

上册



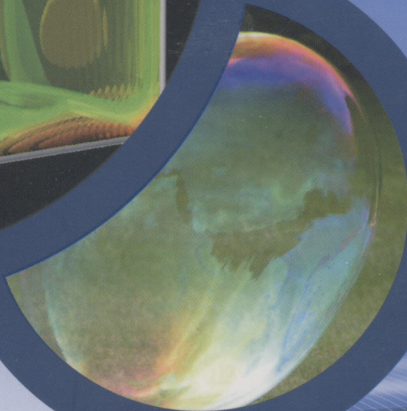
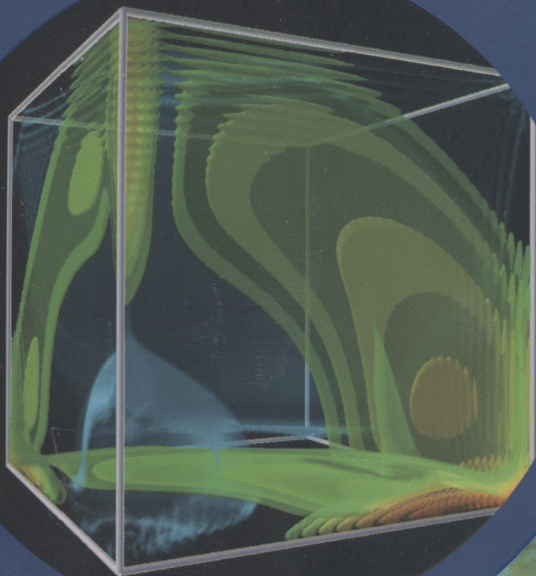
普通高等教育“十一五”国家级规划教材

大学物理学

吴王杰 主编
王晓 蒋敏 副主编



高等教育出版社
Higher Education Press



普通高等教育“十一五”国家级规划教材

大学物理学

上册

吴王杰

主编

王

晓

蒋

敏

副主编

04-43
W882

高等教育出版社

内容提要

本书是根据教育部物理基础课程教学指导分委员会制定的《理工科类大学物理课程教学基本要求》(2008)编写而成的,全书内容由浅入深,突出基本现象、基本概念、基本原理的阐述;明晰概念引入、概念形成、概念应用、理论阐述与应用的知识结构;注重科学素养。本书在教学实践基础上,合理安排教学内容和习题,力求易教易学,以适应当前高等教育快速发展的形势和军队院校培训任务整体转型的需要。

全书分上、下两册,上册包括力学、热学和电磁学,下册包括振动与波动、光学和近代物理基础。本书可作为高等学校非物理类理工科类的 90~120 学时大学物理课程教材,也可供广大物理教师 and 各类学习大学物理的读者参考。

图书在版编目(CIP)数据

大学物理学.上册/吴王杰主编.—北京:高等教育出版社,2009.12

ISBN 978-7-04-027986-3

I. 大… II. 吴… III. 物理学—高等学校—教材 IV. O4

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2009)第197258号

策划编辑 郭亚嫒 责任编辑 张红云 封面设计 张楠
责任绘图 宗小梅 版式设计 马敬茹 责任校对 王雨
责任印制 陈伟光

出版发行 高等教育出版社
社址 北京市西城区德外大街4号
邮政编码 100120
总机 010-58581000

经销 蓝色畅想图书发行有限公司
印刷 北京印刷集团有限责任公司印刷二厂

开本 787×960 1/16
印张 24.5
字数 450 000

购书热线 010-58581118
咨询电话 400-810-0598
网址 <http://www.hep.edu.cn>
<http://www.hep.com.cn>
网上订购 <http://www.landaco.com>
<http://www.landaco.com.cn>
畅想教育 <http://www.widedu.com>

版次 2009年12月第1版
印次 2009年12月第1次印刷
定价 26.40元

本书如有缺页、倒页、脱页等质量问题,请到所购图书销售部门联系调换。

版权所有 侵权必究

物料号 27986-00

前言

物理学作为所有自然科学中发展最早、最成熟、理论与实验并重的一门定量化的学科,其成就不仅发展了自己,而且成为新技术、新学科、新思维的原动力。物理学始终站在科学的前列,推动技术的进步和创新,极大地影响着经济和社会的进步。以物理学基础知识为内容的大学物理课程,它所包含的经典物理学、近代物理学和物理学在科学技术上应用的初步知识等都是一个高素质人才所必备的,是学习掌握其它自然科学和工程技术的基础。除此之外,物理学还有一个越来越重要的作用,这就是帮助学生建立科学的世界观、宇宙观,进行科学能力和科学方法论的训练。

这部教材依据物理基础课程教学指导分委员会制定的《理工科类大学物理课程教学基本要求》(2008)(以下简称基本要求),包含了基本要求所规定的全部基本内容 A 和大部分扩展内容 B,教材保持传统的内容体系,包括力学、热学、电磁学、振动与波动、波动光学和近代物理学六篇共 25 章,并配套有内容丰富全面的数字化教学资源。教材广泛吸收了当前大学物理教学改革成果和经验,力图将大学物理的教育思想、教育目标、课程体系、教学内容和教学手段等方面紧密融合在一起,满足当前一般院校大学物理课程的实际教学需要。

本书的主要特色有:

(1) 强化物理学的学科基础,保持物理学知识系统结构的完整性。教材突出基本现象、基本概念、基本原理的阐述;明晰概念引入、概念形成、概念应用、理论阐述与应用的知识结构。教材的内容深度以基本要求规定的 A 类核心内容为基准,内容广度以基本要求规定的 B 类内容为依据。教材对 A 类核心内容进行详尽的阐述,对 B 类内容作相对简单的介绍,而将更多的 B 类内容纳入到所配套的数字化教学资源中的栏目“知识与拓展”里去。另一方面,为适应教学内容现代化的要求,在经典物理部分采用渗透、穿插近现代内容,介绍高新技术(军事技术)中的物理原理等方式,以增强现代气息;在量子物理部分较完整地讲述了单个微观粒子的运动,并拓展到大量原子中电子的运动,强调了处理微观粒子的量子理论体系。

教材每章后都有内容提要以突出基本要求。围绕教学要求精选习题,并分为选择、填空、计算三类,习题数量和难度适中,便于学生和教师对基本知识的自测和检测,较难的习题给出提示。

(2) 运用教学设计,促进能力和素质培养。教材尝试以物理模型、案例分

析、知识拓展、物理学史四大主线贯穿始终,并围绕这四个方面来进行教学设计。强调了物理模型在物理学理论、科学研究方法以及实际问题中的地位和作用;通过与教学内容紧密结合的例题和案例(案例见随书所配套的数字化教学资源中的栏目“思维、能力与方法训练”),展示分析综合、演绎归纳、科学抽象、类比联想等科学思维方法;在随书所配套的数字化教学资源中还提供大量的与教学内容相关的相当于大学物理水平的知识与拓展阅读材料,通过文献阅读来独立获取知识,扩展知识面;结合重要物理概念穿插介绍著名物理学家和物理学史,介绍在典型物理理论的建立过程中所体现的科学精神。

另外,为方便开展双语教学,教材中还对物理名词给出了英文注释。

(3) 以教材为核心开发教学资源,精心构筑立体化、网络化的教学系统。互联网时代现代信息技术在基础物理教学中已经得到广泛应用,为在基础物理教学中更好地发挥现代信息技术的优势,除了文字内容外,我们还建设了《大学物理网络教材》(高等教育出版社,2001)和网络课程(军队院校精品网络课程库,2003)等网络教学支撑环境。特别地,我们制作了与本教材相配套的数字化教学资源。在这套内容丰富全面的资源中,除了电子教案和习题解答外,我们还精心编写了“思维、能力与方法训练”、“知识与拓展”、“演示程序和动画”等栏目,提供了物理学史、诺贝尔物理学奖、多媒体课件等资料。所有这些内容都在教材每章后面以目录的形式列出,并在书中适当的地方加以注释和引用,从而使这些教学参考资料与教材紧密结合,较好地解决了教学参考资料游离于教学内容之外的问题,提高了教学针对性和使用效率。特别要介绍的是“演示程序和动画”栏目,它包含了约240个演示程序和动画,其中约有150个可调参数的Java Applet演示小程序,具有很强的智能性和交互性,形象直观,学生可以自己设定程序中的物理参数,体现了物理学的实验观察和定量计算的研究风格。这是我们在1999年就开始在国内率先开发的数字化大学物理教学资源,这些内容随《大学物理网络教材》(高等教育出版社,2001)出版后,在国内得到了广泛的赞誉和应用。

这部《大学物理学》教材是编者在解放军理工大学长期从事大学物理课程教学工作的基础上编写而成的,反映了十几年来解放军理工大学大学物理课程建设的集体成果。它最早的形式是军队“九五”规划重点教材《大学物理(网络版)》(吴王杰 陆起图主编),从2000年最初的讲义开始经过3次修订形成了现在的版本,已在解放军理工大学作为重点课程建设的主教材试用至今。教材上册由蒋敏(第一章至第五章)、吴王杰(第六章至第八章)、王晓(第九章至第十四章)修订和编写,下册由吴王杰修订和编写,全书由吴王杰统稿。解放军理工大学张申如教授、韩仙华教授、武文远教授、卞清教授对教材的修订工作提出了大量有益的具体建议,解放军理工大学大学物理课程主讲教师组的全体同志对教

材进行了大量细致的修改。另外,东南大学解希顺教授、徐州师范大学吕华平教授、北京建筑工程学院黄伟教授、南京炮兵学院的陈将伟教授和江苏警官学院的张长珍副教授等在百忙中审阅了教材全稿,并对编写提出了许多具体的意见。此外,我们还吸取了近年来大学物理教学改革的最研究成果,参考了近年来出版的部分优秀大学物理教材,我们对此一并表示诚挚的谢意!

解放军理工大学对教材的编写工作给予了大力支持。教材的编写和出版自始至终得到了高等教育出版社的指导和帮助。

需要特别指出的是,从我们 1999 年开始编写军队“九五”规划重点教材《大学物理(网络版)》时,清华大学陈泽民教授就始终对我们的编写和修订工作给予了大力支持和指导,他在百忙中为教材主审,认真、细致地审阅了全稿,提出了很多中肯、有益的修改意见,为增强教材的思想性、科学性以及教学内容和多媒体课件的设计提出了很多宝贵建议。编者在此向陈泽民教授表示衷心的感谢。

由于编者水平有限,缺点、错误在所难免,恳请使用本教材的师生不吝提出宝贵的意见。

第二章 牛顿定律	27
2.1 物理学中的力	27
2.2 牛顿定律	31
2.3 国际单位制和量纲	34
2.4 应用牛顿定律解题	36
2.5 非惯性系和惯性力	40
内容提要	43
习题	45
第三章 动量与角动量	49
3.1 冲量与动量定理	49
3.2 质点系的动量定理	52
3.3 动量守恒定律	56
3.4 质点的角动量	59
内容提要	64
习题	65
第四章 功和能	69
4.1 功 动能定理	69
4.2 保守力和势能	72
4.3 功能原理	76
4.4 机械能守恒定律	79
4.5 碰撞	82

编者

2009 年 8 月

目 录

目 录	
第一篇 力 学	
第一章 质点运动学	3
1.1 质点的位矢、速度和加速度	3
1.2 运动叠加原理 抛体运动	10
1.3 圆周运动	13
1.4 相对运动	17
内容提要	21
习题	23
第二章 牛顿定律	27
2.1 物理学中的力	27
2.2 牛顿定律	31
2.3 国际单位制和量纲	34
2.4 应用牛顿定律解题	36
2.5 非惯性系和惯性力	40
内容提要	43
习题	45
第三章 动量与角动量	49
3.1 冲量与动量定理	49
3.2 质点系的动量定理	52
3.3 动量守恒定律	56
3.4 质点的角动量	59
内容提要	64
习题	65
第四章 功和能	69
4.1 功 动能定理	69
4.2 保守力和势能	72
4.3 功能原理	76
4.4 机械能守恒定律	79
4.5 碰撞	82

内容提要	85
习题	86
第五章 刚体的定轴转动	90
5.1 刚体的定轴转动	90
5.2 刚体的定轴转动定律	93
5.3 刚体绕定轴转动的动能定理	99
5.4 刚体的角动量定理和角动量守恒定律	101
5.5 进动	105
内容提要	108
习题	109
第二篇 热 学	
第六章 气体动理论	117
6.1 热力学平衡态和温度	117
6.2 分子力和理想气体模型	119
6.3 理想气体的压强和温度	122
6.4 能量均分定理	125
6.5 麦克斯韦速率分布律	128
6.6 气体分子的平均自由程	134
*6.7 气体的输运现象	136
内容提要	138
习题	140
第七章 热力学第一定律	144
7.1 热力学过程	144
7.2 热力学第一定律	146
7.3 理想气体的典型准静态过程	150
7.4 循环过程 卡诺循环	158
内容提要	164
习题	165
第八章 热力学第二定律	170
8.1 自然过程的方向性	170
8.2 热力学第二定律	172
8.3 热力学第二定律的统计意义	175
*8.4 克劳修斯熵公式	178
*8.5 熵的计算	181

212	内容提要	184
312	习题	185
350	第三篇 电 磁 学	
352		
352	第九章 电荷与静电场	191
352	9.1 电荷和库仑定律	191
352	9.2 电场和电场强度	194
351	9.3 高斯定理	201
352	9.4 静电场的环路定理和电势	210
345	9.5 电场强度和电势梯度的关系	216
345	9.6 带电粒子在静电场中的运动	220
320	内容提要	221
322	习题	222
322	第十章 静电场中的导体和电介质	228
301	10.1 导体的静电平衡	228
301	10.2 空腔导体与静电屏蔽	232
302	10.3 静电场中的电介质	235
302	10.4 电位移矢量	239
302	10.5 电容和电容器	243
302	10.6 静电场的能量	248
311	内容提要	253
312	习题	254
312	第十一章 稳恒电流和稳恒磁场	259
312	11.1 电流和电流密度	259
312	11.2 稳恒电场 电源 电动势	265
312	11.3 磁感应强度	268
312	11.4 毕奥-萨伐尔定律	272
312	11.5 磁场的高斯定理	281
312	11.6 安培环路定理	282
312	11.7 带电粒子在磁场中的运动	288
312	11.8 磁场对载流导线的作用	295
312	内容提要	303
312	习题	305
312	第十二章 物质的磁性	311
312	12.1 顺磁性和抗磁性	311

12.2	磁化强度和磁化电流	315
12.3	磁介质中的磁场 磁场强度	317
12.4	铁磁质	320
	内容提要	323
	习题	324
第十三章	电磁感应	326
13.1	电磁感应定律	326
13.2	动生电动势	331
13.3	感生电动势和感生电场	336
13.4	自感和互感	342
13.5	电感和电容电路的暂态过程	347
13.6	磁场的能量	350
	内容提要	354
	习题	355
第十四章	电磁场	361
14.1	位移电流	361
14.2	麦克斯韦方程组	366
	内容提要	368
	习题	369
	习题参考答案	371
	参考文献	378
第七章	热力学第一定律	144
7.1	热力学过程	144
7.2	热力学第一定律	146
7.3	理想气体的实验摩尔热容	150
7.4	循环过程 卡诺循环	158
	内容提要	164
	习题	165
第八章	热力学第二定律	170
8.1	自然过程的方向性	170
8.2	热力学第二定律	172
8.3	热力学第二定律的统计意义	175
8.4	克劳修斯不等式	181
8.5	熵的计算	181

第一篇

力学

12.2 磁化强度和磁化电流	318
12.3 磁介质中的磁场 磁场强度	317
12.4 铁磁质	320
内容提要	323
习题	324
第十三章 电磁感应	326
13.1 电磁感应定律	326
13.2 动生电动势	331
13.3 感生电动势和感生电场	336
13.4 自感和互感	342
13.5 电感耦合电路的能量	347
13.6 磁场的能量	350
内容提要	354
习题	355
第十四章 电磁场	361
14.1 位移电流	361
14.2 麦克斯韦方程组	366
内容提要	368
习题	369
习题参考答案	371
参考文献	378
附录一 数学公式	380
附录二 物理常数	385
附录三 国际单位制	388
附录四 常用物理量的换算	390
附录五 常用物理量的单位	391
附录六 常用物理量的符号	392
附录七 常用物理量的量纲	393
附录八 常用物理量的量级	394
附录九 常用物理量的量级	395
附录十 常用物理量的量级	396
附录十一 常用物理量的量级	397
附录十二 常用物理量的量级	398
附录十三 常用物理量的量级	399
附录十四 常用物理量的量级	400
附录十五 常用物理量的量级	401
附录十六 常用物理量的量级	402
附录十七 常用物理量的量级	403
附录十八 常用物理量的量级	404
附录十九 常用物理量的量级	405
附录二十 常用物理量的量级	406
附录二十一 常用物理量的量级	407
附录二十二 常用物理量的量级	408
附录二十三 常用物理量的量级	409
附录二十四 常用物理量的量级	410
附录二十五 常用物理量的量级	411
附录二十六 常用物理量的量级	412
附录二十七 常用物理量的量级	413
附录二十八 常用物理量的量级	414
附录二十九 常用物理量的量级	415
附录三十 常用物理量的量级	416
附录三十一 常用物理量的量级	417
附录三十二 常用物理量的量级	418
附录三十三 常用物理量的量级	419
附录三十四 常用物理量的量级	420
附录三十五 常用物理量的量级	421
附录三十六 常用物理量的量级	422
附录三十七 常用物理量的量级	423
附录三十八 常用物理量的量级	424
附录三十九 常用物理量的量级	425
附录四十 常用物理量的量级	426
附录四十一 常用物理量的量级	427
附录四十二 常用物理量的量级	428
附录四十三 常用物理量的量级	429
附录四十四 常用物理量的量级	430
附录四十五 常用物理量的量级	431
附录四十六 常用物理量的量级	432
附录四十七 常用物理量的量级	433
附录四十八 常用物理量的量级	434
附录四十九 常用物理量的量级	435
附录五十 常用物理量的量级	436
附录五十一 常用物理量的量级	437
附录五十二 常用物理量的量级	438
附录五十三 常用物理量的量级	439
附录五十四 常用物理量的量级	440
附录五十五 常用物理量的量级	441
附录五十六 常用物理量的量级	442
附录五十七 常用物理量的量级	443
附录五十八 常用物理量的量级	444
附录五十九 常用物理量的量级	445
附录六十 常用物理量的量级	446
附录六十一 常用物理量的量级	447
附录六十二 常用物理量的量级	448
附录六十三 常用物理量的量级	449
附录六十四 常用物理量的量级	450
附录六十五 常用物理量的量级	451
附录六十六 常用物理量的量级	452
附录六十七 常用物理量的量级	453
附录六十八 常用物理量的量级	454
附录六十九 常用物理量的量级	455
附录七十 常用物理量的量级	456
附录七十一 常用物理量的量级	457
附录七十二 常用物理量的量级	458
附录七十三 常用物理量的量级	459
附录七十四 常用物理量的量级	460
附录七十五 常用物理量的量级	461
附录七十六 常用物理量的量级	462
附录七十七 常用物理量的量级	463
附录七十八 常用物理量的量级	464
附录七十九 常用物理量的量级	465
附录八十 常用物理量的量级	466
附录八十一 常用物理量的量级	467
附录八十二 常用物理量的量级	468
附录八十三 常用物理量的量级	469
附录八十四 常用物理量的量级	470
附录八十五 常用物理量的量级	471
附录八十六 常用物理量的量级	472
附录八十七 常用物理量的量级	473
附录八十八 常用物理量的量级	474
附录八十九 常用物理量的量级	475
附录九十 常用物理量的量级	476
附录九十一 常用物理量的量级	477
附录九十二 常用物理量的量级	478
附录九十三 常用物理量的量级	479
附录九十四 常用物理量的量级	480
附录九十五 常用物理量的量级	481
附录九十六 常用物理量的量级	482
附录九十七 常用物理量的量级	483
附录九十八 常用物理量的量级	484
附录九十九 常用物理量的量级	485
附录一百 常用物理量的量级	486

第一章 质点运动学

物质世界是在不断运动着的,物质的运动形态多种多样、千变万化.其中最简单、最基本的运动形态是物体之间或物体各部分之间相对位置的变化,这称为机械运动(mechanical motion).各种机械及机器的运转、宇宙飞船的航行、流体的流动等都是机械运动.力学(mechanics)就是研究机械运动的基本规律及其应用的学科,它是研究复杂运动的基础.

在力学中,描述物体的位置如何随时间变化的内容称为运动学(kinematics).本章主要利用矢量(vector)和微积分来研究质点的运动学问题,并介绍运动的相对性及其描述.

1.1 质点的位矢、速度和加速度

1.1.1 质点、参考系和坐标系

为了突出问题的本质,对所研究的对象,常要抽象为一定的理想化物理模型.在力学中有质点模型、刚体模型、谐振子模型等.

在研究物体的运动问题时,物体的形状和大小是各式各样、千差万别的.有些情况下,物体的形状和大小是重要的,但是我们常会看到一种比较简单的运动,物体在运动中,其上各点都作相同的运动,因而任一点的运动都能代表整体的运动,物体的形状大小可以不必考虑.在这种情况下,可以将物体抽象为一个具有同等质量的点,称为质点(material point).抽象的目的是简化问题和便于作比较精确的描述(请参阅光盘中本章“思维、能力与方法训练”).

在一般情况下,物体的运动是非常复杂的,例如考虑地球的运动,就包括地球绕太阳的公转,绕自转轴的自转,潮汐所表现的变形运动,以及动植物的运动等.由于地球与太阳的距离等于地球半径的 2.34×10^4 倍,所以当考虑地球绕太阳公转时,地球上各点相对于太阳的运动可以看作是相同的,因此研究地球的公转时,虽然它是一个十分巨大的星体,仍然可被简化为一个质点.但是,在研究地球的自转时,就不能再把它当作质点处理了.

在另一些问题中,例如研究一个齿轮的转动,它的形状大小起着主要作用,

不能忽略. 在这类情况下, 可以将物体看作质点的集合体处理. 因此研究质点的运动, 可为进一步研究物体的复杂运动打下基础.

在物理学诸多领域中, 许多基本理论常以点模型为基础而推演发展起来, 这与数学理论中的分析数学微积分方法是相似的. 两者均源于文艺复兴时期主导于西方社会的世界观和方法论——注重个体, 崇尚个性. 正是在这一时期(17世纪), 产生了经典牛顿力学, 体现了注重分析的思想方法——分解整体为众多个体, 从解析个体以及个体之间的相互作用入手, 从而把握整体.

在月球上的某个人会认为他看到了地球在运动, 但对于地球上的人来说是月球在运动, 在这个意义上说, 一切运动都是相对的. 为了描述运动首先需要确定参考系(reference frame), 即描述运动的场所. 选取合适的参考系, 可以方便地研究物体的运动. 例如研究宇宙飞船的运动, 当运载火箭刚发射时, 一般选地面作为参考系; 当飞船绕地球运行时, 则选取地球为参考系; 而当飞船飞离地球, 绕太阳运行时, 则应选太阳为参考系. 在力学中常用到地面参考系和实验室参考系.

最后, 要定量地描述质点的位置和位置随时间的变化, 需要在参考系上建立适当的坐标系(coordinate frame). 常用的有直角坐标系和自然坐标系等.

1.1.2 质点的位矢

如图 1.1, 设质点在时刻 t 处于位置 P , 我们从坐标原点 O 向此点引一条有向线段 OP , 并记作矢量 $\boldsymbol{r}$. $\boldsymbol{r}$ 的方向确定了 P 点相对于坐标轴的方位, r 的大小(模)就是 P 点到原点的距离. 方位和距离都确定了, P 点的位置也就完全确定了. 用来确定质点位置的这一矢量 $\boldsymbol{r}$ 叫作质点的位置矢量(position vector), 简称位矢. 质点运动时, 位矢 $\boldsymbol{r}$ 是随时间改变的, 可以用函数

$$\boldsymbol{r} = \boldsymbol{r}(t) \quad (1.1.1)$$

来表示. 上式就是质点运动方程的矢量表示式, 常称为运动学方程(kinematical equation).

在直角坐标系中, 质点的位置 P 也可以用它在 x 、 y 、 z 轴的坐标 x 、 y 、 z 来表示, 位矢 $\boldsymbol{r}$ 可以写为

$$\boldsymbol{r} = x(t)\boldsymbol{i} + y(t)\boldsymbol{j} + z(t)\boldsymbol{k} \quad (1.1.2)$$

其大小为

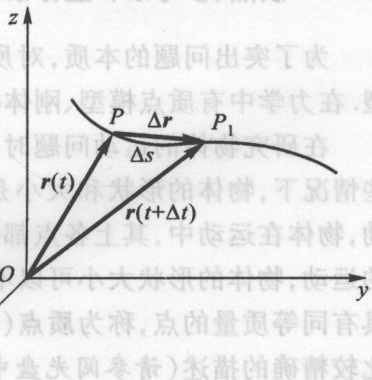


图 1.1 质点的位矢和位移

$$|\mathbf{r}| = \sqrt{x^2 + y^2 + z^2} \quad (1.1.3)$$

位矢 $\mathbf{r}$ 的方向余弦为

$$\cos \alpha = \frac{x}{|\mathbf{r}|}, \quad \cos \beta = \frac{y}{|\mathbf{r}|}, \quad \cos \gamma = \frac{z}{|\mathbf{r}|} \quad (1.1.4)$$

式中 α, β, γ 分别是位矢 $\mathbf{r}$ 与 x 轴、 y 轴、 z 轴之间的夹角. 根据式 (1.1.3), 可得

$$\cos^2 \alpha + \cos^2 \beta + \cos^2 \gamma = 1 \quad (1.1.5)$$

说明式 (1.1.4) 的三个等式中只有两个是独立的, 所以确定一个质点空间位置的参量 (自由度) 是 3 个, 可以是三个直角坐标 (x, y, z) , 也可以是位矢的长度 r 和三个方位角 (α, β, γ) 中的任意两个.

在直角坐标系中, 质点的运动学方程式 (1.1.2) 也可以写成坐标分量的形式:

$$\begin{cases} x = x(t) \\ y = y(t) \\ z = z(t) \end{cases} \quad (1.1.6)$$

从上式中消去参数 t 便得到质点运动的轨迹方程. 所以式 (1.1.6) 也是运动轨迹的参数方程. 质点运动学的重要任务之一就是找出质点运动所遵循的运动学方程.

1.1.3 位移和速度

如图 1.1, 设质点在 t 时刻处于位置 P , 在 $t + \Delta t$ 时刻运动到位置 P_1 , P 和 P_1 的位矢分别为 $\mathbf{r}(t)$ 和 $\mathbf{r}(t + \Delta t)$, 则质点在 t 到 $t + \Delta t$ 时间间隔内位矢的增量为

$$\Delta \mathbf{r} = \mathbf{r}(t + \Delta t) - \mathbf{r}(t) \quad (1.1.7)$$

$\Delta \mathbf{r}$ 称为质点在 t 到 $t + \Delta t$ 时间内的位移矢量, 简称位移 (displacement). 在直角坐标系, 位移可以表示为

$$\Delta \mathbf{r} = \Delta x \mathbf{i} + \Delta y \mathbf{j} + \Delta z \mathbf{k} \quad (1.1.8)$$

其中 $\Delta x, \Delta y, \Delta z$ 分别为质点在 t 到 $t + \Delta t$ 时间间隔内各坐标分量的增量.

需要指出的是, 质点运动的实际路径是图 1.1 中的曲线段 Δs , 其长度即路径的长度也叫作路程 (path), 一般情况下路程并不等于位移的大小, 即 $\Delta s \neq |\Delta \mathbf{r}|$. 例如, 当质点经一闭合路径回到起始位置时, 其位移为 0, 而路程则不为 0. 只有当时间间隔 Δt 取无穷小的极限情况下, 位移的大小 $|\mathrm{d}\mathbf{r}|$ 才等于路程 $\mathrm{d}s$.

一般情况下, 仅知道质点在某时刻的位矢还不能完全确定质点的运动状态, 为确定质点的运动状态, 还需要知道质点运动的方向和快慢. 描述质点运动的方向和快慢的物理量是速度. 在一段时间内, 质点的位移 $\Delta \mathbf{r}$ 和发生这段位移所经历的时间 Δt 之比称为质点在这一段时间内的平均速度, 即

$$\bar{v} = \frac{\Delta r}{\Delta t} \quad (1.1.9)$$

当 Δt 趋于零时, 上式的极限就是位矢对时间的变化率, 称为质点在时刻 t 的瞬时速度, 简称速度 (velocity), 即

$$\mathbf{v} = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{\Delta \mathbf{r}}{\Delta t} = \frac{d\mathbf{r}}{dt} \quad (1.1.10)$$

由式 (1.1.9) 可知, 位移 $\Delta \mathbf{r}$ 是矢量, 所以平均速度是矢量, 其方向与位移 $\Delta \mathbf{r}$ 的方向相同. 而速度 $\mathbf{v}$ 的方向是位移 $\Delta \mathbf{r}$ 在 $\Delta t \rightarrow 0$ 时的极限方向, 如图 1.1 所示, 当 $\Delta t \rightarrow 0$ 时, 位移 $\Delta \mathbf{r}$ 趋向于和轨迹相切, 即沿点 P 的切线方向.

速度的大小叫速率 (speed), 以 v 表示:

$$v = |\mathbf{v}| = \left| \frac{d\mathbf{r}}{dt} \right| = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{|\Delta \mathbf{r}|}{\Delta t} = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{\Delta s}{\Delta t} = \frac{ds}{dt} \quad (1.1.11)$$

表明速率 v 又等于质点所走过的路程对时间的变化率.

在直角坐标系中, 将式 (1.1.2) 代入式 (1.1.10), 则速度 $\mathbf{v}$ 可用三个坐标轴方向的分速度的矢量合成式表示:

$$\mathbf{v} = \frac{dx}{dt}\mathbf{i} + \frac{dy}{dt}\mathbf{j} + \frac{dz}{dt}\mathbf{k} = v_x\mathbf{i} + v_y\mathbf{j} + v_z\mathbf{k} \quad (1.1.12)$$

由上式, 速率也可表示为

$$v = \sqrt{v_x^2 + v_y^2 + v_z^2} \quad (1.1.13)$$

由上式可知, 质点在作机械运动时的运动状态, 即在任一时刻的位置及运动的快慢、方向, 可由该时刻质点的位矢 $\mathbf{r}$ 和速度 $\mathbf{v}$ 来描述. $\mathbf{r}$ 、 $\mathbf{v}$ 称为质点运动的状态参量. 只有当质点的位矢和速度同时被确定时, 质点的运动状态才被完全确定.

1.1.4 加速度

下面进一步介绍描述质点运动速度变化的物理量——加速度. 设质点在 t 与 $t+\Delta t$ 时刻的速度分别为 $\mathbf{v}(t)$ 和 $\mathbf{v}(t+\Delta t)$, 则这段时间内的平均加速度为

$$\bar{\mathbf{a}} = \frac{\Delta \mathbf{v}}{\Delta t} \quad (1.1.14)$$

当 Δt 趋于零时, 上式的极限就是速度对时间的变化率, 称为质点在 t 时刻的瞬时加速度, 简称加速度 (acceleration), 即

$$\mathbf{a} = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{\Delta \mathbf{v}}{\Delta t} = \frac{d\mathbf{v}}{dt} = \frac{d^2\mathbf{r}}{dt^2} \quad (1.1.15)$$

在直角坐标系中, 加速度可用三个坐标轴方向的分加速度的矢量合成式表示为

$$\begin{aligned} \mathbf{a} &= \frac{dv_x}{dt}\mathbf{i} + \frac{dv_y}{dt}\mathbf{j} + \frac{dv_z}{dt}\mathbf{k} = \frac{d^2x}{dt^2}\mathbf{i} + \frac{d^2y}{dt^2}\mathbf{j} + \frac{d^2z}{dt^2}\mathbf{k} \\ &= a_x\mathbf{i} + a_y\mathbf{j} + a_z\mathbf{k} \end{aligned} \quad (1.1.16)$$

加速度的大小为

$$a = \sqrt{a_x^2 + a_y^2 + a_z^2} \quad (1.1.17)$$

加速度 $\mathbf{a}$ 是一个矢量, 它的方向是 $\Delta t \rightarrow 0$ 时 $\Delta \mathbf{v}$ 的极限方向. 注意到描述质点运动状态的速度 $\mathbf{v}$ 是矢量, 所以加速度 $\mathbf{a}$ 不仅表示质点速度大小的变化, 也表示速度方向的变化. 一般情况下, 质点任时刻的加速度方向并不一定沿着该时刻质点速度的方向 (轨迹的切线方向).

根据以上所述, 质点的速度 $\mathbf{v}$ 等于位置矢量 $\mathbf{r}$ 对时间的一阶导数, 加速度 $\mathbf{a}$ 等于位置矢量 $\mathbf{r}$ 对时间的二阶导数, 原则上我们可以接着定义位置矢量对时间的更高阶导数. 但是实际上在牛顿力学中, 只有质点的速度和加速度是有对应的物理意义的.

研究物体的运动问题时, 我们常常会碰到这样两类问题. 一类是已知物体的运动学方程, 要求物体的速度和加速度, 这类问题可以应用公式 (1.1.10) 和 (1.1.15), 通过运动学方程对时间求导数而得到, 此类问题常称为运动学第一类问题. 另一类问题是已知质点的加速度或速度和初始条件 ($\mathbf{r}_0$ 和 $\mathbf{v}_0$), 求物体的运动学方程或运动轨迹, 这类问题可以通过对公式 (1.1.10) 和 (1.1.15) 对时间积分而得到, 此类问题常称为运动学第二类问题.

例题 1.1 已知一质点的运动学方程为 $\mathbf{r} = A(e^{\alpha t}\mathbf{i} + e^{-\alpha t}\mathbf{j})$, 式中 A 和 α 为正的常数. 试求该质点的速度和加速度, 并画出它的轨迹.

解 本题是运动学第一类问题. 根据式 (1.1.10), 质点的速度为

$$\mathbf{v} = \frac{d\mathbf{r}}{dt} = A(\alpha e^{\alpha t}\mathbf{i} - \alpha e^{-\alpha t}\mathbf{j})$$

或

$$v_x = A\alpha e^{\alpha t}, \quad v_y = -A\alpha e^{-\alpha t}$$

所以, v 的大小为

$$v = \sqrt{(v_x^2 + v_y^2)} = A\alpha \sqrt{e^{2\alpha t} + e^{-2\alpha t}}$$

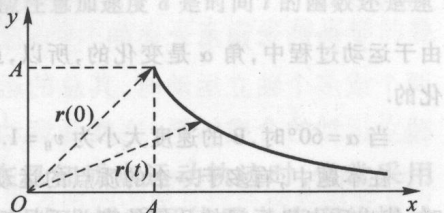
v 的方向与 x 轴的夹角 φ 为

$$\tan \varphi = \frac{v_y}{v_x} = -e^{-2\alpha t} \quad \text{或} \quad \varphi = -\arctan e^{-2\alpha t}$$

根据式 (1.1.15), 质点的加速度 $\mathbf{a}$ 为

$$\mathbf{a} = \frac{d\mathbf{v}}{dt} = A(\alpha^2 e^{\alpha t}\mathbf{i} + \alpha^2 e^{-\alpha t}\mathbf{j})$$

其大小为



例题 1.1 图