在电磁场强度为最大值的空间某一位置上，相应的磁感应强度也为最大值（这一点的理由不必作解释，只告诉学生是被理论和实验所证实的）。
3. 电磁波波速与光速相同，这是麦克斯韦从电磁理论中所预言的。通过这一点，教师应指出科学理论的重大意义在于可以预见人类尚未认识的事实。关于波长、波速与频率（周期）的关系可从跟机械波公式的类比中得出。

关于第三点电磁波物质性的教学，根据教材可从电磁波可脱离电荷独立存在、不需借助媒质传播、具有能量三个方面，简单说明电磁波与实物粒子一样是自然客体。这是人们对于物质认识的一个重大发展，这一点使学生有初步认识即可。

（三）赫兹实验

在这一册教材中，安排了赫兹实验这一节教学内容，目的是通过历史上这个重要实验说明理论正确与否最终需要由实验来检验。在讲述这个实验时，应注意从赫兹对这个实验现象的分析判断的角度进行介绍，使学生能够逐步体会到，对于物理现象的敏锐的观察力来自对基本理论的深入理解，赫兹在实验室里检查仪器时偶然观察到感应圈放电时发生的电火花，立即想到电火花的跳跃实质上是电荷在作间断的快速振动引起的。根据麦克斯韦的理论，快速振动的电荷，必定在周围空间激起电磁波，在这个思想引导下，赫兹设计了如课本图 4.9 所示的实验装置，其中圆形开口状接收器显然是根据电磁感应现象设计出来的。结果正如赫兹所设想的那样，实验获得了成功。在进行本节教学时，最好在分析讨论之后再做实验，以加深学生的感性认识和对电磁理论的理解。

三、电磁波的发射与接收

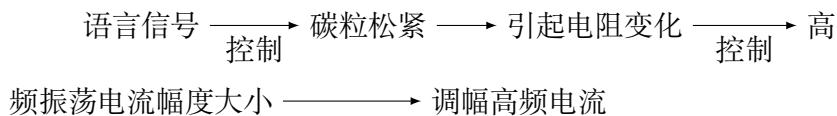
这一单元主要是联系实际的知识，教学中只要求简单介绍原理，使学生有一个大致的了解即可，不宜分析太细。对无线电技术感兴趣的同学，可以引导他们阅读有关书籍，组织课外讲座与实验小组发展他们的兴趣与特长。这一单元演示实验较多，在进行演示时，应力求装置简单、效果明显。教学时，要突出说明主要装置及其作用，需观察的实验现象，使学生把精力集中在所讨论的问题上。

(一) 电磁波的发送

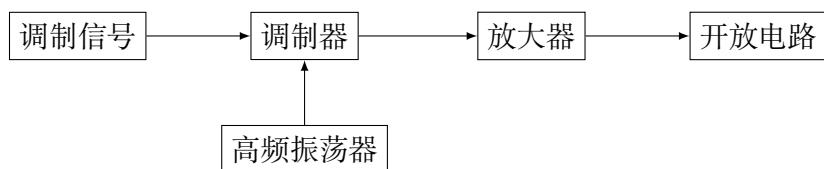
在讲述这一问题时，应当着重向学生说明，我们讨论电磁波的发送是要解决如何运用电磁波传递人们需要的信息，从而引入解决电磁波发送（与接收）中的一系列理论与实际技术问题。在发送时需解决的问题有两个：第一个是如何向外有效地发射电磁波（传得足够远）。这就要利用开放电路与高频电磁波。第二个问题是如何有效地传递人们所需要的信息，这要通过调制来解决。

关于开放电路的教学，应注意对比 LC 振荡电路（闭合振荡电路）与开放电路的不同特点。要让学生了解 LC 振荡电路，是利用电感与电容的不同储能（磁场能和电场能）特性，通过能量转化完成电磁振荡的。在这种情况下，能量被集中在电感线圈内部和电容两个极板之间。而开放电路是要在广阔空间激发电磁波，希望能量以电磁辐射形式向外传播。利用这两种电路的目的不同，它们的特点不同。开放电路是闭合电路的变形。

在讲解调制过程时，学生对调幅过程的理解有困难。这是因为，调制过程不是载波和调制信号的简单叠加，而是通过调制过程使载波的振幅随调制信号的变化而变化。因此，需结合课本上图 4.13 调制电路示意图的分析并配合示波器演示波形加以说明，在说明中，应突出传递的信号频率较低而发送电磁波却需要高频振荡这个矛盾。课本上图 4.13 调制电路的话筒是一种碳粒话筒，它本身兼有两种作用：一方面将语言（声音）信号转变为电信号，另一方面由于碳粒话筒的电阻随碳粒松紧程度改变，兼起调制幅度的作用。而其他话筒，例如常用的动圈电磁话筒是不具备这种特性的。分析时可以指出以下思路：



一般地应将调制过程画成以下所示方框图：



在说明调制的两种方法，即调幅、调频时，可举一些实例，如一般中、短波无线电广播都是用调幅波传送的；电视节目的图象信号是利用调幅波传送的；而伴音信号都是用调频波传送的，这样可使学生获得一些实用知识，也可提高他们的学习兴趣。

应将教材最后所介绍的电磁波发送的方框图给学生讲讲，使他们大致了解这一过程。

(二) 电磁波的接收知识

电磁波的接收知识与学生实际生活联系密切，因此尽可能结合实际进行讲解。应从接收需解决的问题开始讨论。接收电路解决获得电磁波信号和从中选取电磁波信号两个问题，解调解决从被调制的高频电流中取出调制信号的问题。

在介绍获得电磁波信号的方法时，可以从电磁场的电场分量与磁场分量两个方面讲述。任何一个导体位于电磁波传播的空间中，导体中的自由电子受电场分量驱动作用，就会产生相同频率的高频振荡电流。这就是课本上讲的天地线接收。实际上，一般无线电广播电场分量是在竖

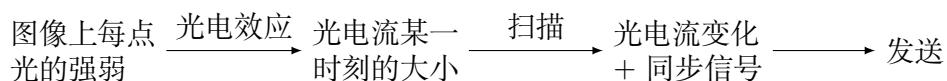
直方向上的（见课本图 4.6），故一般收音机天线是竖直的。而电视广播电场方向一般是水平的，所以电视天线都是水平放置的，这一点观察一下就会知道。利用磁场分量接收也是广播收音机常采用的方法，半导体收音机中有一个磁棒（叫磁性天线），其上绕有线圈，当磁棒水平放置并有磁力线穿过磁棒内时，由电磁感应现象可知，磁棒绕组上将产生感生高频电流。这一点，打开几个半导体收音机后盖就可清楚地观察到。如果将磁棒直立放置，收音机接收信号将明显变弱。这样讲述，既使学生获得了实际知识，同时也运用学过的知识分析了实际问题，可以取得较好的教学效果。

关于电谐振的教学，可以类比机械振动中的共振现象。教材安排的电谐振的演示实验，实际上就是赫兹实验。如果无此设备，也可用其他实验代替（见实验部分）。应当向学生具体介绍一下实际调谐的方法，告诉学生收音机选台调谐使用可变电容器，而更换波段采用接入不同线圈的方法。课本上没有明确给出调谐电路频率公式，教师应附带说明一下，调谐电路固有频率的计算与 LC 振荡电路是相同的。

关于检波的教学，可以先向学生补充说明，由于调制有两种方式：调幅与调频，因而其反过程即解调也有两种方式：检波与鉴频。在实际中有调幅收音机与调频收音机两种。课本上只粗略地介绍了调幅波的检波，用了交流电一章学过的半导体二极管单向导电性和脉动电流分解的知识。教学时可配合演示实验利用示波器对照课本图 4.19 进行讲解。同时可让学生做安装简单收音机的分组实验。这个实验也可以改为按课本图 4.18 的电路进行。这样安排，实验内容简单、所用器材少、说服力强，学生容易完成。有关数据见后面实验部分。课本最后介绍了一般收音机的方框图，学生作一了解即可。

教材第十节介绍传真、电视、雷达等常识，是选学教材。建议将本节与第十二节电子技术一瞥合在一起，作课外讲座，可配合图片或教学电影进行，比在课堂上讲授效果更好一些。教学时，要尽可能向学生介绍我国在四化建设中不断取得的新成就，例如通信卫星等。

在讲解传真、电视、雷达这部分内容时，一方面应注意突出基本原理，不过多涉及技术细节，另一方面也应指出，无线电电子技术给人们在传递和处理信息方面开辟了广阔的领域，其中重要的一个环节是如何将各种信息转化为电信号。传真和电视在将图像的光信号转变为电信号上原理是相同的，即：



这里要着重讲解扫描和同步的作用：扫描是将一幅图像通过逐点逐行逐幅的有顺序的扫描形成某一段时间内的光电流变化；而同步的作用则是需要接收部分逐点逐行逐幅与发送端步调一致地将电信号转变为光信号，才能重现图像。为便于理解，可通过下述例子说明扫描与同步的作用。利用两块坐标黑板，一块上以每一小格为一个象素，画上图案或字，通过顺序叙述每行每格的“黑”“白”，可以将这幅图像通过声音传递出去，由别人在另一处的坐标黑板上重现出来，讲完电视工作原理以后还可利用黑白电视机演示一下行同步与帧同步的实际情况。

由于电视传递的是活动画面，需要解决一些特殊问题，教学中可说明这样几点：

1. 与电影相仿，活动画面分解为若干静止画面，利用人眼视觉暂留（约 0.1 秒），连续放映就可看到活动图景。为使眼睛不感觉闪烁，每秒钟需传递 10 幅以上画面（电影为 24 幅，电视为 25 幅，但通过隔行扫描，实际感觉为 50 幅）。

2. 画面光信号的转换不能只靠一个光电管进行，扫描也不宜用机械方式，在电视中，摄像管中嵌板上是许许多多的小光电管，形成一幅电的“图像”，通过电子束扫描形成光电流。
3. 扫描时，电子束偏转由偏转线圈的磁场控制。同步作用也要通过接收机显像管偏转线圈控制电子束完成。对有兴趣的学生可以介绍一些课外读物，供他们选择阅读，课堂上作些简要介绍与引导即可。

第十一节电磁波的传播的内容在教学时，可归纳成下表，使学生明确天波、地波及直线传播的基本特点和适用波段。这一节的教学可在学生阅读课文的基础上作出简单归纳。

传播形式	适用波段	传播特点
地波	长波、中波	易衍射、稳定、地面吸收大
天波	短波	由电离层反射、不稳定、损耗小
直线传播	微波	与光传播性质相近，可穿越电离层

“电子技术一瞥”的教学，主要是使学生了解电子技术的各个领域在国民经济中的重大意义和发展简况，在教学时，可以历史地叙述电子学的发展及其涉及的各个领域，介绍我国电子工业的发展和应用情况，也可以概要地从电子技术涉及的主要领域介绍有关发展与应用情况。

近代电子技术是从无线电技术发展起来的，而无线电技术只是近代电子技术的一个部分。近代电子技术从电子三极管问世迄今只有 79 年（至 1986 年）的历史，但它已经衍生了许多新兴学科，可从这样几个方面进行简单的介绍：

1. 电子器件及其材料；
2. 通信、广播、电视技术；
3. 自动化、遥控遥测技术；
4. 电子计算机；
5. 边缘学科如仿生电子学、电子显微镜、射电天文学、医学电子学、光电子学、空间电子学等等。

第三节 实验指导

一、演示实验

(一) 用示波器观察振荡电路中的电磁振荡

利用示波器可以方便地观察 LC 振荡电路中产生的振荡电流波形（实际观察的是 L 或 C 两端电压波形）。下面分阻尼振荡和无阻尼振荡两种情况介绍具体演示方法。

(1) LC 振荡电路的阻尼振荡

实验的电路如图 4.2 所示。示波器用 J2458 型教学示波器（或其他型号示波器，用长余辉超低频示波器演示效果会更好），电感线圈 L 可用 J2423 型可拆变压器红色线圈 0—1400 匝绕组（也可用电子管收音机电源变压器初级线圈等电感大、电阻小的线圈），电容器 C 可选用电容在 1 至 50 微法之间的（也可用电解电容），图中 K 为单刀双掷开关，应尽量选用拨动速度快的开关，如钮子开关或拨动开关。电源用 6 伏电池组。实验前先调整好示波器，并将 Y 衰减置于 10，Y 增益旋至中间，扫描频率拨至 10—100 赫挡，并将扫描微调钮逆时针旋到底，接好电路后，将 K 拨向 a ，给电容器充电，然后将 K 拨向 b ，示波器上将显示阻尼振荡波形，根据振荡衰减情况，适当调节扫描微调与 Y 增益，使示波器荧光屏上显示至少有 3 个明显周期的波

形，必要时可适当调整电容器 C 的电容大小。演示时，先较慢地拨动开关两三次，引起学生注意。然后可以来回迅速拨动开关，示波器上将连续出现阻尼振荡波形。

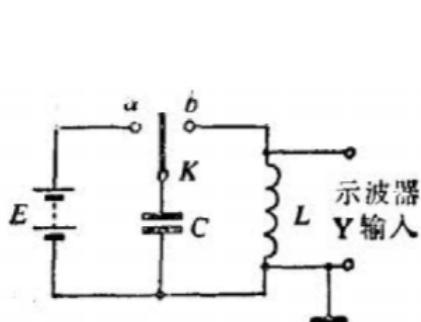


图 4.2

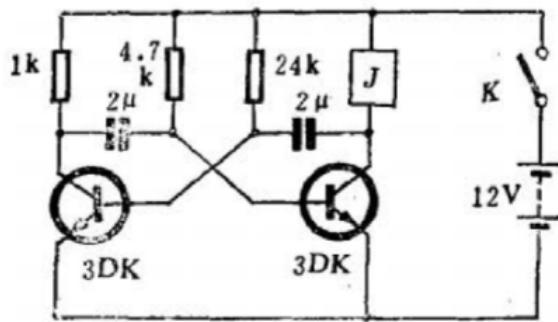


图 4.3

如果想在屏上连续得到稳定而不闪烁的阻尼振荡波形，可以按下述方法制作一个多谐振荡器控制继电器。用继电器一组常闭常开接点作为单刀双掷开关的装置。其电路如图 4.3 所示。三极管为 3DK 型，其 β 值选 40—70 间的。各电阻均可用 1/8W 碳膜或金属膜电阻。2 微法电容也可用两个 5 微法电解电容器负极相接后将两正极接入电路。电源用 12 伏积层电池，也可用其他电池或低压电源。继电器尽可能选用线圈电阻 500 欧以上，吸合电流 20 毫安以下的小型继电器，如 JRX-4 型等，也可将 J2414 型学生实验用电磁继电器接入电路使用。继电器常闭接点应接 LC 电路，常开接点接电源。此电路只要安装与元件无问题，无需调整即可工作。可将整个装置装在一个小盒中，演示时，最好先按前面方法用手拨动开关演示两次，再用此装置说明它的作用，使演示的说服力强一些。

更简单一些的自动开关，可以用一个 2CP(或 2CZ) 二极管与一继电器串联后接入低压交流源，利用二极管只有半个周期导电使继电器吸合，另半个周期截止使继电器释放起到上述自动开关作用，这样可以在荧光屏上显示稳定的阻尼振荡波形。但由于继电器吸放频率为 50 赫，相应的 LC 振荡电路固有周期较小。而一般在振荡电路频率为 50 赫开关频率的 10 倍左右时，才能看到几个周期的衰减波形，如果 L 利用 J2423 型可拆变压器 0—1400 匝绕组，则相应 C 可取 0.1 微法或 0.2 微法。制作这个装置要选择好继电器，最好选用吸放动作时间短的小型或超小型继电器、干簧继电器等。电源电压可从继电器直流电阻与吸合电流求出，取两者乘积的 1.5 倍即可。继电器常闭接点与 LC 电路相接，常开接点与电源相接。

(2) LC 电路的等幅振荡

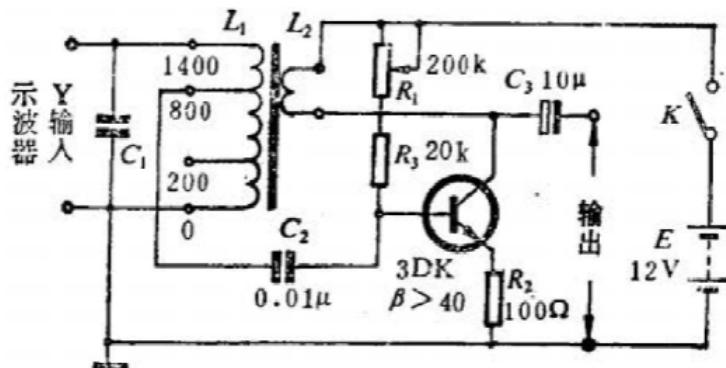


图 4.4

LC 电路的等幅振荡需要利用 *LC* 振荡器进行演示，振荡器电路如图 4.4 所示。这是一个典型的变压器反馈振荡电路。由 L_1 与 C_1 （或 C_2 ）组成 *LC* 振荡电路，经 L_1 抽头与 C_3 将振荡信号输入三极管基极，放大后由集电极经 L_2 正反馈，从而形成 L_1C_1 电路的等幅振荡。图中 R_2 为负反馈电阻，用以改善振荡波形； R_1 为三极管偏置电阻，用以调整三极管工作点。实验时， C_1 取 0.1 微法。 L_1 与 L_2 可以使用 J2423 型可拆变压器上的线圈。 L_1 用红色线圈 0—1400 匝绕组的 800 匝抽头。 L_2 用绿色线圈 0—400 匝绕组。实验前应先进行调试。首先应先调整好示波器，利用示波器检查电路起振情况。再将 R_1 调至最大阻值位置，接通 12V 电源（最好用电池组）。当逐渐减小 R_1 阻值时，就可在示波器上观察到等幅振荡波形。如果观察不到，将绿色线圈（反馈线圈）头尾接线颠倒一下，重新调整 R_1 ，就可起振。适当调节 R_1 和示波器上衰减钮、Y 增益钮、扫描微调钮，使荧光屏上出现 3—5 个稳定波形（一般扫描频率可置 10—100，Y 衰减可置 10 处）。

这个实验中， L_1 、 L_2 还可用半导体收音机用的低频放大推挽输入变压器， L_1 用推挽初级绕组， L_2 用次级绕组的一半（即一端与中心抽头端）。也可以自制一个电感线圈：铁心用 GEIB18 型硅钢片，叠厚 18 毫米，其铁心截面积（中央舌宽 \times 叠厚）为 18 毫米 \times 18 毫米。铁心一般地可从旧的有线广播 15 瓦或 25 瓦变压器中拆出，也可利用学生实验用的可拆变压器铁心。用 0.2 毫米直径的漆包线在自制框架上按图 4.5 所示匝数绕制成 L_1 与 L_2 （图中抽头多些，是为演示振荡频率与电感电容关系准备的）。实验时，可将 0 匝与 400 匝两抽头取出信号送入三极管放大。相应电容器 C_1 仍可取 0.1 微法。

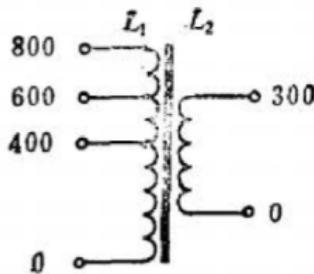


图 4.5

（二）用示波器观察电磁振荡的周期跟电容和电感系数的关系

这个实验与等幅振荡演示实验的装置相同。 L_1 可以用自制的电感线圈，或者 J2423 型可拆变压器，接法同前。另外准备 0.2 微法或 0.5 微法的电容器。实验时，只需先后接入不同电容器，即可看到电容越大周期越长的现象。注意此时扫描微调只能略微变动，以稳定波形。在扫描频率相同时从两次出现波形的个数不同比较周期长短。

在演示电感与振荡周期的关系时，若用自制电感线圈，应先后将 0—800 匝与 0—600 匝绕组接入电路进行观察比较。若用 J2423 型变压器红色绕组，就先后将 0—1400 匝绕组 50—800 匝绕组（至三极管信号仍从 800 匝抽头接出）接入电路，进行对比演示，可看出匝数越多，电感越大，振荡电路周期越长的现象。

如果有条件，可以从三极管集电极处通过一个 10 微法电解电容输出信号到一低频放大器（小扩音机）中，通过喇叭发声的音调高低来同时了解振荡电路频率（周期）变化情况。

(三) 电磁波的发射与接收 (赫兹实验)

演示这个实验是配合本章第五节赫兹实验的教学进行的，因而实验应尽可能重现赫兹当年的实验装置。发射天线与感应圈与课本上的相同，接收装置改为振子天线，并将一试电笔用氖管接在振子之间，如图 4.6 甲所示，以提高实验可见度。实验所用两根发射天线与接收天线都可以用电视机或收音机用的拉杆天线，将两根天线分别固定在有机玻璃板上，另用长绝缘棒（塑料棒等）固定在有机玻璃板上作支架，底座可用木制。注意拉杆天线的固定方法：将有机玻璃板弯成 U 型（可用 40 瓦电烙铁铁管发热部位与折弯处接触烘烤弯制）在安装天线的部位各钻一个孔。天线固定螺丝用稍长一些的铜制 M3 螺丝。将拉杆天线插入孔中，一端装一个静电仪器用的光滑小铜球（也可用焊锡熔化制成），两铜球之间的缝隙在 5 毫米左右，如图 4.6 乙所示。支座尺寸可根据实际制作条件确定。

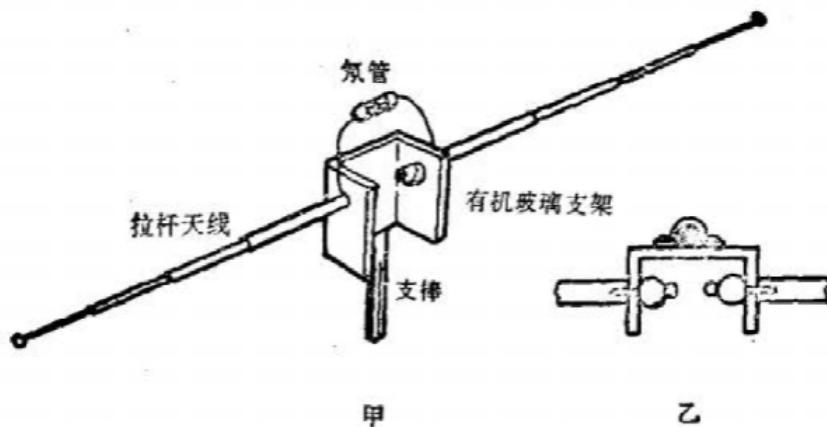


图 4.6

实验时，将感应圈（如 J1206 型感应圈）高压线圈两端放电针卸下，用导线分别将这两端与两根发射天线接好，把感应圈电源接线端与低压电源（J1201 型低压电源）的 6—8 伏直流输出端接好，调节好断续器的调节螺丝，使发射天线两球间产生连续稳定的火花放电。然后将接收天线的拉杆都拉出来，使天线长度与发射天线相同，平行地靠近发射天线，就可以看到接在接收天线间的氖管在感应高电压作用下发光。特别需要注意的是，人体任何部位都不要靠近或接触发射天线，以免受到电击。

(四) 调制

演示调制的实验实际上只演示调幅，所用仪器为 J2458 型教学示波器、J2464 型教学信号源及一台半导体收音机。演示步骤如下：

1. 将教学信号源置于中间，半导体收音机置于信号源高频输出接线柱一侧，示波器置于另一侧。
2. 将示波器 Y 输入端与信号源高频输出端相接，Y 衰减置于 1，扫描频率置于 100—1k，预热示波器，并调出细亮扫描线。
3. 将信号源“调幅—等幅”开关扳向“等幅”，高频频率范围“频率 I — 频率 II”开关扳向“频率 I”，高频增幅钮顺时针旋到底，频率调节钮应调至当地无线电台信号的中波某一频率，低频频率选择钮拨至“1k”，低频增幅钮旋至中间位置。
4. 开启信号源，调节示波器，可以看到等幅波波形，由于频率很高，示波器荧光屏上将出现

宽亮带，这时若将示波器扫描频率拨至“10k—100k”，调整扫描微调可以看到高频等幅振荡的清晰波形，然后仍将扫描频率拨回“100—1k”。

5. 将信号源“调幅一等幅”开关扳向“调幅”，打开半导体收音机。调整调谐钮即可听到 1k 赫声音，调整示波器扫描微调，即可看到蝶状调幅波形（其上下轮廓线就是 1k 赫低频信号的波形）。
6. 调节信号源低频增幅钮，就可以看到调幅波形轮廓线幅度变大或变小，听到声音变大或变小，低频增幅逐渐为零，调幅波波形轮廓线（也是正弦曲线）逐渐变直，就是等幅波了。从而说明低频信号的强弱反映在调幅波上就是轮廓线幅度的大小。
7. 使信号源低频频率增高或降低（拨至 500, 1.5k, 2k 挡），一方面听到声音音调变化，另一方面看到荧光屏上调幅波轮廓线正弦波形个数相应变化，从而说明轮廓线的频率反映低频信号的频率高低。

如果学校中有 J2459 型学生示波器与 J2465 型学生信号源，只要求学生自带一台半导体收音机（小型），就可让学生自己按上述步骤去观察实验了。这样做也增加了学生使用示波器与信号源的机会，有助于培养学生使用实验仪器的能力。

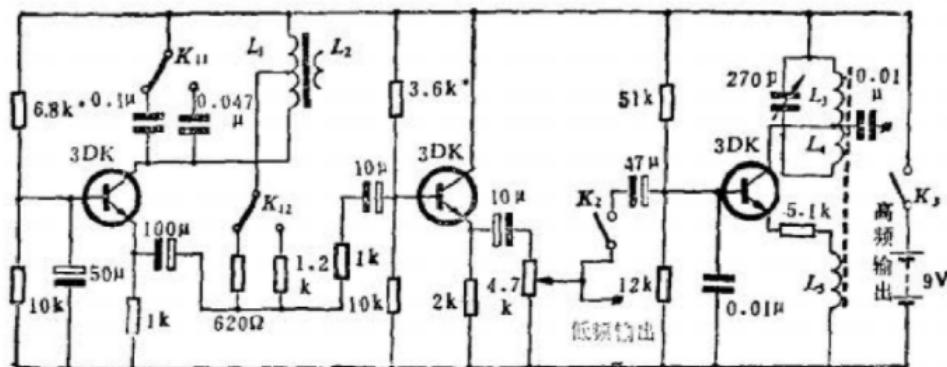


图 4.7

如果想自制一台信号源，可按图 4.7 所示电路进行制作。图中低频振荡与高频振荡均为共振 LC 振荡器，低频两挡，由 K_{11} 与 K_{12} （双刀双掷）转换，在图示开关位置约为 400 赫，另一挡约为 1000 赫， L_1 、 L_2 分别为半导体收音机用输出变压器，次级 L_2 不用。高频振荡输出频率约为 550 千赫至 1700 千赫， L_3 、 L_4 与 L_5 为绕制在磁棒上的自制线圈。绕制时磁棒可选用 MX-400 型中波磁性天线棒，长 100 毫米左右。线圈用七股纱包线绕制在小纸筒上， L_3 绕 76 匝，继续绕 4 匝为 L_4 ， L_5 绕 15 匝。然后将小纸筒套在磁棒上。将 L_3 一端置于磁棒一端约 2 厘米左右处， L_5 置于磁棒中央附近，用蜡将它们固定好。线圈也可以直接用废旧半导体收音机磁性天线与其上线圈直接改制。图中打 * 号的电阻是用于调整三极管工作点的，整个装置可装在一小金属盒中。

（五）电谐振和调谐

电谐振和调谐，可以做两个演示实验。第一个是课本上图 4.16 所示的电谐振装置，如无成品，可以用静电起电机（感应起电机）上的两个莱顿瓶，将自制的矩形固定线框和可动矩形线框固定在两个木底座上。制线框时要用较粗铜线，线框尺寸约 15 厘米 \times 15 厘米，可动（谐振）线框固定边稍长一些，氖管可用试电笔中氖管。实验时将高压感应圈（J1206 型）高压线圈两端

与放电线圈两端（莱顿瓶内外金属板）接好，先调节好放电火花，再调节谐振线框可动边。可以看到，在线框几何尺寸一样即电感一样时（电容也相同），发生电谐振，氖管发光。实验过程中，两线框平面距离一般控制在几十厘米至1米左右，并注意人体不要靠近感应圈高压引线或放电线圈。另外也可用演示实验3中介绍赫兹振子进行电谐振演示，实验时只需改变接收天线长度（伸缩拉杆天线），当发射天线与接收天线几何尺寸相近时，即可观察到电谐振现象（氖管发光）。

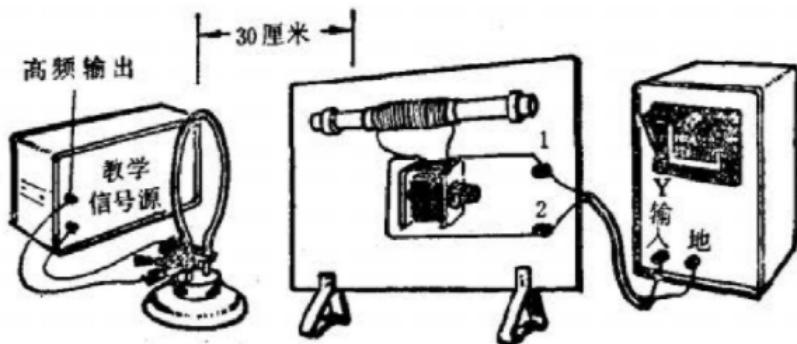


图 4.8

第二个实验是演示实际应用中的电谐振与调谐装置。先自制一个 LC 谐振电路示教板（图 4.8 中间图）。 L 可在 MX-400 型中波磁棒上用多股纱包线绕 70 匝左右制成， C 可用收音机用大型空气单连（改变电容时，可以看到动片旋出），最大容量 270 皮法或 360 皮法均可，注意动片接地。另外将 J2464 型教学信号源（J2465 型学生信号源或其他信号源）的高频输出端接一根用约半米长铜丝弯制的环状天线。调整好示波器（同上一个演示实验，只是将 Y 增益调至最大），将 LC 电路电容两端通过屏蔽线接入示波器。实验步骤如下：

1. 由信号源产生 1 千赫调幅信号，此时，高频增幅钮顺时旋到底，信号源高频载波频率可置于较低频率。
2. 将 LC 调谐电路靠近天线，调整电容大小，可以看到，只有电容动片旋到某一位置时，示波器上显示幅度较大的 1 千赫调幅波形，说明此时发生电谐振。
3. 改变信号源高频载波频率，那么必须随之调整调谐电路电容，才能重新发生电谐振，观察到较大幅度 1 千赫调幅波形，从而说明从多个电台中选台的道理。

(六) 检波

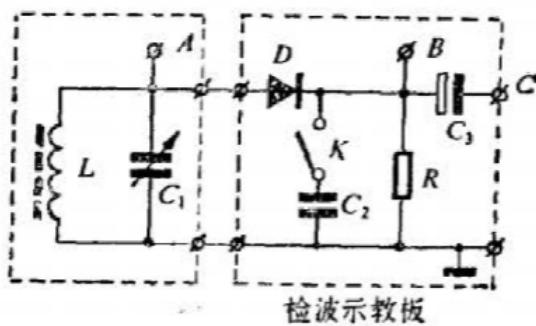


图 4.9

为了较好地演示检波原理，建议用自制的示教板配合信号源与示波管进行演示，在图 4.9 中， LC 调谐回路可用上面实验所用 LC_1 调谐回路示教板，检波部分示教板电路如图 4.9 左边

虚线所示。其中， D 为 2AP 型二极管，负载电阻 R 为 10 千欧， C_2 是高频旁路电容，可选 0.01 微法电容器， C_3 为输出耦合电容，可用 10 微法 10 伏的电解电容器，演示时首先上面实验的方法调整好信号源与示波器，并调好 C_1 ，使 LC_1 电路产生电谐振，用示波器观察 A 点波形，可在荧光屏上出现幅度较大的调幅波形（蝶状波形）（图 4.10 甲）。观察 B 点波形，可以看到经检波后的单向脉动高频振荡电流波形，其轮廓线为低频信号波形。注意，由于二极管本身非线性，不是理想二极管，显示出的波形下方不是严格的一条直线（图 4.10 乙）。然后闭合 K 可以看到经 C_2 旁路后， R 两端波形为低频信号波形（图 4.10 丙）。如果再观察 C 点波形，可以看到刚才低频波形向下移动一段距离，这表明刚才 B 点波形中有直流成分，经 C_3 的隔直流通交流作用后， C 点与地间输出的只是低频交流信号（图 4.10 丁）。

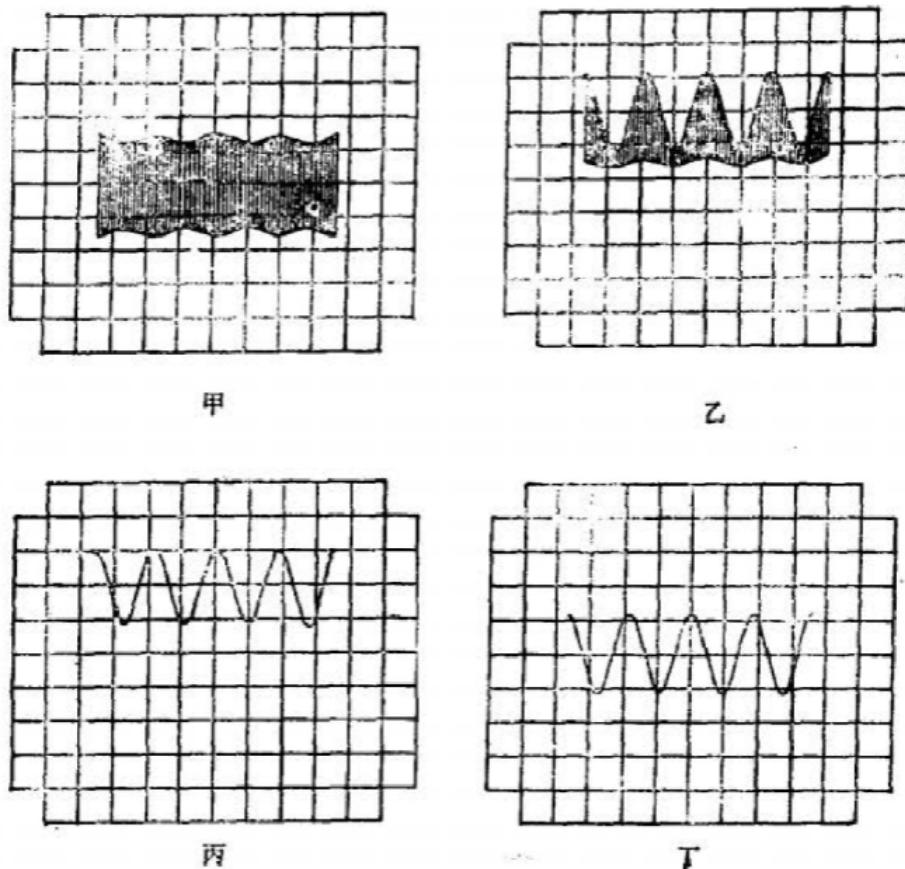


图 4.10

（七）简单收音机的构造和工作原理

在实验 6 中介绍的示教电路，实际上已是最简单的收音机了，与课本上图 4.18 所示的电路是一致的。若将该电路的 C 与地点间输出信号接一小扩音机（或自制一低放电路），就可以听到 1 千赫调制信号的声音。而改变 C_1 就听不到声音，这说明了选台的作用。若用导线代替二极管也听不到声音，说明了二极管的检波作用，如果信号源是自制的，还可以将电唱机（或小录音机）输出信号用屏蔽线接在高频振荡器中振荡三极管基极与地间作为发射台，用这个简单收音机就可收到信号，听到广播了。当然也可将成品信号源输出的信号用屏蔽线接入三极管基极与地间进行实验，如果当地中波广播电台信号很强，还可以直接接收电台广播。接收时，要架设室外天线，使天线通过一个几十皮法的小电容接在调谐回路电容定片上，动片接地线（如接自来

水管等).

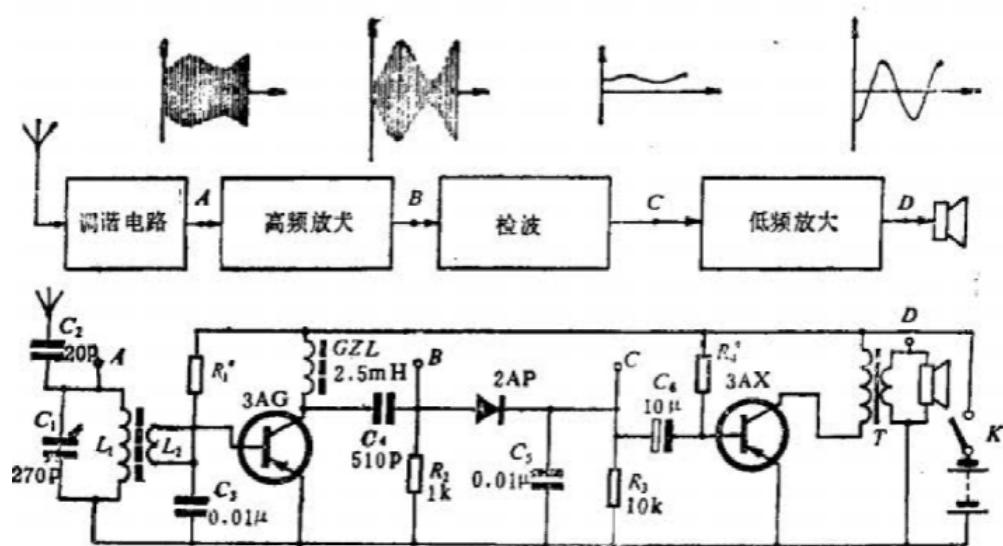


图 4.11

具有放大器的简单收音机的演示实验最好配合学生实验六“安装简单收音机”的教学进行，图 4.11 所示电路与课本图 10.6 所示简单收音机电路基本一致，略有改动，照图做一大型示教板，并在示教板上方画出结构方框图与波形图。演示时，可将信号源与环状天线靠近示教板 L_1C_1 电路的磁棒，要依次讲解每一部分的作用，并观察 A、B、C、D 各点波形。制作时，图中的 L_1 在 MX-400 型长 100 毫米以上的磁棒上用多股纱包线绕 70 匝左右制成，置于距磁棒一端 2 厘米左右； L_2 用同种导线绕 8 匝左右，置于磁棒中央附近。实际收听当地电台广播时，可适当调节 L_1 、 L_2 位置，有最佳效果时再固定。GZL 为高频扼流圈。自制时可用 50 千欧以上，1/2 瓦碳膜电阻当骨架，用直径 0.08 毫米左右的高强度漆包线在其上绕 400 匝左右，两端与电阻引线焊好即成。 T 为半导体收音机用输出变压器，如果是推挽式的，可只用初级两端，中心抽头不用，次级阻抗与喇叭阻抗应匹配，一般多是 8 欧的。电阻 R_1 与 R_4 均为偏流电阻，制作时，可用 20 千欧 1/8 瓦电阻与 330 千欧电位器串联接入电路，以便于调整。三极管 3AG 与 3AX 的 β 值应尽量选高一些的好，一般可选 60—100 范围内的，穿透电流 I_{ceo} 要尽可能小些，电源尽量用电池，也可用低压电源的稳压输出。

电路的工作原理，一般不作介绍。但是，由于高中学生求知欲较强，对于有兴趣的学生，可以根据情况作简要介绍。一般可以先介绍低频放大电路。学生学习过三极管的放大作用，这里可以先说明低频信号通过 C_6 加在基极与地（发射极）之间，引起三极管基极电流变化，造成通过集电极电流的较大变化，通过变压器将放大后的低频信号输入到扬声器发声，偏流电阻 R_4 的作用，可以通过不接入，阻值较大或较小时示波器波形的变化，说明要使三极管完整地放大有正负半周变化的信号电流，必须使三极管有一定工作电流，使正负半周变化反映在集电极电流的大小变化上，然后再介绍高频放大器， R_1 的作用同上，这里主要说明高频放大的道路。由于 C_3 有隔直流通交流作用，因此 L_2 上感应高频信号加在 BG_1 的基极与发射极之间，由基极电流变化引起集电极电流较大变化。由于高频扼流圈 GZL 有阻交流通直流的作用，对高频信号呈现较大阻抗（可由 $X_L = 2\pi f L$ 估算出阻抗约 10 千欧以上），而 C_4 有隔直流通交流作用，对高频信号阻抗很小（也可由 $X_C = \frac{1}{2\pi f C}$ 估算出约几百欧），因此放大的高频信号通过 C_4 与 R_2

与发射极形成回路，可以画出如图 4.12 所示高频放大的等效电路，说明在 R_2 两端得到放大的高频信号，并配合示波器观察该处波形（ B 与地间波形）加以印证。

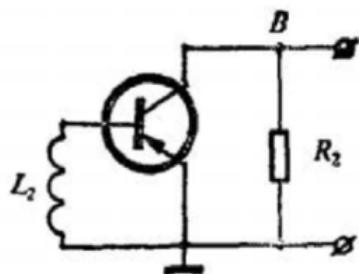


图 4.12

由于该电路很简单、接收灵敏度较低，用信号发生器与环状天线靠近 L_1C_1 电路磁棒时，才能够听到较大声音。如果听当地强电台广播，由于声音较小，只能靠近才能听到，加室外天线后，效果稍好。学生在自己实验时能听到声音就达到实验要求了。

二、学生实验

(一) 安装简单的收音机

这个实验的电路、元件数据及工作原理在演示实验 7 中都已作了说明，如果有配套的高阻耳机也可以代替扬声器与输出变压器直接接入电路。如果当地电台信号太弱可以考虑加接室外天线或用信号源进行实验。如有条件还可配备信号源与示波器由学生自行观察各点波形。这里只说明一下器材、实验步骤及有关调试问题。



图 4.13

课本上所说的实验器材是指课本图 10.5 所示的 J2467 型学生电子实验箱中的器材，该实验箱外形与器材情况如图 4.13 所示。如果无此实验箱，也可以自制，自制时可以将单面敷铜板裁成长 5 厘米宽 2 厘米左右的长条，两端留 1.5 厘米铜箔，中间部分刻去，两端铜箔可各焊一小

弹簧（可将吉他的低音弦中的细铜丝，先烧热退火，绕成螺线状后，再烧红投入油中淬火即可）作接线柱，元件接在其中，并用漆标明元件符号、规格、正负。三极管可用稍宽铜箔板制成三端接线板使用。由于需要调整三极管工作点，实验时还须给每一组配备一个万用表。电源可用电池组或学生电源 6 伏稳压输出。实验步骤可按课本上的说明进行，但应向学生提出接线的先后顺序，一般习惯是由后至前（即低放先接，依次接检波、高放与调谐回路），并要接一级检查一级电路是否正确，不要全部接好后再检查，以使学生养成良好电路接线习惯。在调整三极管工作电流时，也最好接一级调一级，并特别注意万用表正负端的接法。在调试时，与万用表相连的引线要稍长一些，以免表针与电路其他部分相碰（特别是与基极相碰）造成元件损坏。

观察有关各点波形，可参照上面演示实验 7 进行，学生信号源高频输出端可以将一根 1 米左右长的导线两端接好，代替环状天线。

如果要按前面教法建议部分所述进行只有调谐电路与检波电路的实验，即按课本上图 4.18 所示收音机电路进行实验， C_1 最好用空气介质的大型单连， L_1 与 L_2 绕制方法同演示实验 7 中所介绍的，只是 L_2 应增至 20 匝左右，二极管用 2AP 型， C_2 用 0.01 微法电容，耳机一定要用高阻柱的（1.5 千欧以上）。 L_1, L_2 的制作，也可以在直径 4 厘米的一个浸蜡纸筒上用直径 0.35 毫米漆包线绕 80 匝（可在 60 匝、70 匝处抽头）与 30 匝，两线圈相距 5 毫米左右。实验时要接室外天线（通过一个 50 皮法电容接入 L_1 ）与地线， L_1 抽头用以取得较好调谐效果。实验时，可以分别接入试听。如当地电台信号较弱，可以改用信号源进行实验。

第四节 习题解答

一、练习一

- 画一条按正弦规律变化的振荡电流的曲线，并在这条曲线上标出对应于课本图 4.2 甲、乙、丙、丁、戊各个时刻电流值的点。

解答：所求图线如图 4.14 所示。

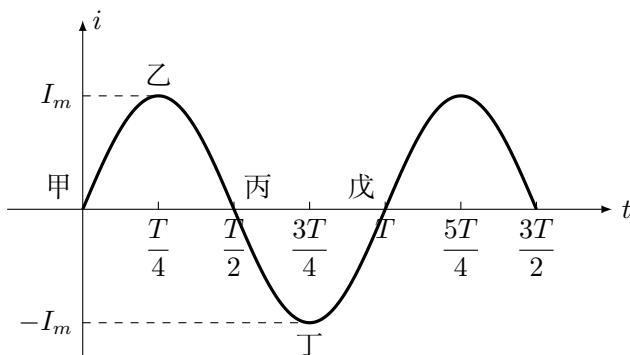


图 4.14

- 在课本图 4.2 所示的电磁振荡中，何时电容器里的电场最强？何时线圈里的磁场最强？电场能和磁场能是怎样相互转化的？

解答：在 $t = 0, T/2, T$ 时（图中的甲、丙、戊），电容器里的电场最强； $t = T/4, 3/4T$ （图中的乙、丁）时，线圈里的磁场最强。电容器充电后，两极板间的电场里储存着电场能。电容器通过线圈放电，形成放电电流。两极板储存电荷电量减少，电压降低，电容器中电场减弱，电场能减少；但电路中放电电流增大，线圈里磁场逐步增强，磁场能逐渐增大。在

这个过程中，电路的电场能逐渐转化为磁场能，当电容器放电完毕时，电路里的电流最大，这时电路里的电场能完全转化为磁场能。由于线圈的自感作用，该电流形成反向充电电流，磁场能又逐渐转化为电场能。反向充电完毕时，电路中的电流强度减小到零，电容器两极板间的反向电场达最大，电路中的磁场能完全转化为电场能。然后又开始反方向的放电过程，电场能又转化为磁场能，这种过程反复进行下去，电场能与磁场能通过电路里的充、放电电流，不断实现互相间的转化。

- 把 LC 回路中产生的自由振荡跟单摆的简谐振动相对比，说明它们类似的地方。

解答：将 LC 回路中产生的自由振荡跟单摆的简谐振动类似的地方列出下表进行对比。

LC 振荡电路	单摆
用电源给电容器完电，电容器获得电场能， LC 电路具有了初始能量。	用外力使摆球偏离平衡位置，摆球获得重力势能，单摆具有了初始能量。
电容器放电，两极板间场强不断减小，放电电流不断增大，电场能逐渐转化为磁场能。放电完了时，电场能完全转化为磁场能。	摆球摆向平衡位置，高度不断增大，重力势能逐渐转化为动能，到达平衡位置时，重力势能最小，动能最大。
电容器反方向充电，充电电流不断减少，两极板间的场强不断增大，磁场能逐渐转化为电场能。充电完了时，磁场能完全转化为电场能。	摆球从平衡位置上升速度不断减小，高度不断增高，动能逐渐转化为重力势能。达到最高点时，动能完全转化为重力势能。
电容器反方向放电，两极板间的场强不断减小，放电电流不断增大，电场能逐渐转化为磁场能。反方向充电完了时，电场能完全转化为磁场能。	摆球沿着与原来相反的方向摆向平衡位置，高度不断降低，速度不断增大，重力势能逐渐转化为动能，到达平衡位置时，重力势能最小，动能最大。
电容器重新开始充电，磁场能转化为电场能。电容器充电完了时， LC 回路回复到初始状态。	摆球从平衡位置沿着与原来相反的方向上升，动能转化为重力势能。摆球上升到最高点，单摆回复到初始状态。

二、练习二

- 一个 LC 回路能够产生 535 千赫到 1605 千赫的电磁振荡，已知线圈的自感系数是 300 微亨，可变电容器的最大电容和最小电容各是多少？

解答：当线圈自感系数一定时， LC 回路中电容器电容越大，振荡频率越低。根据 LC 振荡电路频率公式

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

可得：

$$\begin{aligned} C_{\text{大}} &= \frac{1}{4\pi^2 \cdot f_{\text{低}}^2 \cdot L} = \frac{1}{4\pi^2 \times (535 \times 10^3)^2 \times 300 \times 10^{-6}} \\ &= 0.295 \times 10^{-9} \text{F} = 295 \text{pF} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} C_{\text{小}} &= \frac{1}{4\pi^2 \cdot f_{\text{高}}^2 \cdot L} = \frac{1}{4\pi^2 \times (1605 \times 10^3)^2 \times 300 \times 10^{-6}} \\ &= 32.8 \times 10^{-12} \text{F} = 32.8 \text{pF} \end{aligned}$$

此题求 $C_{\text{小}}$ 还可利用比例求解：因为 $f \propto \frac{1}{\sqrt{C}}$ ，所以

$$\frac{f_{\text{高}}}{f_{\text{低}}} = \frac{\sqrt{C_{\text{大}}}}{\sqrt{C_{\text{小}}}}$$

因此，

$$C_{\text{小}} = \frac{f_{\text{低}}^2}{f_{\text{高}}^2} \cdot C_{\text{大}} = \left(\frac{535 \times 10^3}{1605 \times 10^3} \right)^2 \times 295 = 32.8 \text{pF}$$

2. LC 回路中的可变电容器的电容可从 30 皮法变到 15 皮法。要使这个回路的最低固有频率为 1000 千赫，线圈的自感系数应为多大？用这个线圈，回路的最高固有频率是多大？

解答：当可变电容器电容最大时， LC 回路的振荡频率最低。由频率公式

$$f_{\text{低}} = \frac{1}{2\pi\sqrt{L \cdot C_{\text{大}}}}$$

可得：

$$\begin{aligned} L &= \frac{1}{4\pi^2 \cdot f_{\text{低}}^2 \cdot C_{\text{大}}} = \frac{1}{4\pi^2 \times (10^6)^2 \times 30 \times 10^{-12}} \\ &= 0.84 \times 10^{-3} \text{H} = 0.84 \text{mH} \end{aligned}$$

因为 $f \propto \frac{1}{\sqrt{C}}$ ，所以

$$\frac{f_{\text{高}}}{f_{\text{低}}} = \frac{\sqrt{C_{\text{大}}}}{\sqrt{C_{\text{小}}}}$$

因此，

$$f_{\text{高}} = \sqrt{\frac{C_{\text{大}}}{C_{\text{小}}}} \cdot f_{\text{低}} = \sqrt{\frac{30 \times 10^{-12}}{15 \times 10^{-12}}} \times 10^6 = \sqrt{2} \times 10^6 \text{Hz} = 1.4 \text{MHz}$$

3. 如果把 LC 回路中电容为 C 的电容器用两个电容也为 C 的电容器串联起来代替，回路的固有周期怎样变化？如果不是串联而是并联，固有周期又怎样变化？

解答：设变化了的固有周期分别为 T' 和 T'' 。两个电容为 C 的电容器串联后的电容

$$C' = \frac{1}{2}C$$

根据 LC 回路有周期 $T \propto \sqrt{C}$ ，

$$T : T' = \sqrt{C} : \sqrt{C'} \quad T' = \sqrt{\frac{C'}{C}} \cdot T$$

所以

$$T = \sqrt{\frac{C/2}{C}} \cdot T = 0.707T$$

即周期变短。

当两电容器并联后的电容为 $2C$. 这时的固有周期

$$T'' = \sqrt{\frac{2C}{C}} \cdot T = 1.414T$$

即周期变长.

三、练习三

- 从地球向月球发射电磁波，经过多长时间才能在地球上接收到反射回来的电磁波？地球到月球的距离为 3.84×10^5 千米。

解答：由 $v = s/t$ 得 $t = s/v$ ，代入数值可得

$$t = \frac{s}{v} = \frac{2 \times 3.84 \times 10^5 \times 10^3}{3.00 \times 10^8} = 2.56\text{s}$$

- 我国第一颗人造地球卫星采用 20.009 兆赫和 19.995 兆赫的频率发送无线电信号，这两种频率的电磁波的波长各是多少？

解答：本题波长应计算到 5 位有效数字，书末附表中真空中光速只给出三位，因此需查教材第 186 页所给光速值 $c = 299792458\text{m/s}$ ，计算时应取 $c = 299792 \times 10^3\text{m/s}$.

由 $\lambda = c/f$ 知：

$$\begin{aligned}\lambda_1 &= \frac{c}{f_1} = \frac{299792 \times 10^3}{20.009 \times 10^6} = 14.983\text{m} \\ \lambda_2 &= \frac{c}{f_2} = \frac{299792 \times 10^3}{19.995 \times 10^6} = 14.993\text{m}\end{aligned}$$

- 有一台收音机，它接收的波长范围由 560.7 米到 186.9 米，它接收的频率范围是多少？

解答：该接收机接收的最低频率

$$f_1 = \frac{c}{\lambda_1} = \frac{3.00 \times 10^8}{560.7} = 535 \times 10^3\text{Hz} = 535\text{kHz}$$

该接收机接收的最高频率

$$f_2 = \frac{c}{\lambda_2} = \frac{3.00 \times 10^8}{186.9} = 1605 \times 10^3\text{Hz} = 1605\text{kHz}$$

因而接收机接收的频率范围为 535 千赫至 1605 千赫。（这个频率范围是我国规定的中波广播频率范围。）

- 一个振荡电路辐射出的电磁波的波长是 300 米，这个振荡电路的周期是多大？

解答：由 $c = \lambda/T$ 知：

$$T = \frac{\lambda}{c} = \frac{300}{3.0 \times 10^8} = 100 \times 10^{-8} = 1.00 \times 10^{-6}\text{s}$$

四、练习四

- 有一台收音机，把它的调谐电路中的可变电容器的动片从完全旋入到完全旋出，仍然接收不到某一较高频率电台的信号，要想接收到该电台的信号，应该增加谐振线圈的匝数，还是减小谐振线圈的匝数？为什么？

解答: 应该减小谐振线圈的匝数. 当可变电容器动片完全旋出时, 其电容最小, 谐振电路固有频率最高. 如果要接收较高频率电台的信号必须提高谐振电路固有频率. 根据 $f \propto 1/\sqrt{L}$, 应适当减小线圈自感系数值. 因为线圈自感系数与匝数有关, 匝数越少, L 值越小, 因此可用减小谐振线圈匝数的方法来提高谐振电路的频率, 以接收较高频率电台的信号.

- 收音机由收听某一较高频率的电台改为收听某一较低频率的电台, 调谐电路中可变电容器的动片应该旋进一些还是旋出一些? 为什么?

解答: 应旋进一些. 当可变电容器动片旋进时, 电容变大. 在电感线圈自感系数一定时, 谐振回路的频率与电容器电容平方根成反比. 电容增大, 谐振频率降低.

- 某收音机调谐电路的可变电容器的动片完全旋入时, 电容是 390 皮法, 这时能接收到 520 千赫的无线电波. 动片完全旋出, 电容变为 39 皮法, 这时能接收到的无线电波的频率是多大? 在这两种情形下, 接收到的电磁波的波长分别是多长?

解答: 调谐回路电感线圈自感系数一定时, 其谐振频率与电容平方根成反比, 即: $f \propto 1/\sqrt{C}$. 因此,

$$\frac{f_1}{f_2} = \frac{\sqrt{C_2}}{\sqrt{C_1}}$$

$$f_2 = \sqrt{\frac{C_1}{C_2}} \cdot f_1 = \sqrt{\frac{390 \times 10^{-12}}{39 \times 10^{-12}}} \times 520 = 1644 \text{ kHz}$$

这两种情形下所接收的电磁波波长分别为:

$$\lambda_1 = \frac{c}{f_1} = \frac{3.00 \times 10^8}{520 \times 10^3} = 577 \text{ m}$$

$$\lambda_2 = \frac{c}{f_2} = \frac{3.00 \times 10^8}{1644 \times 10^3} = 182 \text{ m}$$

五、习题

- 要使 LC 回路的固有频率增大, 应该采用下述哪种方法?

- (a) 增大电容器两极板间的距离;
- (b) 增大电容器两极板的正对面积;
- (c) 在线圈中插入铁心;
- (d) 减小线圈的匝数.

解答: 根据 $f = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}}$ 可知, 要使 LC 回路固有频率增大, 可以减小 L 或 C 的值. 根据决定 L 与 C 值的条件可知, 增大电容器两极板距离时, 电容 C 减小; 减小线圈匝数时, 自感 L 减小, 这两种方法都可使 LC 回路固有频率增大, 因而应采用 (a)(d) 所说的方法. (b)(c) 所说的方法都将使固有频率减小.

- 赫兹实验中的发射器为什么用课本图 4.9 那种形式, 而不用该实验中接收器那种形式? 赫兹实验中需要把接收器的两金属球调节到合适的距离, 才有明显的接收效果, 为什么?

解答: 赫兹实验中发射器用课本图 4.9 这种形式是为了使发射回路形成开放电路, 以便电磁辐射能力增大. 把接收器两金属球调节到合适距离时, 接收回路的固有频率将与发射频率相同而发生电谐振, 使接收效果明显.

- 回旋加速器中的磁感应强度为 B , 被加速的粒子的电量为 q , 质量为 m . 用 LC 振荡器作为高频电源, 电感 L 和电容 C 的数值应该满足什么条件?

解答：在回旋加速器中，造成两个 D 型盒窄缝间交变电场的高频电源频率应满足的条件是：

$$f_1 = \frac{1}{T} = \frac{qB}{2\pi m}$$

LC 振荡电路的频率由自感 L 和电容 C 决定，即：

$$f_2 = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}}$$

因此如果采用 LC 振荡器作为回旋加速器的电源，应满足条件 $f_1 = f_2$ ，即

$$\frac{1}{2\pi\sqrt{LC}} = \frac{qB}{2\pi m}$$

所以

$$LC = \frac{m^2}{q^2 B^2}$$

由上式知振荡器电感 L 和电容 C 应满足的条件是两者乘积等于粒子质量平方除以粒子电量与磁感应强度乘积的平方。

4. 附近有电焊机进行电焊，或者有汽车通过，收音机和电视机会受到干扰，解释这个现象。

解答：电焊机工作时产生电弧，与赫兹实验中电火花一样，都会产生电磁波，汽车发动机利用电火花点燃压缩燃料与空气混合物完成做功冲程，电火花也会激发电磁波，所以收音机和电视机会受到干扰。

注：实际上这种火花放电产生电磁波频谱极宽，波形也很复杂，因此不宜过多解释。

第五节 参考资料

一、电子学的发展和电子技术有关资料

电子学来源于电磁学，并在无线电通信技术基础上发展起来，1864 年麦克斯韦提出的电磁理论预见了电磁波的存在，23 年后，即 1887 年赫兹成功地进行了用人工方法产生电磁波的实验。7 年后，意大利的马可尼（1874—1937 年）和俄国的波波夫（1859—1906 年）分别独立地进行了距离几百米到千米的无线电报通信试验（马可尼实验距离为一千五百米，波波夫为二百五十米，马可尼得到了 1909 年诺贝尔物理学奖）。1901 年，马可尼横跨大西洋的无线电报通信试验成功。1906 年德法雷斯特（美国、1873—1961 年）发明真空三极管以后，电子学和电子技术迅速发展，并在基础理论研究推动下向高频（微波）和电子器件研究两个方向发展，并迅速应用于各种领域，第二次世界大战期间，为了研制雷达的需要，出现了与电子管工作原理本不同的速调管、行波管。四十年代后期，实现了黑白电视广播。1946 年出现了第一台用电子管制成的“电子数字计算机”。1948 年美国人肖克莱、巴丁和布拉登发明了晶体管，为此，他们获得了 1956 年诺贝尔物理学奖，晶体管的发明使电子学和电子技术进入新一代。1958 年出现小规模集成电路，60 年代出现第三代计算机，50 年代后期适应空间技术发展产生了“量子振荡器”和“微波激射器”，在此基础上，60 年代出现了“光量子放大器”或称“受激辐射光放大器”，现在称为“激光”，使光导通信成为可能，电子学和电子技术的展，使自动化控制从代替人们的体力劳动发展到代替部分脑力劳动。由于电子技术已渗透到社会各个领域，因此电子技术的水平已成为现代化的重要标志。

电子学和电子技术的内容丰富，应用十分广泛，发展非常迅速。电子学是研究电子和电磁场运动、电路理论及信息传输系统一般规律及其应用的科学，研究掌握这些方面的客观规律是电子学基础研究的内容，运用这些规律研究制造各种电子元件、器件、设备和系统，并广泛地应用于国民经济、国防以及科学技术的各个领域，是电子技术的任务。

电子学基础理论研究大致有这样几个方面：

1. 电磁场理论。电磁场理论研究从经典的宏观方面已发展到量子的微观方面，从自由空间的传播理论发展到特殊介质里的传播理论，研究电磁场理论，掌握电磁波传播规律，具有重要现实意义，例如，远距离短波信是在初步掌握电磁波在高空电离层反射的规律的基础上发展起来的，由于弄清了超高频电磁波在对流层散射的机理才发展起来的远距离散射通信的，现在正进一步研究电磁波在地层中传播的规律，以适应国防、遥感勘探、地震预报技术发展的需要。进一步研究电磁波在等离子体中的传播规律，以适应可控热核反应及空间科学中高空等离子体研究的需要。
2. 电子运动理论研究，电子真空三极管、速调管、行波管、磁控管、电子束管（如示波管、显像管等）、摄像管、晶体管、集成电路等电子器件，都是研究电子运动规律后的产物。研究电子从物质表面发射的机理、电子在磁场电场中的运动规律，是“阴极电子学”、“电子光学”、“微波管电子学”的主要课题。值得注意的是，这些理论以及器件的发明，都是以物理学基础理论研究成果为先导的。在对电磁场和电子注能量交换的理论研究之后，发明了速调管及其它微波管；近代量子力学的建立以及固体物理中能带理论和导电理论的发展，致使晶体管和其他半导体器件的发明；微波波谱学的基础研究，导致了受激辐射微波放大器的发明，并且诞生了激光器。
3. 电路理论和电路技术。电路理论主要是网络理论，网络理论和电路技术解决的是将电子元、器件有效组合成为电子设备和电子系统的问题。与网络理论密切结合的一些应用数学分支如矩阵代数、网络拓扑学也相应发展了。
4. 电磁波新波段的开辟与应用。电磁波新波段的开辟与应用是电子学研究的重要方向，新波段开辟应用是以能产生新波段电磁波的电子器件为先导的，依靠真空三极管开辟了长波无线电通信，真空管的改进又开辟了短波通信领域，速调管、行波管与磁控管的发明开拓了微波波段，而微波技术在现代仍是电子学重要而活跃的方面，它广泛适用于微波通信、微波雷达、微波遥感、射线天文、基本粒子研究（加速器）等领域，微波的生物生理化学作用也被应用于生物、医学领域，当前正在研究开辟毫米波与亚毫米波段的电子器件。光波段应用由于激光器的发明已被广泛运用于光导通信等方面了。可以说，不远的将来，电磁波谱中全部波段都将被人类开拓应用。
5. 电子学另一基础研究方面是信息论研究。信息论是在第二次世界大战结束后，由一部分数学工作者和多年从事通信、雷达工作的电子学工作者，总结实践经验并提高到理论高度而创立的一门新学科，它研究各种信息传输系统的共同规律。这里所指的信息，意义广泛，可以是电话、电报、电视、雷达、声纳、计算机及全息照相系统中的信息；也可以是各类生物神经系统中所传输的信息；还可以是遗传学中遗传因子的信息，等等。信息论主要研究如何有效、可靠、快速、经济地组成信息传输系统传输信号，例如现在迅速发展的编码理论、信号检测估值理论、模式识别理论和随机过程理论将在许多方面得到应用。

电子学和电子技术在应用过程中，与其他学科和技术相结合产生了一系列新的研究与应用

领域，丰富了电子学的研究内容，大大促进了电子技术的发展。其中一些重要方面是：

1. 材料和工艺：大规模集成电路和其他新电子器件所需的新材料、新工艺的突破。例如超低温、超纯度、超高压材料。集成电路光刻工艺将发展到电子束光刻、X光光刻工艺，人们已经在考虑分子或原子级的加工工艺了。
2. 电子计算机向着巨、微两个方面发展。巨型是指存贮容量和运算速度将是现在的几百倍的计算机。微型机则将大量进入人们的家庭，直接为人们起居饮食、学习娱乐、通信联系服务。电子计算机技术将带来工业上的一次革命。
3. 电子学与生物、医学科学相结合的设备，如电子医疗设备（医用加速器、医用无损性扫描设备、人工心肺、人工肾、心脏起搏器等），生理生物基础研究设备（如人体参数无损测量、遥感诊断、听觉视觉机理研究等）。值得特别提出的是仿生电子学开始发展为仿生工程，它研究生命体的各种复杂功能，发现它的规律，并用电子学方法模拟其功能。创造新的仿生电子设备。
4. 光学和电子学结合形成光信息处理、光电子学，这是从光通信技术发展起来的。预计光纤通信将逐步代替电缆通信。这也是通信技术上的一个重大变革。
5. 空间电子学。空间科学的发展大大促进了电子技术的发展，它不但要求电子技术为其提供高质量的、微型化的电子设备，还要求提供超远程、高精度、大容量的信息传输系统、控制系统和存贮系统，同时也给电子学带来新的研究领域，如研究地球外层高空等离子体、地磁变化规律、内辐射带与外辐射带强度位置变化规律及其对电磁波传播与空间通信的影响等等。

空间电子技术的发展，使人类实现了空间通信—同步通讯卫星通信也使人类获得了遥感遥测这样先进的测量方法，同时也带来许多间接成果。例如，高精度的时间系统促使量子振荡器的诞生，不仅解决了频率稳定问题，也给人们提供了时间基准，目前量子用振荡器制成的原子钟已经代替天文钟作为时间基准了。

6. 自动化技术。现在自动化技术逐渐地发展为“智能”自动化，出现了机器人、机械手等电子计算机技术和工业自动化相结合的产物。在此基础上发展起一门新学科：控制论。
7. 一些重要的边缘电子技术，如超导材料与器件、电子显微镜、射电天文和气象、能源技术等等。

（一）调制、调幅、调频与调频立体声广播

调制信号对载波的调制本质上是产生新频率的过程。以调幅为例，当调制信号和载波电压同时加在非线性元件时，产生调幅电流，这个调幅波包含着围绕载波频率分布的若干新频率，分别称为上、下边带，理论上可以证明，若载波频率为 f_0 ，调制信号频率为 f ，则经调制后产生调幅（或调频）波频率范围是 $f_0 - f$ 至 $f_0 + f$ ，这个范围称频带宽度，中波范围为 535 千赫至 1605 千赫，由于频率范围较窄，按国际规定，每个中波（短波）电台只能占有 10 千赫的频带宽度，否则电台拥挤，将互相干扰。因此，调幅广播音频信号最高频率不能超过 5 千赫。在广播音频信号中，高于 5 千赫的音频成分无法发送，又由于调幅波抗干扰能力差，致使中波（短波）广播的质量不是很好。

调频电台工作在 88—108 兆赫频率超短波范围内，频率范围比中波宽得多，每个电台占用频带宽度为 200 千赫。作为音频广播，音频信号频率范围为 30—15000 赫，基本上包括了人耳

能感受到的声波频率。又由于调频波抗干扰能力强，所以调频广播音质要比调幅广播好得多。但由于工作在超短波波段，电波基本上以直线方式传播，传播距离较小（一般只是几十千米范围）。

由于调制方式不同，解调方法也不同，因此收音机也有调幅收音机与调频收音机之分。

调频立体声广播是在调频单声道和音频立体声技术基础上发展起来的，为了使调频立体声广播与普通单声道调频广播都能被同一接收电路接收（称为“兼容”，现在电视广播黑白电视与彩色电视广播就是“兼容”的），采取了许多技术措施，形成不同的制式，目前我国采用的是导频制，美国、日本、欧洲国家也采用此制式，苏联和东欧国家采用的是极化调制制。制式不同，接收电路不同。

导频制调频立体声广播的调制信号由三部分组成，这三部分信号频带互相分离，其主信号为左右两声道音频信号之和（频率范围 50—15000 赫），这个信号可被一般调频收音机接收到，但无法区分左右声道。第二个信号为导频信号（频率为 19 千赫），这个信号是解出左右声道而用的基准频率（实际上需倍频，成为 38 千赫基准频率）。第三个信号是利用调幅方法，将左右两声道音频信号之差调制在 38 千赫频率上，并只取其上下边带成的。这三个信号一起再调制 88—108 兆赫调频广播波段的某一频率载波发射出去。因此调频立体声广播的调制信号可用下式表示：

$$A(t) = (L + R) + (L - R) \sin \omega t + p \sin \frac{\omega}{2} t$$

式中， $L + R$ 为主信号， $(L - R) \sin \omega t$ 为付信道信号， $p \sin \frac{\omega}{2} t$ 为导频信号，其中 ω 为 38 千赫的角频率。

在接收机中，先要通过鉴频取出这三个调制信号，然后分别取出 $L + R$ 与 $L - R$ 信号，再还原为左右声道信号分别送入放大电路放大后输送到左右扬声器，产生立体声音响效果。

（二）麦克斯韦

麦克斯韦（1831—1879），英国物理学家、数学家麦克斯韦生于英国爱丁堡。他父亲知识广博，使他从小就受到科学的熏陶。读中学时就对数学和物理发生了兴趣。1847 年考入爱丁堡大学学习数学、物理，1850 年秋，转入剑桥大学，专攻数学。1854 年留校工作，并于同年开始电磁学的研究。1860 年任英王学院自然哲学和天文学教授，1871 年任剑桥大学物理教授，领导筹建卡文迪许实验室，并任第一任主任。麦克斯韦是英国伦敦皇家学会会员。

麦克斯韦在物理学中的最大贡献是建立了统一的经典电磁场理论和光的电磁理论，预言了电磁波的存在，他在法拉第工作的基础上，总结了十九世纪中叶以前对电磁现象的研究成果，建立了电磁场的基本方程，得出了光的电磁本质以及预言了电磁波的传播速度。1873 年，他的著作《电学和磁学论》出版，这部著作包括了他在电磁学研究方面的所有成果，它的出版标志着经典电磁理论的建立。

麦克斯韦对统计物理学的建立也作出了重要的贡献。他运用数学统计方法，导出了分子运动论的麦克斯韦速度分布律。他在热力学、光学、分子物理学和液体性质的理论等方面都取得了成就。

1879 年 11 月 5 日，麦克斯韦在剑桥去世，年仅 49 岁。后人为纪念他，把电磁系单位制中磁通量的单位命名为麦克斯韦，简称“麦”。

(三) 赫兹

赫兹（1857—1894），德国物理学家。青年时代的赫兹，在数学、科学和手工艺方面才能出众。1877年进入慕尼黑大学学习。1878年转到柏林大学学习。1879年在物理竞赛中成绩突出，荣获金质奖章。1880年获博士学位，1883年任物理学副教授，1885年任物理学教授。

赫兹在物理学上最主要的贡献是用实验成功地证明了电磁波的存在，完善了麦克斯韦的电磁场理论。

他通过实验证明了电磁波以与光速相同的速度直线传播，并具有反射、折射、偏振等性质。赫兹的实验证实了麦克斯韦关于光是一种电磁波的理论。

赫兹还首先发现了光电效应现象，这一发现，成了爱因斯坦建立光量子理论的实验基础。

赫兹关于电磁波的实验为无线电技术的发展开辟了道路，他被誉为无线电通信的先驱。后人为纪念他，把他的名字命名为频率的单位，简称“赫”。

第五章 光的反射和折射

第一节 教学要求	148
第二节 教学建议	149
一、光的直线传播和光的速度	149
二、光的反射	151
(一)反射定律	151
(二)光路的可逆性	151
(三)平面镜	151
(四)球面镜	152
三、光的折射	153
(一)折射定律	153
(二)折射率	153
(三)全反射	154
(四)棱镜	154
四、透镜	155
(一)成像作图	155
(二)成像公式	156
五、透镜的应用	158
(一)眼睛	158
(二)显微镜和望远镜	158
第三节 实验指导	159
一、演示实验	159
(一)凹镜对光的会聚作用, 凸镜对光的发散作用	161
(二)光的折射和折射定律	161
(三)眼镜的矫正作用原理	161
(四)光导纤维传光演示	162
(五)透镜成像	162
(六)光传播的路径弯曲现象	163
二、学生实验	163
(一)测定玻璃的折射率	163
(二)测定凸透镜的焦距	164
(三)组成显微镜模型	165
三、课外实验活动	166
(一)测定水的折射率	166
(二)测定凹透镜的焦距	167
四、补充课外实验活动	168

(一)研究两个互成角度的平面镜中虚像的个数	168
(二)利用透镜公式测凹透镜的焦距	168
(三)组装望远镜模型	168
第四节 习题解答	168
一、练习一	168
二、练习二	171
三、练习三	172
四、练习四	173
五、练习五	174
六、练习六	176
七、练习七	178
八、练习八	178
九、练习九	178
十、练习十	179
十一、习题	182
第五节 参考资料	187
一、光的速度	187
二、光导纤维	188
三、助视光学仪器的视角放大倍数	190

第一节 教学要求

本章讲述几何光学知识，包括两部分内容：一部分是几何光学的基本规律，讲述光的反射定律和折射定律；另一部分是运用基本规律来研究平面镜、球面镜、棱镜和透镜等基本光学元件，这些元件在成像和控制光路方面各有其自身的规律和特点。学习这些知识，可以使我们认识自然界和生活中的许多光现象，理解基本光学元件的作用和光学仪器的原理。因此，这一章知识具有实际意义。

全章教材分为五个单元。一、二节为第一单元，讲述光的直线传播和光速。三、四节为第二单元，讲述光的反射和平面镜、球面镜。五一八节为第三单元，讲述光的折射、全反射和棱镜。九—十二节为第四单元，讲述透镜知识。十三、十四节为第五单元，讲述眼睛、显微镜和望远镜的构造和成像原理。

本章教材相当大一部分内容是在复习初中知识的基础上，进一步扩大、加深和提高的。光的直线传播、光的反射等知识，是复习性的教材。光的折射则在初中学过的知识基础上予以提高，引入了折射定律和折射率的概念，是进一步学习棱镜、色散、透镜的知识基础。透镜是许多光学仪器的主要元件，掌握透镜成像的规律，可以理解一些助视仪器的成像原理。所以，光的折射和透镜成像是本章教学的重点。

这一章的教学要求是：

1. 了解光在同一媒质中沿直线传播的性质，会用光的直线传播解释有关的现象。知道光在真空中的速度。
2. 掌握光的反射定律，会用反射定律解释有关的现象。掌握平面镜成像的原理和规律。了解凹镜对光的会聚作用和凸镜对光的发散作用，了解它们的成像规律，

3. 掌握光的折射定律和折射率的概念，了解媒质的折射率与光速的关系；会用折射定律解释简单的现象。
4. 理解光的全反射现象，掌握临界角的概念和发生全反射的条件，了解全反射现象的应用。
5. 了解棱镜对光的偏折作用和光通过棱镜后的色散现象。
6. 了解凸透镜对光的会聚作用和凹透镜对光的发散作用。了解透镜的主轴、光心、焦点和焦距，掌握透镜成像规律、成像作图法和成像公式。
7. 了解眼睛、显微镜和望远镜的基本构造和成像原理，了解近视眼和远视眼以及眼镜的作用。

虽然学生每天都接触光现象，但是却不能直接看到光的传播路径，讲解光的反射、折射和全反射，要做好演示，让学生看到光的传播路径，以利于揭示规律，加深印象，同时也可以提高学生的学习兴趣。

在几何光学的教学中，研究成像是一个重要的问题，要让学生了解成像规律和所成像的虚实。但是要注意，不要机械地记忆什么镜成什么像，而要着重让学生从根本上弄清实像和虚像的含义，掌握分析成像的规律和成像性质的方法。

在反射和折射现象中光路的可逆性对分析实际问题很有用。教学中要通过具体例子让学生领会到这一点。

媒质的折射率是个重要的概念，要让学生掌握绝对折射率的概念，为了使学生了解媒质的折射率总是相对于另一种媒质而言的，教材介绍了相对折射率，教学中不要求把相对折射率与绝对折射率的关系作为讲述重点，也不要求利用相对折射率进行计算。

学生对于全反射现象是比较生疏的。教学中应通过演示让学生认识这个现象，理解产生全反射现象的条件。在演示时，还应引导学生注意观察光强分布的变化情况，这对于正确理解全反射现象是有帮助的。光导纤维是全反射现象的应用，教学中可根据实际情况，向学生介绍这一新技术的发展情况，以开阔学生的眼界。

透镜是许多光学仪器的重要元件。在透镜成像的教学中，要求学生会用三条特殊光线求出像的位置、大小和倒正，判断像的虚实。对于透镜成像公式，应使学生能独立地把它推导出来，知道什么情况下 f 取正值，什么情况下 f 取负值，并能根据 v 的正负，判断出像的虚实、倒正和位置。

最后一个单元介绍眼睛、显微镜和望远镜。讲眼睛时，主要从物理方面讲解眼睛的成像原理，眼睛的调节以及近视眼、远视眼和眼镜的作用，不要过多地牵涉与生理机制有关的内容，对于显微镜和望远镜，主要学习它们的基本构造和成像原理。要求学生能看懂光路图，了解视角放大的情况。如果有条件，最好在教学中能结合望远镜和显微镜的实物来讲解，并介绍一些使用和维护方面的知识。

第二节 教学建议

一、光的直线传播和光的速度

光的直线传播是几何光学的基础，应通过演示实验让学生看到光传播的路径。演示内容应包括：

1. 光在同一种均匀媒质中沿直线传播；
2. 光到达两种媒质的界面，发生反射和折射；

3. 条件较好的学校还可演示光在非均匀媒质中传播时光线发生弯曲的现象（为阅读教材“海市蜃楼”做准备）。

光线是几何光学最基本的概念之一，它为应用几何学的方法研究光的传播奠定了基础，光的反射定律和折射定律等都是应用光线的概念来表述的，要使学生理解：

1. 光线的概念建立在光的直线传播的基础上，所以，作图时画光线必须要有表示光传播方向的头。
2. 光线和光是有区别的，光线只代表了光的传播方向，并不是实际存在的东西，而光是实际存在的。
3. 有时用光线代表很窄的平行光束的传播路径，从这个意义上讲，光线是光束的抽象；有时又用两条光线代表一束光束，这两条光线表示光束的边缘，也表示出光束的会聚、发散或平行的性质。

要注意应用几何学的方法研究与光的传播有关的实际问题。在对影、本影和半影等问题进行分析时可参考下面五点逐步深入：

1. 点光源发出的光照到不透明物体上，在物体背后的光屏上可以看到光线照不到的黑暗区域——影子。作出光路图，说明影子的范围；
2. 如果物体大小是已知的，应用相似形的关系可以说明影子的大小决定于点光源、物体和光屏的相对位置；
3. 利用发光面较大的面光源代替点光源，说明本影和半影的概念；
4. 面光源的线度大于物体时，移动光屏的位置，讨论屏上影的情况，说明本影、半影等概念的关系。
5. 观察者处于图 5.1 中 A、B、C、D 等不同位置时看面光源 PQ，见到的现象会不同。通过以上分析，可以为学生认识日蚀或月蚀等现象、解答课本练习一第 2 题打下基础，教学时应着重引导学生体会几何光学的研究方法：从光传播的基本定律出发，做出光路图，运用几何学的方法研究有关线段、角度等量的关系。

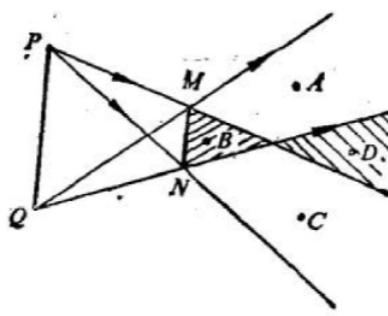


图 5.1

光的速度是物理学中的重要基本常数，为了测量光速，从十七世纪伽利略开始一直到今天，经过了许多科学家的努力，测量结果越来越精确。讲述光的速度要结合物理学史介绍科学家百折不挠、精益求精的探索精神，要重点讲述光的传播速度虽然很大，但是有限的，分析测量光速实验的设计思想。伽利略根据 $v = s/t$ 的原理进行了历史上第一次测光速的实验，尽管没能测出光的速度来，但是他的实验设计思想却给人们指出了努力方向，由于光速是很大的，早期测量光速的方法或者是增大光传播的距离，或者是利用更精巧的办法准确地测量光传播的时间。

罗默观测木星的卫星蚀，第一次证实了光以有限的速度传播，用的就是前一种方法。学生理解罗默方法的原理是有困难的，教材并不要求掌握具体细节，但应使学生理解：虽然卫星绕木星运动的周期是固定的，但在地球上观测木星的两次卫星蚀的时间间隔却是不同的，这是由于地球位于公转轨道上的不同位置时，与木星的卫星间的距离不同。而光以有限速度传播，从卫星发出的光到达地球时经过的距离不等，因此，观测到的卫星蚀的时间间隔也就不等。

迈克耳逊用旋转棱镜法测光速，是采用精巧的办法准确地测量出光传播的时间。他是早期测量光速最准确的科学家。讲述旋转棱镜法测光速的实验设计思想时，要着重理解光由光源 S 发出最后到达望远镜 C 中（课本图 5.5）所经过的路径和旋转棱镜能精巧地测量时间的原理，调节八面棱镜的转速，使光由凹镜反射返回来时八面镜恰好转过 $1/8$ 转，在望远镜 C 中能看到 S 的像（还可进一步引导学生讨论转速增加到转过 $\frac{2}{8}, \frac{3}{8}, \dots$ 转的情况）。测出转速便可求得光在两个山峰之间往返一次所用的时间。

近代科学家还提出用其他的实验原理来测量光速。例如测量激光的频率 ν ，和波长 λ ，根据公式 $c = \lambda \cdot \nu$ 计算光速，大大提高了测量的精度。应该要求学生记住真空中光速的近似值 $c = 3.00 \times 10^8 \text{ m/s}$ 。

二、光的反射

（一）反射定律

反射定律、镜面反射和漫反射在初中讲得都比较清楚，教材中这部分内容是按照复习旧知识安排的。可以通过演示光的反射光路、镜面反射和漫反射，再现这些现象，再进一步采用讨论的方法加深对反射定律的认识。选择讨论题目要针对学生的情况，下列问题可供参考：

1. 在什么条件下发生光的反射现象？
2. 反射定律的内容为什么一定要包括课本中讲的两条？
3. 怎样确定反射界面的法线？如果界面是球面，它的法线是什么？
4. 发生镜面反射时，反射光线和入射光线之间的夹角取值范围可能多大？
5. 漫反射和镜面反射有什么区别和联系？

（二）光路的可逆性

光路的可逆性是几何光学的重要原理之一。要结合反射定律（包括以后的折射定律）理解反射时的光路（包括折射时的光路）是可逆的。几何光学中的光路（面镜、棱镜和透镜的光路和成像）都建立在反射定律和折射定律的基础之上，并且几何光学中的所有光路都是可逆的，应注意，物理光学中的光路是不可逆的。

作为一种方法，光路的可逆性可以用来解决一些具体问题。例如，人眼的视野问题。可以设想在人眼所在的位置处放一个点光源，求出由该点光源发出的光所能照亮的区域，根据光路可逆性，在这个区域内的物体发出的光都能到达人眼，被人眼看到。因此，这个区域是人眼的视野范围。

（三）平面镜

平面镜的内容也是在初中知识的基础上讲述的。讲述的重点放在虚像的概念、虚像的形成以及平面镜成像的特点上。

虚像的概念及其形成分三个层次讲解：

1. 在光的直线传播一节中讲述了根据光的直线传播确定发光点的位置，这为讲解虚像做了准备、由发光点发出的光向各个方向传播，可以将其中的任意两条光线反向延长，它们的交点就是发光点的位置。应该注意，这两条光线必须是同一发光点发出的，由不同发光点发出的两条光线的交点，在成像问题上没有意义；
2. 由某一物点 S 发出的、经平面镜反射后的光线进入了眼睛，人们根据光的直线传播的经验认为这些光线都是由它们的反向延长线的交点 S' 射来的，好象在 S' 点有一个发光点一样， S' 点就是物点 S 的虚像。这里说明了虚像不是光线的实际交点，是“虚”的，需要借助其他光学仪器（如眼睛）才能观察到；
3. 组成物体的每一个物点都在平面镜里产生一个虚像点，这些虚像点的集合就是物体的虚像。教学中要注意培养学生抽象思维的能力，不仅要从实验现象中看到物体通过平面镜可以成像，还要学会从理论上分析推理得出像的概念，再根据反射定律进一步推出物体通过平面镜所成的像是等大、正立的虚像，物和像对于镜面是对称的。

平面镜的应用包括应用平面镜成像，应用平面镜控制光路等，在课文中提到了利用平面镜将微小效应放大、潜望镜的光路图等实例，在习题中安排了平面镜成像，利用激光测量月球和地球间的距离以及人眼通过平面镜观察的视野范围等问题。在分析实际问题时要画好光路图，使学生了解几何光学的研究方法，培养他们灵活应用物理知识解决实际问题的能力。

(四) 球面镜

通过演示实验复习凹镜的会聚作用和凸镜的发散作用，注意从实验观察到的光路出发讲述球面镜的顶点、主轴、焦点（实焦点和虚焦点）和焦距等概念。进一步理解课本 193 页讲述的凹镜和凸镜的实际应用的例子。

近轴光线是球面镜和透镜能成理想像的前提条件，教材中给出了在近轴条件下，球面镜的焦距 $f = r/2$ 是为了使学生对球面镜焦距的大小有一个具体的了解，并不要求深入展开讨论和证明这个公式。根据反射定律，可以分别画出平行于主轴的近轴光线和远轴光线经过凹镜反射后与主轴的交点，如图 5.2 中的 F 和 E 点，说明球面镜的非近轴光线不能会聚于一点。实验给出的几条光线能够在焦点会聚仅是近似的；近似的条件就是入射光线都是近轴光线。为了使远轴的平行光线也能会聚于焦点，实际应用的大口径凹镜都用抛物面镜而不用球面镜。

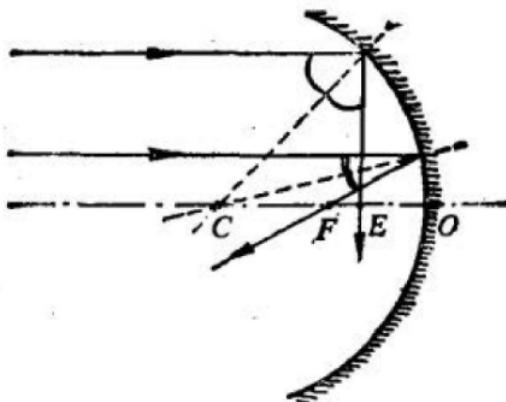


图 5.2

球面镜成像是从实验得出的，教材不要求画成像的光路图，也不要求讲述球面镜成像公式，

只是从实验得出物体通过凹镜可以成放大实像、缩小实像和放大虚像，通过凸镜只能成缩小虚像的情况演示实验中要让学生注意观察用光屏能够接收到实像，而无论把光屏放在什么位置都不能接收到虚像。这表明实像是反射光线实际会聚而成的；虚像不是反射光线的实际会聚点，而是光线的反向延长线的交点，这是实像和虚像的主要区别。

三、光的折射

折射定律和折射率是本章的重点内容，可以按下述几个层次安排教学。

1. 通过演示实验观察光在两种媒质的界面上的折射现象，观察折射角随入射角的增大而增大的规律，激发学生深入研究折射角和入射角的关系的学习动机。
2. 分析课本 197 页表中的实验数据，得出折射定律。
3. 折射定律中的常数决定于两种媒质的性质，引入相对折射率 n_{21} 。
4. 引入绝对折射率，进而求出相对折射率和绝对折射率的关系。

(一) 折射定律

课本结合物理学史讲述了历史上经历了一千多年，由托勒密到斯涅耳经过许多科学家的努力，从大量的实验数据中归纳总结出折射定律，教学过程也要从演示折射现象开始，演示的内容有：

1. 光达到两种媒质的界面上发生折射的现象；
2. 折射角随入射角增大而增大的规律；
3. 光由光疏媒质进入光密媒质向靠近法线方向偏折，光由光密媒质进入光疏媒质向远离法线方向偏折。

通过演示，使学生获得光的折射现象的感性认识。在定性实验的基础上，再分析课本 197 页表中所给出的实验数据，说明托勒密最初得出的折射角与入射角成正比的结论是片面的，给出斯涅耳经过深入的分析得出的折射定律内容。（折射定律现代表述的形式是由笛卡儿提出的。）

和反射定律一样，掌握折射定律也要注意培养学生的想象力，要使学生建立起光由媒质 I 进入媒质 II 的折射图景。使学生在理解界面及其法线、入射光线和折射光线，入射角和折射角等概念的基础上，进一步掌握折射定律。折射定律的第一点指出了入射光线、折射光线、法线在平面内的大致方位，第二点定量地确定折射角，确定折射光线的确切方向。

(二) 折射率

媒质的折射率是由折射定律引入的。教材从光在两种媒质界面上发生折射的现象入手，引入相对折射率，并且直接给出了相对折射率和光在两种媒质中传播速度的关系，然后从光从真空中进入媒质发生折射的特殊情况，引入绝对折射率的概念，并通过折射率和光速的关系，求出相对折射率和绝对折射率的关系。这部分内容，特别是绝对折射率和相对折射率的关系，涉及的物理量比较多，初学者较难掌握，容易造成混乱。教学中应强调 n_{21} 下标的表述及其意义。讲解公式 $n_{21} = \frac{n_2}{n_1} = \frac{v_1}{v_2}$ 时，要和具体的光疏、光密媒质以及光线的偏折情况相联系。

教学中要注意培养学生的想象力，建立光由媒质 I 射入媒质 II 发生折射的图景，理解其中的平面、直线、角度之间的关系，进一步寻求入射角和折射角、媒质的折射率及光速之间的关系，例如，已知水中的光速是真空中光速的 $3/4$ ，光由空气进入水中，以多大的入射角射入时，反射光线和折射光线垂直，学生在头脑中建立了光在空气和水的界面上发生反射和折射的图景。

之后，就能找到入射角、反射角和折射角间的关系，求出入射角来。

课本 201 页讨论的光通过两面平行的玻璃砖发生侧移的例题，既应用了折射定律分析解决具体问题，又为“测定玻璃折射率”的学生实验做准备。可以先演示光通过玻璃砖发生平行侧移的现象，再提出如下问题：

1. 光线穿过玻璃砖后，为什么只发生平移而不改变传播方向？
2. 光线平行侧移的距离、方向决定于什么条件？

让学生自己通过讨论去研究解释这个现象，寻求例题的解。

(三) 全反射

由于学生先接受了光到达两种媒质的界面上既要发生反射，又要发生折射的现象，要进一步认识在一定条件下，光到达界面上只发生反射不发生折射的全反射现象比较困难，学生往往对于发生全反射的条件理解不深刻。教学中，要使学生在实验的基础上，认识全反射现象，了解发生全反射的条件。

做演示实验时，要使学生看到光从光密媒质射入光疏媒质时，折射角大于入射角。随着入射角的增大，折射角也逐渐增大。当入射角达到某一角度时，折射角达到 90° 。再增大入射角，就只有反射光线，没有折射光线。通过现象的观察，使学生了解全反射现象是光由光密媒质射入光疏媒质时，入射角达到某一特定值以后产生的现象。这有助于使学生弄清楚“临界角”的含义。

还要使学生理解全反射现象并不违背折射定律。当光从光密媒质进入光疏媒质时，有 $\sin r = \frac{\sin i}{n_{21}}$ ，而光疏媒质对光密媒质的相对折射率 $n_{21} = \frac{v_1}{v_2} < 1$ ，所以折射角 r 大于入射角 i 。当折射角 $r = 90^\circ$ 时，即使再增大入射角，也不会存在大于 90° 的折射角 r ，这时就发生了全反射现象。

教学时，可结合实验观察使学生理解临界角的概念，掌握计算临界角的方法。

为使学生获得全面的认识，在讨论全反射现象时，也可以分析光由光疏媒质进入光密媒质的情况。通过比较，加深学生对产生全反射条件的认识。

在演示时，还要注意引导学生观察入射光的能量在反射光和折射光中的分配随入射角的大小而变化。使学生认识到发生全反射时，入射光线的能量几乎都被反射回原来的媒质中，没有光能量进入另一种媒质，因而反射光最强。由此可以认识生活中的全反射现象，如课本 205 页讲述的实例，以及使用光导纤维和全反射棱镜的意义。

(四) 棱镜

三棱镜对光的偏折作用和色散现象是折射定律的具体应用，设计如下的教学过程可供参考。

演示单色光通过三棱镜发生偏折的光路，分别演示棱镜的底面在下方和底面在上方的两种情况，让学生观察现象，归纳出光过三棱镜总是向底面偏折的结论。

根据折射定律讨论光在三棱镜两个侧面的折射，定性地说明光通过光密三棱镜向底面偏折的光路。也要提醒学生注意，如果是光疏三棱镜，光的偏折情况将会怎样？让学生在做课本练习六第 1 题时回答。

定性说明偏折角度 θ 与棱镜的折射率有关。在保持入射角 i 和棱镜顶角 A 不变的条件下，棱镜材料的折射率越大，偏折角度也越大。这是由于棱镜的折射率大，在 AB 面上光的偏折角度也大，也就是 AC 面上的入射角变大。在 AC 面，由于入射角和棱镜材料的折射率都变大，偏折角度也要变大。因此总的偏折角度随折射率增大而增大。

演示白光过三棱镜的色散现象，可观察到由色散产生的彩色光带（连续光谱）。要注意引导

学生观察色散时光线的偏折方向以及光谱中不同颜色光的偏折角度。演示时还应在三棱镜的入射侧面前加红、黄、蓝等不同颜色的滤色片，显示单色光通过棱镜的偏折情况。可以看到红光偏折最小，蓝光偏折最大。由此揭示白光包含有各种颜色的色光，不同色光通过棱镜的偏折角度不同，进而可以解释产生色散现象的原因。

组成白光的各种单色光，对三棱镜的入射角都相同，但出射时各色光偏折角度不同，这是由于棱镜对于不同色光的折射率不同造成的，红光的偏折最小，表明棱镜材料对于红光的折射率最小；蓝光的偏折大，表明棱镜对于蓝光的折射率较大，要让学生了解媒质对于不同颜色的光的折射率不同，说明不同色光在该媒质中的传播速度不一样，使学生进一步加深对折射率的认识。

可结合练习五中的题目讲一讲全反射棱镜。常用的全反射棱镜是等腰直角三棱镜。在光学仪器中常用它来控制光路，改变光线的传播方向或使像倒转等。例如，潜望镜中用全反射棱镜代替平面反光镜，改变光线的传播方向；望远镜中常用一对全反射棱镜使像的上下和左右都反转，观察者能够直接看到正立的像。

常用一对全反射棱镜使像的上下和左右都反转，观察者能够直接看到正立的像。

四、透镜

这一单元讲述透镜的成像规律，成像作图法和成像公式。这些内容是本章中重要的基础知识，也是教学的重点。

实验是讲解透镜知识的基础。凸透镜对于光线的会聚作用，凹透镜对于光线的发散作用，物体通过透镜可以成像（包括实像和虚像），都是通过实验得出结论的。通过实验建立起物和像的一一对应关系，为进一步用作图法和公式法研究物像的关系打好基础，要做好下述演示实验：

平行于主轴的光线通过凸透镜后都会聚于主轴上的一点；平行于主轴的光线通过凹透镜后变得发散，借助于直尺看出出射光线的延长线交于主轴上的一点。通过实验的光路讲述主轴、光心、焦点（包括实焦点和虚焦点）和焦距等概念。

从主轴、光心、焦点的概念分别引出凸透镜和凹透镜的三条主要光线，再用实验复现这三条主要光线，强化学生的认识。

通过演示实验复习物体通过凸透镜成像的五种情况（ $u = f$ 时不成立）和凹透镜成像的一种情况。演示过程要注意：

- 利用光屏接收实像，确定实像的位置要注意实验操作的示范，让学生看到光屏在成像位置附近移动时，像由模糊到清晰再到模糊的过程。
- 改变物距的大小应由物距较大逐渐变为较小，使学生对于凸透镜和凹透镜成像的几种情况有比较完整的认识，体会研究方法，切忌只孤立地演示成像的几种情况，而不体现物距（或像距）连续变化的过程。

（一）成像作图

透镜成像作图建立在物体通过透镜可以成像的实验基础之上，物体上的每一个发光点都对应着一个像点，即由物点发出的光线经过透镜折射后，所有出射光线，包括三条主要光线，都汇交于它对应的像点。课本安排练习九第 1 题的目的就是为了加深这个认识，为了确定像点的位置，可以在这些光线中任意选取两条出射光线求得交点，选用三条主要光线中的两条比较方便。同样，确定物点的位置，也可求出与像点相应的任意两条入射光线的交点。这样，可以使学生认

识物点和像点的意义，认识成像作图的基本出发点，正确理解作图方法，避免得出只有三条主要光线才能成像的错误印象。

教学中要注意示范，使学生养成作图规范的良好习惯，作图规范包括：每条光线在透镜折射前后都应标出表示光线行进方向的箭头；正确绘出透镜的符号，标注光心、焦点以及物和像的位置和正倒；分清图中的实线和虚线。

教学中还要注意：

- 采用对比的方法区别凸透镜和凹透镜三条主要光线的不同点。学生对凹透镜的三条主要光线往往掌握不好，其主要原因是对于虚焦点的概念和位置理解不深刻，混淆了凹透镜和凸透镜对光线的作用。
- 强调物点是透镜的入射光线的出射点，像点则是上述入射光线经透镜折射后的出射光线或其延长线的交点，不是随意两条光线的交点，学生往往不注意这点而造成错误。
- 利用作图法确定物像关系，要和物体通过透镜成像的情况相联系，许多实际问题往往是在分析成像情况做出判断后才能正确做图。

教材不要求讲述副光轴和焦平面、副焦点的知识，一般情况只做主轴外物点的成像光路图，对于垂直于主轴的物体，它的像也垂直于主轴，可以只求主轴外物点的像，成像光路如图 5.3 所示，为了确定主轴上物点的像的位置，可以借助于过该点的垂直于主轴的物体的成像作图，求得它的像点。

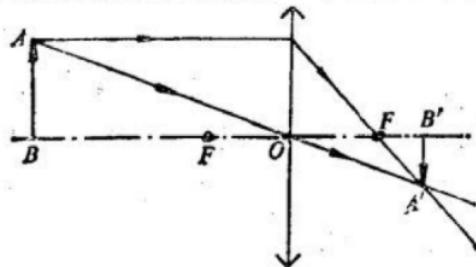


图 5.3

利用几何作图说明实物通过凸透镜和凹透镜成像的几种情况，如图 5.4、图 5.5 所示，可以看到，实像和虚像都是由物点发出的光经透镜（也包括面镜等其它光学元件）后的出射光线的交点。物点和像点是一一对应的。实像点是出射光线的实际交点，可以用光屏来接收，通过光屏的漫射作用，人眼可从各个方向观察到它；虚像是出射光线延长线的交点，只能由人眼或其他光学仪器来承接。

（二）成像公式

在几何作图的基础上推导成像公式的思路是：

- 由几何作图给出物像之间存在的一一对应的关系，寻求物距 u 、像距 v 和焦距 f 间的关系式。
- 在透镜成像的光路图中， u, v, f 都是主轴上的量，利用相似三角形的几何关系推得透镜成像公式和放大率公式。
- 先按照凸透镜实物成实像的情况推导成像公式，然后引入符号规定，把公式推广到凸透镜成虚像，凹透镜成虚像的情况，为了使学生信服，在练习题中安排了证明透镜公式也适用

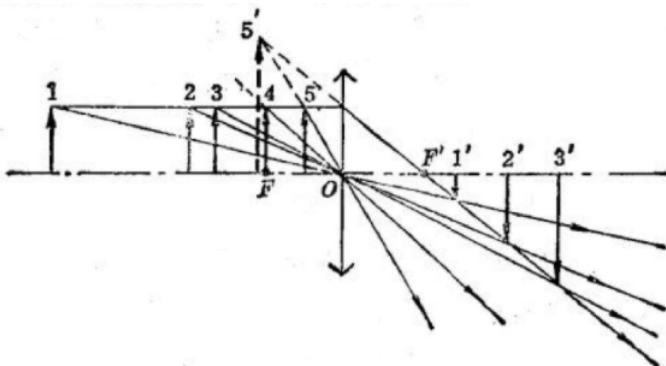


图 5.4

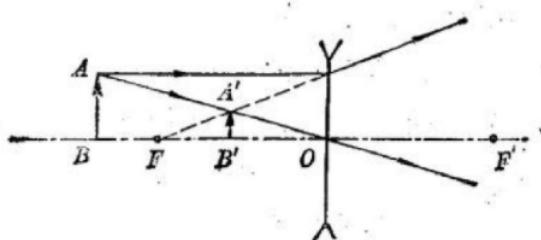


图 5.5

于凹透镜成像.

成像公式 $\frac{1}{u} + \frac{1}{v} = \frac{1}{f}$ 和放大率公式 $m = \frac{A'B'}{AB} = \frac{v}{u}$ 配合使用，既可以确定物体成像的位置，并由像距 v 的正负判断像的实虚和倒正，也能确定像的放大或缩小的情况；利用这两个公式还可以讨论物体经过透镜成像的各种情况。课本练习十第 2 题就是用公式讨论物体成像的情况，讨论的结果和作图法得出的结果一样，也跟实验结果一致。

应用透镜成像公式研究物和像的关系是教材的重点。在使用公式计算时要让学生注意：凸透镜的焦距 f 取正值，凹透镜的焦距 f 取负值；物距 u 总取正值；实像的像距 v 取正值，虚像的像距 v 取负值。计算时，要按照正确的符号规则将已知量的值代入公式，便可得到正确的结果。如果计算出来的 v 是负值，则表示所成的像是虚像； f 是负值，表示所用的透镜是凹透镜。

放大率公式中的 m 总是正值，即 $m = |v|/u$ 。对于实物成实像的情况，由于 $v > 0$ ，所以 $m = v/u$ ；对于实物成虚像的情况，由于 $v < 0$ ，所以 $m = -v/u$ 。

根据公式讨论透镜成像问题要和成像的光路图结合起来。按照符号规则， u 、 v 、 f 都是代数量，有正有负。但是，在从光路图中线段的几何关系寻找 u 、 v 、 f 各量间的代数关系时，把图中的几何线段都看作是正值比较方便。因此，与表示凹透镜焦距的线段对应的代数量可用 $-f$ ，与表示虚像像距的线段对应的代数量可用 $-v$ 。这样在讨论过程中就不会发生选错符号的问题了。具体例子可参看练习十第 1 题的解答。下面再举一例：

某物体通过透镜成放大到 3 倍的正立像。已知物和像的距离是 12 厘米。那么使用的是什么样的透镜？透镜的焦距是多大？

根据已知条件，这是属于凸透镜成虚像的情况， $v < 0$ ，与光路图（图 5.6）中表示物距的 OB' 对应的代数量为 $-v$ 。

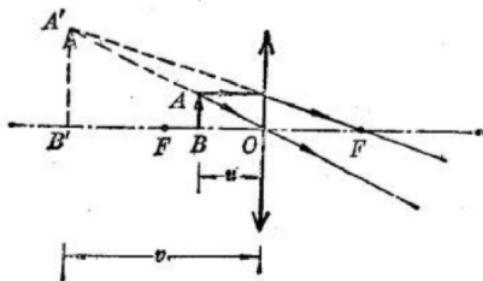


图 5.6

根据物、像关系和放大率公式有：

$$\begin{cases} -u - v = 12 \\ m = \frac{-v}{u} = 3 \end{cases}$$

解方程组可得 $u = 6$ 厘米, $v = -18$ 厘米. 将 u 、 v 数值代入成像公式得 $f = 9$ 厘米.

课本 224 页的例题, 是应用公式法来研究物像关系. 题目所述的求焦距的方法, 是实验室中测量焦距的常用的较准确的方法. 由于这种方法在学生实验中要用到, 因此教学时应使学生理解公式的推导过程, 弄懂公式的意义.

五、透镜的应用

这一单元讲述眼睛、显微镜和望远镜等光学仪器, 作为透镜基础知识的应用.

(一) 眼睛

眼睛的构造相当于一架精巧的焦距可变的照相机. 讲述时应注意以下几点:

视觉的形成: 通过眼球的屈光作用 (相当于凸透镜的作用), 物体在视网膜上所成的倒立缩小的实像, 刺激眼睛的感光细胞, 再经过神经系统的综合分析作用形成视觉.

眼睛的调节: 通过晶状体的弯曲程度来改变眼球的焦距, 使不同距离的物体都能在视网膜上成像. 这里要注意阐明视力范围的远点、近点和明视距离的概念.

近视眼和远视眼的视力范围和正常眼不同, 是由眼睛的屈光系统不正常造成的. 通常以眼睛的远点来判断屈光是否正常, 正常眼的远点在无限远处, 近视眼的远点在眼前的有限距离. 远视眼所成的像落在视网膜后.

配带眼镜可以矫正近视眼和远视眼. 配戴凹透镜可以使像点后移, 配戴凸透镜可以使像点前移. 通过演示实验显示眼镜的矫正作用, 使学生得到直观的认识.

有人认为, 明视距离的远近是远视眼和近视眼的标志, 这是不科学的. 因为明视距离与人的习惯等因素有关. 近视眼和远视眼都具有调节能力, 不能准确地测量它们的明视距离, 而且用明视距离也不能准确地表达眼睛的屈光是否正常.

(二) 显微镜和望远镜

放大视角扩大眼睛的观察范围是讲述显微镜和望远镜的主线. 这些助视光学仪器做为透镜知识的应用, 应着重讲述它们的构造、成像原理和成像光路图.

显微镜是学生比较熟悉的光学仪器, 生物课中学生曾用它观察微小物体的切片. 可以结合“组成显微镜模型”的学生实验进行教学, 让学生自己先预习, 再动手做实验, 通过实验了解显

微镜的构造，掌握显微镜的成像原理和光路图，理解使用显微镜怎样达到放大视角的目的。最后应结合实验说明实际显微镜的构造，讲解使用和调整显微镜的知识。

望远镜是用来观察远处大物体的助视光学仪器，教材重点讲述开普勒望远镜的构造、成像原理和光路图。讲解课本图 5.54 开普勒望远镜原理图时，应向学生说明射入物镜的三条平行光线来自远处天体上的同一点，而不是来自天体上的不同点，目镜所成的虚像的位置应在远处，以免学生误解。要帮助学生理解望远镜的光路，说明望远镜放大视角的作用。眼睛通过目镜观察物体虚像的视角大于人眼直接观察物体的视角，这就好像把物体从远处“拉近”一样。应注意望远镜只放大视角，并不是得到比物体放大的虚像，实际上所成的虚像要比物体本身小。

课本还介绍了牛顿反射式望远镜，用大口径的凹镜代替凸透镜做物镜（课本图 5.55 反射式望远镜原理图），反射光线在会聚到焦点以前被平面镜反射，形成实像。通过目镜再观察这个实像，同样起到放大视角的作用。

条件较好的学校还可以在课后介绍伽利略望远镜，伽利略望远镜是意大利物理学家伽利略在 1609 年发明的。它的物镜是凸透镜，目镜是凹透镜。通过望远镜观察到的像是正立的。简单的观剧镜和儿童玩具望远镜都是伽利略望远镜。课本上没讲伽利略望远镜是为了避开虚物成像和副光轴的问题。

显微镜和开普勒望远镜都是由两个凸透镜组成，除了显微镜的目镜和物镜的焦距都比望远镜的小之外，还可按下表所列内容进行比较。

	显微镜	望远镜
观察对象	近处微小物体	远处的大物体
构造	物镜焦距 f_1 较小，目镜焦距 f_2 较大，物镜和目镜的距离大于 $f_1 + f_2$	物镜焦距 f_1 较大，目镜焦距 f_2 较小，物镜和目镜的距离等于 $f_1 + f_2$
成像特点	物镜成放大实像于目镜的焦距以内，目镜成放大虚像于明视距离处	物镜成缩小实像于焦点附近，目镜成放大虚像于远处

第三节 实验指导

一、演示实验

本章的许多演示实验都需要显示光束传播的路径。显示光束的路径通常用下述两种方法：

- 利用微小颗粒对光的散射。例如，光束通过烟箱，由于烟雾对光的散射，能够显示出光束行进的路径；
- 利用光屏的漫反射作用。例如，光束掠射过光屏，光屏表面对光束的漫反射，显示出光束传播的路径。

显示光的传播路径的光束应是细窄的平行光束。平行光源通过一条或几条狭缝后，便得到一束或几束很窄的平行光束。实验室中可供选择的平行光源有：

- 用平面镜引入一束太阳光做为平行光源。它的优点是比较简单，一般用 1—2 块平面镜反射就可引入太阳光做平行光源。太阳光是理想的平行光，而且色温高，在做色散实验时，由太阳光色散得到的彩色光带的色彩最好。但是，使用太阳光源要受到教室的位置是否向阳以及天气是否晴朗的限制。同时，随着时间的推移，平面镜的方位要作跟踪调整。

2. 由光源（白炽灯或溴钨灯）和凸透镜组成的平行光源。使用时要调整灯丝的位置，使出射光束近似是平行光束。这种平行光源的优点是制造容易，使用方便。
3. 由激光光源产生的激光光束是理想的平行光源。这种光源的优点是光束窄细而且亮度较高、平行性好、单色性好。它的缺点是造价较高。

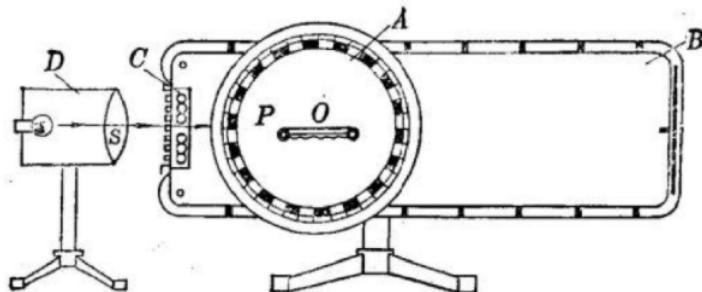


图 5.7

J2501 型光具盘（图 5.7）是比较理想的几何光学演示实验仪器，它由平行光源、矩形光盘、圆形光盘（又叫哈特光盘）和多种光学元件的附件组成。图中的 A 是圆形光盘，B 是矩形光盘，C 是矩形光盘左侧的光栏装置，D 是光源。图中 O 处是光学元件——反射镜。图中的 P 是旋螺钉，用以固定透镜、棱镜等光学元件，用 J2501 型光具盘，可完成中学物理中几何光学的大部分演示实验。

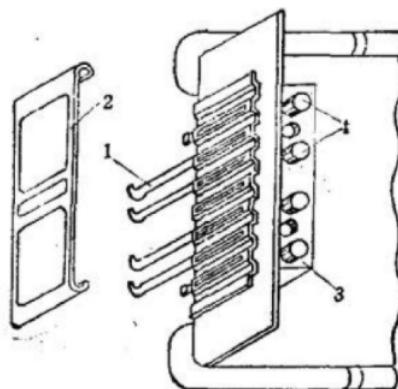


图 5.8

矩形光盘左侧的光栏装置如图 5.8 所示。光栏与屏面垂直，上面共有七条平行缝隙，每条缝隙都可插入栏光片 1。缝隙前面可罩上红色或蓝色的滤光片 2。缝隙右边有一个带有六个小圆孔的铁架 3。小圆孔上可插入装在圆柱形架上的小平面镜 4，可以通过改变镜面方向来改变所需光线的方向。

实验前要组装和调整平行光源和光盘。

1. 调整平行光源和光盘的相对位置，使平行光源射出的光近似和光盘平行，通过矩形光盘左侧的栏光装置，在光盘上可显示出几条光带。
2. 调整光源灯泡的位置，使发光灯丝位于光源凸透镜的焦平面上，灯丝线段和光盘平面垂直，由平行光源射出的光照射到光盘上，可以得到边缘清晰、彼此平行的光带。

结合教材，用光具盘可以完成的演示实验有：

1. 光的直线传播；

2. 光的反射和反射定律；
3. 光的镜面反射和漫反射；
4. 凹镜对光的会聚作用，凸镜对光的发散作用；
5. 光的折射和折射定律；
6. 光通过平行玻璃板的侧移；
7. 全反射现象；
8. 三棱镜对光的偏折，全反射三棱镜；
9. 凸透镜对光的会聚作用，凹透镜对光的发散作用；
10. 眼睛的矫正作用原理.

下面举几例说明实验的方法以及应该注意的问题.

(一) 凹镜对光的会聚作用，凸镜对光的发散作用

使用的仪器有平行光源、矩形光盘、凹柱面镜和凸柱面镜. 把凹柱面镜（或凸柱面镜）挂到矩形光盘上，使圆柱反射面的母线垂直于光盘. 几条光线照射到柱面镜上被反射，在光屏上显示出的入射光线和反射光线的径迹如图 5.9 所示. 它跟过球面镜主轴的截面内的光路相同，调整时要上下移动柱面镜的位置，（也可稍稍绕悬点转动柱面镜），使光屏中央的光线照到柱面镜后，反射光线与入射光线重合，表明这条光线是过球心的，反射光线沿原路返回，这条直线是主轴. 进一步还可指明会聚作用和发散作用，讲解相应的实焦点和虚焦点，顶点和焦距的概念.

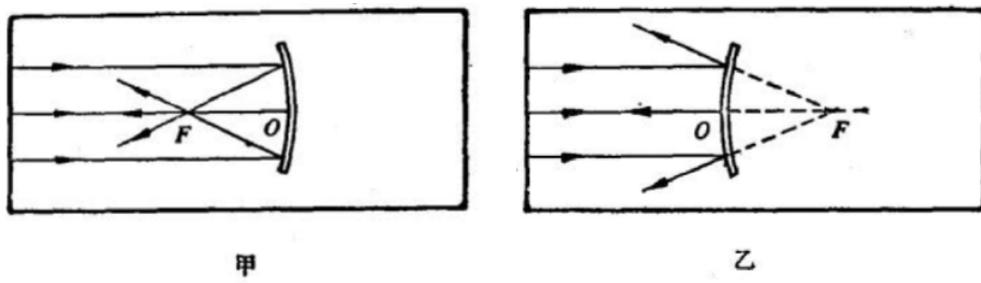


图 5.9

(二) 光的折射和折射定律

使用的仪器有平行光源，矩形光盘，圆形光盘和半圆柱透镜. 在组装实验装置时，要注意用紧固螺钉把半圆柱透镜卡在圆形光盘上，要使半圆柱透镜的圆心位于光盘刻线的中心，直径剖面要和光盘上 90° 刻线对齐. 实验前要调整光源和光盘的相对位置，使得从光盘左侧拦光装置中央透过来的一条光线能够沿着光盘的 0° 刻线射到半圆柱透镜的圆心上，并且一直穿过透镜射出，不改变方向. 从而保证转动圆盘时，光线的入射点始终在圆心处，到达透镜圆弧面上的光线始终是沿着半径方向穿过圆弧面，不改变方向，如图 5.10 所示.

实验的具体步骤可按课本 197 页的思路. 测出几组入射角 i 以及相应的折射角 r ，验证折射定律.

(三) 眼睛的矫正作用原理

眼镜的矫正作用原理包括用凹透镜矫正近视眼，用凸透镜矫正远视眼. 图 5.11 表示凹镜对近视眼的矫正作用. 把眼睛的剖面图贴在矩形光盘上，光盘上挂 $f = 80\text{mm}$ 的双凸柱面透镜. 使

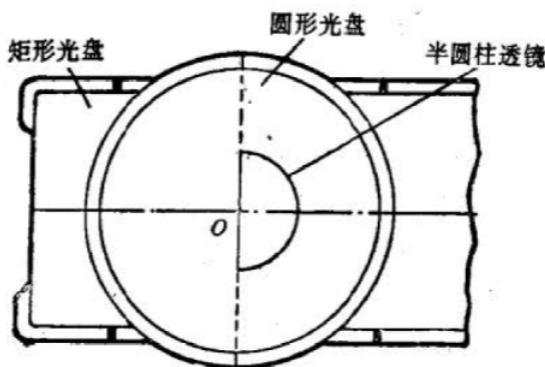


图 5.10

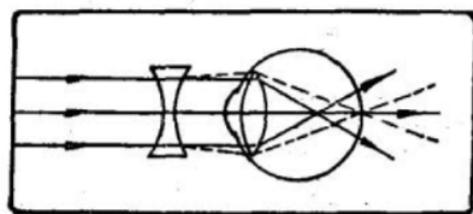


图 5.11

三条平行光线通过透镜会聚在视网膜前，如图中实线所示，再在透镜前挂 $f = -80\text{mm}$ 的双凹柱面透镜，可以看到三条平行光线经凹透镜后，先发散一些，再经凸透镜会聚于视网膜上，如图中点划线所示，调整双凹透镜和双凸透镜之间的距离，可以改变会聚点前后位置。

用凸透镜矫正远视眼的原理和上述实验相仿，用 $f = 160\text{ mm}$ 的双凸柱面透镜代表眼睛，三条平行光线通过透镜后的会聚点较远。再在双凸透镜前挂 $f = 80\text{mm}$ 的双凸柱透镜，可以看到会聚点明显前移，如果能另外配一个焦距较大的双凸柱面透镜，借助眼睛的剖面图来演示，效果更好。

(四) 光导纤维传光演示

按课本图 5.24 所示制作仪器，要选用质地均匀内部没有杂质或小气泡的弯曲玻璃棒，（可多弯两道弯，表示光导纤维能够任意弯曲）暗盒的长度应长一些，内部用黑纸衬上，将伸进暗盒内的玻璃棒外面包一层黑纸，使得光只从玻璃棒端面射入，射到玻璃棒端面上的入射光线的入射角都比较小。在暗盒外看，玻璃棒的侧壁基本上不透光。从玻璃棒的端面传出光，照在光屏上得到一亮斑。（如果玻璃中含有杂质或小气泡，它们对光的反射，可能使部分光从侧壁透出。）

(五) 透镜成像

透镜成像的实验在光具座上进行，演示物体通过凸透镜成实像或虚像，通过凹透镜成虚像的几种情况，光具座上应标注出透镜左右 f 及 $2f$ 的刻度。为了使全班同学都能同时看到物距和像距的大小以及屏上实像的清晰或模糊变化情况，应使光具座的刻度正对同学。在光屏附近，与光具座导轨成 45° 角的位置竖直放置一个大平面镜（图 5.12），学生或者直接看光屏的像，或者通过平面镜看光屏的像。演示时，注意让学生看到移动光屏时，屏上的像由模糊到清晰再到模糊的变化过程。反复移动光屏，最后确定实像的位置。

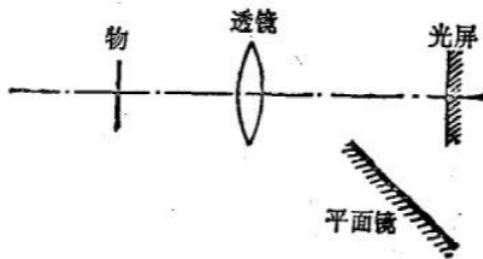


图 5.12

(六) 光传播的路径弯曲现象

在非均匀媒质中光传播的路径发生弯曲的现象，可以做为光的直线传播规律的补充，帮助学生理解海市蜃楼的成因。

在方形标本缸中放入半缸浓白糖水，实验前向糖水上面缓慢注入少量清水，使缸内液体的下部是密度较大的浓糖水，上部是密度较小的清水，由于清水和糖水都向对方扩散，形成了扩散层，扩散层中糖水的折射率由下向上逐渐减小并连续变化，把激光光束打到扩散层中，可以明显地看到激光光束是弯曲的。一般情况，标本缸置时，折射率连续变化的扩散层可以保持一天左右。

二、学生实验

(一) 测定玻璃的折射率

实验仪器主要有梯形（或矩形）玻璃砖，白纸，绘图板，大头针以及直尺、三角板、半圆仪等。实验时应注意：

1. 直线 aa' 和 bb' 要利用直尺画出，不准直接用铅笔靠着玻璃砖的侧面划线，否则容易损伤玻璃砖的光学表面。玻璃砖放在白纸上，平行的两个界面要与直线 aa' , bb' 对齐。
2. 预先画界面 aa' 上的入射光线（直线 OA ）和法线 NN' ，选定入射角，插好大头针 P_1, P_2 。这样做容易找到 P_1, P_2 通过玻璃砖后形成的虚像，便于确定大头针 P_3, P_4 的位置。（课本图 10.7）。
3. 大头针应垂直于纸面插放， P_1 和 P_2 , P_3 和 P_4 的距离稍大一些为好。
4. 入射角 i 的值应取大一些，相应的折射角 r 也会大些。
5. 必须认真画好光路图，准确地求得点 E 和 O 的位置，才能使折射光线的位置比较准确。

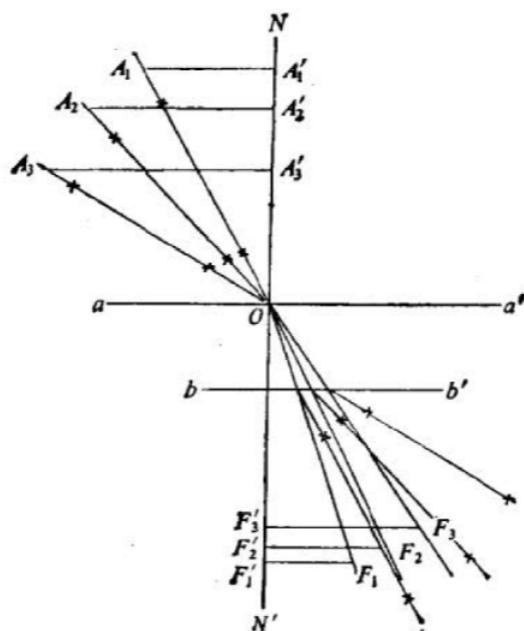


图 5.13

计算折射率可以如课本所述的方法。用量角器量出入射角和折射角，查表求得正弦值，计算折射率，也可用圆规截取 $OA_1 = OF_1$ ，作 $A_1A'_1 \perp ON$, $F_1F'_1 \perp ON'$ （图 5.13），测量 $A_1A'_1$ 和

$F_1F'_1$ 的值, 计算

$$n = \frac{\sin i}{\sin r} = \frac{A_1A'_1}{F_1F'_1}$$

实验记录表格和参考数据:

次数	入射角 i	$\sin i$	折射角 r	$\sin r$	$n = \frac{\sin i}{\sin r}$
1	30.0°	0.500	19.0°	0.326	1.53
2	45.0°	0.707	26.5°	0.446	1.59
3	60.0°	0.866	34.5°	0.566	1.53

$$\bar{n} = 1.55$$

或者:

次数	$AA'(\text{cm})$	$FF'(\text{cm})$	$n = \frac{AA'}{FF'}$
1	3.95	2.55	1.55
2	5.60	3.53	1.59
3	6.90	4.48	1.54

$$\bar{n} = 1.56, \quad (OA_1 = OF_1 = 8\text{cm})$$

说明:

1. 玻璃砖的两个面 aa' 和 bb' 不一定要求平行.
2. 可以用“测定液体的折射率”替代这个实验. 将液体装在薄壁透明容器(如蒸发皿)内, 利用同样的方法确定入射光线、折射光线来测定液体的折射率.

(二) 测定凸透镜的焦距

实验仪器主要有光具座及其附件: 凸透镜 ($f = 100\text{mm}$) 1字屏、光屏、光源和低压电源 (1字屏、光源和低压电源可用小蜡烛代替).

平行光聚焦法是根据焦点的概念来测焦距. 凸透镜应正对着光源, 使入射和凸透镜的主轴平行, 保持光屏与凸透镜平行, 移动光屏直到在屏上得到最小最亮的光斑, 此时光斑和透镜的距离等于焦距. 光源可用太阳, 也可用光具座所附的光源(近似当作平行光源). 由于太阳光经凸透镜会聚的光斑亮度很强, 实验时应注意保护眼睛.

公式法和位移法测焦距都在光具座上进行, 首先要把物屏、凸透镜和光屏靠在一起, 调整它们的高度, 使它们的中心都在和光具座导轨平行的一条直线上, 这叫调共轴. 调共轴是使透镜成像实验顺利进行的条件(在光具座上进行其他实验时, 也必须调共轴).

为了比较精确地测物距和像距, 最好选用垂直于主轴的平面物. 可用光源照亮“1”字屏(有的是刻有箭头的物屏)代替蜡烛火焰做为物体, 如果在“1”字屏上粘一层半透明的薄纸, 会使整个“1”字的亮度比较均匀, 这样更便于观测像的清晰情况.

为了得到光屏上成像最清晰的位置, 应左右移动光屏(或凸透镜), 使光屏上的像由模糊到清晰再到模糊, 通过观察这个过程, 反复移动光屏(或凸透镜), 可得成像最清晰的位置.

实验时物距应选在 $2f$ 附近, 或者物和光屏的距离 L 稍大于 $4f$. 如果物距太大, 则成像过小; 如果物距太小 ($u > f$), 则成像过大. 像过大和过小都不容易确定成像最清晰的位置.

说明:

1. 物体通过凸透镜成实像，应使物和光屏的距离 $L \geq 4f$. 证明如下：由 $\frac{1}{u} + \frac{1}{L-u} = \frac{1}{f}$ ，整理可得 $u^2 - Lu + fL = 0$. 所以

$$u = \frac{L \pm \sqrt{L^2 - 4fL}}{2}$$

要使 u 有实数解，应有 $L^2 - 4fL \geq 0$ ，即 $L \geq 4f$.

- 当 $L = 4f$ 时， $u = v = L/2 = 2f$ 为实物成等大实像.
- 当 $L > 4f$ 时，

$$u_1 = \frac{L + \sqrt{L^2 - 4fL}}{2}, \quad u_2 = \frac{L - \sqrt{L^2 - 4fL}}{2}$$

也就是保持 L 不变，在凸透镜距物体的距离为 u_1 和 u_2 时，物体在光屏上先后两次成像.

2. 三种测焦距方法的比较，平行光聚焦法突出了焦距的概念，可以直接读出结果，但测量比较粗糙. 公式法直接根据成像公式计算焦距，由于物、像和透镜的实际位置和光具座上的标度位置存在偏差，物距和像距往往测不准，造成误差. 位移法是根据公式 $f = \frac{L^2 - d^2}{4L}$ 来测焦距的， L 和 d 都不受上述偏差影响，因此测量结果比较准确.

(三) 组成显微镜模型

本实验要使用光具座，凸透镜 $L_1 (f_1 = 50\text{mm})$ (做物镜)，凸透镜 $L_2 (f_2 = 100\text{mm})$ (做目镜). 还要用切片和切片架，毛玻璃屏，光源和低压电源等.

可以选用生物课的切片做为观察用的小物体. 考虑到像差的影响，组成的显微镜放大倍数一般以 3—5 倍为宜，因此，切片应选较大的，如昆虫的某些器官等.

把光源、切片、凸透镜 L_1 毛玻璃屏和凸透镜 L_2 安装在光具座上后，要调共轴，这是组装的关键步骤.

用光源照亮小物体，通过物镜 L_1 成放大倒立实像，移动毛玻璃屏的位置，在屏上接收到小物体的实像，再通过目镜 L_2 观察毛玻璃屏上的实像. 然后移去屏，直接看小物体所成的像. 安排这个步骤的目的是使学生认识显微镜的成像原理. 在显微镜中，物镜的实像做为目镜的物，进一步通过目镜成放大虚像.

为了避免光源灯丝的干扰，在移去毛玻璃屏直接观察小物体时，可以在光源前放一层半透明的薄纸.

注意使用焦距较小的凸透镜作物镜.

实验参考数据：小物体通过物镜 L_1 成大倒立实像. 物距 $u_1 = 8$ 厘米，焦距 $f_1 = 5$ 厘米，像距 $v_1 = 13.3$ 厘米. 物镜 L_1 和目镜 L_2 间的距离 $L = 20$ 厘米.

目镜成放大虚像. $u_2 = L - v_1 = 6.7$ 厘米，焦距 $f_2 = 10$ 厘米，像距 $v_2 = -20.3$ 厘米. 显微镜的放大倍数

$$m = m_1 \cdot m_2 = \frac{v_1}{u_1} \cdot \frac{|v_2|}{u_2} \approx 5$$

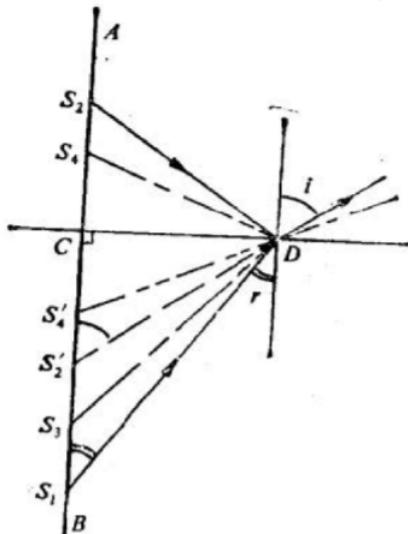


图 5.14

三、课外实验活动

(一) 测定水的折射率

本实验是利用水面的镜面反射和水下物点视深变浅的现象来测定水的折射率。当人眼通过瓶口边缘 D 点观察到水下 S_1 点的虚像和水面上 S_2 点的虚像重合时(图 5.14), 有 $CS_2 = CS'_2$ 。因为 $AB \perp CD$, 所以

$$\sin i = \frac{CD}{\sqrt{CD^2 + CS_2^2}}, \quad \sin r = \frac{CD}{\sqrt{CD^2 + CS_1^2}}$$

折射率

$$n = \frac{\sin i}{\sin r} = \frac{\sqrt{CD^2 + CS_1^2}}{\sqrt{CD^2 + CS_2^2}} \quad (5.1)$$

测量瓶口直径 CD , 刻度尺上的长度 CS_1, CS_2 , 即可计算水的折射率。

如果移动人眼的位置, 再通过 D 点看到水下另一点 S_3 的虚像和水面上 S_4 点的虚像重合时, 同理可得折射率

$$n = \frac{\sin i}{\sin r} = \frac{\sqrt{CD^2 + CS_3^2}}{\sqrt{CD^2 + CS_4^2}} \quad (5.2)$$

在 (5.1)、(5.2) 两个式子中, 消去 CD , 得到:

$$n = \sqrt{\frac{CS_1^2 - CS_3^2}{CS_2^2 - CS_4^2}}$$

这样就可以不测量瓶口的内径, 直接从直尺上读出两组数据求出水的折射率来。

实验中应注意以下几个问题:

适当选取眼睛的观察位置。观察 S_1 和 S_2 的虚像时, 眼睛的位置不能改变。如果入射角 i 增大, 反射光线变强, 折射光线变弱, 因而 S_2 的反射虚像亮度增强, S_1 的折射虚像亮度减弱。为使水面上和水面以下的刻度的虚像都比较清晰, 可用手电筒做辅助照明光源, 光若直接照射尺子水面以上部分, 尺子的反射虚像亮度较大, 便于读出 S_2 的刻度。再将光通过水面直接照射尺子水面以下部分, 尺子的折射虚像亮度较大, 读出 S_1 的刻度。

由于瓶口是圆的，通过瓶口边缘读虚像位置的刻度不易准确。实验时，可在瓶口放一把短尺，使短尺的边缘与直尺的刻度线平行，距离 CD 应为短尺边缘和直尺刻度平面间的距离。

下面列出的是参考数据：

次数	刻度尺上的刻度(厘米)					CD (厘米)	折射率 n
	C	S_1	CS_1	S_2	CS_2		
1	10.0	3.0	7.0	13.5	3.5	6.0	1.327
2	10.0	3.5	6.5	12.8	2.8	6.0	1.336

$$\bar{n} = 1.33$$

采用第二种方法计算可得

$$n = \sqrt{\frac{CS_1^2 - CS_3^2}{CS_2^2 - CS_4^2}} = 1.24$$

由于水中的刻度不容易读准确，后一种方法用到四个读数，因此计算出的数值的误差较大。

(二) 测定凹透镜的焦距

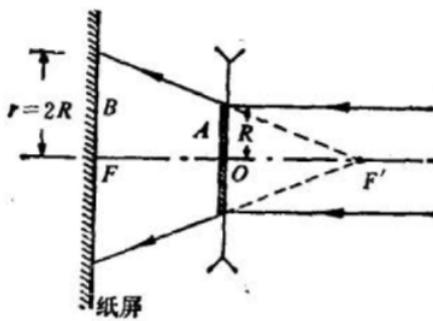


图 5.15

本实验利用凹透镜虚焦点的概念测焦距。在图 5.15 中，平行于主轴的平行光束经凹透镜折射后成发散光束，发散光束都好像从虚焦点 F' 发出的。当半径为 R 的圆纸片 A 的影子和白纸屏上半径为 $2R$ 的圆圈重合时，由相似三角形的关系可知

$$\frac{F'O}{F'F} = \frac{1}{2}$$

因此： $FO = OF' = |f|$

实验时应注意：

1. 凹透镜应正对着太阳光，即太阳光和凹透镜的主轴平行。这样，从凹透镜射出的光线的延长线的交点才是焦点 F' 。
2. 白纸屏应和凹透镜保持平行，使黑纸片在屏上的影子呈椭圆形，如果呈椭圆形的影子，测量结果会不准确。
3. 为了保护透镜的表面，可用清水将黑纸片粘在凹透镜的中心处。实验后要用镜头纸或细软的绒布将凹透镜擦拭干净。

四、补充课外实验活动

(一) 研究两个互成角度的平面镜中虚像的个数

两块小平面镜 M 、 N 垂直地放在桌面上，使两个反射镜面之间的夹角 $\theta = 90^\circ$ ，在桌面上平面镜前放一个小球（图 5.16），两块平面镜中有小球的虚像，一共可以看到几个虚像？保持小球和平面镜 M 不动，使平面镜 N 改变位置与 M 成 60° 角，再观察两块平面镜中小球虚像的个数。试画图说明观察的结果。

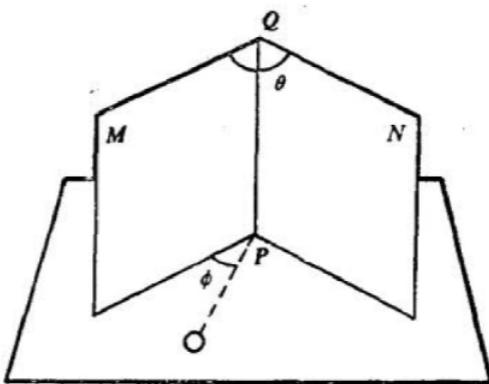


图 5.16

说明：当两个反射镜面之间的夹角 $\theta = 90^\circ$ 时，一共可以看到 3 个虚像；当两个反射镜面之间的夹角 $\theta = 60^\circ$ 时，一共可以看到 5 个虚像。

(二) 利用透镜公式测凹透镜的焦距

过待测凹透镜主轴竖直放置细铁丝 A ，从凹透镜的另一侧可以看到细铁丝 A 的虚像。另外再在铁架台上直立悬吊一根细铁丝 B ，移动铁架台的位置，使细铁丝 B 恰好在铁丝 A 的虚像的正上方。这时，移动头的位置，可以发现从凹透镜中看到铁丝 A 的虚像和不通过凹透镜直接看到的铁丝 B 没有视差，说明铁丝 B 的位置跟铁丝 A 的虚像的位置是一致的。测出虚像距和物距，根据透镜公式可以计算出凹透镜的焦距。

(三) 组装望远镜模型

取焦距不等的两个凸透镜，并测出它们的焦距。用焦距较大的凸透镜做物镜，焦距较小的凸透镜做目镜，把两个凸透镜共轴放置，使它们之间的距离等于两个焦距之和，这就组成简单的开普勒望远镜。用这架望远镜对准远处的物体，如果眼睛对着目镜看，可以见到远处的物体被“拉近”了，如果眼睛对着物镜看，则见到远处的物体被“推远”了。

第四节 习题解答

一、练习一

1. 在课本图 5.6 中， S 是一个点光源， AB 是物体， E 是屏幕，试画出 AB 在屏幕上所成影的范围。

解答：根据光沿直线传播的性质，点光源 S 照到物体 AB 上，在屏 E 上所成影的范围为图 5.17 中的 A_1B_1 。

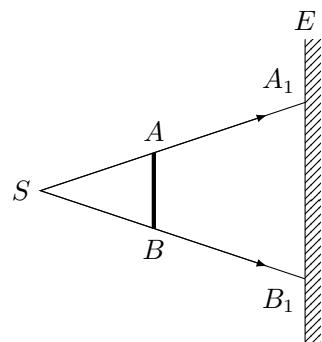


图 5.17

2. 为什么在发生日食的时候，有的地方能看到日全食，有的地方只能看到日偏食？在什么情况下能看到日环食？画出地球、月球和太阳位置的简图来解释发生这几种日食的原因.

解答：月球既围绕地球转动又围绕太阳转动. 当月球位于太阳和地球之间，并且三者大约在一条直线上时，就发生日蚀.

太阳光照到月球上，在月球背后形成本影区、半影区和伪本影区，如图 5.18 所示. 本影区是太阳各个部分发出的光都照不到的区域，半影区是太阳的某一部分发出的光可以照到，其余部分发出的光照不到的区域，伪本影区是和本影区对顶的圆锥区域. 在伪本影区内，太阳中心部分的光照不到，而太阳的边缘部分发的光可以照到. 伪本影区也是一种特殊的半影区.

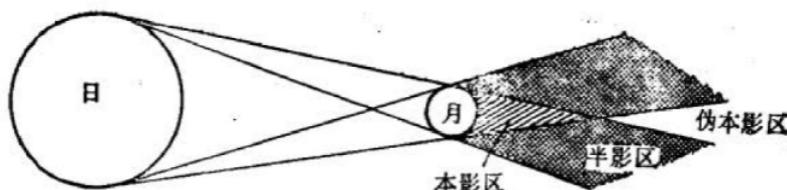


图 5.18

由于日、地间的距离是月、地间距离的 400 倍，月球的半径仅为地球半径的 27%，因此发生日蚀时，月球的本影落在地面上仅有一小块地区. 在本影区内观察，个太阳都被月球遮掩了，看到的是日全食. 在半影区内观察，太阳的一部分被月球遮掩了，看到的是日偏食（图 5.19）.

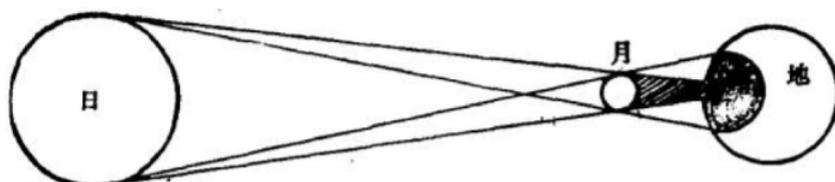


图 5.19

由于公转的轨道是椭圆形的，因此地球和太阳的距离、月球和地球的距离都不是固定不变的. 如果发生日蚀时月球和地球的距离较远，以至于落到地球表面上的只有月球的半影和伪本影，这时在伪本影区内观察时，太阳的中心部分都被月球遮掩了，只能看到太阳四周的边缘部分，这就是日环食（图 5.20）.

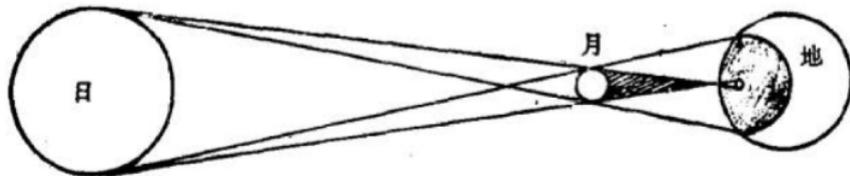


图 5.20

3. 现在需要知道学校里升国旗的旗杆的高度，你能否利用光的直线传播知识想出一种测量的办法来？

解答：在旗杆旁竖直立起一根长 h' 的直杆，太阳光照到旗杆和直杆上，都在地面上形成影子。设影子长分别为 L 和 L' ，如图 5.21 所示。由相似三角形的关系，可得

$$\frac{h}{h'} = \frac{L}{L'}$$

所以， $h = h' \frac{L}{L'}$ 。只要测出 h' 、 L' 及 L ，即可推算出旗杆的高度 h 。

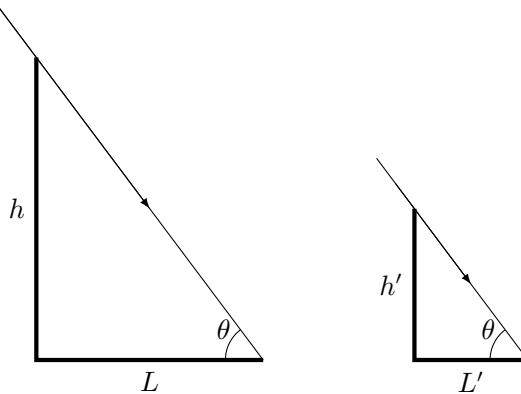


图 5.21

4. 边长 5 厘米的正方形卡片，放在小灯泡正前方 15 厘米的地方，在卡片后方放一个跟卡片平行的纸屏，纸屏距卡片 15 厘米，卡片在屏上的影是什么形状？面积多大？

解答：小灯泡可视为点光源，放在卡片的正前方，屏上的影子也是正方形的。由图 5.22 可知，

$$\frac{A'B'}{AB} = \frac{SQ}{SP} = \frac{15+15}{15}$$

所以，影子的边长

$$A'B' = 2AB = 10\text{cm}$$

影子的面积

$$A'B'^2 = 10^2 = 100\text{cm}^2$$

5. 在迈克耳孙测定光速的一次实验中，测得两山峰间的距离为 35373.21 米，八面镜的旋转速度为 528 转/秒，试利用这些数据算出光在空气中的速度。

解答：八面镜转过八分之一转所用的时间

$$t = \frac{1}{528} \times \frac{1}{8}\text{s}$$

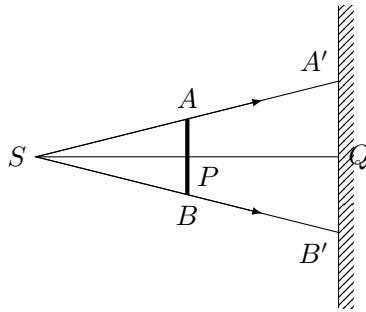


图 5.22

光速

$$c = \frac{2s}{t} = 2 \times 35373.21 \times 8 \times 528 = 2.99 \times 10^8 \text{ m/s}$$

二、练习二

1. 甲乙二人面对着镜子，甲能从镜中看到乙的眼睛，乙是否也能看到甲的眼睛？说明理由。

解答：乙能看到甲的眼睛。因为光路是可逆的。

2. 在课本图 5.11 的潜望镜中，两平面镜倾斜的角度是多大？

解答：两平面镜倾斜的角度都是 45° 。

3. 晚上在灯下看书，如果书的纸面很光滑，有时会看到纸面上发出刺眼的光泽，为什么会出现这种现象？怎样消除它？

解答：光射到纸面上会同时发生镜面反射和漫反射。纸面越光滑，镜面反射越强。如果经光滑纸面的镜面反射的较强的光直接进入眼睛，就会感觉刺眼。

改变灯光的入射方向，使得经光滑纸面的镜面反射的光不能直接进入眼睛，则可消除这种现象。

4. 如课本图 5.12 所示，两个平面镜互相垂直，在跟这两个镜面垂直的平面内，有一条入射光线 AB ，经两个镜面反射后，沿 CD 方向射出，试证明不论光线 AB 以多大的入射角射入，反射光线 CD 都平行于 AB 射出。

证明：过 B 、 C 分别做镜面的法线 BN 、 CN ，如图 5.23 所示。根据反射定律，

$$\angle ABN = \angle NBC, \quad \angle BCN = \angle NCD$$

因为两镜面互相垂直，所以

$$\angle OBC + \angle BCO = 90^\circ$$

因此，

$$\angle NBC + \angle BCN = 90^\circ, \quad \angle ABC + \angle BCD = 180^\circ$$

所以， $AB \parallel CD$ 。

5. 课本图 5.13 中， M 是一个平面镜， S 是光源，通过狭缝使光线射到镜面上， M 的位置，最初是与 S 射来的光线垂直，这时反射光线射在标尺的零刻度上；当 M 转动一角度后，反射光线射到标尺的 n 刻度上。如果标尺到镜 M 的距离为 ℓ ，且 $\ell \gg On$ ，求 M 转动的角度是多大。

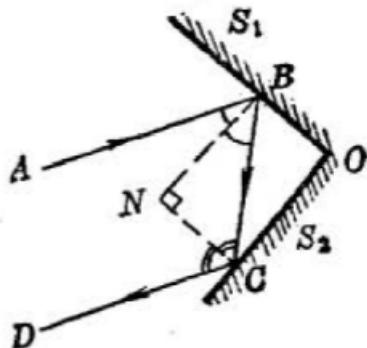


图 5.23

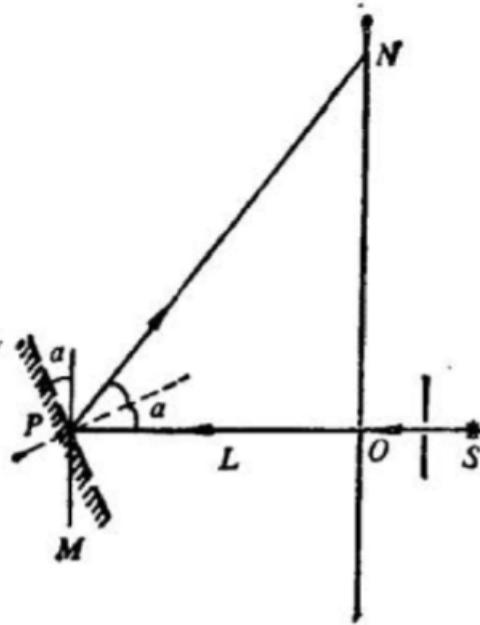


图 5.24

解答: M 转过角度 α 后, 镜面的法线相对于 PO 转过的角度也是 α , 光线 SP 经 M 反射后照到 N (图 5.24), 则

$$\angle SPN = 2\alpha, \quad \tan 2\alpha = \frac{ON}{L}$$

当 $L \gg ON$ 时, $\tan 2\alpha \approx 2\alpha = \frac{ON}{L}$. 所以,

$$\alpha = \frac{ON}{L} \text{(弧度)}$$

6. 有的镜子照出的像会变形, 这是什么原因?

解答: 这是因为镜子的反射面不是理想的平面.

三、练习三

1. 有一个凹镜, 要想知道它的焦距, 请你想出一个粗略测量的方法来.

解答: 由于太阳光平行于主光轴, 把凹镜的反射面对准太阳光时, 光线经镜面反射后会聚于一点, 这点就是焦点. 测出焦点和凹镜顶点的距离, 就测出了焦距.

2. 比较凹镜和凸镜的成像情况有什么不同.

解答: 实物通过凹镜可以成放大或缩小的倒立实像, 也可以成放大的正立虚像.

实物通过凸镜只能成缩小的正立虚像.

3. 有一个凹镜, 把它放在你的面前, 如果能从镜中看到你自己的正立的像, 这时凹镜顶点到你的距离是 20 厘米, 那么这个凹镜的焦距至少有多大?

解答: 人从凹镜中看到自己正立的像, 是凹镜所成正立虚像. 这时人到凹镜顶点的距离一定小于焦距. 所以凹镜的焦距至少是 20 厘米.

4. 如课本图 5.18 所示, M_1 和 M_2 是两个焦距相等的凹镜, 其焦距为 f . 要想使平行于主轴的光线 a 能在 M_1 和 M_2 之间来回反射, 两凹镜的顶点 P_1 和 P_2 应相距多远? 在图中标出两凹镜的焦点 F_1 和 F_2 的位置, 并画出光线 a 被两凹镜反射的光路图.

解答：两凹镜的顶点 P_1 和 P_2 应相距 f 、 $2f$ 、 $3f$ ，相距 $2f$ 时光线 a 被两凹镜反射的光路图如图 5.25 所示。

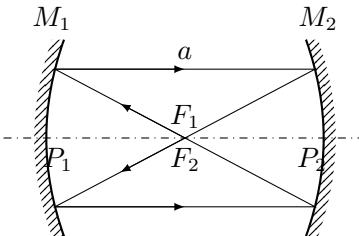


图 5.25

四、练习四

1. 光线以 45° 的入射角从空气射入折射率为 1.55 的玻璃中，折射角是多大？

解答：因为 $\frac{\sin i}{\sin r} = n$ 所以，

$$r = \arcsin \left(\frac{1}{n} \sin i \right) = 27.1^\circ$$

2. 光线从空气射入水中，要想使折射角等于 30° ，入射角应为多大？

解答：

$$\sin i = n \cdot \sin r = 1.33 \cdot \sin 30^\circ = 0.665$$

3. 根据水和岩盐的折射率，分别算出它们中的光速，水中的光速大约是真空中光速的几分之几？

解答：

$$\begin{aligned} v_{\text{水}} &= \frac{c}{n} = \frac{3.0 \times 10^8}{1.33} = 2.26 \times 10^8 \text{ m/s} \\ v_{\text{岩}} &= \frac{c}{n} = \frac{3.0 \times 10^8}{1.54} = 1.95 \times 10^8 \text{ m/s} \\ \frac{v_{\text{水}}}{c} &= \frac{1}{n} = \frac{2.26 \times 10^8}{3.00 \times 10^8} \approx \frac{3}{4} \end{aligned}$$

4. 课本图 5.22 是光线由空气进入某种媒质时的折射情况。试由图中所给的数据求出这种媒质的折射率和这种媒质中的光速。

解答：

$$\begin{aligned} n &= \frac{\sin i}{\sin r} = \frac{\sin(90^\circ - 30^\circ)}{\sin(90^\circ - 55^\circ)} = 1.51 \\ v &= \frac{c}{n} = 1.99 \times 10^8 \text{ m/s} \end{aligned}$$

5. 根据上节表中给出的折射率填空：

(a) 光线从水中垂直射入空气中时，折射角____于入射角；从玻璃斜射入水中时，折射角____于入射角；从空气斜射入酒精中时，折射角____于入射角；从岩盐斜射入水晶中时，折射角____于入射角。

(b) 二硫化碳比水的折射率大，由此可知二硫化碳中的光速比水中的光速____；二者相比，二硫化碳是光____媒质，水是光____媒质。

解答：

(a) 等；大；小；等.

(b) 小；密；疏.

6. 你在池边沿斜线向水面下看去，看到水中有一条鱼，你所看到的鱼的位置比实际的深还是浅？如果鱼也看到了你，鱼所看到的你的头的位置比实际的高还是低？

解答：人看到鱼的虚像 P' 位置比实际位置 P 浅，如图 5.26 甲所示，鱼看到人头的虚像位置 Q' 比实际位置 Q 高，如图 5.26 乙所示。

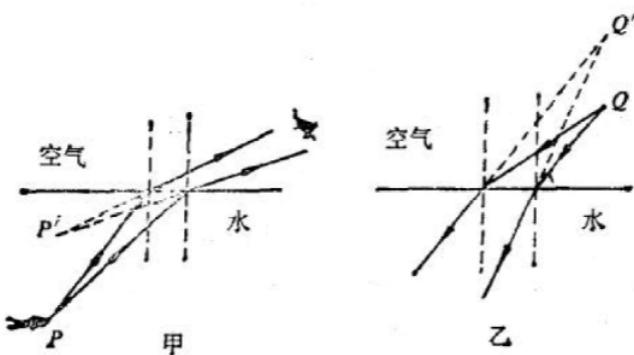


图 5.26

7. 把一块厚玻璃板压在书上，透过玻璃板看书上的字跟拿走玻璃板直接看，感觉有什么不同？做做看，并解释看到的现象。

解答：透过玻璃板看书，看到字的虚像位置比它的实际位置高（图 5.27），这是由于光通过玻璃板发生折射的缘故。

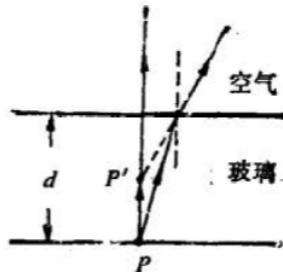


图 5.27

五、练习五

1. 水和金刚石的临界角各是多大？

解答：水对空气的临界角

$$C_{\text{水}} = \arcsin \frac{1}{n_{\text{水}}} = \arcsin \frac{1}{1.33} = 48.8^\circ$$

金刚石对空气的临界角

$$C_{\text{金}} = \arcsin \frac{1}{n_{\text{金}}} = \arcsin \frac{1}{2.42} = 24.4^\circ$$

2. 课本图 5.29 表示一个横截面为等腰直角三角形的玻璃棱镜。当光从它的一个直角边垂直射

入时，就从另一个直角边垂直射出来，而没有光从斜边射出，这种棱镜可以使光的传播方向改变 90° 。说明它的道理。

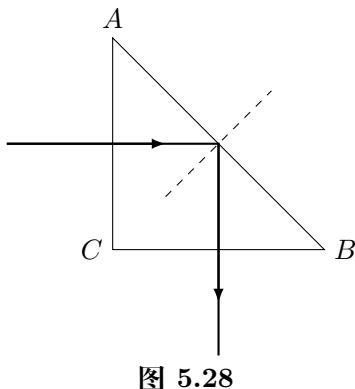


图 5.28

解答：光垂直于界面 AC 进入玻璃棱镜中后到达界面 AB ，入射角 i 为 45° （图 5.28），已知玻璃对空气的折射率 $n > 1.5$ ，所以玻璃对空气的临界角

$$C < \arcsin \frac{1}{1.5} = 41.8^\circ$$

由此可知 $i > C$ ，光在界面 AB 发生全反射，没有光线从斜边 AB 射出，光线垂直界面 BC 进入空气，从而使光的传播方向改变 90° 。

3. 光线从空气射入水中时，光线在水中的折射角最大为多少度？

解答：因为 $\frac{\sin i}{\sin r} = n$ ，所以

$$r = \arcsin \left(\frac{1}{n} \sin i \right)$$

当 $i = 90^\circ$ 时入射角最大，因此折射角的最大值为

$$r = \arcsin \frac{1}{1.33} = 48.75^\circ$$

4. 潜水的人在水面下能看到水面上的全部景象，因为水面上 180° 范围内射入水中的光线全部集中在水下 97.5° 的视野内（课本图 5.30），试说明它的道理。

解答：根据临界角的定义可知，光线从水中射向空气时发生全反射的临界角与入射角以及折射率的关系是

$$\frac{\sin i}{\sin r} = \frac{1}{1.33}$$

所以， $i = \arcsin (1/1.33) = 48.75^\circ$

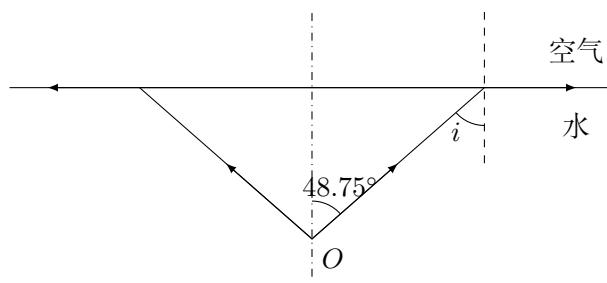


图 5.29

设想在水面下潜水人的眼睛处有一个点光源 O , 由点光源发出的光到达水面时, 入射角在 0° — 48.75° (临界角) 的范围内的光都能透过水面进入空气中, 相应的折射角是 0° — 90° , 如图 5.29 所示. 根据光路的可逆性, 在水面上 180° 范围内的光线都能折射进入水中, 到达人眼. 这些光线都集中在水下 97.5° 的视野范围内.

六、练习六

- 说明课本图 5.31 中, 光线通过棱镜的 AB 和 AC 两个侧面时, 为什么都向底面偏折, 如果这个棱镜的里面是空气, 周围是水, 当光线通过这个空气棱镜时, 射出的光线是否还向底面偏折? 画出这种情况下的光路图来.

解答: 由于棱镜玻璃的折射率 $n > 1$, 所以光由空气进入棱镜时, 折射角小于入射角; 而光由棱镜进入空气时, 是入射角大于折射角, 如图 5.30 所示. 因此在棱镜的 AB 侧面, 光由空气进入玻璃靠近法线偏折; 在 AC 侧面, 光由玻璃进入空气远离法线方向偏折. 两次偏折都是偏向底面方向.

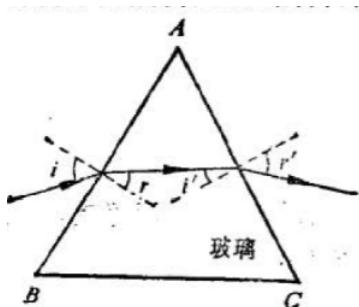


图 5.30

如果棱镜里面是空气周围是水, 即棱镜相对于周围媒质是光疏媒质, 根据折射定律可知, 当入射角 i 较小时, 在 AB 和 AC 面上的折射与上述情况相反, 出射光线将向顶部方向偏折如图 5.31 所示. 当入射角较大时, 光在 AB 侧面向顶部方向偏折, 而在 AC 侧面则可能向底部方向偏折 (或不偏折), 但出射光线 GH 相对于入射光线 EF 仍然是向顶部方向偏折, 如图 5.32 所示.

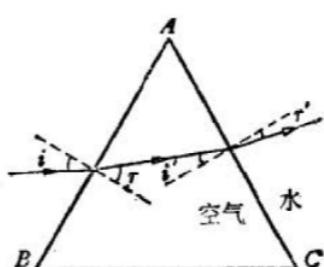


图 5.31

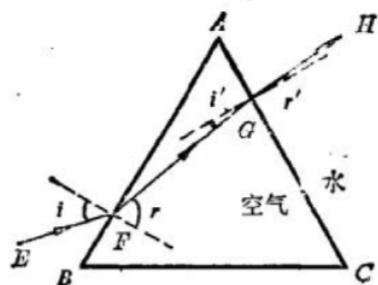


图 5.32

- 冕牌玻璃对紫光的折射率为 1.532, 对红光的折射率为 1.513. 紫光和红光在这种玻璃中的速度各是多大?

解答：因为 $v = c/n$, 所以

$$v_{\text{紫}} = \frac{3.00 \times 10^8}{1.532} = 1.96 \times 10^8 \text{ m/s}$$

$$v_{\text{红}} = \frac{3.00 \times 10^8}{1.513} = 1.98 \times 10^8 \text{ m/s}$$

3. 什么形状的全反射棱镜可以使光线改变 180° ? 这时光线应从哪边射入? 画出光路图来.

解答：等腰直角三棱镜可以使光线改变 180° . 光应垂直于跟直二面角相对的棱镜面射入, 光路如图 5.33 所示.

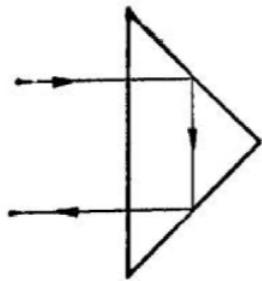


图 5.33

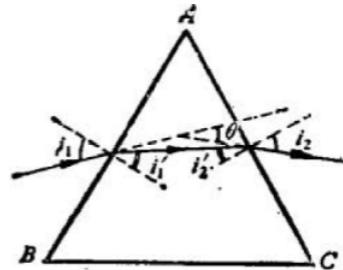


图 5.34

4. 光线通过棱镜时, 偏折角度 θ 跟棱镜材料的折射率有关. 设课本图 5.31 中光线对棱镜的侧面 AB 的入射角以及棱镜的顶角 A 的大小保持不变. 试定性地讨论: 棱镜材料的折射率越大, 偏折角度也越大.

解答：光线通过棱镜发生偏折的角度为 θ (图 5.34),

$$\theta = (i_1 - i'_1) + (i_2 - i'_2)$$

它表示光线通过棱镜向底面偏折的角度等于光线分别在两个侧面发生的向底面偏折的角度之和. 在 AB 侧面, 折射率 n 越大, 从空气进入棱镜的光线向法线方向的偏折越大, 即偏折角度 $i_1 - i'_1$ 越大; 在 AC 侧面, n 越大从棱镜射入空气的光线远离法线方向的偏折越大, 即 $i_2 - i'_2$ 越大. 因此当入射角以及棱镜的顶角 A 保持不变时, 折射率 n 越大, 偏折角度 θ 也越大.

说明: 在图 5.34 中, $A = i'_1 + i'_2$, $\theta = i_1 + i_2 - A$. 又因为

$$\frac{\sin i_1}{\sin i'_1} = n, \quad \frac{\sin i_2}{\sin i'_2} = n$$

所以

$$\sin i_1 = n \sin i'_1, \quad \sin i_2 = n \sin i'_2$$

因此:

$$\begin{aligned} \sin i_2 &= n \sin i'_2 = n \sin(A - i'_1) \\ &= n [\sin A \cos i'_1 - \cos A \sin i'_1] \\ &= \sin A \sqrt{n^2 - n^2 \sin^2 i'_1} - \cos A \sin i_1 \\ &= \sin A \sqrt{n^2 - \sin^2 i_1} - \cos A \sin i_1 \end{aligned}$$

由上式可以明显看出, 当入射角 i_1 和棱镜顶角 A 保持不变时, 折射率 n 越大, i_2 就越大, 偏折角 $\theta = i_1 + i_2 - A$ 也越大.

七、练习七

1. 有一个不知焦距的凸透镜，用什么办法可以粗略地测出它的焦距？

解答：使太阳光沿主轴方向照到凸透镜上，在凸透镜的另一侧可以见到一个十分亮的光点，这就是平行光会聚的焦点，测出这一点到凸透镜的距离也就测出了凸透镜的焦距。

2. 利用点光源和凸透镜如何能得到平行光线？

解答：把点光源置于凸透镜的焦点处，它发出的光经凸透镜折射后即成平行光。

3. 在课本图 5.37 中，画出光线通过透镜后的传播方向。

解答：见图 5.35。

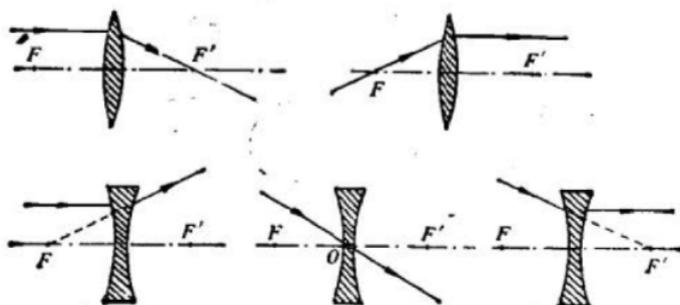


图 5.35

八、练习八

1. 放大镜所成的像是正立、放大的，这是实像还是虚像？放大镜应该是什么透镜？如果其焦距为 f ，镜到物的距离最大不能超过多少？

解答：放大镜所成的放大正立的像是虚像。放大镜应是凸透镜。凸透镜成放大、正立的虚像时，物距最大不能超过焦距，即 $u < f$ 。

2. 幻灯机所成的像是什么像？它的镜头应该是什么透镜？如果镜头的焦距为 8 厘米，镜头到幻灯片的距离只能在什么范围内变化？

解答：幻灯机在屏幕上所成的像是放大的倒立的实像，它的镜头是凸透镜，幻灯片到镜头的距离只能在 f 和 $2f$ 之间变化，即 $f < u < 2f$ ，也就是 $8\text{cm} < u < 16\text{cm}$ 。

3. 照相机所成的像是什么像？它的镜头应该是什么透镜？如果镜头的焦距为 7.5 厘米，镜头到底片的距离最短不能小于多少？

解答：照相机成缩小倒立实像。它的镜头是凸透镜。凸透镜成缩小倒立实像时， $f < v < 2f$ ，因此底片（即像的位置）到镜头的距离最短不能小于焦距，即 7.5 厘米。

九、练习九

1. 如课本图 5.45 所示，已知物体 AB 通过凸透镜后所成的实像 $A'B'$ ，试画出从 A 、 B 两点射向凸透镜的任意两条光线 AE 、 BD 经过凸透镜折射后的传播方向。

解答：物点发出的光经凸透镜折射后都经过对应的像点。从 A 点发出的光线 AE 经凸透镜折射后一定过像点 A' ，折射光线为 EA' ，从 B 点发出的光线 BD 经凸透镜折射后一定过像点 B' ，折射光线为 DB' ，如图 5.36 所示。

2. 一物体位于凸透镜前 15 厘米，凸透镜的焦距为 10 厘米，用作图法求出像到凸透镜的距离。

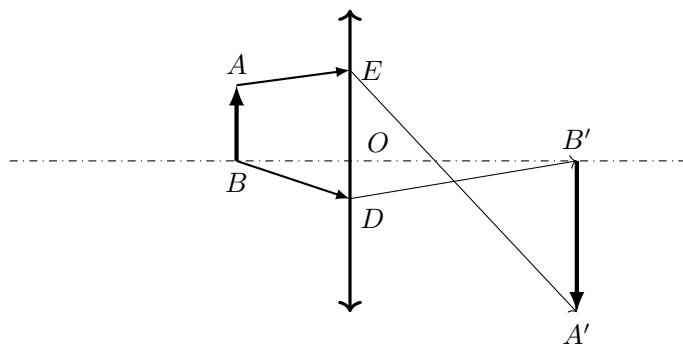


图 5.36

解答：透镜成像的光路如图 5.37 所示，量得 $OB' = 2BO$ ，所以像到凸透镜的距离为 $2 \times 15 = 30$ 厘米。

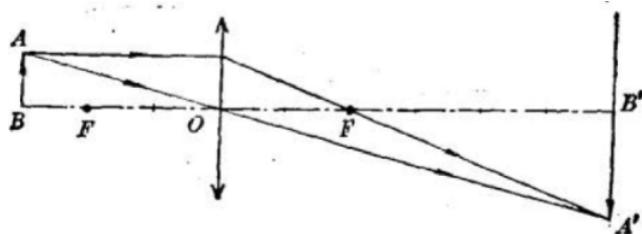


图 5.37

3. 焦距为 10 厘米的凹透镜前有一物体，物到镜的距离为 20 厘米，用作图法求像到镜的距离。

解答：透镜成像光路如图 5.38 所示。量得物距 BO 为像距 $B'O$ 的 3 倍，所以像到凹透镜的距离为 $\frac{20}{3} = 6.7$ 厘米。

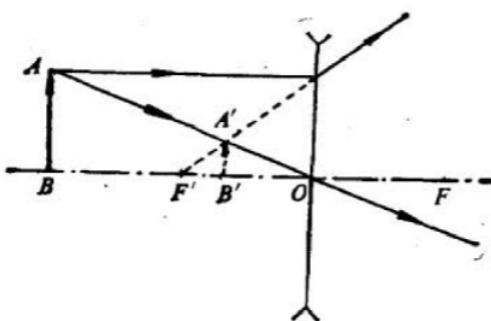


图 5.38

4. 在课本图 5.46 中， OO' 为透镜的主轴， $A'B'$ 为物体 AB 经透镜所成的像。这个透镜是什么透镜？试用作图法求出透镜和它的焦点的位置。

解答：由题可知，像 $A'B'$ 是物 AB 的倒立实像，所以透镜是凸透镜。成像光路图、透镜位置以及焦点位置，如图 5.39 所示。

十、练习十

1. 试证明： $\frac{1}{u} + \frac{1}{v} = \frac{1}{f}$ 也适用于凹透镜成像。（提示：对于凹透镜 f 和 v 应取负值）

证明：物体经凹透镜成缩小虚像，光路如图 5.40 所示。焦距 f 和虚像像距 v 都是负值。用 $-f$ 和 $-v$ 分别表示图中的几何线段 FO 和 $B'O$ 的大小。

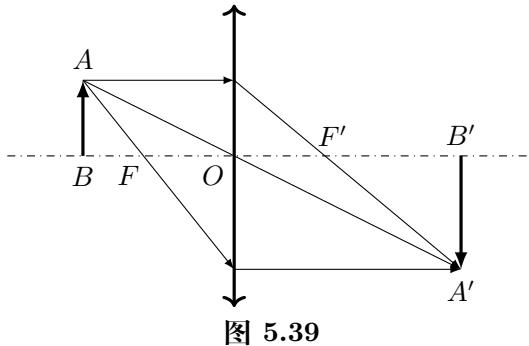


图 5.39

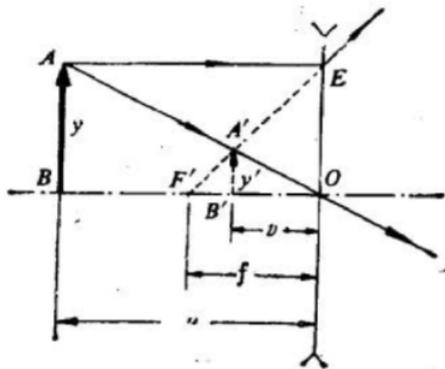


图 5.40

因为 $\triangle OA'B \sim \triangle OAB$, 所以

$$\frac{OB'}{OB} = \frac{A'B'}{AB}, \quad \frac{-v}{u} = \frac{y'}{y}$$

又因为 $\triangle F'A'B' \sim \triangle FEO$, 所以

$$\frac{F'B'}{F'O} = \frac{F'O - B'O}{F'O} = \frac{A'B'}{AB}$$

即

$$\frac{(-f) - (-v)}{(-f)} = \frac{y'}{y}$$

因此:

$$\frac{-v}{u} = \frac{v - f}{-f}$$

即 $fv = uv - uf$. 整理后得

$$\frac{1}{u} + \frac{1}{v} = \frac{1}{f}$$

2. 利用公式 $\frac{1}{u} + \frac{1}{v} = \frac{1}{f}$, 试讨论:

(a) 对于凸透镜, 物距 u 在什么范围内变化时, v 为正值, 成实像? 在什么范围内变化时,

v 为负值, 成虚像?

(b) 对于凹透镜, v 能否为正值?

解答:

(a) 由 $\frac{1}{u} + \frac{1}{v} = \frac{1}{f}$, 可得

$$v = \frac{u \cdot f}{u - f}$$

实物通过凸透镜成像, $u > 0, f > 0$.

- 当 $u - f > 0$, 即 $u > f$ 时, $v > 0$ 成实像.
- 当 $u - f < 0$, 即 $u < f$ 时, $v < 0$ 成虚像.

(b) 由于实物通过凹透镜成像时, $u > 0, f < 0$, 所以总有 $u \cdot f < 0, u - f > 0$. 因此

$$v = \frac{u \cdot f}{u - f} < 0$$

即 v 不能为正值.

3. 一支蜡烛, 距凸透镜 24 厘米, 在离凸透镜 12 厘米的屏上得到清晰的像. 这个凸透镜的焦距是多长? 像是放大的还是缩小的? 画出成像光路图.

解答:

$$f = \frac{u \cdot v}{u + v} = \frac{24 \times 12}{24 + 12} = 8\text{cm}$$

$$m = \frac{v}{u} = \frac{12}{24} = \frac{1}{2}$$

像是缩小的实像, 成像光路图如图 5.41 所示.

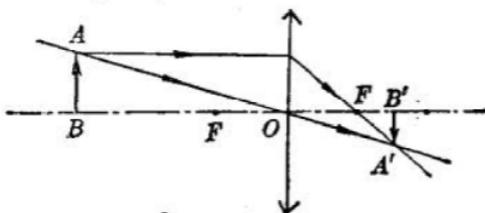


图 5.41

4. 照相机的镜头相当于一个凸透镜, 如果镜头的焦距为 10 厘米, 底片长 3.6 厘米, 要想给身高 1.8 米的人拍一张全身像, 人到镜头的距离至少为多少米?

解答:

$$m' = \frac{A'B'}{AB} = \frac{3.6 \times 10^{-2}}{1.8} = 2 \times 10^{-2}$$

将数值代入 $m = v/u$ 和 $\frac{1}{v} + \frac{1}{u} = \frac{1}{f}$ 两公式, 可得

$$\begin{cases} \frac{v}{u} = 2 \times 10^{-2} \\ \frac{1}{u} + \frac{1}{v} = \frac{1}{10\text{cm}} \end{cases}$$

解得 $u = 5.1$ 米.

为了照全身像, 人到镜头的距离至少为 5.1 米.

5. 用焦距为 10 厘米的凸透镜作放大镜来看微小的物体, 要想使像成在离镜 25 厘米的地方, 镜到物的距离应为多少? 这时看到的像放大了多少倍?

解答: 用凸透镜作放大镜时成的是虚像, 所以 v 为 -25 厘米. 由透镜成像公式可得

$$\frac{1}{u} + \frac{1}{-25\text{cm}} = \frac{1}{10\text{cm}}$$

得到 $u = 7.1$ 厘米.

因此,

$$m = \left| \frac{v}{u} \right| = \frac{25}{7.1} = 3.5$$

6. 物体位于离凹透镜 15 厘米处，凹透镜的焦距是 7.5 厘米，像距是多大？像的放大率是多大？

解答：凹透镜的焦距 $f = -7.5$ 厘米，代入透镜成像公式可得

$$\frac{1}{15\text{cm}} + \frac{1}{v} = \frac{1}{-7.5\text{cm}} \Rightarrow v = -5\text{cm}$$

$$m = \frac{|v|}{u} = \frac{5}{15} = \frac{1}{3}$$

7. 幻灯机的镜头也相当于一个凸透镜，如果不改变幻灯机的镜头，当幻灯机到幕的距离增大时，应该怎样调节镜头到幻灯片的距离，才能得到清晰的像？这时幕上的像是变大还是变小？

解答：幻灯片通过镜头成放大实像，一般来说镜头到屏幕的距离（像距）远远大于幻灯片到镜头的距离（物距），因此幻灯机到幕的距离可以当作像距 v . 由透镜公式可知，镜头焦距 f 不变， v 增大时， u 必定减小，即应使镜头靠近幻灯片，才能得到清晰的像. 由公式 $m = v/u$ 可知， v 增大而 u 减小时， m 将增大，屏上的像变大.

十一、习题

1. 为了使身高 1.8 米的人能从平面镜中看到自己的全身像，如果镜和人都是直立的，平面镜的长度至少应为多长？画图加以说明.

解答：如图 5.42 所示. 人身高 $AB = 1.8$ 米，对于平面镜 MN 人与像是对称的，像长 $A'B' = 1.8$ 米. 人如果能从镜中看到自己的全身像，必须使 AB 各点发出的光通过镜面 MN 反射后都能到达人眼 C 处，即好象是从虚像 $A'B'$ 发出的光都到达 C 点. CA' 、 CB' 与镜面的交点是 P 、 Q ， PQ 的长度就是平面镜的最小长度.

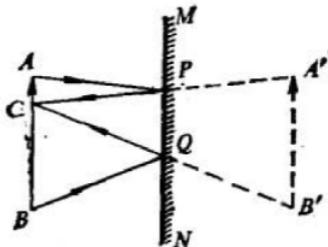


图 5.42

由于 AB 、 MN 都是直立的，有 $AB \parallel MN \parallel A'B'$. 所以 $\triangle CPQ \sim \triangle CA'B'$. 根据

$$\frac{PQ}{A'B'} = \frac{CP}{CA'} = \frac{1}{2}$$

所以

$$PQ = \frac{1}{2} A'B' = 0.90\text{m}$$

2. 光可以从弯曲玻璃棒的一端传到另一端，这是否跟光在同一种媒质中沿直线传播相矛盾？

解答：不矛盾. 光从玻璃棒的一端射入，在均匀玻璃棒内是沿直线传播的. 在玻璃和空气的界面处发生全反射后，在玻璃棒内继续沿直线传播. 光在玻璃和空气界面处多次发生全反射，才使光沿着折线从弯曲的玻璃棒的一端传到另一端.

3. 在水面下 1.0 米处有一个点光源，从水面上看，这个点光源能照亮水面多大的面积？

解答：有折射光线射出的水面，才是在水面上看到的光源照亮的面积。由于水对空气的临界角

$$C = \arcsin \frac{1}{n} = 48.8^\circ$$

也就是在图 5.43 中， $\angle SAN = 48.8^\circ$ ，光的入射角大于 48.8° 的水面，没有折射光线射出。

所以从水面上看，被这个点光源照亮的面积为以 O 为圆心 OA 为半径的圆。

因为

$$OA = h \cdot \tan C = 1.0 \times \tan 48.8^\circ = 1.14\text{m}$$

所以圆面积

$$S = \pi \cdot (OA)^2 = 3.14 \times 1.14^2 = 4.08\text{m}^2$$

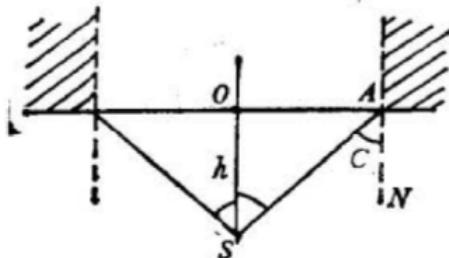


图 5.43

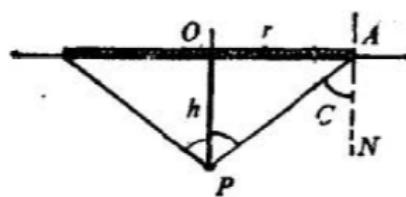


图 5.44

4. 用下面的方法可以测量液体的折射率：取一个半径为 r 的软木塞，在它的圆心处插上一枚大头针，让软木塞浮在液面上（课本图 5.58）。调整大头针插进软木塞的深度，使它露在外面的长度为 h 。这时从软木塞周围各个方向向液体中看，恰好看不到大头针。利用测得的数据 r 和 h 即可以求出液体的折射率。

(a) 写出用 r 和 h 求折射率的计算式；

(b) 用这种方法实际做一下，求出水的折射率。

解答：在图 5.44 中， P 为大头针的顶部， A 为软木塞边缘某点， AN 为法线。在液面上从各个方向向液体中恰好看不到大头针时， $\angle PAN = C$ （临界角）。

因为

$$AP = \sqrt{r^2 + h^2}, \quad \sin C = \frac{r}{\sqrt{r^2 + h^2}}, \quad \sin C = \frac{1}{n}$$

所以

$$n = \frac{1}{\sin C} = \frac{\sqrt{r^2 + h^2}}{r}$$

5. 为了从坦克内部观察外界目标，在坦克壁上开有一个长方形孔。假定坦克的壁厚为 20 厘米，孔的宽度为 12 厘米，孔内安装一块折射率 $n = 1.52$ 的玻璃，厚度跟坦克的壁厚相同，车内人员通过这块玻璃能看到的外界范围为多大角度？

解答：外界的光通过玻璃到达处于孔中心处 P 点的人眼（图 5.45）时，

$$\sin i = n \cdot \sin r = 1.52 \times \frac{6.0}{6^2 + 20^2} = 0.44 \Rightarrow i = 26^\circ$$

眼在中心处观察可以看到外界范围的角度为 $2i = 52^\circ$.

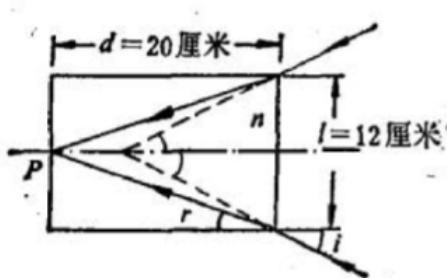


图 5.45

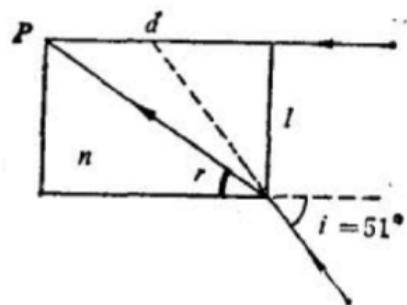


图 5.46

说明：人眼在不同位置观察时，看到外界的范围是不同的。当人眼 P 位于孔的边缘处观察图 5.46，可得

$$\sin i = n \cdot \sin r = 1.52 \times \frac{12}{\sqrt{20^2 + 12^2}} = 0.78 \Rightarrow i = 51^\circ$$

观察范围（角度）为 51° .

6. 课本图 5.59 中给出了光线在光学器件上射入和射出的方向，试在方框内画出可用的光学器件及光路图。

解答：答案如图 5.47 所示。

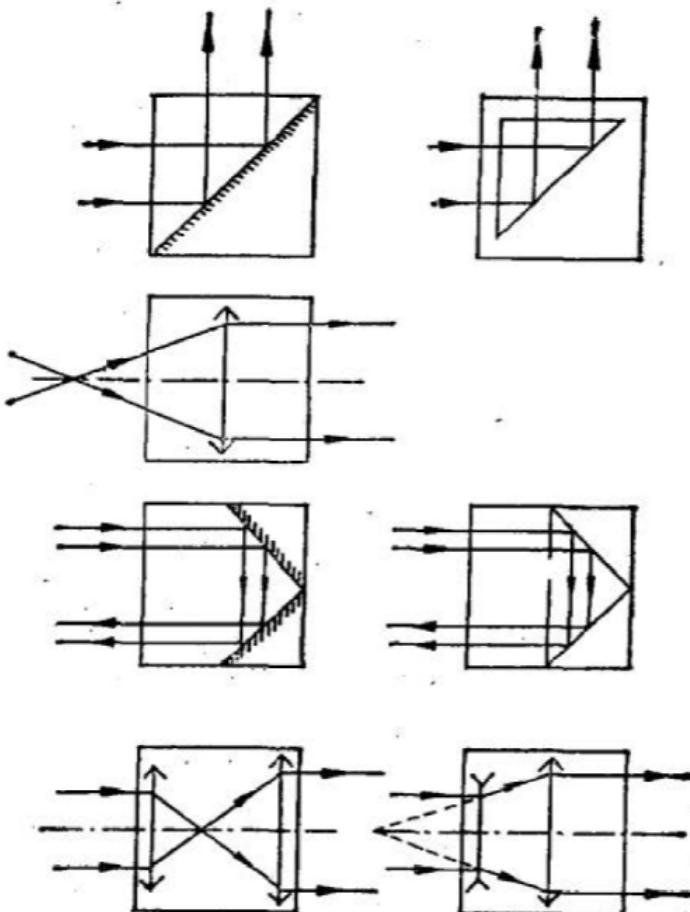


图 5.47

7. 如果把凸透镜的中部用一块黑纸遮住，用它还能得到物体的像吗？为什么？

解答：凸透镜成像是由于光在透镜两侧界面上发生折射的结果。如果凸透镜中部用一块黑纸遮住，它的其余部分仍能透过光线，并在两侧界面上发生折射，仍能成像。只是由于黑纸的遮挡，透过凸透镜的光减少了，成像的亮度降低。

8. 蜡烛到凸透镜的距离为 20 厘米，到光屏的距离为 40 厘米，这时在光屏上得到清晰的烛像，如果把凸透镜向光屏移动 5 厘米，光屏应向后移动多远才能再得到清晰的烛像？这时像的放大率是增大了，还是减小了？

解答：

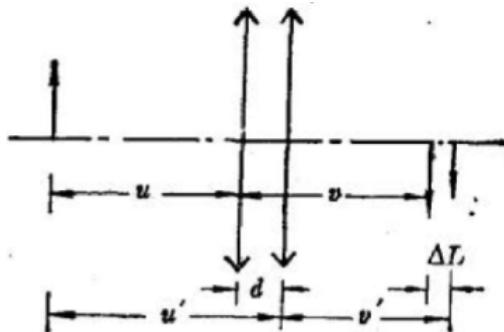


图 5.48

在图 5.48 中，物距 $u = 20$ 厘米，像距 $v = L - u = 40 - 20 = 20$ 厘米。焦距

$$f = \frac{uv}{u+v} = \frac{20 \times 20}{20+20} = 10\text{cm}$$

$$m = \frac{v}{u} = 1$$

将凸透镜向光屏移动 $d = 5$ 厘米，物距 $u' = u + d = 25$ 厘米，像距

$$v' = \frac{u'f}{u'-f} = \frac{25 \times 10}{25-10} = 17\text{cm}$$

光屏移动的距离

$$\Delta L = u' + v' - L = 2\text{cm}$$

放大率 $m' = \frac{v'}{u'} = \frac{17}{25} = 0.68 < m$ ，像的放大率减小了。

9. 当物体到凸透镜的距离为 36 厘米时，光屏上所成的像的高度为 10 厘米；当物体到凸透镜的距离变为 24 厘米时，光屏上像的高度变为 20 厘米，这个凸透镜的焦距是多大？

解答：由透镜公式 $\frac{1}{u} + \frac{1}{v} = \frac{1}{f}$ 和放大率公式 $m = \frac{v}{u} = \frac{y'}{y}$ (y 和 y' 分别为物和像的高度) 可得

$$f = \frac{u \cdot v}{u+v} = \frac{mu}{m+1} = \frac{y' \cdot u}{y'+y}$$

则

$$f = \frac{y'_1 \cdot u_1}{y'_1 + y}, \quad f = \frac{y'_2 \cdot u_2}{y'_2 + y}$$

消 y 并代入数值得

$$f = \frac{y'_1 u_1 - y'_2 u_2}{y'_1 - y'_2} = \frac{10 \times 36 + 20 \times 24}{10 - 20} = 12\text{cm}$$

10. 透镜焦距的倒数 $1/f$ 叫做透镜的焦度，焦度的单位叫做屈光度，透镜的焦距为 1 米时，焦度为 1 屈光度。屈光度乘以 100，就是通常所说的眼镜的度数，某同学眼镜的近视度数是 250 度，他的眼镜是什么透镜？焦距是多大？

解答：近视眼镜为凹透镜。

250 度近视镜的焦度

$$D = \frac{-250}{100} = -2.5 \text{ 屈光度}$$

$$f = \frac{1}{D} = -\frac{1}{2.5} = -0.40 \text{ m} = -40 \text{ cm}$$

11. 如图 5.49 所示，如果以凸透镜的两个焦点 F_1 、 F_2 分别作为计算物距和像距的起点，并且用 x 表示物体 AB 到第一焦点 F_1 的距离，以 x' 表示像 $A'B'$ 到第二焦点 F_2 的距离。试证明：凸透镜成像的公式

$$\frac{1}{u} + \frac{1}{v} = \frac{1}{f}$$

将变为 $xx' = f^2$ 。此式称为牛顿薄透镜公式，在光学书中经常遇到。（提示： $u = x + f$ ，

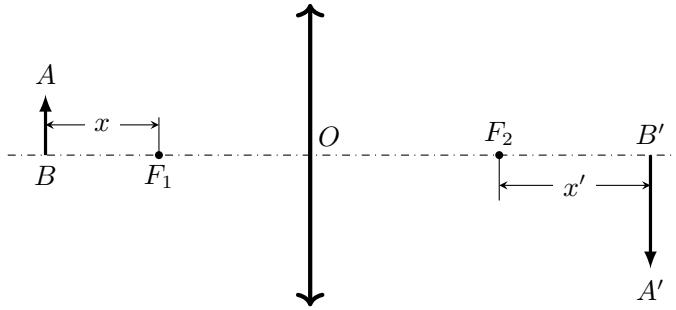


图 5.49

$$v = x' + f$$

证明：在 $\frac{1}{u} + \frac{1}{v} = \frac{1}{f}$ 公式中代入 $u = x + f$ 、 $v = x' + f$ ，得到

$$\frac{1}{x+f} + \frac{1}{x'+f} = \frac{1}{f}$$

整理可得

$$x'f + xf + 2f^2 = xx' + fx' + xf + f^2$$

$$\text{所以 } x \cdot x' = f^2$$

注意：牛顿公式也可由透镜成像作图（图 5.50）直接证明。

因为 $\triangle FAB \sim \triangle FDO$ ，所以 $\frac{AB}{DO} = \frac{x}{f}$ ，又因为 $\triangle F'A'B' \sim \triangle F'CO$ ，所以 $\frac{CO}{A'B'} = \frac{f}{x'}$ 而 $AB = CO$ ， $A'B' = DO$ ，因此

$$\frac{x}{f} = \frac{f}{x'}, \quad x \cdot x' = f^2$$

12. 某人用焦距为 2 厘米和 8 厘米的两个凸透镜分别作物镜和目镜，制成一架简易显微镜。如果物镜到被观察物体的距离为 2.2 厘米，要想使目镜最后所成的虚像距目镜 25 厘米，目镜和物镜间的距离应为多大？这架显微镜的放大率是多大？

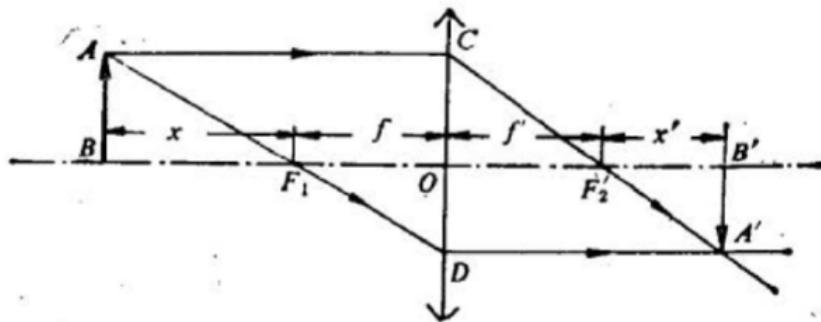


图 5.50

解答：对于目镜成放大的虚像，像距 $v_2 = -25$ 厘米， $f_2 = 8$ 厘米。对应的物距

$$u_2 = \frac{f_2 \cdot v_2}{v_2 - f_2} = \frac{8 \times (-25)}{-25 - 8} = 6.1\text{cm}$$

对于物镜成放大实像。物距 $u_1 = 2.2$ 厘米， $f_1 = 2$ 厘米。对应的像距

$$v_1 = \frac{f_1 \cdot u_1}{u_1 - f_1} = \frac{2 \times 2.2}{2.2 - 2} = 22\text{cm}$$

所以目镜和物镜间的距离 $L = v_1 + u_2 = 28$ 厘米显微镜的放大率

$$m = m_1 \cdot m_2 = \frac{v_1}{u_1} \cdot \frac{v_2}{u_2} = \frac{22}{2.2} \times \frac{25}{6.1} = 41$$

光路图如图 5.51 所示。

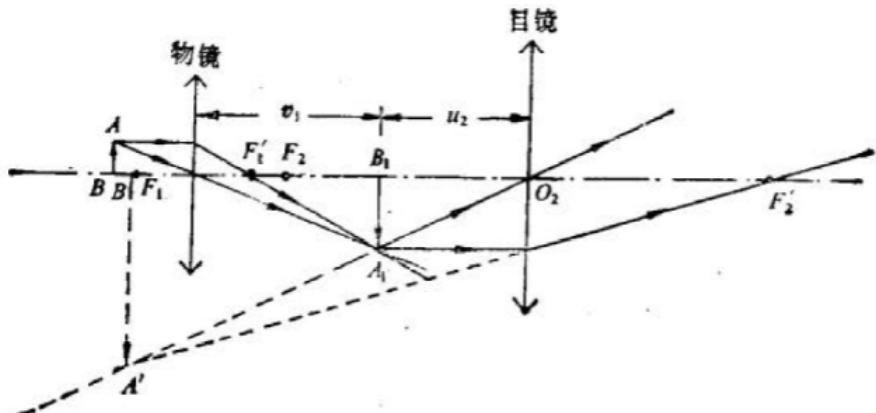


图 5.51

第五节 参考资料

一、光的速度

光速是在物理学史和科学技术上有着非常重要意义的基本物理常数。

1851 年傅科测出水中的光速小于真空中的光速，成为波动说战胜微粒说的实验依据。

1865 年麦克斯韦从理论上计算出电磁波速度

$$v = \frac{1}{\sqrt{\epsilon_0 \cdot \mu_0}} = 3.10740 \times 10^5 \text{km/s}$$

与实验测定的光速值一致，他大胆地预言光是一种电磁波，建立了光的电磁学说。

真空中光速的测量为狭义相对论的建立奠定了实验基础。真空中光速恒定不变，不管选择什么样的参照系，也不管光源或接收器是否运动。光速不变原理成为狭义相对论的基本假设之一。

本世纪 70 年代以后，光速的测量已十分精确，以致在 1983 年第十七届国际计量大会上决定，用光速重新定义长度的基准单位——米：“米”是光在真空中，在 $1/299792458$ 秒的时间间隔内运行路程的长度。

测量真空中的光速一览表

年代	作者	方法	光速值 (km/s)
1727 年	布喇德雷 (Bradley)	光行差法	301,000
1849 年	斐索 (Fizeau)	齿轮法	313,000
1851 年	傅科 (Foucault)	旋转镜法	$298,000 \pm 500$
1933 年	迈克耳孙 (Michelson) 皮斯 (Pease) 皮尔孙 (Pearson)	旋转镜法	$299,774 \pm 2$
1941 年	安德森 (Anderson)	克尔盒调谐器	$299,776 \pm 6$
1950 年	埃森 (Essen)	谐振腔法	$299,792.5 \pm 1$
1951 年	贝格斯特兰 (Bergstrand)	光电测距仪	$299,793.1 \pm 0.3$
1956 年	艾奇 (Edge)	光电测距仪	$299,792.2 \pm 0.1$
1957 年	韦德莱 (Wadley)	雷达测距仪	$299,792.6 \pm 1.2$
1958 年	弗罗默 (Froome)	微波干涉仪	$299,792.5 \pm 0.1$
1961 年	卡特科斯基 (Cutkosky) 托马斯 (Thomas)	电荷的静电单位和电磁单位的比值	$299,791.96 \pm 0.8$
1964 年	兰克、琼斯、艾迪 (Rank, Jones, Gordy)	光谱法 (氯化氢)	$299,792.8 \pm 0.4$
1966 年	卡洛路斯、赫姆伯格 (Karlus, Helmburger)	声调制法	$299,792.47 \pm 0.15$
1972 年	贝依等 (Bay)	氦氖激光 (0.663 微米)	$299,792.462 \pm 0.018$
1972 年	贝艾德 (Baird)	二氧化碳激光 (9 和 10 微米)	$299,792.460 \pm 0.006$
1973 年	美国国家标准局	测定氦-氖激光 3.39 微米谱线的频率和波长	$299,792.574 \pm 0.0011$
1974 年	美国国立物理实验室	测定 CO_2 激光 9.3 微米谱线的频率和波长	$299,792.4590 \pm 0.0008$

二、光导纤维

从 20 世纪 50 年代开始利用光导纤维传输光能的技术得到迅速发展。至今已经形成一门专门的科学——纤维光学。根据传输光能的机制，光导纤维可以分为反射型和折射型两类。

反射型光导纤维由两层均匀媒质组成（图 5.52 甲），内层称为芯线，外层称为包层，芯线的折射率 n_1 大于包层的折射率 n_2 。光从圆柱形光导纤维端面入射，进入芯线内传播，到达芯线

与包层的界面处发生全反射（图 5.52 乙），使得光只在芯线中由一端传到另一端而不进入包层，光能量的损失较小。

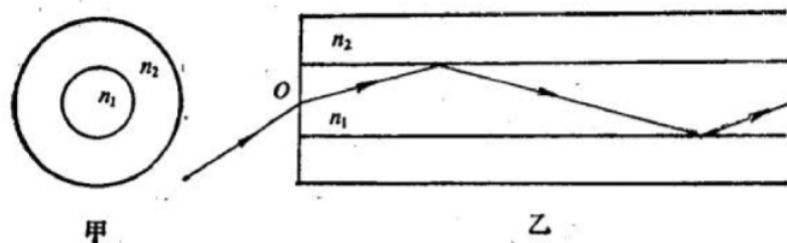


图 5.52

折射型光导纤维是折射率非均匀分布的光导纤维。光导纤维的折射率在它的横断面上沿半径方向连续变化，中心轴线处折射率最大，沿半径向外逐渐减小（图 5.53 甲），在光导纤维内部，光传播的径迹总是偏向中心轴线方向弯曲的周期性变化的曲线，如（图 5.53 乙）所示。和反射型光导纤维一样，光从端面射入光导纤维内传播时，也约束在光导纤维内部一定范围内。折射型光导纤维还具有自动聚焦作用。以不同角度入射到 O 点的光线在光导纤维内行进半个周期的整数倍的路程后，还可以交于一点。光导纤维对光的这种作用和透镜对光的作用一样，因此，可以用在成像系统中。

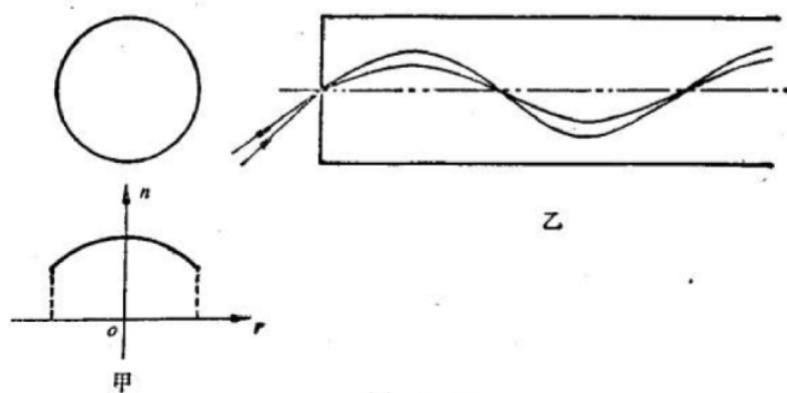


图 5.53

光导纤维被广泛地用于传输光能，具有结构简单、可以任意弯曲的优点。在医疗上，光导纤维可以用于照明和成像，把光导纤维伸入人体内，强光源的光聚焦到光导纤维的注入面，光通过光导纤维传送到人体内，照亮病人体内的病灶部位。同时，再由光导纤维把病变的图象传送出来，供医生观看。如果把能量足够高的激光通过光导纤维传输到人体内，还可以完成高效的外科手术。如果用光导纤维把激光能量传输到体内出血部位，用激光的凝血作用止血，可治疗胃溃疡病人内出血。

光导纤维和激光技术相结合，发展为光纤通信。光纤通信用光导纤维作传输信号的媒质，用光波作载波。传输的任何信息或由信息转换成的交变电流都有一定的频率范围，称为频带宽度，简称带宽。载波要能携带信息，其频带必须比信息的频带更宽。人发出的声音的频带为 0.3 千赫—3.4 千赫，如果传输一路电话，载波的频带宽度须大于 3.4 千赫。所以载波的频带越宽，所能传输的通话路数越多。光纤通信用光波作为载波，光的频率在 10^{10} — 10^{12} 千赫，可同时容纳 100 亿个话路。

在传输信号的媒质上也存在着带宽的问题. 由它限制着所能传输的信号的频带宽度. 对光纤来说, 由它的色散特性决定了它所允许的传输带宽很宽.

通常电话信号占用的频带为 4—5 千赫, 彩色电视信号占用频带宽约 8—10 兆赫. 利用光波做载波的光纤通信技术, 目前已能在一根光导纤维上传送几万路电话或者几十路电视. 在实际中, 还常常用几对、几十对乃至几百对光导纤维组成光缆, 这样, 使每根光缆的通信容量又可以增加几倍, 甚至几百倍. 另外, 光纤通信的中继距离长. 在微波通信线路中, 由于电波能量的损耗, 每隔一段路程就要设置中继站, 把接收到的电波信号放大, 才能继续传播下去. 对于微波通信, 中继站的间隔为 3 公里. 对于光纤通信, 由于制造光纤的技术不断改进, 1970 年美国制造的光导纤维每公里衰减 20 分贝 (即每公里衰减到原来的 1/100), 现在生产的光导纤维每公里只衰减 0.2 分贝, 非常接近于理论的极限值 0.18 分贝. 这样, 光纤通信的中继站的间距可以大大拉长, 目前可达到 100 公里以上, 此外, 光纤通信还具有线径小 (一根光纤的直径为 0.06—0.1 毫米)、重量轻, (现在的轻质光缆每公里不到 2 千克), 取材易、价格低廉, 抗干扰、耐震动等优点, 到 1983 年底, 全世界共敷设 27 万公里长的光纤通信线路, 我国在上海、北京、武汉等城市中敷设了总长 100 多公里的光纤通信线路, 连接武汉三镇的光纤电话已通过鉴定, 并已在试用. 我国新兴的光纤通信产业已初具规模, 在一些重要技术上已达到国际八十年代初的水平.

三、助视光学仪器的视角放大倍数

助视光学仪器包括放大镜、显微镜和望远镜. 使用助视光学仪器的主要目的是放大视角, 通常用视角放大倍数来衡量助视光学仪器的放大本领. 物体通过助视光学仪器得到的虚像对人眼所张的视角 U' 与物体直接对人眼所张的视角 U 之比, 即 $M = U'/U$ 叫做光学仪器的视角放大倍数. 视角越大, 物体在视网膜上所成的实像也越长. 在近轴条件下,

$$U \approx \sin U \approx \tan U, U' \approx \sin U' \approx \tan U'$$

因此, 视角放大倍数也等于借助于助视光学仪器后物体在视网膜上所成的实像长 h' 与物体直接在视网膜上所成实像长 h 之比. 即

$$M = \frac{U'}{U} = \frac{h'}{h}$$

(1) 放大镜用来观察近处比较细小的物体, 最简单的放大镜是一个凸透镜. 它的放大倍数计算如下:

眼睛直接观察, 细小物体, 一般放在明视距离 $L = 25$ 厘米处. 视角 $U = y/L$ (图 5.54 甲).

眼睛通过放大镜观察, 看到的是细小物体的放大虚像, 视角 $U' = y'/L'$ (图 5.54 乙), 其中 $L' = -x' + X'$, 代入放大率公式

$$m = \frac{y'}{y} = -\frac{x'}{f}$$

视角放大倍数

$$\begin{aligned} M &= \frac{U'}{U} = \frac{y'}{y} \cdot \frac{L}{L'} = -\frac{x'}{f} \cdot \frac{25}{L'} \text{cm} \\ &= \frac{25}{f} \text{cm} \times \left(1 - \frac{X'}{L'}\right) \end{aligned}$$

一般说来, 放大镜的放大本领与放大镜的焦距有关, 还与放大镜的使用情况, 即物和透镜的距

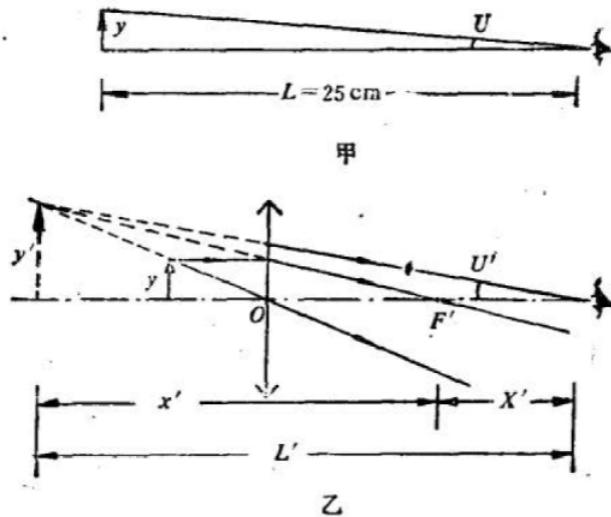


图 5.54

离，人眼和透镜的距离有关。当人眼处于像方焦点 F' 处时， $X' = 0$ ，则

$$M_0 = \frac{25}{f}$$

仅与放大镜的焦距有关，一般所说的放大镜的放大倍数就是指 M_0 来说的。

由于像差的存在，一般简单放大镜的放大倍数不超过 3 倍。

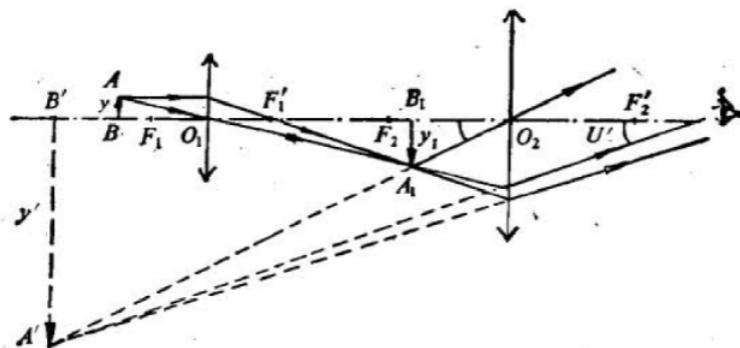


图 5.55 显微镜成像光路

(2) 显微镜由焦距很短的物镜和焦距较长的目镜组成。其成像光路如图 5.55 所示。近处细微的物体放在物镜的物方焦平面附近，成倒立实像于目镜的物方焦面附近，从目镜折射出来的光线都近于平行，这样，虚像 y' 对人眼张的视角 U' 近似等于实像 y_1 对目镜光心 O_2 所张的角度。即 $U' = y_1/f_2$ 。由于物镜的放大率

$$m_1 = \frac{y_1}{y} = \frac{V_1}{u_1}$$

对物镜来说，物距 u_1 近似等于它的焦距 f_1 ，像距 v_1 近似等于镜筒长 L ，所以

$$\frac{y_1}{y} \approx \frac{L}{f}$$

由此得到

$$U' = \frac{y \cdot L}{f_1 \cdot f_2}$$

直接将物体放在明视距离处观察的视角 $U = \frac{y}{25\text{cm}}$ 微镜的视角放大倍数

$$M = \frac{25\text{cm}}{f_2} \cdot \frac{L}{f_1}$$

相当于目镜的放大倍数和物镜的放大倍数的乘积。通常显微镜的目镜和物镜都标有放大倍数的字样，如物镜标有 $40\times$ ，目镜标有 $15\times$ ，则它们组成的显微镜的放大倍数是 $M = 40 \times 15 = 600$ (倍)。

(3) 望远镜用来观察远处大物体。由于物体距人眼很远，视角很小，难以被人分辨清楚。望远镜的作用就是放大视角，物体通过望远镜成虚像，该虚像对人眼所张的视角比物体直接对人眼所张的视角大，犹如把物体从远处“拉近”一样。

开普勒望远镜的目镜和物镜都是凸透镜，物镜的焦距 f_1 大于目镜的焦距 f_2 ，它们相距 $L = f_1 + f_2$ ，因此物镜的像方焦平面和目镜的物方焦平面重合。远处的物体 AB 通过物镜成实像 A_1B_1 于焦平面上，再通过目镜或虚像于无限远处。该虚像对人眼所张的视角等于像 A_1B_1 对目镜光心 O_2 张的角度

$$U' = \frac{y'}{f_2}$$

远处物体直接对人眼所张的视角等于它对物镜的光心 O_1 所张的视角 U ，由图 5.56 可以看出， $U = y/f_1$ 。望远镜的视角放大倍数为 $M = f_1/f_2$ 。

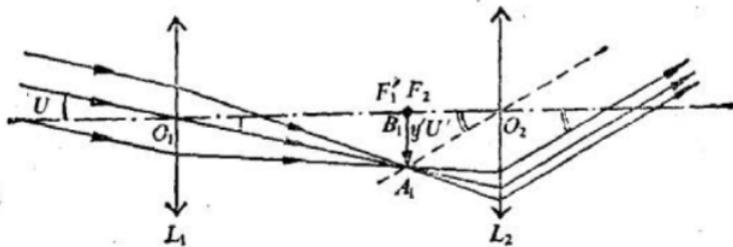


图 5.56 开普勒望远镜成像光路

第六章 光的波动性

第一节 教学要求	194
第二节 教学建议	195
一、光的波动性	195
(一)人类对光的本性的两种认识	195
(二)双缝干涉	195
(三)薄膜干涉	196
(四)光的衍射	197
(五)光的偏振	198
二、光的电磁本性	198
(一)光的电磁说	198
(二)电磁波谱	199
三、光谱的初步知识	199
(一)介绍光谱学的知识	199
(二)光谱分析	199
第三节 实验指导	200
一、演示实验	200
(一)双缝干涉	200
(二)薄膜干涉	201
(三)单缝衍射	202
(四)衍射光栅	203
(五)光的偏振	203
(六)伦琴射线的获得	204
(七)用分光镜观察发射光谱和吸收光谱	206
二、学生实验	208
(一)利用双缝干涉测定光的波长	208
(二)观察光的衍射现象	210
三、课外实验活动	210
(一)观察两块平玻璃板形成的空气膜的干涉条纹 (课本练习一第 5 题)	210
(二)观察单缝衍射 (课本 256 页练习二第 3 题)	210
(三)自制单缝或双缝, 观察衍射现象或干涉现象	211
(四)用手持分光镜观察汞光谱和太阳的吸收光谱	211
第四节 习题解答	211
一、练习一	211
二、练习二	212
三、习题	213

第五节 参考资料	214
一、光源的相干性	214
二、等倾干涉和等厚干涉	215
三、干涉和衍射的区别和联系	217
四、衍射光栅产生的光谱	217
五、偏振光与自然光	219

第一节 教学要求

本章讲述光的波动性、光的电磁理论和电磁波谱，以及光谱和光谱分析的知识。认识光的波动性及其电磁本质，在物理学史上有重要的意义。光谱学的知识，为研究原子结构提供了信息。光的干涉、衍射、偏振等现象，在现代科学技术中有主要的应用。学生应该对这些知识有所了解。

光的干涉现象，根据学生的知识水平和接受能力，有条件分析得深入一些。因此，作为本章的重点内容。衍射现象的分析，要复杂一些，因此只介绍了现象，本章的其他知识都是介绍性的。

本章教材分为三个单元。第一节至第五节为第一单元，讲述光的波动性，第六、七节为第二单元，讲述光的电磁本性，第八节为第三单元，介绍光谱的初步知识。

讲述光的微粒说与波动说的矛盾是为了使学生了解人们对光的本性的认识经历了曲折的过程，也是讲解光的波动性的引子，激发学生的学习兴趣。

光的干涉和衍射现象，在日常生活中极易忽略，学生不熟悉。教学中应注意通过演示使学生观察现象，联系机械波的干涉和衍射现象，运用波动知识进行分析。在讲干涉现象时，不要求解释为什么不同光源发出的光不是相干光，要把教学的重点放在用波动说解释产生明暗条纹的条件上。在推导时要注意突出推导的思路。通过研究光的干涉，还应该让学生知道光的颜色跟波长（频率）有关，不同色光的频率是不同的。

光的衍射现象也证明了光具有波动性。在教学中可以指导学生用一些简单的方法进行观察。

光的偏振现象，证明了光是横波。但是学生对偏振现象比较生疏。教学中应跟学生比较熟悉的机械波的有关现象类比，并在充分观察实验现象的基础上进行讲述。

从表面上看，光现象和电磁现象之间似乎没有什么联系。麦克斯韦提出的光的电磁说和赫兹对电磁波进行的实验研究，揭示了光的电磁本质。通过光的电磁说的教学，应该使学生体会自然现象间的相互联系，对无线电波、红外线、可见光、紫外线、伦琴射线等不同波长的电磁波有一个统一的认识，并对它们的性质和产生机理有所了解。

这一章的教学要求如下：

1. 理解光的干涉现象，理解产生明暗条纹的条件，了解光的干涉现象的应用。
2. 了解光的衍射现象和产生衍射现象的条件。
3. 了解光的偏振现象和光是一种横波。
4. 了解光是一种电磁波；了解无线电波、红外线、可见光、紫外线、伦琴射线等都是波长不同的电磁波。
5. 了解光谱和光谱分析的初步知识。

第二节 教学建议

一、光的波动性

(一) 人类对光的本性的两种认识

人类对光的本性的认识经历了一个辩证发展的过程，到十七世纪，在人类已经积累了许多几何光学知识的基础上，形成了对光的本性的两种认识——微粒说和波动说。

教学中要讲述两种理论在解释实验规律上各有其成功的一面，也要讲述两种理论的不足之处。还要说明两种理论的尖锐矛盾。例如，微粒说难以说明光在媒质界面上同时发生反射和折射，波动说却可以解释这个事实，波动说难以说明光的直线传播，在微粒说看来，这都是很自然的现象。还可适当补充一些历史事实进一步说明微粒说和波动说的尖锐矛盾，例如，笛卡儿从微粒说推导出光的折射定律，得出了光在媒质中的速度大于真空中的光速；惠更斯从波动说也推导出光的折射定律，但得出了光在媒质中的速度小于真空中的光速。对于两束光相交时各自独立传播的事实，微粒说难以解释，波动说却很容易说明，等等。通过这些事实的讲述，使学生认识到理论和实践的矛盾，两种理论对光的本性认识的矛盾，是推动人类认识光的本性的内在动力。

(二) 双缝干涉

光的干涉现象是光具有波动性的重要依据。教材首先介绍了托马斯·杨在历史上第一次解决了相干光源的问题，成功地做出了光的干涉实验，然后具体介绍了双缝干涉实验，并用波动理论对实验现象进行了定量的分析，得出了干涉条纹间距与波长的关系，这对于学生认识光的波动性重要的意义，由于学生对于光的干涉现象比较生疏，难以把光想象成是一种波动，而且运用波动理论分析光的干涉现象，内容比较抽象，学生接受起来会有一定的困难。建议教学中注意如下几点：

首先要复习机械波的干涉的知识，复习重点放在什么是波的干涉现象，相干波源的条件。运用波动理论分析空间振动加强区域和削弱区域的产生条件，还要进一步用光程差来分析两个振动的位相关系，为讲授本节内容做准备。

要做好演示实验，使全班同学都亲眼看到光的干涉现象，这是认识光的干涉的基础。实验内容包括单色光干涉的明暗条纹和白光干涉的彩色条纹。要注意介绍仪器装置。教学要结合课本图 6.2 进行。

运用波动理论分析双缝干涉实验要注意：

1. 说明如何获得相干光源，这是得到稳定的干涉现象的关键。结合实验装置，对照课本图 6.2 说明通过双缝得到的 S_1 和 S_2 两个光源，是在任何时刻频率和位相都相同的相干光源。
2. 类比机械波的干涉，运用波动理论分析光的干涉现象。把 S_1 和 S_2 相干光源发出的光想象成两列光波，两列光波在屏上相遇。两个光振动叠加产生亮、暗条纹。亮条纹处的光能量较强，对应着合振动互相加强；暗条纹处的光能量较弱，对应着合振动互相削弱。
3. 推导屏上亮暗条纹的位置公式要讲清思路：屏上亮纹或暗纹的位置用距 O 点的距离 x 表示，屏上任一点的振动加强或削弱的情况决定于该点到光源 S_1 和 S_2 的距离之差（光程差） $\delta = r_2 - r_1$ 。在 δ 等于波长整数倍的位置，产生亮纹；在 δ 等于半波长奇数倍的位置时产生暗纹。寻求 δ 与 d , ℓ 和 x 的关系，推出 $\delta \approx \frac{d}{\ell} \cdot x$

4. 学生对于公式

$$x = \pm k \frac{\ell}{d} \lambda, \quad k = 0, 1, 2, \dots$$

和

$$x = \pm (2k - 1) \frac{\ell}{d} \cdot \frac{\lambda}{2}, \quad k = 1, 2, \dots$$

的表述方法不习惯，讲述时要从具体的中央亮纹、第1条、第2条……亮纹或暗纹入手，归纳出一般的表述。例如，亮纹的条件是 $\delta = r_2 - r_1 = 0, \lambda, 2\lambda, \dots$ 和 $-\lambda, -2\lambda, \dots$ (“-” 的意义是 $r_2 < r_1$ ，位置在 O 点的下方）。归纳出 $\delta = \frac{d}{\ell}x = \pm k\lambda$ ，解出

$$x = \pm k \frac{\ell}{d} \lambda, \quad k = 0, \pm 1, \pm 2, \dots$$

然后具体说明 $k = 0, 1, 2, \dots$ 所对应的 $x = 0, \pm \frac{\ell}{d}\lambda, \pm 2\frac{\ell}{d}\lambda, \dots$ 的意义，使学生理解这种数学表述的内容。

5. 双缝干涉公式的近似条件是 $\ell \gg d$ 和 $\ell \gg x$ 。双缝间的距离 d 一般仅为十分之几毫米。而屏上偏离开中央亮纹较远处的亮纹的强度是十分弱的，几乎无法观测到。通常能观察到亮纹范围远小于 ℓ 。

根据相邻亮纹或暗纹间的距离公式 $\Delta x = \frac{\ell}{d}\lambda$ 可以测量光波的波长。红光的干涉条纹间距最宽，紫光的最窄，由此可认识不同颜色的光的波长不等，由红到紫，波长越来越短，频率越来越高。进一步说明白光的彩色干涉条纹的产生原因。学生通过测量光波的波长，对于可见光的波长和频率可以有一个大致的认识。

说明双缝干涉的亮暗条纹反映了光源 S_1 和 S_2 发出的光的能量在空间的分布情况。暗条纹处的光能量几乎是零，表明两列光波叠加彼此相互抵消。这并不是光能量损耗了或转变成了其他形式的能量，而是按照波的传播规律，没有能量传到该处；亮条纹处的光能量比较强，光能量增加也不是光的干涉可以产生能量，而是按照波的传播规律，到达该处的能量比较集中。

(三) 薄膜干涉

学生平时都见过薄膜干涉现象（雨后路面上的油膜形成的彩色条纹，色彩绚丽的肥皂泡等）只是没有引起注意。提出一些现象，并让学生动手做肥皂液薄膜的干涉实验，观察单色光的明暗条纹和白光的彩色条纹，会給学生留下深刻的印象。实验时，可引导学生细致地观察干涉条纹，例如，可观察到干涉条纹产生在薄膜的表面上，肥皂液薄膜的干涉条纹基本上是水平的等等。（这些都是等厚干涉的特点决定的。）

分析薄膜干涉实验的重点应放在如何得到相干的两列波，薄膜上是怎样出现明暗相间的干涉条纹或彩色条纹的。课本图 6.4 是肥皂液薄膜干涉的示意图。图中只给出了从楔形薄膜的前后表面反射的两列光波的位相关系和叠加的结果。该图表示的是光波几乎垂直地入射到楔形薄膜上后，又从薄膜的前后表面反射回来的情况，薄膜的两个表面是近于平行的。图中薄膜的楔形被大大夸张了，应该指出，分别从前、后表面反射回来的两列波都来自于同一入射波，因而是相干的。由于从后表面反射的光波比前表面反射的光波通过的路程较长，因而位相要落后一些，落后的相差与膜的厚度有关。在膜上某些厚度的地方，两列反射波是同相的，形成相互加强的亮纹；在另一些厚度的地方两列反射波是反相的，形成相互削弱的暗纹。教材没有深入分析计算光程差和薄膜厚度的关系，也不涉及光在光疏媒质中达到光密媒质的界面反射时的半波损失

以及在液膜内的光波波长小于空气中的波长等问题，教学中应注意掌握讲授的深度，以免加重学生的负担。



图 6.1

薄膜干涉在科学技术上有重要的应用，除了教材中介绍的“用干涉法检验光学元件表面加工的质量”之外，还可适当增加介绍在检验钢球的直径、透镜表面的曲率半径，测量长度的微小变化等方面的应用，讲授增透膜时，要注意说明反射光和透射光的能量之和等于入射光的能量（不考虑媒质对光的吸收）。增透膜的作用只是使反射的两列光波产生相消干涉，反射光的能量趋于零，因增加了透射光在入射光中所占的比例。并不是增加了光的能量，以免学生误解。增透膜的厚度是光在薄膜媒质中传播的波长的 $1/4$ （不是真空中波长的 $1/4$ ）。由于光垂直于薄膜表面入射时，从前后表面反射的两列光波的路程差等于薄膜厚度的 2 倍，如图 6.1 所示，当膜的玻璃厚度是 $\lambda/4$ 时，路程差恰好是 $\lambda/2$ ，从前后表面反射的光波的相位恰好相反，便产生相消干涉。制作增透膜的材料是氟化镁 MgF_2 ，折射率 $n = 1.38$ ，介于空气和玻璃之间。因此在空气和增透膜的界面上、增透膜和玻璃的界面上，反射情况相同，不会再额外增加两列光波的光程差。增透膜只对人眼或感光胶片最敏感的绿光起增透作用。如果白光照射到增透膜上，由于绿光产生相消干涉，在反射光中绿光的强度几乎是零，而其他波长的反射光并没有完全抵消，因此，增透膜呈绿光的互补色——淡紫色。

（四）光的衍射

光的衍射现象进一步证明了光具有波动性，对发展光的波动理论起了重要的作用。教材讲述光的衍射的思路是先说明一般情况下不容易观察到光的衍射现象的原因，同时也就说明了观察衍射现象的条件，再来做衍射实验。由于衍射现象产生的物理过程分析起来比较复杂，课本中对于衍射现象未作理论上的分析。

做好光过小孔或单缝发生衍射现象的实验，是学生认识光的衍射的基础。实验中要让学生观察：

1. 光偏离直线传播，绕过障碍物进入阴影中，并且在屏上出现明暗相间的衍射条纹。
2. 只有孔或狭缝较小时，光的衍射现象才比较显著。
3. 为了认识光的直线传播和光的衍射的关系，观察屏上的光斑变化情况时应使孔径或狭缝的宽度逐渐变小。当孔径或缝宽较大时，屏上光斑的边缘清晰，显示出光沿直线传播；孔径或缝宽逐渐变小时，屏上光斑的边缘逐渐变得不清晰了，衍射现象逐渐变得显著起来，直至出现明暗相间的衍射条纹。

上述演示可以使学生认识到，由于光是波动，遇到障碍物时发生衍射现象是不可避免的，只是由于在一般情况下障碍物的尺寸比光的长大得多，因此衍射现象很不明显。当衍射现象可以忽略时，才可以认为光是沿着直线传播的。

建议采用课堂讲授和学生实验并进的方式进行教学。用游标卡尺的测脚形成可调宽度的狭缝观察线光源的衍射现象，用不同孔径的小孔观察点光源的衍射现象。学生自己动手观察到光的衍射条纹，可使他们了解到缝宽和孔径多大时能够观察到比较显著的衍射现象。

菲涅耳圆盘衍射的中心亮斑能够引起学生的极大兴趣，但在课堂上完成这个实验比较困难。教学时可以用细金属丝产生的衍射来代替，由于观察到在金属丝的阴影中间有一条亮线，学生会更加信服光的衍射现象。

光栅的衍射是衍射现象在科学技术上的重要应用。光通过衍射光栅的亮条纹随着光栅缝数的增加而变窄和变亮的特点是从实验现象中得出的。教学中不要求从理论上加以分析。可介绍一些衍射光栅的应用，例如利用光栅衍射条纹的特点可以比较精确地测量光波的波长和产生均匀分布的光谱等。

(五) 光的偏振

横波的偏振是新概念。为了从机械波入手来认识偏振。应将课本 257 页的实验演示给学生看。这个实验，形象地给出了横波是偏振的机械模型，偏振现象是横波区别于纵波的最明显的标志，通过机械波和光波的类比，可以从光的偏振现象使学生认识光是横波。

光的偏振现象要通过实验给出。实验的设计思想和横波偏振的机械模型一样。电气石晶体薄片或人造偏振片对于某一振动方向的光具有选择吸收的本领，它们的作用相当于课本 257 页的演示中限制或检验振动方向的“狭缝”。实验应先演示光通过两个偏振片时，转动其中一个偏振片的方位，透射光的强度出现周期性的变化，给学生以鲜明突出的印象，再演示光通过一个偏振片的情况，使学生产生悬念，激发他们的探索热情。分析光的偏振实验，要引导学生把光波和机械横波相类比，建立光的波动模型，能想象出光是一种横波，它的振动方向跟光的传播方向垂直，教学中应注意讲清起偏器和检偏器的不同作用，自然光和偏振光的区别和联系。

通过演示反射光的偏振现象，说明光的偏振现象是普遍的（即教材中讲的“除了从光源直接射来的，基本上都是偏振光”），也便于使学生理解光的偏振现象在科学技术上的一些应用，教材还安排了“偏振光与立体电影”的阅读教材，如能配合教学看一场立体电影，学生一定会有浓厚的兴趣。

二、光的电磁本性

(一) 光的电磁说

光的电磁说比光的波动说前进了一大步。课本结合物理学史讲述了人类认识光的本性的发展过程。教学中要注意以下四个环节：

1. 从十七世纪开始到十九世纪初，光的波动说不断地发展和完善，逐渐为人们所接受，但是人们对光的本性认识不足，以为光也是一种机械波，这种认识在光的传播媒质等问题上遇到了严重的困难。
2. 法拉第发现在强磁场作用下，偏振光的振动面发生偏转的现象。它启示人们把表面上很不相同的光现象和电磁现象联系起来。
3. 光是一种电磁波。电磁波和机械波在本质上不同，它可以在真空中传播而不需要任何媒质。这就不仅解决了波动说在光的传播媒质问题上遇到的困难，而且对光的本质有了进一步的认识。

4. 历史上，光的电磁学说是麦克斯韦作为假说提出的，赫兹实验证实了电磁波的客观存在，也证明了光是一种电磁波，使光的电磁理论得以确立。

通过光的电磁说的教学，不仅要使学生了解光的电磁说的基本内容。还要通过光的电磁理论的建立和发展过程，认识理论和实践的辩证关系，从中受到辩证唯物主义世界观的教育。

(二) 电磁波谱

电磁波谱的教学，应该着重使学生领会光的电磁说把光现象和电磁现象统一起来了。

在把无线电波、红外线、可见光、紫外线、伦琴射线和 γ 射线按照频率（或波长）的顺序排列成波谱，使学生对电磁波有一个全面的了解后，还要进一步使学生认识这些电磁波既具有共同的本质，又有各自的特性和不同的产生机理，介绍这些内容可以为进一步学习光的波粒二象性和原子的内部结构做准备。

在电磁波谱的教学中，还要注意介绍红外线、紫外线、伦琴射线的一些应用，以开阔学生的视野，激发他们学习科学技术的志趣。

通过这一单元的教学，应当使学生体会到自然现象之间是相互联系的，有些表面上很不相同的现象却存在着共同本质。把光现象和电磁现象统一起来，是物理学的伟大成果，现在物理学的研究还在更加广泛的范围上进行着类似的统一工作。

三、光谱的初步知识

(一) 介绍光谱学的知识

要让学生认识观察光谱的仪器——分光镜。讲述分光镜的构造原理要结合实物和挂图。应先讲述单色光通过三棱镜的光路，单色光照亮狭缝 S ，经过凸透镜 L_1 形成平行光，通过三棱镜 P 发生偏折，再会聚在凸透镜 L_2 的焦平面 MN 上成实像，狭缝 S 的实像是一条亮线，颜色和入射光相同。再讲复色光通过三棱镜的光路，使学生理解不同颜色的光谱线实际上是照亮的狭缝 S 在焦平面 MN 上形成的不同颜色的实像，这些实像按光的波长顺序排列形成光谱。教学中还可以介绍标尺管的作用及其光路，使学生对分光镜有比较全面的认识。

(二) 光谱分析

结合观察连续光谱、明线光谱（特别是氢原子的光谱）和吸收光谱，使学生了解有关的几个概念，了解各种光谱产生的机制，观察同一元素原子的发射光谱和吸收光谱时，要注意观察吸收光谱的暗线位置和发射光谱的明线位置一致，而不同元素原子有不同的光谱。从而理解光谱代表了每种原子的特征，为介绍原子结构的内容作些准备。正是每种原子都有自己的特征谱线，利用光谱可以鉴别物质和确定物质的化学组成。

需要指出的是，由于中学配备的分光镜分辨本领较差，对于太阳的吸收光谱的暗线，有的仪器不能观察到。

建议采用以学生自学为主的方式进行教学，指导学生通过观察实验和阅读教材，理解光谱产生的机理和光谱的分类，理解发射光谱、连续光谱、明线光谱和吸收光谱之间的关系，认识光谱分析的原理及其方法。

第三节 实验指导

一、演示实验

本章的双缝干涉、衍射、偏振演示实验，要用 J2508 型光的干涉衍射偏振演示仪。

J2508 型光的干涉衍射偏振演示仪是由可转动的光具座、滑块、观察筒、盒式光源、光学元件组成。

光具座上部是附有长 80 厘米标度的单导轨，导轨支撑在光具座的底座上并可在水平面上任意转动。滑块分三种规格，可套在光具座的单导轨上沿导轨滑动。滑块顶部的孔上可安插各种光具。

观察筒由遮光筒、放大镜、玻璃屏和遮光板组成。

盒式光源由低压电源供电。盒内装有 12V50W 的卤钨灯，盒前有聚光透镜。在出光口上装上单缝光栏，便可作线光源使用。

主要光具有：狭缝、牛顿环、双面镜、反射器、毛玻璃屏、双凸透镜等。其中，狭缝包括双缝（缝宽 0.016 毫米，缝距分别为 0.04 毫米和 0.08 毫米两种）、单缝（缝宽 0.08 毫米），光栅（1%）。多缝缝宽 0.02 毫米，缝距 0.08 毫米。牛顿环装在圆形胶木架中，胶木架上有三个调整螺钉。

光源、光具，观察筒均可安装在滑块顶部的小孔上，绕安装轴转动。

图 6.2 的甲、乙、丙分别为光具座、观察筒和盒式光源的结构示意图。

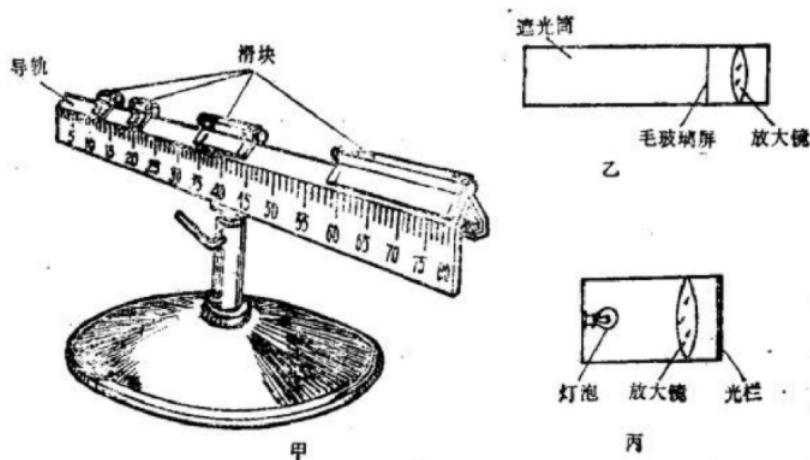


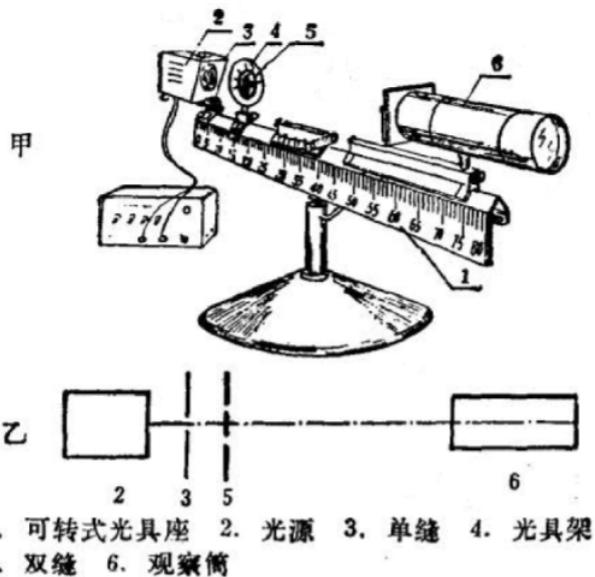
图 6.2

(一) 双缝干涉

用 J2508 型光的干涉衍射偏振演示仪做双缝干涉实验。装置按图 6.3 配置。套在光源前的光源单缝缝宽为 0.11 毫米，双缝的缝宽 0.08 毫米，装在光具架上，缝上的指示刻线对齐光具架上的零刻线。

调整光源、单缝、双缝和观察筒的共轴是实验能否成功的关键。

光具的调整步骤如下：先使单缝和双缝大致平行，相距约 5—10 厘米（双缝离单缝近一些可以增加干涉亮条纹的亮度，但光源单缝和双缝的共轴必须调得很好），观察筒的轴线和光具座导轨平行，调整时可在观察筒前放一张白纸作为观察屏，转动光源使得光通过单缝和双缝后落在白纸屏上的光斑位于观察筒的中心处。再转动光源单缝，使它和双缝平行，在白纸屏上见到



清晰的干涉条纹，如果撤去白纸屏，便在毛玻璃屏上呈现出清晰的干涉条纹。学生可以直接看毛玻璃屏上的干涉条纹，也可以通过透镜观察干涉条纹的放大虚像。如果在光源单缝和双缝之间加滤色片（也可用红色、绿色或紫色的玻璃纸），可以看到单色光的明暗相间的干涉条纹。改变观察筒与双缝的距离，可以看到干涉条纹的宽度随观察筒与双缝间的距离增大而增大的情况。

由于光源用卤钨灯并有聚光透镜，从而使通过单缝和双缝的光通量增加，提高了屏上亮条纹的亮度。为延长灯泡寿命，开始用6伏电源点亮灯泡，然后再根据实际需要逐渐升高电压，但不得超过12伏，接收干涉条纹的毛玻璃屏位于观察筒内，遮挡了其他杂散光，提高了屏上干涉条纹的可见度，因此可在一般亮度的教室中观察到清晰的干涉条纹。

实验时应缓慢转动光具座，使全班同学都能看到实验现象。

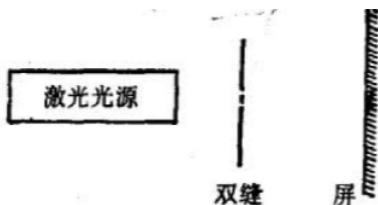


图 6.4

由于激光的平行度好，单色性好，亮度高，是做光的干涉、衍射实验的理想的单色光源，实验装置如图6.4所示，将激光光束直接照射到双缝上，通过双缝后的光再投影到远处的屏上，在屏上便可以见到明暗相间的单色光的干涉条纹，由于激光光束很细，屏上的干涉条纹近于明暗相间的亮点，若采用扩束装置将激光扩束后照到双缝上，可以得到双缝干涉的平行条纹。但扩束后明条纹的亮度很低，实验需在暗室中进行。

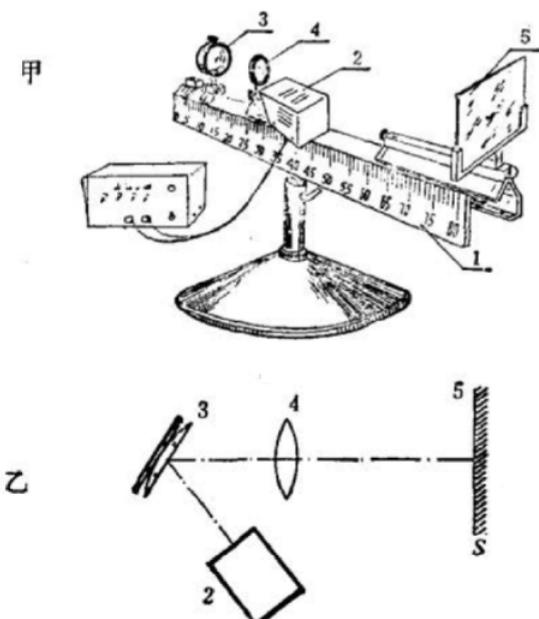
（二）薄膜干涉

可让学生分组做“肥皂液膜上光的干涉”实验。金属丝圆环用黄铜丝或铁丝自制，肥皂液应清洁无杂质，浓度适当。往酒精灯芯上撒食盐，火焰是黄色的。把肥皂液膜靠近酒精灯，通过薄膜的反射去看黄色火焰，在薄膜上可见到明暗相间的干涉条纹。若用白光照射，在薄膜上见到

彩色的干涉条纹.

对于一般的光源，能够见到干涉条纹时，薄膜的厚度须足够薄。因此，肥皂液的浓度不能太浓。干涉条纹一般先出现在薄膜的上部，往往当薄膜将要破裂时，才能见到较多的干涉条纹。

仪器所附的牛顿环，是由一块圆的平板玻璃和一个凸透镜叠合而成的。球面与平板玻璃间形成空气膜，其厚度由接触点向外逐渐增大。调节框上的三个调整螺钉，使干涉图样位于中心部分。但不要拧得过紧，以免玻璃破碎。由牛顿环的空气膜产生的干涉条纹是等厚条纹，利用光的干涉、衍射、偏振演示仪做牛顿环投影实验装置如图 6.5。将牛顿环置于导轨的一端，把光源、凸透镜、毛玻璃屏按图中所示位置放置，使凸透镜 ($f = 7$ 厘米) 距牛顿环大约 8 厘米。光源的光斜射到牛顿环上，使反射光过凸透镜在毛玻璃屏上成像，稍稍调整牛顿环的位置，在毛玻璃屏上可见到清晰的圆环形彩色干涉条纹。条纹越向外越密，条纹的中心是暗斑。



1. 光具座 2. 光源 3. 牛顿环 4. 凸透镜 5. 毛玻璃屏

图 6.5

若将凸透镜放在牛顿环的另一侧，并移动它的位置，也可在光屏（如白墙）上见到牛顿环的干涉条纹，这是光透过牛顿环后经凸透镜成的像，牛顿环的透射干涉条纹的中心是亮斑，和反射干涉条纹是互补的。拧动牛顿环边缘上的调整螺钉，干涉条纹的形状、位置和圆环半径的大小都会发生变化。

本实验用低压电源供电，电压为 6—10 伏。

(三) 单缝衍射

用光的干涉、衍射、偏振演示仪 (J2508 型) 做单缝衍射实验。装置与图 6.3 相似，需将图中的双缝换成宽度为 0.08 毫米的衍射单缝，如图 6.6 所示，调整光源单缝，使衍射单缝和观察筒共轴。调整方法和双缝干涉实验相同。

用游标卡尺的外测脚做宽度可调的单缝代替衍射单缝，可以演示衍射条纹随单缝宽度变化的情况。缝宽较大时，如缝宽为 2 毫米，屏上为边缘清晰的亮线。当缝宽减小时，屏上的亮线的宽度也减小。如果进一步减小单缝的宽度，可以见到亮线的两侧出现衍射条纹。缝宽再减小，



2. 光源 3. 光源单缝 5. 衍射单缝 6. 观察筒

图 6.6

衍射条纹的宽度反而变大，只是明条纹的亮度降低。实验应该注意：

1. 缝宽较大时，屏上的亮线中似有明暗的条纹，这不是衍射条纹，而是仪器的光源卤钨灯灯丝的像的一部分（灯丝像的其余部分被可调狭缝屏遮挡住了）。
2. 用卡尺的测脚做狭缝，缝宽较大时，屏上有时也出现明暗相间的条纹，这是从卡尺反射的光和从光源单缝直接射出的光相干涉的条纹。解决的办法是稍稍转动卡尺，使测脚平面反射的光不能达到观察筒内的毛玻璃屏上。

利用这套实验装置还可以做不透明的单丝衍射实验，取直径在 0.1 毫米左右的细丝（如头发丝、多股绞合电线中的一股等），用胶水竖直地粘在光具架上，替换衍射单缝。光源单缝换用宽 0.025 毫米的，转动单缝的位置，使它和不透明的单丝平行，在屏上可以看到与单丝平行的衍射条纹，特别是在单丝的“影子”中央有一条亮线。

用激光光源做单缝衍射实验，激光光束直接照到狭缝上，通过狭缝后再投影到远处光屏上，可以看到明暗相间的衍射条纹，改变狭缝的宽度，可以看到狭缝越窄，衍射条纹越远，但亮度减弱。

用激光光源还可以做圆孔衍射实验，用细针在牙膏皮上扎出不同孔径的圆孔，激光光束照射到小孔上，通过小孔后直接投射到远处的光屏上，可以看中心处是最亮的圆形光斑，周围还有明暗相间的圆环形条纹，孔径越小，中心亮班及周围的圆环形条纹的面积越大。

(四) 衍射光栅

用光的干涉、衍射、偏振演示器（J2508 型）做光栅衍射的实验，装置如图 6.7。实验时将光源、光源单缝、凸透镜和毛玻璃屏共轴放置在光具座上。调整凸透镜 ($f = 7$ 厘米) 的位置（距光源单缝稍大于 7 厘米），使得光源单缝在毛玻璃屏中央成清晰的放大实像，再将衍射光栅装在光具架上，缝座的指示刻线对齐光具架的零刻线，把光具架插到凸透镜和光屏之间，并靠近凸透镜。调整光源单缝与光栅的刻线平行，在毛玻璃屏上就可以见到光栅的衍射条纹。

为了说明衍射明条纹随着缝数增加而变窄且亮度增强的特点，实验时，可在光具架上顺序装置单缝、双缝、多缝和光栅，比较它们的衍射条纹，上述特点很容易由实验得到。单缝、双缝和多缝的衍射亮条纹的亮度较低，可用观察筒代替毛玻璃屏，便于同学观察。

实验用 6—10 伏交流电。

(五) 光的偏振

演示自然光通过偏振片产生偏振光可用光的干涉、衍射、偏振演示仪。将光源、两个偏振片（分别装在两只光具架上）和毛玻璃屏依次装在光具座上，使它们的中心在平行于光具座导轨的同一条直线上。当两个偏振片的偏振化方向（用偏振片座上的指针表示）平行时，毛玻璃屏上有明亮的光斑；固定一个偏振片（为方便演示，偏振化方向可取竖直方向），转动另一个偏振片，

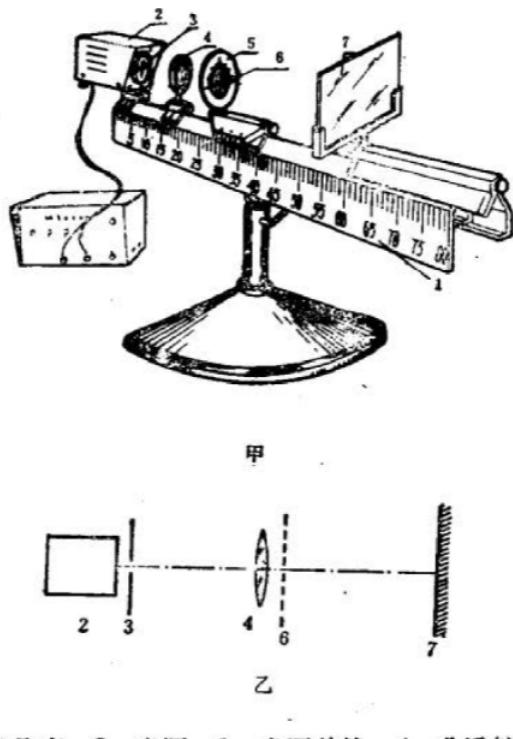


图 6.7

当两个偏振片的偏振化方向垂直时，屏上的光斑几乎消失。继续转动偏振片，屏上光斑的亮度出现周期性变化。

反射光的偏振实验装置如图 6.8 所示。玻片反射起偏器置于光具架上，使其框上的刻线对准入射角为 57° 的定位点，先将光源置于起偏器左侧，转动光源，使出射光束经玻片反射后，光斑落在毛玻璃屏的中央。再把偏振片装入光具架内。转动偏振片，当指示偏振化方向的指针处于竖直方向时，屏上有明亮的光斑。指针处于水平方向时，屏上的光斑几乎消失。

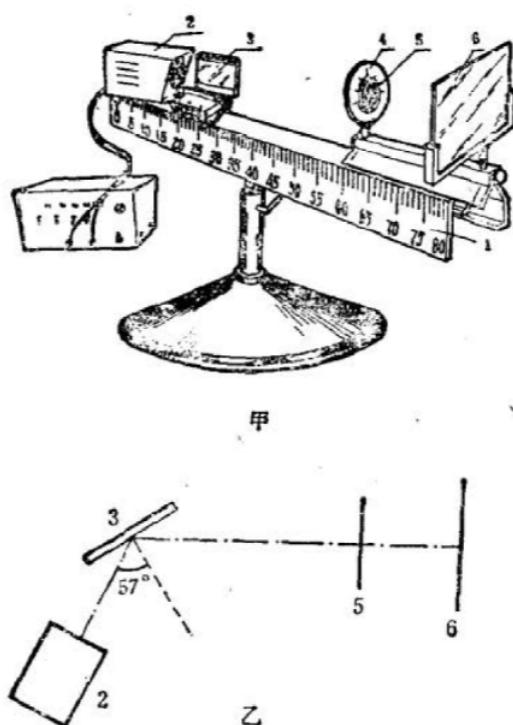
上述两个实验用 6—10 伏低压电源。

偏振片可以用观看立体电影偏光眼镜片代替，左右两只眼镜片的偏振化方向互相垂直。光源可选取平行光源（幻灯、手电筒、激光光源等），通过两个偏振片将光斑投影在墙上，转动其中任一偏振片，很容易观察到光的偏振现象。

反射光偏振起偏器，可以用一般的平板玻璃，将其一面涂黑，用以吸收透过玻璃的光，当光线的入射角为布儒斯特角时，从玻璃表面反射的光是平面偏振光，其振动方向和光的入射平面垂直。再让反射光通过偏振片，转动偏振片的方位，可看到屏上光斑的亮度周期性的变化，利用反射偏振光可以检查偏振片的偏振化方向。

(六) 伦琴射线的获得

实验室中的伦琴射线管由阴极、对阴极（阳极）和辅助阳极组成，管内还有少量活性炭，实验装置如图 6.9 所示，实验时，阴极接感应圈高压输出端的负极，阳极接感应圈高压输出端的正极。接通电源后，由阴极射出的阴极射线打到对阴极上，在对阴极激发出伦琴射线。由于伦琴射线照到荧光屏上，能激发出荧光。所以把手（或一本书，书内夹着钥匙）紧贴在荧光屏前，当射线照射时，在屏上可以看到手的骨骼（或书中的钥匙）产生的阴影。



1. 光具座 2. 光源 3. 玻片起偏器 4. 光具架
5. 偏振片 6. 光屏

图 6.8

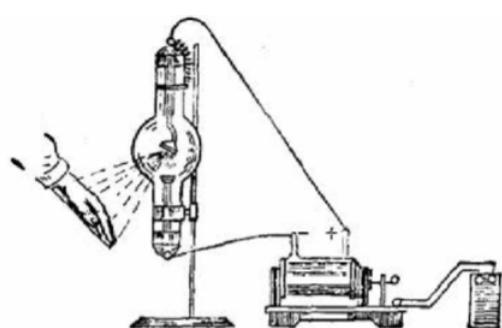


图 6.9 伦琴射线管实验装置

实验要在暗室中进行，正常工作时，一部分伦琴射线直达管壁，在管壁上产生荧光（玻璃材料不同，荧光的颜色也不同）。实验时要注意，伦琴射线管的正、负极接线必须正确。如果接反，尽管能有阴极射线产生，但不能产生伦琴射线，可通过转换感应圈的极性开关，改变接线极性，实验时，要把荧光屏放在对阴极的前方，屏和管壁的距离以能在屏上得到清晰的透视图象为准。涂有荧光物质（硫化锌）的面要向着观察者。

荧光物质——硫化锌有毒，使用时应避免接触，伦琴射线管是高真空仪器，长期放置时，会由于漏气，造成伦琴管损坏。

（七）用分光镜观察发射光谱和吸收光谱

中学物理中主要用棱镜分光镜观察光谱。下面先介绍分光镜的构造。

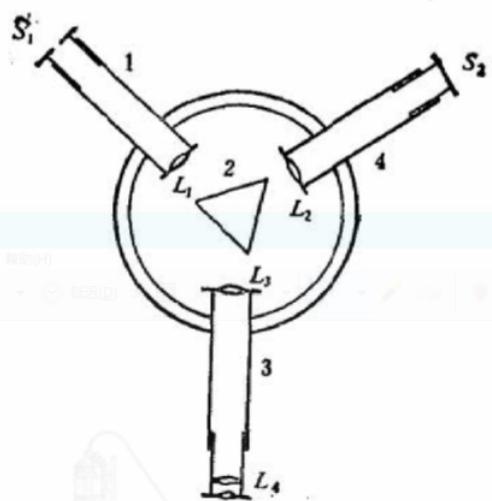


图 6.10

分光镜有四个主要部件，图 6.10 是它的示意图。图中 1 是平行光管，它的前端装有可调节的狭缝 S_1 ，另一端装有消色差透镜 L_1 ；2 是三棱镜，一般用火石玻璃制成，放在平台的中央，三棱镜上不需要透光的都是毛面；3 是望远镜，由物镜 L_3 和透镜组 L_4 组成；4 是标度管，它的前端装有透明的标尺 S_2 ，另一端装有透镜 L_2 。这四个部件都固定在金属圆盘上，并位于同一水平面上。圆盘上部有一胶木罩，以遮挡杂散光线的干扰，因此观察时不需要良好的暗室。1、3、4 三部分可拉出或推进，以便进行调节，望远镜筒 3 还可沿圆盘转动，标度管 4 可以沿圆盘下面的固定螺丝转动。调节标度时，必须先把固定螺丝拧松，调好后再固定。

用分光镜观察发射光谱时，应先使狭缝 S_1 位于透镜 L_1 的焦平面上，以便使光源射入狭缝的光线经过透镜 L_1 后变成平行光束，然后投射到三棱镜上。由于三棱镜的色散作用，光束通过三棱镜后，便成了许多方向不同的平行光束，它们在进入望远镜的物镜 L_3 后，分别在平面 MN 处聚集，形成一条条狭缝的像（图 6.11），观察时，用目镜 L_4 加以放大，就可以看到放大的光谱像。再用小电珠照亮标度管的标尺 S_2 ，经棱镜反射后，在 MN 处同时呈现出标尺的像（图 6.12）。

分光镜可按下列步骤进行调整。

1. 取下三棱镜，将望远镜筒对准窗外远处的物体，移动目镜（从镜筒中拉出或推进），直到从目镜中看清楚很远处的物体。再转动望远镜筒，使它的轴线和平行光管的轴线重合。用小灯泡照亮狭缝，调整缝宽。开始调整时，狭缝可适当取宽一些。将狭缝转到竖直位置并移

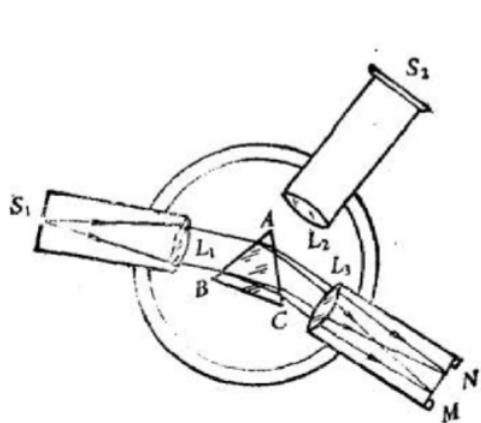


图 6.11

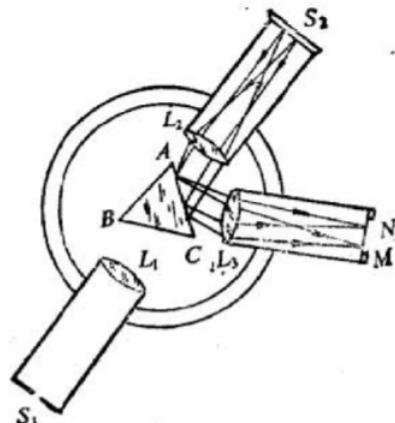


图 6.12

动狭缝（从镜筒中拉出或推进），直到目镜中呈现出竖直狭缝的清晰的像为止。

2. 把三棱镜装在镜台上，使两个光学工作面向着镜管，毛面向着旋钮架。固定好三棱镜，并盖遮光罩。
3. 用小灯泡照亮狭缝，转动望远镜筒的位置，使目镜中出现一条水平的光带横贯目镜视野的中部，由于三棱镜大都工作在最小偏向角附近，因此，能够观察到光谱时，望远镜筒的轴线与三棱镜出射工作面的夹角和平行光管的轴线与三棱镜入射工作面的夹角大致相等。
4. 目镜中观察到的光谱，实质上是成在望远镜物镜焦平面上的狭缝的不同色光的实像的集合。因此，调整步骤 1 和 3 可以合并进行。转动望远镜筒的位置，在目镜中见到水平的彩色光带，再略微移动目镜和移动狭缝的位置，使彩色光带的边缘清晰即可。
5. 用小灯泡照亮标尺，转动标尺管，并稍稍移动标尺的位置，使在目镜中同时看到光谱和标尺的清晰的像。标尺的像应和彩色光带平行，而且边缘重合，分光镜的三个镜管架的接口上均有六个调整紧固螺钉，可用来调整目镜视野中光谱和标尺像的上下位置。
6. 调整狭缝的宽度使狭缝变窄，分光镜的分辨本领提高。这时，线状光谱变窄，带状光谱的各个颜色能够分辨开。但是进入平行光管的光能减少，光谱的亮度减小，也可稍加调整平行光管中狭缝和凸透镜的距离，当距离增大时（目镜的位置也要随之调整，像才能清晰），带状光谱的宽度（或光谱线的长度）减小。

观察连续光谱，光源用白炽灯（应选用色温较高的灯泡，如汽车灯泡）。灯直接照亮狭缝，在目镜中就可以看到连续光谱。稍稍转动望远镜筒的位置，可以看到自左向右的红、橙、黄、绿、蓝、靛、紫等各种颜色的连续光谱。

观察明线光谱，用光谱管作光源，把光谱管接到感应圈（或静电高压电源）的高压输出端，在高电压作用下，光谱管内低压气体电离产生辉光放电，把分光镜的狭缝对准光谱管的狭窄管道部分（图 6.13）。实验要在暗室中进行，在目镜中可以看到暗淡的背景上出现几条不连续的明线光谱，光谱管每组有六只，分别充以氢、氮、氧、二氧化碳、氖和氩等气体。演示时，应使学生重点看氢原子光谱。一般能看到可见光范围内氢的强度较强的三条谱线， H_{α} ：0.6562 微米； H_{β} ：0.4861 微米； H_{γ} ：0.4340 微米。实验时应尽量缩短通电时间，以延长光谱管的寿命。

观察钠的吸收光谱的装置如图 6.14，光源用汽车灯泡。把溶有 NaI 的酒精倒在狭长的金属槽中（也可用固体热膨胀演示器的酒精槽）。狭长槽的走向和光源到狭缝的连线方向一致，使光

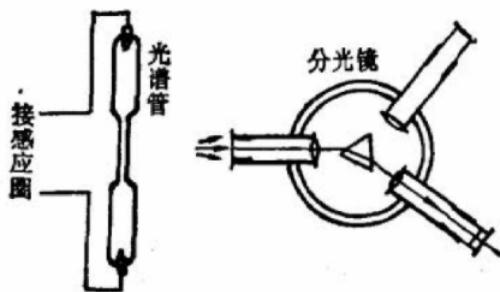


图 6.13

源发出的光在酒精火焰中穿过尽可能长的距离后再进入狭缝。实验时，先接通电源，从分光镜中观察到清晰的连续光谱。然后点燃酒精，在连续光谱的背景上就出现两条暗线 ($\lambda = 0.5890$ 微米和 0.5896 微米)。如果分光镜的分辨本领较低，这两条暗线重合在一起。用硬纸板遮挡灯泡发出的光，在目镜中可见到钠原子光谱的明线；移去纸板后，又能看到光谱的暗线，光谱暗线的位置和亮线的位置是一致的。



图 6.14

实验时，分光镜的狭缝应尽量调得窄些，只有在目镜中看到钠明线光谱的亮线很细窄时，才能见到吸收光谱的暗线。有的分光镜狭缝质量较差，见到吸收光谱的竖直暗线时，还能见到一些水平的横线，这是由于狭缝的边缘不平整造成的。为了使光源的色温高一些，连续光谱的背景亮一些，汽车灯泡的供电电压应达到或稍高于它的额定电压。此外，狭缝宽度也要取窄一些。这些是实验成功的关键，此外，还可以在长酒精槽上加拱形的薄铁板盖，使得酒精火焰及其中的钠离子蒸汽局限在长拱形的盖内。这样可防止因空气流动造成火焰的摆动，光穿过拱形通道时，也会被钠离子吸收得更多些，酒精燃烧完后，金属槽中会出现一些没有完全挥发的 NaI 结晶，它还可以继续溶于酒精中，重复使用。

二、学生实验

(一) 利用双缝干涉测定光的波长

实验仪器有 J2515 型双缝干涉仪、光具座和学生电源等。

实验装置涉及许多元件，为了使学生能够在短时间内把它们正确地组装调整好，需要指导学生做好实验预习，组织学生识别各个元件，注意组装顺序和要领，正确地进行调整，实验完毕要整理仪器，把各个元放回盒中。

仪器的组装和调整要特别注意：

1. 双缝装在遮光管的一端，单缝管套在双缝座外面，都要注意定位槽孔，以保证单缝和双缝大致平行。

2. 把遮光管架在半圆形支架上，使它的轴线与光具座导轨平行，单缝与导轨垂直，直丝灯泡灯丝的中心在遮光管的轴线上，灯丝与单缝平行，并且靠近单缝。这时，眼睛从遮光管的另一端看，可以看到通过单缝和双缝后进入遮光管内的光最强。
3. 再装上测量头，在分划板上可以看到双缝干涉的条纹。若条纹不清晰，还可左右稍稍拨动拨杆，使单缝和双缝平行。转动测量头的方位，使分划板的刻线与干涉条纹的亮线平行。一般说来，照在分划板上的光很弱的主要原因是灯丝与单缝和双缝、测量头或观察筒不共轴；干涉条纹不清晰的主要原因是单缝和双缝不平行。
4. 双缝、测量头和接长管安装到遮光管上，都要使各部件的定位面紧密吻合，否则 ℓ 值变大，影响实验结果。

由于干涉亮条纹有一定的宽度，而且边缘明暗界线模糊，测量时要使干涉亮条纹嵌在分划板的两条竖直刻线中央，亮条纹较宽时可用图 6.15 甲的方式，亮条纹较窄时可用图 6.15 乙的方式。

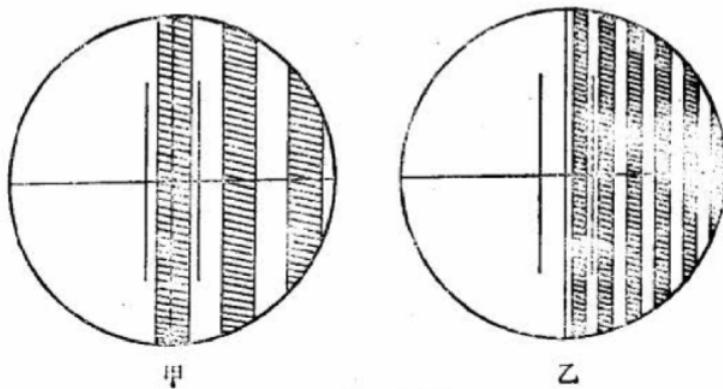


图 6.15

实验参考数据见下表。

	仪器参数		游标尺读数		$\Delta X = \frac{X_7 - X_1}{6}$	$\lambda = \frac{d}{\ell} \cdot \Delta X$
	$d(\text{mm})$	$\ell(\text{mm})$	$X_1 (\text{mm})$	$X_7 (\text{mm})$		
绿光	0.25	600	3.52	11.56	1.340	5.58×10^{-4}
		700	2.44	11.78	1.557	5.56×10^{-4}
	0.20	600	0.64	10.50	1.643	5.48×10^{-4}
		700	1.28	12.86	1.930	5.51×10^{-4}
红光	0.25	600	0.70	10.04	1.557	6.49×10^{-4}
		700	1.10	12.20	1.850	6.61×10^{-4}
	0.20	600	1.64	13.36	1.953	6.51×10^{-4}
		700	0.52	14.42	2.283	6.52×10^{-4}

实验测量误差主要来自分划板的刻线对不准干涉条纹的中心，如按图 6.15 甲或乙所示的方法进行量，干涉条纹中心的读数偏差不超过 0.1 毫米，根据误差理论，波长 λ 的最大相对误差为：

$$\rho_\lambda = \left| \frac{\Delta d}{d} \right| + \left| \frac{\Delta \ell}{\ell} \right| + \frac{|\Delta X_n| + |\Delta X_1|}{|X_n - X_1|}$$

其中前两项双缝间的距离 d 和双缝到屏的距离 ℓ 的相对误差由仪器的技术指标可知,

$$\left| \frac{\Delta d}{d} \right| + \left| \frac{\Delta \ell}{\ell} \right| \leq 2\%$$

选择 $n \geq 7$ 时, $X_n - X_1$ 可达 10 毫米, 第三项相对误差 $\frac{|\Delta X_n| + |\Delta X_1|}{|X_n - X_1|}$ 也不超过 2%, 所以 $\rho_\lambda \leq 4\%$. 滤色片的峰值波长 $\lambda_{\text{红}} = 0.6600$ 微米, $\lambda_{\text{绿}} = 0.5350$ 微米, 按偏差 ± 0.0100 微米计算, 因此测量值的范围是:

- 红光: $0.6600 \pm (0.6600 \times 4\% + 0.0100)$ 微米
即: 0.6240—0.6960 微米,
- 绿光: $0.5350 \pm (0.5350 \times 4\% + 0.0100)$ 微米
即: 0.5040—0.5660 微米.

(二) 观察光的衍射现象

实验可用直长灯丝的白炽灯作线状光源, 使灯丝处于竖直位置, 灯的背景应暗淡, 避免产生强烈的反射光. 也可用日光灯, 在日光灯管外面包上黑纸, 留出一条直缝透出白光作线状光源. 点光源可用手电筒的小灯泡, 背景也应暗淡, 避免产生强烈的反射光.

利用卡尺做宽度可调的单缝, 要注意:

1. 卡尺的测脚必须擦拭干净.
2. 由卡尺测脚形成的单缝要和光源的线状灯丝平行, 并且要和线光源对正, 否则, 由于测脚内侧平面对光的反射, 还可以看到线状光源的虚像, 出现干涉条纹. 如果出现上述现象, 应转动卡尺的测脚平面, 直到现象消失为止. 这时, 眼睛通过测脚的狭缝观察到的只是直接由线光源发出的光.

小孔可让学生自制, 在不透光的黑纸 (如包胶卷、相纸等感光材料的黑纸) 或在牙膏皮上用针扎成不同直径的圆孔. 要注意圆孔的边缘应光滑平整.

比较缝宽和孔径大小对光的衍射的影响时, 应注意保持光源以及光源和单缝 (或圆孔) 的距离不变. 一般来说, 光源的线度越小, 光源距单缝或小孔越远, 能够观察到比较明显的衍射现象的单缝的宽度 (或圆孔的直径) 可以越大.

三、课外实验活动

补充课外实验活动

(一) 观察两块平玻璃板形成的空气膜的干涉条纹 (课本练习一第 5 题)

取两块平玻璃板 (如显微镜的载物玻璃片), 把它们的表面擦拭干净, 对齐并用力压紧, 在白光照射下可以看到彩色干涉条纹. 做好实验的关键:

1. 压紧平玻璃板. 只有当平玻璃板间的空气膜的厚度足够小时, 才会出现干涉条纹.
2. 光的入射角要小, 如果入射角太大, 从薄膜的上下表面反射的光的强度相差较大, 不容易观察到干涉条纹.

(二) 观察单缝衍射 (课本 256 页练习二第 3 题)

用远处的日光灯做线光源, 应选用直径较小的日光灯管 (如 8W 或 6W 日光灯). 对于较粗的灯管, 如果观察不到衍射条纹, 可以增加日光灯和观察者之间的距离, 或者在日光灯管外面包黑纸, 使光源只留一条直缝透光.

(三) 自制单缝或双缝，观察衍射现象或干涉现象

取一块平板玻璃，将它的一面用烟熏黑（也可用墨涂黑）。用一片刮脸刀片靠着直尺在涂黑面上划，便可划出一道很细的透明直缝，即制成了单缝。如果用两片刮脸刀片紧紧地靠在一起，靠着直尺在涂黑面上划，可划出两道紧紧靠在一起的透明双缝。

用制得的单缝和双缝紧靠着眼睛，看线状光源（如远处的日光灯管），使单缝和双缝和光源平行，可以看到单缝衍射条纹和双缝干涉条纹。

(四) 用手持分光镜观察汞光谱和太阳的吸收光谱

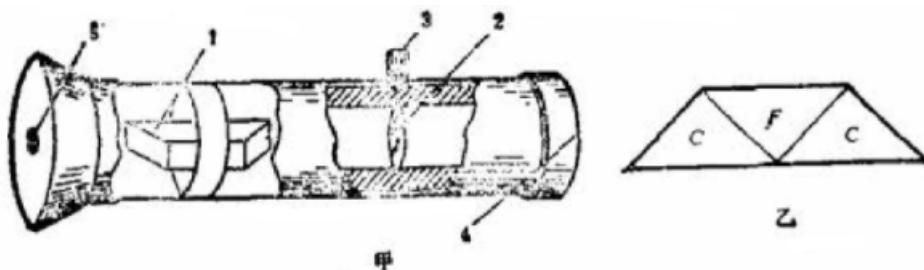


图 6.16

手持分光镜如图 6.16 甲所示，由于镜筒内装有分光元件 1，可使复色光分解成单色光。分光元件（图 6.16 乙）是用两块冕牌玻璃制成的三棱镜 C 和一块火石玻璃制成的三棱镜 F 胶合而成。分光元件的作用是使光谱中部的黄光保持原来的传播方向不偏转，筒内还有一个凸透镜 2，它和筒外的紧固螺钉 3 相连。凸透镜的位置可以前后移动。光从狭缝 4 射入，眼睛靠近观察孔 5 进行观察。进入狭缝的光通过凸透镜后进入分光元件，经过色散，再通过观察孔进入眼睛，在视网膜上会聚得到不同色的狭缝像，形成光谱。观察时，狭缝的宽度要调整适当，并要转动狭缝，使它和分光元件的边棱平行。从观察孔中可以看到矩形的彩色光带，再稍稍移动凸透镜的位置，可使看到的彩色光带边缘更加清晰。

将手持分光镜对着日光灯管，可从观察孔中看到淡淡的连续光谱背景上有几条亮线。这些亮线是日光灯中低压汞蒸汽产生的。和书中插页上的彩图相比较，可知是汞光谱中强度较大的三条亮线，波长分别为 0.5791 微米，0.5461 微米和 0.4358 微米。

将手持分光镜直接对着太阳，如果狭缝的宽度调得比较窄，则可以看到在连续光谱的背景上有一些暗线，这是太阳的吸收光谱。（在太阳的吸收光谱上还可以看到一些横的暗线，这是由于分光镜的窄缝不平整造成的）

第四节 习题解答

一、练习一

- 绿光的干涉条纹与红光的干涉条纹有什么不同？用白光做干涉实验，为什么会有得到彩色的干涉条纹？在彩色条纹中最靠近中央亮纹的是哪种颜色的条纹？为什么？

解答：干涉条纹的相邻亮纹间的距离

$$\Delta x = \frac{\ell}{d} \cdot \lambda$$

在 d 和 ℓ 相同的情况下， $\Delta x \propto \lambda$ ，由于绿光的波长较红光短，因此，绿光的干涉条纹间的

距离 Δx 较窄，红光的较宽.

用白光做实验，由于白光包含着各种不同波长的单色光，不同色光的干涉条纹间的距离 Δx 不同，因此，除了中央亮纹是白色的，两边出现彩色条纹. 第一条亮纹的位置

$$x = \pm \frac{\ell}{d} \cdot \lambda$$

由于紫光的波长最短，紫光的亮纹最靠近中央亮纹.

2. 在杨氏双缝实验中，保持双缝到屏的距离不变，调节双缝间的距离，当距离增大时，干涉条纹间的距离将变____；当距离减小时，干涉条纹间的距离将变____.

解答：变窄；变宽.

3. 色光从真空进入媒质后，频率不变，但传播速度减小了，波长将如何变化？

解答：波的公式 $v = \lambda\nu$ ，频率不变时，波长与波速成正比. 色光由真空进入媒质后，传播速度减小，波长变短.

4. 用单色光做双缝干涉实验，测得双缝间的距离为 0.4 毫米，双缝到屏的距离为 1 米，干涉条纹的间距为 1.5 毫米，求所用光波的波长.

解答：光波的波长

$$\lambda = \frac{d}{\ell} \cdot \Delta x = \frac{0.4 \times 10^{-3} \times 1.5 \times 10^{-3}}{1} = 6.0 \times 10^{-7} \text{ m}$$

5. 取两块平玻璃板，用手指把它们紧紧捏在一起，会从玻璃板面上看到许多彩色花纹；改变手指用力的大小，花纹的颜色和形状也随着改变，做这个实验，并解释看到的现象.

解答：把两块平玻璃板紧紧地捏在一起，两板之间形成空气隙. 光照到玻璃板上，在空气隙的上表面和下表面反射的光形成两列相干波，发生干涉. 亮条纹和暗条纹的位置决定于空气隙各处的厚度和光的波长. 白光照射时，产生彩色的干涉条纹. 改变手指用力的大小，空气隙各处的厚度发生变化，干涉条纹的颜色和形状也就随着改变.

二、练习二

1. 为什么隔着墙能听到墙那边人的说话声，但看不见人？

解答：只有障碍物的尺寸跟波长相差不多时，才能明显地观察到衍射现象. 一般人发出的声音的波长约为几米到十分之几米，可见光的波长约十分之几微米. 把墙做为障碍物，声波能够发生比较明显的衍射现象，隔着墙能够听到墙那边人的说话声；光波不能发生明显的衍射现象，隔着墙不能见到墙那边的人.

2. 光的衍射现象跟光的直线传播是否矛盾？在什么情况下光沿直线传播？

解答：光的衍射现象是光的波动性的表现. 衍射现象是否明显，取决于障碍物或孔的尺寸大小，当障碍物或孔的尺寸与光波长相比相差不多时，光会偏离直线传播绕到障碍物的影子里，形成明暗相间的衍射条纹，当障碍物或孔的尺寸远远大于光的波长时，光的衍射现象很不明显，可以近似认为光是沿着直线传播的.

可见光的波长仅十分之几微米，比一般障碍物或孔的尺寸小得多，在这种情况下，可以忽略衍射现象，认为光沿着直线传播.

3. 把两支铅笔并在一起，中间留一条狭缝，放在眼前，进过这条狭缝去看远处的日光灯，使狭缝的方向跟灯管平行，就看到许多条平行的彩色条纹，做这个实验，并解释看到的现象.

解答：两支铅笔并在一起，形成一条狭缝。远处的日光灯相当于线光源，它发出的光通过与它平行的狭缝发生衍射，再经过眼球的会聚作用，在视网膜上形成明暗相间的衍射条纹。由于日光灯发出白光，它产生的衍射条纹中央是白色的亮纹，两侧是平行的彩色条纹。

三、习题

1. 你用哪些现象或实验来说明：
 - (a) 光是一种波；
 - (b) 光波的波长非常短；
 - (c) 绿光的波长比红光的短。

解答：

- (a) 利用光的干涉现象和衍射现象说明光是一种波。
 - (b) 利用单缝衍射和小孔衍射实验。只有当孔或缝宽很小时，才有比较明显的衍射现象，说明光波的波长非常短。
 - (c) 在保持缝距和缝与屏间的距离不变的条件下，分别用绿光和红光做双缝干涉实验，在屏上观察到绿光的干涉条纹的宽度比红光的窄，说明绿光的波长比红光的短。
2. 水对真空中波长为 0.656 微米的红光的折射率为 $n_1 = 1.33$ ，而对真空中波长为 0.405 微米的紫光的折射率为 $n_2 = 1.343$ 。求这两种波在水中的传播速度和波长。

解答：红光在水中的传播速度

$$v_1 = \frac{c}{n_1} = \frac{3.00 \times 10^8}{1.33} = 2.26 \times 10^8 \text{ m/s}$$

紫光在水中的传播速度

$$v_2 = \frac{c}{n_2} = \frac{3.00 \times 10^8}{1.343} = 2.23 \times 10^8 \text{ m/s}$$

又由于

$$n = \frac{c}{v} = \frac{\lambda_0 \nu}{\lambda \nu} = \frac{\lambda_0}{\lambda}$$

所以： $\lambda = \lambda_0/n$ ，由此得：

- 红光在水中的波长

$$\lambda_1 = \frac{\lambda_{01}}{n_1} = \frac{0.656}{1.33} = 0.493 \mu\text{m}$$

- 紫光在水中的波长

$$\lambda_2 = \frac{\lambda_{02}}{n_2} = \frac{0.405}{1.343} = 0.302 \mu\text{m}$$

3. 波长为 5890 埃的黄光照在一双缝上，在距双缝为 1 米的观察屏上，测得 20 个亮条纹的间距共宽 2.4 厘米，求双缝间的距离。

解答：相邻两条亮纹间的距离

$$\Delta x = \frac{a}{n-1} = \frac{2.4 \times 10^{-2}}{20-1} = 1.3 \times 10^{-3} \text{ m}$$

双缝间的距离

$$d = \frac{\ell \lambda}{\Delta x} = \frac{(n-1)\ell \lambda}{a} = \frac{19 \times 1 \times 5890 \times 10^{-10}}{2.4 \times 10^{-2}} = 4.7 \times 10^{-4} \text{ m}$$

4. 用波长为 0.75 微米的红光做双缝干涉实验，双缝间的距离是 0.05 毫米，缝到屏的距离是 1 米，相邻两条暗纹间的距离是多大？

解答：相邻两条暗纹间的距离

$$\Delta x = \frac{\ell}{d} \cdot \lambda = \frac{1 \times 0.75 \times 10^{-6}}{0.05 \times 10^{-3}} = 1.5 \times 10^{-2} \text{ m}$$

第五节 参考资料

一、光源的相干性

相干波源的必要条件是频率相同，振动方向相同，而且相差恒定，由于机械振动的频率很低，在观察时间内，通常的机械波是连续不断的，因而只要两个波源的频率相同，在观察时间内的任何时刻，这两个波源的相差总是恒定的。对于光波则不然，可见光频率的数量级都在 10^{14} 赫左右，光源的辐射是由原子的外部电子跃迁产生的，一批原子的跃迁发生的时间大约只有 10^{-8} 秒左右。而一个光源，由多个彼此独立的发光原子组成，在观察时间内，光源发出的光是由多批原子跃迁产生的，因而光辐射的初位相是没有什么关联的。因此，不同的光源，或者同一光源的不同部分的光辐射，一般不可能做到相差恒定。也就是说，一般光源的相干性是很差的，在通常的条件下很难观察到光的干涉现象。为了观察到稳定的干涉现象，必须在观察时间内，使到达观察点的两列光波的相差总是恒定的，如果使两列光波都来自于同一批原子的辐射，经过不同的光程到达观察点后，便可产生干涉现象。尽管这些原子的发光是无规则地迅速地改变着的，但是任何位相的改变总是同时发生在这两列波中，因而它们到达观察点时总保持着恒定不变的相差。获得相干光源的方法有两类，一类叫分波阵面法；一类叫分振幅法。杨氏双缝干涉实验是采用分波阵面法获取相干光源的单缝 S 起着线光源的作用，双缝 S_1 和 S_2 处在 S 的同一波阵面上。从同一波阵面上分出的两列光波 S_1 和 S_2 可以看做位相总是相同的两个相干光源。薄膜干涉是采用分振幅法获得相干光源的。一束光投射到薄膜表面上，入射光的能量之中一部分在薄膜的前表面直接反射形成一列反射光波，其余的能量进入薄膜后，再由薄膜的后表面反射出一部分能量，形成另一列反射光波，当入射角较小时，分别从前、后表面反射的两列光波的能量是相近的，它们都来自于同一入射光束，因此也是相干的两列光波。经多次反射得到的光波的能量相差很多，迭加时产生的干涉条纹很不明显，一般都不予考虑。

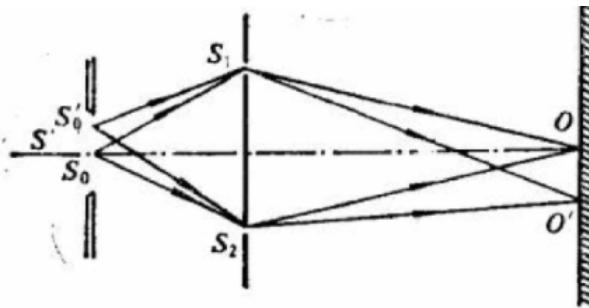


图 6.17

双缝干涉实验中光源单缝 S 的宽度必须适当。光源单缝 S 越宽，通过单缝 S 和双缝 S_1 、 S_2 的光能量越多，因此，屏上干涉条纹的亮度越大，这是显然的。光源单缝 S 的宽度还直接影响

响了屏上干涉条纹的清晰程度。如图 6.17, 光源单缝 S 中的每一点都可以视为子波波源发出子波。由中点 S_0 发出的光波经 S_1 和 S_2 成为两列光波, 到达屏上的 O 点的光程差恒为 0, O 点是由 S_0 发出的光形成的中央亮纹, 其余的亮纹分布在 O 点两侧。对于单缝中的共余点, 如 S'_0 点, 所发出的光波, 经过 S_1 和 S_2 形成两列光波到达屏上光程差为 0 的中央亮纹的位置显然不在 O 点, 而在 O 点以下的某一位置 O' 点。这样, 由单缝 S 中各个点发出的光经过双缝 S_1 和 S_2 到达光屏上形成的干涉亮条纹的位置彼此是错开的, 屏上观察到的干涉条纹是这些干涉条纹的叠加的结果 (由单缝 S 中各点发出的光波是不相干的)。如果单缝 S 比较宽, 单缝上各点形成的干涉亮条纹的位置错开较多, 甚至于有的点的亮条纹的位置落到另一些点的暗条纹处, 屏上的条纹的明暗对比度大大降低, 干涉条纹变得模糊不清, 甚至看不到明暗相间的干涉条纹。

使用一般的光源做薄膜干涉实验, 只有当薄膜的厚度很小时, 才能观察到干涉条纹。这是由于同一批原子辐射发光的时间是很短的, 如果薄膜的厚度较大时, 由后表面反射的光波到达观察点的时间要比前表面反射的光波推迟一段较长的时间。这样, 到达观察点的两列光波只在很短时间内才是由同一批原子辐射的, 才是相干的, 能够出现干涉条纹; 在其余的时间内这两列波不是来自同一批原子辐射的, 是不相干的, 也就不能出现干涉条纹了。

可见, 光源单缝 S 的宽度和薄膜的厚度都与光源的相干性有关, 激光光源的相干性远比一般光源好, 因而利用激光光源做双缝干涉实验, 可以不用光源单缝, 直接将激光光束投射到双缝 S_1 和 S_2 上, 就能在屏上观察到清晰的干涉条纹。用激光光源做薄膜干涉实验, 薄膜较厚时也可以看到干涉条纹 (用一块平玻璃板的两个表面反射的两列光波叠加起来就能看到干涉条纹)。

二、等倾干涉和等厚干涉

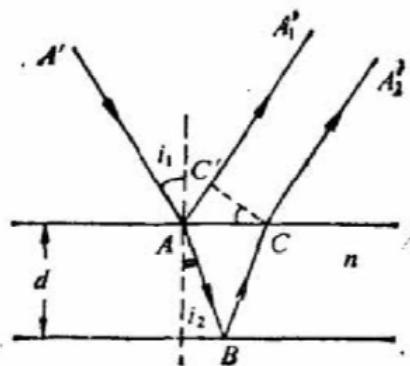


图 6.18

薄膜干涉形成亮纹或暗纹的条件决定于由薄膜的前后表面反射的两列光波的光程差, 设薄膜的折射率为 n , 厚度为 d , 放在空气中。如图 6.18, 光束 $A'A$ 射到膜上, 从薄膜的前表面直接反射的光束 AA'_1 , 从薄膜的后表面反射的光束 CA'_2 。这两束光的光程差为:

$$\delta = n \cdot (AB + BC) - \left(AC' + \frac{\lambda}{2} \right)$$

其中:

$$AB = BC = \frac{d}{\cos i_2}$$

$$AC' = 2d \cdot \tan i_2 \cdot \sin i_1 = 2nd \frac{\sin^2 i_2}{\cos i_2}$$

$\lambda/2$ 是光在光疏媒质中到达光密媒质的界面上反射的半波损失. 代入上式得

$$\delta = 2nd \cdot \cos i_2 - \frac{\lambda}{2} = 2d\sqrt{n^2 - \sin^2 i_1} - \frac{\lambda}{2}$$

可见, 光程差与光束入射角度 i_1 有关, 也与薄膜的厚度 d 有关.

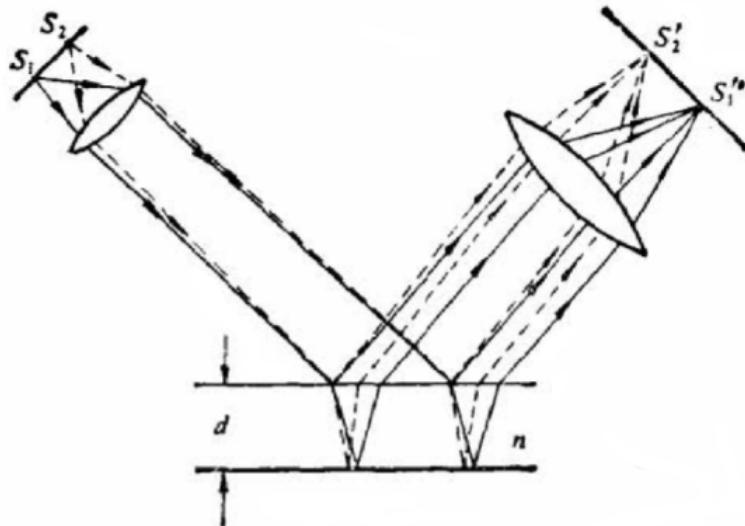


图 6.19

如果薄膜的两个表面彼此平行, 即薄膜的厚度 d 均匀不变, 光程差仅取决于入射光束的入射角 i_1 , 在图 6.19 中, 扩展光源上的点 S_1 、 S_2 发出的光照射到薄膜上, 所有入射角相同的光线经薄膜反射后的光线彼此平行, 经凸透镜会聚在其焦平面上一点. 设入射角为 i_1 的光分别从薄膜的前后表面反射的两列光波的光程差 $\delta = 2d\sqrt{n^2 - \sin^2 i_1} - \frac{\lambda}{2}$ 都相同, 若 $\delta = (2k + 1) \cdot \frac{\lambda}{2}$, 在凸透镜的焦平面上的会聚点的光强是最小值, 形成暗条纹; 若 $\delta = k \cdot \lambda$, 在凸透镜的焦平面上的会聚点的光强是最大值, 形成亮条纹, 前后表面平行的薄膜形成的干涉条纹是由相同的人射角的光形成的, 叫做等倾干涉. 如果不用凸透镜观察等倾干涉条纹, 这些干涉条纹成在无限远处, 通常说, 等倾干涉条纹定域在无限远处.

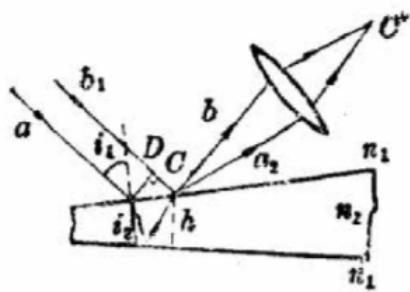


图 6.20

把点光源放在凸透镜的焦点处, 得到的平行光都以相同的入射角照到厚度不等的薄膜上, 如果薄膜的厚度很小, 两个表面间的夹角也很小 (近于平行), 从薄膜的前后表面反射的两列光波的光程差仍可按公式

$$\delta = 2d \cdot \sqrt{n^2 - \sin^2 i_1} - \frac{\lambda}{2}$$

计算. 由于入射角 i_1 都相同, 光程差仅取决于薄膜的厚度. 在图 6.20 中, 光照在楔形薄膜上, 在楔形薄膜的 C 点处, 两列反射光波的光程差 δ 是波长 λ 的整数倍, 则 C 点有最大光强, 与 C 点等厚的各点也都有最大光强, 形成一条亮线; 同样的道理, 薄膜上的暗线对应着光程差是半波长的奇数倍的等厚点, 在薄膜上形成的干涉条纹决定于薄膜厚度相同点的轨迹, 这样的干涉现象叫做等厚干涉. 通常观察等厚干涉条纹时, 光的入射角都不大, 看到的干涉条纹定域在薄膜上. 楔形薄膜的干涉条纹是平行于楔形的棱的直线, 牛顿环是由焦距很大的球面平凸透镜与平面玻璃组成, 在球面和平面之间构成空气薄层, 牛顿环的干涉条纹是等厚干涉条纹, 它是一组明暗相间的同心环.

三、干涉和衍射的区别和联系

光的干涉现象是两列或几列光波在空间相遇时, 光强在某些区域加强, 在另一些区域削弱, 形成稳定的光强有规律分布的现象. 光的衍射现象是光绕过障碍物偏离直线传播进入几何阴影, 并在屏幕上出现光强不均匀分布的现象. 光的干涉和衍射现象在屏幕上都得明暗相间的条纹, 这些条纹的产生, 本质上都是波的相干叠加的结果. 但是光的干涉强调了两个或多个光束的叠加, 对于参加叠加的几列光波都是以直线传播的模型描写的. 这样的干涉可以认为是纯干涉的问题. 光的衍射现象强调了光偏离开直线传播的现象, 光在传播过程中遇到障碍物时, 一部分子波被遮蔽, 其余部分的子波叠加的结果形成了衍射条纹. 尽管二者都是相干波的叠加, 但是前者是有限的几列光波的叠加, 而后者是无数多个子波的叠加.

在实际现象中, 一般既有干涉的问题, 又有衍射的问题. 例如, 双缝干涉实验中, 我们没有考虑双缝中每一个单缝的宽度, 即认为每条单缝都是很窄的 (缝宽远小于光波的波长). 由于衍射作用, 每条单缝单独在光屏上形成的光强度几乎都是相同的. 由这样的两列光波相叠加形成的干涉亮条纹差不多都有相同的强度, 实际上, 由于每条单缝都有一定的宽度, 它们各自独立存在时, 在光屏上都要产生光强度不均匀分布的衍射条纹. 光屏上实际得到的条纹是这两组相干的衍射条纹叠加的结果, 它是被单缝衍射调制的双缝干涉条纹, 如果用激光光源做双缝干涉实验, 在光屏上可以看到级数比较高的干涉条纹, 这时, 可以见到光屏上的干涉亮条纹的强度不是均匀的, 随着单缝衍射条纹的光强分布而变化.

四、衍射光栅产生的光谱

课文提到光栅的缝数增多, 产生的明条纹就变窄, 其原因可分析如下:

光栅是由许多宽度和间距都相等的狭缝组成的, 光通过光栅中的每一条狭缝后, 都产生衍射, 在某些方向上出现明条纹. 各条单缝衍射产生的明条纹比较宽, 互相重叠, 由于从各缝射来的光波的互相干涉, 结果又在叠加区域产生许多明暗条纹.

光栅衍射 (图 6.21) 产生明条纹的条件是

$$(a + b) \sin \phi = k\lambda, \quad k = 0, \pm 1, \pm 2, \dots \quad (6.1)$$

式中 a 为缝宽, b 为两缝间的距离, $a + b$ 叫做光栅常数. 当光栅常数 $a + b$ 和波长 λ 给定时, 表示从各狭缝发出的光线的某些方向, 在这些方向上光波相互加强, 产生明条纹.

当 ϕ 满足条件 $n(a + b) \sin \phi = (2k + 1)\frac{\lambda}{2}$, $k = 0, \pm 1, \pm 2, \dots$ 时, 将出现暗条纹, 式中 n 为任意整数, 其原因是: 例如当 $n = 1$ 时, 不论单缝衍射的情况如何, 相邻两狭缝所发出的光波的光程差是半波长的奇数倍, 应干涉相消, 屏上跟这些方向对应的地方总是暗条纹, 当 n 为

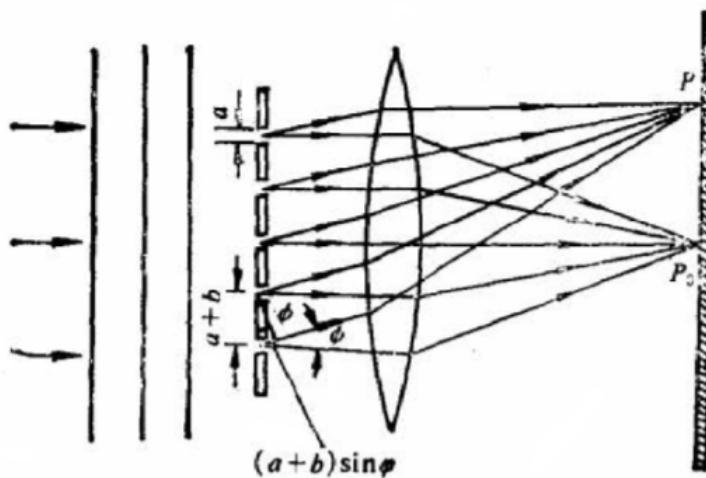


图 6.21

其他任一整数时，第一条狭缝与第 $n+1$ 条狭缝所发出的光波的光程差是半波长的奇数倍，干涉相消；第二条狭缝与第 $n+2$ 条狭缝所发出的光波也干涉相消……也是暗条纹，光栅的狭缝数越多，可以取的 n 值就越多，形成暗条纹的范围就越广。

考虑每一条狭缝，当 ϕ 满足条件 $a \sin \phi = k\lambda$, $k = 0, \pm 1, \pm 2, \dots$ 时，每一条狭缝所发出的光波都各自干涉相消，形成暗条纹，就谈不到各缝的光波的干涉了。

从以上分析可见，在光栅衍射中，只有当 ϕ 满足 (6.1) 式时才能形成明条纹，而形成暗条纹的机会要多得多，因此在明条纹之间充满大量的暗条纹，实际上形成了一片黑暗的背景，这就是光栅的缝数越多，产生的条纹就越窄的原因。

从 (6.1) 式还可以看出，光栅常数一定时，衍射角 ϕ 的大小与入射光的波长 λ 有关，因此白光通过光栅后各种色光将产生各自分开的条纹，而形成光谱。中央条纹也叫零级条纹仍是白色，在中央条纹的两侧，对称地排列着第一级、第二级……光谱，如图 6.22 所示。

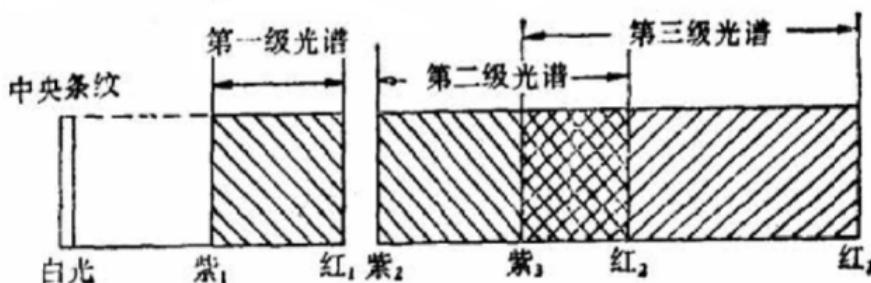


图 6.22

光栅的衍射光谱和棱镜的色散光谱是不同的，其主要区别是：

- 由于角度 ϕ 实际上是很小的， $\sin \phi$ 或 ϕ 跟波长成正比，因此光栅光谱中各谱线到零级条纹的距离跟波长正比，这种光谱叫做匀排光谱。在棱镜光谱中，光谱线间的距离决定于棱镜的顶角和折射率，不具有匀排的性质，光谱的短波部分展开的较大，长波部分展开的较小。
- 在光栅光谱中，波长越短的光，对应的中角越小，而在棱镜光谱中，对应的偏向角越大。光栅光谱中各谱线的排列是由紫到红，与棱镜光谱的由红到紫正好相反。

五、偏振光与自然光

既然光是横波，而且具有偏振性，为什么通常光源发出的光不能直接显示偏振现象呢？我们知道，两束光在相位差很大（达 10^8 个波长）时，还能观察到干涉现象。这一事实说明在 10^8 次振动的初始时刻和终了时刻所发的光还是相干的，它们的振动方向在这一时间间隔内还能够保持在同一平面内。可见在相当长的一段时间（ 10^{-8} 秒已足够长）内，个别原子的辐射不仅能够保持初位相不变，而且还能保持偏振的性质不变。因此可以认为每一个辐射原子每次所发射的是一列平面偏振的电磁波，然而在通常光源中，那些排列得毫无规律数量又非常众多的辐射原子或分子，它们在同一时间内发出的光各自具有不同的初位相和不同的振动面；而且每个原子在每次发光之后，在某一时刻又将以新的初位相和新的振动面重新发光，所以通常光源发出的许多列光波，它们的振动面可以分布在一切可能的方位。平均来看，任何方向都有相同的振动能量，也就是说，电矢量对于光的传播方向是对称而又均匀分布的。这种由通常光源所辐射的光波，其电矢量在垂直于光波的传播方向上既有时间分布的均匀性，又有空间分布的均匀性。也就是说，在各个取向上电矢量的时间平均值是相等的，这种光就是自然光，图6.23甲就是沿z轴传播的自然光，

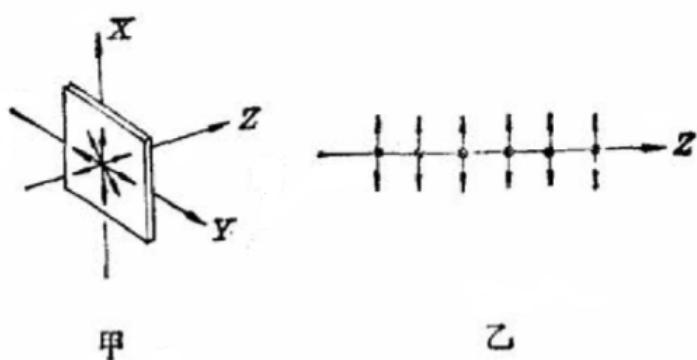


图 6.23

在自然光中，任何取向的电矢量 E 都可分解为相互垂直的两个方向（例如 x 方向和 y 方向）上的分量，所有取向的电矢量在这两个方向上的分量的时间平均值必相等，也就是说，自然光可以用强度相等、振动方向互相垂直的两个平面偏振光来表示，如图6.23乙所示，但是必须注意，由于自然光中各电矢量之间无固定的位相关系，因而其中任何两个取向不同的电矢量不能合成为一个单独的矢量。

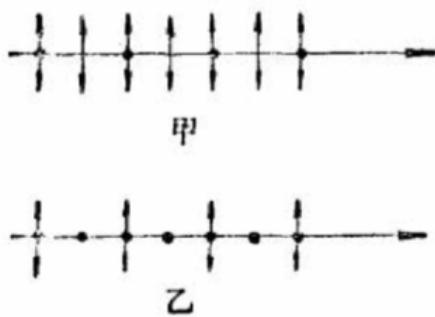


图 6.24

此外，有些光的电矢量在某一确定的方向上最强，而在和它成正交的方向上最弱，这种光称

为部分偏振光. 部分偏振光可用图 6.24 所示的图形来表示, 其中甲表示在图面内电矢量较强的那种部分偏振光, 乙表示在垂直于图面方向上电矢量较强的那种部分偏振光, 设 I_{\max} 为某一部分的偏振光沿某一方向上所具有的能量最大值, I_{\min} 为在其垂直方向上具有的能量最小值, 则通常用

$$P = \frac{I_{\max} - I_{\min}}{I_{\max} + I_{\min}}$$

来量度偏振的程度, 并称 P 为偏振度. 如果 $I_{\min} = 0$, 那么 $P = 1$, 振动完全限制在一个平面(振动面)内, 这就是平面偏振光, $I_{\min} \neq 0$ 时, $P < 1$, 这就是部分偏振光.

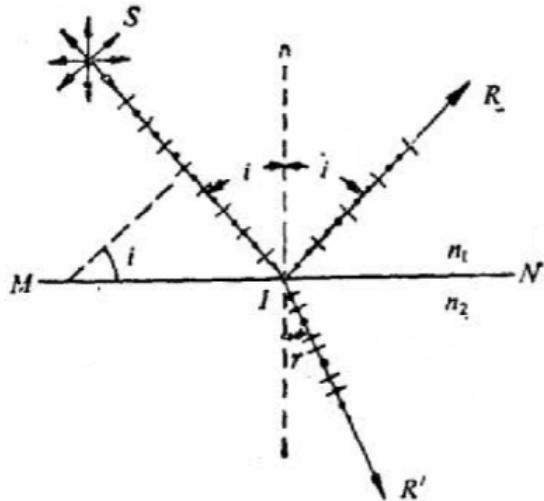


图 6.25

实验证明, 自然光在两种媒质的分界面上反射和折射时, 反射光和折射光就能成为部分偏振光或完全偏振光. 如图 6.25 所示, MN 是两种媒质的分界面, SI 为一束自然光的入射线, IR 和 IR' 分别是反射线和折射线, 由于自然光中在跟光的传播方向垂直的一切方向上光的振幅都可以看作是相等的, 没有任何一个方向较其他方向占优势, 我们如果把光的振动分解为两个分振动, 一个跟入射面(即纸面)垂直, 叫垂直振动, 用点子表示, 一个跟入射面平行, 叫平行振动, 用短线表示, 那么在自然光中, 表示平行振动的短线和表示垂直振动的点子是均匀配置的. 但是, 在反射光束中, 垂直振动多于平行振动, 在折射光束中, 平行振动多于垂直振动.

布儒斯特在 1812 年指出, 反射光偏振化的程度取决于入射角 i . 当 i 为某一定值 i_0 时, 即满足 $\tan i_0 = n_{21}$ 时, 反射光成为完全偏振光, 振动面和入射面垂直, 这时平行振动完全不反射, 只发生折射(折射光不是完全偏振光), 式中的 n_{21} 是折射媒质对于入射媒质的相对折射率, i_0 叫做起偏角.

根据折射定律 $\sin i_0 = \frac{n_2}{n_1} \sin r = n_{21} \sin r$. 由 $\tan i_0 = n_{21}$ 可得:

$$\sin i_0 = \tan i_0 \sin r$$

即

$$\sin r = \frac{\sin i_0}{\tan i_0} = \cos i_0$$

所以

$$i_0 + r = \frac{\pi}{2}$$

这说明, 当入射角为起偏角时, 反射光线和入射光线互相垂直.

第七章 光的粒子性

第一节 教学要求	221
第二节 教学建议	222
一、光电效应——光的粒子性	222
(一)光电效应	222
(二)光子和光子说	223
(三)光电效应的应用	223
二、波粒二象性	224
(一)光的波粒二象性	224
(二)物质波	224
第三节 实验指导	224
一、演示实验	224
(一)光电效应现象	224
(二)研究光电效应的规律	225
(三)光电效应的应用	226
第四节 习题解答	226
一、练习一	226
二、习题	227
第五节 参考资料	228
一、早期量子论和光电效应	228
二、外光电效应和内光电效应	229

第一节 教学要求

本章讲述光电效应、爱因斯坦的光子说的主要内容，还简要讲述光的波粒二象性以及物质波的概念。通过本章的教学，使学生进一步了解光的本性，初步接触一些量子观念，对微观粒子的特性有一个初步印象，本章知识也为学习原子物理作了准备。

本章知识大都只需定性了解。但由于微观粒子的性质不同于宏观物体，学生往往习惯于用观察宏观现象时形成的观念去认识微观粒子，因而在理解微观粒子的性质时会遇到困难，教学中要特别注意使学生了解微观现象与宏观现象有着本质上的差别，以逐步适应这一章内容的教学。

本章可分为两个单元。第一、二、三节为第一单元，讲述光电效应 - 光的粒子性；第四、五节为第二单元，讲述微观粒子的波粒二象性。

光电效应现象及其规律，是认识光的粒子性的基础，最好是做好紫外线照射锌板时发生光电效应的演示，以加深学生对现象的认识，但是，教材中介绍的研究光电效应规律的实验，比较

复杂，不易做准确。因此教学中只要讲清实验现象，使学生能在了解实验现象的基础上，理解光电效应的规律就可以了，不要求一定在课堂上做演示。

光的波动说不能解释光电效应的规律，为了理解这一点要用到下述知识：按照波动理论，光的能量由光的强度决定，而光的强度又由光的振幅决定，与频率无关。这一知识学生过去没有学过，可联系声波的知识（振幅越大声音越强）给学生讲一讲，以帮助学生理解光电效应与光的波动说之间的矛盾。爱因斯坦对光电效应的解释是在普朗克量子说的基础上作出的，教学中也应对普朗克量子说的主要内容作些简单的介绍。

爱因斯坦的光子说及其对光电效应的解释，是本章的重点内容，讲述爱因斯坦对光电效应的解释时，要抓住入射光与金属中自由电子间能量接受关系的线索，着重说明光电效应的极限频率，要让学生理解逸出功的概念，知道不同金属的逸出功不同。

光的波粒二象性是光的两大对立学说的历史性的综合。学生在分别认识了光的波动性和粒子性后，要把这两种认识统一起来仍然是有困难的。教学时要提醒学生，不能用机械模型来想象波粒二象性，爱因斯坦的光子能量公式和动量公式与表征波的特征的频率和波长相联系，表明他的光子说与牛顿的微粒说有着本质的区别，对于公式 $p = E/c$ ，学生知道就行，不要求进行讲解。

物质波一节教材，是选讲内容，对学生不作要求，但这节内容扩大了对波粒二象性的认识，说明了一切微观粒子都具有波粒二象性。如果时间允许，讲一讲还是必要的和有益的。

本章的教学要求是：

1. 了解光电效应的基本规律和光电效应的应用。
2. 知道光子说的基本内容及其对光电效应的解释，掌握爱因斯坦光电效应方程。
3. 了解光的波粒二象性的初步概念。

第二节 教学建议

一、光电效应——光的粒子性

(一) 光电效应

光电效应是学生认识光的粒子性的实验基础，所以最好是做好课本图 7.1 的演示。实验时，要注意验电器金箔闭合或张开的现象都不能简单地说明光电效应，需要对实验现象进行分析后才能得出结论。用紫外线照射带负电的锌板，验电器的金箔立即闭合的实验，需用紫外线照射带正电的锌板，验电器的金箔不闭合的实验做对比，表明紫外光照射锌板只能打出负电荷；用紫外线照射不带电的锌板时，验电器的金箔张开，应补充检验锌板上带正电荷而不是负电荷，这样，通过对这些实验现象的深入分析，才能归纳出现象的共同本质，即光照射下物体中能够发射电子，进而引出光电效应的概念。

光电效应规律的实验，有条件的学校也可以做，没有条件的学校可按照课本 274 页的装置简图描述实验的过程及现象，使学生理解怎样通过实验得出光电效应的实验规律。

有的学生不理解课本图 7.2 电路中的光电流的回路，光电子到达极板 A 后，经电流表再通过电路（包括滑动变阻器和电池组两个支路）到达极板 K 形成回路，这是由于极板 K 发射光电子后带正电荷，光电子到达极板 A 后，极板 A 带负电荷。只有光电子从极板 A 经光电管以外的电路到达极板 K 形成回路，才能持续不断地维持光电流。

光电效应的教学中，应强调它的主要规律，即极限频率的存在以及光电子的最大初动能只与入射光的频率有关而与入射光的强度无关，这是波动说无法解释的实验事实，也是引入光子说的主要依据。把这两点讲清楚了，也就为讲述本单元的核心内容——爱因斯坦的光子说打下了基础。

(二) 光子和光子说

学生接受光子说的主要困难在于建立光量子的观念。教学中要强调光子说与波动说不同，光子说认为光的能量不是连续分布的，而是一份一份地集中在一个个粒子——光子上。光的能量既跟光子的数目有关，也跟每个光子的能量有关。每个光子的能量 $E = h\nu$ ，与光波的频率成正比。

在介绍爱因斯坦的光子说时，可联系普朗克的量子假设，说明理论的继承和发展的关系，学生没有学过黑体辐射的规律，这里也不必补充这方面的知识，只需简要介绍普朗克提出电磁辐射的发射和吸收时，能量是不连续的、一份一份进行的。爱因斯坦则进一步推广了普朗克的假设，认为自由电子与电磁辐射相互作用时，吸收的能量也是不连续的、一份一份的。光就是由这种不连续的粒子组成的。

帮助学生按照光子说建立光的粒子模型：光的能量分布在一个个光子上，光束可以看作光子流，每个光子都以光速运动着。光和其他物质相互作用，就是光和其他物质交换一份一份的光子的能量。

在运用光电效应解释光电效应的规律时，要抓住爱因斯坦的光电效应方程 $\frac{1}{2}mv_m^2 = h\nu - W$ ，着重说明极限频率的存在和入射光子的频率决定光子的最大初动能等实验规律。要让学生了解光电效应方程中各个量所代表的物理意义，知道这个方程是对单个光子而言的，并能从方程上看出，如果入射光的频率很低， $h\nu$ 小于金属的逸出功 W ，自由电子就不会从金属中逸出。只有当光子的能量达到或超过金属的逸出功时，才能产生光电效应。

逸出功是个很重要的概念，应使学生掌握它的意义和计算式。学生还应该知道，不同金属的逸出功不同，它们的极限频率也不同。

教学时要注意能量的单位焦耳与电子伏的换算关系。

在运用光电方程解释光电效应规律时，还可就粒子说和波动说对应的能量、光的强度的认识进行对比，以加深对光子说的认识。

(三) 光电效应的应用

这一节教材讲述的重点是光电管的作用。因此，教学时要使学生清楚地了解光电管的工作原理。

在讲述具体应用时，应使学生了解光控继电器和有声电影是怎样利用光电管来工作的。对光控继电器，应了解电路的基本组成，应清楚是光电管将光信号变为电信号达到自动控制电路的作用的。在有声电影的放映中，是利用光电管把声音信号还原为声音的。对于装置中的其他问题，教学中不必详细介绍。

二、波粒二象性

(一) 光的波粒二象性

光的波粒二象性是十七世纪以来关于光的本性的微粒说和波动说两大对立学说的历史的综合，是对光的本性进行长期研究得出的结论。通过光的波粒二象性的教学，一方面使学生对光的本性有比较完整的了解；另一方面使学生对于描述微观粒子的量子概念有初步的了解。

光的波粒二象性的观点，用经典物理观念是无法理解的。因此只有破除旧观念的影响，才能接受近代物理对微观粒子运动规律的认识，才能理解波粒二象性，但是限于学生的知识基础，在高中物理课中不可能以丰富的事实和有很强说服力的论证去破除学生头脑中已有的经典物理观念，所以对于学生对波粒二象性的了解不能要求过高。教学中只要学生对课文中所述内容大体知道即可，不宜再补充内容。

(二) 物质波

把光的波粒二象性推广到一切微观粒子上，就是德布罗意提出的物质波的假说。电子衍射现象证明了电子的波动性，说明了物质波的理论是正确的。在教学中，要注意介绍电子衍射实验，使学生了解物质波理论的实验验证，并说明物质波也是一种几率波。同时，还要使学生了解，虽然一切微观粒子具有波粒二象性，但光子跟其他微观粒子还是有区别的，光子是永远以光速运动的、没有静止质量的粒子。

这一节的教学，对扩展学生的知识面是有益的。通过对物质波假说的提出和检验过程的了解，还可以对学生进行科学的方法论和辩证唯物主义认识论的教育。

第三节 实验指导

一、演示实验

(一) 光电效应现象

被紫外线照射的锌板能发射出电子，紫外线光源可用弧光灯（摘掉聚光透镜）、紫外线灯或用荧光高压汞灯（除去涂有荧光粉的外壳，从灯芯直接射出的光中含有紫外线）。实验室中高压汞灯的接线电路如图 7.1 所示。图中的镇流器可用万用变压器的初级 0—110 伏的线圈代替。

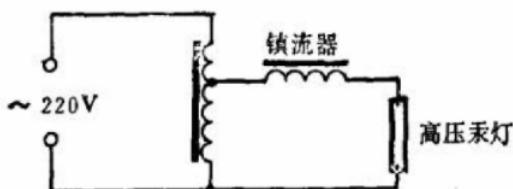


图 7.1

图 7.2 中的锌板必须用细砂纸打磨，除去表面的氧化层，把表面打磨干净的锌板用细尼龙线直接捆绑在指针验电器的小球旁边。

用毛皮摩擦过的橡胶棒使锌板带上负电，验电器的指针偏开一定的角度。用紫外线照射锌板时，见到验电器的指针逐渐回到 0 处，表明在紫外线照射下锌板所带的负电荷消失了。

若使锌板带上正电，用紫外线照射时，验电器的指针的偏角几乎保持不变，表明锌板上的正电荷并不因紫外线的照射而消失。

只用紫外线照射不带电的锌板时，验电器的指针不偏转。若在锌板附近放置带正电的玻璃棒，可以看到验电器的指针发生偏转。进一步用带正电的玻璃棒或带负电的橡胶棒靠近锌板，可以用实验检验出锌板上带的是正电荷。若用带负电的橡胶棒靠近锌板时，验电器的指针也不偏转。

这是由于，锌板在紫外线作用下能够放出电子，锌板带正电。释放出的电子聚集在锌板周围形成空间电荷区，使锌板和周围空间电荷区之间形成反向电压，阻碍光电子的发射，只有用带正电的物体吸附了锌板周围的负电荷，才能使锌板发射出较多的光电子，验电器的指针才能发生偏转。

实验时要注意防止紫外线伤害眼睛。



图 7.2

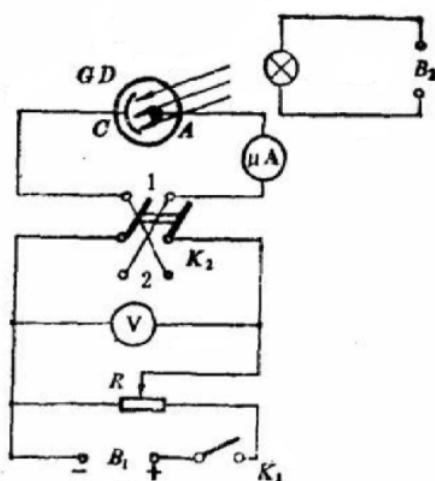


图 7.3

(二) 研究光电效应的规律

研究光电效应的规律的实验线路如图 7.3，其中光电管的型号是 GD-28，它的阴极材料为铯锑 (CsSb)，极限波长约为 0.6500 微米，灵敏度大于 10 微安/流明，工作电压 24 伏，光源可用低压白炽灯，如双缝干涉仪 (J2515 型) 的光源，电表可用一般的演示用电表，如 J0401 型等。

(1) 光电效应的产生

按图连好电路，光电管两极加正向电压约 15 伏左右，这时电路中没有电流。接通照明电路，当光照到光电管的光入射窗口时，电路中有了光电流。用黑纸板遮挡入射窗口，电流随即消失；移开挡板，又有光电流。

(2) 光电管的饱和光电流随入射光强度增大而增大

接通电路，微安表中有光电流通过。移动滑动变阻器的滑动触头，使加在光电管 A, C 两极间的正向电压增大，光电流也增大，直到光电流达到饱和值，照到光电管阴极的光强度要适当（入射光不能过强，否则会影响光电管的使用寿命），要使光电流的饱和值小于 80 微安，正向工作电压小于 24 伏。提高入射光的强度（如把光源移近光电管或提高白炽灯的供电电压），光电流的值继续变大，饱和光电流的值也随之增大。

(3) 将光电管的两极改接反向电压

电压较小时，电路中仍有光电流，逐渐提高反向电压的值，光电流逐渐减小，直到电压达到某一值时，光电流变为 0。再提高入射光的强度，光电流仍为零，在光入射窗口换上不同颜色的滤色片，可以见到，对于紫光阻止光电流的反向电压最大。

(4) 光电管阴极的极限波长，极限效率

电路接正向电压，在入射窗口放蓝色（或绿色）滤色片时，电路中有光电流，若加红色滤色片时，即使是增大入射光的强度，电路中也没有光电流。

（三）光电效应的应用

光电管、电流放大器（光电效应演示器中的附件）、演示用继电器（J2413 型）和小灯泡按图 7.4 连好电路。用灯泡代表计数器，接继电器的常闭触点，继电路的原线圈和电流放大器相连，光照在光电管上，电路中有电流，继电器动作，常闭触点打开，电灯不亮，代表计数器不工作，用手挡住射入光电管的光流，继电器原线圈中的电流消失，常闭触点接通，灯泡亮代表计数器工作一次。若没有电流放大器，可按图 7.5 电路自制。

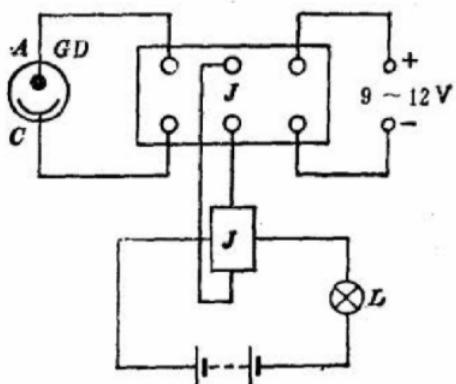


图 7.4

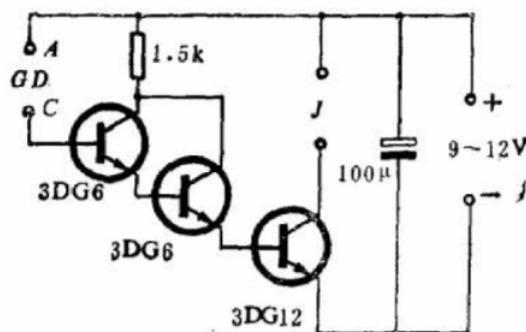


图 7.5

第四节 习题解答

一、练习一

- 使锌板产生光电效应的光子的最长波长是 0.37 微米，这种光子的能量是多少电子伏？锌的逸出功是多少？

解答：光子的能量

$$E = h\nu = \frac{hc}{\lambda} = \frac{6.63 \times 10^{-34} \times 3.0 \times 10^8}{0.37 \times 10^{-6} \times 1.6 \times 10^{-19}} = 3.4 \text{ eV}$$

锌的逸出功 $W = 3.4 \text{ eV}$

- 可见光的光子，能量范围是多大（用电子伏表示）？为什么用可见光不能使锌板产生光电效应？

解答：可见光的频率范围是 3.9×10^{14} — 7.7×10^{14} 赫。光子的能量

$$E_1 = h\nu_1 = \frac{6.63 \times 10^{-34} \times 3.9 \times 10^{14}}{1.60 \times 10^{-19}} = 1.6 \text{ eV}$$

$$E_2 = h\nu_2 = \frac{6.63 \times 10^{-34} \times 7.7 \times 10^{14}}{1.60 \times 10^{-19}} = 3.2 \text{ eV}$$

可见光光子的能量范围为 1.6—3.2 电子伏，都小于锌的逸出功，因此不能使锌板产生光电效应。

3. 铷的逸出功是 3.0×10^{-19} 焦，用波长是 0.59 微米的黄光照射铯，电子从铯表面飞出的最大初动能是多大？

解答：最大初动能

$$\begin{aligned}\frac{1}{2}mv_m^2 &= \frac{hc}{\lambda} - W \\ &= \frac{6.63 \times 10^{-34} \times 3.0 \times 10^8}{0.59 \times 10^{-6}} - 3.0 \times 10^{-19} \\ &= 3.7 \times 10^{-20} \text{ J}\end{aligned}$$

4. 钨的逸出功是 4.52 电子伏，使钨产生光电效应的最长波长是多少？这种波长是可见光吗？

解答：因为 $W = \frac{hc}{\lambda}$ ，所以极限波长是 $\lambda_0 = \frac{hc}{W}$ ，

$$\lambda_0 = \frac{6.63 \times 10^{-34} \times 3.0 \times 10^8}{4.52 \times 1.6 \times 10^{-19}} \text{ m} = 0.275 \mu\text{m}$$

这种波长的光不是可见光。

二、习题

1. 功率为 1 瓦的手电筒灯泡大约有 5% 的电能转化为可见光，试估算它 1 秒钟能释放出多少个可见光的光子。

解答：可见光的频率按 6×10^{14} 赫来估算，光子的能量 $E = h\nu$ ，一秒钟释放的光子数

$$n = \frac{Pt \times 5\%}{h\nu} = \frac{1 \times 1 \times 5\%}{6.63 \times 10^{-34} \times 6 \times 10^{14}} = 10^{17} (\text{个})$$

2. 使铜产生光电效应的最低频率是 1.1×10^{15} 赫，用频率为 1.5×10^{15} 赫的紫外线照射铜时，它发射出的光电子的最大速度是多大？

解答：

$$\frac{1}{2}mv_m^2 = h\nu - h\nu_0$$

最大速度

$$\begin{aligned}v_m &= \sqrt{\frac{2h(\nu - \nu_0)}{m}} \\ &= \sqrt{\frac{2 \times 6.63 \times 10^{-34} \times (1.5 - 1.1) \times 10^{15}}{9.1 \times 10^{-31}}} \\ &= 7.6 \times 10^5 \text{ m/s}\end{aligned}$$

3. 一个质量为 4×10^{-4} 克的尘埃颗粒，以 1 cm/s 的速度在空气中下落，计算它的德布罗意波长。

解答：德布罗意波长

$$\lambda = \frac{h}{mv} = \frac{6.63 \times 10^{-34}}{4 \times 10^{-7} \times 1 \times 10^{-2}} = 1.7 \times 10^{-25} \text{ m}$$

4. 计算速度为 10^3 m/s 的中子的德布罗意波长。这个波长跟 γ 射线的波长相比如何？中子的质量是 $1.67 \times 10^{-27} \text{ kg}$ 。

解答：中子的德布罗意波长

$$\lambda = \frac{h}{mv} = \frac{6.63 \times 10^{-34}}{1.67 \times 10^{-27} \times 10^3} = 4 \times 10^{-10} \text{ m}$$

在 γ 射线的波长范围内.

第五节 参考资料

一、早期量子论和光电效应

量子的概念是德国物理学家普朗克研究黑体辐射时最先提出的.

在任何温度下都能全部吸收落在它上面的一切电磁辐射的物体叫做绝对黑体，简称黑体，一个不透射任何辐射的器壁围住带有一个小孔的空腔，可以作为绝对黑体的模型，实验表明，黑体辐射的能谱（即光谱的能量分布曲线）与组成黑体的材料无关，只与黑体的温度有关，图 7.6 就是黑体辐射的能谱图. 图中的 E_λ 表示波长在 λ 和 $\lambda + d\lambda$ 之间时辐射的能量密度. 可以看出，能量的分布有极其显著的最大值，这个最大值对应的波长 λ_m 随着黑体温度的升高而向短波方向移动.

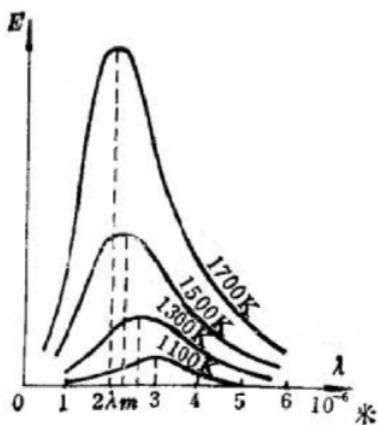


图 7.6

许多物理学家试图从经典理论推导黑体辐射的能量分布公式，结果都失败了. 例如，英国物理学家瑞利和琼斯根据经典物理的电磁场理论和统计物理推得黑体辐射的能量分布公式，只在波长相当长的部分才与实验曲线相符合，而随着波长的减小，辐射通量趋于无限大，而被称为黑体辐射的“紫外灾难”.

1900 年，德国物理学家普朗克假设黑体的腔壁由无数带电谐振子组成，并且假设这些谐振子的能量不能连续变化，只能取一些分立值： $0, e, 2e, \dots$ 这些分立值的能量是 $e = h\nu$ 的整数倍. 从而推出黑体辐射的普朗克公式，这个公式与实验曲线吻合得很好.

普朗克能量量子假设是对经典物理学的一个巨大的突破，1918 年，普朗克由于对量子理论的贡献而荣获诺贝尔物理学奖.

爱因斯坦认识到普朗克量子概念带来的将是物理学理论基础的根本变革，无论是经典力学或经典电动力学都不能应用到微观世界所发生的过程，他进一步发展了能量子的假设，提出了光量子假说，普朗克理论认为空腔中的辐射场（电磁场）本质上仍然是连续的，只是当它们与腔壁谐振子发生能量交换时才显示出量子性，爱因斯坦进一步认为光不仅是一份一份地被辐射或

吸收，而且它的能量也是聚集成一份一份地在空间传播，光是由光子组成的粒子流，每个光子的能量 $e = h\nu$.

光子学说最初是以假说的形式提出的，这是由于当时的实验事实还不充分，光电效应实验也是非常原始的，是在真空条件不很好的条件下做出的。爱因斯坦根据光子假说得出了光电效应方程成功地解释了光电效应的实验规律，但在当时并未被物理学家广泛承认，他们不赞成光子说，因为它违背了光的波动理论。

美国物理学家密立根花了十年的时间做光电效应实验，开始他不相信光量子理论，想用实验否定它，结果恰恰相反，他于 1915 年宣布：证实了爱因斯坦的光电效应方程，并根据该方程用实验测得普朗克常数 h 与普朗克公式提出的 h 值完全一致，其他的一些实验，如光压，康普顿效应等都证明了光量子假设的正确性，1922 年爱因斯坦由于理论物理方面的贡献和光电效应方程而荣获诺贝尔物理奖，密立根也于 1923 年由于他在基本电荷和光电效应方面的研究工作荣获诺贝尔物理奖。

二、外光电效应和内光电效应

通常所说的光电效应是指外光电效应，即物体在光的照射下光电子飞到物体外部的现象。另一种光电效应叫内光电效应，它是物体在光的照射下，内部原子中的一部分束缚电子变为自由电子，这些电子仍留在物体内部，使物体的导电性加强。

利用内光电效应可以制成光敏电阻、光敏二极管和光电池。光敏电阻的阻值随着光照射的强弱而明显地变化。光敏二极管的顶部有玻璃透镜，通常给光敏二极管接上反向电压，如果没有光照，反向电阻很大，电路里几乎没有电流；有光照时，反向电流就随着增大，经三极管放大后，可推动继电器工作。

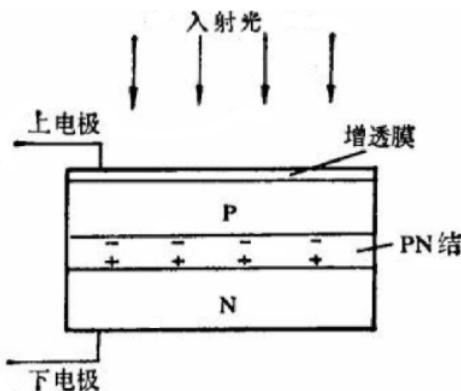


图 7.7

光电池的种类很多，早期有氧化铜光电池和硒光电池，现在又有硅、砷化镓、硫化镉、磷化铟等光电池。硅光电池是由单晶硅材料制成的、具有大面积 PN 结的半导体器件。图 7.7 是硅光电池的结构示意图，PN 结两边各有一个引出电极，就是光电池的正负极。光电池的表面镀有一层增透膜，其作用是为了减小光的反射，提高光电池的转换效率。光电池之所以能把光能转变为能是应用了半导体 PN 结的光生伏打效应。在光照射下，物体内部原子的束缚电子变成自由电子，形成自由电子和空穴。在结电场作用下，自由电子向 N 区运动，空穴向 P 区运动，于是在 N 区和 P 区分别聚集了电子和空穴，产生了电动势。接有负载时，负载中就有电流通过。现在的硅光电池在强光照射下，能产生 0.5 伏的电动势，每平方厘米工作面积输出 24 毫安的光电

流，相当输出功率 10—12 毫瓦。使用时，可把大量的硅光电池串联和并联起来，以得到所需要的电压和电流。光电池作为电源应用在人造地球卫星和灯塔、无人气象站等处。

第八章 原子结构

第一节 教学要求	231
第二节 教学建议	232
一、原子核式结构的建立	232
(一)电子的发现	232
(二)汤姆生的原子模型	232
(三)原子的核式结构的发现	233
(四)原子核的电荷和大小	233
二、玻尔理论	234
(一)玻尔理论产生的背景	234
(二)玻尔原子理论的主要内容	234
(三)氢原子的大小和能级	235
(四)玻尔原子理论对氢光谱的解释	235
(五)玻尔原子理论的困难和量子力学	235
三、原子的受激辐射——激光	236
第三节 习题解答	236
一、练习一	236
二、练习二	238
三、练习三	238
第四节 参考资料	239
一、 α 粒子散射理论	239
二、卢瑟福	242
三、玻尔	243

第一节 教学要求

人类对原子结构的认识，是逐步深入的。本章教材是沿着历史的线索来讲述人类对原子结构的认识的。由于玻尔的原子理论在一定程度上反映了原子的真实情况，又比较适合于中学生的理解能力和知识水平，因此，把这个内容作为本章教学的重点。但教材也指出了玻尔理论的局限性，粗略地介绍了现代原子理论中关于原子结构的一般图景。

这一章的教学可分为三个单元。第一节和第二节为第一单元，讲述原子的核式结构学说的建立。第三节至第五节为第二单元，讲述玻尔理论。第六节为第三单元，讲述原子的受激辐射和激光。

电子的发现，对人类认识原子的结构有重大的意义，它使人们改变了认为原子是组成物质的最小微粒的看法，使人们认识了原子是有结构的。教学中应注意讲清汤姆生研究电子的方法。

汤姆生的原子模型是早期的原子模型，讲述这个模型的目的，一方面是为使学生了解人类对原子的认识经历了曲折的发展过程，更重要的是为了使学生认识 α 粒子散射实验的重要意义。

α 粒子散射实验证明了原子核的存在，通过教学，应当使学生了解 α 粒子散射实验及其结果，了解卢瑟福是怎样分析 α 粒子的散射现象，否定了汤姆生原子模型，提出原子具有核式结构的学说的。

在分析卢瑟福原子模型的困难时，要用到电学、力学和光谱发射的知识。其中有的知识，学生没有学过。例如，根据经典电磁理论，绕核做加速运动的电子要向外辐射电磁波，电磁波的频率等于电子绕核运行的频率，学生就没有学过。对这些内容，不宜过高要求，让学生知道卢瑟福原子模型与原子的稳定性和光谱的发射性质有矛盾就可以了。

玻尔的原子理论，突破了经典理论的束缚，引入了量子化假设，把原子理论推进了一步。应该要求学生了解玻尔理论的主要内容，对原子的轨道和能量的量子化获得具体的认识。明确知道玻尔对原子结构提出的新概念，体会玻尔的创新精神。对于玻尔理论遇到的困难和建立在量子力学基础上的现代原子理论，只作很初步的一般性介绍。

本章中关于激光产生的原理和应用是选讲教材，向学生介绍这个内容可以扩大学生的眼界，引起学习的兴趣，只要教学时间允许，就应该讲一讲这节教材。

本章的教学要求是：

1. 了解 α 粒子的散射实验和卢瑟福的原子核式结构。
2. 了解玻尔原子理论的主要内容及其对氢光谱规律的解释。

第二节 教学建议

一、原子核式结构的建立

本单元讲述了电子的发现以及早期的原子结构模型——汤姆生模型，重点介绍了 α 粒子散射实验。该实验否定了汤姆生模型，奠定了原子核式结构模型的基础。

本单元的教学，应注意以下几点：

(一) 电子的发现

这部分内容的教学，要突出电子的发现对人类认识原子结构的重要作用。

电子是怎样发现的。汤姆生用测定粒子荷质比的方法发现了电子，这个问题在本书第一章中曾经提到过。这里要注意联系已学过的知识，讲清汤姆生方法的原理。汤姆生发现阴极射线在电场和磁场中的偏转现象，根据偏转方向，确认阴极射线是带负电的粒子流，当他测定阴极射线粒子的荷质比时发现，不同物质做成的阴极发出的射线都有相同的荷质比，这表明它们都能发射相同的带电粒子。因此这种带电粒子是构成物质的共同成份，这就是电子。

电子的发现对人类认识原子结构的重要性。电子的发现，使人们认识到原子不是组成物质的最小微粒，原子本身也具有结构。由于原子含有带负电的电子，从物质的电中性出发，推想到原子中还有带正电的部分。这就提出了进一步探索原子的结构、建立原子模型的问题。

(二) 汤姆生的原子模型

汤姆生原子模型是在发现电子的基础上建立起来的，通过教学要使学生对汤姆生原子模型有一个形象的了解，教学中应该注意，讲述汤姆生模型的目的是为了使学生从原子学说的历史发展上来认识 α 粒子散射实验的重大意义，为进一步理解原子的核式结构作好准备。

(三) 原子的核式结构的发现

α 粒子散射实验以及卢瑟福对实验现象的分析为原子的核式结构模型奠定了基础。教学中可按以下几个层次进行教学：为什么用 α 粒子的散射现象可以研究原子的结构， α 粒子的散射实验是怎么做的，实验结果是什么，分析实验结果得到怎样的原子模型。

原子的结构非常紧密，用一般的方法无法探测它内部的结构，要认识原子的结构，需要用高速粒子对它进行轰击，由于 α 粒子具有足够的能量，可以接近原子的中心，它还可以使荧光物质发光，如果 α 粒子与其他粒子发生相互作用，改变了运动的方向，荧光屏便能够显示出它的方向变化，因此卢瑟福采用 α 粒子散射的方法来研究原子的结构。

α 粒子散射实验的装置，可根据课本上的示意图来讲述，主要由放射源、金箔、荧光屏、显微镜和转动圆盘儿部分组成，每一部分的作用应该让学生明确，实验的做法，课文中写得比较简明，重点应指出荧光屏和显微镜能够围绕金箔在一个圆周上转动，从而可以观察到穿过金箔后偏转角度不同的 α 粒子，要让学生了解，这种观察是十分艰苦细致的工作，所用的时间也是相当长的。

必须让学生明确，实验结果可以把入射的 α 粒子分为三部分，这三部分 α 粒子的大致多少是用“绝大多数”、“少数”和“极少数”这样的数量形容词来描述的，它们穿过金箔后的情况分别是沿原来的方向前进、发生了较大的偏转和大角度偏转。卢瑟福的原子核式结构模型就是在分析了这三部分 α 粒子的情况后建立起来的。

对实验结果的分析应着重说明如下几点：

1. 电子不可能使 α 粒子发生大角度散射。 α 粒子跟电子碰撞过程中，两者动量的变化量相等，由于 α 粒子的质量是电子质量的 7300 倍，在碰撞前后，质量大的 α 粒子速度几乎不变，而质量小的电子速度要发生改变。因此， α 粒子与电子正碰时，不会出现被反弹回来的现象。发生非对心碰撞时， α 粒子也不会有大角度的偏转。可见，电子使 α 粒子在速度的大小和方向上的改变都是十分微小的。
2. 按照汤姆生的原子模型，正电荷在原子内部均匀地分布， α 粒子穿过原子时，由于粒子两侧正电荷对它的斥力有相当大一部分互相抵消，使 α 粒子偏转的力也不会很大。 α 粒子的大角度散射现象，说明了汤姆生模型不符合原子结构的实际情况。
3. 实验中发现极少数 α 粒子发生了大角度偏转，甚至反弹回来，表明这些 α 粒子在原子中的某个地方受到了质量、电量均比它本身大得多的物体的作用。
4. 金箔的厚度大约是 1 微米，金原子的直径大约是 3×10^{-10} 米，绝大多数 α 粒子在穿过金箔时，相当于穿过几千个金原子的厚度，但它们的运动方向却没有发生明显的变化，这个现象表明了 α 粒子在穿过时基本上没有受到力的作用，说明原子中的绝大部分是空的，原子的质量和电量都集中在体积很小的核上。

(四) 原子核的电荷和大小

原子核的电荷这部分内容，要突出测知原子核的电荷的重要意义。应该使学生了解，根据 α 粒子散射实验的数据可以算出靶元素原子核的电荷，从而推知这种原子中的电子数。计算的结果表明，元素原子中的电子数非常接近该元素在周期表中的原子序数。人们由此知道元素周期表是按原子中的电子数来排列的。这就是说，元素的化学性质，归根到底是由原子中的电子数、从而是由原子核中的电荷数来决定的。

关于原子的大小，应该让学生记住一个数量级，即原子核的大小在 10^{-14} 米以下，原子的大小是 10^{-10} 米，所以原子核的半径只相当于原子半径的万分之一，这样，原子核的体积与原子体积的比应为万亿分之一。这里突出了原子核是很小的，原子内部是很空的。

为培养学生看书学习能力，可以通过学生自学课文，教师提出参考讨论题让学生讨论，最后由教师归纳总结出课文的基本内容。也可由学生自己提出讨论问题，归纳课文的主要内容，进行讨论，最后由教师进行小结，象这样的看书自学讨论的方式，可以作为这一章的各节课均可采用的一种教学方法。

二、玻尔理论

这一单元是本章的重点，主要讲好玻尔理论的三点假设，让学生理解能量量子化的概念，这是玻尔理论的核心，教学中，要注意以下几点：

(一) 玻尔理论产生的背景

应该让学生清楚地认识到，卢瑟福的原子核式结构模型虽然能很好地解释 α 粒子散射实验，但跟经典的电磁理论发生了矛盾。这些矛盾说明从宏观现象总结出来的经典电磁理论不适用于微观现象，不解决这个矛盾，原子理论就不能前进，这就是产生玻尔原子理论的历史背景。

卢瑟福的原子核式结构模型与经典电磁理论的矛盾主要有两点：按照经典电磁理论，电子在绕核作加速运动过程中，要向外辐射电磁波（这一点学生没有学过，可由教师告诉他们），因此能量要减少，电子轨道半径也要变小，最终会落到原子核上，因而原子是不稳定的；电子在转动过程中，随着转动半径的缩小，转动频率不断增大，辐射电磁波的频率不断变化，因而大量原子发光的光谱应该是连续光谱。然而事实上，原子是稳定的，原子光谱也不是连续光谱而是线状光谱。

(二) 玻尔原子理论的主要内容

玻尔把量子观念引入到原子理论中去，提出了不能用经典概念解释的三条假设，是一个创举。这三条内容应作为整体来理解。为了便于学生掌握玻尔理论，不妨把这三条叫作能级假设，跃迁假设和轨道假设。

能级假设说明原子只能处于一系列不连续的能量状态中，这些状态叫定态，具有一定的能量，也叫能级。能级假设是针对原子的稳定性提出的，它承认核式模型，但假定原子只能处于一系列不连续的稳定状态中，处于稳定状态的原子中的电子，虽做加速运动但不辐射能量，对于“不连续”的概念，学生是不习惯的。一定要使学生明白，从宏观现象的“连续”的概念过渡到微观世界的“不连续”的概念，是人类对物质世界认识上的一次飞跃。

跃迁假设说明原子从一个定态跃迁到另一个定态时，它辐射或吸收一定频率的光子，光子的能量由这两个定态的能量差决定，它说明了原子发光的机制。这一条假设是针对原子光谱是线状光谱提出的，运用了普朗克的量子理论。辐射光子的能量与发生跃迁的两个轨道有关。

轨道假说明原子的不同能量状态对应于电子的不同运行轨道，由于原子的能量状态是不连续的，因此电子的轨道也是不连续的，即电子不能在任意半径的轨道上运行。轨道量子化假设也是针对原子的核式模型提出的，是对第一条假设的补充。

教学时，指出三条假设的针对性，可便于学生理解玻尔理论。教学时还可以把下一节课文中的图 8.5 氢原子的轨道图提前到这里让学生观看，可以把它画成较大的挂图，据图讲述其轨

道“不连续”的含义，让学生对“不连续”的量子观念有一个形象而具体的了解。

(三) 氢原子的大小和能级

这是玻尔理论对氢原子的应用获得成功的具体内容，通过这部分内容的教学，应让学生对能量量子化有比较具体的了解。在讲解原子的能级时，应该说明为什么能量是负值，懂得负值的含义是原子处于某一定态时的能量比电子距核无限远时原子具有的能量少，并使学生通过计算大致了解不同能级的能量值和相应的电子轨道半径大小，为使学生头脑中形成轨道和能量量子化的具体图景，可在本节课上让学生研究课本图 8.4 和图 8.5。在此基础上来理解什么是基态，什么是激发态，了解原子发光的机制。

(四) 玻尔原子理论对氢光谱的解释

这个问题，可首先从氢光谱巴耳末线系的四条可见谱线出发，简单介绍一下巴耳末经验公式（顺便介绍里德伯恒量），说明氢光谱谱线之间是有内在规律的，然后再进一步使学生了解按照玻尔理论推导出来的谱线公式跟巴耳末经验公式在形式上完全一致，而且由前一个公式计算出来的 $\frac{-E_1}{hc}$ 的数值与巴耳末公式中的里德伯恒量的 R 值相符。这说明了巴耳末公式完全可以由玻尔理论推导出来，玻尔理论可以解释氢光谱的规律。

还应向学生说明，氢光谱的其他线系也可以用玻尔理论来解释，由玻尔理论预言存在的新线系，后来也被人们发现，充分说明了玻尔理论的成功。

教学时还应该让学生了解，氢光谱中的每个线系，都是原子从不同的高能级向某一低能级跃迁时发出的谱线。例如，赖曼系是氢原子的电子从 $n = 2, 3, 4, \dots$ 等能级跃迁到 $n = 1$ 的基态时发出的谱线；巴耳末线系是氢原子的电子从 $n = 3, 4, 5, \dots$ 等能级向 $n = 2$ 能级跃迁时发出的谱线，等等。光谱线上的每一条谱线都是大量处于同一能态的原子的电子向同一低能态跃迁的结果，由于每个原子的电子所处的能态不同，大量原子的跃迁在同一时刻，会发出不同频率的光来，因此光谱线上能够出现各种谱线。

学生对同一线系中各个谱线波长的大小排列顺序与对应的能级跃迁之间的联系往往理解不好，课堂上可以通过具体计算，帮助学生理解。

(五) 玻尔原子理论的困难和量子力学

本节的教学，首先可简要指出玻尔理论遇到的主要困难，说明一下造成这种困难的原因在于理论内部的矛盾，玻尔理论是一种半经典的理论，一方面引入了量子假设，另一方面又应用经典理论计算电子轨道半径和能量。因此，玻尔理论在解释复杂的微观现象时遇到困难，乃是必然的。

关于量子力学和薛定谔方程等内容，学生不可能深入理解，可只做简单的讲述。但须指出，量子力学是彻底的量子理论，是研究微观世界的基本理论工具，它不但能解释玻尔理论所能解释的现象，而且能够解释大量玻尔理论不能解释的现象。玻尔理论中的三点假设，在量子力学中也变成理论上推导出来的直接结果。

教学中可着重说明，建立在量子力学基础上的原子理论与玻尔原子理论的区别：根据量子力学，核外电子的运动服从统计规律，而没有固定的轨道，我们只能知道它们在核外某处出现的几率大小，核外电子的这种运动情况可用“电子云”来形象描述。电子云稠密的地方就是电子出现几率大的地方。

新的原子结构理论虽然更加切合实际，但它仅给出了原子的数学模型，而没有给我们提供比较直观的物理图景，因此，学生想象这个模型有一定的困难，如果有些同学对量子力学比较感兴趣，可以引导他们阅读一些有关这方面内容的通俗书籍。

三、原子的受激辐射——激光

激光是一门重要的现代科学技术，在各个领域中有着广泛的应用，对新的技术革命有重要作用，学生了解了激光的知识，可以开阔眼界，了解现代科学技术的发展，增加学习物理的兴趣。

在教学过程中，可以按照原理和应用两个方面进行讲述。

关于激光的产生原理，首先要让学生明确原子发光的两种情形。一种是自激辐射（自然光），一种是受激辐射（激光），了解这两种辐射的不同机制和发出的光在频率、初相和偏振方向上的不同特点。再进一步讲清亚稳态和粒子数反转的问题，让学生了解，只有把处于基态的原子大量激发到亚稳态，使处于高能级的原子数超过处于低能级的原子数，才能使受激辐射持续进行下去得到激光。

讲述激光的应用要从激光的特点出发。激光的主要特点是亮度高、方向性好、单色性好和相干性好。这些特点，应该联系前面学习的受激辐射来理解，也是激光能得到广泛应用的原因。对于激光的应用，除了课本上讲述的以外，教师还可以向学生介绍一些课外读物让学生自己去阅读，以开阔学生的眼界，了解现代科学技术的发展，在有条件的情况下，也可以组织一个科学班会，让学生向全班介绍他们阅读过的有关课外读物的主要内容，介绍激光的特点和广泛应用。

由于激光器的种类很多，具体的构造都比较复杂，教学时不宜多介绍，以便把学生的注意力集中到理解激光的基本原理和主要应用上。

第三节 习题解答

一、练习一

- α 粒子被原子散射的原因是什么？

解答：在原子的中心有一个很小的核，原子的全部正电荷和几乎全部的质量都集中在原子核里，电子在核外定向运动。 α 粒子穿过原子时，影响 α 粒子运动的主要因素是原子核，是原子核与 α 粒子间的库仑斥力影响 α 粒子的运动。如果 α 粒子离核较远，与原子核之间的库仑斥力很小，它运动方向的改变也很小，当 α 粒子与原子核十分接近时，会受到很大的库仑斥力，要发生大角度的偏转。当 α 粒子与原子核发生正碰时，就会被原子核反弹回来，由于原子核很小，能靠近原子核的 α 粒子很少，所以只有极少数 α 粒子能发生大角度偏转。

- 卢瑟福的原子模型与汤姆生的原子模型，主要区别是什么？

解答：汤姆生原子模型认为原子是一个球体，正电荷在整个球内均匀分布，电子象枣糕里的枣子那样镶嵌在球内。而卢瑟福的原子模型认为在原子中心有一个很小的核，核集中了原子的全部正电荷和几乎全部质量，电子在核外绕核旋转。汤姆生原子模型是“均匀”结构，而卢瑟福原子模型是“核式”结构，这是他们的主要区别。

- α 粒子的质量大约是电子质量的 7300 倍。如果 α 粒子以速度 v 跟电子发生弹性正碰（假定电子原来是静止的），求碰撞后 α 粒子的速度变化了多少，并由此说明，为什么原子中的电子不能使 α 粒子发生明显的偏转。

解答：设 α 粒子质量为 M , 电子质量为 m , 电子原来静止, α 粒子以速度 v_1 向电子运动, 设发生弹性正碰后 α 粒子与电子的速度分别为 v'_1 和 v'_2 .

由于是弹性正碰, 动量和动能都守恒. 并且两球运动在同一直线上, 我们可以用代数式来计算.

根据动量守恒定律

$$Mv_1 = Mv'_1 + mv'_2 \quad (8.1)$$

根据动能守恒

$$\frac{1}{2}Mv_1^2 = \frac{1}{2}M{v'_1}^2 + \frac{1}{2}m{v'_2}^2 \quad (8.2)$$

由 (8.1) 和 (8.2) 消去 v'_2 可得

$$v'_1 = \frac{M-m}{M+m}v_1 \quad (8.3)$$

把 $M = 7300m$ 代入 (8.3), 可得

$$v'_1 = \frac{7300m-m}{7300m+m}v_1 = \frac{7299}{7301}v_1$$

$$\Delta v_1 = v'_1 - v_1 = -\frac{2}{7301}v_1 = -0.0003v_1$$

由此可见, α 粒子的速度变化, 只有初速度的万分之三, 这就说明原子中的电子不能使 α 粒子发生明显偏转.

4. 已知氢原子的半径是 0.53×10^{-10} 米, 电子不致被吸引到核上, 按照卢瑟福的原子模型, 电子绕核做匀速圆周运动的速度和频率各是多大?

解答：氢原子核与电子间的库仑引力就是电子绕核做匀速圆周运动的向心力, 所以

$$k \frac{e^2}{r^2} = m \frac{v^2}{r}$$

$$v = \sqrt{\frac{ke^2}{mr}} = \sqrt{\frac{9.0 \times 10^9 \times (1.6 \times 10^{-19})^2}{9.1 \times 10^{-31} \times 0.53 \times 10^{-10}}} = 2.19 \times 10^6 \text{ m/s}$$

运动频率

$$f = \frac{1}{T} = \frac{v}{2\pi r} = \frac{2.19 \times 10^6}{2 \times 3.14 \times 0.53 \times 10^{-10}} = 6.6 \times 10^{15} \text{ Hz}$$

5. 为什么在计算电子与核之间的引力作用时, 可以不考虑万有引力?

解答：已知电子质量 $m = 9.1 \times 10^{-31} \text{ kg}$, 氢核质量 $M = 1.67 \times 10^{-27} \text{ kg}$, 万有引力恒量 $G = 6.67 \times 10^{-11} \text{ N} \cdot \text{m}^2/\text{kg}^2$.

电子与核之间的库仑引力

$$F = k \frac{e^2}{r^2} = 9 \times 10^9 \times \frac{(1.6 \times 10^{-19})^2}{(0.53 \times 10^{-10})^2} = 8.2 \times 10^{-8} \text{ N}$$

电子与核之间万有引力

$$F_{\text{引}} = G \frac{Mm}{r^2} = 6.67 \times 10^{-11} \times \frac{1.67 \times 10^{-27} \times 9.1 \times 10^{-31}}{(0.53 \times 10^{-10})^2} = 3.6 \times 10^{-47} \text{ N}$$

两者比值

$$\frac{F}{F_{\text{引}}} = \frac{8.2 \times 10^{-8}}{3.6 \times 10^{-47}} = 2.3 \times 10^{39}$$

由此可知, 万有引力远小于库仑引力, 所以计算电子与核之间引力作用时, 可以忽略万有引力.

二、练习二

1. 利用公式 $r_n = n^2 r_1$ 和 $E_n = E_1/n^2$, 计算氢原子的第 2、3、4 轨道的半径和电子在这些轨道上的能量.

解答: 已知 $r_1 = 0.53 \times 10^{-10}$ 米, $E_1 = -13.6$ 电子伏, 由公式 $r_n = n^2 r_1$ 和 $E_n = \frac{E_1}{n^2}$ 可以计算出:

- (a) 当 $n = 2$ 时, $r_2 = 2.12 \times 10^{-10}$ 米, $E_2 = -3.40$ 电子伏;
 - (b) 当 $n = 3$ 时, $r_3 = 4.77 \times 10^{-10}$ 米, $E_3 = -1.51$ 电子伏;
 - (c) 当 $n = 4$ 时, $r_4 = 8.48 \times 10^{-10}$ 米, $E_4 = -0.85$ 电子伏.
2. 根据上题算出的结果, 说明要把基态的氢原子激发到 $n = 2$ 的能级上去, 需要供给电子多大的能量. 如果用电磁波来供给这个能量, 需要用波长多长的电磁波? 这个波长属于哪个波段?

解答: 要把氢原子从基态激发到 $n = 2$ 的能级上去, 吸收的能量

$$\Delta E = E_2 - E_1 = -3.4 - (-13.6) = 10.2\text{eV}$$

根据光子能量公式 $\Delta E = h\nu$ 和关系式 $c = \lambda\nu$, 可得电磁波的波长

$$\lambda = \frac{hc}{\Delta E} = \frac{6.63 \times 10^{-34} \times 3.00 \times 10^8}{10.2 \times 1.60 \times 10^{-19}} = 1.22 \times 10^{-7}\text{m}$$

这个波长属于紫外区.

三、练习三

1. 根据玻尔理论, H_α 、 H_β 谱线光子的能量应该是多少电子伏? 根据实验测得的 H_α 、 H_β 的波长算得的光子的能量是多少电子伏? 二者是否一致?

解答: 根据玻尔理论, H_α 和 H_β 谱线的光子, 是由氢原子从量子数 $n = 3$ 和 $n = 4$ 的能级跃迁到 $n = 2$ 的能级时辐射的, 它们的能量分别为

$$H_\alpha : E_3 - E_2 = -1.51 - (-3.40) = 1.89\text{eV}$$

$$H_\beta : E_4 - E_2 = -0.85 - (-3.40) = 2.55\text{eV}$$

而从实验测得的和 H_β 的波长分别是

$$H_\alpha : 0.6562\mu\text{m}, \quad H_\beta : 0.4861\mu\text{m}$$

根据 $\Delta E = h\nu = hc/\lambda$ 可计算这两条谱线对应的光子能量

$$E_{H_\alpha} = \frac{hc}{\lambda} = \frac{6.63 \times 10^{-34} \times 3.00 \times 10^8}{0.6562 \times 10^{-6} \times 1.60 \times 10^{-19}} = 1.89\text{eV}$$

$$E_{H_\beta} = \frac{hc}{\lambda} = \frac{6.63 \times 10^{-34} \times 3.00 \times 10^8}{0.4861 \times 10^{-6} \times 1.60 \times 10^{-19}} = 2.56\text{eV}$$

从计算的结果看, 两者是一致的.

2. 计算氢原子从 $n = 4$, $n = 5$ 能级分别跃迁到 $n = 3$ 能级时辐射出的光子的波长. 这两条谱线在哪个波段? 它们属于哪个线系?

解答：

$$\lambda_1 = \frac{hc}{E_4 - E_3} = \frac{6.63 \times 10^{-34} \times 3.00 \times 10^8}{[-0.85 - (-1.51)] \times 1.60 \times 10^{-19}} \\ = 1.9 \times 10^{-6} \text{m} = 1.9 \mu\text{m}$$

$$\lambda_2 = \frac{hc}{E_5 - E_3} = \frac{6.63 \times 10^{-34} \times 3.00 \times 10^8}{[-0.54 - (-1.51)] \times 1.60 \times 10^{-19}} \\ = 1.2 \times 10^{-6} \text{m} = 1.2 \mu\text{m}$$

这两条谱线在红外波段，属于帕邢线系。

3. 怎样用玻尔原子理论解释原子吸收光谱的规律？

解答：玻尔理论认为原子从较低能级向较高能级跃迁时，要吸收能量；原子从较高能级向较低能级跃迁时，要辐射能量。无论是原子吸收的能量还是辐射的能量，都等于发生跃迁的两个原子能级间的能量差。对同一种原子说来，对应的能级的能量差是一定的，故其发射光谱与吸收光谱中的谱线是一一对应的，能发射什么样的谱线的原子，也必能吸收这样的谱线。这就是白光被某种元素的原子吸收时产生的吸收光谱与这种原子发出的明线光谱相一致的原因。

第四节 参考资料

一、 α 粒子散射理论

α 粒子是放射性物体放射出来的高速粒子，它的质量是电子质量的 7300 倍，带有两个单位的正电荷。 α 粒子穿过金属薄片时，绝大多数平均只有 2—3 度的偏转，但卢瑟福的学生盖革和马斯登在 1909 年从实验中观察到，约有 1/8000 的 α 粒子的偏转角大于 90° ，其中有接近 180° 的。经理论分析知道，这种现象不可能在汤姆生模型那样的原子中发生。当 α 粒子在汤姆生模型的原子的外边时，由于原子的正负电相等且对称分布，原子对 α 粒子没有库仑力的作用（考虑到原子的极化，有作用力也是很微小的）。当 α 粒子接近或进入原子的实体球时，电子因质量很小，对 α 粒子动量变化的影响极小，而它本身将会在 α 粒子的力的作用下离去，所以可以只考虑原子的正电部分对 α 粒子的作用。

设原子半径为 R ，正电荷 Ze 均匀分布在这球体中。 α 粒子带正电荷 $2e$ ，当它在原子球的外边，即 $r \geq R$ 时，它所受原子正电荷的库仑力是 $\frac{2kZe^2}{r^2}$ ，到达球面时是 $\frac{2kZe^2}{R^2}$ 。当 α 粒子进入球内，到达离球心 r 处时，它所受的力比在球面时所受的力还要小，这时对 α 粒子起作用的电荷是以 r 为半径的球体中所含的电荷，这电荷

$$Q = \frac{Ze}{\frac{4}{3}\pi R^3} \times \frac{4}{3}\pi r^3 = \frac{Zer^3}{R^3}$$

因此， α 粒子这时所受的力是

$$\frac{2keQ}{r^2} = \frac{2kZe^2r}{R^3}$$

所以进入球体后，离球心越近，所受的力越小。 α 粒子在汤姆生模型中受原子正电部分的力最大是它到达原子球的表面时。 α 粒子的初速度是可以知道的。按上面分析的 α 粒子的受力情况来看，结论是不能产生大角度散射的，因此汤姆生模型被否定了。

卢瑟福的原子的核式结构模型能够解释 α 粒子散射实验现象。

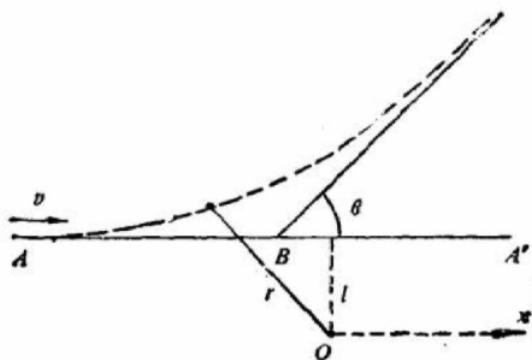


图 8.1

设有一个 α 粒子射到一个原子附近。在原子核的质量比 α 粒子的质量大得多的情况下，可以认为原子核不会被推动， α 粒子在核的库仑力的作用下而改变了运动的方向，如图 8.1 所示。图中 v 是 α 粒子原来的速度， l 是原子核离 α 粒子原运动路径的延长线的垂直距离，叫做瞄准距离，由力学原理可以证明 α 粒子的路径是双曲线，偏转角 θ 和瞄准距离 l 有如下关系：

$$\cot \frac{\theta}{2} = \frac{Mv^2}{2kZe^2} l \quad (8.4)$$

式中 M 是 α 粒子的质量。从上式可以看出， θ 与 l 有对应关系： l 大， θ 就小； l 小， θ 就大；对一定的 l ，有一定的 θ 。对于不同的瞄准距离， α 粒子的轨道形状如图 8.2 所示。

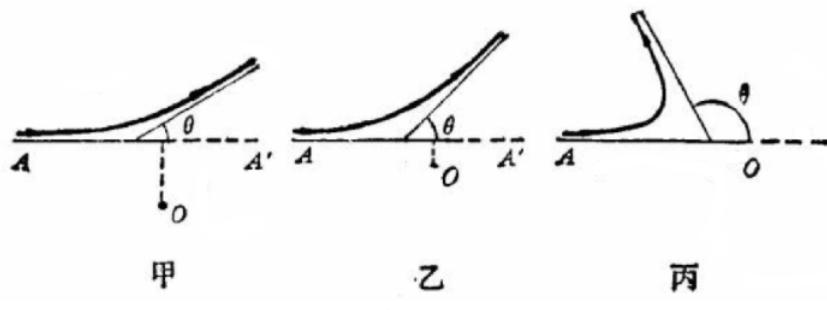


图 8.2

当瞄准距离由 l 缩小到 $l - dl$ 时，散射角将由 θ 增大到 $\theta + d\theta$ 。我们来计算散射到两个角锥面 (θ 和 $\theta + d\theta$) 中间的 α 粒子的数目。

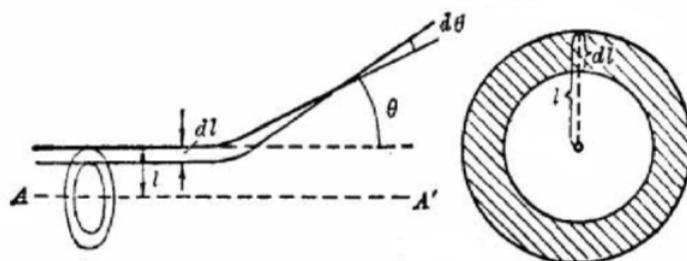


图 8.3

假设有一束均匀分布的，平行而且等速的 α 粒子沿 AA' 方向向金属薄片射来（金属薄片和 AA' 垂直），单位时间内，在与 AA' 垂直的单位面积内有 n_0 个 α 粒子，以原子核 O 为中心，以瞄准距离 l 和 $l - dl$ 为半径作一个圆环，这个圆环面与 AA' 垂直，如图 8.3 所示。这个圆环

的面积为 $dS = 2\pi\ell|d\ell|$. 对准这个环射来的 α 粒子数为

$$dn_0 = n_0 dS = 2\pi n_0 \ell |d\ell|$$

为了求出 $\ell d\ell$ 的值，把 (8.4) 式平方，得

$$\ell^2 = \left(\frac{2kZe^2}{Mv^2} \right)^2 \cot^2 \frac{\theta}{2}$$

微分后得：

$$\ell d\ell = -\frac{1}{2} \left(\frac{2kZe^2}{Mv^2} \right)^2 \frac{\cot \frac{\theta}{2}}{\sin^2 \frac{\theta}{2}} d\theta$$

带回 dn_0 的表达式，则得：

$$dn_0 = \pi n_0 \left(\frac{2kZe^2}{Mv^2} \right)^2 \frac{\cot \frac{\theta}{2}}{\sin^2 \frac{\theta}{2}} d\theta$$

或

$$dn_0 = n_0 \left(\frac{kZe^2}{Mv^2} \right)^2 \frac{2\pi \sin \theta}{\sin^4 \frac{\theta}{2}} d\theta$$

这是被一个核 O 所散射的在两个锥面 θ 到 $\theta + d\theta$ 中间的 α 粒子数.

假设金属薄片每单位面积内有 N 个原子核，由任何一个核所散射的 α 粒子，将都为上式所表示，由于金属薄片到荧光屏的距离较大， N 个散射角锥的顶点可视为集中在一点。在单位时间内，由这 N 个核所散射的包含在两个锥面 (θ 和 $\theta + d\theta$) 内的 α 粒子数为

$$dn = N dn_0 = n_0 N \left(\frac{kZe^2}{Mv^2} \right)^2 \frac{2\pi \sin \theta}{\sin^4 \frac{\theta}{2}} d\theta \quad (8.5)$$

现在我们来求在单位时间内在荧光屏单位面积上观察到的 α 粒子数.

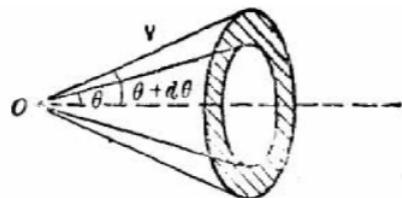


图 8.4

以锥体的顶点 O 为球心作一半径为 r 的球面，如图 8.4 所示，由两个锥面 θ 及 $\theta + d\theta$ 在这个球面上所划出的带区的面积为

$$2\pi r \sin \theta r d\theta = 2\pi r^2 \sin \theta d\theta$$

穿过这个带区面积的 α 粒子总数为 dn . 那么，在单位时间内穿过这个带区的单位面积上的 α 粒子数（即在 θ 方向上，每单位时间在荧光屏上每单位面积内所观察到的 α 粒子数）为

$$dn' = \frac{dn}{2\pi r^2 \sin \theta d\theta} = \frac{n_0 N}{r^2} \left(\frac{kZe^2}{Mv^2} \right)^2 \frac{1}{\sin^4 \frac{\theta}{2}} \quad (8.6)$$

从 (8.6) 式可知，在一定的实验条件下，乘积 $dn' \cdot \sin^4 \frac{\theta}{2}$ 是一个恒量。这个关系是可以用实验来验证的。下表是观察 α 粒子在金箔中散射的实验结果。

散射角 θ°	闪烁数	$dn' \cdot \sin^4 \frac{\theta}{2}$	散射角 θ°	闪烁数	$dn' \cdot \sin^4 \frac{\theta}{2}$
150	33.1	28.8	60	477	29.8
120	51.9	29.0	45	1435	30.8
105	69.5	27.5	30	7800	35.0
75	211	29.1	15	132000	38.4

由实验结果可以看出，当散射角由 15° 变更到 150° 时所得的 $dn' \cdot \sin^4 \frac{\theta}{2}$ 的数值差不多保持不变，这个结论是假设 α 粒子在金属薄片中只发生一次散射而得出的，由于原子核很小， α 粒子在金属薄片中十分接近原子核的机会很少，对于大角度散射来说，这个假设是可以满足的。但对于小角度散射来说， α 粒子是从离核比较远的地方通过的，因此发生多次散射的机会就比较大了，这就是实验数据中， 45° 以上的散射结果与理论值符合的比较好，而 45° 以下的散射结果与理论值偏离比较大的原因。

二、卢瑟福

卢瑟福（1871—1937），英国物理学家。卢瑟福出生于新西兰手工业工人家庭，他的父亲主要从事亚麻加工工作，当时他很可能继承这一职业。但是，由于他在学校里各门功课成绩优异，他的父母决定让他继续学习下去。

1894 年卢瑟福在喀捷贝尔大学毕业。由于电磁方面的论文获得了奖金，这个奖金使他得到了在英国最好的大学实习的机会。卢瑟福在英国剑桥大学卡文迪许实验室实习了三年，当时领导实验室的是卓越的物理学家汤姆生。

1896 年，巴黎的亨利·贝克勒耳发现了天然放射性，卢瑟福对贝克勒耳的发现非常感兴趣，并立即开始研究放射线。他比较了“铀射线”和伦琴射线，查明它们并不是相同的。他于 1899 年肯定了放射性辐射中的两种成分，分别命名为 α 射线和 β 射线（不久之后，维拉德又发现了第三种成分 γ 射线）。

1902 年他和英国化学家索第（1887—1956）共同提出了原子自然衰变理论。卢瑟福明确地指出，放射现象是一种物质的原子以一定的速率自行衰变成另一种物质的原子的过程。这个理论打破了原子不可分的观念，在物理和化学理论上引起了一场剧烈的变革，卢瑟福于 1908 年获得诺贝尔化学奖。

1909 年卢瑟福交给年青物理学家马斯登一项简单的任务，要他数一数穿过各种物质薄片（金、铜、铝等）的 α 粒子，根据当时大家所接受的汤姆生原子模型，从理论上不难作出这样的推断， α 粒子应该很容易地穿过原子，不发生散射现象，因此卢瑟福认为，薄片不会影响 α 粒子的直线运动，马斯登在实验时注意到，虽然绝大多数的 α 粒子穿过了薄片，但是仍然可以看到散射现象——有一些粒子好象是反弹回来了。

卢瑟福知道了这一情况以后，重复了很多次这个实验。在经过三个多星期的认真思考以后，他得出了下面的结论：原子是一个很复杂的系统，它有一个带正电的核心（原子核），在核周围的一条轨道上转动着带负电的电子。

在卢瑟福的原子模型产生后不久，他的学生亨利·莫塞莱证明了原子核内单位电荷的数目就是原子的序数，它决定元素在门捷列夫周期表上的位置。

1918 年，卢瑟福接替退休的汤姆生的职位，担任著名的卡文迪许实验室主任。逝世前，他

一直在那里工作，在这实验室里，他继续做了许多重要的实验.

1919 年他用 α 粒子轰击氮原子，第一次实现了元素的人工转变.

1920 年，他预言了中子的存在.

各国许多天才的物理学家都曾是卢瑟福的学生，如詹姆斯·查德威克（英国），尼尔斯·玻尔（丹麦），彼得·里昂诺维奇·卡皮查（苏联）等等.

三、玻尔

玻尔（1885—1962），丹麦物理学家。玻尔是物理学创始人之一，是卢瑟福的学生，1885 年生于哥本哈根，1911 年毕业于哥本哈根大学，他曾在英国剑桥大学汤姆生领导下的卡文迪许实验室工作，还在曼彻斯特卢瑟福实验室工作过。1920 年他创建了哥本哈根大学理论物理研究所并担任所长，第二次世界大战期间，玻尔去了美国，战后又回到丹麦工作，主张和平利用原子能和控制原子武器。他还领导创建了欧洲核子研究中心（CERN）。

他一生的主要研究工作是发展原子、分子和原子核结构的量子理论。他在普朗克量子假说和卢瑟福原子的核式结构学说的基础上，于 1913 年提出了氢原子结构和氢光谱的初步理论。为此获得 1922 年诺贝尔物理学奖。稍后，又提出了经典规律和量子规律之间的对应原理，这些工作对量子论和量子力学的建立起了重要作用。此外，玻尔在原子核反应理论和解释重核裂变现象等方面，也有重要的贡献。

第九章 原子核

第一节 教学要求	245
第二节 教学建议	245
一、原子核的组成	245
(一)天然放射现象	245
(二)探测放射线的方法	246
(三)原子核的人工转变和原子核的组成	246
(四)放射性同位素及其应用	247
二、核能	248
(一)原子核的结合能	248
(二)重核的裂变	249
(三)轻核的聚变	250
三、基本粒子	250
(一)基本粒子的概念和种类	250
第三节 实验指导	251
一、演示实验	251
(一)用云室观察 α 粒子径迹	251
(二)用盖革计数器进行演示	253
(三)放射源的制作	254
第四节 习题解答	254
一、练习一	254
二、练习二	255
三、练习三	255
四、习题	257
第五节 参考资料	260
一、正电子的发现	260
二、放射性的应用	260
(一)工农业方面	260
(二)医疗方面	261
(三)科学的研究方面	261
三、核电及安全	261
四、贝克勒耳	262
五、玛丽·居里	262
六、约里奥·居里	263

第一节 教学要求

本章讲述原子核的初步知识，主要包括原子核的组成、核能及其应用两方面的内容。这些知识对于学生进一步认识微观世界，了解研究微观世界的方法，都有重要意义。

这章内容分为三个单元，第一单元讲述原子核组成方面的知识，包括第一节到第四节；第二单元讲述关于核能方面的知识，包括第五节到第七节。最后一节，作为一个单元，讲述基本粒子，是选学内容。

原子核的人工转变和原子核的组成是本章教学的重点。在核能正逐渐广泛地被和平利用的当今社会中，了解核能知识是十分必要的。由于原子核的结合能是讨论裂变、聚变中释放原子能的依据，是了解核能的基础，因此，原子核的结合能也是教学的重点内容。

天然放射现象的教学，应着重介绍三种射线的性质，确定三种射线的本质，和放射性元素的衰变规律，说明原子核不仅有复杂的结构，而且可以发生转变。应使学生了解衰变过程都遵守质量数守恒和电荷数守恒的规律。学生应能根据这两条规律得出位移定则，确定衰变后的产物。

通过教学，不仅要使学生了解原子核的组成，而且要使学生知道人们是怎样确定原子核的组成的。通过介绍查得威克确定中子质量的分析，要使学生理解守恒定律在物理研究中所起的作用。

在介绍原子核的结合能时，除了要求学生会计算，还要让学生理解核子平均结合能随质量数变化的曲线的意义。爱因斯坦的质能方程是在说明怎样计算结合能时直接给出的。教学中不要求论证，只要求学生会使用。

通过基本粒子的教学，应使学生了解基本粒子并不是组成物质的最小单元，特别是强子，已发现它们仍有内部结构，许多物理学家倾向于不再用“基本粒子”这个名称，而把它改称为粒子。探索强子结构的夸克（我国叫层子）模型，是一种比较成功的理论。

本章的教学要求是：

1. 了解天然放射现象，知道三种射线的性质以及放射性元素衰变的规律；了解探测放射线的方法。
2. 了解原子能的人工转变，知道原子核的组成，会写核反应方程，了解放射性同位素的应用。
3. 理解原子核的结合能的概念，会用质能方程进行计算，了解释放核能的两种途径——裂变和聚变，以及它们的应用。

第二节 教学建议

一、原子核的组成

（一）天然放射现象

通过这一节的教学应该使学生了解，天然放射现象的发现，打开了人们认识原子内部世界的窗口，它不仅使人类认识到原子核也是具有结构的，而且告诉人们，一种原子核可以自发地转变为另一种原子核。这一发现，揭开了原子核物理的新篇章，至于原子核的内部组成如何，在这里暂不涉及，在讲第三节原子核的人工转变和原子核的组成等内容时，再作统一处理。这一节可着重讲述三种放射线的本质、它们的特性和放射性元素的衰变规律，还应该使学生注意，天然放射性并不是少数元素才具有的。原子序数大于 83 的天然元素都具有放射性，原子序数小于 83 的天然元素，也有一些具有放射性。

三种射线的本质和特性，根据教材中的叙述学生不难掌握。教学中可通过电场中偏转的实验，使学生加深对射线带电性质的理解。对于三种射线的特性（贯穿本领、电离作用等），可以简要地列表对比加以说明。三种粒子的符号、质量数和电荷数，也应该让学生正确掌握：教学中还须告诉学生， α 、 β 、 γ 粒子都是从原子核里放射出来的，但不能认为这三种粒子就是原子核的组成部分。

放射性元素的衰变，放射性元素的原子核发生衰变时，要放出一个 α 粒子或 β 粒子，使原子核转变为新核。要让学生了解，衰变过程遵守质量数守恒和电荷数守恒的规律。衰变后的产物（新核）可由这两个守恒定律来确定。根据放射性元素的衰变过程可写出衰变方程。教学中，要训练学生会正确地书写核符号和衰变时的核反应方程。

教材从衰变方程中根据质量数守恒和电荷数守恒定律得出了位移定则，但在实际教学中，不要强调机械地记忆这个定则学生只要理解了衰变的物理过程，独立推导出位移定则是并不困难的。

半衰期是研究衰变过程的一个重要概念。应使学生明白，放射性元素的衰变规律是统计规律，只适用于含有大量原子的样品，半衰期是表示放射性元素的大量原子核半数发生衰变所需要的时间，表示大量原子核衰变的快慢，当样品中的原子数目减少到统计规律不再起作用的时候，我们就不能肯定在某一时间里这些原子核会有多少发生衰变了。因此也就无法肯定某一放射性样品的全部原子完全衰变所需的时间，有的同学认为，可以由半衰期推算出放射性样品完全衰变的寿命期，当然是不正确的，在学生明白了半衰期的概念后，再引导他们求放射性元素经过 n 个半衰期后的剩余质量，可启发学生自己得出

$$m_n = m_0 \left(\frac{1}{2}\right)^n$$

的结论 (m_0 为放射性元素的初始质量， m_n 为 n 个半衰期后的质量)。

(二) 探测放射线的方法

这一节里讲的云室、计数器和乳胶照相，都是很早就使用了的最起码的核物理的实验手段，跟原子核的人工转变等教材都有关系，应该让学生了解这部分内容。教材主要讲述了三种探测方法的原理，目的是使学生知道研究原子核变化中的微观现象，可以根据各种粒子产生的次级效应来进行观察和判断，进而体会到研究微观现象的规律并不神秘。因此，凡是有条件的学校都应该做好演示，让学生观察，以加深印象，云室设备如果没有，也可以自制（参看实验指导部分）。

云室实验由于粒子径迹呈现时间较短，云室又较小，许多学生同时观察会有困难。教学时可先将各种粒子的径迹图样向同学讲清楚，然后让学生分组进行观察，也可以利用投影幻灯进行观察。

本节教材较多地涉及以前学过的知识，如气体的绝热膨胀、过饱和汽、气体的电离和气体放电等内容。教学中要注意新旧知识之间的联系，及时提示学生回忆过去学过的知识，加深对三种探测方法的原理的理解。

(三) 原子核的人工转变和原子核的组成

学生已经知道了原子核是由质子和中子组成的，但并不了解是根据什么得到这种结论的。本节的教学，应该使学生认识人们是怎样通过变革原子核的实验弄清了原子核的组成的。

关于原子核的人工转变，首先要注意讲清卢瑟福用 α 粒子轰击氮核的实验装置以及怎样确定实验中产生的新粒子就是质子。还可以结合这个实验讲一讲卢瑟福的科学态度，早在 1915 年，卢瑟福的学生马斯登就观察到了用 α 粒子轰击空气时会产生不寻常的长射程粒子。一种可能的解释是这种粒子是氢核，因为这是用 α 粒子轰击氢时常常出现的现象。卢瑟福没有轻易作出结论，而是耐心地进行实验研究，以便弄清那些粒子到底是氮核、氦核还是氢核，实验要在荧光屏前观察和统计微弱的闪烁，条件是相当艰苦的，经过了三年多的时间，在 1919 年夏，他才总结了 α 粒子与轻原子的碰撞现象，对氮原子核的人工转变作出了无可置疑的结论。

关于中子的发现，在教学中可以讲一讲守恒定律对物理学的意义，在中子发现之前，摆在物理学家们面前的问题是：要么 α 粒子轰击铍发出的是 γ 光子，它在跟质子的碰撞中能量和动量不再守恒；要么 α 粒子轰击铍发出的射线不是 γ 光子，而是一种新粒子。查德威克运用了能量和动量守恒定律，科学地分析了实验结果，终于发现了中子。还可以讨论一下，在约里奥·居里夫妇的实验中中子已经出现了，但他们不能识别它，一项划时代的发现，就这样从他们手中溜走了，我们应该由此得到什么教训。

在讲过上述两部分内容的基础上，再来讨论原子核的组成，学生就可以认识到确定原子核的组成并不是一件很容易的事情。从 1911 年提出的原子的核式结构起到 1932 年完成对原子核组成的认识，经历了 21 年。很多科学家为此付出了辛勤劳动。

本节的教学要注意培养学生综合运用知识的能力。还可以让学生进一步练习写核反应方程。要让学生知道核反应方程也和以前讲过核衰变方程一样，遵守电荷数守恒和质量数守恒的规律，不过应该注意，核反应方程反映的是客观的物理过程，是不能反过来根据上述两条规律任意编造的。

(四) 放射性同位素及其应用

人工放射性同位素的发现是核研究的又一项重要成果，这一发现使放射性同位素获得了广泛的应用。

关于同位素，要使学生了解以下几点：

1. 质子数相同而中子数不同的原子互称同位素；
2. 同种元素的不同的同位素在元素周期表上具有相同的位置（原子序数相同），它们的核电荷数相同，具有相同的化学性质；
3. 同种元素的各种同位素的中子数不同，因此它们的物理性质有差异；
4. 同一种元素的多种同位素中，有稳定的，也有不稳定的。不稳定的同位素会自发地放出 α 粒子或 β 粒子衰变为别种元素。这种不稳定的同位素就叫放射性同位素。四十多种元素具有天然放射性同位素，各种元素都有人工放射性同位素。

人工放射性的教学中还要注意讲清 β^+ 衰变和什么是正电子，说明它的性质，并让学生掌握它的符号。

关于放射性同位素的产生及其应用，应使学生了解以下几点：

1. 用中子、质子、氘核、 α 粒子或 γ 光子轰击原子核都可制取放射性同位素，重核裂变的产物也有放射性同位素。现在大量使用的放射性同位素有许多是利用核反应堆产生的。
2. 放射性同位素的应用主要分为两个方面：
 - 利用它的射线，

- 用作示踪原子.

在这两个方面各有其在工业、农业、医疗、科研等许多方面的许多应用实例. 这些实例不要求学生过多的记忆, 只要理解是怎样利用射线的特性和示踪原子来解决实际问题的就可以了.

3. 我国在这方面取得的新成就, 可以适当地补充与介绍, 以充实这部分内容, 进行爱国主义教育.

放射性同位素的应用尽管都是一般性的介绍, 但它涉及的知识原理, 有些也是学生较难理解的, 可适当运用挂图幻灯等教学手段配合教学.

二、核能

(一) 原子核的结合能

原子核的结合能是讨论裂变和聚变时释放原子能的根据, 是本章的一个重要概念.

核力的概念是讲解结合能的基础. 关于核力的本质问题目前尚未完全弄清楚, 仍在进一步深入研究中. 已经确定的核的主要特性有: 核力比电磁力强 100 多倍; 核力是短程力, 只有距离接近到 10^{-15} 米的数量级时才发生作用; 每个核子只跟它相邻的核子间有核力的作用, 而不是跟原子中所有的核子有核力的作用.

讲解结合能的概念时, 为了便于学生接受, 可以按教材中的思路讲述, 即先说明要把原子核拆散成核子, 需要克服核子间的核力做功, 因而需要巨大的能量. 在讲解克服核力做功需要能量时, 如果跟学生熟知的宏观的力学现象作对比, 更便于学生理解, 例如把宇宙飞船发射到地球引力范围之外, 相当于把地球和飞船拆开, 需要克服地球引力做功, 因而需要提供能量, 然后再讲反过来, 核子结合成原子核时, 就要释放能量. 核子结合成原子核时放出的能量或原子核分解为核子时吸收的能量, 都叫原子核的结合能.

根据核反应时的质量亏损和爱因斯坦的质能方程可以计算原子核的结合能 $E = \Delta mc^2$. 在进行计算时, 常常用 u 表示原子质量单位. 书上 331 页的 $1u = 931.5$ 兆电子伏, 指的是 1 个原子质量单位所对应的能量, 即 $1u \times c^2 = 931.5$ 兆电子伏. 教学时要讲清这个式子的意义, 以免引起学生的误解.

质能方程是爱因斯坦从相对论得出的. 在教学时, 要引导学生不要把质能方程理解为质量就是能量或质量可以变成能量. 质能方程指出的是质量和能量之间的联系. 即物体的质量和它具有的能量之间保持着严格的正比关系. 物体质量不但会因为它吸收或放出能量而增减, 还会由于机械运动状态的改变而发生变化, 只不过由于 c^2 是一个非常大的恒量, 通常的能量变化只引起微不足道的质量变化, 在中学阶段只要求学生初步理解和会用质能方程, 不要对该方程作进一步的讨论.

讲平均结合能时, 应明确以下几点:

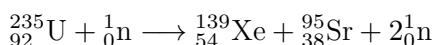
1. 平均结合能反映了核子结合成不同原子核时平均每个核子所释放的能量, 即原子核结合能对每一个核子的平均值;
2. 不同原子核的平均结合能不相同, 平均结合能的大小表征原子核的稳定程度, 平均结合能越大, 原子核越稳定;
3. 轻核和重核的平均结合能都比较小, 中等质量的原子核平均结合能较大, 质量数为 50 — 60 的原子核平均结合能最大, 表示这部分核最稳定. 这些内容都可以引导学生观察平均结合能随质量数变化的曲线得出来.

练习三第5题让学生根据平均结合能计算裂变中释放的能量，可以巩固平均结合能的概念，同时为讲解裂变作了准备。

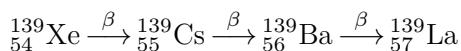
(二) 重核的裂变

在讲解重核裂变时，可以先根据平均结合能曲线说明为什么重核裂变时要放出能量，从图中可以看出，重核的核子平均结合能小于中等质量的核子的平均结合能，因此重核分裂成中等质量的核时，会有一部分结合能放出来。这种由核结构发生变化而放出的能叫做核能，也叫做原子能。

讲述裂变的过程时，还可补充下面的核裂变反应方程



铀核裂变产物 $^{139}_{54}\text{Xe}$ （氙）和 $^{95}_{38}\text{Sr}$ （锶）都是有放射性的，例如 $^{139}_{54}\text{Xe}$ 可以经过一系列的 β 衰变而变成 $^{139}_{57}\text{La}$ ：



所以在重核裂变过程中可以得到多种放射性同位素，这与前面讲述的放射性同位素有关知识可以呼应。

根据质能方程算出释放的能量跟用平均结合能计算的结果是一致的，因为结合能本身也是用质能方程计算出来的。教学时，可把计算出来释放的能量 201 兆电子伏，补充写到课本 334 页的核反应方程中去，强调一下能量守恒。

讲铀核裂变的链式反应时，应着重说明铀 235 与铀 238 跟中子的作用的区别，为讲核反应堆作准备。最后可说明铀核裂变时还可能分裂成三部分或四部分，这是我国科学家钱三强、何泽慧夫妇于 1946 年在法国首先发现的。

核反应堆是用人工控制链式反应的装置，在教学时，可通过挂图或幻灯片，讲清楚反应堆的构造、各部分的名称和作用。可以把反应堆分成五部分来讲述：

1. 铀棒，是天然铀或浓缩铀。作为原子燃料，提供原子能，在裂变时释放大量能量。
2. 减速剂，它的作用是使裂变时产生的快中子减速，变成慢中子，慢中子容易被铀 235 俘获而引起裂变，维持链式反应。
3. 控制棒。它的作用是调节中子数目以控制链式反应速度，镉吸收中子的能力很强，所以用它作控制棒，当反应过于激烈时，使镉棒插入深一些，让它多吸收一些中子，链式反应的速度就会慢一些；当反应过于缓慢，达不到所需功率时，使镉棒插入浅一些，让它少吸收一些中子，链式反应速度就可增大，用电子仪器自动地调节镉棒的升降，就能使反应堆保持一定功率。
4. 冷却剂。用水、液体金属钠或空气等，在反应堆内外循环流动，不断地带走反应堆放出的热量，同时用来输出热能。
5. 水泥防护层。作用是防止铀核裂变物放出的各种射线对人体的危害，用来屏蔽射线，不让它们透射出来。

还应说明原子能反应堆不仅可以提供强大的原子能，而且它产生的大量中子，还可以用来进行各种原子核物理实验，制造各种放射性同位素，利用反应堆还可以生产新的核燃料。

最后，可以介绍一下我国第一座大高通量原子反应堆的简单情况，进行爱国主义教育。我国自行设计建造的第一座大型高通量原子反应堆，于1978年12月安装完毕，于1980年12月达到高功率运行，它的主体及其配套工程的设备，全部都是我国自行设计制造的。

这座高通量反应堆，热功率设计额为12.5万千瓦，最大热中子通量是 6.2×10^{14} 个/ $\text{cm}^2 \cdot \text{s}$ ，据不完全统计，目前世界各国共有400座研究堆，其中中子通量在 3×10^{14} 个/ $\text{cm}^2 \cdot \text{s}$ 以上的约20座左右，这从一个侧面反映我国核科学技术的发展水平。

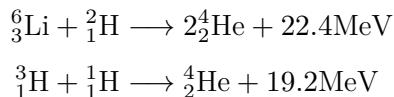
这座高通量反应堆是一座试验研究反应堆。它具有一堆多用的特点，可以同时产生多种放射性同位素和超钚元素。它的建成有助于提高我国许多科学领域和工业部门的技术水平。

(三) 轻核的聚变

与讲裂变相似，在教学时可先据平均结合能曲线说明轻核的平均结合能很小，因此，当某些轻核结合成质量较大的核时，能释放出更多的结合能，一个氘核和一个氚核结合成一个氦核时，能释放17.6兆电子伏的能量，也可以把这个能量，补充写到核反应方程中去。轻核结合成质量较大的核叫做聚变。还可让学生计算一下上述聚变反应中平均每个核子释放出来的能量为：

$$\frac{17.6}{5} = 3.52 \text{ MeV}$$

而铀核裂变时平均每个核子放出的能量约为1兆电子伏，说明轻核聚变时每个核子放出的能量比重核裂变时所释放的能量还要大几倍。关于轻核聚变的例子，可以再提供以下两个核反应方程：



关于聚变发生的条件，要着重说明聚变为什么要在高温下才能发生。因为要使轻核接近到 10^{-15} 米，由于原子核都是带正电的，这样就必须克服电荷之间很大的斥力作用，这就要使核具有很大的动能，必须把它们加热到很高的温度。因此聚变反应又叫做热核反应，这里还可以复习核力为短程力这样一些旧知识。

教学时，应该使学生了解热核反应可分为爆炸式热核反应和可控热核反应。现在人们已经掌握并利用爆炸式热核反应，例如氢弹的爆炸，对可控热核反应，至今尚在研之中，还有许多困难需要克服，这些困难主要是把几千万度以上的高温聚变物质控制在一定足够长的时间，我国自行设计和制造的可控热核反应试验装置“中国环流器一号”已于1984年9月顺利起动，它标志着我国可控核聚变的研究有了新的发展和提高，必将为人类探求新能源作出贡献。

三、基本粒子

本章第八节介绍基本粒子，这是选讲教材。编入这一节教材，目的是使学生知道现代物理的前沿，了解人类对物质结构的认识是不断深入的，是无穷尽的。

(一) 基本粒子的概念和种类

随着人类对基本粒子的不断深入的认识，基本粒子的概念也是不断发展的，当人类知道了质子和中子组成原子核，原子核和电子组成原子时，人们把电子、质子和中子叫做基本粒子。后来又发现正电子、 μ 介子、 K 介子和 π 介子等。人们把电子、正电子称为轻子，质子、中子称为重子，质量介于质子和电子之间的粒子叫做介子。后来又发现了质量比质子大的粒子，名叫超

子，超子也属于重子。后来又发现了反粒子等。现在发现的基本粒子已达几百种。按照基本粒子之间的相互作用，可以把它们分为三类：强子、轻子和媒介子，所有强子都参与强相互作用，轻子都不参与强相互作用，媒介子是传递粒子间相互作用的粒子，例如光子就是其中的一种，是传递电磁相互作用的。原来按照粒子质量所做的分类，已不能恰当地反映粒子的性质。例如，重子和介子都属于强子，但 μ 介子只参与弱相互作用，应属于轻子，现已改称为 μ 子。

应使学生明确绝大多数基本粒子都是不稳定的，在很短时间内就发生衰变，并且能互相转化，课本上列举四个转化的例子，前两个例子是中子转化为质子和质子转化为中子，可以概括为实物粒子之间的转化；后两个例子是正、负电子转化为光子和光子转化为正、负电子，这可以概括为实物粒子与场粒子之间的转化。这些事实表明，实物粒子（如电子）与场粒子（如光子）虽然有基本的区别，但是仍然有着深刻的联系。

应使学生明确基本粒子不是组成物质的最基本的、最小的单元，它们也有复杂的结构。夸克（我国称为层子）模型就是一个强子结构的理论模型，这个理论模型可以解释许多实验现象，强子的性质已明显表现出有内部结构，在这以后，“基本粒子”这个名称就名不副实了，于是近来又把它们改称为“粒子”。研究粒子的种类、性质、运动规律以及它们的内部结构的学科叫粒子物理学。由于许多科学工作者的努力，粒子物理学已经取得了辉煌的成果，然而，就在得到这些新成果的同时，客观世界也把新的疑问呈现在人们面前，等待人们去研究、认识。

这一章的内容，大都只要求学生了解，以扩大学生的视野，因此在教学过程中，可以较多地采用培养学生阅读能力为主的“自学、讨论、总结”式的教学方法，即在堂上由学生自学课文，然后学生自己归纳课文的基本内容，提出问题，通过讨论，最后总结出应该掌握的几个方面的知识。教师也可以提出一些启发性的问题，引导学生讨论，或补充讲解一些课文中没有的内容，最后小结知识要点。

第三节 实验指导

一、演示实验

（一）用云室观察 α 粒子径迹

课本图 9.2 的云室，是活塞式云室，它是用杠杆机构牵动云室底上下运动，使云室内的饱和汽因绝热膨胀而达到过饱和。

实验前，用长约 150 毫米的玻璃移液管，从云室壁上的孔中将酒精均匀地滴洒在云室内的呢子上，约 10—20 滴左右；把放射源插在握子上后送入云室，拧紧螺丝不使漏气。然后把 200—300 伏左右的直流电源接在云室的“+”“-”接线柱上，不要接错。演示时可轻快迅速地向下按压杠杆，使云室骤然膨胀，在膨胀的一刹那可看到很不清楚的 α 粒子的径迹如课本图 9.3 的左图所示，这时不要松手，径迹可保留一小段时间。只要一松手，径迹立即消失，必须间隔 30 秒乃至 1 分钟，才可进行下一次的膨胀与观察。为了让较多的学生观察，可以在云室的上方放置倾斜 45° 角的平面镜，让学生从镜里观察；也可让学生分组观察（每组 4—5 人），配合以较强光源从云室壁上的透明窗把 α 粒子径迹照亮，观察效果更好。

演示实验中可能出现的故障：

1. 密封不严密。如果在按下杠杆时，能听到轻微的嘶嘶漏气声，需要检查一下上盖压圈上的螺钉是否松动，应再紧一紧；或者放射源握子的螺旋没有拧紧，也应再紧一下。务使云室

密闭严密可靠.

2. 径迹模糊不清. 假如云室在膨胀后, 充满白雾, 径迹模糊不清, 可以降低膨胀比, 也就是把限制器的柱头向上拧, 然后再试验几次, 直到径迹清晰为止. 假如这样仍无效, 应检查一下电场电压是否确已加上, 如果因电压未加而云室内离子扫除不尽, 实验效果就差. 有时把电压提高一些也有帮助.
3. 演示径迹不直. 由于微量漏气, 使云室内的气体在数次膨胀之后, 压强发生变化, 引起 α 粒子径迹畸变, 为此, 在经过几次膨胀后, 可以扭开放射源螺旋, 略微放气, 使云室内气体压强恢复, 再拧紧握子螺旋, 即能继续演示实验.
4. 云室上盖玻璃板上结成雾珠. 当滴入酒精过多或房间温度较高时, 往往会出现雾珠, 使上盖不透明, 影响观察. 消除雾珠的方法是把放射源握子拧下, 按几次杠杆, 使云室连续进行吸气和排气动作, 若干次后就可以使雾珠消失, 玻璃盖恢复透明. 这时应将纱布遮住结合套的孔, 防止灰尘进入云室. 同时要在通风的地方排气, 以免云室内排出的射气散布在教室内, 污染教室空气.

在实际的教学过程中, 本实验还是比较容易成功的, 上面这些故障很少发生, 即使出现了也不难解决. 如果不是使用杠杆式的云室, 而是用老式的“橡皮球”式的云室, 实验成功率就差一些, 参照以上方法, 摸索实验的规律, 也可以把演示实验做好.

云室装置也可以自制, 有两种自制的方案: 一种是用干冰致冷, 制作容易, 但需要使用干冰; 另一种还是利用绝热膨胀致冷, 演示比较困难, 需要有一定技巧, 教师可于课前多做几次, 以掌握演示中的一些技巧, 保证课堂演示成功. 现将两种方案分述如下:

干冰式云室 将一个带盖的透明塑料圆筒或玻璃圆筒放在一块干冰上, 用一条浸透酒精的黑布, 围绕在圆筒内壁靠近上部的地方. 在圆筒盖子上的软木塞下面插一根针, 把放射源装在针眼里, 这个云室的结构如图 9.1 所示.

在云室中, 从布条上蒸发出来的酒精, 到达容器底部的冷区域里遇冷要重新凝结, 如果靠近云室底部的区域内没有能使酒精蒸汽形成液滴的其他凝结核(例如灰尘)存在, 则酒精蒸汽附着的凝结核就只能是带电粒子或射线经过时产生的离子. 当顶部的蒸汽向低温处扩散时, 在容器底部达到过饱和状态, 并以离子为凝结核形成雾珠. 因此酒精液滴的径迹反映的是粒子或射线经过的路径. 这种径迹在暗底衬托下是可见的, 并可以照相.

演示时, 应使云室内形成高压电场. 为便于观察, 使光从侧面沿水平方向照射云室内靠近底部的区域.

绝热式云室 这种云室与威尔逊云室原理相同. 云室的结构如图 9.2 所示. 在一个广口瓶上加一个中间有孔的橡皮塞. 橡皮塞中间的孔中插一根玻璃管, 用橡皮管将玻璃管连接到自行车的打气筒嘴上. 瓶塞上穿过两根裸导线, 瓶内的一端焊接一条铜片电极. 实验时, 穿出橡皮塞的一端接电源. 放射源倒插在橡皮塞上. 在瓶内要先放好浸透酒精的脱脂棉. 这种云室的结构简单, 易于操作, 径迹显示时间长.

演示时, 在两电源间加上 200—300 伏的直流电压, 用手把打气筒的活塞慢慢地向下压, 直到感觉到有一定压力时, 突然松手. 压入瓶内的空气突然作绝热膨胀, 使瓶内温度降低, 瓶中酒精蒸汽达到过饱和状态. 由于放射源放出的射线粒子使沿途的气体电离, 这时过饱和的酒精蒸

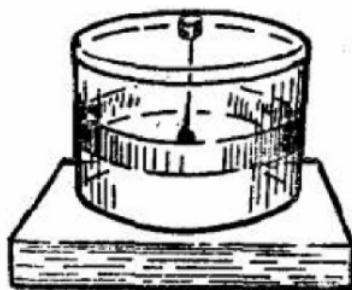


图 9.1



图 9.2

汽便以这些离子为核迅速凝结成液滴，显示出放射线的径迹。演示本实验时要注意：

1. 仪器各部分应密封，不能漏气。在压气时漏气，放气时就不能获得绝热膨胀致冷的效果。
2. 压气时，要缓慢地把打气筒的活塞压下，以防止压缩气体冲开瓶塞。瓶塞要塞紧。
3. 加在电极上的直流高压，可以从电子管收音机取出，也可由自行装置的直流高压电源提供。要注意这时整流器处于空载情况，输出电压较高，所以应在整流器输出端并联一只 2 瓦、100 千欧的电阻，以防止击穿整流器的滤波电容。

(二) 用盖革计数器进行演示

盖革计数器是由盖革计数管、放大和显示装置组成，是利用放射线的电离作用制成的粒子探测仪器（如图 9.3）。

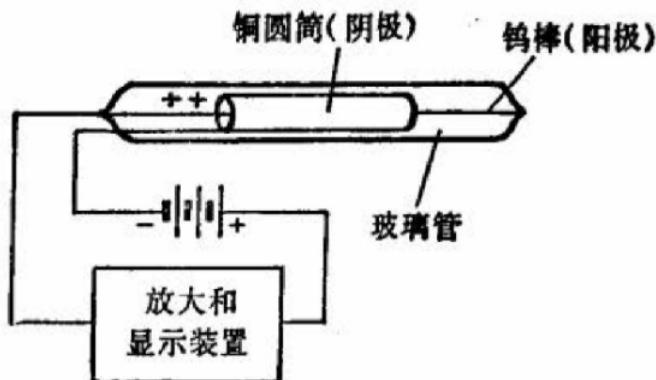


图 9.3

当一个放射性粒子进入计数管时，就使计数管发生一次短暂的放电，从而得到一个脉冲电流。把这个脉冲电流用电子电路加以放大，送入显示装置就可以显示出来。显示的方法可以用扬声器发声、氖泡发光和数字显示等。把计数管用开有窗口的金属套筒保护起来，加上手柄，再用电缆跟放大显示装置连接起来就成为盖革计数器，又叫探测器，例如目前医学及工业用的 β 、 γ 射线探测器。

用探测器可以进行一些演示。只是有的探测器是用耳机听的，声音不够大。演示时，可以通

过合适的线路把它接到扩音机上，使全班学生都能听到。

利用计数器可以探测放射线。做法如下：把几个火柴盒放在讲台上，其中一个装有放射源。调节探测器，使扩音机发出间隔约两秒钟左右的“叭”“叭”声。告诉学生，这响声是宇宙射线进入计数管产生的。然后把探头分别接近各只火柴盒。当探头接近装有放射源的火柴盒时，扩音机里“叭”“叭”声响的次数马上大量增加，这表示了有放射性粒子进入了探测器。

利用计数器还可以演示原子辐射的防护。将探头和放射源放在一定的距离上，让学生注意扩音机中“叭”“叭”声每分钟响的次数，然后分别在探头与放射源之间放上硬纸板、木板、铜片、铁片和铅片，让学生注意扩音机响声间隔的变化。从实验可知哪种材料对射线有较大的防护作用，即阻止射线的本领较大。

(三) 放射源的制作

取一个烧坏了的汽灯纱罩，将它研成粉末，用胶水粘成直径2—3毫米的小球，插在一根火柴杆上，干后即成为放射源。放射源应放进试管或玻璃瓶里保存。

汽灯纱罩是用浸过硝酸钍 $\text{Th}(\text{NO}_3)_4$ 的苎麻做成的，灼烧后的灰烬含有99%的二氧化钍 ThO_2 。二氧化钍具有放射性，所以能作为放射源使用。

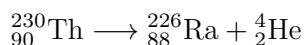
还可以用搜集到的旧夜光表指针（或文具商店出售的罗盘指针）上的磷光粉做成放射源。

第四节 习题解答

一、练习一

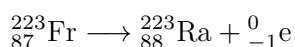
1. 钍230是 α 放射性的，它放出一个 α 粒子后变成了什么？写出衰变方程。

解答：钍230经过 α 衰变后变成镤226，其衰变方程为



2. 钫223是 β 放射性的，它放出一个 β 粒子后变成了什么？写出衰变方程。

解答：钫223经过 β 衰变后变成镤223，其衰变方程为



3. 钍232经过六次 α 衰变和四次 β 衰变后变成一种稳定的元素。这种元素是什么？它的原子量是多少？它的原子序数是多少？

解答：经过六次 α 衰变，质量数减少 6×4 ，电荷数减少 6×2 ；经过四次 β 衰变，质量数不变，电核数增加 4×1 。故新核的质量数： $232 - 6 \times 4 = 208$ ，电荷数： $90 - 6 \times 2 + 4 \times 1 = 82$ 。所以新元素为 $^{208}_{82}\text{Pb}$ （铅）。

4. $^{238}_{92}\text{U}$ 变成 $^{206}_{82}\text{Pb}$ ，要经过几次 α 衰变和几次 β 衰变？

解答：衰变过程中质量数减少为 $238 - 206 = 32$ ，因为 β 衰变不影响质量数，可见要经过八次 α 衰变；而经过八次 α 衰变，电荷数应减少 $8 \times 2 = 16$ ，现在电荷数只减少了 $92 - 82 = 10$ 。因为每经过一次 β 衰变，电荷数增加1，可见经过了六次 β 衰变。

5. $^{210}_{83}\text{Bi}$ 的半衰期是5天。10克的铋210经过20天后还剩下多少？

解答：20天为4个半衰期，故20天后剩下铋210的质量

$$m = m_0 \left(\frac{1}{2}\right)^4 = 10 \times \left(\frac{1}{2}\right)^4 = 0.625\text{g}$$

6. 放射性元素 $^{24}_{11}\text{Na}$ 经过 6 小时后只剩下 $1/8$ 没有衰变，它的半衰期是多少？

解答：因为 $\frac{1}{8} = \left(\frac{1}{2}\right)^3$ ，所以是经过了 3 个半衰期，半衰期为 $6/3 = 2$ 小时。

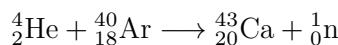
二、练习二

1. 用 α 粒子轰击氮核使它发生转变。从云室的照片中为什么可以确定细而长的径迹是质子产生的，粗而短的径迹是反冲氧核产生的。

解答：质子与氧核相比，质子的质量小，氧核的质量大。根据动量守恒定律，当质子从复核中射出时，就具有比氧核大的速度。由于质子速度大，在气体中能够通过较长的路程。但质子的电量少，电离本领小，所以在云室中的径迹细而长；而反冲氧核的质量大，速度小，在气体中通过的路程短，它的带电量大，电离本领也大，因此它的径迹粗而短。

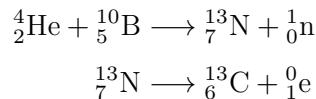
2. 用 α 粒子轰击氩 40，复核衰变时产生一个中子和一个反冲核，这反冲核是什么？写出核反应方程。

解答：反冲核是钙 43，其核反应方程为：



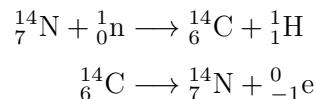
3. 用 α 粒子轰击硼 10，产生一个中子和一个具有放射性的核，它是什么？这个核能放出正电子，它衰变后变成什么？写出核反应方程。

解答：具有放射性的核为 $^{13}_{7}\text{N}$ （氮），经过衰变后变成 $^{13}_{6}\text{C}$ （碳），其核反应方程分别为：



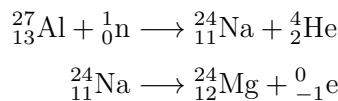
4. 用中子轰击氮 14，产生碳 14，碳 14 具有 β 放射性，它放出一个 β 粒子后衰变成什么？写出核反应方程。

解答：最后衰变为氮 14，其核反应方程为：



5. 用中子轰击铝 27，产生钠 24，写出核反应方程。钠 24 是具有放射性的，衰变后变成镁 24，写出核反应方程。

解答：它们的核反应方程分别是：



三、练习三

1. 氚核的质量是 2.013553u，根据质量亏损，计算氚核的结合能。

解答：氚核由一个质子和一个中子组成，质子、中子和氚核的质量分别为：

$$m_p = 1.007277u, \quad m_n = 1.008665u, \quad m_D = 2.013553u$$

质量亏损

$$\Delta m = m_p - m_n - m_D = 0.002389u$$

氚核的结合能

$$\Delta E = \Delta mc^2 = 0.002389 \times 931.5 = 2.225 \text{ MeV}$$

2. 碳原子的质量是 $12.000000u$, 可以看做是由 6 个氢原子 (质量是 $1.007825u$) 和 6 个中子组成的. 求碳原子核的结合能. (在计算中可以用碳原子的质量代替碳原子核的质量, 用氢原子的质量代替质子的质量, 因为电子的质量可以在相减过程中消去.)

解答: 6 个氢原子的质量

$$M_H = 6m_H = 6 \times 1.007825u = 6.046950u$$

6 个中子的质量

$$M_n = 6m_n = 6 \times 1.008665u = 6.051990u$$

质量总和:

$$M_H + M_n = 6.046950u + 6.051990u = 12.098940u$$

质量亏损

$$\Delta m = 12.098940u - 12.000000u = 0.098940u$$

碳原子的结合能

$$\Delta E = \Delta mc^2 = 0.098940 \times 931.5 = 92.16 \text{ MeV}$$

3. 在 ${}_{\frac{1}{2}}\text{He}$, ${}_{\frac{36}{36}}\text{Kr}$, ${}_{\frac{92}{92}}\text{U}$ 等原子核中核子的平均结合能哪个最大? 哪个最小? 原子核的结合能哪个最大? 哪个最小? (根据平均结合能曲线进行比较)

解答: 根据平均结合能曲线所示, ${}_{\frac{36}{36}}\text{Kr}$ 的平均结合能最大, ${}_{\frac{1}{2}}\text{He}$ 的平均结合能最小. 原子核的结合能应为平均结合能乘以核子数, 故 ${}_{\frac{92}{92}}\text{U}$ 的原子核的结合能最大, 而 ${}_{\frac{1}{2}}\text{He}$ 的原子核的结合能最小.

4. 如果要把 ${}_{\frac{8}{8}}\text{O}$ 分成 8 个质子和 8 个中子, 要给它多少能量? 要把它分成 ${}_{\frac{1}{2}}\text{He}$, 要给它多少能量? 已知 ${}_{\frac{8}{8}}\text{O}$ 的核子平均结合能是 7.98 MeV , ${}_{\frac{1}{2}}\text{He}$ 的核子平均结合能是 7.07 MeV .

解答: 要把氧 16 分成 8 个质子和 8 个中子, 需要的能量就是氧 16 原子核的结合能, 即氧原子核的核子的平均结合能乘以核子数:

$$E = 16 \times 7.98 = 128 \text{ MeV}$$

要把氧 16 分成 4 个氦核, 所需能量应为上述能量减去 4 个氦原子核的结合能 (E'). 因为

$$E' = 4 \times 4 \times 7.07 = 113 \text{ MeV}$$

所以

$$E - E' = 128 - 113 = 15 \text{ MeV}$$

计算把氧 16 分成 4 个氦核所需能量, 还可用核子的平均结合能之差乘以核子总数计算:

$$(7.98 - 7.07) \times 16 = 14.6 \text{ MeV}$$

5. 在一次核反应中, 铀核 ${}_{\frac{92}{92}}\text{U}$ 变成了氙核 ${}_{\frac{54}{54}}\text{Xe}$ 和锶核 ${}_{\frac{38}{38}}\text{Sr}$ (同时放出了若干中子). 铀核的核子平均结合能约为 7.6 MeV , 氙核的核子平均结合能约为 8.4 MeV , 锶核的核子平均结合能约为 8.7 MeV .

- (a) 把 U235 分解为核子，要吸收多少能量？
- (b) 再使相应的核子分别结合成 Xe136 和 Sr90，要放出多少能量？
- (c) 在这个核反应中是吸收还是放出能量？这个能量大约是多大？

解答：

- (a) 把 U235 分解为核子时吸收的能量等于 U235 原子核的结合能

$$E = 7.6 \times 235 = 1.79 \times 10^3 \text{ MeV}$$

- (b) 核子结合成 Xe136 和 Sr90 放出的能量，等于该原子核的结合能

$$E_1 = 8.4 \times 136 = 1.14 \times 10^3 \text{ MeV}$$

$$E_2 = 8.7 \times 90 = 0.78 \times 10^3 \text{ MeV}$$

- (c) 在这个核反应中，是放出能量。这个能量为

$$E_1 + E_2 - E = (1.14 + 0.783 - 1.79) \times 10^3 = 1.3 \times 10^2 \text{ MeV}$$

四、习题

1. 铀 238 的半衰期是 4.5×10^9 年，假设一块矿石中含有 1 千克的铀 238，经过 45 亿年（相当于地球的年龄）以后，还剩有多少铀 238？假设发生衰变的铀 238 都变成了铅 206，矿石中会有多少铅？这时铀铅的比例是多少？再经过 45 亿年，矿石中的铀铅比例将变成多少？根据这种铀铅比例能不能判断出矿石的年龄？

解答： 经过 45 亿年即经过 1 个半衰期，剩下质量应为原来的一半，即剩下铀 238 的质量为 0.5 千克。

因为有一半铀衰变为铅，所以铀、铅的原子核数相等，它们的质量之比等于原子核质量数之比，即

$$238 : 206 = 0.5 : x$$

所以铅的质量 $x = 0.433$ 千克。铀、铅比例为： $0.5 : 0.433 = 1.15 : 1$ 。

再经过 45 亿年，即又经过一个半衰期，0.5 千克铀衰变后质量剩下一半，还有 0.25 千克铀，又有 0.216 千克铅产生。这时铀、铅比例为 $0.25 : (0.433 + 0.216) = 0.385 : 1$ 。

由于铀、铅质量的比例与矿石的年龄有关，因此我们可以根据铀、铅的比例粗略判断矿石的年龄。

2. 长核在 α 衰变中放出能量为 4.78 MeV 的 α 粒子和能量为 0.19 MeV 的 γ 粒子。如果 1 克长每秒钟有 3.7×10^{10} 个原子核发生 α 衰变，算出它每秒钟释放多少能量。

解答： 1 个长原子核发生衰变时放出的能量

$$\Delta E = (4.78 + 0.19) = 4.97 \text{ MeV}$$

3.7×10^{10} 个原子核发生衰变时放出能量

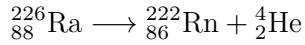
$$E = 3.7 \times 10^{10} \Delta E = 3.7 \times 10^{10} \times 4.97 = 1.8 \times 10^{11} \text{ MeV}$$

3. 静止状态的放射性原子核长 ($^{226}_{88}\text{Ra}$) 进行 α 衰变。为了测量 α 粒子的动能 E ，让 α 粒子垂直飞进 $B = 1$ 特的匀强磁场，测得 α 粒子的轨道半径 $r = 0.2$ 米。

- (a) 写出 Ra 的 α 衰变方程.
 (b) 试计算 α 粒子的动能 E .

解答：

- (a) 镥的 α 衰变方程



- (b) 在匀强磁场中， α 粒子在洛伦兹力作用下作圆周运动，洛伦兹力作为向心力，有

$$qvB = m \frac{v^2}{R}$$

所以

$$v = \frac{qRB}{m}$$

α 粒子的动能

$$\begin{aligned} E &= \frac{1}{2}mv^2 = \frac{1}{2}m \left(\frac{qRB}{m} \right)^2 = \frac{q^2R^2B^2}{2m} \\ &= \frac{(2 \times 1.6 \times 10^{-19})^2 \times 0.2^2 \times 1^2}{2 \times 6.64 \times 10^{-27} \times 1.6 \times 10^{-19}} = 2\text{MeV} \end{aligned}$$

4. 在某些恒星内，三个 α 粒子结合成一个 ${}^12_6\text{C}$ 核。 ${}^12_6\text{C}$ 的质量是 12.0000u ， ${}^4_2\text{He}$ 的质量是 4.0026u . 这个反应中放出多少能量?

解答：三个 ${}^4_2\text{He}$ 的质量

$$m = 3 \times 4.0026\text{u} = 12.0078\text{u}$$

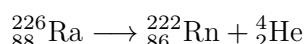
三个 α 粒子结合成碳 12 核时质量亏损

$$\Delta m = 12.0078\text{u} - 12.0000\text{u} = 0.0078\text{u}$$

放出的能量

$$\Delta E = \Delta mc^2 = 0.0078 \times 931.5 = 7.3\text{MeV}$$

5. 已知 ${}_{88}^{226}\text{Ra}$, ${}_{86}^{222}\text{Rn}$, ${}^4_2\text{He}$ 的原子量分别是 226.0254 , 222.0175 , 4.0026 . 求在 ${}_{88}^{226}\text{Ra}$ 衰变



中放出的能量是多少电子伏? 如果这些能量都以 Rn 核和 He 核的动能形式释放出来，放出的 α 粒子的速度有多大?

提示：能量和动量都守恒.

解答：衰变过程中质量亏损

$$\Delta m = 226.0254\text{u} - (222.0175\text{u} + 4.0026\text{u}) = 0.0053\text{u}$$

放出的能量

$$\Delta E = \Delta mc^2 = 0.0053 \times 931.5 = 4.9\text{MeV} = 7.9 \times 10^{-13}\text{J}$$

设 α 粒子质量为 m , 速率为 v , Rn222 的质量为 M , 速率为 V , 由于衰变过程中能量和动量守恒. 则有

$$mv + MV = 0 \quad (9.1)$$

$$\frac{1}{2}mv^2 + \frac{1}{2}MV^2 = \Delta E \quad (9.2)$$

由 (9.1) 可得

$$V = -\frac{m}{M}v$$

代入 (9.2) 式, 可得

$$\begin{aligned}\frac{1}{2}mv^2 \left(\frac{m}{M} + 1 \right) &= \Delta E \\ \frac{1}{2}mv^2 &= \frac{M}{M+m} \Delta E \\ v &= \sqrt{\frac{2M\Delta E}{(M+m)m}} \\ &= \sqrt{\frac{2 \times 222 \times 7.9 \times 10^{-13}}{226 \times 4 \times 1.66 \times 10^{-27}}} = 1.5 \times 10^7 \text{ m/s}\end{aligned}$$

6. 在一原子反应堆中, 用石墨 (碳) 作减速剂使快中子减速。已知碳核的质量是中子的 12 倍, 假设把中子与碳核的每次碰撞都看作是弹性正碰, 而且认为碰撞前碳核都是静止的。

- (a) 设碰撞前中子的动能是 E_0 , 经过一次碰撞, 中子损失的能量是多少?
(b) 至少经过多少次碰撞, 中子的动能才能小于 $10^{-6}E_0$?

解答: 设中子质量 m_1 , 初速度为 v_0 , 碳核质量为 m_2 , 初速度为 0。一次碰撞后, 中子速度为 $-v_1$, 碳核速度为 v_2 。根据动量守恒

$$m_1 v_0 = m_2 v_2 - m_1 v_1 \quad (9.3)$$

根据动能守恒

$$\frac{1}{2}m_1 v_0^2 = \frac{1}{2}m_2 v_2^2 + \frac{1}{2}m_1 v_1^2 \quad (9.4)$$

由题意设 $m_2 = Am_1$, $A = 12$ 。所以

$$v_0 = Av_2 - v_1 \quad (9.5)$$

$$v_0^2 = Av_2^2 + v_1^2 \quad (9.6)$$

解 (9.5) 和 (9.6) 可得

$$v_1 = \frac{A-1}{A+1} v_0 \quad (9.7)$$

- (a) 经过一次碰撞后中子损失的能量

$$\Delta E = \frac{1}{2}m_1 v_0^2 - \frac{1}{2}m_1 v_1^2 = \frac{1}{2}m_1 v_0^2 \left[1 - \left(\frac{A-1}{A+1} \right)^2 \right] = \frac{48}{169} E_0$$

- (b) 经过第 n 次碰撞后, 中子速度为 v_n , 则有

$$v_n = \left(\frac{A-1}{A+1} \right)^n v_0$$

由题意要求, 有

$$\frac{\frac{1}{2}m_1 v_n^2}{\frac{1}{2}m_1 v_0^2} < 10^{-6}$$

即

$$\left(\frac{A-1}{A+1} \right)^{2n} < 10^{-6} \Rightarrow \left(\frac{11}{13} \right)^{2n} < 10^{-6}$$

由对数计算, 可得 $n \geq 42$ 。

所以至少经过 42 次碰撞, 中子动能才能小于 $10^{-6}E_0$ 。

第五节 参考资料

一、正电子的发现

威尔逊云室用于粒子物理研究，由于可以“抓拍”在短暂瞬间内发生的现象，不仅为已知粒子留了影，也记录了原先不为人知的新现象，帮助人们发现新的粒子。第一个被云室摄到的新粒子就是正电子，这也是人们所发现的第一个反粒子，它是从宇宙线中拍摄下来的。

宇宙线是来自外层空间的射线，奥地利科学家亥斯（V. F. Hess, 1883—1965）在研究地球上和大气中的放射性时发现了这种射线。在分析宇宙线的成分和性质时，威尔逊云室是一个很好的工具，密立根是位多年致力于宇宙线研究的专家，他把云室放到强磁体的磁极中间，不间断地每 15 秒钟对云室拍一次照。由于飞行的带电粒子在磁场中发生偏转，就可根据照片中径迹的偏转方向确定其带电的状况。带有相反电荷的粒子偏转方向也相反，在同一磁场强度下，速度的快慢也与偏转有关。另外，在粒子径迹的单位长度上水滴的个数与粒子的质量有一定关系。所以，磁场中的云室的照片可以提供径迹的多种信息，1932 年，密立根的同事年轻的安德孙（C. D. Anderson, 生于 1905 年）在认真察看几千张云室照片时，发现其中有一种径迹是陌生的。这种径迹的弯曲方向表明它是一个带正电的粒子，但是与已知的带正电的粒子如质子相比，它的雾珠密度完全不一样。经过仔细安排的进一步实验，确认了这是一种新粒子，它的质量与电子质量相等，但电荷相反，称为正电子。

在此以前，狄拉克从关于电子的相对论量子理论预见到，一定有一种质量与电子完全相等，电荷大小也相等，只是符号相反的粒子。安德孙发现的正电子恰好具有这种性质，因而，这是狄拉克理论的一个有力支持，狄拉克的理论还预言电子和正电子可以同时成对地由光子从真空中产生出来；相反地，如果一个电子和正电子相撞，他们便同时湮灭，转化为光子。这两种现象也为实验证实了。另外，在发现正电子后测得它在物质中平均只能存在百万分之一秒的时间，但正电子与电子一样是不会自行衰变的，它在物质中存在时间短正是因为它十分容易与物质中的电子发生湮灭反应的缘故。这也说明了为什么只有在云室发明后才能从宇宙线中发现正电子。

由于狄拉克理论的成功，人们从此认识到了微观世界的几个特征。首先，从狄拉克理论导致一个结论：每一种微观粒子都有其反粒子。虽然正粒子和其反粒子相遇时即发生湮灭，所幸我们生存的宇宙空间内，正粒子的数量与反粒子的数量并不相等，例如地球上只有极少数来自外层空间的反质子和正电子，因此不用担心，地球上的物质是不会被湮灭掉的。

二、放射性的应用

（一）工农业方面

放射性测井。如天然 γ 射线测井，只需测量钻井内各个深度的岩层天然放射的 γ 射线强度，加以比较，就能够了解岩层的构造。放射性测井不必分析取出的岩心，方法简便可靠。我国的石油勘探和煤碳勘探等已经应用了这种方法。

土壤水分的测定。可以应用吸收射线的原理来测量土壤水分，通常采用钴 60 的土壤水分测量仪。这种仪器是双管型的，一管装放射源，另一管装盖革计数管。两管按一定的距离插入土中，计数管所测到的计数率和标准曲线相对照，即可测出土壤的水分。

农作物的储藏。利用射线的照射可以抑制马铃薯的发芽和杀死谷仓里的各种害虫。

(二) 医疗方面

诊断上的应用，放射性碘（碘 131）已被应用来诊断甲状腺的机能是否正常，当病人食用一定量的放射性碘后，从小便中的含碘量可以看出正常人和甲状腺失常的人有显著差异。还可以用来检查脑瘤的位置和测量血液循环的速度，诊断血管有无阻塞或硬化。

治疗上的应用，放射线有生理效应，当放射性辐射作用到活的细胞上，可以造成死亡，这种作用的机理跟快速的带电粒子通过细胞对细胞内原子的电离和分子的分解有关。正在迅速地成长和繁殖的细胞，对辐射的作用特别敏感，这种作用可以用来治疗癌肿。

(三) 科学研究方面

半导体的扩散研究。把放射性元素锌（锌 65）电镀到半导体锗的表面，然后在电炉内加热，锌即从表面向里扩散。扩散分子的浓度跟距离表层的深度有关系，有了放射性锌作标记就容易测定这个关系，方法是把锗片一层层磨下，收集每一层磨下的粉末，测量其放射性强度，即可求出扩散分子的浓度。

制造发光剂。发光物质可以在放射性的作用下发光。在发光物质（例如硫化锌）中加很少量的镭盐，就制成了一种经常发光的漆。这种漆要是涂在仪表的表盘、指针或瞄准装置上，就可以使它们在黑暗中也能被看见。

测定地球的年龄。从不含放射性元素的矿中采出的通常的铅，原子量是 207.20。因铀 238 的衰变而形成的铅，原子量是 206。含在某些矿中的铅，原子量很接近 206。由此可见，在铀矿形成的时候（从熔融体或液体中结晶出来），其中并不含有铅，这些矿物中现今的铅都是由铀的衰变积聚起来的。利用衰变定律，根据矿物中的含铅量与含铀量的比例，就可以决定矿物的年龄。应用这种方法确定出来的矿物年龄，要以几亿年来计量，最老的矿物年龄超过 15 亿年，通常是指硬地形成后所经过的时间，当作地球的年龄，根据放射性测定出地球的年龄约为 45 亿年。

三、核电及安全

核电站以铀为燃料，在反应堆中裂变产生热，再用冷却剂带出，传给汽轮发电机，生产电能。这种以高温高压水为冷却剂的核电站称为压水堆型核电站。

压水堆型核电站的安全性好。铀燃料以及产生的大量放射性产物被包盖在耐高温、耐腐蚀的锆金属管中，形成燃料元件。管子被称为防止放射释放的第一道屏障，燃料元件组成堆芯装在直径约四米、壁厚约二百毫米的低合金钢压力壳中，压力壳被称为第二道屏障，压力壳及有关设备又被完全封闭在安全壳中，安全壳又被称为第三道屏障。

对压水堆型核电站进行事故发生可能性的分析表明，堆芯熔化最大假想事故的可能性为 10^{-4} — 10^{-8} /堆年，即一个反应堆运行一万年到一百万年，才可能产生一次这样的事故。而同时由安全壳受损造成大量放射性释放的可能性就更小了。

在全世界已经运行的三百七十四座核电站中，压水堆型占总数的 50%；正在建设的核电站一百七十六座中，压水堆型占 63%。我国正在建设和计划建设的核电站，都是压水堆型核电站。

在工业化、高科技社会对能源的需求日益增加的同时，环境污染和生态问题也日益尖锐，电能是常规能源，常规电站（尤其是燃煤电站）会排出大量的废渣与废气，煤燃料中的 20% 成为灰渣和飞尘。飞尘形成煤烟引起大气污染，烟气中含有大量的二氧化硫、二氧化氮，是产生酸雨的主要因素。科学家们预言，酸雨和二氧化碳产生的“温室效应”将成为今后严重的环境问题。

核能是一种清洁、安全、经济的能源。压水堆型核电站在正常运行时，由于燃料元件包壳、压力系统和安全壳三层屏障的包容，以及放射性废气、废液排放前的一系列处理，加上严格的标准和管理，最终的排放量是很小的。一座大型的压水堆电站，允许的排放量对附近居民的最大照射仅为天然放射性本底的 5%，世界各国多年的运行经验表明，实际排放量很容易被控制在允许排放量以下。对于废气、废液处理过程中的浓缩物，经固化后运至厂外贮存库作永久贮存。在核电站正常运行时，排出的废物很少，有利于保护环境。

现在，发展核电是世界能源发展的共同趋势。据联合国国际原子能机构统计，全世界 1985 年的核发电量占总发电量的 15%。

四、贝克勒耳

贝克勒耳（1852—1908），法国物理学家。1852 年 11 月 15 日诞生于法国巴黎的一个科学世家，祖父、父亲都是法国科学院院士，贝克勒耳幼年偏爱自然科学。1872 年中学毕业后，曾先后在巴黎工业大学和土木工程学院学习，1876 年到工业大学任教。1888 年以光的吸收方面的论文获得博士学位，1892 年任巴黎自然博物馆和巴黎工业大学教授，1903 年贝克勒耳因为发现放射性现象和皮埃尔·居里夫妇同获诺贝尔物理学奖。

贝克勒耳早年从事磷光和荧光现象的研究已取得不少成就。1895 年德国物理学家伦琴发现了 X 射线。这一发现引起了贝克勒耳的很大兴趣。贝克勒耳试图研究 X 射线与可见光的联系，他把一张照相底片用黑纸包得严严实实，再把硫酸铀钾晶体放在上面，在太阳光下照射。几个小时后，把底片冲出来一看，发现底片上有浅浅的黑斑，贝克勒耳认为，这是硫酸铀钾晶体受阳光照射激发出荧光和 X 射线，但是后来的实验，由于几天连阴雨而不能用阳光照射，他只好扫兴地把铀盐晶体和用黑纸包好的照相底片一起放入写字台的抽屉里，结果惊奇地发现：这些未经阳光照射的铀盐也能使底片感光，冲出来的底片上清清楚楚地显现出黑斑。他作了认真的分析，认为这种现象同荧光、阳光都无关，可能是铀盐晶体自身发出的一种神秘的射线的结果，接着他又对铀的穿透辐射性质进行了试验，证明这种辐射在一定距离内具有放电体的性质，即放射性。这是科学实验中认识放射性的开端。在 3 月 2 日科学院例会上，贝克勒耳激动地宣布了这个新发现。

会后贝克勒耳精心地做了一系列实验，分别对铀盐晶体加热、冷冻、研成粉末、溶解在酸里等物理、化学加工，发现只要有铀元素，就有这种神奇的贯穿辐射。他还试验了纯金属铀，发现它所产生的贯穿辐射要比用硫酸铀钾强，在五月十八日科学院例会上，贝克勒耳宣布，铀盐会自发放射出射线，这是一种新的、由原子自身产生的射线，后人就把这种射线叫做贝克勒耳射线。

贝克勒耳刚年过半百，身体健康状况就很差，医生劝他休养，他却舍不得离开实验室，对医生说：“除非把我的实验室搬到我疗养的地方，否则我决不离开！”1908 年 8 月 24 日，贝克勒耳离开了人世，终年 56 岁。后人为纪念这位放射性研究的先驱者，把放射性活度的单位命名为“贝克勒耳”，简称“贝克”。

五、玛丽·居里

玛丽·居里（1867—1934），法国物理学家、化学家。是放射性学说的奠基人之一，原籍波兰，出生于华沙。1884 年在华沙中学毕业时得到了金质奖章，1891 年至 1894 年，在巴黎大自然科学系学习，毕业时得到物理学和数学两个硕士学位，1903 年在巴黎大学完成了博士论文“放射性物质的研究”的答辩。从 1906 年起，为巴黎大学教授和教研室主任，1914 年起兼任镭学研

究院院长。

玛丽·居里和皮埃尔·居里对铀、钍等矿物的放射现象进行了研究，并从大量的沥青铀矿中分离出两种具有更强的放射性物质，于1898年发现了两种元素：钋和镭。

1902年玛丽·居里分离出了零点几克纯净的镭盐，而在1910年她和法国化学家德别爱而诺一起得到了金属镭，她确定了镭的原子量和它在化学元素周期表中的位置。1903年由于放射现象的研究，居里夫妇和贝克勒耳一起得到了物理学诺贝尔奖金，而在1911年，玛丽·居里由于得到了金属状态的镭和对放射性元素性质的研究而荣获化学诺贝尔奖金。

玛丽·居里试验了很多种放射性元素、研究它们的性质，详细分析了放射性测量的方法，研究了放射性辐射对人体细胞的影响，第一个在医学上利用放射性。居里夫妇的杰出发现，开创了利用原子能的新纪元。

1914年巴黎镭学研究院成立，居里夫人任理事，后任院长，1922年当选为巴黎医学科学院院士。同年出任国际文化合作委员会委员，后任副主席。居里夫人除两次获得诺贝尔奖金外，还获得各国科学奖章十六枚，获得二十五个国家的荣誉头衔一百多个，被人们誉为“镭的母亲”。

居里夫人为人类作出了巨大的贡献，深受各国人民的爱戴和尊敬。1920年，美国记者麦朗宁夫人获悉居里夫人很需要一克镭继续作放射性研究，就在全美国妇女中展开了募捐运动。她在不到一年的时间里募集到十万美元，买了一克镭准备献给居里夫人。1921年5月21日，美国第三十四任总统哈定代表美国妇女，向居里夫人馈赠了这一克镭。

由于长期受放射线照射，居里夫人晚年患了恶性贫血症，双目也几乎失明。但她经常隐瞒病情，坚持进行研究，她常说：“我的生活是不能离开实验室的”。1934年7月4日，居里夫人在法国萨瓦去世，终年67岁。

六、约里奥·居里

约里奥·居里（1900—1958），法国物理学家，是居里夫妇的女婿，对原子核物理有重要贡献。

约里奥·居里1900年3月19日诞生在法国巴黎的一个商人家庭。他从小喜欢读书，尤其喜欢钻研自然科学。他非常崇敬法国大科学家巴斯德（1822—1895）和居里夫妇，不但阅读他们的生平传记，还模仿他们的科学生活。约里奥1918年考取居里夫妇发现镭的巴黎理化学院，每门功课都是第一。不久，约里奥应召入伍服役。战后，他回巴黎理化学院一边工作，一边在朗之万教授指导下学习，他的兴趣在物理、化学方面。1925年约里奥作居里夫人的助手，并且结识了伊丽芙·居里。

1930年约里奥以论述放射性元素钋的电化学的论文获得博士学位。1932年约里奥和他的妻子伊丽芙·居里（1897—1956）合作，用放射性钋所产生的 α 射线轰击铍、锂、硼等元素，发现了前所未见的穿透性强的辐射。后经查德威克的研究，确定为中子，1934年他俩在用 α 粒子轰击铝硼时，首次产生了人工放射性物质。由于这一重大发现，两人于1935年获得诺贝尔奖金。约里奥·居里于1937年任法兰西学院教授，法国国家科学研究中心原子能研究所所长。1946年任法国科学研究中心主任，主持法国原子能委员会的领导工作。

从本世纪四十年代中期起，约里奥·居里为了维护世界和平，致力于和平利用原子能的事业，极力反对法国生产和发展原子武器。为世界和平事业做出了重大贡献，1958年8月14日，约里奥·居里在巴黎去世，终年58岁。