普通高中课程标准实验教科书

# 物　理

## 选修 3—4

# 教师教学用书

人民教育出版社　课程教材研究所
物理课程教材研究开发中心　编著

人民教育出版社

主　　编：唐果南
副 主 编：汪　勃　黄晓标　谷雅慧
编写人员：陈永田　杜　敏　葛晓灵　谷雅慧　黄恕伯　刘　虹
　　苗元秀　彭　征　钱泽仪　秦德胜　汪　勃　杨秋金
　　张和松　张　颖　周誉蔼
责任编辑：张　颖　彭　征

**图书在版编目（CIP）数据**

普通高中课程标准实验教科书教师教学用书．物理：选修3－4／人民教育出版社，课程教材研究所物理课程教材研究开发中心编著．—4版．—北京：人民教育出版社，2010.5（2019.7重印）
ISBN 978-7-107-19147-3

Ⅰ.①普…　Ⅱ.①人…②课…　Ⅲ.①中学物理课—高中—教学参考资料　Ⅳ.①G633

中国版本图书馆CIP数据核字(2012)第016850号

**普通高中课程标准实验教科书　物理　选修3－4　教师教学用书**

出版发行　人民教育出版社
　　（北京市海淀区中关村南大街17号院1号楼　邮编：100081）
网　　址　http://www.pep.com.cn
经　　销　全国新华书店
印　　刷　山东德州新华印务有限责任公司
版　　次　2010年5月第4版
印　　次　2019年7月第24次印刷
开　　本　890毫米×1240毫米　1/16
印　　张　13.25
字　　数　330千字
定　　价　25.80元

版权所有·未经许可不得采用任何方式擅自复制或使用本产品任何部分·违者必究
如发现内容质量问题、印装质量问题，请与本社联系。电话：400-810-5788

# 说　明

本书是在《普通高中课程标准实验教科书物理选修3－4教师教学用书》的基础上，根据几年来实验地区的一些反映修订而成的，旨在帮助教师更好地使用《普通高中课程标准实验教科书物理选修3－4》，为教学提供一些参考。

本书介绍了教科书的特色、新的教学理念和一些新的教学方式、方法，与教科书采取“紧密配合”的方式，逐章逐节进行分析说明。本书的主要结构如下：

**课程标准的要求**　摘录了《普通高中物理课程标准（实验）》（以下简称《课程标准》）的相关内容，作为教学的依据。

**本章教材概述**　主要介绍本章教科书的编写意图、主要内容和教材结构的特点，以及在选择内容和讲述方法上的考虑。

**教材分析与教学建议**　根据课程标准及教科书，对每一节教学内容提出了具体的教学目标，并且对教材内容提出了比较详细的建议，包括教学过程中可能遇到的问题，供选择的教学方法，怎样发展学生的非智力因素，怎样使用教科书中的栏目、插图，怎样以新课程理念处理教学问题，如何发展教师自身的教学能力，如何处理数字化教学，如何帮助学生进行探究等。

**问题与练习**　从“内容分析”和“解答与说明”两部分对教科书“问题与练习”中的问题给出了较为详细的解答。

**教学设计案例**　主要目的是给实验地区的教师提供一些教学设计方面的参考，包括一些重点难点的分析、把握、处理，整堂课的设计思想、具体安排等。

**教学资源库**　是与教学内容相关的教学资源，包括“概念、规律和背景资料”“联系生活、科技和社会资料”“实验参考资料”三个部分。课程新理念需要教师进一步提高职业素质，需要教师尽早进入终身学习的轨道，我们在这里围绕教学的需要选择了一些拓展性的内容，为教师的素质发展提供一些线索。

**补充习题**　教科书由于篇幅所限，不可能编写太多的习题。我们这里补充了一些习题，供教师们在教学中选用。

本书编写者还有姚显云、李先全、刘群朴、石勇、李勤、向跃进、何雪平、邬小春、陈海东、范凤霞、涂后胜、卢新渠、胡纪明、涂德新。

本书在编写过程中得到北京市、浙江省、江苏省、山东省、重庆市、天津市、安徽省、江西省、辽宁省等全国各地教研室的热情支持和帮助，在此一并表示衷心的感谢。

对于书中存在的缺点和错误，欢迎教师和物理教育工作者们及时批评、指正。来函请寄：100081　北京市海淀区中关村南大街17号院1号楼　人民教育出版社物理室　收。

人民教育出版社　物理室

2008年4月

# 目　录

第十一章　机械振动　1
一、本章教材概述　1
二、教材分析与教学建议　4
第1节　简谐运动　4
第2节　简谐运动的描述　7
第3节　简谐运动的回复力和能量　10
第4节　单摆　13
第5节　外力作用下的振动　15
三、教学设计案例　17
第4节　单摆　17
四、教学资源库　20
（一）概念、规律和背景资料　20
（二）联系生活、科技和社会资料　25
（三）实验参考资料　28
五、补充习题　29

第十二章　机械波　33
一、本章教材概述　33
二、教材分析与教学建议　35
第1节　波的形成和传播　35
第2节　波的图象　37
第3节　波长、频率和波速　40
第4节　波的衍射和干涉　42
第5节　多普勒效应　45
第6节　惠更斯原理　47
三、教学设计案例　48
第1节　波的形成和传播　48
四、教学资源库　51
（一）概念、规律和背景资料　51
（二）联系生活、科技和社会资料　61
（三）实验参考资料　65
五、补充习题　67

第十三章　光　74
一、本章教材概述　74
二、教材分析与教学建议　76
第1节　光的反射和折射　76
第2节　全反射　79
第3节　光的干涉　82
第4节　实验：用双缝干涉测量光的波长　84
第5节　光的衍射　86
第6节　光的偏振　88
第7节　光的颜色　色散　90
第8节　激光　93
三、教学设计案例　93
第1节　光的反射和折射　93
四、教学资源库　97
（一）概念、规律和背景资料　97
（二）联系生活、科技和社会资料　106
（三）实验参考资料　111
五、补充习题　119

第十四章　电磁波　128
一、本章教材概述　128
二、教材分析与教学建议　130
第1节　电磁波的发现　130
第2节　电磁振荡　133
第3节　电磁波的发射和接收　134
第4节　电磁波与信息化社会　136
第5节　电磁波谱　138
三、教学设计案例　141
第1节　电磁波的发现　141
四、教学资源库　144
（一）概念、规律和背景资料　144
（二）联系生活、科技和社会资料　160
（三）实验参考资料　166
五、补充习题　168

第十五章　相对论简介　175
一、本章教材概述　175
二、教材分析与教学建议　178
第1节　相对论的诞生　178
第2节　时间和空间的相对性　182
第3节　狭义相对论的其他结论　186
第4节　广义相对论简介　189

三、教学资源库 194
（一）概念、规律和背景资料 194
（二）联系生活、科技和社会资料 200
四、补充习题 200

# 第十一章
# 机械振动

## 课程标准的要求

1. 通过观察和分析，理解简谐运动的特征。能用公式和图象描述简谐运动的特征。
2. 通过实验，探究单摆的周期与摆长的关系。
3. 知道单摆周期与摆长、重力加速度的关系。会用单摆测定重力加速度。
4. 通过实验，认识受迫振动的特点。了解产生共振的条件以及在技术上的应用。

## 一、本章教材概述

选修 3—4 模块的主要内容是机械振动、机械波、光和电磁波。机械波的知识是学习光的波动性和电磁波的基础，而要掌握机械波的知识，必须对机械振动要有认识。因此，本章在本模块教学中的基础地位是显而易见的。

本章是选修 3—4 模块的第一章。机械振动是质点运动的一种形式，通过本章的学习，要使学生对质点运动的认识更加全面和深入。以加速度来对质点运动进行分类：学生在初中只了解匀速直线运动，这是一种没有加速度的运动；在高中物理 1 模块中，学生学习匀变速直线运动，这是具有恒定加速度的运动，而且加速度方向和初速度在同一直线上；在物理 2 模块中，学生学习了抛体运动，这也是具有恒定加速度的运动，但加速度方向和初速度可以不在同一直线上；还学习了匀速圆周运动，这是一种具有变化加速度的运动，但加速度大小不变，只是方向变化；本章所学习的机械振动，是加速度大小和方向都发生变化的运动。通过对本章的学习，学生不仅拓展了对质点运动的认识，而且通过对振子的受力和能量分析，进一步加深了对牛顿运动定律和机械能的理解。

本章共五节，第 1 节根据质点运动的位移图象来说明什么是简谐运动；第 2 节介绍描述简谐运动的三个物理量（振幅、周期、相位）和简谐运动的表达式；第 3 节讨论简谐运动物体的受力特点和能量变化；第 4 节分析简谐运动的一个实例——单摆；第 5 节学习在外力作用下的振动（阻尼振动、受迫振动和共振）。本章要在学生原有质点运动相关概念的基础上，由基本概念的定义到基本规律的讨论，由理想情况到实际情况，由固有振动到有外力作用下的振动，渐渐深入，逐步拓展。

编写本章时的有关思考如下。

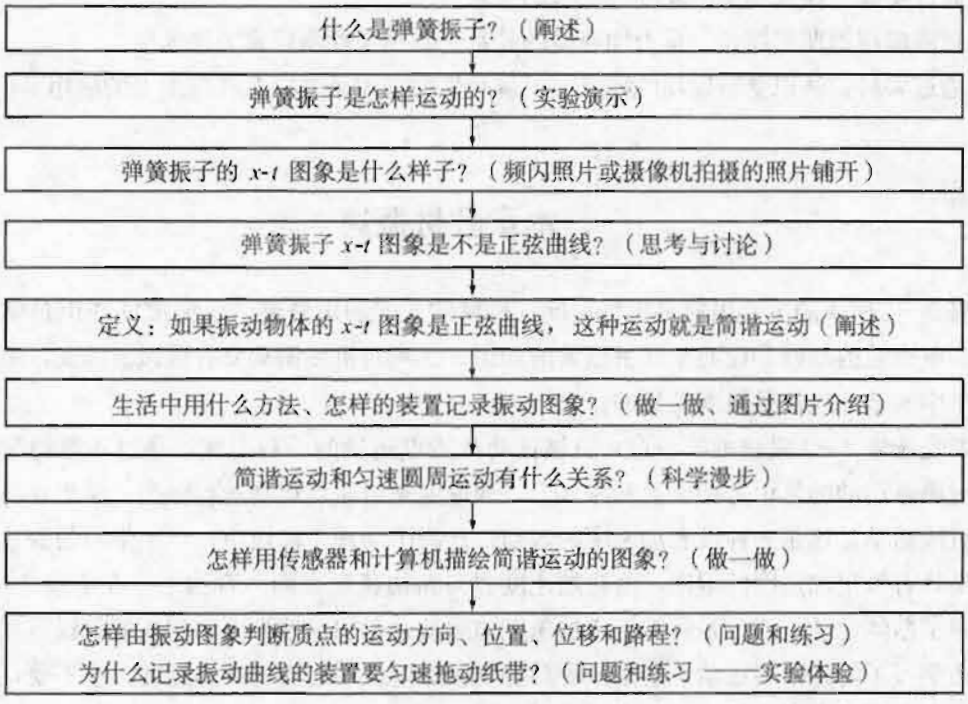
**1. 用运动学概念来定义简谐运动**

在学习简谐运动之前，学生对质点的运动有了一定的了解，例如匀速直线运动、匀变速直线运动、平抛和斜抛运动、匀速圆周运动等。在学生的学习经验中，质点的运动是根据质点运动的轨迹、速度、加速度的特点来划分的，也就是说，是根据运动学的概念来定义和区分质点

所做的是哪种运动。然而到了机械振动，传统的教科书不再从运动学的角度来认识简谐运动，而是从质点的受力特征这一动力学的角度来下定义："物体在跟偏离平衡位置的位移大小成正比，并且总是指向平衡位置的回复力的作用下的振动，叫做简谐运动。"学生觉得这是在用一种特殊的方法来研究一种崭新的运动，难以把简谐运动的新知识纳入到原有的知识架构中，因而感到比较难。

针对以上问题，教科书用运动学的概念来引入和定义简谐运动："如果质点的位移与时间的关系遵从正弦函数的规律，即它的振动图象（$x$-$t$ 图象）是一条正弦曲线，这样的振动叫做简谐运动。"只要学生对位移—时间图象的知识有所理解，凭以上定义，学生便可以直接想象出简谐运动的情形，有利于对简谐运动的理解。

沿着这条思路，教科书在本章第 1 节形成了以下内容线索：




这样的线索有以下几个特点：第一，逻辑上很自然。要了解一个运动的特点，首先想到的就是了解它的位移—时间关系的特点，通过实验分析知道，弹簧振子的位移—时间关系是一条正弦曲线，这是一种最简单的振动，把它定义为简谐运动。第二，采用了各种合理的教学方式，包括阐述、实验演示、照片展示、做一做、思考与讨论、科学漫步、问题与练习中的实验体验等。这些方式跟它们需要解决的教学问题是有效匹配的。第三，有层次。有基本要求的内容，也有不少是针对不同学生的个性化要求的内容。

**2. 用三个物理量来描述简谐运动**

课程标准要求"能用公式和图象描述简谐运动的特征"。要描述简谐运动的特征，仅用振幅、周期（或频率）两个物理量是不够的，它们只能描述简谐运动的振动幅度和变化快慢，无法描述简谐运动的质点在振动过程中所处的状态。因此，本教科书用振幅、周期（或频率）、相位三个物理量来描述质点的简谐运动，把传统教科书属于选学的"相位"这个物理量，作为必学内容放在本教科书的正文中。

学生在"数学 4"模块中已经学习了三角函数的知识，了解 $y=A\sin(\omega x+\varphi)$ 函数式的意

义，能画出 $y=A\sin(\omega x+\varphi)$ 的图象，并能解决 $A$、$\omega$、$\varphi$ 对函数图象变化的影响等数学问题。也就是说，从数学的角度，学生已经学习了怎样描述简谐运动。因此，物理教学的任务，是怎样把学生学到的数学知识紧密地和物理知识联系起来，从物理学的角度进一步理解函数式中这些字母的意义，认识 $x$-$t$ 的函数式是怎样体现这三个物理量的。因此，教科书除了介绍这三个物理量的意义之外，还专门设立了标题，阐述简谐运动的 $x$-$t$ 函数式和这三个物理量的联系，使学生能在 $x$-$t$ 函数式中识别简谐运动的振幅、周期（或频率）、相位和初相。

**3. 认真规划两个单摆实验的教学目标**

关于单摆的实验，课程标准有两条要求：一是要求“通过实验探究单摆的周期与摆长的关系”、二是“会用单摆测定重力加速度”。这两条要求，其知识目标已经在文字上叙述得很明白。在过程方法上，或者说在提高学生的实验素养上，这两个实验能起到什么作用？要发挥这两个实验在提高学生实验素养上的作用，需要分析并利用这两个实验的特点。

“探究单摆周期与摆长的关系”实验的一个重要特点，是分析、处理实验数据有文章可做。学生获得了一系列周期和摆长的对应值之后，一眼看来，只能得出“摆长越长周期也越长”的定性结论。这些数据之间究竟有什么定量关系？学生一时难以判断。因此，这是提高学生分析处理数据能力的好机会。教科书让学生先对数据间的可能关系进行猜测，根据猜测来定义坐标系的横、纵坐标轴，使得在这样的坐标系中作出的图象是一条直线。如果作出的图象确实是一条直线，说明猜测成立，便能形成结论；如果作出的图象不是一条直线，说明猜测不成立，应该根据图象的形状修改所猜测的关系，重新定义坐标轴，直到作出直线为止。由于单摆周期跟摆长的二次方根成正比，这就为学生经历这种数据处理的过程提供了很好的条件，这是高中物理学中不可多得的几个提高学生数据处理能力的实例之一。

“用单摆测定重力加速度”则是从如何减小实验误差方面来提高学生的实验素养。教科书首先从单摆实验的装置和实验条件来思考减小误差的途径：单摆装置要尽量接近理想单摆的模型；实验操作要尽量实现小偏角的条件。其次，教科书在收集实验数据的环节阐述了减小误差的方法和道理：为减小测量摆长所造成的相对误差，应选用摆长较长的单摆；为减小测量周期所造成的相对误差，可以测量单摆摆动 $n$ 次的总时间并应适当增大 $n$ 的值。然后，教科书再从数据处理的角度阐述了减小实验误差的方法：应多测几次求平均值，或者通过作出 $l$-$T^2$ 图象、求其斜率，进而计算出重力加速度。以上减小实验误差的方法和道理，是对所有物理实验都适用的。教科书利用单摆实验这个载体，抓住不同实验的不同特点，对教学目标进行合理规划，全面提高学生的科学素养。

**4. 在“外力作用下的振动”标题下，介绍阻尼振动、受迫振动和共振**

传统教科书把“振动的能量”“阻尼振动”“受迫振动”“共振”这四个主题放在这章教材的最后两节。本教科书把以上简谐运动的能量和回复力一起，合并为“简谐运动的回复力和能量”（第 3 节），阐述简谐运动合力的特征和能量变化的特征。同时，新教科书把“阻尼振动”“受迫振动”“共振”三个主题合并为一节课文，用“外力作用下的振动”作为本节的标题。这样做，不仅使学生认识到，阻尼振动、受迫振动、共振都属于在外力作用下的振动，而且有利于学生对振动分类的理解。学生从逻辑上很容易理解：作用在振动物体上的力有两种，一种是阻碍振动、使振动受到阻尼的力，叫阻力；另一种是保持系统（受阻力时）仍能持续振动的力，叫驱动力。如果没有驱动力，只有阻力，而且阻尼不太大，振子还可以往复运动，只是振幅越来越小，这就是阻尼运动；如果受到驱动力，驱动力做的功补偿了系统的能量损耗，这种振动就是受迫振动。如果受迫振动的驱动力频率跟振动系统的固有频率相等，这时受迫振动的

振幅最大，这就是共振。因此，从外力的特征上来展开对这几种振动的认识，有利于学生理顺这些似乎不很相关的振动形式的联系。

**课时安排建议**

| | | |
|---|---|---|
| 第 1 节 | 简谐运动 | 1 课时 |
| 第 2 节 | 简谐运动的描述 | 1 课时 |
| 第 3 节 | 简谐运动的回复力和能量 | 1 课时 |
| 第 4 节 | 单摆 | 2 课时 |
| 第 5 节 | 外力作用下的振动 | 1 课时 |

## 二、教材分析与教学建议

### 第 1 节　简谐运动

**1. 教学目标**

(1) 认识弹簧振子。

(2) 通过观察和分析，理解简谐运动的位移—时间图象是一条正弦曲线。

(3) 经历对简谐运动运动学特征的探究过程，加深领悟用图象描绘运动的方法。

**2. 教材分析与教学建议**

本节课首先通过学生身边和生活中实际的例子引出振动的概念；而后按从简单到复杂、从特殊到一般的思路，从运动学的角度认识弹簧振子，通过演示实验得出弹簧振子的图象；再通过数据分析揭示出弹簧振子的位移—时间图象是正弦曲线，然后从其运动学特征给出了简谐运动的定义，并进一步引导学生认识简谐运动是一种较前面所学的直线运动、曲线运动更复杂的机械运动；最后回归生活和应用举例，使学生知道机械振动是一种普遍的运动形式。本节重点是形成简谐运动的概念和认识它的位移—时间函数图象，难点是简谐运动位移—时间函数关系的建立。

**(1) 弹簧振子**

教师可演示一组不同物体的振动，例如可选取：弹簧振子、单摆、钟摆的摆轮、一端夹紧的锯条、内燃机汽缸模型中的活塞、水中的浮子、不倒翁以及天平指针等，启发学生归纳出这些运动的共同特点，即物体在某位置附近做往复的周期性运动。

让学生仔细观察竖直放置的弹簧振子的振动，首先引导学生分析振子在某位置附近做往复运动的这个“位置”（平衡位置）有什么特点，然后再让学生强化“往复”和“周期性”，这样学生通过有引导、有目的的观察，可以自主归纳出振动的基本特征，掌握机械振动这种运动形式的特点。可以请同学根据振动的特征再举一些例子，逐步形成机械振动的概念。设备较好的学校还可以利用气垫导轨演示弹簧振子的运动。可通过换用不同劲度系数的弹簧和不同质量的

振子，来观察弹簧振子的频率跟哪些因素有关，但不必做定量分析。

通过对直杆上的弹簧振子和气垫导轨上的弹簧滑块振子的观察发现：直杆上的弹簧振子振动越来越弱，很快就会停止，而气垫导轨上的弹簧滑块振子却能振动很长的时间。对比分析这两个振动情况不同的原因，是因为直杆上的弹簧振子和气垫导轨上的弹簧滑块振子所受摩擦阻力不同。推理：如果将条件理想化，不考虑摩擦阻力，则可建立起理想化的弹簧振子模型。这种忽略次要因素、突出主要因素，即理想化的方法是物理学中经常使用的方法，应该让学生认真领会。

**(2) 弹簧振子的位移—时间图象**

振动图象是本节的重点，也是难点。困难在于学生对 $x$-$t$ 坐标系中某一点的确切含义缺乏清晰认识，其原因是对坐标轴的理解（跟具体现象的联系）不够深刻。本教科书采用把连续拍摄的照片一张张顺次铺开的办法来帮助学生建立时间坐标轴的概念。

教科书的正文展示了水平振动的弹簧振子的连续拍摄的频闪照片，拍摄时底片沿垂直于振动的方向匀速运动，频闪仪每经过一定时间闪光一次，相当于每经过一定时间记录了振子的一次位置，因此，照片上获得的是经过各相等时间间隔振子所到达的位置。

“做一做”中的实验，则使时间坐标轴进一步具体化了。用摄像机（或数码相机的摄像功能）对竖直方向的弹簧振子进行摄像，得到的是大约每隔 0.04 s 拍摄的一帧帧照片。在电脑中建立一个幻灯片文件，把这些照片采用“全部插入”的方式插入在同一张幻灯片中，照片会按拍摄的时间顺序一帧一帧自动向右平铺开来。学生从这个操作过程中可以清楚地“看”到时间轴的形成，由于后一帧照片拍摄的时间比前一帧晚 0.04 s，学生很容易认识图象中的后一个点比前一个点晚 0.04 s，因而有利于学生建立和强化时间坐标轴的概念。

如果学校没有条件做以上实验，可参考下面的教学片段。

**弹簧振子的时间—位移图象**

制作可悬挂在黑板上的示教板，在示教板上安装只能沿水平固定直轨道上运动的木板，并在木板上贴白纸。在示教板上竖直固定劲度系数较小的弹簧振子，在弹簧振子上安装一支绘图笔，使其在纸带上记录下运动的情况。先让振子静止，记录振动的平衡位置 $O$。然后让振子振动起来，指导学生观察振子运动情况，记录下来的轨迹是一条直线。再匀速水平移动木板，得出振动的位移—时间关系图象。

下面分析用上述实验得出的弹簧振子的时间—位移关系图象。

问题 1：先不拉动木板，弹簧振子的轨迹是什么？

说明：这一点非常重要，避免学生误将图象当做运动的轨迹。这是这个实验的目的之一。

问题 2：弹簧振子的运动是匀速直线运动吗？是匀变速直线运动吗？怎么判断呢？

说明：需要将弹簧振子在不同时刻的位移情况描绘出来，才有办法进行进一步的研究振子在不同时刻的速度。

问题 3：我们可以用位移—时间图象来研究这个问题，但如何描述时间呢？

弹簧振子的轨迹是直线，可是如何才能将位移随时间的变化展示在纸带上呢？

这里教师可以进一步启发学生，我们看不见时间，只能看见振子的空间位移，那能不能用

空间位移来间接地表现时间呢？

说明：这是该实验的主要目的，让学生亲身体验如何描述时间。

问题4：为什么匀速拉动的纸带上的位移可以表示时间？

说明：因为匀速直线运动中，要发生相等的位移需要相等的时间，纸带上位移的均匀变化反映了时间的均匀流逝，所以可以用移动木板的位移长短来表现时间的长短。

**（3）简谐运动及其图象**

这一小节教学的核心是如何引导学生认识弹簧振子的 $x$-$t$ 图象与一条正弦曲线的关系。可以先引导学生观察 $x$-$t$ 图，让学生猜测一下这个图象像什么函数的图线，并引导学生想办法验证他们的猜想。

“思考与讨论”提供了两个方法。方法一可以将教科书图11.1-2放大后，量出小球各个位置位移和时间的坐标，代入数据进行检验。由于曲线假定为正弦曲线，时间坐标就要进行转换，以一个周期的时间对应为 $2\pi$，将其他数据转换为相应的弧度值。位移坐标以最大值作为一个单位，其余为几分之一个单位。该方法也可以作为课外思考的作业，让学生自己做。

方法二是通过对小球坐标数据的拟合，发现正弦函数关系。也可以利用“几何画板”软件进行研究，方法是：（1）执行“图表”菜单中的“网格形式”命令，设定坐标；（2）执行“图表”菜单中的“画点”命令，输入多组数据，得到一系列点；（3）执行“图表”菜单中“绘制新函数”命令，绘制一幅正弦函数的图象；（4）调整正弦函数的各个参数，使第（2）步中得到的点尽可能多地落在正弦曲线上。最好能做成课件，在课堂演示。这样可以得出简谐运动的位移与时间的关系是一条正弦曲线，并由此定义简谐运动。

应该指出，这是一条某质点做简谐运动时，位移随时间变化的图象。这句话应该反复强调，写出来、说出来，加强印象，以免学生只记住这个实验，而抽象不出 $x$-$t$ 图象。它不是质点的轨迹，质点做的是直线运动，但它的位移是随时间按正弦规律变化（其 $x$-$t$ 图线是正弦曲线），要让学生从数学函数图象的角度知道，$x$-$t$ 图象是正弦曲线的振动是简谐运动。

用图象表示物理过程或过程之中的变化规律非常简洁直观。对简谐运动的图象物理意义的理解要与振动的实际过程结合起来，依据振动过程要能描绘出其图象，看到图象也能想象出具体的振动过程，根据简谐运动的图象应该知道振动的位移、路程及瞬时速度的方向。实验之后最好再进行多媒体动画演示，进一步加深学生的认识。

### 3. 问题与练习

内容分析

本节课后练习是根据教科书内容的逻辑顺序编排的。第1题涉及对简谐运动概念的理解，让学生理解简谐运动的运动学特点。对于“为什么”一问，可以从其图线是不是正弦曲线的角度回答。第2题是教科书中探究过程的再现，不仅锻炼了学生的动手能力、探究能力，加深对图象的理解，也让学生从中体验到学习物理的乐趣。第3、4题通过定量计算加深理解图象与实际运动的联系和区别，同时也为下一节的振幅、周期等概念做准备。

解答与说明

1. $OO_1$ 坐标轴上的坐标代表时间，纵坐标代表偏离平衡位置的位移。因为要用相等的位移表示相等的时间，所以只有匀速拖动白纸才能保证时间均匀变化；如果拖动白纸的速度是 $5\times10^{-2}$ m/s，在 $OO_1$ 坐标轴上应该每5 cm为1格，每格表示1 s。

2. (1) 质点离开平衡位置的最大距离为 10 cm。

(2) 在 1.5 s 和 2.5 s 时，质点的位置都在距平衡位置约 7 cm 处，分别位于平衡位置两侧。

(3) 在这两个时刻，质点都向 $x$ 轴的反方向运动。

3. (1) 第 1 s 内和第 3 s 内，位移方向跟瞬时速度的方向相同。第 2 s 内和第 4 s 内，位移方向跟瞬时速度的方向相反。

(2) 0。

(3) 20 cm。

## 第 2 节　简谐运动的描述

### 1. 教学目标

(1) 理解振幅、周期和频率，了解相位。

(2) 能用公式描述简谐运动。

### 2. 教材分析与教学建议

本节课以弹簧振子为例，在观察其振动过程位移变化的周期性、振动快慢的特点时，引入描绘简谐运动的物理量（振幅、周期和频率），再通过单摆实验引出相位的概念，最后对比前一节得出的图象和数学表达式，进一步体会这些物理量的含义，并通过“科学漫步”栏目将以上知识和生活实际联系起来。

教科书并不就相位这个概念进行“深挖洞”，而是通过阐述简谐运动的 $x$-$t$ 函数式和这三个物理量的联系，使学生能在具体的 $x$-$t$ 函数式中识别简谐运动的振幅、周期（或频率）、相位和初相，这样做就在一定程度上化解了难点。

编者把传统教科书属于选学的“相位”这个物理量，作为必学内容放在新教科书的正文中，并专门设立了标题。相位这个概念是本节教学的难点，教科书没有给出确切的定义，学生只需要能识别在简谐运动的表达式中什么是相位和初相位，几个振动相比较，什么是同相、什么是不同相、什么是反相。教学中要注意把握这个尺度。

**(1) 振幅、周期和频率**

在引入振幅概念时，先让学生观察振动幅度不同的弹簧振子的振动情况，比较其区别，从而提出以平衡位置为原点的最大距离叫振幅。振幅表示振动的强弱，是标量。振幅越大，振动越强。

应该使学生了解描述周期性的运动要用到周期和频率的概念，同时能理解在简谐运动中周期和频率的确切含义。对全振动概念的理解，要让学生明确，振动物体的位移经过一次往复运动返回到初始值，且运动状态也与初始状态一样（这里的主要标志是振动的方向，即该点的速度方向相同），就完成了一次全振动。可用课件演示让学生反复观察，明确全振动的含义。这样，周期和频率这两个概念及其相互关系就不难掌握了。注意防止将“振动的快慢”和“振动物体运动的快慢”这两种表述混淆起来。振动的快慢用周期 $T$、频率 $f$ 描述，周期越长，振动越慢。对一个确定的振动来说，周期 $T$ 和频率 $f$ 是恒定的。而“振动物体的运动快慢”是指振动体在振动过程中的瞬时速度。由于简谐运动是一种变速运动，振动的快慢只能用瞬时速度

描述，它和振动位移一样，也是在做周期性变化。由此认识振幅、周期、频率都是从整体上描述振动特点的物理量。可以用一个音叉，如256 Hz的音叉，来帮助学生理解频率、周期的定义和关系。通过音叉实验学生还可以知道振幅虽然越来越小，但声音的频率（音调）是不变的，始终是C调“1”。还可以通过不同的弹簧振子（弹簧的劲度系数不同，或振子的质量不同，或振幅不同）进行对比实验观察，引导学生探究弹簧振子的周期和频率取决于哪些量，让学生自己归纳总结。

**（2）相位**

教科书通过一个非常直观的摆球实验来引入相位，先演示和观察振动步调相同（同相），然后再演示步调不同，继而重点演示超前、滞后四分之一周期这些比较特殊然而也特别容易观察的情况，让学生逐步积累一些感性认识。还可以从两个不同的位置（如左右两侧的振幅位置）同时释放摆球，进行观察比较。由此理解简谐运动的相位就是振动的“步调”。相位的概念对理解简谐运动及后面波的叠加有着非常重要的作用，教学中应给予充分的重视。同时也应注意，相位的概念比较抽象，教师应类比实际生活现象中的一些具体事例进行介绍。

**教学片段**

**相　位**

（1）实验引入相位

①配置两个相同的单摆，将摆球向同一侧拉离平衡位置，在相同偏角同时释放，它们的振幅相同、周期相同，并且可观察到运动的步调一致。

②将摆球向同一侧拉离平衡位置，在相同偏角先后释放，它们虽振幅、周期相同，但可观察到运动的步调不一致。

③引入相位。

为了描述振动物体所处的状态和比较两振动物体的振动步调，引入相位这个物理量。

（2）实验感受相位

①同时在同一位置释放两个摆球，使其开始振动，它们在各个时刻振动的状态完全相同，我们说它们的相位相同。

②先后释放两个摆球，后释放的摆球的振动总是落后于先释放的摆球；在同一时刻两摆球的振动情况不同，就说这两个摆球振动的相位不同。

③当第一个摆球到达平衡位置时再释放第二个摆球，那么，当第一个到达另一方的最高点时，第二个则刚刚到达平衡位置；而第二个到达另一方的最高点时，第一个摆球已经返回到平衡位置。从相位概念上说，第二个球的相位比第一个总是落后$\frac{1}{4}$个周期（或者说$\frac{1}{4}$个全振动）的相位。

④两个摆球同时从左右两侧的振幅处释放，它们各个时刻振动的状态完全相反，我们说它们的相位相反。

⑤如果两个摆球振动的步调一致，则称为同相；步调完全相反，则称为反相。

总结以上现象可知，相位决定了振动物体在各个时刻所处的不同振动状态。

（3）简谐运动的表达式

学生应该知道简谐运动的表达式，理解简谐运动表达式中各个物理量的单位和物理意义，会将简谐运动的表达式与简谐运动的图象有机地对应起来加以认识和理解。

学生在数学课中已经了解 $y=A\sin(\omega x+\varphi)$ 函数式的意义，能画出其图象，并能解决 $A$、$\omega$、$\varphi$ 对函数图象变化的影响等数学问题。因此，物理教学的任务，是怎样把学生学到的数学知识紧密地和物理现象联系起来，从物理学的角度进一步理解在简谐运动表达式中这些字母所代表的物理意义。

### 3. 问题与练习

内容分析

本节课后练习是针对简谐运动的表达式来编排的，目的是巩固学生的数图结合、数理结合的能力，加深学生对振幅、周期、相位的理解。

解答与说明

1. 它们的振幅分别为 $3a$ 和 $9a$，比值为 $1:3$；频率分别为 $2b$ 和 $4b$；$t=0$ 时相位差是 $\frac{\pi}{4}$。

2. 虚线代表的振动比实线代表的振动相位落后 $\frac{\pi}{2}$。

3. 依题可分别写出甲、乙两个运动中 $x$ 随 $t$ 变化的关系式。

$$\text{甲：}x=2\sin\left(\frac{\pi}{2}t+\frac{\pi}{2}\right)$$

$$\text{乙：}x=3\sin\left(\frac{\pi}{2}t+\frac{\pi}{4}\right)$$

由公式可得这两个简谐运动的位移－时间图象如图 11-1。

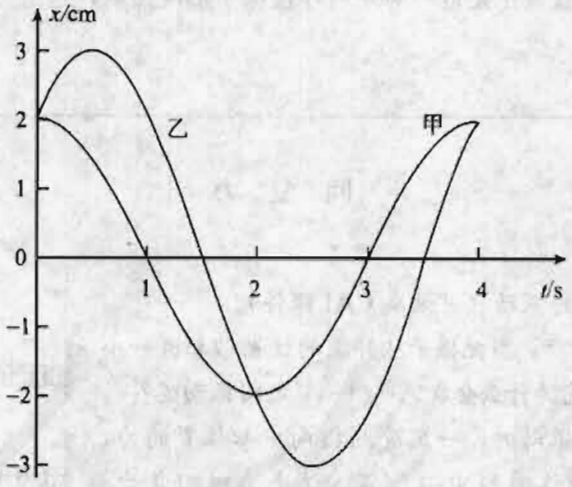



图 11-1

4. A：$x=0.5\sin(5\pi t+\pi)$

B：$x=0.2\sin\left(2.5\pi t+\frac{\pi}{2}\right)$

## 第3节　简谐运动的回复力和能量

### 1. 教学目标

(1) 理解回复力的概念。

(2) 会用动力学的方法，分析简谐运动中位移、速度、回复力和加速度的变化规律。

(3) 会用能量守恒的观点，分析水平弹簧振子中动能、势能、总能量的变化规律。

### 2. 教材分析与教学建议

前两节研究的是做简谐运动的质点的运动特点，不涉及它所受的力以及能量转换的情况，是从运动学的角度研究的。本节要讨论它所受的力和能量转换的情况，是从动力学和能量的角度研究的。这是教学的重点。难点在于对回复力的理解和振动形成原因的认识。

**(1) 简谐运动的回复力**

回复力是根据振动物体所受力的效果来命名的，可以从水平弹簧振子所受的力入手，结合胡克定律进行探究。教学中，有两个难点需要突破。难点之一是 $F=-kx$ 中“$-$”号的引入和认识，可以从平衡位置的两侧入手，具体分析位移的方向及力的方向，以平衡位置为原点，建好坐标轴 $x$。坐标轴本身就规定了“$+$”和“$-$”，因此可以从矢量的角度加以引导，学生自然就会认识到“$-$”表示回复力方向总是与位移的方向相反。难点之二是振动形成的原因，可以从回复力和振子的惯性两个方面加以引导：当振子的惯性使振子远离平衡位置时，回复力总是使振子回到平衡位置，正是这一对矛盾才使振子形成振动，这是分析问题的关键。

#### 回　复　力

①振动形成的原因

观察水平弹簧振子的振动（可做成CAI课件）。

问题：如图11-2所示，当把振子从静止的位置 $O$ 拉开一小段距离到 $A$ 再放开后，它为什么会在 $A-O-A'$ 之间振动呢？

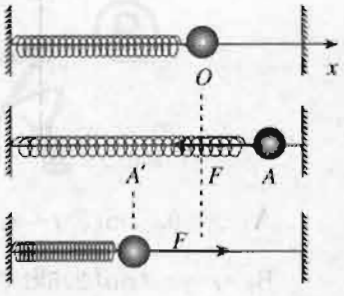



图11-2

分析：物体做机械振动时，一定受到指向中心位置的力，这个力的作用总能使物体回到中心位置，这个力叫回复力。回复力是根据力的效果命名的，对于水平方向的弹簧振子，它就是弹力。回复力也可以是重力、弹力或摩擦力，或几个力的合力，或某个力的分力等。

振子由于惯性而离开平衡位置，当振子离开平衡位置后，振子所受的回复力总是使振子回到平衡位置，这样不断进行下去，就形成了振动。

②简谐运动的动力学特征

问题：弹簧振子振动时，回复力与位移有什么关系呢？

分析：分析振动形成的过程可知，振子的位移总是相对于平衡位置而言的，即初位置是平

衡位置，位移可以用振子的位置坐标 $x$ 来表示，方向始终从平衡位置指向振子。回复力的方向始终指向平衡位置，因而回复力的方向与振子的位移方向始终相反。

对水平方向的弹簧振子来说，回复力就是弹簧的弹力。根据胡克定律可知，在弹簧发生弹性形变时，弹簧振子的回复力 $F$ 跟振子偏离平衡位置的位移 $x$ 成正比，方向总是与位移的方向相反。以 $O$ 为坐标原点，建立坐标轴 $x$ 如图 11-2 所示，则

$$F=-kx$$

式中 $F$ 为回复力，$x$ 为偏离平衡位置的位移，$k$ 是劲度系数，负号表示回复力与位移的方向总相反。

理论研究表明，如果质点所受的力与它偏离平衡位置的位移大小成正比，并且总指向平衡位置，质点的运动就是简谐运动。

做简谐运动的质点，回复力总满足 $F=-kx$ 的形式，式中 $k$ 是比例系数。这就是简谐运动的动力学特征。

"做一做"中的小球所受的合力与它的位移的关系的证明如下。

如图 11-3 所示，平衡状态时有 $mg=kh_0$。

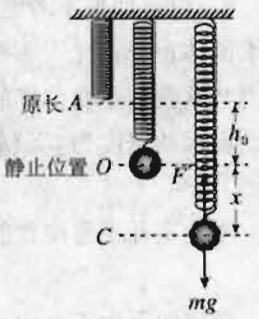


图 11-3

当小球向下偏离平衡位置 $O$ 拉动 $x$ 长度到 $C$ 时，弹簧的弹力 $F'=k(x+h_0)$

规定向下为正方向，则振子所受的回复力为

$$\begin{aligned}F&=mg-F'=mg-k(x+h_0)\\&=mg-kx-kh_0\\&=-kx\end{aligned}$$

回复力与位移的关系符合简谐运动的定义。通过推导，要让学生体会判断物体是否做简谐运动的思路和方法。

**(2) 简谐运动的能量**

从能量守恒的角度对简谐运动进行分析时，只限于对水平弹簧振子。对于竖直的弹簧振子，涉及弹性势能、重力势能、动能三者的变化，不要求从能量的角度对它进行分析。

可先复习一下机械能守恒定律及其守恒条件。在此基础上，用 CAI 课件模拟弹簧振子的振动，分别显示分析 $x$、$F$、$a$、$v$、$E_k$、$E_p$、$E$ 的变化情况，引导学生着重观察振子从 $A\to O\to A'\to O\to A$ 的一个循环，把这一循环分解为四个阶段：$A\to O$、$O\to A'$、$A'\to O$、$O\to A$，逐一加以分析。

再通过"思考与讨论"栏目，引导学生归纳总结出水平弹簧振子的位移大小、速度大小、动能、势能和总机械能的变化规律，掌握简谐运动中动能、势能和总能的变化规律以及分析方法，最后总结出：

总机械能＝任意位置的动能＋势能＝平衡位置的动能＝振幅位置的势能

可以看出，弹簧振子在平衡位置的动能越大，振动的能量就越大。振幅越大，振幅位置的势能就越大，振动的能量就越大。

### 3. 问题与练习

内容分析

前两道题通过对斜面上的弹簧、水中的木筷、圆弧面上的小球运动的分析，丰富学生对简

谐运动及其回复力的认识，使学生进一步认识到回复力不是物体单独受到的另外一种性质的力，它可以是物体所受的某个力，也可以是物体所受的合力，还可以是物体所受某个力的分力，并让学生进一步了解判断一个物体是不是简谐运动的思路和方法。第3题是应用牛顿第二定律，加深对振动平衡位置的认识。第4题是从振动图象的角度，让学生全面认识简谐运动的回复力、速度、加速度、动能和势能的变化规律，进一步丰富学生对振动图象的了解和认识。

解答与说明

1. 小球静止时受到重力、斜面的支持力和弹簧的拉力三个力的作用。平衡时弹簧伸长了$x_0$，则$mg\sin\theta=kx_0$。弹簧拉长后，设离开平衡位置的位移为$x$，规定$x$方向为正方向，则弹簧的拉力

$$F'=-k(x_0+x)$$

小球沿斜面方向受的合力即为小球受的回复力

$$F=F'+mg\sin\theta=-k(x_0+x)+kx_0=-kx$$

这个力与偏离平衡位置的位移成正比且方向相反，因此小球的运动是简谐运动。

2. (1) 如果不考虑水的黏滞阻力，木筷受到重力和水的浮力，重力恒定不变，浮力与排开水的体积成正比，木筷静止时的位置看做平衡位置。以平衡位置为坐标原点，如果木筷所受合力与其偏离平衡位置的位移成正比，且方向相反，则可以判定木筷做简谐运动。证明如下。

设水的密度为$\rho$，横截面积为$S$，静止时浸入水中的深度为$h_0$，则

$$mg=\rho gSh_0$$

木筷离开平衡位置的位移为$x$，木筷所受的浮力

$$F'=\rho gS(x+h_0)$$

规定向下为正方向，则

木筷所受的回复力

$$F=mg-F'=-\rho gSx=-kx$$

由此可知，木筷的运动是简谐运动。

(2) 小球受到重力和圆弧面的支持力。重力恒定不变，支持力始终与运动方向垂直。这样，就回到了与单摆相同的条件。本题的目的是为下节的学习进行一些铺垫，详细推导过程参看第4节。

3. 由$F=-kx$与牛顿第二定律$F=ma$可知，以$AB$方向为正向

在$A$点：$F_A=-kx_A=ma_A$

在$B$点：$F_B=-kx_B=ma_B$

且$A$、$B$在平衡位置两侧，故$x_B-x_A=10$ cm

三式联立解得：$x_A=-4$ cm，$x_B=6$ cm。

即平衡位置在$A$、$B$之间，距$A$点4 cm，距$B$点6 cm。

4. (1) 0.6 s、1.2 s、1.4 s；(2) 0.2 s、1.0 s、1.2 s；(3) 0、0.2 s、0.6 s、0.8 s、1.0 s、1.2 s、1.4 s；(4) 0.1～0.3 s、0.5～0.7 s、0.9～1.1 s、1.3～1.5 s；(5) 0～0.1 s、0.3～0.5 s、0.7～0.9 s、1.1～1.3 s。

## 第4节　单摆

### 1. 教学目标

(1) 知道什么是单摆，了解单摆运动的特点。

(2) 通过实验，探究单摆的周期与摆长的关系。

(3) 知道单摆周期与摆长、重力加速度的关系。会用单摆测定重力加速度。

### 2. 教材分析与教学建议

在学习“单摆”之前，学生们学习了简谐运动及其图象，简谐运动的振幅、周期、频率以及回复力和能量等内容。这里作为简谐运动的应用实例，来学习单摆的运动规律、受力情况和图象特点，以加强对单摆内容的理解，深化、突出了单摆这种简谐运动。

本节教学的重点是单摆振动的特点和单摆周期公式的探究，难点在于单摆的回复力以及对小角度近似的处理。

本节内容多、理论性强、探究过程复杂，建议用两个课时完成：第1课时学习单摆振动的图象和回复力、单摆做简谐运动的条件等内容，第2课时着重探究单摆周期与摆长的关系。

**(1) 单摆及其回复力**

单摆的受力和运动情况较弹簧振子复杂。研究单摆时，注意理想化模型方法的运用是分层次的：一是将实际的摆纳入单摆模型，二是将单摆纳入简谐运动模型。教学中应该首先明确单摆是一种理想化的模型。通过演示实验观察单摆的振动图象，使学生在感观上得到单摆的图象，加深感性认识，给学生提供一个大胆猜想的依据。这个实验最好让学生亲手做一做，体会一下，白纸做匀速运动是什么意思，不做匀速运动又会怎样？白纸做匀速运动，可以保证得到的单摆振动图象的时间轴的间隔均匀分布，这是学生必须要体会的。如果他们能真正体会到它的作用，就不难明白这个实验的意图就是寻求 $x$-$t$ 图象。其次注意在单摆处于静止时和振动过程中的最高点、最低点、一般位置所分别对应的受力分析，使学生领会课本中“因为摆球沿圆弧运动，因此可以不考虑沿悬线方向的力，只考虑沿圆弧切线方向力”的含义。还要使学生明确单摆的回复力只用考虑重力沿圆弧切线方向的分力，而不用考虑绳子的拉力。从运动和受力两个方面，进一步说明单摆是简谐运动。注意让学生理解单摆做简谐运动的受力条件，并体会物理学中常用的近似方法。

**(2) 单摆的周期**

为了研究周期与各种因素是否有关以及有怎样的关系，可以采用控制变量的方式，按照定性和定量相结合的方案。单摆周期公式可通过实验观察、设疑、释疑的方式引入，以培养学生探求和分析新问题的能力并加深对公式的物理意义的理解。为此，可以先介绍一下伽利略发现教堂吊灯振动规律的故事，接着通过对单摆回复力的分析，得出单摆是一种简谐运动。演示实验也可以考虑与“探究单摆周期与摆长的关系”的实验结合起来，改为探究性的学生分组实验。首先提出单摆的周期可能与哪些因素有关，让学生提出猜想，再让学生考虑如何验证这些猜想，并设计出验证的实验方案，从中体会研究的过程和研究方法。建议在实验过程中，以表格的形式板书在事先准备的小黑板或投影片上，学生对比易于总结。在介绍 $T=2\pi\sqrt{\frac{l}{g}}$ 的基

础上，介绍摆钟、测重力加速度等内容。在教学中通过教师的演示、引导、讲述、分析、归纳总结，不仅可使学生正确了解规律的起因，更能培养学生的实验能力。对公式 $T=2\pi\sqrt{\frac{l}{g}}$ 的理解、应用是本节的重点，所以对这一实验的演示，师生应认真对待。

单摆的摆角越小，其运动越接近简谐运动。从理论角度考虑，单摆做简谐运动的条件是摆角小于5°。而在实际中，摆角小于5°的单摆，其运动细节很难观察。因此，在测单摆周期的实验中，可在摆角为15°以内的情况下研究单摆的运动情况，此时由于角度而引起的相对误差为0.5%左右，这在中学物理中是允许的。

**(3) 用单摆测重力加速度**

教科书将传统的“用单摆测重力加速度”的实验改为知识的应用，其目的是加强学生对学习过程的体会，以及科学探究方法的掌握。根据教科书图11.4-5的实验数据，学生可以选择误差较小的数据由公式求出重力加速度。还可以通过图象法，通过改变摆长得到摆长 $l$ 与周期平方 $T^2$ 的图象，从直线的斜率得到重力加速度。

### 3. 问题与练习

内容分析

前两道题进一步巩固和强化对单摆周期公式的理解和认识，后两道题强调了物理学研究中把公式和图象相结合的重要性。

解答与说明

1. 由单摆周期公式 $T=2\pi\sqrt{\frac{l}{g}}$，周期与振幅和摆球质量无关。因 $g'=\frac{g}{2}$，$l'=\frac{l}{4}$，所以 $T'=\frac{\sqrt{2}}{2}T$。

2. 由 $T=2\pi\sqrt{\frac{l}{g}}$，当 $T=2$ s，$g=10$ m/s$^2$ 时，摆长约为1 m。

依题可得，这个摆在月球上

$$T=2\pi\sqrt{\frac{1}{1.6}}\ \text{s}=5\ \text{s}$$

所以在月球上做50次全振动要用250 s。

3. (1) 由图象可以看出，单摆乙的周期是单摆甲的周期的2倍，即 $T_{甲}=\frac{1}{2}T_{乙}$。由单摆的周期公式可知 $l_{甲}:l_{乙}=1:4$。

(2) 由图象可以看出，当乙第一次到达右方最大位移处时经过了 $\frac{1}{4}$ 周期，而此时甲振动到 $\frac{1}{2}$ 周期，因此甲处于平衡位置，此时正向左方运动。

4. (1) 由图可知该单摆的周期为2 s，代入周期公式 $T=2\pi\sqrt{\frac{l}{g}}$，可算出摆长 $l=1$ m。

(2) 其摆角最大时，摆球处于振幅位置。由此可知，摆球振幅为0.04 cm，远小于摆长，因此，最大偏角的正弦值为

$$\sin\theta\approx\frac{A}{l}=0.04,\ \theta\approx2.3^\circ$$

## 第5节　外力作用下的振动

### 1. 教学目标

(1) 通过实验，认识受迫振动的特点。

(2) 知道共振发生的条件以及应用共振和防止共振的事例和方法。

### 2. 教材分析与教学建议

本节首先介绍了固有频率的概念，然后从图象和能量的角度分析了阻尼振动，并介绍了受迫振动，最后通过竖直弹簧振子的共振和单摆的共振两类典型的共振实验，全面认识共振现象、理解共振曲线。

教科书将阻尼振动、受迫振动、共振三个概念放在一起，目的在于使学生能够很好地比较、区别和理解这几种振动。阻尼振动、受迫振动、共振都属于在外力（振动系统之外提供）作用下的振动。阻尼振动的外力是阻力，做功将消耗系统的机械能。受迫振动的外力是动力，做功将补偿系统做阻尼振动时机械能的损耗。共振是受迫振动的一种特殊情况。因此，应从外力特征上来展开对这几种振动的认识。

**(1) 阻尼振动**

简谐运动只是理想的情形。在实际振动中，由于阻力的存在，振动系统最初所获得的能量，在振动过程中因不断克服阻力做功而减小。振动强度逐渐衰减，振幅也就越来越小，最后停止振动。这种振动称为阻尼振动。

从能量转化角度来看，实际的振动都是阻尼振动。由于摩擦和介质阻力做功，系统的机械能转化为内能等其他形式的能，机械能总量逐渐减少，如果没有能量补充，最终振动要停下来。能量减少的方式通常有两种：一种是由于摩擦阻力的存在，例如弹簧振子周围空气等介质的阻力和支承面的摩擦力的作用，使振动的机械能逐渐转化为内能；另一种是由于振动系统引起邻近介质中各质元的振动，振动向外传播出去，使能量以波动形式向四周辐射。这虽然只是机械能的转移，但对振动系统本身来说，其能量也因不断输出而在衰减。例如，音叉在振动时，不仅要克服空气阻力做功而消耗能量，同时还因辐射声波而损失能量。

这一节主要讨论振动系统受摩擦阻力的情形。在振动情况下所受的摩擦阻力，一般来说，往往是指介质的黏滞阻力。在物体运动速度较小的情况下，黏滞阻力的大小与物体运动速度的大小 $v$ 成正比，方向与速度方向相反。

**(2) 受迫振动**

物体在系统内部回复力作用下产生的振动叫做自由振动。为使振动持续下去，必须对系统施加周期性的外力，这种力叫驱动力，也是以力的作用效果命名的力。物体在外界驱动力作用下的振动叫做受迫振动。受迫振动的频率不等于系统自由振动时的频率。实验表明，物体做受迫振动时，在振动稳定后的频率等于驱动力的频率，跟物体的固有频率没有关系。驱动力的频率接近物体的固有频率时，受迫振动的振幅增大，这种现象叫做共振。

受迫振动是指振动体的振动不是由它本身的结构所决定的，而是由一个周期性变化的外力（即驱动力）在迫使它振动。例如一块架起的跳板，如果我们敲它一下，它就会按自己的固有频率颤动起来，这是固有振动。可是，现在有人在跳板上晃动，跳板在人脚下，按人的步伐频

率而振动，这个振动频率就完全取决于在它上面走动的人了，这种振动就是受迫振动。如果人给予跳板的驱动力的频率恰好等于跳板的固有频率，就会每拍必合，愈振愈烈，这就是共振。可以找出许许多多这种共振现象的例子，来说明受迫振动与共振之间的关系。

教学中应充分发挥实验的作用，使学生理解物体在做受迫振动时其频率跟驱动力频率的关系，以及受迫振动的频率与物体固有频率接近时振动的特点。

**(3) 共振**

在做共振实验时，也可以用下面的实验代替教科书中的实验：在同一块薄木板上固定许多长度不同，但质地、粗细相同的小木棒，振动其中的一个，观察其他小木棒哪一个振动得最剧烈。

让学生用辩证的观点认识到，共振在生活中有益有害。声音的共鸣是常见的共振现象。如果振源的频率等于另外一个系统的固有频率，就会发生共鸣现象。各种乐器都有一个共鸣箱，会使得振源的声音增强。利用共振原理做成的共振筛，偏心轮的振动频率可以用电机的电压来控制。当偏心轮提供的驱动力频率等于筛子固有频率时，筛子的振动加剧，筛除杂物的效率明显提高。各类发动机都有一定的固有频率，如果发动机曲轴的转动频率造成发动机整体共振，显然是不利的，为此就要设法改变发动机的质量以改变固有频率，或者改变转速以调整驱动力的频率。

注意引导学生阅读本节教材后的“科学漫步”，多思考一下共振在实际中的应用（如乐器的共鸣箱等），以及避免共振的方法，培养学生理论联系实际的能力和习惯。还可以让学生上网查询共振的有关应用。

**共　振**

通过教科书图 11.5-3 所示的实验，让学生体验共振。实验前，给学生介绍清楚哪个球代表驱动力，驱动力的频率由什么决定，哪些球做受迫振动，各自的固有频率由什么决定。

实验中，引导学生重点观察各个做受迫振动的小球的振幅情况，哪些较大，哪些较小。同时，也要观察各个做受迫振动的小球的周期（频率）。

实验后，引导学生归纳总结受迫振动所遵循的两大规律：一是受迫振动的周期（频率）等于驱动力的周期（频率），与物体的固有周期（频率）无关；二是驱动力的周期（频率）与固有周期（频率）相差越小时振幅越大，相差越大时振幅越小，相等时振幅最大（共振）。

改变驱动的小球，让学生先根据上面总结出的规律猜想，各受迫振动的小球振动周期（频率）怎样？振幅哪个大，哪个小？然后实验，看看猜想是否正确。

根据以上规律，再指导学生定性画出共振曲线，并加以理解和说明。

### 3. 问题与练习

内容分析

第 1 题知识点很简单，但情景设置得好，重在培养学生的审题能力。第 2 题巩固了共振实验及概念。第 3 题注意培养学生理论联系实际的能力。第 4 题很灵活，将单摆周期公式与共振图象结合起来，有一定难度。

解答与说明

1. 小球振动达到稳定时周期为 4 s，频率为 0.25 Hz。

2. (1) $B$、$C$ 也开始振动，且 $C$ 球振动的振幅越来越大。

(2) $A$、$B$ 开始振动，$A$ 球的振幅越来越大。

3. 根据共振的规律，在颠簸的时间间隔正好等于固有周期时，汽车颠簸得最厉害。由 $v=\frac{s}{T}$ 可知，此时速度为 $v=5.3$ m/s。

4. (1) 由图象可以看出单摆的固有频率为 0.3 Hz，则其周期为 $T=\frac{1}{f}=3.3$ s。

由单摆的周期公式 $T=2\pi\sqrt{\frac{l}{g}}$，可求得

$$l=\frac{T^2g}{4\pi^2}=\frac{g}{4\pi^2f^2}=\frac{10}{4\pi^2\times0.3^2}\ \text{m}=2.8\ \text{m}$$

(2) 摆长增大，单摆的固有周期增大，固有频率减小，共振曲线的峰将向左移动。

## 三、教学设计案例

### 第 4 节　单摆①

#### 教学目标

(1) 知道什么是单摆，了解单摆的运动特点。

(2) 知道在摆角很小时单摆做简谐运动。

#### 教学过程

● 引入新课

前面几节课我们学习了弹簧振子，知道了简谐运动的特点及振动周期。在日常生活中，我们还常常看到摆钟、荡船、秋千都在竖直平面内做摆动，这些摆动是属于一种什么样的运动呢？今天我们先学习最简单的摆动——单摆的运动。

● 进行新课

【板书】第 4 节　单摆

1. 什么是单摆

在细线的一端拴一个小球，另一端固定在悬点上，如果悬挂小球的细线的伸缩和质量可以忽略不计，线长又比球的直径大得多，这种装置就叫单摆，单摆是实际摆的理想化模型。

演示实验：出示各种摆动模型（如图 11-4 所示）并使它们摆动起来。

师：以上摆动模型是不是单摆，为什么？

生：模型(1)不是单摆，因为橡皮筋伸长不可忽略。

① 《单摆》这节课可分两个课时进行：第 1 课时讲单摆的简谐运动，第 2 课时探究单摆的周期公式。本案例是针对第 1 课时设计的。

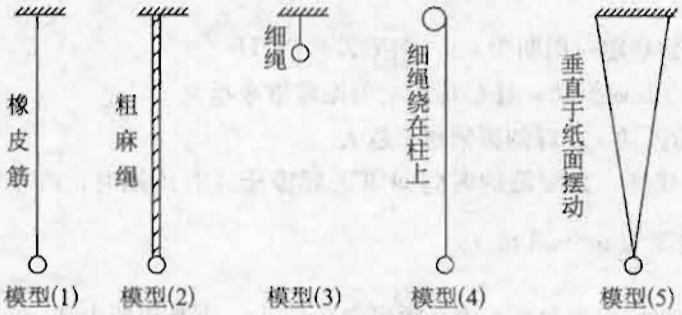



图 11-4

模型(2)不是单摆，因为绳子质量不可忽略。

模型(3)不是单摆，因为绳长不是远大于球的直径。

模型(4)不是单摆，因为悬点不固定，因而摆长在发生变化。

模型(5)是单摆。

师：通过以上的实验观察，我们认识了单摆。使图 11-5 的单摆小球在竖直平面内摆动起来，小球在做什么运动？

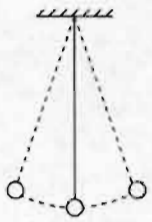


图 11-5

生：机械振动。

师：为什么？

生：因为小球在中心位置两侧做往复运动。

师：对，单摆的摆动是机械振动。凡是振动都需要回复力，那么单摆的回复力是什么力？

【板书】2. 单摆振动的回复力

师：我们首先来分析一下单摆的受力情况。如图 11-6，摆球静止在 $O$ 点时，它受到几个力？这些力的关系如何？

生：摆球受到重力与悬线拉力，两力彼此平衡。

师：对，$O$ 点就是单摆的平衡位置。拉动摆球使它偏离平衡位置，然后放手，摆球沿着以 $O$ 为中点的一段圆弧 $AA'$ 做往复运动。当摆球摆到 $A'O$ 弧上任意一点 $P$ 时（如图 11-6），摆球受到几个力？

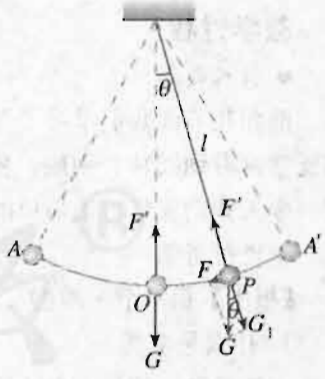



图 11-6

生：摆球受重力 $G$ 和悬线的拉力 $F'$。

师：重力 $G$ 与拉力 $F'$ 是否平衡？

生：不平衡，因为摆球做往复运动是变速运动。

师：那么摆球回到平衡位置的回复力是什么力？

生甲：单摆的回复力是摆球受的重力和绳的拉力的合力。

生乙：单摆的回复力是重力沿圆弧切线方向的分力。

师：单摆振动的回复力是什么？关键是分清它与弹簧振子振动的区别。弹簧振子是在一条直线上做往复运动，它振动的加速度是由合外力产生的。而单摆在一个圆弧上来回运动，摆球做圆周运动时需要向心力来改变摆球的运动方向，这个向心力就是重力 $G$ 沿悬线方向的分力 $G_1$ 跟悬线的拉力 $F'$ 的合力，它的方向指向圆心，它不改变摆球在弧线上运动的快慢，只改变摆球的运动方向。而重力的另一个分力 $F$，即重力沿圆弧切线方向的分力，会改变摆球在弧线上运动的快慢，它的方向始终指向平衡位置，使摆球沿弧线在平衡位置两侧做往复运动。因此

在研究单摆振动的回复力时不需要考虑向心力，只考虑重力沿圆弧切线方向的分力 $F$ 就可以了。当然，这个力也是重力与悬线的拉力的合力沿圆弧切线方向的分力。

【板书】重力沿切线方向的分力 $F=mg\sin\theta$。

师：$F=mg\sin\theta$ 能否说明单摆振动是简谐运动呢？请同学们回忆一下简谐运动回复力的特点。

生：物体所受到的回复力与位移大小成正比，并且总指向平衡位置。表达式为 $F=-kx$。

师：对 $F=mg\sin\theta$ 这个力虽然始终指向平衡位置，其大小随位移的增大而增大，随位移的减小而减小，但不满足简谐运动的条件。即在通常情况下，单摆振动并不是简谐运动。那么，在什么条件下回复力与位移大小成正比呢？请看表格（展示投影片）。

| 摆角 $\theta$ | 正弦值 | 弧度值 |
|---|---|---|
| 1° | 0.017 54 | 0.017 45 |
| 2° | 0.034 90 | 0.034 91 |
| 3° | 0.052 34 | 0.052 36 |
| 4° | 0.069 76 | 0.069 81 |
| 5° | 0.087 16 | 0.087 27 |
| 6° | 0.104 53 | 0.104 72 |
| 7° | 0.121 87 | 0.122 17 |
| 8° | 0.139 17 | 0.139 63 |

师：在摆角很小的情况下，$\sin\theta$ 的值可近似看做等于 $\theta$ 用弧度表示的值，而 $\theta$ 值可以通过弧与半径之比求得，这时圆弧可近似地看成直线，则有

$$\sin\theta\approx\theta,\ \theta\approx\frac{x}{l}$$

$$F=mg\sin\theta=mg\frac{x}{l}$$

师：$x$ 就是摆球偏离平衡位置的位移，$mg$ 和 $l$ 都是恒定值，$\frac{mg}{l}$ 可用常数 $k$ 表示。可见在摆角很小时，单摆振动的回复力与位移大小成正比，摆球在任意点 $P$ 时位移方向与回复力方向相反，我们可以用负号表示，上式可写成：

$$F=-kx$$

【板书】3. 摆角很小时，单摆的振动为简谐运动。

师：上节课我们已知道简谐运动图象都是正弦或余弦曲线，那么单摆的振动图象又如何呢？请同学们观察实验。

【演示】把装有细沙的漏斗吊在支架上，下方放一块硬纸板，让漏斗摆动的同时沿着跟摆动方向垂直的方向匀速拉动硬纸板。从漏斗漏出的细沙连续不断地落在硬纸板上，记录下各个时刻摆球的位置，显示出一条曲线。

师：从实验中可以观察到单摆振动曲线也是一条正弦或余弦曲线，这样从运动学角度也可以说明单摆是做简谐运动。

# 四、教学资源库

## （一）概念、规律和背景资料

**1. 振动和波动是普遍存在的物理运动形式**

人类生活在运动的世界里，机械运动是最直观的物理运动形式，它描述物体的位置、方向如何随着时间的推移而变化。研究机械运动的基础物理内容，构成了经典力学。在机械运动中，除了物体发生平动和转动之外，比较常见的运动就是振动和波动了。人类生活中，到处都有振动的例子。人们乘车、船以及飞机会感到振动；工厂中大型机械运转时，机器甚至厂房会振动；农民在耕种时，农具会振动；甚至地球本身也在不时地因地壳运动而振动着。广义而言，人体内心脏的跳动、肺脏的扩张和收缩等也在一定意义上属于振动。振动并不限制在机械运动范围之内，电流和电压在交流电路中围绕着一定的数值往复变化，也是一种振动。振动现象比比皆是。

有的振动有利，有的振动有害。人们广泛地应用着有利的振动。日常生活中，人们须臾不可离开的各种计时装置利用着振动，通信、电视以及发电等是电磁振动在不同领域中的具体体现。中学物理教科书上常举的共振筛、理发推以及播种机是机械振动的应用。振动的有害方面也不少。人们需要安静的工作环境时（如进行精密的天平测量时），周围街道上的车辆移动甚至都会成为一种干扰。在工厂的生产中，不利振动更是多见。例如大型化工厂的空气压缩机一般都安装在钢结构的厂房里。当卧式活塞空气压缩机运转时，活塞做水平方向的往复运动。活塞来回运动一次，机器和厂房构成的整个系统的质心也相应地在水平方向来回运动一次，这导致厂房自身的质心在水平方向做相应的往复运动。同样地，机器竖直方向的往复运动，也会导致与其固连的厂房相应地上下振动。如果厂房设计得不合理，或者在合理设计的厂房内随便变更空气压缩机的转速，都有可能导致厂房的振动加剧，甚至发生受迫振动下的共振，使厂房形变过大发生损坏甚至坍塌。此外，还有有害的自激共振现象。风吹过烟囱或桥梁，在适当的风速和建筑物尺寸下，就会发生破坏性的自激共振。1953 年在美国有一只直径为 5 m、高约 90 m的焊接烟囱，在风速约为 16 m/s 的强风持续吹动下，以 1 Hz 的固有频率发生自激共振。共振后不久，烟囱就发生挠曲，并且开了个大裂缝。对于有害的振动，根据其发生机理，可以加装特定的隔振装置或采取防振措施加以抑制或消除。

说到振动，就要谈到波。粗略地说，波就是振动的传播。实际上，人们能够感知振动的存在，总是离不开振动的某种传播过程。机械波是机械振动在弹性介质中的传播过程。人类最早认识和研究的波恐怕就是机械波中的声波了。无线电波、X 射线以及光是电磁振动的传播，不过这种传播已经不再需要借助任何介质来实现，它可以在真空中传播。同为振动的传播，声波和电磁波传播的机理不同。前者是弹性介质中质元受到因应变产生的应力的驱动，把介质中的局部形变（即振动）传播开来；而后者基于电磁感应现象，把电路中局部范围内的电或磁的振动散播开去。

波动的利用同样相当广泛，如各种无线电通信、光测量、音乐欣赏以及超声波诊断或探伤，比比皆是。不必要的波动干扰，例如空中杂散电波对于各种电子设备的影响，可以采用吸收或屏蔽的方法加以降低或消除。现代隐形飞机采用的隐形技术之一，就是在飞机外附加一层

特别材料，它对雷达波段的无线电波有强烈吸收作用而极少反射，从而使隐形飞机在接收雷达反射波的屏幕上图象变模糊，甚至消失。高级音乐厅的墙壁上或空中往往设置足够面积的吸声板，用以控制乐音在空中的抑扬时间（交混回响时间），提高音响质量。

**2. 振动的分类**

振动的分类方式是多种多样的。按照是否能够用一个时间参数的周期函数来描述系统的响应，可以把振动分为**周期振动**和**非周期振动**。把振动量 $y$ 作为纵坐标轴，用横坐标轴代表时间 $t$，可以作出振动曲线。所谓周期函数是指满足

$$y(t)=y(t+nT) \tag{1}$$

的函数 $y(t)$，其中 $n$ 为整数，$T$ 是一个与 $t$ 无关的常数，它表示完成一次全振动所需的时间，称做周期。周期振动的振动曲线，每隔 $T$ 重复一次。

按照激励的给予方式，周期振动又可以分为**自由振动**和**非自由振动**。所谓自由振动是指系统受到初次激励后，再没有外界激励时产生的振动。一次性获得必需的能量输入后，系统振动过程的特征由其本身的固有性质（如质量、弹簧的劲度系数、摆长以及阻尼等）决定。简谐运动和弱阻尼振动就属于自由振动。简谐运动可看成无阻尼振动，一次性激励后，振动就永远地持续下去。如果存在着引起能量损耗的任何形式的阻尼（如空气或其他介质的阻力，以及电磁阻尼等），自由振动不可能无限期地持续下去，随着能量的消耗，振幅逐渐衰减，直到完全停止。为了使振动能够维持下去，就需要外界对系统提供持续性的激励。在不同种类的持续性激励下，系统的响应表现为不同的持续振动方式，常见的有受迫振动、自激振动和参数振动等。激励是产生振动的一个必要条件，阻尼足够小（弱阻尼或无阻尼）是产生自由振动的必要条件（而不是产生振动的必要条件）。

**受迫振动**是系统在持续不停的周期性激励作用下的振动。这种激励与系统本身的性质无关，振动过程的特征不仅与系统的固有性质（如弹簧的劲度系数、质量和阻尼等）有关，还与激励的性质（如振幅和频率）有关。受迫振动的激励方式可能以周期力的方式，还可以有其他的形式。例如，振动系统的支撑点做简谐运动，同样可以使系统发生受迫振动。

自激振动不同于受迫振动，系统受到的不再是周期性激励。产生自激振动的系统必须有一个能源，它为系统提供一个持续的（甚至恒定不变的）激励，这个激励被系统的初始振动（通过反馈）调控为周期性的能量输入，把恒定的能源转化为周期性能源来弥补阻尼带来的损耗，使振动得以维持。自激振动的实例很多，诸如风吹树梢飕飕作响，琴弓驱动使琴弦振颤，笛、笙等管乐器的气柱振动发声，以及人体的呼吸和心脏跳动都是自激振动的例子。

**参数振动**是指外界通过使系统内的某个物理参数（如质量、摆长、惯量以及刚度等）发生周期性的变化，来对系统提供能量输入（参数激励）。输入的能量同样用以弥补阻尼带来的能量损失，使振动得以维持下去。最常见的参数振动的实例恐怕就是荡秋千了。荡秋千者在摆动过程中，适时地蹲下、站起（即相位关系恰当），改变等效摆长而对摆动系统做功，人的生物能转化为机械能，周期性地输入系统，使秋千摆动不止。

除了以上谈到的各种周期振动之外，还有系统的响应不能用周期函数描述的非周期振动。这种振动的时间历程 $y=y(t)$ 在振动曲线上不出现重复。非周期振动又可分为脉动响应和随机振动，它们各有自己的形态特征。脉动性的激励，例如短时间内作用在系统上的冲击力，使系统作出脉动响应，某处的位移 $y$ 随时间的变化关系曲线可能如图 11-7 所示。核爆炸引起较远距离处的物体发生的动

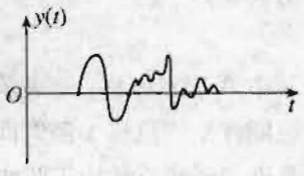


图 11-7

力学响应，如位移、加速度和应力等随时间的变化，就属于这种类型的振动。

振动的形式多种多样，其中简谐运动是最基本的。周期振动不一定是简谐运动，但是依照傅里叶定理，可以把它表示成一个傅里叶级数，即多个简谐运动的叠加。设描述周期振动的函数为$y=y(t)$，$t$为时间参数，$T$为周期，则有

$$y(t)=\frac{a_0}{2}+\sum_{n=1}^{\infty}(a_n\cos n\omega t+b_n\sin n\omega t) \tag{2}$$

式中$\omega=\frac{2\pi}{T}$，称做基频，各项常系数满足

$$a_n=\frac{\omega}{\pi}\int_{-\frac{T}{2}}^{\frac{T}{2}}y(t)\cos n\omega t\,\mathrm{d}t$$

$$b_n=\frac{\omega}{\pi}\int_{-\frac{T}{2}}^{\frac{T}{2}}y(t)\sin n\omega t\,\mathrm{d}t$$

$$(n=1,\ 2,\ \cdots)$$

利用三角函数公式可以把（2）中频率相同的两项合并写成一项：

$$a_n\cos n\omega t+b_n\sin n\omega t=C_n\cos(n\omega t-\varphi_n)$$

式中

$$C_n=\sqrt{a_n^2+b_n^2}$$

$$\tan\varphi_n=\frac{b_n}{a_n}$$

这样就可以把（2）式改写成

$$y(t)=\frac{a_0}{2}+\sum_{n=1}^{\infty}C_n\cos(n\omega t-\varphi_n) \tag{3}$$

此式表明，一切周期振动均可以表示成一系列简谐运动的线性叠加，这些简谐运动的频率是基频$\omega$的整数倍，称做谐频。把周期函数分解为简谐函数（正弦或余弦）的方法，叫做频谱分析。

**3. 简谐运动的定义**

简谐运动的定义，常见的有以下三种：

（1）根据运动学的特征来定义：物体对平衡位置的位移随时间作余弦（或正弦）变化的运动，叫做简谐运动，即

$$x=A\cos(\omega t+\varphi)$$

（2）根据力的特征来定义：物体在线性回复力作用下的运动是简谐运动，线性回复力

$$F=-kx$$

（3）采用运动微分方程来定义：简谐运动遵从的微分方程为

$$\frac{\mathrm{d}^2x}{\mathrm{d}t^2}+\omega^2x=0$$

对于这三种定义可进行以下讨论。

①定义(1)着眼于运动特征。但是，在随时间作余弦变化的驱动力作用下的稳定受迫振动的规律为

$$x=A\cos(\omega_1 t-\varphi)$$

其中$A$表示振幅，$\varphi$表示稳定受迫振动比强迫力落后的相位，$\omega_1$为强迫力变化的角频率。这也同样是“位移$x$随时间作余弦变化”，然而它不属于简谐运动。这是因为余弦或正弦函数都是谐和函数，凡按正弦或余弦规律变化的运动，都叫做谐和运动。而作为一种典型的运动形式或一种有特定意义的运动模型的“简谐运动”，以它的特殊性质区别于一般的谐和运动，这就

是：它的运动周期由振动系统的固有性质决定，它的振幅 $A$ 和初相 $\varphi$ 则由振动的初始条件决定。如果不考虑上述特征，只从（1）中的表达式是不可能把简谐运动从一般的谐和运动中区别出来的。

②简谐运动的第(2)、(3)种定义，在力学范围内是完全等价的，它们确切地定义了“简谐运动”这种独特的运动。由 $F=-kx$ 和牛顿定律可以得到 $\frac{d^2x}{dt^2}+\omega^2x=0$，由积分 $\frac{d^2x}{dt^2}+\omega^2x=0$ 也可以得到 $x=A\cos(\omega t+\varphi)$，而且其中的 $\omega$、$A$、$\varphi$ 正好具有简谐运动才有的特性。

当把简谐运动这个运动模型推广到力学以外的领域时，$\frac{d^2x}{dt^2}+\omega^2x=0$ 的优点就显现出来了。任何一个物理量 $x$，只要满足这个微分方程，那么这个量就随时间在某一值附近做简谐运动。例如，电磁学中由电感和电容构成的 $LC$ 电路中发生电磁振荡时，电流 $i$ 满足的微分方程为

$$\frac{d^2i}{dt^2}+\frac{i}{LC}=0$$

电流 $i$ 随时间作余弦变化

$$i=i_0\cos(\omega t+\varphi)$$

其中 $\omega=\sqrt{\frac{1}{LC}}$，由 $LC$ 电路的固有电学性质决定；振幅 $i_0$ 和初相 $\varphi$，由引起振荡的初始条件决定。由上面的式子可知，$LC$ 电路中的电流做简谐运动，而电流的简谐运动就不好用线性回复力 $F=-kx$ 来定义了。

可见，简谐运动的第(3)种定义十分确切，便于推广。但是中学生不熟悉微积分，这种定义显得十分抽象。在中学物理教学中，为了便于学生接受，采用 $F=-kx$ 的定义是可以的。

**4. 相位**

（1）相位是描述振动状态的物理量

由简谐运动的位移 $x=A\cos(\omega t+\varphi_0)$，速度 $v=-A\omega\sin(\omega t+\varphi_0)$，可以得到

$$\cos\varphi=\frac{x}{A}$$

$$\sin\varphi=-\frac{v}{\omega A}=-\frac{v}{v_m}$$

式中的 $v_m=\omega A$，为简谐运动速度的幅值。可见，相位 $\varphi$ 所确定的是位移与振幅之比 $\frac{x}{A}$，以及速度与速度幅值之比 $\frac{v}{v_m}$。

对于频率和振幅不同的简谐运动，当相位相同时，位移 $x$ 和速度 $v$ 并不相同，但是比值 $\frac{x}{A}$ 和 $\frac{v}{v_m}$ 却是完全相同的。这两个比值更能反映简谐运动的振动状态的特点。例如，当物体处于正的最大位移这一运动状态时，比值 $\frac{x}{A}$ 都等于 1，$\frac{v}{v_m}$ 都等于 0，对应的相位是 $\varphi=2n\pi(n=0,1,2,\cdots)$；当物体处于通过平衡位置向负方向运动这一振动状态时，比值 $\frac{x}{A}=0$，$\frac{v}{v_m}=-1$，所对应的相位为 $\varphi=\frac{\pi}{2}+2n\pi(n=0,1,2,\cdots)$；如此等等。

所以，比值 $\frac{x}{A}$ 和 $\frac{v}{v_m}$ 与一般表示运动状态的位移 $x$ 和速度 $v$ 相比，能更确切地描绘物体的

运动状态。通常说相位是描述振动状态的量，确切地说，相位所描述的是由$\frac{x}{A}$和$\frac{v}{v_m}$所表示的振动状态。这样，对振幅和周期不同的两个简谐运动，比较它们在某时刻的相位，就可以了解它们振动状态是否相同。

(2) 相位和时间

相位$\varphi$是时间$t$的线性函数，即

$$\varphi=\omega t+\varphi_0$$

相位随时间的增加而单调地增大，时间$t$在振动的表达式中是自变量。

引入相位，从振动公式$x=A\cos(\omega t+\varphi_0)$中可以看出，随着相位的单调增加，振动状态作周期性的变化。无论简谐运动周期如何，相同的相位表示相同的振动状态，而且相位每增加$2\pi$，振动状态就重复一次。因此可以说，用相位这个概念能够统一地表述简谐运动状态和振动的周期性。

由$\varphi=\omega t+\varphi_0$可知，相位随时间变化的快慢决定于角频率，或者说，角频率是相位变化的速率，即

$$\Delta\varphi=\omega\Delta t$$

因此，只要知道角频率$\omega$，就可以通过相位的变化确定所经历的时间，或者知道时间，就可以求出相位的变化。

**5. 单摆的周期**

(1) 非线性摆的振动周期

一根不可伸长、不计质量的绳长为$l$，一端固定于$O$点，另一端系质量为$m$的小球，就可组成一个摆，如图11-8所示，竖直线$OP$为摆以$O$点为轴摆动的平衡位置。

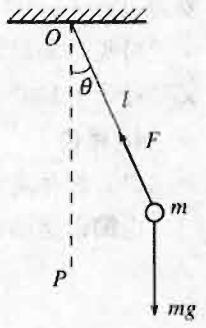


图11-8

为了研究摆动的一般规律，把摆看做一个绕$O$点转动的刚体，摆对$O$轴的转动惯量$I=ml^2$。当角位移为$\theta$时，作用于小球的重力对$O$点的力矩$M=-mgl\sin\theta$（其中的负号表示力矩的方向与角位移$\theta$的方向相反）。根据定轴转动的定律

$$I\beta=M$$

有

$$ml^2\frac{\mathrm{d}^2\theta}{\mathrm{d}t^2}=-mgl\sin\theta$$

整理后可得

$$\frac{\mathrm{d}^2\theta}{\mathrm{d}t^2}+\frac{g}{l}\sin\theta=0$$

这是一个非线性微分方程，与简谐运动的微分方程

$$\frac{\mathrm{d}^2x}{\mathrm{d}t^2}+\omega^2x=0$$

不同。因此，一般情况下的摆，角位移对时间的变化规律不是余弦式，所做的摆动，不是简谐运动，而是一种非线性振动。这种摆的周期表达式为

$$T'=T\left[1+\frac{1}{4}\sin^2\left(\frac{\theta_0}{2}\right)+\frac{9}{64}\sin^4\left(\frac{\theta_0}{2}\right)+\cdots\right]$$

其中$T=\frac{2\pi}{\omega}=2\pi\sqrt{\frac{l}{g}}$。

可见，一般情况下的摆的周期随摆幅（由 $\theta_0$ 表示）的变化而变化，不是等时摆。

（2）单摆和它的周期

当摆动过程中，摆线对平衡位置的角位移 $\theta$ 的绝对值都很小，以至 $\sin\theta\approx\theta$ 时，$\frac{d^2\theta}{dt^2}+\frac{g}{l}\sin\theta=0$ 可以近似为 $\frac{d^2\theta}{dt^2}+\omega^2\theta=0$，其解为

$$\theta=\theta_0\cos(\omega t+\alpha)$$

其中 $\theta_0$ 为最大摆角，为角振幅，周期

$$T=2\pi\sqrt{\frac{l}{g}}$$

通常所说的单摆是指一般的非线性摆在摆角振幅很小时的情形。这是一种等时摆，周期与振幅的大小无关，是一种理想模型。

在实际应用中，在摆角足够小的条件下，就可以使用单摆的周期公式进行计算。

（3）怎样认识“摆角足够小”的条件

由摆的周期 $T'$ 的公式与单摆的周期 $T$ 的公式的比较中，可知误差

$$\eta=\frac{T'-T}{T}=\frac{1}{4}\sin^2\frac{\theta_0}{2}$$

$\theta_0$ 为最大摆角。为了有一个定量的概念，在 $\theta_0$ 为不同角度时周期的误差如下表所示。

| $\theta_0$ | 60° | 30° | 15° | 10° | 5° |
|---|---|---|---|---|---|
| $\eta$ | 0.062 5 | 0.016 7 | 0.042 6 | $1.9\times10^{-3}$ | $4.76\times10^{-4}$ |

从以上数字可以看到：当最大摆角在 15°以内时，误差在 0.5%以内；当最大摆角在 5°以内时，误差在 0.05%以内。

实验中还会有测量误差，如摆长测量误差、计时误差，等等。由于中学物理实验对精度要求不很高，同时，系统误差的精度与测量误差的精度应该协调。因此可以认为，$\theta_0<15°$ 时，可以满足中学物理实验对误差的要求。

## （二）联系生活、科技和社会资料

**1. 人体中的振动效应**

人们时时都要受到振动，例如坐汽车或乘飞机旅行，开动拖拉机，使用电动工具或者在机器附近工作，等等。振动对人的影响有大有小，从使人感到轻度的烦躁到使人受到伤害甚至死亡，这取决于振动的振幅、频率和持续时间。已经作了大量的研究以测量这些效应，因而可以设计出更为安全和更舒适的车辆和机器来。

振动效应的讨论通常是用峰值加速度 $a_{max}$ 而不是用振幅作为变量。根据简谐运动定义式 $\frac{d^2x}{dt^2}+\omega^2x=0$，加速度与位移的关系为 $a=-\omega^2x_0$。当 $x$ 与振幅相等时，加速度的大小为

$$a_{max}=\omega^2A \tag{1}$$

实验室的试验通常是使平台或座位以单一频率振动，而实际振动的情形经常是许多不同频率的振动的组合。图 11-9 画出了坐在硬座位上的试验者对垂直振动的反应。反应最灵敏的频

率为 6～7 Hz，频率比较高或比较低时则可以忍受更大的加速度。

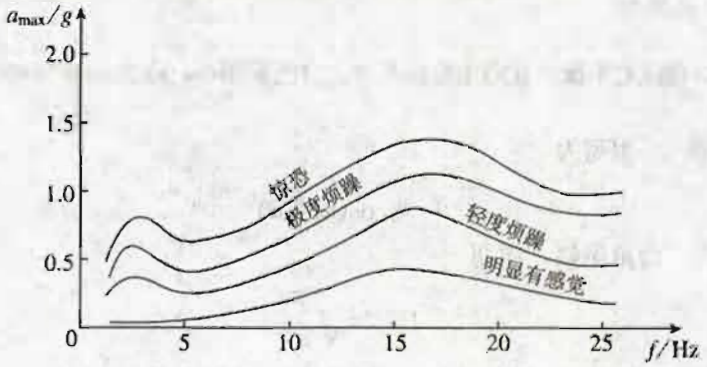
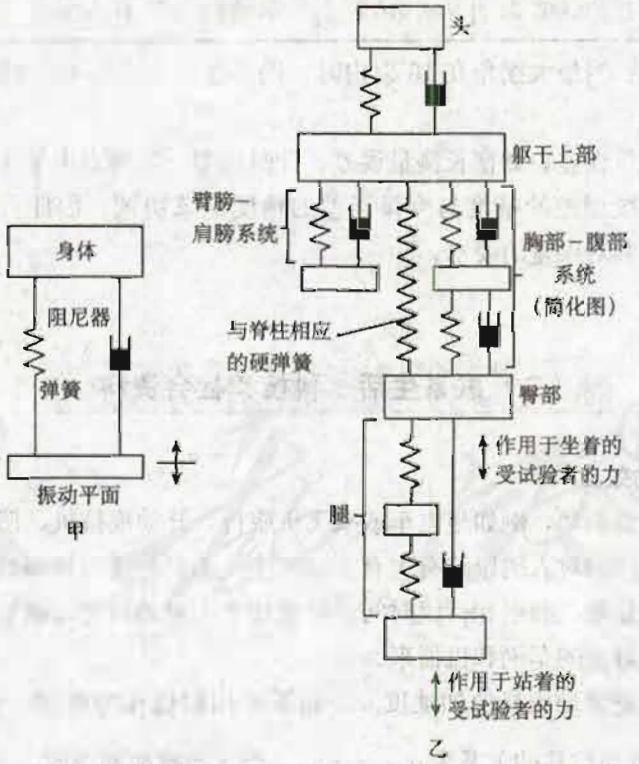



图 11-9　人对简谐运动的平均反应。被试验者坐在做垂直振动的硬座位上。

从图中可看到，在频率是 6 Hz 时令人感到惊恐的峰值加速度约为 0.65$g$，其中 $g$ 是重力加速度。利用(1)式，振幅为

$$A=\frac{a_{max}}{\omega^2}=\frac{0.65\times 9.8}{(2\pi\times 6)^2}\ \text{m}=4.5\times 10^{-3}\ \text{m}$$

可以用数学模型把观察到的身体反应与振动联系起来（图 11-10）。在 2 Hz 以下，身体的反应好像是具有阻尼的挂在弹簧上的单个物体。在 2 Hz 以上，身体各部分存在着相对运动，这就需要考虑比较复杂的模型。当频率大约为 6 Hz 时，身体作为整体发生共振，而腹部的共振频率为 3 Hz，骨盆为 5～9 Hz，头相对于肩的共振频率为 20 Hz，眼眶中的眼球的共振频率




甲　把身体当作单一物体来处理的模型就足以描述频率在 2 Hz 以下的运动。图中类似于盛有液体的活塞装置代表阻尼。

乙　更完善的模型，它考虑到身体各部分的相对运动。

图 11-10

约为 35～75 Hz。强度远低于惊恐水平的振动会引起循环系统、神经系统的生理变化并对肌肉协调、视觉和语言有损害，而高强度的振动可能会引起严重后果或甚至危及肺、心、肠和脑。

对超过 20 Hz 的情况，只要利用软垫座位和各种简单的减震装置，就比较容易使人得到保护以免遭受强烈振动而引起的损害。然而，拖拉机和货车所具有的振动大多在 1～7 Hz，而且有时会出现高达 1 $g$ 的峰值加速度。可以用弹簧和液压减震器建成座位以减少其振动，达到可接受的水平。

与人笔直地站着或坐着相比，如果人的腿稍微弯曲一些的话，那么传到上部身体的振动就大为减少，知道这一点是很有用的。农机的操作者有时就用这种方式站着，使得振动的强度下降，从而比他们坐着时所经受到的振动强度要小。类似地，如果一个人在崎岖不平的路上骑自行车，由踏板来承受一部分或全部重量而不是由座位来承受的话，那么就可减少因振动而引起的不舒适。

（摘自《生命科学物理学》，科学出版社 1985 年第 1 版，有改动）

**2. 昆虫的嗡嗡声**

为什么昆虫在飞行的时候时常会发出嗡嗡声呢？大多数昆虫是没有发出这个声音的特殊器官的。这个嗡嗡声是只有在昆虫飞行的时候才听得到，原因是昆虫飞行的时候，每秒都要振动它的小翅膀几百次。

振动着的翅膀事实上就是振动着的膜片，而我们知道，所有振动得足够频繁的膜片（每秒振动数超过 16 次），都会产生出一定高低的音调来。现在你可以明白，人们是用什么方法知道各种昆虫飞行时候翅膀振动的次数的。这件事情很简单，只要从听觉上判定昆虫发出嗡嗡声的音调高低就行了，因为每一种音调都是跟一定的振动频率相对应的。通过高速摄影技术，人们确定了各种昆虫的翅膀振动频率是几乎不变的。昆虫要调节它们的飞行，只是改变翅膀振动幅度和翅膀的倾斜度，只在受到低温的影响的时候才增加每秒振动翅膀的次数。正是因为这个缘故，昆虫在飞行的时候发出的音调总是不变的。

人们已经测定了，苍蝇（飞的时候发出 F 调音）每秒振动翅膀352 次，山蜂每秒振动翅膀 220 次。蜜蜂在没采蜜飞行的时候发出 A 调音，每秒振动翅膀 440 次，如果带着蜜飞行，翅膀每秒只振动 330 次（B 调）。甲虫飞行时候发出的音调比较低，两翅振动得比较慢。相反地，蚊子每秒要振动翅膀 500～600 次。为了使大家对上面这些数目有进一步的了解，还可以比较一个数目：飞机的螺旋桨平均每秒转 25 转。

**3. 鱼洗**

古代把脸盆称为“洗”，盆底刻有鱼纹的称为鱼洗。这种器物在先秦时期已被人们普遍使用，而能喷水的铜质鱼洗大约出现在唐代。古代鱼洗是一个铜盆，铜盆两边各有一个耳朵，供手摩擦用。当洗干净的手在两耳上来回摩擦时，盆壁的水会四处飞溅。为什么水会自动飞起来？为什么手要洗干净才能使水飞起来？除了盆壁，能否让更多地方的水也飞起来？带着这些问题，亲自动手做做“手动仿古鱼洗”的实验，就会明白古人的聪明之处。当用手摩擦鱼洗双耳时，鱼洗周壁产生对称振动，当来回摩擦的频率与水振动的频率相近时，鱼洗里的水发生相应的谐和振动，有助于了解和研究波动。

## （三）实验参考资料

**1. 用计算机观察声音的波形**

使用计算机认识声音的波形，可以给学生直观地留下深刻的印象，有助于对振动图象和频率概念的理解。

对于要用到的声音文件，可以自己通过 Windows 自带的“录音机”软件直接录取。可以选择比较简单的音叉或者旋律，也可以在互联网上搜索一些便于比较的声音文件。

可以展示声音的波形的文件很多，包括一些专业的声音编辑软件。如果只是向学生展示声音的波形，而不做处理，采用 Windows 自带的 Windows Media Player 播放软件就可以了。

以 Windows Media Player 10 为例。我们可以选取 Windows 自带的声音文件来比较。打开软件后，点击“文件”，在下拉菜单中选择“打开”。这时，可以选择要打开的文件，在 Windows的安装目录下有一个 Media 文件夹（通常是在 C:\ WINDOWS\ Media），可以从中选择一些简单的声音文件。例如，选取“Windows XP 电话拨入声”“Windows XP 电话拨出声”“ringin”“ringout”这四个文件分成两组来比较。打开“ringin”可以听到一个清脆的铃声，而“ringout”就比较低沉。

接下来，点击“查看”按钮，在下拉菜单中选择“可视化效果”。在后面的选项中依次选择“条形与波浪”“波形”，再次播放的时候就可以看到密集的“ringin”和相对稀疏的“ringout”波形了。

如果需要让学生进行更仔细的比较，还可以在屏幕中出现波形的时候拷贝屏幕，复制在“画图”中。这样就可以详细分析两个声音的频率和振幅了（如图 11-11、11-12）。

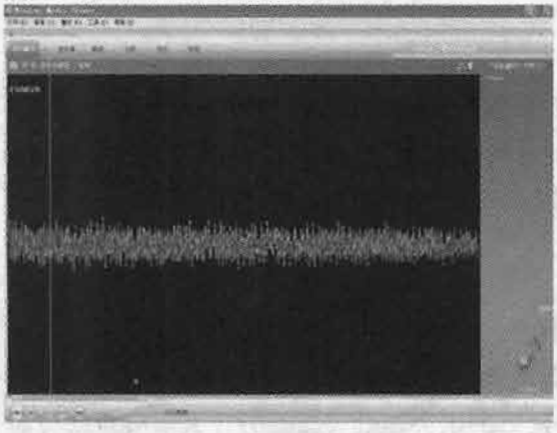


图 11-11

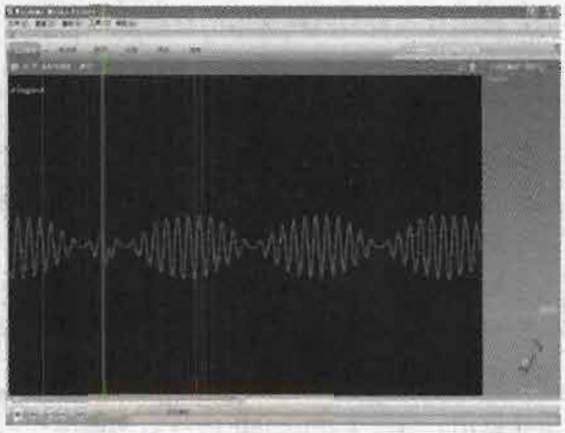


图 11-12

**2. 用传感器和计算机描绘简谐运动的图象**

这个实验可以使用上海市中小学数字化实验系统研发中心和山东远大公司研制的数字化实验系统（DISLab）中的位移传感器，计算机将自动绘出位移随时间变化的曲线。

## 五、补充习题

### A 组

1. 小球做简谐运动，则下述说法中正确的是（　　）

A. 小球所受的回复力大小与位移成正比，方向相反

B. 小球的加速度大小与位移成正比，方向相反

C. 小球的速度大小与位移成正比，方向相反

D. 小球的速度大小与位移成正比，方向可能相同也可能相反

2. 物体做阻尼运动时，它的（　　）

A. 周期越来越小　　B. 位移越来越小

C. 振幅越来越小　　D. 机械能越来越小

3. 对于秒摆（$T=2$ s），下列说法中正确的是（　　）

A. 摆长缩短为原来的 1/4 时，频率为 1 Hz

B. 摆球质量减小到原来的 1/4 时，周期为 4 s

C. 振幅减为原来的 1/4 时，周期为 2 s

D. 如果重力加速度减为原来的 1/4 时，频率为 0.25 Hz

4. 弹簧振子的振动周期为 0.4 s 时，当振子从平衡位置开始向右运动，经 1.26 s 时振子做的是（　　）

A. 振子正向右做加速运动　　B. 振子正向右做减速运动

C. 振子正向左做加速运动　　D. 振子正向左做减速运动

5. 如图 11-13 所示为质点简谐振动的图象。从图象可以看出（　　）

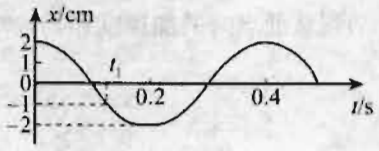



图 11-13

A. 质点振动的频率为 2.5 Hz

B. 质点振动的振幅为 4 cm

C. $t_1$ 时刻质点的加速度方向沿 $x$ 轴正方向

D. $t_1$ 时刻质点的速度方向沿 $x$ 轴正方向

6. 如图 11-14 所示是某振子简谐运动的图象，以下说法中正确的是（　　）

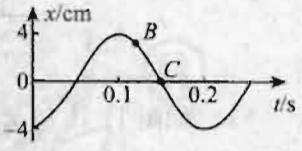



图 11-14

A. 因为振动图象可以由实验直接得到，所以图象就是振子实际运动的轨迹

B. 振动图象所反映的是振子位移随时间的变化规律，并不是振子运动的实际轨迹

C. 振子在 $B$ 位置的位移就是曲线 $BC$ 的长度

D. 振子运动到 $B$ 点时的速度方向即为该点的切线方向

E. 由图象可以直观地看出周期和振幅

F. 利用图象还能知道速度、加速度、回复力及能量随时间的变化情况

7. 如图 11-15 甲所示，质量为 $m$ 的小球在轻弹簧上，平衡时静止在原点 $O$，现向下按小球（在弹性限度内），使其在 $O$ 点上下振动，则图乙中能正确描述小球所受合力随位移 $x$ 变化的关系（合力沿 $+x$ 方向为正）的是（　　）

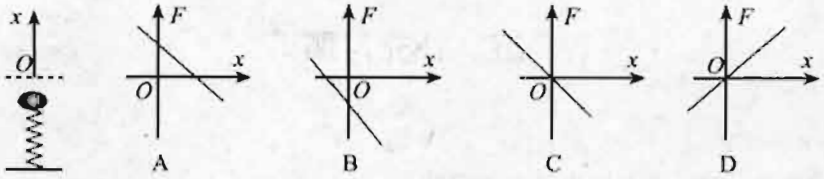



图 11-15

8. 物体做简谐振动，在 24 s 内共完成了 30 次全振动，它振动的周期是_____ s，振动的频率是_____ Hz。

9. 甲、乙两个单摆，同时做简谐运动，甲摆完成 10 次全振动时，乙摆完成 20 次全振动，若乙摆摆长为 1 m，则甲摆的摆长为_____ m。

10. 如图 11-16 所示，质点沿直线做简谐运动，平衡位置在 $O$ 点，某时刻通过 $P$ 点向右运动，经 1 s 再次回到 $P$ 点，再经 1 s 到达 $O$ 点，若 $OP=2$ cm，则质点运动的周期 $T=$_____ s；质点运动的振幅为 $A=$_____ cm。

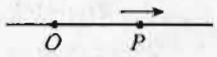



图 11-16

11. 某人从电视屏幕上观察停泊在某星球上的宇宙飞船，看到飞船上摆长为 0.5 m 的单摆在 30 s 内往复摆动 15 次，该星球表面上的重力加速度是多大？

12. 如图 11-17 所示，两个完全相同的弹性小球 1、2（两球碰后速度交换），分别挂在长为 $L$ 和 $L/4$ 的细线上，重心在同一水平面上，相互恰好接触。把 $B$ 球向右拉开一个不大的距离后自由释放，经多长时间两球发生第 10 次碰撞？

图 11-17

13. 如图 11-18 所示，质量为 $M$ 的托盘内放有质量为 $m$ 的物块，开始时手托住托盘，弹簧的劲度系数为 $k$，弹簧处于原长。现放手让托盘向下运动，求当系统运动到最低点时的加速度和物块对托盘的压力。

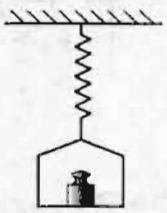


图 11-18

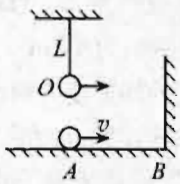



图 11-19

14. 如图 11-19 所示，当单摆摆球经过平衡位置 $O$ 向右运动的瞬间，一个以速度 $v$ 匀速运动的小球，同时经过 $O$ 正下方 $A$ 点在光滑水平面上向右运动，与竖直墙壁碰撞后以原速度返回，求 $B$、$A$ 间距 $x$ 满足什么条件，才能使小球返回时恰好与摆球分别同时经过 $A$ 和平衡位置 $O$？球与墙碰撞时间不计，摆长为 $L$。

## B 组

1. 如图 11-20 所示，弹簧振子沿 $x$ 轴在 $B$、$C$ 之间做简谐运动，$O$ 是平衡位置，当振子从 $B$ 向 $O$ 点运动经过 $P$ 点时（　　）

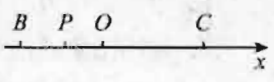



图 11-20

A. 振子的位移为负　　B. 振子的回复力为负

C. 振子的速度为负　　D. 振子的加速度为负

2. 质点做简谐运动的图象如图 11-21 所示，则该质点（　　）

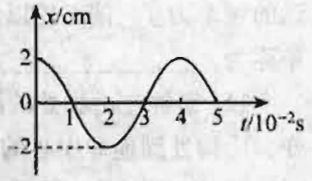


图 11-21

A. 在 0～0.01 s 内，速度与加速度同向

B. 在 0.01～0.02 s 内，速度与回复力同向

C. 在 0.025 s 时，速度为正，加速度为正

D. 在 0.04 s 时，速度最大，回复力为 0

3. 单摆摆长为 $L$，若将摆长增加 1 m，则周期变为原来的 1.5 倍，则 $L$ 为（　　）

A. 2 m　　B. 1.5 m　　C. 0.8 m　　D. 0.5 m

4. 如图 11-22 所示，光滑槽的半径 $R$ 远大于小球运动的弧长，今有两个小球（视为质点）同时由静止释放，其中甲球开始时离圆槽最低点 $O$ 较远些，则它们第一次相遇的地点是在（　　）

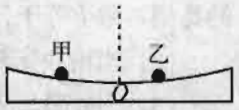


图 11-22

A. $O$ 点　　B. $O$ 点偏左　　C. $O$ 点偏右　　D. 无法确定

5. 水平放置的弹簧振子，质量是 0.2 kg，当做简谐运动时，运动到平衡位置左侧 2 cm 时，受到的回复力是 4 N，当它运动到平衡位置右侧 4 cm 时，它的加速度的大小和方向分别是（　　）

A. 20 m/s$^2$，向右　　B. 20 m/s$^2$，向左

C. 40 m/s$^2$，向左　　D. 40 m/s$^2$，向右

6. 弹簧振子的简谐运动图象如图 11-23 所示，下列结论中错误的是（　　）

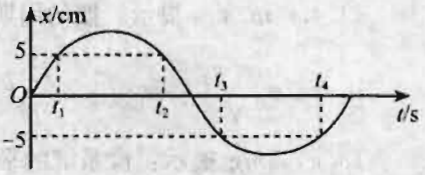


图 11-23

A. $t_1$、$t_4$ 时刻振子的速度相同

B. $t_1$、$t_2$、$t_3$、$t_4$ 四个时刻系统的机械能相同

C. $t_1$、$t_2$、$t_3$、$t_4$ 四个时刻振子的动能相同

D. $t_1$、$t_4$ 时刻振子受到的回复力相同

7. 物体在周期性驱动力作用下做受迫振动，固有频率为 $f_1$，驱动力的频率为 $f_2$，物体做受迫振动的频率为 $f$，则（　　）

A. $f=f_1$　　B. $f=f_2$　　C. $f>f_1$　　D. $f<f_2$

8. 一个水平弹簧被分别拉离平衡位置 3 cm 和 6 cm 处放手，使它们都做简谐运动，则前后两次振幅之比为_____，周期之比_____，回复力的最大值之比为_____。

9. 如图 11-24 所示为质点做简谐运动的振动图象，在图象上有位于与时间轴平行的同一直线上的 $M$、$N$、$P$、$Q$ 四点，试根据图象判断：$M$、$P$ 两点所对应的时间间隔为_____。四点中，质点速度方向为正的点是_____，速度继续增大的点是_____；质点加速度方向为负的点是_____，加速度继续减小的点是_____。

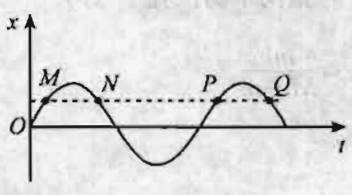


图 11-24

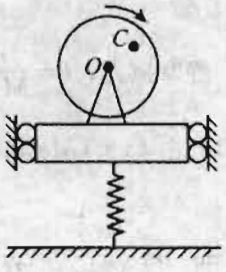


图 11-25

10. 如图 11-25 所示，一个偏心轮的圆心为 $O$，重心为 $C$。系统在竖直方向上发生自由振

动的频率为 $f$，偏心轮以角速度 $\omega$ 绕 $O$ 轴匀速转动，则当 $\omega=$_____时振动最为剧烈，这个现象称为_____。

11. 摆钟在山脚处的周期是 $T_1$，把它拿到高山顶上周期变为 $T_2$，此过程中摆钟的摆长不变。山脚处到地球中心的距离是 $R$，摆钟可看作单摆，试求：山顶到山脚的高度差。

12. 如图 11-26 所示的弹簧振子在光滑水平面上以振幅 $A$ 做简谐运动，质量为 $M$ 的滑块上面放质量为 $m$ 的砝码，砝码随滑块一起做简谐运动，已知弹簧的劲度系数为 $k$，试求：

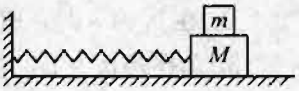


图 11-26

（1）使砝码随滑块一起振动的回复力是什么？它跟位移成正比的比例常数 $k$ 等于什么？

（2）当滑块运动到振幅一半位置时，砝码所受的回复力有多大？方向如何？

（3）当砝码与滑块的摩擦因数为 $\mu$ 时，则要使砝码与滑块不发生相对滑动的最大振幅为多少？

**参考答案：**

**A 组**

1. AB　2. CD　3. AD　4. B　5. AC　6. BEF　7. C

8. 0.8，1.25　9. 4　10. 6，$\frac{4}{3}\sqrt{3}$

11. 4.9 m/s$^2$　提示：摆的周期 $T=\frac{30\text{ s}}{15}=2\text{ s}$，摆长 $l=0.5\text{ m}$。

由 $T=2\pi\sqrt{\frac{l}{g}}$，所以 $g=\frac{4\pi^2 l}{T^2}=\frac{4\pi^2\times0.5}{2^2}\text{ m/s}^2=4.9\text{ m/s}^2$。　12. $t=\frac{29\pi}{4}\sqrt{\frac{L}{g}}$

13. $g$，$2mg$ 提示：设系统的平衡位置距离弹簧原长处为 $A$，则有 $kA=(M+m)g$。

所以对于最低点 $a=\frac{k2A-(M+m)g}{M+m}=g$，方向向上。对物块有 $F_N-mg=ma$，所以 $F_N=2mg$。

14. $x=\frac{\pi nv}{2}\sqrt{\frac{L}{g}}$ 提示：$x=\frac{vt}{2}=\frac{v}{2}n\frac{T}{2}=\frac{\pi nv}{2}\sqrt{\frac{L}{g}}$。

**B 组**

1. A　2. AC　3. C　4. A　5. C　6. D　7. B

8. 1：2，1：1，1：2　9. 一个周期，$M$、$P$，$N$、$Q$，$M$、$N$、$P$、$Q$，$N$、$Q$　10. $2\pi f$，共振

11. $h=\frac{T_2-T_1}{T_1}R$　提示：由 $T=2\pi\sqrt{\frac{l}{g}}$ 和 $g=\frac{GM}{R^2}$，有 $\frac{T_1^2}{T_2^2}=\frac{g_2}{g_1}=\frac{R^2}{(R+h)^2}$，所以 $h=\frac{T_2-T_1}{T_1}R$。

12.（1）静摩擦力，$k=\frac{mk}{M+m}$　（2）$\frac{kmA}{2(M+m)}$，指向平衡位置　（3）$\frac{\mu(M+m)}{k}g$

提示：（1）由 $kx=(M+m)a$ 和 $k'x=ma$，所以 $k'=\frac{mk}{M+m}$。

（2）$F=ma=m\frac{k\frac{A}{2}}{M+m}=\frac{kmA}{2(M+m)}$。

（3）由 $\mu mg\geqslant\frac{kA}{M+m}\cdot m$，所以 $A\leqslant\frac{\mu(M+m)}{k}g$。

# 第十二章
# 机械波

## 课程标准的要求

1. 通过观察，认识波是振动传播的形式和能量传播的形式。能区别横波和纵波。能用图象描述横波。理解波速、波长和频率（周期）的关系。

2. 通过实验，认识波的干涉现象、衍射现象。

3. 通过实验感受多普勒效应。解释多普勒效应产生的原因。列举多普勒效应的应用实例。

4. 了解惠更斯原理，能用来分析波的反射和折射。

## 一、本章教材概述

本章是第十一章“机械振动”教学内容的延伸和扩展。机械振动只讨论物体的运动状态随时间的变化，而波动讨论的是振动在空间介质中的传播。本章着重介绍有关波的共性的知识，如波的形成和传播、波长、频率、波速、波传播的规律、波的图象、波的反射和折射、波的干涉、衍射、多普勒效应等。本章的学习内容是以后学习光波和电磁波的重要基础。

机械波内容可分为2个单元。第1单元包括第1节至第3节，讲述波的基本概念。首先分析说明弹性介质中某处发生振动时，由于介质相邻部分间存在弹性相互作用，振动部分介质要带动邻近部分介质振动，使振动沿介质传播出去。在深入细致地分析横波和纵波形成过程的基础上，明确指出介质传播的是振动，介质本身并不传播，并进一步指出波传递能量和信息。接着介绍横波的图象，说明横波波形图的意义，强调波形图象与振动图象的区别。根据对振动传播过程、横波波形图的空间周期性的分析，简单、准确地给出了波长$\lambda$的定义，说明介质质点的振动周期或频率也叫波的周期或频率，得出波的传播的重要公式$v=f\lambda=\frac{\lambda}{T}$，并举例说明其应用。

第2单元包括第4节至第6节，讲述波的传播特性。首先介绍了波的衍射与波的干涉现象，说明衍射和干涉是波动特有的现象。之后介绍了多普勒效应，说明波源与观察者相对运动时观察者接收到的波的频率发生变化的现象，多普勒效应在现代科技中有重要的应用。最后介绍了波的空间传播规律——惠更斯原理，并用惠更斯原理解释了波的反射和折射现象。

在编写本章时还有以下思考。

**1. 让学生对波动有较全面、深入的认识**

波动是一种常见而重要的运动形式。从三种本质不同的波动——机械波、电磁波、概率波，我们看到波动跨越了经典力学、经典电磁学、量子物理学等多个物理学分支。同时，机械波、电磁波、概率波的越来越广泛的应用，使我们认识到深入研究波动的重要性。本模块研究

机械波和电磁波，3-5模块进一步研究概率波。本章一开始就列举了各种波动现象和它们的广泛应用，使学生认识到波动现象无处不在。波动现象在现代科技中的重要应用和自然界中地震波、海啸等波动对人类造成的巨大灾害表明，认识波动、研究波动具有重要意义。我们除了让学生从更广阔的背景上了解波动的普遍性外，还注意更深入、细致地分析机械波的形成过程，并明确提出波不但传递能量还传递信息。

在波的描述方面，教科书注意区分波的图象与振动图象，指出振动图象显示出时间的周期性，波的图象显示出空间的周期性。在章首选用了达·芬奇的话，形象地描述波动，并把波动与振动区分开。

在上一章明确引入相位概念的基础上，教科书给出波长 $\lambda$ 的准确定义：在波动中，振动相位总是相同的两个相邻质点间的距离叫做波长 $\lambda$。对波速公式 $v=\frac{\lambda}{T}=\lambda f$ 的应用选编了例题，说明波的传播表现为波形的运动。波的干涉现象用波的叠加原理解释。多普勒效应的介绍更为形象，说明了医生用“彩超”检查心脏、大脑和眼底血管病变的原理。教科书介绍了惠更斯原理，并用惠更斯原理解释了机械波的反射和折射现象。

**2. 惠更斯原理对反射、折射的解释**

波的传播可以用惠更斯原理说明，机械波和电磁波的传播都遵从这一原理。惠更斯通过观察波的传播现象提出了惠更斯原理，教科书明确指出它的正确性来自它得出的结论都与事实相符。用惠更斯原理解释波的反射规律和折射规律是过去高中物理教科书所没有的内容，因此写得比较详细。波传播到两种介质的界面处，该处的各点发射子波，在同一种介质中子波波速相同，从而导出反射波的反射角等于入射角。在不同介质中子波的速度不同，从而导出入射角正弦与折射角正弦之比等于相应介质中的波速之比。这一理论分析加深了对波的传播、波在两种介质的界面上发生反射、折射现象的规律的认识，也为下一章光的反射定律和折射定律的理解奠定基础。

**3. 联系学生生活、现代社会及科技发展**

机械振动在弹性介质中的传播是一个复杂的物理过程。为了使学生更好地认识机械波，教科书一方面加强了振动在介质中传播过程的理论分析，另一方面注意加强联系实际。例如，列举学生熟悉和不太熟悉的各种波动现象，从艺术体操中的“带操”和团体操表演中表现的波浪照片入手，使学生对波动现象感到亲切并引起研究的兴趣。教科书在各处的表述中都注意联系机械波、声波、电磁波的各种应用。为了更好地体现波动现象的技术应用，在“科学漫步：超声波”一文中介绍了超声波的特性和各种应用，特别介绍了动物的“声呐”系统，提到近几十年发展起来的新学科——仿生学。

**4. 注意加强了实验**

与过去比较，新教科书更强调物理实验在教学中的作用。例如，对波的反射和折射分别安排了演示实验，在多普勒效应一节介绍了模拟实验。教科书还设置了3个“做一做”栏目，让学生有机会与波动现象紧密接触，深入观察波动现象，提高实验技能，加深对波动现象的理解。

| 课时分配建议 | |
|---|---|
| 第 1 节　波的形成和传播 | 1 课时 |
| 第 2 节　波的图象 | 1 课时 |
| 第 3 节　波长、频率和波速 | 2 课时 |
| 第 4 节　波的衍射和干涉 | 2 课时 |
| 第 5 节　多普勒效应 | 1 课时 |
| 第 6 节　惠更斯原理 | 1 课时 |

## 二、教材分析与教学建议

### 第 1 节　波的形成和传播

**1. 教学目标**

(1) 通过观察和分析，认识波是振动的传播，知道波在传播振动形式的同时也传播能量和信息。

(2) 能区分横波和纵波，知道什么是波峰和波谷、密部和疏部。

(3) 知道什么是机械波和机械波形成的条件。

**2. 教材分析与教学建议**

本节讨论的是机械波的产生和传播，定性研究波的一些基本特征。机械波的形成过程及传播是本节课的重点和难点。学生已经知道了水波、声波、电磁波等名词，通过高中阶段的物理学习，要知道机械波是怎样形成的，知道机械波具有哪些主要物理特征。从研究单一质点的振动到研究多个质点同时又不同步的振动，这对学生的理解力和空间想象力都有较高的要求。

学生对波的认识和理解需要一个过程，教学中不可急于求成，应该注意教学方式的选择。要将教师的讲解变为注重学生的亲身体验和实验的观察，并通过播放录像、模拟动画等方法，帮助学生逐步体会和理解本节知识。注意运用学生已经有的运动学和动力学知识，分析和研究波的基本特征和规律。

**(1) 波的形成和传播**

本章的前言为学生提供了必要而又丰富的资源素材，是为了让学生对波有较为充分的感性认识，同时也说明波动是自然界的一种普遍而重要的运动形式。

在做绳波的演示实验时，应指导学生注意观察以下几点：

①绳上每一点开始运动时的运动状态；

②波源及绳上各点运动的先后顺序；

③波源及绳上各点运动的方向、位移及振幅；

④在细绳上的小布条是否随波前进；

⑤波源停止运动后，绳上各点如何运动。

建立理想模型是物理学中研究客观事物运动和物理结构的一种科学方法。在本节教学过程中建议教师有意识地引导学生复习质点的概念，然后把细绳看做由许多有相互作用的质点所组成，在此基础上分析绳波的运动。应注意引导学生体会或得到以下结论：

①波源带动后续质点振动，所用的力是绳上各质点之间的相互作用力；

②波源和后续质点相继开始振动的振动方向相同；

③一个质点的振动带动了邻近质点的振动，而这些质点的振动又会引起更远质点的振动，这种振动由近及远的传播形成了波；

④认识各质点的振动与振动形式的传播的区别；

⑤认识机械波的传播需要介质，但是介质中的质点并未沿波的传播方向发生迁移。

为了让学生体验感悟机械波，增强学生的参与意识，可在课堂上安排学生完成“做一做”栏目中的活动。在学生有了亲身的体验后，教师再引导探究。此活动能够让学生体验机械波的产生和传播过程，知道虽然振动形式向前传播了，物质并没有随波迁移。让学生认识到波离不开振动，理解振动是波的成因，波是振动在介质中的传播的结果。这个活动还可以帮助学生建立“个体振动，整体波”的认识，进一步体会振动研究的对象是个体，而波动研究的对象是整体。

**（2）横波和纵波**

对纵波的生成，也可以把以上活动稍加改进来进行模拟。学生们肩并肩排成一横排，每个人按照节拍左右摆动头部，一左、二还原、三右、四还原。从排头开始，依次每人慢一拍，全体动起来以后，就会出现一个疏密波。

按照事物的特征来进行分类，是人们认识事物的重要方法。在波动中，按照质点振动方向与波的传播方向的关系，可以把波动分为横波和纵波：质点振动方向与波的传播方向互相垂直的波叫横波，质点振动方向与波的传播方向在一条直线上的波叫纵波。在本章主要讨论横波。

**（3）机械波**

通过学习，要让学生明确波动与振动的联系和区别。

①联系

·振动是波动的原因，波动是振动的结果。有波动必然有振动，有振动不一定有波动。

·波动的频率与振源相同。

②区别

·研究对象不同：振动研究的是单个质点在平衡位置附近的往复运动；波动研究的是介质中大量质点的集体振动。

·力的来源不同：产生振动的回复力，可以由作用在物体上的各种性质的力提供；引起波动的力，则总是介质中各质点间的弹力。

·运动性质不同：各质点的振动，是变加速运动；在同一种介质中波动的传播速度不变。

总之，振动是从个体的角度指组成介质的无数质点的运动形式，而这种振动形式的传播使得各质点依次振动，产生位移不同的情形，从而使我们看到了诸多个体所形成的群体行为，即机械波。

### 3. 问题与练习

内容分析

教科书选择的题目分别从不同的角度强化了学生对机械波的基本认识。第1、2题联系生

活实际，加强对“个体振动，整体波”的认识。第3题对学生的空间想象能力要求较高，帮助学生建立起机械波的空间动态情景，为以后的学习奠定坚实的基础。

解答与说明

1. 不同。脉冲的传播类似于声波的传播（纵波的传播），机车的运动类似于空气分子的定向运动（质点的振动）。

2. 将石子投入平静的湖面，会激起一圈起伏不平的水面波向周围传播，而漂浮在水面的小木块上下振荡却没有随波迁移。

注意：水波不是横波。

3. (1) $t=\frac{T}{2}$时，质点8向上运动，质点12、16还没有运动。

(2) $t=\frac{3T}{4}$时，质点8向下运动，质点12向上运动，质点16没有运动。

(3) $t=T$时，质点8向下运动，质点12向下运动，质点16向上运动。

## 第2节　波的图象

### 1. 教学目标

(1) 能够通过描点的方法作出波的图象，理解波的图象的物理意义。

(2) 知道什么是简谐波。

(3) 通过用图象描述横波，加强利用图象分析问题的能力。

### 2. 教材分析与教学建议

波的图象是本章的教学重点和难点。教学中应根据实际情况，采用多种教学手段，如通过波动箱或者利用多媒体动画课件模拟演示各个时刻的波形，帮助学生在头脑中形成正确的物理图景。以横波为例说明波的图象的物理意义，通过这一过程提高学生的抽象思维能力。

教科书重点讲波的图象表现的是各个质点在某一时刻偏离平衡位置的位移。对此，学生在初学时并不容易理解，开始时可借助波的图象与某时刻横波的形状相似，帮助学生进行理解。要让学生弄清波的图象中横、纵坐标各表示什么物理量，能在图中指出各质点的位移和质点振动的振幅。

教学片段

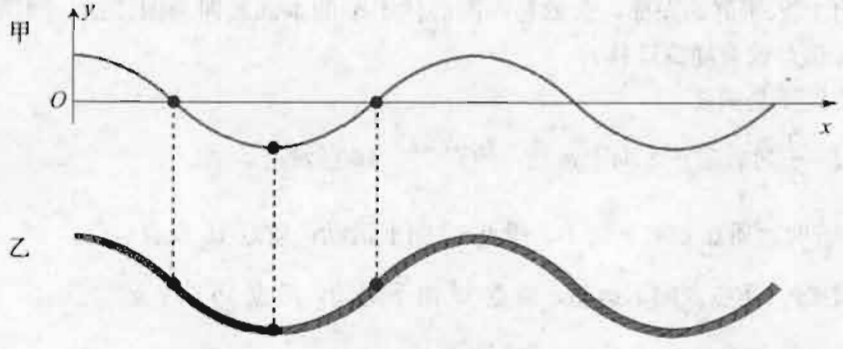
**波的图象**

机械波是机械振动在介质里的传播过程，从波源开始，随着波的传播，介质中的大量质点先后开始振动起来。虽然这些质点都在平衡位置附近重复波源的振动，但由于它们振动步调不一致，所以在某一时刻介质中各质点对平衡位置的位移各不相同。为了从总体上形象地描绘出波的运动情况，可以应用图象的方法——波的图象。

问题1：在平面直角坐标系中，要画出波的图象，横、纵坐标应分别表示什么物理量？怎

样得到波的图象？

分析：横坐标表示在波的传播方向上各质点的平衡位置与参考点（常常取波源处）的距离，纵坐标表示某一时刻各质点偏离平衡位置的位移。也就是说，纵坐标和横坐标都是空间坐标，而且是同一时刻的空间坐标。连接各位移矢量的末端所得到的曲线就是波的图象，如图 12-1。




甲 横波的图象　　乙 绳上的横波

图 12-1 横波的图象

问题 2：横波的图象与波的形状有何区别？

分析：波的图象又叫波形图。从图 12-1 中可以看出，横波的图象与波的形状相似，但二者实质上是不同的。波的图象是一种数学函数图象，它的长短、高低完全取决于坐标尺度的选取；而波的形状不会因坐标尺度的选取不同而改变。纵波的图象和纵波的形状则一点“形似”都不存在了。所以，波形图并不反映实际的波的形状。

简谐横波的图象是一条正弦或余弦曲线。

问题 3：波的图象表示了怎样的物理意义？

分析：波的图象表示介质中各质点在某一时刻偏离平衡位置的位移的空间分布情况。一般地说，在不同时刻质点振动的位移不同，因此，其对应的波的图象也是不同的。

问题 4：从波的图象上可获取哪些物理信息？

分析：能够从波的图象上直接读出的物理量有：振幅，某一时刻各质点的位移，还可根据某一时刻某一质点的振动方向确定波的传播方向或者根据波的传播方向判断各质点的振动方向。

本节难点是波的图象和振动图象的区别。在学过的力学中，学生接触到的主要是 $s$-$t$ 图象、$v$-$t$ 图象等，以及上一章学过的振动图象。这些图象反映的都是物理量随时间的变化关系，然而波的图象描述的是某一时刻在空间不同位置上介质中各个质点偏离平衡位置的位移。

机械波在传播时，介质中每个质点都发生了振动，质点的位移随时间发生变化，并且具有时间上的周期性；在某一时刻，介质中每个质点振动的位移是不相同的，质点的位移随空间发生变化，并且具有空间上的周期性。经过一个周期的时间以后，各个质点的振动状态会重复出现。

从振动图象到波的图象，对学生来说是一个认识能力上的提高。有了对波动图象的比较清楚的认识，学生才会理解描述波动时引入新的物理量——波长、波速和周期（频率）的必要性。教科书特别指出波的图象表示介质“各个质点”在“某一时刻”的位移，振动图象则表示

介质中“某个质点”在“各个时刻”的位移，可类比为一张照片（定格在某一时刻）和一段录像的关系。两种图象的详细对比如下表所示。

| | 振动图象 | 波的图象 |
|---|---|---|
| 研究对象 | 一个质点 | 波的传播方向上的所有质点 |
| 研究内容 | 某质点位移随时间变化的规律 | 某一时刻各个质点的位移分布规律 |
| 横纵坐标 | 位移—时间（$x$-$t$） | 位移—空间位置（$y$-$x$） |
| 图线变化 | 随时间推移图线延续，但已经画出的形状不变 | 不同时刻的波的图象一般不同，随时间推移，图象沿传播方向平移 |
| 周期性 | 曲线的一个完整变化在横坐标上的距离表示振动时间的一个周期即 $T$ | 曲线的一个完整变化在横坐标上的距离表示振动在一个振动周期中传播的距离，即波长 |

建议运用多媒体课件将各个不同时刻的波形在同一画面中展现，引导学生认识波的时间和空间周期性，认识波的传播方向、某时刻的波形与该时刻各质点的振动方向三者之间的关系。

质点的振动方向与波动方向的互相判定是学习的重点和难点。运用波的图象规律求解问题时，应使学生明确波的图象有如下特点：①时间上具有瞬时性（表示某一时刻）；②空间上具有拓展性（表示在空间传播）；③波在传播过程中具有周期性。

### 3. 问题与练习

内容分析

本节问题与练习围绕有关波的图象的物理意义，区别简谐波的图象与简谐振动的图象，波的传播方向与该时刻各质点的振动方向之间的关系和波的图象变化等问题，训练学生利用图象分析和解决实际问题的能力。

解答与说明

1. C、D。

说明：A 和 B 选项考查学生对波的传播方向与该时刻各质点的振动方向之间的关系的掌握情况，C 和 D 选项考查学生对简谐波中各质点的振动情况的分析。

2.（1）若波沿 $x$ 轴正方向传播，图乙为 $L$ 点的振动图象。

（2）若波沿 $x$ 轴负方向传播，图乙为 $N$ 点的振动图象。

3.（1）若波沿 $x$ 轴正方向传播，$K$ 点最先回到平衡位置。

（2）若波沿 $x$ 轴负方向传播，$M$ 点最先回到平衡位置。

4. 1 s 后波形如图 12-2 中虚线所示，4 s 后波形如图 12-2 中实线所示。

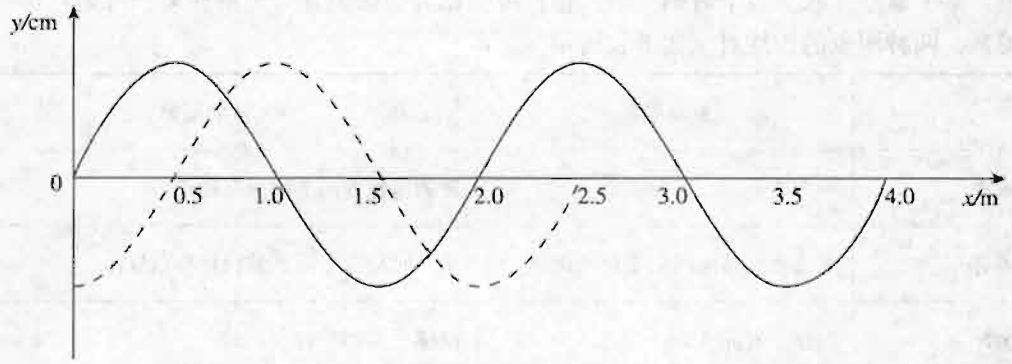



图 12-2

## 第 3 节　波长、频率和波速

### 1. 教学目标

(1) 知道什么是波长、频率和波速。

(2) 理解波长、频率和波速的关系。

(3) 了解决定波长、频率和波速的因素。

### 2. 教材分析与教学建议

波长、频率和波速是描述波的特性的物理量，要让学生切实理解它们。在学生认识波长、频率和波速三者的关系后，应进一步加深对波动图象的认识。本节课后，学生应能够从波的图象中获取相关信息，对有关问题进行讨论或计算，从而让学生进一步理解本章前三节的知识。

**(1) 波长、周期和频率**

教学中可通过波动箱模拟演示波源振动一个周期形成的波形，并结合多媒体动画课件来帮助学生认识波长。从波的图象及多媒体动画课件让学生更直观地看到：在横波中，两个相邻波峰或两个相邻波谷的振动相位相同；在纵波中，两个相邻密部或两个相邻疏部的振动相位相同。

关于波长还有几种说法如下。

①在横波中，两个相邻波峰（或波谷）之间的距离等于波长；

②在纵波中，两个相邻密部（或疏部）之间的距离等于波长；

③经过一个周期 $T$，振动在介质中传播的距离等于一个波长 $\lambda$。

以上三种说法都是正确的，教学中应引导学生进行分析比较，使学生对波长的认识更加深入和全面。

从波的成因提示学生思考波源的振动周期（频率）与波的周期（频率）的关系，要清楚波源以某一频率振动后，在波的传播过程中，介质中的质点也依次以这个频率振动。这个频率就是波的频率，它与介质无关。

**(2) 波速**

经过一个周期 $T$，振动在介质中传播的距离等于一个波长 $\lambda$，从而可以理解波速的概念：

$v=\frac{\lambda}{T}=\lambda f$。

除了理解公式 $v=\lambda f$ 外，还要让学生弄清以下两点：波源每做一次全振动（经过一个周期），波就向前传播一个波长的距离；波的传播速度是由介质本身决定的，波在不同的介质中传播的速度不同，波长由波速和频率共同决定。

波的传播速度 $v=\lambda f$，其中 $v$、$\lambda$、$f$ 三个量相互关联。从公式上看，似乎改变任意一个量都会影响其他两个量。不少的初学者都会产生这样的认识。其实，周期和频率只取决于波源，而与 $v$、$\lambda$ 无关；波速决定于介质的物理性质，它与 $T$、$\lambda$ 无直接关系；波长 $\lambda$ 则决定于 $v$ 和 $T$，只要 $v$ 和 $T$ 其中一个发生变化，其值就会发生变化。

### 3. 问题与练习

内容分析

本节问题与练习围绕有关波的波长、频率和波速的物理意义及它们之间的关系进行选题。第 1 题和第 2 题联系生活实际进行选材，激发学生兴趣。第 3、4、5 题强化学生对规律 $v=\lambda f$ 的理解，同时也考查了学生对波的基本知识的理解程度。

解答与说明

1. 矮个子的双腿前后交替更为迅速。波长、频率、波速分别可以比作两倍步幅、单位时间内左腿（或右腿）在前的次数、人行走的速度。

2. 人能听到的声音的最低频率大约是 20 Hz，最高频率大约 20 000 Hz。可以通过听不同频率的音叉发出的声音来进行测定。

3. 波浪的速度 $v=\frac{\lambda}{T}=\frac{150}{10}\ \text{m/s}=15\ \text{m/s}$。

4. 据题意可知，甲、乙两船之间为 1.5 个波长，即 $1.5\lambda=20\ \text{m}$，因此

$$\lambda=\frac{40}{3}\ \text{m}$$

船每分钟上下浮动 20 次，说明水波的频率

$$f=\frac{20}{60}\ \text{Hz}=\frac{1}{3}\ \text{Hz}$$

则水波的波速

$$v=\lambda f=\frac{40}{3}\times\frac{1}{3}\ \text{m/s}=\frac{40}{9}\ \text{m/s}$$

5. 解：据题意 $s=1.4\times10^4\ \text{m}$，$t=10\ \text{s}$，则水下声速

$$v=\frac{s}{t}=1.4\times10^3\ \text{m/s}$$

说明：本题介绍了一种估算声音在水中传播速度的方法。还可以提出以下问题让学生思考：①题中给出的方法，引起误差的因素有哪些？②还有其他测量声音在水中传播速度的方法吗？

## 第4节　波的衍射和干涉

### 1. 教学目标

(1) 通过观察水波的衍射现象，认识衍射现象的特征。

(2) 知道什么是波的衍射现象和发生明显衍射现象的条件。

(3) 知道衍射现象是波特有的现象。

(4) 了解波的叠加原理。

(5) 通过实验，认识波的干涉现象和波的干涉图样。

(6) 知道波发生明显干涉现象的必要条件。

(7) 知道干涉现象是波所特有的现象。

### 2. 教材分析与教学建议

衍射和干涉是波特有的现象，也是学生后面学习光的衍射的基础，学生往往感到这部分内容抽象、复杂，不易掌握。教科书是按照“观察现象，归纳特征而后得出结论”的顺序编写的，对于波的衍射，教学的关键仍在于实验的演示、观察和对实验现象的分析。为了有助于对实验现象的分析研究，可以在观察真实现象的同时利用课件进行模拟，以便于使学生对衍射留下更加明晰的印象。在波的干涉学习中，从波叠加的一般原理到满足相干条件下的干涉现象，学生对“波是振动形式的传播”的理解得到加深，其中波的相干条件是学习的难点。高中阶段对干涉现象不要从理论上进行讨论，应从实验的角度加强感知。教学中要注意掌握教学要求，避免增加难度。

**(1) 波的衍射**

教学中要注意创造条件做好实验，并充分利用教科书提供的图片进行讲解。突出实验中观察到的现象，帮助学生从中归纳出结论。

波的衍射实验可用水槽演示，如教科书图 12.5-1 所示。水波衍射实验是重点，要反复地演示，边演示边引导学生对比观察实验现象。

根据直线传播的规律，从波源到孔边缘作直线，两直线所夹的区域为水波直线传播时能到达的区域。在实际的实验现象中，波能传播到这一区域之外的地方，这就是水波的衍射现象。这会使学生已有的认识受到极大的挑战，要抓住时机，引导学生认真观察实验。

教学时应该准备好图片，突出实验中应观察到的“特殊”现象。教科书图 12.5-1 乙中，水波经小孔后出现明显的衍射现象，图中上方的波实际上要“弱”一些。图甲中水波经过大孔后，可近似地看做是“直进”的，但边缘是模糊的，不会像刀切的那么齐，即有衍射现象。正如太阳光从窗户射进来，粗略地看明暗界线是分明的，但是仔细去观察就会看到模糊的分界线。

对于衍射现象，在高中阶段不从理论上进行讨论。因此，不要引导学生探究诸如“为什么会发生衍射”“为什么发生显著衍射现象的条件是障碍物尺寸比波长小”等问题。

**(2) 波的叠加**

认识波的叠加是理解波的干涉的基础。教学时可以先安排学生讨论，猜想两个小球相碰会观察到什么，两列波相遇又会怎么样。为了更加直观，还可以安排学生自主活动——由两个同

学分别抖动细绳的两端，产生沿相反方向传播的两列波。要求学生观察这两列波相遇前、相遇时和相遇后出现的情况（引导学生注意观察波的形状变化）。

这样做的目的是让学生获得感性认识，强调两列波的相遇与两个小球的相遇在物理上产生的结果是不同的。相遇前，每列波按照自己的传播方式行进；相遇时，介质质点的位移是两列波分别引起的位移的矢量和；相遇后，每列波又按照自己原来的传播方式前进。这里最好用一个动画课件模拟波的叠加过程，让学生对波的叠加的现象有清楚的认识。

进而总结得出波的叠加原理：几列波相遇时能够保持各自的运动状态继续传播，在它们重叠的区域里，介质的质点同时参与这几列波引起的振动，质点的位移等于这几列波单独传播时的位移的矢量和。

**两列波的叠加**

问题 1：两个运动的小球相遇后会发生碰撞而各自改变运动状态，那么在空间传播的两列波相遇后又会发生什么现象呢？是否也会像两小球那样各自改变其原来的运动状态呢？

实验演示：引导学生观察实验现象。先抖动绳子一端，演示沿绳往某一方向传播的绳波。再同时向上抖动一下绳子两端，就分别有两个凸起状态的绳波 1 和 2 在绳上相向传播（如教科书图 12.6-1 所示），演示两列绳波相向传播并相遇的现象，注意观察这两列波相遇前、相遇时和相遇后出现的情况，然后用动画课件模拟波的叠加过程。

问题 2：两列绳波相遇时，发生了什么现象？

现象：相遇区域的质点振动幅度加大了。

分析：当两个波源产生的两列波在同一介质中传播时，介质中的每个质点都要同时参与两个分运动。在任一时刻，第一列波使某个质点 $A$ 振动所产生的位移是 $x_1$，第二列波同时使质点 $a$ 振动所产生的位移是 $x_2$，则质点 $a$ 的位移就是这两列波分别产生的位移的矢量和。如果位移 $x_1$、$x_2$ 的方向相同，则质点 $a$ 的振动位移的大小就是 $x_1$ 与 $x_2$ 的大小之和，即 $x=x_1+x_2$，方向与 $x_1$、$x_2$ 的相同。如果位移 $x_1$、$x_2$ 方向相反，则质点 $a$ 的振动位移的大小就是 $x_1$ 与 $x_2$ 的大小之差，即 $x=|x_1-x_2|$，而方向与较大的位移的方向相同。

问题 3：两列绳波相遇后，绳波的传播情况又怎样？

现象：两列波相遇后，彼此穿过，继续传播，波的形状和传播的情形都跟相遇前一样。也就是说，相遇后，它们都保持各自的运动状态，彼此都没有受到影响。

总结：几列波相遇时能够保持各自的运动状态继续传播；在它们重叠的区域里，介质的质点同时参与这几列波引起的振动，质点的位移等于这几列波单独传播时分别引起的位移的矢量和。这就是波的叠加原理。

**（3）波的干涉**

在学生理解波的叠加的基础上，再进一步说明，在特殊情况下，即当两列波的频率相同时，叠加的结果就会出现稳定的“干涉图样”——两列波在某些点引起的振动始终加强，在某些点引起的振动始终减弱，并且加强点与减弱点相互间隔。这就是干涉现象。任何两列波都可以叠加，而干涉现象是叠加的特例，特殊在于两列波的频率相同，叠加的结果是稳定的干涉

图样。

教科书是按照“观察现象——归纳特征——得出结论”的顺序编写的。要充分利用实验展示真实的现象，在此基础上用多媒体课件或照片进行逐步深入的分析研究，揭示其特征和产生条件。

观察实验时，应注意“动”“静”结合。“动”表现在干涉区域中最“凸起”或最“凹下”（在教科书图 12.4-4 中为最“黑”或最“亮”）的部分的运动形式向前传播，因为加强和减弱是指该区域的质点的振幅增大或减小，它们处于振动过程中，它们的振动状态在进行传播。而振动减弱的区域的质点振幅很小（或为 0），表现为水面平静。实验中我们看到的现象就是这样形成的。“静”是干涉图样在某一时刻的一幅图片，是静止状态的，但波的干涉图样是在不断变化的，每一个质点都在振动，只是振动的振幅不同。

教科书图 12.4-5 是某一时刻的干涉示意图，实验现象如图 12.4-4。教学中要将两个图进行对比，找到对应的关系。在图 12.4-4 中，最明处为水面凹下最深处，最暗处为水面凸起最高处（用透射光进行观察时），它们的连线相当于教科书图 12.4-5 中的浅色实线（线上各点都是加强）。先对照两图，找到中间的那一条浅色实线，其他的浅色实线和浅色虚线就容易找到了。

注意强调以下几点：

①浅色实线上各点都是始终加强，质点的振动最剧烈，振幅最大；浅色虚线上各点都是始终减弱，质点的振动最平静，振幅最小。在浅色实线与虚线之间的质点的振幅均在最大和最小之间，靠近虚线的振幅较小。

②“振动始终加强”是指该质点以最大振幅在振动，“振动始终减弱”是指该质点以最小振幅在振动（不论“加强”或是“减弱”位移均会出现 0）。

**（4）关于干涉条件**

严格的干涉条件是：两列波的频率相同，相位差恒定，振动方向一致。

节后的“做一做”，能使学生真切体会声音的干涉现象，教师要尽量创造条件组织学生做。

在波的干涉的教学中，应以引导学生认识干涉现象、分析干涉的形成原因作为教学的重点，不要在理论上引申，不要因为学生提出疑问而补充过多过深的内容。要找出本单元教学中学生必须掌握哪些内容，以及哪些内容作为一般性的了解就行了。要注意指导学生阅读教科书，对结论中关键词句更要引起注意，如“频率相同”“互相间隔”“稳定”等等。对学生提出的问题，能深入浅出、简明回答的应当作答，但对过于复杂的内容，可以明确告诉学生，中学物理中不研究，或指点学生自己去读参考书。

### 3. 问题与练习

内容分析

选题都是定性讨论衍射和干涉现象。前两题考查产生明显衍射现象的条件。第 3 题考查干涉时的“加强”“位移”“振幅”之间的关系。第 4 题考查学生对干涉图样的认识。第 5 题考查学生对干涉图样的认识，以及对波动和振动关系的理解。

解答与说明

1. C、D。

说明：通过本练习，可以使学生对于人发声的波长有一个大致的估计。

2. 可以减小波源的频率来增加水波的波长，也可以适当上移挡板 $N$。

注意：只能适当上移挡板 $N$，使小孔的大小和波长相当。如果小孔太小，衍射现象也会发生，但是由于能量的问题，$P$ 点的振动不容易观察。

3. A、B、D。

4. (1) $M$ 质点此时刻处于波峰，以后一个周期内上下振动；$N$ 质点一直处于静止状态（假定两列波的振幅相同）。

(2) 如图 12-3 所示。

(3) 如图 12-3 所示。

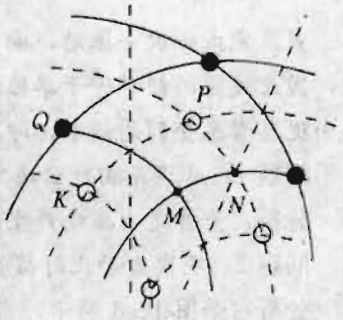


图 12-3

5. (1) 凸起的最高点在图 12-3 中由 $M$ 向 $P$ 移动。$M$ 点并不随波迁移，而只在竖直方向上运动。

(2) 图 12-3 中 $K$ 点是凹下最低的位置；凹下最低的位置由 $K$ 向 $Q$ 移动。

(3) 0。

## 第 5 节　多普勒效应

### 1. 教学目标

(1) 通过实验感受多普勒效应。

(2) 初步定性解释多普勒效应产生的原因。

(3) 列举多普勒效应的应用实例。

### 2. 教材分析与教学建议

本节主要以声波为例介绍多普勒效应。声波的多普勒效应比较常见，易于为学生接受。教科书只对多普勒效应作定性的分析说明，使学生对多普勒效应有初步的了解，教学中不宜作过多的理论引申。多普勒效应在生活中普遍存在，随着科学技术的发展，它的应用日益广泛，如交通管理、医疗检查等等。给学生作些介绍，可以开阔他们的眼界。

教科书以蜂鸣器实验引入介绍多普勒效应。实验时可以改变蜂鸣器的旋转速度，让学生感知音调的变化。教学也可以提供更直观的生活实例，让学生认识生活中有关的物理现象。要做好蜂鸣器实验，杆长最好是 3 m 以上。教学时也可以通过播放火车鸣笛时产生多普勒效应的视频材料引入课题。

多普勒效应是指由于波源或观察者的运动而出现的观测频率与波源频率不同的现象。理解多普勒效应要注意下面两点：①这是由于波源或观察者的运动而出现的现象。对机械波来说，运动或静止都是相对于介质而言。②波源的频率与观察者接收到的频率不同。教学中也可让学生设想：当自己随同某一个波峰一起远离波源，将接收不到波，此时接收到的频率变为 0。

教科书图 12.5-2 比较直观、形象地帮助学生理解接收到完全波的个数，教学中应认真对待。

对于多普勒现象的解释，应把握以下几点：

①声源与观察者相对静止，在单位时间内，观察者所接收到的频率等于声源发出的频率；

②声源与观察者相对靠近，在单位时间内，观察者所接收到的频率大于声源发出的频率；

③声源与观察者相对远离，在单位时间内，观察者所接收到的频率小于声源发出的频率。

教学片段

## 定性解释多普勒效应

声源完成一次全振动，向外发出一个波长的波，频率表示单位时间内完成的全振动的次数，因此波源的频率等于单位时间内波源发出的完全波的个数；而观察者听到的声音的音调，是由观察者感受到的频率，即单位时间接收到的完全波的个数决定的。

问题1：音调是由什么决定的？

分析：声音是由振动产生的，振动的频率决定声波的音调。

问题2：观察者静止时接收到的波的频率和波源的频率是一样的吗？

分析：如图12-4所示，当波源S和观察者A都不动，若波源频率为20 Hz，则波源每秒发出20个完全波，这20个完全波通过观察者的时间为1 s，即观察者每秒接收20个完全波，因此观察者接收到的波的频率没有改变，听到的是“原声原调”。

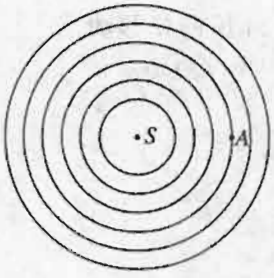


图12-4

问题3：当波源不动，观察者运动时，观察者接收到的频率会改变吗？

分析：如图12-5甲所示，波源不动，观察者向波源由A点经1 s运动到B点，虽然波源每秒仍发出20个完全波，但观察者每秒接收到21个完全波，即接收到的频率增大。

同样的道理，当观察者远离波源，观察者在单位时间内接收到的完全波的个数减少，即接收到的频率减小。

问题4：当观察者不动，波源运动时，观察者接收到的频率会改变吗？

分析：如图12-5乙所示，波源向右运动时，波源右方的波面变得密集，左方的波面变得稀疏，也就是说，波源右方的波长变短，左方的波长变长。因此，当观察者在波源右方时，单位时间内接收到的完全波的个数增多，即接收的频率增大。同理，当观察者在波源左方时，接收到的频率减小。

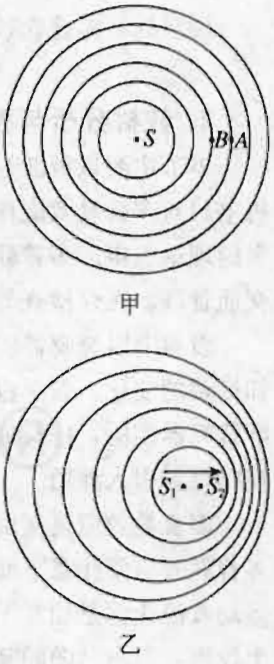


图12-5

课堂小结：当波源与观察者有相对运动时，如果二者相互接近，观察者接收到的频率增大；如果二者相互远离，观察者接收到的频率减小。

讨论：想象你以声波的速度随同某一个波峰一起远离波源，会是什么情景？

关于多普勒效应的应用，除了教科书中提到的，还可根据实际情况，参考本章“教学资源库”，补充介绍一些应用实例。

### 3. 问题与练习

内容分析

第1题和第2题围绕有关多普勒效应的理解和应用进行选材。第3题目的在于开阔学生视野，广泛了解多普勒效应的应用，培养学生的科学热情。

解答与说明

1. 当乙向甲运动时，由于间距缩短，乙接到球的时间间隔将会减少，所以乙每隔小于 1 s 的时间接到一个球。这就相当于观察者向波源靠近时接收到的波的频率增大的情形。

2. B、D。

3. 略。

## 第 6 节　惠更斯原理

### 1. 教学目标

(1) 知道什么是波面和波线，了解惠更斯原理。

(2) 认识波的反射现象，并能用惠更斯原理进行解释。

(3) 认识波的折射现象，并能用惠更斯原理进行解释。

### 2. 教材分析与教学建议

学生在初中已学过光的反射、折射及回声等的初步知识，在此基础上，进一步加深对波的特性的理解。本节重点是惠更斯原理，难点是波面、波线的概念和用惠更斯原理对波的反射规律和折射规律进行解释。由于这些概念比较抽象，应通过实验演示和日常生活经验来辅助教学。波的反射和折射是常见的现象，从对现象的研究中概括出规律，再用来解释现象和指导实践，使学生提高学习的兴趣，感受知识的力量。

**(1) 波面和波线**

可以通过展示水波的照片或者课件，指出波面是同一时刻介质中振动状态相同的质点所构成的面，波线是指跟各个波面垂直的线，用来表示波的传播方向。先引入平面波波线、波面的概念，再结合球面波深化理解波线和波面，让学生能够根据想象建立空间概念，提高学生抽象分析问题的能力。

**(2) 惠更斯原理**

当波在弹性介质中传播时，介质中任一点 $P$ 的振动，将直接引起其邻近质点的振动。从 $P$ 点引起邻近质点的振动这个角度来说，$P$ 点和波源并没有本质上的区别，即 $P$ 点也可以看做新的波源。例如，水面波传播时遇到障碍物，当障碍物上小孔的大小比波长小或与波长相差不多时，就会看到穿过小孔后的波振面是圆弧形的，与原来的波面无关，就像以小孔为波源产生的波动一样。

在总结这类现象的基础上，荷兰物理学家惠更斯首先提出：介质中任一波面上的各点，都可以看做发射子波的波源，其后任意时刻，这些子波在波前进方向的包络面就是新的波面。这就是惠更斯原理。惠更斯原理之所以正确，是因为由它得出的结论都与事实相符。

应用这个原理，可以由某一时刻的波前的位置，用几何作图的方法来确定下一时刻波前的位置和波传播的方向。可以用惠更斯原理来解释波传播中的反射、折射和衍射等现象。

**(3) 波的反射**

学生在初中阶段已学习过光的反射和回声，教师可以类比光的反射现象讲解波的反射，然后根据惠更斯原理进行解释。

用波的反射现象解释夏日雷声轰鸣不绝、回声和混响等现象，有利于加强学生对波的反射

的理解。

教学片段

**机械波的反射**

思考提问：我们知道光有反射现象。机械波是否也具有反射现象呢？能举例说明吗？

问题分析：机械波有反射现象。由惠更斯原理可以作出这样的解释：当机械波到达两种介质的界面时，在界面上会产生子波。子波会向各个方向继续传播，有部分机械波会返回原来的介质继续传播，从而出现机械波的反射现象。例如：

①回声是声波的反射现象，原因是：对着山崖或高墙说话，声波传到山崖或高墙时，会被反射回来继续传播。

②夏日的雷声轰鸣不绝，原因是：声波在云层界面多次反射。

③在空房间里讲话声音更响亮，原因是：声波在房间里遇到墙壁、地面或天花板发生反射时，由于距离近，原声与回声几乎同时到达人耳。人耳只能区分相差 0.1 s 以上的声音，所以人在房间里讲话感觉声音比在空旷处大。如果房间里有帷帐、地毯、衣物等，它们会吸收声波，从而使声音减弱。

**(4) 波的折射**

在学生初中学习光的折射的基础上，可通过类比讲解波的折射。教科书由惠更斯原理做出预言，画出波从介质 1 进入介质 2 的示意图，帮助学生认识波的折射现象。

## 三、教学设计案例

### 第 1 节　波的形成和传播

**教学目标**

(1) 通过观察和分析，认识波是振动传播的形式，知道波在传播振动形式的同时也传播能量和信息。

(2) 能区别横波和纵波，知道什么是波峰、波谷、密部和疏部。

(3) 知道什么是机械波和机械波形成的条件。

**教学过程**

(1) 创设情境，导入新课

质点在大小与位移成正比、方向始终指向平衡位置的回复力作用下，就会做简谐运动。如果做简谐运动的质点与周围的质点间有力的相互作用，它的振动对周围质点会有什么影响？

在日常生活中，我们看到投石于水中，会激起一圈圈起伏不平的水面波向周围传播；物体发出的声音通过声波传给我们，使我们能听到；远处发生的地震激起的地震波使我们受到震

动。如此等等，我们在不断地感受到一种广泛存在的运动形式——波动。

（2）新课教学

**一、波的形成和传播**

根据条件可让学生看录像，如足球比赛中看台上观众形成的“人浪”，大型团体操表演中翻滚的“波浪”，艺术体操中的带操等。

教师演示抖动长绸或绳子来说明波在长绸、绳子上的传播及波的形成过程。

提问：绳波是怎样形成的？

教师总结绳波的形成过程：

1. 绳子各部分可看成由许多质点组成，各部分之间存在着相互作用的弹力；

2. 沿波的传播方向上后一个质点比前一个质点落后一段时间，质点依次被带动；

3. 振动的形式传播出去形成波。

为了让学生体验感悟机械波，可以让部分身高相近的学生紧挨着站到教室内走道上，手肩互搭（告诫参与学生保持连带关系不要松手，并注意平衡不要摔倒），然后让排头的一名同学蹲下、站起做连续运动。由于连带关系，精彩的“人浪”展现于学生眼前，学生兴趣盎然，跃跃欲试。学生有了亲身的体验后，教师通过以下问题引导探究。

提问：形成“人浪”要具备哪些条件？

点拨：要有一个人先振动起来（波源）。

提问：同学为什么要手肩互搭？

点拨：有连带作用。

提问：后一位同学与前一位同学相比，他们的运动有何异同？

点拨：都同样做振动，但节奏稍迟（落后）。

提问：“人浪”沿水平方向传播，人随“人浪”迁移了吗？

点拨：没有，人只是上下振动。（说明质点不随波迁移。）

提问：通过观察以上几个实验，说说产生机械波的条件是什么。

点拨：形成机械波需要波源和介质。

提问：是不是有振动就一定会形成波？

点拨：不一定，还需要介质让振动在其中传播。

在此基础上，用动画模拟绳波的传播过程如图 12-6，让学生讨论分析绳波的传播规律。

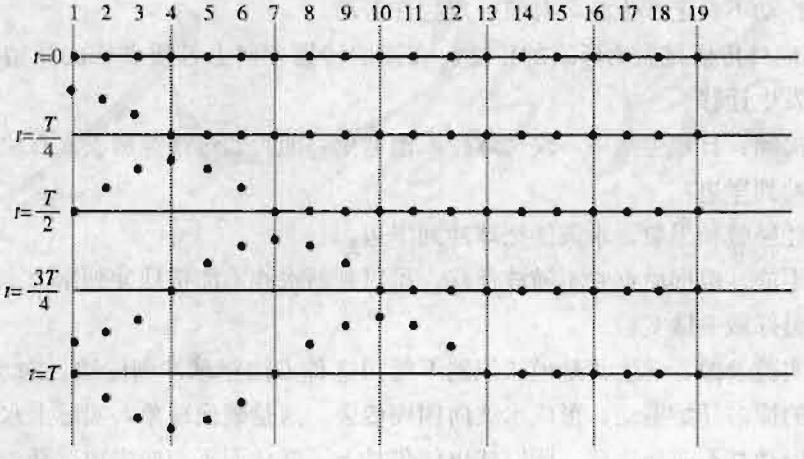



图 12-6

教师归纳总结：

·在波的传播过程中，总是近波源点带动远波源点，使振动沿波的传播方向传递出去。

·振源每完成一次全振动，波形就向波的传播方向前进一定的距离。在波向外传播过程中，质点本身只在其平衡位置附近振动，不沿波的传播方向运动。

·每个质点的起振方向都与波源的起振方向相同，且它们都与波源具有相同的振动周期（频率）和振幅。

**二、横波和纵波**

教师演示：抖动绳子形成的绳波，绳上各个质点的振动方向和波的传播方向垂直，波形为凹凸相间的形状；手提一根长而轻的螺旋弹簧，手有规律地上下振动，弹簧上各质点的振动方向和波的传播方向在一条直线上，弹簧上产生密集的部分和稀疏的部分。

教师总结横波和纵波的概念。

1. 横波：质点的振动方向跟波的传播方向垂直的波叫做横波。

（1）波峰：在横波中凸起的最高处叫做波峰。

（2）波谷：在横波中凹下的最低处叫做波谷。

2. 纵波：质点的振动方向跟波的传播方向在同一条直线上的波叫做纵波。

（1）密部：在纵波中，质点分布最密的地方叫做密部。

（2）疏部：在纵波中，质点分布最疏的地方叫做疏部。

纵波也叫疏密波。

（3）声波是纵波，地震波既有横波又有纵波。

教师演示音叉振动产生声波，并配合图片讲解声波的形成。音叉的叉股向一侧振动时，压缩空气使这部分空气变密，叉股向另一侧振动时，这部分空气变疏，形成疏密相间的波向外传播。

**三、机械波**

师生共同总结机械波的概念和规律。

1. 波源和介质：波源——保持持续振动并引起其他质点振动的物体；介质——借以传播波的物质。

2. 机械波：机械振动在介质中的传播形成机械波。

3. 产生机械波的条件：同时存在振源和介质。

注意：有振动不一定产生波，有波一定存在振动。

4. 机械波向外传播是振动形式的传播。在波的传播方向上各质点依次开始振动，介质中各质点不随波发生迁移。

例如可以提问：日常生活中，发现球掉入池塘里，能否通过往池塘丢入石块，借助石块激起的水波把球冲到岸边？

学生甲：凭经验和想象，水波能把球冲到岸边。

学生乙：不能。根据质点并不随波迁移，可以判断水波不能把球冲到岸边。

学生丙：最好做一做实验。

通过观看实验录像，学生清楚地认识到不能用这种方法把球冲到岸边。向水中投入石块，水面受到石块的撞击开始振动，形成水波向四周传去。这是表面现象，实际上水波向四周传播而水只是上下振动并不向外迁移，所以球也仅仅是上下振动而不会向岸边运动。

5. 波向外传播振动的形式的同时，也在向外传递信息和能量。

**四、波动和振动**

波动与振动是一回事吗？它们的区别与联系分别是什么？

1. 区别

振动是一个质点的往复运动，而波动是介质中许多质点的集体运动。

2. 联系

(1) 都是周期性的运动，波动周期等于质点的振动周期。

(2) 从构成介质的某一质点来看，所呈现的现象是振动；从介质的整体来看，所呈现的现象是波动。

(3) 振动是形成波动的必要条件，但有振动不一定存在波动。

(4) 波动是振动形式的传播过程，同时也在向外传递信息和能量。

**总结拓展**

本节课通过实验的方法，体会机械波的形成与传播。机械振动在介质中的传播形成机械波。产生机械波的条件是同时存在振源和介质。通过比较的方法，根据波的模型进行分析判断，感知振动与波动的联系与区别，理解振动是波动的成因，波动是振动在介质中的传播的结果。

在波的传播过程中，总是近波源点带动远波源点，使振动沿波的传播方向传递出去。振源每完成一次全振动，波形就向波的传播方向前进一定的距离。在波向外传播过程中，质点本身只在其平衡位置附近振动，不沿波的传播方向运动。机械振动在介质中传播形成机械波，波有横波和纵波之分，波动的过程既是振动形式的传递过程又是能量和信息的传递过程。

## 四、教学资源库

### (一) 概念、规律和背景资料

**1. 惠更斯生平**

惠更斯（C. Huygens，1629—1695）1629 年 4 月 14 日出生于海牙，他是荷兰物理学家、天文学家、数学家。

惠更斯的父亲是大臣、外交官和诗人，常与科学家往来。惠更斯自幼聪明好学，多才多艺，13 岁时他就自制一架车床。16 岁时惠更斯进莱顿大学攻读法律和数学，两年后转入布雷达大学。1655 年获法学博士学位，随即访问巴黎，在那里开始了他重要的科学生涯。1663 年访问英国，并成为刚建不久的皇家学会会员。1666 年，应路易十四邀请任刚建立的法国科学院院士。惠更斯体弱多病，全身心献给科学事业，终生未婚，1695 年 7 月 8 日逝于海牙。

惠更斯处于富裕宽松的家庭和社会条件中，没受过宗教迫害的干扰，能比较自由地发挥自己的才能。他善于把科学实践与理论研究结合起来，透彻地解决某些重要问题，形成了理论与实验结合的工作方法与明确的物理思想。他留给人们的科学论文与著作 68 种，《全集》有 22 卷，在碰撞、钟摆、离心力和光的波动说、光学仪器等多方面作出了贡献。

惠更斯最早取得成果的是数学，他研究过包络线、二次曲线、曲线求长法，并发现悬链线

（摆线）与抛物线的区别，还是概率论的创始人。

在1668～1669年英国皇家学会碰撞问题征文悬赏中，惠更斯是得奖者之一。他详尽地研究了完全弹性碰撞问题（当时叫“对心碰撞”），去世后综合发表于《论物体的碰撞运动》(1703)中，包括5个假设和13个命题。他纠正了笛卡儿不考虑动量方向性的错误，并首次提出完全弹性碰撞前后的$\sum mv^2$守恒。他还研究了岸上与船上两个人手中小球的碰撞情况，并把相对性原理应用于碰撞现象的研究。

惠更斯从实践和理论上研究了钟摆及其理论。1656年他首先将摆引入时钟成为摆钟，以取代过去的重力齿轮式钟。在《摆钟》(1658)及《摆式时钟或用于时钟上的摆的运动的几何证明》(1673)中他提出著名的单摆周期公式，并研究了复摆及其振动中心的求法。他还通过对渐伸线、渐屈线的研究找到等时线、摆线以及研究了三线摆、锥线摆、可倒摆及摆线状夹片等。

在研究摆的重心升降问题时，惠更斯发现了物体系的重心与后来欧拉称之为转动惯量的量，还引入了反馈装置——“反馈”这一物理思想今天更显得意义重大。他设计了船用钟和手表平衡发条，大大缩小了钟表的尺寸。他还用摆求出重力加速度的准确值，并建议用秒摆的长度作为自然长度标准。

惠更斯提出了他的离心力定理，他还研究了圆周运动、摆、物体转动时的离心力以及泥球和地球转动时变扁的问题等等。这些研究对于后来万有引力定律的建立起了促进作用。他提出过许多既有趣又有启发性的离心力问题。

他设计制造的光学和天文仪器精巧超群，如磨制了透镜，改进了望远镜（用它发现了土星光环等）与显微镜，还设计了几十米长的“空中望远镜”（无管、长焦距、可消色差）、展示星空的“行星机器”（即现今天文馆雏形）等。惠更斯目镜至今仍在使用。

惠更斯在1678年给巴黎科学院的信和1690年发表的《光论》一书中都阐述了他的光波动原理，即惠更斯原理。他认为每个发光体的微粒把脉冲传给邻近一种弥漫媒质（“以太”）微粒，每个受激微粒都变成一个球形子波的中心。他从弹性碰撞理论出发，认为这样一群微粒虽然本身并不前进，但能同时传播向四面八方行进的脉冲，因而光束彼此交叉而不相互影响，并在此基础上用作图法解释了光的反射、折射等现象。《光论》中最精彩的部分是对双折射提出的模型，用球和椭球方式传播来解释寻常光和非常光所产生的奇异现象，书中有几十幅复杂的几何图，足以看出他的数学功底。

**2. 惠更斯原理**

(1) 惠更斯原理的表述

惠更斯原理是关于波面传播的理论，它的表述可通过图12-7来说明。我们考虑在某一时刻$t$由振源发出的波扰动传播到了波面$S_1$。惠更斯提出：$S_1$上的每一面元可认为是次波的波源。由面元发出的次波向四面八方传播，在以后的时刻$t'$形成次波面。在各向同性的均匀介质中，次波面是半径为$r=v\Delta t$的球面，这里$v$为波速，$\Delta t=t'-t$。惠更斯认为：这些次波面的包络面$S_2$就是$t'$时刻总扰动的波面。

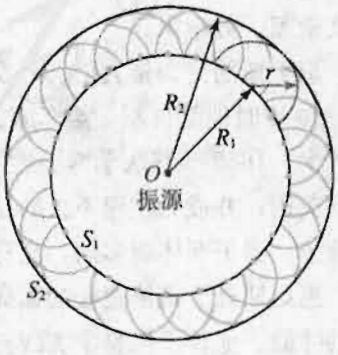


图12-7 惠更斯原理

(2) 对反射定律和折射定律的解释

根据惠更斯原理，可以解释光的反射定律和折射定律，并给出折射率的物理意义——光在两种介质中速度之比。下面就来论证这个问题。

如图 12-8 所示，设想有一束平行光线（平面波）以入射角 $i_1$ 由介质 1 射向它与介质 2 的分界面上，其边缘光线 1 到达 $A_1$ 点。作通过 $A_1$ 点的波面，它与所有的入射光线垂直。在光线 1 到达 $A_1$ 点的同时，光线 2，3，…，$n$ 到达此波面上的 $A_2$，$A_3$，…，$A_n$ 点。设光在介质 1 中的速度为 $v_1$，则光线 2，3，…，$n$ 分别要经过一段时间 $t_2=\frac{A_2B_2}{v_1}$，$\frac{A_3B_3}{v_1}$，…，$\frac{A_nB_n}{v_1}$ 后才到达分界面上的 $B_2$，$B_3$，…，$B_n$ 各点，每条光线到达分界面上时都同时发射两个次波，一个是向介质 1 内发射的反射次波，另一个是向介质 2 内发射的透射次波。设光在介质 2 中的速度为 $v_2$，在第 $n$ 条光线到达 $B_n$ 的同时，由 $A_1$ 点发出的反射次波面和透射次波面分别是半径为 $v_1t_n$ 和 $v_2t_n$ 的半球面。在此同时，光线 2，3，…传播到 $B_2$，$B_3$，…各点后发出的反射次波面的半径分别为 $v_1(t_n-t_2)$，$v_1(t_n-t_3)$，…而透射次波面的半径为 $v_2(t_n-t_2)$，$v_2(t_n-t_3)$，…这些次波面一个比一个小，直到 $B_n$ 处缩成一个点。根据惠更斯原理，这时刻总扰动的波面是这些次波面的包络面。不难证明，反射次波和透射次波的包络面都是通过 $B_n$ 的平面。设反射波总扰动的波面与各次波面相切于 $C_1$，$C_2$，$C_3$，…各点，而透射波总扰动的波面与各次波面相切于 $D_1$，$D_2$，$D_3$，…各点。连接次波源和切点，即得到总扰动的波线，亦即 $A_1C_1$，$B_2C_2$，$B_3C_3$，…为反射光线，$A_1D_1$，$B_2D_2$，$B_3D_3$，…为折射光线。

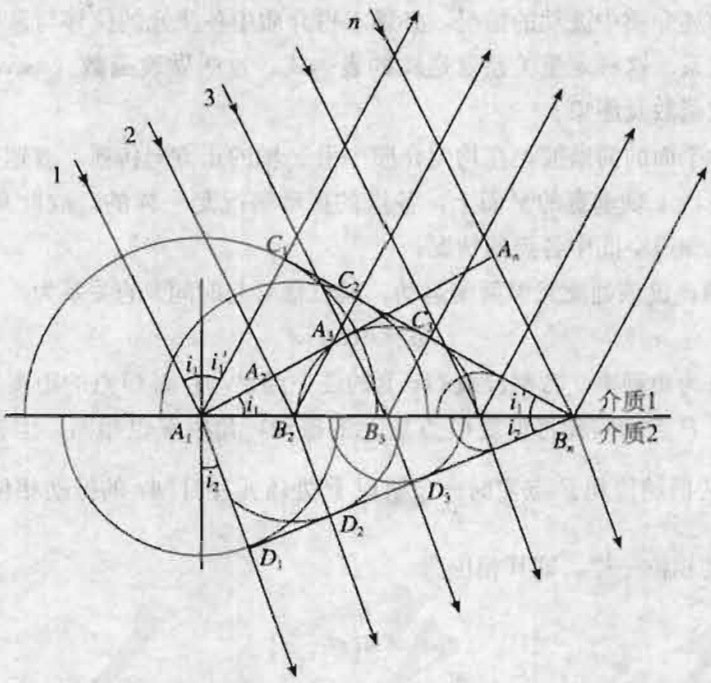



图 12-8　用惠更斯原理解释反射定律和折射定律

由于 $A_1C_1=A_nB_n=v_1t_n$，直角 $\triangle A_1C_1B_n$ 和 $\triangle B_nA_nA_1$ 全等，因而 $\angle A_nA_1B_n=\angle C_1B_nA_1$，由图 12-8 不难看出，$\angle A_nA_1B_n=\angle i_1$（入射角），$\angle C_1B_nA_1=\angle i_1'$（反射角），故得到

$$i'=i$$

这样便导出了反射定律。由图还可看出，$\angle D_1B_nA_1=\angle i_2$（折射角），因此

$$\sin i_2=\frac{\overline{A_1D_1}}{\overline{A_1B_n}}$$

此外 $\sin i_1=\frac{\overline{A_nB_n}}{\overline{A_1B_n}}$，于是

$$\frac{\sin i_1}{\sin i_2}=\frac{\overline{A_nB_n}}{\overline{A_1D_1}}=\frac{v_1t_n}{v_2t_n}=\frac{v_1}{v_2}$$

由此可见，入射角与折射角正弦之比为一常数。这样我们便导出了折射定律。在折射定律中我们称比值$\frac{\sin i_1}{\sin i_2}$为介质 2 相对介质 1 的折射率 $n_{12}$，因此相对折射率与光在两种介质中速度的关系为

$$n_{12}=\frac{n_2}{n_1}=\frac{v_1}{v_2}$$

由此可见，一种介质的绝对折射率为

$$n=\frac{c}{v}$$

式中 $c$ 为真空中光速，$v$ 为该种介质中的光速。从上式看来，在光密介质中光的速度较小。这一结论是与实验相符的。

（选自《新概念物理教程　光学》，赵凯华著，高等教育出版社 2004 年版）

**3. 简谐波的波函数及图解**

（1）简谐波的波函数

为了定量地描述介质中波动的情况，必须求得介质中各质元的位移与该质元所处的平衡位置及时间的定量关系。这种定量关系就是波的表达式，也叫做**波函数**（wave function）。我们只讨论简谐波的波函数及图象。

设有一波前为平面的简谐波，在均匀介质中沿 $x$ 轴的正方向传播，波速为 $v$。由于这是一种平面波，所以在与 $x$ 轴垂直的平面上，各点的振动情况是一样的，故此只要讨论 $x$ 轴上各点的振动，就可以知道空间中各点的情况。

以 $O$ 点为波源，设该处质元做简谐运动，其位移 $u$ 与时间 $t$ 的关系为

$$u=A\cos\omega t$$

式中 $A$ 为振幅，$\omega$ 为角频率。考察波线 $Ox$ 上的任一点 $P$，它离 $O$ 点的距离为 $x$，当波源 $O$ 的振动传到 $P$ 点时，$P$ 点的质元将重复 $O$ 点质元的振动，角频率也相同，但振动的相位要落后于 $O$ 点。因为 $O$ 的振动传到 $P$ 点需时$\frac{x}{v}$，所以 $P$ 处质元在时刻 $t$ 的振动相位和 $O$ 点质元在时刻 $t'=t-\frac{x}{v}$ 的振动相位一样，即其相位为

$$\omega t'=\omega\left(t-\frac{x}{v}\right)$$

考虑到平面简谐波传播时各质元的振幅相等，$P$ 处质元在时刻 $t$ 的位移为

$$u=A\cos\omega t'=A\cos\omega\left(t-\frac{x}{v}\right) \tag{1}$$

这就是平面简谐波的波函数。因 $\omega=\frac{2\pi}{T}$，$vT=\lambda$，$v=\frac{1}{T}$，故波函数也可写为

$$u=A\cos 2\pi\left(\frac{t}{T}-\frac{x}{\lambda}\right) \tag{2}$$

或

$$u=A\cos 2\pi\left(vt-\frac{x}{\lambda}\right) \tag{3}$$

如令 $k=\frac{2\pi}{\lambda}$，则波函数还可写为

$$u=A\cos(\omega t-kx) \tag{4}$$

式中 $k$ 称为**角波数**（wave number），单位为 rad/m。

从波函数中可见，当振幅 $A$、角频率 $\omega$ 和波速 $v$ 确定后，位移 $u$ 是质元所处平衡位置 $x$ 和时间 $t$ 的函数，即波函数有 $x$ 和 $t$ 两个自变量。这是比振动表达式更为复杂的地方。

（2）简谐波的图解

波函数具有随时空变量变化的双重周期性，我们不妨把两个变量分别固定下来，看它随另一个变量变化的情况。

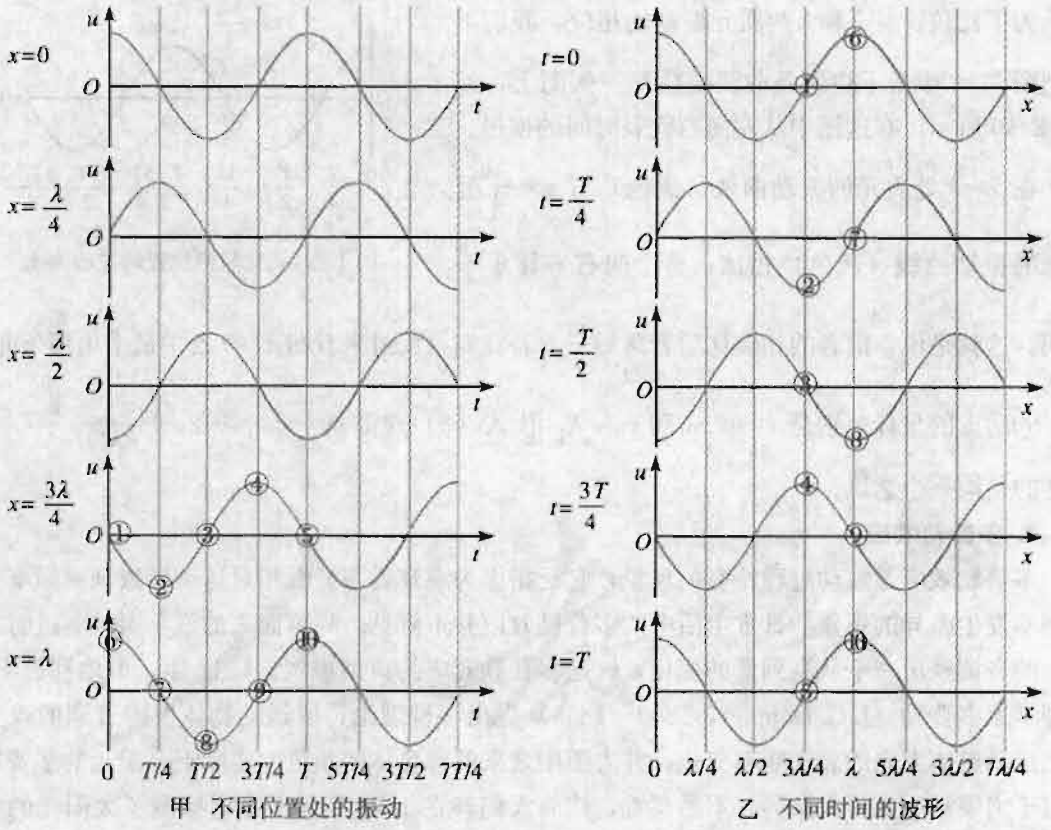
①固定 $x$ 看 $u$ 随 $t$ 的变化

在波线上某一确定地点，即指定 $x$，位移 $u$ 就只是时间 $t$ 的函数，此时波函数就是描述位于 $x$ 处的质元的振动情况。图 12-9 甲画出了 $x=0$、$\frac{\lambda}{4}$、$\frac{\lambda}{2}$、$\frac{3}{4}\lambda$ 和 $\lambda$ 等处质元的振动情况。

由图 12-9 甲可见，位于波线上各点的质元都在做简谐运动，但它们的振动相位却依次落后，任意两点 $x_2$ 和 $x_1$ 的振动相位 $\omega t+\varphi_2$ 与 $\omega t+\varphi_1$ 之差，依（3）式，为

$$\varphi_2-\varphi_1=-\left(\frac{2\pi x_2}{\lambda}\right)-\left(-\frac{2\pi x_1}{\lambda}\right)=-\frac{2\pi(x_2-x_1)}{\lambda} \tag{5}$$

由于前已设波源振动的初相位为 0，即 $x_1=0$ 时，$\varphi_1=0$，所以 $x$ 处质元的初相位为 $-\frac{2\pi x}{\lambda}$。




甲 不同位置处的振动　　乙 不同时间的波形

图 12-9 波函数随时间和空间的双重变化

②固定 $t$ 看 $u$ 随 $x$ 的变化

在某一确定时刻，即 $t$ 一定时，位移 $u$ 仅是 $x$ 的函数。此时波函数就表示在特定时刻 $x$ 轴（波线）上各质元的振动位移的分布情况，而连接 $x$ 轴上各质元位移的曲线，如图 12-9 乙所

示，称为**波形图**。它们就像在时刻 $t$ 用照相机对全体质元拍照，片子上照下的是各质元于同一时刻 $t$ 的位置。

图 12-9 甲、乙所示的振动图和波形图中的各种曲线，常被用来判断各点之间的相位关系，或波的传播方向等有用信息，我们应该很好地熟悉它们。作为练习，反复比较图 12-9 甲和乙是有意义的。例如，我们选择 $x=\frac{3\lambda}{4}$ 处的质元，考察它的位移变化。在 $t=0$、$\frac{T}{4}$、$\frac{T}{2}$、$\frac{3T}{4}$、$T$ 五个时刻它的位移 $u$ 反映在图 12-9 甲的第 4 条曲线上，即①、②、③、④、⑤五个点所代表的状态。如果要看图 12-9 乙，则这五个点分别落在上下五条曲线的第 4 个位置上。我们从两边可以看出，按①→②→③→④→⑤顺序位移 $u$ 的变化都是 $0\rightarrow -A\rightarrow 0\rightarrow A\rightarrow 0$（这里 $A$ 为振幅）。

现在再看图 12-9 乙中最上边那条曲线，比较一下①、⑥两点振动的相位。⑥点的质元现处于 $u=+A$ 的位置，下一步向何处去？竖直向下看第二条曲线，我们发现图中⑦点处于 $u=0$ 的位置。这就是说，$\frac{1}{4}$ 周期后此质元处于 $u=0$ 的位置。依此类推，从下边各条曲线上的⑧、⑨、⑩各点我们看出，此质元以后每经 $\frac{1}{4}$ 周期，$u$ 经历 $-A$ 和 0，回到 $+A$。其实，此质元的振动过程更好地反映在图 12-9 甲最下边那条曲线上。

为了比较 $x=\frac{3\lambda}{4}$ 和 $\lambda$ 两质元振动的相位，我们不妨把图 12-9 甲最下边两条曲线叠放在一张图上，如图 12-10 所示。在这图中从左向右代表时间的推迟。

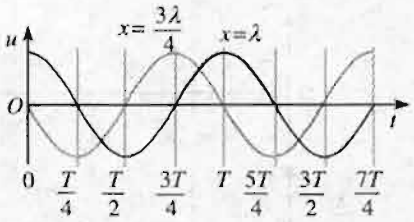


图 12-10　比较两位置的振动曲线

在 $x=\lambda$ 处质元的振动曲线（黑色）与 $x=\frac{3\lambda}{4}$ 处质元的振动曲线（灰色）相比，整个向右平移了 $\frac{1}{4}$ 周期。这就是说，前者的相位比后者落后 $\frac{\pi}{2}$。若我们再反过来看图 12-9 乙中最上边那条曲线，①、⑥两点的坐标分别是 $x_1=\frac{3}{4}\lambda$ 和 $x_6=\lambda$，代入（5）式得 $\varphi_6-\varphi_1=-2\frac{\pi(x_6-x_1)}{\lambda}=-\frac{\pi}{2}$，表达的是同一个意思。

**4. 多普勒效应**

多普勒效应是波动过程特有的现象，它泛指因为观察者与波源相对运动导致观测频率与波源频率发生差异的现象。日常生活中的多普勒效应并不鲜见。鸣笛而来的汽车疾驶而过时，汽笛声的音调经历一个从高到低的变化，这是多普勒效应的典型事例。1842 年，奥地利数学家、物理学家多普勒（J. C. Doppler，1803—1853）提出一种理论，以运动物体发声音调的改变来类比运动星体发光的表观频率变化，并力图用之来解释星体的颜色。实际上，星光的多普勒效应对于肉眼观测显得太微弱，不易察觉，然而人们却在 1871 年借助光谱检测了太阳光的多普勒效应，证实了太阳自转的存在。此后，多普勒效应被广泛地应用在天体运动速度的测量之中。在医学上，多普勒效应也有着日渐增多的应用，现已制成多种利用多普勒效应的诊断仪器，例如，多普勒超声血流计就用来测量人们血管内的血液流速。

尽管多普勒效应的出现都是源于观察者和波源的运动，但对于电磁波（光波）和机械波产生此种效应的机理和物理诠释却不尽相同。理解机械波的多普勒效应，关键是有个介质参考

系、波源和观察者的速度以及波速都是相对于介质参考系而言；对于光波多普勒效应的解释，就没有介质参考系可言，要害是波源与观察者之间的相对运动以及有关“时间膨胀”的结论。

(1) 机械波的多普勒效应与击波

让我们以点波源为例来说明。设 $S$ 为一个点波源，其频率为 $f_0$。在均匀且各向同性的介质中发出球面波，等相面（例如波峰面）是以 $S$ 为中心的球面，设 $u$ 代表介质中波速的大小。

先考虑静止于均匀介质中的点波源 $S$，$S$ 每隔一个周期 $T_0=\frac{1}{f_0}$ 向外发出一个等相面（球面），等相面以速度 $u$ 向外传播，相邻两等相面间的距离为波长 $\lambda_0$，$u=\lambda_0 f_0$。如果观察者 $d$ 沿 $S$、$d$ 连线方向向 $S$ 运动，速度为 $v_d$，则等相面相对观察者的运动速度为 $u+v_d$。相邻等相面经过观察者的时间即周期 $T=\frac{\lambda_0}{u+v_d}=\frac{1}{f}$，所以，$f=\frac{u+v_d}{u}f_0>f_0$。如果观察者远离波源运动，则 $f=\frac{u-v_d}{u}f_0<f_0$。观察者感到波的频率变化是等相面相对于观察者的速度变化产生的。

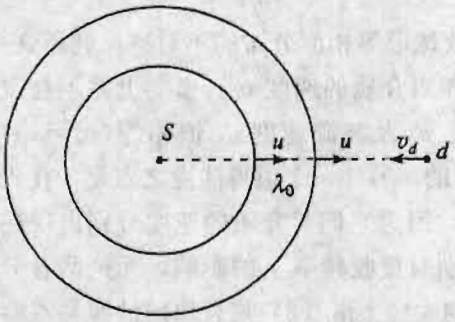


图 12-11

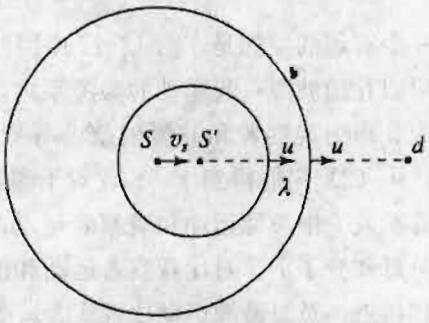


图 12-12

再考虑波源在介质中运动速度为 $v_S$，观察者静止，$v_S$ 指向观察者方向。某一时刻，波源 $S$ 发出的等相面仍是以 $S$ 为球心的球面、传播速度仍是 $u$。但是，因为波源的运动，等相面的分布不再均匀，波长 $\lambda$ 因而与方向有关。经过一个周期 $T_0$，波源 $S$ 运动到位置 $S'$，位移为 $v_S T_0$，如图 12-12 所示。在连线方向上，相邻两等相面间的距离，即波长 $\lambda=\lambda_0-v_S T_0$，所以，观察者感受到波的周期 $T=\frac{\lambda}{u}=\frac{u-u_S}{u}T_0$，$f=\frac{1}{T}=\frac{u}{u-v_S}f_0>f_0$。如果波源远离观察者运动，$\lambda'=\lambda_0+v_S T_0$，则 $f=\frac{u}{u+v_S}f_0<f_0$。观察者感受到波的频率变化是波长变化引起的。

应该注意，无论是观察者运动还是波源运动，相对于介质而言，波的传播速度都是 $u$。当观察者和波源都沿它们的连线运动时，如图12-13所示，观察者感受到的波速为 $u'=u+v_d$，波长 $\lambda'=\lambda_0+v_S T_0$，所以，频率

$$f=\frac{u'}{\lambda'}=\frac{u+v_d}{u+v_S}f_0 \tag{1}$$

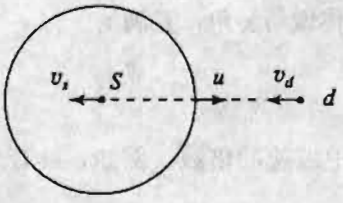


图 12-13

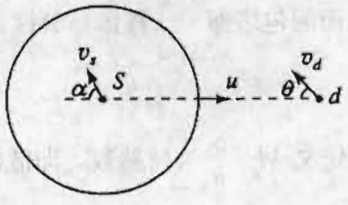


图 12-14

如图 12-14 所示，当观察者速度 $v_d$ 与连线的夹角为 $\theta$、波源速度 $v_S$ 与连线的夹角为 $\alpha$ 时，我们将 $v_d$、$v_S$ 沿连线方向与垂直连线方向分解。机械波没有横向多普勒效应，只需考虑连线方向的分量，则得到

$$f=\frac{u+u_d\cos\theta}{u+u_S\cos\alpha}f_0 \tag{2}$$

把观察者到波源的方向作为基准方向，此表达式也适用于夹角为钝角的情况。其中 $\theta$ 和 $\alpha$ 角代表观察者 $d$ 速度 $v_d$ 和波源速度 $v_S$ 分别与 $d$ 到 $S$ 的射线 $dS$ 的夹角，$S$ 点是某时刻观察者所处的等相面的球心位置。$\theta<\frac{\pi}{2}$ 时观察者向波源而行，$\theta>\frac{\pi}{2}$ 时远离波源而去；$\alpha>\frac{\pi}{2}$ 代表波源向观察者运动，$\alpha<\frac{\pi}{2}$ 则是向远离观察者的方向运动。$v_S$、$v_d$ 都是相对于介质的速度。通常讨论的情况是 $\theta$ 或 $\alpha$ 取 0 或 $\pi$ 的情况中，会出现 $f$ 大于或小于原来波频 $f_0$ 的现象。$\alpha$ 或 $\theta$ 取值 $\frac{\pi}{2}$ 时，相应的运动不会引起多普勒效应。

一个有趣的疑问是，图 12-12 中因波源运动所致球形等相面分布的不对称，利用这一点，是否可以在随波源一起运动的参考系内，发现自身相对介质的速度 $v_S$。事实上并不会发生这种情况，因为观察者和波源的统一导致观察者速度 $v_d$ 及波源速度 $v_S$ 恒相等（$v_d=v_S$），且 $\theta=\alpha$，从（2）只能得到 $f=f_0$，对于测定 $v_S$ 毫无帮助。另外一个值得注意之点是，在机械波的多普勒效应中波源运动和观察者运动的不对称性，因为它们对介质的速度分别出现在（2）式的分母和分子上。对比观察者运动和波源运动分别对接收频率 $f$ 的影响，无论两者分离还是互相接近，总是波源运动比观察者运动产生的影响大些。由（2）式且取定波源与观察者间的相对速度为 $v$，有

两者分离时，$\begin{cases} v_d=0,\ \alpha=0\Rightarrow f=\dfrac{u}{u+v}f_0 \\ 或 \\ v_S=0,\ \theta=\pi\Rightarrow f'=\dfrac{u-v}{u}f_0 \end{cases}$ $\dfrac{f}{f'}=\dfrac{u^2}{u^2-v^2}>1$，

两者接近时，$\begin{cases} v_d=0,\ \alpha=\pi\Rightarrow f=\dfrac{u}{u-v}f_0 \\ 或 \\ v_S=0,\ \theta=0\Rightarrow f'=\dfrac{u+v}{u}f_0 \end{cases}$ $\dfrac{f}{f'}=\dfrac{u^2}{u^2-v^2}>1$。

必须指出，公式（2）只适用在波源的运动速度小于介质中波速的情况，否则分母可能出现 0 或负值。随着波源速度向波速趋近，可以从图 12-15 看到，在波源前方的波面逐渐密集，达到波速时，所有的等相面公切于波源 $S$ 处。如果波源速度再加大，超过介质中的波速，一系列从大到小的球形等相面形成一个圆锥，圆锥的顶点为波源 $S$，如图 12-15。圆锥的侧表面是这组球面的包络面——称做马赫锥。锥面的半顶角 $\alpha$，称做马赫角，它满足

$$\sin\alpha=\frac{u}{v_S} \tag{3}$$

通常定义 $M=\frac{v_S}{u}$ 为马赫数，即波源速度相对于介质中波速的倍数。例如，波音 747 大型客机的马赫数达 0.88，仍是亚音速。马赫数是空气动力学中的重要参数，超音速飞机的马赫数大于 1。

马赫锥面对应着因波源高速运动在介质中产生的一种特殊波动——击波（shock wave）。这种波动在介质中意味着突发性扰动，并引起介质内压强、密度陡变。超音速飞机（如协和式飞机速度达2.2马赫，苏制米格—25B战斗机可达3.2马赫的飞行速度）从头顶飞过时，人们总是先看到飞机，在击波未到达时听不到引擎的轰鸣声。当击波到来时，人们会听到一声短暂的巨响，称做声爆。实际上，这不是一次而是两次压强陡变。人们先体验了一次飞机前部击波引起的压强陡增降，而后是一次机尾击波导致的压强陡变，只不过两次陡变的间隔太短（大约$\frac{1}{50}$ s），听起来好像仅有一次轰鸣。击波引起的压强陡变，有可能导致沿途建筑物的轻微损坏，例如击碎玻璃，所以，超音速飞机只允许在无人居住区上空进行超音速飞行。

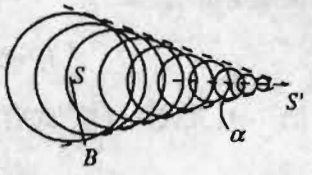


图 12-15

击波是一种普遍存在的现象。只要波源运动的速度超过周围介质中的相应波速，都会存在一个特征锥面，短暂的大幅振动就发生在锥面到达的地方。在静水中游泳的鸭子，身后会留下两条后掠的尾迹，说明鸭子的游泳速度超过水表面波的波速。高速开过水面的快艇留下的燕尾迹，也说明水面击波的存在，由于水面波有色散，尾迹间的夹角恒约为39°，与艇速无关。

以上关于击波的叙述是以点波源为模型进行的。实际运动的物体总有大小，在其运动的正前方，也会产生击波。例如，由空气中的声速公式知，声速与气体绝对温度的平方根$\sqrt{T}$成正比。在运动物体正前方的空气，因受到陡变声压的快速压缩，导致温度升高，因而声速更快。依次前推，靠近物体前表面外较晚产生的扰动，会因波速较快而追上较早产生的扰动，叠加结果在超音速运动声源的正前方产生压强、密度以及振幅的陡变面。这种运动物体前方的压强陡变面对应的击波常称为弓击波或艏波（bow wave），通常出现在船头前面或机翼前方。弓击波的出现，给运动物体带来巨大的阻力，并从物体吸收大量能量。把回收的宇宙飞船做成钝头状，就是为了利用这种击波来吸收飞船的机械能，减小降落速度，使之安全着陆。而对于超音速飞机，为了尽量减少艏波形成带来的机械能损失，总把头部尽量做成针尖状。

（2）光波的多普勒效应

光波（电磁波）作为一种波动过程，也存在多普勒效应。但是，因为电磁波的传播可以在真空中进行，而不依赖任何介质的存在。因此，显然不可能、也不应当再利用介质参考系来解释这种波的多普勒效应，应该依靠的是狭义相对论中因惯性系间相对运动导致时间膨胀的结论。

我们先就特殊情况作个推导。

试考察以恒定速度 $u$ 沿着惯性参考系 $S$ 的 $x$ 轴方向运动的光源 $O'$，在其静系 $S'$ 上发出周期性光脉冲，周期为 $T_0$，频率为 $f_0=\frac{1}{T_0}$。由于时间膨胀，在 $S$ 系上测量光波的周期对应的时间 $\Delta t$ 满足

$$\Delta t=\frac{T_0}{\sqrt{1-\beta^2}} \tag{4}$$

其中 $\beta=\frac{u}{c}$。注意到此时间间隔是用 $S$ 系内不同位置的钟测得，所以 $\Delta t$ 尚不是 $S$ 上某个特定观察者测得的光波周期。为了得到同一个观察者，例如观察者 $O$，测得光脉冲的周期值，还需要考虑光源 $O'$ 运动所带来的影响。譬如设光源 $O'$ 远离 $S$ 系上的观察者 $O$ 而去，如图12-16。$O'$ 发出的相邻光脉冲到达观察者 $O$ 还需要多走过一段距离 $u\Delta t$。所以，观察者 $O$ 测得光脉冲

的周期 $T$ 为

$$T=\Delta t+\frac{u\Delta t}{c}=\Delta t(1+\beta) \tag{5}$$

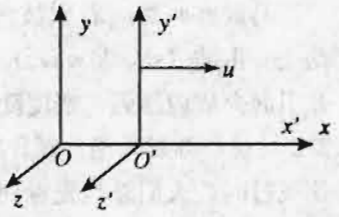


图 12-16

把（4）式代入（5）式后则得到

$$T=T_0\sqrt{\frac{1+\beta}{1-\beta}}$$

或改写成相应的频率关系

$$f=\frac{1}{T}=\sqrt{\frac{1-\beta}{1+\beta}}f_0 \tag{6}$$

这就是光波(或电磁波)的(纵向)多普勒效应公式。它表明，在我们所考虑的情况下，因光源远离观察者而去而导致 $f<f_0$，观察者收到的波频小于波源频率，此现象称做多普勒红移。显然，如果波源改作朝向观察者而来，在（5）式中应把“+”换成“−”，从而导致相应的公式为(6)式中分子、分母换位，结果 $f>f_0$，即发生所谓多普勒蓝移。还可以看出，对光波多普勒效应的解释，不用像弹性波那样引入介质参考系，起作用的只是光源与观察者之间的相对速度，不必计较究竟是哪个在运动。

更为一般的考虑表明，光波还会有横向多普勒效应。

设想情况与图 12-16 相比，仅有一点变动，即两个参考系相互平行的 $x$ 和 $x'$ 轴之间在 $z$ 轴方向有一恒定距离，如图 12-17 所示。$S'$ 系仍以恒定速度 $u$ 相对 $S$ 系沿 $x$ 方向平动，光源随 $S'$ 系原点先后在 $O'_1$ 和 $O'_2$ 处发出两个相邻光脉冲，间隔时间为 $S'$ 系内的周期 $T_0$。因此二事件相对 $S$ 系的空间坐标分别为 $x_1$ 和 $x_2$，时间间隔仍因时间膨胀有 $\Delta t=T_0\sqrt{1-\beta^2}$。这个 $\Delta t$ 仍然不是 $S$ 系内的特定观察者（例如 $O$ 点处观察者）观察到的周期 $T$。经过与得到（5）式同样的分析过程，可以得到代替（5）式的 $T$ 就是

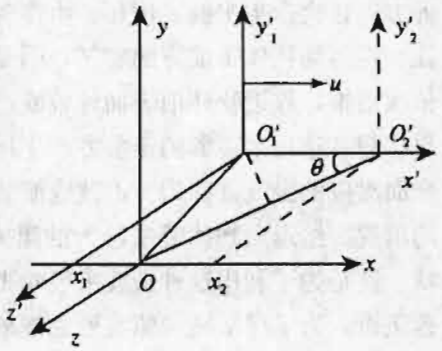


图 12-17

$$T=\Delta t+|x_2-x_1|\frac{\cos\theta}{c} \tag{7}$$

其中右边第二项是第二个光脉冲比第一个脉冲到达观察者 $O$，因多走过距离 $|OO'_2|-|OO'_1|$ 所多用的时间。显然 $|x_2-x_1|=u\Delta t$，代入（7）式，有

$$T=\Delta t\left(1+\frac{u}{c}\cos\theta\right)=\Delta t(1+\beta\cos\theta)$$

把时间膨胀关系代入上式，并利用观测到的频率 $f=\frac{1}{T}$，有

$$f=\frac{1}{T}=\frac{\sqrt{1-\beta^2}}{1+\frac{u}{c}\cos\theta}f_0 \tag{8}$$

其中 $f_0=\frac{1}{T_0}$ 为波源的固有频率，$\theta$ 为光源速度与连线 $OO'$（从观察者到光源的连线）的夹角。

若定义 $\Lambda\equiv\frac{|f-f_0|}{f_0}$ 叫做相对频移，（8）式告诉我们：

①当 $\theta=0$ 或 $\pi$ 时，有光源与观察者之间远离或接近的纵向多普勒效应，公式与（6）相

同。若设$\beta \ll 1$，即光源远低于光速运动时，有纵向相对频移$\Lambda_l$为

$$\Lambda_l = \beta = \frac{u}{c} \tag{9}$$

根据星体光谱发生红移（$\theta=0$）还是蓝移（$\theta=\pi$），可以判断星体远离还是朝向我们运动，再根据相对频移量$\Lambda_l$的大小，可以求出星体的运动速率。这已经成为天文观测中测量星体运动速度的基本方法。例如，1917年斯利弗（V. M. Slipher）拍摄到15个涡旋星系的光谱，并发现其中13个星系的吸收光谱向红端移动了。这一现象说明，星系在离我们而去，根据各个星系的相对频移推算出它们的运行速率，有的可达640 km/s。

②若$\theta=\frac{\pi}{2}$，即光源在观察者面前掠过，(8)式给出$f=f_0\sqrt{1-\beta^2}<f_0$，发生的必定是红移。这种现象对机械波并不存在，是电磁波所特有的，称做横向多普勒效应，其根源在于(8)式中分子上的因子，来源于相对运动的时间膨胀效应。当$\beta \ll 1$时，横向相对频移$\Lambda_t$为

$$\Lambda_t = \frac{1}{2}\beta^2 \tag{10}$$

因为$\Lambda_t$与$\beta$的平方成正比，横向多普勒效应又叫二级红移，它比（9）式给出的纵向（一级）频移小得多。但是，也正是因为二级红移为光信号所独有，对它的成功定量测试，也就成了验证狭义相对论正确性的关键实验之一。

## （二）联系生活、科技和社会资料

**1. 地震波**

地震是一种严重的自然灾害，它起源于地壳内岩层的突然破裂。一年内全球大概发生约百万次地震，但绝大多数不能被人感知而只能由地震仪记录到，只有少数（几十次）造成或大或小的灾难。

发生岩层破裂的震源一般在地表下几千米到几百千米的地方，震源正上方地表的那一点叫震中。从震源和震中发出的地震波在地球内部有两种形式：纵波和横波，它们被地震学家分别称为$P$波（首波）和$S$波（次波）。$P$波的传播速度从地壳内的5 km/s到地幔深处的14 km/s。$S$波的速度较小，约3～8 km/s。两种波速的区别被用来计算震源的位置。$P$波和$S$波传到地球表面时会发生反射，反射时会产生沿地表传播的表面波。表面波也有两种形式：一种是扭曲波，使地表发生扭曲；另一种使地表上下波动，就像大洋面上的水波那样。$P$波、$S$波以及表面波的到达都可以用地震仪在不同时刻记录下来（图12-18）。

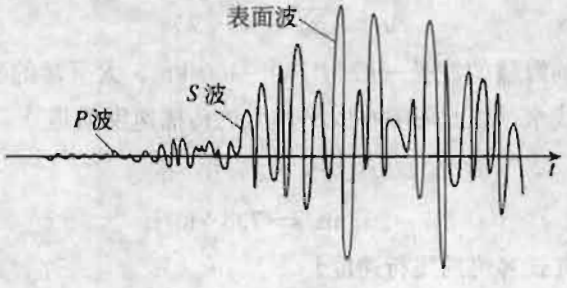



图12-18　地震波的记录

世界上最早的地震仪是公元 132 年汉代张衡创制的“候风地动仪”（图 12-19）。它是一个形似酒樽的容器，内部正中立有一根上粗下细的“都柱”。樽的外表对称地装有八条龙，龙头朝下，口内各含一颗铜丸。龙口上颚是活动的，通过曲杠杆和樽内都柱接触。平时都柱平衡直立，一旦有地震波从某方传来，都柱就会倒向此方，压下曲杠杆而打开龙口，龙口内铜丸即下落到正下方的蛙口中发出声响，告诉看守人地震的发生以及震源的方向。这种地震仪在西方迟至 1 500 多年之后才见到。

图 12-19 候风地动仪

地震波的振幅可以大到几米（例如 1976 年唐山大地震地表起伏可达一米多），因而能造成巨大灾害。一次强地震所释放的能量可以达到 $10^{17}\sim10^{18}$ J。一次地震释放的能量 $E$ 通常用里氏地震级 $M$ 表示，它们之间的关系是

$$M=0.67\lg E-2.9$$

例如，一次里氏 7 级地震释放的能量约为 $10^{15}$ J，这大约相当于百万吨级氢弹爆炸所放出的能量。

地震波中的 $P$ 波可以在固体和液体中传播，而 $S$ 波则只能在固体中传播（因为液体不可能发生切变），它们又都能在固体和液体交界面处反射或折射。因此，对地震波的详细分析可以推知它们传播所经过的介质分布情况。目前对地球内部结构的认识几乎全部来自对地震波的分析（图 12-20）。人造地震可以帮助了解地壳内地层的分布，它是石油和天然气勘探的一种重要手段。此外，对地震波的分析也是检测地下核试验的一种可靠方法。

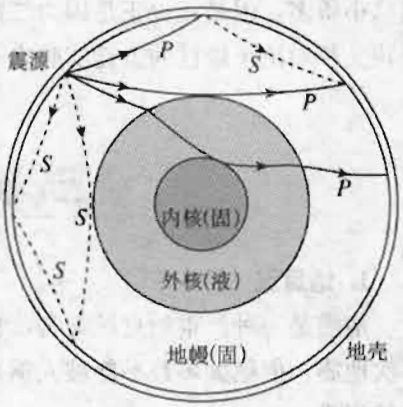



图 12-20 地震波与地球内部结构

**2. 水波**

水波是一种常见的波，从“风乍起，吹皱一池春水”的涟漪，到飓风引起的海面上的惊涛骇浪。形成水波的回复力不是弹性力，而是水的表面张力和重力。微风拂过，水面形成的涟漪细波主要是表面张力作用的结果。这种波叫表面张力波，它的波长很短，一般不大于几厘米。海面上飓风劲吹产生的大波或洋底地震引起的海啸，波长为几米、几百米甚至几百千米。这种巨浪振荡的回复力主要是重力。这种波叫重力波。下面只简要介绍有较重要实际意义的重力波。

水有深浅之别。对水波来说，深浅是相对于水波波长来说的。水的深度 $h$ 较波长 $\lambda$ 为甚小时为浅水。研究指出，浅水面上水波波速 $u$ 和波长无关，只由深度决定，其关系为

$$u=\sqrt{gh}\quad(h\ll\lambda)$$

例如，由洋底地震引起的海啸的波长一般为 100～400 km。太平洋的平均深度为 4.3 km，对海啸来说，太平洋算是浅水，因此海啸在太平洋上的传播速度就是

$$u=\sqrt{9.8\times4.3\times10^3}\ \text{m/s}$$
$$=205\ \text{m/s}=738\ \text{km/h}$$

这大约等于现今大型喷气式客机的飞行速度！

值得注意的是，海啸波在开阔的大洋表面的浪高（从谷底到峰尖的高度差）不过 1 m 左右，不甚显眼。但随着向海岸传播，波速越来越小，前面的波越来越慢，后浪赶前浪，浪头就

越堆越高，可达几十米，形成排山倒海巨浪拍岸的壮观场面。这对沿岸设施可能造成巨大的损害。

对于深水，即 $h \gg \lambda$ 的情况，研究指出，水面波的波速和波长有关，其关系式为

$$u=\sqrt{\frac{g\lambda}{2\pi}} \quad (h \gg \lambda)$$

不管是浅水波还是深水波，表面上水的质元的运动都不是上下的简谐运动而是圆周运动。水面下水的质元的运动是椭圆运动，越深运动范围越小（图 12-21）。这样，水波的波形图线并不是正弦曲线。

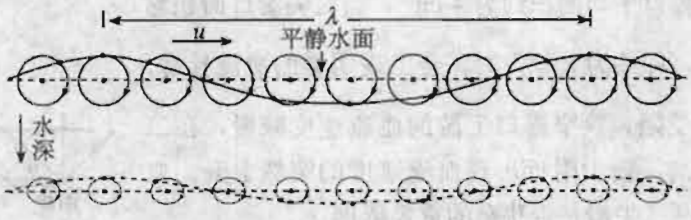



图 12-21　水波中水的质元的运动

（以上两篇摘自《波动与光学》，张三慧主编，清华大学出版社 2000 年第 2 版）

**3. 利用声波干涉控制噪声的原理**

内燃机、通风机、鼓风机、压缩机、燃气轮机在排放各种高速气流的过程中，都伴随有噪声。利用干涉原理制成的干涉型消声器可以降低这种噪声。

我们知道，由两相干声源 $S_1$ 和 $S_2$ 发出的两列相干波，经 $r_1$ 和 $r_2$ 后在介质中点 $P$ 处相遇时，合振幅 $A$ 为

$$A=\sqrt{A_1^2+A_2^2+2A_1A_2\cos\Delta\varphi}$$

其中

$$\Delta\varphi=\varphi_2-\varphi_1+\frac{2\pi}{\lambda}(r_2-r_1)$$

若 $\varphi_2=\varphi_1$，$\Delta\varphi=\frac{2\pi}{\lambda}(r_2-r_1)$。当 $\Delta\varphi=(2k+1)\pi$ $(k=0, 1, 2, \cdots)$，即 $\Delta r=r_2-r_1=\frac{(2k+1)\lambda}{2}$ 时，$A=|A_1-A_2|$。若 $A_1=A_2$，则 $A=0$。显然，当 $\Delta r=\frac{\lambda}{2}$，$\frac{3\lambda}{2}$，$\frac{5\lambda}{2}$，…时，两列声波因相干而抵消。

图 12-22 甲是干涉型消声器的工作原理图。有一列波长为 $\lambda$ 的声波，沿水平管道自左向右传播。当入射波到达 $a$ 处时，分成两束相干波，它们分别通过 $r_1$ 和 $r_2$ 再在 $b$ 处相遇。若 $\Delta r=r_2-r_1$ 恰好等于声波半波长 $\frac{\lambda}{2}$ 的奇数倍，即 $\Delta r=\frac{(2k+1)\lambda}{2}$ 时，声波的振幅 $A=0$。这就是说该频率的声能便被削弱，从而达到控制噪声的目的。实用中的干涉型消声器的结构如图 12-22 乙所示。

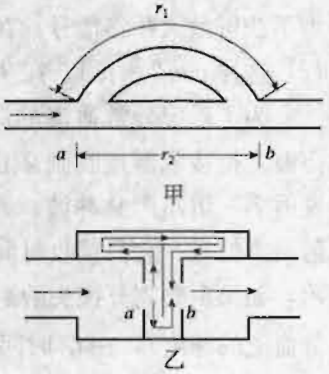



图 12-22

应当指出，干涉型消声器所控制的噪声频率是有限制的，它只能消除低频噪声。发动机的周期性排气噪声（正常工作期间）就是一种典型的低频噪声。一般说来，一台四缸四冲程发动机，当它以 2 000 r/min 的转速运转时，其峰值频率在 200 Hz 以下的

噪声较大。所以常用干涉型消声器来消除这类低速转动发动机所产生的低频噪声。一台带有干涉消声器的柴油发动机经消声处理后，其排气噪声可以降低 10 dB 以上。

为了使这类消声器在低频范围内具有较宽的消声频率，往往将不同结构的消声单元串接起来，并使每一单元的 $\Delta r$ 不等，就可以对不同波长的噪声加以控制。

**4. 多普勒超声诊断**

多普勒超声心动图学是一门新兴学科，它利用超声波的多普勒效应来研究心脏和大血管中血液的动力学特性。多普勒超声心动图学已成为临床心脏病学中的一门诊断技术。下面，以心脏病的二尖瓣狭窄为例，说明其诊断原理。

成年人的二尖瓣口平均面积约为 4 $cm^2$，当二尖瓣口面积缩小到正常瓣口的$\frac{1}{2}$，即约为 2 $cm^2$ 时，会出现明显的血流异常。因血流在二尖瓣口受阻，狭窄瓣口上游的血流速度减慢，在二尖瓣口血流速度增高，瓣尖附近出现血流速度的突然上升。血流速度的测定是诊断二尖瓣是否狭窄的重要依据。

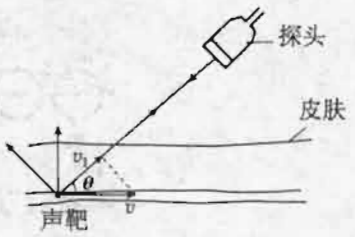


图 12-23

利用超声波的多普勒效应测定血流速度的原理如图 12-23 所示。超声探头产生一束频率在 1～10 MHz 的超声波束，遇到运动中的血细胞（称为声靶）时，沿发射方向返回，再被探头所接收。由于在血细胞中红细胞的数量占优势，因此，大部分的反射信号来自红细胞，其次来自白细胞和血小板。

如果探头发射的超声波频率为 $f_0$，血流速度为 $v$，血的流速与声束之间的夹角为 $\theta$，声波在人体组织内的传播速度为 $u$，则接收器接收到的频率 $f$ 为

$$f=f_0\frac{1+\frac{v_1}{u}}{1-\frac{v_1}{u}}=f_0\frac{\left(1+\frac{v_1}{u}\right)^2}{1-\left(\frac{v_1}{u}\right)^2}=f_0\frac{1+2\frac{v_1}{u}+\left(\frac{v_1}{u}\right)^2}{1-\left(\frac{v_1}{u}\right)^2}$$

式中 $v_1=v\cos\theta$。由于 $v\ll u$，$\left(\frac{v_1}{u}\right)^2$ 略去不计，得

$$f=f_0+2f_0\frac{v_1}{u}$$

多普勒频移

$$f_D=f-f_0=2f_0\frac{v_1}{u}=2f_0\frac{v\cos\theta}{u}$$

为了获得最大频移信号，在进行多普勒超声心动图检查时，应使声束与血流方向尽可能地平行，这样 $\cos\theta\approx\pm1$。在 $f_0$ 和 $v$ 为已知的条件下，只要测得频移值 $f_D$，就可知道血流速度 $v$。

为了确定异常血流的深度，超声发射器将发射脉冲式的超声波，待接收器接收到来自声靶的反射回声信号后，发射器才发射下一组超声脉冲波。而探头上的接收器也不接收所有的反射回声信号，它只接收时间延迟 $t_D$ 的回声信号。如图 12-24 所示，如果声靶离开探头的距离为 $d$（若探头紧挨人体，$d$ 即为异常血流的深度），在 $t_D$ 时间内，声波传播的距离为 $2d$，那么

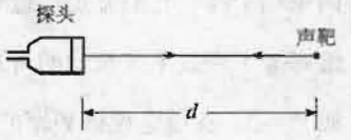


图 12-24

$$d=\frac{ut_D}{2}$$

由于声速 $u$ 为常数，改变时间延迟 $t_D$，就可以得到不同深度的反射回声信号，从而测出异常血

流的深度。

（以上两篇摘自《物理学原理在工程技术中的应用》，马文蔚、苏惠惠、解希顺主编，高等教育出版社 1995 年第 1 版，有改动）

## （三）实验参考资料

**1. 演示横波的形成和传播**

演示波的形成和传播有两类教具，一类是演示真实波，另一类是演示模拟波。教学时，应当先给学生演示真实波的现象，再结合模拟演示分析波的特点。教学仪器配备目录上有 J2203 型波动演示器，是一种组合式的仪器，既可演示横波，又可演示纵波；既可演示真实波的现象，又可作为模拟演示。该仪器的详细使用方法参见仪器说明书。

下面介绍一些较为简易的演示方法。

（1）橡皮绳横波的演示

用橡皮绳演示横波现象理论上最为直观，但由于脉冲传播速度过快以及反射波的干扰，演示现象很不明显。教学时，宜用线密度较大、张力小一些的橡皮绳。可用直径 10 mm、长 6 m 左右的乳胶管，在管内填入密度较大的金属颗粒或粉粒（如铁粉和铅粒），并每隔 1.5～2 cm 用线结扎起来，其结构如图 12-25 所示。

图 12-25

演示时，将橡皮绳的一端拴在门框（或窗框）上，手执另一端。先使橡皮绳静止，再用手上下抖动一次，可以看到一个脉冲沿绳传播，还可以看到反射现象。

也可把橡皮绳平放在地面上或长桌面上，让两个人各持橡皮绳的一端。把绳适当拉紧，一个人猛地向上抖一下，便有一个半波脉冲向对方传播；两个人同时抖动一下，便出现相向传播的两个脉冲波，在相遇时出现叠加现象。由此可以演示波的独立传播和叠加原理。

（2）利用弹性体扭曲形变的传播制作简单的横波演示器。

如图12-26所示，将 2 条长约 1.2 m 宽松紧带并在一起，每隔约 5 cm 用针线钉两条缝线，使两缝线之间可以穿过一根筷子（共横穿二十多根筷子），在每根筷子的两端各固定一个泡沫塑料小球，再将松紧带的两端固定在支架上。调节支架间的距离，使松紧带的松紧适度（不要过紧）。调节每边的小球成水平直线。演示时，拨动一端的小球使其上下振动，则其余的小球顺序振动而形成横波。

用该装置还可以演示两列波的独立传播和相遇时的叠加现象。

（3）模拟横波演示器

箱式模拟横波演示器的外形如图 12-27 所示。逆时针转动摇柄，演示屏上的质点就排成一条水平线；顺时针转动摇柄，各个质点就依次竖直振动起来。教师可以用它来配合讲解，说明波的特点，也可以说明波的图象。

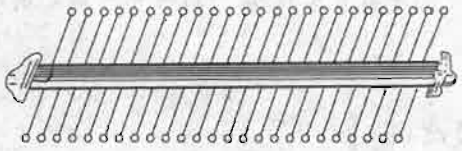


图 12-26

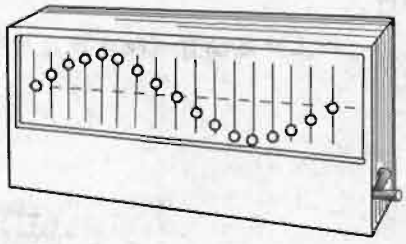


图 12-27

**2. 演示水波的传播**

(1) 用发波水槽可以演示水波的反射、折射、衍射和干涉现象。水波演示器利用薄膜气泵产生频率可调的气脉冲作为波源，而且用频闪光将水波投影至半透明屏上，闪光的频率也可以调节，从而使水波以缓慢的速度传播，或使波形静止，以利于观察。

(2) 如没有现成的仪器，可以自制。图 12-28 是利用电磁打点计时器改装的振源，图 12-29是用玩具电动机加上偏心轮制作的振源。

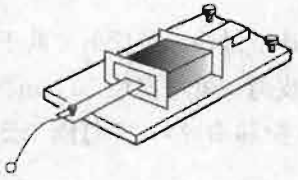


图 12-28

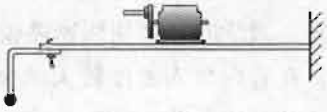


图 12-29

水波槽的周边应向外倾斜，内壁贴上软泡沫塑料或棉纱布以减弱反射波的干扰。

(3) 做波的反射实验时，用点振源产生圆形波。在波的传播方向上放置一条挡板，首先让振子打击一下水面，可以看到圆形的波面向前传播，遇挡板后反射回来。然后再让振子连续振动，观察传播和反射现象。这样可以观察得更清楚一些。

换上条形振子，按同样的程序，可以演示直线波的反射现象。

(4) 如果在波的传播方向上放置两条挡板，中间留一定宽度的间隙，可以看到波的衍射现象。

(5) 演示折射现象时，在水下放一块玻璃板，厚度大约为 5 mm，使浅水区的水深大约为 2 mm，用条形振子产生直线波，并使深水区与浅水区分界线的法线与直线波的传播方向成一锐角，可以看到水波从深水区到浅水区后波面折过一定的角度，且波长变短。

(6) 演示波的干涉时，为使现象清晰，应注意调节振子离开水面的高度、振动的频率和振幅，以及频闪光的频率。

**3. 制作简易的横波实验器**

该仪器的结构如图 12-30 所示。使用大约 24 根饮料吸管、若干回形针和一条胶带纸。展开胶带纸，每隔 25 mm 左右粘一根吸管。每根吸管两端各别上一个回形针。把胶带的一端挂在铁架台的横杆上，拨动上端（或下端）的吸管，使回形针左右振动，就可以看到横波的传播现象。

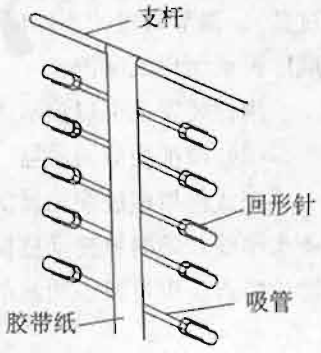



图 12-30

**4. 奇妙的音棒**

器材：长约 1 m 的角铝型材，松香，酒精，棉花。

实验方法：

(1) 将松香溶解在酒精中，再用棉花蘸一些松香酒精溶液涂在角铝的表面上，待酒精挥发后进行实验。

(2) 用一只手的拇指和食指捏在铝型材的中点，再用另一只手的拇指和食指蘸少许松香粉，紧捏角铝材的一边，从接近中间处向外抹动，如图 12-31 所示。反复多次，可听到音棒发出很纯的声音(频率大约为 3～4 kHz)，且响度越来越大，停止摩擦以后，声音可持续很长时间。

图 12-31

原理：摩擦使铝型材产生振动。振动在其中传播，至端部振动被反射，反射波与前进波叠加形成驻波。中点为波节，端点为波腹，两点间的距离为波长 $\lambda$ 的 $\frac{1}{4}$。当波速一定时（材料一定），不同的棒长，就有不同的谐振频率。

说明：本实验可以作为一种趣味性的实验，说明驻波现象，不要求学生透彻了解实验的原理。

**5. 多普勒效应**

在学校里，请老师帮助把 1 kHz 左右的音频声（用信号源发声，或者用音叉发声）录制在你的磁带中。实验时把磁带放在收录机中，用两根绳子把收录机悬挂在门的气窗横档上，按下放音按键，使收录机发声。让收录机摆动起来，你就可以感觉到当收录机向你摆来时音调变高，远离你去时音调变低。如果在实验室里做这个实验，可以把收录机放在转盘架上旋转，以倾听音调的变化。

为了说明多普勒效应，还可以做如下实验。在一根簧片（手工锯条）的一端绑一只小蜡球，再找一只水盆，盛入半盆水。使簧片振动，小蜡球撞击水面，可以看到水面上形成呈同心圆传播的水波。若同时让小球向前运动，则一圈圈的圆不再同心，前方的波纹变得密集，而后方变得稀疏，这相当于前方的波长变短，而后方的波长变长，因此前方接收到的频率变高，而后方接收到的频率变低了。

## 五、补充习题

### A 组

1. 两列频率相同的声波，在空气中相遇发生干涉现象时（　　）

A. 振动加强点的位移总是最大，不随时间改变

B. 在某一时刻，振动加强点的位移可能小于振动减弱点的位移

C. 振动加强点的位移随时间不断变化

D. 振动减弱点的振幅一定小于振动加强点的振幅

2. 如图 12-32 所示，$O$ 为波源，$a$、$b$、$c$、$d$ 是波的传播方向上各质点的平衡位置，$Oa=ab=bc=cd=3$ m，开始各质点均静止在平衡位置，$t=0$ 时波源 $O$ 开始向上做简谐振动，振幅是 0.1 m，波沿 $OS$ 方向传播，波长是 8 m，当 $O$ 点振动了一段时间后经过的路程是 0.5 m 时，各质点的运动方向是（　　）

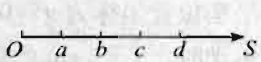


图 12-32

A. $a$ 质点向上　　B. $b$ 质点向上

C. $c$ 质点向下　　D. $d$ 质点向下

3. 一列机械波在某时刻的波形如图 12-33 所示，已知波沿 $x$ 轴正方向传播，波速是 12 m/s，则

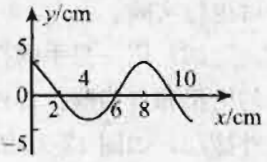


图 12-33

①这列波的波长是 8 cm

②这列波的周期是 8 s

③$x=6$ cm 处质点的振幅为 0

④$x=5$ cm 处质点向 $y$ 轴的负方向运动

A. ①②　　B. ②③　　C. ③④　　D. ①④

4. 一列横波沿 $x$ 轴传播，$t_1$、$t_2$ 时刻波的图象分别如图 12-34 所示实线和虚线，已知 $t_2-t_1=\frac{7}{8}$ s，波速 $v=12$ m/s，则（　　）

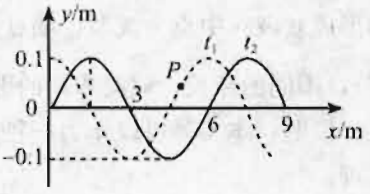


图 12-34

A. 该波沿 $x$ 轴正方向传播

B. 图中 $P$ 质点在 $t_1$ 时刻运动方向水平向左

C. 图中 $P$ 质点在 1s 内向左平移 12 m

D. 图中 $P$ 质点在 1s 内通过的路程为 0.8 m

5. 在坐标原点的波源产生一列沿 $x$ 轴正方向传播的简谐横波，波速 $v=200$ m/s，已知 $t=0$ 时，波刚好传播到 $x=40$ m 处，如图 12-35 所示。在 $x=400$ m 处有一接收器（图中未画出），则下列说法中正确的是（　　）

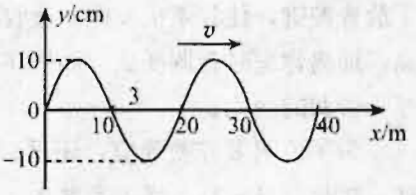


图 12-35

A. 波源开始振动时方向沿 $y$ 轴正方向

B. 从 $t=0$ 开始经 0.15 s，$x=40$ m 的质点运动的路程为 0.6 m

C. 接收器在 $t=2$ s 时才能接收此波

D. 若波源向 $x$ 轴正方向运动，接收器收到波的频率可能为 11 Hz

6. 一列简谐横波沿 $x$ 轴正方向传播，某时刻其波形如图 12-36所示，下列说法中正确的是（　　）

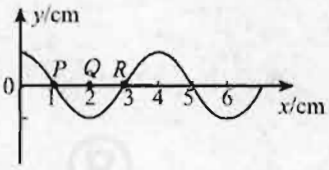


图 12-36

A. 由波形图可知该波的波长

B. 由波形图可知该波的周期

C. 经$\frac{1}{4}$周期后质点 $P$ 运动到 $Q$ 点

D. 经$\frac{1}{4}$周期后质点 $R$ 的速度变为 0

7. 一列简谐横波某时刻的波形图如图 12-37 所示，波源的平衡位置坐标为 $x=0$。当波源质点处于其平衡位置上方且向下运动时，$x=2$ cm 的质点所处位置及运动情况是（　　）

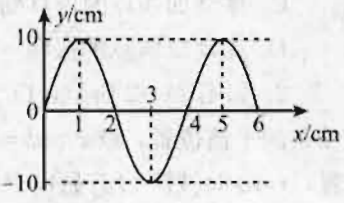


图 12-37

A. 在其平衡位置下方且向上运动

B. 在其平衡位置下方且向下运动

C. 在其平衡位置上方且向上运动

D. 在其平衡位置上方且向下运动

8. 从甲地向乙地发出频率为 50 Hz 的简谐波，当波速为 330 m/s 时，刚好在甲、乙两地

之间形成一列有若干完整波形的波，当波速为340 m/s时，完整波形的波数减少了两个，据此可以判断，甲、乙两地之间的距离应为_____m。

9. 投一枚石子于静水中，见圆形波纹沿水面向外传播，当第一个波峰传到离投石处3 m时，第6个波峰恰好位于投石处，且知第一个波峰传到9 m处历时7.5 s，则水波传播速度为_____m/s，其波长为_____m。

10. 如图12-38所示，是一列简谐横波在$t=0$时的波动图象，波的传播速度为2 m/s，波源的振动频率为_____Hz，则从$t=0$到$t=2.5$ s内，质点$M$通过的路程为_____m，位移为_____m。

11. 一列横波以40 m/s的速度沿$x$轴正方向传播，如图12-39所示，表示介质中$x=6$ m范围内某时刻的波形，由此可知该波的频率为_____Hz，如果该波的波源位于$x=-4$ m处，波源刚开始振动时，质点从平衡位置向下运动，则从波源开始振动算起，至少经过____s时间才能在$x=0$到$x=6$ m段出现图示的波形。

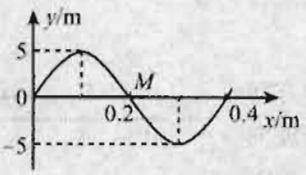



图12-38

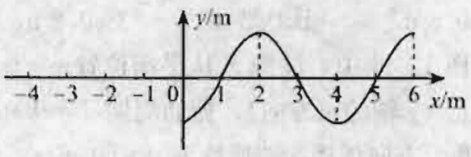



图12-39

12. 一列简谐横波沿$AB$方向由$A$质点传到$B$质点，已知$A$、$B$相距0.6 m，横波的波长$\lambda>0.5$ m。在某一时刻开始计时，质点$A$正处于波峰处，经过0.1 s，第二次回到平衡位置，此刻质点$B$又到波峰处。请画出这一时刻质点$A$、$B$之间的波形图，并计算出这列波的波速。

13. 一列纵波沿直线传播，$M$、$N$是这条直线上相距2.5 m的两质点。当$M$点第一次成为纵波密部的中心开始计时，在14 s末$M$点第八次成为密部中心，同时$N$点也第三次成为密部中心。试据此条件计算该波波长、周期和波速。

14. 如图12-40所示，$S$点是波源，$f=100$ Hz，$u=80$ m/s，波向右传播，在传播过程中经过$P$、$Q$两点，已知$SP=4.2$ m，$SQ=5.4$ m。

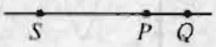



图12-40

(1) 在某一时刻$t$，当$S$点通过平衡位置向上运动时，$P$点和$Q$点是处于波峰，还是处于波谷，或者处于其他位置？

(2) 取$t$为时间的起点，分别画出$P$、$Q$两点的振动图象。

## B组

1. 一列简谐横波沿$x$轴负方向传播，图12-41甲是$t=1$ s时的波形图，图乙是波中某质点位移随时间变化的振动图象（两图用同一时间起点），则图乙可能是图甲中哪个质点的振动图象（　　）

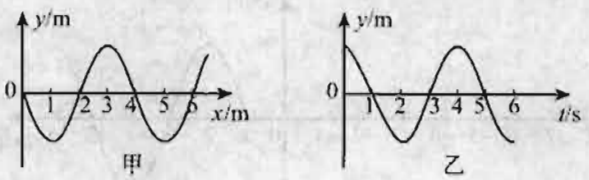



图12-41

A. $x=0$处的质点　　B. $x=1$ m处的质点

C. $x=2$ m处的质点　　D. $x=3$ m处的质点

2. 图 12-42 中是观察水面波衍射的实验装置，$AC$ 和 $BD$ 是两块挡板，$AB$ 是一个孔，$O$ 为波源，图中已画出波源所在区域波的传播情况，每两条相邻波纹（图中曲线）之间距离表示一个波长，则波经过孔之后的传播情况，下列描述正确的是（　　）

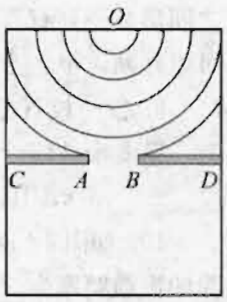


图 12-42

A. 此时能明显观察到波的衍射现象

B. 挡板前后波纹间距离相等

C. 如果将孔 $AB$ 扩大，有可能观察不到明显的衍射现象

D. 如果孔的大小不变，使波源频率增大，能观察到更明显的衍射现象

3. 一列简谐波沿一直线向左运动，当直线上某质点 $A$ 向上运动到达最大位移时，$A$ 点右方相距 0.15 m 的 $B$ 点刚好向下运动到最大位移处，如图 12-43 所示，则这列波的波长可能是（　　）

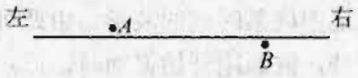


图 12-43

A. 0.6 m　　B. 0.3 m　　C. 0.2 m　　D. 0.1 m

4. 图 12-44 中，波源 $S$ 从平衡位置 $y=0$ 开始振动，运动方向竖直向上（$y$ 轴的正方向），振动周期 $T=0.01$ s，产生的简谐波向左、右两个方向传播，波速均为 $v=80$ m/s。经过一段时间后，$P$、$Q$ 两点开始振动，已知距离 $SP=1.2$ m、$SQ=2.6$ m。若以 $Q$ 点开始振动的时刻作为计时的起点，则在图 12-45 的振动图象中，能正确描述 $P$、$Q$ 两点振动情况的是（　　）

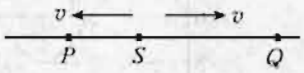


图 12-44

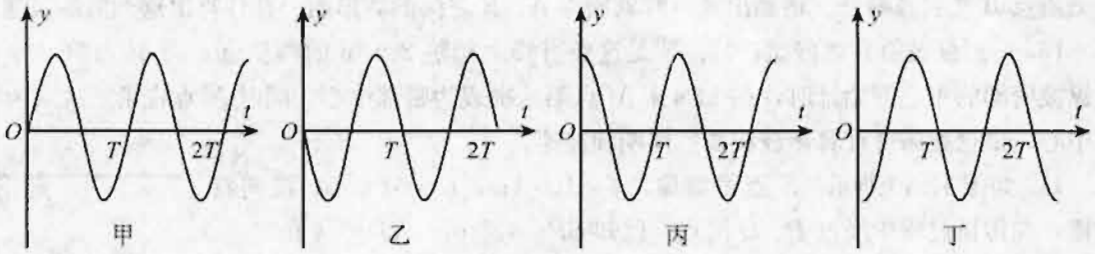


图 12-45

A. 甲为 $Q$ 点振动图象　　B. 乙为 $Q$ 点振动图象

C. 丙为 $P$ 点振动图象　　D. 丁为 $P$ 点振动图象

5. 一列简谐横波，在 $t=0$ 时刻的波形如图 12-46 所示，自右向左传播，已知在 $t_1=0.7$ s 时，$P$ 点出现第二次波峰（0.7 s 内 $P$ 点出现两次波峰），$Q$ 点的坐标是（−7，0），则以下判断中正确的是（　　）

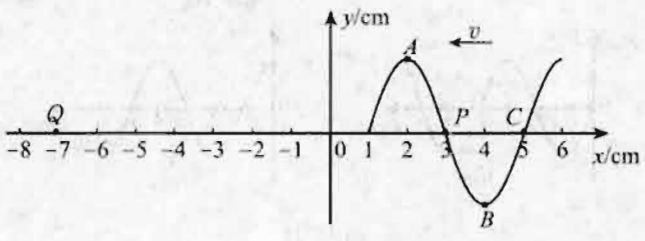


图 12-46

A. 质点 $A$ 和质点 $B$ 在 $t=0$ 时刻的位移是相等的

B. 在 $t=0$ 时刻，质点 $C$ 向上运动

C. 在 $t_2=0.9$ s 末，$Q$ 点第一次出现波峰

D. 在 $t_3=1.26$ s 末，$Q$ 点第一次出现波峰

6. 两辆汽车甲与乙，在 $t=0$ 时分别距十字路口 $O$ 处的距离为 $x_{甲}$ 和 $x_{乙}$。若两车分别以速率 $v_{甲}$ 和 $v_{乙}$ 沿水平的、相互正交的公路匀速前进，如图 12-47 所示。汽车甲持续地以固定的频率 $v_0$ 鸣笛，则在任意时刻 $t$ 汽车乙的司机所检测到的笛声频率将如何变化（已知声速为 $u$，且有 $u>v_{甲}$、$u>v_{乙}$）（　　）

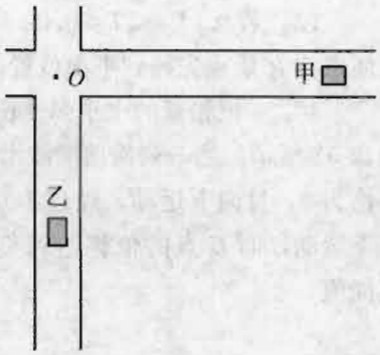


图 12-47

A. 当甲、乙两车均向 $O$ 运动（在到达 $O$ 之前）时，观察者接收到的频率一定比波源发出的频率低

B. 当甲、乙两车均向 $O$ 运动（在到达 $O$ 之前）时，观察者接收到的频率一定比波源发出的频率高

C. 当甲、乙两车均向远离 $O$ 的方向运动时，观察者接收到的频率一定比波源发出的频率低

D. 当甲、乙两车均向远离 $O$ 的方向运动时，观察者接收到的频率一定比波源发出的频率高

7. 一列波在介质中向某一方向传播，如图 12-48 是此波在某一时刻的波形图，且此时振动还只发生在 $M$、$N$ 之间，并知此波的周期为 $T$，$Q$ 质点速度方向是向下的。则波源是_____；$P$ 质点的起振方向为_____；从波源起振开始计时，$P$ 点已经振动的时间为_____。

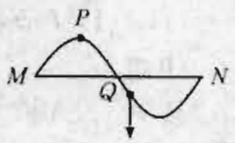


图 12-48

8. 如图 12-49 是一列向右传播的简谐横波在 $t=0$ 时刻（开始计时）的波形图，已知在 $t=1$ s 时，$B$ 点第三次达到波峰（在 1 s 内 $B$ 点有三次达到波峰）。则周期为_____、波速为_____、$D$ 点起振的方向为_____；在 $t=$_____s 时刻，此波传到 $D$ 点；在 $t=$_____s 和 $t=$_____s 时 $D$ 点分别首次达到波峰和波谷；在 $t=$_____s 和 $t=$_____s 时 $D$ 点分别第二次达到波峰和波谷。

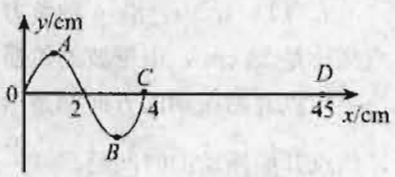


图 12-49

9. 如图 12-50 所示，一列沿 $x$ 轴正方向传播的简谐横波，波速大小为 0.6 m/s，$P$ 点的横坐标为 96 cm，从图中状态开始计时，求：

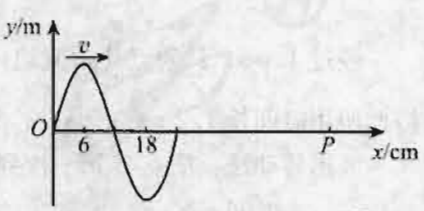


图 12-50

(1) 经过多长时间，$P$ 点开始振动，振动时方向如何？

(2) 经过多少时间，$P$ 点第一次到达波峰？

10. 如图 12-51 所示，在半径为 $R=45$ m 的圆心 $O$ 和圆周 $A$ 处，有两个功率差不多的喇叭，同时发出两列完全相同的声波，且波长 $\lambda=10$ m。若人站在 $B$ 处，正好听不到声音；若逆时针方向从 $B$ 走到 $A$，则时而听到时而听不到声音。试问在到达 $A$ 点之前，还有几处听不到声音？

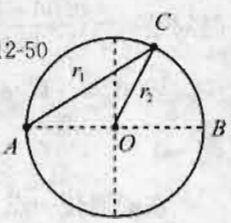


图 12-51

11. 已知在 $t_1$ 时刻简谐横波的波形如图 12-52 中实线所示，在 $t_2$ 时刻

该波的波形如图中虚线所示。$t_2-t_1=0.02$ s。求：

（1）该波可能的传播速度。

（2）若已知 $T<t_2-t_1<2T$，且图中 $P$ 质点在 $t_1$ 时刻的瞬时速度方向向上，求可能的波速。

（3）若 0.01 s$<T<$0.02 s，且从 $t_1$ 时刻起，图中 $Q$ 质点比 $R$ 质点先回到平衡位置，求可能的波速。

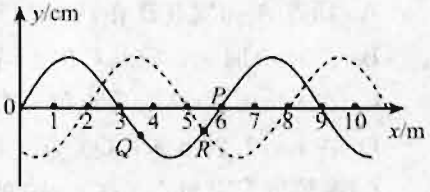



图 12-52

12. 一根张紧的水平弹性长绳上的 $A$、$B$ 两点，相距 14.0 m，$B$ 点在 $A$ 点的右方，如图 12-53 所示。当一列简谐横波沿此长绳向右传播时，若 $A$ 点的位移达到正极大时，$B$ 点的位移恰为 0，且向下运动，经过 1.00 s 后，$A$ 点的位移为 0，且向下运动，而 $B$ 点的位移达到负极大，求此简谐横波的波速可能值。

图 12-53

**参考答案：**

**A 组**

1. BCD　2. A　3. D　4. AD　5. BD　6. AD　7. A

8. 448.8　9. 1.2，0.6　10. 5，250，0　11. 10，0.325

12. 波形图略，6 m/s

13. $\lambda=0.5$ m，$T=2$ s，$v=25$ m/s

14.（1）$P$ 点在波谷，$Q$ 点在波峰（2）如图 12-54 所示。

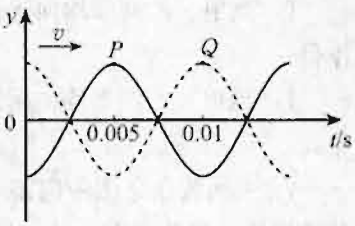



图 12-54

**B 组**

1. A　2. ABC　3. BD　4. AD　5. BC　6. BC

7. $N$，向上，$T/4$　8. 0.4 s，10 m/s，向下，4.1，4.4，4.2，4.8，4.6

9.（1）1.2 s，沿 $y$ 轴负方向（2）1.5 s　提示：（1）开始计时时，这列波的最前端的质点坐标是 24 cm，根据波的传播方向，可知这一点沿 $y$ 轴负方向运动，因此在波前进方向的每一个质点开始振动的方向都是沿 $y$ 轴负方向运动，故 $P$ 点开始振动时的方向是沿 $y$ 轴负方向，$P$ 质点开始振动的时间是 $t=\dfrac{\Delta x}{v}=\dfrac{0.96-0.24}{0.6}$ s$=1.2$ s。

（2）用两种方法求解

质点振动法：这列波的波长是 $\lambda=0.24$ m，故周期是 $T=\dfrac{\lambda}{v}=\dfrac{0.24}{0.6}$ s$=0.4$ s。

经过 1.2 s，$P$ 质点开始振动，振动时方向向下，故还要经过 $\dfrac{3}{4}T$ 才能第一次到达波峰，因此所用时间是 1.2 s+0.3 s=1.5 s。

波形移动法：质点 $P$ 第一次到达波峰，即初始时刻这列波的波峰传到 $P$ 点，因此所用的时间是 $t'=\dfrac{0.96-0.06}{0.6}$ s$=1.5$ s。

10. 8 处　提示：因为波源 $A$、$O$ 到 $B$ 点的波程差为

$\Delta r=r_1-r_2=R=45$ m$=4\dfrac{1}{2}\lambda$，所以 $B$ 点发生干涉相消现象。

在圆周任一点 $C$ 上听不到声音的条件为

$\Delta r=r_1-r_2=\pm(2k+1)\dfrac{\lambda}{2}=\pm5(2k+1)$。

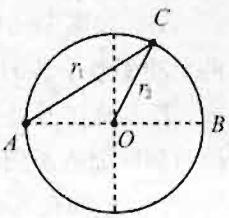



图 12-55

将 $r_2=R=45$ m 代入上式，得 $r_1=\pm5(2k+1)+r_2$。

所以 $r_1=10k+50$ 或 $r_1=-10k+40$。而 $0<r_1<90$ m，所以有 $0<(10k+50)<90$ m 和 $0<(-10k+40)<90$ m。

求得 $-5<k<4$，即 $k=-4$、$-3$、$-2$、$-1$、0、1、2、3，所以在到达 $A$ 点之前有 8 处听不到声音。

11. 提示：（1）如果这列简谐横波是向右传播的，在 $t_2-t_1$ 内波形向右匀速传播了 $\left(n+\frac{1}{3}\right)\lambda$，所以波速 $v=\left(n+\frac{1}{3}\right)\lambda/(t_2-t_1)=100(3n+1)$ m/s（$n=0$，1，2，…）；同理可得若该波是向左传播的，可能的波速 $v=100(3n+2)$ m/s（$n=0$，1，2，…）。

（2）$P$ 质点速度向上，说明波向左传播，$T<t_2-t_1<2T$，说明这段时间内波只可能是向左传播了 5/3 个波长，所以速度是唯一的 $v=500$ m/s。

（3）$Q$ 比 $R$ 先回到平衡位置，说明波只能是向右传播的，而 0.01 s$<T<$0.02 s，也就是 $T<0.02$ s$<2T$，所以这段时间内波只可能向右传播了 4/3 个波长，解也是唯一的 $v=400$ m/s。

12. $v=\dfrac{14(4n_2+1)}{4n_1+3}$ m/s（$n_1=0$，1，2，…；$n_2=0$，1，2，…） 提示：本题考查振动以及波动的传播规律，只有理解波动（图象）传播的规律，准确把握波动过程中的图象关于时间和空间的周期性，才能作出确切和完整的判断。

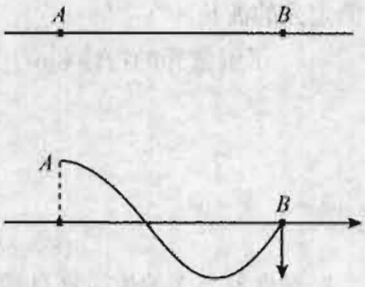


图 12-56

由于波向右传播，据“$A$ 点位移达正极大时，$B$ 点的位移恰为 0，且向下运动”，可画出此时 $A$、$B$ 间的最简波形，如图 12-56 所示。因未明确 $A$、$B$ 距离与波长的约束关系，故 $A$、$B$ 间的距离存在“周期性”。即 $\left(n_1+\frac{3}{4}\right)\lambda=ab=14$ m（$n_1=0$，1，2，…）

因所给定时间与周期的关系未知，故运动时间也存在“周期性”。即

$\left(n_2+\frac{1}{4}\right)T=\Delta t=1.00$ s（$n_2=0$，1，2，…）

因此可能的波速为 $v=\dfrac{\lambda}{T}=\dfrac{14(4n_2+1)}{4n_1+3}$ m/s（$n_1=0$，1，2，…；$n_2=0$，1，2，…）。

# 第十三章 光

## 课程标准的要求

1. 通过实验，理解光的折射定律。

2. 测定材料的折射率。

3. 认识光的全反射现象。初步了解光导纤维的工作原理和光纤在生产、生活中的应用。认识光纤技术对经济、社会生活的重大影响。

4. 观察光的干涉、衍射和偏振现象。知道产生干涉、衍射现象的条件。用双缝干涉实验测定光的波长。

5. 了解激光的特性和应用。用激光观察全息照相。

## 一、本章教材概述

光现象与人的生活息息相关。光对人类非常重要，我们能够看到外部世界丰富多彩的景象，就是因为眼睛接收到了光。据估计，人类由感觉器官接收到的信息中，有90%是通过眼睛得来的。人类很早就开始了对光的观察研究，逐渐积累了丰富的知识。现在，光学已经成为物理学的一个重要分支，并在实际中有广泛应用。光学既是物理学中一门古老的基础科学，又是现代科学领域中最活跃的前沿科学之一，具有强大的生命力和不可估量的发展前景。

通过本模块前两章的学习，学生已经初步了解了机械振动和机械波的一般规律，知道机械波具有干涉、衍射和偏振等特性。本章通过介绍光所具有的相同的干涉、衍射、偏振等特性，使学生知道光也是一种波动。另一方面，光由于其特殊的性质使它有别于机械波，而与红外线、紫外线、X射线等同属于电磁波。这将在第十四章进行介绍。对于光现象的深入研究（光速的测量），还预示了相对论的产生，学生将在本模块第十五章了解相关内容。至于光的粒子性，在3—5模块再作简单介绍。

在初中学生已经初步了解光的反射和折射现象的基础上，本章第1节对光的反射进行了回顾，对光的折射进行了定量研究，通过实验使学生理解折射定律并测定玻璃材料的折射率。接下来的几节以上一章内容为基础，分别对光的干涉、色散、衍射和偏振等现象进行了实验和理论探讨。第8节介绍了一种特殊的光——激光及其应用。在各节的处理上，多是围绕实验（包括演示实验、学生实验、课后小实验等）展开，通过对实验现象的研究，发现其物理规律，再上升为理论，最后介绍其具体应用。

在编写本章时还有以下思考。

**1. 通过光的波动性的学习培养学生的抽象思维能力**

本章所涉及的光现象学生比较熟悉，但对于隐藏其后的道理却难以理解。这是很自然的，

因为从光学发展的历史看，人们对于光的本性的认识经历了漫长的过程，其间有着不断的争论。对于学生来说，这是一个挑战，同时也是锻炼抽象思维能力的很好的素材。因此，本章教材编写时特别注意在认真观察实验事实的基础上加强抽象思维能力的培养。例如，学生头脑中“光沿直线传播”的认识是根深蒂固的，教科书编写时通过对于生活中常见的光的干涉和衍射现象的分析，打破这种思维惯性，并在更高的层次上认识光沿直线传播只是衍射的一种特殊情况。在光的干涉的教学中，应该让学生充分观察干涉图样，再类比前面讲过的机械波，应用波的叠加知识进行分析、推理，理解图样是怎样形成的。最后，通过“用双缝干涉测量光的波长”的实验加强这一认识。

**2. 体现 STS 思想**

人类对光现象的研究不仅极大地丰富了光学知识，还深刻影响了我们的社会生活。教科书除在正文中介绍了光纤和激光技术对我们生活的重大影响外，还在“科学漫步”栏目中编写了“立体电影和偏振光”“X 射线衍射与双螺旋”等内容。这些都是进行科学、技术与社会教育的素材。向学生介绍物理知识及其在社会、技术中的应用，既很好地说明物理与生活息息相关，也大大地开阔了学生的视野。

**3. 体现自主学习和教学方式的多样化**

教科书编写时设计了很多学生活动，例如，测定玻璃折射率、用自制的器材观察双缝干涉现象、用羽毛做光栅衍射实验等。这些实验利用了生活中常见的材料，易于操作。另外，教科书注意与信息技术的整合，设计了利用传感器的实验，例如用光传感器做双缝干涉和单缝衍射实验等。由于市场上有多种型号的产品，其使用方法也不尽相同，因此教科书侧重介绍其工作原理，主要目的是指出在中学物理实验中利用信息技术的一个方向。有条件的学校可以安排这些实验。对于这些丰富的材料，教学中可以灵活处理，既可以作为课堂演示，又可以作为随堂的学生实验，还可作为学生探究活动。同时，教科书提供了较多的阅读材料，加强了内容的开放性，既为学生的自主学习创造了条件，也为教师教学方式上的多样化提供了空间。

**课时分配建议**

| | | |
|---|---|---|
| 第 1 节 | 光的反射和折射 | 2 课时 |
| 第 2 节 | 全反射 | 2 课时 |
| 第 3 节 | 光的干涉 | 1 课时 |
| 第 4 节 | 实验：用双缝干涉测量光的波长 | 1 课时 |
| 第 5 节 | 光的衍射 | 1 课时 |
| 第 6 节 | 光的偏振 | 1 课时 |
| 第 7 节 | 光的颜色　色散 | 2 课时 |
| 第 8 节 | 激光 | 1 课时 |

## 二、教材分析与教学建议

### 第1节　光的反射和折射

**1. 教学目标**

(1) 认识光的反射及折射现象，知道法线、入射角、反射角、折射角的含义。

(2) 理解折射定律，会利用折射定律解释相关光现象和计算有关问题。

(3) 理解折射率的概念，会测定玻璃的折射率。

**2. 教材分析与教学建议**

本节主要讲光的反射定律、折射定律和折射率的测定，它们是本章的重点，教学中要充分重视。初中学习的折射的知识程度是很粗浅的，到这里要进一步深化。折射率是一个全新的知识点，它对于第7节理解全反射非常重要。

因此，本节知识需要重点讲解的有两处，一是折射定律的应用，二是折射率的测量。难点是折射定律与光路可逆原理相结合的应用，特别是在求解折射率时，切忌死套公式。在教科书的结构上，先介绍折射定律和折射率，再引入实验和例题，体现从基本知识到实际应用的过程。

**(1) 反射定律和折射定律**

教科书对光的反射知识作了简单的回顾，这部分内容初中已有介绍，但在高中有所提升，即介绍了比较完整的反射定律。不要求学生解决有关反射定律的复杂难题。

折射现象在初中是作为实验的结论提出来的，只是定性介绍折射角怎样随入射角变化，并没有给出“折射定律”。教师应做好教科书图13.1-2的演示实验，首先让学生看到光由介质1进入介质2的折射图景，其次认识入射光线、折射光线、法线、入射角、折射角。接着，教师可以通过改变入射角，让学生观察并探究入射角与折射角的关系。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，明确折射光线的方向。

光路可逆原理对正确理解光的折射定律有着不可忽视的作用。初学者容易认为只要发生光的折射，则其折射角一定小于入射角。教师可以通过光路可逆实验帮助学生纠正错误想法。

**(2) 折射率**

折射率是掌握折射定律的关键，也是难点。为化解学生的困难，可以按下列层次引导学生理解。

①当光由真空射入水中时，入射角和折射角是可以改变的，但是其正弦值之比却是个常数。

②对不同的介质，比如光由真空射入玻璃时，入射角的正弦跟折射角的正弦之比也是个常数，此常数与光由真空射入水时的那个常数是不同的。不同的介质具有不同的常数，说明这个常数反映着介质的光学特性。

③介质的折射率 $n$ 跟光在其中的传播速度 $v$ 有关，$n=\frac{c}{v}$。由于光在真空中的速度大于光

在介质中的速度，所以折射率始终大于1。

④教科书中给出的折射率属于绝对折射率。一般而言光从介质1射入介质2，入射角正弦与折射角正弦的比，叫做介质2对介质1的相对折射率。绝对折射率、相对折射率的概念，教科书中并没有明确提出，教师不必强化此概念。

学生容易错误地把折射率的概念和物体的密度联系起来，教师可以引导学生分析教科书表1，并提出问题：是不是密度大的物质折射率就大？让学生先比较表中各种物质的密度和折射率的大小，然后归纳、总结。比如，水的密度比酒精的密度大，但水的折射率却比酒精的折射率小。折射率大小不仅反映了介质对光的折射本领，也反映了光在介质中传播速度的大小。其实，折射率大小不仅与介质有关，还与折射光的频率有关，这一点可以在第4节中的“折射时的色散”中向学生介绍。

**(3) 实验：测定玻璃的折射率**

对于测定玻璃的折射率，建议安排学生分组实验，让学生自己根据实验目的，选择适当的器材，科学、合理地设计实验，培养学生分析问题、解决问题的能力。

教师在进行实验指导时，应向学生强调以下注意事项。

①玻璃砖的折射面$a$、$a'$必须画准确，才能确定法线，准确地画出入射角和折射角。注意不能用玻璃砖代替直尺画线，避免划伤玻璃砖表面。可以用铅笔先在白纸上描出玻璃砖界面的两个点，然后取下玻璃砖再用直尺连成线。

②实验时，尽可能将大头针竖直地插在纸上，且$A$和$B$之间、$B$和$O$之间、$C$和$D$之间、$C$和$O'$之间距离要稍大一些。要透过玻璃砖观察大头针，而不是看玻璃砖上面的大头针的顶部。

③入射角$\theta_1$应适当大一些，以减小测量角度的误差。

④在实验的过程中玻璃砖与白纸的位置都不能改变，更不能用手触摸玻璃砖光洁的光学面。

⑤玻璃砖应选用宽度较大的，宜在5 cm以上，若宽度太小，则测量误差较大。

**(4) 关于例题的说明**

该例题关键在于正确理解储油桶内未盛油和盛油时，分别看见$B$、$C$两点的光学现象差异，前者是光的直进现象，后者是光的折射现象。该例题提供了测量透明液体折射率的一种方法。建议教师可以布置学生回家做一做，准备一个不透明的杯子，未加水时，只能看见杯底部的边缘点$B$点，逐渐加水，注意让学生体会观察范围有什么变化。也可启发他们思考：根据水的折射率能不能定量算出不同的深度对应的范围？让学生把课堂教学和课外生活紧密结合起来。

### 3. 问题与练习

内容分析

练习中第1、2题针对折射定律的理解及应用设计，这是本节的重点知识，但题目仅仅涉及介质中一方是空气的情况。若两方均不是空气，可以适当提及，不必强调。第3、4题考查学生对于折射率及速度与折射率的关系的理解，也是本节的重点，教师可根据光路可逆的思想，将题目作适当的变化和加深。第5题是一道结合实际的题目，要求学生用知识解释现象。视深问题不仅有趣，而且有助于学生对折射定律的理解，教师可以结合实例作一些拓展。第6题引发学生对测定玻璃折射率的实验进一步理解和思考。

解答与说明

1. 甲、丁不可能发生，乙、丙可能发生。

注意：可能发生不表示一定发生，因未给出临界角，不能判断光线由玻璃进入空气时入射角是否大于临界角，即情况丙只能判断可能发生，不能断定一定发生。情况乙不但是可能发生，而且是一定发生。

2. 由折射定律可知

$$\frac{\sin 60^\circ}{\sin\theta}=\sqrt{3}$$

$$\sin\theta=\frac{\sin 60^\circ}{\sqrt{3}}=0.5$$

所以 $\theta=30^\circ$，光路图略。

3.
$$v_{水}=\frac{c}{n_{水}}=\frac{3.0\times10^8}{1.33}\ \text{m/s}=2.26\times10^8\ \text{m/s}$$

$$v_{水晶}=\frac{c}{n_{水晶}}=\frac{3.0\times10^8}{1.55}\ \text{m/s}=1.94\times10^8\ \text{m/s}$$

$$\frac{v_{水}}{v_{空气}}=\frac{n_{空气}}{n_{水}}=\frac{1}{1.33}\approx\frac{3}{4}$$

4.
$$n=\frac{\sin 40^\circ}{\sin 35^\circ}=1.12$$

$$v=\frac{c}{n}=2.68\times10^8\ \text{m/s}$$

5. 昆虫表面的反射光经水折射后进入鱼的眼睛，易得折射角小于入射角，因而，鱼逆着折射光看出去，昆虫位置在实际位置的上方。

说明：本题可以针对视深问题作简单拓展。例如，从水下（只要求正下方）看水上物体的视深，以及从水上（只要求正上方）看水下物体的视深。引导学生画光路图，并能够简单推导。教师还可启发学生思考：若另一方介质不是水，而是其他介质会发生什么现象？比如，透过玻璃看物体会有怎样的情况？大气中的蒙气差现象说明什么问题？培养学生的观察及思考能力。

6. (1) 对于入射点 $O$，根据折射定律得

$$n=\frac{\sin\theta_1}{\sin\theta_2}$$

对于出射点 $O'$，同理可以得到

$$n=\frac{\sin\theta_4}{\sin\theta_3}$$

因为 $\theta_2=\theta_3$，$\theta_1=\theta_4$，所以 $AO/\!/O'D$。

(2) 如图 13-1，侧移 $O'C=OO'\sin(\theta_1-\theta_2)$。由图易知，$O'C$ 随 $\theta_1$ 增大而增大。下面证明，当 $\theta_1$ 增大时，$\sin(\theta_1-\theta_2)$也增大。

$$\sin(\theta_1-\theta_2)=\sin\theta_1\cos\theta_2-\cos\theta_1\sin\theta_2$$

为使式中只出现一个变量 $\sin\theta_1$，现用$\sqrt{1-\sin^2\theta_2}$表示 $\cos\theta_2$，再用$\frac{\sin\theta_1}{n}$表示 $\sin\theta_2$，整理后得：

$$\sin(\theta_1-\theta_2)=\frac{\sin\theta_1}{n}\left(\sqrt{n^2-\sin^2\theta_1}-\sqrt{1-\sin^2\theta_1}\right)$$

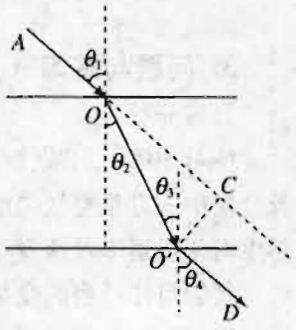


图 13-1

分子分母同乘以$(\sqrt{n^2-\sin^2\theta_1}+\sqrt{1-\sin^2\theta_1})$得：

$$\sin(\theta_1-\theta_2)=\frac{\sin\theta_1}{n}\frac{n^2-1}{\sqrt{n^2-\sin^2\theta_1}+\sqrt{1-\sin^2\theta_1}}$$

由于$\theta_1$增大时$\sin\theta_1$增大，因此，上式的分子增大，分母减小，其值增大。

由以上可知，当$\theta_1$增大时，$OO'$和$\sin(\theta_1-\theta_2)$都随之增大，因此侧移量$O'C$增大。

(3) 入射角适当大一些，折射角也会稍大些，这有利于减小测量误差，所以入射角适当大些好。

说明：通过本题，我们可以看到玻璃砖的以下特点：不改变入射光的性质和方向，只使光线向偏折方向平行侧移；平行光照射到平行玻璃砖上，出射光仍然是平行光，其宽度等于入射光的宽度，而玻璃砖中折射光的宽度随入射角增加而增大。当然，教师也可根据学生情况，补充对于其他形状的玻璃砖，如何测定其折射率的问题。

## 第2节 全反射

### 1. 教学目标

(1) 知道光疏介质和光密介质，认识光的全反射现象。

(2) 知道全反射棱镜及其应用，初步了解光导纤维的工作原理，认识光纤技术对社会经济生活的重大影响。

### 2. 教材分析与教学建议

全反射现象在生活中常会遇到，本节从光的折射入手，探讨了光发生全反射的条件以及相关应用。全反射及发生全反射的条件是本章的重点。

在学生认识并掌握全反射现象产生的条件时，要强调两个层次：一是光由光密介质进入光疏介质，二是入射角大于（或等于）临界角，两个条件缺一不可。教学中首先要让学生正确理解“光密”和“光疏”的概念，不但要了解“密”与“疏”是相对而言的，还要让学生知道不能把光密与光疏跟介质密度的大小混同起来。例如酒精对水来说是光密介质，它的密度却比水小。其次，要让学生正确理解临界角的概念。不但要让学生看到，折射角随入射角的增大而增大，还要让他们看到，随着入射角和折射角的增大，反射光不断增强，折射光不断减弱，当折射角接近90°时，折射光急剧减弱（直到为0），反射光急剧增强（直到跟入射光强度相等）。

全反射棱镜和光导纤维是全反射的应用，这部分内容有利于开阔学生视野，加深对全反射的认识。

**(1) 全反射现象**

本节可从前面光的折射现象入手引入课题，把水、水晶、金刚石两两组合让学生画一画光的折射光路图。通过学生自己画图，让学生体会两点：一是不同介质折射率不同，二是折射率大小具有相对性。在此基础上引出光疏介质和光密介质的概念，学生更容易体会其内涵。

在演示全反射现象时，光源最好用氦氖激光光源，而且要在暗室进行或拉上教室四周的窗帘。为了让入射光经过圆心，可以把氦氖激光光源固定在支架上，让支架转动，玻璃砖固定在带有刻度圆盘的圆心上，以便观察入射角的变化对反射光和入射光的影响。做演示实验时，要使学生看到光从光密介质射入光疏介质时，折射角大于入射角。随着入射角的增大，折射角也

逐渐增大，同时折射光逐渐减弱。当入射角达到某一角度时，折射光突然消失了。再增大入射角，只有反射光，没有折射光。通过对现象的观察，使学生了解全反射现象是光由光密介质射入光疏介质时，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。

不同的介质，由于折射率不同，在空气中发生全反射的临界角是不一样的。介质的折射率越大，发生全反射的临界角越小。启发学生用光路可逆的思想，由全反射及折射率的定义来计算某种介质在空气中发生全反射时的临界角。可以引导学生自己计算几种介质的临界角并分析临界角的大小与 $n$ 的关系。对于公式 $\sin C=\frac{1}{n}$，要求学生在理解的基础上会灵活应用。

全反射现象在日常生活中比较常见，可以选择一些作为演示实验。例如：将空试管斜放在水槽中，然后从其正上方观察试管壁，将会发现试管壁是银白色的。一定要强调发生全反射的条件有两个，但学生常常只记住了判断入射角是否等于或大于临界角，却遗忘了首先应满足光从光密介质射入光疏介质的条件。

在讲解例题的基础上，教师也可以让学生回忆一下在游泳（戴有防水镜）时，从水下观察水上景物的情景。有的学生也许并未体验过，这正激发了他们的好奇心。

**（2）光导纤维**

光导纤维是光的全反射理论的典型应用，一要让学生认真观察光导纤维传输图像的特点，二要分析光导纤维的结构，理解产生全反射的原因。可以利用“做一做”栏目中水流导光实验来模拟光导纤维的传输原理。

若光导纤维的折射率为 $n$，在端面上入射光满足什么条件，才能使光在光导纤维中不断发生全反射，从一端传到另一端？

设当入射光线入射角为 $i$ 时，进入端面的折射光线传到侧面时恰好发生全反射，如图 13-2，则有：$\sin C=\frac{1}{n}$，$n=\frac{\sin i}{\sin r}$，$C+r=90°$，解以上各式得：$\sin i=\sqrt{n^2-1}$，$i=\arcsin\sqrt{n^2-1}$。可见 $i$ 只要不大于 $\arcsin\sqrt{n^2-1}$，光线就能连续不断地产生全反射，从光导纤维的一端传到另一端。实际上光导纤维外包有外皮层，考虑到外皮层折射率比真空的折射率大，实际入射角比前面计算出的 $i$ 要小。

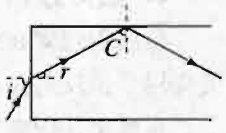


图 13-2

除了教科书中的“水流导光”小实验外，也可做以下实验。在一个盛满清水的烧杯内放两根小试管，甲管内装满清水，乙管内是空气。请同学们观察，哪一根试管特别明亮？为什么？分析总结：观察到乙试管特别明亮，因为光从水射向试管内的空气时，在乙试管表面发生了全反射现象，大量的反射光进入观察者眼中，看起来就显得特别明亮。

### 3. 问题与练习

内容分析

第 1 至 4 题要求学生掌握本节的重点知识，即发生全反射的条件，临界角与折射率的关系。第 1 题可以利用课堂时间处理，便于学生更好地理解全反射的条件，其余则可布置学生课后作业。第 5、6 题则要求作光路图求解，是对学生分析问题、解决问题能力的考查，教师要重点讲评。

解答与说明

1. A、C。

2. 根据临界角公式 $n=\frac{1}{\sin C}$ 得

$$C=\arcsin\left(\frac{1}{n}\right)$$

则玻璃的临界角

$$C_1=\arcsin\left(\frac{1}{1.5}\right)=41°49'$$

金刚石的临界角

$$C_2=\arcsin\left(\frac{1}{2.42}\right)=24°24'$$

3. 根据临界角公式 $n=\frac{1}{\sin C}$ 得

$$C=\arcsin\left(\frac{1}{n}\right)$$

则临界角

$$C=\arcsin\left(\frac{1}{\sqrt{2}}\right)=45°$$

由题目知，入射角小于 45°，故不发生全反射。

4. 如图 13-3。

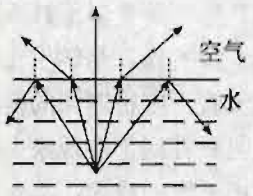



图 13-3

5. 根据图 13-4 可知，从左侧位置观察时

$$\sin\theta_2=\frac{12}{\sqrt{20^2+12^2}}$$

根据折射定律得

$$n=\frac{\sin\theta_1}{\sin\theta_2}$$

则

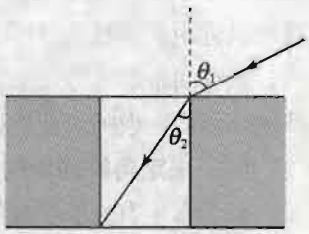



图 13-4

$$\theta_1=\arcsin(n\sin\theta_2)$$

$$=\arcsin\frac{12\times1.52}{\sqrt{20^2+12^2}}=51°36'$$

人在坦克内通过玻璃向外观察时，视角范围为从左侧（或右侧）观察时的两倍，即视角 $\theta=2\theta_1=103°12'$。

6. 根据临界角公式 $n=\frac{1}{\sin C}$ 得

$$C=\arcsin\left(\frac{1}{n}\right)$$

$$=\arcsin\left(\frac{1}{2.4}\right)$$

$$=24°38'$$

易得

$$C<30^\circ$$

其光路图如图 13-5。

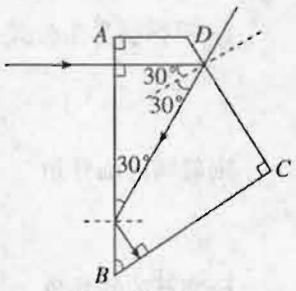



图 13-5

## 第 3 节　光的干涉

### 1. 教学目标

(1) 观察光的干涉现象。

(2) 知道决定干涉条纹间距的条件，认识出现亮条纹和暗条纹的位置特点。

### 2. 教材分析与教学建议

本节主要讲杨氏双缝干涉实验和决定条纹间距的条件，重点是后者。教师要注意回顾和应用机械波干涉的相关知识，分析光屏上明暗条纹的分布规律。这种分析是学生可以理解的，因为干涉现象的本质是波的叠加。同时可以使学生对于干涉现象的物理过程有更具体的了解，进一步加深学生对光的波动性的认识。

**(1) 杨氏干涉实验**

光的干涉现象在日常生活中比较少见，学生对干涉现象的认识完全依赖于实验。因此，成功地做好用氦氖激光器演示光的双缝干涉实验，是学生正确理解本节知识的关键。这个演示实验最好在暗室里进行。若在教室做此实验，应将四周的窗帘拉上，以确保看清干涉条纹。在对光源的介绍上，教师只需要向学生说明要看到干涉现象，除了频率相同外，还要有振动情况相同等更复杂的条件，不提及相位差或相干波的概念，避免加重学生理解上的负担。教师应引导学生仔细观察明暗条纹的特点，还可以让学生在距离光源不同位置用白纸作为接收屏，学生不仅可以近距离观察到白纸上出现了等间距排列的明暗相间的条纹，还能看到屏与光源的距离越大，条纹间距越大等现象。这一方面增加了学生的兴趣，另一方面也为下节的教学作了铺垫。在演示结束后，教师应强调这样的结论：干涉是波独有的特征，杨氏干涉实验证明了光是一种波。

**(2) 决定条纹间距的条件**

因为学生有波的叠加的知识，教师可以提出问题让学生讨论：屏上哪些地方应该出现亮纹，哪些地方应该出现暗纹？引导学生归纳出：当两列波的路程差为半波长的偶数倍时，光振动在该点加强，形成亮纹；当两列波的路程差为半波长的奇数倍时，光振动在该点减弱，形成暗纹。

**教学片段**

**决定条纹间距的条件**

提出问题：为什么频率相同、振动情况相同的两列光会产生明暗相间的干涉图样呢？我们来探究一下干涉现象的原理。

引导分析：首先来回顾一下机械波的干涉。

若在两列相同的波相遇的某点总是波峰与波峰相遇或波谷与波谷相遇，则该点是振动的加强点（例如两波源连线中垂线上的点），把加强点连起来就是加强区。若某点是波峰与波谷相

遇，则该点是振动的减弱点，这些点的连线是减弱区……振动加强区与减弱区是相互间隔的，其分布是不变的。

分析说明：光也是一种波，频率相同、振动情况相同的两列光波在空中的叠加同样应该出现振动加强和振动减弱交替分布的现象。反映在屏幕上：振动加强区，光能量较强——亮；减弱区，光能量较弱——暗，所以得到明暗相间的干涉条纹。

结合图 13-6 讲解如下。

提出问题：思考一下 $S_1$、$S_2$ 的中垂线与屏的交点 $A$ 是亮条纹还是暗条纹，你能解释吗？

分析推测：结合机械波知识，归结到路程差上，可以根据以下线索引导学生逐层分析。

①中垂线与屏的交点 $A$ 距离两波源的路程差为 0，所以总是波峰与波峰相遇或波谷与波谷相遇，应该是亮条纹，我们称之为中心亮纹。

②与中心亮纹相邻的第一条亮纹（两侧各一条）称为第 1 级亮纹，它到两波源的路程差为一个波长 $\lambda$，所以也是波峰与波峰相遇或波谷与波谷相遇，出现亮纹。

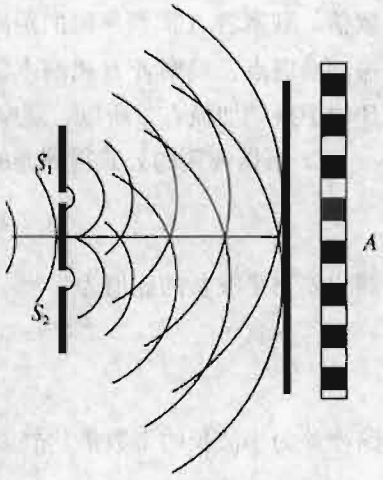


图 13-6

③依次推导，到两波源的路程差为两个波长，即为 $2\lambda$ 的条纹称为第 2 级亮纹；到两波源的路程差为三个波长，即为 $3\lambda$ 的称为第 3 级亮纹……到两波源的路程差为 $n$ 个波长，即为 $n\lambda$ 的称为第 $n$ 级亮纹。

问题引导：对于任意一点 $B$，在什么条件下出现亮条纹，什么条件下出现暗条纹？

（有条件的学校，这一段内容最好用动画动态显示，有利于学生理解干涉图象与路程差的关系。）

小结：两光源发出的光波到达某点的路程差为半波长的偶数倍，即 $\delta=n\lambda$（$n=0$，1，2，3，…）时，光振动在该点加强，形成亮纹；当两列波的路程差为半波长的奇数倍，即 $\delta=\frac{(2n+1)\lambda}{2}$（$n=0$，1，2，3，…）时，光振动在该点减弱，形成暗纹。于是得到明暗相间的干涉条纹。

指导学生完成“做一做”栏目的实验，增强学生的亲身体验，让其感受自然的无限魅力，从而激发学生学习物理的热情。该实验在操作过程中要注意以下几点：

①刀刃划出的两道细缝要平行；

②干涉用的灯光光源亮度要足够大，即功率要大一些；

③观察时双缝要正对眼睛，而且要由远及近地调节眼睛与双缝的距离，以寻找合适的观察点。

### 3. 问题与练习

内容分析

练习中第 1 题涉及光的干涉现象对光的本性的证明。第 2 题考查在干涉现象中如何判断出现亮纹与暗纹的位置，这是本节的难点。题目还从光波干涉引申到了声波的干涉，教师可结合生活实际，创造性地利用该题。若有条件，还可以做模拟实验，让学生亲自体会，激发他们对

科学的兴趣和热情。第3题则是利用第2题的结论，对判断亮纹与暗纹的位置的具体应用。

解答与说明

1. 干涉是波的特性，光的干涉现象说明光是一种波。

2. 亮条纹到两光源的距离差为半波长的偶数倍，暗条纹到两光源的距离差为半波长的奇数倍。观察者$A$离两声源的距离差$\Delta x_1=5.4\ \text{m}-4.5\ \text{m}=0.9\ \text{m}$，是半波长的3倍，故$A$位于振动减弱点。观察者$B$离两声源的距离差$\Delta x_2=5.5\ \text{m}-4.3\ \text{m}=1.2\ \text{m}$，是半波长的4倍，故$B$位于振动加强点。所以，观察者$A$听到的声音比观察者$B$要弱。

3. 根据波速的公式得到光的波长为

$$\lambda=\frac{c}{f}=\frac{3.0\times10^8}{6.0\times10^{14}}\ \text{m}=5\times10^{-7}\ \text{m}$$

路程差与半波长的比值为

$$\frac{\Delta x}{\frac{\lambda}{2}}=\frac{7.5\times10^{-7}}{2.5\times10^{-7}}=3$$

路程差为半波长的奇数倍，故为暗条纹。

## 第4节　实验：用双缝干涉测量光的波长

### 1. 教学目标

(1) 了解“用双缝干涉测量光的波长”的实验原理，知道影响干涉条纹宽度的因素。

(2) 经历用双缝干涉测量光的波长的实验过程，加深对双缝干涉图样的认识和理解，养成合作意识。

### 2. 教材分析与教学建议

本节主要讲相邻亮（或暗）条纹中心间距的表达式，并依据该式测定单色光的波长，难点是相邻亮条纹中心间距的推导，要注意相邻亮条纹距离实际上是其中心的距离。尤其是要处理好两个方面的问题，一是推导过程中的两次近似处理，二是推导过程中出现的正负号的含义和$k$值的意义。重点是做好用双缝干涉测量光的波长的学生实验。教科书先介绍实验原理，再通过思考与讨论，提出猜想，这些是如何进行实验探究的一个示范。在教学中，要充分利用教科书提供的素材，特别是“思考与讨论”所提出的问题，引导学生积极思考并最大限度地自主完成实验探究。

**(1) 实验原理**

这个实验的目的是测定光波的波长。实验能观察到的是明暗相间的条纹，可以测量的量是$d$、$l$、$\lambda$等，所以首先应找出待测量$\lambda$和可测量之间的关系。在推导相邻亮条纹距离公式时，引导学生对数值作出合理的近似，特别要把近似的前提条件讲清楚。第一个近似是直角近似，前提是两缝距离远小于缝到屏的距离；第二个近似是正切值约等于正弦值，前提是角度足够小。

屏上亮纹或暗纹的位置距$O$点的距离用$x$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(路程差)$r_2-r_1$，在$\delta$等于半波长偶数倍的位置，产生亮纹；

在$\delta$等于半波长奇数倍的位置时产生暗纹。寻求$r_2-r_1$与$d$、$l$和$x$的关系，推出$r_2-r_1\approx d\frac{x}{l}$。公式推导过程中，对亮条纹中心位置的公式$x=\pm k\frac{l}{d}\lambda$要引起重视，一是它表示亮条纹中心到双缝连线的中垂线与屏的交点的距离；二是公式中的$k$表示条纹的级数，如+1级亮条纹，-1级亮条纹等。学生对于公式$x=\pm k\frac{l}{d}\lambda$（$k=0$，1，2，…）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，产生亮纹的条件是$\delta=r_2-r_1=0$，$\lambda$，$2\lambda$，…和$-\lambda$，$-2\lambda$，…（“-”的意义是$r_2<r_1$，位置在$O$点的下方），从中归纳出$\delta=d\frac{x}{l}=\pm k\lambda$，解出$x=\pm k\frac{l}{d}\lambda$，$k=0$，$\pm1$，$\pm2$，…然后具体说明$k=0$，1，2，…所对应的$x=0$，$\pm\frac{l}{d}\lambda$，$\pm2\frac{l}{d}\lambda$，…的意义，使学生理解这种数学表述的内容。

教科书在原理推导之后、学生实验之前安排了“思考与讨论”栏目，一方面起到承上启下的作用，另一方面用以激发学生探究的浓厚兴趣。教师一定要处理好栏目中提出的问题，引导学生分析影响条纹宽度的因素，为下面的教学作好铺垫。

**（2）观察双缝干涉图样**

这个实验没有用氦氖激光器作为光源，用的是普通的灯泡，光源发出的光经过滤光片成为单色光，单色光再依次通过单缝和双缝。教科书右侧小字中提到，历史上托马斯·杨就是采用这样的方法。如果有学生问到“为什么一定要在双缝前加一个单缝？”教师只需要向学生说明要看到干涉现象，除了频率相同外，还要有振动情况相同等更复杂的条件。因为单缝到双缝的距离相等，完全对称，所以从单缝出来的一小束光再由双缝分成两束后，能满足“振动相同”这个条件。但教师自己要明白，这主要是为了让两列波既要频率相同，又要有恒定相位差，即构造成相干光源。

在观察双缝干涉图样实验中，教师还应提醒学生注意以下方面。

①光源灯丝最好为线状灯丝，并与单缝平行且靠近。滤光片、单缝、双缝、目镜等如有灰尘，应用擦镜纸轻轻擦去。

②安装时，注意使单缝与双缝相互平行，使光源、滤光片、单缝、双缝的中心均在遮光筒的中心轴线上。调节的基本依据是：若干涉条纹不清晰，是单缝与双缝不平行所致；若照在屏上的光很弱，主要原因是灯丝与单缝、双缝，测量头与遮光筒不共轴所致。故应耐心仔细地调节，以达到最佳效果。

③在改变滤光片颜色时，提示学生先根据“思考与讨论”栏目进行猜想，再做实验验证。

④另外，双缝干涉仪是比较精密的仪器，应轻拿轻放，不能随便拆卸遮光筒、测量头等部件。

**（3）测定单色光波长**

光波波长很小，$\Delta x$、$l$的测量对波长$\lambda$的影响很大。$l$用米尺测量，$\Delta x$利用测量头测量。测量时要注意三个问题：一是分划板中心刻线应与条纹中心对齐；二是测量头的读数要和螺旋测微计的读数联系起来，让学生抓住它们共同的实质；三是为了减小测量误差，应测多条亮纹间距，再求$\Delta x$。教师应向学生讲清楚，为什么计算相邻亮条纹的距离时要用$n$个亮条纹的距离除以$n-1$个亮条纹间距？（画出示意图分析。）实验中，$\Delta x$、$l$都应测量多组数据，最后求出$\lambda$的平均值。

另外，要引导学生正确分析实验误差的来源，以及减少实验误差的方法，让学生提出自己的见解。值得一提的是，相邻两亮条纹的间距是指相邻两亮条纹中心间距。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。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感性认识。

教科书中的“做一做”提供了一个用传感器和计算机观察双缝干涉的实验，以便能更精确和定量地说明干涉中条纹和光强的分布规律。实验时可以使用朗威数字化实验系统（DISLab）中的光传感器。如果没有该实验设备，教师可以利用多媒体课件给学生演示，让学生观察和体会。

### 3. 问题与练习

内容分析

练习中第 1 题考查学生对相邻亮条纹或暗条纹中心间距公式的理解，这是本节的重点，所以题目设计的问题较多。也可安排在学生实验中处理这些问题。第 2 题加深对减小实验误差方法的理解，第 3 题则是具体运用这种方法计算波长。

解答与说明

1.（1）平行。

（2）距离变大。

（3）红色光波长更长。

（4）距离变小。

（5）不变化。

说明：教师可以针对类似的问题做进一步拓展，比如，让学生思考同时改变其中两个因素会出现什么现象。

2. 通过测多个亮条纹宽度求平均值可减少实验误差。

3. 根据题目可知

$$\Delta x=\frac{a}{n-1}=\frac{22.78\times10^{-3}}{9}\ \mathrm{m}=2.53\times10^{-3}\ \mathrm{m}$$

根据公式 $\Delta x=\frac{l}{d}\lambda$ 得

$$\lambda=\frac{d}{l}\Delta x=\frac{0.3\times10^{-3}}{1.2}\times2.53\times10^{-3}\ \mathrm{m}=6.33\times10^{-7}\ \mathrm{m}$$

## 第 5 节　光的衍射

### 1. 教学目标

（1）观察光的衍射现象，知道什么是光的衍射及产生明显衍射现象的条件。能用衍射知识对生活中的现象进行解释和分析。

（2）初步了解衍射光栅。

## 2. 教材分析与教学建议

光的衍射现象进一步证明了光具有波动性，这对发展光的波动理论起到了重要的作用。教科书讲述光的衍射的思路是先让学生思考一般情况下不容易观察到光的衍射现象的原因，然后再观察衍射实验，来说明光的衍射现象及发生衍射的条件。由于衍射现象产生的物理过程分析起来比较复杂，教科书中对于衍射现象只进行了定性分析。

教师可以通过复习机械波衍射的知识，来进行光的衍射教学。复习关于波的衍射的结论：能够发生明显的衍射现象的条件是障碍物或孔的尺寸比波长小，或者跟波长差不多。要让学生体会“明显”“差不多”的含义，再指明由于光的波长很短，要产生明显的衍射现象，障碍物或小孔必须很小。本节以图片阐述了单孔衍射和光栅衍射现象。由于衍射现象不易产生，学生较难理解，适宜借助于多媒体技术把这些现象展示给学生，引发学生的兴趣和思考。

**（1）光的衍射**

衍射与干涉一样，是波的特性，但为什么我们在日常生活中看不到光的衍射现象呢？教科书将这个问题放在本节的开头，一方面激发了学生探究的浓厚兴趣，另一方面也引出了产生明显衍射现象的条件。教师要注意在后面的教学中突出说明，光的衍射现象并没有完全否定光的直进，而是指出了光的直进的适用范围。

做好光通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。要理解光沿直线传播只是一种近似规律，当波长比障碍物或孔的尺寸小得多时，光可以看成是直线传播。当障碍物或孔的尺寸与波长差不多或比波长小时，就发生衍射现象。要注意衍射图样与干涉图样的区别。衍射条纹宽度不等，中央明纹最宽，且各亮纹的亮度不同，中央亮纹最亮，两侧亮纹的亮度依次减弱。干涉条纹的宽度相等，且各条亮纹亮度基本相同。

注意：拍摄激光照射针尖时的衍射照片可用氦氖激光照射大头针尖，使影投射到感光胶片上，用纸板控制曝光时间。胶片的感光度要低一些，所成的像要放大后观察。

教师可通过对“泊松亮斑”的讲述，让学生体会在科学研究上必须重视理论的指导作用和实践的检验作用。作为科研工作者，必须有坚定的自信心和踏实勤奋的工作态度。

**（2）衍射光栅**

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。光栅的衍射图样是每个缝自身衍射和各个缝之间干涉的共同结果。当入射光中有各种波长的色光时，它们将分别在不同的方向上形成自己的亮斑，这就是光栅形成的光谱。光栅的这些特点使它成为科学实验和高新技术中常用的一种重要的光学元件。

关于衍射光栅在科学上的应用和成就可以适当拓展，以激发学生探求科学的欲望。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，X射线衍射光栅元件在X射线天文望远镜、极端远紫外光刻、激光惯性约束核聚变诊断系统、同步辐射、

实验力学等诸多领域有着广泛而重要的应用。例如，美国“空间大天文台计划”中的4颗大型非太阳探测天文卫星之一——Chandra X射线望远镜携带了高能透射光栅和低能透射光栅光谱仪，装备的X射线衍射光栅分辨率是以前设备的10倍，而且集光能力强，成像的能量范围广，并可精确地把光谱分解成不同的能量成分。

本节“做一做”中安排了两个小实验，前者是观察单缝衍射现象，后者是观察光栅衍射现象。实验材料都是生活中常见的，易于操作。用传感器做单缝衍射，体现了课程与信息技术的整合，教学中可以灵活处理，既可以作为课堂演示，又可以作为随堂的学生实验，还可作为学生的探究课题。用羽毛做光栅衍射实验，要鼓励学生亲身去体验，教师还可以让学生眯缝眼睛，从上下眼睫毛交错构成的许多小隙中看灯光，也可看到彩色的衍射花样，这对学生掌握衍射光栅的现象相当有用。这个活动中应注意提醒学生保护眼睛。

在讲完本节后，学生可能产生这样的疑问，即干涉、衍射都要产生明暗相间的条纹，它们究竟有什么区别？其实，干涉、衍射都是波的叠加现象。从本质上讲，两者并无区别。区分干涉、衍射，是一种习惯说法，干涉是指有限多（分立）的光束（波列）的叠加，而衍射是指波阵面上（连续的）无穷多次波发出的波的叠加。在实际中，干涉、衍射常常出现于同一现象中。例如，双缝干涉的图样，实质上是单缝衍射和双缝衍射光束再干涉的综合效果。衍射光栅也是如此。

### 3. 问题与练习

内容分析

本节练习均针对单缝（或单孔）衍射设计，以实验为主，突出了实验的重要性。教师可根据情况安排，做成课堂实验或是布置课后作业，课后作业也可让学生尝试写观察报告，体会物理研究的过程和乐趣。

解答与说明

1. 会观察到明暗相间的彩色条纹，因为当两支铅笔夹成的狭缝与光波波长接近时，会发生光的衍射现象。

说明：也可以用两把直尺重叠并压紧后，对着日光灯观察光的衍射现象。注意直尺要与日光灯平行，而且眼睛要靠近直尺观察。

2. 衍射条纹宽度增大。

3. 起初小孔不太小时，光沿直线传播，此时光斑随小孔尺寸减小而减小。当小孔足够小时，光发生衍射，而且小孔越小衍射效果越强，此时光斑随小孔尺寸减小而增大。

## 第6节　光的偏振

### 1. 教学目标

(1) 观察振动中的偏振现象，知道只有横波才有偏振现象。

(2) 知道偏振光和自然光的区别，能运用偏振知识来解释生活中的一些常见光学现象。

### 2. 教材分析与教学建议

本节主要阐述了光波作为横波具有的偏振现象，以及光的偏振在生产、生活、科技等方面

的应用。偏振现象学生不好理解，所以教科书先从绳波会发生偏振入手，再通过类比去介绍光的偏振。在教学中，做好两个演示实验是让学生接受光有偏振现象的关键，也是本节教学的突破口。本节内容有利于开阔学生的视野，加深对光的波动性，特别是对光是横波的理解。

**(1) 偏振现象**

偏振是区别横波、纵波的重要判断依据，也是学生接触的一个新概念。教科书从机械波入手来认识偏振，应将图 13.6-1 的实验演示给学生看。这个实验形象地说明了偏振是横波的特有现象。教科书处处体现了类比思想，用带有狭缝的木板对应偏振片，通过狭缝后机械波的振动强弱对应通过狭缝后光的明暗，绳波的传递要受狭缝转动的影响，经过偏振片 P 的光也要受偏振片转动的影响，等等。

①机械波模拟实验

做好机械波模拟实验，为后面理解为什么光波是一种横波起着至关重要的作用。要确保全班学生都能看到实验现象。学生曾经学过横波和纵波的定义，所以对实验中上下抖动的软绳形成横波、前后推动的弹簧形成纵波很容易理解。教师可告诉学生，对于横波，在满足与传播方向垂直的前提下，还可以有不同的振动方向。当然，这个实验也可以用来判断横波和纵波。

②光的偏振现象实验

实验的设计思想和上面的实验一样。电气石晶体薄片或人造偏振片对某一振动方向的光具有选择透射的本领，它们的作用相当于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，转动其中任一个偏振片的方位，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。学生常常提出疑问：为什么光要先经过偏振片 P 呢？不这样行不行？答案是否定的。因为实验中两个偏振片的作用是不同的，第一个偏振片 P 使自然光变成偏振光，第二个偏振片 Q 才起到机械波实验中的狭缝的作用，教学中尤其要注意把这个问题讲清楚。光波本质上是由相互垂直的电场 $E$ 分量和磁场分量 $B$ 构成的，电场和磁场的振动方向跟光的传播方向垂直，所以光有偏振现象。这一点教师自身应明白，但不必纳入课堂教学中。

**(2) 偏振现象的应用**

偏振光在日常生活中应用较广泛，要给学生多介绍和分析这些实际例子。比如，应用偏振光可消除在夜间行车时汽车头灯耀眼灯光对迎面汽车司机的影响。方法是把偏振片加在汽车头灯上，同时亦加在汽车挡风玻璃上。由于两偏振片的偏振方向都和地面成 45°角，使有同样装置的迎面来车的偏振光的偏振面正好与自己的挡风玻璃上的偏振片的偏振面互相正交，这样，就大大减弱了迎面来的汽车头灯光，不至于影响司机驾驶。

学生对计算器并不陌生，教师可以在学生观察的基础上进行讲解，这样有利于培养学生联系实际学习物理的观念和习惯。另外，可以安排学生到图书室阅读相关书籍，了解更多的内容。

教科书中“做一做”栏目的实验充分利用了身边的物品，器材来源方便，又注意了环保。教师可以提前安排学生收集相关的物品，然后集中一节课的时间加以研究、讨论。可以让学生把自己观察到的现象和研究的过程记录下来，并谈谈自己的感受和想法。

在“科学漫步”栏目中介绍了立体电影。立体电影是利用光学原理与人的视差相配合而产生的一种奇特的空间影像和立体效果。现在立体电影有两类：一类需要戴特制的眼镜（红绿眼

镜或偏光眼镜等）观看；另一类不戴特制的眼镜，而由光栅银幕产生立体感。教学中只介绍第一类就可以了，要紧紧把握住摄影和放映的可逆性，两束偏振光叠加的复合性原则。根据双目视觉原理，用并列的两台摄影装置分别代表人的左、右眼，同时摄取同一拍摄对象的两个影像。将这两个由于视点不同而略有偏差的影像，同时投映在银幕上，并使观众的左、右眼睛分别只能看到其中相应的一个影像，由视神经传至大脑叠合在一起，就产生了立体感。有条件的话，可以配合教学看一场立体电影，学生一定会有浓厚的兴趣。

### 3. 问题与练习

内容分析

本节的练习紧紧围绕教科书线索。第1题考查光的偏振的概念，强调光的偏振说明了光是一种横波，也是对光的本性的证明。第2题要求学生结合生活实际来回答，教师还可以补充一些光的偏振在实际应用中的例子。

解答与说明

1. 光只能在某个特定方向振动的现象叫偏振现象。偏振是波的特性，光的偏振现象说明光是一种波，而且是一种横波。

2. 两者的目的都是减少通光量，但普通带色玻璃改变了物体的颜色，而偏振片却没有。安装镜片时，镜片的透振方向应沿竖直方向。利用偏振镜片可以检验光波是不是横波，也可以检测某一光波是不是偏振波。

## 第7节　光的颜色　色散

### 1. 教学目标

（1）知道什么是色散现象。

（2）观察薄膜干涉现象，知道薄膜干涉能产生色散，并能利用它来解释生活中相关的现象。

（3）知道棱镜折射能产生色散。认识对同一介质，不同颜色的光折射率不同。

### 2. 教材分析与教学建议

本节主要阐述色散的概念和发生色散现象的两种情况。需要注意的是，教科书把含有多种颜色的光被分解为单色光的现象都叫做色散，因此，白光干涉时产生彩色条纹也是一种色散现象。对于薄膜干涉的色散，学生不好理解，教师应注意让学生动手做肥皂液薄膜的干涉实验，让学生仔细观察现象。在讲解时要辅之以光路图来说明其原理，关键在于寻找和判断发生干涉的两列光从何而来，并充分利用第3节的知识来说明出现色彩的原因。本节的另一项主要内容是棱镜折射的色散，该现象主要涉及同一介质对不同色光速度、折射率、偏折角的影响。关于光的颜色、频率和波长，应当明确，不同颜色的光具有不同的频率，光的频率决定于光源，与介质无关。光在不同介质中传播时，频率（颜色）不变，但速度（从而波长）要改变，在界面发生折射时偏折呈现不同，这就是折射色散的本质。

**（1）光的颜色　色散**

在用白光做双缝干涉的实验中，可选用白炽灯作为光源，教室应拉上窗帘，可以白色墙壁

为屏，确保全班学生都能看到。在讲解中，还要注意以下几点。

①引导学生分析各种色光的分布规律，明白为什么中间是白色光，两侧是彩色光。因为不论光的颜色如何，在屏的中间都应该出现亮纹，也称为中央亮纹，它是各种色光的会聚，所以依然是白色光。两侧出现彩色光的原因，可引导学生运用上节的知识分析各色光条纹的宽度与其波长的关系。

②各色光的颜色是由频率决定的，光由一种介质进入另一种介质，不变的是频率，故光的颜色不会随介质的改变而改变。教科书又指出，不同的人对颜色的感觉不完全一样，所以光的频率是客观存在，至于我们把哪段频率的光称为红光，哪段频率的光称为绿光，这都是人的主观感受。

③教科书只简单提到光谱的概念，不涉及光谱的分类及怎样用分光镜观察光谱。教师可根据学生的具体情况，选择讲解的深浅程度。

**(2) 薄膜干涉中的色散**

学生平时都见过薄膜干涉现象，如雨后路面上的油膜形成的彩色条纹，色彩绚丽的肥皂泡等，只是没有注意观察。可让学生列举此类现象，并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，会给他们留下深刻的印象。

在用肥皂膜做薄膜干涉实验时，可引导学生仔细地观察干涉条纹。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。分析薄膜干涉实验的重点有两个：①如何得到相干的两列波。②薄膜上是怎样出现明暗相间的干涉条纹或彩色条纹的。教科书图 13.7-3 是肥皂液薄膜干涉的示意图。引导学生分析这个图在于突出两个重点：①相干的两列波是来自于薄膜前后两个面的反射光。②在膜上某些厚度的地方，两列反射波的路程差是半波长的偶数倍，形成相互加强的亮纹；在另一些厚度的地方两列反射波的路程差是半波长的奇数倍，形成相互削弱的暗纹。教科书没有深入分析计算路程差和薄膜厚度的关系，也不涉及光从光疏介质中达到光密介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。

在“科学漫步”栏目中介绍了如何利用光的干涉检查仪器平整度，教学中注意引导学生弄清楚两列干涉光的来源。要弄清楚这一点，首先要明确薄膜的特征，其次要明确薄膜是空气薄膜。要认识到明暗条纹是等厚线或等高线，才能分析条纹的弯曲与被测面的凹凸关系。若条纹向左弯曲，说明该处向下凹；反之，若条纹向右弯曲，说明该处向上凸起。

**(3) 折射时的色散**

可参考以下教学片段进行教学。

**教学片段**

**分析折射时的色散**

演示：1. 三棱镜底面在下方

让学生注意观察各色光的排列顺序。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，根据折射定律讨论光在三棱镜两个侧面的折射，作出光通过三棱镜向底面偏折的光路。

演示时还可以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。

2. 三棱镜的底面在上方

问题：此时光带的红色端还会在最上端吗？让学生通过作光路图，作出自己的判断，最后用实验证明：无论棱镜的底面在下方还是上方，光通过三棱镜总是向底面偏折。

小结：从上面实验可以看到，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。由这个实验现象可知，同一介质中不同频率的光的光速不同。由公式 $n=\frac{c}{v}$ 可知，频率大的光在同一介质中的光速小，频率小的光在同一介质中的光速大。各色光在同一介质中的光速不一样，但在真空中却是一样的，即 $c=3\times10^8$ m/s。

教师在教学中还应注意：①我们通常所说的折射率是指波长为 589.3 nm 的黄光而言的，而不是各种色光的折射率的平均值。②光的颜色由频率决定。光由一种介质进入另一种介质，由于频率不改，则 $n=\frac{c}{v}=\frac{\lambda_0}{\lambda}$，由此可以判定有关色光在介质中的传播速度、波长、入射线与折射线偏折程度等问题。

### 3. 问题与练习

内容分析

本节练习题突出了难点内容，即薄膜干涉的色散。第 1 题复习了上一节中条纹间距的计算，第 2 题是用薄膜干涉的色散解释生活中的现象。这两题比较简单，学生也容易理解。第 3 题和第 4 题，结合牛顿环和等倾法检测平整度，加深了学生对干涉问题的进一步理解，同时也突出了理论知识与技术应用的结合，教师可以作适当的拓展。第 5 题考查学生对棱镜折射时的色散问题的理解。

解答与说明

1. 红色光波长最长，形成的亮条纹宽度最大，因而总在最外侧。

2. 肥皂泡的壁各处厚薄并不一样，在光照时发生薄膜干涉。不同的色光的干涉条纹间距是不同的，如果用白光照射，液膜上就会出现彩色条纹。

3. 若换成一个表面曲率半径更大的凸透镜，除中心点外各处的空气膜厚度均减小。要寻找与原厚度相同的位置，只能从中心处向外推移，故形成的干涉条纹的圆环半径增大。若改用波长更长的单色光照射，产生同样的亮条纹所需空气膜厚度增大，条纹向外移动，故条纹圆环半径增大。

4. (1) 因为形成同一条干涉条纹的两列反射波的路程差一定，而且路程差的一半恰好是薄膜的厚度，所以同一干涉条纹是等厚线。

(2) $\frac{\lambda}{2}$。

5. 解答如图 13-7。

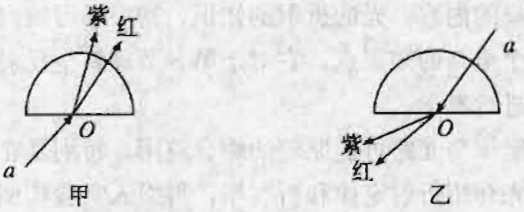



图 13-7

## 第 8 节　激光

### 1. 教学目标

(1) 了解激光的特点及其应用。

(2) 知道全息照相的原理，体验现代科技的神奇，培养对科学的兴趣。

### 2. 教材分析与教学建议

本节主要讲解激光的特点及其应用，以及全息照相技术。只要求学生对激光有所了解，知道激光和自然光的区别，但不给激光下定义，更不讲激光产生的机理。关于全息照相的原理，理解相位差是形成立体图像的根本原因。

由于课程标准对知识的要求仅限于“了解”层次，教学时可以参考“教学资源库”，让学生在老师的指导下自主学习。

### 3. 问题与练习

内容分析

练习题中第 1 至 3 题均考查学生对激光的特点的掌握，这是本节的重点。其中第 2、3 题还介绍了一些科普知识，有助于拓展学生的视野。

解答与说明

1. 可以将激光应用在检查物体表面平整度和全息照相技术等方面。

2. 利用了激光的平行度好的特点。

3. 可以利用激光束来切割、焊接以及在很硬的材料上打孔。医学上可以用激光作为“光刀”来切开皮肤、切除肿瘤，还可以用激光“焊接”剥落的视网膜。

4. 略。

## 三、教学设计案例

## 第 1 节　光的反射和折射

### 教学设计说明

本节主要讲光的折射定律和折射率的测定，它们是本章的重点，教学中要充分重视。教科

书首先回顾了光的反射定律的内容。光的折射的知识，初中学习的内容是很粗浅的，到这里要进一步深化。折射率是一个全新的知识点，它对于第3节理解全反射非常重要。由于本节容量较大，可以安排两个课时进行教学。

本节知识难点是折射定律与光路可逆原理的综合应用，特别是在求解折射率时，切忌死套公式。在教学的安排上，先介绍折射定律和折射率，再引入实验和例题，体现从基本知识到实际应用的过程。

学生对光的现象已有了一些简单的认识，对光学研究中的一些物理量已有初步的了解，如入射角、法线等，所以本节教学设计突出了观察、猜想、分析的学习方法，引导学生总结归纳出光的折射规律，培养学生对科学的好奇心与求知欲，同时也让学生体验探索自然规律的艰辛与喜悦。这一讨论过程一定要重点安排。

## 教学目标

(1) 认识光的反射及折射现象，知道法线、入射角、反射角和折射角。

(2) 理解折射定律，会利用折射定律解释相关光现象和计算有关问题。

(3) 理解折射率的概念，会自主完成测定玻璃折射率的实验。培养学生动手能力和对科学的好奇心与求知欲。

## 教学过程

第一课时

●导入新课

通过游戏引入新课。让自愿参与活动的学生站在玻璃水槽的一侧，从水面上迅速地刺水槽壁上的小气球，刺中为赢。引导学生在体验中发现问题：若叉子瞄准的是眼睛看到的气球的位置，是刺不到气球的；只有当叉子瞄准的方向略低于眼睛看到的位置，才可能成功。教师可以提问：是什么欺骗了我们的眼睛？从而引出课题：光的折射。

●进行新课

(一) 反射定律和折射定律

通过演示激光斜射入水（滴了几滴牛奶的热水）中，学生们可以观察到：光从空气斜射入水中时，传播方向发生了偏折，在水面处还同时发生了反射。引导学生回忆初中学过的光的反射定律。通过实验，再次强化学生对光的折射的感性认识，面对实验现象，建立物理模型，结合初中学过的光的反射，介绍入射光线、折射光线、法线、入射角、折射角等概念，为折射规律的探究打下基础。

让入射角缓慢减小至0（光线垂直射入水中），同学们观察折射角的情况。提出新的问题：光的折射遵循什么规律呢？为了定量研究，设计以下实验。

实验探究：

介绍探究所用的实验器材，包括激光器、半圆形玻璃砖、带有量角器的背板等，着重通过实验介绍光线经过半圆形玻璃砖的特点，如图13-8所示。

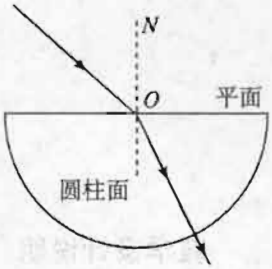


图13-8

(1) 当光从空气中斜射入半圆形玻璃砖的平面时，什么是入射光线、折射光线与法线？它们的空间位置关系如何？

通过实验观察，得出三条线的位置关系：折射光线与入射光线、

法线在同一平面内，折射光线与入射光线分居法线的两侧。

（2）当光从空气中垂直射入半圆形玻璃砖的平面（也就是入射光线与法线重合）时，入射角多大？折射角多大？

观察得出，折射光线的传播方向不变，即入射角为0°，折射角也为0°。

（3）当光从空气中斜射入半圆形玻璃砖的平面时，入射角逐渐增大，让学生观察现象。

学生归纳总结出入射角 $i$ 和折射角 $r$ 之间的关系：

①当光从空气斜射入玻璃介质时，折射角小于入射角；

②折射角随着入射角的增大而增大，随着入射角的减小而减小。

教师引导：折射角与入射角之间有什么定量关系？

（多媒体模拟演示实验）改变入射方向，记录每次变化的入射角及折射角的数据。课堂讨论，让学生充分发挥想象，提出猜想，再通过具体的实验数据分析，找出规律。

教师可以这样引导：

入射角与折射角成正比吗？入射角的平方与折射角的平方成正比吗？入射角与折射角之差是定值吗？它们之间的规律看来是不容易发现的。

教学目的：在探究过程中，学生对于光的折射规律提出大胆的猜想，然后通过实验、小组合作、全班交流得出规律，学生的思维发生碰撞，产生创造的火花。在整个实验探究的过程中，教师因势利导，层层追问，引出新的问题，引起学生进一步的思考。这个探究过程充分体现了科学探究活动的基本要素，学生获得了深层次的情感体验，也体会到科学家寻找科学规律的艰辛。

教师对学生的讨论作总结，并说明最终在1621年，由荷兰数学家斯涅耳分析了大量的数据后，成功找到了两者的关系，即折射角的正弦与入射角的正弦成正比。

（二）对折射定律的理解

很多学生容易认为只要发生光的折射，则其折射角一定小于入射角。教师可以通过光路可逆实验帮助学生提高辨别能力，纠正学生的错误想法。

提出问题：当光从空气中倾斜射入半圆形玻璃砖时，会发生偏折。那么如果让光沿着偏折的方向从半圆形玻璃砖射入空气中时，会按照原来入射的方向射出吗？（学生推测、猜想，可以提出自己的实验设计方案，以下的实验设计供教师参考。）

实验观察：让光从空气中倾斜射入半圆形玻璃砖的平面，改变入射角，让学生填写下面的表格：

| 入射角 $i$ | 30° | 40° | 50° | 60° |
|---|---|---|---|---|
| 折射角 $r$ | | | | |

再让光从半圆形玻璃砖倾斜射入空气中，调整入射方向，使其折射角的大小为第一次实验的入射角大小，记录下入射角，让学生填写下面的表格：

| 入射角 $i$ | | | | |
|---|---|---|---|---|
| 折射角 $r$ | 30° | 40° | 50° | 60° |

分析论证：从上面的实验中，我们发现表格中的数据在误差范围内相同，这说明光的折射遵循光路可逆。

教师提问：大家能应用光的折射规律解释生活中的一些简单现象吗？

呼应课前动手实验，解释为什么水中的物体看上去会变浅，继而引导学生分析解释其他生活中的折射现象，如大气的蒙气差现象等。

第二课时

●导入新课

上节课学习了折射定律及其应用，知道光从一种介质入射到另一种介质中时，入射角的正弦与折射角的正弦之比是一个常数。这个常数与介质的光学性质有关，称为折射率。这节课我们来学习折射率。

●进行新课

（一）折射率

光从一种介质射入另一种介质时，入射角的正弦跟折射角的正弦之比为一常数 $n$。对不同的介质来说，这个常数 $n$ 是不同的。展示几种介质的折射率 $n$。

| 几种介质的折射率 | | | |
|---|---|---|---|
| 金刚石 | 2.42 | 岩盐 | 1.55 |
| 二硫化碳 | 1.63 | 酒精 | 1.36 |
| 玻璃 | 1.5～1.8 | 水 | 1.33 |
| 水晶 | 1.55 | 空气 | 1.000 28 |

由上表可以看出，这个常数 $n$ 跟介质有关系，是一个反映介质的光学性质的物理量，我们把它叫做介质的折射率。折射率的定义式：

$$n=\frac{\sin i}{\sin r}$$

$i$ 是光线在真空中与法线之间的夹角，$r$ 是光线在介质中与法线之间的夹角。光从真空射入某种介质时的折射率，叫做该种介质的绝对折射率，也简称为折射率。

教师总结：

①当光由真空射入水中时，入射角和折射角是可以改变的，但是它们正弦值之比却是个常数。

②对不同的介质，比如光由真空射入玻璃时，入射角的正弦跟折射角的正弦之比也是个常数，它与光由真空射入水时的那个常数是不同的。不同的介质具有不同的常数，说明这个常数反映着介质的光学特性。

③教科书中给出的折射率属于绝对折射率。一般而言，光从介质 1 射入介质 2，入射角正弦与折射角正弦的比，叫做介质 2 对介质 1 的相对折射率。

研究表明，介质的折射率 $n$ 跟光在其中的传播速度 $v$ 有关：

$$n=\frac{c}{v}$$

教师总结：

①折射率没有单位。

②由于光在真空中的速度大于光在介质中的速度，所以折射率始终大于 1。

教师提问：是不是密度大的物质折射率就大？

学生讨论：比较各种物质的密度和折射率的大小，然后归纳、总结。比如，学生会发现水

的密度比酒精的密度大，但水的折射率却比酒精的折射率小。并且说明：折射率大小不仅反映了介质对光的折射本领，也反映了光在介质中传播速度的大小。其实，折射率大小不仅与介质有关，还与折射光的频率有关，这一点可以在第 7 节“折射时的色散”中向学生介绍。

（二）实验：测定玻璃的折射率

教师应结合教科书图 13.1-3 强调以下注意事项：

①玻璃砖的折射面 $a$、$a'$必须画准确，才能确定法线，从而准确地画出入射角和折射角。注意不能用玻璃砖界面代替直尺画线，避免划伤玻璃砖表面。可以用铅笔先在白纸上描出玻璃砖界面的两个点，当取下玻璃砖后再用直尺连成线。

②实验时，尽可能将大头针竖直地插在纸上，且 $A$ 和 $B$ 之间、$B$ 和 $O$ 之间、$C$ 和 $D$ 之间、$C$ 和 $O'$之间距离要稍大一些。观察重合的时候要看玻璃砖里面的像，而不是看玻璃砖上面的大头针的头部。

③入射角 $\theta_1$ 应适当大一些，以减小测量角度的误差。

④在实验的过程中玻璃砖与白纸的位置都不能改变，更不能用手触摸玻璃砖光洁的光学面。

⑤玻璃砖应选用宽度较大的，宜在 5 cm 以上。若宽度太小，则测量误差较大。

说明：对于测定玻璃的折射率，建议安排学生分组实验，让学生自己根据实验目的，选择适当的器材，安排科学、合理的实验步骤，培养学生分析问题、解决问题的能力。

●巩固提高

课后练习：

1. 光线从装满水的水池边缘以 30°的入射角射入水中，光照亮水池底部的点（忽略光线宽度）。该点到入射点水平距离为 0.22 m，水的折射率为$\frac{4}{3}$，求水池的高度。

2. 早晨看见太阳出现在地平线上，太阳真的在那里吗？进一步探究，如果地球表面没有大气层，那么观察到的日出时刻比实际是延后还是提前？

3. 开放性题目：写一篇题为“生活中的折射现象”的小论文。

## 四、教学资源库

### （一）概念、规律和背景资料

**1. 光学的研究对象、分支与应用**

光学是研究光的传播以及它和物质相互作用问题的学科。光学除了是物理学中一门重要的基础学科外，也是一门应用性很强的学科。光学的研究对象早已不限于可见光。在长期的发展过程中，光学里形成一套行之有效的特殊方法和仪器设备，它们可用之于日益宽广的电磁波段。光学与其他同电磁波打交道的学科（如无线电物理、原子和原子核物理）之间的界限，与其说是按波段，还不如说是按研究手段来划分。随着科学的发展，各学科相互交叉和渗透，其间界限愈来愈模糊了。

若不涉及光的发射和吸收等与物质相互作用过程的微观机制，光学在传统上分为两大部

分：当光的波长可视为极短，从而其波动效应不明显时，人们把光的能量看成是沿着一根根光线传播的，它们遵从直进、反射、折射等定律，这便是几何光学；研究光的波动性（干涉、衍射、偏振）的学科，称为物理光学（或波动光学）。光和物质相互作用的问题，通常是在分子或原子的尺度上研究的。在这领域内有时可用经典理论，有时则需用量子理论。对于这类原不属于传统光学的内容，有人冠之以“分子光学”和“量子光学”等名称，也有人把它们仍归于物理光学之内。

光学的应用十分广泛。几何光学本来就是为设计各种光学仪器而发展起来的专门学科。随着科学技术的进步，物理光学也愈来愈显示出它的威力。例如，光的干涉目前仍是精密测量中无可替代的手段，衍射光栅则是重要的分光仪器。光谱在人类认识物质的微观结构（如原子结构、分子结构等）方面曾起了关键性的作用，现在它不仅是化学分析中的先进方法，还为天文学家提供了关于星体的化学成分、温度、磁场、速度等大量信息。近40多年来，人们把数学、信息论与光的衍射结合起来，发展起一门新的学科——傅里叶光学，已被应用到信息处理、像质评价、光学计算等技术中。激光的发明，可以说是光学发展史上的一个革命性的里程碑。由于激光具有强度大、单色性好、方向性强等一系列独特的性能，自从它问世以来，很快就被运用到材料加工、精密测量、通信、全息检测、医疗、农业等极为广泛的技术领域，取得了优异的成绩。此外，激光还为同位素分离、催化、信息处理、受控核聚变，以及军事上的应用，取得了光辉的成果。

（摘自《新概念物理教程　光学》，赵凯华，高等教育出版社2004年11月第1版，有改动）

**2. 光的本性**

光是一种重要的自然现象。我们所以能够看到客观世界中斑驳陆离、瞬息万变的景象，是因为眼睛接收了物体发射、反射或散射的光。据统计，人类感官收到外部世界的总信息量中，至少有90%是通过眼睛的。由于光与人类生活和社会实践的密切联系，光学也和天文学、几何学、力学一样，是最早发展起来的学科之一。然而，在很长一个历史时期里，人类的光学知识仅限于一些现象和简单规律的描述。对光的本性的认真探讨，应该说是从17世纪开始的，当时有两个学说并立。一方面，以牛顿为代表的一些人提出了微粒理论，认为光是按照惯性定律沿直线飞行的微粒流。这个学说直接说明了光的直线传播定律，并能对光的反射和折射作一定的解释。但是，用微粒说研究光的折射定律时，得出了光在水中的速度比空气中大的错误结论。不过这一点在当时的科学技术条件下还不能通过实验测定来鉴别。光的微粒理论差不多统治了17、18两个世纪。另一方面，和牛顿同时代的惠更斯（C. Huygens）提出了光的波动理论，认为光是在一种特殊弹性介质中传播的机械波。这理论也解释了光的反射和折射等现象。然而惠更斯认为光是纵波，他的理论是很不完善的。19世纪初，托马斯·杨（Thomas Young）和菲涅耳（A. J. Fresnel）等人的实验和理论工作把光的波动理论大大推向前进，解释了光的干涉、衍射现象，初步测定了光的波长，并根据光的偏振现象确认光是横波。用光的波动理论研究光的折射，得出的结论是光在水中的速度应小于它在空气中的速度，这一点在1862年为傅科（J. B. L. Foucault）的实验所证实。因此，19世纪中叶，光的波动说战胜了微粒说，在比较坚实的基础上确立起来。

惠更斯—菲涅耳旧波动理论的弱点，和微粒理论一样，在于它们都带有机械论的色彩，把光现象看成某种机械运动过程。认为光是一种弹性波，就必须臆想一种特殊的弹性介质［历史上叫做“以太（aether）”］充满空间。为了不与观测事实抵触，还必须赋予以太极其矛盾的属性：密度极小和弹性模量极大。这不仅在实验上无法得到证实，理论上也显得荒唐。重要的突

破发生在19世纪60年代。麦克斯韦（J. C. Maxwell）在前人的基础上，建立起著名的电磁理论。这个理论预言了电磁波的存在，并指出电磁波的速度与光速相同。因此麦克斯韦确信光是一种电磁现象，即波长较短的电磁波。1888年赫兹（H. R. Hertz）实验发现了波长较长的电磁波——无线电波，它有反射、折射、干涉、衍射等与光波类似的性质。后来的科学实验又证明，红外线、紫外线和X射线等也都是电磁波，它们彼此的区别只是波长不同而已。光的电磁理论以大量无可辩驳的事实赢得了普遍的公认。

以上是经典物理学中光的微粒说与波动说之争的简短回顾，其中讨论的主要是光的传播，很少涉及光的发射和吸收。那时期光和物质的相互作用问题还没有怎么研究过，许多现象尚未发现。

19世纪末、20世纪初是物理学发生伟大革命的时代。从牛顿力学到麦克斯韦的电磁理论，经典物理学形成一套严整的理论体系。当时绝大部分物理学家深信，物理学中各种基本问题在原则上都已得到完美的解决，它的理论体系囊括了一切物理现象的基本规律，剩下的似乎只是解微分方程和具体应用的问题了。然而，正当人们欢庆这宏伟的经典物理学大厦落成的时候，一个个使经典物理学理论陷入窘境的惊人发现接踵而来。1887年迈克耳孙（A. A. Michelson）和莫雷（E. W. Morley）利用光的干涉效应，试图探测地球在“以太”中的绝对运动。他们得到否定的结果，从而动摇了作为光波（电磁波）载体的“以太”假说，以“静止以太”为背景的绝对时空观遇到了根本性的困难。随后瑞利（J. W. S. Rayleigh）和金斯（J. H. Jeans）根据经典统计力学和电磁波理论，导出黑体辐射公式，该公式要求辐射能量随频率的增长而趋于无穷大。当时物理学界的权威开尔文爵士（Lord Kelvin）把光以太和能均分定理的困难比喻作笼罩在物理学晴朗天空中的两朵乌云。从后来物理学的发展看来，这两朵“乌云”正预示着近代物理学两个革命性的重大理论——相对论和量子论的诞生。有趣的是，这两个问题恰好都与光学有关。

现在让我们回到光的本性问题上来。为了解决黑体辐射理论中的矛盾，1900年普朗克（M. Planck）提出了量子假说，认为各种频率的电磁波（包括光），只能像微粒似地以一定最小份额的能量（称为能量子）发生。这是一个光的发射问题。另一个显示光的微粒性的重要发现是光电效应，即光照射在金属表面上可使电子逸出，逸出电子的能量与光的强度无关，但与光的频率有关，这是一个光的吸收问题。1905年爱因斯坦发展了光的量子理论，成功地解释了这个效应。光究竟是微粒还是波动？这个古老的争论重新摆在了我们的面前。

其实，“粒子”和“波动”都是经典物理的概念。近代科学实践证明，光是个十分复杂的客体。对于它的本性问题，只能用它所表现的性质和规律来回答：光的某些方面的行为像经典的“波动”，另一些方面的行为却像经典的“粒子”。这就是所谓“光的波粒二象性”。任何经典的概念都不能完全概括光的本性。

（摘自《新概念物理教程　光学》，赵凯华，高等教育出版社2004年第1版）

**3. 光的波动说**

关于光的本性，早期主张波动说的主要是格里马第、惠更斯和胡克，他们对此进行了研究和发展。

格里马第最早明确地提出光的波动说。当他发现光的衍射现象，即光线并不沿着直线传播时，他设想，光是一种做波浪状运动的精细流体，这种流体能以极大但有限的速度漫射，通过透明体；衍射现象中的色带就如同一块石头投入水中所形成的圆形波状。此外，他对颜色和色觉的解释也都用到波浪式流动的流体的比拟。由于是波浪式的流体，影子的边缘就必然是模糊

的和有影像的，就像水波碰到障碍物时会绕过去一样。

胡克的波动理论与他的颜色研究相关，认为光是类似水波的快速脉冲。在1665年出版的《显微术》中，胡克注意到金刚石受到摩擦、打击和加热时在黑暗中会发光的现象，并以此为根据认为，“光必定是一种振动”，并且是一种快速的小振幅的振动。关于光波扩散，胡克写道：“在一种均匀媒质中这一运动在各个方面都以相等的速度传播。所以发光体的每一脉动或振动都必将形成一个球面。这个球面将不断地扩大，就如同把一石块投入水中后在水面一点周围的环状波膨胀为越来越大的圆圈一样（尽管肯定要快得多）。由此可知，在均匀媒质中扰动起来的这些球面的一切部分都与射线成直角。”这样看来，光是由发光体的振动在媒质中引起的一系列与射线成直角的球形脉冲的扩散。这实际上已提出了波前或波面的概念。

在胡克之后，惠更斯对光的波动说作了有益的扩展。1678年，他向法国科学院提交报告《论光》（于1690年出版）。他认为，如果怀疑“光是某种物质的运动”，那是无法想象的。他还明确地提出，光是发光体中微小粒子的振动，在弥漫于宇宙空间的以太中传播的波动过程。这样，他明确将“以太”概念引入光学研究中。以太作为一种媒质传输光脉冲，它是以极高和有限的速度传播的。当惠更斯首先计算出光速之后，又设想传播光的以太粒子应是极硬的和富于弹性的。为此他写道：“除非假设以太物质的弹性，它的微粒才会具有迅速恢复原状的性质，而不论它们是否或强或弱地被推开。因此，光将总是依照同一速度传播。”他还指出，光线可以各自传输而彼此间毫无影响，“当我们看到一个发光体时，光线不可能像射弹或箭穿过空气那种方式，由物质从发光体传给我们”。

惠更斯认为，光是波动，传播波的物质的每一个微粒，应当不仅朝沿亮点出发的直线上的下一个微粒传递其运动，而且必定朝所有与它相邻和背向运动的微粒传递。因此可以得出：“围绕每一个微粒，都有一个以该微粒为中心的波产生。”这就是著名的“惠更斯原理”。惠更斯还具体地说明了这一原理，他结合图13-9写道：“若$DCF$是以亮点$A$为中心发出的波，在球$DCF$内的微粒$B$发出其分波为$KCL$，它将在由$A$发出的主波到达$DCF$的同时，与波$DCF$在$C$点相遇。显然，波$KCL$上的只有区域$C$才与波$DCF$相遇，即只在$AB$的连线上相遇。同样，球$DCF$内的其他微粒，譬如$bb$、$dd$等，也会产生它们自己的波。不过这些波中的每一个单独与波$DCF$相比起来，可能是极其微弱的，$DCF$是由所有波的离中心$A$点最远的表面部分组成的。从图中可见，由一点产生的光波是以球面波的形式传输的，每个子波也都是下一个球面波的中心，而这些子波的波前的包络面就是点波源的新波前。”

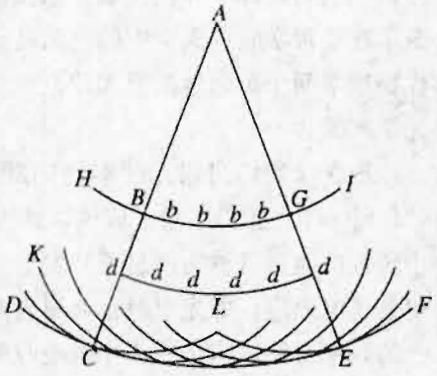


图13-9

惠更斯还利用新的原理绘出了反射和寻常折射的图形，并导出了折射定律，以及光波在不同媒质中传输速度的比值。这个比值与费马的推导结果一致，但与笛卡儿和牛顿的结果不同。在解释光通过透明固体的现象时，他设想：“光波是由均匀地填充透明物体间隙的以太物质传递的。由于光波连续自由地穿过透明体，所以透明体始终充满着以太。”因此，以太充满于固体微粒的孔隙，当光通过以太传播时，由于必须绕过固体微粒而比在自由空间传播慢得多，所以光在透明媒质中比在真空中行进要慢。

在解释双折射现象时，惠更斯认为，光通过以太微粒，同时也通过晶体物质微粒，以太微

粒对光波的传输有影响，并形成一个球面波（即寻常光线）；而晶体中规则排列的微粒都是椭球体，它们也对光波的传输产生影响，并形成一个椭球面波（即非寻常光线）。这样，光波在方解石晶体中的传输形成了两个不同波阵面。但是，如果光波连续通过两个方解石晶体时，会产生4条光线；当两个晶体相互平行放置时，在第一块晶体中形成的双光线，在第二块晶体中这些光线并不进一步分开，而是平行地通过这块晶体；当相互垂直放置时，两个晶体中的寻常光线与非寻常光线会相互交换（图13-10）。适当放置第二块方解石，双折射现象还会消失，就只有一根射出。对此，惠更斯的波动理论是难以作出解释的。因此惠更斯写道："看来似乎有必要在我刚才所作的假定之外，再作进一步的假定，经过这么多次的试验所证实了的假定，不会因此而失去它们的可行性。"

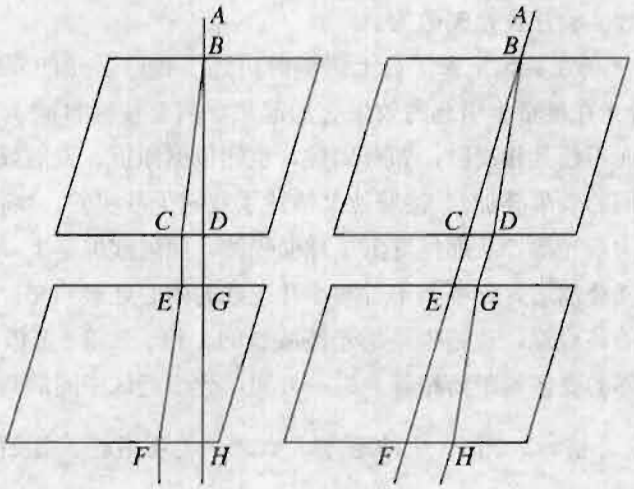



图13-10

此外，对于影子边缘的色带和薄膜颜色，惠更斯也是难以作出解释的，因此波动说同微粒说相比就处在劣势的地位。作为波动说的主干——惠更斯的波动理论是有缺陷的，如他的波是纵波（不是横波），而且是脉冲波；惠更斯也未考虑干涉现象和颜色现象，特别是波动理论的数学基础还比较薄弱。

总起来讲，波动说的困难在于它难以解释光的直线传播这一基本事实；不能解释偏振现象，不能圆满地解释双折射现象；传输光波的以太物质也是值得怀疑的。在18世纪的光学发展中，由于牛顿力学的成功，而符合牛顿力学理论的光微粒在描述光现象上逐渐占据了统治地位，波动说就无足轻重了。

（摘自《物理学史教程》，李艳平、申先甲主编，科学出版社2003年1月第1版，有改动）

**4. 托马斯·杨的研究**

托马斯·杨是从对水波的研究中得到"干涉"概念的。他写道："设想有一组水波，它们以某个不变的速度沿平静的湖面运动，并进入一个狭窄的水道，水道是与湖相连通的。现在我们再设想，在某个因素的作用下形成了另一组同样的波，它与第一组波一样，以相同的速度到达该水道。这两组波并不相互干扰，它们的作用将结合在一起。如果它们到达水道时，一组波的波峰与另一组波的波峰相重合，那么将形成一组波峰更高的波。但如果一组波的波峰与另一组波的波谷相重合，那么波峰恰好填满波谷，水面将保持平静。我假设，如果以与此相同的方式将两束光混合在一起，则每次都会出现类似的效应。我把这一现象称为光的干涉现象。"借助干涉原理，托马斯·杨对牛顿环作出了解释，即在透镜与玻璃之间形成一个空气层，光线在

空气层的上下表面反射的两束光相互叠加就产生了干涉现象。具体地讲，“当有不同起源的两个振动运动，或者完全相同，或者在方向上很接近时，那么它们的共同作用等于它们每一个振动单独所发生的作用之和”，这就对干涉原理和相干条件作了较完整的表述。为了进一步说明干涉理论，他还用紫外线做实验。由于紫外线是不可见光，他让紫外光线反射在涂有氯化银溶液的纸上，结果出现了黑环，从而证明了他的干涉原理。

1801年，托马斯·杨在《哲学杂志》上发表的论文中很完整地阐述了干涉原理：“当同一束光的两部分从不同的路径，精确地或非常接近地沿同一方向进入人眼，则在光线的路程差是某一长度的整数倍处，光将最强，而在干涉区之间的中间带则最弱，这一长度对于不同颜色的光是不同的。”托马斯·杨还明确地指出，相互叠加的两部分光必须是发自同一光源。如果不能满足这个条件，干涉实验往往是失败的。

1802年，托马斯·杨在英国皇家学会上讲演时讲述了自己所做的双缝干涉实验，并且强调说：“为使这两部分光在屏幕上引起的效果叠加起来，需要使来自同一光源、经过不同路径的光到达同一区域，而不使其相离散；如有离散，也能根据回折、发射或折射把光从一方或从两方重合起来，将它们的效果叠加。”接着他又描述了双缝干涉实验：“将平行光通过两个相距很近的针孔，针孔作为新光源，从那里发出了球面光波，照射到屏幕上，光的暗影对称地向两侧散开……这两部分光叠加后，屏幕上正对两小孔连线的中心处最明亮。两侧部分，光从两个小孔到达各点有一定的路程差，若路程差是光波波长的1倍、2倍、3倍……则屏幕上的这些地方为亮区，并且相邻的亮区间距离相等。另一方面，介于亮区中间的暗区，则对应于路程差为光波波长的$\frac{1}{2}$倍、$1\frac{1}{2}$倍、$2\frac{1}{2}$倍……的地方。”此外，他还测定了光波的波长。“比较各次实验，看来空气中极红端的波的宽度约为$\frac{1}{36\,000}$英寸，而极紫端则为$\frac{1}{60\,000}$英寸。”这里的“波的宽度”就是波长，折合成现代的数据，约为$7.1\times10^{-7}$ m（红光）和$4.2\times10^{-7}$m（紫光）。托马斯·杨首次实现了用实验方法测得可见光的波长。

（摘自《物理学史教程》，李艳平、申先甲主编，科学出版社2003年1月第1版，有改动）

**5. 菲涅耳的贡献**

与托马斯·杨不一样，菲涅耳（Augustin Jean Fresnel，1788—1827）不是神童。据说，托马斯·杨在2岁时就能阅读，而菲涅耳直到8岁才开始认字，但他的才智随着年龄的增长而日渐卓越。菲涅耳的职业是工程师，但后来（1814）他转而对光学发生了兴趣，并且独立地做了托马斯·杨所做过的实验，并比托马斯·杨的实验有所进步。据说，阿拉果看到菲涅耳的报告之后，就转向了波动说，同时提醒菲涅耳注意托马斯·杨的实验。在阿拉果的鼓励下，菲涅耳加快了他的研究进度，并且最终为波动说提供了一个坚实的数学基础。

最初，菲涅耳将一根细直而光滑的线放在点光源发出的光束中，在屏上显现出彩色条纹。他精确测量了从光束轴线到诸条纹的距离，并且注意到，当通过细丝一侧的光到达屏之前被别的物体挡住时，屏上影内的光带就消失了。正是这个实验使菲涅耳领悟到干涉原理，可是当时有许多科学家否认这与干涉有关，并用流行的观点来解释衍射现象。

1815年10月，菲涅耳向科学院提交了关于衍射的研究报告。在这篇报告中，除了衍射的实验之外，他还提出了惠更斯—菲涅耳原理。为此，他写道：“在任何一点的光源振动可以看做在同一时刻传播到那一点上的光的元振动的总和，这些元振动来自所考察的未受阻拦的波的所有部分在它以前位置的任何一点的各个作用。”在菲涅耳的研究中，他采用了惠更斯的子波

概念，并加以完善，使子波具有了频率、振幅和相位等内容，从而使光的衍射理论更加完善。

为了说明干涉原理，菲涅耳又设计了新的实验，即双光干涉实验。他使两个平面镜并接起来，交接的角度略小于180°。两面平面镜对一较小光源反射，便可得到两束相干光，在屏上产生了清晰的干涉条纹。由于完全避开衍射作用，光的干涉得到了充分的肯定。

双光干涉的研究是菲涅耳对光学发展的一个重要的贡献，得到阿拉果的支持，并使阿拉果成为法国学术界转而皈依波动说的第一人。

除了实验研究，菲涅耳也试图在数学推导上有所作为，但他当初的推导还不够严密，并且拉普拉斯和泊松等人对波动理论未予重视。这样，菲涅耳决心在实验与理论上作更精密的研究。

在计算衍射花纹时，菲涅耳提出了半波带法，结合惠更斯－菲涅耳原理，可以精确地计算出光通过圆边、直边等形状的孔发生的衍射情况。此外，他还利用惠更斯－菲涅耳原理，克服了惠更斯关于子波形成包络的局限，成功地证明了光是沿直线传播的。这就成功地消除了波动说的一个极大的困难，对确立波动说具有重要的意义。

在马吕斯等人发现偏振现象之后，一开始托马斯·杨也不能解释。到1817年，托马斯·杨提出了新的观点，即光波与声波的不同之处在于，光波是像水波那样的横波，他向阿拉果表达了自己的观点，在给阿拉果的信中，他写道："波动说可以解释横向振动也在径向方向上以相等速度传播，但粒子的运动是在相对于径向的某个恒定方向上，而这就是偏振。"阿拉果将此信转告菲涅耳，菲涅耳很快就以横波观点为基础，推导出光的反射和折射的振幅公式，即菲涅耳公式，并且与后来根据电动力学理论导出的公式完全一致。新的理论最重要的成就是解释了当时惠更斯不能解释的双折射现象。菲涅耳认为，双折射中的两道光线，一道光线在某个平面内振动，另一道光线在一个与前面的平面垂直的平面内振动。当这两道光线发生折射时，其折射角就不一样。也就是说，这两束光线的性质不同，所以发生的折射也不一样。菲涅耳公式是现代薄膜光学中最基本的公式之一，因此这一公式的建立也是菲涅耳对光学的重大贡献之一。

光的波动说也像其他科学理论一样，除了解释现有的现象之外，还应具有某些"预测"的能力，借此以"判决"其理论的正确与错误。这样的判决发生在1818年，当时法国科学院悬赏以发展衍射理论，希望能用微粒说来解释衍射现象。尽管开始菲涅耳并没有多大兴趣，但在阿拉果和安培的鼓励下，菲涅耳向科学院提交了论文。菲涅耳的论文果然使评奖委员会的人员大吃一惊，他们没有想到一位不知名的学者竟然写出来如此好的文章。评审是很严格的，当时的著名学者泊松提出了一个"判决"式的问题，即按菲涅耳公式来推导，是否可以得到一个更令人大吃一惊的结果：在一个盘后的一定距离上放置屏幕，光线可在屏幕上形成的影子中心出现亮点。泊松认为，这样的结果是荒谬的，这是不可能的。菲涅耳和阿拉果接受了挑战，他们进行了精密的实验，结果泊松根据菲涅耳理论作出的"预言"被证实了。这个"预言"轰动了科学院，并且迎来了波动说的辉煌胜利。

1819年，菲涅耳与阿拉果合作进行了验证光是横波的观点的实验。他们将单色光射向杨氏双缝，其后的两条光路上各放置一个起偏器，观察屏幕上形成的干涉条纹变化情况。结果令人信服地证明，光是横波。

由于菲涅耳在光学研究上的成就，他被誉为"物理光学的缔造者"。在这一缔造过程中，我们也不应忽视阿拉果的作用，尽管他曾一度在光是横波的观点面前有过犹豫。正是他介绍了菲涅耳的研究工作，并使菲涅耳注意到托马斯·杨的研究工作；阿拉果还将托马斯·杨关于横

波的观点及时地转告菲涅耳，并使他们建立了良好的合作关系。

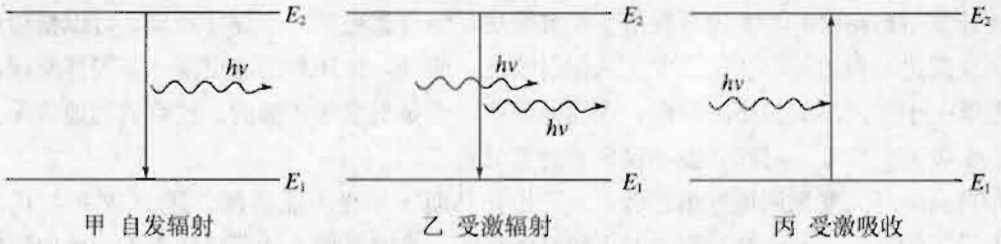
（摘自《物理学史教程》，李艳平、申先甲主编，科学出版社2003年1月第1版，有改动）

**6. 激光**

（1）自发辐射、受激辐射和受激吸收

设 $E_1$ 和 $E_2$ 是原子中电子的两个能级（见图13-11），当电子从高能级 $E_2$ 向低能级 $E_1$ 跃迁时，它将发射一个光子；从低能级 $E_1$ 向高能级 $E_2$ 跃迁时吸收一个光子。根据玻尔频率条件

$$\nu=\frac{E_2-E_1}{h}$$




甲 自发辐射　　乙 受激辐射　　丙 受激吸收

图13-11　辐射和吸收的三种过程

1917年爱因斯坦提出来，光的发射过程实际上有两种。一是在没有外来光子的情况下，处在高能级的原子有一定的概率自发地向低能级跃迁，从而发出一个光子来，这种过程叫做自发辐射过程（图13-11甲）。另一发射过程是在满足玻尔频率条件的外来光子的激励下高能级的原子向低能级跃迁，并发出另一个同频率的光子来，这种过程叫做受激辐射过程（图13-11乙）。自发辐射是个随机过程，处在高能级的原子什么时候自发地发射光子带有偶然性，所以气体中各原子在自发辐射过程中发出的光子（也可以说是光波），其相位、偏振状态、传播方向都没有确定的联系。换句话说，自发辐射的光波是非相干的。然而受激辐射的光波，其频率、相位、偏振状态和传播方向都与外来的光波相同。

光的吸收过程（参见图13-11丙）与受激辐射过程一样，都是在满足玻尔频率条件的外来光子的激励下才发生的跃迁过程，所以吸收过程也叫受激吸收过程，或简称吸收过程。

激光（laser）是“用辐射的受激发射产生光的放大（light amplification by stimulated emission of radiation）”这一词组的缩写，光的受激辐射是激光的理论基础。

（2）粒子数反转

气体中原子在各能级上有一定的统计分布。在一定的温度 $T$ 下原子中的电子处在不同能级上的概率是不相等的。在热平衡的状态下处于高能级上的原子比处于低能级上的原子少，处于基态上的原子最多。

激光的产生是要使光场中特定传播方向、特定频率和特定偏振态的相干光子数量增加。自发发射的光子是不相干的，这里只要考虑相干过程，即受激吸收和受激发射过程。在满足玻尔频率条件的外来光束照射下，两能级间受激吸收和受激发射这两个相反的过程总是同时存在、相互竞争，其宏观效果是二者之差。受激吸收过程正比于原来处于低能级 $E_1$ 上的原子数 $N_1$，受激发射过程正比于原来处于高能级 $E_2$ 上的原子数 $N_2$，在热平衡的状态下 $N_2<N_1$，受激吸收过程比受激发射过程强，外来的光强逐渐减弱。要想实现光的放大，必须设法使处于高能级 $E_2$ 上的原子数 $N_2$ 大于处于低能级 $E_1$ 上的原子数 $N_1$，这就是所谓粒子数反转。

造成粒子数反转的办法是靠某种外来的能源把低能级上的粒子抽运（pump）到高能级上

去。由于存在自发发射，处在激发态上的原子会返回基态或比它低的能级上。我们说，激发态能级有一定的“寿命”，一般激发态的寿命具有 $10^{-8}$ s 的数量级。这样短的寿命给粒子数反转的实现带来很大的困难。有些激发态的能级寿命特别长，可达 $10^{-3}$ s 甚至 1 s，这种寿命特别长的激发态叫亚稳态。亚稳态对激光的获得有着特殊的重要意义。

能产生粒子数反转的介质称为激活介质，通常在激光器中利用的有三能级的和四能级的激活介质，我们以三能级的激活介质为例来说明产生粒子数反转的机制。在图 13-12 中，$E_1$ 为基态，$E_3$ 和 $E_2$ 为激发态，其中 $E_2$ 为亚稳态，粒子在 $E_2$ 上的寿命比粒子在 $E_3$ 上的寿命要长得多。在外界能源（电源或光源）的激励下，基态 $E_1$ 上的粒子被抽运到激发态 $E_3$ 上，因而 $E_1$ 上的粒子数 $N_1$ 减少。由于 $E_3$ 态的寿命很短，粒子将通过碰撞很快地以无辐射跃迁的方式转移到亚稳态 $E_2$ 上。由于 $E_2$ 态寿命长，其上就累积了大量粒子，即 $N_2$ 不断增加。一方面是 $N_1$ 减少，另一方面是 $N_2$ 增加，以至 $N_2$ 大于 $N_1$，于是实现了亚稳态 $E_2$ 与基态 $E_1$ 间的粒子数反转分布。

图 13-12　三能级激活介质的工作模式

（3）共振腔与光放大

实现了反转分布的激活介质，可以做成光放大器，但其本身还不成为一台激光器，这是因为在激活介质内部来源于自发发射的初始光信号是杂乱无章的，在这些光信号的激励下得到放大的受激发射仍是随机的（图 13-13）。为了获得方向单一和单色性很好的受激发射，必须在激活介质的两端安置相互平行的反射面（图 13-14）。这对反射面构成了光学共振腔。

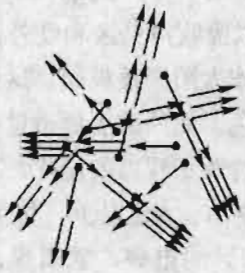


图 13-13　无共振腔时受激发射

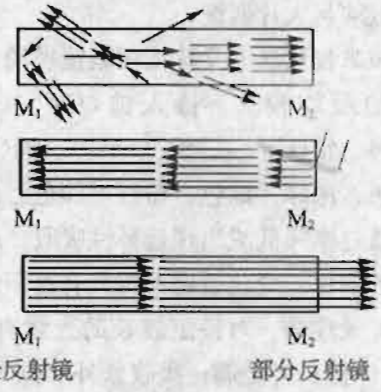


图 13-14　共振腔对光束方向的选择性

在理想的情况下，共振腔的两个反射面之一的反射率应是 100%。为了让激光输出，另一个是部分反射的，但反射率也要相当高。一般地说，两反射面既可以是平面，也可以是凹球面，或一平一凹。为了简单起见，在这里我们只讨论平面共振腔的情况。

如图 13-14，一对互相平行的反射镜 $M_1$ 和 $M_2$ 组成平面共振腔。只有与反射镜轴向平行的光束能在激活介质内来回反射，连锁式地放大，最后形成稳定的强光光束，从部分反射镜 $M_2$ 面输出。凡偏离轴向的那些光线，则或者直接逸出腔外，或者经几次来回，最终跑了出去，它们不可能成为稳定的光束保持下来。总之，共振腔对光束方向具有选择性，使受激辐射集中于特定的方向，激光光束很高的方向性就来源于此。

## （二）联系生活、科技和社会资料

**1. 光学眼镜玻璃**

用于制造各种眼镜镜片的光学玻璃，可以分为矫正视力用眼镜玻璃、遮阳用眼镜玻璃和工业保护目镜玻璃。

*矫正视力用眼镜玻璃* 其所制眼镜与眼睛构成一个光学系统，玻璃材料的选择必须利于消除光学系统的各种缺陷。常用的玻璃有以下5种。①白冕、钠钙、冕牌或钡冕玻璃：折射率$n_D$为1.523或1.53、阿贝数$v_D$约为58。典型的白冕或白托眼镜玻璃的组成为：$SiO_2$70.6%、$Na_2O$11.1%、$K_2O$5.2%、CaO11.9%、$Sb_2O_3$0.6%、$TiO_2$0.6%，能吸收波长短于320 nm的紫外线。②克罗克斯眼镜玻璃：用氧化钕和氧化铈着色的玻璃，吸收345 nm以下的紫外线，在580 nm有一显著的吸收峰，在日光和钨丝灯下呈现出不同颜色的双色效应。③克罗赛脱眼镜玻璃：一种掺硒的玻璃，吸收320 nm以下的紫外线，可见区平均透过率85%，呈淡红色，有利于防眩。④高折射率、低密度眼镜玻璃：又称超薄眼镜玻璃。由于高屈光度眼镜片较厚、曲率半径小而影响成像质量，故发展出高折射率（$n_D=1.60\sim1.80$）、低密度（$\rho=2.6\sim3.5\ g/cm^3$）玻璃。典型产品光学参数为：$n_D$为1.70，$v_D$为30，密度为2.99 $g/cm^3$。常采用密度较小的钙硼硅酸盐系统，引入较多的$TiO_2$、$La_2O_3$、$Nb_2O_5$等折射率高、阿贝数大、密度低的组分。也可加入着色剂以改变玻璃的颜色。⑤双焦眼镜玻璃：在完成研磨的眼镜片上用加热方法粘贴软化点低、折射率高的小片，并与大片一起完成最后加工。小片采用轻火石、火石或钡火石玻璃，膨胀系数须与大片匹配。

*遮阳眼镜玻璃* 又称太阳眼镜玻璃。对可见光区各波长的光线具有相似的吸收，紫外和红外光区的吸收较大。掺入铈（$Ce^{3+}$）、钛（$Ti^{4+}$），以吸收紫外区光线；掺入铬（$Cr^{3+}$）、铁（$Fe^{3+}$）、钴（$Co^{3+}$）、镍（$Ni^{2+}$）、铜（$Cu^{2+}$）、铁（$Fe^{2+}$），以吸收可见区和红外区光线。常用玻璃有灰、深绿、棕色、粉红等颜色。此外变色玻璃也可用作太阳眼镜玻璃。这种玻璃在阳光照射下透过率降低或出现选择性吸收，玻璃呈现淡棕色或灰色。光照减弱后透过率增加，恢复到原来的颜色。变色玻璃不仅具有遮阳玻璃的性能，又可作为矫正视力的镜片。

*护目镜玻璃* 对特定波长的光线有选择地吸收。有吸收500 nm以下、可见区平均透过1%的气焊护目镜玻璃；吸收紫外和红外线，可见区透过0.1%的电焊、氩弧焊、等离子切割防护镜玻璃；吸收紫外和500～600 nm、消除眩光的工业炉护目镜玻璃；吸收600 nm以下，硒硫化镉着色的X光透视设备用的深红色护目镜玻璃；对不同激光波长有强烈吸收的激光防护镜玻璃等。

**2. 光学纤维**

使光以波导方式传输的纤维状光学介质材料，又称光导纤维，常简称光纤。最先实用化的光学纤维是多组分硅酸盐玻璃纤维，它采用棒管复合法拉制而成。其光损耗系数约为200～1000 dB/km。通过工艺控制入射光点和出射光点的纤维排列完全相关一致，便可获得传像光纤，制作医用胃窥镜和工业用内腔窥镜等。

光学纤维的发展和大量应用始于20世纪70年代，即用气相沉积法制备出石英玻璃纤维以后，这种玻璃纤维的光损耗系数降至20 dB/km，并由此实现了光纤通信技术。此后10年内，石英玻璃光纤的光损耗系数又下降到低于十分之一，其成本也下降到低于十分之一，从而使光纤通信代替了部分同轴电缆和微波通信。在低损耗石英玻璃光纤的基础上，利用外场（温度、

压力、电场、磁场等）作用下引起的光纤光学性质变化可以产生传感作用，又开发出传感光纤。其灵敏度高，抗干扰性强，可制作探测器件。此外，低光损耗的光导纤维也是理想的传能介质，掺杂的玻璃光纤又可用作激光光纤。由这些光纤所构成的一类功能光纤，伴随着通信光纤的广泛应用也得到了发展和应用。

结构和原理　光学纤维由纤芯和包层两部分组成。芯子一般由高折射率的石英玻璃或多组分光学玻璃制成，包层由低折射率的玻璃或塑料制成（见图 13-15）。形成波导传输的纤维结构有阶跃（折射率）型和梯度（折射率）型两种。阶跃型光导纤维的芯子与包层间折射率是阶梯状的，入射光线在纤芯和包层间界面产生的全反射呈锯齿状曲折前进。梯度型光导纤维的纤芯折射率从中心轴线开始向径向逐渐减小，因此入射光线进入光纤后，偏离中心轴线的光将呈曲线路径向中心集束传输。由于光束在梯度型光纤中传播时，形成周期性的会聚和发散，呈波浪式曲线前进，故梯度型光纤又称聚焦型光纤。

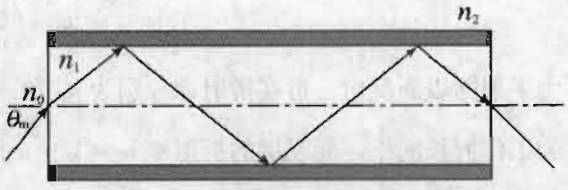


图 13-15　光学纤维结构

光在光纤中传导依据全反射原理。其集光能力用数值孔径（$NA$）表示，即 $NA=n_0\sin\theta_m=(n_1^2-n_2^2)^{1/2}$。式中 $n_0$ 为原介质的折射率，$n_1$ 为纤芯的折射率，$n_2$ 为包层的折射率，$\theta_m$ 为入射角度。

特性　光学纤维主要具有以下三方面特性。

①传输模式：光学上把具有一定频率、一定的偏振状态和传播方向的光波称做光波的一种模式。光导纤维的传输模式是指它所能传输的光波的模式。若一种光导纤维只允许传输一个模式的光波，称为单模光导纤维；若允许同时传输多个模式的光波，称为多模光导纤维。

②损耗特性：光导纤维的损耗包括吸收损耗和散射损耗。吸收损耗由本征吸收和杂质吸收组成。散射损耗由本征散射和宏观缺陷散射组成。本征吸收是介质中的原子或离子的电子跃迁引起的紫外吸收和分子振动引起的红外吸收。本征散射主要为瑞利散射。杂质吸收是纤维中的过渡金属离子吸收（主要在可见光和近红外区域）和阴离子（如羟基 $OH^-$）红外吸收。宏观散射主要由材料中的气泡、条纹、析晶颗粒等引起。

③色散特性：光导纤维的色散由材料色散、波导色散和模间色散组成。材料色散是指不同波长的光在介质中折射率不一样，用数学式表达为 $n=f(\lambda)$，即介质的折射率 $n$ 是波长 $\lambda$ 的函数。波导色散是指传输模的群速度对光源光频不是常数。模间色散是指各个模之间的群速度不同所产生的传输时间差。材料色散和波导色散存在于所有光导纤维中，模间色散只存在于多模光纤中。

种类　光学纤维种类繁多，通常按化学组成分为石英玻璃光纤、卤化物光纤、硫系玻璃光纤和塑料光纤。还可按晶体结构分为单晶光纤和多晶光纤，按应用分为通信光纤和功能光纤。通信光纤是光学纤维最主要的应用领域，已形成产业。功能光纤又分为传感光纤，主要用于制作光纤传感器；传光光纤，主要用于光电信号控制和激光传输，已在输变电工业电网上及激光加工、激光医疗等设备上获得应用；激光光纤为掺杂的光学纤维，主要用作光纤放大器和光纤激光器，是近年来发展最快的一种光学纤维。

**3. 光学增透膜**

沉积在光学元件表面以减少表面反射，增加光学系统透射的一类光学薄膜，又称减反射膜。在各类光学薄膜中，增透膜的历史最久，应用最普遍。按照膜的层数可分为单层增透膜、

双层增透膜、三层增透膜和多层增透膜；按照要求的波带范围可分为单波长增透膜、多波长增透膜和宽带增透镜。增透膜的工作波段从极紫外区一直到远红外区。由于大部分光学仪器工作在人的视觉范围内，所以可见波段的增透膜应用最为广泛。

当光线从折射率为 $n_0$ 的介质垂直入射到折射率为 $n_s$ 的介质时，其表面的反射率 $R$ 为

$$R=\left(\frac{n_0-n_s}{n_0+n_s}\right)^2$$

为了消除表面反射，可在折射率分别为 $n_0$ 和 $n_s$ 的介质之间加入一层薄膜。当膜层的光学厚度为工作波长的$\frac{1}{4}$，而膜层的折射率 $n_1=\sqrt{n_0 n_s}$ 时，则在波长 $\lambda$ 处反射率为 0。对常用的冕牌光学玻璃，$n_s=1.52$，$n_0=1$，则实现消反射的条件为 $n_1=1.23$。由于能够选择的薄膜材料有限，一般用单层膜实现光学表面的消反射是困难的，只能达到一定程度的减反射。常用的单层膜材料有 $MgF_2$，它可使冕牌玻璃的表面反射从 4% 下降到 1.3%。进一步降低反射率就需要双层增透膜。

对$\frac{\lambda}{4}$膜系，用双层增透膜达到消反射的折射率条件为

$$\frac{n_1}{n_2}=\sqrt{\frac{n_0}{n_s}}$$

式中 $n_1$、$n_2$ 分别为第一、第二层薄膜的折射率。由于有两种材料可供选择，用双层增透膜达到消反射的目的要容易得多。考虑到性能优良的薄膜材料很少，更多的双层增透膜是选定材料优化膜层厚度来满足光学要求。适当的选择双层增透膜的参数，可以展宽增透波区。但多数宽带增透膜是由三层以上的膜层构成的。例如由 $MgF_2$-$ZrO_2$-$Al_2O_3$ 构成的冕牌玻璃上的增透膜，其膜系选为$\frac{\lambda_0}{4}$-$\frac{\lambda_0}{2}$-$\frac{\lambda_0}{4}$（$\lambda_0=508$ nm）时，在可见光波段的剩余反射可以降到 0.5% 以下。

在有些光学技术中（例如激光），倍频和可调谐技术常常要求多波长或宽带加多波长增透膜。对于倍频技术，可以用三层$\frac{\lambda}{4}$膜系实现二倍频增透膜，四层$\frac{\lambda}{4}$膜系实现三倍频增透膜。更多的波长或更宽的波区往往要求更复杂的膜系结构。对于红外区，由于基体材料的折射率比较高，实现宽带增透的薄膜膜系，也需要特殊设计。

相对其他类型的光学薄膜，增透膜膜层数一般比较少，所以增透膜的设计常采用矢量分析法和等效界面法等。当规整膜系的结果不理想时，则采用计算机辅助技术进行优化设计。多波长增透膜等较复杂的膜系，一般利用计算机自动设计来实现。

由于增透膜常常位于光学系统的最外面，所以要求很高的机械强度和环境稳定性。激光系统中的增透膜是激光破坏的最薄弱环节，在选择薄膜材料和制备工艺时要注意这一特点。新发展的用溶胶—凝胶法制备的大型激光系统的增透膜，其抗激光强度增加了 1 倍以上。

（资料 1、2、3 摘自《材料科学技术百科全书》，中国大百科全书出版社 1995 年 8 月版，有改动）

**4. 全息照相技术**

（1）全息照相

**概述** 全息照相技术是 1948 年由英国科学家伽柏发明的。全息照片与普通照片不同，它记录了光波所携带的全部信息，即它包含了振幅和相位，而普通照片只记录强度。全息照片的功能在于它能够使被记录的物光波再现，这种再现的物光波与原来真实物体发出的光波几乎完

全相同，因此能在原物已不存在的情况下仍然看到原物栩栩如生的三维图像，还能对原物光波进行放大或缩小。

这种全息照相技术虽然发明较早，但在早期却难以推广，原因是它需要相干长度很长、强度又较强的光源，这在当时是极难达到的。激光的问世，使满足这种要求成为轻而易举的事，因此全息照相技术得到了蓬勃发展。

全息照相虽然是近年来才发展起来的一种新技术，是激光的重要应用领域，但就其原理而言仍然脱离不开光的干涉和衍射，即以干涉的方法记录物光波，用衍射的方法再现物光波。

**原理** 图 13-16 是拍摄某种全息照片的示意图。从激光器 S 发出的一束激光，经过透镜 L 扩束和准直后，投射在分束板 SP 上，其中一束光经反射镜 $M_1$ 反射后，照射在物体 O 上，被物体 O 反射的光束直接投射在照相底片 H 上，这一束光叫做“物光”。另一束光经反射镜 $M_2$ 反射后，也照射在同一底片上，这一束光叫做“参考光”。由于物光和参考光都是从同一束激光分离出来的，所以它们是相干的。在照相底片上，两束光发生干涉，在空间的不同位置发生干涉相长或干涉相消，底片 H 上就把这样的干涉图样记录下来，经过显影和定影处理以后，即成为一张全息照片。照片上的干涉图样的形状反映了物光和参考光束间的相位关系，而其明暗对比程度即可见度反映了光束的强度关系，因此物体反射光中的全部信息，都以不同明暗程度和不同疏密分布的干涉条纹被记录下来。

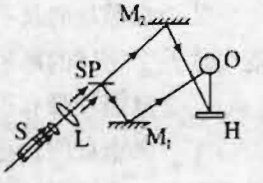


图 13-16

若用激光照射全息照片，当照射的激光对底片的相对位置和拍摄时的参考光相同时，我们从底片的另一侧可以看到原物的虚像。全息照片就相当于一个窗口，当人们移动眼睛从不同角度观察时，就好像对原物观察一样，可以看到它的不同侧面，这就是全息照相的再现。激光通过后，同时还形成一个实像，这一实像可以用屏观察，如图 13-17 所示。

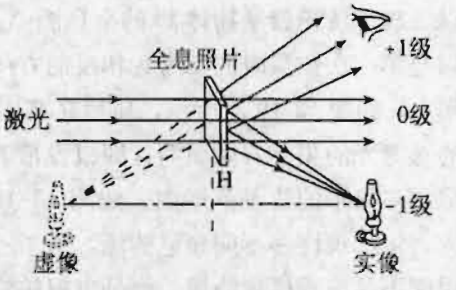


图 13-17

全息照相再现的过程，可以用光栅衍射原理来定性说明。一种最简单的情况是物光和参考光均为平面波，这两束光相遇时产生一组均匀、平行的直条纹，如图 13-18 甲所示。记录下来这一组条纹就和光栅一样，再现时也用一束平行光 $R$ 照射底片 H，这和照射到光栅相类似。经过光栅的衍射后，如图 13-18 乙所示，上下各有一衍射波，其中一束 $O$ 光和原来物光传播的方向一样，并和物光没有区别，即再现了原来物体

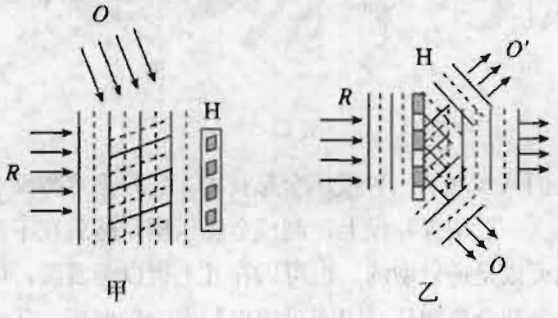


图 13-18

的光波。另一束光$O'$和$O$对称，在另一个方面传播。实际上，全息照相记录的物光波是十分复杂的，不可能是平面波，参考光也不一定是平面波，底片上记录的干涉图样也是十分复杂的，但再现的基本原理却是一致的。在这种情况下，不是简单的直线光栅，而是许多不规则形状的曲线光栅。当然，这样的光栅上衍射光波的波面也是十分复杂的，但是它恰好重现了原来记录下来的物光波波面，与原来物体发射出来的完全一样。

**全息照片的特点** 与一般照片相比，全息照片有以下几个显著的特点：

①全息照片同时记录物光波的强度和相位，因而用特定的单色光照射时，能在特定的方向和范围内再现物光波，在此条件下，再现的物光波与原物光波几乎相同；

②全息照片的每一部分都记录整个物体各部分所发出的信息，因而全息照片的任一小块都能再现整个物体的形象；

③全息照片没有正负片之分，黑白相反不影响观察效果；

④一张全息照片可以分别记录几个物光波，只要使参考光束的方向改变即可，因而可储存的信息量比普通照片大得多；

⑤一张全息照片可以对同一物体用同一参考光束进行两次曝光，从而可显现出该物体两次曝光的微小改变。

(2) 彩虹全息与模压全息

**彩虹全息** 如上所述，全息照片的再现都必须用单色光照明，若用白光照明，则由于各种颜色的像相互重叠在一起，造成像模糊不清，这给实际应用带来诸多不便。为了解决这个问题，1969年本顿提出了一套能以白光再现的全息照片摄制法，其原理如图13-19所示。首先，以常规方法拍摄某物体O的全息图A，如图13-19甲所示；随后在此全息图A前加一狭缝S，以与第一次拍摄时的参考光相反的方向照明，并以一束会聚光束作参考光，再拍摄第二张全息图B，如图13-19乙所示，显然在B中同时记录了物体O和狭缝S的信息；以与第二次拍摄时的参考光的相反方向照明，即以发散光照明，可同时得到物体O与狭缝S的全息像，即像被限制在很小的狭条范围内，如图13-19丙所示。如果此时的照明光改用白光，则由于波长不同，将出现许多不同颜色的像，由于不同颜色的像出现在不同的狭条范围内，并不相互重叠，因而不是出现模糊的像，而是出现按波长排列的一系列像，如同彩虹一般，故这种可用白光再现的全息图被称为“彩虹全息”，如图13-19丁所示。彩虹全息既有立体感，又色彩缤纷，并可在普通光源照明下观察，很有艺术价值。

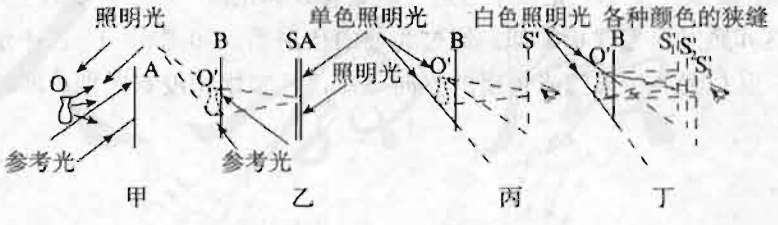



图13-19

**模压全息** 近年来人们又发展了一种模压全息技术，它是把浮雕型全息图上的干涉条纹沟槽用电镀的方法转移到金属（一般用镍）模上，制成金属压模，然后在不透明塑料片上热压而制成浮雕型全息图。这种图既可以是透射型的，也可以在其上镀以金属膜，以便反射观察。用这种方法可以低成本、大批量地复制全息照片，因而可用以制作防伪商标、艺术品、装饰品等。

（摘自《物理学与高新技术》，宣桂鑫主编，上海科技教育出版社2000年2月第1版，有改动）

## （三）实验参考资料

**1. 利用双缝干涉测定光波的波长**

【仪器和器材】 双缝干涉实验仪（J2515 型），光具座（J2507 型），学生电源（J1202 型或 J1202－1 型）。

J2515 型双缝干涉实验仪的结构如图所示。该仪器采用分离光学元件，在光具座上组装成整机的结构。主要部件有遮光筒、照明系统、双缝、观察筒及测量头。整机外形如图所示。

图 13-20 J2515 型双缝干涉实验仪结构示意图

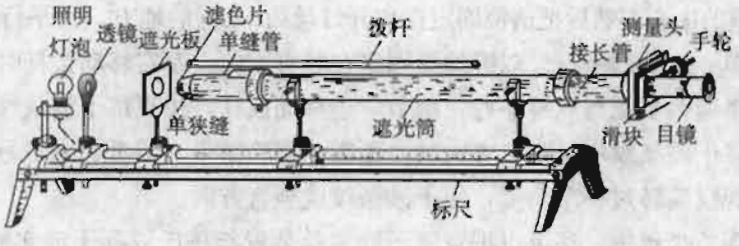



图 13-21 J2515 型双缝干涉实验仪

遮光筒是安装其他部件的基准，并能挡住杂光的干扰，犹如暗室一样。

照明系统包括光源灯泡、透镜、遮光板、光源单缝及滤色片。灯泡灯丝呈线状，12 V，15～24 W，由 J1202 系列学生电源供电。透镜焦距为50 mm。单缝作线光源用，缝宽为 0.100 mm，固定在单缝管的顶端。滤色片有两块：红色滤色片，峰值波长为 660.0±10.0 nm；绿色滤色片，峰值波长为 535.0±10.0 nm。

双缝有两块，双缝间距分别为 $d_1=0.200$ mm，$d_2=0.250$ mm。

观察筒由筒体、毛玻璃屏及目镜组成。毛玻璃屏用于接收干涉图样。通过目镜的放大作用，干涉图样看得更清晰。

测量头上有游标尺、分划板、滑座、滑块、目镜、手轮等。游标尺的主尺固定在滑座上，游标、分划板、目镜固定在滑块上。转动手轮，推动滑块在滑座里移动，并带动游标、分划板及目镜一起移动，通过目镜可以看到分划板上的刻线与干涉条纹的相对位移。干涉条纹的间距在游标尺上读得。测量头与观察筒可互换使用，但不能同时使用。

【实验原理】

光源发出的光经滤色片成为单色光，单色光通过单缝后，相当于线光源，通过双缝后，变成频率相同、相位差恒定的相干光，可以在光屏上产生稳定的干涉图样。根据计算波长的公式 $\lambda=\dfrac{d\Delta x}{l}$，测出双缝间的距离 $d$、双缝到光屏的距离 $l$、$n$ 条干涉条纹间的距离 $a\left(\Delta x=\dfrac{a}{n-1}\right)$，即可算出单色光的波长。

【实验方法】

(1) 仪器的安装调节

按照仪器结构示意图 13-20 及整机图 13-21 把零部件安装在光具座上。在光具座最后两只滑块上插上半圆形支架环，支架环插杆的高度要相等。遮光筒搁在支架环上，与光具座导轨平行。在遮光筒前端固定好双缝，缝取竖直方向。单缝管套在双缝外面，因此从仪器外表上看不到双缝。调节单、双缝平行的拨杆装在单缝管上。灯泡、透镜分别插在光具座滑块上，置于单缝前面。在遮光筒的另一端装上观察筒。遮光板在观察或测量时插在单缝前，用于挡住灯光，以免刺激实验者的眼睛。

仪器调节的关键，一是使光学元件的中心均在仪器的光轴上，即共轴；二是使光源单缝与双缝平行。仪器以遮光筒的轴线为光轴，装在遮光筒上的单缝、双缝、观察筒（或测量头）已共轴，这是由仪器结构保证的，因此只需把灯泡及透镜的中心调节到仪器的光轴上就行了。

采用共轭法调节灯泡及透镜共轴。灯泡与单缝之间的距离约为 25 cm。把灯泡灯丝、透镜大体上调节到与单缝等高。点亮灯泡，透镜移近单缝，在单缝面上成灯丝的缩小像，透镜上下移动，使灯丝的缩小像成在狭缝中心。然后把透镜移向灯泡，在单缝面上成灯丝的放大像，上下或左右移动灯泡，使灯丝放大像亦在单缝中心。反复调节两三次，当移动透镜时，灯丝的放大像及缩小像均成在单缝的中心。然后把透镜固定在离开灯丝约 5 cm 的地方，用平行光照亮单缝。

用拨杆调节单、双缝的平行。双缝的缝固定在竖直方向，左右移动拨杆时，拨动单缝绕光轴旋转，就能把单缝调节到与双缝平行。调节时边移动拨杆，边观察干涉条纹，直至看到清晰的干涉图样。如果干涉条纹不是竖直方向的，不影响实验结果，但看起来不习惯，可把遮光筒连同单、双缝、观察筒转过一个角度，使干涉条纹成竖直方向。

在仪器安装调节过程中，还可以把双缝干涉实验装置与杨氏双孔干涉实验装置进行比较，了解单、双缝的作用以及产生稳定的干涉图样的条件。

(2) 观察双缝干涉图样

按上面方法安装调节好仪器，即可见到白光的双缝干涉图样。在单缝前套上滤色片就可见到单色光的双缝干涉图样。改变滤色片、双缝或加上接长管后再观察干涉图样的变化。

在观察双缝干涉图样时，应注意下面几点。

①在两束相干光波相遇的空间里，都能接收到干涉图样。实验时看到的是在光屏所在位置上的干涉图样，所以在遮光筒接上接长管后仍能接收到干涉图样。但由于双缝与光屏之间的距离（缝屏距）$l$ 变长了，干涉条纹的间距也变大了。

②白光的双缝干涉图样是彩色的，中间一条白色的亮条纹为 0 级亮条纹，其余各级彩色条纹是以 0 级亮条纹为中心左右对称的。在各级的彩色条纹中，红色在最外侧。单色光的双缝干涉图样是明暗相间的条纹，相邻两条明条纹及相邻两条暗条纹的间距均相等。仔细观察，可看出正中的一条亮条纹比较亮、这就是 0 级亮条纹。

③红光产生的干涉条纹的间距比绿光的大，原因是红光波长长。

④双缝距 $d$ 小的双缝，产生的干涉条纹的间距大。

(3) 测定单色光波的波长

仪器安装调节好后，换上测量头，把测量头的游标尺置10 mm左右，调节目镜，在视场中出现清晰的干涉条纹及分划板上的刻线，然后在单缝前套上红色或绿色滤色片即可开始测量。

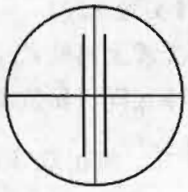


图 13-22 分划板刻线

分划板上的刻线形状如图 13-22 所示，一条水平刻线，三条竖直

刻线。竖直刻线应与干涉条纹平行。若不平行，松开测量头上的紧固螺钉，转动测量头，使竖直刻线与干涉条纹平行。

根据$\lambda=\frac{d\Delta x}{l}$，以双缝距 $d$ 及缝屏距 $l$ 已知的条件下，测出相邻两条亮（或暗）条纹的间距 $\Delta x$，就可计算波长 $\lambda$。若直接测 $\Delta x$，测量的相对误差较大，因此可先测 6 条明（或暗）条纹的总间距，再计算出 $\Delta x$。转动手轮，把分划板刻线对齐左边某一条清晰的亮（或暗）条纹，记下游标尺上的读数 $x_1$，然后把分划板移向右边，把刻线对齐第七条亮（或暗）条纹，记下游标尺读数 $x_7$，如图 13-23 所示。6 条条纹的总间距为 $x_7-x_1$，则 $\Delta x=\frac{x_7-x_1}{6}$。

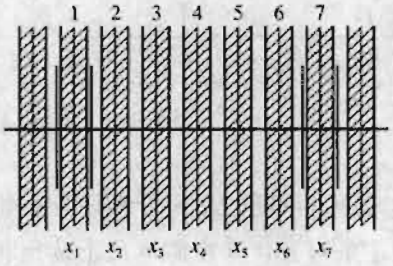



图 13-23

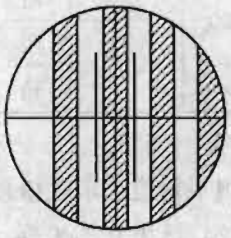


图 13-24

分划板刻线能否对齐干涉条纹，对测量结果影响很大，由于明暗条纹的界线不很清晰，测量时应对齐干涉明（或暗）条纹的中心。方法如下：把明（或暗）条纹嵌在分划板两根短刻线之间，使条纹的两边边缘与短刻线的距离相等，这时，中心刻线就对齐在条纹的中心。如图 13-24 所示。

为减小测量误差，$x_1$ 及 $x_7$ 的读数应重复测几次，取其平均值。计算波长时，双缝缝距 $d$ 标在双缝座上，在安装仪器时就要把 $d$ 值记下来。缝屏距 $l$，不加接长管是600 mm，加上接长管后为700 mm。

J2515 型双缝干涉实验仪有红绿两块滤色片、两块双缝及两个缝屏距，共有八组实验条件可供学生选用。列在表 1 中的测量数据及计算结果供参考。表中的 $x_1$、$x_7$ 已是三次测量数据的平均值。

**表 1**

| 滤色片 | 仪器参数 | | 条纹 | 游标尺读数 | | $(x_7-x_1)$/mm | $\Delta x=\frac{x_7-x_1}{6}$ /mm | $\lambda=\frac{\Delta x\cdot d}{l}$/nm |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | $d$/mm | $l$/mm | | $x_1$/mm | $x_7$/mm | | | |
| 红色 | 0.200 | 600 | 明 | 2.84 | 14.48 | 11.64 | 1.94 | 647 |
| | | | 暗 | 3.80 | 15.50 | 11.70 | 1.95 | 650 |
| | | 700 | 明 | 1.58 | 15.34 | 13.76 | 2.29 | 654 |
| | | | 暗 | 2.64 | 16.56 | 13.92 | 2.32 | 663 |
| | 0.250 | 600 | 明 | 2.28 | 11.88 | 9.60 | 1.60 | 667 |
| | | | 暗 | 3.10 | 12.66 | 9.56 | 1.59 | 663 |
| | | 700 | 明 | 1.48 | 12.54 | 11.06 | 1.84 | 657 |
| | | | 暗 | 2.34 | 13.48 | 11.14 | 1.86 | 664 |

续表

| 滤色片 | 仪器参数 | | 条纹 | 游标尺读数 | | $(x_7-x_1)$/mm | $\Delta x=\frac{x_7-x_1}{6}$ /mm | $\lambda=\frac{\Delta x \cdot d}{l}$/nm |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | $d$/mm | $l$/mm | | $x_1$/mm | $x_7$/mm | | | |
| 绿色 | 0.200 | 600 | 明 | 3.32 | 13.04 | 9.72 | 1.62 | 540 |
| | | | 暗 | 2.60 | 12.18 | 9.58 | 1.60 | 533 |
| | | 700 | 明 | 2.74 | 13.98 | 11.24 | 1.87 | 534 |
| | | | 暗 | 1.88 | 13.08 | 11.20 | 1.87 | 534 |
| | 0.250 | 600 | 明 | 3.18 | 11.00 | 7.82 | 1.30 | 542 |
| | | | 暗 | 3.92 | 11.56 | 7.64 | 1.27 | 529 |
| | | 700 | 明 | 2.84 | 12.00 | 9.16 | 1.52 | 543 |
| | | | 暗 | 3.72 | 12.64 | 8.92 | 1.49 | 532 |

【参考资料】

(1) 用分组平均值法求取相邻两条亮(或暗)条纹的间距 $\Delta x$ 更合理，方法如下：刻线先对齐左边某条条纹，读出它的坐标 $x_1$，以后顺次逐条对齐、并在游标尺上读出相应的坐标 $x_2$，$x_3$，…，$x_n$。把这些读数依次分成二组，若总项数 $n$ 为偶数，二组的项数相同，若 $n$ 为奇数，第一组多一项。如表 2 中测量数据是七项，第一组为 $x_1-x_4$ 四项，$x_5-x_7$ 三项为第二组。第二组与第一组各对应项的差均为 $4\Delta x$，即：

表 2

| 实验条件 | 红色滤色片 | | 双缝 $d=0.250$ mm | | | 缝屏距 $l=700$ mm | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 游标尺读数 | $x_1$ | $x_2$ | $x_3$ | $x_4$ | $x_5$ | $x_6$ | $x_7$ |
| /mm | 3.92 | 5.78 | 7.66 | 9.52 | 11.34 | 13.14 | 15.00 |
| $\Delta x=\frac{(x_5+x_6+x_7)-(x_1+x_2+x_3)}{12}=1.84$ mm，$\lambda=657$ nm | | | | | | | |

$$x_5-x_1=4\Delta x$$

$$x_6-x_2=4\Delta x$$

$$x_7-x_3=4\Delta x$$

把上面三式相加，得

$$12\Delta x=(x_5-x_1)+(x_6-x_2)+(x_7-x_3)$$

$$=(x_5+x_6+x_7)-(x_1+x_2+x_3)$$

$$\Delta x=\frac{(x_5+x_6+x_7)-(x_1+x_2+x_3)}{12}$$

用表 2 的数据，算得 $\Delta x=1.84$ mm，根据实验条件，算得红色滤色片的波长 $\lambda_{红}=657$ nm。

(2) 自制双缝并观察双缝干涉图样

自制双缝所需的器材：蜡烛、玻璃片（用制作生物切片的载玻片较方便）、双面刀片两片。用蜡烛火焰把玻璃片的一面熏黑，操作时防止玻璃片受热不匀而断裂。把两片刀片叠在一起，刀口叠齐、捏紧，在玻璃片熏黑的一面上划一道直线，就得到一块双缝。双缝距约为一块刀片的厚度。在两块刀片之间垫一层纸，再刻一块双缝距大一些的双缝。可以刻在同一块玻璃片上。

观察时手持双缝片，透过双缝观察直丝灯泡，就可看到白光的双缝干涉图样。在灯泡和双缝之间或双缝与眼睛之间插入一张有颜色的玻璃纸或滤色片，即可看到单色光的双缝干涉图样。再改用不同缝距的双缝观察，或移动观察位置改变与光源之间的距离，可看到干涉条纹的

间距发生变化。

【注意事项】

①共轭法成像的条件，物与像平面之间的距离必须大于透镜焦距的四倍，因此用共轭法调节灯泡、透镜与仪器光轴共轴时，灯泡与单缝之间的距离应在 25 cm 左右。

②测量单色光波长时，测量头、接长管与遮光筒连接处的定位面应紧密吻合，否则缝屏距 $l$ 变长，测量误差增大。

③在读取 $x_1$ 至 $x_7$ 的整个过程中，不能拨动调节拨杆或转动测量头，否则会引起干涉条纹的移动而使读数无效。

④考虑仪器误差及测量误差等因素，测量结果红光的波长应在 624～696 nm 之间，绿光波长应在 505～566 nm 之间，若偏离了上述范围，应检查原因。

⑤仪器所用的光源灯泡，其灯丝冷电阻较小，一开始用 12 V 电压点灯泡时，电流过大，学生电源次级保险丝可能会烧断，或者过载保护自动截止，无电压输出。因此，点亮灯泡时电压应逐挡升高至 12 V，使用时不得超过 12 V。

**2. 几个光学的小实验**

(1) 光在水流中弯曲

光导纤维在现代科学技术中有重要的应用，例如光纤通信、医疗中的光纤胃镜等等。你可以通过下面的实验来认识光导纤维的导光现象。

取一只奶粉铁罐，在侧面下部钻一个直径约为 4 mm 的小孔，再取一只高而细的玻璃瓶（例如装花露水的瓶子），将一只带有 2.5 V 聚光灯泡的灯座用线拴在瓶子上的适当部位，将瓶子放入铁罐，使小灯泡通电发光，且聚光于铁罐的小圆孔处。在其前方放置白塑料板，可以看到透过小圆孔的光是直进的。然后，向罐内倒入清水，当水从小孔中流出形成弯曲的水束时，原来在小孔前白色屏板上的光斑消失了，把屏板放在水束经过的途中，并移动屏板的位置，你可以看到光斑始终在水束与屏板相交的位置，好像逃逸不出水束的限制一般，如图 13-25 所示。这是由于光在水束中产生全反射所致。这个实验曾经是一位英国物理学家在赴美旅行时所做报告中的表演，这精彩的表演引起了科学家们的极大兴趣。

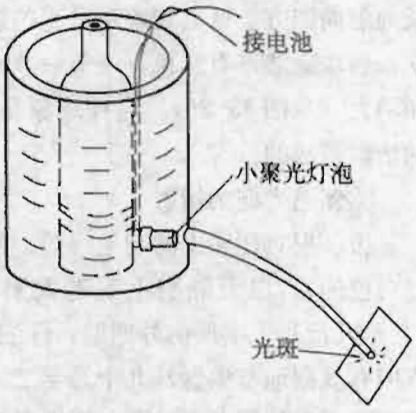


图 13-25

(2) 生活中的干涉、衍射现象

①动植物尸体分解物质的薄膜干涉

在有些小沟的积水洼处，我们有时会看到漂浮在水面上的一片条状略带彩色的“油膜”，这是水下泥土中腐败的动植物尸体分解出来的一种物质，浮于水面形成的薄膜。当阳光照射时，薄膜上、下层表面的反射光发生干涉，从而出现了彩色条纹。这个现象在我们上学的路上稍加留意即能见到。

②汽油薄膜干涉

雨后，在柏油路面或水泥路面上都积了水，我们常会见到由汽车上漏下的污油形成的大片彩色条纹，这是油膜薄层在阳光下出现的光的干涉。请你分辨一下彩色中有哪几种颜色。

③动物的干涉颜色

自然界中有些雄性鸟，毛色特别鲜艳，这是因为鸟的羽毛能产生干涉性的彩色，并且颜色

会随着视线的方向而变化。例如孔雀和鸡的某些尾翎、鸭颈及雉的羽毛都有这种现象。此外某些小的昆虫、大些的甲壳虫（金龟子）等也有这种情况。形成动物性干涉颜色的原因，主要是由于羽毛（或甲壳）的角质层透明膜或者锯齿状的精细表面层结构所引起的。当我们春游或去动物园参观时，请大家注意认真观察。

④矿石上的空气膜和油膜干涉

在一些矿物中，如黄铁矿石、白云母片等，在它们结晶体的裂缝中会形成空气薄膜，也会显现出干涉性颜色。煤块上面，有时有黑亮为主色的彩色，这也是煤块上有煤焦油薄层引起的干涉现象。

⑤眼帘上睫毛的衍射

夜间观看远处电灯，如路灯或车灯，由于周围黑暗，很容易看到由灯发出无数丝状如节带构成的十字光芒，水平光芒中的节带略呈彩色，仔细观察可见淡淡的红色在外，紫色在内。竖直光芒的色彩却不易察觉。这是眼睛的睫毛在交叉时常见的衍射现象。如果在晴天，眯着眼睛看太阳，或者看玻璃里的或水中的太阳的像，都可以看到有许多彩色鲜艳的光芒分布在太阳周围。这也是由于上下眼帘上的睫毛并立如光栅一般引起的衍射现象。

⑥织物细孔光栅的衍射

用纱巾或其他薄如蝉翼的细密织物，在夜间隔纱观看远处的电灯，可以看见以灯为中心发出的十字形光芒，长长地射向四方。认真观察可见光芒近灯处有明暗间隔的块状，明块上略带有彩色，一节一节地向外发散并逐渐变淡而消失（见图 13-26）。这种现象是光在织物细密孔隙上的衍射造成的。

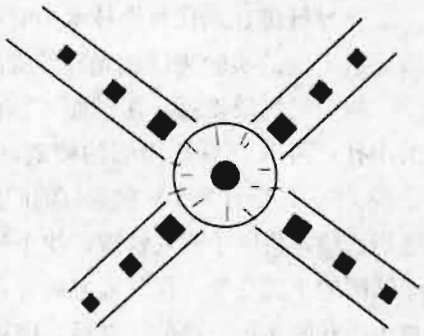


图 13-26

⑦翎毛光栅的衍射

拔一根鸡翅膀上的羽毛（鹅、鸭的翎毛也可以，最好是白色的）。白天隔羽毛观看太阳，见七色光芒按三行（甚至五行）十字形向外四射，仔细观察可看到：在中间太阳的位置呈白色，在它周围沿十字方向有规则地布满着八九个乃至二十余个彩色的太阳的衍射花样（见图 13-27），花样的色彩亮度随着向外而渐渐淡薄。图样向着中间的方向呈蓝紫色，背着中间向外的方向呈红黄色，真是五光十色，好看得很。若晚上拿这些翎毛去看一米外的白炽电灯，则在刚才布满太阳衍射花样的位置上，出现许许多多略带彩色的如同灯丝一样的衍射图样，上下左右都是正的“W”形，一个接一个也十分好看（见图 13-28）。这些都是阳光和灯光透过翎羽上密织的羽丝间的小孔隙（光栅）而出现的衍射现象。

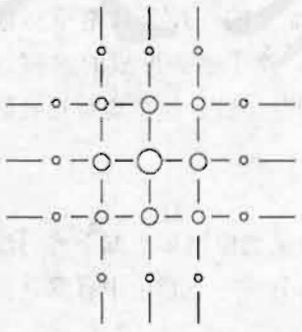


图 13-27

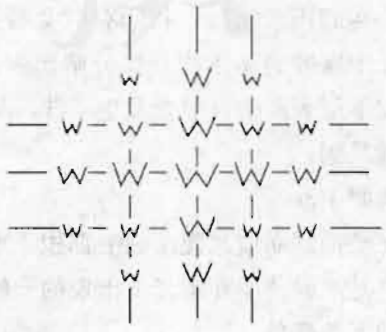


图 13-28

晚上隔翎毛观看远处的路灯，也能见到如同白天见到的太阳光衍射的那种图样，只不过路灯的图样少了一些，鲜明的程度差了一些。

⑧日月的晕

我们都见过太阳或月亮的四周有一个很大的圆圈，太阳或月亮就在这个圆的圆心上，这种现象叫做太阳或月亮的晕。今后若遇此晕，请你仔细观察晕的光环。环的颜色在多数情况下是白色的，但镶有黄和灰蓝色的边缘。它是阳光或月亮经过高空饱和水汽中的雾滴弯折了路径引起的，是自然界中的一种常见的衍射现象。但有时也会出现由云层中的冰晶折射引起的另一种晕（直径的视角是22°或46°），其实质是光的色散。

**3. 干涉、衍射、偏振的简易实验**

(1) 劈形空气薄膜的干涉

取两块一样大小的矩形平板玻璃（如显微镜的载物玻璃片），表面用清水洗净晾干。实验前再用绒布擦去表面灰尘和水汽。把玻璃对齐叠在一起，在两块玻璃之间的一端垫一层薄纸片，然后用橡皮筋把两端都扎起来，使之成一整体。观察时，把它拿近窗口，光的入射角小些，玻璃片上即显出干涉条纹，用手指捏住加压，条纹移动。若靠近日光灯观察，还可看到玻璃片上布满紫绿相间的干涉条纹。

(2) 肥皂液薄膜的干涉

用一根直的金属丝，如自行车轮上的镀铬辐条，弯成等腰三角形，使腰大于底边。取一只盘子，加入洗洁净的水溶液$\left(\text{约加}\frac{1}{3}\text{的水，调匀}\right)$，把金属丝框浸入溶液内，当框从溶液内提出时，即可得一液膜。把框的底边朝下竖直放置，液膜由于受到重力的作用，便呈上薄下厚的劈形。在阳光下，由于液膜里外两层的反射光产生干涉，而显出条状彩色的干涉条纹。若在暗处点燃一支蜡烛，置烛焰于膜一侧，让烛光照射薄膜，仔细观察也可发现在膜中的烛焰像里也有以明暗相间为主的干涉条纹。条纹都如同产生在薄膜表面上，几乎都呈水平。在阳光下条纹呈彩色。

若用细竹竿做的毛笔杆蘸皂液，口吹肥皂泡，在阳光下可见五彩缤纷的干涉条纹布满在肥皂泡的球面上。

(3) 杨氏双缝干涉

取曝光过的135型胶卷的黑底片，放在玻璃板上，用刀片沿直尺在胶片上划一条细缝，然后不移动直尺，将刀口稍微偏一点，再划一条细缝。或者将两片保险刀片并拢，以刀刃的前端沿直尺在胶片上一次划出两道细缝。也可取一小块玻璃片在上面均匀涂一薄层黑墨汁（最好不用烛焰上熏的烟黑，因烟灰颗粒大，划出的缝太宽），待干后再用刀片以同样方法划出两道透明狭缝。缝间距离要小于$\frac{1}{10}$ mm。观察时将带缝的板横放在眼前，通过双缝观看相距半米左右的白炽灯的灯丝，可看到在灯丝两侧细密分布着彩色的干涉条纹（图13-29）。缝离灯越近，细密的干涉条纹越清晰。

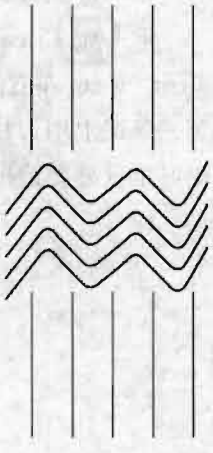


图13-29

(4) 观察单缝衍射

手持两支并排的铅笔，横着靠近眼睛，一眼闭着，另一眼从两笔之间的缝里观看1 m远的白炽灯泡的灯丝，调节手握笔的松紧即可调整缝的宽度。当缝过宽时，灯丝发出的光刺眼，看不到衍射图样；当缝过窄时，即出现长长的带状的竖直光芒，也看不清衍射图样；只有在缝宽适当时，可

在中间有灯丝形状的主亮区沿竖直方向观察到一个有数个“W”形灯丝的彩色衍射图样（图13-30）。“灯丝”之间的距离仍由缝的宽窄决定。缝宽小则主光区越细；缝宽大则主光区越宽，有时像家具上的木纹层层重叠着，十分好看。观察时缝到灯的距离不宜太近或太远，因灯发光功率而异，一般来说灯过亮可稍远些，不很亮可稍近些，请你自行调整。

(5) 观察小孔衍射

取一块玻璃板，用蜡烛火焰均匀熏黑一面，在其间用小针的针尖沿垂直方向向下点几个小点，点时不要让针尖在玻璃上滑动，使去掉的烟黑成尽可能小的小孔。观察时背向阳光，左手拿玻璃将没有熏黑的一面贴近眼睛，右手伸直拿一面小镜子，接身后射过来的阳光，使光反射到熏黑的玻璃表面上，让眼通过小孔看到镜子里太阳的像，这时可看到以太阳的像为中心有无数根细而短小的彩色光芒射向四方，同时还有彩色的衍射斑线分布在同心圆的圆周（图13-31），色彩鲜明，朝里呈蓝紫色，朝外呈红黄色，密密麻麻十分美丽。孔越小，色彩越浓艳；孔越大，色彩越淡薄。有时还能看见条状间隔鲜明的彩色衍射斑块。

图13-30

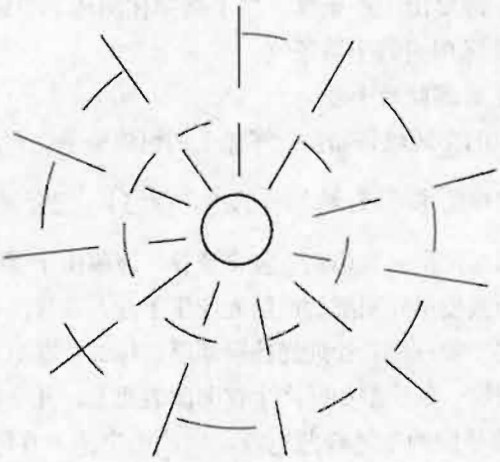


图13-31

本实验也可以用针在黑胶片上刺一小孔，使眼睛通过小孔对远处（2 m以外）的小电珠观察，你可以看到许多同心圆环的衍射现象。

(6) 防黑板反光的偏振镜的制作

取一张15 cm×20 cm大小的硬纸板，画线折叠成长方体形镜筒。镜筒长15 cm，截面为3 cm×6 cm左右的长方形。在筒两侧靠近一端处，用量角器量出33°角，各画两条平行线，在每一条线上用刀片切出长4 cm、宽3 mm的缝（如图13-32），然后用胶水把镜筒黏接好，外糊厚纸（缝要留出）。

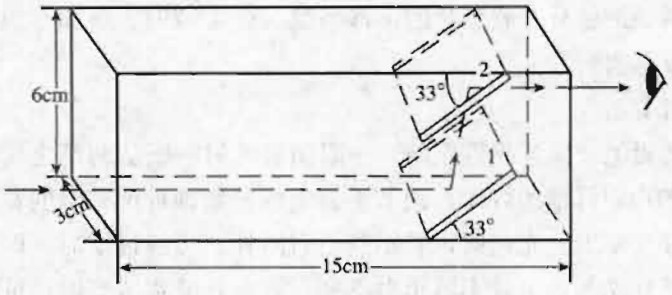



图13-32

取平面镜片和毛玻璃片各1片（若无毛玻璃片，可用同样大小的透明玻璃片，将其一面用砂轮碎片磨毛代用），规格大约4 cm×4 cm，然后拿电工用的黑胶布贴在毛玻璃片粗糙的一面上。把小平面镜插入镜筒下面的刀切细缝1中，反射面向上。同样，把毛玻璃片插入刀切细缝2中，把贴黑胶布的一面向上，平滑面向下对着平面镜。

使用时，把镜筒对准黑板上的字，以观察方向为轴旋转，看到在某角度时毛玻璃片上映出的字由于反光强烈看不清，而当再转90°时黑板上的反光明显减弱，字迹清楚可辨。记住此时镜筒的方位，以后便可按这个方位利用这个镜筒看黑板上的字。

## 五、补充习题

### A组

1. 一束光从空气射入某种透明液体，入射角40°，在界面上光的一部分被反射，另一部分被折射，则反射光线与折射光线的夹角是（　　）

A. 小于40°　　B. 在40°与50°之间

C. 大于140°　　D. 在100°与140°之间

2. 如图13-33所示，只含黄光和紫光的复色光束$PO$，沿半径方向射入空气中的玻璃半圆柱后，被分成两光束$OA$和$OB$沿如图所示方向射出。则（　　）

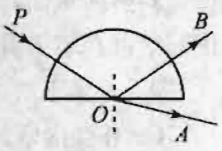


图13-33

A. $OA$为黄光，$OB$为紫光

B. $OA$为紫光，$OB$为黄光

C. $OA$为黄光，$OB$为复色光

D. $OA$为紫光，$OB$为复色光

3. 一束可见光射到空气中的平行玻璃砖上，穿过玻璃砖后从下表面射出，变为$a$、$b$两束平行单色光，如图13-34所示，如果光束$b$是蓝光，则光束$a$可能是（　　）

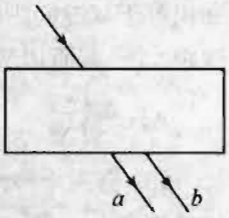


图13-34

A. 红光　　B. 黄光

C. 绿光　　D. 紫光

4. 如图13-35所示，红光和紫光分别从介质1和介质2中以相同的入射角射到真空，发生折射时的折射角也相同。设介质1和介质2的折射率分别为$n_1$、$n_2$，则下列结论中正确的是（　　）

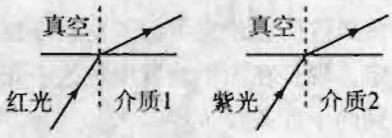


图13-35

A. $n_1=n_2$　　B. $n_1>n_2$

C. $n_1<n_2$　　D. 以上三种可能性都有

5. 沙尘暴是由于土地沙化引起的一种恶劣的气象现象，对人类的生存造成极大的危害，发生沙尘暴时能见度只有几十米甚至几米，天空变黄发暗，这是由于这种情况下（　　）

A. 只有波长较短的一部分光才能到达地面

B. 只有波长较长的一部分光才能到达地面

C. 只有频率较高的一部分光才能到达地面

D. 只有频率较低的一部分光才能到达地面

6. 为了连续改变反射光的方向，并多次重复这个过程，方法之一是旋转由许多反射镜面组成的多面体棱镜（简称镜鼓），如图 13-36 所示。当激光束以固定方向射入到镜鼓的一个反射面上时，由于反射镜绕竖直轴旋转，反射光就可以在屏幕上扫出一条水平线。依此，每块反射镜都将轮流扫描一次。如果要求扫描的范围 $\theta=36°$ 且每秒扫描 60 次，那么镜鼓的反射镜面数目和镜鼓旋转的转速分别为（　　）

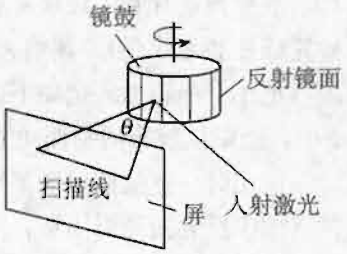


图 13-36

A. 10，360 r/min　　B. 20，180 r/min

C. 20，360 r/min　　D. 40，180 r/min

7. 已知某玻璃对蓝光的折射率比对红光的折射率大，则两种光（　　）

A. 在该玻璃中传播时，蓝光的速度较大

B. 以相同的入射角从空气斜射入该玻璃中，蓝光折射角较大

C. 从该玻璃中射入空气发生反射时，红光临界角较大

D. 用同一装置进行双缝干涉实验，蓝光的相邻条纹间距较大

8. 某同学为了研究光的色散，设计了如下实验：在墙角放置一个盛水的容器，其中有一块与水平面成 45°角放置的平面镜 M，如图 13-37 所示。一细束白光斜射向水面，经水折射向平面镜，被平面镜反射经水面折射后照在墙上，该同学可在墙上看到（　　）

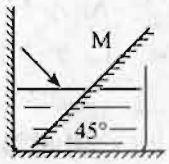


图 13-37

A. 上紫下红的彩色光带　　B. 上红下紫的彩色光带

C. 外红内紫的环状光带　　D. 一片白光

9. 激光散斑测速是一种崭新的测速技术，它应用了光的干涉原理。用二次曝光照相所获得的“散斑对”相当于双缝干涉实验中的双缝，待测物体的速度 $v$ 与二次曝光时间间隔 $\Delta t$ 的乘积等于双缝间距。实验中可测得二次曝光时间间隔 $\Delta t$、双缝到屏的距离 $l$ 以及相邻两条亮纹间距 $\Delta x$。若所用激光波长为 $\lambda$，则该实验确定物体运动速度的表达式是（　　）

A. $v=\dfrac{\lambda\Delta x}{l\Delta t}$　　B. $v=\dfrac{l\lambda}{\Delta x\Delta t}$　　C. $v=\dfrac{l\Delta x}{\lambda\Delta t}$　　D. $v=\dfrac{l\Delta t}{\lambda\Delta x}$

10. 劈尖干涉是一种薄膜干涉，其装置如图 13-38 甲所示。将一块平板玻璃放置在另一平板玻璃之上，在一端夹入两张纸片，从而在两玻璃表面之间形成一个劈形空气薄膜。当光垂直入射后，从上往下看到的干涉条纹如图乙所示。干涉条纹有如下特点：（1）任意一条明条纹或暗条纹所在位置下面的薄膜厚度相等；（2）任意相邻明条纹或暗条纹所对应的薄膜厚度差恒定。现若在图甲装置中抽去一张纸片，则当光垂直入射到新的劈形空气薄膜后，从上往下观察到的干涉条纹（　　）

图 13-38

A. 变疏　　B. 变密　　C. 不变　　D. 消失

11. 如图 13-39 所示等边三棱镜截面 $ABC$，有一束单色光从空气射向 $E$ 点，并偏折到 $F$ 点，已知入射方向与边 $AB$ 的夹角 $\theta=30°$，$E$、$F$ 分别为边 $AB$、$BC$ 的中点，则（　　）

A. 该棱镜的折射率为$\sqrt{3}$

B. 光在$F$点发生全反射

C. 光从空气进入棱镜，波长变小

D. 从$F$点出射的光束与入射到$E$点的光束平行

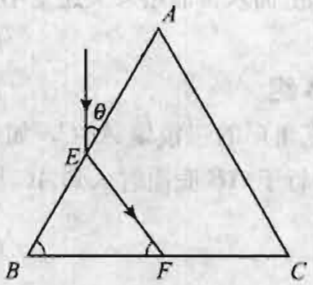



图 13-39

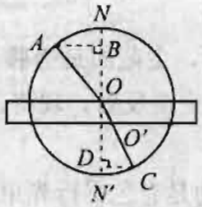



图 13-40

12. 某同学由于没有量角器，在完成了光路图后，以$O$点为圆心，10.00 cm长为半径画圆，分别交线段$OA$于$A$点，交$OO'$连线延长线于$C$点，过$A$点作法线$NN'$的垂线$AB$，交$NN'$于$B$点，过$C$点作法线$NN'$的垂线$CD$，交$NN'$于$D$点，如图13-40所示，用刻度尺量得$OB=8.00$ cm，$CD=4.00$ cm，由此可得玻璃的折射率$n=$_____。

13. 由某种透光物质制成的等腰直角棱镜$ABO$，两腰长都为16 cm。如图13-41所示，为了测定物质的折射率，将棱镜放在直角坐标中，使两腰与$Ox$、$Oy$轴重合，从$OB$边的$C$点注视$A$棱，发现$A$棱的视位置在$OA$边的$D$点，在$CD$两点插上大头针，看出$C$点坐标位置为(0，12)，$D$点坐标位置为(9，0)，则该物质的折射率为_____。

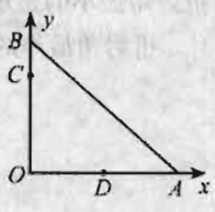



图 13-41

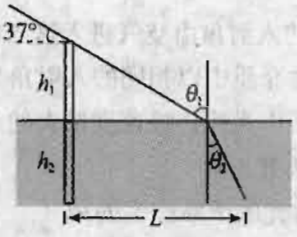



图 13-42

14. 如图13-42所示，一个大游泳池池底面水平，池水深1.2 m，有一竹竿竖直插入池底，浸入水中的部分正好是全长的一半。阳光与水平方向成37°角射入，池底竿影长2.5 m，求水的折射率。

15. 如图13-43所示，光线以入射角$i$从空气射向折射率$n=\sqrt{2}$的透明介质。

(1) 当入射角$i=45°$时，求反射光线与折射光线间的夹角$\theta$。

(2) 当入射角$i$为何值时，反射光线与折射光线间的夹角$\theta=90°$?

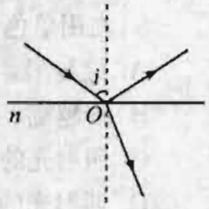



图 13-43

16. 如图13-44所示，棱镜的截面为直角三角形$ABC$，$\angle A=30°$，斜边$AB=a$。棱镜材料的折射率为$n=\sqrt{2}$。在此截面所在的平面内，一条光线以45°的入射角从$AC$边的中点$M$左侧射入棱镜。求射出点的位置(不考虑光线沿原路返回的情况)。

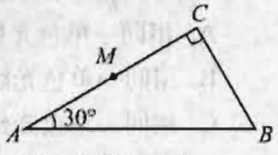



图 13-44

17. 半径为$R$的玻璃半圆柱体，横截面如图13-45所示，圆心为

$O$，两条平行单色红光沿截面射向圆柱面，方向与底面垂直。光线 1 的入射点 $A$ 为圆柱面的顶点，光线 2 的入射点为 $B$，$\angle AOB=60°$，已知该玻璃对红光的折射率为$\sqrt{3}$。

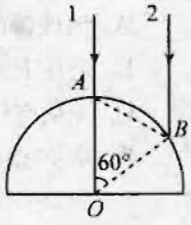


图 13-45

(1) 求两条光线经柱面和底面折射后的交点与 $O$ 点的距离 $d$。

(2) 若入射的是单色蓝光，则距离 $d$ 将比上面求得的结果大还是小?

## B 组

1. 如图 13-46 所示，主截面是等腰直角三角形的三棱镜 $ABC$，如果白光垂直入射到 $AC$ 面上时，在 $AB$ 面上发生全反射，现将白光平行于 $AB$ 底面射入到 $AC$ 面上时，则在光束射出三棱镜时（　　）

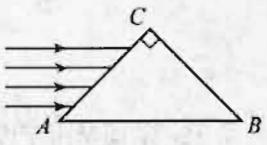


图 13-46

A. 从 $BC$ 边射出的是有色平行光束

B. 从 $BC$ 边射出的是有色不平行光束

C. 从 $BC$ 边没有出射光束

D. 从 $BC$ 边射出的是白色光束

2. 关于某单色光由水中射入空气时的变化，正确的是（　　）

A. 颜色不变，频率变高，光速变大

B. 颜色不变，波长不变，光速变大

C. 频率变低，波长变长，光速变大

D. 频率不变，波长变长，光速变大

3. 水的折射率为 1.33，水晶的折射率为 1.55，玻璃的折射率为 1.50，下面说法中正确的是（　　）

A. 光线以相同的入射角由空气进入这三种介质时，折射角最小的是水晶

B. 光线从这三种介质中以相同的入射角射入空气中时，折射角最小的是水

C. 在这三种介质中光线传播速度最大的是水

D. 以上三种说法都正确

4. 下列现象中由光的干涉产生的是（　　）

A. 天空出现彩虹

B. 肥皂泡在阳光照耀下呈现彩色条纹

C. 阳光通过三棱镜形成彩色光带

D. 光线通过一个很窄的缝呈现明暗相间的条纹

5. 在用单色平行光照射单缝观察衍射现象的实验中，下列说法中正确的是（　　）

A. 缝越窄，衍射现象越显著

B. 缝越宽，衍射现象越显著

C. 照射光的波长越短，衍射现象越显著

D. 照射光的频率越高，衍射现象越显著

6. 关于双缝干涉条纹的以下说法中不正确的是（　　）

A. 用同一单色光做双缝干涉实验，能观察到明暗相间的单色条纹

B. 用同一单色光经双缝干涉后的明条纹距两缝的距离之差为该色光波长的整数倍

C. 用同一单色光经双缝干涉后的明条纹距两缝的距离之差一定为该色光波长的奇数倍

D. 用同一单色光经双缝干涉后的暗条纹距两缝的距离之差一定是该色光半波长的奇数倍

7. 抽制高强度纤维细丝时可用激光监控其粗细，如图 13-47 所示，观察激光束经过细丝时在光屏上所产生的条纹即可判断细丝粗细的变化（　　）

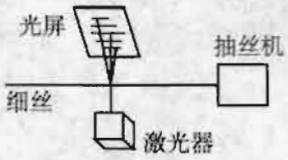


图 13-47

A. 这主要是光的干涉现象

B. 这主要是光的衍射现象

C. 如果屏上条纹变宽，表明抽制的丝变粗

D. 如果屏上条纹变宽，表明抽制的丝变细

8. 玻璃砖横截面如图 13-48 所示，其中 $ABC$ 为直角三角形（$AC$ 边未画出），$AB$ 为直角边，$\angle ABC=45^\circ$；$ADC$ 为一圆弧，其圆心在 $BC$ 边的中点。此玻璃的折射率为 1.5。$P$ 为贴近玻璃砖放置的、与 $AB$ 垂直的光屏。若一束宽度与 $AB$ 边长度相等的平行光从 $AB$ 边垂直射入玻璃砖，则（　　）

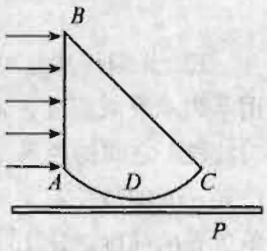


图 13-48

A. 从 $BC$ 边折射出宽度与 $BC$ 边长度相等的平行光

B. 屏上有一亮区，其宽度小于 $AB$ 边的长度

C. 屏上有一亮区，其宽度等于 $AC$ 边的长度

D. 当屏向远离玻璃砖的方向平行移动时，屏上亮区先逐渐变小然后逐渐变大

9. 如图 13-49 所示为一块建筑用幕墙玻璃的剖面图，在其上建立直角坐标系 $Oxy$，设该玻璃的折射率沿 $y$ 轴正方向均匀变化。现有一单色光 $a$ 从原点 $O$，以某一入射角 $\theta$ 由空气射入该玻璃内部，且单色光 $a$ 在玻璃内部的传播路径如图中实线所示。则玻璃的折射率沿 $y$ 轴正方向发生变化的情况是（　　）

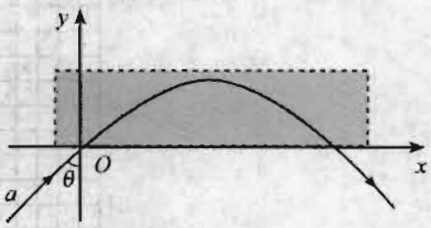


图 13-49

A. 折射率沿 $y$ 轴正方向均匀减小

B. 折射率沿 $y$ 轴正方向先均匀减小后均匀增大

C. 折射率沿 $y$ 轴正方向均匀增大

D. 折射率沿 $y$ 轴正方向先均匀增大后均匀减小

10. 某物体左右两侧各有一竖直放置的平面镜，两平面镜相互平行，物体距离左镜 4 m，右镜 8 m，如图 13-50 所示，物体在左镜所成的像中从右向左数的第三个像与物体的距离是（　　）

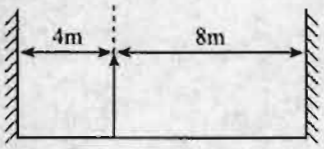


图 13-50

A. 24 m　　B. 32 m　　C. 40 m　　D. 48 m

11. 如图 13-51 所示，空气中有横截面为半圆环的均匀透明柱体，其内圆半径为 $r$，外圆半径为 $R$，$R=\sqrt{2}r$。现有一束单色光垂直于水平端面 $A$ 射入透明柱体，只经过两次全反射就垂直于水平端面 $B$ 射出。设透明柱体的折射率为 $n$，光在透明柱体内传播的时间为 $t$，若真空中的光速为 $c$，则（　　）

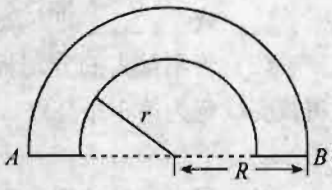


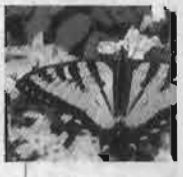
图 13-51

A. $n$ 可能为 $\sqrt{3}$　　B. $n$ 可能为 2

C. $t$ 可能为 $\dfrac{2\sqrt{2}r}{c}$　　D. $t$ 可能为 $\dfrac{4.8r}{c}$

12. 如图 13-52 为双缝干涉的实验示意图，若要使干涉条纹的间距变大可改用波长更____（填“长”或“短”）的单色光，或是使双缝与光屏间的距离____（填“增大”或“减小”）。





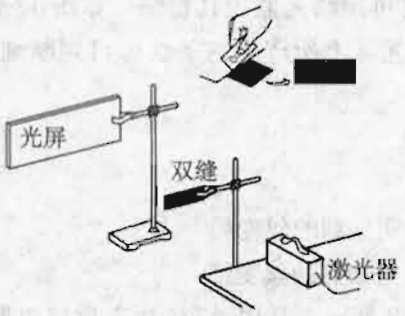



图 13-52

13. 光强传感器对接收到的光信号会产生衰减，且对于不同波长的光衰减程度不同，可以用 $\varphi$ 表示衰减程度，其定义为输出强度与输入强度之比，$\varphi=I_{出}/I_{入}$，图 13-53 右上图表示 $\varphi$ 与波长 $\lambda$ 之间的关系。当用此传感器分别接收 $a$、$b$ 两束光时，传感器的输出强度正好相同，已知 $a$ 光的波长 $\lambda_a=625$ nm，$b$ 光由 $\lambda_{b1}=605$ nm 和 $\lambda_{b2}=665$ nm 两种单色光组成，且这两种单色光的强度之比 $I_{b1}:I_{b2}=2:3$，由图 13-53 可知 $\varphi_a=$_____；$a$ 光强度与 $b$ 光强度之比 $I_a:I_b=$_____。

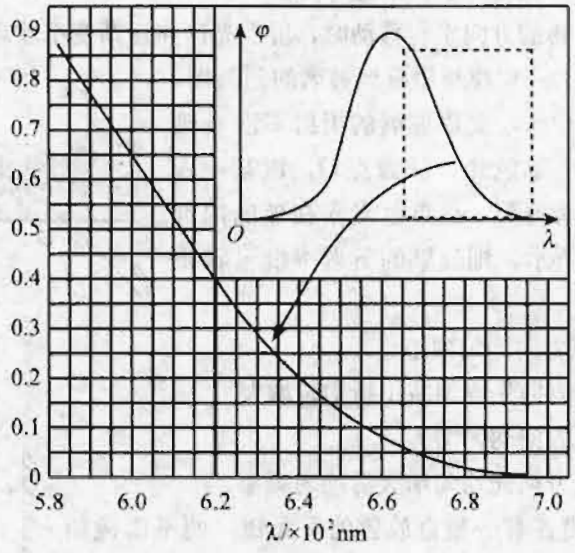
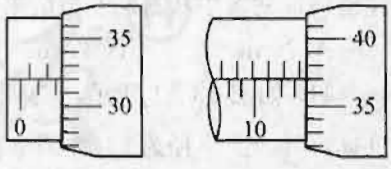



图 13-53

14. (1) 在用双缝干涉测量光的波长实验中，对于某种单色光，为增加相邻亮纹（暗纹）间的距离，可采取_____或_____的方法。

(2) 将测量头的分划板中心刻线与某条亮纹中心对齐，将该亮纹定为第 1 条亮纹，此时手轮上的示数如图 13-54 甲所示。




甲　　乙

图 13-54

然后同方向转动测量头，使分划板中心刻线与第 6 条亮纹中心对齐，记下此时图 13-54 乙中手轮上的示数_____ mm，求得相邻亮纹的间距 $\Delta x$ 为_____ mm。

(3) 已知双缝间距 $d$ 为 $2.0\times10^{-4}$ m，测得双缝到屏的距离 $l$ 为 0.700 m，由计算式 $\lambda=$_____，求得所测红光波长为_____ nm。

15. 如图 13-55，透明半圆柱体折射率为 $n=2$，半径为 $R$、长为 $L$。平行光束从半圆柱体

的矩形表面垂直射入，从部分柱面有光线射出。求该部分柱面的面积 $S$。

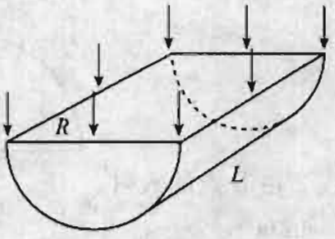



图 13-55

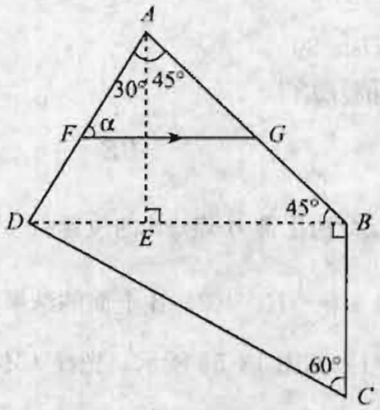



图 13-56

16. 玻璃棱镜 $ABCD$ 可以看成是由如图 13-56 所示的 $ADE$、$ABE$、$BCD$ 三个直角三棱镜组成，一束从 $AD$ 面射入的光线在棱镜中的折射光线 $FG$ 与 $AD$ 面的夹角 $\alpha=60°$，已知光在真空的速度 $c=3\times10^8$ m/s，玻璃的折射率 $n=1.5$。求：

（1）这束入射光线的入射角多大？（用反三角函数表示）

（2）光在棱镜中的传播速度多大？

（3）该束光线第一次从 $CD$ 面出射时的折射角以及此出射光线的偏向角（射出棱镜的光线与射入棱镜的光线之间的夹角）多大？

**参考答案：**

**A 组**

1. D　2. C　3. D　4. B　5. BD　6. B　7. C　8. B　9. B　10. A　11. AC

12. 1.5　13. 4/3

14. $n=4/3$　提示：由折射定律有：$n=\sin\theta_1/\sin\theta_2=\sin53°/\sin\theta_2$　①

由几何关系有 $L=h_1\operatorname{ctg}37°+h_2\operatorname{tg}\theta_2$　②

由①②解得 $\theta_2=37°$，所以 $n=4/3$。

15. （1）$\theta=105°$　　（2）$\operatorname{arctg}\sqrt{2}$

16. 出射点在 $BC$ 边上离 $B$ 点 $\frac{1}{8}a$ 的位置。提示：设入射角为 $i$，折射角为 $r$，由折射定律得 $\frac{\sin i}{\sin r}=n$　①

由已知条件及①式得 $r=30°$　②

入射光线在法线的左侧，光路图如图 13-57 所示。

设折射光线与 $AB$ 的交点为 $D$。

由几何关系可知，在 $D$ 点的入射角 $\theta=60°$　③

设全发射的临界角为 $\theta_c$，则 $\sin\theta_c=\frac{1}{n}$　④

由④和已知条件得 $\theta_c=45°$　⑤

因此，光在 $D$ 点全反射。

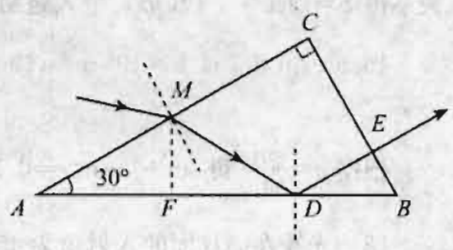



图 13-57

设此光线的出射点为 $E$，由几何关系得$\angle DEB=90°$。

$BD=a-2AF$ ⑥

$BE=BD\sin 30°$ ⑦

联立③⑥⑦式得

$$BE=\frac{1}{8}a$$

即出射点在 $BC$ 边上离 $B$ 点$\frac{1}{8}a$ 的位置。

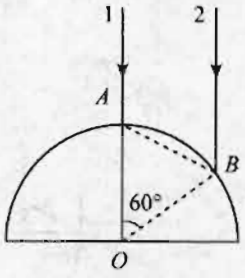


图 13-58

17. (1) $d=\frac{1}{3}R$　(2) 比上面的结果大

提示：(1) 如图 13-58 所示，光线 1 不偏折。光线 2 在 $B$ 点的入射角 $i=60°$，由折射定律得 $n=\frac{\sin i}{\sin r}$，所以 $\sin r=\frac{\sin i}{n}=\frac{\sin 60°}{\sqrt{3}}$。

光线 2 在 $C$ 点处再次发生折射，由几何关系得 $i'=60°-r=30°$

在$\triangle BOC$ 中，由折射定律有 $\sin r'=n\sin i'$，所以 $r'=60°$。

在$\triangle BOC$ 中，由正弦定理，有$\frac{OC}{\sin 30°}=\frac{R}{\sin 120°}$，所以 $OC=\frac{\sqrt{3}}{3}R$，则 $d=OC\cdot \mathrm{tg}(90°-60°)=\frac{1}{3}R$。

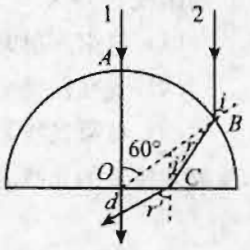


图 13-59

(2) 因为在玻璃圆柱体中红光比紫光的折射率小，所以 $d$ 比上面的结果大。

**B 组**

1. A　2. D　3. A　4. B　5. A　6. C　7. BD　8. BD　9. A　10. B　11. AB

12. 长，增大　13. 0.35，27.5∶35　提示：$a$ 光的波长为 625 nm，在图上对应的强度 $\varphi_a=0.35$；同理在图中找出 $b_1$ 的强度为 $\varphi_{b1}=0.60$，$b_2$ 的强度为 $\varphi_{b2}=0.07$，由 $a$、$b$ 两束光经传感器的输出强度正好相同得$\frac{2}{5}\times 0.6I_b+\frac{3}{5}\times 0.07I_b=0.35I_a$，所以$\frac{I_a}{I_b}=\frac{27.5}{35}$。

14. (1) 减小双缝间距离，增大双缝到屏的距离

(2) 13.870，0.310　(3) $d\Delta x/l$，660

15. $S=\frac{\pi}{3}RL$　提示：半圆柱体的横截面如图 13-60 所示，$OO'$为半径。设从 $A$ 点入射的光线在 $B$ 点处恰好满足全反射条件，由折射定律有 $n\sin\theta=1$。式中，$\theta$ 为全反射临界角。由几何关系得 $S=2RL\cdot\angle O'OB$，带入题给条件得 $S=\frac{\pi}{3}RL$。

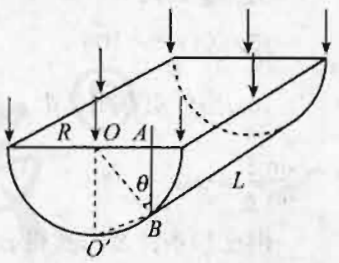


图 13-60

16. arcsin 0.75，$2\times10^8$ m/s，90°　提示：(1) 设光在 $AD$ 面的入射角、折射角分别为 $i$、$r$，$r=30°$。

根据 $n=\frac{\sin i}{\sin r}$得 $\sin i=n\sin r=0.75$，$i=\arcsin 0.75$。(2) 根据 $n=\frac{c}{v}$，得 $v=2\times10^8$ m/s。

(3) 光线在 $AB$ 面的入射角为 45°，设玻璃的临界角为 $C$。则 $\sin C=\frac{1}{n}=0.67$。

$\sin 45°>0.67$，因此光线在 $AB$ 面会发生全反射。

光线在 $CD$ 面的入射角 $r'=r=30°$

根据 $n=\frac{\sin i}{\sin r}$，光线在 $CD$ 面的出射光线与法线的夹角为 arcsin 0.75

从图 13-61 几何关系可知 $\angle FGH=30°$，$i'=i$，所以偏向角为 $90°$

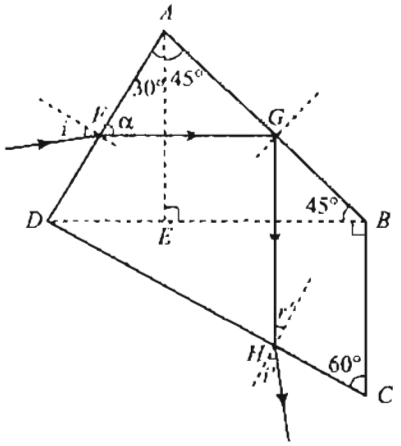



图 13-61

# 第十四章 电磁波

## 课程标准的要求

1. 初步了解麦克斯韦电磁场理论的基本思想以及在物理学发展史上的意义。
2. 了解电磁波的产生。通过电磁波体会电磁场的物质性。
3. 了解电磁波的发射、传播和接收。
4. 通过实例认识电磁波谱，知道光是电磁波。
5. 了解电磁波的应用和在科技、经济、社会发展中的作用。

## 一、本章教材概述

本章是在学生学完机械波和光波的基础上，再来学习电磁波的，所以在教科书引入时注意机械波与电磁波的比较。

第一部分是以物理学史为线索，讲述了麦克斯韦发现电磁波的背景。通过“电磁波的发现”定性地介绍了麦克斯韦的电磁场理论，通过“赫兹的电火花”给出了对电磁波预言的验证方法。

第二部分首先安排了 $LC$ 振荡电路的演示实验，以使学生获得 $LC$ 振荡电路的初步感性知识，在此基础上运用电容器充电放电现象与电感线圈的自感现象对 $LC$ 振荡产生振荡电流的物理原因作了定性的分析，并进一步从能量转化的角度突出 $LC$ 电路产生振荡电流的实质。在振荡电路的基础上讲解无线电波的发射和接收，其中出现了一些专业技术名词，例如“调制”“调幅”“调频”“调谐”“解调”，这对初学者容易造成混乱，需要在理解的基础上区分和识别。

第三部分主要介绍电磁波的应用。首先简要介绍了信息的传递从古到今的发展史，以及电磁波的传播途径。然后以电视作为实例，简要描述了摄像管的基本结构，初步介绍了电视信号发射和接收的基本过程。教科书把雷达、移动电话作为电磁波发射与接收的实例作了简要的介绍。

对于电磁波谱这部分内容，要使学生理解不同频率范围的电磁波服从电磁波的共同规律，但因为频率的不同又各自具有某些特性。教科书给出了电磁波的波谱。图中在不同的波长分布区，在电磁波谱图的下方，给出了一些应用在该波段的设备图标和一些实物图标，通俗地展现了电磁波家族各部分成员的一些用途。然后对电磁波谱的各个组成部分及其应用都作了具体的介绍。最后通过微波炉等实例说明电磁波具有能量，电磁波是一种物质。

在本章的编写中，还注意了以下问题。

**1. 注意揭示物理学探索过程中问题的背景**

现有的物理学知识都是人类从与物理世界的长期对话中，经过无数的曲折与反复，进行抽

象概括而获得的。对现有知识的历史考察，可以把发现过程放在更真实的背景下，让学生了解科学问题是如何提出的，问题是如何解决的，相应的概念和定律是如何萌生、提炼和发展的，从而达到对知识本质的深入理解。例如本章首先介绍麦克斯韦有科学神童的美誉，少年的他在数学上极有天赋。然后，介绍麦克斯韦和法拉第的关系，特别突出法拉第和麦克斯韦的精彩对白。法拉第说："你不应停留在用数学解释我的观点，而应该突破它。"麦克斯韦有天赋是事物发展的内因，受到激励是事物发展的外因。麦克斯韦作出重大贡献的原因，既来源于前人工作的成果，又有他自己的创造性工作。

教科书注意揭示物理学探索过程中问题背景的演化，阐明重大物理学问题产生的历史条件和所导致的重大发现，培育学生善于提出科学问题的灵性。例如麦克斯韦从对已知的电磁学规律的矛盾开始，提出："既然变化的磁场能够产生电场，变化的电场能产生磁场吗？"从而开始了电磁场理论的创立过程。

**2. 强调猜想在科学探究过程中的重要性**

教学中老师们都会说，麦克斯韦的电磁理论是关于电磁场的完整的理论，但是，这个理论不能从当时已有的实验结果中用演绎或归纳的方法得出来。的确，麦克斯韦用数学方法把当时已知的实验定律作了归纳，得到了简洁的、便于数学处理的形式；但是他最大的贡献是作出了两个大胆的猜想（假设）。一个猜想是，当磁场发生变化时，无论有没有闭合导体，空间都会产生感生电场。这个猜想是以电磁感应定律为基础的，相对说来还是容易想到的；另一个是，当电场发生变化时，空间会产生磁场。后一个猜想是根据对称性的考虑：自然界为什么不是这样呢？但是当时没有任何事实直接支持这个猜想，这个猜想的正确性要靠它的推论来验证。过去在中学的科学课程中过分强调了演绎和归纳，对于非逻辑的思维实际上是有意识回避的，而实际上，猜想是创造性思维中最活跃的因素！

**3. 适时地介绍电磁波的物质性**

物理课（以及其他科学课程）要引导学生形成理性思维的习惯。说电场、磁场是一种物质，要有根据，要通过事实说明它们与水流、石块这样的实物具有某些共同的属性。课程标准要求学生"通过电磁波体会电磁场的物质性"正是这个原因。实物的根本属性之一是具有能量，分析电磁波的性质之后发现，电磁波也具有能量，这是电磁场的物质性的最有力的证据之一。另一个证据是电磁波的动量，这在选修 3—5 中将有说明。

电磁场的物质性主要放到电磁波这里来讨论，在静电场和静磁场那里没有反复强调"场也是一种物质"这类口号式的话语，这样做是出于三维课程目标的考虑。

**4. 体现科学、技术、社会的相互关系**

科学技术的发展并不是孤立的，而是与社会其他系统（比如政治、经济、文化、教育等等）有一定的相互作用。人类在这个世界上，主要是通过对自然的认识和利用，求得自身的生存和发展。在科学技术高度发展的今天，科学技术影响到社会生活的方方面面。我们的教育要使学生了解如何掌握科学技术的应用方向，以有益而非有害的方式使用这种力量。

例如，教科书先介绍麦克斯韦在理论上预言了电磁波，再介绍赫兹在实验上证实了电磁波的存在，然后介绍电磁波在现代社会生活中的应用，把学生的视野扩展到科学技术给社会生活带来的巨大变化上。这样，以具体的历史发展的时间为线索，展示科学带来的技术发展，促进社会生活的变化。教材还用漫画"互联网改变了我们的生活和工作的方式"形象地展示了这种变化。

为了进一步展现科学技术社会的相互关系，教科书注意强调人、社会与自然生态和谐发展。例如，在谈到太阳辐射时写到："眼睛把太阳在最强辐射区的辐射作为自己的接收对象，

这样就能看到最多的东西，获得最丰富的信息。读到这里，你是否又一次感受到了自然万物的绝妙与和谐？这是巧合呢，还是生物进化的结果？”在“寻找地外文明”的文中呼吁：“时至今日，人们……还没有找到地外文明。目前已知的文明星球只有一个——地球。生活在地球上的人们应该更加爱护自己的地球母亲。”

**课时安排建议**

| | | |
|---|---|---|
| 第 1 节 | 电磁波的发现 | 1 课时 |
| 第 2 节 | 电磁振荡 | 1 课时 |
| 第 3 节 | 电磁波的发射和接收 | 1 课时 |
| 第 4 节 | 电磁波与信息化社会 | 1 课时 |
| 第 5 节 | 电磁波谱 | 1 课时 |

## 二、教材分析与教学建议

### 第 1 节　电磁波的发现

#### 1. 教学目标

（1）了解发现电磁波的历史背景，知道麦克斯韦对电磁学的伟大贡献。

（2）了解麦克斯韦电磁场理论的主要观点，知道电磁波的概念及通过电磁波体会电磁场的物质性。

（3）体验赫兹证明电磁波存在的实验过程及实验方法，领会物理实验对物理学发展的基础意义。

（4）领会发现电磁波的过程中所蕴含的科学精神和科学研究方法。

#### 2. 教材分析与教学建议

从理论上说，电磁学的核心内容就是电磁场的概念和麦克斯韦的电磁场方程，但这些内容非常抽象，在中学阶段还没有很好的办法让学生接受，只能要求学生对电磁场的理论有一个初步的定性的了解。教科书突出了电磁场理论中最核心的内容：变化的电场产生磁场，变化的磁场产生电场；变化的电场和磁场交替产生传播出去形成电磁波。

电磁场理论建立的历史过程是对我们有极大启发的激动人心的过程，适当介绍这一历史过程对学生有教育作用，在思想方法上也会受益。首先让学生体会麦克斯韦电磁场理论的基本思想在物理学发展中的理论意义；其次是体会科学家研究物理问题的思想方法，例如联想、推理、类比、对称等；还要了解赫兹实验在物理学发展中的贡献以及用实验来验证理论的方法。

本节的知识对学生而言是比较抽象的，学习起来有一定难度。对麦克斯韦电磁场理论不要求大量的展开，要突出电磁波形成的条件和背景。

**(1) 伟大的预言**

对于电磁场理论的核心之一——变化的磁场产生电场，教科书从电磁感应现象中随时间变化的磁场在线圈中产生感应电流谈起。教师可以先引导学生看教科书图 14.1-1，思考由甲图到乙图的逻辑关系。为了使学生容易接受，这里可做一个演示实验，实验装置如图 14-1 所示，当穿过螺线管的磁场随时间变化时，上面的线圈中产生感应电动势，引起感应电流使灯泡发光。教师可提出问题：线圈中产生感应电动势说明了什么？指出麦克斯韦认为变化的磁场在线圈中产生电场，正是这种电场在线圈中引起了感应电流。接着提问：如果用不导电的塑料线绕制线圈，线圈中还会有电流、电场吗？再问：想象线圈不存在时线圈所在处的空间还有电场吗？这种逐步抽象的方法可以帮助学生理解麦克斯韦的想法。要说明，麦克斯韦认为线圈只不过用来显示电场的存在，线圈不存在时变化的磁场同样在周围空间产生电场。要强调指出，麦克斯韦揭露了电磁感应现象的本质——变化的磁场产生电场。

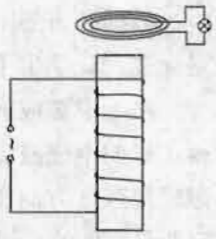


图 14-1

对于电磁场理论的另一个核心——变化的电场产生磁场，在中学我们还没有一个简单的实验能清楚地说明。在教学中应该突出基本要点的提出依据，即电和磁的对称性。进行物理学中存在对称性的教育和类比推理的思想方法教育，这里是一个很好的切入点。

教师可以启发学生回忆学过的知识，有哪些问题是从对称角度提出的。例如奥斯特发现电生磁后，法拉第从对称的角度出发提出磁生电的问题，最终经过 10 年的努力发现电磁感应现象。因为有前面的例子作铺垫，再引出当前的例子，就更加自然且具有说服力。麦克斯韦继承法拉第关于场是客观存在、电场与磁场统一的思想，根据电现象与磁现象的相似性和变化的磁场能产生电场的概念，相信电场和磁场具有对称之美，经过反复思考提出一个假设：变化的电场产生磁场。有了这一步，麦克斯韦就建立了完整的电磁场理论。

教科书中提出："麦克斯韦推断：如果在空间某区域中有周期性变化的电场，那么……这个变化的电场就在空间引起变化的磁场……空间可能存在电磁波。"对于其中的"周期性变化"的理解，教学中不应作为统一的要求。如果学生对此有疑问，可参考以下教学片段进行解释。

**教学片段**

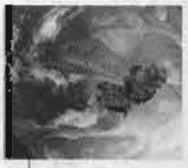
**对麦克斯韦电磁场理论中"周期性变化"的理解**

由 $E=\frac{\Delta\Phi}{\Delta t}$ 可知，如果磁通量 $\Phi$ 均匀变化（即均匀变化的磁场），则产生的电动势 $E$ 是恒定的，在周围空间中形成的电场是恒定不变的，而一个恒定不变的电场不会继续激发磁场；反之，如果磁通量 $\Phi$ 是周期性变化的，则产生的电动势 $E$ 也是周期性变化的，即在周围空间中形成的是周期性变化的电场，这种周期性变化的电场将在空间中又形成周期性变化的磁场……由此，周期性变化的电场和磁场交替激发，形成了一个紧密联系不可分割的整体——电磁场，这个整体由近及远向外传播，就形成了电磁波。

**(2) 电磁波**

通过"周期性变化的磁场产生周期性变化的电场，周期性变化的电场产生周期性变化的磁场"来讲电磁波的形成，在讲电磁波的基本特点时要注意与机械波进行对比，使学生明确两种





波的异同点。

教师在讲述电磁波和机械波的对比时，突出电磁波可以在真空中传播。电磁波传播的波速是光速。让学生了解光是以波动形式传播的一种电磁振动，即光是电磁波。

对于电磁波的教学，应通过对教科书图 14.1-3 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 $\boldsymbol{E}$、$\boldsymbol{B}$、$v$ 矢量在空间中互相垂直；②在电场强度为最大值的空间某一位置上，相应地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场理论中所预言的。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。

电磁波的存在是麦克斯韦理论导出的必然结论。在说明周期性变化的电场在周围空间产生周期性变化的磁场，周期性变化的磁场在周围空间产生周期性变化的电场，形成向外传播的电磁波时，要强调“周围空间”的含义，即变化的电场（磁场）产生的磁场（电场）不局限于变化电场（磁场）所在处而是向周围空间扩展出去。

**（3）赫兹的电火花**

赫兹实验是验证电磁波是否存在的实验，它是检验麦克斯韦理论是否正确的试金石，因此也是物理学史上起奠基作用的经典实验。这个实验对学生认识物理世界来说，同样会起到重要作用。在进行这部分教学时，最好在分析讨论之后再做实验。

在讲述这个实验时，应该使学生认识到赫兹对于物理现象的敏锐洞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线圈放电时发生的电火花，立即想到电火花的跳跃实质是电荷在做间断快速振动引起的。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，赫兹设计了如教科书图 14.1-4 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，导线环成了电磁波的检验器。正如赫兹设想的那样，实验获得了成功。电磁波从感应圈通过空间传到导线环，总需要一定的时间，因此第二个火花比第一个火花必定有一点延迟，即检测器的火花和感应圈的火花不可能同时出现。在第一次观察到感应火花两年之后，1888 年赫兹终于测出了火花的传播速度，而且恰如麦克斯韦所预言的那样，它就是光速。这是科学史中一箭双雕的事件，既证实了电磁波的存在，又证实了光是电磁波。

“做一做”栏目中，捕捉电磁波的实验能够加深对电磁波存在的认识，最好能够在课堂上进行演示。该实验装置与赫兹的实验装置相比，采用了导体管做成的发射天线和接收天线，明显提高了电磁波发射和接收的效率，使氖泡两端更容易聚集较多的电能。赫兹装置中的导电环，必须在获得很高电压后才能放电出现电火花。采用氖泡替代导电环，不需要很高的电压就可以发光，并且亮度较高，更易于观察。

### 3. 问题与练习

内容分析

本节的问题与练习是围绕麦克斯韦电磁场理论和电磁波而编写的，是对学生学习本节知识后的巩固和拓宽。

解答与说明

1. 麦克斯韦在法拉第电磁感应现象的基础上提出“变化的磁场产生电场”的观点。“变化的电场产生磁场”是在他相信电场和磁场有和谐的对称性的基础上提出来的又一个假设。赫兹

通过实验证实了麦克斯韦的假设，说明了这两个假设的正确性。

说明：本题要求学生掌握麦克斯韦两个重要假设的科学依据，使学生明白科学的假设不是毫无根据的胡思乱想，而是在总结前人大量的研究成果的基础上通过分析、计算、推理和大胆猜想提出来的，是探索自然界的一种常用的方法。

2. 麦克斯韦电磁场理论的主要论点是：①变化的磁场激发电场；②变化的电场激发磁场。根据这两个论点，麦克斯韦进一步推断：周期性变化的磁场激发变化的电场，变化的电场又激发变化的磁场。变化的电场和磁场交替激发，由近及远向外传播，形成电磁波。

3. 日光灯启动时正在放音的收音机里会发出“喀、喀”的声音；电吹风工作时会影响电视接收信号；手机接收信号时会影响电视接收信号，这些现象都说明了电磁波的存在。

说明：本题是一道开放性的题目，通过对电磁波的理解和赫兹实验的学习，激发学生的学习兴趣，从理论知识向实际应用转化，在实践中提升学生的动手能力、实验能力，达到学以致用的目的。

## 第 2 节　电磁振荡

### 1. 教学目标

（1）通过对电磁振荡的实验观察，体会 $LC$ 电路中电荷、电场、电流、磁场的动态变化过程及电磁波的产生过程。

（2）了解 $LC$ 振荡电流及其相关物理量的变化情况。

（3）了解固有周期和固有频率的公式，了解实际生产生活中调节振荡电路的频率的基本方法。

### 2. 教材分析与教学建议

本节内容是全章的重点和难点。由于学生对本部分内容不熟悉，所以教科书从演示着手，使学生获得一些感性认识后再学习 $LC$ 振荡电路和振荡电流。教科书对电磁振荡产生过程的分析是从能量转换入手，应用电磁感应和电容器的相关知识，定性分析了在各个阶段，电场能、电荷量、电压、电流、磁感应强度和磁场能的变化规律。在此基础上从能量观点指出振荡电流的物理性质，并介绍了阻尼和无阻尼振荡以及等幅振荡（未明确提出概念）。在本节最后讲了 $LC$ 振荡电路的固有周期和频率的公式，着重强调了周期、频率及其与自感系数 $L$、电容 $C$ 的关系。引入 $LC$ 振荡电路的目的是使学生对迅速变化的电流有具体形象的认识，不用做过多要求。

**（1）电磁振荡的产生**

教科书从介绍 $LC$ 回路的组成并用电流表指针的摆动演示振荡电流开始，使学生获得一定的感性认识。实验电路简单直观，指针来回的摆动容易使学生信服 $LC$ 回路中的电流是振荡电流，所以一定要做好演示实验。实验中要注意有时由于电感线圈电阻不够小、电感不够大，使得电路中不能形成振荡电流或振荡电流周期过小，这时虽然仍然看到电流表指针来回摆动，但这是指针做自由振动造成的假象。因此，要很好地准备实验，应选择适当的电感线圈和电容器使电路的固有周期与指针的固有周期同一数量级。为了检验 $LC$ 回路中是否产生振荡电流，可改变电感线圈的电感 $L$ 或电容器的电容 $C$，观察指针摆动的周期是否随之改变。如果指针摆动的周期跟着改变则说明电路中产生了振荡电流；如果指针摆动的周期不变则说明指针做自由振

动，电路中没有产生振荡电流。

教科书对电磁振荡产生过程的分析是从能量转换着手，重点放在电路中电场能和磁场能的相互转化上。教学时可引导学生逐步分析教科书图 14.2-2 甲中所示的电磁振荡过程。要使学生明确何时电场能转化为磁场能，何时磁场能转化为电场能；何时电场能最大，何时磁场能最大。电场能与磁场能间的转化条件是电感线圈的自感作用和电容器的充放电作用。要启发学生从电磁感应的角度搞清楚：为什么充好电的电容器开始放电时电路里的电流不能立刻达到最大值？电场能为什么不能立刻全部转化成磁场能？为什么电容器放电完毕时电路里的电流还要继续流动？

电磁振荡产生的物理过程比较抽象，为了帮助学生理解，可用单摆的摆动进行类比。电容器充完电时相当于把摆球从平衡位置拉到最高点，电场能相当于摆球势能，磁场能相当于摆球动能。电容器在放电过程中电场能转化为磁场能，相当于摆球由最高点向平衡位置运动，摆球势能转化为动能。电容器放电完毕电场能全部转化为磁场能，相当于摆球到达平衡位置时摆球势能全部转化为动能。

如果想使学生建立起较完整的电磁振荡概念，就要使学生明确“电”不仅指电容器两极板上的电荷，也指该电荷产生的电场；“磁”指电感线圈中的电流产生的磁场。电磁振荡是指这些电荷、电场、电流、磁场都随时间做周期性的正弦变化的现象。要指出振荡电流是一种频率很高的交变电流，很难用交流发电机产生，一般用 $LC$ 回路产生。可说明在演示实验中我们有意加大电感线圈的电感 $L$ 和电容器的电容 $C$ 使振荡电流周期变大（频率减小）以便观察，无线电技术中所应用的振荡电流频率要高得多。

对于阻尼振荡和无阻尼振荡，除了按教科书内容介绍外，还可与单摆的摆动进行对比说明。本节“做一做”栏目中“用传感器和计算机观察振荡电流”的实验可以使用朗威数字化实验系统（DISLab）中的电流传感器或电压传感器。如果学校没有配备传感器设备，也还可用示波器演示 $LC$ 回路产生阻尼振荡时的波形，让同学观察振幅衰减的情况，并用示波器观察补充能量后产生的振荡波形，观察振幅不变的情况。

**（2）电磁振荡的周期和频率**

要启发学生体会到：$LC$ 回路的周期、频率由电路本身的特性（$L$、$C$ 值）决定，所以把电路的周期、频率叫做固有周期、固有频率。教科书没有做进一步的分析和证明，让学生做定性的思考后直接给出了周期公式和频率公式。这两个公式的证明在中学不易讲清楚，我们的目的是让学生通过实验现象的观察了解公式内容，能应用公式对有关问题进行简单的分析、计算。教科书强调了公式中各个物理量的单位，这是有的学生容易出错的地方，课堂上可让学生做一些简单的基本练习。

## 第 3 节　电磁波的发射和接收

### 1. 教学目标

（1）了解有效地发射电磁波的两个条件。

（2）了解调制、调幅、调频、调谐、解调、电谐振在电磁波发射、接收过程中的作用。

（3）通过对电磁波的产生、发射、接收过程及基本电路的简单分析，领会无线电波在实际生活、生产中的应用流程。

## 2. 教材分析与教学建议

本节以有效发射电磁波的两个条件为线索，讲了开放电路以及调制、调频、调幅的概念，然后从在空间中选择我们需要的电磁波的角度讲了接收原理及方法，在此之上介绍了解调。这一节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。

**(1) 无线电波的发射**

无线电波的发射是要解决如何运用无线电波传递人们需要的信息。在发射时需要解决的问题有两个：①如何向外有效地发射无线电波（传得足够远）？这需要利用开放电路与高频电磁波。②如何有效地传递人们所需要的信息？这需要通过调制来解决。

对于五个专业技术名词“载波”“信号”“调制”“调幅”“调频”，教师需要进行比较细致的讲解。根据教科书中的叙述，要引导学生注意这几个术语的区别。最好使用示波器演示调幅波，使学生亲身感受调幅波的形态。教师应该引导学生看调频波的示意图。通过实验和观察，区别“调幅”和“调频”的概念，讲清楚它们各自的优势和局限，加深对“调制”概念的理解。对这部分知识内容，最好依照教科书进行简洁的处理，不要再过多地增加新东西。

在电磁波的调制的教学中，首先要说明为什么需要调制，指出是因为要传送的信号频率低，不易直接发射出去。其次要说明什么叫调制和如何进行调制，指出高频电磁波容易发射，可借助高频电磁波把电信号发射出去，使高频电磁波随低频电信号变化就叫调制。也可引用一些形象的比喻来解释调制，如把声音比做书信，高频振荡比做邮车，调制相当于书信上了邮车。具体的调制方法实际上比较复杂不易讲清楚，可利用教科书图 14.3-2、14.3-3 简单介绍。

**(2) 无线电波的接收**

在电磁波接收的教学中可以先提出问题：空间中存在各种各样电磁波，怎样接收到我们所需的电磁波呢？接收电路解决了获得无线电波的信号和从中选取需要的无线电波信号两个问题，解调则解决了从被调制的高频电流中取出调制信号的问题。

教师在这部分知识的教学中，应注意讲清两个基本概念和接收无线电广播后处理的大体过程。两个基本概念是“调谐”和“解调”。在介绍“调谐”时，可以引导学生复习共振现象及条件，在此基础之上讲解电谐振现象以及调谐的概念，讲课时可结合收音机选台以及波段转换，让学生明确选台时要改变电容 $C$，波段转换时要改变电感 $L$。对于怎样进行“解调”，教科书中没有涉及相应的电路，因此在这部分内容中最好不要过多地展开。对无线电波接收后处理的大体过程应该是调谐、解调、放大、播放。教师应该突出重点部分，把重点放在“调谐”和“解调”的过程上。

教师可以结合教科书表 1 并绘图进行具体地讲述。近距离信息传递途径是直线传播；中距离信息传递途径是利用短波在电离层被反射的传播；远距离信息传递途径是利用微波能够穿过大气层，可以通过卫星转发，因而传播得更远。

## 3. 问题与练习

内容分析

本节的问题与练习是按照电磁波的发射、传播、接收的顺序来安排的，围绕调制、调幅、调频、调谐、解调等几个易混淆的概念加以巩固理解，引导学生在掌握该节内容的基础上加强动手能力的训练，自己制作简单的收音机，并应用所学知识分析解决简单的故障，是对学生综

合能力的培养。

解答与说明

1. 调制——把信息加在载波上，就是使载波随信号改变，这种技术叫做调制。

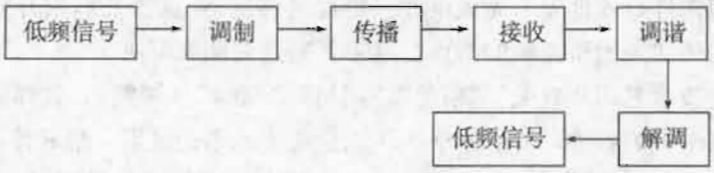
调幅——使高频载波的振幅随信号改变，这种调制叫做调幅。

调频——使高频载波的频率随信号改变，这种调制叫做调频。

调谐——使接收电路产生电谐振的过程叫做调谐。

解调——从高频调制信号中取出低频信号的过程叫做解调。

方框图如下。




2. 调幅波是在载波波形的基础上叠加了音频信号，调幅波的形状是上下对称的，以低频的音频信号作为包络线，载波的高频信号被包含在低频信号的包络线中。

3. 根据公式 $\lambda=\frac{c}{f}$，有

$$\lambda_1=\frac{c}{f_1}=\frac{3.0\times10^8}{2.000\ 9\times10^7}\ \text{m}=14.993\ \text{m}$$

$$\lambda_2=\frac{c}{f_2}=\frac{3.0\times10^8}{1.999\ 5\times10^7}\ \text{m}=15.004\ \text{m}$$

它们都属于短波。

4. 频率较高的电台接收不到，是因为收音机调谐电路的固有频率达不到接收信号的频率，不能产生电谐振，这就需要增加电路的固有频率。由 $f=\frac{1}{2\pi\sqrt{LC}}$ 可知，要增加 $f$ 则应减小 $L$，故应减少线圈匝数。

## 第4节　电磁波与信息化社会

### 1. 教学目标

(1) 了解电磁波在推动信息化社会发展中的巨大作用。

(2) 了解电视、雷达、移动电话等电磁设备的基本原理。

### 2. 教材分析与教学建议

本节以现代信息技术的传递为主线，对实际中广泛应用的器材设备，如电视、雷达、移动电话、因特网等作了简要的介绍。对一些专业词汇，比如“数字信号”等，进行了一定的拓展。本节从多角度展示了信息化社会给人类带来的文明与进步。电视、雷达是电磁波在科学技术上的应用，它们越来越普及，学生很感兴趣，应该向学生介绍。在中学介绍电视、雷达时不可能讲清各种复杂的技术问题，但初步介绍它们的基本工作原理，使学生具备一些普通常识还是可能的，再配合一些挂图和视频资料进行介绍，学生不难接受。为了使学生更加深入地体验

信息化社会对人全方位的影响，在“说一说”中，提出了“你的信息化生活”等问题供学生讨论。在“科学漫步”中，介绍了模拟信号和数字信号的知识。

**（1）电磁波与信息的传递**

通信就是信息的传输与交换，通信的目的是传输消息。有了人类的活动，就产生了通信，例如信鸽、烽火、旗语等。这些早期的通信方式，无论在距离、速度，还是在可靠性和有效性方面都有局限。直到19世纪初，人们开始利用电信号传输消息。1838年莫尔斯（F. B. Morse）发明了电报。1876年贝尔（A. G. Bell）发明了电话，直接将声信号转变为电信号沿导线传送。1901年，马可尼（G. Marconi）成功实现了横渡大西洋的无线电通信。从此，无线电通信方式得到了广泛的应用和迅速的发展。

一个多世纪以来，无线电通信技术得到飞速的发展，大致经历了三个阶段：以1838年发明电报为标志的通信初级阶段；以1948年香农（C. E. Shannon）提出信息论开始的近代通信阶段，其明显特点就是不断开拓更高频率，由低频端向高频端发展，从长波、中波、短波、超短波发展到微波；第三阶段，就是20世纪80年代出现的以光纤通信系统为代表和以综合业务数字网迅速崛起为标志的现代通信阶段，光纤通信、卫星通信和移动通信为现代通信的三大主要发展方向。

**（2）电视**

首先应该让学生了解电视诞生的历史。简述1927年英国发明家贝尔德首次在伦敦公开表演远处传来的活动图像事件，说明人类第一次用电来传递活动图像的经历，它标志着电视的诞生。

电视的基本思想是把一幅图像分解为许多点，把每个点的亮暗（颜色）变成一个电信号传送出去，接收机再把一个电信号还原成一个一定亮暗（颜色）的点。这种把复杂问题分解成简单问题的组合的思维方法对培养学生思维能力是有启发的，如果条件许可向学生作些介绍有好处。

对于摄像管的教学，可以分三步进行。首先简述摄像管的工作原理，其次根据教科书插图熟悉摄像管的主要结构，最后讲述“一帧图像”扫描的概念。这部分重点是摄像管的工作原理，即光信号通过摄像管转变成为电信号，而光电转换的装置是由摄像管的内部结构实现的。教师应该引导学生了解摄像管内部主要结构的设计思想，知道在摄像管感光屏涂覆着一层光敏物质，各处受到光照不同，电阻也就不同。对于显像管，注意说明怎样实施“解调”，即光电转换的逆过程——电光转换的实现方法。显像管与摄像管一样实现“同步扫描”，才会在显像管中出现与摄像管中相同的图像。

**（3）雷达**

雷达的英文为Radar，是“无线电探测与定位”的缩写。雷达的基本任务是测定有关目标的距离、方位和速度等状态参数。雷达主要由天线、发射机、接收机（包括信号处理机）和显示器等部分组成。

雷达发射机产生足够的电磁能量，经过发射转换开关传送给天线。天线将这些电磁能量集中在某一个很窄的方向上形成波束，并向前传播。电磁波遇到目标后，将沿着各个方向被反射，其中的一部分反射回来被雷达的天线获取。天线获取的能量经过收发转换开关送到接收机，形成雷达的回波信号。接收机放大回波信号，经过信号处理机处理，提取出包含在回波中的信息，送到显示器，显示出目标的距离、方向、速度等。

为了测定目标的距离，雷达准确测量从电磁波发射时刻到接收到回波时刻的延迟时间。这

个延迟时间是电磁波从发射机到目标，再由目标返回雷达接收机的传播时间。根据电磁波的传播速度，可确定目标的距离为 $s=\frac{ct}{2}$，其中 $s$ 是目标距离，$t$ 是电磁波从雷达到目标的往返传播时间，$c$ 为光速。

雷达测定目标的方向是利用天线的方向性来实现的。雷达把天线指向要探测的方向，一旦发现目标，从雷达接收机上读出天线的指向角，就是目标的方向角，两坐标雷达只能测定目标的方位角，三坐标雷达可以测定方位角和俯仰角。

测定目标的运动速度是雷达的一个重要功能。雷达测速利用了物理学中的多普勒原理，当目标和雷达之间存在着相对运动时，回波的频率就会发生改变（称为多普勒频移），用于确定目标的相对速度。

**（4）移动电话**

本部分知识要注意讲清三点：①要让学生简要了解移动通信的发展史，使他们感到移动通信的迅猛发展；②重点说明每个移动电话机既是一个电磁波发射器，又是一个电磁波接收器；③介绍什么是“基站”，为什么要建设基站。这是因为手持移动电话发射功率小，灵敏度不高，当手持电话与其他用户通话时，要靠较大的固定无线电台转接，这种固定的无线电台叫做基站，它与电话交换机相连。城市中高大建筑物上经常有移动通信基站的天线。引导学生看教科书中移动电话靠基站转接的示意图，增加对移动电话及其设备的直观认识。

### 3. 问题与练习

解答与说明

1. 收音机上 MW 为中波波段，频率范围 525～1 605 kHz，波长范围 $1.86\times10^{2}$～$5.71\times10^{2}$ m；SW 为短波波段，频率范围 2.0～22.00 MHz，波长范围 $1.36\times10^{2}$～$1.50\times10^{2}$ m；FM 为调频波段，频率范围 87～108 MHz，波长范围 2.8～3.45 m。电视机 VHF（L）（甚高频）频率范围 48.5～92 MHz，波长范围 3.26～6.19 m；VHF（H）（甚高频）频率范围 167～223 MHz，波长范围 1.35～1.80 m；UHF（特高频）频率范围 470～960 MHz，波长范围 0.31～0.64 m。

2. 由于 $c\gg v$，故可不考虑电磁波传播过程中飞机的位移。设雷达两次发射电磁波时飞机分别位于 $s_1$、$s_2$ 处，则 $2s_1=ct_1$，$2s_2=ct_2$。

$$\Delta s=s_1-s_2=\frac{1}{2}c(t_1-t_2)=\frac{1}{2}\times3.0\times10^{8}\times2\times10^{-6}\ \text{m}=300\ \text{m}$$

$$v=\frac{\Delta s}{\Delta t}=\frac{300}{0.8}\ \text{m/s}=375\ \text{m/s}$$

3. 组织学生查阅资料，完成报告。

## 第 5 节　电磁波谱

### 1. 教学目标

（1）通过实例认识电磁波谱。

（2）了解电磁波谱中各波段的主要特性和在科技、经济、社会发展中的主要应用。

（3）了解电磁波具有能量，是一种物质。

(4) 了解太阳辐射能量的分布情况。

## 2. 教材分析与教学建议

本节阐述了电磁波谱的组成，分波段解释了无线电波、红外线、可见光、紫外线、X 射线、γ 射线的特点与应用，并指出电磁波具有能量。

课程标准对这些内容的要求都属于“了解”的层次，没有繁难的推理和计算。因此，教学方式以引导学生阅读和讨论为主。对学生感到疑惑的地方，教师可参考“教学资源库”做些讲解或者说明。对学生以前没有接触的一些仪器设备，比如红外线测温仪或微波炉等，在这里只是简单地介绍相关知识，不要求掌握其工作原理。

**(1) 电磁波谱**

无线电波、红外线、可见光、紫外线、X 射线、γ 射线合起来构成了范围广阔的电磁波谱。它们都是电磁波，因此服从电磁波具有的共同的规律；另一方面，由于频率和波长的不同又表现出不同的特性。

教科书中给出了电磁波的波谱图。在电磁波谱图的下方不同的波长分布区，给出了一些应用在该波段的设备图标和一些实物图标。对收音机、电视机的图标，教师应该向学生做进一步解释，说明收音机一般接收的信号是在中波、短波范围，电视机一般接收的信号是在微波范围。在 X 射线段，教科书中放入的是一张海马骨骼的图标。在 γ 射线段是一张放射性物质的国际通用标志。这些照片都比较直观地显现了电磁波家族“各部分成员”的主要用途。教师要引导学生重点注意教科书中可见光的波长分布位置，了解无线电波、红外线、可见光、紫外线、X 射线、γ 射线波长的排序。

**(2) 无线电波**

教科书首先给出无线电波的波长范围，即波长大于 1 mm（频率小于 300 GHz）的电磁波是无线电波。

引导学生再看电磁波谱图，指出无线电波包括长波、中波、短波、微波。微波炉中的微波能够使食物的分子做剧烈振动，使得内能增加，温度升高。对产生微波的装置——磁控管可以不做要求。对天体辐射产生的无线电波以及射电望远镜可以作简要的介绍，但是在后面的“科学漫步”栏目里，标题为“寻找地外文明”的内容已经涉及这部分知识，所以建议在此处不宜展开。

**(3) 红外线**

1800 年英国物理学家赫谢耳用灵敏温度计研究光谱各种色光的热作用时，把温度计移至红光区域外侧，发现温度更高，说明这里存在一种不可见射线，后来就叫做红外线。教科书中对于红外线的波长范围没有具体给出，也不要求记忆，但是，教学中应该明确地告诉学生，红外线的波长比无线电波短，比可见光长。一定要能够结合电磁波谱的图说明红外线波长所处的位置。

教师对红外线的用途应该作比较详细的讲解。因为学生经常能够见到或者听到这类信息，特别是红外线测温仪、红外线夜视仪、红外摄影、红外遥感技术的运用。教师可以对教科书进行补充。例如，人体也是红外线辐射源，因此，即使是人隐蔽在掩体后，也能够被红外线探测装置发现。在一些控制导弹飞行的系统中，由于敌机喷气发动机会发出红外线，也常常利用红外线进行制导，实现准确的目标跟踪定位，进行精确打击。对这部分内容的教学，目的在于开阔学生的眼界，拓展学生的知识面。

**(4) 可见光**

可见光是我们每天接触最多的电磁波，我们的眼睛能够感觉它的存在，其波长范围大约为400～700 nm。

教科书给出了不同颜色光的波长分布图表，然后提到大气把阳光向四面八方散射。傍晚的太阳颜色发红，是因为傍晚的阳光在穿过厚厚的大气层时，蓝光、紫光大部分被散射掉了，剩下红光、橙光透过大气射入我们的眼睛。分子散射理论首先是由瑞利提出来的。瑞利定律指出：散射光强和波长的四次方成反比，即：$I\propto\frac{1}{\lambda^4}$。如图14-2所示，傍晚太阳穿过大气层的厚度比正午时太阳穿过大气层的厚度大，而且蓝光、紫光的波长相对较短，所以散射得较多，因此才剩下更多的红光、橙光透过大气射入我们的眼睛，导致傍晚的太阳比正午的太阳的颜色更发红一些。

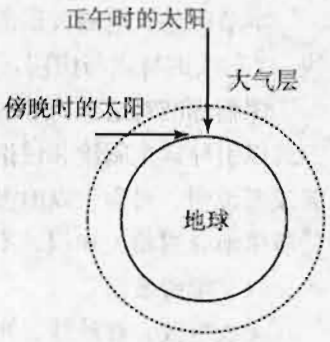


图14-2

**(5) 紫外线**

1801年德国物理学家里特发现，在紫外区放置的照相底版感光，荧光物质发光。

波长范围大约在5～370 nm的电磁波是紫外线。教科书对紫外线的能量较高作了说明，为以后的“波长越短（频率越高）电磁波的能量越大”的结论作了铺垫，希望此处的教学能够引发学生的注意。

对于紫外线对生物细胞的影响以及许多物质在紫外线照射下会发荧光的状况做简单的说明，目的是加深对紫外线的认识，开阔学生眼界。例如：紫外照相可显示出很细微的差别，从而可以清晰地分辨出留在纸上的指纹；照明用的日光灯和诱杀害虫的黑光灯，医院里病房和手术室的消毒，治疗皮肤病和硬骨病等，都利用了紫外线的高能量。

**(6) X射线和γ射线**

1895年德国物理学家伦琴在研究阴极射线的性质时，发现阴极射线（高速电子流）射到玻璃管壁上，管壁会发出一种看不见的射线，伦琴把它叫做X射线。

教科书中用“波长比紫外线更短的电磁波就是X射线和γ射线”“波长最短的电磁辐射是γ射线”来描述它们。根据$E=h\nu=\frac{hc}{\lambda}$可得，频率越高（波长越短），射线的能量就越大。γ射线和X射线相比，因为γ射线的波长更短，所以能量也更大。由于γ射线具有很高的能量，才被人们用于治疗某些癌症以及金属缺陷探测等领域。当然，对人体进行医疗检查常用的“CT”以及“胸透”，都不允许用极高能量的射线，以免对人体造成危害，但是同时又要求能够深入人体内部进行探测。X射线恰恰具备这个优点。“CT”是“计算机辅助X射线断层摄影”的简称。

X射线穿透本领很强，主要应用于工业上金属探伤和医疗上透视人体等方面。

**(7) 电磁波的能量**

电磁波具有能量，可以从使用微波、无线电波、可见光的仪器设备去感知。学生在日常生活中早有体验，比如微波炉、收音机、电视机、大功率的白炽灯、阳光等等。用事实说明电磁波都具有能量。

具有能量是物质的一个基本属性，过去在学习电场和磁场中曾经遇到过，正因为电场和磁场具有能量，所以说电场和磁场都是物质。现在电磁波具有能量，因此说明电磁波也是一种物

质。教师在这里可以让学生进一步理解物质的不同形态。

关于电磁波的物质性，还可以说明电磁波可脱离电荷独立存在、不需要借助媒质传播、具有能量，这些特性简单说明电磁波和实物粒子一样，是自然客体。这是人们对于物质认识的一个重大发展。

**(8) 太阳辐射**

教科书给出了太阳辐射能量大部分集中在可见光和红外线、紫外线区域的图形分布（教科书图 14.5-2），并提出了非常有趣的问题："我们的眼睛正好对这个区域的电磁辐射最敏感……这是巧合呢，还是生物进化的结果？"教师要利用好这个激发学生学习兴趣的机会。因为答案并不唯一，结论是开放式的，有利于学生发挥想象、大胆猜测和探究。这种没有确定答案的问题在新教科书中出现，有利于张扬学生的个性，激励和开启学生的好奇心和探索欲。

**(9) 科学漫步"寻找地外文明"**

教科书在这部分内容讲述了人类在探索地外文明的道路上所做的主要工作。建议对这部分教学内容的安排应该根据实际情况，采用灵活多样的方式进行。例如，可以学生自己阅读教科书，也可以在教师引导下，由学生查阅资料后进行交流研讨，或者就某一主题写一份调查报告。总之，无论采用什么样的学习方式，目的都在于激发学生热爱科学、探索科学、学习科学的热情。

### 3. 问题与练习

解答与说明

1. 从电磁波可以脱离电荷独自存在、不需借助媒质传播、具有能量三个方面可以看到，电磁波和实物粒子一样是一种物质，这是人们对于物质认识的一个重大发现。

2. 光传到眼睛需要的时间 $t=\frac{s}{c}=\frac{10}{3.0\times10^{8}}\ \mathrm{s}=3.3\times10^{-8}\ \mathrm{s}$，在这个距离的完全波有 $n=\frac{s}{\lambda}=\frac{10}{6.0\times10^{-7}}=1.7\times10^{7}$ 个。

3. 电视机接收无线电波，遥控器发出红外线，医院用于灭菌消毒的紫外线，医院透视时用的 X 射线，金属探伤用的 γ 射线。

## 三、教学设计案例

### 第 1 节　电磁波的发现

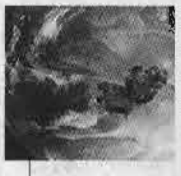
#### 教学目标

(1) 了解发现电磁波的历史背景，知道麦克斯韦对电磁学的伟大贡献。

(2) 理解麦克斯韦电磁场理论的主要观点，知道电磁波的概念及通过电磁波体会电磁场的物质性。

(3) 体验赫兹证明电磁波存在的实验过程及实验方法，领会实验对物理学发展的基础意义。





(4) 领会发现电磁波的过程中所蕴含的科学精神和科学研究方法。

## 教学过程

● 导入新课

通过对前面机械波中的水波、声波、绳波等的学习，我们对机械波有了一定的了解。请同学们回忆有关机械波的知识。

问：机械波是如何形成的？

答：振源产生振动，通过介质将振源的振动形式向外传播即形成机械波。

问：机械波有哪些性质？

答：机械波具有干涉、衍射、反射、折射等性质。

在上一章提到“光是一种电磁波”，我们生活中的电视信号、收音机信号、手机信号等都是电磁波，电磁波与我们的生活息息相关。比如，我国的神舟六号、嫦娥一号升空后距离地球有几十万公里之遥，我们是靠什么去测量和控制的呢？是地面指挥站通过电磁波进行联系和控制。

为什么电磁波得到这样广泛的应用？它是如何产生和发展的呢？它与机械波有何不同呢？我们在这节课里首先来学习电磁波发现的历史，进而研究它的一些主要特征。

● 进行新课

发现电磁波的历史背景：简要介绍麦克斯韦生平和发现电磁波的历史过程，激发学生探究新鲜事物的热情和学习的兴趣。

### 一、伟大的预言

1. 变化的磁场产生电场

通过电磁感应现象的学习我们知道：闭合线圈中的磁通量发生变化就能产生感应电流，如教科书图 14.1-1 甲所示，电流表指针将发生偏转。

问：为什么会产生感应电流呢？自由电荷是如何定向移动的呢？请同学们思考回答。

麦克斯韦认为，一定是有了感应电场，电路中的电荷就在这个电场的作用下做定向移动，产生了感应电流，电磁感应的实质是变化的磁场产生电场。

问：如果回路不闭合，线圈中有感应电流吗？有感应电动势吗？有电场吗？

答：无感应电流，但是感应电动势和电场仍然存在。

问：若空间中没有线圈，还有电场存在吗？

答：有。

师：麦克斯韦在对法拉第、安培、奥斯特、库仑等科学家的研究成果进行大量的分析、计算的基础上，加以自己的推理、猜想，大胆地预言：即使变化的磁场周围没有闭合电路，同样也产生电场。因此，**变化的磁场产生电场**，这是一个普遍规律。

如教科书图 14.1-1 乙所示，该图中的水平环状线是电场线而不是导线，这是由变化的磁场所产生的感应电场，这种感应电场的电场线与我们前面所学静电场中电场线是有区别的，它是闭合的，是一种涡旋电场。

2. 变化的电场产生磁场

师：我们知道自然规律存在着对称性与和谐性，例如：有作用力就有反作用力；奥斯特发现了“电生磁”现象，在此基础上法拉第花费十年时间研究，发现了“磁生电”现象；描述电场可以用电场强度、电场线，描述磁场可以用磁感应强度、磁感线等。麦克斯韦认为“电”与

“磁”也是对称的、统一的。既然变化的磁场能够产生电场，那么变化的电场能否产生磁场呢？麦克斯韦大胆地假设：**变化的电场能够产生磁场**。如教科书旁批所说，这个假说是基于麦克斯韦对自然规律的洞察力提出的，是具有创造性的。

问：教科书中提出：“如果在空间某区域中有周期性变化的电场，那么……这个变化的电场就在空间引起变化的磁场……空间可能存在电磁波。”为什么要“周期性变化”呢？

师：这也是麦克斯韦在当时的一个大胆猜想，后来用麦克斯韦方程组及实践所证明的理论。我们可以由前面所学知识加以类比理解。由 $E=\frac{\Delta\Phi}{\Delta t}$ 可知，如果磁通量 $\Phi$ 均匀变化，则产生的电动势 $E$ 是恒定的，在周围空间中形成的电场是恒定不变的，而一个恒定不变的电场不会继续激发磁场；反之，如果磁通量 $\Phi$ 是周期性变化的，则产生的电动势 $E$ 也是周期性变化的，即在周围空间中形成的是周期性变化的电场。这种周期性变化的电场将在空间中又形成周期性变化的磁场……如教科书图 14.1-2 所示。因此，麦克斯韦认为：变化的电场和磁场交替激发，形成了一个紧密联系不可分割的整体——电磁场，这个整体由近及远向外传播，就形成了电磁波。所以，麦克斯韦的电磁场理论可以概括为：

①变化的磁场激发电场，变化的电场激发磁场。

②均匀变化的磁场激发稳恒的电场，均匀变化的电场激发稳恒的磁场。

③周期性变化的磁场激发同频率周期性变化的电场，周期性变化的电场激发同频率周期性变化的磁场。

④变化的电场和磁场交替激发，形成一个不可分割的统一体由近及远向外传播，形成电磁波。

**二、电磁波**

（1）*电磁场*——变化的电场和磁场交替激发，所形成的一个不可分割的统一体。

（2）*电磁波*——电磁场从发生区域向远处的传播。

经过大量的理论和实践证明，电磁波在传播的过程中 $B$ 和 $E$ 的变化如教科书图 14.1-3 所示，请同学们回忆前面所学机械波的图象对比分析此图，我们可以从中得出电磁波哪些性质呢？

①电磁波中的电场和磁场互相垂直，并且都与波的传播方向垂直，即电磁波是横波。

②在电场强度 $E$ 最大的空间位置上，相应的磁感应强度 $B$ 也为最大值。

麦克斯韦经过分析和计算，发现电磁波在真空中的传播速度等于光速，他由此断定，光是一种电磁波，也应该遵循波的传播规律，即：

③电磁波在真空中的传播速度等于光速，光是一种电磁波。

④电磁波的波速、波长和频率的关系为：$v=\lambda f$。

师：麦克斯韦电磁场理论的建立具有伟大的历史意义，是物理学发展史中的一个划时代的里程碑。这个理论揭示了电、光、磁在本质上是统一的。麦克斯韦在有生之年并没有观察到电磁波，而是在 20 年后由德国物理学家赫兹在整理前人理论知识的基础上，通过实验验证了电磁波的存在，这才把天才的预想变成世人公认的真理。

**三、赫兹的电火花**

师：赫兹电火花实验的装置如教科书图 14.1-4。实验器材分为两部分，一是产生电磁波的仪器——与高压感应圈相连的两个金属小球，二是探测、接收电磁波的仪器——谐振环，用一根粗铜丝弯成环状，环的两端各连一个间距可以调整的金属小球。

演示赫兹的电火花实验，请两个同学共同参与完成。调节发射装置和接收装置间的距离以及谐振环两个小球间的距离，让学生观察到明显的电火花。

师：赫兹通过电火花实验证实了电磁波的存在，同时，他还精确测定了电磁波在真空中的传播速度等于光速，证实了麦克斯韦的理论。同学们可以到在课外活动时间到实验室完成“做一做”栏目，感受电磁波的存在。

### 课堂小节

本节学习了麦克斯韦电磁场理论的主要内容，了解了麦克斯韦和赫兹在探究电磁波过程中的主要贡献及基本思路，知道了麦克斯韦电磁场理论的主要论点：变化的磁场产生电场，变化的电场产生磁场；变化的电场和磁场相互联系，形成一个统一的场，即电磁场。电磁场由发生区域向远处的传播形成电磁波。电磁波中的电场与磁场相互垂直，且二者均与波的传播方向垂直，即电磁波是横波。通过本节学习还了解了电、光、磁的统一性。

### 巩固提高

1. 完成课后作业。
2. 查阅资料，了解探究电磁波历程中各位伟大科学家的主要贡献。

## 四、教学资源库

### （一）概念、规律和背景资料

**1. 电磁场理论建立的历史和意义**

人类对电磁现象的认识、研究和利用，经历了漫长的岁月。16 世纪以前发展十分缓慢，仅仅停留在观察电作用、磁作用的个别现象上，认识是零碎的。16 世纪末，英国人吉尔伯特算是对电磁现象进行比较系统研究的第一个人，基本上属于对现象的定性总结。18 世纪下半叶，法国人库仑把数学方法引进电磁学，用科学仪器作定量测定，于 1785～1787 年得到了电相互作用的平方反比定律，实现了从定性研究到定量研究的飞跃。以后人们发明了伏打电堆和温差电池，才有条件研究动电和磁现象，从而发现电磁之间的内在联系。1820 年，奥斯特发现了电流的磁效应，实现了从电磁分离到电磁统一的飞跃。后来，法拉第发现电磁感应定律并提出了力线思想和场的观念，实现了从超距作用观到近距作用观的飞跃。紧接着，麦克斯韦在前人研究的基础上，在 1861～1862 年提出了涡旋电场和位移电流两个新观念，于 1864 年建立了电磁场理论，实现了从零散的、局部的理论到完整的、统一的理论的飞跃。这就是电磁学发展的基本线条。

任何科学理论的诞生总是以闪光的新观念的问世为先导。新理论是科学家在前人研究基础上，运用丰富的联想和创造性思维，进行综合、引申、突破和创新的产物。

根据一些表面上互不相关、适用范围各不相同的实验定律（库仑定律、毕－萨定律和电磁感应定律等），能否归纳出一组有内在联系的普遍成立的、能对电磁现象作出统一描述的数学理论体系，这是摆在 19 世纪中叶物理学界的一大问题。

在这方面，法拉第走出了坚实的第一步；紧跟着，麦克斯韦迈开了关键的第二步；赫兹则以划时代的实验证实了麦克斯韦的理论，并开拓了光辉的应用前景。

法拉第坚信电磁作用是一种近距作用，为此提出了力线思想和场观念。他认为电场、磁场起传递电力、磁力的媒介作用，力线具有物理实在的性质，是场的表象。描述场的力线、力管虽是一种定性理论，但却为建立电磁学的数学理论提供了物理依据。在当时，场观念是物理学中一个全新的观念、一个开创性的见解，是对超距作用的挑战。

法拉第借用力线把场的许多性质简单而又极富启发性地表示出来了，却因缺乏数学功底，苦于无法用恰当的数学语言来表述，体现不出理论描述的确定性、简洁性和预见性，因而不能更深刻地揭示电磁现象的内在规律性。但是，力线思想和场观念却鼓舞着麦克斯韦接过法拉第的火炬，继续深入地进行研究。

麦克斯韦大学毕业不久，读到了法拉第的《电学实验研究》一书，就被其光辉的科学思想吸引住了。麦克斯韦受过良好的教育，先在爱丁堡大学攻读数学、物理，后转入剑桥大学专攻数学。受霍普金斯和斯托克斯两位导师的直接影响，他很重视数学与物理的结合，成为一个优秀的数学物理学家。这一点对他日后完成电磁理论是至关重要的。

可以说，法拉第和麦克斯韦都很有胆识且极富想象力。一个是实验巨匠，长于物理直觉；一个是理论大师，长于数学分析。两人巧妙地互补结合，翻开了物理学历史上新的一页。

另一方面，开尔文的类比研究对麦克斯韦有很大的影响。在法拉第工作的激励下，开尔文深感有必要把力线思想翻译成数学语言，他用类比方法，从弹性理论和热传导理论中得到借鉴。1842 年，开尔文发表了关于热和电的数学论文。在《论热在均匀固体中的匀速运动及其与电的数学理论的联系》一文中，论述了热在均匀固体中的传导和法拉第应力在均匀介质中的传递这两种现象之间的相似性。他指出：电的等势面对应于热的等温面，而电荷对应于热源，电场线对应于热流线；热量从高温传到低温，而电流从高电势传到低电势。利用傅里叶分析方法，把拉普拉斯方程普遍用于热、电、磁三种运动，建立了这三种现象的共同数学关系。1847 年，开尔文在《论电力、磁力和伽伐尼力的力学表征》一文中，以不可压缩流体的流线连续性为基础，论述了电磁现象与流体力学现象的共性。开尔文的这种类比研究，为麦克斯韦提供了有益的启示。

麦克斯韦对电磁理论的研究，可以分为三个阶段。

**第一阶段**

在开尔文等人工作启示下获得了一些研究成果，于 1855 年发表了论文《论法拉第力线》。这是他第一阶段研究工作的结晶。

在这篇文章中，他发展了开尔文的类比思想，用不可压缩流体的流线类比法拉第的力线，把电场、磁场与流速场类比，把电场强度、磁场强度比作流速。通过类比，他明确了两类不同的物理量，$\boldsymbol{E}$ 和 $\boldsymbol{H}$ 相当于流体力学中的力，$\boldsymbol{D}$ 和 $\boldsymbol{B}$ 相当于流体力学中的流量；流量遵从连续性方程，可以沿曲面积分，而力则可沿线段积分。通过这种类比，从而可以把流体力学中的数学工具移植过来，采用通量、环流、散度、旋度等具有明确定义的概念，来定量描述抽象的电场、磁场在空间的变化情况，并开始建立电磁场方程。

**第二阶段**

1860 年秋，年轻的麦克斯韦特意去拜访老资格的法拉第，这是一次令人难忘的会晤。当麦克斯韦请求指出《论法拉第力线》一文的缺点时，法拉第说："你不应停留在用数学来解释我的观点，而应该突破它！"多么可贵的品质和崇高的人格啊！

突破和创新是科学研究的灵魂。有两个实验事实使麦克斯韦重新考虑他的研究方法。一个是根据伯努利流体力学，流线越密的地方压力越小，而根据法拉第力线思想，力线越密的地方应力越大。两者不宜类比。另一个是从电介质的运动来看，电的运动是平移运动，而从偏振光在晶体中的旋转现象来看，磁运动好像是介质分子的旋转运动。

由此观之，电磁现象有别于流体力学现象，电现象与磁现象也不尽相同，光靠几何上的类比无法洞察事物的本质。类比思想强调的是事物的共性，而忽视了事物的个性。为了能反映电磁现象的特殊性，麦克斯韦把目光转向运用模型（电磁以太模型），并大量借助流体力学的观点和数学方法，从事艰苦的理论研究。在此基础上于1862年发表了《论物理力线》一文，与《论法拉第力线》相比，有了质的飞跃。不再是单纯的数学翻译，而是有了重大的引申和发展，其中意义最为重大的是提出了感应（涡旋）电场和位移电流两个全新观念，在电磁学理论研究上取得了关键性的突破。

**第三阶段**

作为一位伟大的理论物理学家，当他从电磁现象的力学模型中把握住隐藏在纷繁的电磁现象背后的某些本质特征之后，径直把电磁场作为客体，把近距作用引向深入。在实验事实和普遍动力学原理基础上，构建一个全新的理论框架，全面概括电磁场的运动特征和建立电磁场方程。他于1864年宣读、1865年正式发表论文《电磁场的动力学理论》。在这篇论文中，麦克斯韦提出了电磁场的普遍方程组（共二十个分量方程，包括有二十个变量。若采用矢量方程，则有八个方程）。直到1884年，才经赫兹整理给出了简化的对称形式，整个方程组只包括四个矢量方程，一直沿用至今。

麦克斯韦由他的方程组得到了电磁波动方程和波在真空中的传播速度为光速 $c$，从而预言了电磁波的存在，并指出光是一种电磁波。

为了系统地总结电磁学的研究成果，按照一种统一的思想来总结库仑定律建立近百年来的电磁学成就和他本人十多年来取得的成果，1865年，他辞去了皇家学院的教授职务，经过几年的努力，于1873年出版了他的专著《电学和磁学理论》。其中有库仑、奥斯特、安培和法拉第等人的开山之功，也有他本人的创造性研究工作，终于建立起完整的电磁学理论。其意义可与牛顿的《自然哲学的数学原理》（1687年）和达尔文的《物种起源》（1859年）相媲美。

电磁学理论具有如下几个特点：物理观念清新，数学结构优美，电磁时空对称，逻辑体系严密。

综上所述，麦克斯韦对电磁学的突出贡献是：

（1）提出涡旋电场和位移电流两个全新观念；

（2）用严谨的数学方程建立了完整的电磁学理论。

电磁学理论是一座雄伟壮丽的大厦。从1785年库仑定律的发现到1865年麦克斯韦方程的发表，整整经历了80年。法拉第给它打下了坚实的地基，麦克斯韦在上面建造了高楼，赫兹让这座大厦住满了人。法拉第、麦克斯韦、赫兹的名字，永远和电磁学连在一起，光照人间，超越地区，超越世纪，直至今日。

麦克斯韦电磁场理论具有内在的完美性并与一切经验相符合，但它的思想太不平常了，显得艰深难懂，在相当长的时间里未能得到承认。直到1888年赫兹实验的成功，震动了物理学界，才使电磁理论取得决定性胜利，终于为人们普遍接受。电磁理论的建立有以下重要意义。

（1）使原来孤立的电学、磁学和光学三者统一起来了，是继牛顿之后物理学上的又一次大综合，是物理学发展史上又一个里程碑。

(2) 抛弃了超距作用观，使近距作用观在物理学中深深地扎下了根。

(3) 以场量为基本变量，引起了物理学理论基础的根本性变革；电磁场理论是经典场论，是现代规范场理论的先导。

(4) 经赫兹整理得到的简洁对称方程组具有明显的美学品质，是物理美学的重要内容。

(5) 电磁波的预言和发现，为人类开辟了无线电电子学的新纪元。

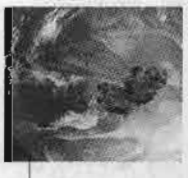
(6) 电磁场理论的建立为狭义相对论提供了基础。这是爱因斯坦在1931年麦克斯韦诞生一百周年时指出的。在麦克斯韦方程中，电场和磁场处于对称地位，时间和空间也处于对称地位。因此，电场和磁场的不可分割，暗示时间和空间也并非彼此独立。同时，麦克斯韦方程与光速不变原理是相容的。这几条正是狭义相对论的基本前提。遗憾的是，由于受绝对时空观的禁锢，麦克斯韦未能悟出自己建立的方程中所蕴藏的全部深刻内涵。

**2. 麦克斯韦生平**

麦克斯韦（James Clerk Maxwell，1831—1879）英国物理学家，经典电磁理论的奠基人。1831年6月13日出生于爱丁堡。父亲受的是法学教育，但思想活跃，爱好科学技术，使他从小就受到科学的熏陶。10岁那年进了爱丁堡中学，由于讲话带有很重的乡音和衣着不入时，在班上经常被排挤、受讥笑。但在一次全校举行的数学和诗歌的比赛中，麦克斯韦一人独得两个科目的一等奖。他以自己的勤奋和聪颖获得了同学们的尊敬。他的学习内容逐渐地突破了课本和课堂教学的局限。麦克斯韦关于卵形曲线画法的第一篇科学论文发表在《爱丁堡皇家学会会刊》上，所采用的方法比笛卡儿的方法还简便。那时他仅仅15岁。1847年入爱丁堡大学听课，专攻数学，但他很重视参加实验，广泛涉猎电化学、光学、分子物理学以及机械工程等等。他说："把数学分析和实验研究联合使用得到的物理科学知识，比之一个单纯的实验人员或单纯的数学家所具有的知识更加坚实、有益而牢固。"1850年麦克斯韦考入剑桥大学，1854年以优异成绩毕业并获得了学位，留校工作。1856年起任苏格兰阿伯丁的马里沙耳学院的自然哲学讲座教授，直到1874年。经法拉第举荐，自1860年起任伦敦皇家学院的物理学和天文学教授。1871年起负责筹划卡文迪许实验室，随后被任命在剑桥大学创办卡文迪许实验室并担任第一任负责人。1879年11月5日麦克斯韦因患癌症在剑桥逝世，终年48岁。

麦克斯韦一生从事过多方面的物理学研究工作，他最杰出的贡献是在经典电磁理论方面。在剑桥读书期间，当麦克斯韦读过法拉第的《电学实验研究》之后，立刻被书中的新颖见解所吸引，他敏锐地领会到了法拉第的"力线"和"场"的概念的重要性。但是，他注意到全书竟然无一数学公式，这说明法拉第的学说还缺乏严密的理论形式。在其老师威廉·汤姆孙的启发和帮助下，决心用自己的数学才能来弥补法拉第工作的这一缺陷。1855年他发表了第一篇论文《论法拉第力线》，把法拉第的直观力学图象用数学形式表达了出来，文中给出了电流和磁场之间的微分关系式。不久，收到法拉第的来信，赞扬说："我惊异地发现，这个数学加得很妙！"1860年，29岁的麦克斯韦去拜访年近70的法拉第，法拉第勉励麦克斯韦："你不要停留在用数学来解释我的观点，而应该突破它！"1861年，麦克斯韦深入分析了变化磁场产生感应电动势的现象，独创性地提出了"分子涡旋"和"位移电流"两个著名假设。这些内容发表在1862年的第二篇论文《论物理力线》中。这两个假设已不仅仅是法拉第成果的数学反映，而是对法拉第电磁学作出了实质性的增补。1864年12月8日，麦克斯韦在英国皇家学会的集会上宣读了题为《电磁场的动力学理论》的重要论文，对以前有关电磁现象和理论进行了系统的概括和总结，提出了联系着电荷、电流和





电场、磁场的基本微分方程组。该方程组后来经 H. R. 赫兹、O. 亥维赛和 H. A. 洛伦兹等人整理和改写，就成了作为经典电动力学主要基础的麦克斯韦方程组。这理论所宣告的一个直接的推论在科学史上具有重要意义，即预言了电磁波的存在。交变的电磁场以光速和横波的形式在空间传播，这就是电磁波；光就是一种可见的电磁波。电、磁、光的统一，被认为是 19 世纪科学史上最伟大的综合之一。1888 年，麦克斯韦的预言被赫兹所证实。1865 年以后，麦克斯韦利用因病离职休养的时间，系统地总结了近百年来电磁学研究的成果，于 1873 年出版了他的巨著《电学和磁学理论》。这部科学名著，内容丰富、形式完备，体现出理论和实验的一致性，被认为可以和牛顿的《自然哲学的数学原理》交相辉映。麦克斯韦的电磁理论成为经典物理学的重要支柱之一。

麦克斯韦兴趣广泛，才智过人，他不但是建立各种模型来类比不同物理现象的能手，更是运用数学工具来分析物理问题的大师。他在其他领域中也作出了不少贡献。1859 年他用统计方法导出了处于热平衡态中的气体分子的“麦克斯韦速率分布律”。他用数学方法证明了土星环是由一群离散的卫星聚集而成的。这项研究的论文获得亚当斯奖。在论文中他运用了 200 多个方程，由此可见他驾驭数学的高超能力！在色视觉方面他提出了三原色理论。他首先提出了实现彩色摄影的具体方案。他设计的“色陀螺”获得皇家学会的奖章。麦克斯韦在他生命的最后几年里，花费了很大气力整理和出版卡文迪许的遗稿以及创建卡文迪许实验室，为人类留下又一笔珍贵的科学遗产。

**3. 赫兹生平**

赫兹（Heinrich Rudolf Hertz，1857—1894），德国物理学家。1857 年 2 月 22 日生于汉堡。青少年时期，勤奋好学，在数学、物理实验等方面显示了出众的才华与能力。1876 年进入德累斯顿理工学院学习工程，但在那里只学了一个短暂时期，就去铁路军团服役一年。1877 年考入慕尼黑大学，学习数理科学。1878 年又转入柏林大学成为亥姆霍兹的学生并做研究工作。他对于理论和实验都很重视，学习比较全面。1879 年因解决亥姆霍兹提出的导体中的运动电荷有无惯性质量这一问题获金质奖章而初露锋芒。1880 年以《旋转导体的电磁感应》一文获博士学位，成为亥姆霍兹的助手。1883 年任基尔大学物理学讲师，1885～1889 年任卡尔斯鲁厄高等工业大学物理学教授，1889 年起接替克劳修斯任波恩大学物理学教授。1894 年 1 月 1 日，赫兹因血液中毒在波恩逝世，年仅 36 岁。

赫兹在物理学上的主要贡献是发现电磁波。当时人们对电磁理论的认识还很不一致。1879 年，亥姆霍兹为柏林科学院设计的重金悬赏中，提出了用实验证明以下课题：变化磁力必然使绝缘体介质极化（产生位移电流），而位移电流又必然产生磁效应，这两个假设在空气或真空中也同样成立。如果成功，电磁学就能“从无路的荒原”中走出来，验证麦克斯韦电磁波的理论和预言。

赫兹首先在 1884 年他的一篇理论性论文中提出源和场统一的思想，通过引入磁流矢势把麦克斯韦方程改写为四个矢量方程。这为他后来的重要实验奠定了思想基础。但当时还缺乏产生和检验快速振荡的仪器，因而他还不敢接受亥姆霍兹要求他研究上述课题的要求。

1886 年 10 月，赫兹在物理实验室仓库发现两个演示用的大线圈，他还发现，当初级线圈有脉动电流时，近旁未闭合的次级线圈打出了火花。而且次级线圈在某些位置上没有火花发生（“中性点”）。赫兹敏锐地抓住这一偶然现象，相信柏林科学院的问题能够解决了。接着他进行了一系列实验：设计出直线型开放振荡器以产生频率极高的电振荡，设计出带火花隙的单线线圈作为检验器（火花的距离可以调节）。接着，于 1887 年 11 月 5 日，他在《论绝缘体中电扰

动产生的电磁效应》一文中叙述了他利用上述高频发射器$AA'$与检测器$B$，检验出置于$C$处的金属与绝缘板（如沥青、纸、干木、石蜡、汽油槽）对周围电磁场（包括各中性点）的影响。从而证明了绝缘介质中产生的迅速交替极化即位移电流的存在，获得柏林科学院奖。

为了证明这种位移电流也存在空气或真空中，他在1888年1月通过驻波方法测出电磁波的速度。办法是在一间空间为15 m×8.6 m×6 m的暗教室中的墙上钉一块4 m×2 m的锌板，用来反射电磁波并与发射波叠加形成驻波。利用小车上的检验器测出波节（无火花）与波腹（火花最强），由此可根据测出的驻波波长与波源频率算出电磁波速度，证明与光波速度一致。赫兹还进一步在1888年夏季证明了电磁波与光波有同样的性质：直线传播（通过垂直方向的锌板有阴影区），反射（高2 m、孔径为1.2 m的抛物面反射镜使电磁波聚焦），折射（高1.2 m、顶角为30°的沥青棱镜使电磁波偏折，折射率为1.69），偏振（通过钢丝屏做成的金属栅），等等。1888年1月21日赫兹完成他的著名论文《论电动力学作用的传播速度》，这一天成了人们公认的电磁波发现的日期。这些实验对于确立麦克斯韦理论的地位具有十分重大的意义。爱因斯坦评价说："只是等到赫兹以实验证实了麦克斯韦电磁波的存在以后，对新理论的抵抗才被打垮。"可以说，赫兹的卓越实验，为麦克斯韦的理论添上了至关重要的一笔。其后迅速发展起来的无线通讯技术，则是直接受惠于赫兹的无与伦比的实验。

他的研究工作，还包括气象、材料硬度等方面，尤其在光电效应与阴极射线等方面，成果更为突出。1891年他开始撰写《力学原理》一书，试图通过力学把物理学各领域统一起来。

物理学大师们对赫兹的工作给予高度评价。爱因斯坦指出，"伟大的变革是由法拉第、麦克斯韦和赫兹带来的"，说明了赫兹的工作对物理学发展所起的不可磨灭的作用。普朗克在一封信中赞扬他："在人们关注电波的时候，赫兹是这一代的冠军。我们物理学会的成员沐浴着他的光辉，也将分享他的荣耀。"他英年早逝，在他的能力和经历正要把他推向对物理学作更大贡献的关头，他的生命结束了。为了纪念他的卓越贡献，将频率的单位命名为赫兹。

**4. 马可尼生平**

居里莫·马可尼（Guglielmo Marconi）于1874年4月28日出生在意大利的波伦亚。他是次子，父亲是一位意大利乡绅，名叫朱赛普·马可尼，母亲叫安妮·吉姆逊。马可尼先后在波伦亚、佛罗伦萨和里窝那接受过私人教育。还在少年时期，他就对物理和电学有很浓厚的兴趣，读过麦克斯韦、赫兹、赖依、洛治等人的著作。1895年马可尼在他父亲的蓬切西奥庄园开始了他的实验室实验。在这里他成功地把无线电信号发送到了2.4 km的距离，他成了世界上第一台实用的无线电报系统的发明者。

1896年马可尼携带着自己的装置到了英国，在那里他被介绍给邮政总局的总工程师威廉·普利斯（后封爵位），该年末他取得了无线电报系统的世界上第一个专利。他在伦敦、索尔兹伯里平原成功地演示了他的通信装置，演示了跨越布里斯托尔湾的通信，1897年7月成立了"无线电报及电信有限公司"（1900年改名为"马可尼无线电报有限公司"）。同年又在斯佩西亚向意大利政府演示了19.3 km的无线电信号发送。1899年他建立起了跨越英吉利海峡的法国和英国之间的无线电通信。他在尼德尔斯、怀特岛、伯恩默斯，尔后又在哈芬霍特尔、普尔、多塞特建立了永久性的无线电台。

1900年马可尼取得了"调谐式无线电报"著名的第7777号专利，在1901年12月的具有历史意义的一天，他决定证明无线电波不受地球表面弯曲的影响，用他的发报系统第一次使无线电波越过了康沃尔郡的波特休和纽芬兰省的圣约翰斯之间的大西洋，距离为3 380 km。

1901年和1902年间他还取得了数项新发明的专利权。1902年他在美国“费拉德尔菲亚”号轮船的班航中试验了无线电报通信的“白昼效应”，同年取得了“磁检波器”的专利，在此以后的许多年中它成为一种标准的无线电收报机。1902年12月他第一次从诺瓦斯科夏省的格莱斯湾，后又从马萨诸塞州的科德角向波特休发送了第一封完整的电文。这些早期的实验在1907年达到了高峰，开创了格莱斯湾和爱尔兰的克利夫顿之间的第一次跨越大西洋的商业无线电报业务，此前已建立了意大利的巴里和门的内哥罗的阿维达里之间的短距离民用无线电报。1905年取得了水平定向天线的专利，1912年发明了产生连续电波的“间断火花”系统。

1914年马可尼被任命为意大利军队的中尉，后提升为上尉。1916年调任为海军司令部的中校。他曾是1917年意大利政府赴美使团的成员之一，1919年担任巴黎和会的意大利特命全权代表。为了表彰他在军队中的服役，于1919年被授予意大利军功勋章。

战时他在意大利服役期间，对在第一次实验中使用的短波重新进行了研究。他和英国的合作者共同做了进一步的试验之后，于1923年在波特休的实验电台和当时巡航于大西洋和地中海的马可尼的快艇之间做了一系列的试验。这些实验最后导致建立了远距离定向通信系统。英国政府采纳了用这种系统作为英联邦之间通信手段的方案。把英国和加拿大联系起来的第一台定向无线电台于1926年建成，第二年又增设了其他电台。

1931年马可尼开始研究更短的波的传递特性，结果在1932年创立了世界上第一次在梵蒂冈城和卡斯特尔甘多尔福的波普夏宫之间的短波无线电话联系。两年之后马可尼在塞斯特里-累旺特演示了导航用的短波无线电航标。1935年又在意大利演示了雷达原理，这是他早在1922年在纽约向美国无线电工程学院作的一篇报告中首次预言过的。

马可尼获得过许多大学的荣誉博士学位，以及许多国际荣誉和奖励，其中有1909年他和C. 布劳恩教授共同获得的诺贝尔物理学奖，英国皇家艺术学会的“阿尔伯特”奖章，约翰·弗利兹奖章，开尔文奖章；俄国沙皇授予的圣安娜勋章；意大利国王任命他为圣马赖斯和圣拉扎路斯荣誉海军中校；1902年被授予意大利国王大十字勋章。马可尼还获得过罗马城的荣誉市民称号（1903年），1905年被封为萨瓦城的文官爵位。马可尼还有许多其他荣誉称号，如1914年被封为意大利元老院的议员，获得过英国皇家维多利亚大十字勋章和爵位，1929年获得了侯爵的世袭头衔。

1905年马可尼与贝阿特莉·奥布林结婚，妻子是巴隆·因基昆十四世的女儿。1927年他们离婚。同年马可尼与罗马的贝琪·斯卡莉伯爵夫人结婚。和前妻有一子两女，和后妻有一女儿。马可尼的个人爱好是打猎、骑自行车和驾驶汽车。

马可尼于1937年7月20日逝世于罗马。

（摘自《诺贝尔奖获得者演讲集物理学（第一卷）》，
宋玉升等译，科学出版社1985年8月第1版）

**5. 为什么电磁波在真空中也能传播**

(1) 机械波只能在弹性介质中传播

弹性介质的特点是介质的相邻质元之间有弹性联系。介质中任一质点对平衡位置的位移都会引起与之接触的周围介质质元的形变（应变）。因为介质具有弹性，发生应变的质元要恢复原来的形状，又必将对与它接触的质元施加弹性力，使那些质元也相继发生应变。这样，介质中任一点的机械振动都会因介质质元的这种弹性联系而由近及远地传播出去。如果一个周围没有任何实物物质的孤立物体发生振动，它将因没有传递作用的媒介而不会对外界产生任何影响，只能自己振动下去，而不会引起其他物体的振动。如果一个振动物体周围的物质是完全无

弹性的，那么振动物体只能造成与之接触的那些介质的塑性形变，也就是说振动物体将把周围的介质“永久地”挤开，最后它仍然是孤立地在那里振动着而不能将振动传播出去。

所以，在固体中传播的机械波的动力学方程（波动方程）中必然地包括有介质的力学性质——弹性模量 $E$ 和密度 $\rho$。前者正是表征介质弹性的物理量。固体中沿 $x$ 轴传播的平面机械波的波动方程为：

$$\frac{\partial^2 \xi}{\partial x^2}=\frac{\rho}{E}\frac{\partial^2 \xi}{\partial t^2} \tag{1}$$

波速

$$v=\sqrt{\frac{E}{\rho}} \tag{2}$$

如果是纵波，靠介质的长变弹性传播，上二式中的弹性模量 $E$ 应为杨氏模量；如果是横波，靠介质的切变弹性传播，上二式中的弹性模量应为切变模量。在空气中传播的声波（纵波），靠空气的体变弹性传播。式中的弹性模量应指体变模量。考虑气体的热学性质后，可得出空气中声速的公式：

$$v=\sqrt{\frac{\gamma RT}{M}} \tag{3}$$

式中，$\gamma$ 为空气的比热比（定压热容量与定容热容量之比值），$R$ 为普适气体常数，$T$ 为热力学温度，$M$ 为空气的摩尔质量。

由上可见，机械波靠介质的弹性传播，机械波的波速由介质的弹性模量和质量密度决定。在 $\rho$ 相同的情况下，弹性模量越大，波速也越大。如固体中，既可能传播纵波，又可能传播横波，但因一般固体的杨氏模量大于切变模量，故在同一种固体中传播的机械纵波的波速大于横波的波速。

（2）电磁波在真空中也能传播

麦克斯韦在建立电磁场理论的时候，尚未摆脱机械论的影响，大量借鉴了连续介质力学的观点和方法，从而构造了“以太”这种类似弹性介质的东西。在他看来电磁波就是在“以太”中传播的弹性波。“以太”被赋予极其矛盾的机械属性，如密度极小，并无处不入，但又具有极大的切变模量等。随着近代物理的兴起，“以太”这种经典电磁理论的桎梏被打破了。振荡着的电磁场本身就具有由近及远传播的功能，它不需要任何介质，在真空中就能传播，这已经是大家公认的事实。

为什么呢？原来是因为电和磁是紧密相互联系的。感应电场和位移电流从假说到被实验证实，成为麦克斯韦建立电磁场理论的重要基石，它正反映了变化的磁场感生电场和变化的电场产生磁场的客观规律。如图 14-3，如果变化的磁场感生的电场也是变化着的，它又将感生磁场；如果这磁场也是变化的，它又将感生电场。如此，变化的电磁场就可通过相互感生而传播出去。所以，电磁波之得以传播，是依赖于变化的磁场感生变化的电场和变化的电场感生变化的磁场。

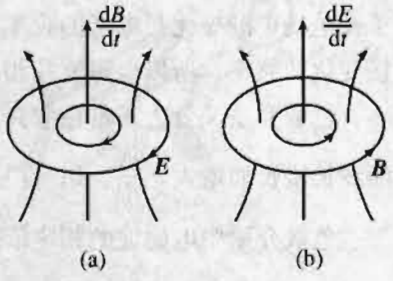


图 14-3

我们设想在空间某处有一个电磁振荡源，如它是一个交变的电场，它在自己周围激发磁场，如图 14-4 中的实线椭圆圈表示，由于这磁场也是交变的，它又在自己周围激发感应电场，

如图 14-4 中的虚线圆圈表示。这样交变的感应电场和磁场相互激发，闭合的电场线和磁感线就像链条环节一样，一个一个地套连下去，在空间传播开，形成电磁波。图 14-4 只是电磁振荡在一个方向上传播的示意图，并非真实的电场线和磁感线的分布图。

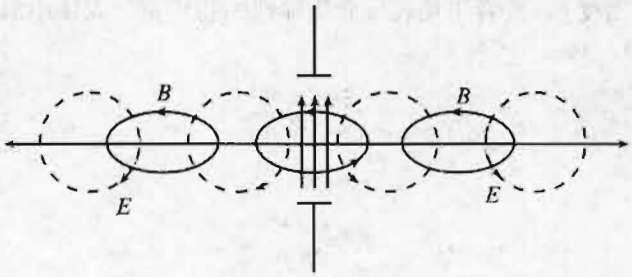



图 14-4

可见，电磁场性质本身决定了电磁振荡通过电与磁的相互感生而传播，形成电磁波。电磁波无需借助其他物质来传递，电磁场本身就是它的物质承担者。由真空中的麦克斯韦方程组导出的平面电磁波方程与平面机械波方程的数学结构完全相同，表明它们有相同的传播特性，电磁波传播的是 $E$ 和 $B$ 的变化，机械波传播的是机械振动。

重要的不同点是，真空中电磁波方程中的 $\varepsilon_0\mu_0$ 是一个物理常数，真空中的波速 $c=\frac{1}{\sqrt{\varepsilon_0\mu_0}}$ 也是一个基本物理常数；而机械波方程中的常系数 $\frac{\rho}{E}$ 和波速 $v=\sqrt{\frac{E}{\rho}}$ 由介质的力学性质决定，机械波的传播必须借助于弹性介质。

(3) 介质对电磁波的影响

前面讲了电磁波是依赖变化的电场和磁场相互感生这种机制传播而不需要借助于介质。但是，由于电场和磁场与物质间存在相互作用，介质对在其中传播的电磁波也是有影响的。这种影响又依介质的物理性质不同而异。下面扼要介绍不同介质对平面电磁波的影响。

①在无损耗的非色散电介质中，电磁波的传播速度即位相传播速度（相速）与电磁波的频率无关，依赖于介质的相对介电常数和相对磁导率，总是小于真空中的光速，即

$$v=\frac{c}{\sqrt{\varepsilon_r\mu_r}}$$

②在无损耗的色散电介质中，电磁波的相速度依赖于频率（或波长）。由于色散介质的分子在电场中的极化与电场的频率有关，因而介电常数区别于通常的静态介电常数，它依赖于电场变化的频率。所以电磁波的相速与频率（或波长）有关。

色散介质又分为正常色散介质和反常色散介质两类。在正常色散介质中，电磁波的相速度随波长增长而增大，$\frac{dv}{d\lambda}>0$；在反常色散介质中，相速度随波长增长而减小，$\frac{dv}{d\lambda}<0$。

色散介质中电磁波的相速依赖于频率变化的例子，人们熟知的是光（电磁波）通过三棱镜后的色散现象。由于相速度与频率有关，因而三棱镜对光的折射率 $n=\frac{c}{v}$（$\approx\sqrt{\varepsilon_r}$）与入射光频率有关。正常色散介质如玻璃、水晶等，它们的折射率 $n$ 随波长增大而减小。因此，包括各种可见光频率的复色光——白光、通过三棱镜后，不同频率的单色光因折射率不同而有不同的折射角。紫光波长最短因而折射率最大，偏折角最大；红光波长最长，折射率最小，因而偏折角最小。于是白光通过棱镜折射以后，发生色散，形成了彩色连续光谱。

在无损耗的理想电介质中，电导率 $\sigma$ 为 0。当电磁波在电介质中传播时，介质内只有位移电流而没有传导电流。另一方面，理想电介质分子在交变电场作用下的极化被当作完全弹性的，即介质分子的交变的位移极化和取向极化过程中没有阻尼，像完全弹性的振子一样在交变电场作用下作受迫振动。所以，变化电磁场的相互感生会无损耗（无吸收）地继续下去。介质对电磁波的作用表现为影响电磁波的传播速度。

在一般的非理想色散介质中，$\sigma=0$ 不严格成立，而且分子的极化也不能认为是完全弹性的。因此，除波速依赖于频率外，还由于电磁振荡与物质的相互作用而吸收电磁波的能量，因而是有损耗的。

③导电介质（导体）对电磁波的影响

导体的电导率不为 0（$\sigma\neq0$），在导体内的电磁振荡中，变化电场要形成传导电流，这将不可逆地把电磁场的能量转换为热能。因此，导体将损耗（或吸收）电磁波的能量，使进入导体的电磁波很快地衰减为 0。电磁波不能透过导体而传播。

根据普遍情形下的麦克斯韦方程组，在导电介质中，沿 $x$ 方向传播的平面电磁波的波动方程为（用电场沿 $y$ 坐标的分量表示）

$$\frac{1}{\mu_r\mu_0}\frac{\partial^2 E_y}{\partial x^2}-\varepsilon_r\varepsilon_0\frac{\partial^2 E_y}{\partial t^2}-\sigma\frac{\partial E_y}{\partial t}=0 \tag{4}$$

与在理想的电介质中的波动方程相比，多出包含电导率的场量 $E_y$ 对时间的一阶导数项，这一项相当于阻尼振动中的阻尼项，使平面简谐电磁波的解具有以下形式：

$$E_y=E_0\mathrm{e}^{-\beta x}\cos(\omega t-\beta x) \tag{5}$$

其中

$$\beta=\sqrt{\frac{1}{2}\omega\mu_r\mu_0\sigma} \tag{6}$$

可见，进入导体后，振幅随 $x$ 增加而指数衰减。当电磁波渗入导体深度为 $\delta$ 时，$E_y$ 的峰值衰减到它原来值的 $\frac{1}{\mathrm{e}}$ 倍（0.368 倍），称 $\delta$ 为 $\left(\frac{1}{\mathrm{e}}\right)$ 渗透深度，有

$$\delta=\left(\frac{1}{2}\omega\mu_r\mu_0\sigma\right)^{-\frac{1}{2}}=(\pi f\mu_r\mu_0\sigma)^{-\frac{1}{2}} \tag{7}$$

其中 $f=\frac{\omega}{2\pi}$ 为频率，渗透深度与频率的平方根成反比。以铜为例，$\mu_r=1$，$\sigma=5.8\times10^7(\Omega\cdot\mathrm{m})^{-1}$，当 $f=60$ Hz 时，$\delta=8.5\times10^{-3}$ m；当 $f=10^6$ Hz 时，$\delta=6.6\times10^{-5}$ m；当 $f=3\times10^{10}$ Hz 时，$\delta=3.8\times10^{-7}$ m。

可见，电磁波不能透过导体而传播，频率越高的电磁波，渗入导体的深度越浅，低频的电磁波的渗透深度较大。所以，薄层的导电材料，可以透过低频的电磁波，对电磁波能起到低通滤波器的作用。

**6. 怎样理解 $E$、$B$ 同位相**

（1）$E$、$B$ 同位相的含义是什么？

设平面简谐波沿 $x$ 方向传播，根据横波性，设电矢量 $\boldsymbol{E}$ 在 $xOy$ 平面内振荡，磁矢量 $\boldsymbol{B}$ 在 $xOz$ 平面内振荡。根据平面电磁波的波动方程，得到平面简谐波的表达式，用 $E_y$ 和 $B_z$ 表示为

$$E_y=E_0\cos(\omega t-kx+\varphi_1) \tag{1}$$

$$B_z=B_0\cos(\omega t-kx+\varphi_2) \tag{2}$$

其中 $\varphi_1$、$\varphi_2$ 分别是在 $x=0$ 处（原点），电振荡和磁振荡的初位相，是解波动方程中出现的积

分常数。两个括号内的量$(\omega t-kx+\varphi_1)$与$(\omega t-kx+\varphi_2)$分别是电振荡和磁振荡在时刻$t$、位置$x$处的位相，所谓$\boldsymbol{E}$与$\boldsymbol{B}$同位相就是指：

$$\omega t-kx+\varphi_1=\omega t-kx+\varphi_2 \tag{3}$$

由于在自由空间传播的电磁振荡有相同的频率$\left(f=\frac{\omega}{2\pi}\right)$，相同的波数$\left(k=\frac{2\pi}{\lambda}\right)$，所以$\boldsymbol{E}$与$\boldsymbol{B}$同位相要求

$$\varphi_1=\varphi_2=\varphi \tag{4}$$

将（4）式代入（1）、（2）式可知，$\boldsymbol{E}$与$\boldsymbol{B}$同位相意味着：

$$\begin{cases}\dfrac{E_y}{B_z}=\dfrac{E_0}{B_0}=\text{常数} & (5)\\ \dfrac{\partial E_y}{\partial t}\Big/\dfrac{\partial B_z}{\partial t}=E_0/B_0=\text{常数} & (6)\\ \dfrac{\partial E_y}{\partial x}\Big/\dfrac{\partial B_z}{\partial x}=E_0/B_0=\text{常数} & (7)\end{cases}$$

这几个关系表明，任一时刻，在任一位置，电场强度$E_y$和磁感应强度$B_z$，以及它们对时间的变化率$\frac{\partial E_y}{\partial t}$和$\frac{\partial B_z}{\partial t}$，对空间坐标$x$的变化率$\frac{\partial E_y}{\partial x}$和$\frac{\partial B_z}{\partial x}$都成比例，而且比值都等于相同的常数。其意义还可以从下面两方面来理解。

一方面，若固定空间一点$P$（$x=x_P$），该点的$E_y$和$B_z$都随时间而变化，在振荡着，但它们的振荡是同位相的，图14-5甲表示在$P$点的$E_y$和$B_z$的振动曲线，即$E_y-t$和$B_z-t$图线。图14-5乙是为便于比较而把它们绘在一个平面上的情况。

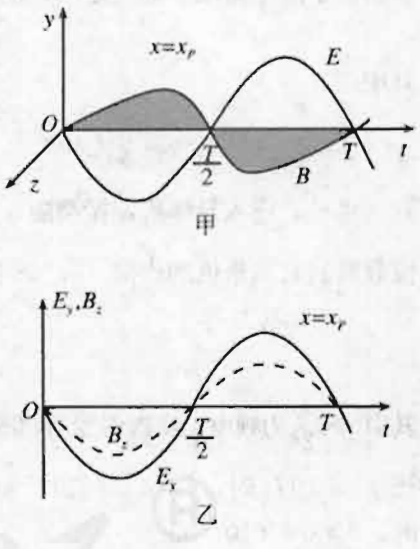


图14-5

可见，在空间任一点，$E_y$和$B_z$的变化完全同步调。它们同时为0（当$t=0$，$\frac{T}{2}$，$T$时），同时取最大值（当$t=\frac{T}{4}$时），时时有相同的符号；在变化过程中，$\frac{\partial E_y}{\partial t}$和$\frac{\partial B_z}{\partial t}$成比例，即振动曲线在任一时刻的切线的斜率成比例，表明$E_y$和$B_z$的时间变化率也作完全同步调的变化。如图14-5中在$t=\frac{T}{4}$时，$E_y$和$B_z$的变化率皆为0，在$t=\frac{T}{2}$时刻二者的变化率为正的最大，表示$E_y$和$B_z$在此时刻都正从负值通过0变为正值；在$t=T$时刻，二者的变化率都为负的最大值，表示$E_y$和$B_z$在此刻都正从正值通过0变成负值，如此，等等。

另一方面，若固定一个时刻$t_0$（$t=t_0$），$E_y$和$B_z$随$x$坐标的（空间）分布也完全“同步”。它们的空间分布曲线，即该时刻的波形，如教科书图14.1-3所示。为便于比较，我们在14-6图中，在同一平面上画出$t_0$时刻的$E_y$和$B_z$的波形，图中的$v$和箭头表示波速和波的传播方向。

由图可见，对于任一确定时刻（$t_0$），$E_y$和$B_z$的数值在任一位置都成比例，$E_y$和$B_z$的波

峰和波谷的位置相同，二者为 0 的位置亦相同，$E_y$ 和 $B_z$ 的空间分布具有相同的周期性。而且，$E_y$ 和 $B_z$ 对坐标 $x$ 的变化率即 $\frac{\partial E_y}{\partial x}$ 和 $\frac{\partial B_z}{\partial x}$ 成比例表明，在任何坐标处，二波形曲线的斜率成比例，$\frac{\partial E_y}{\partial x}$ 和 $\frac{\partial B_z}{\partial x}$ 也随 $x$ 而作“同步”的变化。在波峰和波谷处（$x=\frac{1}{4}\lambda$，$\frac{3}{4}\lambda$），它们都等于 0；二波形曲线与 $x$ 轴的交点相同（$x=\frac{1}{2}\lambda$，$\lambda$），在这些点处的 $\frac{\partial E_y}{\partial x}$ 和 $\frac{\partial B_z}{\partial x}$ 的绝对值取最大值，表示 $E_y$ 和 $B_z$ 的空间变化率最大。

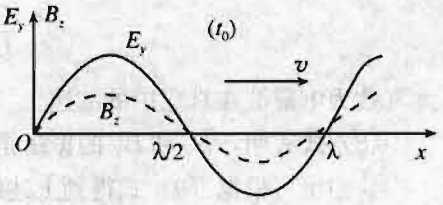


图 14-6

综上所述，$\boldsymbol{E}$、$\boldsymbol{B}$ 同位相，表示 $E_y$ 和 $B_z$ 随时间的变化以及随坐标的分布都是完全同步调的。已知其中一个的传播规律，另一个的传播规律也就知道了，区别只是振荡的物理量不同，振幅不同以及振动的平面不同而已。

(2) $\boldsymbol{E}$、$\boldsymbol{B}$ 同位相的证明

自由空间的平面电磁波的波动方程虽是由麦氏方程组导出的。但只靠它也不能证明 $\boldsymbol{E}$、$\boldsymbol{B}$ 同位相。原因是波动方程式是 $\boldsymbol{E}$ 和 $\boldsymbol{B}$ 彼此独立的波动方程。要证明 $\boldsymbol{E}$ 与 $\boldsymbol{B}$ 同位相，必须根据 $\boldsymbol{E}$ 和 $\boldsymbol{B}$ 相互联系的规律，也即是要根据麦克斯韦方程组中联系电场和磁场的两个环路定理。

我们可以根据安培环路定理的积分形式，得到了沿 $x$ 方向传播的平面电磁波的 $E_y$ 和 $B_z$ 满足的关系式：

$$\frac{\partial E_y}{\partial x}=-\frac{\partial B_z}{\partial t} \tag{8}$$

用同样方法可得

$$\frac{\partial B_z}{\partial x}=-\varepsilon_0\mu_0\frac{\partial E_y}{\partial t} \tag{9}$$

实际上，上面这两个式子，就是自由空间的麦克斯韦方程组中后两个方程，在 $E_x=0$ 和 $B_x=0$ 情况下的两个分量式。它表示 $E_y$ 和 $B_z$ 对空间坐标的变化率，与它们对时间的变化率之间的相互关系。

现在设电磁波的表达式如式 (1)、(2)，对它们进行求导运算后得：

$$\frac{\partial E_y}{\partial x}=kE_0\sin(\omega t-kx+\varphi_1)$$

$$\frac{\partial B_z}{\partial t}=-\omega B_0\sin(\omega t-kx+\varphi_2)$$

代入 (8) 式得：

$$kE_0\sin(\omega t-kx+\varphi_1)=\omega B_0\sin(\omega t-kx+\varphi_2)$$

这式的两端都是时间 $t$ 和空间坐标 $x$ 的正弦函数，要该式成立，必须：

$$kE_0=\omega B_0 \tag{10}$$

和

$$\varphi_1=\varphi_2=\varphi \tag{11}$$

一般情况下为

$$\varphi_1=\varphi_2+2n\pi$$

(7) 式表明，电矢量和磁矢量之比为常数，即

$$\frac{E_0}{B_0}=\frac{\omega}{k}=f\lambda=c=\frac{1}{\sqrt{\varepsilon_0\mu_0}} \tag{12}$$

此常数为电磁波在真空中的波速。

(8) 式表明，$E_y$ 和 $B_z$ 的振荡是同位相的。(一般的 $\varphi_1=\varphi_2+2n\pi$ 也是同位相之意。)

我们也可根据 (9) 式得到上述结果。

事实上，一切平面波 (包括机械波、电磁波等) 都可以表示是某一物理量 $\xi$ 作为时间 $t$ 和空间坐标 $x$ 的如下函数

$$\xi=\xi_0 f(\omega t\mp kx+\varphi) \tag{13}$$

其中 $kx$ 前面若取“−”号表示该波动沿 $x$ 正方向传播，取“+”号表示波动沿 $x$ 负方向传播。如果有另一物理量 $\eta$ 也是 $t$ 和 $x$ 的相同的函数

$$\eta=\eta_0 f(\omega t\mp kx+\varphi) \tag{14}$$

上述两个函数描述了两个沿 $x$ 轴传播的平面波。函数 $f$ 的宗量 $(\omega t\mp kx+\varphi)$ 相同，表示二波位相相同。不难证明这种情况下 $\xi$ 和 $\eta$ 中的一个对时间的偏导数与另一个对空间的偏导数间有简单的比例关系

$$\frac{\partial\xi}{\partial x}=\mp\frac{k\xi_0}{\omega\eta_0}\frac{\partial\eta}{\partial t} \tag{15}$$

$$\frac{\partial\eta}{\partial x}=\mp\frac{k\eta_0}{\omega\xi_0}\frac{\partial\xi}{\partial t} \tag{16}$$

若在上两式中取“−”号，把 $\xi$ 换成 $E_y$，$\eta$ 换成 $B_z$，并注意 $\frac{kE_0}{\omega B_0}=1$，$\frac{kB_0}{\omega E_0}=\frac{1}{c^2}=\varepsilon_0\mu_0$。上两式即为 (8)、(9) 式。可见麦克斯韦方程组中的两个环路定理 [(8)、(9) 两式是它微分形式的分量式] 本身就注定了平面电磁波中的 $\boldsymbol{E}$ 和 $\boldsymbol{B}$ 必须是同位相的，不管这平面波是不是简谐波。其实质是：由变化的电场 (位移电流) 感生磁场；变化的磁场感生电场 (感应电场) 的规律确定了电磁互感在自由空间所产生的电磁波中，$\boldsymbol{E}$ 矢量和 $\boldsymbol{B}$ 矢量的振荡必是同位相的。

**7. 完整的电磁波谱**

光只是电磁波这个“巨大王国” (赫兹的话) 的一小部分。整个王国叫做电磁波谱 (图 14-7)。谱的意思是范围或类型。

从图中可以看到，科学家已经在很大的波长范围内观察了电磁波。波长按从底部的最长到顶部的最短的顺序排列，并列出具有与该波长相同尺寸的典型物体以资比较；频率则按从底部最低到顶部最高的顺序排列，并列出具有这些频率的典型波源。

为了加大表示范围，图 14-7 中的波长和频率都用对数尺度表示，以因子 10 递增，即 1、10、100、1 000 等等。线性尺度——例如 10、20、30——不能妥善处理整个范围。在用图表示跨度很大的量时，对数尺度是很有用的。

所有这些波基本上都是同一种现象，也就是由振动的带电体产生的一种电磁场扰动，而这些扰动以电磁波的形式按光速通过电磁场向外传播；所有这些波都能被其他带电体接收，当电磁波经过这些带电体时，电磁波会使这些物体运动；所有的电磁波都能通过真空传播。

所有这些波都携带能量。电磁波的能量被称为辐射能。例如，由太阳传送到地球的能量就是辐射能。电磁波也常被叫做电磁辐射，因为它们是从带电体“辐射”出来的。由于较高的频率意味着较高的能量 (假定别的东西如振幅不变)，因此，随着我们沿频率标度从底部到顶部攀升，能量也随之增加。

把电磁波谱分成图 14-7 所示的 6 个区段是有用的。这些区段对应于发送或接收电磁辐射

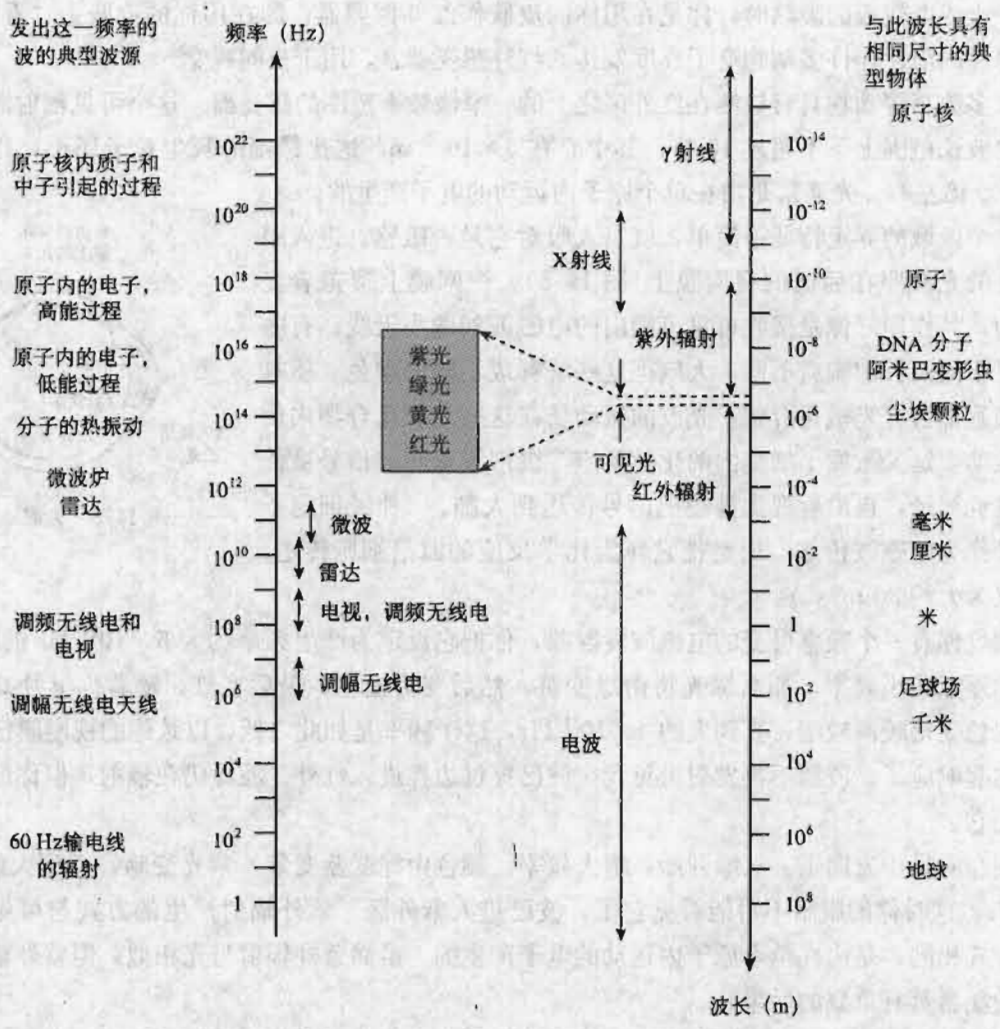



图 14-7

的不同方式。从最长的波长到大约 1 mm 为止的波长范围为电波即无线电波。通过使电子在人造电路中振动的方法，人们可以产生并控制这些波。赫兹波及大量现代技术产生的波都属于这一类。频率在 1 000 kHz（$10^6$ Hz）左右的调幅（AM）无线电波和频率在 100 MHz（$10^8$ Hz）附近的调频（FM）无线电波，是由电子沿金属天线振动产生的，这个天线是电路的一部分；雷达波和微波的频率高达 $10^{12}$ Hz，它们也是由电子方法产生的。

图 14-7 表示电磁波谱。谱没有确切的起点和终点，各个区域之间也没有清晰的界线。

许多自然过程也产生无线电波。射电天文学家用指向恒星或其他天体的射电接收器研究宇宙。事实上，天体产生波谱所有各部分的电磁辐射。在过去几十年里，装置在地球表面或空中的许多新型接收器或“望远镜”已经引起天文学知识的爆炸。

红外辐射的波长范围由 1 mm 到$\frac{1}{1\ 000}$ mm 以下。这相当于婴儿奶粉的微细颗粒的尺寸。红外辐射一般是由分子热能引起的分子无序的热运动产生的。由于所有物体都具有热能，因此，所有物体都会产生红外辐射。热的物体比冷的物体产生较多的红外辐射。红外探测器（如某些对红外敏感的化合物）能在较冷的背景上探测出较热的物体，这是夜视仪器和红外摄影的基础。

虽然你看不见红外辐射，但你能感觉到它。由于它是由热运动产生的，它的频率适合于扰动分子使之进入热运动就不奇怪了。因此，它能使受其照射的物体变热。当你在某一距离外感

受到炉火或电热板的暖热时，你是在用你的皮肤作红外探测器，即在用你的皮肤去“看”。通过竞争性的演化，许多动物有了高度发达的红外感受器官，用于夜间视觉。

大多数高等动物具有检测在红外区之上的一窄段频率范围的感受器。这个可见辐射即光所包含的波长范围上下不超过 10 倍，其中心在 $5\times10^{-7}$ m。这比最细的灰尘粒子还小，比原子大 5 000 倍左右。光通常是由在单个原子内运动的电子产生的。

这个区域的界定特征很简单，就是人眼对它是否敏感。进入眼睛瞳孔的光波照在后面的视网膜上(图 14-8)。视网膜上覆盖着光敏细胞，其作用好像是接收可见范围内的电磁波的微小天线。有些细胞对不同波长的响应不同，大脑把这些解释成不同的颜色。所有这些细胞都含有光敏化合物，光波的振动场在这些光敏化合物内使电子运动，这又激发了细胞内的化学反应。视网膜接收的信号被传送到视觉神经，再沿着视觉神经把信号传送到大脑。(神经细胞不把信号作为电磁波传送，而是把它作为化学反应的波沿细胞传送，速率仅为大约 30 m/s。)

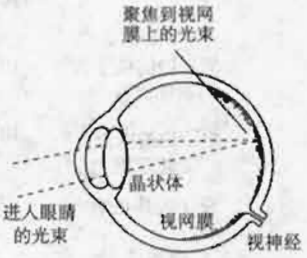


图 14-8 人眼

假设你有一个频率可变的电磁波发射源，你把它设定为产生频率约为 $6\times10^{14}$ Hz 的绿光。如果你逐渐减小频率，那么绿光将由绿变黄，然后变为橙色，最后变红。随着你继续减小频率，红色变得较深较暗，直到大约 $4\times10^{14}$ Hz，这个频率是如此之低，以致你的视网膜已不再能对它起响应了。波源不再发射可见光。波已穿过边界进入红外。波源仍在辐射，但你的眼睛看不见它。

现在向另一方向走。从绿开始，增大频率。颜色由绿变蓝变紫。紫光变暗，直到大约 $8\times10^{14}$ Hz，这时你的眼睛不再能看见它了。波已进入紫外区。紫外辐射产生的方式与可见光产生的方式相同，是由在单个原子内运动的电子产生的。虽然紫外辐射与光相似，但紫外辐射的较高的能量具有重要的后果。

紫外辐射的频率适合于使许多生物分子发生振动，因此它容易被生物所吸收。而且它的能量足以使分子分裂，这能够破坏或杀死活的细胞。紫外辐射被 DNA 吸收后，能引起遗传学上的显著变化即突变。如果突变细胞对其自身进行大量复制，就会导致癌变。如果在精子或卵细胞内发生细胞突变，就会导致变异的后代。

X 射线辐射也由单个原子内的电子产生，不过它来自原子内最高能的电子活动。X 射线波长在 $10^{-10}$ m（这大致是单个原子大小）附近的一个范围内。人们在高能 X 射线管内产生 X 射线(图 14-9)。电子从加热的细金属丝射出，并朝着真空管另一端的金属板加速运动。当电子撞进这块板时，就使金属板的原子产生 X 射线。

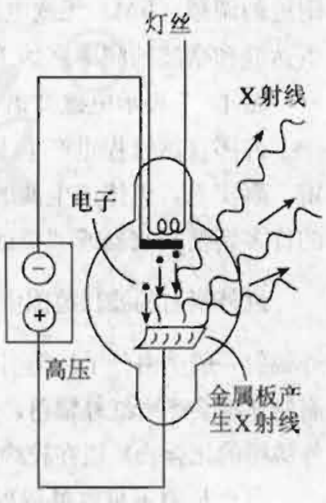


图 14-9 X 射线管的运作

X 射线与生物物质有重要的相互作用。X 射线有足够的能量使生物细胞内的分子电离，也就是说，把电子从一些分子中打出来。被打出来的电子可以继续运动导致进一步的破坏。与紫外线相似，这种辐射能引起突变和癌症。能量足以使生物物质电离的辐射，叫做致电离辐射。X 射线和 γ 射线都是致电离辐射，但紫外线的能量不足以成为致电离辐射。因为 X 射线能够穿透生物物质的深层，所以它可用于检查人体内部而无需外科手术。

我们对电磁波谱的巡视是沿着一定的规律进行的。随着我们向更小的波长行进，我们就走向更高的频率，这就意味着更高能的辐射，因而也就意味着要产生这种辐射需要更高的能量。同时我们也朝着在越来越小的空间区域内发生的过程前进：无线电波在宏观电路中产生；红外辐射在分子中产生；再下面的3个（可见光、紫外辐射和X射线）在原子中产生。

于是，波长最短的辐射即γ辐射，具有最高的频率和最高的能量，并由最高能量的过程在最小的空间区域内产生。γ射线由原子核内的高能核过程产生，而这个高能核过程是由把核维系成一体的强作用力造成的。γ射线在放射性物质中以及在被称为裂变和聚变的核反应中产生。

与X射线相似，γ射线是致电离辐射的一种，它能破坏生物物质。但正是这一特点常常被用来摧毁病变的细胞从而治疗某些癌症。由于γ射线波长比单个原子小得多，原子不容易对γ射线产生反应，因此它在物质中能够穿透到相当深的地方。

请考虑一下你周围的电磁波。它们充满了你所在的房间。数以百计的电视和无线电广播信号、来自中子星的射电脉冲、来自几百万颗正常星体的射电噪声、微弱的宇宙背景辐射、可能来自地外生命的通讯信号、来自太阳和我们的星系中心的辐射以及更多的其他辐射此时此刻正通过你的房间。你的眼睛只能直接看到这些波的整个波谱中微小的可见部分。用适当的接收器，你可以调谐到任何其他频率。宇宙在别的波长范围内显得很不相同。如果我们能直接接受整个波谱，那么，宇宙就会显得非常复杂。眼睛看到的实在只是大自然的巨大王国的微小一部分。

（改编自《物理学：基本概念及其与方方面面的联系》，[美] 阿特·霍布森著，秦克诚等译，上海科学技术出版社2001年10月第1版）

**8. 太阳辐射：来自我们的恒星的光**

太阳发射出波谱中每个区段的电磁波。大部分太阳辐射是可见光、红外线和紫外线，它们产生在太阳可见的表面上。太阳辐射的其他部分是由稀薄的、非常热的气体产生的，这种气体像地球大气包围地球一样包围着太阳。太阳大气内的过程产生出高能X射线和一些γ射线，同时伴随着无线电波。太阳内部深处的高能过程产生的强烈辐射在太阳内部就被吸收并转化，几乎没有直接逸出。

图14-10表明太阳产生的辐射能在不同波长的相对量值。当你坐在阳光下，你的眼睛感受到太阳的可见光，而你的皮肤则感受到太阳红外辐射的温暖。你的皮肤也感受到紫外线，但这要到稍晚时候造成叫做晒斑的细胞损伤时你才觉察到。

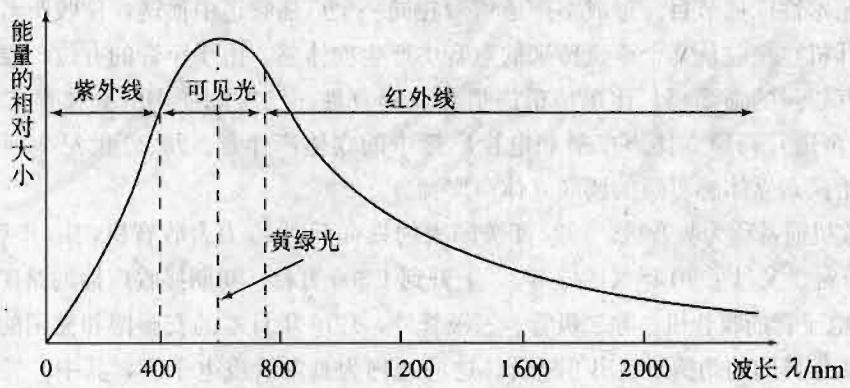



图14-10 太阳光谱中不同波长处能量的相对大小。太阳辐射能的大部分在电磁波谱的紫外辐射、可见光和红外辐射三个区域内。

太阳辐射能图（图 14-10）在波长为 $5.5\times10^{-7}$ m 的黄绿光附近达到极大值，并且在整个可见光区域内都很高。太阳能大部分集中在我们的眼睛能感受到的区域内。更令人吃惊的是，我们的眼睛已经进化成对黄绿光最敏感，这正是太阳光谱的峰值所在。一些市政当局利用这一点，把我们的消防车涂成黄绿色。主要的太阳辐射正好发生在我们的主要感受器即眼睛能够感受的区域内，这是多么奇怪的巧合。我们多么幸运！但是当然这不仅仅是幸运。通过生物进化，动物发展了对到达地球的主要辐射的感受器。比方说，灵敏度峰值出现在微波区域的动物，将会处在生物学上的不利地位，因为没有多少自然产生的微波能量供这种动物进行观察。

到达地球的太阳能的数量在不同地点、不同季节、不同气候条件以及在一天 24 小时内的不同时间是不同的。在美国，每平方米地面平均接收 200 W（即 200 J/s），这个数字是考虑了上述所有差异后的平均。

（改编自《物理学：基本概念及其与方方面面的联系》，
[美] 阿特·霍布森著，秦克诚等译，上海科学技术出版社 2001 年 10 月第 1 版）

## （二）联系生活、科技和社会资料

**1. 调幅广播和调频广播**

无线电频道是一种有限的自然资源，如果两个电磁波信号以同样或极相近的频率发出，便会相互干扰。无线电波中的中波和短波在技术上是最容易实现的，它们载送声音的方式也是比较简单的调幅方式，所以最初的无线电广播是中波和短波调幅广播两种方式。中波可沿着地球表面传播（地波），如果功率较大，能够覆盖半径为一百多千米的地区，也可依靠地球外层空间的电离层反射（天波），有可能到达几百以至上千千米以外的远方。短波主要依靠电离层的反射，功率较大的短波能够传播到几千公里以外。从 20 世纪 40 年代起，陆续产生了新的广播形态，主要是半波调频广播的出现。它与中波广播相比，具有以下明显的优越性：可以做高保真广播，声音优美动听；具有较高的抗干扰能力；广播频段可以容纳大量发射机，播出多套节目；在使用同等功率发射机时，调频广播发射台的服务范围比中波发射台大得多；可以比较容易地实现立体声广播。正因为这些特点，发达国家都已把调频广播作为对国内广播的主要收听覆盖手段。调频立体声广播是在单声道调频广播的基础上发展来的，它用几个位置不同的传声器拾取一个艺术性广播节目，形成多声道信号在同一个广播频道中播送，使收听者在使用多个扬声器（或耳机）接收从几个声道传来的声音中产生立体感，由于声音的方位、层次分明，所以在听觉上有较强的临场感，比单声道广播更具逼真性。已实际使用的立体声广播有双声道（左、右两个声道）调频立体声广播和电视广播中的立体声伴音。从 20 世纪 70 年代后期起，有的国家开始探索立体感更强的调频立体声广播。

广播接收机通常称为收音机。1922 年美国大约只有不到 10 万台收音机，10 年后（1932 年）已达到 350 万台。又过了 10 年（1942 年），上升到 1 300 万台。初期接收广播的是矿石收音机和使用 1～5 支电子管的收音机。除二极管、三极管外，1919 年日本的安藤博和美国的哈尔研制出四极管，1937 年英国的朗德研制出五极管。这些通称为真空管或电子管，其中，三极管应用最广泛。第二次世界大战后，美国贝尔实验室的肖克莱（W. Shockley）、布拉顿（W. Brattain）、巴丁（J. Bardeen）对半导体进行了深入研究，研制出具有和电子管同样功能的晶体管。1948 年 6 月 30 日，贝尔实验室正式宣布晶体管研制成功。这一成果是无线电技术发展史上的又一

里程碑，对电子工业产生了革命性的影响。为此，三位美国科学家荣获1956年度的诺贝尔物理奖。很快在收音机、电视机的生产中，立即用晶体管代替了电子管。广播接收机发展到半导体阶段，才真正得到空前的普及，这也使它成为最适合于贫穷国家的大众传媒，特别是地处边远和基础设施薄弱的地区。调频收音机是比调幅收音机复杂得多的接收工具，从70年代起，收音机朝着能够接收调频和多波段的调幅广播以及录音的多功能、高音质方向发展。

**2. 广播的社会作用**

广播是最先出现的电子大众传媒，在各国政治、经济、社会、文化生活中的作用十分巨大。广播电台一诞生，就在信息传播方面显示了巨大的优越性。列宁指出，广播使“整个俄罗斯都能听到莫斯科当天的报纸”。莫斯科广播电台试播初期，首先开办的节目是“口读报纸”和晚间播出新闻。美国KDKA广播电台开办时每天仅在晚间广播一小时，但开播后一周就及时报道了美国总统大选的竞选活动和结果。1924年10月，美国东西海岸26座广播电台同时播出了柯立芝总统的演讲。

从传播史上看，电视出现之前，广播曾使人们如醉如痴。美国的大众媒体学者德弗勒描述当年美国人喜爱广播时说，“经济来源窘迫的家庭，收音机坏了后也要省吃俭用攒钱修好。他们也许把家具还给贷款公司或拖欠房租，但他们死抱住收音机不放。”今天，无线电广播的形态十分完备而发达，它已完全渗透到人们的日常生活，且各国各地区的广播电波在全球交织成一张密集的网，人们可以利用小巧灵敏的多波段半导体收音机轻而易举地接收来自四面八方的电波。一位名叫奥勒·阿尔姆的瑞典人业余爱好是超远距离接收各国广播，从1955年起到今天，已成功收听和鉴别了215个国家和地区的2 000多家广播电台。他不仅收听北京广播电台的节目，而且在1996年春节前收听到8 000 km以外的江苏南通人民广播电台中波1 440 kHz的信号。这一事例再一次说明了广播的一点对多点的信息传播特性及强大的辐射力。

在当今，尽管广播吸引不了在日益盛行的多媒体世界中更容易对视觉图像着迷的年轻人，但广播仍拥有十分广泛的听众。在危机和战争时期，或许最能体现出广播的价值，即使在今天对不少国家而言，也是如此。如海湾战争期间，埃及、阿联酋和沙特阿拉伯的绝大多数人都是通过广播新闻获悉战争打响了，而且在这三个国家，广播作为深入的消息来源更胜电视一筹。在媒体服务于多民族多语言听众方面，电视也很难与广播竞争。在南非，宪法赋予11种语言以平等地位，广播办有所有11种语言的节目，而电视费了九牛二虎之力才只能提供几种语言的节目。电视要真正反映一国多样性的文化是困难的，广播在音乐和口头语言上更能满足本国各种文化的需要。对音乐的需要，无论是古典音乐、民族音乐还是流行音乐，都为人们的生活提供了一种唯有广播才能满足的选择。在媒介特性上，在对广播与电视加以比较后，瑞典的研究人员得出的结论是：广播属于弹性媒介，它服从于人们的日常生活安排；而电视正相反，它要求人们的日常生活安排适应它。

**3. 无线电话**

无线电话是在20世纪初发明了真空三极管之后才出现的。1915年首次成功地实现了跨越大西洋的无线电话通信；1927年在美国和英国之间开通了商用无线电话。当时的越洋无线电话通信是利用短波无线电波能从电离层折射返回地面这一特性。30年代发现了超短波，40年代发现了微波。超短波和微波都不能从电离层反射，具有直线传播的特性，能穿过电离层。它们在地面上只能以视线距离传播。人们利用这种特性开发了多路无线接力通信。超短波接力通信可以传送30路以下的电话；微波接力通信可以传送几千路电路，还可以用来传送彩色电视。所谓接力通信，就是在直线视距范围（在地面平原地区约50 km）内设立一个中继站进行接收

转发。通信距离越长，设立的中继站越多。

**4. 卫星通信**

卫星通信是利用位于离空 36 000 km 并与地球同步运转的通信卫星作为中继，使各地地面接收站间得以实现双向通信。地面接收站装有抛物天线，对准高空轨道的同步卫星，由卫星上天线和转发器起作用，好像一条微波线路的中继站。卫星通信是 20 世纪 60 年代开始的，迄今已接连发射了几代国际通信卫星。在地球高空轨道安放 3 个同步卫星，就可覆盖全球的地面，实现全球国际通信和电视节目传输。卫星通信只需在两地各设地面站就能相互通信，因此在地面崎岖地区，线路建设比较容易。由于卫星通信各方面的技术已经十分普遍，费用逐渐下降，现在不但许多国家有能力利用，甚至连个别的商业机构也在跃跃欲试了。将来，通信卫星还可能提供另一种全新的服务，因为能够直接传送的不单是电话和电视；信件、报纸及其他形式的信息都能从世界上几乎任何地方传送到家中，或许就在电视屏幕上显示。

**5. 雷达的发明**

在 20 世纪 30 年代，无线电技术出现了重大的突破，那就是雷达的发明。雷达又称作无线电测位，是利用无线电波的反射来测量远处静止或移动目标的距离和方位，并辨认出被测目标的性质和形状。

早在 1887 年，赫兹进行验证电磁波存在的实验时就曾发现：发射的电磁波会被一大块金属片反射回来，正如光会被镜面反射一样。

1897 年夏天，在波罗的海的海面上，俄国科学家波波夫在非洲号巡洋舰和欧洲号练习船上直接进行 5 km 的通信试验时，发现每天联络舰伊林中尉号在两舰之间通过时，通信就中断，波波夫在工作日记上记载了障碍物对电磁波传播的影响，并在试验记录中提出了利用电磁波进行导航的可能性。这可以说是雷达思想的萌芽。

1921 年业余无线电爱好者发现了短波可以进行洲际通信后，科学家们发现了电离层。短波通信风行全球。

1934 年，一批英国科学家在 R. W. 瓦特领导下对地球大气层进行研究。有一天，瓦特被一个偶然观察到的现象吸引住了。他发现荧光屏上出现了一连串明亮的光点，但从亮度和距离分析，这些光点完全不同于被电离层反射回来的无线电回波信号。瓦特马上想到，在荧光屏上既然可以清楚地显示出被建筑物反射的无线电信号，那么活动的目标例如空中的飞机，不是也可以在荧光屏上得到反映吗？

根据上述的设想，瓦特和一批英国电机工程师在 1935 年研制成功第一部用来探测飞机的雷达。后来，探测的目标又迅速扩展到船舶、海岸、岛屿、山峰、礁石、冰山，以及一切能够反射电磁波的物体。

当时研制雷达纯粹是为了军事需要，因此是在保密状态下进行的。实际上，几乎在同一时期，各国的科学家们都在保密的条件下独立地开展这方面的工作，都有杰出的代表人物。R. W. 瓦特只能说是在这方面已为大家知晓的代表人物而已。

到 1939 年为止，一些国家秘密发展起来的雷达技术已达到了完全实用的地步。就在这一年，爆发了第二次世界大战，这项新发明在二战显示出了它的巨大威力。

**6. 微波通信**

由于微波的频率极高，波长又很短，其在空中的传播特性与光波相近，也就是直线前进，遇到阻挡就被反射或被阻断，因此微波通信的主要方式是视距通信，超视距以后需要中继转发。

一般来说，由于地球球面的影响以及空间传输的损耗，每隔 50 km 左右，就需要设置中

继站，将电波放大转发而延伸。这种通信方式，也称为微波中继通信或称微波接力通信。长距离微波通信干线可以经过几十次中继而传至数千公里仍可保持很高的通信质量。微波站的设备包括天线、收发信机、调制器、多路复用设备以及电源设备、自动控制设备等。为了把电波聚集起来成为波束，送至远方，一般都采用抛物面天线，其聚焦作用可大大增加传送距离。多个收发信机可以共同使用一个天线而互不干扰，我国现用微波系统在同一频段同一方面可以有六收六发同时工作，也可以八收八发同时以增加微波电路的总体容积。多路复用设备有模拟和数字之分。模拟微波系统每个收发信机可以工作于 60 路、960 路、1 800 路或 2 700 路通信，可用于不同容量等级的微波电路。

数字微波系统应用数字复用设备以 30 路电话按时分复用原理组成一次群，进而可组成二次群 120 路、三次群 480 路、四次群 1 920 路，并经过数字调制器调制于发射机上，在接收端经数字解调器还原成多路电话。最新的微波通信设备，其数字系列标准与光纤通信的同步数字系列（SDH）完全一致，称为 SDH 微波。这种新的微波设备在一条电路上八个束波可以同时传送三万多路数字电话电路。

微波通信由于其频带宽、容量大，可以用于各种电信业务的传送，如电话、电报、数据、传真以及彩色电视等均可通过微波电路传输。微波通信具有良好的抗灾性能，对水灾、风灾以及地震等自然灾害，微波通信一般都不受影响。但微波经空中传送，易受干扰，在同一微波电路上不能使用相同频率于同一方向，因此微波电路必须在无线电管理部门的严格管理之下进行建设。此外由于微波直线传播的特性，在电波波束方向上，不能有高楼阻挡，因此城市规划部门要考虑城市空间微波通道的规划，使之不受高楼的阻隔而影响通信。

近年来我国开发成功点对多点微波通信系统，其中心站采用全向天线向四周发射，在周围 50 km以内，可以有多个点放置用户站，从用户站再分出多路电话分别接至各用户作用。其总体容量有 100 线、500 线和 1 000 线等不同容量的设备，每个用户站可以分配十几或数十个电话用户，在必要时还可通过中继站延伸至数百公里外的用户使用。这种点对多点微波通信系统对于城市郊区、县城至农村村镇或沿海岛屿的用户、对分散的居民点也十分适用，较为经济。微波通信还有“对流层散射通信”“流星余迹通信”等，是利用高层大气的不均匀或流星的余迹对电波的散射作用而达到超过视距的通信，这些系统，在我国应用较少。

**7. 通信技术发展大事记**

1837 年，莫尔斯发明电报。

1876 年，贝尔发明有线电话。

1893 年，发明步进式电话交换机。

1897 年，马可尼发明无线通信，在固定站与拖船之间的通信距离达 18 n mile。

1918 年，调幅无线电广播商用。

1919 年，调频无线电广播商用。

1938 年，黑白电视广播系统商用。

1946 年，开通了车载移动电话，工作在 30～40 MHz 频段。

1953 年，NTSC 彩色电视制式在美国研制成功。

1960 年，发明激光。

1965 年，发明程控电话交换机。

1978 年，模拟蜂窝移动通信投入商用。

1991 年，GSM 移动通信系统在欧洲投入商用。

1995年，CDMA移动通信系统投入商用。

通信技术发展最快的时期是在近30年，由于程控电话交换机与蜂窝移动通信技术的成熟与普及，再加上计算机硬件与软件技术的发展，将社会推向了网络化、信息化的时代。

（摘自《通信原理》，黄载禄、殷蔚华编著，科学出版社2005年1月第1版）

**8. 微波炉是怎样把食物加热的？**

微波炉利用微波的能量把食物加热，由微波的能量转变为食物的内能。

在水分子（$H_2O$）中，H的一端带正电，而O的一端带负电。微波通过食物时，微波的电场就对水分子产生作用力，令水分子的正负两端急剧地扭转振动。如图14-11所示。这振动就引致摩擦生热，迅速把食物煮熟。

微波炉的微波频率为2 450 MHz，这是使水分子振动的最有效频率。

瓷质盛器中没有水分子，也没有一端正一端负的其他分子，故微波炉的电场不能使其分子运动，故不会被加热。反之，金属盛器中具有大量的自由电子。自由电子轻易受到微波的电场而运动，善于吸收微波的能量而受热。故不要用金属器皿载食物放入微波炉中。

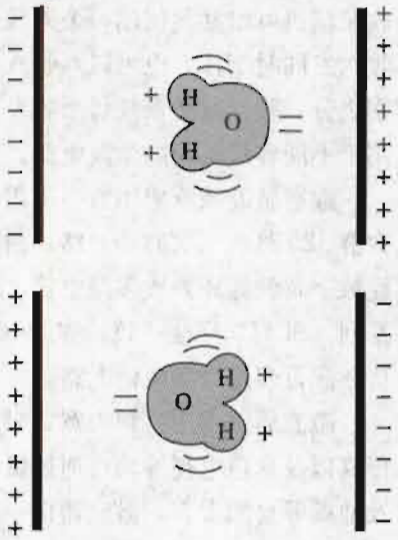



图14-11 水分子因电场的变化而振动

（摘自《生活的物理》，何定梁编著，上海远东出版社2000年1月第1版）

**9. 射电天文学**

射电观测为我们提供了非常不同于光学观测所得的信息，并应用于迥然不同的技术。波长长意味着辐射的波动特性在观测中是十分明显的。波长长也对应于光子的能量低。这就是说，射电区域能够反映较冷的区域。例如，射电观测可以告诉我们恒星形成。我们也将看到有一些在较长波段发出大量能量的高能的源。这样射电观测也给了我们研究高能现象的途径。

射电天文学的诞生缘于卡尔·央斯基（Karl Jansky）的一次偶然发现。他是设于新泽西州的贝尔电话实验室的工程师。1931年，央斯基探测神秘的无线电干扰源。他注意到这个干扰信号总是每天提前4 min达到峰值。这个时间记录表明这是固定于恒星背景中的一个天体。（每天4 min的漂移起因于地球绕太阳的运动。）干扰极大的时间与银芯通过地方子午线的时刻相符。央斯基得出结论：他收到的无线电波是来自银芯。人们由此认识到天体可以是一个强的无线电源。

第二次世界大战之后，射电天文学家充分利用了战争期间获得发展的雷达技术。英国、荷兰、澳大利亚和美国哈佛大学的一个小组都开展了射电观测。主要的进展是能够观测到波谱在无线电波段上的谱线。

20世纪50年代中期，人们清楚地认识到主要的射电天文台必须全力开展协作，在美国建立了国家射电天文台（NRAO）。（这是美国的首家国立天文台，稍早于基特峰光学天文台建成。）NRAO的第一台望远镜设置在西弗吉尼亚州的格林班克，远离各种人造的干扰源（在国家射电宁静带上）。由于地球大气对于波谱的射电波段的很大部分是透明的，就没有必要把射电天文台配置在高海拔或高清晰度的地方。我们甚至可以透过云层观测。我们能够不分白天或黑夜进行观测，因为天空不会散射来自太阳的射电波，不像太阳光受到散射而使天空十分明亮（呈现蓝色）。

现在我们来观察射电望远镜是如何工作的。射电望远镜包括某个收集辐射的部分和检测辐射的接收机。大多数现代的射电望远镜有一面很大的盘状天线，收集辐射，并把它聚集到焦点上。（它们像光学望远镜。）在这个过程中长的波长变得很重要。望远镜的分辨率取决于望远镜相对于波长的大小。（在波谱的射电部分大气宁静度不是问题。）由于波长很长，要达到高分辨率就要大的聚光镜。不过，表面不必要很精密。它的光洁度只要求达到小于大约$\frac{\lambda}{20}$。例如，对于 20 cm 的波长，1 cm 直径的洞对于望远镜的性能没有影响。制造一架大望远镜要求具有很精确的表面，是很困难的，这正困扰着人们。大多数大望远镜是由较小的片材组装而成的，它们比较容易精确加工。然后，片材拼装成一个大的良好表面。拼装要经过调节，使得望远镜在以各个角度倾斜时能把重力的影响减至最小，已经开发出几种技术，通过在观测中时刻监测各个片材而主动地调整表面。单面射电望远镜的最佳分辨率大约是 30″，稍微好于人在可见光下以裸眼观测。

较大的天线很重要，因为它们为我们提供较好的角分辨率。射电源的亮度微弱也是我们要建造大望远镜的理由。较大的望远镜能截获较多的辐射，并能使我们探测到较弱的源。最大的单面天线安装于波多黎各阿雷西博的国家大气和电离层中心。这面天线由网眼构成，放置于天然的碗形谷地上。表面上的孔相当大，我们只能把这面天线用于长波观测。还有这面天线不能指向任何方向，它只朝向上方。不过，通过在四周移动探测器，实际上可以观测相当广阔的天空。多年以来，最大的全移动天线是在德国艾菲尔斯堡马克斯·普朗克射电天文研究所。望远镜的直径是 100 m。内部 80 m 的表面是以固体片材做成，所以它可以用于几厘米的波长。外面 20 m 是网眼结构，以构成更大的天线，用于用衍射影响较大的长波观测。最新的大望远镜是伯德望远镜，刚刚安装于格林班克的 NRAO。这是一架全动 100 m 望远镜。它设计成能利用比德国望远镜更多的集光面积。为达到这一点部分是靠减小支撑结构的挡光。整个表面都相当精密，可以观测短至 7 mm 的波长。

探测射电波要用射电接收机。射电天文学所用接收机的设计理念类似于家用无线电收音机。与家用收音机一样，输入信号首先与参考振荡器给出的信号混合，产生较低的拍频信号并放大。我们通过改变参考振荡器的频率来改变要观测的频率（就像改变无线电台一样）。然而，来自天空射电源的信号在到达我们这里后变得十分微弱，这样射电天文所用的接收机必须比家用收音机灵敏得多。有时接收机冷却到绝对温度几度，以最大限度地压缩仪器背景噪声的来源。与测辐射热机不同，它不是简单地检测送达它的能量；它还能保存波谱信息。

正如在光学观测中一样，在射电天文学中我们能够进行连续的和线谱的观测。连续谱的研究如同光学测光。把接收机调谐到很宽的频率范围接收辐射，并且测量所接收的总功率。从这些信息我们得到连续谱的总体形状（强度按频率的分布）。在谱线观测中辐射在小的频率间隔内探测，所以可以测定谱线形状。

射电天文学在 20 世纪最后 30 年的最重要的进展是在毫米波波段（即最短的射电波）的发展。正如我们所知道的，有一些观测只在毫米波段才有可能。在毫米波段上的工作还有一些固有的好处。譬如说我们在 1 mm 上观测，我们只要用$\frac{1}{100}$直径的天线，就能达到在 10 cm 上观测的同一角分辨率！当然，这个天线表面的精密度必须要高 100 倍，这意味着天线难以做得很大。这把毫米波望远镜的大小限制在几十米直径，至多只具备约 10″至 20″的分辨率。

在毫米波段大气会阻挡部分入射的辐射（在对射电波全部透明和对红外光全部屏蔽之间的

某些波段上)。这就是也有必要把毫米波望远镜安置在海拔高、大气干燥的地方(正如光学和红外望远镜)。

(摘自《天文学:物理新视野》,[美] M. L. 库纳特著,萧耐园等译,湖南科学技术出版社 2005 年 11 月第 1 版,有改动)

## (三) 实验参考资料

**1. 电磁振荡的产生**

教科书图 14.2-1 所示的 $LC$ 回路中能产生阻尼振荡的必要条件是电路中的电阻 $R<2\sqrt{\frac{L}{C}}$,所以应采用粗导线在铁芯上绕制自感系数相当大的线圈,电容却不可过大。

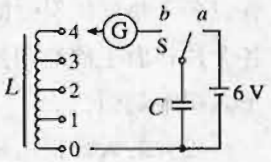


图 14-12

用指针式电表显示振荡电流时,为便于观测,振荡的周期应不小于 0.5 s,且振荡持续的时间要长些,使能观察到 3～5 个周期。为此应使线圈的自感系数尽量大些,电容也适当大些,线圈和电表的电阻要尽量小。所用电流表的指针动圈游丝系统的惯性应尽量小,才能使指针的运动和振荡电流的变化接近同步。为了避免在振荡电流消失后,指针系统由于自身惯性仍来回振动造成假象,应当给电表并联一个阻值适当的阻尼电阻,当电流消失后指针能直接回到平衡位置。

J2434 型电磁振荡演示仪能达到上述要求。它所附的阻尼振荡示教板电路如图 14-12 所示,$L$ 为特制的有抽头大电感线圈,接 1～4 时电感量大于 500 H,电阻小于 50 Ω,$C$ 为 200 μF 金属化纸介电容器,G 为仪器所附的灵敏电流表,内部接有阻值适当的阻尼电阻,表盘刻度零点左右各 30 格。实验时开关 S 先接 $a$ 再扳向 $b$,可看到表针向零点左右摆动,周期约 2 s,振幅逐渐衰减,振荡 5 个周期后振幅衰减到 1 格以下。如 $C$ 用电解电容器,反向漏电较严重,加快了能量损耗,振荡持续的时间将变短。

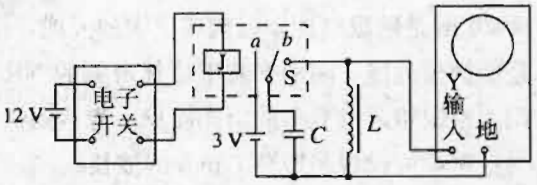


图 14-13

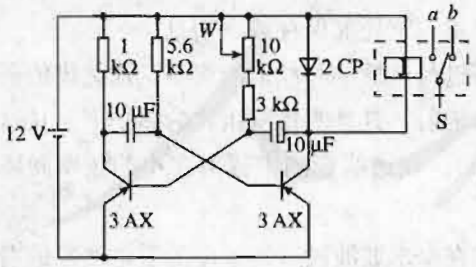


图 14-14

用示波器代替指针式电表能直接显示振荡的图象,并且因为示波管中电子的惯性极小,可以显示高频率的振荡电流,从而避免使用大电感演示。实验电路如图 14-13 所示,$L$ 为 J2425 型变压器原理说明器的 400 匝线圈或 J2423 型可拆变压器的 800 匝线圈,套在闭合铁芯上,电感量仅几亨,$C$ 为 2 μF 电容器。虚线框内为 J2466 型无线电组合教具中的电磁继电器,J 是它内部电磁铁线圈,用继电器的接点来控制 $C$ 的充、放电。"电子开关"是无线电组合教具中的一个组件,是一个晶体管自激多谐振荡器,有的产品中无此组件,可用有关零件按图 14-14 所示电路组成。接通 12 V 电源,电子开关工作,线圈 J 中通过矩形脉冲电流,使继电器的动接点 S 按一定频率在静接点 $a$、$b$ 间反复转换。J2458 型教学示波器的输入耦合开关置于"DC",Y 衰减置于"100",扫描范围旋到

“10～100”，仔细调节扫描微调旋钮，使扫描频率恰好等于继电器动接点转换频率时，就可看到稳定的阻尼振荡的电压—时间图象。再调 Y 增益和 X 增益使图象有适当的幅度和横向展开。为使图象有典型性，应显示出 3～5 个周期的波形，所以要适当搭配 $L$、$C$ 值，使电磁振荡的频率是继电器转换频率的 6～8 倍。对于图 14-14，可以调节电位器 $W$ 改变电子开关所产生的矩形脉冲频率从而改变继电器转换的频率。

**2. 电磁波的发射和接收**

*方法一*

**目的** 用莱顿瓶演示电磁波的发射和接收。

**器材** 莱顿瓶两只（一只带振子，一只带氖泡），感应圈等。

**操作**

（1）将感应圈输出端接于带振子的莱顿瓶上（图 14-15 甲）。

（2）接通感应圈的电源，使莱顿瓶振子开始振荡，并发出电磁波。

（3）将带氖泡的莱顿瓶靠近，调节两莱顿瓶上滑动杆的位置相同，可看到氖泡发亮图 14-15 乙。说明带氖泡的莱顿瓶接收到了电磁波，产生了电谐振。

（4）若两莱顿瓶上的滑动杆位置不一样，则氖泡不亮，这说明两振荡电路固有周期不同时，没有电谐振现象。

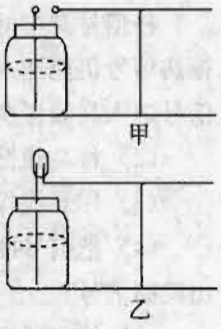


图 14-15

*方法二*

**目的** 用赫兹振荡器演示电磁波的发射和接收。

**器材** 感应圈，拉杆天线（能拉长至 1 m 以上）4 根，球形导体（直径约 1 cm）2 个，氖泡，绝缘手柄等。

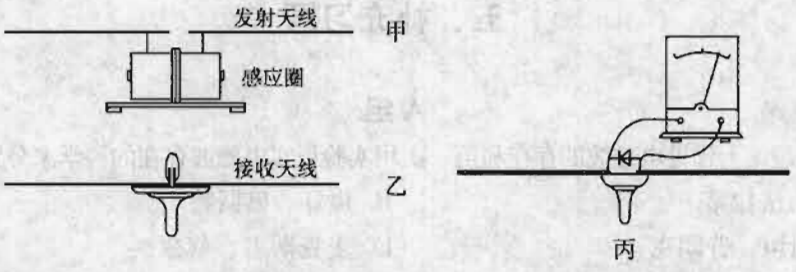


图 14-16

**操作**

（1）将两个球形导体装在两根拉杆天线粗端，再将拉杆天线固定在感应圈上，使两个球形导体相距约 5 mm（图 14-16 甲），作为发射天线。

（2）将氖泡和另外两根拉杆天线装在绝缘手柄上，并将氖泡的两端分别接于拉杆天线的粗端（图 14-16 乙），作为接收天线。

（3）接通感应圈的电源，使感应圈工作。这时必须先安好天线，再接通电源。

（4）将接收天线的长度调节成与发射天线的长度相同。将接收天线平行地逐步靠近发射天线，可看到氖泡逐渐发光。说明发射天线发射出电磁波，接收天线收到电磁波，并且产生了电谐振，谐振电流使氖泡发光。

（5）改变接收天线的长度，或转过一定的角度，可看到氖泡变暗或熄灭。说明接收天线与电磁波不产生电谐振时，接收到的电磁波的能量很小。

**说明** 取下接收器的氖泡，在两根拉杆天线的邻近端接上一只晶体二极管（2 AP 型），然

后再与电流表并联（图 14-16 丙）。当接收器收到电磁波时，电流表的指针就发生偏转，接收距离可达几米。

方法三

**目的** 用教学信号源和普通中波收音机演示电磁波的发射和接收。

**器材** 教学信号源（J 2464 型或 J 2465 型），信号发生器（话筒、电唱机或录音机均可），收音机，导线（1～2 m）等。

**操作**

（1）对信号源进行改装

将信号源中低频振荡器和高频振荡器的连线断开。接一个耳机插座，使普通低频振荡器的振荡信号仍能送入高频振荡器，当外接信号插头插入耳机插座时才断开低频振荡器，而将外接信号送入高频振荡器进行调制。

（2）将高频振荡器置于中频段（550～1 650 kHz）。

（3）用导线作为天线。将天线一端连接信号源的输出端并将其竖直放置。

（4）把信号插头（如电唱机）插入改装的插座内，将信号送入进行调制，这时天线中发射出调制信号。

（5）将收音机打开，调节接收频率，在适当位置即可收到信号源中发出的电磁波信号，这时收音机的频率与高频振荡器的振荡频率相同。

（6）改变高频振荡器的频率，必须重新调节收音机的接收频率才能收到信号。

（摘自《中学物理实验大全》，杨介信、张大同主编，上海教育出版社 1995 年 12 月第 1 版）

## 五、补充习题

### A 组

1. 首先从理论上预见电磁波的存在和第一次用实验证实电磁波存在的科学家分别是（　　）

A. 牛顿、法拉第　　B. 焦耳、奥斯特

C. 爱因斯坦、普朗克　　D. 麦克斯韦、赫兹

2. 某同学对机械波和电磁波进行类比，总结出下列内容，其中不正确的是（　　）

A. 机械波的频率、波长和波速三者满足的关系，对电磁波也适用

B. 机械波和电磁波都能产生干涉和衍射现象

C. 机械波的传播依赖于介质，而电磁波可以在真空中传播

D. 机械波既有横波又有纵波，而电磁波只有纵波

3. 要使 $LC$ 振荡电路的频率从 700 kHz 变为 1400 kHz，应该（　　）

A. 调可变电容器 $C$，使 $C'=2C$

B. 调可变电容器 $C$，使 $C'=\frac{1}{2}C$

C. 调可变电容器 $C$，使 $C'=\frac{1}{4}$

D. 调电感线圈 $L$，使 $L'=4L$

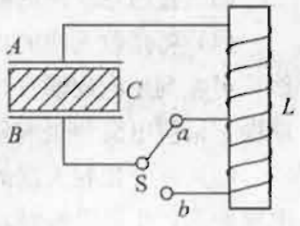


图 14-17

4. 如图 14-17 所示的振荡电路，其中 $L$ 是一个带铁芯的有抽头

的线圈，$C$ 的两板间插有电介质板，为了降低振荡频率，下列措施中正确的是（　　）

A. 从两板间抽出介质板　　B. 从线圈中抽出铁芯

C. 将开关 S 从 $a$ 拨到 $b$　　D. 增加两板的电荷量

5. 两个相同的白炽灯 $L_1$ 和 $L_2$ 接到如图 14-18 所示的电路中，灯 $L_1$ 与电容器串联，灯 $L_2$ 与电感线圈串联，当 $a$、$b$ 处接电压最大值为 $U_m$、频率为 $f$ 的正弦交流电源时，两灯都发光，且亮度相同。更换一个新的正弦交流电源后灯 $L_1$ 的亮度大于灯 $L_2$ 的亮度，新电源的电压最大值和频率可能是（　　）

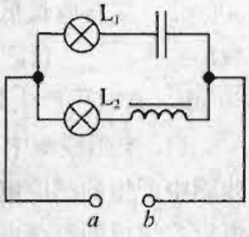


图 14-18

A. 最大值仍为 $U_m$，而频率大于 $f$

B. 最大值仍为 $U_m$，而频率小于 $f$

C. 最大值大于 $U_m$，而频率仍为 $f$

D. 最大值小于 $U_m$，而频率仍为 $f$

6. 眼睛的视觉暂留时间为 0.1 s，为了使电视图像是连续活动的，电视台每秒内发送的图像信号（　　）

A. 应该多于 10 张　　B. 应该少于 10 张

C. 通常每秒发射 10 张　　D. 通常每秒发射 25 张

7. 关于电磁波，下列说法中正确的是（　　）

A. 雷达是用 X 光来测定物体位置的设备

B. 使电磁波随各种信号而改变的技术叫做解调

C. 用红外线照射时，大额钞票上用荧光物质印刷的文字会发出可见光

D. 变化的电场可以产生变化的磁场

8. 如图 14-19 所示的电路中，自感线圈的自感系数为 $L$，电容器的电容为 $C$，电源电动势为 $E$，今将开关 S 由 1 扳到 2，从这一时刻起（　　）

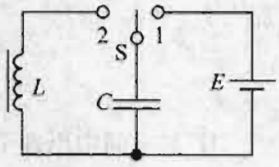


图 14-19

A. 经历时间 $\frac{\pi}{2}\sqrt{LC}$ 时，回路中的磁场能达到最大值

B. 经历时间 $\pi\sqrt{LC}$ 时，回路中的磁场能达到最大值

C. 在 $\frac{1}{4}$ 周期的时间里，电容器放电的电量为 $CE$

D. 在 $\frac{1}{4}$ 周期的时间里，电容器放电的平均电流是 $\frac{2E}{\pi}\sqrt{\frac{C}{L}}$

9. 下列关于电磁波的说法中正确的是（　　）

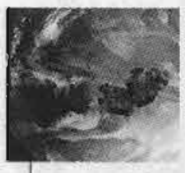
A. 电磁波必须依赖介质传播　　B. 电磁波可以发生衍射现象

C. 电磁波不会发生偏振现象　　D. 电磁波无法携带信息传播

10. 在产生电磁振荡的过程中，$LC$ 回路中电容器内的电场强度在 $5\times10^{-8}$ s 内由最大值变为 0，在这段时间里电路中电流的变化情况是_____，若线圈的自感系数不变，要使振荡周期变为 $4\times10^{-7}$ s，则电容器的电容应变为原来的_____倍。

11. 在 $LC$ 振荡电路中，已知电容器的电容为 $C$，振荡电流 $i=I_m\sin\omega t$，则此电路中线圈的自感系数为_____，若该电路发射的电磁波在某种介质中的波长为 $\lambda$，则电磁波在这种介质中的传播速度为_____。





12. 回旋加速器的高频电源是一个 $LC$ 振荡器，加速器的磁感应强度为 $B$，被加速的粒子电荷量为 $q$、质量为 $m$，那么 $LC$ 振荡电路中电感 $L$ 和电容 $C$ 的乘积应为_____。

13. 在如图 14-20 所示的电路中，可变电容器的最大电容是 300 pF，要接收最低频率是 550 kHz 的电磁波，线路上线圈的自感系数 $L$=_____ H，如果可变电容器的动片完全旋出时电容变为 30 pF，这时可产生频率 $f$ =_____ MHz 的振荡电流。

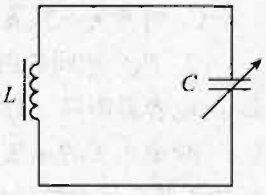


图 14-20

14. 电感线圈中的电流在 0.6 s 时间内改变了 1 A，在这段时间内线圈中产生的感应电动势为 0.2 mV，求由这个线圈和 $1.4\times10^4$ pF 的电容器组成的振荡电路产生的电磁波在真空中的波长。

15. 如图 14-21 所示，$LC$ 振荡电路的电容器的两极板水平放置，开关 S 断开时，两极板内的带电液滴恰好静止。已知 $C$=4 μF，$L$=0.1 mH。现将 S 闭合，经过 $2\pi\times10^{-5}$ s，液滴的加速度多大，方向如何？（电容器极板间距离足够大，$g$ 取 10m/s²）

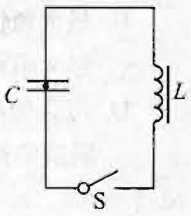


图 14-21

16. 收音机接收无线电波的频率范围比较宽，通常把频率分成几个波段，利用改变调谐电路中线圈自感的方法来选择波段，再利用调节可变电容器的方法，在同一波段内选择所需要的频率。如图 14-22 所示是某收音机的调谐电路，当转换开关 S 置于位置 1 时，电路中线圈的自感为 $L_1$，接收中波段的无线电波；当 S 置于位置 2 时，电路中线圈的自感为 $L_2$，接收短波段的无线电波，如果可变电容器 $C$ 的调节范围为 12～180 pF，$L_1$ 为 700 μH，那么在中波段接收无线电波的频率范围是多大？如果这台收音机能接收的无线电波的频率最高为 20 MHz，那么 $L_2$ 是多大？

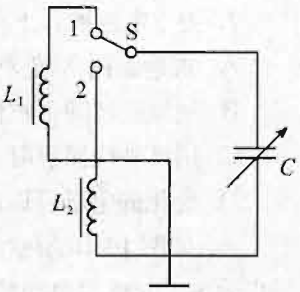


图 14-22

## B 组

1. 某空间中出现了如图 14-23 中虚线所示的一组闭合的电场线，这可能是（　　）

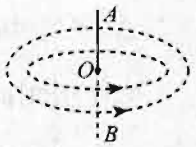


图 14-23

A. 在中心点 $O$ 有一静止的点电荷

B. 沿 $AB$ 方向有通有恒定电流的直导线

C. 沿 $BA$ 方向的磁场在减弱

D. 沿 $AB$ 方向的磁场在减弱

2. 无线电广播需要对电磁波进行调制的原因是（　　）

A. 经过调制后的高频电磁波向外界辐射能量的本领更强

B. 经过调制后的电磁波在空间传播波长才能不变

C. 经过调制后的电磁波在空间才能传播得更快

D. 经过调制后的高频电磁波才能把我们要发射的信号传递出去

3. 如图 14-24 所示的电路中，$L$ 是自感系数很大的用铜导线绕成的线圈，其电阻可忽略不计，开关 S 原来是闭合的，当开关 S 断开的瞬间（　　）

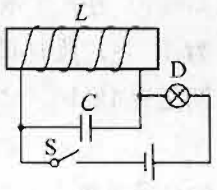


图 14-24

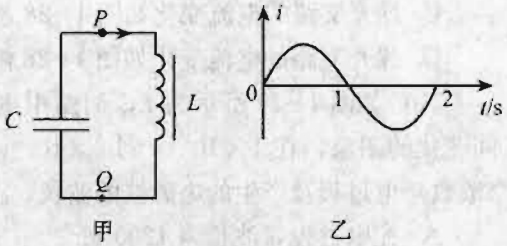
A. 灯泡 D 要过一会儿才熄灭

B. $L$ 中电流方向会发生改变

C. $LC$ 回路将产生振荡，刚断开瞬间，磁场能最大

D. 电容器将放电，电场能将变为磁场能

4. 如图 14-25 甲所示的 $LC$ 振荡电路中，通过 $P$ 点的电流变化规律如图 14-25 乙所示，且把通过 $P$ 点向右的电流方向规定为电流的正方向，则（　　）



甲　　乙

图 14-25

A. 0.5 s 至 1 s 时间内电容器在充电

B. 0.5 s 至 1 s 时间内电容器的上极板带正电

C. 1 s 至 1.5 s 时间内 $Q$ 点比 $P$ 点电势高

D. 1 s 至 1.5 s 时间内磁场能正在转变成电场能

5. 目前雷达发射的电磁波频率多在 200 MHz 至 1000 MHz 的范围内。下列关于雷达和电磁波的说法中正确的是（　　）

A. 真空中上述雷达发射的电磁波的波长范围在 0.3 m 至 1.5 m 之间

B. 电磁波是由恒定不变的电场或磁场产生的

C. 测出从发射电磁波到接收反射波的时间间隔可以确定雷达和目标的距离

D. 波长越短的电磁波，反射性能越强

6. 如图 14-26 所示是通过电容器电容的变化来检测容器内液面高低的仪器原理图，容器中装有导电液体，是电容器的一个电极，中间的导体芯柱是电容器的另一个电极。芯柱外面套有绝缘管作为电介质，电容器的这两个电极分别与一个线圈的两端相连，组成 $LC$ 振荡电路，使该振荡电路产生电磁振荡，根据其振荡频率的高低（用与该电路相连的频率计显示），就可以知道容器内液面位置的高低。如果频率计显示该振荡电路的振荡频率变大了，则液面是（　　）

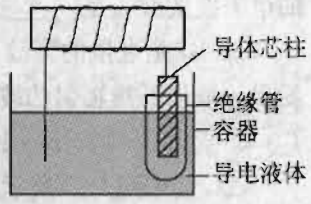


图 14-26

A. 升高了　　B. 降低了　　C. 不变　　D. 根据题给条件无法判断

7. $LC$ 振荡电路的固有频率为 $f$，则（　　）

A. 电容器内电场变化的频率也为 $f$　　B. 电容器内电场变化的频率为 $2f$

C. 电场能和磁场能转化的频率为 $f$　　D. 电场能和磁场能转化的频率为 $2f$

8. 以下电场能够产生变化的磁场的是（　　）

A. $E=10$ V　　B. $E=5\sin(4t+1)$ V

C. $E=(3t+2)$ V　　D. $E=(4t^2-2t)$ V

9. 把两个分别发红光、绿光的发光二极管并联起来，再接入如图 14-27 所示的电路中，电路中的电容 $C$ 和线圈的自感系数 $L$ 比较大，且满足 $2\pi\sqrt{LC}=2$ s。即此回路的振荡周期在 2 s 左右，设法让电容器带上足够的电，再闭合开关 S，若通过电感中线圈的电流变化如图 14-28 甲所示（设通过线圈的电流方向自上而下为正），则对闭合开关 S 后的过程，下列说法中正确的是（　　）

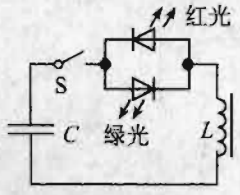


图 14-27

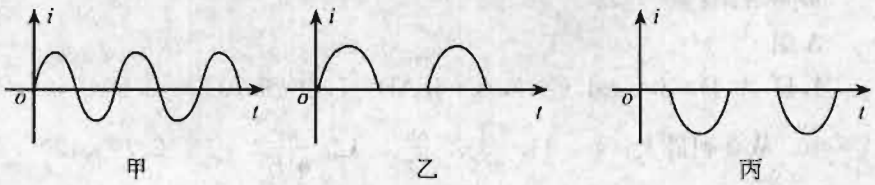


图 14-28

A. 绿光的发光二极管始终不发光

B. 红光、绿光的发光二极管交替发光，且每次发光的时间为 1 s

C. 绿光支路的电流变化如图 14-28 乙所示

D. 绿光支路的电流变化如图 14-28 丙所示

10. 如图 14-29 所示为 $LC$ 回路中电容器中的电荷量随时间变化的图象，在 $1\times10^{-6}$ s 到 $2\times10^{-6}$ s 内，关于电容器的充（或放）电过程及产生的电磁波的波长，正确的结论是（　　）

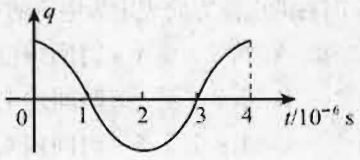


图 14-29

A. 充电过程，波长为 1200 m

B. 充电过程，波长为 1500 m

C. 放电过程，波长为 1200 m

D. 放电过程，波长为 1500 m

11. 红外遥感技术得到广泛的应用，从原理上说是因为红外线的波长_____，_____，容易穿透云雾烟尘，又由于一切物体都在不停地辐射红外线，并且不同物体辐射红外线的_____不同。

12. $LC$ 回路中电容 $C=3.6\times10^{-2}$ pF，电感 $L=\frac{1}{\pi^2}$ mH，若能向外发射电磁波，则所发射的电磁波的波长是_____ m，电场能变化的周期是_____ s。

13. 蛇是老鼠的天敌，它是靠接收热辐射来发现老鼠的。假设老鼠的体温约为 37 ℃，它发出的最强的热辐射的波长为 $\lambda_m$。根据热辐射理论，$\lambda_m$ 与辐射源的绝对温度 $T$ 的关系近似为 $T\cdot\lambda_m=2.90\times10^{-3}$ m·K。老鼠发出最强的热辐射的波长为_____ m，属于_____波段。

14. 如图 14-30 所示的电路中，电容器的电容 $C=1$ μF，线圈的自感系数 $L=0.1$ mH，先将开关 S 扳至 $a$。这时电容器内有一带电油滴恰能保持静止。然后将开关 S 扳至 $b$，经过 $t=3.14\times10^{-5}$ s，油滴的加速度是多大？当油滴的加速度 $a'$ 为何值时，$LC$ 回路中的振荡电流有最大值？（$g$ 取 10m/s²，$\pi$ 取 3.14，研究过程中油滴不与极板接触）

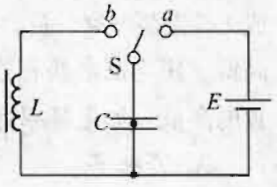


图 14-30

15. 如图 14-31 所示，由板距 $d=2$ cm，板长 $l=20$ cm 的平行板电容器电容 $C=\frac{1}{\pi^2}\times10^{-8}$ F 和线圈 $L=4\times10^{-4}$ H 组成一理想的 $LC$ 振荡电路，电路电动势 $E=10$ V。今有荷质比为 $10^5$∶1的带电粒子（不计重力），沿电容器中心轴线飞入，当在 1 时，粒子恰好从电容器的下板边缘飞出，若开关 S 接 2 时，飞入电容器的粒子是否能飞出。若不能，粒子将打在何处？若能，粒子飞出时的速度是多大？

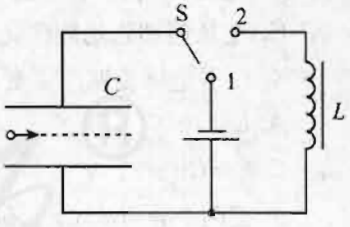


图 14-31

**参考答案：**

**A 组**

1. D　2. D　3. C　4. C　5. A　6. AD　7. D　8. ACD　9. B

10. 从 0 到最大，4　11. $\frac{1}{\omega^2C}$，$\frac{\lambda\omega}{2\pi}$　12. $\frac{m^2}{q^2B^2}$　13. $2.79\times10^{-4}$，1.74

14. $2.44\times10^{3}$ m 提示：根据公式 $E=L\dfrac{\Delta I}{\Delta t}$，得 $L=E\cdot\dfrac{\Delta I}{\Delta t}=0.2\times10^{-3}\times\dfrac{0.6}{1}$ H=0.12 mH。

由 $T=2\pi\sqrt{LC}$ 及 $\lambda=cT$ 可得

$$\lambda=2\pi c\sqrt{LC}=2\pi\times3\times10^{8}\times\sqrt{0.12\times0^{-3}\times1.4\times10^{-8}}\ \text{m}=2.44\times10^{3}\ \text{m}。$$

15. 448～1737 kHz，20 m/s²，方向竖直向下

提示：$T=2\pi\sqrt{LC}=2\pi\sqrt{0.1\times4\times10^{-6}\times10^{-3}}\ \text{s}=4\pi\times10^{-5}\ \text{s}$

S闭合前，电场力竖直向上与重力平衡。当 $t=2\pi\times10^{-5}\text{s}=\dfrac{T}{2}$ 时，电场力竖直向下，此时带电液滴所受合力为 $2mg$，所以液滴的加速度为 20 m/s²，方向竖直向下。

16. 5.28 μH 提示：这是一个两波段的调谐电路，有两个自感线圈 $L_1$ 和 $L_2$，其中 $L_1>L_2$，当S置于位置1时，$L_1$ 和 $C$ 组成的调谐电路固有频率较小；当S置于位置2时，$L_2$ 和 $C$ 组成调谐电路固有频率较大。当S置于位置2，可变电容器的电容最小时，调谐电路的固有频率最大，接收的无线电波频率最高。

据公式 $f=\dfrac{1}{2\pi\sqrt{LC}}$，得 $f_1=\dfrac{1}{2\pi\sqrt{L_1C_1}}=\dfrac{1}{2\pi\sqrt{700\times10^{-6}\times12\times10^{-12}}}$ Hz=1737 kHz，

$$f_2=\frac{1}{2\pi\sqrt{L_1C_2}}=\frac{1}{2\pi\sqrt{700\times10^{-6}\times180\times10^{-12}}}\ \text{Hz}=448\ \text{kHz}。$$

即在中波段接收无线电波的频率范围是 448～1737 kHz。

据 $f_{min}=\dfrac{1}{2\pi\sqrt{L_2C_1}}$，$LC$ 的乘积最小时 $f$ 有最大值

$$L_2=\frac{1}{4\pi^2C_1f_{max}^2}=\frac{1}{4\pi^2\times12\times10^{-12}\times(20\times10^{6})^2}\ \text{H}=5.28\ \mu\text{H}。$$

**B组**

1. C　2. D　3. C　4. AC　5. ACD　6. B　7. AD　8. BD　9. BC　10. A

11. 长，衍射现象明显，强度　12. 3.6，$1.2\times10^{-8}$　13. $9.6\times10^{-6}$m，红外线

14. 20 m/s²，10 m/s² 提示：当S扳至 $a$ 时。油滴受力平衡，显然油滴带负电，所以 $mg=\dfrac{U}{d}q$。当S扳至 $b$ 后，$LC$ 回路中有振荡电流，振荡周期为

$$T=2\pi\sqrt{LC}=2\times3.14\times\sqrt{0.1\times10^{-3}\times10^{-6}}\ \text{s}=6.28\times10^{-5}\text{s}。$$

当 $t=3.14\times10^{-5}$ s时，电容器恰好反向充电完毕，两板间电场强度与 $t=0$ 时等大反向，由牛顿第二定律得 $\dfrac{U}{d}q+mg=ma$，$a=20$ m/s²。

当振荡电流最大时，电容器处于放电完毕状态，两板间无电场，油滴仅受重力作用，所以 $mg=ma'$，$a'=10$ m/s²。

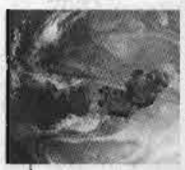
即当油滴的加速度为 10 m/s²时，$LC$ 回路中振荡电流有最大值。

15. 能，$v_0$ 提示：S接2后，$LC$ 回路中产生电磁振荡，其振荡周期

$$T=2\pi\sqrt{LC}=2\pi\sqrt{4\times10^{-4}\times10^{-8}/\pi^2}\ \text{s}=4\times10^{-6}\ \text{s}$$

粒子沿原方向射入后，在初速度方向做匀速直线运动，垂直极板方向先在第一个 $\dfrac{1}{4}T$ 内做





加速运动，后在第二个$\frac{1}{4}T$内减速运动，第三个$\frac{1}{4}T$内反向加速，第四个$\frac{1}{4}T$内反向减速，并回到入射时所在直线上。

S接1时，由$y=\frac{d}{2}=\frac{1}{2}\frac{qU}{md}t^2$，得$t=\sqrt{\frac{m}{qU}}d=2\times10^{-4}$s。

因此$\frac{t}{T}=50$，所以粒子以速度$v_0$沿入射方向飞出。

# 第十五章
# 相对论简介

## 课程标准的要求

1. 知道狭义相对论的实验基础、基本原理和主要结论。

2. 了解经典时空观与相对论时空观的主要区别。体会相对论时空观的建立对人类认识世界的影响。

3. 初步了解广义相对论的几个主要观点以及主要观测证据。

4. 关注宇宙学研究的新进展。

## 一、本章教材概述

学生是否学过狭义相对论，对于以后的日常生活没有影响，甚至与大多数技术工作也没有关系。新课程安排这些内容，目的是加强学生对科学方法、科学意义的认识。狭义相对论的建立在科学发展史上具有十分典型的意义。

这部分内容的思路如下。

①某些实验和观测事实提示：光速可能对于任何参考系都是一样的

②没有事实证明某个惯性系具有不同于其他惯性系的特殊地位

↓

光速不变原理，狭义相对性原理

↓

同时的相对性

↓

长度和时间间隔的相对性

↓

μ子寿命的检验，铯原子钟的检验……

关于科学的过程，过去的教学可能给学生一个形式化的、不真实的图景：把“大量”实验结果归纳起来，就得到科学的理论。事实上，多数科学定律都不可能由简单的归纳得到。科学猜想，或者说非逻辑的思维，在科学发现的过程中，甚至在认识日常生活的事物中，都起着决定性的作用，这点在过去的教学中往往被忽视。这些猜想和假设之所以正确，根本上还是因为由它们得到的许许多多（可直接检验的）推论都与事实相符。

本章可以分为两个单元。第1单元（第1节～第3节），介绍了相对论诞生的历史环境，经典的相对性原理，以及相对性原理在电磁学领域里遭遇的困惑：经典物理绝对时空观遭遇了著名的迈克耳孙—莫雷实验的严峻挑战。介绍了爱因斯坦在已有知识背景和实验基础上，通过

思维的自由创造，大胆猜想提出的两条假设：狭义相对性原理和光速不变原理。然后以此为出发点，通过形式逻辑演绎推理得出以下结论：同时的相对性、长度的相对性、时间间隔的相对性、相对论速度变换公式、相对论质量、相对论质能。这些内容是狭义相对论的主要内容，为后面的教学作了必要的准备。

第2单元（第4节），介绍了爱因斯坦在狭义相对论基础上，将狭义相对性原理进一步推广，大胆提出了一个动态的、发展的时空观，解决了令他深感不安的两个问题：一个是引力问题，另一个是非惯性系问题。让学生了解，由于有物质的存在，空间和时间会发生弯曲，而引力场实际上是一个弯曲的时空。在此基础上，得到的一些令人惊异的结论，如引力使光线弯曲，引力场对时空影响而出现的“引力红移”现象。广义相对论原理和等效原理的问世，我们才得以了解神奇的高速世界，认识变化多彩的天体物理，探索奥秘无穷的宇宙。

在编写本章时还有以下思考。

**1. 通过介绍相对论的诞生过程，引导学生认识实验对于物理理论的推动作用**

物理学的发展从来就是与实验密不可分的。狭义相对论一直被许多人认为是爱因斯坦通过自己一个人天才的努力，仅凭逻辑和数学上的美感制造出来的一个完美的理论。这使得有些人认为自己可以仅凭着运气和一些荒唐古怪的想法就可以独立的创造出一个完整的理论。针对这样的思想，教科书详细地介绍了在狭义相对论产生之前，物理学家面对的实验和理论的困扰。在简单介绍了伽利略相对性原理以后，比较详细地介绍了伽利略相对性原理、电磁规律和实验结果之间出现的矛盾。教科书提到了1887年的迈克耳孙－莫雷实验：将一束光分成互相垂直的两束，一束的传播方向与地球的运动方向一致，另一束与地球的运动方向垂直。由于地球的运动，这两束光的速度就应该有微小的差别。然而，不管科学家如何努力，精密的实验得到的结果却是两束光的速度没有差别。除此之外，包括1868年的霍克实验、1851年的斐索实验等一系列实验的结果都表明：不论光源和观测者做怎样的相对运动，光速都是相同的。虽然爱因斯坦后来的回忆中认为在他思考狭义相对论的时候并没有注意到迈克耳孙－莫雷实验，但是他关注了1851年的斐索实验，这些实验揭示了相同的物理内涵：光速不变原理。所以爱因斯坦相对论的大厦并不是凭空建造的。

另一方面，这些实验也必然将产生这样伟大的理论。教材在“科学足迹：狭义相对论出现的前夜”中，介绍了洛伦兹和庞加莱的贡献，他们距离爱因斯坦的理论只有一步之遥。如果没有爱因斯坦，狭义相对论同样会为人们所认识，这是物理学和科学发展的必然。

人们对于相对论的赞美不仅由于它的神奇。作为一个物理理论，首先相对论应该是正确的。虽然它的两个基本假设不能直接通过实验验证，但是由此得到的推论在后来的实验中都得到了证实。一个成功的物理理论一定要有实验的支持，这也是需要学生深入体会的。

广义相对论同样不是凭空出现的。在介绍广义相对论之前有一段“超越狭义相对论的思考”，介绍了狭义相对论无法回答的内在问题。爱因斯坦超越时代地发现了这些问题，进而创立了广义相对论。面对一个问题，经过逻辑的推理，作出合理的假设，这才是物理的思维方式。另一方面，由于广义相对论涉及的实验条件，用我们现在的科学技术水平是难以实现的，所以目前没有太多的实验支持它，国际上也有一些专家学者提出了其他的引力理论，也可以解释目前观测到的现象，所以教学时不应该把这个理论神圣化。

**2. 简单了解相对论的几个主要观点和主要结论**

爱因斯坦的相对论以深奥难懂著称。这是由于人们平时接触的都是低速运动，因此相对论的很多结论与日常经验不一致，使得学生很难理解以致获得清楚的认识。特别是受牛顿物理学

经典的时空观的影响，在很大程度上增加了教学难度。这样，教学中一方面要通过逻辑推理使学生认识到结论的正确性，另一方面又要说明，人的感性认识以直接经验为基础，同时也受到直接经验的局限。

本章着重从物理思想上阐明狭义相对论的两个基本假设和几个重要结论。特别强调，在这一系列重要结论中，同时的相对性是理解相对论时空观的关键性概念。爱因斯坦正是以这点作为突破口，建立了全新的时间和空间理论，构建了崭新的物理学大厦。

相对论的全面阐述要用到较多的高等数学知识，由于学生缺少这方面的知识基础，所以本章的许多结论都是直接给出的。其中的许多逻辑推导过程，只能把最简单的特例介绍给学生，并不是非常严格。严格的数学推导需要学生具有深厚的数学基础，不要求学生掌握。这一点要给学生说明，以培养学生缜密的思维习惯，同时激发学生进一步学习的愿望。通过对本章内容的定性分析，要培养学生发现问题的能力。教科书以少数不深奥、不难懂的原理以及实验为基础，经过可信的逻辑演绎推理，让学生理解和发现，进而得到那些竟是如此简洁、和谐的神奇的结论，并为实验观测所证实是正确的。这种理论科学家通过理性思维创造、探究的方法，也是我们教学中要重点向学生介绍，要学生学习把握的创新的思维方法。

教学中，对于几个结论应该区别对待：质能关系 $E=mc^2$ 要牢记；长度的相对性和时间间隔的相对性应该定性地知道，即知道什么情况下“变长”，什么情况下“变短”；至于速度变换公式，知道伽利略的速度变换公式在高速下不成立也就行了。做到这些就可以达到课程标准的要求。

**3. 通过对于广义相对论和宇宙学的基本了解，进一步体会科学认识发展的过程**

课程标准对于广义相对论的要求是：“初步了解广义相对论的几个主要观点及主要观测证据”。“初步了解”已经是最低的要求了，而有所要求的也只限于“主要”观点和“主要”观测证据。因此，教科书从等效原理得出结论的简单分析过程，也不要求学生复述。教师做了分析，学生体会到从原理到结论之间是有逻辑关系的，而结论又被观测所证实，也就可以了。这里教学的目的是让学生再次感受前面所述的科学认识的过程。

教科书的“科学漫步：科学家对宇宙的研究”，简单介绍了宇宙学研究的新进展。这样，一方面可以增长学生的见识和学习兴趣，另一方面还可以培养学生科学的世界观。教科书从人类历史发展的角度进入，介绍了人类对宇宙的认识过程；从“地心说”到“日心说”再到“大爆炸理论”，这种认识不断深入。同时，人们还认识到，人类在宇宙中的地位在不断变小。从起初认为人类居住在宇宙的中心、万物为我而生，到认识到人类的居所只不过是一个普通的星系边缘附近一颗小小恒星的行星。以此为知识背景，学生自然会生出对大自然的景仰之心和热爱之情。

**课时安排建议**

| | | |
|---|---|---|
| 第 1 节 | 相对论的诞生 | 1 课时 |
| 第 2 节 | 时间和空间的相对性 | 2 课时 |
| 第 3 节 | 狭义相对论的其他结论 | 1 课时 |
| 第 4 节 | 广义相对论简介 | 1 课时 |

## 二、教材分析与教学建议

### 第1节　相对论的诞生

**1. 教学目标**

(1) 了解经典的相对性原理。

(2) 知道狭义相对论的实验基础。

(3) 了解狭义相对论的两个基本假设。

**2. 教材分析与教学建议**

通过本节教学应使学生了解，牛顿力学和相对论建立之前的整个经典物理学都是建立在绝对时空概念的基础之上，在人类活动的低速运行“正常”范围内是非常准确的。在该概念下，经典力学定律、伽利略变换和力学相对性原理三者是自洽的、和谐一致的。但是在这个范围以外，牛顿物理学的结论就与观测结果不一致，它揭示了经典物理内在的某些基本矛盾。爱因斯坦系统全面地审查了牛顿物理学和麦克斯韦电磁场理论的基础，洞察出其中内在的某些基本矛盾，集中在时空与物质运动之间联系的根本原因，终于找到了克服困难的途径，确立了崭新的时空观，建立了把力学和电磁学统一起来的自洽和谐的新的物理基础理论——狭义相对论。

本节的重点是让学生了解，面对迈克耳孙—莫雷等实验的结果，爱因斯坦通过否定以太的存在，同时否定了牛顿力学的绝对空间和绝对时间，指出：自然界不存在特殊的惯性系，不仅力学规律，而且其他物理规律，包括电磁规律，在不同惯性系中都具有相同形式，并通过光速不变原理，构建崭新的时空观，为后面的学习打下基础。

爱因斯坦的相对论以博大精深、深奥难懂著称。在学习中，学生只要理解爱因斯坦建立相对论的科学探究思想和逻辑推理方法，以及观测结果与理论很好地吻合，就足够了。

**(1) 相对论诞生的历史背景**

通过介绍让学生了解，19世纪末麦克斯韦电磁场理论已臻于完善，以牛顿力学、热力学与统计物理及电磁场理论为主要内容的经典物理学形成了完整的科学体系，并被赞誉为“一座庄严雄伟的建筑体系和动人心弦的美丽庙堂”，已经达到了近乎完美的程度。当时的科学家认为，未来的物理学家只要做一些修修补补的工作就可以了。当德国著名物理学家普朗克立志要献身理论物理学时，他的老师也劝他：“年轻人，物理学是一门已经完成了的科学，不会再有多大的发展了，将一生献给这门学科，太可惜了。”当时的理论物理学达到了巅峰状态，但其中也隐含着巨大的危机。著名物理学家威廉·汤姆孙也承认“物理学明朗的天空中还有两朵小小的、令人不安的乌云”。其中一朵乌云与黑体辐射有关，在普朗克等物理学家的研究下，催生了量子理论；另一朵与光的速度有关，在洛伦兹、庞加莱，特别是爱因斯坦的研究下，建立了崭新的相对论理论。这两个理论成为了近代物理学的标志，对人们的生活产生了深远而巨大的影响。

**(2) 经典的相对性原理**

通过复习，使学生明确牛顿运动定律表述形式只适用于惯性系，即惯性系定义为牛顿惯性定律成立的参考系。相对于某惯性系做匀速直线运动的另一参考系也是惯性系。通常，与地球

表面相连的参考系可看成是近似的惯性系，太阳系是更好的惯性系。特别要指出的是，即使是严格意义下的惯性系也不止一个。我们还可以从更广泛的角度来考虑这样一个问题：如果不限于力学、更不限于牛顿定律，不同惯性系在表述物理定律时是否要求有相同形式？这里，可通过介绍伽利略对相对性原理的实验描述来分析讨论。

1632 年，伽利略发表了《关于两个世界体系的对话》，通过生动的描述说明了一个重要的思想：以地面和相对于地面做匀速直线运动的船为两个惯性系，则在封闭的大船舱内所进行的实验和观测与在地面上所进行的实验和观测没有差异，即所有惯性系都是等价的、平权的。我们不可能通过在一个惯性系内部所进行的实验和观测来判断该惯性系是处于绝对静止还是绝对运动。该文中，伽利略已经明确指出，不论做什么力学实验，都不能判断船相对于地球的匀速直线运动状态。在这里是将地球表面当作惯性系，匀速运动的船也是一个惯性系（不论速度多大）。结合人们的日常经验和观测很容易相信这样一个论述："力学规律在任何惯性系中都是相同的。"把这一论述叫做"伽利略相对性原理"。于是对经典的相对性原理，可归纳为两个相互密切联系的结论：

① 相对于一个惯性系做匀速直线运动的参考系也是一个惯性系；

② 在一个惯性系内通过一切力学实验都不能判断这个惯性系相对于另一个惯性系的匀速运动状态。

应提示学生注意：结合"问题与练习"第 2 题，如果汽车处于加速（或减速）状态时，车内的人观察下落的水滴，则因水滴下落时向后（或向前）偏移，人们能够判断出自己是处在加速（或减速）状态中吗？加速的船还是一个惯性系吗？让学生仔细思考一下惯性系和非惯性系的差别。

**（3）相对性原理与电磁规律**

19 世纪末电磁理论在麦克斯韦的推动下达到了一个顶峰，他的成就在于将当时所有已知的电磁学知识归纳集中于四个方程之中。虽然学生的数学基础还不够理解这些方程，但可以体会其中简洁和谐的关系：

$$\nabla \cdot \boldsymbol{E}=\frac{\rho}{\epsilon_0}$$

$$\nabla \cdot \boldsymbol{B}=0$$

$$\nabla \times \boldsymbol{E}=-\frac{\partial \boldsymbol{B}}{\partial t}$$

$$\nabla \times \boldsymbol{B}=\mu_0 \boldsymbol{J}+\frac{1}{c^2}\frac{\partial \boldsymbol{E}}{\partial t}$$

麦克斯韦方程组的重要意义在于，它除了将人类已知的电磁知识加以描述外，还揭示了一些人们不知道的情况：构成这些方程的电磁场以振动波的形式在空间传播，通过计算，它们都等于光速，这并非巧合，方程组揭示出光是一种电磁波。

1890 年，赫兹在写出静止以太参考系中波动方程时，明确指出"波速 $c$ 与波源的运动速度无关"并不需要初始条件，并始终把光速不变性作为一个限制条件。电磁波速 $c$ 直接从方程中导出，本身是电磁规律的有机组成部分，而不是电磁规律应用于某个具体事物的结论，这点非常重要。

接下来介绍，在电磁学领域里，相对性原理遇到了麻烦，这个麻烦与光速有关，它主要表现在：根据伽利略变换得到的经典力学的速度合成法则、相对性原理、电磁场理论，三者间出现不和谐，好像电磁规律不是对任何惯性系都一样。那么，麦克斯韦的电磁理论到底对哪个惯

性参考系成立，即电磁波对哪个惯性参考系的速度是 $c$？许多物理学家通过实验和天文观测研究这个问题。由于受牛顿绝对空间和绝对时间的观念长期支配的影响，物理学界中多数人认为在绝对空间中充满着以太，麦克斯韦方程仅在相对于绝对空间静止的以太这一特殊惯性参考系中成立，电磁波是以太的波动。于是在地球这个相对于绝对空间运动的系统中，麦克斯韦方程仅近似成立。通过电磁学或光学实验应该能够测量出地球相对于以太的漂移速度。

为此，很多物理学家设计了一系列实验，想要测出地球在“以太”中运动的速度。1887年的迈克耳孙—莫雷实验是这些实验中最著名的一个：他们将一束光分成互相垂直的两束，一束的传播方向和地球的运动方向一致，另一束和地球的运动方向垂直（教科书图 15.1-2）。

迈克耳孙和莫雷期待发现，在互相垂直的方向上光束的传播速度会有所不同，这个差别可能就是地球在“以太”中的速度。如果地球相对于“以太”以速度 $v$ 运动，那么在地球上看，沿地球运动方向观测到的光速就应该是 $c-v$，而垂直于地球运动方向的光束速度还应该是 $c$。由于地球在宇宙中的运动速度很大，这两束光的速度就应该有较明显的差别。（这里用到了速度合成法则，它一直被认为是理所当然而无需证明的，但是下面我们就会看到，对于高速运动的物体，这个法则的正确性动摇了。）然而，不管他们如何努力，精密的实验得到的结果却是两束光的速度没有差别。为了防止地球公转的影响，他们在一年内的不同时间重复同样的实验，但是不管他们如何努力，还是没有观测到差别。

一个可能的解释是“以太”会被地球带动，即地球附近的“以太”相对于地球静止。然而，之前被人们广泛接受的另一个实验——光行差实验却表明，“以太”未被地球带动。1851年的斐索水流实验则似乎告诉我们，“以太”部分地被运动物体带动。这些非常精确、可信度很高的实验的结果出现了矛盾。从而得到了一个令人惊奇的结果：不论光源和观测者做怎样的相对运动，光速都是相同的！正是在这种情况下，开尔文勋爵才指出了这朵“乌云”。要让学生了解这一著名实验，以确凿事实否定了长期以来人们所认为的以太的存在，这对近代物理学的发展产生了重大影响。

在令人困惑的实验结果面前，科学家有两种选择：一种是修正现有的理论，去迎合实验结果（这相对比较容易，但常常无效）；另一种则是创立全新的理论。当时大多数物理学家仍在努力使迈克耳孙—莫雷实验与“以太”的假说相符合，但是也有人反对那种抱着“以太”不放的观念。法国数学家兼物理学家庞加莱问道：“以太究竟是什么，它的分子是如何排列的，它们是相互吸引还是相互排斥？”他热切期望一种根本的解决办法。他说到：“也许我们必须建立一种新的力学，对它我们只能够管中窥豹……在这个新力学中，光速是一个不可逾越的极限。”

**（4）狭义相对论的两个基本假设**

为了解决光速问题引出的经典相对性原理在电磁规律中的麻烦（更确切地说是经典物理内部的基本矛盾），洛伦兹等人提出了收缩因子假说以便在以太存在的前提下解释现象，修补牛顿经典理论，但很难让人信服。法国数学家、物理学家庞加莱虽洞察到物理学的危机，但他依然没有真正从牛顿时空观中解脱出来，因而没有在理论上作出根本性的思考，他们的许多理论都不能协调全部实验与观测事实。

只有爱因斯坦从马赫关于绝对时空的批判中领悟到伽利略变换是可疑的。因为在伽利略变换中，根据相对性原理，不能保证麦克斯韦电磁场规律在不同惯性系中保持形式不变。他经过批判性的思考，终于认识到“时间是值得怀疑的！”（绝对时间）。他希望创立一个与实际世界相符的描述，使它不受人为偏见的影响，在它描述的世界里，客观存在是至高无上的。

爱因斯坦认为时间概念与空间概念一样只具有相对意义，在崭新的时空概念下，以绝对时空观为前提的伽利略变换完全失效，必须代之以新的变换。爱因斯坦推广了伽利略的相对性原理，他认为不论是力学规律还是电磁学规律，在所有的惯性系中都具有相同的形式。换言之，相对性原理对一切自然规律都适用，不存在一个特殊的参考系，一切惯性系都是平权的，这就是狭义相对论第一个基本原理。以太作为一个特殊的参考系的存在已没有实在意义，爱因斯坦果断坚定地从近代物理将要搭成的舞台上，驱走了以太这个幽灵。爱因斯坦还依据其他一些实验事实，提出了狭义相对论第二个原理——真空中光速不变假设（光速不变原理），在承认光速不变假设的前提条件下，迈克耳孙—莫雷实验等观测和实验的直接结果也就自然而然相融洽了。

以此两个原理（假设）为基础，爱因斯坦通过直觉思维，运用已有的公理，通过逻辑演绎和严格清晰的数学推导，得到了新时空概念下的坐标变换关系，也就是洛伦兹变换。

$$x'=\frac{x-vt}{\sqrt{1-\frac{v^2}{c^2}}}$$

$$y'=y$$

$$z'=z$$

$$t'=\frac{t-\frac{vx}{c^2}}{\sqrt{1-\frac{v^2}{c^2}}}$$

从这两个基本原理出发，我们可以审视已有的定律：牛顿的运动学、动力学、电磁学、引力理论等。满足基本原理的规律就可以保留，而不满足的就要做出修正。于是，就得到了相对论的运动学、动力学方程。在后面学到的包括同时的相对性、时间间隔的相对性、空间间隔的相对性等各种奇妙的推论都是由此而来。如果你相信这两条基本原理，那么你在逻辑上必须相信这些预言，尽管这些预言显得相当古怪。相对论本身并不是专门描述高速运动物体的理论，它其实是把物理规律推广到各种运动情况的一种方法，牛顿力学只不过是宏观低速情况下这些基本物理理论的近似。狭义相对论创造性地把时间、空间和物质运动联系起来，深刻地揭示了时空与物质运动的统一性，成功地消除了经典物理内在的某些基本矛盾。它改变了科学家、哲学家，甚至普通人对时空的认识，使自然界的基本物理图景得到了更新和完善。

教学时要强调，爱因斯坦的狭义相对论是建立在他的相对性原理和光速不变原理两大假设基础上，并且是有一定的实验基础支持的。狭义相对性原理已被迈克耳孙－莫雷实验以及其他关于探测绝对静止惯性系的否定结果给予了很好的实证，学生学习起来一般易于接受。狭义相对性原理认为，在一切惯性参考系中物理定律的数学形式应该完全相同。物体的时间、位移、速度等物理量有可能因为所选择参考系的不同而不同，但是它们所遵从的物理规律却是同一个。相对论使我们相信，自然世界是有规律的，同时，这些规律是客观的，不会因为时间、地点和观测者的不同而有所不同。狭义相对性原理还揭示了一个问题：各个惯性参考系是互相平等的，没有一个更基本的参考系，绝对空间和绝对时间是不存在的。这就跟牛顿时空观产生了根本性的不同。

光速不变原理，即真空中光速恒为 $c$，与光源的速度无关，则是爱因斯坦以敏锐的洞察力深入考查各种物理事实的结果。这对于习惯于传统的经典物理观念（伽利略变换）的人来说是最难于接受的。然而，通过介绍一些具体的光速不变原理的实验和观测结果，可以帮助学生建立光速不变的基本观念。

例如，结合我国古代天文学家对近代天文学的重大贡献——著名的蟹状星云的观测记录来说明。在我国古代史籍《宋会要》中记载了一次天文观测超新星爆发的过程。记载写道："嘉祐元年三月，司天监言：'客星没，客去之兆也。'初，至和元年五月，晨出东方，守天关，昼见如太白，芒角四出，色赤白，凡见二十三日。"其大意是：负责天象观测的官员司天监讲，超新星（客星）最初出现于公元1054年（北宋至和元年）五月，位置在金牛座附近（天关），白天看上去如同金星（太白），呈红白色，光芒四射，可见达23日。到1056年（嘉祐元年）五月，这位不速之客才隐去消失。

从经典力学的观点看，超新星爆发，其外围物质向四面八方飞散，某些爆发物向地球运动，有些侧向运动。如果伽利略变换是正确的，则朝向地球运动的爆发物发出的光到达地球的时间是 $t=\frac{L}{c+v}$，侧向运动的爆发物发出的光到达地球的时间为 $t'$，近似的 $t'\approx\frac{L}{c}$。式中 $v$ 是爆发物的速度，$L$ 是超新星与地球之间的距离。

根据天文观测的资料数据，$L=6\ 300$ 光年，$v=1\ 500\ \mathrm{km/s}$，容易算出 $t'-t\approx30$ 年。这就是说，根据伽利略相对性速度合成法则计算，地球上至少在30年内都可以看到超新星爆发时所产生的强光。然而历史上记载的却是白昼"凡见二十三日"，一共历时22个月的时间里就看不见了。经验事实与假设发生了矛盾，说明上面推算的依据即伽利略变换有问题，结论应该是光速与发光物体本身的速度无关。光速并不遵从伽利略速度合成法则。

### 3. 问题与练习

解答与说明

1. 根据伽利略相对性原理，选列车车厢内的任一物体作参照物是无法分辨火车是相对地球静止或做匀速直线运动，而选取列车以外的参照物则可以区分。本题通过学生的日常生活体验，帮助学生认识伽利略相对性原理。

2. 本题的答案由学生的日常经验给出，使学生对于狭义相对性原理有更深入的理解。由于加速、减速、转弯都涉及非惯性参考系，所以与狭义相对性原理并不矛盾。

3. 根据伽利略速度合成法则，地球上测得光速为 $c-0.75c=0.25c$。根据狭义相对论光速不变原理，光速大小与光源运动状态无关，所以地球上实际测得的光速为 $c$。本题的主旨是让学生深入体会光速不变原理。

## 第2节　时间和空间的相对性

### 1. 教学目标

（1）知道狭义相对论关于时空相对性的主要结论。

（2）了解经典时空观与相对论时空观的主要区别，体会相对论时空观的建立对人类认识世界的影响。

（3）通过实例，了解时间和空间的相对性，体会相对论时空观与低速世界情境的差异。

### 2. 教材分析与教学建议

本节的重点是以爱因斯坦狭义相对论的两个原理为基础，通过对一些简单现象的分析和逻

辑推理，得到的一系列惊人的重要结论，并且所有推论都与事实很好地相符合。其中“同时”的相对性比较抽象，不易为学生理解，也是本节的难点。它是理解狭义相对论的关键概念，相对论中关于时空的新特征都与这一基本概念相关，许多有关相对论的佯谬以及对相对论理解上产生的种种疑惑，大都来源于对它的模糊认识。因此在教学中阐述清楚“同时”的相对性，以及它与其他相对论的结论的联系是至关重要的。

教科书中对这些结论的推导都不是严格的，不必在数学关系上多下功夫。教学中，重在引导学生对于结论的认识。

**(1)“同时”的相对性**

要让学生知道“同时”的相对性是相对论两个假设的直接推论。用相对论的时空观描述的世界与我们用牛顿经典时空观了解的世界存在很大差别，教学中要从物理学研究的思想和方法上引导学生去认识和体会这种差别。

我们知道在牛顿力学中，物体对于不同的惯性坐标系的空间坐标和时间坐标，满足伽利略变换。而在这组变换下，位置、速度是相对的，空间长度、时间间隔、运动物体的加速度是绝对的或不变的。同时性也是不变的，即相对于某一惯性参考系的两个事件是否同时发生是不变的。相对于某一惯性参考系同时发生的两个事件，相对于其他惯性参考系也必定同时的，这就是牛顿时空观中“同时”的绝对性。牛顿时代，大家对绝对时间深信不疑。

但是，“同时”的相对性指出：两个事件在一个惯性系中是同时发生的，在其他惯性系中观察将不再是同时的事件了。这种“同时”的相对性与牛顿物理学中“同时”的绝对性不同。

这样就产生了一个新奇的结论：对于静止的观察者同时的两个事件，对于运动的观察者就不是同时的（见教科书例证）。换句话说，“同时”不是绝对的，而取决于观察者的运动状态。这一结论否定了牛顿力学中作为基础的绝对时间和绝对空间的框架。

爱因斯坦指出：一些疑难问题的关键是过去的时空观不对，特别是大家太相信绝对时间了。之所以大家都没有发现问题，是由于日常生活中所涉及的运动速度都是很低的（与光速相比），通常看不出相对论效应。但是当运动速度接近光速时，即在高速世界里，一切都会变得十分陌生。教学中要讲清楚，“同时”的相对性对相对论的其他结论的联系是至关重要的。

**(2) 长度的相对性**

要让学生知道长度的相对性（动尺缩短），是“同时”的相对性带来的一个普遍的时空属性，它与物体的具体组成和结构无关，当物体运动速度越接近光速，这种收缩效应就变得越显著。

要讲清利用严格数学推导可以得到洛伦兹变换的相对论长度收缩公式

$$l=l_0\sqrt{1-\left(\frac{v}{c}\right)^2} \tag{1}$$

① 从历史上看，早在1889年斐兹杰惹和洛伦兹在1892年先后独立提出了收缩假定，他们承认，在以太理论这一特殊惯性系中一个静止的长为 $l_0$ 的物体，当它沿长度方向相对以太以速度 $v$ 运动时，将缩短到 $l=l_0\sqrt{1-\left(\frac{v}{c}\right)^2}$。他们先于爱因斯坦得到了洛伦兹的收缩数学公式，但是一直认为是高速运动物体的真实的收缩。1904年，庞加莱已经走到相对论大门前，他在论文《数学物理的现状和未来》中，讨论了运动物体的收缩、质速关系等。虽然他认识到运动物体的收缩跟时空有关，但下不了决心放弃以太假说去创建新的更优越的理论，他没能认识到这是在不同惯性系之间进行时间测量、“同时”的相对性的必然结果。爱因斯坦发现了问

题的症结在于时间观念，意识到了新的时空测量的重大意义，并将其植入相对论体系中得到了完美的解释。

② 要让学生理解长度收缩公式的物理意义，必须注意参考系的选择及参考系的运动状态。一个相对于所选参考系静止的物体（如杆或者尺子），在这个参考系中的长度可以称做它的“正确长度”$l_0$，只要在这一参考系中测出杆或尺子两端的坐标，就能得到它的正确长度，无须同时测量其两端。但是相对于某一参考系运动的物体（杆或者尺子），其测量结果就不同了，也就是，对某一参考系的观测者发现杆或尺子在运动。长度收缩原理指出，在此参考系中运动的杆或尺子要短一些。这种长度收缩并非幻觉，当运动的杆或尺子从观测者身边经过时，任何精确的测量都表明其长度要比静止时短。并非看上去短了，它的确变短了。

对于长度的相对性，我们还可以这样去理解：对于运动的杆或尺子，只有同时测量其两端坐标才能得出其长度，但由于同时的相对性，对两端坐标的测量存在着先后差别，在这期间，杆或尺子已经沿运动方向移动了一段长度，测量出来的结果比“正确长度”变短了。

③ 长度收缩指的是只在物体运动方向上的长度收缩。严格的数学推导表明，在垂直于运动方向的长度是一样的，没有变化。

④ 教学中特别要指出的是，长度收缩完全是相对的。从物理学研究的方法讲，在做相对运动的不同惯性系中，根据同时的相对性，由洛伦兹变换容易得出均为“动尺缩短”，这也表明了各个惯性参考系是平权的。

**（3）时间间隔的相对性**

教学时要分析清楚“动钟变慢”与同时的相对性的联系，使学生知道运动的钟变慢是同时的相对性带来的时空属性。

① 时间间隔的相对性可以通过长度的相对性的一些简单例子加以说明。

以高速列车为例。假设一列以速度 $v$ 高速运动的列车上有一个长 $l$ 的细杆，列车从观察者 $A$ 身边经过。列车上的观察者 $B$ 认为观察者 $A$ 相对自己以 $v$ 运动，所以观察者 $A$ 从细杆头到细杆尾所用的时间是 $t=\frac{l}{v}$。

而观察者 $A$ 则认为观察者 $B$ 和细杆以速度 $v$ 运动，由长度的相对性，他发现细杆的长度变成 $l'=l\sqrt{1-\left(\frac{v}{c}\right)^2}$，这样，他测得细杆经过身边所用的时间是 $t'=\frac{l'}{v}$。所以

$$t=\frac{t'}{\sqrt{1-\left(\frac{v}{c}\right)^2}}$$

可以由洛伦兹变换严格推得

$$\Delta t=\frac{\Delta\tau}{\sqrt{1-\left(\frac{v}{c}\right)^2}} \tag{2}$$

本式可以理解为时间变慢的关系或是两个惯性系的时间坐标的关系式。其中一个惯性系相对于时钟甲是静止的，这个惯性系的单一时钟甲读出的时间是“固有时间间隔”，故叫做 $\Delta\tau$；另一个惯性系相对于时钟甲是运动的，在该惯性系中测量运动的时钟甲从一点到另一点的这两个事件发生的时间间隔，需要由该惯性系中相应两点的两只对准的时钟乙、丙的读数差给出，这样的时间间隔称“坐标时间间隔”$\Delta t$。坐标时间间隔所指的是两个事件发生在不同地点，这个时间间隔的测量与同时的相对性定义有关。经过比较，总有 $\Delta\tau<\Delta t$，说明运动的时钟所

描述的物理过程变慢了。速度 $v$ 越接近光速 $c$，这个现象越明显。

② 要讲清“动钟变慢”（或时间膨胀）是两个不同惯性系进行时间比较的一种效应，不要误认为是时钟的结构或精度因运动而发生了变化。

③ 教学中要特别指出，运动时钟变慢完全是相对的，由于两个惯性参考系是平权的，其中的观测者都将发现对方的钟变慢了。

这里可能会遇到一个问题，就是双子佯谬的问题。在地球上出生的孪生兄弟，出生之后哥哥乘坐高速的宇宙飞船出发，经过几十年后回来将会发现，哥哥比弟弟年轻。那么，如果站在哥哥的角度，是不是可以认为弟弟做高速运动而变得比哥哥年轻了呢？在我们站在弟弟的角度分析的时候，是选取了地球作参考系，在这个问题里，可以认为地球是惯性参考系，所以关于哥哥变年轻的结论是可以相信的。而当我们站在哥哥的角度分析的时候，则选取了一个有加速度的参考系——宇宙飞船。所以，这时的推论则没有确实的依据。狭义相对论虽然指出各个惯性参考系是平权的，但是同时也指出非惯性系和惯性系是绝对不同的。所以当他们再次相遇的时候，哥哥比弟弟年轻的结果是一个确定的事情。

**（4）时空相对性的验证**

通过对“尺缩效应”和“钟慢效应”的洛伦兹变换得出的公式(1)、(2)进行分析讨论知道，只有当两个参考系的相对速度 $v$ 大到可与光速相比时，空间和时间测量的相对性才比较明显。

教科书中介绍的实验以及到目前为止的所有实验，都支持狭义相对论的结论。要让学生明白，科学探究的结论是紧紧围绕着猜想与假设在进行发散性思维或逻辑思维演绎，如果能获得观测实验结果的支持，就能将猜想和假设发展成为科学结论，最后上升为科学理论。

**（5）相对论的时空观**

教学时要学生了解牛顿物理学的绝对时空观，知道牛顿物理学的空间与时间是绝对分离没有联系的，脱离物质而单独存在，与物质的运动无关。在非相对论物理学中，时间和空间是基本概念，人人都知道什么是时间和空间。从历史的角度看，人们只有时间概念和空间概念，直到相对论创立后才逐渐建立时空概念。

许多人觉得时空不难理解，因为它无非是“时间加空间”。然而，在相对论中时空是基本概念，时间和空间是派生的相对概念。“派生”是指借助于参考系把时空作“3+1”分解，才得到三维空间和一维时间概念。“相对”则指同一时空存在许多不同的“3+1”分解方案。相对论的时空观认为，空间和时间与物质及其运动状态有关，这是时空属性。

人类生活在低速运动的世界里，长期习惯地接受和形成了经典时空观，人类对于空间、时间更进一步的认识而形成的新的时空观，是建立在新的实验事实和相关结论与传统观念不一致的矛盾基础上，不断发展、不断完善起来的。

教学中还要让学生体会新科学理论并未全盘否定经典物理学，经典物理学在其适用范围内（低速运动）仍然有效成立。

### 3. 问题与练习

解答与说明

1. $B$ 事件先发生。可以设想，在事件 $A$ 发生时 $A$ 处发出一个闪光，事件 $B$ 发生时 $B$ 处发出一个闪光。“两闪光相遇”作为一个事件，发生在线段 $AB$ 的中点，这在不同参考系中看都是一样的。“相遇在中点”这个现象在地面系中很容易解释：两个闪光同时发出，两个闪光传播的速度又一样，当然在线段的中点相遇。

火箭上的人则有如下推理。地面在向火箭的方向运动，从闪光发生到两闪光相遇，线段中点向火箭的方向运动了一段距离，因此闪光 $B$ 传播的距离比闪光 $A$ 长些。既然两个闪光的光速相同，一定是闪光 $B$ 发出得早一些。

2. 火车上的人测得，闪光先到达前壁。如教科书图 15.2-6，由于地面上的人测得闪光同时到达前后壁，而在光向前后两壁传播的过程中，火车要相对于地面向前运动一段距离，所以光源发光的位置一定离前壁较近，这个事实对于车上、车下的人都是一样的。在车上的人看来，既然发光点离前壁较近，各个方向的光速又是一样的，当然闪光先到达前壁。

应该注意的是，这题的结论与光源安放在车上还是地上没有关系。图 15.2-6 有意识地把光源画在地面上了，为的是给长度的相对性做些准备。在学生自己完成此题后教师进行讲解时，应该注意这个问题。

3. 火箭相对于火箭上的人是静止的，所以不管火箭的速度是多少，火箭上人测得的火箭长度与静止时相同，为 $l'=30$ m。如果火箭的速度为 $v=3\times10^3$ m/s，地面的观察者测得的火箭长度为

$$l=l'\sqrt{1-\left(\frac{v}{c}\right)^2}=30\times\sqrt{1-\left(\frac{3\times10^3}{3\times10^8}\right)^2}\ \text{m}=30\times(1-5.0\times10^{-11})\ \text{m}$$

如果火箭的速度为 $v=\frac{c}{2}$，地面观察者测得的火箭长 $l$ 为

$$l=l'\sqrt{1-\left(\frac{v}{c}\right)^2}=30\times\sqrt{1-\left(\frac{\frac{c}{2}}{c}\right)^2}\ \text{m}=26\ \text{m}$$

4. 地面上的观察者认为 $C$ 钟走得最慢，因为它相对于观察者的速度最大。根据公式 $\Delta t=\frac{\Delta t'}{\sqrt{1-\left(\frac{v}{c}\right)^2}}$ 可知，相对于观察者的速度 $v$ 越大，其上的时间进程越慢。地面钟 $v=0$，它所记录的两事件的时间间隔最大，即地面钟走得最快。

5. 卫星上观测到的时间为 $\Delta t'=1$ min，卫星运动的速度为 $v=8\times10^3$ m/s，所以地面上观测到的时间为

$$\Delta t=\frac{\Delta t'}{\sqrt{1-\left(\frac{v}{c}\right)^2}}=\frac{1}{\sqrt{1-\left(\frac{8\times10^3}{3\times10^8}\right)^2}}\ \text{min}=(1+3.6\times10^{-10})\ \text{min}$$

通过这个题目我们可以看到，即使对于人造卫星这样飞快的速度，相对论效应也是微不足道的。

## 第 3 节　狭义相对论的其他结论

### 1. 教学目标

(1) 知道相对论速度变换公式。

(2) 知道相对论质能关系。

### 2. 教材分析与教学建议

本节的重点是：在狭义相对论的两个原理基础上，进一步强调在光速极限条件下，经典的

伽利略速度叠加的法则不再适用，而要用相对论条件下由洛伦兹变换得到的速度叠加公式。注意教科书中得到的相对论推论式（1）只适用于在同一直线匀速运动的条件，其他情况较复杂。质速关系结论（2）揭示了质量和速度的相互联系，突破难点的关键是明确物体的速度 $v$ 永远小于光速，其运动质量总要大于静止质量。著名的爱因斯坦质能方程式（3）揭示了质量和能量的相互联系，要进一步了解这是能量的另一种形式，物体的静能量与静质量相关。这部分知识的学习也为《物理选修 3-5》的学习埋下伏笔，奠定基础。

**（1）相对论速度叠加公式**

通过狭义相对论两个原理的学习，知道光对任何物体的运动速度都一样，物体运动的极限速度都不可能超过真空中的光速。在宏观低速运动条件下，伽利略的速度叠加原理简单有效。但对高速运动的物体及微观高速粒子，速度的叠加原理与传统经典观念矛盾，必须要考虑相对论效应。

相对论速度变换公式是根据相对论理论中的洛伦兹变换推出的结论，只适用于同一直线运动物体速度的叠加。对于更复杂的速度的叠加，可从其他书籍中了解。

教学中要注意讲清，通常按经典时空观 $u=u'+v$，而根据式（1）实际情况 $u<u'+v$；如果令 $u'=c$，可得 $u=c$，表明光速不变，与光源速度无关。又令 $v=c$，同理仍可得 $u=c$，表明一切物体的运动速度不能超过光速，不能无限增大，光速是物体运动速度的极限。这说明任何理论都应是自洽的，不应该自相矛盾，让学生体会到自洽性检验是科学理论研究的一个基本方法。

**（2）相对论质量**

在教学中一般不强调“运动质量”或“相对论质量”概念。大多数科普读物把质量分成静质量 $m_0$ 和运动质量 $m=\gamma m_0=\dfrac{1}{\sqrt{1-\dfrac{v^2}{c^2}}}m_0$ 两个概念，把质能关系写成 $E=mc^2$（$E=m_0c^2$ 作为特例含于其中），于是能量守恒也就是质量守恒。然而，在近代相对论文献中已经不同，这些文献不再使用运动质量概念，谈到质量就是指静质量，并以 $m$ 代表（下标 0 已无必要）。这样，质点的质量 $m$ 就如同它的电荷量一样是不变量，而质点的能量 $E$ 则因参考系而异（依赖于观察者）。这时，质能关系应理解为 $E_0=mc^2$，即质点的静能（相对于瞬时静止观察者的能量）为不变量（不随坐标系的变换而异）。①

根据光速不变原理，总有 $v<c$，物体运动的等效质量总要大于静止时的质量，物体运动时 $m$ 随 $v$ 单调增加。在回旋加速器中为了获取高能带电粒子，在 D 形盒上加有周期性的交变电压，使得每运动经过缝隙一次便获得能量。但由于相对论效应，高能粒子在速度增大后“质量”增大，使得它运动的周期变大，不再与回旋加速器上的交变电场同步，致使用回旋加速方式粒子获取的能量受到了限制，不能无限增大，这也从动力学的角度理解了光速 $c$ 是一切物质运动的极限速度。

我们可以再考虑一个火箭不断加速的情况。假设火箭的牵引力为 $F$，则加速度 $a=\dfrac{F}{m}$，随

① 爱因斯坦经历了狭义相对论发表初期的一些曲折后，于 1948 年的一次私人通信中写道：“为运动物体引入质量 $m=\dfrac{m_0}{\sqrt{1-\dfrac{v^2}{c^2}}}$ 概念并无益处……除了‘静质量’$m$ 外最好不引入其他质量概念……”

着速度的不断增加，$m$ 也不断变大，在极限情况，假如火箭的 $v\to c$，结果质量 $m\to\infty$，所以 $a\to 0$，故我们进一步地理解了为什么光速 $c$ 是一切物体运动的极限速度。

**(3) 质能方程**

知道根据狭义相对性原理及洛伦兹变换，经过高等数学推导，可得到相对论动力学的一个著名结论：

$$E=mc^2$$

这是爱因斯坦在 1905 年关于相对论的第二篇论文中，划时代地导出的质能关系，他的发现影响和改变了我们生活的世界。质能关系式从理论上预言了核能释放及原子能利用和原子弹研制的可能性。

教学时要让学生知道，在实际计算运用中常用变化量的表达式：

$$\Delta E=\Delta mc^2 \tag{3}$$

质量亏损时，$\Delta m=\Delta E/c^2$，即当质量减少 $\Delta m$，就意味着要释放出 $\Delta E=\Delta mc^2$ 的巨大能量。因此，(3) 式被称为是改变世界的方程。

### 3. 问题与练习

解答与说明

1. 设在实验室中观察，甲电子向右运动，乙电子向左运动。若以乙电子为“静止”参考系，即 $O$ 系，实验室（记为 $O'$ 系）就以 $\frac{4}{5}c$ 的速度向右运动，即 $O'$ 系相对于 $O$ 系的速度为 $v=\frac{4}{5}c$。甲电子相对于 $O'$ 系的速度为 $u'=\frac{4}{5}c$。这样，甲电子相对于乙电子的速度就是在 $O$ 系中观测到的甲电子的速度 $u$，根据相对论的速度合成公式，这个速度是

$$u=\frac{u'+v}{1+\frac{u'v}{c^2}}=\frac{\frac{4}{5}c+\frac{4}{5}c}{1+\frac{\frac{4}{5}c\times\frac{4}{5}c}{c^2}}=\frac{40}{41}c$$

在实验室中观测，每个电子的质量是

$$m'=\frac{m_e}{\sqrt{1-\frac{v^2}{c^2}}}=\frac{m_e}{\sqrt{1-\left(\frac{\frac{4}{5}c}{c}\right)^2}}=\frac{5}{3}m_e$$

2. 在实验室观测，两个电子的总动能为

$$\begin{aligned}E_{k1}&=2(m'c^2-m_ec^2)\\&=2\times\left(\frac{5}{3}m_ec^2-m_ec^2\right)\\&=\frac{4}{3}m_ec^2\\&=1.3m_ec^2\end{aligned}$$

相对于乙电子，甲电子的质量是

$$m''=\frac{m_e}{\sqrt{1-\left(\frac{\frac{40}{41}c}{c}\right)^2}}=4.56m_e$$

因此，以乙电子为参考系，甲电子的动能（也就是总动能）为

$$E_{k2}=m''c^2-m_ec^2=4.56m_ec^2-m_ec^2=3.56m_ec^2$$

物理学的研究常常要利用高速粒子的相互撞击。通过这个习题我们看到，为使相互碰撞的粒子达到一定的相对速度，同时加速两束粒子，使它们迎头相撞，这样所需的能量要比只加速一束粒子，用它去轰击静止的靶所需的能量少，因而在技术上容易实现。这就是为什么有时候人们使用粒子对撞机，而不用普通加速器的原因。

3. 加速后电子的动能是

$$E_k=qU=1.6\times10^{-19}\times100\ \text{J}=1.6\times10^{-17}\ \text{J}$$

因为

$$E_k=mc^2-m_ec^2$$

所以

$$m-m_e=\frac{E_k}{c^2}$$

因此

$$\frac{m-m_e}{m_e}=\frac{E_k}{m_ec^2}$$

把数值代入，得

$$\frac{m-m_e}{m_e}=\frac{1.6\times10^{-17}}{9.1\times10^{-31}\times(3.0\times10^8)^2}=2.0\times10^{-4}$$

即质量改变了0.02%。这说明在100 V电压加速后，电子的速度与光速相比仍然很小，因此可以使用 $E_k=\frac{1}{2}mv^2$ 这个公式。

由 $E_k=\frac{1}{2}mv^2$ 得电子的速度

$$v=\sqrt{\frac{2E_k}{m}}=\sqrt{\frac{2\times1.6\times10^{-17}}{9.1\times10^{-31}}}\ \text{m/s}=5.9\times10^6\ \text{m/s}$$

这个速度虽然达到了百万米每秒的数量级，仍仅为光速的2%。

## 第4节　广义相对论简介

### 1. 教学目标

(1) 初步了解广义相对论的几个主要观点及主要观测证据。

(2) 关注宇宙学研究的新进展。

### 2. 教材分析与教学建议

本节是在狭义相对论的基础上，将相对性原理由惯性系扩展到非惯性系，由平直的时空扩展到弯曲时空，结合引力场概念，得到了广义相对性原理。重点是了解“等效原理”，虽然这个原理既基本又简单，从中体会爱因斯坦带给我们启迪的新思想、新观念却显得非常重要。通过学习，知道由广义相对论原理出发所预言的几个重要结论：

- 引力使光线弯曲；
- 引力场实际是一个弯曲的时空；
- 引力红移。

通过本节教学使学生了解宇宙学的相关知识，体会人类对自然的认识在不断扩展。

**(1) 超越狭义相对论的思考**

1905年爱因斯坦关于狭义相对论的第一篇文章面世后，德国著名物理学家普朗克给予了高度关注和推动，使得相对论很快成为全世界有识之士研究和争论的课题，年轻的爱因斯坦引起了学术界的注意，成为争议性的知名人物。

这一期间，爱因斯坦已在认真思考狭义相对论无法解决的、令他十分不安的两个问题。

第一个是引力问题。狭义相对论虽然对力学、热力学、电磁场动力学规律的时空坐标变换是正确的，但对万有引力定律描述上出现严重困难。牛顿的万有引力理论是指两个物体相互的引力作用是一种超距的瞬间传递（即传递作用的速度为无穷大），这与狭义相对论依据的自然界中一切物体的运动，包括电磁相互作用不超过极限光速 $c$ 的基本原理冲突，换句话说，万有引力定律不满足洛伦兹变换，无法纳入狭义相对论的理论框架。

第二个是非惯性系问题。狭义相对论只适用于惯性系。作为狭义相对论基础的惯性系，地位如此特殊但又无法严格定义。我们知道，通常把不受外力的物体保持静止或匀速直线运动状态的参考系定义为惯性系，然而怎么才叫“不受外力”呢？人们又定义在惯性系中保持静止或匀速直线运动状态的物体为“不受外力”的物体。这样形成了逻辑循环的困惑，狭义相对论无法解释。事实上，我们很难找到真正的惯性系，从逻辑分析上讲，一切自然规律也不应局限于惯性系，必须考虑在非惯性系也是成立的。

**(2) 广义相对性原理和等效原理**

引导学生在前述背景介绍下，思考怎样来解决这两个问题。爱因斯坦考虑要解决第二个问题，必须去掉惯性系在相对论理论中的特殊地位，把相对性原理从“任何惯性系平权”推广到“包括非惯性系在内的任意参考系（即包括惯性系和非惯性系）平权”。他在1916年的论文中首先将以前只适用于惯性系的相对论称为狭义相对论，将只对惯性系物理规律同样成立的相对性原理叫做狭义相对性原理，并进一步表述了广义相对性原理：“在任何参考系中，物理规律都是相同的。”或可理解为：“物理学定律必须对于无论哪种方式运动着的参考系都成立。”

爱因斯坦的一个“思想实验”将前面的两个问题联系了起来。假设一艘正要起飞的宇宙飞船中有一位宇航员，他有一只称量体重的秤。如果他站在秤上，秤将显示他的体重。当飞船起飞的时候，宇航员将发现自己重了很多。如果飞船飞到远离地球和其他星球的地方，可以认为飞船不再受到其他星球的引力，那么宇航员将发现他处于失重的状态，秤无法显示他的重量。可惜这只是一个可能，还有一个可怕的情况是，飞船发射失败，在地球的引力之下，宇航员和飞船都在加速落向地球，这时秤也无法显示他的重量。

通过对这样“思想实验”的思考，爱因斯坦提出，一个均匀的引力场和一个做匀加速运动的参考系是等价的。这就是著名的等效原理。

通过等效原理，爱因斯坦将万有引力和非惯性系的问题联系了起来，可以开始考虑引力和非惯性系的问题。

他仔细思考了这样一个情况：对于一个转动的巨大圆盘，从地面上看，同样的杆，越是放在靠近边缘的地方，速度越大。根据狭义相对论，杆的长度也就越短。盘上的人也观察到了这种差别。这时测量圆盘的周长和直径，它们的比值就不再是 $\pi$ 了，三角形的内角和也不再是180°了。这种情况在数学上属于黎曼几何的范畴。

黎曼几何为爱因斯坦发展广义相对论提供了数学工具。爱因斯坦努力钻研黎曼几何以后，认为引力可能是一种几何效应，万有引力是时空弯曲的表现。他大胆地假设，当有引力存在

时，时空不再是平直时空，而是某种弯曲的时空。

时空的弯曲可以通过空间的弯曲来理解。一块橡胶布上有整齐的格子，如果用手向下压，格子就弯曲了。如果原来布上有一个小球静止不动，由于手的出现造成的弯曲将会使小球靠近过来。

如果可以建立引力和时空的弯曲程度之间的关系，就可以得到一个完整的广义相对论了。除了黎曼几何这个强有力的数学工具以外，还应该对这个可能的公式作出一定的限制。

既然一定的物质产生了引力，引力又表现为时空的弯曲，一个自然的假设就是物质的分布将决定时空的弯曲程度。这是爱因斯坦在掌握了大量的物理知识的基础上做出的猜测。

不论时空是否弯曲、不论是否是惯性参考系，都应该遵从相同的物理规律，这可以当做是对狭义相对性原理的推广。

1915 年爱因斯坦提交了一篇名为《引力的场方程》的论文，标志着广义相对论的建立，通过这个广义相对论的基本方程——爱因斯坦方程就可以精确地揭示出时空的弯曲程度和物质能量的关系。当一个物体运动时，它影响了时间和空间；反过来，时空的结构又影响了物体的运动。时间和空间影响着发生在宇宙中的每件事，而又被这些事情影响着。这样，一个完整的广义相对论的体系就建立起来了。

需要特别指出的是，当我们回头来看，按照爱因斯坦方程，当没有物质和能量的时候，时空就回到了平直时空的情形。实际上，狭义相对论忽略了物体之间的引力作用，因此时空近似平直。狭义相对论在宏观低速的情况下会得出跟牛顿理论几乎相同的结论，广义相对论也是这样，当时空结构回到平直时空的时候，物理定律应该能回到狭义相对论的相应定律。可见狭义相对论是广义相对论物理学在引力可以忽略时候的近似，只要引力不可以忽略，时空就不能看做平直的，应该用广义相对论。

在低速弱场条件下，尽管广义相对论力学的结论与牛顿力学的结论近似一致，但两者关于引力本质的认识存在明显差别：牛顿力学认为“苹果落地”是苹果受地球引力而获得加速度，苹果做非惯性运动；广义相对论则认为苹果是完全不受力的自由质点（在广义相对论中，引力不再被看做力，而是时空曲率），其加速度为 0，做惯性运动。

此外，在现代相对论研究中，尤其是霍金将微分几何这个强大的数学工具引入相对论研究以后，人们对于广义相对论有了更深入的认识。物理学家也开始重新思考等效原理的地位。现在区分广义相对论和狭义相对论主要是在于时空是不是弯曲，也就是有没有引力，而等效原理模糊了广义相对论和狭义相对论的界线。在广义相对论的基本论证中完全可以不用等效原理，从其他的一些原理出发得到广义相对论的主要结论，比如用“假设当时空恢复到平直的时候，物理定律回到狭义相对论的框架”等假设就可以代替等效原理。

**(3) 广义相对论几个结论**

了解从广义相对论两个基本原理出发，爱因斯坦预见性地提出了验证这一理论的几个著名实验。

① 光线经过强引力场中发生弯曲

爱因斯坦从光子理论研究中，得出光子的运动质量 $m$ 不为 0。当光子通过大质量星球附近的引力场时，同样会受到引力作用。如果我们在加速运动的升降机内，观测垂直于运动方向的光线，光线将不再像在匀速直线运动的升降机内那样沿直线传播，而变成弯曲的光线。按照等效原理，这就相当于存在引力。可以认为物质的引力使时空弯曲，弯曲的时空又使光线弯曲，即“物质的引力使光线弯曲”。

通常一般物体引力场很弱，时空弯曲现象不明显。爱因斯坦研究了质量较大、又与人类密

切相关的太阳。由于太阳的存在，造成太阳附近的时空弯曲，因而来自遥远恒星发出的光，在通过太阳附近时会发生弯曲，恒星的视位置将偏离它的正常位置。他计算出光线从太阳附近掠过的最大偏折角是1.75″（秒弧度），并指出这一现象在日全食时进行观测最有效。1919年5月29日，发生日全食期间，英国皇家学会派出了英国天文学家爱丁顿（A. Eddington）为首的两支科学观测远征队，分赴西非几内亚湾的普林西比岛和拉美的巴西东北海岸外索布雷尔岛进行观测，成功地观测到了太阳背后恒星发出的光线经过太阳附近发生弯曲的现象，并拍得了太阳背后恒星的照片。观测结果最后的结论是：星光在太阳附近确实发生了平均值为1.7″的偏折（两地实测结果分别是1.61″和1.98″），在实验误差范围内与理论预期值取得了很好的一致，从而确认广义相对论的结论是正确的。这是广义相对论创立以来最早得到科学界认同的最重大的成果。到目前为止科学家对400多颗恒星作了测量，射电天文学的发展使人类不用等日全食发生也能在地球上进行精度很高的观测，且与理论值符合。

② 引力红移

引力导致时空弯曲。按照相对性原理，空间效应与时间效应是互相影响的，在发生空间弯曲效应的同时，时间膨胀效应也发生了。换句话说，我们观察到引力场空间弯曲的同时也将观测到引力场时钟变慢。我们知道大质量恒星的强引力场对光子的运动产生作用，考虑将原子发射光波的频率作为时钟标准使用，时间膨胀效应（时钟变慢）将反映在光波频率的降低。例如，钠原子的光通过强引力场后，虽然我们还是能通过著名的“双黄线”认识到是钠原子发光，但是其频率已发生了变化。

如果我们去观测发自大质量恒星的光波，所接受到的光波频率要比它实际发出的光波频率低。在可见光范围内，红光频率是最低的，因此通常将由于引力作用使观测者接受到的光波频率变低的现象称为“引力红移”。例如，太阳上原子发射的光的频率会比地球上同种原子发射的光要低，太阳表面的钟比地球上的钟走得慢，所以地球上的观测者将感到太阳辐射的光的光谱线会发生红移。1925年，美国天文学家亚当斯（W. S. Adams）观测了天狼星伴星所发出的谱线的相对频移是$6.6\times10^{-5}$，该值与爱因斯坦的理论预言值$5.9\times10^{-5}$基本一致，从而又一次验证了广义相对论的正确性。

③ 水星轨道近日点的进动

教学中可以补充介绍牛顿的经典力学理论在描述行星运动时，其理论值与实际观测结果存在微小差异。早在1859年，天文学家勒维耶就发现水星在绕太阳运转的过程中，运行轨道在缓慢地旋转，100圈约旋转45″，水星运动的轨道不再形成闭合的椭圆，近日点会不断移动。这种反常现象用牛顿力学理论是不能解释的，成为长期困扰天文学家的一个难解之谜。这个疑难最终由爱因斯坦依据引力场理论作出了科学的解释：在强大的引力场中弥漫着巨大的场能，根据相对论质能等价结论，这种场能可以折合成太阳的有效质量，数值相等。这种有效质量所产生的引力作用与通常的物质质量是等效的，同样对环绕太阳运转的行星产生影响。特别需要指出的是，由于场能空间分布的不均匀性，当水星运动到靠近太阳附近（近日点）时，场能影响较为显著，这种影响使得水星运行的椭圆轨道非常缓慢地绕太阳旋转，这就是“水星近日点进动”现象。爱因斯坦用广义相对论计算近日点的进动速率与实际观测结果取得了很好的一致。行星轨道旋转之谜的成功破译，是广义相对论再一次取得的伟大胜利。

**(4) 关于大爆炸的宇宙**

按照广义相对论，宇宙就是无所不包的最大的时空，而且它的弯曲情况和物质的分布应该符合爱因斯坦方程。

我们知道，一个半径为 $R$ 的球表面积是 $4\pi R^2$，然而一个在篮球表面爬行的蚂蚁却永远爬不到球的边界。我们的地球也可以看做这样一个曲面。如果把二维的球面推广到三维，会得到与一个三维球不同的曲面，可以把它叫做三维超曲面。爱因斯坦得到了一个三维超曲面的宇宙模型。三维的人和动物都生活在这样一个三维世界里，但是无论怎样也走不到它的外边来。

爱因斯坦的宇宙模型就像一个静止的球。然而，天文学家研究发现，大多数星系都在远离我们，而少数星系在靠近我们。但是靠近我们的星系都是处于银河系所在的星系团当中。美国天文学家哈勃进一步研究了那些远离我们的星系，他发现：星系离地球越远，它们离开我们的速度越快！

如果我们在吹气球，气球上画了几个点，随着气球越来越大，这几个点的距离将会越来越远。如果这些点就是各个星系，那么这个气球就是我们说过的表示整个宇宙的三维超曲面。哈勃定律就告诉我们：宇宙是在膨胀的。

现在，如果我们逆着时间来看，宇宙就是在收缩，也就是说，宇宙在以前的一个时刻将会比现在更小。那么，会不会在很早以前，整个宇宙是从一个尺度极小的状态发展演化出来的呢？这就是大爆炸的宇宙论。

在大爆炸理论中，宇宙最初是一个原始火球，后来发生了一次巨大的爆炸，造成了宇宙的膨胀。在急速的膨胀中宇宙迅速冷却，在几个小时之内就形成了氢核和氦核等。之后随着宇宙继续膨胀，温度降低到几千摄氏度时，电子和原子核的结合形成了原子等物质。随着时间的流逝，在一些地方物质分布得比较集中，在引力的作用下它们相互靠近，最后形成了星系。由于引力的存在，星系中各部分的物质会更加集中在一起，在这个过程中，原子激烈地相互碰撞，温度不断升高，最后形成了和我们的太阳一样的恒星。

大爆炸宇宙模型成功地解决了很多天文观测事实。例如，它预言早期的宇宙会发出白热的辐射，随着宇宙的膨胀，这些辐射逐渐变冷，成为微波辐射。1965 年美国的彭齐亚斯和威耳孙检测到了这个微波辐射。大爆炸的宇宙模型取得了巨大的成功，但是它没有解释为什么会发生大爆炸，也无法预言宇宙的未来。

### 3. 问题与练习

解答与说明

1. 可以结合教科书图 15.4-2 叙述，但应注意避免以下的误解：

根据等效原理，一个引力场等价于一个做匀加速运动的参考系。存在引力场的时空不再是平直的，而是弯曲的，也可认为是物质的引力使时空弯曲。在匀加速参考系的时空中，光线的运动轨迹是一条曲线，所以是弯曲的时空。因此，弯曲的时空使光线弯曲，或者说物质的引力使光线弯曲。

这种说法的问题在于，存在引力场的时空是弯曲的，而加速参考系仍然处在平直时空，但是由于已经做了“3+1”分解，这个参考系的观测者会发现空间是弯曲的，光线在弯曲的空间中的轨迹也不再是直线。

2. 建议阅读当代最重要的广义相对论和宇宙论学者斯蒂芬·霍金（S. Hawking）所著《时间简史》等相关科普书籍，由教师组织，在同学中举办小型讨论会。

## 三、教学资源库

### （一）概念、规律和背景资料

**1. 爱因斯坦的生平**

1879 年 3 月 14 日爱因斯坦出生于德国南部的一个小城。在上学之前他曾经是一个迟钝的儿童，三岁才开始学说话。在中学时期，因为对上学厌倦之极而退了学。虽然他的物理和数学学得不错，但是糟糕的生物学和法文的成绩使他没有通过瑞士联邦工业大学的入学考试。

为了准备另一次考试，他在瑞士的一所中学呆了一年。瑞士自由的空气和阳光使他生机勃勃。他后来回忆，正是在这里，他开始有了导致后来相对论的原始想法。

在大学期间，爱因斯坦还是只对自己感兴趣的学科着迷，而忽视其他科目。毕业后，在朋友格罗斯曼的帮助下，1902 年他找到了一个专利审查员的工作。爱因斯坦后来常常提到在专利局工作的七年对他是一种“解脱”，这份工作使他能够交房租，而每天只占用他八小时，剩下的时间他就可以对大自然深思默想。

1905 年被誉为爱因斯坦的“奇迹年”，除了教科书中简单介绍的关于狭义相对论及其主要结论的论文以外，爱因斯坦对于光电效应的解释成为光敏二极管和电视摄像技术的基础；对于布朗运动的解释是对现代统计力学的一项重大贡献，其导出的方法可用于模拟空气污染物的行为和股票市场涨跌走势。爱因斯坦在物理学中的天才思想，使得他在很多方面都走得很远。

在爱因斯坦发表了狭义相对论以后，整个世界都处于对相对论的震惊和争论之中。然而，爱因斯坦自己却冷静地发现了狭义相对论中的基本困难。经过深入的思考，爱因斯坦推测，引力效应可能是一种几何效应，万有引力是时空弯曲的表现。由于引力起源于质量，他认为时空弯曲起源于物质的存在和运动。这是爱因斯坦在掌握了大量的物理知识的基础上所做出的猜测。

然而，如何把时空几何与运动联系起来呢？爱因斯坦在建立新理论的过程中感到了自己数学知识的欠缺，他需要新的数学工具。又是格罗斯曼伸出了援助之手，告诉他当时一些意大利人正在研究黎曼几何与张量分析，也许对他有用。

黎曼几何是从对欧氏几何的研究中发展出来的。1834 年，数学家黎曼把欧氏几何和非欧几何统一起来，成为黎曼几何，用来描述弯曲和扭曲的几何客体。当时，他还天才地预见到，真实的空间不一定是平直的。如果不平直，就不能用欧氏几何来描述。

黎曼几何为爱因斯坦发展广义相对论提供了数学基础，爱因斯坦努力钻研黎曼几何，几经曲折，终于于 1915 年建立了广义相对论。

在建立广义相对论的过程中，黎曼几何是最重要的数学工具。物理和数学密不可分，尤其是在经过物理飞速发展的当今时代，没有良好的数学基础，根本不可能理解那些高深的物理理论。

在发表广义相对论之后，爱因斯坦又对量子理论作出了贡献，并在后来一直思考大统一的理论，虽然这些思考没有得到一个成熟的理论，但是仍然产生了深远的影响。玻色－爱因斯坦凝聚已经成为实验物理学家工作的领域，而 EPR 佯谬（E 指爱因斯坦）成为了当代量子信息技术讨论的基础，连一度被爱因斯坦抛弃的宇宙常数也成了宇宙学家们用来解释暗能量的方案。

1955 年，在最后一封亲笔签名的信上，爱因斯坦同意将自己的名字加入一份号召所有国家中止核武器研究的声明。1955 年 4 月 18 日，由于大动脉破裂，他在医院中与世长辞。

**2. 狭义相对论的四维时空**

随着物理学近年的发展，在霍金等物理学家将微分几何引入相对论以后，人们对于相对论有了更深入的认识。相对论的基本概念都是建立在四维时空的基础上的，对于一般的中学生来说，这是很难理解的，所以教科书中基本上没有出现“时空”这样的术语。在这里，我们给有兴趣的教师和学生简单地做一下介绍。

相对论的时空是由事件组成的。在日常生活中从打开门、关上灯到新闻中的汽车相撞都是一个事件。任何事件总要占据一定的空间并持续一段时间。我们把生活中的事件模型化，认为每一个事件发生在空间的一点和时间的一瞬。进一步推广，不管是否发生了什么，空间的一点和时间的一瞬就叫做一个事件（event）。

所有的事件就组成了时空（spacetime）。由于每一个事件是由三个空间坐标和一个时间坐标描述的，所以由事件组成的时空是四维的，叫做闵氏时空。

三维的空间可以描绘成无限大的盒子，此外还可以找到很多描绘空间的方法。然而，如果要把时间和空间一起描绘成一个直观的形象就困难得多了。

一个办法是把三维的空间想象成一个半径无限大的球。这样，在任何一个时刻，我们的空间都是这样的一个无限大的球，而下一个时刻还是这样一个球。我们的时空整体就像一串冰糖葫芦，这些无限大的球被时间这个“棒”串在一起。

还有一种帮助理解的办法。我们可以压缩掉空间的一维，也就是把三维的无限大的盒子变薄成一个无限大的平面，用这个平面代表某一个时刻的空间。这样，时空看起来就像一页一页纸叠起来的书稿了，页码就表示了时间。这样的时空其实就是牛顿的绝对时间和绝对空间。

而爱因斯坦的四维时空可以想象成是把三维的盒子再加上一维，成为一个四维的盒子。我们也可以通过压缩掉一维来理解。相对论的时空可以看成一个土豆（图 15-1），观测者的不同运动情况对应着不同的参考系。当我们选择了一个参考系来观察时间和空间的时候，也就是进行“3+1”分解，就像是把这个土豆切开进行观看，那个切面就是我们所观测的空间。这里同样用一个二维的面代表了三维的空间，与切面垂直的方向代表了时间。相比之下，牛顿的绝对时空就好像是一盘切好了的土豆片。

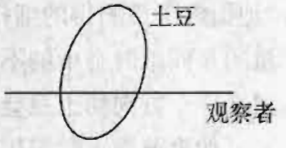


图 15-1

现在我们来看“同时的相对性”，这其实是在时空中发生了两个绝对的事件，站在车厢里的观测者把四维时空的“土豆”切开，发现这两个事件在一个切面上；而地面上的观测者则选择了不同的“切法”，于是两个事件有了时间的先后（图 15-2）。

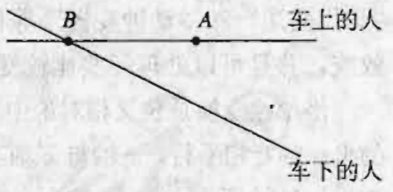


图 15-2

我们来看一下时空图。如果只是考虑在直线上的运动（本章中若无特别说明，都是只考虑一维运动的情况），首先任意选择一个惯性参考系，用竖直向上的轴表示时间，水平轴表示空间轴 $x$（图 15-3）。这样，各种在 $x$ 轴上运动的粒子都可以用图中的曲线表示。质点 $a$ 静止不动，不同的时刻它的位置都是 $x_0$，所以它表示成一条跟 $t$ 轴平行的直线。如果这个质点是向外匀速运动的话，随着时间的增加 $x$ 逐渐变大，就成为图 $b$ 的直线。如果质点一开始快速运动，后来逐渐变慢，它就如 $c$ 所示。

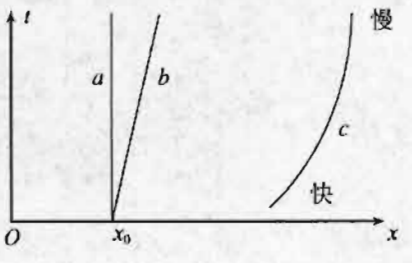


图 15-3

在图 15-3 中，我们看到，惯性参考系的观测者正好就是直线 $a$、$b$，而做减速运动的观测者则对应于曲线 $c$。相对论时空中的直线叫做测地线，就像是欧氏几何中的直线，在欧几里得几何中，两点之间的最短线就是直线段，而测地线具有相似的性质。

我们看到惯性参考系的观测者正是对应着一定的测地线，而非惯性参考系的观测者则没有对应测地线，所以一个物体是不是做惯性运动，是绝对的事情，不会因为参考系的选取而变化。

“长度的相对性”可以这样理解，一个质点在四维时空中就成为一条曲线，同样的道理，一个细杆上的一点就是在杆头和杆尾的曲线之间的一条线，这样一个细杆在四维时空就变成了一个二维面。在一个惯性参考系（例如一列火车）中静止的细杆就是如图 15-4 所示的一个二维面。这是一个绝对的对象，与参考系、坐标系和观测者都无关。

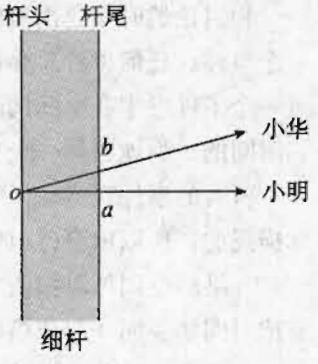


图 15-4

但是，每一个人都自然地站在自己的参考系的立场上来看问题，所以这种看法从一开始就是相对的。

假设 $o$ 点有一个事件，例如一个灯发光。小明在一列匀速运动的火车中，在灯发光的同时测量车上的一根细杆，细杆的长度就是他“切开”细杆的曲面得到的线段（图 15-4 中的线段 $oa$），这就是“火车参考系测得的细杆”。

然而，同时是相对的，站在地面上的小华也在灯亮的同时测量火车上的这根细杆，他测得的细杆长度就是他自己“切开”细杆的曲面得到的线段（图 15-4 中的线段 $ob$），就代表了“地面参考系测得的细杆”。这样，我们看到，在不同参考系中测量同一根细杆的时候，其实测量的是四维时空中的不同线段，所以测量的长度不同。这就好像我们沿一个方向切一个土豆，跟换一个方向切土豆会得到长度不同的土豆片。

如果要深入学习用微分几何作为数学工具分析相对论，可以参考北京师范大学梁灿彬教授编著的《微分几何与广义相对论》（科学出版社，2006 年 1 月第 2 版）等专业书籍。

**3. 用洛伦兹变换讨论相对论的基本问题**

在教科书中没有出现洛伦兹变换的公式，而是通过光速不变原理出发通过特例让学生体会“动尺变短”和“动钟变慢”等相对论效应。而通过洛伦兹变换，就可以比较严格地证明这些效应，并且可以处理一些比较复杂的问题。

洛伦兹变换是狭义相对论中不同惯性参考系之间的时间、空间坐标的变换。设 $S$ 系和 $S'$ 系的坐标轴互相平行，$x$ 轴与 $x'$ 轴互相重合，$S'$ 系以速度 $u$ 沿 $x$ 的正方向匀速运动，在 $t=t'=0$ 时，两坐标轴的原点 $O$ 与 $O'$ 重合。则一个事件 $A$ 在 $S$ 系的时空坐标（$x$，$y$，$z$，$t$）与它在 $S'$ 系的时空坐标（$x'$，$y'$，$z'$，$t'$）之间的关系是：

$$\begin{cases} x'=\dfrac{x-ut}{\sqrt{1-\dfrac{u^2}{c^2}}} & (1) \\ y'=y \\ z'=z \\ t'=\dfrac{t-\dfrac{u}{c^2}x}{\sqrt{1-\dfrac{u^2}{c^2}}} & (2) \end{cases}$$

$$\begin{cases} x'=\dfrac{x+ut'}{\sqrt{1-\dfrac{u^2}{c^2}}} \\ y=y' \\ z=z' \end{cases} \tag{3}$$

其逆变换是：

$$\begin{cases} t=\dfrac{t'+\dfrac{u}{c^2}x'}{\sqrt{1-\dfrac{u^2}{c^2}}} \end{cases} \tag{4}$$

这就是洛伦兹变换。下面结合教科书中的情景具体讨论几个基本问题。

(1) 同时的相对性

在 $S$ 系不同地点同时发生的两个事件 $A(x_1,\ t_1)$ 和 $B(x_2,\ t_2)$，其中 $t_1=t_2$，$x_1\neq x_2$。在 $S'$ 系看来两个事件的时空坐标则分别是 $A(x'_1,\ t'_1)$ 和 $B(x'_2,\ t'_2)$。

由 (2) 式可以看到

$$\Delta t'=t'_2-t'_1=\frac{(t_2-t_1)-\dfrac{u}{c^2}(x_2-x_1)}{\sqrt{1-\dfrac{u^2}{c^2}}}=-\frac{\dfrac{u}{c^2}(x_2-x_1)}{\sqrt{1-\dfrac{u^2}{c^2}}}\neq 0$$

即在 $S$ 系同时发生的两个事件，在 $S'$ 系不同时发生。同时可以看出，当 $x_2>x_1$ 时，$t'_2>t'_1$，也就是说 $A$ 事件先发生。

(2) 长度的相对性

假设杆 $MN$ 沿着车厢运动的方向固定在火车 ($S'$ 系) 上，与火车一起运动 ($N$ 靠近火车头)。火车上的观察者认为杆是静止的，他利用固定在火车上的坐标轴，读出杆两端的位置坐标，坐标之差就是他测出的杆长 $l_0$。地面观察者利用固定在地面上的坐标轴 ($S$ 系)，读出杆两端的位置坐标，坐标之差就是他测得的杆长 $l$。为了使这个测量有意义，地面观察者的测量应该是在 $S$ 系同时进行的。

假设地面观察者测量 $M$ 位置的事件是 $A$，测量 $N$ 位置的事件是 $B$，则在 $S$ 系两个事件的时空坐标可以写成 $A(x_1,\ t_1)$ 和 $B(x_2,\ t_2)$，在 $S'$ 系看来两个事件的时空坐标则分别是 $A(x'_1,\ t'_1)$ 和 $B(x'_2,\ t'_2)$。

测量在 $S$ 系同时进行，说明 $t_1=t_2$，$l=x_2-x_1$。杆的固有长度为 $l_0$，所以 $x'_2-x'_1=l_0$。

利用 (1) 式可以得到

$$l_0=x'_2-x'_1=\frac{x_2-ut_2}{\sqrt{1-\dfrac{u^2}{c^2}}}-\frac{x_1-ut_1}{\sqrt{1-\dfrac{u^2}{c^2}}}=\frac{(x_2-x_1)-u(t_2-t_1)}{\sqrt{1-\dfrac{u^2}{c^2}}}=\frac{x_2-x_1}{\sqrt{1-\dfrac{u^2}{c^2}}}=\frac{l}{\sqrt{1-\dfrac{u^2}{c^2}}}$$

这就是长度的相对性。

(3) 事件间隔的相对性

如果在 $S'$ 参考系中的一个地点不同时发生了两个事件 $A(x_1,\ t_1)$ 和 $B(x_2,\ t_2)$，则 $x_2=x_1$，$\tau=t_2-t_1$。其中 $\tau$ 可以认为是 $S'$ 中固定在 $x_1$ 处的一个观测者的固有时。则由 (2) 式可以得到

$$\Delta t'=t'_2-t'_1=\frac{(t_2-t_1)-\dfrac{u}{c^2}(x_2-x_1)}{\sqrt{1-\dfrac{u^2}{c^2}}}=\frac{\tau}{\sqrt{1-\dfrac{u^2}{c^2}}}$$

这就是时间间隔的相对性。

(4) 应用洛伦兹变换时应注意的几个问题

①洛伦兹变换中 $(x, y, z, t)$ 和 $(x', y', z', t')$ 是同一事件在两个不同参考系内的两组时空坐标。

②我们所说的尺和钟是指作为长度和事件的度量基准的物体或过程。在各惯性参考系中的度量基准必须是一致的，长度和时间的度量基准必须依据相同的物理过程。

③每个惯性参考系中的尺和钟都相对本惯性参考系静止且不可移动，而且由事件发生处本惯性参考系的观测者就地直接测量。

④动尺收缩公式中 $l_0$ 为尺的固有长度，动尺 $l$ 要求尺头和尺尾同时测量，否则就不能使用动尺收缩公式，而应用洛伦兹变换计算。

动钟变慢公式中 $\tau$ 为固有时间，否则不能使用动钟变慢公式，而应用洛伦兹变换计算。

(摘自《基础物理学 上册》，梁绍荣、管靖主编，高等教育出版社，有改动)

**4. 时空相对性的验证——$\mu$ 子**

作为狭义相对论的一个重要结论，时间的相对性可以通过 $\mu$ 子进行实验验证。同时，由于涉及的运算简单，这个例子也是验证长度相对性的一个很好的练习。应该注意的是，这个实验中其实还涉及了原子物理和统计物理的一些概念。

为了解释这个问题，我们首先需要明确：$\mu$ 子生成的高度和速度并不是确定的。

从生成来看，$\mu$ 子是由原始宇宙线和高层大气相互作用产生的。在 100 km 以上，这种相互作用就开始了，$\mu$ 子作为次级宇宙线也就可能出现。由于原始宇宙线能量的不同和与大气作用情况的不同，生成 $\mu$ 子的位置很多是在距离地面 15 km 甚至更低的位置产生的。而由于原始宇宙线能量的不同，$\mu$ 子的速度也大不相同，基本上接近光速，参考的数据从 $0.99c$ 到 $0.999\ 4c$，通常选 $0.995c$。

下一个概念是 $\mu$ 子的寿命。$\mu$ 子很容易发生衰变，教科书中说 $\mu$ 子的寿命是 3.0 μs，而大多数书中是用的 2.2 μs。实际上，$\mu$ 子的半衰期是 2.2 μs，而核的寿命是一个不太常用的物理量，是半衰期的 1.44 倍 $(1/\ln 2)$，正好约等于书中的 3.0 μs。基本上可以简单地认为，在寿命结束以后，$\mu$ 子就全部消失了。

现在回到最初的问题：既然 $\mu$ 子生成的高度和速度都不能确定，如何通过它证实时间间隔的相对性呢？

1941 年，美国科学家罗西和霍尔通过测量从山顶到海平面接收到的 $\mu$ 子数目，来看运动的 $\mu$ 子衰变的快慢。实验的基本思想如下。不考虑相对论效应，即使 $\mu$ 子以接近光速运动 $(0.995c)$，在它的寿命 3 μs 内，也仅能运动约 1 km，所以如果一定数量的 $\mu$ 子，通过一座 6 000 m高的山峰，在到达地面之前基本上将全部衰变。这样只要测得在地面接收到的 $\mu$ 子数目，就可以计算出运动的 $\mu$ 子寿命。这个计算过程和 $\mu$ 子在哪里产生无关。

一篇文献中的真实数据如下：在 1 981 m 的山顶上测得 563 个 $\mu$ 子进入大气层，在海平面上测得 408 个，$\mu$ 子下降的速率为 $0.995c$。如果不考虑相对论效应，应该仅有 27 个 $\mu$ 子，而考虑了以后的计算结果，理论值是 415 个，与观测数据基本符合。

**5. 双子佯谬和铯原子钟实验**

在学习了时间间隔的相对性以后，如果学生听说过双子佯谬的话，很可能会提出下面这样的问题：

如果有甲、乙两个双生子，甲在地球上，而乙乘坐接近光速的飞船遨游太空后返回地球，

那么当甲和乙重逢的时候，他们两个谁更年轻呢？

如果把地球作为一个惯性参考系，而把相对地球做匀速直线运动的飞船作为另外一个惯性参考系，那么根据狭义相对论，两个惯性参考系是对称的，甲可以认为乙在进行高速的宇宙航行，而乙也可以认为是甲在随着地球一起做宇宙航行，所以甲和乙都会认为对方的时间变慢了，也就是认为对方年轻了。

但是，如果甲和乙都处于惯性参考系之中的话，乙就无法飞回地球，甲乙无从相遇，也就无法比较谁更年轻了。

所以，问题的关键在于乙要返回地球，而这个过程中乙必须做变速运动。也就是说，与乙相对静止的参考系是一个非惯性参考系，而在狭义相对论中惯性参考系和非惯性参考系是不同的，因此两个参考系就不再对称了。在始终处于地球这个惯性参考系的甲看来，做宇宙飞行的乙返回地球时，将会比甲年轻。这个结论是爱因斯坦在 1905 年的关于相对论的第一篇论文中做出的，在半个世纪以后得到了实验验证。由于实验的成功验证，现在也把它称为双生子效应。

在教科书中提到了 1971 年验证时间间隔相对性的实验：把四只铯原子钟调整同步，然后把它们放在两架喷气式飞机上在赤道平面附近做环球飞行，一架向东飞，一架向西飞。当绕地球飞行一周后回到地面，与地面上的铯原子钟进行比较。实验结果与相对论的理论预言非常符合。

然而教科书在注释中提到："原子钟的差异实际是狭义相对论和广义相对论两种效应的结果。"这是怎么回事呢？

通常情况下，相对于我们讨论的问题所涉及的时间和空间尺度，不需要考虑地球的引力场引起的时空弯曲。然而对于精确的原子钟，地球的引力场引起的广义相对论的效应就不能忽略了。由于飞机在高空飞行，空中的原子钟所在的引力场与地面不同，由于"引力红移"的效应，地面的原子钟比空中的原子钟走得慢。从下表中可以看出，引力效应（广义相对论）和运动学效应（狭义相对论）对于时间间隔的影响大致相当，在误差范围以内实验结果和理论预言相符。

| | | | $\Delta\tau$（飞行原子钟读数减去地面钟读数，以 $10^{-7}$ s 为单位） | |
|---|---|---|---|---|
| | | | 向东飞行 | 向西飞行 |
| 实验结果 | 四只原子钟编号 | 120 | −57 | +277 |
| | | 361 | −74 | +284 |
| | | 408 | −55 | +266 |
| | | 447 | −51 | +266 |
| | 平均值 | | −59±10 | +273±7 |
| 理论给出的预言值 | 引力效应 | | 144±14 | 179±18 |
| | 运动学效应 | | −184±18 | 96±10 |
| | 总的净效应 | | −40±23 | 275±21 |

（上表摘自《狭义相对论实验基础》，张元仲，科学出版社 1979 年 9 月第 1 版）

## （二）联系生活、科技和社会资料

**要使科学造福于人类，而不成为祸害**

——爱因斯坦对加利福尼亚理工学院学生的讲话

看到你们这一支以应用科学作为自己专业的青年人的兴旺队伍，我感到十分高兴。

我可以唱一首赞美诗，来颂扬应用科学已经取得的进步；并且无疑地，在你们自己的一生中，你们将把它更加推向前进。我所以能讲这样一些话，那是因为我们是生活在应用科学的时代和应用科学的家乡。但是我不想这样来谈。我倒想起一个娶了不称心的妻子的小伙子，当人家问他是否感到幸福时，他回答说："如果要我说真心话，那我就不得不扯谎了。"

我的情况也正是这样。试设想，一个不很开化的印第安人，他的经验是否不如通常的文明人那样丰富和幸福？我想并不如此。一切文明国家的儿童都那么喜欢扮"印第安人"玩，这是值得深思的。

这样了不起的应用科学，它既节约了劳动，又使生活更加舒适，为什么带给我们的幸福却那么少呢？坦率的回答是，因为我们还没有学会怎样正当地去使用它。

在战争时期，应用科学给了人们相互毒害和相互残杀的手段。在和平时期，科学使我们生活匆忙和不安定。它没有使我们从必须完成的单调的劳动中得到多大程度的解放，反而使人成为机器的奴隶；人们绝大部分是一天到晚厌倦地工作着，他们在劳动中毫无乐趣，而且经常提心吊胆，惟恐失去他们一点点可怜的收入。

你们会以为在你们面前的这个老头子是在唱不吉利的反调。可是我这样做，目的无非是向你们提一点忠告。如果你们想使你们一生的工作有益于人类，那么，你们只懂得应用科学本身是不够的。关心人的本身，应当始终成为一切技术上奋斗的主要目标；关心怎样组织人的劳动和产品分配这样一些尚未解决的重大问题，用以保证我们科学思想的成果会造福于人类，而不致成为祸害。

在你们埋头于图表和方程时，千万不要忘记这一点！

（摘自《爱因斯坦文集》第三卷，商务印书馆1979年10月第1版，有改动）

## 四、补充习题

### A组

1. 爱因斯坦相对论的提出是物理学思想的重大革命，因为它（　　）

A. 揭示出时间和空间并非绝对不变的　　B. 否定了牛顿力学

C. 修正了能量和质量互相转化的理论　　D. 是最终的物理理论，不用再发展和完善了

2. 下列说法中正确的是（　　）

A. 所有惯性系的物理基本规律都是等价的

B. 在真空中，光的速度与光的频率、光源的运动状态、观察者的运动速度有关

C. 在任何惯性系中，光在真空中沿任何方向的传播速度都相同

D. 相对论认为时间和空间与物质的运动状态有关，它们不是相互独立的

3. 下列各种物体的运动，不服从经典力学规律的是（　　）

A. 发射导弹　　B. 自行车、汽车、飞机等交通工具的运动

C. 真空中光速不变　　D. 人造卫星绕地球运动

4. 下列关于广义相对论的说法正确的是（　　）

A. 引力场等效于一个做匀加速运动的参考系

B. 所有参考系都是平权的，不论它们是惯性系还是非惯性系，对于描述物理现象来说都是平等的

C. 引力场的存在使得空间不同位置的时间进程出现差别，譬如引力红移现象

D. 一个非惯性系，可以看成一个惯性系，只不过是它的后面有一个均匀的引力场

5. 关于经典力学的绝对时空观的下列说法中不正确的是（　　）

A. 时间和空间是相互联系和影响的

B. 同时发生的事件对任何参考系都是同时的

C. 在任何参考系中测量的时间间隔和空间距离都是相同的

D. 物体的质量是恒定不变的

6. 下列关于经典力学的评价正确的是（　　）

A. 经典力学揭示了自然界的运动规律，是不可否定的

B. 经典力学的时空观符合我们周围的客观事实，是完全正确的

C. 经典力学适用于宏观低速现象

D. 经典力学既然有误，不能再用来解决我们日常生活的问题

7. 下列说法中不符合狭义相对论时空观的是（　　）

A. 在一个参考系中同时发生的两个事件，在另一个参考系中看来不是同时发生的

B. 时钟相对于观察者运动时会变慢

C. 物体相对于观察者静止时它的长度测量值最大

D. 物体的质量随运动速度的增加而减小

8. 火车在地面上 $A$、$B$ 两点间向 $B$ 运行，坐在火车上的人观察到在 $A$、$B$ 两点分别有一个事件同时发生，在与 $A$、$B$ 都相对静止的地面观察者看来，_____点的事件先发生。

9. 一核弹含 20 kg 的钚。爆炸后生成物质量比原来小$\frac{1}{10\ 000}$，求爆炸中释放的能量。

10. 观察者测出电子的质量为 $2m_0$，求电子速度。（$m_0$ 是电子的静止质量）

## B 组

1. 关于牛顿力学规律的适用范围，下列说法中正确的是（　　）

A. 适用于宏观物体　　B. 适用于微观物体

C. 适用于高速运动的物体　　D. 适用于低速运动的物体

2. 设某人在以速度为 $0.6c$ 的飞船上，打开一个光源，则下列说法中正确的是（　　）

A. 飞船正前方地面上的观察者看到这一光速为 $1.6c$

B. 飞船正后方地面上的观察者看到这一光速为 $0.4c$

C. 在垂直飞船前进方向地面上的观察者看到这一光速是 $c$

D. 在地面上任何地方的观察者看到的光速都是 $c$

3. 下列哪些实验支持广义相对论（　　）

A. 利用日全食机会观察恒星，发现恒星位置与实际不符

B. 氢原子发出的光从太阳传播地球时的频率要比地球上氢原子发出的光的频率要低

C. 水星在近日点的进动现象

D. 迈克耳孙实验

4. 根据爱因斯坦的理论，一把米尺，在它与观察者有不同相对速度的情况下，米尺长度是不同的，它们之间的关系见图 15-5 所示。由此可知，当米尺和观察者的相对速度达到 0.8$c$（$c$ 为光速）时，米尺长度大约为_____ m。在日常生活中，我们无法察觉到米尺长度变化的现象，是因为观察者相对于米尺的运动速度_____。

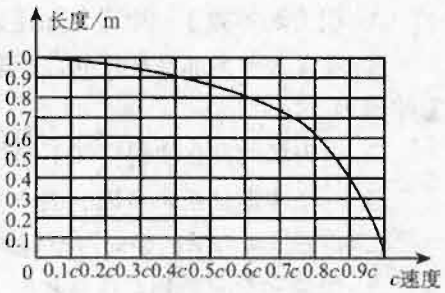



图 15-5

5. $\pi^+$ 介子是一种不稳定粒子，平均寿命是 $2.6\times10^{-8}$ s（在它自己的参考系中测得）。

（1）如果该粒子相对于实验室以 0.8$c$ 的速度运动，那么实验室坐标系中测得的 $\pi^+$ 介子寿命多长？

（2）$\pi^+$ 介子在衰变前运动了多长距离？

6. 一枚静止时长 30 m 的火箭以 3 km/s 的速度从观察者的身边掠过，观察者测得火箭的长度为多少？火箭上的人测得火箭的长度为多少？如果火箭的速度为光速的二分之一呢？

7. 地球上的观察者，看见飞船 $A$ 以速度 $2.0\times10^8$ m/s 从他身边飞过，飞船 $B$ 以速度 $1.0\times10^8$ m/s 跟随 $A$ 飞行。求：

（1）$A$ 上的乘客看到 $B$ 的相对速度。

（2）$B$ 上的乘客看到 $A$ 的相对速度。

8. 人造地球卫星以第二宇宙速度（约 11 km/s）运动，求卫星的质量与静质量的比值？

9. 把一个电子从静止加速到 0.1$c$，需要对它做多少功？如果将电子从 0.8$c$ 加速到 0.9$c$，又需对它做多少功？（电子静止质量 $m_0=9.1\times10^{-31}$ kg）

10. 一个电子被电压为 $10^6$ V 的电场加速后，其质量为多大？速率为多大？

**参考答案：**

**A 组**

1. A　2. ACD　3. C　4. ABCD　5. A　6. C　7. D　8. $A$

9. $\Delta E=1.8\times10^{14}$ J 提示：由质能关系 $E=mc^2$ 可得。

10. 0.866$c$ 提示：由相对论质量公式 $m=\dfrac{m_0}{\sqrt{1-\left(\dfrac{v}{c}\right)^2}}$ 可得。

**B 组**

1. AD　2. CD　3. ABC

4. 0.6，远远小于光速（速度很小）　提示：从米尺长度与观察者的相对速度图象可看出，当相对速度为 0.8$c$ 时，对应的米尺的长度为 0.6 m。

5. （1）$4.3\times10^{-8}$ s　（2）10.32 m　提示：$\Delta t'$ 是 $\pi^+$ 介子在自己参考系中的寿命，在实

验室中的寿命用 $\Delta t=\dfrac{\Delta t'}{\sqrt{1-\left(\dfrac{v}{c}\right)^2}}$ 求得：即：$\Delta t=\dfrac{\Delta t'}{\sqrt{1-\left(\dfrac{v}{c}\right)^2}}=\dfrac{2.6\times10^{-8}}{\sqrt{1-0.8^2}}$ s$=4.3\times10^{-8}$ s。

因此粒子在衰变前，运动距离 $s=v\Delta t=0.8\times3\times10^8\times4.3\times10^{-8}$ m$=10.32$ m。

6.30 m，$30\times(1-5.0\times10^{-11})$ m，26 m　提示：火箭相对于火箭上的人是静止的，所以不管火箭的速度是多少，火箭上人测得火箭长度与静止时相同，长度为 30 m。

若火箭的速度为 $v=3\times10^3$ m/s，则地面观察者测得火箭长度 $l$ 为

$$l=l'\sqrt{1-\left(\frac{v}{c}\right)^2}=30\times\sqrt{1-\left(\frac{3\times10^3}{3\times10^8}\right)^2}\ \text{m}=30\times(1-5.0\times10^{-11})\text{m}\approx30\ \text{m}$$

若火箭的速度为 $v=\dfrac{c}{2}$，则地面观察者测得火箭长度 $l$ 为

$$l=l'\sqrt{1-\left(\frac{v}{c}\right)^2}=30\times\sqrt{1-\left(\frac{1}{2}\right)^2}\ \text{m}=26\ \text{m}$$

7.（1）$1.2\times10^8$ m/s　（2）$B$ 看到 $A$ 向反方向以运动，速度为 $1.2\times10^8$ m/s　提示：由相对论速度叠加公式 $u=\dfrac{v+u'}{1+\dfrac{u'v}{c^2}}$ 可得。

8. $\dfrac{m}{m_0}=1.000\ 05$　提示：由相对论质量公式 $m=\dfrac{m_0}{\sqrt{1-\left(\dfrac{v}{c}\right)^2}}$ 可得，由此计算说明，当 $v\ll c$ 时，可以认为物体质量没有改变，若物质速度与光速相比不能忽略时，则物体质量 $m$ 变化一定要考虑。

9. $4.10\times10^{-16}$ J，$5.14\times10^{-14}$ J 提示：对电子所做的功等于电子能量的改变，由质能关系 $E=mc^2$，可求得对电子做的功，对电子做的功等于电子能量增加 $W=mc^2-m_0c^2$。

$W_1=(m-m_0)\cdot c^2=\left[\dfrac{m_0}{\sqrt{1-\left(\dfrac{v}{c}\right)^2}}-m_0\right]\cdot c^2$，将 $v=0.1c$ 代入得 $W_1=4.10\times10^{-16}$ J。

同理可求得将电子从 $0.8c$ 加速到 $0.9c$ 做的功 $W_2$ 为

$W_2=m_2c^2-m_1c^2=\left[\dfrac{m_0}{\sqrt{1-\left(\dfrac{v_2}{c}\right)^2}}-\dfrac{m_0}{\sqrt{1-\left(\dfrac{v_1}{c}\right)^2}}\right]c^2$，将 $v_1=0.8c$，$v_2=0.9c$，代入得

$W=5.14\times10^{-14}$ J。

10. $2.69\times10^{-30}$ kg，$0.94\,c$　提示：电场力对电子做功等于电子能量的改变。由电场力对电子做功等于电子能量的增加可得电子的质量 $m$ 为 $W=eU=mc^2-m_0c^2$，代入数据得 $m=2.69\times10^{-30}$ kg。又由 $m=\dfrac{m_0}{\sqrt{1-\left(\dfrac{v}{c}\right)^2}}$ 可得电子此时的速率为 $v=c\sqrt{1-\left(\dfrac{m_0}{m}\right)^2}\approx0.94c$。