

21世纪高等院校教材

大学物理

(第二版)

上册

主 编 王纪龙

副主编 周希坚 李秀燕

编 委 王钢柱 杨毅彪

郝玉英 周 伟



科学出版社

www.sciencep.com

21 世纪高等院校教材

大学物理

(第二版)

上册

主 编	王纪龙	
副主编	周希坚	李秀燕
编 委	王钢柱	杨毅彪
	郝玉英	周 伟

科学出版社

北 京

内 容 简 介

本书是根据“高等工业学校大学物理课程教学基本要求”的精神,按照21世纪人才培养模式的需要和课程体系、教学内容改革的要求,在广泛吸取了近年来出版的国内外一些较为优秀的同类教材的成功经验后编写而成的。全书分上、下两册。上册包括力学(含相对论)、电磁学;下册包括振动和波动学、量子物理基础、热物理学。

本书可作为高等工业学校各专业和其他类院校非物理类专业本、专科学生的大学物理教材,也可用作成人教育的大学物理教材和教学参考书。

图书在版编目(CIP)数据

大学物理(上、下册)/王纪龙主编. —2版. —北京:科学出版社,2003
(21世纪高等院校教材)

ISBN 7-03-011054-4

I. 大… II. 王… III. 物理学-高等学校-教材 IV. O4

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2002)第 105952 号

责任编辑:巴建芬/责任校对:包志虹

责任印制:安春生/封面设计:槐寿明

科学出版社 出版

北京东黄城根北街16号

邮政编码:100717

<http://www.sciencep.com>

新蕾印刷厂 印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2002年2月第 一 版 开本:720×1000 1/16

2003年1月第 二 版 印张:27 1/2

2004年2月第三次印刷 字数:524 000

印数:15 501—18 500

定价:57.00元(含上、下册)

(如有印装质量问题,我社负责调换〈杨中〉)

前 言

大学物理是高等院校理工科(非物理类)专业一门重要的必修基础课,除为大学生终身学习打下必要的、系统的物理理论基础外,课程本身还体现了对大学生进行科学思维、科学方法和创新能力的培养.在对大学生进行综合素质培养中,大学物理对学生科学素养的提高有着重要的、其他学科无法替代的作用.

选择好的教材是提高教学质量的关键,所以编写一套满足 21 世纪人才培养需要的、好教、好学、好用的大学物理教材显得尤为重要.一套好的教材需要不断地完善,要经过广泛的教学实践的检验,在使用中发现问题或不足,不断地进行修正.为此,我们在开展物理系列课程改革研究时,把大学物理教材的研究作为重要课题之一,对已由科学出版社出版的《大学物理》(王纪龙主编,2002 年 2 月)进行了全面修改,并推出《大学物理》第二版.

本次修订的原则:教学内容的取舍要满足 21 世纪人才培养的需要;结构体系的变化要有利于教与学,要深入浅出,不有意深化、难化教学内容,力戒大学物理理论物理化;基本概念和基本规律的阐述力求准确、严谨,力戒语言模棱两可,含糊不清;保留原书优势,进一步强调对大学生创新思维和创新能力的培养.

本次在全面修订的基础上重点修订了电磁学部分的内容;重写了几乎全部的物理专题;新增了中外物理学家简介,特别编写了中国和华裔著名物理学家简介;附录增加了百年物理学诺贝尔奖简况.本次修订还大篇幅调整了各章后的习题,选题力求围绕各章基本内容,每学时教学内容配以 4~5 个习题供选择,同类题实行精选,难度梯度适当.

参加本书编写与修订的有:王纪龙,周希坚,李秀燕,王钢柱,郝玉英,杨毅彪,周伟.其中第一、二、三章由郝玉英编写;第五、六、七章由李秀燕编写;第八、九、十章及中外物理学家简介和百年诺贝尔奖简况由杨毅彪编写;第十一、十二、十五章由王钢柱编写;第十六、十九、二十章由周伟编写.王纪龙负责第四章、第十三章的编写和下册的统稿工作,周希坚负责第十四、十七、十八章的编写和上册的统稿工作.

本书虽经全面的修订,但难免仍存在一些不足,恳请使用本书的同行和读者批评指正.

王纪龙

2002 年 12 月于太原

本书中涉及的物理量和单位

量的名称	量的符号	单位名称	单位符号	量纲	备注
长度	l, s	米	m	L	
面积	S	平方米	m^2	L^2	
体积	V	立方米	m^3	L^3	1L(升) = $10^{-3}m^3$
时间	t, τ	秒	s	T	
位移	$s, \Delta r$	米	m	L	
速度	v, u	米每秒	$m \cdot s^{-1}$	LT^{-1}	
加速度	a	米每二次方秒	$m \cdot s^{-2}$	LT^{-2}	
角位移	θ	弧度	rad	1	
角速度	ω	弧度每秒	$rad \cdot s^{-1}$	T^{-1}	
角加速度	β	弧度每二次方秒	$rad \cdot s^{-2}$	T^{-2}	
质量	m	千克	kg	M	
力	F	牛顿	N	LMT^{-2}	$1N = 1kg \cdot m \cdot s^{-2}$
重力	G	牛顿	N	LMT^{-2}	
功	A	焦耳	J	L^2MT^{-2}	$1J = 1N \cdot m$
能量	$E(W)$	焦耳	J	L^2MT^{-2}	
动能	E_k	焦耳	J	L^2MT^{-2}	
势能	E_p	焦耳	J	L^2MT^{-2}	
功率	P	瓦特	W	L^2MT^{-3}	$1W = 1J \cdot s^{-1}$
摩擦系数	μ	-	-	-	
动量	p	千克米每秒	$kg \cdot m \cdot s^{-1}$	LMT^{-1}	
冲量	I	牛顿秒	$N \cdot s$	LMT^{-1}	
力矩	M	牛顿米	$N \cdot m$	L^2MT^{-2}	
转动惯量	J	千克二次方米	$kg \cdot m^2$	L^2M	
角动量(动量矩)	L	千克二次方米每秒	$kg \cdot m^2 \cdot s^{-1}$	L^2MT^{-1}	
电流	I	安培	A	I	
电荷量	Q, q	库仑	C	TI	
电荷线密度	λ	库仑每米	$C \cdot m^{-1}$	$L^{-1}TI$	
电荷面密度	σ	库仑每平方米	$C \cdot m^{-2}$	$L^{-2}TI$	
电荷体密度	ρ	库仑每立方米	$C \cdot m^{-3}$	$L^{-3}TI$	

续表

量的名称	量的符号	单位名称	单位符号	量纲	备注
电场强度	E	伏特每米	$V \cdot m^{-1}$ 或 $N \cdot C^{-1}$	$LMT^{-3}I^{-1}$	$1V \cdot m^{-1} = 1N \cdot C^{-1}$
电场强度通量	Ψ_E	伏特米	$V \cdot m$	$L^3MT^{-3}I^{-1}$	
电势	V	伏特	V	$L^2MT^{-3}I^{-1}$	
电势差、电压	U	伏特	V	$L^2MT^{-3}I^{-1}$	
电容率	ϵ	法拉每米	$F \cdot m^{-1}$	$L^{-3}M^{-1}T^4I^2$	
真空电容率	ϵ_0	法拉每米	$F \cdot m^{-1}$	$L^{-3}M^{-1}T^4I^2$	
相对电容率	ϵ_r	-	-	-	
电偶极矩	p_e	库仑米	$C \cdot m$	LTI	
电极化强度	P	库仑每平方米	$C \cdot m^{-2}$	$L^{-2}TI$	
电极化率	χ_e	-	-	-	
电位移	D	库仑每平方米	$C \cdot m^{-2}$	$L^{-2}TI$	
电位移通量	Ψ_D	库仑	C	TI	
电容	C	法拉	F	$L^{-2}M^{-1}T^4I^2$	$1F = 1C \cdot V^{-1}$
电流密度	j	安培每平方米	$A \cdot m^{-2}$	$L^{-2}I$	
电动势	\mathcal{E}	伏特	V	$L^2MT^{-3}I^{-1}$	
电阻	R	欧姆	Ω	$L^2T^{-3}I^{-2}$	$1\Omega = 1V \cdot A^{-1}$
电阻率	ρ	欧姆米	$\Omega \cdot m$	$L^3MT^{-3}I^{-2}$	
电导率	γ	西门子每米	$S \cdot m^{-1}$	$L^{-3}M^{-1}T^3I^2$	$1S = 1A \cdot V^{-1}$
磁感应强度	B	特斯拉	T	$MT^{-2}I^{-1}$	$1T = 1Wb \cdot m^{-2}$
磁导率	μ	亨利每米	$H \cdot m^{-1}$	$LMT^{-2}I^{-2}$	
真空磁导率	μ_0	亨利每米	$H \cdot m^{-1}$	$LMT^{-2}I^{-2}$	
相对磁导率	μ_r	-	-	-	
磁通量	Φ_m	韦伯	Wb	$L^2MT^{-2}I^{-1}$	$1Wb = 1V \cdot s$
磁化强度	M	安培每米	$A \cdot m^{-1}$	$L^{-1}I$	
磁化率	χ_m	-	-	-	
磁场强度	H	安培每米	$A \cdot m^{-1}$	$L^{-1}I$	
磁矩	p_m	安培平方米	$A \cdot m^2$	L^2I	
自感	L	亨利	H	$L^2MT^{-2}I^{-2}$	$1H = 1Wb \cdot A^{-1}$
互感	M	亨利	H	$L^2MT^{-2}I^{-2}$	
电场能量	W_e	焦耳	J	ML^2T^{-2}	
磁场能量	W_m	焦耳	J	ML^2T^{-2}	
电磁能密度	w	焦耳每立方米	$J \cdot m^{-3}$	$ML^{-1}T^{-2}$	

目 录

前 言

本书中涉及的物理量和单位

第一篇 力 学

第一章 质点运动学	3
§ 1-1 质点运动的描述	3
§ 1-2 曲线运动	12
§ 1-3 相对运动	20
习题	24
中外物理学家简介(一)	27
专题选读 A 天体物理学(一)	28
第二章 质点动力学	35
§ 2-1 牛顿运动定律 力	35
§ 2-2 牛顿定律的适用范围	48
§ 2-3 冲量 动量定理	50
§ 2-4 动量守恒定律	55
* § 2-5 火箭的飞行原理	60
§ 2-6 功 动能 动能定理	62
§ 2-7 势能 机械能守恒定律	68
§ 2-8 碰撞	85
习题	91
中外物理学家简介(二)	98
专题选读 B 天体物理学(二)	99
第三章 刚体的转动	103
§ 3-1 刚体运动学	103
§ 3-2 力矩 转动定律	107
§ 3-3 角动量与角动量守恒定律	120
§ 3-4 转动中的功和能	127
* § 3-5 质心的运动定律 刚体的平面运动	133
* § 3-6 刚体的进动	139
习题	141
中外物理学家简介(三)	144

专题选读 C 非线性科学(一)	145
第四章 狭义相对论基础	153
§ 4-1 力学相对性原理	154
§ 4-2 迈克耳孙-莫雷实验	157
§ 4-3 狭义相对论的基本假设	160
§ 4-4 几个重要的狭义相对论效应	165
§ 4-5 狭义相对论动力学基础	174
习题	184
中外物理学家简介(四)	187
专题选读 D 广义相对论	188

第二篇 电磁学

第五章 真空中的静电场	195
§ 5-1 电荷 库仑定律	195
§ 5-2 电场 电场强度	200
§ 5-3 电场线 高斯定理	210
§ 5-4 静电场的环路定理 电势	222
§ 5-5 等势面 电势梯度	232
§ 5-6 带电粒子在静电场中的运动	237
习题	238
中外物理学家简介(五)	243
专题选读 E 等离子体技术	244
第六章 静电场中的导体和电介质	248
§ 6-1 静电场中的导体	248
§ 6-2 空腔导体 静电屏蔽	253
§ 6-3 电容和电容器	257
§ 6-4 电介质的极化	264
§ 6-5 电介质中的静电场	271
§ 6-6 静电场的能量	276
习题	280
中外物理学家简介(六)	284
专题选读 F 固体的能带结构	285
第七章 稳恒电流	290
§ 7-1 电流 电流连续性方程	290
§ 7-2 欧姆定律 焦耳-楞次定律	293
§ 7-3 电源 电动势	298
§ 7-4 稳恒电流的电路定律	301
习题	305

中外物理学家简介(七)	307
专题选读 G 超导体	308
第八章 真空中的稳恒磁场	316
§ 8-1 磁场 磁感应强度矢量	316
§ 8-2 毕奥-萨伐尔定律	320
§ 8-3 运动电荷的磁场	328
§ 8-4 磁场的高斯定理和安培环路定理	329
§ 8-5 安培定律	336
§ 8-6 磁力做功	344
§ 8-7 带电粒子在电场和磁场中的运动	346
习题	352
中外物理学家简介(八)	356
第九章 介质中的磁场	357
§ 9-1 磁介质的磁化	357
§ 9-2 磁介质的磁场	362
§ 9-3 铁磁质	364
习题	369
中外物理学家简介(九)	371
第十章 变化电磁场的基本规律	372
§ 10-1 电磁感应定律	372
§ 10-2 动生电动势 感生电动势	375
§ 10-3 自感 互感 磁场能量	387
§ 10-4 麦克斯韦电磁场理论	396
习题	404
中外物理学家简介(十)	409
专题选读 H A-B 效应	411
附录 I 矢量运算	413
附录 II 重要的物理常量和数据	425
附录 III 国际单位制(SI)	426
附录 IV 常用的能量、功、热量的单位互换表	428

第一篇 力 学

力学是一门古老的学问。在我国,公元前5世纪的《墨经》中已有关于杠杆原理的论述;在西方也可追溯到公元前4世纪亚里士多德(Aristotle)关于力产生运动的说教。但是力学作为一门科学理论的建立则已到了公元17世纪。公元16世纪末至17世纪初,伽利略(G. Galilei)用实验的方法发现了落体定律,其后牛顿(I. Newton)提出了以他名字命名的三个运动定律和万有引力定律,从而奠定了古典力学的基础。现在把以牛顿定律为基础的古典力学称为牛顿力学,或经典力学。经典力学理论是物理学中发展最早、最成熟的理论,它有严谨的理论体系和完备的研究方法。因而,从建立到20世纪初,牛顿力学兴盛了约300年。虽然在20世纪初发现了经典力学的局限性(局限于宏观物体的低速运动),因而在宏观物体的高速运动领域建立了相对论,在微观物体的低速运动领域建立了量子力学,但是在一般技术领域,更多的只涉及宏观低速问题,因此,经典力学是各工程技术(包括机械、建筑、水利、造船、航空、航天等)的理论基础。力学研究的对象是机械运动。机械运动是指物体间或物体内部各部分之间相对位置的变化。机械运动是存在于自然界中最普遍和最基本的运动形式。力学中提出的许多物理概念和物理原理适用于整个物理学。所以经典力学也是物理学和自然科学的基础。物体的运动总是在一定的空间和时间进行的,所以时空观问题也属力学研究的范畴。

本篇共4章。第一章质点运动学,主要研究质点运动的描述;第二章质点动力学,主要研究物体间的相互作用以及它们对物体运动的影响,着重介绍动量、能量等概念及相应的守恒定律;第三章介绍刚体定轴转动的运动学和动力学问题;第四章介绍狭义相对论的基本原理和概念。因为狭义相对论的时空观已成为现代物理的基础概念,而且与牛顿

力学有紧密的联系,所以把狭义相对论与经典力学放在一起介绍给学生.这样更有利于学生对这一部分内容的学习和理解.

考虑到中学物理已为学生打下了良好的基础,为处理好与中学物理的衔接,这一部分的第一、二章中,对中学已有的概念只作简单复习,而不作更多重复.在处理问题上注重建立坐标系的训练和微积分及矢量运算的应用.这一思想广泛体现在教学内容和例题、习题中.

第一章 质点运动学

质点运动学侧重用几何学的观点研究质点机械运动状态随时间变化的关系. 本章主要内容为:位置矢量、位移、速度和加速度等基本概念及质点的曲线运动和相对运动等.

§ 1-1 质点运动的描述

一、参考系、坐标系、质点

自然界中所有的物体都在不停地运动,绝对静止不动的物体是不存在的. 运动是物质存在的形式,是物质的固有属性,运动和物质是不可分割的. 这就是运动的绝对性. 例如在地面上相对静止的高楼都随地球一起以 $3.0 \times 10^4 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 的速度绕太阳运动,而太阳又以 $3.0 \times 10^5 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 的速度在银河系中运动. 但是,要描述一个物体的机械运动,必须选择另一个运动物体或几个虽在运动而相互间相对静止的物体作为参考,然后再研究这个运动物体是如何相对于参考物体运动的. 以上在描述物体运动时被选作参考的物体称为参考系.

在运动学中,参考系的选择可以是任意的. 在实际问题中,参考系选择既要考虑问题的性质和需要,又要力求使对运动的描述变得简单. 例如,确定交通车辆的位置时,可选用固定于地面上的房子或路牌作参考系,这样的参考系通常叫地面参考系. 在实验室中确定某一物体的位置时,可选实验室的墙壁或固定的实验桌作参考系,这样的参考系就叫实验室参考系. 经验表明,对同一物体的运动选择不同的参考系,对物体运动描述的结果是不相同的. 例如,加速上升的升降机天花板上的一松动螺钉的下落过程,以升降机为参考系,螺钉的初速为零,作加速下落的直线运动;以地面为参考系,螺钉以脱落时升降机速度为初速作竖直上抛运动. 在不同参考系中,对同一物体的运动具有不同的描述,叫做运动描述的相对性. 运动描述的相对性表明,参考系的选择对描述一个物体的运动具有重要的意义. 当我们研究一个物体的运动时,必须明确地选择恰当的参考系,只有选定了参考系,运动的描述才有意义. 以后还会看到,凡是描述物体运动状态的物理量都具有相对性,如位置矢量、速度矢量等.

参考系选定之后,为了定量地描述一个物体相对于此参考系的位置,需在此参考系上建立固定的坐标系. 最常用的坐标系是笛卡尔坐标系.

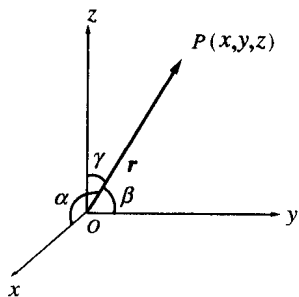
任何物体都有一定的大小、形状和内部结构. 通常情况下,物体运动时,内部

各点的运动情况常常是不相同的. 因此要精确描写一般物体的运动并不是一件简单的事. 为使问题简化, 可以采用抽象的办法: 如果物体的大小和形状在所研究的问题中不起作用, 或所起的作用可以忽略不计, 我们就可以近似地把此物体看作一个没有大小和形状的理想物体, 称为质点. 质点是一个理想化模型, 质点仍然是一个物体, 它具有质量, 同时它已被抽象化为一个几何点. 质点是实际物体在一定条件下的抽象. 理想化模型的引入在物理学中是一种常见的重要的科学分析方法, 在以后的课程中还将引入一系列理想模型, 例如刚体、理想气体、点电荷等. 把物体抽象为质点的方法具有很大的实际意义和理论价值. 如在天文学中把庞大的天体抽象为质点的方法已获得极大的成功. 从理论上讲, 我们可以把整个物体看成由无数个质点所组成的质点系, 从分析研究这些最简单的质点入手, 就可能把握整个物体的运动, 所以质点运动是研究物体运动的基础. 物体抽象为质点需要注意: ①同一个物体在一个问题中可抽象为质点, 在另一个问题中则不能简化为质点. 例如研究地球绕太阳公转时, 由于地球至太阳的平均距离(约 1.5×10^8 km)比地球的半径(约为 6370 km)大得多, 地球上各点相对于太阳的运动可以看作是相同的, 可以把地球当作质点; 但研究地球自转时, 地球上各点的运动情况大不相同, 地球就不能当作质点处理了. ②注意区别质点与小物体. 物体再小(原子核的线度约为 10^{-15} m)也有大小、形状, 而质点为一几何点, 它没有大小, 在空间占有确切的位置.

二、位置矢量、位移

1. 位置矢量

空间任一点 P 的位置, 在直角坐标系中可以用一组坐标 (x, y, z) 来表示, 也可以用从坐标原点向 P 点引一有方向的线段 r 来表示, 如图 1-1 所示. r 称为位置矢量, 简称位矢, 也叫矢径.



矢径的端点就是质点的位置, 矢径在笛卡儿坐标系坐标轴上的投影分别为 x 、 y 、 z . 位置矢量可表示为

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

式中 \mathbf{i} 、 \mathbf{j} 、 \mathbf{k} 分别为沿 x 、 y 、 z 轴的单位矢量. 位置矢量的大小为

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

图 1-1 质点的位置表示 位置矢量的方向余弦为

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

式中 α 、 β 和 γ 分别是 \boldsymbol{r} 与 x 轴、 y 轴和 z 轴之间的夹角。

质点运动时,质点的空间位置随时间的变化关系可用矢径或坐标表示为

$$\boldsymbol{r} = \boldsymbol{r}(t) = x(t)\boldsymbol{i} + y(t)\boldsymbol{j} + z(t)\boldsymbol{k} \quad (1.1)$$

或
$$x = x(t), \quad y = y(t), \quad z = z(t) \quad (1.2)$$

当质点在 Oxy 平面内运动时,式(1.2)简化为

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

知道了运动方程,质点的整个运动情况也就清楚了,所以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。

运动质点在空间所经过的径迹称为轨道。轨道为直线的运动,称为直线运动;轨道为曲线的运动,称为曲线运动。从式(1.2)中消去 t 后可得轨道方程,而式(1.2)是轨道的参数方程。例如一运动质点的运动方程为

$$\boldsymbol{r} = a \cos \omega t \boldsymbol{i} + a \sin \omega t \boldsymbol{j}$$

由 $x = a \cos \omega t, y = a \sin \omega t$ 消去 t 便得其轨道方程为

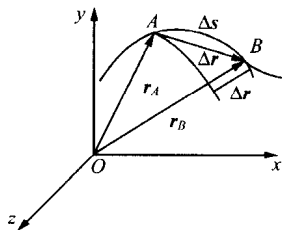
$$x^2 + y^2 = a^2$$

位置矢量具有大小、方向,服从几何加法。位置矢量具有瞬时性,质点在运动过程中,不同时刻的位置矢量不同。位置矢量描述质点的运动状态,前面已经讲过,它具有相对性。运动质点的某一空间位置,用不同的坐标系来描写,表达式是不一样的。

式(1.1)表明:质点的实际运动是各分运动的矢量合成,这个由空间的几何性质所决定的各分运动和实际运动的关系叫运动的叠加(或合成)原理。

2. 位移

设曲线 AB 是质点轨道的一部分,如图 1-2 所示。 t 时刻质点在 A 点处, $t + \Delta t$ 时刻质点到达 B 点处。 A 、 B 两点的位置分别由 \boldsymbol{r}_A 和 \boldsymbol{r}_B 来表示。在 Δt 时间内,质点位置的变化可以用由 A 到 B 的有向线段 \overrightarrow{AB} 来表示,称为质点的位移。显然



$$\overrightarrow{AB} = \boldsymbol{r}_B - \boldsymbol{r}_A = \Delta \boldsymbol{r} \quad (1.3) \quad \text{图 1-2 位移矢量}$$

$\boldsymbol{r}_B - \boldsymbol{r}_A$ 表示矢径 \boldsymbol{r} 在 Δt 时间内的增量,所以用 $\Delta \boldsymbol{r}$ 表示。 $\Delta \boldsymbol{r}$ 即质点在 $t \sim t + \Delta t$ 这一段时间内的位移。

应该注意:①位移表示质点位置的改变,并非质点所经历的路程。如图 1-2 所

示, Δr 为矢量, 它的量值 $|\Delta r|$ 即割线 AB 的长度, 而路程 Δs 是标量, 即曲线 AB 的长度. 只有在时间 Δt 趋近于零时 Δs 和 $|\Delta r|$ 方可视为相等. 即使在直线运动中, 位移和路程也是两个截然不同的概念.

② $|\Delta r|$ 不等于 Δr . $\Delta r = r(t + \Delta t) - r(t)$, 它反映 Δt 时间内质点相对于原点的径向长度增加. 一般地说 $|\Delta r| \neq \Delta r$, 如图 1-2 所示.

③ 位置矢量和位移在量值上都表示长度, 常用单位为米(m)、千米(km)和厘米(cm).

三、速度、加速度

1. 速度

位移 Δr 和发生这段位移所经历的时间 Δt 的比称为质点在这一段时间内的平均速度. 以 \bar{v} 表示平均速度, 则

$$\bar{v} = \frac{\Delta r}{\Delta t} \quad (1.4)$$

平均速度是矢量, 它的方向就是位移的方向.

当 Δt 趋于零时式(1.4)的极限, 即质点位置矢量对时间的变化率, 称为质点在时刻 t 的瞬时速度, 也叫即时速度, 简称速度. 用 v 表示速度, 则

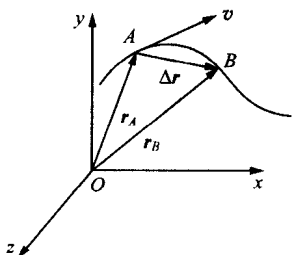


图 1-3 速度矢量

$$v = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{\Delta r}{\Delta t} = \frac{dr}{dt} \quad (1.5)$$

速度为矢量, 速度的方向就是 Δt 趋于零时 Δr 的方向, 如图 1-3 所示, 即质点运动轨道在 A 点的切线方向. 因此, 质点在 t 时刻的速度的方向就沿着该时刻质点所在处运动轨道的切线而指向运动的前方.

速度的大小叫速率, 以 v 表示, 则有

$$v = |v| = \left| \frac{dr}{dt} \right| \quad (1.6)$$

若以 Δs 表示在 Δt 时间内质点沿轨道所经过的路程, 当 Δt 趋于零时, $|\Delta r| = \Delta s$, 由此可得

$$v = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{|\Delta r|}{\Delta t} = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{\Delta s}{\Delta t} = \frac{ds}{dt} \quad (1.7)$$

上式表明速率的大小又等于质点所走过的路程对时间的变化率. 一般地,

$$v = \left| \frac{d\mathbf{r}}{dt} \right| \neq \frac{dr}{dt}$$

将式(1.1)代入式(1.5),由于 i, j, k 不随时间改变,所以有

$$\mathbf{v} = \frac{d\mathbf{r}}{dt} = \frac{dx}{dt}\mathbf{i} + \frac{dy}{dt}\mathbf{j} + \frac{dz}{dt}\mathbf{k} = v_x\mathbf{i} + v_y\mathbf{j} + v_z\mathbf{k} \quad (1.8)$$

速度沿三个坐标轴的分量 v_x, v_y, v_z 分别为

$$v_x = \frac{dx}{dt}, \quad v_y = \frac{dy}{dt}, \quad v_z = \frac{dz}{dt} \quad (1.9)$$

速度的大小为

$$v = |\mathbf{v}| = \sqrt{v_x^2 + v_y^2 + v_z^2} \quad (1.10)$$

速度是矢量,既有大小,又有方向,服从几何加法;速率是标量,只有大小,没有方向. 速度是描述质点运动状态的物理量,对于不同的参考系,质点速度的大小、方向是不同的,速度具有相对性.

在国际单位制即 SI 制中,速度的单位是米·秒⁻¹($\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$).

一些物体运动速度大小:如光在真空中速度为 $3.0 \times 10^8 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$,北京正负电子对撞机中电子速度为 0.999 999 98 倍的光速,空气中声速(0°C)为 $3.3 \times 10^2 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$,人跑步(最大)速度约为 $11 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$.

2. 加速度

在变速运动中,质点的运动速度是随时间变化的,而质点速度的变化情况要用加速度来表示.

若以 $\mathbf{v}(t)$ 和 $\mathbf{v}(t + \Delta t)$ 分别表示质点在 t 时刻和 $t + \Delta t$ 时刻的速度,如图 1-4 所示,则在这段时间内的平均加速度 $\bar{\mathbf{a}}$ 由下式定义:

$$\bar{\mathbf{a}} = \frac{\mathbf{v}(t + \Delta t) - \mathbf{v}(t)}{\Delta t} = \frac{\Delta \mathbf{v}}{\Delta t} \quad (1.11)$$

当 Δt 趋于零时,此平均加速度的极限,即速度对时间的变化率,称为质点在时刻 t 的瞬时加速度,简称加速度,以 \mathbf{a} 表示加速度,则有

$$\mathbf{a} = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{\Delta \mathbf{v}}{\Delta t} = \frac{d\mathbf{v}}{dt} \quad (1.12)$$

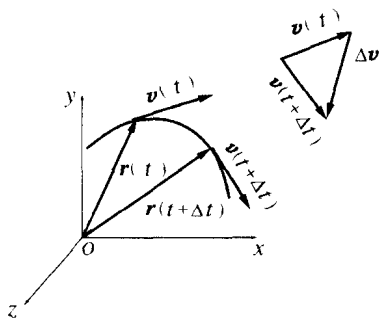


图 1-4 加速度矢量

加速度是矢量,是速度对时间的变化率,因此,不论是速度的大小发生变化,或者是速度的方向发生变化,或者是速度的大小和方向同时发生变化,都有加速度.

把式(1.5)代入式(1.12)得

$$\mathbf{a} = \frac{d\mathbf{v}}{dt} = \frac{d^2\mathbf{r}}{dt^2} \quad (1.13)$$

把式(1.8)代入式(1.12)得

$$\mathbf{a} = \frac{d\mathbf{v}}{dt} = \frac{dv_x}{dt}\mathbf{i} + \frac{dv_y}{dt}\mathbf{j} + \frac{dv_z}{dt}\mathbf{k} = a_x\mathbf{i} + a_y\mathbf{j} + a_z\mathbf{k} \quad (1.14)$$

加速度沿三个坐标轴的分量分别为

$$a_x = \frac{dv_x}{dt} = \frac{d^2x}{dt^2}, \quad a_y = \frac{dv_y}{dt} = \frac{d^2y}{dt^2}, \quad a_z = \frac{dv_z}{dt} = \frac{d^2z}{dt^2} \quad (1.15)$$

加速度的大小为

$$a = \sqrt{a_x^2 + a_y^2 + a_z^2} \quad (1.16)$$

加速度的单位是米·秒⁻²(m·s⁻²).

例 1-1 汽车向东行驶 5 km,又向南行驶 4 km,再向西行驶 2 km,求汽车合位移的方向和大小.

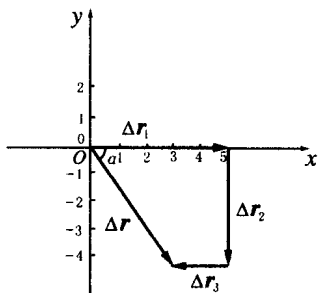


图 1-5 例 1-1 图

解 取向东为 x 轴的正方向,向北为 y 轴正方向建立坐标系,如图 1-5 所示,则对

第一位移矢量 $\Delta\mathbf{r}_1$ 有 $\Delta x_1 = 5 \text{ km}$, $\Delta y_1 = 0$

第二位移矢量 $\Delta\mathbf{r}_2$ 有 $\Delta x_2 = 0$, $\Delta y_2 = -4 \text{ km}$

第三位移矢量 $\Delta\mathbf{r}_3$ 有 $\Delta x_3 = -2 \text{ km}$, $\Delta y_3 = 0$

由位移定义得

$$\Delta\mathbf{r} = \mathbf{r}_2 - \mathbf{r}_1 = (x_2 - x_1)\mathbf{i} + (y_2 - y_1)\mathbf{j} = \Delta x\mathbf{i} + \Delta y\mathbf{j}$$

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

此处

$$\Delta x = \Delta x_1 + \Delta x_2 + \Delta x_3 = (5 + 0 - 2) \text{ km} = 3 \text{ km}$$

$$\Delta y = \Delta y_1 + \Delta y_2 + \Delta y_3 = -4 \text{ km}$$

$$|\Delta\mathbf{r}| = \sqrt{(\Delta x)^2 + (\Delta y)^2} = \sqrt{3^2 + (-4)^2} \text{ km} = 5 \text{ km}$$

合位移与 x 轴夹角为

$$\alpha = \arctan\left(\frac{\Delta y}{\Delta x}\right) = \arctan\left(\frac{-4}{3}\right) = -53.1^\circ$$