

普通高等教育“十二五”规划教材
全国高等医药院校规划教材

供临床、基础、预防、口腔医学类专业用

医学物理学

主 编 王光昶

清华大学出版社

教育部高等学校医学门类学科教学指导委员会
医学物理学课程教学指导委员会

医学物理学

第二版

人民卫生出版社

普通高等教育“十二五”规划教材
全国高等医药院校规划教材

供临床、基础、预防、口腔医学类专业用

医学物理学

主 编 王光昶

清华大学出版社
北 京

内 容 简 介

本书包括力学基础、物体的弹性与形变、流体的运动、机械振动和机械波、声波、分子运动论、热力学基础、静电场、直流电、磁场与电磁感应、波动光学、几何光学、近代物理学基础、X射线、原子核和放射性、激光及其医学应用、磁共振成像共16章。本书根据现代医学对物理学的基本要求,并结合教学实践经验,由全国11所院校共同合作编写而成。在教材内容上紧密结合医学,以突出物理学在医学上的应用为特点,充分考虑到教材的实用性、科学性、先进性和前沿性,重点阐述物理学的基本思想、概念、原理和方法,加强了基础理论和基本知识在医学上的应用,克服了理论化、公式化等枯燥乏味、烦琐的内容。让学生在学的过程中真正体会到学有所用,更有利于学生自主学习。为增加本书的可读性,还在每章末安排了“阅读材料”,介绍了物理、医学、生命科学等诺贝尔奖金获得者的成长经历及重大理论发现的经过,以及与正文内容相关的新概念、新方法及新技术的应用等,这些将有助于帮助学生树立正确的科学发展观,培养创新思维,提高综合素质及分析问题、解决实际问题的能力。

本书可作为临床、预防、药学、护理、口腔、检验、美容、麻醉、影像等专业的本科生教材,也可供自学者参考。

版权所有,侵权必究。侵权举报电话:010-62782989 13701121933

图书在版编目(CIP)数据

医学物理学/王光昶主编. —北京:清华大学出版社,2011.9
(普通高等教育“十二五”规划教材·全国高等医药院校规划教材)
ISBN 978-7-302-26537-5

I. ①医… II. ①王… III. ①医用物理学—高等学校—教材 IV. ①R312

中国版本图书馆CIP数据核字(2011)第169599号

责任编辑:罗 健

责任校对:刘玉霞

责任印制:杨 艳

出版发行:清华大学出版社

地 址:北京清华大学学研大厦A座

<http://www.tup.com.cn>

邮 编:100084

社 总 机:010-62770175

邮 购:010-62786544

投稿与读者服务:010-62776969, c-service@tup.tsinghua.edu.cn

质 量 反 馈:010-62772015, zhiliang@tup.tsinghua.edu.cn

印 刷 者:北京市清华园胶印厂

装 订 者:三河市漂源装订厂

经 销:全国新华书店

开 本:185×260 印 张:24 插 页:2 字 数:637千字

版 次:2011年9月第1版 印 次:2011年9月第1次印刷

印 数:1~3000

定 价:39.80元

产品编号:040013-01

前言

PREFACE

医学物理学是一门重要的基础课,医学院校医学本科专业开设医学物理学课,一方面在于较系统地为学生打好必要的物理基础;另一方面使学生初步掌握科学的思维方法和研究问题的方法,培养学生唯物的世界观和科学的发展观,激发他们的探索创新精神,提高人才的科学素质;最后进一步使学生深刻认识到现代医学的发展实际上走的是一条与物理学紧密相结合的道路,深刻领悟“学有所用”的道理。

本书从现代科学技术的发展及培养面向 21 世纪医学科学人才的总体要求出发,本着对传统的本科医学物理学课进行大胆改革的精神,教材的编写力求基础性、学术性、思想性和可读性的统一,体现“精、实、宽、新、用、活”等特色,使教材既具有适合于专业特点的实用性和科学性,又具有能反映时代精神的前沿性和先进性,同时还基本保留传统教材的基础性、系统性和完整性。本书在参考国内外有关教材,并结合我们的教学实践经验的基础上,由全国 11 所院校共同合作编写而成。在教材内容上紧密结合医学,以突出物理学在医学上的应用为特点,重点阐述物理学的基本思想、概念、原理和方法,加强了基础理论和基本知识在医学上的应用,克服了理论化、公式化等枯燥乏味、烦琐的内容,让学生在学的过程中真正体会到学有所用,更有利于学生自主学习。本书在内容结构上,还在每章末安排了“阅读材料”,有利于拓宽学生的知识面,开拓学生的创新思维,提高学生的科学素质。

本书内容丰富但又具有较大的弹性,能够满足不同专业不同教学时数的教学需求。本书适合普通高等医药院校临床、预防、药学、护理、口腔、检验、美容、麻醉、影像等专业使用,也可供医药院校其他专业、生命科学有关专业的师生和研究工作者作为参考用书。本书有配套指导用书《医学物理学学习指导》,便于教学和学生自学。

在编写过程中,由于编者的知识、能力和水平有限,加之编者较多,全书的结构风格难以统一。书中的错误和不足之处在所难免,恳请广大读者批评指正。

编者

2011 年 6 月

目 录

CONTENTS

绪论	1	4.5 惠更斯原理及波的干涉	79
第1章 力学基础	4	4.6 声波	84
1.1 物理量及其描述	4	4.7 超声波	90
1.2 运动的描述	7	4.8 超声技术及其医学应用	92
1.3 力学基本定律	10	习题四	96
1.4 刚体的定轴转动	15	第5章 分子运动论	100
1.5 转动惯量在医学领域中的应用	21	5.1 物质微观结构的基本概念	100
习题一	22	5.2 理想气体分子运动论	101
第2章 物体的弹性与形变	25	5.3 生物膜的输运	107
2.1 应变和应力	25	5.4 液体的表面现象	110
2.2 材料的弹性	26	习题五	117
2.3 物体的形变和弹性势能	30	第6章 热力学基础	120
2.4 弹性腔的力学问题	31	6.1 热力学系统 热力学第一定律	120
2.5 骨与肌肉的生物力学特性	32	6.2 热力学第一定律的应用	123
习题二	37	6.3 循环过程 卡诺循环	127
第3章 流体的运动	40	6.4 热力学第二定律	130
3.1 理想流体 稳定流动	40	6.5 熵与熵增加原理	132
3.2 伯努利方程及其应用	41	6.6 生物热力学	137
3.3 黏性流体的流动	46	6.7 热效应的医学应用	138
3.4 黏性流体的流动规律	48	习题六	140
3.5 血流动力学基础	52	第7章 静电场	142
习题三	57	7.1 电场和电场强度	142
第4章 机械振动和机械波 声波	60	7.2 电通量 高斯定理	145
4.1 简谐振动	60	7.3 电势和电势梯度	150
4.2 阻尼振动、受迫振动和共振	65	7.4 电偶极子与电偶层	156
4.3 简谐振动的合成与分解	67	7.5 压电效应及其应用	159
4.4 机械波	73	7.6 电场的生物学效应	160
		7.7 生物电现象及其医学应用	162
		习题七	164

第 8 章	直流电	167
8.1	电流密度	167
8.2	基尔霍夫定律	172
8.3	电容器的充电和放电	174
8.4	生物膜电位	176
8.5	直流电在医学中的应用	181
	习题八	186

第 9 章	磁场与电磁感应	189
9.1	磁场 磁感应强度	189
9.2	磁场对运动电荷和电流的作用	190
9.3	电流的磁场	194
9.4	磁通量 电磁感应	198
9.5	电磁感应定律 感应电动势	200
9.6	电磁振荡和电磁波	202
9.7	磁场的生物效应及磁效应的医学应用	205
	习题九	208

第 10 章	波动光学	212
10.1	光的干涉	212
10.2	光的衍射	217
10.3	光的偏振	222
10.4	旋光现象	229
10.5	波动光学的应用	231
10.6	光辐射生物效应	235
	习题十	236

第 11 章	几何光学	238
11.1	球面折射	238
11.2	透镜	242
11.3	眼睛	248
11.4	几种医用光学仪器的原理及应用	253
11.5	纤镜及特殊显微镜	257
	习题十一	262

第 12 章	近代物理学基础	265
12.1	热辐射	265
12.2	光的量子性	272
12.3	氢原子光谱 玻尔的氢原子理论	276

12.4	物质的波动性质	279
12.5	原子壳层结构	284
12.6	原子光谱与分子光谱	286
12.7	扫描隧道显微镜	289
12.8	量子生物学概述	290
	习题十二	292

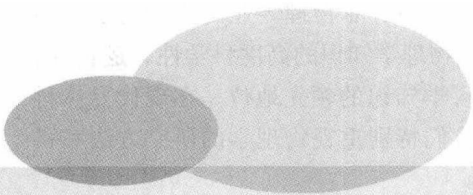
第 13 章	X 射线	295
13.1	X 射线的产生	295
13.2	X 射线的性质和 X 射线衍射	298
13.3	X 射线谱	299
13.4	物质对 X 射线的吸收规律	302
13.5	X 射线的医学应用	304
	习题十三	309

第 14 章	原子核和放射性	312
14.1	原子核的基本性质	312
14.2	原子核的衰变	316
14.3	放射性核素的衰变规律	318
14.4	射线与物质的相互作用	322
14.5	辐射剂量	326
14.6	射线的测量原理和放射性核素在医学上的应用	328
	习题十四	332

第 15 章	激光及其医学应用	335
15.1	激光产生的基本原理	335
15.2	激光的特性	340
15.3	激光的医学应用	341
15.4	激光在精密生物技术和医疗技术中的应用	348
	习题十五	350

第 16 章	磁共振成像	353
16.1	核磁共振的基本概念	353
16.2	核磁共振现象	357
16.3	磁共振成像原理	361
16.4	MRI 的应用与发展	366
	习题十六	370

参考文献	372
-------------	-----



绪 论

一、物理学的研究对象

物理学是以认识物质的基本属性,研究物质运动规律为研究目的的学科,是自然科学的基础。它的研究对象十分广泛,包括宇观、宏观、微观世界。

物理学是研究物质结构、物质相互作用和运动规律的一门自然科学,是自然科学中最重要的基础学科之一。它对科学技术的发展起到至关重要的作用。

在所有自然科学中,物理学所研究的物质运动形式,具有最基本、最普遍的性质。具体来说,物理学研究的运动包括:机械运动、分子热运动、电磁运动、原子内部运动、场与物质的相互作用等。这些运动形式普遍存在于其他高级而复杂的物质运动形式之中。因此,物理学所研究的规律具有最基本、最普遍的意义,从而使得物理学的知识和理论成为研究其他自然科学不可缺少的基础。正是由于物理学所研究的物质运动形态和运动规律在各自适用的范围内有其普遍的适用性、统一性和简单性,随着现代科学技术的迅速发展和各门学科之间的相互渗透,形成了许多与物理学直接有关的新兴边缘学科(或前沿学科),如物理化学、天体物理学、生物物理学、生物物理化学、量子化学、生物物理遗传学、医学影像物理学、激光医学、血液流变学、量子生物学、生物医学工程学等。物理学的每一次重大发现和发明都极大地推动了其他自然科学的发展,促使科学技术和生产技术发生根本性的变革。

医学物理学是现代物理学与医学相结合所形成的交叉学科,它的基础知识、基本原理和方法,已成为研究医学所不可缺少的基础。现代医学的发展,实际上走的是一条与物理学紧密相结合的道路。因此,物理学必将不断地推动医学向前迅猛发展。

二、物理学的研究方法及其科学思维

学习物理学的研究方法和科学思维,不仅有助于对学生物理学和其他学科的学习能力的培养,而且可以启发学生积极思维,激发学生的探索精神和创新意识,培养学生的创新精神和科学态度。各门学科包括物理学在内,其基本任务是认识物质属性,研究物质运动规律,其研究方法都是遵循“实践-理论-实践”的认识法则。具体地说,物理学研究方法包括观察、实验、假说和理论各个环节。观察和实验所获得的大量资料是理论的依据。理论是从几条基本原理出发,说明一定范围内的各种物理现象,并且还能在一定程度上预言未知现象的存在,指导进一步的实践。简单地说,物理学研究方法就是理论联系实践的科学方法。

大量事实表明,物理思想与方法不仅对物理学本身有价值,而且对整个自然科学,乃至社会科学的发展都有着重要的贡献。据统计,自20世纪中叶以来,在诺贝尔化学奖、生理学及医学奖,甚至经济学奖的获奖者中,有很多人具有物理学的背景;这就意味着他们从物理学中汲取了

营养和智能,转而在非物理领域里获得了成功。反过来,至今发现有非物理专业出身的科学家问鼎诺贝尔物理学奖的事例。这就是物理学科学思维价值所在。物理学知识的高度科学性、逻辑性、系统性和准确性常常以数学形式描述,使得物理学处于现代科学知识的领先地位。在现代自然科学体系中,物理学形成的科学风格、提供的科学准则,就是人们特别重视物理学的研究方法和科学思维的原因。

物理学的研究方法是开发智力和提高能力的途径。物理学思想能启迪学生的创新思维,是培养创造型人才的火种。对学生而言,学好物理学能够很好地培养自己的创新能力,提高自己的认识水平。

三、物理学与科学发展和技术进步

物理学的发展已经经历了三次大突破,在 17~18 世纪,由于牛顿力学的建立和热力学的发展,不仅有力地推动了其他学科的进展,而且适应了研制蒸汽机和发展机械工业的社会需求,机械能、热能的有效应用引起了第一次工业革命。到了 19 世纪,在电磁理论的推动下,人们成功地制造了电机、电器和电信设备,引起了工业电气化,使人类进入了应用电能的时代,这就是第二次工业革命。20 世纪以来,由于相对论和量子力学的建立,人们对原子、原子核结构的认识日益深入。在此基础上,人们实现了原子核能和人工放射性同位素的利用,促成了半导体、核磁共振、激光、超导、红外遥感、信息技术等新兴技术的发明,许多边缘学科也发展起来了。新兴工业犹如雨后春笋,现代科学技术正在经历一场伟大的革命,人类进入了原子能、电子计算机、自动化、半导体、激光、空间科学、遗传信息学等高新技术的时代。

20 世纪以来,物理学一方面向认识的深度迈进,另一方面又向应用的广度发展。它在发掘新能源、新材料以及革新工艺过程、检测方法等方面,都提供了丰富的实验资料和理论根据;而许多新技术、新工艺的实现,又大大地发展了生产力。生产技术的发展,反过来也为物理学的进一步研究准备了雄厚的物质条件,形成相辅相成、齐头并进的局面。物理学与科学技术的关系,已如第三次世界物理学大会决议所指出:“物理学是我们认识世界的基础……,是其他科学和绝大部分技术发展的直接的或不可缺少的基础,物理学过去是、现在是、将来也是全球技术和经济发展的主要驱动力。”

四、物理学与医学的关系

医学是以人体为研究对象的生命科学。生命现象属于物质的高级而复杂的运动形式,并且有其自身的运动规律,在生命活动中包含着大量的物理现象和物理过程。在医学的发展进程中无时无刻不在运用着物理学的理论、方法和技术。物理学每一新进展无不对医学有巨大影响,促使医学产生突破性的进步。显微镜的发明和使用,电子显微镜的出现,以及 X 射线衍射技术、波谱技术、电泳、色谱等使人类对生命现象的认识逐渐深化,生命科学已经从宏观形态的研究进入到微观机制的探讨,从细胞水平提高到分子水平,从定性分析提高到定量分析。物理学的发展已经历了三次大的突破,而每次突破都促进了医学的发展,生命科学研究和医疗实践中都越来越广泛地采用物理学的技术和方法。随着物理学经历第一次大突破时,科学家发明了温度计、压强计、显微镜等仪器,之后这些仪器就在医学中得到广泛应用并弥补了医学检测手段的不足。到了物理学发展经历的第二次突破时,这期间对医学发展促进较大的两件事是 X 射线的发现及很快地在医学上的应用;其次是 1889 年沃勒(Waller)提出的心脏电偶极子模型,为心电图的记录提供了理论基础。在物理学经历第三次大突破以来,由于量子力学微观理论的成果,又直接促进了核磁共振、

激光等新技术的发展,这些成果已成为医生们诊断和治疗的得力帮手。20 世纪 70 年代以后,由于电子计算机技术的飞速发展和日臻成熟,使其在医学领域内得以大显身手,除了 X-CT (X 射线电子计算机断层成像)、ECT (发射型计算机断层成像)、MRI (核磁共振成像)、PET (正电子发射型计算机断层成像) 这样的大型设备之外,尚有微型计算机控制的某些人工器官亦在临床上应用,这些都强有力地促进了医学科学的发展与现代化。总之,物理学每一次新的理论发现和技术发展都会为医学研究和医疗实践提供新的理论基础和更先进、更方便、更精密的仪器和方法。与此同时,生物学和医学的不断发展,又给物理学提出了新的研究课题。两者相互促进、相互渗透、共同前进,不断揭示生命现象的本质。

综上所述,我们不难看出物理学与医学之间的紧密关系。物理学的成就促进了医学的发展和进步,同时也促进了医学物理学这门边缘学科的逐渐成熟,医学物理学的发展离不开物理学与医学的结合。因此,正确认识物理学与医学的关系,端正学习物理学的态度,是学好医学物理学的关键。

五、物理学与人才培养

在人类追求真理、探索未知世界的过程中,物理学展现的一系列科学的世界观和方法论,深刻地影响着人类对物质世界的基本认识、人类的思维方式和社会活动。从这个角度,我们可以把物理学看做是人类文明发展的基石,它在人才的科学素质培养中具有重要的地位。

高等医学院校肩负着培养我国各类高级医疗、卫生专门人才的重任,要使我们培养的医疗、卫生技术人员,能在飞速发展的科学技术面前有所创新、有所前进,对人类作出较大的贡献,就必须加强基础理论特别是物理学的学习。通过学习能对物质最普遍、最基本的运动形式和规律有比较全面而系统的认识,掌握物理学中的基本概念和基本原理以及研究问题的方法,同时在科学实验能力、计算能力以及创新思维和探索精神等方面受到严格的训练,培养分析问题和解决问题的能力,提高科学素质,努力实现知识、能力、素质的协调发展。探索未知是人类的天性。人类正是在不断探索自然世界的过程中,形成和发展了物理学,从而得以修正和完善与我们赖以生存的地球的联系,使人类能在一个与自然更加和谐美好的关系中生存。

(王光昶)

第1章

力学基础

力学 (mechanics) 研究的是物体机械运动 (mechanical motion) 的规律。机械运动是最基本的运动形式, 是其他运动的基础。因此力学是学习物理学的基础。

1.1 物理量及其描述

物理量是指物理学中度量物体属性或描述物体运动状态及其变化过程的量, 它们通过物理定律及其方程建立相互间的关系。它们中有的规定为互相独立的基本物理量, 有的是按照物理定义由基本物理量导出的导出量。在 1971 年第十四届国际度量衡大会 (General Conference of Weights & Measures) 上, 确定了长度、质量、时间、电流、热力学温度、发光强度和物质的量作为基本物理量。

本节在力学范畴内, 介绍质量、时间和长度三个基本物理量以及国际单位制和量纲。

1.1.1 质量

质量 (mass) 源于对物质的认识, 质量是物理学最基本、最重要的概念之一。20 世纪以前, 人们认识到的物质是能被人的感官所直接感受到的, 可称为物体的客观存在。在长期的实践中, 需要度量物体的量, 由此形成了质量的概念。即: 质量被理解为“物体所含物质的量”, 质量具有可加性。例如, 每一物体的质量是其各组成部分的质量之和。在经典概念中, 物体的质量与它的运动状态无关。任一物体在运动或静止时质量保持不变。

迄今为止, 国际上公认的质量基准是保存在巴黎国际计量局中的铂铱原器, 规定它的质量为 1kg (1 千克), 所以又叫做千克原器。各国一般有千克原器的复制品, 其他物体的质量可通过与千克原器比较 (直接或间接) 来确定。

表 1-1 给出一些以 kg 为单位表示的物体的质量, 它们的质量值大小相差约 10^{83} 倍。

表 1-1 一些物体的近似质量

物 体	质量/kg	物 体	质量/kg
已知的宇宙	1×10^{53}	大象	5×10^3
银河系	2×10^{41}	葡萄	3×10^{-3}
太阳	2×10^{30}	尘埃微粒	7×10^{-7}
月球	7×10^{22}	青霉素分子	5×10^{-17}
Eros 星 (爱神小行星)	5×10^{15}	铀原子	4×10^{-25}
小型山脉	1×10^{12}	质子	2×10^{-27}
远洋货轮	7×10^7	电子	9×10^{-31}

1.1.2 时间

时间 (time) 均匀流逝的概念源于人们观察到自然界大量的周期性重复的事件, 例如地球的自转和公转、摆的振动等。人们相信, 任一个自身重复的现象都可作为时间的标准。精确的周期性运动事件均匀地测量着流逝的时间, 由此发明了计时装置, 通常称为钟。

时间是物理学的基本物理量之一, 确定它的基准是一个重要的问题。所谓时间基准, 就是选定一个周期性过程作为标准钟, 标准钟的周期应是稳定的。利用原子的辐射获得稳定的振动的技术已经成熟, 这种装置叫做原子钟。原子钟有极高的稳定性和精确度, 而且任何实验室都可以使用。1967 年第 13 届国际计量会议规定, 以 ^{133}Cs 原子基态的两个超精细结构对应的振动周期作为时间标准, 相应的装置叫做 Cs 原子钟。秒 (s) 的定义是

$$1\text{s} = 9\,192\,631\,770T$$

式中, T 是 Cs 原子钟的振动周期, 现在可以做到 Cs 原子钟的相对误差不大于 10^{-13} 。

表 1-2 中列出了一些时间间隔。

表 1-2 一些时间间隔的近似值

测 量 量	持续时间间隔/s	测 量 量	持续时间间隔/s
质子的半衰期	1×10^{39}	人两次心跳之间的时间	8×10^{-1}
宇宙的年龄	5×10^{17}	μ 介子的半衰期	2×10^{-6}
Cheops 金字塔的年龄	1×10^{11}	最短的实验室光脉冲	6×10^{-15}
人类寿命估算值	2×10^9	最不稳定粒子的半衰期	1×10^{-23}
一天的长度	9×10^4	普朗克时间 ^①	1×10^{-43}

① 指大爆炸后物理学定律可应用的最早时间。

1.1.3 长度 (空间)

在经典物理概念里, 空间是均匀各向同性的, 空间与时间无关, 也不依赖于是否有任何物质存在其中或在其中运动。物理学的空间总是通过物体存在而表现出来的, 也是可用物体为量具而测量的空间。

长度 (length) 基准是 18 世纪开始研究的课题。原先企图定义米 (m) 为沿地球的一条子午线从北极到赤道距离的千万分之一。按照这一定义, 不能制成有足够精确度的实际基准。后来, 把米规定为保存在巴黎国际计量局的一根铂铱合金尺的长度, 这根尺叫做米原器。各国都有米原器的复制品, 用来校准其他量具。米原器及其复制品很难不受各种因素的影响, 它们的精确度不能满足科学技术发展的需要。

1960 年第 11 届国际计量会议规定以 ^{86}Kr 的橙红色光的波长 λ_k 为长度基准, 米 (m) 的定义为

$$1\text{m} = 1\,650\,763.73\lambda_k$$

这种基准的精确度可超过 10^{-8} , 而且便于在实验室直接使用。

20 世纪 60 年代激光器问世, 激光具有极好的单色性。随着激光稳频技术的迅速发展, 使激光的频率稳定性可优于 10^{-11} 。到 80 年代初, 用 Cs 原子钟测量激光频率的技术已具备实现的可能性, 1983 年第 17 届国际计量会议规定:

$$c = 299\,792\,458\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$$

米的定义是: 真空中的光波, 在 $(299\,792\,458)^{-1}\text{s}$ 时间间隔内传播的距离。

表 1-3 给出大到宇宙、小到极小物体的长度的近似值。

表 1-3 一些长度的近似值

测 量 量	长度/m	测 量 量	长度/m
地球到银河系的距离	2×10^{26}	珠穆朗玛峰的高度	9×10^3
地球到仙女座星系的距离	2×10^{22}	一页纸的厚度	1×10^{-4}
地球到最近的恒星（半人马座）的距离	4×10^{16}	典型生物病毒的大小	1×10^{-8}
地球到冥王星的距离	6×10^{12}	氢原子的半径	5×10^{-11}
地球的半径	6×10^6	质子的有效半径	1×10^{-15}

1.1.4 单位制与量纲

1. 国际单位制（SI 制） 物理学中每一种基本量都有一个基本单位。曾经采用过不同的单位，例如质量和长度曾以克（g）和厘米（cm）为基本单位，某些地区还流行过以磅和英尺为基本单位，现在规定以千克和米为基本单位。由于选定的基本量不同或规定的基本单位不同，就形成了不同的单位制，还曾出现过几种单位制并存的情况。现已普遍采用国际单位制（见表 1-4），简称 SI 制。

表 1-4 国际单位制规定的 7 个量为基本量

序 号	物 理 量	单 位	符 号
1	长度	米	m
2	质量	千克	kg
3	时间	秒	s
4	物质的量	摩尔	mol
5	电流	安（培）	A
6	热力学温度	开（尔文）	K
7	发光强度	坎（德拉）	cd

本书只用 SI 制。在原子物理中，为了便于描述微观粒子，还常用原子质量单位（u）。原子质量单位是一个¹²C 原子的质量的 1/12。

$$1\text{u} = 1.660\ 565\ 5 \times 10^{-27}\text{kg}$$

2. 量纲 导出量可由基本量导出。例如，速率 v 的定义是物体运动的路程 Δs 与所经历的时间 Δt 之比，即 $v = \frac{\Delta s}{\Delta t}$ ，其中 Δs 的物理性质是长度，量纲记为 L； Δt 的物理性质是时间，量纲记为 T。按照速率的定义式有

$$\text{dim}v = \frac{L}{T} = LT^{-1} \tag{1-1}$$

说明导出量的属性的关系式叫做量纲式。若物理量 Q 在导出关系上属于与长度的 p 次方、质量的 q 次方和时间的 r 次方成正比，则 Q 的量纲式为

$$\text{dim}Q = L^p M^q T^r \tag{1-2}$$

量纲式只给出属性关系，不包含数值关系。

从形式上看，量纲式与定义或定律的表示式相同，只是以属性符号代替相应的物理量的符号，

并且不计比例常数（没有单位的数）。量纲式的意义在于说明导出量与基本量的属性关系，从而给出了导出量的单位。只要用基本量的单位代替基本量的属性，就得到导出量的单位。

1.2 运动的描述

任何实际物体都具有一定的形状和大小，在研究物体运动时，如果物体的形状和大小对物体运动的影响很小或是次要因素，可以忽略物体的形状和大小，把它看成一个具有质量的几何点，称为质点（mass point）。质点是一个理想模型，是实际物体有条件的、合理的抽象映像，具有物体的全部质量，占据物体的原来空间位置。

自然界中的一切物体都处于永不停息的运动之中，运动是绝对的，静止是相对的。当研究某个物体的运动时，必须事先选择一个假定为不动的（静止的）物体作为参考标准（参照物），这个被选择的物体称为参照系（reference frame）。选取不同的参照系来研究同一物体的运动，其结果可能不同。坐在行驶的火车中的乘客，如果以车厢作为参照系，那他是静止的；如果以车厢外的铁轨作为参照系，那他是随车厢一起运动的。所以，描述一个物体运动时，首先要说明它是相对于哪个参照系的。参照系虽然可以任意选取，但是在解决实际问题时，选取合适的参照系可使问题得到简化，易于求解。在描述地面上物体的运动时，通常选择地球或相对地面静止的其他物体作为参照系。

1.2.1 位置矢量和位移

质点的运动是指其空间位置随时间的变化。质点运动学的基本问题是如何描述质点的位置及其变化情况。如图 1-1 所示，把参照系中 O 点选作坐标原点。从 O 到质点 P 的有向直线段 $\vec{OP} = \mathbf{r}(t)$ 可表示 t 时刻此质点 P 的位置。 $\mathbf{r}(t)$ 称为位置矢量（place vector）。位置矢量有两个要素：其一是用它的长度（线段 $\overline{OP}$ ）表示质点到原点的距离，叫做 r 的模；其二是用箭头所指的方向表示质点相对坐标系的方向。

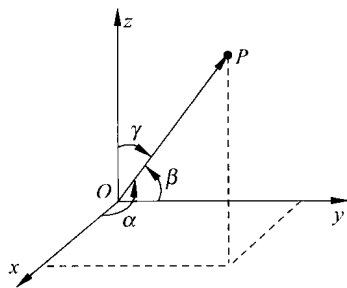


图 1-1 位置矢量

$\mathbf{r}$ 在笛卡儿直角坐标轴上的三个分量分别是 $r_x \mathbf{i}$, $r_y \mathbf{j}$, $r_z \mathbf{k}$ ，则可用矢量式表示

$$\mathbf{r} = r_x \mathbf{i} + r_y \mathbf{j} + r_z \mathbf{k} \quad (1-3)$$

当质点 P 在运动时，它的坐标值是时间 t 的函数，可表示成

$$\begin{cases} r_x = r_x(t) = r \cos \alpha \\ r_y = r_y(t) = r \cos \beta \\ r_z = r_z(t) = r \cos \gamma \end{cases} \quad (1-4)$$

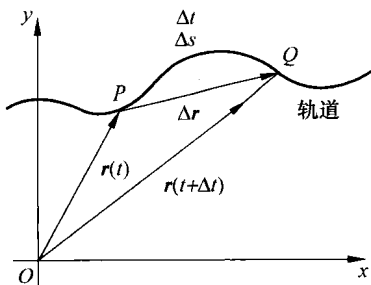


图 1-2 位移

上述两式分别称为质点运动方程的矢量表达式和标量表达式。

质点 t 时刻从 P 点开始，经过 Δt 时刻移动到 Q 点，在空间运动时，描出的曲线称为它的运动轨道或轨迹，如图 1-2 所示。质点从 P 至 Q 的有向直线段 $\vec{PQ} = \Delta \mathbf{r}$ 是质点在这段时间 Δt 内的位移。质点沿轨道移动的弧长 $\widehat{PQ}$ 称为它在 Δt 时间内移动的路程 Δs 。

位移是矢量，路程是标量。质点作直线单向运动时，位移的大小 $|\Delta \mathbf{r}|$ 等于路程 Δs 。位移 $\Delta \mathbf{r}$ 是位置矢量 $\mathbf{r}$ 在时间 Δt 内的增量，可用下式表示其关系：

$$\Delta \mathbf{r} = \mathbf{r}(t + \Delta t) - \mathbf{r}(t) \quad (1-5)$$

例题 1-1 一个停车场正在进行汽车试驾活动, 说也巧, 停车场上正好画着一套坐标系, 汽车的位置坐标对时间的函数由下式给出:

$$x = -0.31t^2 + 7.2t + 28 \quad (1-6)$$

$$y = 0.22t^2 - 9.1t + 30 \quad (1-7)$$

式中, t 的单位为 s, x 和 y 的单位为 m。

(1) 用单位矢量表示汽车在 $t=15\text{s}$ 时刻的位矢, 并求出其大小和角度。

(2) 画出汽车从 $t=0\text{s}$ 至 $t=25\text{s}$ 之间的路径。

解 (1) 因为式 (1-6) 和式 (1-7) 是汽车位矢 $\mathbf{r}$ 的标量分量, 于是可写出

$$\mathbf{r}(t) = x(t)\mathbf{i} + y(t)\mathbf{j} \quad (1-8)$$

当时, 其位矢分量为

$$x = [(-0.31) \times 15^2 + 7.2 \times 15 + 28] \text{ m} \approx 66 \text{ m}$$

$$y = (0.22 \times 15^2 - 9.1 \times 15 + 30) \text{ m} = -57 \text{ m}$$

所以, 在 $t=15\text{s}$ 时, $\mathbf{r}(t) = (66\text{m})\mathbf{i} - (57\text{m})\mathbf{j}$, 如图 1-3 (a) 所示。

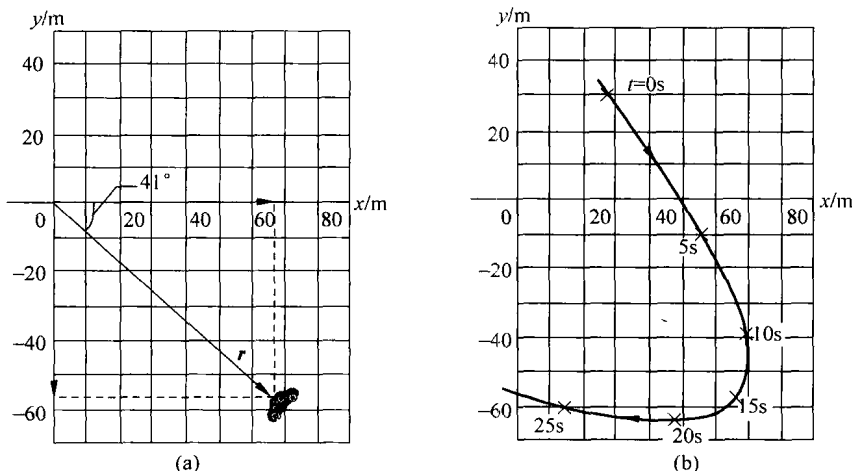


图 1-3 例题 1-1 图

(2) 我们可以选取 $t=0\text{s}$, $t=5\text{s}$, $t=10\text{s}$, $t=15\text{s}$, $t=20\text{s}$, $t=25\text{s}$ 等一些特定时刻, 重复以上步骤, 然后按照其结果画点, 将这些特定的点连接起来就是汽车的路径, 如图 1-3 (b) 所示。

1.2.2 速度

在时间 Δt 内质点发生的位移为 $\Delta \mathbf{r}$ (如图 1-2 所示), 把位移 $\Delta \mathbf{r}$ 和所经历的时间 Δt 的比称为质点在这一段时间的平均速度可表示为

$$\frac{\Delta \mathbf{r}}{\Delta t} \quad (1-9)$$

质点经过 P 点附近无限短时间 Δt 内的平均速度, 称为质点在 P 点的瞬时速度, 简称速度 (velocity), 可表示为

$$\lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{\Delta \mathbf{r}}{\Delta t} = \frac{d\mathbf{r}}{dt} \quad (1-10)$$

式 (1-10) 表明, 速度是矢径 $\mathbf{r}$ 对时间 t 的一阶导数。速度和平均速度都是矢量, 其方向由位移

$\Delta \mathbf{r}$ 的方向决定。当 $\Delta t=0$ 时, Q 点无限接近于 P 点, $\overrightarrow{PQ}$ 与轨道在 P 点的切线一致。这表明, P 点速度 $\mathbf{v}$ 的方向沿着 P 点的轨道切线方向。

例题 1-2 在例题 1-1 中, 以单位矢量表示汽车在 $t=15\text{s}$ 时的速度 $\mathbf{v}$, 并求其大小和角度。

解 根据 $\mathbf{v} = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{\Delta \mathbf{r}}{\Delta t} = \frac{d\mathbf{r}}{dt}$, 在 $t=15\text{s}$ 时, 分别对汽车位矢分量求导, 得速度分量分别为

$$v_x = \frac{dx(t)}{dt} = -0.62t + 7.2 = -2.1(\text{m/s})$$

$$v_y = \frac{dy(t)}{dt} = 0.44t - 9.1 = -2.5(\text{m/s})$$

汽车在 $t=15\text{s}$ 时的速度

$$\mathbf{v} = -(2.1\text{m/s})\mathbf{i} - (2.5\text{m/s})\mathbf{j}$$

如图 1-4 所示。可以看出, 速度 $\mathbf{v}$ 与路径相切。

速度 v 的大小

$$v = \sqrt{v_x^2 + v_y^2} = \sqrt{(-2.1\text{m/s})^2 + (-2.5\text{m/s})^2} = 3.3\text{m/s}$$

速度 $\mathbf{v}$ 的方向

$$\theta = \arctan \frac{v_y}{v_x} = \arctan \left(\frac{-2.5\text{m/s}}{-2.1\text{m/s}} \right) = \arctan 1.19 = -130^\circ$$

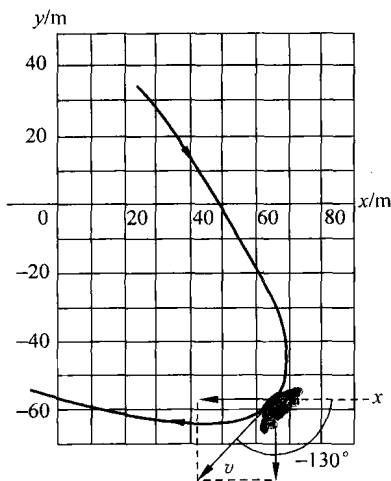


图 1-4 例题 1-2 图

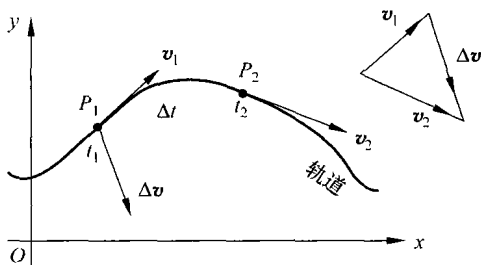


图 1-5 速度的增量

1.2.3 加速度

t_1 时刻质点在 P_1 点, 速度为 $\mathbf{v}_1$, 而在 t_2 时刻它移动到 P_2 点, 速度为 $\mathbf{v}_2$, 如图 1-5 所示, 速度的增量 $\Delta \mathbf{v}$ 为

$$\Delta \mathbf{v} = \mathbf{v}_2 - \mathbf{v}_1 \quad (1-11)$$

按矢量三角形法则或矢量平行四边形法则, 可求得 $\Delta \mathbf{v}$ 的大小与方向。 $\Delta \mathbf{v}$ 与相应的时间 $\Delta t = t_2 - t_1$ 的比值, 称为质点在 Δt 时间内的平均加速度 $\bar{\mathbf{a}}$, 可表示为

$$\bar{\mathbf{a}} = \frac{\Delta \mathbf{v}}{\Delta t} \quad (1-12)$$

质点在任一时刻 t 附近的无限短时间 Δt 内的平均加速度, 称为质点在该时刻的瞬时加速度 $\mathbf{a}$, 简称加速度 (acceleration), 其数学表达式为

$$\mathbf{a} = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{\Delta \mathbf{v}}{\Delta t} = \frac{d\mathbf{v}}{dt} = \frac{d^2 \mathbf{r}}{dt^2} \quad (1-13)$$

上式表明, 加速度等于速度对时间的一阶导数, 又等于矢径对时间的二阶导数。

速度 $\mathbf{v}$ 和加速度 $\mathbf{a}$ 在笛卡儿坐标轴的投影分别为 v_x, v_y, v_z 和 a_x, a_y, a_z , 即有

$$\mathbf{v} = v_x \mathbf{i} + v_y \mathbf{j} + v_z \mathbf{k} \quad (1-14)$$

$$\mathbf{a} = a_x \mathbf{i} + a_y \mathbf{j} + a_z \mathbf{k} \quad (1-15)$$

式 (1-14)、式 (1-15) 与式 (1-3) 一致, 参照图 1-5, 也可写出与式 (1-4) 类似的关系式。矢径、速度、加速度在同一坐标轴的投影 (也称分量) 也满足导数关系:

$$v_x = \frac{dr_x}{dt}, \quad a_x = \frac{dv_x}{dt} = \frac{d^2 r_x}{dt^2} \quad (1-16)$$

$$v_y = \frac{dr_y}{dt}, \quad a_y = \frac{dv_y}{dt} = \frac{d^2 r_y}{dt^2} \quad (1-17)$$

$$v_z = \frac{dr_z}{dt}, \quad a_z = \frac{dv_z}{dt} = \frac{d^2 r_z}{dt^2} \quad (1-18)$$

加速度 $\mathbf{a}$ 是速度 $\mathbf{v}$ 对时间的变化率。如果加速度 $\mathbf{a}$ 的方向和速度 $\mathbf{v}$ 的方向一致, 则物体速度 $\mathbf{v}$ 只发生量值的变化, 其方向不会发生改变, 物体作直线运动。如果加速度 $\mathbf{a}$ 的方向和速度 $\mathbf{v}$ 的方向垂直, 则物体速度 $\mathbf{v}$ 的量值不变, 其方向会发生改变, 物体作圆周运动。如果加速度 $\mathbf{a}$ 的方向和速度 $\mathbf{v}$ 的方向不一致, 则物体速度 $\mathbf{v}$ 的量值和方向都会发生变化, 物体作曲线运动。将作曲线运动物体的加速度 $\mathbf{a}$ 分解为沿速度 $\mathbf{v}$ 方向的切向加速度 $\mathbf{a}_t$ 和垂直速度 $\mathbf{v}$ 方向的法向加速度 $\mathbf{a}_n$ 。切向加速度改变速度的量值, 法向加速度改变速度的方向。

将式 (1-13) 转换成积分形式, 则有

$$\mathbf{v} = \int \mathbf{a} dt, \quad \mathbf{r} = \int \mathbf{v} dt \quad (1-19)$$

若质点在力的作用下作匀加速直线运动, 假设在 $t=0$ 时刻, 质点的位移是 r_0 , 速度是 v_0 , 则在 $t=t$ 时刻, 质点的位移 r 和速度 v 分别为

$$r = \int_0^t a dt^2 = r_0 + \frac{1}{2} a t^2 \quad (1-20)$$

$$v = \int_0^t a dt = v_0 + a t \quad (1-21)$$

位移、速度和加速度是运动学中很重要的三个物理量, 它们的共同特点是瞬时性、相对性和矢量性。所谓瞬时性, 是指这三个物理量一般都随时间而变, 它们的量值都是某一瞬时的量值; 所谓相对性, 是指这三个物理量都是相对于选定的那一个参照系, 对不同参照系可有不同的量值; 所谓矢量性, 是指这三个物理量都是矢量, 必须同时指明它们的大小和方向, 必须按照矢量的法则进行计算。

在国际单位制中, 长度的单位是米 (m), 时间的单位是秒 (s), 速度的单位是米每秒 ($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$), 加速度的单位是米每秒平方 ($\text{m} \cdot \text{s}^{-2}$)。

1.3 力学基本定律

1.3.1 牛顿运动定律

研究物体运动与物体间相互作用的联系与规律是力学的动力学部分, 牛顿总结了前人的成就,