

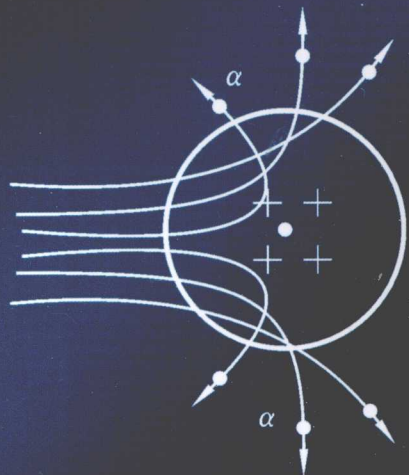


普通高等教育“十一五”规划教材
普通高等院校物理精品教材



大学物理简明教程 (下)

尹国盛 郑海务 主编



华中科技大学出版社
<http://www.hustp.com>

普通高等教育“十一五”规划教材
普通高等院校物理精品教材

大学物理简明教程

(下 册)

主 编 尹国盛 郑海务

副主编 杨 毅 周呈方

参 编 (以姓氏笔画为序)

任凤竹 闫玉丽

张大蔚 张新安

杨 毅 周呈方

夏晓智 彭成晓

华中科技大学出版社

中国·武汉

图书在版编目(CIP)数据

大学物理简明教程(下册)/尹国盛 郑海务 主编. —武汉:华中科技大学出版社,
2009年9月
ISBN 978-7-5609-5681-7

I. 大… II. ①尹… ②郑… III. 物理学-高等学校-教材 IV. O4

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2009)第 159724 号

大学物理简明教程(下册)

尹国盛 郑海务 主 编

策划编辑:周芬娜

责任编辑:田 密

责任校对:周 娟

封面设计:潘 群

责任监印:周治超

出版发行:华中科技大学出版社(中国·武汉)

武昌喻家山 邮编:430074 电话:(027)87557437

录 排:武汉佳年华科技有限公司

印 刷:华中科技大学印刷厂

开本:710mm×1000mm 1/16

印张:18.25

字数:342 000

版次:2009年9月第1版

印次:2009年9月第1次印刷

定价:28.00元

ISBN 978-7-5609-5681-7/O · 504

(本书若有印装质量问题,请向出版社发行部调换)

前 言

本书是在尹国盛、张果义主编的《大学物理精要》的基础上,参照教育部新制定的“非物理类理工学科学大学物理课程教学基本要求”修订而成的。本书既涵盖了“基本要求”的主要内容和部分扩展内容,又保持了原书的“精”、“要”特色。所谓“精”,是指选材力求精简,叙述力求精练,分析力求精辟,提炼了大学物理中的精髓,尽量体现少而精的原则;所谓“要”,是指大学物理中的主要内容和重要计算方法,本书既包括主要概念、定律、定理和公式,又包括要点、难点和易错、易混的问题,还包括近年来编著者的重要教学经验和科研成果,同时还借鉴了国内外的同类教材。

全书分上、下两册,上册包括力学和电磁学,下册包括热学、波动与光学、量子物理基础和相对论简介。基本内容是按 128 学时安排的(不含带“*”的),多于或少于此学时的专业可根据实际情况进行适当增减。

全书共分 12 章,由尹国盛、夏晓智、郑海务担任主编,翟俊梅、杨毅、周呈方担任副主编。各章的编著人员为:第 1 章,张华荣;第 2 章,张华荣、李天锋;第 3 章,郑海务;第 4 章,翟俊梅;第 5 章,彭成晓;第 6 章,李天锋;第 7 章,彭成晓、张大蔚;第 8 章,闫玉丽;第 9 章,张新安;第 10 章,杨毅;第 11 章,任凤竹;第 12 章,周呈方、翟俊梅初审第 1、2、3 章,杨毅初审第 4、5、6、11、12 章,周呈方初审第 7~10 章;夏晓智编写“数学基础”并复审上册,郑海务复审下册;全书由尹国盛教授统稿。

在编著本书的过程中,除参阅书末所附书目外,还参阅了国内外有关书籍和杂志,并采纳了河南大学物理系部分教师的宝贵建议;在出版过程中,得到了华中科技大学出版社的大力支持。在此,一并表示衷心的感谢,并恳请读者、同行在使用本书的过程中,对其中的不足之处予以批评指正。

本书出版之际,适逢“国庆”60 周年,谨以此书向伟大的祖国母亲献礼!

编 者

2009 年 6 月于河南大学

下册的量 and 单位

热学的量和单位

量		单 位	
名称	符号	名称	符号
热力学温度	T	开[尔文]	K
摄氏温度	t	摄氏度	$^{\circ}\text{C}$
压强	p	帕[斯卡]	Pa
分子质量	m	千克	kg
摩尔质量	M	千克每摩[尔]	kg/mol
热量	Q	焦[耳]	J
内能	E	焦[耳]	J
热导率	λ	瓦[特]每米开[尔文]	$\text{W}/(\text{m} \cdot \text{K})$
传热系数	K	瓦[特]每平方米开[尔文]	$\text{W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$
热扩散率	a	平方米每秒	m^2/s
分子自由程	λ	米	m
分子碰撞频率	Z	次每秒	1/s
热容	C_m	焦[耳]每开[尔文]	J/K
比热容	c	焦[耳]每千克开[尔文]	$\text{J}/(\text{kg} \cdot \text{K})$
摩尔定容热容	$C_{V,m}$	焦[耳]每摩[尔]开[尔文]	$\text{J}/(\text{mol} \cdot \text{K})$
摩尔定压热容	$C_{p,m}$	焦[耳]每摩[尔]开[尔文]	$\text{J}/(\text{mol} \cdot \text{K})$
比热容比	γ		
热机效率	η		
制冷系数	ϵ		
熵	S	焦[耳]每开[尔文]	J/K

振动和波的量和单位

量		单 位	
名称	符号	名称	符号
振幅	A	米	m
周期	T	秒	s
频率	ν	赫[兹]	Hz
角频率	ω	弧度每秒	rad/s
相位	φ	弧度	rad
振动位移	x, y	米	m
振动速度	v	米每秒	m/s
波长	λ	米	m
波速	v, u	米每秒	m/s
角波数	k	弧度每米	rad/m
波的强度	I	瓦[特]每平方米	W/m^2
声强级	L_I	贝[尔]	B

光学的量和单位

量		单 位	
名称	符号	名称	符号
折射率	n	米	m
光程	Δ	米	m
光程差	δ	弧度	rad
相位差	$\Delta\varphi$	米	m
光栅常量	d	米	m
透光部分	a	米	m
遮光部分	b	米	m
光栅宽度	L	米	m
分辨本领	P		

量子物理基础的量和单位

量		单 位	
名称	符号	名称	符号
辐出度	M	瓦[特]每平方米	W/m^2
单色辐出度	M_λ	瓦[特]每平方米赫[兹]	$\text{W}/(\text{m}^2 \cdot \text{Hz})$
辐射能	W	焦[耳]	J
辐射能密度	w	焦[耳]每立方米	J/m^3
频率	ν	赫[兹]	Hz
逸出功	A	焦[耳]	J
半径	r	米	m
速度	v	米每秒	m/s
能量	E	焦[耳]	J
动能	E_k	焦[耳]	J
势能	E_p	焦[耳]	J
波函数	ψ		

相对论的量和单位

量		单 位	
名称	符号	名称	符号
长度	L	米	m
速度	v, u	米每秒	m/s
能量	E	焦[耳]	J
质量	m	千克	kg
静止质量	m_0	千克	kg
动量	p	千克米每秒	$\text{kg} \cdot \text{m}/\text{s}$
力	F	牛[顿]	N

目 录

第 7 章 气体动理论	(1)
7.1 平衡态 温度和理想气体的状态方程	(1)
7.1.1 热力学系统 平衡态 状态参量	(1)
7.1.2 温度 热力学第零定律 温标	(3)
7.1.3 理想气体状态方程	(4)
7.2 理想气体压强 温度的微观意义	(5)
7.2.1 理想气体的微观模型	(5)
7.2.2 理想气体的压强	(6)
7.2.3 温度的微观意义	(8)
7.3 能量均分定理 理想气体的内能	(9)
7.3.1 自由度	(9)
7.3.2 能量均分定理	(11)
7.3.3 理想气体的内能	(12)
7.4 麦克斯韦速率分布律	(13)
7.4.1 速率分布函数	(13)
7.4.2 麦克斯韦速率分布律	(14)
7.4.3 三种统计速率	(15)
7.5 气体的输运现象 分子的碰撞	(19)
7.5.1 分子的平均碰撞频率	(20)
7.5.2 平均自由程	(20)
7.5.3 黏滞现象	(21)
7.5.4 热传导现象	(22)
7.5.5 扩散现象	(23)
提要	(25)
思考题	(26)
习题	(27)
第 8 章 热力学基础	(29)
8.1 热力学第一定律	(29)
8.1.1 准静态过程	(29)
8.1.2 功 热量 内能	(31)

8.1.3	热力学第一定律	(35)
8.1.4	摩尔热容	(35)
8.2	理想气体的几个特殊过程	(36)
8.2.1	等容过程——气体的摩尔定容热容	(37)
8.2.2	等压过程——气体的摩尔定压热容	(38)
8.2.3	等温过程	(39)
8.2.4	绝热过程	(42)
* 8.2.5	多方过程	(45)
8.3	循环过程 卡诺循环	(48)
8.3.1	循环过程	(48)
8.3.2	热机 制冷机与热泵	(49)
8.3.3	卡诺循环	(53)
8.4	热力学第二定律	(57)
8.4.1	自然过程的方向	(57)
8.4.2	可逆过程和不可逆过程	(58)
8.4.3	热力学第二定律的两种主要表述	(59)
* 8.4.4	开尔文表述与克劳修斯表述的等效性	(60)
* 8.5	卡诺定理	(60)
8.5.1	卡诺定理	(61)
8.5.2	卡诺定理的证明	(61)
* 8.6	熵与熵增加原理	(62)
8.6.1	克劳修斯等式	(62)
8.6.2	熵	(63)
8.6.3	克劳修斯不等式	(64)
8.6.4	熵增加原理	(65)
* 8.7	热力学第二定律的本质和熵的统计意义	(66)
8.7.1	几个重要概念	(66)
8.7.2	热力学第二定律的本质	(68)
8.7.3	熵的统计意义	(68)
8.7.4	熵变的计算	(68)
	提要	(70)
	思考题	(71)
	习题	(74)
第9章	振动和波	(79)
9.1	简谐振动	(79)
9.1.1	简谐振动的特征	(79)

9.1.2	简谐振动的特征物理量	(82)
9.1.3	简谐振动的旋转矢量表示法	(83)
9.1.4	几种常见的简谐振动	(87)
9.1.5	简谐振动的能量	(89)
9.2	阻尼振动 受迫振动 共振	(91)
9.2.1	阻尼振动	(91)
9.2.2	受迫振动	(93)
9.2.3	共振	(94)
* 9.3	电磁振荡	(94)
9.3.1	振荡电路 无阻尼自由电磁振荡	(94)
9.3.2	阻尼振荡	(96)
9.4	振动的合成	(96)
9.4.1	两个同方向同频率简谐振动的合成	(96)
9.4.2	两个同方向不同频率简谐振动的合成	(98)
9.4.3	两个同频率相互垂直简谐振动的合成	(100)
9.5	简谐波	(101)
9.5.1	机械波的产生	(102)
9.5.2	简谐波的波函数	(105)
9.5.3	简谐波的能量	(109)
9.6	波的叠加 驻波	(112)
9.6.1	惠更斯原理	(112)
9.6.2	波的干涉	(114)
9.6.3	驻波	(117)
* 9.7	声波	(121)
9.7.1	声波	(121)
9.7.2	超声波	(122)
9.7.3	次声波	(123)
* 9.8	电磁波	(123)
9.8.1	电磁波的产生与传播	(123)
9.8.2	电磁波的特性	(124)
9.8.3	电磁波的能量	(125)
9.8.4	电磁波的动量	(126)
9.8.5	电磁波谱	(127)
	提要	(128)
	思考题	(129)
	习题	(131)

第 10 章 波动光学	(135)
10.1 光的干涉	(136)
10.1.1 光源	(136)
10.1.2 相干光	(136)
10.1.3 获得相干光的方法	(136)
10.1.4 光程 光程差	(137)
10.2 杨氏双缝干涉	(139)
10.2.1 杨氏双缝干涉实验	(140)
* 10.2.2 光波的空间相干性	(142)
* 10.2.3 劳埃德镜	(143)
10.3 薄膜干涉	(144)
10.3.1 薄膜干涉	(144)
10.3.2 劈尖 牛顿环	(148)
10.3.3 迈克耳孙干涉仪	(155)
10.4 光的衍射	(158)
10.4.1 光的衍射现象	(158)
10.4.2 惠更斯-菲涅耳原理	(159)
10.4.3 衍射的分类	(161)
10.5 夫琅和费衍射	(161)
10.5.1 单缝衍射	(161)
10.5.2 圆孔衍射 光学仪器的分辨本领	(165)
10.6 光栅衍射	(168)
10.6.1 衍射光栅	(169)
10.6.2 光栅方程	(170)
10.6.3 谱线的缺级	(172)
10.6.4 衍射光谱	(174)
10.7 光的偏振	(175)
10.7.1 自然光与偏振光	(175)
10.7.2 偏振光的应用	(177)
10.8 马吕斯定律	(177)
10.8.1 起偏和检偏	(177)
10.8.2 马吕斯定律	(178)
10.9 反射光和折射光的偏振	(179)
10.9.1 反射起偏	(180)
10.9.2 布儒斯特定律	(180)
10.9.3 透射起偏	(181)

* 10.10	双折射	(182)
10.10.1	o 光和 e 光	(182)
10.10.2	人工双折射	(184)
	提要	(184)
	思考题	(187)
	习题	(189)
第 11 章	量子物理基础	(193)
11.1	热辐射 普朗克能量子假说	(194)
11.1.1	热辐射现象	(194)
11.1.2	研究热辐射的理想模型——黑体	(195)
11.1.3	黑体辐射的实验定律	(195)
11.1.4	经典物理学遇到的困难	(197)
11.1.5	普朗克的能量子假说和黑体辐射公式	(198)
11.2	光电效应 康普顿效应	(199)
11.2.1	光电效应	(199)
11.2.2	康普顿效应	(204)
11.2.3	光电效应与康普顿效应的关系	(209)
11.3	物质的本性	(209)
11.3.1	光的波粒二象性	(209)
11.3.2	德布罗意波	(210)
11.3.3	德布罗意假设的实验证明	(212)
* 11.4	玻尔的氢原子理论	(214)
11.4.1	玻尔氢原子理论思想的来源	(214)
11.4.2	玻尔的氢原子理论	(217)
11.5	薛定谔方程	(220)
11.5.1	不确定关系	(220)
11.5.2	波函数及其统计解释	(223)
11.5.3	薛定谔方程	(225)
11.6	薛定谔方程的应用举例	(228)
11.6.1	一维无限深势阱	(228)
11.6.2	一维方势垒 隧道效应	(230)
* 11.6.3	量子力学中的原子结构问题	(231)
* 11.7	激光原理	(234)
11.7.1	激光产生的物理基础	(235)
11.7.2	激光器	(237)
11.7.3	激光束的特性和应用	(238)

提要	(240)
思考题	(243)
习题	(245)
第 12 章 狭义相对论简介	(248)
12.1 经典力学的时空观	(248)
12.1.1 伽利略变换 牛顿力学相对性原理	(248)
12.1.2 经典力学的时空观	(249)
12.2 迈克耳孙-莫雷实验	(250)
12.2.1 寻找以太的努力	(250)
12.2.2 迈克耳孙-莫雷实验	(250)
12.3 狭义相对论的基本原理	(252)
12.4 狭义相对论的时空观	(253)
12.4.1 必须修改牛顿力学的时空观	(253)
12.4.2 同时的相对性	(254)
12.4.3 长度的相对性	(256)
12.5 洛伦兹变换	(257)
12.5.1 洛伦兹坐标变换	(257)
12.5.2 洛伦兹速度变换	(258)
* 12.6 支持洛伦兹变换的实验	(259)
12.6.1 地球上的 μ 子流	(259)
12.6.2 π 介子的寿命	(259)
12.6.3 斯坦福直线加速器中的电子	(259)
12.6.4 双胞胎效应	(259)
12.7 狭义相对论的动量和能量	(260)
12.7.1 动量与速度的关系	(260)
12.7.2 狭义相对论力学的基本方程	(261)
12.7.3 质量与能量的关系	(261)
12.7.4 动量与能量的关系	(262)
提要	(263)
思考题	(264)
习题	(265)
附录 数学基础	(266)
习题参考答案	(273)
参考文献	(279)

第 7 章 气体动理论

物质的运动形式是多种多样、丰富多彩的。在力学部分已经研究了物质最简单的运动形式——机械运动,并用牛顿力学对机械运动所遵从的规律进行了深入探讨。在本章和第 8 章中将介绍物质的热运动,讨论与热现象有关的性质和规律。从宏观上看热现象是与温度有关的现象,从微观上看热现象与物体中原子的热运动有关。研究热现象规律的方法有微观的统计力学和宏观的热力学两种。统计力学方法是从宏观物体由大量微观粒子(原子、分子等)所构成、粒子又不停地做热运动的观点出发,运用概率论研究大量微观粒子的热运动规律的方法,本章气体动理论将讨论这方面的问题。热力学方法,则是从能量观点出发,以大量实验观测为基础,来研究物质热现象的宏观基本规律及其应用的方法,这将在第 8 章讨论。统计力学和热力学是从不同的角度研究物质热运动规律的,它们相辅相成,互为补充。

气体动理论是统计力学的一个组成部分,它是由麦克斯韦、玻耳兹曼等人在 19 世纪中叶建立起来的。这一理论从气体的微观结构模型出发,根据大量分子运动所表现出来的统计规律,解释气体的宏观热性质,从而揭示气体所表现出来的宏观热现象的本质。

本章首先引入热力学平衡态的概念,通过平衡态引入状态参量和理想气体的状态方程;然后利用理想气体的微观模型,采用统计的方法导出理想气体的压强公式,解释温度的微观本质,讨论能量均分定理和麦克斯韦气体分子速率分布律;最后介绍气体的输运过程和分子的平均自由程。

7.1 平衡态 温度和理想气体的状态方程

7.1.1 热力学系统 平衡态 状态参量

热学研究的是一切与热现象有关的问题,其研究对象可以是固体、液体或气体,这些大量微观粒子(原子、分子)组成的宏观物体,称为热力学系统,简称系统。与系统发生相互作用的外部环境物质称为外界。按照系统与外界的交流特点,可将系统分为孤立系统、封闭系统和开放系统。如果一个热力学系统与外界不发生任何物质和能量的交换,则该系统称为孤立系统;如果一个热力学系统与外界只有能量交换而无物质交换,则该系统称为封闭系统;如果一个热力学系统与外界同时有能量交换和物质交换,则该系统称为开放系统。

按照系统所处状态可将系统分为平衡态系统和非平衡态系统。人们在实践中发

现,一个不受外界影响的系统,最终总会达到宏观性质不随时间变化而变化且处处均匀一致的状态。我们把在不受外界影响的条件下系统处于宏观性质不随时间改变的稳定状态,称为热力学平衡态,简称平衡态。而不满足上述条件的系统状态称为非平衡态。例如,有一密闭容器,中间用一隔板隔开,将其分成 A、B 两室,其中 A 充满某种气体, B 为真空室,如图 7.1(a)所示。最初 A 中气体处在平衡态,其宏观性质不随时间变化而变化,然后将隔板抽去, A 中气体向 B 中扩散。由于气体在扩散过程中,气体体积、压强不断变化,因此过程中的每一中间态都是非平衡态。随着时间的推移,气体充满整个容器,扩散停止,此时系统的宏观性质不再随时间变化而变化,系统达到了新的平衡态,如图 7.1(b)所示。

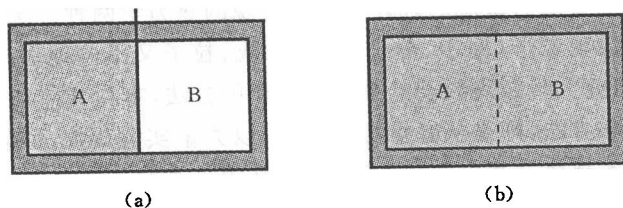


图 7.1

需注意,如果系统与外界有能量交换,即使系统的宏观性质不随时间变化,也不能断定系统是否处于平衡态。例如,将铁棒的一段与高温热源相接触,另一端与低温热源相接触,在经过足够长的时间后,铁棒上每一点的宏观性质不会随时间变化,但由于铁不是孤立系统,受到外界条件的影响,因此这不是平衡态,而是一种稳态。

平衡态是一理想概念,因为任何一个系统不可能不受到外界的影响。一个实际系统处于平衡态时需要满足:

- (1) 系统与外界没有物质交换,且其能量交换可以略去不计;
- (2) 平衡态下系统的宏观性质不随时间变化。

系统平衡态是一种动态平衡,宏观性质不随时间变化,但从微观上看,组成系统的大量粒子的微观运动状态仍处于不停的变化之中,只是大量粒子运动的总效果不变,在宏观上表现为系统的宏观性质不变。

在力学中研究质点的机械运动时,用位矢和速度来描述质点的运动状态,而在讨论由大量做热运动的气体分子构成的宏观热力学系统状态时,由于包含气体分子数目庞大,且不停地做无规则运动,分子的位矢和速度各不相同,用位矢和速度只能描述单个分子的微观状态,不能描述整个热力学系统的宏观状态。对一定量的气体,其宏观状态可用气体的体积 V 、压强 p 和热力学温度 T 来描述。气体的体积、压强和温度这三个物理量称为气体的状态参量。其中,体积 V 是几何量,压强 p 是力学量,而热力学温度 T 属热学量,它们都是宏观量。而组成气体的分子都具有各自的质量、速度、动量、能量等,这些描述个别分子的物理量称为微观量。

气体的体积是气体分子所能达到的空间,与气体分子本身体积的总和是完全不

同的概念。气体体积的国际单位制单位为 m^3 (立方米), 常用单位有 L (升), 换算关系为 $1 \text{ m}^3 = 10^3 \text{ L}$ 。

气体的压强是气体作用在容器器壁单位面积上的指向器壁的垂直作用力, 即作用于器壁上单位面积的正压力, $p = F/S$ 。在国际单位制中, 压强的单位为 Pa (帕[斯卡]), 简称帕, $1 \text{ Pa} = 1 \text{ N/m}^2$, 其他常用压强单位有标准大气压 (atm)、毫米汞柱 (mmHg) 等, 其换算关系为 $1 \text{ atm} = 1.013\,25 \times 10^5 \text{ Pa} = 760 \text{ mmHg}$ 。

7.1.2 温度 热力学第零定律 温标

温度是热力学中一个非常重要和特殊的状态参量, 用来表征物体的冷热程度, 但冷热取决于人们对物体的直接感觉, 这种感觉往往是不准确的。例如, 在寒冷的冬天, 用手触摸温度相等的铁球和木球, 会明显感觉到铁球要比木球冷, 其中原因不在于物体本身的温度, 而在于两种物质导热能力的差异。这种建立在主观感觉上的概念, 注定要被严格而科学的定义取代。

假设有两个热力学系统, 原来各自处于平衡态, 现使两个系统相互接触并能发生传热 (称热接触), 热接触后的两个系统的状态一般都将发生变化, 但经过一段时间后, 两个系统的状态便不再变化, 这表明两个系统最终达到了一个共同的平衡态。由于这种共同的平衡态是两个系统在发生传热的条件下达到的, 所以称两者处于热平衡。当然两个系统即使不进行热接触也能达到热平衡, 热接触仅仅为热平衡提供了一定的条件而已。

现在考虑 A、B、C 三个系统, 将系统 A 和系统 B 分别与系统 C 接触, 经过足够长的时间后, A 和 B 分别与 C 达到了热平衡, 然后再将 A 和 B 接触, 此时观察不到 A 和 B 状态发生任何变化, 这表明 A 和 B 也已处于热平衡。这一实验规律称为热力学第零定律, 表述为, 如果两个热力学系统中的每一个都与第三个热力学系统处于热平衡, 则这两个系统也必然处于热平衡。

热力学第零定律告诉我们, 互为热平衡的物体必具有共同的宏观性质。我们定义这个决定一个系统与其他系统是否处于热平衡的宏观性质为温度, 它的特征就是一切互为热平衡的系统都具有共同的温度。

热力学第零定律的重要性在于不仅给出了温度的定义, 而且指出了温度的测量方法。我们可以选择适当的系统作为温度计, 测量时使温度计与待测系统热接触, 当两者达到热平衡时, 温度计所指示的温度就是待测系统的温度。要定量地描述温度, 还必须给出温度的数值表示法——温标。同一温度在不同的温标中具有不同的数值。在日常生活中常用的一种温标是摄氏温标, 用 t 表示, 其单位为 $^\circ\text{C}$ (摄氏度)。人们将水的冰点定义为摄氏温标的 0°C , 水的沸点定义为摄氏温标的 100°C , 并将冰点温度和沸点温度之差的 1% 规定为 1°C 。在科学技术领域中, 常用的是热力学温标, 又称开尔文温标, 用 T 表示, 它的国际单位制单位为 K (开[尔文]), 简称开。这种温标是不依赖于任何测温物质和测温属性的理想温标, 它避免了测温物质和测温属性

对测量温度的影响。它规定水的三相点温度为 273.16 K。

热力学温标的刻度单位与摄氏温标相同,它们之间的换算关系为

$$T = 273.15 + t \quad (7.1)$$

即热力学温标规定 273.15 K 为摄氏温标的零度。

温度没有上限,却有下限,温度的下限是热力学温标的绝对零度。温度可以无限接近于 0 K,但永远不能达到 0 K。目前实验室能够达到的最低温度为 2.4×10^{-11} K。

7.1.3 理想气体状态方程

当质量一定的气体处于平衡态时,其三个状态参量 p 、 V 、 T 之间并不相互独立,而是存在一定的函数关系,其表达式称为气体的状态方程,一般可表示为

$$f(p, V, T) = 0 \quad (7.2)$$

在热力学部分,气体状态方程的具体形式是由实验来确定的。实验表明,在压强不太高、温度不太低的条件下,各种气体都遵从玻意耳定律、查理定律和盖·吕萨克定律。我们把严格遵从上述三条定律的气体称为理想气体。由气体的三大定律可以得到质量为 m 、摩尔质量为 M 的理想气体的状态方程为

$$pV = \frac{m}{M}RT \quad (7.3)$$

式中, $R = 8.314 \text{ J}/(\text{mol} \cdot \text{K})$ 。

例题 7.1 氧气瓶的容积为 $3.2 \times 10^{-2} \text{ m}^3$,其中氧气的压强为 $1.30 \times 10^7 \text{ Pa}$,氧气厂规定压强降到 $1.00 \times 10^6 \text{ Pa}$ 时,就应重新充气,以免经常洗瓶。某小型吹玻璃车间,平均每天用去 0.4 m^3 压强为 $1.01 \times 10^5 \text{ Pa}$ 的氧气,问一瓶氧气能用多少天(设使用过程中温度不变)?

分析 由于瓶中氧气不可能完全使用,为此可通过两种办法分析求解。

(1) 从氧气质量的角度来分析。利用理想气体状态方程求出每天使用的氧气质量 m_3 和可供使用的氧气的质量(即原瓶中氧气的总质量 m_1 和需充气时瓶中剩余氧气的质量 m_2 之差),从而可求得使用天数 $n = (m_1 - m_2)/m_3$ 。

(2) 从容积角度来分析。利用等温膨胀条件将原瓶中氧气由初态($p_1 = 1.30 \times 10^7 \text{ Pa}$, $V_1 = 3.2 \times 10^{-2} \text{ m}^3$)膨胀到充气条件下的终态($p_2 = 1.00 \times 10^6 \text{ Pa}$, V_2 待求),比较可得 p_2 状态下实际使用掉的氧气的体积为 $V_2 - V_1$ 。同样将每天使用的氧气由初态($p_3 = 1.01 \times 10^5 \text{ Pa}$, $V_3 = 0.4 \text{ m}^3$)等温压缩到压强为 p_2 的终态,并算出此时的体积 V'_2 ,由此可得使用天数 $n = (V_2 - V_1)/V'_2$ 。

解一 根据分析有

$$m_1 = \frac{Mp_1V_1}{RT}, \quad m_2 = \frac{Mp_2V_2}{RT}, \quad m_3 = \frac{Mp_3V_3}{RT}, \quad V_1 = V_2$$

则一瓶氧气可用天数

$$n = (m_1 - m_2)/m_3 = \frac{(p_1 - p_2)V_1}{p_3V_3} = 9.5$$

解二 根据分析,由理想气体状态方程得等温膨胀后瓶内氧气在压强为 $p_2 = 1.00 \times 10^6 \text{ Pa}$ 时的体积为

$$V_2 = \frac{p_1 V_1}{p_2}$$

每天用去相同状态的氧气容积,则一瓶氧气可用天数

$$n = \frac{V_2 - V_1}{V_2'} = \frac{(p_1 - p_2)V_1}{p_2 V_3} = 9.5$$

例题 7.2 一抽气机转速 $\omega = 400 \text{ r/min}$,抽气机每分钟能抽出气体 20 L ,设容器的容积 $V_0 = 2.0 \text{ L}$,问经过多长时间后才能使容器内的压强由 0.101 MPa 降为 133 Pa ,假定抽气过程中温度不变。

分析 抽气机每打开一次活门,容器内气体的容积在等温条件下扩大了 V ,因而压强有所降低,活门关上以后容器内气体的容积仍然为 V_0 ,下一次又如此变化,从而建立递推关系。

解 活门运动第一次,

$$p_0 V_0 = p_1 (V_0 + V), \quad p_1 = \frac{V_0}{V_0 + V} p_0$$

活门运动第二次,

$$p_2 = \frac{V_0}{V_0 + V} p_1 = \left(\frac{V_0}{V_0 + V} \right)^2 p_0$$

活门运动第 n 次,

$$p_{n-1} V_0 = p_n (V_0 + V), \quad p_n = \left(\frac{V_0}{V_0 + V} \right)^n p_0$$

则有

$$n = \frac{\ln \frac{p_n}{p_0}}{\ln \frac{V_0}{V_0 + V}}$$

抽气机每次抽出气体体积为

$$V = \frac{20}{400} \text{ L} = 0.05 \text{ L}$$

已知 $V_0 = 2.0 \text{ L}$, $p_1 = 1.01 \times 10^5 \text{ Pa}$, $p_n = 133 \text{ Pa}$

将上述数据代入,可得

$$n = 269$$

$$t = \frac{269}{400} \times 60 \text{ s} = 40 \text{ s}$$

7.2 理想气体压强 温度的微观意义

7.2.1 理想气体的微观模型

前面给出了从宏观角度描述热力学系统状态的状态参量,下面将从微观角度讨