马来西亚华文独中教科书

高中适用

物理

上册

浙 江 教 育 出 版 社
董教总华文独中工委会统一课程委员会

高中适用

《物理》上册

美术编辑：曾国兴
行政编辑：黄宝玉
封面设计：曾国兴
版面设计：艺诚文化
电脑排版：杭州兴邦电子印务有限公司

编辑单位：
浙江教育出版社
董教总华文独中工委会统一课程委员会
Unified Curriculum Committee of
Malaysian Independent Chinese Secondary School Working Committee（MICSS）

出版发行：
马来西亚华校董事联合会总会（董总）
United Chinese School Committees' Association of Malaysia（Dong Zong）
Blok A, Lot 5, Seksyen 10, Jalan Bukit, 43000 Kajang,
Selangor Darul Ehsan, Malaysia.
Tel: 603-87362337
Fax: 603-87362779
Website: www.dongzong.my
Email: support@dongzong.my

印刷：
Percetakan Advanco Sdn. Bhd.

版次：
2017年12月第1版

印次：
2020年11月第4次印刷

编审团队

学科顾问：杜新宝　黄召仁　曾飞焕

主　　编：杨建宋

副 主 编：胡晓雄　徐　刚　须雪忠　徐　奎

其他编写者：陈敏华　孙领军　徐国亮　鲍邓齐　鲁　斌
余国祥　王　凯　沈　涛

编审委员：吴德安　陈陆东　陈子响　张丽萍　林伟章
涂振兴　章凤仙　黄树群　傅蔷蓓　谢玉成

责任编辑：韦　勇　谢玉成

责任校对：余晓克

鸣　谢

本书承蒙编审团队协助编写与审阅，老师协助审稿及提供意见。另外，中国的王延光特级教师和臧文彧教研员在本书的编写过程中，审阅了样张并提出了很多有益的建议；杭州师范大学理学院、浙江省萧山中学以及山东省远大网络多媒体股份有限公司也为本书的编写提供了帮助，谨此统致谢忱。

董教总华文独中工委会统一课程委员会　启

2017年10月

编辑说明

本教材是根据董教总华文独中工委会统一课程委员会物理学科委员会所拟定的《高中物理课程标准》（以下简称“课标”）编写。课标拟定时参考了我国教育部颁发的中学新课程纲要以及世界其他国家或地区高中物理课程纲要及标准。

本套教材共分上、中、下三册，适用于采用华文教育的高中理科学生。

本套教材在整个高中阶段需要的总教学课时为400学时（包括习题教学和复习课的课时）。上册的教学主要安排在高中一年级，建议每周的课时为5～7节课（包括习题课和复习课）。

教材的每一章都有一个章首页，对学习本章需要的基础知识提出要求，对本章的主要内容进行提纲性介绍。在每一节教学内容的编写中，在详细阐述本节主要物理现象、物理规律和应用物理规律解决问题这一主线下，设置了演示、实验、探究、说一说、做一做、练一练、例题、思考与讨论、拓展阅读等栏目。在每一节末，都设置了练习题。在每一章的章末，给出了本章的基本知识结构图和本章的总练习题，便于学生的复习巩固。

教材的编写特色体现在以下三个方面：

（1）教材紧扣董教总华文独中工委会统一课程委员会物理学科委员会所拟定的课标提出的教学要求，落实各项具体的教学目标。

（2）教材还参考了我国教育部颁发的中学新课程纲要以及世界其他国家或地区高中物理课程纲要、标准及教材，并将各地教学改革的成果渗透其中，所选的素材力求反映当代科技的进步和生产、生活对物理知识的要求。

（3）教材编写追求文字简练，对物理现象和概念表述清晰，对物理规律教学和应用物理解决实际问题做到循序渐进、逐步提高，在物理知识教学的同时渗透物理科学思想方法的教学。教材采用彩色编排，图文并茂，可读性强。

本套教材配套相应的教师用书上、中、下三册。教师用书包括：（1）本章教材概述：包括章内各节内容的联系与编写特色，以及各节的课时安排建议。（2）各节教材分析与教学建议，包括：①教学目标，重点、难点分析，学情分析；②教学建议，如何用好教材讲授具体的各个知识点；③课后习题

解答。（3）教学设计案例：针对典型的课例给出1～2个参考性的教学设计，对教师的教学起参考作用。（4）教学资源库。每一章根据教学内容收列一定数量的教学资源，有对教材内某些知识的拓展深化，有对某些物理背景和人物的介绍，也有对某些物理实验和教学环节的补充说明。（5）补充习题以及简要的解答。每一章再提供10多道习题，这些习题的难度比教材中的练习题更深入一些，程度达到高校招生考试水平，供教师在教学中选用。

陈敏华和余国祥编写了第1章，徐奎编写了第2章，徐刚编写了第3章和第10章，胡晓雄、沈涛和徐国亮编写了第4章，胡晓雄编写了第9章，徐国亮编写了第5章，孙领军编写了第6章，鲍邓齐编写了第7章，鲁斌编写了第8章，须雪忠和王凯编写了第11章。杨建宋负责全书的构架、统稿和修正，王延光、臧文彧和徐十庆参与了本书的部分审核和校订工作。

对教材中有待改善之处，敬请大家不吝指正。

董教总华文独中工委会统一课程委员会

高中物理编审团队

2017年10月

目录

contents

第1章 物理学简介

本章提要

1. 物理学的研究对象。
2. 物理学的简要历史。
3. 物理学的研究方法。
4. 物理学的学习方法。

学前储备

1. 初步了解常见的物理现象和物理性质。
2. 知道物理学是实验与理论密切结合的学科。
3. 了解初中科学学过的物理量及其物理意义。
4. 知道观察和实验在物理学中的重要作用。

第1节　什么是物理学

物理学（physics）是一门自然科学，是以大自然中物质的性质为研究对象的。

大自然由物质构成，给我们呈现了丰富多彩的现象或性质。我们通过自己的感官可以直接发现一些现象或性质：物体的体积大小、轻重、运动快慢、冷热、亮暗……

说一说

说说物质世界中的各种现象，说说什么叫物质、现象和性质及它们之间的关系。

列举能通过自己的感官直接观察到的其他现象。

举例说明，你是如何用自己的感官来比较两个物体的体积大小、轻重、运动快慢、冷热和亮暗的。

想一想

在初中科学课程中你已经了解到了很多自然现象。在这些现象中，哪些是无法直接用自己的感官察觉到的？

在自然界中，物质是客观存在的。所有物质都有很多种不同方面的性质，我们可以通过观察其呈现出来的现象去感知这些性质。有些现象我们能通过感官直接察觉到，如物体运动（motion）（图 1.1.1 ）、物体冷或热（heat）（图 1.1.2 ）和物体的发光（light）（图 1.1.3 ）等；有些现象我们无法通过感官直接感知到，如电（electricity）和磁（magnetism）等，这时候我们得借助仪器设备进行现象观察。我们能看见物体是否在运动，也能感觉到物体的冷热，但没有察觉电或磁的感官，我们只能间接地来研究这些性质。比如，我们通过物体在电和磁的作用下所发生的运动变化（图 1.1.4 ）或热（图 1.1.5 ）和光的效应（图

1.1.6）来研究电和磁。在物理学中，我们不但要研究我们自己的感官能直接感知到的物质性质，还要研究我们自己的感官不能直接感知到而需借助于仪器设备或其他方法才能感知到的性质。

图 1.1.1　人和动物能在地面上运动

图 1.1.2　用空调机可以使热在房屋内外流动

图 1.1.3　我们每天能看到从太阳发出来的光

图 1.1.4　列车在电和磁的作用下高速运动

图 1.1.5　电热丝通电后发光、发热

图 1.1.6　空气在高电压作用下导电，形成闪电

物理学研究自然界中物质的性质和这些性质所呈现出来的现象及规律，其中有些物质的性质或现象专门由其他学科（化学和生物学等）去研究，物理学研究的是自然界中的基本规律。由于物理学与化学等学科都是研究自然现象的，因此，物理学与这些学科有着紧密的联系，物理学是这些学科的基础。我们把在物理学中所研究的现象或性质叫作物理现象或物理性质。物理现象或物理性质主要包括关于运动的现象或性质、关于热的现象或性质、关于电和磁的现象或性质和关于光的现象或性质等。

大自然所呈现的现象是错综复杂的。有时候我们所观察到的现象既包括运动的现象，也包括热的现象或其他现象。在物理学中，我们将先学会研究某一种现象，然后再来综合地研究实际所呈现的现象。在物理学中，我们把研究运动的分支学科叫作力学（mechanics），把研究热现象的分支学科叫作热学（thermodynamics），把研究电和磁的现象的分支学科叫作电磁学（electromagnetism），把研究光的现象的分支学科叫作光学（optics），把研究微观领域中原子、原子核和其他更微观粒子的分支学科分别叫作原子物理学（atomic physics）、原子核物理学（nuclear physics）和粒子物理学（particle physics），等等。从这些学科中还细分出更现代的分支学科，如相对论（relativity）、量子物理学（quantum physics）等。与此同时，物理学家与其他科学家合作，共同研究更综合、更复杂的现象，从而形成许多与物理学有关的交叉学科，如物理化学（physical chemistry）、生物物理学（biophysics）等。

力学是物理学最古老的一门分支学科。自从17世纪牛顿在伽利略等人的研究基础上，再研究、归纳而成的牛顿三大运动定律，已经被人们认识三百多年了。很久以来，人们一直认为，我们可以用力学来解释自然界中发生的所有现象；用力学既可以解释运动过程，也可以解释热、电和磁以及化学的过程。这个观点把大自然看作一台巨大的、复杂的“机器”。

从20世纪初以来，人们开始意识到这个观点是不正确的。在一个给定的过程中，力的现象、电磁的现象和热的现象都扮演着各自的角色。在学习物理学中，当我们学习的内容仅涉及力学时，我们仅仅关注物体的运动，而不会去关心它的冷热、它的颜色、它的电性和磁性；我们当然更不会去关心与物理学无关的情况，如它的价格、它的美丑。

物理学是一门自然科学，是研究物质的运动、热、电和磁等性质的科学。物理学包括力学、热学、电磁学、光学、原子物理学、原子核物理学和粒子物理学等。

拓展阅读

物理学的历史（力学部分）

力学是我们最早学的物理学分支学科，这是因为力学是物理学史中最早出现的学科。在这里，我们仅介绍力学的历史。同学们以后在学习物理学其他分支学科时，可以通过查阅文献来学习相关的物理学史。

力学的研究对象是力和运动。运动是人们最早感知到的物理现象之一。早在 2 300 多年前（公元前 347 年），古希腊哲学家亚里士多德（Aristotle，公元前 384—公元前 322）（图 1.1.7）就开始撰写一本名叫《物理学》的书。此书虽然被公认为一本哲学著作，可里面有大量篇幅涉及对运动的描述。作为一本自然哲学的巨著，本书不同于我们现在所学的物理学，但它包括了现在的物理学、化学、生物学、天文学和地理学等内容，涉及整个自然科学。

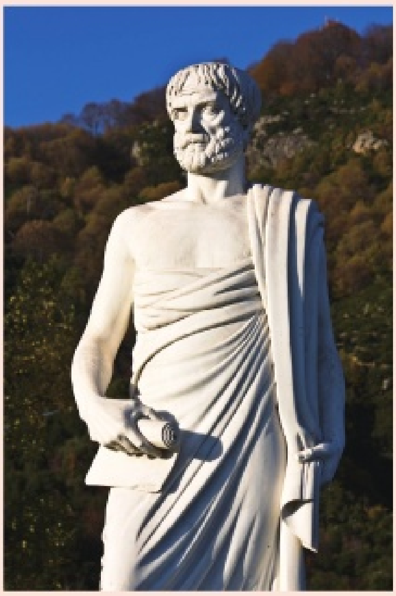


图 1.1.7　亚里士多德

然而，由于历史条件的限制，亚里士多德关于运动的研究停留在观察的层面，还没有进入定量测量的阶段。因此，他所得出的关于运动的结论有的是含糊的，有的在现在看来甚至是错误的。尽管如此，他所得出的结论还是为后人进一步研究打下了基础。

直到 17 世纪，意大利科学家伽利略（Galileo Galilei，1564—1642）（图 1.1.8）开创了定量研究的方法，得出了关于

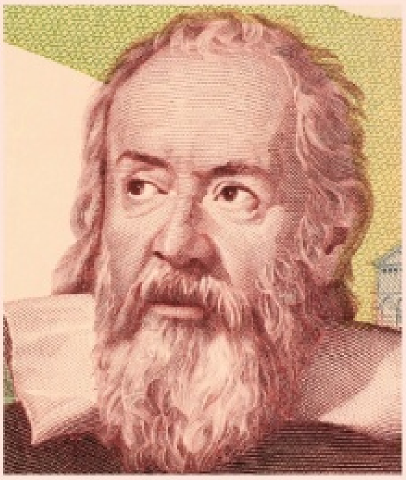


图 1.1.8　伽利略

运动的几个规律，如自由落体运动的规律等。他关于运动的结论主要记载在他所著的两本书《关于托勒密和哥白尼两大世界体系的对话》和《关于两门新科学的对话》中。爱因斯坦曾这样评价伽利略：“伽利略的发现以及他所应用的科学的推理方法是人类思想史上最伟大的成就之一，而且标志着物理学的真正开端。”伽利略因此被公认为物理学的开拓者。

后来，与他同时代的其他几位科学家通过对物体之间相互碰撞的研究完善了他关于运动的结论，如法国科学家笛卡儿（René Descartes，1596—1650）于 1644 年提出了用物体的速率和质量的乘积表示物体运动的多少，荷兰科学家惠更斯(Christian Huygens，1629—1695）于 1667 年提出了用速度和质量的乘积表示物体运动的多少。惠更斯创造出来的这一工具就是我们将要学习的动量（momentum），当时被称为运动之量（quantity of motion）。经过大量的测量，人们最终发现动量是守恒的（conserved），即动量既不会产生也不会消灭。

著名英国科学家牛顿(Isaac Newton，1643—1727）(图 1.1.9）总结了前人得出的关于运动的结论，于 1687 年在他的《自然哲学的数学原理》一书中提出了三大运动定律，即牛顿运动定

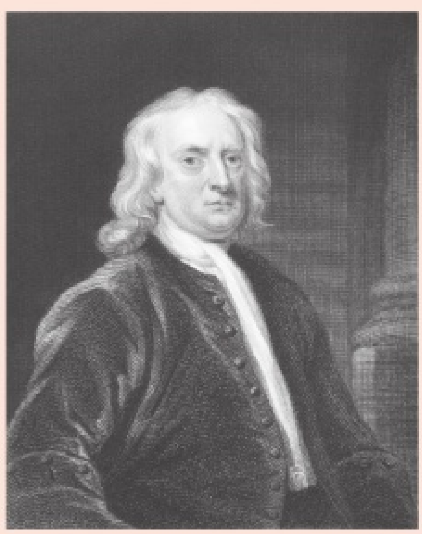


图 1.1.9　牛顿

律（Newton's laws of motion）。这三大运动定律被称为力学的基本定律。这本著作的出版是物理学史上的一件大事，标志着经典力学体系的建立。

牛顿力学体系的建立无疑是一个重大的进步，而且很快就在自然科学领域占据了支配的地位。但是，它本身还存在着许多缺陷。后来，在一些科学家的共同努力下，牛顿力学得到不断的丰富和完善，尤其是当人们创造出能量（energy）这一物理量后，把整个力学理论乃至整个物理学建立在崭新的基础之上，这是因为能量连接了物理学的各分支学科。后来，人们通过大量的测量还发现，能量像动量一样也是守恒的。

随着科学技术的发展，人们可以通过粒子加速器对电子、质子等微观粒子输入能量，使其加速。人们在实验室里发现，在给粒子输入能量的过程中，粒子是不能无限地被加速的。后来人们发现，质量（mass）和能量描述的是同一个物理性质，即惯性（inertia）。这就是著名的爱因斯坦质能方程 $E = mc^2$ 的本质含义。质量和能量仅仅是测量单位不同，它们之间的比例系数是 c^2。因此，当我们通过粒子加速器给粒子输入能量时，相当于在给它输入质量，其惯性就相应地增大，因而越来越难加速，最后它的速度会接近一个极限值。后来人们通过测量发现，这个速度极限值刚好与光在真空中的速度相同。

这一重大发现验证了 20 世纪初爱因斯坦（Albert Einstein，1879—1955）（图 1.1.10）提出的相对论力学的正确性。牛顿力学所不能解释的高速物体的运动现象可以用爱因斯坦的相对论力学来加以解释。

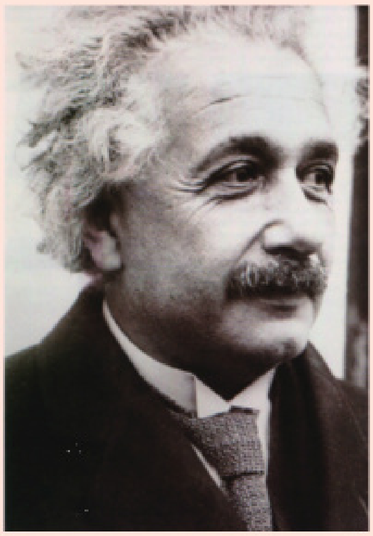


图 1.1.10　爱因斯坦

牛顿力学的局限性还表现在无法解释微观粒子所表现的特殊现象：微观粒子不仅具有粒子性，同时还具有波动性。20 世纪 20 年代人们所建立的新的物理学分支学科量子力学，能够很好地描述微观粒子的运动规律。

然而，相对论和量子力学并没有否定牛顿力学，而只说明牛顿力学在一定的条件（宏观物体的低速运动）下适用。当然，相对论和量子力学也有其局限性。它们是哪一种更具普遍性的理论的特殊情形呢？这有待于我们继续不断地去探索。

力学发展史的图示如下（图 1.1.11）：

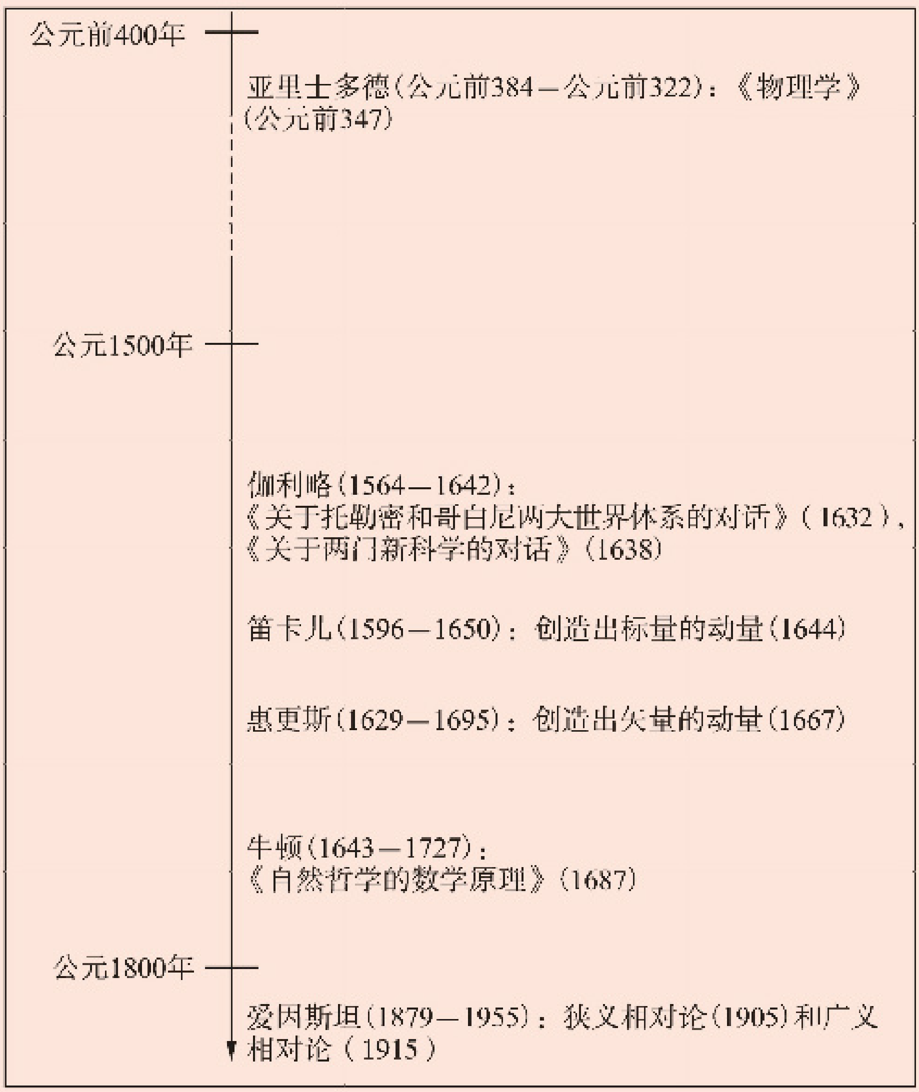


图 1.1.11　力学发展史简图

在这幅图中，由于篇幅的限制，我们没有把所有的力学内容和在力学发展过程中做出过重大贡献的物理学家都罗列在内。同学们可以从别的角度来画与此图不同的力学发展史简图，在以后的学习过程中也可以仿照这样的方法画出热学发展史、电磁学发展史和整个物理学发展史的简图。这样，既可以拓展自己的知识面，也可以加深对物理学的理解。

练习 1-1

1. 在你的记忆中，你最先关注的 3 种自然现象或性质是什么？

2. 列举你在初中科学课程中所学到的 5 个具体的物理现象或物理性质，并将它们分别归类到相应的物理学分支学科中：

物理学分支学科	物理现象或物理性质
力学	
热学	
电磁学	
光学	
原子、原子核和粒子物理学	

3. 列举你能用自己的感官直接感知到的 5 个具体的物理现象或物理性质，并将它们分别归类到相应的物理学分支学科中（若某一分支学科没有对应的现象或性质，则填“无”）：

物理学分支学科	物理现象或物理性质
力学	
热学	
电磁学	
光学	
原子、原子核和粒子物理学	

第 2 节　物理学的研究方法

通过前面一节的学习我们知道，物理学的研究对象就是自然界中物质的性质和这些性质所呈现出来的现象。物理学家通过对自然界物质所呈现出来的现象的长期、系统和细致的观察，逐步形成概念（concept），发现各概念间的定性（qualitative）关系。从亚里士多德以后很多年中，哲学家和科学家都一直只是定性地认识这个世界。然而，后来的科学家和物理学家不满足于定性的认识，他们需要将定性的概念定量化，于是就创造出相应的可测量的物理量(physical quantity)，进而找出各物理量间的定量(quantitative)关系。

物理学最一般的研究方法是：**观察→提出假设→形成概念→定义物理量→实验测量→找出物理量之间的定量关系→得出相应的物理规律→验证假设并将其上升到理论**。显然，观察是物理学研究的起点。

观察是科学探究和物理学研究的基本方法，是一种有目的、有计划、比较持久的知觉活动。

无目的、无计划的观察从来不能用来发现真理。那么，我们如何进行科学观察呢？

图 1.2.1　哈勃望远镜

科学观察离不开我们的感官，但在很多时候仅靠我们的感官是不够的，还要借助于望远镜、显微镜等观察仪器。例如，为了观察遥远的天体，人们制造了太空望远镜（图 1.2.1）；为了观察物质的微观结构，人们制造了电子显微镜（图 1.2.2）。科学观察的对象是物质在某些条件下所呈现的性质或现象，而许多现象都要在特定的实验室条件下才会发生，因此需要借助于先进的实验设备。例如，为了观察原子核的内部结构，人们制造

图 1.2.2　电子显微镜

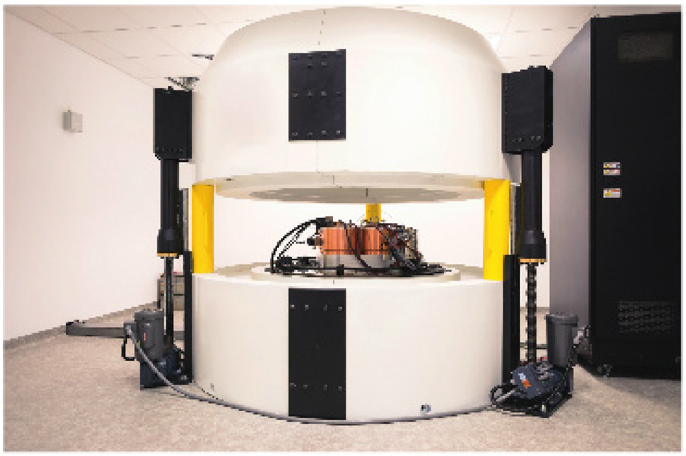


图 1.2.3　高能粒子加速器

出了高能粒子加速器（图 1.2.3），让高能微观粒子去打开原子核的大门。科学观察需要我们把观察到的现象及时记录下来，有时还要与测量结合起来，把测量数据同时记录下来，因而需要利用照相机、录音机、摄像机和计算机等信息记录和处理工具。而上面所介绍的这些实验仪器，都是根据物理原理制造出来的。

科学观察不同于一般的观察，要有明确的目的；观察时要全面、细致和实事求是，并及时记录下来；对于需要较长时间的观察，要有计划，有耐心；观察时要积极思考，多问几个为什么。在观察的基础上，还需要同别人交流看法，进行讨论。

我们要通过对物理现象或性质的定量描述，找出物理现象或性质所遵循的规律。那么，我们具体又该怎么做呢？

我们来看看，在初中科学课程中我们是如何研究运动和热的。

说一说

在初中科学课程中，我们是如何研究运动和热的？

在初中科学课程中，我们用速度（velocity）来描述物体运动的快慢，用温度（temperature）来描述物体的冷热程度。速度和温度是可测量的物理量。图 1.2.4 和图 1.2.5 分别是测量速度和温度的仪器。显然，这些测量仪器也是根据物理原理制造出来的。

物体运动的快慢和冷热程度是人们经过长期观察后形成的概念。在此基础上，人们定义出描述物体运动快慢和冷热程度的物理量分别为速度和温度。然而，仅有速度还不能很好地描述运动，仅有温度也不能很好地描述热。后来，人们又定义出别的物理量（这些物理量我们将在以后相关的章节中介绍）来更全面地描述运动和热，并通过测量找出这些量之间的关系，来验证原来的假设。

因此，物理量也是我们研究物理现象或性质的工具。我们通过对物理量的测量，找出各物理量之间的关系。这样，物理学就成了一门定量的科学。

图 1.2.4　汽车上的速度计

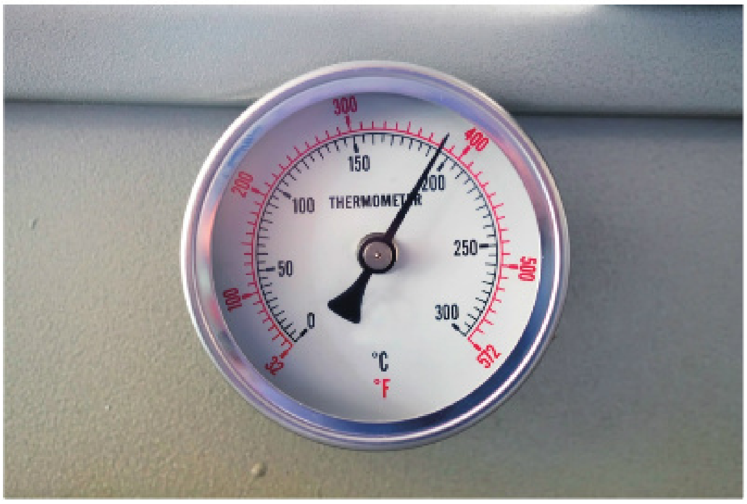


图 1.2.5　工业上用的温度计

物理量是研究物理现象或性质的工具。物理学是一门以实验为基础的自然科学，测量是实验中的主要工作。

想一想

测量物理量需要测量仪器。没有测量仪器，仅凭我们自己也能进行测量吗？

人本身也是一个测量工具。人通过感官来“估计”某一物理量的值，这也是一种测量。测量值总是一个区间。在用仪器测量前，我们知道这个值是某一较大的区间。在用仪器测量后，我们仍知道这个值是某一区间，但这个区间比用仪器测量前要小了。比如，在对一支笔的长度（length）的测量中，某人用肉眼凭自己的判断能力测出这支笔的长度为区间 [10 cm，15 cm]，即他判断出这支笔的长度不会小于 10 cm，也不会大于 15 cm。然后，他用最小刻度为毫米的刻度尺测这支笔的长度，测量结果是区间 [11.5 cm，11.6 cm]。测量值的区间由于使用了刻度尺而变小了。

测量是获得信息（data）的过程。通过测量，我们获得了区间更小的测量值，我们对所测的量有了比以前更确切和详细的了解。物理学虽然是一门定量的科学，但它并不是一门绝对精确的科学。物理学家们并不能确定某个物理量的真实值，而只能借用精密的测量仪器并根据他们的判断能力来缩小物理量的测量值的区间，从而获得更多的信息。用仪器测量缩小了测量值的区间，实质上是缩小了我们的未知程度。不管我们使用多么

精密的测量仪器，我们得到的测量值总是一个区间。测量值的区间给了我们不断探索未知世界的空间。

测量值总是一个区间。测量是获得信息的过程。

说一说

物理学各分支学科的物理量一样吗？

物理量是研究物理性质的工具。在研究运动时，我们用速度来描述物体的运动状态；在研究热时，我们用温度来描述物体的热的状态。显然，这是两种不同的研究工具。研究不同的物理现象或性质，需要运用不同的物理量。然而，这并不是说我们在学习热学知识时就可完全忘掉力学知识。在力学中所用的某些工具，在热学中也要用。例如，在力学和热学中，我们都要运用能量和功率（power）这两个物理量。在力学中得到的一些定律在热学中同样起作用。

研究不同的物理现象或性质，需要运用不同的物理量。

想一想

在研究热的现象中，仅有温度这一物理量够吗？设想一下，我们还需要哪些物理量？

温度是我们早已熟悉的物理量。温度的符号是 θ，常用单位是摄氏度（℃），可以用温度计来测量。

假如有两只杯子分别盛有 300 mL、80℃的水。我们只需用温度这个物理量来比较它们有关热的情况。比较的结果是，它们的热的情况是相同的。如果我们将其中一杯水的三分之一倒到另一只空杯。这时，仅用温度这一物理量来比较这三只杯中水的热是不够的。这是因为，虽然它们的温度仍是相同的，但它们的热的多少是不同的（图 1.2.6）。我们还需要创造一个能描述热的多少的物理量。这个物理量我们将在以后学到。

图 1.2.6　三杯温度相同的水所含的热不一样多

同样，三辆速度相同、大小不同的汽车，它们所含的运动的多少也是不一样的（图 1.2.7）。我们还需要创造一个能描述运动多少的物理量。这个物理量我们也将在以后学到。

图 1.2.7　三辆以相同速度行驶的汽车所含的运动不一样多

温度不能完全描述热的现象，速度不能完全描述运动的现象，质量、密度（density）等物理量也无法穷尽物质的所有性质。

任何物理量都不能完全描述一种物理现象，都无法穷尽物质的所有性质。

通过对物理量的测量所获得的数据，要通过我们的思维对其进行处理。在数据处理中，我们还要运用一定的数学方法，有时还要运用计算机来帮助我们做这项工作。因此，学好数学和信息技术，是学好物理学的基础。另外，各门学科在知识上和研究方法上都相互联系，有相似之处。我们必须学好高中阶段包括物理在内的所有学科，为今后从事某一方面的研究和工作打下扎实的基础。

练习 1-2

1. 列举你在初中科学课程中所学到的物理量，并将它们分别归类到相应的物理学分支学科中（若还没有学过相应的物理量，则填“无”）：

物理学分支学科	物理量
力学	
热学	
电磁学	
光学	
原子、原子核和粒子物理学	

2. 在上题的基础上，通过浏览高中物理教材，列举你将要学到的物理量，并将它们分别归类到相应的物理学分支学科中（若还没有浏览到相应的物理量，则填“无”）：

物理学分支学科	物理量
力学	
热学	
电磁学	
光学	
原子、原子核和粒子物理学	

3. 在研究物体的运动时，仅有速度这一物理量够吗？我们还需要哪些物理量？

第 3 节　怎样学好高中物理

各门学科的学习方法有许多共同之处。然而，对于不同学科由于其自身的特点，还需要有特定的学习方法。下面我们根据学习各门学科的共同特点和学习高中物理学的特点来谈谈高中物理学的学习方法。

① 兴趣与动机

动机在这里指的是，我们学习物理的动力是什么，或者说，我们为何要学习物理。

有的同学会说，学物理是为了将来成为一名科学家或物理学家，是为了更好地建设我们的国家，是为了过上更幸福的生活。这样说都不错。下面我们从更基本的层面上来讨论这一问题。

自伽利略以来，没有任何一位物理学家是为了功名或利益而进行物理学研究的。他们寻求物理规律的真正原因是想理解这个物质世界，理解整个宇宙。物理学发展的取之不竭的原动力在于物理学家理解世界的渴望。

同学们，更好地理解这个世界是否也应成为我们学习物理学的目的呢？如果我们以此为目的来投入学习，这在心理学上叫内在动机驱动下的学习。内在动机不同于外在动机，它是一种持久的、不会被外界因素所左右的学习动力。在这种内在动机驱动下，学习成为由理解而带来快乐的活动，而不是为了获得某些短暂功利而带来的负担。在这种内在动机驱动下，学习成为一个人终身要从事的活动。

② 观察与实验

物理学是实验学科，其研究对象是物理现象或物理性质。我们只有通过日常长期的观察，才能积累对物理现象或物理性质的感性认识和经验，为形成正确的概念和探索这些现象和性质打下必要的基础。

观察要有目的、有计划，也要以一定的知识为基础。因此，在观察前，我们要阅读相关的书籍和资料，明确观察的目的，制订观察的步骤；观察时要及时做好记录；观察结束后要进行深刻的思考和认真的总结，为后续观察和研究提出相关问题。

观察不仅要靠自己的感官，还要借助于必要的仪器和设备。

观察是一种实践活动。在观察中要亲自动手操作，要善于与他人合作。

在物理实验中，物理量的测量是非常重要的工作。因此，学习物理时我们必须把测量作为一个重要的学习内容。我们到实验室去，不但要观察现象，更重要的是要学会测量，学会处理测量数据。测量值总是一个区间，但我们要根据测量的目的努力想办法缩小测量值的区间。

③ 概念与联系

任何一门学科，都有自己一系列的基本概念，它们构成了本学科的理论基础。因此，对一门学科的学习，应该准确把握和深刻理解其基本概念。

概念不是现象和性质，而是对现象和性质的抽象。因此，一个概念总对应着某一现象的某一方面，或某一物质的某一性质。在学习概念时，我们一定要注意概念与现象或性质的联系和区别。

物理量是重要的物理概念，是定量化了的物理概念。物理量和其他概念一样，是人们创造出来的。每个物理量对应着相应的定义（definition）。物理量是用来测量的，物理量也可用来运算，每个物理量对应着相应的符号和公式。

物理概念会随着物理学的发展而发生变化。从某种角度来说，物理学的发展史也就是物理概念的变化史。因此，我们要学习物理学的历史，学会用发展的眼光来看待物理概念。

物理学包括力学、热学、电磁学、光学、原子物理学、原子核物理学和粒子物理学等分支学科。自然现象是错综复杂的，同一现象既与力学有关，也与热学、电磁学等其他分支学科甚至与化学等其他非物理学科有关。在学习物理学时，我们**要注意对比各分支学科间的研究方法，注意它们之间的联系**。

物理量是物理学的研究工具。我们在开始学习物理学的一个新的领域时，要先弄清楚以前学过的哪些物理量这里仍然要用到，新的物理量是什么，最重要和最基本的物理量又是什么。

说一说

根据初中科学所学的知识和你对高中物理知识的大致了解，说说物理学中各分支学科间的联系。

物理学具有自己独特的研究对象。物理学的研究对象与数学、化学、天文学等具有共同的特点，都以自然现象和物质的性质为研究对象。因此，物理学与这些学科之间具有紧密的联系。在学习物理学时，我们要同时学好其他学科，并将它们进行联系和比较。

说一说

根据初中科学所学的知识和你对高中各学科知识的大致了解，说说物理学与其他学科间的联系。

学习物理学时，我们还要注重物理学与生产和生活实际的联系，与社会发展的联系。

例如，我们身边的通信工具与通信卫星有关，通信卫星与当今发达的空间技术有关，而空间技术正是基于 17 世纪牛顿在前人研究基础上所建立的经典力学的定律。

图 1.3.1　人造地球卫星

又如，现在我们的生活和生产离不开电。电的广泛应用驱使人们发明了能产生大量电能的核电站（图 1.3.2），而核电站中的技术正是基于电磁学中法拉第（Michael Faraday，1791—1867）发现的电磁感应定律、热学中卡诺（Nicolas Léonard Sadi Carnot，1796—1832）发现的热机原理和原子核物理学中爱因斯坦发现的质能方程等物理定律。

图 1.3.2　核电站

说一说

根据初中科学所学的知识和你通过课外书、网络等途径所了解到的知识，说说物理学与生产、生活和社会发展的联系。

要学好物理学，同学们还要结合自身的情况摸索出适合自己的学习方法，重视理论与实验的结合，要不断摸索有效的学习途径，借鉴身边同学好的学习方法，经过长期的培养形成良好的学习习惯。学习物理学的方法就像研究物理学的工具一样，没有对错之分，但有好坏之别。我们每一个人，都要不断努力，摸索出一个适合自己的好的学习方法。

练习 1-3

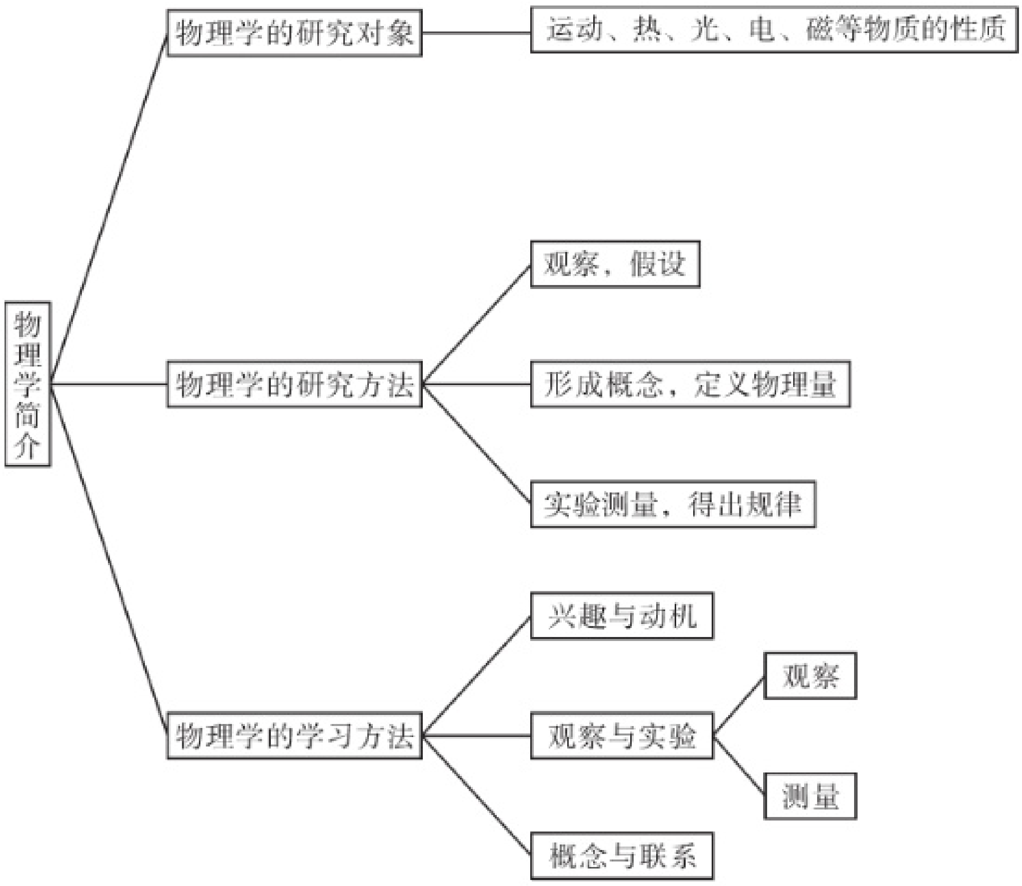
1. 如何观察物理现象？

2. 如何掌握好物理量？

3. 如何学好高中物理？

章末回顾

本章基本知识结构



总练习一

1. 物理现象主要包括哪些现象？氢气在空气中燃烧生成水，是不是物理现象？把糖加入温水中做成糖水，是不是物理现象？一壶烧开的水让它自然冷却，是不是物理现象？

2. 物理学有哪些主要分支？物理学一般分为经典物理学和近代物理学，若从年份上来划分，大致分界点在哪里？

3. 20 世纪被称为物理学的世纪，物理学在这个世纪有哪些重大突破？它们对人类文明的进步有什么意义？

4. 物理实验在物理学的发展中有什么作用？为什么说测量在物理实验中很重要？

5. 物理理论要通过什么环节得到检验？为什么说我们学习的物理知识是螺旋式上升的？

6. 要学好物理学，为什么保持学习兴趣很重要？如何才能保持持久的学习兴趣？

7. 你能说出初中已经学过的 20 个物理量吗？这些物理量各有什么物理意义？

8. 你能谈谈在初中科学学习中，如何养成一个好的学习习惯？在高中阶段，为什么说摸索出一个适合自己的好的学习方法很重要？你打算怎么做？

第2章 物理量的测量、单位和数据处理

本章提要

1. 测量的实质和国际单位制的基本知识。
2. 物理量的量纲。
3. 测量误差的产生原因和有效数字的知识。
4. 科学记数法和数量级。
5. 常见的物理量之间的关系和图象。

学前储备

1. 实际做过长度、体积、质量、时间等物理量的测量，知道它们的常用单位。
2. 掌握正负指数的知识。
3. 会在平面直角坐标系上画图象。

第 1 节　物理量的测量和单位

1 物理量的测量

当你去医院体检时，需要做许多项目的检查：身高、体重、血压、心跳……有时候你还得被检查一些特殊项目，比如铁或者胆固醇的含量是否正常等。这些检查结果都以测量数值显示出来。

什么是测量呢？**测量（measurement）**就是未知量与某一标准的比较，比较的标准叫作这种量的**单位（unit）**。例如，你要测量一袋米的质量，未知量是一袋米的质量，比较的标准就是千克，它是由你使用的天平或台秤来定义的。又如，当你测量旗杆的高度时，旗杆的高度是未知量，而米则是比较的标准。

物理学里基本的具体数值都来自测量，从这个意义上说，物理学也是一门测量科学，学习物理首先要学习测量方面的基本知识和技能。实验和理论是物理学的两大支柱，中学生学习物理要同时兼顾这两个方面。

图 2.1.1　两名同学在做静电实验

2 基本单位和导出单位

每一个物理量都有它的单位。由于各物理量间存在规律性的联系，因此不必对每一个物理量的单位都独立地加以规定。我们可以选定一些物理量作为**基本量（fundamental quantities）**，并为每个基本量规定一个单位——**基本单位（fundamental units）**，其他物理量的单位可以按照它们与基本量之间的关系式（定义或定律），由基本单位导出。例如，如果选定长度、质量、时间为基本量，它们的单位米（m）、千克（kg）、秒（s）就是基本单位。那么根据体积与长度的关系式可以导出体积的单位是 m^3，根据密度的定义式可以导出密度的单位是 $kg\ m^{-3}$，根据速率的定义可以导出速率的单位是 $m\ s^{-1}$。基本量以外的物理量叫

导出量（**derived quantities**），它们的单位叫**导出单位**（**derived units**）。按照这种方法得出的一套单位，构成了一个**单位制**（**system of units**）。

③ 国际单位制

科学家有了新的发现后，就要将他的研究成果与其他科学家进行交流。在科学交流过程中，科学家必须使用合适的单位，这对科学交流非常重要。目前，世界上大多数的国家都采用**国际单位制**（**International System of Units，缩写为 SI，又称 SI 单位制**）。国际单位制选定了 7 个物理量为基本量（见表 2-1），并规定了它们的单位为基本单位。

表 2-1　SI 的基本量和基本单位

基本量			基本单位		
中文	英文	符号	中文	英文	国际符号
长度	length	l	米	meter	m
质量	mass	m	千克	kilogram	kg
时间	time	t	秒	second	s
热力学温度	temperature	T	开尔文（简称开）	kelvin	K
电流	current	I	安培（简称安）	ampere	A
发光强度	luminous intensity	I_v	坎德拉（简称坎）	candela	cd
物质的量（摩尔数）	amount of substance measured in moles	n	摩尔（简称摩）	mole	mol

坐落在法国塞夫勒的国际度量衡标准局与坐落在美国马里兰州葛底斯堡的美国标准技术协会共同保存着长度、时间、质量的标准，即制作与校正米尺、时钟和秤的标准。

国际单位制是从 18 世纪末法国制定的米制逐渐发展而来的。

长度单位“米”最初的定义是：经过巴黎的子午线由赤道至北极的弧长的一千万分之一。根据这个定义，科学家经过测量，用铂铱合金制成米基准器。在 1889 年第一次国际度量衡大会（CGPM）上，进一步将其确定为“国际米原器”，规定在 0℃时两端的两条刻线间的距离为 1 m。后来科学家发现由赤道通过巴黎到北极的子午线弧长比这个“米”的一千万倍要长，因而在 1960 年改用光的波长来定义米。20 世纪 60 年代以来，激光技术的突飞猛进促进了长度基准的发展，1983 年第 17 届国际度量衡大会规定“米是光在真空中 $\frac{1}{299\ 792\ 458}$ s 的时间间隔内所经路径的长度”。

质量单位“千克”也起源于法国，最初的定义是：4℃时 1 dm^3 纯水的质量。后来根据这一规定用铂铱合金制成的千克基准器，在第一次国际度量衡大会上被定为国际千克原器，这个规定一直沿用至今。国际千克原器的质量与千克最初的定义相差约 28 mg。

时间单位“秒”，是在钟表发明以后才有的，是 1 天的$\frac{1}{86\ 400}$。国际上对“秒”的定义做过几次修改，现在国际单位制的基本单位“秒”是用铯原子钟定义的。

表 2-2　国际单位制中千克、米、秒定义的最新进展

单位	千克	米	秒
最新进展	2011 年，国际度量衡大会原则性同意以普朗克常数重新定义千克，并计划于 2018 年会议上做出最终决定	1983 年，国际度量衡大会重新制定米的定义：“光在真空中行进 $\frac{1}{299\ 792\ 458}$ s 的距离”为一标准米	1967 年，国际度量衡大会对秒的定义是：铯-133 原子基态的两个超精细能级间跃迁对应辐射的 9 192 631 770 个周期的持续时间

思考与讨论

为什么选长度、质量、时间的单位作为力学中的基本单位?

一种物理量如果只规定一个单位，如对于长度只规定一个单位“米”，在测量远大于或远小于这个单位的量时，是很不方便的。在国际单位制中采用的办法是在单位前面加上表示十进倍数或分数的词冠，如千（kilo）代表 10^3，厘（centi）代表 10^{-2}，等等。国际单位制从 10^{-24} 到 10^{24} 之间规定了 20 个词冠（见表 2-3）。

表 2-3　SI 用于构成十进倍数和分数单位的词冠

因数	英文名称	中文名称	词头符号	因数	英文名称	中文名称	词头符号
10^{-1}	deci	分	d	10^1	deca	十	da
10^{-2}	centi	厘	c	10^2	hecto	百	h
10^{-3}	milli	毫	m	10^3	kilo	千	k
10^{-6}	micro	微	μ	10^6	mega	兆	M
10^{-9}	nano	纳[诺]	n	10^9	giga	吉[咖]	G

续表

因数	英文名称	中文名称	词头符号	因数	英文名称	中文名称	词头符号
10^{-12}	pico	皮[可]	p	10^{12}	tera	太[拉]	T
10^{-15}	femto	飞[母托]	f	10^{15}	peta	拍[它]	P
10^{-18}	atto	阿[托]	a	10^{18}	exa	艾[可萨]	E
10^{-21}	zepto	仄[普托]	z	10^{21}	zetta	泽[它]	Z
10^{-24}	yocto	幺[科托]	y	10^{24}	yotta	尧[它]	Y

（注：方括号中的文字为不产生误解时可省略的文字）

④ 物理量的量纲

表示一个物理量是由哪些基本量组成和怎样组成的式子，叫作这个物理量的**量纲（dimension）**。例如，如果以 L、M、T 分别表示长度、质量、时间这三个基本量的量纲，那么面积的量纲是 L^2，因为面积＝长 × 宽，而长和宽的量纲都是 L。因为体积＝长 × 宽 × 高，所以体积的量纲是 L^3；因为密度＝质量 ÷ 体积，所以密度的量纲是 $M\,L^{-3}$；因为速率＝距离 ÷ 时间，所以速率的量纲是 LT^{-1}。

需要注意的是，一个物理量的量纲和它的单位有密切关系。面积的量纲是 L^2，它的单位是 m^2；体积的量纲是 L^3，它的单位是 m^3；密度、速率的量纲分别是 $M\,L^{-3}$ 和 $L\,T^{-1}$，它们的单位分别是 $kg\,m^{-3}$ 和 $m\,s^{-1}$。可见，知道了它的单位（用基本单位表示）就可以知道它的量纲。例如，如果知道一个物理量的单位是 $kg\,m\,s^{-2}$，那么它的量纲就是 MLT^{-2}。

在高中物理的学习过程中，量纲知识可以帮助同学们检查等式是否正确。在物理计算中，物理量的量纲不会因为数学运算而改变。任何复杂的物理方程式，等号两边的量纲必须相等；并且，**在物理方程式中，只有量纲相同的项才能相加减，这叫量纲法则**。一个正确的物理方程式一定符合量纲法则。假如你在解题时列出一个求路程的方程式如下：

符合量纲法则的方程式未必是对的，但不符合量纲法则的方程式肯定是错的。

$$s = ut + \frac{1}{2}vt^2 \text{（这里的 } u\text{、}v \text{ 分别代表速度）}$$

这个方程式等号左边是长度量纲 L，等号右边第一项的量纲是 L，第二项的量纲是 LT（$\frac{1}{2}$以及其他纯数，都没有量纲，或者说它们的量纲是 1）。根据量纲法则，等号右边两项不能相加，更不会出现它们之和等于等号左边的量纲 L 了，所以这个方程式肯定是错的。这种把单位作为代数量，与其他物理量一样进行运算分析的方法，称为**量纲分析（dimensional analysis）**。

拓展阅读

几个经典的测量实例

1. 地月之间的距离

科学家们用太空望远镜将激光发射到阿波罗宇宙飞船安置在月球表面的反射器上，反射器把激光反射回来。通过这种方法，科学家就可以准确地测量出地月之间的距离。经测定，地球与月球之间的平均距离约为 385 000 km，并且这个值的精确度高于百亿分之一。运用这种激光技术，科学家还发现月球正以 3.8 $cm\,a^{-1}$（1 a 表示 1 年）的速度离开地球。

2. 全球定位系统

全球定位系统（Global Positioning System，简称 GPS）是由美国国防部研发的，它装有专门为检验爱因斯坦的相对论引力理论的原子钟。如今，GPS 已经成为民用设备，它的信号免费向全世界提供，并广泛应用于陆海空导航、地图的绘制和勘测、远程通信和卫星网络，以及地震和大地构造研究等各个领域，是一种具有较高准确性和精确度的测量技术。GPS 由 24

图 2.1.2　珠穆朗玛峰

颗带发射器的轨道卫星和地球上的众多接收器组成，卫星发出由高度准确的原子钟测量得到的时间信号。接收器利用至少 4 颗卫星传来的信息，得出目的地的纬度、经度和海拔高度。不同地面接收器的精确度各不相同，汽车上的接收器也许可以告诉你几米内的位置情况，而地球物理学家所用的接收器则可以测量地壳毫米量级的移动。如图 2.1.2，科考人员成功地把 GPS 接收器安装在珠穆朗玛峰峰顶，通过这种方法，科学家提高了所测得的珠穆朗玛峰高度的准确性：珠穆朗玛峰确切的海拔为 8 844.43 m，而不是 8 848 m。

美国的全球定位系统与中国的北斗系统、欧洲的伽利略系统以及俄罗斯的格洛纳斯系统并称四大卫星导航系统。

3. 引力波

激光干涉引力波天文台（Laser Interferometer Gravitational Wave Observatory，简称 LIGO）是美国建设的大型引力波激光干涉仪，由加州理工学院和麻省理工学院负责运行，分别坐落在美国北部的华盛顿州和南部的路易斯安那州，南北距离约 2 000 km；干涉仪的臂长分别为 3 km 和 4 km，呈垂直布置。一旦引力波闯入地球，引发时空震荡，造成时空距离变动，这将让干涉仪的干涉条纹变化，LIGO 依此确定引力波强度。在引力波寻觅的征途上，欧洲、日本和澳大利亚也不甘落后，他们相继建设各自的探测器，苦苦等待引力波投来令人激动的涟漪。根据推算，在距离几千光年的黑洞或中子星合并事件，其引力波强度可以被 LIGO 测到。2016 年 2 月 11 日，美国科学家宣称，LIGO 已成功探测到引力波。消息一经传出，立即在全球科学界引起轰动，这是世纪性的、革命性的、振奋人心的重大发现，其重大意义可以媲美百年前的人类发现电磁波。人类科学研究从电磁波时代进入引力波时代。

练习 2-1

1. 填空：

   1 m =____ dm =____ cm =______ mm =______ μm =______ km。

   1 kg =________ g =________ mg =________ μg。

   1 h =______ min =______ s =________ ms =________ μs。

2. 把下列质量的测量值，按从小到大的顺序排列：

   11.6 mg，1 021 μg，0.000 006 kg，0.31 mg。

3. 乒乓球的直径大约是几厘米？篮球的直径大约是几分米？你的身高大约是几米？

4. 一个鸡蛋的质量大约是多少克？你身体的质量大约是多少千克？

5. 在体育课上跑步刚刚结束时，你的脉搏每分钟跳多少次？在刚刚下课时，你的脉搏每分钟跳多少次？

6. 分别写出长度、质量、时间、面积、体积、速率、密度的量纲和单位符号。

第 2 节　误差和有效数字

① 误差

误差可以设法减小，但不能消除。

测量的结果不可能绝对准确。例如，用刻度尺来测量长度，用天平来测量物体的质量，用温度计来测温度，用电流表来测电流或用电压表来测电压，测出的数值跟被测物理量的真实值都不可能完全吻合。测出的数值与真实值的差异叫作**误差**（**error**）。从来源看，误差可以分为**系统误差**（**systematic errors**）和**偶然误差**（**random errors**）两种。

图 2.2.1　通过测量 200 g 的砝码来检验电子秤的准确性

系统误差是由于仪器本身不够精密（precision）或实验方法和实验原理不够完善而产生的。例如，天平的砝码不准确、没有考虑空气浮力的影响、做热学实验时没有考虑散热损失等，都会产生系统误差。系统误差的特点是：在多次重复做同一测量时，误差总是有规律地偏大或偏小，而不会出现某几次偏大而另外几次偏小的情况。要减小系统误差，必须针对它产生的原因，校准实验仪器（图 2.2.1），改进实验方法，或者从原理上设计更完善的实验。

偶然误差也称随机误差，是由各种偶然误差因素对实验者、测量仪器或物理量的影响而产生的。例如，用具有毫米刻度的尺测量物体的长度，毫米以下的数值只能用眼睛估计，各次测量的值就不一致，有时偏大，有时偏小。我们用交流电压表测量插座上的电压，由于电网的波动，我们测到的电压值也会忽大忽小，并在一个范围内波动。偶然误差总是有时偏大，有时偏小，并且偏大和偏小的机会相同。因此，进行多次测量，取各次测量的平均值，可以很大程度地消除偶然误差的影响，这个平均值要比一次测得的测量值更接近真实值。

做一做

下面给出了三种不同的长度测量工具，请自行查阅相关资料，了解它们的结构、原理、精密度和使用方法，比较它们各自的优缺点，并且用它们实际测量一下身边的物品。

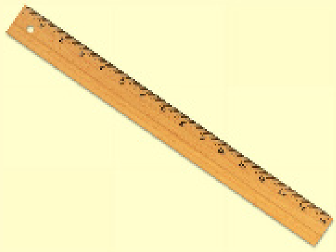


图 2.2.2　毫米刻度尺

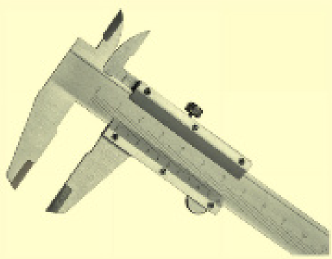


图 2.2.3　游标卡尺

图 2.2.4　螺旋测微器

② 有效数字

测量既然有误差，测得的数值就只能是近似值。例如，当你用毫米刻度尺测量一支钢笔的长度时，把钢笔的首端对齐零刻度，发现钢笔的尾端正好处在 14.3 ～ 14.4 cm 之间，你估读后得到钢笔的测量值为 14.35 cm。这一测量值共包含四位有用的数字：前三位你是确定的，最后一位则是你估计的。像这样的有用数字称为**有效数字**（**significant digit**）。对于同样一个物体，用不同的测量工具对其长度进行测量，得到的有效数字位数可能是不一样的。

必须指出的是，测量值 14.5 cm、14.50 cm、14.500 cm 的含义是不同的，它们分别代表三位、四位、五位有效数字。14.5 表示最后一位数 5 是不可靠的，而 14.50 和 14.500 表示各自最后一位数 0 是不可靠的。因此，最后一位数 0 是有意义的，不能随便舍去或者添加。但是，小数的第一个非零数字前面的零是用来表示小数点位置的，不是有效数字。例如，0.92、0.056、0.003 4 都是只有两位有效数字。

在学生实验中，测量时要按照有效数字的规则来读数和记录。在处理实验数据进行加减乘除运算时，也应该按照有效数字运算规则进行。但由于这些规则比较复杂，在中学阶段将不作具体要求，运算结果一般取两位或者三位有效数字就可以了。

> 做任何运算时，所得结果的有效数字绝对不能比条件所给的有效数字位数更多。

练习 2-2

1. 把本应在 20℃的恒温室内使用的直尺拿到 30℃的环境中使用，测得值必然比真实值偏____。如果不小心将天平的砝码磨损掉一小块，那么用它称量时得到的值必然比真实值偏____。
2. 为什么多次测量求平均值可以减小偶然误差？
3. 把下列数据按准确度由小到大的顺序排列：0.003 4 m、45.6 m、1 234 m。
4. 请分别说出以下数据的有效数字有几位。

   普朗克常量：0.000 000 000 000 000 000 000 000 000 000 000 662 606 957 J s

   万有引力常量：0.000 000 000 066 7 N m^2 kg^{-2}

   地球赤道的平均半径：6 378.17 km

   吉隆坡的重力加速度值：9.78 m s^{-2}

5. 读数时，眼睛正对刻度（图 2.2.5），或者与刻度成某一角度（图 2.2.6），前者得到的结果比后者更准确。在图 2.2.6 中，视差使读数移动了多少？

图 2.2.5　眼睛正对刻度

图 2.2.6　眼睛斜对刻度

第 3 节　科学记数法和数量级

1 科学记数法

地球赤道半径大约是六千四百千米。这个长度如果写成 6 400 km，从有效数字的角度看是不好的，因为会使人误以为是四位有效数字，但其实最后的 0 是不可靠的。实际上，地球赤道半径是 6 378.17 km，说它约为六千四百千米是只取了两位有效数字。如果地球半径写成 64×10^2 km 或 6.4×10^3 km，就不会引起误会了。

任何近似数都可以用 1 ～ 10 之间的一个数乘以 10 的若干次方来表示。这种表示数字的方法叫**科学记数法（scientific notation）**。按照科学记数法，地球赤道半径，取两位有效数字应写成 6.4×10^3 km，取四位有效数字应写成 6.378×10^3 km。质子的质量是 0.000 000 000 000 000 000 000 000 001 672 623 kg，取两位有效数字应写成 1.7×10^{-27} kg，取三位有效数字应写成 1.67×10^{-27} kg。

物理学里要处理的数据有的非常小，如核子的直径约为 0.000 000 000 000 001 m；有的非常大，如银河系的直径约为 1 000 000 000 000 000 000 000 m。采用科学记数法，不仅能表示出有效数字位数，还可以很方便地写出这些非常小或者非常大的数据，如核子直径可写成 1×10^{-15} m，银河系的直径可写成 1×10^{21} m。此外，采用科学记数法，在比较几个小数或几个大数时，不需要去数它们的位数，只要看看指数就一目了然了。

表 2-4　一些典型的长度

事物名称	长度 /m
现在能观测到的宇宙最大距离	10^{26}
银河系直径	10^{21}
太阳半径	7×10^8
地球半径	6×10^6
细菌直径	10^{-5}
原子直径	10^{-10}
核子直径	10^{-15}
电子直径	10^{-18}

表 2-5　一些典型的质量

事物名称	质量 /kg
宇宙	10^{50}
银河系	10^{42}
太阳	2×10^{30}
地球	6×10^{24}
细胞	10^{-10}
碳原子	10^{-26}
核子	10^{-27}
电子	10^{-30}

表 2-6　一些典型的时间

事物名称	时间 /s
宇宙膨胀至今	10^{18}
太阳年龄	10^{17}
^{14}C 的半衰期	1.8×10^{11}
人类文明史	10^{11}
一日	8.6×10^4
百米赛跑世界纪录	9.58
τ 子的寿命	10^{-13}
Z^0 粒子的寿命	10^{-25}

② 数量级

某个物理量的数值，在采用科学记数法写成 $A\times10^n$ 时，10 的指数 n 叫作这个物理量的**数量级（order of magnitude）**。例如，质子的质量，以千克为单位，数量级是 -27，以克为单位，数量级是 $-27+3=-24$。两个物理量，若用相同的单位，则指数相差多少，就说它们相差多少个数量级。例如，太阳半径比地球半径大两个数量级，即约大 $10^2=100$ 倍；核子质量比碳原子质量小一个数量级，即核子质量约为碳原子质量的十分之一。

有些物理量，或者由于知识或测量技术的限制，只算出或测出其大致范围；或者由于只需知道其大致范围而确切数值对了解问题影响不大，在这两种情况下，就只说出其数量级而不说出其确切值。上表中，关于宇宙的数据就属于前一种情况，关于核子、电子的数据则属于后一种情况。关于空间和时间的数量级，请阅读本章的拓展阅读材料《物理世界的空间尺度和时间尺度》。

③ 近似计算

物理学是一门定量的科学，实验测量和理论计算都达到了很高的精度，如时间计量就有 12 ～ 13 位有效数字。理论物理学家在进行详细计算之前，为了选择和建立恰当的模型，需要首先粗略估算各有关物理量的大小和相对重要性；同样，实验物理学家在进行精密测量之前，为了选择合适的测量仪器和方法，也需要对各有关物理量的数量级做粗略的估算。所以，粗略的估算即近似计算，在物理研究中经常用到。

近似计算对学习物理也很有用。近似计算往往可以使物理问题得到更深入、具体的分析；近似计算能很快得出近似结果，可以避免诸如点错了小数点之类的失误。

对于近似计算，一位有效数字就足够了。我们可以把有关的数都简化成一位有效数字后再计算。例如，要计算一年有多少秒，精确的算法如下：

$$365.242\,2\times24\times60\times60\ \text{s}=3.155\,692\,608\times10^7\ \text{s}。$$

近似计算时，把 4 项乘数分别简化为 4×10^2、2×10、6×10、6×10，计算简化如下：

$$\begin{aligned}&4\times10^2\times2\times10\times6\times10\times6\times10\\&=4\times2\times6\times6\times10^{2+1+1+1}\ \text{s}\\&\approx300\times10^5\ \text{s}\\&=3\times10^7\ \text{s}\end{aligned}$$

例题 2-1 如果雾中水滴的半径是 2.73×10^{-3} cm，试估算这颗水滴的体积大约是多大。

解

$$
\begin{aligned}
V &= \frac{4}{3}\pi r^3 \\
&\approx \frac{4}{3}\times3\times(3\times10^{-3})^3\ \text{cm}^3 \\
&= 4\times(27\times10^{-9})\text{cm}^3 \\
&\approx 4\times3\times10\times10^{-9}\ \text{cm}^3 \\
&\approx 1\times10^{-7}\ \text{cm}^3
\end{aligned}
$$

故这颗水滴的体积大约是 1×10^{-7} cm^3。

练习 2-3

1. 请用科学记数法写出下面几个数据。

   普朗克常量：0.000 000 000 000 000 000 000 000 000 000 000 662 606 957 J s

   万有引力常量：0.000 000 000 066 7 N m^2 kg^{-2}

   地球赤道的平均半径：6 378.17 km

   吉隆坡的重力加速度值：9.78 m s^{-2}

2. 木星的直径约是 1.39×10^5 km，地球的直径约是 1.28×10^4 km，它们的数量级各是多少？木星直径约为地球直径的多少倍？

3. 填空：

   (a) 201.27，用科学记数法表示时，小数点需向左移__位，应乘以 10 的__次方。

   (b) 32 001.0，用科学记数法表示时，小数点需向左移__位，应乘以 10 的__次方。

   (c) 2 018 795.4，用科学记数法表示时，小数点需向左移__位，应乘以 10 的__次方。

   (d) 0.021，用科学记数法表示时，小数点需向右移__位，应乘以 10 的__次方。

   (e) 0.000 320，用科学记数法表示时，小数点需向右移__位，应乘以 10 的__次方。

   (f) 0.000 005 6，用科学记数法表示时，小数点需向右移__位，应乘以 10 的__次方。

4. 估算一天大约有多少秒。

第 4 节　物理公式和图象

1 物理公式

物理学经常要研究一个物理量与另外一个或几个物理量之间的关系，或者说要研究一个物理量怎样随另外一个或几个物理量的变化而变化。例如，初中讲过的胡克定律(Hooke's law) 研究的是：在弹性限度内，弹簧的伸长（或缩短）量 Δl 怎样随外力 F 的变化而变化；玻意耳定律（Boyle's law）研究的是：一定质量的气体，在温度不变时，它的体积 V 怎样随压强 p 的变化而变化；研究液体内部的压强，就是研究液体内部的压强 p 怎样随深度 h 和液体密度 ρ 的变化而变化。

物理量之间的关系，在高中物理中最常见的是**正比（正比例，direct proportion）**关系。例如，在弹性限度内，弹簧的伸长量 Δl 跟拉力 F 成正比；物体做匀速运动时，通过的路程 s 跟运动的时间 t 成正比。这些正比关系可写作 $\Delta l \propto F$、$s \propto t$，符号 $\propto$ 表示成比例。说“Δl 与 F 成正比”或“s 与 t 成正比”，就是说 F 或 t 增大到几倍，Δl 或 s 也随着增大到几倍。再如，在质量一定的情况下，物体的加速度大小与合外力大小成正比。

像 $s \propto t$ 这类表示式，作为物理公式通常写成等式形式：$s = kt$；式中 k 是 s 与 t 的比值，叫**比例常量（proportionality constant）**，也叫比例常数或比例系数。在物理学里比例常量 k 都有它的物理意义，不同物理公式中的比例常量有不同的物理意义。在初中我们学过，匀速运动中 s 与 t 的比值，就是这个匀速运动的速率 v。因此，这个公式应该写成 $s = vt$。

高中物理中，另一个比较常见的物理量间的关系是**反比（反比例，inverse proportion）**关系。例如，玻意耳定律描述为：一定质量的气体，在温度不变时，它的体积 V 跟压强 p 成反比。说“V 与 p 成反比”，就是说 p 增大到几倍，V 就减小到原来的几分之一。用公式表示可写成 $V \propto \frac{1}{p}$，或 $V = k\frac{1}{p} = \frac{k}{p}$，或 $pV = k$。再如，在合外力一定的情况下，物体的加速度大小与质量大小成反比。

物理意义越深刻，公式往往越简洁。如图 2.4.1，丹麦天文学家第谷（Tycho Brahe，1546—1601）用了 30 年时间观测行星运动并且获得了数千个观测数据，德国天文学家开普勒（Johannes Kepler，1571—1630）将这些数据概括为行星运动三大规律，英国物

理学家牛顿又以其为基础发现了极其简洁而且适用范围更广的万有引力定律。

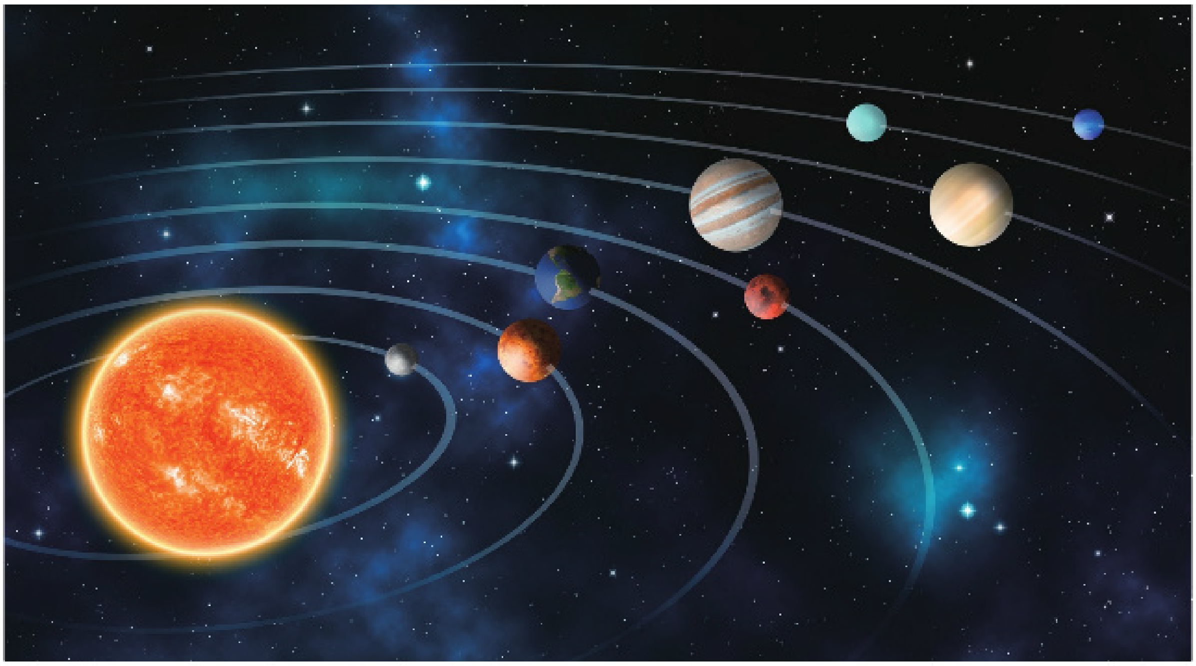


图 2.4.1　太阳系

② 图象

图象（graph）是研究物理量之间关系的重要手段。它不但可以形象地表示出物理公式所反映的物理量之间的关系，而且可以帮助人们根据实验数据寻求物理量之间的关系，进而得出物理公式。

最简单的图象是**直线（straight line）**。从数学课中我们知道，直线方程式的一般形式是 $y = kx + b(k \neq 0)$，式中 k、b 是常数，x 是**自变量（independent variable）**，y 是**因变量（dependent variable）**，或者说 y 是关于 x 的**函数（function）**。例如，对于直线方程式 $y = 3x + 2$，其 x 与 y 的对应值表如表 2-7 所示，对应图象如图 2.4.2 所示。

表2-7　直线方程式 $y = 3x + 2$ 中，x 与 y 的对应值表

y	x
2	0
5	1
8	2
11	3

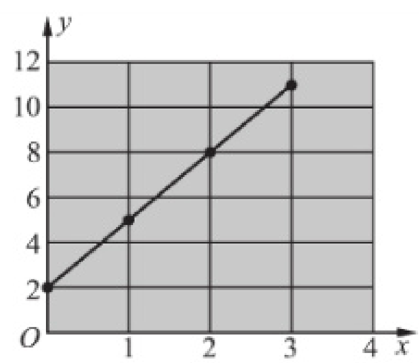


图 2.4.2　直线方程式 $y = 3x + 2$ 中，x 与 y 对应的函数图象

在数学中，常数 k 叫作**斜率**（**slope**），常数 b 叫作 y 轴的**截距**（**intercept**），它们都可以根据图象求出。斜率 k 是 y 的增量 Δy 与相对应 x 的增量 Δx 的比值。在图 2.4.2 中，$k=\frac{\Delta y}{\Delta x}=\frac{11-5}{3-1}=\frac{6}{2}=3$。

y 轴的截距 b 是直线与 y 轴的交点，即自变量 $x=0$ 时函数 y 的值。在图 2.4.2 中，$b=2$。当两个量的图象是直线时，通常说这两个量是**线性关系**（**linear relation**）。当 y 轴的截距 $b=0$ 时，直线方程式变为 $y=kx$。

这是一条通过原点的直线，它表示 y 与 x 这两个量是正比关系。表 2-8 列出了一次做胡克定律实验时得到的拉力 F 和弹簧伸长量 Δl 的数值，图 2.4.3 给出了 F 与 Δl 的对应函数图象。

表 2-8　拉力 F 和弹簧伸长量 Δl 的对应值表

F/N	Δl/cm
0	0.0
1	0.7
2	1.4
3	2.1
4	2.7
5	3.5

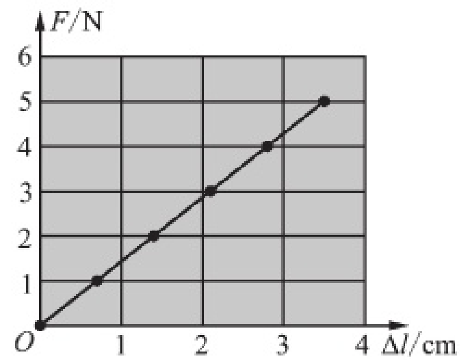


图 2.4.3　拉力 F 和弹簧伸长量 Δl 对应的函数图象

反比关系的图象不是直线而是**双曲线**（**hyperbola**）。表 2-9 列出了一次做玻意耳定律实验时得到的气体压强 p 和气体体积 V 的数值，图 2.4.4 给出了 p 与 V 的对应函数图象。

表 2-9　气体压强 p 与气体体积 V 的对应值表

p/kPa	V/dm^3
10	220
20	110
30	74
50	45
70	32
100	23

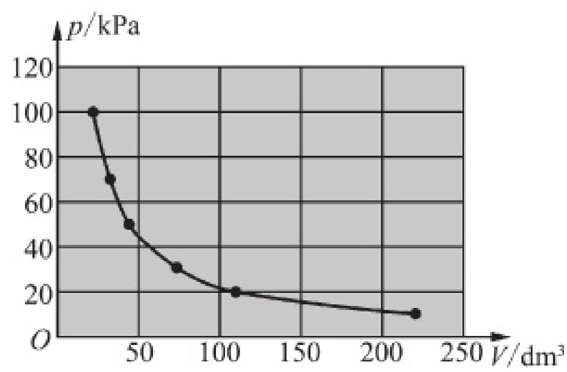


图 2.4.4　气体压强 p 与气体体积 V 对应的函数图象

在后面的学习中，我们还会遇到像 $y = kx^2$ 和 $y^2 = kx$ 这样的函数关系式，它们的图象分别如图 2.4.5 和图 2.4.6 所示。它们都属于二次函数，它们的图象都是抛物线（parabola）。

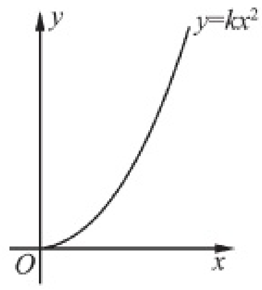


图 2.4.5

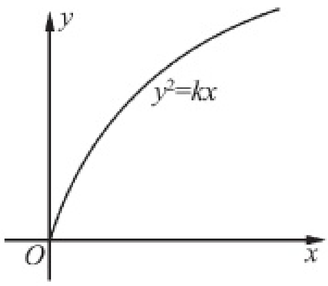


图 2.4.6

通过改变坐标轴的内容，我们可以将曲线的图象转变为直线的图象，例如，在图 2.4.4 中，我们把纵坐标 p 改为 $\frac{1}{p}$，就可以获得一条直线的图象。这个方法在我们处理实验数据时经常用到。

在作曲线“拟合”坐标系中的点时，要注意“顺势”“平滑”地画线。如果有些点难以落在曲线上，应该使它们大致均匀地分布在曲线两侧。

练一练

下表给出一些特定体积的纯金块的质量。

纯金块的体积 /cm³	1.0	2.0	3.0	4.0	5.0
纯金块的质量 /g	19.4	38.6	58.1	77.4	96.5

（1）根据上表给出的数据，在图 2.4.7 中画出各个数据点，并画出这些点的拟合线。

（2）描述所得到的图线。

（3）根据你的图线，说出纯金块的质量与体积之间存在着什么类型的关系。

（4）这条图线的斜率是多少？注意写出正确的单位。

（5）写出表示纯金块质量和体积关系的函数表达式。

（6）用一个词阐述直线斜率的物理意义。

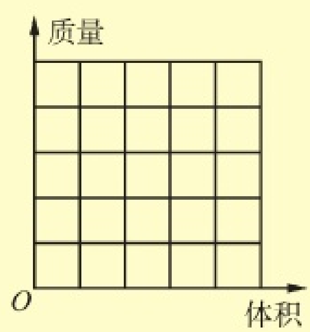


图 2.4.7 纯金块质量与体积的关系图象

③ 内插法和外推法

正如著名文学家马克・吐温满怀激情地感叹："科学真是迷人，根据零星的事实，增添一点猜想，竟能赢得那么多收获！"利用图象可以很方便地知道没有实际测定过（或计算过）的数值。例如，从图 2.4.3 中很容易知道：当拉力 $F = 3.5$ N 时，弹簧的伸长量 Δl 约为 2.3 cm；当弹簧的伸长量 $\Delta l = 3$ cm 时，对应的拉力约需 4.3 N。这种利用已画出的图象由一已知物理量的数值推知其对应的未知量数值的做法，叫作内插法（interpolation）。如果所求的数值超出了实验数据的范围（例如，利用图 2.4.3 求拉力大于 5 N 时的 Δl），可以顺着图象的趋势将它延长后求出，这种做法叫作外推法（extrapolation）。

> 物理规律或者定律总是只能在一定范围内成立。

内插法和外推法都是物理学中常用的方法。但必须注意：内插法只在图象是连续的平滑曲线或者直线时才适用，外推法很可能因为超出规律的适用范围而无效。例如，图 2.4.3 表示的 Δl 与 F 成正比关系只适用于弹性限度内，用外推法求超出弹性限度的数值必定是错的。

练习 2-4

1. 从图 2.4.3 中求拉力 $F = 2.5$ N 时，弹簧的伸长量 Δl 大约是多少；从图 2.4.4 中求气体体积 $V = 60\ \mathrm{dm}^3$ 时，压强 p 大约是多少。

2. 圆周长的公式是 $C = \pi d$。周长 C 和直径 d 存在什么样的函数关系？填写 d 与 C 的对应值表，并画出图象。

d/cm	0	1	2	3	4	5
C/cm						

3. 圆面积的公式是 $S = \pi r^2$。这是几次函数？填写 r 与 S 的对应值表，并画出图象。

r/cm	0	1	2	3	4	5
S/cm^2						

拓展阅读

物理世界的空间尺度和时间尺度

熊家炯

图 2.4.8 一些典型物理现象的空间尺度

你知道现代科学所知的物理世界在空间和时间尺度上有多大吗？请看图 2.4.8、图 2.4.9 中关于一些典型物理现象的空间尺度和时间尺度的图示。

现代天文探测表明，宇宙至少延展了 10^{10} 光年，即 10^{26} m，这说的是宇宙尺度的下限。古人云：一尺之棰，日取其半，万世不竭。说的是物质世界往小的方向可以

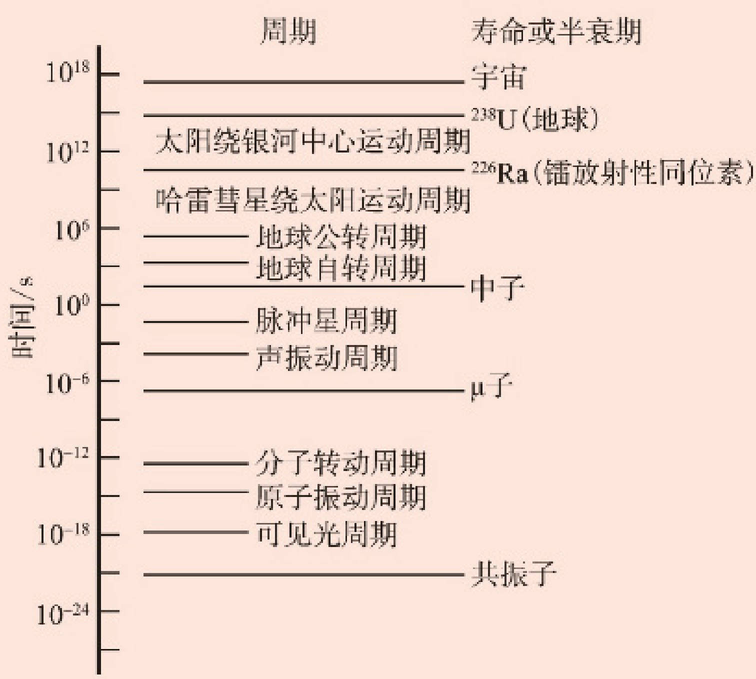


图 2.4.9 一些典型物理现象的时间尺度

一直分下去。现代实验所涉及的基本粒子的“内部”空间约为 10^{-17} m。从空间范围看，从 10^{26} m 到 10^{-17} m，相差 43 个数量级！

从时间范围看，我们所知的这一部分宇宙的寿命约为 100 亿年，即 10^{17} s，而粒子物理实验表明，某些基本粒子的寿命约为 10^{-23} s，两者相差 40 个数量级！

既然物理世界在时空尺度上跨越了这么大的范围，我们对它的描述也不免要划分为许多层次。每个层次里，物质的结构和运动规律将表现出不同的特点。怎么划分层次？从大的方面说，首先可把物理现象区分为低速和高速，以及宏观和微观等类别。

以光在真空中的速度 $c = 2.998\times10^{8}\ \mathrm{m\ s^{-1}}$ 为判据，物体运动速度 v 接近光速的物理现象，称为高速物理现象，反之为低速物理现象。即：

$\left(\frac{v}{c}\right)^2$ 接近于 1——高速物理现象，或相对论性运动；

$\left(\frac{v}{c}\right)^2$ 远小于 1——低速物理现象，或非相对论性运动。

从这个判据，无论是蜗牛爬行还是火箭飞行，都属于低速物理现象；高能加速器中质子的运动速度接近 0.99 c，这才属于高速物理现象。

一个物理现象发生的限度范围 r 和它的动量 mv 的乘积，即 mvr，小到常数 $\hbar$ 的数量级时，称为微观物理现象，反之则为宏观物理现象，即：

mvr 远大于 $\hbar$——宏观物理现象；

mvr 接近于 $\hbar$——微观物理现象。

这里的常数 $\hbar = \frac{h}{2\pi} \approx 1.054\times10^{-34}\ \mathrm{J\,s}$（$h$ 是普朗克常数）。电子在氢原子中运动属于微观物理现象；一颗尘埃在空气中漂浮，电子在真空管中运动，都属于宏观物理运动。

人类对物理世界的认识，是首先从低速、宏观物理现象开始的，后来逐渐进入高速物理现象和微观物理现象。若把物理

现象按空间尺度和速率大小划分为若干区域，则有如图 2.4.10 那样的示意图。

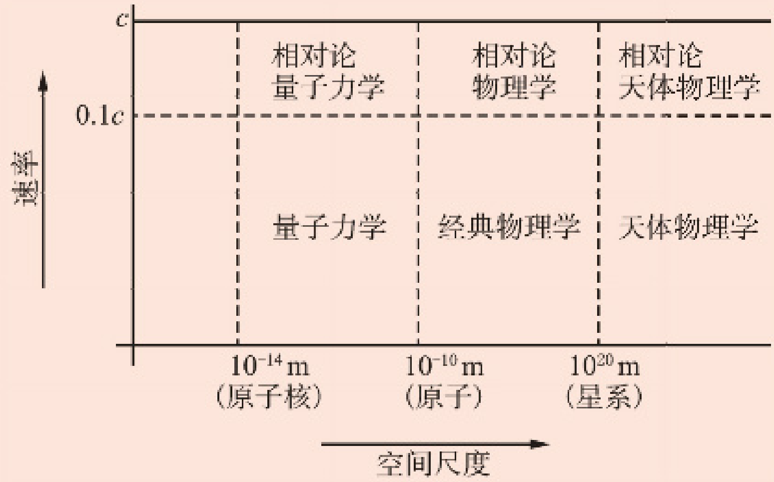


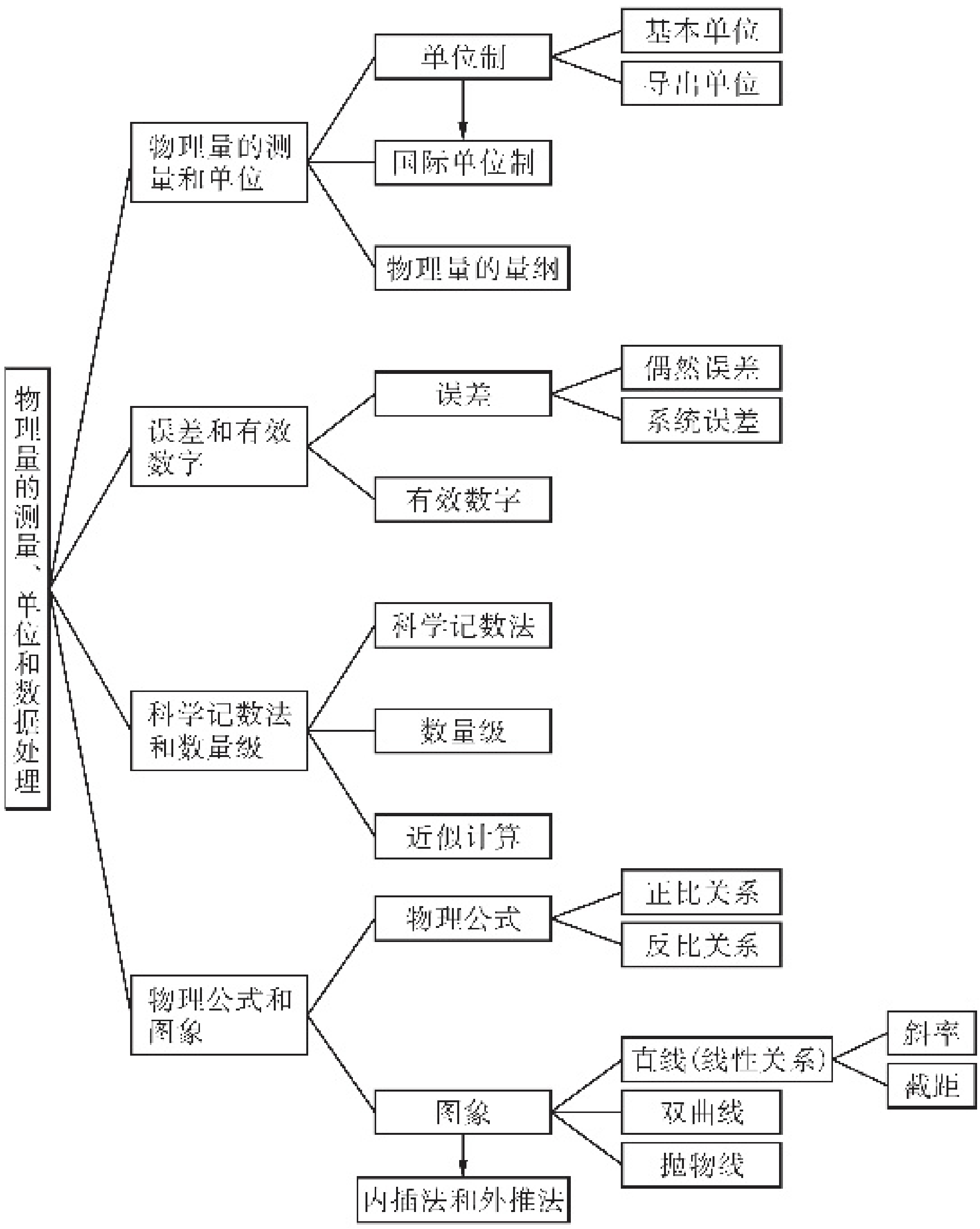
图 2.4.10　一些典型物理现象的空间尺度（未按比例作图）

我们在图 2.4.10 中不同区域里，定性地标出了相应的物理学分支的名称，这不过是从一个角度反映物理这一科学之宫的轮廓而已。

（摘自《现代物理知识》1989 年第 2 期，略有改动）

章末回顾

本章基本知识结构



总练习二

基础练习

1. 下列各量中，等于 86.2 cm 的是（　　）

   A．8.62 m　　　　B．0.862 mm

   C．8.62×10^{-4} km　　　　D．862 dm

2. 爱马需要解答一个题目，题目给出了距离是 5 km，速度是 5 m s^{-1}，但是她忘记了公式。为了得到以秒为单位的结果，爱马需要做的是（　　）

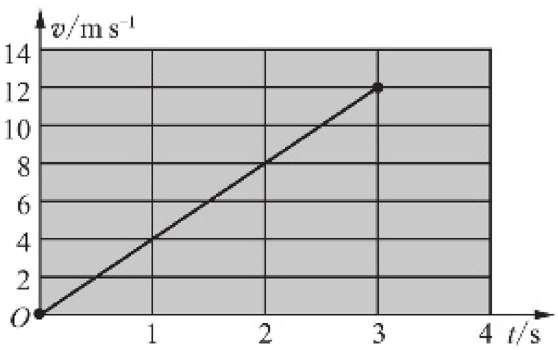
   A．用 5 km 乘以 5 m s^{-1}，然后乘以 1 000

   B．用 5 km 除以 5 m s^{-1}，然后乘以 1 000

   C．用 5 km 除以 5 m s^{-1}，然后除以 1 000

   D．用 5 km 乘以 5 m s^{-1}，然后除以 1 000

3. 下图中直线的斜率是（　　）



速度与时间的关系图象

（第 3 题）

   A．0.25 m s^{-2}　　B．0.4 m s^{-2}　　C．2.5 m s^{-2}　　D．4.0 m s^{-2}

4. 有些直尺的零刻度并不是在其顶端，而是设置在距离顶端几毫米处。这样做是如何提高直尺测量的准确性的？

5. 你的朋友在一个报告中说，沿着 250 m 的跑道跑一圈，他所花费的时间为 65.414 s。他还说，这是用一只精密度为 0.1 s 的秒表，测量了跑 7 圈所用的时间才得到的数值。你认为他的这个结论可信吗？

6. 你的同学准备用一只最多能显示 10 位数字的计算器计算“$\dfrac{409\ \mathrm{km}}{6\ \mathrm{h}}$”。当他输入“$\dfrac{409}{6}$”后，屏幕上显示“68.166 666 66”。他认为“小数位数越多越精确”，所以他取“68.166 666 66 km h^{-1}”作为最后结果。他这样取值对吗？为什么？

7. 某城市的交通音乐广播的频率是 91.8 MHz，这等于多少千赫兹？某条高速公路的最高限速是 120 km h^{-1}，这等于多少米每秒？

8. 计算：10.8 g ＋ 8.264 g ＝_____；6 371 km ＋ 1.8 m ＝_____。

9. 一年（365 天）相当于多少秒？（结果要求用科学记数法表示）

10. 如图所示的叶子有多长？

用毫米刻度尺测量一片树叶的长度
（第 10 题）

提高练习

11. 如今公认的地球表面的重力加速度值为 9.801 m s^{-2}，而你用单摆实验获得的重力加速度值是 9.4 m s^{-2}，那么是否应该抛弃前者而接受你所得到的新数值呢？说明你的理由。

12. 在质量—体积图象（如图 2.4.7）中，如果 y 轴的截距不为零，而是 3 g，这表示什么含义？

13. 将下列数据用图象表示，其中时间为自变量。

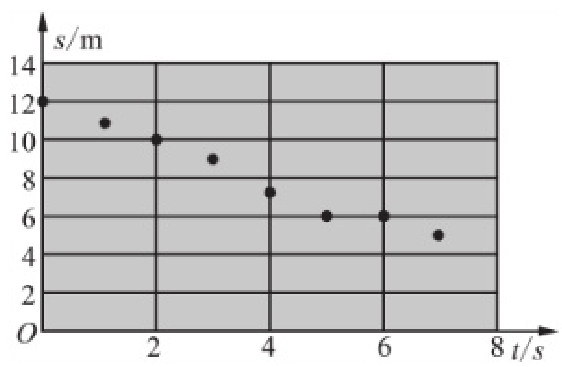
时间 /s	0	5	10	15	20	25	30	35
速度 /(m s^{-1})	12	10	8	6	4	2	2	2

14. 请你参照表 2-8 或图 2.4.3，再用另一根不同的弹簧进行实验，也在图 2.4.3 中描绘出 Δl–F 图象。你得到的直线可能比原图中的直线更平缓，或者说斜率更小。请你解释这代表了什么意思。

15. 同学们在初中已经学过了速度的单位是“$m\,s^{-1}$”。已知动量的定义式是 $p = mv$，动能的表达式是 $E = \frac{1}{2}mv^2$，请你推导出动量和动能的单位。

16. 在磁场中运动的带电粒子所受到的磁场力的大小可由公式 $F = Bqv$ 求出。其中，F 表示力，单位为 $kg\,m\,s^{-2}$；q 表示粒子所带的电荷量，单位为 A s；v 表示速度，单位为 $m\,s^{-1}$；B 表示磁感应强度，单位为 T（特斯拉）。请用国际单位制中的基本单位来表示 1 T 的值。

17. 写出利用下图所示数据点得到的最佳拟合直线的方程。（提示：作一条直线，让所给数据点对称地分布在直线两侧，找出此直线的斜率和截距）



距离与时间的关系图象

（第 17 题）

第3章 直线运动

本章提要

1. 运动物体的位置及其变化快慢的表示。
2. 匀速直线运动的规律。
3. 匀加速直线运动的规律。
4. 用图象来表示直线运动的规律。
5. 自由落体运动的规律。

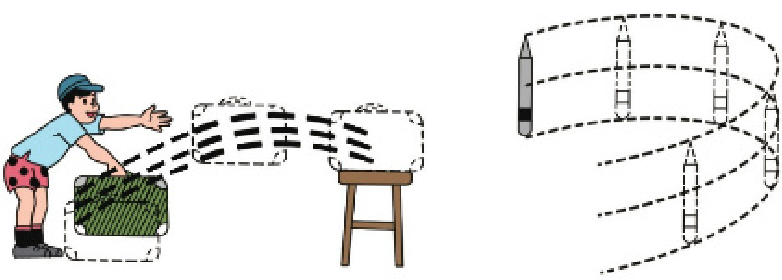
学前储备

1. 初步了解标量和矢量、路程和位移、速率和速度。
2. 会分析匀速运动问题。
3. 了解正比例、反比例和线性函数图象。

第 1 节　机械运动

1 机械运动

在我们生活的世界里，有时晴空万里，有时风雨交加，有时冰天雪地，有时春暖花开；动物在繁衍生息，植物在进行光合作用；发动机在燃烧汽油，孩子们在燃放烟花；用电灯照亮黑夜的道路，用电波联系遥远的国度……这里既有生命运动，也有涉及热、光、电等的运动。其中有一类运动是自然界中最简单、最基本的运动形态，如行人走路、鸟儿飞翔、汽车飞驰、地球的自转和公转等。这一类物体的空间位置随时间变化的运动，称为**机械运动（mechanical motion）**。古希腊哲学家亚里士多德在他的著作《物理学》中说："自然是自身具有运动来源的事物的形态或形式。"他认为物理学研究的自然是运动事物的本原和原因，不能脱离运动的事物来研究自然。可以说，物理学的创立是从研究运动开始的。



（a）　（b）

图 3.1.1　平动的手提包和铅笔

图 3.1.2　火车整体沿直线运动，车轮既有平动也有转动

机械运动可以分成两类。如图 3.1.1 中的手提包、铅笔运动时，物体上所有的点都做相同的运动，称为平动。正在运转的电风扇叶片、正在旋转的芭蕾舞演员，物体上所有的点都绕一条轴线做圆周运动，称为转动。**各式各样看起来很复杂的机械运动，都可以看成是平动和转动组合而成的**。像行驶中的火车车轮（如图

3.1.2)、滚动中的足球、正被拧入的螺丝钉等都是同时做平动和转动的。

②物体和质点

当研究物体的运动时，我们面对的物体其形状和大小是千差万别的。但物体平动时它所有的点都做相同的运动，只要知道它任何一点的运动情况，就知道了整个物体的运动情况，因此我们可以不考虑物体的形状和大小，把物体看成一个拥有它全部质量的点，简称**质点**（**point mass**）。例如，在研究列车沿平直轨道运动时，车厢上各点的运动完全一样，可以用车厢上的任一点表示列车的运动，这时就能把列车看成质点。

在物理学中，把复杂问题进行合理的抽象，突出主要因素，忽略次要因素，建立理想化的“物理模型”，并将其作为研究对象，是经常采用的一种科学研究方法。“质点”便是一个物理模型。

有些情况，物体虽然也有转动，但它的形状和大小在研究的问题中可以忽略不计，我们也可以把它看成质点。例如，我们居住的地球在绕太阳公转，同时又在自转，但考虑到地球的直径只有地球到太阳距离的万分之一，因此在研究地球的公转运动时，由地球大小及自转而引起的地球上各部分的运动差异可以忽略不计。此时，可以忽略地球的形状和大小把它看成质点。当然，如果在研究地球的自转时，就不能把地球看成质点了。

一个物体能否被看成质点，是由物体本身和所研究的问题两方面共同决定的。

思考与讨论

在研究列车车轮的运动时，能否把车轮看成质点？

练习 3-1

1. 在日常生活中，哪些物体的运动只有平动或转动？哪些物体的运动是平动和转动兼而有之？

2. 体育比赛也含有很多物理道理，在分析乒乓球的运动规律时能否把它视为质点？在研究跳水运动员（如图 3.1.3）的技术动作时，能否把她视为质点？

图 3.1.3　比赛中的跳水运动员

第 2 节　参照物、坐标系和参照系

1 参照物

通常我们会说房屋、树木是静止的，但考虑到地球是有公转和自转的，我们也会说房屋和树木是随着地球一起运动的。那么，房屋和树木到底是运动的还是静止的呢？

同样，站在匀速前进的列车上的人手里拿着一个苹果，在同车的人看来苹果是静止的，但站台上的人看到苹果和列车一起运动。如果列车上拿苹果的人把手松开，同车的人看到苹果是沿直线竖直下落，而站台上的人看到苹果是水平抛出后沿曲线运动。

为什么对同一事件人们会看到不同的现象呢？实际上，在判断一个物体是运动还是静止时，我们会选择另一个物体作为参照的标准，这一作为标准的物体称为**参照物**(**reference body**)。生活在地球上的人，习惯以地球为参照物。这样，房屋、树木和地球都是静止的。我们若以太阳为参照物，房屋、树木会随着地球一起自转同时绕着太阳公转，这时候我们就说房屋和树木都是运动的。列车上的人以列车为参照物，站台上的人以地面为参照物，故看到的现象不同。可见，**谈论一个物体运动与否，是与所选的参照物有关的**。同一个运动，如果观察它的时候所选的参照物不同，就可能得到不同的观察结果。

思考与讨论

飞花两岸照船红，百里榆堤半日风。
卧看满天云不动，不知云与我俱东。

——〔宋〕陈与义

这首诗中描述的云是动的还是不动的？

图 3.2.1　仰卧舟中的诗人

② 坐标系

为了把物体在各个时刻相对于参照物的位置定量地表示出来，我们可以在参照物上某一点引出一个适当的**坐标系**(**coordinate system**)。例如，在研究列车沿直线轨道前进时，可以设定轨道上某一点为坐标原点，然后沿着轨道建立一维直线坐标系，同时规定好正方向和单位长度。如图 3.2.2 所示，当列车车头运行到 A 点时，此时它的位置坐标是 $x_A = 4$ km；当车头运行到 B 点时，它的位置坐标是 $x_B = -3$ km。

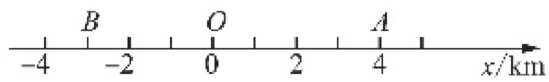


图 3.2.2　一维直线坐标系

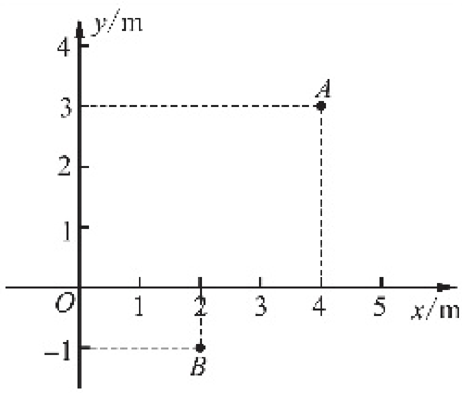


图 3.2.3　二维直角坐标系

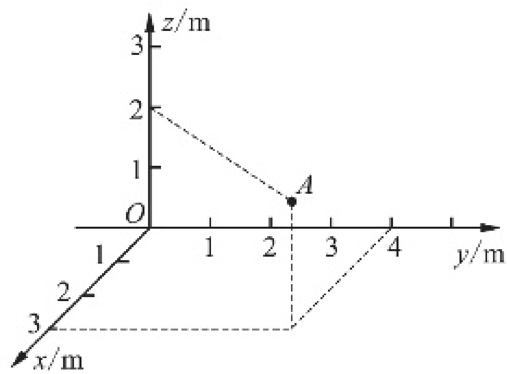


图 3.2.4　三维直角坐标系

如果物体在一个平面范围内运动，例如，小船在湖面上划行，要确定它的位置，可以设定湖面或者岸边的某一点为原点，然后从原点 O 引出互相垂直的 Ox 和 Oy 坐标轴，且这两条坐标轴都在湖面上，如图 3.2.3 所示，这样的坐标系称为二维直角坐标系。如果物体在立体空间内运动，例如，飞机在空中飞行，要确定它的位置，就需要从原点引出三条互相垂直的坐标轴 Ox、Oy 和 Oz，如图 3.2.4 所示，这样的坐标系称为三维直角坐标系。本章局限于讨论直线运动，所以只需要用到一维直线坐标系。

> 参考系也定义为：与参照物固连的整个延伸空间，而在参照物上设置的坐标系称为参考坐标系。
>
> ——《中国大百科全书 · 物理学》

固定在所选参照物上的坐标系称为**参照系**或**参考系**(**reference frame** 或 **reference system**)。当物体运动时，它的位置对应的坐标会随时间而变化。若能知道物体坐标随时间变化的规律，就可以知道任意时刻物体的位置。

练习 3-2

1. “太阳东升西落”“一江春水向东流”，分别是用什么物体作参照物的？

2. 相对地面静止的人造卫星被称为同步卫星。请问：这种卫星绕地心运动一周需要多长时间？

3. 写出图 3.2.3 中 A 点和 B 点的坐标，及图 3.2.4 中 A 点的坐标。

第 3 节　路程和位移

1 路程与位移

物体在运动过程中经过的路径痕迹简称为轨迹。按轨迹的不同，我们可以把质点的运动分成直线运动与曲线运动两大类。物体运动轨迹的长度称为**路程（distance travelled）**。例如，如图 3.3.1 所示，小明从家去学校有两条路径可以选择，一条路径是先沿直线向北走 300 m，再沿直线向东走 400 m 到达学校，一共行走的路程是 700 m；另一条路径是沿一条曲线道路走 600 m，直接到学校。小明选择不同的路径从家到学校所要走的路程不一样，但“殊途同归”，运动过程的初末位置变化是相同的。在物理学中，用一个称为**位移（displacement）**的物理量来表示物体（质点）位置的变化，我们从初位置到末位置作一条有向线段，用这条有向线段表示位移。如图 3.3.2 所示，线段 OA 表示小明从家到学校的位移，其大小是 500 m，方向是东偏北 37°。

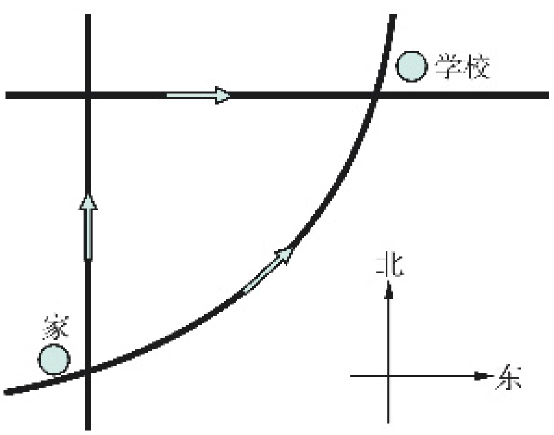


图 3.3.1　从家去学校的路程

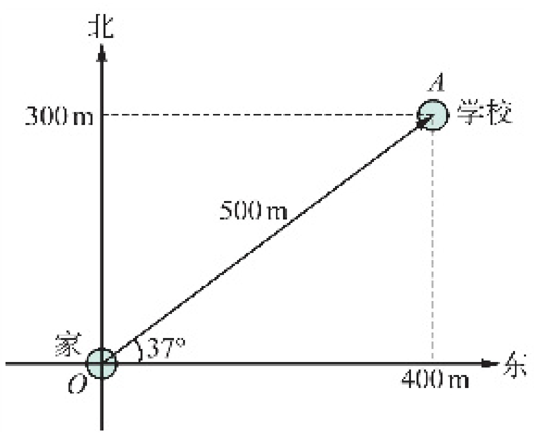


图 3.3.2　从家去学校的位移

思考与讨论

如图 3.3.3 所示，学校、小红家和商店在同一条平直马路上，小红家在学校东侧 300 m 处，商店在小红家东侧 100 m 处。某天放学后，小红先到商店买了一瓶饮料，再回到家，请问：小红回家的路程和位移分别是多少？

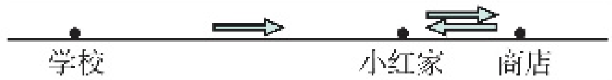


图 3.3.3　回家的路程和位移

② 标量和矢量

在物理学中，像位移这样既有大小又有方向的物理量称为**矢量**（**vector**）。而那些只有大小没有方向的物理量称为**标量**（**scalar**）。路程是标量，初中时学过的质量、温度等也都是标量。

矢量相加和标量相加将遵从不同的法则。

一个袋子中原有 20 kg 大米，再放入 10 kg 大米，那么现在大米的质量是 30 kg。也就是说，**两个标量相加遵从数值相加的法则**。

矢量相加的法则有所不同，下面我们来考虑一个具体问题：

思考与讨论

小明去旅行，第一天从 *A* 地到 *B* 地，第二天从 *B* 地到 *C* 地，请你在图 3.3.4 中用有向线段分别表示小明第一天和第二天对应的位移。小明这两天对应的位移可以怎么表示？这三者之间的关系应该怎么理解？你能通过这个实例总结出一个矢量相加的法则吗？

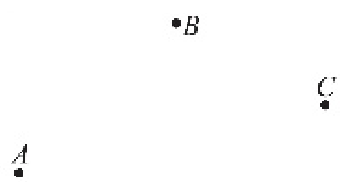


图 3.3.4　矢量相加

从上面这个例子我们看到，矢量相加并不是简单的数值相加，如图 3.3.5 所示。

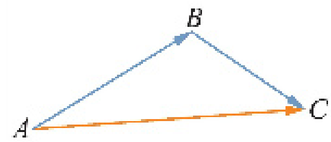


图 3.3.5　位移三角形

③ 位置与位移

在本章中，我们主要研究直线运动。我们可以沿着运动所在的直线方向建立坐标系，如图 3.3.6 所示。

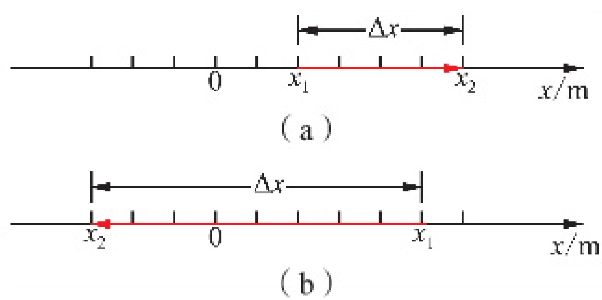


图 3.3.6　直线运动的位置和位移

如果物体的初位置在 x_1，末位置在 x_2，那么 $x_2 - x_1$ 就是物体的位移，记为

$$\Delta x = x_2 - x_1$$

如图 3.3.6 a，当 $x_1 = 2\ \mathrm{m}$、$x_2 = 6\ \mathrm{m}$ 时，

$$\begin{aligned}\Delta x &= 6\ \mathrm{m} - 2\ \mathrm{m}\\ &= 4\ \mathrm{m}\end{aligned}$$

此位移的方向为 x 轴的正方向。

如图 3.3.6 b，当 $x_1 = 5\ \mathrm{m}$、$x_2 = -3\ \mathrm{m}$ 时，

$$\begin{aligned}\Delta x &= (-3\ \mathrm{m}) - 5\ \mathrm{m}\\ &= -8\ \mathrm{m}\end{aligned}$$

此位移的方向为 x 轴的负方向。

从这个例子中可以看出，在直线运动中，位移的正负实际上表达了位移的方向。位移的方向与坐标轴的正方向一致时，位移是正的；位移的方向与坐标轴的正方向相反时，位移是负的。

练习 3-3

1. 某城市出租车的收费标准是每公里 2.40 元。这里的“公里”指的是路程还是位移？

2. 体育场的标准跑道的周长为 400 m。

（a）百米赛跑选用跑道的直道部分，百米赛跑运动员跑完全程的路程是多少？位移大小是多少？

（b）有一名运动员沿跑道跑了两周，他跑的路程是多少？位移大小是多少？

3. 如图 3.3.7 所示，从高出地面 3 m 的位置竖直上抛一个小球，它上升 5 m 后回落，最后到达地面。请分别以地面和抛出点为原点建立坐标系，方向均以向上为正方向，并填写下面表格：

坐标原点的设置	出发点的坐标	最高点的坐标	落地点的坐标	上升过程的位移	下落过程的位移	全过程的位移	全过程的路程
以地面为原点							
以抛出点为原点							

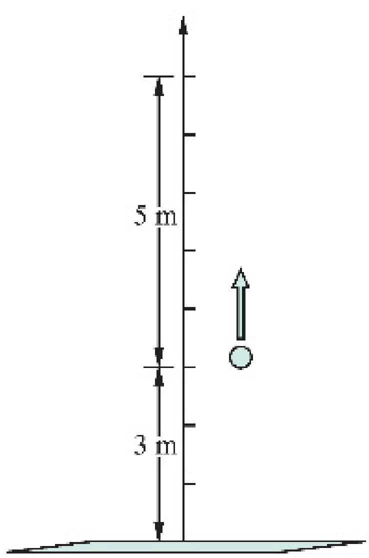


图 3.3.7　竖直上抛的小球

第 4 节　匀速直线运动　速度和速率

1 时刻和时间

为了说明某一件事情，常常要用到时刻和时间这两个概念，例如，上午 8 时 10 分开始上第一节课，8 时 50 分下课，这里的“8 时 10 分”和“8 时 50 分”指的是上课和下课的时刻，而这两个时刻之间相隔的 40 分钟，就是第一节课所经历的时间。所以，为了研究物体运动的状态和过程，我们可能需要同时用到时刻和时间这两个概念。

用时间轴可以表示不同的时刻和经过的时间。例如，一架飞机 8 时 10 分从吉隆坡起飞，13 时 10 分抵达杭州，图 3.4.1 表示了它的起飞时刻 t_1、抵达时刻 t_2，两个时刻相隔的时间 $\Delta t = t_2 - t_1$，$\Delta t = 5$ h 是飞机的飞行时间。

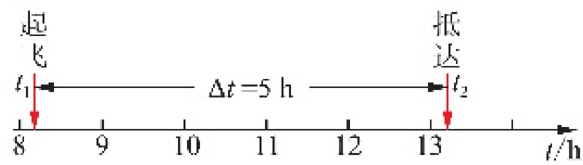


图 3.4.1　时刻与时间

2 速度

物体运动时，它的位置会随时间而变化，而且变化的快慢往往不同，我们也称之为运动的快慢不同。要比较物体运动的快慢，可以有两种方法。一种是相同时间内比较物体位移的大小，位移大，运动得快。例如，自行车在 30 min 内行驶 8 km，汽车在相同时间内行驶 50 km，汽车比自行车快。另一种是位移相同，比较所用时间的长短，时间短，运动得快。例如，2009 年 8 月 17 日，牙买加人博尔特在德国柏林创造了 9.58 s 的男子百米赛跑世界纪录，而小明同学跑完 100 m 用了 15.5 s，小明跑得就慢多了。

那么，怎么比较汽车和百米赛跑运动员的快慢呢？物理学中用位移和发生这个位移所用的时间的比值表示物体运动的快慢，我们称之为**速度**（**velocity**），通常用字母 v 表示。如果在时间 Δt 内物体的位移是 Δx，那么它的速度就可以表示为

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

在国际单位制中，速度的单位是 $\mathrm{m\,s^{-1}}$。常用的单位还有 $\mathrm{km\,h^{-1}}$、$\mathrm{cm\,s^{-1}}$。

速度也是矢量，速度的大小在数值上等于单位时间内物体位移的大小，速度的方向与物体位移的方向相同，也就是我们常说的物体运动的方向。表 3-1 列举了生活中常见的几种物体的速度，从中你也可了解这些物体运动的快慢。

表 3-1　一些物体的速度

物体	$v/(\mathrm{m\,s^{-1}})$
光在真空中传播	3.0×10^{8}
地球绕太阳公转	3.0×10^{4}
第一宇宙速度	约 7.9×10^{3}
步枪子弹	约 900
民航客机	约 300
列车（高铁）	约 100
猎豹	最快 30
虎鲸	最快 15
远洋轮船	8 ～ 17
赛马	15
人类	最快 10.4

3 匀速直线运动

一名晨跑爱好者每天准时跑过湖边一段平直的马路，一名摄影爱好者在同一张底片上每隔 1 s 拍摄一次，如图 3.4.2 所示。从图中可知，跑步的人在第 1 s 内的位移是 5 m，在前 2 s 内的位移是 10 m，在前 3 s 内的位移是 15 m，在前 6 s 内的位移是 30 m……这一段运动的特点是：轨迹是直线，在相等时间内发生的位移相等。这样的运动我们称之为**匀速直线运动**（**rectilinear motion with uniform velocity**），常简称为**匀速运动**。

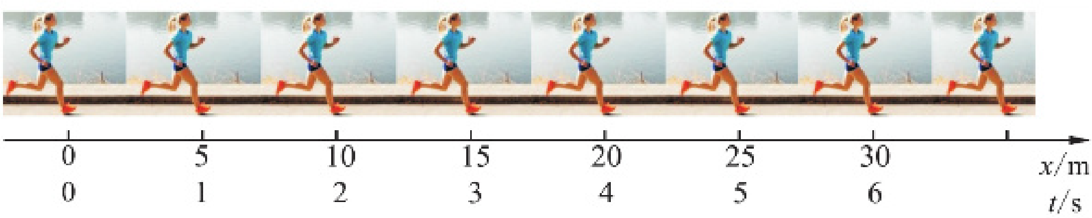


图 3.4.2　跑步的人的位置坐标及对应的时刻

4 速率和匀速率运动

速率（**speed**）指的是物体通过的路程和它通过这段路程所需时间的比值，即等于物体在单位时间内通过的路程。速率的单位和速度的单位相同。但由于路程是一个只有大小、没有方向的标量，因此速率也是标量，而速度是矢量。

匀速率运动指的是在运动中物体的速率保持不变的运动。在直线运动的情况下，如果物体只向某一方向运动，那么它的位移大小和通过的路程相等，则此运动的速度大小和速率也相等。这种情况下，可以说速率是速度的大小，或者说速率是速度的绝对值。

可见，在此时匀速率直线运动就是匀速直线运动。但是如果物体在运动中还存在反方向的运动，那就不能这样说了。

⑤ 直线运动中的相对速度

物体 A 和物体 B 沿着同一条直线运动，若在某一时刻，物体 A 的运动速度为 v_A，物体 B 的运动速度为 v_B，则我们把 $v_{AB} = v_A - v_B$ 定义为物体 A 相对于物体 B 的相对速度。一般在处理问题时，我们以地面为参照系，所以通常我们所讲的速度就是物体相对于地面的运动速度。

例题 3 – 1 两辆小汽车在平直的公路上行驶，沿公路建立一维直线坐标轴，设定向右为正方向。车 A 相对于地面的速度 $v_A = 30\ \mathrm{m\,s^{-1}}$。

(a) 如图 3.4.3 a，若车 B 在车 A 的前面相对于地面的速度 $v_B = 25\ \mathrm{m\,s^{-1}}$，求车 A 相对于车 B 的速度 v_{AB} 和车 B 相对于车 A 的速度 v_{BA}。

(b) 如图 3.4.3 b，若车 B 在车 A 的前面相对于地面的速度 $v_B = -25\ \mathrm{m\,s^{-1}}$，求车 A 相对于车 B 的速度 v_{AB} 和车 B 相对于车 A 的速度 v_{BA}。

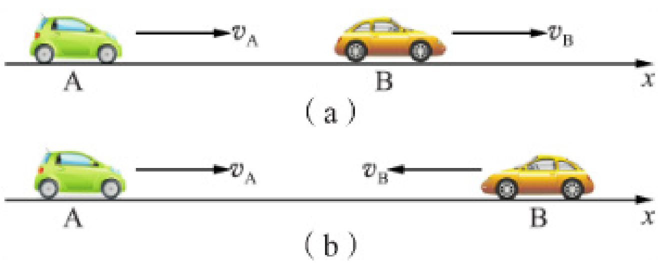


图 3.4.3　直线运动的相对速度

分析 什么是车 A 相对于车 B 的速度呢？实际就是坐在车 B 中的人以他自己或车 B 为参照物，即认为自己不动，然后去观察和描述车 A 的速度。反之亦然。

解 (a) 车 A 相对于车 B 的速度

$$\begin{aligned} v_{AB} &= v_A - v_B \\ &= 30\ \mathrm{m\,s^{-1}} - 25\ \mathrm{m\,s^{-1}} \\ &= 5\ \mathrm{m\,s^{-1}} \end{aligned}$$

车 B 相对于车 A 的速度

$$\begin{aligned} v_{BA} &= v_B - v_A \\ &= 25\ \mathrm{m\,s^{-1}} - 30\ \mathrm{m\,s^{-1}} \\ &= -5\ \mathrm{m\,s^{-1}} \end{aligned}$$

即车 B 中的人觉得车 A 以 $5\ \mathrm{m\ s^{-1}}$ 的速度在靠近他，车 A 中的人觉得车 B 也是以 $5\ \mathrm{m\ s^{-1}}$ 的速度在靠近他。

（b）车 A 相对于车 B 的速度

$$\begin{aligned} v_{AB} &= v_A - v_B \\ &= 30\ \mathrm{m\ s^{-1}} - (-25\ \mathrm{m\ s^{-1}}) \\ &= 55\ \mathrm{m\ s^{-1}} \end{aligned}$$

车 B 相对于车 A 的速度

$$\begin{aligned} v_{BA} &= v_B - v_A \\ &= -25\ \mathrm{m\ s^{-1}} - 30\ \mathrm{m\ s^{-1}} \\ &= -55\ \mathrm{m\ s^{-1}} \end{aligned}$$

即车 B 中的人觉得车 A 以 $55\ \mathrm{m\ s^{-1}}$ 的速度在靠近他，车 A 中的人觉得车 B 也是以 $55\ \mathrm{m\ s^{-1}}$ 的速度在靠近他。

可见，在同一直线上运动的两个物体 A 和 B，若在同一参考系中的速度分别为 v_A、v_B ，则 A 对 B 的相对速度为

$$v_{AB} = v_A - v_B$$

B 对 A 的相对速度为

$$v_{BA} = v_B - v_A$$

若物体的运动不是直线运动，则两物体间的相对速度就要遵从矢量相减法则

$$\vec{v}_{BA} = \vec{v}_A - \vec{v}_B$$

练习 3-4

1. 同学之间常常会问：“现在几点了？”“还剩几分钟上课？”哪句话问的是时刻？哪句话问的是时间？
2. $1\ \mathrm{m\ s^{-1}}$、$1\ \mathrm{km\ h^{-1}}$、$1\ \mathrm{cm\ s^{-1}}$，这三个速度值中哪个速度最大？哪个速度最小？
3. 利用表 3-1 的数据，请问：

（a）1 光年（光在真空中传播 1 年的距离）相当于多少米？

（b）除了太阳以外，最靠近地球的恒星是半人马座中的比邻星，它离地球的距离是 4.0×10^{13} km，它发出的光要经过多长时间才能到达地球？人们乘坐现有的宇宙飞船需要多长时间才能到达比邻星？

第 5 节　匀速直线运动的图象

1 位置—时间图象

表 3-2　时间和位置

t/s	x/m
0	0
1	5
2	10
3	15
4	20
5	25
…	…

根据上节图 3.4.2 中跑步者的位置坐标及对应的时刻，我们得到位置和时间的对应关系，如表 3-2 所示。为了用图象来表示这种关系，我们建立直角坐标系，横轴表示时间，纵轴表示位置，如图 3.5.1 所示。这样的图象称为位置—时间图象，或 x-t 图象。

图 3.5.1 是表示正比例函数图象的一条过原点的直线，对应的位置和时间关系可以表示为 $x = vt$，其中 v 代表跑步者的速度，v 的大小等于直线斜率的大小。从 x-t 图象可以求出任意时间内对应的位移大小，反过来说也可以求出物体发生任何位移所用的时间，同时还可以求出物体运动的速度大小。

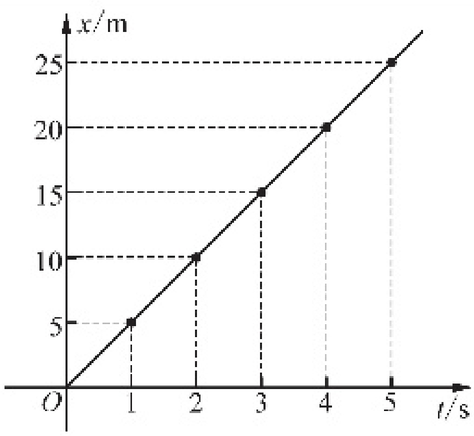


图 3.5.1　x-t 图象

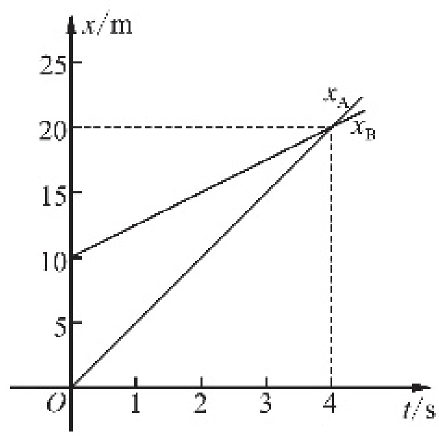


图 3.5.2　跑步者 A 和 B 的位置—时间图象

例题 3 - 2　两名跑步者 A 和 B 的位置—时间图象如图 3.5.2 所示，请你根据图象分别写出两名跑步者的位置和时间的函数关系式，并比较两名跑步者跑步速度的大小。

解　利用直线 x_A 上两个点的坐标（0 s，0 m）和（4 s，20 m），可得 A 的速度

$$v_A = \frac{20\ \text{m} - 0\ \text{m}}{4\ \text{s} - 0\ \text{s}}$$

$$= 5\ \text{m s}^{-1}$$

进而可得 A 的位置和时间的函数关系式为 $x_A = 5t$。

利用直线 x_B 上两个点的坐标（0 s，10 m）和（4 s，20 m），可得 B 的速度

$$v_B = \frac{20\ \mathrm{m} - 10\ \mathrm{m}}{4\ \mathrm{s} - 0\ \mathrm{s}}$$

$$= 2.5\ \mathrm{m\,s^{-1}}$$

进而可得 B 的位置和时间的函数关系式为 $x_B = 10 + 2.5\,t$。

显然可得，$v_A > v_B$。同时我们还可以从图中得到以下信息：当 $t = 0$ 时，B 在 A 的前方 10 m 处，4 s 后 A 追上 B。

在例题 3－2 中，x_B 与 t 是一次函数关系，我们也称位置与时间成线性关系，这种线性关系表示匀速直线运动。

② 速度—时间图象

匀速运动的速度与时间关系也可以用它的速度—时间图象（或称 v-t 图象）来表示。取直角坐标系的横轴表示时间，纵轴表示速度，例题 3-2 中跑步者 A 和 B 的速度—时间图象如图 3.5.3 所示。匀速直线运动的速度不随时间变化，所以 A 和 B 的 v-t 图象都是一条平行于横轴的直线。

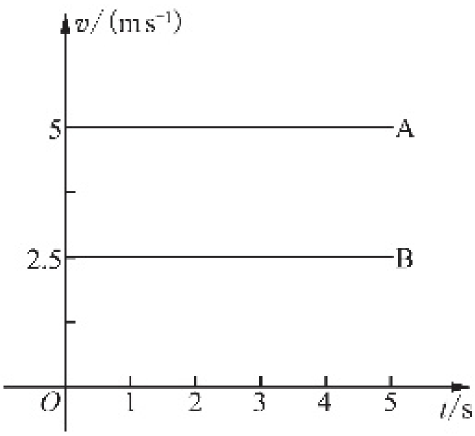


图 3.5.3　v-t 图象

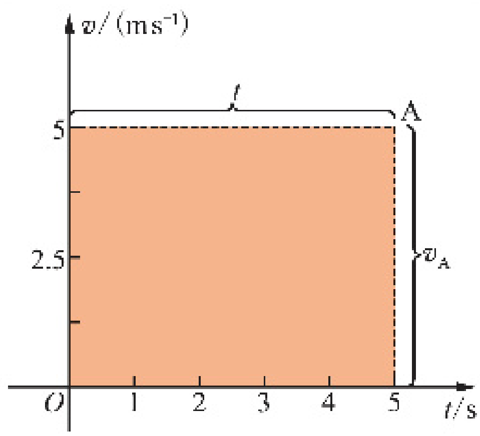


图 3.5.4　位移对应着矩形面积

利用 v-t 图象可以求出任意时间内发生的位移。例如，要求跑步者 A 在前 5 s 内的位移，可以利用公式 $x_A = v_A t$，如图 3.5.4 所示，着色的矩形边长分别是 v_A 和 t，矩形的面积正好是 $v_A t$。也就是在此 v-t 图象中，物体的位移对应着图象和横轴（时间 t 轴）所围的面积。

例题 3－3 在一条平直的东西方向公路上，小明驾车从 A 点匀速向西行驶 50 km 至 B 点，然后立即折返，以同样的快慢行驶到 A 点东侧 100 km 的 C 点，经历的时间是 4 h。试着分别画出这一运动过程的位置与时间及速度与时间的关系图象，并加以分析。

解 运动过程的位置与时间及速度与时间的关系图象分别如图 3.5.5 a 和图 3.5.5 b 所示。在图 3.5.5 a 中，位置与时间图象是两段斜线，小明驾车在第 2 h 时回到 A 点。两段斜线的斜率大小相等，但一正一负，表明速度的大小相等，但方向相反。在图 3.5.5 b 中，速度的正负代表了两段运动的速度方向不同。

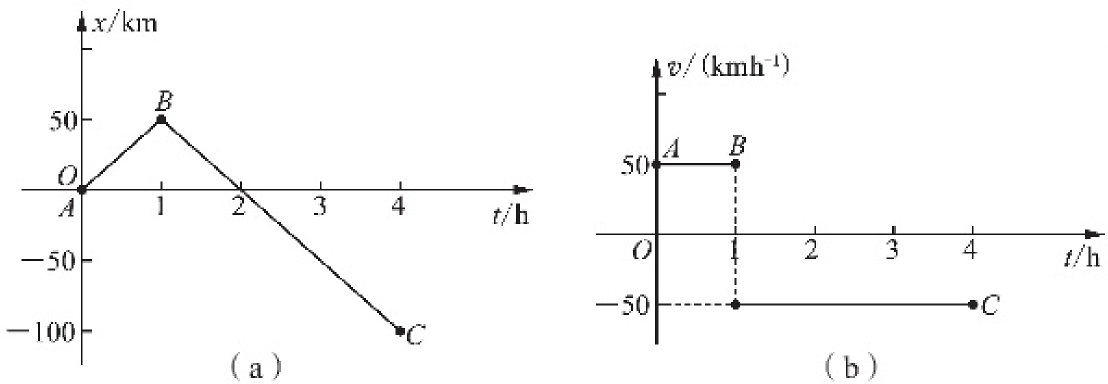


图 3.5.5　x-t 和 v-t 图象

思考与讨论

你能否根据图 3.5.5 b，计算出小明驾车在第 1 h 内的位移、在后 3 h 内的位移以及 4 h 内的位移？

练习 3-5

1. 请在同一个直角坐标系中分别作出速度是 10 kmh^{-1} 和 15 kmh^{-1} 的两个匀速运动的位置—时间图象。这两个图象的直线倾斜角哪个大？
2. 一列火车的位置—时间图象如图 3.5.6 所示。图象中 OA 段和 BC 段表示的运动速度哪个大？AB 段与横轴平行，它表示火车做什么运动？速度是多大？火车在前 2 h 内的位移有多大？

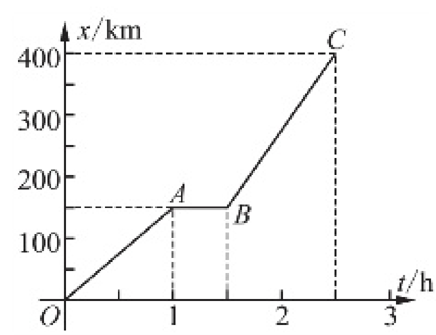


图 3.5.6　火车的 x-t 图象

第 6 节　变速直线运动　平均速度和瞬时速度

1 变速直线运动

飞机起飞前在跑道上的运动越来越快，技术人员研究一架飞机的起飞过程，得到如表 3-3 所示的数据。请你利用这些数据研究飞机起飞的运动过程具有哪些特点。

表 3-3　飞机起飞时的时间与位置

t/s	x/m
0	0
6	50
12	220
18	490
24	860
30	1 360

做一做

用计算机绘制 x-t 图象

借助于常用的数表软件，可以迅速、准确地根据表中的数据作出 x-t 图象，甚至能够写出图象所代表的函数关系式。下面以 Microsoft Excel 软件为例作简要介绍，同学们也可以试一试。

在 Excel 表格的工作簿中依次输入相应的位置、时间数据，用鼠标全部选中这些数据，按照“插入”中的“图表”的提示就能一步步得到如图 3.6.1 所示的图象。在操作的过程中，Excel 软件会要求确定“图表类型”，这时可以选择“平滑散点图”；操作过程中还会出现“添加趋势线”的对话框，里面有可选择的多种函数关系，这时需要你根据数据呈现的趋势作出合理的选择。

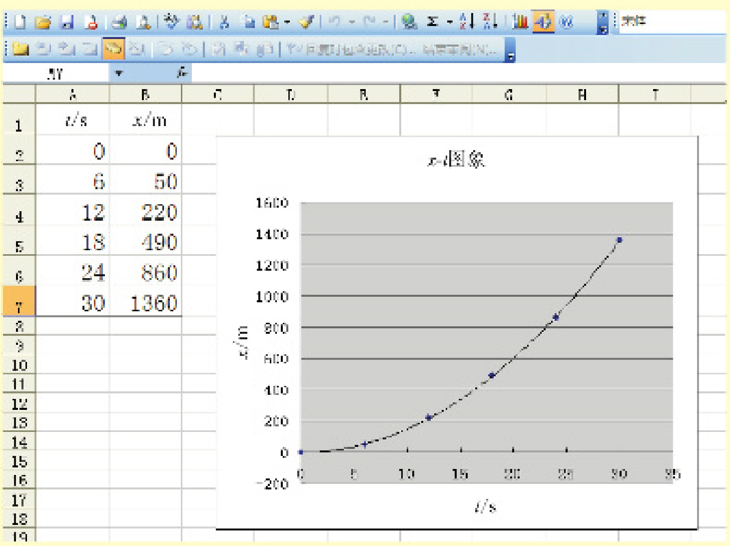


图 3.6.1　利用软件根据数据自动作图

从图 3.6.1 我们可以发现，$x-t$ 图象不再是直线，而是一条曲线。在相等的时间内物体的位移不都相等的直线运动，我们称之为**变速直线运动**（**rectilinear motion with variable velocity**），简称**变速运动**。变速运动远比匀速运动更常见。

② 平均速度

变速直线运动的运动快慢可以用**平均速度**（**average velocity**）来表示。平均速度的定义式为

$$v=\frac{\Delta x}{\Delta t}=\frac{x_2-x_1}{t_2-t_1}$$

它表示物体在 Δt 时间内的平均快慢程度。平均速度也是矢量，它的方向和位移 Δx 的方向一致，它的大小在数值上对应 $x-t$ 图象中两相应坐标点间连线的斜率大小。如图 3.6.2，我们据图可知，起飞的飞机在 6 s 末到 30 s 末的时间内，对应的平均速度 v_1 的大小等于割线 1 的斜率，即

$$v_1=\frac{1\ 360\ \text{m}-50\ \text{m}}{30\ \text{s}-6\ \text{s}}\approx 54.6\ \text{m s}^{-1}$$

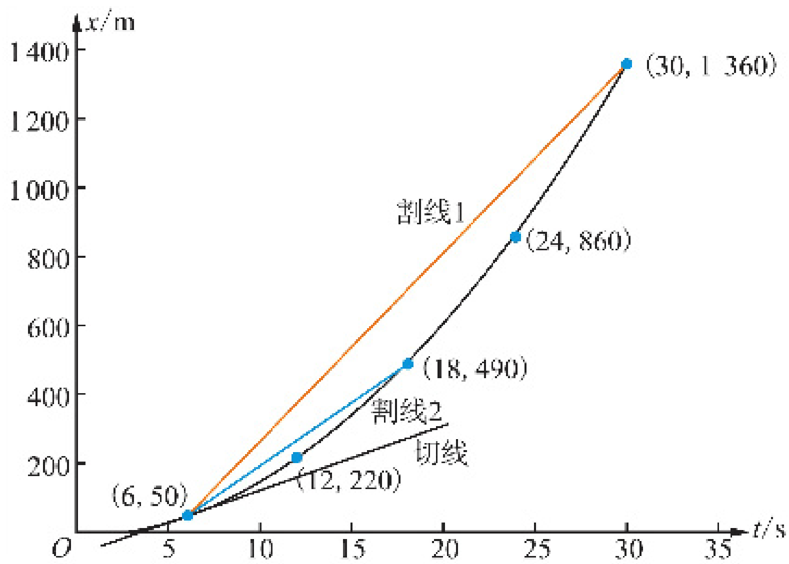


图 3.6.2　平均速度与瞬时速度

在 6 s 末到 18 s 末的时间内，对应的平均速度 v_2 的大小等于割线 2 的斜率，即

$$v_2=\frac{490\ \text{m}-50\ \text{m}}{18\ \text{s}-6\ \text{s}}\approx 36.7\ \text{m s}^{-1}$$

思考与讨论

你能求出起飞的飞机在第 1 个 6 s、第 2 个 6 s、……第 5 个 6 s 的平均速度吗？它们有什么特点？

说一说

美国物理学家费曼（R. P. Feynman，1918—1988）曾杜撰过这样一个笑话：一位女士由于驾车超速而被警察拦住。警察对她说："太太，您刚才的车速是 90 km h^{-1}！"这位女士反驳说："不可能！我才开了 7 min，还不到 1 h，怎么可能走了 90 km 呢？""太太，我的意思是如果您继续像刚才那样开车，在下 1 h 内您将驶过 90 km。""这也是不可能的。我只要再行驶 16 km 就到家了，根本不需要再驶过 90 km。"

如果你是警察，你会怎样和这位超速的女士交流？

3 瞬时速度

平均速度只能粗略地描述物体运动的快慢。为了使描述精确些，我们可以把时间 Δt 取得小一些，物体从 t 到 $t+\Delta t$ 这样一个较短的时间内，运动快慢的差异也会小一些。Δt 越小，运动的描述也就越精确。当 Δt 趋向于零时，相应的平均速度 $\dfrac{\Delta x}{\Delta t}$ 就趋近于某一数值（极限值），这一极限值被称为物体在时刻 t 的**瞬时速度**（**instantaneous velocity**）。瞬时速度表示物体在某一时刻或者某一位置时的速度。

图 3.6.3　汽车仪表盘中的速度计

瞬时速度也是矢量。它的方向是物体在该点的运动方向。它的大小等于位移—时间图象中过曲线上该点的切线的斜率。如图 3.6.2 所示，起飞的飞机在 6 s 末的瞬时速度大小等于切线

的斜率。以后讲到“速度”一般均指瞬时速度。

瞬时速度的大小称为瞬时速率，简称速率，它是标量。如图 3.6.3 所示，汽车速度计上的示数实际是汽车的速率。日常生活中说的“速度”，有时是指速率，这需要根据具体情况判断。

练习 3-6

1. (a) 一列火车沿直线向东行驶，开始以 100 $\mathrm{km\,h^{-1}}$ 行驶了 1 h，再以 200 $\mathrm{km\,h^{-1}}$ 又行驶了 1 h，请问：这列火车全程的平均速度是多少？

   (b) 另有一列火车，开始以 100 $\mathrm{km\,h^{-1}}$ 行驶了 100 km，再以 200 $\mathrm{km\,h^{-1}}$ 又行驶了 100 km，请问：这列火车全程的平均速度是多少？

2. 骑自行车的人沿一段下坡路直行，第 1 s 内通过 1 m，第 2 s 内通过 3 m，第 3 s 内通过 5 m，第 4 s 内通过 7 m。求最初 2 s 内、最后 2 s 内和全程的平均速度。

3. 如图 3.6.4 所示，运动员竖直向上垫起一个排球。排球在上升时速度逐渐减小，在下降时速度逐渐增大，这都是指什么速度？在整个过程中，是否存在某一时刻排球的速度等于零？

图 3.6.4　竖直垫起的排球

第 7 节　变速直线运动的加速度

1 加速度

思考与讨论

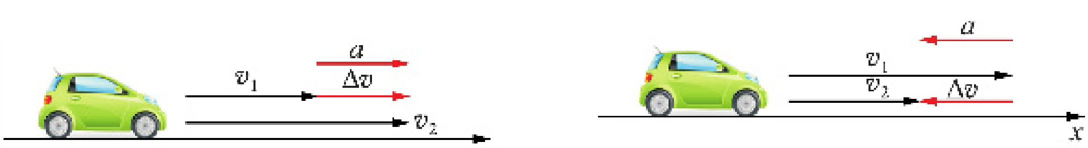
小汽车从静止开始在 20 s 内速度达到 $100\ \mathrm{km\,h^{-1}}$，接着做匀速直线运动；高速列车从静止开始在 500 s 内加速到 $350\ \mathrm{km\,h^{-1}}$，接着做匀速直线运动。请问：最后两者谁的速度大？谁的速度变化大？谁的速度变化得更快？

在上面的讨论中，我们发现小汽车和高速列车的速度都在增加，但速度增加的快慢不一样。那么，怎样来描述速度变化的快慢呢？类比之前用位移与时间的比值来描述物体位置变化的快慢，我们可以用速度的变化量与时间的比值来描述速度变化的快慢。由此引入一个新的物理量——**加速度**（**acceleration**），表示速度的变化量与发生这一变化所用时间的比值。通常用 a 代表，定义式为

$$a=\frac{\Delta v}{\Delta t}=\frac{v_2-v_1}{t_2-t_1}$$

在国际单位制中，加速度的单位是“米每二次方秒”，符号是 $\mathrm{m\,s^{-2}}$。

加速度 a 是矢量，它的方向与速度变化量 Δv 的方向相同。在变速直线运动中，速度的方向始终在一条直线上。如图 3.7.1 所示，取小汽车的初速度 v_1 的方向为正方向，如果是加速运动，那么速度的变化量 $\Delta v = v_2 - v_1 > 0$，加速度是正值，加速度方向与初速度方向相同；如果是减速运动，那么速度的变化量 $\Delta v = v_2 - v_1 < 0$，加速度是负



（a）小汽车做加速直线运动　　（b）小汽车做减速直线运动

图 3.7.1　加速度方向与速度方向

值，加速度方向与初速度方向相反。可见，适当选取坐标系后，直线运动的加速度方向可以用正、负符号表示出来。

在直线运动中，若速度增加，则加速度的方向与速度方向相同；若速度减小，则加速度方向与速度方向相反。表 3-4 所列是一些常见运动物体的加速度。

表 3-4　常见运动物体的加速度

运动物体	$a/(\mathrm{m\,s^{-2}})$
炮弹在炮膛内	5×10^4
跳伞者着陆时	-24.5
飞机着陆时	$-5\sim-8$
汽车急刹车	$-4\sim-6$
汽车起步	约 2
列车起步	约 0.35

2 平均加速度和瞬时加速度

加速度的定义式$a=\dfrac{\Delta v}{\Delta t}$跟平均速度的定义式类似，这个加速度的数值只能表示在一段时间内速度改变的平均快慢程度，应该称为**平均加速度**。对于一般的变速直线运动来说，平均加速度的数值会随着所选的时间间隔的不同而不同，如图 3.7.2 所示，割线斜率的大小等于时刻 t_1 至时刻 t_2 之间 Δt 时间内的平均加速度的大小。因此，有必要引入**瞬时加速度**的概念，来表示运动物体在任一时刻（或任一位置）的速度变化的快慢程度。跟确定瞬时速度的办法相同，取 Δt 趋近于零时平均加速度的极限值，就得到瞬时加速度了。

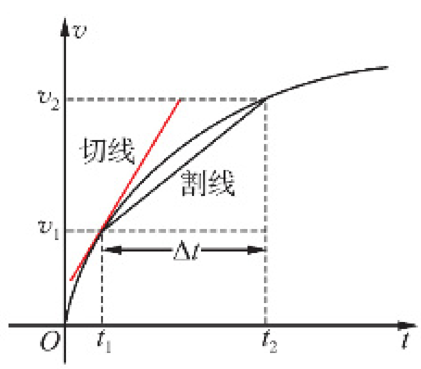


图 3.7.2　平均加速度和瞬时加速度

根据图 3.7.2，我们来分析时刻 t_1 时瞬时加速度的大小。考虑到 Δt 趋向于零的极限，原来两点间的连线（割线）就过渡到过 t_1 时刻曲线的切线，t_1 时刻物体的瞬时加速度就由 v-t 图象上曲线在该时刻的切线斜率来表示。

瞬时加速度也常常简称为加速度。我们以后讲到的加速度，一般指的就是瞬时加速度。

例题3 – 4 （a）沿直线轨道加速运动的列车在 20 s 内速度从 10 m s^{-1} 增加到 15 m s^{-1}，请问：列车的平均加速度是多大？

（b）汽车紧急刹车时，速度在 2 s 内从 10 m s^{-1} 减小到零，请问：汽车的平均加速度是多大？

解 （a）取列车运动方向为正方向，初速度是正值，设列车的平均加速度为 a_1，则

$$\begin{aligned} a_1 &= \frac{v_2 - v_1}{\Delta t} \\ &= \frac{15\ \mathrm{ms^{-1}} - 10\ \mathrm{ms^{-1}}}{20\ \mathrm{s}} \\ &= 0.25\ \mathrm{ms^{-2}} \end{aligned}$$

加速度是正值，表示加速度的方向跟初速度的方向相同。

（b）取汽车的运动方向为正方向，初速度是正值，设汽车的平均加速度为 a_2，则

$$\begin{aligned} a_2 &= \frac{(0-10)\ \mathrm{ms^{-1}}}{2\ \mathrm{s}} \\ &= -5\ \mathrm{ms^{-2}} \end{aligned}$$

加速度是负值，表示加速度的方向跟速度的方向相反。

练习 3-7

1. 请你定性地画出下列运动的 v-t 图象：

（a）加速度为零的运动。

（b）加速度不变（为正）的运动。

（c）加速度不变（为负）的运动。

2. 有人说："速度越大，加速度也越大。"你认为这种说法对吗？还有人说："速度变化越大，加速度也越大。"你认为这种说法对吗？

3. 有没有符合下列说法的实例？若有，请举例。

（a）物体运动的加速度等于 0，而速度不等于 0。

（b）物体运动的速度等于 0，而加速度不等于 0。

（c）物体具有向东的加速度，而速度的方向却是向西。

4. 小汽车的"百公里加速时间"是小汽车从静止开始直线加速到 100 km h^{-1} 所用的最少时间，这是反映汽车性能的重要参数。经济型小汽车 A、豪华型越野车 B 和超级跑车 C（如图 3.7.3）实测的百公里加速时间分别为 11.3 s、7.8 s 和 3.1 s，请计算它们在测试时的平均加速度。

图 3.7.3　超级跑车

第 8 节 匀加速直线运动

① 匀加速直线运动的特点

如图 3.8.1 所示，$v-t$ 图象是一条倾斜的直线，无论 Δt 选在什么区间，对应的速度变化量 Δv 与时间 Δt 之比 $\dfrac{\Delta v}{\Delta t}$ 都是一样的，说明物体运动的加速度保持不变。所以，图 3.8.1 表示的物体运动是加速度不变的直线运动。

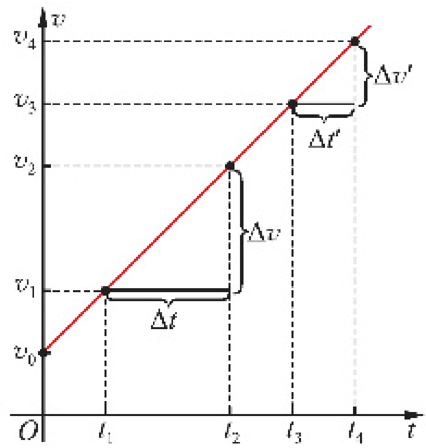


图 3.8.1 $v-t$ 图象是一条倾斜的直线

做变速直线运动的物体，如果在相等的时间内速度的增加量相等，这样的运动被称为**匀加速直线运动**（**rectilinear motion with uniform acceleration**）。如果加速度的方向与初速度的方向相反，但加速度的大小是不变的，这样的运动被称为匀减速直线运动。自由下落的物体、在平地上滚动的足球、竖直向上抛出的石子等都可以看成做匀加速直线运动或匀减速直线运动。若加速度等于零，则速度不变，物体就做匀速直线运动。

② 速度与时间的关系

匀加速直线运动的速度与时间的关系可以用如图 3.8.1 的一条倾斜直线来表示，也可以用公式来表达。我们可以把运动开始时刻（$t=0$）到 t 时刻的时间作为 Δt，而 t 时刻的速度 v 与开始时刻的初速度 v_0 之差就是速度的变化量 Δv，也就是

$$\Delta t = t - 0$$

$$\Delta v = v - v_0$$

且有 $a=\dfrac{\Delta v}{\Delta t}$，于是可得 $v = v_0 + at$。

这就是表示匀加速直线运动中速度与时间关系的公式。

例题 3 – 5 某列车原以 30 $m\,s^{-1}$ 的速度匀速行驶，现以 0.2 $m\,s^{-2}$ 的加速度加速，5 min 后速度达到多少?

解 列车的初速度 $v_0 = 30\ m\,s^{-1}$，加速度 $a = 0.2\ m\,s^{-2}$，时间 $t = 5\ min = 300\ s$，则 5 min 后的速度为

$$\begin{aligned} v &= v_0 + at \\ &= 30\ m\,s^{-1} + 0.2\times300\ m\,s^{-1} \\ &= 90\ m\,s^{-1} \end{aligned}$$

例题 3 – 6 某小汽车在紧急刹车时的加速度大小是 5.6 $m\,s^{-2}$，如果必须在 3 s 内停下来，那么小汽车的行驶速度最高不能超过多少?

分析 从开始刹车到停止的过程中，小汽车做匀减速运动。若取小汽车运动的方向为正方向，则加速度取负号，可得 $a = -5.6\ m\,s^{-2}$。这个过程的持续时间 $t = 3\ s$，它的末速度 $v = 0$，初速度 v_0 就是要求的最高行驶速度。

解 由 $v = v_0 + at$，可得

$$\begin{aligned} v_0 &= v - at \\ &= 0 - (-5.6\ m\,s^{-2})\times3\ s \\ &= 16.8\ m\,s^{-1} \\ &\approx 60\ km\,h^{-1} \end{aligned}$$

③ 位移与时间的关系

在本章第 5 节中我们看到，匀速直线运动的位移可以利用 v-t 图象求出（如图 3.5.4）。同样，在这里也可以利用 v-t 图象来求匀加速直线运动的物体在时间 t 内的位移。

如图 3.8.2 a 所示的物体运动，可以设想把时间 t 分成 5 段，把每一段 $\frac{1}{5}t$ 时间内的物体运动视为匀速运动，以每一段起始时刻的速度乘以 $\frac{1}{5}t$ 的积近似当作各段中物体的位移。在图 3.8.2 b 中，5 个小矩形的面积之和近似代表物体在整个过程中的位移。

显然，上面的做法是有误差的。为了减小误差，我们可以把整个运动过程划分为更多的小段，如图 3.8.2 c 所示，用这些小段的位移之和来代表物体在整个过程中的位移，这样做误差就会减小很多。可以想象，如果整个运动过程被划分成的小段越多，每段的时间就越短，这种方法求解位移的误差也就越小。当每一小段的时间间隔小到趋向于零时，所有的小矩形面积之和就等于直线下方梯形的面积，如图 3.8.2 d 所示，此梯形的面

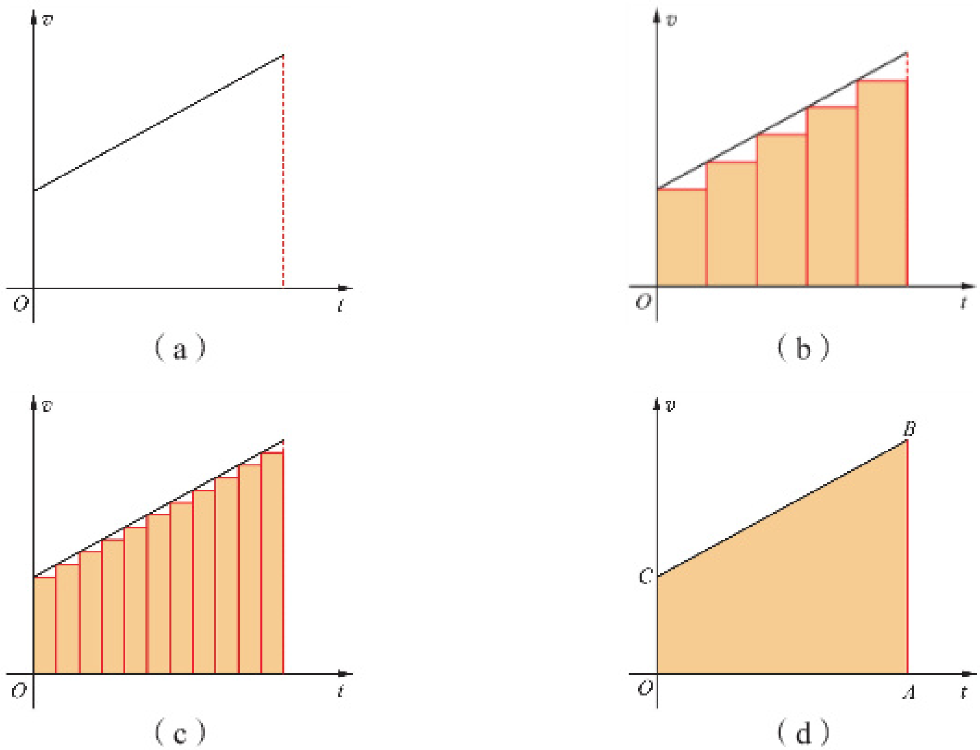


图 3.8.2　位移等于 v-t 斜线下的面积

积就等于匀加速直线运动的位移大小。

如图 3.8.2 d 所示，梯形 $OABC$ 的面积是

$$S=\frac{1}{2}(OC+AB)\cdot OA$$

把面积及各条线段换成所代表的物理量，即面积 S 代表位移 s，OC 代表初速度 v_0，AB 代表末速度 v，OA 代表时间 t，得到

$$s=\frac{1}{2}(v_0+v)t$$

把前面得到的 $v=v_0+at$ 代入上式，可得

$$s=v_0t+\frac{1}{2}at^2$$

这就是表示匀加速直线运动中位移和时间关系的公式。

思考与讨论

这里讨论的前提是，计时开始（$t=0$）时物体位于坐标原点，所以在 t 时刻位移的大小等于这时刻的坐标 x。如果计时开始时物体位于坐标 x_0 的位置，那么时间 t 内对应的位移是多少？时刻 t 对应的坐标位置又在哪里？

④ 位移与速度的关系

例题 3－7 如图 3.8.3 所示，一名滑雪运动员从一个长 100 m、近似斜面的跳台上匀加速滑下，已知他在跳台顶端的初速度是 5 m s^{-1}，到达跳台末端时的速度是 25 m s^{-1}，请问：这一过程中运动员的加速度有多大?

图 3.8.3　跳台滑雪

分析 在公式 $v=v_0+at$ 和 $s=v_0t+\frac{1}{2}at^2$ 中共有 v_0、v、s、a 和 t 五个量，只要知道其中三个量就可求得其他两个量。本题已知 v_0、v 和 s，可以消去 t，解出 a，即得答案。

解 由 $v=v_0+at$ 和 $s=v_0t+\frac{1}{2}at^2$，消去 t，可得 $v^2-v_0^2=2as$，则加速度

$$
\begin{aligned}
a&=\frac{v^2-v_0^2}{2s}\\
&=\frac{25^2-5^2}{2\times 100}\,\mathrm{m\,s^{-2}}\\
&=3\,\mathrm{m\,s^{-2}}
\end{aligned}
$$

这一过程中运动员的加速度大小是 3 m s^{-2}。

在例题 3-7 中，$v^2-v_0^2=2as$ 表示的是匀加速直线运动中位移与速度的关系。如果问题的已知量和待求解的量都不涉及时间，那么利用此公式求解，往往会更简便。

练习 3-8

1. 某列车原来的速度是 36 $km\,h^{-1}$，在一长段下坡路上匀加速行驶了 250 s，速度增加到 216 $km\,h^{-1}$。请问：这段时间内列车的加速度有多大？

2. 一个做匀减速直线运动的物体的加速度大小为 4 $m\,s^{-2}$，在某时刻的速度为 20 $m\,s^{-1}$。试求这一时刻后 4 s 末物体的速度。

3. 某型号的舰载机在航空母舰（如图 3.8.4）的跑道上加速时，舰载机依靠发动机推力获得的最大加速度为 5 $m\,s^{-2}$，起飞所需的速度为 50 $m\,s^{-1}$，跑道长为 100 m。请问：
   （a）舰载机能否单独依靠自身的发动机从舰上起飞？
   （b）为了使舰载机在开始时就有一个初速度，航空母舰装有弹射装置。对于该型号的舰载机，弹射系统必须使它具有多大的初速度？

图 3.8.4　航空母舰

4. A、B 两辆汽车在同一起点同时启动做匀加速直线运动，车 A 向右，车 B 向左。10 s 后，车 A 行驶了 50 m，车 B 行驶了 80 m。取向右为正方向，求 A、B 两车的加速度。

5. 甲、乙两车停在同一地点，甲车以 3 $m\,s^{-2}$ 的加速度沿一直线道路前进，同时乙车以 2 $m\,s^{-2}$ 的加速度沿同一道路后退，它们在 8 s 末的速度各是多少？两车相距多远？

第 9 节　自由落体运动

1 自由落体运动

物体下落的运动是一种常见的运动。挂在线上的重物，如果把线剪断，它就在重力的作用下沿竖直方向下落。从手中由静止释放的石块，在重力的作用下也沿着竖直方向下落。

不同的物体，下落的快慢有何不同呢？

演示 3-1

在同一高度同时释放大小、形状和厚度一样的一块金属片和一块纸片，它们谁先落地？

把纸片搓成一个很紧的小纸团，再从同一高度同时释放金属片和小纸团，它们落地的情况跟之前有什么不同？

请你说说产生这一不同现象的原因。

纸片下落比金属片慢得多，这是因为存在空气阻力，纸片比金属片轻，空气阻力对它的影响比较大。纸片搓成小纸团后，小纸团受到的空气阻力比纸片受到的空气阻力小得多，所以小纸团跟金属片几乎同时落地。

演示 3-2

拿一根长约 1.5 m 的玻璃管（如图 3.9.1），一端封闭，另一端有气阀，把形状和质量都不相同的几个物体，如金属片、小羽毛、小木塞、小玻璃球等，放入其中。把玻璃管竖直立起来，观察这些物体的下落情况。

把玻璃管里的空气抽出，再把玻璃管竖直倒立过来，再次观察物体下落的情况。

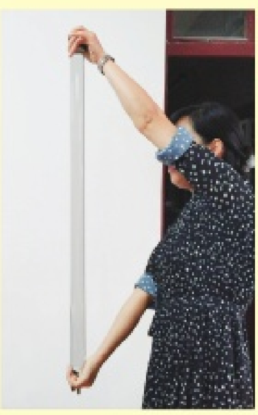


图 3.9.1　牛顿管

玻璃管中有空气时，里面的物体下落的快慢不同。玻璃管中没有空气时，里面的物体下落的快慢就相同了。

物体只在重力作用下的运动，称为**自由落体运动（free-fall motion）**。这种运动只有在没有空气的空间才能发生。在有空气的空间里，如果空气阻力作用的影响比较小，可以忽略，那么物体的下落可以近似看作自由落体运动。

图 3.9.2 是自由下落的小球的频闪照片，照片上相邻的像是相隔相同的时间拍摄的。从照片上可以看出，在相等的时间内小球的位移越来越大，表明小球的速度越来越大，即小球做加速直线运动。从多种途径研究均表明，**自由落体运动是匀加速直线运动**。

② 重力加速度

使用不同物体进行的反复实验表明，在同一地点，一切物体自由下落的加速度都相同，这个加速度称为**自由落体加速度（free-fall acceleration）**，也叫**重力加速度（gravitational acceleration）**。通常用 g 表示，它的方向是竖直向下的，大小可以通过多种方法用实验测定。

精确的实验发现，在地球上的不同地方，g 的大小是不同的。在赤道，$g = 9.780\ \mathrm{m\,s^{-2}}$；在两极，$g = 9.832\ \mathrm{m\,s^{-2}}$。在一般的计算中可以取 $g = 9.8\ \mathrm{m\,s^{-2}}$，在粗略计算时还可以取 $g = 10\ \mathrm{m\,s^{-2}}$。初速度为零时自由落体运动的速度与时间关系可以表示为 $v = gt$，位移与时间的关系可以表示为 $h = \frac{1}{2}gt^2$。

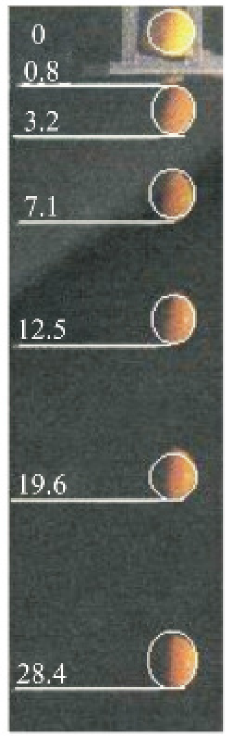


图 3.9.2　自由下落的小球的频闪照片

表 3-5　一些地点的重力加速度

地点	纬度	$g/(\mathrm{m\,s^{-2}})$
新加坡	北纬 1°17′	9.780 7
吉隆坡	北纬 3°08′	9.782 6
好望角	南纬 33°56′	9.796 3
华盛顿	北纬 38°53′	9.801 1
北京	北纬 39°56′	9.801 2
伦敦	北纬 51°31′	9.811 9
莫斯科	北纬 55°45′	9.815 6

思考与讨论

你能从表 3-5 中发现重力加速度的不同与什么因素有关吗？有着怎样的规律？可能还会与什么因素有关？请考证你的想法。

练习 3-9

1. 一个从静止开始自由下落的物体，到达地面的速度是 39.2 $m\,s^{-1}$。这个物体是从什么高度落下的？落到地面用了多少时间？

2. 为了测出一口深井的井口到水面的距离，让一颗小石子从井口无初速自由下落，经过 3 s 听到小石子落水的声音，忽略声音的传播时间，请估算井口到水面的距离。若考虑到声音在空气中传播需要一定的时间，估算的结果是偏大还是偏小？

3. 如图 3.9.2，频闪仪每隔 0.04 s 闪光一次，照片中的数字表示小球下落的距离，单位是 cm。请通过这幅照片求出小球自由下落的加速度。

拓展阅读

伽利略对自由落体运动的研究

亚里士多德的观点　是什么因素决定一个物体下落的快慢？平常观察到的事实是，一块石头比一片树叶下落得快些……古希腊的亚里士多德认为物体下落的快慢是由它们的重量决定的。他的这一论断与人们的日常经验相符合，以至于其后两千多年的时间里，大家都奉之为经典。

逻辑的力量　16 世纪末，意大利青年学者伽利略对亚里士多德的论断提出质疑。伽利略是这样推论的：取两块轻重不同的石头，把它们绑在一起。根据亚里士多德的论断，重石下落快，轻石下落慢。因而重石向下拉轻石，轻石向上拖重石，故两石共同下落的快慢介于重石和轻石单独下落之间。然而，绑在一起的两石比重石还重，它们应该下落得比重石要快。于是，逻辑上产生了矛盾，为了摆脱这种困境，伽利略认为只有一种可能性：重物与轻物应该下落得同样快。

猜想与假说　伽利略并没有就此止步，他进一步研究的问题是落体运动服从怎样的规律。任何人都可以观察到，物体下落时速度是越来越大的。在伽利略之前就有人进行过这方面的探讨。最早的可能是 14 世纪萨克松尼（Saxony）的学者艾伯特（Albert），他的见解是物体下落的速度 v 正比于它已经过的距离。另一位 14 世纪的学

图 3.9.3　比萨斜塔

者奥雷姆（Nicole Oresme）作了不同的推测，他的见解是物体下落的速度 v 正比于它已花费的时间。在那个时代几乎没人去验证或是反驳这些观点。15 世纪文艺复兴时期，达·芬奇（Leonardo da Vinci，1452—1519）提出一种不同的落体运动规律，他认为在连续的相等时间里落体经过的距离正比于整数序列 1、2、3、4、…。伽利略提出的落体运动规律有几种不同的表述，其中之一与达·芬奇的表达方式一样，不过他认为在连续的相等时间里落体经过的距离正比于奇数序列 1、3、5、7、…。现在我们不难理解，伽利略的见解是与奥雷姆相一致的。

实验验证　伽利略与众不同的是，他用自己的实验来验证自己的结论。据说，伽利略曾经扛着铁球爬上比萨斜塔去做落体实验，有无此事至今还有争论。不过可以估算，铁球从塔顶落下的时间只有两秒左右，当时没有计时装置可以精确地分辨出十分之几秒的时间，无法通过这样的实验直接来验证落体运动的规律。伽利略巧妙地采用斜面来减缓物体下落的过程，同时依靠滴水计时，做了上百次的实验。结果表明，小球沿斜面滚下的运动是匀加速直线运动，换用不同质量的小球，从不同的高度开始滚动，只要斜面的倾角一定，小球的加速度都是相同的。不断增大斜面的倾角，重复上述实验，发现小球均做匀加速直线运动，且加速度随斜面倾角增大而变大。

小球沿斜面向下的运动并不是落体运动。伽利略将上述实验结果作了这样的推理：随着斜面倾角的逐渐增大，小球的运动都是匀加速直线运动。如果斜面的倾角增大到 90°，小球的运动

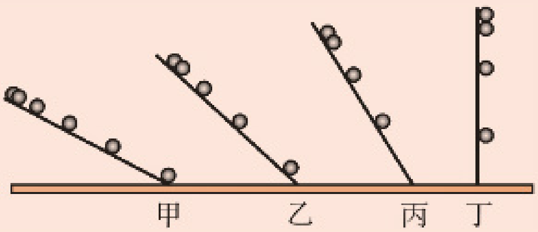


图 3.9.4　斜面倾角外推至 90°

就是落体运动了，这时小球仍然会保持匀加速运动的性质，而且所有物体下落时的加速度都是一样的。

科学研究方法　伽利略的逻辑和实验自然令人钦佩，但是人们仍然充满疑惑：为什么日常生活中较重的物体下落得比较快呢？伽利略把原因归之于空气阻力对不同物体的影响不同。他写道：“如果完全排除空气的阻力，那么所有物体将下落得同样快。”这时，落体运动也就真正成为自由落体运动了。为此，伽利略特别指出，在科学研究中，懂得忽略什么与懂得重视什么同等重要。

伽利略对运动的研究，不仅确立了许多用于描述运动的基本概念，而且创造了一套对近代科学的发展极为有益的科学方法。这些方法的核心是把实验和逻辑推理（包括数学演算）严谨地结合起来，从而发展了一套科学的思维方式和研究方法。对于伽利略的成就和获得成就的方法，爱因斯坦的赞扬颇具代表性：“伽利略的发现以及他所应用的科学的推理方法，是人类思想史上最伟大的成就之一，而且标志着物理学的真正开端。”伽利略之前的科学踯躅于泥途荒滩，千年徘徊。从伽利略开始，大师辈出，经典如云，近代科学的大门从此打开了。

伽利略生平　伽利略是伟大的意大利物理学家和天文学家，比萨大学和帕多瓦大学的教授。他融会贯通了当时的数学、物理学和天文学，在研究工作中开科学实验之先河，奠定了现代科学的基础。

伽利略用自己制作的望远镜观测天空，发现了木星拥有四颗卫星。观测结果支持了天文学的新学说——哥白尼（Nicolaus Copernicus，1473—1543）的日心说。伽利略从 1624 年

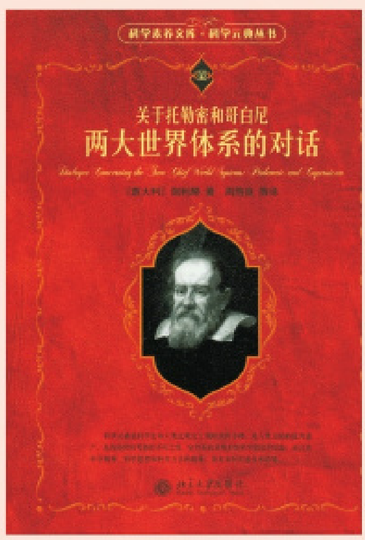


图 3.9.5　《关于托勒密和哥白尼两大世界体系的对话》中文译本

开始写作《关于托勒密和哥白尼两大世界体系的对话》一书，但是由于此书使日心说变成冲击当时教会教义和传统“科学”框架的理论，因此在1632年出版后立刻成为禁书。1633年，伽利略被罗马宗教裁判所判刑入狱（后改为在家监禁）。尽管如此，他仍坚持研究工作，并将自由落体等方面的研究成果转送荷兰，于1638年出版了《关于两门新科学的对话》。这部著作的出版，奠定了伽利略作为近代力学创始人的地位。

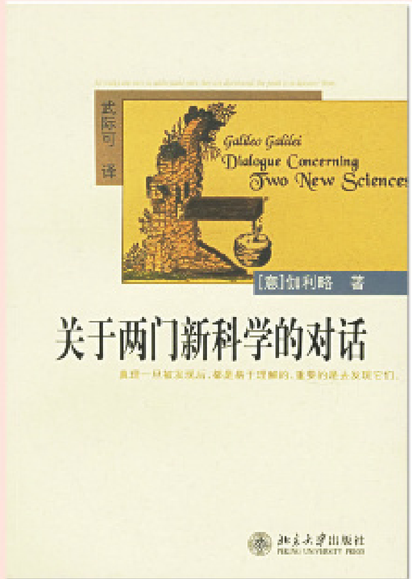
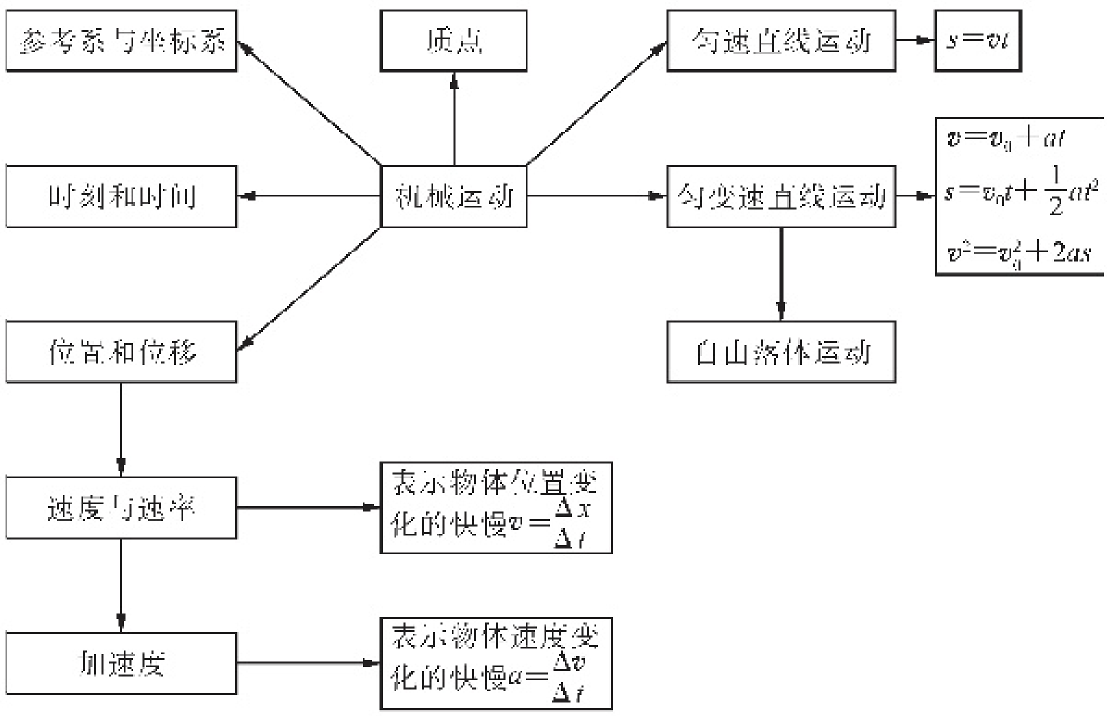


图 3.9.6 《关于两门新科学的对话》中文译本

时隔346年，罗马教廷于1979年承认对伽利略的压制是错误的，并为他“恢复名誉”。但是教会对科学的干涉和对伽利略的迫害所造成的影响是深刻的。之前一直是人才辈出的意大利，在伽利略之后，它的科学研究很快衰落，在很长一段时间里，没有再出现伟大的科学家。

章末回顾

本章基本知识结构



总练习三

基础练习

1. 物体的 ____________ 随时间变化，称为机械运动。机械运动可以分成平动和转动。不考虑物体的形状和大小，把它看成一个拥有全部质量的点，简称 ____________。在 ______________________ 和 ______________________ 两种情况下可以将物体视为质点。
2. 在描述一个物体的运动时，选来作为参照的另外物体称为 _____________。为了把物体各个时刻相对于参照物的 __________ 定量地表示出来，我们可以建立坐标系。固定在所选参照物上的坐标系称为 ____________ 或 ____________。
3. 物体运动轨迹的长度称为 ____________。用来表示物体的位置变化的物理量称为 _______________。既有大小又有方向的物理量称为 ____________，只有大小没有方向的物理量称为 ____________。在直线运动中，我们如果沿着运动所在的方向建立坐标系，那么坐标 x 表示 ____________，Δx 表示 ____________。
4. 在时间轴上，一个点表示 ____________，一条线段表示____________。位移和发生这段位移所用的时间的比值称为 ____________，其常用单位是 ________，其方向是 ____________的方向，其大小在数值上等于 ____________。速度的大小也称为 ______________。在相等时间内发生的位移相等，这样的运动称为 _____________________。若在同一条直线上运动的 A、B 两个物体的速度分别是 v_A 和 v_B，则物体 A 相对于物体 B 的相对速度 $v_{AB}=$ _________________。
5. 在位置—时间图象中，一条倾斜的直线表示 _____________运动。在速度—时间图象中，匀速直线运动的图象是一条平行于 _____________的直线。
6. 在相等的时间内物体的位移不都相等的直线运动称为 _____________。变速直线运动的快慢可以用 _________来表示，其定义式为 _____________。精确地描述物体在某一时刻或某一位置的速度称为 _________________。
7. _______________与 _______________的比值称为加速度，其符号是 ______，定义式为 _________________，在国际单位制中的单位是 _____________，单位的符号是 ___________________。加速度是矢量，它的方向与速度变化量的方向相同。在变速直线运动中，若初速度与加速度同向，则物体做 _______运动；若初速度与加速度反向，则物体做 _______运动。平均加速度只能表示运动物体在一

段时间内速度改变的平均快慢程度；______________可以反映运动物体在某一时刻或某一位置的速度变化快慢程度。

8. 做变速直线运动的物体，若在相等的时间内速度的增加量都相等，这样的运动称为 ____________。若加速度的方向与初速度的方向相反，但加速度的大小是不变的，这样的运动称为 ________________。匀加速直线运动的速度与时间的关系式是 ________________，位移与时间的关系式是 ________________，位移与速度的关系式是 ________________________。

9. 物体只在重力作用下的运动称为 ________________。自由落体运动是 ______________运动。自由落体加速度也叫 _______加速度。

10. 关于质点，下列说法不正确的是（　　）

A. 物体能否看作质点，不能由体积的大小判断

B. 物体能否看作质点，不能由质量的大小判断

C. 物体能否看作质点，不能由物体是否做直线运动判断

D. 研究月相时，可以把月球视为质点

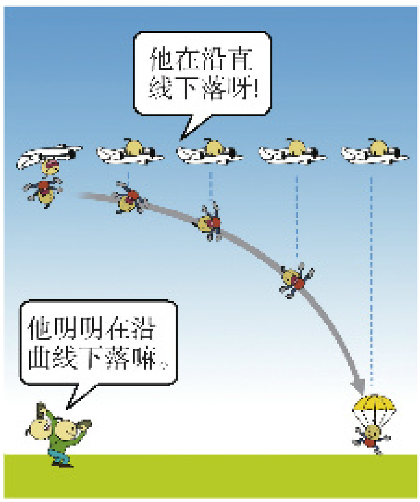
11. 如图所示，飞机上的人和地面上的人观察跳伞者的运动情况，得出不同的结论。下列说法正确的是（　　）

A. 飞机上的人看到跳伞者是静止的

B. 飞机上的人看到跳伞者始终在飞机的后方

C. 地面上的人看到跳伞者在做曲线运动

D. 地面上的人看到跳伞者在做直线运动



（第 11 题）

12. 关于矢量与标量，下列说法正确的是（　　）

A. 速度是标量　　B. 位移是矢量

C. 温度是矢量　　D. 力是标量

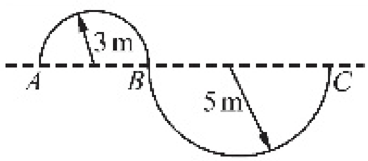
13. 如图所示是一名晨练者每天早晨进行锻炼时的行走路线，他从 A 点出发，沿半径分别为 3 m 和 5 m 的半圆经 B 点到达 C 点。他的位移和路程分别为（　　）

A. 16 m，方向从 A 点到 C 点；16 m

B. 8 m，方向从 A 点到 C 点；8 π m

C. 8 π m，方向从 A 点到 C 点；16 m

D. 16 m，方向从 A 点到 C 点；8 π m



（第 13 题）

14. 下列对物体运动的判断，错误的是（　　）

A. 速度为正，加速度为负，物体做加速运动

B. 速度为负，加速度为负，物体做加速运动

C. 速度为负，加速度为正，物体做减速运动

D. 速度为正，加速度为正，物体做加速运动

15. 在月球上的同一高度同时释放羽毛和铁锤，出现的现象是（　　）

A. 羽毛先落地，铁锤后落地

B. 铁锤先落地，羽毛后落地

C. 铁锤和羽毛同时落地

D. 因为在月球上，所以无法判断铁锤和羽毛哪个先落地

16. 一物体做匀变速直线运动，初速度为 3 $\mathrm{m\,s^{-1}}$，加速度大小为 1 $\mathrm{m\,s^{-2}}$，经过 2 s 后，其末速度大小是（　　）

A. 1 $\mathrm{m\,s^{-1}}$　　　　B. 2 $\mathrm{m\,s^{-1}}$

C. 3 $\mathrm{m\,s^{-1}}$　　　　D. 4 $\mathrm{m\,s^{-1}}$

17. 在一片广阔的草原上，以东西方向为轴，且以向东方向为正方向，以某处为坐标原点，建立一维直线坐标系。一匹马最初在原点以西 3 km 处，几分钟后奔跑到原点以东 2 km 处。这匹马的最初位置和最终位置分别是（　　）

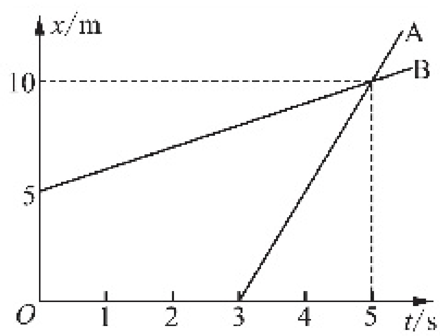
A. 3 km，2 km

B. －3 km，2 km

C. 3 km，－2 km

D. －3 km，－2 km

18. 沿着同一直线运动的物体 A、B，其相对同一参考系的位置 x 随时间变化的函数图象如图所示。由图象可知（　　）



（第 18 题）

A. 从第 3 s 起，两个物体的运动方向相同，且 $v_A > v_B$

B. 两个物体由同一位置开始运动，但 A 比 B 迟 3 s 开始运动

C. 在 5 s 内物体的位移相同，5 s 末 A、B 相遇

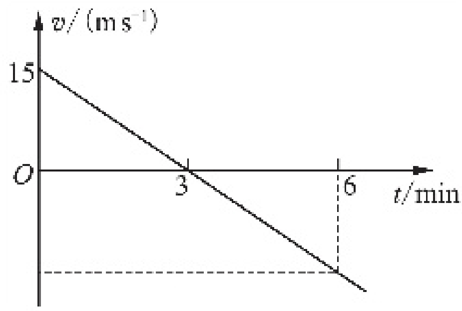
D. 5 s 内 A、B 的平均速度相等

提高练习

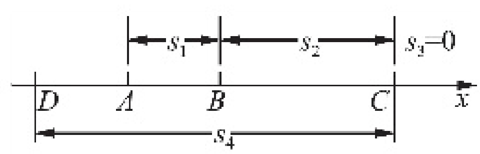
19. 甲车和乙车在同一条平直公路上相向行驶，取甲车行驶方向为正方向。若甲车的速度是 15 m s^{-1}，乙车的速度是 −10 m s^{-1}，则甲车相对于乙车的相对速度是多少？

20. 一辆汽车沿平直公路行驶，第 1 s 内通过 5 m 的距离，第 2 s 内和第 3 s 内各通过 20 m 的距离，第 4 s 内又通过了 15 m 的距离。求汽车在最初 2 s 内的平均速度和最后 2 s 内的平均速度。

21. 一个滑块以 15 m s^{-1} 的初速度滑上一个光滑的斜面，取向上运动方向为正方向，其做直线运动的 v–t 图象如图所示。分别求出当 t = 1.5 min、3 min、4.5 min 和 6 min 时的对应速度和加速度。



（第 21 题）



（第 22 题）

22. 某质点由 A 点出发做东西方向的直线运动，前 5 s 向东运动了 30 m 到达 B 点，接着用了 5 s 前进了 60 m 到达 C 点，在 C 点停了 4 s 后又向西运动，经历了 6 s 运动 120 m 到达 A 点西侧的 D 点，如图所示。求：

（a）质点全过程的平均速度。

（b）质点全过程的速率。

23. 一辆汽车在平直公路上以 6 m s^{-1} 的速度慢速行驶，某时刻起，该车以 2 m s^{-2} 的加速度做匀加速直线运动，已知这一加速度可以维持 12 s。求汽车在这 12 s 内前进的位移。

24. 某航母跑道长 200 m，舰载机在航母上滑行的最大加速度为 6 m s^{-2}，起飞需要的最小速度为 50 m s^{-1}。求舰载机在滑行前需要借助弹射系统获得的最小初速度。

25. 短跑名将博尔特曾经在北京奥运会上创造了 100 m 和 200 m 短跑项目的新世界纪录，他的成绩分别是 9.69 s 和 19.30 s。假定他在 100 m 比赛时从发令到起跑的反应时间是 0.15 s，起跑后做匀加速运动，达到最大速率后做匀速运动。200 m 比赛时，反应时间及起跑后加速阶段的加速度和加速时间均与 100 m 比赛时相同，但由于弯道和体力等因素的影响，以后的平均速率只有跑 100 m 时最大速率的 96%。求：

（a）加速所用时间和达到的最大速率。

（b）起跑后做匀加速运动的加速度（结果保留两位小数）。

26. 从高空同一位置无初速自由下落两个物体，第 1 个物体下落 1 s 后，第 2 个物体开始下落，若两个物体是用长 $l = 95$ m 的细线连在一起的，则第 2 个物体下落多长时间后线被拉直？

第4章 牛顿运动定律

本章提要

1. 力的分类方法和力学中常见的三种力。
2. 怎样求摩擦力的大小和方向。
3. 怎样求几个力的合力和一个力的分力。
4. 物体的运动不需要力来维持，力是使物体产生加速度的原因。
5. 物体间的力总是成对出现的。
6. 用牛顿运动定律解决问题。

学前储备

1. 知道加速度的概念。
2. 知道什么是力。
3. 知道物体具有惯性。
4. 掌握三角形和三角函数的基本知识。

第1节　力与运动

在研究物体的运动时，我们经常会提到物体的运动状态。如果一个物体保持静止状态或匀速直线运动状态，即速度的大小和方向都保持不变，我们就说它的运动状态保持不变。例如，汽车停在停车场，或者在平直的公路上匀速行驶，汽车的运动状态没有变化。如果物体速度的大小或方向发生了变化，我们就说它的运动状态发生了变化。例如，汽车加速、减速和转弯的时候，汽车的运动状态就发生了变化。

思考与讨论

1. 在汽车启动加速、制动减速过程中，汽车的运动状态是否发生变化？原因是什么？
2. 绕着地球匀速飞行的人造卫星，它的运动状态有没有改变？

汽车的加速过程，在牵引力的作用下，由静止开始运动，速度不断增大；汽车的制动过程，由于受阻力的作用，速度不断减小，最后停下来。抛出去的粉笔，由于受到重力的作用，速度的大小和方向都发生变化。可见，物体运动状态的改变，是由于受到力的作用，**力是改变物体运动状态的原因**。

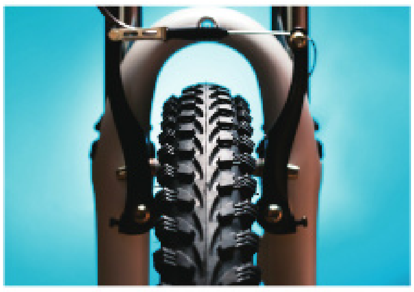
关于力与运动的关系，早在两千多年前，古希腊的亚里士多德根据人们日常生活中的经验，提出物体要保持运动状态不变就必须有一个恒定的力作用于它；要使物体运动得更快，必须用更大的力；如果没有力的作用，物体必然停止运动（将逐渐减速最后停下来）。他认为“力是维持物体运动的原因”。这种错误观点一直流传了两千多年，直到17世纪才被伽利略纠正过来。中国春秋战国时期的墨翟（约公元前468—公元前376）说：“力，形之所以奋也。”意思是说，力是改变物体运动状态的因素，这种观点是正确的。爱因斯坦曾经说过，“有一个基本的问题，千百年来都因为它太复杂了而含糊不清。这个问题就是运动问题”。由此看来，人类正确地认识力与运动的关系问题，经历了漫长的过程。

第 2 节　力的种类

① 力

在我们的生活中，力的作用处处存在。那么，什么是力？

排球的运动有什么变化



什么力使车轮停止运动

图 4.2.1

思考与讨论

1. 图 4.2.1 中有哪些力？
2. 这些力产生了哪些作用效果？
3. 你认为什么是力？

在物理学中，人们把改变物体的运动状态、产生形变的原因，即物体与物体之间的相互作用，称作**力**（**force**）。

力的大小、方向、作用点不同，它的作用效果就不同。力的大小、方向、作用点称为**力的三要素**。

力的大小可以用测力计（如弹簧测力计）来测量。在国际单位制中，力的单位是**牛顿**，符号是 **N**。

力可以用一根带箭头的线段来表示，线段按比例（标度）画出，它的长短表示力的大小，它的指向表示力的方向，箭头（或箭尾）表示力的作用点，力的方向沿着力的作用线。这种表示力的方法，叫作**力的图示**。

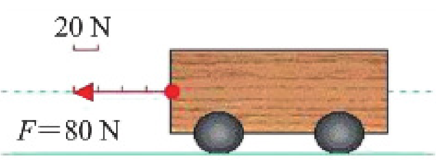


图 4.2.2　力的图示

在受力分析时，我们有时只需要画出**力的示意图**，即只画出力的方向和作用点。

根据力的性质不同，在力学中有重力、弹力和摩擦力。我们见到的拉力、压力、支持力、动力、阻力等，它们是根据力的作用效果来命名的。不论是什么性质的力，只要效果是加快物体运动的，就可以称为动力；效果是阻碍物体运动的，就可以称为阻力。

② 重力

地球表面的物体，都受到地球的吸引。物体所受地球的吸引力，称为**重力**，它赋予物体**重量**（**weight**）。重力或重量的符号是 W，单位是牛顿（N）。

物体所受的重力或物体的重量 W 与它本身的质量 m 成正比，可表示为

$$W = mg$$

在重力场内，比例常数 g 称为重力场强度，单位是牛顿每千克（$\mathrm{N\,kg^{-1}}$）。在地球表面，g 约为 $9.8\ \mathrm{N\,kg^{-1}}$，近似值取为 $10\ \mathrm{N\,kg^{-1}}$。重力的大小可以用弹簧测力计来测量。

一个物体的各部分都要受到重力的作用，从作用效果上看，我们可以认为物体各部分受到的重力集中在一个点上，这一点叫作物体的**重心**（**centre of gravity**）。如图 4.2.3 所示，在双人滑冰比赛中，只要托举在身体的重心处，就能稳定地完成动作。换一个角度看：物体质量分布的等效中心叫作物体的质量中心，简称**质心**（**centre of mass**）。物体所受的任何力可以看成集中作用于质心上，这时，物体只做平动，不做转动。一般来说，物体的质心和它的重心是重合的。

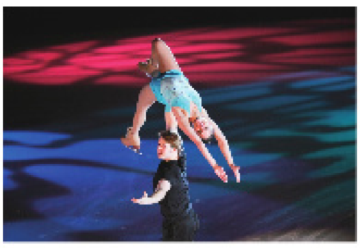


图 4.2.3　托举在身体的重心处能稳定地完成动作

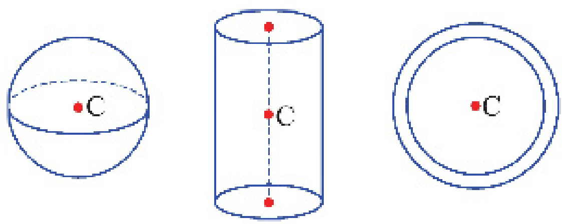


图 4.2.4　形状规则、质量分布均匀的物体的重心位置

如图 4.2.4 所示，形状规则、质量分布均匀的物体，重心在它的几何中心上。

如图 4.2.5 所示，质量分布不均匀的物体的重心除了与物体的形状有关外，还与物体的质量分布有关。

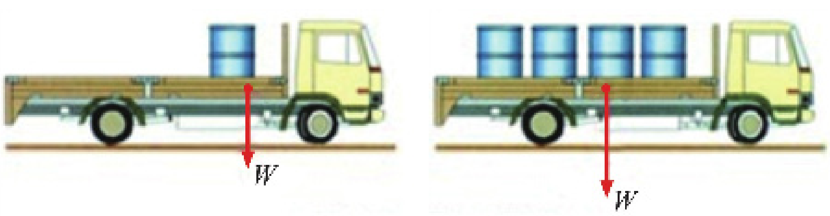


图 4.2.5　质量分布不均匀的物体的重心位置

做一做

寻找物体的重心

如图 4.2.6 所示，用细线将形状不规则的薄板静止悬挂，然后换一个悬挂位置，用直尺和笔把两次细线的延长线标记下来，其交点就是薄板的重心。

把薄板平放，用手指或笔尖顶在重心处，观察薄板是否能平衡。

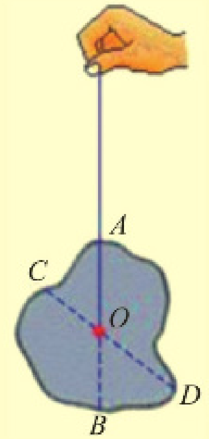
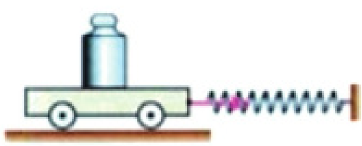


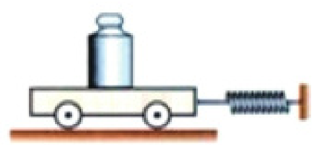
图 4.2.6　用悬挂法寻找物体的重心

③ 弹力

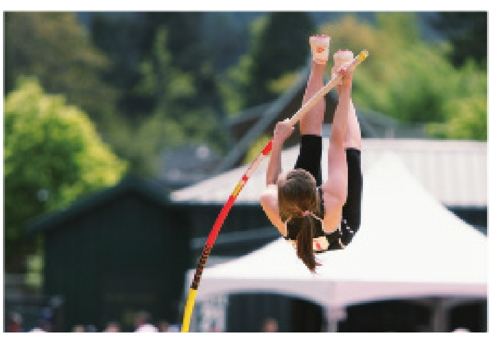
物体在力的作用下形状或体积发生改变，叫作**形变（deformation）**。有些物体在形变后能恢复原状，这种形变叫作**弹性形变（elastic deformation）**。如果外力过大，使物体形变超过一定的限度，撤去外力后，物体就不能完全恢复到原来的形状，这个限度叫作**弹性限度（elastic limit）**。



弹簧伸长



弹簧压缩



撑竿弯曲

弓弦拉伸

图 4.2.7　物体在外力的作用下发生形变

在图 4.2.7 中，发生形变的物体由于要恢复原状，对与它接触的物体会产生力的作用，这种力叫作弹力（elastic force）。弹力产生在直接接触而发生形变的物体之间，弹力的方

向总是与引起形变的作用力的方向相反。

物体受外力作用时会产生形变，但有时形变很小，要用仪器才能显示出来。

演示 4-1

显示微小形变

如图 4.2.8 所示，在一张桌子上放一个铁架台，将一支激光笔固定在铁架台上，激光射到墙面上，形成一个光点。按压桌面，观察墙面上光点位置的变化。这个现象说明了什么？

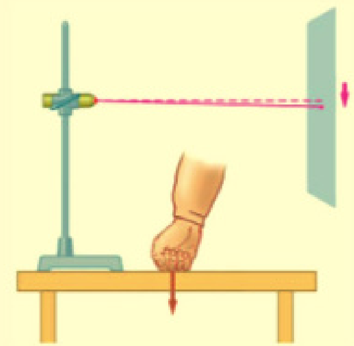


图 4.2.8　观察桌面的微小形变

当一本书放在水平桌面上，书的重量会向下挤压桌面，桌面因而发生微小的形变。桌面的形变使桌面对书产生向上的弹力，这就是桌面对书的支持力。

在受到桌面的弹力的作用时，书本身也会发生微小的形变。书的形变也使书对桌面产生向下的弹力，这就是书对桌面的压力。

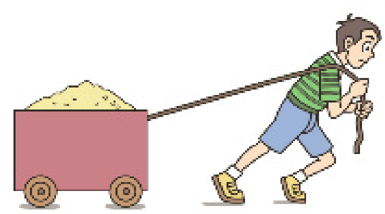


图 4.2.9　绳子对小车的拉力和小车对绳子的拉力都是弹力

事实上，当书与桌面相互挤压时，两者都同时发生微小形变而产生了弹力，相互作用在对方。一般而言，两个相互挤压的物体间都有弹力的相互作用，弹力的方向总是垂直于两物体的接触面。

如图 4.2.9 所示，用绳子拉小车，小车和绳子都发生了微小形变。小车的形变对绳子产生斜向下的弹力，这就是小车对绳子的拉力；绳子的形变对小车产生斜向上的弹力，这就是绳子对小车的拉力。绳子对小车的拉力的方向总是沿着绳子指向绳子收缩的方向。

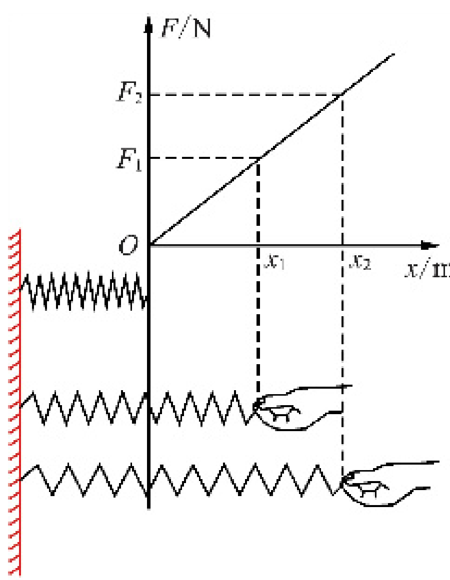


图 4.2.10　弹力与弹簧伸长量的关系

弹力的大小跟形变的大小有关：形变越大，弹力也越大；形变消失，弹力也消失。弹力与形变的定量关系，一般来讲比较复杂。而弹簧的弹力与弹簧的形变量的关系则比较简单（如图 4.2.10 所示）。实验表明：在弹性限

度内，弹簧发生弹性形变时，弹力的大小跟弹簧伸长（或缩短）的长度成正比，即

$$F = kx$$

式中的 k 称为弹簧的**劲度系数（coefficent of stiffness）**，单位是 N m^{-1}，它取决于弹簧本身的结构（材料、匝数、直径等）。不同的弹簧 k 值不同，表明弹簧的“硬”与“软”的程度不同。这个规律是英国科学家胡克发现的，叫作**胡克定律（Hooke’s law）**。

4 摩擦力

摩擦力也是自然界中常见的力。两个相互接触的物体，当发生相对运动或具有相对运动的趋势时，就会在接触面上产生阻碍相对运动或相对运动趋势的力，这种力叫作**摩擦力（frictional force）**。

图 4.2.11　滑雪板与雪地由于相对运动产生摩擦力

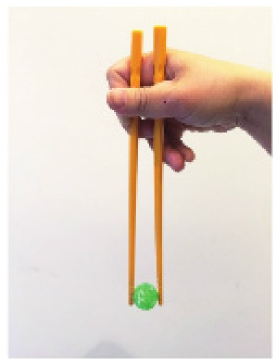


图 4.2.12　筷子与被夹物体由于有相对运动趋势也产生摩擦力

思考与讨论

除了图 4.2.11 和图 4.2.12 中的例子，你还能举出其他与摩擦力有关的实例吗？摩擦力的大小与哪些因素有关？摩擦力的方向如何？

●滑动摩擦力

两个物体相互接触并挤压，当它们沿接触面发生相对运动时，每个物体的接触面都会受到对方作用的阻碍相对运动的力，这种力叫作**滑动摩擦力（sliding frictional force）**。滑动摩擦力的方向总是跟物体的接触面相切，并且跟它们的相对运动方向

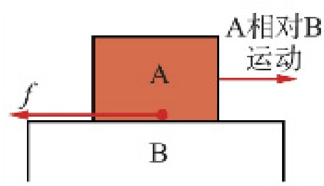


图 4.2.13　A 受到 B 的滑动摩擦力

相反(如图 4.2.13 所示)。滑动摩擦力的大小与接触面的粗糙程度、压力的大小有关,那么,滑动摩擦力的大小与它们之间有什么定量的关系呢?

探究 4-1

滑动摩擦力大小与压力的关系

如图 4.2.14 所示,将木块和长木板叠放在水平桌面上,弹簧测力计一端固定,另一端与木块水平相连,用力拉动长木板,使长木板在桌面上滑动。

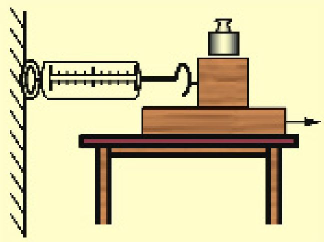


图 4.2.14

想一想:

1. 木块与长木板间的滑动摩擦力的大小如何测出?依据是什么?
2. 木块对长木板的压力的大小如何测出?怎样改变压力?
3. 改变长木板的粗糙程度,重复上述实验,结果如何?

大量的实验表明:滑动摩擦力的大小跟压力成正比,也就是跟两个物体表面间的垂直作用力成正比。

$$f=\mu_K F_N$$

其中 μ_K 是比例系数(它是两个力的比值,没有单位),叫作**动摩擦系数(coefficient of kinetic friction)**,它的数值跟相互接触的两个物体的材料有关。材料不同,两个物体之间的动摩擦系数也不同。动摩擦系数还跟接触面的情况(如粗糙程度)有关。

表 4-1　几种材料之间的动摩擦系数

材料	动摩擦系数	材料	动摩擦系数
钢—钢	0.25	木—冰	0.03
钢—木	0.40	木—皮革	0.30
钢—冰	0.20	橡胶轮胎—水泥路面	0.70
木—木	0.30		

●静摩擦力

说一说

如图 4.2.15 所示，木箱在推力的作用下有了相对地面的运动趋势，但是没有运动，是什么力阻碍它的运动？这个力跟推力有何关系？

图 4.2.15　用力推木箱，木箱没被推动

当两个彼此接触、挤压的物体之间没有发生相对滑动，但具有相对运动趋势时，接触面上会产生一种阻碍相对运动趋势的力，这种力叫作**静摩擦力**（**static frictional force**）。静摩擦力的方向总是与接触面相切，并且跟物体相对运动趋势方向相反。

演示 4-2

测量静摩擦力的大小

如图 4.2.16 所示，木块放在水平长木板上，用弹簧测力计沿水平方向拉木块。在拉力增大到一定值之前，木块不会运动。

在弹簧测力计的指针下轻塞一个小纸团，它可以随指针移动，并作为指针到达最大位置的标记。

继续用力，当拉力达到某一数值时木块开始移动，拉力会突然变小。

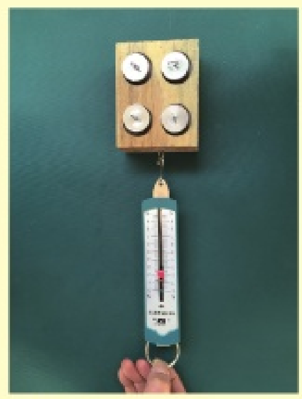


图 4.2.16　用弹簧测力计测静摩擦力，小纸团可以记录拉力的最大值

实验表明：静摩擦力随着拉力的增大而增大。当拉力增大到某一特定值时，物体将开始滑动。这时，物体间的静摩擦力达到最大，这个最大值称为**最大静摩擦力**（**maximum static frictional force**）。两个物体之间实际发生的静摩擦力在 0 和最大静摩擦力之间，即 $0 < f \leqslant f_m$。

最大静摩擦力的大小也跟两个物体之间的正压力成正比，$f_m = \mu_s F_N$，比例系数 μ_s 叫作**静摩擦系数**（**coefficient of static friction**），其值也取决于两个物体接触面的性质。

滑动一开始，摩擦力就减小。可见，在压力相同的情况下，滑动摩擦力小于最大静摩擦力，即动摩擦系数一般小于静摩擦系数。

例题 4 - 1 质量为 20 kg 的桌子静止在水平地面上，桌子与地面之间的动摩擦系数为 0.5，最大静摩擦力与滑动摩擦力的大小视为相等。一名同学给桌子一个水平推力。（取 $g = 10\ \mathrm{N\,kg^{-1}}$）

（a）当推力的大小为 50 N 时，地面对桌子的摩擦力是多大？

（b）当推力的大小变为 300 N 时，地面对桌子的摩擦力是多大？

（c）将推力又减小为 50 N（桌子仍在滑动），地面对桌子的摩擦力是多大？

（d）撤去推力，桌子继续滑动，地面对桌子的摩擦力是多大？

解 根据题意，桌子与地面之间的最大静摩擦力为

$$\begin{aligned} f_m &= \mu_s F_N \\ &= \mu_s mg \\ &= 0.5 \times 20 \times 10\ \mathrm{N} \\ &= 100\ \mathrm{N} \end{aligned}$$

（a）当推力 $F = 50\ \mathrm{N}$ 时，$F < f_m$，桌子没有滑动，地面对桌子的摩擦力为静摩擦力，

$$f = F = 50\ \mathrm{N}$$

（b）当推力 $F = 300\ \mathrm{N}$ 时，$F > f_m$，桌子滑动起来，地面对桌子的摩擦力为滑动摩擦力，

$$\begin{aligned} f &= \mu_K F_N \\ &= \mu_K mg \\ &= 0.5 \times 20 \times 10\ \mathrm{N} \\ &= 100\ \mathrm{N} \end{aligned}$$

（c）当推力又减小为 50 N 时，桌子仍在滑动，地面对桌子的摩擦力仍是滑动摩擦力，大小为 100 N。

（d）撤去推力时，桌子继续滑动，地面对桌子的摩擦力还是滑动摩擦力，大小为 100 N。

拓展阅读

四种基本的相互作用

牛顿在他的著作《自然哲学的数学原理》的前言中写道:“我拿出这一作品,作为哲学的数学原理,因为哲学中的全部责任似乎在于——从运动的现象去研究自然界中的力,然后用这些力去说明其他现象。”牛顿本人正是实践这样思路的先驱,他在发表三个运动定律的同时,还发表了万有引力定律。牛顿以后的三百年里,物理学家们从各种自然现象中,寻找支配这些运动现象的力。目前,物理学界公认,自然界存在四种基本的相互作用:万有引力(简称“引力”)、电磁力、强相互作用和弱相互作用。

在宏观世界里,能显示其作用的只有两种:引力和电磁力。

引力是所有物体之间都存在的一种相互作用,力学中常见的重力属于引力的范畴。由于引力常量 G 很小,因此对于通常大小的物体,它们之间的引力非常微弱,常被忽略不计。但是,对于一个具有极大质量的天体,引力成为决定天体之间以及天体与物体之间的主要作用。例如,地球对它表面的一般物体的引力,决定了自由落体和抛体运动的规律。引力对天体、人造地球卫星或关闭动力后的航天器的运动,起着主导作用。

电磁相互作用包括静止电荷之间以及运动电荷之间的相互作用。两个点电荷之间的相互作用规律是 18 世纪法国物理学家库仑(Charles-Augustin de Coulomb,1736—1806)发现的。运动着的带电粒子之间,除存在库仑静电力作用外,还存在磁力(洛伦兹力)的相互作用。根据麦克斯韦(James Clerk Maxwell,1831—1879)电磁理论和狭义相对论,电和磁是密切相关的,是统一的。在一个参考系中观察到的磁力可以和另一个参考系中观察到的库仑静电力联系起来,因此,静电力、

磁力统一为电磁相互作用。力学中常见的弹力和摩擦力属于电磁力。

引力、电磁力能在宏观世界里显示其作用。这两种力是长程力，从理论上说，它们的作用范围是无限的。宏观物体之间的相互作用，除引力外，所有接触力都是大量原子、分子之间电磁相互作用的宏观表现。

弱相互作用和强相互作用是短程力。短程力的相互作用范围在原子核尺度内。强相互作用力只在 10^{-15} m 范围内有显著作用，弱相互作用力的作用范围大约在 10^{-18} m。这两种力只有在原子核内部和基本粒子的相互作用中才显示出来，在宏观世界里不能察觉它们的存在。弱相互作用是在原子核的 β 衰变中发现的，核子（质子、中子）、电子和中微子等参与弱相互作用。强相互作用是介子和重子（包括质子、中子）之间的相互作用，因为这种力把核子束缚在一起，核物理学家们把它称为核相互作用。

尽管四种相互作用存在巨大的差别，物理学家们仍在努力寻求力的统一。近年来，在弱相互作用和电磁相互作用的统一方面，已经取得成功，实验已经证明，正如电和磁是电磁相互作用的两种不同表现一样，弱相互作用和电磁相互作用也只不过是统一的弱电相互作用的两种不同表现而已。弱电统一的成就促进了强、电、弱三种作用统一起来的大统一的研究。

［摘自人民教育出版社 2003 年 6 月第 1 版《全日制普通高级中学（必修）物理第一册教师教学用书》，略有改动］

练习 4-2

1. 用一个点代表受力物体，作出下列几个力的图示。

（a）水平桌面对放在桌面上的书产生 5 N 竖直向上的支持力。

（b）用 800 N 的力沿与水平线成 30° 斜向右上方拉一辆小车。

（c）抛出后在空中运动的质量为 4 kg 的铅球所受的重力。

2. “物体的重心一定在物体上，形状规则的物体重心在其几何中心上。”这种说法对吗？为什么？

3. “一个物体放在水平桌面上，物体对桌面的压力就是物体所受的重力。”这种说法对吗？为什么？

4. 重为 400 N 的木箱放在水平地面上，木箱与地面之间的最大静摩擦力是 120 N，动摩擦系数是 0.25。如果分别用 70 N 和 150 N 的水平力推木箱，那么木箱受到的摩擦力分别是多少？

第 3 节　力的合成与分解

① 合力与分力

生活中，我们常常见到这样的实例：一个力的作用效果与两个或者更多力的作用效果相同。

演示 4-3

探寻合力与分力的关系

两名女生互成角度地施加拉力共同提一桶水，使水桶悬空静止；一名男生单独提这桶水，也可以使水桶悬空静止。两次实验中水桶受力的示意图如图 4.3.1 所示，那么这组实验告诉我们一个什么物理道理呢？

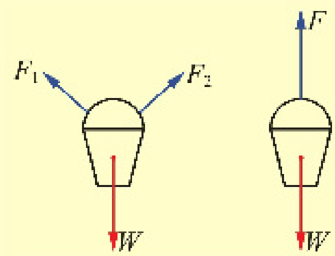


图 4.3.1

通过上面的实验，我们不难得出：F_1、F_2 共同作用时产生的效果与 F 单独作用时产生的效果相同。

几个力共同作用的效果同某一个力单独作用的效果相同，共同作用的这几个力叫作**分力**（**components of a force**），单独作用的这个力叫作那几个分力的**合力**（**resultant of a set of forces**）。

② 力的合成

求几个分力的合力的过程叫**力的合成**（**composition of forces**）。下面我们探究求几个力的合力的方法。

思考与讨论

在图 4.3.1 中，如果两名女生的用力大小 F_1、F_2 均为 100 N，那么她们的合力一定是 200 N 吗？

为了弄清楚这个问题，我们先来思考两种特殊的情况：

1. 如果 F_1、F_2 的方向相同，那么她们的合力为多大？
2. 如果 F_1、F_2 的方向相反，那么她们的合力为多大？

通过前面的讨论，我们知道力的合成不是简单的代数运算，似乎还与分力 F_1、F_2 的方向有关。下面我们来探究求合力的一般方法。

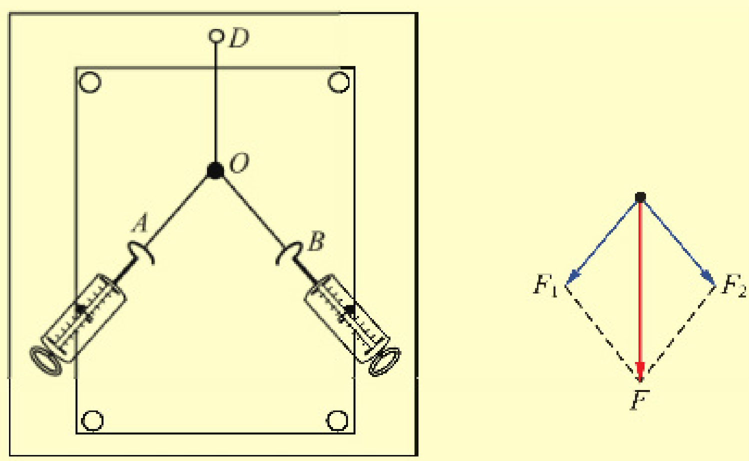
实验 4-1

探究求合力的方法

在桌面上平放一块木板，把一张白纸固定在木板上，橡皮条的一端固定在木板上的 D 点，两条细绳套系在橡皮条的另一端，如图 4.3.2 a 所示。

用两个弹簧测力计分别钩住细绳套，互成一定角度拉橡皮条，橡皮条伸长，使结点到达某一位置 O。记下两个弹簧测力计的示数 F_1、F_2 及两条细绳的方向 OA、OB，在纸上按事先定出的标度作出力 F_1 和 F_2 的图示。

撤去 F_1、F_2，只用一个弹簧测力计，通过细绳套把橡皮条的结点拉到相同的位置 O，记下弹簧测力计的示数 F



（a）　（b）

图 4.3.2

和细绳的方向 OC，按同样的标度作出力 F 的图示。

对于橡皮条来说，力 F 的作用效果与力 F_1、F_2 共同作用的效果相同，所以 F 等于 F_1、F_2 的合力。

那么，合力 F 与分力 F_1、F_2 有什么关系呢？

如图 4.3.2 b 所示，用虚线把合力的箭头端分别与两个分力的箭头端连接，或许能得到一些启示。初步得出结论后，请改变力 F_1 和 F_2 的大小和方向，重做上述实验，看看结论是否相同。

由多次实验可以得出：两个力合成时，以表示这两个力的线段为邻边作平行四边形，这两条邻边之间的对角线就代表合力的大小和方向，如图 4.3.3a 所示。这个法则叫作**平行四边形定则（parallelogram rule）**。

如果两个以上的力作用在一个物体上，也可以应用平行四边形定则求出它们的合力：先求出任意两个力的合力，再求出这个合力跟第三个力的合力，直到把所有的力都合成进去，最后得到的结果就是这些力的合力。

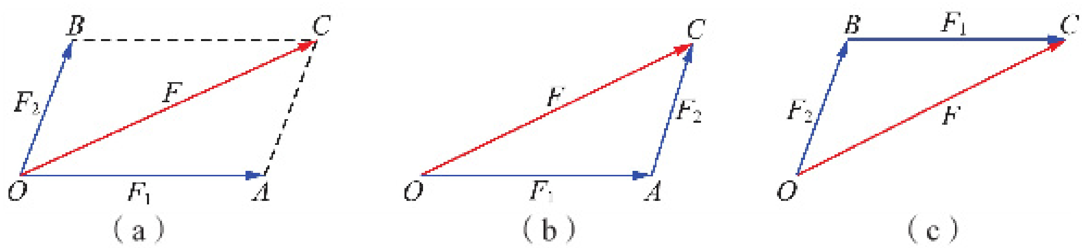


图 4.3.3　力的平行四边形定则和三角形定则

力的平行四边形也可以用力的三角形来代替。如图 4.3.3 所示，F 是 F_1 和 F_2 的合力，按照图 4.3.3 b 的方法，把分别表示 F_1 和 F_2 的线段 OA、AC 首尾相接地画出来，再连接 O 和 C，从 O 指向 C 的有向线段就表示合力 F 的大小和方向。上述的作图法叫作力的**三角形定则（triangle method of force addition）**。按照图 4.3.3 c 的方法作三角形 OBC，同样可以求出 F_1 和 F_2 的合力 F。

连续使用力的三角形定则可以求出多个力的合力，如图 4.3.4 所示是求四个力合力的方法。把多个力的首尾相接求合力的方法，叫作力的**多边形定则（polygon method of force addition）**。

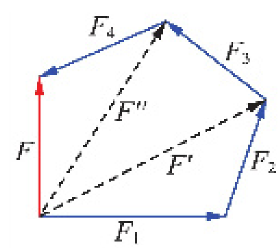


图 4.3.4

例题 4－2　在电线杆的两侧常用钢丝绳把电线杆固定在地面上，如图 4.3.5 所示。已知钢丝绳与地面的夹角 $\angle A=\angle B=60°$，每条钢丝绳的拉力都是 300 N，求两根钢丝绳作用在电线杆上的合力。

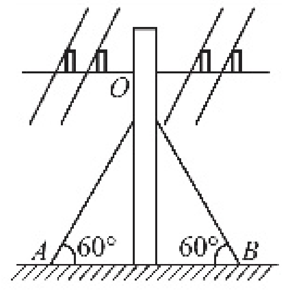


图 4.3.5

分析　本题可以运用作图法作出钢丝绳拉力的平行四边形，然后求出合力。同时也可以采取计算法得到这两个拉力合力的大小。

解　①作图法

如图 4.3.6 所示，自 O 点引两条有向线段 OC 和 OD，夹角为 60°。设单位长度表示 100 N，则 OC 和 OD 的长度都是 3 个单位长度，作出平行四边形 $OCED$，其对角线 OE 就表示拉力 F_1、F_2 的合力 F。量得 OE 的长约为 5.2 个单位长度，所以合力 $F=100\times5.2\ \text{N}=520\ \text{N}$。用量角器量得 $\angle COE=\angle DOE=30°$，所以合力的方向竖直向下。

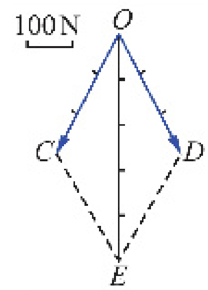


图 4.3.6

②计算法

先画出力的平行四边形，如图 4.3.7 所示。由于 $OC=OD$，得到的是菱形 $OCED$，连接 CD、OE，两对角线互相垂直且平分，OD 表示 300 N，$\angle COO'=30°$。在 $\triangle OCO'$ 中，$OO'=OC\cos 30°$。

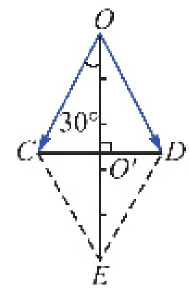


图 4.3.7

在力的平行四边形中，各线段的长表示力的大小，则有 $\frac{F}{2}=F_1\cos 30°$，所以合力 $F=2F_1\cos30°=2\times300\times\frac{\sqrt{3}}{2}\ \text{N}\approx519.6\ \text{N}$，方向竖直向下。

总结　矢量的运算遵循平行四边形定则，作图法和计算法是运用这一法则进行矢量运算的具体方法。①作图法：要选取统一标度，严格作出力的图示及平行四边形，用统一标度去量度作出的表示合力的对角线，求出合力的大小，再量出对角线与某一分力的夹角，求出合力的方向。②计算法：根据平行四边形定则作出示意图，然后利用解三角形的方法求出合力。

③ 力的分解

在日常生活中，人们通常用什么方法使方木从中间分开？如图 4.3.8 所示，用刀或斧可以将方木从中劈开，所用的刀或斧越锋利，劈方木时所用的力就越小。成语中常用“迎

刃而解”来形容刀的锋利。刀刃在物理中常看成“劈”，它的截面是一个顶角很小的等腰三角形。在生产实践中，人们利用“劈”的原理设计并制造了劈木机、裂石机等。

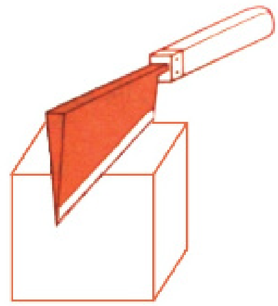


图 4.3.8

如图 4.3.9 所示，“劈”给方木施加了一个竖直向下的压力 F，我们知道，如果把方木从中分开需要施加指向两侧的力 F_1 和 F_2，这说明力 F 和力 F_1、F_2 的作用效果相同，两者具有等效替代的关系。在物理学中，如果一个力可以用几个力来替代，而且替代前后的效果相同，那么这几个力就是这一个力的分力。而把一个力分解成几个力的方法，就叫作**力的分解**（**resolution of forces**）。

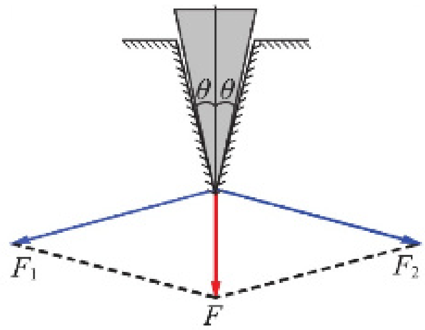


图 4.3.9

因为分力的合力就是原来被分解的那个力，所以力的分解是力的合成的逆运算，同样遵守平行四边形定则。把一个已知力 F 作为平行四边形的对角线，那么，与力 F 共点的平行四边形的两条邻边，就表示力 F 的两个分力。在图 4.3.9 中，力 F_1 和 F_2 为平行四边形的两条邻边，所以力 F_1 和 F_2 为力 F 的分力。

如果没有限制，对于同一条对角线，可以作出无数个不同的平行四边形，如图 4.3.10 所示。也就是说，同一个力 F 可以分解为无数对大小、方向不同的分力。一个已知力应该怎样分解，要根据实际情况来确定。

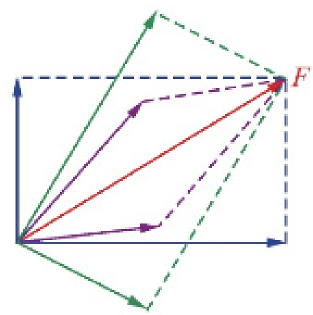


图 4.3.10　一个力可以分解为无数对分力

例题 4 – 3　如图 4.3.11 所示，当一辆汽车行驶在大桥引桥上时，它受到的重力应怎样分解呢？

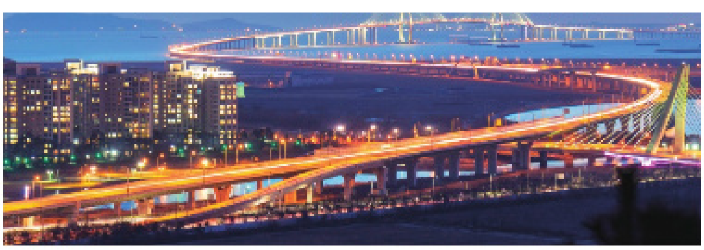


图 4.3.11　高大的桥要造很长的引桥，减小斜面的倾角

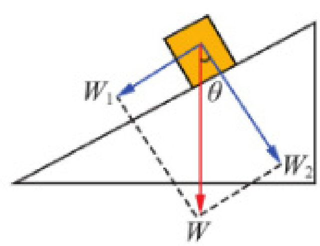


图 4.3.12　按照力的作用效果将 W 分解为 W_1 和 W_2

分析 重力对物体的作用效果：①使物体沿斜面向下滑动；②使物体压紧斜面。故可以将重力沿这两个方向进行分解，如图 4.3.12 所示。

解 由上面的分析可知，两个分力相互垂直，故它们与合力的关系可表示为

$$W_1 = W\sin\theta$$

$$W_2 = W\cos\theta$$

当斜面的倾角 θ 增大时，W_1 增大，W_2 减小。

总结 力的分解可按下面步骤进行：

确定要分解的力 → 考察力的作用效果 → 确定两个分力的方向 → 画出力的平行四边形

思考与讨论

如图 4.3.11 所示，为什么高大的桥要造很长的引桥来减小倾角呢？

车辆上桥时，分力 W_1 阻碍车辆前进；车辆下桥时，分力 W_1 使车辆运动加快。为了行车方便与安全，高大的桥要造很长的引桥，来减小桥面的坡度。

●力的正交分解法

在很多问题中，常把一个力分解为互相垂直的两个分力，特别是物体受多个力作用时，把物体受到的各个力都分解到互相垂直的两个方向上去，然后求两个方向上的力的合力，这种方法称为力的正交分解法。在求多个力的合力时，用正交分解的方法，将力分解后再合成，非常便捷。

例如，力 F_1、F_2、F_3 作用在物体的点 O 上，如图 4.3.13 所示。我们取 F_1 的方向为 x 轴的正方向，建立平面直角坐标系，将不在坐标轴上的两个力分解到两个坐标轴上，则有

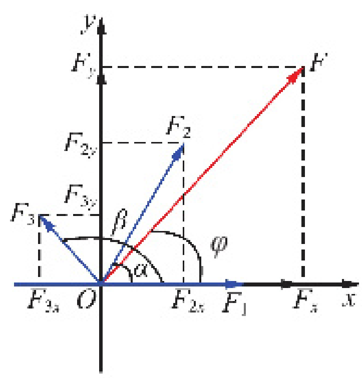


图 4.3.13

x 轴方向：$F_{1x} = F_1$，$F_{2x} = F_2\cos\alpha$，$F_{3x} = F_3\cos\beta$

y 轴方向：$F_{1y} = 0$，$F_{2y} = F_2\sin\alpha$，$F_{3y} = F_3\sin\beta$

然后求出 x 轴方向和 y 轴方向的合力：

$$F_x = F_{1x} + F_{2x} + F_{3x} = F_1 + F_2\cos\alpha + F_3\cos\beta$$

$$F_y = F_{1y} + F_{2y} + F_{3y} = F_2\sin\alpha + F_3\sin\beta$$

知道了 F_x 和 F_y 的大小，就可以求出合力 F 的大小和方向：

$$F=\sqrt{F_x^2+F_y^2}，\tan\varphi=\frac{F_y}{F_x}$$

力的正交分解法是一种很有用的方法，它不仅可以应用于求合力，还可以应用于其他问题的求解。

例题 4 – 4 如图 4.3.14 所示，重为 500 N 的人用跨过定滑轮的轻绳牵引重为 200 N 的物体，当绳与水平面成 60° 角时，物体静止。不计滑轮与绳的摩擦。求地面对人的支持力和摩擦力的大小。

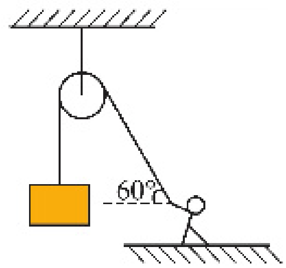


图 4.3.14

分析 人和重物静止，所受合力皆为零，绳对物体的拉力 F' 等于物重；人受四个力的作用，且人受绳的拉力 F 的大小与 F' 相同。

解 如图 4.3.15 所示，以人为研究对象，以水平方向为 x 轴的方向、竖直方向为 y 轴的方向建立平面直角坐标系，将绳的拉力分解，得

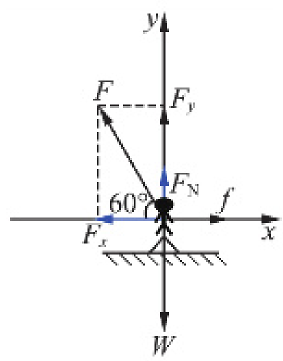


图 4.3.15

水平分力：
$$\begin{aligned}F_x&=F\cos 60°\\&=200\times\frac{1}{2}\ \text{N}\\&=100\ \text{N}\end{aligned}$$

竖直分力：
$$\begin{aligned}F_y&=F\sin 60°\\&=200\times\frac{\sqrt{3}}{2}\ \text{N}\\&=100\sqrt{3}\ \text{N}\end{aligned}$$

在 x 轴上，f 与 F_x 二力平衡，所以静摩擦力 $f=F_x=100$ N；

在 y 轴上，由三力平衡得，地面对人的支持力

$$\begin{aligned}F_N&=W-F_y\\&=(500-100\sqrt{3})\text{N}\\&=100(5-\sqrt{3})\text{N}\end{aligned}$$

总结 正交分解法不仅可以应用于力的分解，也可应用于其他任何矢量的分解。我们选取坐标系时，可以是任意的，不过选择合适的坐标系可以使问题简化，通常坐标系的选取有两个原则：①使尽量多的矢量落在坐标轴上；②尽量使未知量落在坐标轴上。

4 矢量相加的法则

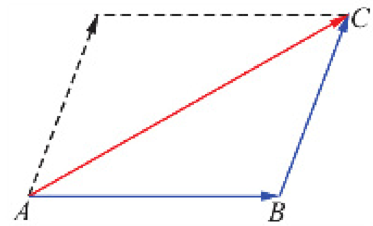


图 4.3.16　位移也是矢量，求合位移时也要遵从矢量相加的法则

力是矢量，求两个力的合力时，不能简单地把这两个力的大小相加，而应按照平行四边形定则来确定合力的大小和方向。

在第 3 章我们学过位移，它也是矢量。如图 4.3.16 所示，一个人从 A 走到 B，发生的位移是 AB，又从 B 走到 C，发生的位移是 BC，在整个过程中，这个人的位移是 AC。

请大家回顾第 3 章第 3 节的“思考与讨论”

如果平行地移动位移矢量 BC，使它的始端 B 与 A 重合，我们可以看到：两次位移构成了一个平行四边形的一组邻边，而合位移正是它们所夹的对角线。所以，位移矢量相加也遵从平行四边形定则。

同时，我们也发现：AB 和 BC 两个位移与它们的合位移 AC 组成了一个三角形。因此，位移的合成也遵从三角形定则，三角形定则与平行四边形定则的实质是一样的。

既有大小又有方向，相加时遵从平行四边形定则（或三角形定则）的物理量叫作**矢量**。只有大小，没有方向，求和时按照算术法则相加的物理量叫作**标量**。

练习 4-3

1. 已知 $F_1 = F_2 = 10\ \text{N}$，求下列两种情况下两力的合力：

 （a）F_1 与 F_2 垂直。

 （b）F_1 与 F_2 成 120° 角。

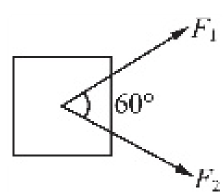


图 4.3.17

2. 如图 4.3.17 所示，物体受到大小相等的两个拉力作用，每个拉力都是 20 N，夹角是 60°，求这两个力的合力。（请用作图法和计算法分别求解）

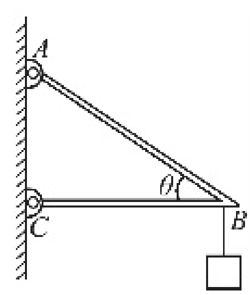


图 4.3.18

3. 如图 4.3.18 所示，在三角形支架 B 处用一根细绳挂一个重为 120 N 的重物，已知 $\theta = 30°$，求横梁 BC 和斜梁 AB 所受的力。（A、C 处为光滑铰链连接）

第 4 节　牛顿第一运动定律

1 伽利略的理想斜面实验

在亚里士多德以后的两千多年内，人们普遍认为力是维持物体运动的原因。直到 17 世纪，伽利略认为，将人们引入歧途的是摩擦阻力。在日常生活中，物体的运动离不开摩擦阻力的干扰，如果没有了摩擦，运动的物体将一直以恒定的速度运动下去。

由于地球上的实验无法排除重力、摩擦阻力和空气阻力等因素的影响，伽利略设计了由两个对接斜面组成的理想实验，成功地揭示了力与运动的关系。

如图 4.4.1 所示，让小球沿一个斜面从 A 点由静止滚下来，小球将滚上另一个斜面。如果没有摩擦，小球将上升到与原来相同的高度而到达 C 点。如果减小第二个斜面的倾角，小球在这个斜面上要到达与原来相同高度的 C' 点就要通过更长的路程。继续减小第二个斜面的倾角，使它成为水平面，小球就再也到达不了原来的高度，而沿着水平面以恒定的速度一直运动下去。

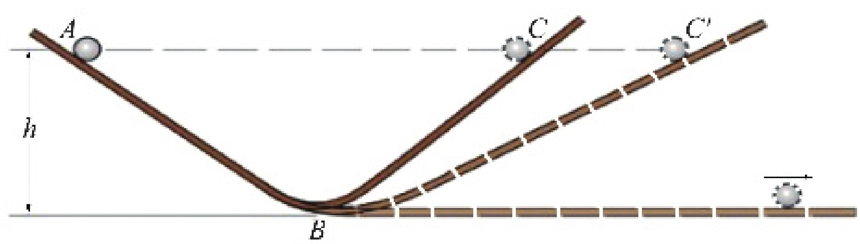


图 4.4.1　伽利略理想斜面实验

由此，伽利略认为：力不是维持物体运动的原因，力是改变物体运动状态的原因，一旦物体具有了某一速度，如果它不受外力，就将以这一速度匀速地运动下去。

伽利略的理想斜面实验虽然是想象中的实验，但它是建立在可靠的事实基础之上的。这类理想实验以可靠的事实为基础，经过抽象思维，抓住主要因素，忽略次要因素，从而更深刻地揭示了自然规律。这种把可靠的事实和严密的思维结合起来的理想实验，是科学研究中的一种重要方法。

> 伽利略理想斜面实验所使用的独特研究方法标志着物理学的真正开端。

演示 4-4

观察气垫导轨上滑块的运动

我们可以用气垫导轨近似地验证上述结论。气垫导轨（如图 4.4.2 所示）是中空的，表面有很多气孔。往导轨里充气时，在导轨和滑块间有一层空气使滑块浮在上面。气垫导轨上的滑块所受的摩擦力很小，可忽略不计。现在把气垫导轨调水平。

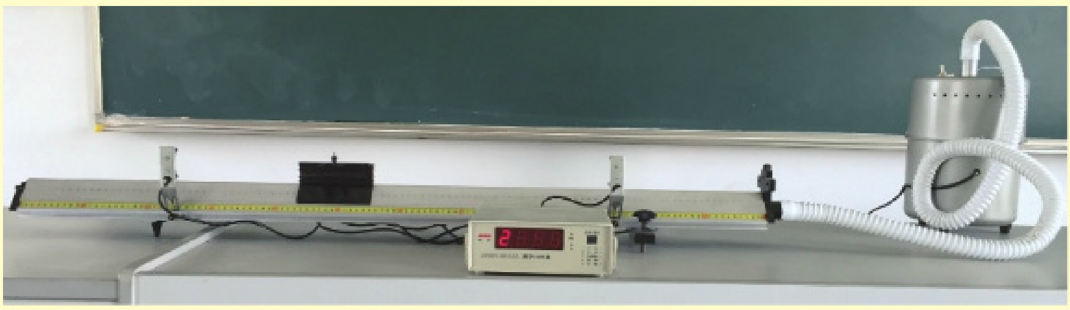


图 4.4.2　气垫导轨实验

1. 推动一下滑块，滑块很长时间后才停下来，这说明了什么？

2. 在气垫导轨不同位置放两个光电门，观察到挡光条通过每个光电门的时间几乎相等，这说明了什么？

3. 观察滑块的运动状态在哪些地方发生了改变，为什么会在这些地方发生改变？

与伽利略同时代的法国科学家笛卡儿补充和完善了伽利略的观点，他明确指出：一个不受外界任何因素影响的物体，将永远保持静止或匀速直线运动，不可能做曲线运动。

笛卡儿虽然弥补了伽利略的不足，但他认为整个宇宙好比是一台机器，一旦被上帝开启后将永无休止地运动下去。他把运动的原因归于上帝，显然，这样的观点是错误的。

② 牛顿第一运动定律（惯性定律）

英国科学家牛顿在伽利略、笛卡儿等前辈研究的基础上，总结出了力与运动关系的一条基本定律：**一切物体总保持匀速直线运动状态或静止状态，直到有外力迫使它改变这种状态为止。这就是牛顿第一运动定律（Newton's first law of motion）**。

牛顿第一运动定律揭示了物体运动与力的关系，认为**力是物体运动状态发生变化的原因，表明了一切物体都具有保持匀速直线运动状态或静止状态的性质**，这种性质叫**惯性（inertia）**。因此，牛顿第一运动定律又叫**惯性定律（law of inertia）**。

因为不可能把宇宙中的任何物体完全孤立起来，也就是说，不受力作用的物体是不存在的。但我们在日常生活中遇到的许多现象可以帮助我们理解牛顿第一定律[①]，例如，在冰壶运动中，冰壶离开手后，以几乎不变的速度继续前进，直至碰到另一只冰壶，才会改变这种运动状态。

练习 4-4

1. 一冰块以 $2\ \mathrm{m\,s^{-1}}$ 的速度沿光滑水平面滑动时，冰块有没有受到向前的作用力？$4\ \mathrm{s}$后它的速度是多少？

2. 有同学说，向上抛出的物体，在空中向上运动时，一定受到了向上的作用力，否则它不可能向上运动。这样的说法对吗？为什么？

① 在以后的学习中我们把牛顿第一运动定律简称为牛顿第一定律。

拓展阅读

惯性参考系

我们知道在描述火车车厢内物体的运动时，可以选择地面为参考系，也可以选择车厢为参考系。那么，在应用牛顿第一定律分析问题时，参考系的选择还能任意吗？我们来看下面一个例子。

在一辆以地面为参考系做匀速直线运动的车厢内有一个光滑小球。以车厢为参考系，小球保持静止，小球所受的合外力为零，符合牛顿第一定律。如果车厢开始向右做加速运动，以车厢为参考系，会看到小球向左做加速运动（如图 4.4.3 所示），但小球并没有受到其他作用力，小球所受合外力仍然为零。这说明：以加速运动的车厢为参考系，牛顿第一定律不成立。

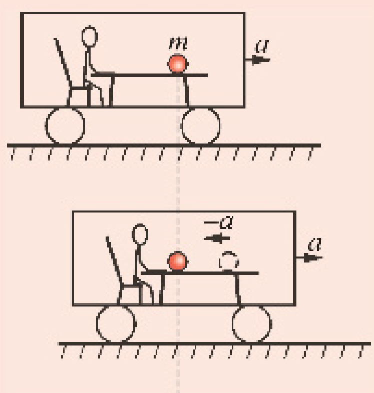


图 4.4.3

在有些参考系中，不受力的物体会保持静止或匀速直线运动状态，这样的参考系叫作**惯性参考系**，简称**惯性系**（**inertial system**）。以相对地面加速运动的车厢为参考系，牛顿第一定律不成立，这样的参考系叫作**非惯性参考系**。

第 5 节　惯性与质量

物体受作用力时运动状态改变的快慢，除了和物体受到的力有关以外，还和什么有关呢？

生活中的现象以及实验表明，物体受力时运动状态改变的快慢，还和物体的质量有关。

演示 4-5

惯性与质量的关系

如图 4.5.1 所示，把两辆相同的小车放在光滑的水平板上，其中一辆小车上放有重物。用双手将两辆小车慢慢靠近，使两车之间夹着的弹簧被压缩，然后松开双手，让两辆小车同时运动。我们会看到什么现象？

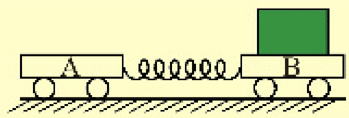


图 4.5.1

我们知道，推动一辆自行车比推动一辆摩托车容易得多；如果一辆空车和一辆满载货物的重车在相同的牵引力作用下由静止开始运动，它们运动状态改变的情况并不相同。空车的质量小，在较短的时间内可以达到某一速度，运动状态容易改变；重车的质量大，要在很长的时间内才能达到相同的速度，运动状态难以改变。

质量越小的物体，运动状态越容易改变，也就是该物体的惯性越小；质量越大的物体，运动状态越难以改变，也就是该物体的惯性越大。可见，**质量是物体惯性大小的量度**。一个物体惯性的大小，意味着改变该物体运动状态的难易程度。

思考与讨论

我们有这样的生活经验：拍住一只吸满血的蚊子比拍住一只没有吸血的蚊子要容易得多，尝试着用今天所学的物理知识加以解释。

在实际中，我们经常要考虑物体惯性的大小。当我们要求物体的运动状态不容易改变时，应该尽量增大物体的质量。抽水站的电动机和水泵都固定在很重的底座上，就是为了增大它们的惯性，以减小电动机工作时的振动或避免因意外的碰撞而移动位置。

相反，当我们要求物体的运动状态容易改变时，应该尽可能减小物体的质量。歼击机的质量比运输机、轰炸机的质量要小得多，并且歼击机在战斗前还要抛掉副油箱，以进一步减小质量，来提高灵活性。

练习 4-5

1. 大卡车与小轿车以相同的速率在平直公路上行驶，两辆车同时制动，哪一辆车会先停下？

2. 在高速公路上，严禁货车超载，这是为什么？

第 6 节　动量

我们根据生活常识知道，两辆质量相同而速度不同的汽车，要想使速度较大的车停下来更困难些，也就是说需要较大的阻力或者较长的时间。我们也知道，空卡车与满载的重卡车以相同的速度行驶时，需要较大的阻力或较长的时间，才能使重卡车停下。为了反映这种区别，我们引入动量这个物理量。

① 动量的定义

物体的质量和速度的乘积叫作**动量**（**momentum**），如果以 p 代表物体的动量，m 为物体的质量，v 为物体的速度，那么物体的动量可以表示为

$$p = mv$$

动量是矢量，它的方向与速度的方向相同。在国际单位制中，动量的单位是千克米每秒（kg m s^{-1}）。

例题4－5　如图4.6.1所示，在某次橄榄球比赛中，一名质量为95 kg的橄榄球前锋以 5 m s^{-1}的速度向东跑动，这时他的动量是多少？

解　由动量的定义式知道，运动员动量的大小为

$$\begin{aligned} p &= mv \\ &= 95 \times 5\ \text{kg m s}^{-1} \\ &= 475\ \text{kg m s}^{-1} \end{aligned}$$

动量的方向向东。

图 4.6.1

② 动量的变化量

例题4－6　如图 4.6.2 所示，质量为 0.2 kg 的钢球，以 8 m s^{-1} 的速度水平向右运动，碰到一个坚硬的障碍物后被弹回，沿着同一直线以 8 m s^{-1} 的速度水平向左运动。碰撞前后钢球的动量各是多少？碰撞前后钢球动量的变化量

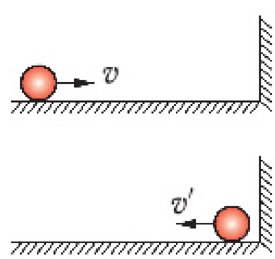


图 4.6.2

是多少？

分析　动量是矢量，因此，描述一个物体的动量时不仅要计算它的大小，而且要明确方向；此例题中，碰撞前后钢球速度的大小虽然没有变化，但是速度方向变了，所以动量的方向也发生了变化，也就是动量发生了变化。为了求得动量的变化量，需要选定动量的正方向。

解　设水平向右为正方向。碰撞前钢球运动的方向沿坐标轴正方向，动量为

$$\begin{aligned} p &= mv \\ &= 0.2 \times 8 \ \mathrm{kg\,m\,s^{-1}} \\ &= 1.6 \ \mathrm{kg\,m\,s^{-1}} \end{aligned}$$

碰撞后钢球运动的方向沿坐标轴负方向，动量为

$$\begin{aligned} p' &= mv' \\ &= 0.2 \times (-8) \ \mathrm{kg\,m\,s^{-1}} \\ &= -1.6 \ \mathrm{kg\,m\,s^{-1}} \end{aligned}$$

动量的变化量是矢量，如果动量变化前后都在一条直线上，那么我们在选定一个正方向后，就可以用代数运算的方法求出动量的变化量。

钢球动量的变化量是碰撞后动量与碰撞前动量的矢量差值，即

$$\begin{aligned} \Delta p &= p' - p \\ &= -3.2 \ \mathrm{kg\,m\,s^{-1}} \end{aligned}$$

上式中的负号表示动量变化量的方向与坐标轴的正方向相反。

练习 4-6

1. 在一次扣杀中，羽毛球以 0.45 $\mathrm{kg\,m\,s^{-1}}$ 的动量飞越球网。若羽毛球的质量为 5 g，则它当时的速度是多少？
2. 一辆摩托车和驾驶员的质量共为 200 kg，某次比赛时以 180 $\mathrm{km\,h^{-1}}$ 的速度行驶，摩托车和驾驶员的总动量是多少？
3. 世界一级方程式锦标赛（简称 F1），与奥运会、世界杯足球赛并称为“世界三大体育盛事”。F1 赛车的加速系统非常强劲，某型号赛车的质量为 600 kg（如图 4.6.3 所示），从时速 0 加速到 100 $\mathrm{km\,h^{-1}}$ 仅需 2.3 s，此过程中动量的变化量是多少？单位时间内动量的变化量又是多少？

图 4.6.3

4. 以 2 $\mathrm{m\,s^{-1}}$ 的速度运动的排球和铅球，能不能都用头去顶？请说明理由。

拓展阅读

动量的起源

我们观察跳动的高尔夫球、滚动的铅球等周围运动着的物体，最终都会停下来，看起来宇宙间运动的总量似乎在减少。整个宇宙是不是也像在地面上滑行的物体，总有一天会停下来呢？生活在16、17世纪的许多哲学家认为，只要能找到一个合适的物理量来量度运动，就会看到运动的总量是不会减少的。这个合适的物理量到底是什么呢？

法国科学家笛卡儿提出，质量和速率的乘积是一个合适的物理量。但是后来荷兰数学家、物理学家惠更斯在研究碰撞问题时发现：按照笛卡儿的定义，两个物体运动的总量在碰撞前后不一定守恒，他首先提出了动量的方向性。

牛顿在总结前人研究的基础上，把笛卡儿的定义作了重要的修改，即不用质量和速率的乘积，而用质量和速度的乘积，这样就找到了量度运动多少的合适的物理量。牛顿把它叫作“运动量”，就是现在说的动量。

科学家们在追寻不变量的努力中，逐渐建立了动量的概念。

第 7 节　牛顿第二运动定律

1 牛顿第二运动定律

牛顿研究了许多关于物体运动的现象，结合前人的研究成果，他在《自然哲学的数学原理》这本书中把力和动量变化的关系作为他的第二个运动定律，后人称为**牛顿第二运动定律（Newton's second law of motion）**：

物体所受作用力与物体动量的变化率成正比，力的方向与动量变化的方向相同。

在这里，动量的变化率指的就是$\dfrac{\Delta p}{\Delta t}$，即单位时间内动量变化的多少。这样牛顿第二定律[①]可以表示为

$$F \propto \frac{\Delta p}{\Delta t}$$

写成等式即

$$F = k\frac{\Delta p}{\Delta t}$$

其中 k 是比例系数，它的值与单位的选取有关。

上式中如果力的单位是牛顿，动量的单位是千克米每秒，时间的单位是秒，这时 $k=1$。

即有

$$F = \frac{\Delta p}{\Delta t}$$

当物体的质量不变时，

$$\frac{\Delta p}{\Delta t} = \frac{mv_2 - mv_1}{\Delta t} = \frac{m(v_2 - v_1)}{\Delta t} = m\frac{\Delta v}{\Delta t} = ma$$

这样牛顿第二定律可以写成另外一种形式：

$$F = ma$$

此式是物体的质量一定时常用的牛顿第二定律的导出公式。

于是我们可以得出牛顿第二定律的另一种表述形式：**物体的加速度跟所受的作用力成正比，跟物体的质量成反比，加速度的方向与作用力的方向相同。**

牛顿第二定律表明，力是使物体产生加速度的原因，力不变则加速度不变；力随时间改变，加速度也随时间改变；作用力为零则加速度也为零，这时物体将保持静止或匀速直线运动状态。

① 在以后的学习中我们把牛顿第二运动定律简称为牛顿第二定律。

牛顿第二定律还表明，要产生同样大小的加速度，质量越大的物体，所需的合外力也越大。这说明质量越大的物体，就越难以改变运动状态，所以质量是物体惯性大小的量度。

牛顿力学研究的是宏观低速的物体，其运动速度要远小于光速。近代物理学的研究表明，对于像电子、质子这样的微观粒子的运动，牛顿第二定律不适用。当物体的运动速度接近光速时，物体的质量明显地随着速度而发生变化，牛顿第二定律也不再适用。

> 加速度是矢量，它的方向跟力的方向相同。
> 在国际单位制中，力的单位就是根据牛顿第二定律定义的：使质量为 1 kg 的物体产生 1 m s^{-2} 加速度的力，此力的大小规定为 1 N。

② 实验验证

如图 4.7.1 所示，把两辆相同的小车放在光滑的水平轨道上，前端各系一条细绳，绳的另一端跨过定滑轮各挂一个小盘，盘中可放砝码（也可以悬挂不同数目规格为 10 g 的小钩码来代替盘和砝码）。小盘和砝码所受的重力，可看作使小车做匀加速运动的合外力。因此，增减小盘中的砝码就可以改变小车受到的合外力。

> 1. 实验前，需要平衡摩擦力，将轨道远离滑轮的一端适当垫高，直至小车不挂小盘时能够匀速运动。
> 2. 小盘和砝码的质量之和远小于小车和车上钩码的总质量时，才能近似认为小盘和砝码所受的总重力等于小车所受的合外力。

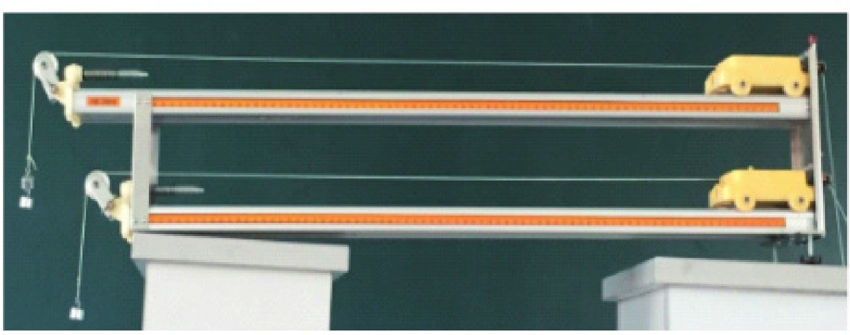


图 4.7.1　验证牛顿第二定律的实验装置

两小车后端各系一条细线，用同一个铁夹夹住，使小车静止。铁夹打开，两小车同时开始运动，铁夹合上，两辆小车同时停下来。用刻度尺测量两辆小车的位移，由于两车运动的时间相等，根据 $s=\frac{1}{2}at^2$ 不难得出，两车的位移之比等于它们的加速度之比。

演示 4-6

验证加速度与合外力的关系

保持两辆小车的总质量相同，让两辆小车所挂的小盘中砝码数不同，再打开铁夹让两辆小车同时从静止开始运动一段时间，然后合上铁夹让它们同时停下来。改变小盘中的砝码数，重复上述实验。

实验结果表明，在实验误差允许的范围内，两辆小车的位移之比等于小车所挂小盘与砝码所受的总重力之比。

这说明物体的加速度之比与所受合外力之比相等，即物体质量不变时，加速度与合外力成正比。

演示 4-7

验证加速度与物体质量的关系

保持两辆小车所挂的小盘中砝码数相同，通过在小车上放置不同的钩码，保持两辆小车总质量不同，重复上述实验。

实验结果表明，在实验误差允许的范围内，两辆小车的位移之比与小车总质量成反比。

这说明物体的加速度之比与物体总质量成反比，即物体所受合外力一定时，加速度与质量成反比。

例题 4－7 在光滑水平面上放置一个静止的物体，质量是 5 kg，在 10 N 的水平力作用下开始运动，5 s 末的速度是多大？ 10 s 内通过的位移是多少？

分析 本题已知物体的受力情况（如图 4.7.2），求解物体的运动情况。首先需要分析它的运动情况，物体原来是静止的，初速度为 0，在水平恒力作用下产生恒定的加速度，所以它做初速度为 0 的匀加速直线运动。本题已知物体的质量 m 和所受的力 F，先根据牛顿第二定律求出物体的加速度 a，再根据匀加速直线运动速度与时间的关系和位移与时间的关系，就可以求出 5 s 末的速度和 10 s 内通过的位移。

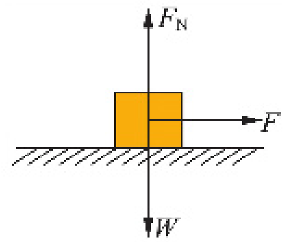


图 4.7.2 物体受力分析图

解 由已知条件 $m = 5\ \mathrm{kg}$，$F = 10\ \mathrm{N}$，$t_1 = 5\ \mathrm{s}$，$t_2 = 10\ \mathrm{s}$，根据牛顿第二定律，有

$$\begin{aligned} a &= \frac{F}{m} \\ &= \frac{10}{5}\ \mathrm{m\,s^{-2}} \\ &= 2\ \mathrm{m\,s^{-2}} \\ v &= v_0 + at_1 \\ &= 0 + 2 \times 5\ \mathrm{m\,s^{-1}} \\ &= 10\ \mathrm{m\,s^{-1}} \\ s &= v_0 t + \frac{1}{2} a t_2^2 \\ &= 0 + \frac{1}{2} \times 2 \times 100\ \mathrm{m} \\ &= 100\ \mathrm{m} \end{aligned}$$

例题 4－8 一名滑雪爱好者，质量是 75 kg，以 $v_0 = 2\ \mathrm{m\,s^{-1}}$ 的初速度沿山坡匀加速滑下，山坡的倾角 $\theta = 30°$。在 $t = 5\ \mathrm{s}$ 的时间内滑下的路程 $x = 60\ \mathrm{m}$。求滑雪者受到的阻力（包括摩擦力和空气阻力）。


图 4.7.3 滑雪者匀加速滑下

分析 已知人的运动情况，求人所受的力，求解时应注意以下几点：

1. 分析人的受力情况，考虑以下几个问题：滑雪者共受到几个力的作用？这几个力各沿什么方向？它们之中哪个力是待求的，哪个力实际上是

已知的？然后作出人的受力示意图。

2. 根据运动学的关系得到下滑加速度，求出对应的合力，再由合力求出人受到的阻力。

3. 适当选取坐标系。坐标系的选择，原则上是任意的，但是为了解决问题的方便，选择时一般根据以下要求选取：①运动正好沿着坐标轴的方向。②尽可能多的力落在坐标轴上。如有可能，待求的未知力尽量落在坐标轴上，不去分解。

解　如图 4.7.4 所示，建立直角坐标系，把重力 W 沿 x 轴方向和 y 轴方向进行分解，得到

$$W_x = mg\sin\theta$$

$$W_y = mg\cos\theta$$

与山坡垂直方向，物体没有发生位移，没有加速度，所以 W_y 与支持力 F_N 大小相等、方向相反，彼此平衡。物体所受的合力 F 等于 W_x 与阻力 $F_阻$的合力。

因为沿山坡向下的方向为正方向，所以合力 $F = W_x - F_阻$，合力的方向沿山坡向下，使滑雪者产生沿山坡向下的加速度。

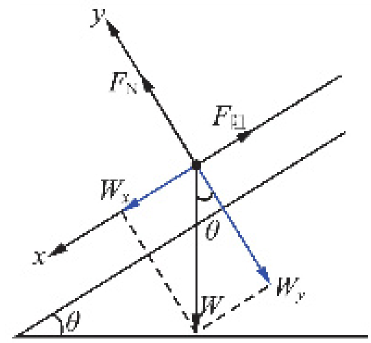


图 4.7.4　滑雪者的受力分析

运算时尽量使用代表物理量的字母，必要时再把已知量的数值代入。

滑雪者的加速度可以根据运动学的规律求得：

$$s = v_0t + \frac{1}{2}at^2$$

解出

$$a = \frac{2(s - v_0t)}{t^2}$$

$$= \frac{2\times(60 - 2\times5)}{5^2}\ \mathrm{m\,s^{-2}}$$

$$= 4\ \mathrm{m\,s^{-2}}$$

根据牛顿第二定律 $F = ma$，有

$$W_x - F_阻 = ma$$

解出

$$F_阻 = W_x - ma$$

$$= mg\cdot\sin\theta - ma$$

$$= (75\times9.8\times\sin30° - 75\times4)\ \mathrm{N}$$

$$= 67.5\ \mathrm{N}$$

故滑雪者受到的阻力为 67.5 N。

例题4 – 9 两物体 A 和 B 的质量各为 2 kg 和 3 kg，它们分别系于细绳的两端（细绳伸长忽略不计），细绳跨过光滑轻质的定滑轮，如图 4.7.5 所示，B 下降，A 上升。求两物体的加速度大小。

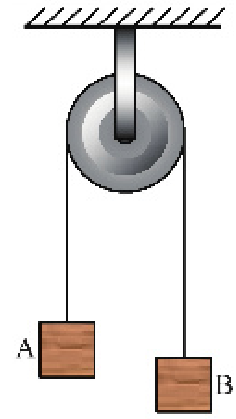


图 4.7.5

分析 本题属于连接体问题，A 和 B 通过细绳相连接，它们运动的加速度大小和速度大小始终是相等的，这是解决此类问题的关键所在。

解 设 A 的加速度大小为 a_A，B 的加速度大小为 a_B，已知 $m_A = 2$ kg，$m_B = 3$ kg，对两物体受力分析如图 4.7.6 所示。

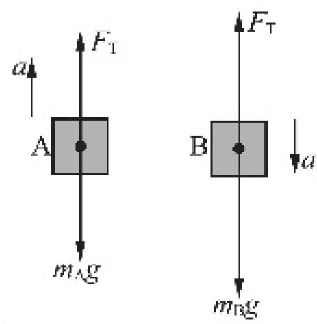


图 4.7.6

根据题意，可得 $a_A = a_B$ ①

对 A 物体，根据牛顿第二定律，得

$$F_T - m_A g = m_A a_A \quad ②$$

对 B 物体，根据牛顿第二定律，得

$$m_B g - F_T = m_B a_B \quad ③$$

由①②③，得 $a_A = a_B = \dfrac{m_B g - m_A g}{m_A + m_B}$ ④

$$= \frac{3\times 9.8 - 2\times 9.8}{2+3}\ \mathrm{m\,s^{-2}}$$

$$= 1.96\ \mathrm{m\,s^{-2}}$$

练习 4-7

1. 一个质量为 60 kg 的滑雪运动员，沿某长直斜坡下滑时的加速度是 5.8 $\mathrm{m\,s^{-2}}$，他下滑时所受合外力的大小是多少？

2. 一个静止在水平地面上的物体，质量是 5 kg，在 10 N 的水平拉力作用下沿水平向右运动，物体与地面间的摩擦力是 5 N，求物体在 2 s 末的速度和 2 s 内的位移。

3. 当网球被击出时，可近似认为球从静止加速到 50 $\mathrm{m\,s^{-1}}$。网球的质量约为 0.06 kg，请估算球拍对球施加的力。（假设球加速运动的距离为 0.3 m，且在这个过程中加速度大小不变）

4. 质量为 4 kg 的物体在 10 N 的水平拉力的作用下沿水平面做匀速直线运动，撤去水平拉力后经 4 s 物体停下来，求物体做匀速运动的速度和撤去拉力后的位移。

5. 一个物体的质量 $m = 0.4\ \mathrm{kg}$，以初速度 $v_0 = 30\ \mathrm{m\,s^{-1}}$ 竖直向上抛出，经过 $t = 2.5\ \mathrm{s}$ 物体上升到最高点。已知物体上升过程中所受到的空气阻力大小恒定，求物体上升过程中所受空气阻力的大小。

6. 一名滑雪者从静止开始沿山坡滑下，山坡的倾角 $\theta = 30°$，滑雪板与雪地的动摩擦系数是 0.04。求：（取 $g = 10\ \mathrm{m\,s^{-2}}$）
（a）滑雪者的加速度大小。
（b）滑雪者 5 s 内滑下的路程。
（c）滑雪者 5 s 末速度的大小。

第 8 节　牛顿第三运动定律

1 作用力与反作用力

如图 4.8.1 所示，足球运动员用头顶球时，足球受到了头的作用力，同时人的头部也会感到球对它的作用力。

图 4.8.1　足球运动员头球

生活中当你用手推桌子时，你就对桌子施加了作用力，同时你的手也会感到桌子对你施加一个力的作用。

冬天，我们会把自己的双手手心正对紧压在一起，然后来回搓动，用相互摩擦来取暖。在这个过程中左手对右手施加了一个摩擦力的作用，同时右手对左手也施加了一个摩擦力的作用。

演示 4-8

物体间的相互作用力

把两根条形磁铁放在尽量光滑的桌面上，让它们的异名磁极相互靠近但不接触，用两手按住它们保持静止。当两手先后放开其中一只手时，如图 4.8.2 所示。我们会看到什么现象？该现象告诉我们什么道理？

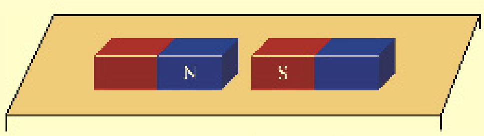


图 4.8.2　相互靠近的条形磁铁

由此可见，当两个物体相互作用时，如果一个物体对另一个物体施加力的作用，另一个物体同时也会反过来对它施加力的作用。

所有这些现象都表明，力的作用是相互的。**在物理学中，物体间相互作用的这一对力，通常叫作作用力（action）与反作用力（reaction）。作用力与反作用力总是互相依存，同时存在的。我们可以把其中任何一个力叫作作用力，另一个力叫作反作用力。**

② 牛顿第三运动定律

既然力的作用是相互的，那么物体间的作用力与反作用力存在怎样的关系呢？

探究 4-2

作用力与反作用力的关系

如图 4.8.3 所示，把 A、B 两个弹簧测力计的挂钩钩在同一条细绳上，保持它们在同一水平线上，两手分别用力拉两个测力计。其中测力计 B 的示数可以指示测力计 A 对 B 的作用力的大小，而测力计 A 的示数可以指示测力计 B 对 A 的反作用力的大小。

改变两手拉力的大小，观察两个测力计的示数如何改变。

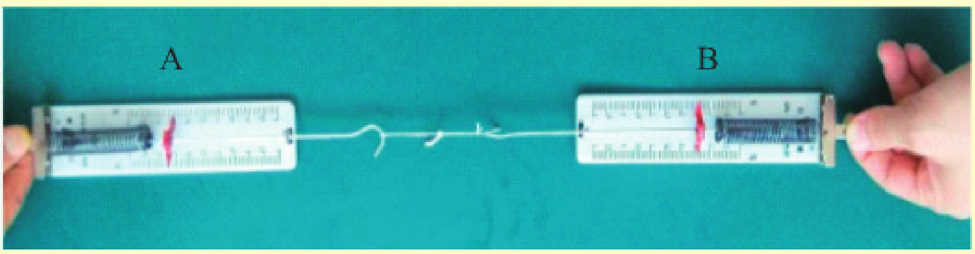


图 4.8.3　用弹簧测力计测拉力

大量的事实表明：**两个物体之间的作用力与反作用力总是大小相等，方向相反，作用在同一条直线上。这就是牛顿第三运动定律（Newton's third law of motion）**。

数字实验

牛顿第三定律的检验

● **实验器材**

力传感器及其附件，电脑。

● 实验操作

1. 点击软件主界面上的实验条目“力的相互作用”，打开该软件。

2. 两手各握住一个力传感器，让传感器的测钩相互钩住，保持两传感器测钩轴心在同一条直线上（图 4.8.4），对传感器进行调零。

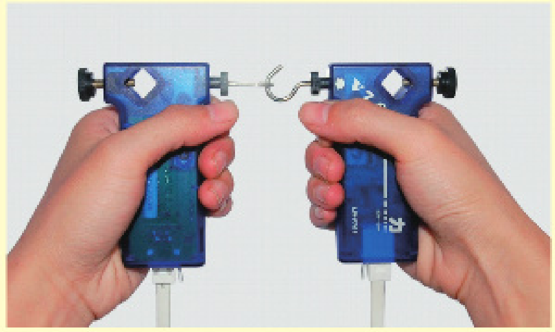


图 4.8.4　力的相互作用实验装置

3. 两手轻拉轻放传感器，得出如图 4.8.5 所示的实验图线，可见两个力传感器测量的力方向相反。实验图线以时间轴为中心上下对称。

4. 点击“镜像”按钮，可将以 x 轴为镜像的图形复原，根据两个力图线的重合程度比较作用力与反作用力的大小关系，如图 4.8.6 所示。

图 4.8.5　力的相互作用实验结果

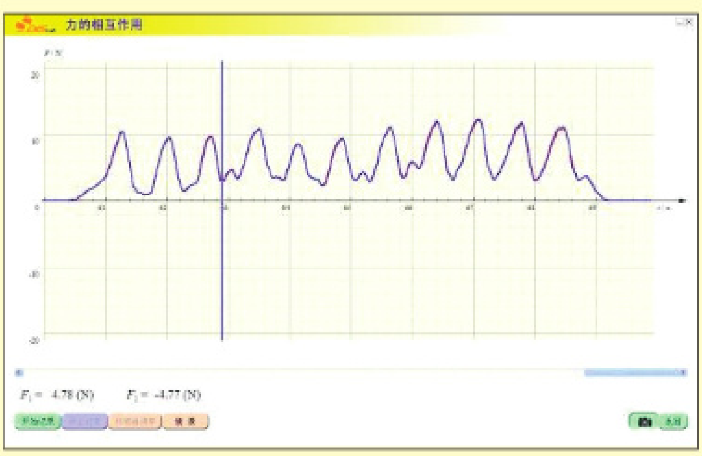


图 4.8.6　使用“镜像”功能


图 4.8.7　火箭发射升空

牛顿第三运动定律揭示了物体运动之间的相互联系，使人们不仅可以研究单个物体的运动，而且可以把存在相互作用的各个物体的运动联系起来进行研究。

在日常生活和生产中涉及牛顿第三运动定律的例子是很多的。如图 4.8.7 所示，火箭发射升空时，作用力把燃料燃烧释放出来的气体向下喷出，这些气体则给火箭施加了一个反作用力，把火箭送上太空。划船时桨向后推水，水就向前推桨，从而推动船向前运动。奥运会跳水运动员在跳板上起跳时，他对跳板的蹬力与跳板对他的弹力也是一对相互作用力。

例题 4 – 10　一辆汽车拉着一辆拖车在平直道路上行驶，汽车的牵引力 $F = 15\ 000$ N。汽车与拖车的质量分别是 $m_1 = 5\ 000$ kg 和 $m_2 = 2\ 500$ kg，所受的阻力分别是 $f_1 = 1\ 000$ N 和 $f_2 = 500$ N。求它们的加速度和汽车与拖车之间的拉力。

分析　题目中如果涉及两个及两个以上的物体，要合理选择研究对象，灵活使用整体法和隔离法。汽车与拖车一起前进，因此它们有相同的加速度。先对两个研究对象分别进行受力分析，再根据牛顿第二定律列式。对两个研究对象，均有一个力是未知的，但这两个力是作用力与反作用力，根据牛顿第三定律①，它们大小相等、方向相反，这样两个方程式就可以联立求得加速度。

解　汽车与拖车一起前进，设它们的加速度为 a，分别对它们进行受力分析，如图 4.8.8 所示。根据牛顿第二定律，得

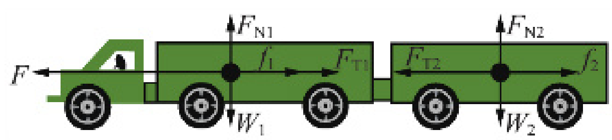


图 4.8.8　汽车和拖车受力分析图

对于汽车：

$$F - F_{T1} - f_1 = m_1 a \qquad ①$$

对于拖车：

$$F_{T2} - f_2 = m_2 a \qquad ②$$

根据牛顿第三定律，得 $F_{T1} = F_{T2}$　　③

由①②③，得

$$a = \frac{F - f_1 - f_2}{m_1 + m_2}$$

$$= \frac{15\ 000 - 1\ 000 - 500}{5\ 000 + 2\ 500}\ \text{m s}^{-2}$$

① 在以后的学习中我们把牛顿第三运动定律简称为牛顿第三定律。

$$= 1.8\ \mathrm{m\,s^{-2}}$$

由②式，得
$$F_{T2} = f_2 + m_2 a$$
$$= (500 + 2\,500 \times 1.8)\ \mathrm{N}$$
$$= 5\,000\ \mathrm{N}$$

拓展 在本题的解答中，我们主要采取了隔离法。在解答本题时我们也可以优先采用整体法——把汽车和拖车作为一个整体，先求出这个整体的合外力 $F_{合} = F - f_1 - f_2$，然后求出加速度，再用隔离法求拉力。

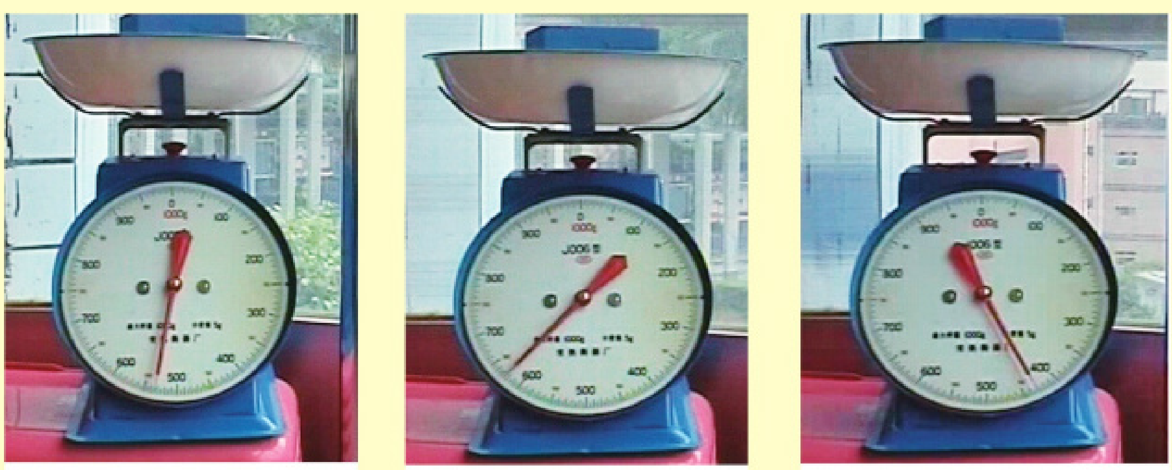
③ 升降机底板的压力

生活中，我们在乘坐竖直升降电梯时，当电梯启动、制动时我们会感觉到电梯底板对脚的反作用力发生变化，这究竟是什么原因呢？

探究 4-3

观察竖直升降电梯中盘秤示数变化

在竖直方向的升降电梯中，放一台盘秤，在秤盘中放置一物块。当电梯静止时，盘秤示数如图 4.8.9 a 所示；当电梯启动向上加速时，示数如图 4.8.9 b 所示；当电梯向上时制动，示数如图 4.8.9 c 所示。请你帮忙分析其中蕴含的物理道理。



（a）　　（b）　　（c）

图 4.8.9　电梯中盘秤实验

对秤盘上的物块进行受力分析，如图 4.8.10 所示。根据牛顿第三定律得，物块受到的支持力与物块对秤盘的压力是一对作用力与反作用力，故盘秤指针的示数大小表示物块对盘秤的压力大小，也可以表示物块受到的支持力大小。

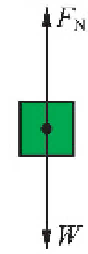


图 4.8.10　盘秤上物块受力分析图

当电梯静止或匀速运动时，

$$F_N - mg = 0$$

即
$$F_N = mg$$

当电梯加速向上运动时，

$$F_N - mg = ma$$

即
$$F_N = mg + ma > mg$$

上面的结果表明物块对支持物的压力比自身所受的重力要大一些。

当电梯减速向上运动时，

$$F_N - mg = m(-a)$$

即
$$F_N = mg - ma < mg$$

上面的结果表明物块对支持物的压力比自身所受的重力要小一些。

如果物体正好以大小为 g 的加速度竖直下落，那么此时 $F_N = 0$，表明物体对支持物或悬挂物没有作用力，好像完全没有了重力作用，这种状态叫作**失重状态(weightlessness)**。

做一做

将一个矿泉水瓶的底部及瓶的两侧各开几个细孔，用塞子堵住小孔，向瓶内注入清水。打开塞子，正常情况下，水就会从小孔内喷射出来。如图 4.8.11 所示，若让瓶子从空中自由下落，则观察到水不再向外喷射。这究竟是什么原因呢？

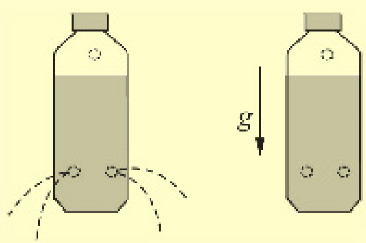


图 4.8.11

例题4－11 一个质量为 70 kg 的人乘搭升降机上下楼。在下列各情况中，人对升降机底板的压力是多少？（取 $g = 10\ \text{m s}^{-2}$）

（a）以 $v = 5\ \text{m s}^{-1}$ 的速度匀速下降。

（b）以 $a = 5\ \text{m s}^{-2}$ 的加速度竖直加速上升。

（c）以 $a = 5\ \text{m s}^{-2}$ 的加速度竖直加速下降。

（d）以重力加速度 g 竖直减速上升。

解 对人进行受力分析，如图 4.8.12 所示，取向上为正方向。

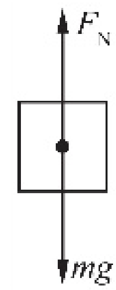


图 4.8.12

（a）匀速下降时，由平衡条件，得

$$\begin{aligned} F_N &= mg \\ &= 70\times 10\ \text{N} \\ &= 700\ \text{N} \end{aligned}$$

（b）加速上升时，由牛顿第二定律，得

$$F_N - mg = ma$$

解得

$$\begin{aligned} F_N &= m(g + a) \\ &= 70\times(10 + 5)\ \text{N} \\ &= 1\ 050\ \text{N} \end{aligned}$$

（c）加速下降时，由牛顿第二定律，得

$$F_N - mg = m(-a)$$

解得

$$\begin{aligned} F_N &= m(g - a) \\ &= 70\times(10 - 5)\ \text{N} \\ &= 350\ \text{N} \end{aligned}$$

（d）减速上升时，由牛顿第二定律，得

$$F_N - mg = m(-g)$$

解得

$$\begin{aligned} F_N &= mg - mg \\ &= 0 \end{aligned}$$

拓展阅读

太空——无与伦比的实验室

太空的特殊环境条件，既是人类进入太空的障碍，也是一个可以开发利用的、地面上难以模拟的天然实验室。特别是其接近于完全失重的环境，在地球上只能用自由落体、飞机的抛物线飞行等获得很短时间的实现。在太空，卫星或飞船以第一宇宙速度绕地球运行时，舱和舱内的物体都处于完全失重状态。

利用这个无与伦比的实验室，可以进行失重条件下物理、化学及生命科学的实验研究。近年来在中国“神舟”飞船内，就开展了大量失重环境下流体物理、材料科学和空间生命科学等方面的科学实验。这些实验不仅使人类认识了许多新的自然现象和规律，而且还具有很强的现实意义和广泛的应用性。它既可以改进传统的实验方法，试验新的设备和工艺，有助于地面工业生产过程和工艺的改进，以及农作物品种的改良和新品种的培育，也可进行各种金属、非金属以及药物、生物等新材料和物品的试制加工，为今后太空工业的发展奠定基础。因此，它不仅和工农业生产的进一步发展有着密切的关系，而且还具有极为广阔的商业开发前景。

练习 4-8

1. 用牛顿第三定律判断下列说法是否正确。

 (a) 人走路时,只有地对脚的反作用力大于脚蹬地的作用力时,人才能前进。(　　)

 (b) 物体 A 静止在物体 B 上，A 的质量是 B 的质量的 10 倍，所以 A 作用于 B 的力大于 B 作用于 A 的力。(　　)

 (c) 以卵击石，石头没损伤而鸡蛋破了，是因为鸡蛋对石头的作用力小于石头对鸡蛋的作用力。(　　)

2. 吊扇通过吊杆悬挂在天花板上，设吊扇所受的重力为 W，当吊扇正常转动时，吊杆对吊扇拉力 F 的大小等于 W 的大小吗？请说明理由。

3. 某人站在一台秤上处于静止状态,在他猛然下蹲到静止的过程中,台秤的示数（不考虑台秤的惯性）怎样变化?

4. 竖直升降的电梯内的天花板上悬挂着一个弹簧测力计，如图 4.8.13 所示，弹簧测力计的挂钩上悬挂着一个质量为 4 kg 的物体，试分析下列情况下电梯的运动情况 :（取 $g = 10\ \mathrm{m\,s^{-2}}$）

 (a) 当弹簧测力计的示数为 40 N，且保持不变。

 (b) 当弹簧测力计的示数为 32 N，且保持不变。

 (c) 当弹簧测力计的示数为 44 N，且保持不变。

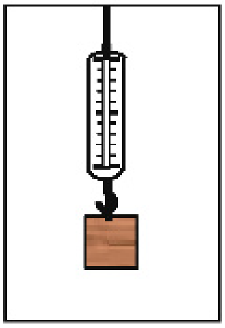


图 4.8.13

5. 如图 4.8.14 所示，质量为 $m_1 = 10$ kg 和 $m_2 = 20$ kg 的两个物体靠在一起置于同一光滑水平面上。现对它们施加一个 $F = 80$ N 向右的水平力，使它们一起做加速运动，求两物体间的作用力大小。(取 $g = 10\ \mathrm{m\,s^{-2}}$)

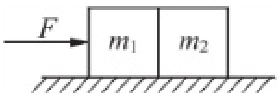
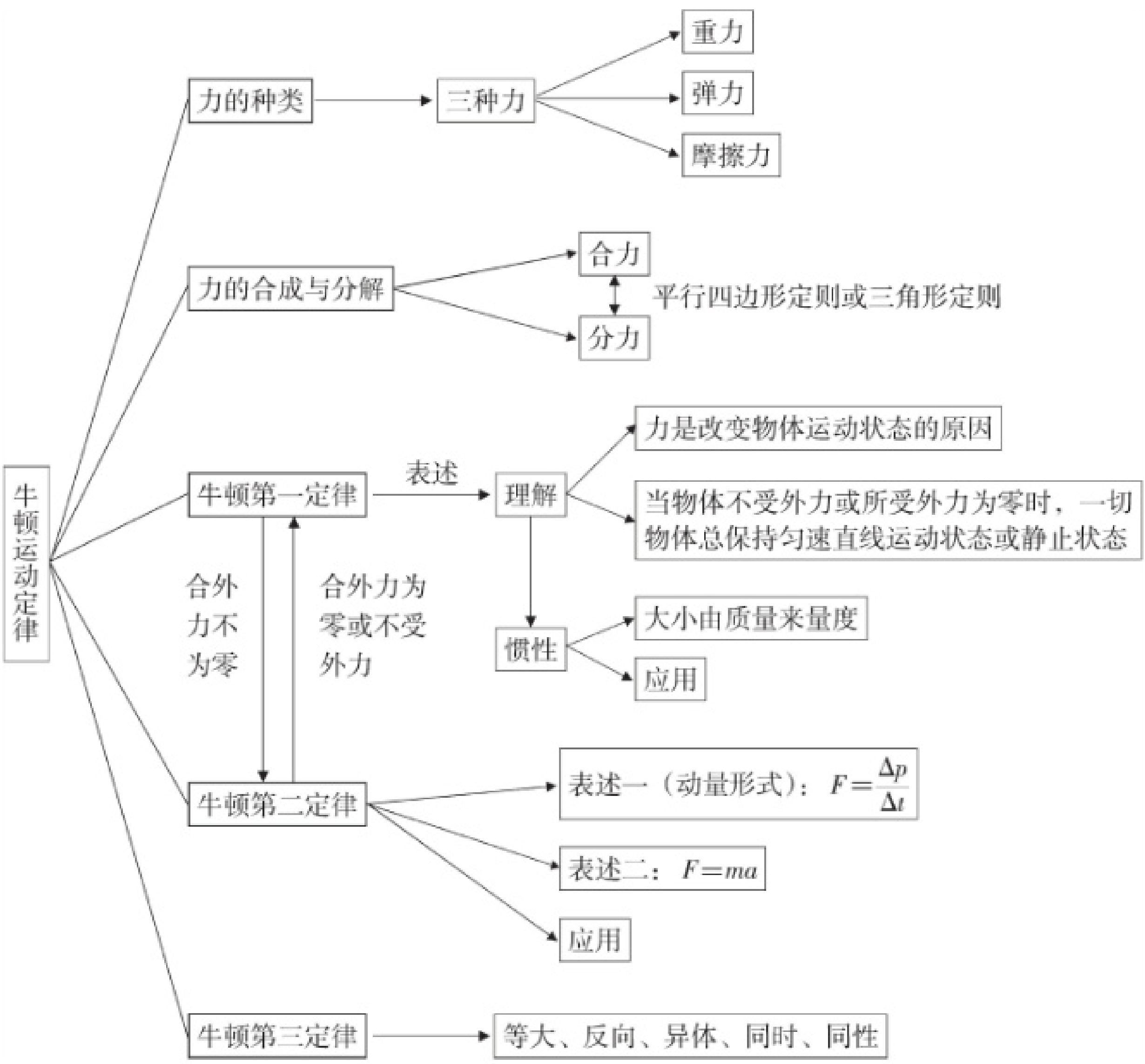


图 4.8.14

章末回顾

本章基本知识结构



总练习四

基础练习

1. 对下列现象的解释，正确的是（　　）

A. 在一定拉力作用下，小车沿水平面匀速前进，没有这个拉力，小车就会停下来，所以力是物体运动的原因

B. 向上抛出的物体由于惯性，因此向上运动，以后由于重力作用，惯性变小，因此速度也越来越小

C. 急刹车时，车上的乘客由于惯性一样大，因此都会向前倾倒

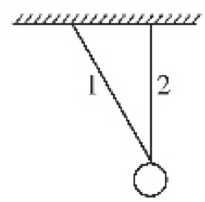
D. 质量大的物体运动状态不容易改变，是物体的质量大，惯性也就大的缘故

2. 重为 100 N 的物体放在水平地面上，现用 60 N 的力竖直向上提物体，则物体所受的合力为（　　）

A. 0　　　　B. 40 N，方向向下

C. 60 N，方向向上　　　　D. 100 N，方向向下

3. 如图所示，一个小球被两根轻绳挂于天花板上，球静止，绳 1 倾斜，绳 2 恰好竖直，则小球所受的作用力有（　　）



（第 3 题）

A. 1 个　　　　B. 2 个

C. 3 个　　　　D. 4 个

4. 有一质量为 m 的人正站在以加速度 a 匀加速上升的电梯中，下列说法正确的是（　　）

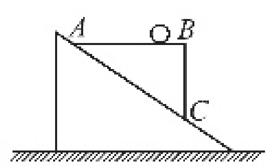
A. 此人对地板的压力大小为 $m(g+a)$

B. 此人对地板的压力大小为 $m(g-a)$

C. 此人受到的重力大小为 $m(g+a)$

D. 此人受到的合力大小为 $m(g-a)$

5. 如图所示，一个劈形物 ABC 各面均光滑，放在固定的斜面上，水平边 AB 上放一光滑小球。现把劈形物从静止开始释放，则小球在碰到斜面前的运动轨迹是（　　）



（第 5 题）

A. 沿斜面的直线　　　　B. 竖直的直线

C. 弧形曲线　　　　D. 抛物线

6. 穿梭机是一种游戏项目，可以锻炼人的胆量和意志。人坐在穿梭机上，在穿梭机加速下降的阶段（$a<g$），下列说法正确的是（　　）

A. 人处于超重状态

B. 人处于失重状态

C. 人先处于超重状态，后处于失重状态

D. 人先处于失重状态，后处于超重状态

7. 下列关于力和运动关系的说法，正确的是（　　）

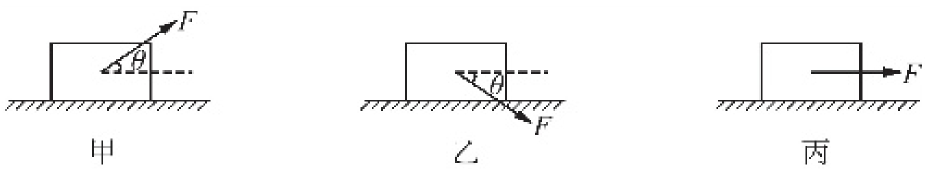
A. 物体所受的合力不为零时，其速度不可能为零

B. 物体所受的合力的方向，就是物体运动的方向

C. 物体所受的合力与物体运动速度无直接联系

D. 物体所受的合力不为零，则加速度一定不为零

8. 如图所示，甲、乙、丙三个物体质量相同，与地面的动摩擦系数相同，它们受到大小相同、方向不同的力 F 作用。当它们滑动时，受到的摩擦力大小是（　　）



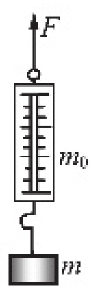
（第 8 题）

A. 甲、乙、丙所受摩擦力的大小相同　　B. 甲受到的摩擦力最大

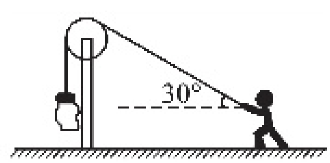
C. 乙受到的摩擦力最大　　D. 丙受到的摩擦力最大

9. 如图所示，弹簧测力计外壳质量为 m_0，弹簧及挂钩的质量忽略不计，挂钩吊着一质量为 m 的重物。现用一方向竖直向上的外力 F 拉着弹簧测力计，使其向上做匀加速运动，则弹簧测力计的示数为（　　）

A. mg　　B. $\dfrac{m}{m_0+m}mg$　　C. $\dfrac{m_0}{m_0+m}F$　　D. $\dfrac{m}{m_0+m}F$



（第 9 题）



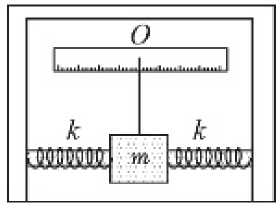
（第 10 题）

10. 如图所示，水平地面上固定着一根竖直立柱，某人用绳子通过立柱顶端的定滑轮将 100 N 的货物提起。已知人拉着绳子的一端，且该端与水平方向的夹角为 30°，则立柱顶端所受压力的大小为（　　）

A. 200 N　　B. $100\sqrt{3}$ N

C. 100 N　　D. $50\sqrt{3}$ N

11. 惯性制导系统广泛应用于弹道式导弹工程中，这个系统的重要元件之一是加速度计。加速度计的构造原理示意图如图所示：沿导弹长度方向安装的固定光滑杆上套着一质量为 m 的滑块，滑块两侧分别与劲度系数均为 k 的弹簧相连。两弹簧的另一端各与固定壁相连，滑块原来静止，弹簧处于松弛状态，其长度为自然长度。滑块上装有指针，可通过标尺测出滑块的位移，然后通过控制系统进行制导。设某段时间内导弹沿水平方向运动，指针向左偏离 O 点的距离为 x，则这段时间内导弹的加速度（　　）



（第 11 题）

A. 方向向左，大小为$\frac{kx}{m}$　　B. 方向向右，大小为$\frac{kx}{m}$

C. 方向向左，大小为$\frac{2kx}{m}$　　D. 方向向右，大小为$\frac{2kx}{m}$

12. 枪管长 0.5 m，质量为 2 g 的子弹从枪口射出时的速度为 400 $\mathrm{m\,s^{-1}}$，假设子弹在枪管内受到的高压气体的力是恒定的，试估算此力的大小。

13. 一辆质量为 1.0×10^3 kg 的汽车，经过 10 s 由静止加速到 108 $\mathrm{km\,h^{-1}}$ 后匀速前进。

（a）求汽车加速时所受的合力。

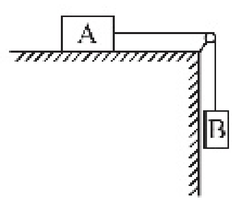
（b）如果关闭汽车发动机油门并刹车，设汽车受到的阻力为 6.0×10^3 N，求汽车由 108 $\mathrm{km\,h^{-1}}$ 的速度到停下来所用的时间和所通过的路程。

14. 一手提机关枪每分钟发射 300 发子弹。若每颗子弹的质量为 9.6 g，出枪口的速度为 820 $\mathrm{m\,s^{-1}}$，求机关枪在发射时所受的平均后坐力。

15. 质量为 2 kg 的木箱在水平恒力 F 的作用下由静止开始运动，4 s 末速度达 4 $\mathrm{m\,s^{-1}}$，此时将力 F 撤去，又经过 6 s 木箱停止运动。求力 F 的大小。

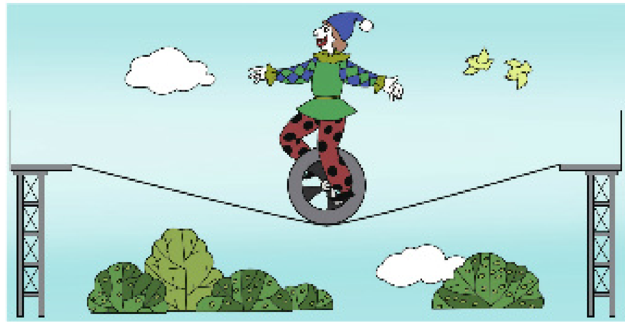
提高练习

16. 如图所示，A、B 两物体的质量分别为 $m_A = 2.0$ kg、$m_B = 4.0$ kg。A 与桌面间的滑动摩擦力为 0.4 N，当轻轻释放 B 后，物体 A 沿桌面滑行的加速度为多少？（取 $g = 10\ \mathrm{m\,s^{-2}}$）



（第 16 题）

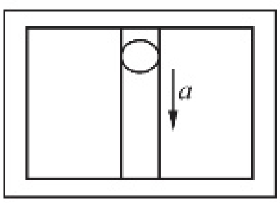
17. 如图所示，一名骑独轮车的杂技演员在空中的钢索上表演，如果演员与独轮车的总质量为 80 kg，两侧的钢索互成 150° 夹角，求钢索所受拉力的大小。($\cos 75° \approx 0.259$)



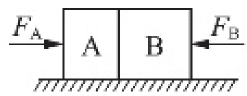
（第 17 题）

18. 某人在以 $a = 2\ \mathrm{m\,s^{-2}}$ 匀加速下降的升降机中最多能举起 $m_1 = 75$ kg 的物体，则此人在地面上最多可举起多大质量的物体？若此人在一匀加速上升的升降机中最多能举起 $m_2 = 50$ kg 的物体，则此升降机上升的加速度为多大？（取 $g = 10\ \mathrm{m\,s^{-2}}$）

19. 如图所示，质量为 M 的木箱放在水平面上，木箱中的立杆上套着一个质量为 m 的小球。开始时小球在杆的顶端，由静止释放后，小球沿杆下滑的加速度为重力加速度的$\frac{1}{2}$，即 $a = \frac{1}{2}g$。小球在下滑的过程中，木箱对地面的压力为多少？



（第 19 题）



（第 20 题）

20. 在光滑的水平面上，A、B 两物体紧靠在一起，如图所示，A 物体的质量是 24 kg，B 物体的质量是 120 kg。$F_A = 4$ N，方向水平向右；$F_B = (16 - 3t)$ N（t 以 s 为单位），是随时间变化的水平力，$t = 0$ 时，F_B 水平向左。从静止开始，经过多少时间，A、B 两物体开始脱离？

第 5 章 静力学

本章提要

1. 共点力、力臂、力矩、力偶等概念。
2. 物体保持平衡的条件。
3. 相互平行的几个力的合力。

学前储备

1. 熟悉常见的三种力。
2. 知道牛顿运动定律。
3. 具备三角函数的基本知识。

第 1 节　共点力作用下物体的平衡

① 共点力作用下物体的平衡状态

物体同时受到几个力的作用，如果这几个力都作用在物体的同一点上，或者它们的作用线相交于一点，如图 5.1.1 所示，这样的一组力叫作**共点力系（concurrent forces）**。

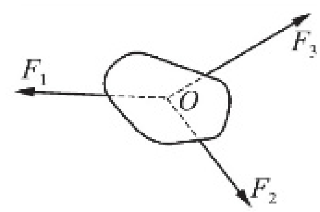
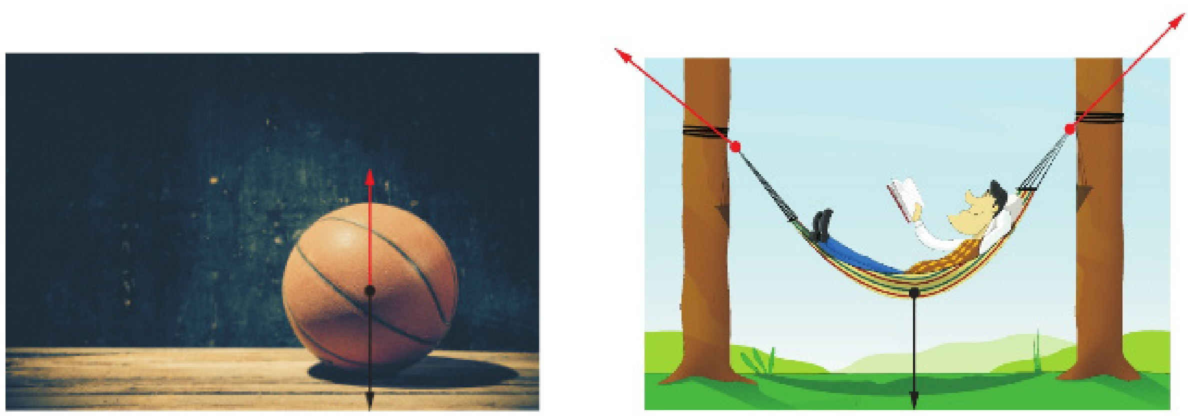


图 5.1.1　共点力系

物体在共点力的作用下，保持静止或匀速直线运动状态，我们就说这个物体处于**平衡状态 (equilibrium state)**。



水平地板上的篮球　　躺着人的吊床

图 5.1.2

说一说

在图 5.1.2 中，篮球、吊床都处于平衡状态。

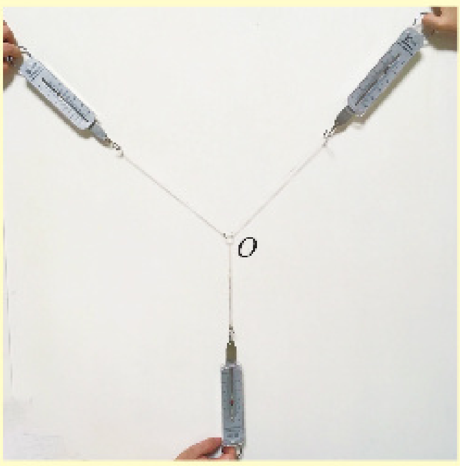
1. 它们各自受到哪些力的作用？
2. 这些力应当满足什么样的条件？

② 共点力作用下物体的平衡条件

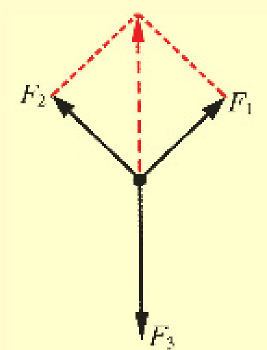
探究 5-1

探究共点力作用下物体的平衡条件

如图 5.1.3 a 所示，在水平木板上铺一张白纸，把三条细绳的一端结在一起，让绳结 O 在白纸中央。三人合作，各用一个弹簧测力计拉绳的另一端，注意保持 O 点不动。记下三个弹簧测力计的示数和方向，如图 5.1.3 b 所示。用一定的标度作出三个力的图示。以两个共点力 F_1 和 F_2 的线段为邻边作平行四边形，这两条邻边之间的对角线就代表合力的大小和方向。这个法则叫作平行四边形定则。根据力的平行四边形定则，看看这三个力有什么关系。



（a）



（b）

图 5.1.3

改变三个力的大小和方向，仍使 O 点保持不动，重做实验，研究三个力的合力等于多少。

若是四个共点力、五个共点力……其合力又是怎样的呢？你可以用力的合成法，将多个力的平衡转化为二力平衡。

通过上面实验的探究我们看到，物体在静止状态下，受到的共点力的合力为零。大量实验和观察到的事实都能得出相同的结论。由此可以总结出一般性的规律：物体在共点力作用下的平衡条件是合力为零，即

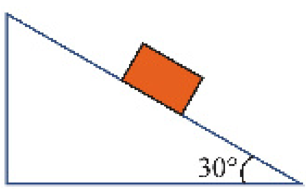
$$\sum \vec{F}=0\ （\vec{F}\text{是 }F\text{ 的矢量表示}）$$

当共点力处在同一平面上时，其合力等于零，也就是各个力在 x 轴上和 y 轴上的分量的代数和分别等于零，即

$$\sum F_x = 0$$
$$\sum F_y = 0$$

作用在物体上的几个力的合力为零，叫作力的平衡。当物体只受到同一直线上的两个共点力的作用，且合力为零时，这就是在初中所学过的二力平衡情况。

例题5－1 如图 5.1.4 a所示，质量为 1 kg 的物体静止在倾角为30° 的固定斜面上，则该物体受到斜面的支持力和摩擦力分别为多大？（取 g=10 m s^{-2}）



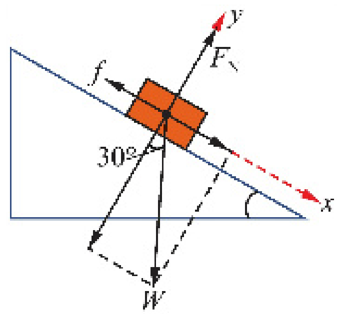


图 5.1.4

解 作出物体的受力分析图，将重力分解到垂直于斜面和平行于斜面方向，如图 5.1.4 b所示。

$\because$ $$\sum F_x = W\sin30° - f = 0$$

$\therefore$ $$\begin{aligned} f &= W\sin30° \\ &= mg\sin30° \\ &= 1\times10\times\frac{1}{2}\ \text{N} \\ &= 5\ \text{N} \end{aligned}$$

$\because$ $$\sum F_y = F_N - W\cos30° = 0$$

$\therefore$ $$\begin{aligned} F_N &= W\cos30° \\ &= mg\cos30° \\ &= 1\times10\times\frac{\sqrt{3}}{2}\ \text{N} \\ &\approx 8.66\ \text{N} \end{aligned}$$

请进一步思考：若该物体与斜面间的动摩擦系数为 0.3，要使该物体沿斜面匀速向上滑动，则需要对物体施加多大的沿斜面的推力？

练习 5-1

1. 沿光滑的墙壁用网兜把一个足球挂在 A 点，如图 5.1.5 所示，足球的质量为 m，网兜的质量不计。足球与墙壁的接触点为 B，悬绳与墙壁的夹角为 α。求悬绳对足球的拉力和墙壁对足球的支持力。

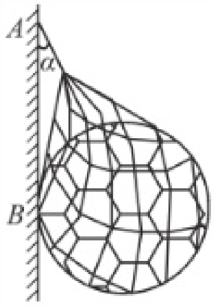


图 5.1.5

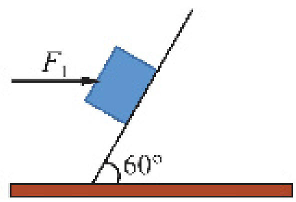


图 5.1.6

2. 物体 A 在水平力 $F_1 = 400$ N 的作用下，沿倾角 $\theta = 60°$ 的斜面匀速下滑，如图 5.1.6 所示。物体 A 受到的重力 $W = 400$ N，求斜面对物体 A 的支持力和物体 A 与斜面间的动摩擦系数 μ_K。

3. 质量为 m 的光滑小球被竖直挡板挡住，静止在倾角为 θ 的斜面上，如图 5.1.7 所示，求小球压紧挡板的力的大小。

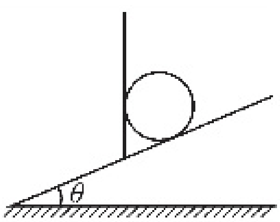


图 5.1.7

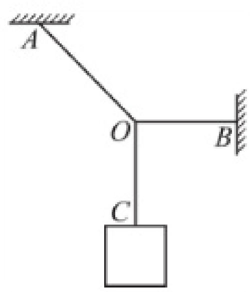


图 5.1.8

4. 如图 5.1.8 所示，三段不可伸长的细绳 OA、OB、OC，它们能承受的最大拉力相同，并共同悬挂一个物体，其中 OB 是水平的，A 端、B 端固定。若逐渐增加 C 端所挂物体的质量，则最先断的绳（　　）

A. 必定是细绳 OA

B. 必定是细绳 OB

C. 必定是细绳 OC

D. 可能是细绳 OB，也可能是细绳 OC

第 2 节　力矩的平衡　平面力系的平衡

① 转动平衡状态

力不仅可以使物体移动，也可以使物体发生转动。物体转动时，它的各点都沿着圆周运动，圆周的中心在同一直线上，这条直线叫作转轴。一个有固定转轴的物体，在力的作用下，如果保持静止或匀速转动状态，我们就说这个物体处于转动平衡状态。

② 力矩

说一说

为了改变物体的转动状态，如从静止开始转动，要施加力。那么，所施加的力对物体产生的转动效果与哪些因素有关呢？

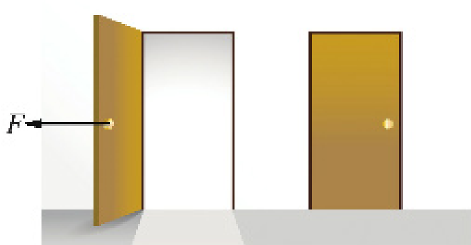


图 5.2.1　在离转轴较远的地方推门，用较小的力就能把门推开

图 5.2.2　相同的力 F 作用在 B 点比作用在 A 点更容易拧紧螺帽

日常经验告诉我们，在离转轴较近的地方推门，用较大的力才能把门推开；在离转轴较远的地方推门，用较小的力就能把门推开，如图 5.2.1 所示。用扳手来拧螺帽，在 B 点用力比在 A 点用力更容易拧紧螺帽，如图 5.2.2 所示。可见，在相同作用力下，力和转轴之间的距离越大，力产生的转动效果就越大。

从转轴到力的作用线的垂直距离，叫作**力臂**（**arm of force**），如图 5.2.3 所示，F_1 和 F_2 作用在杠杆上，杠杆的转动轴过 O 点且垂直于纸面，L_1 是 F_1 对转动轴的力臂，L_2 是 F_2 对转动轴的力臂。力 F 和力臂 L 的乘积称为力对转轴的**力矩**（**moment of force**）。通常用 M 表示力矩，有

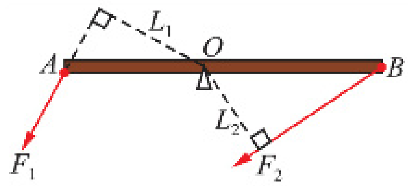


图 5.2.3　力和力臂

$$M = FL$$

在国际单位制中，力矩的单位是**牛顿米**，符号是 **N m**。

力矩可以使物体沿不同的方向转动。通常规定，使物体沿逆时针方向转动的力矩为正值；使物体沿顺时针方向转动的力矩为负值。在图 5.2.3 中，F_1 的力矩为正值，F_2 的力矩为负值。如果有几个力矩共同作用，那么这几个力矩的合力矩等于它们的代数和。

$$\sum M = M_1 + M_2$$

3 力矩的平衡

说一说

在初中，我们学过杠杆的平衡条件，你能用力矩的概念将杠杆的平衡条件表示出来吗？

下面我们用实验来探究这个条件：

探究 5-2

如图 5.2.4 所示，把力矩盘固定在铁架台上，使力矩盘面保持竖直，并可绕转轴自由转动。在盘上任意四个位置按上图钉，在其中三枚图钉上分别挂上钩码，在第四枚图钉上挂上弹簧测力计，弹簧测力计的另一端挂在横杆上。当力矩盘处于静止状态时，量出各力的力臂，计算出各力的力矩，求出力矩的代数和。

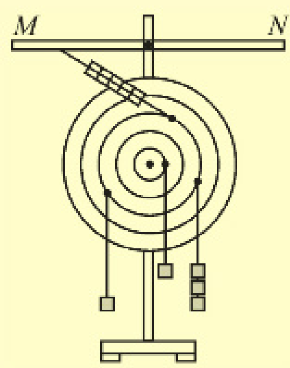


图 5.2.4　探究力矩平衡的条件

改变图钉的位置和各力的大小，重做几次实验，看看可以得出什么规律。

从实验探究中可以发现，有固定转轴的物体，受多个力矩作用时，物体的平衡条件是所受的合力矩等于零。即

$$M_1 + M_2 + M_3 + \cdots = 0$$

或者

$$\sum M = 0$$

作用在物体上几个力的合力矩为零的情形叫作力矩的平衡。

4 平面力系的平衡

如果作用在物体上的各个力的作用线都在一个平面上，这种力系为**平面力系（planar force system）**。上面讨论的共点力的平衡条件和力矩的平衡条件，都是在平面力系的情况下得出的。一个物体受到几个力的作用，若这几个力的合力为零，合力矩也为零，则物体就会处于平衡状态。物体在平面力系作用下保持平衡，必须满足下面两个条件：

$$\begin{cases} \sum \vec{F} = 0 \\ \sum M = 0 \end{cases}$$

这就是平面力系的平衡条件。

在解答物体平衡问题时，为了方便，通常把力作正交分解，利用各力在相互垂直的两个方向分力的代数和为零来求出答案。这时，平面力系的平衡条件可表示为

$$\begin{cases} \sum F_x = 0 \\ \sum F_y = 0 \\ \sum M = 0 \end{cases}$$

例题 5－2 街道旁的路灯经常用三角形的结构悬挂，如图 5.2.5 所示为它的简化模型。图中硬杆 OB 可以绕通过 B 点且垂直于纸面的轴转动，钢索和杆的重量都可以忽略。如果悬挂物所受的重力是 W，$\angle AOB = \theta$，钢索 OA 对 O 点的拉力和硬杆 OB 对 O 点的支持力各是多大？

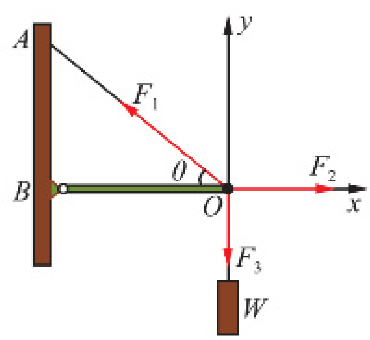


图 5.2.5　O 点的受力分析

分析　研究 O 点的受力情况可知，它受到如图 5.2.5 所示的三个力的作用：钢索的拉力 F_1，沿钢索方向指向 A 点；硬杆的支持力 F_2，沿硬杆方向指向右方；悬绳的拉力 F_3，方向竖直向下，大小与悬挂物的重力相等，即 $F_3 = W$。

解　按照图 5.2.5 建立直角坐标系，根据$\sum F=0$，可得

$$F_2-F_1\cos\theta=0 \quad ①$$

$$F_1\sin\theta-F_3=0 \quad ②$$

由①②两式，解得

$$F_1=\frac{F_3}{\sin\theta}=\frac{W}{\sin\theta}$$

$$F_2=F_1\cos\theta=\frac{W}{\tan\theta}$$

当 θ 很小时，$\sin\theta$ 和 $\tan\theta$ 都接近 0，F_1 和 F_2 就会很大，对材料强度要求很高，所以钢索的固定点 A 不能距 B 点太近。而 A 点过高则消耗材料过多，所以固定点 A 应选在适当的位置上。

例题 5－3　如图 5.2.6 所示，一个质量为 m、半径为 R 的球，用细绳悬挂在 L 形的直角支架上，支架的重量可以忽略，$AB=2R$，$BD=CD=\sqrt{3}R$。为了使支架不会在水平桌面上绕 B 点翻倒，应在 A 端至少加多大的力？

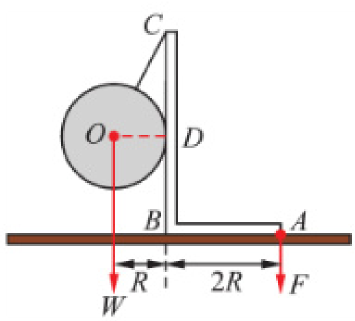


图 5.2.6

分析　如图 5.2.6 所示，把球和直角支架整体作为研究对象，球受到重力 $W=mg$，A 端受到作用力 F，要使加在 A 端的力最小，力臂应最大，即力臂为 AB 的长度。

解　以 B 点为支点，根据$\sum M=0$，

即　　$W\times OD-F\times AB=0$

其中　　$OD=R$，$AB=2R$

可得　　$F=\dfrac{1}{2}mg$

例题 5－4 如图 5.2.7 a 所示，有一根重 30 N 的均匀直棒 AB，A 端用铰链连接在墙上，B 端用一条水平绳拉着，直棒 AB 静止在与墙成 30° 角的位置。求绳对直棒的拉力和铰链对直棒的作用力。

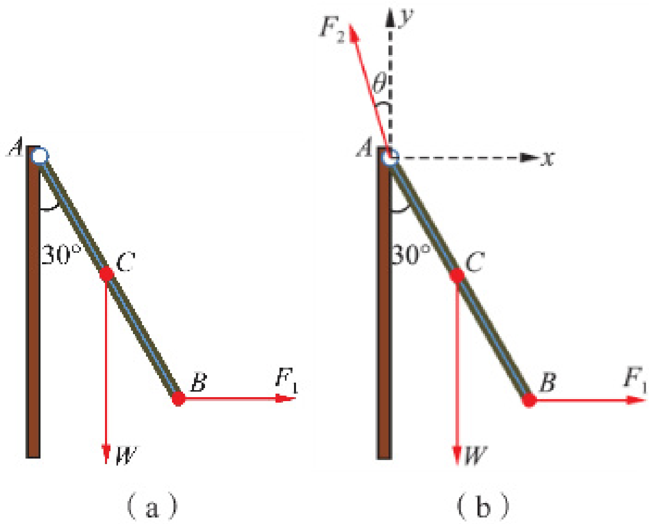


图 5.2.7

分析 以直棒为研究对象，如图 5.2.7 b 所示，直棒受到重力 W、水平拉力 F_1 及铰链作用力 F_2 的作用，在这三个共点力作用下保持平衡。

解 以 A 为转轴，F_2 通过转轴，力矩为零。设直棒长为 l，由 $\sum M=0$ 可得

$$F_1 l\cos30°-\frac{1}{2}Wl\sin30°=0$$

$$\begin{aligned}F_1&=\frac{1}{2}W\frac{\sin30°}{\cos30°}\\&=\frac{\sqrt{3}}{6}W\\&=\frac{\sqrt{3}}{6}\times30\ \mathrm{N}\\&=\sqrt{75}\ \mathrm{N}\end{aligned}$$

将 F_2 沿竖直、水平方向分解，由 $\sum F_x=0$ 可得

$$F_1-F_2\sin\theta=0$$

$$F_2\sin\theta=F_1 \qquad ①$$

由 $\sum F_y=0$ 可得

$$F_2\cos\theta-W=0$$

$$F_2\cos\theta=W \qquad ②$$

由①②式可得

$$\begin{aligned}F_2&=\sqrt{F_1^2+W^2}\\&=\sqrt{75+30^2}\ \mathrm{N}\\&\approx31.2\ \mathrm{N}\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}\tan\theta&=\frac{F_1}{W}\\&=\frac{\sqrt{75}}{30}\\&\approx0.289\end{aligned}$$

$$\theta\approx16.1°$$

练习 5-2

1. 如图 5.2.8 所示，轻杆 BC 的 C 端铰接于墙面上，B 点用绳子拉紧，在 BC 中点 O 挂重物 W。当轻杆 BC 以 C 为转轴时，绳子拉力的力臂是（　　）

   A. OB　　B. BC　　C. AC　　D. CE

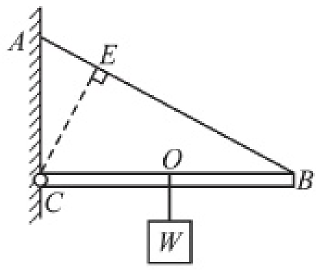


图 5.2.8

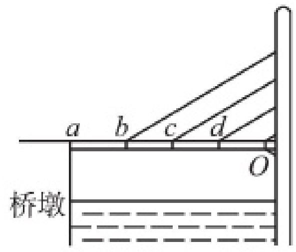


图 5.2.9

2. 如图 5.2.9 所示是单臂斜拉桥的示意图，均匀桥板 aO 重为 W，三根平行钢索与桥面成 30° 角，间距 $ab = bc = cd = dO$。若每根钢索受力相同，左侧桥墩对桥板无作用力，则每根钢索的拉力大小是（　　）

   A. W　　B. $\dfrac{\sqrt{3}W}{6}$　　C. $\dfrac{W}{3}$　　D. $\dfrac{2W}{3}$

3. 如图 5.2.10 所示，半径是 0.1 m、重为$10\sqrt{3}$ N 的均匀小球，放在光滑的竖直墙和长为 1 m 的光滑木板 OA（不计重力）之间，并保持静止。木板可绕轴 O 转动，木板和竖直墙的夹角 $\theta = 60°$，求墙对小球的弹力和水平绳对木板的拉力。

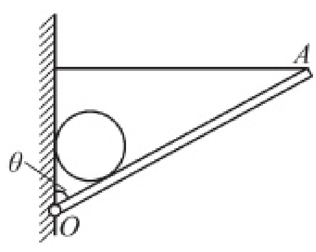


图 5.2.10

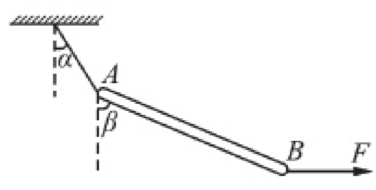


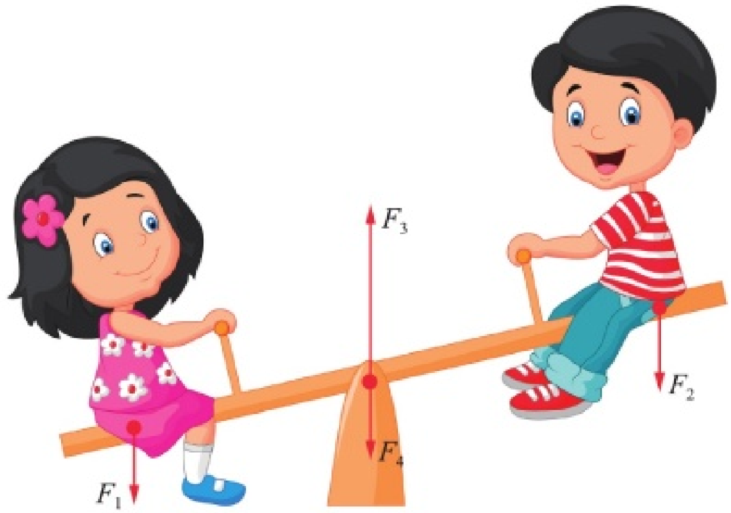
图 5.2.11

4. 如图 5.2.11 所示，一根重为 W 的均匀硬杆 AB，杆的 A 端被细绳吊起，在杆的另一端 B 作用一水平力 F，把杆拉向右边。整个系统平衡后，细线、杆与竖直方向的夹角分别为 α、β，求证：$\tan\beta = 2\tan\alpha$。

第 3 节　平行力系

① 平行力系

扁担挑重物



小孩玩跷跷板游戏

图 5.3.1

在日常生活中，我们经常会遇到物体受到平行力的情况。如图 5.3.1 所示，一个人担着两个水桶，两个人玩跷跷板游戏等。由两个或者两个以上的平行力所组成的受力系统，称为**平行力系**（**parallel force system**）。为了简化起见，此节所涉及的平行力系，仅限于平面力系的范围内。

说一说

如图 5.3.2，试说明瓶子的受力情况。

图 5.3.2　被手握住的瓶子

在共点力系中，由于作用点为已知的公共作用点，求合力时只需确定各力的大小和方向。但在平行力系中，欲求合力，除了要确定各力的大小和方向外，还要确定各力作用线的位置。

② 平行力系的合力

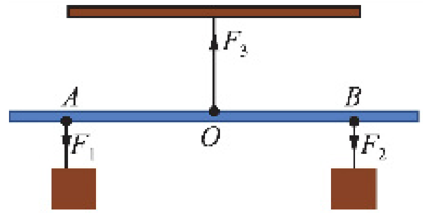


图 5.3.3　平行力系的合力

如图 5.3.3 所示，在一根均匀轻质棒上挂轻重不同的两个物体，用一根细绳把棒悬挂起来，并使棒保持水平。棒在力 F_1、F_2 及 F_3 的作用下保持平衡。故其满足力系的平衡条件 $\sum \vec{F}=0$ 和 $\sum M=0$。

由 $$\sum \vec{F}=0$$

得 $$F_3-F_2-F_1=0$$

$$F_3=F_2+F_1$$

所以，F_1 和 F_2 的合力大小等于 F_3 的大小，方向与 F_3 的方向相反。

以过 A 点且垂直于纸面的直线为转轴，由 $\sum M=0$ 得

$$F_3\times AO-F_2\times AB=0$$

即 $$F_3\times AO=F_2\times AB$$

若 AB 的长度已知，则可知 F_3 的位置。

例题 5－5　一根质量分布不均匀的横梁，当平放在两个相距 4.5 m 的支柱上时，对支柱的压力分别是 300 N 及 240 N，求横梁所受的重力及重心位置。

解　如图 5.3.4 所示，横梁受到重力 W、左边支柱的支持力 F_1、右边支柱的支持力 F_2 的作用。设横梁的重心离左边支柱的距离为 x。

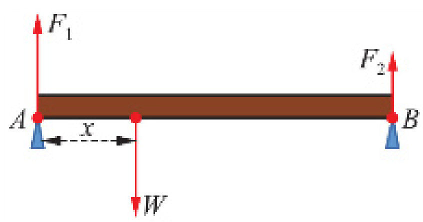


图 5.3.4　横梁的受力情况

根据 $\sum \vec{F}=0$ 可得

$$F_1+F_2-W=0 \qquad ①$$

由牛顿第三定律得 $F_1=300\ \text{N}$，$F_2=240\ \text{N}$。

代入①式，得横梁所受的重力

$$\begin{aligned}W&=F_1+F_2\\&=(300+240)\ \text{N}\\&=540\ \text{N}\end{aligned}$$

以过左端支点 A 且垂直于纸面的直线为转轴，根据 $\sum M=0$ 可得

$$F_2\cdot AB-W\cdot x=0 \qquad ②$$

把 $AB=4.5\ \text{m}$ 代入②式，得

$$\begin{aligned}x&=\frac{F_2\cdot AB}{W}\\&=\frac{240\times4.5}{540}\ \text{m}\\&=2\ \text{m}\end{aligned}$$

例题 5 – 6 如图 5.3.5 所示，重为 600 N 的均匀木板搁在相距为 2.0 m 的两堵竖直墙之间，一个重为 800 N 的人站在离左墙 0.5 m 处，求左、右两堵墙对木板的支持力大小。

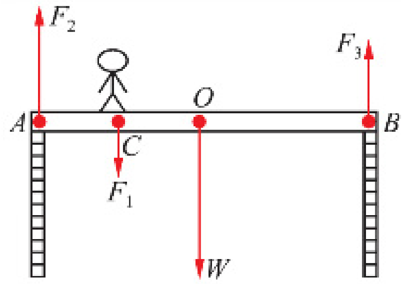


图 5.3.5 木板的受力情况

分析 以木板为研究对象，受力分析如图 5.3.5 所示，木板受到重力 W、人对它的压力 F_1，左边墙壁的支持力 F_2 和右边墙壁的支持力 F_3 的作用。

解 以点 A 为支点，根据$\sum M = 0$，得

$$F_3 \cdot AB - F_1 \cdot AC - W \cdot AO = 0$$

即 $$F_3 \times 2 - F_1 \times 0.5 - W \times 1 = 0 \quad ①$$

以点 B 为支点，根据$\sum M = 0$，得

$$F_1 \cdot BC + W \cdot BO - F_2 \cdot AB = 0$$

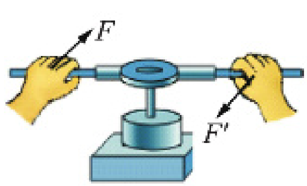
即 $$F_1 \times 1.5 + W \times 1 - F_2 \times 2 = 0 \quad ②$$

把 $F_1 = W_{人} = 800\ \text{N}$，$W = 600\ \text{N}$ 代入①②式，得

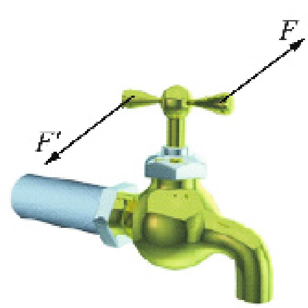
$$F_2 = 900\ \text{N},\ F_3 = 500\ \text{N}$$

③ 力偶

转动方向盘



用旋凿拧螺钉



拧水龙头

图 5.3.6

在日常生活中，通常遇到两个大小相等、方向相反的平行力作用在一个物体上的情形，这样的两个力叫作**力偶**（**couple**）。如图 5.3.6 所示，人们在转动方向盘、用旋凿拧螺钉、拧水龙头的时候，方向盘、旋凿、水龙头都受到力偶的作用。

说一说

你还能举出生活中物体受到力偶的例子吗？力偶的力矩怎么计算？有什么特点？

力偶的合力为零，它不能使物体移动，只能使物体转动。力偶的力矩等于组成力偶的两个力的力矩之和。下面我们来求图 5.3.7 中由 F_1 和 F_2 组成的力偶对任一选定的轴 O 的力矩。

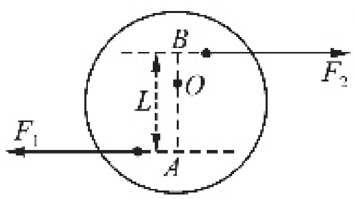


图 5.3.7　力偶矩

因为 $F_1 = F_2$，所以我们可以用 F 来表示每一个力的大小，于是就可以求得力偶的合力矩为

$$M = F_1 \cdot OA + F_2 \cdot OB = F \cdot (OA + OB),$$

因为 $OA + OB = AB = L$，所以

$$M = FL$$

力偶的力矩，简称**力偶矩**（**moment of couple**）。由上式可以看出，力偶矩等于组成力偶的一个力的大小跟这两个力作用线间的距离的乘积。力偶矩跟转轴的位置无关。

练习 5-3

1. 如图 5.3.8 所示的杆秤，O 为提纽，A 为刻度的起点，B 处下面为秤钩，P 处下面为秤砣。关于杆秤的性能，下列说法正确的是（　　）

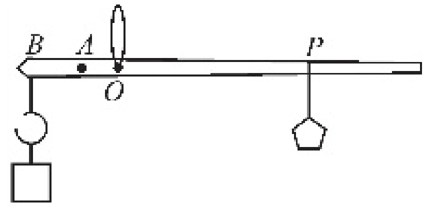


图 5.3.8

A. 不称物时，秤砣移至 A 处，杆秤平衡

B. 不称物时，秤砣移至 B 处，杆秤平衡

C. 称物时，OP 的距离与被测物的质量成正比

D. 称物时，AP 的距离与被测物的质量成正比

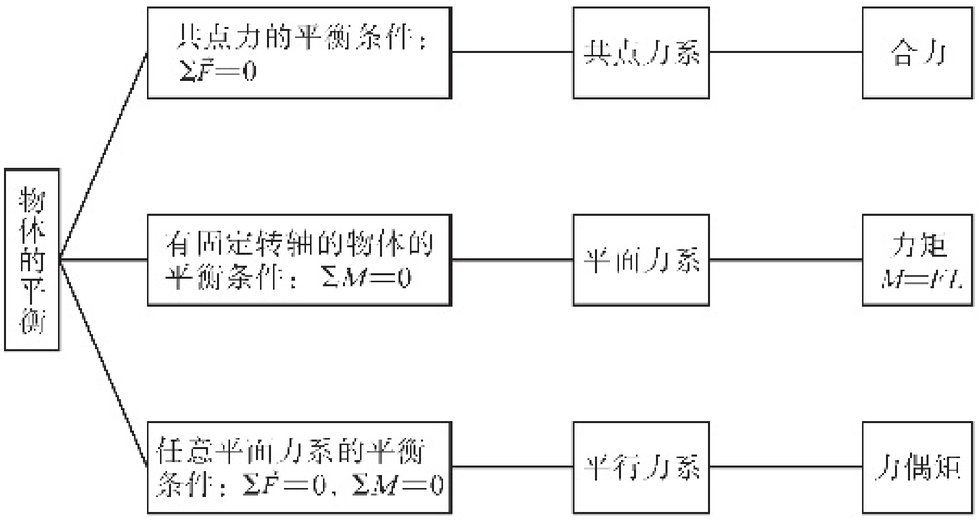
2. 一根长 1.2 m 的木棒，一端挂一个 50 N 的物体，另一端挂一个 70 N 的物体，要想用悬线把木棒水平悬挂起来，悬点的位置应在什么地方？悬线的张力是多少？

3. 汽车方向盘的直径是 40 cm，司机两只手各用 15 N 的力转方向盘，两手的力偶矩是多大？

4. 两个身高相同的人用一根 1.8 m 长的木棍抬一桶水，如果想让甲承受的压力是乙的 2 倍，那么应该把桶挂在什么位置上？

章末回顾

本章基本知识结构



总练习五

基础练习

1. 运动员用双手握住竖直的滑竿匀速上攀和匀速下滑时，运动员所受到的摩擦力分别是 F_1 和 F_2，那么（　　）

A. F_1 向下，F_2 向上，且 $F_1 = F_2$　　B. F_1 向下，F_2 向上，且 $F_1 > F_2$

C. F_1 向上，F_2 向上，且 $F_1 = F_2$　　D. F_1 向上，F_2 向下，且 $F_1 = F_2$

2. 质量为 50 g 的磁铁紧紧吸在竖直放置的铁板上，它们之间的动摩擦系数为 0.3。要使磁铁匀速下滑，需向下加 1.5 N 的拉力。若要使磁铁匀速向上滑动，则向上施加的拉力大小为（　　）

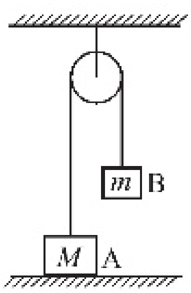
A. 1.5 N　　B. 2 N

C. 2.5 N　　D. 3 N

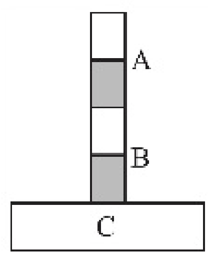
3. 如图所示，物体 A 和 B 的质量分别为 M 和 m，用跨过定滑轮的轻绳相连，A 静止在水平地面上，不计摩擦，则 A 对绳的作用力与地面对 A 的作用力的大小分别为（　　）

A. mg，$(M - m)g$　　B. mg，Mg

C. $(M - m)g$，Mg　　D. $(M + m)g$，$(M - m)g$



（第 3 题）



（第 4 题）

4. 如图所示，重力大小都是 W 的 A、B 条形磁铁，叠放在水平木板 C 上。静止时，B 对 A 的弹力为 F_1，C 对 B 的弹力为 F_2，则（　　）

A. $F_1 = W$，$F_2 = 2W$　　B. $F_1 > W$，$F_2 > 2W$

C. $F_1 > W$，$F_2 < 2W$　　D. $F_1 > W$，$F_2 = 2W$

5. 如图所示，在粗糙水平面上有两个质量分别为 m_1 和 m_2 的木块 A 和 B，中间用一根原长为 L、劲度系数为 k 的轻弹簧连接起来，木块与地面间的动摩擦系数为 μ。现

（第 5 题）

用一水平力向右拉木块 B，当两木块一起匀速运动时，两木块之间的距离是（　　）

A. $L+\frac{\mu}{k}m_1 g$　　B. $L+\frac{\mu}{k}(m_1+m_2)g$

C. $L+\frac{\mu}{k}m_2 g$　　D. $L+\frac{\mu}{k}\left(\frac{m_1 m_2}{m_1+m_2}\right)g$

6. 关于力矩，下列说法正确的是（　　）

A. 力对物体的转动作用取决于力矩的大小和方向

B. 力矩等于零时，力对物体不产生转动作用

C. 力矩等于零时，力对物体也可以产生转动作用

D. 力矩的单位是“N m”，也可以写成“J”

7. 有大小为 $F_1 = 4$ N 和 $F_2 = 3$ N 的两个力，其作用点距转轴 O 的距离分别为 $L_1 = 30$ cm 和 $L_2 = 40$ cm，则这两个力对转轴 O 的力矩 M_1 和 M_2 的大小关系为（　　）

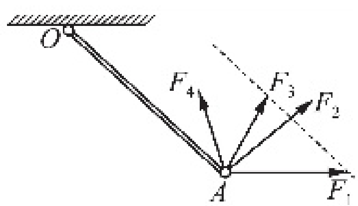
A. 因为 $F_1 > F_2$，所以 $M_1 > M_2$　　B. 因为 $F_1 > F_2$，所以 $M_1 < M_2$

C. 因为 $F_1L_1 = F_2L_2$，所以 $M_1 = M_2$　　D. 无法判断 M_1 和 M_2 的大小

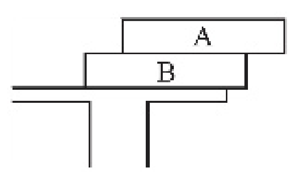
8. 如图所示，直杆 OA 可绕 O 轴转动，图中虚线与杆平行。杆的 A 端受到 F_1、F_2、F_3、F_4 四个力的作用，它们与杆在同一竖直平面内，则它们对 O 点的力矩 M_1、M_2、M_3、M_4 的大小关系是（　　）

A. $M_1 = M_2 > M_3 = M_4$　　B. $M_1 > M_2 > M_3 > M_4$

C. $M_2 > M_1 = M_3 > M_4$　　D. $M_1 < M_2 < M_3 < M_4$



（第 8 题）



（第 9 题）

9. 如图所示，A、B 是两个完全相同的长方形木块，长为 l，叠放在一起，放在水平桌面上，端面与桌边平行。A 木块放在 B 木块上，右端有 $\frac{l}{4}$ 伸出。为了保证两木块不翻倒，木块 B 伸出桌边的长度不能超过（　　）

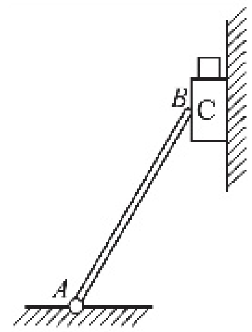
A. $\frac{l}{2}$　　B. $\frac{3l}{8}$

C. $\frac{l}{4}$　　D. $\frac{l}{8}$

10. 棒 AB 的一端 A 固定在地面上，可绕 A 点无摩擦地转动，B 端靠在物体 C 上，使 C 静止在光滑的竖直墙上，在 C 上再放上一个小物体，如图所示。若整个装置仍保持平衡，则 B 端与 C 之间的弹力大小将（　　）

A. 变大　　B. 变小

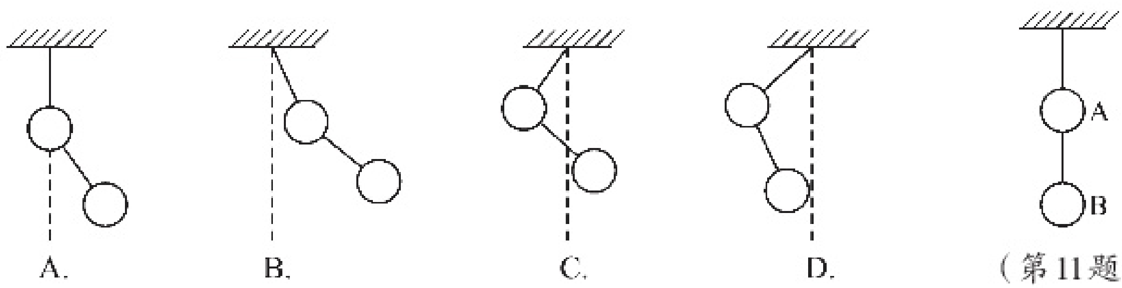
C. 不变　　D. 无法确定



（第 10 题）

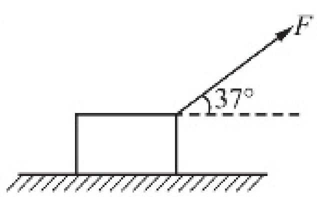
提高练习

11. 如图所示，用轻质细线把两个质量未知的小球悬挂起来。现对小球 A 施加一个左偏下 30° 的恒力，并对小球 B 施加一个右偏上 30° 的同样大小的恒力，最后达到平衡，表示平衡状态的图可能是选项中的（　　）

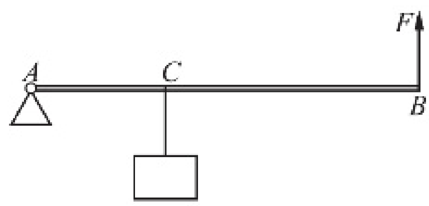


（第 11 题）

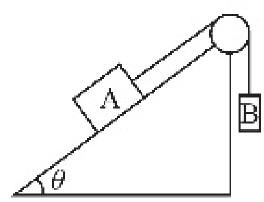
12. 如图所示，在水平路面上用绳子拉一只重 100 N 的箱子，绳子和路面的夹角为 37°。当绳子的拉力为 50 N 时，恰好使箱子匀速移动，求箱子和地面间的动摩擦系数。



（第 12 题）



（第 13 题）

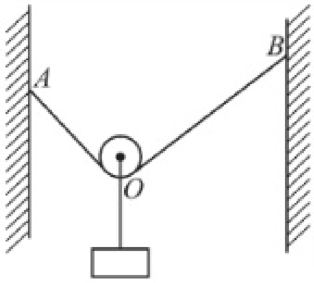


（第 14 题）

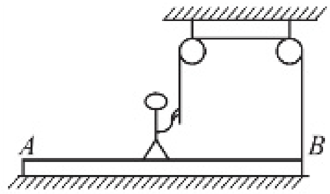
13. 如图所示，均匀杆 AB 每米重为 30 N，将 A 端支起，在离 A 端 0.2 m 的 C 处挂一个重 300 N 的物体，在 B 端施加竖直向上的拉力 F，使杆保持水平方向平衡，问：杆长为多少时，所用的拉力 F 最小？最小值为多大？

14. 如图所示，斜面的倾角 $\theta = 37°$，斜面上的物体 A 重 10 N。物体 A 和斜面间的动摩擦系数 $\mu = 0.2$，为了使物体 A 在斜面上做匀速运动，定滑轮所吊的物体 B 所受的重力应为多大？

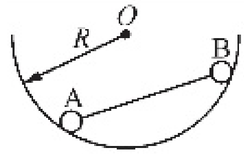
15. 如图所示，相距 4 m 的两根柱子上拴着一根 5 m 长的细绳，细绳上有一个光滑的小滑轮，小滑轮吊着 180 N 的重物，则静止时 AO、BO 绳所受的拉力各是多大？



（第 15 题）



（第 16 题）



（第 17 题）

16. 如图所示，质量为 m 的运动员站在质量为 M 的均匀长板 AB 的中点处，长板位于水平地面上，可绕通过 A 点的水平轴无摩擦转动。长板的 B 端系有轻绳，轻绳的另一端绕过两个定滑轮后，握在运动员的手中。当运动员用力拉绳子时，滑轮两侧的绳子都保持在竖直方向，则要使长板的 B 端离开地面，运动员作用于绳子的最小拉力是多大？

17. 如图所示，两个所受重力大小分别为 W_A 和 W_B 的小球 A 和 B，用细杆连接起来，放置在光滑的半球形碗内。小球 A、B 与碗的球心 O 在同一竖直平面内。若碗的半径为 R，细杆的长度为 $\sqrt{2}R$，$W_A > W_B$，则连接两小球的细杆静止时与竖直方向的夹角为多大？

第6章 平面运动

本章提要

1. 曲线运动是一种变速运动。
2. 抛射体运动和圆周运动是常见的两种曲线运动。
3. 利用运动的合成和分解来分析抛射体运动。
4. 利用圆周运动规律解决实际问题。

学前储备

1. 知道加速度与力的关系。
2. 知道匀变速直线运动的基本规律。
3. 会对一般物体进行受力分析。

第1节　曲线运动

在第 3 章我们研究了物体沿着一条直线的运动。实际上，在自然界中，普遍发生的却是曲线运动。被运动员抛出去的铅球，是沿着一条曲线落地的；公路上汽车转弯时，其运动路线是曲线；地球绕太阳公转，轨迹接近圆，也是沿曲线运动。抛出去的铅球、转弯的汽车、公转的地球，它们的运动路径都是曲线，我们把运动路径是曲线的运动统称为**曲线运动**（**curvilinear motion**）。

1 曲线运动的速度方向

曲线运动与直线运动的明显区别是速度的方向时刻在改变。那么，在曲线运动中，物体的速度方向是怎样确定的呢？

链球是田径运动的投掷项目之一。链球运动使用的器械是链子连接着用铁或铜制成的球体，链子上带有把手。比赛时，运动员两手握着链球的把手，人和球同时旋转，球做曲线运动。一旦运动员放手，链球即刻飞出。放手的时刻不同，链球飞出的方向也不一样，可见做曲线运动的物体，不同时刻的速度具有不同的方向。

思考与讨论

观察图 6.1.1 及图 6.1.2 中的现象，说出砂轮打磨时产生的炽热微粒、从旋转的伞边飞出去的水滴，它们的运动方向有什么特点。

图 6.1.1　微粒的飞出方向

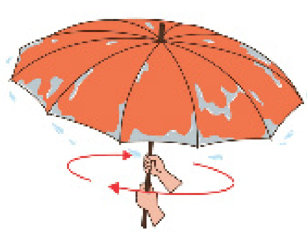


图 6.1.2　水滴离开伞面时的飞出方向

可以看到，被打磨物体与砂轮接触处有火星沿砂轮的切线方向飞出。这些从被打磨物体上擦落的炽热微粒，由于惯性，它们以被擦落时的速度方向做直线运动。因此，微粒的运动方向就是砂轮与被打磨物体接触处质点的运动方向。如果沿着砂轮移动被打磨物体，可以看到，在任何位置被擦落的砂粒都会沿着接触处的切线方向飞出。同样，离开伞边的水滴也是沿切线方向飞出，水滴的飞出方向表示出了伞边各质点的运动方向。

由此可以得出结论：质点在曲线运动中的速度方向是时刻改变的，**质点在曲线某一点的速度方向，沿曲线在这一点的切线方向**（如图 6.1.3）。

速度是矢量，它既有大小又有方向。不论速度的大小是否改变，只要速度的方向发生改变，就表示速度发生了变化。曲线运动中速度的方向时刻在变化，所以，**曲线运动是变速运动**。

图 6.1.3　曲线运动的速度方向特点

② 物体做曲线运动的条件

物体在什么条件下才做曲线运动呢？既然曲线运动是变速运动，那么做曲线运动的物体一定具有加速度。

加速度的方向与速度变化的方向有关。当加速度的方向与物体的速度方向在一条直线上时，它不改变速度的方向，只改变了速度的大小，物体做变速直线运动；当加速度方向与速度的方向不在一条直线上时，它将改变物体的速度方向，使物体做曲线运动（如图 6.1.4）。由此可知，直线运动是加速度方向与速度方向成 0° 或 180° 角时的特殊曲线运动。

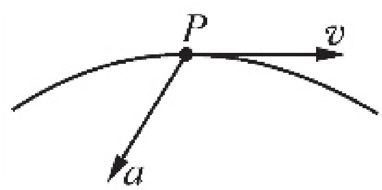


图 6.1.4　物体做曲线运动的条件

演示 6-1

一个钢球在水平面上做直线运动，在钢球运动路径的旁边放一块磁铁，观察图 6.1.5 中钢球的运动路径有什么样的变化。说一说，发生变化的原因是什么？

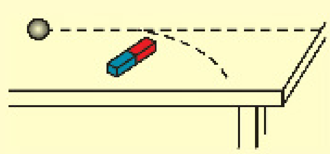


图 6.1.5　钢球在磁铁作用下的运动特点

根据牛顿第二定律，物体加速度的方向与它受力的方向总是一致的。当物体受力的方向与它的速度方向不在一条直线上时，加速度的方向与速度的方向有了夹角，于是物体的速度方向发生变化，物体做曲线运动。也就是说，**当物体所受合力的方向与它的速度方向不在同一直线上时，物体做曲线运动**。这就是物体做曲线运动的条件。

练习 6-1

1. 举两个实例，说明物体做曲线运动的条件。

2. 某人以恒定的速率绕操场跑了一圈，他的运动是匀速运动还是变速运动？为什么？

3. 用带箭头的线段画出做曲线运动的物体从 A 点运动到 B 点过程中（如图 6.1.6），物体在 C、D、E、F 各点的速度方向。

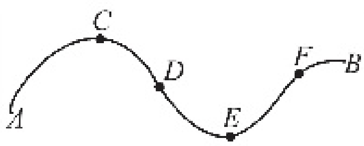


图 6.1.6

4. 质点做曲线运动，从 A 到 B 速率逐渐增加。如图 6.1.7 所示，四名同学用示意图表示质点从 A 到 B 的运动轨迹及速度方向和加速度方向，其中正确的是（　　）

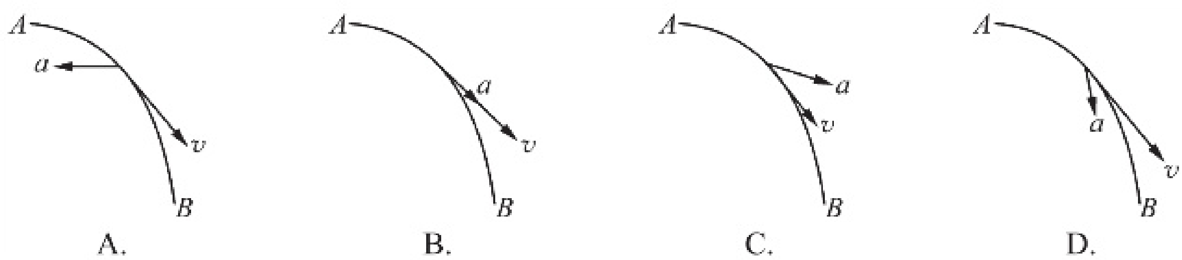
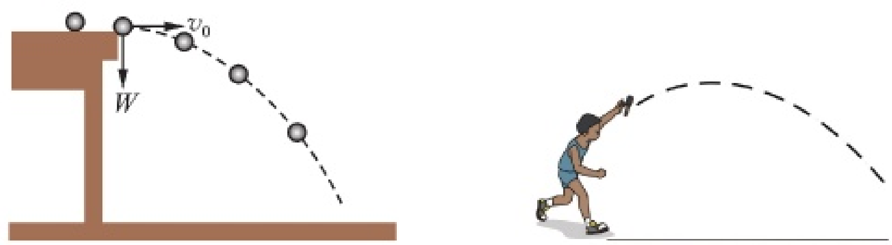


图 6.1.7

第 2 节　抛射体运动

以一定的初速度将物体抛出，物体将在空中做**抛射体运动**（**projectile motion**）。除竖直上抛外，其余的抛射体运动都是曲线运动。如果忽略空气阻力对物体运动的影响，只考虑重力的作用，物体的加速度恒为重力加速度，运动将是一种匀变速运动。在本节中，我们仅考虑这种情况。抛射体开始运动时的速度叫作**初速度**（**initial velocity**），按照初速度的方向可以对抛射体运动进行分类。本节主要研究的是两种抛射体运动：初速度方向水平的平抛运动和初速度方向斜向上（或斜向下）的斜抛运动（如图 6.2.1 所示）。



平抛运动　　　　斜抛运动

图 6.2.1　常见的两种抛射体运动

考虑到物体在做抛射体运动时，只受到竖直方向的重力作用，在水平方向上不受外力作用，因此可以把抛射体运动看成是由水平方向上的匀速直线运动和竖直方向上的匀变速直线运动组合而成，从而使问题变得容易研究。

1 运动的合成与分解

议一议

小船渡河问题

小船渡河的运动如图 6.2.2 所示，在流动的河水中，小船从 A 点出发最后运动到了对岸的 B' 点。

我们可以这样来研究这个问题：假如河水不流动，小船在静水中沿 AB 方向行驶，一段时间后，小船将从 A 点运动到 B 点；假如小船在流动的河水中不划动，

那么小船就会被河水冲向下游，经过相同的时间，小船将从 A 点运动到 A' 点。现在，小船在流动的河水中行驶，它同时参与上述两个运动，经过相同的时间，小船将从 A 点运动到 B' 点，这时位移 AB、AA' 与 AB' 成什么关系？

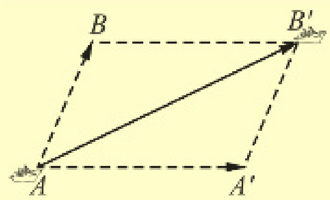


图 6.2.2 小船在流动的河水中的运动

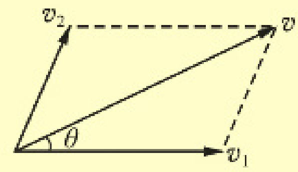


图 6.2.3 速度的合成

当一个物体同时参与两种或两种以上的运动时，我们把它参与的每一种运动称为分运动，物体的实际运动就是这些分运动的合运动。在对小船渡河问题的讨论中，我们已经看到，根据矢量运算的平行四边形定则，合运动的位移将是各分运动位移的矢量和。由各分运动求合运动，我们称之为**运动的合成**。

速度是位移与对应的时间之比，所以我们也可以由位移的矢量叠加同时得出：合运动的速度 v 将是各分运动速度 v_1、v_2、…的矢量和（如图 6.2.3）。

反过来，已知合运动的情况，应用平行四边形定则，我们也可以求出各分运动的情况。这种由合运动求各分运动，我们称之为**运动的分解**。在讨论物体的抛射体运动时，我们常常将这个运动分解为水平方向的匀速直线运动和竖直方向的匀变速直线运动。

练一练

一架飞机以 200 km h^{-1} 的速度沿与水平方向成 $\theta = 30°$ 角斜向上飞行。如果把飞机的运动看成是水平方向和竖直方向两个分运动的合运动，试利用运动分解的方法求出飞机两个分运动的速度大小。

提示 由于把飞机的运动看成是水平方向和竖直方向两个分运动的合运动，按照图 6.2.4，可以把飞机的速度 v 分解成水平方向和竖直方向两个分速度 v_1 和 v_2，这两个分速度也是这两个分运动的速度。

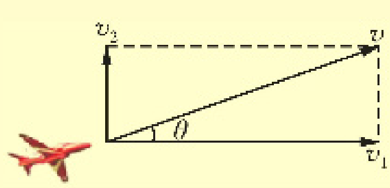


图 6.2.4 速度的分解

上面练一练的解题过程如下：

解

$$
\begin{aligned}
v_1 &= v\cos\theta \\
&= 200 \times \frac{\sqrt{3}}{2}\ \mathrm{km\ h^{-1}} \\
&= 100\sqrt{3}\ \mathrm{km\ h^{-1}}
\end{aligned}
$$

$$
\begin{aligned}
v_2 &= v\sin\theta \\
&= 200 \times \frac{1}{2}\ \mathrm{km\ h^{-1}} \\
&= 100\ \mathrm{km\ h^{-1}}
\end{aligned}
$$

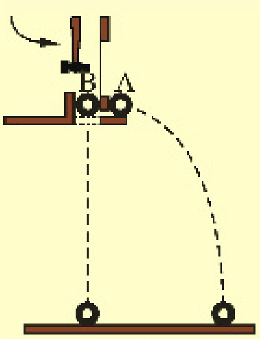
② 平抛运动

若做抛射体运动的物体，其初速度是沿水平方向的，则这个抛射体运动叫作平抛运动。平抛运动是最简单的抛射体运动。例如，被运动员水平传递出去的篮球、以一定的初速度从平台上滚落的小球、水平管中喷出的水流等，在忽略空气阻力的情况下，它们的运动都属于平抛运动。

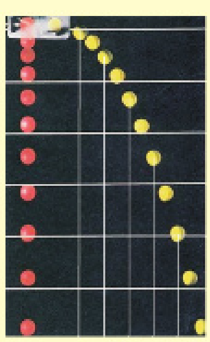
下面，我们通过一个演示实验来研究平抛运动的特点，从而进一步了解研究曲线运动的方法。

演示 6-2

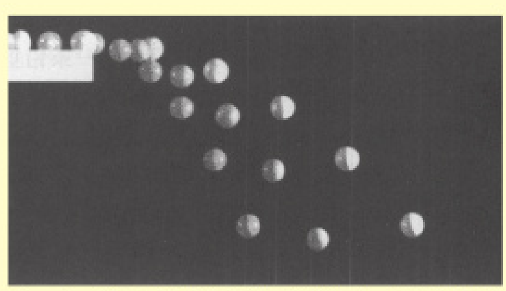
利用如图 6.2.5 a 所示的装置进行实验。用小锤击打弹片，小球 A 水平飞出，同时小球 B 自由落下，两个小球下落时的快速曝光摄影图如图 6.2.5 b 所示。观察它们的落地时间，分析小球 A 在水平方向上和竖直方向上的运动各有什么特点。再用不同大小的力，以小锤击打弹片，观察 A、B 两小球落地的情况。



（a）平抛运动的实验演示



（b）小球下落时的快速曝光摄影图



（c）以不同的初速度同时水平抛射出去的三个小球，将同时落地

图 6.2.5

从图 6.2.5 b 的小球下落时的快速曝光摄影图中，我们可以看出，做平抛运动的小球 A 在水平方向上，在相等的时间内的位移相同，而在竖直方向上与小球 B 始终同步。这就说明做平抛运动的物体，在水平方向上做匀速直线运动，而在竖直方向上做匀加速直线运动。

从图 6.2.5 c 中，我们可以看出，不论用多大的力击打弹片，A、B 两小球总是同时落地。

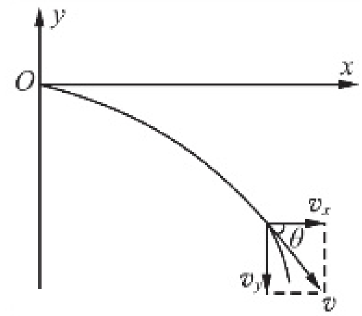


图 6.2.6

下面，我们利用匀速直线运动公式和匀加速直线运动公式来分析小球 A 在被抛出后，t 时刻的速度及位置。

如图 6.2.6，取水平方向为 x 轴，正方向与初速度 v_0 方向相同；取竖直方向为 y 轴，正方向竖直向上；取抛出点为原点，建立直角坐标系。因为加速度的方向与 y 轴正方向相反，所以是负值，即 $a=-g$。在 t 时刻，小球 A 的速度及位置坐标为

水平方向：速度 $v_x=v_0$ ①

坐标 $x=v_0t$ ②

竖直方向：速度 $v_y=v_{0y}-gt$

$=-gt$ ③

坐标 $y=v_{0y}t-\frac{1}{2}gt^2$

$=-\frac{1}{2}gt^2$ ④

从图 6.2.6 中可以看出来，t 时刻小球 A 的实际运动速度 v 与两个分速度 v_x、v_y 正好构成一个矩形的对角线和一对邻边。根据勾股定理（毕氏定理），可知

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

上式表示，小球 A 在下落的过程中速度 v 越来越大。

那么，速度的方向怎样来确定呢？在图 6.2.6 中，速度 v 与水平方向所成的角 θ 是直角三角形的一个锐角，它的正切值等于对边和邻边的比值，即

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

上式表示，在小球 A 下落的过程中速度 v 与水平方向夹角的正切值是越来越大的。因为 θ 角是锐角，所以其正切值越大，θ 角也越大。由此可以得出，抛体下落的方向越来越接近竖直向下的方向，这与我们的日常经验是一致的。

例题 6－1　一辆玩具小车从 0.8 m 高的平台上以 3 $\mathrm{m\,s^{-1}}$ 的水平速度飞出，求它落地时的速度大小和方向。（不计空气阻力，取 $g=10\,\mathrm{m\,s^{-2}}$）

分析　按题意作图 6.2.7。小车在水平方向不受力，所以水平方向的分速度总等于初速度 $v_0=3\,\mathrm{m\,s^{-1}}$；小车在竖直方向的加速度为 g，初速度的竖直分量为 0，可以应用匀变速直线运动的规律求出小车竖直方向的分速度。

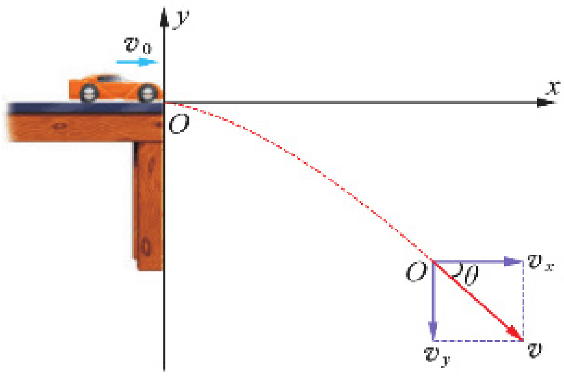


图 6.2.7

解　以小车刚飞出时的位置为原点建立直角坐标系，x 轴沿初速度方向，y 轴竖直向下。小车落地时，在水平方向的分速度是

$$v_x=v_0=3\,\mathrm{m\,s^{-1}}$$

根据匀变速直线运动的规律，小车落地时在竖直方向的分速度满足以下关系：

$$v_y^2-v_{0y}^2=2gh$$

$$v_y^2-0=2\times(-10)\times(-0.8)(\mathrm{m\,s^{-1}})^2$$

$$v_y=-4\,\mathrm{m\,s^{-1}}$$

根据平行四边形定则，得到小车落地时的速度大小为

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

$$=\sqrt{3^2+(-4)^2}\,\mathrm{m\,s^{-1}}$$

$$=5\,\mathrm{m\,s^{-1}}$$

$$\tan\theta=\frac{v_y}{v_x}=\frac{-4}{3}$$

$$\theta\approx-53°$$

故小车落地时的速度大小为 5 $\mathrm{m\,s^{-1}}$，方向为与水平方向成 53° 角斜向下。

做一做

利用如图 6.2.8 所示的装置，让小钢球从斜槽上某一位置由静止滚下，小钢球从斜面小槽的水平末端飞出后在空中做平抛运动。重复上述做法，利用描点法在竖直白纸上记录下小钢球经过的多个位置，从而描出小钢球做平抛运动的轨迹。

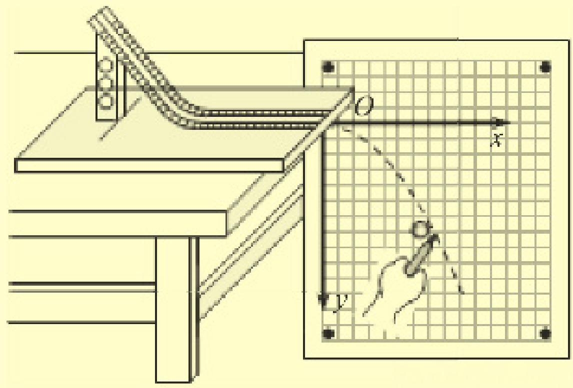


图 6.2.8　研究平抛运动的轨迹

判断小钢球做平抛运动的轨迹是不是抛物线。

以小钢球离开水平小槽末端的位置为原点 O，在描有小钢球轨迹的白纸上建立直角坐标系。以小钢球在原点时的速度方向为 x 轴的正方向，取竖直向下为 y 轴的正方向。在 x 轴上作出等间距的几个点 A_1、A_2、A_3、…，设 $OA_1 = A_1A_2 = A_2A_3 = \cdots = l$。由 A_1、A_2、A_3、…向下作垂线，垂线与轨迹的交点记为 M_1、M_2、M_3、…。通过刻度尺测量出轨迹上任意一点的纵坐标，并利用方程 $y = ax^2$ 来判断该轨迹是否为一条抛物线。同学们可以想一想:除了上述方法以外，是否还可以通过其他方法来判断小钢球的轨迹特点?

通过测量和计算可知，平抛运动的轨迹是抛物线。请同学们思考：如果想得到上述小钢球的初速度，还需要测量什么物理量？怎样进行计算？

练一练

利用第 174 页②④两个式子，用数学方法列式说明物体做平抛运动的运动轨迹。

上面的“练一练”的解答过程如下：

解　从②式得出 $t=\dfrac{x}{v_0}$，代入④式，得到

$$y=\frac{g}{2v_0^2}x^2 \qquad ⑤$$

在⑤式中，自由落体的加速度 g、抛体的初速度 v_0 都是不随时间变化的常量，也就

是说，$\dfrac{g}{2v_0^2}$这个量与 x，y 无关，因此⑤式具备抛物线函数表达式的特点，即平抛运动物体的运动轨迹是一条**抛物线**。

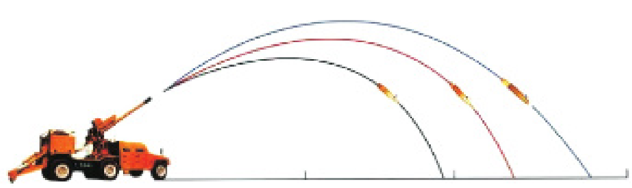
其实，数学中把二次函数的图象称为抛物线，这个名称就是由抛体运动得来的。

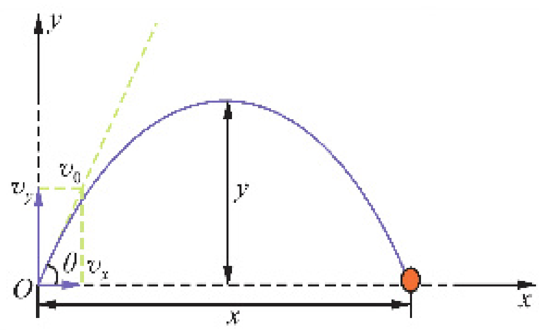
③ 斜抛运动

如果物体被抛出时的速度不是沿水平方向，而是沿斜向上或斜向下方向，它在空中运动时的受力情况仍和平抛时完全一样，我们称这种抛体运动为**斜抛运动**。平抛运动可以看作是斜抛运动的一个特例。

物体做斜抛运动和平抛运动时的唯一不同之处是：在做斜抛运动时，物体的初速度在水平方向和竖直方向都有分量，大小分别是 $v_{0x}=v_0\cos\theta$ 和 $v_{0y}=v_0\sin\theta$。仿照平抛运动的处理方法，可以把斜抛运动看成是水平方向的匀速直线运动和竖直方向的匀加速直线运动的合成，从而可以得到斜抛物体运动的速度和位移的表达式。

例题 6－2 如图 6.2.9 a 所示是以相同初速度 v_0、不同仰角 θ（即抛射角）发射炮弹时的情景。请通过计算说明，炮弹的射程与抛射角的关系。


（a）



（b）

图 6.2.9

分析 根据题意画出炮弹离开炮筒后的运动示意图，炮弹的初速度 v_0 可以分解为水平向右的分速度 v_x 和竖直向上的分速度 v_y，然后运用运动学的知识便可求解。

解 以炮筒口的位置为原点建立直角坐标系，规定 x 轴的正方向水平向右，y 轴的正方向竖直向上，如图 6.2.9 b 所示。

如前所述，炮弹从炮筒射出后，在 x 轴方向做匀速运动，在 y 轴方向做竖直上抛运动，炮弹水平方向的分速度 v_x 和竖直方向的分速度 v_y 分别为

$$v_x=v_0\cos\theta$$

$$v_y = v_0 \sin\theta - gt$$

从而可得到炮弹位置（x，y）与时间的关系为

$$x = v_0 \cos\theta t$$

$$y = v_0 \sin\theta t - \frac{1}{2}gt^2$$

落地时，由 $y = 0$，得出炮弹在空中的飞行时间为

$$t = \frac{2v_0 \sin\theta}{g}$$

炮弹的射程是炮弹的抛射点与落地点之间的水平距离，即

$$x = v_x t = v_0 \cos\theta \cdot \frac{2v_0 \sin\theta}{g} = \frac{v_0^2 \sin 2\theta}{g}$$

结论：初速度相同的情况下，

（1）当 $\theta < 45°$ 时，抛射角越大，射程越大；

（2）当 $\theta > 45°$ 时，抛射角越大，射程越小；

（3）当 $\theta = 45°$ 时，射程最大。

例题6－3 在中学生投掷大赛上，每个选手有多次的投掷机会，小明的最好成绩是 51 m。不计小明身高的影响，问：投掷物离开小明手时的速度有多大？

分析 投掷物出手后，在空中做斜抛运动。按照运动的合成原理，斜抛运动可以看成是水平方向的匀速直线运动和竖直方向的匀减速（匀加速）直线运动的合成，初速度分别为 $v_{0x} = v_0\cos\theta$ 和 $v_{0y} = v_0\sin\theta$。

解 投掷物水平方向和竖直方向的位移分别为

$$x = v_0\cos\theta\, t \qquad ①$$

$$y = v_0\sin\theta\, t - \frac{1}{2}gt^2 \qquad ②$$

投掷物落地时，$y = 0$。由②式解得 $t_1 = 0$，$t_2 = \frac{2v_0 \sin\theta}{g}$。

把 t_2 的值代入①式，得水平方向发生的位移为

$$x = \frac{2v_0^2 \sin\theta \cos\theta}{g}$$

当 $\theta = 45°$ 时，x 有最大值

$$x_m = \frac{v_0^2}{g}$$

投掷物离开小明手时的速度大小为

$$\begin{aligned} v_0 &= \sqrt{g x_m} \\ &= \sqrt{9.8 \times 51}\ \mathrm{m \cdot s^{-1}} \\ &= 22.4\ \mathrm{m \cdot s^{-1}} \end{aligned}$$

练习 6-2

1. 如图 6.2.10，取 x 轴沿水平地面、y 轴沿竖直方向，建立直角坐标系。现从 y 轴上沿 x 轴正方向抛出三个小球 a、b 和 c，三个小球的运动轨迹如图所示，其中 b 和 c 是从同一点抛出的，不计空气阻力。请你根据所学的平抛知识分析三个小球在空中的运动时间关系及抛出时的初速度关系，哪个最大？哪个最小？

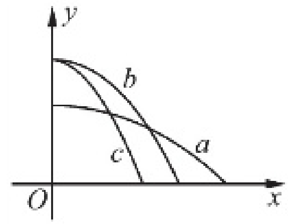


图 6.2.10

2. 证明：做平抛运动的物体在任意相等时间间隔 Δt 内的速度改变量 Δv 都相同，且方向恒为竖直向下。

3. 一个小球从 0.9 m 高的桌面上水平飞出，落地位置离桌子边缘 2.4 m，求小球离开桌面时的速度大小。

4. 如图 6.2.11，以初速度 $v_0 = 1\ \mathrm{m\ s^{-1}}$ 从某点平抛出一个小球，最后垂直落在倾角为 30° 的斜面上。问：

（a）小球在空中运动的时间有多长？

（b）抛点到落点的直线距离有多大？

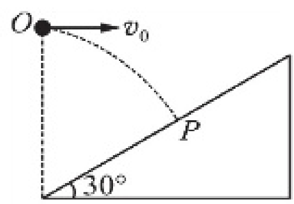


图 6.2.11

5. 如图 6.2.12 所示，喷水池的喷头以某个角度向各个方向喷水，当水滴落在水面时，会在水面上形成一个圆圈。现使喷头以一定大小的初速度，分别以 30°和 60°的倾角朝各个方向斜向上喷水，试证明这些水滴落在水面上时，所形成的圆圈的半径相等。


图 6.2.12

第 3 节　匀速圆周运动

物体的运动轨迹是圆或圆的一部分的运动叫圆周运动（circular motion），圆周运动也是一种常见的曲线运动。如图 6.3.1，转弯的火车、田径场上正在通过弯道的运动员以及转动的风扇叶片上的每一个点，它们都在做圆周运动。圆周运动中最简单的一种叫匀速率圆周运动。下面我们来学习匀速率圆周运动的特点。

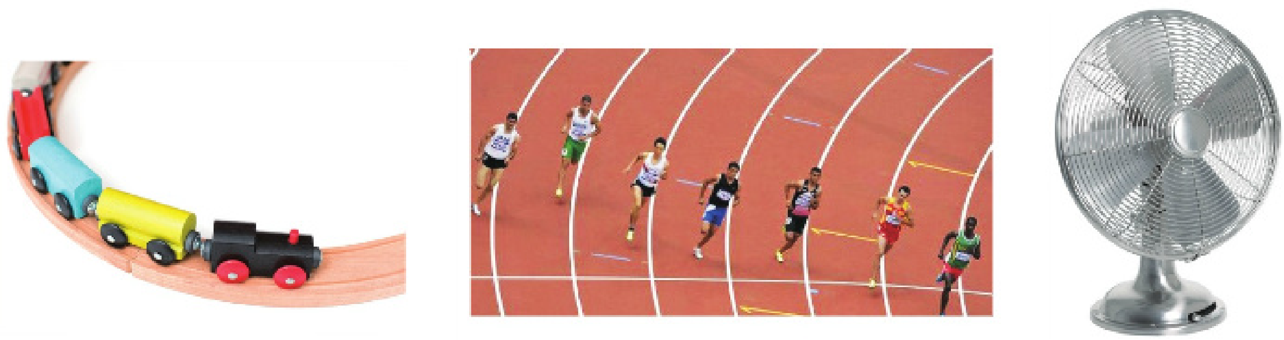


图 6.3.1　常见的圆周运动

思考与讨论

以自行车行驶过程中大、小齿轮及后轮的转动快慢不同来思考：如何来描述物体做圆周运动的快慢？（如图 6.3.2）

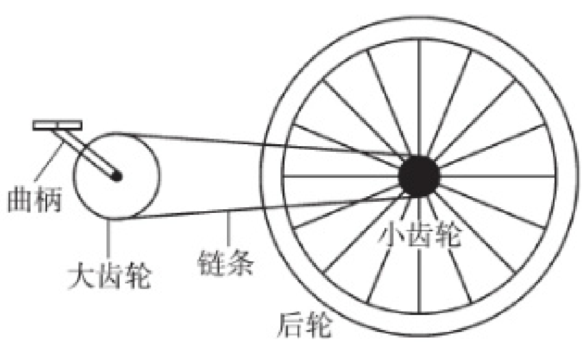


图 6.3.2　自行车上大、小齿轮及后轮的圆周运动

① 线速率

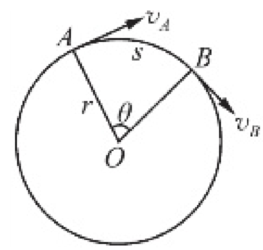


图 6.3.3

如图 6.3.3，物体做圆周运动时，如果在任何相等的时间内通过的弧长都相等，这样的圆周运动叫作**匀速率圆周运动（circular motion with uniform speed）**，简称**匀速圆周运动**。可见，对某一个做匀速圆周运动的物体，当它的运动时间增大几倍时，它所通过的弧长也将增大到原来的几倍。也就是说，对于某一个确定的匀速圆周运动，通过的弧长 Δs 与时间 Δt 的比值是一个常量，这个常量反映了物体运动的快慢，叫作**线速率**，用 v 表示，即

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

在匀速圆周运动中，线速率是不变的，根据曲线运动速度方向的特点可知，匀速圆周运动的速度方向永远和轨迹相切（如图 6.3.3 中的 v_A 与 v_B），速度方向时刻在改变，所以，**匀速圆周运动是一种变速运动**。线速率也可称为切线速率（tangential speed），线速率 v 只是描述了运动速度的大小。

② 角速率

物体做匀速圆周运动的快慢还可以用它与圆心连线扫过角度的快慢来描述。如图 6.3.3，因为物体运动的弧长与所对应的圆心角成正比，所以物体绕圆心的转动快慢可以用半径转过的角度 $\Delta\theta$ 和转过这个角度所用的时间 Δt 的比值来描述。这个比值叫作**角速率（angular speed）**，用符号 ω 表示，其表达式为

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

角速率的单位由角的单位和时间的单位决定。在国际单位制中，角度的大小可用弧度（rad）表示，时间的单位是秒（s），所以角速率的单位是弧度每秒（rad s^{-1}）。

因为匀速圆周运动是线速率不变的运动，物体单位时间内通过的弧长相等，所以物体在单位时间内转过的角度也相等。因此说，**匀速圆周运动是角速率不变的圆周运动**。

> 在用弧度表示角时，常会出现字母 π。要注意，π 不是单位符号，而是一个数字——圆周率 3.14…。例如，360° 的圆周，用弧度作单位可以写作 2π。

3 周期与频率

做匀速圆周运动的物体运动一周所用的时间叫作**周期（period）**，用 T 来表示。周期也是圆周运动中常用的物理量，也可以表示运动快慢。周期长说明运动慢，周期短说明运动快，它的单位和时间的单位是一样的，也是秒。

单位时间内转动的圈数，称为频率（frequency），用符号 f 表示，单位为赫（Hz）。

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

技术上常用转速描述转动的快慢。转速是每分钟转过的圈数，转速的单位为转每分钟（revolution per minute，rpm）。所以转速 $n=60f$。

4 线速率与角速率的关系

线速率和角速率都是描述圆周运动快慢的物理量，那么它们之间有什么关系呢？

物体在半径为 r 的圆周上做匀速圆周运动，一个周期里转过的弧长是 $2\pi r$，半径转过的角度为 2π，根据线速率和角速率的定义可得

$$v=\frac{\Delta s}{\Delta t}=\frac{2\pi r}{T}$$

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

从上述两式可以得出

$$v=\omega r$$

这表明，**在半径确定的圆周运动中，线速率与角速率成正比**。

思考与讨论

如图 6.3.2，自行车的大齿轮、小齿轮及后轮是相互关联的三个转动部分。在自行车行驶过程中，各轮边缘的线速率有什么关系？各轮的角速率有什么关系？

例题 6 – 4　地球可以看作一个半径为 6.4×10^3 km 的球体。位于赤道上的物体随地球自转做匀速圆周运动，则该物体做匀速圆周运动的角速率和线速率各是多大?

分析　地球自转一周所用的时间是 24 h，位于赤道上的物体随地球自转，该物体的运动可以看成是绕地心做半径为地球半径的匀速圆周运动。根据线速率和角速率与周期的关系，可以分别求出物体的线速率和角速率。

解　物体做匀速圆周运动的周期为 T，由此可得

$$
\begin{aligned}
v&=\frac{2\pi r}{T}\\
&=\frac{2\times3.14\times6.4\times10^6}{24\times3\,600}\ \mathrm{m\ s^{-1}}\\
&\approx4.65\times10^2\ \mathrm{m\ s^{-1}}
\end{aligned}
$$

$$
\begin{aligned}
\omega&=\frac{2\pi}{T}\\
&=\frac{2\times3.14}{24\times3\,600}\ \mathrm{rad\ s^{-1}}\\
&\approx7.27\times10^{-5}\ \mathrm{rad\ s^{-1}}
\end{aligned}
$$

练习 6-3

1. 在飞行表演中，一架飞机做匀速圆周运动时的轨道半径为 3 000 m，线速度为 150 $\mathrm{m\ s^{-1}}$。问：这架飞机圆周运动的周期为多大？角速率为多大？

2. 现在城市中的一些大酒店里设有旋转餐厅（如图 6.3.4）。顾客可以静坐在餐桌旁边，一边品尝美食，一边欣赏全城的美景。设某旋转餐厅转动一周所需的时间约为 1 h，餐桌边缘离转轴中心约为 20 m，求餐桌边缘的线速率。若该餐桌旁边有两名顾客，他们到转轴中心的距离之差为 0.5 m，则他们的线速度大小之差是多少？

图 6.3.4　旋转餐厅

3. 闹钟与手表进行了激烈的争论：

　　闹钟说："我的秒针针尖的线速率为 9×10^{-4} $\mathrm{m\ s^{-1}}$，你的秒针针尖的线速率只有 3×10^{-4} $\mathrm{m\ s^{-1}}$，我比你快得多。"

　　手表说："你的秒针 60 s 转一圈，我的秒针也是 60 s 转一圈，我的并不比你的慢。"

　　你认为闹钟和手表谁说得对？

第 4 节　向心力

匀速圆周运动既然是变速运动，做匀速圆周运动的物体就一定具有加速度。这个加速度的方向和大小有什么样的特点呢？

① 向心加速度的方向

如图 6.4.1 所示，设物体沿半径为 r 的圆周做匀速圆周运动，在某时刻它处在 A 点，速度是 v_A，经过一段很短的时间 Δt 后，运动到 B 点，速度为 v_B。为了更清楚地表示速度变化的情况，我们把速度矢量 v_A 和 v_B 的始端移到同一点，如图 6.4.2 所示。根据三角形定则求出速度矢量的改变量 Δv。

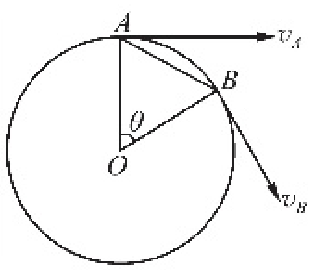


图 6.4.1

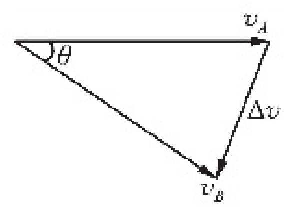


图 6.4.2

比值 $\dfrac{\Delta v}{\Delta t}$ 表示物体在时间 Δt 内的平均加速度 $\bar{a}$，它的方向与 Δv 的方向相同。在图 6.4.2 中，v_A 和 v_B 的大小相等，当 Δt 趋向零时，$\bar{a}$ 就表示物体在 A 点时的瞬时加速度。当时间 Δt 趋向零时，Δv 也趋近于零，这时 Δv 便垂直于 v_A，而 v_A 的方向在圆周的切线上，这时 Δv 的方向是沿着半径方向指向圆心。可见，**物体做匀速圆周运动时，它在任一时刻的加速度都是沿着半径指向圆心**。因此，匀速圆周运动的加速度叫作**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。

② 向心加速度的大小

我们可以看出：图 6.4.2 中的矢量三角形和图 6.4.1 中的三角形 OAB 是相似三角形。设 $v_A = v_B = v$，则有

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

上式两边同时除以 Δt，得

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

由此，推导出向心加速度的公式

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

向心加速度的大小也可以用角速率和半径来表示，根据 $v=\omega r$ 的关系，上式可以改写成

$$a_C=\omega^2 r$$

在匀速圆周运动中，因为 v、ω、r 大小都是不变的，所以向心加速度的大小也是不变的。但是向心加速度的方向却时刻在改变，因此，**匀速圆周运动是一种变加速曲线运动**。

向心加速度公式 $a_C=\frac{v^2}{r}$ 和 $a_C=\omega^2 r$ 虽然是从匀速圆周运动中推导出来的，但也同样适用于变速圆周运动。在变速圆周运动中，向心加速度的大小随着线速率（或角速率）的变化而变化。利用上述向心加速度公式求物体在变速圆周运动中某一时刻的向心加速度时，必须用这一时刻的瞬时线速率或瞬时角速率。当然，在变速圆周运动中考虑加速度时，除了考虑向心加速度外，我们还必须考虑描述线速率变化的切向加速度分量。

3 向心力及其方向

物体做匀速圆周运动时，物体具有加速度，这说明该物体一定受力。前面我们已经推导出向心加速度的公式，根据牛顿第二定律，我们也可以推导出产生向心加速度的外力公式：

$$\begin{aligned}F_C&=ma_C\\&=m\omega^2 r\end{aligned}$$

因为 $v=\omega r$，所以

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

我们知道，向心加速度的方向是指向圆心的，而加速度方向又总是跟合外力的方向一致，所以使物体产生向心加速度的力的方向也一定是指向圆心的。因此，我们习惯上把使物体产生向心加速度的力叫作**向心力（centripetal force）**。

做一做

粗略验证向心力的公式

取一根圆珠笔杆，用一根尼龙线穿过它，一端拴一个较轻的小物体（如橡皮），另一端拴金属螺母（其质量大于橡皮的质量）。如图 6.4.3 所示，手握圆珠笔杆，抡起轻小物体，尽量使轻小物体做匀速圆周运动。当转速达到一定值时，螺母会处于静止状态，而不再向下运动。

如果依次改变轻小物体的质量、转动的角速率、转动的半径，情况会如何？

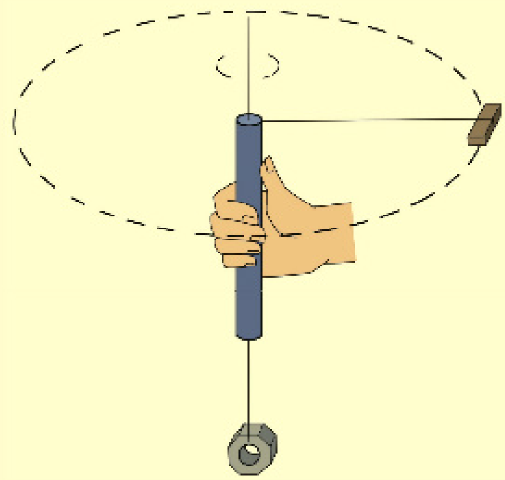


图 6.4.3　探究物体做圆周运动的向心力大小与哪些因素有关

必须注意：向心力不是一种特殊的力，它可能是某一个力或是某一个力的分力，也可能是几个力的合力。例如，月球绕着地球运动，向心力就是地球对月球的引力；随圆盘转动的物块，它受到的向心力就是圆盘对它的摩擦力；而链球比赛时，链球做圆周运动的向心力可以近似看成是链子对它的拉力和球所受重力的合力。

分析做匀速圆周运动的物体的受力情况时，首先要弄清楚这个物体受到哪些作用力，只要物体做匀速圆周运动，物体受到的合外力就一定指向圆心，也就是使物体产生向心加速度的向心力。如果物体不是做匀速圆周运动，那么物体所受的合外力不指向圆心，合外力除在沿半径方向上有一个分力（即向心力）外，还会在速度方向上有分力，这个分力改变了物体速度的大小。

说一说

如图 6.4.4 和图 6.4.5 所示的物体都做圆周运动，分析它们的受力情况，说出它们所受的合外力分别沿什么方向。

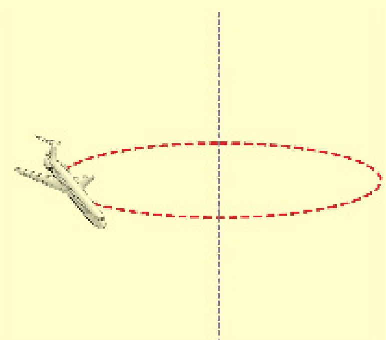


图 6.4.4　飞机在水平面内盘旋

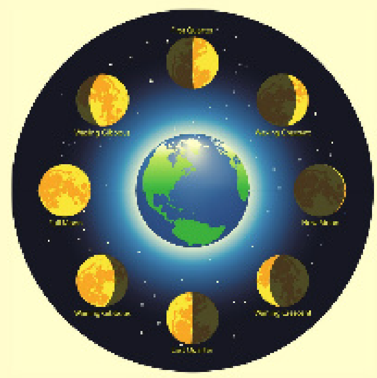


图 6.4.5　月亮绕地球做圆周运动

请同学们再举几个类似的圆周运动的实例。

例题 6－5　月球绕地球公转的轨道接近圆，半径为 3.84×10^5 km，公转周期是 27.3 天。月球绕地球公转的向心加速度是多大？

分析　根据圆周运动的速率定义式

$$v=\frac{\Delta s}{\Delta t}=\frac{2\pi r}{T}$$

求出线速率，然后根据向心加速度与线速率的关系式求出向心加速度的大小。

解　月球的公转周期 $T=27.3\times24\times3\ 600\ \text{s}\approx2.36\times10^6\ \text{s}$，

月球公转的向心加速度为

$$\begin{aligned}a_C&=\frac{v^2}{r}\\&=\frac{4\pi^2 r}{T^2}\\&=\left(\frac{2\times3.14}{2.36\times10^6}\right)^2\times3.84\times10^5\ \text{km s}^{-2}\\&\approx2.7\times10^{-3}\ \text{m s}^{-2}\end{aligned}$$

例题 6 – 6 如图 6.4.6，圆锥摆中小球的质量为 1 kg，摆线长为 1 m（设摆线为轻绳且没有弹性）。小球在水平面内做半径为 0.6 m 的匀速圆周运动。问：摆线上的拉力为多大？小球的线速率是多少？

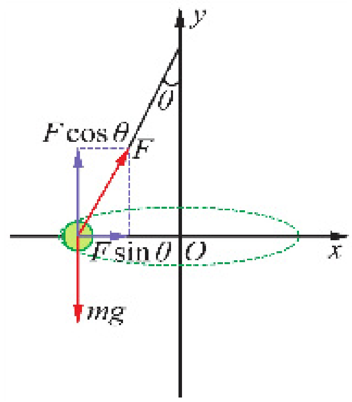


图 6.4.6 圆锥摆

分析 小球受两个力的作用：绳的拉力 F 和重力 mg，小球在竖直方向上没有运动，故拉力的竖直分力 $F\cos\theta = mg$。拉力的另一个分力 $F\sin\theta$ 提供小球做圆周运动所需的向心力。

解 小球的受力情况如图 6.4.6 所示，建立如图所示的直角坐标系，将拉力沿坐标轴方向分解为两个力。根据小球的运动情况，有

x 轴方向：

$$F\sin\theta = F_C$$

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

y 轴方向： $$F\cos\theta = mg$$

联立上述方程式，得

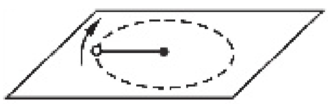
$$F = 12.25\ \text{N}$$

$$v = 2.1\ \text{m s}^{-1}$$

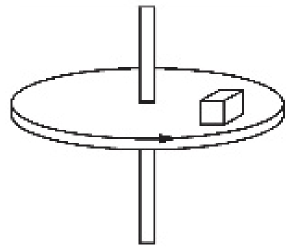
练习 6-4

1. 有人说：“从公式 $F_C = m\frac{v^2}{r}$ 来看，向心力的大小与圆周的半径成反比；从公式 $F_C = m\omega^2 r$ 来看，向心力的大小又与圆周的半径成正比。”由两个公式得出了矛盾的结果，你对此是怎样解释的？

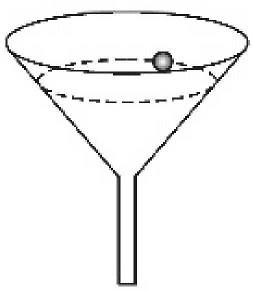
2. 如图 6.4.7 所示，说出各物体做匀速圆周运动的向心力是由什么力提供的。



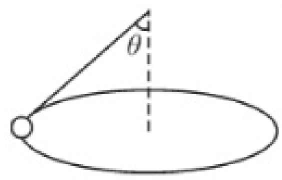
球被绳拉着在水平面内做圆周运动



物块随圆盘一起转动



小球在漏斗内壁做圆周运动



小球在圆锥面内转动

图 6.4.7

3. 一个质量为 3.5 kg 的物体在半径为 1.0 m 的圆周上以 3.0 m s^{-1} 的速率做圆周运动。问：该物体做圆周运动的向心加速度为多大？需要多大的向心力？

4. 用细绳拴着小球在水平面内做圆周运动。问：当转速相同时，绳长易断还是绳短易断？为什么？

第 5 节　离心运动及其应用

1 认识离心运动

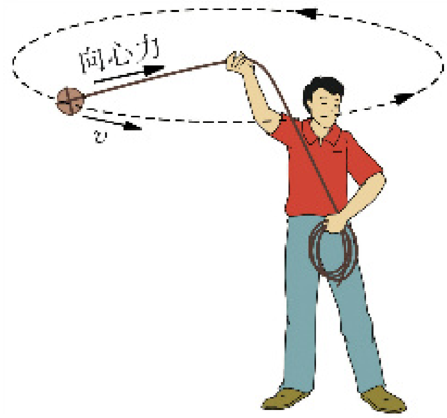


图 6.5.1　小球做圆周运动

生活中常会出现这样的现象：做圆周运动的物体，由于惯性，总有沿着圆周的切线方向飞出去的倾向。例如，用绳子系着小球用力旋转使其做圆周运动，一旦松手或者绳子断开，小球就会沿着它所在处的圆弧的切线方向飞出（如图 6.5.1）。为了防止做圆周运动的物体飞出伤人，人们会采取保护措施。例如，投掷链球的场地除了链球出口处，周围要用铁网围住，防止因链断开或球意外脱手而导致事故发生。

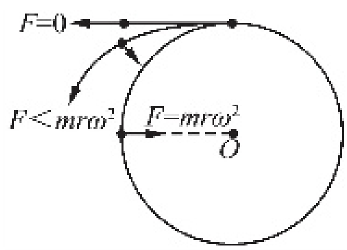


图 6.5.2　离心运动

在存在合外力但合外力不足以提供物体所需的向心力时，物体虽然不会沿切线飞出，但会逐渐远离圆心运动（如图 6.5.2）。

为什么会出现这种情况呢？我们知道，做圆周运动的物体，它的速度方向就沿圆周的切线方向。物体之所以没有飞出去，是因为物体受到的合外力提供了它所需要的向心力。一旦向心力消失或不足，物体由于惯性，就会做远离圆心的运动。

做匀速圆周运动的物体，在合外力突然消失或合外力不足以提供所需的向心力时，物体所做的远离圆心的运动，被称为**离心运动**。

思考与讨论

在如图 6.5.3 所示的旋转盘上，开始时有的人离转轴近一点，有的人离转轴远一点，当转盘加速旋转时，哪些人更容易滑出去？为什么？


图 6.5.3　旋转盘游戏

② 离心运动的应用

离心运动有很多应用。例如，洗衣机脱水时利用离心运动把附着在衣服上的水分甩掉；纺织厂也用这样的方法使纺织品干燥。

医院和科研机构常用离心分离器加快液体中悬浮微粒的沉淀；铸造工业采用的离心铸造工艺是把熔化的钢水浇入圆柱形模子中，模子沿圆柱的中心轴线高速旋转，钢水由于离心运动趋于周壁，冷却后就形成无缝钢管。

做一做

握住体温计的顶部用力甩，就能把水银甩回玻璃泡内。如何解释这个现象呢？

③ 离心运动的危害与防止

有些离心运动是有害的。在水平公路上行驶的汽车，转弯时所需的向心力是由车轮与路面间的静摩擦力提供的（图 6.5.4）。如果汽车转弯时速度过大，所需向心力大于最大静摩擦力，汽车将做离心运动而造成事故。

高速转动的砂轮、飞轮等，都不得超过所允许的最大转速。转速过高时，砂轮、飞轮内部分子间的相互作用力不足以提供所需的向心力，离心运动会使它们破裂，酿成事故。

图 6.5.4　汽车转弯时的向心力由静摩擦力提供

练习 6-5

1. 在匀速转动的圆盘上有一个与圆盘相对静止的物体，物体相对于圆盘有运动趋势吗？若有，是沿什么方向的？

2. 在什么条件下物体可能做离心运动？物体做离心运动时，运动轨迹的形状可能是怎么样的？

3. 衣服在洗衣机脱水筒（如图 6.5.5）里脱水后，衣服常常会紧贴在筒壁上，你知道这是为什么吗？

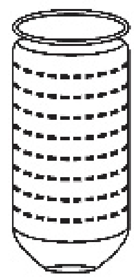


图 6.5.5 洗衣机的脱水筒

4. 分析做离心运动的物体，该物体运动速度的大小和方向变化有哪几种可能？说明原因。

第 6 节　竖直平面上的圆周运动

许多同学都看过“水流星”杂技表演。如图 6.6.1，用一根绳子系着盛水的容器，演员抡动绳子使容器做圆周运动，只要速度足够大，即使容器在竖直平面内运动到最高点，容器口朝下时，水也不会洒出来。这是什么原因呢？

图 6.6.1　“水流星”杂技表演

做一做

用铁丝做一个如图 6.6.2 所示的凹凸形的桥面模型。

1. 把一个小球放在凹桥面的底部 A，调节此处两铁丝的间距，使球刚好不掉下去。观察球从轨道最高处滚下，经过最低点时的现象。

2. 再把凹桥面的底部 A 的两个轨道间距固定，使小球不能在此掉落。调整凸形桥面的两铁丝的间距，使小球静止在凸桥面 B 时，刚好能撑开两铁丝下落。再次让小球从轨道的最高处滚下，观察小球到达凸形桥面 B 时的现象。

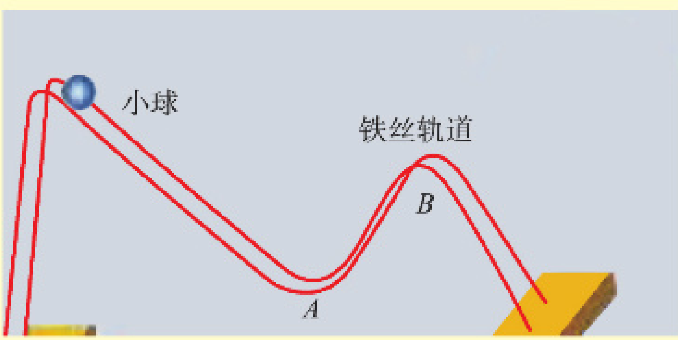


图 6.6.2　凹凸桥模型

可以看到，在实验步骤 1 中，小球运动到凹桥面的底部 A 时，小球掉了下去，这说明运动的小球对凹桥面底部的压力大于小球静止时对凹桥面底部的压力。在实验步骤 2

中，小球运动到凸形桥面 B 时并没有掉下去，这说明运动小球对凸形桥面的压力小于小球静止时对凸形桥面的压力。

公路上的拱形桥是常见的，汽车过拱形桥时的运动也可以看作圆周运动。质量为 m 的汽车在拱形桥上以速度 v 前进，设桥面的圆弧半径为 r，我们来分析汽车通过桥面最高点时对桥面的压力。

以汽车为研究对象，分析汽车所受的力（如图 6.6.3），汽车所受的重力 W 和桥面对汽车的支持力 F_N 的合力就是使汽车做圆周运动的向心力 F_C。由于向心加速度 a_C 的方向是竖直向下的，故

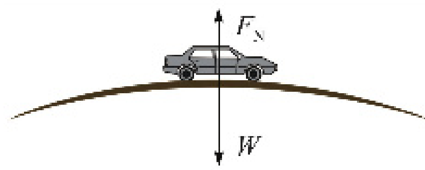


图 6.6.3　汽车过拱形桥

$$F_C = W - F_N$$

根据牛顿第二定律 $F_C = ma_C$，有

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

所以
$$W - F_N = m\frac{v^2}{r}$$

由此得出桥面对汽车的支持力

$$F_N = W - m\frac{v^2}{r}$$

汽车对桥面的压力 F_N' 与桥面对汽车的支持力 F_N 是一对作用力与反作用力，二者大小相等，方向相反。所以汽车对桥面的压力的大小为

$$F'_N = W - m\frac{v^2}{r}$$

由此可以看出，汽车对拱形桥的压力 F_N' 小于汽车的重力 W，而且汽车的速度越大，压力越小。试思考：当汽车的速度不断增大时，会发生什么现象？

请同学们仿照上面的方法，证明汽车通过凹形桥的最低点时（如图 6.6.4），车对桥面的压力将比汽车受到的重力大。从而理解，一般的桥做成凸形桥，除便于船只的航行外，在力学上也有其合理性。

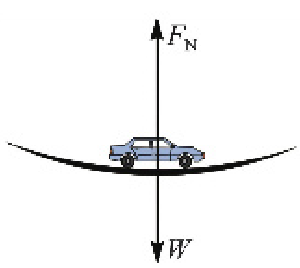


图 6.6.4　汽车过凹形桥

例题 6 – 7　如图 6.6.3，汽车的质量为 800 kg，桥拱的半径为 50 m，当汽车到达桥顶时的速度为 5 m s^{-1}，此时汽车对桥面的压力有多大？（取 g = 10 m s^{-2}）

分析　汽车受到重力和桥对它的支持力，两个力都在竖直方向上。在桥顶时，汽车做圆周运动的向心力是由这两个力的合力提供的。

解　由 $F_C = mg - F_N$ 和 $F_C = m\frac{v^2}{r}$ 得

$$
\begin{aligned}
F_N &= mg - F_C \\
&= mg - m\frac{v^2}{r} \\
&= \left(800 \times 10 - 800 \times \frac{5 \times 5}{50}\right)\ \text{N} \\
&= 7\,600\ \text{N}
\end{aligned}
$$

由牛顿第三定律可知：桥面对汽车的支持力与车对桥面的压力是一对作用力与反作用力，二者大小相等，方向相反。所以，汽车对桥面的压力大小为 7 600 N，方向竖直向下。

思考与讨论

在“水流星”杂技表演时（如图 6.6.1），为了使水不流出来，演员必须做到哪一点？

例题 6 – 8　长为 l 的细绳系着一个小球在竖直面内做圆周运动，要使小球能通过圆周的最高点，在圆周最高点小球的速度至少要多大？

分析　小球能通过最高点，不脱离圆周，绳中的拉力应该

$$F_{拉} \geqslant 0$$

解　小球在圆周的最高点时，由牛顿第二定律，得

$$F_{拉} + mg = m\frac{v^2}{l}$$

∴　当 $F_{拉} = 0$ 时，$v = \sqrt{gl}$；

当 $F_{拉} > 0$ 时，$v > \sqrt{gl}$。

练习 6-6

1. 车过拱形桥时，速度不能太大，请你利用所学知识谈谈其原因。

2. 如图 6.6.5，小球分别固定在轻绳和轻杆的一端，绕 O 点在竖直面内做圆周运动。在图 6.6.5 a 中，当小球到达最高点时，其速度最小值是多大？在图 6.6.5 b 中，小球到达最高点时，杆对球的作用力可能有哪几种情况？

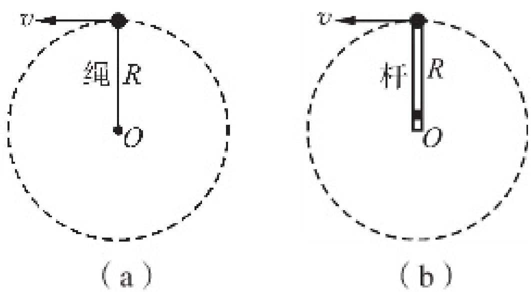


图 6.6.5

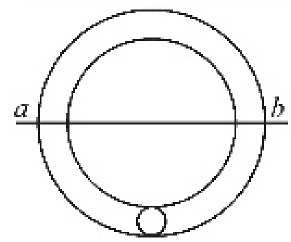


图 6.6.6

3. 如图 6.6.6，在竖直放置的光滑圆形管道内，小球在竖直平面内做圆周运动。问：小球做圆周运动到达最高点时的最小速度为多大？此时管道对小球的作用力为多大？方向如何？

第 7 节　行星的运动及开普勒定律

图 6.7.1　开普勒

从古至今，人类都在不断地探索天体的运动规律，曾存在着地心说和日心说两种对立的观点。但不论是地心说还是日心说，古人都把天体的运动看得很神圣，认为天体的运动必然是最完美、最和谐的匀速圆周运动。

德国天文学家开普勒（图 6.7.1）用了 10 多年的时间研究了前人的观测记录，发现行星绕太阳运动的轨道不是圆，而是椭圆。同时开普勒还发现了行星运动的其他规律。他分别于 1609 年和 1619 年发表了太阳系行星运动的三大定律，被后人称为**开普勒行星运动定律**。

开普勒第一定律：所有行星绕太阳运动的轨道都是椭圆，太阳处在椭圆的一个焦点上（图 6.7.2）。

实际上，行星绕太阳运动的轨道形状十分接近于圆，在中学阶段的学习中，我们是按圆轨道来处理的。这样，对于任一行星来说，它都绕太阳在做匀速圆周运动，太阳处在圆心的位置。

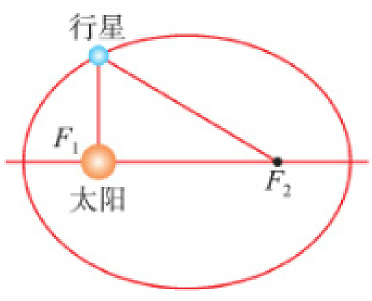


图 6.7.2　行星绕太阳运动的轨迹是椭圆

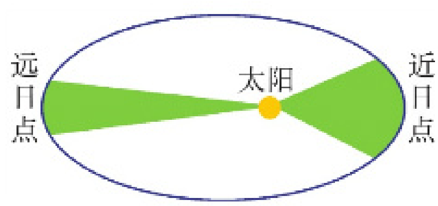


图 6.7.3　行星与太阳的连线在相等的时间内扫过相等的面积

开普勒第二定律：对每个行星而言，太阳与行星的连线在相等的时间内扫过相等的面积（图 6.7.3）。

这个定律告诉我们，在行星运动的过程中，它的速度随着与太阳距离的变化而不断变化。当它离太阳比较近的时候，运行的速度比较大，而离太阳较远时速度较小。

开普勒第三定律：绕太阳运行的所有行星的轨道半长轴的立方与其公转周期的平方成正比。

若用 R 代表椭圆轨道的半长轴（图 6.7.4），T 代表公转周期，则根据开普勒第三定律，可得

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

比值 k 是一个对所有绕太阳运行的行星都相同的常量。

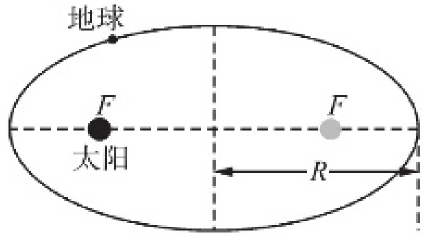


图 6.7.4　R 是椭圆轨道的半长轴

拓展阅读

开普勒三大定律是开普勒在第谷（图 6.7.5）留下的资料的基础上花费了无数的精力，通过观测和猜测得来的，并最终发表在 1619 年出版的《宇宙和谐论》中。这三大定律在一个世纪后，被牛顿从另外一个途径独立地得到了，这个途径就是万有引力定律。下节课同学们学习引力定律以后，就可以推导出这三大定律了。

图 6.7.5　第谷

例题 6－9　木星是太阳系中质量最大的行星，其质量相当于地球质量的 1.3×10^3 倍。由于木星的轨道半径约为地球轨道半径的 5 倍（木星轨道和地球轨道都可近似地看成圆），因此木星上的“一年”比地球上的“一年”长得多。问：木星上的“一年”是地球上的“一年”的多少倍？

分析　此题可以根据开普勒第三定律，把木星周期与地球周期的比值转化为它们半径的比值。

解　由开普勒第三定律 $\dfrac{R^3}{T^2}=k$，可得

$$\frac{R_{地}^3}{T_{地}^2}=\frac{R_{木}^3}{T_{木}^2}$$

则

$$\frac{T_{木}}{T_{地}}=\left(\frac{R_{木}}{R_{地}}\right)^{\frac{3}{2}}$$

$$=5\sqrt{5}$$

故木星上的“一年”是地球上的“一年”的 $5\sqrt{5}$ 倍。

练习 6–7

1. 月球环绕地球运动的轨道半径为地球半径的 60 倍，运行周期约为 27 天。运用开普勒三大定律计算：人造卫星在赤道平面内离地面多高时，它可以随地球一起转动，并相对静止在地球某处的上空？（已知地球的半径为 R）

2. 请通过网络或书籍，了解地心说和日心说这两种不同学说的建立和发展过程。

第 8 节　万有引力定律

1 万有引力定律

太阳系的行星在各自基本恒定的轨道上围绕太阳运动，并且遵循一定的运动规律。这些行星为什么会如此运转呢？它们为什么不会脱离太阳呢？在地面向上抛出的物体，不论物体上升多高，它总要落回地面，这又是为什么呢？牛顿总结了前人的研究成果，运用开普勒三大定律和自己在力学、数学方面的研究成果，于 1687 年在《自然哲学的数学原理》中正式提出了**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，引力 F 的方向在它们的连线上，引力 F 的大小与这两个物体的质量 m_1 和 m_2 的乘积成正比，与这两个物体间的距离 r 的平方成反比。即

$$F=G\frac{m_1m_2}{r^2}$$

公式中质量 m 的单位用千克（kg），距离 r 的单位用米（m），力的单位用牛顿（N）。G 是比例系数，叫作**引力常量 (gravitational constant)**，$G=6.674\ 1\times10^{-11}\ \mathrm{N\ m^2\ kg^{-2}}$。万有引力定律适用于任何两个物体。

万有引力定律中的两个物体间的距离，对于两个相距很远可以看成质点的物体，就是指两质点之间的距离；对于两个匀质的球体，则是两球心的距离。

万有引力定律清楚地向人们揭示，复杂运动的背后隐藏着简洁的科学规律；它明确地向人们宣告，天上和地上物体的运动，都遵循着完全相同的科学法则。

例题 6 – 10　任何两个物体之间都存在着引力，为什么当两个人接近时他们不会吸在一起？我们通常分析物体的受力时是否需要考虑物体间的万有引力？请根据实际情况，运用合理的数据，通过计算说明以上两个问题。

分析　如果把两个接近的人吸在一起就需要克服人与地面之间的摩擦力。假设两个人的质量均为 60 kg，相距 1 m，人与地面之间的摩擦系数为 0.5。利用万有引力定律求出人与人之间的引力与人与地面之间的摩擦力，对比这两个力的大小就可以说明为什么两个靠近的人不会吸在一起，以及平时在研究物体受力时，我们为什么不用考虑万有引力了。

解　由万有引力定律估算两个人之间的引力为

$$
\begin{aligned}
F &= G\frac{m^2}{r^2} \\
&= 6.67\times10^{-11}\times\frac{60^2}{1}\ \mathrm{N} \\
&\approx 2.4\times10^{-7}\ \mathrm{N}
\end{aligned}
$$

人与地面之间的最大静摩擦力为

$$
\begin{aligned}
f_m &= \mu_s F_N \\
&= \mu_s mg \\
&= 60\times9.8\times0.5\ \mathrm{N} \\
&= 294\ \mathrm{N}
\end{aligned}
$$

可以看出：人站立时受到地面对他的摩擦力远远大于另一个人对他的万有引力。所以，这么小的引力不仅不可能把两个人吸到一起，而且基本无法察觉到它的存在。

由以上例题可以知道，尽管自然界中任何两个物体之间都存在着引力，但一般物体间的引力非常小，常常忽略不计。

我们能明显感觉到地球引力的作用，是由于地球的质量很大。一般情况下可以认为，地球上的物体所受的重力约等于地球对它的引力。在估算地球与地面物体之间的万有引力时，通常将地球质量等效集中于地球中心。

拓展阅读

实际上，行星绕太阳运行的轨道与圆十分接近，在中学阶段的学习中我们可以按圆轨道处理。下面我们尝试利用牛顿运动定律和开普勒行星运动定律推导出万有引力定律。

设质量为 m 的某行星，以速率 v 绕质量为 M 的太阳做匀速圆周运动，公转周期为 T，它们之间的距离为 r，根据牛顿第二定律，行星所受的向心力为

$$F_C = ma_C = m\omega^2 r = m\frac{4\pi^2 r}{T^2}$$

由开普勒第三定律可知，$\frac{r^3}{T^2}$ 是常量，将上式变形为

$$F_C=\frac{4\pi^2 r^3}{T^2}\cdot\frac{m}{r^2}$$

因此可知 F_C 与 m 成正比，与 r^2 成反比。

行星所受向心力由行星与太阳间的引力提供。同理，这个引力也应该与太阳的质量 M 成正比，即

$$F\propto\frac{Mm}{r^2}$$

写成等式

$$F=G\frac{Mm}{r^2}$$

G 为常量，F 为万有引力，其方向沿着行星与太阳中心的连线方向。

② 引力常量

万有引力定律是自然界的基本规律之一，在物理学中占有很重要的地位。然而，牛顿得出了万有引力与物体质量及它们之间距离的关系，却未能给出准确的引力常量。100 多年以后，英国物理学家卡文迪许（Henry Cavendish，1731—1810）在实验室里巧妙地利用扭秤，经多次实验，精确地测出了两个铅球之间的引力，并得到了当时精确度很高的引力常量，之后在几十年内无人超过他。

卡文迪许得出引力常量 G 以后，又测量了许多物体间的引力，所得结果与利用引力常量 G 按万有引力定律计算所得的结果相同。引力常量的普适性成了验证万有引力定律正确性的最早证据。

引力常量的确定有着非常重要的意义，它使万有引力定律有了真正的实用价值。例如，知道 G 的值后，利用万有引力定律便可以计算天体的质量了。

如何利用万有引力定律计算天体的质量？若不考虑地球自转的影响，地面上质量为 m 的物体所受的重力 mg 等于地球对物体的引力，即

$$mg=G\frac{mM}{R^2}$$

拓展阅读

卡文迪许扭秤实验

1797 年夏，英国物理学家卡文迪许改进米歇尔的扭秤并开始实验。1798 年，他利用扭秤成功地测出了引力常量，不仅证明了万有引力定律是正确的，而且让万有引力定律有了实用性。

实验的具体做法：

1. 将两个质量均为 m 的铅球分别放在扭秤的两端。扭秤中间用一根韧性很好的钢丝系在支架上，钢丝上有面小镜子。

2. 再用两个质量都为 m' 的铅球同时分别吸引扭秤上的两个铅球（如图 6.8.1）。由于万有引力作用，钢丝发生扭转，使扭秤微微偏转。

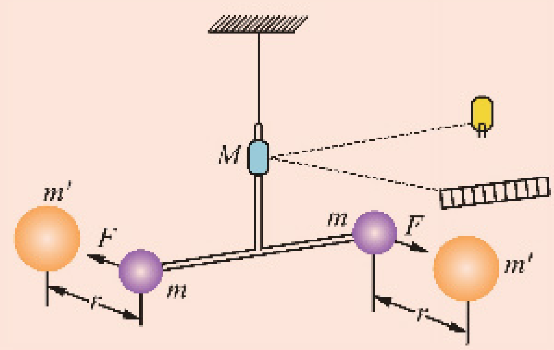


图 6.8.1　卡文迪许扭秤实验的示意图

此实验的巧妙之处在于将微弱的力的作用进行了放大。

扭秤钢丝上的平面镜能把射来的光线反射到刻度尺上。当钢丝发生扭转时，被平面镜反射的光也将在刻度尺上移动。这时钢丝扭转的角度可以从平面镜反射的光点在刻度尺上移动的距离求出，再根据钢丝的扭转力矩跟扭转角度的关系，就可以算出这时的扭转力矩，进而求得 m 与 m' 之间的引力 F。卡文迪许利用扭秤进行了一系列十分仔细的测量，测得引力常量 $G = 6.754 \times 10^{-11}\ \mathrm{N\ m^2\ kg^{-2}}$，与目前的公认值只差百分之一。

卡文迪许解决问题的思路是，将不易观察的微小变化量，通过杠杆效应放大转化为容易观察的显著变化量，再根据显著变化量与微小量的关系算出微小的变化量。

式中 M 是地球的质量，R 是地球的半径，也就是物体到地心的距离。由此解出

$$M=\frac{gR^2}{G}$$

地面上的重力加速度 g 和地球半径 R 在卡文迪许之前就已知道，测出了引力常量 G，就可以算出地球的质量 M。卡文迪许也因此被称为“能称出地球质量的人”。

思考与讨论

我们已经知道，地球绕太阳做圆周运动，如果把地球的公转看成是匀速圆周运动，地球的公转周期是 T，地球与太阳的距离为 r，太阳的质量为 M。利用万有引力定律推导出太阳质量的表达式。

③ 宇宙速度

知道了行星的运动规律，学习了万有引力定律，请同学们思考一个问题：飞船挣脱地球束缚并登上月球的条件是什么？在《自然哲学的数学原理》中，牛顿用一张图形象地说明了人造地球卫星上天并绕地球运行的奥秘（图 6.8.2）。牛顿认为：把物体从地面某高处水平抛出，速度一次比一次大，落地点也就一次比一次远。如果速度足够大，物体就不再落回地面，它将绕地球运动，成为人造地球卫星。

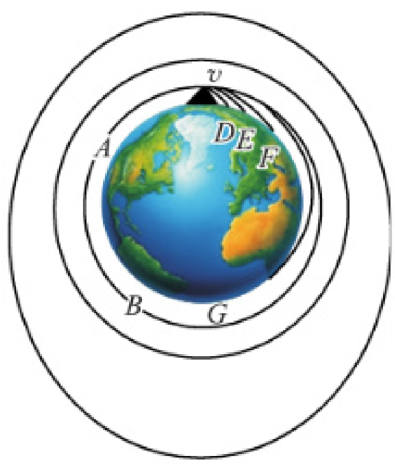


图 6.8.2　牛顿设想，当抛出速度很大时，物体就不会落回地面

现在我们就来计算这个足够大的速度到底需要多大。

卫星绕地球的轨道可以看成圆周，并且卫星距地面的高度远小于地球的半径，因此卫星轨道半径可近似为地球半径。设地球的质量为 M，卫星的质量为 m，卫星绕地球做匀速圆周运动的速度为 v，它到地心的距离为 r，则

$$m\frac{v^2}{r}=G\frac{Mm}{r^2}$$

解得

$$v=\sqrt{\frac{GM}{r}}$$

将地球质量 5.98×10^{24} kg、地球半径 6 400 km 代入上式，得

$$v=\sqrt{\frac{6.67\times10^{-11}\times5.98\times10^{24}}{6.40\times10^{6}}}\ \mathrm{m\,s^{-1}}\approx7.9\ \mathrm{km\,s^{-1}}$$

这就是物体在地面附近绕地球做匀速圆周运动的速度，叫作**第一宇宙速度（first cosmic velocity）**，也称**环绕速度**（图 6.8.3）。当卫星具有第一宇宙速度时，它绕地球的运行轨道是圆形的。

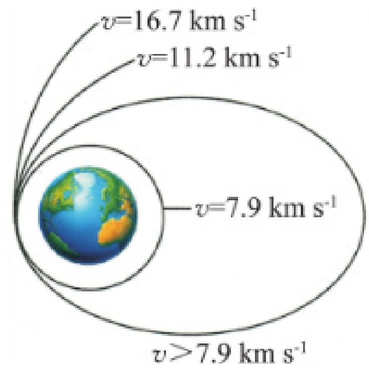


图 6.8.3　三个宇宙速度

在地面附近发射卫星，如果速度大于 $7.9\ \mathrm{km\,s^{-1}}$，它绕地球运行的轨迹就不再是圆，而是椭圆。当速度足够大时，卫星甚至会摆脱地球束缚，远离地球而去。通过计算知道，人造卫星脱离地球的最小速度为 $11.2\ \mathrm{km\,s^{-1}}$。我们把 $11.2\ \mathrm{km\,s^{-1}}$ 叫作**第二宇宙速度**。

脱离地球的卫星还受到太阳引力的作用，相当于“人造行星”。在地面附近发射一个物体，要使物体挣脱太阳引力的束缚，飞到太阳系外，必须使它的速度至少为 $16.7\ \mathrm{km\,s^{-1}}$，这个速度叫作**第三宇宙速度**。

想一想

如果一个物体能沿着地球表面做匀速率圆周运动而不掉落到地球上，物体应该有多大的速度？

例题 6 – 11　金星的半径是地球半径的 0.95，质量为地球质量的 0.82，金星表面的自由落体加速度是多大？（取 $g=9.8\ \mathrm{m\,s^{-2}}$）

分析　如果不考虑星球的自转影响，星球表面物体所受的重力就是星球对它的万有引力。

解　设金星的质量为 M_1，半径为 R_1，金星表面的自由落体加速度为 g_1，则在金星表面有

$$G\frac{M_1m}{R_1^2}=mg_1 \quad ①$$

设地球的质量为 M_2，半径为 R_2，地球表面的自由落体加速度为 g_2，则在地球表面有

$$G\frac{M_2 m}{R_2^2}=mg_2 \qquad ②$$

①式除以②式，得 $\frac{M_1}{M_2}\cdot\frac{R_2^2}{R_1^2}=\frac{g_1}{g_2}$，即

$$\begin{aligned}g_1&=\frac{M_1}{M_2}\cdot\frac{R_2^2}{R_1^2}g_2\\&=\frac{0.82}{1}\times\frac{1^2}{0.95^2}\times 9.8\ \mathrm{m\,s^{-2}}\\&\approx 8.9\ \mathrm{m\,s^{-2}}\end{aligned}$$

试一试

试推导金星的“第一宇宙速度”的大小。

拓展阅读

观测宇宙的新途径——引力波的观测意义

2016 年 2 月 11 日，美国科研人员宣布他们利用激光干涉引力波天文台（LIGO）探测到引力波的存在。引力波是爱因斯坦广义相对论所预言的一种以光速传播的时空波动，是时空曲率的扰动以行进波的形式向外传递的一种方式。引力波是一种能脱离引力场源在真空中传播的波动引力场，又称引力辐射。2015 年 9 月 14 日抵达地球并被检测到的引力波是约 13 亿年前两个黑洞碰撞时，两个巨大质量结合所传送出的时空扰动。

引力波的观测意义不仅在于对广义相对论的直接验证，更在于它能够提供一个观测宇宙的新途径，就像观测天文学从可见光天文学扩展到全波段天文学那样极大地扩展了人类的视野。

练习 6-8

1. 一个质子由两个 u 夸克和一个 d 夸克组成。一个夸克的质量是 7.1×10^{-30} kg，求两个夸克相距 1.0×10^{-16} m 时的万有引力。（结果保留 2 位有效数字）

2. 根据万有引力定律和牛顿第二定律说明：为什么不同物体在地球表面的同一纬度上自由落体加速度都是一样大的？为什么高山上的自由落体加速度比地面的小？

3. 利用所学知识，推导第一宇宙速度的另一个表达式 $v=\sqrt{gR}$（R 为地球的半径）。

拓展阅读

行星绕太阳运动的原因

太阳系的组成

太阳系中有八大行星，它们绕太阳旋转，轨迹为椭圆，太阳处在椭圆的一个焦点上。除了水星和金星外，其他行星都有卫星。按照离太阳的远近，八大行星（图 6.8.4）分别是：最近的水星（Mercury）、金星（Venus）、地球（Earth）、火星（Mars）、木星（Jupiter）、土星（Saturn）、天王星（Uranus）、海王星（Neptune）。除此以外，太阳系中还有无数的小行星、彗星、流星及星际物质。在庞大的太阳系家族里，太阳是它们的中心，太阳的质量占了太阳系总质量的 99.8%。太阳系中各天体主要是由氢、氦、氖等气体，冰（水、氨、甲烷），以及含有铁、硅、镁等元素的岩石构成。据天文学家测算，太阳的寿命可达 100 多亿年，目前它正处于稳定而旺盛的中年时期。

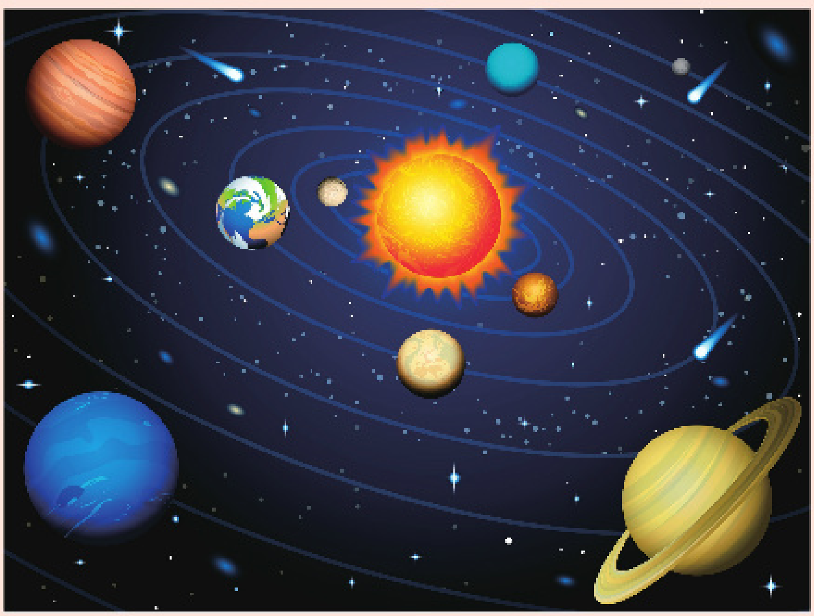


图 6.8.4　太阳系的组成

人类认识太阳系的过程

人类观察和记录行星的历史可以追溯到古埃及时期。古埃及人对神秘莫测的太空充满敬畏之情，对天文的记录和研究已经比较深入，他们也是最早为行星命名的。受到古埃及人的影响，古巴比伦人对天文学的研究更加精确，他们已经能够利用复杂的数学知识推算出行星的运行轨迹，编制预测行星位置的星历表。直到古希腊人托勒密的地心学说的出现，人们才根据天文观测构建出一套完整的宇宙模型。

地心说

地心说最初由米利都学派形成初步理念，后由古希腊学者欧多克斯（Eudoxus of Cnidus，公元前 408—公元前 355）提出，然后经亚里士多德完善，最后是托勒密进一步发展而成为理论的。从 13 世纪到 17 世纪左右，地心说也一直是天主教教会公认的世界观。地心说的代表人物有两个：

（1）亚里士多德

亚里士多德认为：宇宙是一个有限的球体，分为天地两层，地球位于宇宙中心，日月围绕地球运行，物体总是落向地面。地球之外有 9 个等距天层，按由里到外的排列依次是：月球天、水星天、金星天、太阳天、火星天、木星天、土星天、恒星天和原动力天，此外空无一物。上帝推动了恒星天层，才带动了所有天层的运动。人类居住的地球，则静止不动且处于宇宙的中心。

（2）托勒密

托勒密（图 6.8.5）的地心说认为，地球处于宇宙的中心静止不动。从地球向外依次有月球、水星、金星、太阳、火星、木星和土星，它们在


图 6.8.5　托勒密（Claudius Ptolemaeus，约 90—168）

各自的轨道上绕地球运转。

地心说是世界上第一个行星体系模型。尽管它把地球当作宇宙中心是错误的，然而它的历史功绩不应抹杀。地心说承认地球是“球形”的，并把行星从恒星中区别出来，着眼于探索和提示行星的运动规律，这标志着人类对宇宙认识的一大进步。地心说最重要的成就是运用数学计算行星的运行，托勒密还第一次提出“运行轨道”的概念，设计出了一个本轮均轮模型（图 6.8.6）。按照这个模型，人们能够对行星的运动进行定量计算，推测行星所在的位置，这是一个了不起的创造。在一定时期里，依据这个模型可以在一定程度上正确地预测天象。地心说中的本轮均轮模型是托勒密根据有限的观察资料拼凑出来的，他是通过人为地规定本轮、均轮的大小及行星运行速度，才使这个模型和实测结果取得一致。但是，到了中世纪后期，随着观察仪器的不断改进，行星位置和运动的测量越来越精确，观测到的行星实际位置同这个模型的计算结果的偏差逐渐显露出来。但是，信奉地心说的人们并没有认识到这是由地心说本身的错误造成的，却用增加本轮的办法来补救地心说。开始这种办法还能勉强应付，后来小本轮增加到 80 多个，仍不能满意地计算出行星的准确位置。这不能不使人们怀疑地心说的正确性了。到了 16 世纪，哥白尼在持日心地动观的古希腊先辈和同时代学者的基础上，终于创立了日心说。从此，地心说便逐渐被淘汰了。

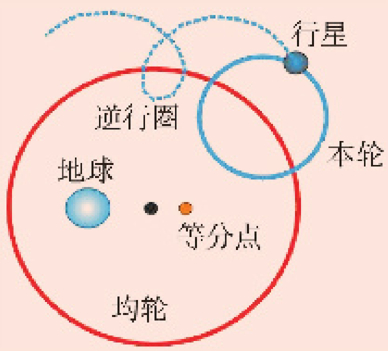


图 6.8.6　本轮均轮模型

日心说

日心说也称为地动说，是和地心说相对立的学说，它认为太阳是宇宙的中心。早在公元前 300 多年，西方阿里斯塔克

(Aristarchus，公元前 315—公元前 230）和赫拉克里特(Heraclitus，约公元前 530—公元前 470）就已经提出太阳是宇宙的中心，地球是绕太阳运动的。

波兰天文学家哥白尼（图 6.8.7）在中学时就对天文学很感兴趣，他相信研究天文学离不开观测和数学。他克服困难，30 年如一日，每天坚持观测天文现象，终于取得了可靠的数据，提出了日心说，建立了一个新的宇宙模型，记录在了 1543 年发表的《天体运行论》中。

图 6.8.7　哥白尼

哥白尼的日心说沉重打击了教会的宇宙观，这是唯物主义和唯心主义斗争的伟大胜利。哥白尼是欧洲文艺复兴时期的一位巨人，他把毕生的精力都投入到天文学中，为后人留下了宝贵的遗产。

然而，由于哥白尼的日心说所获得的数据和托勒密体系的数据都不能与第谷的观测相吻合，因此日心说此时仍不具备优势。直到 1609 年，伽利略发明了天文望远镜，并以此发现了一些可以支持日心说的新天文现象后，日心说才开始引起人们的关注。更为重要的是，德国天文学家开普勒用了 10 多年的时间研究了丹麦天文学家第谷的行星观测记录，发现假设行星的运动是匀速圆周运动，那么计算所得的数据与观测数据不符。由此，他以椭圆轨道取代圆形轨道修正了日心说之后，日心说在与地心说的斗争中才取得了真正的胜利。

在科技发达的今天，我们都知道太阳并非宇宙的中心，它

只是太阳系的中心。太阳也只是浩瀚宇宙中一颗普通的恒星。日心说也只是一个学说，它只是较地心说而言相对合理。

行星的运动规律

从公元前3000年水星被苏美尔人发现以后，直至1783年天王星被证实存在，人类对太阳系中行星运动规律的研究已经从运动学过渡到动力学。由于研究行星的运动只能用观察、测量的方法，因此第谷的观测资料对于开普勒得出三大定律具有很重要的意义。开普勒认真研究了第谷的行星观测记录，并利用他卓越的数学知识，通过大量的计算，终于在10多年的时间内，得到了关于行星运动规律的开普勒三大定律。开普勒三大定律是一个整体，它对行星运动规律的描述是一个从定性到定量的过程，开普勒第一定律是其余两个定律的基础。但三个定律描述的内容又是各自独立的，并不重复。

开普勒发现行星运动规律后，人们开始了更深入的思考：为什么行星围绕太阳运动？

关于这个问题，伽利略、开普勒、笛卡儿都提出过自己的解释。牛顿时代的科学家胡克等人的认识更进一步，他们认为：行星绕太阳运动是因为受到了太阳对它的引力，甚至提出行星的轨道是圆的。牛顿在前人对惯性研究的基础上，开始思考“物体怎样才会不沿直线运动”这一问题。他的结论是：要改变物体的运动速度就需要有力的作用。这就是说，使行星沿圆或椭圆运动，需要指向圆心或椭圆焦点的力，这个力应该就是太阳对它的引力。于是，牛顿利用他的运动定律把行星的向心加速度与太阳对它的引力联系起来了。

不仅如此，牛顿还认为，这种引力存在于所有物体之间，从而描述出了普遍意义下的万有引力定律。

万有引力定律在天体问题上的成就不仅仅说明了行星绕太阳运动的原因，更重要的是人们还利用它发现了未知的新天体。

海王星的发现就是天文学家利用万有引力定律计算出来的，人们称其为“笔尖下发现的行星”。

海王星的轨道之外残存着太阳系形成初期遗留的物质，近 100 年来，人们在这里还发现了冥王星等几个较大的天体。但是，因为距离遥远，太阳的光芒无法照亮那里，在地球附近很难看出究竟。尽管如此，黑暗寒冷的太阳系边缘依然牵动着人们的心，探索工作从来没有停止过。

章末回顾

本章基本知识结构

- 平面运动
  - 曲线运动
    - 定义
    - 瞬时速度的方向：轨迹的切线方向
    - 物体做曲线运动的条件：合外力与速度不在一条直线上
  - 抛射体运动
    - 定义
    - 运动规律
      - 水平方向 — 匀速运动
      - 竖直方向 — 加速度为g的匀变速运动
    - 研究方法
  - 匀速圆周运动
    - 性质
    - 描述
      - 线速度
      - 角速度
        - （线速度、角速度）$v=\omega r$
      - 周期和频率 — $f=\dfrac{1}{T}$
    - 向心力
      - 来源
      - 表达式
        - $F_C=m\omega^2 r$
        - $F_C=m\dfrac{v^2}{r}$
    - 离心运动
  - 万有引力定律 — 表达式：$F=G\dfrac{m_1m_2}{r^2}$
    - 天体质量 — $M=\dfrac{gR^2}{G}$
    - 人造卫星
    - 宇宙速度
      - 第一宇宙速度 $7.9\ \mathrm{km\ s^{-1}}$
      - 第二宇宙速度 $11.2\ \mathrm{km\ s^{-1}}$
      - 第三宇宙速度 $16.7\ \mathrm{km\ s^{-1}}$
  - 行星运动及开普勒定律
    - 天体运动规律
    - 开普勒三大定律
      - 轨道定律
      - 面积定律
      - 周期定律

总练习六

基础练习

1. 某轰炸机在高空水平匀速飞行并进行投弹演习，飞行员在间隔相等的时间内连续投掷几颗炸弹。不考虑炸弹在空中运动所受的空气阻力，请你联系物理知识提出两个与炸弹运动有关的问题。(仅要求提出问题，每个问题尽量不超过 15 个字。例如，炸弹离开飞机后做平抛运动吗？)

   问题 1：________________

   问题 2：________________

2. 下列说法正确的是(　　)

   A. 匀速圆周运动是一种匀速运动

   B. 匀速圆周运动是一种匀变速运动

   C. 匀速圆周运动是一种变加速运动

   D. 物体做圆周运动时，其合外力垂直于速度方向

3. 下列说法正确的是(　　)

   A. 物体保持速率不变沿曲线运动，其加速度为 0

   B. 曲线运动一定是变速运动

   C. 变速运动一定是曲线运动

   D. 物体沿曲线运动一定有加速度，且一定是匀加速曲线运动

4. 下列现象中，为了避免发生离心运动的是(　　)

   A. 汽车过弯道时要减速

   B. 制作棉花糖

   C. 洗衣机甩干衣物

   D. 制作无缝钢管

5. 中国于 2011 年 9 月底在酒泉卫星发射中心发射空间目标飞行器“天宫一号”。“天宫一号”是中国为下一步建造空间站而研制的，重约 8.5 t，分为支援舱和实验舱两个舱。在实验舱做实验时，下列仪器不可以使用的是(　　)

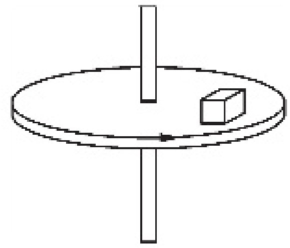
   A. 天平

   B. 弹簧握力计

   C. 温度计

   D. 秒表

6. 如图所示，物体与水平圆盘保持相对静止，并随圆盘一起做匀速圆周运动。下列说法正确的是（　　）



（第 6 题）

A. 物体受重力、支持力、静摩擦力和向心力的作用

B. 支持力提供物体做匀速圆周运动所需的向心力

C. 摩擦力的方向始终指向圆心

D. 若摩擦力突然消失，则物体将沿曲线飞离圆心

7. 物体受几个力作用做匀速直线运动，若突然撤去其中一个力，它不可能做（　　）

A. 匀速直线运动　　B. 匀加速直线运动

C. 匀减速直线运动　　D. 曲线运动

8. 做平抛运动的物体，每秒的速度增量（　　）

A. 大小相等，方向相同　　B. 大小不等，方向不同

C. 大小相等，方向不同　　D. 大小不等，方向相同

9. 发射人造卫星是将卫星以一定速度送入预定轨道，发射场一般选择在尽可能靠近赤道的地方。这样选址的优点是，在赤道附近（　　）

A. 地球的引力较大　　B. 地球自转的角速度较大

C. 地球自转的线速度较大　　D. 重力加速度较大

10. 某人以不变的速度向垂直于对岸的方向游去，游到中间，水流速度加大，则此人渡河所用时间比预定时间（　　）

A. 增加　　B. 减少　　C. 不变　　D. 无法确定

提高练习

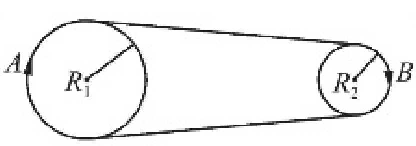
11. 如图所示的皮带传动装置，主动轮的半径与从动轮的半径之比 $R_1 : R_2 = 2 : 1$，A、B 分别是两轮边缘上的点，假设皮带不打滑，则下列说法正确的是（　　）

A. A、B 两点的线速度之比为 $v_A : v_B = 1 : 2$

B. A、B 两点的角速度之比为 $\omega_A : \omega_B = 2 : 1$

C. A、B 两点的加速度之比为 $a_A : a_B = 1 : 2$

D. A、B 两点的加速度之比为 $a_A : a_B = 2 : 1$



（第 11 题）

12. 如图所示，一辆质量为 m 的汽车，通过凸形路面的最高处时对路面的压力大小为 F_1，通过凹形路面的最低处时对路面的压力大小为 F_2，则（　　）

（第 12 题）

A. $F_1 > mg$　　B. $F_1 = mg$

C. $F_2 = mg$　　D. $F_2 > mg$

13. 将月球、地球同步卫星及静止在赤道上的物体三者进行比较，下列说法正确的是（　　）

A. 三者都只受万有引力的作用，万有引力提供向心力

B. 月球的向心加速度小于地球同步卫星的向心加速度

C. 地球同步卫星与静止在赤道上物体的角速度相同

D. 地球同步卫星相对地心的线速度与静止在赤道上的物体相对地心的线速度大小相等

14. 由于地球的自转，使得赤道上的物体绕地轴做匀速圆周运动。关于该物体，下列说法正确的是（　　）

A. 向心力等于地球对它的万有引力

B. 速度等于第一宇宙速度

C. 加速度等于重力加速度

D. 周期等于地球同步卫星运行的周期

15. 天文学家发现某恒星的一颗行星在圆轨道上绕其运动，并测出了轨道半径和运行周期。由此可推算出（　　）

A. 行星的质量　　B. 行星的半径

C. 恒星的质量　　D. 恒星的半径

16. 一根长 60 cm 的细绳，最多能承受 100 N 的拉力，用它吊起一质量为 4 kg 的物体，当物体摆动起来经过最低点时，绳子恰好被拉断。

（a）绳断时物体速度为多大？

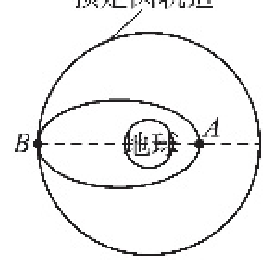
（b）若绳断处距离地面的高度为 0.8 m，求物体落地时的速度大小。（不计空气阻力，$g = 10\ \mathrm{m\,s^{-2}}$）

17. 开普勒第三定律指出：行星绕太阳运动的椭圆轨道的半长轴 R 的三次方与它的公转周期 T 的二次方成正比，即 $\dfrac{R^3}{T^2} = k$。

（a）将行星绕太阳的运动按圆周运动处理，请你推导出太阳系中该常量 k 的表达式。（引力常量为 G，太阳的质量为 $M_{太}$）

（b）开普勒定律不仅适用于太阳系，它对一切具有中心天体的引力系统（如地月系统）都成立。经测定：月地距离为 3.84×10^{8} m，月球绕地球运动的周期为 2.36×10^{6} s。试计算地球的质量 $M_{地}$。（$G = 6.67\times10^{-11}$ N m^2 kg^{-2}，结果保留 1 位有效数字）

18. 中国首次执行载人航天飞行任务的“神舟六号”飞船于 2005 年 10 月 12 日在酒泉卫星发射中心发射升空，由“长征二号 F 型”运载火箭将飞船送入近地点为 A、远地点为 B 的椭圆轨道上。近地点 A 距地面的高度为 h_1。实施变轨后，飞船进入预定圆轨道，如图所示。飞船在预定圆轨道上飞行 n 圈所用的时间为 t，之后返回。已知引力常量为 G，地球表面的重力加速度为 g，地球半径为 R，问：



（第 18 题）

（a）飞船在预定圆轨道上运动的周期为多大？

（b）预定圆轨道距地面的高度为多少？

（c）飞船在近地点 A 的加速度为多大？

19. 侦察卫星在通过地球两极上空的圆轨道上运行，它的运行轨道距地面高度为 h。已知地球的半径为 R，地球表面处的重力加速度为 g，地球的自转周期为 T。

（a）试求该卫星的运行速度。

（b）要使卫星在一天内将地面上赤道各处在日照条件下的情况全部拍下来，卫星在通过赤道上空时，卫星上的摄像机应拍摄地面上赤道圆周的弧长是多少？

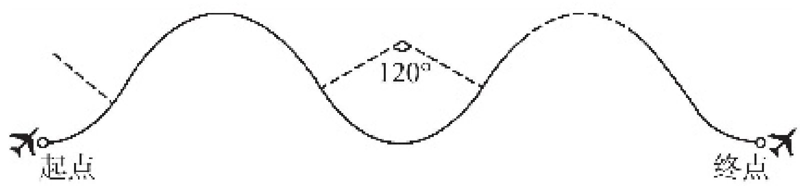
20. 据报道：中国航天员在俄罗斯训练时，曾经在 1.5 万米的高空连续飞了 10 个抛物线。中国小伙子虽然是第一次做这种实际飞行实验，但全程神情泰然自若，失重时都纷纷飘起来，还完成了穿、脱宇航服等操作。设飞机的运动轨迹是如图所示的一个抛物线接着一段 120° 的圆弧再接着一个抛物线；飞机的最大速度是 900 km h^{-1}，在圆弧段飞机的速率保持不变；被训航天员所能承受的最大视重量是 8 mg。问：

（a）在这 10 个连续的动作中，被训航天员处于完全失重状态的时间是多少？

（b）圆弧的最小半径是多少？

（c）完成这些动作的总时间至少是多少？（实际上，由于飞机在这期间有所调整和休息，所花的总时间远大于这个时间，约是 1 h）

（d）其间飞机的水平位移是多少？（抛物线部分左右对称，上升阶段和下降阶段时间相等，水平位移相等，加速度相同，飞机在抛物线的顶端时速度在水平方向。取 $g = 9.8\ \text{m s}^{-2}$）



（第 20 题）

第7章 功与能

本章提要

1. 功的定义及计算。
2. 动能和势能的定义和计算。
3. 功与能转换的关系——动能定理。
4. 机械能守恒定律的条件及应用。

学前储备

1. 知道力的合成与分解。
2. 知道运动学中位移的求解。
3. 知道牛顿运动定律。

第1节　功和功率

① 功

图 7.1.1　人提着水桶不动，没有对水桶做功

功的概念起源于早期的工业发展需要。当时的工程师们需要一个比较蒸汽机效能的办法。在实践中大家逐渐认识到，当燃烧同样多的燃料时，机械举起的重量与举起的高度的乘积可以用来衡量机器的效能，从而比较蒸汽机的优劣。当时，人们把物体的重量与其上升高度的乘积叫作功。到了 19 世纪 20 年代，法国科学家科里奥利（Coriolis，Gustave Gaspard de，1792—1843）扩展了这一基本思想，明确地把作用于物体上的力和受力点沿力的方向上的位移的乘积叫作“力的功”。

力和在力的方向上移动的位移，是做功的两个必要条件。从地面上提起水桶时，水桶在力的作用下，向上移动了一段位移，人对水桶做了功。如果手提着水桶站着不动（如图 7.1.1），虽然用了力，但是水桶没有发生位移，人只是费了力气，没有对水桶做功，这叫“劳而无功”。物理学中的功与日常生活中所说的功是不一样的。

在初中，我们学过功的计算表达式，用 F 表示作用在物体上的力，s 表示物体在力的方向上发生的位移，W 表示 F 对物体做的功，则有

$$W = Fs$$

图 7.1.2　拖地时，人对拖把所施加的力与拖把的位移不在同一条直线上

上述公式仅适用于 F 和 s 方向一致且 F 的大小恒定的情况。但在实际生活中，作用力的方向与物体运动的方向常常是不一致的（如图 7.1.2）。

为了计算这种情况下的功，我们可以把力进行分解（如图 7.1.3）：F_1 为水平方向的分力，其做功；F_2 为竖直方向的分力，其不做功。根据力的分解知识，

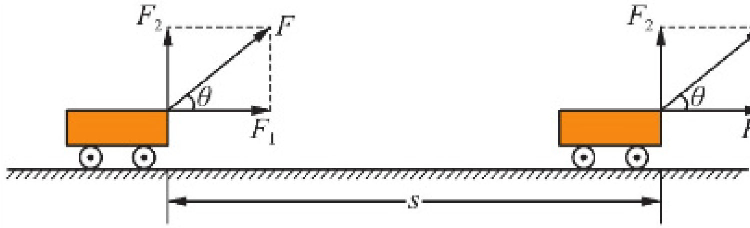


图 7.1.3

可知

$$F_1 = F\cos\theta$$

$$W = F_1 s = Fs\cos\theta$$

这是计算功的一般公式，它表明，**力对物体所做的功（work），等于力的大小、位移的大小、力与位移夹角的余弦这三者的乘积**，即

$$W = Fs\cos\theta$$

虽然力和位移都是矢量，但功却是标量。在国际单位制中，功的单位是焦耳（joule），简称焦，符号为 J。也就是

$$1\ \mathrm{J} = 1\ \mathrm{N} \times 1\ \mathrm{m} = 1\ \mathrm{N\,m}$$

由功的计算式可知，在力和位移的大小都一定时，功就由力和位移的夹角的余弦决定：

（1）当力与位移的夹角 $\theta = 0$ 时，$\cos\theta = 1$，$W = Fs$。

（2）当力与位移的夹角 $\theta = 90°$ 时，$\cos\theta = 0$，$W = 0$，表示力对物体不做功。

（3）当力与位移的夹角 $0 \leqslant \theta < 90°$ 时，$\cos\theta > 0$，$W > 0$，表示力对物体做正功，使物体的速度增加。

（4）当力与位移的夹角 $90° < \theta \leqslant 180°$ 时，$\cos\theta < 0$，$W < 0$，表示力对物体做负功，也可以说物体克服这个力做了功，使物体的速度减小。

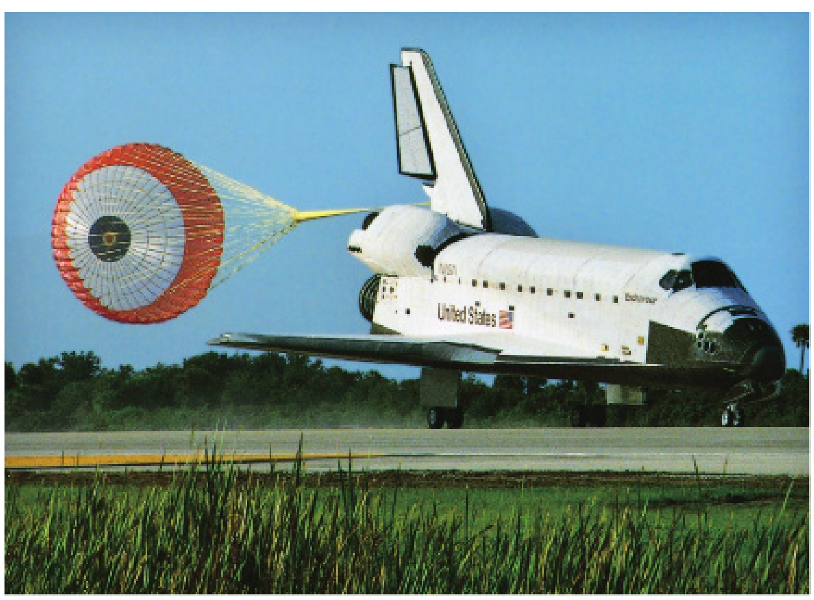


图 7.1.4　航天飞机通过减速伞的阻力使自己快速停下来

例如，航天飞机要在普通飞机的跑道上降落，就要打开尾部的减速伞（如图 7.1.4 所示），在这个过程中，减速伞对航天飞机的作用力的方

向与飞机位移的方向相反（或者说两者夹角成 180°），使航天飞机减速，减速伞的拉力对航天飞机做负功，也可以说航天飞机克服这个拉力做了功。

当物体在多个外力作用下运动时，需要分析哪些力做功，做正功还是做负功，哪些力不做功。所有外力对物体做的总功等于各个外力分别对物体做功的代数和，即

$$\begin{aligned} W_{总} &= W_1 + W_2 + W_3 + \cdots \\ &= F_1 s\cos\theta_1 + F_2 s\cos\theta_2 + F_3 s\cos\theta_3 + \cdots \end{aligned}$$

可以证明，某个物体在多个外力作用下运动时，所有外力对这个物体做的总功，等于这些外力的合力对该物体做的功，即

$$W_{总} = F_{合}\, s \cos\theta$$

例题 7 – 1 如图 7.1.5，一个质量 $m = 2$ kg 的物体，受到与水平方向成 37° 角斜向上方的拉力 $F_1 = 10$ N，在水平地面上移动的距离 $s = 2$ m。物体与地面间的滑动摩擦力 $F_2 = 4.2$ N。求外力对物体所做的总功。

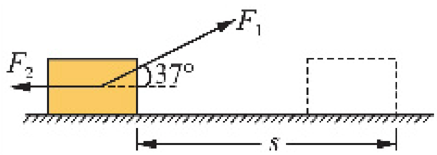


图 7.1.5

分析 对物体进行受力分析可知，物体受到重力、支持力、拉力和摩擦力四个力的作用，由于重力和支持力与位移方向垂直，不做功，因此只有拉力和摩擦力做功。我们可以先分别求出两个力做的功，再求总功；也可以先根据力的合成求出合外力，然后再求合外力做的功。

解法一 拉力 F_1 对物体所做的功为

$$\begin{aligned} W_1 &= F_1 s\cos 37° \\ &= 10\times2\times\cos 37°\ \text{J} \\ &\approx 16.0\ \text{J} \end{aligned}$$

摩擦力 F_2 对物体所做的功为

$$\begin{aligned} W_2 &= F_2 s\cos 180° \\ &= 4.2\times2\times\cos 180°\ \text{J} \\ &= -8.4\ \text{J} \end{aligned}$$

外力对物体所做的总功

$$
\begin{aligned}
W &= W_1 + W_2 \\
&= (16.0 - 8.4)\,\text{J} \\
&= 7.6\ \text{J}
\end{aligned}
$$

解法二　通过受力分析可知，物体受到的合外力水平向右，大小为

$$
\begin{aligned}
F_{合} &= F_1\cos 37^\circ - F_2 \\
&= (10\times\cos 37^\circ - 4.2)\,\text{N} \\
&\approx 3.8\ \text{N}
\end{aligned}
$$

所以

$$
\begin{aligned}
W_{总} &= F_{合}s \\
&= 3.8\times 2\ \text{J} \\
&= 7.6\ \text{J}
\end{aligned}
$$

② 功率

不论是人直接做功，还是利用牛、马或机器做功，人们不仅关注做功的多少，还十分关注做功的快慢。

我们在初中已经知道，物体做功的快慢用功率来表示。功 W 跟完成这些功所用时间 t 的比值叫作**功率（power）**，即

$$P=\frac{W}{t}$$

在国际单位制中，功率的单位是**瓦特（watt）**，简称瓦，符号是 W，1 W = 1 J s^{-1}。生活中常用的单位还有千瓦（kW），1 kW = 1 000 W。

人骑自行车的功率约为 200 W

高级跑车的功率约为 200 kW

动车组 CRH2 的最大功率约为 4 800 kW

图 7.1.6

功率是衡量机器性能的重要指标。图 7.1.6 给出了几种交通工具的功率。实际上，由 $P=\frac{W}{t}$ 计算出来的功率是这段时间内的**平均功率**。

在作用力的方向与物体位移的方向成 θ 角的情况下，$P=\frac{W}{t}=\frac{Fs}{t}\cos\theta$，若物体做匀速直线运动，$\frac{s}{t}=v$，则有

$$P = Fv\cos\theta$$

当作用力的方向与物体位移的方向一致时，上式可简化为

$$P = Fv$$

也就是说，功率等于力与物体运动速度的乘积。需要指出的是，这个公式里的速度是瞬时速度，这个公式对于物体做变速运动也是适用的，由这个公式计算出的功率指的是机器在某一速率时的**瞬时功率**。

图 7.1.7　汽车的手动换挡装置

当汽车、火车等交通工具的发动机输出功率一定时，牵引力和运动速度成反比，减小速度，牵引力增大；增大速度，牵引力减小。所以，汽车在上坡时，司机经常采用换挡（如图 7.1.7）的办法降低速度，以获得较大的牵引力。卡车载重时，由于需要较大的牵引力，因此行驶速度比空载时要小。

在汽车变速箱里有一组齿轮，齿轮有大小之分，用于传动的齿轮与不同的从动齿轮接触，会调配出不同的速度，其实换挡就是控制车速的变化，从而改变汽车的牵引力。生活中的山地自行车前后两个齿轮盘通过链条连接，就是一个很直观的变速器。

做一做

你能估计你登楼梯时的功率吗？登楼梯需要能量；当你克服身体所受的重力移动一段高度时，你就做了功。要计算你登楼梯的功率，需要测量哪些量？想一想，为了增大你上楼梯的功率，你应该怎么做？

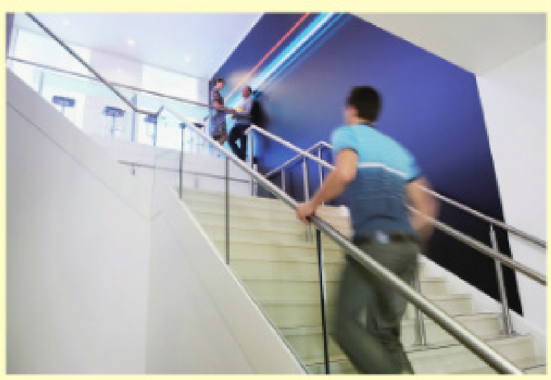


图 7.1.8

例题 7 – 2 一辆汽车的发动机的额定功率为 110 kW，该汽车在水平公路上以最大的速度匀速行驶时受到的阻力为 1 900 N，求该汽车匀速行驶的最大速度。

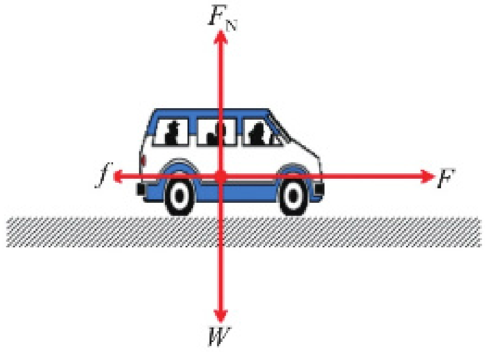


图 7.1.9

分析 每台发动机都有额定功率，额定功率是发动机正常工作时的最大功率。发动机正常工作时的实际输出功率可以小于额定功率，但不能经常超过额定功率。本题中汽车发动机的输出功率正好等于额定功率。

汽车在水平方向上受到两个力：牵引力 F 和阻力 f（如图 7.1.9）。汽车启动以后，速度逐渐增加，当汽车以最大速度匀速行驶时，$F = f$，这时汽车的输出功率 $P = Fv_m = fv_m$。

解 根据 $P = Fv_m = fv_m$，可得

$$\begin{aligned} v_m &= \frac{P}{f} \\ &= \frac{110 \times 10^3}{1\,900}\ \mathrm{m\,s^{-1}} \\ &\approx 57.9\ \mathrm{m\,s^{-1}} \\ &\approx 208\ \mathrm{km\,h^{-1}} \end{aligned}$$

在实际生活中，汽车行驶的速度一般都小于汽车的最大速度，所以，汽车行驶时的实际功率都小于它的额定功率。

实际上，汽车、飞机、轮船等交通工具匀速行驶时的最大速度受额定功率的限制，要提高最大速度必须提高发动机的额定功率。这就是高速列车（图 7.1.10）和汽车需要大功率发动机的原因。

图 7.1.10 中国的高速列车

练习 7-1

1. 关于功率，以下说法正确的是（　　）

   A. 根据 $P=\frac{W}{t}$ 可知，机器做功越多，其功率就越大

   B. 根据 $P=Fv$ 可知，汽车的牵引力一定与其速率成反比

   C. 根据 $P=\frac{W}{t}$ 可知，只要知道时间 t 内机器所做的功，就可以求得这段时间内任一时刻机器做功的功率

   D. 根据 $P=Fv$ 可知，发动机的功率一定时，交通工具的牵引力与运动速率成反比

2. 人骑自行车在平直的公路上以正常速度行驶，人和自行车受到阻力为车和人总重量的 0.02，试估算人骑车的功率。

3. 起重机将质量为 100 kg 的重物竖直向上移动了 2 m，在下列三种情况下，做功的力各有哪几个？每个力做了多少功？做的是正功还是负功？（不计阻力，取 $g=10\ \mathrm{m\ s^{-2}}$）

   （a）匀加速提升重物，加速度 $a=0.2\ \mathrm{m\ s^{-2}}$。

   （b）匀速提升重物。

   （c）匀减速下降重物，加速度 $a=0.2\ \mathrm{m\ s^{-2}}$。

第 2 节　恒力与变力的功

① 恒力的功

物体在一恒力 F 作用下，在力的方向上发生了一段位移 s，我们根据功的计算式 $W = Fs\cos\theta$ 可以求出该恒力所做的功。我们现在利用图象来研究这个过程。我们以物体所受的力为纵坐标，以位移为横坐标，作出力—位移图象（如图 7.2.1 所示）。

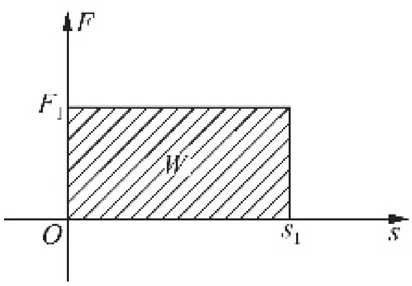


图 7.2.1　阴影部分的面积在数值上等于 F 所做的功

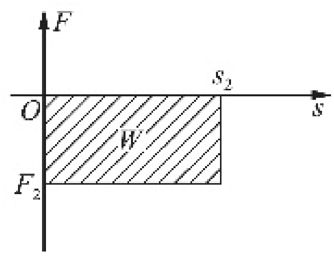


图 7.2.2　阴影面积在横轴的下方，表示阻力所做的功

类比 $v-t$ 图象可知，图 7.2.1 中阴影面积在数值上刚好等于 F 对物体所做的功。如果力的方向与位移方向相反，以位移方向为正方向，那么力 F 是负的，这时，表示做功的阴影面积在横轴的下方（如图 7.2.2）。

② 变力的功

在实际生活中，并不是所有做功的力都是恒力。汽车启动后汽车牵引力的大小是在变化的。如果作用在物体上的力是**变力（variable force）**，但力的方向仍与位移的方向一致，且在同一条直线上，此时的力—位移图象就不再是一条平行于横轴的直线，而是一条曲线（如图 7.2.3 b），这时如何求变力对物体做的功呢？

如图 7.2.3 a，物体在变力 F 的作用下，从 A

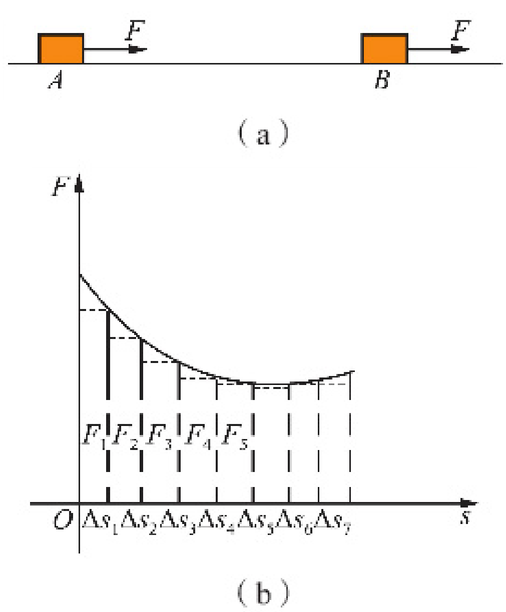


图 7.2.3　变力做功

处运动到 B 处。因为 F 是变化的，所以无法直接运用公式 $W = Fs\cos\theta$ 计算力在全过程中做的功。我们可以把线段 AB 平均分成很多小段 Δs_i，如图 7.2.3 b 中的 Δs_1、Δs_2、Δs_3、…在各段微小的位移上，力的变化很小，可以认为是恒定不变的，设它们分别为 F_1、F_2、F_3、…它们对物体做的功的总和为

$$W = F_1\Delta s_1 + F_2\Delta s_2 + \cdots + F_n\Delta s_n$$

即图 7.2.3 b 中各个小矩形的面积之和。如果每等份都很小，那么所有小矩形的面积之和就趋近于力—位移曲线跟横轴间包围的面积。

③ 弹簧弹力做的功

弹簧中的弹力随着形变量的变化而变化。如图 7.2.4，将弹簧的一端固定，另一端施以水平拉力 F，使弹簧在弹性限度范围内缓慢伸长 x。根据胡克定律可知，弹簧上的拉力 $F = kx$，其中 k 是弹簧的劲度系数，对于同一根弹簧来说是不变的。x 为弹簧的形变量，作出的 F-x 图象如图 7.2.5 所示。可得

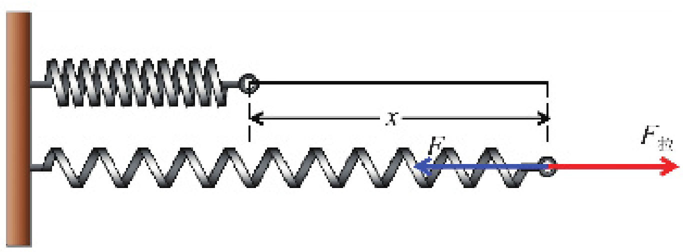


图 7.2.4

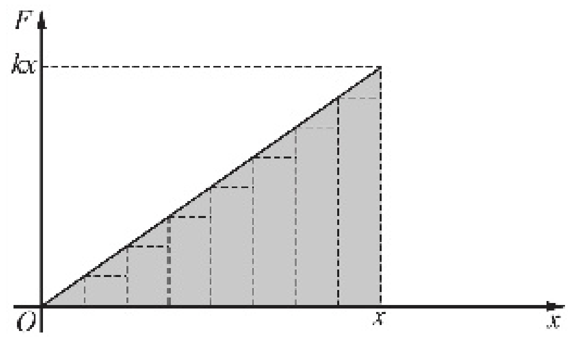


图 7.2.5

图 7.2.5 中阴影部分的面积即为外力克服弹力所做的功，根据几何关系有

$$W = \frac{1}{2} \cdot kx \cdot x = \frac{1}{2}kx^2$$

可见，**外力对弹簧所做的功等于弹簧的劲度系数与弹簧形变量平方的乘积的一半**。

如果弹簧被压缩了 x，上式仍然可以表示外力对弹簧所做的功，这时公式中的 x 为弹簧的压缩量。

蹦极运动（如图 7.2.6）中的弹性绳的弹力与形变量成非线性关系，所以不能应用弹簧的做功公式来计算。

图 7.2.6　蹦极运动

练习 7-2

1. 如图 7.2.7 所示，某力 $F = 10$ N 作用于半径 $R = 1$ m 的转盘的边缘上。力 F 的大小保持不变，但方向始终保持与作用点的切线方向一致，则转动一周这个力 F 做的总功应为（　　）

   A. 0 J　　B. 20π J

   C. 10 J　　D. 20 J

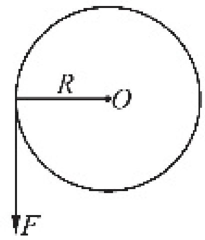


图 7.2.7

2. 如图 7.2.8 所示，用铁锤将一枚铁钉击入木块中，设木块对铁钉的阻力与铁钉进入木块内的深度成正比。在铁锤第一次敲击时，能把铁钉击入木块内 1 cm。问：第二次敲击时，能击入多少深度？（设铁锤每次敲击所做的功相等）

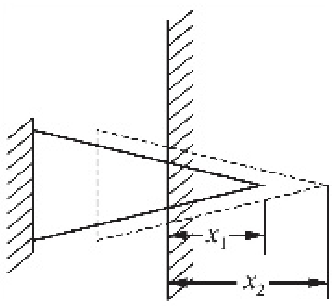


图 7.2.8

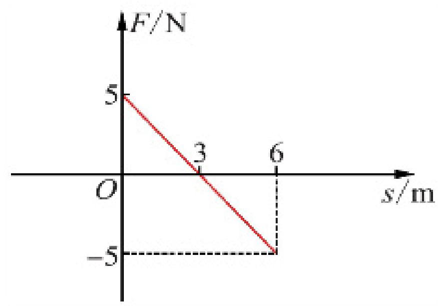


图 7.2.9

3. 图 7.2.9 是力 F 随位移变化的图象。该力在 0 ～ 6 m 内做的功是多少？

4. 两根相同的弹簧 A 及 B，A 的劲度系数 k_A 比 B 的劲度系数 k_B 大。问：下列两种情况下，哪一根弹簧需做较大的功？

   （a）使两根弹簧伸长相等的长度。

   （b）使用相等的力拉伸两根弹簧。

5. 有一根弹簧，一端固定，另一端施以一水平拉力 F，使它在弹性限度内伸长 0.2 m。设弹簧的劲度系数为 100 N m^{-1}，求拉力 F 所做的功。

第 3 节　动能

① 功和能

在物理学中，功和能有着密切的联系。一个物体能够做功，我们就说这个物体具有能量。流动的河水能够推动水轮机做功，具有能量；内燃机里的高温高压气体能推动活塞做功，也具有能量。本节将从做功的角度来研究能量。

② 动能

图 7.3.1　利用水流驱动水车

图 7.3.2　海边风车发电

因为运动的物体可以做功，所以物体因为运动而具有某种能量。**物体由于运动而具有的能，叫作动能**。海风、流动的河水、行驶的汽车等都具有动能。

人类利用动能已经有很长的历史了，例如，利用河水的动能来驱动水车（如图 7.3.1），利用风的动能驱动风力发电机发电（如图 7.3.2）。

微风能驱动风车转动；飓风能掀翻汽车，摧毁房屋。物体的动能跟哪些因素有关？

在物理学中，物体的动能表示为

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

图 7.3.3　陨石坠落砸出巨大的陨石坑

由上式可知，物体的质量越大，运动的速度越大，动能就越大。从太空飞向地球的陨石质量和速度都很大，所以陨石具有很大的动能，能在地面上砸出很大的陨石坑(如图 7.3.3)。

动能是标量。它的单位与功相同，在国际单位制中，动能的单位也是焦耳 (J)。

例题 7 – 3　一辆载重 50 t 的货车在高速公路上以 100 km h^{-1} 的速度行驶（如图 7.3.4），求其具有的动能。

图 7.3.4

解　因为

$$m = 50\ 000\ \text{kg}$$

$$v=\frac{100}{3.6}\ \text{m s}^{-1} \approx 27.8\ \text{m s}^{-1}$$

根据动能的表达式，得

$$\begin{aligned} E_k &= \frac{1}{2}mv^2 \\ &= \frac{1}{2} \times 50\ 000 \times 27.8^2\ \text{J} \\ &\approx 1.93 \times 10^7\ \text{J} \end{aligned}$$

因为货车质量大，高速行驶时具有很大的动能，所以发生交通事故时危害较大，因此严禁货车超载、超速行驶，而且高速公路上对货车限定的最高时速也低于普通小汽车。

③ 动能定理

功和能量有着密切的联系，我们可以根据牛顿第二定律和匀变速运动的规律，推导出外力做功与物体动能变化之间的关系。

如图 7.3.5，设一个物体放在光滑的平面上，质量为 m，初速度为 v_1，在与运动方向相同的合外力 F 的作用下发生一段位移 s，速度增加到 v_2。

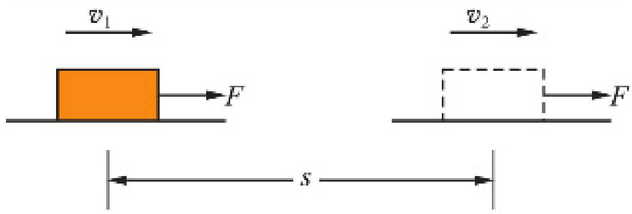


图 7.3.5

根据牛顿第二定律

$$F = ma$$

和匀变速运动的规律

$$v_2^2 - v_1^2 = 2as$$

可得

$$Fs = \frac{1}{2}mv_2^2 - \frac{1}{2}mv_1^2$$

用 W 表示合外力 F 在这一过程中所做的功，用 E_{k1} 表示物体的初动能 $\frac{1}{2}mv_1^2$，用 E_{k2} 表示物体的末动能 $\frac{1}{2}mv_2^2$，则有

$$\begin{aligned} W &= E_{k2} - E_{k1} \\ &= \frac{1}{2}mv_2^2 - \frac{1}{2}mv_1^2 \end{aligned}$$

上式表明，**合外力对物体所做的功等于物体动能的增量**。**这个结论叫动能定理（theorem of kinetic energy）**。从上式中可以看出，当合外力做正功时，物体的动能增大；合外力做负功时，物体的动能减小。例如，在汽车启动时，发动机的牵引力对汽车做正功，汽车的动能增大；刹车时，阻力对汽车做负功，汽车的动能减小。可见，我们可以用外力做功的多少来度量物体动能的改变量。

演示 7-1

验证动能定理

我们可以通过图 7.3.6 的装置来验证动能定理。把长木板的一端垫高少许，用以平衡摩擦力，这样拉动小车做功的力只有绳子的拉力。通过打点计时器可以测出小车的速度，两个计时点之间的距离就是拉力作用下小车发生的位移。当小车的质量比钩码大很多时，可以近似认为绳子的拉力等于钩码所受的重力。

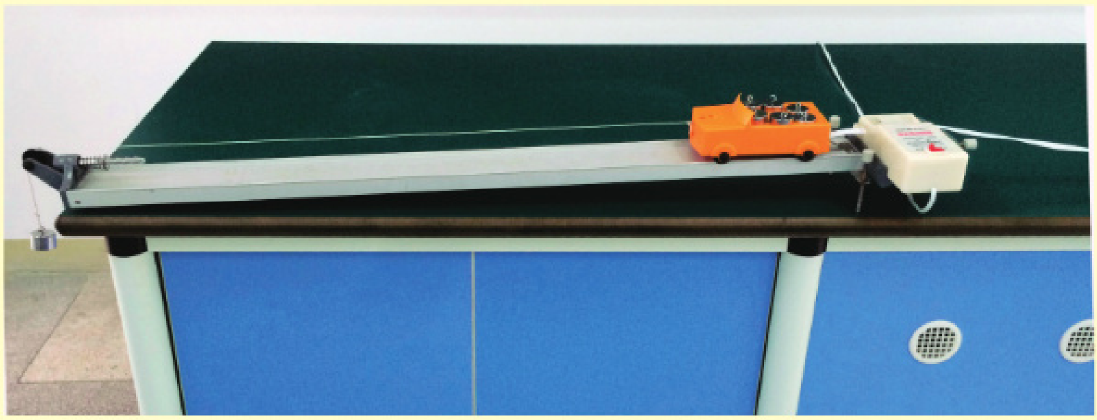


图 7.3.6

以下是两个验证动能定理的方案：

方案一（直接验证）：选择纸带上的两个点，测量不同位置时的速度，先计算拉力对物体做的功与物体动能的改变量，再比较两者的大小关系。

方案二（用图象验证）：根据 $W=\frac{1}{2}mv_2^2-\frac{1}{2}mv_1^2$，先用实验数据作出 W-v^2 图象，再根据图象的特点来验证动能定理。

例题 7－4 一架质量 $m = 5.0\times10^3$ kg 的喷气式飞机，起飞过程中从静止开始滑行的路程 $s = 5.0\times10^2$ m 时，达到起飞速度 $v = 60$ m s^{-1}。在此过程中飞机受到的平均阻力是飞机重量的 0.02，求飞机受到的牵引力。（取 $g = 10$ m s^{-2}）

图 7.3.7　飞机在跑道上滑行

分析 飞机滑行过程中牵引力与阻力的合力对飞机做功。本题已知飞机滑行过程的始末速度，因此可以知道它在滑行过程中增加的动能，故可以用动能定理求出合力做的功，再求出牵引力。

> 飞机滑行时除了地面阻力外，还受到空气阻力，后者随速度的增加而增加。本题中“平均阻力是飞机重量的 0.02”只是一种粗略的估算。

解 飞机起飞过程中，飞机的初动能 $E_{k1} = 0$，末动能 $E_{k2}=\dfrac{1}{2}mv^2$，飞机牵引力做正功 $W_1 = Fs$，阻力做负功 $W_2 = -F's$，其中阻力 $F' = 0.02\ mg$。根据动能定理 $W = E_{k2} - E_{k1}$，于是有

$$Fs-F's=\frac{1}{2}mv^2-0$$

代入数据后解得

$$\begin{aligned}F&=\frac{mv^2}{2s}+0.02mg\\&=\left(\frac{5.0\times10^3\times60^2}{2\times5.0\times10^2}+0.02\times5.0\times10^3\times10\right)\text{N}\\&=1.9\times10^4\ \text{N}\end{aligned}$$

故飞机所受的牵引力是 1.9×10^4 N。

本题也可以用牛顿运动定律来求解，但从这个例题可以看出，动能定理不涉及物体运动过程的加速度和时间，因此用动能定理处理问题常常比较方便。

在运用动能定理时还应该注意到，力对物体做的功可正可负，做正功时物体的动能增加，做负功时物体的动能减小。

拓展阅读

风力发电的原理

风力发电的原理，是利用风力带动风车叶片旋转，再通过增速机将旋转的速度提升，来促使发电机发电(如图 7.3.8)。依据目前的风车技术，大约是 3 m s^{-1} 的微风速度，便可以开始发电。风力发电没有燃料问题，也不会产生辐射或空气污染，因此风力发电正在世界上形成一股热潮。

图 7.3.8 风力发电

小型风力发电系统效率很高，但它不是只由一个发电机头组成的，而是一个有一定科技含量的小系统：风力发电机＋充电器＋数字逆变器。风力发电机由机头、转体、尾翼、叶片组成。风力发电机的每一部分都很重要，各部分的功能为：叶片用来接受风力并通过机头转为电能；尾翼使叶片始终对着来风的方向从而获得最大的风能；转体能使机头灵活地转动以实现尾翼调整方向的功能；机头的转子是永磁体，定子绕组切割磁感应线产生电能。

风力发电机因风量不稳定，故其输出的是 13 ~ 25 V 变化的交流电，需经充电器整流，再对蓄电瓶充电，使风力发电机产生的电能变成化学能。然后用有保护电路的逆变电源，把电瓶里的化学能转变成交流 220 V 的市电，才能保证稳定使用。

练习 7-3

1. 改变汽车的质量和速度，都可以使汽车的动能发生改变。下列几种情形下，汽车的动能各是原来的多少倍？

   (a) 质量不变，速度增大到原来的 2 倍。

   (b) 速度不变，质量增大到原来的 2 倍。

   (c) 质量减半，速度增大到原来的 4 倍。

   (d) 速度减半，质量增大到原来的 4 倍。

2. 把一辆汽车的速度从 10 km h^{-1} 加速到 20 km h^{-1}，或从 50 km h^{-1} 加速到 60 km h^{-1}，哪种情况做的功比较多？通过计算加以说明。

3. 质量为 20 kg 的小车在光滑的水平路面上，行进了 2.5 m，速度从 10 m s^{-1} 增大到 12 m s^{-1}。求小车所受的水平推力。

4. 将质量 $m = 2$ kg 的一块石头从离地面 $H = 2$ m 的高处由静止开始释放（如图 7.3.9），石头落入泥潭并陷入泥中 $h = 5$ cm 深处，不计空气阻力，求泥对石头的平均阻力。（取 $g = 10$ m s^{-2}）

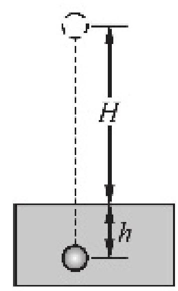


图 7.3.9

第 4 节　势能

① 重力势能


图 7.4.1　打桩机在打桩

不仅运动的物体具有能量，被举高的物体或发生了弹性形变的物体也具有能量。

如图 7.4.1，打桩机的重锤被钢丝绳拉到顶端，然后让其从顶端下落，从而把木桩或钢铁构件打进地基里。大坝上游的蓄水从高处落下，推动水轮机转动。这些例子都表明，物体一旦处在一定的高度，就具有一定的能量。当它从所处的高度降落时，这些能量就被释放出来。我们把物体处于一定的高度而具有的能量叫作**重力势能**(**gravitational potential energy**)。

做一做

影响小球势能大小的因素有哪些?

如图 7.4.2，准备两个大小相同的小球，一个钢球，一个木球，再盛一盆细沙。

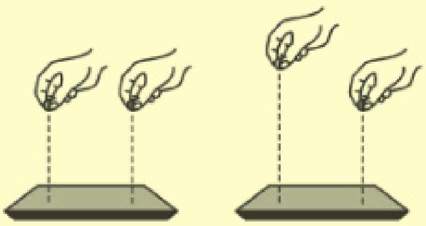

（a）　（b）

图 7.4.2

在沙盆上方同一高度释放这两个小球（如图 7.4.2 a)，钢球的质量大，在沙中陷得较深些。

让钢球分别从不同的高度落下（如图 7.4.2 b)，钢球释放的位置越高，在沙中陷得越深。

由以上实验可以看出，重力势能的大小与物体的质量和所处的高度有关。物体的质量越大，所处的高度越高，重力势能就越大。在物理学中，把物体的重力势能表示为

$$E_p = mgh$$

重力势能是标量。在国际单位制中的单位也是焦耳 (J)。

图 7.4.3　山顶上的巨石

对于同一个物体，重力势能的大小由物体所在的高度决定，而这个高度的参考面的选取是任意的。为了确定物体的高度，我们必须选择某个水平面的高度为零，物体在这个高度的重力势能也为零，这样的水平面叫作零势能面。如图 7.4.3 所示，当我们选择山顶的地面为零势能面时，巨石的重力势能为零；当我们选择山脚地面为零势能面时，巨石的重力势能就很大。

必须指出的是，无论我们怎样选择零势能面，巨石在山顶和山底之间的势能差总是一定的。也就是说，物体在两处的势能差与零势能面的选取无关，只与这两处的高度差有关。

虽然重力势能的零势能面的选择是任意的，但实际中应视研究问题的方便而定，通常选择水平地面作为零势能面。在水平地面以下的高度为负值，重力势能也为负值，表示物体在该位置所具有的重力势能比在水平地面上要低。

由于重力势能的大小与零势能面的选取有关，而重力势能差与零势能面的选取无关，仅与物体下落的高度有关，因此人们更关注重力势能差。例如，建筑工地上的打桩机就是利用重锤的重力势能差把桩打入地下；修筑高高的堤坝提高水位，就是利用水的重力势能差来发电（如图 7.4.4）。

图 7.4.4　修建大坝蓄水，增加水的势能

② 重力做功与重力势能的改变

力做功的过程就是能量转化的过程。重力做功与重力势能之间有什么关系呢？

我们通过一个实例来分析这个问题。

设质量为 m 的小球，从离地为 h_1 的 A 处下落到离地为 h_2 的 B 处（如图 7.4.5）。在这一个过程中，重力对小球做的功

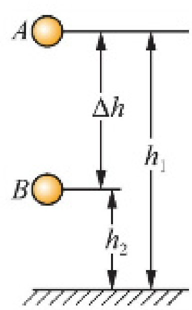


图 7.4.5

$$W = mg(h_1 - h_2) = mgh_1 - mgh_2$$

我们选择地面为零势能面，则物体在 A 处的重力势能 $E_{pA} = mgh_1$，在 B 处的重力势能 $E_{pB} = mgh_2$，所以

$$W = E_{pA} - E_{pB} = -\Delta E_p$$

物体从高处下落的过程中，重力做正功，$W > 0$，$E_{pA} > E_{pB}$，重力势能减少；物体被举高的过程中，重力做负功，$W < 0$，$E_{pA} < E_{pB}$，重力势能增加。重力势能的改变是通过重力做功来实现的，重力对物体做了多少功，重力势能就下降了多少。物体克服重力做了多少功，物体就增加了多少重力势能。

探究 7-1

重力做功与物体运动的路径有没有关系？

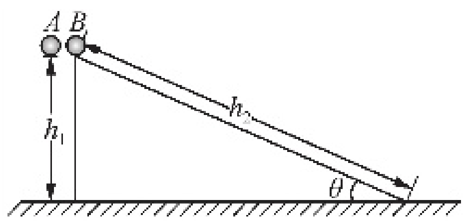


图 7.4.6

如图 7.4.6，同一个物体分别通过两种方式从斜面顶端运动到地面：一种方式是自由下落，另一种方式是沿斜面滑下。这两种方式中，重力所做的功相同吗？

自由下落：　$W_A = mgh_1$

沿斜面滑下：$W_B = mg\sin\theta \cdot h_2$

$\qquad\qquad\quad = mgh_1$

可见，重力所做的功只跟物体下落的初末位置的高度差有关，与物体运动的路径无关。也就是说，只要物体下落的高度差确定了，不论物体沿什么路径从起点到终点，重力所做的功都是相同的，都是等于物体重力势能的变化（如图 7.4.7）。

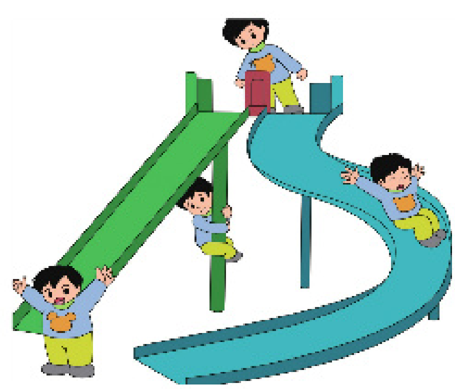


图 7.4.7　重力做功与路径无关

③ 势能与系统

势能是系统所共有的。重力势能与重力做功密切相关，而重力是物体与地球之间的相互作用力。也就是说，若没有地球吸引，就谈不上重力。所以，严格地说，重力势能是地球与物体所组成的“系统”所共有的，而不是物体单独拥有的。虽然我们在表述时，往往会说物体的重力势能是多少，但这种表述是不严谨的。

④ 弹性势能

在射箭比赛中，运动员的手一松开，拉满弦的弯弓在恢复原状时就把箭发射出去（如图 7.4.8）。可见，弹性形变的物体在恢复原状的过程中能够做功，说明它具有能量。在物理学中，把物体因为发生弹性形变而具有的能叫作**弹性势能（elastic potential energy）**。

图 7.4.8　拉满弦的弓存储了弹性势能

弹簧在被拉伸或压缩时，弹簧中就存储了弹性势能；弹簧在恢复原状的过程中，储存的弹性势能释放出来，它就对外做功。经验告诉我们，弹性形变越大，在恢复原状时它对外做的功就越多，具有的弹性势能也越大。

在本章第 2 节中，我们已经知道，一根形变量为 x 的弹簧回到原长，弹簧中的弹力做功为

$$W=\frac{1}{2}kx^2$$

即形变量为 x 时，弹簧的弹性势能

$$E_p=\frac{1}{2}kx^2$$

用文字表述为：**弹簧的弹性势能等于弹簧的劲度系数与弹簧形变量平方的乘积的一半**。

探究 7-2

除了重力势能和弹性势能，还有其他形式的势能。任何形式的势能都是物体系统由于物体之间或者物体内各部分之间存在相互作用（力）而具有的能，是由各物体之间的相对位置决定的。例如，分子之间由于存在相互作用而具有势能，叫作分子势能；电荷之间由于存在相互作用而具有势能，叫作电势能。分子势能或电势能分别属于分子或电荷组成的系统，而不是一个分子或一个电荷单独拥有的。

想一想

月球上的物体是否也有“重力势能”？

练习 7-4

1. 沿着高度相同、坡度不同、粗糙程度也不相同的斜面将同一个物体分别从底端拉到顶端，下列说法正确的是（　　）
   A. 沿坡度小的斜面运动时，物体克服重力做功多
   B. 沿坡度大、粗糙程度大的斜面运动时，物体克服重力做功多
   C. 沿坡度小、粗糙程度大的斜面运动时，物体克服重力做功多
   D. 不管沿怎样的斜面运动，物体克服重力做功相同
2. 如图 7.4.9 所示，小明玩蹦蹦杆，在小明将蹦蹦杆中的弹簧向下压缩的过程中，小明的重力势能、弹簧的弹性势能的变化是（　　）
   A. 重力势能减小，弹性势能增大
   B. 重力势能增大，弹性势能减小

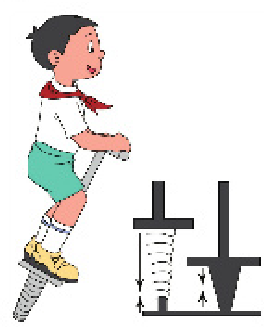


图 7.4.9

C. 重力势能减小，弹性势能减小

D. 重力势能不变，弹性势能增大

3. 如图 7.4.10 所示，质量为 0.5 kg 的小球，从桌面以上高 $h_1 = 1.2$ m 的 A 点下落到地面的 B 点，桌面高 $h_2 = 0.8$ m。

（a）在下面表格的空白处按要求填入数据。

所选择的参考面	小球在 A 点的重力势能	小球在 B 点的重力势能	整个下落过程中小球重力做的功	整个下落过程中小球重力势能的变化量
桌面				
地面				

（b）若小球下落时有空气阻力，则表格中的数据是否应该改变？

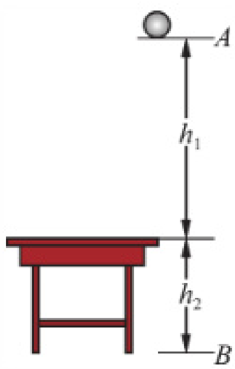


图 7.4.10

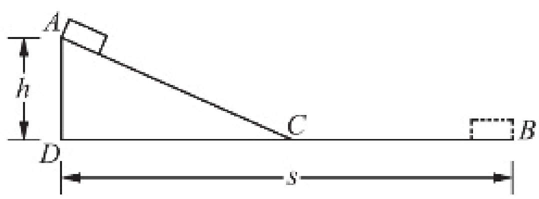


图 7.4.11

4. 质量是 100 g 的小球从 1.8 m 的高处落到水平地面上，又弹回到 1.25 m 的高处。整个过程中重力对小球所做的功是多少？小球的重力势能变化了多少？

5. 如图 7.4.11 所示，物体从高为 h 的斜面体的顶端 A 由静止开始滑下，滑到水平面上的 B 点静止，A 到 B 的水平距离为 s，求物体与接触面间的动摩擦系数。（已知斜面体和水平面由同种材料制成）

第 5 节　机械能守恒定律

① 机械能

我们知道，物体可以具有动能和势能，我们把物体的动能和势能之和称为**机械能**（**mechanical energy**），即

$$E = E_p + E_k$$

动能和势能之间是可以相互转化的。如图 7.5.1，当人骑自行车到下坡路时，不用力蹬车，自行车也会越来越快，这是因为在下坡过程中，重力势能转化为动能；若骑自行车以一定的速度冲上斜坡时，不用力蹬车，则自行车的速度会越来越小，这是因为自行车的部分动能转化成了势能，所以速度减小。

图 7.5.1　自行车下坡时速度越来越大

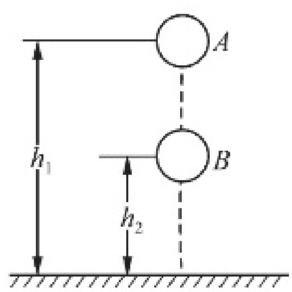


图 7.5.2

② 机械能守恒定律

如图 7.5.2 所示，重物的质量为 m，当重物下落到离地高度为 h_1 的 A 点时的速度为 v_1，下落到离地高度为 h_2 的 B 点时的速度为 v_2。根据本章第 3 节所学的动能定理可知，重物从 A 点运动到 B 点，重力做正功，重物的动能增加，有

$$W_{重}=\frac{1}{2}mv_2^2-\frac{1}{2}mv_1^2$$

根据重力做功与重力势能的关系，有

$$W_{重}= mgh_1 - mgh_2$$

这个式子表明重力对小球做的功等于小球下落过程中重力势能的减少量。联立以上两式，

可得

$$mgh_1-mgh_2=\frac{1}{2}mv_2^2-\frac{1}{2}mv_1^2$$

即在小球自由下落的过程中，重力势能的减少量正好等于动能的增加量，说明重力做了多少功，就有多少重力势能转化为动能。把上式移项后得

$$mgh_1+\frac{1}{2}mv_1^2=mgh_2+\frac{1}{2}mv_2^2$$

即

$$E_{p1}+E_{k1}=E_{p2}+E_{k2}$$

上式表明，物体在自由下落运动中，只受重力作用，物体的机械能保持不变。也就是说，物体的动能与重力势能可以相互转化，但其总量是不随时间变化的，或者说是守恒的。

同样可以证明，在只有弹力做功的物体系统内，物体的动能与弹性势能可以相互转化，总的机械能也保持不变。

大量的实验和研究结果都表明，**在只有重力或弹力做功的物体系统内，动能与势能可以相互转化，机械能的总量保持不变**。这个结论叫作**机械能守恒定律**（**law of conservation of mechanical energy**）。

机械能守恒定律是力学中的一条重要定律，是普遍的能量守恒定律的一种特殊情况。

演示 7-2

利用自由落体验证机械能守恒定律

我们用铁架台、打点计时器、纸带、重物、夹子等器材来验证机械能守恒定律，具体步骤为：

1. 按图 7.5.3 组装好实验器材。

2. 用手提着纸带的末端，让重物靠近打点计时器，接通电源，松开纸带，让重物自由下落，使打点计时器在纸带上打下一系列清晰的点。

3. 在忽略空气阻力和纸带摩擦力的情况下，重物可以看作自由落体运动，只有重力做功，重物下落的高度可以从纸带上测量，重物的速度也可以利用纸带求出。

4. 自己设计一个表格记录数据，分别记录各点

图 7.5.3　机械能守恒定律的验证

的速度与间距。

5. 比较一下在打各个点的时候，重物的动能与重力势能的总和是否保持不变。本装置还可以验证动能定理，想一想，怎么做？

例题 7－5　荡秋千是一种常见的休闲运动（如图 7.5.4），若秋千钢管长度为 2.0 m，荡到最高点时，钢管与竖直方向成 60° 角，求荡到最低点时秋千板的速度。（忽略空气阻力和摩擦力，取 $g = 9.8\ \mathrm{m\ s^{-2}}$）

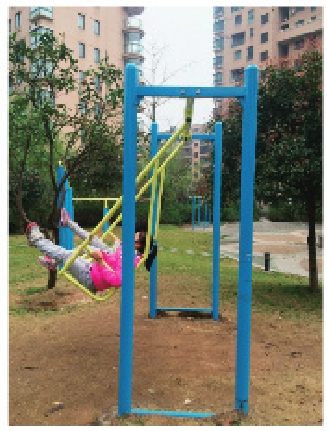


图 7.5.4

分析　由于人和秋千板组成的系统所受的作用力是变力，难以直接用牛顿第二定律和运动学公式来求解。

在秋千运动的过程中，由于忽略空气阻力，系统受到重力、钢管的拉力作用，钢管拉力始终与运动方向垂直，不做功，实际上只有重力做功，所以可以用机械能守恒定律来求解。

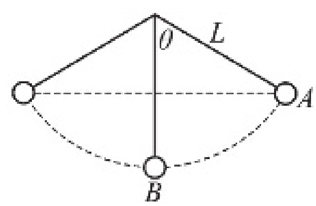


图 7.5.5

解　如图 7.5.5 所示，选择秋千板最低位置时所处的水平面为零势能面。秋千板最高点 A 位置为初始状态，此时其动能为零，重力势能 $E_{p1} = mgL(1 - \cos\theta)$。在最低点 B 处为末状态，此时其重力势能为零，动能 $E_{k2}=\frac{1}{2}mv^2$。根据机械能守恒定律，有

$$E_{p1} + E_{k1} = E_{p2} + E_{k2}$$

$$mgL(1-\cos\theta)=\frac{1}{2}mv^2$$

所以

$$\begin{aligned} v &= \sqrt{2gL(1-\cos\theta)} \\ &= \sqrt{2 \times 9.8 \times 2.0 \times (1-\cos 60^\circ)}\ \mathrm{m\ s^{-1}} \\ &\approx 4.4\ \mathrm{m\ s^{-1}} \end{aligned}$$

③ 能量转化与守恒定律

初中所学过的力、热、光、电、磁等各种现象，都与能量有着密切联系。19 世纪 40 年代前后，科学界已经形成一种思想氛围，即用联系的观点去观察自然。不仅机械能之间可以转化，电现象与磁现象也可以转化，热和电也可以转化……这预示着，把分立的环节连成一体的时刻已经到来，也就是到了能量转化与守恒定律形成的时候了。在这种情况下，不同国家、不同领域的十几位科学家，以不同的方式各自独立地提出：**能量既不会凭空产生，也不会凭空消失，它只能从一种形式转化为另一种形式，从一个物体转移到另一个物体，在转化或转移的过程中，能量的总量保持不变。**这个规律叫作**能量守恒定律（law of conservation of energy）**。

能源是人类社会活动的物质基础，自工业革命以来，煤和石油成为人类的主要能源。然而煤炭和石油资源是有限的，以今天的开采和消耗速度，地球上的石油将在百年内耗尽。能源短缺已经成为关系到人类社会能否持续发展的大问题。

既然能量是守恒的，不可能消失，为什么我们还要节约能源？因为各种能源被人们利用后最终都转化为环境的内能，我们无法把这些内能收集起来重新利用。这种现象叫作能量的耗散。能量的耗散表明，在能源的利用过程中，虽然能量在数量上没有减少，但在可利用的品质上降低了，从便于利用变成不便于利用了。这是能源危机的深层次的含义，也是“自然界的能量虽然守恒，但还是要节约能源”的根本原因。

探究 7-3

图 7.5.6　高速公路旁的避险车道

在高速公路下坡处，为了防止汽车刹车系统失灵造成交通事故，在下坡路旁边常修有避险车道（如图 7.5.6）。假设避险车道可以简化为一个倾角为 30° 的斜面，在忽略斜坡摩擦力的情况下，汽车关闭发动机，其速度与冲上斜坡的长度有何关系？如果高速公路的最高限速为 $100\ \text{km h}^{-1}$，那么斜坡需要修多长？同学们也可一起讨论，斜坡的长度除了与速度有关外，与不同车辆的质量有没有关系？（实际的避险车道还依靠了斜面上的碎石来使汽车减速并停下来，这里我们作了简化处理）

练习 7-5

1. 从 h 高处以初速度 v_0 竖直向上抛出一个质量为 m 的小球，如图 7.5.7 所示，若取抛出处物体的重力势能为 0，不计空气阻力，则物体着地时的机械能为（　　）

   A. mgh　　　　B. $mgh+\frac{1}{2}mv_0^2$

   C. $\frac{1}{2}mv_0^2$　　　　D. $\frac{1}{2}mv_0^2-mgh$

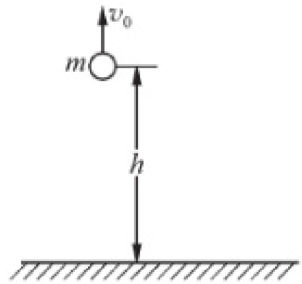


图 7.5.7

2. 摆动的秋千摆动幅度会越来越小，下列说法正确的是（　　）

   A. 秋千的机械能守恒

   B. 秋千减少的机械能消失了

   C. 秋千只有动能和重力势能的相互转化

   D. 秋千减少的机械能转化为内能，但总能量守恒

3. 如图 7.5.8 所示，光滑弧形轨道末端水平、离地面的高度为 H，将钢球从轨道上高度 h 处静止释放，钢球的落点距轨道末端的水平距离为 s。当 s^2 与 h 满足什么关系时（用 H、h 表示），便可证明小球下滑运动中机械能守恒？

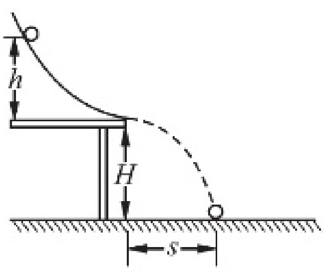
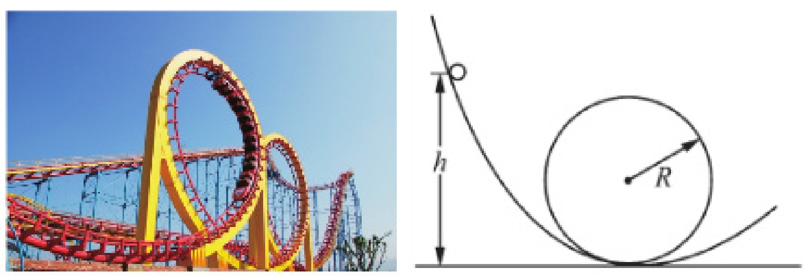


图 7.5.8



（a）　　（b）

图 7.5.9

4. 如图 7.5.9 a 所示，游乐场的过山车可以底朝上在圆轨道上运行，游客却不会掉下来。其模型如图 7.5.9 b 所示，弧形轨道的下端与竖直圆轨道相接，使小球从弧形轨道上端滚下，小球进入圆轨道下端后沿圆轨道运行。实验发现，只要 h 值大于一定值，小球就可以顺利通过圆轨道的最高点。已知圆轨道半径为 R，试求 h 的这一定值。（不考虑阻力）

第 6 节 质量与能量

1 质量与速度

从地面上物体的运动到天体的运动，从大气的流动到地壳的变动，从拦河筑坝、修建桥梁到设计各种机械，从投出篮球到发射导弹、人造卫星、宇宙飞船……所有这些都服从经典力学的规律。

但是，像一切科学一样，经典力学也不会穷尽一切真理，它也有自己的局限性。它像一切科学理论一样，都是一部“未完成的交响曲”。

上面提到的各种物体的运动，速度都远小于真空中的光速。处理这些运动，经典力学完全适用。20 世纪初，著名物理学家爱因斯坦建立了狭义相对论。狭义相对论阐述了物体在接近光速运动时所遵从的规律，得出了一些不同于经典力学的结论。

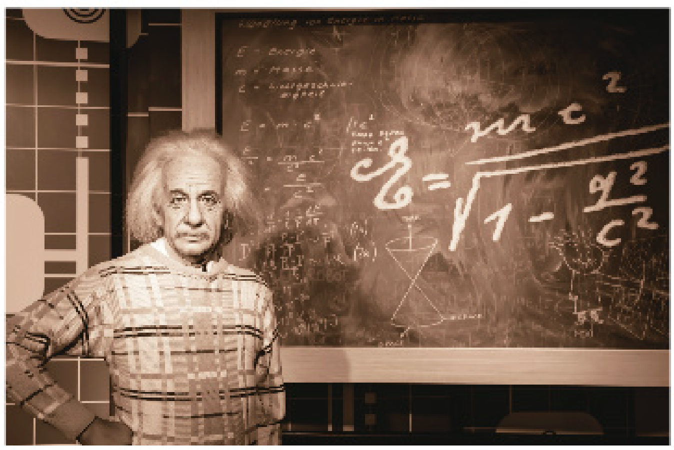


图 7.6.1 爱因斯坦和他的相对论

在经典力学中，物体的质量 m 是不随运动状态改变的；但在狭义相对论中，质量要随物体运动速度的增大而增大，即

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

式中 m_0 是物体静止时的质量，m 是物体速度为 v 时的质量，c 是真空中的光速。

依上式计算，在低速运动中，它的质量增大十分微小，可以忽略不计，经典力学完全适用。但如果物体的速度接近光速，例如，速度 $v=0.8c$ 时，物体的质量增大到静止质量的约 1.7 倍。这时，经典力学就不再适用了。

② 质量与能量

质量与能量是和物质与运动密切联系的两个重要概念。质量概念通过化学质量守恒定律和化学原子论被确立为实物的量的量度，能量概念通过能量守恒定律被确立为各种物质运动的量度。狭义相对论的建立深刻地揭示了两者之间的联系，1905 年，爱因斯坦导出了质能关系式：

$$E = mc^2$$

式中 E 为系统的总能量，m 为系统的总质量，c 为光速。

该公式表明物体相对于一个参照系静止时仍然有能量，这是与经典力学相矛盾的。因为在经典力学中，静止物体是没有能量的。公式中的 E 可以看成是物体总能量，它与物体总质量（包括静止质量和运动所带来的质量）成正比，只有当物体静止时，它才与物体的静止质量（经典力学中的“质量”）成正比。这也表明物体的总质量和静止质量是不同的。

反过来讲，一束光子在真空中传播，其静止质量是 0，但由于它们有运动能量，因此它们也有质量。

质能关系式也可表示为

$$\Delta E = \Delta mc^2$$

其中的 Δm 为物体质量的变化量。

我们知道，原子核由质子和中子组成，质子和中子统称为核子。当若干个核子结合成一个原子核时，将发生质量亏损，并伴随着结合能的释放。在核反应中，质量亏损指的是反应前和反应后反应物总静止质量之差。如果在核反应前后质量亏损为 Δm，那么核反应过程中释放出的能量就是 $\Delta E = \Delta mc^2$。在原子核的裂变反应中，每个核子平均可以释放出 0.9 MeV（$1\ \text{MeV} = 1.6\times10^{-13}\ \text{J}$）的能量；聚变反应中，每个核子平均可以释放出来的能量是这个数值的 4 倍，这为人类获取巨大的核能指明了方向。

在热中子的轰击下，铀-235 原子核会发生裂变反应，释放出巨大的能量。1 kg 铀-235 全部裂变，释放的能量超过了 2 500 t 煤完全燃烧时释放的能量。大型核动力航空母舰只需要 10 kg 左右的铀-235 就可以行驶 200 000 ~ 300 000 km，一次加注核燃料可连续运行 20 多年，因此在 45 ~ 50 年的服役期内只需要换一次核燃料。

拓展阅读

爱因斯坦的简介

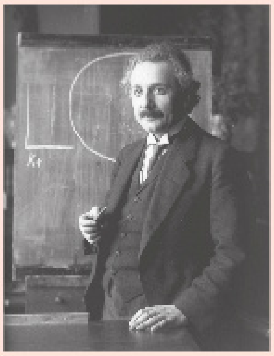


图 7.6.2　爱因斯坦

爱因斯坦是犹太裔物理学家，现代物理学的开创者和奠基人。他于 1879 年出生于德国乌尔姆市的一个犹太人家庭，1900 年毕业于苏黎世联邦理工学院，入瑞士国籍。1905 年，获苏黎世大学哲学博士学位；1909 年，开始在大学任教；1914 年，任威廉皇家物理研究所所长兼柏林大学教授。后被迫移居美国，1940 年入美国国籍。

爱因斯坦最著名的三项科学成就是：提出光量子假设（光子说），建立相对论（狭义相对论和广义相对论），创建现代宇宙学理论。

爱因斯坦的重大成就开始于 1905 年，这一年后来被科学界称为“爱因斯坦奇迹年”：

3 月，爱因斯坦应用普朗克的能量子假说，提出光量子假设，一举解决了光电效应问题；

4 月，爱因斯坦向苏黎世大学提交论文《分子大小的新测定法》，以强有力的论据最终证明了原子论学说；

5 月，爱因斯坦完成了近代物理学划时代性的论文《论动体的电动力学》，独立而完整地提出了狭义相对性原理，建立起狭义相对论，开创物理学的新纪元；

9 月，爱因斯坦在论文《物体的惯性同它所含的能量有关吗》中提出了质能关系的一个原始形式，后经改写即成为狭义相对论中最著名的一个公式：质能方程（$E=mc^2$）。

1906 年，爱因斯坦完成了关于固体比热的论文《普朗克的辐射和比热理论》，创建了固体比热量子理论的第一个模型：爱

因斯坦模型。

1907 年，爱因斯坦提出等效原理，迈出了创建广义相对论的第一步。

1915 年，爱因斯坦成功地建立起广义相对论的引力场方程（此场方程有时也称为希尔伯特—爱因斯坦引力场方程），完成了广义相对论的理论创建工作。

1916 年是爱因斯坦的又一个取得重大成就的年份：

3 月，爱因斯坦完成了《广义相对论的基础》的总结性论文，广义相对论体系完整地建立起来；

5 月，爱因斯坦提出宇宙空间有限无界的假说；

8 月，爱因斯坦完成了《关于辐射的量子理论》，总结量子理论的发展，提出了受激辐射理论，此理论成为激光技术的理论基础。

1917 年，爱因斯坦应用他创立的广义相对论研究整个宇宙，建立起第一个自洽的宇宙模型，开创了在严格的理论基础之上研究宇宙学的全新阶段。

1921 年，爱因斯坦因为在光电效应方面的研究成果获得诺贝尔物理学奖。

1922 年，爱因斯坦完成了关于统一场论的第一篇论文，开创了统一场理论研究的先河（他试图将电磁场和引力场统一起来，但未能获得成功）。

1927 年，爱因斯坦同哥本哈根学派就量子力学的解释问题进行激烈的论战，发表《牛顿力学及其对理论物理学发展的影响》，这对量子力学后来的发展产生了深远的影响（爱因斯坦曾经与玻尔（Niels Henrik David Bohr，1885—1962）争论量子力学的完备性问题，提出了著名的“光子箱”理想实验，与同样著名的“薛定谔猫”佯谬一起构成了对“正统”量子力学理论的重大挑战）。

1934 年，爱因斯坦同波多耳斯基和罗森合作发表了向哥本哈根学派挑战的论文，提出了著名的“ERP 佯谬”，质疑量子

力学的不完备性。

1937 年，爱因斯坦与英费尔德和霍夫曼合作完成论文《引力方程和运动问题》，从广义相对论的场方程推导出物质的运动方程，进一步揭示了时空、物质和运动的深刻的内在联系，这是爱因斯坦取得的最后一项重大成就。

除上述成果之外，爱因斯坦还取得了其他一些研究成果，同时致力于推动人类和平事业和科普宣传工作，所有的这些成果和努力极大地推动了科学技术的发展和人类社会的进步，爱因斯坦因此成为 20 世纪最伟大的物理学家。

个人名言

1. Imagination is more important than knowledge. 想象力比知识更重要。

2. Joy in looking and comprehending is nature's most beautiful gift. 从观察和理解中获得乐趣是大自然赐予的最美好的礼物。

3. If you can't explain it simply, you don't understand it well enough. 如果你不能把它简单地解释出来，那说明你还没有很好地理解它。

4. Small is the number of people who see with their eyes and think with their minds. 只有少数人在用他们自己的眼睛观察、用他们自己的头脑思考。

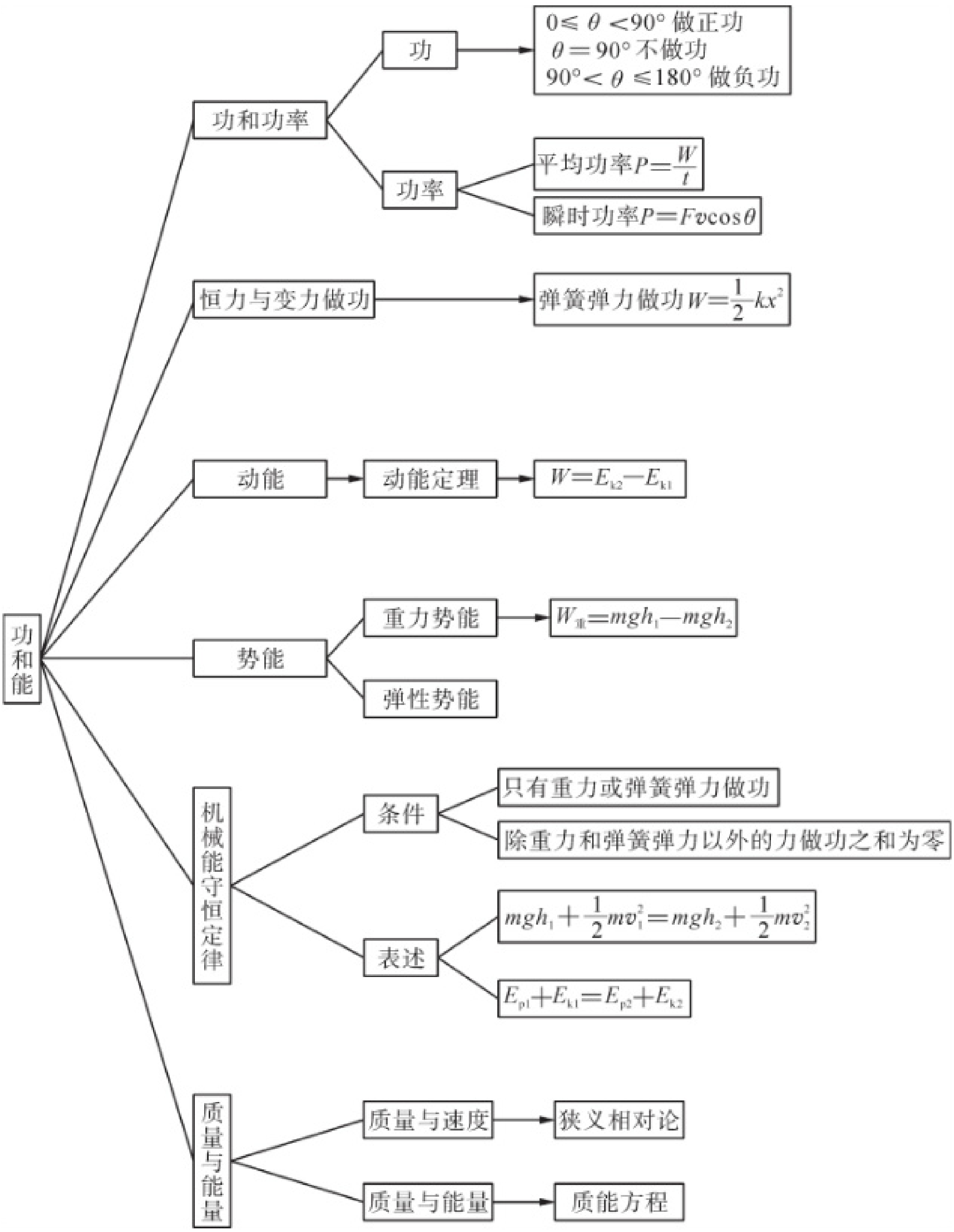
5. The most incomprehensible thing about the world is that it is comprehensible. 这世界最无法理解的事情是它是可理解的。

练习 7–6

1. 试绘制运动物体的质量 m 随其速度 v 变化的关系图。
2. 试估算铀–235 裂变时，每克铀–235 释放的能量相当于多少千克的煤完全燃烧所释放的能量。（已知铀–235 的摩尔质量为 0.235 kg mol^{-1}，每摩尔铀–235 中有 6.02×10^{23} 个原子核，每个原子核裂变时可以释放 200 MeV 的能量，1 MeV $=1.6\times10^{-13}$ J，每千克煤完全燃烧可以获得 2.93×10^{7} J 能量）

章末回顾

本章基本知识结构

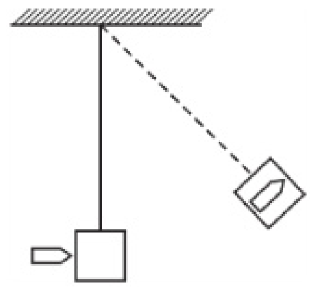


总练习七

基础练习

单项选择题

1. 木块静止挂在绳子下端，一颗子弹以水平速度射入木块并留在其中，再与木块一起共同摆到某一高度，如图所示。从子弹开始射入到共同上摆到最大高度的过程中，下列说法正确的是（　　）



（第 1 题）

A. 子弹的机械能守恒

B. 木块的机械能守恒

C. 子弹和木块的总机械能守恒

D. 以上说法都不对

2. 蹦床运动是运动员从蹦床反弹起来后在空中表演技巧的运动。当运动员从最高处下降至最低处的过程中（不计空气阻力），运动员（　　）

A. 动能一直增大　　B. 所受重力始终做正功

C. 动能一直减小　　D. 重力势能只转变成动能

3. 质量为 m 的物体，从静止出发以 $\frac{g}{2}$ 的加速度竖直下降 h，下列说法正确的是（　　）

①物体的机械能增加了$\frac{1}{2}mgh$

②物体的动能增加了 $\frac{1}{2}mgh$

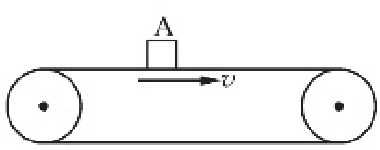
③物体的机械能减少了$\frac{1}{2}mgh$

④物体的重力势能减少了 mgh

A. ①②③　　B. ②③④　　C. ①③④　　D. ①②④

4. 如图所示，水平传送带以速度 v 匀速传动，质量为 m 的小物块 A 由静止轻放在传送带上，小物块与传送带间的动摩擦系数为 μ。在小物块与传送带相对静止时，系统转化为内能的能量为（　　）

A. mv^2　　B. $2mv^2$　　C. $\frac{1}{4}mv^2$　　D. $\frac{1}{2}mv^2$



（第 4 题）

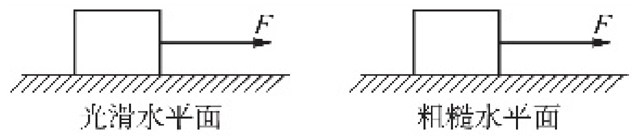
5. 某人用同一水平力 F 先后两次拉同一个物体，第一次使该物体沿光滑水平面前进 s 的距离，第二次使该物体沿粗糙水平面也前进 s 的距离，如图所示。若先后两次拉力做的功分别为 W_1 和 W_2，功率分别为 P_1 和 P_2，则（　　）

A. $W_1=W_2$，$P_1=P_2$

B. $W_1=W_2$，$P_1>P_2$

C. $W_1>W_2$，$P_1>P_2$

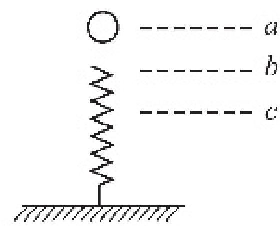
D. $W_1>W_2$，$P_1=P_2$



（第 5 题）

多项选择题

6. 如图所示，小球自 a 点由静止自由下落，到 b 点时与弹簧接触，到 c 点时弹簧被压缩到最短。若不计弹簧质量和空气阻力，在小球由 $a\to b\to c$ 的运动过程中，以下叙述正确的是（　　）



（第 6 题）

A．小球和弹簧的总机械能守恒

B．小球的重力势能随时间均匀减少

C．小球在 b 点时，动能最大

D．小球到 c 点时，重力势能的减少量等于弹簧弹性势能的增加量

7. 某物体在力 F 的作用下从光滑斜面的底端运动到斜面的顶端，动能的增加量为 ΔE_k，重力势能的增加量为 ΔE_p。下列说法正确的是（　　）

A. 重力所做的功等于 $-\Delta E_p$

B. 力 F 所做的功等于 $\Delta E_k+\Delta E_p$

C. 合外力对物体所做的功等于 ΔE_k

D. 合外力对物体所做的功等于 $\Delta E_k+\Delta E_p$

8. 从离地高为 H 的阳台上以速度 v 竖直向上抛出质量为 m 的物体，它上升 h 后又返回下落，最后落在地面上。下列说法正确的是（不计空气阻力，以地面为参考面）（　　）

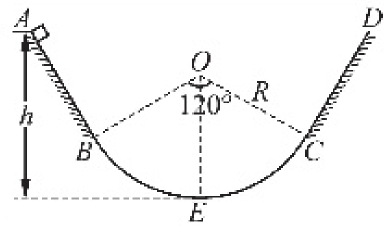
A. 物体在最高点时的机械能为 $mgH+\frac{1}{2}mv^2$

B. 物体落地时的机械能为 $mg(H+h)+\frac{1}{2}mv^2$

C. 物体落地时的机械能为 $mg(H+h)$

D. 物体在回落过程中，经过阳台时的机械能为 $mgH+\frac{1}{2}mv^2$

9. 如图所示，在竖直平面内固定一个半径 $R=2\ \text{m}$、圆心角为 120° 的光滑圆弧轨道 BEC，其中 E 点是最低点。在 B、C 两端平滑、对称地连接长度 s 均为 $\sqrt{3}\ \text{m}$ 的 AB、CD 两段粗糙直轨道，直轨道上端 A、D 与最低点 E 之间的高度差 h 均为 2.5 m。现将质量为 0.01 kg 的小物块由 A 点静止释放，小物块与直轨道间的动摩擦系数均为 0.25。（取 $g=10\ \text{m s}^{-2}$）求：



（第 9 题）

（a）小物块从静止释放到第一次过 E 点时重力做的功。

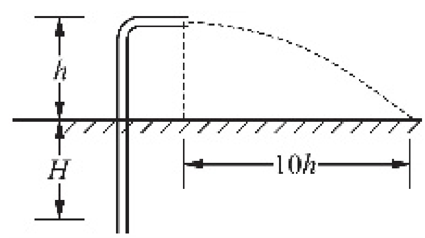
（b）小物块第一次通过 E 点时的动能大小。

10. 质量为 500 t 的机车以恒定的功率由静止出发，经 5 min 行驶 2.25 km，速度达到最大值 $54\ \text{km h}^{-1}$，设阻力恒定且取 $g=10\ \text{m s}^{-2}$。求：

（a）机车的功率。

（b）机车的速度为 $36\ \text{km h}^{-1}$ 时机车的加速度大小。

11. 如图所示是喷水“龙头”的示意图，喷水口距离地面的高度为 h，用效率为 η 的抽水机，从地下 H 深的井里抽水，使水充满喷水口，并以恒定的速率从该“龙头”沿水平方向喷出，喷水口的截面积为 S，其喷灌半径可达 $10\ h$。求带动抽水机的电动机的最小输出功率。（已知水的密度为 ρ，不计空气阻力）



（第 11 题）

提高练习

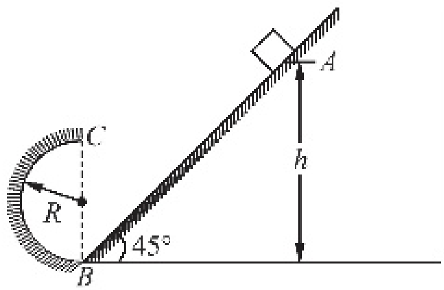
12. 在光滑水平面上有一个静止的物体，现以水平恒力 F_1 推这一物体，作用一段时间后，换成相反方向的水平恒力 F_2 推这一物体。当恒力 F_2 的作用时间与恒力 F_1 的作用时间相同时，物体恰好回到原处，此时物体的动能为 32 J。试问：在整个运动过程中，恒力 F_1 做的功和恒力 F_2 做的功各是多少？

13. 如图所示，倾角为 45° 的光滑斜面 AB 与竖直的光滑半圆轨道在 B 点平滑连接，半圆轨道半径 $R=0.40\ \text{m}$。质量 $m=1.0\ \text{kg}$ 的小物块在 A 点由静止沿斜面滑下，

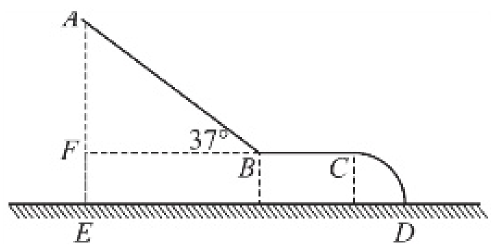
已知小物块经过半圆轨道最高点 C 时对轨道的压力恰好等于零，小物块离开半圆形轨道后落在斜面上的 D 点（D 点在图中没有标出）。（取 $g = 10\ \mathrm{m\ s^{-2}}$）求：

（a）A 点距水平面的高度 h。

（b）小物块从 C 点运动到 D 点的时间 t（结果可用根式表示）。



（第 13 题）



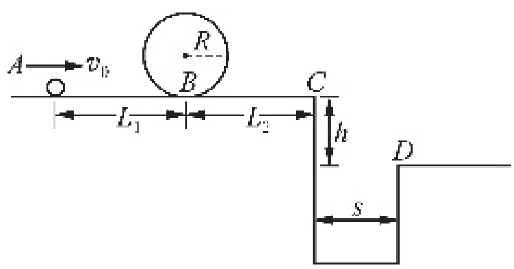
（第 14 题）

14. 如图所示为某小区儿童娱乐的滑梯示意图，其中 AB 为光滑斜面滑道，与水平方向的夹角为 37°，BC 为粗糙水平滑道，与半径为 0.2 m 的 $\frac{1}{4}$ 圆弧 CD 相切，ED 为地面。已知儿童在粗糙滑道上滑动时的动摩擦系数是 0.5，A 点离地面的竖直高度 $AE = 2\ \mathrm{m}$。（取 $g = 10\ \mathrm{m\ s^{-2}}$）

（a）求儿童由 A 点静止起滑到 B 点时的速度大小。

（b）为了使儿童在娱乐时不会从 C 点脱离圆弧水平飞出，粗糙水平滑道 BC 至少为多长？（B 点的能量损失不计）

15. 如图所示，一个小球从 A 点以某一水平向右的初速度出发，沿水平直线轨道运动到 B 点后，进入半径 $R = 10\ \mathrm{cm}$ 的光滑竖直圆形轨道，圆形轨道间不相互重叠，即小球离开圆形轨道后可继续向 C 点运动，C 点右侧有一壕沟，C、D 两点的竖直高度差 $h = 0.8\ \mathrm{m}$，水平距离 $s = 1.2\ \mathrm{m}$，水平轨道 AB 长为 $L_1 = 1\ \mathrm{m}$，BC 长为 $L_2 = 3\ \mathrm{m}$，小球与水平轨道间的动摩擦系数 $\mu = 0.2$，取 $g = 10\ \mathrm{m\ s^{-2}}$。



（第 15 题）

（a）若小球恰能通过圆形轨道的最高点，求小球在 A 点的初速度。

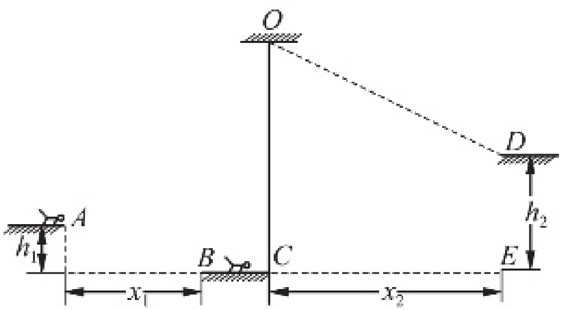
（b）若小球既能通过圆形轨道的最高点，又不掉进壕沟，则小球在 A 点初速度的范围是多少？

16. 山谷中有三块石头和一根不可伸长的轻质青藤，其示意图如图所示，图中 A、B、C、D 均为石头的边缘点，O 为青藤的固定点，$h_1 = 1.8$ m，$h_2 = 4.0$ m，$x_1 = 4.8$ m，$x_2 = 8.0$ m。开始时，质量分别为 $M = 10$ kg 和 $m = 2$ kg 的大、小两只猴子分别位于左边和中间的石头上，当大猴发现小猴将受到伤害时，迅速从左边石头的 A 点水平跳至中间石头。大猴抱起小猴跑到 C 点，抓住青藤下端，荡到右边石头上的 D 点，此时速度恰好为零。运动过程中猴子均可看成质点，空气阻力不计，取 $g = 10\ \mathrm{m\ s^{-2}}$。求：

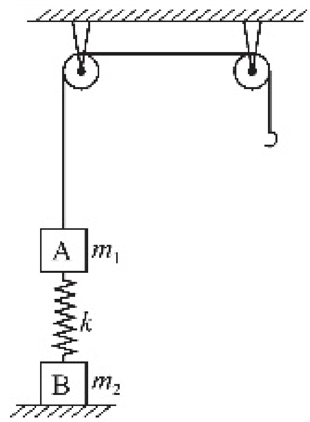
（a）大猴从 A 点水平跳离时速度的最小值。

（b）猴子抓住青藤荡起时的速度大小。

（c）猴子荡起时，青藤对猴子的拉力大小。



（第 16 题）



（第 17 题）

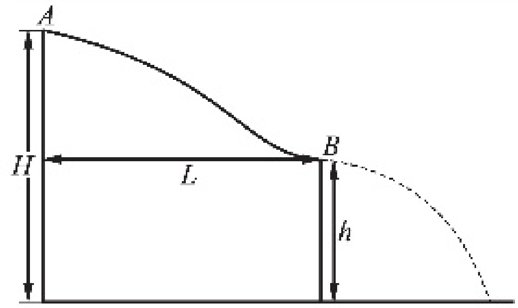
17. 如图，质量为 m_1 的物体 A 经一轻质弹簧与下方地面上的质量为 m_2 的物体 B 相连，弹簧的劲度系数为 k，A、B 都处于静止状态。一条不可伸长的轻绳绕过轻滑轮，一端连物体 A，另一端连一轻挂钩。开始时，各段绳都处于伸直状态，A 上方的一段绳沿竖直方向。现在挂钩上挂一个质量为 m_3 的物体 C 并从静止状态释放，已知 C 恰好能使 B 离开地面但不继续上升。若将 C 换成另一个质量为（$m_1 + m_3$）的物体 D，仍按上述初位置由静止状态释放，则这次 B 刚离开地面时 D 的速度大小是多少？

18. 在一次运动会上，要求运动员从高为 H 的平台上 A 点由静止出发，沿着动摩擦因数为 μ 的滑道向下运动到 B 点后水平滑出，最后落在水池中。设滑道的水平距离为 L，B 点距水面的高度 h 可由运动员自由调节，如图所示。（取 $g = 10\ \mathrm{m\ s^{-2}}$）

（a）求运动员到达 B 点的速度与高度 h 的关系式。

（b）运动员要达到最大水平运动距离，B 点距水面的高度 h 应调为多大？对应的最大水平距离 s_{max} 为多少？

（c）若图中 $H = 4$ m，$L = 5$ m，动摩擦系数 $\mu = 0.2$，要使从 A 点开始的水平运动距离达到 7 m，则 h 的值应为多少？



（第 18 题）

第8章 动量守恒定律

本章提要

1. 动量定理及其应用。
2. 动量守恒定律。
3. 反冲作用以及对常见反冲作用现象的解释。
4. 碰撞的种类以及各自满足的动量、能量关系。

学前储备

1. 知道动量以及动量的变化量。
2. 知道牛顿第二定律。
3. 知道动能定理及机械能守恒定律。

第 1 节　冲量与动量的关系

一辆汽车，受到不同的牵引力时，从开始启动到获得一定速度，所需的时间是不同的。若牵引力大，所需的时间就较短；若牵引力小，所需的时间就较长。

1 冲量

现在我们来定量地研究这一类问题：如图 8.1.1 所示，在光滑的水平面上，一个质量为 m 的物体，在力 F 的作用下，由初速度 v_0 开始加速，经过时间 t，物体的速度将有多大变化？这个问题用牛顿运动定律很容易解决。

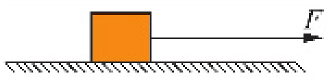


图 8.1.1　物体在力的作用下加速

根据牛顿第二定律

$$F = ma$$

又有 $v = v_0 + at$，得到

$$v - v_0 = \frac{Ft}{m}$$

即

$$Ft = m\Delta v$$

由此可以看出，要使某一个物体获得一定的速度变化，既可以用较小的力作用较长的时间，也可以用较大的力作用较短的时间，只要力和力作用时间的乘积 Ft 相同即可。也就是说，对于一定质量的物体，力所产生的改变物体速度的效果，是由 Ft 这个物理量来决定的。在物理学中，力与力作用时间的乘积叫作**力的冲量**(**impulse**)，通常用字母 I 表示，即

> 力是矢量，冲量也是矢量，冲量的方向由力的方向决定。
> 冲量是力对时间的积累效应，而功是力对空间的积累效应。对这些相关物理量的研究、比较和讨论，大大推动了物理学的发展。

$$I = F\Delta t = F(t - t_0)$$

在国际单位制下，冲量的单位为牛顿秒（N s）。

例题 8－1　如图 8.1.2 所示，质量为 m 的小物块，从高为 H、倾角为 θ 的光滑斜面顶端，由静止开始滑到底端的过程中，重力、弹力、合力的冲量各为多少？

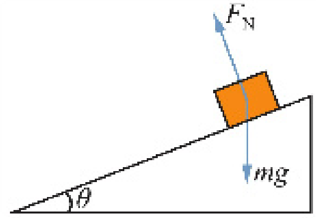


图 8.1.2　物体在斜面上下滑

分析　冲量被定义为力与力作用时间的乘积，只要对小物块进行受力分析，将各个力的大小计算出来，并运用匀变速运动的规律，计算出运动时间，把力的大小与运动时间相乘，即可求得冲量的大小。冲量的方向，由力的方向决定。

解　根据匀变速直线运动的规律，得

$$s=v_0t+\frac{1}{2}at^2$$

$$\frac{H}{\sin\theta}=0+\frac{1}{2}(g\sin\theta)t^2$$

$$t=\frac{1}{\sin\theta}\sqrt{\frac{2H}{g}}$$

根据受力分析，重力　$W=mg$

弹力　$F_N=mg\cos\theta$

合力　$\sum F=mg\sin\theta$

所以它们的冲量依次是：

$I_G=\dfrac{m\sqrt{2gH}}{\sin\theta}$，方向为竖直向下

$I_N=\dfrac{m\sqrt{2gH}}{\tan\theta}$，方向为垂直斜面向上

$I_{合}=m\sqrt{2gH}$，方向为沿斜面向下

该过程中弹力虽然做功为零，但对物体的冲量并不为零。

② 动量定理

在第 4 章第 6 节中，我们已经定义动量 $p=mv$。我们现在看到，冲量将引起物体动量的变化。

根据牛顿第二定律，得

$$\begin{aligned}F&=ma\\&=m\frac{v'-v}{t'-t}\\&=\frac{mv'-mv}{t'-t}\\&=\frac{p'-p}{t'-t}\end{aligned}$$

有 $$F(t'-t)=mv'-mv$$

即 $$I=p'-p$$

上式表明：**物体所受合外力的冲量等于它的动量变化量**。这个关系式叫作**动量定理（impulse-momentum theorem）**。由于动量、冲量都是矢量，所以这个关系式是矢量的关系式。

由动量定理我们可以知道，一个物体动量的变化，是由作用在这个物体上合外力的冲量所引起的。合外力越大、作用时间越长，合外力的冲量就越大，物体动量的增量就越多；反之，合外力越小、作用时间越短，合外力的冲量就越小，物体动量的增量就越小。

在许多情况下，作用在物体上的力并非恒力，但我们仍能用动量定理去解决。若作用在物体上的力是变力，可以将其作用过程细分为很多短暂的小过程，每一个极短时间的小过程中，受力可看作近似不变，物体做匀变速运动，能够应用动量定理。把应用于每个短暂小过程的关系式相加，就得到了应用于整个过程的动量定理。在变力作用的情况下，动量定理中的 F 可理解为在作用时间内变力的平均值。

思考与讨论

在日常生活中，我们会发现，一些易碎物品很多是用固体泡沫衬垫、气泡膜以及纸（如图 8.1.3）等松软材料包装；汽车内部都会安装安全气囊装置（如图 8.1.4），该气囊在汽车发生交通事故时自动弹出以保证人员安全；跳远运动员落地时双腿弯曲落在沙坑里……这是为什么呢？你还能举出其他相关的例子吗？

图 8.1.3　用纸托盘包装的鸡蛋

图 8.1.4　汽车剧烈碰撞时弹出的安全气囊

例题 8 – 2　一个足球的质量为 0.7 kg，当它以 2 m s^{-1} 的水平速度飞来时，足球运动员将球顶回，足球以 1.5 m s^{-1} 的速度向相反方向飞去。如果顶球的时间是 0.1 s，求：

（a）足球动量的变化量。

（b）足球运动员对球的平均作用力。

分析　动量是矢量，既有大小又有方向。如图 8.1.5 所示，头顶了足球之后，足球速度的大小和方向都发生了变化。要计算足球动量的变化量，首先应该确定其碰撞前和碰撞后的动量。在一维直线运动的情况下，只要选定坐标的正方向，即可确定动量的方向。动量为正，说明速度方向与正方向相同；动量为负，说明速度方向与正方向相反。

图 8.1.5　头球时，头给球以某一方向的冲量，引起足球动量的变化

在本例题中，足球经历减速到零再反向加速运动的过程，头对足球的力并非恒力，但动量定理仍适用。用动量定理所求得的力就是足球运动员在这段时间内对足球的平均作用力。

解　（a）取足球的初速度方向为正方向。撞击前，足球的速度 $v = 2$ m s^{-1}，对应其初动量为

$$\begin{aligned} p &= mv \\ &= 0.7\times 2 \text{ kg m s}^{-1} \\ &= 1.4 \text{ kg m s}^{-1} \end{aligned}$$

撞击后，足球的速度 $v' = -1.5$ m s^{-1}，对应的动量为

$$\begin{aligned} p' &= mv' \\ &= 0.7\times(-1.5) \text{ kg m s}^{-1} \\ &= -1.05 \text{ kg m s}^{-1} \end{aligned}$$

撞击前后动量的变化量为

$$\begin{aligned} \Delta p &= p' - p \\ &= (-1.05 - 1.4) \text{ kg m s}^{-1} \\ &= -2.45 \text{ kg m s}^{-1} \end{aligned}$$

动量变化量为负，说明其方向与所规定的正方向相反。

（b）根据动量定理，得 $F(t'-t) = mv' - mv = \Delta p$

$$F=\frac{\Delta p}{\Delta t}$$

$$= \frac{-2.45}{0.1}\ \mathrm{N}$$
$$= -24.5\ \mathrm{N}$$

平均作用力的大小为 24.5 N，方向与初速度方向相反。

做一做

某校开展“鸡蛋撞地球”的活动。若将鸡蛋直接从六楼释放，掉到一楼的地面上，则鸡蛋一定会打破。那么，怎样设计巧妙的装置，能保证鸡蛋落地而不碎呢？

根据动量定理，要使鸡蛋不碎，就必须减小鸡蛋着地时所受的作用力。我们可以从两方面加以考虑：一是延长鸡蛋与地面撞击时的相互作用时间，这可通过用普通容器（容器的材料、形状、结构不限）包装鸡蛋来实现，如图 8.1.6 所示；二是降低鸡蛋撞击地面前的瞬时速度，这可以通过在包装容器上安装起减速作用的“降落伞”来实现，如图 8.1.7 所示。

除了如图 8.1.6 和图 8.1.7 的设计，你还能设计怎样的方案，使鸡蛋能够安全地“撞击”地球呢？

图 8.1.6　利用充气袋、泡沫衬垫进行缓冲，延长作用时间，减小作用力

图 8.1.7　利用“降落伞”减小落地的速度

拓展阅读

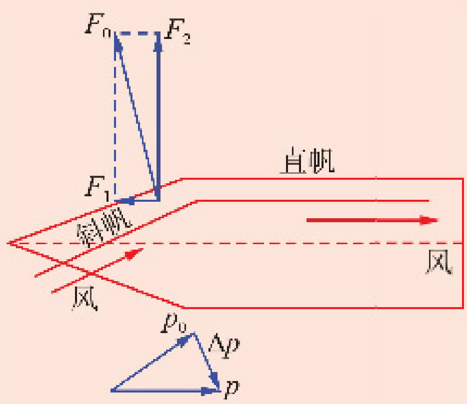
无动力帆船的逆风行舟

无动力帆船是靠风吹在帆上的力而航行的。在通常情况下，静水中帆船总是顺着风向而走。但有经验的帆船运动员或船夫，他们巧妙地选择帆船的方向与帆的取向，可以让船的航向与风向成一钝角，侧面迎风，同时隔一段时间转动一次帆的取向，通过走“之”字形线路，实现帆船逆着风的方向航行。

我们可以用以下的模型来解释这一现象。假设帆对风来说是光滑的，摩擦力可以忽略，按照动量定理，风对帆的作用力 F_0 与风过帆以后动量增量 Δp 的方向相反。F_0 作用在帆上并传导给船体。F_0 可分解为如图 8.1.8 b 所示的沿船行进方向的分力 F_1 和垂直船行进方向的分力 F_2。

这两个分力对船的运动所起的作用是明显不一样的。因为船底设有龙骨（如图 8.1.8 a)，使船侧向运动的阻力很大。即使有 F_2 从侧面作用于船，由于水的阻力，船也很难因此向侧面运

（a）



（b）

图 8.1.8

动。但 F_1 的作用就明显不一样，因船体是流线型的，在沿着船行进的方向上如果受到 F_1 作用的话，船就会很容易沿这个方向运动。

这样，船的行进方向是与风向成一钝角的。行进一定路程后，改变帆的方向，船就向另一侧斜着运动了，如图 8.1.9 所示。如此走“之”字形，借助于风力航行的船便实现了逆风行舟。

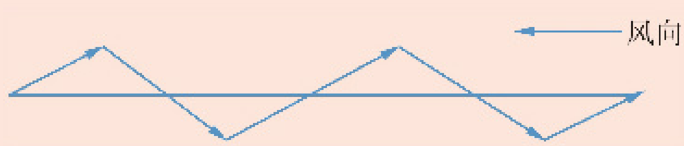


图 8.1.9　船“之”字形航行

练习 8–1

1. 质量为 70 kg 的撑竿跳运动员（如图 8.1.10），从 5.60 m 的高处落到海绵垫上，经时间 1 s 停下。（取 $g = 10\ \mathrm{m\ s^{-2}}$）

   （a）求海绵垫对运动员的平均作用力。

   （b）若身体与海绵垫的接触面积为 0.20 $\mathrm{m^2}$，求身体所受平均压强。

   （c）如果不用海绵垫，落在普通沙坑中的运动员以 0.05 $\mathrm{m^2}$ 的接触面积着地并历时 0.1 s 后静止，求沙坑对运动员的平均作用力和运动员所受压强。


图 8.1.10　撑竿跳运动员

2. 体操运动员从一平台上跳下，下落 2 m 后双脚触地，接着他用双腿弯曲的方法缓冲，使自身重心又下降了 0.5 m 后才停止。问：在着地过程中，地面对他双脚的平均作用力约为其自身重力的多少倍？

3. 一个质量 $m = 2\ \mathrm{kg}$ 的物体，在 $F_1 = 8\ \mathrm{N}$ 的水平推力作用下，从静止开始沿水平面运动了 $t_1 = 5\ \mathrm{s}$；然后推力减小为 $F_2 = 5\ \mathrm{N}$，方向不变，物体又运动了 $t_2 = 4\ \mathrm{s}$；之后撤去外力，物体再经过 $t_3 = 6\ \mathrm{s}$ 后停下来。试求物体在水平面上所受的摩擦力。

4. 某种气体分子束由质量 $m = 5.4 \times 10^{-26}\ \mathrm{kg}$、速度 $v = 460\ \mathrm{m\,s^{-1}}$ 的分子组成，各分子都沿同一方向运动，垂直地打在某平面上后又以原速率反向弹回。如果分子束中每立方米的体积内有 $n_0 = 2.7 \times 10^{25}$ 个分子，求被分子束撞击的平面所受到的压强。

第 2 节　动量守恒定律

① 相互作用物体间的动量变化

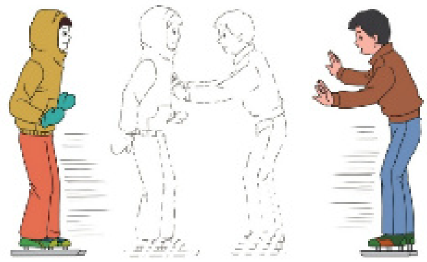


图 8.2.1　两人在冰面上相互推

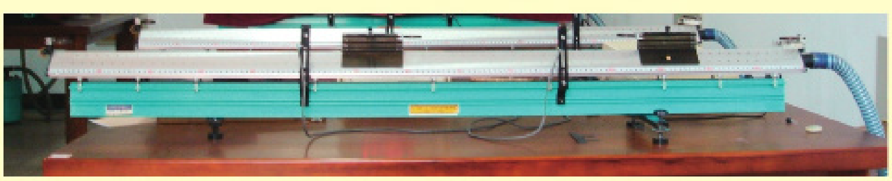
图 8.2.2　水面上相互作用的小船

在生活中，我们经常可以看到，几个物体在相互作用时，它们的动量会发生变化。例如，在冰面上原来静止的两个人，无论谁推谁一下，两个人都会向相反的方向运动起来，如图 8.2.1 所示；两艘在水面上静止的船，一艘船上的人用力推另一艘船，两艘船都往各自相反的方向运动，如图 8.2.2 所示；在发射炮弹的时候，炮弹向前飞出，同时炮身后退，炮弹和炮身的动量都发生了变化。

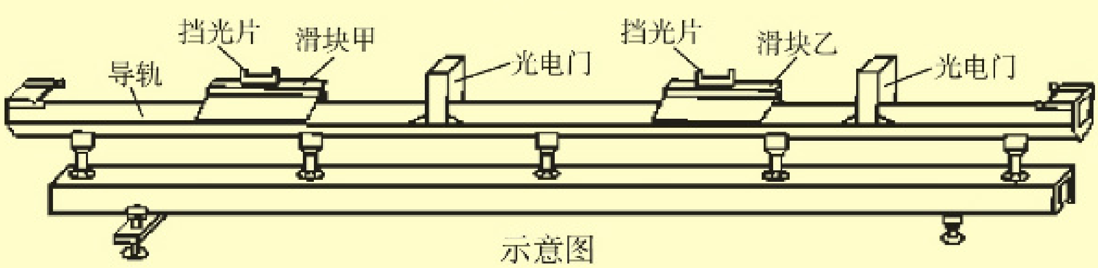
在两个物体发生相互作用时，一个物体受到另一个物体对它的作用力，同时另一个物体也受到来自于这个物体的反作用力，从而改变各自的动量。可以通过进一步的实验和理论探究，弄清楚两个相互作用的物体动量变化的规律。

演示 8-1

气垫导轨上的碰撞实验



实物图



示意图

图 8.2.3　气垫导轨上的碰撞实验

取两个滑块甲和乙，分别称出它们的质量。把它们放在水平放置的气垫导轨上，如图 8.2.3 所示。推动滑块甲，让它以一定的速度碰撞滑块乙。滑块碰撞前后的速度可以通过光电门测出。我们可以做以下的碰撞实验：

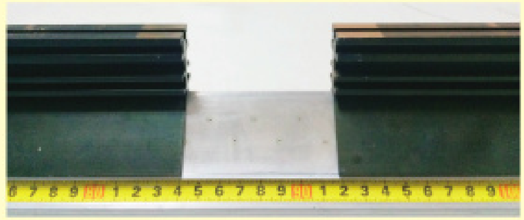


图 8.2.4　两滑块直接相碰

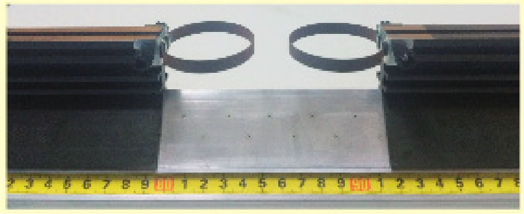


图 8.2.5　装上弹性碰撞架的两滑块

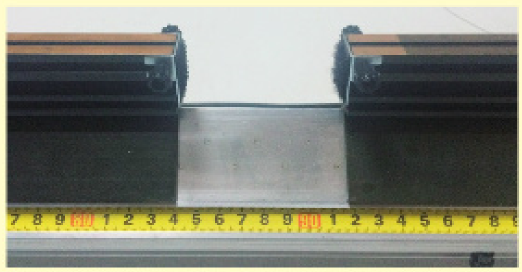


图 8.2.6　装上尼龙搭扣的两滑块

方案一：如图 8.2.4 所示，将两个滑块放在气垫导轨上，给滑块甲一个初速度，使其与静止的滑块乙直接碰撞，测出碰撞前后两滑块的速度。

方案二：如图 8.2.5 所示，在两个滑块的端面装上弹性碰撞架，给滑块甲一个初速度，使其与静止的滑块乙碰撞，测出碰撞前后两滑块的速度。

方案三：如图 8.2.6 所示，在滑块相互碰撞的地方装上尼龙搭扣，使碰撞后两个滑块连成一体。给滑块甲一个初速度，使其与静止的滑块乙碰撞，测量碰撞前后两滑块的速度。

方案四：将两个滑块用弹簧相连，并用细线拉近，使弹簧压缩，然后烧断细线，弹簧弹开后落下，两个滑块由静止向相反的方向运动，分别测量它们分开后的速度。

你还有其他实验方案吗？

实验完成后，填写如下表格：

$m_{甲}=$		$m_{乙}=$		挡光片的宽度：		
	$v_{甲}$	$v_{乙}$	$m_{甲}v_{甲}+m_{乙}v_{乙}$	$v'_{甲}$	$v'_{乙}$	$m_{甲}v'_{甲}+m_{乙}v'_{乙}$
方案一						
方案二						
方案三						
方案四						
方案五						
实验结论：						

② 动量守恒

从上面的实验结果我们可以发现，两个物体碰撞前后，物理量 $m_甲 v_甲 + m_乙 v_乙$ 与物理量 $m_甲 v'_甲 + m_乙 v'_乙$ 几乎相等。我们把两个滑块动量的矢量和叫作它们的总动量。实验结果表明，在碰撞前后，系统的总动量是几乎不变的。

我们现在用动量定理来讨论这个问题：

如图 8.2.7 所示，在气垫导轨上运动的滑块 A 和 B，质量分别为 m_1 和 m_2；速度同向，分别为 v_1 和 v_2，且 $v_1 > v_2$。碰撞后，它们的速度分别变为 v_1' 和 v_2'。在碰撞过程中，A 受到 B 对它的作用力为 F_1，B 受到 A 对它的反作用力为 F_2，根据动量定理，对 A、B 分别有

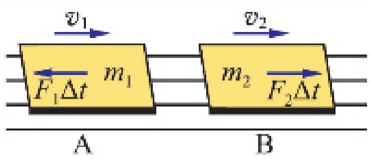


图 8.2.7

$$F_1\Delta t = m_1v_1' - m_1v_1，F_2\Delta t = m_2v_2' - m_2v_2$$

F_1 与 F_2 为作用力和反作用力，根据牛顿第三定律，它们大小相等，方向相反，即满足 $F_1 = -F_2$，所以有

$$m_1v_1' - m_1v_1 = -(m_2v_2' - m_2v_2)$$

即

$$m_1v_1 + m_2v_2 = m_1v_1' + m_2v_2'$$

两个滑块碰撞前的总动量与碰撞后的总动量相等。这个结果，和之前的实验结果是一致的。

理论和实验都表明，在碰撞前后，两个滑块的总动量保持不变，这就是**动量守恒**（**conservation of momentum**）。

③ 动量守恒定律

在相互作用着的物体构成的系统中，每个物体所受的力，既可能来自系统内其他物体所施加的力，即**内力**（**internal force**）；也可能来自系统外其他物体所施加的力，即**外力**（**external force**）。

如图 8.2.8 所示，在碰撞过程中，系统内部的相互作用力始终有 $F_1 = -F_2$，故内力的合冲量为零，不影响系统的总动量。当然，在相互作用过程中，系统除了受到内力以外，还受到向下的重力和向上的支持力作

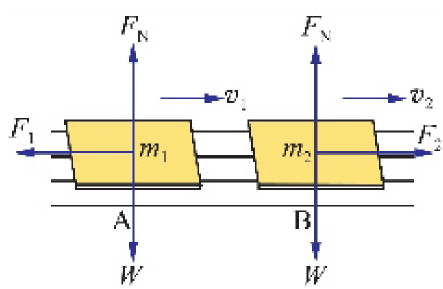


图 8.2.8

用，重力和支持力作用在同一个物体上，大小相等，方向相反，合力为零。**整个系统的合外力为零或者根本不受外力作用，这就是系统动量不变的条件**。

由此我们可以得出结论：**系统不受外力或所受外力的合力为零，这个系统的总动量将保持不变**。这就是**动量守恒定律**（**law of conservation of momentum**）。

例题 8 – 3　如图 8.2.9 所示，在光滑水平桌面上有一个木块，子弹以 400 m s^{-1} 的速度射向木块，子弹的质量 $m_1 = 20$ g，木块的质量 $m_2 = 380$ g。

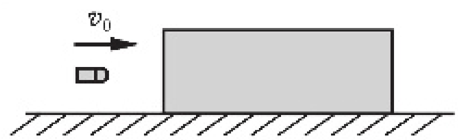


图 8.2.9

（a）若子弹击中木块后，最后留在其中，问：木块运动的末速度有多大？

（b）若子弹把木块打穿，穿过后子弹的速度降为 200 m s^{-1}，这时木块的速度又有多大？

分析　子弹在木块中运动时与木块发生相互作用，它们是一个系统，这个系统就是我们的研究对象。在相互作用时，系统所受的外力有：子弹和木块的重力、地面的支持力以及空气的阻力。重力和支持力之和为零，空气阻力远小于碰撞中发生的内力，可以忽略。因此，我们可以认为碰撞过程中系统所受外力的矢量和为零，系统动量守恒。

在运用动量守恒定律时，我们应确定碰撞前和碰撞后动量的表达式。碰撞前的动量是指碰撞开始时那一刻的动量，碰撞后的动量是指碰撞刚结束那一刻的动量。

解　（a）以子弹的初速度方向为正方向，有 $v_1 = 400$ m s^{-1}。子弹与木块相互作用后留在木块中，它们的末速度相等，设此速度为 v'。系统的初动量 $p = m_1v_1$，系统的末动量 $p' = (m_1 + m_2)v'$。由动量守恒定律 $p = p'$，可得

$$m_1v_1 = (m_1 + m_2)v'$$

所以

$$\begin{aligned} v' &= \frac{m_1v_1}{m_1+m_2} \\ &= \frac{0.02 \times 400}{0.02+0.38}\ \text{m s}^{-1} \\ &= 20\ \text{m s}^{-1} \end{aligned}$$

（b）在子弹打穿木块这个过程中，动量守恒。设穿出后子弹的速度为 v_1''，木块的速度为 v_2''，则此时系统的末动量为 $p'' = m_1v_1'' + m_2v_2''$。

由动量守恒定律 $p = p''$，可得

$$m_1v_1 = m_1v_1'' + m_2v_2''$$

所以

$$v_2'' = \frac{m_1v_1 - m_1v_1''}{m_2}$$

$$= \frac{0.02 \times 400 - 0.02 \times 200}{0.38}\ \mathrm{m\,s^{-1}}$$

$$\approx 10.5\ \mathrm{m\,s^{-1}}$$

在实际应用中，动量守恒定律也可以就某一分量来应用。如果系统在相互作用中所受的合外力不等于零，但在某一方向上，合外力的分量为零，那么在这个方向上，动量的分量是守恒的。

在某些特殊的场合，比如碰撞或爆炸，系统所受的内力远远大于外力。由于外力不等于零，动量守恒定律的条件已经不满足了，但因为内力远远大于外力，外力所造成的影响很小，我们仍然可以近似地用动量守恒定律来处理问题。

> 试计算例题 8-3 (a)(b)中，子弹、木块各自的能量变化，以及子弹、木块系统整体的能量变化。你有什么发现？

4 动量守恒定律的普适性

上述例题若用牛顿运动定律来解决，由于每个时刻子弹与木块之间的作用力都在发生变化，解决起来很复杂。但动量守恒定律只涉及始末两个状态，与过程中力的细节无关，这样问题的解决就大大简化了。

虽然动量守恒定律是从牛顿运动定律推导而来，但其意义已经突破了牛顿运动定律的范畴。现代物理的研究表明，动量守恒定律是自然界中最重要、最普遍的规律之一。

研究表明，大到星系的宏观系统，小到原子、基本粒子等微观系统，无论相互作用的是万有引力、弹力、摩擦力、电磁力还是其他什么相互作用力，无论相互作用的物体是黏合在一起还是分裂成几块，无论物体作用前后的运动是否在一条直线上，也不论两个物体是否发生接触，动量守恒定律都是适用的。

正因为如此，动量守恒定律成为人们认识自然、改造自然的重要工具。

⑤ 动量守恒中的能量问题

在物体相互作用的过程中，通常伴随着能量的变化。在系统内部，作用力与反作用力作用在两个不同物体上，若此时存在位移，就伴随着做功和能量的转移与转化。一般情况下，由于碰撞时间极短，这种能量的变化最直观的反映便是整个系统动能的变化。

我们继续以例题 8-3 为例，若子弹射入木块后留在木块内，整个系统动能的变化量为

$$
\begin{aligned}
\Delta E &= E_2 - E_1 \\
&= \frac{1}{2}(m_1+m_2)v'^2 - \frac{1}{2}m_1 v_1^2 \\
&= \frac{1}{2}\times(0.02+0.38)\times 20^2\ \mathrm{J} - \frac{1}{2}\times 0.02\times 400^2\ \mathrm{J} \\
&= -1\,520\ \mathrm{J}
\end{aligned}
$$

负号表明相互作用后，总动能减少。

那么，减少的这一部分动能到哪里去了呢？如图 8.2.10 所示，子弹在木块中运动，木块受到的力为 F_1，运动了位移 s_1，则子弹对木块做的功 $W_1 = F_1 s_1$；子弹受到的力为 F_2，运动了位移 s_2，木块对子弹做的功 $W_2 = -F_2 s_2$。由于 F_1 与 F_2 为作用力和反作用力，大小相等且方向相反，大小均记为 F，则相互作用结束后，做的总功 $W = W_1 + W_2 = F(s_1 - s_2) = -Fd$。总功为负，减少的动能转变为内能了。

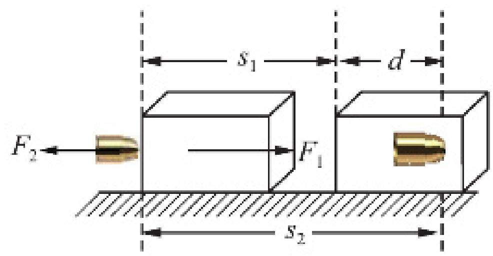


图 8.2.10

那么，例题 8-3 中子弹射穿木块后系统的动能是否损失呢？我们来计算一下例题 8-3(b) 中整个系统的动能变化：

$$
\begin{aligned}
\Delta E' &= E'_2 - E_1 \\
&= \frac{1}{2}m_1 v_1'^2 + \frac{1}{2}m_2 v_2'^2 - \frac{1}{2}m_1 v_1^2 \\
&= \frac{1}{2}\times 0.02\times 200^2\ \mathrm{J} + \frac{1}{2}\times 0.38\times 10.5^2\ \mathrm{J} - \frac{1}{2}\times 0.02\times 400^2\ \mathrm{J} \\
&\approx -1\,179\ \mathrm{J}
\end{aligned}
$$

动能依旧损失，但其数值变小了。如果再改变作用的形式，可以将动能的损失继续降低。在某些相互作用中，动能的损失可以降为零。

例题 8 – 4 如图 8.2.11 所示，放在光滑水平桌面上的小爆竹忽然炸成两块，其中大块的质量为 400 g，并水平向右运动，其速度为 50 m s^{-1}；另一小块的质量为 200 g。求：

（a）另一小块的速度的大小和方向。

（b）爆炸所引起的爆竹动能的增加值。

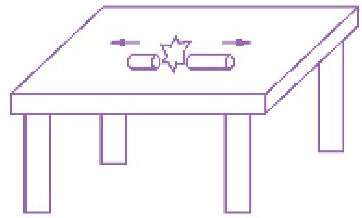


图 8.2.11

分析 爆竹静止在光滑水平桌面上，初动量为零。后在内力作用下分为两块，作用在两块上的力大小相等，方向相反，作用时间相等，故合冲量为零。因此，把爆竹看成一个系统，则系统动量守恒。开始时，爆竹动能为零；当爆竹分成的两部分开始运动时，爆竹的动能增加。

解 （a）令向右为正方向，开始时爆竹静止，$p_0 = 0$ kg m s^{-1}。由于爆炸为内力，因此把爆竹看成一个系统，则系统动量守恒。设分成的大物块质量为 m_1，速度为 v_1；分成的小物块质量为 m_2，速度为 v_2，则

$$p_1 = m_1v_1 + m_2v_2$$

根据系统动量守恒，得

$$p_0 = p_1 = m_1v_1 + m_2v_2$$

因此

$$\begin{aligned} v_2 &= \frac{p_0 - m_1v_1}{m_2} \\ &= \frac{0 - 0.4 \times 50}{0.2}\ \text{m s}^{-1} \\ &= -100\ \text{m s}^{-1} \end{aligned}$$

负号表示 v_2 的方向向左。

（b）爆竹动能的增加值为分成的两物块动能之和，即

$$\begin{aligned} \Delta E &= \frac{1}{2}m_1v_1^2 + \frac{1}{2}m_2v_2^2 \\ &= \frac{1}{2} \times 0.4 \times 50^2\ \text{J} - \frac{1}{2} \times 0.2 \times 100^2\ \text{J} \\ &= 1\,500\ \text{J} \end{aligned}$$

例题 8－5　如图 8.2.12 所示，一辆质量为 M 的平板车 B 放在光滑水平面上，在其右端放一质量为 m 的小木块 A。已知 $m < M$，A、B 间的动摩擦系数为 μ，现给 A 和 B 以大小相等、方向相反的初速度 v_0，使 A 开始向左运动，B 开始向右运动，最后 A 不会滑离 B。求：

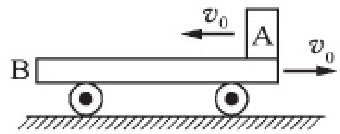


图 8.2.12

（a）A、B 最后的速度大小和方向。

（b）从地面上看，小木块向左运动到离出发点最远处时，平板车向右运动的位移大小。

分析　小木块向左运动，平板车向右运动，两者有相对运动。在相对运动过程中，两者所受的滑动摩擦力大小相等，方向相反，对双方作用了相同的时间。因此，把小木块和平板车看成一个系统，则系统的总冲量为零，系统总动量守恒；但从地面上看，小木块和平板车发生了不同的位移，相对位移不为零，系统总机械能不守恒。

因为 $M > m$，所以 $p_M > p_m$，则系统的总动量 $p_{合}$ 的方向向右。小木块先向左做匀减速直线运动，速度减为零后又折回，做反向加速运动，直至与平板车具有相同的速度，即摩擦力对小木块先做负功，再做正功，而摩擦力对平板车始终做负功。

解　（a）以向右为正方向，由 A、B 系统动量守恒定律，得

$$Mv_0 - mv_0 = (M + m)v$$

则

$$v = \frac{M-m}{M+m}v_0，方向向右$$

（b）小木块向左运动到速度减为零时，到达最远处，此时板车移动的位移为 s，速度为 v'，则由 A、B 系统动量守恒，得

$$Mv_0 - mv_0 = Mv'$$

对平板车应用动能定理，得

$$-\mu mgs = \frac{1}{2}mv'^2 - \frac{1}{2}mv_0^2$$

联立上述两式，解得

$$s = \frac{2M-m}{2\mu mg}v_0^2$$

思考　小木块从开始运动到相对平板车静止，在平板车上相对平板车的位移是多少？

例题 8 – 6 如图 8.2.13 所示，光滑水平面上有一辆质量为 M 静止的小车，它的上表面是由水平面连接 $\frac{1}{4}$ 圆弧的光滑曲面。一个质量为 m 的小物块以水平初速度 v_0 进入小车，求小物块在光滑曲面上上升的最大高度。

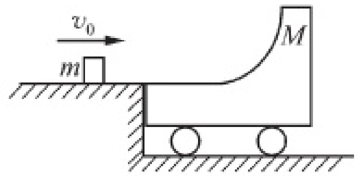


图 8. 2.13

分析 在小物块冲上曲面后，与曲面发生相互作用，此时重力和支持力的合冲量不为零，系统动量不守恒。但我们同时也注意到，在水平方向上，系统没有受到其他力的作用，在水平方向上，动量分量是守恒的。在小物块与小车相互作用过程的开始阶段，小物块减速，小车加速，小物块相对于小车向前并向上运动。当小物块与小车相对静止时，即有最大高度。

解 设当小物块与小车相对静止时，速度为 v，根据水平方向动量守恒，有

$$mv_0 = (m + M)v$$

由于整个过程中系统机械能守恒，设小物块所能到达的最大高度为 h，则有

$$\frac{1}{2}mv_0^2=\frac{1}{2}(m+M)v^2+mgh$$

解得
$$h=\frac{Mv_0^2}{2(m+M)g}$$

在某些相互作用过程中，虽然整个系统动量不守恒，但在某个方向上，总动量的分量仍可能保持不变。

思考 如果小物块冲出了 $\frac{1}{4}$ 圆弧，上述解法是否仍然有效？

练习 8–2

1. 某人站在平板车上，与车一起在光滑水平面上做直线运动，当人相对于车竖直向上跳起时，车的速度大小将（　　）

A. 增大　　B. 减小

C. 不变　　D. 无法判断

2. 如图 8.2.14 所示，在光滑水平面上，用等大异向的 F_1、F_2 分别同时作用于 A、B 这两个静止的物体上，已知 $m_A < m_B$，经过相同的时间后同时撤去两个力，之后两物体相碰并黏为一体，则黏合体最终将（　　）

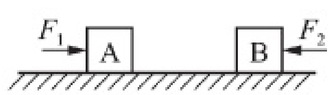


图 8.2.14

A. 静止　　B. 向右运动

C. 向左运动　　D. 无法确定

3. 如图 8.2.15 所示，一个木箱原来静止在光滑水平面上，木箱内粗糙的底板上放着一个小木块，木箱和小木块都具有一定的质量。现使木箱获得一个向右的初速度 v_0，则下列说法正确的是（　　）

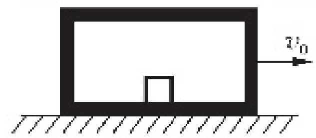


图 8.2.15

A. 小木块和木箱最终都将静止

B. 小木块最终将相对木箱静止，两者一起向右运动

C. 小木块将来回往复碰撞木箱内壁，而木箱一直向右运动

D. 若小木块与木箱的左壁碰撞后相对木箱静止，则两者将一起向左运动

4. 如图 8.2.16 所示，甲、乙两船的总质量（包括船、人和货物）分别为 10 m、12 m，两船沿同一直线、同一方向运动，速度分别为 $2v_0$、v_0。为了避免两船相撞，乙船上的人将一件质量为 m 的货物沿水平方向抛向甲船，甲船上的人将货物接住。求抛出货物的最小速度。（不计水的阻力）

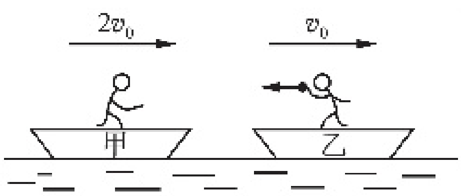


图 8.2.16

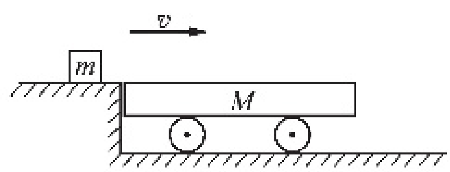


图 8.2.17

5. 如图 8.2.17 所示，木块的质量 $m = 0.4$ kg，它以速度 $v = 20$ m s^{-1} 水平地滑上一辆静止的平板小车，已知小车的质量 $M = 1.6$ kg，木块与小车间的动摩擦系数 $\mu = 0.2$，木块没有滑离小车，地面光滑，取 $g = 10$ m s^{-2}。求：

（a）木块相对小车静止时小车的速度。

（b）从木块滑上小车到木块相对于小车刚好静止时，小车移动的距离。

6. 如图 8.2.18 所示，用轻弹簧相连的质量均为 2 kg 的 A、B 两物块，都以 $v = 6$ m s^{-1} 的速度在光滑的水平地面上运动，弹簧处于原长，质量为 4 kg 的物块 C 静止在前方，B 与 C 碰撞后两者黏在一起运动。

（a）当弹簧的弹性势能最大时，物块 A 的速度为多大？

（b）弹簧弹性势能的最大值是多大？

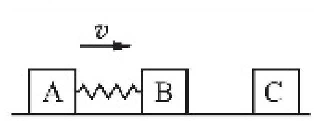


图 8.2.18

第 3 节　反冲作用

同学们一定做过这样的实验：如图 8.3.1 所示，将一定量的气体充入一个气球，然后放手，使气球自由运动。此时，会观察到什么现象呢？

气球不断地从充气嘴处放出气体，其体积不断减小，与此同时，气球在空中不断运动。当气体全部释放，气球也就逐渐停止运动。

那么，这是一种怎样的现象？为什么会产生这样的现象？

图 8.3.1　气球放气实验

1 反冲

根据动量守恒定律，如果一个静止的物体在内力的作用下分裂成两部分，一部分向某个方向运动，另一部分必然向相反的方向运动。这个现象叫作**反冲**（**recoil**）。在反冲运动中，物体受到的反冲作用通常叫作反冲力。气球正是受到喷出气体对其的反冲力而向前运动的。

在日常生活中，我们常常需要利用反冲现象。农田、园林的浇灌装置能够一边喷水一边旋转，这是因为喷口的朝向与径向略有偏斜，水从喷口喷出时，喷管因反冲而旋转，这样就可以自动旋转，改变喷水方向。

图 8.3.2　冲天炮

冲天炮（如图 8.3.2）也称火箭炮或飞天炮，是春节时儿童喜爱的一种鞭炮。当火药被点燃后，气体迅速从后部喷出，在强大的反冲力下，炮身便向前运动。中国的宋代已经出现冲天炮这种玩具，也叫“起火”，逢年过节时人们都要放“起火”来庆祝。后来“起火”被改进成为火箭，用于战争中。

但有时候，我们也要尽量减小反冲所带来的危害。在榴弹炮发射时，炮弹从炮筒中飞出，炮身就向后退，这种反冲运动对炮弹发射是不利的。为了使大炮回到原来的位置并重新瞄准，需要花费不少时间，这就降低了射击速度。如图 8.3.3

所示，现在的大炮都安装了使大炮在发射后自动迅速复位的装置。此外，人们还发明了无后坐力炮，这种炮在发射时火药气体从炮身后面的开口喷出，炮身不受火药气体向后面的压力，因此发射时炮身不后退。

图 8.3.3 榴弹炮

例题 8 – 7 一门旧式大炮，炮身的质量是 1 000 kg，水平发射一枚质量是 2.5 kg 的炮弹，炮弹飞出的速度相对地面为 600 m s^{-1}。求炮身后退的速度。

分析 把炮身和炮弹看成一个系统，则炮弹和炮身之间的相互作用力是内力，不影响系统的动量。值得注意的是，在发射过程中水平方向上系统虽然受地面的摩擦力，但时间极短，且摩擦力的大小远远小于系统的内力，因此可忽略，可以认为系统在水平方向动量守恒。

解 设炮弹的质量为 m，炮身的质量为 M，由于炮弹发射之前，炮弹和炮身的速度均为零，则初动量 $p = 0$。在炮弹发射之后，炮弹的速度为 v，炮身的速度为 V，则此时动量 $P' = mv + MV$。根据动量守恒定律，有

$$0 = mv + MV$$

则

$$V = -\frac{mv}{M} = -\frac{2.5 \times 600}{1\,000}\ \text{m s}^{-1} = -1.5\ \text{m s}^{-1}$$

负号表示炮身的速度方向与炮弹的速度方向相反。

② 典型的反冲作用现象

●反击式水轮机

如图 8.3.4 所示，反击式水轮机是大型水力发电站应用最广泛的水轮机。它是靠水流的反冲作用旋转的。中国在 20 世纪 70 年代就生产出了转轮直径为 5.5 m、质量为 110 t、最大功率达 3×10^5 kW · h 的反击式水轮机。

图 8.3.4 弗朗西斯型反击式水轮机

做一做

为了演示反击式水轮机的工作原理，我们可以做这样的模型。如图 8.3.5 所示，在一个圆锥形筒的下端焊接两个或更多根出水曲管，圆锥形筒可绕中心竖直轴自由转动。往筒里灌水，当水从下端曲管中流出时，由于反冲力的存在，水以相反方向的力作用于曲管上。这样，筒在水流的反冲作用下，绕竖直轴转动，直到筒中的水流尽为止。

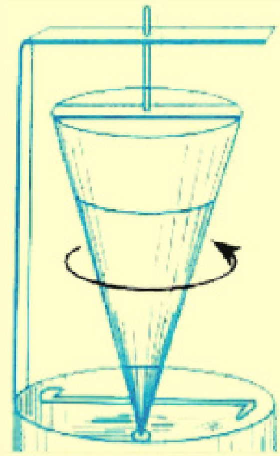


图 8.3.5　反击式水轮机模型

●火箭

火箭在中国宋代就已经出现，原始的火箭是在竹筒里装入一些火药，把竹筒捆在箭杆上，火药点燃后，燃烧生成的气体以很大的速度从筒里向后喷出，竹筒就带着箭向前飞去。

现代火箭是利用热气流高速向后喷出产生的反冲力来向前运动的喷气推进装置。它自身携带燃烧剂与氧化剂，不依赖空气中的氧助燃。火箭既可在大气中，又可在外层空间中飞行。现代火箭可作为快速远距离运输的工具，用来发射卫星和投送武器。

例题 8－8　火箭发射前的总质量为 M，燃料全部燃尽后的质量为 m。假设火箭燃气的喷射速度相对于地面为 v_0，问：燃料燃尽后火箭的速度 v 有多大？

分析　在火箭发射过程中，燃气向后高速喷出，箭身就向前进，属于反冲现象。在这个过程中，虽然有重力作用，但内力远大于重力，可以认为在此过程中系统动量守恒。

解　设火箭的速度方向为正方向，火箭发射前静止，总动量为 $p=0$。燃料喷出后，总动量为

$$p'=mv-(M-m)v_0$$

根据动量守恒，有 $p=p'$，即

$$0=mv-(M-m)v_0$$

则

$$v=\frac{M-m}{m}v_0$$

$$=\left(\frac{M}{m}-1\right)v_0$$

从上面的计算可以知道，火箭获得的最终速度主要取决于两个条件：一个是喷气速度 v_0；一个是质量比 $\frac{M}{m}$，即火箭发射前的质量与燃料燃尽后的质量之比。现代火箭燃料常用的是液氢，喷气速度在 2 000 ~ 4 000 m s^{-1}，喷气速度很难再大幅提高。因此，若要提高火箭的速度，必须提高质量比。一般情况下，这个参数小于 10。但是这样的火箭还不能达到发射人造卫星所需要的速度，要发射人造卫星，现在采用多级火箭。

多级火箭是由单级火箭组合而成的。如图 8.3.6 所示，发射时，先点燃第一级火箭，它的燃料用完之后空壳自动脱离，这时第二节火箭开始工作，第二级火箭在燃料用完以后空壳也自动脱离，以后就是下一级火箭开始工作。多级火箭能在工作中及时把对后面航行没有用的空壳抛掉，使火箭质量减小，在理论上能够达到很大的速度。但实际应用中一般不会超过四级，因为级数太多，连接机构和控制机构的质量会增加很多，工作的可靠性也会降低。


图 8.3.6　多级火箭的构件

做一做

水火箭又称气压式喷水火箭或水推进火箭。利用废弃的饮料瓶制作成动力舱、箭体、箭头、尾翼、降落伞。如图 8.3.7 所示，在饮料瓶中灌入三分之一的水，利用打气筒充入空气使其达到一定的压力后发射。压缩的空气把水从火箭尾部的喷嘴向下高速喷出，在反冲力的作用下，水火箭快速上升，像导弹一样有一个飞行轨迹，最后达到一定高度。

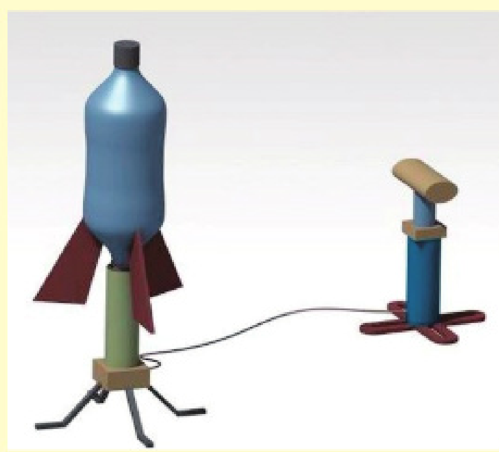


图 8.3.7　水火箭

水火箭的制作材料可选用可乐瓶、木塞、球类气针、圆珠笔芯、轻便不透气的桌布等。

练习 8-3

1. 下列属于反冲运动的是（　　）

A. 喷气式飞机的运动　　B. 汽车的运动

C. 火箭的运动　　D. 反击式水轮机的运动

2. 一艘炮艇在海面上匀速行驶，突然从艇头和艇尾同时向前和向后各发射一枚炮弹，设两枚炮弹的质量相同，相对船的速率相同，炮艇的牵引力、阻力均不变，则炮艇的动量和速度的变化是（　　）

A. 动量不变，速度增大　　B. 动量减小，速度不变

C. 动量增大，速度增大　　D. 动量增大，速度减小

3. 一艘有前后舱的船静止于水平面上，船前舱进水，堵住漏洞后用一台水泵把前舱的水抽往后舱，如图 8.3.8 所示。不计水的阻力，船的运动情况是（　　）

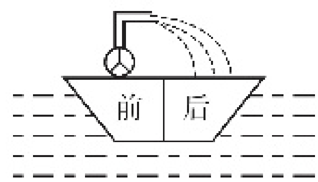


图 8.3.8

A. 向前运动　　B. 向后运动

C. 静止　　D. 无法判断

4. 从地面上竖直向上发射一枚炮弹，炮弹的初速度 $v_0 = 100\ \mathrm{m\ s^{-1}}$，经过 $t = 6.0\ \mathrm{s}$ 后，炮弹炸成质量相等的两块。从爆炸时算起，经过 $t_1 = 10.0\ \mathrm{s}$ 后，第一块碎片先落到发射地点。问：从爆炸时算起，另一块碎片经过多少时间也落回地面？（不计空气阻力，取 $g = 10\ \mathrm{m\ s^{-2}}$）

5. 太空中有一枚相对于空间站静止的火箭，火箭的质量为 M，火箭突然喷出质量为 m 的气体，气体喷出的速度为 v_0（相对于空间站）。紧接着，火箭再喷出质量也为 m 的另一部分气体，此后火箭获得的速度为 v（相对于空间站）。问：火箭第二次喷射的气体的速度是多大（相对于空间站）？

第 4 节　碰撞

图 8.4.1

碰撞是自然界十分普遍的现象。1919 年，卢瑟福（Ernest Rutherford，1871—1937）在研究微观粒子时，用镭放出的 α 粒子轰击氮原子核，发现了质子。天体与天体之间往往伴随着许多碰撞，恐龙灭绝据说是 6 500 万年前小行星撞击地球造成的。在日常生活中，也伴随着很多形式的碰撞，例如，打台球时球与球之间的对撞（如图 8.4.1），打乒乓球时球拍对乒乓球的拍打，钉钉子时榔头对钉子的击打，等等。这些都是通过碰撞的形式进行相互作用的。

由于在碰撞中，主要的相互作用力为内力，且内力远远大于外力，通过本章第 2 节的学习，我们已经知道，系统的动量可认为是守恒的。

平面上一个运动的球与一个静止的球碰撞，碰撞前球的运动速度与两球心的连线在同一条直线上，碰撞后两球的速度仍沿着这条直线。这种碰撞称为**正碰**（**head on collision**），也叫**对心碰撞**，如图 8.4.2 所示。由于在碰撞前后，速度在同一条直线上，所以正碰属于一维碰撞。

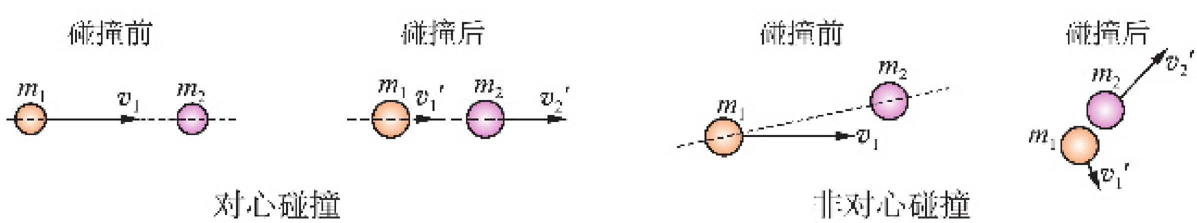


图 8.4.2　两种碰撞

平面上一个运动的球与一个静止的球碰撞，如果碰撞前球的运动速度与两球心的连线不在同一条直线上，碰撞后两球的速度都会偏离原来两球心的连线。这种碰撞称为**非对心碰撞**（**non-head on collision**），也叫**斜碰**（**oblique collision**），如图 8.4.2 所示。发生非对心碰撞的两个物体，碰撞后的速度都不与原来的速度在同一条直线上，属于平面内的二维碰撞。

如果两个球在空间中发生非对心碰撞，碰撞后的速度在三个维度上都有分量，那就属于三维碰撞的问题了。

在高中阶段，我们重点讨论一维碰撞的问题。

1 碰撞过程

演示 8-2

如图 8.4.3 所示，将两个质量相同的钢球分别吊在细绳上，静止时两球挨在一起。现使 A 球偏开一个角度后放开，它回到原来的位置时撞上 B 球。你会观察到怎样的现象呢？

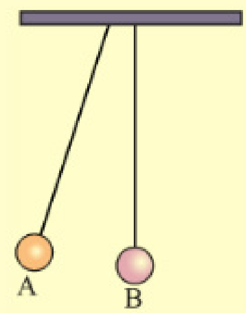


图 8.4.3

由于绳长相等，碰撞时 A 球与 B 球等高，发生对心碰撞，属于一维碰撞问题。通过演示可以看到，碰撞后 A 球静止，B 球摆到与 A 球原来几乎相等的高度；当 B 球摆回来撞上 A 球后，B 球又静止，A 球又摆到与原来差不多的高度上。这个过程还将继续下去，两个球交替摆动。在这个过程中，我们看到碰撞后一个球停下来而把动量完全传递给了另一个球，在这个过程中动量守恒。

但是，动量守恒的情况还可以设想很多种，例如，碰撞前 A 球的速度是 v，碰撞后它以 $-v$ 的速度弹回，而 B 球以 $2v$ 的速度向前运动；或者碰撞后 A 球以 $0.4v$ 的速度，B 球以 $0.6v$ 的速度同时向前运动。这两种情况都不违反动量守恒定律，在不违反动量守恒定律的许多可能情况中，为什么实际发生的只有我们看到的这一种情况呢？

原来，在碰撞过程中，还涉及能量的传递和转化。

对于碰撞的过程，如图 8.4.4 所示，两个小球相互靠近并接触（如图 8.4.4 a），由于相互挤压产生形变（如图 8.4.4 b），速度相等时形变达到最大（如图 8.4.4 c），然后形变逐渐恢复（如图 8.4.4 d），最后相互分离（如图 8.4.4 e）。在这个过程中，能量的传递出现在形变过程中。若两者发生的都是弹性形变，则系统机械能守恒，发生的碰撞是**弹性碰撞**（**elastic collision**）。若相互接触过程中发生的不是弹性形变，则系统机械能不守恒，发生的碰撞是**非弹性碰撞**（**inelastic collision**）。

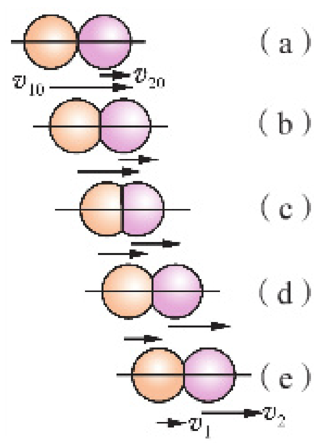


图 8.4.4　碰撞过程

② 弹性碰撞

如果碰撞过程中机械能守恒，这样的碰撞叫作弹性碰撞。

如图 8.4.5 所示，设碰撞前两球的质量分别为 m_1 和 m_2，第一个球的速度为 v_1，第二个球的速度为 0。碰撞后，两球的速度分别为 $v_1{}'$ 和 $v_2{}'$。若两球发生弹性碰撞，则两球所组成的系统同时满足动量守恒和机械能守恒。

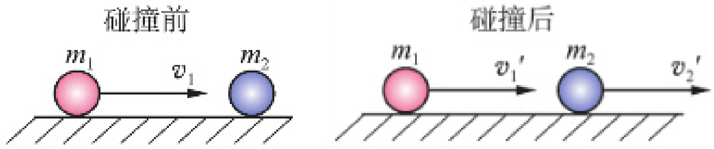


图 8.4.5

系统动量守恒的表达式为

$$m_1v_1 = m_1v_1{}' + m_2v_2{}'$$

系统机械能守恒的表达式为

$$\frac{1}{2}m_1v_1^2-\frac{1}{2}m_1v_1'^2+\frac{1}{2}m_2v_2'^2$$

可以解出

$$v_1'=\frac{m_1-m_2}{m_1-m_2}v_1\ ,\ v_2'=\frac{2m_1}{m_1+m_2}v_1$$

对于这个结果，我们做一些简单的讨论。

（1）若 $m_1 = m_2$，这时

$$m_1 - m_2 = 0,\ m_1 + m_2 = 2\,m_1$$

由上面两式，有

$$v_1{}' = 0,\ v_2{}' = v_1$$

碰撞后速度发生交换。这与我们在演示 8-2 中看到的实验结果相吻合，所以两个球之间的碰撞为弹性碰撞。

（2）若 $m_1 \ll m_2$，即第二个球的质量比第一个球的质量大得多，这时

$$m_1 - m_2 \approx - m_2,\ \frac{2m_1}{m_1+m_2} \approx 0$$

有

$$v_1{}' = - v_1,\ v_2{}' = 0$$

这表示碰撞后第一个小球被弹了回去，以原来的速率反向运动，而第二个小球仍然静止。这种情况很普遍，例如，乒乓球与墙壁的碰撞，篮球与地面的碰撞（图 8.4.6），气体分子与容器器壁的碰撞，等等。

图 8.4.6

（3）若 $m_1 \gg m_2$，即第一个球的质量比第二个球的质

量大得多，这时

$$m_1 - m_2 \approx m_1,\ m_1 + m_2 \approx m_1$$

根据上面的公式，有

$$v_1' = v_1,\ v_2' = 2v_1$$

这表示碰撞后第一个球的速度几乎没有改变，而第二个球却以 $2v_1$ 的速度被撞了出去。

做一做

如图 8.4.7 所示，将乒乓球放在篮球上，使它们一起从同一高度释放，篮球碰到地面后反弹，试观察乒乓球反弹的高度。你能够解释这个实验现象吗？

图 8.4.7

③ 非弹性碰撞

在很多情况下，碰撞过程往往伴随着机械能的损失。**如果在碰撞过程中机械能不守恒，这样的碰撞叫作非弹性碰撞**。

若两个物体碰撞后相互黏合，以相同的速度向前运动，这种碰撞叫作**完全非弹性碰撞**。可以证明，在这种情况下，碰撞后两物体的相对速度为零，机械能损失最多。

例题 8－9 冲击摆是一种用来测量子弹速度的装置。如图 8.4.8 所示，将质量为 m_1 的沙箱用绳悬挂起来，使它只能摆动不能转动。设绳长为 L，开始时沙箱静止，将质量为 m_2、速度为 v 的子弹沿沙箱能摆动的方向射入后，子弹和沙箱一起运动。现测出沙箱偏离平衡位置的最大角度为 α，试计算子弹入射前的速度 v。

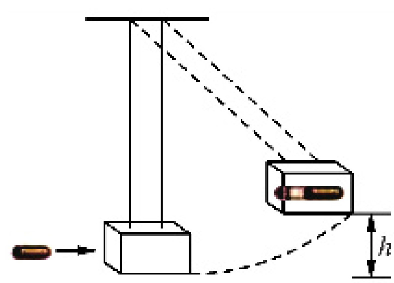


图 8.4.8 冲击摆

分析 以子弹和沙箱为系统，碰撞前后水平方向系统不受外力，则该方向系统动量守恒，且碰撞后它们以相同的速度运动，则发生的是完全非弹性碰撞，此时系统机械能

不守恒。之后冲击摆向上摆动，系统的动能转化为系统的重力势能。

解　设碰撞后，它们共同的速度为 u，有

$$m_2v=(m_1+m_2)u$$

因为系统受重力和拉力作用，拉力不做功，只有重力做功，所以机械能守恒，即

$$\frac{1}{2}(m_1+m_2)u^2=(m_1+m_2)gh$$

碰撞中机械能不守恒，碰撞后机械能守恒。

由几何关系，知

$$h=L(1-\cos\alpha)=2L\sin^2\frac{\alpha}{2}$$

由以上各式，得出

$$v=\frac{2(m_1+m_2)}{m_2}\sqrt{gL}\sin\frac{\alpha}{2}$$

做一做

牛顿摆是常见的桌面演示装置，如图 8.4.9 所示，5 个质量相同的球由吊绳固定，彼此紧密排列。如果将右侧的一个球撞击左球，会出现什么现象呢？如果是 2 个、3 个呢？请你试一试，并运用本节课的知识进行解释。

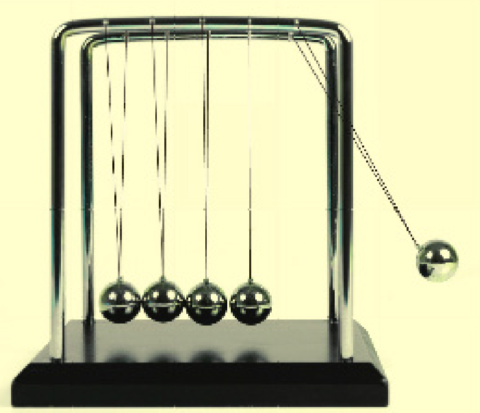


图 8.4.9

练习 8-4

1. 现有甲、乙两个滑块，质量分别为 $3m$ 和 m，以相同的速率 v 在光滑水平面上相向运动，发生了碰撞。已知碰撞后，甲滑块静止不动，那么这次碰撞是（　　）

   A. 弹性碰撞　　　　B. 非弹性碰撞

   C. 完全非弹性碰撞　　　　D. 条件不足，无法确定

2. 甲物体在光滑水平面上的运动速度为 v_1，与静止的乙物体相碰，碰撞过程中无机械能损失。下列结论正确的是（　　）

   A. 乙的质量等于甲的质量时，碰撞后乙的速度为 v_1

   B. 乙的质量远小于甲的质量时，碰撞后乙的速率是 $2v_1$

   C. 乙的质量远大于甲的质量时，碰撞后甲的速率是 v_1

   D. 碰撞过程中甲对乙做的功大于乙动能的增量

3. 质量为 M、内壁间距为 L 的箱子静止于光滑的水平面上，箱子中间有一个质量为 m 的小物块，小物块与箱子底板间的动摩擦系数为 μ，初始时小物块停在箱子正中间。现给小物块一水平向右的初速度 v，如图 8.4.10 所示，小物块与箱壁碰撞 N 次后恰又回到箱子正中间，并与箱子保持相对静止。设碰撞都是弹性的，则整个过程中，系统损失的动能为（　　）

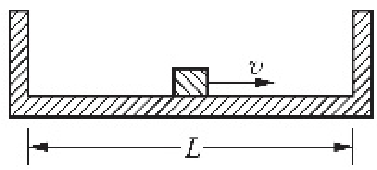


图 8.4.10

   A. $\frac{1}{2}mv^2$　　　　B. $\frac{1}{2}\frac{mM}{2m+M}v^2$

   C. $\frac{1}{2}N\mu mgL$　　　　D. $N\mu mgL$

4. 如图 8.4.11 所示，运动的球 A 在光滑水平面上与一个原来静止的球 B 发生弹性碰撞。试问：当 A、B 的质量关系如何，可以实现使 B 球获得：(a) 最大的动能；(b) 最大的速度；(c) 最大的动量？

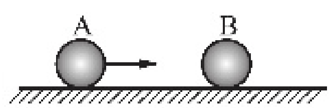
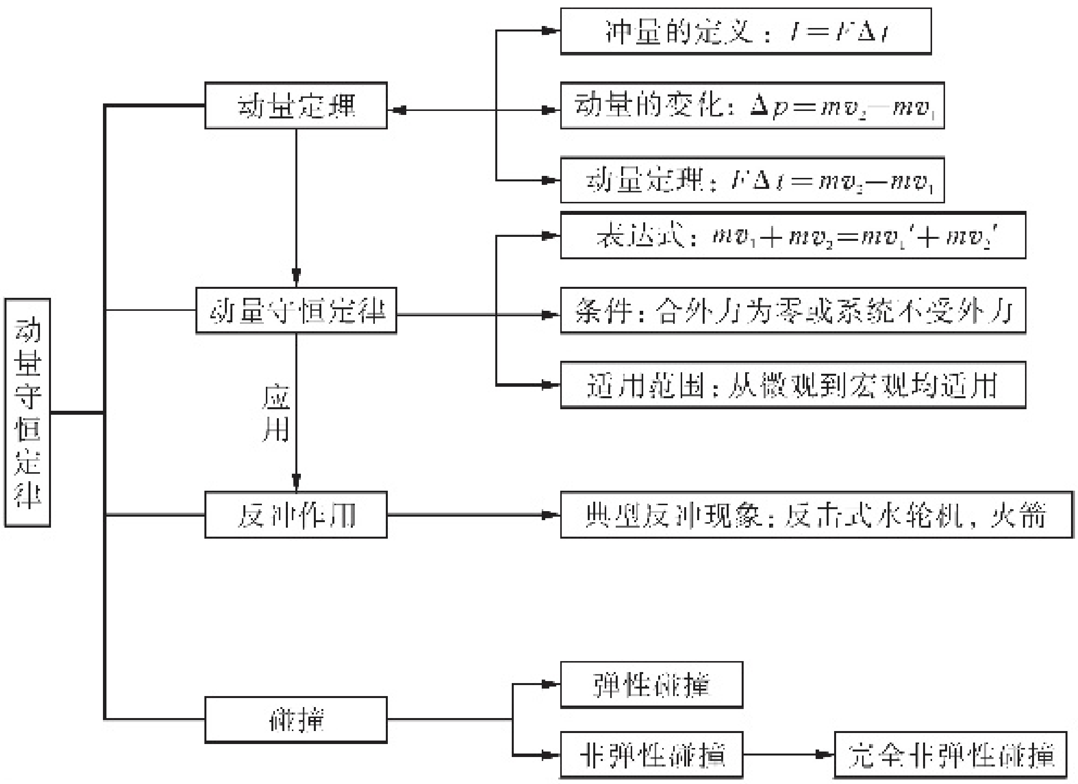


图 8.4.11

5. 物理学家卢瑟福在一篇文章中写道：可以预言，当 α 粒子与氢原子相碰时，可使之迅速运动起来。按一维弹性碰撞考虑，很容易证明，氢原子的速度可达到 α 粒子碰撞前速度的 1.6 倍，即氢原子获得的能量占入射粒子能量的 64%。试证明此结论。（碰撞是完全弹性的，且 α 粒子的质量接近氢原子质量的 4 倍）

章末回顾

本章基本知识结构



总练习八

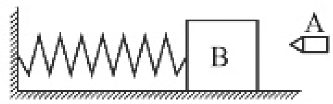
基础练习

1. 一个质量为 100 g 的小球，从 0.80 m 高处自由下落到一块厚软垫上。若从小球接触软垫到小球陷至最低点经历了 0.2 s，则这段时间内软垫对小球的冲量为________。（取 $g=10\ \mathrm{m\ s^{-2}}$，不计空气阻力）

2. 为了模拟宇宙大爆炸的情形，科学家们让两个带正电的重离子加速后，沿同一条直线相向运动并发生猛烈碰撞。若要使碰撞前的动能尽可能多地转化为内能，则应设法使离子在碰撞前的瞬间具有（　　）

A. 相同的速率　　B. 相同的质量　　C. 相同的动能　　D. 大小相同的动量

3. 在如图所示的装置中，木块 B 与水平桌面间的接触是光滑的，子弹 A 沿水平方向射入木块后留在木块内，并将弹簧压缩到最短。现将子弹、木块和弹簧合在一起作为研究对象（系统），则此系统在从子弹开始射入木块到弹簧压缩至最短的过程中（　　）



（第 3 题）

A. 动量守恒，机械能守恒　　B. 动量不守恒，机械能不守恒

C. 动量守恒，机械能不守恒　　D. 动量不守恒，机械能守恒

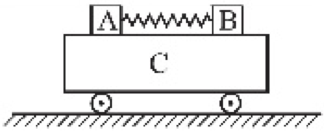
4. 静止在水面上的船长为 L，质量为 M，一个质量为 m 的人站在船头。当此人由船头走到船尾时，不计水的阻力，船移动的距离是（　　）

A. $\dfrac{mL}{M}$　　B. $\dfrac{mL}{M+m}$　　C. $\dfrac{mL}{M-m}$　　D. $\dfrac{(M-m)L}{M+m}$

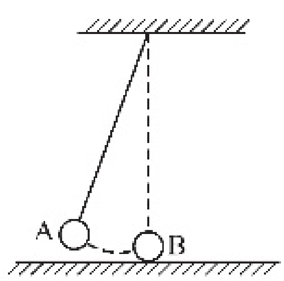
5. 如图所示，A、B 两个物体的质量比 $m_A : m_B = 3 : 2$，它们原来静止在平板车 C 上，A、B 间有一根被压缩了的弹簧，A、B 与平板车上表面间的动摩擦系数相同，地面光滑。当弹簧突然释放后，则有（　　）

A. A、B 系统动量守恒　　B. A、B、C 系统动量守恒

C. 平板车向左运动　　D. 平板车向右运动



（第 5 题）



（第 6 题）

6. 如图所示，小球 A 和小球 B 质量相同，B 置于光滑水平面上，当 A 从高为 h 处由静止摆下，到达最低点恰好与 B 相碰，并黏合在一起继续摆动，它们能上升的最大高度是（　　）

A. h　　　　B. $\frac{h}{2}$　　　　C. $\frac{h}{4}$　　　　D. $\frac{h}{8}$

7. 向空中发射一个物体，不计空气阻力。当此物体的速度恰好沿水平方向时，物体炸裂成 A、B 两块。若质量较大的 A 块的速度方向仍沿原来的方向，则（　　）

A. B 的速度方向一定与原速度方向相反

B. 从炸裂到落地的这段时间里，A 飞行的水平距离一定比 B 的大

C. A、B 一定同时到达水平地面

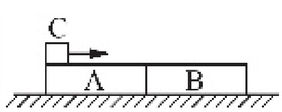
D. 在炸裂过程中，A、B 受到的爆炸力的冲量大小一定相等

8. 质量为 M 的小船以速度 v_0 行驶，船上有两个质量均为 m 的人 A 和 B，A 和 B 分别静止站在船头和船尾。现 A 沿水平方向以速率 v（相对于静止水面）向前跃入水中，然后 B 沿水平方向以同一速率 v（相对于静止水面）向后跃入水中。求 B 跃出后小船的速度。

9. 如图所示，质量分别为 $m_A = 0.5\ \mathrm{kg}$、$m_B = 0.4\ \mathrm{kg}$ 的长木板 A 和 B 紧挨在一起静止在光滑的水平面上，质量为 $m_C = 0.1\ \mathrm{kg}$ 的木块 C 以初速度 $v_{C0} = 10\ \mathrm{m\,s^{-1}}$ 滑上 A 板左端，最后 C 和 B 板相对静止时的共同速度 $v_{CB} = 1.5\ \mathrm{m\,s^{-1}}$。求：

（a）A 板最后的速度 v_A。

（b）C 刚离开 A 板时的速度 v_C。



（第 9 题）

（第 10 题）

10. 如图所示，甲、乙两个小孩各坐一辆冰车在摩擦不计的冰面上相向运动，已知甲连同冰车的总质量 $M = 30\ \mathrm{kg}$，乙连同冰车的总质量也是 $M = 30\ \mathrm{kg}$，甲还推着一只质量 $m = 15\ \mathrm{kg}$ 的箱子。甲、乙滑行的速度大小均为 $2\ \mathrm{m\,s^{-1}}$，为了避免相撞，在某时刻甲将箱子沿冰面推给乙，箱子滑到乙处时被乙接住。试问：

（a）甲至少用多大的速度（相对于地面）将箱子推出，才可避免和乙相撞？

（b）甲在推出时对箱子做了多少功？

提高练习

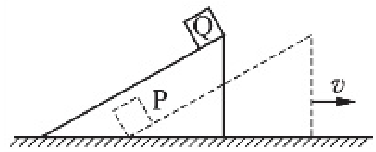
11. 如图所示，带有斜面的木块 P 原静止在光滑的水平桌面上，另一个小木块 Q 从 P 的顶端由静止开始沿光滑的斜面下滑。当 Q 滑到 P 的底部时，P 向右移动了一段距离，且具有水平向右的速度 v。下列说法正确的是（　　）

A. P、Q 组成的系统动量守恒

B. P、Q 组成的系统机械能守恒

C. Q 减少的重力势能等于 P 增加的动能

D. Q 减少的机械能等于 P 增加的动能



（第 11 题）

12. 甲、乙两个小球在水平光滑直轨道上向同方向运动，已知它们的动量分别是 $p_1 = 5\ \mathrm{kg\,m\,s^{-1}}$、$p_2 = 7\ \mathrm{kg\,m\,s^{-1}}$。甲从后面追上乙并发生碰撞，碰撞后乙球的动量变为 $p'_2 = 10\ \mathrm{kg\,m\,s^{-1}}$。两球质量 m_1 与 m_2 间的关系可能是（　　）

A. $m_1 = m_2$　　　　B. $m_1 = 2m_2$

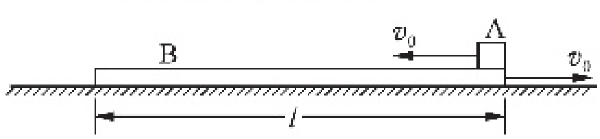
C. $m_1 = 4m_2$　　　　D. $m_1 = 6m_2$

13. 一名连同装备总质量 $M = 100\ \mathrm{kg}$ 的宇航员，脱离宇宙飞船后，在离飞船 $L = 45\ \mathrm{m}$ 处与飞船处于相对静止状态。他带着一个装有 $m = 0.5\ \mathrm{kg}$ 氧气的贮氧筒，贮氧筒有一个可以使氧气以 $v = 50\ \mathrm{m\,s^{-1}}$ 的速度喷出的喷嘴。宇航员必须向着与返回飞船相反的方向释放氧气，才能回到飞船上去，同时又必须保留一部分氧气供他在飞向飞船的途中呼吸。宇航员呼吸的耗氧率 $\lambda = 2.5\times10^{-4}\ \mathrm{kg\,s^{-1}}$。如果他在开始返回的瞬间释放 $\Delta m = 0.1\ \mathrm{kg}$ 的氧气，他能安全回到飞船吗？如果宇航员想以最短的时间返回飞船，他开始最多能释放出多少质量氧气？这时他返回飞船所用时间是多少？

14. 如图所示，一个质量为 M、长为 l 的长方形木板 B 放在光滑的水平地面上，在其右端放一个质量为 m 的小木块 A，$m < M$。现以地面为参照系给 A 和 B 以大小相等、方向相反的初速度，使 A 开始向左运动、B 开始向右运动，但最后 A 刚好没有滑离 B 板。求：

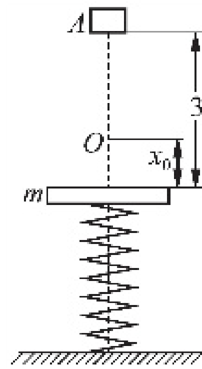
（a）它们最后的速度的大小和方向。

（b）A 向左运动到达的最远处（从地面上看）离出发点的距离。



（第 14 题）

15. 质量为 m 的钢板与直立轻弹簧的上端连接，弹簧下端固定在地面上。钢板平衡时，弹簧的压缩量为 x_0，如图所示。一个物块从钢板正上方距离为 $3x_0$ 的 A 处自由下落，打在钢板上并立刻与钢板一起向下运动，但不粘连。它们到达最低点后又向上运动。当物块的质量为 m 时，它们恰能回到 O 点。若物块的质量为 $2m$，仍从 A 处自由下落，则物块与钢板回到 O 点时，还具有向上的速度。求物块向上运动到达的最高点与 O 点的距离。

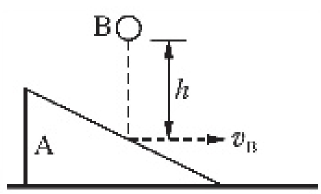


（第 15 题）

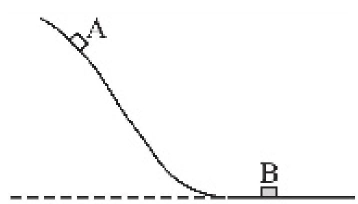
16. 如图所示，一个带斜面的物体 A 静止在光滑的水平面上，它的质量 $M = 0.5$ kg。另一个质量 $m = 0.2$ kg 的小物体 B 从高处自由下落，落到 A 的斜面上，下落高度 $h = 1.75$ m。B 与斜面碰撞后的速度变为水平向右，碰撞过程中 A、B 组成的系统机械能没有损失。（取 $g = 10\ \mathrm{m\ s^{-2}}$）

（a）碰撞后 A、B 的速度各多大？

（b）碰撞过程中，A、B 的动量变化量各多大？



（第 16 题）



（第 17 题）

17. 一个质量为 m 的小滑块 A 沿斜坡由静止开始下滑，与一个质量为 km 的静止在水平地面上的小滑块 B 发生正碰撞，如图所示。设碰撞是弹性的，且一切摩擦不计。为了使 A、B 能且只能发生两次碰撞，则 k 的值应满足什么条件？

18. 如图所示，在水平桌面上放有长木板 C，C 上右端是固定挡板 P，在 C 的左端和中点处各放有小物块 A 和 B，A、B 的尺寸以及 P 的厚度皆可忽略不计，A、B 之间和 B、P 之间的距离皆为 L。设长木板 C 与桌面之间无摩擦，A、C 之间和 B、C 之间的静摩擦系数及滑动摩擦系数均为 μ，A、B、C（连同挡板 P）的质量相同。开始时，B 和 C 静止，A 以某一初速度向右运动。试问：下列情况是否能发生？若能发生，请求出 A 的初速度 v_0 应满足的条件；若不能发生，请定量说明理由。

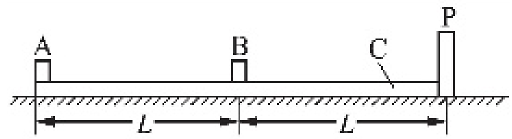
（a）A 与 B 发生碰撞。

（b）A 与 B 发生碰撞（设为弹性碰撞）后，B 与挡板 P 发生碰撞。

（c）B 与挡板 P 发生碰撞（设为弹性碰撞）后，B 与 A 在 C 上再发生碰撞。

（d）A 从 C 上掉下来。

（e）B 从 C 上掉下来。



（第 18 题）

第9章 转动

本章提要

1. 怎样描述物体的转动。
2. 怎样描述物体转动的惯性。
3. 力怎样改变物体的转动。
4. 物体转动的动能与哪些因素有关。
5. 关于物体转动的一个重要的守恒定律——角动量守恒定律。

学前储备

1. 知道圆周运动的线速度、角速度的概念及它们之间的关系。
2. 知道什么是物体的惯性。
3. 知道什么是物体的动能。
4. 知道力和力矩的概念，知道什么是加速度。
5. 知道什么是动量，什么是动量守恒定律。

第 1 节　刚体及其转动

在前面的学习中，我们所讨论的都是可以被视为质点的物体和由这样的物体组成的物体系统的力学规律。但是，自然界中大量的运动物体并不能简单地当作质点看待，本章我们所研究的物体就不能简单地当作质点来处理。

1 刚体及刚体的平动

一般情况下物体受到力的作用，其形状或多或少会发生变化，但是有些物体的形状变化很小，可以忽略不计，如一个钢球受力时就是如此。我们把这种在运动过程中其大小和形状都不发生变化的物体称为**刚体（rigid body）**。显然，与质点一样，刚体也是一种理想模型。在本章谈到的物体我们都可以看作刚体。

如图 9.1.1 所示，如果刚体在运动过程中，其内任意两点连成的一条线，在运动中都保持平行，这样的运动我们称之为**刚体的平动**。抽屉在抽出来时，可以认为它发生了平动。在蹬自行车时，如果忽略脚在蹬板上的摆动，我们可以将自行车蹬板的运动近似看作是平动。

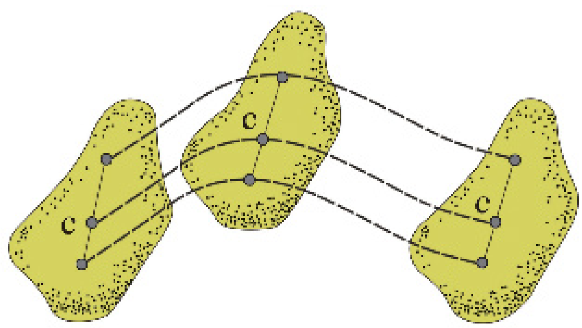


图 9.1.1　刚体的平动

思考与讨论

从斜面上下滑的木块是平动吗？从斜面上滚下的皮球的运动与前面的木块一样吗？请说明理由。

刚体的质量分布在整个刚体上。为了研究刚体的运动，我们把刚体的等效质量中心称为**刚体的质心（centre of mass）**。刚体在做平动运动时，刚体上每一点的运动规律都是

一样的。为了研究的方便，我们通常会用刚体质心的运动，来代表刚体平动时每一点的运动。我们在第 4 章中已经学过了物体重心的概念，重心代表了物体重力作用的等效中心。虽然物体的质心和物体的重心从定义上看不一样，但在物体体积不是很大的情况下，可以证明，一个物体的质心和重心是重合在一起的。

2 刚体定轴转动的描述

在日常生活中，我们观察门窗的打开或关上以及机器上飞轮的运动，会发现，它们运动的特点是刚体上各点都在绕着位于某一直线上的点做圆周运动，各点运动轨迹所在的平面与此直线垂直。刚体的这种运动叫作**转动**（**rotation**），这条直线叫作**转轴**。如果转轴相对于给定参考系（如地面）是静止不动的，这样的转动就叫作**刚体的定轴转动**。下面我们研究如何来描述刚体的定轴转动。

●**角速度**

物体的转动有快有慢，因此，在相同的时间内，不同的物体转过的角度可能是不同的。为了描述转动的快慢，我们把物体转过的角度跟转过这个角度所用时间的比值，叫作**角速度**（**angular velocity**），用 ω 来表示。如果用 $\Delta\theta$ 表示在 Δt 这样一段时间内物体上的一点转过的角度，那么角速度 ω 表示为

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

如果时间 Δt 很短，也就是 $\Delta t\rightarrow 0$，ω 就表示某一时刻刚体转动的瞬时角速度。角速度的单位是弧度每秒，符号是 rad s^{-1}。

●**线速度**

刚体转动时，其上各点的角速度都是相同的，但是到转轴距离不同的点，在相同时间内转过的弧长并不相同。例如，在图 9.1.2 中，经过相同的时间，M 点比 N 点转过的弧长要短。为了描述这种差别，我们又引入了**线速度**的概念。刚体上某点线速度的大小等于这个点转过的弧长与所用时间的比值。如果用 Δs 表示刚体上某点在 Δt 时间内转过的弧长，那么线速度 v 的大小可以表示为

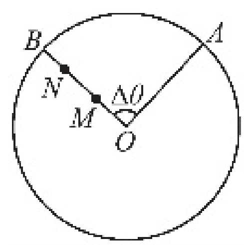


图 9.1.2

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

线速度的大小也叫线速率。

如图 9.1.2 所示，如果角 θ 的单位用弧度，它所对的弧长为 s，那么弧的半径 r 跟 θ 的关系为

$$s = r\theta$$

对于刚体上某个确定的点来说，r 是一个确定值，于是有

$$\Delta s = r\Delta\theta$$

上式中两边同时除以 Δt，得

$$v = r\omega$$

或

$$\omega=\frac{v}{r}$$

●角加速度

如果刚体转动的角速度也是变化的，在时刻 t 的角速度为 ω，在时刻 $t+\Delta t$ 的角速度为 $\omega+\Delta\omega$，那么我们把 $\Delta\omega$ 与 Δt 的比值叫作刚体在 Δt 这段时间间隔内的**角加速度（angular acceleration）**，用符号 α 表示，即

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

它的单位是弧度每二次方秒，符号为 rad s^{-2}。当 $\Delta t\to 0$ 时，α 就表示某一时刻刚体转动的瞬时角加速度。角加速度是描述刚体角速度变化快慢的物理量。

③ 刚体的匀变速转动

在定轴转动中，若刚体在任何时刻的角加速度都一样，则在相同的时间间隔内刚体角速度的变化量相同，我们说刚体在做**匀角加速度运动**或**匀变速转动**。仿照质点的匀变速直线运动的情况，我们很容易从角速度及角加速度的定义推导出刚体匀变速转动的关系式：

$$\omega = \omega_0 + \alpha t$$

$$\theta=\omega_0 t+\frac{1}{2}\alpha t^2$$

$$\omega^2 - \omega_0^2 = 2\alpha\theta$$

式中 ω_0 为 $t=0$ 时的角速度，ω 为时刻 t 的角速度，α 为角加速度，θ 为从 $t=0$ 到 t 时刻之间转动的角度。

例题 9－1 某型号电动机的转子由静止开始做匀变速转动，5.0 s 后转速增到 1 440 rpm，试求此转子的角加速度和 4.0 s 内转过的角度。

解 电动机转子的初角速度 $\omega_0=0$，

5.0 s 末转子的转速 $n=1\,440$ rpm，

所以　　　　　频率 $f=\frac{1\,440}{60}\ \text{Hz}=24\ \text{Hz}$

$$
\begin{aligned}
\text{角速度}\ \omega &= 2\pi f \\
&= 2\pi\times 24\ \text{rad s}^{-1} \\
&= 48\pi\ \text{rad s}^{-1}
\end{aligned}
$$

$$
\begin{aligned}
\text{转子的角加速度}\ \alpha &= \frac{\omega-\omega_0}{t} \\
&= \frac{48\pi-0}{5}\ \text{rad s}^{-2} \\
&\approx 30\ \text{rad s}^{-2}
\end{aligned}
$$

$$
\begin{aligned}
\text{转子 4 s 内转过的角度}\ \theta &= \omega_0 t+\frac{1}{2}\alpha t^2 \\
&= 0+\frac{1}{2}\times 30\times 4^2\ \text{rad} \\
&= 240\ \text{rad}
\end{aligned}
$$

练习 9-1

1. 列举几个生活中或生产中见到的平动和转动的例子。

2. 半径为 15 cm 的砂轮，每 0.2 s 转一圈。砂轮旋转的角速度为多大？砂轮上离转轴不同距离的点，角速度大小是否相同？线速度大小是否相同？试求离转轴最远处点的线速度的大小。

3. 一个刚体绕定轴做匀变速转动，已知角加速度为 2.0 rad s^{-2}，开始时角速度为 4.0 rad s^{-1}。问：

（a）$t=3$ s 时刚体的角速度是多大？

（b）在 3 s 内刚体转过了多少圈？

第 2 节　刚体的转动惯量

1 转动惯性

在研究物体的平动时，我们知道物体具有惯性，如果不受力的作用，它就会保持匀速直线运动或静止状态不变。与此类似，转动的物体也具有惯性。

演示 9-1

观察物体转动的惯性

在如图 9.2.1 所示的装置中，金属圆盘 R 可以绕轴 AA' 转动，而圆环 M 和圆环 N 又可以绕各自的轴 BB' 和 CC' 转动。这样，金属盘的轴 AA' 就可以指向空间任何方向，所以这个装置叫作万向架。

把细绳绕在圆盘 R 的轴上，猛然抽动细绳，使圆盘 R 高速旋转，然后用手改变框架的方向，观察轴 AA' 的方向是否改变。

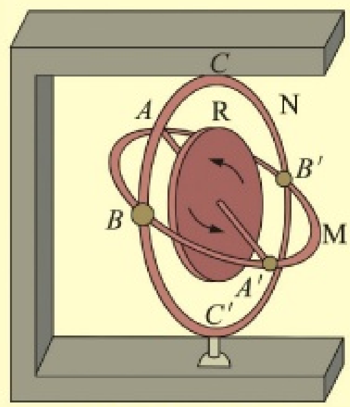


图 9.2.1　万向架

通过演示实验我们观察到，无论怎样转动框架，圆盘转动轴 AA' 在空间的指向都不改变，圆盘的转速也没有发生改变，这说明转动着的物体也具有惯性。

物体在转动时具有惯性，那么转动时的惯性与什么有关呢？在第 4 章的学习中，我们知道物体平动时的惯性跟质量有关，质量越大，惯性越大，质量是物体平动时惯性大小的量度。但是，转动的情况更复杂些。物体转动的惯性不仅与质量有关，还与其他因素有关。例如，两个质量相同的物体，如果一个物体的质量集中于距转轴较远的地方，另一个物体的质量均匀分布或集中在距转轴较近的地方，它们的转动惯性就不一样。

在演示 9-2 中，A、B 在杆的两端时，砝码落到桌面的时间较长，这表明，质量如果集中在距转轴较远的地方，物体就不容易“启动”，它的转动惯性就比较大。

演示 9-2

物体的转动惯性与质量分布的关系

如图 9.2.2 所示，A 和 B 是套在杆 CD 上的两个重物，可以固定在杆的不同位置上。砝码 M 的悬线绕在轴 OO' 上，砝码下落时可以带动杆 CD 旋转。

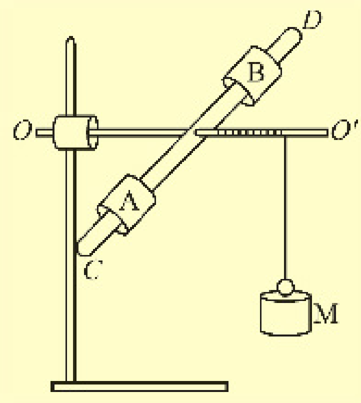


图 9.2.2

先把 A、B 固定在杆 CD 的两端，把砝码的悬线全部绕在轴 OO' 上，使杆和砝码从静止开始运动，记录砝码落到桌面的时间。然后把 A、B 移到靠近轴 OO' 的位置，重复上述操作。比较两次记录的时间，它们相同吗？如果不同，说明了什么问题？

如图 9.2.3 所示，工厂机床上的飞轮的外沿总是做得比较厚实，其目的之一也就是为了获得比较大的转动惯性。在机床运转时，飞轮有较大的转动惯性，飞轮的角速度就比较平稳，我们以后还会看到，这时飞轮储存的转动动能也会比较大。


图 9.2.3　边缘厚实的飞轮

2 转动惯量

物理学中为了量度物体转动时的惯性，引入了一个物理量，这个物理量叫作**转动惯量（moment of inertia）**，用 I 表示。

一个质量为 m 的质点，用细线固定在转轴 OO' 上，使细线与 OO' 垂直，细线长为 r，质量可以忽略，如图 9.2.4 所示，那么质点绕 OO' 转动时的转动惯量是

$$I = mr^2$$

如果物体有一定的大小，不能看作一个质点，我们可以把它看作是由很多质点组合而成（如图 9.2.5 所示），各质点的质量分别为 m_1、m_2、…，计算出每个质点对轴 OO' 的转动惯量，然后再取和，这就是物体对转轴的转动惯量，即

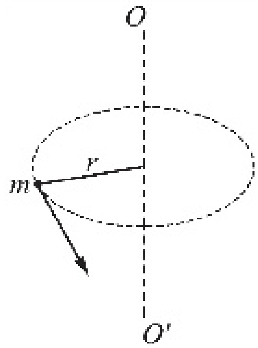


图 9.2.4

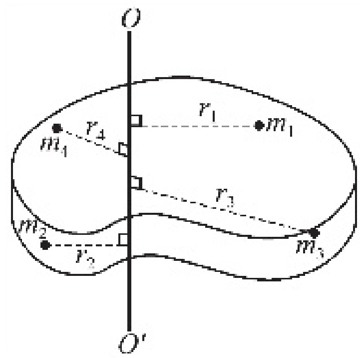


图 9.2.5

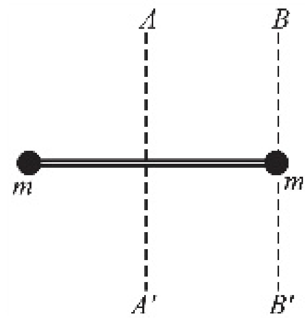


图 9.2.6

$$I = m_1r_1^2 + m_2r_2^2 + m_3r_3^2 + \cdots$$

或

$$I=\sum_i m_i r_i^2$$

我们把 $I=\sum_i m_i r_i^2$ 叫作转动惯量的定义式。

我们在给出物体的转动惯量时，一定要说明这个转动惯量是相对于哪条转轴而言的。下面先分析一个简单的例子。如图 9.2.6 所示，一根质量可以忽略的轻杆，长为 l，两端各固定一个质量为 m 的小球。如果转轴是轻杆的中垂线 AA'，根据转动惯量的定义式，该系统的转动惯量为

$$I=m\left(\frac{1}{2}l\right)^2+m\left(\frac{1}{2}l\right)^2=\frac{1}{2}ml^2$$

但对于过轻杆的端点并且与轻杆垂直的轴 BB' 而言，因为有一个小球在转轴上，故系统的转动惯量为

$$I' = ml^2 + 0 = ml^2$$

可见，同一个物体对不同转轴，其转动惯量是不一样的。

根据以上的分析可知，物体内部质量的分布对转动惯量的影响是很大的。物体质量分布不同，组成物体的各质点对轴的距离就不同。在转动惯量的表达式中，与距离的关系是与它的二次方成正比，这就表示质量分布对转动惯量的影响非常大。

例题 9－2 一轻杆上固定着 3 个质量均为 m 的质点并绕垂直于杆的轴转动，3 个质点到轴的距离分别为 r、$2r$ 和 $3r$，求这个系统的转动惯量。

解 根据转动惯量的定义式 $I=\sum_i m_i r_i^2$，这个系统对转轴的转动惯量为

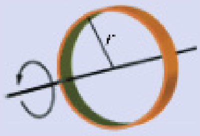
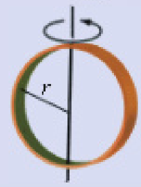
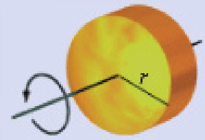
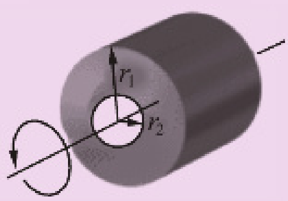
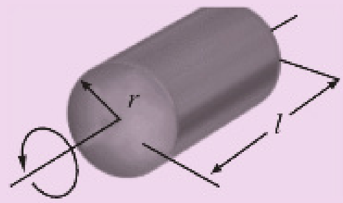
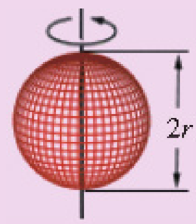
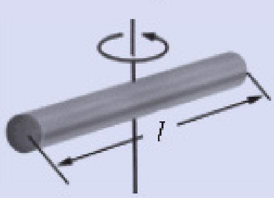
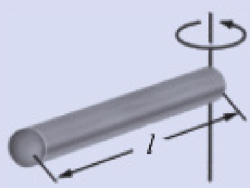
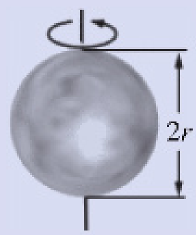
$$I = mr^2 + m(2r)^2 + m(3r)^2$$

即

$$I = 14mr^2$$

对于形状规则、质量均匀分布的物体，它们的转动惯量可以用高等数学的方法计算出来，常见物体的转动惯量如下表所示。

表 9-1　常见物体对不同转轴的转动惯量

<table>
<tr>
<td>圆环：转轴通过中心与环面垂直
$I=mr^2$

</td>
<td>圆环：转轴沿直径
$I=\frac{mr^2}{2}$

</td>
<td>薄圆盘：转轴通过中心与盘面垂直
$I=\frac{mr^2}{2}$

</td>
</tr>
<tr>
<td>圆筒：转轴沿几何轴
$I=\frac{m(r_1^2+r_2^2)}{2}$

</td>
<td>圆柱体：转轴沿几何轴
$I=\frac{mr^2}{2}$

</td>
<td>球壳：转轴沿直径
$I=\frac{2mr^2}{3}$

</td>
</tr>
<tr>
<td>细棒：转轴通过中心与棒垂直
$I=\frac{ml^2}{12}$

</td>
<td>细棒：转轴通过端点与棒垂直
$I=\frac{ml^2}{3}$

</td>
<td>球体：转轴沿直径
$I=\frac{2mr^2}{5}$

</td>
</tr>
</table>

③ 平行轴定理

在前面的讨论中，我们知道同一个物体，对于不同转轴的转动惯量不同。在图 9.2.6 中，通过讨论，我们看到，当转轴通过此系统的质心时，系统的转动惯量为

$$I_c=\frac{1}{2}ml^2$$

当转轴平移 $\frac{l}{2}$ 距离到轻杆的一端时，系统的转动惯量变成了

$$I=ml^2$$

I 与 I_C 满足关系式：

$$I=I_c+2m\left(\frac{l}{2}\right)^2$$

事实证明，这个关系式是普遍适用的。如图 9.2.7 所示，一条轴 OO' 穿过物体的质心 C，

另一条轴 AA' 与轴 OO' 平行，且与轴 OO' 的距离为 d，若物体相对于轴 OO' 的转动惯量为 I_C，则物体相对于轴 AA' 的转动惯量为

$$I = I_C + Md^2$$

式中 M 是物体的总质量。这个关系就叫作**转动惯量的平行轴定理**（**parallel axis theorem**）。

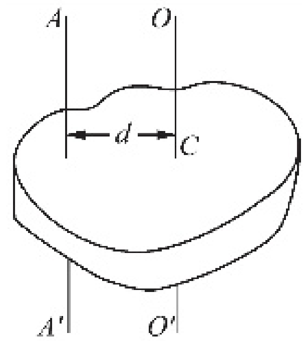


图 9.2.7

物体在绕着自己的对称轴转动时，它的惯性不仅表现在它的转速不易改变，而且转轴的方向也不易改变。在火箭等飞行器上，让装在万向架中的陀螺仪高速旋转，由于转动时的惯性，不管飞行器怎样运动，它的转轴在空间的指向都保持不变，利用这个原理可以制成惯性导航仪。

轮船在大海中航行，常因风浪而颠簸。为了减少轮船的摇摆，人们在船舱底部装上很重的高速转动的飞轮，由于惯性，飞轮转动的轴线方向不易改变，可以有力地抵抗风浪的影响，使轮船能够比较平稳地前进。

练习 9-2

1. 计算刚体的转动惯量时，能不能把刚体的质量看作集中在它的几何中心？请举例说明。

2. 已知一根质量不计的轻杆上固定着两个质量分别为 m 和 $2m$ 的物体（可看作质点），轻杆绕垂直于杆的轴转动，其中质量为 m 的物体到转轴的距离为 $2r$，质量为 $2m$ 的物体到转轴的距离为 r，求这个系统对转轴的转动惯量。

3. 已知质量均匀分布的细棒绕通过中心且与棒垂直的转轴的转动惯量为 $I=\frac{ml^2}{12}$，试利用平行轴定理证明：细棒绕通过端点与棒垂直的转轴的转动惯量为 $I=\frac{ml^2}{3}$。

第 3 节　刚体滚动时的动能

在前面的学习中,我们知道了运动的物体具有动能。物体转动的时候,除了转轴以外,物体上的各点都在运动，因此转动着的物体也具有动能。那么，物体转动时的动能该如何来描述呢?

① 刚体转动时的动能

刚体绕定轴转动时，组成刚体的很多个质点绕轴做圆周运动。质量为 m_i 的质点速度为 v_i，因而具有动能 $E_i=\frac{1}{2}m_iv_i^2$，所有质点的动能之和就是刚体绕定轴转动时整个刚体具有的动能，若用 E_k 表示，则有

$$E_k=\frac{1}{2}m_1v_1^2+\frac{1}{2}m_2v_2^2+\cdots+\frac{1}{2}m_nv_n^2$$

如果刚体转动的角速度为 ω，每个质元到转轴的距离为 r_i，则有 $v_i=\omega r_i$，因而上式变为

$$\begin{aligned}E_k&=\frac{1}{2}m_1r_1^2\omega^2+\frac{1}{2}m_2r_2^2\omega^2+\cdots+\frac{1}{2}m_nr_n^2\omega^2\\&=\frac{1}{2}(m_1r_1^2+m_2r_2^2+\cdots+m_nr_n^2)\omega^2\end{aligned}$$

由转动惯量的定义可知，上式括号内的 $m_ir_i^2$ 之和就是转动惯量 I，因而刚体绕定轴转动时的动能为

$$E_k=\frac{1}{2}I\omega^2$$

可以看出，这与平动动能 $\frac{1}{2}mv^2$ 在形式上十分相似。

例题 9－3　如果一个质量为 m、半径为 r 的均匀球体绕通过球心的轴以角速度 ω 旋转，试求它的转动动能。我们生活的地球，质量为 5.98×10^{24} kg，半径为 6.4×10^6 m，并认为地球的质量是均匀分布的，那么由于自转，它的转动动能有多大?

解　因为均匀球体对通过球心的轴的转动惯量 $I=\frac{2}{5}mr^2$，所以均匀球体的转动动能为

$$E_k=\frac{1}{5}mr^2\omega^2$$

对于自转的地球，其转动动能为

$$E_k=\frac{1}{5}mr^2\omega^2$$
$$=\frac{1}{5}\times 5.98\times 10^{24}\times(6.4\times 10^6)^2\times\left(\frac{2\times 3.14}{24\times 3\ 600}\right)^2\ \mathrm{J}$$
$$\approx 2.6\times 10^{29}\ \mathrm{J}$$

② 刚体滚动时的动能

滚动是生产和生活中比较常见的运动。这里只研究无滑动滚动。

如图 9.3.1 所示，均匀圆盘沿地面滚动。由于圆盘与地面的接触点 N 没有发生滑动，圆盘和地面的接触点 N 是静止的，此时圆盘的运动可以看成是绕着一条不动轴的转动，这条轴过 N 点且垂直于盘面。由于圆盘和地面的接触点在不断改变，所以转动轴的位置也跟着在改变，这样的转动轴叫作**瞬时轴**（**instantaneous axis**）。

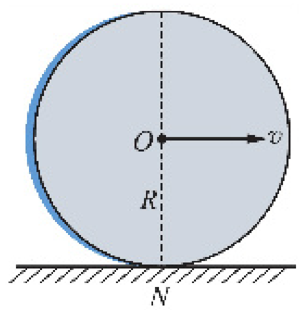


图 9.3.1

设圆盘半径为 R，它的中心相对于地面的运动速度为 v，圆盘的中心相对于瞬时轴的角速度为 $\omega=\frac{v}{R}$。如果用 I 表示圆盘对于过它的边缘且与盘面垂直的轴的转动惯量，那么圆盘滚动时的动能可以表示为

$$E_k=\frac{1}{2}I\omega^2$$

根据平行轴定理，转动惯量 I 和过圆盘中心的转动惯量 I_C 之间有如下关系：

$$I=I_C+md^2$$

其中 m 是盘的质量，d 是两条轴之间的距离，在这个问题中，d 就是盘的半径 R。这样，圆盘滚动时的动能又可以写成

$$E_k=\frac{1}{2}I_C\omega^2+\frac{1}{2}mR^2\omega^2$$

即

$$E_k=\frac{1}{2}I_C\omega^2+\frac{1}{2}mv^2$$

由上式可以看出，刚体滚动时的动能由两部分组成：一部分相当于刚体绕过质心的轴转动时的转动动能，另一部分则相当于把整个刚体的质量集中于质心的质点平动时的动能。

练习 9-3

1. 一个质量均匀分布的圆环，$m = 1\ \mathrm{kg}$，半径 $R = 0.1\ \mathrm{m}$，绕一垂直于环面且过环心的轴以角速度 $\omega = 2.0\ \mathrm{rad\ s^{-1}}$ 转动，求圆环转动的动能大小。

2. 质量为 m、半径为 R 的均质圆盘在地面上做无滑动的滚动，前进速度为 v，圆盘的动能是多大？如果圆盘以同样的角速度绕着过盘心且与盘面垂直的固定轴转动，圆盘的动能又是多大？

第 4 节　刚体的转动定律

前面我们从运动学的角度学习了描述刚体绕定轴转动时的几个物理量以及它们之间的关系，本节我们来研究刚体绕定轴转动的动力学规律。

在第 5 章静力学中我们已经学过，转轴与力的作用线之间的距离 d 叫作力臂，力臂与作用力 F 的乘积叫作力矩，符号为 M。如图 9.4.1 所示，力 F 对转轴的力矩 $M = Fd$。在力矩的作用下，刚体的角速度将发生变化。下面我们来研究它们之间的关系。

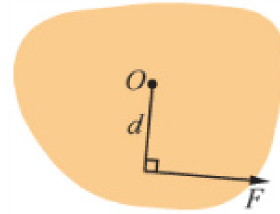


图 9.4.1

我们可以把刚体看成由许多的质点组成，其中第 i 个质点的质量是 m_i，速度是 v_i，它到转轴的距离是 r_i，它受到的切向力是 F_i。每个质点的运动都遵从牛顿第二定律，因此有

$$F_i = m_i\frac{\Delta v_i}{\Delta t} = m_i\frac{\Delta(r_i\omega)}{\Delta t} = m_i r_i\frac{\Delta\omega}{\Delta t}$$

如果用 M_i 表示第 i 个质点所受的力矩，那么 $r_iF_i = M_i$，于是上式可以写成

$$M_i = m_i r_i^2\frac{\Delta\omega}{\Delta t}$$

然后对所有质点求和：

$$\sum M_i = \sum m_i r_i^2\frac{\Delta\omega}{\Delta t}$$

用 M 表示刚体受到的总力矩，称为转矩，同时注意到：

$$I = \sum m_i r_i^2,\ \alpha = \frac{\Delta\omega}{\Delta t}$$

于是有

$$M = I\alpha$$

上式表明，刚体转动的角加速度跟它所受的转矩成正比，这就是**刚体的转动定律**。

思考与讨论

请同学们想一想，刚体的转动定律表达式 $M = I\alpha$ 与动力学中我们学过的哪条定律的表达式十分相似？根据这种相似性，你还能猜想并写出哪些转动的规律？

通过比较不难发现，这个定律的表达式与牛顿第二定律的表达式 $F = ma$ 十分相似，

转矩对应平动中的合外力，转动惯量对应平动中的质量，角加速度对应平动中的加速度。平动和转动各物理量和物理规律的对照可参阅下表。

表 9-2　平动与转动的对照

匀加速度直线运动	匀角加速度转动
a（加速度）为定值	α（角加速度）为定值
F（作用力）	M（转矩）
m（质量）	I（转动惯量）
x（位移）	θ（角位移）
v（速度）	ω（角速度）
$v=v_0+at$	$\omega=\omega_0+\alpha t$
$x=v_0t+\frac{1}{2}at^2$	$\theta=\omega_0t+\frac{1}{2}\alpha t^2$
$v^2-v_0^2=2ax$	$\omega^2-\omega_0^2=2\alpha\theta$
$F=ma$	$M=I\alpha$
$E_k=\frac{1}{2}mv^2$（平动动能）	$E_k=\frac{1}{2}I\omega^2$（转动动能）
p（动量）	L（角动量）

例题 9－4　如图 9.4.2 所示，转动惯量 $I=1.5\ \mathrm{kg\ m^2}$ 的飞轮以角速度 $\omega=40\pi\ \mathrm{rad\ s^{-1}}$ 匀速转动，现在关闭电动机，飞轮将在摩擦力矩 $M=6.0\ \mathrm{N\ m}$ 作用下逐渐减速，求停止前它能转过多少圈。

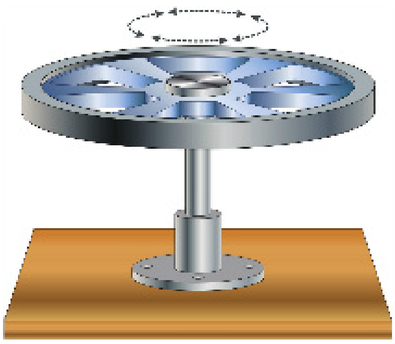


图 9.4.2　转动着的飞轮

解　飞轮在摩擦力矩的作用下减速，

角加速度 $\alpha=\frac{-M}{I}=\frac{-6.0}{1.5}\ \mathrm{rad\ s^{-2}}=-4\ \mathrm{rad\ s^{-2}}$

角位移 $\theta=\frac{\omega_0^2-\omega^2}{2\alpha}$

转过的圈数 $N=\frac{\theta}{2\pi}$

$=\frac{\omega_0^2-\omega^2}{4\pi\alpha}$

$=\frac{0-(40\pi)^2}{4\pi(-4)}$

≈ 314

例题 9－5 如图 9.4.3 所示的装置叫作阿特伍德（Atwood）机，用一细绳跨过定滑轮，而在绳的两端各悬挂质量为 m_1 和 m_2 的物体，其中 $m_1 > m_2$，求它们的加速度及绳两端的张力 F_{T1} 和 F_{T2}。（绳不可伸长，质量可忽略，它与滑轮之间无相对滑动；滑轮的半径为 R，质量为 m，且分布均匀）

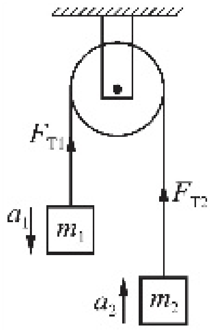


图 9.4.3　阿特伍德机

解　分别隔离 m_1、m_2 和滑轮，如图所示，对于 m_1 和 m_2，有

$$m_1 g - F_{T1} = m_1 a_1 \qquad ①$$

$$F_{T2} - m_2 g = m_2 a_2 \qquad ②$$

对滑轮，外力矩为 $(F_{T1} - F_{T2})R$，转动惯量为 $I=\frac{1}{2}mR^2$，故有

$$(F_{T1}-F_{T2})R=I\alpha=\frac{1}{2}mR^2\alpha \qquad ③$$

由于绳子不可伸长，且不打滑，故有

$$a_1 = a_2 = R\alpha \qquad ④$$

由①②③④，得

$$a_1=a_2=\frac{2(m_1-m_2)}{m+2(m_1+m_2)}g$$

$$F_{T1}=\frac{(m+4m_2)m_1}{m+2(m_1+m_2)}g$$

$$F_{T2}=\frac{(m+4m_1)m_2}{m+2(m_1+m_2)}g$$

若滑轮质量 $m\to 0$，则 $F_{T2}=F_{T1}=\frac{2m_1m_2}{m_1+m_2}$，$a=\frac{m_1-m_2}{m_1+m_2}g$。这个结果与第 4 章我们解得的结果是一致的。

练习 9-4

1. 一个质量为 20 kg、半径为 0.2 m 且质量分布均匀的圆盘，被安装在一个半径为 15 mm 的水平轴上而成为一个飞轮。若不计转轴的质量和摩擦，当沿转轴切线方向施加一个 50 N 的力时，飞轮的角加速度是多大？

2. 如果上题中的飞轮从静止开始转动，10 s 后它的动能是多少？共转了多少圈？

3. 一个可绕定轴转动的飞轮，在 20 N m 的总力矩作用下，在 10 s 内转速由零均匀地增加到 8 rad s^{-1}，求飞轮的转动惯量。

第 5 节　角动量

通过上一节课的学习，我们知道刚体绕定轴转动的转动定律 $M=I\alpha$ 与质点的牛顿第二运动定律 $F=ma$ 在形式上十分相似。如果进一步类比，我们还会发现，就像 $F=ma$ 可以改写为 $F=\frac{\Delta(mv)}{\Delta t}$ 一样，转动定律 $M=I\alpha$ 也可改写为

$$M=\frac{\Delta(I\omega)}{\Delta t}$$

与把质点的质量 m 与其速度 v 的乘积 mv 定义为质点的动量 p 一样，我们把刚体对轴的转动惯量与刚体绕轴转动的角速度的乘积 $I\omega$ 叫作刚体对此轴的**角动量**（**angular momentum**），通常用 L 表示，即

$$L=I\omega$$

在国际单位制中，角动量的单位是 $\mathrm{kg\ m^2 s^{-1}}$。

一个质点 m 以角速度 ω 绕轴做半径为 r 的圆周运动，它相对转轴的角动量是 $L=mr^2\omega$，又因为 $\omega=\frac{v}{r}$，所以可以得到它相对轴的角动量为

$$L=rmv$$

此表达式适合矢量 r 与矢量 v 相互垂直的情形。

对于一般的情形，转轴到质点的径向矢量 r 与质点的线速度 v 的夹角为 θ 时，质点相对转轴的角动量为

$$L=rmv\sin\theta$$

例题 9－6　海王星绕太阳的轨道运动可看成是匀速圆周运动，轨道半径约为 $r=5\times10^{12}\ \mathrm{m}$，周期 $T=165$ 年，海王星的质量约为 $m=1\times10^{26}\ \mathrm{kg}$。试计算海王星对太阳中心的角动量大小。

解　海王星做匀速圆周运动，故有

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

太阳是圆轨道中心，在轨道上任何位置海王星运动速度都与轨道半径垂直，故它对太阳中心的角动量为

$$
\begin{aligned}
L &= rmv \\
&= m\frac{2\pi r^2}{T} \\
&= \frac{1\times 10^{26}\times 2\times 3.14\times(5\times 10^{12})^2}{165\times 365\times 24\times 3\,600}\ \mathrm{kg\,m^2\,s^{-1}} \\
&\approx 3\times 10^{43}\ \mathrm{kg\,m^2\,s^{-1}}
\end{aligned}
$$

练习 9-5

1. 月球绕地球运行的轨道可近似看成是圆，若地球的质量为 $M_{地}$，月球的质量为 $M_{月}$，月心与地心之间的距离为 r_0，月球环绕速度为 v，不考虑月球的大小，求月球对地心的角动量大小。

2. 一个半径为 R、质量为 m 的均匀圆盘，绕着垂直于盘面过圆盘中心的轴线以角速度 ω 转动，求圆盘相对转轴的角动量大小。

第 6 节　角动量守恒定律

思考与讨论

通过前面的学习，我们知道当物体（或系统）不受力或所受的合外力为零时，物体（或系统）的加速度为零，物体（或系统）的速度不变，总动量守恒。那么，在刚体定轴转动的问题中，当刚体所受的合外力矩为零时，刚体的哪些量保持不变？

我们从刚体的转动定律 $M=\dfrac{\Delta(I\omega)}{\Delta t}=I\alpha$ 知道，当刚体所受的合外力矩为零时，刚体的角加速度为零，角速度将保持不变，此时刚体的角动量守恒，这就是著名的**角动量守恒定律（law of conservation of angular momentum）**。我们通常这样表述：**刚体不受外力矩的作用或合外力矩为零时，角动量守恒**。用数学式表达是：$I\omega=$常量，或者 $rmv\sin\theta=$常量 。

这个定律是由实验总结出来的，本章图 9.2.1 中的万向架实验，实际上就是角动量守恒定律的例证。实验中转动的金属圆盘虽然受到重力和轴端支持力的作用，但这些力都通过轴线，所以对转轴的力矩为零，圆盘的角动量守恒，它的转速和转轴在空间的指向都不变。

著名的“茹科夫斯基”转凳就是角动量守恒定律的一个体现。如图 9.6.1 所示，一个人手握哑铃坐在无摩擦的转凳上，在别人的帮助下处在自由的高速转动之中。此时，如果这个人手握哑铃的双臂收回胸前，我们会发现，他转动的角速度会有明显的增加。从角动量守恒的观点去理解，即：$I_0\omega_0=I\omega$，当他的双手臂收回胸前时，转动惯量变

图 9.6.1　“茹科夫斯基”转凳

小了，即 $I < I_0$，所以他的角速度增加了。

角动量守恒定律与机械能守恒定律、动量守恒定律一起，并称为经典力学的三大守恒定律。虽然从上面的推导中看，角动量守恒定律来源于牛顿运动定律，但现代物理的研究表明，角动量守恒定律已经是自然界中普遍成立的规律之一，将适用于更加普遍的情形。

宇宙中有一种恒星叫中子星，它的体积很小，直径只有 10 km 的数量级，质量却和太阳相仿。中子星自转一周所需的时间不到 1 s。为什么它有这样快的自转角速度呢？原来中子星在恒星的演化过程中，已经进入“老年期”，它年轻的时候是一颗巨大的、缓慢转动的恒星，由于能量大量消耗，温度降低，在自身引力的作用下体积缩小，但质量变化不大，所以转动惯量减小，转速就增加了。1967 年，科学家首次发现了脉冲星（如图 9.6.2），曾被叫作“小绿人一号”。脉冲星是中子星的一种，因为这种星体不断地发出电磁脉冲信号，所以人们就把它命名为脉冲星。地球自转一周是 24 h，而脉冲星的自转周期竟然小到 0.001 337 s！

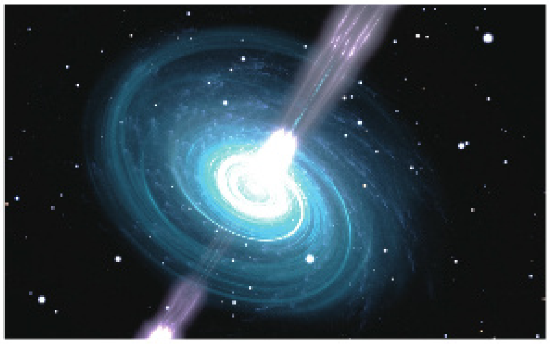


图 9.6.2　脉冲星想象图

两个相互关联的物体，如果不受外力矩的作用或合外力矩为零，它们的总角动量守恒。假设原来两个物体都是静止的，那么在以后的运动过程中总角动量将会保持为零。即

$$I_1\omega_1 + I_2\omega_2 = 0$$

移项后，得

$$I_2\omega_2 = -I_1\omega_1$$

这个结果表明，如果其中一个物体开始转动，如 $\omega_1 \neq 0$，那么另一个物体一定会朝相反的方向转动。

演示 9-3

系统的角动量守恒

如图 9.6.3 所示，将一台小电扇用绳吊起，并使它静止。通电后我们看到，当扇叶以较大的角速度旋转时，电扇壳体以较小的角速度向相反的方向旋转。

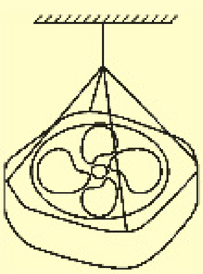


图 9.6.3

如图 9.6.4 所示，在太空舱外，飘浮在太空中的宇航员也可以借此来实现“翻身”。当静止中的宇航员用手臂沿其身体的轴线转出一个又一个的圈圈时，与此同时其身体将沿反方向发生缓慢的转动，当宇航员整体转到相反的面时，他只要停止手的转动，他整体又将恢复静止，这样，他就成功地实现了“翻身”。

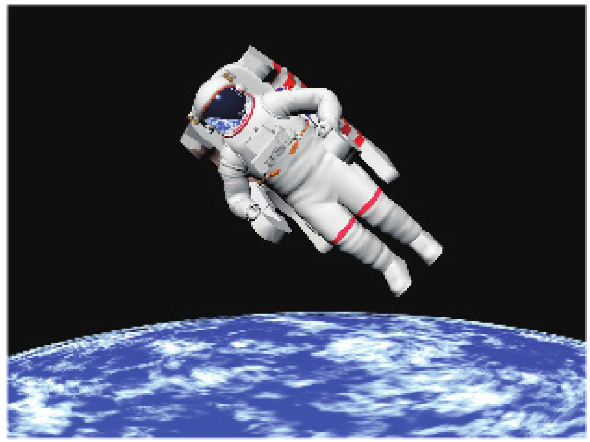


图 9.6.4　太空舱外的宇航员

例题 9－7　中国第一颗人造卫星绕地球沿椭圆轨道运动，地球的中心 O 为该椭圆的一个焦点。已知地球的平均半径 $R=6\,378$ km，人造卫星距地面最近的距离 $l_1=439$ km，最远的距离 $l_2=2\,384$ km，若人造卫星在近地点的速度为 $8.10\ \mathrm{km\,s^{-1}}$，求人造卫星在远地点的速度。（人造卫星在运行的过程中只考虑受到地球的引力）

分析　本题求解时，首先要注意到人造卫星是在万有引力作用下运动，它相对于地球中心的合外力矩始终为零，这样我们就可以应用角动量守恒定律解决问题。此外，在远地点和近地点速度都垂直于地心与人造卫星的连线。

解　我们认为人造卫星在运动时仅受到地球对它的引力，由于引力始终指向地球中心 O，因而对 O 点来说没有外力矩作用在卫星上，所以人造卫星在运动过程中对 O 点的角动量守恒。

人造卫星在近地点的角动量：$L_1=mv_1(R+l_1)$　　①

人造卫星在远地点的角动量：$L_2=mv_2(R+l_2)$　　②

根据角动量守恒定律，有

$$mv_1(R+l_1)=mv_2(R+l_2) \qquad ③$$

由①②③得

$$\begin{aligned} v_2&=v_1\frac{R+l_1}{R+l_2}\\ &=8.10\times\frac{6\,378+439}{6\,378+2\,384}\ \mathrm{km\,s^{-1}}\\ &\approx 6.3\ \mathrm{km\,s^{-1}} \end{aligned}$$

练习 9-6

1. 做匀速圆周运动的物体对哪一点的角动量守恒？它的动量守恒吗？为什么？

2. 一颗人造地球卫星到地球中心 O 的最大距离和最小距离分别是 R_A 和 R_B，设卫星在两处对应的角动量分别为 L_A 、L_B，动能分别为 E_{kA}、E_{kB}，请比较 L_A 和 L_B 的大小关系，以及 E_{kA} 和 E_{kB} 的大小关系。

3. 把小球系在一条细绳上，并把细绳的另一端固定在直杆的上端（如图 9.6.5 所示）。推一下小球，使它绕杆转动。由于细绳在直杆上缠绕，小球会越转越快。怎样解释这一现象？

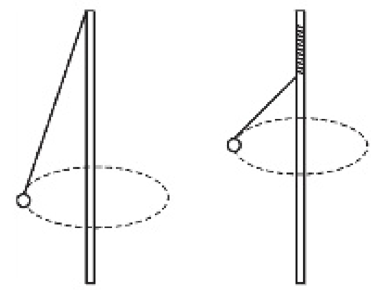
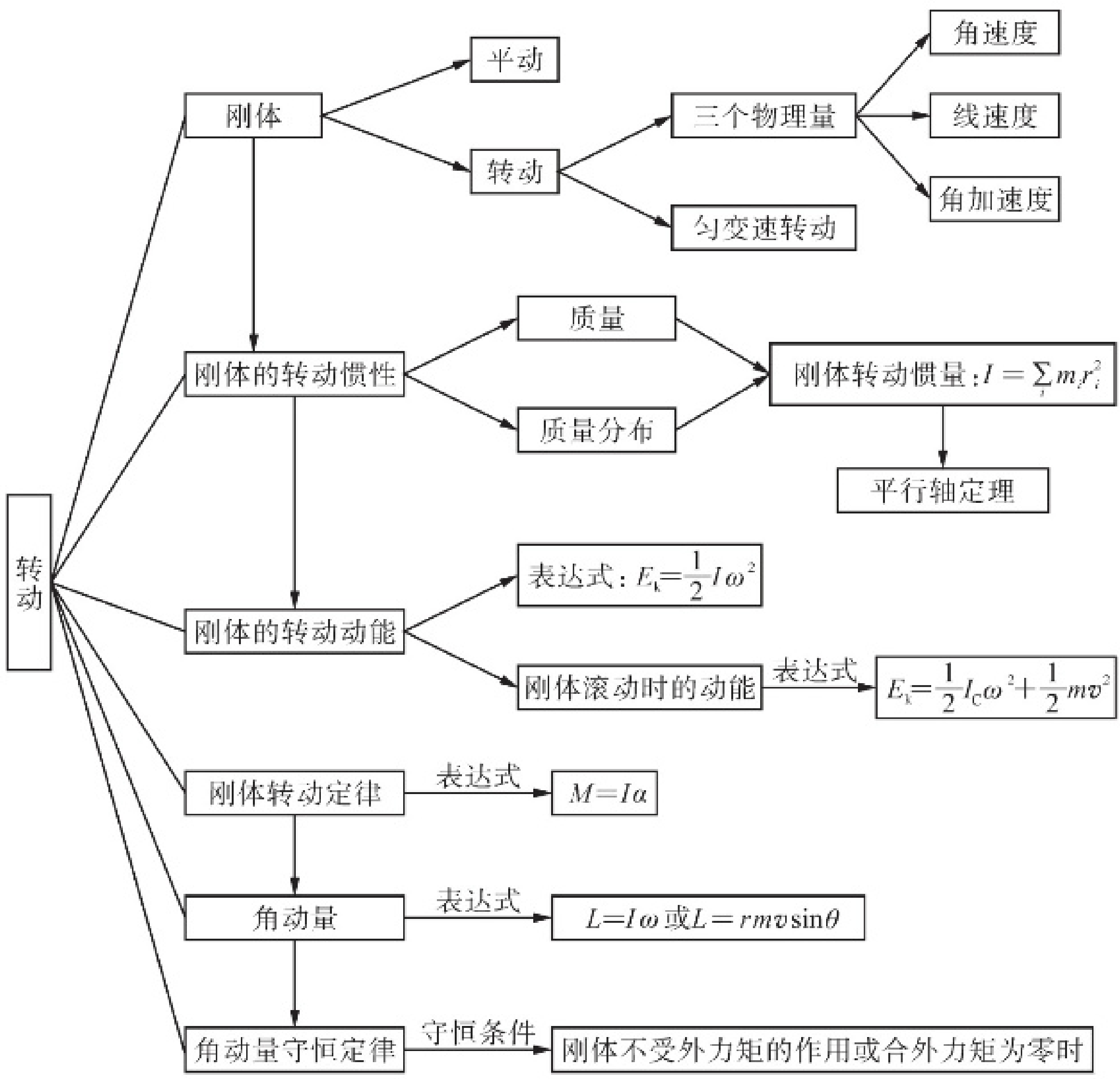


图 9.6.5

4. 一个平台能无摩擦地转动，一个人站在平台中心，两手拿着质量相等的重物，两臂平伸，转台的转速为 60 rpm。若两臂改为下垂，人、平台和重物的总转动惯量减为原来的 $\frac{1}{3}$，求两臂下垂时转台的转速。

章末回顾

本章基本知识结构



总练习九

基础练习

1. 物体转动时，它的惯性与哪些因素有关？

2. 地球赤道上的一点相对于太阳的线速度是正午时大，还是午夜时大？

3. 物体的质量和质量的分布，哪一个对转动惯量的影响大？这一点在转动惯量的表达式中是怎样反映出来的？

4. 杂技演员翻筋斗时在空中总是把身体蜷曲起来，快到地面时又把身体打开，这是为什么？

5. 如图所示，一个人站在水平转盘上，用一只手举起一个自行车轮子，当他用另一只手拨动轮边使轮子转动时，他自己会同时沿相反方向转动起来。怎样解释这一现象？

（第 5 题）

6. 从表 9-1 中看到，实心圆柱体和圆筒绕轴线的转动惯量不一样，实心球和球壳也有类似的区别，请尝试解释这种区别。

7. 从表 9-1 中我们可以知道，均匀细杆绕过中点和过端点的垂直轴的转动惯量不相同，怎样解释这种区别？请你推测，实心球绕它的一条切线转动时，其转动惯量比 $I=\dfrac{2mr^2}{5}$ 大一些还是小一些？请说出理由。

8. 两个均质圆盘 A 和 B 的密度分别为 ρ_A 和 ρ_B，$\rho_A>\rho_B$，但两圆盘的质量与厚度相同。若两盘对通过盘心垂直于盘面的轴的转动惯量各为 I_A 和 I_B，则（　　）

   A. $I_A>I_B$　　　　B. $I_B>I_A$

   C. $I_A=I_B$　　　　D. I_A、I_B 哪个大，不能确定

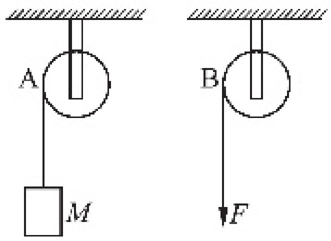
9. 如图所示，A、B 为两个相同的绕着轻绳的定滑轮，A 滑轮挂一个质量为 M 的物体，B 滑轮受拉力 F 作用，而且 $F=Mg$。设 A、B 两滑轮的角加速度分别为 β_A 和 β_B，不计滑轮轴的摩擦，则有（　　）

A. $\beta_A = \beta_B$

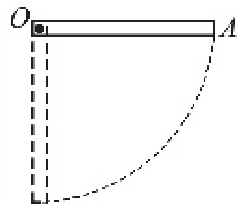
B. $\beta_A > \beta_B$

C. $\beta_A < \beta_B$

D. 开始时 $\beta_A = \beta_B$，以后 $\beta_A < \beta_B$



（第 9 题）



（第 10 题）

10. 均匀细棒 OA 可绕通过其一端 O 且与棒垂直的水平固定光滑轴转动，如图所示。现使棒从水平位置由静止开始自由下落，在棒摆动到竖直位置的过程中，下列说法正确的是（　　）

A. 角速度从小到大，角加速度从大到小

B. 角速度从小到大，角加速度从小到大

C. 角速度从大到小，角加速度从大到小

D. 角速度从大到小，角加速度从小到大

11. 若上题中棒的质量变为原来的两倍，长度不变，则棒下落到竖直位置时的角速度（　　）

A. 变大　　B. 变小

C. 不变　　D. 是否变，不能确定

12. 一台汽车发动机的转速在 7.0 s 内由 200 rpm 均匀地增加到 3 000 rpm。求：

（a）在这段时间内的初角速度和末角速度以及角加速度。

（b）这段时间内转过的角度。

13. 一个半径为 25 cm 的圆柱体，可绕与其中心轴线重合的光滑固定轴转动。圆柱体上绕上绳子，圆柱体的初角速度为零。现拉绳的端点，使其以 1 m s^{-2} 的加速度运动，绳与圆柱体表面无相对滑动。

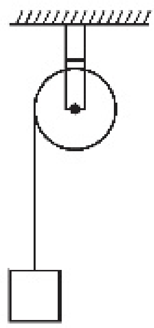
（a）试计算在 t = 5 s 时，圆柱体的角加速度。

（b）如果圆柱体对转轴的转动惯量为 2 kg m^2，那么要保持上述角加速度不变，应加的拉力为多大？

14. 把一块半径为 R 的圆形平板平放在水平桌面上，平板与水平桌面的摩擦系数为 μ。若平板绕通过其中心且垂直于板面的固定轴以角速度 ω_0 开始旋转，它将在旋转多少圈后停止？（已知圆形平板的转动惯量 $I=\frac{1}{2}mR^2$，其中 m 为圆形平板的质量）

提高练习

15. 如图所示，质量 $m_1 = 0.5$ kg、半径 $R = 10$ cm 的定滑轮上缠绕了很多轻质柔软的细绳，细绳的下端悬挂一个质量 $m_2 = 0.5$ kg 的重物，定滑轮可以看成是质量均匀分布的圆盘，轴上的摩擦力矩不计。问：把重物从离地 $h = 1$ m 的位置由静止释放后，其运动到地面时的速度有多大？



（第 15 题）

（第 17 题）

16. 一个质量为 M 的小孩站在静止的可自由转动的圆盘的边缘处，圆盘的半径为 R，转动惯量为 I。现在小孩沿圆盘边缘切线方向水平扔出一块质量为 m 的石头，石头相对于地面的速度为 v。求小孩及圆盘将获得的角速度。

17. 如图所示是一个悠悠球，当提线的手以某一加速度向上运动时，悠悠球的中心将在某一高度上保持不变，并且悠悠球绕其中心发生转动。如果把悠悠球视作半径为 R 的均质圆盘，试问：手此时向上提绳的加速度应为多大？

18. 有一个半径为 R 的均匀球体，绕通过其一直径的光滑固定轴匀速转动，转动周期为 T_0。如果它的半径由 R 自动收缩为 $\frac{1}{3}R$，求球体收缩后的转动周期。（球体对于通过直径的轴的转动惯量为 $I=\frac{2mR^2}{5}$，式中 m 和 R 分别为球体的质量和半径）

19. 在半径为 R 的具有光滑竖直固定中心轴的水平圆盘上，一个人站立在距转轴 $\frac{1}{3}R$ 处，人的质量是圆盘质量的 $\frac{1}{8}$。开始时圆盘载人对地以角速度 ω_0 匀速转动，现在此人沿圆盘半径走到圆盘边缘。已知圆盘对中心轴的转动惯量为 $\frac{1}{2}MR^2$。求此时圆盘对地的角速度大小。

20. 质量为 70 kg 的人站在半径为 2 m 的水平转台边缘，转台的固定转轴竖直通过台心且无摩擦，转台绕竖直轴的转动惯量为 5 600 kg m^2。开始时整个系统静止，现人以相对于地面为 1 m s^{-1} 的速率沿转台边缘行走。求人沿转台边缘行走一周，回到他在转台上的初始位置所用的时间。

第10章 振动

本章提要

1. 了解机械振动现象和简谐运动的定义。
2. 会用数学方程描述简谐运动。
3. 会用函数图象描述简谐运动。
4. 了解共振以及如何利用或防止共振。

学前储备

1. 理解力与运动的关系。
2. 理解动能、势能及机械能守恒定律。
3. 了解匀速圆周运动及线速度、角速度和向心加速度的关系。
4. 了解正弦函数及其图象表示。

第 1 节　振动现象

① 自然界中的振动现象

图 10.1.1　表演者擂鼓庆祝新年

小鸟从树枝上飞走，树枝就上下晃动；敲一下锣、打一下鼓，锣面和鼓面就起伏跳动（如图 10.1.1）；推一下吊灯、荡一下秋千，吊灯和秋千就往返摆动。这些现象中，物体都是在一平衡位置上下或左右往复运动，我们把这类运动称为**机械振动**（**mechanical vibration**），一般称为**振动**（**vibration**），它是自然界中普遍存在着的一种运动形式。

内燃机的活塞在气缸中的往复运动，高层建筑的微弱晃动，人体深呼吸时胸脯的起伏等都是机械振动。琴弦的振动让人们欣赏到优美的音乐，地震则给人类带来巨大的灾难。如图 10.1.2 所示是用青铜浇铸而成的鱼洗，当用手快速且有节奏地摩擦盆边的两铜耳，盆会振动起来，盆内水波荡漾，并有水滴跳出水面。振动并不局限于机械振动范围之内，在交流电路中电流、电压的变化，也是一种振动。在物理学中，人们将振动的概念予以推广，把一个物理量在某一数值附近的反复变化都称为振动。交变电磁场中电场强度和磁感应强度的变化就称为**电磁振动**或**电磁振荡**。此外还有高温下分子的振动、固体晶格上原子的振动等。

图 10.1.2　鱼洗

这些振动虽然和机械振动具有不同的物理含义，甚至可以说是本质上不同的现象，但它们随时间变化的情况以及其他一些性质在形式上都遵从相似的规律，只要对机械振动的规律研究得比较透彻，就可以很好地分析和理解其他的振动形式。

② 产生振动的条件

振动是怎样产生的呢？当振动的物体离开它的平衡位置时，它会受到一个指向平衡位置的力，这个力的作用是迫使它回到原来的平衡位置，因此也把这个力称为**回复力**（**restoring force**）。回复力是产生振动的条件，没有回复力就不会产生振动现象。在不同的机械振动中，回复力的种类和性质也千差万别，而且一般来说比较复杂。例如，小鸟从树枝上飞走，树枝就振动起来。这个现象看似简单，但树枝所受回复力的性质和规律却颇为复杂，因此很难着手研究。于是，我们就像研究其他现象一样，从最简单、最基本的振动入手。我们将首先研究物体在弹簧弹力作用下的振动，这时候物体所受的回复力仅仅是弹簧的弹力。

③ 线性回复力

在第 4 章，我们已经知道，弹簧受到拉力发生拉伸形变（stretched deformation）或弹簧受到压缩发生压缩形变（compressed deformation）时，其内部就会产生使弹簧有恢复原状趋势的**弹力**。在第 4 章中我们已经学过胡克定律，在胡克定律中，弹簧的伸长量 x 是与外加的拉力 $F_{拉}$成正比，弹簧伸长的方向与拉力的方向相同，所以其关系式为

$$F_{拉}=kx$$

式中 k 是弹簧的劲度系数。

拉力 $F_{拉}$与弹簧伸长量 x 的关系如图 10.1.3 所示，图中的 A 点表示弹簧的弹性限度。如果我们拉伸弹簧超过这个点，弹簧就可能受到损坏，这时即使撤去拉力，弹簧也可能回不到原长。

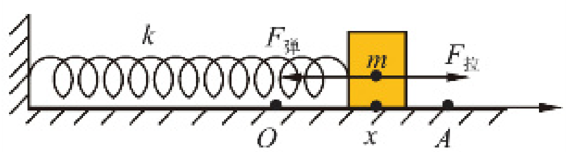


图 10.1.3

在弹簧的缓慢拉伸中，外加的拉力和弹簧的弹力是一对平衡力。所以，以上规律也可以理解为：在弹性限度内，弹簧的弹力 $F_{弹}$与拉伸量 x 成正比，弹力的方向与拉伸的位移方向相反，即

$$F_{弹}=-kx$$

在机械振动中，具有这样规律的回复力称为线性回复力。物体在做机械振动时，由于振动系统的不同，受到的回复力将是多种多样的，线性回复力是各种回复力中最简单、最基本的一种。当一个物体在线性回复力的作用下发生振动时，振动将具有比较简单的运动形式，我们在下一节将讨论这种情形。

例题 10 – 1 一根竖直悬挂的弹簧，在其下端挂 0.2 kg 的重物时，弹簧的长度为 0.5 m；换挂 0.4 kg 的重物时，弹簧的长度为 0.6 m。

（a）求弹簧原长和它的劲度系数。

（b）如果此弹簧在弹性限度内的最大伸长量是 0.3 m，那么在此弹簧下端悬挂的重物不可超过多少千克？

解 （a）设弹簧的原长为 l_0，重力加速度 $g = 9.8\ \mathrm{m\ s^{-2}}$，由 $F = kx$ 可得

$$0.2\times9.8 = k(0.5 - l_0) \qquad ①$$

$$0.4\times9.8 = k(0.6 - l_0) \qquad ②$$

由①②可解得 $l_0 = 0.4\ \mathrm{m}$，$k = 19.6\ \mathrm{N\ m^{-1}}$

即弹簧的原长是 0.4 m，劲度系数是 19.6 N $\mathrm{m^{-1}}$。

（b）若伸长量 $x = 0.3\ \mathrm{m}$，设此时所挂重物的质量为 M，则有

$$M\times9.8\ \mathrm{m\ s^{-2}} = k\times0.3\ \mathrm{m},$$

可解得

$$M = 0.6\ \mathrm{kg}$$

即在弹簧下端悬挂的重物不可超过 0.6 kg。

练习 10-1

1. 一根弹簧在 10 N 的外力作用下，伸长了 12 cm。要使弹簧再伸长 8 cm，则需要加多大的外力？这根弹簧的劲度系数是多少？

2. 已知一根原长为 40 cm 的弹簧的劲度系数是 50 N m^{-1}，弹性限度是 10 N，你在使用这根弹簧时应该注意把弹簧的长度控制在怎样一个范围内？

3. 有两根完全相同的轻质弹簧，劲度系数均是 20 N m^{-1}。
   （a）如图 10.1.4 a 所示，把两根弹簧串联后再在下端悬挂 0.2 kg 的重物，则两根弹簧的伸长量各是多少？
   （b）如图 10.1.4 b 所示，把两根弹簧并联后再在下端悬挂 0.2 kg 的重物，则两根弹簧的伸长量又各是多少？

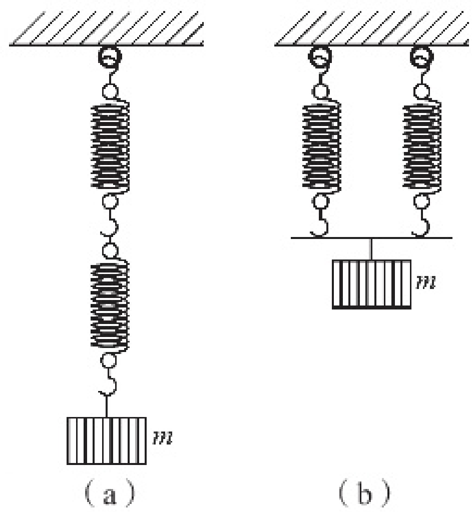


图 10.1.4　弹簧的串联和并联

第 2 节　简谐运动

① 弹簧振子

把一个有孔的小球装在弹簧的一端，再把小球和弹簧穿在一根光滑的水平细杆上，弹簧的另一端固定，小球能够自由滑动，如图 10.2.1 所示。如果小球和细杆之间的摩擦可以忽略，弹簧的质量与小球相比也可以忽略，我们把这样的系统称为**弹簧振子（spring oscillator）**。

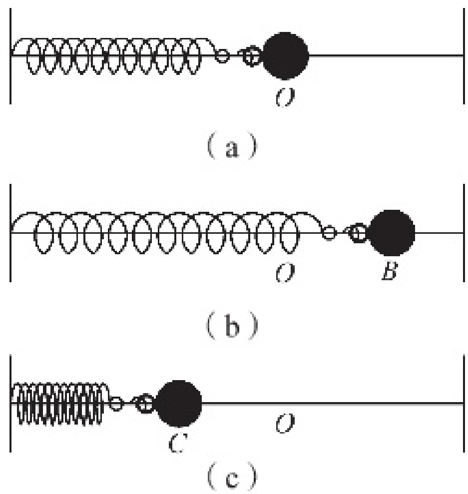


图 10.2.1　水平振动的弹簧振子

弹簧处于原长时，小球水平方向上不受力，静止在 O 点（如图 10.2.1 a）。如果用力把小球向右拉至某一位置 B 点（如图 10.2.1 b），撤去外力后，小球就以 O 点为中心左右运动起来。这种运动是最简单的振动形式，下面我们来具体分析其特点。

（以 O 点为位移原点，向右为正方向，本章中的位移均是指相对于 O 点的位移）

小球的位置	位移		速度		加速度	
	方向	大小	方向	大小	方向	大小
B 点						
$B \to O$						
O 点						
$O \to C$						
C 点						
$C \to O$						
O 点						
$O \to B$						
B 点						

② 简谐运动

分析弹簧振子的运动，我们可以发现它在振动过程中的受力特点。在图 10.2.1 中，取平衡位置 O 点为原点，设离开 O 点的位移为 x，向右为 x 的正方向。所以，回复力 F 与位移 x 的关系可以写为

$$F = -kx$$

上式表示物体所受的回复力为线性回复力。在线性回复力的作用下，物体将做的振动称为**简谐运动（simple harmonic motion）或简谐振动**，简写为 **SHM**。

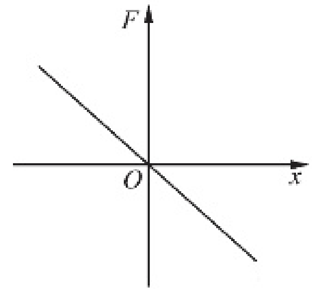


图 10.2.2　回复力 F 与位移 x 的关系图

将线性回复力公式代入牛顿第二定律

$$F = ma$$

可得加速度 a 与位移 x 的关系为

$$a = -\frac{k}{m}x$$

做简谐运动的物体，它的加速度大小也总是与离开平衡位置的位移大小成正比，方向总是指向平衡位置。线性回复力或加速度与位移成正比而反向的这个关系式常常作为一个物体是否做简谐运动的判据。

简谐运动是最简单的振动，也是我们理解和分析更复杂振动的基础。

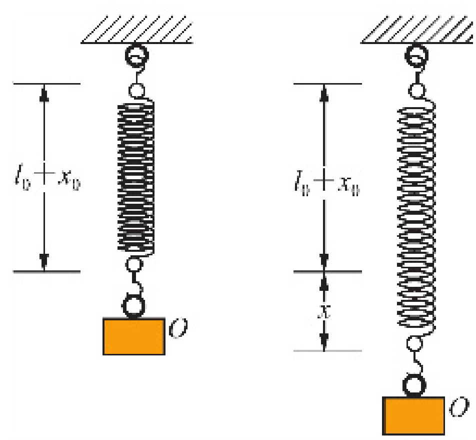
例题10 – 2　请证明竖直悬挂的弹簧振子的振动是简谐运动。

解　设弹簧的原长为 l_0，下端悬挂质量为 m 的重物静止时（如图 10.2.3 a），弹簧长度伸长 x_0，满足

$$mg = kx_0$$

设该位置为振动时位移的原点，取竖直向下方向为正方向。当重物振动产生位移为 x 时（如图 10.2.3 b），重物所受的合外力为

$$F = -k(x_0 + x) + mg = -kx$$



（a）　（b）

图 10.2.3　竖直振动的弹簧振子

这表明弹簧振子在竖直方向的振动是简谐运动。只不过这里振动的平衡位置不再是弹簧的原长位置，而是其悬挂重物时的静止位置，此处弹簧已经有一个伸长量，所以振动的位移也不再等于弹簧的伸长量或压缩量。

例题10－3 在内直径为 d 的U形管内装有质量为 m 的液体（液体的密度为 ρ ），如图10.2.4所示，液体在管内做微小振动，忽略液体与管壁的摩擦，试证明管内液体将做简谐振动。

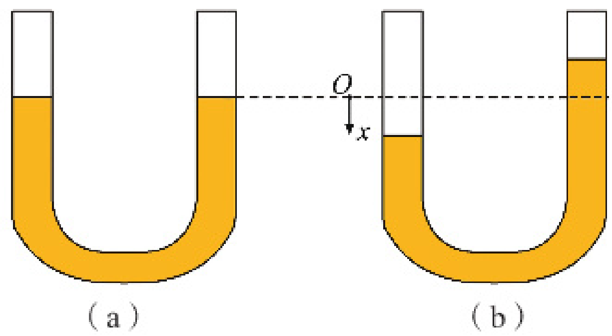


图 10.2.4 U 形管中的液体

分析 要证明液体发生的振动是简谐振动，可以先假设液体发生了一段微小的位移，再检查加在液体上的力是否符合线性回复力的规律，若符合，则液体发生的振动是简谐振动。

解 建立如图 10.2.4 b 所示的坐标系。设某时刻 t，左侧液面下降，液面的坐标为 x，则管内 Ox 段液柱的质量为

$$m_1=x\frac{\pi d^2}{4}\rho$$

整个液体所受的合力为

$$F=-2m_1g=-2x\frac{\pi d^2}{4}\rho g$$

根据牛顿第二定律，液柱的加速度为

$$a=\frac{F}{m}=-\frac{\pi d^2}{2m}\rho gx$$

液体的加速度与位移成正比而反向，由此可知液体将做简谐振动。

③ 单摆

把一个小球拴在细线的下端，并把细线的上端固定在某一位置，如果细线的质量与小球相比可以忽略，球的直径与线的长度相比也可以忽略，而且在小球摆动的过程中细线的长度保持不变，这样的装置称为**单摆**(**simple pendulum**)。单摆是实际摆的理想化模型。使摆球偏离竖直方向一个角度，松手后，摆球就左右摆动起来，如图 10.2.5 所示。摆球的运动是简谐运动吗？我们来分析一下它的回复力。

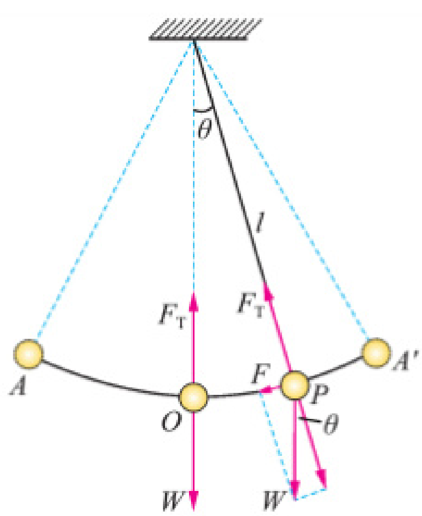


图 10.2.5 单摆的回复力

如图 10.2.5 所示，摆球静止在 O 点时，摆球受到

的重力与细线的拉力相互平衡，所以 O 点是单摆的平衡位置。以 O 点为原点，水平向右的方向为 x 轴正方向建立坐标系。分析摆球运动到任意一点 P 时的受力情况，重力沿着圆弧 AA' 切线方向的分力 $F=-mg\sin\theta$，F 是使摆球沿圆弧振动的回复力。当 θ 很小（一般 5°以内）时，摆球相对于 O 点的位移 x 的大小，与 θ 角所对的弧长、弦长都近似相等，因而 $\sin\theta\approx\frac{x}{l}$（其中 l 为摆长），所以单摆的回复力

$$F=-\frac{mg}{l}x,\ 即\ k=\frac{mg}{l}$$

上式表明，当偏角 θ 很小（一般 5°以内）时，单摆的运动可以看作是简谐运动。

④ 振幅、周期和频率

如图 10.2.1 所示，弹簧振子在光滑水平细杆上的 B 点和 C 点之间振动，O 点为平衡位置。其中 $OB=OC$，它们是振动物体离开平衡位置的最大距离，称为**振幅（amplitude）**。

简谐运动是一种周期性运动。描述振动物体运动状态的物理量（位移、速度）其大小和方向在经过一定时间后，又会全部恢复到原值，而且这种情况会相隔相同时间后不断重复出现。我们把每一个这样的过程称为一次完全的振动，简称全振动，例如，在图 10.2.1 中，振子从 B 点开始经 O 点到 C 点，再经 O 点返回 B 点。我们把完成一次全振动所需的时间，称为振动的**周期**。单位时间内完成全振动的次数，称为振动的**频率**。用 T 表示周期，用 f 表示频率，则有

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

在国际单位制中，周期的单位是秒；频率的单位是**赫兹**，符号是 Hz，$1\ \text{Hz}=1\ \text{s}^{-1}$。

练习 10-2

1. 产生简谐运动的条件是什么？

2. 什么是单摆？在什么条件下可以把单摆的运动看成是简谐运动？

3. 在一个周期中，振动物体有几次通过平衡位置？有几次到达速度为零的位置？

4. 人发出声音的频率范围是 60 ～ 1 200 Hz，求其周期范围。

第 3 节　简谐运动方程

简谐运动是变速运动，而且加速度也是变化的，因此直接研究它的运动规律是有一定困难的。我们可以尝试换一个角度来研究这个问题。

简谐运动和匀速圆周运动是两种不同的运动，但有趣的是，它们都是周期性运动，它们之间是否会有更密切的联系呢？

演示 10-1

如图 10.3.1 a 所示，在研究竖直振动的弹簧振子时，我们可以在它的右侧设置一个转速可以精确调节的微型电机，使其带动一头安有乒乓球的金属棒转动，在弹簧振子的左侧放置一块硬纸板，并用平行光线从侧面照射这套装置。通过适当调节电机的转速和振子的振幅，我们可以观察到，乒乓球和振子在硬纸板上的影子始终是重合的。

我们也可以用同样的方法来研究单摆的运动规律，如图 10.3.1 b 所示，也可以观察到同样的结果。

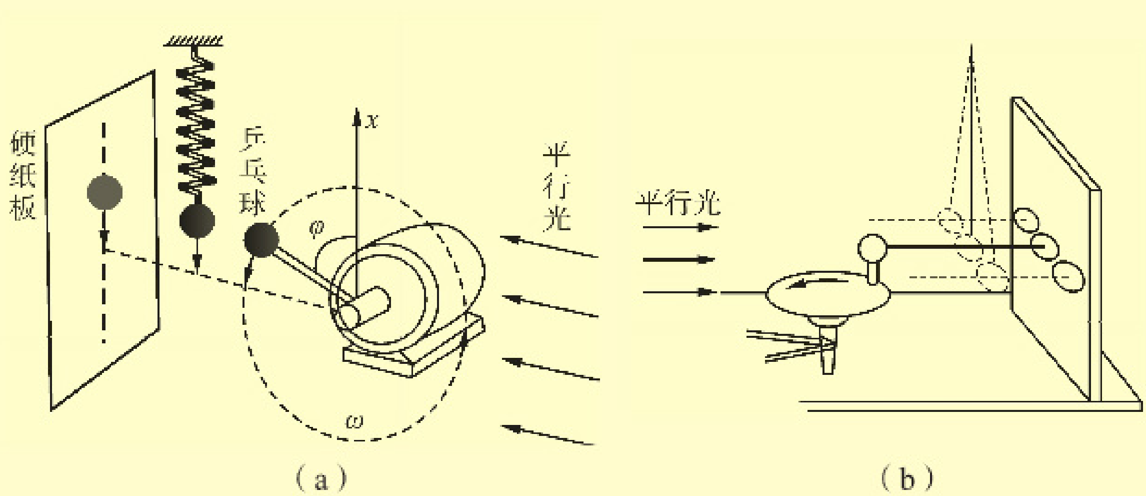


图 10.3.1　匀速圆周运动和简谐运动之间关系的演示实验

这些演示实验表明，做匀速圆周运动的物体在圆周的某一条直径方向上的投影是简谐运动。这让我们感到惊奇，因为从表面上看，匀速圆周运动根本没有任何“弹簧”的踪迹。

与此同时，这个演示实验的结论也使我们感到非常“幸运”，因为匀速圆周运动中的物理量与时间的关系是简单的。

① 位移、速度和加速度与时间的关系

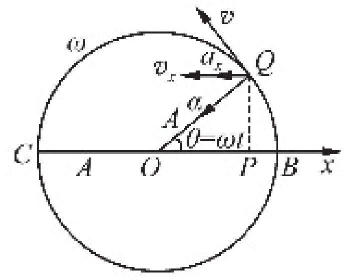


图 10.3.2　简谐运动的位移、速度和加速度

如图 10.3.2 所示，设一质点以角速度 ω 在半径为 A 的圆周上做匀速圆周运动。以它的一条直径为 x 轴，设 $t=0$ 时刻质点在 B 点，则 $t=t$ 时刻质点运动到 Q 点，Q 点在 x 轴上的投影 P 点相对于 O 点的位移 x 与时间 t 的关系为

$$x=A\cos\theta=A\cos\omega t$$

P 点的速度等于质点在 Q 点的线速度 v 在 x 轴方向上的分量，即

$$v_x=-v\sin\theta=-\omega A\sin\omega t$$

已知质点在 Q 点的加速度为向心加速度 $a=\omega^2A$，方向指向圆心 O 点，则 P 点的加速度等于质点在 Q 点的加速度在 x 轴方向上的分量，即

$$a_x=-a\cos\theta=-\omega^2A\cos\omega t=-\omega^2x$$

做一做

如图 10.2.3 所示的竖直振动的弹簧振子，把振子从平衡位置向下拉一段距离 A，放手让其振动，A 就是振动的振幅。用秒表测出 n 个全振动所用的时间 t，$\frac{t}{n}$ 就是振动的周期。再把振幅减小为原来的一半，用同样的方法测量振动的周期。通过这个实验你有什么发现？由此你对周期与振幅的关系有什么猜想？

从这里我们再一次看到，加速度 a 与位移 x 成正比且反向。这就是简谐运动才有的加速度的特征。鉴于演示 10-1 中得出的结论，上述求得的 P 点的位移、速度和加速度与时间的关系，也就是做简谐运动物体的位移、速度和加速度与时间的关系。通常我们把位移 x 与时间 t 的关系式称为简谐运动方程。（本章所说的位移均指质点相对于平衡位置 O 点的位移）

② 简谐运动的周期公式

在简谐运动中，我们已经看到

$$a_x = -\omega^2 x$$

在上一节中，我们得到

$$a = -\frac{k}{m}x$$

联系这两式，可得 $\omega = \sqrt{\frac{k}{m}}$，且圆周运动的周期 $T = \frac{2\pi}{\omega}$，这也就是简谐运动的周期。于是得到弹簧振子的周期为

$$T = 2\pi\sqrt{\frac{m}{k}}$$

可见，弹簧振子的周期与振幅无关。

对于单摆，由 $k = \frac{mg}{l}$，得单摆的周期为

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

可见，单摆的周期（摆角很小时①）只取决于摆长和重力加速度，而跟摆球的质量和振幅无关。单摆的周期与振幅无关，最早是伽利略在 1583 年前后发现的。1656 年，荷兰物理学家惠更斯首先确定了单摆的上述周期公式，并利用这一特性制成了摆钟（如图 10.3.3），大大提升了人类计时的准确性。

图 10.3.3　摆钟

③ 用单摆测定重力加速度

由单摆周期公式可得 $g = \frac{4\pi^2 l}{T^2}$，如果测出单摆的摆长 l、周期 T，就可以求出当地的重力加速度。这是测定重力加速度的一种简便方法。

例题 10 – 4　在图 10.2.3 中，如果弹簧的劲度系数是 400 N m^{-1}，悬挂重物的质量是 1 kg，振幅是 1 cm，不计空气阻力。求：

（a）振子的周期。

（b）振子的最大速度。

（c）振子的最大加速度。

---

① 利用高等数学研究单摆的运动就会看到，上述单摆的周期公式是个近似公式，由它算出的周期与精确值之间的差别随着偏角的增加而增加。当偏角为 5°时两者相差 0.01%，30°时差 1.7%，60°时差 7.3%，90°时差 18%。

解　(a) 由 $T=2\pi\sqrt{\frac{m}{k}}$，得振子的周期

$$
\begin{aligned}
T&=2\pi\sqrt{\frac{1}{400}}\ \text{s}\\
&=0.314\ \text{s}
\end{aligned}
$$

(b) 振子的最大速度在位移为零的位置，最大速度

$$
\begin{aligned}
v_m&=\omega A\\
&=\frac{2\pi}{T}A\\
&=\frac{2\pi}{0.314}\times 0.01\ \text{m s}^{-1}\\
&=0.2\ \text{m s}^{-1}
\end{aligned}
$$

(c) 振子的最大加速度在位移最大处，最大加速度

$$
\begin{aligned}
a_m&=\omega^2 A\\
&=\left(\frac{2\pi}{T}\right)^2 A\\
&=\left(\frac{2\pi}{0.314}\right)^2\times 0.01\ \text{m s}^{-2}\\
&=4.0\ \text{m s}^{-2}
\end{aligned}
$$

练习 10-3

1. 一个水平振动的弹簧振子，已知其劲度系数为 60 N m^{-1}，振子的质量是 0.2 kg，振幅是 2 cm，不计空气阻力和摩擦阻力。求：

(a) 振子的周期。

(b) 振子的最大速度。

(c) 振子的最大加速度。

2. 一个单摆的摆长为 2.0 m，周期是 2.84 s，求出当地的重力加速度。

3. 已知某地的重力加速度是 9.8 m s^{-2}，想制作一个周期是 2 s 的秒摆，则秒摆的摆长是多少？已知月球表面的自由落体加速度为 1.6 m s^{-2}，则此秒摆在月球上做 50 次全振动要用时多少？

第 4 节　简谐运动的图象

简谐运动的位移、速度和加速度都随时间变化，它们与时间之间的函数关系分别是：

$$x = A\cos\omega t$$

$$v = -\omega A\sin\omega t$$

$$a = -\omega^2 A\cos\omega t$$

这些关系也可以用图象表示出来，如图 10.4.1 所示。图中横坐标表示时间 t，纵坐标分别表示位移 x、速度 v 和加速度 a。

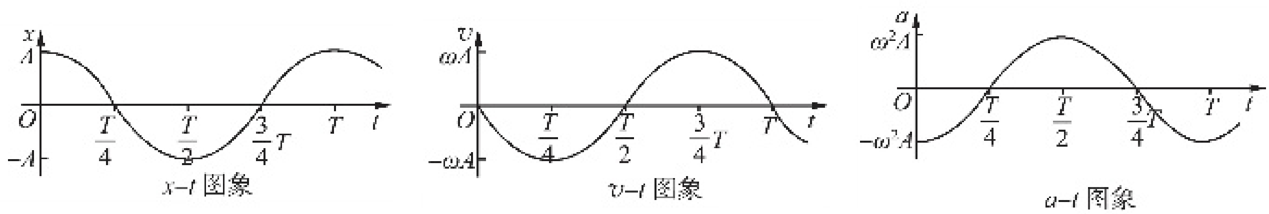


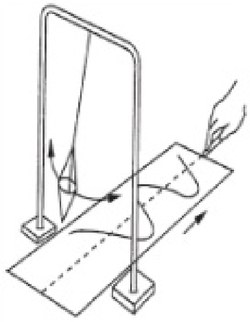
图 10.4.1　简谐运动的图象

思考与讨论

结合图 10.4.1，完成下面表格，并和同学一起讨论：位移、速度、加速度的最大值和最小值分别在什么时刻？三者之间有怎样的对应关系？

时间 t	$\frac{T}{4}$	$\frac{T}{2}$	$\frac{3T}{4}$	T
位移 x				
速度 v				
加速度 a				

所以，简谐运动中的质点相对于平衡位置的位移与时间的关系遵从正弦或余弦函数的规律，即它的振动图象（x–t 图象）是一条正弦或余弦曲线。同样的，v–t 图象和 a–t 图象也都是正弦或余弦曲线。


(a)

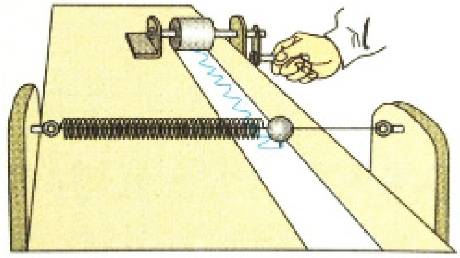

(b)

图 10.4.2　用实验绘制简谐运动的图象

简谐运动的图象也可以通过实验得到。最简单的方法是用漏斗做一个单摆，在漏斗里装上细沙，把单摆悬挂在架子上，在漏斗下方放一块长纸板，使漏斗的平衡位置位于纸板中线的上方，如图 10.4.2 a 所示。使漏斗左右摆动，同时沿摆动的垂直方向匀速拉动长纸板，从漏斗中流出的细沙就在长纸板上描绘出沙摆的振动图象。我们也可以用这种方法得到弹簧振子的振动图象，如图 10.4.2 b 所示。

上述实验能够得到比较粗略的简谐运动图象，得到的图象与从理论上绘制的简谐运动图象基本上是一致的。在实验室也可以采用频闪仪拍摄频闪照片的方式得到更加精准的简谐运动图象，如图 10.4.3 所示。

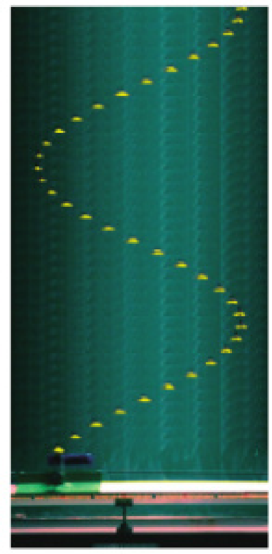


图 10.4.3　弹簧振子的数码照片

思考与讨论

如何从实验得到的简谐运动图象中确定位移与时间的关系？

我们可以在图 10.4.3 中建立恰当的坐标系，通过测量得到振子在各个位置的横、纵坐标。再把测量值输入计算机，然后用数表软件来分析是否可以用正弦曲线来拟合这一系列数据。

做一做

我们可以用数码相机和计算机绘制弹簧振子的 $x-t$ 图象，具体做法如下：

用数码相机中的摄像功能拍摄弹簧振子的运动，大约每隔 0.04 s（取决于相机的品牌与型号，某些相机还可以自主设定）拍摄一帧照片。拍摄时最好让振子沿着取景框的左侧边缘振动。

在计算机中建立一个幻灯片的演示文稿，把这些照片插入文稿中的同一张空白幻灯片中，照片会按照拍摄时间的先后一帧一帧自动向右平铺开来。把这些照片的上端对齐，便能得到与图 10.4.3 相似的图象。

上述记录和研究振动的方法有很多实际应用。医院里用心电图仪绘制心电图（如图 10.4.4）、地震台用地震仪绘制地震曲线（如图 10.4.5）以及电工实验中用示波器（如图 10.4.6）显示信号曲线等，都是用类似的方法记录和展示振动情况的。

正弦函数的一般形式是 $y=A\sin(\omega x+\varphi)$，它的图象称为正弦曲线。$y=A\cos\omega x$ 的图象也是一条正弦曲线，因为它可以写成 $y=A\sin\left(\omega x+\frac{\pi}{2}\right)$。

图 10.4.4　心电图

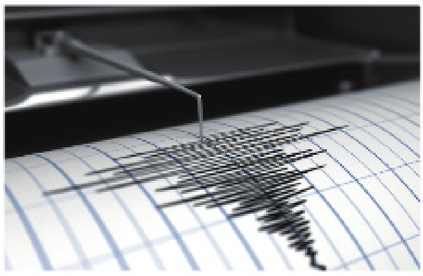


图 10.4.5　地震仪

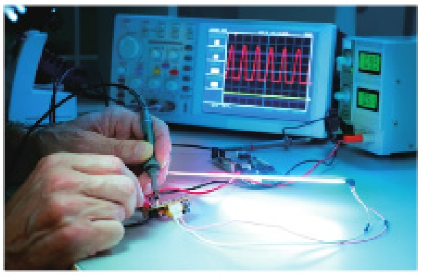


图 10.4.6　示波器

练习 10-4

1. 一个做简谐运动的弹簧振子周期为 T，振幅为 A。已知振子从平衡位置第一次运动到 $x=\dfrac{A}{2}$ 处所用的时间为 t_1，从最大的正位移处第一次运动到 $x=\dfrac{A}{2}$ 处所用的时间为 t_2，请比较 t_1 和 t_2 的大小。

2. 图 10.4.7 是某质点做简谐运动的图象，请你根据图象中的信息回答下列问题：

   （a）质点离开平衡位置的最大距离是多少？

   （b）质点在第 2 s 末的位移是多少？

   （c）质点在前 2 s 内经过的路程是多少？

   （d）在第 1.5 s 和第 2.5 s 这两个时刻，质点向哪个方向运动？

   （e）质点相对平衡位置的位移方向与它的瞬时速度方向在哪些时间内是相同的？在哪些时间内是相反的？

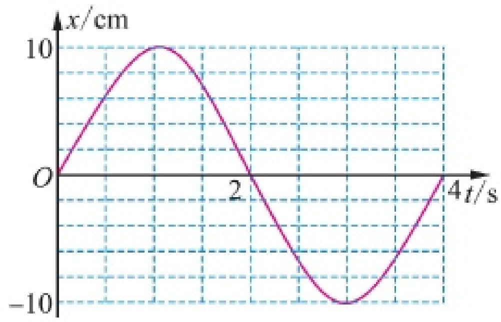
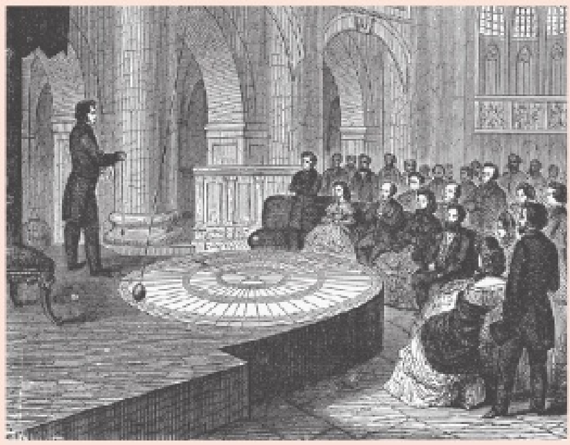


图 10.4.7　某质点的振动图象

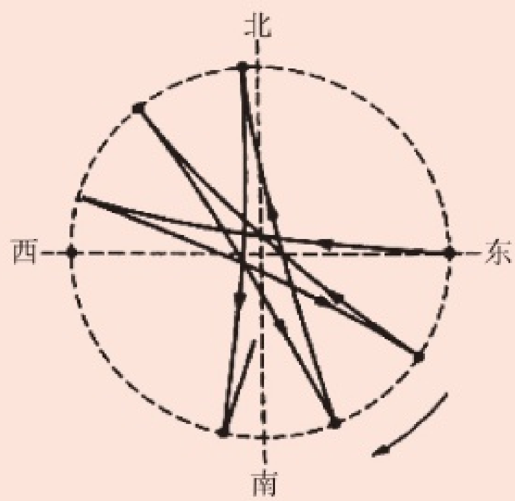
3. 著名的傅科摆可以看成是摆长为 67.15 m 的一个单摆，试问：这个摆的周期大约为多少？

拓展阅读

1851 年，为了表明地球是在自转着，法国科学家傅科（Jean Foucault，1819—1868）在巴黎国葬院大厅的穹顶上悬挂了一条67 m 长的绳索，绳索的下面是一个重达 28 kg、直径约为30 cm 的摆锤，摆锤的下方是巨大的沙盘，如图 10.4.8 a 所示。每当摆锤经过沙盘上方的时候，摆锤上的指针就会在沙盘上面画出摆锤运动的轨迹。按照日常的经验，指针应该在沙盘上画出唯一一条轨迹。实验开始后人们发现，这个摆锤每经过一个周期的振动，在沙盘上画出的轨迹都会偏离原来的轨迹，如图 10.4.8 b 所示（在这个直径 6 m 的沙盘边缘，两个轨迹之间相差大约 3 mm)。



（a）



（b）

图 10.4.8

数字实验

简谐振动图象

●实验器材

分体式位移传感器，弹簧振子，一体式位移传感器等。

●实验操作

本实验列举的例子是弹簧振子的振动图象，装置图如图 10.4.9 所示。

图 10.4.9　弹簧振子的数字实验装置

1. 利用如图 10.4.9 所示的弹簧振子装置，打开软件，在“组合图线”中添加“ s1—时间”图线，打开位移传感器发射器的电源开关，拉动使其做简谐振动，可得到如图 10.4.10 所示的实验图象。

2. 选取实验图线中的某段区域，点击“拟合”，选取正弦拟合（如图 10.4.11），得到分析结果（如图 10.4.12）。

由拟合的结果可以看出，拟合图线与运动图线高度重合，由此可推断，弹簧振子的运动图象符合正弦规律。

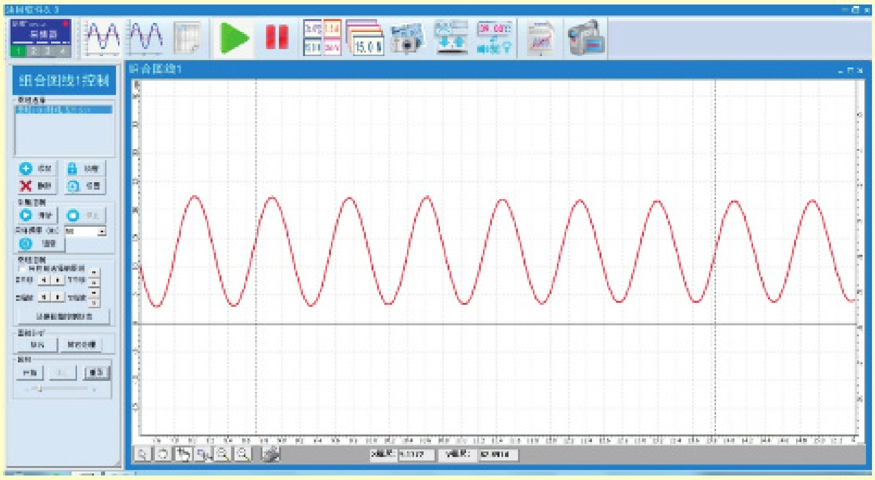


图 10.4.10　弹簧振子的振动图象

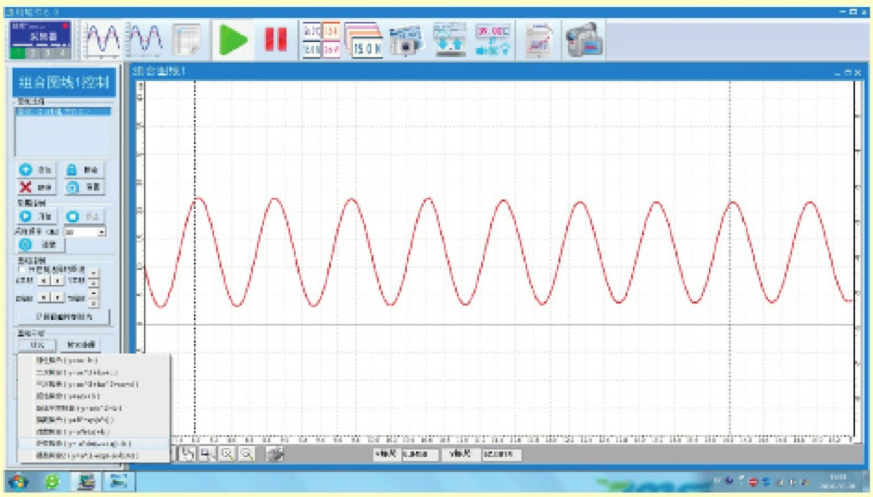


图 10.4.11　选择正弦拟合

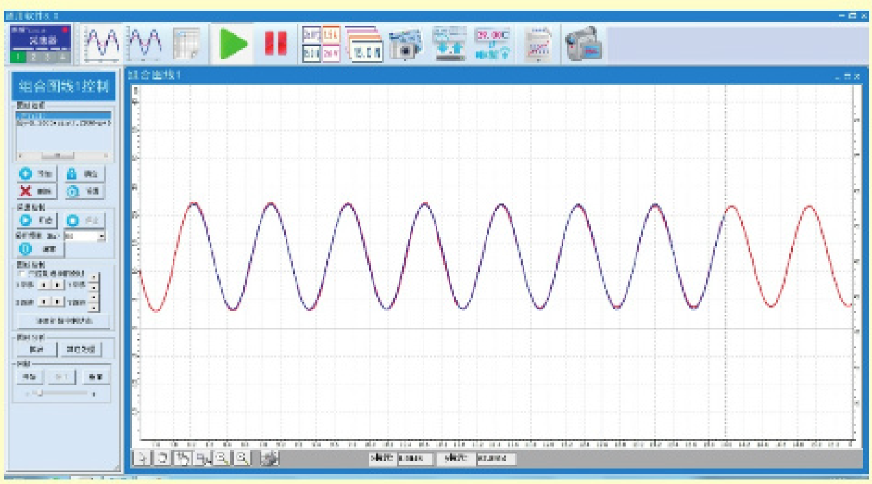


图 10.4.12　弹簧振子的正弦拟合图线

第 5 节　简谐运动的能量

在水平方向做简谐运动的弹簧振子，它的速度在不断变化，因而它的动能也在不断变化；弹簧的伸长量或压缩量在不断变化，因而它的弹性势能也在不断变化。它们的变化具有什么规律呢？

思考与讨论

结合图 10.2.1 完成下面这张表格，并和同学一起讨论你的猜想。

位置	B 点	$B \to O$	O 点	$O \to C$	C 点
位移	A	减小	0	增大	$-A$
速度					
动能					
势能					

弹簧振子在某时刻 t 的位移和速度分别为

$$x = A\cos\omega t$$

$$v = -\omega A\sin\omega t$$

根据动能和势能的表达式，弹簧振子的动能和势能分别为

$$E_k = \frac{1}{2}mv^2 = \frac{1}{2}m\omega^2 A^2 \sin^2\omega t$$

$$E_p = \frac{1}{2}kx^2 = \frac{1}{2}kA^2 \cos^2\omega t$$

上述两式表明，弹簧振子的动能和势能也做周期性变化。考虑到 $\omega = \sqrt{\frac{k}{m}}$，所以系统在任意时刻的机械能为

$$\begin{aligned}E &= E_k + E_p \\ &= \frac{1}{2}m\omega^2 A^2 \sin^2\omega t + \frac{1}{2}kA^2 \cos^2\omega t \\ &= \frac{1}{2}kA^2(\sin^2\omega t + \cos^2\omega t)\end{aligned}$$

即
$$E=\frac{1}{2}kA^2$$
或
$$E=\frac{1}{2}m\omega^2A^2$$

这表明，弹簧振子系统的机械能与振幅的平方成正比，不随时间 t 变化，也就是机械能守恒。在没有外界阻力的情况下，系统只有弹簧弹力在做功，这也是符合机械能守恒定律的。

简谐运动的动能 E_k、势能 E_p 和机械能 E 跟位移 x 的关系，也可以用图象表示，如图 10.5.1 所示。从图象中可以看出，在 $x=0$ 处，动能最大，势能最小（等于零）；在 $x=\pm A$ 处，势能最大，动能最小（等于零）；动能和势能之和是一个常量，不随 x 的变化而变化。这表明，物体在做简谐运动时，动能和势能相互转化，动能的减少量等于势能的增加量，势能的减少量等于动能的增加量，机械能保持不变。

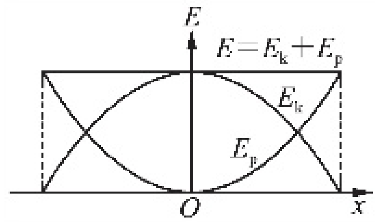


图 10.5.1　简谐运动的 E_k-x、E_p-x、E-x 图象

例题10－5　一个弹簧振子沿水平方向振动，外界阻力忽略不计，已知弹簧的劲度系数 $k=400\ \mathrm{N\ m^{-1}}$，振子的质量 $m=1\ \mathrm{kg}$，振幅 $A=2\ \mathrm{cm}$，求振子在 $x=1\ \mathrm{cm}$ 时的势能、动能和机械能。

解法一　势能
$$\begin{aligned}E_p&=\frac{1}{2}kx^2\\&=\frac{1}{2}\times 400\times 0.01^2\ \mathrm{J}\\&=2.0\times 10^{-2}\ \mathrm{J}\end{aligned}$$

动能
$$E_k=\frac{1}{2}mv^2=\frac{1}{2}m\omega^2A^2\sin^2\omega t$$

由 $\cos\omega t=\frac{x}{A}=\frac{1}{2}$，得 $\sin\omega t=\frac{\sqrt{3}}{2}$，

且
$$\begin{aligned}\omega&=\sqrt{\frac{k}{m}}\\&=\sqrt{\frac{400}{1}}\ \mathrm{rad\ s^{-1}}\\&=20\ \mathrm{rad\ s^{-1}}\end{aligned}$$

所以
$$\begin{aligned}E_k&=\frac{1}{2}m\omega^2A^2\sin^2\omega t\\&=\frac{1}{2}\times 1\times 20^2\times 0.02^2\times\left(\frac{\sqrt{3}}{2}\right)^2\ \mathrm{J}\\&=6.0\times 10^{-2}\ \mathrm{J}\end{aligned}$$

机械能　　$E = E_k + E_p$

$= 8.0\times10^{-2}$ J

解法二　势能　　$E_p=\frac{1}{2}kx^2$

$=\frac{1}{2}\times 400\times 0.01^2$ J

$=2.0\times 10^{-2}$ J

机械能　　$E=\frac{1}{2}kA^2$

$=\frac{1}{2}\times 400\times 0.02^2$ J

$=8.0\times 10^{-2}$ J

则动能　　$E_k = E - E_p$

$= 6.0\times10^{-2}$ J

练习 10–5

1. 一个竖直振动的弹簧振子，劲度系数 $k = 100$ N m^{-1}，振子质量 $m = 0.4$ kg，把振子从平衡位置向下拉 4 cm 后放开，振子开始振动。外界阻力忽略不计，求振子回到平衡位置时的动能。

2. 一个水平振动的弹簧振子，外界阻力忽略不计，在势能跟动能相等时，振子离开平衡位置的位移大小 x 是振幅 A 的几分之几？

3. 单摆的摆球质量 $m = 50$ g，摆长 $l = 1$ m，推一下摆球，使它获得动能 $E_k = 0.1$ J，它偏离竖直方向的角度能达到多大？（取 $g = 10$ m s^{-2}）

4. 一个弹簧振子的劲度系数 $k = 100$ N m^{-1}，振子质量 $m = 0.1$ kg，水平振动的振幅 $A = 4$ cm，外界阻力忽略不计。求振子离开平衡位置的位移为 3 cm 时的势能和动能。

第 6 节　受迫振动　共振

1 自由振动

做简谐运动的物体受到的回复力，是振动系统内部的相互作用力。如果振动系统不受外力的作用，此时的振动称为**自由振动**（**natural vibration**），也称为固有振动。

自由振动的振幅取决于振动起始时系统所具有的能量。自由振动的频率称为**固有频率**（**natural frequency**），只与振动系统的参数有关。例如，弹簧振子的固有频率只与弹簧的劲度系数和振子的质量有关。

2 阻尼振动

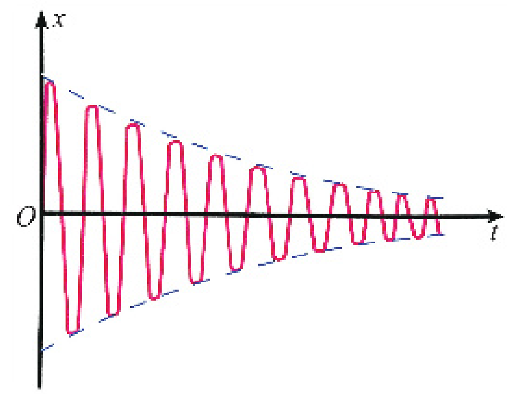


图 10.6.1　阻尼振动的图象

在实际过程中我们发现，一个在水平滑轨上振动的弹簧振子慢慢会停止振动，一个单摆左右摆动的幅度会逐渐减小。这是因为除了回复力，振子还受到滑轨的摩擦阻力，单摆还受到空气的阻力。振动系统需要克服这样的阻力做功，系统振动能量逐渐耗散，因而振幅随着时间逐渐减小，最后减为零。这种振幅逐渐减小的振动，被称为**阻尼振动**（**damping vibration**）。图 10.6.1 是阻尼振动的图象。阻尼越大，振幅减小得越快。阻尼过大时，系统将不再发生振动。

振动系统受到阻尼作用时，其振动频率会小于系统的固有频率。阻尼越大，频率减小得就越明显。

当阻尼很小时，振幅减小得就很慢。如果在一个不太长的时间里看不出振幅有明显的减小，就可以把它当简谐运动来处理，如空气中摆动的单摆。

3 受迫振动

阻尼振动最终要停下来，那么怎样才能产生持续的振动呢？可以在振动系统上持续施加一个周期性的外力，外力对系统做功，补偿系统的能量损耗，使振动持续下去。这

样的周期性外力称为**驱动力**，这样的振动称为**受迫振动（forced vibration）**。机器运转时底座的振动，扬声器纸盆的振动，汽车在颠簸路段上的振动等都是受迫振动。

演示 10-2

受迫振动的频率与什么因素有关

如图 10.6.2 所示，在一框架的上部有一水平摇把，在摇把中部下凹部分悬挂一个弹簧振子。匀速转动摇把，弹簧振子就受到一个周期性的驱动力而做受迫振动。当振动稳定后，请观察弹簧振子振动的频率和摇把转动的频率有何关系。在不同的摇把转速下观察，你又有哪些发现？

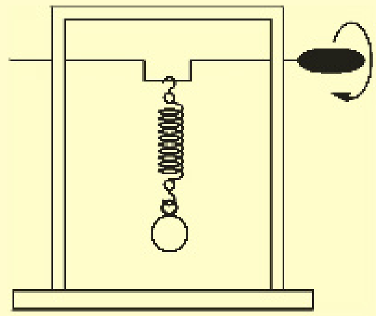


图 10.6.2　受迫振动

通过上述演示实验我们可以发现，当振动稳定后，受迫振动的振幅将保持一定的值，**受迫振动的频率总是等于周期性驱动力的频率，与系统的固有频率无关**。

如果改变驱动力的频率，我们会发现受迫振动的振幅会随着驱动力频率的变化而变化，那受迫振动的振幅又与什么因素有关呢？

做一做

如图 10.6.3 所示，在支架上水平地拴上一条细绳，在细绳上悬挂一些单摆，其中 B 摆、G 摆的摆长跟 A 摆的摆长相等。使 A 摆前后摆动，进而牵动水平绳，水平绳又牵动其他摆，于是其余各摆都做受迫振动。请观察各摆的频率和振幅有何特点。

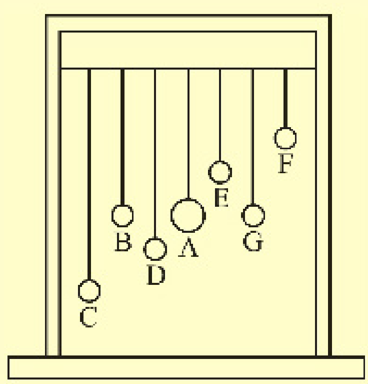


图 10.6.3　共振的研究

实验表明，当系统做受迫振动时，驱动力的频率越接近系统的固有频率，系统的振幅就会越大。当驱动力的频率等于系统的固有频率时，受迫振动的振幅最大，这种现象称为**共振**① (**resonance**)。

共振现象在生活中和技术上是常见的。例如，利用共鸣箱可以使音叉的声音放大，就是共振的一种应用。如图 10.6.4，你可以试着用音叉演示一下声音的共振现象。大多数弦乐器都有一个木制的共鸣箱以放大弹奏的声音，如图 10.6.5 所示。修建桥梁时需将桥柱插入江底，如果使打桩机打击桥柱的频率接近桥柱的固有频率，桥柱就发生共振而剧烈振动，使周围的泥沙松动，桥柱就容易深入江底。

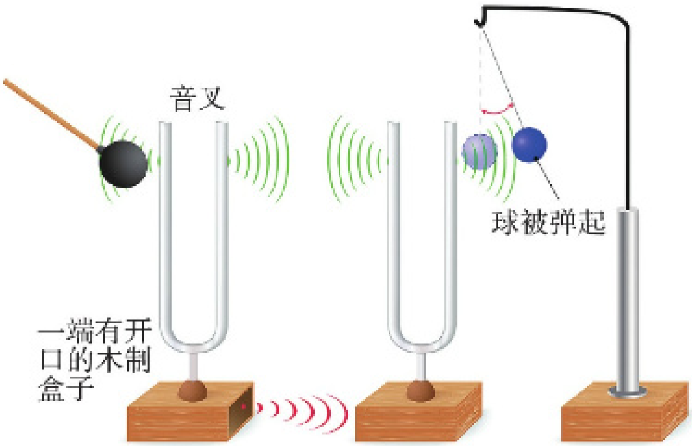


图 10.6.4　声音的共振

图 10.6.5　弦乐器

共振现象有时是有害的，应设法避免。汽车和洗衣机的设计、桥梁和铁轨的建造，工程师都需要考虑如何避免产生共振。

①也称位移共振。对于有阻尼的振动系统，当驱动力的频率略小于固有频率时，系统的振幅才达到最大值。阻尼越大，这两个频率的差别越大。

练习 10-6

1. 什么是阻尼振动？什么是受迫振动？请各举一个例子加以说明。

2. 什么是共振？共振有什么益处和害处？请各举一个例子加以说明。

3. 远处传来的钟声使实验桌上的音叉响了起来，怎么解释这种现象？在音叉上缠了一些铁丝，钟声再响时，音叉却不响了。为什么？

4. 一辆小汽车的车身—弹簧系统的固有频率是 2.5 Hz。这辆小汽车在一段起伏不平的路面上行驶，路面凸起之处大约都相隔 8 m。这辆小汽车以多大速度行驶时车身上下颠簸得最剧烈？

拓展阅读

共振和减振

中国古代对共振早有了解。据《天中记》记载，晋初（公元 3 世纪）时，京城有户人家挂着的一个铜盘每天早晚都会轻轻自鸣两次，大家都感到惊恐。当时的学者张华判断，这是铜盘与皇宫早晚的钟声共鸣所致。后来把铜盘磨薄一些（改变固有频率），它就不再自鸣了。唐朝的刘餗在《隋唐嘉话》中记录，洛阳某寺庙的磬无故自鸣，太乐令曹绍夔解释为“此磬与钟律合，故击彼此应”，用锉刀在磬上锉几下，磬就不再响了。

共振在现代生活中也有很多应用。共振筛是把筛子用四根弹簧支起来，在筛架上安装一个偏心轮，偏心轮在电动机的带动下转动时，适当调节偏心轮的转速，可以使筛子受到的驱动力频率接近筛子的固有频率，筛子发生共振可以大大提高筛选工作的效率。收音机也是利用电磁共振（也称谐振）来工作的，当调节它的选频电路的电磁振荡频率等于想要收听的电台的无线电波频率时，这个电台的信号就会得到加强，而其他电台则被排除在外。如图 10.6.6 所示是医学检查中使用的磁共振成像（Magnetic Resonance Imaging，简称 MRI），它是利用具有磁矩的氢原子核在磁场中进动时，当外加的电磁波频率与其进动频率相等时能够吸收电磁波的能量，而当外加的电磁波取消时又会发射相同电磁波的核磁共振原理来工作的。如图 10.6.7 所示，当你在海边玩耍时捡到一个海螺壳，可以把它贴

图 10.6.6　磁共振成像（MRI）

在耳朵旁听听它发出的声音。海螺壳是一个共鸣器，可以把背景噪声中某些频率的声音放大。管弦乐器多是利用共鸣来增加特殊音调的响度。

图 10.6.7　倾听海螺的声音

在某些情况下，共振还可能造成损害。军队或火车过桥时，整齐的步伐或车轮对铁轨接缝的撞击会对桥梁产生周期性的驱动力，如果驱动力的频率接近桥梁的固有频率，就可能使桥梁的振幅显著增大，致使桥梁断裂。1940 年 11 月 7 日，刚建成通车才四个月的美国华盛顿州塔科马海峡大桥（Tacoma Narrows Bridge）在风速 42 英里 / 时、频率 0.2 Hz 的阵风吹动下摇晃得越来越剧烈。随着一声巨响，桥身突然断裂，坍塌到了水中。

鉴于共振的危害，在很多场合我们要避免共振的产生。火车过桥时要适当减速，使驱动力的频率小于桥梁的固有频率。飞机设计师必须保证机翼的固有频率要高于飞机发动机的振动频率，防止机翼在发动机达到一定速度时发生猛烈颤抖。机器运转时，如活塞的往复运动、轮的转动会产生周期性的驱动力，这时要调节机器的运转速度，使驱动力的频率和机器或支持物的固有频率不一致。同样，厂房建筑物的固有频率也不能处在机器运转的频率范围之内。轮船航行时，如果所受波浪冲击力的频率接近轮船左右摇摆的固有频率，轮船可能倾覆。这时应改变航向，使波浪冲击力的方向与轮船摇摆的方向不一致，同时改变航速，使波浪冲击力的频率远离轮船摇摆的固有频率。

除了避免共振以外，有时我们还需要减振，以降低外界冲击力对物体的破坏作用。减振的方法之一是给被保护的物体附

加一层阻尼材料，使冲击过程的机械能尽可能多地转化为阻尼材料的内能。例如，在商品运输过程中使用泡沫塑料作为包装材料，在桥梁的立柱与横梁、横梁与横梁之间加装液压阻尼器，等等。

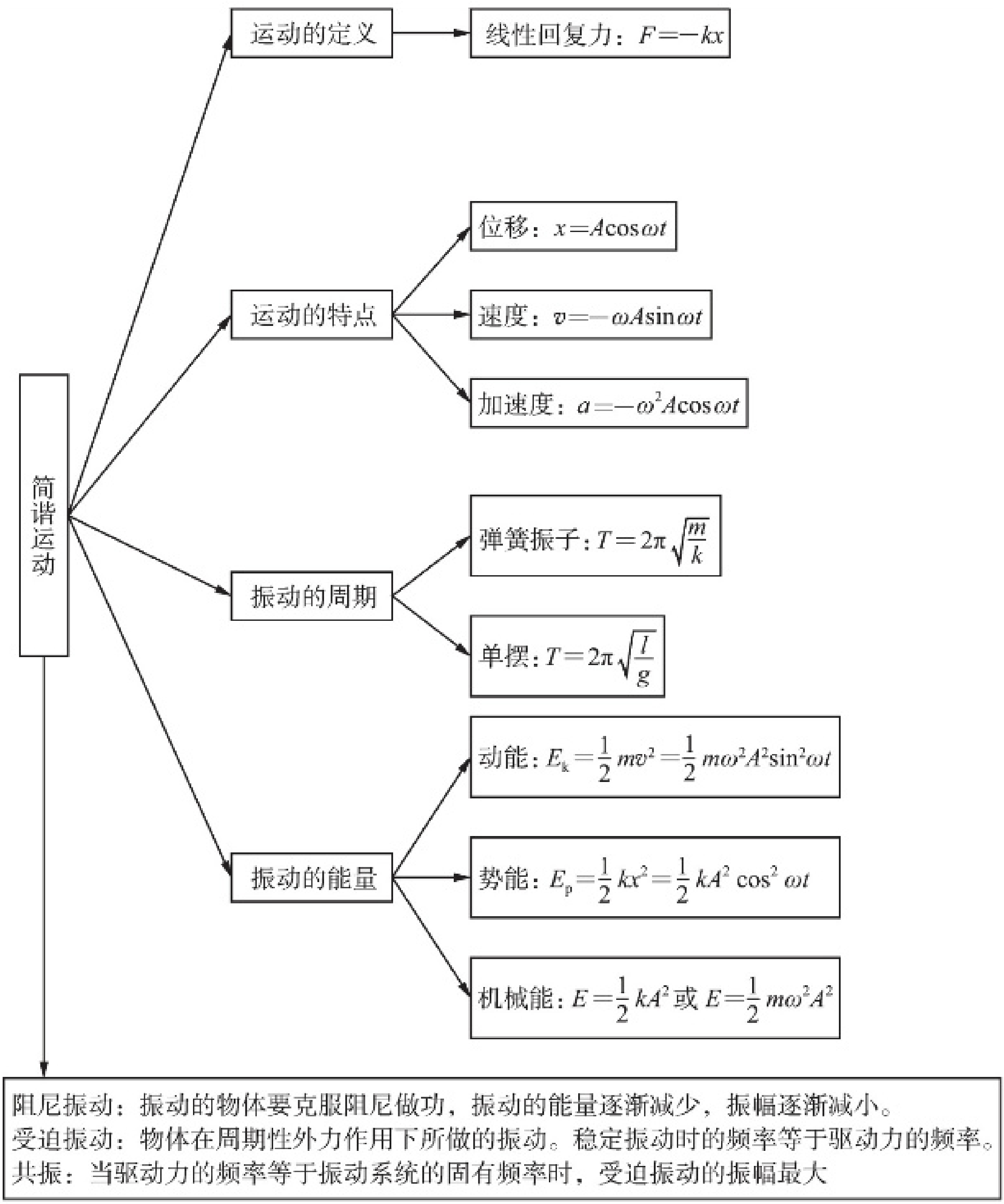
图 10.6.8 车辆减振器

减振的另一个方法是在被保护物体与外界冲击作用之间加装弹簧，形成“物体—弹簧—物体”系统。如图 10.6.8 所示是一辆汽车的减振器，当地面坑洼的振动冲击频率远大于减振器的固有频率时，减振器不会及时把地面对轮胎的冲击力传递给车座，从而减轻对车座上的人的冲击。而一般的汽车有轮胎和车身底盘、底盘和座椅、座椅和乘客这样的三级减振系统。

摩天大楼会在强风的作用下产生晃动，大楼越高晃动越明显，而这种晃动不仅会损害建筑结构，还会使在大楼里的人感到不舒服。为了减小这样的晃动，摩天大楼里都会安装一种称为调谐质量阻尼器的系统。

章末回顾

本章基本知识结构



总练习十

基础练习

1. 若单摆的摆长不变，摆球的质量由 20 g 增加到 40 g，摆球离开平衡位置的最大角度由 4° 减为 2°，则单摆振动的（　　）

   A. 频率不变，振幅不变　　B. 频率不变，振幅改变

   C. 频率改变，振幅不变　　D. 频率改变，振幅改变

2. 单摆做简谐振动，在摆动的过程中（　　）

   A. 只有在平衡位置时，回复力才等于重力和细绳拉力的合力

   B. 只有在最高点时，回复力才等于重力和细绳拉力的合力

   C. 小球在任意位置处，回复力都等于重力和细绳拉力的合力

   D. 小球在任意位置处，回复力都不等于重力和细绳拉力的合力

3. 有一个弹簧振子，第一次被压缩 x 长度后释放做自由振动，周期为 T_1；第二次被压缩 $2x$ 长度后释放做自由振动，周期为 T_2，则 $T_1 : T_2$ 为（　　）

   A. 1 : 1　　B. 1 : 2　　C. 2 : 1　　D. 1 : 4

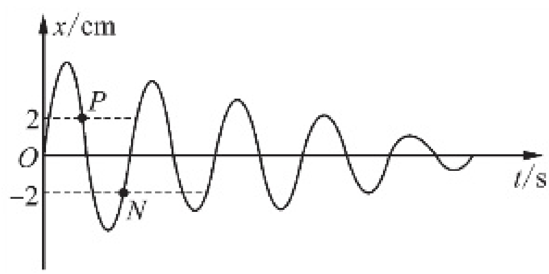
4. 如图所示是单摆做阻尼振动的位移—时间图象，下列说法正确的是（　　）

   A. 摆球在 P 与 N 时刻的势能相等

   B. 摆球在 P 与 N 时刻的动能相等

   C. 摆球在 P 与 N 时刻的机械能相等

   D. 摆球在 P 时刻的机械能小于在 N 时刻的机械能



（第 4 题）

5. 在山脚走时准确的摆钟，被考察队带到珠穆朗玛峰的顶端，则这个摆钟（　　）

   A. 变慢了，重新校准应减小摆长

   B. 变慢了，重新校准应增大摆长

   C. 变快了，重新校准应减小摆长

   D. 变快了，重新校准应增大摆长

6. 如图所示，长度为 l 的轻绳上端固定在 O 点，下端系一个小球（小球可以看成质点），在 O 点正下方距 O 点 $\frac{3}{4}l$ 处的 P 点固定一枚小钉子。现将小球拉到 A 点处，轻绳被拉直，然后由静止释放小球。B 点是小球运动的最低位置，C 点（图中未

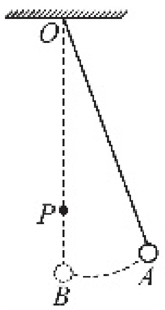
标出）是小球能够到达的左侧最高位置。已知 A 点与 B 点之间的高度差为 h，$h \ll l$，A、B、P、O 在同一竖直平面内，当地的重力加速度为 g，不计空气阻力。下列说法正确的是（　　）

A. C 点与 B 点的高度差小于 h

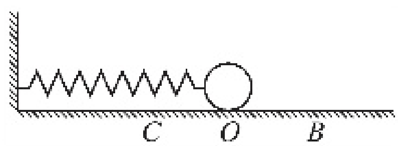
B. C 点与 B 点的高度差等于 h

C. 小球摆动的周期等于 $\frac{3\pi}{2}\sqrt{\frac{l}{g}}$

D. 小球摆动的周期等于 $\frac{3\pi}{4}\sqrt{\frac{l}{g}}$



（第 6 题）



（第 7 题）

7. 如图所示，弹簧振子的小球在 B、C 之间做简谐运动，O 为 B、C 间的中点，B、C 间的距离为 10 cm，则下列说法正确的是（　　）

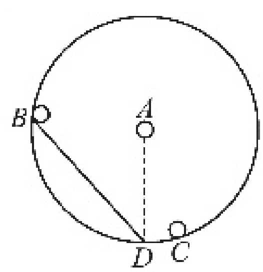
A. 小球的最大位移是 10 cm

B. 只有在 B、C 两点时，小球的振幅才是 5 cm；在 O 点时，小球的振幅是 0

C. 无论小球在什么位置，它的振幅都是 5 cm

D. 从任意时刻起，一个周期内小球经过的路程都是 20 cm

8. 如图所示，将小球甲、乙、丙（都可视为质点）分别从 A、B、C 三点由静止同时释放，最后都到达竖直面内圆弧的最低点 D，其中甲是从圆心 A 出发做自由落体运动，乙沿弦轨道从一端 B 到达另一端 D，丙沿圆弧轨道从 C 点运动到 D 点，且 C 点很靠近 D 点。如果忽略一切摩擦阻力，那么下列判断不正确的是（　　）



（第 8 题）

A. 甲球最先到达 D 点，乙球最后到达 D 点

B. 甲球最先到达 D 点，丙球最后到达 D 点

C. 丙球最先到达 D 点，乙球最后到达 D 点

D. 甲球最先到达 D 点，无法判断哪个球最后到达 D 点

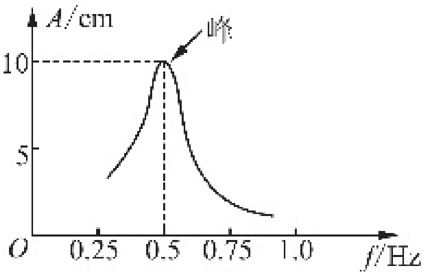
9. 如图所示是一个单摆做受迫振动时的共振曲线，表示振幅 A 与驱动力的频率 f 的关系，下列说法正确的是（　　）

A. 摆长约为 10 cm

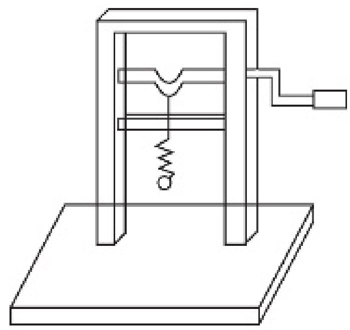
B. 摆长约为 1 m

C. 若增大摆长，则共振曲线的“峰”将向右移动

D. 若增大摆长，则共振曲线的“峰”将向左移动



（第 9 题）



（第 10 题）

10. 如图所示，在曲轴上悬挂一个弹簧振子，曲轴不动时让其上下振动，振动周期为 T_1。现让把手以周期 T_2 匀速转动，$T_2 > T_1$，当其运动达到稳定后，则（　　）

A. 弹簧振子的振动周期为 T_1

B. 弹簧振子的振动周期为 T_2

C. 要使弹簧振子的振幅增大，可以减小把手的转速

D. 要使弹簧振子的振幅增大，可以增大把手的转速

提高练习

11. 人们欲乘坐游船出海游玩，当日有一定的风浪，游船上下起伏。可把游船的起伏简化成竖直方向的简谐运动，振幅为 20 cm，周期为 3.0 s。当船上升到最高点时，甲板刚好与码头地面平齐。地面和甲板的高度差不超过 10 cm 时，人们能够舒服地登船。在一个周期内，人们能舒服登船的时间是（　　）

A. 0.5 s　　B. 0.75 s　　C. 1.0 s　　D. 1.5 s

12. 简谐运动的振动图线可用下述方法画出：如图 a 所示，在弹簧振子的小球上安装一支绘图笔 P，让一条纸带在与小球振动方向垂直的方向上匀速运动，笔 P 在纸带上画出的就是小球的振动图象。取振子离开平衡位置水平向右的方向为正方向，纸带运动的距离代表时间，得到的振动图象如图 b 所示。

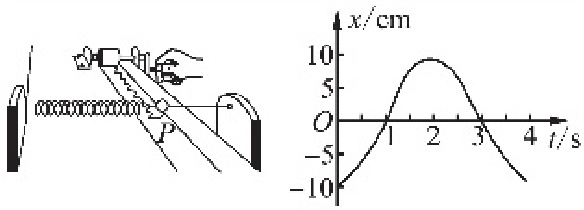
（a）为什么必须匀速拖动纸带？

（b）刚开始计时时，振子处在什么位置？ $t = 17$ s 时振子相对平衡位置的位移是多少？

（c）若纸带运动的速度为 2 cm s^{-1}，振动图象上 $t = 1$ s 对应的点和 $t = 3$ s 对应的点的距离是多少？

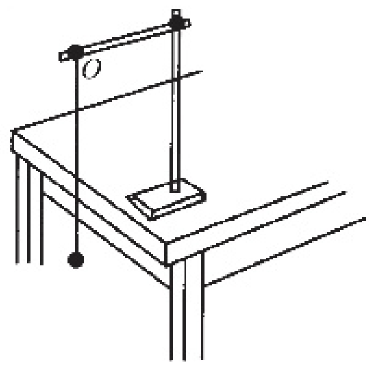
（d）振子在 ________ s 末负方向速度最大；在 ________ s 末正方向加速度最大；$t = 2.5$ s 时振子正在向 ________ 方向运动。

（e）写出振子的振动方程式。



（a）　　（b）

（第 12 题）



（第 13 题）

13. 某学生研究小组用单摆测定重力加速度的实验装置如图所示。

（a）组装单摆时，应选用下列器材中的________（填选项前的字母）。

A. 长度为 1 m 左右的细线

B. 长度为 30 cm 左右的细线

C. 直径为 1.8 cm 的塑料球

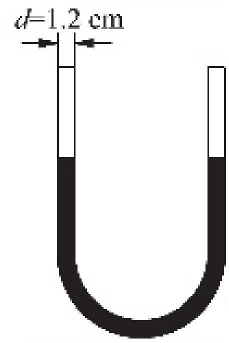
D. 直径为 1.8 cm 的铁球

（b）测出悬点 O 到小球球心的距离（摆长）L 及单摆完成 n 次全振动所需的时间 t，则重力加速度 $g =$__________（用含 L、n、t 的式子表示）。

（c）下表是某同学记录的三组数据，并作了部分计算，请补充完整。

组次	1	2	3
摆长 L/cm	80.00	90.00	100.00
50 次全振动的时间 t/s	90.0	95.5	100.5
振动周期 T/s	1.80	1.91	
重力加速度 g/(m s^{-2})	9.74	9.73	

14. 在内直径为 1.2 cm 的 U 形管内装有质量为 67.80 g 的液体，如图所示，液体在管内做微小振动，忽略液体与管壁的摩擦，求其振动的周期。（液体的密度为 1.00 g cm^{-3}）



（第 14 题）

15. 质量 $m = 5$ g 的小球悬挂在一竖直轻弹簧下端，弹簧伸长 $\Delta l = 1$ cm 而平衡。经推动后，该小球在竖直方向做振幅 $A = 4$ cm 的振动。求：

（a）小球的振动周期。

（a）小球的振动能量。

16. 一物体做简谐振动，其振动速度的最大值 $v_m = 4\times10^{-2}$ m s^{-1}，其振幅 $A = 2\times10^{-2}$ m。若 $t = 0$ 时，物体处于平衡位置且向 x 轴的负方向运动。求：

（a）振动周期 T。

（b）振动加速度的最大值 a_m。

（c）振动方程式的数值表达式。

第11章 流体力学

本章提要

1. 静止液体内部压强的规律。
2. 阿基米德原理及其应用。
3. 稳定流动和连续性方程式。
4. 伯努利方程式及其应用。
5. 物体在实际流体中运动时受到的黏滞阻力和涡旋阻力。

学前储备

1. 知道压力和压强，知道液体中压强的知识。
2. 知道浮力及其原因。
3. 知道大气压强及其应用。
4. 知道功、动能与势能的知识。

第 1 节　流体的性质

做一做

1. 用打气筒向自行车轮胎或篮球打气，体会气体的压缩性。

2. 如图 11.1.1 所示，一个空的矿泉水瓶子拧上盖子，挤压它很容易；但是，一个装满水的矿泉水瓶子拧上盖子，挤压它很不容易。

（a）　　　　（b）

图 11.1.1

在人们的日常生活中，水和空气可能是两种最重要的物质了。我们在喝水、洗澡甚至每一次呼吸时，都会实实在在感受到水和空气的重要性。根据日常经验，你可能并不觉得水和空气有什么共同点。然而，如果你仔细研究，你将会发现它们确实具有一些共同的性质。比如说，液态的水和气态的空气都是很容易流动的，不像固体那样具有一定的形状。所以，液体和气体又统称为**流体（fluid）**。

当然，液体和气体又是有很大区别的。例如，液体有固定的体积，有自由表面，气体却没有固定体积，也没有自由表面，也就是说，气体一定充满它所在的容器，不管这

个容器有多么大而气体是多么少。另外，在压缩性（compressibility）上，液体几乎不能被压缩，而气体就比较容易被压缩。

还有，流体运动时，在其内部相对运动的相邻部分之间，有着类似于固体运动时存在的摩擦阻力，流体的这一性质称为黏滞性（viscosity）。相对而言，气体的黏滞性比较小，常常被我们忽略，而液体的黏滞性远比气体的大。液体和气体尽管有这么多不同，但由于它们都有能流动的共性，所以在力学性质上表现出许多相似之处。例如，不同流体与处于流体中的物体之间的相互作用，可以用相同的形式描述；在外力作用下流体具有相同的运动规律；等等。这一章我们主要研究流体具有共同规律的那些现象，研究流体的运动规律在日常生活、水利工程、航天航空和生物体内的体液输运中的实际应用。

第 2 节　液体的压强

① 压力和压强

在初中我们知道，压强等于压力与受力面积之比。如果用 F 表示一个面所受的压力，用 S 表示受力的面积，用 p 表示压强，那么

$$p=\frac{F}{S}$$

在国际单位制中，压强的单位是帕斯卡，符号是 Pa，1 Pa = 1 N m^{-2}。

压强的其他单位有巴（bar）、标准大气压（atm）、毫米水银柱（mmHg）等。它们之间的换算关系是

$$1\ \text{bar} = 10^5\ \text{Pa}$$

$$1\ \text{atm} = 1.013\ 25\times10^5\ \text{Pa} = 760\ \text{mmHg}$$

② 静止液体内部的压强

在静止液体内部，由于液体的重力影响，在不同深度的压强是不一样的。在游泳时，当我们潜入深水区时，会明显感觉到水的压强在增大。回顾我们初中曾做过的实验（如图 11.2.1）：把液体压强计的金属盒放在某种静止液体的同一深度处，使橡皮膜朝不同方向时，U 形管两边液面的高度差不发生变化，这表明在**液体内部同一深度处，各个方向的压强大小相等**；改变金属盒的深度，U 形管两边的液面的高度差随着深度的增加而增加，这表明**液体的深度越大，压强也越大**。

用不同的液体做上述实验时，发现在同一深度处，**液体密度越大的，压强也越大**。

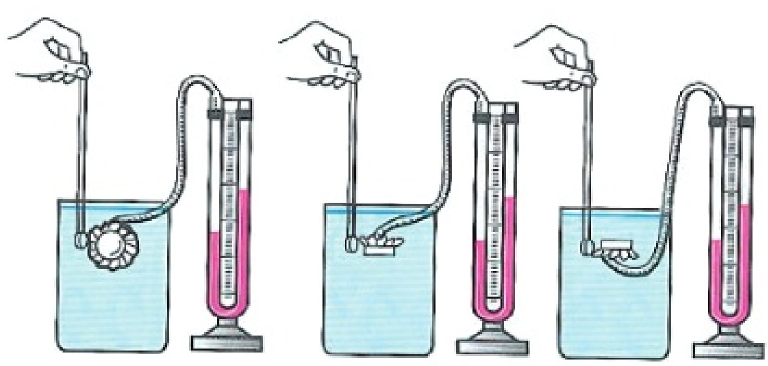


图 11.2.1　液体内部的压强与方向无关

从这个实验里，我们看到，**液体内部的压强，与液体的密度和深度有关**。

下面我们探求静止液体内部压强的规律。

如图 11.2.2 a 所示，设 A、B 两点在液体的同一深度处，作以 AB 连线为轴、底面积为 ΔS 的非常细的小柱体，使 ΔS 上的压强可以看作处处是相等的。如果 ΔS 上 A 处的压强为 p_A，ΔS 上 B 处的压强为 p_B，那么该柱体水平方向的平衡条件是

$$p_A\Delta S - p_B\Delta S = 0$$

$$\text{即}\quad p_A = p_B$$

在这里 A、B 两点是任意选取的，所以我们证明了静止液体中同一深度处水平方向压强都相等。又由于静止液体内部任意一点处各个方向的压强大小相等，这样我们就证明了静止液体中同一深度处各个方向的压强都相等。

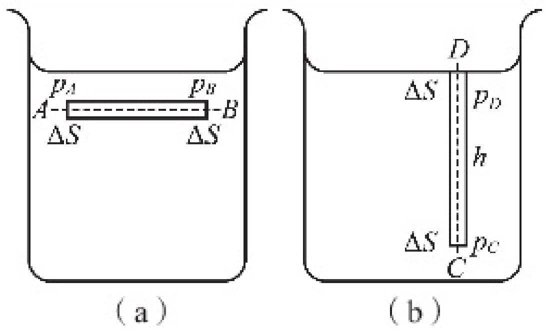


图 11.2.2　静止液体内两点间的压强差

如图 11.2.2 b 所示，在液体内部任选一点 C，以过 D 点的竖直线 CD 为轴，作底面积为 ΔS、长为 h 的非常细的小柱体。该柱体在竖直方向的平衡条件是

$$p_C\Delta S - p_D\Delta S - \rho gh\Delta S = 0$$

$$\text{即}\quad p_C - p_D = \rho gh$$

在这里，C 点是任意选取的。如果 D 点是在液面上，该点处的压强是大气压强 p_0，这样静止液体深度为 h 处的压强为

$$p = p_0 + \rho gh$$

其中，p_0 是液面处的大气压强，ρ 是液体的密度，ρgh 可以理解为液体在该点产生的压强。

可见，液体内部某点的压强取决于液体的密度和该点所处的深度。我们在建造大桥的时候，建造者常常要潜到水下 50 m 处去工作，这个深度上，水的压强将会达到 6 个标准大气压，比在水面上整整高出 5 个标准大气压！ 2012 年，中国载人深潜器“蛟龙号”探测了世界上最深的海沟——位于北太平洋的马里亚纳海沟，它所经受的压强是标准大气压的 700 多倍。

③ 帕斯卡定律

帕斯卡定律（Pascal's law）是法国科学家帕斯卡（Pascal，1623—1662）于1653年提出的，这也是我们在初中已经学过的，它的表述如下：**不可压缩静止流体中任一点受外力作用产生压强增值后，此压强增值将瞬间传至静止流体各点。**对帕斯卡定律，我们通常表述为：在一个密闭容器内的液体，能够把它受到的压强向各个方向传递，其压强大小保持不变。

图 11.2.3　帕斯卡

帕斯卡定律的论证是很容易的。因为我们可以证明，静止液体内两点之间的压强差，仅由液体密度和两点之间的高度差决定。当液体某处（如活塞附近）压强增大了 Δp 时，必然导致液体中每点的压强都增大同一个量 Δp，才能保持液体内任意两点间的压强差不变。帕斯卡定律还可用下面的演示实验加以证明。

演示 11-1

取一个表面有几个小孔的空心球，球上连接一个圆筒，每一个小孔上都扎有橡皮膜。把水倒进球和筒里，用活塞压筒里的水，可以看到，扎在各个小孔上的橡皮膜都向外凸出（如图 11.2.4）。

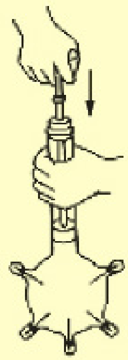


图 11.2.4

演示实验表明，活塞加在水上的压强，被水传递到了各个小孔的橡皮膜上。球上的小孔是朝着不同方向的，可见，液体能够把它受到的压强向各个方向传递，实验证实了帕斯卡定律。

工业上常见的液压机是帕斯卡定律的一个重要应用。如图 11.2.5 所示，**液压机工作时，**

用一个小的作用力，通过液体传递压强，就可以获得一个大的作用力，这就是液压机的工作原理。液压机的结构如图 11.2.6 所示，它的内部有一个截面积较大的活塞及一个截面积较小的活塞，分别装在一大一小两个圆柱筒内，两筒底部用管子连通，内部盛满油性液体。

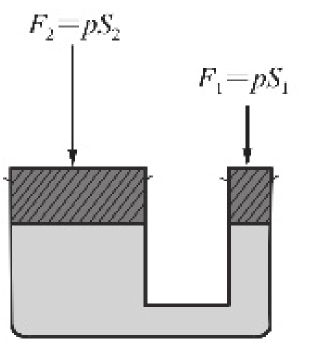


图 11.2.5　液压机的原理图

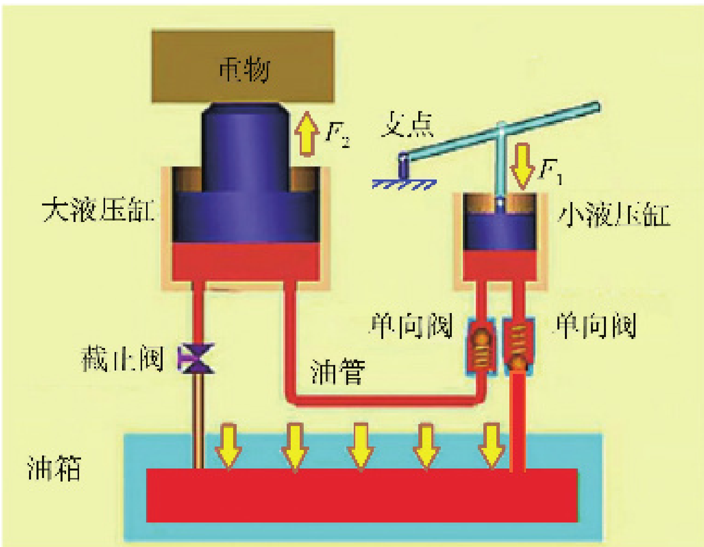


图 11.2.6　液压机结构示意图

如果小活塞的面积 $S_1 = 5\times10^{-4}\ \mathrm{m}^2$，大活塞的面积为小活塞面积的 10 倍，即 $S_2 = 5\times10^{-3}\ \mathrm{m}^2$。当在小活塞上加上一个较小的力 $F_1 = 300\ \mathrm{N}$ 时，由于压强由液体传递到大活塞底部，大活塞就受到一个向上的压力 $F_2 = 3\ 000\ \mathrm{N}$。由此可知：当 $\dfrac{S_2}{S_1}$ 的值很大时，就可使 F_2 远大于 F_1。修理汽车用的液压千斤顶，用的也是这个原理。

例题11－1　图11.2.7中的 U 形管盛有两种不能混合的液体，以两种液体的分界面（在 A 点）为准，两液柱的高分别为h_1 及 h_2。求这两种液体的密度之比。

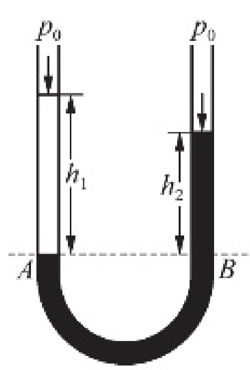


图 11.2.7　液体密度的测量

分析　静止液体深度为 h 处的压强为 $p_0 + \rho gh$，如果两种液体的密度分别为 ρ_1 和 ρ_2，那么可列出如下方程式：

$$p_A = p_0 + \rho_1 gh_1$$

$$p_B = p_0 + \rho_2 gh_2$$

况且同一段静止液体在同一深度处的压强相等，所以 A、B 两点的压强 p_A、p_B 相等，从而可求出两种液体密度的比值。

解　由 $p_A = p_B$，可得 $\rho_1 gh_1 = \rho_2 gh_2$。

所以
$$\frac{\rho_1}{\rho_2}=\frac{h_2}{h_1}$$

练习 11-2

1. 在海中 300 m 深处由海水产生的压强为多大？（海水的密度为 1.03×10^3 kg m^{-3}，取 $g = 10$ m s^{-2}）

2. U 形管内装有水银，向其中的一端倒入 150 mm 的水后，另一端的水银面将由原来的位置上升多少？

3. 某楼顶的水箱离地 20 m，要把该水箱加上水，地面供水管中的水压至少要多大？

4. 有一个液压千斤顶，其大活塞面积为小活塞面积的 15 倍，现在要顶起汽车的一侧，至少需要对汽车施加 80 000 N 的力。问：

   （a）在小活塞上至少要施加多大的压力？

   （b）如果施加在小活塞上的力是使用 10 ∶ 1 的杠杆获得的，那么手压杠杆的力要多大？

   （c）如果小活塞下移 10 mm，那么大活塞向上移动的距离是多少？ 10 ∶ 1 的杠杆中手下压的距离又是多少？

第 3 节　阿基米德原理

① 浮力的产生和阿基米德原理

我们在初中学过，浸在液体中的物体由于液体的压力差而受到向上的浮力。浮力的规律早在公元前 3 世纪就由希腊的科学家阿基米德（Archimedes，公元前 287—公元前 212）发现，后人把它叫作**阿基米德原理（Archimedes' principle）**。

为了简便计算，考虑一个正六面体形状的物体浸没在液体中（如图 11.3.1）。如果正六面体的棱长为 l，液体的密度为 ρ，由于正六面体前、后两面受到液体的压力相互抵消，左、右两面受到液体的压力也相互抵消，上、下两面因液体而产生的压强 p_1、p_2 分别为 $p_0+\rho gh_1$ 和 $p_0+\rho gh_2$（其中 $h_2-h_1=l$），所以上、下两面的压力差即等于物体所受的浮力，即

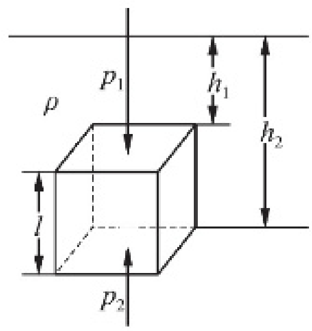


图 11.3.1

$$F_{浮}=\rho g(h_2-h_1)l^2=\rho gl^3=\rho gV$$

其中 ρgV 是与正六面体同体积的液体的重量，即浸在液体中的正六面体受到的浮力大小等于正六面体排开的液体的重量。虽然浮力公式我们是用正六面体来推导的，但这个公式适用于任何形状的物体，即：**浸在液体中的物体所受的浮力，其大小等于被物体排开的液体所受的重力**。这就是阿基米德原理。

图 11.3.2　阿基米德

阿基米德原理用公式表示为

$$F_{浮}=\rho_{液}gV_{排}$$

应特别注意的是：上式中的 $V_{排}$是物体浸入液体后**排开液体的体积**，它不一定是物体的体积。在同一液体内，浮力 $F_{浮}$与 $V_{排}$成正比，即浮力会随物体排开液体体积的变化而改变。

同样，物体在气体中也受到浮力，阿基米德原理也适用于处在气体里的物体。

2 物体的浮沉条件

由阿基米德原理，可以很方便判断任一个物体浸入液体中，是浮在液面上还是沉入液体中。对于实心物体，比较物体所受的重力 W 与液体对物体浮力 $F_{浮}$ 的大小，将出现以下三种可能情况：

（1）物体浮在液面上。

此时物体所受的重力等于浮力，即

$$W = F_{浮}$$
$$\rho_{物} g V_{物} = \rho_{液} g V_{排}$$
$$\text{因为 } V_{物} > V_{排}$$
$$\text{所以 } \rho_{物} < \rho_{液}$$

（2）物体悬浮在液体中。

此时物体所受的重力也等于浮力，即

$$W = F_{浮}$$
$$\rho_{物} g V_{物} = \rho_{液} g V_{排}$$
$$\text{因为 } V_{物} = V_{排}$$
$$\text{所以 } \rho_{物} = \rho_{液}$$

（3）物体沉入液体底部。

此时物体所受的重力大于浮力，即

$$W > F_{浮}$$
$$\rho_{物} g V_{物} > \rho_{液} g V_{排}$$
$$\text{因为 } V_{物} = V_{排}$$
$$\text{所以 } \rho_{物} > \rho_{液}$$

综观上述分析，物体的浮沉条件可表述为：**当物体的密度小于液体的密度时，物体会上浮，并部分露出液面；当物体的密度等于液体的密度时，物体悬浮于液体中；当物体的密度大于液体的密度时，物体会下沉到底部。**

③ 船的原理

演示 11-2

取一盆水，拿来一个瓷碗。将瓷碗侧着放入水中，由于瓷碗的密度大于水的密度，瓷碗就沉到水底，如图 11.3.3 a 所示。

将瓷碗开口向上平放在水中，瓷碗就漂浮在水面上，如图 11.3.3 b 所示。

（a）

（b）

图 11.3.3　瓷碗的沉与浮

当制作物体的材料的密度大于液体的密度时，物体会沉入液体中。但是，如演示 11-2 中那样用增大物体排开液体体积的办法，也可以使物体漂浮在液面上。所以，要使物体漂浮在水面上，我们可以有下面的两种办法：

（1）用密度比水小的材料制作物体。古时候人们制造船，主要的造船材料就是木板。中国明代的郑和下西洋时，整个船队都是由木制的大船组成的。

（2）用水泥或铁板这种密度比水大的材料制作。只要船的形状和位置摆放能够排开足够多的水，船就能漂浮在水面上。现代人们常用铁板制造漂浮在水面上的大型轮船。

轮船的规格通常用轮船的排水量表示，**轮船的排水量就是轮船装满货物后排开的水重**。轮船在安全所允许的情况下，满载货物时，水表面和船舷相交的线叫作**载重线（plimsoll line or load line）**。一般把它画在船壳的外表面上，装货时不能使载重线的上缘没入水面以下。

船舶检验机构勘定载重线后，即在船舶中部两舷的外板上画出载重线标志，以表明载重线的位置（如图 11.3.4）。在图 11.3.4 中，圆环中间横线代表夏季载重线，其他各

条水平线分别代表不同情况下的载重线，并标有字母。字母 S 代表夏季载重线（summer load line），W 代表冬季载重线（winter load line），T 代表热带载重线（tropical load line），F 代表淡水载重线（fresh water load line），TF 代表热带淡水载重线（tropical fresh water load line）。

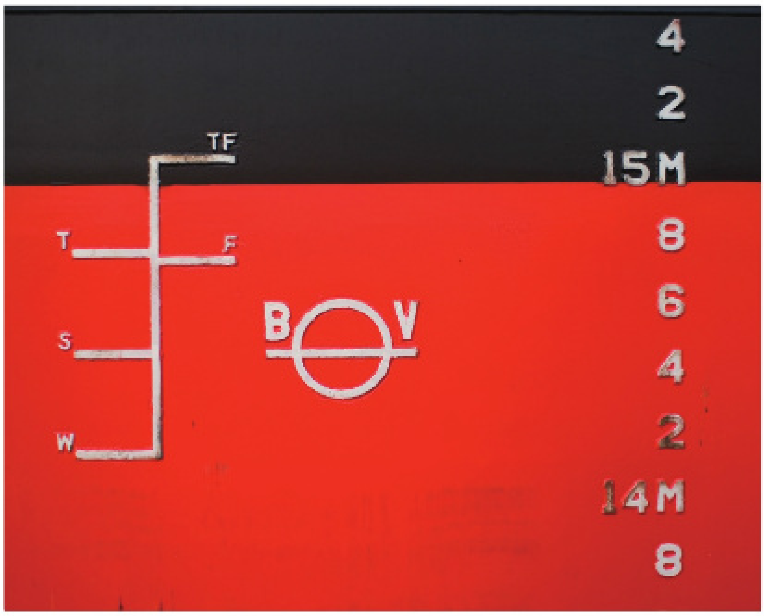


图 11.3.4　国际航行船舶载重线标志

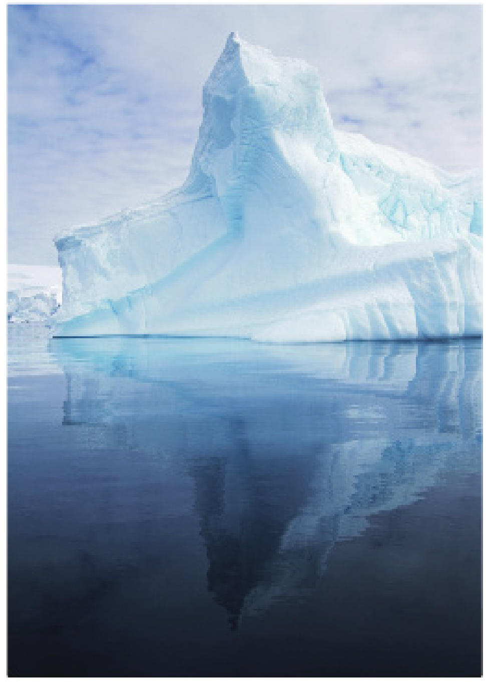


图 11.3.5　静止在海水中的冰山

例题11－2　静止在海水中的冰山（如图11.3.5），如果冰的密度为 $\rho_1=0.92\times10^3$ kg m^{-3}，海水的密度为 $\rho_2=1.03\times10^3$ kg m^{-3}，求冰山在海面上及海面下两部分的体积之比。

分析　设冰山在海面上的体积为 V_1，在海面下的体积为 V_2，则冰山所受的重力为 $W_1=\rho_1g(V_1+V_2)$，冰山排开海水所受的重力为 $W_2=\rho_2gV_2$。根据阿基米德原理，冰山漂浮在海面上，冰山所受的重力必等于它受到的浮力。

解　由 $W_1=W_2$ 可得

$$\rho_1g(V_1+V_2)=\rho_2gV_2$$

代入数值，得

$$920\,(V_1+V_2)=1\,030V_2$$

$$\frac{V_1}{V_2}=\frac{11}{92}$$

例题11－3　蜡烛长 $l_0=20$ cm，密度 $\rho_1=0.9\times10^3$ kg m^{-3}，在蜡烛的底部装上一块铁片。这样，加了铁片底座的蜡烛，能直立在水中，且露出水面的蜡烛高 $h=1$ cm。问：点燃蜡烛，蜡烛燃烧掉多少后，将全部浸没在水中？

分析　此题还是重力与浮力的平衡问题。设水的密度为 $\rho_0=1.0\times10^3$ kg m^{-3}，铁块的密度为 ρ_2，铁块的体积为 V，蜡烛的横截面积为 S，燃烧掉的长度为 l，那么燃烧前，蜡烛与底座所受的总重力为 $W_0=\rho_1Sl_0g+\rho_2Vg$，燃烧后，它们所受的总重力为 $W_1=\rho_1S(l_0-l)g+\rho_2Vg$；燃烧前，浮力为 $F_0=\rho_0g[S(l_0-h)+V]$，燃烧后，浮力为 $F_1=\rho_0g[S(l_0-l)+V]$。由燃烧前重力与浮力相等,燃烧后重力与浮力相等，联立方程式便可求解。

解　由燃烧前的重力与浮力相等，有

$$\rho_1Sl_0g+\rho_2Vg=\rho_0g[S(l_0-h)+V]$$

由燃烧后的重力与浮力相等，有

$$\rho_1S(l_0-l)g+\rho_2Vg=\rho_0g[S(l_0-l)+V]$$

联立以上两式，有

$$\begin{aligned}l&=\frac{\rho_0h}{\rho_0-\rho_1}\\&=\frac{1.0\times10^3\times1}{1.0\times10^3-0.9\times10^3}\text{ cm}\\&=10\text{ cm}\end{aligned}$$

练习 11–3

1. 给你一架天平和砝码盒，一个装有水的杯子（可以加水），一块形状不规则的铝块，请你设计一个方案，测量该铝块的密度。

2. 如果某种液体的密度为 ρ_1，漂浮在该种液体表面上的物体的密度为 ρ，试证明浮体在液面以上的体积与液面以下的体积之比为 $\dfrac{\rho_1-\rho}{\rho}$。

3. 一块金银合金，在空气中重 1.46 N，在水中重 1.36 N。若金的密度为 19.3×10^3 kg m^{-3}，银的密度为 10.5×10^3 kg m^{-3}，求合金中金的质量。

4. 总质量为 9 270 t 的货轮航行在海上时（海水的密度为 1.03×10^3 kg m^{-3}），它排开多少体积的海水？当此货轮进入淡水港口时，它必须卸下多少货物才能保持“吃水”深度相同？

5. 某货轮在冬季从加拿大港口出发时，其载重线在 W 线处（如图 11.3.4），当该货轮抵达巴生港口时，其载重线在哪里？

第 4 节　大气压强

1 大气

人类的生活离不开大气，大气存在于我们周围，通过人造卫星飞行时的观察发现，大气层延伸的高度在 1 000 km 以上，但没有明显的界线。大气层的成分主要有氮气和氧气，按体积百分比，其中氮气占 78.1%，氧气占 20.9%，还有氩气（占 0.93%）、少量的二氧化碳、稀有气体（氦气、氖气、氪气、氙气、氡气）和水蒸气。

思考与讨论

气体分子是运动着的，它们为什么没有飞散到宇宙空间中去呢？

我们在第 6 章学过，一个物体要完全离开地球，必须具有不小于 11.2 km s^{-1} 的速度（第二宇宙速度）。气体分子也一样，它要离开地球，也必须具有这么大的速度，但地球大气层分子的平均速度仅几百米每秒，远远小于第二宇宙速度，所以绝大多数的空气分子都被重力“束缚”在地球周围。

思考与讨论

既然在大气层中各种气体分子都会受到地球的吸引，那么它们为什么没有掉到地球的表面上呢？

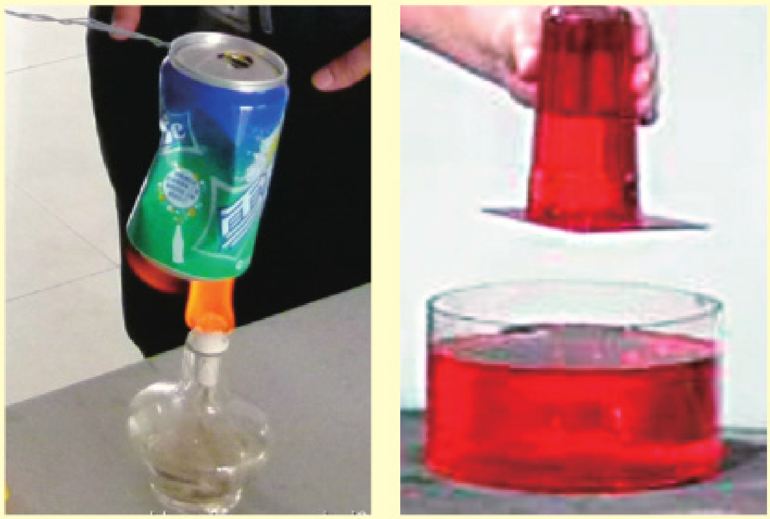
由于组成大气的各种气体分子总是处于永不停息的无规则运动状态中，分子的运动和分子间的频繁碰撞，使得它们不会像固态和液态的物质那样，落在地球的表面上。

这样，气体分子的无规则运动和作用在气体分子上的重力得到动态的平衡，使得这

些分子只能在地球附近的空间中运动，形成环绕地球的空气层，即大气层，大气层的密度将随着高度的增加而变小。整个大气层由于随高度不同表现出不同的特点，分为对流层、平流层、中间层、热层和外层。

演示 11-3

实验一：如图 11.4.1 a 所示，在空饮料罐内装入少量水，加热至水沸腾后，将饮料罐迅速浸入水中，你看到了什么现象？你觉得是什么神奇的力量，使得饮料罐几乎瞬间变形？



（a）（b）

图 11.4.1

实验二：如图 11.4.1 b 所示，将杯子装满水，用一块平整的塑料方片盖住杯口，倒置并观察实验现象。为什么满满的一杯水会被一块小小的塑料片支撑在杯内呢？

② 大气压强

我们在初中已经知道，在大气中的物体都要受到大气压强(atmospheric pressure)的作用。演示 11-3 中饮料罐变形、塑料片不掉下来，以及如图 11.4.2 所示的能用吸管吸上饮料，都是大气压强的作用。生活中许多现象都可以说明大气压强的存在。

图 11.4.2

③ 气压的测量

大气压强可以通过气压计来测量。

演示 11-4

通过托里拆利（Torricelli）实验测量大气压强（如图 11.4.3）。先将玻璃管开口向上，注满水银，再倒插入水银槽内，等玻璃管中水银面不再下降后，测量管内外水银面的高度差。

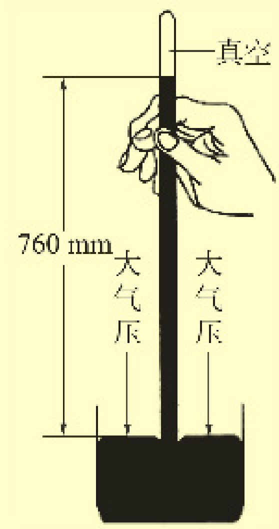


图 11.4.3

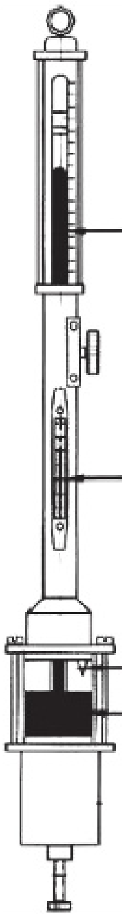
我们也可以通过专门测量大气压强的仪器——水银气压计（也叫福廷气压计）或无液气压计（也叫金属盒气压计，如图 11.4.4）来测量大气压强。

图 11.4.4　无液气压计

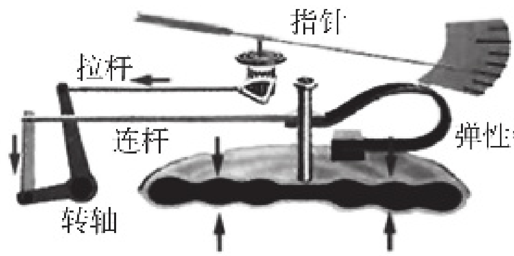
如图 11.4.5 a，水银气压计是在玻璃管外面加上一个金属套管，套管上装有量度水银柱高度的刻度尺。在水银槽顶上装有一根象牙针，针尖正好位于刻度尺的零点，另用皮袋作为水银槽底。使用时，轻转皮袋下的螺旋，使槽内水银面恰好跟象牙针尖接触（即与刻度尺的零点在同一水平线上），然后由管上刻度尺读出水银柱的高度，此高度示数即当时当地大气压强的大小。

如图 11.4.5 b，无液气压计的主要部分是一个盒内空气已经抽出的波纹盒，盒盖处用弹性钢片向外拉着。随着大气压强的增大或减小，盒盖就被压得凹进去一些或拉出来一些。波纹盒厚度的变化，通过盒面上的连杆等传动机构带动指针旋转，由指针所指的刻度可得出大气压强的数值。

测量表明，在海平面附近，大气压强约等于 760 mm 高水银柱产生的压强，水银的



（a）水银气压计结构图



（b）无液气压计结构图

图 11.4.5

密度是 13.6×10^3 kg m^{-3}，有

$$\begin{aligned}p &= \rho gh\\ &= 13.6\times10^3\times9.8\times0.760\ \text{Pa}\\ &\approx 1.013\times10^5\ \text{Pa}\end{aligned}$$

在海拔 2 000 m 以下，每升高 9 m，大气压强约降低 100 Pa。

物理学上把 101 325 Pa 规定为 1 标准大气压（atm），一般常取 1.013×10^5 Pa 作为标准大气压的近似值，即

$$1\ \text{atm} = 760\ \text{mmHg} = 1.013\times10^5\ \text{Pa}$$

对于密闭容器中的气体（或液体），可以用压强计（piezometer）来测量它的压强。如果气体（或液体）的压强与大气压强相差不多，可以用内盛液体的 U 形管压强计来测量。U 形管的一端与待测压强的容器相接（如图 11.4.6），U 形管的另一端则通向大气。

在图 11.4.6 中，U 形管左液柱底的压强为 $(p+\rho gy_1)$，右液柱底的压强为 $(p_0+\rho gy_2)$，其中 p_0 为大气压强，ρ 为压强计中所用液体的密度，所以有

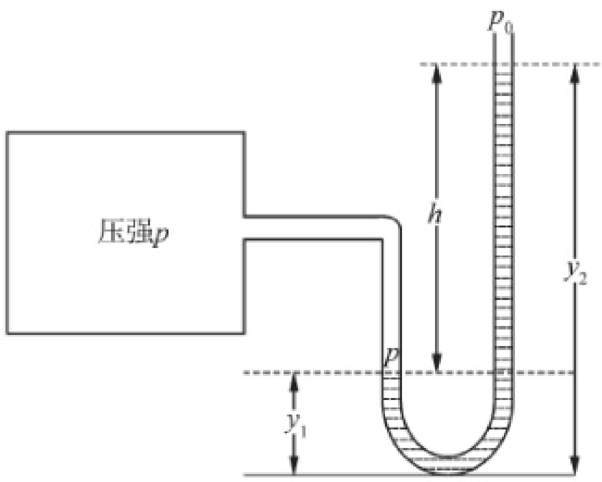


图 11.4.6


图 11.4.7

$$p + \rho g y_1 = p_0 + \rho g y_2$$
$$p = p_0 + \rho g(y_2 - y_1)$$
$$p = p_0 + \rho g h$$

上式中，p 称为**绝对压强（absolute pressure）**，绝对压强与大气压强之差称为**计示压强（gauge pressure）**，计示压强与两液柱的高度差成正比。

如果气体（或液体）的压强比大气压强大得多，就要用金属压强计来测量，如图 11.4.7 所示。

练习 11-4

1. 如果把大气压强理解为大气分子所受的总重力与地球的表面积之比，试估算大气的总质量约为多少千克。

2. 把一盛水的 U 形管压强计的左管与一煤气管连通，U 形管右管液面比左管高 180 mm，求煤气的实际压强和计示压强。已知此时的大气压强为 755 mmHg。

第 5 节　稳定流动和连续性方程式

1 理想流体

在本章第 1 节中，我们提到过流体具有可压缩性和黏滞性。但在一定条件下，我们可以忽略流体的这两个性质，从而简化流体的模型。我们把不可压缩和完全没有黏滞性的流体称为**理想流体（ideal fluid）**。

其实在很多场合，流体的可压缩性和黏滞性是可以被忽略的。从压缩性来讲，我们知道气体一般来说是易于被压缩的，但是当气体所受的压强与其本身压强相差不多时，其密度变化也很小，这时气体的压缩问题可忽略。例如，飞机飞行速度在 100 m s^{-1} 以下时，其周围空气的密度变化不大，压缩问题就可以不考虑。黏滞性也是一样，在考虑空气流动甚至是河水流动的问题时，黏滞性显得并不重要，通常可予以忽略。

总之，在一定条件下，我们可以忽略流体的可压缩性和黏滞性，把真实流体作为理想流体来处理。作了这样的简化处理后，就能使流体问题的讨论大为简化。

2 稳定流动与湍流

流体在流动时，如果流体中各质点在先后经过某一点时速度不随时间变化，即流速在空间的分布不随时间变化，这样的流动称为**稳定流动**，简称**稳流（steady flow）**，也叫**定常流动**。如图 11.5.1 所示，在稳定流动下，所有流体质点在先后经过 P 点时，将具有相同的速度，对 Q 点或 R 点，情况也是一样，即虽然各点的速度不同，但每一点的速度不随时间变化。宽阔的水面上缓慢的水流通常看作稳定流动。

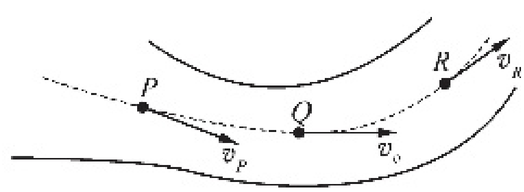


图 11.5.1　稳流——流体中的各个质点经过 P、Q、R 各点时的速度分别是 v_P、v_Q、v_R

与之相反的不稳定流动叫作**湍流（turbulent flow）**或**扰流**，如瀑布下翻滚的水流（如图 11.5.2）、小溪中的激流和狂风的吹袭等。此时流体质点的速度不但每一点都不相同，而且都随时间变化，流速在空间的分布是紊乱的，这就是湍流的特征。

图 11.5.2　壮观大瀑布下的水流便是湍流

③ 连续性方程式

设想理想流体连续不断地在一根没有摩擦的管子中做稳定流动，在管子的侧壁既没有流体流入，也没有流体流出。由于理想流体是不可压缩的，因此在单位时间内流过每个横截面的流体的体积是相等的。

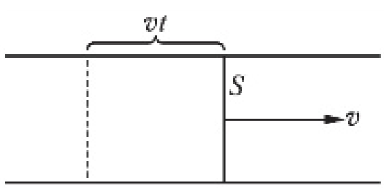


图 11.5.3

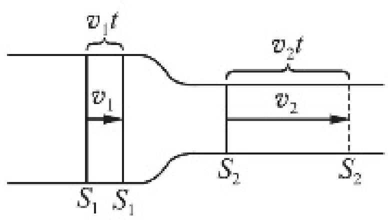


图 11.5.4

假设某一个横截面的面积是 S，流体从左向右流过这个横截面的速度是 v（如图 11.5.3）。那么，在 t s 内，在横截面 S 左方 vt 长度以内的流体都将通过这个横截面。所以在 1 s 内通过这个横截面的流体体积等于 vS。

如图 11.5.4，如果用 v_1 代表流体流过横截面 S_1 的速度，v_2 代表它流过横截面 S_2 的速度，那么有

$$v_1S_1 = v_2S_2 = \text{常量}$$

上式称为**理想流体的连续性方程式（equation of continuity）**。vS 是单位时间内流过管子横截面的流体体积，称为**流量（volume flux/flow rate）**。

理想流体的连续性方程式表明：**理想流体流过任一截面的流量相等，或者说流速与管道的横截面积成反比**。如果管子各部分的粗细相同，那么流体流过这些部分时的流速都相同；如果管子各部分的粗细不同，如图 11.5.4 所示的那样，那么在管子细的地方流

速大，在管子粗的地方流速小。同样道理，在一条河流中，河面窄、河底浅的地方水流得快；河面宽、河底深的地方水流得慢。

4 流线

为了形象地描述流体的运动，我们利用**流线（stream line）**来研究流体的运动。流线就是这样一些假想的线：它上面每一点的切线方向就是该点上流速的方向，某一区域内流线的疏密情况反映了该区域流速的大小。在稳定流动中，流线将不随时间变化。流线不会相交，否则在交点处会有两条流线，也就意味着同一个流体质点在该点出现两个速度方向，这是不可能的。

如图 11.5.5 所示的是流体流过圆柱体时的流线图。C、D 连线处的横截面大，流线比较稀疏；A、B 连线处的横截面小，流线就比较密。由连续性方程式可知，横截面积大的地方，流速小；横截面积小的地方，流速大。所以，流线稀疏表示该处流速小，流线密集表示该处流速大。这样，我们就可以利用流线分布的疏密来表示流速的大小。

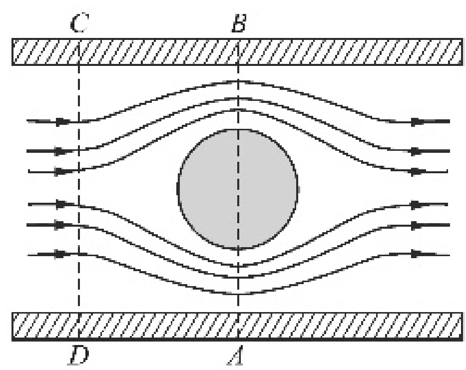


图 11.5.5

练习 11-5

1. 什么是理想流体？为什么说，在很多场合下，我们可以把真实的流体简化为理想流体，而忽略它们的可压缩性和黏滞性？

2. 什么叫稳定流动？什么叫湍流？请你各举两个例子说明稳定流动和湍流。

3. 请说出连续性方程式的物理意义。在初中我们学过，电荷在导线中定向运动形成电流，请说出你所知道的哪个规律就是电流的连续性方程。

4. 什么是流线？如何通过流线知道该点流速的方向？流线的疏密与流速大小有什么关系？在稳定流动中，流线有什么特点？

5. 如图 11.5.6，液体在水平管内做稳定流动，A 管的截面积是 $1\times10^{-3}\,\mathrm{m}^2$，B 管的截面积是 $8\times10^{-4}\,\mathrm{m}^2$，C 管的截面积是 $6\times10^{-4}\,\mathrm{m}^2$，液体在 A 管、B 管中的流速分别是 $10\,\mathrm{m\,s^{-1}}$、$8\,\mathrm{m\,s^{-1}}$，求 C 管中液体的流速。

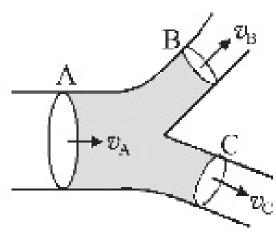


图 11.5.6

第 6 节　伯努利方程式

1 伯努利原理

做一做

实验一：如图 11.6.1 所示，将两张纸竖直、平行放置于唇下，用嘴向它们中间吹气，两张纸是靠近一些，还是分开一些?

实验二：如图 11.6.2 所示，将一个乒乓球放在倒置的漏斗中间，用口含住漏斗向里吹气，乒乓球是向上贴向漏斗，还是被吹跑?

你首先猜一猜，然后做这些实验。实验结果或许会和很多同学预期的相反。为什么会这样呢?

图 11.6.1

图 11.6.2

上面实验的结果是两张纸更靠近一些和乒乓球向上贴向漏斗，出现这样的实验结果是由于空气流动后，流动空气处的压强会减小，其他地方的静止空气因压强比较大，就会压过来。**这种流体的压强随流速的增大而减小的原理，称为伯努利原理（Bernoulli's principle）**，是 1738 年由瑞士科学家伯努利（Bernoulli，1700—1782）首先提出的。

图 11.6.3　伯努利

数字实验

流体压强与流速的关系

●实验器材

相对压强传感器 3 个、流体压强实验器 1 个，电脑等。

●实验操作

1. 如图 11.6.4，在吸泵上安装直径不同的吸管。按照连续性方程式，当开动吸泵时，进入每节管内气体的流量相同，管径越小，气体的流速越大。

2. 按图 11.6.4 分别将第 1 ～ 3 通道的相对压强传感器接入红色、蓝色、绿色吸管的测量接口。

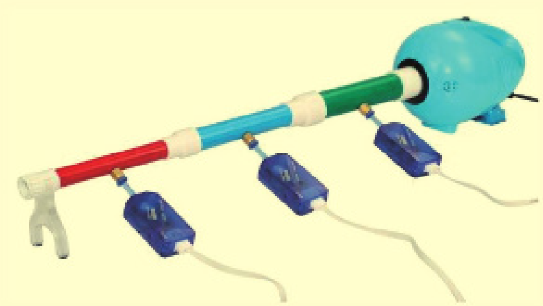


图 11.6.4　实验装置图

3. 点击专用软件上的实验条目进入实验界面。

4. 点击“开始记录”，并对传感器进行软件调零。

5. 打开气泵电源开关，观察实验曲线（如图 11.6.5），总结实验结论：流体流速越大，其压强越小。

图 11.6.5　流体压强实验的电脑界面图

② 伯努利方程式

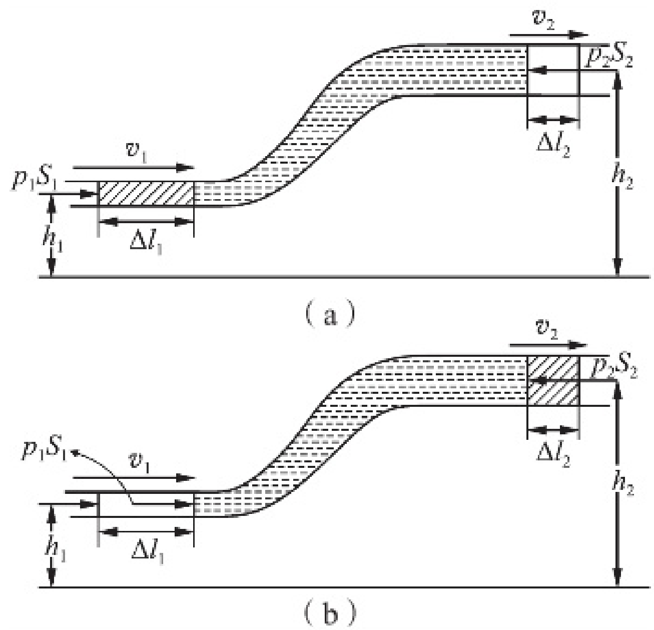


图 11.6.6　一段理想流体在导管中的稳定流动情况

图 11.6.6 表示一段理想流体在一导管中的稳定流动情况，我们可以运用动能定理来讨论这一段流体的流动问题。设导管左、右两端各有水平且粗细均匀的一段，左端截面面积为 S_1，右端截面面积为 S_2；在左端的 S_1 流过长度为 Δl_1 流体的时间内，右端的 S_2 流过长度为 Δl_2 的流体，如图 11.6.6 所示。由于理想流体不可压缩，因此 $S_1\Delta l_1 = S_2\Delta l_2$，即 $\Delta V_1 = \Delta V_2 = \Delta V$。设 ΔV 中此液体的质量为 m。在图 11.6.6 中，用虚线表示的这部分流体，其上各点的速度未变，这部分流体的动能没有改变。所以讨论动能变化时，这段流体的动能增量就是 ΔV_1 和 ΔV_2 之间动能的差值，即

$$\Delta E_k=\frac{1}{2}mv_2^2-\frac{1}{2}mv_1^2$$

按照动能定理，只有合外力对流体做了功才有这个动能的增量。理想流体没有黏滞性，不必考虑摩擦力做功的问题。重力对流体所做的功为

$$W_{重}=-mg(h_2-h_1)$$

作用在 S_1 上的压力对流体所做的功为 $p_1S_1\Delta l_1 = p_1\Delta V$；作用在 S_2 上的压力对流体所做的功为 $-p_2S_2\Delta l_2 = -p_2\Delta V$。

合外力对这段流体所做的总功为

$$W=(p_1-p_2)\Delta V-mg(h_2-h_1)$$

根据动能定理，得 $W=\Delta E_k$，即

$$(p_1-p_2)\Delta V-mg(h_2-h_1)=\frac{1}{2}m(v_2^2-v_1^2)$$

上式也可以写成

$$p_1\Delta V+\frac{1}{2}mv_1^2+mgh_1=p_2\Delta V+\frac{1}{2}mv_2^2+mgh_2$$

每项都除以 ΔV，得

$$p_1+\frac{1}{2}\frac{mv_1^2}{\Delta V}+\frac{m}{\Delta V}gh_1=p_2+\frac{1}{2}\frac{mv_2^2}{\Delta V}+\frac{m}{\Delta V}gh_2$$

即
$$p_1+\frac{1}{2}\rho v_1^2+\rho g h_1=p_2+\frac{1}{2}\rho v_2^2-\rho g h_2$$

所以
$$p+\frac{1}{2}\rho v^2+\rho g h=\text{常量}$$

上式便是**伯努利方程式**。方程中 p、$\frac{1}{2}\rho v^2$ 及 $\rho g h$ 分别为单位体积流体的压强能（静压强）、单位体积流体的动能（动压强）和单位体积流体的重力势能（重力压强）。所以伯努利方程式说明**单位体积流体的压强能、动能及重力势能的和为一常量**。

例题 11－4　如图 11.6.7 所示为一个放在地面上的装有水的大水桶，现在其侧壁水深为 h 处开了一小孔，问：小孔开在哪里，水从小孔流出后将喷得最远？设水桶中的水深为 H。

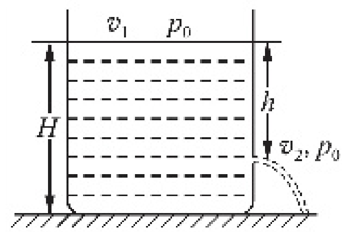


图 11.6.7

分析　设小孔处的流速为 v_2，小孔处高度 $h_2=0$，则水面处的高度为 $h_1=h$。因为水桶的横截面积比小孔大得多，所以在水面处流速 $v_1\approx 0$。水面处和小孔处的压强都是大气压强 p_0，由伯努利方程式可以求出水从小孔处喷出的速度 v_2。

从小孔中喷出的水将做平抛运动，水平喷射的距离可用第 6 章学过的平抛运动知识求解。要分析水流的最远距离，可以对所求得的解做极值分析。

解　根据伯努利方程式

$$p_1+\frac{1}{2}\rho v_1^2+\rho g h_1=p_2+\frac{1}{2}\rho v_2^2+\rho g h_2$$

因为 $v_1=0$，$h_1=h$，$h_2=0$，$p_1=p_2=p_0$，

所以
$$p_0+0+\rho g h=p_0+\frac{1}{2}\rho v_2^2+0$$

即
$$gh=\frac{1}{2}v_2^2$$

由此可得小孔处水的流速为

$$v_2=\sqrt{2gh}$$

可见，小孔处水的流速与物体从高度 h 由静止自由下落所得的速度一样大。

按照平抛运动的规律：

$$x=v_2 t$$
$$y=\frac{1}{2}gt^2$$

代入下落距离 $y=H-h$，$v_2=\sqrt{2gh}$，可得

$$x=\sqrt{2h\cdot 2(H-h)}=2\sqrt{h(H-h)}$$

当 $h=\frac{H}{2}$ 时，x 有最大值。

练习 11-6

1. 为什么在飞驰的列车边，人站得太近会有被吸入的危险?

2. 快速行驶的大巴车上，如果你把车窗拉开一条缝，你会发现窗外的空气会正对窗缝吹进来。你能用伯努利方程式解释吗?

3. 打乒乓球时，我们总是喜欢让球高速转起来，从而使其运动方向变得飘忽不定。你能解释这个现象吗?

4. 台风经过的地方，紧闭的玻璃窗会从内向外破碎，破碎的玻璃片通常都向外飞散而不会飞到屋内。这是为什么?

第 7 节　伯努利方程式的应用

伯努利方程式在处理流体动力学方面有广泛的应用，常见的流速计、流量计、喷雾器都是基于这一原理设计的，用伯努利方程式可以解释空吸现象、“香蕉球”现象和飞机举力的产生等现象。

从伯努利方程式，可得

$$p_1+\frac{1}{2}\rho v_1^2-\rho gh_1=p_2+\frac{1}{2}\rho v_2^2+\rho gh_2$$

如果流体做水平流动或在流动中高度差效应不显著的情况下，伯努利方程式表示为

$$p_1-\frac{1}{2}\rho v_1^2=p_2+\frac{1}{2}\rho v_2^2$$

或

$$p+\frac{1}{2}\rho v^2=C$$

上式说明**在理想流体的稳定流动中，流速大的时候压强小，流速小的时候压强大**。下面列举的空吸现象和飞机举力的产生，都可以用这一结论来分析。

1 空吸现象

如图 11.7.1 所示，当向水平管内打入气体时，由伯努利方程式可知：气体的流速越大，压强越小。在截面积非常小的位置（图中 A 处），气体流速极快，当该处压强小于大气压减去该处下面细管中高度为 h 的液柱产生的压强，容器中的液体就会被吸上来，这就是空吸现象（suction）。

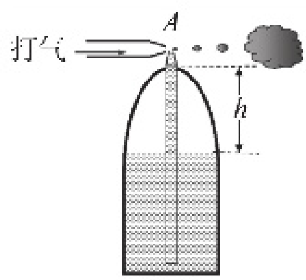


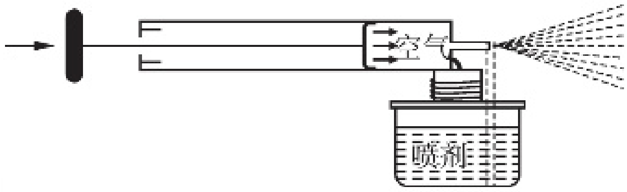
图 11.7.1　空吸现象的原理示意图

生活中的喷雾器、水流抽气机、汽车的汽油汽化器等都是利用空吸现象工作的设备。

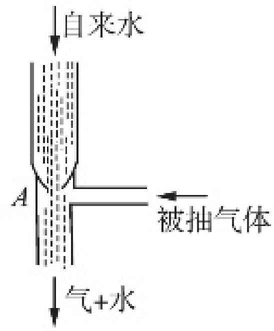
如图 11.7.2 a 所示是喷雾器的结构示意图。当把活塞向喷雾器的圆筒里压入时，圆筒里的空气就以很大的速度从其末端的小孔喷出，小孔近旁的压强就比周围的压强低。喷雾器中的喷剂在压强差的作用下，通过装在小孔下方的细管上升到喷嘴口，然后受到从圆筒喷出的高速气流的冲击，分散成雾状喷射出去。

如图 11.7.2 b 所示是水流抽气机的结构示意图。当从水管流出的自来水经过管的细窄部分 A 时，水流速度增大，压强变得较低。因此，我们就可以通过跟被抽容器连接的

管子，把被抽容器里的空气吸出，一直到被抽容器中的压强跟水管细窄部分 A 处的压强相等为止。从被抽容器中吸出的空气随着自来水一同流出。



（a）



（b）

图 11.7.2

② 飞机的举力

在空中飞行的飞机，受着重力作用却不掉下来，这是因为飞机的机翼在飞行时受到空气向上的作用力（举力）的缘故。

演示 11-5

如图 11.7.3，把事先用硬纸板做成的机翼模型安装在杠杆的一端，在杠杆的另一端加适当的配重，使杠杆处于平衡位置；然后用电扇（或电吹风）沿水平方向向机翼模型吹风。观察装有机翼模型的杠杆是否还平衡，这说明了什么？

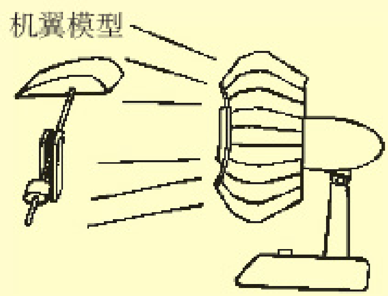
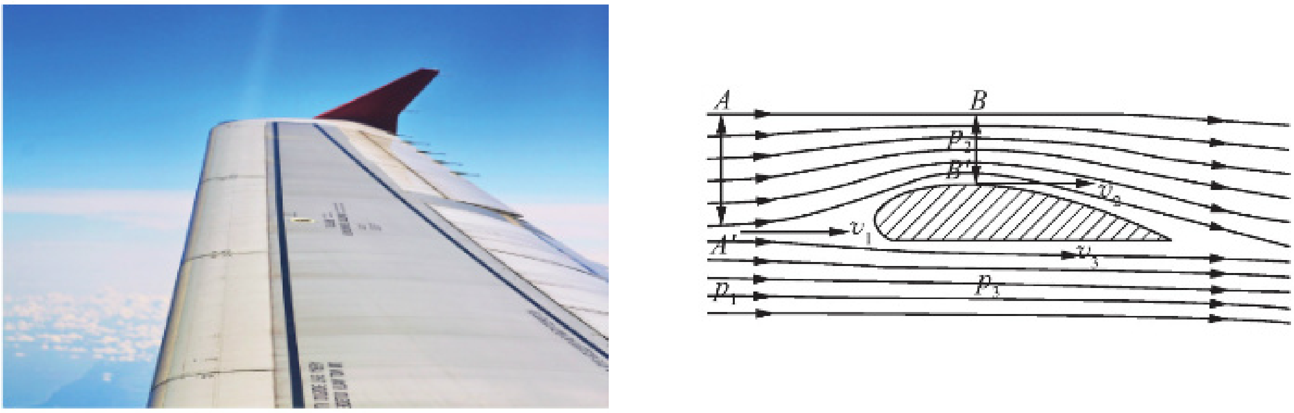


图 11.7.3

在上面的演示实验中，沿水平方向向机翼模型吹风，相当于机翼在空气中水平飞行。从实验可以看到，机翼模型上升使杠杆倾斜。这说明气流从机翼周围流过时，机翼受到举力的作用。飞机上升的举力是由于机翼的形状而产生的。

如图 11.7.4 a 所示为机翼的图片，机翼的形状是上面呈圆拱形，下面较平直。如图 11.7.4 b 所示，当气流朝机翼吹来时，在机翼前缘被分成两股：一股气流流过机翼的上方，绕过圆拱形的上翼面，由于机翼上方气流截面 BB' 的面积小于机翼前方气流截面 AA' 的面积，机翼上方气流的流速 v_2 就大于机翼前方气流的流速 v_1；另一股气流流过机翼的下



（a）　　　　（b）

图 11.7.4

方，机翼下方气流的流速 v_3 大致等于前方气流的流速 v_1。按照伯努利方程式，我们知道流体流速大的地方压强小，流速小的地方压强大，因此机翼上方的空气压强小，机翼下方的空气压强大，这种压强差就对机翼产生了竖直向上的作用力，这个作用力就是飞机受到的举力。

说一说

如图 11.7.5，一辆汽车正在风洞内进行空气动力学实验。你能说出图中哪一部分的气流流速大吗？

图 11.7.5

练习 11-7

1. 用一张长方形的小纸条折成如图 11.7.6 所示的形状，并放在桌面上。请你设计一种轻轻向折纸吹一口气就能把折纸吹翻的方法，并解释你设计的方法成功或失败的原因。

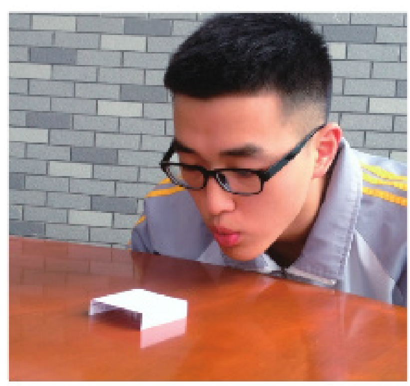


图 11.7.6

2. 飞机机翼初看好像是一个整体，实际上是由几部分组成的，如图 11.7.7，它的襟翼可以绕轴向后下方、后上方偏转。飞行员在飞机上升、平稳飞行、下降和着陆减速等过程中，是通过操纵杆改变襟翼的弯曲度来改变飞机的升力、阻力的。下列选项中画出了简化的机翼截面图，其中表现飞机上升的是（　　）

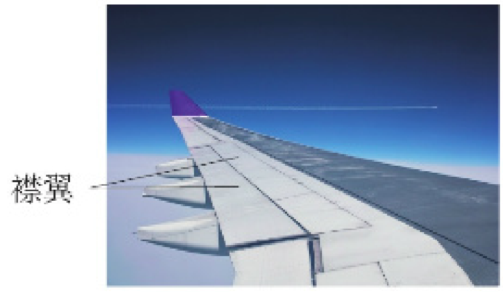
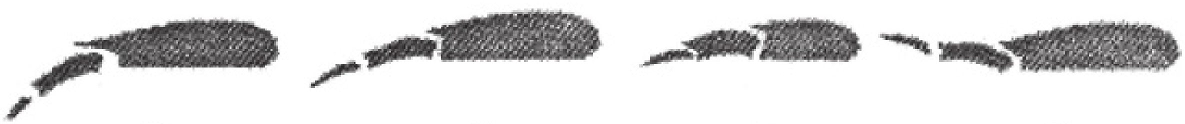


图 11.7.7



A.　　B.　　C.　　D.

3. 图 11.7.8 是用来向汽车的内燃机气缸里提供空气与汽油燃料的汽化器。当气缸里的活塞做吸气冲程时，外界的空气就沿着 B 管自左向右地流向气缸。B 管里有一狭窄部分叫扩散室，扩散室的中部装着喷嘴 C，浮子室 D 里装有汽油，它和喷嘴组成一个连通器，如果浮子室里的汽油面低于或等于喷嘴的高度，汽油是不会从喷嘴流出的。当空气流经截面较窄的扩散室时，汽油就会与空气形成混合“气体”，经过节流孔板进入内燃机气缸。燃料混合物进入气缸后被点火燃烧，推动活塞运动，让汽车跑起来。试用伯努利原理分析，汽油是怎样与空气形成混合“气体”的。

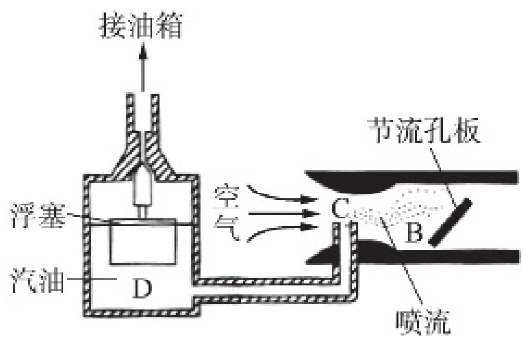


图 11.7.8

4. 根据空吸现象的原理，你能设计一个液体流速计吗？请给出设计思路，并运用伯努利方程式给出液体流速计的测量公式。

第 8 节　物体在真实流体中的运动

在本章第 5 节中我们已经知道，真实的流体具有可压缩性和黏滞性。飞机的飞行速度在 100 m s^{-1} 以下时，压缩问题可以不考虑；但当飞行速度接近 300 m s^{-1} 时，贴近机身的空气压强和密度均有明显变化，就必须考虑空气的压缩问题，这时的空气就要被看作是可以压缩的了。黏滞性也一样，在考虑空气流动甚至是河水流动的问题时，黏滞性通常可予以忽略。但在考虑润滑作用时，黏滞性就十分重要，不能被忽略。

1 流体的黏滞性

实际的流体具有**黏滞性**。流体的黏滞性源自流体相邻层面间因剪切运动而形成的摩擦力。

当两片玻璃间夹着一层油，一片固定，另一片滑动时，油层将产生剪切形变，造成许多不同速度的小油层，如图 11.8.1 所示。若上层玻璃以速度 v 向右滑动而下层玻璃静止，则油层上部的速度接近 v 而油层下部的速度接近于零。小油层间的相对运动产生了摩擦力，阻碍了玻璃的滑动。若两片玻璃间夹入一层沥青，玻璃将较难滑动，这说明沥青的黏滞性比油大很多。

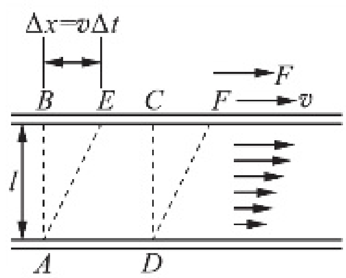


图 11.8.1

因为实际流体具有黏滞性，所以物体在其中运动时，将会受到黏滞性的阻力，而且这阻力是随着物体相对流体速度的增加而增加的。

演示 11-6

把带有刻度、底端封闭的玻璃管竖直固定在桌面上，让其中盛蓖麻油。取钢质小球让它由玻璃管上部自由下落，观察小球在蓖麻油中的运动。

可以用秒表或光电门计时器测出小球经过某个高度差所用的时间，并做进一步的定量分析。

上面演示实验中，小球在液体内速度随下落距离的变化情况如图 11.8.2 所示。小球在接近于液面的地方放手，起初加速下落，直至达到其终端速度（terminal velocity）v_0 后，即以 v_0 匀速下落。

在不同季节重复做这一实验，会发现液体的黏滞程度是随着温度的升高而降低的。

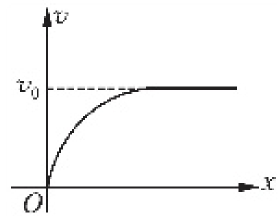


图 11.8.2

② 涡旋阻力

当物体在流体中的相对速度大到超过某一限度时，在物体后面区域的流体的连续性就会遭到破坏而出现了**涡旋（vortex）**。涡旋中的压强能由于部分转换成了质点的动能，故物体后面区域的压强比物体前面的压强较低，这前后的压强差就形成了新的阻力，称为**涡旋阻力**。这个阻力作用在物体上，它的方向和物体在流体中运动的方向相反。当速度增加时，这个力迅速增大，而且在物体高速运动时变得非常大。

我们通过下面的实验，可以观察到运动物体后面涡旋处的压强比没有涡旋处的压强小。在实验里，我们让流体运动、物体静止，显然这与流体静止、物体运动是等效的。

如图 11.8.3 所示，把一个火柴盒（或任何一个适当大小的平面形物体）固定在一个位置上，再把一段点燃的蚊香或艾条放在火柴盒的后面。先在静止的空气中观察烟柱的运动，然后对着火柴盒面用力吹气，再观察烟柱的运动。

在实验中我们发现：吹气前，烟柱向上飘升；吹气时，烟柱飘向火柴盒。这个实验结果说明火柴盒后面的压强比其他地方的压强低。流体流过一平面时的流线分布情况可用图 11.8.4 来加以说明。

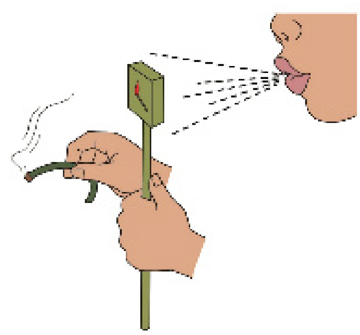


图 11.8.3

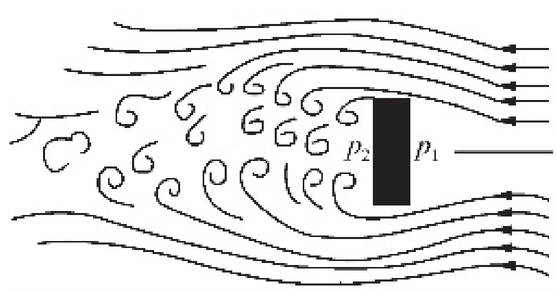


图 11.8.4

练习 11-8

1. 汽车飞驰而过时，路旁的树木、干草叶等往往被吹向车后。注意观察这种现象，并说明原因。

2. 请搜集船艇和汽车的外形特征，举出 3 个流线型的例子。

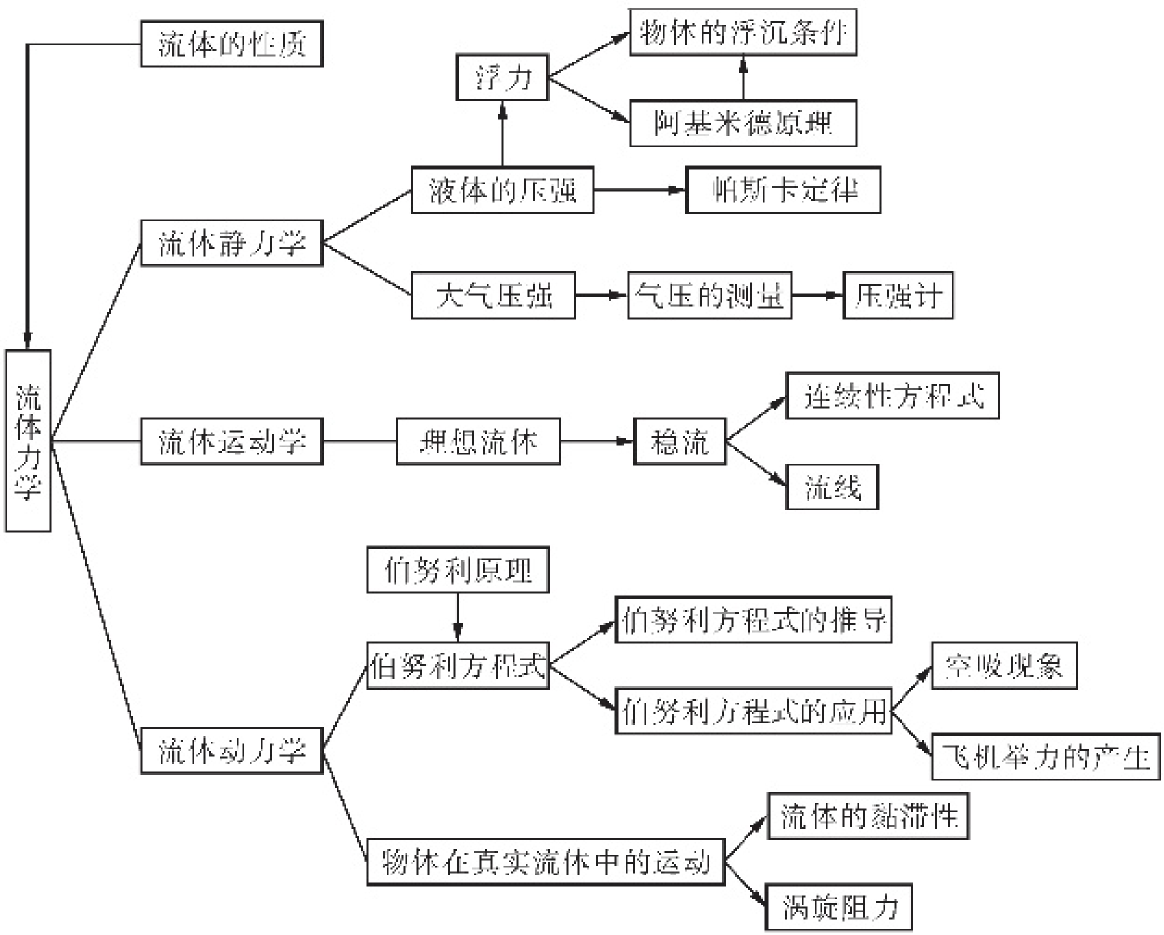
3. 老年人常常会患高血脂症和高血压症，并伴随血管弹性的下降。请分析这些疾病之间的关联性。通过查阅资料，给出预防这些疾病的建议。

4. 试解释为何从高空自由下落的雨滴最后会具有一个稳定的终端速度。

5. 雨滴下落时所受到的空气阻力与雨滴的速度有关，雨滴速度越大，它受到的空气阻力就越大；此外，当雨滴速度一定时，雨滴下落时所受到的空气阻力还与雨滴半径的 n（$1 \leqslant n \leqslant 2$）次方成正比。假设一颗大雨滴和一颗小雨滴从同一云层同时下落，最终它们都将__________（填“加速”“减速”或“匀速”）下落。______（填“大”或“小”）雨滴先落到地面；接近地面时，______（填“大”或“小”）雨滴的速度较小。

章末回顾

本章基本知识结构



总练习十一

基础练习

1. 一个盛水容器底部的压强与一个盛有 10.0 cm 深水银的烧杯底部的压强相同。已知水银的密度约为水的 13.6 倍，那么此盛水容器中的水有多深？

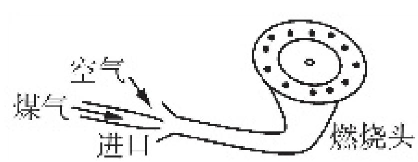
2. 假定你脸的正面部分面积约为 0.035 m^2，那么你的脸部所受的大气压力为多大？

3. 一木块浮于水中时，$\frac{2}{3}$ 的体积浸于水中；浮于油中时，则有 $\frac{9}{10}$ 的体积浸于油中。请你根据上述情况求出木块的密度和油的密度。

4. 2012 年 6 月 27 日，中国载人深潜器“蛟龙号”在北太平洋的马里亚纳海沟最大下潜深度达 7 062 m，标志着中国海底载人科学研究和资源勘探能力达到国际领先水平。（海水密度 $\rho = 1.03\times10^3$ kg m^{-3}，$g = 10$ m s^{-2}）
   （a）当“蛟龙号”排开水的体积为 30 m^3 时，它受到的浮力为多大？
   （b）当“蛟龙号”下潜至 7 000 m 深度时，其壳体受到海水的压强为多大？

5. 下列现象中，没有用到大气压强的是（　　）
   A. 利用离心式水泵抽水
   B. 用吸管吸瓶中的饮料
   C. 茶壶盖上留有小孔
   D. 拦河坝上窄下宽

6. 如图所示是家用煤气灶灶头的示意图，使用时打开煤气阀门，拧动点火装置，煤气和空气在进口处混合并流向燃烧头被点燃，而煤气不会从进口处向空气中泄漏，其原因是（　　）
   A. 进口处煤气流速小，压强大于大气压强
   B. 进口处煤气流速小，压强小于大气压强
   C. 进口处煤气流速大，压强大于大气压强
   D. 进口处煤气流速大，压强小于大气压强



（第 6 题）

7. 列车大提速后，站台上的乘客与列车间的空气流速和压强也发生了变化。为了有效地防止意外事故的发生，站台的安全线距离由原来的 1 m 变为 2 m。关于列车与乘客间空气流速及压强的变化，下列判断正确的是（　　）

A. 空气流速变大，压强变小

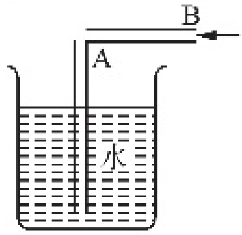
B. 空气流速变大，压强变大

C. 空气流速变小，压强变大

D. 空气流速变小，压强变小

8. 如图所示，把长 10 cm 左右的吸管 A 插在盛水的杯子中，另一根吸管 B 的管口贴靠 A 管的上端，再往 B 管中吹气，可以看到 A 管中的水面（　　）

A. 上升　　B. 下降　　C. 不变　　D. 无法判断



（第 8 题）

（第 9 题）

9. 如图所示，把一张半卷着的硬纸片摆放在桌面上，如果使劲吹一下它的下面，可以发现硬纸片不会翻转过去。这是因为流体的压强与流体流动的________有关，吹出的气使硬纸片下面空气的压强________（填“变大”“变小”或“不变”）。

10. 有些跑车在车尾安装了一种“气流偏导器”，此“气流偏导器”上表面平直，下表面呈弧形凸起。当跑车高速行驶时，流过它上方的空气速度比下方空气速度____（填“大”或“小”），此时上方空气压强比下方空气压强____（填“大”或“小”），这样“气流偏导器”受到一个向____（填“上”或“下”）的压力差，从而使车轮抓紧地面。

提高练习

11. 把装满水的量筒浸入水中，口朝下，然后抓住量筒底竖直向上提，在量筒口离开水面前，量筒露出水面的部分（　　）

A. 是空的　　B. 有水，但不满

C. 充满水　　D. 以上三种情况都有可能

12. 一块冰浮于一杯水中，当冰块融化后，水面是否有升降？如果冰块中含有一铁块，冰块融化后水面会下降，你知道这是为什么吗？

13. 现有一个浮体，将它的一半浸入一杯静止的水中，并盖紧杯口。请问：把这个系统移置到月球表面时，系统将会发生什么变化？把这个系统移置到微重力的太空中，又会发生什么变化？

14. 在一次生态实验中，某研究小组往一个水族箱中注入了半箱水，然后把它放在一台秤上，示数为 200 N。

(a) 将一块重 5 N 的石块放到这个水族箱中，如果石块沉没到箱底，那么这时台秤的示数是多少？在石块下沉的过程中，台秤的示数如何变化？

(b) 把石块从水族箱中捞出，并调整箱中水的总量，使台秤的示数再次为 200 N。此时，若将一条重 5 N 的鱼放入水族箱中，则台秤的示数又为多少？如果鱼在水中上下游动，那么台秤的示数又如何变化？

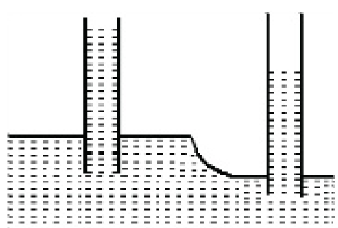
15. 足球场上的“香蕉球”、乒乓球比赛时的“旋转球”等，发出的球向前飞行的同时绕自己的轴转动，从而使球做偏离抛物线轨道的弯曲运动。试分析其原因。

16. 如图所示，有一个水平放置的流量为 $3\times10^{-3}\ \mathrm{m^3\,s^{-1}}$ 的排水管，在截面积为 40 $\mathrm{cm^2}$ 及 10 $\mathrm{cm^2}$ 的粗、细两处各接一根竖直玻璃管。求：

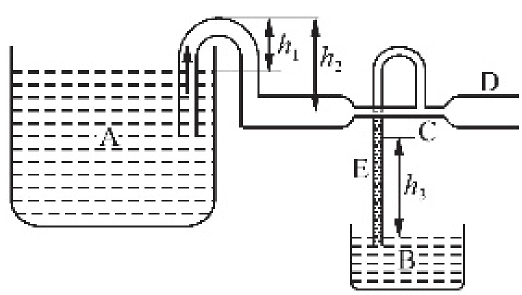
(a) 粗、细两处的流速。

(b) 粗、细两处的压强差。

(c) 两根玻璃管中水柱的高度差。



（第 16 题）



（第 17 题）

17. 如图所示，容器 A 和 B 中装有同种液体，可视为理想流体，水平管横截面 $S_D = 2S_C$，容器 A 的横截面 $S_A \gg S_B$，求管 E 中的液柱高度。($\rho_{液} \gg \rho_{空气}$)