



普通高等教育“十一五”国家级规划教材

力学简明教程

陈锺贤 霍 雷 编著

 机械工业出版社
CHINA MACHINE PRESS



普通高等教育“十一五”国家级规划教材

力学简明教程

陈世英 王 健 编著

清华大学出版社

普通高等教育“十一五”国家级规划教材

力学简明教程

陈鍾贤 霍 雷 编著
严导淦 皮名嘉 审



机械工业出版社

《力学简明教程》是物理学的基本和基础教材, 主要包括绪论、运动学、动力学的基本定律、机械能守恒定律、动量守恒定律和角动量守恒定律、两体问题、连续体力学基础、机械波与声, 以及狭义相对论力学基础等内容。

本书将质点、刚体和振动问题合并一起讨论, 这有益于质心系、刚体力学和振动规律的讨论。书中涉及到少量数值计算方法和 C 语言程序, 旨在强调计算机数值模拟所采用的是最简单和最直接的物理原理计算方法, 遂使对原理的理解更直观浅显, 可显现演示课件的可信度, 并更加有利于物理内容和基本概念的理解与领悟, 促进计算机和数值计算方法在物理学中的应用。

本书为普通高等学校物理学科和物理类学科的力学课程教材, 也可用作其他学科的学生和教师的力学教学参考书。同时, 本书配有可供教师选用和参考或作为学生自学与复习辅助工具的 PowerPoint 课件及链接程序的运行软件, 用户可在机械工业出版社教材网 (www.cmpedu.com) 上注册下载。

图书在版编目 (CIP) 数据

力学简明教程/陈锺贤, 霍雷编著. —北京: 机械工业出版社, 2007. 8

普通高等教育“十一五”国家级规划教材

ISBN 978-7-111-22172-2

I. 力… II. ①陈…②霍… III. 力学—高等学校—教材
IV. 03

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2007) 第 127896 号

机械工业出版社 (北京市百万庄大街 22 号 邮政编码 100037)

策划编辑: 李永联 责任编辑: 张金奎 版式设计: 霍永明

封面设计: 姚毅 责任校对: 肖琳 责任印制: 王书来

保定市中国画美凯印刷有限公司印刷

2007 年 9 月第 1 版第 1 次印刷

169mm × 239mm · 8.75 印张 · 340 千字

标准书号: ISBN 978-7-111-22172-2

定价: 22.00 元

凡购本书, 如有缺页、倒页、脱页, 由本社发行部调换

销售服务热线电话: (010) 68326294

购书热线电话: (010) 88379639 88379641 88379643

编辑热线电话: (010) 88379720

封面防伪标均为盗版

序

今春四月,正值江南满城风絮、落英缤纷的浣花季节,应冰城唐光裕教授电嘱,承乏哈尔滨工业大学物理系陈锺贤、霍雷两位教授编著的《力学简明教程》一书的审稿工作。

本书作为大学物理系(包括其他相关专业)本科普通物理学课程开篇性的教材,曾以内部讲义试用多年。在漫长的岁月中,通过不断地实践,迭经探索和修改,筚路蓝缕,累心累智,追求完美,终于打造出一本适合我国国情和富有创新色彩的力作。而今,瓜熟蒂落,列为教育部“普通高等教育‘十一五’国家级规划教材”。

本书的主要特色具体表现在以下几个方面:

1. 编者勇于探索,开拓进取,锐意改革,不落窠臼,不唯权威是从,不慑于国外教材的约定俗成,以独到的见解,另辟蹊径,对全书内容和体系作了积极稳妥的处理,既不拘泥于同类教材的传统模式,又便于教学操作,易教易学;且以生替熟,避免了与中学物理不必要的重复,也注意到与后续课程的衔接。

2. 本书内容宏富,且经编者反复梳理,精心铺陈,并定格于适中的深广度和读者可接受的起点;某些内容,在力保科学性的前提下,从生活和工程技术实际出发,提出问题,触发学生的兴趣和好奇心,催动学生进一步去探究和拷问。

3. 本书在论述上以一种简单而不单薄,清淡而不肤浅的叙事风格,由浅入深,引俗趋真又不诡随,意到笔随而不拘一格,重在基本概念和基本理论的阐释,颇多点睛之笔,对读者起到一定的点拨解惑作用。

4. 每章正文中的例题和每章末的习题,皆经编者精心设计,且布题周详,题材多样,难易适中,导引有序,有助于学生把握全章,并达到基本训练的目的。

5. 物理与数学关系密切。窃以为让学生实现从“不变”的思维方式向“变”的观念转化,从“恒量”转向“变量”的跨越,乃是思想上的一种飞跃,也是中等教育与高等教育的一个分野。为此,本书不仅结合内容需要,补充了一些必要的微积分和矢量运算知识;同时,还在有关内容中穿插了一些C语言程序片断。

总之,编者对本书在提高物理直觉性的浓度、信息量的密度和物理思想的深度等方面所作的努力,弥足珍贵。尽管书中难免有某些微瑕,有待逐步完善,但只要不辍耕耘,那么,今日种花,明朝闻香,是可以预期的。

编者嘱序,爰弁其简端,以酬高谊。

严隽琨

2007年7月25日于同济学舍

时溽暑未祛,挥汗如雨

前言

力学是大学物理学课程之开门篇,是物理学最早建立的学科,是物理学的基本和基础内容之一,读者的物理概念和物理思想的树立也将从力学起步。力学从最基本的定义出发,从最直观的机械运动开始讨论,逐步地将涉及场和波动的概念。普通物理学力学部分以经典力学为主要内容,也将讨论狭义相对论力学的基础问题。力学中的重要定理和定律大都可以延拓到整个物理学范畴。力学所体现出的唯物和辩证的观点,更是贯穿整个物理学的重要哲学思想。

本书主要包括绪论、运动学、动力学的基本定律、机械能守恒定律、动量守恒定律和角动量守恒定律、两体问题、连续体力学基础、机械波与声,以及狭义相对论力学基础等内容。

本书在内容编排上与传统力学教材有所不同,最明显的差异是质点、刚体和振动问题并没有分开描述,而是合并在一起讨论。与之相关联的另一个差别是力的作用是广义的,即包含力和力矩的作用。这种安排的目的是希望能有益于加强质点系和质心系的概念,能促进它们与刚体的运动更紧密地结合,这对研究刚体的平面运动和刚体的一般运动十分有益。机械振动及其合成与分解则纳入直线运动范畴,分别在第1、2章相关节中讨论。针对当代学生的现状,丰富质点力学的内容是有益的,也为机械波的学习提前打下基础。

这种编排的想法最初萌生于20世纪80年代,并在教学过程中付诸实施。作为内部讲义的《力学简程》,经过多年课堂教学的实际试用,受到同仁的认可与好评,也受到学生们的欢迎。同时,在试用的过程中,也摸索出了关于改进与完善教材体系的思路。本书通过机械工业出版社申报并获准列为教育部“普通高等教育‘十一五’国家级规划教材”后,作者又共同审慎地讨论了该书在物理学科教学中的定位、理论框架和知识结构,包括和相关学科的分工与衔接等教学问题。作者一致认为,基础物理教学的首要任务是促进学生确立客观、正确的物理思想,树立辩证、唯物的世界观,提高科学素质和学识水平,本书正是依照这一准则重新修改的。本书对具有不尽相同表述的物理原理作了恰当的表述和较详细的解析;对那些多数教材论及不多的一些物理问题作了必要的、较深入透彻的分析;作为力学的综合性问题,增设了“两体问题”部分,以便可以深入讨论最常见的两个物体的力学现象与规律,例如折合质量、资用能、离心势能、有效势能等问题;同时还万有引力和开普勒定律内容也安排在这一章节中讨论。

本书给出了若干C语言程序片断,它们或是物理过程的演示算法,或是物理图像的制作程序。对C语言不熟悉的读者,全然不必理会C语言本身的语法与功能,只需要了解其中与基本物理过程有关的几条关键算式。之所以要给出源程

序,目的在于强调计算机数值模拟所采用的是最简单和最直接的物理原理计算方法,并没有经过复杂的数学运算与变换处理,从而使物理原理的理解直观浅显,同时也提高了演示课件的可信度。至于相关的数值计算方法,也是从最低级和最原始的方法入手,涉及的数学问题非常简单,而并不是采用数值计算方法中令连续函数离散化和微分函数差分化的—般处理方法。这样做的目的,主要是希望更加有利于物理内容和基本概念的理解与领悟,也想为促进计算机和数值计算方法在物理学研究中的应用撞击出星星之火。

《力学简明教程》的取名,表明作者试图撰写—部简明扼要的力学教材,希望能留给读者参阅其他参考书的空间,以便能博览众书,吸收多家之长。本书的绪论及第1、2、3、4、7章和附录由陈鍾贤撰写,第5、6和8章由霍雷撰写,全书由陈鍾贤统稿。该书初稿由赵远教授审阅后,给予了评价甚高的推荐意见,在此表示感谢。

严导淦和皮名嘉两位先生审阅了全部书稿,提出了深刻、中肯的宝贵意见和建议,作者逐一作了认真讨论和修订。两位先生渊博的学识和精益求精的学术作风,不仅使本书水平得到提高,作者亦受益匪浅。限于水平和能力,有未尽修正之处,还望见谅。唐光裕先生对本书的撰写和审阅给予了帮助与指导。谨此—并表示诚挚的谢意。

书中的物理函数曲线都是根据相应的物理数学模型,利用计算机 Matlab 或 C 语言编程绘制的。感谢唐勐、靳辰飞和张勇老师以及王飞和何姜等所做的工作和给予的帮助。

本书适用于大学第一学期力学课程。考虑到学生掌握数学知识的程度,物理量的定义主要从极限概念阐述,前几部分的内容尽量避免涉及积分计算。为了让学生了解微积分的概念,或作为资料性质的内容,附录中简单介绍了微积分和矢量运算的相关基础知识。

使用本书 PowerPoint 课件及链接程序的运行软件时,仅需将他们置于同一文档中即可链接运行。课件依据书中基本内容,作了适当节选和少许增补。链接程序增强了物理过程的直观性,对正确理解物理概念有益。

原书稿中空间矢量均采用带“ $\rightarrow$ ”的字母表示,如速度 $\vec{v}$ 。这样表示符号意义明显且不易混淆,有益于教学,但此事未能成行,深感遗憾。仅此请读者注意,书中矢量依旧用黑体字母表示。

由于作者才疏学浅,又企求锐意改革创新,定有不当与错误之处,敬请读者与同仁不吝赐教,在此预致感谢。

陳鍾賢 序

丁亥年立秋於冰城

目 录

序

前言

绪论	1
1 运动学	8
1.1 参考系 坐标系 位置矢量	8
1.2 位移 速度 加速度	9
1.3 质点的运动	15
1.4 简谐运动	21
1.5 刚体的运动	28
1.6 相对运动	32
习题	34
2 动力学的基本定律	40
2.1 牛顿运动定律	40
2.2 牛顿运动定律的应用	44
2.3 质心运动定律	45
2.4 刚体的定轴转动	46
2.5 隔离体方法的应用	51
2.6 振动系统的动力学分析	55
2.7 非惯性系与惯性力	62
习题	65
3 机械能守恒定律	71
3.1 功	71
3.2 动能定理	74
3.3 势能	84
3.4 机械能守恒定律	88
习题	92
4 动量守恒定律 角动量守恒定律	97
4.1 动量守恒定律	97
4.2 人造地球卫星的发射与回收	102
4.3 角动量守恒定律	107
4.4 进动 (precession)	116
习题	118

目 录

5 两体问题	123
5.1 两体问题概述	123
5.2 碰撞	129
5.3 万有引力	137
习题	143
6 连续体力学基础	147
6.1 固体的弹性	147
6.2 流体静力学	152
6.3 理想流体的运动	155
6.4 伯努利方程及其应用	159
6.5 粘滞流体的运动	162
6.6 流体中运动物体所受的阻力和升力	165
习题	168
7 机械波与声	171
7.1 波动概述	171
7.2 一维简谐波	174
7.3 波动方程与波速	176
7.4 能流密度	180
7.5 惠更斯原理 波的衍射、反射和折射	184
7.6 波的干涉 驻波	186
7.7 相速与群速	192
7.8 多普勒效应	195
7.9 声学简介	198
习题	204
8 狭义相对论力学基础	208
8.1 狭义相对论的历史背景与实验基础	208
8.2 洛伦兹变换	214
8.3 狭义相对论时空性质	219
8.4 狭义相对论动力学	225
8.5 能量动量的变换关系	231
8.6 四维时空	233
8.7 广义相对性原理	237
习题	239
附录	242
附录 A 中华人民共和国法定计量单位	242
附录 B 微积分与矢量运算简介	245
附录 C 习题参考答案	255
参考文献	270

绪 论

自然界有两个基本属性。

自然界的第一个基本属性是**物质性**——自然界是由物质组成的，不存在超越物质的客体。从宇观天体、宏观物体、介观世界到微观粒子；从固体、液体、气体到等离子体；从微生物、植物、动物直至人类本身……无一不是自然界中客观存在的物质。物质可以以各种各样的形式存在，既具有共性，又具有个性。空间和时间就是物质存在的两个最基本的属性，是物质存在的基本形式。能量、动量和质量也都是物质的基本属性。实物具有能量、动量和质量，实物是物质；场也具有能量、动量和质量，场也是物质。引力场、静电场、恒磁场和电磁场等都是物质存在的不同形式。当然，实物和场之间有共性，也有不同。场是以能量为存在形式的物质形态。两个实物不可能同时存在于同一空间，但两个场可以同时共存于同一空间；实物有静止质量，而场的静止质量为零。

自然界的第二个基本属性是**运动性**——宇宙间一切物质都在永恒地运动着。运动是绝对的，静止是相对的。运动是物质存在的基本形式。恩格斯指出：“没有运动的物质和没有物质的运动都是同样不可思议的。”地球、太阳、银河系和总星系在不停地运动着；分子、原子、原子核和电子也在不停地运动着；冰溶化为水和水蒸发为水汽及其逆过程是一种运动；氢气和氧气燃烧生成水以及水分子电解产生氢气和氧气也是一种运动；植物、动物和人的出生、成长和死亡同样也是一种运动过程。运动包含宇宙间所发生的一切变化和过程。机械运动、电磁波、相变、化学反应、生理变化直至思维过程等都是物质的运动形式。

1. 物理学概述

自然界的物质性与运动性决定了自然科学领域的基本研究内容就是探索自然界物质的组成和物质运动、变化及发展的根本原因和规律。物理学就是研究物质结构和物质运动的最基本和最普遍规律的自然科学。

1999年3月于美国亚特兰大召开的第23届国际纯粹物理与应用物理联合会[⊙]代表大会指出：“物理学——研究物质、能量和它们的相互作用的学科”。运动的世界充满物质之间的相互作用。物质的相互作用以能量的交换与传递为基本形式。

物理学大厦由三大分支鼎立，即理论物理学、实验物理学和计算物理学。简

⊙ International Union of Pure and Applied Physics, 缩写为 IUPAP。

单地说, **理论物理学**探索自然界最基本的现象与规律, 包括宇宙的形成、人类的起源和物质的生成等最深层次的问题。**实验物理学**是用实验方法研究物理学问题, 包括实验理论、实验方法和实验装置。理论要经过实验检验, 实验要依据理论引导。**计算物理学**则是计算机学、数值计算方法和物理学融合的现代交叉学科。计算物理学是利用电子计算机进行数据采集、数值计算和数字仿真来发现和研究物理现象与物理规律的新兴学科。计算物理学是理论物理方法和实验物理方法的补充和更新。

不同的运动形式具有各自的运动规律, 需要用不同的方法去研究解决。因此, 基础物理学又分为力学、分子物理和热力学、电磁学、光学、原子物理学和原子核物理学等。

整个人类文明中有两门学问, 自然科学和社会科学, 而哲学则是自然科学和社会科学的总括。物理学是哲学的重要基地, 物理学就是自然哲学。物理学关于宇宙物质性和运动性的观点是哲学的根基; 相对论的时间与空间和物质与运动的对立统一的辩证观更是物质不能脱离运动这一哲学观点的重要基础。

物理学是科学大厦的栋梁、支柱与基石, 蕴涵着未来技术进步所需要的基本知识。物理学的定理、定律和科学思想, 不仅是物理学的宝贵财富, 也是自然科学的重要基础。近代物理学的成就为现代科学发展拓宽了思维空间, 越来越成为众多学科不可缺少的一部分。IT (Information Technology, 信息技术) 是当代的热门课题, 众所周知, 信息传播的通道正在由光缆替代电缆, 信息存储介质也已经由磁盘发展到光盘, 这些都得益于物理学和激光技术的发展, 物理学的重要性由此可见一斑。可以断言, 随着物理学的不断发展与进步, 信息科学、材料科学、能源科学和生命科学等与物理学的联系都将越来越紧密, 越来越不可分割, 以至于传统的学科分类也面临着新的挑战。

物理学是技术与工程不可或缺的基础。历史上, 1909 年卢瑟福的 α 粒子散射实验到 20 世纪 40 年代的核能利用, 从 1917 年爱因斯坦的受激发射理论到 1960 年第一台激光器的诞生, 从 1926 年量子力学的产生到晶体管的发明, 直至信息时代等等无一不表明物理学对工程技术的导向与推进作用。与此同时, 现代信息、材料、能源和生命科学与技术等领域的进步也正在催动着物理学在光学和量子物理学等方面快速进展。

现代社会越来越注重人才的素质培养, 物理学是培养科学素质的最重要的学科之一。科学技术的进步需要物理学提供理论基础雄厚与训练有素的人才。科学型人才就是要致力于研究和发现客观规律, 并创立科学原理; 工程型人才则要把科学原理演变成设计、规划和决策。科学知识是科学素质的载体, 科学素质孕育于广博的科学知识之中。科学的思想、开阔的眼界、丰富的知识是高素质人才的必要条件。物理学涉及的科学知识广博而深邃, 其科学的世界观和时空观是科

学素质必备的元素,其严谨的科学性和严密的逻辑性是科学素质的基本要素。

人类认识自然界一般总是有一个由古典到现代、由初浅到高深、由外围到核心、由表象到本质和由特殊到一般的循序渐进的过程。遵循这一过程来探求科学知识是常用的行之有效的方法之一。

2. 理想化与模型

理想化是自然科学必要的和常用的科学方法。

影响事物及其运动性质的因素众多,但就所研究的问题而言,其中必有一些是起主导作用的决定性因素,而另一些则是次要的无关大局的因素。科学的方法是分清主次,把握关键,忽略次要的内容。这样不仅使问题获得简化,而且突出了事物的本质,使问题典型化,更具有代表性和普遍意义。这种主次取舍的加工就称为理想化。理想化又可分为研究对象的理想化和运动过程的理想化。

理想化的研究对象通常称为物理模型。在力学中,随着研究的需要和深化,将物体逐步抽象成各种不同的物理模型,例如质点、刚体等等。

质点——大小和形状可以忽略不计且具有原来物体全部质量的物体。例如,在笔直的铁轨上行驶的一列火车,各车厢的运动都相同,一节车厢的运动,或者车厢上某一固定点的运动,就可代表整列火车的运动,即可忽略大小形状而视为质点。一个物体是否可以视为质点,不是由物体本身的大小形状所决定的,而是取决于所研究的问题。例如,研究地球绕太阳公转的规律时,设地球的半径为 R ,地球到太阳的距离为 r ,由于 $R \ll r$,所以地球可视为质点;而研究地球的自转运动时,地球则不能看作质点,此时地球可以按刚体来处理。

刚体——物体上任意两点之间距离的变化始终可以忽略不计的物体。同样,理想化为刚体与否,也要由所研究的问题来决定。同一个乒乓球,在研究球路和球的落点时可以看作质点;在研究旋转球和弧圈球时就要视为刚体;而研究球的弹跳问题时则要按弹性体来处理。

弹性体——形变可以完全恢复的物体。例如,一根直杆原长为 l_0 (m 或米),今以大小为 F 的外力拉伸此杆,使之伸长为 l_1 ,若 $F \geq 0$,则 $l \geq l_0$;继而,如果撤销外力,即 $F = 0$,则 $l = l_0$,亦即直杆完全恢复了原长 l_0 ,可见,该直杆在此过程中是弹性体。对于弹性体,在线形变限度内,有

$$\frac{F}{S} = E \frac{\Delta y}{\Delta x}$$

式中, F/S 称应力或协强; $\Delta y/\Delta x$ 称应变或协变; E 是弹性模量,又称杨氏[○]模量,反映材料受拉伸或压缩的性质。

理想流体——理想流体是指一定量流体的体积保持不变,即不随压强而变化,

○ 托马斯·杨(Thomas Young),法国,1773—1829

或称为不可压缩;同时,流体在流动时不受阻力,即包括流体之间和流体与管壁之间的摩擦阻力均可忽略不计。

理想化的运动过程,例如匀速直线运动、匀速率圆周运动、简谐运动(simple harmonic motion)和流体的稳定流动等都是常见的理想运动形式。描述一个运动过程可以采用语言叙述,也可以采用几何图形或曲线形象地描述。最基本和最准确的方法是在数学上采用函数描述,运动方程通常是一个微分方程,它的解称为运动函数,有时也称作运动表达式。例如, $x = 3\sin(\omega t + 2)$ 表示的是一个沿 x 轴的简谐运动,它是运动微分方程 $\frac{d^2x}{dt^2} + \omega^2 x = 0$ 的一个特解。

3. 物理学与数学

数学是自然科学的科学语言。物理量及其定义、物理定律、原理和定理用数学语言叙述则简明、扼要、准确和严密。描述物理规律的数学方程式常称为物理过程的数学模型。运动过程的理想化,就是要确定物理过程的理想化模型,进而建立理想化的数学模型——运动方程。对实际问题用数学方法分析与推导,有助于揭示新的物理规律和引入新的物理量。20 世纪初,第一个对当时物理学的危机进行全面和深入分析的是数学家庞加莱(H. Poincaré, 1854—1912, 法国)[○]。有趣的是,被列为七大“数学世纪难题”之一的“庞加莱猜想”于 2006 年被完全破解,著名数学家丘成桐说,这一证明将有助于人类更好地研究三维空间,对物理学和工程学都将产生深远的影响。

从历史上看,很多著名的科学家,如哥白尼(N. Copernicus, 1473—1543, 波兰)、伽利略(G. Galilei, 1564—1642, 意大利)、牛顿(I. Newton, 1642—1727, 英国)、伯努利(D. Bernoulli, 1700—1782, 瑞士)、卡诺(S. Carnot, 1796—1832, 法国)、麦克斯韦(J. Maxwell, 1831—1879, 英国)、普朗克(Max Planck, 1858—1947, 德国)、爱因斯坦(A. Einstein, 1879—1955, 德国)、泡利(W. E. Pauli, 1900—1958, 瑞士)等等,他们大多是物理学家,其中不乏数学家。物理学与数学在发展中始终相互推动,相互促进。物理学理论本身蕴涵着深奥的数学规律,因此,如果没有深厚的数学基础,要想获得物理学领域的突出成就几乎是不可能的。物理学与数学的依赖关系导致物理学与数学相结合的课程或学科的产生,例如数学物理方法和计算物理学等。

物理学者一方面要善于从实际过程中形成物理概念,运用逻辑推理分析、构建数学模型,即由实践转向理论;另一方面又要善于从数学过程和结论中考问其物理意义,即由理论研究得出预见或判断来指导实践。

[○] 庞加莱,科学的价值,1905 年,第八章:数学物理学当前的危机

4. 空间与时间

空间和时间是物质的最基本的属性,是物质存在的最普遍的形式。时空观则是人类对世界的最根本的观点。时空观也是衡量一个人的世界观的试金石。

物理学的基本观点认为没有脱离时间和空间而存在的物质,也没有脱离物质运动而存在的时间和空间。不过,人类认识世界的过程是在有限的空间和时间内的一种实践活动,因此得出的科学结论不可能拓展到永远,这里“永”是指时间无限,“远”是指空间无限。所谓“恒定均匀”总是有一定的时间和空间范围。物理学中“永远”是理论、理想和极限的情况,是实际真实情况的近似。

空间与时间显示出无限性。物理学认为空间具有无限性、广延性。从宇观上讲,现在已知人类生活在地球上,地球属于太阳系,太阳系属于银河系,而银河系又属于总星系……;从微观上讲,人类现在已知分子、原子、粒子和夸克……。时间的无限性体现在对过去尚可探索宇宙的形成和人类的起源等问题,对未来则可推测未来世界的发展历程。

空间与时间具有相对性。物质的运动离不开空间和时间,空间和时间也离不开物质的运动,这是绝对的;但是空间和时间并不是独立的,它们都是物质存在的形式,从相对论的坐标变换式中可明显看出空间和时间的相互依存关系。

5. 物理量 基本量与导出量 量纲

物理定律和定义建立起物理量之间的相互关系,有必要将某些量规定为基本物理量,它们的单位称为基本单位,其余的物理量则可依据物理定律和定义导出,称为导出物理量和导出单位,从而构成物理量单位的体系,即单位制。选用不同的基本量和基本单位,就形成不同的单位制。例如,英国和美国通常采用英制,即英尺-磅-秒制;有些行业习惯采用工程单位制,即米-千克力-秒制,物理学曾采用厘米-克-秒(CGS)制。为了便于国际交流,1875年签署了米制公约,规定长度单位为米,质量单位为千克,时间单位为秒,称为国际单位制。

基本物理量是人为选择的,基本单位则是由规定的实验方法确定的。随着科学技术的进步,实验方法不断改进,基本单位的精确度和稳定度也在不断提高。

1983年国际计量大会通过决定,1米被定义为平面电磁波在 $1/299792458$ 秒的持续时间内在真空中传播行程的长度。

1875年米制公约会议之后,用含铂90%、铱10%的合金制成国际千克原器作为质量的基准。

1967年国际计量大会决议,定义1秒是位于海平面上的铯 $\text{Cs}133$ 原子基态的两个超精细能级间在零磁场中跃迁振荡 9192631770 个周期所持续的时间。

在国际单位制(SI)中,除长度、质量和时间外,还有电流、热力学温度、物质的量和发光强度等共七个量为基本量。对应的基本单位为米(m)、千克(kg)、秒(s)、安培(安, A)、开尔文(开, K)、摩尔(mol)和坎德拉(cd)。还有两个辅

助单位,即平面角的单位弧度(rad)和球面角的单位球面度(sr)。其余四个基本单位的确定方法可分别参阅电磁学、热学和光学等相关著作。

国际单位制在我国的使用依据《中华人民共和国法定计量单位》和《中华人民共和国法定计量单位使用方法》,详见附录 A。

导出单位的确定与基本单位和导出量与基本量的关系式的选择有关。导出量与基本量的关系式称为**量纲式**,量纲式反映了导出物理量与基本物理量的量纲之间的关系。**量纲**是物理量的一种基本性质,例如长度、质量、时间或其它一种组合。基本量的量纲常用规定的符号表示,例如 L、M、T 分别表示基本量长度 l 、质量 m 和时间 t 的量纲。导出量的量纲则由基本量的量纲及其指数组成的量纲式表示。力学中一个物理量 Q 的量纲式或量纲一般可表示为

$$\dim Q = L^p M^q T^r$$

例如体积 V 的量纲

$$\dim V = L^3$$

密度 ρ 的量纲

$$\dim \rho = ML^{-3}$$

速度 v 的量纲

$$\dim v = LT^{-1}$$

量纲的运用具有很大益处。首先,量纲不考虑物理量的数值,也不考虑物理量单位的大小。由于各物理量均用基本量纲的表达式表示,物理量之间的相互关系一目了然。量纲可用来快速检查一个物理关系式正确与否。量纲法则指出,两个量纲相同的物理量才可以相加、相减或相等。如果出现不同量纲的两个量相加、相减或相等,则必定是错误的。对于指数、对数和三角函数中的宗量,其量纲为 1,也常称为无量纲数。例如 $\cos(\omega t + \varphi)$ 中的宗量 $\omega t + \varphi$,其中 $\dim \varphi = 1$,要求宗量 ωt 的量纲 $\dim \omega t = 1$,则应有 $\dim \omega = T^{-1}$ 。如果出现上述宗量非量纲 1 的情况,则必定是错误的。在理论研究过程中,对导出的公式及其中每一个物理量,可通过量纲检查其正确与否。

6. 力学概述

宇宙间各种形态的物质都在永恒地运动着,具有各种不同的运动形式,其中最简单的运动是物体位置随时间的变化。宏观物体之间或物体各部分之间相对位置的变化称为机械运动(mechanical motion)。行星绕太阳运行,人造天体的轨道运动,河水沿江河流淌,汽车在公路上行驶,人在曲径上漫步等,都是机械运动。

力学(mechanics)是研究物体机械运动的学科,一般可分为静力学(statics)、运动学(kinematics)和动力学(dynamics)。静力学研究物体在相互作用下的平衡问题;运动学研究运动物体的位置随时间变化的规律;动力学则研究物体的运动

与物体间相互作用的内在联系。

现代科学以物理学为起点，而物理学则以力学为开端。

力学知识最早起源于对自然现象的观察和在生产实践中的经验。在我国古代，随着天文、工具、建筑和水利等事业的发展，人们积累了关于力学的生产技术与经验，并对力学的科学原理与基本概念有了一些初步的认识。在《墨经》、《考工记》、《论衡》、《史记》、《论气》和《天工开物》等我国古代书籍中，有对自然现象、力学的概念和基本原理等的相关叙述，还有对音律、空气振荡和水波衰减等内容的记载。古埃及、古希腊和巴比伦等国也积累了丰富的力学知识。古代有关书籍有亚里士多德的《物理学》和《论天》，阿基米德的《论支承》和欧几里得的《几何原本》等。古希腊的阿基米德对杠杆平衡、重心位置和浮力等作了系统研究，发现了它们的基本规律，初步奠定了静力学的基础。

1543年，哥白尼的《天体运行论》出版，日心说最终取代地心说。由于天文观测技术的发展，当时力学中的规律往往首先在天体运行研究中被发现。

17世纪，开普勒根据第谷的30年天文观测资料总结出行星运动的三定律。伽利略在实验研究和理论分析的基础上，最早阐明自由落体运动的规律，提出加速度的概念。牛顿在伽利略、开普勒和笛卡儿等人工作的基础上，把物体的运动规律归结为三条基本运动定律和一条万有引力定律，由此建立起一个完整的力学理论体系，这标志着力学开始成为一门科学。

19世纪被称为“科学世纪”，力学和整个物理学都获得迅速发展。尽管有些物理思想已经超越了牛顿力学的框架，但本质上仍属于经典理论体系。牛顿力学也称为经典力学，它是在人类当时熟悉的宏观物体低速运动的实践中建立起来的。

20世纪初，相对论指出牛顿力学不适用于高速或宇宙尺度内的物体运动；到20世纪20年代，量子论指出牛顿力学不适用于微观世界。这反映了人们对力学认识的深化，即认识到物质在不同层次上的运动规律是不同的。

力学是物理学、天文学和许多工程学的基础。力学研究主要有三种手段，即理论分析、实验研究和数值计算。对一个实际的力学问题，往往需要理论、实验和计算这三方面的相互配合。

思 考 题

- 1 您对自然界最基本的看法和观点如何？
- 2 说出物理学研究的领域。
- 3 如何理解物理学与人类文明的关系。
- 4 举例说出物理学和当代工程技术的关系。

1 运动学

运动学描述物体的机械运动,即空间位置随时间的变化,而不追究产生这种运动的原因及运动改变的根由。

1.1 参考系 坐标系 位置矢量

前面说过,运动是绝对的,自然界的事物总是在不停地运动着。运动的描述是相对的,描述物体的运动总是相对于一个任意指定的物体(或彼此不作相对运动的物体群),这个参照物体称为参考系。为了定量描述物体的运动,必须在参考系上任意取定一个参考点 O ,并以 O 为原点构建一个坐标系。所以坐标系实际上就是参考系的替身。在运动学中,参考系的选择是任意的,因此,常常以使问题的研究简化为条件来选取坐标系。

运动质点在 t 时刻的空间位置可用位置矢量(简称位矢,有时亦称矢径)来表示,如图 1-1 所示。

$$\mathbf{r} = \mathbf{r}(t)$$

这种位置矢量随时间变化的关系式称为运动函数,也称运动表达式。在所选定的空间笛卡儿坐标系 $Oxyz$ 中,上式可表示为

$$\mathbf{r} = x(t)\mathbf{i} + y(t)\mathbf{j} + z(t)\mathbf{k}$$

式中, $\mathbf{i}$ 、 $\mathbf{j}$ 、 $\mathbf{k}$ 分别是 x 、 y 、 z 轴的单位矢量。 $\mathbf{i}$ 、 $\mathbf{j}$ 、 $\mathbf{k}$ 的模(即大小)均为 1,其方向沿各自坐标轴的正方向。在选定的笛卡儿坐标系中 $\mathbf{i}$ 、 $\mathbf{j}$ 、 $\mathbf{k}$ 的大小和方向皆不随时间而变化,所以是恒矢量。

请看下面三个常见的运动函数。第一个运动函数

$$\mathbf{r} = R\cos\omega t\mathbf{i} + R\sin\omega t\mathbf{j} + v\mathbf{k} \quad (1-1-1)$$

当 R 和 v 是不为零的恒量时,式(1-1-1)描述的是质点螺旋运动,它在 $z = 0$ 平面上的投影是半径为 R 的匀速(率)圆周运动,即

$$\mathbf{r} = x\mathbf{i} + y\mathbf{j} = R\cos\omega t\mathbf{i} + R\sin\omega t\mathbf{j}$$

其中

$$r^2 = x^2 + y^2 = R^2$$

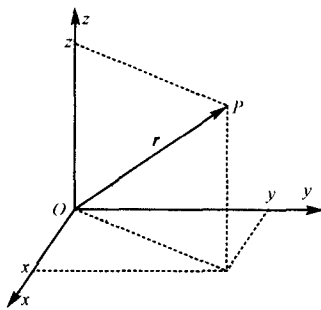


图 1-1 位置矢量