

普通高中

WULI

物理

教学参考资料

必修

第二册

上海科学技术出版社

普通高中

物 理
教学参考资料

必修 第二册

上海科学技术出版社

主 编：蒋最敏 高 景

本册主编：朱 璨

编写人员：（以姓氏笔画为序）

朱 璨 李希凡 杨鸣华 杨 炯 徐建军 廖 灿 谭一宁

图书在版编目（C I P）数据

普通高中物理教学参考资料：必修. 第二册 / 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，2022.2 (2025.1重印)

ISBN 978-7-5478-5559-1

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. ①G633.73

中国版本图书馆CIP数据核字(2021)第233862号

责任编辑：金波艳

封面设计：房惠平

普通高中 物理教学参考资料 必修 第二册

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 上海中华印刷有限公司

版 次 2022 年 2 月第 1 版

印 次 2025 年 1 月第 4 次

开 本 890 毫米×1240 毫米 1/16

印 张 10.75

字 数 290 千字

书 号 ISBN 978-7-5478-5559-1/G·1084

定 价 33.00 元

版权所有·未经许可不得采用任何方式擅自复制或使用本产品任何部分·违者必究
如发现印装质量问题或对内容有意见建议，请与本社联系。电话：021-64848025

编写说明

本书是《普通高中教科书 物理 必修 第二册》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 先在章首对该章学习内容及展开逻辑进行简单说明,再以节为单位编写,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:节首图的情境设置、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。

本章练习部分解读 与《普通高中教科书 物理练习部分 必修 第二册》同步,设置了“参考解答”和“习题主要素养与水平分析”。

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 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

第五章 曲线运动	1
第一部分 整章分析	1
第二部分 本章教材解读	2
第一节 曲线运动	3
第二节 平抛运动	8
第三节 圆周运动	16
第四节 向心力 向心加速度	23
第五节 圆周运动的应用	31
第三部分 本章练习部分解读	43
第四部分 本章实验与活动部分解读	50
第六章 万有引力定律	52
第一部分 整章分析	52
第二部分 本章教材解读	53
第一节 行星的运动	54
第二节 万有引力定律	59
第三节 万有引力定律的应用	64
第三部分 本章练习部分解读	76
第七章 机械能守恒定律	80
第一部分 整章分析	80
第二部分 本章教材解读	81

第一节 功	82
第二节 功率	90
第三节 动能 动能定理	97
第四节 重力势能	103
第五节 机械能守恒定律	111
第三部分 本章练习部分解读	125
第四部分 本章实验与活动部分解读	131

第八章 牛顿力学的局限性与相对论初步	132
第一部分 整章分析	132
第二部分 本章教材解读	133
第一节 牛顿力学的局限性	134
第二节 相对论初步	139
第三节 宇宙的起源与演化	152
第三部分 本章练习部分解读	161

第五章 曲线运动

第一部分 整 章 分 析

学习目标

1. 初步形成曲线运动的概念,能用平抛运动、匀速圆周运动的规律解释或解决生活中的简单问题。
2. 通过观察和实验了解曲线运动,知道物体做曲线运动的条件,认识平抛运动、匀速圆周运动的规律,体验将复杂运动分解为简单运动的物理思想,体会物理学中实验过程和理论推导的方法,以及化繁为简的研究方法。
3. 通过探究平抛运动特点的实验和探究向心力大小与半径、角速度、质量关系的实验,学会设计实验方案,进行实验并获得数据、分析数据,进而归纳出实验结论、作出解释。能撰写简单的实验报告。
4. 结合车辆转弯、离心现象和分子速率测定等与生活实际及科技研究相关的事例分析,知道科学、技术、社会之间存在密切的关系。

编写意图

课程标准中对本章内容的要求为:

2. 2. 1 通过实验,了解曲线运动,知道物体做曲线运动的条件。
2. 2. 2 通过实验,探究并认识平抛运动的规律。会用运动合成与分解的方法分析平抛运动。体会将复杂运动分解为简单运动的物理思想。能分析生产生活中的抛体运动。
2. 2. 3 会用线速度、角速度、周期描述匀速圆周运动。知道匀速圆周运动向心加速度的大小和方向。通过实验,探究并了解匀速圆周运动向心力大小与半径、角速度、质量的关系。能用牛顿第二定律分析匀速圆周运动的向心力。了解生产生活中的离心现象及其产生的原因。

本章内容是在直线运动规律的知识基础上进行曲线运动的学习,在拓展对运动多样性的认识和分析过程中,深化对位移、速度、加速度等重要概念的理解,进一步提升关于力与运动关系的认识。

本章从生活中的曲线运动如投出篮球的运动等事例开始,引导学生了解曲线运动的特点。通过“自主活动”“大家谈”等栏目,经历将具体运动抽象的过程,认识曲线运动的速度方向、受力情况等规律,认识描述匀速圆周运动的线速度、角速度等物理量;通过研究平抛运动、匀速圆周运动等运动形式,体会物理学中实验和理论推导的方法,以及化繁为简的研究方法;结合车辆转弯、离心现象和分子速率测定等事例的分析,体会曲线运动规律与实际问题的联系。本章重点关注从现象归纳规律、运用规律解释现象的认知过程。

本章内容的学习要注重对运动观念的进一步提升,还应注重创设运用物理规律解释或解决实际问题的情境,为分析实际生活中的复杂运动奠定基础。

完成本章内容的学习,共需要 9 课时。其中,第一节 1 课时,第二节 2 课时,第三节 2 课时,第四节 2 课时,第五节 2 课时。

第二部分 本章教材解读

过山车是一种常见的游乐设施，很多学生都体验过这个项目，能回味在随过山车一起做曲线运动时惊险和异样的感受。用此图作为本章的情境引入可以使学生产生共鸣，激发学习曲线运动的兴趣。

同时，在学习圆周运动的应用时，可以运用此运动模型进一步讨论在竖直平面内圆周运动轨道的最高点与最低点的动力学规律。



图示为游乐场内过山车的照片。过山车是一种颇受人们欢迎的游乐项目，过山车上的游客随过山车沿轨道做曲线运动。曲线运动与之前学过的直线运动有不同的特点，具有更复杂的规律。过山车上的游客在运动过程中的速度、加速度是如何变化的？受力情况又是怎样的？

第五章 曲线运动

- 在本章中我们将：
 1. 了解物体的曲线运动及其条件，认识平抛运动规律，用线速度、角速度和周期等概念描述匀速圆周运动。
 2. 通过实验探究平抛运动和匀速圆周运动的规律。
 3. 运用运动合成与分解的方法分析生活中的抛体运动，运用牛顿第二定律分析匀速圆周运动，了解离心现象及其成因。
- 本章的学习中将用到匀变速直线运动的规律和牛顿第二定律。
- 本章的学习有助于运动观念的进一步提升，并为分析实际生活中的复杂运动奠定基础。

[1]



图 5-1 滑雪

第一节 曲线运动

在日常生活中，物体的运动轨迹一般是比较复杂的曲线。物体沿曲线所做的运动叫曲线运动（curvilinear motion）。图 5-1 中的滑雪运动员、图 5-2（a）中投出的篮球和图 5-2（b）中行驶的自行车所做的运动都是曲线运动。



图 5-2 常见的曲线运动

本节编写思路

本节通过滑雪、投出的篮球及行驶的自行车等图片，用生活中常见事例为引导，引出本节讨论的主题，建立曲线运动的概念。

通过演示实验、“自主活动”等环节，让学生了解做曲线运动物体的速度方向及物体做曲线运动的条件，进而思考曲线运动有何规律等问题。

通过介绍伽利略对曲线运动的研究方法，引出运动合成与运动分解的研究思路，让学生体会将复杂运动分解为简单运动的物理思想。

在学习过程中所经历的观察、实验、思辨等过程，有助于学生掌握研究方法、理解运动规律、解释常见的曲线运动，以及探讨生产生活中的复杂运动等。

正文解读

[1] 滑雪运动是学生熟知的曲线运动。本节利用滑雪运动图片引出曲线运动的情境，使学生感知曲线运动的速度方向是变化的，这正是本节要讨论的重点。

[1] 此处设置“自主活动”是为了使学生能直观地观察到，做曲线运动的物体在某点的瞬时速度方向沿曲线在该点的切线方向，而且各点的速度方向是不同的。这种现象意味着陀螺边缘任意一点在运动过程中的速度是变化的，说明做曲线运动的物体具有加速度。

在纸板陀螺的实验中，可以先使纸板陀螺在水平放置的白纸上旋转，待其旋转稳定后再用滴管将墨水滴到陀螺边缘，就可观察到墨水飞出，并在白纸上留下径迹。

[2] 通过分析做曲线运动的篮球的受力情况，得出其所受合力方向与运动方向不同。根据牛顿第二定律，得出其加速度方向与速度方向不同，从而得出物体做曲线运动的条件。

通过分析和演绎得出重要结论的方法，将有助于提高学生运用已有物理原理进行模型建构、科学推理等方面的能力。

[3] 此处设置“自主活动”是为了让学生进一步体验物体是如何做曲线运动的，深刻体验物体做曲线运动的条件，同时培养学生的实验探究能力和发散思维能力。

活动可按以下步骤进行：①让乒乓球沿斜面滚下做直线运动；②在垂直于其运动轨迹的方向吹乒乓球，观察它的运动轨迹；③试着在不同位置吹，直到乒乓球经过指定位置；④总结吹乒乓球成功入位的经验。通过此活动的探究过程，可启发学生如何把物体沿某一曲线的运动与其沿两个不同方向上的分运动联系起来，为形成运动合成相关概念做铺垫。

② 如何确定做曲线运动物体速度的方向？

[1]

自主活动

如图 5-3 所示，用牙签和圆形硬纸板制作一个纸板陀螺，在纸板边缘滴上墨水，将陀螺放在白纸上，旋转陀螺使墨水飞出，观察墨水在白纸上留下的径迹。



图 5-3 纸板陀螺

可以观察到，墨水沿圆纸板的切线方向飞出。

大量事实表明，做曲线运动的物体，其速度的方向是时刻改变的，物体在某一点的瞬时速度方向沿曲线在该点的切线方向，如图 5-4 所示。

速度是矢量，不论速度的大小是否改变，只要速度的方向改变，就表示速度发生了变化，所以曲线运动是变速运动，做曲线运动的物体具有加速度。



图 5-4 曲线运动速度的方向

② 物体做曲线运动的条件是什么？

[2]

对投出的篮球进行分析，可以发现篮球受到的重力与速度方向是不同的，如图 5-5 所示。

根据牛顿第二定律，物体的加速度方向与物体受到的合力方向一致。当合力的方向与速度方向不同时，加速度方向也就与速度方向不同，物体运动的速度方向就会发生改变而做曲线运动。

可见，物体做曲线运动的条件是：物体所受合力的方向与其速度方向不在同一直线上。



图 5-5 重力使投出的篮球做曲线运动

[3]

自主活动

在水平桌面上，一个乒乓球沿斜面滚下后做直线运动。如图 5-6 所示，从侧面用力吹乒乓球，使乒乓球运动经过指定位置，应该如何吹才能完成任务？



图 5-6 吹乒乓球

如何研究曲线运动?

早在 17 世纪,伽利略就已经提出了研究曲线运动的方法,他认为可以把曲线运动分解为两个相互垂直方向的运动。设想石块从一艘匀速行驶的帆船桅杆顶部下落;并假定当船停着不动时,石块从桅杆顶部落到甲板需要的时间相当于脉搏跳动 2 次的时间。当船向前匀速航行时,使石块从桅杆顶部同一位置落下,石块落到甲板上时间不变,石块的运动轨迹就是一条曲线,如图 5-7 所示。

石块所做的曲线运动可看成是由竖直方向的自由落体运动和水平方向的匀速直线运动组合而成的。这两个运动称为石块的分运动,而它们的合运动就是石块所做的曲线运动。

在研究曲线运动时,通常把它看成两个简单直线运动的组合,从而使问题变得容易研究。

既然一个运动可以看成两个分运动的组合,那么只要知道每个分运动的规律,就可以得到合运动的规律。由于描述物体运动的位移、速度和加速度等物理量都是矢量,那么,两个分运动在一段时间内的位移、速度和加速度等物理量的矢量和就是该段时间内物体合运动的位移、速度和加速度。这种已知分运动求合运动的方法,称为运动的合成。

反之,由已知的合运动求分运动的方法,称为运动的分解。

把石块开始下落的点设为坐标原点 O ,以水平向右和竖直向下分别为 x 轴和 y 轴的正方向建立平面直角坐标系,如图 5-8 所示。然后,分别研究 x 轴、 y 轴这两个方向的分运动——直线运动的规律,得出两个分运动的位移、速度和加速度。最后根据矢量合成的平行四边形定则,得到石块合运动的位移、速度和加速度。

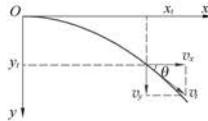


图 5-8 运动的分解与合成

特性:

- (1) 运动独立性:各分运动之间是互不相干的,即各个分运动均按各自规律运动,彼此互不影响。因此在研究某个分运动时,不需要考虑其他分运动。
- (2) 运动等时性:各个分运动与合运动总是同时发生,同时结束,经历相等的时间。因此,若已知某一分运动的时间,也就知道了其他分运动经历的时间;反之亦然。
- (3) 运动等效性:各个分运动叠加起来的效果就是合运动,描述运动的物理量如位移、速度、加速度等,均为各分运动物理量的矢量和,这就是运动的叠加原理。

[1]

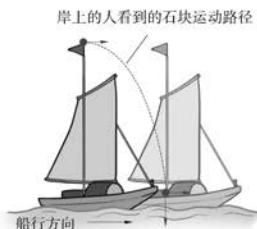


图 5-7 行驶的帆船

[2]

助一臂

运动的叠加原理 一个运动可以看成两个或几个运动的合成或叠加,这两个或几个运动是同时进行的且互不干扰。

[1] 教材图 5-7 中“行驶的帆船”的问题早在 17 世纪前就有不少学者做了思考和解释。伽利略利用他的惯性原理解释了这个问题。对于站在岸上的观察者来说,在帆船停靠在岸边和匀速行驶的两种情况下,石块的运动是不同的。当帆船停靠在岸边时,站在岸上的观察者看到石块做自由落体运动;当帆船匀速行驶时,石块不仅在竖直方向做自由落体运动,而且由于惯性,它同时还要沿水平方向做匀速直线运动,因此它的运动路径是图中虚线所示,是这两个运动的合成。

利用伽利略的思路,可引出研究曲线运动的方法,即可把它看成两个简单直线运动的组合的科学方法。

[2] 此处设置“助一臂”是为了说明运动合成与分解的基本原理,包括如下运动的

[1] 此处设置“自主活动”是对前面学习的运动合成与分解方法的应用。通过对“渡江问题”的分析和讨论，感受运用运动合成与分解的方法对研究比较复杂的运动的重要性，为后续研究平抛运动打下基础。

参考答案：轮船实际航向为偏向江水流动方向，与江岸夹角约 63.4° ；轮船相对于岸的速度大小约为 13.4 km/h ；轮船将行驶到对岸沿江水流动方向下游 100 m 处。

问题与思考解读

1. 参考解答：见图1(受到重力G竖直向下；速度v沿篮球运动轨迹的切线方向向前)

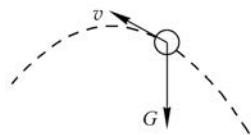


图 1

命题意图：通过实例分析与作图，体会物体做曲线运动时受到偏离运动方向的力的作用，其速度方向必将改变。

主要素养与水平：运动与相互作用(I)；模型建构(I)。
2. 参考解答：铅球水平方向的分速度为 $v_x = v \cos 30^\circ \approx 8.66 \text{ m/s}$ ，竖直方向的分速度为 $v_y = v \sin 30^\circ = 5 \text{ m/s}$ 见图2

命题意图：通过对速度分解的计算与作图，体会用运动分解法研究实际运动的方法。

主要素养与水平：运动与相互作用(I)；模型建构(I)。
3. 参考解答：对质点施加力F后，质点受到的合力就为F，它与质点原运动方向不在一条直线上。由F的方向推断，此后该质点的运动轨迹最接近图中的BQ虚线

命题意图：体验运用曲线运动产生的条件分析与判断质点的运动轨迹。

[1]

自主活动

设江水的流速为 6 km/h ，轮船在静水中行驶的速度为 12 km/h 。当驾驶员驾驶轮船垂直向对岸方向航行时，轮船实际行驶的方向如何？速度大小为多少？如果江面宽 200 m ，轮船将行驶到对岸何处？

可见，在研究比较复杂的运动问题时，运用运动合成与分解的方法往往是十分有效的。同时，这一方法的运用要注意合运动与分运动之间、各分运动之间都具有等时性的特点。

问题与思考

- 如图5-9所示，图中的虚线为某同学投出篮球的运动轨迹。请标出篮球在图示位置所受的力和速度矢量。
- 运动员以 10 m/s 的速度沿与水平面夹角为 30° 的方向斜向上推出一铅球。这个速度在水平方向和竖直方向的分速度分别是多大？画出速度分解的图示。
- 如图5-10所示，一质点沿AB方向做匀速直线运动，当质点运动到B点时加上一个力F。此后该质点的运动轨迹最接近图中哪条虚线，简述理由。
- 一艘渡船在宽为d的河中航行。现从码头出发，船头垂直于河岸，以速度v匀速向对岸行驶。问：
 - 若河水的流速处处为u，渡船将停靠在对岸哪个位置？
 - 若越靠近河中央水的流速越大，试定性画出该船行驶的轨迹示意图。
- 某飞机以 30° 仰角起飞，起飞时初速度大小为 100 m/s 。假设其做加速度大小为 1 m/s^2 的匀加速直线运动。则：
 - 起飞后 10 s 末飞机离地多高？
 - 此时刻飞机距起飞点的水平距离为多少？
- 在学校趣味运动会“运动击杆”的比赛中，要求运动员坐在一辆由西向东运动的小车上抛出一小球，击中位于小车左侧（北边）路边的一根旗杆。运动员应如何抛出小球才能击中目标？试画出示意图并说明理由。



图 5-9

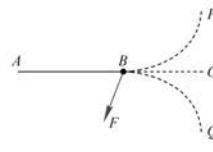


图 5-10

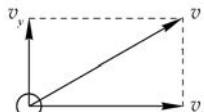


图 2

主要素养与水平: 运动与相互作用(I); 科学推理(I)。

- 4. 参考解答:** (1) 渡船将停靠在对岸沿河水流动方向下游距码头正对岸 $s = \frac{ud}{v}$ 处 (2) 见图 3

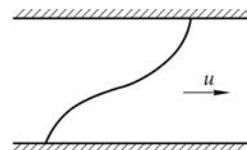


图 3

命题意图: 体验运用运动合成与分解的方法研究问题,运用各分运动具有等时性的特点研究较复杂的运动,为后续学习平抛运动的轨迹做准备。

主要素养与水平: 运动与相互作用(II); 科学推理(II)。

- 5. 参考解答:** (1) 根据匀加速直线运动规律, $s = v_0 t + \frac{1}{2} a t^2 = 1050 \text{ m}$, 所以飞机离地面高度为 $h = s \sin 30^\circ = 525 \text{ m}$ (2) 距起飞点的水平距离为 $x = s \cos 30^\circ \approx 909.33 \text{ m}$

命题意图: 运用运动合成与分解的思路和方法解决物体做匀变速运动时的实际问题。

主要素养与水平: 运动与相互作用(II); 模型建构(II); 科学推理(II)。

- 6. 参考解答:** 应在小车尚未到达旗杆正前方之前抛出小球;且需控制好抛出的速度大小,使小球的水平(合)运动恰好对着旗杆 见图 4

命题意图: 在实际的运动情境中,运用运动合成与分解的方法进行模型建构、问题分析及实践探究。

主要素养与水平: 模型建构(III); 科学推理(II); 科学论证(II)。

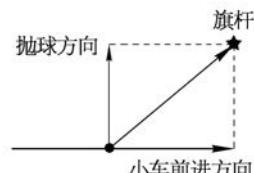


图 4

本节编写思路

本节通过节首图瀑布顶端飞出的水滴,以及上抛的乒乓球、水平击出的排球、斜向上踢出的足球等所做的运动引出抛体运动的概念,进而提出平抛运动的概念。用生活中常见的事例引出本节讨论的主题,建立平抛运动的概念,对学生而言是比较直观的。

通过“平抛运动有什么规律?”的问题,引导学生根据运动合成与分解的思想探究平抛运动的特点,并根据数据分析结果归纳得出结论。依据实验结论,运用运动合成与分解的方法,通过演绎推理,得到平抛运动的位移和速度的规律。

生活中很多熟悉的运动都可以被视为抛体运动。经历平抛运动规律的探究过程将提升从实验中获取信息、处理信息,以及归纳实验结论的能力,体会物理学中实验探究和理论推导的方法,以及化繁为简的研究方法。

学习过程中经历的观察、实验、思辨等过程,有助于学生掌握运动规律和研究方法,并用来解释和描述常见的平抛运动,为日常生活提供指导。

正文解读

[1] 黄果树瀑布是我国著名景点之一。利用黄果树瀑布的照片引出平抛运动的情境,能使学生初步感知什么是平抛运动,以及平抛运动的轨迹形状和运动特点。这正是本节要讨论的重点。

[1]



图 5-11 黄果树瀑布

第二节 平抛运动

如图 5-12 所示,将乒乓球向上抛出,将排球水平击出,将足球斜向踢出,这种以一定速度抛出,在空气阻力可以忽略、只在重力作用下的运动叫做抛体运动。若抛出物体的初速度沿水平方向,该物体的运动叫做平抛运动。图 5-11 中瀑布顶端飞出的水滴,图 5-12 (b) 中水平击出的排球所做的运动,都可以近似看作平抛运动。



图 5-12 常见的抛体运动

平抛运动有什么规律?

复杂的曲线运动可以看成是两个或多个简单运动的合成。下面,我们用运动合成与分解的方法通过实验来探究平抛运动的规律。

学生实验

[1]

探究平抛运动的特点**提出问题**

平抛运动有何特点？

实验原理与方案

做平抛运动的物体初速度沿水平方向，只受重力作用，可以将平抛运动分解为水平和竖直方向上的两个直线运动来研究。

实验装置与方法

如图 5-13 所示的装置包含摆锤、弹性金属片和两个小球。当摆锤敲击弹性金属片时，小球 A 和 B 同时开始运动，小球 A 由于受到水平撞击做平抛运动，而小球 B 从原处落下做自由落体运动。通过比较做平抛运动和自由落体运动的小球落地先后，探究平抛运动竖直方向分运动的规律。

如图 5-14 所示的装置包含底部水平的斜槽、可以固定方格纸和复写纸的竖直板，以及可以上下移动的带凹槽的挡板。当小球从斜槽水平飞出后落在挡板的凹槽中时，由于小球受到凹槽的挤压会通过复写纸在方格纸上留下落点的位置。通过小球落点的位置，探究平抛运动水平方向分运动的规律。

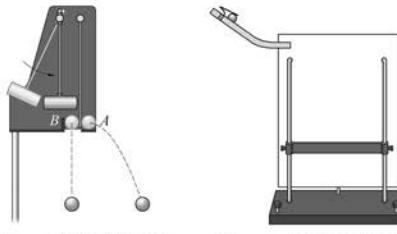
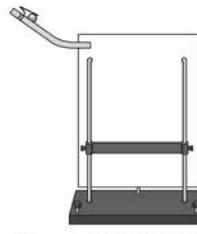
实验操作与数据收集

(1) 将摆锤拉开一定角度后释放，摆锤击中弹性金属片，记录两个小球落地的先后。分别改变摆锤的释放角度和小球距地面的高度，重复实验，将数据结果记录到表 5-1 中。

表 5-1 实验数据记录表

实验序号	1	2	3	4	5
两个小球落地的先后					

(2) 在竖直板上依次附上方格纸和复写纸，记录小球飞出点的位置，并标上水平方向和竖直方向。将挡板固定在某一高度，让小球由静止沿斜槽滚下，记录小球的落点位置；改变挡板的高度，使小球从斜槽的同一高度由静止滚下，再次记录小球的落点位置；重复实验，可以在方格纸上得到小球平抛运动过程中的多个落点位置。

图 5-13 探究平抛运动
竖直方向分运动的规律图 5-14 探究平抛运动
水平方向分运动的规律

[1] “探究平抛运动的特点”的实验由两部分内容组成，分别为探究平抛运动竖直方向分运动的规律和探究平抛运动水平方向分运动的规律。

教材图 5-13 所示的实验装置是通过比较平抛小球 A 和自由落体小球 B 的下落时间得出平抛运动竖直方向分运动的规律。开始实验前，弹性金属片所夹的小球 B 必须与小球 A 处在同一高度；摆锤敲击弹性金属片时必须使小球 A 和小球 B 同时开始运动。

教材图 5-14 所示的实验装置可以用来获取小球一次平抛运动的轨迹，然后分析小球的运动轨迹坐标，得出平抛运动水平方向分运动的规律。实验要注意的事项有：① 保证竖直板处于竖直平面内；② 保证小球水平抛出；③ 因为是研究小球的“一次”平抛运动，小球

在斜槽上必须从同一位置由静止释放；④ 为精确描述平抛运动的轨迹，必须合理选取一定数量的落点位置。

此实验要注重对学生实验设计、实验观察、实验条件控制和实验操作技能的培养，通过此实验使学生进一步提升实验探究能力。

[1] 在数据分析时要注意：① 建立直角坐标系时，原点必须是小球抛出点的球心位置（不是斜槽底部的端点位置）；② 根据实验记录的位置点拟合平抛运动轨迹时，要光滑连接各点形成一条平滑的曲线；③ 实验记录的小球各位置点并不是连续相等时间间隔的点，数据分析时，必须在上述获得的平滑曲线上，根据竖直方向自由落体的运动规律选取一组时间间隔相等的点作为数据分析点。

通过数据处理和分析可得到实验结论：平抛运动水平方向的分运动是匀速直线运动。

[2] 采用电磁定位板是“探究平抛运动的特点”实验的另一方案，有条件的学校可以采用。实验操作时要注意：① 用水平仪调节电磁定位板上边沿至水平；② 平抛物体的顶盖

面必须正对电磁定位板，即亮灯一面朝外，否则数据点的位置有漂移；③ 重复实验时，每次打开信号源后应重新设置零点位置；④ 平抛物体落入接球槽后，应避免反弹。

[3] 在学生实验得出结论的基础上，要强调平抛运动的加速度就是重力加速度，平抛运动是一种匀变速曲线运动。然后，运用数形结合的方法进行分析和演绎，进一步从理论上推演得出平抛运动的位移公式和位移方向规律。通过分析和演绎得出重要结论，有助于模型建构、科学推理能力的提高。

数据分析

比较做平抛运动和自由落体运动的小球落地先后，归纳平抛运动竖直方向分运动的规律。

[1] 用平滑曲线连接各落点位置，得到小球做平抛运动的轨迹。以小球飞出点为原点，建立合适的平面直角坐标系。根据竖直方向分运动的规律，设法在轨迹上取一组时间间隔相等的点，根据这些点的坐标，分析平抛运动水平方向分运动的规律。

实验结论

平抛运动竖直方向上的分运动为_____；水平方向上的分运动为_____。

交流与讨论

各组就数据分析的具体过程进行交流，比较、分析实验结果的异同及其原因。

[2] 本实验也可选用如图 5-15 所示的装置，包含电磁定位板、弹射器、平抛物体（含信号源）、接球槽等。平抛物体被弹射器水平射出后，每隔相同的时间发射一次信号，电磁定位板接收信号并记录该时刻平抛物体的位置信息，通过计算机对采集到平抛物体的位置信息进行处理，即可得到平抛物体在水平方向和竖直方向分运动的规律。

[3] 通过大量实验，我们发现平抛运动可以分解为水平方向的匀速直线运动和竖直方向的自由落体运动。可见，平抛运动的加速度就是重力加速度，所以平抛运动是一种匀变速曲线运动。

如何描述做平抛运动物体的位移和速度？

如图 5-16 所示，对一个做平抛运动的物体，我们以抛出点为坐标原点、水平抛出的初速度方向为 x 轴正方向、竖直向下为 y 轴正方向，建立平面直角坐标系。物体做平抛运动的规律就可以用 x 轴和 y 轴两个方向的分运动的规律来表示。

通常将物体由原点沿 x 轴正方向抛出的时刻作为初始时刻，则经过时间 t，做平抛运动的物体在 x 轴和 y 轴方向的分运动的位移随时间 t 变化的规律分别为

$$x = v_0 t$$

$$y = \frac{1}{2} g t^2$$

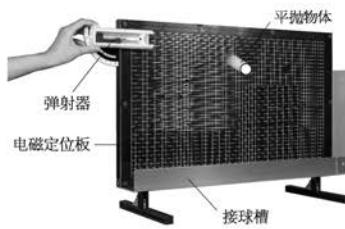


图 5-15 探究平抛运动的另一种装置

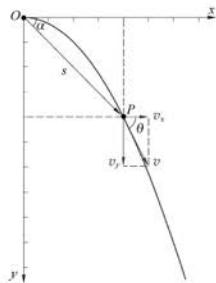


图 5-16 平抛运动的分解

物体做平抛运动的位移是这两个分运动位移的矢量和。根据平行四边形定则，位移的大小为

$$s = \sqrt{x^2 + y^2}$$

位移方向可用其与 x 轴的夹角 α 表示，则

$$\tan \alpha = \frac{y}{x} = \frac{gt}{2v_0}$$

由于将抛出时刻作为初始时刻，做平抛运动的物体在任一时刻沿 x 轴和 y 轴两个分运动的速度大小分别为

$$v_x = v_0$$

$$v_y = gt$$

[1] 根据平行四边形定则，物体在该时刻的速度是两个分运动速度的矢量和，其大小为

$$v = \sqrt{v_x^2 + v_y^2} = \sqrt{v_0^2 + (gt)^2}$$

速度方向可用其与 x 轴的夹角 θ 表示，则

$$\tan \theta = \frac{v_y}{v_x} = \frac{gt}{v_0}$$

[2]

大家谈

距地面相同高度，将几个物体以不同的初速度自同一点水平抛出，这些物体飞行的时间相等吗？

[3]

拓展视野

根据平抛运动在 x 轴、y 轴两个方向分运动的位移公式 $x = v_0 t$ 、 $y = \frac{1}{2} g t^2$ ，消去时间 t ，就可以得到 y 与 x 之间的关系： $y = \frac{g}{2v_0^2} x^2$ 。在该式中，重力加速度 g 与平抛初速度 v_0 都不随时间变化，即 $\frac{g}{2v_0^2}$ 与 x 、 y 无关，因此，上式具有二次函数 $y = ax^2$ 的形式。数学中把二次函数的图像叫抛物线，就是从抛体运动而来的。

[4]

示例 如图 5-17 所示，一架小型运输机以 $v_0 = 180 \text{ km/h}$ 的速度水平飞行，在 $h = 320 \text{ m}$ 高空向灾区投放救灾物资包。(不计空气阻力， g 取 10 m/s^2)

[1] 同样，运用数形结合的方法进行分析和演绎，推演得出平抛运动的速度公式和速度方向规律。

[2] 此处设置“大家谈”是为了在演绎平抛运动位移和速度的规律后进一步理解平抛运动的时间由高度决定，强化合运动与分运动具有独立性和等时性。

参考答案：这些物体飞行的时间相等。

[3] 此处设置“拓展视野”是为了让学生了解平抛运动的轨迹是抛物线。平抛运动轨迹方程的得出主要是数学推演过程，在推演过程中要注意体现数形结合，更要注意从物理的角度理解平抛运动的轨迹方程。教师可根据学生情况提出问题：①若初速度增大，轨迹形状会如何变化？②若在重力加速度较小的环境中，轨迹形状又将如何变化？

[4] 例题的设置是为了让学生认识平抛运动的普遍性，体会物理学在实际生活中的应用价值。例题示范的教学过程是在教师的引导下，提炼出解决问题的程序和规范，让学生逐步提升运用物理规律解决实际问题的能力。

[1] 解这类题的基本过程是：① 对研究对象进行运动和受力分析，确定其满足做平抛运动的条件；② 建立直角坐标系；③ 在两个分运动的方向上，分别运用运动学公式建立适当的方程，并得出相应的结果；④ 对分运动进行合成，得到最终结果；⑤ 对得到的结果是否合理进行论证。

(1) 为了将物资包准确投到目标位置，应当在离该位置的水平距离多远处释放物资包？

(2) 物资包落地时，速度的大小和方向如何？

分析：救灾物资包做平抛运动。运用运动分解的方法，可以先算出物资包在竖直方向分运动（自由落体运动）的时间，这就是物资包平抛运动的飞行时间，也是水平方向运动的时间。在这段时间内，运输机水平匀速飞行的距离就是释放物资包的位置与目标位置之间的水平距离。

[1] 解：(1) 物资包被投放后做平抛运动。建立如图 5-17 所示的坐标系，根据平抛运动在竖直方向分运动的规律，物资包在竖直方向的位移 y 与其运动时间 t 的关系为

$$y = \frac{1}{2}gt^2$$

当 $y = h$ 时，物资包落到地面，可知救灾物资包的飞行时间

$$t = \sqrt{\frac{2y}{g}} = \sqrt{\frac{2h}{g}} = \sqrt{\frac{2 \times 320}{10}} \text{ s} = 8 \text{ s}$$

根据平抛运动在水平方向分运动的规律，可知物资包投放后到达目标位置的水平位移

$$x = v_0 t$$

又 $v_0 = 180 \text{ km/h} = 50 \text{ m/s}$ ，得

$$x = 50 \times 8 \text{ m} = 400 \text{ m}$$

所以，为准确地将物资包投送到目标位置，应当在离目标位置水平距离 400 m 处提前投放。

(2) 物资包落地时速度的水平分量和竖直分量的大小分别为

$$v_x = v_0, \quad v_y = gt = \sqrt{2gh}$$

因此，物资包落地的速度大小为

$$v = \sqrt{v_x^2 + v_y^2} = \sqrt{v_0^2 + 2gh}$$

代入数据，得

$$v = \sqrt{50^2 + 2 \times 10 \times 320} \text{ m/s} \approx 94.3 \text{ m/s}$$

物资包落地时速度的方向与水平方向夹角 θ 的正切为

$$\tan \theta = \frac{v_y}{v_x} = \frac{\sqrt{2gh}}{v_0}$$

代入数据，得

$$\tan \theta = \frac{\sqrt{2 \times 10 \times 320}}{50} = 1.6$$

故

$$\theta \approx 58^\circ$$

因此，救灾物资包落地时速度的大小为 94.3 m/s，速度的方向与水平面的夹角约为 58° 。

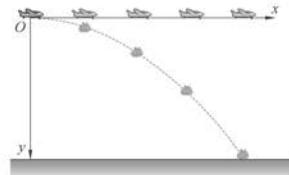


图 5-17 空投物资包

[1]

大家谈

上例分析中忽略了空气阻力的影响。实际的空投作业往往是一项复杂的、需要综合考虑各种因素的工作。如果飞机飞得比较高，救灾物资包会因为落地速度很大而受损。为安全地实施空投，你能否给出一些设想和方案？

问题④思考

- 判断下列物体的运动是否属于抛体运动，并说明理由。
 - 洒水车喷出的水。
 - 运动员推出的铅球。
 - 向空中抛出的一张纸。
 - 竖直向下扔出的一粒石子。
 - 运动员发球时竖直向上抛出的网球。
- 做平抛运动的物体在任意1 s内速度变化量的大小是多少？方向如何？
- 水平匀速飞行的飞机上连续投下一系列物体，站在地面上的人看到的情景是否如图5-18所示？飞机上的人看到的又是怎样的情景？
- 极限运动员想驾驶摩托车以30 m/s的水平初速度做飞越河谷表演，河谷的尺寸如图5-19所示。不计空气阻力，摩托车能否越过该河谷？简述理由。
- 以初速度 v_0 水平抛出一小球，忽略空气阻力。如图5-20所示，某同学画出了该小球经历连续相等时间后速度矢量 v_1 、 v_2 、 v_3 的关系图。对该同学所画的图作出评价。
- 在“探究平抛运动的特点”实验中，某同学得到了如图5-21所示的数据轨迹线，则该平抛运动的初速度大小为多少？

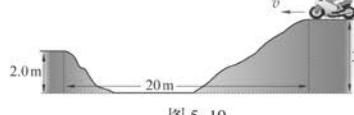


图5-19

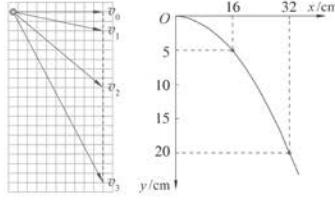


图5-20



图5-18

图5-21

9.8 m/s^2 ，所以其任意1 s内速度变化量的大小为 9.8 m/s ，方向竖直向下。

命题意图：对平抛运动的条件形成有进一步的认识。

主要素养与水平：运动与相互作用(I)；科学推理(I)。

3. 参考解答：是 飞机上的人只看到最后投出的物体，之前投出的物体均被最后一个物体挡住(这些物体处在同一条直线上)

命题意图：理解平抛运动在水平方向的分运动为匀速直线运动，在竖直方向的分运动为自由落体运动。

主要素养与水平：运动与相互作用(I)；模型建构(II)；科学推理(II)。

4. 参考解答：飞越河谷到对岸其竖直高度差为 $h = (3.5 - 2.0) \text{ m} = 1.5 \text{ m}$ ，则根据 $h = \frac{1}{2}gt^2$ 得飞越

[1] 此处设置“大家谈”是为了让学生了解实际的抛体运动往往比较复杂，在运用平抛运动规律解释和解决生产生活中的实际问题时，常需要忽略一些次要因素，是理想化的。这里的问题是开放的，会有多种回答。

问题与思考解读**1. 参考解答：**(1)

(2)(4)(5)中物体的运动可以忽略空气阻力的影响，可看作只受重力作用，属于抛体运动；(3)中的纸张不可忽略空气阻力的作用，不属于抛体运动

命题意图：根据对实际事例的分析，加深理解物体做抛体运动的条件。

主要素养与水平：

运动与相互作用(I)；模型建构(I)。

2. 参考解答：物体做平抛运动的加速度为重力加速度 $g =$

$$\text{时间 } t = \sqrt{\frac{2h}{g}} \approx 0.55 \text{ s,}$$

如果以 30 m/s 的水平初速度飞越河谷, 飞跃的水平距离 $s = v_0 t = 16.5 \text{ m}$, 小于河谷的宽度 20 m , 所以摩托车不能越过该河谷

命题意图: 从题设条件中提取有用的信息, 建立平抛运动模型, 讨论实际问题。

主要素养与水平: 模型建构(I); 科学论证(II); 科学本质(I)。

5. 参考解答: 该图有错。平抛运动水平方向分运动为匀速直线运动, 水平方向的分速度不变, 故图中各时刻速度矢量末端在同一竖直线上是正确的。但因平抛运动竖直方向的分运动是自由落体运动, 在相等时间内速度的增加量是相等的, 即图中小球经历连续相等时间后的速度矢量 v_1 、 v_2 、 v_3 末端在竖直方向的间隔应该相等, 所以该图有错

7. 奥运会 50 m 步枪射击项目所用靶的直径为 154.4 mm 。如图 5-22 所示, 若某步枪运动员沿水平方向射击, 正好对准靶的中心。分析说明:

- (1) 若子弹飞出枪膛的速度为 600 m/s , 能否击中靶?
- (2) 若子弹飞出枪膛的速度为 350 m/s , 能否击中靶?
- (3) 实际射击时, 运动员应该如何瞄准才能取得更好的成绩?

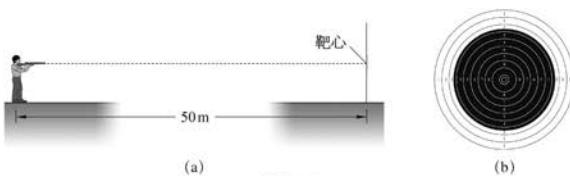


图 5-22

命题意图: 根据平抛运动的规律, 判断速度矢量之间的关系。强化竖直方向分运动的规律。

主要素养与水平: 运动与相互作用(II); 模型建构(II); 质疑创新(II)。

6. 参考解答: 由题设数据分析得, 坐标原点 O 为平抛运动的抛出点。根据 $y = \frac{1}{2}gt^2$, $x = v_0 t$, 得平

$$\text{抛运动的初速度为 } v_0 = x \sqrt{\frac{g}{2y}} \approx 1.58 \text{ m/s}$$

命题意图: 通过对实验数据的分析, 判断物体的运动性质及运动状态, 提升物理实验数据分析的能力。

主要素养与水平: 证据(II); 解释(II)。

7. 参考解答：若忽略子弹飞行时空气阻力的影响，则子弹在空中的运动是平抛运动。根据平抛运动的规律，其水平方向分运动为匀速直线运动 $x = v_0 t$ ，竖直方向分运动为自由落体运动 $y = \frac{1}{2} g t^2$ ，亦即 $y = \frac{1}{2} g \left(\frac{x}{v_0}\right)^2$ 。（1）代入数据，得 $y_1 \approx 0.034 \text{ m} = 34 \text{ mm}$ ，小于靶的半径，所以能击中靶。（2）代入数据，得 $y_2 = 0.10 \text{ m} = 100 \text{ mm}$ ，大于靶的半径，所以不能击中靶。（3）为使子弹击中靶心，运动员瞄准时应考虑子弹飞行时竖直方向有下落的效果，所以应瞄准比靶心略高处。

命题意图：将射击运动中子弹的实际运动抽象为满足条件的平抛运动，体验基于经验事实与物理原理建构物理模型的思想，联系实际学以致用。

主要素养与水平：模型建构（Ⅲ）；科学推理（Ⅲ）；科学论证（Ⅲ）；科学本质（Ⅱ）。

本节编写思路

在学习直线运动、平抛运动的基础上，运用位移、速度等运动学概念来描述匀速圆周运动。

本节内容基于生活中的场景展开，首先根据学生对日常圆周运动现象的认识及运动学概念，建立匀速圆周运动的模型，结合关于圆的数学知识和速度的知识，通过演绎的方式建立线速度的概念；然后通过“大家谈”栏目，引出并建立角速度的概念；之后，根据圆周运动具有重复性这一特点，建立周期的概念；最后，运用数学知识和物理概念的定义演绎推导相关物理量之间的关系。

在建立线速度、角速度、周期等概念并用以描述圆周运动的过程中，学生要运用逻辑推理、数学演绎等思维方法，建构良好的概念体系，进一步形成运动的观点。教师要注意建构积极有意义的情境，帮助学生体会建立物理概念的必要性。

正文解读

[1] 摩天轮是一种大型机械游乐设施。摩天轮边缘挂有供游客乘坐的座舱。乘客坐在座舱内随摩天轮慢慢转动，可以从高处俯瞰四周景色。

本节用摩天轮的图片创设情境，引发学生联想自己参与或看到过的圆周运动，教学中可以结合教材图 5-24 展示一些物体做圆周运动的场景，帮助学生基于生活经验开始本节课的学习，激发学习兴趣。

[1]



图 5-23 摆天轮

第三节 圆周运动

如果物体运动的轨迹是圆周，我们就说物体在做圆周运动。当我们坐在图 5-23 所示的摩天轮上，从高空饱览美丽风光的同时，就正在做圆周运动。

在生产、生活和自然界中，许多过程都涉及圆周运动，例如，图 5-24 (a) 所示的家用洗衣机工作时转筒上的各点，图 5-24 (b) 所示的旋转餐厅的座椅，图 5-24 (c) 所示时钟上时针、分针、秒针上的各点等。



(a)



(b)



(c)

图 5-24 常见的圆周运动

物体做圆周运动时,如果在任意相等时间内通过的弧长总是相等,这种运动就叫做匀速圆周运动 (uniform circular motion)。

做匀速圆周运动的物体每经过一段时间会重复之前的运动状态,匀速圆周运动具有周期性,因此,描述匀速圆周运动的方法与描述直线运动、抛体运动的方法相比,有自己的特点。

如何描述匀速圆周运动的快慢?

- [1] 如图 5-25 所示,做匀速圆周运动的物体从 A 点运动到 B 点,可以用 A、B 两点之间弧长 Δs 与所用时间 Δt 的比来表示速度的大小,即

$$v = \frac{\Delta s}{\Delta t}$$

当 Δt 足够小时,弧 AB 与线段 AB 几乎没有差别, Δs 就等于物体由 A 运动到 B 的位移大小,这时的 v 就是物体在这一位置的瞬时速度大小。

与所有曲线运动一样,物体做圆周运动时,它在任意位置的速度方向就是该位置圆周的切线方向,如图 5-26 所示。

物体做匀速圆周运动的速度大小不变,方向不断变化,因此,匀速圆周运动是变速运动,这里的“匀速”指的是速率不变,即速度大小不变。

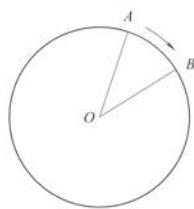


图 5-25 物体沿圆周从 A 运动到 B

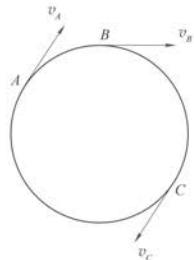


图 5-26 圆周运动的速度方向

- [2]

大家谈 月球绕地球的运动和地球绕太阳的运动,都可近似看成是匀速圆周运动。

地球说:“你怎么这么慢?我绕太阳运动 1 s 能走 29.79 km,你绕我运动 1 s 才走 1.02 km。”

月球说:“你可别这么说,你要用一年时间才绕太阳一圈,我 28 天就走了一圈。到底谁快谁慢?”

关于上述对话,你有什么看法?

描述圆周运动快慢与描述直线运动快慢的方法有所不同,体会从不同角度描述运动,从而完善运动观念。

[1] 教材中,基于匀速圆周运动用弧长与所用时间之比定义线速度的大小,然后根据曲线运动的速度方向确定线速度方向就是所在位置圆周的切线方向。在给出角速度定义之后,再说明为了与角速度有区别,又将圆周运动的速度叫做线速度。

圆周运动是曲线运动的特殊情况,其线速度的定义与曲线运动速度的定义相同,即对平均速度取极限,当 $\Delta t \rightarrow 0$ 时, $\frac{\Delta s}{\Delta t}$ 就是物体在某时刻(或某位置)的瞬时速度,它的大小和方向也就是做圆周运动物体的线速度的大小和方向。

[2] 此处设置“大家谈”是为了让学生通过参与月球和地球运动的相关讨论引出问题——对于同一种运动,从不同角度描述会产生两种截然相反的结论,从而使学生意识到

[1] 小电扇上各点的运动是否一样快的问题再次引发认知冲突，使学生注意到描述圆周运动快慢仅比较单位时间内通过的路程是不够的，还需要从转动的角度来看问题，提出要比较单位时间内转过角度的大小，进而建立角速度的概念。

[2] 角速度是矢量，在圆周运动中，其方向垂直于物体运动所在的平面，与物体运动方向的关系遵循右手螺旋定则，如图 5 所示。线速度和角速度的矢量关系表达式为

$$\mathbf{v} = \omega \times \mathbf{r}$$

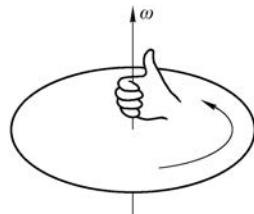


图 5

课程标准中不要求学生了解角速度的方向。关于圆周运动的角量描述可见节后资料链接。

[1] 如图 5-27 所示的小电扇转动时，每个叶片转得一样快，同一叶片上的各点也转得一样快，但是这些点的速度大小不一定相同。

可见，做圆周运动的物体既可看作沿着圆弧做曲线运动，也可看作绕圆心转动，仅用速度来描述圆周运动的快慢是不够的。物理学中用角速度（angular velocity）来描述物体转动的快慢。

[2] 如图 5-28 所示，做匀速圆周运动的物体从 A 点运动到 B 点，可以用圆弧 AB 所对应的圆心角 $\Delta\varphi$ 与所需时间 Δt 的比来表示角速度大小。角速度用 ω 表示，则有

$$\omega = \frac{\Delta\varphi}{\Delta t}$$

在国际单位制中，角度的单位是弧度（rad），时间的单位是秒（s），角速度的单位是弧度/秒（rad/s）。

做匀速圆周运动物体的角速度保持不变。

研究圆周运动时，为了区别于角速度 ω ，速度 v 又可叫做线速度（linear velocity）。



图 5-27 小电扇

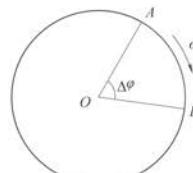


图 5-28 匀速圆周运动的角速度

拓展视野

角的单位制有角度制和弧度制两种。

弧度制规定圆周上长度等于半径的一段弧长所对的圆心角为 1 rad，圆周所对的圆心角为 2π rad。

$$\text{弧度制与角度制的换算关系是 } 1 \text{ rad} = \frac{360^\circ}{2\pi} \approx 57^\circ 17' 45''.$$

匀速圆周运动具有周期性，做匀速圆周运动的物体运动一周所用的时间叫做周期（period），用符号 T 表示。在国际单位制中，周期的单位是秒（s）。

技术上常用转速描述圆周运动的快慢。物体沿圆周运动的圈数与所用时间的比叫做转速，常用符号 n 表示。转速的常用单位是转/秒（r/s）。

与线速度和角速度相比，周期更容易被观察和测量，常用来比较圆周运动的快慢，周期越小，转动越快。

线速度、角速度、周期之间有怎样的关系？

线速度、角速度、周期都可以描述匀速圆周运动的快慢。一个做匀速圆周运动的物体，设运动的半径为 r ，则其做匀速圆周运动的周期 T 与角速度 ω 、线速度 v 之间的关系为

$$T = \frac{2\pi}{\omega}, T = \frac{2\pi r}{v}$$

其运动的线速度与角速度大小的关系为

$$v = \omega r$$

拓展视野

当物体绕固定轴转动时，物体上各点都在做圆周运动，且各点的角速度都相等。但各点的线速度大小不一定相等，只有到转轴距离相等的各点的线速度大小才相等。在同一个转动物体上，各点线速度的大小与其到轴的距离成正比。所以，在研究物体绕固定轴转动时，一般不能将物体视为质点。

示例 已知地球的半径 $R = 6.37 \times 10^3$ km，上海位于北纬 30° 附近。问：

(1) 位于赤道上的物体随地球自转的角速度和线速度分别是多大？

(2) 位于上海的物体随地球自转的线速度是多大？

分析：地球自转时，随地球一起运动的所有物体都在绕着地轴做匀速圆周运动，因此，它们的角速度、周期均与地球的相同。而线速度的大小则与物体所处位置的地理纬度有关，如图 5-29 所示。

解：(1) 物体随地球自转的周期 $T = 24$ h。根据做匀速圆周运动物体的角速度与周期的关系，可得赤道上物体的角速度为

$$\omega = \frac{2\pi}{T} = \frac{2\pi}{24 \times 3600} \text{ rad/s} \approx 7.27 \times 10^{-5} \text{ rad/s}$$

设赤道上的物体随地球转动的线速度为 v_1 ，运动半径为 r_1 ，则有 $r_1 = R$ 。根据做匀速圆周运动物体的线速度与角速度的关系可得

$$v_1 = \omega r_1 = 7.27 \times 10^{-5} \times 6.37 \times 10^6 \text{ m/s} \approx 463 \text{ m/s}$$

(2) 设位于上海的物体随地球转动的线速度为 v_2 ，运动半径为 r_2 ，由上海所在纬度，则有 $r_2 = R \cos 30^\circ$ 。根据做匀速圆周运动物体的线速度与角速度关系可得

$$v_2 = \omega r_2 = 7.27 \times 10^{-5} \times 6.37 \times 10^6 \times \cos 30^\circ \text{ m/s} \approx 401 \text{ m/s}$$

[1]

大家谈

上海“东方明珠”电视塔的高度约为 468 m，它随地球转动的线速度大小是多少？甲同学认为电视塔塔顶和底部的旋转半径不同，需要分别计算；乙同学认为答案就是上例中的 v_2 。你同意哪个观点？试说明理由。

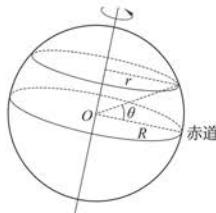


图 5-29 地球的自转

[1] 此处设置“大家谈”是为了引导学生通过具体计算发现，“东方明珠”电视塔虽然很高，但考虑其高度计算得到的结果与忽略其高度计算得到的结果近似相等，形成在研究“东方明珠”电视塔随地球自转时可将其看作质点的认识，完整地经历一次模型建构的过程。另外，要求学生根据计算结果为自己的观点寻找证据，经历基于事实证据和科学推理对不同观点和结论做出判断的科学论证过程。

问题与思考解读

第三节 圆周运动 17

1. 参考解答：两种说法均错误。根据 $v = \omega r$ 可知，线速度还与运动半径有关，角速度大的物体如果运动半径很小，线速度有可能小；根据 $\omega = \frac{2\pi}{T}$ 可知，物体做匀速圆周运动，周期越大，角速度越小。

命题意图：通过辨析，巩固对匀速圆周运动的线速度、角速度、周期之间关系的认识。

主要素养与水平：科学论证（Ⅱ）。

2. 参考解答：如果客人指的是两个茶杯的角速度一样大，则这个判断正确；如果客人指的是两个茶杯的线速度一样大，则这个判断不正确。两个茶杯随转盘一起运动，角速度都与转盘的角速度相同，但由于运动的半径不同，所以两个茶杯运动的线速度大小不同。比较做圆周运动物体的快慢时，应该说明比较的是角速度还是线速度。

命题意图：讨论身边常见的情境有助于养成用物理知识理解身边事物的习惯。进一步理解线速度、角速度是从不同角度对圆周运动快慢进行描述的，培养从多角度看待事物的意识，增强运动的观念。

主要素养与水平：运动与相互作用（Ⅰ）；科学论证（Ⅱ）。

3. 参考解答：时针针尖每 12 h 运动一圈，秒针针尖每 60 s 运动一圈，所以时针针尖运动的周期大。

根据 $\omega = \frac{2\pi}{T}$ 即可得到时针针尖的角速度小。

命题意图：建立匀速圆周运动的模型，关注身边的圆周运动，理解周期和角速度。

主要素养与水平：模型建构（Ⅰ）；科学推理（Ⅰ）。

问题与思考

1. 对于做匀速圆周运动的两个物体，下列说法是否正确？试说明理由。

- 角速度大的物体，线速度也一定大；
- 周期大的物体，角速度也一定大。

2. 如图 5-30 所示，餐桌上的自动转盘在电动机的带动下匀速转动，转盘上放有 A、B 两个茶杯。一位客人说两个茶杯运动得一样快，这个判断是否正确？简述理由。



图 5-30

3. 钟表的时针针尖和秒针针尖的运动都可看作匀速圆周运动，试比较它们运动的周期和角速度的大小。

4. 某飞机在空中等待降落时，近似以 80 m/s 的速度做平行于地面的匀速圆周运动，圆周半径为 4 000 m。计算飞机运动的周期和角速度的大小。

5. 如图 5-31 所示，一辆变速自行车有 3 个链轮和 6 个飞轮，链轮和飞轮的齿数如表 5-2 所示。该自行车的前后轮周长均为 2 m，设人脚踩踏板的转速为 1.5 r/s。

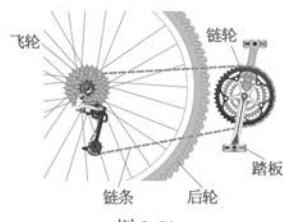


图 5-31

- 当采用的链轮和飞轮齿数分别为 48 和 24 时，该自行车的行驶速度为多大？

- 假设踏板的转速不变，通过选择不同的链轮和飞轮，该自行车行驶的最大速度与最小速度之比为多少？

表 5-2

名称	链轮				飞轮				
	齿数	48	38	28	15	16	18	21	24

6. 我们知道飞机的飞行速度远大于鸟的飞行速度。但我们观察近处的飞鸟和远处的飞机时，往往会觉得鸟比飞机飞得快。试解释这种现象。

4. 参考解答: 根据 $T = \frac{2\pi r}{v}$ 可求得周期为 314 s。由 $\omega = \frac{v}{r}$ 求得角速度为 0.02 rad/s

命题意图: 建立匀速圆周运动模型,运用公式计算周期和角速度。

主要素养与水平: 科学推理(II)。

5. 参考解答: (1) 链轮与飞轮的齿数之比就是两轮的半径之比, $r_1 : r_2 = 2 : 1$, 链轮的转速与踏板的转速相同, 为 $n_1 = 1.5$ r/s, 其角速度 $\omega_1 = 2\pi n_1$; 传动中链轮边缘的线速度与飞轮边缘的线速度大小相等, 即 $\omega_1 r_1 = \omega_2 r_2$; 由后轮的周长 l 可求出其半径为 $r_3 = \frac{l}{2\pi}$, 则自行车的行驶速度大小 $v = \omega_2 r_3 = \frac{n_1 r_1 l}{r_2} = 2n_1 l = 6$ m/s (2) 由 $v = \frac{n_1 r_1 l}{r_2}$ 可知, $r_1 : r_2$ 取最大时自行车行驶速度最大, $r_1 : r_2$ 取最小时自行车行驶速度最小, $v_{\max} = \frac{48}{15} n_1 l$, $v_{\min} = \frac{28}{28} n_1 l$, 可得 $\frac{v_{\max}}{v_{\min}} = \frac{16}{5}$

命题意图: 从较为复杂的实际情境中建立匀速圆周运动模型, 建议教师给学生有关自行车行驶速率与轮缘线速度大小之间关系的提示。通过分析、演绎的过程讨论自行车运动速率与链轮、飞轮各种组合的关系, 培养科学思维, 并为学期活动作铺垫。

主要素养与水平: 运动与相互作用(II); 科学推理(III)。

6. 参考解答: 我们观察近处的飞鸟和远处的飞机时, 在同一段时间内, 眼睛与飞鸟连线转过的角度大于眼睛与飞机连线转过的角度, 据此得出鸟比飞机快的结论, 这是用角速度来判断飞鸟与飞机的快慢。而飞机的飞行速度远大于飞鸟的飞行速度, 这个速度指的是线速度。实际上, 在人们的潜意识里, 往往以观察者自身为中心, 将物体绕自己运动的角速度作为依据, 来判断物体运动的快慢。

命题意图: 用学过的知识对生活中容易引起困惑的现象作出合理的解释, 培养科学论证的能力。

主要素养与水平: 模型建构(II); 科学论证(II)。

资料链接

圆周运动的角量描述

质点做圆周运动时, 可以用角量来描述。

当一质点在 xOy 平面内绕原点 O 做半径为 R 的圆周运动时, 其位置可以用质点的坐标 x 、 y 描述, 由于 $x^2 + y^2 = R^2$, x 、 y 两个量中只有一个独立的, 所以描述这样的运动只需一个坐标值即可。为方便描述, 可以用原点 O 和质点之间的连线与 x 轴正方向之间的夹角 θ 来描述质点的位置。如图 6 所示, 如果在时刻 t , 质点在 A 点, 半径 OA 与 x 轴成 θ 角, 则 θ 就是质点在 t 时刻的角位置。如果在时刻 $t + \Delta t$, 质点到达 B 点, 半径 OB 与 x 轴成 $\theta + \Delta\theta$ 角, 那么质点在 Δt 时间内绕点 O 运动的角位置增量就是 $\Delta\theta$ 。

与平均速度的定义类似, $\Delta\theta$ 与 Δt 之比就是 Δt 时间内质点绕点 O 运动的平均角速度, 用 $\bar{\omega}$ 表示, 即

$$\bar{\omega} = \frac{\Delta\theta}{\Delta t}$$

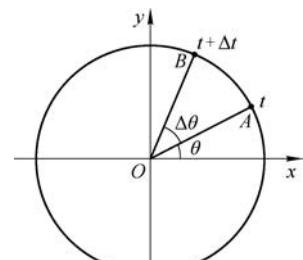


图 6

如果 Δt 趋近于零, 相应的 $\Delta\theta$ 也趋近于零, 而比值趋近于某一极限值, 即

$$\omega = \frac{d\theta}{dt}$$

式中, ω 叫做 t 时刻质点的瞬时角速度(简称角速度), 它是一个矢量, 方向如图 7 所示。

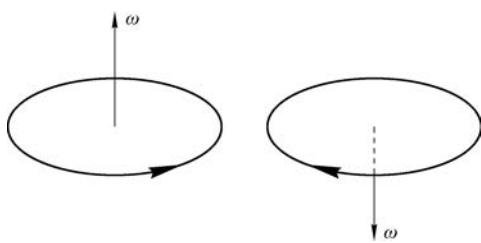


图 7

设质点在某一时刻的角速度为 ω_0 , 经过时间 Δt 后, 角速度变为 ω , $\Delta\omega = \omega - \omega_0$ 叫做这段时间内的角速度增量。 $\Delta\omega$ 与 Δt 之比叫做这段时间内质点绕点 O 运动的平均角加速度, 用 $\bar{\alpha}$ 表示, 即

$$\bar{\alpha} = \frac{\Delta\omega}{\Delta t}$$

如果 Δt 趋近于零, 相应的 $\Delta\omega$ 也趋近于零, 而比值趋近于某一极限值, 即

$$\alpha = \frac{d\omega}{dt}$$

式中, α 叫做 t 时刻质点的瞬时角加速度(简称角加速度)。

角位移的单位是 rad(弧度), 角速度的单位是 rad/s(弧度每秒), 角加速度的单位是 rad/s²(弧度每二次方秒)。

质点做匀速圆周运动时, 角速度 ω 是常量, 角加速度 α 为零; 质点做变速圆周运动时, 角速度 ω 不是常量, 角加速度 α 也可能不是常量, 如果角加速度 α 为常量, 就是匀变速圆周运动。

[1]

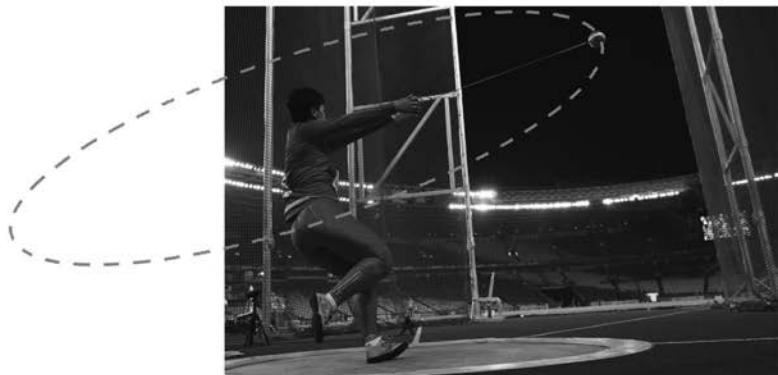


图 5-32 链球运动

第四节 向心力 向心加速度

在链球比赛中,为了使链球飞得更远,运动员会拉着链条的一端旋转,使系在链条另一端的链球跟着做圆周运动,如图 5-32 所示。经过 3~4 圈加速旋转,运动员猛然松手使链球飞出。

物体做匀速圆周运动的条件是什么?

[2] 自主活动

如图 5-33 所示,在细绳的一端系一个小球,用手捏住绳子另一端,使小球在水平放置的玻璃平板上绕被捏住的绳子一端转圈。

细绳对小球拉力的方向与小球的速度方向有什么关系?将手松开,观察小球是否能继续转圈。

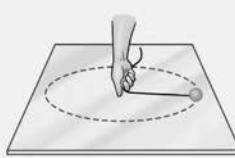


图 5-33 转圈的小球

上述活动中,当手松开后,小球不再受拉力作用,脱离圆周,沿切线方向飞出。

研究表明,物体做匀速圆周运动的条件是受到与物体的速度方向垂直、指向圆心且大小不变的合力作用,这个力叫做向心力 (centripetal force)。

定律通过理论演绎建立向心加速度概念,并得出向心加速度公式。

正文解读

[1] 链球是田径运动中的一种投掷项目。球体用铁或铜制成,装有链子和把手。运动员两手握着把手,人和球同时旋转,经加速旋转后,运动员猛然松手使链球飞出。

[2] 此处设置“自主活动”是为了让学生体验向心力的存在:先让学生感受小球做圆周运动时手上受到的力,然后观察现象——松手后小球就不再做圆周运动,帮助学生认识到做圆周运动的物体必须受到指向圆心的力。

本节编写思路

本节中创设情境时,可以先介绍链球运动的世界纪录、中国女子链球运动员在奥运赛场上的战绩等,然后再介绍链球投掷的过程,很自然地引入向心力的概念。

本节内容主要研究做匀速圆周运动物体的受力特点,教学中要引导学生将牛顿运动定律用于研究匀速圆周运动,进一步体会力是改变物体运动状态的原因,丰富知识的结构,深化运动与相互作用的观念。向心力概念的建立和理解是本节的重点和难点。教材第一部分内容围绕向心力概念的建立,从对赛场上链球运动的分析到自主活动中操作、感受,逐步形成对向心力的认识;第二部分内容在定性实验的基础上,通过定量实验探究向心力公式;第三部分内容根据牛顿第二

[1] 示例 1 的教学

目的在于：① 认识向心力是物体做圆周运动的必要条件；② 体会向心力可以由一个或几个施力物体提供；③ 理解向心力是一个以效果命名的力，它可以是我们熟悉的弹力、摩擦力、重力中的任何一种力，也可以是它们的合力或分力；④ 理解向心力始终指向圆心，它只改变速度方向，不改变速度大小。

[1] 示例 1 游乐场里有一种旋转飞椅，当飞椅以一定的速率旋转时，游客和飞椅一起在水平面内做匀速圆周运动，如图 5-34 所示。将飞椅和游客视为整体，分析其受到的向心力的来源。



图 5-34 旋转飞椅

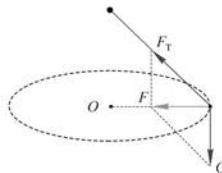


图 5-35 受力示意图

分析：以某一游客和所坐的飞椅为研究对象，将其视为质点，其受力情况可抽象成如图 5-35 所示的示意图。根据质点做匀速圆周运动的轨迹，可确定运动所在圆周的圆心，进而可确定质点所受向心力的方向。对质点进行受力分析，所受力的合力就是质点做匀速圆周运动的向心力。

解：如图 5-35 所示，以飞椅和游客整体为研究对象，其在水平面内做匀速圆周运动，受到的向心力一定指向轨迹的圆心 O 。根据受力分析，飞椅和游客整体受到重力 G 和沿吊绳向上的弹力 F_T 的作用，两个力的合力 F 就是其所受的向心力，该合力一定在水平面内，并且指向 O 点。

向心力是根据作用效果命名的力，重力、弹力、摩擦力或者这些力的合力都可以作为向心力。

② 向心力的大小与哪些因素有关？

[2]

大家谈

在前面的自主活动中，改变小球运动的快慢、细绳的长度与小球的质量，感受手上拉力大小的变化，猜测向心力的大小可能与哪些因素有关。

[3]

我们猜想：向心力的大小可能与做匀速圆周运动物体的圆周半径、运动快慢和质量都有关，它们有什么定量关系呢？这需要通过定量的实验来研究。

[2] 通过“大家谈”让学生猜测影响向心力大小的可能因素，引出定量实验研究的方向。

[3] 该实验是一个学生实验，建议先引导学生猜想，然后采用控制变量的方法，逐个得出向心力与物体质量、角速度、圆周半径的关系。

[1]

学生实验

探究向心力大小与半径、角速度、质量的关系

提出问题

物体做匀速圆周运动时所受向心力的大小与物体运动的圆周半径、运动快慢及质量有关，向心力大小与这些因素之间有何定量关系？

实验原理与方案

向心力大小 F 与半径 r 、角速度 ω 、质量 m 都有关，本实验需要采用控制变量法。分别研究：(1) ω 与 m 一定时， F 与 r 的关系；(2) r 与 m 一定时， F 与 ω 的关系；(3) r 与 ω 一定时， F 与 m 的关系。

综合三个实验研究的结论，探究向心力大小 F 与半径 r 、角速度 ω 、质量 m 的关系。

实验装置与方法

图 5-36 所示的实验装置可供本实验选用。在电动机控制下，悬臂可绕轴在水平面内匀速转动，在悬臂的转轴上固定一个无线力传感器；水平连杆的一端与无线力传感器相连，连杆上可固定砝码；无线光电门传感器安装在悬臂的一端，挡光片固定在支架上。当悬臂匀速转动时，砝码随之做匀速圆周运动。实验中力传感器测出对连杆的拉力大小等于砝码受到的向心力大小；砝码的运动半径可由悬臂上的刻度读出；测出光电门通过挡光片的瞬时速度，进而可得到悬臂旋转的角速度，即砝码的角速度。

本实验采用作图的方法分析数据，研究物理量间的函数关系。

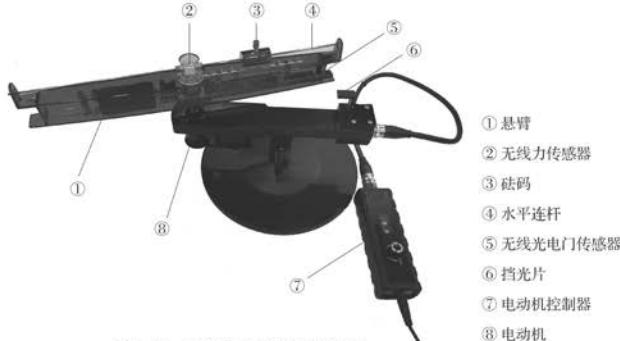


图 5-36 研究向心力的实验装置

实验操作与数据收集

根据实验原理与方案的要求，使悬臂带动砝码做匀速圆周运动，测量并记录相关实验数据，填入表 5-3、表 5-4 和表 5-5。

需向心力由连杆提供。为了消除连杆本身对实验的影响，在悬臂的另一侧也安装有一根同样的水平连杆。

[1] 本实验涉及的物理量较多，数据测量较为复杂，教材中已给出明确的实验装置和测量步骤。

实验装置及操作说明：

(1) 为了便于测量运动中物体受到的力和运动速度的大小，本实验使用无线力传感器和无线光电门传感器，它们测得的数据通过无线接收器传送至计算机。

(2) 实验中，光电门传感器测得的是每次悬臂顶端经过挡光装置时的线速度，该速度与悬臂半径的比就是砝码的角速度，角速度乘以砝码运动的半径可得到砝码运动的线速度。相比较而言，砝码运动的角速度比其线速度容易测量，而且更容易控制，因此本装置适宜研究向心力的大小与物体运动的半径、角速度、质量的关系。

(3) 实验中，砝码固定在水平连杆上，所

表 5-3 实验数据记录表 (ω 、 m 一定)

实验序号	1	2	3	4	5
r/m					
F/N					

表 5-4 实验数据记录表 (r 、 m 一定)

实验序号	1	2	3	4	5
$\omega/(rad\cdot s^{-1})$					
F/N					

表 5-5 实验数据记录表 (ω 、 r 一定)

实验序号	1	2	3	4	5
m/kg					
F/N					

数据分析

根据实验数据，选择合适的坐标系描点作图，研究相关物理量间的关系。

实验结论

做匀速圆周运动的物体，当：

(1) ω 与 m 一定时，_____；

(2) r 与 m 一定时，_____；

(3) ω 与 r 一定时，_____。

向心力 F 与 r 、 ω 、 m 的关系是：_____。

交流与讨论

[1] (1) 各组就实验数据进行交流，比较、分析实验结果的异同及其原因，探讨实验的改进方法。

(2) 线速度、角速度都可以描述物体做匀速圆周运动的快慢，用本实验装置能否直接研究向心力大小与半径、线速度、质量的关系？

大量的研究表明，做匀速圆周运动的物体受到的向心力 F 的大小等于物体的质量 m 、圆周半径 r 和角速度 ω 的二次方的乘积，即

$$F = m\omega^2 r$$

[1] 本实验的重点在于培养学生参照实验方法实施操作、记录数据、处理分析数据、发现特点、形成结论等诸方面的实验素养，引导学生学会用物理术语、图表等交流探究的过程和结果等。

将 $v = \omega r$ 代入上式，即可得

$$F = m \frac{v^2}{r}$$

做匀速圆周运动物体的加速度如何确定？

[1] 物体做匀速圆周运动时受到的合力始终指向圆心，根据牛顿第二定律，它的加速度也始终指向圆心，与线速度的方向垂直，如图 5-37 所示。因此，匀速圆周运动的加速度叫做向心加速度（centripetal acceleration），向心加速度只改变速度的方向，不改变速度的大小。

由向心力公式和牛顿第二定律可以得出向心加速度的表达式为

$$a = \omega^2 r \text{ 或 } a = \frac{v^2}{r}$$

在匀速圆周运动中，由于 r 、 v 和 ω 的大小是不变的，所以向心加速度的大小不变，但向心加速度的方向始终指向圆心，一直在变化，因此，匀速圆周运动是变加速运动。

示例 2 如图 5-38 所示，质量 $m = 3 \text{ kg}$ 的物体放在水平的转盘上，在半径 $r = 2 \text{ m}$ 的圆周上以 $v = 4 \text{ m/s}$ 的速度随转盘做匀速圆周运动。求：

- (1) 物体的向心加速度大小；
- (2) 物体受到的静摩擦力。

分析：由匀速圆周运动的线速度和半径，可直接求出向心加速度。对物体进行受力分析，根据运动状态可确定物体受到的重力和支持力在竖直方向平衡，平台对物体的静摩擦力提供物体做匀速圆周运动所需的向心力。根据牛顿第二定律可求出物体受到的向心力，即静摩擦力。

解：(1) 由于物体随转盘一起做匀速圆周运动，其向心加速度的大小

$$a = \frac{v^2}{r} = \frac{4^2}{2} \text{ m/s}^2 = 8 \text{ m/s}^2$$

(2) 如图 5-39 所示，物体受到三个力的作用，其中重力 G 和支持力 F_N 平衡，转盘对物体的静摩擦力 F_f 指向圆心，作为物体受到的向心力。

因此，由牛顿第二运动定律，物体受到的静摩擦力

$$F_f = ma = 3 \times 8 \text{ N} = 24 \text{ N}$$

静摩擦力的方向始终指向圆心。

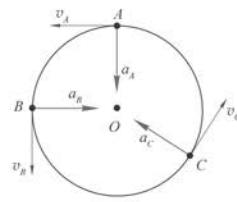


图 5-37 向心加速度

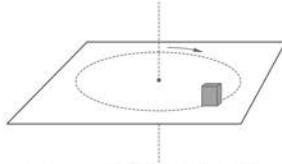


图 5-38 物体随转盘匀速转动

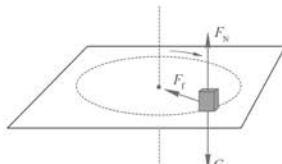


图 5-39 物体的受力分析

[1] 通过实验得出向心力公式后，可由牛顿第二定律方便地得出向心加速度公式，培养学生的推演能力。

教师可根据学生的情况，给学生介绍“向心加速度公式的理论推导”（见节后资料链接），提高学生演绎推理的能力。

向心加速度 a 和线速度 v 、角速度 ω 的矢量关系式为

$$\mathbf{a} = \boldsymbol{\omega} \times \mathbf{v}$$

[1] 此处设置“拓展视野”是为了帮助学生将对向心力的认识推广到一般曲线运动，知道圆周运动中的向心力就是法向力。教师可根据学生的认知程度和课时情况选用。

[1]

拓展视野

一般情况下，做曲线运动的物体，其速度的大小和方向都在改变，它受到的合力可以沿切线方向和法线方向分解，如图 5-40 所示。切线方向的力改变速度的大小，法线方向的力改变速度的方向。

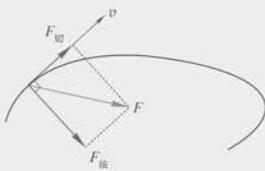


图 5-40 曲线运动中合力的分解

问题与思考解读

1. 参考解答：合理，因为 $1 \frac{\text{kg} \cdot (\text{m}/\text{s})^2}{\text{m}} = 1 \text{ kg} \cdot \text{m/s}^2 = 1 \text{ N}$

命题意图：从物理量单位推演的角度理解物理公式和物理量间的关系。

主要素养与水平：科学推理(Ⅱ)。

2. 参考解答：这两种结论都正确，但前提不同，在角速度相同的情况下， a 与 r 成正比；在线速度相同的情况下， a 与 r 成反比

命题意图：对两种截然不同的结论进行评价，引导学生全面考虑问题，形成在应用物理规律时要注重规律前提的意识，养成全面思考问题的科学态度。

主要素养与水平：质疑创新(Ⅰ)。

3. 参考解答：(1) 不正确。处于地表不同纬度的物体做圆周运动的圆心位于地轴上的不同位置，随地球自转的物体的向心加速度方向在所在纬度平面内指向地轴 (2) 在赤道处物体的向心加速度比较大。因为不同位置物体的角速度相同，根据 $a = \omega^2 r$ ，赤道处物体的运动半径大，所以向心加速度也大 (3) 上海位于北纬 30° 附近， $r = R_{\text{地}} \cos 30^\circ$ ，地球自转周期为 24 h ，根据 $\omega = \frac{2\pi}{T}$ 和 $a = \omega^2 r$ ，可求得 $a \approx 0.03 \text{ m/s}^2$

命题意图：以物体随地球自转为情境，抽象出物理模型，加深对加速度的理解。

问题与思考

- 试根据力、质量、速度和半径的单位，判断向心力公式 $F = m \frac{v^2}{r}$ 是否合理。
- 关于向心加速度与半径的关系，甲同学认为，根据公式 $a = \omega^2 r$ 可得 a 与 r 成正比；乙同学认为，根据公式 $a = \frac{v^2}{r}$ 可得 a 与 r 成反比。试对这两种截然不同的说法作出评价。
- 由于地球的自转，地球上的物体都有向心加速度，试回答：
 - “在地球表面各处的向心加速度的方向都是指向地心的”，这种说法是否正确？为什么？
 - 在赤道和极地附近的向心加速度哪个大？为什么？
 - 在上海的物体由于地球自转而产生的向心加速度为多大？
- 有一种游乐项目，游客进入一个大型圆筒状容器后，紧靠竖直筒壁站立（图 5-41）。当圆筒开始转动后，转速逐渐增大，游客会感到自己被紧紧地压在筒壁上；当转速增大到一定数值时，底板突然下落了几厘米，游客们惊奇地发现自己竟然没有跟着底板一起下落！解释这一现象。
- 若旋转餐厅转动一周的时间约为 1 h ，某顾客坐在离转轴距离约为 20 m 的座位上。计算该顾客受到的向心力与重力的比值。
- 线的一端系一个重物，手执线的另一端使重物在光滑水平桌面上做匀速圆周运动。在使重物运动周期相同的条件下，使用长线易断还是短线易断？为什么？

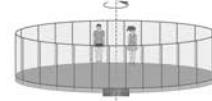


图 5-41

7. 在如图 5-42 所示的装置中, A、B 两个小球穿在光滑杆上并可沿杆滑动, 两球之间用一根细线连接。甲、乙两位同学就“装置绕轴匀速转动时, 如何能使两球相对光滑杆静止”这一问题展开讨论。甲认为, 两个小球放置在任意位置都可以。乙则认为, 两个小球只有放置在特定位置才可以。你赞同哪个观点? 试为这个观点作进一步论证。

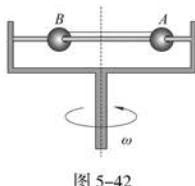


图 5-42

主要素养与水平:

运动与相互作用(Ⅱ);
模型建构(Ⅱ);科学推理(Ⅱ);科学论证(Ⅱ)。

4. 参考解答:

人受到竖直向下的重力、指向圆心的弹力和竖直向上的摩擦力, 向心力由这三个力的合力提供;或者说摩擦力和重力相互平衡, 筒壁给人的弹力提供向心力。当转速足够大时, 向心力的大小, 即筒壁的弹力足够大, 导致人和筒壁间的最大静摩擦力大于人受到的重力, 人就不会往下掉。

命题意图: 综合应用静摩擦力、向心力的知识, 解决生活中的实际问题, 提高解决综合问题的能力。

主要素养与水平:

运动与相互作用(Ⅱ);
科学推理(Ⅱ);科学论证(Ⅱ)。

5. 参考解答:

设顾客的质量为 50 kg。根据已知条件, 他随餐厅做圆周运动的周期

$$T = 1 \text{ h} = 3600 \text{ s}, \text{ 运动半径 } r = 20 \text{ m}。 \text{ 由公式 } F = m\omega^2 r \text{ 和 } \omega = \frac{2\pi}{T} \text{ 可得 } F = m \frac{4\pi^2}{T^2} r。 \text{ 代入数据可得 } F \approx$$

$3.05 \times 10^{-3} \text{ N}$ 。向心力与重力的比值 $\frac{F}{G} \approx 6.22 \times 10^{-6}$, 可见这个比值非常小, 所以顾客感觉不到

命题意图: 通过建模、估算, 巩固向心力知识, 讨论生活中的实际问题。

主要素养与水平: 运动与相互作用(Ⅱ);科学推理(Ⅱ)。

6. 参考解答: 长线易断 由向心力公式 $F = m\omega^2 r$ 和 $\omega = \frac{2\pi}{T}$ 可得 $F = m \frac{4\pi^2}{T^2} r$ 。当周期相同时, 线越

长即重物做圆周运动的半径越大, 所需向心力越大, 线越容易断。

命题意图：针对问题情境，选择适合的向心力公式解决问题。

主要素养与水平：科学论证(Ⅱ)。

7. 参考解答：乙的观点正确 两个小球只有放置在特定位置才可以相对杆静止。两球所受向心力均来自细线的拉力，大小相等；两球的角速度相等，根据公式 $F = m\omega^2 r$ 可以得出两球做圆周运动的半径与两球的质量成反比，所以位置由两球的质量之比决定

命题意图：在真实情境中抽象出物理模型，综合运用圆周运动相关知识，经过分析、推理解决问题。

主要素养与水平：科学推理(Ⅱ)；科学论证(Ⅲ)。

资料链接

向心加速度公式的理论推导

我们可以根据向心加速度的定义确定其方向，并从理论上推导其表达式。

如图 8(a)所示，质点沿半径为 r 的圆周做匀速圆周运动，质点在 A 点时的速度为 v_A ，经过很短的时间 Δt 运动到 B 点，速度变为 v_B ，圆弧 \widehat{AB} 的圆心角为 $\Delta\varphi$ 。如图 8(b)所示，根据矢量和的三角形法则，图中 Δv 是质点从 A 运动到 B 过程中速度的变化量。 $\frac{\Delta v}{\Delta t}$ 就是质点在 Δt 时间内的平均加速度，方向跟 Δv 的方向相同。当 Δt 趋近于 0 时， $\Delta\varphi$ 也趋近于 0，这时 Δv 便趋近于与 v_A 垂直，而 v_A 的方向在圆周的切线上，所以 Δv 的方向趋近于沿半径指向圆心。因此，质点做匀速圆周运动时在任一点的加速度都是沿着半径指向圆心的，这也是向心加速度一词的由来。

从图 8 可以看出，图(b)中的矢量三角形跟图(a)中的 $\triangle OAB$ 是相似的。因为 $v_A = v_B$ ，可用 v 表示 v_A 、 v_B 的大小，则有

$$\frac{|\Delta v|}{v} = \frac{AB}{r}$$

即

$$|\Delta v| = AB \cdot \frac{v}{r}$$

将上式两边同时除以 Δt ，有

$$\frac{|\Delta v|}{\Delta t} = \frac{AB}{\Delta t} \cdot \frac{v}{r}$$

当 $\Delta t \rightarrow 0$ 时，A、B 间弦长趋近于 A、B 间圆弧长，等式左边 $\frac{|\Delta v|}{\Delta t}$ 即为向心加速度 a 的大小，右边的 $\frac{AB}{\Delta t}$ 就是匀速圆周运动的线速度大小 v ，代入整理得

$$a = \frac{v^2}{r}$$

这就是匀速圆周运动的向心加速度公式。

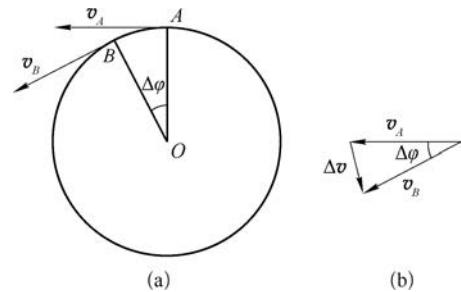


图 8

本节编写思路

[1]



图 5-43 转弯的火车

第五节 圆周运动的应用

圆周运动的运动规律和物体做圆周运动的条件，在生活、生产和科学的研究等方面有很广泛的应用。

[2] 如何测定分子速率？

我们知道，组成物质的分子总是在做永不停息的无规则运动。分子速率的测量对于分子热运动的研究具有重大意义。

1920 年，美国物理学家史特恩 (O. Stern, 1888—1968) 提出了一种应用圆周运动规律测定气体分子速率的方法。史特恩实验装置如图 5-44 所示。 A 、 B 为双层共轴圆筒形容器，内筒 A 半径为 r ，外筒 B 半径为 R ，内外筒可同时绕转轴 K 以同一角速度高速旋转；容器内部抽成高度真空，沿转轴 K 装有一根镀银的铂丝，铂丝通电加热使银蒸发成气体，一些

[3] 银原子穿过筒 A 的狭缝 a 射出，最终落于筒 B 的内表面。由于银原子由内筒运动到外筒需要一定时间，若容器不动，这

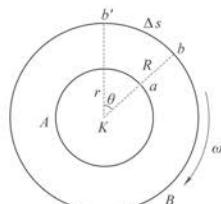


图 5-44 史特恩实验装置示意图

用，可根据学生具体情况，介绍“菲索齿轮法测光速”（见节后资料链接）。

[3] 银原子离开转轴时，随转轴而转的线速度可忽略。

本节通过介绍圆周运动的实例，让学生通过受力分析、运动分析建立匀速圆周运动模型，运用牛顿运动定律、匀速圆周运动规律解决具体问题。其中只对分子速率测定提出定量要求，其余都是定性分析。目的是使学生对圆周运动加深理解，能够解释常见的与圆周运动相关的现象，深化运动与相互作用的观念。

根据学生具体情况，介绍“铁轨引导的转弯”（见节后资料链接）。

正文解读

[1] 火车转弯时，车身向弯曲轨道的内侧倾斜，说明弯道处铁轨的外轨高于内轨。

本节中“车辆转弯时如何获得向心力”的内容与此呼应。

[2] 关于用圆周运动规律测速率的其他应

些原子将到达外筒内壁上的 b 点；若容器以角速度 ω 旋转，这些原子将到达外筒内壁上的 b' 点。

设待测银原子的速率为 v ，则原子由内筒运动到外筒所需的时间为

$$\Delta t = \frac{R - r}{v}$$

而在此时间内，外筒上的 b' 点转过的弧长为

$$\Delta s = R\theta = R\omega\Delta t$$

由以上两式可得

$$v = \frac{(R - r)R\omega}{\Delta s}$$

实验中只需测得 R 、 r 、 ω 、 Δs ，即可求得银原子的速率。

② 车辆转弯时如何获得向心力？

[1] 汽车、火车等在运动中经常会转弯（图 5-43），转弯时的运动可以看成局部的圆周运动，转弯必须有足够的向心力作用才能完成。

汽车在水平地面上转弯时，受重力、支持力和地面对车轮的静摩擦力，竖直方向的重力与支持力平衡，只有地面对车轮的静摩擦力提供汽车转弯所需的向心力。

如图 5-45 所示，火车轨道弯道处的外轨通常略高于内轨。当火车通过弯道时，车身会向弯道的圆心倾斜很小的角度 α ，这时火车受到的支持力 F_N 与重力 G 的合力 F 沿水平方向，提供了火车转弯所需的向心力。

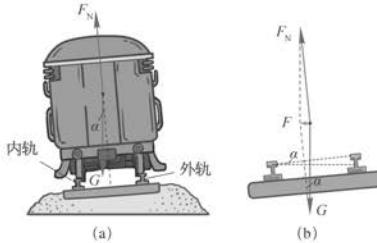


图 5-45 火车转弯时的受力分析

③ 什么是离心现象？

全自动洗衣机进入甩干程序后，在电动机的带动下，洗衣机的内筒会绕轴高速旋转。随着转速的增加，附着在衣物上的水需要的向心力越来越大，当衣物对水的附着力小于水

需要的向心力时，水就会离开衣物，从筒壁的小孔中飞出，一会儿衣物上的水就基本被甩掉了。

图 5-46 所示是制作棉花糖的情景。砂糖颗粒在加热腔中熔化成糖液，当加热腔高速旋转时，由于缺少足够的向心力，糖液无法维持圆周运动，便从加热腔壁上的小孔飞出，遇冷凝结成固态的糖丝，聚成一团就成了棉花糖。

[1] 从上面的事例我们可以看到，做圆周运动的物体，

如果受到的力不足以提供所需的向心力，物体就会远离圆心，这就是离心现象。

生活、生产中的离心现象有着广泛的应用，但有时也会造成危害，需要设法防范。

当汽车在道路上转弯时一定要减速慢行，尤其在雨雪天气、路面湿滑时，更要减速慢行，以防因摩擦力不足而发生离心现象——车辆发生侧滑，酿成车祸。



图 5-46 棉花糖的制作

[1] 离心现象是惯性离心力作用的结果。详细的解释请参阅节后资料链接“惯性离心力”。

[2]

大家谈

某报道说：“冬天路面有积雪，转弯时驾驶员必须小心地平衡向心力和离心力，以免出现打滑。”试指出该报道中的科学性错误，并从理论上分析车辆打滑与哪些因素有关，再提出一些防止车辆打滑的建议。

高速转动的砂轮、飞轮等，都不得超过额定的最大转速。如果转速过高，砂轮、飞轮内部的相互作用力不足以提供需要的向心力，砂轮、飞轮的某些组成部分会被高速甩出，这类离心现象可能酿成人身伤害等事故。

飞机由俯冲拉起或翻筋斗时，飞行员的血液由于离心运动会流向下方，造成飞行员大脑缺血，感觉四肢沉重，这种现象叫做过荷。过荷太大时，飞行员会暂时失明，甚至晕厥。飞行员可以通过加强训练、增强体质来提高抗荷能力。图 5-47 所示就是飞行员进行提升抗荷能力训练的载人离心机。



图 5-47 载人离心机

[2] 通过“大家谈”，引导学生运用离心现象的知识，分析生活中的事件，对不科学、不规范的说法提出质疑、批判，并利用所学的物理知识提出加强安全的举措，关注交通安全，提升社会责任感。

[1] 此处设置“STSE”

是为了引导学生查阅资料,进一步了解离心技术在工业、生物、医学、化学等领域的具体应用。

问题与思考解读

1. 参考解答: 汽车通过弯道出口时的运动可近似看作局部的圆周运动,速度越大需要的向心力就越大,如果不减速,地面不能提供足够的向心力,容易发生汽车冲出弯道的事故

命题意图: 用圆周运动知识解释生活中的常见现象,巩固向心力的相关知识。

主要素养与水平:
质疑创新(I);社会责任(II)。

2. 参考解答:
(1) 舞蹈演员旋转时,裙摆因得不到足够的向心力而做远离圆心的运动,裙子张开 (2) 转动伞柄,伞面对水的附着力不足以提供水所需的向心力,水就被甩离伞面

(3) 车辆急转弯时,黄沙做圆周运动,如得不到足够向心力,黄沙就会被甩出

命题意图: 从实际情境中抽象物理模型,用物理语言解释生活中常见的现象,提升物理观念。

主要素养与水平: 科学论证(II)。

[1]

STSE

利用离心现象的原理可以设计各种离心机械,离心节速器就是其中一种。

离心节速器的主要构件是离心式飞锤,图 5-48 所示是离心式飞锤的结构示意图。在转速增大时,重锤的离心运动使上拉杆张开一定角度,并通过下拉杆使套在竖直转轴上的套筒向上移动,带动相关的调速部件运作。转速越大,上拉杆张角越大,套筒向上移动的距离也越大。离心式飞锤具有测速、调速等多方面的用途。

在热电站里,要求汽轮机的转速能自动调节以保证在用电量变化的情况下发电机转速仍能保持稳定。采用离心式飞锤就可以随机轴转速的增减自动调节进入汽轮机的蒸汽流量,确保转速不变。如图 5-49 所示,当机轴因负载减小而转速增大时,飞锤转动加快,套筒上拉,通过杠杆将蒸汽阀门下压,使进入汽轮机的蒸汽流量减小,机轴的转速下降到额定的数值以达到稳定转速的效果。

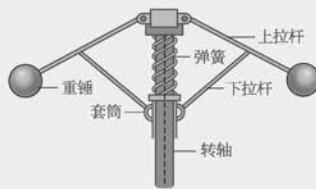


图 5-48 离心式飞锤的结构示意图

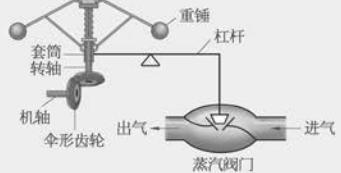


图 5-49 汽轮机转速的调节示意图

问题与思考

1. 图 5-50 (a)、(b) 所示是高速公路上常见的限速标志,为什么在弯道出口处的限速往往与其他路段的限速有如此大的差异?



图 5-50

2. 试解释下列常见现象。

- (1) 舞蹈演员在表演旋转动作时,裙子会张开。
- (2) 在雨中转动伞柄,伞面上的雨水会很容易被甩掉。

- (3) 满载黄沙的卡车急转弯时,部分黄沙会被甩出。
3. 公路上有一段半径 $r = 50\text{ m}$ 的水平弯路,一辆质量 $m = 2.0 \times 10^3\text{ kg}$ 的汽车,其轮胎与路面间的最大静摩擦力 $F_{\max} = 1.4 \times 10^4\text{ N}$,该汽车在这段弯路上行驶的最大安全速度为多大?
4. 列举一些生活中与离心现象有关的例子。
5. 图 5-51 所示是一种可用于测定子弹速度的装置示意图,纸质圆筒绕中心轴 OO' 以角速度 ω 旋转,子弹以一定速度沿与轴线平行的方向从圆筒一个底面上的 A 点射入,从另一个底面上的 B 点射出,射出时 A 、 B 两点在圆筒上的位置如图中所示。若 A 点与 B 点所在半径的夹角为 θ ,圆筒的长度为 l ,求子弹的速度大小 v 。

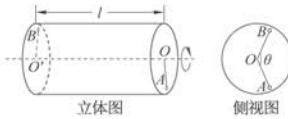


图 5-51

3. 参考解答: 汽车受到的重力和支持力平衡,静摩擦力提供向心力。由公式 $F_f = m \frac{v^2}{r}$ 可得,最大安全速

$$\text{度 } v = \sqrt{\frac{F_{\max} r}{m}} = \sqrt{\frac{1.4 \times 10^4 \times 50}{2.0 \times 10^3}} \text{ m/s} \approx 18.71 \text{ m/s}$$

命题意图: 用向心力公式计算车辆转弯的最大安全速度,熟悉向心力公式,提升安全意识。

主要素养与水平: 科学推理(Ⅱ);社会责任(Ⅱ)。

4. 参考解答: 高速转弯时赛车冲出赛道;长发女孩快速旋转时,头发会“飘”起来……

命题意图: 引导学生关注生活,理解离心现象。

主要素养与水平: 运动与相互作用(Ⅱ)。

5. 参考解答: 子弹的运动可看作匀速直

线运动,纸筒匀速转动,子弹运动距离 l 的时间与纸筒转过 $2\pi n + \theta$ ($n = 0, 1, 2, \dots$) 的时间相等,即 $\frac{l}{v} = \frac{2\pi n + \theta}{\omega}$,

$$\text{解得 } v = \frac{l\omega}{2\pi n + \theta} (n = 0, 1, 2, \dots)$$

命题意图: 思考圆周运动的周期性问题,结合直线运动、圆周运动的规律解决比较复杂的问题,提升分析问题、解决问题的综合能力。

主要素养与水平: 运动与相互作用(Ⅲ);科学推理(Ⅲ)。

资料链接

铁轨引导的转弯

与汽车不同,火车没有方向盘,行驶在铁轨上的火车,行驶方向完全由铁轨引导。如图9所示,在火车车轮内侧有一圈比轮子稍大一点的圆盘,叫做轮缘,遇到弯道或岔道时,轮缘起到导向作用,使整列火车转弯或换道。

火车的车轮并不是平整的圆柱体,而是圆台。这一设计可以帮助火车顺利通过弯道。火车在直道上行驶时,两侧的车轮以等大的轮半径分别在两边的轨道上滚动,如图10(a)所示;若列车向左转弯,由于惯性,车体会偏向右侧,导致右侧车轮与轨道接触点处的车轮半径较大,左侧半径较小,如图10(b)所示(从车尾看)。这样,由于存在半径差,右轮在右侧弯轨上行驶的路程大于左轮行驶的路程,就可以使车轮完成转向了。

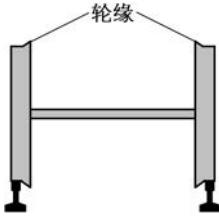


图9

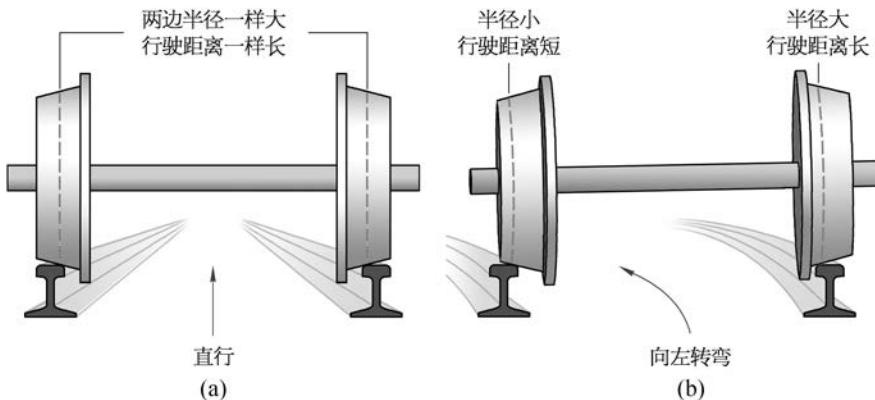


图10

设计高速铁路时,为满足列车高速运行的需要,转弯半径就应当加大。一般情况下,不同设计时速的高速铁路对应的最小转弯半径如下表所示。

设计时速(km/h)	250	300	350
最小转弯半径(m)	4 000	4 500	7 000

我国新建高速铁路一般逢山开隧、遇水架桥,线路较为平直,大多数路段为直线或大半径曲线,为高速铁路时速的提升做好了充分的准备。

菲索齿轮法测光速

人们现在都知道,真空中光速为 3×10^8 m/s,这么大的光速是怎么测出来的呢?意大利物理学家伽利略在1607年进行了世界上第一次测量光速的尝试。他让两个人分别站在相距数千米的两座山上,每人拿一盏灯,第一个人先亮灯,当第二个人看到第一个人的灯亮时立即亮起自己的灯,根据第一个人亮灯到他看到第二个人亮灯的时间间隔来计算光速。因为光的传播速度太大,加之观察者还要有一定的反应时间,实验方法过于粗糙,实验没有成功。

1849年,法国物理学家菲索采用旋转齿轮法测量光速。此法原则上与伽利略提出的方法相似,不过用反射镜代替了第二个观察者,用旋转的齿轮代替了手动亮灯的开关。

齿轮法的装置如图 11 所示。光源 S 发出的光照射到半透明的玻璃片 M_1 上,一部分光被 M_1 反射。在光的传播路径上,有一个转速可调的齿轮 W ,它的齿隙不遮光,而它的齿却能遮住来自 M_1 的光。通过齿隙的光经过相当长的距离 L 到达平面镜 M_2 后再次被反射并沿原路返回。如果齿轮不动,返回的光会穿过同一齿隙,并通过半透明玻璃片 M_1 被其后的观察者看到。

转动齿轮,若齿轮速度较小,穿过齿隙 1 的光被 M_2 反射后仍穿过齿隙 1 进入观察者的眼睛。当齿转到光的传播路线上时,光将被遮住,观察者看不到光。因此,来自 M_1 的光交替照射到齿隙和齿,观察者将看到闪光。

随着齿轮转速的增大,观察者每次看到亮光的时间越来越短。齿轮转速增大到某一数值时,穿过齿隙 1 的光被 M_2 反射后再返回到齿轮时,恰被紧邻的齿 a 挡住,观察者看不到亮光;转速继续增大,当由 M_2 返回的光恰好穿过齿隙 2 时,观察者再次看到亮光。

设齿轮的转速为 n ,齿轮的齿数为 N ,则观察者第一次看不到亮光时,齿 a 转到齿隙 1 的位置所需的时间为

$$\Delta t = \frac{1}{2Nn}$$

在这段时间内,光由齿轮传播到 M_2 ,又由 M_2 返回到齿轮,走的路程为 $2L$,所以光速 c 为

$$c = \frac{2L}{\Delta t} = 4LnN$$

菲索用的齿轮齿数为 $N=720$,在巴黎市郊相距约 8 km 的两地之间进行测量, $2L=1.7266 \times 10^4$ m,发现第一次看不见光时,齿轮的旋转速度为 12.6 r/s,由此测得 $c \approx 3.13 \times 10^8$ m/s。这个实验中,主要的误差是很难精确地定出看不见光的条件,但菲索的结果已经很接近实际的光速。菲索之后,又有许多人先后改进了这个实验,所得结果均在 2.99×10^8 m/s 和 3.01×10^8 m/s 之间。

惯性离心力

如图 12 所示,水平圆盘上有一径向直槽,槽内弹簧一端固定于圆心 O ,另一端系一小球。当圆盘以均匀角速度旋转时,弹簧伸长,小球相对圆盘静止。在位于地面的观察者甲看来,小球受到弹簧的拉力,使之产生向心加速度做圆周运动。如有另一观察者乙位于圆盘上,则在他看来,此时小球静止必受平衡力作用,除受到弹簧伸长导致的回复力以外,同时还受到一个与回复力大小相等、方向相反的惯性力,否则小球不会静止。这个沿径向向外的力叫做惯性离心力,也就是平常所说的“离心力”。

两位观察者的看法不同,是因为他们所处的参考系不同。甲处于相对地面静止的参考系(可看作是惯性系),乙处于转动参考系(即非惯性系)。对甲来说,是不存在“离心力”的,也就是说,在惯性系中是没有“离心力”的,惯性离心力是存在于转动参照系中的。在转动参考系中引入惯性离心力,可使牛顿运动定律继续成立。

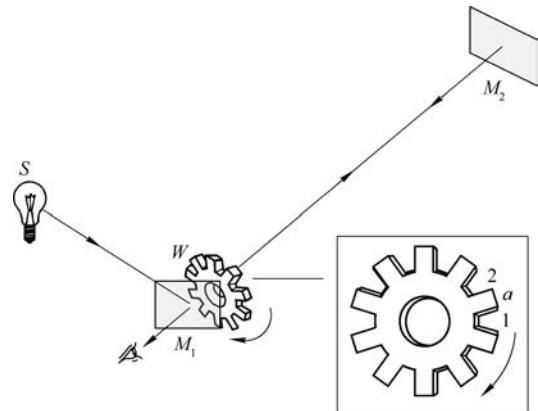


图 11

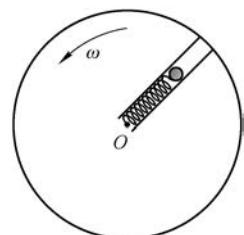


图 12

[1] 这是一个以测量为主要手段的研究活动。要求学生根据所学知识,以及掌握的各种测量方法,通过观察、理论计算,预测踏板每转动一周自行车前进的距离。然后设计方案,测量这一距离,比较理论值与测量值,分析差异产生的原因。最后形成研究报告、交流展示文稿,并与其它小组相互交流。

通过本活动应了解实验研究的一般过程,知道如何利用合适的方法、器材和测量手段获取数据,学会分析、解释数据。本活动需要小组成员分工协作完成。

[1]

学期 活动

研究自行车中的圆周运动。

自行车是日常生活中常用的交通工具。当用力蹬踏板时,后车轮就会转动,从而使自行车前进,自行车运动时许多部件都在做圆周运动。以小组为单位探究一辆自行车各转动部件的传动关系;根据匀速圆周运动的知识,计算自行车的踏板每转动一周自行车前进的距离,并通过实验测量该距离。

活动要求:

- (1) 以小组为单位(不超过4人)开展研究活动,进行人员分工。
- (2) 制定研究方案。
- (3) 计算踏板每转动一周自行车前进的距离。
- (4) 进行实验,记录并处理数据。
- (5) 归纳总结得出结论。
- (6) 撰写并交流研究报告。

小结

· 基本概念和基本规律

曲线运动的速度方向：做曲线运动物体的速度方向是时刻改变的，物体在某一点的瞬时速度方向沿曲线在该点的切线方向。

物体做曲线运动的条件：物体所受合力的方向与其速度方向不在同一直线上。

运动的合成：已知分运动求合运动的方法。

运动的分解：已知合运动求分运动的方法。

平抛运动：以一定速度将物体水平抛出，只在重力作用下所做的运动。

平抛运动的规律：平抛运动是水平方向的匀速直线运动和竖直方向的自由落体运动的合运动。

匀速圆周运动：物体在任意相等时间内通过的弧长总是相等的圆周运动。

角速度：物体做匀速圆周运动时转过的角度与所用时间的比。

线速度：物体做匀速圆周运动时通过的弧长与所用时间的比。

周期：做匀速圆周运动的物体运动一周所用的时间。

向心力：物体做匀速圆周运动时受到的与速度方向垂直、始终指向圆心的力。

向心加速度：物体做匀速圆周运动时的加速度。做匀速圆周运动的物体在任一点的加速度都指向圆心。

· 基本方法

通过研究平抛运动、匀速圆周运动等运动形式，认识化繁为简的研究方法。

通过探究向心力大小的实验，体会控制变量的方法。

· 知识结构图



复习与巩固解读

32 第五章 曲线运动

1. 参考解答：如果 F 沿 x 轴正方向，则质点在 y 轴方向的速度分量应不变，现 y 轴方向的速度分量减小，故 F 不沿 x 轴正方向；如果 F 沿 y 轴正方向，则 y 轴方向的速度分量应增加，与题意不符。所以恒力 F 的方向既不可能沿 x 轴正方向，也不可能沿 y 轴正方向。

命题意图：用牛顿第二定律分析曲线运动。

主要素养与水平：运动与相互作用(I)；科学推理(I)。

2. 参考解答： A 、 B 均做匀速圆周运动，由题意可知 $m_A = m_B$ ， $\omega_A = \omega_B$ ， $r_A > r_B$ ，根据 $F = m\omega^2 r$ 可判定同一时刻 $F_A > F_B$ ；随着转盘越转越快， ω 增大， A 、 B 所需向心力均增大；又已知 A 、 B 与水平转盘间的最大静摩擦力相同，所以 A 所需向心力先超过最大静摩擦力的数值，会先飞离转盘。

命题意图：理解情境，建立模型，运用向心力、离心现象以及静摩擦力的相关知识分析推理解决问题。

主要素养与水平：运动与相互作用(II)；模型建构(II)；科学推理(II)。

3. 参考解答：(1) 三个物体都随地球自转，所以 $\omega_A = \omega_B = \omega_C$ (2) 由地理知识可知 $r_A < r_B < r_C$ ，根据 $v = \omega r$ 可判定 $v_A < v_B < v_C$ (3) 物体的周期与地球自转周期相同，所以 $T_A = T_B = T_C$

命题意图：结合地理知识建立模型，巩固角速度、线速度、周期的概念。

主要素养与水平：运动与相互作用(II)；科学推理(II)。

4. 参考解答：(1) $\omega = \frac{2n\pi}{t}$ $v = \frac{2nl\pi}{t}$ (2) 以 OB 长 5 cm、手柄每 1 min 匀速转动 80 圈代入上述表达式，可估算得角速度、线速度大小分别为 8.4 rad/s 、 0.42 m/s

复习与巩固

1. 如图 5-52 所示，一质点在恒力 F 的作用下，由坐标原点以初速度 v_0 沿曲线运动至 A 点。质点在 A 点的速度 v_t 方向恰与 x 轴平行，判断恒力 F 的方向是否可能沿 x 轴正方向或 y 轴正方向，并说明理由。

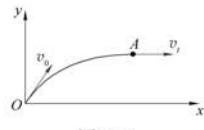


图 5-52

2. 两块相同的木块 A 、 B 置于水平转盘上，木块 A 到转轴的距离大于木块 B 。在转盘越转越快的过程中，木块 A 先飞离转盘，分析说明造成这种现象的原因。
3. 三个物体 A 、 B 、 C 分别静止在北京、上海、广州。关于三个物体随地球自转的运动，试分析：
(1) 角速度 ω_A 、 ω_B 、 ω_C 的大小关系；
(2) 线速度 v_A 、 v_B 、 v_C 的大小关系；
(3) 周期 T_A 、 T_B 、 T_C 的大小关系。
4. 有一款手摇削笔器如图 5-53 所示，手柄的 BO 段长为 l ， AB 段长为 d 。一位同学转动手柄削铅笔，在时间 t 内匀速转动了 n 圈。
(1) 写出手柄 A 处角速度和线速度大小的表达式；
(2) 根据日常经验估算角速度和线速度的大小。



图 5-53

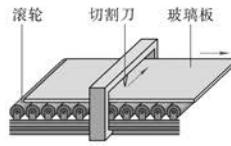


图 5-54

5. 如图 5-54 所示，在一条玻璃生产线上，宽 9 m 的成型玻璃板以 2 m/s 的速度向前匀速平移。在切割工序处，垂直于流水线的刀架上的金刚石切割刀的移动速度为 10 m/s 。为使割下的玻璃板呈矩形，问：
(1) 切割刀的移动轨迹与玻璃板平移方向的夹角应为多大？
(2) 切割一块玻璃需要多少时间？
6. 一架飞机在无风的天气里以 120 m/s 的速度在距地面 250 m 处水平匀速飞行，向受雪灾影响的牧区投下成捆的干草。若忽略空气阻力，干草经过多少时间到达地面？干草落地时速度大小为多少？

命题意图：培养从

真实情境中抽象出物理模型的能力，学会用圆周运动规律估算日常情境中的问题。

主要素养与水平：

运动与相互作用(Ⅱ)；科学推理(Ⅱ)；科学论证(Ⅱ)。

5. 参考解答：

(1) 切割刀位移轨迹与玻璃平移方向的夹角为

$$\alpha, \tan \alpha = \frac{v_{\text{刀}}}{v_{\text{玻璃}}} = 5, \text{ 所}$$

以 $\alpha = 78.7^\circ$ (2) 根据分运动与合运动的等时性， $t = \frac{d}{v_{\text{刀}}} = 0.9 \text{ s}$

命题意图：在生产实际问题中分析什么是分运动、什么是合运动，运用运动合成与分解的方法和规律处理问题。

主要素养与水平：

运动与相互作用(Ⅰ)；模型建构(Ⅱ)；科学本质(Ⅱ)。

6. 参考解答：

干草竖直方向为自由落体

$$\text{运动, } t = \sqrt{\frac{2h}{g}} \approx$$

7.14 s。干草落地时竖直方向的分速度为 $v_y = \sqrt{2gh} = 70 \text{ m/s}$ ，落地速度大小为 $v_t = \sqrt{v_0^2 + v_y^2} \approx 138.92 \text{ m/s}$

命题意图：体会运用运动合成与分解的方法研究平抛运动的事例。

主要素养与水平：模型建构(Ⅱ)；科学推理(Ⅱ)；科学本质(Ⅱ)。

- 7. 参考解答：**(1) 由题意 $v_0 = v_y = gt_1$ ，得 $t_1 = \frac{v_0}{g}$ ；此时速度大小为 $v_t = \sqrt{2}v_0$ ，速度方向与水平方向成 45° 角斜向下 (2) $x = v_0 t_2, y = \frac{1}{2}gt_2^2$ ，由题意 $x = y$ ，则 $v_0 t_2 = \frac{1}{2}gt_2^2$ ，得 $t_2 = \frac{2v_0}{g}$ ；此时 $x = \frac{2v_0^2}{g}$ ，物体位移大小为 $s = \sqrt{2}x = \frac{2\sqrt{2}v_0^2}{g}$ ，位移方向与水平方向成 45° 角斜向下 (3) 因 $y = \frac{1}{2}gt^2$ ，所以至少从

7. 以速度 v_0 沿水平方向抛出一物体。

- (1) 抛出多少时间后，物体水平方向和竖直方向的分速度大小相等？求此时物体的速度大小和方向。
 (2) 抛出多少时间后，物体水平方向和竖直方向的分位移大小相等？求此时物体的位移大小和方向。
 (3) 至少从多高处水平抛出物体，才会分别出现第(1)小题和第(2)小题中的情况？

8. 如图 5-55 所示，半径为 r 的圆筒 A 绕竖直中心轴匀速转动，筒的内壁上有一个质量为 m 的物体 B。物体 B 一边随圆筒 A 转动，一边以竖直向下的加速度 a 下滑。若物体与筒壁间的动摩擦因数为 μ ，圆筒 A 转动的角速度为多大？

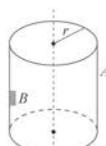


图 5-55

9. 用如图 5-56(a) 所示的装置可以测定分子速率。在小炉 O 中，金属银熔化并蒸发。银原子束通过小炉的圆孔逸出，经过狭缝 S_1 和 S_2 进入真空的圆筒 C。圆筒 C 可绕过 A 点且垂直于纸面的轴以一定的角速度转动。

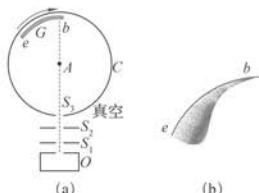


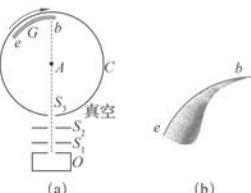
图 5-56

- (1) 若已测出圆筒 C 的直径为 d 、转动的角速度为 ω ，银原子落在玻璃板 G 上的位置到 b 点的弧长为 s ，写出银原子速率的表达式；
 (2) 若 $d = 1 \text{ m}$, $\omega = 200\pi \text{ rad/s}$, s 约为圆筒周长的 $\frac{1}{4}$ ，估算银原子速率的数量级；
 (3) 如图 5-56(b) 所示，银原子在玻璃板 G 上堆积的厚度各处不同。比较靠近 b 处与靠近 e 处的银原子速率哪个大，并说明理由。

10. 某同学利用电磁定位板研究某物体的抛体运动，得到了如表 5-6 所示的一组数据，相邻数据对应的时间间隔均为 0.02 s。类比平抛运动的研究过程，分析说明这个物体的运动在水平方向和竖直方向上的运动特点。

表 5-6

x/m	0.009	0.036	0.062	0.088	0.114	0.140	0.166	0.192	0.217	0.243	0.268	0.293
y/m	0.004	0.025	0.040	0.052	0.061	0.065	0.065	0.062	0.055	0.044	0.028	0.010



$$y_1 = \frac{1}{2} g t_1^2 = \frac{v_0^2}{2g}$$

出物体,第(1)小题的情况才能满足;至少从

$$y_2 = \frac{1}{2} g t_2^2 = \frac{2v_0^2}{g}$$

抛出物体,第(2)小题的情况才能满足

命题意图:运用运动合成与分解的方法研究平抛运动的规律。

主要素养与水平:
运动与相互作用(Ⅱ);
模型建构(Ⅱ);科学推理(Ⅱ)。

8. 参考解答:对物体B进行受力分析:
在竖直方向受到重力和滑动摩擦力的作用,水平方向受到垂直于筒壁指向轴心的弹力作用。
根据牛顿第二定律,有
 $ma = mg - F_f$ 和
 $m\omega^2 r = F_N$,另有 $F_f = \mu F_N$ 。由此三式可解得
 $\omega = \sqrt{\frac{g - a}{\mu r}}$

命题意图:在综合运用动力学知识解决问题中培养分析、综合的思维能力。

主要素养与水平:科学推理(Ⅱ)。

9. 参考解答:(1) 银原子运动距离d,所用时间与圆筒转过弧长s所用时间相等,即: $\frac{d}{v} = \frac{s}{\frac{d}{2}\omega}$,可解得
 $v = \frac{\omega d^2}{2s}$ (2) 将已知数据代入上述表达式可得银原子速率的数量级为 10^2 m/s (3) 根据 $v = \frac{\omega d^2}{2s}$ 即

可确定,落点越靠近b处的原子的速率越大

命题意图:从真实情境中抽象出圆周运动和分子的匀速直线运动,并能建立两者的联系。培养抽象建模、逻辑推演的思维能力。

主要素养与水平:运动与相互作用(Ⅲ);科学推理(Ⅲ)。

11. 如图5-57所示,将小球从倾角为45°、高1.8 m的斜面顶端A处水平抛出,刚好落在斜面底端B处。

(1) 抛出后经过多少时间,小球的速度方向恰好与斜面平行?

* (2) 小球在运动过程中离斜面的最大距离是多少?

*12. 如图5-58所示为排球比赛场地示意图。球场总长18 m,网高2.43 m。运动员在离网3 m处(前排3 m线)跳起并沿水平方向将排球击出,击球点的高度为3.23 m。试讨论击出排球的水平初速度在什么范围内才能使排球既能过网又不会出界?

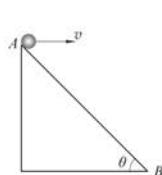


图5-57

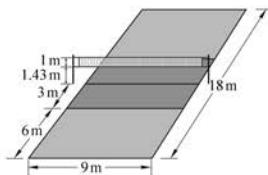


图5-58

10. 参考解答：在水平方向上,此物体在连续相等时间内运动的位移近似相等,所以水平方向为匀速直线运动;在竖直方向上,此物体在连续相等时间内运动的位移先减小,再反方向增大(可能是斜上抛运动)

命题意图：通过对实验数据的分析,判断物体的运动规律,提升实验探究能力。

主要素养与水平：证据(Ⅲ);解释(Ⅲ)。

11. 参考解答：小球从A处水平抛出,刚好落在斜面底端B处,在竖直方向的分运动 $h = \frac{1}{2}gt^2$,得

$$t = \sqrt{\frac{2h}{g}} \approx 0.61 \text{ s}, \text{ 水平方向的分运动 } x = v_0 t, \text{ 得 } v_0 = \frac{x}{t} = \frac{h \cot 45^\circ}{t} \approx 2.95 \text{ m/s} \quad (1) \text{ 小球运动过程中}$$

速度与斜面平行时,其速度方向与水平方向成 45° 角,所以 $v_0 = v_y = gt_1$,得 $t_1 = \frac{v_0}{g} \approx 0.30 \text{ s} \quad (2) \text{ 小球运}$

动过程中离斜面距离最大时就是第(1)小题结论的位置。可用另一种运动分解的思路:把小球的运动分解为沿斜面的匀加速直线运动和垂直于斜面向上的匀减速直线运动。因此,只要求出垂直于斜面向上运动的最大高度就可回答第(2)小题的设问。垂直于斜面运动初速度分量 $v_y = v_0 \sin 45^\circ$, 加速度分量 $a_y = g \cos 45^\circ$, 根据匀变速直线运动的规律 $0 = v_y^2 - 2a_y H$, 解得 $H \approx 0.31 \text{ m}$

命题意图：研究比较复杂的平抛运动问题,体会模型建构的思想,体验从不同的角度思考问题,培养科学的态度。

主要素养与水平：运动与相互作用(Ⅱ);模型建构(Ⅱ);科学推理(Ⅲ)。

12. 参考解答：假设击球方向垂直于网面,根据平抛运动的规律,竖直方向分运动为自由落体运动

$$h = \frac{1}{2}gt^2, \text{ 得 } t = \sqrt{\frac{2h}{g}}; \text{ 水平方向分运动为匀速直线运动 } v_0 = \frac{x}{t}, \text{ 由此得 } v_0 = x \sqrt{\frac{g}{2h}}. \text{ 由题意可知,若}$$

排球恰能过网: $x_1 = 3 \text{ m}$, $h_1 = (3.23 - 2.43) \text{ m} = 0.8 \text{ m}$, 代入数据得 $v_0 = x_1 \sqrt{\frac{g}{2h_1}} \approx 7.42 \text{ m/s}$; 若排球

恰好不出界: $x_2 = (3 + 9) \text{ m} = 12 \text{ m}$, $h_2 = 3.23 \text{ m}$, 代入数据得 $v_0 = x_2 \sqrt{\frac{g}{2h_2}} \approx 14.78 \text{ m/s}$ 。所以击出排

球的水平初速度大小应在 7.42 m/s 和 14.78 m/s 之间

命题意图：将一个比较复杂的排球实际运动抽象为满足题设条件的平抛运动,体验基于经验事实与物理原理建构物理模型的思想,联系实际学以致用。

主要素养与水平：模型建构(Ⅳ);科学推理(Ⅲ);科学本质(Ⅲ);科学态度(Ⅱ)。

第三部分 本章练习部分解读

第一节 曲 线 运 动

(一) 参考解答

1. 曲线所做的 曲线的切线
2. 同一直线 物体速度方向不在同一直线上
3. 见下页表

说 法	判断	说明理由或举例
变速运动一定是曲线运动	错	匀加速直线运动也是变速运动
曲线运动一定是变速运动	对	曲线运动的速度方向一定变化
曲线运动可以是匀变速运动	对	曲线运动速度方向变化但其加速度可以不变

4. 只要物体所受合力方向与速度方向不在同一直线上, 物体就做曲线运动, 无论该合力是恒力还是变力。故答案为 D

5. v_B 、 F_B 。因 v_B 与曲线不相切, F_B 方向指向曲线弯曲的外侧

6. 吹乒乓球时, 对乒乓球侧向施力, 使乒乓球产生一侧向加速度, 开始做曲线运动而转弯。但在原运动方向上, 乒乓球由于惯性仍然要保持原有的分速度而继续运动, 所以乒乓球到不了指定位置

7. 根据运动叠加原理可知, 位移 $s = \sqrt{x^2 + y^2} \approx 51 \text{ m}$ 速度的竖直分量 $v_y = \frac{y}{t} = 1 \text{ m/s}$

8. 根据运动叠加原理可知, 小船相对于河岸的速度大小 $v = \sqrt{v_0^2 + u^2} = \sqrt{5^2 + 1^2} \text{ m/s} \approx 5.10 \text{ m/s}$ 。

因 $\tan \theta = \frac{v_0}{u} = 5$, 可得小船相对于河岸的速度与河岸的夹角 θ 为 78.7°

9. 根据运动叠加原理: (1) $\sin \theta = \frac{u}{v_0} = \frac{6}{25}$, 得 $\theta = 13.9^\circ$, 向北偏西 13.9° 方向飞行; $v = \sqrt{v_0^2 - u^2} = \sqrt{25^2 - 6^2} \text{ m/s} \approx 24.27 \text{ m/s}$, 飞行时间 $t = \frac{s}{v} = 20.6 \text{ s}$ (2) B 、 C 距离 $d = \frac{u}{v_0} s = \frac{6}{25} \times 500 \text{ m} = 120 \text{ m}$;

飞行时间 $t = \frac{s}{v_0} = 20 \text{ s}$

(二) 习题主要素养与水平分析

习题的主要素养与水平

题号	运动与相互作用	模型建构	科学推理	科学论证	问题	证据	解释	科学本质
1	I		I					
2	I		I					
3	I		II					
4	II		II					II
5	II			I				II
6	II		II	II	II		II	
7	II	II		II				II
8	II	II		II				II
9	II	II		II				II

第二节 平 抛 运 动

(一) 参考解答

1. 重力 重力加速度(或 9.8 m/s^2) 匀变速

2. 合成 分解 匀速直线 自由落体

3. 平抛运动竖直方向的分运动为自由落体运动 平抛运动水平方向的分运动为匀速直线运动

4. 因为做平抛运动的物体在连续相等时间内位移的大小和方向都是变化的,所以选项 A、B 错误;而平抛运动物体的加速度为重力加速度 g ,所以选项 D 正确;在相等时间 Δt 内 $\Delta v = g \Delta t$,速度的变化量相等,所以选项 C 正确

5. 见下表

说 法	判 断	说明理由或举例
弹丸 A 先落地	错	平抛运动的竖直分运动为自由落体运动,根据分运动与合运动的等时性,两者同时落地
弹丸 B 通过的位移较小	对	平抛运动位移的竖直分量是自由落体的位移
两弹丸落地时速率可能相等	错	平抛运动末速度的竖直分量是自由落体的末速度
两弹丸落地过程中速度的变化量相等	对	两者运动的加速度均为竖直向下的重力加速度 g
两弹丸在空中运动的加速度相同	对	两者运动的加速度均为竖直向下的重力加速度 g

6. $1 : \sqrt{3} \quad \sqrt{3} : 2 \quad 3 : 2 \quad 1 : \sqrt{3}$ 根据平抛运动竖直方向、水平方向的位移和速度表达式可得上述答案

7. 根据 $\tan \theta = \frac{v_0}{v_y} = \frac{v_0}{\sqrt{2gh}}$ 分析可得,初速度相同时,高度越小,小球落地的瞬时速度与竖直方向之间的夹角越大;同一高度抛出时,初速度越大,小球落地的瞬时速度与竖直方向之间的夹角越大,因 B 球的高度小且初速度大,所以 B 球落地的瞬时速度与竖直方向的夹角最大

8. (1) 当风速不大时,忽略空气阻力的情况下,石子的运动可以看成平抛运动 (2) 平抛运动的时间

$$t = \sqrt{\frac{2h}{g}} = \sqrt{\frac{2 \times 70}{9.8}} \text{ s} \approx 3.78 \text{ s}; \text{ 水平距离 } x = v_0 t = 10 \times 3.78 \text{ m} = 37.8 \text{ m}; \text{ 因为 } v_y = \sqrt{2gh} = \sqrt{2 \times 9.8 \times 70} \text{ m/s} \approx 37.04 \text{ m/s}, \text{ 得石子入水瞬时速度大小 } v = \sqrt{v_0^2 + v_y^2} = \sqrt{10^2 + 37^2} \text{ m/s} \approx 38.33 \text{ m/s}, \text{ 由 } \tan \theta = \frac{v_0}{v_y} = \frac{10}{37} \approx 0.27, \text{ 可得速度方向与竖直方向的夹角约为 } 15.1^\circ$$

9. 小球下落 h_2 过程的水平位移 $x = v_0 \sqrt{\frac{2h_2}{g}} = 2 \text{ m} > l$, 故小球不会落到第一层平台上,而是直接落到地面。小球落到地面的水平位移 $x' = v_0 \sqrt{\frac{2(h_1 + h_2)}{g}} = 3.2 \text{ m}$, 设 $l' = x' - l = (3.2 - 1.5) \text{ m} = 1.7 \text{ m}$, 则小球落在第一层平台下 1.7 m 远的地面上

10. 设竖直方向的速度分量为 v_y ,由题意, $\tan \theta = \frac{v_0}{v_y} = \frac{h}{x}$, $x = v_0 t$, $v_y = gt$, 可解得 $v_0 = \sqrt{gh}$; 因为 $v_y = \sqrt{2gy} = \frac{v_0}{\tan \theta} = \frac{\sqrt{gh}}{\tan \theta}$, 得 $y = \frac{h}{2\tan^2 \theta}$, 所以飞行高度 $H = h + y = h \left(1 + \frac{1}{2\tan^2 \theta}\right)$

11. (1) 对小铁球受力分析可得,它受到的合力方向沿斜面向下,与初速度方向垂直,所以小铁球做类似平抛运动的匀变速曲线运动 (2) 小铁球的运动加速度为 $a = g \sin \theta$, 在斜面上运动的时间 $t = \sqrt{\frac{2m}{a}} = \sqrt{\frac{2m}{g \sin \theta}}$, 则初速度大小 $v_0 = \frac{n}{t} = n \sqrt{\frac{g \sin \theta}{2m}}$

(二) 习题主要素养与水平分析

习题的主要素养与水平

题号	运动与相互作用	模型建构	科学推理	科学论证	问题	解释	科学本质
1	I	I					
2	I	I					
3	I	I	II		II	II	
4	II	II					II
5	II	II		II			
6	II	II	II				
7	II	II	II		II	II	
8	II	II	II				II
9	II	II	II	III			
10	III	III	III				
11	III	III	III				

第三节 圆周运动

(一) 参考解答

1. 圆周 弧长(或路程)
2. 不变 变化
3. 180° 30° 见图 13
4. 见下表

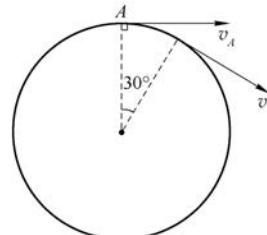


图 13

说 法	判断	说明理由或举例
因为匀速圆周运动是匀速运动, 所以速度不变	错	匀速圆周运动的速度大小不变, 但方向时刻改变, 所以速度是变化的
因为匀速圆周运动是曲线运动, 所以是变速运动	对	曲线运动的速度方向时刻在变, 所以是变速运动
做匀速圆周运动的物体线速度越大, 则运动一周的时间越短	错	因为 $T = 2\pi \frac{r}{v}$, 所以仅凭线速度大还不能判定周期小
做匀速圆周运动的物体, 角速度越大, 则运动一周的时间越短	对	因为 $T = 2\frac{\pi}{\omega}$, 所以角速度越大, 即可断定周期越小, 即运动一周的时间越短

5. (1) $<$ $>$ $<$ (2) $<$ $=$ $=$ (3) $=$ $>$ $<$
6. $2 : 3$ $2 : 3$ $4 : 9$
7. 见下表

说 法	判断	说明理由或举例
物体上任何一点的线速度都不变	错	匀速转动物体上的每一点都在做匀速圆周运动, 线速度时刻改变
物体上任何一点的角速度都不变	对	匀速转动物体上的每一点都在做匀速圆周运动, 角速度保持不变
物体上任意两点的线速度大小都不同	错	半径相同的点, 线速度大小都相同
物体上任意两点的角速度大小都不同	错	匀速转动物体上的每一点做圆周运动的角速度都相同

8. a 和 c b 、 c 和 d 因为皮带不打滑, 所以 a 、 c 两点的线速度大小均与皮带速度相同, 而 b 、 c 、 d 为绕轴转动的同一物体上的三个点, 所以角速度大小相同

9. 速率计的指针指在“120 km/h”上, 表示此刻汽车的行驶速率为 $120 \text{ km/h} \approx 33.33 \text{ m/s}$ 。车轮轮缘上的点绕轮轴转动的线速度大小就等于汽车行驶的速率, 为 33.33 m/s 。根据 $n = \frac{\omega}{2\pi} = \frac{v}{2\pi r}$, 可求出 $n \approx 17.69 \text{ r/s}$

(二) 习题主要素养与水平分析

习题的主要素养与水平

题号	运动与相互作用	模型建构	科学推理	科学论证	科学态度
1	I				
2	I				
3		I	I		
4	I			I	
5			II		I
6			II		
7				I	
8	I		II		
9	II		II		I

第四节 向心力 向心加速度

(一) 参考解答

1. (1) 指向圆心 (2) 作用效果 (3) 向心加速度 方向 (4) 向心力

2. 见下表

说 法	判 断	说明理由或举例
向心力的方向始终沿着半径指向圆心, 所以是一个恒力	错	向心力的方向从物体指向圆心, 物体的位置在变化, 从不同的位置指向圆心的方向是变化的, 所以向心力是变力
对做匀速圆周运动的物体进行受力分析时, 不能遗漏向心力	错	做匀速圆周运动的物体, 受到的向心力是它所受力的合力
向心力只改变物体运动的方向, 不改变运动的快慢	对	向心力与速度方向垂直, 所以不改变速度的大小, 只改变速度的方向

3. 见图 14

4. $12 : 1 \quad 4 : 1 \quad 4 : 3 \quad 4 : 9$ 由 $a = \omega^2 r$ 可得 $\frac{a_1}{a_2} = \frac{\omega_1^2}{\omega_2^2} \cdot \frac{r_1}{r_2}$;
 由 $F = m\omega^2 r$ 可得 $\frac{F_1}{F_2} = \frac{m_1}{m_2} \cdot \frac{\omega_1^2}{\omega_2^2} \cdot \frac{r_1}{r_2}$; 由 $a = \frac{v^2}{r}$ 可得 $\frac{a_1}{a_2} = \frac{v_1^2}{v_2^2} \cdot \frac{r_2}{r_1}$;
 由 $F = m \frac{v^2}{r}$ 可得 $\frac{F_1}{F_2} = \frac{m_1}{m_2} \cdot \frac{v_1^2}{v_2^2} \cdot \frac{r_2}{r_1}$

5. C 物体随地球自转而绕其自转轴做匀速圆周运动, 角速度、周期由地球自转决定, 所以, 不论放

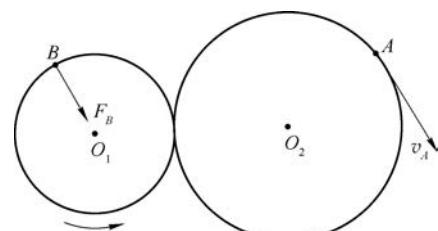


图 14

在哪里,物体的角速度和周期都相同,所以选项 C 正确。在北京和广州的物体运动的半径不同,向心力 $F=m\omega^2 r$, 所以向心力大小不同,选项 A 错误;向心加速度 $a=\omega^2 r$, 所以向心加速度大小不同,选项 B 错误;线速度 $v=\omega r$, 所以线速度大小不同,选项 D 错误

6. (1) 两个力,重力和绳的拉力 (2) 小球受到的合力提供向心力,由小球指向 O'

7. (1) 根据 $a=\frac{v^2}{r}$, 可解得 $v=\sqrt{ar}$, 将 $a=8 \text{ g}$ 、 $r=2.25 \text{ m}$ 代入,可解得 $v \approx 13.42 \text{ m/s}$ (2) 根

据 $T=\frac{2\pi r}{v}$, 可解得 $T \approx 1.05 \text{ s}$

8. 小球在运动过程中水平方向上只受到绳子拉力的作用,该力始终与小球速度方向垂直,不改变速度的大小,所以小球在运动中的速率始终是 2 m/s 。当绳子拉力(即小球受到的向心力)达到 4 N 时,绳子将断,根据 $F=m\frac{v^2}{r}$ 可求出细绳将断时小球的运动半径 $r_{\min}=m\frac{v^2}{F_{\max}}$, 代入已知数据可得 $r_{\min}=0.4 \text{ m}$ 。

根据题意可知,小球每运动半圈,运动半径减小 20 cm , 所以半径从 1 m 减小到 0.4 m 需经过 3 个半圈。

根据 $T=\frac{2\pi r}{v}$ 可求得 $T_1=\pi \text{ s}$, $T_2=0.8\pi \text{ s}$, $T_3=0.6\pi \text{ s}$ 。所以 $t=\frac{T_1}{2}+\frac{T_2}{2}+\frac{T_3}{2}=1.2\pi \text{ s} \approx 3.77 \text{ s}$

(二) 习题主要素养与水平分析

习题的主要素养与水平

题号	运动与相互作用	模型建构	科学推理	科学论证
1	I			
2				II
3		I		
4			II	
5	II		I	
6		II		
7	II	I	II	
8	II	III	III	

第五节 圆周运动的应用

(一) 参考解答

1. 问题(1): 自行车赛道转弯处的平面为什么都做成倾斜的? 回答: 赛道倾斜,自行车受到的弹力倾斜向上,其水平分力可以为自行车转弯提供所需的向心力。

问题(2): 对行驶在转弯道内侧的选手和外侧的选手而言,如果他们的质量相同,行驶速度大小相同,谁需要的向心力更大? 回答: 行驶在内侧赛道的选手需要的向心力更大。根据向心力公式 $F=m\frac{v^2}{r}$ 可知,质量相同、速度大小相同的情况下,半径越小所需向心力越大

2. 甲、乙两位同学的说法都不正确。向心力的作用效果是改变物体的运动方向,并不会使物体朝圆心运动,所以甲的说法错误。以地面为参考系来看,人向盘边缘靠拢是因为盘底给人的摩擦力不足以提供人做圆周运动所需的向心力,所以人做离心运动,而不是因为人受到了离心力的作用,所以乙的说法也不对

3. $\sqrt{r_1} : \sqrt{r_2} = \sqrt{r_1} : \sqrt{r_2}$ 根据已知条件和 $F = m \frac{v^2}{r}$ 可得, $v_1 : v_2 = \sqrt{r_1} : \sqrt{r_2}$; 根据 $t = \frac{l}{v}$ 和 $l = \frac{1}{2}\pi r$ 可得, $t_1 : t_2 = \sqrt{r_1} : \sqrt{r_2}$

4. 见下表

说 法	判断	说明理由或举例
物块处于平衡状态	错	平衡状态中物体的速度大小、方向都不变,而圆盘上物块的速度方向不断变化,所以不是平衡状态
物块受到三个力作用	对	物块受到重力、支持力和静摩擦力的作用
角速度一定时,物块距转轴的距离越远,越容易脱离圆盘	对	根据向心力公式 $F = m\omega^2 r$, 物块到转轴的距离越大,需要的向心力越大,越接近最大静摩擦力,即越容易脱离圆盘
物块距转轴距离一定时,运动周期越小,越不容易脱离圆盘	错	周期越小即角速度越大,根据向心力公式 $F = m\omega^2 r$, 角速度越大,需要的向心力越大,越接近最大静摩擦力,即越容易脱离圆盘

5. (1) 以建议的速度行驶时,火车受到的重力和垂直于轨道平面的支持力作用的合力恰好可以提供向心力,火车轮缘对内轨和外轨恰好无挤压作用,对轨道不会造成损害 (2) 如果火车转弯时的速度大于 $\sqrt{Rg \tan \theta}$, 火车需要更大的向心力,轮缘会对外轨造成挤压,速度越大,挤压作用越大;如果速度小于 $\sqrt{Rg \tan \theta}$, 火车需要的向心力较小,轮缘会对内轨造成挤压,速度越小,这个挤压作用越大

6. 还需要测量齿轮的齿数 p ,以及车轮的半径 r 实验中小车齿轮转过的圈数为 $\frac{N}{p}$,则小车的行程 $l = \frac{N}{p} \cdot 2\pi r = \frac{2\pi r N}{p}$, 小车行驶的时间 $t = \frac{N}{n}$, 所以小车的速率 $v = \frac{2\pi r n}{p}$

7. (1) 根据向心力公式 $F = m\omega^2 r$, 可算出当小球 A 随转台以角速度 $\omega = 4 \text{ rad/s}$ 、半径 $r = 0.25 \text{ m}$ 转动时,所受向心力 $F = 4 \text{ N}$ 。因为这个向心力由轻绳提供,所以轻绳对物体 B 的拉力 $F_{\text{拉}} = 4 \text{ N}$ 。物体 B 静止在地面上,受到重力、支持力和绳拉力的作用,根据共点力平衡有 $mg = F_N + F_{\text{拉}}$, 即可求出地面对 B 的支持力 $F_N = 6 \text{ N}$, 所以 B 对地面的压力也为 6 N (2) 要使 B 脱离地面,则绳对 B 的拉力要等于 B 的重力,即 10 N,此时小球 A 受到的向心力也为 10 N。根据 $F = m\omega^2 r$, 即可求得角速度至少为 $\omega' = 2\sqrt{10} \text{ rad/s}$

8. < > = 小球受重力与圆锥壁弹力的作用,其合力即小球做匀速圆周运动的向心力。由重力的大小与方向以及弹力和向心力的方向,可得向心力 $F = mg \cot \alpha$ (α 为半锥角),所以两小球的向心力相同。而两球做圆周运动的半径 $r_A > r_B$ 。根据 $\omega^2 = \frac{F}{mr}$ 可判定 $\omega_A < \omega_B$, 根据 $v^2 = \frac{Fr}{m}$ 可判定 $v_A > v_B$,

根据 $a = \frac{F}{m}$ 可判定 $a_A = a_B$

(二) 习题主要素养与水平分析

习题的主要素养与水平

题号	运动与相互作用	模型建构	科学推理	科学论证	质疑创新	问题	证据	社会责任
1	I					II		
2	II			II	II			

(续表)

题号	运动与相互作用	模型建构	科学推理	科学论证	质疑创新	问题	证据	社会责任
3	II		II					
4	I			II				
5	II	II	II	II				II
6	II	III	II				II	
7	II	III	III					
8	II		II					

第四部分 本章实验与活动部分解读

1. 自主活动 观察墨水的径迹

由观察到的墨水径迹可以得到什么结论？

参考解答：墨水近似沿陀螺边缘的切线方向飞出，由此可知陀螺边缘的速度大致沿切线方向

命题意图：观察现象，对现象进行分析和推理从而作出猜想。

2. 自主活动 改变乒乓球的运动方向

(1) 应在什么位置吹气才能使乒乓球经过指定位置？

参考解答：在乒乓球尚未运动到指定位置前方时吹气

命题意图：感受当物体受到与速度不在同一直线上的力作用时，速度方向会发生变化。

(2) 分别描述吹气前、吹气时和吹气后乒乓球的轨迹。

参考解答：吹气前，乒乓球在桌面上沿直线运动；吹气时，乒乓球沿曲线运动；吹气后，乒乓球沿斜向直线运动

命题意图：进一步感受力改变速度方向的作用效果。

3. 学生实验 探究平抛运动的特点

(1) 各组就数据分析的具体过程进行交流，比较、分析实验结果的异同及其原因。

参考解答：实验中得到的轨迹都近似是抛物线。平抛运动的水平分运动是匀速直线运动，竖直分运动是初速度为零的匀加速直线运动，加速度约等于重力加速度。但各组在斜槽上释放小球的位置不同，因此小球从出口槽水平飞出的初速度不同，使得其轨迹的形状不同

命题意图：能比较不同组的实验图像，分析差异的原因，并表达观点。

(2) 为什么每次必须将小球从同一位置由静止释放？如何探究平抛运动的初速度大小对运动轨迹的影响？

参考解答：小球每次从同一位置由静止释放，是为了保证水平抛出的初速度相等，这样实验中得到的轨迹才能视作同一次平抛运动的轨迹。通过改变小球的释放高度，重新实验得到轨迹，可以研究初速度大小对运动轨迹的影响

命题意图：理解实验操作中的注意事项，拓展实验研究的内容。

4. 自主活动 探究向心力的作用效果

(1) 向心力方向与速度方向有什么关系？

参考解答：向心力的方向与速度方向垂直

(2) 手松开后,小球将怎样运动?

参考解答：小球沿着圆周切线做直线运动

(3) 向心力的作用效果是什么?

参考解答：改变小球的运动方向

命题意图：通过三个问题逐步帮助学生理解向心力的作用效果。

5. 学生实验 探究向心力大小与半径、角速度、质量的关系

(1) 各组就实验数据进行交流,比较、分析实验结果的异同及其原因。

参考解答：实验数据虽然各不相同,但是由数据得出的规律是相同的。各组实验测量的数据是特殊的点,但大量数据归纳出来的结论都是向心力与半径、角速度、质量的关系,是同一个规律

命题意图：能分析实验图像中的信息,比较多组实验结果。

(2) 线速度、角速度都可以描述物体做匀速圆周运动的快慢,用本实验的装置能否直接研究向心力大小与半径、线速度、质量的关系?

参考解答：本装置可以测出光电门经过挡光片时的速度大小,除以光电门到转轴的距离即可得到砝码运动的角速度。通过控制电机的转速可控制砝码运动的角速度。实验中若固定砝码的运动半径 r 、线速度 v ,研究向心力 F 与质量 m 的关系,就和固定 r 、 ω 研究 F 与 m 的关系一样,因为 r 、 ω 固定, v 就不变。同样,固定 r 、 m 研究 F 与 v 的关系也和固定 r 、 m 研究 F 与 ω 的关系一样。但如果要固定 m 、 v 研究 F 与 r 的关系,情况就不同了:实验中固定 ω ,改变 r , v 会随之变化,操作中很难做到 v 保持不变。所以本实验装置用来探究向心力大小与半径、角速度、质量的关系比较合适,不适合探究向心力大小与半径、线速度、质量的关系

命题意图：理解实验设计的意图。

第六章 万有引力定律

第一部分 整 章 分 析

学习目标

1. 了解万有引力定律的发现过程,知道万有引力定律,能用万有引力定律分析简单的天体运动问题。
2. 通过了解人类探索行星运动规律的历史和万有引力的发现过程,认识发现万有引力定律的重要意义及科学定律对人类探索未知世界的作用。
3. 通过了解卡文迪什扭秤实验的精妙设计,体会物理实验中“微小量放大”的思想。
4. 通过了解“称量”地球和太阳的质量、预测彗星回归、发现海王星等万有引力定律的应用实例,了解航天事业的发展,认识科学研究包含着想象和创新,以及人类对自然的探索是永无止境的。

编写意图

课程标准中对本章内容的要求为:

2.2.4 通过史实,了解万有引力定律的发现过程。知道万有引力定律。认识发现万有引力定律的重要意义。认识科学定律对人类探索未知世界的作用。

2.2.5 会计算人造地球卫星的环绕速度。知道第二宇宙速度和第三宇宙速度。

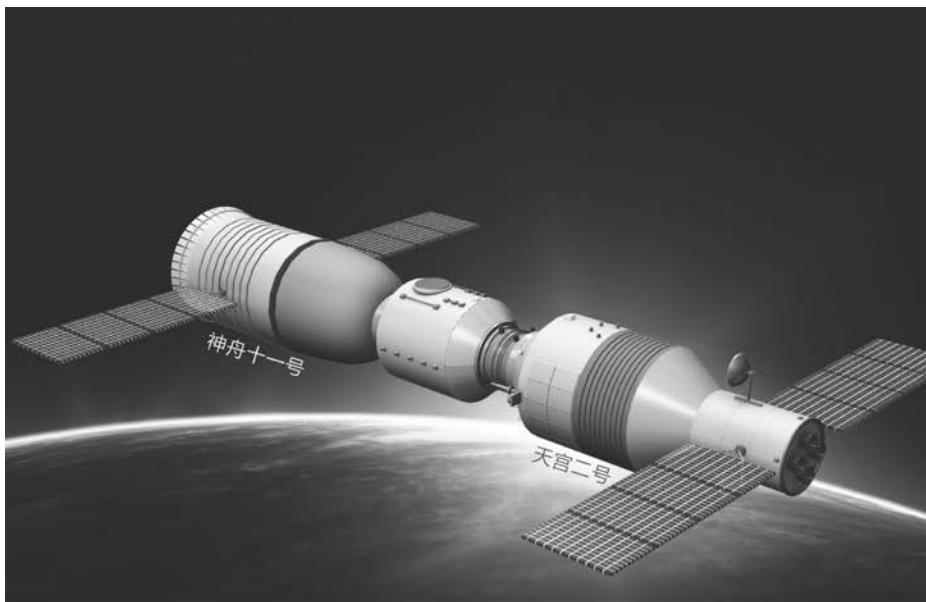
本章是在学习了牛顿运动定律和圆周运动的基础上,继续学习万有引力定律和天体的运动规律。

本章通过回顾人类探索行星运动的历史,引导学生体会人类对自然界探索的精神,加强运动和相互作用的观念。通过了解牛顿经过对落体运动和月亮运动的关联思考从而提出万有引力这一史实,使学生认识到科学研究包含了大胆的想象和创新。通过了解万有引力定律的发现过程,引导学生体会统一性观念在科学认识中的重要意义。通过运用万有引力定律计算天体质量、发现海王星等事实,引导学生体会科学定律的重要作用。通过介绍我国航天事业的发展,激发学生的爱国热情,以及探索自然、造福人类的意识。本章重点关注从现象归纳规律,运用规律解释现象的认识过程。这部分内容充分体现了模型建构、科学推理、科学态度和质疑创新等物理学科素养的培养。

在本章学习过程中,不仅要关注运动观念的形成,还应注重创设运用物理规律解释或解决实际问题的情境,注重体会科学定律在科学探究中的重要作用。

完成本章内容的学习,共需要 4 课时。其中,第一节 1 课时,第二节 1 课时,第三节 2 课时。

第二部分 本章教材解读



图示为我国“神舟十一号”飞船与“天宫二号”空间站对接过程的模拟图。“神舟十一号”与“天宫二号”的对接过程仿佛是在太空中穿针引线。要让两个航天器在约 7.67 km/s 的速度下完美对接，是一个非常复杂的过程。你知道图示情境中的对接处距地面有多高吗？

第六章 万有引力定律

- 在本章中我们将：
 1. 知道万有引力定律。
 2. 了解万有引力定律的发现过程，认识其重要意义以及科学定律对人类探索未知世界的作用。
 3. 运用万有引力定律分析简单的天体运动问题。
- 本章的学习将用到匀速圆周运动规律和牛顿第二定律。
- 本章的学习有助于通过物理定律的普适性认识自然界的统一性，体会人类对自然规律的探索历程，加强运动和相互作用的观念。

在“神舟十一号”与“天宫二号”交会对接过程中，“神舟十一号”飞船经历 5 次变轨，逐渐靠近“天宫二号”空间站，在距离地面 393 km 的高空中实现高速、刚性自动交会对接，其中蕴含着以万有引力定律为基础的复杂、高端技术，也包含着我国航天科学家与技术人员的智慧与辛劳，是我国在航天技术上的一次重大飞跃。

以此作为本章情境引导，充分体现了万有引力定律的发现是物理学发展史上的重大成就，是人类探索宇宙历程中的伟大基石。让学生在学习本章内容之前一睹其魅力，认识到科学定律对人类探索未知世界的作用。

本章第三节的“问题与思考”第 4 题与此呼应。

本节编写思路

本节通过提出问题引出本节讨论的主题：人类通过对天体运动的认识与研究过程，最终建立起行星运动的正确模型，为下一节学习万有引力定律做好准备。

通过“拓展视野”栏目了解地心说的问题所在和日心说的成功之处，了解开普勒关于行星运动的三定律，启发学生体会人类对行星运动规律的认识历经了几代人的不懈努力，领会科学家实事求是、坚持真理、勇于创新的精神。

通过介绍开普勒运用第谷的观测资料潜心研究与计算的过程，引导学生明白建构物理模型是科学思维的重要内容，“问题、证据、解释”是科学探究的核心素养。

本节的学习过程可以有两种形式：一种是教师讲述；另一种是学生自己阅读教材并查阅相关资料，再共同讨论、总结、归纳。后一种形式可以培养学生获取资料、分析资料、合作交流的能力，提高学生的物理学科核心素养。

36 第六章 万有引力定律

[1]

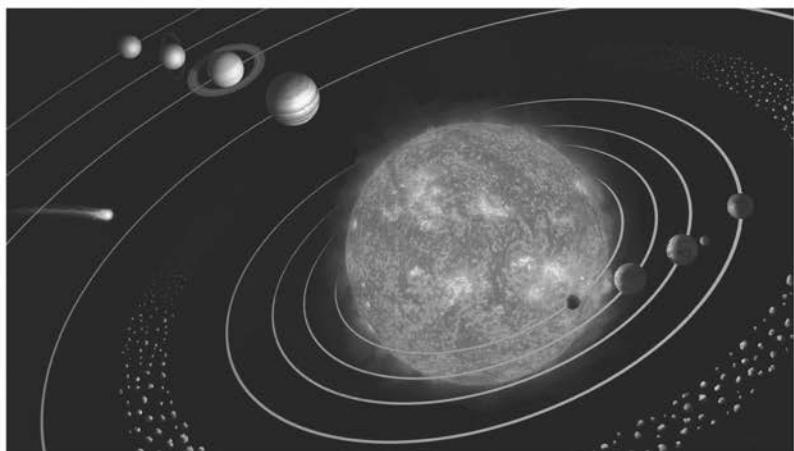


图 6-1 太阳系模型图

第一节 行星的运动

日升月落，斗转星移。自古以来人类仰望天空，对各种天文现象充满好奇，并试图破解其中的奥秘。大约在公元前 500 年，作为科学的天文学开始起步，人类开始探寻对这些现象的进一步认识，对天空的认知也从太阳系（图 6-1）逐步走向浩瀚的宇宙。

② 人类在早期是如何认识天体运动的？

地心说和日心说是历史上关于天体运动的两种重要学说。

地心说经过几个世纪的发展，到公元 2 世纪由古代天文学家托勒密（图 6-2）进一步完善而成。地心说认为地球静止不动，是宇宙的中心；太阳、月亮和行星等所有天体都绕地球运动。地心说能解释一些天文现象，符合人们的日常经验。

地心说延续了一千多年之后，随着生产和航海事业的发展，天文观测的资料日益丰富，人们发现地心说的理论与实际的观测资料并不完全一致，也不能准确解释某些天文现象。

16 世纪，波兰天文学家哥白尼（图 6-3）利用前人积累的天文资料，经过近 40 年的观测和研究，提出了日心说。日心说



图 6-2 托勒密
(C. Ptolemy, 约 90—168)

正文解读

[1] 太阳系模型是学生熟悉的天体运行模型。本节利用太阳系模型图引出行星运动的情境，使学生初步感知行星运动的形式和规律，这正是本节的重点。

[1] 认为太阳是宇宙的中心，地球和其他行星围绕太阳运动（图 6-4）。哥白尼的学说能简洁地解释“火星逆行”等行星运动的现象，可以简单明了地说明许多天文学的问题。虽然日心说受到当时社会的阻挠和禁止，但还是很快传播开来。哥白尼日心说的提出，不仅铺平了通向近代天文学的道路，而且开创了自然科学的新时代。



图 6-3 哥白尼 (N. Copernicus, 1473—1543)

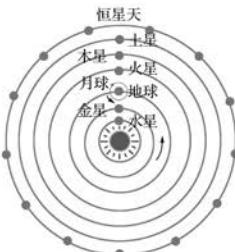


图 6-4 哥白尼日心说示意图

直到 17 世纪初，伽利略用自己发明的望远镜观察天空，发现了围绕木星运动的“月球”，从而证明地球并非所有天体的中心。至此，地心说才真正退出历史舞台。

[2]

拓展视野

通常观察到火星在天空中的运动是沿着同一个方向缓慢而稳定地在遥远的背景星前面移动。但大约每过两年，地球会在绕日的轨道上超越火星，在此期间火星显得非常大而亮，这段时间内观察火星会发现火星在天空上倒着走，这个现象称作火星逆行。如图 6-5 所示的是火星逆行的示意图。地心说在解释这一现象时遇到了很大的困难，用日心说对该现象进行解释则简洁许多。

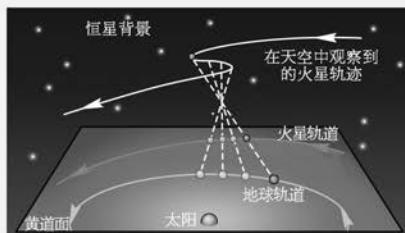


图 6-5 火星逆行现象示意图

行星的运动有什么规律？

[3] 德国天文学家开普勒（图 6-6）支持哥白尼的日心说，他仔细研究了丹麦天文学家第谷（T. Brahe, 1546—1601）花了连续 20 年对行星仔细观测积累的资料，经过 4 年多的

着运动的，这是以不同天体为中心观察的结果。解释这一现象可以进一步提升运动与相互作用观念、科学思维等物理学科素养。

[3] 开普勒在对火星轨道的研究中，起初认为是圆轨道，但他得到的结果与第谷的观测数据始终存在至少 $8'$ 的偏差。开普勒对第谷长期观测得到的数据的精确性深信不疑，从而得出了行星运动并非匀速圆周运动，而是以椭圆轨道运动的结论，体现了科学探究中的问题、证据、解释等学科素养。要让学生体会尊重客观事实、坚持实事求是是科学研究中的基本态度和社会责任。

[1] 从地心说到日心说的发展充满曲折和艰辛。人们的宇宙观代表着与所处时期社会大背景相适应的主流观念和意识形态。从地心说到日心说的转变不是简单的参考系的转变，而是要打破宗教社会的束缚，是人类思想的一次重大解放。在教学时，可以阐述这些观点，体会科学家追求真理的科学精神。

[2] 此处设置“拓展视野”是为了说明火星逆行的解释是日心说有力的证明。地心说在解释这一现象时，要用到复杂的本轮、均轮等，遇到了很大的困难，而根据哥白尼的日心说就可以用简洁的理论来解释。

地球、火星沿各自轨道绕太阳运行，当地球超越火星时，由于视角关系（教材图 6-5），在天空背景中看起来，火星在一段时间内是倒

[1] 为了感受开普勒第三定律中的比例常量 k 值, 可以列出各大行星的轨道半长轴和公转周期的数据, 让学生观察并发现规律, 提高科学探究中的证据、解释、交流等学科素养。

在理解了开普勒关于行星运动定律的基础上, 应指出定律不但适用于行星绕太阳运动, 也适用于卫星绕行星运动, 但 k 值是不同的。

还需说明, 开普勒对行星轨道的论述将圆轨道改变为椭圆轨道是非常正确和严谨的, 且其中的偏差很小, 所以在后续研究问题时, 我们可以近似地把椭圆轨道看作圆轨道。

[2] 此处设置“拓展视野”是为了介绍椭圆的相关知识。椭圆知识在该学段的数学课程中尚未学习, 这里介绍椭圆的形成及其焦点与长轴, 可以帮助学生更好地理解开普勒三定律。

刻苦计算, 最后发现行星运动的真实轨道不是圆, 而是椭圆。1609 年, 开普勒发表了著名的开普勒第一和第二定律。开普勒第一定律把太阳的位置精确标定在椭圆的一个焦点上, 各行星都在椭圆轨道上绕太阳运行。开普勒第二定律也叫“面积定律”, 提出了行星与太阳的连线在相等时间内扫过的面积相等, 这就解释了行星在近日点运动快、在远日点运动慢的原因(图 6-7)。1619 年, 开普勒又在《宇宙和谐论》一书中发表了开普勒第

[1] 三定律, 即行星绕太阳运行的椭圆轨道半长轴 a 的三次方与周期 T 的二次方之比是一个常量, 即

$$\frac{a^3}{T^2} = k$$

式中, k 是一个与行星无关的常量。



图 6-6 开普勒 (J. Kepler, 1571—1630)

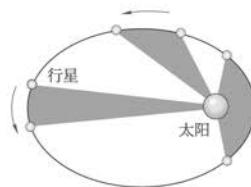


图 6-7 开普勒第二定律

实际上, 行星的椭圆轨道都接近于圆, 在中学阶段的研究中我们一般可近似地按圆轨道处理。因此, 若用 r 表示行星圆轨道的半径, 则有

$$\frac{r^3}{T^2} = k$$

[2] 拓展视野

可以用一根细绳和两枚钉子来画椭圆, 如图 6-8 所示。绳的两端用钉子固定在纸上, 再用笔尖保持绳始终绷紧画线, 绕中心 O 一圈所画的线就形成了椭圆。两枚钉子的位置就是椭圆的焦点, 焦点所在的较长的虚线就是椭圆的长轴, 其长度的一半就叫半长轴, 常记为 a 。半长轴是中心到椭圆的最大距离。

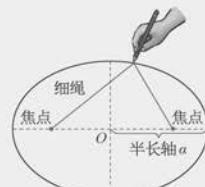


图 6-8 椭圆的绘制

[1] 开普勒的成就表明,观察是科学的研究的开端。观察激发思考,进而发现科学规律,建立新的理论,这些规律和理论又引发新的观察和思考,人类就是这样在科学的大道上前行。开普勒三定律已经传达了重大的“天机”,蕴涵着更为简洁、更为普遍的规律,其中的奥秘直到牛顿万有引力定律的建立才最终被“破译”出来。

问题④思考

- 人类对天体运动的认识在不断发展,简述托勒密、哥白尼、第谷和开普勒对天文学发展作出的贡献。
 - 17世纪,天文学家哈雷观察到一颗彗星,这颗彗星绕太阳运行的轨道示意图如图6-9所示。彗星最近飞临地球的时间是在1986年。在如图位置飞临地球阶段,彗星运动速度的大小如何变化?简述理由。
- 
- 图6-9
- 判断下列关于行星绕太阳运动的描述是否正确,并说明理由。
 - 太阳处于椭圆轨道的中心。
 - 所有行星在同一椭圆轨道上运动。
 - 轨道半长轴越短的行星周期越长。
 - 行星从近日点运动到远日点过程中速率逐渐减小。
 - 天文学家发现一颗小行星沿近似圆形轨道绕太阳运行,测得该轨道的平均半径约为地球公转轨道半径的3倍。这颗小行星绕太阳运行的周期大约是多少年?

[1] 开普勒关于行星运动的三定律是牛顿提出万有引力定律的基础,要让学生体会到开普勒发表此三定律的重要性。这三个定律蕴含着行星运动的动力学关系,它们的建立为后续物理学家研究天体的运动规律打开了“大门”。

问题与思考解读

1. 参考解答: 托勒密完善了古代天文学,主张地心说,解释了一些天文现象;哥白尼根据前人积累的资料,经历几十年的观测研究,重新提出日心说,简单明了地解释了诸如“火星逆行”等很多天文学问题,铺平了通向近代天文学的道路;第谷进行了长期的天文观测,积累了20年的观测资料,为开普勒的研究提供重要依据;开普勒利用第谷的观测资料,经过4年多刻苦计算,发现并发表了关于行星

运动的三定律,准确阐述了行星运动的规律

命题意图:了解人类对行星运动研究的发展历程,体会人类追求真理的科学精神(可以让学生在课后查阅文献,更详尽地了解科学家的成就和他们追求真理的精神)。

主要素养与水平: 科学本质(I);科学态度(I)。

2. 参考解答: 彗星运动的速度增大。彗星飞临地球实际上是在其椭圆轨道上接近太阳,根据开普勒第二定律,在相同时间内彗星与太阳连线扫过的面积相同,则彗星接近太阳时,在相同时间内运动的路程就长,所以其速度增大

命题意图:运用已有的物理知识解释物体的运动规律。

主要素养与水平: 运动与相互作用(I);科学推理(II)。

3. 参考解答: (1) 错误。由开普勒第一定律可知,太阳位于行星椭圆轨道的一个焦点上 (2) 错误。每颗行星的周期不同,根据开普勒第三定律,行星轨道的半长轴不同,所以各行星的轨道不同 (3) 错误。根据开普勒第三定律可知,行星运行周期的二次方与轨道的半长轴的三次方成正比 (4) 正确。根据开普勒第二定律可知,行星从近日点向远日点运动的过程中,在相等时间内运动的路程减少,所以运动速率减小

命题意图: 通过对各种说法的分析判断,理解开普勒关于行星运动的三定律。

主要素养与水平: 运动与相互作用(Ⅱ);模型建构(Ⅱ);科学推理(Ⅱ)。

4. 参考解答: 由开普勒第三定律 $\frac{r^3}{T^2} = k$, 得 $T' = T \sqrt{\left(\frac{r'}{r}\right)^3} = \sqrt{27}$ 年 ≈ 5.2 年

命题意图: 开普勒第三定律的简单应用,为下一节万有引力定律的应用作铺垫。

主要素养与水平: 运动与相互作用(Ⅱ);模型建构(Ⅱ);科学推理(Ⅱ)。

[1]



图 6-10 浩瀚宇宙与万有引力

第二节 万有引力定律

1665 年 8 月，22 岁的牛顿为躲避英国剑桥的鼠疫回到家乡林肯郡。这期间他研究了许多科学问题，包括开普勒的行星运动定律。在此基础上，牛顿经过长期研究，最终发现了茫茫空中的天体与地球上的物体共同遵循的物理规律——万有引力定律（图 6-10）。

据传，当牛顿在思考月亮绕地球运行的原因时，看见窗前一棵树上落下一个苹果，这引起了他的思考。为什么苹果会落下来，而月亮却没有落下来？

② 什么力使月亮绕地球运行？

牛顿认为，或许使苹果下落的力同样使月亮向地球“下落”，而就是这个“下落”才使月亮不断改变方向而始终保持在绕地球运行的轨道上。

牛顿的思考是：水平抛出一个苹果，它将沿曲线落回地面；苹果抛出得越快，它就会落得越远。如果把苹果抛出得足够快，它就可以绕过地球表面的大部分圆周，甚至能永远不会落回地面而变成绕地球运行（图 6-11）。

牛顿的思考并未就此止步，月亮到底受到什么力的作用才使其绕地球运行？这个力与行星绕太阳运行所受的力是否类似？用这种力能不能解释开普勒三定律？

图 6-11
从苹果到月亮

学探究中制定方案、设计实验、获取数据和处理信息等物理实验素养。

在学习中所经历的推演定律、实验介绍等过程，有助于学生对模型建构、科学推理、科学论证、科学本质等核心素养的提升。

正文解读

[1] 牛顿经过长期的研究，将茫茫空中的天体运动与地球上的物体运动这两种看似无关的现象联系起来，把地上与天上的引力统一起来，使学生感受牛顿作为大科学家敏捷的思维和创新、统一的思想，这正是本节除万有引力定律内容之外要表达的科学家的质疑创新、科学探究精神。

本节编写思路

本节通过阐述牛顿“从苹果到月亮”的思考，引出万有引力的概念，从而得出万有引力定律的内容，为下一节学习万有引力定律在天文学上的成就、人类航天事业取得的成就等内容做好准备。

通过“拓展视野”栏目，简单了解万有引力定律的推演过程。虽然此推演过程对学生而言较难理解，但从行星运动规律到万有引力定律的建立过程是很好的科学探究素材。在培养学生科学思维、科学探究等核心素养方面，让学生经历万有引力定律的推演过程是很有价值的。

通过介绍卡文迪什扭秤实验的设计，使学生了解该实验设计的精妙之处，即如何测量物体间的微小力。从而引导学生体会物理实验在物理定律建立过程中的重要性，培养学生在科

[1] 对“从苹果到月亮”的解释，可用前一章平抛运动规律推演到匀速圆周运动规律来说明，可以让学生更好地理解其中的物理原理。

[2] 万有引力定律的得出虽然需要演绎推理，但并不是仅靠已有的规律得到的，需要科学家大胆的假设。

牛顿是一位对物理规律的普遍意义极其敏感的科学家，从想到天上与地上引力的统一，到研究太阳与行星间的引力，再到提出万有引力，他不满足于一个规律的发现，而是力求探索自然界物理法则的统一。

[3] 此处设置“拓展视野”是为了让学生了解万有引力定律的推演过程。此推演是在圆周运动规律、开普勒行星运动定律和牛顿第三定律基础上的科学推理。但更重要的是要假设太阳对行星的作用力与行星对太阳的作用力具有“平等”的地位，这是科学家思维上的重大突破。从运动的角度看，太阳与行星的运动是不同的，但太阳对行星的引力与行星对太阳的引力这对作用力与反作用力具有相等的关系式，这体现了牛顿的智慧。

[1] 牛顿在大胆猜想的基础上，经过大量严谨的推演，终于揭开了天体运动的神秘面纱。1684年，牛顿得出，不论是天上的两个天体之间还是地上两个物体之间都存在与距离的二次方成反比的引力，正是由于这个引力导致苹果落地和行星在不同的轨道上运动。就这样，地面上物体运动的规律和天体运动的规律统一了。

牛顿认为，地球对苹果的引力、地球对月亮的引力与太阳对行星的作用力本质上都完全相同，而且无论天上、地上还是天地之间的任何两个物体之间全都存在这种引力。牛顿把这种所有物体之间都存在的相互吸引力叫做万有引力（universal gravitation）。

牛顿的这种统一观念是物理学中普适性的经典，鼓舞了很多有才华的青年走上了物理学研究的道路。诺贝尔物理学奖获得者李政道（1926—）曾说，物理法则既适用于地球上你卧室里的现象，也适用于火星上的现象，这一思想对学生时代的他来说是新颖的，激发了他的兴趣，物理法则的普适性深深打动了他。

② 万有引力的大小如何确定？

[2] 牛顿发现了万有引力，并推出万有引力定律（law of universal gravitation）：自然界中任何两个物体都相互吸引，相互间引力的大小与物体质量的乘积成正比，与它们之间距离的二次方成反比。

若用 m_1 、 m_2 分别表示两物体的质量， r 表示两物体间的距离，则万有引力定律可表示为

$$F = G \frac{m_1 m_2}{r^2}$$

式中，质量的单位为kg，距离的单位为m，力的单位为N。 G 是比例系数，叫做引力常量（gravitational constant），是一个既有数值又有单位的常量， $G = 6.67 \times 10^{-11} \text{ N}\cdot\text{m}^2/\text{kg}^2$ ，适用于任何两个物体之间的引力。

这里所说的距离 r 是指可以看成质点的两物体间的距离，若是质量均匀分布的球体则是两个球心间的距离。

3 拓展视野

许多大行星的椭圆轨道非常接近圆轨道。设太阳的质量为 m_1 ，行星的质量为 m_2 ，行星公转的轨道半径为 r 、周期为 T ，太阳对行星的引力大小为 F 。行星公转运动的线速度

$$\text{大小 } v = \frac{2\pi r}{T}.$$

由于 F 提供了行星绕太阳做圆周运动的向心力，则 $F = m_2 \frac{v^2}{r} = m_2 \frac{4\pi^2 r}{T^2}$ 。

由开普勒第三定律可知， $T^2 \propto r^3$ ，则 $F \propto \frac{m_2}{r^2}$ 。

根据牛顿第三定律，太阳受到行星的引力大小 $F' = F$ 。也就是说，在引力的存在与性质上，行星和太阳的地位完全相当，因此，既然 $F \propto \frac{m_2}{r^2}$ ，必有 $F' \propto \frac{m_1}{r^2}$ 。所以， $F \propto \frac{m_1 m_2}{r^2}$ 。

② 引力常量是如何测得的？

[1] 1798年，英国物理学家卡文迪什（H. Cavendish, 1731—1810）巧妙地利用扭秤装置，第一次在实验室里比较精确地测出了引力常量。

卡文迪什扭秤的主要结构和原理如图6-12所示，装有平面镜M和两个相同小球a、b的T形架，用石英丝悬吊起来，当小球a、b被大球c、d吸引时，T形架和石英丝会发生极其微小的扭转，利用平面镜对光的反射能测出这个微小的扭转角，进而测量出大球与小球间极微小的万有引力。卡文迪什由此验证了万有引力定律，并测出了引力常量G的数值。

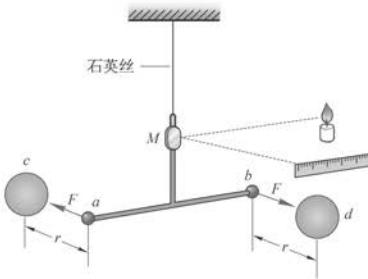


图 6-12 卡文迪什扭秤实验示意图

[2]

大家谈

如果万有引力突然消失，世界将会变成什么样子？

[3] 示例 已知地球的质量 $m_{\text{地}} = 5.972 \times 10^{24} \text{ kg}$ ，地球半径 $r_{\text{地}} = 6.371 \times 10^6 \text{ m}$ 。利用万有引力定律计算地球表面重力加速度g的大小。

分析：地球表面的物体所受到的重力近似等于地球对物体的万有引力。由引力常量、地球质量和半径可以计算地球表面的重力加速度。

解：设地球上有一物体的质量为m，物体所受重力为mg，地球对物体的万有引力为 $G \frac{m_{\text{地}} m}{r_{\text{地}}^2}$ ，由 $mg = G \frac{m_{\text{地}} m}{r_{\text{地}}^2}$ 可得

$$g = G \frac{m_{\text{地}}}{r_{\text{地}}^2} = 6.67 \times 10^{-11} \times \frac{5.972 \times 10^{24}}{(6.371 \times 10^6)^2} \text{ m/s}^2 \approx 9.81 \text{ m/s}^2$$

可以让学生理解重力加速度的来源，以及由哪些因素决定等知识，把前、后所学知识联系起来，融会贯通。这体现了运动与相互作用观念、科学本质与科学论证等核心素养的培养。

[1] 卡文迪什实验是物理学史上最经典的实验之一，其巧妙之处在于通过精妙的设计，利用光学原理把微小力“放大”显现并测量出来。

牛顿提出万有引力定律时没能得出引力常量的值，卡文迪什扭秤实验不仅是对万有引力定律的直接证明，还使此定律有更广泛的使用价值，被称为是“称量地球质量”的实验。

[2] 此处设置“大家谈”是为了在学习万有引力定律以后，让学生想象在我们生活的空间没有万有引力的景象，体验发现万有引力定律的重要意义。

[3] 学习了万有引力定律后思考此示例，首先要说明在忽略地球自转的影响下，地面上物体的重力等于物体与地球间的万有引力；其次，通过此示例的计算

问题与思考解读

1. 参考解答：这种说法错误。首先，运动是相对的，如果以苹果为参照物，可以说地球向苹果运动。其次，地球和苹果间的万有引力大小与它们质量的乘积成正比，是作用力与反作用力，两者大小相等。人是站在地球上的人，一般以地球为参照物，观察到的是苹果落向地球，所以从这个角度，我们一般说“苹果落向地球，而不说地球向上运动碰到苹果”

命题意图：通过该问题的讨论，进一步体会万有引力的大小与两个相互作用物体的质量的乘积成正比，不是由各自的质量大小决定的。

主要素养与水平：运动与相互作用(I)；解释(I)；科学本质(I)。

2. 参考解答：如教材图 6-12 所示，采用的方法是利用 T 形架上的平面镜 M 对入射光的反射，以“放大”石英丝扭转的微小角度。装置有两个效果：① 反射光的偏转角是平面镜偏转角的 2 倍，这是第一次“放大”；② 标尺离平面镜越远，光点移动距离越大，此为第二次“放大”。只要测量光点移动的距离，根据光路的几何关系即可计算石英丝扭转的微小角度

命题意图：通过此实验“放大法”的描述，进一步了解卡文迪什扭秤实验设计的精妙之处，体验物理实验的创新性设计思想。

主要素养与水平：问题(I)；证据(I)；解释(II)。

3. 参考解答：能。万有引力定律表述的是两个质点间的吸引力，而两颗恒星的尺度远小于彼此间的距离，可视为质点。根据万有引力定律得两颗恒星间的万有引力

在上例的计算中，之所以能认为物体受到的重力近似等于地球对物体的万有引力，是由于忽略了地球自转的影响，但是这样计算得到的重力加速度的值与实验中测得的地球表面重力加速度的平均值 (9.80 m/s^2) 非常接近。

问题与思考

- 1.“我们说苹果落向地球，而不说地球向上运动碰到苹果，是因为地球的质量比苹果大得多，地球对苹果的引力比苹果对地球的引力大得多。”这种说法对吗？为什么？
2. 简述如何在卡文迪什扭秤实验中用“放大法”测量 T 形架转动的微小角度。
3. 根据天文观测，在距离地球 430 ly 处有两颗恒星，它们的质量分别为 $1 \times 10^{31} \text{ kg}$ 和 $6.4 \times 10^{30} \text{ kg}$ ，半径分别为 $4.86 \times 10^{10} \text{ m}$ 和 $2.4 \times 10^9 \text{ m}$ ，它们之间的距离为 $7.57 \times 10^{12} \text{ m}$ 。能否用万有引力定律直接计算它们之间的万有引力大小？(ly 为长度单位光年的符号，即光在一年内传播的距离， $1 \text{ ly} \approx 9.46 \times 10^{15} \text{ m}$)
4. 氢原子是由一个质子和一个电子组成的，质子的质量是 $1.7 \times 10^{-27} \text{ kg}$ ，电子的质量是 $9.1 \times 10^{-31} \text{ kg}$ 。在氢原子中，电子和质子相距约 $5.3 \times 10^{-11} \text{ m}$ ，两者间的万有引力有多大？
5. 我们知道，任何两个物体间一定存在万有引力。为什么图 6-13 中放在水平地面上的两个铅球没有因为万有引力而吸引在一起？它们的万有引力与重力之比约为多少？
6. 地球的质量约为月球质量的 81 倍。假设月球探测器“嫦娥一号”沿地月连线飞行，当地球对它的引力和月球对它的引力大小相等时，“嫦娥一号”与地心和月心之间的距离之比为多少？



图 6-13

$$F = G \frac{m_1 m_2}{r^2} = 6.67 \times 10^{-11} \times \frac{1 \times 10^{31} \times 6.4 \times 10^{30}}{(7.57 \times 10^{12})^2} N \approx 7.45 \times 10^{25} N$$

命题意图：从已知条件中提炼有用信息，应用万有引力定律解决问题，并了解在宇观尺度中万有引力定律的应用，以及天体之间万有引力大小的数量级。

主要素养与水平：运动与相互作用(Ⅱ)；模型建构(Ⅱ)；科学推理(Ⅱ)。

4. 参考解答： $F = G \frac{m_1 m_2}{r^2} = 6.67 \times 10^{-11} \times \frac{1.7 \times 10^{-27} \times 9.1 \times 10^{-31}}{(5.3 \times 10^{-11})^2} N \approx 3.67 \times 10^{-47} N$

命题意图：通过氢原子的质子和电子之间万有引力大小的计算，体会在微观粒子中万有引力大小的数量级。

主要素养与水平：运动与相互作用(Ⅱ)；模型建构(Ⅱ)；科学推理(Ⅱ)。

5. 参考解答：每个铅球的质量约为 5 kg，若取两个铅球相距 1 m 放置，根据万有引力定律计算它们之间的万有引力 $F = G \frac{m_1 m_2}{r^2} = 6.67 \times 10^{-11} \times \frac{5 \times 5}{1^2} N \approx 1.67 \times 10^{-9} N$ ；万有引力与重力之比 $\frac{F}{G} = \frac{1.67 \times 10^{-9}}{5 \times 9.8} \approx 3.41 \times 10^{-11}$ 。可见两铅球间的万有引力远小于自身的重力，在水平地面上不可能克服铅球受到的摩擦阻力而运动，所以它们不可能吸引在一起。

命题意图：根据生活常识，通过建立简单的物理模型计算两铅球间的万有引力大小加以判断，感受在我们生活空间里的万有引力大小的数量级，提高“问题、证据、解释”等科学探究的素养。

主要素养与水平：问题(Ⅱ)；证据(Ⅱ)；解释(Ⅱ)。

6. 参考解答：“嫦娥一号”与地心和月心间的距离分别为 r_1 、 r_2 。由题意 $G \frac{m_{\text{地}} m_0}{r_1^2} = G \frac{m_{\text{月}} m_0}{r_2^2}$ ，得

$$\frac{r_1}{r_2} = \sqrt{\frac{m_{\text{地}}}{m_{\text{月}}}} \approx 9$$

命题意图：运用万有引力定律讨论“嫦娥一号”探月飞行的实际问题，同时体现对科学本质与社会责任方面素养的培养。

主要素养与水平：模型建构(Ⅱ)；科学推理(Ⅲ)；科学本质(Ⅱ)。

本节编写思路

本节通过几个问题的提出,引导学生了解万有引力定律在天文学上的重要贡献,及其在人类探索宇宙过程中的重要作用,同时了解我国航天事业的成就和发展。

通过“称量”地球和太阳的质量、预测哈雷彗星的回归、海王星的发现等一系列问题,让学生认识到万有引力定律经受了实践的检验,取得了巨大的成就。启发学生体会万有引力定律建立的伟大科学成就,感悟科学的力量,进一步建立运动与相互作用的观念。

本节主要是应用性的内容,应着重引导学生建构物理模型,并明确求解思路。通过学习,使学生深刻体会科学定律对人类探索未知世界的作用,从而激起学生对科学探究的兴趣。

[1]

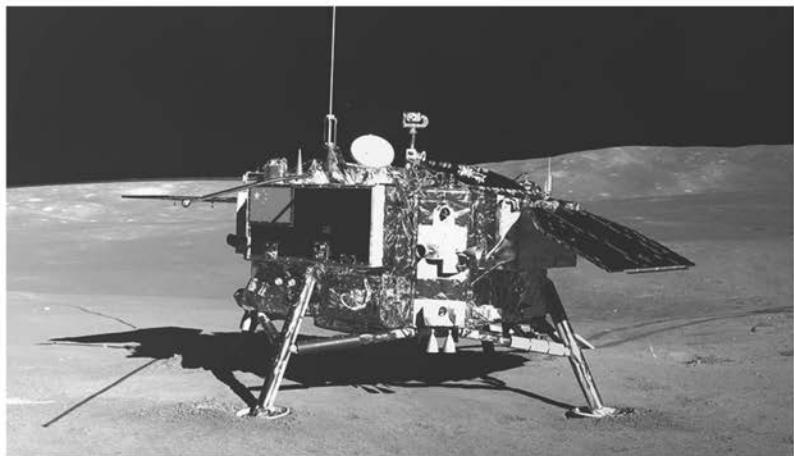


图 6-14 “嫦娥四号”探测器

第三节 万有引力定律的应用

自古以来,人类除了感叹宇宙的深奥莫测,也期盼能离开地球飞向宇宙。万有引力定律揭示了天体运动的规律,是研究天体运动的重要理论依据。20世纪50年代兴起的航天技术,也是以万有引力定律作为重要的理论基础。万有引力定律的建立对天文学和航天技术的发展起了很大的推动作用。

② 如何“称量”地球和太阳的质量?

[2]

地面上质量为 m 的物体受到的重力近似等于地球对该物体的万有引力

$$mg = G \frac{m m_{\text{地}}}{r_{\text{地}}^2}$$

式中, $m_{\text{地}}$ 是地球的质量, $r_{\text{地}}$ 是地球半径。由此可得

$$m_{\text{地}} = \frac{gr_{\text{地}}^2}{G}$$

在卡文迪什测出引力常量之前,人们已经测得 g 和 $r_{\text{地}}$, 所以一旦测得引力常量 G , 就可以通过上式算出地球质量 $m_{\text{地}}$ 。因此,卡文迪什把自己的实验说成是“称量地球质量的实验”。

正文解读

[1] 我国“嫦娥四号”月球探测器于2018年12月8日凌晨发射,是世界上第一个成功实现在月球背面软着陆的航天器。利用“嫦娥四号”在月球表面的照片引出本节的主题,激发学生的学习兴趣,使学生体会万有引力定律的建立对人类探索未知世界的作用,同时感受我国在航天领域的突出成就。

[2] “称量”地球质量对学生来说是一个挑战性的话题,又是一个运用所学知识和方法可以解决的实际问题。为此需要建构一个忽略地球自转这一次要因素,且把物体的重力大小看作等于万有引力大小的物理模型。

[1]

大家谈

月球绕地球公转的周期为 27.3 天，若要计算地球的质量和平均密度，还需要知道哪些条件？

[2]

运用万有引力定律不仅可以“称量”地球的质量，还可以“称量”太阳的质量。

假设太阳的质量为 m_{\odot} ，某个行星的质量为 m ，两者间的距离为 r ，行星绕太阳公转的角速度为 ω ，周期为 T ，行星与太阳之间的万有引力为 F ，则有

$$F = G \frac{m m_{\odot}}{r^2}$$

由于行星做匀速圆周运动的向心力 F 由太阳对行星的万有引力提供，根据向心力表达式，则有

$$F = m \omega^2 r = m \left(\frac{2\pi}{T} \right)^2 r$$

将两式联立可得

$$m_{\odot} = \frac{4\pi^2 r^3}{GT^2}$$

天文观测表明，地球绕太阳公转的轨道半径为 1.49×10^{11} m，周期为 3.16×10^7 s，代入上式得

$$m_{\odot} = \frac{4 \times 3.14^2 \times (1.49 \times 10^{11})^3}{6.67 \times 10^{-11} \times (3.16 \times 10^7)^2} \text{ kg} \approx 1.96 \times 10^{30} \text{ kg}$$

如果已知卫星绕行星公转的周期以及卫星和行星之间的距离，利用同样的方法，我们也可以“称量”行星的质量。

万有引力定律对天文学还有什么突出贡献？

[3]

1705 年，英国天文学家哈雷（E. Halley，1656—1742）在整理彗星观测记录时发现，1682 年、1607 年和 1531 年出现的 3 颗彗星轨迹看起来如出一辙。他猜测这三次出现的彗星可能是同一颗彗星，他继续查询更早的记录，发现每隔 76 年左右都会有相同的观测记录。在此基础上，哈雷运用万有引力定律反复推算，验证自己的猜测，最后预言这颗彗星将于 1759 年再次出现。

虽然哈雷于 1742 年去世了，但全世界的天文学家都在 1759 年等待哈雷预言的这颗彗星。3 月 13 日，这颗明亮的彗星果然拖着长长的尾巴出现在夜晚的星空中。为了纪念哈雷，人们用他的名字来命名这颗彗星。早在公元前 613 年（春秋时期），我国就发现了哈

[3] 哈雷利用彗星的观测记录推算出，人们记录的三次彗星的出现都是同一颗彗星的回归，该结论是利用万有引力定律运算做出解释的。同时，哈雷得出了该彗星出现的周期，预言了它以后出现的时间。他的预言被后来的观测一一验证，这充分证明万有引力定律的发现之伟大。这里可使学生深深感受到，很多科学理论之所以被称为真理，不仅在于其创立的时候，而且在于以后被科学观测或实验所证实的时候。

[1] 此处设置“大家谈”是为了在计算地球质量以后，让学生自主探究相关延展性问题。可提示学生将万有引力定律与牛顿第二定律结合起来进行研究。

参考答案：根据月球公转所需向心力由万有引力提供，即

$$G \frac{m_{\text{地}} m_{\text{月}}}{r^2} = m_{\text{月}} \frac{4\pi^2}{T^2} r,$$

$$\text{得 } m_{\text{地}} = \frac{4\pi^2 r^3}{GT^2}, \text{ 其中 } r$$

为月球公转半径；又因

$$\text{为 } \rho_{\text{地}} = \frac{m_{\text{地}}}{V_{\text{地}}} = \frac{m_{\text{地}}}{4\pi \frac{R^3}{3}},$$

$$\text{得 } \rho_{\text{地}} = \frac{3\pi r^3}{GT^2 R^3}, \text{ 其中 } R$$

为地球的半径。所以，还需要知道月球公转半径 r 和地球的半径 R 。

[2] “称量”太阳质量的思路与“称量”地球质量的思路不同，但与“大家谈”中讨论的思路相似，由于学生已有一定的知识储备，可以通过问题引导的方法，让学生自主探究。

[1] 预言并发现未知天体——海王星是万有引力定律理论价值的又一生动例证。

在海王星被发现并观测证实以后，1930年，天文学家根据海王星运动不规则的记载，又发现了冥王星（现代天文学认为，冥王星不属于太阳系中的大行星）。

[2] 以牛顿当初“从苹果到月亮”的设想为情境，引导学生建立模型，进而推理得出第一宇宙速度的结论。前后呼应，引起学生的兴趣。

通过对第一宇宙速度的推演，让学生体会万有引力定律的理论可以指引人类实现“飞天”的梦想。

彗星并载入《春秋·文公十四年》：“秋七月，有星孛入于北斗。”到1910年，哈雷彗星共计34次回归，我国史籍中的记录就多达31次，从公元前240年至公元

[1] 1910年有连续29次的观察记录。哈雷彗星最近一次回归的时间是1986年（图6-15）。

海王星的发现是应用万有引力定律的另一个重大成就。

到18世纪，人们已经知道太阳系有7颗行星，而且发现天王星的运行轨道总是与万有引力定律的计算结果有比较大的偏离。当时有人推测，在天王星的轨道外侧可能还有一颗未被发现的行星，正是这颗行星对天王星的引力作用导致了上述偏离。

英国剑桥大学的学生亚当斯和法国的天文爱好者勒维烈根据天王星的观测资料，各自独立地运用万有引力定律计算出这颗“新”行星的轨道。

1846年9月23日晚，德国天文台的加勒在勒维烈预言的位置附近观察到了这颗行星。这就是太阳系的第八颗行星——海王星。人们称其为“笔尖下发现的行星”。



图6-15 哈雷彗星

② 什么是“第一宇宙速度”？

[2] 按照牛顿设想，以足够大的速度水平抛出的苹果可以绕地球做圆周运动。那么，究竟要多大的速度才能使苹果成为地球的“人造卫星”？

假设地球的质量为 $m_{\text{地}}$ ，人造卫星的质量为 m ，其绕地球做匀速圆周运动的线速度大小为 v ，人造卫星到地心的距离为 r 。若要使人造卫星不“落回地面”，则

$$G \frac{mm_{\text{地}}}{r^2} = m \frac{v^2}{r}$$

由此可得

$$v = \sqrt{\frac{Gm_{\text{地}}}{r}}$$

近地卫星一般在离地面100~200 km的高度飞行，与地球半径相比这个高度可以忽略不计，因此可以用地球半径 $r_{\text{地}}$ 近似代替近地卫星到地心的距离 r 。代入数据可得

$$v = \sqrt{\frac{6.67 \times 10^{-11} \times 5.97 \times 10^{24}}{6.37 \times 10^6}} \text{ m/s} \approx 7.9 \times 10^3 \text{ m/s} = 7.9 \text{ km/s}$$

这就是物体在地面附近绕地球做匀速圆周运动的速度，叫做第一宇宙速度（first cosmic velocity）。若以第一宇宙速度水平抛出苹果，苹果将不再落回地面，而成为地球的“人造卫星”。

[1] 示例 我国于1970年4月发射的第一颗人造地球卫星“东方红一号”(图6-16)可近似看成沿圆轨道做匀速圆周运动,这颗卫星离地球表面的平均高度 $h=1.41\times10^6\text{ m}$ 。已知地球半径 $r_{\text{地}}=6.37\times10^6\text{ m}$,地球质量 $m_{\text{地}}=5.97\times10^{24}\text{ kg}$,求该卫星绕地球运行的速度和周期。

分析:卫星受到地球的万有引力提供其绕地球运行的向心力。根据万有引力定律和向心力表达式,可以计算卫星的速度和周期。

解:卫星绕地球做匀速圆周运动轨道的平均半径

$$r=r_{\text{地}}+h=(6.37\times10^6+1.41\times10^6)\text{ m}=7.78\times10^6\text{ m}$$

设卫星质量为 m ,卫星绕地球运行速度为 v ,由于卫星受到地球的万有引力即为其绕地球运行的向心力,有

$$G \frac{m_{\text{地}} m}{r^2} = m \frac{v^2}{r}$$

则

$$v = \sqrt{\frac{Gm_{\text{地}}}{r}} = \sqrt{\frac{6.67 \times 10^{-11} \times 5.97 \times 10^{24}}{7.78 \times 10^6}} \text{ m/s} \approx 7.15 \times 10^3 \text{ m/s}$$

由匀速圆周运动的周期公式,得卫星绕地球运行的周期

$$T = \frac{2\pi r}{v} = \frac{2 \times 3.14 \times 7.78 \times 10^6}{7.15 \times 10^3} \text{ s} \approx 6.83 \times 10^3 \text{ s} \approx 114 \text{ min}$$

[2]

大家谈

上例中计算出的卫星运行速度为什么小于第一宇宙速度?

由万有引力定律可知,卫星的线速度增大,地球对卫星的引力并不会增大。若引力不足以提供向心力使卫星做匀速圆周运动,卫星就会产生离心现象远离地球。进一步的理论计算表明,如果发射卫星的初速度大于7.9 km/s而小于11.2 km/s,卫星绕地球运行的轨道将是椭圆轨道,如图6-17所示。

如果初速度超过11.2 km/s,卫星就能完全摆脱地球引力的束缚,成为围绕太阳运行的“人造行

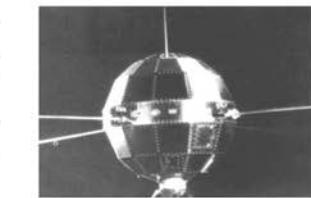


图6-16 人造卫星“东方红一号”

[1] 随着人造卫星技术的不断发展,人造卫星与人们生活的联系也越来越紧密。了解人造卫星的发射与运行,是学习万有引力定律后必不可少的教学内容。

以我国1970年发射的第一颗人造卫星作为示例背景进行分析计算,主要是让学生了解新中国航天事业的起步、发展与成就,着重体现科学态度、社会责任等核心素养的培养。

[2] 此处设置“大家谈”是为了让学生在上述示例所得卫星运行速度大小的结果后,进一步引导学生讨论并理解人造卫星发射速度、运行速度及第一宇宙速度三者之间的关系。

本活动的参考答案是:卫星运行所需向心力由万有引力提供
 $G \frac{m_{\text{地}} m_{\star}}{r^2} = m_{\star} \frac{v^2}{r}$,由

此可得卫星运行速度大小 v 随其运行半径 r 的

增大而减小,说明距地面越高的卫星运行速度越小。

同时,也可以在学习了下一章以后,从卫星发动机做功与能量转化的角度作出进一步解释,阐述在不同轨道运行的卫星的周期、向心加速度、角速度等物理量之间的关系。

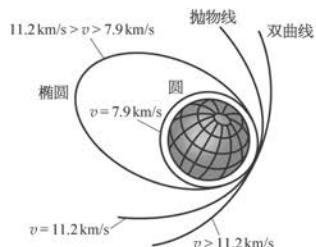


图6-17 卫星的轨道与发射速度的关系

[1] 关于第二宇宙速度和第三宇宙速度的内容,由于学生掌握的知识有限,无须作详细的理论推演,只作简单的介绍。学生只要了解它们的基本含义即可。

[2] 近年来,我国在运载火箭技术、人造地球卫星、载人航天、太空探索等航天技术领域发展迅速。教师可以结合图片、视频等丰富的教学资源进行展示与介绍,如北斗卫星导航系统、航天员太空授课、航天员出舱活动、航天器太空对接、登月探测等。

这部分内容可以采用学习小组的形式,让学生合作查阅、收集资料,再共同讨论、汇总并归纳,形成相关主题的报告,最后在课堂上进行交流。培养学生获取资料、分析资料、合作交流的能力,体现核心素养的培育。

[1] 星”。通常将 11.2 km/s 这一速度叫做第二宇宙速度 (second cosmic velocity)。

若要摆脱太阳引力的束缚,飞到太阳系以外的宇宙空间去,发射卫星的初速度必须达到 16.7 km/s,这个速度叫做第三宇宙速度 (third cosmic velocity)。

[2] 我国的航天事业取得了哪些成就?

经过 60 多年的奋斗,我国航天事业取得了以人造卫星、载人航天、深空探测等为标志的辉煌成就。

• 航天运载系统

长征系列运载火箭是我国自行研制的航天运载工具,为我国航天事业提供了强有力的支持。长征系列运载火箭起步于 20 世纪 60 年代。1970 年 4 月 24 日,“长征一号”运载火箭首次将“东方红一号”卫星送入预定轨道。2016 年,新一代运载火箭“长征五号”的成功首飞标志着运载火箭完成升级换代。应用该型火箭发动机的“长征六号”“长征七号”新型运载火箭实现首飞,以及“长征十一号”固体运载火箭成功发射使我国航天运载系统进一步完善。

• 人造地球卫星

自 1970 年 4 月发射第一颗人造地球卫星“东方红一号”以来,我国已经发射了数百颗人造卫星,如“风云”“海洋”等系列对地观测卫星,“亚太”“中星”等系列通信卫星,“天通一号”移动通信卫星,以及由三颗“天链一号”卫星组成的第一代数据中继卫星系统。由我国自主建设、独立运行的北斗卫星导航系统已建成开通。

• 载人航天

2003 年 10 月,“神舟五号”载人飞船首次把我国航天员杨利伟送上太空,绕地球运行 14 圈后安全返回地球。2012 年 6 月和 2013 年 6 月,“神舟九号”和“神舟十号”载人飞船先后成功发射,与“天宫一号”目标飞行器实施对接。2022 年 10 月 31 日,梦天实验舱发射成功,与天和核心舱、问天实验舱组成空间站“T”字基本构型,标志着我国空间站的建设又迈出了关键一步。我国已掌握了载人天地往返、空间出舱(图 6-18)、空间交会对接、组合体运行、航天员中期驻留等载人航天领域的重大技术。



图 6-18 航天员翟志刚首次空间出舱

• 月球探测

2007 年 10 月,我国第一个月球探测器“嫦娥一号”成功发射;2012 年 12 月,“嫦娥

二号”成功实施小行星“飞越探测”；2013年12月，“嫦娥三号”完成月球表面巡视探测。2014年11月，月球探测工程三期飞行试验的圆满成功，标志着我国完全掌握航天器以接近第二宇宙速度“再入返回”的关键技术。

2019年1月3日10时26分，“嫦娥四号”探测器自主着陆在月球背面，实现了人类探测器首次在月球背面软着陆（图6-14），这也意味着中国成为世界上首个在月背实施软着陆的国家。其携带的“玉兔二号”月球车已开始对月球背面进行科学探测（图6-19）。这是每位中国人深受鼓舞并为之骄傲的。

[1] 我国航天事业从无到有、从弱到强、飞速跨越发展，离不开以钱学森（图6-20）为代表的一大批热爱祖国、艰苦奋斗、无私奉献、勇于攀登的科学家。1934年，钱学森从上海交通大学毕业后，先后在美国麻省理工学院和加州理工学院深造，1938年获博士学位。为报效祖国，钱学森克服了当时美国政府的重重阻挠，于1955年辗转回到祖国。在钱学森的带领下，我国于1960年成功发射了第一枚近程导弹，1970年成功把中国第一颗人造卫星“东方红一号”送入预定轨道……2003年，“长征二号”运载火箭将“神舟五号”载人飞船送入太空……钱学森为组织领导我国火箭、导弹和航天器的研究发展工作发挥了巨大作用，对我国航天事业和国防事业的迅速发展作出了卓越的贡献，被誉为“中国航天之父”。

为传承航天精神、激发创新热情，自2016年起，我国将每年4月24日设立为“中国航天日”。未来，我国的航天事业将继续蓬勃发展，并不断加强与世界各国的联系与合作，为人类的和平与安全、生存与发展贡献力量。

问题与思考

- 已知月球半径为 1.7×10^6 m，质量为 7.3×10^{22} kg，则月球表面的重力加速度为多大？猜想并描述登月航天员在月球表面的行动会是怎样的情形。
- 已知海王星以近似圆轨道绕太阳运行，半径为 4.50×10^{12} m。已知太阳的质量为 1.99×10^{30} kg，试计算海王星绕太阳运行的周期。
- 若某人造地球卫星因某种原因绕地球运行的圆形轨道半径逐渐减小，分析说明该卫星运行速率和周期的变化情况。

度的 $\frac{1}{6}$ ，所以航天员在月球上受到的重力也仅为地球上重力的 $\frac{1}{6}$ 。若航天员在月球表面按地球上的习惯

行走，会有飘浮感，不容易掌握平衡，一不小心就会跌倒。

命题意图：运用万有引力定律讨论在月球上行走的实际问题，体会万有引力在生活中的作用，培养学生对物理问题进行猜想、假设，然后做出解释的科学探究能力。

主要素养与水平：科学推理（I）；问题（I）；解释（II）。

2. 参考解答：太阳对海王星的万有引力提供海王星绕太阳运行的向心力，有 $G \frac{m_{\odot} m}{r^2} = ma$ =

$$m \frac{4\pi^2}{T^2} r, \text{ 得 } T = 2\pi \sqrt{\frac{r^3}{Gm_{\odot}}} = 2 \times 3.14 \times \sqrt{\frac{(4.50 \times 10^{12})^3}{6.67 \times 10^{-11} \times 1.99 \times 10^{30}}} \text{ s} \approx 5.21 \times 10^9 \text{ s} \approx 165 \text{ y}$$

[1] 通过对我国航天事业做出重大贡献的“两弹一星”元勋钱学森等科学家的事迹介绍，培养学生的爱国热情，启发学生爱科学、学科学，树立探索自然、造福人类的远大理想。

这里也可以让学生自己查阅资料，收集其他我国“两弹一星”元勋的生平事迹，再讨论、交流。培养学生获取资料、分析资料、合作交流的能力，体现物理学科核心素养的培育。

问题与思考解读

1. 参考解答：物体在月球表面，有

$$mg_{\text{月}} = G \frac{m_{\text{月}} m}{r_{\text{月}}^2}, \text{ 则}$$

$$g_{\text{月}} = G \frac{m_{\text{月}}}{r_{\text{月}}^2} = 6.67 \times 10^{-11} \times \frac{7.3 \times 10^{22}}{(1.7 \times 10^6)^2} \text{ m/s}^2 \\ \approx 1.68 \text{ m/s}^2$$

由于月球表面的重力加速度为 1.68 m/s^2 ，约为地球表面重力加速



图6-19 “玉兔二号”月球车



图6-20 钱学森 (1911—2009)

命题意图：体会万有引力定律与匀速圆周运动规律相结合在天文学上的应用与研究。

主要素养与水平：
运动与相互作用(I);
模型建构(I);科学推理(II)。

3. 参考解答：人造卫星绕地球做圆周运动是由万有引力提供向心力。卫星在轨道半径 r 减小的过程中，万有引力对卫星做正功，卫星的动能增大，所以该卫星的速率 v 增大。

根据 $G \frac{m_{\text{地}} m}{r^2} = ma = m \frac{4\pi^2}{T^2} r$, 得 $\frac{r^3}{T^2} = \frac{Gm_{\text{地}}}{4\pi^2}$,

为常量，因为 r 减小，所以卫星运行周期 T 减小

命题意图：加深对万有引力定律的理解，进一步体会研究人造卫星的运行与研究天体的运动一样，它们在太空的运行都是由万有引力提供向心力（如仅根据匀速圆周运动的规律分

析问题，结果可能会出错）。

主要素养与水平：运动与相互作用(II);科学推理(II);科学本质(II)。
4. 参考解答：由章首图中信息可知，“神舟十一号”与“天宫二号”对接时相对于地面的速率为 7.67 km/s 。地球半径 $R = 6.37 \times 10^6 \text{ m}$, 飞船与空间站距地面高度为 h , 根据万有引力提供向心力，有 $G \frac{m_{\text{地}} m}{(R+h)^2} = m \frac{v^2}{(R+h)}$, 又有 $g = G \frac{m_{\text{地}}}{R^2}$, 可得 $h = \frac{gR^2}{v^2} - R \approx 3.89 \times 10^5 \text{ m}$

命题意图：运用万有引力定律解决相关问题，回顾章首图所展示的情境并加以讨论，起到前后呼应的学习效果。既了解了空间站的一些数据，又感受到我国航天技术赶超世界先进水平的速度。

主要素养与水平：模型建构(II);科学推理(II);科学本质(II)。

4. 根据章首图的说明和地球质量与半径的数据，估算“神舟十一号”飞船与“天宫二号”空间站对接处距地面的高度。
5. 在北斗卫星导航系统中，北斗-G6 卫星在赤道上方约 $3.59 \times 10^4 \text{ km}$ 处的圆形轨道上运行，恰好相对于地球表面静止不动，是一颗“地球同步卫星”。分析说明该卫星为什么是“静止不动”的。
6. 在牛顿“抛苹果”的理想实验中，用于抛苹果的装置必须安置在距地面高 150 km 的“高山之巅”（地球半径为 $6.37 \times 10^3 \text{ km}$ ），才能忽略空气阻力。抛出苹果的初始速率达到多大时，苹果才能回到原处？苹果再次回到装置处需要多少时间？

5. 参考解答：根据万有引力提供向心力 $G \frac{m_{\text{地}} m}{(R+h)^2} = m \frac{4\pi^2}{T^2} (R+h)$, 由题设已知 $h \approx 3.59 \times 10^7 \text{ m}$ 。

又有 $g = G \frac{m_{\text{地}}}{R^2}$, 可得此北斗卫星运行的周期为 $T = \frac{2\pi}{R} \sqrt{\frac{(R+h)^3}{g}}$, 代入数据得周期约为 24 h。这与地球

自转周期相等, 所以它相对于地球表面是静止不动的, 叫“地球同步卫星”

命题意图：了解地球同步卫星的特点, 初步知道我国北斗卫星导航系统的组成。

主要素养与水平：问题(II); 证据(II); 解释(II)。

6. 参考解答：距地面 150 km 高处的空气密度是地面空气密度的 $\frac{1}{300000}$, 所以可以忽略空气阻力。

水平抛出的苹果要回到原处, 必须使其绕地球做匀速圆周运动。由题意可知, 苹果匀速圆周运动的半径

为 $r = 6.37 \times 10^3 \text{ km} + 150 \text{ km} = 6.52 \times 10^6 \text{ m}$, 根据万有引力提供向心力, 有 $G \frac{m_{\text{地}} m}{r^2} = m \frac{v^2}{r}$, 又有 $g =$

$G \frac{m_{\text{地}}}{R^2}$, 则其所需速度 $v = R \sqrt{\frac{g}{r}} = 6.37 \times 10^6 \times \sqrt{\frac{9.8}{6.52 \times 10^6}} \text{ m/s} \approx 7.81 \times 10^3 \text{ m/s}$ 。回到原处所需时

间 $t = T = \frac{2\pi r}{v} \approx 5.24 \times 10^3 \text{ s}$

命题意图：学习万有引力定律的应用以后, 回顾牛顿假设的合理性。

主要素养与水平：运动与相互作用(III); 模型建构(III); 科学推理(III)。

小结

· 基本概念和基本规律

万有引力：任何物体之间都存在的相互吸引的力。

万有引力定律：自然界中任何两个物体间都相互吸引，相互间引力的大小与物体质量的乘积成正比，与它们之间距离的二次方成反比。

第一宇宙速度：物体在地面附近绕地球做匀速圆周运动的速度。

· 基本方法

通过了解开普勒关于行星运动定律的发现过程，感悟归纳的方法。

通过了解万有引力定律的发现过程，感悟物理学规律普适性、统一性的思想方法。

通过了解卡文迪什实验方案，体会物理实验中微小量放大的科学方法。

· 知识结构图



复习与巩固解读

52 第六章 万有引力定律

复习与巩固

1. 根据万有引力定律证明开普勒第三定律。
2. “火卫一”“火卫二”沿近似圆形轨道绕火星运行的周期分别是7 h 39 min和30 h 18 min。分析比较“火卫一”“火卫二”向心加速度的大小。
3. 分析说明，为什么第一宇宙速度是人造地球卫星绕地球做匀速圆周运动的最大线速度？
4. 月球绕地球运行是因为万有引力的作用，那么质量较大的地球吸引月球的力是否比月球吸引地球的力更大些呢？试作出解释。
5. 质量为m的人造地球卫星，在距地面h高处绕地球做匀速圆周运动。已知地球半径为R，求：
 - (1) 该卫星受到的向心力大小；
 - (2) 该卫星绕地球运行的速率；
 - (3) 该卫星绕地球运行的周期。
6. 在太阳系中，火星与木星轨道之间的空间由小行星带占据，该小行星带轨道半径的延伸范围约从2.5 AU到3 AU(1 AU为地球到太阳的平均距离)。试计算该空间内小行星绕太阳运行的周期范围。
7. 为了研究如图6-21所示的木星“大红斑”，要发射一颗能绕木星同步运行的卫星进行观测。已知木星的自转周期约为9.8 h，质量约为地球质量的320倍，半径约为地球半径的11倍，又已知地球同步卫星的轨道半径约为地球半径的6.65倍，则这颗木星同步卫星的轨道半径约为木星半径的多少倍？
8. 若某天体飞临某个行星并进入行星表面附近的圆形轨道，观测到该天体绕行星运行一周所用的时间为T，如何估算这颗行星的密度？
9. 阅读材料：“神舟五号”是我国第一艘载人飞船，总长9.2 m，总质量 7.79×10^3 kg，装有52台发动机，能精确调整飞船的飞行姿态和运行轨道。其返回舱直径2.5 m，容积约为6 m³。“神舟五号”飞船在太空中在轨运行了14圈，历时21 h 23 min，经受了180℃的温差考验，最终“神舟五号”的返回舱安全返回地面。已知地球半径为 6.37×10^6 m，请根据以上信息，计算“神舟五号”在轨运行时距地面的高度，以及飞船运行时的速度大小。

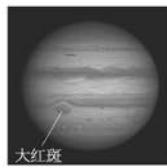


图6-21

$G \frac{m_{\text{地}} m}{r^2} = m \frac{v^2}{r}$ ，可知 $v^2 \propto \frac{1}{r}$ ，所以最小轨道半径 $r = R_{\text{地}}$ 时，人造卫星有最大运行速度

命题意图：了解人造卫星运行速度与第一宇宙速度的关系。

主要素养与水平：运动与相互作用(Ⅱ)；科学推理(Ⅱ)；科学本质(Ⅱ)。

4. 参考解答：否。万有引力定律告诉我们，万有引力的大小与两个物体质量的乘积成正比，是两物体间的相互作用，所以地球对月球的吸引力与月球对地球的吸引力大小相等，方向相反。

命题意图：通过辨析，进一步领会万有引力定律的内涵。

主要素养与水平：运动与相互作用(Ⅰ)；科学本质(Ⅱ)；解释(Ⅱ)。

1. 参考解答：某行星运行时万有引力提供向心力， $G \frac{m_{\oplus} m}{r^2} = m \frac{4\pi^2 r}{T^2}$ ，得 $\frac{r^3}{T^2} = \frac{Gm_{\oplus}}{4\pi^2}$ ，为常量，所以得证。

命题意图：了解万有引力定律是关于宏观物体运动及相互作用的一条基本的定律。

主要素养与水平：模型建构(Ⅰ)；科学推理(Ⅰ)。

2. 参考解答：根据向心加速度 $a = \omega^2 r = \frac{4\pi^2}{T^2} r$ 和 $r^3 \propto T^2$ ，得 $a \propto \frac{1}{T^{\frac{4}{3}}}$ ，所以“火卫一”的向心加速度大于“火卫二”的向心加速度。

命题意图：了解天体运动规律中周期、轨道半径、向心加速度等物理量之间的正确关系。

主要素养与水平：运动与相互作用(Ⅰ)；科学推理(Ⅱ)。

3. 参考解答：由

5. 参考解答:

(1) 卫星的向心力由万有引力提供, $F =$

$$G \frac{m_{\text{地}} m}{(R+h)^2}, \text{因为 } g =$$

$$G \frac{m_{\text{地}}}{R^2}, \text{所以得 } F =$$

$$\frac{mgR^2}{(R+h)^2} \quad (2) \text{由 } F =$$

$$\frac{mgR^2}{(R+h)^2} = m \frac{v^2}{R+h},$$

得卫星运行的速率 $v =$

$$R \sqrt{\frac{g}{R+h}} \quad (3) \text{卫星}$$

$$\text{的周期 } T = \frac{2\pi(R+h)}{v}$$

$$= \frac{2\pi}{R} \sqrt{\frac{(R+h)^3}{g}}$$

命题意图:运用万有引力定律研究人造地球卫星在轨运行时力和运动的规律。

主要素养与水平:

运动与相互作用(Ⅱ);
科学推理(Ⅱ)。

6. 参考解答:

$1 \text{AU} = 1.5 \times 10^{11} \text{m}$,
由题意,小行星轨道半径范围是 $2.5 \sim 3 \text{ AU}$,
即 $3.75 \times 10^{11} \sim 4.5 \times 10^{11} \text{m}$, 太阳质量 $m_{\odot} = 1.96 \times 10^{30} \text{ kg}$, 根据

$$G \frac{m_{\odot} m}{r^2} = m \frac{4\pi^2}{T^2} r, \text{得 } T = 2\pi \sqrt{\frac{r^3}{Gm_{\odot}}}, \text{代入数据得小行星运行周期范围是 } 1.3 \times 10^8 \sim 1.7 \times 10^8 \text{ s}$$

命题意图:学习了万有引力定律后,通过计算了解太阳系中小行星的一些常识性知识。

主要素养与水平:模型建构(Ⅱ);科学推理(Ⅱ);科学本质(Ⅱ)。

7. 参考解答:根据 $G \frac{m_{\mathrm{木}} m}{r^2} = m \frac{4\pi^2}{T^2} r$, 得 $r = \sqrt[3]{\frac{Gm_{\mathrm{木}} T^2}{4\pi^2}}$, 其中 $m_{\mathrm{木}} = 320m_{\text{地}} = 320 \times 5.97 \times 10^{24} \text{ kg}$,

木星的同步卫星周期与木星自转周期相同 $T = T_{\mathrm{木}} = 9.8 \text{ h} = 3.53 \times 10^4 \text{ s}$, 代入数据,计算可得此同步卫星轨道半径 $r \approx 1.6 \times 10^8 \text{ m}$ 。由题意,木星半径 $R = 11R_{\text{地}} \approx 7.0 \times 10^7 \text{ m}$, 所以 $r \approx 2.3R$

命题意图:运用万有引力定律计算并了解木星同步卫星的规律,提升分析和解决较复杂问题的能力。

*10. 简要论述地球同步卫星在轨正常运行时需要满足的物理条件。

*11. 通过对前人观测记录的艰苦研究,开普勒终于从大量复杂的观测数据中发现了行星运动的规律。如今,我们借助现代化的数据处理技术,可以快捷地获得太阳系八颗行星的轨道半径(将行星的轨道近似看成圆形轨道)与绕日公转周期之间的关系。太阳系行星轨道的平均半径 R 和行星绕日公转周期 T 的现代测量值如表 6-1 所示。将表中的 R 和 T 分别取常用对数,分析 $\lg R$ 与 $\lg T$ 之间的关系并回答以下问题。

(1) 如何运用上述数据分析的结果验证开普勒第三定律?

(2) 在数据处理的过程中,为什么用 $\lg R$ 与 $\lg T$ 的关系替代 R 与 T 的关系?简述理由。

表 6-1

行星	轨道的平均半径 $R/\times 10^9 \text{ km}$	绕日公转周期 $T/\text{年}$
水星	57.9	0.24
金星	108	0.615
地球	150	1.00
火星	228	1.88
木星	778	11.9
土星	1 430	29.5
天王星	2 870	84.0
海王星	4 500	165

主要素养与水平：模型建构(Ⅲ);科学推理(Ⅲ)。

- 8. 参考解答：**设行星质量为 m_1 、半径为 R , 则其密度 $\rho = \frac{m_1}{V} = \frac{3m_1}{4\pi R^3}$ 。某天体在该行星表面附近绕行星运行, 可认为轨道半径等于此行星半径, 有 $G \frac{m_1 m_2}{R^2} = m_2 \frac{4\pi^2}{T^2} R$, 得 $\frac{m_1}{R^3} = \frac{4\pi^2}{GT^2}$, 所以该行星的密度 $\rho = \frac{3\pi}{GT^2}$

命题意图：体会通过天体绕行星运动的规律计算该行星的密度, 本题与教材第 45 页“大家谈”呼应。

主要素养与水平：运动与相互作用(Ⅱ);模型建构(Ⅱ);科学推理(Ⅱ)。

- 9. 参考解答：**由材料信息可得, “神舟五号”运行周期 $T = \frac{t}{n} = 5.5 \times 10^3$ s。根据 $G \frac{m_{\text{地}} m}{(R+h)^2} = m \frac{4\pi^2}{T^2} (R+h)$ 和 $g = G \frac{m_{\text{地}}}{R^2}$, 得“神舟五号”距地面高度 $h = \sqrt[3]{\frac{gR^2 T^2}{4\pi^2}} - R \approx 3.59 \times 10^5$ m。根据 $v = \frac{2\pi(R+h)}{T}$, 得飞船运行速度 $v \approx 7.69 \times 10^3$ m/s

命题意图：通过阅读给定的材料, 从中提炼出解决问题的有用信息, 并用之解决实际问题。培养学生根据问题获取信息、处理信息、解决问题的能力。

主要素养与水平：模型建构(Ⅲ);科学推理(Ⅲ);问题(Ⅲ);解释(Ⅲ)。

- 10. 参考解答：**所谓“地球同步卫星”, 就是在绕地球运行时相对于地球表面静止不动。首先, 因为卫星运行时圆轨道的圆心是地心, 要相对于地球表面静止不动, 其运行的轨道必须与地球赤道平面共面, 所以同步卫星必须在地球赤道上空。其次, 卫星运行的周期必须与地球自转的周期相等, 所以周期 $T = 24$ h; 根据万有引力提供向心力, $G \frac{m_{\text{地}} m}{(R+h)^2} = m \frac{4\pi^2}{T^2} (R+h)$ 和 $g = G \frac{m_{\text{地}}}{R^2}$, 可得 $h = \sqrt[3]{\frac{gR^2 T^2}{4\pi^2}} - R$, 代入数据可得卫星应在赤道上空约 $h \approx 3.58 \times 10^7$ m 高处。其运行的速率为 $v = \frac{2\pi(R+h)}{T} \approx 3.07 \times 10^3$ m/s

命题意图：通过对卫星相对于地球“同步”的全面讨论, 体验对联系实际问题的全面思考, 包括建构物理模型, 进行科学推理、科学论证并作出合理解释等过程。

主要素养与水平：模型建构(Ⅱ);科学推理(Ⅲ);科学本质(Ⅲ)。

- 11. 参考解答：**(1) 可运用图像法处理数据, 画出 $\lg R - \lg T$ 图像, 并分析它们的关系来验证开普勒第三定律; (2) 因为把表中 R 和 T 的数据转换为 $\lg R$ 和 $\lg T$ 后, 它们的对数函数关系是简单的线性关系, 通过图线的斜率即可研究 R 和 T 的函数关系(注: 根据画出的图像, 得到图线的斜率为 $\frac{2}{3}$, 即可验证开普勒第三定律)

命题意图：体验科学探究中根据提出的物理问题进行假设, 并思考如何运用数学知识进行信息处理的过程(本题可以只要求学生说出方案, 不要求具体验证)。

主要素养与水平：问题(Ⅲ);证据(Ⅲ);解释(Ⅲ)。

第三部分 本章练习部分解读

第一节 行星的运动

(一) 参考解答

1. 日心 开普勒
2. P A (或 Q B)
3. 见下表

说 法	判断	说明理由或举例
“日心说”认为太阳是静止不动的	对	“日心说”认为太阳是宇宙的中心,所以认为太阳静止不动
“日心说”认为地球和其他行星都绕太阳做匀速圆周运动	对	根据日心说的内容和示意图,这就是其基本观点
上述“日心说”的两个观点,现在看来也是完全正确的	错	根据现在的宇宙观,太阳系统银河系中心运动,银河系也是运动的,任何天体都是运动的。而且行星绕太阳运行的轨道也不是圆周

4. 见下表

说 法	判断	说明理由或举例
地球的公转速度大小是不变的	错	地球绕太阳以椭圆轨道公转,根据开普勒定律,其公转速度大小是变化的
冬至这天地球的公转速度最大	对	冬至时地球距太阳最近,根据开普勒定律,此时地球的公转速度最大
夏至这天地球的公转速度最大	错	夏至时地球距太阳最远,根据开普勒定律,此时地球的公转速度最小

5. 由开普勒第三定律 $\frac{r^3}{T^2} = k$, 得 $r' = 12^{\frac{2}{3}} \times 1$ 天文单位 ≈ 5.24 天文单位
6. 火星比木星多“走”一圈,所以时间 $\Delta t = \frac{2\pi}{\omega_1 - \omega_2} = \frac{T_1 T_2}{T_2 - T_1}$
7. 能。由开普勒第三定律 $\frac{r^3}{T^2} = k$, 得 $r = \sqrt[3]{k T^2} \approx 2.68 \times 10^{12}$ m, 所以 $x_2 = 2r - x_1 = 5.27 \times 10^{12}$ m

(二) 习题主要素养与水平分析

习题的主要素养与水平

题号	运动与相互作用	模型建构	科学推理	科学本质	科学态度
1	I				I
2	I	I			
3	I	I		I	
4	I	I		I	
5	II	II	II	II	
6	II	III	II	II	
7	II	III	II	II	

第二节 万有引力定律

(一) 参考解答

1. 万有引力 $F = \frac{Gm_1 m_2}{r^2} = 6.67 \times 10^{-11}$ 卡文迪什

2. 地面物体 天体

3. AC 万有引力定律是建立在开普勒关于行星的运动定律基础上的,是自然界任何两个物体之间都存在的相互作用力

4. BD 当两物体间的距离 r 趋于零时就不能看成质点,故选项 A 错误;两物体间的万有引力分别作用在两个物体上,是一对作用力与反作用力,而不是平衡力,所以选项 C 错误

5. 分析得两者间距离为地球绕太阳公转的平均轨道半径 r_0 ,由万有引力定律得 $F = \frac{Gm_1 m_2}{r_0^2} = \frac{6.67 \times 10^{-11} \times 1.96 \times 10^{30} \times 5.97 \times 10^{24}}{(1.49 \times 10^8 \times 10^3)^2} N \approx 3.52 \times 10^{22} N$

6. 根据小行星表面物体所受重力等于是万有引力,得 $g = \frac{Gm}{R^2} = \frac{6.67 \times 10^{-11} \times 7 \times 10^{20}}{(5 \times 10^5)^2} m/s^2 \approx 0.19 m/s^2$

7. (1) $9.8 m/s^2$ (2) 约 $9.77 m/s^2$ (3) 约 $9.22 m/s^2$ (4) 约 $5.69 m/s^2$ 先在计算机上画出函数 $y = k\left(\frac{1}{x^2}\right)$ 的图像,然后在图像上拟合得出结果。重力加速度随高度的增加而减小,而在地面附近(地表高低起伏的山脉)减小量较小,在粗略计算相关问题时可忽略

(二) 习题主要素养与水平分析

习题的主要素养与水平

题号	运动与相互作用	模型建构	科学推理	科学论证	问题	解释	交流	科学本质
1	I							I
2	I							I
3	I		I					I
4	I		II					II
5	II	II	II					
6	II	II	II					
7	II		II		II	II	II	II

第三节 万有引力定律的应用

(一) 参考解答

1. 见下表

说 法	判断	说明理由或举例
第一宇宙速度是人造地球卫星运行时的最小速度	错	第一宇宙速度是发射人造卫星时的最小速度。人造卫星运行时,根据万有引力提供向心力,轨道越高运行速度越小
人造地球卫星运行时的速度一定小于第二宇宙速度	对	根据上述理由,人造卫星在轨运行时速度小于第一宇宙速度,也小于第二宇宙速度
地球上的物体无论具有多大的速度都不能脱离太阳的束缚	错	如物体达到第三宇宙速度就可以脱离太阳引力的束缚

2. CD 讨论人造卫星运行规律需从万有引力提供向心力出发

3. ABC 同步卫星是相对于地球表面静止的,且任何卫星运行的速度均小于第一宇宙速度,所以选项 A、B、C 正确

4. 由 $\frac{Gm_{\text{地}} m_{\text{月}}}{r^2} = m_{\text{月}} \frac{4\pi^2}{T^2} r$, 得 $T^2 \propto r^3$ (1) $T = \sqrt{\left(\frac{6.7 \times 10^3}{3.9 \times 10^5}\right)^3} \times 27.3 \times 24 \text{ h} \approx 1.48 \text{ h}$ (2) $r = \sqrt[3]{\left(\frac{1}{27.3}\right)^2} \times 3.9 \times 10^5 \text{ km} \approx 4.30 \times 10^4 \text{ km}$

5. 由 $g = \frac{Gm}{R^2}$, $\rho = \frac{m}{V}$, 得 $\rho = \frac{3m}{4\pi R^3} = \frac{3g}{4\pi G R} = \frac{3 \times 9.8}{4\pi \times 6.67 \times 10^{-11} \times 6.37 \times 10^6} \text{ kg/m}^3 \approx 5.51 \times 10^3 \text{ kg/m}^3$

6. 由 $g_{\text{月}} = \frac{Gm_{\text{月}}}{R_{\text{月}}^2} = \frac{g}{6}$, 得 $m_{\text{月}} = \frac{g R_{\text{月}}^2}{6G} = \frac{9.8 \times (1.74 \times 10^6)^2}{6 \times 6.67 \times 10^{-11}} \text{ kg} \approx 7.41 \times 10^{22} \text{ kg}$

7. 由 $\frac{Gm_{\text{地}} m}{(R+h)^2} = m \frac{4\pi^2}{T^2} (R+h)$, $g = \frac{Gm_{\text{地}}}{R^2}$, 得 $h = \sqrt[3]{\frac{g R^2 T^2}{4\pi^2}} - R$ 。代入数据后可知同步卫星在距地面约为 36 000 km 的高处

8. (1) 同步卫星和赤道上物体的角速度相等,由 $a = \omega^2 r$, 得 $a_1 : a_2 = r : R$ (2) 由 $\frac{Gm_{\text{地}} m}{r^2} = m \frac{v^2}{r}$, 得 $v_1 : v_2 = \sqrt{R} : \sqrt{r}$

9. (1) 根据 $\frac{Gm_{\text{地}} m}{r^2} = ma$, 加速度 a 与卫星的质量无关,所以微小卫星运行的加速度与同一轨道上运行的大卫星的加速度完全相同 (2) 根据 $\frac{Gm_{\text{地}} m}{r^2} = m \frac{4\pi^2}{T^2} r$, 与 $\frac{Gm_{\text{地}} m}{r^2} = m \frac{v^2}{r}$, 同步卫星的周期 T 为地球自转周期,是确定值,得同步卫星的运行高度、速度等都与卫星的质量无关,两种卫星的这些参数均一致

10. 已知物体在地球上的重力 $P = 10 \text{ N}$, 在距土星中心 $3.2 \times 10^5 \text{ km}$ 处受到土星的引力 $P' = 0.38 \text{ N}$ 。因 $g = \frac{P}{m} = \frac{Gm_{\text{地}}}{r^2}$, 得 $\frac{m_{\text{土}}}{m_{\text{地}}} = \frac{P'}{P} \cdot \left(\frac{r'}{r}\right)^2 = \frac{0.38}{10} \times \left(\frac{3.2 \times 10^5}{6.37 \times 10^3}\right)^2 \approx 96$, 所以土星质量约为地球的 96 倍

11. 因贴近月球表面做匀速圆周运动, $\frac{Gm_{\text{月}} m_{\text{船}}}{R^2} = m_{\text{船}} \frac{4\pi^2}{T^2} R$, 又有 $g = \frac{Gm_{\text{月}}}{R^2} = \frac{P}{m}$ 。解以上两式,得 $R = \frac{T^2 P}{4\pi^2 m}$, $m_{\text{月}} = \frac{T^4 P^3}{16\pi^4 Gm^3}$

12. 由牛顿第二定律 $F - mg' = ma$, 及 $m = \frac{P}{g} = 1.6 \text{ kg}$, 得 $g' = \frac{F}{m} - a = 9 \text{ m/s}^2$ 。由 $g = \frac{Gm_{\text{地}}}{r^2}$, 得 $\frac{r}{R} = \frac{h+R}{R} = \sqrt{\frac{g}{g'}}$, 所以 $h = \left(\sqrt{\frac{g}{g'}} - 1\right) R = \left(\sqrt{\frac{10}{9}} - 1\right) \times 6.37 \times 10^3 \text{ km} \approx 345 \text{ km}$

(二) 习题主要素养与水平分析

习题的主要素养与水平

题号	运动与相互作用	模型建构	科学推理	科学本质
1	I			I
2	I	I	II	II

(续表)

题号	运动与相互作用	模型建构	科学推理	科学本质
3	II		II	
4	II	II	II	
5	II		II	
6	II		II	
7	II	II	II	
8	II	II	II	II
9	II	II	II	II
10	II	II	II	
11	II	III	III	II
12	III	III	III	III

第七章 机械能守恒定律

第一部分 整 章 分 析

学习目标

1. 会用动能定理和机械能守恒定律解释简单的现象,解决简单的实际问题,形成用机械能转化和守恒的思想分析问题的意识,初步建立能量观念。
2. 能将简单问题中物体的运动过程进行抽象,体会科学抽象的思维方法,能从功和能的角度用简单的证据表达自己的观点;在应用机械能守恒定律解决问题的过程中,体会守恒的思想,领悟用守恒思想分析问题的方法。
3. 在验证机械能守恒定律的实验中,经历记录、分析和处理实验数据的过程,能根据证据得出结论并作出解释,能通过相互交流来表达实验的过程和结果。

编写意图

课程标准中对本章内容的要求为:

2. 1. 1 理解功和功率。了解生产生活中常见机械的功率大小及其意义。
2. 1. 2 理解动能和动能定理。能用动能定理解释生产生活中的现象。
2. 1. 3 理解重力势能,知道重力势能的变化与重力做功的关系。定性了解弹性势能。
2. 1. 4 通过实验,验证机械能守恒定律。理解机械能守恒定律,体会守恒观念对认识物理规律的重要性。能用机械能守恒定律分析生产生活中的有关问题。

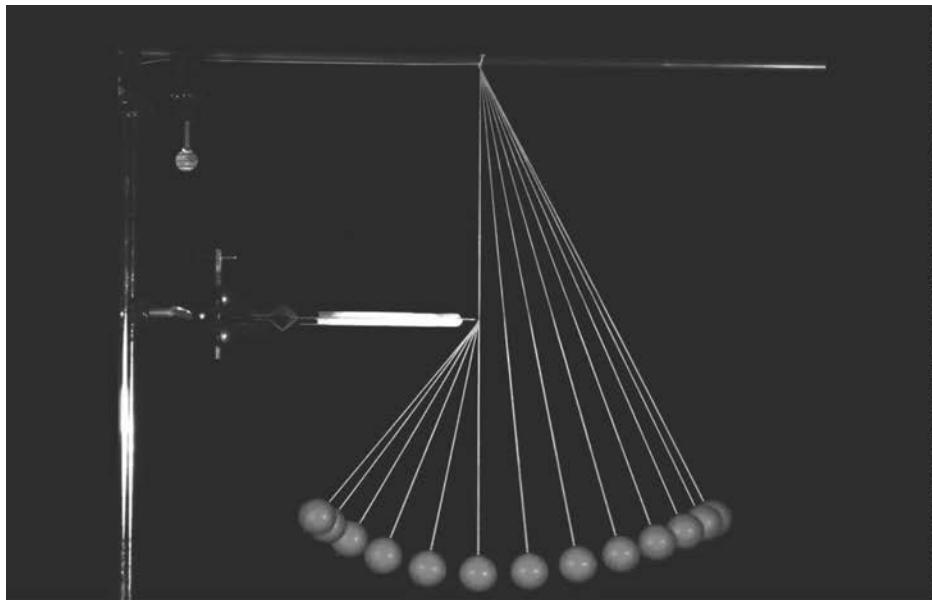
在初中学习的基础上,本章要求理解功和能的定量表述,进一步理解功和能的定量关系,在解决相关实际问题的过程中感受动能定理相对于牛顿运动定律的优势,以及运用动能定理和牛顿运动定律解决问题的不同特点。

由动能定理结合势能与保守力做功的关系推出机械能守恒定律,并通过实验验证机械能守恒定律,认识理论推演与实验验证在探究物理规律过程中的作用和意义。在理解牛顿运动定律及初步建立“运动与相互作用”观念的基础上,能描述外力对物体所做的功和物体运动的情况,能用机械能转化和守恒的思想分析问题,能用动能定理和机械能守恒定律解释生活中简单的现象,解决简单的实际问题。通过机械能守恒定律的应用,经历定量运算,感受机械能守恒定律对解决实际问题的重要意义。

本章内容揭示了运动、相互作用和能量之间的相互关系,帮助学生初步建立能量观念,并初步感受守恒的思想。

完成本章内容的学习,共需要 13 课时。其中,第一节 2 课时,第二节 2 课时,第三节 4 课时,第四节 2 课时,第五节 3 课时。

第二部分 本章教材解读



图示为用细线悬挂的小球在竖直平面内左右摆动的频闪照片。图中的小球自右侧初始位置释放后沿圆周摆至最低点，由于尺子对细线的阻挡，小球继续向左侧摆动，圆周轨道半径减小。我们发现，小球在左右两侧所能到达的最大高度大致相等；小球自高处向低处运动时，相邻影像之间的间隔越来越大。这两个现象背后的物理原理是什么呢？

第七章 机械能守恒定律

- 在本章中我们将：
 1. 理解功、功率、动能、重力势能等概念，理解动能定理，知道重力势能的变化与重力做功的关系，定性了解弹性势能，理解机械能守恒定律。
 2. 根据牛顿定律推导动能定理，通过实验验证机械能守恒定律。
 3. 运用动能定理、机械能守恒定律分析、解释生产生活中的有关问题和现象。
- 本章的学习将用到物体的匀变速直线运动、曲线运动规律和牛顿定律。
- 本章的学习有助于能量观念和守恒思想的形成，为运用功能关系、守恒定律分析较为复杂的运动过程奠定基础。

空气阻力较小时，单摆摆动过程中机械能近似守恒的情境比较容易呈现。此过程也经常被用来代替伽利略的理想斜面实验。可结合必修一中的“斜面实验”引导学生分析两者的共同点，猜想其中的不变量；为机械能守恒定律的学习埋下伏笔。教师也可引导学生用摄像机自行拍摄有关过程，利用适当的辅助手段分析比较摆球在两侧所达到的最大高度。

可引导学生根据章节首图以及相关说明文字分析摆球摆动过程中的速率变化，猜想摆球摆动过程中高度与速率的定性关系，为学生提供通过寻求科学证据进行科学猜想的实际经历。

本节编写思路

本节从机械提升重物的情境引出功的概念，并在初中已学知识的基础上，理解恒力做功的计算式。

通过问题“力怎样才能做功？”“怎样计算恒力的功？”的递进引领，引出做功的条件、功的计算等内容。

第一部分以物理学史和“自主活动”为依托，理解功的概念和做功的条件。第二部分通过对曲线运动过程中恒力对物体做功的分析，体验用微元法分析问题的思想，并在示例中加以巩固。第三部分用“力-位置”图像表示功，既作为公式的补充，也为变力做功的拓展打下基础。

在学习过程中经历微元法分析的过程，有助于学生科学思维的培养。



图 7-1 上海洋山深水港大型吊装机械

第一节 功

[1] 马车由静止开始沿水平地面向前做加速运动，是因为马对车做了功。在初中已经学过功的概念以及简单机械的知识。无论是图 7-1 中现代化港口的大型吊装机械，还是图 7-2 中我国古代的提水机械——桔槔，都是通过做功来提升重物的。不仅机械可以做功，所有的物体甚至人体自身都能做功。做功需要力，重力、弹力和摩擦力都能做功。物理学中，把这些力所做的功叫做机械功 (mechanical work)，简称功。

② 力怎样才能做功？

第一次工业革命时，人们为了比较蒸汽机的效益建立了功的概念。1826 年，法国物理学家科里奥利 (G. Coriolis, 1792—1843) 引入“功”一词，并将其定义为用机器“举起物体的重量与高度的乘积”。现在，这一定义已经大为扩展了。

在初中，我们所学的计算功的公式是

$$W = Fs$$

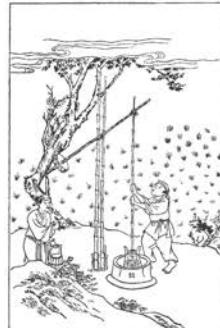


图 7-2 《天工开物》中的桔槔图

正文解读

[1] 功的概念起源于第一次工业革命大规模使用的热机，当时为了寻找一种能够比较蒸汽机效益的办法，人们在实践中逐渐认同用“机器举起物体重量与高度的乘积”来量度蒸汽机的效益，并称之为“功”。19 世纪初，科里奥利 (G. Coriolis, 1792—1843) 明确地把作用力和受力点沿作用力方向的位移的乘积叫做“功”。教材图 7-1、图 7-2 所示的机械，都被用来提升重物，以此呼应功的早期定义。而本节引言选用马拉车做功，使马车加速，说明功的概念不局限于竖直方向提升重物的过程，做功的效果可以使重物高度增加（重力势能增大），也可以使物体加速（动能增大）。

式中, F 表示物体受到的力的大小, s 是物体在力的方向上通过的距离。现在将 s 定义为物体在力的方向上发生的位移大小, 因此, 当物体在力的方向上发生位移时, 称力对物体做了功。功是标量。在国际单位制中, 力的单位是 N, 位移的单位是 m, 功的单位就是 N·m。为了纪念英国物理学家焦耳 (图 7-3), 将功的单位命名为“焦耳”, 用符号 J 表示, 即 $1\text{J}=1\text{N}\cdot\text{m}$ 。



图 7-3 焦耳

(J. Joule, 1818—1889)

[1] 自主活动

图 7-4 所示分别为举重运动员训练的四种情况: 图 (a) 为缓慢上举过程; 图 (b) 为举着不动; 图 (c) 为缓慢向前移动; 图 (d) 为缓慢下蹲过程。请你说说在这四种情况下运动员都对杠铃做功吗? 你认为怎样才能做功?

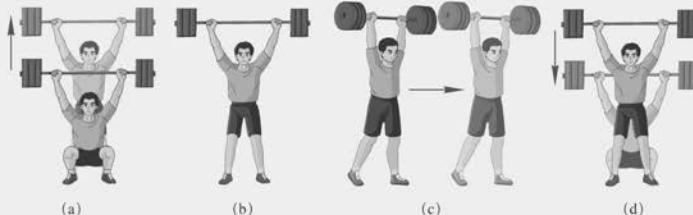


图 7-4 举重运动员训练的四种情况

利用初中所学的功的计算式, 我们可以讨论图 7-4 (a)、(b) 和 (c) 中运动员对杠铃做功的情况。图 7-4 (d) 中, 杠铃向下移动, 而运动员对杠铃的作用力向上。这时, 运动员是否对杠铃做功呢?

怎样计算恒力的功?

在一般情况下, 作用在物体上的力与物体位移的方向不一定相同, 这时可以用矢量分解的方法来分析力做功的情况。

如图 7-5 所示, 物体受恒力 F 的作用由 A 沿直线运动到 B , F 与物体位移 s

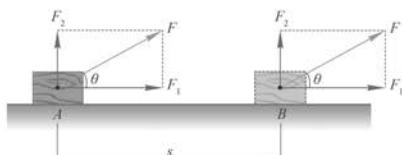


图 7-5 恒力对物体做功

[1] 此处设置“自主活动”的目的是引导学生利用初中关于功的基础知识分析图(a)(b)(c)的情况。

参考答案: 图 (a) 做正功, 图 (b)(c) 不做功, 图 (d) 做负功。物体在力的方向上有位移时才能做功。

[1] 由于必修课程内的研究对象仅限于质点,故功的计算式中, s 为质点的位移。在一般情况下, s 应理解为受力点的位移。如图 1 所示,通过弹簧拉静止于水平桌面上的物体,物体虽然不动,但拉力的受力点有移动,拉力仍然做功(弹簧弹性势能增大)。可根据学生的具体情况,结合数学中向量内积的知识,介绍功的计算式的矢量形式 $\mathbf{W} = \mathbf{F} \cdot \mathbf{s}$,体现学科综合的思想。

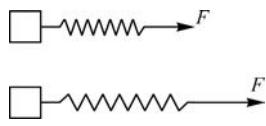


图 1

[2] 此处设置“大家谈”的目的是引导学生通过分解位移的方式得到相同的结论,使学生体验两种方法的等价性,培养学生从不同角度分析问题的意识。

成 θ 角。这时可以将 F 沿 s 方向和与 s 垂直的方向分解成两个分力 F_1 、 F_2 。其中, F_1 与 s 在同一直线上,则 F_1 对物体做功。由于 $F_1 = F\cos\theta$, 故 F_1 对物体做功为 $W = F_1 s = F s \cos\theta$ 。 F_2 与 s 垂直, 物体在 F_2 的方向上无位移, 故 F_2 对物体做功为零。

[1] 综上所述, 物体做直线运动时, 恒力对物体所做的功等于恒力大小、位移大小、恒力与位移之间夹角 θ 的余弦三者的乘积, 即

$$W = F s \cos\theta$$

[2]

能否通过分解位移获得恒力做功的计算式?

物体做曲线运动时, 恒力对物体所做的功怎样计算呢?

[3] 如图 7-6 (a) 所示, 物体沿任意曲线路径由 A 运动到 B , 作用于物体的恒力 F 与物体位移 s 所成角为 θ 。

如图 7-6 (b) 所示, 将物体途经的曲线路径分割成无限多微小段, 物体经过每一微小段的运动可视为直线运动。图 7-6 (b) 中第 i 个微小段的位移 Δs_i 与恒力 F 所成的夹角为 θ_i , 在这段微小位移上, 恒力 F 做的微小功 $\Delta W_i = F \Delta s_i \cos\theta_i$ 。将 Δs_i 沿 F 方向和与 F 垂直的方向分解成两个分位移 Δs_{i1} 和 Δs_{i2} , $\Delta s_{i1} = \Delta s_i \cos\theta_i$, $\Delta s_{i2} = \Delta s_i \sin\theta_i$ 。因此, $\Delta W_i = F \Delta s_{i1}$ 。

物体从 A 沿曲线运动到 B 过程中, 恒力 F 对物体所做的功 W 就是每一段微小位移上恒力 F 所做功的代数和, 即

$$W = \Delta W_1 + \Delta W_2 + \dots = F \Delta s_{11} + F \Delta s_{21} + \dots = F(\Delta s_{11} + \Delta s_{21} + \dots)$$

从几何角度而言, 上式中的 $(\Delta s_{11} + \Delta s_{21} + \dots)$ 即每一微小段位移沿 F 方向分量的累加, 其结果等于图 7-6 (a) 中位移 s 沿 F 方向的分量 s_1 , $s_1 = s \cos\theta$ 。

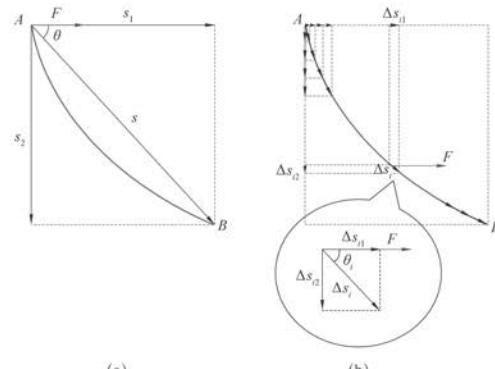


图 7-6 曲线运动中恒力对物体做的功

[3] 通过恒力在曲线运动过程中做功的分析, 明确恒力做功的计算式对曲线运动也同样适用。同时, 提供一个运用微元法分析问题的范例, 帮助学生理解“功是力对空间的积累效应”, 也为第四节学习重力做功的特点做好铺垫。

教师可视具体情况引导学生进一步分析物体沿任意曲线路径由 B 返回 A 的过程中, 恒力 \mathbf{F} 所做的功, 进而总结物体沿闭合路径运动过程中恒力做的功。以上分析表明, 恒力做功具有保守力做功的特点。

所谓恒力, 是指其大小和方向均不随空间位置和时间变化的力, 而且只决定于施力物体和受力物体之间的相互作用, 与受力物体的运动状态(即速度)无关。设恒力为 \mathbf{F} , 则 \mathbf{F} 做的功

$$W = \int_A^B \mathbf{F} \cdot d\mathbf{s} = \mathbf{F} \cdot \int_A^B d\mathbf{s} = \mathbf{F} \cdot \mathbf{s}_{AB}$$

其中, \mathbf{F} 为恒力, \mathbf{s}_{AB} 为位移。由上式易见, 恒力 \mathbf{F} 沿闭合路径做功必为零, $\oint_s \mathbf{F} \cdot d\mathbf{s} = 0$ 。

综上所述，物体做曲线运动时，恒力对物体所做的功也等于恒力大小、位移大小、恒力与位移之间夹角的余弦三者的乘积，即

$$W = F s \cos \theta$$

- [1] 由此可见，恒力所做的功不仅取决于恒力的大小和位移的大小，还取决于恒力和位移之间的夹角。

当 $0 \leq \theta < \frac{\pi}{2}$ 时， $\cos \theta > 0$, $W > 0$, 称恒力做正功；

当 $\theta = \frac{\pi}{2}$ 时， $\cos \theta = 0$, $W = 0$, 称恒力不做功；

当 $\frac{\pi}{2} < \theta \leq \pi$ 时， $\cos \theta < 0$, $W < 0$, 称恒力做负功，或称物体克服恒力做功。

如图 7-4 (d) 所示，运动员对杠铃的作用力与杠铃位移的夹角为 π ，运动员对杠铃做负功。

实际情况下，物体往往受到多个力的作用，从而需要计算多个力对物体所做的总功。由于功是标量，故无论物体是受多个力先后作用还是受多个力同时作用，所有力对物体所做的总功等于各个力对物体做功的代数和。若物体可以被视作质点且受多个力同时作用，则所有的力均为共点力，它们所做的功也等于所有力的合力所做的功。

- [2] 示例 如图 7-7 所示，工人将重 $G = 100 \text{ N}$ 、装满棉花的包裹沿离地高 $h = 1 \text{ m}$ 的水平平台由静止开始从 A 处推至平台边缘 B 处， A 、 B 间的距离为 4 m ；工人对包裹施加恒定的推力，推力大小 $F = 50 \text{ N}$ ，推力与水平面的夹角 $\theta = 37^\circ$ ；包裹到达 B 处时，撤去推力，包裹随即在重力作用下落至水平地面上的 C 处。若包裹与平台间的动摩擦因数 $\mu = 0.2$ ，分别求出作用于包裹的各个力所做的功，以及这些力所做的总功。(忽略空气阻力)

分析：包裹自 A 处被推至 B 处的过程中受四个大小与方向均不变的力作用，包裹由 B 落至 C 的过程中仅受重力作用。因此，只要明确各个力与位移的夹角，即可利用恒力做功的公式计算各力所做的功，这些力做功的代数和就是它们对包裹所做的总功。

解：以包裹为研究对象，包裹由 A 运动至 B 过程中的受力分析如图 7-8 所示，包裹受到大小与方向均不变的推力 F 、平台的支持力 F_N 、摩擦力 F_f 和重力 G 的作用。

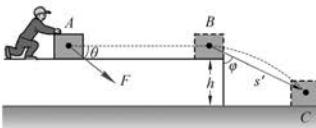


图 7-7 工人推包裹

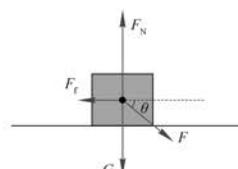


图 7-8 包裹的受力分析

[1] 这里的公式 $W = F s \cos \theta$ 以及多个力做的总功等于合力做的功，均只适用于质点，而一般情况下，多个外力对物体做功的代数和并不一定可以用合外力与位移的内积来计算。这是因为一方面对非质点的情形，如果作用于物体的多个力并非一定是共点力，并不能用合力描述；另一方面各个力的作用点的位移也可能并不一致。例如，作用于弹簧两端的拉力做的功和作用于刚体使之加速旋转的力偶做的功。教师可视具体情况引导学生分析如图 2 所示过程中，作用于轻弹簧两端、等大、反向的恒力 F_1 和 F_2 将弹簧拉长 x 的过程中所做的总功。

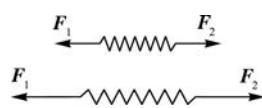


图 2

- [2] 示例选择工人推包裹的实际情境，针对水平直线运动和平抛曲线运动两段过程求解全过程中各个力做功。具体结果涉及正功、负功和不做功各种情况。其中，物体自 B 处经平抛运动落至 C 处的过程中，重力做功的计算呼应了此前对曲线运动中恒力做功特点的分析，亦为第四节重力做功的特点埋下伏笔。

设包裹由 A 至 B 的位移为 s , G 、 F_N 、 F_f 与 s 的夹角分别为 α 、 β 和 γ , 则 $s=4\text{ m}$, $\alpha=90^\circ$, $\beta=90^\circ$, $\gamma=180^\circ$ 。

根据竖直方向的力平衡关系可得

$$F_N = G + F \sin \theta = (100 + 50 \times \sin 37^\circ) \text{ N} = 130 \text{ N}$$

则

$$F_f = \mu F_N = 0.2 \times 130 \text{ N} = 26 \text{ N}$$

由已知条件和恒力做功的计算式可知, 包裹由 A 被推至 B 的过程中:

重力做功

$$W_G = G s \cos \alpha = 100 \times 4 \times \cos 90^\circ \text{ J} = 0$$

支持力做功

$$W_N = F_N s \cos \beta = 130 \times 4 \times \cos 90^\circ \text{ J} = 0$$

推力做功

$$W_F = F s \cos \theta = 50 \times 4 \times \cos 37^\circ \text{ J} = 160 \text{ J}$$

摩擦力做功

$$W_f = F_f s \cos \gamma = 26 \times 4 \times \cos 180^\circ \text{ J} = -104 \text{ J}$$

包裹由 B 落至 C 的过程中, 只有重力做功, 设包裹的位移为 s' , 重力与位移的夹角为 φ , 则重力做功

$$W_G' = G s' \cos \varphi = Gh = 100 \times 1 \text{ J} = 100 \text{ J}$$

整个过程中, 包裹受到的作用力所做的总功为

$$W = W_F + W_G + W_N + W_f + W_G' = (160 + 0 + 0 - 104 + 100) \text{ J} = 156 \text{ J}$$

② 如何用图像表示功?

[1] 可通过与 $v-t$ 图面积的物理意义的类比, 进一步强化 $F-x$ 曲线与 x 轴所围面积的物理意义。

当力的方向与受力物体的位移沿同一直线时 (力与位移的夹角为 0 或 π), 力对物体所做的功可以用图像来表示。

[1] 图 7-9 所示为恒力与位置的关系图像。图中横坐标 x 表示物体的位置, 纵坐标 F 表示力。该图像称为力-位置图像, 即 $F-x$ 图。图线下阴影面积表示在一段位移上力做的功。

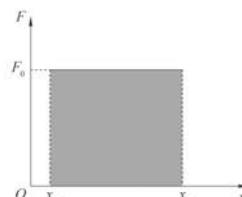


图 7-9 恒力的力-位置图像

[1]

拓展视野

如图 7-10 (a) 所示, 物体从 $x=x_0$ 处沿直线运动到 $x=x_f$ 处的过程中, 力 F 的方向始终和物体的位移方向一致, 但其大小随物体的位置 x 变化。

在此情形下, 将物体在整个过程中的位移分为无限多微小位移 $\Delta x(\Delta x \rightarrow 0)$ 。在每一段 Δx 中, F 的变化很小, 可视为恒力。对于图中第 i 段微小位移 Δx_i , F_i 做的微小功 $\Delta W_i = F_i \Delta x_i$, 即图 7-10 (a) 中蓝色窄条矩形的面积。物体从起点运动到终点的过程中, F 对物体做的功为所有微小功的累加, 即

$$W = \Delta W_1 + \Delta W_2 + \dots = F_1 \Delta x_1 + F_2 \Delta x_2 + \dots$$

从几何角度而言, 上述累加表示将图 7-10 (a) 中无限多窄条矩形的面积进行累加, 其结果正好等于图 7-10 (b) 中从起点到终点之间图线下方的面积。

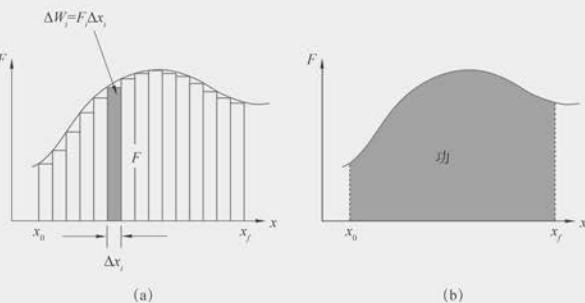


图 7-10 变力的力-位置图像

问题与思考

- 运动员用 100 N 的力将球踢出, 球滚出的距离是 10 m。某同学根据 $W=Fs$ 得出运动员踢球做的功是 1000 J。这种算法是否正确? 简述理由。
- 周末, 小明在家打扫卫生, 他先把沙发推开, 清洁地面后再把沙发推回原位。有同学认为, 整个过程中沙发的位移为零, 所以滑动摩擦力对沙发做的功也是零。这种观点是否正确? 简述理由。
- 周一早上, 小明提起书桌上的书包背到肩上, 出门去学校。他乘电梯下楼后, 走到一个十字路口正好遇到红灯, 便站立等待。绿灯亮起后, 小明加速通过横道线, 走到校门口。进入校门后, 他放慢脚步走向教学楼, 然后走楼梯到达三楼的

上的位移。而推开、推回过程中, 滑动摩擦力的方向变化且总是与运动方向相反, 始终做负功, 故虽然全过程位移为零, 但滑动摩擦力对沙发做负功

命题意图: 考查对功的计算式中位移的理解。

主要素养与水平: 模型建构(I); 科学论证(I)。

3. 参考解答: 小明对书包做正功的情况有: 提起书包的过程、加速前进的过程、走楼梯上楼的过程, 这些过程中小明对书包的作用力与书包的运动方向同向或成锐角, 根据 $W=Fs\cos\theta$, 可知做功为正。

做负功的情况有: 乘电梯下楼的过程、放慢脚步的过程、取下书包放到椅子下面的过程, 这些过程中小明对书包的作用力与书包的运动方向相反或成钝角, 根据 $W=Fs\cos\theta$ 知做功为负。

不做功的情况有: 站立等待的过程、水平路面匀速前进的过程, 这些过程中, 或者书包的位移为零, 或

[1] 教师可视具体情况, 将 $F-x$ 图面积的物理意义推广至变力做功的情况。建议与变速直线运动中分析 $v-t$ 图面积物理意义的过程类比。教师可提供线性变力做功的示例供学生练习, 并介绍对位移的平均力概念。

问题与思考解读

1. 参考解答: 不正确。公式 $W=Fs$ 中, F 为恒力、 s 为恒力作用下物体运动在力方向上的位移; 而运动员对球的作用力 100 N 并未作用 10 m 全过程, 故直接代入计算不正确

命题意图: 考查对功的计算式中位移的理解。

主要素养与水平: 模型建构(I); 科学论证(I)。

2. 参考解答: 不正确。公式 $W=Fs$ 中, F 为恒力、 s 为恒力作用下物体运动在力方向

者小明对书包的作用力与书包的位移方向垂直,根据 $W=F_s \cos \theta$ 知做功为零

命题意图:从文字表述中提取信息,结合真实情境辨析做功情况。

主要素养与水平:模型建构(Ⅱ);科学论证(Ⅰ)。

4. 参考解答:对匀速上升的电梯受力分析,由平衡条件知

$$\begin{aligned} \text{拉力 } F_T &= G = \\ mg &= 2.0 \times 10^3 \times 9.8 \text{ N} \\ &= 1.96 \times 10^4 \text{ N} \end{aligned}$$

由恒力做功公式
 $W=F_s \cos \theta$ 知

$$\begin{aligned} W_T &= F_T h = \\ 1.96 \times 10^4 &\times 10 \text{ J} = \\ 1.96 \times 10^5 \text{ J} & \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} W_G &= -Gh = \\ -1.96 \times 10^4 &\times 10 \text{ J} = \\ -1.96 \times 10^5 \text{ J} & \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{总功 } W_{\text{总}} &= W_T + \\ W_G &= [1.96 \times 10^5 + \\ (-1.96 \times 10^5)] \text{ J} = 0 \end{aligned}$$

命题意图:结合平衡条件分析做功情况。

主要素养与水平:模型建构(Ⅰ);科学推理(Ⅰ)。

5. 参考解答:分析下滑过程,可知重力和阻力对儿童做功。

重力是恒力,由恒力做功公式 $W=F_s \cos \theta$ 知

$$W_G = G s \cos \theta = Gh = mgh = 30 \times 10 \times 3 \text{ J} = 900 \text{ J}$$

阻力大小恒定、方向变化,始终与运动方向相反。由此可知阻力做负功,与路程成正比,路程近似取滑道长度 l

$$W_f = -F_f l = -60 \times 12 \text{ J} = -720 \text{ J}$$

此过程中各力所做的总功

$$W_{\text{总}} = W_G + W_f = (900 - 720) \text{ J} = 180 \text{ J}$$

教室。他走到自己的课桌前,从肩上取下书包并放到椅子下面,然后坐好等待上课。”在上述情境中,小明有时对书包做正功,有时对书包做负功,有时则不做功。从上述情景中选出有关实例并简述理由。

4. 总质量 $m=2.0 \times 10^3 \text{ kg}$ 的电梯在钢绳的牵引下匀速上升至 $h=10 \text{ m}$ 处,此过程中钢绳拉力和电梯所受的重力分别做了多少功?这两个力做的总功是多少?
5. 如图 7-11 所示,质量 $m=30 \text{ kg}$ 的儿童从滑梯顶端 A 点滑下,经长 $l=12 \text{ m}$ 的旋转滑道到达底端 B 点, A 、 B 两点间的水平距离 $x=4 \text{ m}$,高度差 $h=3 \text{ m}$ 。若下滑过程中阻力 F_f 的大小恒为 60 N , g 取 10 m/s^2 ,求下滑过程中重力 G 和阻力 F_f 对儿童所做的总功。
6. 如图 7-12 所示,长度 $l=1 \text{ m}$ 、质量 $m=5 \text{ kg}$ 的均质硬杆一端由光滑铰链固定于天花板上的 O 点。在杆的另一端施加水平恒力 $F=10 \text{ N}$,使杆由竖直位置绕 O 点转过角度 $\theta=37^\circ$, g 取 10 m/s^2 ,求此过程中各力对杆所做的总功。

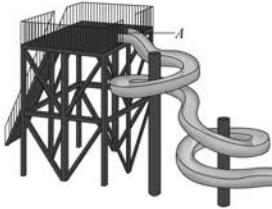


图 7-11



图 7-12

命题意图：将真实情境转化为模型化情境。

主要素养与水平：模型建构(Ⅱ);科学推理(Ⅰ)。

6. 参考解答：杆转动过程中受到重力 G 、恒力 F 和铰链对杆的作用力 F_N , 其中仅重力 G 、恒力 F 做功。 G 的作用点为重心, 位于杆的中点, 其上升高度 $h = \frac{l(1 - \cos \theta)}{2} = \frac{1 \times (1 - \cos 37^\circ)}{2} \text{ m} \approx 0.1 \text{ m}$

由恒力做功公式 $W = Fs \cos \theta$ 知

$$W_F = Fl \sin \theta = 10 \times 1 \times \sin 37^\circ \text{ J} = 6 \text{ J}$$

$$W_G = -mgh = -5 \times 10 \times 0.1 \text{ J} = -5 \text{ J}$$

$$W_{\text{总}} = W_F + W_G = [6 + (-5)] \text{ J} = 1 \text{ J}$$

命题意图：由求各个力做功转而求各力所做总功, 深化对功的计算式中位移的理解。

主要素养与水平：模型建构(Ⅰ);科学推理(Ⅱ)。

本节编写思路

本节以常见的徒步上楼与乘电梯上楼的情境引出做功的快慢。

通过“自主活动”运用证据分析与论述的过程，建立功率的概念。“拓展视野”介绍功率常用单位“马力”建立的历史。通过“大家谈”运用类比方法，由平均功率的概念得到瞬时功率概念，再由“助一臂”总结平均值与瞬时值的一般关系。借助教材图 7-13 和“STSE”介绍，由国产机车功率的提升展示我国铁路技术的发展。最后讨论机械工作时的实际功率和额定功率，并在“拓展视野”中介绍汽车发动机功率的实际消耗情况。

在学习过程中经历对变力作用下物体运动情况的分析，有助于提高学生模型建构和科学推理的能力。

[1]



图 7-13 “复兴号”动车组

第二节 功率

[2]

人类设计、制造机械的主要目的是借助机械代替人力完成做功的过程。家住大楼高层的人们一般都乘电梯上楼，当然也可以徒步登楼，这两种方式克服重力做功相等，但乘电梯上楼更快捷，说明克服重力做功更快。驾驶汽车或骑自行车通过相同的距离，汽车发动机所做的功较多，所需的时间却更少，说明汽车发动机做功更快。

生活中的大量事例表明，在做功的过程中，做功的快慢也是人们关注的问题。

如何描述做功的快慢？

[3] 自主活动

建筑工人在 1 min 内将质量为 20 kg 的水泥搬到 6 m 高的三楼；工地上的起重机在 20 s 内将质量为 1 t 的建筑材料匀速提升 10 m。比较建筑工人和起重机做功的快慢并简述理由。

正文解读

[1] 可结合“STSE”的相关内容，介绍“复兴号”与“和谐号”的研发过程、相关技术参数等。提醒学生注意，功率是描述动车组性能的重要参数之一。

[2] 功率的概念在初中已有涉及。“登楼”的例子中，克服重力做功相同，通过生活经验可以判断两种方式的时间长短，并直接判断做功的快慢关系。而驾驶汽车和骑自行车通过相同距离的时间差异显而易见，尽管两种方式中功和时间都不相同，但学生还是较容易判断出做功的快慢。

[3] 此处设置“自主活动”的目的就是在引入部分的基础上，通过定量的比较判断做功快慢。

时间相等的情况下，做功越多表示做功越快；做功相同的情况下，所花时间越短，做功越快。在初中我们已经知道，做功的快慢用**功率**（power）描述。一般情况下，做功可能时快时慢，这时可以用一段时间内做的总功 W 与做功时间 t 的比来反映做功的快慢，这个比叫做平均功率。平均功率用 \bar{P} 表示，即

$$\bar{P} = \frac{W}{t}$$

平均功率表示做功的平均快慢，类似于用平均速率表示物体位置变化的平均快慢。在国际单位制中，功的单位是 J，时间的单位是 s，所以功率的单位是 J/s。为了纪念英国发明家瓦特（图 7-14），将功率的单位命名为“瓦特”，用符号 W 表示，即 $1\text{ W} = 1\text{ J/s}$ 。功率的常用单位还有千瓦（kW）。功率是标量。



图 7-14 瓦特
(J. Watt, 1736—1819)

[1] 此处设置“拓展视野”的目的是介绍历史上曾用过的功率单位——“马力”，以及单位制对生产生活的重要意义，让学生了解物理单位建立的过程。教师可视情况介绍目前空调功率的单位（如 1 匹、1.5 匹等），引导学生体会物理单位与生产生活之间的广泛联系。

[1] 拓展视野

18 世纪后期，瓦特为了测定蒸汽机功率，引入“马力”这一功率单位。当时，瓦特认为一匹马能以 180 磅（相当于 800 N）的力拉着转动半径为 12 英尺（相当于 3.7 m）的磨轮以 144 圈 / 时的转速转动。由此定出 1 马力功率为 32 572 磅·英尺 / 分，经四舍五入后取为 33 000 磅·英尺 / 分。由于这是根据英制计量标准所得，故称为英制马力，即 745.7 W。可是同一时期，德国等采用公制单位的国家对英制计量标准有些“水土不服”，他们采用公制马力作为功率单位。公制马力也称为米制马力，定义为：一匹马于 1 min 内将 75 kg 的物体提升 60 m，即 735.5 W。由于英制马力和公制马力的不一致，在工业革命发展初期给各国的工业生产造成麻烦。

对于恒力与位移方向相同的情况，将功的计算式代入平均功率的定义式，可得

$$\bar{P} = \frac{W}{t} = \frac{Fs}{t} = F\bar{v}$$

式中， F 为恒力的大小， \bar{v} 为物体在时间 t 内的平均速度的大小。

[2]

大家谈

回顾以平均速度概念为基础建立瞬时速度概念的过程，如果以平均功率概念为基础，能否建立瞬时功率概念呢？

[2] 此处设置“大家谈”的目的是通过类比，由平均功率的概念建立瞬时功率概念，再次体会极限思想在物理学中的应用。教材第 64 页“助一臂”是在这个“大家谈”基础上归纳为平均值与瞬时值的关系。教师可视情况回顾平均加速度与瞬时加速度以作为“助一臂”的一个案例。

[1] 此处设置“助一臂”是供教师视情况介绍恒力做功瞬时功率的一般表达式。

$$\begin{aligned} P &= \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{\Delta W}{\Delta t} \\ &= \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{\mathbf{F} \cdot \Delta \mathbf{s}}{\Delta t} \\ &= \mathbf{F} \cdot \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{\Delta \mathbf{s}}{\Delta t} \\ &= \mathbf{F} \cdot \mathbf{v} \end{aligned}$$

应提醒学生注意，一般情况下，瞬时功率 $P = Fv \cos \alpha$ 。此式对变力做功的瞬时功率也适用。

[2] 教材图 7-15 形象化地展示了生活中常见功率数量级的对比情况，帮助学生建立常见功率数量级的感性认识。可提醒学生，本图中各功率“柱体”的高度按对应数量级对数的比例绘制。

在生活实际中，有时还需要关注力在特定时刻做功的快慢。物理学中，用瞬时功率表示力在某一时刻做功的快慢。当力与瞬时速度的方向相同时，力的大小 F 与瞬时速度大小 v 的乘积就是瞬时功率 P ，即

$$P = Fv$$

功率是生活中常用的物理概念。例如，人类心脏跳动的功率约 $1.4 \sim 1.5 \text{ W}$ ；手机充电器的功率约 5 W ；人在运动状态下所消耗功率的数量级为 10^2 W ；运动员的最大瞬时输出功率、家用微波炉和摩托车的输出功率数量级均为 10^3 W ；而家用轿车、万吨级巨轮和喷气式客机发动机输出功率的数量级分别为 10^5 W 、 10^6 W 和 10^8 W ；全球能源总消耗功率的数量级为 10^{13} W ，太阳辐射总功率的数量级则为 10^{26} W 。图 7-15 所示为这些功率的数量级“阶梯”。

[2]

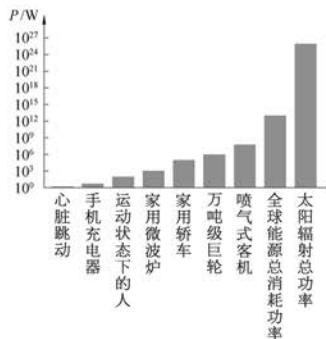


图 7-15 功率的数量级“阶梯”

助一臂

[1]

随时间变化的物理量都有平均值和瞬时值之分，例如，平均速度和瞬时速度。瞬时值可以看成微小时间段（趋于零的时间段）内的平均值的极限。

[3]

STSE

我国铁路的发展，从国产机车动力功率的提升可以窥其一斑。20世纪70年代的上游型蒸汽机车和东方红型内燃机车功率约1000kW，80年代的东风型内燃机车功率约1300kW，90年代的韶山型内燃机车功率约4000kW；2007年投入运营的和谐号CRH1型电力动车组功率约5000kW；2017年投入运营的“复兴号”动车组（图7-13）功率则可达10000kW。与此同时，列车运行速度也飞速提升。以从上海到北京的列车为例，70年代约需20h，2000年缩短到约10h，2017年“复兴号”运行后仅需约4.5h。我国铁路技术的迅猛发展，已实现古人“千里江陵一日还”的梦想。

[3] 此处设置“STSE”是为了展示我国高铁技术的飞速发展，引导学生体会我国综合国力的提升，增强民族自豪感与社会责任感。

② 机械工作时的功率有限制吗?

机械做功的快慢与机械的结构和性能有关，每一台机械在正常状态下长时间工作的功率不应超过某一最大值，这个最大值称为机械的额定功率。

机械实际运行时的功率叫做实际功率。如果实际功率长时间超过额定功率就可能损坏机械或缩短机械的使用寿命。

- [1] 示例 一台起重机以 $2.1 \times 10^3 \text{ N}$ 的牵引力将质量 $m = 200 \text{ kg}$ 的货物由静止开始竖直向上匀加速提升。如果该起重机的额定功率 $P_0 = 5 \times 10^3 \text{ W}$, g 取 10 m/s^2 。

(1) 求货物做匀加速运动的时间。

(2) 起重机达到额定功率后即保持瞬时功率 P_t 不变，分析此后货物的运动情况。

分析：货物向上做匀加速运动的过程中，牵引力保持不变，所以，牵引力的瞬时功率不断增大。当牵引力的瞬时功率增大至额定功率时，若继续保持牵引力大小不变，则牵引力的瞬时功率将突破额定功率。因此，当牵引力的瞬时功率等于额定功率时，匀加速运动阶段结束。此后，起重机若以额定功率运行，则牵引力逐渐减小，但速度继续增大；当牵引力大小等于货物重力大小时，货物将开始匀速上升。

解：(1) 以货物为研究对象，它受到重力与牵引力两个力的作用，以向上为正方向，设牵引力为 F ，货物由静止开始向上做匀加速运动的加速度为 a 。由牛顿第二定律可得

$$F - mg = ma$$

$$\text{则 } a = \frac{F - mg}{m} = \frac{2.1 \times 10^3 - 200 \times 10}{200} \text{ m/s}^2 = 0.5 \text{ m/s}^2$$

以货物从静止开始运动为初始时刻，经过时间 t ，起重机瞬时功率达到额定功率，货物的匀加速运动阶段结束，则货物的瞬时速度

$$v_1 = at$$

牵引力的瞬时功率为

$$P_t = P_0 = Fv_1 = Fat$$

则

$$t = \frac{P_0}{Fa} = \frac{5 \times 10^3}{2.1 \times 10^3 \times 0.5} \text{ s} \approx 4.8 \text{ s}$$

(2) 由于起重机保持额定功率运行，故 4.8 s 后牵引力减小，速度继续增大，牵引力与速度乘积保持不变。由牛顿第二定律可知，货物做加速度减小的加速运动。当牵引力减小到与重力相等时，货物将匀速上升。此时

$$F = mg$$

$$\text{则 } v_2 = \frac{P_0}{F} = \frac{P_0}{mg} = \frac{5 \times 10^3}{200 \times 10} \text{ m/s} = 2.5 \text{ m/s}$$

即货物最终以 2.5 m/s 的速度匀速上升。

[1] 示例综合牛顿定律和功率概念的应用。第(1)小题运用牛顿定律分析恒力作用过程，然后通过功率与速度关系计算时间；第(2)小题功率不变而作用力为变力，无法用牛顿定律直接求解最终速度，引导学生综合物体匀速运动时的受力情况与额定功率的概念解出最终速度。

[1] 此处设置“拓展视野”的目的是因为中学物理教学涉及汽车发动机功率时，常将问题做简化处理。事实上，汽车发动机的功率通常仅有30%左右用于驱动汽车，相关问题见教材第90页第10题，供教师选用。

问题与思考解读

1. 参考解答：见下表

额定功率数量级	家用电器
10^0 W	手电筒、手机、门铃
10^1 W	台灯、净水机、手机充电器、单人电热毯
10^2 W	电扇、电视、计算机、电冰箱、洗衣机
10^3 W	电饭锅、电热水器、微波炉、空调

命题意图：通过查阅相关资料，形成对家用电器功率数量级的认识，增强节能意识。

主要素养与水平：能量(I)；证据(I)。

2. 参考解答：(1) 不正确。功率 $P = \frac{W}{t}$ ，时间长，做功也可能更多，无法确定功率的大小 (2) 不正确。功率 $P = \frac{W}{t}$ ，做功多，时间也可能更长，无法确定功率的大小 (3) 不正确。功率 $P = Fv$ ，作用力大，速度可能很小，无法确定功率的大小 (4) 不正确。功率 $P = Fv$ ，速度大，作用力可能很小，无法确定功率的大小

命题意图：通过问题辨析，加深对功率概念的理解。

主要素养与水平：科学推理(I)；交流(I)。

3. 参考解答：克服重力做的功 W 等于 mgh ，两次上楼过程做功 W 相等，第一次走上去，所用时间 t_1 比第二次跑上去的时间 t_2 长。由功率 $P = \frac{W}{t}$ 知，走上去的功率 P_1 小于跑上去的功率 P_2

在解决上述问题的过程中，我们默认起重机的实际功率就是牵引力对货物做功的功率。事实上，除了提升重物做功以外，由于克服内部机件的摩擦等，起重机做的功还会消耗在其他方面。

为了简化起见，一般情况下我们也默认汽车发动机的功率即驱动力的功率。所以，当汽车上坡或阻力较大时，若发动机以额定功率工作，驾驶员往往通过使汽车减速来获得更大的驱动力。

[1] 拓展视野

汽车发动机输出的功率有一部分用于水泵的运作及热损耗，输入至传动和驱动系统的功率只是发动机输出功率的另一部分。即使如此，传动和驱动系统内部机件的运作也会消耗一部分功率，余下的才是真正意义上的驱动功率。

问题与思考

- 用表格或图示的方式列举额定功率的数量级分别为 10^0 W 、 10^1 W 、 10^2 W 和 10^3 W 的家用电器。
- 判断下列关于功率的说法是否正确，并简述理由。
 - 做功时间越长，功率越小。
 - 做功越多，功率越大。
 - 作用力越大，功率越大。
 - 物体速度越大，功率越大。
- 某同学从一楼到二楼，第一次走上去，第二次跑上去，比较两次克服重力做功的功率。
- 2018年上海中心国际垂直马拉松赛于11月25日上午盛大举行，近千名选手参加比赛。我国一位女选手用时20 min 55 s 抵达终点。上海中心大厦（图7-16）楼高632 m，共计127层，比赛赛道终点设在119层，选手们经历了3398级台阶的考验，在终点552 m的高空俯瞰最美的上海全城风光，顿时忘却了疲劳，纷纷在上海之巅记录自己的成功时刻。
根据上述材料，试估算该女选手比赛过程中克服重力做功的平均功率。



图7-16

5. 举重运动员在图 7-17 所示的抓举过程中, 将 150 kg 的杠铃举高了 63 cm, 所用的时间是 0.8 s。求这一过程中运动员举杠铃的平均功率。

6. 两个物体从离地相同高度处先后做自由落体运动和平抛运动并落至水平地面。试比较这两个物体在落至水平地面过程中重力的平均功率。

*7. 某电动汽车的部分动力性能参数如表 7-1 所示。若该汽车沿平直公路由静止开始做加速度 $a = 1.5 \text{ m/s}^2$ 的匀加速直线运动, 当车速达到 $v_t = 72 \text{ km/h}$ 时, 电机恰好以额定功率工作, 此后电机的功率保持不变。假设行驶过程中汽车受到的阻力大小恒定。

(1) 分析说明电机达到额定功率后, 汽车的加速度和速度的变化情况。

(2) 电机以额定功率工作时, 汽车的最大速度为多少?

(3) 该汽车充满电后, 以上述方式运动的总时间为多少?



图 7-17

表 7-1	
动力电池容量 / (kW·h)	48.3
电机额定功率 / kW	85
整车质量 / kg	1 710

命题意图: 将真实情境抽象为模型化情境, 为第 4 题做铺垫。

主要素养与水平:

模型建构(I); 科学论证(I)。

4. 参考解答:

认为选手的平均功率就是其克服重力做功的功

$$率, P = \frac{W}{t} = \frac{mgh}{t}。估$$

计选手质量约为 60 kg,

比赛时间为 1 255 s, 高度

552 m。故其功率 $P =$

$$\frac{mgh}{t} = \frac{60 \times 10 \times 552}{1 255} \text{ W}$$

$$\approx 3 \times 10^2 \text{ W}$$

命题意图: 将真实情境转化为模型化情境, 从题目信息中分析提取有效信息。

主要素养与水平:

模型建构(I); 能量(I)。

5. 参考解答:

认为选手的平均功率就是其克服杠铃重力做功的功率, 故其功率

$$P = \frac{W}{t} = \frac{mgh}{t} =$$

$$\frac{150 \times 9.8 \times 0.63}{0.8} \text{ kW} \approx$$

$$1.16 \text{ kW}$$

命题意图: 将真实情境转化为模型化情境。

主要素养与水平: 模型建构(I); 能量(I)。

6. **参考解答:** 平抛运动的竖直分运动是自由落体运动, 故两者的运动时间相等。

重力的平均功率 $P = \frac{W}{t} = \frac{mgh}{t}$, 高度 h 相等, 时间 t 相等, 而两物体质量大小关系未知, 故功率大小

关系也无法确定

命题意图: 综合运动规律分析问题。

主要素养与水平: 运动与相互作用(I); 科学推理(I)。

7. **参考解答:** (1) 在运动的方向上, 汽车受到驱动力 F 和阻力 $F_{阻}$ 的作用, 由牛顿第二定律知合外力

$F_{合} = F - F_{阻} = ma$ 。由题意知,汽车达到额定功率后,汽车的速度继续增大,但功率保持不变,由 $P = Fv$ 知,驱动力 F 将减小,合外力 $F_{合}$ 将减小,加速度 a 将减小,速度增加直至加速度减小至零后保持以最大速度匀速运动。

(2) 车速达到 $v_1 = 72 \text{ km/h} = 20 \text{ m/s}$ 时,电机恰好以额定功率工作,由 $P = Fv$ 知,此时 $F_1 = \frac{P}{v_1} =$

$$\frac{85000}{20} \text{ N} = 4.25 \times 10^3 \text{ N}$$

由牛顿第二定律知 $F_{合} = F_1 - F_{阻} = ma$, 所以 $F_{阻} = F_1 - ma = (4250 - 1710 \times 1.5) \text{ N} = 1685 \text{ N}$ 汽车保持功率不变以最大速度匀速运动时, $F_2 = F_{阻} = 1685 \text{ N}$ 。

由 $P = F_2 v_m$ 知 $v_m = \frac{P}{F_2} = \frac{85000}{1685} \text{ m/s} \approx 50.45 \text{ m/s} \approx 182 \text{ km/h}$

(3) 汽车做匀加速直线运动过程中,电机功率随时间均匀增加,此过程用时 $t_1 = \frac{v_1}{a} = \frac{20}{1.5} \text{ s} \approx 13.3 \text{ s}$,

平均功率 $\bar{P} = \frac{P}{2}$ 。故这一过程电机耗能 $W_1 = \bar{P}t_1 = \frac{85000}{2} \times \frac{20}{1.5} \text{ J} \approx 5.67 \times 10^5 \text{ J} \approx 0.16 \text{ kW} \cdot \text{h}$ 。汽车以额定功率行驶时,电池剩余能量 $W_2 = W - W_1 = (48.3 - 0.16) \text{ kW} \cdot \text{h} = 48.14 \text{ kW} \cdot \text{h}$, 则汽车以额定功率行驶的时间 $t_2 = \frac{W_2}{P} = \frac{48.14}{85} \text{ h} \approx 0.57 \text{ h} = 2052 \text{ s}$ 。故汽车以上述过程运动的总时长 $t = t_1 + t_2 = (13.3 + 2052) \text{ s} = 2065.3 \text{ s} \approx 34.4 \text{ min}$ 。

命题意图: 综合牛顿运动定律分析问题。

主要素养与水平: 运动与相互作用(Ⅱ);科学推理(Ⅱ)。

[1]



图 7-18 长江三峡水利枢纽

第三节 动能 动能定理

在初中我们已经知道，物体由于运动而具有的能量称为动能 (kinetic energy)。运动物体的动能与物体的质量和速度有关。人类活动中，利用动能的实例很多。图 7-18 所示的长江三峡水利枢纽，主要就是利用水流由高处下落的巨大动能发电。图 7-19 所示是明代宋应星所著《天工开物》中记载的我国古代的一种农业机械——水碾，水碾也是利用水的动能做功的装置。

如何计算动能？

如图 7-20 所示，质量为 m 的物体沿水平面向右做匀加速直线运动。物体在初始位置 A 时的瞬时速度为 v_0 ，经过位置 B 时的瞬时速度为 v_t 。物体的位移为 s 。



图 7-20 物体向右做直线运动

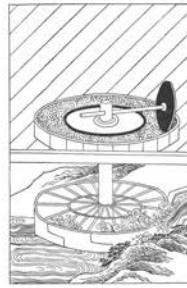


图 7-19 水碾

本节编写思路

本节以水流做功的场景引出动能概念。

首先运用牛顿运动定律分析匀加速直线运动，研究合力的功与运动状态改变的关系，导出了动能定理的关系式，由此表明物体所受合力对空间的累积效应导致物体运动状态的变化；再定义描述物体运动状态的物理量——动能。让学生知道动能的定义绝非凭空建立，由此体会物理量之间的逻辑关系。

明确动能的定义后继续介绍生产生活中利用动能的事例，深化对动能的理解。在“拓展视野”中，不仅分析了风力发电机的发电功率，还建立一种分析连续流体动能的模型。

最后在示例中定量分析变力作用下的曲线运动，体验运用牛顿运动定律与动能定理分析问题的不同特点。

学习过程中经历对动能定义的深入理解，有助于能量观念的形成。经历推演和物理建模过程，有助于运动与相互作用观念的建立和科学思维的培养。

正文解读

[1] 教材图 7-18 与图 7-19 均与水流的动能有关。这些都是学生较为熟悉的实际场景，有助于动能概念的引入。在初中关于动能定义及其与质量和速度的定性关系基础上，借助实际场景引发学生关于利用动能做功的联想。

[1] 学生在初中已经学过动能的定性概念,知道动能与物体的质量和速度有关。本节没有直接给出定义,而是先研究物体运动过程中合力做的功所引起的运动状态改变,由牛顿第二定律以及匀加速直线运动规律导出式(3)。

推导过程中, $\frac{1}{2}mv_t^2$ 、

$\frac{1}{2}mv_0^2$ 都仅与物体的瞬时速度和质量有关,且

$\frac{1}{2}mv_t^2 - \frac{1}{2}mv_0^2$ 与合力对物体做的功相等,联系初中已有的“做功的过程就是能量转化和转换的过程”以及动能与质量、速度定性关系等知识基础,可以定量描述物体运动的物理量——动能,并得到 $W = E_{kt} - E_{k0}$ 。借此让学生体会动能的定义(较为明显的是系数为 $\frac{1}{2}$,而不是 1)并非凭空引入。

[1] 由于物体做匀加速直线运动,所以物体所受合力 $F_{合}$ 为恒力,设物体的加速度为 a ,根据牛顿第二定律

$$F_{合} = ma \quad (1)$$

$$a = \frac{v_t^2 - v_0^2}{2s} \quad (2)$$

将式(2)代入式(1)可得

$$F_{合} = m \left(\frac{v_t^2 - v_0^2}{2s} \right)$$

整理后得

$$F_{合}s = \frac{1}{2}mv_t^2 - \frac{1}{2}mv_0^2$$

令

$$E_{kt} = \frac{1}{2}mv_t^2, E_{k0} = \frac{1}{2}mv_0^2$$

则

$$F_{合}s = E_{kt} - E_{k0} \quad (3)$$

式(3)左边为合力对物体所做的功, E_{k0} 和 E_{kt} 与功的单位相同。我们把物体的质量与速度的二次方乘积的一半,称为物体的动能,用符号 E_k 表示,即

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

E_{k0} 、 E_{kt} 分别为物体在 A、B 两个位置的动能, E_{k0} 为初位置的动能, E_{kt} 为末位置的动能。

动能是标量,动能的单位是千克·米²/秒² ($\text{kg}\cdot\text{m}^2/\text{s}^2$),也就是焦耳 (J)。动能和速度一样,是描述物体运动状态的重要物理量。

如何利用物体的动能?

具有动能的物体可以对其他物体做功。如图 7-21 所示,水电站通过大坝将高处的水流集中后引至低处的水力发电机组,水流对发电机组中水轮机的涡轮(图 7-22)产生冲击作用并使之转动,涡轮则带动与其连接的发电机发电。

[2]



图 7-21 水力发电示意图



图 7-22 水力发电机的涡轮

[2] 教材图 7-21 和图 7-22 向学生展示水力发电的实际场景以及水力发电机的重要部件——涡轮,让学生较形象地感受水力发电利用水流动能的情景。教师可视情况介绍潮汐发电站的原理。

[1] 人们很早就利用空气的动能通过风车来抽水、磨面……现在，人们感兴趣的是如何利用风发电。风力发电就是利用空气流动的动能带动风力发电机（图 7-23）的叶片旋转，再通过齿轮增速箱提升旋转的速度来驱动发电机发电。根据目前的技术，风速约 3 m/s 时风力发电机便可以开始发电。风力发电具有成本低、清洁、可再生等优点。

除了发电以外，水切割机利用高速射流的动能进行高效率的冷切割加工，具有对切割材材质理化性能无影响、无热变形、切缝窄、精度高、切面光洁、无污染等优点。20世纪 80 年代提出的动能武器——动能拦截弹能通过直接碰撞的方式，拦截并摧毁诸如卫星或导弹弹头等高速飞行的目标。

[2] 拓展视野

通过适当简化和抽象，可以用图 7-24 所示的模型研究影响风力发电机发电功率 P 的主要因素。

设风力发电机叶片长度为 r 、空气均匀且密度为 ρ 、风速恒为 v 。时间 t 内流经叶片的空气都在图中长为 d 的圆柱体内，该圆柱体的底面积为 $A = \pi r^2$ 。设圆柱体中的空气质量为 m ，这些空气的动能为

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

式中

$$m = \rho Ad = \rho \pi r^2 vt$$

联立以上两式可得时间 t 内流过风车叶片的空气动能为

$$E_k = \frac{1}{2} mv^2 = \frac{1}{2} \rho \pi r^2 v^3 t$$

则单位时间内流过风车叶片的空气所具有的动能为

$$\frac{E_k}{t} = \frac{1}{2} \rho \pi r^2 v^3$$

流过风车叶片的动能有一部分被用来对叶片做功、发电。可以认为，风力发电机的发电功率 $P \propto \frac{E_k}{t}$ ，即 $P \propto r^2 v^3$ 。



图 7-23 风力发电机示意图

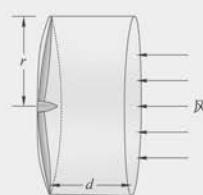


图 7-24 研究风力发电机功率的模型

[1] 通过简要介绍水力发电、风车抽水、风力发电、水切割机、动能武器等事例，展示动能在多种实际场景中的应用。关于水切割机、动能武器的介绍，建议结合相关视频资料实施。教师可视学生实际情况引导学生结合第五章中圆周运动的知识，猜想教材图 7-23 中齿轮增速箱的工作原理，并通过查阅文献验证猜想。

[2] 此处设置“拓展视野”是为了介绍绿色能源——风能。与传统水力发电相同，风力发电也是利用连续流体的动能。这里介绍的一种建模方式具有重要的实际意义，教师可根据学生的实际情况引导学生选学。

力对物体所做总功的效果是什么？

具有动能的物体可以做功，对物体做功也可以改变物体的动能。

[1] 教师可根据具体情况补充介绍质点组的动能定理。

对于含有多个质点的质点组而言，质点组动能的增量等于外力、内力对系统所做功的代数和，即 $W_{\text{外}} + W_{\text{内}} = \sum_{i=1}^N E_{k,i} - \sum_{i=1}^N E_{k,0,i}$ 。

可以用冰面上两人互推的例子加以说明。通过用牛顿定律推演动能定理的过程说明牛顿定律在经典力学中的核心地位。事实上，动量定理、角动量定理均可由牛顿定律推演得出。

[2] 示例选择小球受到变力作用的曲线运动，教师需指明此情况选用动能定理而不用牛顿定律分析的理由。在教材第 65 页示例的基础上，引导学生对比牛顿定律的解题思路，体会动能定理解题思路的特点——只关注物体的初、末状态和全过程所做的功。建议教师引导学生讨论将小球由 A 缓慢推至 B 的过程，注意配合教材第 72 页正文内容，总结用动能定理解决问题的一般步骤。

教师可设计关于平抛运动的问题，引导学生利用平抛运动的结论论证动能定理也适用于平抛运动。

[1] $F_{\text{合}} s = E_{k,i} - E_{k,0}$ 反映了合力对物体所做的功与物体动能变化之间的关系，即物体受到的合力所做的功等于物体动能的变化量。这一规律被称为动能定理 (theorem of kinetic energy)。动能定理的表达式也可以写成

$$W_{\text{合}} = \Delta E_k = E_{k,i} - E_{k,0}$$

式中， $W_{\text{合}}$ 为合力对物体所做的功或各力对物体做功的代数和， ΔE_k 表示动能变化量， $E_{k,i}$ 为末动能， $E_{k,0}$ 为初动能。

当 $W_{\text{合}} > 0$ 时， $\Delta E_k > 0$ ，表示合力做正功，动能增加；当 $W_{\text{合}} < 0$ 时， $\Delta E_k < 0$ ，表示合力做负功，动能减小。

我们虽然是从受恒力作用的物体做匀加速直线运动的过程推导得到动能定理，但是进一步的理论推导可以证明，动能定理对于变力做功和物体做曲线运动的过程依然成立。

从牛顿第二定律出发，可以导出动能定理。这表明动能定理是牛顿第二定律的一个推论，由牛顿第二定律还可以推演出其他重要的力学定理，这体现了牛顿力学的简约美。

[2] 示例 如图 7-25 所示，长为 l 的轻质细绳下端悬挂一质量为 m 的小球，用大小为 F 的水平拉力将小球由静止开始从最低点 A 拉至 B 点， $\angle AOB = \theta$ ，在此过程中细绳始终绷直。若不计空气阻力，求小球到达 B 点时的速度大小 v。

分析：小球受到重力、水平拉力和绳子拉力的作用。小球运动过程中，重力做负功，水平拉力做正功，这些都是恒力的功，可以计算。而绳子拉力虽然是变力，但始终与小球的速度垂直，所以绳子拉力不做功。用动能定理可求出小球到达 B 点时的速度大小。

解：以小球为研究对象，小球在水平方向上的位移 $s = l \sin \theta$ ；在竖直方向的位移是

$$h = l - l \cos \theta = l(1 - \cos \theta)$$

小球从 A 点到 B 点的运动过程中，水平拉力做正功，重力做负功。根据动能定理，水平拉力与重力做功的代数和等于动能变化量，可得

$$Fs - mgh = \frac{1}{2} mv^2 - 0$$

即

$$F l \sin \theta - mg l (1 - \cos \theta) = \frac{1}{2} mv^2$$

由此可得

$$v = \sqrt{\frac{2l}{m} [F \sin \theta - mg (1 - \cos \theta)]}$$

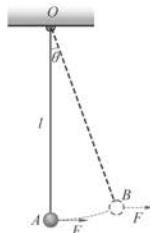


图 7-25
小球的运动

问题与思考解读

72 第七章 机械能守恒定律

用动能定理解决问题的一般步骤为：(1) 确定研究对象；(2) 根据运动过程确定各力做功的情况；(3) 确定物体初状态和末状态的动能；(4) 根据已知条件列出表达式求得结果。

与牛顿运动定律一样，动能定理也是解决力与运动变化关系的重要规律。但由于动能定理不涉及加速度、时间等物理量，所以在处理过程较为复杂的运动问题时有明显的优越性。此外，动能定理也被广泛用来处理变力、冲击力等作用过程更为复杂的运动问题。

问题与思考

1. 判断下列关于动能的说法是否正确，并简述理由。

- (1) 动能大的物体，速度一定大。
- (2) 做变速运动的物体动能一定变化。

2. 估算下列物体的动能，并写出必要的计算过程。

- (1) 行驶在高速公路上的客车中的乘客。
- (2) 从十楼阳台落至地面的花盆。
- (3) 空中飞行的子弹。
- (4) 被快速抽击的乒乓球。

3. 质量为 1500 kg 的汽车的行驶速度从 10 km/h 加速到 20 km/h，再由 20 km/h 加速到 30 km/h。分析比较上述两段过程中汽车动能的变化量。

4. 质量为 400 g 的足球以 2 m/s 的水平速度撞击墙壁，并以 1 m/s 的速度反向弹回。求碰撞过程中足球速度和动能的变化量。

5. 弓弦对 85 g 的箭的作用距离为 75 cm，平均作用力大小为 105 N。求箭离开弦时的速度大小。

6. 如图 7-26 所示，长 $l=1$ m 的轻质细绳下端悬挂质量 $m=1$ kg 的钢球，对钢球施加水平恒力 $F=10$ N，将小球从最低点 A 由静止开始拉动，且拉动过程中细绳始终绷直。若不计空气阻力， g 取 10 m/s^2 ，求：

- (1) 细线转过 $\theta=30^\circ$ 时，钢球的速度大小 v_1 ；
- (2) 细线转过的最大角度。

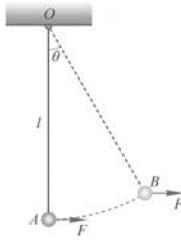


图 7-26

过程中的阻力，由动能定理知 $W_G = \Delta E_k = E_k - 0$ ，故 $E_k = W_G = mgh = 5 \times 10 \times 28 \text{ J} = 1.4 \times 10^3 \text{ J}$

(3) 估计子弹质量为 10 g，即 0.01 kg ，速度为 500 m/s 。故其动能 $E_k = \frac{1}{2}mv^2 = \frac{1}{2} \times 0.01 \times 500^2 \text{ J} \approx 1.3 \times 10^3 \text{ J}$

(4) 估计乒乓球质量为 3 g，即 0.003 kg ，速度为 50 km/h ，约 14 m/s 。故其动能 $E_k = \frac{1}{2}mv^2 = \frac{1}{2} \times 0.003 \times 14^2 \text{ J} \approx 0.3 \text{ J}$

命题意图：通过估算，认识生活中动能的数量级，形成能量观念，提升安全意识。

主要素养与水平：能量(I)；科学论证(I)。

1. 参考解答：(1) 不正确。动能与质量和速度大小都有关系，动能大的物体质量可能很大，但速度不一定大
(2) 不正确。动能与速度的方向无关、只与速度大小有关，变速运动可能是速度方向变化而大小不变，动能也可能不变

命题意图：通过问题辨析，加深对动能概念的理解。

主要素养与水平：科学推理(I)；交流(I)。

2. 参考解答：(1) 估计乘客质量为 60 kg ，高速公路上客车速度 $v = 100 \text{ km/h} \approx 28 \text{ m/s}$ 。
故其动能 $E_k = \frac{1}{2}mv^2 = \frac{1}{2} \times 60 \times 28^2 \text{ J} \approx 2 \times 10^4 \text{ J}$

(2) 估计花盆质量为 5 kg ，层高约 3 m ，花盆的下落高度 h 约为 28 m 。忽略花盆落地

3. 参考解答: $10 \text{ km/h} \approx 2.78 \text{ m/s}$, $20 \text{ km/h} \approx 5.56 \text{ m/s}$, $30 \text{ km/h} \approx 8.33 \text{ m/s}$, 动能增量 $\Delta E_k =$

$$\frac{1}{2}mv_t^2 - \frac{1}{2}mv_0^2 = \frac{1}{2}m(v_t^2 - v_0^2)。$$

从 10 km/h 加速到 20 km/h , $\Delta E_{k1} = \frac{1}{2}m(v_t^2 - v_0^2) = \frac{1}{2} \times 1500 \times (5.56^2 - 2.78^2) \text{ J} \approx 1.74 \times 10^4 \text{ J}$;

从 20 km/h 加速到 30 km/h , $\Delta E_{k2} = \frac{1}{2}m(v_t^2 - v_0^2) = \frac{1}{2} \times 1500 \times (8.33^2 - 5.56^2) \text{ J} \approx 2.89 \times 10^4 \text{ J}$;

虽然速度的增量都是 10 km/h , 但从 20 km/h 加速到 30 km/h 过程的动能增量更大

命题意图: 区分速率变化和动能变化, 形成能量观念。

主要素养与水平: 能量(I); 科学论证(I)。

4. 参考解答: 由题意知, 碰撞过程中足球速度的增量 $\Delta v = v_t - v_0 = (-1 - 2) \text{ m/s} = -3 \text{ m/s}$ (以初速度方向为正方向); 动能增量 $\Delta E_k = \frac{1}{2}m(v_t^2 - v_0^2) = \frac{1}{2} \times 0.4 \times (1^2 - 2^2) \text{ J} = -0.6 \text{ J}$

命题意图: 区分速度变化和动能变化, 形成能量观念。

主要素养与水平: 能量(I); 科学推理(I)。

5. 参考解答: 由题意知, 弓弦对箭做功 $W = Fs = 105 \times 0.75 \text{ J} = 78.75 \text{ J}$ 。由动能定理 $W = \Delta E_k = \frac{1}{2}mv_t^2 - \frac{1}{2}mv_0^2 = \frac{1}{2}mv_t^2 - 0$ 知, $v_t = \sqrt{2 \frac{W}{m}} = \sqrt{2 \times \frac{78.75}{0.085}} \text{ m/s} \approx 43.05 \text{ m/s}$

命题意图: 模型化情境中动能定理的简单应用。

主要素养与水平: 模型建构(I); 科学推理(I)。

6. 参考解答: (1) 细绳从最低点 A 由静止开始转过 30° 的过程中, 仅有重力 G 和恒力 F 对小球做功。

由 $W = Fs \cos \theta$ 知, $W_G = -mgh = -mgl(1 - \cos \theta) = -1 \times 10 \times 1 \times (1 - \cos 30^\circ) \text{ J} \approx -1.34 \text{ J}$, $W_F = Fl \sin \theta = 10 \times 1 \times \sin 30^\circ \text{ J} = 5 \text{ J}$, 总功 $W = W_G + W_F = (-1.34 + 5) \text{ J} = 3.66 \text{ J}$ 。

由动能定理知 $W = \Delta E_k = \frac{1}{2}mv_t^2 - \frac{1}{2}mv_0^2 = \frac{1}{2}mv_t^2 - 0$, 故 $v_t = \sqrt{2 \frac{W}{m}} = \sqrt{2 \times \frac{3.66}{1}} \text{ m/s} \approx 2.71 \text{ m/s}$

(2) 小球从最低点 A 由静止开始转过最大角度 θ_m 的过程中, 由动能定理知 $W = W_G + W_F = \Delta E_k$ 。又因为最大角度时速度为零, 故 $W_G + W_F = 0 - 0$, 即 $-mgl(1 - \cos \theta_m) + Fl \sin \theta_m = 0$, $-10 \times (1 - \cos \theta_m) + 10 \sin \theta_m = 0$, 即 $\cos \theta_m + \sin \theta_m = 1$, 解得 $\theta_m = 90^\circ$ 。

$\theta_m = 90^\circ$ 对应细绳处于水平位置, 因此全过程重力对小球做负功 $-mgl$, 力 F 对小球做正功 mgl , 两者抵消, 动能增量为零。

命题意图: 模型化情境中动能定理的应用。

主要素养与水平: 模型建构(I); 科学推理(II)。

本节编写思路

[1]



图 7-27 滑雪运动的连续影像

本节以滑雪运动连续影像中运动员高度变化的情境引出，在“自主活动”小球下落撞击泡沫板的实验探究中引导学生经历猜想、设计、记录、分析、论证的过程，同时建立重力势能概念。

通过理论推演得到重力做功的特点和重力势能的定义，讨论重力做功与重力势能变化量的关系。

再结合“STSE”高空坠物的介绍和示例深化对重力势能的理解。

结合实例定性介绍弹性势能及其影响因素。本节借助“大家谈”讨论运动过程中重力势能、动能的变化情况。

学习中经历的实验探究过程有利于科学探究能力的培养和能量观念的形成。

[2]

自主活动

如图 7-28 所示，在水平桌面上铺一块厚薄均匀的泡沫板，让半径相同、质量不同的实心小球从不同的高度自由下落到泡沫板上，根据撞击产生凹痕的深浅猜想小球的重力势能与哪些因素有关。尝试用控制变量的思想设计实验方案并予以实施。

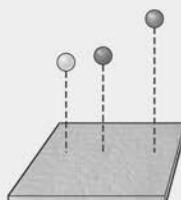


图 7-28 小球对泡沫板的撞击

为了深入探讨重力势能的含义，我们先研究重力做功的特点。

正文解读

[1] 节首图通过连续影像展现滑雪运动过程中运动员离地高度的变化，可以让学生分析运动员上升和下落过程中重力做功以及重力势能变化的大致情况。

[2] 此处设置“自主活动”的目的是引导学生经历猜想、设计、记录、分析等过程，并运用证据论证猜想。活动中也可根据实际情况用松软的花泥、橡皮泥等代替泡沫板。

[1] 由于此前已经分析过恒力做功的特点，故可以直接引用该结论得到重力做功的特点。

② 重力做功的特点如何？

[1] 如图 7-29 所示， y 轴正方向竖直向上，水平地面处 $y=0$ 。质量为 m 的物体沿任意路径 1 由 A 运动到 B ，位移为 s 。位移与物体所受重力之间的夹角为 θ ， A 、 B 离开水平地面的竖直高度分别为 h_A 、 h_B （即 A 、 B 的 y 坐标）。

由于地表附近重力可视为恒力，根据恒力做功的计算式，这一过程中重力对物体所做的功

$$W_G = mgs \cos\theta \quad (1)$$

由图示几何关系可得

$$h = h_A - h_B = s \cos\theta \quad (2)$$

式中， h 为 A 、 B 两点的竖直高度差。将式（2）代入式（1）得

$$W_G = mgh = mgh_A - mgh_B \quad (3)$$

由于图 7-29 中的路径 1 是任意选取的，这就表明，从 A 到 B 的过程中重力所做的功与路径无关，只取决于始、末位置之间的竖直高度差。

如果物体沿图 7-29 中的路径 2 从 B 返回 A ，这一过程的位移与 s 等大反向，与重力的夹角为 $\pi - \theta$ ，则物体返回过程中重力做功

$$W'_G = mgs \cos(\pi - \theta) = -mgs \cos\theta = -mgh \quad (4)$$

这意味着，如果物体沿路径 1 和 2 组成的闭合路径运动一周，则

$$W_G + W'_G = 0$$

即重力做功为零。

由上述推导过程可以得到重力做功的特点：

重力做功仅取决于物体的始、末位置，而与物体经过的路径无关。或者说，沿任意闭合路径一周，重力做功为零。

[2] 此处设置“拓展视野”是为了介绍弹力与万有引力做功的特点，说明保守力也可以是变力。此栏目内容供教师选用。

拓展视野

与重力一样，弹簧的弹力、万有引力做功也与物体经过的路径无关，只取决于始、末位置，这样的力被称为保守力。在讨论了第一节问题与思考的第 2 题后，我们知道滑动摩擦力做功与物体经过的路径有关，或者说物体沿闭合路径运动一周摩擦力做功不为零，这种力被称为耗散力。空气、水等流体的阻力都是耗散力。

② 如何计算重力势能？

重力势能的定义是在重力做功性质的基础上提出的。物体的始、末位置一旦确定，重

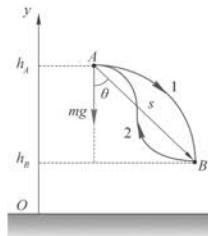


图 7-29 重力做功

力的功便确定下来。由式(3)可以发现,若令 $E_{p0} = mgh_A$ 、 $E_{p'} = mgh_B$, 则 E_{p0} 和 $E_{p'}$ 都是与物体位置有关的物理量。

将物体的重力 mg 与所在高度 h 的乘积称为重力势能, 即

$$E_p = mgh$$

由于高度 h 具有相对性, 所以重力势能也是相对的, 只有在选取了重力势能为零的参考平面以后才能确定重力势能。

物理学中将重力势能为零的参考平面称为零势能面, h 就是物体相对于零势能面的高度。零势能面一般都是根据研究需要设定的。

若物体处于零势能面以上, 则 $h > 0$, $E_p > 0$; 处于零势能面以下, 则 $h < 0$, $E_p < 0$ 。

[1]

大家谈

实际上, 物体总有一定的形状和大小。有时, 物体的形态还会发生变化。计算实际物体的重力势能时, 物体相对于重力势能零势能面的高度该如何确定?

从根本上说, 地球上的物体具有重力势能, 是由于地球和物体间存在万有引力的相互作用, 如果物体不受重力作用, 就没有重力势能。所以重力势能是物体和地球这一体系所共有的。只是为简单起见, 我们说物体具有重力势能。

[2]

拓展视野

在地球附近的小尺度空间, 地球对物体的引力可视作恒力, 而在尺度与地球半径可以比拟的空间, 地球对物体引力应被视作变力。若将地球看成质量均匀分布的球体, 而将物体视作质点, 地球对物体的引力总是指向地心, 其大小仅与物体和地心间距离有关。如图 7-30 所示, 物体沿任意曲线路径从 A 移到 B 。在数学上可以证明, 图中小段位移 s 上引力对物体做的功与沿地球径向 Ox 轴小段位移 s_r 上引力所做的功相等。因此, 物体沿 AB 移动过程中, 引力所做的功等于沿地球径向 $A'B'$ 移动过程中, 引力所做的功。由于从 A 到 B 的路径是任意的, 所以引力做的功与路径无关, 只取决于物体的始、末位置。万有引力和以后将要学习的库仑力具有类似的性质, 这些力做功都与路径无关, 是保守力。

由于地球和物体间万有引力而具有的势能称为引力势能, 以无穷远处的引力势能为零, 引力势能的表达式可写为 $E_p = -\frac{Gm_{\text{地}}m}{r}$ (式中 $m_{\text{地}}$ 为地球质量, m 为物体质量, r 为物体到地心的距离)。重力势能就是地球表面附近的引力势能。

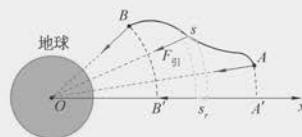


图 7-30 地球对物体的引力

[1] 此处设置“大家谈”的目的是引导学生讨论物体的形状对重力势能的影响。计算重力势能时, 高度取物体重心到零势能面的距离。同一物体形态变化时, 其重心位置会发生变化, 故重力势能也会发生变化。

[2] 此处设置“拓展视野”的目的是在更大的尺度上展示万有引力做功与路径无关, 这也为以后学习库仑力做功的特点以及电势能打下基础。更详细的内容可参见节后资料链接“万有引力的保守性”。

[1] 重力做功与重力势能变化量之间的关系可通过教材第 78 页问题与思考第 2 题做具体说明。

[2] 此处设置“STSE”旨在引导学生先估算鸡蛋在 4 楼、8 楼、18 楼所具有的重力势能，结合数据感受重力势能可能带来的危害，同时对学生进行安全意识和社会责任感教育。

[3] 示例通过零势能面的变换，让学生体验重力势能值与零势能面的选取有关，而重力势能的变化与零势能面的选取无关。

② 重力做功与重力势能变化量之间的关系如何？

[1] 由式(3)可知，重力做功引起物体重力势能的变化。用符号 ΔE_p 表示某一过程中物体重力势能的变化量，并规定

$$\Delta E_p = E_{p'} - E_{p0}$$

其中 E_{p0} 与 $E_{p'}$ 分别为物体在始、末位置的重力势能，则式(3)可以改写成

$$W_G = -\Delta E_p$$

这就是重力做功与重力势能变化量之间的关系。具体而言就是：

物体下降，重力做正功， $W_G > 0$ ，物体重力势能减少， $\Delta E_p < 0$ ；物体上升，重力做负功或物体克服重力做功， $W_G < 0$ ，物体重力势能增大， $\Delta E_p > 0$ 。

必须注意，尽管重力势能取决于零势能面位置的选取，但重力势能的变化量与零势能面的选取无关。

[2] STSE

重力势能是一种“潜在”的能量形式，在适当的条件下这种能量可以释放出来。有关高楼坠物的事故报道屡见诸报端，一次次事故引发全民关注高空坠物这一“悬在城市上空的痛”。据测算，鸡蛋从 4 楼落下可把人头顶砸出肿包；从 8 楼落下会把头皮砸破；从 18 楼落下就会砸破头骨。如果鸡蛋从 25 楼落下……2019 年，国家规定故意从高空抛弃物品者将被依法追究刑事责任。防止高楼坠物，杜绝高空抛物，遵纪守法，应该从我做起，从身边做起。

[3] 示例 如图 7-31 所示，树上与 A 等高的 P 处有一个质量 $m = 0.3 \text{ kg}$ 的苹果下落。苹果有可能被人用篮子在与 B 等高处接住，也可能落到地面 C，还可能落到地面后滚入坑底 D 处。 $(g \text{ 取 } 10 \text{ m/s}^2)$

(1) 分别以 A、C、E 所在水平面为零势能面，求 P 处苹果的重力势能。

(2) 苹果由 P 分别落至 C 或落至 D 的过程中，求重力所做的功以及重力势能的变化量。

分析：计算重力势能的关键是根据不同零势能面正确得出 P 的相对高度。而计算重力做功和重力势能变化量则与零势能面的位置无关。

解：(1) 以 A 所在水平面为零势能面，P 的相对高度 $h_A = 0$ ，则 P 处苹果的重力势能

$$E_{pA} = mgh_A = 0$$

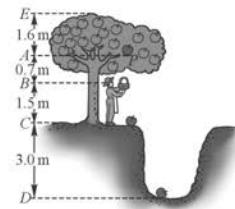


图 7-31 苹果的重力势能

以 C 所在水平面为零势能面, P 的相对高度 $h_C = 2.2 \text{ m}$, 则 P 处苹果的重力势能

$$E_{pC} = mgh_C = 0.3 \times 10 \times 2.2 \text{ J} = 6.6 \text{ J}$$

以 E 所在水平面为零势能面, P 的相对高度 $h_E = -1.6 \text{ m}$, 则 P 处苹果的重力势能

$$E_{pE} = mgh_E = 0.3 \times 10 \times (-1.6) \text{ J} = -4.8 \text{ J}$$

(2) 苹果由 P 落至 C 处, 高度降低 $\Delta h_C = 2.2 \text{ m}$, 则

$$\text{重力做正功} \quad W_{GC} = mg\Delta h_C = 0.3 \times 10 \times 2.2 \text{ J} = 6.6 \text{ J}$$

$$\text{重力势能变化量} \quad \Delta E_{pC} = -W_{GC} = -6.6 \text{ J}$$

苹果由 P 落至 D 处, 高度降低 $\Delta h_D = 5.2 \text{ m}$, 则

$$\text{重力做正功} \quad W_{GD} = mg\Delta h_D = 0.3 \times 10 \times 5.2 \text{ J} = 15.6 \text{ J}$$

$$\text{重力势能变化量} \quad \Delta E_{pD} = -W_{GD} = -15.6 \text{ J}$$

除了重力势能外还有其他形式的势能吗?

将图 7-32 所示的玩具青蛙拧紧发条后放在地上, 玩具青蛙便能自行跳跃前进。图 7-33 所示的运动员张弓搭箭, 蓄势待发, 当他放开弓弦后, 离弦之箭便飞驰而去。实际上, 跳跃的玩具青蛙和飞驰而去的箭所获得的能量分别来自发条被拧紧和弓被拉开时发生弹性形变所蓄积的能量。



图 7-32 玩具青蛙



图 7-33 射箭运动

[1] 发生弹性形变的物体由于各部分之间相对位置发生变化而具有的能量叫做弹性势能 (elastic potential energy)。对于具有弹性的物体而言, 弹性形变程度越大, 物体所具有的弹性势能也越大。以弹簧为例, 弹簧不发生形变时的弹性势能为零。弹簧发生形变时, 它所蓄积的弹性势能与弹簧的形变量和弹簧的劲度系数都有关系。在弹性限度内, 若劲度系数一定, 形变量越大, 弹性势能越大; 形变量一定, 劲度系数越大, 弹性势能越大。

物体发生弹性形变时会产生弹力的作用, 弹力所做的功 W 与弹性势能变化量 ΔE_p 之间的关系是

$$W = -\Delta E_p$$

这与重力做功和重力势能变化量的关系完全相同。

[1] 可以证明, 在弹性限度内弹簧弹力所做的功只跟它初、末状态的形变量有关, 与物体经过的路径无关, 弹力是保守力; 选取弹簧原长位置为零势能面, 可得弹性势能满足

$$E_p = \frac{1}{2}kx^2。$$

[1] 此处设置“大家谈”旨在引导学生定性分析运动过程中重力势能、动能和弹性势能的变化情况，可以尝试用柱状图表示其中若干标志性位置的弹性势能、重力势能与动能的定性关系。

问题与思考解读

1. 参考解答：(1) 不正确。根据 $W_G = -\Delta E_p$ 可知，物体下降时重力做多少正功，物体重力势能就减小多少；物体上升时重力做多少负功，物体重力势能就增大多少。

(2) 不正确。根据 $E_p = mgh$ ，因高度 h 具有相对性，故而重力势能也是相对的，与零势能面的选取有关。又根据 $W_G = -\Delta E_p$, W_G 与零势能面的选取无关，可知重力势能变化量与零势能面的选取无关。

命题意图：深化做功与能量变化的关系，建立能量观念。

主要素养与水平：科学推理(I); 交流(I)。

2. 参考解答：按列依次为：-3.3 J 5.7 J -9 J 增加 9 J 0 9 J -9 J 增加 9 J 15 J 24 J -9 J 增加 9 J

命题意图：将真实情境转化为模型化情境，体验零势能面选取的作用。

主要素养与水平：能量(I); 科学推理(I)。

3. 参考解答：运动员自 A 落至 C 的过程中，重力对运动员做正功、重力势能不断减小；A 至 B 过程中，无弹力作用，弹性势能不变；B 至 C 过程中，弹力对运动员做负功，弹性势能不断增大。

命题意图：将真实情境转化为模型化情境，分析影响势能的因素。

主要素养与水平：模型建构(I); 科学推理(I)。

[1]

大家谈

在撑竿跳和跳板跳水中，运动员起跳阶段分别借助了撑竿和跳板的弹性作用。请分析撑竿和跳板的弹性势能在运动员完成动作过程中的变化。

问题与思考

1. 判断下列关于重力做功和重力势能的说法是否正确，并简述理由。

(1) 重力做多少正功，物体的重力势能就增加多少；重力做多少负功，物体的重力势能就减小多少。

(2) 重力势能及其变化量都与零势能面的选取有关。

2. 如图 7-34 所示，运动员从距地面高 $h_1 = 2.5$ m 的 A 处投出一篮球，正中距地高 $h_3 = 3.05$ m 的篮板，球运动过程中到达的最高点 B 距地面高 $h_2 = 4$ m。球的质量 $m = 0.6$ kg, g 取 10 m/s^2 。按要求在表 7-2 中填入数据。



图 7-34

表 7-2

零势能面位置	篮板	A 点	地面
篮球在 A 点的重力势能			
篮球在 B 点的重力势能			
从 A 到 B 过程中篮球重力做的功			
从 A 到 B 过程中篮球重力势能的变化			

3. 图 7-35 所示为蹦床运动示意图。A 为运动员到达的最高点；B 为运动员下落过程中刚接触蹦床时的位置；C 为运动员到达的最低点。运动员自 A 落至 C 的过程中，运动员的重力势能和蹦床的弹性势能如何变化？

4. 质量相等的均匀木球和铁球放在水平地面上，两球重力势能的大小关系与零势能面的选取是否有关？

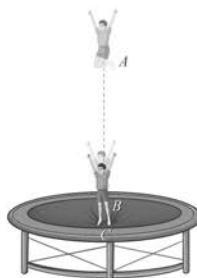


图 7-35

5. 跨越式跳高(图7-36)在专业的田径比赛中已不常见,专业运动员普遍采用背越式跳高(图7-37)。试从重力势能的角度分析原因。



图 7-36



图 7-37

6. 如图7-38所示,地上有3摞书,每摞25本。每本书尺寸均为 $260\text{ mm} \times 185\text{ mm} \times 20\text{ mm}$,质量均为500g。这些书刚好能放满一个三层书架,书架最低一层置物板距地面高50cm,相邻两层板的间距为40cm,g取 10 m/s^2 。将书从地面放到书架的过程中,至少需做多少功?

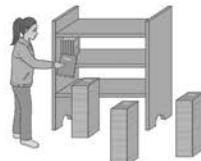


图 7-38

4. 参考解答:如图3所示,质量相等的均匀木球和铁球因为密度不同,放在水平地面上时木球重心位置更高。无论选取何处为零势能面,木球的重心高度更大,根据 $E_p = mgh$,且 mg 相等,故木球的重力势能也必然更大。若木球的质量大于铁球,则当选取高于木球重心高度某处为零势能面时,可能出现木球的重力势能小于铁球的重力势能的情况

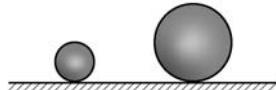


图 3

命题意图:将真实情境转化为模型化情境,理解重心位置与重力势能的关系。

主要素养与水平:模型建构(I);科学推理(II)。

5. 参考解答:观察教材图7-36和图7-37可知,跨越式跳高时运动员的重心必须明显高于横杆,而背越式跳高时则较低。对同一位运动员而言,重心高度越高、重力势能越大,就要求运动员克服重力做功更多。由此可知,从克服重力做功角度来看背越式跳高具有明显优势

命题意图:用能量观点解释真实问题。

主要素养与水平:模型建构(I);科学论证(II)。

- 6. 参考解答:**分析题意可知,初始时总质量 $m=37.5\text{ kg}$ 的3摞书整体重心高度在最大高度一半的位置 $h_{c1}=0.02 \times \frac{25}{2}\text{ m}=0.25\text{ m}$,而摆满三层书架后整体重心在第二层书的中心高度处 $h_{c2}=(0.5+0.4+\frac{0.26}{2})\text{ m}=1.03\text{ m}$ (考虑书长度260mm的侧边竖立的姿态)。

根据 $W_G = -\Delta E_p$ 可知, 至少需要克服重力做功 $W = -W_G = \Delta E_p = mgh_{e2} - mgh_{e1} = 37.5 \times 10 \times (1.03 - 0.25) J = 292.5 J$

命题意图: 将真实情境转化为模型化情境。此题常见的计算方法有: ① 隔离法: 各层分别确定书籍中心位置、重力势能, 再求和; ② 整体法: 由质量分布确定三层书籍整体的重心, 计算总重力势能。可比较两种做法, 总结隔离法和整体法的特点。

主要素养与水平: 模型建构(I); 科学推理(II)。

资料链接

万有引力的保守性

就地球-物体这一体系而言, 地球和物体间的引力是内力。设物体位移为 $d\mathbf{r}_{物}$ 时, 引力对物体做的元功为 $dW_{物}$; 而此时地球位移为 $d\mathbf{r}_{地}$, 引力对地球做元功 $dW_{地}$, 则

$$dW_{物} = \mathbf{F}_{物} \cdot d\mathbf{r}_{物}, \quad dW_{地} = \mathbf{F}_{地} \cdot d\mathbf{r}_{地}$$

式中, $\mathbf{F}_{物}$ 和 $\mathbf{F}_{地}$ 分别为地球与物体间相互作用的引力。引力做的总元功为

$$dW = dW_{物} + dW_{地}$$

$\mathbf{F}_{物}$ 和 $\mathbf{F}_{地}$ 互为作用力和反作用力, $\mathbf{F}_{物} = -\mathbf{F}_{地}$ 。因此

$$dW = \mathbf{F}_{物} \cdot (d\mathbf{r}_{物} - d\mathbf{r}_{地}) = \mathbf{F}_{物} \cdot d(\mathbf{r}_{物} - \mathbf{r}_{地}) = \mathbf{F}_{物} \cdot d\mathbf{r}_{地物} = \mathbf{F}_{物} \cdot d\mathbf{r}$$

其中, $\mathbf{r}_{物}$ 和 $\mathbf{r}_{地}$ 分别为在我们所取的惯性参考系(例如这一体系的质心)中物体和地球的位置矢量。 $\mathbf{r}_{物} - \mathbf{r}_{地} = \mathbf{r}_{地物}$ 为由地心指向物体(视为质点)的位置矢量。令 $\mathbf{r}_{地物} = \mathbf{r}$, \mathbf{r} 即为从地心指向物体的位置矢量, 亦即地球参考系中物体的位置矢量。

由此可见, 引力对体系做的总功和地球参考系中引力对物体做的功相同。在地球参考系中, 地球位移为零。将上式积分

$$W = \int dW = \int_A^B \mathbf{F}_{物} \cdot d\mathbf{r} = \int_A^B \frac{Gm_{地}}{r^2} m (-\mathbf{r}_0) \cdot d\mathbf{r} = -Gm_{地} m \int_A^B \frac{dr}{r^2} = \frac{Gm_{地} m}{r_B} - \frac{Gm_{地} m}{r_A}$$

式中, r_A 和 r_B 分别为地球参考系中物体的始、末点位置矢量的大小; \mathbf{r}_0 为由地球指向物体的单位矢量; 负号代表引力, 即引力指向地球; m 和 $m_{地}$ 分别为物体和地球的质量。

由上式可见, 引力的功与物体和地球移动的路径无关, 只取决于彼此初始和结束的相对位置, 即由体系初始和结束的状态决定, 而与状态间过渡的过程无关。综上所述, 我们证明了引力是保守力。

以上讨论还表明, 引力的保守性关键在于万有引力是各向同性的径向力, 由此可知, 凡相对某个中心各向同性的径向力必为保守力。点电荷的静电力也具有同样的性质, 也是保守力。而任意电荷分布产生的静电场的电场力为各个点电荷电场力的叠加, 因此不仅匀强电场, 任何静电场的电场力都必为保守力。分子间的相互作用虽然不满足二次方反比关系, 但也是球对称的径向力, 也是保守力。

[1]



图 7-39 游乐园里的“海盗船”

第五节 机械能守恒定律

在物理学的发展过程中,各种形式的能量概念先后建立起来。物理学家发现,不同形式的能量可以相互转化,而且遵循能量守恒这一基本定律。图 7-39 所示的“海盗船”由低处往高处摆动时,它的重力势能增大,动能减小;由高处向低处摆动时,它的重力势能减小,动能增大。物理学中,把动能和势能统称为机械能 (mechanical energy)。

在“海盗船”来回摆动的过程中,如果不计空气阻力和摩擦力,就只有重力做功,动能和势能相互转化,转化过程中它们的总和不变,即机械能守恒。

② 机械能守恒的条件是什么?

[2] 自主活动

如图 7-40 所示,在一个提桶内放一些重物,用绳子将它悬挂在门框下。将提桶拉离竖直位置并靠近自己的鼻子后放手,提桶将前后摆动。如果放手后站着不动,提桶在摆动过程中是否会碰到鼻子呢?请尝试一下。

图 7-40
“碰鼻”实验

正文解读

[1] 节首图中“海盗船”是游乐园中常见的游乐项目,学生可以根据乘坐“海盗船”的体验简要描述乘坐过程中乘客动能和重力势能的变化。

[2] 此处设置“自主活动”旨在保证安全的前提下让学生通过体验,感受吊桶摆动过程中机械能近似守恒的情境。让学生先猜想吊桶摆回来的最高位置是否会达到或超过释放位置,然后进行实验;注意保持姿势和位置。若无合适条件开展活动,也可以选用相关视频供学生观看。

本节编写思路

本节由“海盗船”摆动的情境引出,在“自主活动”中经历吊桶碰鼻的实验,体验运用规律在实验中作出预测的过程。

通过动能定理推演机械能守恒定律,在“助一臂”中说明能量守恒在微观领域同样适用,介绍科学家追寻守恒量的故事。

然后结合章首图的频闪照片分析摆球运动过程,通过示例定量分析抛体和滑雪运动员的曲线运动,体验运用牛顿运动定律与机械能守恒定律分析问题思路的不同特点。

最后在学生实验“验证机械能守恒定律”中,经历实验操作、数据收集、数据分析、实验结论、交流与讨论的过程。

学习中经历的理论推演、实验和分析过程,有助于培养学生的运动与相互作用观念、能量观念和科学探究素养。

[1] 运用动能定理推演机械能守恒定律，需要强调除重力和弹力外其他外力做功为零的条件；还可以说明式(3)就是功能原理：即对质点而言，重力和弹力之外其他外力做功的代数和等于机械能的增量。

可补充介绍在地球表面附近重物的机械能守恒其实是近似的。正文中只考虑重物的动能及其变化，而地球的动能变化被忽略。详细内容见节后资料链接“地球表面重物的机械能守恒”。

可补充讨论：若物体运动过程中动能与势能都不变，能否称机械能守恒？

[2] 此处设置“助一臂”旨在表明能量守恒定律是自然界的基本规律。能量概念的形成和发展，伴随着人类对能量守恒定律认识的发展。历史上人们曾不止一次地在新现象中发现似乎有能量消失或产生，而后来物理学家们总能找到一种科学的解释，使能量守恒定律得以保持，由此建立起来的新理论又进一步推动了物理学的发展。

在这个活动中，提桶与“海盗船”的摆动过程类似，涉及势能和动能的变化。这种变化源自势能与动能之间的转化，而这种转化又受制于一条重要的物理学定律，如果不知道这一定律，会担心提桶把鼻子撞扁。

势能和动能之间的相互转化有时不仅涉及重力势能，还会涉及弹性势能。如图 7-41 所示的蹦极运动，蹦极者在重力和弹性绳拉力的作用下下坠、反弹的过程中动能、重力势能和弹性势能之间不断相互转化。

物体的机械能 E 等于其动能和势能的代数和，即

[1]

$$E = E_p + E_k$$

根据动能定理，合力对物体所做的功等于物体动能的变化量，即

$$W_{\text{合}} = \Delta E_k \quad (1)$$

将重力所做的功 W_G 、弹力所做的功 W_E 分离出来，并用 W' 表示除重力和弹力以外其他力所做功的代数和，则式 (1) 可改写成

$$W' + W_G + W_E = \Delta E_k \quad (2)$$

根据重力、弹力做功的特点，用 ΔE_p 表示重力势能与弹性势能变化量的代数和，则式 (2) 可以改写成

$$W' - \Delta E_p = \Delta E_k$$

即

$$W' = \Delta E_k + \Delta E_p = \Delta E \quad (3)$$

式中， ΔE 为机械能变化量。

若 $W' = 0$ ，则 $\Delta E = 0$ 。这表明除重力和弹力以外，其他外力做功为零时，机械能变化量为零，即机械能总量不变。

以上结论表明：在只有重力和弹力做功的系统内，动能与势能相互转化，机械能总量不变。这就是**机械能守恒定律** (**law of conservation of mechanical energy**)。

机械能守恒的条件是，只有重力和弹力做功，其他力不做功。由于不计空气阻力，自由落体运动和抛体运动过程中，物体的机械能都是守恒的。



图 7-41 蹦极运动

助一臂

能量是物理学中极为重要的概念。除了机械能以外，能量还有很多种形式。能量这一概念的重大价值在于其在不同形式之间转化时的守恒性。适用于微观粒子范畴的量子力学问世后，许多传统的、重要的物理概念都得到了修正和发展，而能量守恒的观念却经受住了考验并继续发挥重要的作用。1930 年，物理学家泡利 (W. Pauli, 1900—1958) 由于坚信能量守恒的普适性而从理论上推测出一种新的粒子——中微子的存在，这一理论预言在 1956 年被实验所证实。现代物理学认为，中微子是解开许多宇宙之谜的钥匙。追求某种守恒性往往是产生科学思想必不可少的前提。科学家常有寻找守恒量的强烈愿望，与运动相联系的守恒量长久以来一直是物理学家们寻找的目标。

[2]

[1]

拓展视野

图 7-42 (a) 所示是质点在竖直平面内运动的轨道。以水平地面为横轴, 同时将水平地面作为重力势能的零势能面, 以质点的重力势能为纵轴并选取合适的标度, 建立如图 7-42 (b) 所示的直角坐标系。这样, 图 (b) 中与轨道轮廓相同的曲线将反映质点沿轨道运动时重力势能 E_p 的变化情况, 这条曲线就称为质点的势能曲线。若忽略运动过程中质点受到的阻力, 质点的机械能守恒。将质点由 A 处静止释放, 其机械能恒为 E_1 , 当质点沿轨道运动到 D 处时, 质点的动能 E_{kD} 和重力势能 E_{pD} 如图 (b) 所标示。若将质点由 B 处静止释放, 质点运动过程中的机械能恒为 E_2 , 质点将无法到达图 (b) 中 C 处右侧的所有位置。势能曲线的起伏直接反映了质点重力势能的变化情况, 当质点机械能守恒时, 势能曲线还能反映质点动能变化的情况。

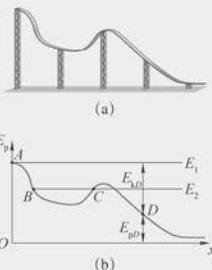


图 7-42 势能曲线

如何运用机械能守恒定律解决实际问题?

章首图的频闪照片表明, 小球自高处摆动至低处, 位置不断降低, 重力势能不断减小; 小球相邻影像的间隔越来越大, 表明小球的速度越来越大, 即小球的动能不断增大。反之, 小球由低处摆动至高处, 重力势能增大, 动能减小。

实际上小球摆动时受到空气阻力的作用, 但小球在左右两侧的最大高度大致相等。这表明, 小球从右侧摆动至左侧的过程中, 阻力所做的功对摆球的影响不大。通常我们会忽略空气阻力, 便可以运用机械能守恒定律方便地获得小球摆动过程中任意位置高度和速率的关系。但如果用牛顿运动定律分析小球的运动, 即便忽略空气阻力, 细线对小球不断变化的拉力作用将是不可回避的, 解决问题的过程将变得十分复杂。

机械能守恒定律通常用动能和势能相互转化时总量保持不变的形式来表示。

如图 7-43 所示, 将质量为 m 的物体从离水平地面高为 h_1 的 A 处以速度 v_1 抛出, 当物体到达离地高为 h_2 的 B 处时速度为 v_2 。若忽略空气阻力, 物体从 A 到 B 的过程中机械能守恒, 以地面为零势能面, 则机械能守恒的表达式可以写作

$$\frac{1}{2}mv_1^2 + mgh_1 = \frac{1}{2}mv_2^2 + mgh_2$$

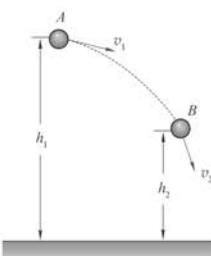


图 7-43 抛体运动

[1] 此处设置“拓展视野”旨在介绍能展示势能变化情况的可视化工具——势能曲线。可以视情况由学生分别描绘由 A、B 处释放的物体动能随水平位置 x 变化的图像, 并结合势能曲线形象地感受机械能守恒的情境。还可以分析地图中的等高线与重力势能的关系。此内容供教师选用。

[1] 示例 强调用机械能守恒定律解决问题的思路,重在寻求两个状态的联系,对过程的分析仅用来判断机械能是否守恒,而并不过多涉及运动过程的细节。

若用 E_{k0} 、 E_{p0} 和 E_0 分别表示物体位于初位置 A 时的动能、势能和机械能;用 $E_{k\ell}$ 、 $E_{p\ell}$ 和 E_ℓ 分别表示物体位于末位置 B 时的动能、势能和机械能,则机械能守恒的表达式又可写作

$$\begin{aligned} E_{k0} + E_{p0} &= E_{k\ell} + E_{p\ell} \\ \text{或} \quad E_0 &= E_\ell \end{aligned}$$

[1] 示例 如图 7-44 所示,滑雪运动员从被冰雪覆盖的斜坡顶端 A 以速度 $v_A = 2 \text{ m/s}$ 滑下,到达坡底 B 时的速度为 $v_B = 16 \text{ m/s}$ 。运动过程中的阻力均忽略不计, g 取 10 m/s^2 。

- (1) A 、 B 两点间的竖直高度差 h 为多少?
- (2) 如果运动员由坡底以速度 $v_B = 7 \text{ m/s}$ 冲上坡面,它能到达的最高点高度 h' 为多少?

分析:由于斜坡的形状不确定,无法用牛顿第二定律求出运动员的加速度和速度。运动员在 A 、 B 间运动时,只有重力对运动员做功,运动员的机械能守恒,由此可以根据机械能守恒定律,用 A 、 B 两点机械能之间的关系求解。

解:(1) 运动员在运动过程中,只有重力做功,因此运动员的机械能守恒。将 B 所在的水平面设为零势能面,根据机械能守恒定律,有

$$\begin{aligned} \frac{1}{2}mv_A^2 + mgh &= \frac{1}{2}mv_B^2 + 0 \\ h &= \frac{v_B^2 - v_A^2}{2g} = \frac{16^2 - 2^2}{2 \times 10} \text{ m} = 12.6 \text{ m} \end{aligned}$$

(2) 运动员从坡底运动到最高点的过程中只有重力做功,机械能仍然守恒,仍以 B 所在的水平面为零势能面,则有

$$\begin{aligned} 0 + mgh' &= \frac{1}{2}mv_B^2 + 0 \\ h' &= \frac{v_B^2}{2g} = \frac{7^2}{2 \times 10} \text{ m} = 2.45 \text{ m} \end{aligned}$$

用机械能守恒定律解决问题的一般步骤为:(1)确定研究对象;(2)判断机械能守恒条件是否成立;(3)选取零势能面;(4)确定始末状态的动能和势能;(5)列出相关表达式并求得结果。

机械能守恒定律是物理学的重要规律,机械能守恒定律关注的是两个运动状态之间的能量关系,并不过多地涉及运动过程的细节。因此,在满足机械能守恒条件时,运用机械能守恒定律解决运动过程较为复杂的机械运动问题往往具有明显的优势。

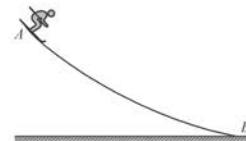


图 7-44 斜坡上的下滑运动

学生实验

验证机械能守恒定律

实验原理与方案

[1] 在物体运动过程中, 空气阻力和重力都对物体做功, 当空气阻力远小于重力时, 物体的机械能近似守恒。为了验证机械能近似守恒, 需要测量物体在任意位置处的动能和重力势能。本实验通过测量物体的速度和高度间接测量物体的动能和重力势能。

实验装置与方法

图 7-45 所示的实验装置可供选用。本装置中, 光电门传感器固定在摆锤上。由于连接杆的质量远小于摆锤质量, 摆动过程中, 连接杆的动能和重力势能可以忽略, 只要测量摆锤(含光电门传感器)的动能和重力势能即可。6 块挡光片可用螺栓固定在不同位置并由板上刻度读出其对应的高度。挡光片宽度 d 、摆锤的质量 m 已知。释放摆锤, 光电门传感器可以分别测出摆锤经过 6 个挡光片时的速度 v 的大小。

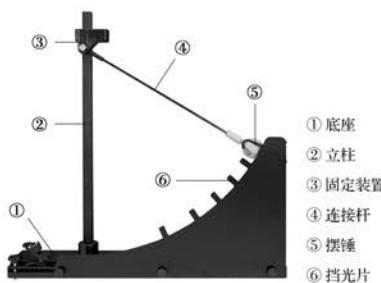


图 7-45 验证机械能守恒定律的实验装置

实验操作与数据收集

释放摆锤, 记录各个挡光片所在高度和摆锤通过各个挡光片时的瞬时速度大小, 填入表 7-3。

表 7-3 实验数据记录表

挡光片宽度 $d = \underline{\hspace{2cm}}$ m, 摆锤质量 $m = \underline{\hspace{2cm}}$ kg

挡光片	1	2	3	4	5	6
高度 h/m						
速度 $v/(m\cdot s^{-1})$						

数据分析

根据实验数据, 选择合适的坐标系描点作图, 并进行分析。

实验结论

_____。

[1] 实验的主要目的是设计实验方案, 学习使用机械能守恒实验装置, 验证机械能守恒定律。

提供的实验器材中, 研究对象是内置光电门传感器的摆锤, 6 块挡光片分别固定在不同高度, 因此在摆锤运动过程中可以测量 6 个位置所对应的瞬时速度, 结合摆锤质量和光电门光孔对应的高度可以得到摆锤的动能和重力势能。通过计算和作图的方法处理数据, 验证结论。

实验装置中, 挡光片的位置是可以改变的, 便于重复实验。挡光片固定后, 其在底座面板上对应的高度即为光电门光孔的高度。

除了提供所需的器材外, 鼓励学生结合《物理实验与活动部分必修》中的思考题, 设计其他实验方案, 有条件的可以进行实验。

问题与思考解读

1. 参考解答: (1) B

情境更接近机械能守恒。因为根据经验可知,铅球运动过程中所受的阻力相较其重力更小,且其飞行路程更短、做功更少,对机械能影响也更小。

(2) A 情境更接近机械能守恒。雨滴从高空下落至地面的距离远大于橡皮擦由桌面滑落到地面的路程,阻力对雨滴做的功更多,对机械能影响也更大,因此橡皮擦下落过程更接近机械能守恒。

命题意图: 在真实情境中判断机械能守恒定律的适用条件。更详细的讨论参见节后资料链接“关于雨滴和橡皮擦下落机械能是否守恒的问题”。

主要素养与水平:

科学推理(I);能量观念(I)。

2. 参考解答: 分析此过程能量转化、转

移可知,铁弹丸的重力势能一部分转移为小水珠的重力势能。因为铁弹丸质量显著大于小水珠质量,虽然小水珠的高度高于铁弹丸的最大高度,但小水珠的重力势能仍小于铁弹丸的重力势能,此现象合理。

命题意图: 在真实情境中分析能量转化、转移情况并做定性判断。

主要素养与水平: 模型建构(I);科学论证(I)。

3. 参考解答: 是。但物体运动过程中不涉及重力做功,且没有发生动能和重力势能之间的转换,故通常不从机械能守恒的角度分析这类问题。

命题意图: 理解机械能守恒的内涵。

主要素养与水平: 能量(I);科学论证(I)。

4. 参考解答: 车站比轨道略高的设计将会在地铁进站时将地铁的一部分动能转化为重力势能存储

交流与讨论

各组就实验数据进行交流、比较,分析实验结果的异同及其原因,探讨实验的改进方法。

问题与思考

1. 分别判断下列两组情境中,哪个过程更接近机械能守恒,并简述理由。

(1) A. 足球被踢起并飞入球门的过程;

B. 铅球被斜向上抛出再落地的过程。

(2) A. 橡皮擦从书桌滑落到地面的过程;

B. 雨滴从高空下落至地面的过程。

2. 图 7-46 中一颗铁弹丸从离水面不高处落入水中,溅起来的几颗小水珠却可以跳得很高。简要分析这一现象。

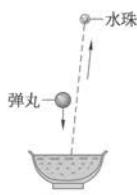


图 7-46

3. 在光滑水平面上做匀速圆周运动的物体机械能是否守恒?

4. 上海轨交 3 号线车站比轨道略高,图 7-47 所示是设计方案示意图。试从有效利用能源的角度,分析这种设计的优点。

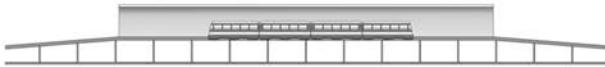


图 7-47

5. 将质点从高处以某一初速度斜向上抛出,不计空气阻力。判断质点落地时的速度大小与质点的质量、初速度大小和方向、抛出时的高度是否有关,并简述理由。

起来有利于其减速，在地铁出站时又将重力势能转化为动能有利于其加速。从能源利用的角度看，这很好地利用了动能和重力势能的转化，比单纯靠机械减速、加速更节能。

命题意图：在真实情境中分析能量转化、转移情况并做出评价。

主要素养与水平：模型建构(I)；科学论证(II)。

5. 参考解答：不计空气阻力的情况下，质点飞行过程中只有重力做功，机械能守恒。设水平地面为零势能面，从抛出到落地的全过程有 $E_t = E_0$ ，则

$$\frac{1}{2}mv_t^2 + mgh_t = \frac{1}{2}mv_0^2 + mgh_0$$

$$\frac{1}{2}v_t^2 + gh_t = \frac{1}{2}v_0^2 + gh_0$$

$$v_t^2 = v_0^2 + 2g(h_0 - h_t)$$

故落地时的速度大小与初速度大小、抛出时的高度有关，与质点的质量、初速度方向无关。

命题意图：运用机械能守恒定律解决实际问题。

主要素养与水平：科学推理(II)；能量观念(I)。

资料链接

地球表面重物的机械能守恒

机械能守恒定律可由牛顿运动定律推演得出，而牛顿运动定律只在惯性参照系里成立。

为了使问题简化，将地球和重物都设想为均质球体，从而均可抽象为处于球心的质点，并忽略地球的自转。

取地球-重物这一体系的质心为参考系。由于质心静止，此参考系为惯性系。设地球和重物的质量分别为 $m_{\text{地}}$ 、 m 。在此参考系中，假设重物从静止自由下落的距离为 h_1 ，重力做功 $W_1 = mgh_1$ ；同时重物对地球的引力也对地球做功 $W_2 = mgh_2$ 。引力的总功 $W = W_1 + W_2 = mg(h_1 + h_2)$ ，其中， h_2 为地球向“上”运动的距离。由动能定理，重物的动能 $E_{k1} = mgh_1 = \frac{1}{2}mv_1^2$ ， v_1 是重物下落距离 h_1 时的速度；同时，

地球获得动能 $E_{k2} = mgh_2 = \frac{1}{2}m_{\text{地}}v_2^2$ ， v_2 是地球的速度。体系总动能为 $E_k = E_{k1} + E_{k2} = \frac{1}{2}mv_1^2 +$

$\frac{1}{2}m_{\text{地}}v_2^2$ 。由于质心静止，有 $mv_1 = m_{\text{地}}v_2$ ， $v_2 = \frac{mv_1}{m_{\text{地}}}$ ， $E_k = \frac{1}{2}\left(1 + \frac{m}{m_{\text{地}}}\right)mv_1^2$ ，则

$$E_{p1} + 0 = E_{p2} + E_k \quad (1)$$

上式即重物自由下落的机械能守恒的严格表达式。

若以地球为参考系，引力对地球不做功，重物下落的距离变为 $h = h_1 + h_2$ ，引力对重物做功 $W = mgh$ ，显然这是一对内力做功之和，与参考系无关。此时，获得速度 $v = v_1 + v_2$ ， v 为重物相对地球的速度。由质心静止的条件 $mv_1 = m_{\text{地}}v_2$ ，得

$$v = \left(1 + \frac{m}{m_{\text{地}}}\right)v_1$$

重物的动能 $E'_{k1} = \frac{1}{2}mv^2 = \frac{1}{2}m\left(1 + \frac{m}{m_{\text{地}}}\right)^2v_1^2 = \left(1 + \frac{m}{m_{\text{地}}}\right)E_k$

由于势能只取决于体系物体间的相对位置,于是机械能守恒可表示为

$$E_{p1} + 0 = E_{p2} + E'_{k} = E_{p2} + \left(1 + \frac{m}{m_{\text{地}}}\right) E_k \quad (2)$$

将式(1)与式(2)相比,多出一因子 $\left(1 + \frac{m}{m_{\text{地}}}\right)$ 。 $\frac{m}{m_{\text{地}}}$ 的量级约为 10^{-24} ,即亿亿亿分之一(地球质量 $m_{\text{地}}$ 约为 $6 \times 10^{24} \text{ kg}$)。

由此可见,以地球作为惯性系,所引起的误差很小。从上面的讨论可以看出这是由于质心系中,相比重物,地球的动能完全可以忽略。这也是由于地球位移远远小于重物,引力对地球做的功远远小于对重物所做的功。

关于雨滴和橡皮擦下落机械能是否守恒的问题

虽然在实际情况中无法严格满足仅有系统内重力和弹力做功的机械能守恒条件,但是机械能守恒定律对真实的物理过程仍具有现实指导意义。下面就以雨滴和橡皮擦下落的比较为例,通过估算来判断实际问题是否适用机械能守恒定律。

查阅资料可知,雨滴大约由3 000 m 高空下落,落地速度一般不超过 8 m/s;橡皮擦由大约 1 m 高的桌面滑落,实测落地速度约为 4.3 m/s。选地面为零势能面计算机械能损失百分比可知,雨滴下落过程损失了超过 99% 的机械能,橡皮擦落地过程仅损失约 6% 的机械能。由此可见,橡皮擦落地过程更接近机械能守恒。

对于橡皮擦落地这类机械能损失不足 10% 的情况,在粗略的分析中,我们可以近似认为其机械能不变,可运用机械能守恒定律解决问题。

[1]

学期 **活动**

解释交通法规中汽车刹车距离与车速之间的关系。

为了保证交通安全，汽车在行驶过程中严禁超速，且车辆之间应该保持必要的安全距离。通过查阅相关资料、访问有关部门，收集关于汽车刹车距离与车速关系的数据，撰写调查报告。

活动要求：

- (1) 摘录相关资料中关于我国最高车速和安全车距的规定和数据，标明出处（如“……”摘自《×××》第××页）。
- (2) 将上述信息按照一定的逻辑顺序排列（可以用图表的形式）。
- (3) 运用动能定理对收集到的数据进行分析，阐述我国交通法规中有关条例的制定依据。
- (4) 以小报的形式进行展示与交流。

[1] 这是一个调查类活动，要求收集我国现行交通法规中关于最高车速和安全车距的规定和数据，结合汽车的刹车距离、驾驶员的反应时间等参数，运用动能定理分析说明这些规定的依据。活动以小组为单位合作完成，成果以小报形式进行展示与交流。

编制的小报中应包含以下内容：引用的数据及出处、必要的理论分析过程、机动车安全驾驶宣传。

小结

· 基本概念和基本规律

功：当物体在力的方向上发生位移时，称力对物体做了功。恒力对物体所做的功等于恒力大小、位移大小、恒力与位移之间夹角的余弦三者的乘积。

平均功率：一段时间内做的总功与做功时间的比。恒力与位移方向相同时，等于恒力大小与平均速度大小的乘积。

瞬时功率：当力与瞬时速度的方向相同时，等于力的大小与瞬时速度大小的乘积。

额定功率：机械在正常状态下长时间工作不应超过的功率最大值。

动能：物体的质量与速度的二次方乘积的一半。

动能定理：物体受到的合力所做的功等于物体动能的变化量。

重力势能：物体的重力与物体相对于零势能面高度的乘积。

弹性势能：发生弹性形变的物体由于各部分之间相对位置发生变化而具有的能量。

机械能：物体动能和势能的代数和。

机械能守恒定律：在只有重力和弹力做功的系统内，动能与势能相互转化，机械能总量不变。

· 基本方法

通过动能定理、机械能守恒定律的推导过程，体会理论演绎的方法。

通过验证机械能守恒定律的实验，学会分析和处理实验数据的方法。

通过应用机械能守恒定律解决问题的过程，体会守恒思想，领悟从守恒的角度分析问题的方法。

· 知识结构图



复习与巩固解读

复习与巩固

- 判断下列关于功的说法是否正确，并简述理由。
 - 功有正负之分，所以功是矢量。
 - 力越大，力对物体所做的功就越多。
 - 力对物体不做功，物体的位移一定为零。
- 定性作出汽车以恒定速度沿斜坡向上行驶的过程中，汽车的动能、势能和机械能随汽车离地面高度变化的图像，并简述理由。
- 神舟飞船从发射升空至返回大致经历了以下四个阶段，判断各个阶段返回舱的机械能是否守恒，并简述理由。
 - 飞船发射升空。
 - 飞船在椭圆轨道上绕地球运行。
 - 飞船进行最后一圈绕地飞行时进入返回姿态，返回舱与推进舱分离，制动发动机点火，飞船持续下降预备进入大气层。
 - 飞船借助降落伞和反推发动机逐步减速穿越大气层，以3~4 m/s的速度下降预备着陆。
- 起重机吊住质量为m的木箱，沿竖直方向以加速度a匀加速上升一段距离h。重力加速度为g，不计空气阻力，求起重机对木箱所做的功。
- 小明身高1.8 m，在运动会上参加跳高比赛时采取背越式跳法，起跳后恰能越过1.8 m高的横杆。估算小明为此做了多少功？(g取10 m/s²)
- 有研究表明，游泳时人受到水的阻力正比于人在水中速度的二次方。男子自由泳100 m和800 m的世界纪录分别为46.91 s和452.12 s。试比较运动员创造以上两项世界纪录时所做的功和平均功率。
- 如图7-48所示，质量为m的物体在水平拉力F的作用下，由静止开始沿粗糙水平面向前运动s₁后，撤去拉力F，已知物体与水平面间的摩擦力为F_{f0}。求：
 - 刚撤去拉力时，物体的速度v；
 - 物体滑行的最大距离s₂。

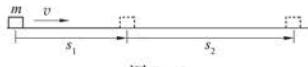


图7-48

- *8. 研究机械能守恒定律的装置如图7-49所示，用光电门传感器测量摆锤释放后经过各个挡光片时的速度，结合各挡光片相对轨道最低点的高度和摆锤质量，可

情境转化为模型化情境，练习运用图像工具。

主要素养与水平：科学推理(I)；能量观念(I)。

- 参考解答：(1) 飞船发射升空过程中机械能不守恒。此过程发动机做功，飞船重力势能和动能都增加
- 机械能守恒。飞船在椭圆轨道上运行时，仅受地球万有引力作用，仅有地球万有引力做功，机械能守恒
- 机械能不守恒。制动发动机点火，对飞船做功，机械能不守恒
- 机械能不守恒。飞船借助降落伞和反推发动机逐步减速过程中，空气阻力和反推发动机对飞船做负功，机械能不守恒

1. 参考解答：(1) 不正确。虽然功有正负之分，但功是标量

(2) 不正确。根据 $W = Fscos\theta$ 可知，做功与位移和力都有关，力比较大但位移情况未知，物体所做的功无法确定

(3) 不正确。根据 $W = Fscos\theta$ 可知，当力与位移垂直或者力为零时，做功也为零，而此时物体的位移不一定为零

命题意图：功的概念辨析。

主要素养与水平：科学推理(I)；能量观念(I)。

2. 参考解答：见图4 汽车以恒定速度沿斜坡向上行驶的过程中，汽车速度大小不变，高度随时间均匀增大，汽车的动能不变，势能和机械能随汽车离地面高度均匀增大。若选择出发位置为零势能面，则势能正比于高度

命题意图：将真实

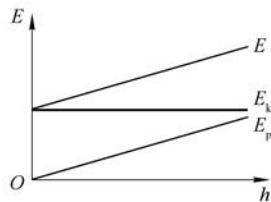


图4

命题意图：在真实情境中判断机械能守恒定律适用条件。

主要素养与水平：
模型建构(Ⅱ);科学论证(Ⅱ)。

4. 参考解答：以木箱为研究对象，受到竖直向上的拉力 F 和重力 mg 作用以加速度 a 匀加速上升。根据牛顿第二定律知 $F_{合} = F - mg = ma$ ，故拉力 $F = mg + ma$ 。又已知位移竖直向上，大小为 h ，可得拉力 F 对木箱所做的功 $W = Fh = m(g + a)h$

命题意图：综合应用牛顿第二定律。

主要素养与水平：
运动与相互作用(Ⅰ);
科学推理(Ⅰ)。

5. 参考解答：估计小明质量为 70 kg ，起跳前的重心位于身高一半处约 0.9 m 高，起跳后重心达到的最大高度约为 1.8 m ，忽略其水平速度可近似认为最大高度时速度为零。忽略

阻力，起跳后只有重力做功，小明的机械能守恒，选地面为零势能面，有 $E_{k0} + mgh_0 = E_{kt} + mgh_t$ ，代入数据，小明做功 $W = E_{k0} = mg(h_t - h_0) = 70 \times 10 \times (1.8 - 0.9)\text{ J} = 630\text{ J}$

命题意图：将真实情境转化为模型化情境。

主要素养与水平：模型建构(Ⅱ);科学推理(Ⅰ)。

6. 参考解答：忽略变速段和转向过程，将比赛全过程简化为匀速运动，动力等于水的阻力。
由条件知 100 m 和 800 m 比赛过程的平均速度为 2.132 m/s 和 1.769 m/s ，故动力之比等于阻力之比，等于速度二次方之比为 1.453 。

根据功的公式 $W = Fs$ 可知，做功之比等于 0.182 ，所以 800 m 比赛过程做功多。

根据功率的公式 $P = Fv$ 可知，做功功率之比等于速度三次方之比为 1.751 ，所以 100 m 比赛过程的

以分析摆锤运动过程中机械能的变化。

某组同学在一次实验中，将挡光片等间隔放置在圆弧轨道上，部分实验数据如表 7-4 所示。

(1) 在图 7-50 中用横轴表示高度 h ，纵轴表示能量，绘制运动过程中摆锤重力势能 E_p 、动能 E_k 及机械能 E 随高度 h 变化的图线。

(2) 以下哪组数据最接近表格中 x 、 y 的合理取值？简述理由。

- A. $x = 0.089$, $y = 0.116$ B. $x = 0.098$, $y = 0.125$
C. $x = 0.103$, $y = 0.130$ D. $x = 0.106$, $y = 0.113$

表 7-4

序号	1	2	3	4	5
高度 h/cm	15.2	10.0	5.8	2.7	0.7
势能 E_p/J	0.149	0.098	0.057	0.027	0.007
动能 E_k/J	0.019	0.060	0.089	x	0.106
机械能 E/J	0.168	0.158	0.146	y	0.113



图 7-49



图 7-50

- *9. 某电动汽车动力性能参数如表 7-5 所示。汽车由静止开始匀加速启动，电机以额定功率工作后保持电机功率不变，继续加速 10 s 达到最大速度，假设行驶过程中汽车受到的阻力保持不变。求全过程中汽车的位移大小。

表 7-5

动力电池容量 / (kW·h)	48.3
电机额定功率 / kW	150
最高车速 / ($\text{km} \cdot \text{h}^{-1}$)	135
整车质量 / kg	1710
0~50 km/h 加速时间 / s	4.2

*10. 某汽车质量 $m=2000\text{ kg}$ 、发动机最大输出功率 $P_{\max}=150\text{ kW}$, 以 $v_0=72\text{ km/h}$ 的速率匀速行驶时, 发动机和传动与驱动系统内的功率分配关系如图 7-51 所示。已知水泵的功率 P_1 恒定, 传动与变速等内部机件摩擦而损耗的功率 P_2 与汽车的行驶速率成正比, 汽车行驶时所受的空气阻力 $F_{阻1}$ 与行驶速率 v 的关系为 $F_{阻1}=kv^2$ (k 为恒量), 所受路面的阻力 $F_{阻2}$ 大小恒定。

- (1) 以 v_0 匀速运动时, 求汽车驱动力 F_0 的大小。
- (2) 汽车以 v_0 行驶时能产生的最大加速度大小为多少?
- (3) 汽车能否以 $v=3v_0$ 的速率匀速行驶? 简述理由。

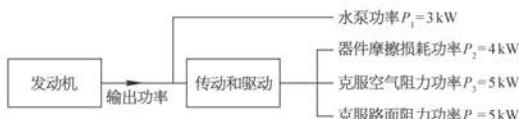


图 7-51

*11. 已知某公园中喷泉的喷水高度可达 h , 任何时候都有体积为 V 的水处于空中, 水的密度为 ρ 。求该喷泉底部水泵的最小功率 P 和喷水管口的横截面积 S 。

平均功率大

命题意图: 在真实情境中建立简单模型, 并解决定性半定量的问题。

主要素养与水平: 模型建构(I); 科学推理(I)。

7. 参考解答: (1) 以物体为研究对象, 在拉力作用下向前运动 s_1 过程中, 拉力 F 和摩擦力 F_f 做功。根据动能定理, 拉力 F 和摩擦力 F_f 做功的代数和等于动能变化量, 即 $Fs_1 - F_f s_1 = \Delta E_k = \frac{1}{2}mv^2 - 0$, 故 $v =$

$$\sqrt{\frac{2(F - F_f)s_1}{m}}$$

(2) 对物体从静止开始运动到滑行停止的全过程分析可知, 拉力 F 和摩擦力 F_f 做功, 同样根据动能定理有 $Fs_1 - F_f(s_1 + s_2) = \Delta E_k = 0 - 0$, 故 $s_2 = \frac{(F - F_f)s_1}{F_f}$

命题意图: 运用动能定理解决简单问题。

主要素养与水平: 模型建构(I); 科学推理(I)。

8. 参考解答: (1) 见图 5 (2) C。由已知数据可知, 机械能逐渐减小, 且经过相同路程机械能的减小量也逐渐增大, 故选 C(此题基于真实测量)

命题意图: 实验误差分析。

主要素养与水平: 科学推理(II); 能量观念(I)。

9. 参考解答: 汽车在运动方向受到动力 F 和大小恒定的阻力 $F_{阻}$ 作用, 以最大车速 $v_m=135\text{ km/h}=37.5\text{ m/s}$ 匀速运动时, 由平衡条件知 $F=F_{阻}$, 又知道动力功率为电机额定

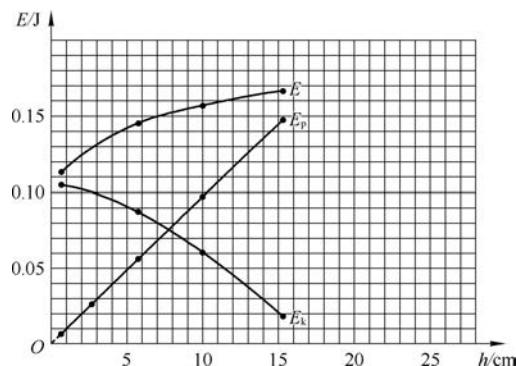


图 5

功率 150 kW, 有 $P = Fv_m = F_{阻}v_m$

故

$$F_{阻} = \frac{P}{v_m} = \frac{150\,000}{37.5} \text{ N} = 4\,000 \text{ N}$$

行驶过程中汽车受到的阻力保持不变, 达到额定功率前动力保持恒定。可知汽车由静止开始经 4.2 s 匀加速达到 $50 \text{ km/h} \approx 13.9 \text{ m/s}$, 易知加速度 $a \approx 3.31 \text{ m/s}^2$ 。由牛顿第二定律知 $F_{合} = F - F_{阻} = ma$, 所以 $F = ma + F_{阻} = (1710 \times 3.31 + 4000) \text{ N} = 9.66 \times 10^3 \text{ N}$ 。

匀加速运动速度 $v_1 = at$, 动力功率 $P = Fv = Fat$, 随时间均匀增加, 达到额定功率时有 $t_1 = \frac{P}{Fa} = \frac{150\,000}{9.66 \times 3.31} \text{ s} \approx 4.69 \text{ s}$ 。

此过程位移 $s_1 = \frac{1}{2}at^2 = \frac{1}{2} \times 3.31 \times 4.69^2 \text{ m} \approx 36.4 \text{ m}$, 动力做功 $W_1 = Fs_1$ 。达到额定功率后继续加速 $t_2 = 10 \text{ s}$, 动力做功 $W_2 = Pt_2 = 150\,000 \times 10 \text{ J} = 1.5 \times 10^6 \text{ J}$ 。

汽车由静止起动直至达到最大速度的全过程中, 仅有动力 F 和大小恒定的阻力 $F_{阻}$ 做功, 根据动能定理有

$$W_F + W_{阻} = \Delta E_k$$

$$W_1 + W_2 - F_{阻}s_{全} = \frac{1}{2}mv_m^2 - 0$$

联立并代入数值, 解得 $s_{全} \approx 162 \text{ m}$ 。

全过程中汽车的位移大小约为 162 m。

命题意图: 在真实情境中建立模型, 从能量角度解决常见问题。

主要素养与水平: 模型建构(I); 科学推理(III)。

10. 参考解答: (1) 汽车在运动方向受到驱动力 F 和阻力 $F_{阻}$ 作用, 其中阻力包含空气阻力 $F_{阻1}$ 和路面的阻力 $F_{阻2}$, $F_{阻} = F_{阻1} + F_{阻2}$ 。以 $v_0 = 20 \text{ m/s}$ 匀速行驶时, 汽车受力平衡, 故 $F_0 = F_{阻} = F_{阻1} + F_{阻2}$ 。

由功率分配关系图知, 此时驱动力功率 $P_{F0} = P_3 + P_4 = (5 + 5) \text{ kW} = 10 \text{ kW}$, 又 $P_{F0} = F_0 v_0$ 。

$$\text{故 } F_0 = \frac{P_{F0}}{v_0} = 10 \times 10^3 \div 20 \text{ N} = 500 \text{ N}$$

(2) 由(1)中分析可知, 汽车速率为 v_0 时, 阻力 $F_{阻} = F_0 = 500 \text{ N}$ 。

若发动机以最大输出功率 $P_{max} = 150 \text{ kW}$ 工作, 则驱动力功率 $P_F = P_{max} - (P_1 + P_2) = [150 - (4 + 3)] \text{ kW} = 143 \text{ kW}$, 又 $F = \frac{P_F}{v_0} = 143 \times 10^3 \div 20 \text{ N} = 7150 \text{ N}$, 由牛顿第二定律知 $F_{合} = F - F_{阻} = ma$, 代入数值, 解得 $a \approx 3.33 \text{ m/s}^2$

(3) 不能。若汽车以速率 $v = 3v_0$ 匀速行驶, 由题意知, 水泵的功率 P_1 恒定为 3 kW; 传动损耗的功率 P_2 与汽车的行驶速率成正比, 为 12 kW; 空气阻力 $F_{阻1} = kv^2$, 功率 $P_{阻1} = kv^3 = 3^3 \times 5 \text{ kW} = 135 \text{ kW}$; 路面的阻力 $F_{阻2}$ 大小恒定, 功率 $P_{阻2} = F_{阻2}v = 15 \text{ kW}$ 。

此时应有发动机输出功率 $P = P_1 + P_2 + P_{阻1} + P_{阻2} = (3 + 12 + 135 + 15) \text{ kW} = 165 \text{ kW}$, 超出发动机最大输出功率 $P_{max} = 150 \text{ kW}$, 故汽车不可能以速率 $v = 3v_0$ 匀速行驶。

命题意图: 了解汽车的能量转化情况, 从能量角度分析问题。

主要素养与水平: 模型建构(II); 科学推理(III)。

11. 参考解答: 忽略阻力作用, 喷出的水在空中可视为做竖直上抛运动。 $v_0 = \sqrt{2gH}$ 为水的初速度,

即喷水管口处的水流速度,可得喷口单位时间喷出的水的体积,即流量 $Q=v_0 S$ 。又因为竖直上抛运动在空中的飞行时间 $T=\frac{2v_0}{g}$,空中水的总体积为 V ,有 $V=QT=v_0 ST$,故管口的横截面积 $S=\frac{V}{v_0 T}=\frac{Vg}{2v_0^2}=\frac{V}{4H}$ 。

$$\text{喷泉底部水泵的最小功率 } P=\frac{1}{2}\rho S v_0^3=\frac{1}{2}\rho \frac{V}{4H}(\sqrt{2gH})^3=\frac{\rho g V}{2}\sqrt{\frac{gH}{2}}$$

(最小功率的详细推导参见教材第 70 页“拓展视野”)

命题意图:从能量角度分析流体问题。

主要素养与水平:模型建构(II);科学推理(III)。

第三部分 本章练习部分解读

第一节 功

(一) 参考解答

1. 4(答案在合理范围即可)

2. 0 0 -2 000 2 000

3. 见下表(要求学生至少填出两个,“空气阻力”为选择性要求,判断合理均为正确)

作用力	是否做功	正功还是负功
重力	是	正功
绳的拉力	否	
空气阻力	是	负功

4. D

5. $mgh - \mu mgh \cot \theta = 0$

6. B

7. (1) 重力做功 $W_G = -mgh = -60 \times 10 \times 5 \text{ J} = -3000 \text{ J}$

(2) 顾客做匀速运动,由平衡条件知支持力 F_N 竖直向上、大小等于 G ,故支持力做功 $W_N = F_N h = mgh = 60 \times 10 \times 5 \text{ J} = 3000 \text{ J}$ 。此小题也可通过动能定理求解如下:顾客做匀速运动,动能不变,由动能定理知其所受支持力 F_N 与重力 G 做功之和等于零,即 $W_N = -W_G = 3000 \text{ J}$

8. 由题意,弹力 F_N 和重力 G 沿竖直方向,位移 s 水平向右,由恒力做功公式 $W = F s \cos \alpha$,而 $\cos 90^\circ = 0$ 易知,弹力 F_N 和重力 G 与位移方向垂直,故做功为零。

拉力 F 对木箱做的功 $W_F = F s \cos \theta = 200 \times 30 \times \cos 37^\circ \text{ J} = 4800 \text{ J}$

9. 由力的合成可知,物体所受合力 $F = 10 \text{ N}$ 、沿北偏东 37° 方向,由牛顿第二定律知,物体具有沿合力方向的加速度 $a = \frac{F}{m} = \frac{10}{5} \text{ m/s}^2 = 2 \text{ m/s}^2$ 。

由静止开始在 10 s 内, 物体沿合力方向匀加速直线运动位移 $s = \frac{1}{2}at^2 = \frac{1}{2} \times 2 \times 10^2 \text{ m} = 100 \text{ m}$ 。

又 F_1 与位移的夹角 $\alpha = 37^\circ$, F_2 与位移的夹角 $\beta = 53^\circ$, 由恒力做功公式 $W = Fs \cos \theta$ 知,

$$(1) W_1 = F_1 s \cos \alpha = 8 \times 100 \times \cos 37^\circ \text{ J} = 640 \text{ J}$$

$$(2) W_2 = F_2 s \cos \beta = 6 \times 100 \times \cos 53^\circ \text{ J} = 360 \text{ J}$$

$$(3) \text{ 合力做功 } W = W_1 + W_2 = (640 + 360) \text{ J} = 1000 \text{ J}。 \text{ 此小题也可通过合力做功来求解: } W = Fs = 10 \times 100 \text{ J} = 1000 \text{ J}$$

(二) 习题主要素养与水平分析

习题的主要素养与水平

题号	运动与相互作用	能 量	模型建构	科学推理
1	I	I	I	I
2	I	I	I	I
3	I	I	I	I
4	I	I	I	I
5	I	I	II	I
6	I	I	I	II
7	I	I	II	I
8	I	I	I	II
9	I	I	I	II

第二节 功 率

(一) 参考解答

1. $100 \quad 200$

2. $2880 \quad 1440$

3. 全国一年节省的电能最接近 $W = Pt = 2 \times (0.06 - 0.01) \times 4.3 \times 10^8 \times 4 \times 365 \text{ kW} \cdot \text{h} \approx 6.28 \times 10^{10} \text{ kW} \cdot \text{h}$

4. 1.00×10^8

5. $\frac{F^2 t}{m}$

6. 100

7. 72(此处计算 1 min 内克服重力做功的平均功率, 时间用总时间代入计算, 不要求算出上升过程时间)

8. B

9. (1) 由牛顿第二定律知 $F_{合} = ma = 200 \times 0.5 \text{ N} = 100 \text{ N}$ 。

分析货箱受力情况知, 其所受合外力 $F_{合} = F - mg$, 所以 $F = F_{合} + mg = (100 + 2000) \text{ N} = 2100 \text{ N}$ 。

在由静止开始匀加速 5 s 的过程中, 位移 $s = \frac{1}{2}at^2 = \frac{1}{2} \times 0.5 \times 5^2 \text{ m} = 6.25 \text{ m}$, 牵引力做功 $W = Fs =$

$$2100 \times 6.25 \text{ J} = 13125 \text{ J}, \text{ 平均功率 } P = \frac{W}{t} = \frac{13125}{5} \text{ W} = 2625 \text{ W}$$

(2) 5 s 时货箱速度 $v = at = 0.5 \times 5 \text{ m/s} = 2.5 \text{ m/s}$, 牵引力的瞬时功率 $P_t = Fv = 2100 \times 2.5 \text{ W} = 5250 \text{ W}$

10. 在水平路面行驶的汽车所受合外力 $F_{\text{合}} = F - F_{\text{阻}}$, 其中阻力 $F_{\text{阻}} = 2 \times 10^3 \text{ N}$, 牵引力 F 的功率 $P = Fv$ 。

(1) 当汽车的速度达到 5 m/s 时, $F = \frac{P}{v} = \frac{5 \times 10^4}{5} \text{ N} = 10000 \text{ N}$, $F_{\text{合}} = F - F_{\text{阻}} = (10000 - 2000) \text{ N} = 8000 \text{ N}$, 由牛顿第二定律 $F_{\text{合}} = ma$ 知, $a = \frac{F_{\text{合}}}{m} = \frac{8000}{2000} \text{ m/s}^2 = 4 \text{ m/s}^2$

(2) 由 $P = Fv$ 知, 当汽车功率保持为额定功率时, 随着速度的增加, 牵引力减小, 合外力减小, 加速度减小, 汽车做加速度减小的变加速运动。

当牵引力减小至等于阻力时, 加速度减小为零, 汽车达到最大速度 v_{max} 。

有 $F = F_{\text{阻}} = 2 \times 10^3 \text{ N}$, $v_{\text{max}} = \frac{P}{F} = \frac{5 \times 10^4}{2000} \text{ m/s} = 25 \text{ m/s}$

(二) 习题主要素养与水平分析

习题的主要素养与水平

题号	运动与相互作用	能 量	模型建构	科学推理	社会责任
1	I	I	I	I	
2	I	I	I	I	
3		I	I	II	I
4	I	I	II	II	
5	I	I	I	II	
6	I	I	I	II	
7	I	I	II	II	
8	I	I	II	II	
9	I	I	I	II	
10	I	I	II	II	

第三节 动能 动能定理

(一) 参考解答

1. C

2. 484 m/s

3. 相同 16 : 25

4. 20 4

5. 根据动能定义 $E_k = \frac{1}{2}mv^2$, 速度由 10 km/h 加速到 20 km/h, 动能约增加 $1.74 \times 10^4 \text{ J}$; 而由

50 km/h 加速到 60 km/h, 动能约增加 $6.37 \times 10^4 \text{ J}$ 。由此可知, 从 50 km/h 加速到 60 km/h 动能增加

得多

6. 忽略棒球所受其他作用力,考虑棒球受手套作用力作用减速至零的过程,根据动能定理 $W_{合} = \Delta E_k$, 有 $-F_s = 0 - \frac{1}{2}mv^2$, 故 $F_s = \frac{mv^2}{2s} = \frac{0.145 \times 32^2}{2 \times 0.25} N = 296.96 N$

7. 18 9

8. 54 18 56 74

9. (1) 汽车牵引力与输出功率的关系 $P = F_{牵}v$, 将 $P = 50 kW$, $v_1 = 90 km/h = 25 m/s$, 代入得 $F_{牵} = \frac{P}{v_1} = 2 \times 10^3 N$, 当轿车匀速行驶时,牵引力与阻力大小相等,有 $F_{阻} = 2 \times 10^3 N$

(2) 在减速过程中,发动机只有 $\frac{1}{5}P$ 用于汽车的牵引,根据动能定理有 $\frac{1}{5}Pt - F_{阻}L = \frac{1}{2}mv_2^2 - \frac{1}{2}mv_1^2$, 代入数据得 $Pt = 1.575 \times 10^5 J$, 电源获得的电能为 $E_{电} = 0.5 \times \frac{4}{5}Pt = 6.3 \times 10^4 J$

(3) 根据题意,轿车在平直公路上匀速行驶时受到的阻力仍为 $F_{阻} = 2 \times 10^3 N$,此过程中,由能量转化及守恒定律可知,仅有电能用于克服阻力做功 $E_{电} = F_{阻}L'$,代入数据得 $L' = 31.5 m$

(二) 习题主要素养与水平分析

习题的主要素养与水平

题号	运动与相互作用	能 量	模型建构	科学推理	科学论证
1		I	I	I	
2		I	I	I	
3	I	I	I	I	
4	I	I	I	I	
5		I	I	I	
6	I	I	II	I	
7	I	I	I	I	
8	II	I	II	II	
9	I	II	III	III	II

第四节 重 力 势 能

(一) 参考解答

1. 192

2. 做负功 增大 不做功 不变 做正功 减小

3. 2.5 -5 -7.5 7.5 0 -7.5(此处笔盒高度 0.01 m, 可认为远小于题中高度 1.5 m, 计算中忽略尺寸对重心的影响;教师可对比竖直放置的书重心 0.1 m 则需纳入考虑的情况)

4. 6.75×10^4

5. 7 200 -3 000 4 800(忽略小华身高的影响)

或 7 740 -2 460 4 800(考虑小华身高 1.8 m, 则重心高度为 0.9 m; 学生做出合理估值均为正确)

6. 标量 >

7. $\frac{1}{9}mgl$

8. 根据已知条件知,子弹具有动能 $E_k = \frac{1}{2}mv^2 = \frac{1}{2} \times 0.005 \times 500^2 \text{ J} = 625 \text{ J}$ 。

重力加速度取 10 m/s^2 ,砖块的重力势能 $E_p = mgh = E_k$,有 $2 \times 10h = 625$,所以 $h = \frac{E_k}{mg} = \frac{625}{2 \times 10} \text{ m} =$

31.25 m ,又 $h = 31.25 \text{ m} = 3 \text{ m} \times 10 + 1.25 \text{ m}$,约为 11 层楼的对应高度(教师可引导学生注意高空坠物的危害)

9. 首先将电能单位转化为焦耳, $1 \text{ kW} \cdot \text{h} = 3.6 \times 10^6 \text{ J}$ 。

重力加速度取 10 m/s^2 ,假设高中生质量 $m = 50 \text{ kg}$,将其举高 h ,需做功 $W = mgh$ 。

所以 $h = \frac{W}{mg} = \frac{3.6 \times 10^6}{50 \times 10} \text{ m} = 7200 \text{ m}$

10. 人跳到最高时,重心在身高的一半处,其高度 $h_1 = (2.9 - 2.3 + 1.8 \times \frac{1}{2}) \text{ m} = 1.5 \text{ m}$,重力势能值

$$E_p = \Delta mgh = 70 \times 10 \times 1.5 \text{ J} = 1050 \text{ J}$$

立定跳高过程中重心最高提升 $\Delta h = (2.9 - 2.3) \text{ m} = 0.6 \text{ m}$,所以重力势能最多增加 $mg\Delta h = 70 \times 10 \times 0.6 \text{ J} = 420 \text{ J}$

(二) 习题主要素养与水平分析

习题的主要素养与水平

题号	运动与相互作用	能 量	模 型建构	科学推理	社会 责任
1		I	I	I	
2		I	I	I	
3		I	I	I	
4		I	I	II	
5	I	I	II	II	
6		I	I	II	
7	I	I	II	II	
8	I	I	I	II	I
9	I	I	I	II	
10	I	I	II	II	

第五节 机械能守恒定律

(一) 参考解答

1. 动能 势能 只有重力和弹力做功
2. 增大 减小 减小 增大
3. 15 20
4. 见下表

能量的种类	具有能量的物体
动能	蹦极者
重力势能	蹦极者、地球系统
弹性势能	弹性绳系统
简述能量的转化	
下坠过程：首先是一段自由落体运动，重力势能转化为动能；绳拉直后先加速再减速至零，加速过程中重力势能转化为动能和弹性势能，减速过程中重力势能和动能转化为弹性势能。上升过程：先加速再减速至零，加速过程中弹性势能转化为动能和重力势能，减速过程中弹性势能和动能转化为重力势能。上升过程中绳松弛时减速上升，动能转化为重力势能	

5. 2 10 -100

6. C

7. D。抛出后仅有重力对小球做功，由机械能守恒知小球落地时的机械能等于其在最高点的机械能 $mg(h - h_1)$

8. D

9. 该同学采取背越式跳法，可认为在越过 1.8 m 高的横杆过程中，重心的最大高度即为 $H = 1.8 \text{ m}$ ，估计直立姿态起跳时其重心在身高一半高度 $h_0 = 0.9 \text{ m}$ 。忽略阻力的影响和水平速度，在起跳到越过横杆的过程中，仅受重力作用，机械能守恒。选择地面为零势能面，有 $\frac{1}{2}mv^2 + mgh_0 = 0 + mgH$ ，代入数值即可知初速度大小约为 4.24 m/s

10. 重锤整体由静止开始下落至即将击中钟的过程中，仅有重力对系统做功，系统机械能守恒。

将重锤摆动的最低点（即图中 B' 点）设为零势能面，根据机械能守恒定律，有 $0 + 0 + mgh_A + mgh_B = \frac{1}{2}mv_A^2 + \frac{1}{2}mv_B^2 + mgh'_A + 0$ 。

又 $v_A = v_B$ 令为 v , $h_A = L(1 - \cos 30^\circ)$, $h_B = L(1 - \cos 60^\circ)$, $h'_A = L(1 - \cos 30^\circ)$ ，代入可得

$$mgL(1 - \cos 30^\circ) + mgL(1 - \cos 60^\circ) = \frac{1}{2}mv^2 + \frac{1}{2}mv^2 + mgL(1 - \cos 30^\circ)$$

$$\text{整理得 } v = \sqrt{gL(1 - \cos 60^\circ)} = \sqrt{\frac{gL}{2}}$$

(二) 习题主要素养与水平分析

习题的主要素养与水平

题号	运动与相互作用	能 量	模型建构	科学推理	交 流
1		I	I	I	
2		I	I	I	
3	I	I	I	II	
4	I	I	II	II	
5	I	I	II	II	
6	I	I	I	II	

(续表)

题号	运动与相互作用	能 量	模型建构	科学推理	交 流
7	I	I	I	II	
8	I	I	I	II	
9	I	II	II	II	
10	I	II	III	II	

第四部分 本章实验与活动部分解读

1. 自主活动 探究重力势能的影响因素

(1) 能否根据结果猜想重力势能与哪些因素有关？若能，提出猜想；若不能，说明理由。

参考解答：能。重力势能与物体所受的重力和高度有关

命题意图：通过实验探究，猜想影响重力势能的因素。

(2) 如何运用控制变量的思想设计实验方案？

参考解答：将同一个小球从不同高度释放，可以控制重力不变。将不同的小球从同一高度释放，可以控制高度不变

命题意图：根据初步猜想设计实验方案进一步探究，理解控制变量思想的作用。

2. 学生实验 验证机械能守恒定律

(1) 各组就实验数据进行交流、比较，分析实验结果的异同及其原因，探讨实验的改进方法。

参考解答：由于各组设置挡光片的位置可能不同，实验中摆锤在各位置的重力势能和动能不同。但重力势能与动能变化的趋势相同，且两者之和近似不变。仔细思考可能会发现，机械能在摆锤向下摆动过程中逐渐减小，这主要是克服空气阻力引起的。

就实验改进而言，一方面可以通过适当减小挡光片宽度来减小速度测量的误差，另一方面可以增加摆锤的质量来降低机械能损失的比例

命题意图：能比较不同组的实验图像，细致分析实验结果，分析误差的成因并提出改进方案。

(2) 若装置中仅提供一块挡光片，能否完成本实验？若能，写出实验方案；若不能，说明理由。

参考解答：能。分别将挡光片固定在6个不同位置，重复实验，得到的6组数据可以视为摆锤一次摆动过程中的结果

命题意图：在理解实验原理的基础上，设计其他实验方案。

第八章 牛顿力学的局限性与相对论初步

第一部分 整 章 分 析

学习目标

1. 知道牛顿力学的局限性。通过分析牛顿力学的局限性,对如何判断高速与低速、微观与宏观、强引力与弱引力有初步的概念,体会人类对自然界的探索是不断深入、永无止境的。
2. 初步了解相对论时空观,通过相对论的基本原理、同时的相对性等基本概念来理解相对论的时空观,知道时钟变慢、长度缩短及质能关系等狭义相对论效应;对弯曲时空有初步的了解,知道水星近日点进动、引力红移、光线偏折、引力波等广义相对论的一些重要实验验证。
3. 初步了解恒星的演化过程,知道白矮星、中子星和黑洞的一些基本性质。初步了解宇宙的演化过程,知道大爆炸理论和宇宙微波背景辐射的基本性质。关注宇宙起源和演化的研究进程,对暗物质和暗能量有所了解。

编写意图

课程标准中对本章内容的要求为:

- 2.3.1 知道牛顿力学的局限性,体会人类对自然界的探索是不断深入的。
- 2.3.2 初步了解相对论时空观。
- 2.3.3 关注宇宙起源和演化的研究进展。

本章首先通过物体在恒力作用下速度能否超过光速这个问题引出牛顿力学在高速情况下的局限性,随后讨论牛顿力学在微观领域和强引力场情况下的局限性。通过讨论让学生理解任何科学理论都有一定的局限性和适用范围,同时也体会到人类对自然界的探索和理解是不断深入的。

其次,对狭义相对论和广义相对论作了简洁的介绍,让学生初步了解相对论的基本原理和一些重要结果,了解同时的相对性、时间的相对性和长度的相对性等重要概念。这部分内容的难度相对较大。

最后介绍了恒星及宇宙的起源和演化,让学生对恒星和宇宙的起源及演化有一个初步的概念,了解我们的宇宙从何而来。

相对论是学生第一次接触现代物理学理论,涉及的新概念、新内容很多,并且与传统的观念及日常的经验有比较大的冲突,学习和理解会有一定的难度。相对论和量子力学是现代物理学的两大支柱,高中阶段进行初步的学习是十分必要的。

完成本章内容的学习,共需要 4 课时。其中,第一节 1 课时,第二节 2 课时,第三节 1 课时。

第二部分 本章教材解读



图示为位于天鹅座的双星辇道增七(Albireo)的照片。这个明亮的双星系统距离我们约380光年，约75 000年彼此绕行一周。实际上其中的黄色星本身也是一对双星，只因相距太近而难以分辨。浩瀚的星空蕴藏着无穷的奥秘，一架小小的望远镜就能让我们领略到星空无尽的魅力。极目远望，我们能看到多少颗恒星？宇宙中的恒星是有限的还是无限的？

这是位于天鹅座的双星辇道增七(Albireo)的照片。通过这张照片，不仅能让学生领略到星空的无尽魅力，同时也希望能激发学生探索宇宙、探索自然的好奇心，既脚踏实地，也仰望星空。黑格尔曾经说过，一个民族有一群仰望星空的人，他们才有希望。

第八章 牛顿力学的局限性与相对论初步

- 在本章中我们将：
 1. 知道牛顿力学的局限性，认识物理学理论的发展与适用范围，初步了解相对论的基本结论。
 2. 通过人类对宇宙天体的探索历程初步了解宇宙的起源以及恒星演化的基本观点。
 3. 体会人类对自然界的探索是不断深入、永无止境的。
- 本章的学习将用到匀速直线运动的规律和牛顿力学的基本方法。
- 本章的学习有助于现代时空观与物质观的形成。

本节编写思路

本节通过物体在恒力作用下速度能否超过光速这个问题引出牛顿力学在高速情况下的局限性，随后讨论牛顿力学在微观领域和强引力场情况下的局限性，最后讨论牛顿力学的局限性给我们的启示。

正文解读

[1] 这是一张天文台激光导星的照片。所谓激光导星，是通过发射激光来激发高层大气中的钠原子发光，产生人造星象，用来矫正地球大气扰动的影响，从而使地面望远镜获得稳定的高质量天体影像。这一技术的运用，使我们对神秘浩瀚的宇宙有了更深入的认识。而这一技术涉及的激光、原子发光等现象只能用量子力学的知识进行解释，这也是牛顿力学局限性的一个方面。

[1]



图 8-1 激光导星

第一节 牛顿力学的局限性

[2]

自 17 世纪以来，以牛顿三大定律和万有引力定律为基础的牛顿力学在解释自然界所发生的各种物理现象时都取得了极大的成功，同时，在各类工程技术中也有了广泛的应用。按照牛顿力学的观点，只要给定物体的初始条件和所受合力，就能给出物体之后运动状态的完整描述。但实际上，牛顿力学的应用有一定的局限性，或者说，有一定的适用范围。局限性主要体现在高速、微观及强引力场情况下牛顿力学不再适用。

② 在恒力作用下，物体运动速度会越来越大甚至超过光速吗？

[3]

按照牛顿第二定律，物体在恒力作用下，其加速度是恒定的，即运动速度将随时间的增加而持续增加，只要时间足够长，速度就可以任意大甚至超过光速。实际真是如此吗？我们知道，虽然牛顿力学已经在非常广泛的领域内得到了验证，但都是在低速、宏观及弱引力场情况下的验证。即使是宇宙飞船、人造卫星这样高速运动的物体，其速度也远远低于光速。在有相关实验证之前，我们并不能推断牛顿力学对高速运动依然成立。

[2] 通过之前的学习，学生已经看到牛顿力学所取得的巨大成功，往往会错误地认为，所有物理现象都能用牛顿力学来解释，只要给定物体的初始条件和所受合力，就能给出物体后续运动状态的完整描述。所以有必要在这里讨论牛顿力学的局限性，让学生明白，任何科学理论都有一定的局限性和适用范围。对牛顿力学而言，所有的验证和成功都建立在低速情况下。我们并不能因此推断牛顿力学对高速运动依然成立。这里所谓的高速或低速，是相对真空中的光速 c 而言的。

[3] 在牛顿力学中，物体速度是没有上限的，只要外力作用的时间足够长，物体的运动速度就可以任意大乃至超过光速。通过伽利略速度合成公式，也能得到超过光速的速度。需要注意的是，伽利略速度合成公式来源于伽利略变换，即伽利略力学相对性原理。

[1] 爱因斯坦在 16 岁时就问过这样简单而又深刻的问题，如果以光速追赶上一束光，将会看到什么？我们会看到静止的光吗？日常经验告诉我们，如果驾车追赶上一列火车的话，汽车速度越接近火车的速度，我们就会觉得火车越慢。如果汽车速度与火车速度相同，就会觉得火车似乎是静止的（不考虑周围环境因素）。爱因斯坦经过深入思考后认为，如果以光速追赶上一束光，应当看到一束在空间中停滞不前、静止的光，但这样又违反了麦克斯韦电磁理论，不可能出现这种情况。

[2] 示例 现代大型高能粒子加速器可以把粒子的速度加速到与光速极为接近的程度。质子质量 $m_p = 1.67 \times 10^{-27}$ kg，如果把一个质子加速到具有能量 1.60×10^{-10} J，并假定这个能量就是质子具有的动能，按照牛顿力学，质子的速度为多大？

$$\text{解: } E_k = \frac{1}{2} m_p v^2$$

$$v = \sqrt{\frac{2E_k}{m_p}} = \sqrt{\frac{2 \times 1.60 \times 10^{-10}}{1.67 \times 10^{-27}}} \text{ m/s} \approx 4.38 \times 10^8 \text{ m/s} \approx 1.46 c > c$$

由此可见，按照牛顿力学，高能质子的速度将超过光速，这个结论是错误的，到目前为止，实验上从未发现过超光速的粒子。事实上，任何粒子的速度都不可能超过光速。可见，牛顿力学在高速运动情况下不再适用。

[3] 拓展视野

在高能物理中，我们通常使用电子伏 (eV) 来衡量高能粒子的能量，它和国际单位制中能量单位 J 的换算关系为 $1 \text{ eV} = 1.60 \times 10^{-19} \text{ J}$ 。常用的单位还有兆电子伏 (MeV)、吉电子伏 (GeV) 和太电子伏 (TeV)， $1 \text{ MeV} = 10^6 \text{ eV}$ ， $1 \text{ GeV} = 10^3 \text{ MeV}$ ， $1 \text{ TeV} = 10^3 \text{ GeV}$ 。目前世界上最大的加速器——大型强子对撞机 (Large Hadron Collider, LHC) 可以将单个质子加速到 $0.999\ 999\ 99 c$ ，使之具有 7 TeV 的能量。

[4] 牛顿力学除了无法应用于高速运动的情况外，在解释其他现象时也遇到了困难。按照牛顿力学，波的传播需要介质，如声波和水波的传播。但我们知道，光可以在真空中传播。为了将光纳入牛顿力学的范畴，物理学家惠更斯 (C. Huygens, 1629—1695) 借用了古希腊学者亚里士多德提出的观点，假设了光传播所需的特殊介质——以太的存在。为了测量地球相对以太的运动，1887 年，物理学家迈克耳孙 (A. A. Michelson, 1852—1931) 和莫雷 (E. W. Morley, 1838—1923) 做了一系列精密测量的实验。结果却表明，不存在相对以太的运动，不同方向的光速没有差异，即真空中的光速在任何参考系下都具有相同的数值，与参考系的相对速度无关，以太其实并不存在。或者说，以太的引入是多余的，光可以在真空中传播。

便，也反映了质量与能量之间的内在统一。

[4] 麦克斯韦建立的电磁理论将电、光、磁统一在一个理论中，并证明光也是电磁波。所以电磁波的传播速度就是光速 c ，并且 $c = \frac{1}{\sqrt{\epsilon_0 \mu_0}}$ ，其中， ϵ_0 、 μ_0 分别是真空介电常数和真空磁导率，这是两个物理常量。由于机械波的传播需要介质，在传统观念的束缚下，为了解释光在真空中的传播，假设了一种特殊的介质即以太的存在。而为了解释观察到的物理现象，就需要赋予以太各种奇怪的性质。比如，以太充满宇宙，没有质量，绝对静止。一方面物体可以毫无阻碍地穿过以太，另一方面又要求以太有一定的刚性以支撑横波的传播。迈克耳孙和莫雷做了一系列精密的光干涉测量实验，试图找到地球相对以太的运动，结果都是否定的。爱因斯坦经过思考后发现，如果光速不随参考系改变，迈克耳孙和莫雷的实验结果就是必然的，而以太的引入则是多余的，光可以在真空中传播。

[1] 由于日常生活涉及的速度都远低于光速，爱因斯坦的“追光实验”实际上是一个思想实验。通过分析发现，因为不存在静态的电磁波，无论以多大的速度追光，都不可能追上光，即不存在静止的光。

[2] 能和光速比拟的只有高能加速器中的高能粒子，通过示例可见，按照牛顿力学，这些高能粒子的速度将会超过光速，但这是违反实验事实的，超光速粒子从未被发现过。因此，牛顿力学在高速情况下不再适用。

[3] 在高能物理中，我们通常使用 eV、MeV、GeV 等作为能量单位。由于在高能物理中常常采用所谓的自然单位制，即令 $c = \hbar = 1$ ，这样，质量、动量、能量都具有相同的单位。比如，我们可以说电子的质量为 0.51 MeV ，实际上是说电子的质量为 $0.51 \text{ MeV}/c^2$ ，这不仅给计算带来很大的方

[1] 讨论牛顿力学的局限性，不可避免地要涉及微观粒子的运动。这里只是简单提及牛顿力学不能用于讨论微观粒子的运动，选择性必修第三册会较详细地讨论微观粒子和量子力学。

[2] 牛顿力学在描述行星等天体的运动时取得了极大的成功，但实际上，牛顿力学并不能描述中子星、黑洞等强引力场天体的运动和宇宙的演化。一个天体所产生的引力场强弱可以用无量纲数 $\frac{mG}{Rc^2}$ 来描述，即引力场强弱不仅和质量有关，也和质量分布的半径有关。显然，在质量不变的情况下，地球半径越小，则表面引力加速度越大，也就意味着引力场越强。牛顿力学是广义相对论在弱引力场情况下的近似，只有广义相对论才能正确描述强引力场天体的运动和宇宙的演化。

[3] 讨论牛顿力学的局限性必须强调，尽管牛顿力学有一定的适用范围，但这并不表示牛顿力学就失去了存在的意义。在低速、宏观和弱引力场情况下，牛顿力学仍是非常精确的理论。实际上，任何理论包括牛顿力学的应用都有一定的条件和适用范围。超出了这个范围，理论就不再适用，需要寻找新的更加一般的理论。不能说广义相对论推翻了牛顿力学，量子力学推翻了牛顿力学，这些理论都是科学理论，都在一定的条件下适用。人类对自然界的探索和认识是不断深入、永无止境的。

即使是在适用范围内，牛顿力学也存在一定的局限性。开普勒定律告诉我们，地球绕太阳的公转轨道是一个椭圆，这可以用牛顿力学严格证明。但如果考虑太阳、地球和月球构成的三体系统，问题就变得异常复杂，经过 300 多年的努力，这个问题仍未得到解决。实际上，在牛顿力学框架下是无法给出三体问题的完整描述的，只能在一定的条件下给出近似解或数值解。

② 牛顿力学可以描述原子的运动吗？

[1] 牛顿力学在解释涉及原子等微观粒子的物理现象时也遇到了极大的困难。1911 年，物理学家卢瑟福（E. Rutherford, 1871—1937）提出了原子结构理论，原子是由原子核及核外电子组成的。卢瑟福的理论对原子物理和原子核物理的发展作出了极为重要的贡献，但这个理论无法解释原子的稳定性及其他很多性质。事实上，在微观领域，物理量不再是连续变化的，而是分立的。微观粒子既有粒子性，又有波动性。牛顿力学对此无能为力，只有量子力学才能正确描述原子、质子及电子等微观粒子的性质和状态，牛顿力学不再适用于微观世界。我们所熟悉的激光也是在量子理论的基础上发明出来的，激光的用途广泛，图 8-1 所示为天文台的激光导星。所谓激光导星，是通过发射激光来矫正地球大气扰动的影响，从而使地面望远镜获得稳定的高质量天体影像。

② 牛顿力学适用于所有天体吗？

[2] 一个质量为 m 、半径为 R 的天体所产生的引力场强弱通常用一个数 $\frac{mG}{Rc^2}$ 来描写，其中 G 为引力常量， c 为真空中的光速。对于地球，这个值约为 10^{-9} ，对于太阳约为 10^{-6} ，而对于中子星，这个值约为 10^{-1} ，黑洞则接近于 1。显然，这个值越小，表示引力场越弱；越接近于 1，则表示引力场越强。牛顿力学在描述行星等弱引力场天体运动方面取得了很大的成功，牛顿力学对天体运动规律的解释，不仅预言了海王星的存在和哈雷彗星的回归，并且也将地球上物体的运动规律和天体的运动规律统一起来，达到了当时科学的高峰。但随着科学的发展，我们发现牛顿力学无法正确描述中子星、黑洞等强引力场天体的运动，也不能用于描述宇宙的演化规律，即牛顿力学在强引力场情况下也不再适用。

② 牛顿力学的局限性有何启示？

[3] 牛顿力学存在局限性，或者说牛顿力学的应用有一定的限制范围，但这并不表示牛顿力学就失去了存在的意义。在低速、宏观和弱引力场情况下，牛顿力学仍是非常精确的理论。实际上，任何理论包括牛顿力学的应用，都有一定的条件和适用范围。超出了这个范围，理论就不再适用，需要寻找新的更加一般的理论。一般来说，新的理论并不会完全否定原有理论，而是将原有理论作为新理论的一个特殊情况，或者说，原有理论是新理论的一个近似。

从物理学的发展历史可以看到，人类对自然界的探索是不断深入的，从简单到复杂，从特殊到一般，从零散到整体，从表象到本质，每一次新现象的发现，每一个新理论的建立，都使我们对自然界的认识更全面、更准确、更深入。人类对科学的探索是永无止境的。

问题与思考解读

问题与思考

1. 下列物理现象中，哪些可以在牛顿力学的框架下得到解释？哪些不能在牛顿力学的框架下得到解释？试简述理由。
(1) 地球绕太阳公转；(2) 量子通信；(3) 引力波；(4) 加速器中高能粒子的运动；
(5) 激光。
2. 计算表 8-1 中物体运动速度的速度比 $\frac{v}{c}$ 及因子 $\gamma = \frac{1}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}}$ 。
表 8-1

运动物体	步行的人	奔跑中的短跑运动员	高铁	卫星	从地球逃逸的卫星	加速器中的高能粒子
速度 v	5 km/h	10 m/s	300 km/h	3.08 km/s	11.2 km/s	0.999 9 c

3. 北京正负电子对撞机是我国第一台高能加速器，可以将电子能量加速到 $3.52 \times 10^{-10} \text{ J}$ (2.2 GeV)。按照牛顿力学，这个电子的速度是多大？这种情况下，牛顿力学是否适用？为什么？
4. 对于质量为 1.4 倍太阳质量、半径与地球相同的白矮星，计算它的 $\frac{mG}{Rc^2}$ 。你认为牛顿力学可以正确描写白矮星的运动吗？简述理由。(太阳质量 $m_{\odot} = 1.989 \times 10^{30} \text{ kg}$ ，引力常量 $G = 6.67 \times 10^{-11} \text{ N} \cdot \text{m}^2/\text{kg}^2$ ，地球半径 $r_{\oplus} = 6.371 \times 10^6 \text{ m}$ ，光速 $c = 3.0 \times 10^8 \text{ m/s}$)
5. 牛顿力学的局限性体现在哪些方面？

1. 参考解答：日常生活所涉及的现象都是在低速、宏观和弱引力场的情况下发生的，牛顿力学能够对这些现象做出很好的解释。牛顿力学无法解释的物理现象一定是和高速、微观粒子及强引力场有关的现象。所以，(1)可以在牛顿力学框架下得到解释；(2)和(5)涉及量子力学，(3)涉及强引力场，(4)涉及高速运动，都不能在牛顿力学框架下得到解释

命题意图：将牛顿力学的局限性与具体问题或现象联系起来，能做出基本判断。

主要素养与水平：科学推理(I)；解释(I)；科学本质(I)。

2. 参考解答：见下表

运动物体	步行的人	奔跑中的短跑运动员	高铁	卫星	从地球逃逸的卫星	加速器中的高能粒子
速度 v	5 km/h	10 m/s	300 km/h	3.08 km/s	11.2 km/s	0.999 9 c
$\frac{v}{c}$	4.6×10^{-9}	3.3×10^{-8}	2.8×10^{-7}	1.03×10^{-5}	3.73×10^{-5}	0.999 9
γ	$1 + 1.1 \times 10^{-17}$	$1 + 5.4 \times 10^{-16}$	$1 + 3.9 \times 10^{-14}$	$1 + 5.3 \times 10^{-11}$	$1 + 6.99 \times 10^{-10}$	70.71

命题意图：对常见物体运动速度与光速之比及 γ 值大小有个数量级的概念。因子 γ 反映了相对论效应的大小， $\gamma=1$ 即表示没有相对论效应。由表中数据可见，即使是卫星、火箭等，速度也是远低于光速， γ

几乎等于 1,牛顿力学完全可以适用于这些情况。只有高能加速器中的高能粒子才具有与光速可比拟的速度。

主要素养与水平: 运动与相互作用(I)。

3. 参考解答: 按照牛顿力学,可以认为电子的能量就是动能,因此有

$$E_k = \frac{1}{2} m_e v^2 \rightarrow v = \sqrt{\frac{2E_k}{m_e}} = \sqrt{\frac{2 \times 3.52 \times 10^{-10}}{9.11 \times 10^{-31}}} \text{ m/s} \approx 2.78 \times 10^{10} \text{ m/s} \approx 92.7c$$

这个速度远大于光速,这是不可能的,因此牛顿力学并不适用于高能加速器中粒子的运动

命题意图: 通过实例计算说明牛顿力学不适用于高能粒子运动。

主要素养与水平: 运动与相互作用(I)。

4. 参考解答: $\frac{mG}{Rc^2} = \frac{1.4 \times 1.989 \times 10^{30} \times 6.67 \times 10^{-11}}{6.371 \times 10^6 \times (3 \times 10^8)^2} \approx 3.24 \times 10^{-4}$, 这个值远小于 1, 不属于强引

力场,因此牛顿力学可以正确描述白矮星的运动

命题意图: 通过实例计算说明白矮星的引力场虽然比地球大得多,但仍可用牛顿力学描写。

主要素养与水平: 科学推理(I);解释(I);科学本质(I)。

5. 参考解答: 牛顿力学的局限性体现在三个方面,即对于高速(接近光速)运动、微观粒子(原子、原子核、质子、电子等)及强引力场(中子星、黑洞等)不再适用,无法正确描述这些物理现象

命题意图: 对牛顿力学的局限性进行小结。

主要素养与水平: 科学论证(I);解释(I);科学本质(I)。

[1]

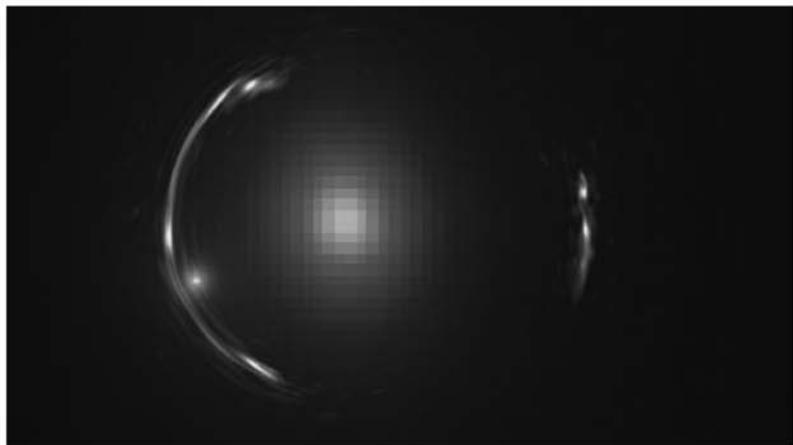


图 8-2 爱因斯坦环

第二节 相对论初步

[2] 19世纪末，以牛顿力学、热力学和统计物理以及电磁理论为支柱的经典物理学已经形成完整的科学体系，自然界的各种物理现象几乎都能在这一理论框架下得到解释。1900年，物理学家开尔文勋爵，即W.汤姆孙（W. Thomson, 1824—1907）在回顾了物理学所取得的伟大成就之后，充满自信地宣称，物理学的大厦已经基本完成，剩下的只是一些修饰工作。但他在展望20世纪物理学前景时也承认，明朗的天空中还有两朵小小的、令人不安的乌云。正是这两朵乌云，引发了现代物理学的伟大革命，导致了相对论和量子力学的诞生。

② 光速是有限的吗？

[3] 我们知道，真空中的光速 $c = 299\,792\,458 \text{ m/s}$ ，但一直到17世纪，科学界对光速是否有限还是有争议的，甚至当时的一些著名学者都认为光速是无限的，光的传播不需要时间。伽利略曾提出过测量光速的设想，如图8-3所示，两个人分别站在相距数千米的山头，第一个人举起灯笼并开始计时，当第二个人看到第一个人的灯笼后立即举起自己的灯



图 8-3 伽利略设想的光速测量示意图

立，但同时，黑体辐射问题和迈克耳孙-莫雷实验也在困扰着物理学家。正是这两朵小小的乌云，引发了20世纪现代物理学的伟大革命，导致了相对论和量子力学的诞生。

迈克耳孙-莫雷实验的目的是寻找以太存在的证据。但实验结果表明，不存在相对以太的运动。不同方向的光速没有差异，即真空中的光速在任何参考系下都具有相同的数值，与参考系的相对速度无关。以太其实并不存在。迈克耳孙-莫雷的实验结果与经典物理的观念有很大的冲突。需要思考如下的问题：光是否可以在真空中传播？相对性原理对光是否成立？伽利略速度合成公式对光是否成立？

[3] 认识到光速的有限性是科学上很重要的进步。如果光速无限大，显然就没有相对论了。伽利略第一个认识到光速是有限的，并最早开始尝试测量光速。显然，以当时的测量精度，用伽利略的方法是不可能测出光速的。

本节编写思路

本节从光速是否有限引出狭义相对论的基本原理，通过相对论的基本原理、同时的相对性等基本概念理解相对论的时空观，随后介绍时钟变慢等狭义相对论效应；通过对引力作用方式的描述初步了解弯曲时空，最后介绍水星近日点进动等广义相对论的一些重要实验验证。

正文解读

[1] 爱因斯坦环中的蓝色像为一个质量巨大的星系，起到引力透镜的作用，红色环为一个被蓝色巨星系遮挡的星系由于光线偏折而被观测到的部分。具体会在广义相对论的实验验证部分加以说明。

[2] 19世纪末，以牛顿力学、热力学和统计物理以及麦克斯韦电磁理论为支柱的经典物理学体系已经基本建

[1] 罗默通过对“木卫一”的观测给出了光速测量的结果。虽然误差较大，但却是第一个光速测量的结果，实际上利用罗默的方法可以得到非常精确的结果。之后布莱德雷利用光行差法，菲索利用旋转齿轮法，傅科利用旋转镜面法等，测得了更精确的结果。现代物理利用谐振腔、激光、干涉等方法测量光速，精度大大提高。利用家用微波炉（工作频率 2 450 MHz）也能测得光速。将一块巧克力放在微波炉中加热数十秒后，测出两个相邻熔化点之间的距离，这就是微波的半个波长。将波长（即所测距离的两倍）和微波频率相乘即可得出光速。

1983 年，第十七届国际计量大会作出决定，将真空中的光速 $c = 299\ 792\ 458 \text{ m/s}$ 定为精确值，而将 1 m 定义为光在真空中于

$\frac{1}{299\ 792\ 458} \text{ s}$ 内行进的距离。

[2] 相对性原理是物理学的一个重要原理，体现了物理学规律普适性的思想。不同的惯性系之间是平权的，不存在特殊的惯性系，物理规律在不同的惯性系具有相同的形式。爱因斯坦为了解决 20 世纪初经典物理学的困境，打破了传统观念的桎梏，将伽利略的力学相对性原理推广到所有物理规律，包括电磁规律，认为所有物理规律在不同的惯性系都具有相同的形式。爱因斯坦在相对性原理和光速不变原理基础上建立的狭义相对论，不仅驱散了乌云，也形成了对时空观念全新的认识。

从狭义相对论的两条基本原理出发，可以导出两个惯性系之间的变换，即洛伦兹变换（见节后资料链接）。从洛伦兹变换可以很容易得出同时的相对性、时间膨胀及长度缩短的结论。显然，当 $v \ll c$ 时就回到伽利略变换。洛伦兹变换给出的是时间和空间的变换，时间和空间不再是独立的，而是一个整体，我们将时间和空间统称为四维时空。因此，洛伦兹变换实际上是四维时空的变换。

笼，当第一个人看到第二个人的灯笼后便停止计时，以此来计算出光的速度。

可以想象，以当时的测量精度，这个实验是不可能完成的，因为光传播 3 km 的距离只需要约 $10 \mu\text{s}$ 的时间。1676 年，丹麦天文学家罗默（O. C. Romer, 1644—1710）通过对

[1] “木卫一”的观测，首次计算出光速为 $2.2 \times 10^8 \text{ m/s}$ ，这个数值虽然误差较大，但已经是一个很了不起的结果，第一次证明了光速是有限的。19 世纪，法国物理学家菲索（A. H. L. Fizeau, 1819—1896）和傅科（J. B. L. Foucault, 1819—1868）分别用旋转齿轮和旋转镜面法对光速进行了测量，得到了相当精确的结果。

② 什么是相对性原理？

[2] 我们知道，牛顿运动定律成立的参考系称为惯性系，而相对惯性系做匀速直线运动的参考系也是惯性系。伽利略相对性原理告诉我们，力学规律在任何惯性系中都具有相同的形式。伽利略早在 1632 年就指出，在一艘行驶平稳的大船里，无法通过密闭船舱内的力学实验来判断大船是否在行驶。但相对性原理能推广到所有物理规律吗？

英国物理学家麦克斯韦（J. C. Maxwell, 1831—1879）在 1864 年证明光是电磁波，在真空中的传播速度就是光速 c ，且不涉及具体的参考系。那么，光速在哪个参考系正好等于 c ？如果在 S 参考系等于 c ，那么在另一个以速度 v 相对 S 参考系做匀速直线运动的 S' 参考系中，是否还等于 c （图 8-4）？

如果认为光在所有惯性系中的速度都是 c ，那就违反了基于伽利略相对性原理得到的速度合成公式，也就违反了伽利略相对性原理；如果认为伽利略相对性原理对光也成立，满足速度合成公式，那么光应该只在一个特殊的惯性系中速度为 c 。但这样又说明光速不是在所有惯性系中都等于 c ，实际上也违反了相对性原理。物理学家们陷入了两难境地。

为了解决这个问题，爱因斯坦（图 8-5）抛弃了传统的思维方式，另辟蹊径，在 1905 年提出了两条基本原理，从而建立了一个全新的理论——狭义相对论。这两条原理可以表述如下：

相对性原理：物理规律包括电磁规律，在所有惯性系中都具有相同的形式。

光速不变原理：真空中的光速在所有惯性系中都是相同的，与光源和观测者的速度无关。

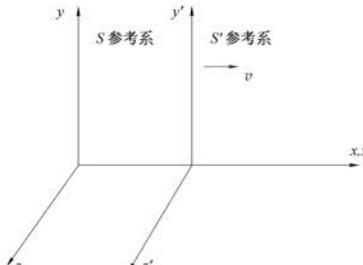


图 8-4 互相做匀速直线运动的参考系

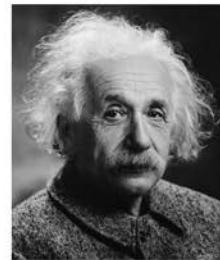


图 8-5 爱因斯坦

[1]

大家谈

牛顿的时空观认为，空间就是一个可以容纳一切物体而又广阔无边的无限大的箱子，时间则是均匀流逝的长河；没有起点，也没有终点。物体在空间中运动，时间则标记物体运动的延续性。但物体的运动并不会影响时间和空间的性质。你是怎么理解时间和空间的呢？

[2]

在狭义相对论中，时间和空间不再是绝对的，而是统一在一个四维时空之中。爱因斯坦相对论的建立，给物理学带来了革命性的变化，彻底抛弃了牛顿的绝对时空观，建立了全新的相对论时空观，对现代科学的发展具有深远的意义。

作为狭义相对论两个基本原理的直接推论，就是同时的相对性，即在一个参考系中同时发生的事件，在另一个参考系中不再同时。假设一列高铁沿直线轨道以匀速 v 向右运动，车厢中央的光源在时刻 $t=0$ 发出一个闪光，如果车厢长度为 $2L$ ，则经过时间 $\frac{L}{c}$ 后闪光分别到达车厢的前壁和后壁。对于车厢里的观察者来说，车厢是惯性系，光向前及向后的传播速度相同，传播的距离相同，因此闪光同时到达车厢的前壁及后壁，即这两个事件对车上的观察者来说是同时发生的（图 8-6）。

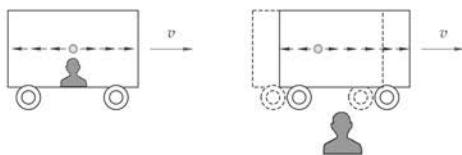


图 8-6 同时的相对性

但地面上的观察者不这么认为，因为当闪光向车厢前壁传播时，车厢也在以速度 v 向前运动，因此，闪光到达前壁的距离要比到达后壁的距离长一些，而光速是不变的，所以在地面上的观察者看来，闪光先到达车厢后壁，后到达车厢前壁。即对地面上的观察者而言，这两个事件不是同时发生的。

[3]

大家谈

如果有另一列高铁以匀速 v 向左运动，那么这列高铁上的观察者认为第一列高铁上闪光到达车厢前、后壁是同时的，还是不同的？如果不是同时的，哪个先发生？如果第一列高铁是静止的，情况又如何？

那么，两个事件发生的顺序有没有可能在不同参考系是相反的呢？实际上，洛伦兹变换保证了所谓的四维间隔是一个不变量，即在不同的惯性系，间隔平方 $S^2 = (x_2 - x_1)^2 + (y_2 - y_1)^2 + (z_2 - z_1)^2 - c^2(t_2 - t_1)^2$ 是一个不变量。 $S^2 < 0$ 的间隔称为类时间隔， $S^2 > 0$ 称为类空间隔， $S^2 = 0$ 则称为类光间隔。由于信号的传递速度不能超过光速，两个具有因果关系的事件一定是类时间隔。对于类时间隔，两个事件发生的顺序在不同的惯性系都是相同的，不会颠倒。而对于类空间隔，两个事件发生的顺序在不同惯性系有可能是相反的。但因为类空间隔的两个事件没有因果关系，即使发生的顺序相反，也不会有任何矛盾。

[3] “大家谈”参考解答：第一列高铁以匀速 v 向右运动，第二列高铁以匀速 v 向左运动或者静止，那么在第二列高铁上的观察者看来，第一列高铁都是以一定速度向右运动，所以结论不变，即第一列高铁车厢中央发出的闪光先到达车厢后壁，后到达车厢前壁。

[1] “大家谈”参考解答：现代物理学认为，时间和空间是不可分割的整体，时间和空间构成四维时空。时空的性质与物质分布和物质运动密切相关。

[2] 由洛伦兹变换公式容易得到 $t_2 - t_1 = \frac{v(x'_2 - x'_1)}{c^2} / \sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}$ 。

因此，在 S' 系中同时 ($t'_2 = t'_1$) 发生的两个事件，在 S 系中就不是同时的 ($t_2 \neq t_1$)，即同时是相对的。

两个不同地点在时间上的同时，并不是一个简单的问题，涉及如何使两地的钟同步或校准的问题。爱因斯坦敏锐地发现，只要认为光速不变，利用光信号就可以解决所有惯性系的钟同步问题。

而在一个惯性系中校准同步的两个钟，在另一个惯性系中则一般是不同的。这就是相对论中同时的相对性的来源。

[1] 对同一地点先后发生的两个事件有

$$t_2 - t_1 = \frac{t'_2 - t'_1}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}}.$$

因此，在 S' 系中，在同一地点($x'_2 = x'_1$)先后发生的两个事件的时间间隔在不同的参考系也是不同的，即运动的钟会变慢。

运动的钟变慢并不是钟出了问题，而是由相对论的时空性质导致的结果。因此，时间膨胀或钟慢效应也是相对的，两个互相做匀速直线运动的参考系上的观测者都认为对方的钟变慢了。

如果有一对孪生子，甲留在地球上，乙乘坐接近光速的飞船离开地球到太空旅行几十年后再回到地球，那么按照相对论，究竟谁更年轻呢？因为甲留在地球上，乙随着飞船做高速运动，所以回到地球后乙比甲年轻。但从运动的相对性来看，乙也可

以认为自己在飞船内静止，甲随着地球做高速运动，所以应当甲比乙年轻。这里似乎存在悖论。

但实际上，甲、乙之间并不是对等的，甲所在的地球可以近似看成惯性系，而乙所在的飞船要经历起飞加速、匀速飞行、减速掉头再加速、匀速飞行、最后减速降落的过程，并不是惯性系。如果忽略加速和减速的过程（假定时间较短），飞船绝大部分时间都是在匀速飞行，可以看成惯性系，那么离开地球和返回地球的旅程也必然是两个不同的惯性系。考虑到这一点，可以证明，无论是以甲为参考系还是以乙为参考系，当乙乘坐飞船完成太空旅行后回到地球，都将会比甲年轻，悖论并不存在。

这个结论与我们头脑中的固有观念是冲突的，我们的直觉认为，如果两个事件在一个参考系中是同时的，那在其他参考系中也一定是同时的，这似乎是天经地义的。但如果我们承认爱因斯坦的两条基本原理，则同时的相对性就是自然的结论。但为什么日常生活中我们觉察不到这种相对性？那是因为日常生活中涉及的速度都远远小于光速，这一差异我们是感觉不到的。

牛顿力学认为，两个先后发生的事件，在不同惯性系中观察到的时间间隔都是相同的。但在狭义相对论看来，不同惯性系观察到的时间间隔是不同的（图8-7）。假设一列

[1] 高铁沿直线轨道以匀速 v 向右运动，车厢地板上一个光源向上发出一个闪光，被车厢顶部的反射镜反射回车厢地板，并用一个钟记录下光脉冲来回运动经历的时间。假设车厢高度为 h ，因为光速为 c ，所以车厢里的观察者看到的时间间隔为 $\Delta t' = \frac{2h}{c}$ 。但在地面上的观察者看来，当光脉冲向上传播和返回时，车厢同时在以匀速 v 向右运动，因此光脉冲的路径是等腰三角形的两条斜边，如果光脉冲来回的时间间隔是 Δt ，则有

$$\Delta t = \frac{2}{c} \sqrt{h^2 + \left(\frac{v\Delta t'}{2}\right)^2}$$

消去 h 后可得

$$\Delta t = \frac{\Delta t'}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}} = \gamma \Delta t'$$

其中 $\gamma = \frac{1}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}}$ ，因为 $v < c$ ，所以因子 $\gamma > 1$ ，故 $\Delta t > \Delta t'$ 。

即在惯性系中，运动的钟（即高铁上的钟）比静止的钟要走得慢。这个结论称为狭义相对论的时间膨胀或钟慢效应，这体现了时间的相对性。我们把在自身静止的参考系内测得的时间称为固有时。显然，固有时的时间间隔是最短的。

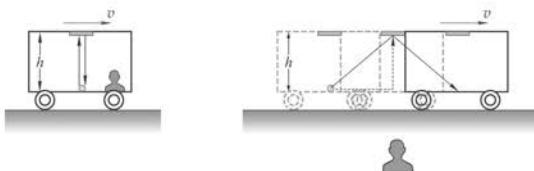


图8-7 时间的相对性

拓展视野

对于速度 $v_1 = 300 \text{ km/h}$ 的高铁、速度 $v_2 = 7.9 \text{ km/s}$ 的近地卫星和速度 $v_3 = 0.999 c$ 的高能粒子，计算各自的时间膨胀效应有多大。由 γ 的表达式得

$$\begin{aligned}\gamma_1 &= \frac{1}{\sqrt{1 - \frac{v_1^2}{c^2}}} = \frac{1}{\sqrt{1 - \frac{(300 \times 10^3)^2}{299792458^2}}} \approx 1 + 3.9 \times 10^{-14} \\ \gamma_2 &= \frac{1}{\sqrt{1 - \frac{v_2^2}{c^2}}} = \frac{1}{\sqrt{1 - \frac{(7.9 \times 10^3)^2}{299792458^2}}} \approx 1 + 3.5 \times 10^{-10} \\ \gamma_3 &= \frac{1}{\sqrt{1 - \frac{v_3^2}{c^2}}} = \frac{1}{\sqrt{1 - 0.999^2}} \approx 22.37\end{aligned}$$

可见，即使是像卫星这样的高速运动物体，时间膨胀效应也是微乎其微的，只有接近光速的高能粒子才会有显著的时间膨胀效应。

必须指出，时间膨胀或钟慢效应并不是钟出了问题，而是由狭义相对论的时空性质导致的。一个静止的观察者会发现匀速运动参考系中所有的物理过程都变缓了，甚至生命进程也变缓了。而在这个运动参考系中的观察者却认为一切正常，并不觉得自己看到的一切在变缓。由于运动是相对的，两个互相做相对运动的参考系中的观察者会认为对方的钟都在变慢。

物体长度的测量和同时性密切相关，如果要测量一个直杆的长度，在相对直杆静止的参考系内，只需测出直杆两端的位置然后求出位置的差即可。因为直杆是静止的，所以两端位置的测量并不要求是同时的。但如果直杆是运动的，要测出直杆的长度，就必须同时测出两端的位置，否则测出的就不是直杆的长度了。既然同时性是相对的，那么长度的测量也一定是相对的。根据同时的相对性可以得出

[1]

$$L = L_0 \sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}} < L_0$$

其中 L 为地面观察者测得的直杆长度， L_0 为在相对直杆静止的参考系内测得的长度，称为固有长度。因此，狭义相对论告诉我们，物体沿运动方向的长度会缩短，这个结果称为狭义相对论的长度收缩或尺缩效应，这就是长度的相对性。

列车。但是，在列车上的观测者看来，隧道比列车短，任何时刻列车都不可能完全在隧道内，似乎总有一块石头会砸到列车。仔细分析可以发现，隧道内的观测者认为同时掉下的石头，在列车上的观测者看来并不是同时掉下的，而是当车头还未出隧道时出口上方先掉第一块，车尾进入隧道后入口上方再掉第二块，所以石头同样没有砸到列车（为了简化，此处不考虑石头下落速度和掉入铁轨的问题），即隧道内的观测者和列车上的观测者对于石头是否砸到列车的结论是一致的，同样不存在悖论。

[1] 由洛伦兹变换

可得 $x'_2 - x'_1 =$

$$\frac{x_2 - x_1 - v(t_2 - t_1)}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}}.$$

测量长度要求同时测定两端坐标，即 $t_2 = t_1$ ，因此得到 $x_2 - x_1 =$

$$(x'_2 - x'_1) \sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}$$

$$\rightarrow L = L_0 \sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}},$$

即长度收缩。

相对论的长度收缩也不是因为物体内部结构发生变化造成的，同样是由相对论的时空性质导致的结果。长度收缩也是相对的，高速列车经过隧道时，列车上的观测者认为隧道缩短了，而隧道内的观测者则认为是列车缩短了。

假定高速列车和隧道的静止长度相同，当列车通过隧道时，隧道内的观测者发现当列车完全在隧道内时，隧道两端正好同时掉下两块石头，因为列车比隧道短，所以石头没有砸到

拓展视野

可以这样考虑来测量直杆的长度。如图 8-8 所示，在直杆的一端装上激光发射器和接收器，另一端装上反射镜。当发射器发出激光被反射镜反射回接收器，记录下激光往返的时间间隔，即可得到直杆的长度。在直杆静止的参考系内，如果激光往返的时间间隔为 $\Delta t'$ ，则直杆的长度为

$$L' = L_0 = \frac{c\Delta t'}{2}$$

其中 L_0 为固有长度。假设直杆所在的参考系相对地面观察者以匀速 v 向右运动，如果地面观察者测得的直杆长度为 L ，设激光从直杆左端发出到达反射镜的时间为 Δt_1 ，因为在这段时间内直杆向前运动了 $v\Delta t_1$ 的距离，因此有

$$c\Delta t_1 = L + v\Delta t_1$$

$$\Delta t_1 = \frac{L}{c-v}$$

同理，设激光从反射镜返回接收器的时间间隔为 Δt_2 ，在这段时间内直杆向前运动了 $v\Delta t_2$ 的距离，因此有

$$c\Delta t_2 = L - v\Delta t_2$$

$$\Delta t_2 = \frac{L}{c+v}$$

因此，地面观察者测得总的时间间隔为

$$\Delta t = \Delta t_1 + \Delta t_2 = \frac{L}{c-v} + \frac{L}{c+v} = \frac{2L}{c\left(1 - \frac{v^2}{c^2}\right)}$$

注意到 Δt 是地面观测者测得的激光从发出到接收的时间间隔， $\Delta t'$ 是相对直杆静止的观测者测得的相应的时间间隔。根据前面讨论的时间的相对性，两者满足关系

$$\Delta t' = \Delta t \sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}$$

将这个关系代入上式并与固有长度的表达式比较，即可得到

$$L = \frac{c}{2} \Delta t \left(1 - \frac{v^2}{c^2}\right) = \frac{c}{2} \Delta t' \sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}} = L_0 \sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}$$

因为 $\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}} < 1$ ，所以 $L < L_0$ ，即运动的物体沿运动方向的长度会缩短。

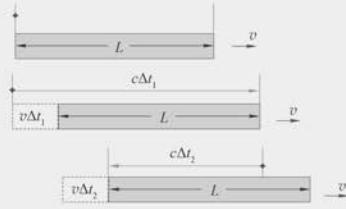


图 8-8 长度的相对性

应当指出，长度收缩也是相对的，一列高铁过桥时，桥上的观察者认为高铁变短了，而高铁上的观察者认为是桥变短了。另外，长度收缩只发生在平行于运动的方向上，垂直于运动方向的长度没有收缩。

拓展视野

自然界中的 μ 子来源于宇宙线，是一种不稳定的粒子，产生后很快就衰变成电子和中微子，平均寿命为 $\Delta t' = 2 \times 10^{-6}$ s，如果不考虑相对论效应，即使以光速运动，也不可能穿越厚度为 $L_0 = 9500$ m的大气层被地面的探测器探测到，但事实上，地面的实验室确实观察到了穿越大气层到达地面实验室的 μ 子。下面我们就来分析为何 μ 子可以到达地面。

设 μ 子的速度为 $v = 0.998 c$ ，一方面，在 μ 子看来，大气层是以速度 $-v$ 在运动，由于长度收缩，厚度变为

$$L = L_0 \sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}} = 9500 \times \sqrt{1 - 0.998^2} \text{ m} \approx 600 \text{ m}$$

而在其平均寿命内可以飞行的距离为

$$v\Delta t' = 0.998 \times 299792458 \times 2 \times 10^{-6} \text{ m} \approx 600 \text{ m}$$

另一方面，在地面观察者看来，由于时间膨胀， μ 子的寿命应当是

$$\Delta t = \frac{\Delta t'}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}} = \frac{2 \times 10^{-6}}{\sqrt{1 - 0.998^2}} \text{ s} \approx 3.16 \times 10^{-5} \text{ s}$$

因此，通过的距离为

$$v\Delta t = 0.998 \times 299792458 \times 3.16 \times 10^{-5} \text{ m} \approx 9500 \text{ m}$$

可见，无论从哪个角度看， μ 子都可以在衰变之前到达地面。

牛顿力学经过修改后可以改写成相对论力学，即符合狭义相对论的形式，但质量的定义要修改为

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

m 称为物体的运动质量，而 m_0 则称为物体的静止质量，即物体在自身静止的参考系中的质量。由上式可见，物体的运动速度越大，相应的运动质量也就越大，并且任何静止质量不为零的物体其运动速度都不可能等于或大于光速，否则运动质量将变成虚数或无限大，这是没有意义的。同时也可以看到，通过外力作用将物体加速到光速也是不可能实现的。

此即爱因斯坦质能关系或质能方程，这表示物体具有一定的质量也就具有与之相联系的一定的能量。质能关系是核能开发利用的理论基础。

由质能关系和动量定义可得

$$E^2 = m^2 c^4 = \frac{m_0^2 c^4}{1 - \frac{v^2}{c^2}} = \frac{m_0^2 c^4 \left(1 - \frac{v^2}{c^2} + \frac{v^2}{c^2}\right)}{1 - \frac{v^2}{c^2}} = \frac{m_0^2 c^2 v^2}{1 - \frac{v^2}{c^2}} + m_0^2 c^4 = p^2 c^2 + m_0^2 c^4$$

这是相对论性的能量动量关系，这与非相对论的能量动量关系 $E = \frac{p^2}{2m}$ 很不一样。在相对论情况下，能量守恒和动量守恒依然成立。显然，当 $v \ll c$ 时就回到通常的表达式。

[1] 牛顿力学是非相对论的，但经过修改后可以改写成相对论的形式，即相对论力学

$$\mathbf{F} = \frac{d\mathbf{p}}{dt}$$

其中， \mathbf{F} 是物体受到的作用力， \mathbf{p} 为物体的动量，定义为

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

其中， \mathbf{v} 为物体运动的速度， $m = \frac{m_0}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}}$ 称

为物体的运动质量， m_0 称为静止质量，即物体在自身静止的参考系中的质量。如果将初始静止的物体由于外力对其做功获得的能量定义为该物体的动能，则可以推出（见节后资料链接）

$$\begin{aligned} E_k &= \int_0^v \mathbf{F} \cdot d\mathbf{r} \\ &= \frac{m_0 c^2}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}} - m_0 c^2 \\ &= mc^2 - m_0 c^2 \end{aligned}$$

其中， $m_0 c^2$ 是物体静止时具有的能量，称为静能，而

$$E = mc^2 = E_k + m_0 c^2$$

为物体具有的总能量，

[1] 狹义相对论建立后,爱因斯坦一直在思考如何突破惯性系的限制。事实上,严格的惯性系并不存在,地球只是近似的惯性系。爱因斯坦认为,不应该有特殊的参考系,所有的参考系都应该是平权的。由此,爱因斯坦把狭义相对性原理推广为广义相对性原理:物理规律在任何参考系中都具有相同的形式。

爱因斯坦通过电梯思想实验发现,一个自由下降的密闭电梯轿厢内的观测者无法判断自己是在做匀加速运动还是静止在一个均匀引力场中,也就是说,加速运动与引力场等效。根据这一事实,爱因斯坦提出了广义相对论的另一个重要原理,即等效原理:一个均匀的引力场与一个做匀加速运动的参考系等价,或者说,无法通过在密闭箱子内的实验来判断系统是静止在引力场中还是在无引力场情况下做加速运动。

从这两条基本原理出发,爱因斯坦在1915年建立了一个全新的理论,即广义相对论。广义相对论是狭义相对论的推广,也是牛顿引力理论的推广,是我们理解天体物理和宇宙学的重要理论基础。

爱因斯坦在1915年建立广义相对论后提出了三大经典验证,即水星公转轨道的近日点进动、光在引力场中的偏折和引力红移。这三大实验与20世纪60年代的雷达回波延迟实验、21世纪的引力探测器B(GP-B)和引力波的探测等实验,都在很高的精度上与广义相对论的预言一致。

[2] 水星近日点进动的实际观测值为每世纪5 600.73",考虑到地轴进动以及金星、地球和木星等行星的影响,牛顿力学给出的水星进动值为每世纪5 557.62",两者相差为43.11"。而广义相对论对水星轨道的计算给出的进动修正值恰为43.03",与观测非常一致,成功地解释了水星近日点的进动,这个进动的修正值完全是由空间弯曲造成的。

进一步可以推出狭义相对论的另一个重要结论,就是爱因斯坦质能关系

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

即一定质量的物质就具有与之相当的一定的能量。由于光速高达 3×10^8 m/s,由质能关系可知,即使是1 g的物质也蕴藏着巨大的能量。爱因斯坦的质能关系是核能开发利用的理论基础,人类从此就进入了核能利用的新时代。

② 什么是等效原理?

[1] 我们在日常生活中都有这样的经验,乘电梯时如果电梯加速下降,我们会有失重的感觉,当电梯加速上升时又会有超重的感觉。可以想象一下,如果电梯是在地球的引力场中做自由落体运动,那电梯里的人会有什么感觉呢?如果电梯是在空无一物的太空做加速运动,那电梯里的人又会有什么感觉呢?

爱因斯坦根据这一事实,提出了广义相对论的第一个基本原理,即等效原理:一个均匀引力场与一个做匀加速运动的参考系等价,或者说,无法通过在密闭箱子内的实验来判断系统是静止在引力场中还是在无引力场情况下做加速运动。

爱因斯坦同时认为,不应该存在特殊的参考系,所有参考系都应该是等价的。由此爱因斯坦提出了广义相对论的另一个基本原理,即广义相对性原理:物理规律在任何参考系中都具有相同的形式。

从这两条基本原理出发,爱因斯坦在1915年建立了一个全新的理论——广义相对论。

广义相对论是狭义相对论的推广,也是牛顿引力理论的推广,是我们理解天体物理和宇宙学的重要理论基础。在广义相对论中,物体之间的万有引力不再是超距作用,而是时空弯曲的结果。即物质分布导致时空弯曲,物体又在弯曲的时空中运动。我们可以用弹性膜上的重球(图8-9)来形象地理解物质与时空的关系。美国物理学家惠勒(J. A. Wheeler, 1911—2008)对此曾有一个形象的说法:物质告诉时空如何弯曲,时空告诉物质如何运动。

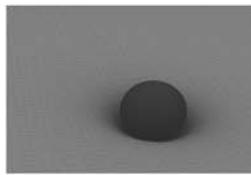


图8-9 弹性膜上的球

广义相对论自从1915年建立以来,已经被大量的实验和观测所证实。水星公转轨道的近日点进动,光经过太阳等大质量天体时的偏折,引力场中的谱线红移和时钟变慢以及引力波的辐射等,都以极高的精度和广义相对论的预言一致。

[2] 行星绕太阳的公转轨道是一个椭圆,但观测发现,行星公转一周后近日点较之前的位置会有一个偏离,这个现象称为行星公转轨道的近日点进动(图8-10)。水星的轨道进动值相对较大,其中大部分可以由牛顿力学给予解释,但还剩余一部分,即每世纪43"的进动

值无法解释。而广义相对论对水星轨道的计算给出的这个进动值恰为 $43.03''$ ，与观测值非常一致，成功地解释了水星近日点的进动，这个进动完全是由空间弯曲造成的。

按照广义相对论，光在引力场中并不是沿着直线传播，而是沿着所谓测地线行进。如果附近没有大质量天体，测地线就是直线；而当光掠过大质量天体时会发生偏折（图8-11）。根据广义相对论的计算，光掠过太阳时会发生 $1.75''$ 的偏折。实际上，如果把光看成光子，牛顿力学也同样可以得出光经过太阳时会有一个偏折，

[1] 但偏折的角度只有广义相对论预言的一半。1919年，英国天文学家爱丁顿（A. S. Eddington, 1882—1944）利用日全食对光经过太阳时的偏折进行了观测，基本证实了广义相对论的预言，以后又进行了多次更高精度的测量，完全验证了广义相对论的预言。正是由于这个原因，当遥远天体发出的光经过大质量天体时，光线发生偏折。我们不仅能观察到被大质量天体遮挡的遥远天体，而且还能看到被遮挡的天体形成的多个像，甚至看到如图8-2所示的环状，这个环就被称为爱因斯坦环。

正如运动的钟会变慢一样，根据广义相对论，引力场中的钟也会变慢，引力场越强，钟慢效应就越显著。即地面的钟比高空的钟要走得慢。1971年，物理学家哈菲勒（J. C. Hafele, 1933—2014）和基廷（R. E. Keating, 1941—2006）将铯原子钟由民航飞机携带，在万米高空沿赤道环绕地球飞行。实验结果与广义相对论的预言符合极好。从另一方面来说，引力场发出的光被远处的观测者接收时波长会变长，也就是会发生引力红移，引力场越强，红移越大。引力红移效应最早在白矮星的观测中得到验证，之后又进行了更多的精确测量，完全证实了广义相对论的引力红移效应。

拓展视野

[3] 光子的能量可以写成 $E = hv$ ，其中 h 为普朗克常量， v 为光子的频率。根据相对论质能关系，可以把光子看成质量为 $m = \frac{hv}{c^2}$ 的粒子。考虑到光子在引力场中的势能 mgH ，如果在地面向上发射一束频率为 v 的光，然后在离地面高度为 H 的地方接收，由能量守恒可得

$$hv = hv' + mgH = hv' + hv \frac{gH}{c^2}$$

到达地球会发生红移，但红移量只有 10^{-6} ，难以测量。之后对天狼B、波江座40B等白矮星光谱的引力红移进行了测量，得到了较好的结果。

[3] 1960年，哈佛大学的两位物理学家利用穆斯堡尔效应巧妙地测得一座22.6 m高的楼顶到地面的引力红移，以极高的精度证实了引力红移效应。

引力场中的时钟变慢效应也经过多次实验的验证，如1971年铯原子钟在飞机上的实验，1980年引力探测器A(GP-A)携带原子钟的实验等，中国科学家也在“天宫二号”上开展了类似的实验。

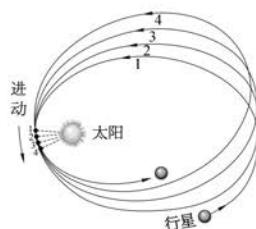


图 8-10 近日点进动

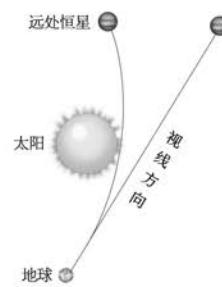


图 8-11 光线偏折

[1] 爱丁顿在1919年对星光经过太阳时发生偏折的测量精度并不高，而且光在引力场中发生偏折并不是广义相对论独有的结论，其他理论也有类似的预言。如果把光子看成有质量的微粒，牛顿力学给出光经过太阳时的偏折为 $0.875''$ ，是广义相对论预言值的一半。严格来说，1919年的测量结果并不能完全判定观测结果与广义相对论一致。之后又进行了多次测量，精度始终不高，直到20世纪90年代，利用甚长基线干涉技术，才以万分之一的精度证实了广义相对论对光线偏折的预言，只不过当时观测的不再是光，而是无线电波。

[2] 爱因斯坦在1907年就从等效原理推出了引力红移效应，即引力场中发出的光在远处接收时会发生红移，比如太阳发出的光

[1] 早在 1916 年，爱因斯坦就预言了引力波的存在，即质量分布的变化会导致时空曲率的变化并以波的形式以光速向外传播。中子星的碰撞合并、黑洞的碰撞合并，都会产生强大的引力波，宇宙演化早期也会产生所谓的原初引力波。如果说用望远镜观测是看天体的外表，那么引力波的探测就是去“倾听”天体的声音。根据广义相对论，引力波传播时会导致时空曲率的变化，也就会使距离和长度发生微小的变化。不过，想要测出这个变化，精度必须要达到 10^{-21} ，也就是说，1 000 m 的长度变化只有质子尺度的千分之一。20 世纪 50 年代末，韦伯最早开始用共振棒探测器进行引力波的探测，但因为灵敏度太低，一直没有结果。从 70 年代开始，泰勒和赫尔斯通过一对脉冲双星的持续观测，首先间接证明了引力波的存在。差不多在同时，韦斯等人开始尝试利用激光干涉来探测引力波。直到 2015 年，在爱因斯坦提出引力波预言整整 100 年之后，激光干涉引力波天文台(LIGO)终于第一次直接探测到了引力波。这是两个黑洞碰撞合并发出的引力波，经过 13 亿光年的长途奔跑到达地球。引力波的直接探测，给广义相对论的实验验证画上了圆满的句号。

则光子的红移为

$$\frac{\Delta v}{v} = \frac{v' - v}{v} = -\frac{gH}{c^2}$$

将 $H = 22.6 \text{ m}$ 代入，得

$$\frac{\Delta v}{v} = -2.46 \times 10^{-15}$$

1960 年，哈佛大学的物理学家曾在一座 22.6 m 高的楼顶做了这个实验，结果与广义相对论的计算结果符合极好。

爱因斯坦在 1916 年建立广义相对论之后不久就预言了引力波的存在。根据广义相对论，质量的分布导致时空的弯曲。而质量分布尤其是大质量分布的变化将导致时空曲率的变化，这种变化即所谓时空涟漪会以波的形式以光速向外传播，这就是 **引力波**。黑洞及中子星的碰撞合并会产生最强大的引力波，从而能被地球上的探测设备探测到。在爱因斯坦提出引力波的预言整整 100 年之后，经过 50 多年的不懈努力，2016 年，美国的激光干涉引力波观测台 (Laser Interferometer Gravitational-wave Observatory, LIGO) 宣布，探测到了来自 13 亿光年之外两个黑洞碰撞合并所发出的引力波，这是人类第一次直接探测到的引力波信号。引力波的直接探测，给广义相对论的实验验证画上了圆满的句号。

爱因斯坦不仅是狭义相对论和广义相对论的创立者，也是量子力学的创立者之一，他还是固体量子理论、量子统计、激光理论和现代宇宙学研究的先驱，在物理学众多领域都做出了开创性的工作，极大地推动了现代物理学的发展。

[2]

STSE

为了提高定位精度，卫星定位系统的一个重要问题就是时钟的精确同步。导航卫星在地球高空做高速运动，所以必须考虑到相对论效应的修正。根据狭义相对论，卫星高速运动将造成时钟变慢，而根据广义相对论，卫星所处位置的引力场较地面为弱，因而时钟变快。根据计算，广义相对论的效应是狭义相对论的 6 倍。因此，如果不考虑广义相对论的修正，定位精度将大大降低。

问题与思考

1. 下列情况中地面上和不同车上的观察者看到的光速是多大？

- (1) 两辆车沿直线道路高速相向而行，其中一辆车上的人向另一辆车发出一束光；
- (2) 两辆车一前一后沿直线道路以不同速度高速前行，后面车上的人向前一辆车发出一束光。

[2] 广义相对论的效应虽然微弱，但其实离日常生活并不远，我们平时使用的卫星定位就需要考虑广义相对论的修正。如果忽略广义相对论的效应，就会大大降低卫星定位的精度。

问题与思考解答

2. 如果在一艘平稳行驶的游轮上的密闭船舱内做物理实验，和地面实验室的结果会有什么不同？
3. 一列高铁高速行驶经过车站时，列车中点经过车站信号灯的瞬间信号灯正好发出一个闪光，列车上的观察者认为闪光是同时到达车头和车尾还是先后到达的？车站上的观察者认为是同时的还是有先后的？
4. 一个优秀的短跑运动员在比赛时的速度可以达到 10 m/s ，如果运动员跑完全程时，静止的计时员记录的时间为 19.7 s ，则运动员携带的计时器记录的时间是否同样为 19.7 s ？
5. 一列高铁静止长度为 201.4 m 。当它以 305 km/h 的时速通过站台，站台上的观察者测到的列车长度是否同样为 201.4 m ？
6. 到目前为止，已经有哪些实验和观测证明了广义相对论的正确性？

1. 参考解答：根据光速不变原理，不论光源和观察者如何运动，光速都是 c ，始终不变

命题意图：通过具体例子理解光速不变原理。

主要素养与水平：运动与相互作用(I)；科学推理(I)；解释(I)；科学本质(I)。

2. 参考解答：根据相对性原理，物理规律在所有惯性系中都具有相同的形式，因此在平稳行驶的游轮上的密闭船舱内做物理实验，将得到与地面实验室完全一致的结果

命题意图：通过具体例子理解相对性原理。

主要素养与水平：科学推理(I)；解释(I)；科学本质(I)。

3. 参考解答：因为车站上和列车上的观

察者看到闪光都以光速传播，所以列车上的观察者认为闪光将同时到达车头和车尾。但车站上的观察者看来，闪光传播时列车同时在向前运动，因此闪光到达车头的距离与到车尾的距离不同，所以在车站上的观察者看来，闪光不是同时到达车头和车尾

命题意图：通过具体例子理解同时的相对性。

主要素养与水平：科学推理(I)；科学论证(I)；解释(I)。

4. 参考解答：因为运动时钟变慢，运动员的计时器记录的时间要比 19.7 s 稍短

命题意图：通过具体例子理解狭义相对论的时钟变慢。

主要素养与水平：科学推理(I)；科学论证(I)；解释(I)。

5. 参考解答：因为运动方向长度缩短，站台上的观察者测得的列车长度略小于 201.4 m

命题意图：通过具体例子理解狭义相对论的长度缩短。

主要素养与水平：科学推理(I); 科学论证(I); 解释(I)。

6. 参考解答：到目前为止,广义相对论的预言已经被水星近日点进动、光经过太阳时的偏折、引力场中的谱线红移、引力场中的时钟变慢和引力波等实验和观测所证实

命题意图：对广义相对论的实验验证进行小结。

主要素养与水平：证据(I); 科学本质(I)。

资料链接

洛伦兹变换

从狭义相对论的两条基本原理出发,可以导出两个惯性系之间的变换,即洛伦兹变换。假设惯性系 S' 系相对另一个惯性系 S 系沿 x 轴方向以匀速 v 运动,则有变换

$$x' = \frac{x - vt}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}}$$

$$y' = y$$

$$z' = z$$

$$t' = \frac{t - \frac{vx}{c^2}}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}}$$

不难导出更一般的洛伦兹变换。由于运动是相对的,在上式中令 v 变为 $-v$,即可得到反变换

$$x = \frac{x' + vt'}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}}$$

$$y = y'$$

$$z = z'$$

$$t = \frac{t' + \frac{vx'}{c^2}}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}}$$

从洛伦兹变换可以很容易得出同时的相对性、时间膨胀及长度缩短的结论。显然,当 $v \ll c$ 时就回到伽利略变换。

如果只考虑沿 x 方向的运动,则物体在 S' 系中的速度为 $u' = \frac{dx'}{dt'}$,在 S 系中的速度为 $u = \frac{dx}{dt}$,由洛伦兹变换可得狭义相对论的速度合成公式

$$u = \frac{u' + v}{1 + \frac{u'v}{c^2}}$$

由上式可见,通过速度合成不可能得到大于光速的速度,并且当 $u'=c$ 或 $v=c$ 时,立刻就得到 $u=c$ 。

质能方程

如果将初始静止的物体由于外力对其做功获得的能量定义为该物体的动能,则可以推出

$$\begin{aligned} E_k &= \int_0^v \mathbf{F} \cdot d\mathbf{r} = \int_0^v \frac{d\mathbf{p}}{dt} \cdot d\mathbf{r} = \int_0^v \mathbf{v} \cdot d(m\mathbf{v}) = \int_0^v (m\mathbf{v} \cdot d\mathbf{v} + \mathbf{v} \cdot \mathbf{v} dm) \\ &= \frac{1}{2} \int_0^v \left[\frac{m_0 dv^2}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}} + \frac{v^2}{c^2} \cdot \frac{m_0 dv^2}{\left(1 - \frac{v^2}{c^2}\right)^{\frac{3}{2}}} \right] = \frac{1}{2} \int_0^v \frac{m_0 dv^2}{\left(1 - \frac{v^2}{c^2}\right)^{\frac{3}{2}}} = \int_0^v m_0 c^2 d\left(\frac{1}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}}\right) \\ &= \frac{m_0 c^2}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}} - m_0 c^2 = mc^2 - m_0 c^2 \end{aligned}$$

其中, $m_0 c^2$ 是物体静止时具有的能量,称为静能,而

$$E = mc^2 = E_k + m_0 c^2$$

为物体具有的总能量,此即爱因斯坦质能关系或质能方程。

爱因斯坦场方程

广义相对论中最重要的方程是爱因斯坦场方程

$$R_{\mu\nu} - \frac{1}{2} R g_{\mu\nu} = \frac{8\pi G}{c^4} T_{\mu\nu}$$

这一方程描述了时空性质与物质分布之间的关系。其中, $g_{\mu\nu}$ 为描述时空性质的度规张量; $R_{\mu\nu}$ 为里奇张量, R 为曲率标量,两者都是由度规张量及其导数构成的量,反映了时空的几何性质; $T_{\mu\nu}$ 为物质分布的能量动量张量,反映了物质在空间的分布。这是一个很复杂的微分方程,广义相对论的所有结果都是从这个方程来的。在弱场近似下爱因斯坦方程就回到牛顿的引力方程。

广义相对论和牛顿引力理论在描述引力相互作用的方式上是不同的,按照牛顿理论,任何两个质量不为零的物体之间存在万有引力而互相吸引。而按照广义相对论,质量分布造成空间的弯曲,物体则是在弯曲空间中运动。如果用弹性膜来比喻时空,设弹性膜上有黑、白两个光滑的球,黑球质量较大,白球质量较小,如图 1 所示。黑球因质量较大使得弹性膜变形弯曲,白球由于质量较小,放在弹性膜上几乎不改变膜的性质。显然,如果白球初始静止,将很快滑向黑球。按照牛顿理论,这是因为两个球之间存在万有引力。而按照广义相对论,则是因为空间(弹性膜)的弯曲。也就是说,广义相对论中并不存在引力,有的只是时空的弯曲,引力相互作用被几何化了。

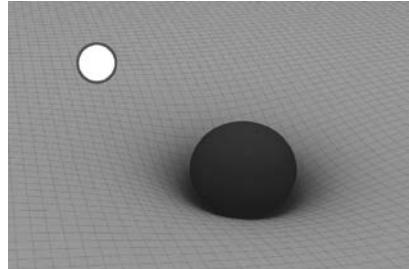


图 1

本节编写思路

本节介绍恒星及宇宙的演化，让学生对恒星和宇宙的起源及演化有初步的概念，了解我们的宇宙从何而来。同时，对暗物质和暗能量也做了简要的介绍。

正文解读

[1] 这是我们目前对宇宙演化进程的认识。

[2] 牛顿的宇宙是无限的，不仅空间上是无限的，无边无际，时间上也是无限的，没有起点，也没有终点。显然，无限的宇宙中一定有无限多的恒星，否则，由于引力是长程作用，且宇宙已经存在了无限长的时间，如果是有限的恒星，宇宙将是不稳定的，所有恒星都将坍缩到一点。如果有无限多的恒星，则可以假定恒星在宇宙空间中是均匀分布的。但这样会导致奥尔伯斯佯谬，即宇宙中任意一点，无限多星光的叠加都足以达到太阳的亮度。

另一方面，用牛顿力学讨论问题时，往往会假定取无限远处势能为零。牛顿的无限宇宙在无限远处仍然有无限多恒星，势能不可能为零。因此，牛顿的无限宇宙和牛顿力学也是不自洽的。

[3] 哈勃通过观测发现，绝大部分星系的光谱都是红移的，并且距离越远的星系，谱线的红移就越大。如果这是多普勒效应造成的红移，那就说明几乎所有星系都在远离或者退行。哈勃定律指出，星系的退行速度和距离成正比，距离越远，退行速度越大。

现在把宇宙膨胀造成的红移称为宇宙学红移。发现所有星系都在退行，并不说明地球是宇宙的中心。在任何一个星系上看，所有其他星系也都在退行。这可以用一个均匀分布着黑点的气球来说明，当气球膨胀时，站在任何一个黑点上看，会发现所有的黑点都在远离，并且距离越远的黑点其远离的速度越大。

[1]

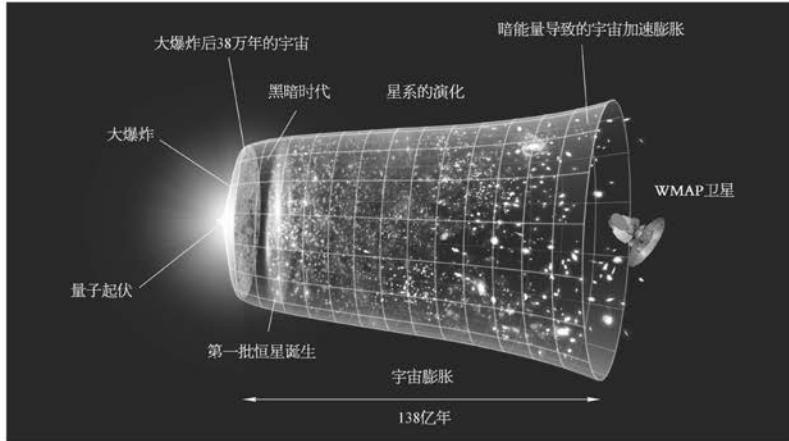


图 8-12 宇宙演化进程

第三节 宇宙的起源与演化

人类探索宇宙的奥秘已经有很长的历史了，战国时期的思想家尸佼（前 390—前 330）在 2 300 多年前就给出了宇宙的定义，“四方上下曰宇，往古来今曰宙”。但只有当广义相对论建立之后，宇宙学才真正成为现代科学意义上的一门学科。图 8-12 所示就是人类目前对宇宙演化进程的认识。

② 宇宙是有限的还是无限的？

[2] 牛顿认为，宇宙是无限的。不仅空间上是无限的，时间上也是无限的，没有起点，也没有终点。因此，无限的宇宙中一定有无限多颗恒星，并且是均匀分布在宇宙中的。否则由于引力的作用，宇宙将是不稳定的。但在 1826 年，德国天文学家奥尔伯斯（H. W. Olbers, 1758—1840）指出，如果宇宙无限，且恒星在空间中的分布均匀，则任意方向上都会有无限多颗恒星，这些恒星的星光叠加起来后将足以达到太阳的光度，即不应该有黑夜。这就是所谓的奥尔伯斯佯谬。那么，宇宙到底是有限的还是无限的？

[3] 1929 年，美国天文学家哈勃（E. P. Hubble, 1889—1953）通过对大量星系的观测发现，银河系以外的绝大部分星系都在远离我们，即星系都在退行，并且离我们越远的星系，其退行速度就越大。由此哈勃提出，星系的退行速度与距离成正比。这就是哈勃定律。

拓展视野

由于天体之间的距离遥远，用通常的长度单位m或km来表示天体之间的距离是很不方便的。在天文学中通常用天文单位、光年和秒差距来表示距离（图8-13）。其中天文单位（AU）定义为日地平均距离，即

$$1 \text{ AU} = 1.495\ 978\ 7 \times 10^8 \text{ km} \approx 1.5 \text{ 亿 km}$$

光年（l.y.）定义为光在真空中沿直线传播一年所经过的距离，即

$$1 \text{ l.y.} = 9.460\ 553\ 6 \times 10^{12} \text{ km} \approx 10 \text{ 万亿 km}$$

秒差距（pc）定义为地球公转轨道半径对应的视角为1''时的距离，即

$$1 \text{ pc} = 3.085\ 678 \times 10^{13} \text{ km} \approx 3.261\ 5 \text{ l.y.} \approx 30 \text{ 万亿 km}$$

离我们最近的恒星比邻星的距离为4.3 l.y.，或1.3 pc。

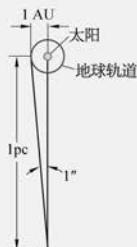


图8-13 天文单位和秒差距

[1] 根据哈勃定律，星系之间的距离在不断增加。因此，在过去，星系之间的距离一定比现在要小，也就是说，宇宙是在不断地膨胀。根据这个观测事实，在前人研究工作的基础上，物理学家伽莫夫（G. Gamow, 1904—1968）等人在1948年前后提出了大爆炸宇宙论（big bang cosmology），即我们的宇宙起源于约138亿年前的大爆炸。需要指出，这里所说的大爆炸，只是一个形象的说法，并不是通常意义上物体在某个空间的爆炸，而是时空本身的爆炸。可以说，在大爆炸之前，没有空间，也没有时间。大爆炸之后，时间才有了开端，空间则随之膨胀。

• 宇宙的演化

[2] 图8-14所示为宇宙演化的简明时间轴。根据大爆炸宇宙论的理论，在大爆炸之后的瞬间，宇宙处于极高温、极高密的炽热状态，极不稳定。在大爆炸之后约 10^{-43} s时的温度约为 10^{32} K，然后随着宇宙的膨胀，温度不断下降。大爆炸后约 10^{-6} s，温度下降到 10^{13} K左右，开始形成质子和中子等粒子。大爆炸后约10s，温度下降到 10^9 K时，质子、中子



图8-14 宇宙演化时间轴

质子和中子等微观粒子。在 $t=10^{-2}$ s时，质子和中子数量基本相等，随着温度下降，中子占比减少，到 $t=226$ s时，质子比例为87%，中子比例为13%，这导致最后整个宇宙中氦的占比约为26%，氢的比例约为74%，这与观测相当一致。大爆炸后约1s，温度下降到 10^{10} K，中微子和其他粒子相互作用退耦，成为自由粒子，形成中微子背景辐射。但因为探测困难，目前并没有探测到中微子背景辐射。大爆炸后约10s，温度下降到 10^9 K时，质子、中子开始结合成氦核，同时有少量氘核、氦3、锂等轻核生成。大爆炸之后约38万年，温度下降到约3000K，中性原子形成。此后，在大尺度上电磁力不再起作用，引力开始成为宇宙的主导作用力。此时，光子与物质不再有显著的相互作用，成为自由粒子，宇宙变得透明。随着宇宙的膨胀，这些光子由于红移变成今天温度为2.725K的宇宙微波背景辐射，微波背景辐射也称为最后散射面。随着宇宙膨胀，温度继续下降，形成大量气体云，大爆炸后2亿年左右第一批恒星形成，开始发光发热，大爆炸后10亿年左右，第一批星系形成。

[1] 伽莫夫的大爆炸宇宙学被提出后，一开始并没有被认可，很多人并不相信可以这样研究宇宙。直到1965年理论预言的宇宙微波背景辐射被意外发现。在这之后，随着越来越多的观测证据，基于广义相对论的大爆炸理论成为研究宇宙学的标准模型。

需要强调，宇宙膨胀是空间的膨胀，星系之间在不断远离，但由于引力的束缚，星系本身并没有膨胀，太阳系也没有膨胀。

[2] 根据大爆炸宇宙学理论，可以给出非常详尽的宇宙演化历史。在宇宙演化的极早期，温度极高，能量极高。随着时间的推移，宇宙不断膨胀，温度逐渐下降。

大爆炸后 10^{-43} s，温度约为 10^{32} K，称为普朗克时期，目前对这个时期的物理知之甚少，也许未来的量子引力理论能够给出这一时期的描述。大爆炸后约 10^{-6} s，温度下降到 10^{13} K左右，开始形成

[1] 宇宙中存在大量体积巨大、密度和温度都很低的星云，由于引力作用导致的密度起伏，会造成一些区域密度增大，一些区域密度减小。如果质量足够大，引力就会超过热运动向外的压力引起星云的收缩并形成一些引力中心。收缩过程中，大的星云会碎裂成很多小的星云。开始收缩时星云密度较小，产生的热能会很快散发出去，这使星云进一步收缩，密度上升。当密度足够大时，核心区域变得不透明，温度迅速上升，最后形成原恒星。在引力作用下原恒星进一步收缩，当核心区域达到氢的聚变温度时，一颗新的恒星就诞生了，即进入了主序星阶段。

在稳定的主序星阶段，恒星向外膨胀的压力和引力达到平衡。一旦核心区域的核聚变停止，温度就会下降，引力就会超过向外的压力，恒星将开始收缩使得温度上升。如果核聚变剧烈，温度上升过快，向外的压力就会超过引力，恒星将会膨胀，使得温度下降。由于恒星在不断地辐射能量，核燃料终有消耗殆尽的时候，核心区域的核聚变总有停止的一刻，因此引力将使恒星最终坍缩为致密天体。

恒星质量越大，演化速度就越快，寿命也就越短。太阳的寿命约为 100 亿年，大质量恒星的寿命只有几千万年甚至几百万年，而质量比太阳还小的恒星寿命可达几百亿甚至上千亿年。

小质量恒星最终将演化成白矮星，密度可达 10^6 g/cm^3 ，白矮星内部不再有核聚变反应，不再有能量释放。随着时间的推移，残存的能量将逐渐散去，白矮星温度将逐渐降低，最后变成黑矮星。

大质量恒星演化到后期会发生超新星爆发，核心部分形成密度高达 10^{14} g/cm^3 的中子星。由于超新星爆发会释放巨大的能量，铁以后的重元素都是在超新星爆发中形成的，所以从某种意义上讲，人类也是超新星爆发的产物。超新星爆发后的恒星碎片散落在宇宙空间，成为下一代恒星的原料。

开始结合成氢核、氦核，同时有少量氘核、氦 3、锂等轻核生成。核合成完成后，整个宇宙中氦元素的占比约 26%，这与目前的观测相当一致。大爆炸之后约 38 万年，温度下降到约 3 000 K，中性原子形成。此时光子与物质不再有显著的相互作用，成为自由粒子，宇宙变得透明。随着宇宙的膨胀，这些光子由于红移变成今天温度为 2.725 K 的宇宙微波背景辐射。这个背景辐射在 1964 年被美国射电天文学家彭齐亚斯（A. Penzias, 1933—）和威尔逊（R. W. Wilson, 1936—）无意中发现。随着宇宙膨胀，温度继续下降，形成大量气体云，大爆炸后约 2 亿年，第一批恒星形成，开始发光发热，大爆炸后约 10 亿年，第一批星系形成。银河系形成于 100 亿年以前，而太阳系形成于 50 亿年前。

[1] 恒星的演化

如图 8-15 所示，恒星起源于宇宙中的气体、尘埃等物质。在引力作用下，这些气体和尘埃聚集收缩成密度较大的原始星云，最后进一步收缩形成原恒星。原恒星在引力作用下进一步收缩，形成一个密度极大的核心，温度越来越高。当核心温度达到 10^7 K 时，氢开始发生聚变为氦的热核反应并辐射能量，于是新的恒星诞生了。这时候的恒星压力和引力达到平衡，处于稳定阶段，称之为为主序星。恒星在这一阶段停留的时间最长，太阳已经在主序星阶段停留了 50 亿年，并且还将继续停留 50 亿年。

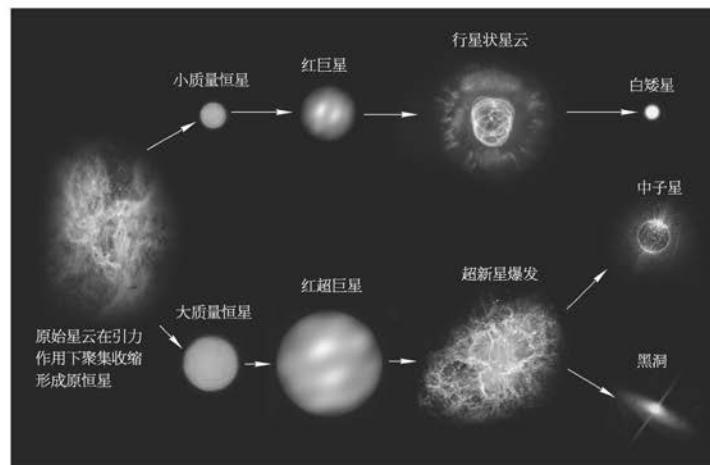


图 8-15 恒星的演化

当恒星核心部分的氢大部分都聚变为氦以后，因为氦的聚变温度远高于氢的聚变温度，所以核心部分的聚变反应会停止，因而压力下降，星核在引力作用下再次收缩，从而

温度上升。当温度达到 10^8 K 时, 就开始发生氦聚变为碳的聚变反应。如果恒星有足够的质量, 这样的过程会一直进行下去, 依次产生氧、硅、钙、铁等元素, 形成类似洋葱的结构。因为铁是最稳定的元素, 所以聚变反应到铁元素产生后就停止了。没有了热核反应维持的压力, 星核就会在引力作用下不断收缩, 密度越来越大。

对于小质量恒星, 由于没有足够的质量, 核反应到一定阶段就会停止, 然后逐渐形成体积巨大、表面温度较低的红巨星, 之后, 恒星外层物质由于不断膨胀形成行星状星云, 核心部分将形成质量不超过 1.4 个太阳质量、密度达到 10^6 g/cm^3 、尺度和地球相似的白矮星。天狼星的伴星就是一颗白矮星。

[1] 对于大质量恒星, 晚期会形成红超巨星, 热核反应会一直持续到铁元素的产生。然后由于热核反应停止, 星体在巨大引力作用下再次收缩, 核心密度越来越大, 最后将发生超新星爆发, 外层物质形成向外扩散的气体云, 核心留下密度高达 10^{14} g/cm^3 而尺度只有几十千米的致密天体, 即完全由中子构成的中子星。高速旋转的中子星也叫脉冲星。对于质量更大的恒星, 因为引力巨大, 最后将形成更神秘的天体——黑洞。

图 8-16 所示为发生在北宋至和元年 (1054 年) 的一次超新星爆发之后留下的遗迹, 称为蟹状星云。《宋会要》有关于蟹状星云超新星爆发的记载: “至和元年五月己丑 (1054 年 7 月 4 日), 晨出东方, 守天关 (金牛 ξ 附近)。昼见如太白 (即金星), 芒角四出, 色赤白, 凡见二十三日。”

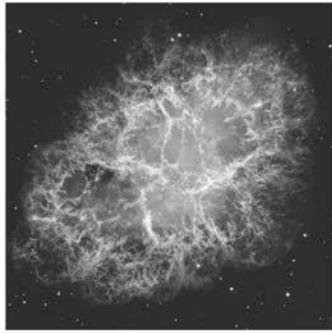


图 8-16 蟹状星云

拓展视野

按照广义相对论, 最简单的黑洞是施瓦茨黑洞, 黑洞存在一个视界面, 视界半径即为施瓦茨半径 $R_s = \frac{2Gm}{c^2}$, 其中 G 为引力常量, m 为黑洞质量, c 为光速。视界是一个单向膜, 任何物体或光进入视界后就再也无法离开, 即视界内任何信息都不能传递到视界之外。如果有一艘飞船飞向黑洞, 航天员定时向远处的观察者发送信号, 则远处的观察者会发现, 随着飞船靠近黑洞, 信号的红移会越来越大, 发送信号的时间间隔也越来越长。靠近黑洞的一刹那, 信号将会因为被无限红移而无法被观察者观测到, 也就是说, 远处的观察者不可能看到飞船穿越黑洞的过程。如果黑洞的质量是一个太阳质量, 则相应的施瓦茨半径为 $R_s = 2.95 \text{ km}$ 。

视界面是单向膜, 物质或光一旦进入视界, 就无法回头。视界面也是无限红移面, 视界面上发出的光将由于无限红移而无法被远处的观测者观测到。黑洞的引力场很强, 它会将附近的物质都吸进去, 而物质在向黑洞坠落时, 由于做加速运动而辐射 X 射线, 因此, 类似天鹅座 X-1 这样的强 X 射线源很可能是个黑洞。另外, 星系的中心往往是一个巨型黑洞。已经有大量的证据证明黑洞是存在的。天体物理学家根泽尔和盖兹已经发现, 银河系中心的人马座 A 是一个质量约为 400 万个太阳质量的巨型黑洞。第一张黑洞照片就是事件视界望远镜 EHT(Event Horizon Telescope)拍摄的巨型椭圆星系 M87 中心、质量约为 65 亿个太阳质量的巨型黑洞。关于黑洞, 还有更多的奥秘等待人类去揭开。

[1] 质量更大的恒星演化到最后会一直坍缩下去, 直到形成黑洞。牛顿力学其实早在 18 世纪就预言了黑洞的存在, 即一个质量为 m 的天体, 如果其半径小于 $\frac{2Gm}{c^2}$, 则表面逃逸速度

将大于光速, 这个天体就成为看不见的天体, 即所谓的暗星。对太阳而言, 这个临界半径为 2.95 km 。也就是说, 如果把太阳压缩到半径为 2.95 km 的球内, 太阳就成为黑洞了。

由于黑洞是强引力场天体, 牛顿力学是不适用的, 虽然得到的临界半径和广义相对论的结果一致, 但意义是不同的。按照广义相对论, 一旦形成黑洞, 当物质进入视界面以后, 将不可避免地向中心坍缩, 直到形成奇点。也就是说, 黑洞是由视界包围的一个奇点, 而视界面是一个几何面, 并不是物质的界面。

[1] 早在 20 世纪 30 年代,通过星系和星系团的质量分布及运动的观测研究,就发现星系和星系团中有大量的暗物质存在。对宇宙大尺度结构的研究也表明,暗物质有助于大尺度结构的形成。没有暗物质,将无法解释目前观测到的宇宙大尺度结构的形成和星系及星系团的稳定。

暗物质不参与电磁相互作用,不发光,难以用传统的望远镜进行观测,只能通过引力效应探测。

通过研究大尺度结构的形成可知,暗物质的速度应远低于光速,否则无法形成现有的大尺度结构。中微子虽有质量,但因其速度接近光速,不太可能是暗物质。

由于对暗物质的性质并不清楚,虽然提出了很多暗物质的候选者,但到目前为止,尚未有任何实验发现暗物质存在的证据。

[2] 20 世纪末对遥远超新星的观测显示,宇宙不仅在膨胀,而且是在加速膨胀。为了解释宇宙的加速膨胀引入了暗能量。暗能量是目前最大的物理学难题之一,根据对宇宙微波背景辐射的精确测量可以得知,暗能量约占整个宇宙的 68%,暗物质约占 27%,普通的可见物质只占 5% 左右。

我们对暗能量知之甚少,更不知道如何探测。爱因斯坦在其方程中加的宇宙常数项,是解释暗能量的最简单的模型,还有很多各种各样的理论模型,但没有一个是令人满意的。物理学发展到今天,突然发现我们所了解的只是区区 5% 而已。

爱因斯坦告诉我们,宇宙中最不可理解的事,就是宇宙是可以理解的。

更复杂的黑洞是带电荷或有旋转的黑洞,根据广义相对论,任何黑洞只需要用质量 m 、电荷量 Q 及角动量 J 这三个参数描写。

经典黑洞是只进不出的,但物理学家霍金 (S. W. Hawking, 1942—2018) 证明,如果考虑量子效应,黑洞将会产生辐射,即所谓的霍金蒸发。但这个效应实际上很难观测到。

图 8-17 所示是包括中国科学家在内的各国科学家们经过数年努力,利用分布在全球的 8 台射电望远镜同步拍摄,并经过 2 年多的数据处理后得到的第一张黑洞照片。这是一个距离地球约 5.5×10^7 l.y.、质量约为 65 亿个太阳质量的巨型黑洞。



图 8-17 第一张黑洞照片

② 什么是暗物质?

[1] 通过对星系及星系团质量分布和宇宙大尺度结构的研究,天体物理学家发现,除了由原子、分子组成的普通物质,如恒星、星际气体、星际尘埃之外,星系及星系团内还存在大量的暗物质,而暗物质的总质量要远远大于宇宙中所有可见物质的质量总和。如果没有暗物质,星系及星系团的形成和稳定将无法解释。这些暗物质没有电磁辐射,和普通物质只发生引力作用,因此用望远镜等传统方法难以探测。到目前为止,还没有暗物质探测的直接证据,也不清楚暗物质到底是由什么样的粒子组成的。

② 什么是暗能量?

[2] 1998 年,天体物理学家对遥远超新星的观测研究发现,宇宙不仅在膨胀,而且是在加速膨胀。为了解释宇宙的加速膨胀,物理学家引入了充满整个宇宙并具有负压性质的暗能量。但我们实际上对暗能量的性质还很不了解,更不知道如何去探测。根据对宇宙微波背景辐射的精确测量可以得知,暗能量约占整个宇宙的 68%,暗物质约占 27%,而普通的可见物质只占 5% 左右。因此,虽然暗物质和暗能量目前无法探测到,但却极大地影响着宇宙的演化和宇宙大尺度结构的产生,也决定了宇宙未来的命运。有人将暗物质和暗能量称为 21 世纪物理学上空的两朵新的乌云,如何驱散这两朵乌云,物理学将如何解决这些难题,是当代人们极为关注的科学前沿。

问题与思考解读

112 第八章 牛顿力学的局限性与相对论初步

问题与思考

1. 恒星演化到晚期，最终会形成哪几种致密天体？
2. 某同学认为，宇宙微波背景辐射产生于第一批恒星诞生的时候，目前温度为300 K，在宇宙中的分布均匀各向同性。试分析该说法是否正确。
3. 恒星不断地向周围空间辐射巨大的能量，判断下列关于恒星能量如何产生的说法是否正确，并简述理由。
 - (1) 恒星内部优质煤的燃烧。
 - (2) 恒星核心区域的核聚变。
 - (3) 恒星上可燃气体的燃烧。
4. 什么是暗物质？什么是暗能量？为什么要引入暗物质和暗能量？

1. 参考解答：恒星演化到晚期，先进入红巨星阶段，然后根据质量大小不同，小质量恒星会形成白矮星，大质量恒星会发生超新星爆发，最后形成中子星甚至黑洞。

命题意图：对恒星演化过程进行小结。

主要素养与水平：科学推理(I);解释(I)。

2. 参考解答：该同学的说法部分正确，部分错误。宇宙微波背景辐射产生于大爆炸后38万年，比第一批恒星的诞生早很多，目前温度为2.7 K，在宇宙中的分布均匀，各向同性。

命题意图：初步了解宇宙微波背景辐射的基本性质。

主要素养与水平：科学推理(I);证据(I);解释(I)。

3. 参考解答：(1)和(3)错误，因为恒星内部并不满足化学燃烧的条件，而且煤及可燃气体的燃烧都是化学反应，其释放的能量与核聚变相比是微不足道的。(2)正确，恒星的能量来自核心区域的核聚变。

命题意图：初步了解恒星能源产生机制。

主要素养与水平：科学推理(I);解释(I);科学本质(I)。

4. 参考解答：暗物质是不发光、没有电磁辐射、和普通物质只有引力作用、目前尚未发现的一种未知的物质；暗能量则是一种充满宇宙、具有负压性质的能量。目前对暗物质和暗能量还很不了解，也不清楚如何探测。引入暗物质是为了说明星系、星系团的稳定性，解释宇宙结构的产生，引入暗能量是为了解释宇宙的加速膨胀。

命题意图：对暗物质和暗能量有初步了解。

主要素养与水平：科学推理(I);解释(I);科学本质(I)。

[1] 爱因斯坦是 20

世纪最伟大的物理学家,对现代物理学的两大支柱——量子力学和相对论的建立与发展均做出了杰出的贡献。爱因斯坦在其一生的科学研究生涯中,在物理学各个领域都做出了开创性的工作,极大地推动了现代物理学的发展。

1905 年,爱因斯坦连续发表了 4 篇划时代的重要论文。他在第一篇论文中提出了光量子假说,成功解释了光电效应,对量子力学的建立产生了重要影响。第二篇论文对布朗运动给出了正确解释。第三篇论文建立了狭义相对论,完美解决了世纪之交的以太疑难,否定了牛顿的绝对时空观,建立了全新的相对论时空观,对现代物理学产生了深远的影响。第四篇论文给出了著名的质能方程,开启了核能利用的时代。1906 年,爱因斯坦提出固体比热理

论,是固体量子理论的开创者;1915 年以一己之力完成广义相对论,建立了一个关于时空和引力的全新理论,对时空的本质有了更加深刻的认识,开启了物理学新的时代,影响深远。广义相对论提出的所有预言,都在之后的 100 年内被一一证实。广义相对论被公认为 20 世纪人类认识自然最伟大的科学成果之一。物理学家玻恩曾说过,广义相对论“把哲学的深奥、物理学的直观和数学的技艺令人惊叹地结合在一起”。1916 年,爱因斯坦提出受激辐射理论,是激光理论的开拓者;1917 年发表关于宇宙学的论文,开启了现代宇宙学的研究;1924 年完成波色-爱因斯坦统计,预言了波色-爱因斯坦凝聚并在 70 年后被实验证实;1935 年与合作者提出 EPR 佯谬,对量子力学的发展产生重要影响,并直接催生了对量子纠缠和量子通信的研究。

爱因斯坦具有超人的智慧和深刻的物理直觉,对现代物理学做出了无可匹敌的重大贡献,他的科学思想和哲学思想影响深远,是一座难以企及的高峰。

学期 活动

[1] 了解相对论的发展历史和爱因斯坦的科学思想。

20 世纪初相对论的建立是现代物理学的一次革命,了解相对论的发展历史和爱因斯坦的科学思想有助于我们更好地学习和掌握现代物理学知识,提高分析问题和解决问题的能力及创新能力。通过阅读相关书籍和查阅有关资料,进一步了解相对论的发展历史和爱因斯坦的科学思想,并在此基础上撰写读书报告。

活动要求:

- (1) 整理并总结相对论的发展历史以及对相对论的建立有过贡献的科学家。
- (2) 总结爱因斯坦对建立相对论的主要贡献。
- (3) 通过爱因斯坦的科学生涯总结爱因斯坦的科学思想。
- (4) 以小组的形式进行展示与交流。

小结

· 基本概念和基本规律

狭义相对论基本原理

相对性原理：物理规律在所有惯性系中都具有相同的形式。

光速不变原理：真空中的光速在所有惯性系中都是相同的，与光源和观测者的速度无关。

广义相对论基本原理

等效原理：一个均匀的引力场与一个做匀加速运动的参考系等价。

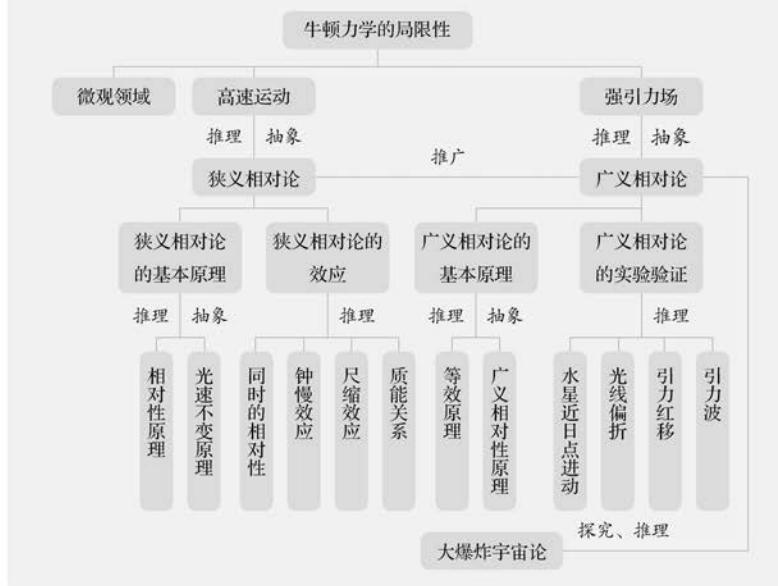
广义相对性原理：物理规律在任何参考系中都具有相同的形式。

· 基本方法

通过爱因斯坦建立相对论的过程，感受思想实验的方法。

通过对相对论效应和实验证的学习，认识理论演绎、科学推理和科学论证的方法。

· 知识结构图



复习与巩固解读

1. 参考解答：相
对论的长度缩短是沿
运动方向，所以接近光
速运动的观察者会认
为街道两边的建筑物
高度不变，但宽度变窄

命题意图：理解狭
义相对论的长度缩短只
是沿运动方向。

主要素养与水平：
运动与相互作用(I)；
科学推理(I)；解释(I)。

2. 参考解答：因
为运动是相对的，根据
相对论的长度缩短效
应，列车上的观察者认
为桥缩短了，所以列车
比桥更长，而桥上的观
察者则认为列车缩短了，
桥比列车更长

命题意图：通过具
体例子理解狭义相对论
的长度缩短是相对的。

主要素养与水平：
运动与相互作用(I)；
科学推理(I)；解释(I)。

3. 参考解答：顶
楼离地心距离远一些，所
以引力场要弱一些，按照广
义相对论，引力场越强，钟就
越慢。因此一楼的钟要比
顶楼的钟稍慢一些

命题意图：通过具体例子理解广义相对论中引力场越强，时钟越慢的效应。

主要素养与水平：科学推理(II)；科学论证(II)；解释(II)。

4. 参考解答：假定光反射到齿轮时，正好转过一个齿，即光从第二个齿缝穿过，齿轮转一圈的时间为 $\frac{1}{n}$ ，转过一个齿缝的时间为 $\frac{1}{nm}$ ，光传播时间为 $\frac{2L}{c}$ ，因此有

$$\frac{2L}{c} = \frac{1}{nm}, L = \frac{c}{2nm} = \frac{299\,792\,458}{2 \times 1\,000 \times 720} \text{m} \approx 208 \text{ m}$$

可以利用平面镜的多次反射来增加光传播的距离

复习与巩固

- 如果一个人以接近光速的速度在长直的街道上运动，那么在他眼里，街道边建筑物的高度和宽度会有什么变化？
- 一列高铁高速经过一座静止长度与高铁相同的桥梁，列车上的观察者认为桥梁和列车哪个更长？桥梁上的观察者认为哪个更长？
- 高楼顶楼的钟和一楼的钟相比，哪个走得慢？
- 测量光速可以有不同的方法，比如在月球上放置一个反射镜，在地球上向月球发射一束激光，反射回地面后通过激光的往返时间来计算光速。图 8-18 所示为法国物理学家菲索利用旋转齿轮法来测量光速的装置，当齿轮静止时，光束穿过齿缝经平面镜反射后能被观察者看到；当齿轮旋转时，如果反射光返回时正好碰到齿轮，观察者就看不到光，如果反射光返回时正好转到下一个齿缝，观察者就能看到光。设此时反射镜到齿轮的距离为 L ，齿轮转速为 $n = 1\,000 \text{ r/s}$ ，齿轮的齿数为 $m = 720$ ，要想测出光速， L 需要多长？如何增加这个长度？
- 如果光速只有 $\frac{c}{3}$ 甚至更小，相对论效应是更显著还是不易看到？
- 如果引力常量 G 增大，牛顿力学的适用范围是变大还是变小？
- 地球绕太阳公转轨道的近日点会有进动吗？不考虑其他天体的影响，地球近日点进动值比水星近日点进动大还是小？简述理由。
- 牛顿引力理论和爱因斯坦广义相对论在描述地球和太阳之间的相互作用时有什么不同？
- 太阳的寿命约为 100 亿年，太阳形成至今已经演化了约 50 亿年。再过 50 亿年，太阳将进入什么阶段？太阳这类小质量恒星最后会演化成什么样的致密天体？
- *10. 有人说，宇宙是无限的，宇宙中的恒星也是无限多的，因此在宇宙中的任意一点，无限多恒星的光叠加起来都足以达到太阳的亮度，即不应该有黑夜。如何用现代宇宙学理论来分析解决这个悖论？

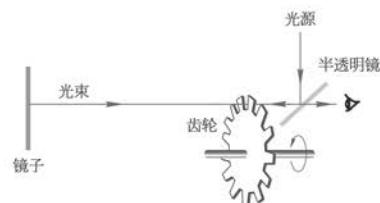


图 8-18

命题意图：通过计算理解如何利用旋转齿轮法测量光速。

主要素养与水平：科学推理(Ⅲ);科学论证(Ⅲ);解释(Ⅲ);科学态度(Ⅲ)。

5. 参考解答：如果光速只有 $\frac{c}{3}$ 甚至更小,那么速度比 $\frac{v}{c}$ 更接近于1,因此相对论效应会更容易显现

命题意图：理解在什么条件下狭义相对论效应更容易显现。

主要素养与水平：科学推理(Ⅲ);科学论证(Ⅲ);解释(Ⅲ);科学本质(Ⅲ)。

6. 参考解答：如果 G 增大,则无量纲数 $\frac{mG}{Rc^2}$ 变大,即更容易达到强引力的条件,因此牛顿力学的适用范围变小

命题意图：理解在什么条件下广义相对论的效应显得重要。

主要素养与水平：科学推理(Ⅲ);科学论证(Ⅲ);解释(Ⅲ);科学本质(Ⅲ)。

7. 参考解答：地球相比水星要离太阳远一些,所以受到太阳的引力场也要小一些,如果不考虑其他天体的影响,地球的近日点进动值要比水星的小

命题意图：通过具体例子理解广义相对论中的行星轨道近日点进动效应。

主要素养与水平：科学推理(Ⅲ);科学论证(Ⅲ);解释(Ⅲ)。

8. 参考解答：按照牛顿引力理论,太阳和地球都具有巨大的质量,彼此存在引力作用,互相吸引,这个吸引力正好提供了地球绕太阳公转的向心力。而按照广义相对论,是因为太阳质量巨大,造成周围空间的弯曲,然后地球是在这个弯曲的空间中运动,即绕日公转

命题意图：理解广义相对论对引力作用的描述方式与牛顿引力理论的不同之处。

主要素养与水平：模型建构(Ⅲ);科学论证(Ⅲ);解释(Ⅲ);科学本质(Ⅲ)。

9. 参考解答：太阳属于小质量恒星,再过50亿年,太阳将进入红巨星阶段,最后将形成白矮星

命题意图：通过太阳了解小质量恒星的演化历史。

主要素养与水平：物质(Ⅲ);科学推理(Ⅲ);解释(Ⅲ)。

10. 参考解答：按照现代宇宙学理论,首先宇宙是有限的,因此宇宙中的恒星也是有限的。其次,光的传播需要时间,形成较晚、距离较远的恒星的光可能尚未传播到地球。所以悖论不成立

命题意图：能初步运用现代宇宙学理论来解释奥尔伯斯佯谬。

主要素养与水平：模型建构(Ⅳ);科学推理(Ⅳ);科学论证(Ⅳ);解释(Ⅳ)。

第三部分 本章练习部分解读

第一节 牛顿力学的局限性

(一) 参考解答

1. A、B、D可以在牛顿力学框架下得到解释。C、E不能在牛顿力学框架下得到解释

2. 见下表

运动物体	马拉松运动员	赛车	歼击机	从太阳系逃逸的卫星	高能粒子
v	20 km/h	260 km/h	3 000 km/h	16.7 km/s	$0.99 c$
$\frac{v}{c}$	1.85×10^{-8}	2.41×10^{-7}	2.78×10^{-6}	5.57×10^{-5}	0.99

3. 按照牛顿力学,可以认为质子的能量就是动能,因此有

$$E_k = \frac{1}{2} m_p v^2, v = \sqrt{\frac{2E_k}{m_p}} = \sqrt{\frac{2 \times 1.12 \times 10^{-6}}{1.67 \times 10^{-27}}} \text{ m/s} \approx 3.66 \times 10^{10} \text{ m/s} = 122c$$

按照牛顿力学,质子的速度将是光速的 122 倍

$$4. \frac{mG}{Rc^2} = \frac{3 \times 1.989 \times 10^{30} \times 6.67 \times 10^{-11}}{20 \times 10^3 \times (3 \times 10^8)^2} = 2.21 \times 10^{-1}$$

$$5. \frac{mG}{Rc^2} = \frac{4 \times 10^6 \times 1.989 \times 10^{30} \times 6.67 \times 10^{-11}}{1.0 \times 10^{10} \times (3 \times 10^8)^2} = 0.590$$

6. 如果速度比 $\frac{v}{c}$ 远小于 1,无量纲数 $\frac{mG}{Rc^2}$ 远小于 1,说明速度很小,引力场很弱,并且研究对象的尺度远大于原子的尺度,我们就可以放心地使用牛顿力学来讨论问题

7. 金星和地球质量差不多,但金星相对地球离太阳更近,太阳引力场更强,所以在地球上做物理实验的结果更符合牛顿力学

(二) 习题主要素养与水平分析

习题的主要素养与水平

题号	运动与相互作用	科学推理	科学论证	问题	解释	科学本质
1		I	I	I	I	I
2	I					
3	I			I	I	I
4				I	I	I
5				I	I	I
6		I	I	I	I	I
7		II	II	II	II	II

第二节 相对论初步

(一) 参考解答

- 根据光速不变原理,不论光源和观察者如何运动,光速都是 c ,始终不变
- 根据相对性原理,物理规律在所有惯性系中都具有相同的形式,因此在平稳行驶的游轮上的密闭船舱内做物理实验,无法测出游轮的速度
- 同时是相对的,对车上的观测者是同时的事件对地面上观测者就不是同时的。因为列车向右运动,所以地面的观察者看到的是闪电先击中车尾,再击中车头
- 因为时钟变慢只跟速率有关,所以地面上观测者认为两列车上的钟的快慢是相同的,而对其中一列车上的观测者来说,对方的车是在做相对运动,所以对方的时钟会变慢
- 因为时钟变慢效应,飞船上的钟走得慢一些,所以记录的时间会小于 592 s
- 因为长度缩短,运动员认为自己跑完的距离比 100 m 稍短
- 狭义相对论的基本原理是:相对性原理和光速不变原理。广义相对论的基本原理是:广义相对性原理和等效原理
- 都对。因为运动是相对的,根据相对论的长度缩短效应,列车上的观察者认为隧道缩短了,所以列车比隧道更长,而隧道内的观察者则认为列车缩短了,隧道比列车更长

9. 同步卫星离地面高度约 36 000 km, 所以引力场比地面要弱一些, 按照广义相对论, 引力场越强, 钟就越慢。因此地面上的钟比同步卫星上的钟慢一些

10. 假定多余的时间正是光穿过地球公转轨道直径的时间, 因此有

$$c = \frac{L}{t} = \frac{2 \times 1.50 \times 10^{11}}{22 \times 60} \text{ m/s} \approx 2.27 \times 10^8 \text{ m/s}$$

考虑到木星位置的变化和光传播距离的变化, 可以减小误差

11. 由于恒星的光经过太阳时会弯曲, 看上去会觉得恒星位置向外有一点偏移, 所以在日全食时看到的恒星环会比没有太阳时看到的恒星环显得大一些

(二) 习题主要素养与水平分析

习题的主要素养与水平

题号	运动与相互作用	模型建构	科学推理	科学论证	证据	解释	科学本质
1	I	I	I	I	I	I	I
2	I	I	I	I	I	I	I
3	I	I	I	I	I	I	
4	I	I	I	I	I	I	
5	I	I	I	I	I	I	
6	I	I	I	I	I	I	I
7	I	I	I	I	I	I	I
8	I	I	I	I	I	I	
9	I	I	I	I	I	I	
10	II	II	II	II	II	II	
11	II	II	II	II	II	II	

第三节 宇宙的起源与演化

(一) 参考解答

1. 主序星是类似太阳的恒星, 核心区域进行核聚变释放能量; 红巨星形成于小质量恒星演化晚期, 其特点是体积大、温度低; 白矮星是小质量恒星演化的最终产物, 特点是体积小、密度大; 中子星是质量较大恒星演化的最终产物, 通常在超新星爆发后产生, 体积更小, 密度更大

2. 宇宙微波背景辐射产生于大爆炸 38 万年后, 星系形成之前。光子与物质不再有相互作用, 变成自由光子, 随着宇宙膨胀温度逐渐降低, 形成现在观测到的宇宙微波背景辐射, 目前温度为 2.7 K, 在宇宙中的分布是均匀各向同性的

3. 恒星的能量来自核心区域的核聚变, 由于恒星的巨大质量产生的引力收缩使核心区域形成高温高压的条件, 使得氢聚变为氦的聚变反应得以持续进行。地球没有巨大的质量, 核心区域不足以产生高温高压的条件, 不会发生核聚变, 因而不会自己发光

4. 暗物质不发光, 没有电磁辐射, 和普通物质只有引力作用, 是目前尚未发现的一种未知的物质。因为没有电磁辐射, 所以无法用光学或射电望远镜观测到暗物质

5. 小质量恒星演化到晚期先进入红巨星阶段, 最后形成白矮星。大质量恒星演化到晚期将发生超新

星爆发，最后形成中子星甚至黑洞

6. 引力场越强，红移越大，时钟越慢。因此地球上的观测者将会发现，宇宙飞船发回信号的时间间隔越来越长，信号波长也越来越长，到接近黑洞时已经完全接收不到信号

(二) 习题主要素养与水平分析

习题的主要素养与水平

题号	物质观念	能量观念	模型建构	科学推理	科学论证	问题	证据	解释
1	I	I	I	I	I	I	I	I
2	I	I	I	I	I	I	I	I
3	I	I	I	I	I	I	I	I
4	I	I	I	I	I	I	I	I
5	I	I	I	I	I	I	I	I
6	II	II	II	II	II	II	II	II

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 - 2021042



绿色印刷产品

ISBN 978-7-5478-5559-1

A standard linear barcode representing the ISBN number 978-7-5478-5559-1. To the right of the main barcode is a smaller vertical barcode.

9 787547 855591

定价：33.00 元