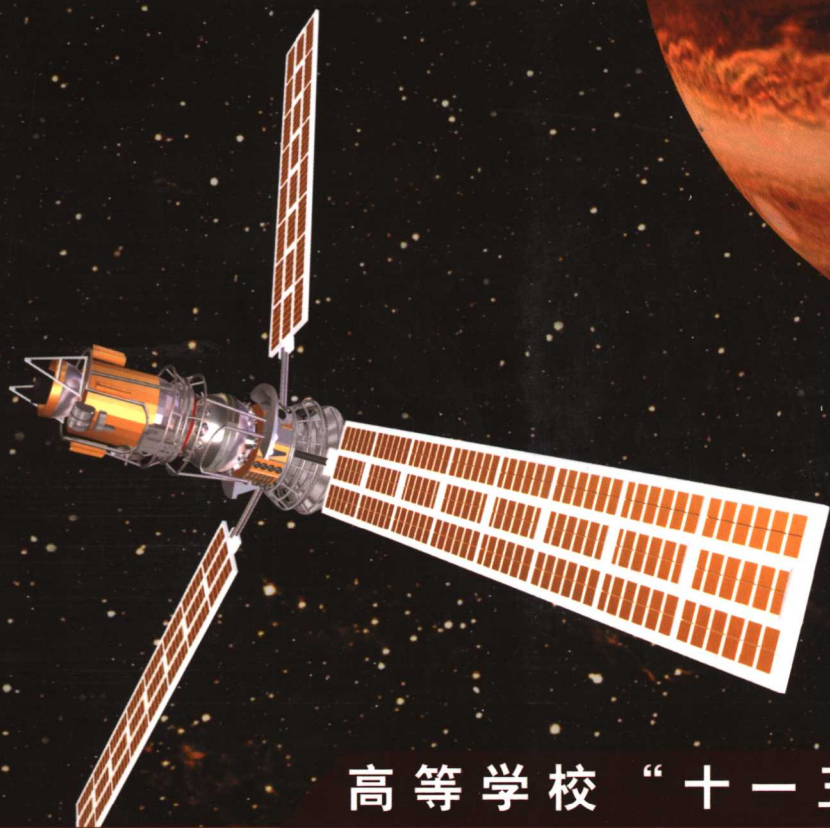




高等学校“十一五”规划教材

大学物理学

第二版
上册

黄祝明 吴锋 主编



化学工业出版社

高等学校“十一五”规划教材

大学物理学

第二版
上册

黄祝明 吴锋 主编



化学工业出版社

北京

本书在 2002 年出版的《大学物理学》的基础上改版而成。是省级重点教学研究项目《面向 21 世纪工科物理教学内容和方法的改革探讨》课题的成果之一。按照一般工科本科院校学生的实际情况,在改革旧的工科大学物理教材的体系和内容方面进行了大胆的探索。本书仍基本保持传统模式,适当更新了教学体系和内容,深度和广度较适当,同时吸取了近年来国内出版的面向 21 世纪课程教材的一些先进的思想和出色的方法,力求做到“经典物理现代化,物理前沿普物化”,特别便于一般工科本科院校的学生自学和教学,具有可教性和可学性的使用价值。

全书分上、下两册,共四篇内容。第一篇力学;第二篇热学基础;第三篇电磁学;第四篇波动光学、近代物理以及计算物理学基础。全书教学参考学时数为 120 学时左右,适用于一般工科本科院校。

本书可作为高等工科院校各专业和理科非物理学专业的大学物理课程的教科书,也可供其他专业选用和大学物理教师教学参考。

图书在版编目 (CIP) 数据

大学物理学/黄祝明,吴锋主编. —2 版. —北京:化学工业出版社,2008.1
高等学校“十一五”规划教材
ISBN 978-7-122-01609-6

I. 大… II. ①黄…②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 (2007) 第 183954 号

责任编辑:王文峡

装帧设计:尹琳琳

责任校对:李 林

出版发行:化学工业出版社(北京市东城区青年湖南街 13 号 邮政编码 100011)

印 刷:大厂聚鑫印刷有限责任公司

装 订:三河市延风装订厂

787mm×1092mm 1/16 印张 31¼ 字数 935 千字 2008 年 1 月北京第 2 版第 1 次印刷

购书咨询:010-64518888 (传真:010-64519686) 售后服务:010-64518899

网 址: <http://www.cip.com.cn>

凡购买本书,如有缺损质量问题,本社销售中心负责调换。

总 定 价:48.00 元 (上、下册)

版权所有 违者必究

编 审 人 员

主 编 黄祝明 吴 锋

编写人员 黄祝明 吴 锋 胡亚联

余仕成 李端勇 夏守之

何菊明

第二版前言

本书的第一版是省级重点教学研究项目《面向 21 世纪工科物理教学内容和方法的改革探讨》课题的成果之一（课题 2005 年获得学校教学成果一等奖，省级教学成果二等奖）。

当时我们按照“九五”国家级重点教材及教育部面向 21 世纪课程教材规划的要求和一般工科大学院校学生的实际情况，在改革旧的工科大学物理教材的体系和内容方面进行大胆的探索。在备课教案和讲义的基础上，我们编写了本教材的第一版。2002 年出版以来至今已有 5 年，本教材多次重印，受到师生的欢迎和好评，同时在精品课程建设中发挥了重要作用。

2007 年 1 月教育部、财政部决定实施“高等学校本科教学质量与教学改革工程”，继续推进国家精品课程建设，遴选 3000 门左右课程，进行重点改革和建设，力争在教学内容、教学方法和手段、教学梯队、教材建设、教学效果等方面有较大改善，全面带动我国高等学校的课程建设水平和教学质量。启动“万种新教材建设项目”，加强新教材和立体化教材建设，鼓励教师编写新教材，积极做好高质量教材推广和新教材选用工作。我校大学物理课程在 1998 年被评为校级优质课程，2002 年被评为省级优质课程，2004 年大学物理课程又被评为省级精品课程。2006 年经湖北省精品课程评审委员会评审通过，省教育厅审核，大学物理课程获准申报国家精品课程。精品课程建设带动和促进了教材建设，于是我们在教材第一版的基础上，总结精品课程建设的经验和体会，对教材进行了完善和修改，每章后编排了思考题和习题，使之更便于一般工科大学院校的学生自学和教学，具有可教性和可学性的使用价值。

本书仍然保持原有的体系，由黄祝明、吴锋主编，他们负责制定本教材的编写修改提纲，提出要求，并进行全书的统稿工作以及组织在教学中试用。各篇章的具体执笔人如下：第一篇力学：黄祝明；第二篇热学基础：吴锋；第三篇电磁学第十章至第十二章：胡亚联；第十三章至第十五章：余仕成；第四篇波动光学、近代物理第十六章、第二十章、第二十一章、第二十二章：李端勇；第十七章至第十九章夏守之、黄祝明；第二十三章：何菊明。全书思考题和习题：何菊明。本书再版过程中，得到武汉工程大学教务处、理学院和化学工业出版社的关心和支持，我们在此表示衷心的感谢。

由于编者水平所限，书中难免有不妥之处，敬请老师和同学们在使用中提出宝贵的意见。

编 者
2007 年 10 月

第一版前言

物理学是整个自然科学的支柱，是人类文明、现代科技和工业的根基。纵观世界科技发展史，物理学的每一次重大突破，都极大地促进了社会生产力的发展。现代原子能、激光、航天、计算机、信息等新兴产业，都利用了 20 世纪物理学的最新成就。

物理学是一切自然科学的基础。物理学所研究的粒子和原子，构成了蛋白质、基因、器官、生物体、一切人造的和天然的物质、陆地、海洋和大气等等。在这个意义上，物理学构成了化学、生物学、材料科学和地球物理学等学科的基础，物理学的基本概念和技术被应用到了所有的自然科学。在这些学科和物理学之间的边缘领域中，形成了一系列新的分支学科和交叉学科，从而促使自然科学更加迅速地发展。

物理学一直是自然科学的带头学科。它与现代应用技术的广泛结合，为人类认识自然、改造自然、发展生产提供了强有力的武器。一方面，物理学为所有的科学领域提供了理论基础、实验手段和研究方法。现代物理学已发展到能够说明小到分子、原子、原子核、基本粒子、超弦，大到恒星、星系、宇宙的种种现象和规律。它能够说明种种线性的和非线性的复杂问题。物理学理论为自然科学和工程科学的大厦奠定了坚不可摧的基石；另一方面，物理学的重要作用还在于它利用其重要的理论框架，建立了许多相关学科或交叉学科，如生物物理、天体物理、化学物理、原子物理、量子化学、量子生物学、生物磁学等。

物理学决定着人们对物质世界的根本性看法。物理学发现的关于物质运动遵循的“决定论法则”、“随机性法则”以及“混沌性法则”，是迄今为止人类对自然认识的最高境界。物理学研究方法和思维也是无与伦比的。“理想模型法”、“实验方法”、“类比方法”、“科学假说”、“思想实验”、“对称性思维”等，无一不闪耀着科学和智慧的光辉，对所有学科都有借鉴作用。

既然物理学对于自然科学的发展、社会生产力的进步起着如此巨大的带头和推动作用，大学物理学在高等教育中的地位就不言而喻了。在人类所有的才能之中，最重要最神奇的就是思维能力和创新能力。大学物理在人才的创新能力、思维能力的培养方面有着重要的不可替代的作用。大学物理通过物理学的基本思维方法、基本观念、基本实验的设计思想、方法、技能等的教学来实现对人才科学素质的培养。

21 世纪高等教育的观念正在发生转变，社会和市场需要高素质、有创新能力的“复合型”人才。因此，大学物理的教学目的，应当是培养和提高学生的科学素质、科学思维方法和科学研究的能力。人才培养是一个系统工程，大学物理教学必须为高等教育人才培养的总目标服务。大学物理教学的任务除了使学生掌握基本的物理知识及实际应用，并得到有关技术技能、技巧的训练外，更重要的是发展学生智力，提高学生能力，培养学生的科学世界观和科学素质。大学物理教学必须着重培养学生的观察和实验能力，科学思维能力，分析和解决实际问题的能力，自学能力等等；另外，大学物理还应把发展学生的非智力因素纳入自己的教学任务。主要是通过揭示物质运动规律培养学生辩证唯物主义的科学世界观，通过严格的实验训练培养学生实事求是的科学态度，通过物理学史的教学来激发学生的学习兴趣，通过物理学理论体系的整体介绍，使学生能够鉴赏什么是和谐、对称、统一的科学美，培养学生的科学情趣。

工科专业的学生为什么要学物理？在我国以前的看法是为专业课服务。于是专业课需要的内容就讲，不需要的内容就不讲或少讲。这种陈旧的观点显然不能适应 21 世纪人才培养的需要。著名理论物理学家，诺贝尔奖得主理查德·费曼说：“科学是一种方法，它教导人们：一些事物是怎样被了解的，什么事情是已知的，现在了解到什么程度（因为没有事情是绝对已知的），如何对待疑问和不确定性，证据服从什么法则，如何去思考事物，做出判断，如何区别真伪和表面现象。”所以，大学物理课不仅仅是物理知识的教育，不仅仅是为专业课服务。大学物理学是学

习一切工程技术知识,培养学生科学素质的最有效的基础课,是21世纪迎接新技术挑战的必修课程,是科技和工程技术人员终身学习过程中必须在大学阶段学习的重要理论课。大学物理课应当把对学生的科学素质教育作为自己的首要任务,应当使学生对物理学的内容和方法,工作语言,概念和物理图像,其历史现状和前沿等方面,从整体上有一个全面的了解。

国家教育部非常重视21世纪工科物理教材编写工作。目前国内新编大学物理教材数十余种,其侧重点各有千秋。有的突出了理论物理学的内容,有的将计算机物理引入教材,有的增加了物理技术应用方面的篇幅。这些教材由于把一些理论物理学的内容引入了普通物理,使得教材难度增大,不适合一般工科本科院校使用,特别是不适宜学生自学。

教学内容的核心就是教材。21世纪大学物理教材一方面要在新内容、高起点、技术应用等方面有较大突破。另一方面也应具有易教易学的特点。一般工科本科院校的大学物理教学如何面向21世纪,教材又如何适应新世纪教学改革的需要?这些问题一直是我们教学研究和探讨的主题。1998年我们申报立项了省级《面向21世纪工科物理教学内容和方法的改革探讨》课题,三年来,我们按照“九五”国家级重点教材及教育部面向21世纪课程教材规划的要求和一般工科本科院校学生的实际情况,集多年教学之经验,在备课教案和讲义的基础上,编写了这本教材。本书仍基本保持传统模式,适当更新了教学体系和内容,深度和广度较适当,同时吸取了近年来国内出版的面向21世纪课程教材的一些先进的思想和出色的方法,力求做到“经典物理现代化,物理前沿普物化”,便于学生自学和教师教学。为适应不同的教学对象和不同专业类别的教学需要,还编入了一些打“*”号,并用小字排印的选学内容(其中第九章全章为选学内容,为便于阅读未用小字排印)。本书每章后编有物理前沿和物理学史,可拓展学生的知识面,有利于提高学生的科学素质。

本书曾在武汉化工学院2000级部分专业中试用,受到学生的欢迎和好评。

本书由黄祝明、吴锋主编,他们负责制定本教材的编写提纲,提出要求,并进行全书的修改和统稿工作以及组织在教学中试用。各篇章的具体执笔人如下:第一篇力学:黄祝明;第二篇热学基础:吴锋;第三篇电磁学第十章至第十二章:胡亚联;第十三章至第十五章:余仕成;第四篇波动光学、近代物理第十六章、第二十章、第二十一章:李端勇;第十七章至第十九章夏守之、黄祝明。本书出版过程中,得到武汉化工学院教务处、物理与热能工程系和化学工业出版社的关心和支持,在此表示衷心的感谢。

由于编者水平所限,书中难免有缺点和错误,敬请老师和同学们在使用中提出宝贵的意见。

编 者

2002年4月于武汉化工学院

目 录

第一篇 力 学

第一章 质点运动学	2
第一节 质点运动的描述	2
一、参考系、坐标系	2
二、质点、质点系	2
三、质点运动的矢量描述	3
第二节 常用坐标系的选用	5
一、直角坐标系、抛体运动	5
二、自然坐标系、切向加速度和法向加速度	7
* 三、平面极坐标系、横向速度和径向速度	8
第三节 相对运动	9
本章提要	10
思考题	11
习题	12
物理学史	13
第二章 经典力学的守恒定律	14
第一节 牛顿运动定律和惯性系	14
一、牛顿运动定律的表述及其应用	14
二、惯性系与非惯性系	19
三、平动加速参考系中的惯性力	19
四、匀速转动参考系中的惯性离心力	20
第二节 动量定理和动量守恒定律	20
一、冲量和质点的动量定理	21
二、质点系动量定理	22
三、动量守恒定律	24
四、火箭飞行	25
* 五、质心及质心运动定理	27
第三节 动能定理和机械能守恒定律	29
一、功和质点的动能定理	29
二、保守力、非保守力和势能	31
三、势能曲线及应用	34
四、质点系的动能定理和功能原理	36
五、机械能守恒定律与能量守恒定律	37
六、两体碰撞	40
第四节 角动量和角动量守恒定律	43
一、质点的角动量	43
二、力矩和质点的角动量定理	44
三、质点角动量守恒定律	45
四、质点系的角动量定理	46
* 五、质心系的角动量定理	47
* 第五节 对称性和守恒定律	48
一、什么是对称性?	49

二、物理定律的对称性	49
三、时空对称性和动量、角动量和能量守恒定律	49
本章提要	51
思考题	52
习题	53
物理学史	54
第三章 连续体力学	56
第一节 刚体运动学	56
一、刚体及研究方法	56
二、刚体的平动和定轴转动	56
三、描述刚体转动的物理量	57
四、匀变速转动公式	58
五、角量和线量的关系	59
第二节 刚体动力学	60
一、刚体绕定轴转动时对转轴的角动量	60
二、转动惯量	61
三、刚体定轴转动的转动定理和角动量定理	63
四、刚体定轴转动的动能定理	66
五、刚体的进动和回转效应	69
本章提要	70
思考题	70
习题	71
物理学史	72
第四章 相对论基础	73
第一节 从经典力学到狭义相对论	73
一、伽利略相对性原理	73
二、伽利略变换	73
三、经典力学的困难	74
第二节 狭义相对论的基本假设与洛伦兹变换式	76
一、狭义相对论的基本假设	76
二、洛伦兹变换	76
三、相对论速度变换公式	78
第三节 狭义相对论的时空观	79
一、同时的相对性	79
二、长度收缩	79
三、时间膨胀	81
第四节 狭义相对论动力学基础	82
一、动量和质量	82
二、力、功和动能	83
三、能量和质能关系	84
四、能量和动量的关系	85
本章提要	85
思考题	86
习题	87
物理学史	87

第二篇 热学基础

第五章 热学的预备知识	91
第一节 热力学系统的状态和过程	91

一、热力学系统	91
二、热力学状态	91
三、热力学过程	91
第二节 温度	92
一、热力学第零定律	92
二、温度计和温标	92
第三节 分子热运动与分子力	93
一、通常的物质是由大量分子（或原子）组成的	93
二、分子热运动	94
三、分子力	94
第四节 状态参量和物态方程	95
一、状态参量	95
二、物态方程	95
第五节 统计规律的基本概念	96
一、事件	96
二、概率	96
三、统计平均和统计规律	97
物理学史	98
今日物理	98

第六章 平衡态的统计规律	100
第一节 理想气体的压强和温度	100
一、理想气体的微观模型和统计假设	100
二、理想气体的压强公式	100
三、理想气体的温度公式	102
第二节 麦克斯韦速率分布律	102
一、速率分布律	102
二、速率分布函数	103
三、麦克斯韦速率分布律	104
四、三种速率	105
第三节 玻尔兹曼分布律	106
一、玻尔兹曼分布律	106
二、重力场中粒子按高度的分布	107
第四节 能量均分定理	107
一、自由度	107
二、能量均分定理	108
三、理想气体的内能	109
第五节 分子碰撞频率的统计规律	110
一、平均碰撞频率	110
二、平均自由程	111
本章提要	111
思考题	112
习题	113
物理学史	113
今日物理	114

第七章 热力学第一定律	116
第一节 热力学第一定律	116
一、内能、功和热量	116
二、热力学第一定律	117
第二节 理想气体的等值过程	118
一、等容过程	118

二、等压过程	119
三、等温过程	120
第三节 理想气体的绝热过程和多方过程	121
一、绝热过程	121
二、多方过程	123
第四节 循环过程和卡诺循环	124
一、循环过程	124
二、热机和效率	124
三、制冷机及制冷系数	124
四、卡诺循环	125
本章提要	128
思考题	128
习题	129
物理学史	130
今日物理	131
第八章 热力学第二定律	132
第一节 热力学第二定律的表述	132
一、可逆过程与不可逆过程	132
二、热力学第二定律的表述	132
第二节 卡诺定理	134
一、卡诺定理的内容	134
二、卡诺定理的证明	134
三、热力学温标	135
第三节 熵和熵增加原理	135
一、克劳修斯等式	135
二、熵	136
三、熵增加原理	137
四、温熵图	138
第四节 热力学第二定律的统计意义	138
一、理想气体自由膨胀不可逆性的统计意义	138
二、热力学概率和玻尔兹曼熵公式	140
三、热力学第二定律的适用范围	140
本章提要	140
思考题	140
物理学史	141
今日物理	142
第九章 非平衡过程	145
第一节 气体中的输运过程	145
一、黏滞现象	145
二、热传导现象	146
三、扩散现象	146
第二节 线性不可逆过程热力学	147
一、线性不可逆过程的基本假设	147
二、不可逆的熵产生率	148
三、Onsager 理论	148
四、最小熵产生原理	149
五、C-A 效率	150
六、广义热力势, 有限时间熵和有限时间热力学长度	151
七、热力装置性能指标的优化	152
第三节 耗散结构	153

一、两类有序结构	153
二、耗散结构的实例	153
三、耗散结构的熵特征	154
四、分支现象	154
五、涨落的作用	155
第四节 分形	155
一、分形和分形维数	155
二、相似维数	156
三、随机行走的分维	157
四、分形生长	158
本章提要	159

第三篇 电 磁 学

第十章 基本的电磁现象及其描述	162
第一节 静电的基本现象	162
一、电荷与电荷守恒定律	162
二、库仑定律	166
第二节 磁的基本现象	168
一、早期磁现象	169
二、近期磁现象	169
第三节 静电场及恒定磁场的描述	170
一、电场和电场强度	171
二、静止的点电荷的电场及其场强叠加原理	172
三、恒定电流	177
四、磁场和磁感应强度	180
五、毕奥-萨伐尔定律	182
本章提要	185
思考题	186
习题	187
物理学史	188
第十一章 真空中的高斯定理和安培环路定理	190
第一节 真空中静电场和磁场的高斯定理	190
一、电场线与电通量	190
二、静电场的高斯定理及应用	192
三、磁场的高斯定理	198
第二节 静电场的环路定理和电势	200
一、静电场的环路定理	200
二、电势差和电势	202
三、电势叠加原理	203
四、电场强度与电势梯度的关系	206
第三节 磁场的环路定理	210
一、磁场的安培环路定理	210
二、利用安培环路定理求磁场的分布	212
本章提要	215
思考题	216
习题	216
第十二章 电磁相互作用	219
第一节 磁相互作用	219
一、洛伦兹力	219

二、带电粒子在电磁场中的运动	221
三、霍尔效应	225
四、量子霍尔效应	227
第二节 磁场对电流的作用	229
一、安培力及安培定律	229
二、平行无限长载流直导线的相互作用力	232
三、载流线圈在均匀磁场中所受的力矩	234
四、磁力的功	235
第三节 运动电荷的电磁场	237
一、运动电荷的电场和磁场（非相对论的）	237
二、电磁场的相对论性变换	238
三、运动电荷的电磁场（相对论的）	239
四、两个运动电荷之间的相互作用	243
本章提要	245
思考题	245
习题	246

附录 课程内容的学时分配建议	247
----------------------	-----

第一篇 力学

力学 (mechanics) 是研究物体机械运动规律的一门学科。机械运动即物体位置随时间的变动。例如：天体的运行，大气和河水的流动，各种交通工具的行驶，各种机器的运转等等。

机械运动 (mechanical motion) 是物质运动最简单、最基本的初级运动形态。几乎在物质的一切运动形式中都包含有这种最基本的运动形式，因而力学是学习物理学和其他学科的基础，也是近代工程技术的理论基础。力学是古老的，历经无数人的工作，特别是伽利略、牛顿、拉普拉斯等人的工作。最早成为最完善的学科，被称为**牛顿力学**或**经典力学**。研究宏观物体（尺寸远大于原子尺度 10^{-10}m 的物体）的低速（远小于光速）运动的客观规律。在各种工程技术，特别是机械、建筑、水利、造船，甚至航空航天技术中，经典力学至今仍保持着充沛的活力而起着基础理论的作用。

本篇主要讲述经典力学的基础，包括质点力学和部分连续体力学。着重阐述动量、角动量、能量等概念及相应的守恒定律，最后一章介绍狭义相对论基础。

第一章 质点运动学

一个形状和大小可以不计但具有一定质量的物体称为质点。对于质点的运动，通常分两个方面来讨论。首先是单纯地描述质点在空间的运动情况，即说明它的运动特征，如质点的位置、速度、加速度、轨道等。这部分内容称为运动学 (kinematics)。其次是讨论运动产生的原因和运动状态变化的原因，即说明运动的因果关系，如牛顿运动定律、动量定理、动能定理以及守恒定律等。这部分内容称为动力学 (dynamics)。

本章主要介绍质点运动学，即讨论质点运动的定量描述问题。由于采用了矢量概念和微积分等数学方法，因而使很多在中学物理课程中已学习过的概念和公式将更严格、更全面也更系统化了。最后还介绍了同一质点的运动描述在不同参考系中的变换——伽利略变换。

第一节 质点运动的描述

一、参考系、坐标系

一切物质均处在永恒不息的运动之中，运动的这种普遍性和永恒性又称为运动的绝对性。为了观测一个物体的运动，而选作参考的另一物体（或另一组相对静止的物体）称为参考系 (frame of reference)。

由于参考不同的物体来观测同一物体的运动，所获得的图像和结果就会不同，这个事实称为运动描述的相对性。由于对物体运动的描述是相对的，因此，在说明物体的运动时，必须指明所选取的参考系。研究地面上物体的运动，通常都选地面或在地面上静止的物体作参考系。在今后的讨论中，凡是没有具体指明参考系的，均指相对于地面参考系的运动。

参考系选定后，为了能定量地描述物体的位置和它的运动，还必须在参考系上建立一个适当的坐标系，把坐标系的原点和轴线固定在参考系中。坐标系也可有不同的选择，要看问题的性质和研究的方便来决定。最常用的是直角坐标系、极坐标系、自然坐标系等。坐标系实质上是由实物构成的参考系的数学抽象。

二、质点、质点系

任何物体都有大小和形状。物体运动时，一般地讲其内部各点位置的变化是不一样的，物体的形状和大小也可能发生变化。因此，物体做一般的机械运动时，物体各部分的运动规律将十分复杂。

如果在某些情况下，物体的大小和形状对于所研究的问题不起作用，或所起作用甚小而可忽略不计时，为了使问题简化，可将被研究的物体看做一个只具有质量而没有大小和形状的几何点，即质点 (particle)。

质点是物体的理想化模型，其实际意义如下。

(1) 如果一个物体在运动中既不转动也不变形，只有平移，则物体上各点的运动必然相同，此时整个物体的运动可用物体上任一点的运动来代表。因此，当一个物体只发生平移时，就可将该物体当做质点。

(2) 如果一个物体的尺度很小，它的转动和形变在问题中完全不重要时，也能将它当做质点。当然能否将一个物体看做质点，并不是根据它的绝对大小，而是要由问题的性质来决定。例如，在研究地球公转时，因日地距离远大于地球的直径，地球上各点间的距离与日地距离相比是微不足道的。所以，在公转中仍能将地球视为质点。反之，即使很小的物体，像微粒、分子、原子等，当我们考察它们的转动、振动等问题时，就必须考虑其内部结构，而不能把它们看成质

点。因此,一个物体究竟能否看做质点,要具体问题具体分析。

(3) 当研究物体的运动不能忽略物体的大小和形状时,质点的模型就不适用了。这时,可以把物体看成是由若干质点组成的质点系统,简称质点系(system of particles)。这样,通过研究各质点的运动规律,便可以了解整个物体的运动规律。

(4) 质点、质点系是从客观实际中抽象出来的理想模型。以后还要学习到刚体、线性谐振子、理想气体、点电荷、电流元等理想模型。在科学研究中,常根据所研究问题的性质,突出主要因素,忽略次要因素,建立理想模型,这是经常采用的一种科学思维方法。这样做,可以使问题大为简化但又不失其客观真实性。可以说,没有合理的模型,理论就寸步难行。

三、质点运动的矢量描述

1. 质点的位置矢量和运动方程

在中学阶段,质点的位置可由直角坐标系中的三个坐标 x 、 y 、 z 表示。在质点运动时,它的坐标是时间的函数:

$$x=x(t), y=y(t), z=z(t)$$

这就是质点的运动方程(equation of motion)。质点在运动过程中将描绘出一条曲线,称为轨迹。从上式运动方程中消去参变量 t , 便可得到质点的轨迹方程。质点的位置还可以用一矢量来描述,即从坐标原点 O 指向质点所在处 P 的有向线段 $\overrightarrow{OP}$ 来表示,这个有向线段叫做该质点的位置矢量(position vector),简称位矢,用 $\mathbf{r}$ 表示(图 1-1)。显然,质点的位矢其大小和方向不仅与参考系有关,而且与坐标原点 O 的选择有关。但当参考系与坐标原点选定后,位矢 $\mathbf{r}$ 就能指明质点相对坐标原点的距离和方位,亦即确定了质点的空间位置。

当质点运动时,它的位矢是随时间变化的,则位矢 $\mathbf{r}$ 为时间 t 的矢量函数,一般表示为 $\mathbf{r}=\mathbf{r}(t)$ 。它描述了质点在任一时刻 t 相对于坐标原点的距离和方位,并包含有质点如何运动的全部信息。此式称为质点运动的位矢方程,也可称为质点运动方程的矢量表示式。

2. 位移矢量

设质点沿轨迹 MN 做曲线运动,如图 1-2 所示,在时刻 t_1 ,质点在 P_1 处,其位矢为 $\mathbf{r}_1$,在时刻 t_2 ,质点运动到 P_2 处,位矢为 $\mathbf{r}_2$,于是质点在时间间隔 $\Delta t (\Delta t = t_2 - t_1)$ 内的位置变化可用自 P_1 指向 P_2 的矢量 $\Delta \mathbf{r}$ 来表示,即由起始位置 P_1 指向终止位置 P_2 的有向线段 $\overrightarrow{P_1P_2}$,叫做位移矢量,简称位移(displacement)。由图 1-2 中可知 $\Delta \mathbf{r} = \mathbf{r}_2 - \mathbf{r}_1$,显然,位移 $\Delta \mathbf{r}$ 是 Δt 时间内的位矢 $\mathbf{r}$ 的增量,是描述质点在 Δt 时间内位置变动的大小和方向。

位移 $\Delta \mathbf{r}$ 和位矢 $\mathbf{r}$ 不同,位矢确定某一时刻质点的位置,位移则描述某段时间内质点始末位置的变化。对于相对静止的不同坐标系来说,位矢依赖于坐标系的选择,而位移则与所选取的坐标系无关(见图 1-3)。

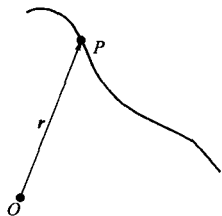


图 1-1 位置矢量

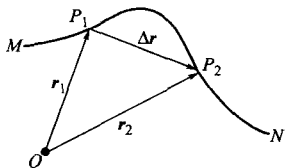


图 1-2 位移矢量

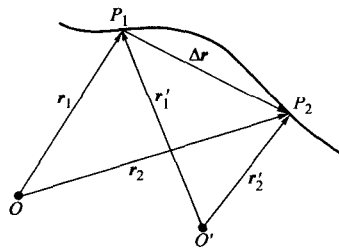


图 1-3 对不同的坐标原点,质点的位矢不同,但位移相同

位移 $\Delta \mathbf{r}$ 和路程 Δs 也不同,位移只反映某段时间内质点始末位置的变化,它不涉及质点位置变化过程的细节。在图 1-2 中,位移 $\Delta \mathbf{r}$ 的大小虽然等于由 P_1 到 P_2 的直线距离,但并不意味着质点是从 P_1 沿直线移动到 P_2 。质点从 P_1 到 P_2 沿曲线所走过的实际轨迹的长度叫做路程(distance)。路程 Δs 是标量,而且总有 $\Delta s \geq |\Delta \mathbf{r}|$ 。但是在 $\Delta t \rightarrow 0$ 的极限情况下,它们的微分是相等的,即 $ds = |d\mathbf{r}|$ 。另外,当始末位置 P_1P_2 一定,则位移是唯一确定的,但从 P_1 到 P_2

可有许许多多不同的路程。

还要指出的是, 位移 $\Delta \mathbf{r}$ 的大小和位矢大小的增量 $\Delta r (\Delta r = | \mathbf{r}_2 | - | \mathbf{r}_1 |)$ 一般是不相等的。

3. 速度和速率

为了说明质点运动的方向和快慢, 可以粗略地计算质点在 Δt 时间内的平均速度, 它等于质点在 Δt 时间内位置矢量的平均变化率, 亦即等于 $\Delta \mathbf{r}$ 与 Δt 的比值。用 $\bar{\mathbf{v}}$ 表示, 即

$$\bar{\mathbf{v}} = \frac{\mathbf{r}_2 - \mathbf{r}_1}{\Delta t} = \frac{\Delta \mathbf{r}}{\Delta t} \quad (1-1)$$

平均速度是矢量, 其方向与位移 $\Delta \mathbf{r}$ 的方向相同, 大小为 $|\frac{\Delta \mathbf{r}}{\Delta t}|$ 。显然, Δt 取得越短, 近似的程度就越好。

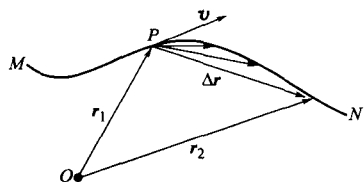


图 1-4 质点的平均速度和速度

的程度就越好。

为了精确真实地反映出质点在各个瞬时的运动状态, 可将时间 Δt 无限减小, 并使之趋近于零, 即 $\Delta t \rightarrow 0$, 这样, 质点的平均速度就会趋向一个确定的极限矢量, 见图 1-4。这个极限矢量称为 t 时刻的瞬时速度, 简称速度 (velocity)。即

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

速度是矢量, 大小描述质点在 t 时刻运动的快慢, 方向就是 t 时刻质点运动的方向, 即 P 点所在处的轨道切线方向, 并指向质点的运动方向。显然, 质点在某一时刻的瞬时速度等于该时刻的位置矢量对时间的一阶导数, 或位置矢量随时间的变化率。于是, 只要知道了用位矢表示的质点运动方程, 就可求得质点的速度。

通常, 平均速率的定义为 $\bar{v} = \frac{\Delta s}{\Delta t}$, 即质点在 Δt 时间内的平均速率等于路程 Δs 与时间 Δt 的比值。瞬时速率的定义为

$$v = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{\Delta s}{\Delta t} = \frac{ds}{dt}$$

由于在 $\Delta t \rightarrow 0$ 时, $ds = |d\mathbf{r}|$, 则 $\frac{ds}{dt} = |\frac{d\mathbf{r}}{dt}|$, 可见瞬时速率就是瞬时速度的大小。

综上所述, 平均速率与平均速度, 还是瞬时速率与瞬时速度都是有区别的。速度不仅表明质点运动的快慢, 还表明质点运动的指向, 它是矢量。而速率 (speed) 仅仅表明质点移动的快慢, 是标量。

4. 加速度

质点运动时, 它的速度大小和方向都可能随时间而变化, 为了描述质点的速度变化的快慢和方向, 我们引入加速度的概念。

设质点在时刻 t_1 的速度为 $\mathbf{v}_1$, 到时刻 t_2 的速度为 $\mathbf{v}_2$, 则定义质点在 Δt 时间内的平均加速度为

$$\bar{\mathbf{a}} = \frac{\mathbf{v}_2 - \mathbf{v}_1}{\Delta t} = \frac{\Delta \mathbf{v}}{\Delta t} \quad (1-3)$$

平均加速度是矢量, 其方向与速度增量 (见图 1-5) $\Delta \mathbf{v}$ 的方向相同, 大小为 $|\frac{\Delta \mathbf{v}}{\Delta t}|$ 。显然, Δt 取得越短, 近似程度越好。

在 $\Delta t \rightarrow 0$ 时, 取上式的极限, 就得到在 t_1 时刻的瞬时加速度, 简称加速度 (acceleration)。即

$$\mathbf{a} = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{\Delta \mathbf{v}}{\Delta t} = \frac{d\mathbf{v}}{dt} \quad (1-4)$$

可见, 质点在某时刻的瞬时加速度等于该时刻速度矢量对时间的一阶导数。若以 $\mathbf{v} = \frac{d\mathbf{r}}{dt}$ 代入上式, 加速度 $\mathbf{a}$ 也等于