



“十一五”规划教材

大学物理

(上册)

张学恭



西安交通大学出版社

内容提要

本书按照教育部高等学校非物理类专业物理基础课程教学指导分委员会制定的理工科大学物理课程教学基本要求编写,大学物理课程教学基本要求中将教学内容分为 A、B 两类,其中 A 类为核心内容,是课程的基本要求,B 类为扩展内容。本书基本上是根据核心内容的要求编写的,也加入了少量的扩展内容。本书适用于主要以核心内容为教学要求的各类高等院校的工科专业和理科非物理专业的本科物理课程。全书共 14 章,分上、下册出版。上册 7 章分别为质点的运动规律、运动的守恒定律、刚体的定轴转动、真空中的静电场、静电场中的导体和电介质、稳恒磁场、电磁感应与电磁场;下册 7 章分别为气体动理论、热力学基础、机械振动、机械波、波动光学、狭义相对论、量子物理基础。每节后有思考题,每章后有习题,书后给出了习题答案,可供读者参考。

图书在版编目(CIP)数据

大学物理.上册/张学恭编著. —西安:西安交通大学出版社,2010.1
ISBN 978—7—5605—3286—8

I. ①大… II. ①张… III. ①物理学—高等学校—教材 IV. ①04

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2009)第 219145 号

书 名 大学物理(上册)
编 著 张学恭
责任编辑 邹林 田华 桂亮

出版发行 西安交通大学出版社
(西安市兴庆南路 10 号 邮政编码 710049)
网 址 <http://www.xjtpress.com>
电 话 (029)82668357 82667874(发行中心)
(029)82668315 82669096(总编办)
传 真 (029)82668280
印 刷 西安新视点印务有限责任公司

开 本 727mm×960mm 1/16 印张 17.875 字数 330 千字
版次印次 2010 年 1 月第 1 版 2010 年 1 月第 1 次印刷
书 号 ISBN 978—7—5605—3286—8/O·307
定 价 25.00 元

读者购书、书店添货、如发现印装质量问题,请与本社发行中心联系、调换。
订购热线:(029)82665248 (029)82665249
投稿热线:(029)82664954
读者信箱:jdgy@yahoo.cn

版权所有 侵权必究

序

物理学是现代自然科学中的一门重要的基础学科。它的任务是：研究物质运动最一般的规律，物质的基本结构和物质之间的相互作用，并由此探索各种可能的实际应用。

我们所在的宇宙由客观存在的多种形态的物质组成。大家最熟悉的普通物质（下文简称物质）由各种粒子（如电子、质子、中子、夸克等）和场（如引力场、电磁场）构成。这类物质常常组合为原子、分子等，形成固态、液态、气态、等离子态等各种形态。此外，还有许多物质，如“暗物质”、“暗能量”等，虽然客观存在，但目前人类不仅不能通过自身器官，如眼、耳等直接感觉到，甚至还不能利用现有的仪器设备观测到，只能通过某些自然现象间接地觉察其存在。现在的科学家和工程技术人员大多是对已知的物质进行理论和实验研究，不断扩大和加深对物质世界内在奥秘的认识，为人类谋福祉；还有少数先行者则在探寻那些人类尚未进入的领域，为21世纪、22世纪人类和科学的发展开辟目前还不清楚的全新的途径。

物质有多种存在形态和运动形式。各门自然科学分别研究特定对象的运动发展规律。物理学的特点则是它探索的是物质运动最普遍的规律，例如时间空间的性质，能量、动量、质量、电荷的守恒等，对于任何学科都是十分重要的。因此，尽管各种专业千差万别，但都必须在中学物理基础上，进一步提高和扩展物理知识，这就是开设大学物理课程的目的。

随着科学研究的深入和技术水平的提高，物理学的研究范围越来越广，小至粒子，大至宇宙，分工越来越细，形成了许多发支，这些分支又各自发展成为独立的学科。例如按运动形式的不同，形成了力学、电磁学、热学、光学、声学等；按研究对象的不同，形成凝聚态物理、粒子物理、地球物理、天体物理等。这些学科又分别派生出新的分支。同时，许多物质运动过程往往是多种运动形式的综合，不能仅仅孤立地考察其中某一种运动形式，因而在学科分化得越来越细的同时，又产生了许多交叉性的新学科。例如物理化学、量子化学、生物物理、量子生物学等。这样的分支现在已经成百上千，仍在不断出现新的变化。

物理学还充当着发展生产力的先锋的作用，在不断的创新中转化为新兴的先进技术，从而又衍生出大量应用物理类的工程性学科。例如核工程、激光物理、微

电子学等。

显然,大学物理课程不可能也不必要面面俱到。在本教材中,只按物质运动的几种常见的形式择要讨论其核心内容,虽然只是沧海一粟,但只要真正弄清了主要内容,打下了必要的基础,在今后需要更深入的物理知识时,就完全可以通过自学和独立研究来达到目的。

在学习大学物理时,我们不仅要学习物理知识本身,正确理解基本概念,掌握最重要的定律、公式,了解它们的适用范围。还要通过学习过程领会更多的科学思维方法。如:怎样发现和提出问题;怎样在解决问题时判断主要因素和次要因素,建立各种简化的理想模型;怎样使理论和实验两方面的研究成果相辅相成,相互推动;怎样正确理解生产力发展的需求与学科自身发展相互促进的关系;等等。学到科学的思想方法,不仅对学好本课程,而且对今后从事任何工作都会产生十分积极的作用,这也是学习大学物理课程的一个重要目标。

吴寿隍

2009年9月于西安交通大学

前 言

物理学是研究物质的基本结构、相互作用和物质最基本最普遍的运动形式(机械运动、电磁运动、热运动、微观粒子的运动等)及其相互转化规律的学科。物理学的研究对象具有极大的普遍性,它的基本理论渗透于自然科学的各个领域,应用于生产技术的各个部门,是其他自然领域和工程技术发展的基础。

在人类追求真理、探索未知世界的过程中,物理学展现了一系列科学的世界观和方法论,深刻地影响着人类对物质世界的基本认识,深刻地影响着人类的思维方式和社会生活,是人类文明发展的基石,在人才的科学素质培养中具有极为重要的地位。

物理学是一门基础学科,它是当代工程技术科学的主要支柱之一。在许多科学技术领域和生产部门之中,都广泛地应用着物理学中的力学、热学、电磁学、振动、波动、光学和近代物理等各方面的基本理论和基本知识。在高等理工科院校中,“大学物理”是一门重要的基础课。物理学在理工科学生的知识结构中具有奠基的作用。进入科学技术的任何一个领域,都必须通过物理学的大门。

本教材是根据教育部高等学校非物理类专业物理基础课程教学指导分委员会于2004年12月制定的非物理类理工科大学物理课程教学基本要求内容,结合编者数十年大学物理课程的教学经验,并参考了国内现行的部分大学物理课程教材编写而成的。大学物理课程教学基本要求中将大学物理课程的教学内容分为A、B两类,其中A类为核心内容,是课程的基本要求,B类为扩展内容。本教材基本上是根据核心内容的要求编写的,也写入了少量的扩展内容。本教材适用于主要以核心内容为教学要求的各类高等院校的工科专业和理科非物理专业的本科物理课程。

在本教材的编写过程中,编者力求能使学生学到物理学中最基本的规律和概念,掌握比较完整的物理图像,而在理论深度上要求适度。在内容的精选和更新上,在深广度的掌握上,都作了认真的探讨。编者的目的,是使本教材除了帮助学生掌握物理学的基本内容和基本规律外,还要使学生掌握科学的分析方法和思维方法。本教材对物理概念的阐述和分析,力求清晰、简明,富有系统性、逻辑性、哲理性,隐含方法论;在系统阐述物理的基本规律、基本方法、基本概念的同时,引导

和培养学生用高等数学来分析和解决物理问题的能力,以便对学生进行科学思维的训练。

学生学物理要入门,必须强调先掌握“物理语言”,强调物理语言的准确性,强调物理语言、物理量符号、物理量单位等的规范、简明和统一性。本教材还强调了要学生学会掌握物理模型的概念、思想及方法,自然界中的各种物质、现象,相互作用,相互联系,相互制约,千变万化,物理学要培养学生掌握运用物理模型的科学研究方法。各种定律、定理、公式都是针对各种理想的物理模型的,强调掌握各种物理模型的条件。本教材贯穿了对这方面能力的培养。

本教材在每节后都附有几道思考题,是根据该节中应掌握的主要概念和应思考清楚的主要问题专门编写的。通过对这些思考题的理解,使学生能够基本掌握该节的主要思路、概念和方法。

全书采用国际单位制,书后附有物理量的名称、符号及单位,矢量及其运算和习题参考答案。

西安交通大学吴寿镠教授对书稿进行了非常认真仔细的审阅,提出了许多宝贵的意见和具体建议;在本教材的编写过程中,还得到了西安思源学院、西安邮电学院、西安理工大学、西安交通大学等院校从事物理课程教学的一些同志的大力支持,在此向他们一并表示衷心的感谢。

由于编者学识和教学经验所限,可能对课程基本要求的理解不够,或对某些问题认识不深,因此书中缺点和错误在所难免,诚恳希望广大读者给予批评指正。

编 者

2009 年 10 月于西安

目 录

第 1 章 质点的运动规律	(1)
1.1 质点运动的运动方程和位移	(2)
1.2 质点运动的速度和加速度 运动学中的两类问题	(9)
1.3 运动叠加原理 抛体运动	(19)
1.4 圆周运动和一般平面曲线运动的自然坐标描述	(21)
1.5 圆周运动的角量描述	(26)
1.6 不同参考系中速度和加速度的变换关系	(30)
1.7 牛顿运动定律	(32)
1.8 牛顿运动定律的应用	(39)
习题	(44)
第 2 章 运动的守恒定律	(50)
2.1 能量守恒定律	(50)
2.2 动量守恒定律	(66)
2.3 质点的角动量和角动量守恒定律	(79)
习题	(83)
第 3 章 刚体的定轴转动	(90)
3.1 刚体的平动和定轴转动	(90)
3.2 刚体定轴转动的转动定律 转动惯量	(92)
3.3 刚体定轴转动的动能和动能定理	(100)
3.4 刚体的角动量和角动量守恒定律	(105)
习题	(112)
第 4 章 真空中的静电场	(117)
4.1 电荷 库仑定律	(117)
4.2 电场和电场强度	(120)
4.3 电通量 高斯定理	(130)

4.4	电场力的功 电势	(142)
4.5	等势面 电场强度与电势的关系	(152)
	习题	(156)
第 5 章	静电场中的导体和电介质	(162)
5.1	静电场中的导体	(162)
5.2	静电场中的电介质	(167)
5.3	导体的电容 电容器	(173)
5.4	电场的能量	(177)
	习题	(180)
第 6 章	稳恒磁场	(185)
6.1	基本磁现象	(185)
6.2	毕奥—萨伐尔定律	(189)
6.3	磁通量 磁场的高斯定理	(195)
6.4	安培环路定理	(198)
6.5	磁场对载流导线的作用	(204)
6.6	磁场对运动电荷的作用	(209)
6.7	磁介质中的磁场	(213)
	习题	(217)
第 7 章	电磁感应与电磁场	(224)
7.1	电源的电动势	(224)
7.2	电磁感应的基本规律	(226)
7.3	动生电动势	(231)
7.4	感生电动势 有旋电场	(236)
7.5	自感和互感	(239)
7.6	磁场的能量	(244)
7.7	麦克斯韦电磁场理论与电磁波简介	(249)
	习题	(254)
	习题答案	(260)
附录一	物理量的名称、符号及单位	(266)
附录二	矢量及其运算	(269)

第 1 章 质点的运动规律

无限广阔的自然界,丰富多彩,存在着各种形态的物质。一切物质都处于永恒的运动之中,自然界的一切现象都是物质运动的表现。物质的运动形式是多种多样的,每一种运动形式都有其特有的规律。

物质运动的规律,在物理学中通常是由某些定律或理论来表述的。而这些定律的表述,只有在定义了各种不同的物理量之后才会成为可能。用来表述物理定律的物理量是构成物理学的基本要素,这些物理量可以确切地量度物质的属性和描述物质运动的状态及其变化过程。这些物理量通常都用确定的符号来表示。每一门学科都有它自己的语言,这些语言是用各种图形、符号及它们之间的相互联系组成的。表示物理量的这些符号以及它们之间的相互联系组成了物理学语言的基本要素,这是首先必须掌握的。

在研究物理问题时,一般都要先对物理现象进行观察和实验。利用各种仪器去测定有关的物理量。每一个物理量都有一个规定的量度标准,称为该物理量的标准单位。所谓量度,就是把一个待测的物理量同该物理量的标准单位进行比较,看它是标准单位的多少倍。比如说一个房间的长度为 5.30 米,就是说它的长度为米尺长度的 5.30 倍。每一个物理量的大小都必须有数值和单位共同来表述,才是完整的,才具有明确的意义。

我国采用国际单位制。国际单位制的国际代号为 SI,简称为国际制或 SI 制,它是国际上公认的最先进的单位制。在国际单位制中,规定了长度、质量、时间、电流、热力学温度、物质的量和发光强度等七个物理量作为基本量,它们的单位即为国际单位制的基本单位。另外还规定了平面角和立体角两个量的单位为国际单位制的辅助单位。其余物理量的单位,依据某些物理定律或定义,均可由基本单位导出,称为导出单位。

在物质的各种运动形式中,最简单、最基本的一种是物体位置的变化,这种变化包括一个物体相对于另一个物体位置的变化,以及一个物体的某些部分相对于其它部分位置的变化。这种位置的变化称为机械运动。如地球围绕太阳的运动,人造卫星围绕地球的运动,汽车、火车、飞机的运动,各种机器的运转等等,都是机械运动。力学就是研究机械运动的规律及其特征的学科。

物理学的发展就是从研究宏观物体的运动规律开始的。伽利略和牛顿等物理学家总结了这方面的研究成果,建立了以牛顿定律为基础的经典力学,也称为牛顿力学。

物理学的近代发展表明,经典力学的适用范围是宏观物体及运动速度远小于真空中的光速的情况。微观粒子的运动遵循量子力学规律,而当物体的运动速度大到可与真空中的光速相比较时,物体运动遵从相对论力学规律。

但是,经典力学得到的若干结果,仍然是整个物理学的基石。这不仅因为在相当广阔的尺度范围内,经典力学是高度准确的,具有较大的实用价值,而且因为用经典力学发展起来的一些重要的物理概念和定律,像动量、能量、角动量及其守恒定律等,也实用于包括微观物理学在内的整个物理学,并已成为认识和探索自然规律极重要的理论基础。所以只有对经典力学有较深刻的理解,才有可能掌握和研究物理学的其它领域,也才可能对整个物理学有较为全面的认识。

1.1 质点运动的运动方程和位移

1.1.1 质点

在物理学的研究过程中,为了突出所研究的主要问题,便于寻求其规律,物理学中常常把所研究的对象加以简化,使之抽象成理想模型,这种理想的模型保留有实际物体的主要特征,而对次要因素不予考虑或暂时不予考虑。此种理想模型称为物理模型。模型概念的引入在科学研究中具有极为重要的方法论的意义。实际物体的运动往往是很复杂的,要描述其运动的全部情况,通常不大可能,而且也没有必要。科学研究的任务,就是要利用模型,抓住实际运动物体的主要特征,忽略次要因素,以便在理想的情况下,揭示出运动的普遍规律和特征。模型与实际物体相比,有其相对的简单性,它往往在数学上可以精确计算,在实验上能够精确测量。人们通过对物理模型的研究,认识其主要规律,然后再把这种认识向客观实际逼近,使对物质世界的认识更全面、更真实。可以毫不夸张地说,是各种各样的物理模型,把人们的认识一步一步地引向物质世界的深处。

实际的物体都有一定的大小、形状、质量和内部结构。一般说来,物体各部分的运动情况并不相同,即物体各部分之间还存在相对运动。为了简化对运动物体的研究,我们引入本书中用到的第一个物理模型——质点,以便在数学上可以精确描述物体的空间位置。如果所研究的问题中,物体的大小及形状可以忽略时,就可以近似地把该物体用质点模型处理。例如,研究地球绕太阳公转时,由于地球的平均半径(约 6.4×10^3 km)比起地球与太阳间的距离(约 1.50×10^8 km)小得多,地

球上各点相对于太阳的运动可视为相同。这时,就可以忽略地球的大小和形状,把地球看作一个近似于在椭圆形轨道上绕太阳运动的质点。在研究某些天文学问题时,还常常把整个太阳系甚至整个星系近似地看作质点。由此可见,就所讨论的问题的性质而言,若所研究物体的大小和问题中所涉及的其它线度相比甚微,物体的大小和形状不起作用或只起次要作用,则可以忽略不计,可以把整个物体看成没有大小和形状的几何点,但它具有整个物体的质量。一个物体是否可以被抽象成质点,是有条件的、相对的,而不是无条件的、绝对的,应根据具体问题的不同情况而定。比如在研究地球的自转时,如果仍然把地球看作质点,显然就没有实际意义了。又如若研究汽车的平动,整个汽车都可以看作是一个质点,但若研究车轮的转动,车轮就不能当作质点看待。另外,质点也并非指非常小的物体,即质点并不包含限制物体大小的意思,如当讨论原子及原子核的结构和内部运动时,即使是直径小到约为 10^{-15} m 的原子核,也不可能将其看作质点了。

在本章和第2章中,我们把研究的物体都当作质点来处理,研究质点的运动是研究物体运动的基础。在第3章中,我们还要用到刚体这个理想模型,在本书的其它部分中,还将用到点电荷、理想气体等物理模型。

1.1.2 参考系和坐标系

1. 参考系和坐标系

在自然界中,大到星系,小到原子、电子,一切物体都处于永恒的运动之中。运动和物质是不可分割的,运动是物质存在的形式,是物质的固有属性,物质运动存在于人们的意识之外,这便是运动本身的绝对性。

所谓质点在空间的位置及变化,都是相对于某个参考物体而言的,为描述质点的运动而选定的参考物体或参考系统称为参考系。物质的运动是客观存在的,但当选用不同的参考系时,对同一物体运动情况的描述就会不同,这称为运动描述的相对性。例如,在相对于地面作匀速直线行驶的汽车上,某人将一石子竖直上抛,若选汽车和这人组成的系统为参考系,石子为竖直上抛(然后竖直下落)运动;而以地面为参考系,石子却是斜上抛运动。所以描述物体运动时,首先必须明确所选用的参考系。从描述物体运动来说,参考系的选择可以是任意的,主要看问题的性质和研究的方便来确定。

参考系选定后,为了定量地确定物体相对于参考系的位置及变化,还需要建立一个坐标系。在本书中我们约定坐标系是固定在参考系上的,物体相对于坐标系的运动,也就是相对于参考系的运动。运动物体的位置将由它在坐标系中的坐标值来确定。同时,坐标系还可以起到刻度标尺的作用,便于定量地确定物体的位

置。坐标系的类型可有不同的选择,常用的是直角坐标系,根据问题的性质不同,也常选用其它坐标系,如自然坐标系、平面极坐标系、柱坐标系、球坐标系等。

2. 直角坐标系

17 世纪初期,法国科学家笛卡儿创立了空间直角坐标系。先在参考系上选择一固定点 O 作为坐标系的坐标原点,该坐标系由坐标原点 O 和由 O 点向外无限延伸的相互垂直的三条坐标轴(分别称为 X 轴, Y 轴, Z 轴)所组成,坐标轴在空间的取向可根据需要来确定,但三条坐标轴一定要相互垂直,且运用时应遵从右螺旋法则(也简称右手法则),即右手四指从 X 轴方向经直角夹角转向 Y 轴时,伸长的大拇指所指的方向即为 Z 轴正方向。如图 1-1 所示。

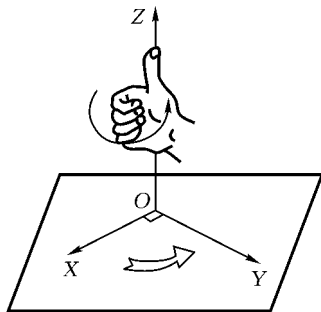


图 1-1 直角坐标系

设某时刻质点位于 M 点,在选定的参考系上固结直角坐标系 $OXYZ$, O 点到 M 点的线段 r 在三个坐标轴上的投影分别为 x, y, z ,也称为 M 点的三个坐标(如图 1-2 所示),这三个坐标 (x, y, z) 唯一地确定了 M 点的位置。后面我们用矢量表示质点的位置时,分别用 i, j, k 表示 X 轴, Y 轴, Z 轴方向上的单位矢量。

在选定参考系后,原则上讲,坐标系的坐标原点的选取可以是任意的,只要三条坐标轴相互垂直且符合右手法则,它们在空间的方向也可以说是任意的。但在一个具体问题中,坐标原点和坐标轴方向一旦确定,就不要随意变更。选的坐标系不同,同一点的坐标值就不同,它们只对于选定的坐标系才有意义。

当质点限制在一个平面上运动时,空间直角坐标系可以简化成平面直角坐标系,只用两条坐标轴就够了,质点的位置可用两个坐标(如 x, y)来确定。当质点作直线运动时,只需要用一个坐标轴(如 OX 轴),质点的位置只用一个坐标(x)就可确定。

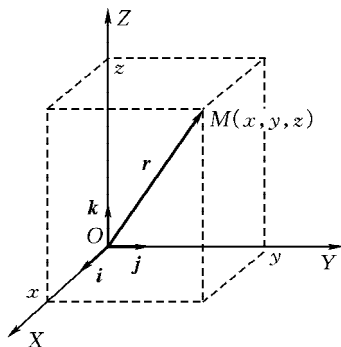


图 1-2 质点的位置矢量 r 和坐标 (x, y, z)

1.1.3 位置矢量和运动方程

1. 位置矢量及其在直角坐标系中的表示

要描述一质点的运动,首先应表示出某一时刻它的空间位置,位置矢量是确定

质点空间位置的物理量。在参考系上取一固定点 O 作为原点,在上述图 1-2 中,质点 M 的位置可用由 O 点指向 M 点的有向线段 $\mathbf{r}$ 来表示, $\mathbf{r}$ 即是表示 M 点的位置矢量(也称为位矢)。严格说来,应称为 M 点对 O 点的位置矢量。显然,不同位置的质点对 O 点的位置矢量是不同的。但是若选用的原点不同,同一位置质点的位置矢量也不同,因此同一问题中的原点 O 应是确定的,它的选择随问题的不同由方便而定。某点的位置矢量的大小即是该点和坐标原点 O 间空间距离的大小,在国际单位制中,位置矢量大小的单位为米(m),即长度单位。

若以 O 点为坐标原点建立一直角坐标系 $OXYZ$,则 M 点的位置也可用三个分量 x, y, z 来表示。这称为质点 M 的位置的直角坐标表示,在确定质点 M 的位置上,这两种表示方法是等价的。假如两种表示方法中选的原点 O 是同一点,它们之间应该是有相互联系的。若 M 点的位置矢量在 X, Y, Z 轴上的分量(即坐标)分别为 x, y, z ,则 $x\mathbf{i}, y\mathbf{j}, z\mathbf{k}$, 分别为位置矢量 $\mathbf{r}$ 在三个坐标轴方向的分矢量,由矢量合成法则,位置矢量可表示为

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

对于同一原点 O ,空间各点的位置矢量 $\mathbf{r}$ 表示与位置坐标 (x, y, z) 表示有一一对应的关系。当然,直角坐标系中坐标轴方向是随问题的方便而定的。虽然坐标轴方向的选择不同,质点位置的各直角坐标就会不同,但这种对应关系不会改变。

位置矢量 $\mathbf{r}$ 的大小(即 $\mathbf{r}$ 的模)为

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

位置矢量 $\mathbf{r}$ 的方向,可由其与三个坐标轴 X, Y, Z 正向之间的夹角 α, β, γ 的方向余弦来确定

$$\begin{aligned} \cos\alpha &= \frac{x}{r} \\ \cos\beta &= \frac{y}{r} \\ \cos\gamma &= \frac{z}{r} \end{aligned} \quad (1-2b)$$

因为它们满足

$$\cos^2\alpha + \cos^2\beta + \cos^2\gamma = 1$$

故 α, β, γ 三个夹角中,只有两个是独立的。空间任一质点的位置矢量都可以用式(1-2a)和式(1-2b)来表示其大小和方向。

如果质点被限制在一个平面内运动,则质点位置矢量的直角坐标表示可以简化为两个分量,若取此平面为 OXY 平面,质点的位置矢量可表示为

$$\mathbf{r} = x\mathbf{i} + y\mathbf{j}$$

其大小为

$$r = |\mathbf{r}| = \sqrt{x^2 + y^2}$$

设位置矢量 $\mathbf{r}$ 与 X 轴正向之间的夹角为 α , 其满足

$$\tan\alpha = \frac{y}{x}$$

由于 x, y 为代数量。所以 α 也为代数量, 以由 X 轴正向沿直角夹角转向 Y 轴正向为正, 若由 X 轴正向转向位置矢量 $\mathbf{r}$ 的方向与上述方向一致, α 为正; 否则, α 为负。

若质点作直线运动, 则问题将更加简单, 可选此直线为 X 轴(或 Y 轴、 Z 轴), 则质点的位置矢量可表示为

$$\mathbf{r} = x\mathbf{i}$$

这种情况下, 一般都简化为用标量(即坐标 x 的正负)来表示质点的位置。

2. 运动方程 轨迹

当质点运动时, 位置矢量 $\mathbf{r}$ 的大小和方向均随时间 t 变化, 因此可写成矢量函数的形式, 即

$$\mathbf{r} = \mathbf{r}(t) \quad (1-3)$$

该式称为质点的运动方程。

在直角坐标系中, 质点运动时的坐标 x, y, z 也都是时间 t 的函数, 即

$$\begin{aligned} x &= x(t) \\ y &= y(t) \\ z &= z(t) \end{aligned} \quad (1-4)$$

该式表示的方程组为质点运动方程用直角坐标表示的形式, 也称为运动方程的分量式。以后均取二者的原点 O 是同一点, 这样已知一种表示就可以写出另一种形式, 两种运动方程的表示是完全等价的。如一质点的运动方程的分量式为

$$\begin{aligned} x &= 5t^2 + 3t + 2 \\ y &= 4t + 1 \\ z &= 2t + 5 \end{aligned}$$

则运动方程的矢量形式为

$$\mathbf{r} = (5t^2 + 3t + 2)\mathbf{i} + (4t + 1)\mathbf{j} + (2t + 5)\mathbf{k}$$

若质点限制在一平面内运动或作直线运动, 像质点的位置表示一样, 运动方程的表示也同样可以简化。

当质点运动时, 在选定的参考系中, 位置矢量 $\mathbf{r}$ 的末端将会随着时间的变化在空间描绘出一条连续的曲线(或直线), 这就是质点所经历的路径, 称为质点运动的轨迹。质点运动的轨迹, 可由轨迹方程来确定。由坐标表示的质点运动方程, 消去

时间 t , 即可得到只含有坐标变量 x, y, z 的轨迹方程。轨迹为直线的称为直线运动; 轨迹为曲线的称为曲线运动。

例题 1-1 已知一质点在直角坐标系 $OXYZ$ 中的运动方程为

$$x = 5 \cos \frac{\pi}{3} t$$

$$y = 5 \sin \frac{\pi}{3} t$$

$$z = 0$$

式中 t 以 s 计, x, y 的单位以 m 计, 求该质点在任一时刻的位置矢量及质点的轨迹方程。

解 根据运动方程, 该质点在任一时刻的位置矢量为

$$\mathbf{r} = 5 \cos \frac{\pi}{3} t \mathbf{i} + 5 \sin \frac{\pi}{3} t \mathbf{j}$$

从已知的运动方程中消去 t , 可得到质点的轨迹方程。由

$$x^2 + y^2 = (5 \cos \frac{\pi}{3} t)^2 + (5 \sin \frac{\pi}{3} t)^2 = 25$$

所以轨迹方程为

$$x^2 + y^2 = 25, z = 0$$

以上两式表示轨迹是在 $z=0$ 的平面内的一个以坐标原点 O 为圆心、以 5 m 为半径的圆周, 即质点在 $z=0$ 的平面内作圆周运动。

1.1.4 位移矢量

位移矢量是为描述质点位置变化而引进的物理量。如图 1-3 所示, 设一质点在空间作曲线运动, 在 t 时, 质点位于 A 点处, 到了 $t+\Delta t$ 时, 质点到了 B 点处。将 A, B 两点的位置矢量分别用 $\mathbf{r}(t)$ 和 $\mathbf{r}(t+\Delta t)$ 表示, 则从 A 到 B 的有向线段 $\Delta \mathbf{r}$ 就表示在时间间隔 Δt 内质点位置矢量的改变量, 称为质点的位移矢量, 简称位移。由图可见, 位移矢量仅与质点的始、末位置有关, 与始、末两位置间的路径无关。由矢量运算有

$$\Delta \mathbf{r} = \mathbf{r}(t+\Delta t) - \mathbf{r}(t) \quad (1-5)$$

在直角坐标系中, 由于

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

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

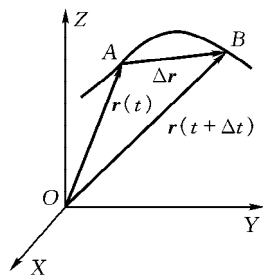


图 1-3 位移矢量

所以位移矢量可表示为

$$\begin{aligned}\Delta \mathbf{r} &= [x(t + \Delta t) - x(t)]\mathbf{i} + [y(t + \Delta t) - y(t)]\mathbf{j} + [z(t + \Delta t) - z(t)]\mathbf{k} \\ &= \Delta x\mathbf{i} + \Delta y\mathbf{j} + \Delta z\mathbf{k}\end{aligned}$$

(1-6)

位移的大小和方向可参照式(1-2)类似地给出。

若质点作直线运动,以该直线为 X 轴,则位移

$$\Delta x = x(t + \Delta t) - x(t)$$

可简化为代数量,若 $\Delta x > 0$,表示位移方向与 X 轴正方向相同;若 $\Delta x < 0$,则位移方向与 X 轴正方向相反。

应该注意,位移表示质点位置矢量的变化,并不是质点所经历的路程,位移和路程是两个不同的概念。位移是矢量,而路程是标量。除质点作只沿一个方向的直线运动情况下,位移的大小与路程相等外,其它情况,两者没有联系。

质点的同一客观运动,取的参考系不同,位移是不同的。如在一辆匀速直线运动的卡车上,在 A 点时,车上一人竖直向上抛出一物体,车到 B 点时,物体落回手中。若以卡车为参考系,这一运动过程物体的位移为零;若以地面为参考系,物体的位移矢量应该是由 A 到 B 的有向线段来表示,其大小显然不为零。在国际单位制中,位移的大小与路程的单位都是米(m)。

例题 1-2 一质点在某平面内沿逆时针方向作半径为 $R = 1.2 \text{ m}$ 的圆周运动,在一段时间内,它转了 3.2 周,求该质点在这段时间内的位移和路程。

解 建立如图所示的平面直角坐标系。设起始时刻质点在 X 轴正向圆周上的 A 点,质点沿圆周转动了 3 周又回到 A 点,再转过 0.2 周到 B 点。计算位移时,只用考虑 0.2 周就可以了。由于 $360^\circ \times 0.2 = 72^\circ$,若以圆心 O 点为坐标原点, A 点和 B 点的位置矢量 $\mathbf{r}_A$ 和 $\mathbf{r}_B$ 间的夹角为 72° ,故有

$$\mathbf{r}_A = 1.2\mathbf{i}$$

$$\mathbf{r}_B = 1.2\cos 72^\circ\mathbf{i} + 1.2\sin 72^\circ\mathbf{j} = 0.37\mathbf{i} + 1.14\mathbf{j}$$

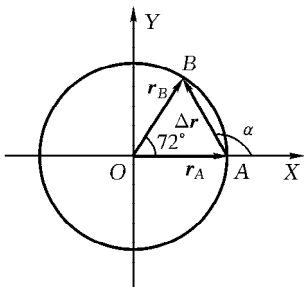
质点的位移矢量为

$$\Delta \mathbf{r} = \mathbf{r}_B - \mathbf{r}_A = (0.37 - 1.2)\mathbf{i} + 1.14\mathbf{j} = -0.83\mathbf{i} + 1.14\mathbf{j}$$

位移的大小

$$|\Delta \mathbf{r}| = \sqrt{(0.83)^2 + (1.14)^2} = 1.41 \text{ m}$$

其方向由角 α 确定,角 α 的值为



例题 1-2 图

$$\alpha = \arctan \frac{1.14}{-0.83} = \arctan(-1.37) = 126^\circ$$

即该质点位于位移矢量 $\Delta \mathbf{r}$ 与 X 轴正向夹角为 126° 的方向上,距 A 点为 1.41 m 处。

这一过程的路程为 $s = 2\pi R \times 3.2 = 2 \times 3.14 \times 1.2 \times 3.2 = 24.1 \text{ m}$

思考题

1-1 在物理学中,引入物理量的符号有什么意义?

1-2 物理量中的标量和矢量有什么区别? 如果仅知一个物理量是个有大小和方向的量,能否确定该量一定是矢量? 有人说,和矢量一定比分矢量大,这话对吗? 为什么?

1-3 在物理学中常常把所研究的对象加以简化,使之成为理想模型。采用这种理想化的方法对物理学的发展有什么实际意义?

1-4 位移和路程有什么区别? 分别举例说明怎样计算直线运动(包括在一直线上的往返运动)及曲线运动中的位移和路程。

1-5 当参考系选定之后,对一个运动质点,其某时刻的位置矢量与所选取的坐标系有没有关系? 某段时间间隔的位移矢量与所选取的坐标系有没有关系?

1-6 $|\Delta \mathbf{r}|$ 和 Δr 有无区别? 它们和路程 s 有无区别? 试分别举例说明。

1.2 质点运动的速度和加速度 运动学中的两类问题

1.2.1 速度矢量

速度矢量是描述质点运动快慢和方向变化的物理量,它是由质点位置矢量随时间的变化来决定的。

如图 1-3 中,在时间 Δt 内,质点的位移矢量为 $\Delta \mathbf{r}$,则 $\Delta \mathbf{r}$ 与时间 Δt 之比表示质点在 Δt 时间内位置矢量的平均变化率,称作质点在 Δt 时间内的平均速度,用 $\bar{\mathbf{v}}$ 表示,即

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

平均速度是矢量,其大小等于 $|\Delta \mathbf{r}|$ 与 Δt 的比值 $|\Delta \mathbf{r}|/\Delta t$,其方向与位移矢量 $\Delta \mathbf{r}$ 的方向相一致。由于位移 $\Delta \mathbf{r}$ 的大小和方向与从哪一时刻 t 起及所取的时间 Δt 的大小均有关,故平均速度的大小和方向也随时刻及此后所取时间 Δt 的大小