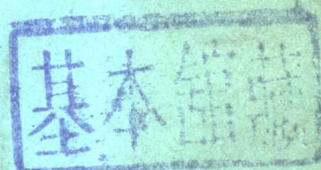


928916

大学物理

下 册

吴百诗 主编



西安交通大学出版社

029816

04
6013
2

04
6013
2

大 学 物 理

下 册

吴 百 诗 主 编

石 学 儒 刘 国 华
李 锦 泉 薛 一 东

西安交通大学出版社

内 容 简 介

本书是以1987年国家教委颁布的《高等工业大学物理课程教学基本要求》为根据,在总结编者长期教学经验的基础上编写的。全书分上、下两册,上册包括力学、电磁学;下册包括热力学、气体分子运动论、机械波、波动光学基础、狭义相对论力学基础、量子物理基础、激光和固体能带结构、专题选讲等。此外,上、下册中都还有选择地编写了部分阅读材料,供读者选用。

本书可作高等工业院校各专业的大学物理课程教材,也可作综合大学和高等师范院校非物理类专业及成人高等教育物理课程的教材或教学参考书。

大 学 物 理

下 册

吴百诗 主编

石学儒 刘国华 李锦泉 薛一东

责任编辑 李亚东

西安交通大学出版社出版

(邮政编码: 710049)

西安交通大学出版社印刷厂印装

陕西省新华书店经售

开本787×1092 1/16 印张17.5 字数: 424 千字

1990年12月第1版 1990年12月第1次印刷

印数: 1—10050

ISBN7-5605-0374-8/O·66 定价: 3.00元

前 言

本书是根据国家教委 1987 年颁布的高等工业学校大学物理课程教学基本要求(简称基本要求)编写的。大学物理是一门重要的基础理论课,根据课程的性质,书中着重阐述基本概念、基本知识及运用它们分析一般问题的思路和方法。

本书编写过程中特别注意内容的精选,并使之大体上和基本要求所提 130~140 参考学时范围相符,以利教学。为此,我们采取的措施有:

(1) 内容的选用较严格地按基本要求取舍。对基本要求中规定的掌握、理解和了解三级要求作了认真的研究和处理;对要求掌握的内容,力求作到问题的来龙去脉交代清楚,论证严密清晰,使读者学后能较熟练地应用,例如对力学中功和能的处理;对要求理解的内容,则尽量作到结论交代准确清楚,讲清分析问题的思路和方法,例如对高斯定理的处理;对要求了解的内容,则只作一般性介绍,着重物理概念,少作数学推导,着重定性分析,少作定量计算,讲些简单的应用也是着眼于帮助读者了解,例如对电介质和磁介质的处理。

(2) 考虑到工科的特点并吸收了一些教师的意见,在按基本要求选取内容的基础上也增加了少数内容,如质心、转动惯量的平行轴定理、垂直振动的合成等,对这些内容只作简要介绍。

(3) 尽量避免和中学物理内容简单重复,中学物理学习中应该掌握的内容,本书中一般不再重复论述;与此同时,书中注意充分利用中学物理基础知识,并按需要给予总结、提高,例如对力学中的碰撞、电磁学中导体的静电平衡问题就是这样处理的。

(4) 作为自选内容,书中编写了热辐射、原子核物理基础,及椭圆和圆偏振光、偏振光的干涉。据了解,前两部分内容的取舍是在制订基本要求过程中各方面看法分歧最多的。考虑到这一原因,我们把这两部分编入自选内容,以资扩大书的适应性。

(5) 为了使学有余力的学生可以学到更多一些知识,本书中还编写了一些阅读材料,阅读材料的选择也着眼于基本理论、基本知识,特别是那些在工程技术中用途颇广的有关内容和科学技术的新成就。编者认为书中的阅读材料也可以作为自选内容的教材。

全书采用 SI 单位制,本书中用到的物理量的表示符号、单位和量纲列表于书前,正文中一般不再对各量的量纲、单位一一交代。

本书分上下两册,上册包括力学和电磁学部分,下册包括热力学、气体分子运动论、波动和波动光学、近代物理等部分。将电磁学放在热力学和气体分子运动论前面只是为了与后继课程的配合和安排上的方便,对于先讲热学部分的,这种安排也不会有任何影响。

与现有多数教材相比,本书体系安排上作了两点较大的变动,一是先热力学后气体分子运动论;二是将电介质和磁介质组成一章。对前者,编者认为对工科学生应首先要求他们掌握热学的宏观规律,在此基础上学习气体分子运动论,从而在微观意义上对宏观热现象的本质以及如何采用统计平均的方法建立宏观量与微观量的联系等有一初步了解。对后者,编者认为,在电磁学中对工科学生应首先要求他们掌握真空中静电场和稳恒电流磁场的基本

cABS=107

规律，在此基础上考虑介质的影响，而且首先要求学生了解如何在宏观上计及介质的影响，而对产生此种影响的微观机理，只能要求作初步了解。此外，从微观机理到研究方法，电介质和磁介质都有着相似的地方，两者对照起来学也有其有利之处。不过不论是热力学气体分子运动论，还是电介质、磁介质，现在的写法都不会给教学中先后次序的安排带来约束，也就是说，先讲授气体分子运动论后讲热力学，或者把电介质安排在静电学之后，都是可以的。

我们对体系所作的上述变动，也考虑了基本要求中对上述内容的层次安排。

本书编写者的具体分工为：第一、二、三、四章（焦兆焕），第五章（张国柱），第六章（吴百诗），第七章（李甲科），第八、九章（张云祥），第十章（周瑞云），第十一、十二章（石学儒），第十三、十七章（刘国华），第十四章（李锦泉、吴百诗、姚国维），第十五、十六章（薛一东），第十八章（石学儒、薛一东、柴晋临），此外编写阅读材料的有李甲科、石学儒、吴百诗、周瑞云、阎智春等。

本书由吴百诗教授主编，李甲科副教授协助主编作了大量的组织出版工作。

在本书编写试用过程中得到王小力、王军、杨英民、孟红星、党福喜等同志的大力协助和支持，在此表示感谢。

由于我们学识和教学经验的限制以及对基本要求理解不深，不当之处和错误在所难免，还望使用本书的师生指正。

编 者

1989.11

物理量的名称、符号及单位

一、国际单位制和量纲

本书根据国务院规定，物理量的单位全部采用国际单位制，即SI。SI中以长度、质量、时间、电流、热力学温度、物质的量和发光强度作为基本量，并取这7个量的单位作为基本单位，称为SI基本单位。

物理量是通过描述自然规律或定义新量的方程而彼此相互联系的。为制定单位制和引入量纲的概念，通常把几个量作为相互独立的，也就是上面所说的，把它们当作基本量，而把它们的单位作为基本单位。其它量则根据定义或借助方程表示，这些量称为导出量，它们的单位称为导出单位。

任一量 Q 可以用其它量以方程式的形式表示，这一表达式可以是若干项之和，每一项又可表示为选定的一组基本量 A, B, C, \dots 的乘方之积，有时还乘以数字系数 ξ ，即

$$\xi A^\alpha B^\beta C^\gamma \dots$$

每一项基本量的指数($\alpha, \beta, \gamma, \dots$)分别相同。因此，导出量的单位也可以由基本单位(包括它的指数)的组合来表示，表示它的关系式就称为物理量的量纲。量 Q 的量纲则表示为基本量的量纲积

$$\dim Q = (A)^\alpha (B)^\beta (C)^\gamma \dots$$

式中 $(A), (B), (C), \dots$ ，表示基本量 A, B, C, \dots 的量纲，而 $\alpha, \beta, \gamma, \dots$ 则称为量纲指数。

所有量纲指数都等于零的量，称为无量纲量，其量纲积或量纲为 $(A)^0 (B)^0 (C)^0 \dots = 1$ 。

在7个基本量的量制中，其基本量长度、质量、时间、电流、热力学温度、物质的量和发光强度的量纲分别用 L, M, T, I, Θ, N 和 J 表示，而导出量 Q 的量纲一般形式为：

$$\dim Q = L^\alpha M^\beta T^\gamma I^\delta \Theta^\epsilon N^\zeta J^\eta$$

例如：

量	量纲
速度	LT^{-1}
角速度	T^{-1}
力	LMT^{-2}
能	L^2MT^{-2}
电位	$L^2MT^{-2}I^{-1}$
熵	$L^2MT^{-2}\Theta^{-1}$

利用量纲可以定出同一物理量的不同单位之间的换算关系。由于只有量纲相同才能够相加、相减或相等，指数函数是无量纲量，因而可以按照这些原则用量纲来检验等式的正确性。

二、物理量的名称、符号和单位(SI)一览表

物理量名称	物理量符号	单位名称	单位符号
长度	l, L	米	m
面积	S, A	平方米	m^2
体积、容积	V	立方米	m^3
时间	t	秒	s
[平面]角	$\alpha, \beta, \gamma, \theta, \varphi$ 等	弧度	rad
立体角	Ω	球面度	sr
角速度	ω	弧度每秒	$\text{rad}\cdot\text{s}^{-1}$
角加速度	β	弧度每二次方秒	$\text{rad}\cdot\text{s}^{-2}$
速度	v, u, c	米每秒	$\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$
加速度	a	米每二次方秒	$\text{m}\cdot\text{s}^{-2}$
周期	T	秒	s
转速	n	每秒	s^{-1}
频率	ν, f	赫[兹]	Hz ($1\text{Hz}=1\text{s}^{-1}$)
角频率, 圆频率	ω	弧度每秒	$\text{rad}\cdot\text{s}^{-1}$
波长	λ	米	m
		埃	\AA ($1\text{\AA}=10^{-10}\text{m}$)
波数	$\sigma, \tilde{\nu}$	每米	m^{-1}
振幅	A	米	m
质量	m	千克(公斤)	kg
密度	ρ	千克每立方米	$\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$
面密度	ρ_s, ρ_A	千克每平方米	$\text{kg}\cdot\text{m}^{-2}$
线密度	ρ_l	千克每米	$\text{kg}\cdot\text{m}^{-1}$
动量	P, p	} 千克米每秒	$\text{kg}\cdot\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$
冲量	I		
动量矩(角动量)	L	千克二次方米每秒	$\text{kg}\cdot\text{m}^2\cdot\text{s}^{-1}$
转动惯量	I, J	千克二次方米	$\text{kg}\cdot\text{m}^2$
力	F, f	牛顿	N
力矩	M	牛[顿]米	$\text{N}\cdot\text{m}$
压力, 压强	p	帕[斯卡]	Pa
相位	φ	弧度	rad
功	W, A	} 焦耳	J
能[量]	E, W		
动能	E_k, T		
势能	E_p, V		
功率	P	瓦[特]	W

续表

物理量名称	物理量符号	单位名称	单位符号
热力学温度	T, θ	开[尔文]	K
摄氏温度	t, θ	摄氏度	°C
热量	Q	焦[耳]	J
热导率(导热系数)	κ, λ	瓦[特]每米开[尔文]	$W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1}$
热容	C	焦[耳]每开[尔文]	$J \cdot K^{-1}$
比热容	c	焦[耳]每千克开[尔文]	$J \cdot kg^{-1} \cdot K^{-1}$
摩尔质量	M	千克每摩尔	$kg \cdot mol^{-1}$
定压摩尔热容	c_p	} 焦[耳]每摩尔开 [尔文]	$J \cdot mol \cdot K^{-1}$
定容摩尔热容	c_v		
内能	U, E	焦[耳]	J
熵	S	焦[耳]每开[尔文]	$J \cdot K^{-1}$
平均自由程	$\bar{\lambda}$	米	m
扩散系数	D	二次方米每秒	$m^2 \cdot s^{-1}$
电荷[量]	Q, q	库[仑]	C
电流	I, i	安[培]	A
电荷密度	ρ	库[仑]每立方米	$C \cdot m^{-3}$
电荷面密度	σ	库[仑]每平方米	$C \cdot m^{-2}$
电荷线密度	λ	库[仑]每米	$C \cdot m^{-1}$
电场强度	E	伏[特]每米	$V \cdot m^{-1}$
电位, (电势)	U, V	} 伏[特]	V
电位差, 电压	$U_{12}, U_1 - U_2$		
电动势	\mathcal{E}		
电位移	D	库[仑]每平方米	$C \cdot m^{-2}$
电通[量], 电位移通量	Ψ, Φ_e	库[仑]	C
电容	C	法[拉]	$F (1F = 1C \cdot V^{-1})$
介电常数(电容率)	ϵ	法[拉]每米	$F \cdot m^{-1}$
相对介电常数	ϵ_r	无量纲	
电偶极矩	p, p_e	库[仑]米	$C \cdot m$
电流密度	j, δ	安[培]每平方米	$A \cdot m^{-2}$
磁场强度	H	安[培]每米	$A \cdot m^{-1}$
磁感应强度	B	特[斯拉]	$T (1T = 1Wb \cdot m^{-2})$
磁通量	Φ	韦[伯]	$Wb (1Wb = 1V \cdot s)$
自感	L	} 亨[利]	$H (1H = 1Wb \cdot A^{-1})$
互感	M, L_{12}		
磁导率	μ	亨[利]每米	$H \cdot m^{-1}$

续表

物理量名称	物理量符号	单位名称	单位符号
[面]磁矩	m, p_m	安[培]平方米	$A \cdot m^2$
电磁能密度	w	焦[耳]每立方米	$J \cdot m^{-3}$
坡印廷矢量	S	瓦[特]每平方米	$W \cdot m^{-2}$
[直流]电阻	R	欧[姆]	$\Omega (1\Omega = 1V \cdot A^{-1})$
电阻率	ρ	欧[姆]米	$\Omega \cdot m$
光强	I	瓦[特]每平方米	$W \cdot m^{-2}$
相对磁导率	μ_r	无量纲	
折射率	n	无量纲	
发光强度	I	坎[德拉]	cd
辐[射]出[射]度	M	} 瓦[特]每平方米	$W \cdot m^{-2}$
辐[射]照度	I		
[源]功率	P	瓦[特]	W
声强级	L_I	分贝	dB
核的结合能	E_B	焦[耳]	J
半衰期	τ	秒	s

三、基本物理常数表(1986年国际推荐值)

物理量	符号	数值	单位	不确定度
光速	c	299 792 458	$m \cdot s^{-1}$	
真空磁导率	μ_0	$4\pi \times 10^{-7}$	$N \cdot A^{-2}$	
真空介电常数	ϵ_0	8.854 187 817...	$10^{-12} F \cdot m^{-1}$	
牛顿引力常数	G	6.672 59(85)	$10^{-11} m^3 \cdot kg^{-1} \cdot s^{-2}$	128
普朗克常数	h	6.626 075 5(40)	$10^{-34} J \cdot s$	0.60
基本电荷	e	1.602 177 33(49)	$10^{-19} C$	0.30
里德伯常数	R_∞	10 973 731.534(13)	m^{-1}	0.0012
电子质量	m_e	0.910 938 97(54)	$10^{-30} kg$	0.59
康普顿波长	λ_c	2.426 310 58(22)	$10^{-12} m$	0.089
电子经典半径	r_e	2.817 940 92(38)	$10^{-15} m$	0.13
质子质量	m_p	1.672 623 1(10)	$10^{-27} kg$	0.59
阿伏伽德罗常数	N_A, L	6.022 136 7(36)	$10^{23} mol^{-1}$	0.59
原子(统一)质量单位, 原子质量常数 $1u$ $= m_u = \frac{1}{12} m(^{12}C)$	m_u	1.660 540 2(10)	$10^{-27} kg$	0.59
摩尔气体常数	R	8.314 510(70)	$J \cdot mol^{-1} \cdot K^{-1}$	8.4
玻耳兹曼常数	k	1.380 658(12)	$10^{-23} J \cdot K^{-1}$	8.4
摩尔体积(理想气体) $T = 273.15K, p = 101325Pa$	V_m	22.414 10(19)	$L \cdot mol^{-1}$	8.4
斯特藩-玻耳兹曼常数	σ	5.670 51(19)	$10^{-8} W \cdot m^{-2} \cdot K^{-4}$	34

目 录

前言

物理量的名称、符号及单位

第十一章 热力学

§ 11.1 热学的研究对象和研究方法	(1)
§ 11.2 平衡态与准静态过程 理想气体状态方程	(2)
§ 11.3 功 热量 内能 热力学第一定律	(6)
§ 11.4 准静态过程中功和热量的计算	(8)
§ 11.5 理想气体的内能和 c_V 、 c_p	(11)
§ 11.6 热力学第一定律对理想气体在典型准静态过程中的应用	(13)
§ 11.7 绝热过程	(17)
§ 11.8 循环过程	(21)
§ 11.9 热力学第二定律	(26)
§ 11.10 可逆与不可逆过程	(27)
§ 11.11 卡诺循环 卡诺定理	(29)
习题	(33)

第十二章 气体分子运动论

§ 12.1 分子运动论的基本概念	(39)
§ 12.2 统计规律的特征	(41)
§ 12.3 理想气体的压强公式	(42)
§ 12.4 麦克斯韦速率分布定律	(45)
§ 12.5 温度的微观本质	(49)
§ 12.6 能量按自由度均分定理	(51)
§ 12.7 玻耳兹曼分布律	(54)
§ 12.8 气体分子的平均自由程	(56)
* § 12.9 气体内的迁移现象	(59)
§ 12.10 热力学第二定律的统计意义和熵的概念	(60)
习题	(66)

第十三章 机械波

§ 13.1 机械波的产生和传播	(69)
§ 13.2 平面简谐波	(70)
§ 13.3 波的能量	(78)
§ 13.4 惠更斯原理	(82)
§ 13.5 波的干涉	(84)
§ 13.6 驻波	(86)

§ 13.7	多普勒效应	(91)
	习题	(93)
第十四章 波动光学基础		
§ 14.1	光是电磁波	(98)
§ 14.2	光源 光波的叠加	(101)
§ 14.3	获得相干光的方法 杨氏实验	(105)
§ 14.4	光程与光程差	(109)
§ 14.5	薄膜等厚干涉	(111)
§ 14.6	迈克耳孙干涉仪	(116)
§ 14.7	惠更斯——菲涅耳原理	(120)
§ 14.8	单缝的夫琅和费衍射	(122)
§ 14.9	衍射光栅及光栅光谱	(128)
§ 14.10	线偏振光 自然光	(134)
§ 14.11	偏振片的起偏和检偏 马吕斯定律	(135)
§ 14.12	反射和折射产生的偏振 布儒斯特定律	(137)
§ 14.13	双折射现象	(139)
	习题	(143)
第十五章 狭义相对论力学基础		
§ 15.1	力学相对性原理 伽利略坐标变换式	(148)
§ 15.2	狭义相对论的两个基本假设	(151)
§ 15.3	洛伦兹坐标变换式	(152)
§ 15.4	狭义相对论的时空观	(157)
§ 15.5	狭义相对论质点动力学简介	(161)
	习题	(165)
第十六章 量子物理基础		
§ 16.1	量子物理学的诞生——普朗克量子假设	(168)
§ 16.2	光电效应 爱因斯坦光子理论	(170)
§ 16.3	康普顿效应及光子理论的解释	(173)
§ 16.4	氢原子光谱 玻尔的氢原子理论	(177)
§ 16.5	微观粒子的波粒二象性 测不准关系	(184)
§ 16.6	波函数 一维定态薛定谔方程	(188)
§ 16.7	电子自旋 四个量子数	(194)
§ 16.8	原子的电子壳层结构	(196)
	习题	(200)
第十七章 激光与固体能带结构		
§ 17.1	自发辐射 受激辐射和受激吸收	(203)
§ 17.2	粒子数反转和光放大	(205)
§ 17.3	激光器的基本构成 激光的形成	(206)
§ 17.4	激光的纵模与横模	(208)

§ 17.5	激光的特性及应用	(210)
§ 17.6	固体的能带	(211)
§ 17.7	绝缘体 导体 半导体	(214)
§ 17.8	杂质半导体	(216)
	习题	(217)
第十八章 选讲专题		
§ 18.1	热辐射 普朗克量子假设	(219)
	习题	(224)
§ 18.2	椭圆和圆偏振光 偏振光的干涉	(225)
	习题	(233)
§ 18.3	原子核基本知识简介	(233)
	习题	(241)
阅读材料		
V	实际气体的性质	(242)
VI	多光束干涉及法布里——珀罗干涉仪	(247)
VII	粒子物理简介	(254)

第十一章 热力学

有关热现象的理论有两种。一是宏观理论，称为热力学；一是微观理论，称为统计物理学。本章介绍热力学，它的理论基础主要是热力学第一和第二定律，前者实际上是包括热现象在内的能量守恒与转换定律，后者则指明了过程进行的方向和条件。

§ 11.1 热学的研究对象和研究方法

自然界中物质的运动形式是多种多样的。力学中，曾研究了最简单的物质运动形式——机械运动。本章和下一章，将研究物质运动的另一种形式——分子热运动。

在力学现象中，物体的状态变化与物体受到力的作用是相关的。经验告诉我们，在有一类现象中，物体的状态或物理性质的变化，总是与物体冷热程度的变化密切相关。例如，物体的热胀冷缩，固、液、汽各状态的相互转变，软钢经加热后迅速冷却会提高其表面硬度等等。通常用温度表示物体的冷热程度，而把与温度有关的物理性质及状态的变化称为热现象。研究热现象的理论统称热学，它是物理学的一个重要组成部分。

人们对热现象的认识，历史上经过了漫长的岁月。尽管人类在日常生活中天天都碰到热现象，但18世纪以前，由于生产力水平很低，所以人们很少对它进行较深入的研究。18世纪以后，生产力有了很大的发展，生产上对动力的需求，促使人们产生了利用热来获得机械功的企图，从而开始了对热现象进行较为广泛的研究。18世纪中期，随着蒸汽机的出现和它在生产中的广泛利用，如何提高蒸汽机的效率便成为一个迫切的问题。这种情况不仅使得对有关热机技术问题的研究增强了，同时对热现象的本质也进行了更深入的探讨。关于热现象的本质问题，历史上曾有不少人认为物体中都含有一种能从高温物体自动地流向低温物体的“热质”，而把温度看成是物体中含有热质多少的量度；与此对立的学说则认为热现象是物质运动的一种表现。在很长的一段时期内，热质说占有统治地位。直到1798年，伦福德发现制造枪炮时切削下的碎屑有很高的温度；1799年，戴维将两块冰互相摩擦而使之完全熔化，这些事实都是热质说无法解释的，从而使它受到重大的打击。1842年，德国医生迈耶提出了能量守恒学说，他认为热是一种能量，能够与机械能相互转化。此后，焦耳做了很多实验，证实了传热和做功对改变物体的热运动能量具有等效性。焦耳的著名实验，最后确立了能量守恒与转换定律，彻底否定了热质说，并为以后建立热力学理论和促进分子运动论的飞跃发展奠定了基础。

在物质的分子结构学说建立以后，人们才逐渐认识到热现象是物体中分子热运动的表现。19世纪中期以后，为了改进热机的设计，人们对当时热机的工作物质——气体的性质进行了广泛的研究，分子运动论便是围绕气体性质的研究发展起来的。大家知道，任何物体都是由大量的微观粒子（分子、原子等）组成的。通常把描写这些微观粒子特征的物理量（如质量、速度、能量等）称为微观量，而把描写宏观物体特征的物理量（如压强、温度、体

积、内能等)称为宏观量。显然,宏观量都是可以由实验观测的物理量。从微观上看,物体内部的微观粒子都在永不停息地做无规则运动,这种运动常称为分子热运动。就其中的单个粒子来说,由于受到其它粒子的复杂作用,其运动状态瞬息万变,显得杂乱无章而具有很大的偶然性。但在总体上,大量粒子的热运动却遵循着确定的规律,这种大量偶然事件的总体所具有的规律性称为统计规律性。所以说,热现象是大量微观粒子热运动的集体表现,服从统计规律;描写物体的宏观量与描写其中粒子的微观量之间,也存在着必然的联系。正是基于这些特点,热运动才成为区别于其它运动形式的一种基本运动形式。

热学中包含两种不同的理论。由观察和实验总结归纳出的有关热现象规律,构成热学的宏观理论,称为热力学。从分子、原子等微观粒子的运动和它们之间的相互作用出发,研究热现象的规律,则构成热学的微观理论,称为统计物理学。虽然两者的研究对象都是热现象,但是它们所采用的研究方法却是截然不同的。热力学是根据由自然界大量现象的观察和实验中总结出来的几个基本定律,用逻辑推理的方法去研究宏观物体热性质的,并不追究其微观本质。统计物理学则是从物质的微观结构出发,依据粒子运动所遵守的力学规律,对大量粒子的总体,应用统计方法去研究热现象的规律和本质。因为热力学中的基本定律是从大量的实际观测中总结出来的,所以具有高度的可靠性和普遍性。但是由于热力学不考虑物质的微观结构,因而就不能对宏观热现象的规律给出其微观本质的解释,这一点正是热力学理论的局限性和缺点所在。统计物理学则正好弥补了热力学的缺陷,它可以从微观上更好地揭示热现象的本质,给出宏观规律的微观解释,从而更深刻地认识热力学理论的意义。至于统计物理学结论的正确性,则需要热力学来检验和证实。这样,在对热现象的研究上,两种理论起着相辅相成的作用。

气体分子运动论是统计物理学的组成部分,它是从气体微观结构的理想模型出发,运用统计平均方法研究气体在平衡状态下的性质以及由非平衡状态向平衡状态的转变过程等问题。下一章将讨论这一部分内容。但不全面地介绍统计物理学。

热力学和统计物理学理论,在历史上对第一次产业革命起过有力的推动作用,在现代工程技术问题中也获得了越来越广泛的应用。此外,这些理论本身,也是近代物理学中一个非常活跃的研究领域。

§ 11.2 平衡态与准静态过程 理想气体状态方程

一、气体的状态参量

用来描写物体系统运动状态的物理量称为状态参量,比如位置矢量和速度是描写物体系统机械运动状态的力学参量。热力学的研究对象是由大量粒子组成的宏观物体或物体系,常称为热力学系统,简称系统,也叫工质。要描写热力学系统的状态,需要引入一些新物理量。气体是一种最简单的热力学系统,也是我们要研究的主要对象。实验表明,对于一定质量的气体,其状态一般可用气体的压强、体积和温度来描写,所以常把这3个物理量称为气体的状态参量。

应当注意,因为气体没有固定的形态,气体分子由于热运动可以到达整个容器所占有的空间,所以气体的体积 V 就等于容纳气体的容器的容积。切不可把气体的体积与气体中分子本身体积的总和相混淆。

气体的压强 p 工程上也叫压力, 是指气体作用在单位面积容器壁上的垂直作用力, 它是气体中大量分子对器壁碰撞而产生的宏观效果。

温度的概念比较复杂。它在本质上与物体内部大量分子热运动的剧烈程度密切相关, 但在宏观上可以简单地把它看成是物体冷热程度的量度, 并规定较热的物体具有较高的温度。经验告诉我们, 冷热程度不同的物体相互接触时, 最后将趋于冷热程度一致的热平衡状态, 具有共同的温度。因此, 可以利用某些物质具有的与冷热状态有关并且易于测量的某一特性 (例如汞柱的长度) 制成温度计, 将温度计与待测物体接触, 待它们达到热平衡后, 观测其测温特性的指示 (如汞柱高度), 就可以测定物体的温度。温度的数值表示法叫做温标。国际计量大会规定, 最基本的温标是 SI 中的热力学温标, 其符号为 T , 单位是 K (开尔文)。日常使用较多的另一种温标是摄氏温标, 符号为 t , 单位是 $^{\circ}\text{C}$ 。摄氏温标与热力学温标的换算关系规定为

$$t = T - 273.15$$

必须指出, 由上式规定的摄氏温标中, 水的冰点等于 0°C , 而沸点不是正好等于 100°C , 但却非常接近 (为 99.975°C)。

二、平衡态与准静态过程

上面说明了气体的状态可以用压强、温度和体积等参量来描写, 不过这并不是任何情况下都能做得到, 而是有一定条件的。考虑一定质量且具有一定体积的气体, 忽略重力及外界的其它各种影响, 那么不管气体起初处于什么状态, 经过一段时间后, 气体中各部分的温度、压强以及分子数密度等都将趋于均匀一致。这时, 气体的状态参量 p 、 V 、 T 都有确定的数值。如果保持气体不受外界影响, 内部也没有任何形式的能量转化 (如化学变化、原子核变化等), 则气体将始终保持这一状态而不会发生宏观变化, 其状态参量也将不随时间变化, 气体的这种状态称为平衡状态, 简称平衡态。

又如, 两个冷热程度不同的物体相互接触, 经过足够长的时间后, 两者的温度将趋于一致。这时, 如果没有外界影响, 两个物体就会保持这一状态而不再发生宏观变化, 这也是一种平衡态。从大量的自然现象中可以归纳出一个结论: 对于普遍的热力学系统来说, 平衡态是指系统的这样一种状态, 即在没有外界 (指与系统有关的周围环境) 影响的条件下, 系统各部分的宏观性质长时间内不发生变化的状态。这里所说的没有外界影响, 是指系统与外界之间不通过作功或传热的方式交换能量, 否则系统就不能达到并保持平衡态。由于实际上并不存在完全不受外界影响, 并且宏观性质绝对保持不变的系统, 所以平衡态只是一个理想化的概念, 它是在一定条件下对实际情况的抽象和概括。在实际问题中, 只要系统状态的变化很微小而可以忽略时, 就可以近似地看成平衡态。应当指出, 平衡态是指系统的宏观性质不随时间变化的状态, 但从微观上看来, 平衡态下系统内的分子仍在作永不停息的热运动, 只不过这时分子热运动的平均效果不随时间变化而已。也正是这种分子热运动的平均效果不随时间变化, 系统在宏观上才表现为处于平衡态。因此, 热力学中的平衡实质上是一种动平衡, 通常把这种平衡称为热动平衡。

只有在平衡态下, 系统的宏观性质才可以用一组确定的参量来描写。因此, 状态参量实际上就是描写系统平衡态的变量。例如, 一定质量气体的平衡态, 可以用其状态参量 p 、 V 、 T 的一组值来表示。一组参量值表示气体的某一平衡态, 而另一组参量值则表示气体的另一平衡态。如果系统的宏观性质随时间而变化, 它所处的状态就称为非平衡态。在非平衡态

下，系统各部分的性质一般说来可能各不相同，并且在不断地变化，所以就不能用统一的参量来描写系统的状态。在下面的讨论中，除非特别声明，所说的状态一般都是指平衡态。

系统与外界有能量交换时，其状态就会发生变化。当系统从一个状态不断地变化到另一状态时，我们就说系统经历了一个热力学过程。在热力学中具有重要意义的是所谓准静态过程（也叫平衡过程），在这种过程中系统所经历的任一中间状态都无限接近平衡态。显然，这是一种理想过程。因为状态变化必然会破坏系统的平衡，原来的平衡态被破坏以后，需要经过一段时间才能达到新的平衡态。但是实际发生的过程，往往进行较快，以至于在还没有达到新的平衡态以前又继续了下一步的变化，因而过程中系统经历的是一系列非平衡态，这样的过程称为非静态过程。不过只要过程进行得足够缓慢，使得过程中的每一步，系统都非常接近平衡态，这种过程就可近似地看成准静态过程。实际上，准静态过程就是这种足够缓慢过程的理想极限。在实际问题中，除了一些进行极快的过程（如爆炸过程）外，大多数情况下都可以把实际过程看成是准静态过程。

三、理想气体状态方程

实验表明，描写一定质量气体平衡态的3个参量中，当任一参量值发生变化时，其它2个也将随着变化。也就是说，3个参量之间必然存在一定的关系，其中一个参量是其余参量的函数。例如，温度 T 是压强 p 和体积 V 的函数，可以表示为

$$T = f(p, V)$$

这个关系式就是一定质量气体处于平衡态时的状态方程。它的具体形式，一般说来与气体的性质有关，通常需要通过实验来确定。各种实际气体在压强不太大（与大气压相比）和温度不太低（与室温相比）的条件下，遵守波义耳定律、查理定律、盖-吕萨克定律以及阿伏伽德罗定律。根据这些实验定律，不难导出1摩尔气体的状态方程为

$$pV = RT \quad (11.1)$$

式中 $R=8.31\text{J}/(\text{mol}\cdot\text{K})$ ，是摩尔气体常数。

如果气体的质量为 m ，摩尔质量为 M ，则气体的摩尔数就是 $\nu = m/M$ 。这时，气体的状态方程为

$$pV = \frac{m}{M}RT = \nu RT \quad (11.2)$$

上式也称为克拉珀龙方程。

由于状态方程是根据实验定律导出的，而这些实验定律都是在一定的实验条件下得到的，它们反映的都是实际气体的近似性质，所以各种实际气体都近似地遵守式(11.1)或(11.2)。在温度不太低时，压强越低，近似程度越高，在压强趋于零的极限条件下，各种实际气体才严格地遵守式(11.1)或式(11.2)。这个事实表明，一切实际气体在 p 、 V 、 T 之间的变化关系上都具有共性，这表明在它们都近似地遵守关系式(11.1)或(11.2)。至于各种气体的不同个性，则反映在它们遵守状态方程的近似程度上。所有气体表现出的共性不是偶然的，而是反映了气体的一种内在规律性。为了概括和研究气体的这一共同规律性，引入理想气体的概念。通常把在任何条件下都严格遵守克拉珀龙方程的气体称为理想气体，而把式(11.1)和(11.2)称为理想气体状态方程。显然，理想气体实际上是不存在的，它只是实际气

体的近似和理想化模型。实际气体在一般温度和较低压强下，在一般应用问题中都可近似地看成理想气体。

以上讨论的是化学纯的理想气体。对于含有多种化学成分的混合气体，根据道尔顿分压定律可知，混合气体的压强等于各成分气体的分压强之和。所谓分压强，是指每一种气体在与混合气体具有相同的温度和体积的条件下，单独产生的压强。假定混合气体由 n 种成分的气体组成，第 i 种气体的质量为 m_i 、摩尔质量为 M_i 、分压强为 p_i ，则由式(11.2)有

$$p_i V = \frac{m_i}{M_i} RT \quad i=1, 2, \dots, n$$

式中 V 和 T 分别是混合气体的体积和温度。对 n 个方程求和，得

$$\sum_i p_i V = \sum_i \frac{m_i}{M_i} RT$$

混合气体的压强 p 和质量 m 分别为

$$p = \sum_i p_i, \quad m = \sum_i m_i$$

另外，规定混合气体的表观摩尔质量由下式决定

$$M = \frac{m}{\sum_i \frac{m_i}{M_i}} = \frac{m}{\sum_i \nu_i}$$

即混合气体的摩尔质量等于各成分气体质量的总和与摩尔数总和之比。综合以上关系可得

$$pV = \frac{m}{M} RT \quad (11.3)$$

这就是混合理想气体的状态方程。它与式(11.2)形式相同，但必须注意其中各量的含义则有所区别。

从以上讨论可以看出，对一定质量的气体来说，其状态参量 p 、 V 、 T 中只有两个是独立的。因此，任意给定两个参量的一组数值，就确定了气体的一个平衡态。例如，在以 p 为纵轴、 V 为横轴的 p - V 图上，任一点都对应着一个平衡态。一个准静态过程，在图中则可用一条曲线来表示。图 11.1 中的曲线，就表示由初平衡态 $a(p_1, V_1, T_1)$ 变化到终平衡态 $b(p_2, V_2, T_2)$ 的某一准静态过程。

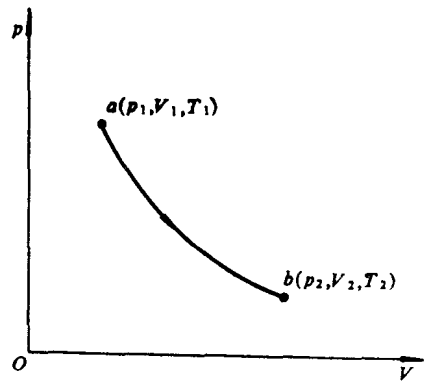


图 11.1

复习思考题

11.1 气体处于平衡态时有什么特征？热力学中所指的平衡与力学中所说的平衡有什么不同？

11.2 一金属杆，一端置于沸水中，另一端置于冰水中。如果沸水和冰水的温度都保持不变，那么经过一段时间后，杆上各处的温度虽然各不相同，但都将不随时间变化。试问金