



SPT 21世纪高等院校教材

工科类

大学物理

上册

主 编 王纪龙
副主编 周希坚 郝虎在
编 委 王云才 王钢柱 汤洪明

科学出版社

21 世纪高等院校教材

大学物理

(上册)

主 编	王纪龙	
副主编	周希坚	郝虎在
编 委	王云才	王钢柱
	汤洪明	

科学出版社

2002

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,按照面向 21 世纪课程体系、教学内容改革的要求,在吸取了现行的国内外一些较有影响的同类教材的成功经验后编写而成的。全书分上、下两册,共五篇。上册包括力学(含相对论)、电磁学;下册包括波动学、量子物理基础、热物理学。

本书可作为高等工业学校各专业本、专科学生的大学物理教材,也可用作其他类大专院校非物理专业以及成人教育的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. —北京:科学出版社,2002
(21 世纪高等院校教材)

ISBN 7-03-010093-X

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 004182 号

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>

中国科学院印刷厂印刷

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

2002 年 2 月第一次印刷 印张: 28 1/4

印数:1—8 000

字数: 541 000

定价: 60.00 元(含上、下册)

(如有印装质量问题,我社负责调换〈科印〉)

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	1L(升) = 10^{-3}m^3
面 积	S	平方米	m^2	L^2	
体 积	V	立方米	m^3	L^3	
时 间	t, τ	秒	s	T	
位 移	$s, \Delta r$	米	m	L	
速 度	v, u	米每秒	$\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$	LT^{-1}	
加 速 度	a	米每二次方秒	$\text{m}\cdot\text{s}^{-2}$	LT^{-2}	
角 位 移	θ	弧度	rad	1	
角 速 度	ω	弧度每秒	$\text{rad}\cdot\text{s}^{-1}$	T^{-1}	
角 加 速 度	β	弧度每二次方秒	$\text{rad}\cdot\text{s}^{-2}$	T^{-2}	
质 量	m	千克	kg	M	1N = $1\text{kg}\cdot\text{m}\cdot\text{s}^{-2}$
力	F	牛顿	N	LMT^{-2}	
重 力	G	牛顿	N	LMT^{-2}	
功	A	焦耳	J	L^2MT^{-2}	1J = $1\text{N}\cdot\text{m}$
能 量	$E(W)$	焦耳	J	L^2MT^{-2}	1W = $1\text{J}\cdot\text{s}^{-1}$
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}	
摩 擦 系 数	μ	—	—	—	
动 量	p	千克米每秒	$\text{kg}\cdot\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$	LMT^{-1}	
冲 量	I	牛顿秒	$\text{N}\cdot\text{s}$	LMT^{-1}	
力 矩	M	牛顿米	$\text{N}\cdot\text{m}$	L^2MT^{-2}	
转 动 惯 量	J	千克二次方米	$\text{kg}\cdot\text{m}^2$	L^2M	
角动量(动量矩)	L	千克二次方米每秒	$\text{kg}\cdot\text{m}^2\cdot\text{s}^{-1}$	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	$\text{C}\cdot\text{m}^{-1}$	L^{-1}TI	
电荷面密度	σ	库仑每平方米	$\text{C}\cdot\text{m}^{-2}$	L^{-2}TI	
电荷体密度	ρ	库仑每立方米	$\text{C}\cdot\text{m}^{-3}$	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	$C \cdot m$	LI	
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	$J \cdot m^{-3}$	$ML^{-1}T^{-2}$	

前 言

大学物理因其在培养大学生科学素质、科学思维方法和科学研究能力,特别是培养大学生的创新思维和创新能力方面具有独特的、不可替代的作用,因而成为高等工业学校各专业重要的必修基础课。进入 21 世纪以来,科学技术的发展、人类文明的进步对人才培养提出了更高的要求。为适应新世纪高新技术人才的培养,大学物理课已被公认为高等工科院校四大重点基础课程之一。能力培养、素质教育正在不断地向传统的大学物理教学提出挑战,所以编写一套符合时代需求的《大学物理》教材,既是物理教学的需要,也是高校广大物理教师的期盼。

编者长期从事大学物理教学,从 20 世纪 80 年代以来,先后多次正式出版大学物理教学参考书和大学物理教材,并被多所院校近 2 万人次使用。此次出版的《大学物理》是根据“高等工业学校物理课程教学基本要求”的精神,在深厚的教学积累基础上,分析比较了目前国内外一些比较优秀的同类大学物理教材,汲取了其中比较成功的经验之后,在编者已出版的《大学物理学》基础上,经过较大修改而成的。编写中突出了以下特点:

1. 加强近代物理部分在全书的比重,使这部分内容占到全书的三分之一以上。让学生更多地感受到近百年来物理学的新进展,为大学生在校学习和毕业后知识更新和终身教育打下扎实的理论基础。

2. 结合中学物理教材改革现状,适当地、前瞻性地调整了大学物理各部分的起点,避免与中学物理教材的过多重复。特别在力学部分强调了坐标系的建立、矢量运算和微积分的应用,这一思想体现在教学内容、例题、习题诸方面,让学生尽早感受大学物理与中学物理的不同,以便引起学生对大学物理的重视和兴趣。

3. 把大学生的科学素质教育和能力培养贯穿于教学中,体现在教材内。适时、适度地引入物理学史,以激发学生对物理的兴趣,同时以物理学家严谨的治学态度、科学的思维方式影响学生,培养学生的创新思维能力。为鼓励学生的个性发展,在每章后面附上相关的物理学前沿内容,供学有余力的学生阅读,扩展学生的知识面,为其个性发展留出空间。书中还有一部分带“*”的内容供有兴趣的学生自学。

4. 在保持理论框架不变的前提下,除引入每章后的专题介绍外,将教学内容更新融合在整个教学过程中,包括例题、习题、书中举例等,使学生在近代物理不断发展的动态氛围中学习经典理论,以避免给学生留下经典物理过于遥远、没什么用处的错觉。

5. 内容安排上遵循学生的认识规律和便于教学的原则。上册包括力学(含相对论)、电磁学,下册包括波动学、量子物理基础、热物理学。按照一般工科院校的教学安排,大学物理教学分两个学期,每个学期讲一册。这样安排有如下好处:①把相对论放在上册,一方面把近代物理的两大理论支柱分别放在两个学期教学,均衡了教学压力,更有利于激发学生学习物理的兴趣;另一方面,与力学放在一起,有利于学生及早接受正确的时空观。②把电磁学放在上册,一方面保证了教学的完整性和系统性不受学期间隔的影响;另一方面,在学习大学物理的第一学期就完整学完电磁学,可引起学生对本课程的重视,使学生明显感觉到中学物理与大学物理之间存在一个台阶。③把热学放在量子物理基础之后,可把量子概念引入气体动理论和热力学中,对相关内容和概念从经典到量子化给出更深刻的解释。这一部分还加强了热力学第二定律和熵的介绍。这一安排体现了加强近代部分的指导思想。但也避免了把大学物理编成理论物理初级教材。

本教材适合授课时数 130~140 学时。

全书采用国际单位制,书中用到的物理量的名称、符号、单位和量纲列表于书前,所以书中不再介绍物理量的量纲。

本书的编写分工如下:第一、二、三章由周希坚编写,第五、六、七章由王钢柱编写,第四、八、九、十章由郝虎在编写,第十一、十二、十九章由汤洪明编写,第十三、十四、十五章及附录由王纪龙编写,第十六、十七、十八、二十章由王云才编写。在本书编写过程中,李秀燕博士和北京师范大学杨学军博士都给予了很大的帮助,在此谨向他们表示衷心感谢。

由于水平所限,本书难免存在一些不足,恳请使用本书的各位同行与读者批评指正。

王纪龙

2001 年 10 月于太原

目 录

前 言

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
专题选读 A 天体物理学简介(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
专题选读 B 天体物理学简介(二)	101
第三章 刚体的转动	105
§ 3-1 刚体运动学	105
§ 3-2 力矩 转动定律	109
§ 3-3 角动量与角动量守恒定律	122
§ 3-4 转动中的功和能	129
* § 3-5 质心的运动定律 刚体的平面运动	135
* § 3-6 刚体的进动	141
习题	143
专题选读 C 非线性科学简介(一)	148
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
专题选读 D 非线性科学简介(二)	187
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	211
§ 5-4 静电场的环路定理 电势	223
§ 5-5 等势面 电势梯度	233
§ 5-6 带电粒子在静电场中的运动	237
习题	241
专题选读 E 等离子体技术简介	248
第六章 静电场中的导体和电介质	253
§ 6-1 静电场中的导体	253
§ 6-2 空腔导体 静电屏蔽	260
§ 6-3 电容和电容器	264
§ 6-4 电介质的极化	271
§ 6-5 电介质中的静电场	279
§ 6-6 静电场的能量	284
§ 6-7 热电体 铁电体和压电体及其应用	288
习题	291
专题选读 F 凝聚态物理学简介(一)	299
第七章 稳恒电流	305
§ 7-1 电流 电流连续性方程	305
§ 7-2 欧姆定律 焦耳-楞次定律	308
§ 7-3 电源 电动势	313
§ 7-4 稳恒电流的电路定律	316
习题	320
专题选读 G 凝聚态物理学简介(二)	323
第八章 真空中的稳恒磁场	331
§ 8-1 磁场 磁感应强度矢量	331
§ 8-2 毕奥-萨伐尔定律	335
§ 8-3 运动电荷的磁场	343
§ 8-4 磁场的高斯定理和安培环路定理	344

§ 8-5 安培定律	351
§ 8-6 磁力做功	358
§ 8-7 带电粒子在电场和磁场中的运动	360
习题	366
第九章 介质中的磁场	371
§ 9-1 磁介质的磁化	371
§ 9-2 磁介质的磁场	376
§ 9-3 铁磁质	378
习题	383
专题选读 H 凝聚态物理学简介(三)	384
第十章 变化电磁场的基本规律	390
§ 10-1 电磁感应定律	390
§ 10-2 动生电动势 感生电动势	393
§ 10-3 自感 互感 磁场能量	405
§ 10-4 麦克斯韦电磁场理论	414
习题	422
附录 I 矢量运算	427
附录 II 重要的物理常量和数据	439
附录 III 国际单位制(SI)	440
附录 IV 常用的能量、功、热量的单位互换表	442

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、参照系、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照系。

在运动学中,参照系的选择可以是任意的。在实际问题中,参照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照系,这样的参照系通常叫地面参照系。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照系,这样的参照系就叫实验室参照系。经验表明,对同一物体的运动选择不同的参照系,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—松动螺钉的下落过程,以升降机为参照系,螺钉的初速为零,作加速下落的直线运动;以地面为参照系,螺钉以脱落时升降机速度为初速作竖直上抛运动。在不同参照系中,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,参照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照系,只有选定了参照系,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。

参照系选定之后,为了定量地描述一个物体相对于此参照系的位置,需在此参照系上建立固定的坐标系。最常用的坐标系是笛卡儿直角坐标系。

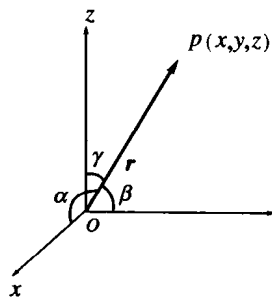
任何物体都有一定的大小、形状和内部结构。通常情况下,物体运动时,内部

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

$$r = xi + yj + zk$$

式中 i 、 j 、 k 分别为沿 x 、 y 、 z 轴的单位矢量。位置矢量的大小为

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

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 $\mathbf{r}$ 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

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

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,则式(1.2)简化为

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

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

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

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 $\mathbf{r}_A$ 和 $\mathbf{r}_B$ 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

$$\overrightarrow{AB} = \mathbf{r}_B - \mathbf{r}_A = \Delta \mathbf{r} \quad (1.3)$$

$\mathbf{r}_B - \mathbf{r}_A$ 表示矢径 $\mathbf{r}$ 在 Δt 时间内的增量,所以用 $\Delta \mathbf{r}$ 表示。 $\Delta \mathbf{r}$ 即质点在 t 到 $t + \Delta t$ 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

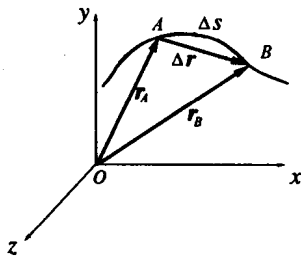


图 1-2 位移矢量

示, $\Delta \mathbf{r}$ 为矢量, 它的量值 $|\Delta \mathbf{r}|$ 即割线 AB 的长度, 而路程 Δs 是标量, 即曲线 $\widehat{AB}$ 的长度。只有在时间 Δt 趋近于零时 Δs 和 $|\Delta \mathbf{r}|$ 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 $|\Delta \mathbf{r}|$ 不等于 Δr 。 $\Delta \mathbf{r} = \mathbf{r}(t + \Delta t) - \mathbf{r}(t)$, 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 $|\Delta \mathbf{r}| \neq \Delta r$, 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 $\Delta \mathbf{r}$ 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 $\bar{\mathbf{v}}$ 表示平均速度, 则

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

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 $\mathbf{v}$ 表示速度, 则

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

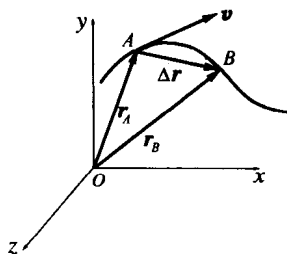


图 1-3 速度矢量

速度为矢量, 速度的方向就是 Δt 趋于零时 $\Delta \mathbf{r}$ 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

$$v = |\mathbf{v}| = \left| \frac{d\mathbf{r}}{dt} \right| \quad (1.6)$$

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, $|\Delta \mathbf{r}| = \Delta s$, 由此可得

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

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, 对于不同的参照系, 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(m·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℃)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

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

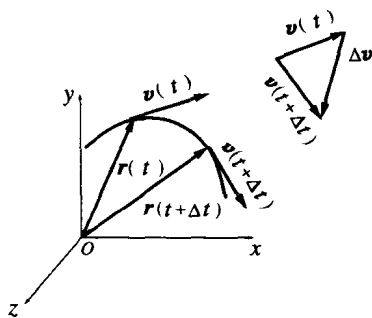


图 1-4 加速度矢量