

大学物理学

第一分册

力学·热学

秦德培 主编



重庆大学出版社

大学物理学

第一分册

501/186/11

力学·热学

秦德培 主编

重庆大学出版社

内 容 提 要

本书根据全国高等学校工科物理课程教学指导委员会制定的《大学物理课程教学基本要求》及其修改意见编写。全书分《力学·热学》、《电磁学》、《波动学》和《近代物理及物理学在现代科学技术中的应用》4个分册出版。本分册包括力学中的质点运动学、动力学、刚体的转动和热学中的气体动理论、热力学基础等内容。每章均附有内容提要,配置有现今较为流行的习题和思考题。

本书可作为工科院校大学物理课程的通用教材,也可作为其它院校非物理专业和成人教育学院、职工大学等院校各工科专业的教学参考书。

大学物理学 第一分册

秦德培 主编

责任编辑 黄开植

*

重庆大学出版社出版发行

新华书店经销

重庆通信学院印刷厂印刷

*

开本:850×1168 1/32 印张:7.625 字数:202千

1996年2月第2版 1996年2月第1次印刷

印数:30501—38000

ISBN 7-5624-0028-8/O·8 定价:7.60元

(川)新登字 020号

前 言

本书是为工科各专业编写的大学物理课程教材,是何世湘主编西南地区十一所院校联合编写的《大学物理学》的再版。在原书的编写过程中,各参编单位进行了卓有成效的合作,对各校的教学工作都起到了积极的促进作用。教学形势在不断发展,为适应各校教改的需要,不少的院校已先后编出并在教学中使用了一批切合本校实际的新教材。作为主编和参编人员较集中的重庆大学,经连续8年的教学实践,也深感有必要对原书进行合理的修订,在各参编单位的理解和赞同下,决定继续发扬该书的成果,改由重庆大学修订再版。

再版充分吸收了原版的优点,并认真总结了校内广大教师长期积累的教学经验,力求编成一套便于学生阅读,有利教师教学的简明教材。再版在以下几个方面作了改进:

- (1)对教学中的重点和难点,作了更深入细致的分析。
- (2)根据修订后的《基本要求》,对内容作了相应的调整,删去了绝大部分的超纲部分,重点更突出,内容更精练。
- (3)物理概念和基本规律的阐述更符合近代科学的发展水平。
- (4)例题更切合基础教学的需要,习题和思考题的配置,更符合当前教学的要求。

此外,鉴于物理学正在现代科学技术和工程实践中发挥着越来越重要的作用,为开阔学生视野,激发学生学习物理学和自然科学的兴趣,除基础教学内容之外,本书还选编了一些反映物理学在现代科学技术中应用的简明专题材料,供学生课外阅读或作专题选讲。

本教材由秦德培主编，唐南任副主编。参加编写的有王佳眉、陈宁、金属东和林德华(以姓氏笔划为序)。本分册由秦德培(第四、五章)、陈宁(第一、三章)和金属东(第二章)编写，由秦德培统稿。王佳眉选编了全书的例题和习题。

前课程指导委员会委员、原主编何世湘教授对再版工作给予了热忱的指导和帮助，原版的一些作者也表达了对再版工作的关心。在此，我们对她(他)们表示衷心的感谢；对于编写过程中借鉴其它教材的作者们，也谨致诚挚的谢意。限于编者的业务水平和学经验，书中难免有不当和错误之处，敬请读者批评指正。

编者

1995年10月

常用物理常量表

名 称	符 号	数 值
引力常量	G	$6.67 \times 10^{-11} \text{N} \cdot \text{m}^2 \cdot \text{kg}^{-2}$
地球质量	M	$5.98 \times 10^{24} \text{kg}$
地球半径	R	$6.4 \times 10^6 \text{m}$
阿伏伽德罗常量	N_A	$6.02 \times 10^{23} \text{mol}^{-1}$
气体常量	R	$8.31 \text{J} \cdot \text{mol}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$
玻耳兹曼常量	k	$1.38 \times 10^{-23} \text{J} \cdot \text{K}^{-1}$
理想气体标准状 态下的摩尔体积	V_m	$22.4 \times 10^{-3} \text{m}^3 \cdot \text{mol}^{-1}$
标准大气压	p_0	$1.013 \times 10^5 \text{Pa}$
电子电量	e	$1.602 \times 10^{-19} \text{C}$
电子静质量	m_e	$9.11 \times 10^{-31} \text{kg}$
电子静能	E_e	0.511MeV
质子静质量	m_p	$1.673 \times 10^{-27} \text{kg}$
中子静质量	m_n	$1.675 \times 10^{-27} \text{kg}$
1 电子伏特能量	eV	$1.602 \times 10^{-19} \text{J}$
真空电容率	ϵ_0	$8.85 \times 10^{-12} \text{F} \cdot \text{m}^{-1}$
真空磁导率	μ_0	$4\pi \times 10^{-7} \text{H} \cdot \text{m}^{-1}$
真空中光速	c	$3.00 \times 10^8 \text{m} \cdot \text{s}^{-1}$
普朗克常量	h	$6.63 \times 10^{-34} \text{J} \cdot \text{s}$
里德伯常量	R_∞	$1.097 \times 10^7 \text{m}^{-1}$
玻尔半径	a_0	$5.29 \times 10^{-11} \text{m}$
电子康普顿波长	λ_c	$2.426 \times 10^{-12} \text{m}$

主要物理量的符号

力 学

位置矢量	r	滑动摩擦系数	μ
位移	$\Delta r, dr$	最大静摩擦系数	μ'
路程	s	功	A
速度	v	功率	P
速率	v	动能	E_k
加速度	a	势能	E_p
角位置	θ	机械能	E
角速度	ω	冲量	I
角加速度	β	动量	p
切向加速度	a_t	力矩	M
法向加速度	a_n	角动量	L
力	F, f	转动惯量	J
重力	W, P	转动动能	E_k
劲度系数	k		

热 学

体积	V	气体常量	R
温度	T	玻耳兹曼常量	k
压强	p	阿伏伽德罗常量	N_A
分子质量	m	分子数	N
气体质量	M	分子数密度	n
摩尔质量	M_{mol}	分子速率	v
物质的量	ν	概率	W

刚性分子自由度	N_A	定体摩尔热容	C_V
平动自由度	t	定压摩尔热容	C_P
转动自由度	r	多方指数	n
分子平动动能	ϵ_t	绝热指数	γ
分子转动动能	ϵ_r	热机效率	η
分子动能	ϵ	致冷系数	w
内能	E	热力学概率	Ω
平均碰撞频率	\bar{Z}	熵	S
平均自由程	$\bar{\lambda}$		
功	A		
热量	Q		
摩尔热容	C		

目 录

第一篇 力 学

第一章 质点运动学	.....
§ 1.1 描述质点运动的物理量	.....
一、位置矢量	.....
二、位移	.....
三、速度	.....
四、加速度	.....
§ 1.2 曲线运动中的切向加速度和法向加速度	..... 13
§ 1.3 圆周运动的角量描述	..... 16
§ 1.4 运动学量的积分关系	..... 17
一、加速度为时间的函数 $a=a(t)$	..... 17
二、加速度为速度的函数 $a=a(v)$ 和加速度为位置 的函数 $a=a(x)$	..... 19
§ 1.5 运动叠加原理	..... 22
§ 1.6 相对运动	..... 24
内容提要	..... 27
思考题	..... 29
习题	..... 32
第二章 动力学	..... 37
§ 2.1 常见力	..... 37
一、万有引力和重力	..... 37
二、静电力	..... 38
三、弹力	..... 39
四、摩擦力	..... 40

§ 2.2 牛顿运动定律	41
一、牛顿运动定律	41
二、有关牛顿运动定律的说明	41
三、力学的单位制和量纲	43
§ 2.3 牛顿运动定律的应用	45
§ 2.4 非惯性系中的力学问题	53
§ 2.5 功	55
一、功	55
二、一对力的功	58
§ 2.6 动能定理	60
§ 2.7 势能	63
一、保守力与耗散力	63
二、势能	64
三、常见的势能	65
四、保守力与势函数的关系	67
§ 2.8 机械能守恒定律	69
§ 2.9 动量定理	76
一、动量定理	76
二、质点系动量定理	78
三、质心运动定理	79
§ 2.10 动量守恒定律	80
一、动量守恒定律	80
二、动量守恒定律的应用	81
§ 2.11 角动量和角动量守恒定律	83
一、力矩	84
二、角动量	85
三、角动量定理	85
四、角动量守恒定律	86
五、力学定律在解题中的综合应用	91
§ 2.12 牛顿力学的适用范围	96
内容提要	97
思考题	99
习题	105

第三章 刚体的转动	118
§ 3.1 定轴转动刚体运动学	119
§ 3.2 定轴转动刚体动力学	120
一、转动惯量	120
二、转动定律	125
三、角动量守恒定律	128
四、功能关系和机械能守恒定律	134
内容提要	136
思考题	137
习题	139

第二篇 热 学

第四章 气体动理论	145
§ 4.1 平衡态与态参量	145
一、平衡态	145
二、态参量	145
§ 4.2 统计规律与统计平均值	146
一、统计规律	146
二、分布函数	147
三、统计平均值	149
§ 4.3 麦克斯韦速率分布和玻耳兹曼能量分布	151
一、麦克斯韦速率分布函数	151
二、玻耳兹曼能量分布	155
§ 4.4 理想气体的压强和物态方程	157
一、理想气体的微观模型和统计性假设	157
二、压强公式的推导	158
三、理想气体的物态方程	160
§ 4.5 气体分子的碰撞	161
§ 4.6 能量均分定理	165
一、自由度	165
二、能量均分定理	166
三、理想气体的内能	167
内容提要	169

思考题	171
习题	174
第五章 热力学基础	179
§ 5.1 准静态过程	179
§ 5.2 热力学第一定律	181
一、热力学第一定律	181
二、准静态过程中的体积功	182
三、热量和热容	183
§ 5.3 热力学第一定律对理想气体常见过程的应用	188
一、等体过程	189
二、等压过程	189
三、等温过程	189
四、绝热过程	189
§ 5.4 绝热方程的推导	191
§ 5.5 循环	194
一、循环	194
二、热机的效率和致冷机的致冷系数	195
三、卡诺循环	200
§ 5.6 热力学第二定律	202
一、热力学第二定律	202
二、热力学第二定律是自然界宏观热力学过程进行方向的 普遍规律	203
三、可逆过程和不可逆过程	205
§ 5.7 热力学第二定律的统计意义	207
一、热力学第二定律是统计规律	207
二、热力学第二定律的统计解释	207
三、熵增加原理	210
内容提要	211
思考题	213
习题	217
习题答案	224

第一篇 力 学

自然界中的一切物质都处于永恒运动之中。物质运动的形式是多种多样的,其中,最简单、最基本的运动形式是物体位置的变动,称为**机械运动**。机械运动广泛存在于日常生活和生产实践中,存在于物质的物理的、化学的……以及生命的复杂运动中。力学,就是研究物体机械运动的一门学科,是深入研究物质的各种高级、复杂运动的基础。力学的规律,具有极大的普遍性和重要的实用性。关于力学的分类,运动学从现象上研究物体运动状态及其变化的规律,而动力学则从本质上去研究力和运动状态变化的关系。

第一章 质点运动学

任何物体都有一定的形状和大小,运动情况常常是很复杂的。如果物体上各部分的运动情况完全一样(如气缸中活塞的运动,称为**平移**),或在具体问题中无需考虑物体各部分运动的差别(如研究地球绕太阳的轨道运动,无需考虑地球的自转和地球上各点离太阳距离的不同),就可以用一个没有形状和大小的“点”来代替物体,这样的点称为**质点**。

运动是永恒的、绝对的,然而又是相对的。物体的运动,总是针对某个被称做**参考系**的物体或物体组而言的,参考系不同,运动的情况就不一样。例如,在匀速前进的车厢中竖直上抛物体,以车厢

为参考系时物体作直线运动,以地面为参考系时就作抛物线运动了。这叫做运动描述的**相对性**。选择好参考系后,再建立起与之固定的坐标系,就能对质点的运动作出具体的、定量的描述。

§ 1.1 描述质点运动的物理量

一、位置矢量

位置矢量是一个用来表示质点位置的物理量,简称**位矢**,定义为从坐标原点到质点 P 的有向线段,用 r 表示为 $r = \overrightarrow{OP}$ 。 r 的大小 $r = |r|$ 给出了质点到原点的距离, r 的指向表明了质点偏离原点的方向(图 1.1)。如果引入一个沿位矢方向大小为 1 的单位矢量 \hat{r} ,就可以集距离 r 和方向 \hat{r} 于一身,清楚地将位矢表示为

$$r = r\hat{r} \quad (1.1)$$

坐标 (x, y, z) 也同样可以表示质点的位置。如果用 i, j, k 分别表示沿 x, y, z 坐标轴正向的单位矢量,按平行四边形定则,可以将位矢 r 表示成 3 个分矢量 $x = xi$, $y = yj$ 和 $z = zk$ 的矢量和,记作

$$r = xi + yj + zk \quad (1.2)$$

x, y, z 为 r 在 x, y, z 3 个坐标轴上的投影,称为位

矢沿对应坐标轴的分量。由图 1.1 可以看出,位矢的大小 r 和表明位矢方向的 3 个方位角,即与各坐标轴的夹角,可以用分量表示为

$$r = \sqrt{x^2 + y^2 + z^2} \quad (1.3)$$

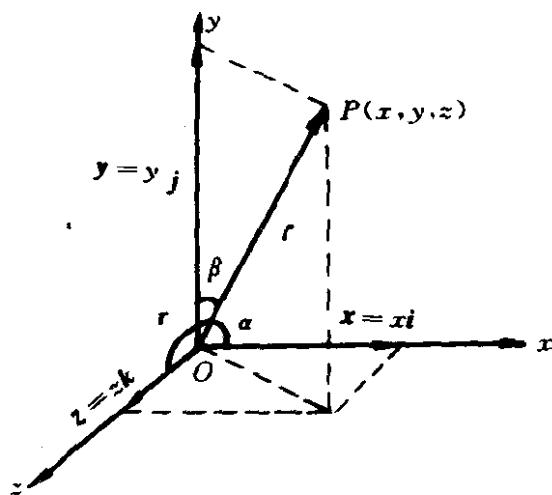


图 1.1 位置矢量

$$\cos\alpha = \frac{x}{r}, \quad \cos\beta = \frac{y}{r}, \quad \cos\gamma = \frac{z}{r} \quad (1.4)$$

质点运动时,位矢随时间变化,表示 r 随时间 t 变化的函数式

$$r = r(t) \quad (1.5)$$

或
$$r(t) = x(t)i + y(t)j + z(t)k \quad (1.6)$$

$$x = x(t), \quad y = y(t), \quad z = z(t) \quad (1.7)$$

称为质点的运动学方程。

运动质点所描绘的空间路径称为轨道,式(1.7)即为轨道的参数方程,由式(1.7)消去时间 t ,便可求得表达运动质点各坐标量函数关系的轨道方程。

二、位移

当质点在轨道上从 A 点运动到 B 点,位矢由 r_A 变为 r_B 时,表示质点位置变化的有向线段 AB 称为质点由 A 点到 B 点的位移。根据矢量的运算规则,位移 AB 可以表示为位矢的增量

$$\Delta r = r_B - r_A \quad (1.8)$$

位移只反映质点位置改变的实际效果,不能说明运动的具体路径和路程,也不能说明发生位移所需的时间。因为,从 A 点到达 B 点,可以沿着不同的路径,经历不同的路程(路径的长度),也可以经历不同的时间。

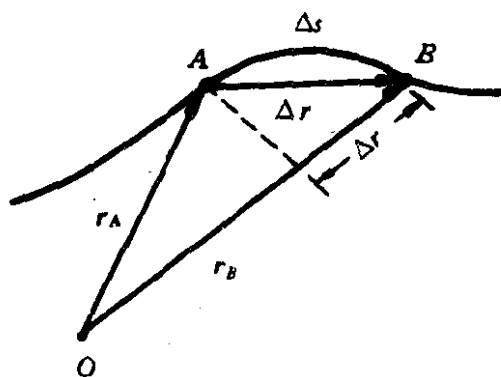


图 1.2 位移

位移 Δr 是矢量,其量

值 $|\Delta r|$ 为位矢增量的大小,不同于位矢大小的增量 $|\Delta r|$ 。图 1.2 清楚地表明,一般情况下 $|\Delta r| \neq |\Delta r|$ 。

由 $r = xi + yj + zk$, 位移可表示为

$$\Delta r = \Delta xi + \Delta yj + \Delta zk \quad (1.9)$$

$\Delta x, \Delta y, \Delta z$ 为位移的 3 个分量。

三、速度

位移没有说明发生位移的时间,对运动的描述是不全面的。设质点在 Δt 时间内由 A 点到 B 点发生 Δr 的位移,表示质点在该 Δt 时间内平均运动快慢和运动方向的

$$\bar{v} = \frac{\Delta r}{\Delta t}$$

称为质点在该 Δt 时间内的平均速度。平均速度是矢量,它的方向就是位移的方向,也即图 1.3 中轨道割线 AB 的方向,它的大小等于该 Δt 时间内单位时间的位移量。一般说来,平均速度的方向和大小,都会随 Δt 的长短而改变。平均速度在 Δt 趋近于零时的极限

$$v = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{\Delta r}{\Delta t}$$

称为质点的瞬时速度或简称速度,在数学上可以表示为位矢 r 对时间 t 的一阶导数

$$v = \frac{dr}{dt} \quad (1.10)$$

速度也是一个矢量,是对质点在给定时刻或给定位置运动快慢和运动方向的精确描述。速度的方向为元位移 dr 的方向,即轨道前进的切线方向(图 1.3)。因 $\Delta t \rightarrow 0$ 时表示位移大小的轨道割线长 $|dr|$ 与表示轨道长的路程 ds 相等,速度的大小。

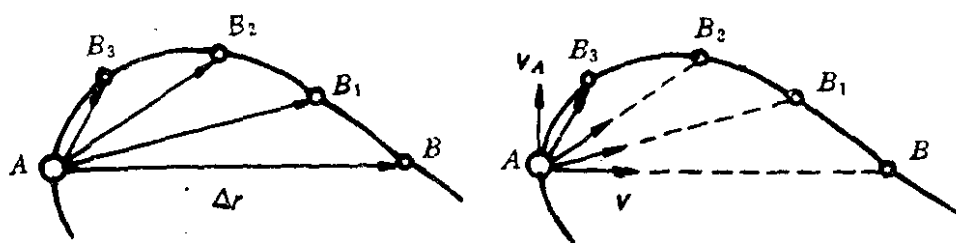


图 1.3 平均速度和瞬时速度的方向

$$|v| = \frac{|dr|}{dt} = \frac{ds}{dt}$$

与由路程定义的,只反映运动快慢的速率

$$v = \frac{ds}{dt} \quad (1.11)$$

相等。正因如此,速率也就常常成为速度大小的同义词,在使用上不再加以区分。

因位矢 $r = xi + yj + zk$, 由 $v = \frac{dr}{dt}$ 可得

$$v = \frac{dx}{dt}i + \frac{dy}{dt}j + \frac{dz}{dt}k \quad (1.12)$$

如将 v 用分量表示成

$$v = v_x i + v_y j + v_z k \quad (1.13)$$

则速度分量为

$$v_x = \frac{dx}{dt}, \quad v_y = \frac{dy}{dt}, \quad v_z = \frac{dz}{dt} \quad (1.14)$$

速度的大小及其方位角,同样可用速度分量表示为

$$v = \sqrt{v_x^2 + v_y^2 + v_z^2} \quad (1.15)$$

$$\cos\alpha = \frac{v_x}{v}, \quad \cos\beta = \frac{v_y}{v}, \quad \cos\gamma = \frac{v_z}{v} \quad (1.16)$$

由于一般情况下 $|dr| \neq |dr|$, 不能将速度的大小或速率 $v = \frac{|dr|}{dt}$ 写成 $\frac{|dr|}{dt}$ 。

四、加速度

质点运动时,速度 v 的大小和方向都可以改变。如用 $\Delta v = v_B - v_A$ 表示质点在 Δt 时间内从轨道上 A 点运动到 B 点的速度增量(图 1.4), 则反映 Δt 时间内速度平均变化率的

$$\bar{a} = \frac{\Delta v}{\Delta t}$$

称为质点在该 Δt 时间内的平均加速度, $\Delta t \rightarrow 0$ 时, 平均加速度的极限