

普通高中

WULI
物理

教学参考资料



选择性必修

第一册

上海科学技术出版社

普通高中

物 理
教学参考资料

选择性必修 第一册

上海科学技术出版社

主 编：蒋最敏 高 景
本册主编：高 景
编写人员：（以姓氏笔画为序）
周上游 於 丰 郑百易 高 景

图书在版编目（C I P）数据

普通高中物理教学参考资料：选择性必修. 第一册 /
上海市中小学（幼儿园）课程改革委员会组织编写；蒋
最敏，高景主编。—上海：上海科学技术出版社，
2023.1 (2025.1重印)
ISBN 978-7-5478-5977-3

I. ①普… II. ①上… ②蒋… ③高… III. ①中学物
理课—高中—教学参考资料 IV. ①G634.73

中国版本图书馆CIP数据核字(2022)第209393号

责任编辑：张 燕
封面设计：房惠平

普通高中 物理教学参考资料 选择性必修 第一册
上海市中小学(幼儿园)课程改革委员会组织编写

出 版 上海世纪出版(集团)有限公司 上海科学技术出版社
(上海市闵行区号景路159弄A座9F-10F 邮政编码201101)
发 行 上海新华书店
印 刷 上海新华印刷有限公司
版 次 2023年1月第1版
印 次 2025年1月第3次
开 本 890毫米×1240毫米 1/16
印 张 9.75
字 数 264千字
书 号 ISBN 978-7-5478-5977-3/G·1141
定 价 30.00元

编写说明

本书是《普通高中教科书 物理 选择性必修 第一册》的配套教师用书,主要阐释教材编写意图,阐明相关物理概念和知识,并提供相应的资料作为知识背景,旨在帮助教师更深入地理解相关教学内容。

教材的编写坚持以立德树人为目标,注重核心素养与教学内容的内在联系。根据在“情境、探究、应用”框架下强调“从生活走进物理,从物理走向社会”,教材每章节的内容引入均注重以实际生活中的真实问题为情境,然后按“描述现象”“提出问题”“开展探究”“形成结论”“实际应用”的逻辑顺序展开。据此,本书以章为单位进行编写,内容包括整章分析、本章教材解读、本章练习部分解读、本章实验与活动部分解读四部分。

整章分析 由“学习目标”和“编写意图”两个栏目组成。“学习目标”部分根据课程标准的要求,明确了在本章的学习过程中涉及的基本方法、技能,以及应体现和逐步形成的学科核心素养;“编写意图”部分包括课程标准的相关要求,本章涉及的重点概念与形成核心素养的关系,本章内容与前、后章内容的关系和在形成核心素养过程中的作用,以及本章内容的学时建议。

本章教材解读 以节为单位编写,由“本节编写思路”“正文解读”“资料链接”“问题与思考解读”和“复习与巩固解读”等栏目组成。“本节编写思路”主要对该节所要解决的问题及问题解决的逻辑关系、关键支架、所涉及的知识和规律与核心素养的关系等做出分析说明。“正文解读”的内容包括:学习内容与教材正文关系的说明;针对教师教或学生学的过程中可能产生的疑问以及一些重要概念做进一步说明和阐述;介绍相关内容的知识背景、实际应用和物理学史等;教材中栏目的说明及设置栏目的目的和作用;阐述学期活动的性质、方法和要求等。“资料链接”是对“正文解读”部分内容的补充和进一步阐述。“问题与思考解读”和“复习与巩固解读”部分设置“参考解答”“命题意图”和“主要素养与水平”,旨在改变相对固化的习题形式,适当增强习题开放性,减少死记硬背和“机械刷题”现象。其中“命题意图”阐述了编写者的出题意图,包括该题对概念的形成、方法的掌握所起的作用,以及该题应体现或解决的重点知识等。“主要素养与水平”是编写者根据自身对课程标准的理解给出习题所对应或体现的核心素养二级指标以及相应的水平(依据的标准请参见附录:物理学科核心素养的水平划分,书中的“Ⅰ”“Ⅱ”……分别对应“水平1”“水平2”……)。

本章练习部分解读 与《普通高中教科书 物理练习部分 选择性必修 第一册》同步,对每道题目作出解答。

本章实验与活动部分解读 与《普通高中教科书 物理实验与活动部分 选择性必修》同步,设置了“参考解答”和“命题意图”。

应该指出,给出习题体现的“主要素养与水平”的做法是一种尝试,其目的在于引发广大教师在教学实践中对新课标、新教材和新课程所倡导的学科核心素养及其水平划分、学业质量及其水平划分进行深入的思考。教师对水平划分的描述一定会有“见仁见智”的理解。同时,教学过程如何开展、具体内容的教学怎样进行,需要教师根据学情和自身的教学特点做出考虑和安排,这是教师创造性、个性化的工作,应该予以充分的尊重。相应地,书中并未给出具体的教学指导。

对于书中存在的不足之处,我们欢迎广大教师和物理工作者提出宝贵的意见和建议。

目录

第一章 动量	1
第一部分 整章分析	1
第二部分 本章教材解读	3
第一节 相互作用中的守恒量 动量	4
第二节 物体动量变化的原因 动量定理	9
第三节 动量守恒定律	15
第三部分 本章练习部分解读	30
第四部分 本章实验与活动部分解读	33
第二章 机械振动	35
第一部分 整章分析	35
第二部分 本章教材解读	37
第一节 机械振动 简谐运动	38
第二节 简谐运动的回复力和能量	45
第三节 单摆	50
第四节 受迫振动 共振	57
第三部分 本章练习部分解读	64
第四部分 本章实验与活动部分解读	66
第三章 机械波	68
第一部分 整章分析	68
第二部分 本章教材解读	69

第一节 机械波的形成和传播	70
第二节 机械波的描述	75
第三节 机械波的反射和折射	80
第四节 机械波的干涉和衍射	83
第五节 多普勒效应	90
第三部分 本章练习部分解读	98
第四部分 本章实验与活动部分解读	101

第四章 光	102
第一部分 整章分析	102
第二部分 本章教材解读	103
第一节 光的折射	104
第二节 全反射	113
第三节 光的干涉	118
第四节 光的衍射和偏振	125
第五节 激光	131
第三部分 本章练习部分解读	140
第四部分 本章实验与活动部分解读	144

第一章 动量

第一部分 整章分析

学习目标

1. 理解动量和冲量的概念,理解动量定理和动量守恒定律,能用动量定理和动量守恒定律分析、解释涉及碰撞、反冲等物体间相互作用的简单问题,进一步深化运动与相互作用和能量的观念。
2. 经历寻找相互作用中守恒量的过程,体验守恒的思想方法,会用系统的思想分析问题;知道动量守恒定律的普遍意义,体会自然界的和谐统一。
3. 通过实验探究和演绎推理,建立动量和冲量的概念,归纳得出动量守恒定律;通过实验证动量守恒定律,增强证据意识,体验减小实验误差的方法。
4. 通过动量守恒定律内容的学习,认识其与牛顿运动定律的联系与区别,以及适用条件和适用范围,体会物理学研究是建立在观察和实验基础上的;了解我国长征系列运载火箭的发展历程,增强科技强党的责任感。

编写意图

课程标准中对本章的“内容要求”为:

- 1.1.1 理解冲量和动量。通过理论推导和实验,理解动量定理和动量守恒定律,能用其解释生产生活中的有关现象。知道动量守恒定律的普适性。
- 1.1.2 通过实验,了解弹性碰撞和非弹性碰撞的特点。定量分析一维碰撞问题并能解释生产生活中的弹性碰撞和非弹性碰撞现象。
- 1.1.3 体会用守恒定律分析物理问题的方法,体会自然界的和谐与统一。

动量守恒定律是自然界的基本守恒定律之一,在生产生活及科学技术领域中有重要的应用,是探究原子和原子核的组成与结构、了解宇宙起源的必备知识和方法基础。动量定理可以被用于分析解释碰撞、缓冲等相互作用过程,在牛顿第二定律的基础上,形成对力的时间累积效应的认识。

本章以必修课程学习时形成的物质和能量守恒观念为先导,从寻找机械运动的守恒量出发进行实验探究,初步建立动量的概念,形成对相互作用系统中守恒量的认识。然后,聚焦于相互作用中物体动量变化的原因和量度,通过演绎推导和实验证理解动量定理;在建立冲量概念的过程中理解力对时间的累积效应,认识冲量是动量改变的原因和度量。最后,根据牛顿第三定律,通过演绎推导和实验证相结合的方法认识由相互作用的物体所组成的系统动量守恒的条件。本章内容的展开思路旨在强调寻找“守恒量”的思想方法,突出实验与分析推理相结合的科学探究过程。

通过动量定理、动量守恒定律的学习和运用,在能量守恒的基础上,进一步深化变化与守恒的观

念,拓展对运动与相互作用和能量观念的认识;体验寻找守恒量的思想和方法在物理研究中的作用和意义;体会自然界的和谐与统一,领略物理规律与生产生活、科学技术的关系,增强探索物理问题的兴趣。

完成本章内容的学习,共需要 6 课时,其中第一节 1 课时,第二节 2 课时,第三节 3 课时。

第一章

动 量

碰撞现象在自然界和生活中普遍存在，如陨石与星球的碰撞、打桩机打桩、台球的母球撞击彩球、分子间的碰撞等。碰撞现象是重要的物理现象。无论是宏观还是微观领域，碰撞都是发现新现象、探索新规律的重要手段。在研究物体间相互作用的规律时人们逐步认识到，各种复杂现象的背后蕴藏着某些简单而深刻的原理。科学的目标之一就是发现复杂自然现象背后的简单法则。

在必修课程中，我们已经学习了牛顿运动定律和机械能守恒定律。在本章中，将学习并理解冲量和动量的概念，理解动量定理和动量守恒定律，了解物体间碰撞的特点。在学习中，通过猜想、假设与实验，探寻碰撞过程中的守恒量；通过分析碰撞和反冲现象，体会用守恒定律分析问题的方法，加深对不同物理知识之间关系的理解，进一步发展“相互作用”“能量”“系统”和“守恒”的观念，感受物理学理论所描述的自然界的和谐与统一。

本节编写思路

本节以寻找守恒量为切入点，在回顾建立普遍的能量守恒定律的基础上，联系物理学史中关于 mv 和 mv^2 哪个是机械运动的守恒量之争激发学生兴趣，通过两个滑块以不同方式的相互作用的实验，逐步认识到 mv 是机械运动的守恒量，建立动量的概念。关于历史上争论的简单说明见本书第8页资料链接。

本节通过三次实验，引导学生通过猜想、分析和处理数据，经历科学探究的过程，感受寻找守恒量的思想方法，提高科学探究能力。

三次实验的具体情境和结果为：

1. 质量相等的两个滑块，通过固定在静止滑块上的轻质弹簧发生碰撞。碰撞前、后两滑块 mv 之和、 mv^2 之和均几乎不变。

2. 质量相等的两个滑块，通过固定在滑块上的尼龙搭扣互相接触并发生碰撞。碰撞前、后两滑块的 mv 之和几乎不变，但 mv^2 之和明显减小。

3. 质量不相等的两个滑块相向运动，通过固定在其中一个滑块上的轻质弹簧发生碰撞，碰撞后两滑块反向弹开。碰撞前、后两滑块 mv 大小之和不相等，但 mv 的矢量和几乎不变。

上述实验涉及环节较多，且测量及数据获得需要较长时间，因此通过给出实验过程与测量结果的方式引导学生进行探究。也可以利用其他测量手段获得实验数据。

正文解读

[1] 图 1-1 和图 1-2 描述的实验均给出了完整的实验数据（分别见表 1-1 和表 1-2），旨在引导学生关注对实验结果的分析。

第一节 相互作用中的守恒量 动量

在物理学的发展历程中，物理学家逐渐形成了这样的观念：物理学的任务是发现普遍的自然规律；自然过程中包含着某种物理量的不变性，即存在守恒量，是物理规律最基本的表现形式之一。物理学家在探求自然规律的过程中，不断地探寻着不同的守恒量。

能量守恒定律是自然界的普遍规律之一。历史上，“能量守恒”曾不止一次受到质疑。每当出现这样的情况，都伴有新能量形式的发现。例如，摩擦导致运动物体的机械能减小，能量似乎消失了；通电的导线会发热，导线的能量似乎增加了。进一步研究上述现象发现了内能和电能，拓展了能量的内涵，推动了物理学的发展。

众多学者都曾卷入“什么是相互作用中运动的守恒量”的争论。这一争论从 17 世纪末一直延续到了 18 世纪中期。一部分学者认为，守恒量是“以速度及物质之量联合度”^①的，即 mv ；另一部分学者认为，这一守恒量应为 mv^2 。这些学者关于何为“相互作用中运动的守恒量”的观点各不相同，但他们的描述均与质量 m 和速度 v 有关。

▶ 寻找碰撞过程中的守恒量

以水平气垫导轨上的两个滑块为研究对象，用频闪技术拍摄滑块的运动过程，测量它们的质量和碰撞前后的速度，探寻这个守恒量是质量与速度的乘积 mv ，还是质量与速度平方的乘积 mv^2 。考虑到碰撞涉及两个物体的质量，以及它们碰撞前、后的速度，我们从最简单的情况开始实验探索。

如图 1-1 所示，选择两个质量均相等的滑块 A 和 B 置于水平导轨上，滑块 B 前端装有轻质弹簧。推动滑块 A，使其与静止的滑块 B 碰撞。分别测量两滑块碰撞前、后的速度。实验结果如表 1-1 所示。

[1]



图 1-1 实验图（一）

表 1-1 实验数据记录表 (一)

[1] 滑块质量 $m_A = m_B = 0.207 \text{ kg}$

物理量	$v_A/(\text{m}\cdot\text{s}^{-1})$	$v_B/(\text{m}\cdot\text{s}^{-1})$	$m_A v_A/(\text{kg}\cdot\text{m}\cdot\text{s}^{-1})$	$m_B v_B/(\text{kg}\cdot\text{m}\cdot\text{s}^{-1})$	$m_A v_A^2/(\text{kg}\cdot\text{m}^2\cdot\text{s}^{-2})$	$m_B v_B^2/(\text{kg}\cdot\text{m}^2\cdot\text{s}^{-2})$
碰撞前	0.362	0	7.49×10^{-2}	0	2.71×10^{-2}	0
碰撞后	0	0.358	0	7.41×10^{-2}	0	2.65×10^{-2}

本次实验中，每个滑块的质量与速度的乘积 mv 、质量与速度平方的乘积 mv^2 在碰撞前后均发生变化。对数据做进一步分析发现，两个滑块的 mv 之和与 mv^2 之和在碰撞前后几乎不变。这个实验结果提示我们两个滑块碰撞前后的 mv 之和、 mv^2 之和均有可能是碰撞中的守恒量。

改变实验中的碰撞方式，使碰撞后 A、B 两滑块一起运动。

如图 1-2 所示，仍选用质量均为 0.207 kg 的 A、B 两个滑块，在两滑块相对的面上固定尼龙搭扣，一旦搭扣互相接触，两滑块将粘在一起。碰撞前滑块 B 静止，滑块 A 向右运动与滑块 B 碰撞，实验结果如表 1-2 所示。

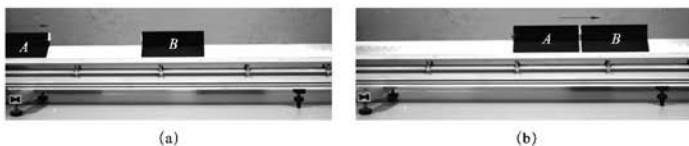


图 1-2 实验图 (二)

[2] 滑块质量 $m_A = m_B = 0.207 \text{ kg}$

物理量	$v_A/(\text{m}\cdot\text{s}^{-1})$	$v_B/(\text{m}\cdot\text{s}^{-1})$	$(m_A v_A + m_B v_B)/(\text{kg}\cdot\text{m}\cdot\text{s}^{-1})$	$(m_A v_A^2 + m_B v_B^2)/(\text{kg}\cdot\text{m}^2\cdot\text{s}^{-2})$
碰撞前	0.342	0	7.08×10^{-2}	2.42×10^{-2}
碰撞后	0.168	0.168	6.96×10^{-2}	1.17×10^{-2}

在本次实验中，A、B 两个滑块的质量与速度的乘积 mv 之和在碰撞前后几乎没有发生变化，但质量与速度平方的乘积 mv^2 之和明显减小。可见， mv^2 不可能是碰撞中的守恒量。

为了进一步研究 mv 之和是不是碰撞中的守恒量，应考虑更为一般的情况。

如图 1-3 所示，选用两个质量不等的滑块 m_A 和 m_C ， $m_A = 0.207 \text{ kg}$ ， $m_C = 0.104 \text{ kg}$ 。碰撞前两滑块相向运动，滑块 A 向右运动，速度 v_A 的大小为 0.544 m/s ，滑块 C 向左运动，速度 v_C 的大小为 0.387 m/s ；碰撞后两滑块弹开，滑块 A 向左运动，速度大小为 0.069 m/s ，滑块 C 向右运动，速度大小为 0.832 m/s 。

[1] 分析表 1-1 中

数据可得：两滑块碰撞前、后总动量和总动能均几乎保持不变。这一结论为本章第三节中“弹性碰撞”概念的建立奠定基础，也体现出课程标准中“通过实验，了解弹性碰撞和非弹性碰撞的特点”的要求。

[2] 分析表 1-2 中数据，可得两滑块碰撞前、后总动量几乎不变，但总动能明显减小，这为本章第三节中“非弹性碰撞”概念的建立做铺垫，并体现出课程标准“通过实验，了解弹性碰撞和非弹性碰撞的特点”的要求。

[1] 在“自主活动”

中处理分析第三次实验的数据,要求学生根据图1-3描述的实验,将数据填入表格并进行适当处理,然后对所得结果进行分析,得出“碰撞前、后两滑块 mv 的大小之和并不相等,但其矢量和几乎不变”的结论。在处理数据获得体验的基础上,认识动量的矢量性和动量作为反映机械运动的守恒量与动能的区别。

④ 第一章 动量



(a)

(b)

图1-3 实验图(三)

[1] 自主活动

将第三次实验的数据填入表1-3,讨论A、C两滑块碰撞前后质量与速度的乘积 mv 之和是否保持不变。

表1-3 实验数据记录表(三)

$$m_A = \text{_____ kg}, m_C = \text{_____ kg}$$

物理量	$v_A / (\text{m}\cdot\text{s}^{-1})$	$v_C / (\text{m}\cdot\text{s}^{-1})$	$m_A v_A / (\text{kg}\cdot\text{m}\cdot\text{s}^{-1})$	$m_C v_C / (\text{kg}\cdot\text{m}\cdot\text{s}^{-1})$	$(m_A v_A + m_C v_C) / (\text{kg}\cdot\text{m}\cdot\text{s}^{-1})$
碰撞前					
碰撞后					

分析表1-3中的数据可知,两滑块碰撞前后质量与速度乘积 mv 的矢量和基本保持不变。

综合上述实验结果可以猜想,在碰撞中的守恒量可能是 mv 的矢量和。

在物理学中,把物体的质量与速度的乘积称为动量(momentum),用符号 p 表示。

$$p = mv$$

在国际单位制中,动量的单位是千克·米/秒(kg·m/s)。

动量是一个矢量,它的方向与速度的方向相同。

大量实验表明,在一定条件下,相互作用的两物体动量的矢量和是守恒量。

问题与思考

- 列举学过的物理量中的守恒量,这些物理量的守恒是否有前提?
- 某同学乘坐摩天轮随座舱在竖直平面内做匀速圆周运动。在摩天轮转动一周的过程中,该同学的动量是否变化?
- 一名高中生骑自行车上学,估算他以正常速度骑行时的动量。

主要素养与水平:
运动与相互作用观念(I)。

2. 参考解答: 动量是矢量,其方向与物体运动的速度方向相同。该同学随摩天轮做匀速圆周运动,动量的大小不变,方向为圆周的切线方向,时刻改变,因而该同学的动量是变化的,但转过一周,该同学的始、末动量相同。

命题意图: 了解动量的矢量性。

主要素养与水平: 科学推理(II)。

3. 参考解答: 高中生的体重为50~60 kg,一般骑自行车的速度比100 m赛跑的速度小,为10~15 km/h。代入 $p = mv$ 得,高中生骑行时的动量为150~250 kg·m/s。

命题意图: 根据动量的定义,为估算动量的大小收集数据。

主要素养与水平: 运动与相互作用观念(II);解释(I)。

4. 质量为 1.2 t 的家用轿车，其 0~100 km/h 直线加速阶段的 $v-t$ 图像如图 1-4 所示。该车在第 2.5 s 至第 4.5 s 的时间间隔内动量变化了多少？

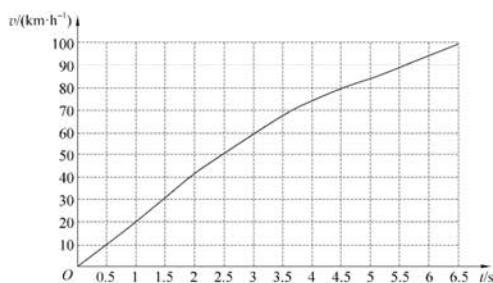


图 1-4

5. 如图 1-5 所示，一只质量为 0.18 kg 的垒球，以 25 m/s 的速度飞来，被运动员以 40 m/s 的速度反向击回。击球前后垒球动量的变化量为多大？



图 1-5



图 1-6

6. 如图 1-6 所示，两个形状相同的小球 A、B，质量分别为 20 g 和 10 g，用等长的细线悬挂在同一高度。第一次保持 B 球竖直悬挂，将 A 球拉至某高度由静止释放；第二次保持 A 球竖直悬挂，将 B 球拉开，从相同高度由静止释放。两球两次碰撞前后的速度如表 1-4 所示。

根据上述实验数据，能否得出“碰撞过程中守恒的物理量就是动量”的结论？

表 1-4

碰撞情况	碰撞前 A 的速度 v_A	碰撞前 B 的速度 v_B	碰撞后 A 的速度 v_A'	碰撞后 B 的速度 v_B'
A 碰 B	1 m/s	0	0.33 m/s	1.33 m/s
B 碰 A	0	1 m/s	0.66 m/s	-0.33 m/s

B 两球在碰撞前、后的动量的总量几乎不变，应用物体动能的表达式可得，小球动能的总量也几乎不变。但是仅从两次实验并不能归纳出“动量是碰撞过程中的守恒量”的普遍规律。

命题意图：这是教材上实验的延续，在相对熟悉的情境中开展科学推理，体现科学本质和科学态度。

主要素养与水平：科学本质(Ⅱ)；科学态度(Ⅱ)。

4. 参考解答：由图可知，2.5 s 时车速 v_1 为 50 km/h, 4.5 s 时车速 v_2 为 80 km/h, 根据 $\Delta p = mv_2 - mv_1$, 代入数据得 $\Delta p \approx 1 \times 10^4 \text{ kg} \cdot \text{m/s}$, 即这段时间内动量的变化量大小为 $1 \times 10^4 \text{ kg} \cdot \text{m/s}$, 方向与速度方向相同。

命题意图：能从图像中读取数据，通过分析推理得出物体动量的变化量。

主要素养与水平：科学推理(Ⅱ)。

5. 参考解答：取垒球被反向击回的方向为正方向。垒球被击回的过程，其动量的变化量 $\Delta p = mv_2 - mv_1 = 0.18 \times [40 - (-25)] \text{ kg} \cdot \text{m/s} = 11.7 \text{ kg} \cdot \text{m/s}$, 方向与初速度方向相反。

命题意图：知道动量和动量的变化量需要关注其矢量性。

主要素养与水平：模型建构(Ⅱ)。

6. 参考解答：根据表中的数据可得，A、

资料链接

历史上关于运动守恒量的争论

16世纪末,许多哲学家认为,宇宙间运动的总量是不会减少的,只要能够找到一个合适的物理量来量度运动,就会看到运动的总量是守恒的。笛卡尔(R. Descartes, 1596—1650)就持这种观点。他提出以物体质量与速率的乘积 mv 作为运动的量度, mv 永远不会不留痕迹地消失,也不能从虚无中产生。牛顿支持笛卡尔的观点,他写道:“运动之量,以速度及物质之量联合度之”。这样,以 mv 作为运动的量度似乎得到了公认。17世纪80年代,莱布尼兹(G. W. Leibniz, 1646—1716)认为应以 mv^2 作为运动的量度。由此引发了长达一个世纪的两派科学之争。

一百多年之后,能量转化与守恒定律确立了,人们才对这两种量度的区别有了进一步的认识。这场争论使人们认识了物质运动形式及描述的多样性。

动能与动量的区别

动量是描述物体间相互作用时,机械运动在物体间传递的物理量。两个物体,即使动量的大小相等,由于运动的方向不同,当它们与其他物体相互作用时,其机械运动传递的结果也会不相同,所以动量是矢量,其方向与瞬时速度的方向一致。

动能是描述物体间相互作用时,机械运动转化为其他形式运动的物理量。动能反映了物体因为运动具有的做功本领。

当物体的动量发生变化时,其动能不一定发生变化,而物体的动能发生变化时,其动量一定发生变化。

每一个运动的物体都具有一定的动量和动能,但动量的变化和能量的转化服从不同的规律。动量的变化反映了力对时间的累积效应,而动能的变化则反映了力对空间的累积效应。两者从不同的角度描述了运动物体的特征,两者都是状态量,且两者的大小间存在确定的定量关系,即 $E_k = \frac{p^2}{2m}$ 。

相对论动量

当物体的运动速度接近甚至达到光速时,其质量 m 满足相对论质—速公式:

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

式中, m_0 表示物体静止时的质量, c 表示光速, v 为运动物体的速度。

在这种情况下,仍将物体的动量定义为:

$$p = mv$$

只是考虑到相对论效应,物体的质量是一个随物体运动速度的增大而变大的量。

对于速度为 c 的光子来说,其动量 p 跟能量的关系为:

$$p = \frac{E}{c} = \frac{h\nu}{c} = \frac{h}{\lambda}$$

本节编写思路

回顾上一节的实验结果,将问题聚焦于相互作用系统内某个物体动量变化的原因,引入本节内容。

本节通过理论推导和实验验证相结合的方法,讨论物体动量变化的原因及量度,得出冲量的概念和动量定理,并用其分析解决实际问题。具体分为三个层次:

- 以手推车只在一个恒定推力作用下做匀加速直线运动为例,通过演绎推导,得出冲量的概念和动量定理,再将动量定理推广到多力作用情况。

- 用实验验证动量定理,将动量定理的适用范围由恒力作用情况推广到受变力作用的情况。

- 通过示例,示范用动量定理解决实际问题的方法,体会动量定理的特点,形成解决问题的思路。

第二节 物体动量变化的原因 动量定理

通过碰撞实验寻找相互作用中的守恒量时发现,碰撞前后两个物体动量的矢量和不变,但每个物体的动量都发生了变化。单个物体动量发生变化的原因是什么?

[1] ▶ 冲量

推动一辆质量为 m 的小车,使其由静止开始加速到速度 v ,小车的动量由 0 增加为 mv 。由牛顿运动定律可知,若由一名儿童用较小的力推动该车,所需的时间较长;换由一位成人用较大的力推,则所需时间较短。可见,物体动量的变化不仅与作用力有关,还与力的作用时间有关。

假设小车仅在水平恒力 F 的作用下,沿光滑的水平地面做匀加速直线运动,从 t_0 到 t ($\Delta t = t - t_0$),速度由 v_0 增加到 v ,则动量由 mv_0 增大到 mv 。以小车为研究对象,设小车加速度为 a ,由牛顿第二定律和运动学知识可知

$$F = ma$$

$$a = \frac{\Delta v}{\Delta t} = \frac{v - v_0}{t - t_0}$$

整理可得

$$F(t - t_0) = mv - mv_0 = p - p_0$$

即

$$F\Delta t = p - p_0$$

p_0 和 p 分别表示加速过程始、末两个状态小车的动量。

上式表明,小车动量的变化由作用力 F 和作用时间 Δt 共同决定,只要两者的乘积 $F\Delta t$ 相同,小车动量的变化就相同。

在物理学中,把作用力与其作用时间的乘积称为冲量(impulse),用符号 I 表示。

$$I = F\Delta t$$

冲量是矢量,它的方向与力 F 的方向一致。在国际单位制中,冲量的单位是牛顿·秒,符号为 N·s。

利用上式可直接计算恒力的冲量。以力 F 为纵轴,时间 t 为横轴作 $F-t$ 图像,若 F_0 为恒力,图像为平行于横轴的直线,如图 1-7 所示,直线与横轴所围面积可表示 $0 \sim t_1$ 时间内力 F_0 的冲量大小。

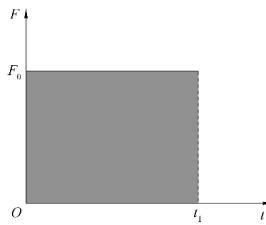


图 1-7 恒力的 $F-t$ 图像

学习本节内容,将经历推导、实验和应用等过程,有助于学生提高模型建构、科学推理的能力,感悟科学与社会生活之间的关系,并认识高空抛物的严重危害,形成从自身做起、坚决杜绝此类行为的责任感。

正文解读

[1] 通过创设小车由静止加速,动量发生变化的情境,引导学生联系生活经验,体会作用力与持续作用时间会影响动量的变化。再将小车受力和运动情况进行简化,推导小车动量变化与作用力、持续作用时间的定量关系,建立冲量的概念。

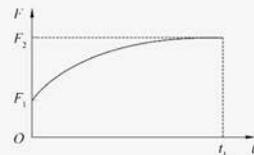
[1] 此处设置“大家谈”，旨在引导学生通过类比和迁移，理解变力的冲量可以用图像的“面积”来表示。运用无限分割与逼近的方法，在深入理解冲量概念的同时，为实验验证变力作用下的动量定理做准备。

[2] 动量是与物体运动状态对应的“状态量”，冲量是与作用时间或运动过程对应的“过程量”。动量定理表明，合力的冲量导致物体的动量发生改变，冲量的大小量度了物体始末状态动量变化量的大小。

[3] 这是一个需要学生动手做的“自主活动”。通过实验获得变力作用下的 $F-t$ 图像，由此得出相应的冲量大小。根据约定的正方向和小车碰撞前、后的速率，比较碰撞过程中小车受力的冲量和碰撞前后小车动量的变化量是否相等，验证动量定理。

[1] 大家谈

如果物体受到一个大小随时间变化的力的作用，力随时间变化的关系如图 1-8 所示，如何确定这个力的冲量？

图 1-8 某个变力的 $F-t$ 图像

▶ 动量定理

在实际情况中，物体往往在某一时间段 Δt 内受到多个力的作用，这些力在 Δt 时间内的共同作用效果与其合力在这段时间内的作用效果相同。因此，物体在 Δt 时间内动量的变化等于其所受合力 $F_{合}$ 在这段时间内的冲量，即

$$F_{合} \Delta t = p - p_0$$

这一关系称为动量定理 (theorem of momentum)。

上述动量定理的推导是从物体在恒力作用下的特殊情形中得出的结论。变力作用下物体的动量变化是否也遵循动量定理？

[3] 自主活动

如图 1-9 所示，①为力传感器，②为光电门传感器，③为装有挡光片和弹性圈的小车，④为水平导轨。推动小车，使弹性圈与固定的力传感器碰撞，利用力传感器获得小车受到的力与作用时间的关系，光电门传感器测得碰撞前、后小车的速度。根据所得数据，验证动量定理。

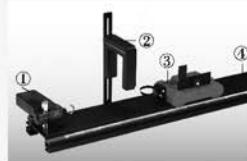


图 1-9 验证动量定理

在上述活动中，小车虽然受到变力作用，但动量定理依然成立。

进一步的研究表明，物体在变力作用下动量定理也成立。

[4] 示例 高空抛物存在极大的安全隐患，即使从楼上落下一枚小小的鸡蛋，也可能把路上的行人砸伤。假设鸡蛋撞击地面的持续时间为 0.005 s，估算一枚由 7 楼自由下落的鸡蛋对地面的平均冲击力有多大。

分析：根据实际情况，估算鸡蛋的质量和下落高度。由自由落体运动的规律或机械能守恒定律得鸡蛋触地前的速度。以鸡蛋为研究对象，分析鸡蛋的受力情况，用动量定理估算鸡蛋在触地过程中撞击地面的平均作用力。

[4] 本示例示范了应用动量定理分析问题的一般思路或步骤，即：

- (1) 明确研究对象，把它从周围环境中隔离出来。
- (2) 明确相互作用的过程，分析研究对象在此过程中的受力情况，画出其受力分析的示意图。
- (3) 分析研究对象在相互作用前、后速度的大小和方向。
- (4) 约定正方向，根据动量定理列出相应的方程并求解。

解：通常 500 g 鸡蛋约有 8 枚，则 1 枚鸡蛋的质量 m 约为 0.06 kg。一般住宅楼的层高约为 3 m，则鸡蛋下落的高度 h 约为 18 m。由于下落距离不大，可以忽略鸡蛋下落时的空气阻力，则可将鸡蛋下落的过程看作自由落体运动。重力加速度 g 取 10 m/s²。

以鸡蛋为研究对象，设鸡蛋触地前的速度为 v_1

$$v_1 = \sqrt{2gh} = \sqrt{2 \times 10 \times 18} \text{ m/s} \approx 19 \text{ m/s}$$

触地过程中，鸡蛋受到地面作用力 \bar{F}_N 和重力 G 的作用，受力分析如图 1-10 所示。

鸡蛋触地，在合外力 $F_{合}$ 的作用下，它的速度在 $\Delta t = 0.005 \text{ s}$ 内由 v_1 减小到零。取竖直向上为正方向，以鸡蛋为研究对象，在鸡蛋触地到速度为零的过程中，速度方向与正方向相反，其初动量为 $-mv_1$ ，末动量为零。再由动量定理

$$\begin{aligned} \text{得} \quad F_{合}\Delta t &= mv - mv_0 \\ \text{即} \quad (\bar{F}_N - G)\Delta t &= 0 - (-mv_1) \\ \bar{F}_N &= \frac{mv_1}{\Delta t} + G \\ &= \left(\frac{0.06 \times 19}{0.005} + 0.06 \times 10 \right) \text{ N} \\ &= 228.6 \text{ N} \end{aligned}$$

地面对鸡蛋作用力的反作用力即为鸡蛋对地面的作用力。由此可知，鸡蛋落地时对地面平均冲击力的大小约为 228.6 N。



图 1-10 鸡蛋触地时的受力分析

[1] 由 7 楼自由下落的鸡蛋对地面的平均冲击力与 23 kg 物体受到的重力相当。因此，“高空抛物”存在极大的危险。为了保护人民的生命安全，2021 年，国家正式将“高空抛物罪”列入刑法。

拓展视野

在很短时间内大小随时间剧烈变化的作用力称为冲力。

图 1-11 中曲线与时间轴包围的面积即为冲力的冲量。

由于冲力在极短时间内由零达到最大值后又很快减小为零，通常无法直接用力与时间的乘积计算其冲量。设想存在一个恒力 \bar{F} ，它在相同时间内的冲量与冲力的冲量相等，如图 1-11 所示。该恒力改变动量的效果与冲力相同，反映了冲力在该段时间内的平均作用效果，称为平均冲力。

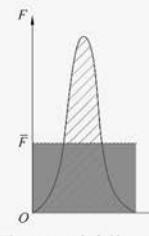


图 1-11 冲力的 $F-t$ 图像

鸡蛋触地过程中，地面对鸡蛋的作用力远大于鸡蛋所受到的重力（约为 0.6 N）。对于碰撞、冲击等相互作用过程，计算平均冲力时往往可以忽略重力的影响。

例中要求的平均冲击力，是用恒力替代变力。这是从力的时间累积作用效果的角度，通过用恒力替代变力，使得两者在相同时间内的冲量相等，由此求出的恒力大小即为所求平均冲击力的大小。

[1] 这里，还需要说明两点：

(1) 解决此类问题不能单凭相互作用时间 Δt 很短，就轻易忽略重力。示例表明，对于竖直方向发生的撞击，撞击力的平均大小既有撞击物自身重力 mg 的贡献，也有其动量变化率 $\frac{m\Delta v}{\Delta t}$ 的贡献，只有当两

者之比，即 $\frac{g}{\frac{\Delta v}{\Delta t}}$ ≪ 1

时，才能忽略重力。相反，在人从高处跳下双膝弯曲、使用发泡包装材料搬运易碎物品、航天返回舱着陆前利用反冲火箭缓冲等事例中，都是通过延长相互作用时间 Δt ，大大减小动量变化率 $\frac{m\Delta v}{\Delta t}$ 对撞击力的贡献，这些事例中重力 mg 反而可能对撞击力大小有主要贡献。

(2) 鸡蛋与地面碰撞时，鸡蛋所受地面的作用力是一个变力。示

问题与思考解读

1. 参考解答：人从高处跳下，以一定的速度接触地面，落地后人的速度变为零。从将要接触地面到速度减为零的过程中人动量的变化 Δp 一定，即合力的冲量一定。由动量定理 $F \cdot \Delta t = \Delta p$ 可知，若通过弯曲双腿增加减速过程的时间 Δt ，人所受的合力 F 将减小。由于人所受重力不变，则地面对腿部的作用力减小。因此，弯曲双腿可起到保护作用。

命题意图：用动量定理解释简单的现象。

主要素养与水平：模型建构(Ⅱ)；科学论证(Ⅱ)；科学本质(Ⅰ)。

2. 参考解答：由图可知， $0 \sim 4$ s 内合力 F 的冲量为 $4 \text{ N} \cdot \text{s}$ 。由动量定理 $F \cdot \Delta t = mv_2 - mv_1$ 得， 4 s 内合力 F 的冲量等于物体动量的变化量，物体的初动量为 0 ，则末动量

为 $4 \text{ kg} \cdot \text{m/s}$ ，可得末速度为 2 m/s ，与 $t = 0$ 时合力 F 的方向一致。

命题意图：能从图像中读取信息，用动量定理做简单的推理。

主要素养与水平：科学推理(Ⅱ)；科学论证(Ⅱ)。

3. 参考解答：由自由落体运动的规律得小球碰地前的速度 v_1 的大小为 5.3 m/s ，与地面碰撞后小球做竖直上抛运动，可得小球与地面碰撞后的速度 v_2 的大小为 4 m/s 。以向上为正方向，球与地面碰撞的过程，由动量定理，得 $F_{合} \cdot \Delta t = mv_2 - mv_1$ ，即 $F_{合} = \frac{mv_2 - mv_1}{\Delta t} = \frac{0.02 \times [4 - (-5.3)]}{0.004} \text{ N} = 46.5 \text{ N}$ ， $F_{合} = F - G = 46.5 \text{ N}$ ，得 $F = 46.7 \text{ N}$ ，即小球受到的平均冲力 F 的大小为 46.7 N 。

命题意图：厘清运动过程，明确规律的适用对象，对综合性物理问题进行分析和推理，发展运动与相

问题与思考

- 当人从高处跳下双脚接触地面时，会本能地弯曲以减小人与地面间的冲击力，类似的现象称为“缓冲”。用动量定理解释其中的原因。
- 质量为 2 kg 的物体在合力 F 作用下由静止开始运动，合力 F 随时间 t 变化的图像如图 1-12 所示，求物体在 4 s 末的速度。

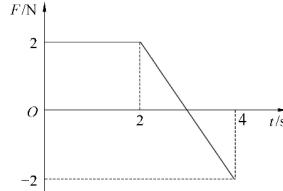


图 1-12

- 质量为 0.02 kg 的小球从离地面 1.4 m 高处自由下落至地面，与地面碰撞后反弹，小球反弹的最大高度为 0.8 m 。设小球与地面碰撞时间为 0.004 s ，忽略空气阻力的影响，小球受到地面的平均冲力为多大？(g 取 10 m/s^2)
- 冲量和功均与力有关，也与过程有关。冲量和功有哪些区别？
- 长为 l 的轻绳，一端固定在水平面上，另一端连着质量为 m 的质点，使质点在水平面上做周期为 T 的匀速圆周运动。在 $\frac{1}{4}T$ 内质点所受绳子拉力的冲量和质点所受重力的冲量分别为多少？
- 某同学打算通过如图 1-13 所示的装置测量小车在水平导轨上受到的摩擦力。图中 A 、 B 分别为位移传感器的发射端和接收端，可测量小车速度大小随时间的变化； C 为力传感器，可测量小车受到的拉力 F 的大小。水平细线一端连接小车上的力传感器，另一端跨过定滑轮连接钩码。钩码由静止释放后，细线带动小车从静止开始在轨道上运动至钩码着地，此后，小车继续沿轨道向前运动一段距离后静止。实验测得的 $F-t$ 图像如图 1-14 (a) 所示，图中 t_2 为小车静止的时刻。



图 1-13

- (1) 在图 1-14 (b) 中画出小车运动的 $v-t$ 图像的大致形状。
(2) 根据牛顿运动定律、动能定理、动量定理均可实现小车所受摩擦力的测量, 测量的方案如何? 分别需要从图像中获取哪些信息? 补全表 1-5。

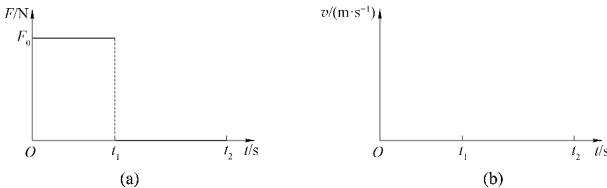


图 1-14

表 1-5

原理	测量的物理量及相应符号	摩擦力与所测物理量的关系
牛顿运动定律		
动能定理		
动量定理		

互作用观念。

主要素养与水平:

运动与相互作用观念
(Ⅱ); 模型建构(Ⅲ)。

4. 参考解答:

冲量是力对时间的累积, 反映物体运动量的变化; 功是力对空间的累积, 反映物体能量的变化。冲量是矢量, 功是标量

命题意图: 通过比较, 建立与原有认知的联系, 有助于建立运动与相互作用的观念。

主要素养与水平:

运动与相互作用观念
(Ⅲ)。

5. 参考解答:

质点做匀速圆周运动的向心力由绳子的拉力提供, 拉力为变力, 用动量定理求其冲量。在 $\frac{1}{4}T$ 内, 动量的大小虽然没变, 但方向转过了 $\frac{\pi}{2}$, 动量变化量的大小为 $2\sqrt{2}\pi \frac{ml}{T}$ 。故绳子拉力的冲量大小为 $2\sqrt{2}\pi \frac{ml}{T}$,

方向与初速度的夹角为 $\frac{3}{4}\pi$ 。重力为恒力, 其冲量为 $G \cdot \Delta t = mg \frac{1}{4}T = \frac{1}{4}mgT$, 方向竖直向下

命题意图: 了解冲量的矢量性, 比较恒力的冲量和变力的冲量。

主要素养与水平: 运动与相互作用观念(Ⅲ); 科学推理(Ⅱ)。

6. 参考解答: (1) 如图 1 所示 (2) 测量方案: 根据题干要求组装实验装置, 获取力 F 随时间变化的图像及对应物体运动速度 v 随时间变化的图像。从 $F-t$ 图像上可获得不同时间内力的大小, 从 $v-t$ 图像上获得相应时间段内的加速度和位移大小

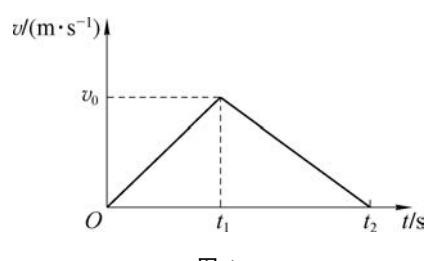


图 1

原 理	测量的物理量及相应符号	摩擦力与所测物理量的关系
牛顿运动定律	小车所受的拉力 F_T 和阻力 F_f , 加速和减速阶段的加速度分别为 a_1 和 a_2	$F_T - F_f = ma_1$, $F_f = F_T - ma_1$; 或 $F_f = ma_2$
动能定理	小车所受的拉力 F_T 和阻力 F_f , 加速和减速阶段的位移分别为 s_1 和 s_2	$F_T s_1 - F_f(s_1 + s_2) = 0$, $F_f = \frac{F_T s_1}{s_1 + s_2}$
动量定理	小车所受的拉力 F_T 和阻力 F_f , 小车加速和减速阶段的时间分别为 t_1 和 $(t_2 - t_1)$	$F_T t_1 - F_f t_2 = 0$, $F_f = \frac{F_T t_1}{t_2}$

命题意图: 根据已有的实验装置,运用不同的规律展开方案设计和分析推理。

主要素养与水平: 运动与相互作用观念(Ⅲ); 科学推理(Ⅲ); 证据(Ⅲ)。

第三节 动量守恒定律

物体间的作用是相互的，作用力与反作用力的冲量会同时引起相互作用物体的动量的变化。几个有相互作用的物体构成一个系统。系统外的物体对系统内物体的作用力称为**外力**(external force)，系统内物体间的相互作用力称为**内力**(internal force)。

在寻找碰撞过程守恒量的实验中，两个相互作用的滑块构成了一个系统，两个滑块碰撞过程中的相互作用即为系统内力。在实验中，滑块在水平方向受到的阻力可以忽略不计，因此系统所受外力的合力为零。实验结果提示我们，系统不受外力，系统内物体动量的矢量和是守恒量。若系统受到外力作用，其动量的矢量和还是守恒量吗？

► 动量守恒定律

两个质量为 m_1 、 m_2 沿同一直线运动的物体构成一个系统。两物体分别受到外力 F_1 和 F_2 的作用，它们之间的相互作用力分别为 $F_{1\text{内}}$ 和 $F_{2\text{内}}$ ，各力的作用时间均为 Δt ；在相互作用的始、末时刻， m_1 的速度为 v_{10} 和 v_1 ， m_2 的速度为 v_{20} 和 v_2 。

以 m_1 为研究对象，其受到 F_1 与 $F_{1\text{内}}$ 的作用，根据动量定理，有

$$(F_1 + F_{1\text{内}})\Delta t = m_1 v_1 - m_1 v_{10}$$

以 m_2 为研究对象，其受到 F_2 与 $F_{2\text{内}}$ 的作用，根据动量定理，有

$$(F_2 + F_{2\text{内}})\Delta t = m_2 v_2 - m_2 v_{20}$$

由牛顿第三定律

$$F_{1\text{内}} = -F_{2\text{内}}$$

由此可得

$$(F_1 + F_2)\Delta t = (m_1 v_1 + m_2 v_2) - (m_1 v_{10} + m_2 v_{20})$$

上式中，等式右边的两项分别为两物体相互作用后与相互作用前的动量之和，即系统末状态和初状态的动量。由此可知，系统动量的变化是受到外力作用的缘故。

如果系统所受到的外力之和为零，即 $F_1 + F_2 = 0$ ，则有 $(m_1 v_1 + m_2 v_2) - (m_1 v_{10} + m_2 v_{20}) = 0$ ，即

$$m_1 v_{10} + m_2 v_{20} = m_1 v_1 + m_2 v_2$$

由此可知，当 m_1 、 m_2 构成的系统所受外力之和为零时，相互作用前、后系统的动量不变。

进一步的研究和实践发现，一个系统，无论包含多少个物体，内力作用有多复杂，如果系统不受外力或所受外力的矢量和为零，系统的动量就保持不变。这个结论称为**动量守恒定律**(law of conservation of momentum)，可表示为

$$p_0 = p \text{ 或 } \Delta p = 0$$

式中， p_0 为系统的初动量， p 为系统的末动量， Δp 为系统动量的变化。

本节运用理论推导和实验验证相结合的方法，得出动量守恒定律。结合物理学史，阐释动量守恒定律的普遍意义。本节内容按以下思路展开：

1. 介绍系统、外力和内力的概念。

2. 以相互作用的两个物体为系统，通过对系统所受外力、内力的分析，演绎推理得出系统的动量守恒定律，并推广到任意多个物体组成的系统，以及可以忽略系统外力影响的情况。

3. 结合物理学史的简介，认识动量守恒定律的普适性，并通过实验验证动量守恒定律。

4. 运用动量守恒定律，分析、解释碰撞、反冲等现象，体会动量守恒定律在解决此类问题中的方法和价值，认识不同类型碰撞的特点。

学习本节内容，将经历推导、实验和应用等过程，有助于学生提高模型建构、科学推理和论证的能力，感悟科学与社会生活及技术之间关系，并增强民族自豪感。

正文解读

12 第一章 动量

[1] 如果碰撞前两球的运动方向不在其球心的连线上,这样的碰撞称为非对心碰撞,简称斜碰。如果碰撞前两球的运动方向在其球心的连线上,这样的碰撞称为对心碰撞,简称正碰。

图 1-15 中,白球、黑球在一个频闪周期内的位移反映了各自在碰撞前、后的速度。

理论和实验都表明,无论正碰还是斜碰,只要碰撞过程中系统所受外力的矢量和远小于内力,且作用时间极短,系统的动量可视为守恒,即碰撞前、后系统中各物体动量的矢量和保持不变。

[2] 根据近代科学的研究,守恒定律源于对称。物理规律的每一种对称性(即不变性)通常都对应着一个守恒量。对称与守恒这两个概念是紧密联系在一起的。有关时间对称对应动量守恒和空间对称对应能量守恒的具体内容,可参见大学物理教材。

除了系统不受外力或所受外力的矢量和为零的情况外,如果系统所受的外力远小于内力且作用时间极短,则可忽略外力的冲量,近似认为系统的动量守恒。

[1] 拓展视野

如图 1-15 所示的频闪照片中,白色台球 A 撞击了原本静止的黑色台球 B。撞击后 A 球改变了运动方向,B 球也由静止开始运动。由于 A、B 两球大小相同、质量相等,碰撞前后 A、B 球的动量仅由其速度决定。用箭头分别表示碰撞前 A 球的动量 p_A 和碰撞后 A、B 两球的动量 p_A' 、 p_B' ,发现碰撞后两球动量的矢量和几乎与碰撞前 A 球的动量相等,即 A、B 两球组成的系统在碰撞前后动量守恒。

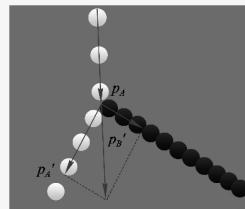


图 1-15 台球碰撞的频闪照片

历史上,科学家围绕“运动的守恒量”展开激烈的争论,最终确立了两个既有联系又有区别的物理量:动量和能量。动量守恒定律和能量守恒定律都是自然界中重要的定律。

[2] ▶ 动量守恒定律的普适性

用牛顿运动定律分析物体运动状态的变化,需要知道物体在整个运动过程中各个时刻的受力细节,这些信息的获取往往非常繁琐,甚至无法直接获得。运用动量守恒定律分析物体运动状态的变化,不涉及具体过程,只考虑始、末两个状态的动量,使问题大大简化。即使不清楚相互作用机制,科学家也可运用动量守恒定律根据已有的事实对物理过程的结果作出一定的推测。

迄今为止,物理学的发展史上还未发现违背动量守恒定律的事例。因此,在分析新的现象或实验结果时,如果发现似乎违背动量守恒定律的情况,物理学家总是提出一些新的假设,使之满足动量守恒的规律,而这些假设往往最终都被新的发现所证实。例如,两个运动的带电粒子在电磁相互作用下动量似乎也不守恒,但当把电磁场的动量引入系统后,动量守恒仍然成立。

目前,物理学的研究范围已经从宏观、低速拓展到微观、高速。牛顿运动定律仅适用于宏观、低速的领域,而动量守恒定律在各种情况下均成立。当物体发生相互作用时,只要系统不受外力或所受外力的矢量和为零,无论物体是黏合在一起还是分裂成碎块;无论物体相互作用前后是否在一条直线上运动,无论作用是接触还是非接触,无论相互作用的物体有多少个,也无论相互作用的性质如何;大到宇宙天体,小到原子、基本粒子,动量守恒定律总是成立的。

► 碰撞现象

碰撞现象广泛存在，如锤子击打钉子，台球间的撞击，足球运动员身体间的合理冲撞，火车车厢间的挂接，对撞机中微观粒子的碰撞等。这类现象中，相互作用情况复杂，力的作用时间短，通常可以从动量的角度加以分析。

- [1] 示例 如图 1-16 所示，在水平冰面上，质量为 m_1 的儿童，以速度 v_0 向右滑行，与质量为 m_2 、静止的成人相撞后一起以相同的速度继续向右运动。求：

- (1) 两人共同运动的速度。
- (2) 在相撞过程中两人组成的系统损失的动能。

分析：相撞时两人组成的系统受到的外力可忽略，动量守恒。

解：以两人组成的系统为研究对象，取水平向右为正方向。碰撞过程中所受外力有重力、支持力和阻力。竖直方向的外力之和为零；水平方向的阻力远小于两人相撞时的水平内力，系统的动量守恒。

- (1) 设两人相撞后共同运动的速度为 v ，由于碰撞过程中系统动量守恒，根据动量守恒定律

$$m_1 v_0 = (m_1 + m_2) v$$

得

$$\begin{aligned} v &= \frac{m_1 v_0}{m_1 + m_2} \\ &= \frac{v_0}{1 + \frac{m_2}{m_1}} \end{aligned}$$

- (2) 系统损失的动能为

$$\begin{aligned} \Delta E_k &= \frac{1}{2} m_1 v_0^2 - \frac{1}{2} (m_1 + m_2) v^2 \\ &= \frac{m_1 m_2 v_0^2}{2(m_1 + m_2)} \\ &= \frac{m_1 v_0^2}{2 \left(\frac{m_1 + m_2}{m_1} \right)} \end{aligned}$$

系统在碰撞前后动量守恒，动能有损失。在物理学中，将这类碰撞称为**非弹性碰撞**（inelastic collision）。与此对照，在物理学中，把碰撞前后动量和动能都不变的碰撞称为**弹性碰撞**（elastic collision）。

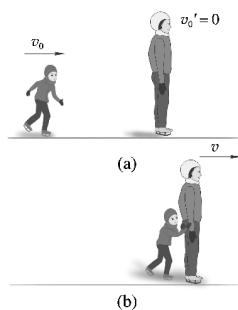


图 1-16 滑冰

[1] 本示例呈现了一个完全非弹性碰撞的情境。运用动量守恒定律分析解决实际问题，只需考虑系统中物体相互作用前、后的动量，不需要考虑相互作用过程中的具体细节。可见，动量守恒定律能解决许多在相互作用过程中不能直接用牛顿运动定律解决的问题。它为我们解决碰撞、反冲等问题提供了方法和思路，具体为：

(1) 确定研究的系统和过程。

(2) 分析系统中各个物体的受力情况，明确哪些是外力，哪些是内力；判断系统是否满足动量守恒的条件或可近似用动量守恒定律处理。

(3) 分析系统中各个物体在过程始、末的运动状态。

(4) 约定正方向，列方程求解，并对结果进行适当的讨论。

[1] 这个装置叫牛顿摆。其运动过程可以看作钢球自左至右依次发生弹性碰撞的过程，在此过程中动量、能量经一次次碰撞由最左边的钢球传递到最右边的钢球。具体分析可见本书第 23 页资料链接。

[2] 此处设置“大家谈”的目的是引导学生通过体会弹性碰撞和非弹性碰撞的特点，感悟科学与现代社会生活的关系。在汽车相撞或追尾时，正是通过车身变形吸收汽车的动能，并使之转化为内能，才避免对车上人员造成严重伤害。

[3] 这是一个让学生利用日常生活中的常见物品和文具，自己动手做一做的活动。目的是让学生从中获得关于反冲现象的直观体验，感受蕴藏在日常生活中的科学原理，为建立反冲概念做铺垫。

[1]



图 1-17 钢球的碰撞装置

[2]

大家谈

行驶中的汽车如果发生迎头相撞或追尾，发动机盖或后备厢盖会严重变形。在设计汽车时，为什么不加强这两处的强度？

▶ 反冲现象

鱿鱼（图 1-18）是海洋中的“游泳健将”，通过向后喷射水流使自身快速向前游动。类似的现象在生活中还有很多。



图 1-18 鱿鱼

[3] 自主活动

如图 1-19 所示，用夹子稍稍夹住笔的尾部，置于桌面上，轻轻敲击桌面，夹子会与笔分离。观察夹子与笔分离时会怎样运动。



图 1-19 夹子与笔的分离



图 1-20 火箭的发射

系统在内力作用下向某一方向发射部分物质，从而使系统的剩余部分向相反方向运动的现象，称为反冲（recoil）现象。

如图 1-20 所示，火箭的发射也利用了反冲现象。火箭携带的燃料燃烧后产生气体，这些高温、高压的气体以很大的速度从尾部向后喷出，将火箭推向前方。1970 年，“长征一号”火箭把我国第一颗人造卫星“东方红一号”送入了预定轨道；1990 年，“长征二号”捆

绑式大推力火箭发射成功，表明我国具有了发射重型卫星的能力；2018年，“长征三号乙”运载火箭搭载“嫦娥四号”探测器开启了月球背面探测的新旅程。2020年，“长征五号遥四”运载火箭搭载“天问一号”发射成功，迈出了我国自主开展行星探测第一步。

与碰撞类似，在发生反冲的过程中系统两部分间相互作用的内力往往远大于系统所受的外力，系统动量通常是守恒的。

[1]

学生实验**验证动量守恒定律****提出问题**

相互作用的物体构成的系统，在所受外力的矢量和为零的条件下动量守恒。如何通过实验来验证这一结论？

实验原理与方案

两个物体相互作用的过程中，若系统外力可以忽略，相互作用前、后系统的动量守恒。

只研究最简单的一维情况（即两个物体碰撞前后均沿同一直线运动）。实验中需测量运动物体的质量，以及它们相互作用前、后的速度，验证系统动量是否保持不变。

实验装置与方法

实验装置如图1-21所示，所需的实验器材为：平直轨道，两辆一端装有弹性圈、一端装有尼龙搭扣的小车，配重片若干，光电门传感器2个。

尽量减小小车所受的阻力，通过增减配重片改变小车的质量，利用光电门传感器测量相互作用前、后两小车的速度大小。



图1-21 验证动量守恒的实验装置

实验操作和数据收集

在水平轨道的合适位置安装光电门传感器，使其能准确测量小车的速度大小。

第一次实验：将两小车置于轨道上，装有弹性圈的一端相对。使两小车相互靠近压缩弹性圈，并由静止同时释放。

第二次实验：将两小车置于轨道上，装有尼龙搭扣的一端相对。保持其中的一辆小车静止，另一辆小车以合适的速度向静止小车运动。

多次实验并在表1-6中记录两小车的质量和相互作用前、后小车的速度大小。

[1] 这是一个课标

规定的“学生实验”，目的在于通过实验验证相互作用的两个物体组成的系统在作用前、后动量的矢量和保持不变。

本实验中，小车在初始状态时与光电门传感器的相对位置对实验结果的影响很大，实验中应对此加以关注。关于本实验的具体讨论或说明可见物理实验与活动部分。

问题与思考解读

1. 参考解答: (a) A、B 组成的系统动量不守恒,理由是:在 A、B 相互作用的时间内,竖直墙壁对 A 有水平方向的作用力,A、B 组成的系统动量不守恒。A、B 组成的系统动能不变 (b) A、B 组成的系统动量守恒,理由是:在相互作用的过程中 A、B 组成的系统所受外力为零,动量守恒。A、B 组成的系统动能变化,理由是:A 和 B 原来静止,即人和车的总动能为零,运动后,A、B 动能均不为 0,总动能变大 (c) A、B 组成的系统动量不守恒,理由是:在相互作用的过程中,地面对木板 B 有水平方向的作用力,A、B 组成的系统动量不守恒。A、B 组成的系统动能变化,理由是:A、B 间的摩擦力做功,将 A、B 系统的动能转化为内能,A、B 组成的系统动能减少

命题意图:通过对简单情境的分析,理解动量守恒的条件。

主要素养与水平:
物理观念(Ⅱ);科学推理(Ⅱ)。

2. 参考解答: 弹簧由压缩到恢复原长的过程中,A 物体始终位于原处,B 物体在弹簧弹力作用下做加速运动。如果地面光滑,则由于 A 受到墙的作用,即 A、B 组成的系统受到外力作用,动量不守恒。在此过程中,A 的动能始终为零,B 的动能增加,物体 A、B 和弹簧组成的系统动能增加。且在此过程中仅有弹力对 B 做功,物体 A、B 和弹簧组成的系统机械能守恒。如果地面不光滑,释放前,物体 A、B 和弹簧组成的系统动量为 0,释放后到弹簧恢复原长的过程中的任意时刻,由于 A 始终静止、B 具有向右运动的速度,物体 A、B 和弹簧组成的系统动量不为 0,因此动量不守恒。同时,由于有摩擦力对 B 做功,故物体 A、B 和弹簧组成的系统的机械能也不守恒。

提示:本问题也可根据 $F = kx$ 画出能量与弹簧形变量大小之间的关系图像来反映能量的变化。

命题意图:通过同一实例,分析并判断动量和机械能是否守恒,动能是否不变,理解守恒的条件。

主要素养与水平:运动与相互作用观念(Ⅲ);科学推理(Ⅱ)。

16 第一章 动量

表 1-6 实验数据记录表

小车 A 的质量 $m_A = \underline{\hspace{2cm}}$ kg, 小车 B 的质量 $m_B = \underline{\hspace{2cm}}$ kg

实验序号	相互作用前		相互作用后	
	小车 A 速度 $v_{A0}/(\text{m}\cdot\text{s}^{-1})$	小车 B 速度 $v_{B0}/(\text{m}\cdot\text{s}^{-1})$	小车 A 速度 $v_A/(\text{m}\cdot\text{s}^{-1})$	小车 B 速度 $v_B/(\text{m}\cdot\text{s}^{-1})$
1				
2				
3				
4				

数据分析

利用表中的数据,分别计算并比较相互作用前、后两小车的动量以及两小车动量的矢量和。

实验结论

交流与讨论

交流各组所得数据和结论。讨论其他实验方案。

问题与思考

1. 在如图 1-22 所示的三种情境中,A 和 B 组成的系统动量是否守恒? 动能是否变化? 简述理由。

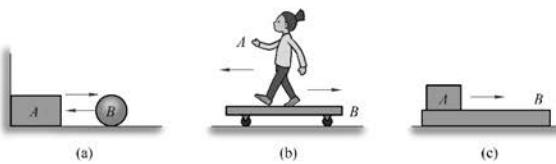


图 1-22

- (a) 小球 B 与靠在墙角的物体 A 碰撞后以同样大小的速度弹回。
(b) 人 A 在小车 B 上突然行走,小车后退(忽略小车与地面间的摩擦力)。
(c) 木块 A 在木板 B 上滑动,木块与木板、木板与地面之间的接触面均粗糙。

2. 如图 1-23 所示,A、B 两物体连接在轻质弹簧两端。弹簧压缩后由静止释放 B 物体。分析说明弹簧由压缩状态到恢复原长的过程中,A、B 和弹簧



图 1-23

组成的系统动量和动能如何变化？在此过程中系统的机械能是否守恒？

3. 如图 1-24 所示，光滑水平面上有大小相同的 A、B 两球在同一直线上同向运动，A 球的质量为 B 球的一半。取向右为正方向，A、B 两球的动量均为 $6 \text{ kg} \cdot \text{m/s}$ ，运动中两球发生碰撞。如果碰撞后 A 球的动量变化量为 $-4 \text{ kg} \cdot \text{m/s}$ ，则 B 的动量变化量是多少？碰撞后 A、B 的动量分别为多少？
4. 如图 1-25 所示，甲、乙两个小朋友各乘一辆冰车在水平冰面上游戏，甲与他的冰车总质量 $m_{\text{甲}}=30 \text{ kg}$ ，乙与他的冰车总质量 $m_{\text{乙}}=30 \text{ kg}$ 。游戏时甲推着一个质量 $m=15 \text{ kg}$ 的箱子和他一起以大小为 2 m/s 的速度 v_0 滑行，乙以同样大小的速度迎面滑来。为了避免相撞，甲突然将箱子沿冰面推给乙，箱子滑到乙处时乙迅速把它抓住。分析说明这样做是否一定能避免相撞，为什么？（忽略冰面的摩擦）
5. 质量为 m 的小球 A 以速度 v_0 碰撞质量也为 m 的静止小球 B。碰撞后 B、A 两球的速度之差为 $\frac{3}{4}v_0$ 。碰撞后，A、B 的速度大小分别为多少？两球的机械能损失了多少？
6. 小球 A 以速度 v_0 与另一个静止小球 B 发生碰撞，两个球的质量相等。碰撞后两球的运动方向与 v_0 的方向在同一直线上。仅根据动量守恒定律，两球碰撞后的速度可能为：① $v_A=0, v_B=v_0$ ；② $v_A=\frac{v_0}{2}, v_B=\frac{v_0}{2}$ ；③ $v_A=\frac{2}{3}v_0, v_B=\frac{1}{3}v_0$ ；④ $v_A=-v_0, v_B=2v_0$ 。分析哪几组结果是可能的。



图 1-24



图 1-25

3. 参考解答：

A、B 两球组成的系统在碰撞过程中水平方向没有受到外力作用，系统动量守恒。碰撞后，两球的总动量不变。碰撞中，A 球的动量变化了 $-4 \text{ kg} \cdot \text{m/s}$ ，B 球的动量变化了 $4 \text{ kg} \cdot \text{m/s}$ ，A 球的动量由 $6 \text{ kg} \cdot \text{m/s}$ 变化了 $-4 \text{ kg} \cdot \text{m/s}$ ，即末动量为 $2 \text{ kg} \cdot \text{m/s}$ ，方向向右；B 球的动量由 $6 \text{ kg} \cdot \text{m/s}$ 变化了 $4 \text{ kg} \cdot \text{m/s}$ ，即末动量为 $10 \text{ kg} \cdot \text{m/s}$ ，方向向右。

提示：初始状态 A、B 两球动量相等，A 球质量较小，速度较大，追上 B 球与其相碰，A 球减速，B 球加速。可以从碰撞前后 A、B 两球的动能是否合理的角度引导对结果的思考。

命题意图：从动量的变化量的角度运用动量守恒定律。

主要素养与水平：
科学论证（Ⅱ）。

4. 参考解答：

忽略冰面的摩擦，根据动量守恒定律，甲推箱子和乙接箱子两个过程均符合动量守恒的条件。甲推出箱子，甲的动量减小，速度减小。乙接到箱子，乙的动量也减小。若能使乙的动量反向，且比甲的动量大，则甲和乙均向右运动，甲的速度小于乙的速度，甲和乙不会相碰。

取向右方向为正方向，根据动量守恒定律，以甲和箱子为研究对象，设甲以速度 v 将箱子推出，推出箱子后甲的速度为 $v_{\text{甲}}$ ，则 $(m_{\text{甲}}+m)v_0=m_{\text{甲}}v_{\text{甲}}+mv$ 。以乙和箱子为研究对象，设乙接到箱子后的速度为 $v_{\text{乙}}$ ， $mv-m_{\text{乙}}v_0=(m+m_{\text{乙}})v_{\text{乙}}$ 。当 $v_{\text{甲}}=v_{\text{乙}}$ 时，甲与乙恰好不相撞，解得 $v=5.2 \text{ m/s}$ ，即甲若能以相对于地面不小于 5.2 m/s 的速度将箱子推出，甲、乙就不会相撞。

提示：结合实际情况，对该结果可进一步思考，假如甲不能使箱子具有 5.2 m/s 的速度，则可以在甲、乙之间多次推动箱子，来实现甲、乙两人不相撞。

命题意图：在定性分析的基础上做定量计算。

主要素养与水平：运动与相互作用观念(Ⅲ);科学论证(Ⅲ)。

5. 参考解答： A 、 B 两球组成的系统,碰撞时不受外力作用,动量守恒。设碰撞后 A 球的速度为 v_A , B 球的速度为 v_B ,以 A 球初始方向为正方向,根据动量守恒定律, $mv_0+0=mv_A+mv_B$,由题意得: $v_B-v_A=\frac{3}{4}v_0$,解得 $v_B=\frac{7}{8}v_0$, $v_A=\frac{1}{8}v_0$,方向均与 v_0 同向。碰撞前, A 、 B 两球的机械能 $E_1=\frac{1}{2}mv_0^2$, 碰

撞后, A 、 B 两球的机械能 $E_2=\frac{1}{2}mv_A^2+\frac{1}{2}mv_B^2=\frac{1}{2}m\left(\frac{1}{8}v_0\right)^2+\frac{1}{2}m\left(\frac{7}{8}v_0\right)^2=\frac{25}{64}mv_0^2$, 机械能的变化量 $\Delta E=E_2-E_1=\frac{25}{64}mv_0^2-\frac{1}{2}mv_0^2=-\frac{7}{64}mv_0^2$, 即两球的机械能损失了 $\frac{7}{64}mv_0^2$

命题意图：从动量和能量两个视角分析碰撞的过程,为下一个问题做准备。

主要素养与水平：运动与相互作用观念(Ⅲ);解释(Ⅱ)。

6. 参考解答：四组数据均满足动量守恒,①碰撞后,总动能不变,可能发生;②碰撞后,总动能变小,可能发生;③碰撞后, A 物体的速度可能与 B 速度同方向,但不可能大于 B 的速度,不可能发生;④碰撞后,总动能增大,不可能发生

命题意图：从动量和动能两个视角判断碰撞发生的可能性。

主要素养与水平：运动与相互作用观念(Ⅲ)。

资料链接

外力和内力对系统动量的影响

设系统由 N 个物体构成,以下标 $i(i=1, 2, 3, \dots, N)$ 标记各个物体。第 i 个物体所受的外力和内力分别以 $\mathbf{F}_{i\text{外}}$ 和 $\mathbf{F}_{i\text{内}}$ 表示,则第 i 个物体满足的动量定理为: $(\mathbf{F}_{i\text{外}}+\mathbf{F}_{i\text{内}})\Delta t=m_i \mathbf{v}_i-m_i \mathbf{v}_{i0}$ 。共有 N 个这样的方程,将这些方程相加可得 $\sum_{i=1}^N (\mathbf{F}_{i\text{外}}+\mathbf{F}_{i\text{内}})\Delta t=\sum_{i=1}^N m_i \mathbf{v}_i-\sum_{i=1}^N m_i \mathbf{v}_{i0}$ 。由于系统中物体间相互作用的内力总是成对出现,其矢量和为零,由此可得 $\sum_{i=1}^N \mathbf{F}_{i\text{外}}\Delta t=\sum_{i=1}^N m_i \mathbf{v}_i-\sum_{i=1}^N m_i \mathbf{v}_{i0}$, 即 $\mathbf{F}_{\text{合}}\Delta t=m\left(\sum_{i=1}^N m_i \mathbf{v}_i-\sum_{i=1}^N m_i \mathbf{v}_{i0}\right)=m \mathbf{v}_c-m \mathbf{v}_{c0}$ 。这就是系统动量定理,式中 $m=\sum_{i=1}^N m_i$ 为系统总质量, \mathbf{v}_c 为系

统质心速度。因此,内力对系统动量的改变没有影响,系统动量的改变由系统所受外力矢量和的冲量决定。

为说明内力的作用,可以考虑系统内物体均不受外力的情况,在此情况下系统动量守恒。但如果系统内物体间存在内力,则对第 i 个物体而言,由动量定理有 $\mathbf{F}_{i\text{内}}\Delta t=m_i \mathbf{v}_i-m_i \mathbf{v}_{i0}$, 该物体的动量将发生变化。这意味着虽然系统总动量保持不变,但只要存在内力作用,系统内每个物体的动量仍将发生变化。内力的作用效果,是使系统中相互作用的物体间发生动量的转移和传递。

散射——微观粒子间的碰撞

对心碰撞和非对心碰撞,都是针对宏观物体之间通过直接接触发生碰撞而言的。物理学家经常利用高速运动的粒子与物质中的原子、原子核等碰撞,通过研究碰撞前后入射粒子和被碰粒子运动状态的改

变,获得关于物质微观结构的认识。与宏观物体之间的碰撞不同的是,微观粒子之间的碰撞并不直接接触,因此微观粒子之间的碰撞又称为散射。在原子、原子核和基本粒子领域,通过运用动量守恒和能量守恒研究微观粒子之间的碰撞,获得了多项关于物质微观结构的重大发现。其中为我们熟知的著名案例有:卢瑟福(E. Rutherford, 1871—1937)通过 α 粒子散射实验发现了原子的核式结构(图2);查德威克(J. Chadwick, 1891—1974),利用 α 粒子碰撞铍的实验发现了中子。

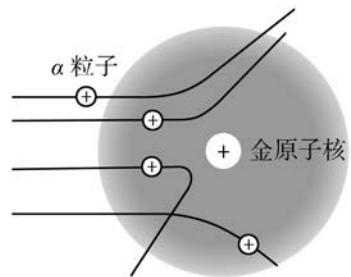


图 2

牛顿摆的具体分析

教材图1-17中,小球自左向右依次编号为1、2、3、4、5。拉起球1由静止释放,下摆后以水平速度 v 入射。由于球1与球2的碰撞过程极其短暂,不计球2向右的位置变化。以球1、2为系统,在两球碰撞的极短时间内,除两球相互碰撞的内力外,在水平方向不受球3的作用,忽略空气阻力,球1、2组成的系统动量守恒。同时可以认为碰撞过程挤压阶段的形变在恢复阶段得到了完全恢复,即两球做弹性碰撞。因此,碰撞前、后两球总动能不变。设每个球的质量均为 m ,球1、2碰后速度分别为 v_1 、 v_2 ,则可列式如下:

$$mv = mv_1 + mv_2$$

$$\frac{1}{2}mv^2 = \frac{1}{2}mv_1^2 + \frac{1}{2}mv_2^2$$

联立两式可得: $v_1 = 0$, $v_2 = v$ 。

结果表明,碰后球1静止,球2获得球1入射的速度,即两球从碰前到碰后恰好交换速度。然后,球2以速度 v 与球3碰撞,并与之交换速度……,直到球5获得速度 v 并向上摆动到与球1释放点相同的高度。

火箭飞行原理

火箭反冲的速度,可以应用动量守恒定律进行计算。考虑火箭在上升过程中某一段时间 Δt ,如图3所示,设喷气前火箭及所携带燃料的总质量为 m ,初速度为 v_0 , Δm 为 Δt 时间内喷出的气体质量($\Delta m < 0$),喷出的气体速度为:

$$v' = v - u$$

式中 v 为喷气后火箭的速度, u 为气体相对于喷气后火箭的速度。

忽略火箭所受重力的冲量,由动量守恒定律:

$$mv_0 = (m + \Delta m)v + (-\Delta m) \cdot v'$$

解得

$$\Delta v = -\frac{\Delta m}{m}u$$

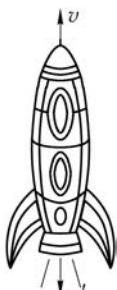


图 3

如果把此式改为微分形式,并进行积分就可得到大家熟悉的结果:

$$v = u \ln \frac{M_0}{M}$$

其中 M_0 是火箭原始总质量, M 是喷气全部结束时的火箭质量。

这个结果表明,火箭发动机的喷气速度越大,喷出的燃气质量与火箭喷气前总质量之比越大,火箭反

冲获得的速度就越大。

现代火箭发动机的喷气速度已经达到 $2\ 000\sim4\ 000\text{ m/s}$,短期内很难大幅提高。因此,要提高火箭的速度,就需要减轻火箭本身的质量。但是,为确保火箭结构的强度,一般要把火箭起飞时的总质量与除燃料外的箭身质量之比设计在10以下。这就意味着,靠减轻火箭本身的质量来提高火箭的速度是有限的,达不到发射人造卫星所需要的 7.9 km/s 的要求。为解决这个问题,齐奥尔科夫斯基(Константин Эдуардович Циолковский,1857—1935)首先提出了液体燃料多级火箭的理论。根据这个理论,每一级火箭的燃料用完后,箭体就自动脱落,这样就可以将火箭的反冲速度提高到很大。

在齐奥尔科夫斯基理论的基础上,现代运载火箭技术得到了长足的发展。我国自1956年建立专门的航天研究机构到现在,运载火箭技术获得了迅速的发展。1964年6月,我国自行设计研制的运载火箭首次发射升空。1970年4月24日,我国第一颗人造卫星发射成功。我国的大型系列运载火箭以“长征”命名,圆满完成了各种卫星的发射任务,成功实现了载人航天和探测器在月球着陆。2016年11月3日,我国研制成功的大推力运载火箭“长征五号”在文昌航天发射场首飞成功,标志着我国火箭技术已经跨入世界先进行列。2020年,“长征五号遥四”运载火箭搭载“天问一号”发射成功,迈出了我国自主开展行星探测第一步。

学期 活动

[1] 设计并完成一个测量反冲物体所受冲力的实验。

在反冲现象中，物体通过以一定速度发射部分的物质而实现反向的加速运动。在此过程中，物体会受到冲力的作用。如何测量这个力？以初中曾经制作过的靠向后喷射水流飞行的“水火箭”为例，设计一个方案，测量“水火箭”持续喷出水流时，水流对火箭作用力随时间的变化。估算“水火箭”的最大速度（选做）。

活动要求：

- (1) 制定实验方案和测量方法，说明使用的主要器材和配件。
- (2) 通过实验得到作用力随时间变化的数据。
- (3) 根据阅读材料提供的信息和实验数据，估算水火箭的最大速度。（选做）
- (4) 完成实验报告，互相交流、评价。
- (5) 实验过程中注意安全。

阅读材料：

火箭由火箭本体（火箭箭体、载荷等）和所携带的燃料构成。火箭发射时，燃料在燃烧室中燃烧，产生高温高压气体并通过喷口喷出，同时对火箭施加一个推力。由动量定理可以推得，火箭受到的推力大小 $F_{推} = u \frac{\Delta m}{\Delta t}$ ，式中 $\frac{\Delta m}{\Delta t}$ 为单位时间喷出气体的质量， u 是气体相对火箭的喷射速度，其大小对于确定型号的火箭发动机而言是确定的。

如果火箭仅在推力作用下运动，发射前火箭与燃料总质量为 m_0 ，火箭本体质量为 m ，当燃料耗尽时，火箭的最终速度可通过理论计算得到，其大小为 $v_t = u \ln \frac{m_0}{m}$ 。

[1] 这是一个小组合作活动，要求设计方案，测量反冲物体所受冲力随时间的变化情况。活动时，可选用“水火箭”为对象。方案应该包括测量的原理、选用的器材和测量方法、所测数据及处理结果的呈现方式，以及主要步骤。

对于有兴趣的同学来说，可以根据所制订的方案开展实验，于学期结束前在班内进行展示交流。

小结

· 基本概念和基本规律

动量: 物体质量与速度的乘积, 用符号 p 表示。动量是矢量。

冲量: 作用力 F 与其作用时间 Δt 的乘积, 用符号 I 表示。冲量是矢量。

动量定理: 物体动量的变化量等于其所受合力的冲量。

动量守恒定律: 如果系统不受外力或所受外力的矢量和为零, 系统的总动量保持不变。

弹性碰撞: 碰撞前后系统动量保持不变的同时, 动能也保持不变的碰撞。

非弹性碰撞: 碰撞前后系统动量保持不变的同时, 动能有损失的碰撞。

反冲: 系统在内力作用下向某一方向发射部分物质, 从而使系统的剩余部分向相反方向运动的现象。

· 基本方法

通过寻找守恒量的实验分析, 认识应用实验数据处理、分析和提取证据的方法。

经历由牛顿运动定律推导得出动量定理的过程, 感受演绎推理的方法。

通过探究动量守恒定律, 运用演绎推理和实验验证结合的方法。

· 知识结构图



复习与巩固

- 如图 1-26 所示, 小球用不可伸长的轻绳悬挂在 O 点, 将小球拉紧从 A 点由静止释放, 小球向下摆动至最低点 B 。在此过程中, 根据动能定理, 小球重力做的功等于动能的变化量, 即 $W = \Delta E_k$ 。由此, 有同学认为, 小球重力的冲量 I 与小球动量的变化量 Δp 之间也满足类似关系, 即 $I = \Delta p$ 。试对此说法作出评析。
- 从平台上以相同的速率抛出小球, 第一次竖直向上抛出, 第二次水平抛出。忽略空气阻力的影响, 比较小球两次落地瞬间的动量, 以及两次运动过程中小球所受合力的冲量。
- 在光滑的绝缘水平面上, 有两个相距一定距离的带电小球 A 、 B 。它们的质量分别为 m_1 、 m_2 , 带有等量电荷。
 - 静止释放两小球, 分析两球组成的系统动量是否守恒。
 - 若在空间加一沿水平方向的匀强电场, 静止释放后两球组成的系统动量是否守恒?
- 物体以初速度 v_0 竖直向上抛出, 落回抛出点时的速度为 v_t , 运动过程中物体所受的阻力与其速度成正比。画出物体从抛出到落回抛出点过程中的 $v-t$ 图像。在此过程中阻力的冲量为多少? 物体从抛出到落回抛出点的时间为多少?
- 蹦极运动员离开跳台时的速度为零。将运动员离开跳台到弹性绳刚好被拉直的过程视为第一阶段, 将弹性绳刚好被拉直到运动员下降至最低点的过程视为第二阶段。分析比较第一阶段中运动员所受重力的冲量和第二阶段中运动员所受弹性绳拉力的冲量的大小。(忽略空气阻力)
- 水平面上有质量相等的 a 、 b 两个物体, 均处于静止状态。水平推力 F_1 、 F_2 分别作用在 a 、 b 上, 作用一段时间后撤去推力。撤去推力后, 两物体继续运动一段距离, 先后停下。两物体由静止起运动到停止的 $v-t$ 图像如图 1-27 所示, 图中 AB 段与 CD 段平行。分析比较 F_1 与 F_2 的大小, 以及 F_1 的冲量与 F_2 的冲量的大小。
- 质量为 m_1 的火箭搭载质量为 m_2 的卫星, 以速率 v_0 进入太空中的预定位置后两者分离。星箭分离前, 卫星位于火箭箭体前端。星箭分离后, 箭体以速率 v_2 沿原方向运动, 估算星箭分离后卫星的速率 v_1 。

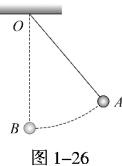


图 1-26

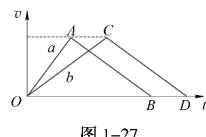


图 1-27

相同速率竖直上抛和水平抛出, 竖直上抛后经过更长的时间 t 才会落地, 故所受合力的冲量 mgt 更大

命题意图: 分析比较两种相似的抛体运动, 理解动量的矢量性, 体会求恒力冲量的方法。

主要素养与水平: 模型建构(Ⅱ); 科学推理(Ⅱ)。

3. 参考解答: (1) A 、 B 两球在光滑水平面上由静止释放, 在水平方向上两球仅受相互间库仑力的作用, 不受其他外力, 则 A 、 B 两球组成的系统动量守恒 (2) 若在空间加一沿水平方向的匀强电场, A 、 B 均受到大小相等的水平电场力作用。若 A 、 B 带等量同种电荷, 它们所受电场力方向相同, 两球组成的系统所受水平外力不为零, 两带电小球组成的系统动量不守恒。若 A 、 B 带等量异种电荷, 它们所受电场力方向相反, 两球组成的系统所受水平外力为零, 两带电小球组成的系统动量守恒

命题意图: 分情况讨论, 从多个视角分析物理问题。

1. 参考解答: 小球在摆动过程中, 除了重力, 还受到绳子拉力的作用, 重力的冲量不等于合力的冲量。动量的变化量等于合力的冲量。故重力的冲量不等于小球动量的变化量

命题意图: 从动能的变化和动量的变化两个角度分析常见的运动, 厘清引起变化的原因。

主要素养与水平: 物理观念(Ⅲ)。

2. 参考解答: 小球运动过程中, 忽略空气阻力的影响, 仅受重力作用。根据动能定理知, 小球的两次运动过程中, 重力做功相等, 动能的变化量相等。因初动能相等, 故小球两次落地时动能相等。小球两次落地瞬间, 虽然速度大小相等, 但是速度方向不同, 故动量方向不同, 即落地时动量不同。小球从同一位置以

主要素养与水平：

质疑(Ⅱ)。

复习与巩固 (21)

4. 参考解答：取

向上为正方向。物体所受的阻力用 $F_{\text{阻}} = kv$ 表示。根据牛顿第二定律，上升阶段物体的加速度

$$a_1 = \frac{G + F_{\text{阻}}}{m} =$$

$$g + \frac{kv}{m}, \text{ 物体做加速度}$$

减小的减速运动。下降段物体的加速度 $a_2 =$

$$\frac{G - F_{\text{阻}}}{m} = g - \frac{kv}{m}, \text{ 物体}$$

做加速度减小的加速运动。物体从抛出点上升到落回抛出点的 $v-t$ 图像如图 4 所示，图线与时间轴所围的两部分的面积大小相等，说明物体从抛出到返回抛出点过程的位移为 0。

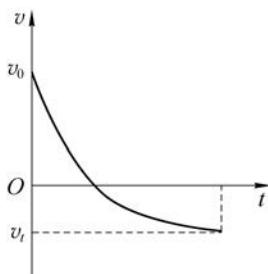


图 4

由于 $F_{\text{阻}}$ 的方向始终与速度 v 的方向相反，且 $F_{\text{阻}} = kv$ ，因此阻力随时间变化的 $F_{\text{阻}}-t$ 图像与 $v-t$ 图像相似，与时间轴所围的两部分面积大小也相等，可以互相抵消。说明物体从抛出到返回抛出点的过程中 $F_{\text{阻}}$ 的冲量 $I_{\text{阻}}$ 为 0。根据动量定理，物体从抛出到返回抛出点的过程中，合力的冲量 $I = I_G + I_{\text{阻}}$ ， $I_{\text{阻}} =$

$$0, I = I_G = -mgt = -mv_t - mv_0, \text{ 可得时间 } t = \frac{mv_t + mv_0}{mg} = \frac{v_t + v_0}{g}$$

命题意图：综合应用牛顿运动定律和动量定理，从图像中发现规律，并应用类比推理建立物理量的特征，得到结论。

主要素养与水平：科学推理(IV)；解释(III)。

5. 参考解答：在运动员下落的整个过程中，若忽略空气阻力，只有重力和弹性绳拉力有冲量。第一

8. 如图 1-28 所示为沿同一直线运动的 A、B 两小球碰撞前后的 $x-t$ 图像。其中直线 a、b 分别为小球 A、B 碰撞前的 $x-t$ 图线，直线 c 为碰撞后两球的 $x-t$ 图线。根据图中的信息描述 A、B 两小球碰撞前后的运动情况。若 A 球质量为 1 kg，则 B 球质量为多少？

9. 如图 1-29 (a) 所示，气垫导轨上两个静止的滑块 A、B 之间放有一根被压缩的轻质弹簧，两个滑块用绳子连接。将绳子烧断后，两个滑块向相反方向运动，运动过程中的频闪照片如图 1-29 (b) 所示。已知频闪的频率为 10 Hz，滑块 A、B 的质量分别为 200 g、300 g。根据照片记录的信息，问：

10 9 8 7 6 5 4 3 2 1 cm

(a)

10 9 8 7 6 5 4 3 2 1 cm

(b)

图 1-29

- (1) 绳子烧断且 A、B 离开弹簧后，A、B 分别做什么样的运动？运动速度分别为多大？
 (2) 绳子烧断后 A、B 的动能如何变化？总动能是否不变？
 (3) 绳子烧断后 A、B 的动量如何变化？总动量是否守恒？

10. 如图 1-30 所示，在光滑水平面的左侧固定一竖直挡板，A 球静止在水平面上，B 球向左运动并与 A 球发生碰撞，碰撞前后 A、B 均沿同一直线运动。

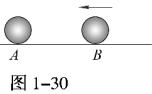


图 1-30

B 球碰撞前、后的速率之比为 3:1，A 球垂直撞向挡板，相撞后以原速率返回，两球刚好不发生第二次碰撞。分析两球的质量关系。

11. 一艘宇宙飞船垂直于飞行方向的横截面积为 S ，以恒定的速率 v_0 航行，进入一个具有宇宙尘埃的区域。设该区域内单位体积有 n 颗尘埃，每颗尘埃的质量为 m ，尘埃碰到飞船前是静止的，碰到飞船后黏附其上。在忽略其他阻力的情况下，飞船为保持匀速航行，发动机需提供大小为 nmv_0^2S 的牵引力，试写出推导这一表达式的过程。

12. 质量为 m_0 的人乘坐质量为 m 的气球，静止于离地 h 高处。如果从气球上放下一个质量不计的软梯，让人沿软梯匀速降到地面，则软梯至少需多长。

阶段的初速度和第二阶段的末速度都为零,动量变化量为零,根据动量定理,总冲量为零。因此,重力对运动员的总冲量大小等于弹性绳拉力的冲量大小。第一阶段和第二阶段都有重力作用,弹性绳拉力仅在第二阶段作用,所以第一阶段重力的冲量应小于第二阶段弹性绳拉力冲量的大小

命题意图:从局部与整体两个视角展开分析,描述推理的过程,不需要用物理量符号来表示关系式,也不需要通过关系式来判断。

主要素养与水平:运动与相互作用观念(Ⅱ)。

6. 参考解答:图1-27中AB与CD平行,说明撤去推力后两物体的加速度相同,而撤去推力后物体的合力等于摩擦力 F_f ,根据牛顿第二定律可知,两物体受到的摩擦力 F_f 大小相等。在加速过程中,a物体的加速度大于b物体的加速度,由牛顿第二定律 $F - F_f = ma$ 可知,a物体所受的推力 F_1 大于b物体所受的推力 F_2 ;由图1-27可知,a的运动时间小于b的运动时间,根据 $I_f = F_f \Delta t$ 可知,摩擦力对a物体的冲量小于摩擦力对b物体的冲量。根据动量定理,推力的冲量大小等于摩擦力的冲量大小,所以 F_1 的冲量小于 F_2 的冲量

命题意图:从图像上获取信息,从总体和局部分析、比较,解释结论。

主要素养与水平:解释(Ⅲ)。

7. 参考解答:以火箭和卫星为系统,在太空中系统不受外力,总动量守恒。以分离前的运动方向为正方向,则 $(m_1 + m_2)v_0 = m_1v_2 + m_2v_1$,得 $v_1 = \frac{m_1(v_0 - v_2) + m_2v_0}{m_2}$

命题意图:判断动量守恒的条件,用动量守恒定律解决问题,用给定的符号来表述和交流。

主要素养与水平:运动与相互作用观念(Ⅱ)。

8. 参考解答: $x-t$ 图像的斜率表示速度,则碰撞前A球的速度 $v_1 = \frac{\Delta x}{\Delta t} = \frac{4-10}{2} \text{ m/s} = -3 \text{ m/s}$,B球的速度为 $v_2 = \frac{\Delta x}{\Delta t} = \frac{4-0}{2} \text{ m/s} = 2 \text{ m/s}$,碰撞后两球一起运动,速度 $v = \frac{\Delta x}{\Delta t} = \frac{2-4}{2} \text{ m/s} = -1 \text{ m/s}$ 。根据动量守恒定律,有 $m_Av_1 + m_Bv_2 = (m_A + m_B)v$,解得 $m_B = \frac{m_Av - m_Av_1}{v_2 - v} = \frac{1 \times (-1) - 1 \times (-3)}{2 - (-1)} \text{ kg} \approx 0.67 \text{ kg}$

命题意图:读图,构建运动情境,用动量守恒定律解决问题时要关注动量的矢量性。

主要素养与水平:模型建构(Ⅲ);解释(Ⅲ)。

9. 参考解答:(1)由图可知,每个滑块在相等时间内通过的位移相等,所以离开弹簧后两滑块分别做匀速直线运动。A、B滑块的速度大小分别为: $v_A = \frac{\Delta x_A}{\Delta t} = 0.09 \text{ m/s}$, $v_B = \frac{\Delta x_B}{\Delta t} = 0.06 \text{ m/s}$ (2)释放弹簧前,两滑块均处于静止状态,总动能为0。释放弹簧后,两滑块均由静止变为运动,两滑块的动能均变大。由于动能是标量,虽然两滑块运动方向相反,但总动能不为0。因此释放弹簧后,两滑块总动能增加,由弹簧的弹性势能转化而来(3)释放弹簧前,两滑块均处于静止状态,总动量为0。释放弹簧后,两滑块均由静止变为向相反方向运动,两滑块动量大小变大。以水平向右为正方向,两滑块动量的矢量和 $m_Av_A + m_Bv_B = [0.2 \times 0.09 + 0.3 \times (-0.06)] \text{ kg} \cdot \text{m/s} = 0 \text{ kg} \cdot \text{m/s}$,因此总动量守恒

命题意图:从频闪照片中获取物体的运动情况,做出合理的推理。

主要素养与水平:解释(Ⅱ);科学论证(Ⅲ)。

10. 参考解答:取向左为正。由于B球碰撞前、后的速率之比为3:1,设碰撞前,B球的速度为 v_0 ,

则碰撞后, B 球的速率是 $\frac{1}{3}v_0$ 。因 A 球与挡板碰撞后以原速率返回, 两球刚好不发生第二次碰撞。所以碰撞挡板后 A 球的速度与两球相撞后 B 球的速度方向相同、大小相等, 都是 $-\frac{1}{3}v_0$ 。 B 撞 A , A 、 B 组成的系统在水平方向上不受其他外力, 由动量守恒定律, 得 $m_B v_0 = m_A \frac{1}{3}v_0 - m_B \frac{1}{3}v_0$, 得 $\frac{m_A}{m_B} = \frac{4}{1}$ 。综合分析可知, A 球的质量必须大于 B 球的质量的 4 倍。

命题意图: 科学推理可以从已知推测未知的结论, 也可从已有的结论推断可能形成的条件。

主要素养与水平: 科学推理(II)。

11. 参考解答: 设宇宙飞船进入尘埃的时间为 t , 在 t 时间内黏附在飞船上的尘埃质量 $M = v_0 t S n m$, 对黏附的尘埃, 飞船使其加速, 由动量定理得, 飞船对尘埃的冲量 $Ft = Mv_0$, 得尘埃对飞船的作用力大小为 $F = \frac{Mv_0}{t} = nm v_0^2 S$, 飞船为了维持匀速航行, 其发动机也需提供同样大小的牵引力

命题意图: 对比较陌生的情境, 通过建立物理模型, 转换对象, 把复杂问题分解为简单问题。

主要素养与水平: 模型建构(III); 科学论证(IV)。

12. 参考解答: 以人和气球的系统为研究对象, 系统所受竖直方向的合力为零, 动量守恒。以竖直向下为正方向, 设人沿软梯滑至地面, 软梯长度至少为 L 。人沿软梯至地面的过程中, 气球上升的高度为 $L - h$, 气球上升的速度大小 $v_2 = \frac{L-h}{t}$, 人相对于地面下降的高度为 h , 人沿软梯匀速向下的速度大小为 $v_1 = \frac{h}{t}$ 。根据动量守恒定律, $0 = -mv_2 + m_0 v_1$, 得 $0 = m\left(-\frac{L-h}{t}\right) + m_0 \frac{h}{t}$, 解得 $L = \frac{m+m_0}{m}h$

命题意图: 能建立运动模型, 用正确的符号来表达物理量; 在动态变化的物理过程中, 找到适用的规律。

主要素养与水平: 运动与相互作用观念(III)。

第三部分 本章练习部分解读

第一节 相互作用中的守恒量 动量

1. 原直线上

2. 质量 速度 矢量 速度 $\text{kg} \cdot \text{m/s}$

3. 见下表

说 法	判 断	理 由
分别以相同大小的速度竖直向上和水平向右抛出两个质量相等的小球。在抛出的瞬间, 两球的动量相同	错	动量是矢量, 既有大小也有方向
动量与物体的质量有关。动量越大, 物体的惯性也越大	错	质量是惯性的量度。动量与质量和速度均有关, 动量大不代表质量大
动量和动能都与物体的质量和速度有关。若物体的动能不变, 其动量一定不变	错	动能是标量, 动量和速度都是矢量, 速度的方向的变化不会影响动能, 但会影响动量
质量一定的物体, 动量变化量与其速度变化量成正比	对	根据动量定义, 由于质量不变, $\Delta p = m \Delta v$

4. 见下表

车厢	碰撞前的动量 p_1 / (kg · m · s ⁻¹)	碰撞后的动量 p_2 / (kg · m · s ⁻¹)	碰撞前、后动量的变化 Δp / (kg · m · s ⁻¹)	碰撞前的动能 E_{k_1} / J	碰撞后的动能 E_{k_2} / J	碰撞前、后动能的 变化 ΔE_k / J
X	1×10^5	4×10^4	-6×10^4	2.5×10^5	4×10^4	-2.1×10^5
Y	3×10^4	9×10^4	6×10^4	1.5×10^4	1.35×10^5	1.2×10^5

动量

5. 设弹性球撞墙前的运动方向为正方向,则其撞墙前的速度 $v_1 = 5$ m/s,撞墙后的速度 $v_2 = -5$ m/s。由 $m = 540$ g = 0.54 kg, 则碰撞前弹性球的动量 $p_1 = mv_1 = 0.54 \times 5$ kg · m/s = 2.7 kg · m/s, 碰撞后弹性球的动量 $p_2 = mv_2 = 0.54 \times (-5)$ kg · m/s = -2.7 kg · m/s, 碰撞前、后弹性球动量变化量 $\Delta p = p_2 - p_1 = (-2.7 - 2.7)$ kg · m/s = -5.4 kg · m/s

6. 干草包离开飞机后做平抛运动,水平方向速度 $v_x = 36$ m/s, 竖直方向速度 $v_y = \sqrt{2gh} = \sqrt{2 \times 10 \times 60}$ m/s = $20\sqrt{3}$ m/s, 则干草包着地前的瞬时速度为 $v = \sqrt{v_x^2 + v_y^2} \approx 49.96$ m/s。由干草包的质量 $m = \frac{G}{g} = \frac{175}{10}$ kg = 17.5 kg, 则其着地时的动量大小 $p = mv = 17.5 \times 49.96$ kg · m/s = 874.3 kg · m/s;

设着地时 v_x 与 v 的夹角为 θ , 则 $\tan \theta = \frac{v_y}{v_x} = \frac{20\sqrt{3}}{36} = \frac{5}{9}\sqrt{3}$, 即动量方向为偏东斜向下,与水平方向夹角约为 43.9°

7. (1) 碰撞前: A 球做匀速直线运动, B 球静止; 碰撞后: A 球静止, B 球做匀速直线运动 (2) 由球间距知,两球做匀速运动的速度大小相等。因两球质量也相等,说明两球动量变化量的大小相等,但方向相反。两球的动量之和不变

8. (1) 先分段分析物体在三个 2 s 内的运动情况: 由最大静摩擦力 F_{fsmax} 的大小近似等于滑动摩擦力的大小,得 $F_{fsmax} = \mu mg = 0.4mg = 0.4 \times 0.5 \times 10$ N = 2 N, 由图 1-5 知,前 2 s, $F = 1$ N, $F < F_{fsmax}$, 则物体保持静止状态。从第 3 s 起, $F = 3$ N, 物体做匀加速运动, 加速度 a 的大小为 2 m/s², 到 3 s 末物体运动时间 $t_1 = 1$ s, 则 $v_3 = at_1 = 2 \times 1$ m/s = 2 m/s, $p_3 = mv_3 = 0.5 \times 2$ kg · m/s = 1 kg · m/s。第 5 s 起, 物体做匀速直线运动, 物体在 5 s 时的速度 v_5 就是其在 4 s 末的速度 v_4 , 物体的加速时间 $t_2 = 2$ s, 即 $v_5 = v_4 = at_2 = 2 \times 2$ m/s = 4 m/s, $p_5 = mv_5 = 0.5 \times 4$ kg · m/s = 2 kg · m/s (2) 第 1 s 内物体保持静止状态, 动量变化量为零; 第 3 s 内物体的动量变化量 $\Delta p_3 = p_3 - p_2 = 1$ kg · m/s; 第 5 s 内物体做匀速直线运动, 动量变化量为零

第二节 物体动量变化的原因 动量定理

1. 速度变化

2. 过程 时间

3. $\Delta p = mv - mv_0$ 合力

4. 以花粉颗粒为对象,假设其做直线运动,则 $\Delta p = p_2 - p_1 = mv_2 - mv_1 = 1 \times 10^{-10} \times (7.5 - 0)$ kg · m/s = 7.5×10^{-10} kg · m/s, $I = \Delta p = 7.5 \times 10^{-10}$ N · s

5. 在 $F-t$ 图像中,力与时间轴所围成的面积表示该力的冲量,即 $I = \frac{1}{2} \times 2 \times 2$ N · s = 2 N · s

6. (1) 由图 1-8 可知,头盔与球的作用时间仅为 3 ms,但是作用力的最大值达到 1.5×10^4 N,相当

于 1 500 kg 的重物所受的重力,因此如果球直接与头部接触,会造成伤害 (2) 以球为研究对象,以杆对球的作用力的方向为正方向,则球飞向杆的方向为负方向,由动量定理可知, $I = \Delta p = p_2 - p_1 = mv_2 - mv_1$, 则 $v_2 = \frac{I + mv_1}{m} = \frac{15 + 0.145 \times (-47)}{0.145} \text{ m/s} \approx 56.4 \text{ m/s}$

7. (1) $1 \text{ N} \cdot \text{s} = 1 \text{ kg} \cdot \text{m} \cdot \text{s}^{-2} \cdot \text{s} = 1 \text{ kg} \cdot \text{m/s}$, 与动量的单位相同 (2) 根据动量定理, 动量的变化量和冲量方向一致, 均为负。因为冲量是矢量, 冲量的方向与合力方向一致, 则刹车过程中合力方向与运动方向相反, 即与初动量方向相反 (3) 由动量定理可知, 在三种制动情境中, 初速度均为 72 km/h (20 m/s), 末速度均为 0, 由 $I = \Delta p = mv_2 - mv_1$ 可知, 冲量大小相等。但由于作用时间不同, 则平均作用力不相等。由于车上的乘客与车同步运动, 速度相同。以乘客为对象, 设其质量为 60 kg, 由 $I = Ft$, 得

$$F = \frac{I}{t} = \frac{m_{\text{人}} v_2 - m_{\text{人}} v_1}{t}, \text{ 即为乘客在减速阶段受到的水平方向平均作用力大小, 则轻踩刹车时, 乘客在}$$

减速阶段受到的水平方向平均作用力约为 57.1 N; 急刹车时, 平均作用力约为 315.8 N; 撞击护栏时, 平均作用力约为 5 454.5 N, 相当于人体重的 9 倍左右, 此时若用手支撑肯定会造成伤害 (4) 由动量定理可知, 物体的动量变化量等于它在这个过程中所受合力的冲量。有无安全气囊, 乘客的动量变化量不变。但安全气囊可使相互作用的时间加长, 则乘客受力变小, 起到保护作用

8. 以该氮气分子为研究对象, 以其弹回的方向为正方向, 由动量定理可知, $I = Ft = mv' - mv$, 代入数据得, $I = mv' - mv = 4.7 \times 10^{-26} \times [550 - (-550)] \text{ N} \cdot \text{s} = 5.17 \times 10^{-23} \text{ N} \cdot \text{s}$, 则 1 s 内 1.5×10^{23} 个氮分子的平均作用力 $F' = 1.5 \times 10^{23} \times 5.17 \times 10^{-23} \text{ N} \approx 7.8 \text{ N}$

9. 示例: 一个质量为 1.3 kg 的小木块原本静止, 被撞击后以 0.2 m/s 的速度运动, 作用时间为 0.55 s, 求撞击过程中平均作用力的大小。

10. (1) 甲向左运动, 乙向右运动。根据两人在两张照片中相对 O 点距离的变化, 可知两人在相同时间内的运动距离不同。两人的速度大小不同, $v_{\text{甲}} < v_{\text{乙}}$ (2) 两人都穿着溜冰鞋, 在互推的过程中, 推力远大于阻力, 推力可近似视为合力。推力对两人的作用时间相等, 推力对两人的冲量大小相等, 则两人的动量变化量大小相等, 两人的动量大小相等 (3) 由(1)、(2)可知, 相互作用后两人的动量大小相等, 甲的速度大小比乙小, 则甲的质量大于乙的质量

11. (1) 以金属球为研究对象, 弹射器对金属球作用的末速度即为金属球离开桌面做平抛运动的初速度。根据平抛运动的规律, 得 $v_x = \frac{R}{\sqrt{\frac{2H}{g}}}$, 则弹射器对球的冲量 $I = \Delta p = mv_x - 0 = \frac{mR}{\sqrt{\frac{2H}{g}}}$ (2) 桌

面高为 1.5 m, 代入 $I = \frac{mR}{\sqrt{\frac{2H}{g}}}$, 可得 $I \approx 1.81mR$ 。以 R 为纵轴, $\frac{1}{m}$ 为横轴建立坐标系, 此时利用表中的数据作图, 所得图像为一条直线, 斜率为 $0.55I$ (3) 根据图像可得弹射器对金属球的冲量大小, 若要估算弹射器对金属球的平均作用力, 还需要测量弹射器对金属球的作用时间。可用高速摄影机拍摄弹射器与金属球作用过程的视频, 分析视频得到两者的相互作用时间

第三节 动量守恒定律

1. 内力 外力
2. 如果系统不受外力或所受外力的矢量和为零, 则系统的动量保持不变, 称为动量守恒定律
3. 极短 远大于

4. 以小球为对象,因为小球受到重力作用,重力为外力,小球的动量不守恒 以小球和地球组成的系统为对象,地球和小球间的相互作用为内力,系统的动量守恒

5. 航天员的运动方向与喷射气体的方向相反。由于穿戴喷气背囊的航天员和气体组成的系统所受外力为零,满足动量守恒定律。初始状态航天员与气体的速度均为零,若气体喷射方向向前,则航天员运动方向向后。设航天员的速度为 v' ,由动量守恒定律公式 $p = p'$, 由于初始状态为静止,则 $0 = (m - m_0)v'_1 + m_0v$, 即航天员的速度为 $v'_1 = -\frac{m_0}{m - m_0}v \approx -\frac{m_0}{m}v$

6. 以两辆小车组成的系统为对象,以小车 A 的速度方向为正方向,设弹簧弹开前、后小车 A 的速度分别为 v_A 、 v'_A , 小车 B 的速度分别为 v_B 、 v'_B 。由于弹簧对两车的作用力为内力,满足动量守恒,即 $m_A v_A + m_B v_B = m_A v'_A + m_B v'_B$, 代入数据,得 $0 = 1.5 \text{ kg} \times 27 \text{ cm/s} + 4.5 \text{ kg} \times v'_B$, 则 $v'_B = -9 \text{ cm/s}$, 即小车 B 的速度大小为 9 cm/s,方向与 A 车相反

7. 在粒子分裂过程中,系统的动量守恒,设分裂前、后 A 粒子的速度分别为 v_A 、 v'_A , B 粒子的速度分别为 v_B 、 v'_B , 则 $m_A v_A + m_B v_B = m_A v'_A + m_B v'_B$, 得 $0 = m_A v'_A + (m - m_A) v'_B$, 即 m_A 占 1.7%

8. 示例: 车辆进行模拟撞击实验,两辆实验汽车由遥控装置控制沿着同一直线相向行驶,以甲车行驶方向为正方向。甲车质量为 2 000 kg,速度为 5 m/s,乙车质量为 1 000 kg,行驶速度为 -4 m/s,试问撞击后两车一起运动的速度是多少?

评价要点: 两车的 m 与 v 是否正确对应, v 的方向是否正确表达等。

9. 两位同学的分析均不全面。以两车组成的系统为对象,两车碰撞瞬间碰撞方向上系统的内力比外力(包括摩擦力)大很多,可认为系统动量守恒。但碰撞后,两车一起滑行,系统受摩擦力作用,动量不守恒。根据《机动车运行安全技术条件》(中华人民共和国国标 GB 7258 - 2017),乘用车制动初速度为 50 km/h,制动距离应小于 20 m,得两车滑行的加速度 a 约为 4.8 m/s²。根据 $v = \sqrt{2as}$ 计算两车滑行的初速度,即两车碰撞的末速度约为 7.6 m/s。由动量守恒定律可得,追尾前 B 车的速度约为 46 km/h,故 B 车没有超速

第四部分 本章实验与活动部分解读

1 自主活动 验证动量定理

参考解答: 利用牛顿第二定律的实验装置,细绳一端连接小车,另一端跨过滑轮连接钩码。释放小车,小车和钩码所受阻力不计或保持不变,小车将在大小和方向都不变的拉力 F 作用下做匀加速直线运动。运动中通过两个光电门传感器,测量挡光片通过两光电门时的速度 v_1 、 v_2 ,同时记录小车从第一个光电门传感器运动到第二个光电门传感器的时间 Δt 。恒定拉力 F 可通过小车上的力传感器获得。因为小车做加速运动,拉力 F 与钩码重力的大小并不相等。从而验证 $F\Delta t = m(v_2 - v_1)$

命题意图: 经历方案设计的过程,深化对动量定理的理解。

2 自主活动 夹子与笔的分离

参考解答: 将笔和夹子视为系统,忽略系统所受的外力,笔和夹子的总动量为零,笔和夹子分离时水平方向的动量大小是相等的,方向相反,所以它们向相反的方向运动

命题意图: 观察现象,对现象做简单的分析和解释。

3 学生实验 验证动量守恒定律

(1) 参考解答：减小相互作用过程中阻力的冲量，满足动量守恒的条件

命题意图：理解实验方案中的操作，加深对动量守恒条件的认识。

(2) 参考解答：① 将装有弹簧圈且质量相等的两小车相对放置，如图 5 放置。小车 A 静止，小车 B 碰撞静止的小车 A，验证两小车的速度交换。

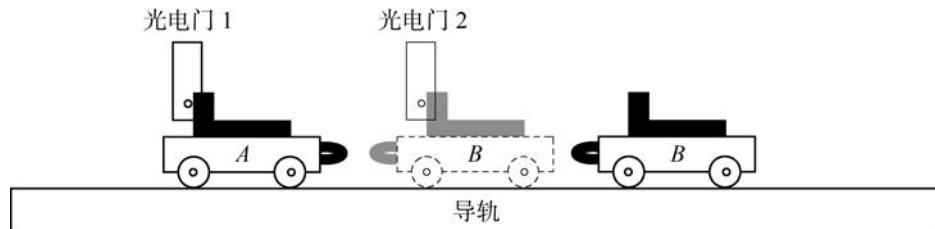


图 5

② 调整光电门传感器的位置，使装有挡光片的小车能顺利通过光电门传感器，进一步调整光电门传感器在导轨上的位置，使小车 A 静止在两光电门传感器之间，其挡光片靠近光电门传感器的接收孔，调整另一光电门传感器在导轨上的位置，使小车 B 挡光结束时，立即与静止的小车 A 相互碰撞。

③ 正确连接传感器、数据采集器和计算机，运行软件，在界面相应位置，录入两小车的质量和挡光片宽度。

④ 推动在光电门传感器之外的小车 B，在其将要到达光电门前放手。小车 B 将与静止在两光电门之间的小车 A 碰撞，由于弹簧圈的作用，原本静止的小车 A 向左运动，原本运动的小车 B 静止。光电门传感器测得的小车 B 碰撞前的速度和小车 A 碰撞后的速度

命题意图：修改原有实验方案，实现新的实验情境。

第二章 机械振动

第一部分 整 章 分 析

学习目标

1. 理解做简谐运动物体的受力特点、运动特征及能量转化规律；知道受迫振动的概念和特征，深化运动与相互作用及能量的观念。
2. 能根据现实生活中的振动或摆动的特点，建构弹簧振子和单摆模型；归纳简谐运动的一般规律；能根据牛顿运动定律和机械能守恒定律，分析、解决与简谐运动相关的简单实际问题；会使用恰当的证据表达问题解决的过程和结果。
3. 在本章的多个自主活动中，通过推理分析、发现问题、归纳总结认识相关规律，体会实验观察与分析推理相结合的探究方法，形成主动探究的意识；经历研究单摆周期与摆球质量、摆长关系的实验过程，体验通过猜想假设、数据收集并用图像拟合处理、分析数据得出结论的科学探究方法；能利用单摆的周期公式测当地的重力加速度。
4. 通过实验与理论相结合认识简谐运动规律，知道物理学是基于人类有意识的探究而形成的对自然现象的描述与解释，并需要接受实践的检验；懂得实事求是、小组合作对于科学探究与测量的重要性；通过对受迫振动相关的实验观察和实例分析，增强研究物理问题的兴趣，感悟物理学研究与社会生活和技术发展的关系。

编写意图

课程标准中对本章的“内容要求”为：

- 1.2.1 通过实验，认识简谐运动的特征。能用图像、物理量及公式描述简谐运动。
- 1.2.2 通过实验，探究单摆的周期与摆长的定量关系。知道单摆周期与摆长、重力加速度的关系。会用单摆的周期公式测量重力加速度的大小。
- 1.2.3 通过实验，认识受迫振动的特点。了解产生共振的条件及其应用。

机械振动是自然界中最普遍的现象之一。简谐运动是机械振动中最简单、最基本的运动形式，任何复杂的机械振动均可视为不同简谐运动的叠加。简谐运动的规律是研究更为复杂的机械振动与机械波、电磁振荡与电磁波的基础，可用于解释生活中与振动相关的现象，为工程技术中的相关应用提供理论基础。

本章首先建构弹簧振子的模型，通过观察归纳，得到简谐运动的位移-时间图像，利用牛顿运动定律和能量关系分析推理，得到简谐运动的动力学特征；再从真实的摆动现象抽象单摆模型，通过分析推理得到单摆做简谐运动的条件，探究其做简谐运动时周期与摆球质量、摆长的关系，并用单摆的周期公式测量

重力加速度。最后,讨论有关受迫振动、共振及其在现代生活、生产中的应用等内容。整章内容的展开,由概念归纳到规律讨论,由自由振动到受迫振动,逐渐深入,体现了重视科学探究和学以致用的导向。

通过本章的学习,可以拓展对机械运动的认识,深化运动与相互作用及能量观念;感悟用图像和物理量描述周期性运动的方法;能促进模型建构、分析推理、实验探究和验证等能力的发展,体验通过累积测量减小实验误差的科学方法,感悟物理规律与社会生产生活及技术发展的关系。

完成本章内容的学习,共需要 7 课时,其中第一节 2 课时,第二节 2 课时,第三节 2 课时,第四节 1 课时。

第二章 机械振动

在事物运动、变化发展的过程中，某些特征可能多次重复出现，自然界中以此为特点的周期性运动十分普遍。昼夜交替、潮起潮落、季节变换就是地球周期性运动的反映；岁月更迭，时间流逝，数千年来，人们发明了多种计时装置，它们都利用了事物的周期性规律。

我们在必修课程中已经学习了直线运动、曲线运动，以及牛顿运动定律和机械能守恒定律。在本章中，将认识简谐运动的特征、探究单摆的运动规律，理解机械振动的规律，了解受迫振动的特点，了解共振的条件及应用。在学习中，运用力与运动的关系和能量的观念认识简谐运动的特征，进一步加深对质点运动的认识。在学生实验中，用传统方法和现代信息技术获取和处理实验数据，分析实验图像，得出实验结论，初步体验通过实验构建知识的乐趣，提升科学探究的能力。本章也是学习机械波的基础。

本节编写思路

本节通过分析生活实例和弹簧振子的运动,引出机械振动的概念。按照从特殊到一般、由形象到抽象的思路,着重讨论了简谐运动的运动学特征。

本节内容按以下思路展开:

1. 通过抽象弹簧振子模型、观察振子的运动过程,用图像的方法研究振子的位置随时间的变化情况,得出弹簧振子的振动图像。

2. 根据弹簧振子的振动图像,从运动学角度初步建立简谐运动的概念,认识简谐运动的周期性。

3. 用振幅、周期和频率描述简谐运动的运动学特征,给出简谐运动的位移-时间关系式。

学习本节内容,将经历观察分析、描图拟合、归纳概括的过程,有助于学生提高模型建构、科学推理的能力,增强证据意识。本节内容是进一步学习简谐运动动力学特征的基础。

正文解读

[1] 通过联系生活实例和已有的振动发声知识,感受振动的普遍性。

[2] 用弹簧振子引入简谐运动的运动规律是因为该装置可以形象、直观地呈现出振动和简谐运动的动态过程和运动图像。

第一节 机械振动 简谐运动

[1] 自然界中有各种各样的振动,我们生活在振动的世界中。汽车、火车、飞机在运行时都发生振动;蚊子翅膀每秒振动数百次,发出我们听得见的声音;各种乐器正是由于振动才能产生美妙的音乐;对于人体来说,心脏跳动、肺的呼吸、脑电波的涨落等也都是振动;地震则是一种强烈的、有很大破坏性的振动。你一定有过如图 2-1 所示荡秋千的体验,秋千的运动也是一种振动。振动是自然界中普遍存在的运动形式。

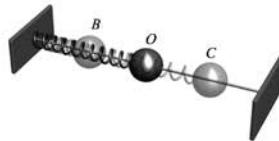


图 2-1 秋千的运动

► 机械振动

如图 2-2 所示,质量为 m 的小球套在水平光滑金属杆上,轻质螺旋弹簧一端固定,另一端与小球连接,这样就构成了一个最简单的振动系统——弹簧振子 (spring oscillator)。构成弹簧振子的小球可视为质点。

小球在 O 点不受弹簧弹力的作用(弹簧既不伸长也不压缩),在运动方向上合力为零,在物理学中 O 点称为平衡位置。一旦小球受到扰动离开 O 点,它就会受到指向 O 点的弹力作用,最近只能到达 B 、 C 两点处。于是,小球在弹力的作用下将不断在 O 点两侧来来回回,做周期性的往复运动。弹簧振子的运动是一种典型的振动。



[2] 图 2-2 弹簧振子模型

物体在某一位置附近的往复运动称为机械振动 (mechanical vibration),简称振动。

► 振动图像

小球在平衡位置两侧的运动具有重复性。如何比较直观地描述不同时刻小球的位置呢?以平衡位置为坐标原点 O ,沿小球的振动方向建立坐标轴 (x 轴),小球在平衡位置右侧时,相对平衡位置的位移为正;在平衡位置左侧时,相对平衡位置的位移为负。在垂直于 x 轴的方向建立时间轴 (t 轴)。图 2-3 (a) 描述了弹簧振子在 9 个连续的间隔相等的时刻偏离平衡位置 O 的位移。

将图 2-3 (a) 逆时针旋转 90° ,用平滑的曲线把球心的位置连接起来,如图 2-3 (b) 所示,便得到振动过程中小球相对平衡位置的位移与时间的关系图像。进一步抽象后可得

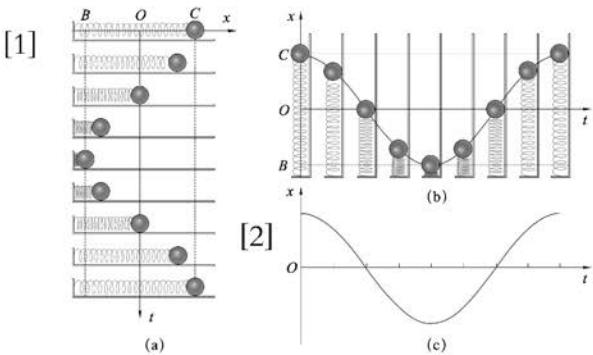


图 2-3 振动位置与时间的关系

如图 2-3 (c) 所示的 $x-t$ 图像, 称为小球的振动图像。

如果没有能量损耗, 小球将会在弹簧弹力的作用下持续往复运动, 这样的运动称为自由振动。由于振动具有周期性, 随着记录时间的增加, 图 2-3 (c) 所示的图像会不断重复。因此, 只需要研究图 2-3 (c) 所示这一段时间内的运动就可以推测后续任意时刻振动物体相对平衡位置的位移。振动的物体从某一位置出发到第一次回到该位置, 并保持与出发时相同运动方向的过程称为一次全振动。图 2-3 (c) 所示就是一个全振动过程的 $x-t$ 图像。通过研究一次全振动就能知道振动的全过程。

► 简谐运动

[3] 可以证明, 弹簧振子的振动图像与正弦或余弦图像一致。弹簧振子的这种振动称为简谐运动 (simple harmonic motion)。简谐运动是最简单、最基本的振动。一切复杂的周期性振动都可以看作不同的简谐运动的合成。

[4] STSE

钢琴弹奏“中央 C”的振动比较复杂, 用声传感器获得的强度如图 2-4 (a) 所示。这种复杂的周期性运动包含了不同振幅和频率的简谐运动, 用“频谱分析”软件可以得到如图 2-4 (b) 所示的频谱图, 图中每一条直线代表“中央 C”这个音中相应的简谐运动的成分。

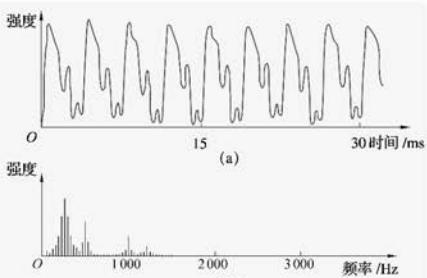


图 2-4 强度图像与频谱

[4] 此处“STSE”旨在通过联系乐音频谱的知识体会简谐运动是最简单、最基本的机械振动, 感悟自然现象背后蕴含着简单的物理规律。

[1] 这里利用类似频闪照相的方式获得小球的位置和对应的时刻。根据获得的数据描绘位置随时间变化的图像, 分析图像, 归纳运动的特点和规律。也可以利用位移传感器直接得到类似的结果。

[2] 由振动图像可得振子在任意时刻的位置, 可知振动的振幅、周期和频率, 可确定振子的运动方向。需要注意的是, 图像表示的是振子位置随时间变化的规律, 不是振子运动的轨迹。

[3] 这里以弹簧振子为例, 从振子位移随时间变化的规律, 即振子的运动学特征出发, 直接给出简谐运动的概念。实际上, 在一般情况下, 判断振子是否做简谐运动还需考虑其受力条件, 相关讨论可见本书第 43 页资料链接。

[1] 教材仅给出振子从正的最大位移开始计时的简谐运动表达式

$$x = A \cos\left(\frac{2\pi}{T}t\right), \text{ 该表}$$

达式与教材图 2-3(c) 对应。

[2] 相位描述了振子的振动状态, 关于相位的进一步理解可见本书第 44 页资料链接。

振动物体在平衡位置两侧往复运动。在图 2-3 (a) 中, $OB = OC$ 。 OB 、 OC 的长度是振动物体离开平衡位置的最大距离, 称为振幅 (amplitude), 用符号 A 表示, 单位是 m。

简谐运动是一种周期性运动。振动物体完成一次全振动所需的时间称为振动的周期 (period), 用符号 T 表示。振动的周期反映振动的快慢; 周期越短, 振动越快。完成全振动的次数与所用时间之比称为振动的频率 (frequency), 用符号 f 表示。频率也反映了振动的快慢; 频率越高, 振动越快。周期与频率的关系是

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

在国际单位制中, 周期 T 的单位是 s; 频率 f 的单位是赫兹, 符号是 Hz, $1 \text{ Hz} = 1 \text{ s}^{-1}$ 。

简谐运动的位移与时间的关系式, 可以用余弦 (或正弦) 函数表示为

$$[1] \quad x = A \cos\left(\frac{2\pi}{T}t\right)$$

[2]

拓展视野

1610 年, 伽利略用他新制作的望远镜发现了木星的四颗主要卫星。经过数周的观察, 他发现似乎每颗卫星都在相对于木星做简谐运动, 木星则处在卫星运动的中心点。而实际上木星的卫星绕木星运动的规律接近匀速圆周运动。这一现象反映了简谐运动和匀速圆周运动之间的紧密联系。

根据数学中的单位圆与余弦函数的知识, 我们能得出做匀速圆周运动物体在同一条直径上的投影的运动是简谐运动的结论。

如图 2-5 所示, 某质点沿逆时针方向做半径为 A 、周期为 T 的匀速圆周运动。 $t=0$ 时, 质点位于 P 处, 其在过圆心的 x 轴上的投影点为 M_0 , 经过时间 t , 质点运动到 P' 处, 其投影点 M 的坐标 x 与时间 t 的函数关系可表示为

$$x = A \cos\left(\frac{2\pi}{T}t + \varphi\right)$$

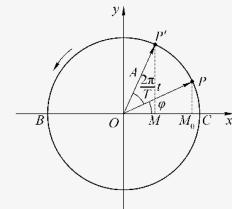


图 2-5 简谐运动与匀速圆周运动的关系图

可见, 投影点 M 沿 x 轴做简谐运动。质点沿圆周运动一周, 其投影点恰好在 x 轴上由 M_0 经 O 、 B 、 C 再回到 M_0 , 完成一次全振动。在图 2-5 中, OP' 与 x 轴正方向间的夹角 $\Phi = \frac{2\pi}{T}t + \varphi$, 称为振动的相位, 与物体的振动状态直接对应, 其中, φ 是

$t=0$ 时的相位, 称为初相位。例如, 当相位 $\Phi = \frac{\pi}{3}$ 时, 根据图 2-5 可知, M 位于 $x = \frac{1}{2}A$

问题与思考解读

处，且向着x轴的负方向运动。可见，相位是描述投影点M运动状态的物理量。如果两个简谐运动的相位不同，则它们的运动状态将不一致，可以用它们的相位之差 $\Delta\phi$ （称为相位差）来描述其振动状态的差异。例如，两个周期相等的简谐运动之间的相位差 $\Delta\phi$ 就是它们的初相位差 $\Delta\varphi$ 。当 $\Delta\varphi$ 等于 π 的奇数倍时，两者运动的步调正好相反。同理，当 $\Delta\varphi$ 等于0或 2π 的整数倍时，两者同步振动，任意时刻的振动状态均相同。

问题与思考

- 小朋友在水平地面上拍皮球，皮球上上下下往复运动。皮球的运动是不是简谐运动？
- 图2-6所示是某质点做简谐运动的x-t图像。根据图像中的信息回答下列问题。
 - 该质点做简谐运动的振幅为多大？周期为多少？
 - 在1.5 s时刻和2.5 s时刻，质点的位置在哪里？
 - 在1.5 s时刻和2.5 s时刻，质点分别向哪个方向运动？

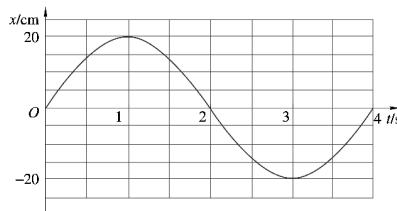


图2-6

- 一个质点在平衡位置O点附近做简谐运动。若从过O点开始计时，经过6 s小球第一次经过M点，再继续运动，又经过2 s它第二次经过M点。该小球做简谐运动的周期可能是多少？
- 甲、乙两个弹簧振子均做简谐运动：甲的振幅为4 cm，乙的振幅为2 cm，它们的周期都是2 s。当t=0时，甲的位移为4 cm；乙的位移为-2 cm。图2-7所示为甲的振动图像，试在图中画出乙的振动图像（画出一个周期）。

各类信息。

主要素养与水平：科学推理(Ⅱ)；解释(Ⅱ)。

- 参考解答：若振子从O点开始向右运动，且M点在O右侧，则 $\frac{1}{4}T = \left(6 + \frac{2}{2}\right) \text{ s} = 7 \text{ s}$ ， $T = 28 \text{ s}$ 。若振子从O点开始向右运动，且M点在O点左侧，则 $\frac{3}{4}T = \left(6 + \frac{2}{2}\right) \text{ s} = 7 \text{ s}$ ， $T \approx 9.33 \text{ s}$

命题意图：能从不同的角度将文字描述转化为简谐运动的过程，知道简谐运动的对称性。

主要素养与水平：模型建构(Ⅲ)；质疑创新(Ⅱ)。

- 参考解答：如图1所示

1. 参考解答：拍摄皮球上下运动的视频，用视频分析软件获得皮球的位移-时间图像。不难发现，皮球的位移-时间图像不是正弦或余弦图像。因此，皮球的上下运动不是简谐运动

提示：此处不需要从动力学视角来分析简谐运动的条件。

命题意图：将真实的运动与简谐运动建立联系，了解简谐运动的特点。

主要素养与水平：运动与相互作用观念(Ⅰ)。

- 参考解答：(1) 振幅为20 cm，周期为4 s
(2) 1.5 s时刻质点的位置在14.1~14.2 cm之间，2.5 s时刻质点的位置在-14.2~-14.1 cm之间
(3) 在1.5 s时刻质点向x负方向运动，2.5 s时刻质点也向x负方向运动

提示：本题也可根据数学三角函数表达式进行推理。

命题意图：从x-t图像中提取简谐运动的

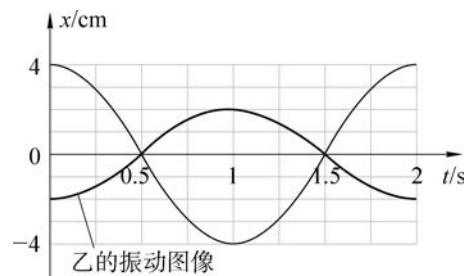


图1

命题意图：体会绘制简谐运动图像的过程，通过比较评价所画图像的质量。

主要素养与水平：

解释(II)；科学本质(I)。

5. 参考解答：甲：

$$x = 10 \sin \frac{\pi}{2} t \text{ cm, 乙:}$$

$$x = 5 \sin(\pi t + \pi) \text{ cm}$$

命题意图：从图像中获取简谐运动的特征信息，用关系式表示运动的过程，感悟形与数的结合，体会振动的周期性。

主要素养与水平：

模型建构(II)；科学本质(I)。

6. 参考解答：根据表中的数据和图线，可猜测振子质量 m 与振动周期 T 的二次方成正比。以 m 为纵坐标， T^2 为横坐标，在 $m-T^2$ 图像中描出数据点，这些数据点大致分布在一条直线上，并把数据点拟合成一条几乎过原点的直线，可验证猜想。 T 与 m 的关

$$\text{系为: } T = k \sqrt{m}, k = 0.44 \text{ s/kg}^{1/2}$$

命题意图：能从已获得的实验数据表和图线中发现数据的特点，能处理数据，探寻规律，得到结论。

主要素养与水平：问题(I)；解释(III)。

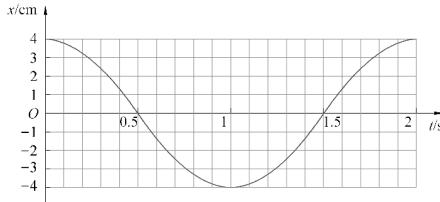


图 2-7

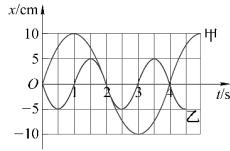


图 2-8

5. 甲、乙两弹簧振子的振动图像如图 2-8 所示，写出甲、乙两弹簧振子简谐运动的位移随时间变化的关系式。

6. 某同学为了探究弹簧振子的振动周期 T 与振子质量 m 间的关系，用天平测量弹簧振子的质量，用光电门传感器测量弹簧振子的振动周期 T ，测得的实验数据如表 2-1 所示，根据实验数据画出如图 2-9 所示的图像。如何设置坐标系使实验数据在坐标系中描出的点分布在一条过原点的直线上？写出周期 T 与振子质量 m 间的函数关系。

表 2-1

实验序号	振子质量 m/kg	周期 T/s
1	0.10	0.14
2	0.20	0.20
3	0.40	0.28
4	0.60	0.35
5	0.80	0.40

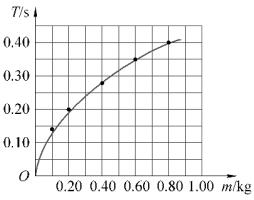


图 2-9

资料链接

简谐运动的判据

以弹簧振子为例。符合胡克定律的某轻弹簧一端固定，一端与质量为 m 、可以视为质点的物体相连，物体置于光滑水平面上，在水平方向物体除受弹簧的弹力外，不受其他外力的作用。以物体的平衡位置为坐标原点建立 $O-x$ 坐标，当物体偏离平衡位置位于 x 处时，在水平方向物体仅受弹力 F 作用，设弹簧的劲度系数为 k ，则

$$F = -kx \quad (1)$$

由牛顿定律并令 $\omega^2 = \frac{k}{m}$ 可得

$$\frac{d^2x}{dt^2} + \omega^2 x = 0 \quad (2)$$

通常称式(2)为弹簧振子运动所满足的动力学方程。式中 ω 即为简谐运动的圆频率，仅由振动系统自身的物理性质决定。

由(2)式可解得

$$x = A \cos(\omega t + \varphi) \quad (3)$$

式中 A 、 φ 为积分常量，由初始条件决定。

上述式(1)、(2)、(3)均可作为物体做简谐运动的判断依据，但其意义与适用范围不同。

式(1)表示物体受到了一个线性回复力的作用，在机械运动范畴，如果物体受到这一形式的外力作用，则可以判定物体将做简谐运动。当然，式中的 k 不一定是弹簧的劲度系数，仅表示 F 与 $-x$ 成正比， k 为比例常量，这类力称为“准弹性力”。

在力学中，用式(1)和(2)作为物体是否做简谐运动的判据是等价的，但式(2)在其他领域有更普遍的意义。实际上任一物理量只要满足式(2)，该物理量随时间的变化就满足简谐运动的规律。如 LC 电路中电容器上所带电荷量 Q 满足方程

$$\frac{d^2Q}{dt^2} + \frac{1}{LC} Q = 0$$

此方程的形式与式(2)一致，其解也是正弦或余弦函数，说明电量随时间也以简谐运动的规律变化，但这并不是机械运动，因此也就不存在如式(1)所表示的线性回复力。由此可见，用某一物理量所满足的形如式(2)的动力学方程作为是否做简谐运动的判据，可以适用于各类形式的运动。

式(3)为简谐运动的表达式。虽然由式(2)可以解得该表达式，但形如式(3)的表达式不一定就是式(2)的解。如物体受到一个周期性外力而做受迫振动时，虽然动力学方程已不是式(2)的形式，但物体做受迫振动的稳定解同样可以表示为

$$x = A \cos(\omega' t + \phi)$$

上式虽然与式(3)形式上一致，但式中的 $\omega' \neq \sqrt{k/m}$ ， A 和 ϕ 亦不由初始条件确定。因此，如果用式(3)作为简谐运动的判据，还必须对 ω 进行限定，即应由振动系统自身的性质决定。

根据上述讨论可知，用动力学方程作为简谐运动的判据，适用范围更广、更普遍。

相 位

由简谐运动的特点可知,如果仅用位置 x 描述振子的运动状态是不够的,因为在某一个位置上,振子可能向 x 轴的正方向运动,也可能向 x 轴的负方向运动,因此除了位置,还需要同时知道振子在该位置处的速度才能确定某一时刻的运动状态。但无论是位置 $x = A \cos(\omega t + \varphi)$, 还是速度 $v = \frac{dx}{dt} = -\omega A \sin(\omega t + \varphi)$, 其取值均由 $\Phi = \omega t + \varphi$ 决定,因此可以用 Φ 来确定振动的状态,我们把 Φ 称为相位,单位为弧度(rad)。只要振子在某一时刻的相位确定,振子的位置、速度、加速度、能量乃至下一时刻的变化趋势就都能确定。

振动的一个基本特征是运动的周期性,一个周期内的运动规律清楚了,任一时刻运动也就确定了。因此,当用相位 Φ 描述简谐运动时, Φ 的取值为 $\varphi \sim 2\pi + \varphi$ 。

由 $\Phi = \omega t + \varphi$ 可知,圆频率表示了相位变化的快慢,而 φ 则反映了 $t=0$ 时刻的运动状态,我们把 φ 称为初相位,它取决于振子的初始运动状态 x_0 和 v_0 。

可以用图像形象地描述相位的概念,如图 2 所示,对于某一确定的简谐运动 $x = A \cos(\omega t + \varphi)$, 画坐标轴 x , 在 x 轴上取一点 O 为原点,自 O 点出发作一矢量 A , 其长度等于简谐运动的振幅 A , 它与 x 轴正方向间的夹角为 φ 。 A 称为振幅矢量,它在 x 轴上的投影 $x_0 = A \cos \varphi$, 即为初位移。

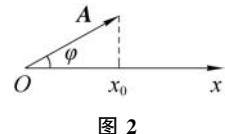


图 2

令 A 自 $t=0$ 开始,以数值等于圆频率 ω 的角速度沿逆时针方向匀速转动。在任一时刻 t , A 与 x 轴正方向间的夹角为 $\omega t + \varphi$, 此时它在 x 轴上的投影 $x = A \cos(\omega t + \varphi)$ 可以表示质点沿 x 轴做简谐运动。我们把这样的表示方法称为简谐运动的几何表示法,或称矢量表示法。

通常把 A 的端点 M 称为参考点,参考点的运动轨迹称为参考圆, O 为参考圆中心,如图 3 所示。参考点在 x 轴上的投影即为质点位置,而参考点以角速度 ω 运动时,它的投影点的运动就是简谐运动。在任一时刻,参考点 M 的速度、加速度大小分别为 ωA 和 $\omega^2 A$, 它们在 x 轴上的投影分别为 $v = -\omega A \sin(\omega t + \varphi)$ 和 $a = -\omega^2 A \cos(\omega t + \varphi)$, 这正是振子做简谐运动的速度和加速度。因此利用旋转矢量图可以形象地描述一个周期内简谐运动的运动规律。

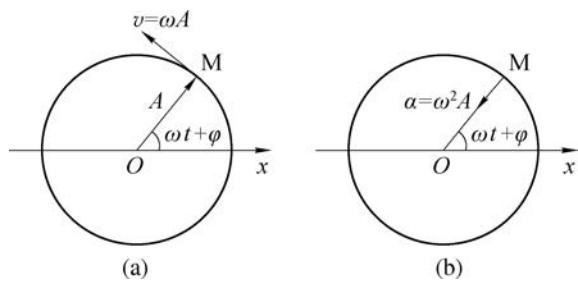


图 3

振动的相位与物体的振动状态直接对应,因此可以用相位比较两个简谐运动状态的差异。设两个频率相同的简谐运动分别为

$$\begin{cases} x_1 = A_1 \cos(\omega t + \varphi_1) \\ x_2 = A_2 \cos(\omega t + \varphi_2) \end{cases}$$

它们的相位差为

$$\Delta\Phi = \Phi_2 - \Phi_1 = (\omega t + \varphi_2) - (\omega t + \varphi_1) = \varphi_2 - \varphi_1$$

这两个简谐运动的运动规律并无原则区别,只是在“步调”上相差了一段时间 $\Delta t = \frac{\varphi_2 - \varphi_1}{\omega}$ 。

本节编写思路

本节按从特殊到一般的思路,以弹簧振子为例,进一步探讨了简谐运动的能量变化规律。

本节内容按以下思路展开:

- 分析弹簧振子经过不同位置时受力与运动状态改变的关系,归纳得出回复力的概念和振子做简谐运动的条件。

- 分析弹簧振子运动过程中,回复力做功与弹性势能变化的关系,结合机械能守恒定律,理解做简谐运动的系统内部动能、做功与能量的转化,以及机械能的守恒。

学习本节内容,将经历观察、分析弹簧振子振动过程中受力与运动状态变化、做功与机械能转化的过程,在巩固和深化运动与相互作用观念及能量观念的同时,发展科学推理与探究的能力。

第二节 简谐运动的回复力和能量

弹簧振子沿 x 轴做简谐运动,小球的位移与时间的关系 $x = A \cos\left(\frac{2\pi}{T}t\right)$ 比我们以前学过的各类运动都要复杂。小球为什么会如此运动?由牛顿运动定律可知,小球的运动一定与其受力有关。

▶ 回复力

以图 2-10 所示的弹簧振子为例,把不受弹力作用的平衡位置作为坐标原点 O ,水平向右为正方向建立 x 轴。在振动的全过程中,除了平衡位置外,小球始终受到弹簧弹力 F 的作用。小球在平衡位置右侧时,位移 x 为正,弹力 F 沿着 x 轴负方向;小球在平衡位置左侧时,位移 x 为负,弹力 F 沿着 x 轴正方向。可见弹力总是与位移方向相反,总是指向平衡位置。小球位移 x 的大小即为弹簧的形变量,根据胡克定律,在任意位置,小球所受弹力 F 为 $F = -kx$

- [1] 式中 k 是弹簧的劲度系数。小球在弹簧弹力的作用下,在平衡位置两侧做简谐运动。我们把振动物体受到的总是指向平衡位置的力称为回复力(**restoring force**)。物体在运动方向上只受回复力的作用,且回复力与偏离平衡位置的位移大小成正比,该物体一定做简谐运动。

示例 如图 2-11 所示的频闪照片显示了弹簧振子在半个周期中 7 个时刻的位置。为了便于观察,①~⑦间弹簧的像已经做了处理。位置①和位置⑦分别为弹簧拉伸和压缩形变最大的位置,频闪时间间隔为 0.1 s,照片与实际长度之比为 1:4。

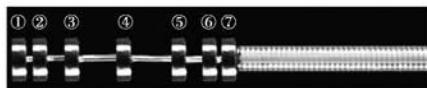


图 2-11 某弹簧振子运动的位置

- 根据照片确定此弹簧振子做简谐运动的振幅、周期和频率。
- 定性分析弹簧振子中的振动物体从位置①到位置⑦过程中回复力和速度的变化。

正文解读

[1] (1) 回复力是根据力对物体运动状态改变的效果来命名的。(2) 简谐运动的受力特征是物体所受回复力 F 满足 $F = -kx$ 的关系,式中 x 表示物体离开平衡位置的位移, k 为比例常量,由物体组成的振动系统的固有性质决定。对弹簧振子而言,该常量即为弹簧的劲度系数。

[1] 解答(2)示范了基于证据的解释方式。上述解释分别从运动学和动力学的角度展开,看似相互独立,实际上振子速度的变化与其所受回复力的作用是相互联系的。

[2] 一般而言,简谐运动的周期是由系统的性质决定的,可通过动力学方程得出相应的表达式,具体参考本书第43页资料链接。

分析:由半个周期内弹簧拉伸形变最大位置与压缩形变最大位置可得弹簧振子做简谐运动的振幅大小。根据半个周期中频闪的次数和频闪的时间间隔可得简谐运动的周期和频率。由于频闪时间间隔恒定,根据照片上相邻两个位置之间的距离就能近似反映弹簧振子中振动物体在该位置附近的速度大小。根据弹簧的形变量可以判断物体所受回复力的情况。

解:(1)位置①是拉伸形变最大的位置,相隔半个周期的位置⑦就是压缩形变最大的位置,利用刻度尺量出照片中位置①与位置⑦中心的距离约为4.4 cm,考虑到照片与实际长度之比为1:4,可知两者实际距离约为17.6 cm,所以该弹簧振子做简谐运动的振幅 $A \approx 8.8$ cm。

半个周期内,频闪摄影所经历的时间为 $0.1\text{ s} \times 6 = 0.6\text{ s}$ 。所以,运动的周期 $T = 1.2\text{ s}$,频率

$$f = \frac{1}{T} = \frac{1}{1.2} \text{ Hz} \approx 0.83 \text{ Hz}$$

[1] (2)从图片上可以看出,在相等时间间隔内,弹簧振子经过的位移不同,从位置①到位置⑦,弹簧振子先加速后减速。位置①和位置⑦离平衡位置最远,在这两处物体的速度为0。根据简谐运动中回复力和位移的关系,物体受到的回复力与其偏离平衡位置的位移大小成正比,在位置①回复力最大,方向向右;从位置①到位置④,随着物体位置的变化,回复力逐渐减小,到位置④时回复力为0;随后回复力方向向左,且逐渐增大,到位置⑦时,又达到最大。从位置①到位置④,回复力方向与运动方向相同,速度增大;从位置④到位置⑦,回复力方向与运动方向相反,速度减小。

[2] 拓展视野

如图2-12所示,沿半径为A的圆周,做匀速圆周运动的质点在x轴上的投影点M沿x轴做简谐运动。 $t=0$ 时,质点位于C处; t 时刻,质点位于D处,其投影点M所受的回复力大小等于质点受到的向心力在x轴上的投影。

$$\begin{aligned} F_{\text{回}} &= F_x = F_{\text{向}} \cos\left(\frac{2\pi}{T}t\right) \\ F_{\text{向}} &= -m\left(\frac{2\pi}{T}\right)^2 A \cos\left(\frac{2\pi}{T}t\right) = -m\left(\frac{2\pi}{T}\right)^2 x = -kx \end{aligned}$$

式中 m 为质量, T 为周期。由上式可得常数 $k = m\left(\frac{2\pi}{T}\right)^2$,则简谐运动物体的周期 $T = 2\pi\sqrt{\frac{m}{k}}$ 。

对弹簧振子来说, k 即为弹簧的劲度系数, m 为小球的质量。可见,弹簧振子做简谐运动的周期仅与小球的质量、弹簧的劲度系数有关,即由弹簧振子本身决定,与其他因素如振幅无关,称为弹簧振子的固有周期。

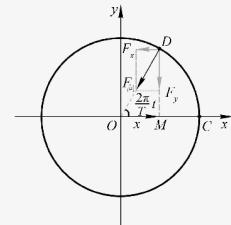


图2-12 简谐运动与圆周运动的关系

► 简谐运动中的能量

弹簧振子的动能与速度有关，势能与弹簧的形变量即位移的大小有关。简谐运动的过程中，弹簧振子的速度和位移时刻变化。弹簧振子动能和势能也在不断变化。

[1] 自主活动

分析半个周期内弹簧振子的动能、势能是如何变化的，填入表2-2。

表2-2 弹簧振子做简谐运动过程中动能、势能的变化（参考图2-10）

小球位置	位移	弹性势能	速度	动能
C	最大	最大	0	0
C→O	减小	减小	增大	增大
O				

在上述过程中，弹簧弹力对动能与弹性势能的相互转化起到了什么作用？

- [2] 可以看出，弹簧振子做简谐运动的过程中，弹力做功引起动能与弹性势能相互转化。由于只有弹力做功，机械能守恒。弹簧振子的机械能既等于它处于平衡位置时的动能也等于它在最大位移处的弹性势能，振幅反映了弹簧振子机械能的大小。

问题与思考

1. 观察弹簧振子的振动过程，运用牛顿运动定律分析一次全振动的过程中振子所受的回复力、振子的位移、速度、加速度是如何变化的？把分析结论填在表2-3中，归纳速度、加速度随位移变化的规律。

表2-3

小球位置	位移	回复力	加速度	速度
C	向右 最大			0
C→O	向右 减小	向左 减小	向左 减小	向左 增大
O				
O→B	向左 增大	向右 增大	向右 增大	向左 减小
B	向左 最大	向右 最大	向右 最大	0
B→O	向左 减小	向右 减小	向右 减小	向右 增大
O	0	0	0	向右 最大
O→C	向右 增大	向左 增大	向左 增大	向右 减小

问题与思考解读

1. 参考解答：如下表

小球位置	位 移	回 复 力	加 速 度	速 度
C	向右 最大	向左 最大	向左 最大	0
C→O	向右 减小	向左 减小	向左 减小	向左 增大
O	0	0	0	向右 最大
O→B	向左 增大	向右 增大	向右 增大	向左 减小
B	向左 最大	向右 最大	向右 最大	0
B→O	向左 减小	向右 减小	向右 减小	向右 增大
O	0	0	0	向右 最大
O→C	向右 增大	向左 增大	向左 增大	向右 减小

[1] 此处的“自主活动”要求学生对照教材图2-10，利用对称性，根据表中给出的示范，完成表格并讨论交流。

交流时，需要引导学生从回复力做功出发，分析能量转化关系。

[2] 振动系统具有的总机械能称为系统的振动能量。以弹簧振子为例，计算做简谐运动的系统的振动能量。

设弹簧振子在某时刻t的位移为 $x = A \cos(\omega t + \varphi)$ ，则该时刻振子的速度为 $v = -\omega A \sin(\omega t + \varphi)$ 。故弹簧振子系统的振动能量为 $E = \frac{1}{2}kx^2 + \frac{1}{2}mv^2 = \frac{1}{2}k[A \cos(\omega t + \varphi)]^2 + \frac{1}{2}m[-\omega A \sin(\omega t + \varphi)]^2$ 。由于 $\omega^2 = \frac{k}{m}$ ，可得： $E = \frac{1}{2}kA^2 = \frac{1}{2}m\omega^2 A^2$ 。由此可见，做简谐运动的系统机械能守恒，且振幅A反映了系统振动的总机械能。

命题意图：将一个全振动过程分段，利用表格的形式引导学生发现规律，在填表的过程中，明确表格中各个物理量之间的关系所遵循的物理规律，体会振动的对称性和周期性。

主要素养与水平：科学推理（Ⅱ）；解释（Ⅱ）。

2. 参考解答：

- (1) $0\sim 2$ s 和 $4\sim 6$ s 时间内质点相对平衡位置的位移方向沿 x 轴正方向 (2) 该质点做简谐运动的周期为 4 s，故该质点在任意 4 s 内的路程是相同的，为 20 cm (3) 图中 $0\sim 1$ s, $2\sim 3$ s, $4\sim 5$ s 时间内，质点的位移方向与瞬时速度方向相同；图中 $1\sim 2$ s, $3\sim 4$ s, $5\sim 6$ s 时间内，质点的位移方向与瞬时速度方向相反 (4) $2\sim 4$ s 时间内质点受到的回复力方向沿 x 轴正方向

命题意图：建立图像与简谐运动的关系，根据图像中的信息分析

振动的过程，厘清各个物理量之间的关系，特别是矢量的方向性。

主要素养与水平：模型建构（Ⅱ）；科学推理（Ⅲ）。

- 3. 参考解答：**根据胡克定律可知，小球运动到平衡位置左侧 4 cm 处，受到的回复力为 8 N。由振动的对称性知，小球运动到平衡位置右侧 4 cm 处，受到的回复力为 8 N，方向向左。由牛顿第二定律得 $a = \frac{F}{m} = \frac{8}{0.2} \text{ m/s}^2 = 40 \text{ m/s}^2$ ，方向向左

命题意图：对具体的振动过程运用振动的对称性，形成完整的证据链，进行定量分析。

主要素养与水平：科学推理（Ⅲ）；科学论证（Ⅲ）。

- 4. 参考解答：**如图 4 所示

2. 如图 2-13 所示为某质点沿 x 轴做简谐运动的振动图像，根据图像回答下列问题。

- (1) 在图中哪段时间内质点相对平衡位置的位移方向沿 x 轴的正方向？
- (2) 质点在任意 4 s 内的路程是否相同？若相同是多少？若不同试说明理由。
- (3) 图中质点在哪些时间内位移方向与瞬时速度的方向相同？在哪些时间内位移方向与瞬时速度的方向相反？
- (4) 在图中哪段时间内质点受到的回复力方向沿 x 轴正方向？

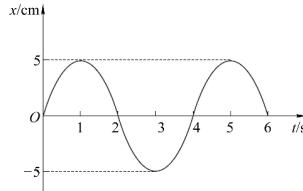


图 2-13

3. 某弹簧振子中小球的质量为 0.2 kg，当它运动到平衡位置左侧 2 cm 时，受到的回复力为 4 N。求小球运动到平衡位置右侧 4 cm 时的加速度。

4. 如图 2-14 (a) 所示，弹簧振子在水平方向做简谐运动， O 点为平衡位置， B 、 C 为两侧位移最大的位置。图 (b) 表示振动过程中弹簧振子在位置 O 的动能 E_k 、势能 E_p 和机械能 E 。试在图 (c) 和图 (d) 中画出弹簧振子经过位置 C 和 OB 间某一位置 D 的动能 E_k 、势能 E_p 及机械能 E 。

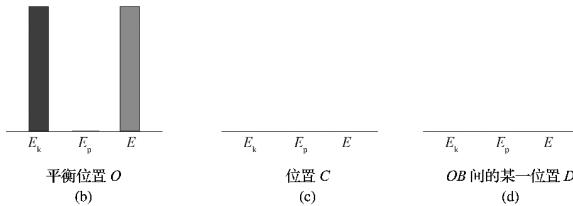
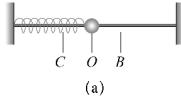


图 2-14

5. 由轻质弹簧和滑块构成的弹簧振子在光滑水平面上做简谐运动。有一小块黏土从高处竖直落下，刚好落在滑块上，随滑块一起振动。若黏土落到滑块上时，滑块刚好位于最大位移处，弹簧振子做简谐运动的振幅将保持不变，试从能量的角度解释上述现象。

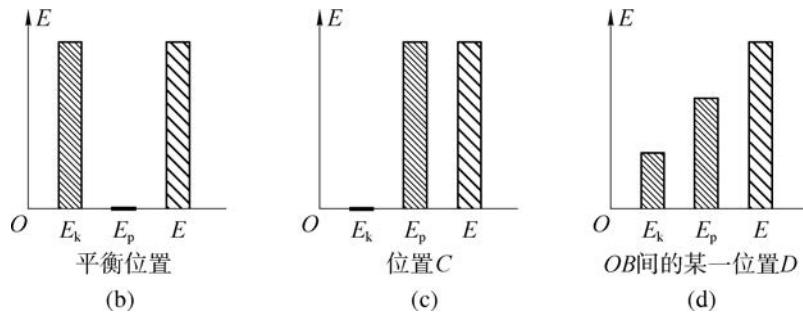


图 4

提示：三个图中表示机械能 E 的矩形一样高，图(d)中表示动能 E_k 和势能 E_p 之和等于机械能 E 。

命题意图：以图(b)为支架，通过图示直观描述振动过程中能量的变化和能量的守恒。

主要素养与水平：能量观念(Ⅲ)；交流(Ⅲ)。

5. 参考解答：振幅是表示振动强弱的物理量，与振动系统的总机械能有关。振子经过最大位移处时速度为零，此时系统的机械能为弹性势能。黏土从高处竖直落在振子上，改变滑块的质量，不改变滑块振动方向的速度和系统的弹性势能，因此系统的机械能不变，振幅不变

命题意图：从碰撞和能量的角度，对一个比较复杂的现象进行定性分析。

主要素养与水平：能量观念(Ⅲ)；科学推理(Ⅳ)。

本节编写思路

本节按照逐步深入的思路,研究单摆的运动。具体内容按以下思路展开:

1. 首先建立单摆模型,在此基础上,用图像研究摆球位置随时间的变化,得到单摆的振动图像。对图像定性分析,提出单摆可能做简谐运动的猜想。

2. 分析摆球受力与运动状态改变的关系,认识摆球受到的回复力由重力沿轨迹切线方向的分力提供;推导回复力与摆球偏离平衡位置位移的关系,验证单摆做简谐运动的猜想,明确单摆做简谐运动的条件。

3. 在观察猜想的基础上,用控制变量法探究单摆做简谐运动的周期与摆长的关系,并利用单摆做简谐运动的周期公式测量当地的重力加速度。

学习本节内容,将经历观察现象、建构模型、猜想假设、推理论证、实验探究与测量等过程,有助于学生科学思维和科学探究能力的发展。通过对单摆运动有意识的探究,可以形成对其规律的描述与解释,培养学生认真细致、实事求是的态度,增强团队合作的意识。

第三节 单摆

弹簧振子的振动是简谐运动的一个例子。如图 2-15 所示的“空中飞人”杂技演员的运动,与秋千、钟摆在竖直平面内的运动类似,也是周期性地在最低点附近来来回回地“摆动”。

[1] 为了研究摆动的规律,我们用细线下悬挂一个小球来近似表示上述所有的“摆”。如果细线的质量与小球的质量相比可以忽略,小球的大小与细线的长度相比也可以忽略,这样的装置就称为单摆 (simple pendulum)。单摆 (图 2-16) 也是一种物理模型。



图 2-15 “空中飞人”



图 2-16 单摆

拓展视野

1851 年,傅科演示了一个摆长为 67 m、摆锤质量为 28 kg 的单摆——傅科摆的运动。傅科摆的摆动周期很大,能够持续摆动很长时间。摆锤下方是巨大的沙盘,每当摆锤经过沙盘,摆锤上的指针就会在沙上留下运动的轨迹。人们发现,在傅科摆摆动的过程中,摆动平面会缓慢地沿顺时针方向转动。这是由于在北半球地球沿逆时针方向转动的结果,这一现象有力地证明了地球在自转。傅科摆是人们在地球上证实地球自转的第一个实验。在北半球,傅科摆 (图 2-17) 的摆动平面顺时针转动;在南半球,傅科摆的摆动平面逆时针转动,且纬度越高,转动越快。

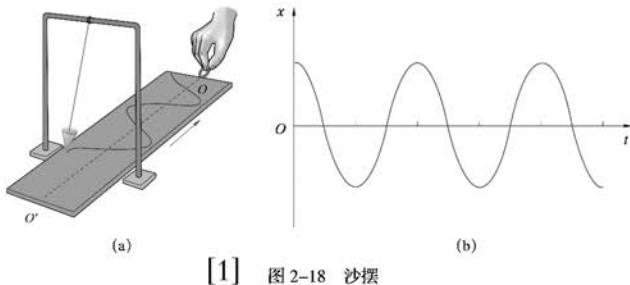


图 2-17 国家授时中心的傅科摆

► 单摆的振动图像

如图 2-18 (a) 所示, 将盛有细沙的漏斗吊在支架上, 支架下方放一块硬纸板, 漏斗静止时恰好位于直线 OO' 的正上方。沿垂直 OO' 的方向拉开漏斗, 使悬线以较小的角度偏离竖直方向, 释放漏斗后其在垂直于 OO' 的方向上自由摆动。漏斗摆动的同时沿着 OO' 的方向匀速拉动硬纸板。

每时每刻都会有细沙从漏斗中漏出落在硬纸板上, 硬纸板上细沙的分布反映了各个时刻漏斗的位置。盛有细沙的漏斗相当于单摆的摆球, 这条由细沙描绘的曲线显示了摆球的位置随时间变化的关系。将该曲线抽象为如图 2-18 (b) 所示的 $x-t$ 图像, 此图像与余弦函数的图像非常相似, 由此可以初步猜想单摆的摆动也是一种简谐运动。



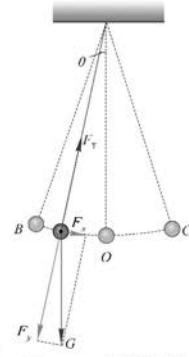
[1] 图 2-18 沙摆

► 单摆振动的原因

如图 2-19 所示, 将质量为 m 的摆球从平衡位置 O 拉到 B 点。放手后, 摆球在重力 G 和拉力 F_T 的作用下在 O 点两侧来回摆动。将重力 G 沿圆弧的切线和半径方向分解, 正是在重力沿圆弧切线方向的分力作用下, 摆球才能在竖直平面内沿圆弧 BC 往复运动。

摆球在任意位置所受重力沿切线方向分力的大小 $F = F_s = mg \sin \theta$, θ 为摆线与竖直方向的夹角^{*}。当摆角很小时, F 的方向近似指向平衡位置, 力 F 就是单摆的回复力; 此时摆球相对于 O 点的位移 x 的大小和摆角 θ 对应的弧长几乎相等。因此 $\sin \theta$ 近似等于位移 x 与摆长 l 的比值。单摆的回复力

$$F = -mg \frac{x}{l} = -kx$$



[2] 图 2-19 摆球的受力分析图

^{*}如果 θ 很小, 且用弧度制表示, θ 与 $\sin \theta$ 的值近似相等; θ 所对应的弦长和弧长也近似相等。这时可近似认为摆球沿直线在平衡位置两侧振动。

设此时该回复力产生的切向加速度为 a , 则由牛顿第二定律可得, $-mg \sin \theta = ma$, 代入加速度 $a = l \frac{d^2 \theta}{dt^2}$

$$\text{整理后可得, } \frac{d^2 \theta}{dt^2} + \frac{g}{l} \sin \theta = 0.$$

与简谐运动的动力学方程 $\frac{d^2 x}{dt^2} + \omega^2 x = 0$ 对比, 摆球角位移随时间并不按余弦函数规律变化, 因此,

单摆的摆动并不是简谐运动。只有在小角度摆动的情况下, 由于 $\sin \theta \approx \theta$, 单摆才近似做简谐运动。

[1] 在由沙摆获得振动图像的实验中, 若以速度 v 匀速拉动硬纸板, 纸板通过的距离 $L = vt$, 该距离 L 即表示沙摆摆动所经历的时间 t 。图中从坐标原点开始, 横轴方向的线段长反映了摆从初始时刻 (0 s), 沿纵轴方向摆动的时间 t 。这种以空间表示时间的方法也应用于地震监测仪、心电图仪等技术中。

[2] 单摆的摆动不同于弹簧振子的运动, 摆球是在竖直平面内沿以悬点为中心的圆弧来回运动, 因此, 一般研究其角位移随时间的变化。如教材图 2-19 所示, 设单摆的摆球质量为 m 、摆长为 l 。当摆球经过角位移为 θ 的位置时, 其重力沿切线方向的分力充当回复力, 表达式为 $F = -mg \sin \theta$, 式中负号表示力的方向与角位移的方向相反。

在此近似下，单摆受到的回复力与其偏离平衡位置位移的大小成正比，方向始终指向平衡位置，符合简谐运动回复力的特征。由此可见，在摆角很小的情况下，可近似认为单摆的运动是一种简谐运动。

► 单摆做简谐运动的周期

[1] 单摆的等时性是在小角度摆动时的近似结论。理论计算表明，即使最大摆角达到 15° ，摆的实际周期与等时周期相差不超过千分之五。周期与最大摆角的关系可参见本书第56页资料链接。

[1] 1581年，伽利略观察了悬挂着的蜡烛架的摆动。他用自己的脉搏计后发现，虽然蜡烛架摆动的幅度越来越小，但是每次摆动所用的时间却大致相等，摆动的周期与振幅无关，这就是摆的等时性。虽然不少科学家认为，这可能只是一个传说，但伽利略确实对摆进行了深入的研究。他设计了一个脉搏仪，用标准长度的单摆来测量脉搏。

单摆做简谐运动的周期与哪些因素有关？如何验证你的猜想？

自主活动

利用光电门传感器、天平、刻度尺研究单摆的周期与摆球质量、摆长之间的关系。

利用光电门测量单摆的周期 T （图2-20）、天平测量摆球的质量 m 、刻度尺测量摆长 l 。

保持摆长不变，研究单摆周期与摆球质量的关系。保持摆球质量不变，研究单摆周期与摆长的关系。



图2-20 测单摆周期的实验装置示意图

通过上述实验我们发现，单摆做简谐运动的周期与摆球的质量无关，周期与摆长的二次方根成正比。

实际上，早在17世纪惠更斯就发现单摆做简谐运动的周期与摆长的二次方根成正比，与重力加速度的二次方根成反比，与振幅和摆球的质量无关，确定了单摆振动的周期公式

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

单摆的周期仅由摆长与当地的重力加速度大小决定，称为单摆的固有周期，相应的频率称为固有频率。

拓展视野

通过对弹簧振子做简谐运动的分析可知，其周期 $T = 2\pi\sqrt{\frac{m}{k}}$ 。单摆做

简谐运动的回复力 $F = -mg\frac{x}{l} = -kx$ ，

将 $k = \frac{mg}{l}$ 代入即可得单摆小角度摆

动时的周期 $T = 2\pi\sqrt{\frac{l}{g}}$ 。

[1] 学生实验

用单摆测量重力加速度的大小

提出问题

重力加速度是一个重要的常量，地球上不同地点的重力加速度的大小不尽相同。如何通过实验测量重力加速度呢？

实验原理与方案

单摆的振动具有周期性，其周期与重力加速度的大小有关。当单摆做简谐运动时，其周期 T 与重力加速度 g 的关系为 $T = 2\pi \sqrt{\frac{l}{g}}$ ，式中 l 为摆长，则当地的重力加速度 $g = \frac{4\pi^2 l}{T^2}$ 。

分别测量单摆的摆线长度和摆球直径，以及单摆做简谐运动的周期，可得重力加速度的大小。

实验装置与方法

实验装置如图 2-21 所示。

细线下端连接一个小球，上端固定，构成单摆。使单摆在竖直平面内做简谐运动，用停表测量其做简谐运动的周期，用刻度尺测量悬挂状态下细线的长度，用游标卡尺测量小球的直径。

思考：如果没有游标卡尺，仅用刻度尺，如何比较准确地测量摆长？

实验操作与数据收集

将连接小球的细线上端固定在铁架台上，使之可自由摆动。

测量自由悬挂状态下细线的长度 l_0 和小球的直径 d ，摆长 $l = l_0 + \frac{d}{2}$ 。

使小球偏离平衡位置（摆角小于 5° ）并由静止释放做小角度摆动。

用停表测量单摆经过 30~60 次全振动的时间 t 。改变摆线的长度，重复几次实验。

将实验数据记录在表 2-4 中。

思考：为了尽量准确地测量周期，应以摆球位于最高点还是平衡位置的时刻作为计时的起点？为什么要测量 n 次全振动的时间？



图 2-21 用单摆测量重力加速度的实验装置

[1] 这是一个测量类学生实验，目的是根据单摆周期公式，利用单摆摆动的周期性，测量当地重力加速度的大小。在物理实验与活动部分中，本实验要求学生自主选择器材、设计实验步骤、选择数据处理方式、思考减小实验误差的方法等，以呼应课标最终要求学生独立撰写完整实验报告的水平要求。

问题与思考解读

36 第二章 机械振动

1. 参考解答：单摆运动的轨迹为圆弧，单摆的小角度摆动可视为简谐运动，经过平衡位置时在振动方向上外力为零，在指向圆心方向的合力不为零，摆球不处于受力平衡状态。在水平方向做简谐运动的弹簧振子经过平衡位置时回复力为零，合力为零，处于受力平衡状态。

命题意图：把单摆与弹簧振子两个简谐运动常用模型进行对比，从力与相互作用的角度分析单摆的简谐运动。

主要素养与水平：运动与相互作用观念(Ⅲ)；模型建构(Ⅱ)。

2. 参考解答：由简谐运动的特点可知，当摆角增大，摆球偏离平衡位置的位移增大，动能转化为重力势能，所以速度减小；由回复力和位移的关系 $F = -kx$ 可知，位移增大，回复力也增大。

提示：回复力的大小，也可用 $F_{回} = mg \sin \theta$ 表示，可得摆角 θ 增大，回复力也增大。

命题意图：引导从生活中摆(单摆摆动)的情境思考摆角增大时速度的变化情况；从单摆回复力是重力沿圆弧切线的分力，或机械运动的回复力与位移的关系，多视角厘清各个物理量之间的关系，分析摆角增大过程中它们的变化。

主要素养与水平：运动与相互作用观念(Ⅰ)；能量观念(Ⅰ)；科学推理(Ⅲ)。

3. 参考解答：光电门传感器的工作原理是：挡光时，通过的电流为零；无挡光时，电流不为零。光电门传感器位于摆的最低点，摆球通过光电门传感器时挡光，电流为零。单摆经过平衡位置起，在一个周期内会经过平衡位置两次，所以单摆的周期对应图 2-23 中的 $t_1 \sim t_3$ 或 $t_2 \sim t_4$ 时间段。

命题意图：呼应教材中的自主活动，能用光电门传感器测量单摆的周期，了解单摆周期测量的原理。

表 2-4 数据记录表

小球直径 $d = \underline{\hspace{2cm}}$ ，单摆全振动次数 $n = \underline{\hspace{2cm}}$

实验序号	摆线长度 l_0/m	n 次全振动的时间 t/s	摆长 l/m	周期 T/s
1				
2				
3				
4				
5				

数据分析

用图像法处理数据，在图 2-22 的坐标系中选择合适的物理量作为横、纵坐标。在坐标系中描出数据点，并据此画出相应的图像。使这些点近似分布在一条直线上。由直线的斜率可得重力加速度的测量值。

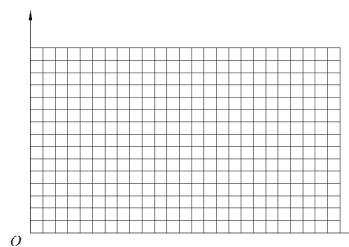


图 2-22 坐标图像

除了用图像法，还可如何处理数据得到结果？

实验结论

本地的重力加速度 $g = \underline{\hspace{2cm}} m/s^2$ 。

交流与讨论

交流各组测得的重力加速度值和数据处理方法，讨论提高测量精度的措施。

问题与思考

1. 单摆与弹簧振子做简谐运动经过平衡位置时是否处于受力平衡的状态？

2. 做简谐运动的单摆，在摆角增大的过程中，摆球的速度和回复力的大小如何变化？

主要素养与水平：

第三节 单摆 37

模型建构(Ⅲ)；科学推理(Ⅱ)。

3. 如果在“用单摆测量重力加速度的大小”的实验中将光电门传感器固定在摆动最低点来记录时间，图2-23所示为光电门传感器电流I与t的图像，分析单摆的周期与图中哪一段时间对应。

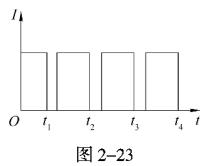


图2-23

4. 某同学利用单摆测当地的重力加速度大小，他发现测得的重力加速度比当地的公认值大。试分析可能的原因。

5. 周期为2 s的单摆称为秒摆，秒摆的摆长约为1 m。某同学观察到吊车缆绳下的物体从一侧最高位置摆到另一侧最高位置的时间约为5 s。推测缆绳的大致长度，并说明推测的依据。

6. 在“用单摆测量重力加速度的大小”的实验中，若摆长为l的单摆完成n次全振动的总时间为t，单摆周期为多少？某同学测得多组摆长l和周期T的数据，得到如图2-24所示的图线，若直线的斜率为k，写出重力加速度g与斜率k的关系。

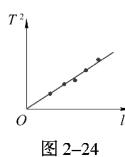


图2-24

4. 参考解答：单摆周期T与重力加速度g的关系为： $T = 2\pi \sqrt{\frac{l}{g}}$ 。若以悬点到摆球下端的长度作为摆长，则摆长偏长；若测周期时，以摆球经过平衡位置起计时，每次经过记为一次全振动，则周期偏小；以摆球经过平衡位置起计时，第一次经过读数为“1”，读数“30”认为全振动是30次，其实只有29次，则周期偏小。这些均可能导致测得的重力加速度值偏大

命题意图：“用单摆测量重力加速度大小”的实验，是有一定精度要求的实验，设想实验中可能发生的错误操作，预测其对测量结果的影响，引导实验中加以关注。

主要素养与水平：质疑(Ⅲ)；科学态度

(Ⅱ)。

5. 参考解答：一般吊车缆绳与物体组成的摆动系统的摆动偏角很小，将吊车缆绳下物体的摆动视为单摆做简谐运动，其从一侧最高位置摆到另一侧最高位置的时间为半个周期，周期 $T=10$ s。根据单摆周

期公式 $T=2\pi \sqrt{\frac{l}{g}}$ 可知， $\frac{T_1^2}{T_2^2}=\frac{l_1}{l_2}$ ，故缆绳的长度约为25 m

命题意图：将缆绳下物体的运动抽象为单摆的小角度摆动，利用秒摆的信息，通过比较估算绳长。

主要素养与水平：运动与相互作用观念(Ⅱ)；模型建构(Ⅲ)。

6. 参考解答：单摆的周期 $T=\frac{t}{n}$ 。图2-24中图线的斜率 $k=\frac{T^2}{l}$ ，根据单摆周期公式 $T=2\pi \sqrt{\frac{l}{g}}$ ，

得 $g = \frac{4\pi^2 l}{T^2}$, 故重力加速度 $g = \frac{4\pi^2}{k}$

命题意图: 呈现不同的数据分析方式,通过推理获得结论,培养学生在实验中多样化数据处理的能力。

主要素养与水平: 解释(Ⅲ);科学论证(Ⅱ)。

资料链接

“单摆周期与振幅无关”的讨论

只有在摆角足够小的情况下,单摆的摆动才可以近似看作简谐运动,其周期才满足公式 $T_0 = 2\pi\sqrt{\frac{L}{g}}$, 与振幅无关,是单摆的固有周期。在任意摆角的情况下,单摆周期 T 与最大摆角 θ_{\max} 的关系为:

$$T = T_0 \left(1 + \frac{1}{4}\sin^2 \theta_{\max} + \frac{9}{64}\sin^4 \theta_{\max} + \dots\right)$$
(得出这一结果的参考文献,可通过“单摆的周期与摆角的关系”关键词检索查阅)。

根据上述公式,可以计算出最大摆角 θ_{\max} 对单摆周期的影响,如下表所示。

θ_{\max}	5°	10°	15°	20°	30°	45°	60°
$\frac{T - T_0}{T_0}$	0.000 5	0.001 9	0.004 3	0.007 7	0.017 4	0.036 9	0.071 9

可见,当摆角较小时,单摆的摆动可视为简谐运动,其摆动具有等时性,周期为固有周期。

本节编写思路

本节以简谐运动的特征和规律为基础,研究生产生活中普遍存在的在周期性外力作用下的振动。本节内容按以下思路展开:

- 分析实例,引入与受迫振动相关的概念;通过实验观察和分析,得出受迫振动的规律。
- 结合实验观察和分析,认识共振现象及其产生的条件。
- 介绍共振在生产生活中的现象,了解利用与防止共振的方法。

学习本节内容,将经历实验观察、实例分析、建立概念、得出规律的过程,有助于学生拓展关于机械振动特征和规律的认识,增强观察、分析、概括和交流的能力,激发对自然现象的好奇心,感悟科学、技术和社会生活之间的关系。

第四节 受迫振动 共振

[1] 弹簧振子的振动不可能永远持续下去。这是因为在振动的过程中总是存在各种阻力;振动系统不断克服阻力做功,机械能逐渐减小,振幅也不断减小,最后停止振动。振动系统所受的阻力越大,振幅减小得越快,如果阻力过大,振动将无法发生。

▶ 受迫振动

[2] 荡秋千时,想要秋千持续摆动,保持原来的最大高度,即保持秋千的振幅不变,可以让小伙伴按照秋千摆动的节奏在合适的时机周期性地施加推力来维持。通过推力做功来补偿机械能的损耗。由此可见,为维持持续振动需要外力作用于振动系统,振动系统在周期性外力作用下的振动称为受迫振动(**forced vibration**)。这种周期性的外力称为受迫振动的驱动力(**driving force**)。

如图2-25所示,建筑工人正在用振捣器捣实混凝土。振捣器工作时,混凝土内部的颗粒发生受迫振动,颗粒间的空隙被砂浆填充,气泡被挤出,从而增加混凝土的强度。洗衣机运转时底座发生的振动、扬声器发声时纸盆的振动等都是受迫振动。

为保持物体的持续振动,需要利用驱动力适时地补充能量。物体受迫振动的规律与驱动力有何关系呢?



图2-25 建筑工人用振捣器工作

[3] 自主活动

在如图2-26所示的装置中,弹簧振子悬挂在O点,匀速转动摇柄可使O点在竖直方向做周期性运动,带动弹簧振子在周期性驱动力的作用下做受迫振动。摇柄的转动周期即为驱动力的周期。

不转动摇柄,估测弹簧振子自由振动的振动周期(频率)。以不同转速匀速转动摇柄,估测弹簧振子受迫振动周期(频率),并分析其与自由振动周期(频率)、驱动力周期(频率)间是否有关。

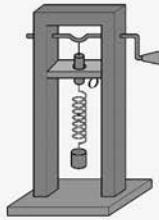


图2-26 研究受迫振动的装置

正文解读

[1] 通过描述阻力影响下弹簧振子的运动情况,初步体会真实的机械振动都是在回复力和其他外力共同作用下发生的。

[2] 此处通过秋千、振捣器等实例,引入受迫振动和驱动力的概念。

[3] 这是一个通过观察发现规律的自主活动。实验中,首先让弹簧振子做自由振动,测出其固有周期;再观察用较小转速匀速转动摇柄时,转动周期与振子固有周期的关系;最后,改变摇柄的转速,观察不同转速下弹簧振子振幅的变化。

大量实验表明，弹簧振子做受迫振动稳定后的频率总是等于驱动力的频率，与自由振动的频率无关。当驱动力的频率很低或很高时，振子的振幅均不大；当驱动力的频率接近弹簧振子自由振动的频率时，振幅会剧烈增大。

[1] 此处介绍的是振幅随驱动力频率变化的情况。实际上振子的最大速度也会随驱动力频率而变化。

[2] 这是一个观察共振现象的自主活动。具体说明见物理实验与活动部分。

[1] ▶ 共振现象

调节驱动力的频率，将频率不同的驱动力先后作用于同一个振动系统，其做受迫振动的振幅 A 将随驱动力的频率 f 变化，如图 2-27 所示。

可以看出，当驱动力的频率 f 接近系统做自由振动的频率 f_0 （即为系统的固有频率）时，受迫振动的振幅剧烈增大，这种现象称为**共振（resonance）**。

弹簧振子系统在驱动力的作用下会发生共振。单摆在驱动力的作用下是否也会发生共振？

[2] ◆ 自主活动

如图 2-28 所示，在有弹性的横梁上悬挂四个摆，其中 A 摆和 C 摆的摆长相等。 A 摆开始振动后， B 摆、 C 摆、 D 摆也随之振动起来。

B 摆、 C 摆、 D 摆做什么振动？它们振动的频率是否相等？哪个摆的振幅最大？为什么？

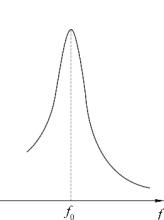


图 2-27 受迫振动振幅 A 与驱动力频率 f 的关系

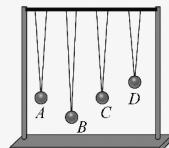


图 2-28 观察摆的受迫振动及共振装置

实验表明，与 A 摆摆长相同的 C 摆振幅最大，即发生了共振。这一结果又一次表明，当驱动力频率与系统的固有频率接近时，会产生共振现象。

共振现象普遍存在于各个领域，《梦溪笔谈》中写道：“余友人家有一琵琶，置之虚室，以管色奏双调，琵琶弦辄有声应之，奏他调则不应，宝之以为异物，殊不知此乃常理。”琵琶琴弦自动应和管乐之音的现象其实是因为管乐声波的振动引起了琵琶的共振。

微波炉加热就是一个生活中利用电磁波共振加热的例子。食物中水分子的固有振动频率约为 2 500 MHz，处于电磁波谱的“微波”波段。微波炉加热食品时，炉内产生很强的电磁场振荡，使食物中的水分子做受迫振动。由于电磁场驱动力频率与水分子的固有频率相近，水分子发生共振，将电磁辐射能转化为内能；从而使食物内部的温度迅速升高。微波加热是对物体内部的整体加热，极大地提高了加热效率，完全改变了人类传统的加热食物的方式。

核磁共振现象是原子核在外磁场作用下发生共振而吸收某一频率电磁波的物理过程。目前核磁共振成像（MRI）检查已成为一种常见的影像检查方式，在对大多数器官早期病变的筛查方面较其他检查手段有其特定的优势，并且这种检查技术由于没有放射性，不会

问题与思考解读

40 第二章 机械振动

对人体健康产生影响。

事物都具有两面性。在某些情况下，共振也可能造成损害。

机床加工需要很高的精度，机床运转时会产生周期性的驱动力。若造成共振，振幅过大将降低加工质量，缩短机床的使用寿命。因此，在设计机床和放置机床的厂房时都要考虑共振的影响。

总之，利用共振时应使驱动力的频率接近振动物体的固有频率；防止共振时应使驱动力的频率远离振动物体的固有频率。

问题与思考

1. 如图 2-29 所示，A、B 是两个完全相同的音叉，将它们的共鸣箱相对放置，敲击音叉 A 后迅速用手捂住它，使它停止振动。此时，是否还能听到音叉振动发出的声音？为什么？

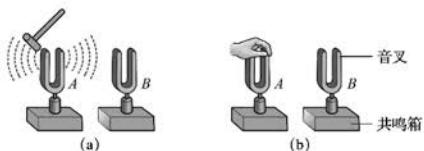


图 2-29

2. 说一说，生活中还有哪些利用和防止共振的实例。

3. 如图 2-30 所示的装置，弹簧振子的固有频率是 4 Hz。现匀速转动摇柄，给弹簧振子以周期性的驱动力。某同学分析得到弹簧振子振动达到稳定时的频率为 1 Hz，由此推测摇柄转动的频率是多少。

4. 表 2-5 记录了某受迫振动的振幅随驱动力频率变化的关系，分析该振动系统的固有频率 $f_{固}$ 约为多少？

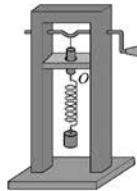


图 2-30

表 2-5

驱动力频率 $f_{驱}/\text{Hz}$	30	40	50	60	70	80
受迫振动振幅 A/cm	10.20	16.80	27.20	28.10	16.50	8.30

5. 在某些道路上安装了若干条突起于路面且与行驶方向垂直的减速带，当车辆经过减速带时会产生振动。假如减速带间距为 10 m，汽车的固有频率为 1.25 Hz，车辆以多大的速度行驶在此减速区时颠簸得最厉害？

力完成一次周期性变化，摇柄转动的频率即为驱动力的频率。弹簧振子做受迫振动，而受迫振动的频率等于驱动力的频率，与振动系统的固有频率无关。

命题意图：厘清物体受迫振动的频率与驱动力的频率的关系。

主要素养与水平：模型建构(Ⅲ)；科学论证(Ⅱ)。

4. 参考解答：由数据表可知，驱动力的频率为 60 Hz 时，振幅最大；驱动力的频率为 70 Hz 时，振幅又减小。由共振曲线推得 $f_{固}$ 在 50 Hz 到 70 Hz 之间，接近 60 Hz。

命题意图：对数据进行简单的分析，根据振幅与驱动力频率的图像，由振幅的变化推测固有频率的范围。

主要素养与水平：科学推理(Ⅰ)；解释(Ⅱ)。

1. 参考解答：能够听到。因为音叉 A 与音叉 B 完全相同，它们的固有频率也相同。音叉 A 被敲击后以固有频率振动，向周围发出声波。即使音叉 A 被捂住，不再振动，但其发出的声波使音叉 B 发生共振，音叉 B 发出与音叉 A 相同频率的声音。

命题意图：对实验现象进行简单的推理，认识共振发生的条件。

主要素养与水平：运动与相互作用观念(Ⅱ)；科学推理(Ⅱ)。

2. 参考解答：荡秋千时，按一定的节奏推，秋千摆得更高；船只在周期性波浪作用下，晃动幅度增大；乐器的共鸣箱等。

命题意图：建立共振与生活实际的联系。

主要素养与水平：社会责任(Ⅰ)。

3. 参考解答：1 Hz。摇柄每转动一周，驱动

5. 参考解答：由汽

车的固有频率为 1.25 Hz 可知，汽车的固有周期为 0.8 s 。设车辆经过减速带时匀速行驶，速

$$\text{度 } v = \frac{x}{t} = \frac{10}{0.8} \text{ m/s} =$$

$$12.5 \text{ m/s} = 45 \text{ km/h}。$$

以此速度在减速区匀速行驶，车辆容易发生共振，颠簸厉害

命题意图：将实际情境中的信息进行转化，解释生活中的共振现象。

主要素养与水平：模型建构(IV)；社会责任(I)。

小结 41

小结

· 基本概念和基本规律

机械振动：物体在某一位置附近的往复运动。

简谐运动：质点相对平衡位置的位移与时间关系遵从余弦函数(或正弦函数)规律的振动。

振幅：振动物体离开平衡位置的最大距离，用符号 A 表示。

周期：振动物体完成一次全振动所需的时间，用符号 T 表示。

频率：完成全振动的次数与所用时间之比，用符号 f 表示。

回复力：振动物体受到的总是指向平衡位置的力。做简谐运动物体所受的回复力与相对平衡位置的位移大小成正比，方向相反。

单摆做简谐运动的周期：与摆球的质量和振幅无关，周期与摆长的二次方根成正比，与重力加速度的二次方根成反比。

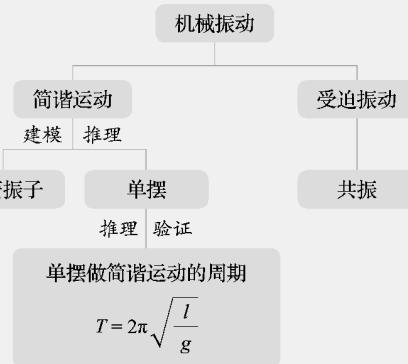
共振：当驱动力的频率 f 接近系统做自由振动的频率 f_0 时，受迫振动的物体振幅剧烈增大的现象。

· 基本方法

经历形成简谐运动概念和建立弹簧振子、单摆模型的过程，感受抽象与建模的方法。

通过实验数据的分析、解释过程，认识将实验数据线性化处理的思想与方法。

· 知识结构图



复习与巩固解读

复习与巩固

- 说说机械振动的运动特征。图 2-31 为某质点运动的位移 x 与时间 t 的关系图像，判断该质点是否在做机械振动，为什么？
- 某简谐运动的振幅为 4 cm，振动物体在 1.0 s 内通过的路程为 36 m，则简谐运动的频率是多少？
- 某弹簧振子做简谐运动，振动物体先后以相同速度通过相距 1.0 cm 的 A 、 B 两点，历时 0.2 s，再从 B 点回到 A 点的最短时间为 0.4 s。弹簧振子的平衡位置在何处，其运动周期及频率为多少？
- 甲、乙两个人先后观察同一弹簧振子在水平面内左右振动情况。已知弹簧振子的振幅为 5 cm，周期为 2 s。设平衡位置右方为 x 轴正方向，作 $x-t$ 坐标如图 2-32 (a)、(b) 所示，时间轴上每格代表 0.5 s。则：
 - 甲开始观察时，振动物体正好在平衡位置且向右运动，试在图 (a) 中画出甲观察到的弹簧振子的振动图像。
 - 乙在甲观察 3.5 s 后开始观察并计时，试在图 (b) 中画出乙观察到的弹簧振子的振动图像。

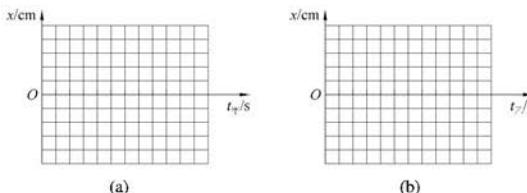


图 2-32

- 图 2-33 为某人的心电图。如果心电图仪卷动纸带的速度为 1.5 m/min，图中每格的宽度为 5 mm，则由此可估算出此人的心率为多少？



图 2-33

- 某单摆在地球上摆动振幅为 A 时，周期为 T 。当把该单摆放在月球上以 $\frac{1}{2}A$ 的振幅摆动时，周期变为多少？(月球的重力加速度大约是地球的 $\frac{1}{6}$)

0.2 s，则周期 $T = 0.8$ s，频率 $f = 1.25$ Hz

命题意图：认识振动的周期性、对称性。
根据分段描述推断周期。

主要素养与水平：运动与相互作用观念
(III)；模型建构(II)。

4. 参考解答：(1) 如图 5 所示 (2) 如图 6 所示

命题意图：将文字描述转化为弹簧振子的振动图像，了解振动图像随时间的变化特征。

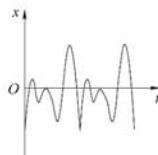


图 2-31

1. 参考解答：机械振动的运动特征是周期性的变加速运动。图 2-31 所示的质点的运动符合机械振动的运动特征，是机械振动

命题意图：认识振动是一种普遍存在的运动类型，了解振动的特点。

主要素养与水平：运动与相互作用观念(I)；科学推理(II)。

2. 参考解答：振动物体 1.0 s 内通过的路程是振幅的 900 倍，即完成 225 次全振动，故频率为 225 Hz

命题意图：用振动的周期性推理振动的频率。

主要素养与水平：科学推理(III)；证据(II)。

3. 参考解答：根据简谐运动的对称性，平衡位置在 A 、 B 两点连线的中点。由题意得， $\frac{T}{4} =$

$$\left(\frac{0.2}{2} + \frac{0.4 - 0.2}{2}\right) \text{ s} =$$

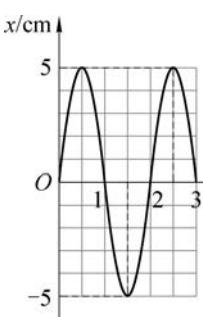


图 5

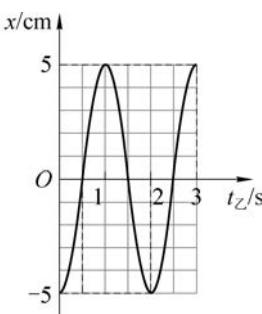


图 6

主要素养与水平：

运动与相互作用观念(Ⅲ);模型建构(Ⅱ)。

5. 参考解答：

由图2-33知,纸带移动15.5格为0.0775 m,历时

$$t = \frac{s}{v} = \frac{0.0775}{1.5} \text{ min} \approx$$

0.052 min。其间心跳4次,心率约为77次/min

命题意图：将心脏的跳动与心电图建立联系,寻找周期运动的特点。

主要素养与水平：运动与相互作用观念(Ⅲ);模型建构(Ⅳ)。

6. 参考解答：单摆摆动周期与振幅无关,与当地重力加速度有关。根据单摆周期公

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

重力加速度为地球的 $\frac{1}{6}$,则该单摆在月球上

的周期为 $\sqrt{6}T$

命题意图：认识单摆的等时性,了解影响单摆周期的因素。

主要素养与水平：

科学推理(Ⅱ);科学论证(Ⅱ)。

7. 参考解答：

(1) 因振子沿振动方向位移的最大值为3 cm,即从一侧最大位移到另一侧最大位移处的距离为3 cm。振子的振幅 $A = 1.5 \text{ cm}$,振子的周

$$\text{期 } T = \frac{t}{n} = 0.2 \text{ s} \quad (2) \text{ 如图7所示} \quad (3) x = -A \sin\left(\frac{2\pi}{T}t\right) =$$

$$-0.015 \sin(10\pi t) (\text{m})$$

命题意图：将文字描述的简谐运动过程转化为图像,用表达式表示振动过程。

主要素养与水平：模型建构(Ⅲ);解释(Ⅱ)。

7. 某弹簧振子在水平方向做简谐运动,以水平向右为位移正方向,振子中的小球沿振动方向运动的最大位移为3 cm,小球在2 s内完成了10次全振动。若从小球经过平衡位置时开始计时,经过 $\frac{1}{4}$ 周期小球有正向最大加速度。则:

- (1) 弹簧振子做简谐运动的振幅和周期为多少?
- (2) 在图2-34中画出小球的位移—时间图像。
- (3) 写出小球的位移—时间关系式。

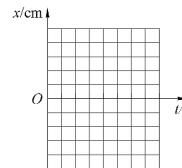


图2-34

8. 一个做简谐运动的弹簧振子,当 $t=0$ 时小球位于平衡位置。试分别画出弹簧振子的机械能、动能随时间变化的大致图像(一个周期)。

9. 一位天文学家带着一个摆钟到赤道地区进行天文观测。这个摆钟在启程时调得非常准确,但到了赤道地区后,摆钟却每昼夜慢2 min。于是他调整摆长,使其恢复准确。当他将摆钟带回出发地时,发现钟又走快了。试对上述事实做出合理的解释。

10. 如图2-35所示,装有砂粒的试管竖直浮于水面上静止。将试管竖直提起少许后由静止释放,可以观察到试管上下振动。试判断这种振动是否为简谐运动,表述论证的思路。



图2-35

11. 将盛有细沙的漏斗吊在支架上,支架下放一块硬纸板演示单摆摆动图像。甲、乙两同学分别得到两个摆中的细沙在各自木板上形成的曲线(图2-36),板上的直线 OO' 代表时间轴,板上的曲线显示出摆的位移随时间变化的关系。甲和乙拉动硬纸板的速度分别为 v_1 和 v_2 ,且 $v_2=2v_1$,根据曲线推测两个摆的振动周期 T_1 和 T_2 的大小关系。

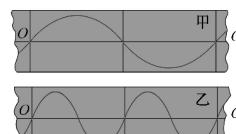


图2-36

12. 某课外兴趣小组想做“用单摆测量当地重力加速度的大小”的实验研究。为使实验尽可能准确,他们该如何选择摆球?在实验中,他们通过记录单摆振动 n 次所用的时间 t 获得了单摆的周期 T ,多次改变摆长,测得多组周期 T 与摆长 l 的数据,并据此画出 T^2-l 图像,通过计算获得重力加速度大小。试问,如果摆球选择不合适,或者摆长测量有误,会对实验结果产生怎样的影响?为何要用 T^2-l 图像来处理实验数据?

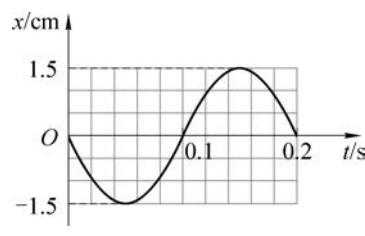


图7

8. 参考解答：弹簧振子做简谐运动，只有弹簧弹力做功，系统动能和弹性势能相互转化，系统总的机械能不变。在一个周期内，从平衡位置起计时，动能先减小后增大，再减小、再增大。如图 8 所示

提示：此处不要求写出动能随时间变化的表达式。

命题意图：从能量观念的角度分析弹簧振子的振动过程。

主要素养与水平：能量观念(Ⅱ)；模型建构(Ⅲ)。

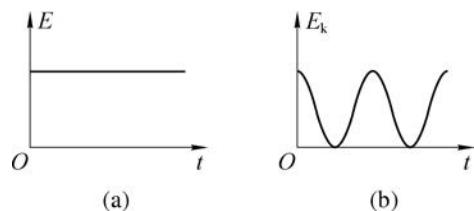


图 8

9. 参考解答：将摆钟的摆动视为简谐运动，其周期 $T = 2\pi \sqrt{\frac{l}{g}}$ 。从出发地到赤道地区，同一摆钟，同一摆长，周期变长。由此可推得两地的重力加速度不同，可知赤道地区的重力加速度小于出发地的重力加速度。因此，在赤道应调短摆长，使周期变小，回到出发地应恢复为原摆长

提示：此处提出的 2 min 仅仅是事实性描写，并不要求进行严格的计算。

命题意图：用单摆做简谐运动的模型对摆钟走时快慢变化的事实做出合理解释。

主要素养与水平：模型建构(Ⅳ)；科学推理(Ⅲ)。

10. 参考解答：试管悬浮于水面上，试管所受的重力与浮力平衡，合力为零。设此位置为平衡位置。若试管沿竖直方向偏离平衡位置的位移为 x ，浮力改变，重力不变，忽略阻力影响。浮力变化量的大小即为试管所受重力和浮力合力的大小，方向始终指向平衡位置，合力即为回复力。设试管横截面积为 S ，回复力 $F_{回} = -\Delta F_{浮} = -\rho g S x$ ，取 $k = \rho g S$ ，则 $F_{回} = -kx$ 符合简谐运动的条件，这种振动为简谐运动

提示：也可拍摄一段视频，分析试管离开平衡位置的 x 与时间 t 的图像，根据 $x-t$ 图像是否具有正弦图像的特点来加以论证。

命题意图：能使用恰当的证据，进行分析和推理，表达自己的结论。

主要素养与水平：模型建构(Ⅳ)；科学论证(Ⅲ)。

11. 参考解答：沿 OO' 拉动纸板运动相同长度 l 所用的时间之比为 $\frac{t_1}{t_2} = \frac{\frac{l}{v_1}}{\frac{l}{v_2}} = \frac{v_2}{v_1} = 2$ ，由图 2-36 可知，在运动 l 的距离内，甲用时一个周期，乙用时 2 个周期，即 $\frac{t_1}{t_2} = \frac{T_1}{2T_2}$ ，结合两式，得 $T_2 = \frac{T_1}{4}$

命题意图：从时间和空间两个维度，认识单摆摆动的周期性。

主要素养与水平：模型建构(Ⅳ)；科学推理(Ⅲ)。

12. 参考解答：摆球选用体积小、密度大的球。摆球会因为打孔造成质量分布变化，所得图像可能不通过原点，对结果无影响。若某一次摆长测量有误，可能导致该数据点与其他点不在一条直线上。若该点明显偏离，应舍弃，对结果无影响。根据实验数据作 $T-l$ 图，所得图像不是直线，而 T^2-l 图像是一条直线，可利用图像的斜率分析重力加速度。用图像可以减小误差对实验结果的影响；也可在刻度尺不够长时，提供正确测量部分摆长来获取数据，通过 T^2-l 图像分析获得重力加速度

命题意图：依据已有的方案，能选用合适的实验器材，对方法和结果进行反思和评价。

主要素养与水平：证据(Ⅱ)；质疑创新(Ⅲ)。

第三部分 本章练习部分解读

第一节 机械振动 简谐运动

1. 静止(或平衡)

2. 平衡位置 周期

3. 弹簧 小球(或物块) 阻

4. 简谐 余弦或正弦

5. 最大 速度

6. $1.6 \quad 1.4$ 或 $0.53 \quad 0.33$ 若振子从 O 点开始向右运动, P 点在 O 点的右侧, 则 $T = 4 \times (0.3 + \frac{0.2}{2})$ s = 1.6 s, $\Delta t = 0.3 \times 2 + \frac{T}{2} = 1.4$ s。若振子从 O 点开始向右振动, P 点在 O 点左侧, 则 $\frac{3}{4}T = 0.4$ s, $T \approx 0.53$ s, $\Delta t = (0.53 - 0.2)$ s = 0.33 s

7. $x-t$ 图像的斜率代表速度的大小, 图(a)中, 物体在一个周期内, 先沿正方向做匀速直线运动, 然后静止, 再沿反方向做匀速直线运动, 随即又静止, 之后再沿正方向做匀速直线运动, 并回到出发位置, 整个运动过程以时间 T 为周期不断重复。该物体做机械振动但不是简谐运动。图(b)中, 物体做简谐运动, 其 $x-t$ 图像符合简谐运动的特点, 物体在一个周期内, 沿正方向先加速后减速, 然后沿反方向先加速后减速, 回到出发位置。图(c)中, 物体做简谐运动, 因为 $x-t$ 图像是正弦函数图像, 符合简谐运动的特点。物体在一个周期内, 先沿正方向做减速直线运动, 再沿反方向做加速直线运动, 然后再沿反方向做减速直线运动, 之后再沿正方向做加速直线运动, 并回到出发位置, 整个运动过程以时间 T 为周期不断重复

8. 不同意。根据 $x = A \cos\left(\frac{2\pi}{T}t\right)$, 当 $t = \frac{1}{4}T$ 时, $x = 0$, 即物体处于平衡位置; 当 $t = \frac{1}{8}T$ 时, $x = \frac{\sqrt{2}}{2}A$

9. (1) 拍摄第一帧时, 振子位于平衡位置, 因此每次拍摄时振子均在该位置出现, 频闪照片中的振子看似静止在平衡位置 (2) 这两张照片中的振子均只出现在三个不同的位置, 其中一个为平衡位置, 另两个位置关于平衡位置对称。第一张照片中, 振子的位置分别为平衡位置和两个位移最大的位置, 第二张照片中, 振子的位置为平衡位置及位于平衡位置和最大位移之间的关于平衡位置对称的两个位置

第二节 简谐运动的回复力和能量

1. 平衡位置 零

2. kx 相反

3. 弹力 守恒

4. 如图 9 所示(图 9 所示仅是答案之一)

5. (1) 因为振子经过 P 、 Q 时速度相同, 所以平衡位置在 PQ 连线的中点处 (2) $T = 4 \times \left(\frac{0.4 - 0.2}{2} + \frac{0.2}{2}\right)$ s = 0.8 s, $f = \frac{1}{T} = \frac{1}{0.8}$ Hz = 1.25 Hz

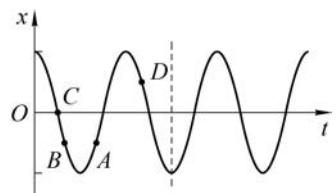


图 9

6. (1) $T = \frac{10}{15} \text{ s} \approx 0.67 \text{ s}$ (2) $x = A \cos\left(\frac{2\pi}{T}t\right) = 20 \times 10^{-2} \times \cos\left(\frac{2\pi}{\frac{2}{3}} \times 0.8\right) \text{ m} \approx 0.062 \text{ m}$

7. 由晶片的频率 $f = 4 \times 10^4 \text{ Hz}$, 得其周期 $T = 2.5 \times 10^{-5} \text{ s}$, 由晶片做简谐运动的周期 $T = 2\pi\sqrt{\frac{m}{k}}$, 得 $k = \frac{4\pi^2 m}{T^2} = 6.3 \times 10^6 \text{ N/m}$

8. 由图(b)可知, 振幅 $A = \frac{0.1275 - 0.0825}{2} \text{ m} = 0.0225 \text{ m}$, 根据机械能守恒定律, 由图可得, 当势能为零时, B 球的动能为 0.04 J , 根据动能定理, 得 $W = \Delta E_k = E_{k\max} - 0$, $E_{k\max} = \frac{1}{2}F_{\text{回max}} \cdot A = \frac{1}{2}k \cdot A^2 = 0.04 \text{ J}$, 则 $k \approx 158.02 \text{ N/m}$

9. (1) 设振子的平衡位置为 O , 取向下为正方向, 此时弹簧的形变量为 x_0 , 根据胡克定律及平衡条件有 $mg = kx_0$, 当振子向下偏离平衡位置为 x 时, 回复力(即合力)为 $F = mg - k(x + x_0)$ 。解得 $F = -kx$, 可见重物振动时的受力符合简谐运动的条件, 即重物的运动是简谐运动 (2) 取向上为正方向, $x = 0.1 \sin(2\pi t) \text{ m}$

10. 拍摄时应保持摄像头与标记点在同一水平高度处

第三节 单 摆

1. 质量 理想

2. 重力 分

3. 余弦或正弦

4. 无关 无关 等时或周期 惠更斯

5. 单摆的回复力是重力沿圆弧切线方向的分力。在平衡位置时, 回复力为零, 合力不为零。摆动过程中, 重力沿摆线的分力与拉力的合力提供向心力, 除摆球经过最高点外, 不为零

6. a 表示动能的变化, c 表示机械能的变化 A 点、 C 点对应最低点, B 点对应最高点

7. (1) 摆长增加一倍, 周期变为原来的 $\sqrt{2}$ 倍 (2) 根据 $T = 2\pi\sqrt{\frac{l}{g}}$, 摆长变为原来的 4 倍后周期变为原来的 2 倍。当摆角为 θ 时, 单摆上升高度为 Δh , 根据机械能守恒定律 $mg\Delta h = \frac{1}{2}mv^2$, 即 $v = \sqrt{2g\Delta h} = \sqrt{2gl(1-\cos\alpha)}$, 此时最大速度是原来的 2 倍。根据 $F = mg\sin\alpha$, 最大回复力不变

8. 该双线摆前后摆动时, 可等效为一个摆长为 $l\sin\alpha$ 的单摆, 故其周期 $T = 2\pi\sqrt{\frac{l\sin\alpha}{g}}$ 。与摆长为 $l\sin\alpha$ 单摆的周期进行比较: 使两摆同步摆动, 经历足够长时间, 观察两摆的运动是否一致

9. 设摆线与竖直方向的最大夹角为 θ , 根据机械能守恒, $\frac{1}{2}mv^2 = mgl(1-\cos\theta)$, 得 $\cos\theta \approx 0.998$, $\theta \approx 3.62^\circ$ 。钉了钉子后摆长变为 80 cm, 设此时摆线与竖直方向的最大夹角为 α , 则 $t = \frac{T_1}{2} + \frac{T_2}{2} = \pi\sqrt{\frac{l}{g}} + \pi\sqrt{\frac{l}{2g}} \approx 2.14 \text{ s}$ 。由机械能守恒, 得 $mgl(1-\cos\theta) = mg \frac{l}{2}(1-\cos\alpha)$, 即 $1.6 \times (1-\cos\theta) =$

$0.8 \times (1 - \cos \alpha)$, 得 $\alpha \approx 5.13^\circ$

10. 表中所缺数据为 1.500 和 244.9, 重力加速度为 9.869 m/s^2

11. 根据 $F-t$ 图像可知小球做周期性的摆动, 每次经过最低点时速度最大, 所需向心力最大, 故传感器测得的值最大, 小球在最高点时传感器测得的值最小。 t_1 到 t_2 时间内, 小球从最高点运动到最低点, 忽略阻力的影响, 根据机械能守恒定律估算重力势能的变化值。此过程中小球的初速度为 0, 设小球在最低点的速度为 v , 由牛顿第二定律, 有 $F - mg = m \frac{v^2}{L}$, 动能的增加量 $\Delta E_k = \frac{1}{2}mv^2$, 得势能的增加量 $\Delta E_p = -\Delta E_k = -\frac{(F - mg)L}{2}$

第四节 受迫振动 共振

1. 受迫 周期性
2. 回复(或“弹”) 固有
3. 驱动力 无关
4. 接近(等于) 共振
5. 乙 300 300

6. 用声波将玻璃杯击碎, 利用的是共振现象, 而物体发生共振现象的条件为驱动力的频率与物体的固有频率相同。用手指轻弹玻璃杯发出的声音的频率可近似为玻璃杯的固有频率, 所以将声波发生器的频率调到接近该频率就能击碎玻璃杯

第四部分 本章实验与活动部分解读

1 自主活动 研究单摆周期与摆球质量、摆长之间的关系

参考解答: T 坐标转化为 T^2 , 或 l 坐标转化为 \sqrt{l} , 可将图像转化为直线

命题意图: 用图像的方法来处理实验数据。

2 学生实验 用单摆测量重力加速度的大小

(1)

设 想	是否合理	理 由
摆的振幅越大越好	否	摆的振幅增大, 摆角也随之增大。摆角大到一定程度时, 其运动不能视为简谐运动
摆球的质量应大些、体积应小些	是	可以减小空气阻力的影响
摆线应细些, 长约 1 m, 伸缩性应小些	是	摆线尽量细些, 其质量可不计。摆线长一些, 可使单摆小角度摆动时的摆幅不至于太小, 便于测量摆动的次数和时间。摆线的伸缩性小则可认为摆长保持不变
计时的起点和终点位置均选在摆球达到的最高点处	否	最低点的位置在摆动的过程中不变。摆球通过最低点的速度最大, 人眼容易分辨摆球经过最低点的时刻。以最低点为计时的起、止点, 周期测量误差小

命题意图: 质疑不正确的实验操作, 减少测量误差。

(2) 参考解答: 设摆线长为 l_0 , 摆球直径为 d , 单摆的周期为 T 。即 $T^2 = \frac{4\pi^2(l_0 + \frac{d}{2})}{g} = \frac{4\pi^2}{g}l_0 + \frac{\pi^2 d^2}{g}$

$\frac{4\pi^2 \left(\frac{d}{2}\right)}{g}$, 若用摆线长作为摆长画图, 可得到图 2-4 所示的实验结果, 说明该同学可能把摆线长当作摆长了。通过该直线的斜率 k , 能正确得到重力加速度的大小 $g = \frac{4\pi^2}{k}$

命题意图: 对图像进行推理和分析。

3 自主活动 弹簧振子做受迫振动的振动频率与振幅

参考解答: 保持弹簧振子静止, 向下轻拉弹簧振子的重物, 释放重物, 此时观察到的振动频率即为弹簧振子自由振动的频率

命题意图: 认识自由振动, 做一个简单的方案设计。

4 自主活动 单摆做受迫振动的振动频率与振幅

参考解答: 短 长 理由是: 从上往下逐渐移动重物, 坚杆振动的频率降低, 驱动力的频率下降, 单摆的振动频率与摆长有关, 摆长越长, 自由振动的频率越小。当驱动力的频率与自由振动的频率接近时产生共振, 因而观察到摆长从短到长的单摆依次产生共振

命题意图: 认识共振现象, 利用共振的条件、单摆周期与摆长的关系推理实验现象。

第三章 机械波

第一部分 整 章 分 析

学习目标

1. 理解机械波的产生、传播机理,能区分横波和纵波,能用波形图描述机械波,理解波速与波长、频率的关系,深化运动与相互作用及能量观念。
2. 经历建构机械波模型、描绘波的图像的过程。能从个别与整体两个视角,选用合适的模型,用图像等方法,分析解决与机械波的传播相关的问题。
3. 通过生活实例和实验,认识机械波的反射、折射、干涉和衍射现象及多普勒效应,知道机械波产生干涉和明显衍射的条件;能用波的叠加解释波的干涉现象,了解多普勒效应的成因;有与他人交流、解释、讨论的意识。
4. 通过了解和解释机械波在生产生活中的应用,感悟物理知识与社会生活和技术发展的关系。

编写意图

课程标准中对本章的“内容要求”为:

1. 2. 1 通过观察,认识波的特征。能区别横波和纵波。能用图像描述横波。理解波速、波长和频率的关系。

1. 2. 2 知道波的反射和折射现象。通过实验,了解波的干涉与衍射现象。

1. 2. 3 通过实验,认识多普勒效应。能解释多普勒效应产生的原因。能列举多普勒效应的应用实例。

波是一种普遍的运动形态。研究机械波的产生和传播,描述其特征与规律,可为理解各种机械波的波动现象、了解机械波的特性和规律在技术中的应用、研究电磁波和微观粒子的波动性奠定基础。

本章首先通过观察现象得到机械波的产生条件,再将介质抽象为一系列存在弹性作用的质点,描绘波形,分析由于存在相互作用使振动和能量在相邻质点间传播,用图像来描述横波,认识波的周期性及波速、波长和频率的关系;最后通过观察和分析,了解波的干涉、衍射和多普勒效应及其应用。整章内容的展开经历观察现象、描绘图形、思辨抽象等过程,逐渐深入地呈现对机械波的认识,体现了从生活走向物理,用物理解释生活的意图。

通过本章的学习,认识波动是一种普遍的运动形态,体会个体与整体、局部与系统结合的研究思路,以及图像与演绎结合的方法,丰富对运动与相互作用及能量观念的认识;发展模型建构、观察分析、演绎归纳等能力;感悟物理学是对自然现象的描述和解释,增强研究物理现象和问题的兴趣。

完成本章内容的学习,共需要 8 课时,其中第一节 2 课时,第二节 2 课时,第三节 1 课时,第四节 2 课时,第五节 1 课时。

第三章 机械波

人与人之间的交往、人与外部世界之间的交流，都和我们周围无处不在的各种波密切相关，例如，人们依靠声波来交谈。波动现象在自然界中普遍存在，有我们熟悉的水波、声波、地震波、无线电波；也有来自宇宙深处的电磁波、引力波；甚至微观粒子如电子、质子、中子也具有波动的性质。目前，波的应用已深入到生产、生活的方方面面。我们用光波照明，用无线电波通信，用超声波与X射线探测物体（包括人体）内部，用电磁波探寻宇宙的奥秘，用微观粒子的波动性研究物质的结构，等等。

在初中阶段我们已经学习过声波的知识，上一章又学习了机械振动。在本章中，将认识波的特征，理解波长、频率和波速的关系；知道波的反射、折射，了解波的干涉、衍射现象；认识多普勒效应；运用图像来描述横波。在学习中，基于事实建构机械波模型；用叠加的思想解释波的干涉现象。本章的学习有助于提升相互作用和能量的观念、发展科学思维能力。本章也是学习光的波动性和电磁波的基础。

本节编写思路

本节按特殊到一般的思路,以弹性绳和轻弹簧为例,讨论了机械波的产生、传播和分类。本节内容按以下思路展开:

1. 观察波在弹性绳和水面上的传播,分析绳中质点通过相互作用传递振动和能量的过程,认识机械波的产生条件,形成机械波的概念。

2. 观察轻弹簧中疏密波的传播,认识机械波的分类。

学习本节内容,将经历观察、分析机械波的产生,形成机械波的概念,描绘机械波的波形等过程,拓宽对运动形态的认识,丰富对运动与相互作用及能量观念的认识,促进科学推理能力的发展,感悟物理规律与社会生活之间的关系。

第一节 机械波的形成和传播

我们的耳朵能听到各种声音是声波作用于耳膜的结果;医疗检查中的“B超”利用了超声波的特性;石子投入平静的水面后漾起的阵阵涟漪(图3-1)和艺术体操运动员舞动丝带产生的一个个美丽螺旋也都是特殊的波。这些波都是振动在介质中的传播。



图3-1 水面的涟漪

► 机械波

物理学中,把机械振动在介质中的传播称为**机械波(mechanical wave)**。能够传播机械波的物质(如空气和水等)称为**介质**。

如图3-2所示,弹性绳的一端固定,手持另一端连续上下振动。可以看到振动状态沿绳传播,形成了一列波。

这列波由左向右沿绳传播,系在绳上的小铃铛也随之上下振动,但却没有随波移动。这说明,波传播了振动的运动形式和能量,而介质本身并没有随波迁移。



图3-2 绳波示意图

[1] 自主活动

如图3-3所示,软木塞漂浮在水槽内平静的水面上,手指在水槽另一端周期性地上下振动碰触水面。

观察水面的变化和软木塞的运动情况。结合实验现象,从物理学的角度说一说成语“随波逐流”是否恰当?

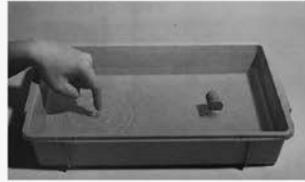


图3-3 手指碰触水面形成水波

实验发现,当水波到达软木塞时,软木塞大致在上下运动,但并没有随水波在水平方向的传播而随波迁移。

正文解读

[1] 这是一个需要动手操作和观察现象的“自主活动”,目的是丰富对机械波的传播与质点振动关系的直观体验,认识到在波的传播过程中,质点并不随波迁移。

► 机械波的形成和传播

[1] 把绳波实验中的弹性绳分成一个个小段来分析，每一小段都简化为一个质点。这些质点间具有相互作用。当外力使第一个质点以一定规律开始运动时，它相对相邻的第二个质点发生了运动，第二个质点将也在弹性力的作用下开始运动；同样，第二个质点的运动又将依次引起第三、第四等较远质点的运动，从而形成了机械波。

由此可见，形成机械波必须要有两个条件：一要有做机械振动的物体——波源，二要有能够传播机械振动的介质。

[2] 自主活动

在图 3-4 中用红点表示组成绳子的一个个质点，小弹簧表示质点间存在弹性相互作用，箭头表示质点的运动方向。 T 是波源做简谐运动的周期，图中已画出了 $t=0$ 、 $t=\frac{1}{4}T$ 、 $t=\frac{1}{2}T$ 时刻的波形。根据对绳波实验的观察，画出绳波在 $t=\frac{3}{4}T$ 、 $t=T$ 和 $t=\frac{5}{4}T$ 时刻的波形。

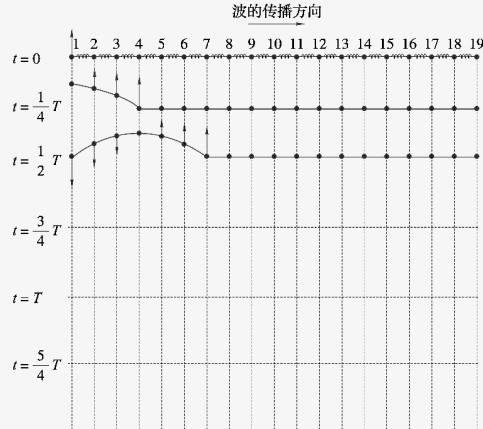


图 3-4 绳波在不同时刻的波形

[3] 由活动可知，远处的质点总比近处的质点迟一些开始振动。振动的形式和能量沿着绳传递出去，形成了绳上由近及远、凹凸相间的波。绳子在某一时刻的形状称为波形。绳子上每一个质点的运动情况都与波源相同，只是时间上由近及远相应滞后。

[1] 本段为“自主活动”做准备。本段内容的讨论体现了整体与个体结合的研究思路。

[2] 本活动需按以下步骤进行：

(1) 分析每个质点在不同时刻的位置。

(2) 观察同一时刻各质点的空间分布。

(3) 根据教材图 3-4 中的波形示范，用平滑的曲线将同一时刻各质点的位置连接起来，得到该时刻的波形图。

(4) 归纳波的传播规律。

[3] 这里还需要指出的是，教材将介质质点的振动称为“简谐运动”，是基于学生高中阶段学习的层次而作的简化处理，其涵义仅指质点位移随时间按余弦或正弦规律变化。实际上，介质中的质点是在上、下游质点的弹性相互作用下做受迫振动。

[1] 设置这个“大家谈”的目的是让学生在上述“自主活动”的基础上,进一步认识波源的振动与波形及波形移动情况之间的联系。为建立波的图像做准备。

[2] 横波和纵波是两种最基本的机械波,现实世界中的机械波往往更为复杂,可以分解为振动沿传播方向的纵波和垂直于传播方向的横波。

[1] 大家谈

在绳波实验中,波源连续振动会形成凹凸相间的连续波形。假使实验时手持绳端仅振动一个周期或半个周期,会观察到怎样的现象?

[2] ▶ 横波和纵波

当波沿绳子传播时,绳子中各质点的振动方向和波的传播方向互相垂直。我们把介质中质点的振动方向与波的传播方向垂直的波称为横波(*transverse wave*)。横波中,凸起部分的最高点称为波峰,下凹部分的最低点称为波谷。

质点的振动方向和波的传播方向是否也可能在同一直线上呢?

把轻弹簧用细线水平悬挂起来,如图3-5(a)所示。用手左右有规律地拉动、挤压弹簧的一端,弹簧与手接触的相邻部分受到周期性的拉伸与压缩,一会变疏,一会变密,这种疏密相间的状态沿弹簧自左向右传播,形成了一列疏密相间的波,如图3-5(b)所示。此时,弹簧就成为波传播的介质。介质中的质点左右振动,疏密波由左向右传播,介质中质点的振动方向与波的传播方向在同一直线上。这样的波称为纵波(*longitudinal wave*)。质点分布最密的位置称为密部,质点分布最疏的位置称为疏部。

在空气中传播的声波就是纵波,声波也能在液体、固体中传播。

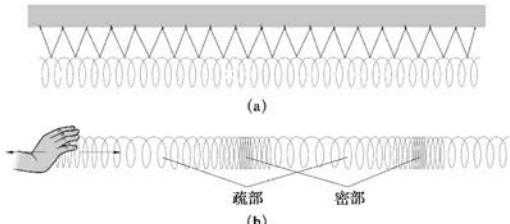


图3-5 纵波实验示意图

[3] STSE

地震又称地动、地振动,是地壳发生突然破裂和错动时释放的能量以地震波的形式向四周辐射的自然现象。地震波是机械波。地震发生时,从震源同时发出横波(S波)和纵波(P波)。P波造成的破坏小,S波导致的破坏大,而P波的传播速度比S波快得多。利用地震波的这一特性,当探测仪器感应到P波时,可对地震的破坏范围和破坏程度进行快速评估,在S波到达前几秒至数十秒发出预警。我国的地震预警网在平均响应时间、震级偏差等关键核心技术上处于世界领先水平。

[3] 发生地震时,从震源发出的地震波中有两种形式:纵波(P波)和横波(S波)。当P波和S波传到地表时发生反射形成沿地表传播的表面波(简称面波)。面波又包含两种形式:一种是扭曲波,使地表发生扭曲,另一种使地表上下波动,就像在大洋面上传播的水波那样。因此,实际上地震发生时,会形成P波、S波和面波三种形式的波。虽然地震在什么时候发生不可预测,但一旦发生地震,却可以通过地震监测系统提前发出预警。

问题与思考解读

问题与思考

- 平静的湖面上漂浮着几片树叶，一块小石子从桥面竖直落在湖面上激起了一圈圈水波，小石子的落水处位于树叶的左侧。试简述此后波的传播及树叶的运动情况。
- 手持长绳的一端不停地上下振动，在长绳上形成一列横波。描述当手停止运动后绳上的波形。
- 如图 3-6 所示，把金属链条上端的小环挂在铁架台上横杆 A 的端点附近，用手握住链条下端。在手不能碰到阻挡物 B 的情况下，你能够使小环从铁架上脱落吗？试一试，如果成功了，说说你是怎样使小环脱落的。

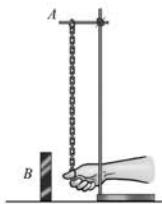


图 3-6

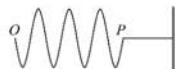


图 3-7

- 如图 3-7 所示是振源 O 振动形成的机械波沿水平绳传播到质点 P 时，在绳上形成的波形图。试问：
 - 振源 O 刚开始向什么方向振动？你是如何判断的？
 - 在绳上传播的波是横波还是纵波？为什么？
- 水平绳的一端在外界作用下上下做简谐运动，形成了如图 3-8 所示沿绳子传播的横波。则：
 - 在图 (a) 中，根据波传播的方向标出质点 A 、 B 、 C 、 D 、 E 此刻的速度方向，并指出哪些质点的速度将越来越大。
 - 在图 (b) 中，质点 P 的速度方向向下，在图中标出表示波传播方向的箭头。

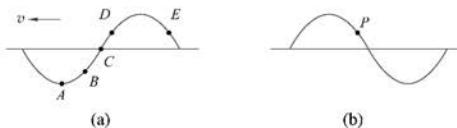
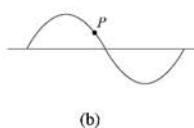


图 3-8



质 (I)。

- 参考解答：能。要使小环从水平横杆上脱落，小环必须运动到横杆最左端 A 之外。当手握链条下端平行于横杆来回抖动，在链条上产生波。波由下向上传播，带动小环平行于横杆来回滑动，小环可能从 A 端脱落

命题意图：知道波通过一定的弹性介质，把波源的振动通过介质得以传播。希望学生通过可实现的操作体验波的传播。

主要素养与水平：模型建构(II)；科学推理(II)。

- 参考解答：(1) 向下。此时 P 点处于即将振动的状态， P 点向下振动，而 P 点的起始振动情况反映振源 O 的起始振动情况，所以振源 O 刚开始时也是向下振动的 (2) 横波。因绳上的各点上下振动，

1. 参考解答：以小石子落水处为中心漾起圈圈涟漪，由近及远传播开去。传到树叶处，树叶上下振动，并不随波迁移

命题意图：用简洁的语言进行表述；由情境知道波的产生条件；能用恰当、合理的语言表述波的传播与介质质点之间的关系；知道湖面上的树叶可简化为波传播中的某一质点——建立物理模型。

主要素养与水平：运动与相互作用观念(II)；科学推理(II)。

2. 参考解答：手停止运动后，靠近波源的地方先停止运动，原有的波形由近及远向前传播

命题意图：知道绳上的横波波形特点；理解波传播与振动的关系。

主要素养与水平：科学推理(II)；科学本

波由左向右传播，介质中质点的振动方向与波的传播方向垂直

命题意图：知道横波的特征；通过波形知道某质点的振动方向；理解波源的起始振动方向与已有波形中某些质点的运动相同，仅时序不同。

主要素养与水平：运动与相互作用观念(Ⅱ)；科学推理(Ⅱ)。

5. 参考解答：

- (1) A、B、C、D、E 各点的振动速度方向如图 1(a) 所示，A、B 和 E 三点的速度将越来越大
(2) 如图 1(b) 所示

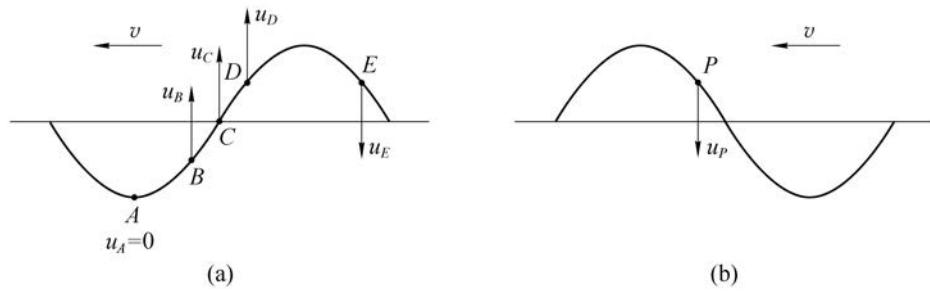


图 1

命题意图：知道介质振动方向与波传播方向的相互关系。

主要素养与水平：运动与相互作用观念(Ⅲ)；科学推理(Ⅱ)。

本节编写思路

第二节 机械波的描述

无论探测水下潜艇位置的声呐，或是用于医疗诊断的B超；还是监测地震的设备，它们的工作原理都与波的特性有关。

[1] 波在介质中传播时，不同位置的质点都在振动。波是大量质点的集体运动，用振动图像分别描述每个质点的运动不仅繁琐，而且不能反映波的整体性质。波传播时，介质中不同位置质点的振动规律虽然相同，但彼此间的步调并不一致，某一时刻各质点相对平衡位置的位移在传播方向上具有空间周期性。是否可以用某一时刻介质中各质点在空间的分布规律描述波的特性呢？

[2] ▶ 波的图像

我们以横波为例。通过观察波在弹性绳中的传播，可以发现横波沿绳传播的过程中，绳的形状每时每刻都在变化，波峰与波谷互相间隔的波形由近及远地沿着绳传播。此时，若拍一张照片就能记录下该时刻的波形，如图3-9(a)、(b)所示。波形描述了某一时刻介质中所有质点的位置，即所有质点相对其平衡位置的位移，是介质运动的整体表现。

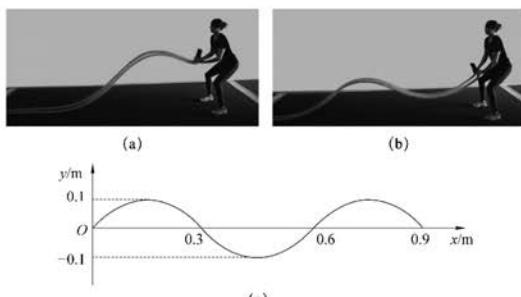


图3-9 绳波的波形与波形图

用横坐标 x 表示波的传播方向上各个质点的平衡位置坐标，用纵坐标 y 表示某时刻各质点相对平衡位置的位移，由此可得介质中各质点的位置坐标，这些点的集合就是这个时刻波的图像，称为波形图。图3-9(c)所示即为某时刻绳波的波形图。

本节以绳波为例，形成波的图像。通过图像分析和演绎推理相结合的方法，深化对机械波传播规律的认识。本节内容按以下思路展开：

1. 观察绳波在不同时刻的波形，建立波的图像，了解其物理意义。

2. 用周期(频率)、波长、波速来描述波动现象，推导这些量之间的定量关系。

3. 利用波的图像及波速与波长、周期(频率)的关系，分析解决与波的传播和质点振动相关的问题。

学习本节内容，将根据绳波的波形与质点振动的关系建立波的图像，利用波的图像和相关物理量描述波动现象，用示例示范问题的解决方法。在此过程中，深化对机械波的认识，强化时空观念和发展科学推理能力。

正文解读

[1] 在波传播过程中，介质中每个质点的运动和大量质点集体运动之间有联系也有区别，引入本节关于机械波描述的内容。

[2] 通过两个时刻波形的对比，引导学生认识同一时刻的波形反映了介质质点集体的运动状态，不同时刻波形的差异反映了波形随时间平移的结果，由此建立横波的图像。

对纵波来说，虽然介质中各质点的振动方向与波的传播方向在同一直线方向上，同样可以用横坐标 x 表示各质点平衡位置的空间分布，用纵坐标 y 表示同一时刻各质点偏离各自平衡位置的位移，就得到与横波类似的波的图像。

[1] 这里说介质中的质点具有与波源相同的振幅，其前提是不计介质中的能量损耗。

[2] 本段体现了每个质点振动的时间周期性和大量质点在某一时刻空间位置分布的周期性之间的关系，即个体与整体的关系。

当波沿某一方向传播时，后一时刻的波形可视为前一时刻的波形沿传播方向的平移，而平移的距离就是波在这两个时刻之间传播的距离。

► 描述波的物理量

当机械波在介质中沿某一确定方向传播时，由于介质中的质点都做与波源相同的振动，各质点具有与波源相同的振幅、周期或频率。波源的振幅、周期或频率就是该波的振幅、周期或频率。波的周期是介质中任意一个质点完成一次全振动所需要的时间，用符号 T 表示，单位是秒(s)。波的频率是介质中任意一个质点完成全振动的次数与所用时间之比，用符号 f 表示，单位是赫兹(Hz)。周期和频率互为倒数，即 $T=\frac{1}{f}$ 。

[2] 如图3-10所示为一列横波在不同时刻的波形。1~19为介质中间隔相等的质点。当质点1振动一个周期完成一次全振动时波刚好传到质点13，质点13开始振动。此后两者的振动情况完全一致，它们在任意时刻相对平衡位置的位移和速度的大小和方向总是相同的。仔细观察还会发现，质点2与质点14、质点3与质点15、质点4与质点16的振动完全相同，即每一个质点均能找到与其振动情况相同的质点。

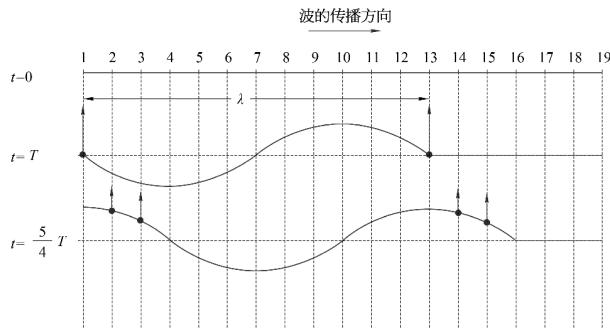


图3-10 波形图中振动相同的质点

我们把振动在介质中经过一个周期 T 传播的距离称为波长(wave length)，用符号 λ 表示，单位为米(m)。

在一列波中，如果两个质点的平衡位置间的距离为一个波长，它们的振动情况总是相同的。对于横波，相邻波峰或者相邻波谷间的距离等于波长，如图3-10所示；对于纵波，相邻疏部或者相邻密部间的距离等于波长。

周期和波长分别描述了机械波在时间和空间上的周期性。

机械波在均匀介质中沿传播方向匀速传播，其传播速度称为波速(wave speed)，用

符号 v 表示。波速 $v = \frac{\Delta x}{\Delta t}$, Δx 是波传播的距离, Δt 是波传播距离 Δx 所需要的时间。

由于每经过一个周期振动在介质中的传播距离为一个波长, 波速也可以表示为 $v = \frac{\lambda}{T}$ 或 $v = \lambda f$ 。

机械波的频率由波源决定, 波速由介质决定, 波源和介质共同决定了机械波的波长。

- [1] 示例 开始计时时, $x = 0$ 处的波源由平衡位置开始沿 y 方向振动, 产生的波沿着 x 轴的正方向传播。 $t_1 = 0.3$ s 的波形如图 3-11 所示。求这列波的振幅 A 、波长 λ 、波速 v 、周期 T , 并画出 $t_2 = 0.5$ s 时的波形。

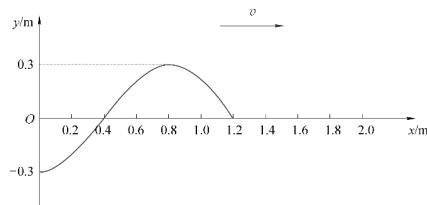


图 3-11 $t_1 = 0.3$ s 时刻的波形图

分析: 从波形图获得振幅与波长的大小, 利用波长、波速、周期间的关系可以得到其他所求的量。根据波的传播特点确定某时刻的波形。

解: 由图 3-11 可知, 这列波的振幅

$$A = 0.3 \text{ m}$$

由于波经过 0.3 s 沿 x 轴正方向传播了 $\frac{3}{4} \lambda$, 历时 $\frac{3}{4} T$,

则

$$\frac{3}{4} \lambda = 1.2 \text{ m}$$

得

$$\lambda = 1.6 \text{ m}$$

由

$$\frac{3}{4} T = 0.3 \text{ s}$$

得

$$T = 0.4 \text{ s}$$

由 $v = \frac{\lambda}{T}$ 可知

$$v = \frac{\lambda}{T} = \frac{1.6}{0.4} \text{ m/s} = 4 \text{ m/s}$$

由上述计算可知, 波传播的过程中, 波形以 4 m/s 的速度沿着传播方向匀速平移。经过 $\Delta t =$

[1] 通过本示例可知, 利用波的图像解决问题的关键是明确介质中质点的振动与机械波传播之间的关系。解题时需要关注: (1) 从图像中获取信息; (2) 波动的空间周期性; (3) 波形随时间变化的规律。

[1] 此处设置“大家谈”的目的,是在“示例”的基础上,了解在波形图上根据机械波的传播方向判断质点振动方向的方法,巩固对介质中质点的振动与机械波传播之间关系的认识。

问题与思考解读

1. 参考解答: 由图3-13可知,质点a、b平衡位置之间的距离

为 $\frac{3}{4}\lambda$, 质点a、b开始

振动的时刻之差 $t_1 -$

$t_2 = -\frac{3}{4}T$, 负号表示

质点a先于质点b开始振动

命题意图: 知道波长 λ , 能知道两质点平衡位置之间的距离与波长的关系; 知道波长、波速及传播距离的关系。

主要素养与水平: 运动与相互作用观念(Ⅱ); 科学推理(Ⅰ)。

2. 参考解答: 波的频率由波源决定,可

知声波由空气进入水中,频率不变。根据波速与频率、波长的关系: $v = \lambda f$ 。声波由空气进入水中,波速变大,所以波长变大

命题意图: 知道波传播的频率由波源决定,波速由介质决定;能根据 $v = \lambda f$ 的关系做出判断。

主要素养与水平: 科学推理(Ⅱ); 科学本质(Ⅰ)。

3. 参考解答: 甲、乙两人的观点均不正确。波速由介质决定,频率由波源决定。波长由波速和频率共同决定,即与波源和介质都有关,与振幅无关,所以甲的观点不对。若在同种介质中,波速一定,频率越高则波长越短。乙同学没有说明在同种介质中,所以乙同学的观点也不正确

命题意图: 知道波传播的频率由波源决定,波速由介质决定;并能用简洁的语言表述。

主要素养与水平: 科学论证(Ⅱ); 质疑创新(Ⅲ)。

$t_2 - t_1 = 0.5 s - 0.3 s = 0.2 s$, 波向右传播的距离 $\Delta x = v\Delta t = 4 \times 0.2 m = 0.8 m = \frac{1}{2}\lambda$ 。

所以,波形向右传播了 $\frac{1}{2}\lambda$,由此可得 $t_2 = 0.5 s$ 时的波形如图3-12所示。

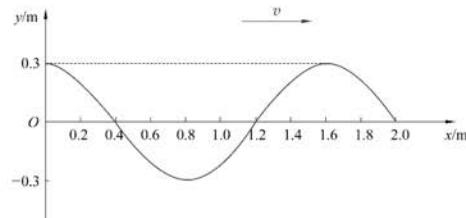


图3-12 $t_2 = 0.5 s$ 时刻的波形图

[1] 大家谈

你能根据图3-11中的波形图确定波源的起振方向吗? 在0.3 s和0.5 s两个时刻,0.8~1.2 m间各个质点是远离平衡位置还是向着平衡位置方向运动?

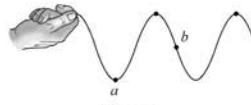


图3-13

问题与思考

1. 用手握住水平长绳一端以周期 T 连续上下抖动,形成沿绳传播的一列横波。如图3-13所示为某一时刻的波形。质点a处于波谷位置,质点b恰好位于平衡位置。若质点a、b开始振动的时刻分别为 t_1 、 t_2 ,则 $t_1 - t_2$ 为多少?

2. 空气中的声速小于水中的声速,声波由空气进入水中时波长如何变化? 并说明理由。

3. 甲、乙两同学在讨论机械波的波长时,甲认为波源振动的振幅越大,形成的机械波波长越长;乙认为波源振动的频率越高,形成的机械波的波长越短。这两种观点对吗? 为什么?

4. 如图3-14所示为一列波速为2.0 m/s的横波在某一时刻的波形图,该波的振幅、频率分别是多少?

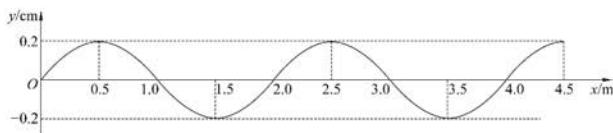


图 3-14

5. 如图 3-15 所示为一列周期为 0.4 s 的横波在 $t=0$ 时刻的波形图。此时质点 M 正经过平衡位置沿 y 轴负方向运动，画出 $t=0.5$ s 时的波形图。

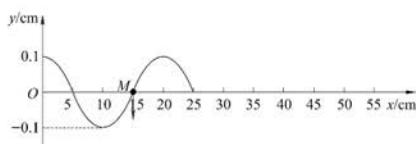


图 3-15

6. 如图 3-16 所示，图 (a) 和图 (b) 中图线的形状相同，一个是某一时刻的波形图，另一个是该波传播过程中波源的振动图像。你能分辨出哪一个是波形图，哪一个是波源的振动图像吗？根据图像中的信息你能找出这列波的波长、周期和波速吗？

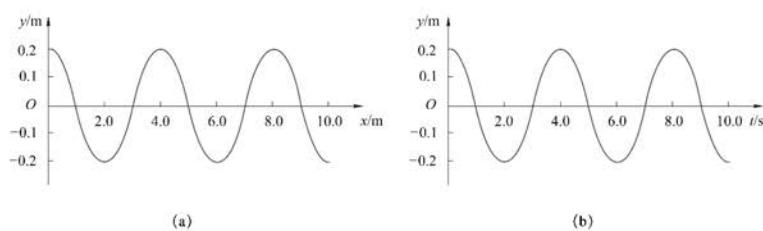


图 3-16

4. 参考解答：由教材图 3-14 可知，振幅 $A = 0.2 \text{ cm}$ ，波长 $\lambda = 2.0 \text{ m}$ 。根据 $v = \lambda f$ ，代入数据可得频率 $f = 1 \text{ Hz}$

命题意图：在图像中提取合理的信息，知道 $v = \lambda f$ ，并做出简单的推理。

主要素养与水平：科学推理(Ⅱ)。

5. 参考解答：如图 2 所示 根据 M 点此时的运动方向，可知波由左向右传播。由图 3-15 可知波长 $\lambda = 20 \text{ cm}$ ，由题意知周期

$$T = 0.4 \text{ s}, \text{ 波速 } v = \frac{\lambda}{T} = \frac{0.2}{0.4} \text{ m/s} = 0.5 \text{ m/s}.$$

则 $t=0.5 \text{ s}$ 时的波形为将原波形向右平移 25 cm。也可根据

$$0.5 \text{ s} = 1 \frac{1}{4} T, \text{ 则 } 0.5 \text{ s} \text{ 时的波形为将原波形向右平移 } \Delta x = 1 \frac{1}{4} \lambda$$

命题意图：根据恰当的证据，结合波与振动之间的关系，做出推理。

主要素养与水平：运动与相互作用观念(Ⅲ)；科学推理(Ⅲ)。

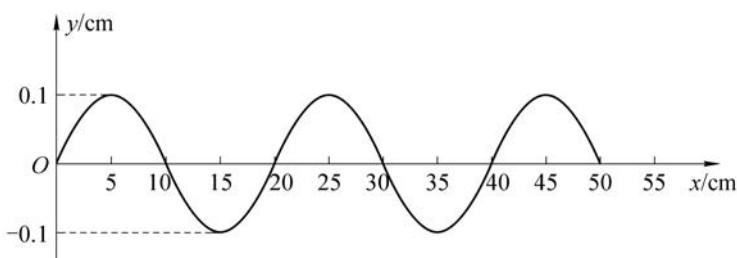


图 2

6. 参考解答：图 3-16(a) 为波形图，图 3-16(b) 为振动图像。由图(a)可知，波长 λ 为 4 m；由图(b)可知，周期 T 为 4 s，波速 $v = \frac{\lambda}{T} = \frac{4}{4} \text{ m/s} = 1 \text{ m/s}$

命题意图：通过比较相似图像，了解图像表达的意义。

主要素养与水平：科学推理(Ⅱ)；证据(Ⅰ)。

本节编写思路

观察水波的传播，与光的反射和折射现象类比，认识机械波的反射、折射现象。本节内容按以下思路展开：

1. 观察水槽中水波传播遇到挡板所发生的现象，分析类比，认识机械波的反射现象。

2. 观察水槽中水波从深水区向浅水区传播所发生的现象，认识机械波的折射现象。

3. 介绍生产生活中机械波的反射和折射现象。

学习本节内容，将通过观察和类比认识机械波的反射和折射现象，拓展对机械波特性的认识，提高学生对于波动现象的好奇心，知道物理规律是技术应用的基础，感悟物理学是对自然现象的描述与解释。

第三节 机械波的反射和折射

[1] 声呐是现代舰船的必备装置，如渔船用声呐探测鱼群，舰艇用声呐探测敌方潜艇等。声呐系统是通过声波在水下的传播完成水下探测和通信任务的。图 3-17 (a) 为声呐扫描海底获得的一战时德国沉没潜艇的图像；图 3-17 (b) 为主动式声呐工作原理的示意图，由声呐主动发射声波“照射”目标，并接收目标的反射波，根据反射波返回的时间和相关参数来测定目标。其中的原理与波的反射有关。

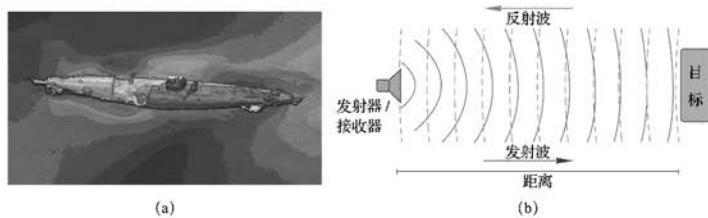
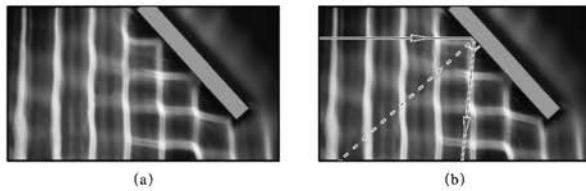


图 3-17 声呐工作示意图

► 波的反射

[2] 如图 3-18 (a) 所示，发波水槽中一列沿着直线传播的水波遇到挡板后发生了反射。挡板像镜子一样改变了水波的传播方向。波在传播过程中遇到障碍物时发生的背离障碍物传播的现象，称为波的反射（reflection）。



[3] 图 3-18 水波的反射

在图 3-18 (b) 中，我们用虚线表示挡板的法线，带箭头的蓝线表示波的传播方向。入射方向与法线的夹角为入射角，反射方向与法线的夹角为反射角。观察图 3-18 (b) 不

正文解读

[1] 介绍声呐在探测水下目标中的应用，基于学生的已有知识，激发其深入了解机械波反射的兴趣。

[2] 水面波是人们能够直接看到的最直观、最生动的波。人类认识波动现象，往往都是从水面波开始的。水面波看上去与横波相似，实际上既不是横波，也不是纵波。水面波中每个质点的运动都是由纵向运动和横向运动合成的。

[3] 观察图 3-18 所示的水的反射现象，类比光的反射现象，认识机械波的反射现象及其遵循的规律。在讨论机械波的反射时，不要求用惠更斯原理进行解释。

难发现波的反射与我们初中接触的光的反射有着相似的规律：反射角等于入射角。

如图 3-19 所示，水波被堤坝阻挡时发生了明显的反射。

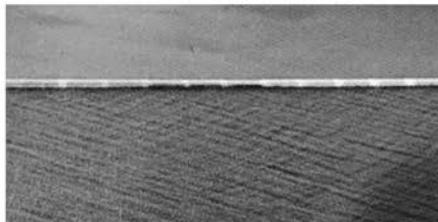
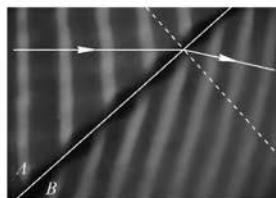


图 3-19 水波遇到堤坝发生反射

► 波的折射

当波沿着介质传到边界时，除了会发生反射，一部分波会穿过边界进入另一种介质，并改变传播方向，这就是波的 **折射 (refraction)**。

如图 3-20 所示，在水槽底部放置一块玻璃板，使得水槽 B 区域的水比 A 区域浅。由于水波在深水区和浅水区的传播速度不同，可将深水区和浅水区看作两种介质。波由深水区进入浅水区后波的传播速度减小，传播方向也发生了变化。可以观察到图中所示的折射图样。



[1] 图 3-20 水波在不同深度的水中传播

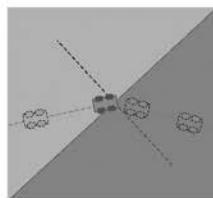


图 3-21 小车运动方向的偏折 [2]

波的折射现象可与小车进入粗糙程度不同的区域运动方向发生偏折的情况类比。如图 3-21 所示，灰色表示较光滑的硬地，绿色表示粗糙的草地。一辆无动力小车原本在硬地上沿着直线行驶，到达硬地和草地的交界处时，蓝色车轮先进入草地，阻力增大，蓝色车轮速度变慢；红色车轮依旧在硬地上行驶，速度不变，车的行驶方向将发生偏转。小车完全进入草地后，继续沿着直线行驶。

在两种介质的分界面处，波的反射和折射往往同时发生。

[1] 观察图 3-20

所示的水波的折射现象，类比光的折射现象认识机械波的折射现象。在讨论机械波的折射时，不要求运用惠更斯原理进行解释。

[2] 将机械波的折

射现象与图 3-21 所示的小车运动方向偏折的现象做类比，说明机械波之所以会在两种介质界面产生折射，是因为机械波在两种介质中的传播速度不同。

问题与思考解读

1. 参考解答：①

③是机械波的反射，②是机械波的折射

命题意图：合理解释生活现象。

主要素养与水平：运动与相互作用观念(I)；科学本质(I)。

2. 参考解答：测量的是从发射超声波至接收到被测物体反射的超声波这段时间的中间时刻，即超声波接触被测物体时刻，位移传感器与被测物体间的距离。

命题意图：知道反射式测速中距离测量的基本原理。

主要素养与水平：科学推理(II)。

3. 参考解答：由图3-23(b)可知，第一个超声波脉冲接触汽车的时刻 $\frac{T}{2}$ ，此时汽车距离波源的距离为 $v_0 \cdot \frac{T}{2}$ ；第二个超声波脉冲接触汽车的时刻 $T_0 + \frac{T + \Delta t}{2}$ ，此时汽车距离波源的距离为 $v_0 \cdot \frac{T + \Delta t}{2}$ ；第三个超声波

脉冲接触汽车的时刻 $2T_0 + \frac{T + 2\Delta t}{2}$ ，此时汽车距离波源的距离为 $v_0 \cdot \frac{T + 2\Delta t}{2}$ 。经过时间 $t = T_0 + \frac{\Delta t}{2}$ ，汽

车与波源间增加的距离 $s = \frac{1}{2}v_0 \cdot \Delta t$ 。可推测，汽车正在匀速远离，其速度 $v = \frac{s}{t} = \frac{\frac{1}{2}v_0 \cdot \Delta t}{T_0 + \frac{\Delta t}{2}} = \frac{v_0 \cdot \Delta t}{2T_0 + \Delta t}$

提示：超声波在介质中匀速传播，本题也可通过绘制超声波传播的 $x-t$ 图像来分析推导，获得相同的结论。

命题意图：在明确结论的基础上进行合理的推理，证实结论的可靠性。

主要素养与水平：模型建构(IV)；科学推理(III)。

在大海中，海浪可能向着各个方向传播，但无论海岸的形状如何，靠近岸边的海浪总是趋于平行于海岸，沿着垂直于海岸的方向滚滚而来(图3-22)。这是因为海浪的传播速度受海水深度的影响。越靠近岸边，海水深度越小，海浪传播的波速越小，传播方向也渐渐变化，无论海岸的形状如何，最终近岸海浪的传播方向总趋于与岸线垂直。



图3-22 海浪垂直于海岸的方向传播

问题与思考

1. 生活中有时会见到以下现象：①夏日的雷声轰鸣不绝；②水波从深水区向浅水区传播，其传播方向会发生改变；③在回音壁一端贴墙而立说话，声音会沿着墙壁传到一二百米的另一端。其中哪些属于机械波的反射？哪些属于机械波的折射？

2. 用反射式位移传感器测量距离的原理与声呐类似，静止的位移传感器发射的超声波脉冲被运动的待测物体反射。位移传感器记录发射和接收超声波的时间差来获取两者间距。这样测得的是哪一刻位移传感器与被测物体之间的距离？

3. 利用超声波可以测量运动物体的速度。图3-23(a)为某同学设计的超声波测速的示意图。波源每隔 T_0 时间向正在平直轨道上运动的小车发出超声波脉冲，并接收其反射回来的信号。图3-23(b)中振幅较大的是发出的脉冲，振幅较小的是接收到的信号，横轴为时间轴。根据图(b)可以推断小车在匀速运动，且车速大小为 $v_{车} = \frac{v_0 \Delta t}{2T_0 + \Delta t}$ ，式中 Δt 为固定的时间间隔， v_0 为波速，写出推断的过程。

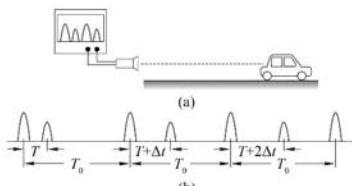


图3-23

本节编写思路

第四节 机械波的干涉和衍射

[1] 生活中，经常会有两列波在同一种介质中相遇的现象。例如，两滴水同时滴入水槽形成两列彼此独立的水波，在水槽中传播并相遇，如图 3-24 所示；房间里两个人同时讲话也形成两列彼此独立的声波，在空气中传播并相遇。两列波相遇会发生什么现象？

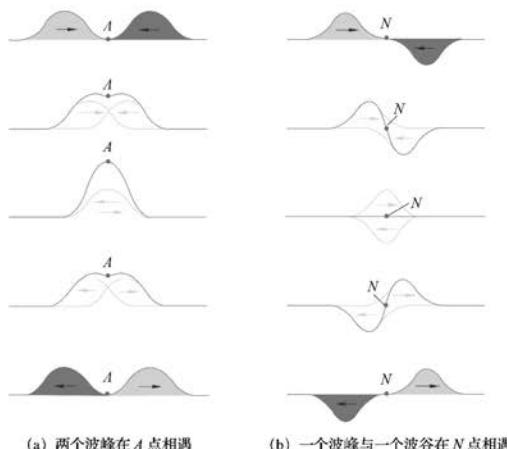


图 3-24 两列水波相遇

▶ 波的叠加

两位同学分别握住弹性长绳的两端，抖动一下，各产生一个波。这两个波在绳上沿着相反的方向传播。观察这两个波相遇前、相遇时和相遇后的波形。

图 3-25 中绳上的质点 A 和 N 在两列波相遇时同时受到了两列波的影响。在相遇之后两波继续按相遇前的规律传播。



[2] 图 3-25 两列绳波相遇

本节以水波和绳波为例，通过实验观察，结合分析推理、比较归纳，认识机械波的干涉、衍射现象及其特征，拓展对波的特性的了解。本节内容按以下思路展开：

1. 以两列波相遇为例，通过观察认识机械波的传播具有独立性；通过分析推理，了解波的叠加原理。

2. 观察两列波相遇产生的干涉图样，根据波的叠加原理分析并认识机械波的干涉现象及其应用。

3. 观察机械波的衍射现象，归纳机械波发生明显衍射的条件。

学习本节内容，将在观察、分析的基础上，认识机械波的干涉、衍射现象，了解机械波的干涉在消声降噪技术中的应用。通过学习本节内容，学生认识到干涉、衍射是波的重要特征，

为下一章学习光的干涉、衍射奠定基础。

正文解读

[1] 通过两列波相遇的实例引入本节内容。

[2] 图 3-25 中用系列图描述了两列相向传播的波，在相遇前、相遇中和相遇后的传播和叠加情况，并辅以不同颜色和线型，直观呈现机械波传播的独立性。

[1] 在两列波相遇的区域，介质中每一个质点的运动都是两列波分别引起的振动的叠加，这称为波的叠加原理。

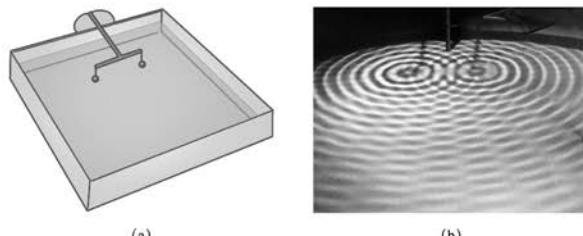
[2] 要在实验中观察到清晰的机械波的干涉图样，应使固定在同一振动架上同一高度的两个小球，振动后能刚好触碰水面。实验中，还要调节好振动架带动两小球振动的频率，在水面上产生波长相对较短、看起来波纹较为细密的水波。

在两列波相遇的区域，所有质点的位移遵循相同的运动合成规则，如图 3-26 所示。图中蓝色箭头表示左边传来的波引起的位移，绿色箭头表示右边传来的波引起的位移，红色箭头表示质点的合位移。由此可知，介质中质点的位移是两列波分别引起的位移的矢量和，这种现象称为波的叠加。

两列波相遇后仍然能够保持原来的特性（频率、波长、振动方向等）继续传播。在它们相遇的区域，介质中每一个质点同时参与两列波引起的振动，质点的位移是两列波分别引起的位移的矢量和。在水波的反射实验中，我们可以观察到入射水波和反射水波互相穿过彼此独立传播的现象。

► 波的干涉

利用如图 3-27 (a) 所示的实验装置可以观察到两列完全相同的水波互相叠加的现象。固定在同一振动架上的两个小球，周期性地触动水面，形成两列频率相同的水波。这两列水波相遇后，在它们重叠的区域内出现了如图 3-27 (b) 所示的现象。

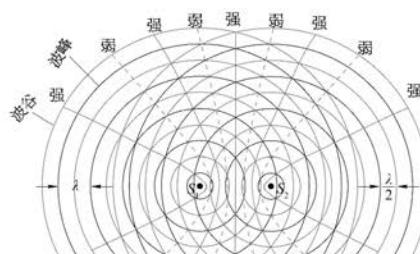


[2] 图 3-27 水波实验发生器与水波干涉图样

两列振动情况相同的波源产生的波在某区域相遇时，在相遇区域的某些位置质点的振幅较大，振动加强；某些位置质点的振幅较小，振动减弱；振动加强和减弱区域相互间隔，且分布稳定，这样的现象称为波的干涉 (interference)。振动加强和振动减弱的区域是稳定分布的，这种分布图样称为干涉图样。

图 3-28 为两列互相干涉的水波某一时刻的示意图。黑线表示两列波的波峰，蓝线表示两列波的波谷。黑线与黑线的交点表示波峰与波峰相遇。在两列波叠加的区域，介质中

各个质点的位移为两列波分别引起的位移的矢量和，此时黑线交点处的位移数值最大，等于两列波的振幅之和；同样，蓝线与蓝线交点处的位移数值也最大，也等于两列波的振幅之和。经过四分之一周期，两列波在这些点引起的位移均为零，这些点都在平衡位置；经过半个周期，波峰变为波谷，波谷变为波峰，这些点的位移数值依旧是最大的。这些区域就是振动加强的区域。



[1] 图 3-28 两列相同波相遇

[2]

大家谈

黑线与蓝线的交点表示波峰与波谷相遇，这些点此时位移数值的大小如何？经过四分之一周期、半个周期这些点的位移数值会发生什么变化？这些点位于振动加强的区域还是振动减弱的区域？

[3]

波的干涉是波的重要特征之一。利用干涉原理制成的干涉型消声器可用来降噪。内燃机、通风机、鼓风机等工作时，都伴有高速气流。高速气流排放过程中会产生噪声。如图 3-29 所示，当噪声声波经管道到达点 A 时，分为两路传播，在主通道的 B 处汇合时两列声波彼此干涉。如半圆的直径合适，两路声波会互相抵消，从而降低了噪声。干涉型消声器对单频或频率范围较窄的低频噪声有较好的消声效果。为了具有较宽的消声频率范围，可以将不同的消声单元串联起来，即可对不同波长的噪声降噪了，汽车的排气管也具有类似的消声结构。

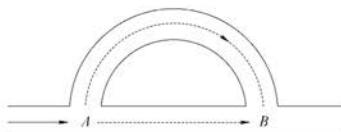


图 3-29 消声管原理示意图

[1] 图 3-28 为某一时刻两列水波在相遇区域叠加的情况，正文中还讨论了经过四分之一周期和半个周期时加强点的位移情况，目的在于说明虽然波的干涉图样是稳定的，但介质中的质点仍处于振动过程中。

关于图中橙色的实线、虚线分别表示振动加强点、减弱点稳定分布的讨论，可参见本书第 89 页资料链接。

[2] 此处设置“大家谈”的目的在于通过思考讨论，能根据波的叠加描述两列相同水波相遇后，振动减弱点位移随时间的变化，加深对干涉现象中振动减弱意义的理解。进一步结合正文，体会干涉图样的动态稳定性。

[3] 正文中“如半圆的直径合适”是指沿不同路径的两列波在 B 处相遇时恰好满足干涉相消的条件。

▶ 波的衍射

如图 3-30 所示，在水槽中产生一列水波，将一支笔垂直水面插入水中，对水波的传播几乎没有影响。这一现象说明水波能够绕过障碍物继续传播。波可以绕过障碍物进入其阴影区继续传播的现象，称为波的衍射（diffraction）。

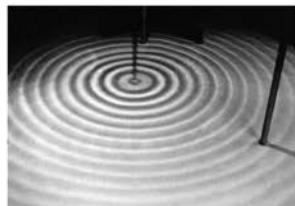


图 3-30 水波

[1] 这是一个动手做和观察归纳的“自主活动”。具体说明见物理实验与活动部分。

[1] 自主活动

在发波水槽内产生一列水波。

在水槽内放置两块挡板，两板中间留一条缝隙，如图 3-31 所示。保持振源的振动频率不变，逐渐改变缝隙的宽度，观察水波的传播情况。

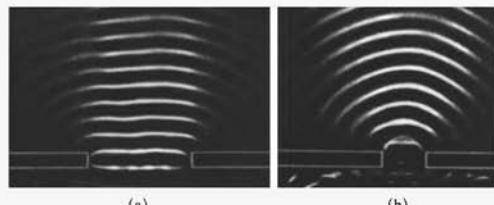


图 3-31 衍射实验

以上实验证实，当缝隙的宽度比波长大得多时，水波几乎无法到达挡板后的区域，如图 3-31 (a) 所示；当缝隙的宽度与波长相差不多或比波长小时，水波可以绕到挡板后面继续传播，如图 3-31 (b) 所示。

更多的实验表明，波能够发生明显衍射现象的条件是：障碍物（或缝隙、小孔）的尺寸与波长相差不多或比波长小。

问题与思考解读

问题与思考

1. 如图 3-32 所示, 两列波沿 x 轴相向传播, 画出当右行波的波峰位于 $x=10 \text{ cm}$ 时两列波相遇叠加的波形。

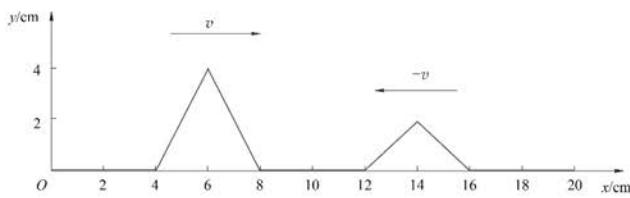


图 3-32

2. 如图 3-33 所示, 两列振幅均为 2.0 cm 的横波均沿 x 轴传播, 传播速度大小相等, 其中一列沿 x 轴正方向传播 (图中实线所示), 一列沿 x 轴负方向传播 (图中虚线所示)。这两列波的频率相等, 振幅相等, 振动方向均沿 y 轴, 在图示时刻, 平衡位置位于 $x=1 \text{ cm}, 2 \text{ cm}, 3 \text{ cm}, 4 \text{ cm}, 5 \text{ cm}, 6 \text{ cm}, 7 \text{ cm}, 8 \text{ cm}$ 处的各质点中,

- (1) 振幅最大的质点有哪些? 振幅为多大?
(2) 振幅最小的质点有哪些?

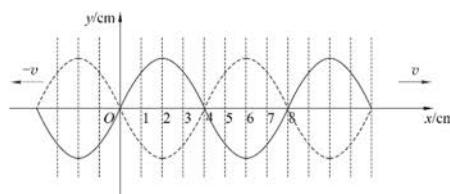


图 3-33

3. 如图 3-34 所示, 用两个相同的扬声器同时发出频率为 440 Hz 的声音。在周围走一走, 感觉声音是否有细微的差别, 说说其中的道理。

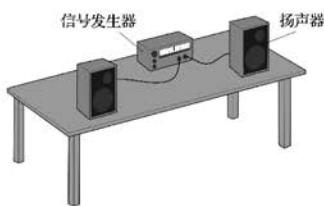


图 3-34

振动加强, 某些区域振动减弱, 反映为声音的响度有变化

命题意图: 知道满足一定条件的波, 在相遇区域产生稳定的干涉现象。假如有条件做一做, 通过声波可以更直观地感受。

主要素养与水平: 模型建构(III); 科学本质(I)。

4. 参考解答: 甲同学的说法不正确, 此时 B 质点位于波峰, D 质点位于波谷。这两点都是振动加强的点, 它们的振幅最大, 相对平衡位置的位移不会始终不变。乙同学的说法正确, P 质点

1. 参考解答: 如图 3 所示

命题意图: 在知道波的传播特点的基础上, 能用位移的矢量叠加画出波的图形。

主要素养与水平: 运动与相互作用观念(III); 科学推理(II)。

2. 参考解答: (1) 平衡位置位于 $x=4 \text{ cm}$ 和 8 cm 处的质点振幅最大, 振幅为 4 cm
(2) 平衡位置位于 $x=2 \text{ cm}$ 和 6 cm 处的质点振幅最小, 振幅为零

命题意图: 知道波叠加加强和减弱的意义。

主要素养与水平: 科学推理(III); 解释(II)。

3. 参考解答: 若声音的频率较高时, 可以感觉到轻响有差异。两个扬声器可视为相干波源, 它们发出的波在空间叠加, 会出现稳定的干涉现象, 某些区域

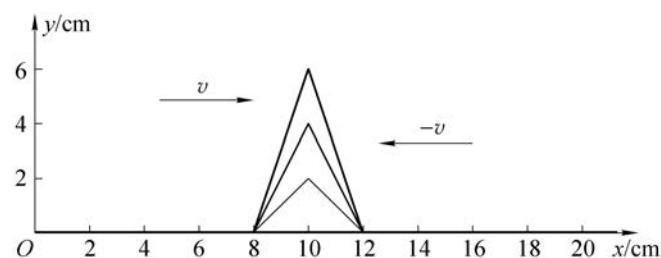


图 3

位于波源连线的中垂线上,波源 S_1 、 S_2 到该处的距离相等,振动加强,振幅为两列波振幅之和。丙同学的说法不正确, C 质点和 E 质点的振动减弱,振幅不为零,为两列波的振幅之差 $A_1 - A_2$

命题意图: 理解加强与减弱的意义。

主要素养与水平: 科学论证(Ⅲ);质疑创新(Ⅲ)。

5. 参考解答: 图 3-36 中水波的波长小于桥墩的宽度。水波的波速不变,降低 S 处拍打水面的频率,可增大水波的波长。根据波的衍射条件,障碍物(桥墩)的宽度与水波波长差不多或者比水波的波长小时,水波能够绕过桥墩继续传播,使桥墩后的树叶 A 振动起来

命题意图: 知道明显衍射的条件;知道通过介质中物体是否振动来判断波是否到达;通过波长、振动频率和波速三者的关系做简单推理。

主要素养与水平: 运动与相互作用观念(Ⅲ);科学论证(Ⅱ)。

6. 参考解答: 相对于超声波,次声波的频率较低,波长较长,遇到相同的障碍物,次声波更容易发生衍射,绕过障碍物继续传播,反射波的强度会减弱,不利于蝙蝠定位

命题意图: 知道确定物体位置的精度与波长有关,能结合蝙蝠的生存需求做推理。

主要素养与水平: 运动与相互作用观念(Ⅱ);科学论证(Ⅱ)。

7. 参考解答: 管口 S 处的振动可视为波源。声波通过左、右两条长度不同的通道传到管口 T ,发生叠加。若两列声波在 T 处引起的振动步调相同,则 T 处的振动加强,声音变强;若在 T 处引起的振动步调相反,则声音变弱。调节 B 管伸入 A 管的长度,改变了左侧通道的长度,改变了两列声波在 T 处引起

4. 波源 S_1 、 S_2 在同一水面上步调一致地上下振动,分别产生了振幅为 A_1 、 A_2 ($A_1 > A_2$) 的两列水波。两列波的波峰、波谷分别用实线、虚线表示,如图 3-35 所示为某一时刻两列水波相遇的图样。关于水面上 B 、 C 、 D 、 E 、 P 质点的运动状态,三位同学的观点如下。

甲: B 质点始终位于波峰, D 质点始终位于波谷。

乙: P 质点的振动加强,其振幅为 $A_1 + A_2$ 。

丙: C 、 E 质点的振动减弱,其振幅为 0。

分析说明三位同学的观点是否正确。

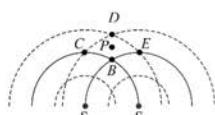


图 3-35

5. 如图 3-36 所示, P 为直立于小河之中的一个实心桥墩, A 为靠近桥墩浮在水面上的一片树叶,小河水面平静。在 S 处稳定拍打水面,形成水波向桥墩后面传播,但树叶 A 没有明显振动。为使水波能传播到桥墩后面使树叶 A 振动起来,可以采用什么方法?

6. 蝙蝠通过发射高频超声波,根据从障碍物反射回来的超声波来判定前进的方向。假如蝙蝠发出的是频率较低的次声波,会出现什么情况?

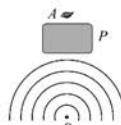


图 3-36

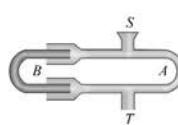


图 3-37

7. 如图 3-37 所示为汽车消音器的示意图,从管口 S 处传入某一频率的声音,通过左右两条管道传到管口 T ,调节 B 管伸入 A 管的长度, T 处听到的声音强弱会发生变化。对此现象做出解释。

的振动情况差异程度,即声音的强弱会随之变化

命题意图:通过生活中汽车经过身旁声音并不大的现象,用波的叠加解释,体会 STSE 的意义。

主要素养与水平:运动与相互作用观念(Ⅱ);科学论证(Ⅲ)。

资料链接

两相干点波源发出的波干涉加强、减弱点的分布

如图 4 所示,两个相干点波源 S_1 、 S_2 发出的波在空间某点 P 相遇时, P 点的合运动是两个波源发出的波在该点引起振动的叠加,其合振动的振幅取决于 P 点到两个点波源的波程差,波程差 $\Delta r = r_2 - r_1$ 。当波程差等于波长的整数倍时,合振动的振幅最大;当波程差等于半波长的奇数倍时,合振动的振幅最小。可见,空间所有与这两个波源间的波程差为常数的点的集合将在同一个曲面上,这个曲面由 $r_2 - r_1 = C$ 决定。所有满足干涉极大条件: $\Delta r = r_2 - r_1 = m\lambda$ 的点的集合,是一组以两个点波源的连线为对称轴的旋转双曲面。由此可见,教材图 3-28 中表示的干涉加强和减弱的橙色实线和虚线均为双曲线。

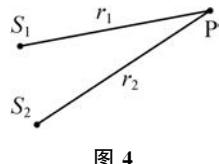


图 4

本节编写思路

本节通过联系实例，结合分析推理，认识多普勒效应及其成因，了解生产生活中多普勒效应的现象和应用。本节内容按以下思路展开：

1. 以声波为例，通过列举生活现象，结合测量体验，认识多普勒效应。

2. 以水波为例，通过分析比较观察者、波源相对介质静止和运动时所接收的波数，认识多普勒效应的成因。

3. 以水波和声波为例，了解多普勒效应的应用。

学习本节内容，首先体验声波的多普勒效应，归纳多普勒效应的特征。再以水波为例，分析比较不同情形下，观察者单位时间内接收到的波数的变化，体会多普勒效应的成因。然后，了解多普勒效应的实际应用。本节内容可加深对波的特有现象的认识。

第五节 多普勒效应

当救护车、消防车从身边飞驰而过时，你有没有注意过它们鸣笛声的音调发生了变化？当这些特种车辆向你驶来时，你会觉得音调升高了；当车辆离你而去时，音调降低了。

▶ 多普勒效应

1842年，多普勒（Doppler，1803—1853）在铁道旁散步，发现鸣笛的火车经过身旁时，音调先变高后变低。他对这种现象进行了研究，发现波源与观察者有相对运动时，观察者接收到的波的频率会发生改变。

[1] 自主活动

用声音发生器发出某种频率的声波，用声传感器测量该声波的频率。当快速移动声音发生器时，听一听音调有什么变化，观察声传感器测得的声波的频率，你有什么发现吗？生活中有没有类似的现象？

如果声音发生器静止，移动声传感器，又有什么现象？

大量实验表明，当波源与观察者发生相对运动时，观察者接收到的波的频率高于或低于波源频率，这种现象称为多普勒效应（Doppler effect）。

把一颗石子扔入水中，水面会产生一阵不断向外扩展的涟漪。与此类似，波源振动时，发出的波向各个方向传播。如果波沿各个方向传播的速度相同，经过相同时间波将传到同一个球面，在二维平面上就是一个圆。用实线表示波峰，波在二维平面中的传播情况是如图3-38所示的同心圆，相邻圆的半径之差即为一个波长。

波源每完成一次全振动，波就向外传播一个波长，随着波的传播，图3-38所示的同心圆就不断扩展。此时如果在圆的某一条半径上距波源确定距离处有一位观察者，随着波以波速 v 传播，图3-38中间距为 λ 的波峰会一个个相继经过该观察者，他接收到



图3-38 观察者、波源都静止

正文解读

[1] 这是一个体验类的“自主活动”。当声音发生器发出一定频率的声波时，发生器相对于观察者以不同方式运动，体验声音频率的变化。目的在于，认识波传播过程中的特有现象，为引入多普勒效应做铺垫。

的频率就是单位时间内经过观察者的波峰数目，即 $f = \frac{v}{\lambda}$ 。可见，当波源与观察者都静止时，观察者接收到的频率就是波源的振动频率。

如果观察者向着波源运动，如图 3-39 所示，单位时间内经过观察者的波峰数则会增加，观察者接收到的频率高于波源的频率；观察者远离波源运动时，单位时间内经过观察者的波峰数将减少，观察者接收到的频率低于波源的频率。

当观察者相对介质静止，而波源相对介质运动时，观察者测得的频率也会变化。图 3-40 所示描述了由波源发出的波的波峰经过四个周期在空间的分布，图中圆点表示波源，圆形实线表示波峰。某一时刻波源发出的波的波峰是以该时刻波源位置为圆心的圆。波峰向外扩展的同时，波源也沿直线运动。在波源的运动方向上，不同时刻发出的波峰间距减小，而相反方向则增加。

可见，波源向着观察者运动时，波源与观察者连线方向上的波峰间距将被压缩，波长减小。但由于波速不变，观察者在单位时间内接收到的波峰数增加，即接收到的频率高于波源的频率；反之，波源远离观察者时，波源与观察者连线方向上的波峰间距将被拉伸，波长增大，观察者在单位时间内接收到的波峰数减少，接收到的频率低于波源的频率。

► 多普勒效应的应用

蝙蝠是利用声波的高手。它们发出高频超声波脉冲，接收反射声波。当蝙蝠的猎物——昆虫在蝙蝠前飞行时，昆虫若飞得比蝙蝠快，两者间的距离增大，从昆虫身上反射的超声波频率会变低；若蝙蝠逐渐接近昆虫，从昆虫身上反射的超声波频率会变高。蝙蝠就是据此来探测和捕捉昆虫的（图 3-41）。蝙蝠不仅用超声波来捕食、定位和导航，还用超声波来感知其他同伴。

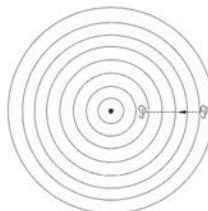
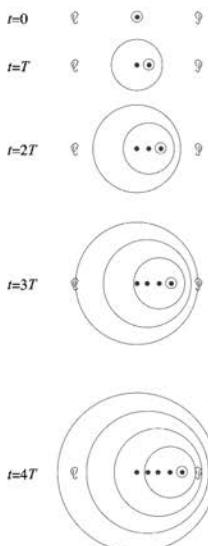


图 3-39 观察者运动、波源静止



[1] 图 3-40 波源运动、观察者静止



图 3-41 蝙蝠利用多普勒效应捕食

[1] 图 3-40 中的一系列图描述了运动的波源在不同时刻的位置，及波源发出的波在空间的分布情况，形象地说明波源运动时，接收器在单位时间内接收到的波峰数。将其与图 3-39 所示波源和观察者均静止时的情形做比较。

多普勒现象在我们的生活中有很多应用，不胜枚举。

多普勒超声心动图学是一门新兴学科，利用超声波的多普勒效应来研究心脏和大血管中血液的流动特性。进入人体的超声波被血细胞反射，由于血细胞的运动，反射波的频率发生了变化。由此能得到血液流动快慢的信息。

公路上的测速仪利用多普勒效应根据反射声波频率的变化来检测汽车的车速。天文学家根据星系运动引起的多普勒效应认识到宇宙一直在膨胀。

STSE

当波源移动的速度超过介质中的波速时会出现马赫锥。马赫 (E. Mach, 1838—1916) 在研究一个微小的点波源运动时发现，当点波源以超音速在空气中运动时存在一个以点波源为顶点的锥面。在锥面内才能听到声音，在锥面外部不会听到声音，这个圆锥称为马赫锥，这种形式的波动称为船波。船波最直观的例子就是船掠过水面留下的痕迹，这时船的速度超过了水波的速度，如图 3-42 所示。超音速飞机发出的震耳欲聋的裂空声就是船波传播的结果。

这是由于声波的传播速度是有限的，飞机速度接近音速时就会追上自身发出的声波，飞机发出的沿前进方向传播的声波在飞机前方变得非常密集，使空气压强变得很大，能量非常集中，出现一个界面。界面两侧气体的压强等物理性质都会发生突变，正是压强的突变导致了“音爆”。在这种情况下流经飞机表面的气流变得非常紊乱，使飞机产生剧烈抖动，给飞行带来很大的干扰，甚至导致飞机坠毁，这就是所谓“音障”问题。如果飞机加速度足够大，便能尽快穿过这个不稳定的声波屏障，飞到声音的前方突破音障。从技术上而言，突破音障除了增加发动机的推力外，还可以通过改变飞机的气动外形来实现，目前采取的方法之一是将机翼做成三角形，或把机翼做得又薄又短（图 3-43）。



图 3-42 船掠过水面留下的水波图



图 3-43 改变飞机的气动外形来突破音障

问题与思考解读

问题与思考

- 站在站台上，如何根据汽笛音调的变化，判断火车是驶向站台还是驶离站台？
- 设想将声传感器以声速远离一个频率为 440 Hz 的声源，测得的声音频率为多少？
- 蜻蜓点水是蜻蜓在水中产卵的行为。假如蜻蜓沿着直线匀速飞行，每隔相同时间点一次水。某次飞行在水面形成的波纹如图 3-44 所示，说明在什么条件下会出现这样的波纹？画出不同条件下可能的波纹示意图。

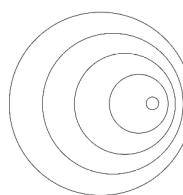


图 3-44

1. 参考解答：鸣笛的火车为波源。由于多普勒效应，站台上的观察者听到的声音频率不同，音调不同，火车驶向站台时音调变高，驶离站台时音调变低

命题意图：将生活经验与推理做出一致的分析。

主要素养与水平：运动与相互作用观念(Ⅱ)；科学推理(Ⅱ)。

2. 参考解答：声传感器以声速远离波源，声传感器接收到的波数为零，测到的声音频率为零

命题意图：知道声源与测量之间的关系。

主要素养与水平：科学推理(Ⅱ)；科学论证(Ⅱ)。

3. 参考解答：图 3-44 中的波纹左疏右密，说明蜻蜓(波源)相对于水(介质)向右运动，蜻蜓的速度小于水波的速度。若蜻蜓的速度与水

波的速度相同，则波纹如图 5 所示

提示：学生还可能画出蜻蜓沿其他方向运动的情况，注意各个圆环的圆心应等间距。

命题意图：引导学生观察生活现象，并用所学的知识做出解释。

主要素养与水平：运动与相互作用观念(Ⅱ)；科学推理(Ⅲ)。

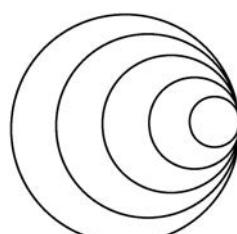


图 5

小结

· 基本概念和基本规律

机械波：机械振动在介质中的传播。

横波：介质中质点的振动方向与波的传播方向垂直的波。

纵波：介质中质点的振动方向与波的传播方向在同一直线上的波。

波的周期：介质中任意一个质点完成一次全振动所需要的时间，与波源振动的周期相等，用符号 T 表示。

波的频率：介质中任意一个质点完成全振动的次数与所用时间之比，与波源的频率相等，用符号 f 表示。

波长：振动在介质中经过一个周期 T 传播的距离，也是介质中运动状态完全相同的两个相邻质点间的距离，用符号 λ 表示。

波速：机械波在介质中传播的速度，由介质的性质决定，用符号 v 表示。

波的反射：波在传播中遇到障碍物时发生的背离障碍物传播的现象。

波的折射：波在传播中从一种介质进入另一种介质时发生了传播方向偏折的现象。

波的干涉：两列振动情况相同的波源产生的波在某区域相遇时，在相遇区域的某些位置质点的振幅较大，振动加强；某些位置质点的振幅较小，振动减弱；且振动加强和减弱区域相互间隔、分布稳定的现象。

波的衍射：波绕过障碍物继续传播的现象。

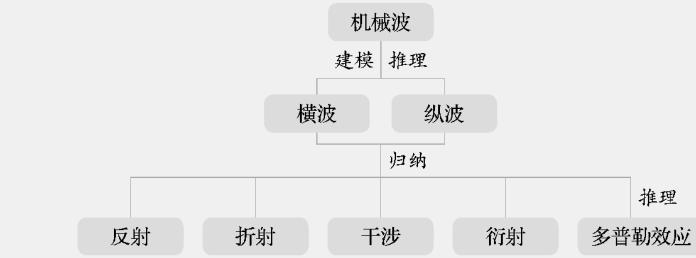
多普勒效应：当波源与观察者发生相对运动时，观察者接收到的波的频率高于或低于波源频率的现象。

· 基本方法

通过建构机械波模型，感受通过抽象、归纳得出结论的方法。

通过观察、分析波的传播现象，感受基于证据进行解释、论证的方法。

· 知识结构图



复习与巩固解读

68 第三章 机械波

复习与巩固

- 一列多米诺骨牌依次倒下，球场看台上的“人浪”此起彼伏。这些现象能否认为是波的传播？
- 空气中一列声波的频率是 200 Hz，它的周期是多少？如果这列声波在水中传播，它的周期是多少？如果在水中这列声波的波长为 7.4 m，则这列声波在水中的传播速度是多少？
- 如图 3-45 所示为一列沿 x 轴正方向传播的横波在某时刻的波形图。此时位于 $x = 3 \text{ cm}$ 的质点经过 $\frac{1}{4} T$ 后的坐标为多少？

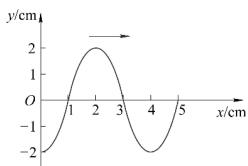


图 3-45

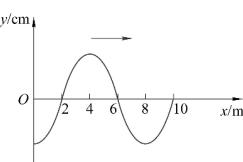


图 3-46

- 如图 3-46 所示为一列沿 x 轴正方向传播的横波在某时刻的波形图，波源位于坐标原点 O，从 $t = 0$ 时开始振动。波速为 2 m/s，分别画出 $t = 3.5 \text{ s}$ 和 $t = 6.5 \text{ s}$ 两个时刻的波形图。
- A 、 B 两波相向而行，在某时刻的波形与位置如图 3-47 所示，已知波的传播速度为 v ，图中坐标尺每格长度为 l ，在图中画出又经过 $t = \frac{\pi l}{v}$ 时的波形。

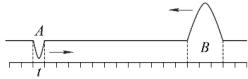


图 3-47



图 3-48

- 在一根水平绷紧的弹性绳上，质点 A 从零时刻开始上下做简谐运动，经时间 t 形成的波形如图 3-48 所示。若规定向上方向为质点离开平衡位置位移 y 的正方向，画出质点 A 从零时刻开始做简谐运动的振动图像。
- 一列横波沿 x 轴正方向传播。当平衡位置位于 $x_1 = 10 \text{ m}$ 的质点 A 位于波峰时，平衡位置位于 $x_2 = 140 \text{ m}$ 的质点 B 位于波谷；在 A 、 B 之间有 6 个波峰，振源的振动周期为 0.2 s。这列波的波速为多大？质点 B 从波谷开始经多少时间位于波峰？

科学推理(Ⅱ)；科学本质(Ⅰ)。

- 参考解答：经过 $\frac{1}{4} T$ 后该点的坐标为 $(3, 2)$ 。因波传播时质点不会随波迁移，该质点在 x 轴的坐标不变，为 $x = 3 \text{ cm}$ 。在横波的传播过程中，质点振动方向与波的传播方向垂直。横波沿 x 轴正方向传播，图示时刻坐标为 $(3, 0)$ 的质点振动方向沿 y 轴正方向。经过 $\frac{1}{4} T$ 周期后，该质点位于正向最大位移处，为 $y = 2 \text{ cm}$

命题意图：知道波的传播与质点振动之间的关系，由关系做出推理。

主要素养与水平：运动与相互作用观念(Ⅱ)；科学推理(Ⅰ)。

1. 参考解答：从波的运动形式角度，两种现象都与波的传播类似。从机械波传播的原因而言，多米诺骨牌依次倒下可以看作是一个脉冲波的传播，人浪则不可。

命题意图：知道波的特点和波传播的条件。

主要素养与水平：运动与相互作用观念(Ⅱ)。

2. 参考解答：声波在空气中的周期 $T = \frac{1}{f} = \frac{1}{200} \text{ s} = 0.005 \text{ s}$ 。这列声波在水中的周期也是 0.005 s。这列声波在水中的速度 $v = \frac{\lambda}{T} = \frac{7.4}{0.005} \text{ m/s} = 1480 \text{ m/s}$

命题意图：知道描述波的几个物理量之间的关系，根据关系进行简单的运算。

主要素养与水平：

4. 参考解答：如

图 6 所示

命题意图：知道描述波传播的各物理量及相互之间的关系，理解波传播的特点。

主要素养与水平：

运动与相互作用观念（Ⅲ）；科学推理（Ⅱ）。

5. 参考解答：如图 7 所示

提示：先找出两个“子波”在相遇时的情况，因初始时刻两个“子波”中心刚好相距 $14l$ ，

$$故 t = \frac{7l}{v} \text{ 时刻两个“子波”的中心重合；画好两个“子波”后，再叠加。}$$

命题意图：知道波速决定于介质；能画出某时刻两列波传播的图形；能根据波的叠加原理画出某时刻的波形。

主要素养与水平：运动与相互作用观念（Ⅲ）；科学推理（Ⅱ）。

6. 参考解答：如图 8 所示

命题意图：能根据波形及波的传播方向，推断波中质点的运动方向；会画出某质点的振动图像。

主要素养与水平：科学推理（Ⅱ）；科学本质（Ⅰ）。

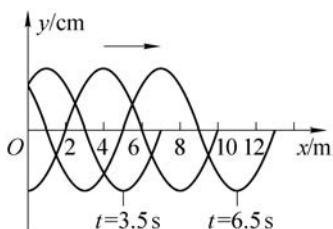


图 6

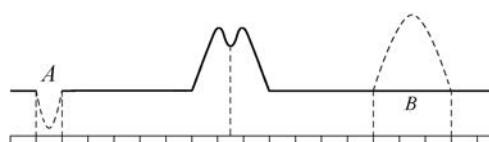


图 7

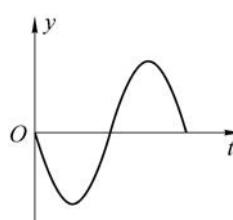


图 8

8. 一列横波沿 x 轴正方向传播，其波速为 1 m/s ，频率为 2.5 Hz ，振幅为 4 cm 。在 x 轴上有 P 、 Q 两点， $x_Q - x_P = 3.9 \text{ m}$ 。某时刻 P 处的质点位于平衡位置上方最大位移处，再经过多少时间 Q 处质点也位于平衡位置上方的最大位移处？在这段时间内该质点经过的路程是多少？

9. 如图 3-49 (a)、(b)、(c)

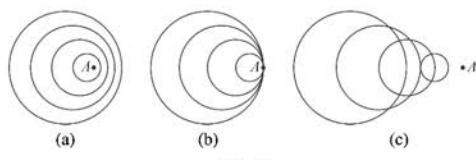


图 3-49

所示分别反映了飞机以三种不同速度在空中（不考虑空气的流动）水平飞行时产生声波的情况。图中一系列圆表示飞机不同时刻发出的声波传播到的位置， A 点表示飞机的位置。分析说明哪张图中飞机飞行的速度最大。最大速度约为声波速度的多少倍？

10. 在利用发波水槽观察水波的衍射实验中，若改变挡板的方向和位置可观察到水波通过挡板后的不同情况。在图 3-50 中画出水波在挡板后的传播情况。

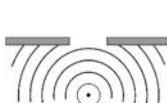


图 3-50



图 3-51

11. 两波源 I、II 在水槽中形成的水波示意图如图 3-51 所示，其中实线为波峰，虚线为波谷。此时 a 、 b 两点分别处于波谷与波谷、波峰与波峰叠加的状态。因此，这两个位置的振动始终加强。你是否认同此说法，说明理由。

- *12. 在静止的水面上，一个波源 S 做垂直水面、周期为 T 的振动，所产生的波沿水面以大小为 v 的速度向各个方向传播，波源开始振动后经过 Δt 时间，在水面上看到的水波示意图如图 3-52 (a) 所示，图中实线表示波峰。则：

- (1) 说明图 (a) 中的图像为什么是一系列的同心圆？波长为多少？

- (2) 如果波源不动，水流以速度 v 沿某一方向流动，那么波源开始振动后经过 Δt 时间时，站在岸上的人将看到的图像是图 (b) 中的哪一个？说明判断的理由。

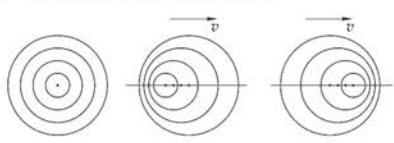


图 3-52

7. 参考解答: 由题意可知, 质点 A、B 间距 $x_2 - x_1 = 6 \frac{1}{2} \lambda = 130$ m, 则 $\lambda = 20$ m。 $v = \frac{\lambda}{T} = \frac{20}{0.2}$ m/s = 100 m/s。质点 B 现在位于波谷, 到达波峰, 需经过 $(n + \frac{1}{2}) T = (2n + 1) 0.1$ s ($n = 0, 1, 2, \dots$)

命题意图: 根据证据能建立位置之间的距离与波长的关系; 理解波的周期性特点。

主要素养与水平: 科学推理(III); 解释(II)。

8. 参考解答: 波长 $\lambda = \frac{v}{f} = \frac{1}{2.5}$ m = 0.4 m, 则 $x_Q - x_P = 3.9$ m = $9 \frac{3}{4} \lambda$ 。以 M 点为参考点, M 点与 Q 点间距离为 9λ , 则两点振动情况完全

同步。由图 9 可知, P 处的质点位于平衡位置上方最大位移处时, Q 处的质

点位于平衡位置向下运动, 再经过 $(n + \frac{3}{4}) T = (0.4n + 0.3)$ s ($n = 0, 1, 2, \dots$), Q 处的质点也位于平衡位置上方最大位移处。这段时间内 Q 处的质点经过的路程为 $16(n + \frac{3}{4})$ cm ($n = 0, 1, 2, \dots$)

命题意图: 知道描述波的物理量之间的关系; 能运用周期性做出合理判断。体会整体与部分之间有着紧密的关系(波是许多质点的运动表现, 任一质点在不同的时刻有不同的位置特征)。

主要素养与水平: 模型建构(IV); 科学推理(III)。

9. 参考解答: 图(c)中飞机飞行的速度最大, 飞机的速度约为声波速度的 2 倍。由图(a)、(b)、(c)可知, 圆表示相同时间间隔声波传播的距离, 图中最大的圆表示最早被发出的声波传播到的位置, 其半径为波传播的距离, 其圆心为飞机的初始位置。比较三图可得, 声波传播的速度相同。A 点与大圆圆心连线的长度为波传播时飞机飞过的距离。比较可知, 在相同的时间内, 图(a)中飞机飞过的距离小于波传播的距离, 图(b)中飞机飞过的距离等于波传播的距离, 图(c)中飞机飞过的距离约为波传播距离的 2 倍。因波在同种介质中的传播速度相同, 所以图(c)中飞机的速度最快, 约为声波速度的 2 倍

命题意图: 能阅读图像, 从获取的信息中, 结合所学规律做出推理。

主要素养与水平: 模型建构(IV); 解释(III)。

10. 参考解答: 如图 10 所示, 图(a)中, 没有明显衍射现象, 水波被挡板挡住。图(b)中小孔的尺寸与波长相近, 有明显衍射现象

命题意图: 能在观察到的现象的基础上, 用恰当的图形来表述。

主要素养与水平: 运动与相互作用观念(II); 科学推理(I)。

11. 参考解答: 由图 3-51 可知, 这两列波的波长不同, 不符合相干条件, 不会出现稳定的干涉图样, 此说法错误

命题意图: 知道波的叠加原理; 理解始终加强的含义。引导学生进行分析思考。

主要素养与水平: 科学论证(II); 质疑创新(III)。

12. 参考解答: (1) 波源相对于介质静止, 产生的波形自波源位置以相同的速度向各个方向传播, 波峰连线到波源的距离相等, 形成以波源为圆心的一系列圆周。相邻波峰的距离为一个波长, 即相邻同心圆的半径之差为一个波长 λ (2) 岸上人看到的图像是图(b)中的(I)。因波源不动, 水流向右运动, 带

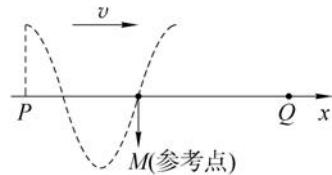


图 9

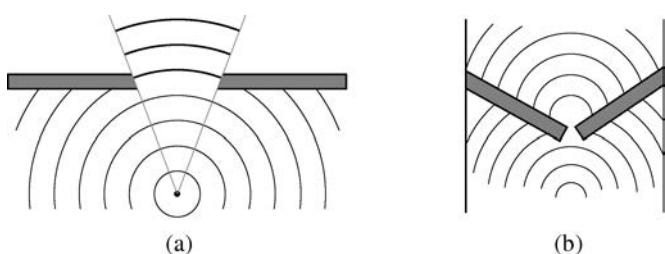


图 10

动介质中的质点均匀向右移动,产生的任一波峰保持圆形往外传播,相当于外圆的圆心向右运动,后产生的波峰圆的圆心在左边,形成图(b)的 I

命题意图:应用所学的多普勒效应对生活中的现象做出判断,同时希望教师能创设更多的真实情境,发现问题,进行探究。

主要素养与水平:模型建构(V);科学论证(III)。

第三部分 本章练习部分解读

第一节 机械波的形成和传播

1. 机械振动 相互作用
2. 在同一直线上 声 垂直 绳
3. 见下表

说 法	判 断	说明理由或举例
有机械振动一定会有机械波	错	机械波的产生条件是波源和能够传播机械振动的介质
有机械波一定有机械振动	对	机械波是机械振动在介质中的传播
只要有介质,就一定有机械波	错	形成机械波除介质外,还要有波源

4. 没有。弹簧的一端振动时,会产生疏密相间的波沿弹簧传播,但是每一圈弹簧却不会随波迁移;水面上的树叶并不会沿水波的传播方向运动;抖动绳子产生的绳波并不会让绳子向前运动

5. 如图 11 所示 波源起振方向向下

6. 引起水波的波源是船桨对水面的作用。由于运动员的动作整齐划一,八个船桨几乎同时接触水面,同时离开水面,形成的水波同时开始向周围传播,水波的波速相等,因此形成的水波圈的大小也几乎相等

7. 还需要的信息是 P 波的波速 v_1 和 S 波的波速 v_2 设 P 波从震源传播到地震记录仪的时间为 t ,则 $v_1 t = v_2 (t + 600 \text{ s})$,则 $t = \frac{600v_2}{v_1 - v_2} \text{ s}$, $s = v_1 t = \frac{600v_1 v_2}{v_1 - v_2} \text{ m}$

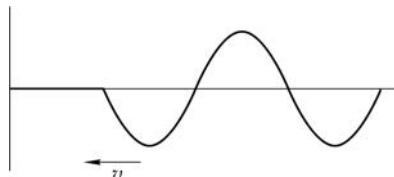
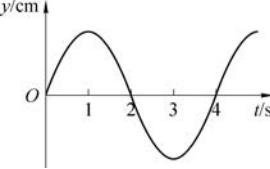
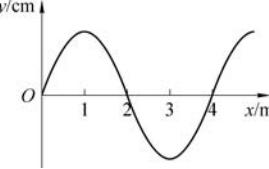


图 11

第二节 机械波的描述

1. 波速 介质的性质 无关
2. 等于 等于 无关
3. 振动情况总是相同 波峰(谷) 相邻疏(密)部
4. 超音速指物体的运动速度大于当前环境中声速的现象。通常所说的声速为 340 m/s 是声波在海平面高度、1 个标准大气压和 15°C 的条件下的传播速度。声速大小受介质影响,当空气的密度等参数变化时,声速也会发生变化。需根据当时、当地的确切的声速为依据来做出判断。所以做超音速运动的物体的速度可以大于,也可以小于 340 m/s
5. 波源是振动的琴弦,介质是空气,波长为 1.31 m

6. 见下表

图 像		
研究对象	一个质点	介质中的各个质点
横坐标	时间	各个质点平衡位置的空间分布
纵坐标	该质点相对于平衡位置的位移	各个质点相对于平衡位置的位移
两个相邻峰值间的距离	周期	波长
图像的意义	一个质点在不同时刻的振动位移	介质中各质点在同一时刻的振动位移
由图像直接获得的信息	振幅, 周期	振幅, 波长
图像随时间变化趋势	图形不变, 图线随时间而延伸	原有波形沿波的传播方向平移

7. (1) 由图 3-4 可知, 波长 $\lambda = 8 \text{ m}$, 根据 P 点的运动情况, 可以判断这列波向左传播, Q 点沿 y 轴负方向运动 (2) 当波从图示位置经过时间 $\Delta t = 0.3 \text{ s}$, 向左运动 $\Delta x = 3 \text{ m}$ 后, P 点到达平衡位置, 由此

$$\text{可得, 波速 } v = \frac{\Delta x}{\Delta t} = \frac{3}{0.3} \text{ m/s} = 10 \text{ m/s, 频率 } f = \frac{v}{\lambda} = \frac{10}{8} \text{ Hz} = 1.25 \text{ Hz}$$

8. 由图 3-5 可知, 波长为 6 m , 周期为 $T = \frac{\lambda}{v} = \frac{6}{2} \text{ s} = 3 \text{ s}$, 因此 5.25 s 后的波形与 2.25 s 后的波形一致。由于 b 点向上振动, 因此该波向右传播。经过 2.25 s , 该波向右平移 $s = vt = 2 \times 2.25 \text{ m} = 4.5 \text{ m}$, 据此画出波形图如图 12 所示

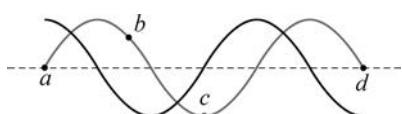


图 12

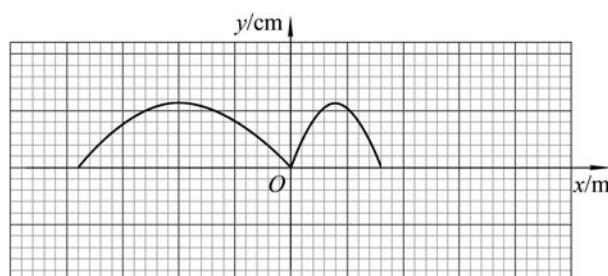


图 13

9. 由于两个传感器测得的是距离最近的振动同步的两个位置, 传感器间距即为声波的波长 λ , 由此可得 $v = \lambda f = sf$ 。该方案有以下几点可以改进: (1) 探寻 n 个振动完全同步的位置, 测量距离后求平均值, 得到波长, 可减小误差; (2) 使扬声器与两个传感器的距离缩小, 保证声波不会受到其他因素的影响

10. 如图 13 所示

第三节 机械波的反射和折射

1. (a) 入射方向与法线的夹角等于反射方向与法线的夹角 频率
2. 如图 14 所示 实线表示遇到挡板后的水波, 虚线表示的是法线。水波遇到挡板后反射, 波速大小不变、方向改变, 波长不变

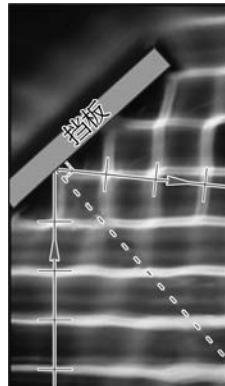


图 14

3. (1) 如图 15 所示 (2) $\lambda = \frac{2.7}{4.5} \text{ m} = 0.6 \text{ m}$, $v = f\lambda = 18 \times 0.6 \text{ m/s} = 10.8 \text{ m/s}$

4. (1) 两个峰值会离得更远 (2) 由图 3-12(b) 可得, 峰值 A 与峰值 B 相差 33 个格子, 设 s 为堵塞物上侧到管道上壁的距离, 则 $s = v \cdot \frac{t}{2} = \frac{340 \times (2.0 \times 10^{-6} \times \frac{33}{5})}{2} \text{ m} \approx 2.24 \times 10^{-3} \text{ m}$

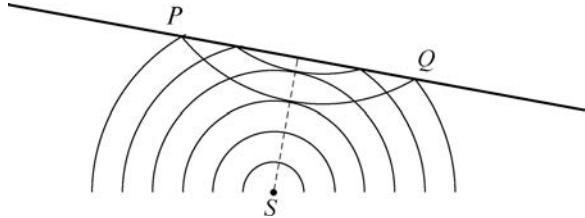


图 15

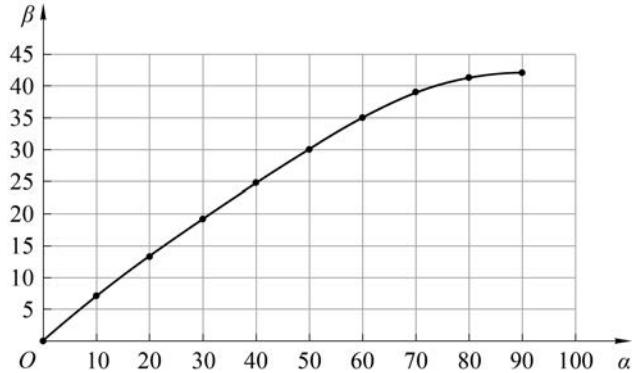


图 16

5. (1) 如图 16 所示 (2) 由图可知, 当 β 为 10° 时, α 约为 15°

第四节 机械波的干涉和衍射

1. 波长 衍射

2. 干涉 互相间隔 分布稳定

3. 6 或 8 蝙蝠为了探测虫子需要加强反射, 减小衍射, 即没有产生明显衍射。超声波的波长为 0.57 cm , 对应的频率 $f = \frac{v}{\lambda} = \frac{340}{5.7 \times 10^{-3}} \text{ Hz} \approx 5.96 \times 10^4 \text{ Hz}$, 当蝙蝠发出的超声波频率大于该数值时, 反射更明显。即蝙蝠发射的超声波频率可能为 $6 \times 10^4 \text{ Hz}$ 或 $8 \times 10^4 \text{ Hz}$

4. 因为波速一定的前提下, 低频声波的波长相对较长, 即使遇到障碍物也容易绕过障碍物发生衍射, 不容易被挡住, 可以传播比较长的距离

5. 如图 17 所示

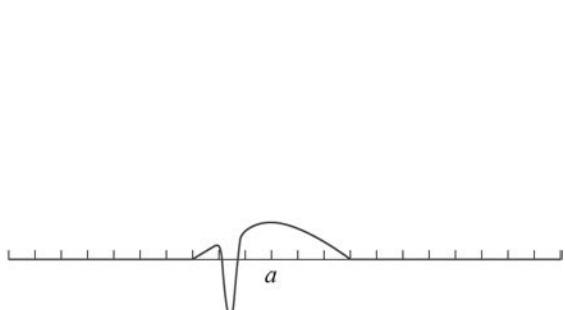


图 17

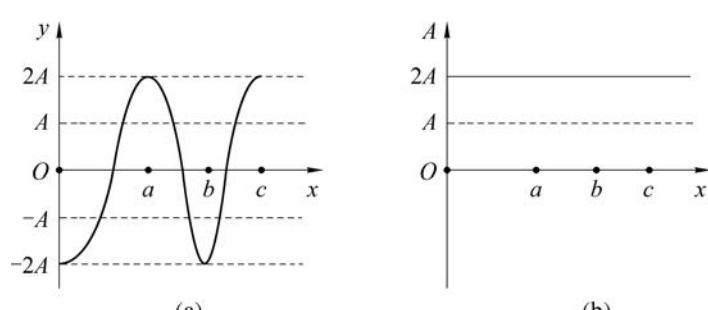


图 18

6. 如图 18(a)、(b) 所示

7. 因为扬声器发射的声波会被金属盘反射, 所以可以将金属盘看作另一个波源。两波源的波长和波速相同, 发出的声波沿 PQ 相向传播且相遇并叠加, 沿连线呈现稳定的干涉图样。在 PQ 连线上振动的加强点和减弱点间隔分布, 所以在传感器沿 PQ 连线匀速移动的过程中, 传感器测得的声波强度会周期

性变化

8. 主动降噪技术是通过在隔音耳罩内部接近耳机内部的扬声器处放置一个麦克风,对人耳听到的噪声进行采样,通过电子系统,产生一个与噪声的振动方向始终相反的“反噪声”。反噪声与噪声叠加,从而消除外界通过耳罩传入的噪声

第五节 多普勒效应

1. 大于 小于
2. 救护车从远处驶来时,频率会变大;救护车驶离时,频率会变小
3. 先变大后变小
4. $f_{\text{甲}} = f_0 < f_{\text{乙}}$, 因为甲与发声装置处于相对静止状态,所以甲听到的声音频率不变;而发声装置与乙相互靠近,根据多普勒效应,乙听到的声音频率增大
5. 由图 3-18 可知,靠近 B 侧的水波波长较小,A 侧的水波波长较大。由于波峰向外扩展的同时,波源也沿直线运动,在波源的运动方向上,不同时刻发出的波的波峰间距减小,而相反方向则增加。因此波源向右运动,波速 u 比波源运动的速度 v 大

第四部分 本章实验与活动部分解读

1 自主活动 水波的传播

参考解答: 软木塞做上下起伏的运动,并不随水波的传播沿水面向远处迁移,其运动方向与水波的传播方向垂直

命题意图: 认识横波的特点。

2 自主活动 水波的衍射

参考解答: 波的传播是需要能量的,当缝隙太小时,通过缝隙的水波能量太少,在实验中不能有效地观察到水面波

命题意图: 从能量的角度认识波的衍射现象。

第四章 光

第一部分 整 章 分 析

学习目标

1. 理解光的折射定律,了解折射率的概念,认识光的全反射现象;了解光的干涉、衍射和偏振现象,认识光的波动性,进一步完善物质观念和运动与相互作用观念。
2. 通过测量玻璃砖的折射率和利用双缝干涉测量光的波长,进一步体会间接测量和累积测量的方法。能用光的折射定律和全反射规律,分析、解释或解决与光的折射及全反射有关的简单问题。了解光的干涉、衍射和偏振现象在生产生活中的应用。
3. 经历探究光的折射定律的过程,体验基于证据发现规律的方法。
4. 了解激光、光纤在生产生活中的应用,体会物理规律对技术进步和社会生活的促进和影响。

编写意图

课程标准中对本章的“内容要求”为:

1. 3. 1 通过实验,理解光的折射定律。会测量材料的折射率。
1. 3. 2 知道光的全反射现象及其产生条件。初步了解光纤的工作原理、光纤技术在生产生活中的应用。
1. 3. 3 观察光的干涉、衍射和偏振现象,了解这些现象产生的条件,知道其在生产生活中的应用。知道光是横波,会用双缝干涉实验测量光的波长。
1. 3. 4 通过实验,了解激光的特性。能举例说明激光技术在生产生活中的应用。

光的折射定律和全反射规律是几何光学的基本内容。通过对光的折射和全反射的学习,认识光在不同介质中的传播规律。光的干涉、衍射和偏振是物理光学的基本内容。通过类比机械波,分析光的干涉、衍射和偏振现象,知道光具有波动性,为认识光的波粒二象性奠定基础。这些现象和规律在生产生活和科学技术领域有广泛的应用。

本章通过实验探究与观察,建立光的折射定律,认识光的全反射、干涉、衍射、偏振等现象,知道光是横波。通过测量介质折射率的实验,初步认识光与介质存在相互作用。通过测量光波长的实验,了解干涉现象的应用。通过观察,了解激光的特性和应用。

通过本章内容的学习,深化对几何光学规律的认识,类比机械波初步认识光具有波动性,促进实验观察、分析推理等能力的发展,深化物质、运动与相互作用及能量等观念,从而感悟人对自然规律的认识是逐步深化的,增强研究物理现象和问题的兴趣,进一步感悟物理规律与社会生活及技术之间的关系。

完成本章内容的学习,共需要 7 课时,其中第一节 2 课时,第二节 1 课时,第三节 2 课时,第四节 1 课时,第五节 1 课时。

第四章 光

人类对光的研究可以追溯到公元前1 000 多年。我国战国初期的思想家墨子的著作中记载了丰富的光学知识。古希腊数学家欧几里得的著作也描述了当时所了解的光学现象。直到17世纪前半叶，人们对于光的认识还仅限于光的直线传播及光的反射、折射现象。对光本质的认识经历了一个漫长的过程。光的波动说与微粒说之争始于17世纪初，其间经历了通过光的干涉和衍射实验证实光具有波动性，建立光的电磁波理论的过程。直至20世纪初，人们才认识到光具有波粒二象性。

在初中阶段，我们已经学习过光的反射和折射现象的相关知识。在本章中，将理解光的折射定律；知道光的全反射现象，了解光的干涉、衍射和偏振现象以及发生这些现象的条件；知道光是横波；了解激光的特性。在学习中，通过对光具有波动性的论证，增强证据意识，提升科学论证能力。通过实验发展科学探究能力；在观察实验现象的过程中，提升科学思维能力，形成科学态度。本章也是学习电磁波、波粒二象性等知识的基础。

本节编写思路

第一节 光的折射 71

本节从生活情境引入,通过探究建立光的折射定律和折射率的概念,并用所得规律测量介质的折射率。本节内容按以下思路展开:

1. 探究得出光的折射定律、建立折射率的概念。知道折射率反映了介质的光学性质、介质中的光速与折射率有关。

2. 用插针法测量介质的折射率,进一步体验用光线形象描述光的传播的方法。

3. 根据光的折射定律和折射率的概念,分析相关的实际现象或问题,了解折射率在生产技术中的应用。

学习本节内容,将经历实验探究、实验测量以及运用概念和规律分析实际现象或问题等过程。由此建立光的折射定律和折射率的概念、了解介质中光速与折射率的关系,发展实

验观测技能和分析推理能力,提高探究物理问题的兴趣、增强团队合作的意识,体验实事求是、认真细致对实验探究和测量的重要性,感悟物理规律与生产技术和生活之间的关系。

第一节 光的折射

[1] 站在清澈的湖边,你是否有过这样的体验,同时看到湖旁景物的倒影和水底的枯枝,如图 4-1 所示。这是来自景物和枯枝的光分别在水面发生反射和折射后,同时进入眼睛产生的视觉效果。



图 4-1 水中景象

在初中我们已经学习了光的有关知识,如图 4-2 所示,光从介质 1 射到介质 1 与介质 2 的分界面时,一部分光会返回到介质 1,我们把这种现象称为光的反射。光的反射遵循光的反射定律。在发生反射现象的同时,还有一部分光进入了介质 2,并改变了传播的方向,这就是光的折射现象。

► 光的折射定律

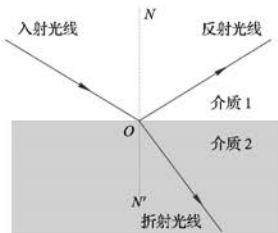


图 4-2 光在两种介质表面的反射与折射

在光的折射现象中,改变入射光的方向,折射光的方向也随之改变。入射光线与法线的夹角为入射角,折射光线与法线的夹角为折射角。折射角随着入射角的变化而变化。

入射角和折射角之间有什么定量关系?下面我们通过实验研究光从空气斜射入水中时,入射角与折射角之间的定量关系。

正文解读

[1] 以照片中的自然风光为情境,观察水面上景物的倒影、水底树木的枝条,引导学生回顾光在介质表面的反射定律和折射现象,为定量探究光的折射定律做准备。

[1] 自主活动

如图 4-3 所示,画有方格的圆盘竖直插入水槽,水面恰好位于水平直径 PQ 处。在盘边缘固定激光笔,激光笔射出的光由空气沿半径 AO 斜射入水中,光发生折射,折射光线为 OB 。由于圆盘半径一定,通过比较光线 AO 、 OB 在水面与法线方向的投影,即可得入射角 θ_1 、折射角 θ_2 的各种信息。选择不同的入射角,在表 4-1 中记录数据,据此分析 θ_1 与 θ_2 之间的定量关系。

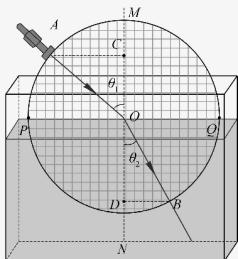


图 4-3 光从圆盘圆心处射入水槽

表 4-1

实验序号	OC	OD	AC	BD
1				
2				
3				
4				

从上面的实验可以看出, AC 与 BD 的比值为常数。如何将 AC 与 BD 的关系转化为 θ_1 与 θ_2 的关系呢?

设圆盘半径为 R , 则有

$$\frac{AC}{BD} = \frac{R\sin\theta_1}{R\sin\theta_2} = \frac{\sin\theta_1}{\sin\theta_2}$$

[2] 斯涅耳 (W. Snell, 1580—1626) 在分析了大量数据后, 总结出光的折射定律 (**law of refraction**): 当光从介质 1 射入介质 2 时, 折射光线与入射光线、法线处在同一平面内, 折射光线与入射光线分别位于法线的两侧; 入射角 θ_1 的正弦与折射角 θ_2 的正弦之比为一常数, 即

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

在光的折射现象中, 光路也是可逆的。图 4-3 所示的实验中, 如果光沿 BO 从水下入射, 折射后进入空气中的光将沿 OA 方向。

光在两种介质的分界面发生折射现象时, 入射角的正弦与折射角的正弦之比为常数, 该常数与入射角和折射角的大小均无关。但是, 对于不同的介质, 这个常数不同。

研究表明, 常数 C 与光在介质中的速度有关, 以 v_1 表示光在介质 1 中的速度, v_2 表示光在介质 2 中的速度, 常数 $C = \frac{v_1}{v_2}$ 。

分界面上并作为光的入射点。这样, 在半径一定的情况下, 入射角和折射角的三角函数, 可以用图 4-3 中的线段长度表示, $\frac{AC}{BD}$ 为入射角与折射角的正弦之比, $\frac{OC}{OD}$ 为入射角与折射角的余弦之比。

[2] 此处可引导学生联系机械波的折射现象, 感受光和机械波在传播规律上相似。另外, 在定量探究得出光的折射定律后, 可以借助实验进一步验证折射现象中光路的可逆性。

[1] 这是一个让学生活动手实验探究的“自主活动”。目的在于引导学生在初中定性实验的基础上, 进一步通过小组合作探究折射角与入射角的定量关系。本实验的设计思路是: 改变入射角, 用圆盘上的方格测得入射光和折射光在法线方向、平行界面方向的投影长度, 分析和处理数据, 得出入射角与折射角的正弦之比为常数的结论。

公元 140 年, 托勒密曾认为在光的折射现象中, 入射角 θ_1 与折射角 θ_2 之间存在简单的正比关系, 并且通过实验测量得到光从空气斜射入水中时 $\theta_2 = 0.7\theta_1$ 的结论。后来人们发现, 上述结论只在入射角较小时才大致成立。实际上, 由于小角度时 $\sin\theta \approx \theta$, 托勒密的结论正是折射定律在入射角较小时的近似。

实验时应注意, 使圆盘的中心 O 始终在

► 折射率

[1] 将表 4-2 中几种介质的折射率由大到小排序，发现并非介质的密度越大折射率就越大。如水的密度比酒精大，折射率却比酒精小。

[2] 这是一个让学生推理的“自主活动”。要求学生针对光从折射率为 n_1 的介质斜射入折射率为 n_2 的介质的一般情况，综合运用折射定律 $\frac{\sin\theta_1}{\sin\theta_2} = C = \frac{v_1}{v_2}$ ，介质折射率的概念及其与光速的关系式 $n_1 = \frac{c}{v_1}$, $n_2 = \frac{c}{v_2}$ ，导出折射定律的表达式

$n_1 \sin\theta_1 = n_2 \sin\theta_2$ 。据此认识光在两种介质分界面发生折射时折射角与入射角相对大小的关系，为全反射的学习做准备。

当光从真空斜射入某种介质时，把常数 C （即入射角 θ_1 的正弦与折射角 θ_2 的正弦的比值）称为这种介质的折射率（refractive index），用符号 n 表示。

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

光在真空中的速度为 c ，在介质中的速度为 v ，折射率也可表示为

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

由于光在真空中的速度大于其在介质中的速度，所以介质的折射率都大于 1。折射率决定了光从真空斜射入介质时的偏折程度，反映了介质的光学性质。

在实际中，通常遇到光从空气射入某种介质，或者从某种介质射入空气的情况。由于光在空气中的速度接近光在真空中的速度，空气的折射率近似为 1。可认为光由空气进入介质的折射情况与光由真空进入介质的折射情况相同。此时同样可以用折射率 n 反映光从空气斜射入介质时的偏折程度。表 4-2 中列举了几种介质的折射率。

[1] 表 4-2 几种介质的折射率

介质	折射率	介质	折射率
合成碳硅石	2.65	水晶	1.54
金刚石	2.42	酒精	1.36
二硫化碳	1.63	水	1.33
玻璃	1.2~1.8	空气	1.000 28

对于两种不同介质，光在其中传播的速度大小不同，不同介质的折射率就不同。把折射率较小的介质称为光疏介质（optically thinner medium），折射率较大的介质称为光密介质（optically denser medium）。光疏介质与光密介质是相对而言的，例如，水、水晶和金刚石三种介质相比较，水晶相对于水是光密介质，而相对于金刚石则是光疏介质。

[2] 自主活动

当光从折射率为 n_1 的介质以入射角 θ_1 入射到折射率为 n_2 的介质时，折射角为 θ_2 。利用折射定律和折射率的定义推导：折射定律可以表示为 $n_1 \sin\theta_1 = n_2 \sin\theta_2$ 。并讨论光从光疏介质入射到光密介质或从光密介质入射到光疏介质时，光线偏折现象有什么不同。

无论光是由光疏介质入射到光密介质还是由光密介质入射到光疏介质，折射角都随入射角增大而增大。

[1] 生活中的很多现象都与光的折射有关。如图 4-4 所示，日落时，我们看到椭圆状的太阳逐渐沉入地平线。这是因为大气的密度随高度的减小而增大，离地面越近，大气的密度越大，光在其中的传播速度越小，折射率越大；来自太阳的光线在穿过大气层的过程中发生了折射，逐渐向地面弯曲；沿着地面观察者的视线看来，光线似乎是从较高的位置射过来的，太阳被“抬高”了。如图 4-5 所示，由于落日上缘和下缘发出的光在大气中的折射情况不同，落日看起来呈椭圆形。大气的折射同样会对星体位置的观察造成偏差，这是天文学家在地球上进行天文观测时必须考虑的因素。



图 4-4 日落时观察到椭圆状的太阳

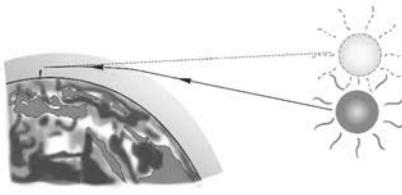


图 4-5 观察落日的示意图

[2] STSE

折射率是物质的一种物理属性，常被用作检测食品的一项指标。例如，通过折射率的测定，可以控制高浓度葡萄糖浆的浓度，确定果汁饮料的含糖量，鉴别食用油中脂肪酸的构成，测定牛乳乳清的乳糖含量，快速区分甲醇与乙醇，等等，从而有效打击伪劣产品，维护市场秩序。

[3] 学生实验

测量玻璃的折射率

提出问题

折射率是反映介质光学性质的一个重要参数。光从一种介质进入另一种介质时，折射光的传播路径与折射率有关。入射光从空气进入玻璃时，如何确定光在玻璃中的传播路径，并由此测量玻璃的折射率？

实验原理与方案

光在同一种均匀介质中沿直线传播，两点可确定一条光线。当光从空气斜射入另一种

[1] 从地面观察太阳东升西落的景象或星体的位置，看到的景象或位置与实际情况有偏差。原因在于，光从太阳或星体射向地面，在大气层中是从光疏介质向光密介质传播，大气的折射率连续变化，光由于折射而逐渐向地面弯曲。这与地面上看到的“海市蜃楼”在原理上是相同的。

[2] 此处设置“STSE”栏目，使学生了解折射率在食品成分检测中的作用，进一步认识折射率是物质本身的光学属性，知道物理规律是食品安全快速检测技术的基础。

[3] 这是一个课标规定的“学生实验”，需利用插针法画出光在玻璃砖中的折射光线，得到玻璃的折射率。有关实验的具体讨论或说明可见物理实验与活动部分。

介质时会发生偏折，其规律满足折射定律。

通过测绘射入和射出玻璃砖的光线，确定光在玻璃砖中的传播路径，可得光从空气入射到玻璃界面处的入射角 θ_1 和折射角 θ_2 ，根据折射定律计算得到玻璃的折射率。

实验装置与方法

实验装置如图4-6所示。

用大头针分别确定入射光线和出射光线，通过作图找出光线在玻璃砖两个平行表面的入射点和出射点，两点的连线就是光在玻璃砖中的传播路径。

实验操作与数据收集

按照玻璃砖的宽度在白纸上画出两条平行直线，将玻璃砖依平行线置于白纸上。在玻璃砖的一侧垂直于纸面插两枚大头针 a 、 b ，其连线与玻璃砖表面成一定角度。在另一侧透过玻璃砖观察，并在该侧的适当位置再插两枚大头针 c 、 d ，使四枚大头针依次遮挡。此时，它们位于同一条射入眼睛的光线上，如图4-6所示。根据大头针的位置在白纸上画出入射光线和出射光线，确定入射点和出射点，画出玻璃砖中的折射光线。

测量并记录光在空气和玻璃分界面上的入射角 θ_1 和折射角 θ_2 。改变入射角，再次测量，将数据记录在自己设计的表格中。

数据分析

根据测得的入射角和折射角，计算两者正弦的比值。

实验结论

玻璃的折射率 $n=$ _____。

交流与讨论

交流各组的测量结果，讨论如果只有刻度尺，如何测量和处理数据。

如果准备插第三枚大头针时，发现透过玻璃砖观察不到前两枚大头针，原因是什么？

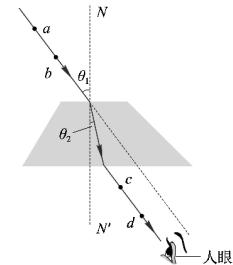


图4-6 测量玻璃的折射率

[1] 本“示例”示范了解答几何光学问题的一般思路和步骤，如画出相应的光路图，做出必要的分析和运算。“视觉深度”与观察者的视线方向有关。题中取入射角、折射角的小角度进行近似计算，得到的仅是观察者以接近垂直水面方向看池底情况下的视觉深度。若观察方向逐渐偏离，越接近水面方向，视觉深度越小；视线接近平行于水面观察时视觉深度接近零。

[1] **示例** 人的双眼看到的图像信息经大脑处理后，产生了空间深度。站在游泳池边上观察池底时感觉深度（视觉深度）比池壁所标的数值 h 要小。通过计算解释这一现象。

分析：视觉深度小于实际深度的原因是从池底某点发出的光线经水面折射进入双眼产生的视觉效果。为此可以简化为由池底某点发出两条夹角较小的光线经水面折射进入空气。根据几何关系推算视觉深度。

问题与思考解读

1. 参考解答：图

(a) 不可能会发生，理由是：光从玻璃砖斜射入空气时会发生光偏离原来传播方向的折射现象。图(b) 可能会发生，理由是：光从玻璃砖斜射入空气，折射角大于入射角，符合光从光密介质斜射入光疏介质的折射规律。图(c) 可能会发生，理由是：光从空气斜射入玻璃砖，折射角小于入射角，符合光从光疏介质斜射入光密介质的折射规律。图(d) 不可能会发生，理由是：光从空气斜射入玻璃砖，折射角应小于入射角。

提示：不需要确定具体的角度数值。

命题意图：知道光垂直两种介质界面入射时方向不改变，光斜射入介质界面时，将发生折射现象；根据生活实际做出正确判断。

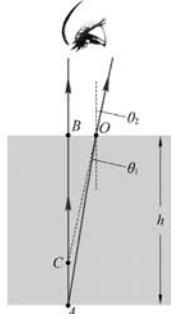


图 4-7 分析光的折射

解：如图 4-7 所示，从池底的 A 点画两条光线 AB 和 AO，AB 沿竖直方向，AO 与竖直方向偏离一个角度 θ_1 。AO 经水面折射偏离了原来的方向，与竖直方向的偏角为 θ_2 。折射光线的反向延长线与 AB 相交于 C，BC 大小即为视觉深度。

由表 4-2 可知，水的折射率 $n=1.33$ 。在直角三角形 OBA 中
 $OB = AB \tan \theta_1$

根据光路可逆，可以反向看作光线从空气射入水中，根据折射定律

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

在直角三角形 OBC 中

$$BC = OB \cot \theta_2 = AB \tan \theta_1 \times \cot \theta_2 = AB \times \frac{\tan \theta_1}{\tan \theta_2}$$

当角度 θ_1 很小时， θ_2 也很小

$$\sin \theta_1 \approx \tan \theta_1, \sin \theta_2 \approx \tan \theta_2$$

则

$$\frac{BC}{AB} = \frac{\tan \theta_1}{\tan \theta_2} = \frac{\sin \theta_1}{\sin \theta_2} = \frac{1}{n} \approx \frac{3}{4}$$

可见，池水的视觉深度约为实际深度的 $\frac{3}{4}$ 。

问题与思考

1. 如图 4-8 所示为光从空气射入半圆形玻璃砖再从玻璃砖射入空气的光路图，O 为半圆形砖的圆心。指出哪些情况是可能发生的，哪些是不可能发生的，并说明理由。

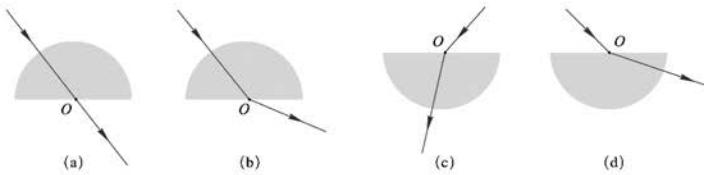


图 4-8

2. 如图 4-9 所示，一束光线斜射入容器中，并在容器底部形成一个光斑。往容器中逐渐注水的过程中，图中的光斑的位置将如何变化？

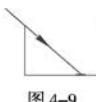


图 1

主要素养与水平：科学推理(Ⅱ)。

2. 参考解答：由图 1 可知，往容器中注水的过程中，光斑慢慢向左移动

提示：不要求讨论光斑的形状变化。

命题意图：关注因为光发生折射引起光斑位置变化的现象。

主要素养与水平：科学推理(Ⅱ)；科学本质(Ⅰ)。

3. 参考解答：

当视线与玻璃板表面垂直时,透过玻璃板看到的字迹上浮,原因正如教材中示例解释所表明的那样,字迹的视觉深度比实际深度小。当视线与玻璃表面不垂直时,看到的字迹的位置不仅有上下的变化还存在水平方向的偏移,原因是来自字迹从玻璃砖上表面出射的光线反向延长形成的虚像的位置相对字迹的位置发生了水平偏移

提示:不要求通过画严格的光路图进行解释

命题意图:会用简洁的语言描述观察到的现象,并根据光从玻璃射向空气的折射现象,加以定性的解释。

主要素养与水平:
物质观念(I);科学推理(II)。

4. 参考解答:正如教材图4-5所示,越靠近地面,大气的折射率越大。太阳光在大气

层内发生了连续的折射,逐渐弯曲

命题意图:关注教材中的示意图,用示意图提供的信息,做出解释。

主要素养与水平:物质观念(I)。

5. 参考解答:(1)由折射率关系式 $n=\frac{\sin i}{\sin r}$,通过比较表4-3和表4-4的数据可知,水的折射率 $n_1=\frac{\sin i_1}{\sin r_1}$,透明介质的折射率 $n_2=\frac{\sin i_2}{\sin r_2}$,由于入射角*i*相同,折射角 $r_1 > r_2$,即 $\sin r_1 > \sin r_2$, $n_1 < n_2$ (2)根据表4-4的数据可知,光从空气进入某种透明介质,折射率 $n_2=\frac{\sin i}{\sin r}\approx 1.73$,查表4-2可

3. 把一块厚玻璃板压在水平放置的纸上,透过玻璃板看纸上的字迹与直接看纸上的字迹会有什么不同?试解释发生这种现象的原因。
4. 诗句“大漠孤烟直,长河落日圆”给我们展现了一幅美丽的画卷。当诗人看到落日接近地平线之时,太阳的实际位置已经位于地平线下方了。分析这种现象的原因是什么?
5. 某同学通过实验研究光的折射。表4-3记录的是光从空气以不同角度射入水中的实验数据,表4-4记录的是光从空气射入某种透明介质的实验数据。
 - (1)由表4-3和表4-4的数据,判断这种透明介质和水的折射率哪个更大。简述判断依据。
 - (2)根据表4-4的数据,结合表4-2“几种介质的折射率”,判断这种透明介质可能是哪种材料。

表4-3

入射角 <i>i</i>	0°	30°	45°	60°
折射角 <i>r</i>	0°	22°	32°	40°
入射角 <i>i</i>	0°	30°	45°	60°

表4-4

入射角 <i>i</i>	0°	30°	45°	60°
折射角 <i>r</i>	0°	17°	24°	30°
入射角 <i>i</i>	0°	30°	45°	60°

6. 如图4-10所示,一束光从空气斜射入某介质,入射光线与反射光线的夹角为90°,折射光线与入射光线延长线的夹角θ为15°,该介质的折射率和光在该介质中传播的速度分别为多少?

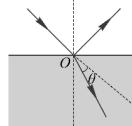


图4-10

得,这种透明介质可能是玻璃

提示:也可根据表中的数据,计算出水和透明介质的折射率 n 的大小,直接比较 n 的大小。

命题意图:能在控制入射角大小的前提下,比较折射角,理解折射率的意义;从获得的证据做出合理的推断。

主要素养与水平:科学论证(III);解释(III)。

6. 参考解答:(1)由反射定律可知入射角 α 等于反射角 β ,由于 $\alpha + \beta = 90^\circ$,故 $\alpha = 45^\circ$;设折射角为 γ ,则由图 4-10 可知, $\gamma + \theta = \alpha = 45^\circ$,由于 $\theta = 15^\circ$,故折射角 $\gamma = 30^\circ$,所以该介质的折射率 $n = \frac{\sin \alpha}{\sin \gamma} = \frac{\sin 45^\circ}{\sin 30^\circ} = \sqrt{2}$ (2)由折射率与速度的关系 $n = \frac{c}{v}$,得 $v = \frac{c}{n} = \frac{3.0 \times 10^8}{\sqrt{2}} \text{ m/s} \approx 2.12 \times 10^8 \text{ m/s}$

命题意图:知道光发生反射、折射时入射角与反射角、折射角的关系,做出几何关系的推断,结合折射定律得出折射率 n ;知道光在不同介质中的速度与折射率的关系。

主要素养与水平:解释(III);科学论证(II)。

资料链接

惠更斯原理与光的折射定律

荷兰物理学家克里斯蒂安·惠更斯(Christiaan Huygens)在创立光的波动说时首先提出:行进中的波阵面上任一点都可看作是新的次波源,而从波阵面上各点发出的许多次波所形成的包络面,就是原波面在一定时间内所传播到的新波面。这一内容被称为惠更斯原理。利用惠更斯原理,可以导出光的反射定律和折射定律。

如图 2 所示,设想一束平行光(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,它与所有入射光垂直。在光线 1 到达 A_1 点的同时,光线 2,

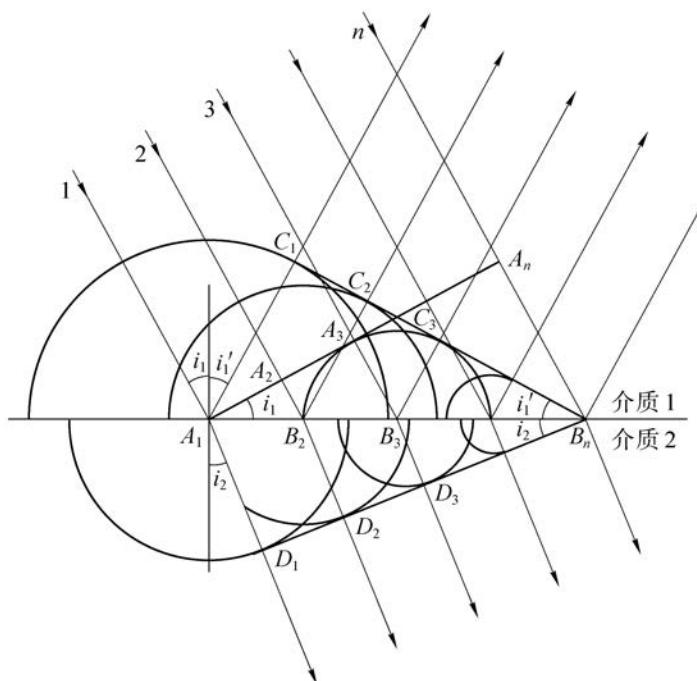


图 2

$3, \dots, n$ 到达此波面上的 A_2, A_3, \dots, A_n 点。设光在介质 1 中的速度为 v_1 , 则光线 $2, 3, \dots, n$ 分别要经过一段时间 $t_2 = \frac{A_2 B_2}{v_1}, \frac{A_3 B_3}{v_1}, \dots, \frac{A_n B_n}{v_1}$ 后才到达分界面上的 B_2, B_3, \dots, B_n 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 点发出的反射次波波面和透射次波波面分别是半径为 $v_1 t_n$ 和 $v_2 t_n$ 的半球面。

与此同时, 光线 $2, 3, \dots, n$ 传播到 B_2, B_3, \dots, B_n 各点后发出的反射次波波面的半径分别为 $v_1(t_n - t_2), v_1(t_n - t_3), \dots$ 而透射次波面的半径为 $v_2(t_n - t_2), v_2(t_n - t_3), \dots$ 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, 此刻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。设反射波的波面与各次波面相切于 C_1, C_2, C_3, \dots 各点, 而透射波的波面与各次波面相切于 D_1, D_2, D_3, \dots 连接次波源和切点, 即得到波线; $A_1 C_1, B_2 C_2, B_3 C_3, \dots$ 为反射光线, $A_1 D_1, B_2 D_2, B_3 D_3, \dots$ 为折射光线。

由于 $A_1 C_1 = A_n B_n = v_1 t_n$, $\triangle A_1 C_1 B_n$ 和 $\triangle B_n A_n A_1$ 全等, 因而 $\angle A_n A_1 B_n = \angle C_1 B_n A_1$, 由图 2 中不难看出, 入射角 i_1 等于反射角 i'_1 , 这样就得到了反射定律。还可以看出, $\angle D_1 B_n A_1 = i_2$, 可得:

$$\begin{aligned}\sin i_1 &= \frac{A_n B_n}{A_1 B_n} = \frac{v_1 t_n}{A_1 B_n}, \\ \sin i_2 &= \frac{A_1 D_1}{A_1 B_n} = \frac{v_2 t_n}{A_1 B_n},\end{aligned}$$

故

$$\frac{\sin i_1}{\sin i_2} = \frac{v_1}{v_2}.$$

即入射角与折射角的正弦之比为一常数。这样便导出了折射定律。

实际上, 利用惠更斯原理同样可以解释机械波的传播、反射和折射等现象。

(选自赵凯华《新概念物理教程 光学》, 高等教育出版社 2004 年版, 此处有增删)

本节编写思路

本节从生活现象引入,通过思考讨论、实验观察和理论推导,认识光的全反射现象及发生全反射现象的条件,了解生产生活中的全反射现象和应用。本节内容按以下顺序展开:

1. 通过实验观察,认识光的全反射现象及其产生条件。

2. 根据光的折射定律推导当光从介质斜射入真空或空气时发生全反射现象的临界角。

3. 了解光纤的结构和工作原理,以及光纤技术的实际应用。

学习本节内容,将经历观察全反射现象,认识其特征和发生条件;推导全反射的临界角,了解全反射现象在技术中应用的过程;进一步完善对光的反射、折射现象及所遵循规律的认识,体验实验观察与理论推导相结合的研究方法,发展归纳和推理的能力,提高探究物理问题的兴趣,感悟物理规律对技术发展和社会生活的指导意义。

第二节 全反射

[1] 如图 4-11 所示,水中的一些气泡特别明亮,如一颗颗晶莹的珍珠,这是因为光线在气泡的表面发生了全反射。

▶ 全反射

根据光的折射定律,光由光疏介质射入光密介质(如由空气射入水中)时,折射角小于入射角;光由光密介质射入光疏介质(如由水射入空气中)时,折射角大于入射角;折射角随入射角的增大而增大。

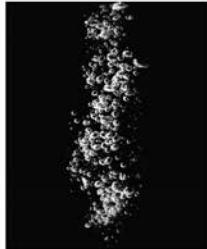


图 4-11 水中气泡

[2]

大家谈

当光由光密介质射入光疏介质,随着入射角的增大最大折射角有多大? 将猜想用光路图表示。

如何用实验观察这样的现象?

[3] **自主活动**

如图 4-12 所示,激光束沿着半圆柱形玻璃砖的半径射到它的平直面上,光在玻璃与空气的界面上同时发生反射与折射。逐渐增大入射角,观察反射光和折射光如何变化。



图 4-12 观察光的全反射

由活动可观察到,当光从玻璃射入空气时,同时发生折射和反射,折射角大于入射角。随着入射角逐渐增大,折射角相应增大;同时,折射光越来越弱,反射光越来越强。

正文解读

[1] 水中的气泡相对于周围的水是光疏介质。当光从水射向气泡时,在气泡表面发生了全反射,因此这些气泡看起来特别晶莹。如果将空试管的封闭端伸入水中,同样会看到水中的试管表面就像镀了银一样明亮。

[2] 此处设置“大家谈”的目的是让学生利用光的折射定律,通过作图分析、讨论,认识到光由光密介质斜射入光疏介质时,折射角将比入射角先达到 90° ,从而产生进一步探究的好奇心,并为通过实验探究全反射现象及规律奠定基础。

[3] 这是一个通过实验观察现象的“自主活动”。实验中,学生不仅能观察到光从玻璃砖射向空气时,折射角随入射角的增大而增大,还能看到在此过程中,反射光的强度不断增强,折射光的强度不断减弱。当折射角达到 90° 时,折射光消失。通过对上述现象的分析和归纳,可以了解全反射现象的特征。

[1] 这里也可以直接利用上一节“自主活动”推导的折射定律的普遍表达式 $n_1 \sin \theta_1 = n_2 \sin \theta_2$, 导出介质的临界角。

[2] 光是一种电磁波, 它可以像无线电波那样, 作为一种载体来传递信息。载有声音、图像以及各种数字信号的激光从光导纤维的一端输入, 就可以沿着光纤传到千里以外的另一端, 实现光纤通信。光纤通信的主要优点是容量大、衰减小、抗干扰性强。

[3] 医用内窥镜用若干光纤平行聚集成束来传输图像。如图 3 所示, 内窥镜装有两组光导纤维, 一组用来把光传递到人体内部照明, 另一组将体内的情况传到目镜用于观察。



图 3

强。当入射角增大到某一角度时, 折射光消失, 只剩下反射光。这就是全反射 (total reflection) 现象。

[1] ▶ 临界角

光从光密介质射入光疏介质, 当折射角达到 90° 时, 折射光完全消失, 此时的入射角称为临界角 (critical angle), 用符号 C 表示。

光由介质射入空气 (或真空), 若入射角为临界角 C , 则折射角为 90° , 根据光的折射定律

$$\frac{\sin C}{\sin 90^\circ} = \frac{1}{n}$$

即

$$\sin C = \frac{1}{n}$$

则

$$C = \arcsin \frac{1}{n}$$

不同介质的折射率 n 不同, 各种介质的临界角 C 也不同。介质的折射率越大, 发生全反射的临界角越小, 越容易发生全反射。水的临界角为 48.8° , 玻璃的临界角为 $32^\circ\sim42^\circ$, 金刚石的临界角为 24.4° 。与其他材质比, 金刚石特别容易发生全反射。正因为如此, 经过精心打磨的金刚石看起来璀璨夺目。

[2] 光导纤维简称“光纤”, 是一种能够传导光波和各种光信号的纤维, 如图 4-13 所示。21 世纪人类社会进入信息大爆炸的时代, 光纤是传输信息的理想载体。

[3] 如图 4-14 所示为反射型光纤的结构示意图。光纤的结构呈圆柱形, 中间是直径为微米级的纤芯, 具有高折射率, 外面包裹低折射率材料, 最外面是塑料护套。特殊的制造工艺和特殊的材料, 使光纤既纤细似发, 柔顺如丝, 又具有较高的强度。光能够在光纤中传输就是利用光在折射率不同的两种介质的分界面产生的全反射。由于外层材料的折射率比



图 4-13 光纤导光

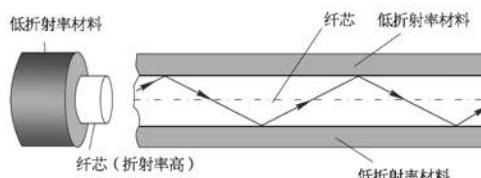


图 4-14 光纤结构示意图

问题与思考解读

纤芯小，进入纤芯的光线在两种介质的界面上作多次全反射而曲折前进，沿着芯线传递，就好像自来水只能在水管里流动一样，不会泄漏出去。

医学上，医生用光导纤维制成的内窥镜来检查人体胃、肠器官等脏器的内部，也可利用光导纤维成像技术辅助做微创手术。

问题与思考

- 在下部有孔的透明桶内装满水，用聚光手电筒或激光笔透过桶照亮该孔时可观察到，随着水流从小孔流出，光能沿着水流传播。水流的形状发生变化时，光的传播方向也随之变化。动手做一做，分析产生这一现象的原因。
- 按照纤芯折射率的分布可将光纤分为突变型和渐变型两类。突变型光纤纤芯的折射率是均匀的，渐变型光纤纤芯的折射率不均匀。从光纤一端射入的光被约束在纤芯中传播，最终从光纤的另一端射出。查找资料，画出光在两种光纤的纤芯中传播路径的示意图，并说出这两种路径有何区别。
- 水池中平静的水面下有一个点光源向各个方向发光，在池边可看到水面上有一个圆形亮斑。若亮斑的中心位置不变，面积逐渐减小，分析判断该点光源在水下的运动方向。
- 如图 4-15 所示，折射率为 1.5 的玻璃圆柱棒直径 $d = 4\text{ cm}$ ，长 $L = 40\text{ cm}$ 。一束光射向圆柱棒一个底面的中心，折射入圆柱棒后再由棒的另一底面射出。该束光在圆柱棒中最多能经历多少次全反射？
- 如图 4-16 所示为水下 h 深处的摄影机拍摄的画面，画面中既有水面上的景物也有水面下的情景。若在摄影机正上方的水面放置一半径为 r 的不透光圆形挡板，摄影机便无法拍摄任何水面上的景物。若水的折射率为 n ，试问要发生这种现象，圆板最小半径 r 应为多少？

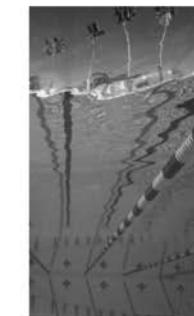


图 4-16

料的折射率不断变化的情况下，能建立相应的模型来近似。

主要素养与水平：模型建构(IV)；科学推理(II)。

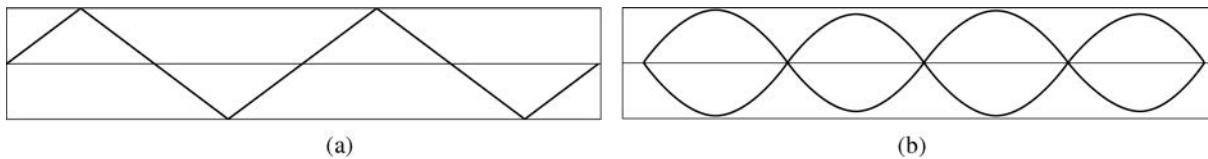


图 4

- 参考解答：点光源向上运动。当点光源发出的光斜射入水和空气的界面时，若入射角小于临界角，折射光穿出水面；若入射角大于或等于临界角，发生全反射，光无法穿出水面，形成有界的亮斑。

1. 参考解答：光在水和空气的界面能发生全反射(若光全部发生全反射，我们将不可能看到光)

提示：使用激光笔时，激光勿直射眼睛。也可用聚焦的强光做此实验。

命题意图：引导学生用身边的物品开展活动。

主要素养与水平：物质观念(I)。

2. 参考解答：如图 4 所示 突变型光纤也称阶跃型光纤，突变型光纤的纤芯折射率均匀，光在纤芯中沿折线传播[图 4(a)]。渐变型光纤的折射率不均匀，内部大外部小，光在纤芯中沿曲线传播[图 4(b)]

命题意图：知道光在同一种介质中传播方向不发生改变，光斜射入不同介质的表面，其传播方向改变。对于材

图 5 为恰好发生全反射现象的光路图,由图可知,点光源向上运动,光斑的面积将减小

命题意图:了解光发生全反射的条件,能结合情境做出合理分析。

主要素养与水平:模型建构(IV);科学推理(II)。

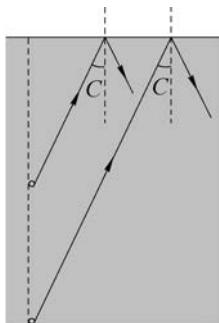


图 5

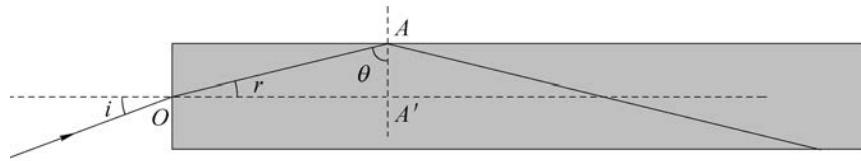


图 6

4. 参考解答:根据题意,由玻璃的折射率为 1.5 可知,光在玻璃中发生全反射的临界角 $C = \arcsin \frac{1}{n} \approx 42^\circ$ 。如图 6 所示,设光由 O 点进入圆柱,经端面折射后射向 A 点,由几何关系可知,若光在 A 点的入射角 θ 恰为临界角 $C \approx 42^\circ$, 则光在圆柱棒中能经历的全反射次数最多。但若光在 A 点以临界角 42° 入射,则在 O 点的折射角 $r=48^\circ$, 由折射定律,此时 O 点的入射角 i 将大于 90° 。因此,光在 A 点必须以大于 42° 的角入射,且 O 点的入射角 i 和反射角 r 间还必须满足折射定律。由此可得 O 点的折射角 r 不会大于 42° , A 点的入射角 θ 不小于 48° 。光在玻璃棒中经历的全反射次数 $n = \frac{L}{d \tan \theta}$, 取整得 9 次。

命题意图:由折射定律、全反射条件,结合几何关系进行推理分析。

主要素养与水平:模型建构(IV);科学推理(III)。

5. 参考解答:如图 7 所示,当恰好发生全反射时,摄影机发出的光不能到达水面上方,根据光路可逆,水面上物体发出的光也恰好不能到达摄影机,临界角 $C = \arcsin \frac{1}{n}$, 则圆盘的最小半径 $r = h \tan C = \frac{h}{\sqrt{n^2 - 1}}$

命题意图:能将所涉情境简化为合适的模型,并依据模型进行分析。

主要素养与水平:模型建构(IV);科学推理(III)。

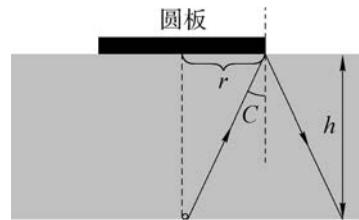


图 7

资料链接

海市蜃楼

“海市蜃楼”也叫“蜃景”,是光在密度和折射率随高度连续变化的大气中传播时,因为折射和全反射产生的现象。例如,夏天,海平面上的下层空气温度比上层低,密度比上层大,折射率也比上层大,且地球表面存在曲率。站在海边的观察者不能直接看见其视线以下远处的景物,从远处景物射向空中的光,因从光密介质向光疏介质传播,会在大气中连续发生折射,直至被全反射回地面。如果光正好进入眺望远方的观察者眼中,观察者就会看到远处景物悬在空中的“虚像”[图 8(a)]。再如,沙漠里,太阳照到沙地上,接近沙地表面的热空气层比上层空气的密度小、折射率小。从远方景物射向地面的光,同样因为从光密介质向光疏介质传播,会在大气中连续发生折射,直至被全反射而逐渐远离地面。如果光线正好进入人的眼中,就会在远处的地面上看到景物倒立的“虚像”[图 8(b)]。

(b)],仿佛远处有水面而发生了反射。沙漠里的行人常被这种景象所迷惑,以为前方有水源而奔向前去,却总是可望而不可及。

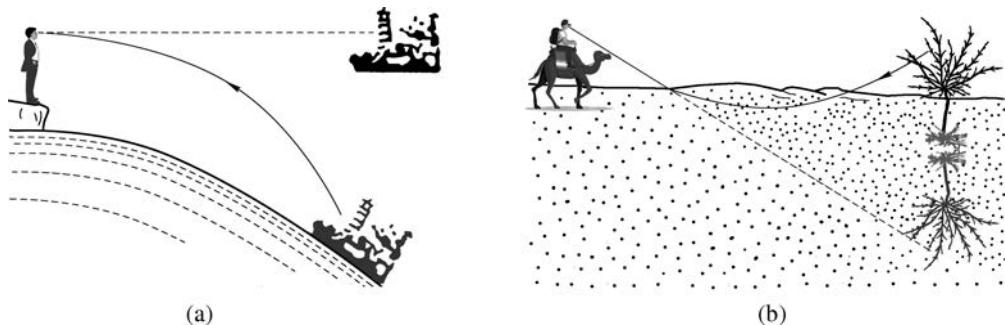


图 8

神奇的反光膜

夜晚乘汽车行驶在高速(或高架)路上常常会发现,当车灯发出的光照到道路标志上时,标志相对周围物体特别明亮。这是因为在道路标志上有一层反光膜。

根据反射定律,只有当入射角为 0° 时,反射光的方向才会与入射光的方向相反。然而,当一束光照射到反光膜上后,即使入射角在相当大的范围内变化,大部分光还是大致沿与入射光相反的方向返回。其原因是反光膜的表面均匀密布着球形玻璃微珠或立方角微棱镜。

1. 球形玻璃微珠

将一束平行光射向水珠,光经折射→全反射→再次折射后,不再是平行光,如图 9(a)所示,这就是水珠的散射现象。如果用折射率较大的玻璃珠($1.8 \leq n \leq 2$)代替水珠,理论计算和实验结果均表明,玻璃珠可以使绝大部分光沿着与入射光大致相反的方向返回,如图 9(b)所示。

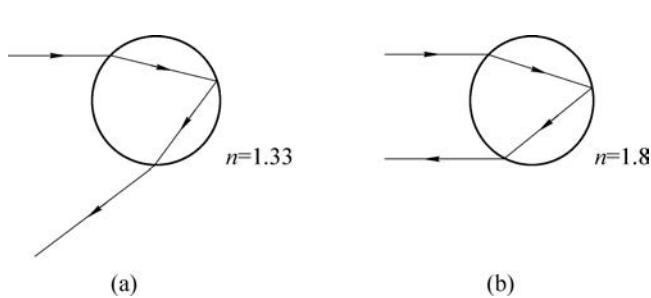


图 9

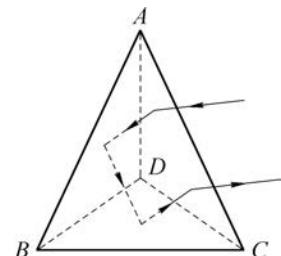


图 10

2. 立方角微棱镜

立方角微棱镜是一个四面体,如图 10 所示,其中 ADB 、 BDC 、 CDA 三个表面相互垂直。可以证明,当一束光从 ABC 面射入,通过相互垂直的三个面多次全反射后,将沿着与入射光相反的方向返回。

公路两侧护栏上或城市主干道路上等间距镶嵌的标志就是用上述类似元件制成的,光照上去非常醒目,以引起司机的注意。

本节编写思路

第三节 光的干涉 81

本节通过实验观察和类比分析,讨论光的干涉现象及产生条件、形成原因。利用光的干涉测量光的波长,了解光的干涉的应用,认识光的波动性。本节内容按以下顺序展开:

1. 观察光的双缝干涉与薄膜干涉现象,类比机械波的干涉分析其成因和产生条件,认识光的波动性。

2. 通过实验,认识光的双缝干涉条纹间距与光的波长等因素有关,通过光的双缝干涉实验测量光的波长。

3. 了解生产生活中的薄膜干涉现象和应用。

学习本节内容,将经历观察双缝干涉和薄膜干涉的现象,与机械波类比分析其成因和产生条件;了解双缝干涉条纹间距与光的波长等因素的关系,利用双缝干涉测量光的波长;了解生活中光的干涉现象及应用;认识光具有波动性。进一步体验实验观察、测量与理论分析相结合的研究方法,发展分析、归纳和推理的能力;增强对自然现象及其奥秘的好奇心和探究欲,体会物理学对于技术发展与实际应用的作用。

正文解读

[1] 干涉是波特有的现象,但在日常生活中,两个普通光源发出的光叠加后,却观察不到干涉图样,这与普通光源的发光机制有关。具体可见本书第124页资料链接。

[2] 在杨氏双缝干涉实验中,利用双缝从入射光的同一个波阵面上分出两列相位相同的相干光。这种获得相干光的方法称为分波阵面法。

第三节 光的干涉

[1] 干涉是波特有的现象。光是电磁波,同样也会发生干涉。但是我们从未观察到教室里两盏相同的灯同时照明时出现干涉图样,这说明,发生光的干涉现象与发生机械波干涉现象一样,同样需要满足一定的条件。

► 光的双缝干涉实验

1801年,英国物理学家托马斯·杨(图4-17)在实验室成功观察到了光的干涉现象。他让一束太阳光照射到一个有小孔的屏上,光从小孔射出后,射到位于第二个屏上靠得很近(约0.1mm)的两个小孔上,在两个小孔后的光屏上出现了彩色图样。后来他把小孔均改为彼此平行的狭缝,用单色光(严格地说,是指只有一个频率或波长的光。实际上频率范围很窄的光,就可认为是单色光)做实验,得到了清晰的、明暗相间的条纹。



图4-17 托马斯·杨(T. Young, 1773—1829)

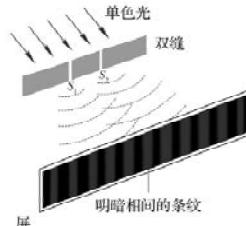


图4-18 双缝干涉

[2] 托马斯·杨利用波的叠加思想很好地解释了光的干涉现象。如图4-18所示,一束单色光同时入射到双缝 S_1 、 S_2 ,一束光被分成了两束,这两个缝可视为两个振动情况总是相同的光源,从 S_1 、 S_2 发出的光波在光屏上相遇叠加,波峰与波峰、波谷与波谷叠加处,光波相互加强;波峰与波谷叠加处,光波相互削弱抵消,从而在屏上呈现出明暗相间的条纹。

与机械波的干涉类似,两束振动情况完全相同的光在空间相遇,彼此叠加,出现在一些区域振动相互加强、在另一些区域振动相互削弱且分布稳定的的现象。这种现象称为光的干涉现象。

实际上,振动方向相同、频率相等、相位差恒定的光源称为相干光源,由相干光源发出的光相互叠加才能产生光的干涉现象。

光的干涉现象表明,光具有波的特性。为了纪念托马斯·杨的贡献,这个实验称为杨氏双缝干涉实验。

可用如图 4-19 (a) 所示的装置观察光的干涉现象。激光器发出的光可认为是单色光。当一束激光通过双缝时，被分为振动情况相同的两束光，射到光屏上发生叠加，形成光的干涉图样，如图 4-19 (b) 所示。

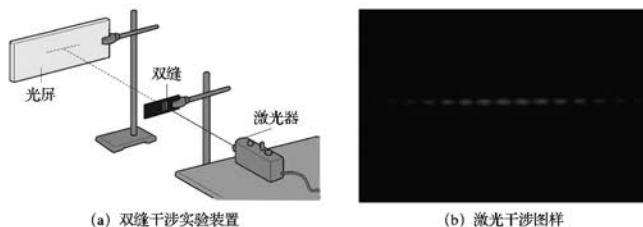


图 4-19 双缝干涉实验

自主活动

调换不同间距的双缝，调节光屏与双缝的距离，观察光屏上干涉条纹的变化。

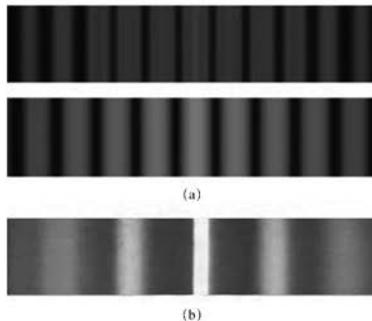
观察发现，在双缝干涉图样中，明条纹或暗条纹之间的距离是相等的。保持光屏到双缝的距离不变，减小双缝间距，光屏上的条纹间距增大；保持双缝间距不变，增大光屏到双缝的距离，光屏上的条纹间距也增大。

进一步实验表明，保持双缝间距和屏到双缝的距离都不变，改变光的颜色，条纹间距也随之变化。红光的条纹间距最大，紫光的条纹间距最小，如图 4-20 (a) 所示。

可见，双缝干涉图样是明暗相间、等间距的条纹。相邻明条纹或相邻暗条纹的间距相等，相邻明条纹或暗条纹中心间距 Δx 大小取决于双缝间距 d 、光屏到双缝的距离 L 和光的波长 λ 。它们之间的定量关系为

$$[1] \quad \Delta x = \frac{L}{d} \lambda$$

当用白光作为光源时，光屏上出现彩色的干涉条纹，如图 4-20 (b) 所示。这是由于白光是由不同颜色的单色光复合而成，各色光产生的条纹间距不同，在光屏上叠加在一起，中央明纹为白色，两边出现彩色条纹。图 4-20 不同色光在同一实验装置的双缝干涉图样



[1] 有关双缝干涉相邻明或暗条纹间距与入射光波长定量关系的推导见本书第 124 页资料链接。

[1] 这是一个课标规定的“学生实验”，目的是利用双缝干涉实验测量单色光的波长。实验中需测量两条暗纹之间的距离，这是因为暗纹中心的位置相比亮纹中心的位置更容易确定。相邻暗纹间距的测量需要用累积的方法，通过测量多条暗纹之间的总距离后获得。有关本实验的具体讨论或说明见物理实验与活动部分。

[1] 学生实验

用双缝干涉实验测量光的波长

提出问题

可见光的波长很短，其范围大致为 400~760 nm（约为头发直径的百分之一）。通常说的“白光”是由不同单色光混合而成的，如何测量某种单色光的波长呢？

实验原理与方案

单色光发生双缝干涉时，条纹间距 Δx 与双缝间距 d 、光屏到双缝的距离 L 、光的波长 λ 之间有确定的关系 $\Delta x = \frac{L}{d} \lambda$ 。通过测量条纹间距 Δx ，就可以间接测出光的波长 λ 。由于可见光的波长 λ 很小，比值 $\frac{L}{d}$ 必须足够大才能较为准确地测量波长 λ 。

利用单色光的双缝干涉图样，测量相关物理量，通过计算得到单色光的波长。

实验装置与方法

实验装置如图 4-21 所示。从左到右依次为可调亮度的激光器（光源）、已知间距的双缝、光强分布传感器。



图 4-21 实验装置

光强分布传感器可通过测量光屏上的光强分布数据得到干涉条纹间距 Δx ，测量双缝到传感器接收面的距离 L ，便可得到激光器发出的单色光的波长 λ 。

实验操作与数据收集

调节光源的亮度以及激光器、双缝、传感器的相对位置，使与传感器连接的计算机屏幕上呈现清晰的干涉图样。选定不相邻的两条暗纹，测出其中心间距，并算出相邻暗纹的间距 Δx ，用刻度尺测量双缝到传感器接收面的距离，将数据记录在表 4-5 中，通过计算获得单色光的波长。

改变双缝到传感器接收面的距离，再次测量 Δx 。

表 4-5 实验数据记录表

实验序号	双缝间距 d/mm	双缝到传感器接收面距离 L/cm	相邻暗纹间距 $\Delta x/cm$
1			
2			

数据分析

根据 $\Delta x = \frac{L}{d} \lambda$ 的关系，求得激光器发出的单色光的波长。

实验结论

所测激光器发出的单色光的波长 $\lambda = \text{_____ m}$ 。

交流与讨论

改变双缝到传感器接收面的距离后，干涉图样有什么变化？如果直接测量相邻暗纹间距，对测量结果是否有影响？

▶ 薄膜干涉

潮湿地面上残留的油膜在阳光下呈现出七彩的颜色；原本透明的肥皂泡飘荡在空中，在阳光的照射下变得五彩斑斓；这些现象都是光干涉的结果，如图 4-22 所示。日常生活中的很多现象都与光的干涉有关。

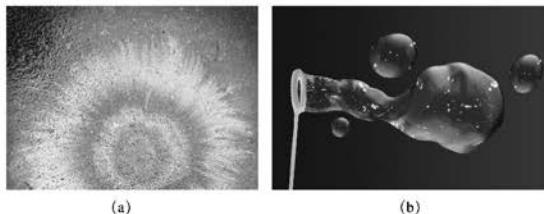


图 4-22 阳光下的油膜和肥皂膜

[1] 自主活动

将一个深色的杯子浸入肥皂液，取出后会在杯口形成一层肥皂膜，如图 4-23 所示，杯口倒置，让肥皂膜竖直，观察肥皂膜上的花纹。用酒精灯作为光源照射肥皂膜，在灯芯上撒一些食盐，酒精灯的火焰将变为黄色，观察肥皂膜上出现的现象。



图 4-23 杯口上的肥皂膜

[1] 设置这个“自主活动”的目的是，通过观察白光射向肥皂膜被反射后产生的彩色干涉条纹，激发学生了解条纹产生原因的好奇心；结合教材正文认识薄膜干涉现象及其成因。在本活动中，也可以观察单色光照射肥皂膜形成的干涉条纹，进一步了解这类干涉的特征。

[1] 这个“STSE”

栏目介绍了薄膜干涉在检查镜面或精密光学平面平整度中的应用。旨在让学生了解相干光的产生，利用同一亮纹或暗纹与空气膜厚度的对应关系，了解通过干涉条纹的形状检测物体表面平整程度的方法。这种检测的精度可达 10^{-8} m。在此过程中，进一步体会物理原理在生产和生活中的作用。

问题与思考解读

1. 参考解答：两盏灯是两个独立的光源，它们发出的光不符合光干涉的条件

提示：不需要从发光原理的角度进行分析。

命题意图：定性区别生活中相同的光源，产生光干涉的光源之间的不同。

主要素养与水平：模型建构(Ⅱ)；科学推理(Ⅱ)。

2. 参考解答：光在空气膜的上下表面发生反射，两束反射光叠加，形成干涉条纹。在与中心距离相等的位置的连线是一个个同心圆环，同一圆环对应的空气膜厚度相同，两束反射光的叠加情况相同，呈现相同的条纹

命题意图：知道光发生干涉现象的条件，能定性分析形成圆环形条纹的原因。

主要素养与水平：科学推理(Ⅲ)；科学本质(Ⅰ)。

3. 参考解答：镜片的表面有彩色花纹，光在镜片镀膜的上下表面反射，反射光叠加产生干涉

提示：还会看到一圈圈的镜片边缘，其原因与全反射有关。

命题意图：引导学生关注生活，并能用所学知识解释现象。

主要素养与水平：模型建构(Ⅱ)；科学推理(Ⅱ)；科学本质(Ⅰ)。

观察实验现象发现，在自然光下肥皂膜上出现水平的彩色条纹；酒精灯灯芯加盐后照射，肥皂膜上出现水平的黄色条纹。

产生这一现象的原因是照射到肥皂膜上的光从膜的前后两个表面反射回来。两列反射光由同一光源产生，满足相干条件，能够发生干涉。竖立的肥皂膜在重力作用下形成了上薄下厚的楔形结构，如图 4-24 所示。在某一厚度的地方两列反射光互相加强，出现明条纹；在另一厚度的地方两列反射光互相抵消，出现暗条纹。

自然光中不同色光的波长不同，出现明纹和暗纹的位置不同，从而在薄膜表面互相交叠呈现出彩色条纹。

这种光照射到薄膜上，从膜的两个表面分别反射形成相干光而互相叠加的干涉现象，称为薄膜干涉。

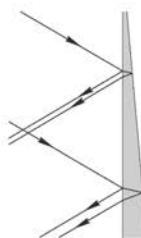


图 4-24 肥皂膜前后表面反射示意图

[1] STSE

薄膜干涉可以用来检查镜面或其他精密光学平面的平整度。如图 4-25 (a) 所示，在待测平面上放置一个透明标准样板，在样板的一侧垫一张纸片。在标准样板的下表面与待测平面之间形成了一个楔形的空气膜。用平行光从上垂直向下照射，光在空气层的上下两个表面反射形成相干光，发生干涉。如果待测平面非常平整，会出现如图 4-25 (b) 所示的平行条纹。如果待测平面不够平整，条纹就会出现弯曲，如图 4-25 (c) 所示。

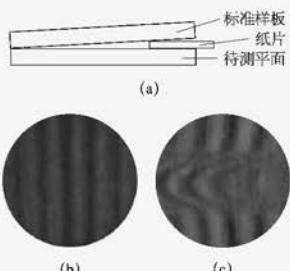


图 4-25 干涉检测物体表面平整度

问题与思考

- 教室里的两盏相同的灯同时照射时，为什么观察不到光的干涉图样？
- 将如图 4-26 (a) 所示的球面半径很大的平凸透镜放在一块平板玻璃上。单色光从上方垂直入射，在凸透镜和平板玻璃之间的空气膜上下表面反射，反射光互相干涉。从上往下观察，可以看到如图 4-26 (b) 所示的明暗相间的圆环状条纹，这种条纹称为牛顿环。说说为什么条纹是圆形的。

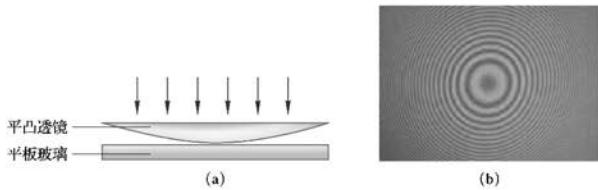


图 4-26

3. 在明亮的光线下以一定角度观察眼镜镜片，能观察到什么现象？分析出现这种现象的原因。
4. 阳光下的肥皂泡上呈现出彩色的花纹，花纹随肥皂泡形状而变化。用光的干涉原理解释上述现象。
5. 图 4-27 所示为某兴趣小组为测试无线电发射器发出的电磁波频率而设计的装置示意图。将无线电发射器与两个相距为 d 的天线相连，两个天线同时向外发送相同的信号。信号接收器装在小车上，小车沿着与两天线连线平行、距离为 L 的直轨道以速度 v 匀速运动。发现接收器接收到的信号有规律地变化，时强时弱。相邻两次接收到最强信号的时间间隔为 Δt 。利用上述信息确定无线电发射器发射的无线电波的频率。

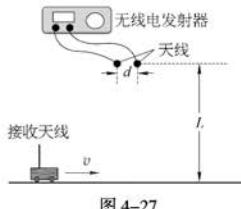


图 4-27

4. 参考解答：

阳是由不同波长的光组成的复色光。阳光入射到肥皂泡上，在肥皂膜的前、后表面发生反射，两反射光在相遇区域发生干涉。不同波长的光干涉图样不同，这些干涉图样的叠加出现彩色花纹。肥皂泡的形状变化，肥皂膜的厚度也相应变化，膜前、后表面的反射光的叠加情况随之变化，花纹也随之发生变化。

命题意图：引导学生动手做一做，观察不同形状的肥皂泡，进行探究与分析。

主要素养与水平：

模型建构(Ⅱ)；科学推理(Ⅲ)。

5. 参考解答：

无线电发射器的两根天线可视为两个点光源，小车运动的直轨道可视为光屏。相邻干涉条纹间距由 $\Delta x = \frac{L\lambda}{d}$ 决定，小

车匀速运动 $\Delta x = v\Delta t$ ，无限电波的频率 $f =$

$$\frac{c}{\lambda} = \frac{c}{d\Delta x} = \frac{Lc}{dv\Delta t}$$

提示：不需要关注多普勒效应。

命题意图：通过类比的方式，理解无线电波也具有光相似的干涉现象。

主要素养与水平：模型建构(Ⅳ)；科学推理(Ⅲ)。

资料链接

光源的发光机理

普通光源发光的机理是处于激发态的原子(或分子)的自发辐射,即光源中的原子吸收了外界能量而处于能量比较高的状态(激发态),这些激发态是极不稳定的,电子在激发态上存在的时间平均只有 $10^{-11} \sim 10^{-8}$ s,随后,原子就会自发地回到能量较低的状态(低激发态或基态)以保持系统的稳定。在此过程中原子将多余的能量以电磁波(光波)的形式向外辐射。粗略地说,原子或分子的发光实际上是间歇性的或不连续的,每次只能发射有限长的光波波列。波列的长度与环境有关,如果发射光波的原子或分子受到其他原子或分子的作用越强,发射过程受到的干扰就越大,波列就越短。不过,即使在非常稀薄的气体中,相互作用几乎可以忽略的情况下,其发射波列持续的时间 τ_0 也不会大于 10^{-8} s,相应波列长度小于米的数量级。微观粒子的发光过程有自发辐射和受激辐射两种。普通光源以自发辐射为主,这是一种随机过程,每个原子或分子先后发射的波列,以及不同原子或分子发射的各个波列,彼此间在振动方向和相位上没有什么联系,并且波列持续的时间 τ_0 比通常探测仪器的响应时间 Δt 短得多。

两个普通光源发出的两列光波的相位差 δ 不固定,对于空间任意一点来说,两列光波在该点叠加后光强干涉因子 $\cos \delta$ 的数值在 $[-1, +1]$ 区间迅速变化,人眼观察或仪器记录到的 $\cos \delta$ 对时间的平均值为零,两列光波在该点叠加后的光强就等于两列光波分别在该点的光强之和。在物理学中,称这样两个普通光源为不相干光源,由它们发出的光叫做不相干光。要观察到光的干涉现象,必须设法使相互叠加的两列光波有稳定的相位差,这样的两列光叫做相干光,发出这两列光的光源叫相干光源。

(选自赵凯华《新概念物理教程 光学》,高等教育出版社 2004 年版,此处有增删)

双缝干涉条纹间距与入射光波长的关系

图 11 为杨氏双缝干涉实验装置的示意图。以激光发出平面波通过双缝 S_1 、 S_2 , S_1 、 S_2 处于同一波阵面为例,此时由 S_1 、 S_2 射向光屏的两列子波的相位差恒为 0。图中屏上 O 点是 S_1 、 S_2 的中垂线与屏的交点, P 是屏上 O 点外的一点。 x 为 P 点到 O 点的距离, d 是 S_1 、 S_2 之间的距离, L 为双缝屏到光屏的距离,以 λ 表示激光的波长(忽略激光的波带宽 $\Delta\lambda$), r_1 、 r_2 分别表示屏上 P 点到 S_1 、 S_2 的距离。设由 S_1 、 S_2 分出的两列相干光波传播到屏上 P 点的路程差为 $\delta = r_2 - r_1$,则由图可知

$$r_1^2 = L^2 + \left(x - \frac{1}{2}d\right)^2, \quad r_2^2 = L^2 + \left(x + \frac{1}{2}d\right)^2$$

则

$$r_2^2 - r_1^2 = 2xd$$

即

$$(r_2 + r_1)(r_2 - r_1) = 2xd$$

由于 $L \gg d$ 、 $L \gg x$,取 $r_2 + r_1 = 2L$,

故

$$\delta = (r_2 - r_1) = \frac{d}{L}x$$

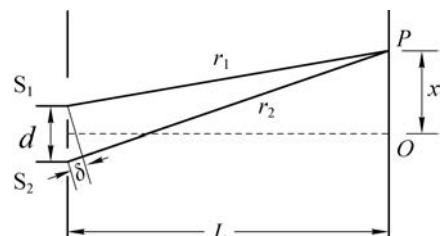


图 11

当 δ 等于入射光波长 λ 的整数倍时,由 S_1 、 S_2 分出的两列光波在 P 点同相叠加,出现亮条纹,则

$$\delta = (r_2 - r_1) = \frac{d}{L}x = \pm k\lambda \quad (k = 0, 1, 2, \dots)$$

即

$$x = \pm k \frac{L}{d} \lambda \quad (k = 0, 1, 2, \dots)$$

因此相邻亮条纹间的距离为 $\Delta x = \frac{L}{d}\lambda$ 。

本节编写思路

第四节 光的衍射和偏振

[1] 光具有波动性，除了能发生干涉，也一定会产生衍射。但是在日常生活中，我们通常观察到光沿直线传播，并没有绕过障碍物到达其背后的阴影区域。可见，观察光的衍射也需要满足一定的条件。

▶ 光的衍射

对于机械波而言，障碍物或孔隙的尺寸与波长相差不多时才能观察到明显的衍射现象。由于光波的波长很短，远小于常见物体的尺寸，所以一般可以近似地认为光是沿直线传播的。在日常生活中，我们易忽略光的衍射现象。

[2] 自主活动

在如图 4-28 所示的装置中，用激光照射狭缝，改变狭缝的宽度，观察光屏上光强分布的变化。

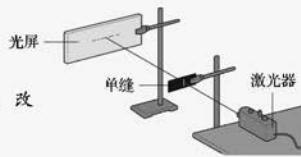
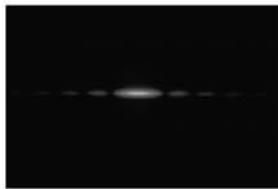


图 4-28 单缝衍射实验装置图

实验观察到，光屏上被照亮的范围比缝的宽度大得多，而且出现了明暗相间的分布（图 4-29）；若将狭缝改为小圆孔，也会有类似的现象，在光屏上出现明暗相间的同心圆环（图 4-30）。



[3] 图 4-29 光通过狭缝的衍射图样

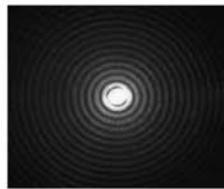


图 4-30 光通过小孔的衍射图样

当光在传播过程中遇到孔隙（或障碍物）后，偏离原来的直线传播方向绕过孔隙（或障碍物）继续传播的现象称为光的衍射。

射。再与机械波的衍射现象类比，启发思考光发生明显衍射也需要类似的条件，从而为“自主活动”中通过实验观察光的衍射奠定基础。

通过上一节的实验可知，光的波长只有十分之几微米。日常生活中障碍物、缝、孔等的线度通常比光的波长大得多，并不满足使光在传播时发生明显衍射的条件，因此很难观察到光的衍射现象，光在均匀介质中近似为沿直线传播。当光射向一个针孔、一条用刀片在玻璃片上刻划出的狭缝，或者羽毛的缝隙、一根如发丝时，就可以清楚地观察到光的衍射现象。

[2] 这是一个让学生通过实验观察光的单缝衍射现象的“自主活动”。通过活动，不仅可以认识光的衍射现象，还能知道当缝宽变化时，衍射条纹的变化情况，了解光的衍射现象特征，体验光发生明显衍射的条件。

[3] 图 4-29 至图 4-33，分别给出了不同情况下的衍射图样，这些衍射图样反映了障碍物形状的信息。

本节通过类比和实验观察，认识光的衍射和偏振现象，了解光的衍射和偏振的应用，进一步认识光是横波。本节内容按以下顺序展开：

1. 与机械波类比，了解光发生明显衍射现象的条件。观察光的衍射现象，进一步认识光具有波动性。

2. 观察光的偏振现象，与机械波类比，认识光波是横波。

3. 了解光的衍射和偏振的实际应用。

学习本节内容，经历观察、实验及与机械波的类比，了解光的衍射和偏振现象的实际应用等过程，不仅获得了光具有波动性的证据，知道光波是横波，还能促进观察、推理能力的发展，从而提高使用证据的意识，了解物理学与技术和生活的关系。

正文解读

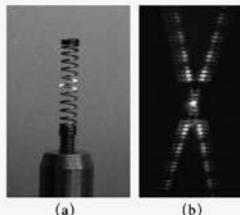
[1] 从光能够发生干涉、具有波动性出发，推出光也一定会产生衍

[1] 图 4-31(b)从右上方到左下方的光强分布是激光照射图 4-31(a)中弹簧的正面一段产生的衍射条纹；图 4-31(b)左上方到右下方的光强分布是激光照射图 4-31(a)中弹簧的背面一段产生的衍射条纹。利用图 4-31 所示的衍射图样与螺旋弹簧结构的关系，就可以了解由图 4-32 所示的 DNA 分子 X 光衍射图样对 DNA 分子结构的推测，并体会物理学与其他学科研究的联系。

[2] 这是一个通过实验观察圆盘衍射的“自主活动”。在圆盘衍射中，衍射图样的中心会产生一个泊松亮斑。在同样的条件下，若把圆盘换成同样大小的圆孔，衍射图样的中心不一定总是亮斑。

STSE

科学家可以通过衍射图样来推断障碍物或孔隙的空间结构和形状。用激光束从侧面水平照射竖直弹簧，如图 4-31 (a) 所示。光屏上会出现如图 4-31 (b) 所示的衍射图像。而如图 4-32 所示为 1952 年拍摄的首张 DNA 分子 X 射线衍射图像，与图 4-31 (b) 十分相似。当年科学家正是根据照片中的信息提出了 DNA 分子的双螺旋结构。



[1] 图 4-31 激光照射弹簧的衍射图样



图 4-32 DNA 分子的 X 射线衍射图样

1818 年，法国科学院组织了一次竞赛，目的是要解决光到底是粒子还是波的问题。年轻的工程师菲涅耳 (A.-J. Fresnel, 1788—1827) 在其投送的论文中按照波动说的理论深入地研究了光的衍射，提出了解决衍射问题的数学方法。竞赛评委泊松 (S. D. Poisson, 1781—1840) 是波动说的反对者，他认为菲涅耳的论文有问题。根据菲涅耳的分析他推演出，如果把不透光的小圆盘放在光束的中心，圆盘影子的中心竟然会出现一个亮斑！泊松认为这是非常荒谬的，波动说可以休矣。但不久之后，竞赛委员会的主席阿拉果 (F. Arago, 1786—1853) 却在实验中发现圆盘影子的中心确实存在亮斑。泊松的计算反而为光的波动说提供了有力支持。毕竟这个亮斑是由泊松首先推演出来的，为了纪念泊松的质疑对光学研究的促进作用，后人将这个亮斑称为“泊松亮斑”。

[2] 自主活动

如图 4-33 (a) 所示，用激光照射直径略小于激光束的不透明圆盘，观察光屏上的现象。

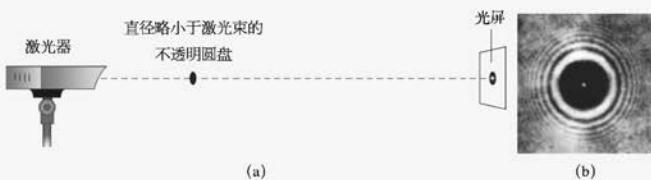


图 4-33 圆盘衍射

可以观察到，光屏上不透明圆盘的阴影中心确实有一个亮斑。

[1] 光通过一条狭缝会衍射，光通过平行的多条狭缝同样会衍射。狭缝越窄、狭缝数量越多，光的衍射现象越明显。激光防伪技术就是利用激光在印有图案的表面上沿不同方向刻上密排的细条纹。光通过这些细条纹发生衍射，形成特定的彩色图案来防伪。如图 4-34 所示即为纪念币上的防伪标识。



图 4-34 防伪标识

[2]

大家谈

声波的波长范围为 0.017~17 m，人眼可感知的可见光范围为 400~760 nm。请解释“只闻其声不见其人”现象的原因。

▶ 光的偏振

光能够发生干涉和衍射现象表明光是一种波。作为电磁波的光到底是横波还是纵波？

在绳波的传播方向上放置一个有狭缝的木板。沿绳传播的横波可以穿过如图 4-35 (a) 所示的狭缝；若将狭缝旋转 90°，波就无法通过了，如图 4-35 (b) 所示。而纵波是沿着波的传播方向振动的，所以无论狭缝的方向如何，纵波都可以穿过。

可以利用类似的方法来检验光是横波还是纵波。在实验室中，通常用“偏振片”来实现狭缝的功能，其作用是只让沿一定方向振动的光波通过。

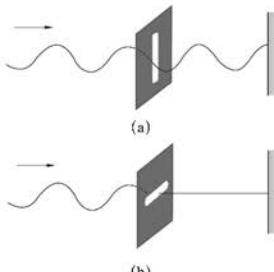


图 4-35 判断横波的示意图

[3]

自主活动

在光的传播路径上放一块偏振片 A，使光通过 A 照射到光屏上，观察光屏上的现象（图 4-36）；在光的传播路径上再放一块偏振片 B，保持 A 不动，转动 B，或保持 B 不动，转动 A，观察光屏上的现象。

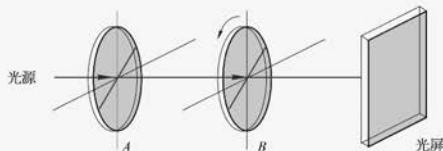


图 4-36 偏振片检测光的横波特征

[3] 此处设置“自主活动”的目的是让学生用两个偏振片进行实验，观察当转动其中一个偏振片时光屏上光强的变化，类比机械波的类似实验，认识光波是横波。

实验中两个偏振片的作用是不同的。沿入射光的方向，前一个偏振片的作用是使自然光变成偏振光，后一个偏振片起到“狭缝”的作用。

[1] 多条平行的狭

缝或刻痕就构成了光栅。光照射到光栅上发生衍射分两种情况：一是入射光束射向多条平行狭缝，狭缝作为次波源发出透射次波叠加而产生衍射，如透过羽毛或眼睫毛的缝隙看日光灯光时，能看到彩色条纹，这就是白光的光栅衍射现象；二是光束入射到多条平行刻痕上，刻痕作为次波源发出反射次波叠加而产生衍射花样，图 4-34 所示的激光防伪标识就是一个反射光栅。

[2] 此处设置“大

家谈”，旨在让学生利用已知声波、光波波长范围的数据，结合对生活中门、窗及墙的尺寸的估计，分析解释“只闻其声不见其人”的道理。通过实例体会波发生明显衍射现象的条件。

[1] 光的电磁理论

指出，光是电磁波，传播交变的电磁场，电磁波对人的眼睛或感光仪器（如照相底片等）起作用的主要是电场矢量 E 。因此，在描述光波中的振动矢量时，用矢量 E 来表示，称为光矢量。光是横波，光的振动矢量与光的传播方向垂直。但是，在垂直于光的传播方向的平面内，光矢量还可能有各种不同的振动状态。我们把光在与传播方向相垂直的平面内的各种振动状态称为光的偏振。偏振现象是横波区别于纵波的一个标志。

观察得到，随着 A 或 B 的转动，光屏上的光斑亮度随之变化。当两偏振片处在某个特定位置时，没有光线到达光屏。这一现象可以用光是横波来解释。

- [1] 电磁理论指出，电磁波是横波，横波的振动方向总和传播方向垂直。不同的横波，即使传播方向相同，振动方向也可能不同，这样的现象称为偏振（polarization）。偏振现象是横波区别于纵波的一个标志。

普通光源发出的光，在垂直于光传播方向的平面内包含一切振动方向的光，这样的光称为自然光。图 4-36 中偏振片 A 称为起偏器，偏振片 B 称为检偏器。自然光经过起偏器 A 后，在垂直于传播方向的平面内光只沿一个特定的方向振动，这种光称为偏振光，这个特定方向就称为偏振片的偏振方向。转动 B ，使 B 与 A 偏振方向的夹角变化，屏上光斑的亮度随之相应变化，当两者的偏振方向互相垂直时，屏上的光强最弱。自然光在玻璃、水面等物体表面发生反射和折射时，反射光和折射光都是不同程度的偏振光。

光的偏振现象有许多应用。如拍照时阳光、闪光灯光都会影响戴眼镜人的拍摄效果；拍摄橱窗和鱼缸内景物时，也会因明亮的反射光而受干扰。在镜头上加装偏振滤光片就能减弱反射光对拍摄的影响。

拓展视野

普通光源（如日光、各种照明光源等）发出的自然光，是由构成发光物质的大量原子、分子同时发射的光波组成。虽然每个原子或分子都发出一列长度有限、沿某一方向振动的光波，但不同原子或分子发出的光波的振动方向是随机的。自然光是由大量随机发出的光波组成，光的振动出现在各个方向的概率相同。如果用带箭头的直线表示光的振动方向，在与光传播方向相垂直的平面内，自然光的振动如图 4-37 所示。为了获得仅沿某确定方向振动的偏振光，通常是让自然光经过某些具有一定内部结构的透明物质后射出。自然光在物质中传播时，由于光与物质的相互作用，导致除沿某特定方向振动的光之外，沿其他方向振动的光波能量均被物质吸收，从而射出的是只沿一个方向振动的偏振光。这个方向就是该物质的偏振方向。

观众戴上眼镜观看立体电影有身临其境的

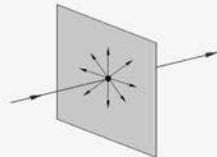


图 4-37 自然光的振动方向

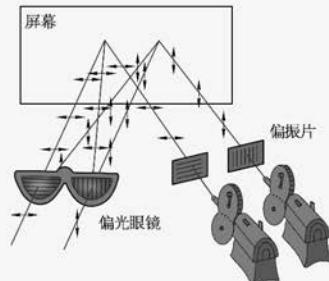


图 4-38 观看立体电影示意图

问题与思考解读

感觉。立体电影是利用人双眼的视角差和会聚功能制作的可产生立体感觉的电影(图4-38)。立体电影拍摄时使用两台摄像机同时拍摄景物的双视点图像。放映时使用两台放映机将两个视点的图像同步放映，在两台放映机前分别装有两个偏振片，偏振片的偏振方向互相垂直。从放映机射出的光通过偏振片后的偏振方向也互相垂直。这时如果用眼睛直接观看，看到的画面是重叠的，有些模糊不清。观众使用对应上述偏振光的偏振眼镜观看银幕，左眼只能看到左机映出的画面，右眼只能看到右机映出的画面，两眼看到的画面略有差别，从而产生立体感。

问题与思考

1. 用激光笔垂直照射一根细铜丝，观察光屏上的衍射图样有什么特点。在垂直光线的平面内转动铜丝，又会观察到什么现象？
2. 如何证实液晶屏发出的光为偏振光？
3. 某同学做了三个单缝，如图4-39所示为用激光分别照射三个单缝得到的衍射图样。比较三个单缝的宽度。
4. 如图4-40所示，甲、乙两图是同一单色光分别透过孔径为 $d_{\text{甲}}$ 和 $d_{\text{乙}}$ 的两圆孔后在光屏上形成的图样。由图样比较 $d_{\text{甲}}$ 和 $d_{\text{乙}}$ 的大小。

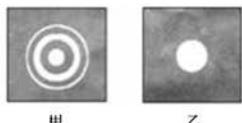


图4-39



图4-40

5. 柔软的耳机线中有很多粗细均匀的细铜丝。对这些细铜丝的加工要求非常高。工厂中利用如图4-41所示的装置，用激光器照射细铜丝，对抽丝过程实施自动控制。这一技术利用了光的什么现象？如果发现光屏上的条纹变宽，表明此时抽出的铜丝粗细发生了怎样的变化？为什么？
6. 强光突然照射眼睛，会使人产生短时间视觉障碍。为了避免夜间迎面驶来的汽车远光灯带来的安全隐患，某同学做了如下设想：将汽车前灯玻璃和汽车前窗玻璃都改用偏振玻璃。这样的设想如何实现使双方司机不受对方车辆发出的强光的影响？

显，若实验时保持单缝到光屏的距离不变，则由上而下，缝的宽度越来越大。由获得三张照片所用的缝均能产生衍射现象，说明缝宽符合衍射的条件

命题意图：观察衍射图样做出分析。

主要素养与水平：科学推理(Ⅱ)；科学论证(Ⅱ)。

4. 参考解答： $d_{\text{甲}} < d_{\text{乙}}$ 。图甲中，单色光通过小孔出现明暗相间且宽度不等的条纹，这是光的衍射现象。图乙是个圆亮斑，说明光主要沿直线传播，没有发生明显的衍射现象。图乙所对应的圆孔孔径远大于单色光的波长，一定大于发生衍射现象的图甲所对应的圆孔孔径。

命题意图：根据现象做出合理的推断。

主要素养与水平：科学推理(Ⅱ)；科学论证(Ⅱ)。

1. 参考解答：光屏上出现与铜丝平行的明暗相间的衍射条纹。在垂直于光线的平面内转动铜丝，条纹会随铜丝转动，条纹与铜丝始终平行

提示：不需要从理论层面进行推理。

命题意图：引导学生进行实际的观察。

主要素养与水平：

物质观念(Ⅰ)；科学推理(Ⅱ)。

2. 参考解答：将一片偏振片放在液晶屏上，点亮液晶屏(发出白光)，透过偏振片观察发光的液晶屏，慢慢转动偏振片，能观察到明暗变化的现象

命题意图：引导学生能进行实际的观察。

主要素养与水平：

物质观念(Ⅱ)。

3. 参考解答：从三张照片的单缝衍射图样可以看出，由上而下，衍射现象越来越不明

5. 参考解答：这一技术利用了光的衍射现象。光屏上的条纹变宽，说明铜丝变细，光的衍射现象变得更加明显

命题意图：关注物理与生产生活的联系。

主要素养与水平：科学推理(Ⅱ)；社会责任(Ⅰ)。

6. 参考解答：若前窗玻璃的偏振方向与前灯玻璃的偏振方向均斜向右上方 45° ，两车相向而行时，对方来车前灯玻璃的偏振方向与本车前窗玻璃的偏振方向垂直，则司机看不见对方车辆车前灯发出的炫目的灯光

提示：引导学生关注主要因素。

命题意图：解释偏振玻璃的实际应用，关注物理与生活和生产的联系。

主要素养与水平：科学推理(Ⅲ)；社会责任(Ⅰ)。

本节编写思路

本节通过观察和实例介绍激光的特点和应用。本节内容按以下顺序展开：

1. 回顾激光从设想到实现的历史线索，介绍激光的基本概念。

2. 介绍激光的特性，以及这些特性在生产生活和科学技术中的应用。

学习本节内容，通过联系物理学史和生活实例，结合观察，了解激光的基本概念。知道激光具有方向性好、单色性好、相干性好、亮度高的特点，以及在生产生活中的应用，引导学生知道激光与自然光的区别，激发其对科学的兴趣，感受现代科技的力量。

正文解读

[1] 普通光源发出的光来自其原子或分子的自发辐射，激光来自

[1] 在我们的生活中存在各种各样的光源，如太阳、萤火虫、蜡烛、日光灯、弧光灯等。激光（laser）是20世纪60年代才出现的一种新型光源。

▶ 激光

[2] 早在1916年爱因斯坦就提出了“光可以被放大”这一设想。直到1959年，汤斯（C. H. Townes, 1915—2015）等人发表了关于实现激光的论文。1960年，梅曼（T. H. Maiman, 1927—2007）发明了世界上第一台激光器。1961年，中国科技人员研制出了我国第一台红宝石激光器。1964年，我国著名科学家钱学森受邀为LASER取了“激光”这个贴切的中文名称。

当前，激光技术在工农业生产、光纤通信、宽带网络、信息处理、医疗卫生、文化教育、科技研究、军事发展等多方面都发挥着重要的作用。如图4-42所示为2016年G20峰会文艺演出中激光投影技术呈现出的舞台效果。



图 4-42 激光投影效果



图 4-43 激光扫描条形码

如图4-43所示，激光扫描仪正在检读条形码。黑色线条对激光的反射率低；浅色条纹对激光的反射率高，被激光扫描仪识读后转换为计算机能接受的二进制信息。条码技术的应用大大促进了商品流通和管理的信息化。

原子或分子的受激辐射。

[2] 激光的英文名称为LASER，取自英文Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation的各单词首字母组成的缩写词，意思是“通过受激辐射的光放大”，即通过受激辐射而产生、放大的光。激光的英文全名已经完全表达了产生激光的主要过程。1964年，我国科学家钱学森为LASER取了“激光”这个贴切的中文名称。激光具有广泛的应用，如激光灯标、光纤通信、激光光谱、激光测距、激光雷达、激光切割、激光武器、激光唱片、激光指示器、激光矫视、激光美容、激光扫描、激光灭蚊器等。图4-43所示的激光扫描条形码，是人们在日常生活中非常熟悉的激光的具体应用。

[1] 与激光光源不同，普通光源通过“自发辐射”发光。处于高能级的粒子自发发射光子具有偶然性，所以各粒子在自发辐射过程中发出的光子（或光波），其相位、偏振状态、传播方向都没有确定的联系。因此，自发辐射的光波是非相干的。通常电子处于低能级的原子数总是远大于电子处于高能级的原子数。正常情况下，产生越来越多相同光子的可能性是不存在的。因此，“拓展视野”中所说的受激辐射的现象是指在实现了电子处于高能级上的原子数大于电子处于低能级上的原子数，即所谓粒子数反转的条件下才能发生的。

[1] 拓展视野

设 E_1 和 E_2 是原子中电子的两个不同能级。当电子从较高能级 E_2 自发地跃迁到较低能级 E_1 时会发射出一个光子，该过程称为“自发辐射”。如果有一个能量恰好等于高低能级能量差的外来入射光子，处于较高能级 E_2 的电子会在外来光子“诱发”下跃迁到较低能级 E_1 ，并发射出一个与外来光子完全相同的光子，如图 4-44 所示，该过程称为“受激辐射”。若受激辐射产生的光子在介质中传播时又诱发了更多的其他原子发生相同的受激辐射，就会产生越来越多的相同光子。这些光子的性质完全相同，这意味着光被放大了。这种在受激过程中被放大的光就是激光。



图 4-44 受激辐射

▶ 激光的特性

与普通光源发出的光相比，激光有着显著不同的特性，主要表现在：方向性好、单色性好、相干性好、亮度高四个方面。

普通光源发出的光都是向四面八方辐射的，无论我们采用什么物理方法，都很难获得理想的平行光束。即使采用凹面镜、聚光镜等光学器件，可将光会聚成近似平行的光束；但若照射距离较大，光束仍会发散，在远处呈现大而暗淡的光斑。

如图 4-45 所示，激光是沿一定方向发射、沿直线辐射的很细的光束，其发散角仅为 0.001 rad 左右。即使照射到离地球 $380\,000 \text{ km}$ 外的月球，激光束在月球上的光斑直径仍不足 2 km 。如果用探照灯往月球照射（实际上这是不可能的），其光斑直径将达几百千米。激光的方向性是普通光源无法企及的。因此，激光常被广泛应用于测距、通信、雷达和制导等方面。



图 4-45 激光光束的方向性

拓展视野

激光之所以具有这么好的方向性要归功于激光器谐振腔的特殊结构。全反射镜和部分反射镜构成如图 4-46 所示的光学谐振腔。根据光的传播规律，凡是偏离轴线的光或直接逸出腔外，或经过几次来回反射后逸出腔外，不可能形成较强的光束。只有那些传播方向严格地与谐振腔轴线平行的光子才能在腔体内通过反复来回反射受激放大，因此，从激光器输出的激光束是与谐振腔的轴线平行一致的光束。

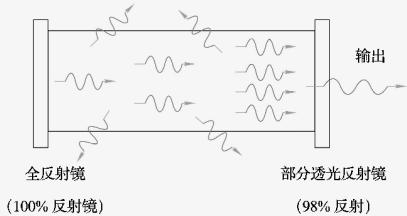


图 4-46 光学谐振腔

光的颜色由光在真空中的波长决定。“单色光”的波长范围越小，这种色光的单色性就越好。例如，氪 (Kr86) 灯发射的红光波长为 605.7 nm ，其波长的变化范围为 $4.710 \times 10^{-4}\text{ nm}$ 。而 He-Ne 激光器发出的红色激光波长为 632.8 nm ，其波长的变化范围仅为 $2 \times 10^{-9}\text{ nm}$ ，比氪 (Kr86) 灯红光的单色性提高了几十万倍。由于具有良好的单色性，激光常被用于精密测量、精准定位和测速等。

我们曾用激光束直接照射双缝，观察光屏上干涉条纹的特点。这是由于激光具有很好的相干特性，激光照射双缝后，能在光屏上看到清晰的干涉条纹。

激光的高度相干性使人们可以像利用无线电波一样用激光携带信号，通过光导纤维传输文字、声音、图像，从而实现了通信手段的重大突破。

[1] 全息技术也称“虚拟成像技术”，是利用干涉和衍射原理记录并再现物体三维信息的技术。全息技术不仅可以产生立体的空中幻象，还可以使幻象与表演者互动，一起完成表演，产生令人震撼的演出效果。全息技术利用了光的干涉原理。只有激光出现后，全息技术才得到长足的发展。

由于激光的方向性好，能量可以在空间沿发射方向高度集中，亮度比普通光源有极大提高。在机械制造中，常需按一定的形状切割或焊接厚度达几厘米至几十厘米的钢板。由于激光具有方向性好、能量集中的突出优点特别适用于加工各种材料，如焊接（图 4-47）、打孔、切割（图 4-48）等。激光不仅能干削铁如泥的“重活”，还可以在金属、水晶上雕刻，甚至在金刚石上“钻”出极其细小完美的小孔。在超大规模集成电路的研制与开发中激光已成为关键技术。

[1] 关于激光在全息技术中的应用可参见本书第 135 页资料链接。

1. 参考解答：

说明激光具有方向性好、强度高的特点。使用激光笔时应避免直接照射人体，特别是不能直射眼睛。

命题意图：引导学生具备良好的社会责任意识。

主要素养与水平：科学本质(I)。

2. 参考解答：

(1) 光纤通信是利用激光平行度非常好的特点对信号进行“调制”，使其在光导纤维中传递信息；光在光纤中发生全反射，能量衰减小，能实现传播方向的可控性和远距离传递信息。

(2) 医学上用激光作“光刀”来切除肿瘤是应用了激光方向性好，光源的能量集中在很小一点上，可以在空间某个小区域内产生极高的温度。

(3) “激光测距雷达”利用激光测量远目标的距离是因为激光平行度好、方向性好。

命题意图：关注物理与技术应用的联系。

主要素养与水平：科学本质(I)；社会责任(I)。

3. 参考解答：全息照相利用激光相干性好的特点；激光切割利用了激光单色性好、平行度好、亮度高的特点；用激光光源直接照射双缝做光的双缝干涉实验，利用了激光相干性好的特点，易于观察干涉现象。

命题意图：对激光的应用进行归纳与表述。

主要素养与水平：科学本质(I)。



图 4-47 激光焊接金属



图 4-48 激光切割金属

激光雷达向被测目标发射激光，测量反射或散射信号确定被测目标的距离、运动速度及方位。激光雷达可以全天候作业，具有测距精度高、重量轻、功耗低的优点。

STSE

图 4-49 为上海超强超短激光实验装置。超强超短激光指峰值功率大于 1 TW (太瓦, $1 \text{ TW} = 10^{12} \text{ W}$)，脉冲宽度小于 100 fs (飞秒, $1 \text{ fs} = 10^{-15} \text{ s}$) 的激光。2017 年 10 月，中科院上海光机所和上海科技大学超强激光光源联合实验室成功实现上海超强超短激光实验装置 (SULF) 10 PW (拍瓦, $1 \text{ PW} = 10^{15} \text{ W}$) 激光放大输出，脉冲宽度为 21 fs。这是当时已知的世界最高激光脉冲峰值功率，达到国际同类研究的领先水平。



图 4-49 上海超强超短激光实验装置

问题与思考

1. 在阳光下用激光笔照射墙壁依然可以看到很亮、很小的光斑。这说明激光具有什么特性？在使用激光笔时需要注意什么？
2. 激光具有普通光源不具备的一些特性，主要有：单色性好、强度大、传播方向性好等。在下列利用激光特性的实际应用中，利用了激光的哪些特性？
 - (1) 在光纤通信中利用激光在光纤中传递信息。
 - (2) 在医院，利用激光进行手术。
 - (3) 利用激光测距仪精确测量远处目标的距离。
3. 除了上述的应用外，激光还有哪些应用？这些应用利用了激光的什么特性？

资料链接

全息照相

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(由振幅决定)。全息照片的功能在于它能够使来自被记录的物体的光波再现,这种再现的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其栩栩如生的三维图像。

全息照相技术在其发明早期难以推广。原因是它需要相干长度很大、强度也较强的光源,这在当时是难以达到的。激光的问世,使满足这种要求变得轻而易举,全息照相技术也因此得到了蓬勃发展。

全息照相技术就其原理来说,就是以干涉的方法记录原物发出的光波,用衍射的方法再现原物的光波。拍摄时,一束相干光通过分束器分为两束,一束直接射向记录介质(称为参考光),另一束射向拍摄对象,经反射后(称为物光)射向同一记录介质。由于物光和参考光间存在着光程差,这两束光在记录介质处叠加而产生干涉。因此记录介质不仅记录了物体不同部位的反光强度,也记录了由于空间位置不同而形成的位相信息,即把物体上不同位置发出的光波振幅和相位转换成在空间上变化的强度,也就是干涉条纹,记录介质上的干涉条纹记录了物光的全部信息。目前全息技术已在各个领域获得广泛应用,日常生活中常见的一个例子就是作为防伪标志的彩虹全息图像。

[1] 这是一个阅读综述类的活动。要求围绕对光的本性的认识，阅读书籍和查阅资料。对信息摘录综合、分析提炼、思考总结，以图表、时间轴或者导图等多种形式将人类对光的认识过程呈现出来。在学期结束前撰写一篇读书报告，在班级中交流。

学期 活动

[1] 了解人类对光的本性的认识过程。

在认识光的本性的过程中，人们经历了微粒说和波动说之争。随着科学的发展，人们对这个问题的认识逐步深入。

阅读书籍并查阅相关资料，了解这一历史过程，体会实验和理论在科学中的作用，撰写读书报告。

活动要求：

- (1) 摘录书本上关于光的本性认识的重要事件（相关人物，时间节点，主要观点），标明出处（如“……”摘自《××》第××页。）
- (2) 按一定的顺序排列上述信息。
- (3) 确定从一个角度（如：科学方法、认识论、科学技术推动社会发展等角度）切入，对人类探索光的本性的过程作出评述。
- (4) 在班级内进行展示与交流。

小结

· 基本概念和基本规律

折射: 光从介质1入射到介质1与介质2的分界面时,部分进入介质2,并改变传播方向的现象。

折射定律: 当光从介质1射入介质2时,折射光线与入射光线、法线处在同一平面内,折射光线与入射光线分别位于法线的两侧;入射角的正弦与折射角的正弦之比为一常数。

折射率: 光从真空射入某种介质发生折射时,入射角的正弦与折射角的正弦的比值。

全反射: 当光从光密介质射向光疏介质的入射角大于某一角度时,光全部反射回光密介质的现象。

光的干涉: 两束相干光在空间相遇,彼此叠加,在一些区域振动相互加强,在另一些区域振动相互减弱,且分布稳定的现象。

光的衍射: 光在传播过程中遇到孔隙(或障碍物)后,偏离原来的直线传播方向绕过孔隙(或障碍物)继续传播的现象。

光的偏振: 在垂直于光传播方向的平面内光波沿某一或某些方向振动的现象。

· 基本方法

在探究光的折射现象过程中,运用归纳、推理与实验探究结合的方法。

通过观察干涉、衍射现象,感受利用证据进行论证的方法。

· 知识结构图



复习与巩固解读

1. 参考解答：能看到干涉条纹。观察范围不变，条纹数减少，条纹的宽度变大

命题意图：知道空气斜劈形成干涉的原理；通过斜劈倾角的大小与干涉条纹的间距关系进行分析。

主要素养与水平：科学推理(Ⅱ)。

2. 参考解答：红色滤光片只允许红光通过，绿色滤光片只允许绿光通过。通过用红色滤光片遮挡的缝的光是红光，通过用绿色滤光片遮挡的缝的光是绿光，而红光和绿光不能发生干涉，无干涉条纹，但有红光和绿光分别通过各自缝隙的衍射条纹

提示：这是一种思想实验，实际操作比较困难。

命题意图：根据干涉的条件做出推理，合理表述实验现象。

主要素养与水平：科学推理(Ⅱ)；科学论证(Ⅱ)。

3. 参考解答：如图 12 所示

命题意图：能根据光的折射画出正确的光路图。

主要素养与水平：科学推理(Ⅱ)；交流(Ⅲ)。

4. 参考解答：当 θ 增大时，入射角减小，则折射角减小，从而光在玻璃中的传播路程减小，时间变短， d 减小

命题意图：由折射定律分析折射角的变化，并能结合几何关系进行分析。

主要素养与水平：科学推理(Ⅱ)。

5. 参考解答：如图 13 所示，由几何关系可知，

复习与巩固

1. 如图 4-50 所示，在两块平板玻璃的一侧垫上两张纸片。用光垂直照射玻璃，由上向下观察，可看到干涉条纹。若抽掉一张纸片，还能看到干涉条纹吗？如果还能看到，视野中看到的干涉条纹有何变化？



图 4-50

2. 在双缝干涉实验中，以白光为光源，可在光屏上观察到彩色干涉条纹。设想用红色和绿色滤光片分别盖在两条缝上，是否还会在屏幕上看到明暗相间的光强分布？

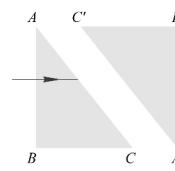


图 4-51

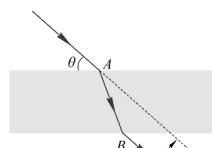


图 4-52

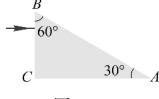


图 4-53

3. 如图 4-51 所示，有两块相同的玻璃直角棱镜 ABC 与 $A'B'C'$ ，将 AC 面与 $A'C'$ 面平行放置并置于空气中，一束单色光垂直于 AB 面由左侧入射。画出光经两块棱镜后出射的光路图。

4. 如图 4-52 所示，上、下表面平行的玻璃砖放在空气中，一束光从玻璃砖上表面的 A 点射入，入射方向与玻璃砖表面成 θ 角。光进入玻璃砖后经过又一次折射，从玻璃砖下表面的 B 点射出，出射光线相对于入射光线的延长线有一水平偏移，移动距离为 d 。如果使入射方向与玻璃砖表面的夹角 θ 逐渐增大，光在玻璃中的传播时间以及出射光线偏离入射方向的距离将如何变化？

5. 如图 4-53 所示，折射率为 1.41 的直角棱镜 ABC 置于空气中。一束光从直角棱镜的 BC 面垂直射入后又从棱镜中射出，其出射方向与 AC 面之间的夹角为多大？

6. 某同学利用微波发射器和接收器研究电磁波。发射器可发射频率为 10 GHz 的一定强度的电磁波，接收器可显示接收到电磁波的强度。

(1) 如图 4-54 (a) 所示，接收器和发射器置于同一直线上，在发射器和接收器前均加装一偏振片，此时接收器显示接收到的信号最强。若接收器按图示方向绕轴线转动，接收到信号的强度如何变化？

(2) 如图 4-54 (b) 所示，在发射器和接收器之间放置一块带双缝的金属平板，接收器沿虚线移动时，接收器接收到信号的强弱会发生变化。解释为何接收器位于双缝连线的中垂线上时，接收到的信号最强。

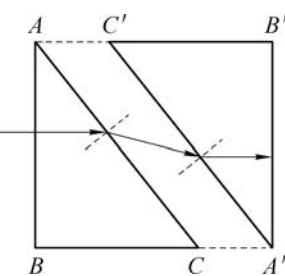


图 12

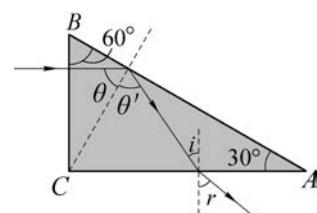


图 13

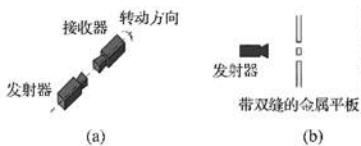


图 4-54

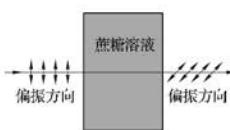


图 4-55

7. 蔗糖溶液具有一种称为“旋光性”的光学性质。当沿某一方向振动的偏振光经过蔗糖溶液后，出射的偏振光会相对入射偏振光的振动方向转过一个角度（图 4-55），角度的大小 α 与蔗糖溶液的浓度 c 间的关系为 $c = ka$ 。常数 k 与光在溶液中传播的距离和温度有关。简述如何利用两块偏振片比较不同蔗糖溶液的浓度。

8. 图 4-56 为一根长为 L 、折射率为 n 的实心玻璃棒。为了保证一束光从玻璃棒一个端面上的中心射入后只从另一个端面射出。在入射端面上，光的最大入射角为多少？



图 4-56

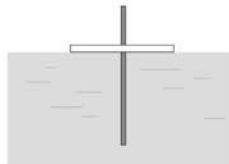


图 4-57

9. 如图 4-57 所示，将一根标有刻度的细直棒从直径为 d 的圆形泡沫板中心垂直插入。将该装置漂浮在液体表面，调整细棒插入液体的深度，同时从液面上方观察。发现当细棒插入液体中一定深度时，从液面上方任何方向观察，都恰好看不到液体中的细棒。读出此时细棒浸入液体的深度 L ，即可得到液体的折射率。分析产生该现象的原因，求出液体的折射率。

10. 图 4-58 (a) 为光分别通过狭缝、正方形孔与圆孔后产生的衍射图样（缝和孔的形状标于各图的右下方）。当光通过正六边形孔时，会在光屏上产生如图 4-58 (b) 所示的衍射图样。根据图 (a) 中提供的信息，分析说明产生图 (b) 衍射图样的原因。

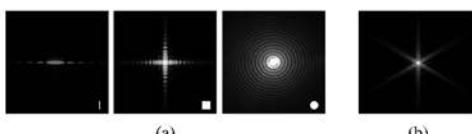


图 4-58

一周的过程中，接收到的信号强度先减小后增大，再减小再增大。发射器发射频率为 10 GHz 的电磁波，其波长为 3 cm，与金属平板上的缝隙的宽度可相比拟，会发生明显的衍射现象。双缝成为两个波源，它们的频率、相位和振动方向总是相同的，在金属板后的空间互相叠加，发生干涉现象，某些区域相互加强，某些区域相互削弱，接收器沿虚线移动时接收到的信号强度会变化。由于双缝到其中垂线的距离相等，且此处距离双缝最近。所以，此处接收器接收到的信号最强

命题意图：转换情境，在不同情境中提炼信息，做出分析。

主要素养与水平：模型建构(Ⅱ)；科学推理(Ⅱ)。

7. **参考解答：**将温度相同、浓度不同的蔗糖溶液置于相同的容器中。光沿相同的路径穿过装有蔗糖溶液的容器。入射前经过偏振片 1，记录其方向，即为入射光的偏振方向。出射后光经过偏振片 2，转动偏

光在棱镜的 AB 边和空气界面上的入射角 θ 为 60° ，由于光从棱镜内入射到 AB 和空气界面上发生全反射的临界角

$$\sin C = \frac{1}{n} = \frac{1}{1.41}$$

界角 $C = 45^\circ$ ，小于入射角 θ 。可见入射到 AB 面的光会发生全反射后射到 AC 面。光入射到 AC 面和空气界面的入射角为 $i = 30^\circ$ ，根据折射定律 $\frac{1}{n} = \frac{\sin i}{\sin r} = \frac{\sin 30^\circ}{\sin r} = \frac{1}{1.41}$ ，光经 AC 面折射后的折射角 $r = 45^\circ$ 。因此光从棱镜出射时，其出射方向与 AC 面之间的夹角为 45°

命题意图：能用光路图正确表示光的传播情况，结合光的折射、全反射条件，做出分析。

主要素养与水平：

模型建构(Ⅱ)；科学推理(Ⅱ)。

6. **参考解答：**

(1) 接收器沿轴线转动

振片 2,使观察到的光强最弱,记录其方向。出射光的偏振方向与此时偏振片 2 的方向垂直。比较入射偏振光和出射偏振光的角度差异,差异越大,蔗糖溶液的浓度越高

命题意图:关注物理、生活与技术应用的联系。

主要素养与水平:模型建构(II);社会责任(I)。

8. 参考解答:为了使光能在玻璃棒中传播至另一端,光进入玻璃棒后,在玻璃棒与空气的分界面上须发生全反射。如图 14 所示,光沿着与端面垂直且过某一直径的平面入射端面中心。由几何关系可知,只要经端面折射后进入玻璃棒的光线第一次入射到玻璃棒侧面时能发生全反射,以后将一直满足全反射条件。设光从端面入射时的入射角为 i ,折射角为 r ,第一次入射到玻

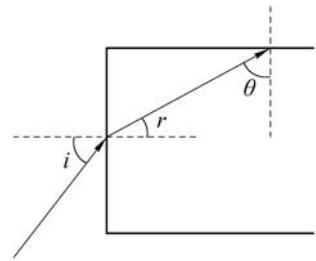


图 14

璃棒侧面时的入射角为 θ ,当 θ 为临界角 C 时, i 最大。由折射定律, $\sin C = \frac{1}{n}$, $n = \frac{\sin i_{\max}}{\sin r}$, 由几何关系,

$$r + C = \frac{\pi}{2}, \text{由此可得, } \sin i_{\max} = n \cos C = n \sqrt{1 - \frac{1}{n^2}} = \sqrt{n^2 - 1}, i_{\max} = \sin^{-1} \sqrt{n^2 - 1}$$

命题意图:根据全反射条件,依据光的折射定律,找到临界条件,结合几何关系进行合理分析。

主要素养与水平:科学推理(III);科学论证(III)。

9. 参考解答:如果从细棒最低点发出的光无法由液面出射,在液面上方就无法看到液体中的细棒。可见,只要由细棒最低点发出的光到达液面处泡沫板边缘时的入射角恰为临界角即可。如图 15 所示,由几何关系,当细棒在液体中的长度为 L 时,光到达液面,入射角满足

$$\sin \theta = \frac{\frac{d}{2}}{\sqrt{\left(\frac{d}{2}\right)^2 + L^2}} = \frac{d}{\sqrt{d^2 + 4L^2}}, \text{由折射定律 } \sin \theta = \frac{1}{n}, \text{得 } n = \frac{\sqrt{d^2 + 4L^2}}{d}$$

命题意图:阅读文本,将文字转化为示意图,根据全反射条件,依据光的折射定律,结合几何关系进行合理分析。

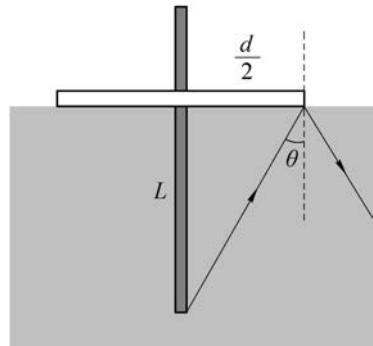


图 15

主要素养与水平:科学推理(III);科学论证(III)。

10. 参考解答:由教材图 4-58(a)可以总结得出这样的规律:单缝有两条边,矩形孔有四条边,而圆孔可视为由 n 条边构成的 n 边形($n \rightarrow \infty$)。由衍射图样的特征发现,在任一条边的垂直方向都会有一组衍射图样,因此单缝有两条衍射图样,矩形孔有四条衍射图样,圆孔沿各个方向均有衍射。由此可推断六边形孔的衍射图样沿六个与边垂直的方向展开,如图 4-58(b)所示

命题意图:能根据已有的事实,建立合适的推理逻辑,对新情况做出分析。

主要素养与水平:模型建构(V);科学论证(III)。

第三部分 本章练习部分解读

第一节 光的折射

1. 法 入射角的正弦值 折射角的正弦值

2. 小大光密

3. 反射 折射

4. $n_C > n_B > n_A$ 。光以一定角度射入不同折射率的介质中时,介质的折射率越大,偏离入射光的角度越大,折射角越小

5. B

6. 由 $n = \frac{\sin \theta_1}{\sin \theta_2} = \frac{\sin 45^\circ}{\sin 27.7^\circ} \approx 1.52$ 知,该介质可能是玻璃

7. 如图 16 所示,光由空气斜射入玻璃砖, $\frac{\sin \theta_1}{\sin \theta_2} = n$, 光由玻璃砖斜射入空气,由光路可逆得, $\frac{\sin \theta_3}{\sin \theta_2} = n$, 得 $\theta_1 = \theta_3$, 即入射光线与出射光线平行。由

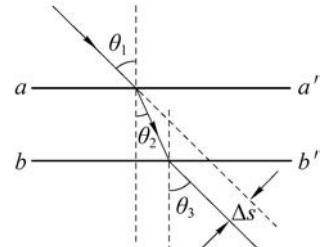


图 16

折射定律 $\sin \theta_1 = n \sin \theta_2$, $\sin \theta_2 = \frac{\sin \theta_1}{n} = \frac{1}{3}$, $\theta_2 \approx 19.5^\circ$, 入射光线的延长线

和折射光线间的垂直距离 $\Delta s = \frac{d}{\cos \theta_2} \sin(\theta_1 - \theta_2) = \frac{0.05}{\cos 19.5^\circ} \sin(30^\circ - 19.5^\circ) \text{ m} \approx 9.67 \times 10^{-3} \text{ m}$

8. 色拉油的折射率约为 1.5,与实验中所选烧杯玻璃的折射率接近,光从玻璃进入油和从油进入玻璃的偏折都不明显,几乎沿直线传播。因此,无法辨别出油中的玻璃烧杯

第二节 全反射

1. 光密 光疏 $n = \frac{1}{\sin C}$

2. 弱 强

3. 如图 17 所示

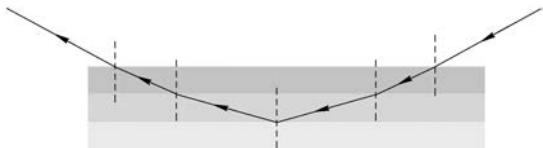


图 17

4. 光由水射入空气时,临界角为 $\arcsin \frac{1}{1.33} \approx 48.8^\circ$

与没有气泡时相比,光在水与气泡的界面处发生全反射,即有更多的光反射进入眼睛,观察者感到水中的气泡特别亮

5. 如图 18 所示,设当光到达 A 和 A' 及以外的区域发生全反射,则

$\theta = \arcsin \frac{1}{1.33} \approx 48.8^\circ$, 设灯泡形成的亮斑半径为 x , 则 $\tan 48.8^\circ = \frac{x}{3}$,

$x = 3 \tan 48.8^\circ \approx 3.43 \text{ m}$, 则亮斑的直径为 $2x = 6.86 \text{ m}$

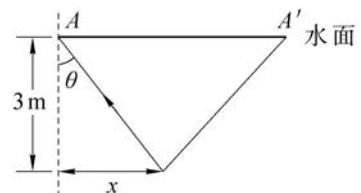


图 18

6. 临界角 $C = \arcsin \frac{1}{1.31} \approx 49.8^\circ$ 设入射角为 θ_1 , 折射角为 θ_2 , 根

据图 4-6 和冰柱的尺寸,得 $\tan \theta_2 = \frac{0.05}{0.5} = 0.1$, $\theta_2 \approx 5.7^\circ$, 由于 $90^\circ - \theta_2 > C$, 得

光在冰纤中发生全反射,由折射率 $n = \frac{\sin \theta_1}{\sin \theta_2} = 1.31$, 得入射角 $\theta_1 \approx 7.5^\circ$

7. (1) 如图 19 所示 设光从空气射入玻璃的入射角为 θ_1 , 折射角为 θ_2 , 光由玻璃射入空气的入射角为 θ_3 , 则 $\frac{\sin \theta_1}{\sin \theta_2} = n$, 即 $\frac{\sin 60^\circ}{\sin \theta_2} = 1.50$, 得 $\theta_2 \approx 35.3^\circ$, 由三

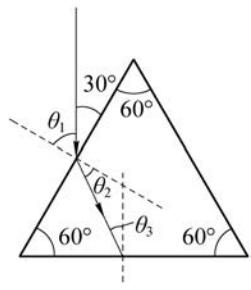


图 19

角形的内角和为 180° , 得 $\theta_3 = 24.7^\circ$ (2) 玻璃的临界角 $C = \arcsin \frac{1}{1.50} \approx 42^\circ$, 即 $\theta_3 < C$, 所以光会穿过 BC

8. 让光从空气斜射入该介质, 通过测量入射角 θ_1 和折射角 θ_2 , 根据 $n = \frac{\sin \theta_1}{\sin \theta_2}$ 得到折射率, 再利用 $\sin C = \frac{1}{n}$ 得出全反射的临界角

9. (1) 光源 P 发出的光斜射到 N 处, N 处为玻璃和空气的界面, 若入射角 θ 大于临界角, 就会发生全反射 (2) 下雨时 N 处外侧会有水滴, N 处为玻璃和水的界面。由于玻璃对水的临界角大于玻璃对空气的临界角, 入射角为 θ 的激光不再满足全反射条件, 激光在 N 处同时发生折射和反射, 部分光线会从挡风玻璃前表面射出到车辆外侧, 接收器 Q 感知到光照就会突然变弱, 做出挡风玻璃外侧有水的判断, 启动雨刮器

第三节 光的干涉

1. 反干涉

2. 不可能, 独立光源非相干, 不满足发生干涉的条件
3. 见下表

说 法	判 断	理 由
肥皂膜上的条纹是竖条纹	错	同一水平高度处薄膜厚度相同, 具有相同的光程差, 形成干涉图样, 因此肥皂膜上的条纹是横条纹
肥皂膜上的条纹是横条纹	对	同一水平高度处薄膜厚度相同, 具有相同的光程差, 形成干涉图样, 因此肥皂膜上的条纹是横条纹
肥皂膜上的条纹是均匀分布的	错	因重力的作用, 导致上薄下厚, 且厚度变化不均匀的楔形薄膜
肥皂膜上的条纹是稳定不变的	错	薄膜厚度不断变薄, 彩色条纹不断流动

4. 该实验用波长为 530 nm 的单色光, 照射间距为 0.2 mm 的双缝, 双缝到光屏的距离为 2 m

5. (1) 不要直视激光, 光强较大时需要佩戴激光防护镜 (2) 双缝干涉图样的条纹间距 $\Delta x = \frac{\lambda L}{d}$, 当 λ, L 一定时, 双缝间距 d 越小, 条纹间距越大, 条纹越清晰; 反之, 条纹不明显, 不便于观察和测量
(3) 如图 20 所示

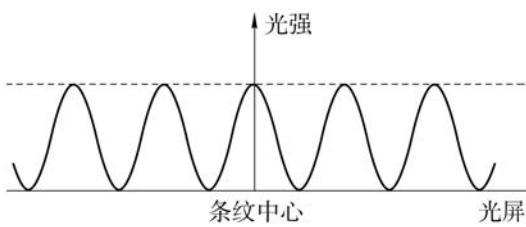


图 20

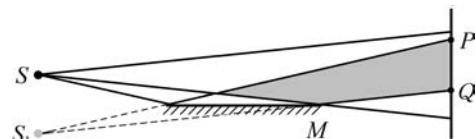


图 21

6. 566.67 nm 绿光

7. 0.755 m 由于杨氏双缝干涉的条纹间距和光在介质中的波长成正比, 在水中的介质波长小于在空气中的波长, 所以条纹间距会减小

8. 光源由平面镜反射所成的虚像 S_1 可看作和 S 相干的光源,两者会出现干涉现象。如图 21 所示,在 PQ 范围内会出现干涉条纹。

第四节 光的衍射和偏振

1. 障碍物或者孔的尺寸与波长差不多或比波长小 障碍物的尺寸比光的波长大得多
2. 见下表

类 别	单 缝 衍 射	双 缝 干 涉
产生条件	狭缝足够小,与波长相差不大	两列相干光叠加
条纹宽度	条纹宽度不等,中央最宽	条纹宽度相等
亮 度	中央明纹最亮,两侧变暗	各亮纹的亮度基本相同
相 同 点	都是波特有的现象,证明光是一种波	

3. 中央明条纹宽度增加,亮度减弱,衍射现象更明显
4. 横波 旋转过程中,透过偏振片的光强先增强,然后又减弱到零。理由:两偏振片的偏振方向垂直时,没有光通过即光强为零。当两偏振片的偏振方向平行时,光强度最大,随后两偏振片的偏振方向又垂直时光强再次变为零。
5. (1) 反射光的偏振方向与入射平面垂直 (2) 因为光通过橱窗玻璃的反射光是偏振光,利用光的偏振原理,在照相机镜头前装一片偏振片,会减弱反射光进入镜头的强度,使橱窗内物体的影像更清晰。

第五节 激 光

1. 方向 相干
2. 见下表

实 例	特 点
激光测距	方向性
光纤通信	相干性
激光焊接、切割金属	亮度高

3. 白炽灯为复合光源,激光为单色光源,相干性更好,干涉现象更明显
4. 见下表

说 法	判 断	理 由
全息照片的拍摄利用了激光易于全反射的特点	错	全息照片的拍摄主要利用了激光相干性好的特性
激光测距利用了激光相干性好的特点	错	激光测距主要利用了激光方向性好的特性
由于激光的方向性好,可以用激光来携带信息	错	用激光携带信息主要利用了激光相干性好的特性
利用激光方向性好、亮度高的特点,可用激光来当“手术刀”	对	用激光当“手术刀”主要利用了激光方向性好、亮度高、能量大的特性

第四部分 本章实验与活动部分解读

1 自主活动 光从空气斜射进入水中的折射

参考解答：实验现象不同。将水换为盐水，相同的入射角对应的折射角不同。实验结论相同，入射角与折射角的正弦值的比值基本相等

命题意图：运用规律推理新实验的现象。

2 学生实验 测量玻璃的折射率

(1) **参考解答：**如图 22 所示

命题意图：将实验中的方法做简单的迁移。

(2) **参考解答：**实验器材：水、大头针、白纸、三角板、量角器、木板。步骤：装有水的薄的方形透明塑料容器放置在白纸上，在塑料容器的一侧垂直于纸面插两枚大头针 a 、 b ，其连线与塑料容器表面成一定角度。在另一侧透过塑料容器观察，并在该侧的适当位置再插两枚大头针 c 、 d ，使四枚大头针依次遮挡。此时，它们位于同一条射入眼睛的光线上。根据大头针的位置在白纸上画出入射光线和出射光线，确定入射点和出射点，画出塑料容器中的折射光线。测量并记录光在空气和水界面上的入射角 θ_1 和折射角 θ_2

命题意图：自主完成方案的设计，深化对实验方案的理解。

3 自主活动 光在玻璃与空气界面的折射、反射和全反射

参考解答：开始时，反射光比折射光强度弱。增大角度，反射光强度增大，折射光强度减弱。当角度增大到某一值时，折射光消失，仅有反射光。继续增大入射角，始终只有反射光。这一现象可以用能量守恒进行解释，折射光的能量与反射光的能量之和等于入射光的能量。入射光的能量一定时，反射光光强增大，则折射光强度必定减弱

命题意图：从能量的角度看光的反射、折射和全反射现象。

4 学生实验 用双缝干涉实验测量光的波长

(1) **参考解答：**用累积的方法来减小实验误差

命题意图：理解实验中的关键步骤。

(2) **参考解答：**单色光发生双缝干涉时，条纹间距 Δx 与双缝间距 d 、光屏到双缝的距离 L 、光的波长 λ 之间有确定的关系 $\Delta x = \frac{L}{d}\lambda$ 。利用本实验装置，用已知波长 λ 的单色光作为光源，测量条纹间距 Δx ，

光屏到双缝的距离 L ，双缝间距 $d = \frac{L}{\Delta x}\lambda$ 。将测量得到的数值与双缝屏上所标数值进行比较

命题意图：设计一个方案，体会双缝干涉实验在长度测量方面的应用。

5 自主活动 肥皂膜的干涉现象

参考解答：基本没有变化

命题意图：认识肥皂膜发生干涉的原因。

6 自主活动 光的单缝衍射

参考解答：光通过单缝衍射呈现出中间宽、亮，两边对称的亮暗间隔等距的光强分布，光扩展的方向与单缝相互垂直。小方孔可以看作两个两组单缝垂直合成。每个单缝在光屏上分别有光强分布，则小方孔的光强分布就可等效为两个垂直单缝的衍射光强分布的叠加

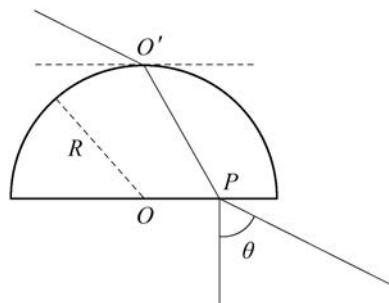


图 22

命题意图：对实验现象进行分析和推理。

7 自主活动 圆盘衍射

参考解答：按照光的波动理论计算结果圆盘中央应该出现亮斑。实验现象与理论计算的结果一致，说明光通过圆盘后没有沿直线传播，到达了圆盘后的阴影区域，发生了衍射现象，为光的波动性提供有力支持

命题意图：认识泊松亮斑发现的意义。

8 自主活动 光通过偏振片后的光强变化

参考解答：液晶屏发出的光为偏振光，在垂直于传播方向的平面内光只沿一个特定的方向振动。若连续转动偏振片，则偏振片的偏振方向与液晶屏发出的光的偏振方向的夹角随之变化，通过偏振片的光强也会发生相应变化

命题意图：通过推理解释实验现象。

附录 物理学科核心素养的水平划分

水平	物理观念
水平 1	能从物理学的视角观察自然现象,具有将物理学与实际相联系的意识
水平 2	形成初步的物理观念,能从物理学的视角解释一些自然现象,能应用物理知识解决一些实际问题
水平 3	具有物理观念,能从物理学的视角描述和解释自然现象,能应用物理知识解决实际问题
水平 4	具有清晰的物理观念,能从物理学的视角正确描述和解释自然现象,能综合应用物理知识解决实际问题,能指导工作和生活实践
水平 5	具有清晰、系统的物理观念,能从物理学的视角正确描述和解释自然现象,能灵活应用所学的物理知识解决实际问题,能有效指导工作和生活实践
	科学思维
水平 1	能说出一些简单的物理模型;能对常见的物理现象进行简单分析;能区别观点和证据;知道质疑和创新的重要性
水平 2	能在熟悉的问题情境中应用常见的物理模型;能对比较简单的物理现象进行分析和推理,获得结论;能使用简单和直接的证据表达自己的观点;具有质疑和创新的意识
水平 3	能在熟悉的问题情境中根据需要选用恰当的模型解决简单的物理问题;能对常见的物理现象进行分析和推理,获得结论并作出解释;能恰当使用证据表达自己的观点;能对已有观点提出质疑,从不同角度思考物理问题
水平 4	能将实际问题中的对象和过程转换成物理模型;能对综合性物理问题进行分析和推理,获得结论并作出解释;能恰当使用证据证明物理结论;能对已有结论提出有依据的质疑,采用不同方式分析解决物理问题
水平 5	能将较复杂实际问题中的对象和过程转换成物理模型;能在新的情境中对综合性物理问题进行分析和推理,获得正确结论并作出解释;能考虑证据的可靠性,合理使用证据;能从多个视角审视检验结论,解决物理问题具有一定的新颖性
	科学探究
水平 1	具有问题意识;能在他人指导下使用简单的器材收集数据;能对数据进行初步整理;具有与他人交流成果、讨论问题的意识
水平 2	能观察物理现象,提出物理问题;能根据已有的科学探究方案,使用基本的器材获得数据;能对数据进行整理,得到初步的结论;能撰写简单的报告,陈述科学探究过程和结果
水平 3	能分析物理现象,提出可探究的物理问题,作出初步的假设;能在他人帮助下制订科学探究方案,使用基本的器材获得数据;能分析数据,发现特点,形成结论,尝试用已有的物理知识进行解释;能撰写实验报告,用学过的物理术语、图表等交流科学探究过程和结果
水平 4	能分析相关事实或结论,提出并准确表述可探究的物理问题,作出有依据的假设;能制订科学探究方案,选用合适的器材获得数据;能分析数据,发现其中规律,形成合理的结论,用已有的物理知识进行解释;能撰写完整的实验报告,对科学探究过程与结果进行交流和反思

(续表)

水 平	科 学 探 究
水平 5	能面对真实情境,从不同角度提出并准确表述可探究的物理问题,作出科学假设;能制订有一定新意的科学探究方案,灵活选用合适的器材获得数据;能用多种方法分析数据,发现规律,形成合理的结论,用已有的物理知识进行科学解释;能撰写完整规范的科学探究报告,交流、反思科学探究过程与结果
	科学态度与责任
水平 1	认识到物理学是对自然现象的描述与解释;对自然界有好奇心,知道学习物理需要实事求是,有与他人合作的意愿;知道科学·技术·社会·环境存在相互联系
水平 2	认识到物理学是基于人类有意识的探究而形成的对自然现象的描述与解释,并需要接受实践的检验;有学习物理的兴趣,具有实事求是的态度,能与他人合作;认识到物理研究与应用会涉及道德与规范问题,了解科学·技术·社会·环境的关系
水平 3	认识到物理研究是建立在观察和实验基础上的一项创造性工作;有较强的学习和研究物理的兴趣,能做到实事求是,在合作中能尊重他人;认识到物理研究与应用应考虑道德与规范的要求,认识到人类在保护环境和促进可持续发展方面的责任
水平 4	认识到物理研究是一种对自然现象进行抽象的创造性的工作;有学习和研究物理的内在动机,坚持实事求是,在合作中既能坚持观点又能修正错误;能依据普遍接受的道德与规范认识和评价物理研究与应用,具有保护环境、节约资源、促进可持续发展的责任感
水平 5	认识到物理学是人类认识自然的方式之一,是不断发展的,具有相对持久性和普适性,但同时也存在局限性;有较强的学习和研究物理的内在动机,能自觉抵制违反实事求是的行为,在合作中既能主动参与又能发挥团队作用;在进行物理研究和应用物理成果时,能自觉遵守普遍接受的道德与规范,养成保护环境、节约资源、促进可持续发展的良好习惯

摘自《普通高中物理课程标准(2017年版 2020年修订)》

说 明

本书根据教育部颁布的《普通高中物理课程标准(2017年版2020年修订)》和高中物理教科书编写,经上海市中小学教材审查委员会审查准予使用。

编写过程中,上海市中小学(幼儿园)课程改革委员会专家工作委员会、上海市教育委员会教学研究室、上海市课程方案教育教学研究基地、上海市心理教育教学研究基地、上海市基础教育教材建设研究基地、上海市物理教育教学研究基地(上海高校“立德树人”人文社会科学重点研究基地)及基地所在单位复旦大学给予了大力支持。马世红、王祖源、陆昉、陈树德、蒋平、冀敏在本书编写的各个阶段审阅了书稿。在此一并表示感谢!

欢迎广大师生来电来函指出书中的差错和不足,提出宝贵意见。出版社电话:021-64848025。

声明 按照《中华人民共和国著作权法》第二十五条有关规定,我们已尽量寻找著作权人支付报酬。著作权人如有关于支付报酬事宜可及时与出版社联系。

经上海市中小学教材审查委员会审查
准予使用 准用号 II - GJ - 2022028



绿色印刷产品

ISBN 978-7-5478-5977-3

A standard linear barcode representing the ISBN number.

9 787547 859773 >

定价：30.00 元