



21世纪高等学校规划教材

DAXUE WULI
JIAO CHENG

大学物理教程

■ 主编 范仰才

主审 胡义华

上



北京邮电大学出版社
www.buptpress.com



21 世纪高等学校规划教材

大学物理教程

(上)

主 编 范仰才

参 编 张春华 林清华 陈 丽
朱燕娟 张 欣 方 允

主 审 胡义华

北京邮电大学出版社

· 北京 ·

内 容 简 介

本书是根据教育部最新颁布的《理工科大学物理课程教学基本要求》，吸取了国内外同类教材的优点，并考虑了当前地方本科院校的教学实际，在总结编者长期教学经验的基础上编写的。内容包括基本要求中 A 类内容和择要遴选有关 B 类内容。全书分上、下两册，上册包括力学、热学、振动波动和波动光学；下册包括电磁学、相对论、量子物理基础。本书不求内容的多和深，但求内容的高和新。在高视点选择经典内容的同时，适当加强了近代物理及高新科技物理基础的介绍。撰述上力求物理概念、原理准确，简洁，透彻，重点突出，图像清晰。与本教材配套的《大学物理教程教师解答手册》将另册出版。

本书可作为本科院校理工科各专业的大学物理教材，也可作为各类普通高等学校非物理类专业、各类成人高校物理课程的教材或教学参考书。

图书在版编目(CIP)数据

大学物理教程. 上/范仰才主编. -- 北京:北京邮电大学出版社, 2012. 1

ISBN 978-7-5635-2817-2

I. ①大… II. ①范… III. ①物理学—高等学校—教材 IV. ①O4

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2011)第 223207 号

-
- | | |
|------|--|
| 书 名 | 大学物理教程(上) |
| 主 编 | 范仰才 |
| 责任编辑 | 唐咸荣 |
| 出版发行 | 北京邮电大学出版社 |
| 社 址 | 北京市海淀区西土城路 10 号(100876) |
| 电话传真 | 010-82333010 62282185(发行部) 010-82333009 62283578(传真) |
| 网 址 | www. buptpress3. com |
| 电子信箱 | ctrd@buptpress. com |
| 经 销 | 各地新华书店 |
| 印 刷 | 北京泽宇印刷有限公司 |
| 开 本 | 787 mm×960 mm · 1/16 |
| 印 张 | 20.5 |
| 字 数 | 448 千字 |
| 版 次 | 2012 年 1 月第 1 版 2012 年 1 月第 1 次印刷 |
-

ISBN 978-7-5635-2817-2

定 价: 34.00 元

如有质量问题请与发行部联系

版权所有 侵权必究

前 言

本教材是为了适应当前教学改革的需要,在 2005 年出版的普通高等教育“十五”国家级规划教材的基础上,依据教育部非物理类专业基础物理课程教学指导分委会最新颁布的“大学物理课程教学基本要求”重新编写而成。本教材包括了“基本要求”A 类除几何光学外的全部知识点,并对 B 类知识点有选择性地作了适当拓展,特别加强了近代物理知识和高新科技物理基础的介绍。

重新修订后的本教材与原版比较有如下明显特色:

1. 进一步提炼了经典内容,更新了教学体系

教材按力学、热学、振动、光学、电磁学、原子物理的顺序编写。其中,力学篇幅大大缩减,质点力学中删去了与中学物理重复的内容,加强了矢量性、变力作用下运动的分析、动量和能量及其守恒定律等重要概念的阐述。热学部分把气体动理论放于热力学之前讲授,虽然统计概念和统计方法对初次接触的学生理解上会有难度,但动理论放于热力学后面讲,问题同样不可避免,先讲动理论的好处是显而易见的。机械波与光波虽然本质不同,但其波动特征和描述方法类似,因此教材在讨论完机械振动与机械波后紧接着讨论波动光学。电磁学的篇章未作调整,但内容进行了重写。

2. 加强了近代物理及高新科技物理基础的介绍

近代物理及高新科技物理基础的内容明显加强。近代物理的内容包括:狭义相对论,量子物理基础,激光和固体的量子理论。狭义相对论一般教材都放于力学后,本教材将其放在近代物理篇,从物理学发展史上考虑是合适的。量子物理的内容按量子论发展的先后次序编写,更有利于学生了解量子概念的诞生和发展过程;量子力学中尽量避开繁琐的数学推导,加强了物理概念、重要结论的阐述;为适应一些专业特点的需要,本教材专辟了激光与固体的量子理论一章。此外,教材在适当地方还介绍了一些当前高新技术领域中的基础物理原理,如低温与超导、熵与信息、全息技术、光纤通信、光学信息处理、液晶、等离子体、纳米技术、遥感技术等,还引入了非线性物理的一些基本概念,如混沌、非线性光学等。尽管有些内容学生不一定能完全清楚,但这将有益于激发学生的求知欲望和培养学生的独立思考能力。

3. 增加了物理学发展史的介绍

教材在每篇的开头语中,简明扼要地介绍了该分支学科的形成和发展历史。首先让学生

对该分支学科的发展有个初步的了解,有利于学生开阔眼界,提高对物理学的学习兴趣与热爱。

4. 更加重视学生掌握、运用知识及综合能力的培养

教材力求突出主干,删减枝节,叙述严谨,科学规范。尽量避免繁琐的叙述和冗长的数学推导,力求物理概念、原理阐述准确、简洁、透彻,重点突出,图像清晰,真正在“适用”和“好用”上做足功夫。进一步精选和更换了部分例题,使书中例题一方面对学生习题起到良好的示范作用,另一方面是通过部分例题以达到扩展学生的知识面。习题中在原思考题、选择题、计算题的基础上增加了少量更有利于学生巩固基本概念的填空题;习题总量略有增加,还增加了少量略有难度的计算题。

几点说明:

(1)本教材的定位是,工科大学的大学物理教材。全书分上、下两册出版,参考学时为110~130学时。

(2)教材中打*号的内容或章节多为开“窗口”的内容,教师可自行取舍;若将打*号的内容除去,仍不影响教材的整体性。

(3)本书的原版于2005年获普通高等教育“十五”国家级规划教材,原主编钟韶教授在教材的编写、出版和申报普通高等教育“十五”国家级规划教材中做了大量的开创性工作。本次修订得到广东工业大学物理与光电工程学院领导和老师的极大关注,对教材的重新修订提出了很多赋有建设性的意见和建议;另在编写过程中参考和吸取了当今国内外一些优秀教材和优秀教学改革成果,编者在此一并表示感谢。

本书由教育部物理课程教学指导委员会委员胡义华教授主审。编写分工如下:第1、第2章由张欣编写;第4、第5章及阅读材料(3)、(4)由朱燕娟编写;第6、第7、第8、第9、第10章及阅读材料(5)由张春华编写;第3、第11、第12章及全书习题、阅读材料(1)、(10)、前言、绪论和附录1、2、3、4由范仰才编写;第13、第14章由林清华编写;第15章及阅读材料(13)由方允编写;第16、第17章及阅读材料(8)由陈丽编写。参加阅读材料编写的还有钟韶[阅读材料(2)]、王博[阅读材料(6)]、李群[阅读材料(7)]、周金运[阅读材料(9)]、刘美希[阅读材料(11)、(12)]、赵韦人[阅读材料(14)]、肖万能[阅读材料(15)]。最后由范仰才负责全书的修改、统稿和定稿工作。

请登录网站 www.buptpress3.com 购买与教材配套的《大学物理教程教师解答手册》(主编范仰才,书号为978-7-5635-2815-8,北京邮电大学出版社)。

编写一套适合当前教学改革的教材是一种探索,由于编者水平有限,加之时间仓促,书中肯定存在不妥和疏漏之处,恳请使用本书的广大师生批评指正。

编者

2011年8月

目 录

绪论	1
第一篇 力 学	
第 1 章 质点运动学	5
§ 1.1 参考系和坐标系 质点	5
§ 1.2 质点运动的描述	6
§ 1.3 自然坐标系中的速度和加速度	13
§ 1.4 不同参考系中速度和加速度的变换关系	17
思考题	18
习题	19
第 2 章 质点动力学	22
§ 2.1 牛顿运动定律	22
§ 2.2 惯性系与非惯性系	27
§ 2.3 力的空间积累效应	31
§ 2.4 保守力的功 势能 机械能守恒定律	35
§ 2.5 力的时间积累效应 动量守恒定律	42
*§ 2.6 质心 质心运动定理	48
阅读材料(1) 混沌及其特征	50
思考题	54
习题	56
第 3 章 刚体的定轴转动	65
§ 3.1 刚体及刚体定轴转动的描述	65
§ 3.2 刚体定轴转动定律	67

§ 3.3 定轴转动的功和能	73
§ 3.4 角动量定理和角动量守恒定律	77
* § 3.5 进动	81
阅读材料(2) 对称性与守恒律	83
思考题	86
习题	86

第二篇 热 学

第 4 章 气体动理论	92
§ 4.1 平衡态 态参量 理想气体物态方程	92
§ 4.2 理想气体的压强公式	94
§ 4.3 理想气体的温度公式	98
§ 4.4 能量按自由度均分 理想气体的内能	99
§ 4.5 麦克斯韦速率分布律	102
* § 4.6 玻耳兹曼分布律	108
§ 4.7 分子的平均碰撞频率和平均自由程	109
* § 4.8 气体内的输运过程	111
* § 4.9 范德瓦尔斯方程 真实气体	114
阅读材料(3) 低温与超导	117
思考题	120
习题	121
第 5 章 热力学基础	125
§ 5.1 准静态过程 功 热量和内能	125
§ 5.2 热力学第一定律及其在理想气体等值过程的应用	128
§ 5.3 绝热过程 多方过程	133
§ 5.4 循环过程 卡诺循环	137
§ 5.5 热力学第二定律	142
§ 5.6 热力学第二定律的统计意义 熵	145
阅读材料(4) 热学熵与信息熵	151
思考题	153
习题	155

第三篇 振动和波动

第 6 章 振动学基础	162
§ 6.1 简谐振动的运动学 旋转矢量表示法	162
§ 6.2 简谐振动的动力学特征	170
§ 6.3 简谐振动的能量	174
§ 6.4 简谐振动的合成	176
§ 6.5 阻尼振动 受迫振动 共振	184
思考题	187
习题	188
第 7 章 波动学基础	192
§ 7.1 机械波的形成和传播	192
§ 7.2 平面简谐波的波函数	197
§ 7.3 波的能量 声波	203
§ 7.4 波的叠加和干涉	207
§ 7.5 驻波	210
* § 7.6 多普勒效应	215
阅读材料(5) 超声波及其应用	218
思考题	220
习题	221

第四篇 波动光学

第 8 章 光的干涉	229
§ 8.1 光源 光的相干性	229
§ 8.2 分波阵面干涉	231
§ 8.3 光程与光程差	234
§ 8.4 分振幅干涉	237
§ 8.5 迈克耳孙干涉仪	244
阅读材料(6) 全息照相	245
思考题	248

习题	249
第 9 章 光的衍射	253
§ 9.1 光的衍射 惠更斯-菲涅耳原理	253
§ 9.2 单缝夫琅禾费衍射	255
§ 9.3 光栅衍射	258
§ 9.4 圆孔衍射 光学仪器分辨率	264
§ 9.5 X 射线衍射	266
阅读材料(7) 光纤通信	268
思考题	271
习题	271
第 10 章 光的偏振	274
§ 10.1 自然光和偏振光	274
§ 10.2 起偏和检偏 马吕斯定律	276
§ 10.3 反射和折射时光的偏振	278
§ 10.4 光的双折射现象	280
*§ 10.5 偏振光的干涉 人为双折射现象	284
阅读材料(8) 光学信息处理	289
思考题	295
习题	297
附录 1 矢量	299
附录 2 国际单位制(SI)	305
附录 3 常用物理常量表	307
附录 4 物理量的名称、符号和单位(SI)一览表	309
习题答案	313
参考文献	320

绪 论

物理学的研究对象

自然界是由物质组成的,世界是物质的世界。存在于我们周围和我们意识之外的客观实在都是物质。物质有两种不同的形态:一类是实物,包括宏观物体和微观粒子,它的范围从大至日、月、星辰,到小至分子、原子、基本粒子;另一类是场,包括引力场、电磁场、量子场等。两种基本形态中,场是更基本的,每种粒子对应于一种场,各种不同粒子的场互相重叠地充满全空间。

物质运动和物质间的相互作用是物质的普遍属性,物质的物理运动具有粒子和波动两种图像,宏观物体的机械运动,包括天体运动和分子的无规则热运动呈现粒子图像;而场运动则呈现波动图像。在微观领域,无论是实物还是场都呈现波粒二象性。已经查明,物质间的相互作用有四种:即引力相互作用、电磁相互作用、强相互作用和弱相互作用。研究发现,实物间的相互作用是通过场来传递的,实物激发出场,场再作用于另一实物。

物质运动和相互作用总是在一定的空间和一定的时间发生的。空间是物质运动广延性的反映,时间则是物质运动过程持续性的体现。在时空均匀和各向同性条件下,物质的运动和相互作用过程遵循一系列守恒定律;而在高速和强场情况下,时空的几何性质和量度与物质的分布和运动有密切关系。

物理学就是研究物质的基本结构、基本运动形式、相互作用及其转化规律的自然科学。工科(非物理类)大学物理学课程的内容体系包括:

- (1)力学(质点力学和刚体力学);
- (2)热学(动理论和热力学基础);
- (3)振动和波动(机械振动及其传播规律);
- (4)波动光学(光的干涉、衍射和偏振);
- (5)电磁学(电磁场的运动规律和电磁相互作用);
- (6)近代物理基础(狭义相对论和量子物理基础)。

物理学与科学技术的关系

物理学是一切自然科学和工程技术的基础。它的基本理论渗透在自然科学的各个领域,应用于生产技术的许多部门。物理学的发展引发了一次次的技术革命,推动着社会和人类文明的发展。可以说社会的每一次大的进步都与物理学的发展紧密相连。18世纪中叶,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步,而且适应了研制蒸汽机和发展机械工业的社会需要,引起了第一次产业革命,极大地改变了工业生产的面貌。19世纪,在法拉第、麦克斯韦电磁场理论的推动下,人们成功地制造出电机、电器和电讯设备,引起了工业电气化,使人类进入了应用电能的时代,给人类的生产和生活带来巨大的变化。这就是第二次产业革命。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、新兴工业犹如雨后春笋般地发展起来,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、计算机应用、自动化、半导体、激光、空间科学等高新技术为特征的信息时代。这就是第三次产业革命。

总之,物理学已成为基础学科中发展最快、影响最深的一门学科。20世纪以来,它一方面向认识的深度进军,另一方面又向应用的广度发展,它在发掘新能源、新材料,以及革新新工艺过程、检测技术等方面,提供了丰富的实验资料和理论依据;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。当代自然科学发展特点之一,正是科学研究和工业技术的关系日益密切,从研究到应用的速度愈来愈快,周期愈来愈短。工业技术不断地向自然科学提出新的课题要求解决,许多发现和发明,已很少带偶然性,而是人们有意识地、有目的地进行系统研究的结果。科学应当先行于技术,应当充分发挥理论对实践的指导作用。物理学与技术科学、生产实践的关系生动地体现了理论与实践之间的辩证关系。现在,全世界正在面临着以信息、能源、材料、生物工程和空间技术等为核心的一场新技术革命,在这些高新科技领域中必将不断涌现人们今天尚不知道的一系列新技术和新产品,物理学以其最广泛和最基本的内容正成为各个新兴学科的先导,近代物理在量子论和粒子物理等研究方向上的突破和成熟可能孕育和萌发科学和技术的新芽,建立在物理学等自然科学基础上的高科技在21世纪将出现史无前例的辉煌,使人类文明进入更高级的阶段。

努力学习大学物理

物理学的发展过程,是人类对客观世界认识过程中的一个重要组成部分。物理学中不少

规律和理论是直接由生产实践中总结出来的,但更多的物理发现却来自长期的科学实验。因此,科学实验和生产实践,都是推动科学技术发展的强大动力和源泉。物理学研究方法一般是在观察和实验的基础上,对物理现象进行分析、抽象和概括,从而建立物理定律,进而形成物理理论,再回到实践中去经受检验。

21 世纪的大学生肩负全面建设小康社会和实现中华民族伟大复兴的历史使命。要使自己能在飞速发展的科学技术面前有所独创、有所作为,对人类作出较大的贡献。大学阶段是人生科学生涯中打基础、练就基本功、提高综合素质最关键的阶段。必须重视基础理论特别是物理学的学习。物理学是辩证唯物主义的坚实的自然科学基础,学习物理必须以辩证唯物主义为指导。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,树立辩证唯物主义的世界观,掌握物理学中的基本概念和基本原理,以及研究问题的思想与方法,同时在科学实验能力,计算机能力和抽象思维能力等方面受到严格的训练,培养分析问题和解决问题的能力,提高科学素养。应该指出,大学物理学中所讲述的只是基本的内容,而且物理学和其他学科一样发展很快,新发现和新成果不断涌现,我们一方面要牢固地掌握物理学的基础理论,同时也要经常注意物理学的新成就,扩大知识面。扎扎实实地练好基本功,掌握新的知识,使自己成为理想远大、热爱祖国、追求真理、勇于创新的人;德才兼备、全面发展的人;视野开阔、胸怀宽广的人;知行统一、脚踏实地的人;为全面建设小康社会和实现中华民族伟大复兴贡献自己应有的力量。

第一篇 力 学

力学是物理学的重要组成部分,是物理学最早形成的学科,它起源于公元前4世纪古希腊学者亚里士多德关于力产生运动的说法,以及我国《墨经》中关于杠杆原理的论述等。但其成为一门科学则始于17世纪伽利略论述惯性运动,继而牛顿提出了力学三大运动定律。以牛顿运动定律为基础的力学称为牛顿力学或经典力学。它研究的对象是物体的机械运动。经过300多年的发展,力学形成了严谨的理论体系和完备的研究方法。它的许多概念和原理具有广泛的适用性,从而使力学成为了物理学和许多工程技术的理论基础。20世纪以来,量子力学、相对论的建立以及对混沌等问题的研究,对经典力学带来了巨大的冲击,使人们对力学的认识发生了重大的改变。尽管物理学的近代发展揭示了经典力学只在宏观低速领域内适用,然而,由于一方面在相当广阔的尺度和速率范围内经典力学仍具有较大的实用价值,另一方面在包括高速和微观领域在内的整个物理学中,经典力学的一些重要概念和定律,如动量、角动量、能量及其守恒定律仍同样适用。经典力学不仅没有失去它原有的光辉和存在的价值,而且仍然保持着作为整个物理学基础的重要地位,在自然科学和工程技术的广阔领域内,牛顿力学仍然能够较精确地解决广泛的理论和实际问题。

本篇主要讨论经典力学,包括质点力学和刚体力学基础,以牛顿定律为基础展开,着重阐明能量、动量、角动量等概念及其相应的守恒定律。

第1章 质点运动学

力学是研究物体机械运动的规律。宏观物体之间(或物体内部各部分之间)相对位置的变动称为机械运动。经典力学中,通常把力学分为静力学、运动学和动力学。本章只研究运动学规律。运动学是从几何的观点来描述物体的运动,即研究物体的空间位置随时间变化的关系,而不涉及引起物体运动和改变运动状态的原因。

本章首先定义描述质点运动的物理量,如位矢、位移、速度、加速度等,并进而讨论这些量随时间变化的关系。然后讨论曲线运动中的法向加速度和切向加速度及圆周运动的角量描述,最后介绍不同参考系中速度和加速度的变换关系。

位移、速度和加速度是运动学中重要的物理量,它们都具有相对性、瞬时性和矢量性,因此也反映了物体的基本特性。只有掌握了这些特性,才能正确理解这些物理量的意义。

§ 1.1 参考系和坐标系 质点

1.1.1 参考系和坐标系

宇宙万物,大至日、月、星、辰,小至原子内部的粒子都在不停的运动着。运动是绝对的,但是对运动的描述却是相对的。例如,坐在运动着的火车上的乘客看同车厢的乘客是“静止”的,看车外地面上的人却向后运动;反过来,在车外路面上的人看见车内乘客随车前进,而路边一同站着的人静止不动。这是因为车内乘客是以“车厢”为标准进行观察的,而路面上的人是以地球为标准观察的,即当选取不同的标准物对同一运动进行描述时,所得结论不同,因此,我们就把相对于不同的标准物所描述物体运动情况不同的现象叫运动的相对性。而被选为描述物体运动的标准物叫参考系。参考系的选取以分析问题的方便为前提,如描述星际火箭的运动,开始发射时,可选地球为参考系,当它进入绕太阳运行的轨道时,则应以太阳为参考系才便于描述。在地球上运动的物体,常以地球或地面上静止的物体为参考系。

在参考系选定后,为了定量的描述物体的位置随时间的变化,还必须在参考系上建立一个坐标系。如图1-1中的直角坐标系 $Oxyz$,坐标系建立后,物体的位置就可以用它在这个坐标系中的三个坐标 (x, y, z) 来描述。坐标系的选取有多种多样,除直角坐标系外,力学中还常用到

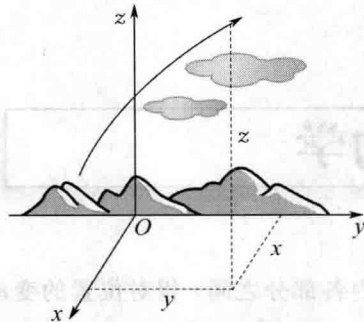


图 1-1 直角坐标系

极坐标系、自然坐标系等。

机械运动是物体的空间位置随时间变化的过程,因此描述物体的运动还必须确定时间。一般地说,时间是表示事件之间的顺序。可以选定某种周期性重复的运动过程作为参考标准,把其他的运动过程与这个选定的过程进行比较,判别和排列各个事件发生的先后顺序及间隔的大小。如可以利用时钟来量度。也就是说,描述机械运动参考系的概念要扩充,在建立空间坐标系的同时,还须建立时间坐标轴。坐标原点为计时起点。计时起点的选择原则上是可以任意的,视问题的方便而定。时刻对应于时间轴上的一点。时刻

为正或负表示该时刻在计时起点的以后或以前。时间间隔对应于时间轴上一个区间。“时间”一词有时指时间变量,有时指时间间隔。

1.1.2 质点

物质世界是错综复杂、丰富多采的。在物理学中,为了突出研究对象的主要性质,经常建立一些理想模型来代替实际的物体。通过对理想模型行为的描述,揭示自然规律。

力学中的质点就是一种理想模型。任何物体都是具有大小和形状的,但是在某些情况下,物体的形状大小对讨论它的运动无关紧要。例如,当研究地球绕太阳转动时,由于地球直径(约为 1.28×10^7 m)比地球与太阳的距离(约为 1.50×10^{11} m)小得多,地球上各点的运动相对于太阳来讲可视为相同,此时可以忽略地球的形状和大小,但当研究地球绕自身轴转动时则不能忽略,所以说,只要物体运动的路径比物体本身尺寸大得多的时候,就可以近似地把此物体看成只有质量而没有大小和形状的几何点,这个抽象化的点就叫质点。一般来说,若在所研究的问题中,不涉及物体的转动和形变,物体的形状和大小对运动的影响可以忽略,就可把物体看作质点。当我们研究一些比较复杂的物体的运动时,虽然不能把整个物体看成质点,但在处理方法上常可把复杂物体看成由许多质点组成的,在解决质点运动问题的基础上来研究这些复杂物体的运动。

§ 1.2 质点运动的描述

1.2.1 位置矢量 运动方程

为了表示运动质点的位置,首先要选参考系,然后在参考系上建立坐标系,如图1-2所示。任意时刻质点 P 在直角坐标系中的位置可用 P 所在点的三个坐标 (x, y, z) 来确定,或者用从

原点 O 指向 P 点的有向线段 $\overrightarrow{OP} = \boldsymbol{r}$ 来表示。矢量 \boldsymbol{r} 称为位置矢量, 简称位矢或矢径。相应地, 坐标 x, y, z 也就是位矢 \boldsymbol{r} 在坐标轴上的三个分量。

直角坐标系中, 位矢 \boldsymbol{r} 可表示为

$$\boldsymbol{r} = x\boldsymbol{i} + y\boldsymbol{j} + z\boldsymbol{k} \quad (1-1)$$

式中 $\boldsymbol{i}, \boldsymbol{j}, \boldsymbol{k}$ 分别表示沿 x, y, z 三个坐标轴正方向的单位矢量。位矢 \boldsymbol{r} 的大小和方向余弦分别为

$$|\boldsymbol{r}| = r = \sqrt{x^2 + y^2 + z^2} \quad (1-2)$$

$$\cos \alpha = \frac{x}{r}, \quad \cos \beta = \frac{y}{r}, \quad \cos \gamma = \frac{z}{r} \quad (1-3)$$

质点运动时, 其空间位置不断随时间变化, 这时质点的坐标 x, y, z 和位矢 \boldsymbol{r} 都是时间的函数。描述质点空间位置随时间变化的函数式, 称为质点的运动方程, 即

$$x = x(t), \quad y = y(t), \quad z = z(t) \quad (1-4a)$$

或 $\boldsymbol{r} = \boldsymbol{r}(t) \quad (1-4b)$

其中, 式(1-4a) 是运动方程的分量式, 而式(1-4b) 是运动方程的矢量式。知道了运动方程, 就能确定任一时刻质点的位置, 从而确定质点的运动。运动学的主要任务之一, 就是根据各种问题的具体条件, 求解质点的运动方程。

质点运动的空间轨迹称为轨道。轨道为直线时, 称为直线运动。轨道为曲线时, 称为曲线运动。从式(1-4a) 中消去时间 t 即得轨道方程。式(1-4a) 也就是轨道的参数方程。

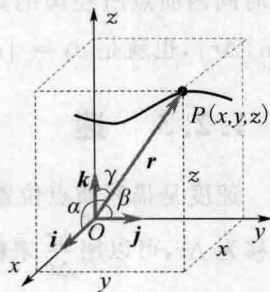


图 1-2 位置矢量

1.2.2 位移

如图 1-3 所示, 设质点沿曲线轨道运动, t 时刻, 质点在 A 点, 位矢为 \boldsymbol{r}_A , 经过 Δt 时间, 质点运动到 B 点, 位矢为 \boldsymbol{r}_B 。在 Δt 时间内位置矢量的增量

$$\Delta \boldsymbol{r} = \boldsymbol{r}_B - \boldsymbol{r}_A \quad (1-5)$$

称为质点在 Δt 时间内的位移。位移是描述质点位置变化大小和方向的物理量。在图上就是从起始位置 A 指向终点位置 B 点的一个矢量。位移是矢量, 它的运算遵守矢量加法的平行四边形法则。

在直角坐标系中, 位移的表达式为

$$\begin{aligned} \Delta \boldsymbol{r} &= (x_B - x_A)\boldsymbol{i} + (y_B - y_A)\boldsymbol{j} + (z_B - z_A)\boldsymbol{k} \\ &= \Delta x\boldsymbol{i} + \Delta y\boldsymbol{j} + \Delta z\boldsymbol{k} \end{aligned} \quad (1-6)$$

位移的大小: $|\Delta \boldsymbol{r}| = \sqrt{\Delta x^2 + \Delta y^2 + \Delta z^2}$

注意: 位移的大小或位移的模只能记作 $|\Delta \boldsymbol{r}|$, 而不能记作 Δr , 参见图 1-3。 Δr 通常表示位矢的模的增量, 即 $\Delta r = |\boldsymbol{r}_B| - |\boldsymbol{r}_A|$, 而 $|\Delta \boldsymbol{r}|$ 则是位矢增量的模, 即 $|\Delta \boldsymbol{r}| = |\boldsymbol{r}_B - \boldsymbol{r}_A|$, 两者显然不等。

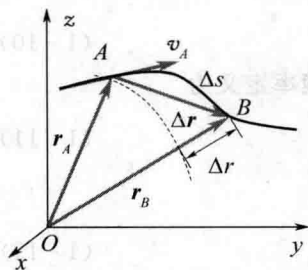


图 1-3 位移与路程

质点在 Δt 时间内所经实际轨迹的长度(如图 1-3 中弧线 \widehat{AB} 的长度)叫路程,以 Δs 表示。路程 Δs 是标量,而位移是矢量。一般情况下,某段有限时间内,质点位移的大小 $|\Delta \mathbf{r}|$ 不等于这段时间内质点所经历的路程 Δs ,当且仅当 Δt 趋于零时,两者的极限值才相同,即 $\lim_{\Delta t \rightarrow 0} \Delta s = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} |\Delta \mathbf{r}|$,也就是 $ds = |d\mathbf{r}|$ 。

1.2.3 速度

速度是描述质点位置变化的快慢和方向的物理量。设一质点 P 沿曲线运动, Δt 时间内的位移为 $\Delta \mathbf{r}$,可以用 $\frac{\Delta \mathbf{r}}{\Delta t}$ 来粗略描述 P 在 Δt 内位置变化的快慢和方向,称为质点在 Δt 内的平均速度,即

$$\bar{\mathbf{v}} = \frac{\Delta \mathbf{r}}{\Delta t} \quad (1-7)$$

平均速度是矢量,其方向与 $\Delta \mathbf{r}$ 同方向。平均速度的大小与所取的时间间隔 Δt 有关。显然用平均速度描述质点的运动是粗糙的,因为在 Δt 时间内,质点各个时刻的运动情况不一定相同。质点的运动可以时快时慢,方向也可以不断变化,平均速度不能反映质点运动的真实细节。如果要精确地知道质点在某一时刻或某一位置的实际运动情况,应使 Δt 尽量减小,当 Δt 趋近于零时,平均速度的极限值,即质点位矢对时间的变化率,就称为质点在 t 时刻的瞬时速度,简称速度,即

$$\mathbf{v} = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{\Delta \mathbf{r}}{\Delta t} = \frac{d\mathbf{r}}{dt} \quad (1-8)$$

即速度是位矢对时间的一阶导数。速度的方向就是 Δt 趋近于零时, $\Delta \mathbf{r}$ 的极限方向,参见图 1-3。当 Δt 趋近于零时, B 点无限地靠近 A 点, $\frac{\Delta \mathbf{r}}{\Delta t}$ 的极限方向即轨迹在 A 点的切线方向,因此质点速度的方向是沿该时刻质点所在处运动轨迹的切线并指向质点前进的一方。

在直角坐标系中,速度矢量可以表示为

$$\mathbf{v} = \frac{d\mathbf{r}}{dt} = \frac{dx}{dt}\mathbf{i} + \frac{dy}{dt}\mathbf{j} + \frac{dz}{dt}\mathbf{k} = v_x\mathbf{i} + v_y\mathbf{j} + v_z\mathbf{k} \quad (1-9)$$

瞬时速度的大小叫瞬时速率,简称速率,即

$$v = |\mathbf{v}| = \sqrt{v_x^2 + v_y^2 + v_z^2} \quad (1-10)$$

若质点在 Δt 时间内通过的路程为 Δs ,则,质点在 Δt 时间内的平均速率定义为

$$\bar{v} = \frac{\Delta s}{\Delta t} \quad (1-11)$$

质点在 t 时刻的速率为

$$v = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{\Delta s}{\Delta t} = \frac{ds}{dt} \quad (1-12)$$

即,速率等于质点所走过的路程对时间的变化率。因为路程 s 和时间 t 都是标量,所以速率是一