



普通高等教育“十一五”国家级规划教材

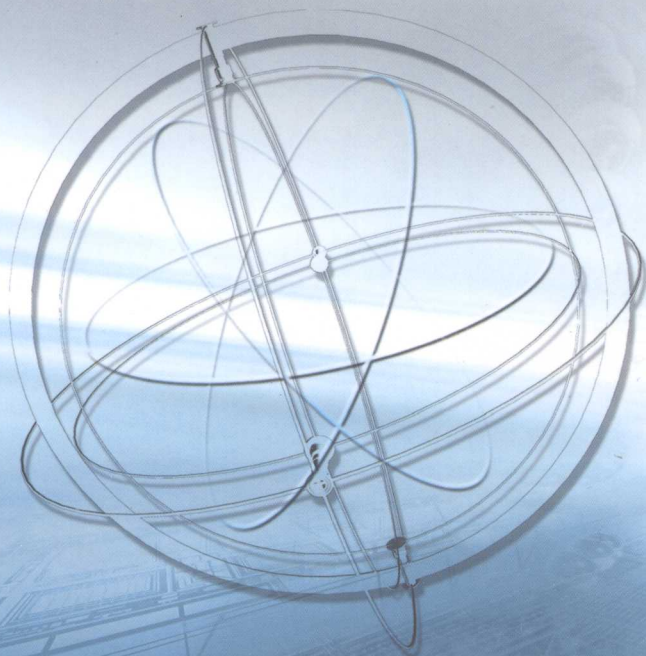
大学物理学

DaXue WuLiXue

第3版

上

主编 赵近芳 主审 颜晓红



北京邮电大学出版社
www.buptpress.com



普通高等教育“十一五”国家级规划教材

大学物理学

(第3版)

(上)

04
zh31.1/上

主编 赵近芳
编者 黎培德 黄克立
杨友田 崔洪农 王登龙
主审 颜晓红



北京邮电大学出版社
www.buptpress.com

内 容 简 介

本书是根据教育部《高等教育面向 21 世纪教学内容和课程体系改革计划》的精神编写的,于 2008 年被评选为普通高等教育“十一五”国家级规划教材.全书分上、下两册,上册:力学基础、相对论、振动与波和热学;下册:电磁学、波动光学和量子论.与之配套的还有《大学物理学学习指导》一书.两者既可彼此独立,又可相互配套使用.本书作为工科物理及理科非物理专业大学物理教材的改革尝试,采取了“高、宽、新、活、宜”的原则,即高视点选择经典内容,努力拓宽知识面,尽力反映新科技发展概况,注意各部分知识之间的活化联系,同时内容的难度较适宜.

本书可作为高等工科院校各专业的物理教材,也可作为综合大学和师范院校非物理专业的教材或参考书,并配有教学光盘.

图书在版编目(CIP)数据

大学物理学.上/赵近芳编著. — 3 版. — 北京:北京邮电大学出版社,2008

ISBN 978-7-5635-1694-0

I. 大… II. 赵… III. 物理学—高等学校—教材 IV. O4

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2008)第 062500 号

书 名	大学物理学(上)
主 编	赵近芳
责任编辑	沙一飞 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	010-62282185(发行部) 010-62283578(传真)
电子信箱	ctrd@buptpress.com
经 销	各地新华书店
印 刷	北京忠信诚胶印厂
开 本	787 mm×960 mm 1/16
印 张	20
字 数	420 千字
版 次	2008 年 6 月第 3 版 2008 年 6 月第 1 次印刷

ISBN 978-7-5635-1694-0

定价(上、下册):58.00 元

本册定价:29.00 元

如有质量问题请与发行部联系

版权所有 侵权必究

前 言

本书是为适应当前教学改革的要求,根据教育部《高等教育面向 21 世纪教学内容和课程体系改革计划》的精神,在总结我们多年教材改革实践的基础上,汲取了当前国内外优秀教学改革成果而编写的,是普通高等教育“十一五”国家级规划教材。教材既包括了工科大学物理课程指导委员会制定的教学基本要求的全部内容,又特别加强了近代物理知识和新科技物理基础的介绍,使全书内容更丰富、更符合工科物理教学的需要,这套教材的主要特点是:

1. 高视点选择经典内容,更新了教学体系 如力学中删去了直线运动、抛体运动、碰撞等内容,加强了矢量性、能量及守恒定律等重要概念的阐述,使学生对大学物理有新鲜感。教材把相对论纳入力学篇,使牛顿力学与相对论时空观紧密相联,开拓了学生的视野。

2. 大力使内容现代化 教材介绍了当前新技术领域中的基础性物理原理,如熵与信息、全息、光纤通信、能带理论、激光、超导、纳米科学技术等,还引入了非线性物理的一些基本概念,如混沌、孤波、耗散结构、非线性光学等内容;同时大力加强了现代物理学的重要观念,如相对论时空观、微观粒子的波粒二象性、量子论以及时空对称性与守恒定律的关系等,使读者尽早接触现代高科技的发展脉搏和现代物理的前沿课题,具有鲜明的时代特色。

3. 加强从全局观点掌握、运用知识的综合能力 教材力求突出主干,删除枝节,精选了例题和习题,尽量避免烦琐的叙述和冗长的数学推导,力求对物理概念、原理阐述准确、简洁、透彻,重点突出,便于学生阅读和理解。加强重要概念在各部分内容中的联系,如势能概念在力学、热学和电学中一直互相呼应,一脉相承,使学生整体把握知识的能力受到必要的训练,有利于从全局观点掌握、运用知识和综合思考。

4. 开“窗口”、重视科学素质训练 在现代物理部分大胆地“渗透”一些科技前沿信息及开一定的非线性物理“窗口”。尽管有些内容学生不一定能完全清楚,但这将有益于培养学生的求知欲望和独立思考能力,而求知欲和独立思考是科学素质和创造能力的基本要素。

说明:

- (1) 本书教学参考时数为 120 学时;
- (2) 教材中打 * 号的章节多为开“窗口”的内容,教师可自行取舍;
- (3) 书中小字部分是相关章节的延伸内容,不作要求;
- (4) 若将打 * 号的章节和小字部分除去,仍不影响教材的整体性。

本书第一版于 2002 年 8 月由北京邮电大学出版社出版,为新一代物理教材。该书出版

后,曾在国内十多所高校中使用,反映较好。

本书第二版于2005年由北京邮电大学出版社出版,教材体系与第一版大体相同,保持了原教材基础知识系统、扎实,内容精干,重实际训练等特色,又进一步加强了现代物理的新观念、新思想及新技术的介绍,使全书内容更丰富、更符合工科物理教学的需要。

现根据使用学校师生的反馈意见和要求,对教材进行了再次修改。全书分《大学物理学》上、下册和《大学物理学学习指导》。上册:力学、相对论、振动与波、热物理学;下册:电磁学、波动光学、量子物理学、新技术的物理基础(专题);指导书:学习指导和系列化习题。

几点说明:

1. 将振动与波归入力学篇,同时在电磁学篇最后讲述电磁波,接着再讲述波动光学,前后连贯,更方便教学。

2. 教材中删去了部分起点较高的内容和习题,并对书中一些不规范的地方进行了修正。

3. 教材增加了阅读材料和本章小结,供学生自学时参考。

4. 修改了书中的插图,使之更准确、更形象、更美观。

本书由黎培德编写力学、振动与波、超导电性及阅读材料一、二、三、五、六;杨友田编写热学及阅读材料七、八、九;黄克立编写电磁学、激光原理及阅读材料十、十一、十二;赵近芳编写波动光学、固体的能带结构、纳米科学技术及阅读材料十三、十四、十五、十六、十七;崔洪农编写相对论、量子物理基础、原子核物理和粒子物理及阅读材料四、十八;王登龙编写玻色-爱因斯坦凝聚及阅读材料十九。学习指导的相关章节仍由以上编者分工编写,最后由赵近芳教授负责全书的修改和定稿工作。在改编过程中,参加讨论和编写的老师还有黄小益、蔡新华、曹东坡、贺江达、滕道祥、陈飞民、卢德华、唐世洪、苏卡林、周宙安、张登玉、方家元、黄祖洪、吴松安、龚志强、刘朝辉、彭解华、陈昌永、王振华、施毅敏等,他们提出了许多很中肯的建议,尤其是得到了北京航空航天大学、北京邮电大学、厦门大学、中北大学、武汉理工大学、江汉大学、湘潭大学、中南大学、长沙理工大学、南华大学、湖南大学、华南理工大学、中南林学院等学校老师的帮助和指导,教育部物理教学指导委员会委员颜晓红教授仔细审查了此书,匡乐满教授和罗维治教授对此书提出了许多宝贵意见,北京邮电大学出版社有关人员在本书的编辑出版过程中付出了大量的劳动,在此一并致谢。

编写适合教学改革需要的教材是一种探索,加之编者水平所限,难免有不妥和疏漏之处,恳请读者批评指正。

编者

2008年2月

绪 论

物理学的研究对象

物理学是关于自然界最基本形态的科学,它研究物质的结构和相互作用以及物质的运动。

存在于我们周围和我们意志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,另一类是场。实物包括微观粒子和宏观物体,它的范围是从基本粒子的亚核世界到整个宇宙。场包括引力场、电磁场和量子场等。

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。物质间有四种基本相互作用,即引力相互作用、电磁相互作用、强相互作用和弱相互作用。在 20 世纪 70 年代末,电磁相互作用和弱相互作用已经统一为电弱相互作用。研究发现,实物间的相互作用是由场来传递的,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的条件下,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。

大学物理课程的内容体系可以按以下顺序:

- (1) 力学和相对论——讨论机械运动和时空性质;
- (2) 振动与波——讨论宏观领域的波动规律;
- (3) 热学——讨论由大量分子组成的热力学系统的统计性规律和宏观表现;
- (4) 电磁学——讨论电磁场的运动规律和电磁相互作用;
- (5) 波动光学——讨论光的干涉、衍射和偏振;
- (6) 量子物理学——讨论微观粒子的波粒二象性和量子运动的特征。

物理学和科学技术的关系

物理学是一切自然科学的基础,处于诸多自然科学学科的核心地位。物理学研究的粒子和原子构成了蛋白质、基因、器官、生物体,构成了一切天然的和人造的物质以及广袤的陆地、海洋、大气,甚至整个宇宙。因此,物理学是化学、生物、材料科学、地球物理和天体物理等学科的基础。今天,物理学和这些学科之间的边缘领域中又形成了一系列分支学科和交叉学科,如粒子物理、核物理、凝聚态物理、原子分子物理、电子物理、生物物理等等。这些学科都取得了引人注目的成就。

物理学的发展,广泛而直接地推动着技术的革命和社会的文明。18世纪60年代开始的第一次技术革命以蒸汽机应用为标志,它是牛顿力学和热力学发展的结果。19世纪70年代开始的第二次技术革命以电力的广泛应用和无线电通讯为标志,它是电磁学发展的结果。20世纪40年代兴起的并一直延续至今的第三次技术革命是相对论和量子论发展的结果。事实证明,几乎所有重大的新技术领域学科(如电子学、原子能、激光和信息技术等)的创立,事前都在物理学中经过长期的酝酿、在理论和实验两方面积累了大量知识后,才突然迸发出来的。物理学是科技生产力发展的不竭源泉。

在新世纪开始的今天,全世界范围内正面临着以信息、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。在这些高科技领域中必将层出不穷地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。

努力学好物理学

物理学的理论是通过观察、实验、抽象、假设等研究方法并通过实践的检验而建立起来的。实践是检验科学真理的唯一标准。学习物理应遵循实践—理论—再实践的方法,独立思考、自己判断,不必迷信偶像和屈从权威。以实事求是、老老实实的态度对待科学真理是绝对必要的。作为大学理工科的学生,学习物理首先要注重课程内容的内在联系、清晰的条理和严谨的逻辑,扎扎实实学好基本理论和基本知识。这包括对物理概念、规律、物理图像等有透彻的理解,对物理学的研究方法、数学描述语言和推演技巧的熟练掌握,因此适当的记忆和做习题是必要的。但是,掌握现有的书本知识还远远不够。物理学和一切自然科学的发展是永不停息的,纷繁复杂的自然界中人类未知的事物还远远超过已经了解的事物,发现和创新

是自然科学的生命和灵魂.科学工作者应当争取有所发现、有所创新,同学们应当通过学习和掌握物理知识的过程来培养自己的创新意识和创造能力.

在培养创新能力方面,学会“体会式”的学习方法是十分重要的.著名物理学家、诺贝尔物理学奖获得者杨振宁先生在多次谈话中比较了中美两国的教育方式.他提到中国的传统教育方式强调知识的系统性,提倡循序渐进地学习,这有利于学生打下坚实的基础;而美国的教育注重知识的广泛性、提倡“渗透式”,其特点是在学习的时候,学生对所学的内容往往还不太清楚,然而就在这个过程中学生一点一滴体会到了许多东西.其优点是学生有较强的独立思考能力和创造意识,易于较快进入科学发展的前沿.这两种学习方式各具特色,长短互补.我们应当努力把两者的优点和谐地统一起来,中西兼蓄、为我所用.基于这些考虑,本书在适当章节插入一些对学生来说不很熟悉和感觉较难的内容,目的就是希望渗透一些近代或高新技术的信息,以开拓视野,希望读者能以富于进取的精神来对待这些内容.

目 录

力学基础篇

第 1 章 运动的描述	(2)
1.1 参考系 坐标系 物理模型	(2)
1.2 运动的描述	(3)
1.3 相对运动	(15)
阅读材料 混沌——确定论系统中的“随机行为”	(18)
本章提要	(21)
习题	(22)
第 2 章 运动定律与力学中的守恒定律	(24)
2.1 牛顿运动定律	(24)
*2.2 非惯性系 惯性力	(30)
2.3 动量 动量守恒定律 * 质心运动定理	(33)
2.4 功 动能 势能 机械能守恒定律	(40)
2.5 角动量 角动量守恒定律	(53)
2.6 刚体的定轴转动	(58)
*2.7 理想流体的伯努利方程	(71)
阅读材料 时空对称性和守恒定律	(78)
本章提要	(82)
习题	(85)
第 3 章 相对论	(90)
3.1 伽利略变换和经典力学时空观	(90)
3.2 狭义相对论产生的实验基础和历史条件	(92)
3.3 狭义相对论基本原理 洛仑兹变换	(95)
3.4 狭义相对论时空观	(101)
3.5 狭义相对论动力学	(107)
阅读材料 广义相对论简介	(111)
本章提要	(120)
习题	(121)
第 4 章 机械振动	(124)
4.1 简谐振动的动力学特征	(124)

4.2	简谐振动的运动学	(127)
4.3	简谐振动的能量	(132)
4.4	简谐振动的合成 *振动的频谱分析	(135)
4.5	阻尼振动 受迫振动 共振	(142)
	阅读材料 非线性振动简介	(146)
	本章提要	(148)
	习题	(149)
第 5 章	机械波	(152)
5.1	机械波的形成和传播	(152)
5.2	平面简谐波的波动方程	(157)
5.3	波的能量 *声强	(166)
5.4	惠更斯原理 波的叠加和干涉	(170)
5.5	驻波	(177)
5.6	多普勒效应 *冲击波	(183)
*5.7	色散 波包 群速度	(188)
	阅读材料 非线性波 孤波	(190)
	本章提要	(191)
	习题	(192)
气体动理论和热力学篇		
第 6 章	气体动理论基础	(198)
6.1	平衡态 温度 理想气体状态方程	(198)
6.2	理想气体压强公式	(201)
6.3	温度的统计解释	(204)
6.4	能量均分定理 理想气体的内能	(205)
6.5	麦克斯韦分子速率分布定律	(208)
*6.6	玻耳兹曼分布律	(213)
6.7	分子的平均碰撞次数和平均自由程	(215)
*6.8	气体内的输运过程	(218)
	阅读材料 奇妙的低温世界	(222)
	本章提要	(225)
	习题	(226)
第 7 章	热力学基础	(229)
7.1	内能 功和热量 准静态过程	(229)
7.2	热力学第一定律	(232)
7.3	气体的摩尔热容量	(235)
7.4	绝热过程	(238)

7.5 循环过程 卡诺循环	(241)
7.6 热力学第二定律	(247)
7.7 热力学第二定律的统计意义 玻耳兹曼熵	(251)
7.8 卡诺定理 克劳修斯熵	(254)
阅读材料 熵与信息	(261)
阅读材料 耗散结构	(265)
本章提要	(271)
习题	(273)
附录 I 矢量	(276)
附录 II 国际单位制(SI)	(289)
附录 III 常用基本物理常量表	(291)
附录 IV 物理量的名称、符号和单位(SI)一览表	(292)
附录 V 空气、水、地球、太阳系一些常用数据	(295)
附录 VI 历年诺贝尔物理学奖获得者	(296)
习题答案	(303)

力学基础篇

力学是物理学中最古老和发展最完美的学科。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。但其成为一门科学理论则始于 17 世纪伽利略论述惯性运动,继而牛顿提出了力学三个运动定律。以牛顿运动定律为基础的力学理论称为牛顿力学或经典力学。它所研究的对象是物体的机械运动。经典力学有严谨的理论体系和完备的研究方法,如观察现象,分析和综合实验结果,建立物理模型,应用数学表述,作出推论和预言,以及用实践检验和校正结果等。因此,它曾被人们誉为完美普遍的理论而兴盛了约三百年。直至 20 世纪初才发现它在高速和微观领域的局限性,从而在这两个领域分别被相对论和量子力学所取代,但在一般的技术领域,如机械制造、土木建筑、水利设施、航空航天等工程技术中,经典力学仍然是必不可少的重要的基础理论。

本篇主要讲述质点力学、刚体的定轴转动以及机械振动和机械波。着重阐明动量、角动量和能量诸概念及相应的守恒定律(并简要介绍了对称性与守恒定律的关系)。长期以来,经典力学被认为是决定论的。随着现代科学技术的发展,人们发现经典力学问题实际上大部分具有不可预测性,是非决定论的。本书也向读者介绍了这方面的基本知识——混沌。狭义相对论的时空观和牛顿力学联系紧密,亦可归入力学范畴。

第1章 运动的描述

力学所研究的是物体机械运动的规律. 宏观物体之间(或物体各部分之间)相对位置的变动称为机械运动. 在经典力学中, 通常将力学分为运动学、动力学和静力学. 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的变化关系, 不涉及引发物体运动和改变运动状态的原因.

1.1 参考系 坐标系 物理模型

为了描述物体的运动必须作三点准备, 即选择参考系、建立坐标系、提出物理模型.

1.1.1 运动的绝对性和相对性

众所周知, 运动是物质的存在形式, 运动是物质的固有属性. 从这种意义上讲, 运动是绝对的. 但本书所讨论的运动, 还不是这种哲学意义上的广义运动. 即使以机械运动形式而言, 任何物体在任何时刻都在不停地运动着. 例如, 地球在自转的同时绕太阳公转, 太阳又相对于银河系中心以大约 250 km/s 的速率运动, 而我们所处的银河系又相对于其他银河系大约以 600 km/s 的速率运动着. 总之, 绝对不运动的物体是不存在的.

然而运动又是相对的. 因此本书所研究的物体的运动都是在一定的环境和特定的条件下运动. 例如, 当说一列火车开动了, 这显然是指火车相对于地球(即车站)而言的. 离开特定的环境、条件谈论运动没有任何意义. 正如恩格斯所说:“单个物体的运动是不存在的——只有在相对的意义下才可以谈运动.”

1.1.2 参考系

运动是绝对的, 但运动的描述却是相对的. 因此, 在确定研究对象的位置时, 必须先选定一个标准物体(或相对静止的几个物体)作为基准. 那么这个被选作标准的物体或物体群, 就称为**参考系**.

同一物体的运动, 由于所选参考系不同, 对其运动的描述就会不同. 例如在匀速直线运动的车厢中, 物体的自由下落, 相对于车厢是作直线运动; 相对于地面, 却是作抛物线运动; 相对于太阳或其他天体, 运动的描述则更为复杂. 这一事实充分说明了运动的描述是相对的.

从运动学的角度讲, 参考系的选择是任意的, 通常以对问题的研究最方便、最简单为原

则. 研究地球上物体的运动, 在大多数情况下, 以地球为参考系最为方便(以后如不作特别说明, 研究地面上物体的运动, 都是以地球为参考系). 但是, 当在地球上发射人造“宇宙小天体”时, 则应以太阳为参考系.

1.1.3 坐标系

要想定量地描述物体的运动, 就必须在参考系上建立适当的坐标系. 在力学中常用的有直角坐标系. 根据需要, 也可选用极坐标系、自然坐标系、球面坐标系或柱面坐标系等.

总的说来, 当参考系选定后, 无论选择何种坐标系, 物体的运动性质都不会改变. 然而, 坐标系选择得当, 可使计算简化.

1.1.4 物理模型

任何一个真实的物理过程都是极其复杂的. 为了寻找某过程中最本质、最基本的规律, 总是根据所提问题(或所要回答的问题), 对真实过程进行理想化的简化, 然后经过抽象提出一个可供数学描述的物理模型.

现在所提的问题是确定物体在空间的位置. 若物体的线度比它运动的空间范围小很多时, 例如绕太阳公转的地球和调度室中铁路运行图上的列车等; 或当物体作平动时, 物体上各部分的运动情况(轨迹、速度、加速度)完全相同. 这时可以忽略物体的形状、大小, 而把它看成一个具有一定质量的点, 并称之为质点.

若物体的运动在上述两种情形之外, 还可推出质点系的概念. 即把这个物体看成是由许许多多满足第一种情况的质点所组成的系统. 当把组成这个物体的各个质点的运动情况弄清楚了, 也就描述了整个物体的运动.

在力学中除了质点模型之外, 在后续章节中还会遇到刚体、理想流体、谐振子及理想弹性介质等物理模型.

综上所述: 选择合适的参考系, 以方便确定物体的运动性质; 建立恰当的坐标系, 以定量地描述物体的运动; 提出较准确的物理模型, 以确定所提问题最基本的运动规律.

1.2 运动的描述

1. 位置矢量

为了表示运动质点的位置, 首先应该选参考系, 然后在参考系上选定坐标系的原点和坐标轴, 参看图 1.1. 质点 P 在直角坐标系中的位置可由 P 所在点的三个坐标 x, y, z 来确定, 或者用从原点 O 到 P 点的有向线段 $\vec{OP} = \boldsymbol{r}$ 来表示, 矢量 \boldsymbol{r} 叫作位置矢量(简称位矢, 又称矢径). 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.

在直角坐标系中, 位矢 \boldsymbol{r} 可以表示成

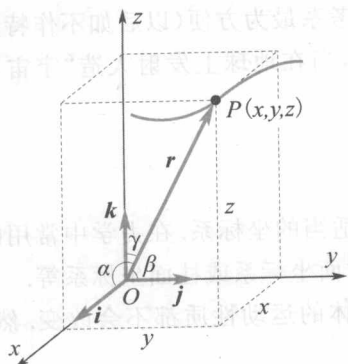


图 1.1 直角坐标系下的位矢

$$\mathbf{r} = xi + yj + zk \quad (1.1)$$

式中 i, j, k 分别表示沿 x, y, z 三轴正方向的单位矢量. 位矢 r 的大小为

$$|\mathbf{r}| = r = \sqrt{x^2 + y^2 + z^2} \quad (1.2)$$

位矢的方向余弦是:

$$\cos \alpha = \frac{x}{r}, \cos \beta = \frac{y}{r}, \cos \gamma = \frac{z}{r}.$$

质点的机械运动是质点的空间位置随时间变化的过程. 这时质点的坐标 x, y, z 和位矢 r 都是时间 t 的函数. 表示运动过程的函数式称为运动方程, 可以写作

$$x = x(t), y = y(t), z = z(t). \quad (1.3a)$$

$$\mathbf{r} = \mathbf{r}(t) \quad (1.3b)$$

或

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. 力学的主要任务之一, 正是根据各种问题的具体条件, 求解质点的运动方程.

质点在空间的运动路径称为轨道. 质点的运动轨道为直线时, 称为直线运动. 质点的运动轨道为曲线时, 称为曲线运动. 从式(1.3a)中消去 t 即可得到轨道方程. 式(1.3a)就是轨道的参数方程.

轨道方程和运动方程最明显的区别, 就在于轨道方程不是时间 t 的显函数. 例如, 已知某质点的运动方程为

$$x = 3\sin \frac{\pi}{6}t, y = 3\cos \frac{\pi}{6}t, z = 0.$$

式中 t 以 s 计, x, y, z 以 m 计. 从 x, y 两式中消去 t 后, 得轨道方程

$$x^2 + y^2 = 9, z = 0.$$

其表明质点是在 $z = 0$ 的平面内, 作以原点为圆心, 半径为 3 m 的圆周运动.

2. 位移

如图 1.2 所示, 设质点沿曲线轨道 \overline{AB} 运动, 在 t 时刻, 质点在 A 处, 在 $t + \Delta t$ 时刻, 质点运动到 B 处, A, B 两点的位矢分别由 r_1 和 r_2 表示, 质点在 Δt 时间间隔内位矢的增量

$$\Delta \mathbf{r} = \mathbf{r}_2 - \mathbf{r}_1 \quad (1.4)$$

称之为位移, 它是描述物体位置变动大小和方向的物理量, 在图上就是由起始位置 A 指向终止位置 B 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(或三角形法则).

如图 1.3 所示, 位移的模只能记作 $|\Delta \mathbf{r}|$, 不能记作 Δr . Δr 通常表示位矢的模的增量, 即 $\Delta r = |\mathbf{r}_2| - |\mathbf{r}_1|$, 而 $|\Delta \mathbf{r}|$ 则是位矢增量的模(即位移的模), 而且在通常情况下 $|\Delta \mathbf{r}| \neq \Delta r$.

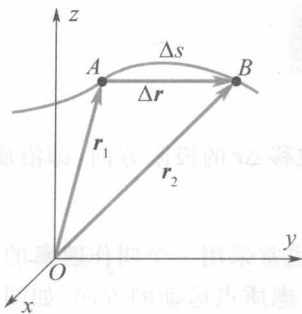


图 1.2 位移

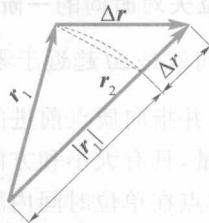


图 1.3 位移的大小

必须注意,位移表示物体位置的改变,并非质点所经历的路程.例如在图 1.2 中,位移是有向线段 \overline{AB} ,它的量值 $|\Delta r|$ 为割线 AB 的长度.路程是标量,即曲线 \widehat{AB} 的长度,通常记作 Δs .一般说来, $|\Delta r| \neq \Delta s$.显然,只有在 Δt 趋近于零时,才有 $|\mathrm{d}r| = \mathrm{d}s$.应当指出,即使在 $\Delta t \rightarrow 0$ 时, $|\mathrm{d}r| = \mathrm{d}r$ 这个等式也不成立.

在直角坐标系中,位移的表达式为

$$\Delta \mathbf{r} = (x_2 - x_1)\mathbf{i} + (y_2 - y_1)\mathbf{j} + (z_2 - z_1)\mathbf{k} = \Delta x \mathbf{i} + \Delta y \mathbf{j} + \Delta z \mathbf{k} \quad (1.5)$$

位移的模为

$$|\Delta \mathbf{r}| = \sqrt{(x_2 - x_1)^2 + (y_2 - y_1)^2 + (z_2 - z_1)^2} \quad (1.6)$$

位移和路程的单位均是长度的单位,国际单位制(SI制)中为 m.

3. 速度

研究质点的运动,不仅要知道质点的位移,还必须知道在多长时间通过这段位移,亦即要知道质点运动的快慢程度.

如图 1.2,在时刻 t 到 $t + \Delta t$ 这段时间内,质点的位移为 $\Delta \mathbf{r}$,那么 $\Delta \mathbf{r}$ 与 Δt 的比值,称为质点在 t 时刻附近 Δt 时间内的平均速度

$$\bar{\mathbf{v}} = \frac{\overline{AB}}{\Delta t} = \frac{\Delta \mathbf{r}}{\Delta t} \quad (1.7)$$

这就是说,平均速度的方向与位移 $\Delta \mathbf{r}$ 的方向相同,平均速度的大小与在相应的时间 Δt 内每单位时间的位移大小相同.

显然,用平均速度描述物体的运动是比较粗糙的.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,方向也可以不断地改变,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,即 $\Delta t \rightarrow 0$,用平均速度的极限值——瞬时速度(简称速度)来描述.

质点在某时刻或某位置的瞬时速度,等于该时刻附近 Δt 趋近于零时平均速度的极限值,数学表示式为

$$\boldsymbol{v} = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{\Delta \boldsymbol{r}}{\Delta t} = \frac{d\boldsymbol{r}}{dt} \quad (1.8)$$

可见速度等于位矢对时间的一阶导数。

速度的方向就是 Δt 趋近于零时, 平均速度 $\frac{\Delta \boldsymbol{r}}{\Delta t}$ 或位移 $\Delta \boldsymbol{r}$ 的极限方向, 即沿质点所在处轨道的切线方向, 并指向质点前进的一方。

速度是矢量, 具有大小和方向. 描述质点运动时, 也常采用一个叫作速率的物理量. 速率是标量, 等于质点在单位时间内所行经的路程, 而不考虑质点运动的方向. 如图 1.2 所示, 在 Δt 时间内质点所行经的路程为曲线 \widehat{AB} . 设曲线 \widehat{AB} 的长度为 Δs , 那么 Δs 与 Δt 的比值就称为 t 时刻附近 Δt 时间内的平均速率, 即

$$\bar{v} = \frac{\Delta s}{\Delta t} \quad (1.9)$$

平均速率与平均速度不能等同看待. 例如, 在某一段时间内, 质点环行了一个闭合路径, 显然质点的位移等于零, 平均速度也为零, 而质点的平均速率则不等于零。

虽然如此, 但在 $\Delta t \rightarrow 0$ 的极限条件下, 曲线 \widehat{AB} 的长度 Δs 与直线 AB 的长度 $|\Delta \boldsymbol{r}|$ 相等, 即在 $\Delta t \rightarrow 0$ 时, $ds = |d\boldsymbol{r}|$, 所以瞬时速率

$$v = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{\Delta s}{\Delta t} = \frac{ds}{dt} = \left| \frac{d\boldsymbol{r}}{dt} \right| = |\boldsymbol{v}| \quad (1.10)$$

即瞬时速率就是瞬时速度的模。

在直角坐标系中, 由式(1.1)可知, 速度可表示成

$$\boldsymbol{v} = \frac{d\boldsymbol{r}}{dt} = \frac{dx}{dt}\boldsymbol{i} + \frac{dy}{dt}\boldsymbol{j} + \frac{dz}{dt}\boldsymbol{k} = v_x\boldsymbol{i} + v_y\boldsymbol{j} + v_z\boldsymbol{k} \quad (1.11)$$

式中 $v_x = \frac{dx}{dt}$, $v_y = \frac{dy}{dt}$, $v_z = \frac{dz}{dt}$ 叫作速度在 x, y, z 轴的分量. 这时速度的模可以表示成

$$v = |\boldsymbol{v}| = \sqrt{v_x^2 + v_y^2 + v_z^2} \quad (1.12)$$

速度和速率在量值上都是长度与时间之比, 国际单位制(SI)中为 m/s.

4. 加速度

在力学中, 位矢 \boldsymbol{r} 和速度 \boldsymbol{v} 都是描述物体机械运动的状态参量. 即 \boldsymbol{r} 和 \boldsymbol{v} 已知, 质点的力学运动状态就确定了. 即将引入的加速度概念则是用来描述速度矢量随时间的变化率的物理量。

在变速运动中, 物体的速度是随时间变化的. 这个变化可以是运动快慢的变化, 也可以是运动方向的变化, 一般情况下速度的方向和大小都在变化. 加速度就是描述质点的速度(大小和方向)随时间变化快慢的物

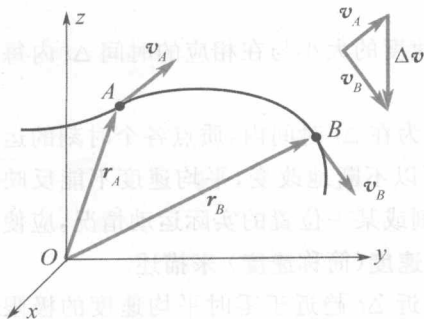


图 1.4 速度的增量