

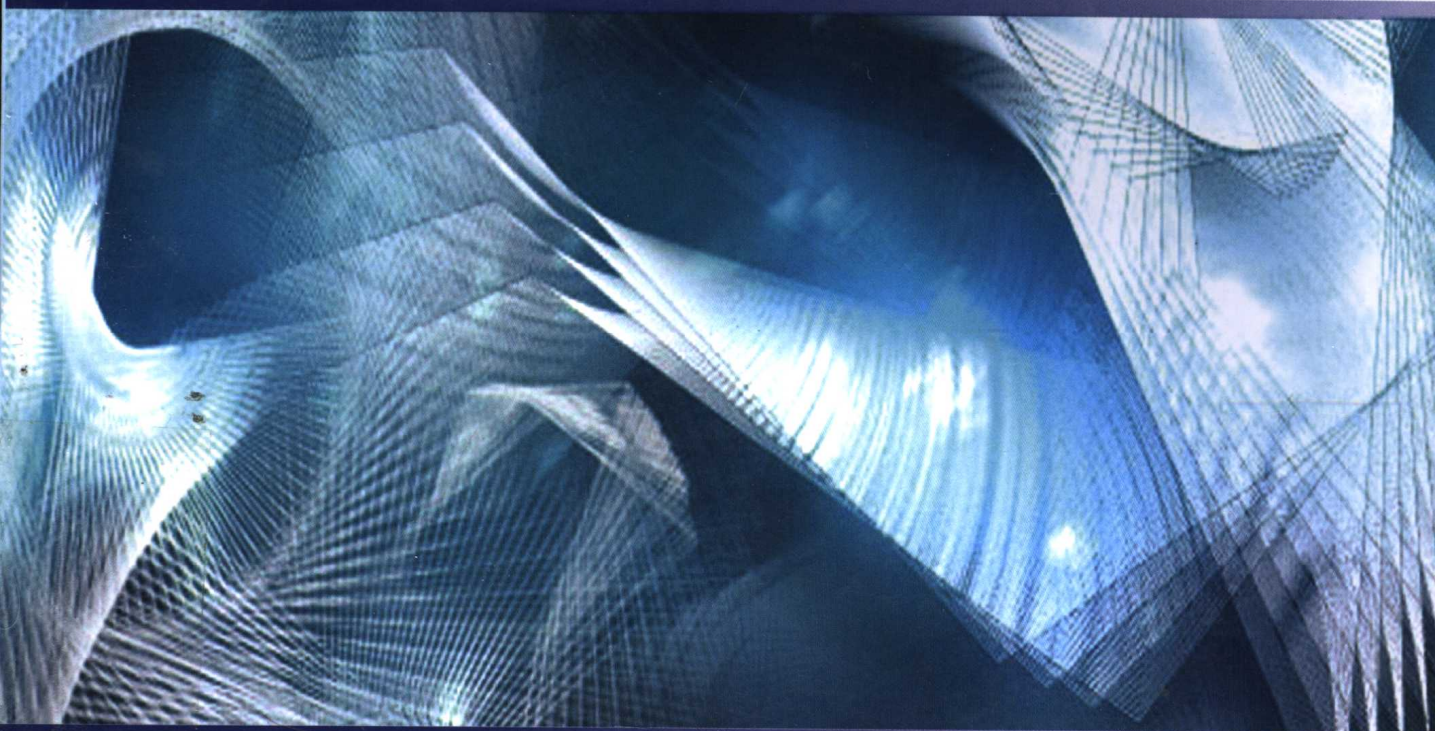


二十一世纪全国高等院校规划教材

普通物理学

PU TONG WU LI XUE

主编 王庆飞 姚玉钦



 西北工业大学 出版社

04/322

2007

二十一世纪全国高等院校规划教材

普通物理学

主 编 王庆飞 姚玉钦

副主编 李建新 刘栓江 吴 洁 郑桂梅

梁为民 崔亚量 刘振东 孙兴川

王 磊 张石定 牛兴平 李现常

窦立璇

西北工业大学出版社

【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、按照教育部非物理类专业物理基础课程教学指导分委员会 2004 年修订的“普通物理教学基本要求(讨论稿)”编写的。教材基本上保持传统的内容体系,包括力学、热学、电磁学、振动与波动、光学和近代物理学共 18 章。本书着重能力和素质培养,强化教学基本要求,加强近现代物理知识,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。

图书在版编目(CIP)数据

普通物理学 / 王庆飞,姚玉钦主编. —西安:西北工业大学出版社,2007.7

二十一世纪全国高等院校规划教材

ISBN 978-7-5612-2244-7

I. 普… II. ①王…②姚… III. 普通物理学—高等学校—教材 IV. 04

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2007)第 113347 号

出版发行:西北工业大学出版社

通信地址:西安市友谊西路 127 号 邮编:710072

电 话:(029)88493844 88491147

网 址:www.nwpup.com

印 刷 者:宏达印务有限公司

开 本:787mm×1 092mm 1/16

印 张:29.25

字 数:720 千字

版 次:2007 年 7 月第 1 版 2007 年 7 月第 1 次印刷

定 价:38.00 元

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发展的前列,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普通物理学课程,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高素质人才所必备的,是学习掌握其他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 worldview、宇宙观,进行科学能力和科学方法的训练。

这部《普通物理学》教材按照教育部非物理类专业物理基础课程教学指导分委员会 2004 年修订的“普通物理教学基本要求(讨论稿)”编写,包含了基本要求所规定的全部基本内容和大部分扩展内容,教材基本上保持传统的内容体系,包括力学、热学、电磁学、振动与波动、光学和近代物理学共十八章。为适应不同的教学对象和不同的专业类别的教学需要,还编入了一些相关的内容。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、教学内容等方面紧密融合在一起。

为了使学生对物理学的基本概念、基本理论、基本方法能够有比较全面和系统的认识 and 正确的理解,这部教材在教学内容、教学方法等方面进行了认真细致的编排和一些创新设计。主要特色有:

(1) 强化教学基本要求。为了适应当前物理教学改革和实际教学的需求,做到实用与好用,教材加强了基本现象、基本概念、基本原理的阐述,深入浅出,增加了典型例题。围绕教学要求精选习题,习题数量适中,书后附有答案,便于学生和教师对基本知识的自测和检测。

(2) 加强近现代物理知识。为适应教学内容现代化的要求,一方面在经典物理中渗透、穿插近现代内容,介绍高新技术中的物理原理,以增强现代气息;另一方面,相对论、量子力学、核物理与粒子物理单独成章,加强近代内容阐述和介绍,并力求做到经典物理现代性,物理前沿普物化。

(3) 着重能力和素质培养。全书强调了物理模型在物理学理论和科学研究方法以及解决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,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;本书还结合重要物理概念穿插介绍著名物理学家和物理学史,介绍了在典型物理理论的建立过程中所体现的科学精神;并以阅读材料的形式适当“开窗口”。

(4) 为方便开展双语教学,教材中还对物理名词给出了英文词汇。

本书由王庆飞、姚玉钦主编,并负责全书的统稿工作;李现常编写绪论、第一章,计约 2.7 万字;刘振东编写第二、十三章,计约 5.5 万字;牛兴平编写第三章,计约 2.5 万字;郑桂梅编写第四、十八章,计约 6.1 万字;崔亚量编写第五章,计约 5.0 万字;李建新编写第六章,计约 5.7

万字;张石定编写第七章,计约 3.6 万字;梁为民编写第八章,计约 5.2 万字;刘栓江编写第九、十四章,计约 6.1 万字;吴洁编写第十章,计约 5.2 万字;姚玉钦编写第十一章,计约 6.6 万字;孙兴川编写第十二章,计约 3.2 万字;窦立璇编写第十五章,计约 2.5 万字;王磊编写第十六章,计约 3.2 万字;王庆飞编写第十七章,计约 6.1 万字。另外,孙兴川、王磊、张石定、牛兴平、李现常、窦立璇还完成了全书习题的解答工作。

在编写过程中,我们还吸取了近年来普通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普通物理学教材,我们对此一并表示诚挚的谢意!

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。

编 者

内 容 提 要

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、按照教育部非物理类专业物理基础课程教学指导分委员会 2004 年修订的“普通物理教学基本要求(讨论稿)”编写的。教材基本上保持传统的内容体系,包括力学、热学、电磁学、振动与波动、光学和近代物理学共十八章。本书着重能力和素质培养,强化教学基本要求,加强近现代物理知识,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。

目 录

绪 论	(1)
第一章 质点运动学	(3)
第一节 参考系与质点	(3)
第二节 质点运动的描述	(4)
第三节 曲线运动	(9)
第四节 相对运动	(13)
思考题一	(16)
习题一	(17)
第二章 质点动力学	(18)
第一节 牛顿运动定律	(18)
第二节 单位制和量纲	(20)
第三节 冲量和动量	(21)
第四节 功和能	(25)
第五节 功能原理和机械能守恒定律	(28)
第六节 守恒定律	(29)
第七节 流体力学基础	(30)
思考题二	(37)
习题二	(38)
第三章 刚体力学	(41)
第一节 刚体的平动和转动	(41)
第二节 转动定理和转动惯量	(43)
第三节 刚体定轴转动的动能定理	(48)
第四节 角动量及角动量守恒定律	(50)
思考题三	(55)
习题三	(55)
第四章 机械振动	(57)
第一节 简谐振动	(57)
第二节 简谐振动的能量	(64)
第三节 简谐振动的合成	(66)
第四节 阻尼振动 受迫振动 共振	(72)
思考题四	(78)
习题四	(79)
第五章 机械波	(82)
第一节 波的基本概念	(82)

第二节 平面简谐波 波动方程	(86)
第三节 波的能量 波的强度	(91)
第四节 声波	(93)
第五节 波的叠加原理和惠更斯原理	(98)
第六节 波的干涉	(100)
第七节 驻波	(101)
第八节 多普勒效应	(105)
思考题五	(110)
习题五	(111)
第六章 热力学基础	(114)
第一节 热力学平衡态及其描述	(114)
第二节 热力学第零定律和温度	(117)
第三节 状态方程	(120)
第四节 准静态过程	(123)
第五节 热力学第一定律	(126)
第六节 热力学第一定律对理想气体的应用	(128)
第七节 循环过程 卡诺循环	(133)
第八节 热力学第二定律	(136)
第九节 熵	(140)
思考题六	(144)
习题六	(145)
第七章 气体动理论	(150)
第一节 气体动理论的基本观点	(150)
第二节 理想气体的压强公式	(152)
第三节 温度的微观意义	(154)
第四节 能量按自由度均分定理	(156)
第五节 麦克斯韦速率分布律	(158)
第六节 范德瓦耳斯方程	(161)
第七节 平均碰撞自由程	(164)
第八节 输 运	(165)
思考题七	(170)
习题七	(170)
第八章 真空中的静电场	(173)
第一节 电荷 电荷守恒定律	(173)
第二节 库仑定律	(175)
第三节 电场 电场强度	(178)
第四节 高斯定理	(186)
第五节 静电场的环路定理 电势	(193)
第六节 等势面 电场强度与电势梯度的关系	(197)

思考题八	(201)
习题八	(202)
第九章 静电场中的导体和电介质	(206)
第一节 静电场中的导体	(206)
第二节 封闭导体壳内外的静电场	(210)
第三节 电容和电容器	(212)
第四节 静电场中电介质的极化	(218)
第五节 有电介质时的高斯定理 电位移	(221)
第六节 静电场的能量	(225)
思考题九	(228)
习题九	(229)
第十章 稳恒电流的磁场	(233)
第一节 稳恒电流	(233)
第二节 磁 场	(237)
第三节 毕奥—萨伐尔定律及其应用	(240)
第四节 安培环路定理及其应用	(245)
第五节 磁场对运动电荷的作用	(250)
第六节 磁场对载流导线和载流线圈的作用	(253)
思考题十	(260)
习题十	(261)
第十一章 磁介质中的磁场 电磁波	(266)
第一节 磁介质 磁场强度	(266)
第二节 铁磁质	(272)
第三节 电磁感应定律	(274)
第四节 互感现象与自感现象	(280)
第五节 磁场的能量	(283)
第六节 涡流和趋肤效应	(286)
第七节 电磁场和电磁波	(288)
思考题十一	(303)
习题十一	(304)
第十二章 光的干涉	(308)
第一节 人类对光本性的认识	(308)
第二节 光源 光的相干性	(309)
第三节 杨氏双缝干涉实验	(311)
第四节 其他分波面干涉实验	(313)
第五节 光程和光程差	(314)
第六节 薄膜干涉——等倾干涉	(316)
第七节 薄膜干涉——等厚干涉	(318)
第八节 迈克尔逊干涉仪	(322)

思考题十二	(324)
习题十二	(326)
第十三章 光的衍射	(328)
第一节 光的衍射现象 惠更斯-菲涅耳原理	(328)
第二节 单缝夫琅禾费衍射 菲涅耳半波带法	(329)
第三节 圆孔夫琅禾费衍射 光学仪器的分辨率	(332)
第四节 衍射光栅	(334)
第五节 X射线的衍射 布拉格方程	(336)
思考题十三	(338)
习题十三	(339)
第十四章 光的偏振	(341)
第一节 光的偏振态的描述	(341)
第二节 起偏和检偏 马吕斯定律	(343)
第三节 反射与折射时的偏振 布儒斯特定律	(345)
第四节 光的双折射	(347)
* 第五节 人工双折射与旋光现象	(348)
* 第六节 偏振光的干涉	(350)
思考题十四	(352)
习题十四	(352)
第十五章 现代光学基础	(353)
第一节 光的吸收、色散和散射	(353)
第二节 激光	(355)
第三节 激光的特性、应用及常用激光器	(358)
第四节 全息照相	(362)
第五节 非线性光学简介	(364)
思考题十五	(367)
第十六章 相对论简介	(368)
第一节 经典时空观和伽利略变换	(368)
第二节 狭义相对论产生的实验基础和基本原理	(369)
第三节 洛伦兹坐标变换和速度变换	(372)
第四节 狭义相对论时空观	(375)
第五节 狭义相对论动力学基础	(379)
第六节 广义相对论简介	(382)
思考题十六	(385)
习题十六	(385)
第十七章 量子力学基础	(388)
第一节 普朗克-爱因斯坦的光量子理论	(388)
第二节 氢原子的玻尔理论	(393)
第三节 德布罗意的物质波	(397)

第四节 波函数的统计诠释·····	(399)
第五节 海森伯不确定性原理·····	(401)
第六节 薛定谔方程·····	(403)
第七节 一维定态问题·····	(406)
第八节 量子力学中的氢原子问题·····	(413)
第九节 电子的自旋 原子的电子壳层结构·····	(417)
思考题十七·····	(424)
习题十七·····	(424)
第十八章 核物理与粒子物理 ·····	(427)
第一节 原子核的基本性质·····	(427)
第二节 原子核的放射性衰变·····	(429)
第三节 原子能及其和平利用·····	(432)
第四节 粒子物理简介·····	(435)
习题十八·····	(438)
习题参考答案 ·····	(440)

绪 论

从有文字记载的人类思想史的最初篇章开始,人们便一直在寻找各种途径,谋求对已知的那些纷繁迷乱的事件加以整理,赋予某种秩序。自然科学就是这种谋求秩序的做法之一,并在近几个世纪形成了系统的研究方法。这些方法包括观察的技术,推理和预言的法则,设计实验的思想以及交流实验结果和理论结果的途径等。所有这些都称为科学方法。

物理学是重要的自然科学分支之一。物理学研究宇宙间物质存在的各种主要的基本形式,它们的性质、运动和转化以及内部结构,从而认识这些结构的组元及其相互作用、运动和转化的基本规律。物理学的各分支学科是按物质的不同存在形式和不同运动形式划分的。客观世界是一个内部存在着普遍联系的统一体。物理学家力图寻找一切物理现象的基本规律。从而去统一地理解一切物理现象。

经典力学研究宏观物体的低速机械运动的现象和规律。宏观是相对于原子等微观粒子而言的,低速是相对于光速而言的。热学研究热的产生和传导,研究物质处于热状态下的性质和这些性质如何随着热状态的变化而变化。经典电磁学研究宏观电磁现象和客观物体的电磁性质。光学研究光的性质及其和物质的各种相互作用,光是电磁波。

对于高速运动现象的研究建立了狭义相对论,对于原子内部运动状态的研究,导致了量子力学的诞生。原子和原子核物理的研究不仅成功地解释了元素周期性、化学键等重大课题,而且对原子及原子核的性质、内部结构、内部受激状态、衰变过程、裂变过程以及它们之间的反应过程等有了较深入的认识。

而物理原理、定律和定理则表征了该物理现象中若干物理量之间的关系。而物理量之间的关系则是用数学运算来表示的。从数学角度而言,物理量大致可分成标量和矢量两种。标量计算遵从代数运算法则。矢量运算遵从平行四边形法则。

物理学实验都是可以重复和再现的。物理学的定律和理论都是以实验观测结果为依据,然后又被实验所验证的。引入或定义物理量,必须做到两点,一是规定一种测定这个物理量的方法或标准,二是给它规定一种度量的单位。目前国际上已选定了七个物理量作为基本量,规定了它们的测量方法和单位。这些量是质量、长度、时间、电流、热力学温度、光强度和物质的量,在此基础上建立了国际单位制(SI)。物理学中的其他量的单位,都是基本单位的导出单位。

面对比较复杂的现象或过程,为了分析方便,抓住主要矛盾,物理学常常采用理想模型进行简化。通过对模型的分析,从中得到现象或过程的基本规律。然后,将所得的规律再回到实验中去,使其与实验结果相比较,观察其正确程度,并进行必要的修正。如质点、刚体、理想气体、光线、点电荷等都是成功的理想模型。

由于物理学所研究的物质运动普遍地存在于复杂运动形态之中,是深刻认识复杂运动的

起点或途径,因而物理学也成为自然科学和技术科学中多个学科的理论基础或支柱。同时,由于物理学与自然科学其他领域和技术越来越广泛地结合,从而促成了一个又一个新兴学科的出现。物理学也总是以其特有的方式推动着人类社会的发展。

学习物理学必须正确理解物理理论和概念,掌握现象和过程的物理图象,弄清定律和定理的条件、适用范围和应用方法。通过物理课程学习,可以在科学实验能力、计算能力和抽象思维能力等方面得到严格训练,从而能提高提出问题、分析问题和解决问题的本领。

第一章 质点运动学

力学是研究物体的机械运动规律的。机械运动是最简单最基本的运动。物体相对位置随时间的变化叫做机械运动。质点运动学 (particle kinematics) 只描述物体运动状态变化的规律, 而不涉及引起运动状态改变的原因。本章给出了描述物体运动状态的基本方法, 介绍了参考系、坐标系、质点等重要概念; 定义了位置矢量、位移、速度、加速度等表示物体运动状态的物理量; 具体分析了几种常见的运动形式, 并给了伽利略坐标变换。

第一节 参考系与质点

自然界中一切物体(大到星体小到分子原子)都在不停的运动, 物体的运动是绝对的, 静止是相对的, 物体运动的描述是相对的, 要描述一个物体的运动就必须首先选定一个参考物。

一、参考系

确定物体的位置需要参考物, 描述物体位置的变化也需要参考物。这种为描述物体的位置及其运动而选定的物体(或物体组)叫做参考系 (frame reference)。

在描述物体的运动之前要首先确定参考系。被选作参考系的物体, 是观察者认为“静止”的物体, 是观察者的观察角度或立足点。同一物体的运动, 因选择的参考系不同, 观察的结果也不同。如观察无风天雨滴的运动, 以地球为参考系(站在地面上观察), 雨滴竖直向下运动; 以行进的车辆为参考系(站在行进的车上观察), 雨滴倾斜向后运动。因此, 描述物体的运动必须指明相对于哪个参考系。

参考系选择不同的参考系对物体运动的描述不同, 运动学中参考系的选择是任意的, 以解决问题方便为原则。研究地面上运动的物体通常选择地球为参考系。

要想定量描述物体的运动, 仅有参考系是不够的, 还需要在参考系上建立适当的坐标系 (system of coordinates)。在坐标系中, 物体的位置由坐标定量地确定。常用的坐标系有直角坐标系、极坐标系、球坐标系等。具体描述物体的运动规律时, 可根据具体情况选择适当的坐标系形式。坐标系选择的不同, 仅影响到描述物体运动所用的参数, 对物体的运动性质及规律无任何影响。适当的选择坐标系, 可以简化计算便于描述。由于坐标系是固定于参考系上的, 因此坐标系的实质是参考系的数学抽象。

二、质点

实际物体的运动往往是复杂的, 影响物体运动的因素很多。但是, 在这诸多因素中, 有些因素对物体的运动起着主要的、决定性的作用, 有些因素则是次要的、微不足道的。我们在处理实际问题时, 如果将所有因素不加区分地统统考虑, 就难以把握问题的实质, 甚至使问题变得不可解。因此, 在研究实际物体的运动时, 要分清问题中的主要因素、次要因素, 根据问题的性质, 忽略一些次要因素, 将研究对象简单化、理想化、抽象化。经过这样处理的研究对象称作物理模型。

任何实际物体都有一定的大小、形状和质量。研究物体运动时,如果物体的大小、形状在问题中不起主要作用,则可以忽略不计。同时,所研究的问题不涉及物体的转动与形变,这种情况下,我们就可以用一个没有大小、没有形状的“点”来代替实际物体。在物体的机械运动中,由于质量起着很重要的作用,因此我们使这个“点”只保留质量而忽略其大小和形状。这就是质点(particle)。质点是力学中一个极为重要的物理模型。

一个物体能否被抽象为质点是有条件的,首先要根据所研究问题的性质具体分析。研究地球绕太阳的公转时,可以将地球看成质点,因为地球与太阳之间的距离远大于地球半径。研究地球自转时,就不能把地球看成质点了,因为点是谈不上自转的。另外,物体能否被看成质点,还要看问题要求的精确度。将实际物体抽象为质点,等于忽略了许多因素对物体运动的影响,这必然会带来理论与实际的误差,如果这一误差导致计算结果不满足问题要求的精确度,就不能使用质点模型了。这时,可以根据问题需要,选择新的物理模型。

三、时间和空间

任何物体的运动都是在一定的时间(time)和空间(space)中进行的。运动不能脱离时间和空间。空间反映物质的广延性,与物体的体积和位置的变化联系在一起。时间反映物理事件的顺序性和持续性,与物理事件的变化发展过程联系在一起。人们对时空概念的认识经历了从牛顿的绝对时空观到爱因斯坦的相对时空观的转变。牛顿认为时间空间是不依赖于物质的客观存在,是绝对的、与物质运动无关的。而爱因斯坦的相对论时空观指出,绝对的时间与空间是不存在的,时间空间与运动密不可分,是相对的。到目前为止人们所认识到的时空范围:从宇宙的年龄 10^{18} s (20 亿年,宇宙年龄) 到微观粒子的最短寿命 10^{-24} s,从宇宙的尺度 10^{26} m (20 亿光年) 到微观粒子尺度 10^{-15} m。跨度之大令人惊叹!随着物理学的深入发展,人们定会进入更加广阔的时间和空间。

第二节 质点运动的描述

一、位置矢量和运动学方程

1. 位置矢量

如图 1-1 所示,选定参考系,并在参考系上建立直角坐标系 $Oxyz$ 。设质点位于空间 P 点,则 P 点的位置可用坐标 x, y, z 表示,即 $P(x, y, z)$ 。此外,力学中常采用矢量表示法, P 点的位置由自坐标原点 O 至 P 点所引的矢量 $\mathbf{r}$ 表示(见图 1-1)。矢量的大小等于 P 点和坐标原点间的距离 r ,方向由 O 指向 P 。这个矢量称为质点的位置矢量(position vector),简称位矢或矢径。描述质点的空间位置,用坐标和用位置矢量是一致的,由图 1-1 可以看出,坐标 x, y, z 是矢量 $\mathbf{r}$ 在直角坐标系三个坐标轴上的投影。因此,在直角坐标系中位置矢量的正交分解式为

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

$\mathbf{i}, \mathbf{j}, \mathbf{k}$ 分别为 x, y, z 轴方向的单位矢量。位置矢量的大小为

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

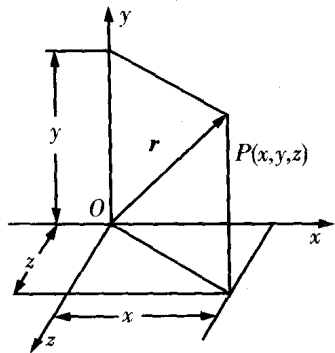


图 1-1 空间直角坐标系

它表明了质点距坐标原点的距离。质点相对原点的方位,用位置矢量的方向余弦表示。它们分别是

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

α, β, γ 分别为 r 与 x, y, z 坐标轴的夹角。 $\cos\alpha, \cos\beta, \cos\gamma$ 之间有如下关系:

$$\cos^2\alpha + \cos^2\beta + \cos^2\gamma = 1 \quad (1-4)$$

2. 运动学方程

质点运动时,它的位置不断地随时间变化,因此它的位置矢量 r 是时间 t 的函数

$$r = r(t) \quad (1-5)$$

(1-5) 式称为质点的运动学方程(kinematical equation)。在直角坐标系中,运动学方程的正交分解式为

$$r = r(t) = x(t)i + y(t)j + z(t)k \quad (1-6)$$

质点的运动学方程,描述了质点的运动规律。根据它可求得质点在任意时刻的位置及运动状态。

因为质点的位置还可以用坐标表示,所以它的运动学方程还有下面的标量形式

$$x = x(t) \quad y = y(t) \quad z = z(t) \quad (1-7)$$

质点的运动一般为三维空间的曲线运动,当质点运动受到某种限制时可变为二维平面上的曲线运动或一维直线运动。

质点运动时描出的轨迹称为质点的运动轨迹。在坐标系中它是质点位置矢量的矢端画出的曲线。式(1-7)是以时间 t 为参数的质点轨迹的参数方程,消去参数,便可得出质点的在三维空间的轨迹方程。当质点在平面上运动时,其运动学方程的标量形式为

$$x = x(t) \quad y = y(t)$$

消去参数 t , 得到质点在平面上的轨迹方程为

$$y = y(x) \quad (1-8)$$

运动学的重要任务之一就是找出各种具体运动所遵循的运动学方程。

二、位移和路程

1. 位移

质点运动时,其位置矢量随时间不断变化。为表示质点位置的变化情况,我们定义一个新的物理量——位移矢量(displacement)。如图 1-2 所示,质点沿某曲线运动。 t 时刻位于 A 点,位置矢量为 $r(t)$; 经过 Δt 时间,质点运动到 B 点,位置矢量为 $r(t+\Delta t)$, 定义:由始点 A 到终点 B 的有向线段 $\overrightarrow{AB}$ 叫做质点在这一运动过程中的位移矢量,简称位移。由图 1-2 可以看出,质点在某一运动过程中的位移等于它在该过程中位置矢量的增量,记作 Δr 。即

$$\Delta r = r(t+\Delta t) - r(t) \quad (1-9)$$

在直角坐标系中位置矢量可用正交分解式表示,

$$r(t) = x(t)i + y(t)j + z(t)k \quad (1-10)$$

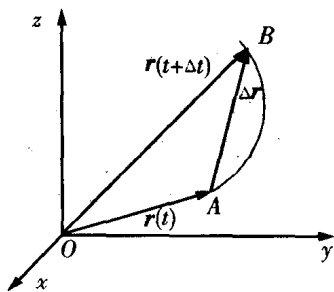


图 1-2 位 移

$$\mathbf{r}(t + \Delta t) = x(t + \Delta t)\mathbf{i} + y(t + \Delta t)\mathbf{j} + z(t + \Delta t)\mathbf{k} \quad (1-11)$$

由(1-9)、(1-10)和(1-11)式可得到质点的位移为

$$\Delta \mathbf{r} = \Delta x \mathbf{i} + \Delta y \mathbf{j} + \Delta z \mathbf{k} \quad (1-12)$$

其中 Δx 、 Δy 、 Δz 是位移矢量在 x 、 y 、 z 轴上的投影,它们分别为

$$\left. \begin{aligned} \Delta x &= x(t + \Delta t) - x(t) \\ \Delta y &= y(t + \Delta t) - y(t) \\ \Delta z &= z(t + \Delta t) - z(t) \end{aligned} \right\} \quad (1-13)$$

2. 路程

路程是质点所经过的实际路径的长度,路程是标量。而位移是描述质点位置变化的量,它只表示质点位置变化的实际效果,并非质点所经历的实际路程。如图 1-2 中,有向线段 $\overrightarrow{AB}$ 表示位移矢量,割线 AB 的长度 $|\Delta \mathbf{r}|$ 表示它的大小。而曲线 AB 的弧长 Δs 代表路程,从图中可以看出 $|\Delta \mathbf{r}|$ 和 Δs 并不相等,只有在时间 Δt 趋于零时 $|\Delta \mathbf{r}|$ 和 Δs 才相等。

三、速度和速率

1. 平均速度和平均速率

在图 1-2 中,设质点在 Δt 时间内的位移为 $\Delta \mathbf{r}$,定义质点位移 $\Delta \mathbf{r} = \mathbf{r}(t + \Delta t) - \mathbf{r}(t)$ 与发生这一位移的时间间隔 Δt 之比为质点在这段时间内的平均速度,记作 $\bar{\mathbf{v}}$ 。即

$$\bar{\mathbf{v}} = \frac{\Delta(\mathbf{r})}{\Delta t} = \frac{\mathbf{r}(t + \Delta t) - \mathbf{r}(t)}{\Delta t} \quad (1-14)$$

由式(1-14)可以看出,平均速度是一矢量,方向与位移矢量 $\Delta \mathbf{r}$ 的方向相同。它描述了质点在 Δt 的时间内位置大小和方向变化的平均快慢程度。

为了描述质点沿轨迹运动的快慢程度,我们还定义了另外一个物理量——平均速率。把质点经过的路程 Δs 与所用时间 Δt 比值定义为质点在时间 Δt 内的平均速率。

$$\bar{v} = \frac{\Delta s}{\Delta t} \quad (1-15)$$

因为路程是标量,所以平均速率也是标量。平均速率和平均速度是两个不同的概念。一般情况下,因为 $\Delta s \neq |\Delta \mathbf{r}|$,所以平均速率和平均速度的绝对值也不相等。平均速度和平均速率的单位相同,在国际单位中为米/秒($m \cdot s^{-1}$)

2. 瞬时速度与瞬时速率

平均速度与所取的时间间隔有关,时间间隔越短,平均速度越能真实的反映质点在相应时间内的运动快慢。因此,我们定义质点在 t 时刻的瞬时速度:它等于 t 至 $t + \Delta t$ 时间内平均速度 $\Delta \mathbf{r} / \Delta t$ 当 $\Delta t \rightarrow 0$ 时的极限,记作 $\mathbf{v}$ 。即

$$\mathbf{v} = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \bar{\mathbf{v}} = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{\Delta \mathbf{r}}{\Delta t} \quad (1-16)$$

由上述定义可以看出,质点的瞬时速度等于位置矢量对时间的一阶导数,即

$$\mathbf{v} = \frac{d\mathbf{r}}{dt} \quad (1-17)$$

我们通常所说的质点运动速度,就是指它的瞬时速度。瞬时速度是矢量,在直角坐标系中它可以用正交分解式表示

$$\mathbf{v} = v_x \mathbf{i} + v_y \mathbf{j} + v_z \mathbf{k} \quad (1-18)$$