

大学物理学

(下)

陆培民 陈美锋 曾永志 主编

清华大学出版社

大学物理学

(下)

陆培民 陈美锋 曾永志 主编

清华大学出版社
北京

内 容 简 介

《大学物理学》分为上、下两册,本书为下册,从第8章到第14章。第8章和第9章属于热学内容,讲述气体动理论和热力学基本定律;第10章到第12章属于电磁学内容,讲述静电场、稳恒电流磁场、电磁感应和电磁波的基本概念;第13章和第14章属于量子物理基础内容,讲述量子物理基本概念、原子中电子的状态和分布规律,并简单介绍固体的结构及其组成粒子之间的相互作用与运动规律。上、下册都开设专题阅读,介绍物理前沿和现代物理思想。

本书涵盖《理工科非物理类专业大学物理课程教学基本要求》的所有A类内容,B类内容有的带“*”号出现,有的写成专题形式;适合中等学时的大学物理教学。

版权所有,侵权必究。侵权举报电话:010-62782989 13701121933

图书在版编目(CIP)数据

大学物理学(下)/陆培民等主编. —北京:清华大学出版社,2011.8

ISBN 978-7-302-26277-0

I. ①大… II. ①陆… III. ①物理学—高等学校—教材 VI. ①O4

中国版本图书馆CIP数据核字(2011)第141706号

责任编辑:朱红莲

责任校对:刘玉霞

责任印制:李红英

出版发行:清华大学出版社

地 址:北京清华大学学研大厦A座

<http://www.tup.com.cn>

邮 编:100084

社 总 机:010-62770175

邮 购:010-62786544

投稿与读者服务:010-62776969, c-service@tup.tsinghua.edu.cn

质 量 反 馈:010-62772015, zhiliang@tup.tsinghua.edu.cn

印 装 者:清华大学印刷厂

经 销:全国新华书店

开 本:185×260

印 张:16

字 数:386千字

版 次:2011年8月第1版

印 次:2011年8月第1次印刷

印 数:1~4200

定 价:30.00元

产品编号:040000-01

物理学是研究物质的基本结构、相互作用和物质运动最基本、最普遍的形式及其相互转化规律的科学。物理学的研究对象具有极大的普遍性,它的基本理论渗透在自然科学的一切领域,并广泛地应用于生产技术的各个部门。以物理学的基础知识为内容的“大学物理学”课程,它所包括的经典物理、近代物理以及它们在科学技术上应用的初步知识是理工科学生进一步学习专业知识的基础。为了很好地完成“大学物理学”课程的教学任务,目前有大量的相关教材。不同的教材是根据不同的实际情况编写的,这是因为随着高校招生规模的扩大,高等教育正在从精英教育向大众教育过渡,分层次办学以及人才培养多样化的趋势日渐突出。

本书编写的初衷,是为中等学时的大学物理教学提供一套难度合适、篇幅精练、易教易学的教材。本书是根据教育部最新制定的《理工科非物理类专业大学物理课程教学基本要求》,在福州大学邱雄等人主编的《大学物理》(上、下册,2002版)基础上进行编写的。它涵盖《理工科非物理类专业大学物理课程教学基本要求》的所有A类内容;B类内容有的带“*”号出现、有的写成专题形式。

在本书编写初衷的指导下,本书具备以下特色:①强调物理思想和物理图像,简约推导,能够用物理图像解释清楚的,尽量不用复杂的数学推证;②精心设计问题,引导读者学习,体现引导式、研究性学习理念;③注重物理学知识与科学技术相结合、与自然现象相结合、与生活相结合,以增强物理学理论的真实感和生动感;④注重科学思维和方法的培养,把物理学方法论中所涉及的一些基本原理介绍给读者;⑤在近代物理学内容的叙述上力求通俗、生动,突出物理学图像,以近代物理学发展的历史为主线编写近代物理;⑥开设专题阅读,介绍物理前沿和现代物理思想,以激发读者学习物理的兴趣;⑦版面设计美观,写作语言朴实流畅、通俗易懂。

本书分上、下两册。上册包括质点力学、刚体定轴转动、狭义相对论、振动波动和光学等内容,下册包括热学、电磁学、量子物理基础和固体物理简介等内容。在保证大学物理教学体系的整体性和系统性的基础上,章节的编排适当地考虑了教学上的方便。例如,狭义相对论虽然属于近代物理内容,但本书把它排在质点力学和刚体定轴转动之后,目的是在经典时空观之后紧接着全新的狭义相对论时空观,形成鲜明的对比;又如,由于振动和波动是波动光学的基础,所以把光学安排在上册。

编写教材是提高教学质量的有效途径之一,福州大学的所有大学物理学任课教师都参与了本书的编写工作。龚炎芳、张晓岚和陈永毅编写第1章到第4章和专题A,陈美锋、曾群英、江云坤和杨开宇编写第5章到第7章和专题B,蒋夏萍和黄碧华编写第8章、第9章、专题C和专题D,曾晓萌、苏万钧、钟志荣和翁臻臻编写第10章到第12章、专题E和专题

F,曾永志、黄春晖、王松柏和夏岩编写第13章、第14章和专题G。全书由陆培民、陈美锋和曾永志主编。

本书编写参考了许多资料和兄弟院校的教材,在此一并表示真诚的谢意。

由于水平所限,加上时间紧,书中的错误和不足在所难免,请读者提出宝贵意见,以期再版时作进一步的修改。

物理常量表

名 称	符 号	计 算 用 值
引力常量	G	$6.67 \times 10^{-11} \text{ N} \cdot \text{m}^2 / \text{kg}^2$
真空中的光速	c	$3.00 \times 10^8 \text{ m/s}$
电子静质量	m_e	$9.11 \times 10^{-31} \text{ kg}$
质子静质量	m_p	$1.67 \times 10^{-27} \text{ kg}$
中子静质量	m_n	$1.67 \times 10^{-27} \text{ kg}$
阿伏伽德罗常量	N_A	$6.023 \times 10^{23} \text{ mol}^{-1}$
玻耳兹曼常量	k	$1.38 \times 10^{-23} \text{ J/K}$
元电荷	e	$1.60 \times 10^{-19} \text{ C}$
真空介电常量	ϵ_0	$8.85 \times 10^{-12} \text{ F/m}$
真空磁导率	μ_0	$1.26 \times 10^{-6} \text{ N/A}^2$
普朗克常量	h	$6.63 \times 10^{-34} \text{ J} \cdot \text{s}$
电子康普顿波长	λ_C	$2.43 \times 10^{-12} \text{ m}$
玻尔磁子	μ_B	$9.27 \times 10^{-24} \text{ J/T}$
里德伯常量	R	$1.10 \times 10^7 \text{ m}^{-1}$
玻尔半径	a_0	$5.29 \times 10^{-11} \text{ m}$

第 8 章 气体动理论	1
8.1 热学的基本概念	1
8.1.1 热力学系统 平衡态	1
8.1.2 热力学第零定律	2
8.1.3 理想气体状态方程	4
8.2 理想气体的压强和温度	5
8.2.1 理想气体的压强	5
8.2.2 理想气体的温度	8
8.3 能量均分原理	10
8.3.1 自由度	10
8.3.2 能量按自由度均分原理	11
8.3.3 理想气体的内能	11
8.4 麦克斯韦速率分布律	12
8.4.1 速率分布函数	13
8.4.2 麦克斯韦速率分布函数	14
8.4.3 麦克斯韦速率分布函数的实验验证	15
* 8.5 玻耳兹曼分布律	17
8.6 碰撞及输运过程	19
8.6.1 气体分子的碰撞和平均自由程	19
* 8.6.2 气体分子的输运过程	21
* 8.7 实际气体的状态方程	23
习题	27
第 9 章 热力学基础	30
9.1 热力学第一定律	30
9.1.1 内能、功和热量	30
9.1.2 热力学第一定律	33
9.2 几个典型的热力学过程	34
9.2.1 等体过程	35
9.2.2 等压过程	35
9.2.3 等温过程	36

9.2.4	绝热过程和多方过程	37
9.3	循环过程	40
9.3.1	准静态的循环过程	41
9.3.2	卡诺循环	42
9.3.3	循环过程的应用	43
9.4	热力学第二定律 熵	47
9.4.1	热力学过程的方向性	47
9.4.2	热力学第二定律	48
9.4.3	热力学第二定律的微观意义	49
9.4.4	克劳修斯熵公式	52
9.4.5	熵增加原理	53
专题 C	熵概念的扩展	56
专题 D	耗散结构简介	60
	习题	63

VI

第 10 章 静电场 67

10.1	真空中的静电场	67
10.1.1	库仑定律	67
10.1.2	电场 电场强度	69
10.2	真空中的高斯定理及其应用	73
10.3	环路定理 电势	78
10.3.1	静电场的环路定理	78
10.3.2	电势与电势差	79
10.3.3	电势的计算	80
10.3.4	电场强度与电势的微分关系	81
10.4	静电场中的导体	83
10.4.1	导体的静电平衡	83
10.4.2	静电屏蔽	84
10.5	静电场中的电介质	86
*10.5.1	电介质的极化	87
10.5.2	电介质中的高斯定理	88
10.6	电容与电容器	90
10.6.1	孤立导体的电容	90
10.6.2	电容器的电容	90
10.7	静电场的能量	92
10.7.1	电容器的能量	93
10.7.2	电场的能量	93
	习题	96

第 11 章 稳恒电流磁场	100
11.1 稳恒电流 电动势	100
11.1.1 稳恒电流 电流密度	100
11.1.2 电源 电动势	101
11.2 稳恒电流的磁场	102
11.2.1 磁场 磁感应强度	102
11.2.2 毕奥-萨伐尔定律	103
11.3 磁场的高斯定理	107
11.4 磁场的安培环路定理及应用	109
11.4.1 磁场的安培环路定理	109
11.4.2 安培环路定理的应用	111
11.5 磁场中的磁介质	112
* 11.5.1 磁介质的磁化	112
11.5.2 磁介质中的安培环路定理	114
11.6 磁场对运动电荷及电流的作用	115
11.6.1 磁场对运动电荷的作用——洛伦兹力	115
11.6.2 磁场对电流的作用——安培力	121
11.6.3 磁场对载流线圈的作用	122
* 11.6.4 磁力的功	123
11.6.5 磁力的应用	124
习题	125
第 12 章 电磁感应	130
12.1 电磁感应定律	130
12.1.1 电磁感应现象	130
12.1.2 法拉第电磁感应定律	130
12.2 动生电动势	132
12.3 感生电动势和感生电场	134
12.4 自感和互感	137
12.4.1 自感和自感系数	137
12.4.2 互感和互感系数	139
12.5 磁场能量	140
12.5.1 自感磁能	140
12.5.2 磁场能量	140
12.6 位移电流	142
12.7 麦克斯韦方程组及电磁波	144
12.7.1 麦克斯韦电磁场基本理论	144
12.7.2 电磁波	145

专题 E 巨磁电阻效应	147
专题 F 等离子体	150
习题	153
第 13 章 量子物理基础	156
13.1 经典物理的困难	157
13.1.1 黑体辐射	157
13.1.2 光电效应	159
13.1.3 原子的线状光谱和原子的结构	160
13.2 量子论的诞生	163
13.2.1 普朗克的能量子理论	163
13.2.2 爱因斯坦的光电效应方程	168
13.2.3 康普顿散射	170
13.3 玻尔氢原子模型	173
13.3.1 玻尔的三个假设	173
13.3.2 玻尔的氢原子理论	174
* 13.3.3 弗兰克-赫兹实验	176
* 13.3.4 对应性原理	179
13.4 微观粒子的波粒二象性	182
13.4.1 德布罗意物质波的假设	182
13.4.2 德布罗意假设的实验验证	183
13.5 波函数 不确定关系	186
13.5.1 波函数	186
13.5.2 波函数的统计诠释	187
13.5.3 粒子的力学量的平均值	191
13.5.4 不确定关系	194
13.5.5 不确定关系的物理意义	196
13.6 薛定谔方程及其应用	197
13.6.1 薛定谔方程	198
13.6.2 薛定谔方程的简单应用	200
* 13.7 氢原子结构	208
13.7.1 氢原子中电子的定态薛定谔方程	208
13.7.2 三个量子数及其物理意义	209
13.7.3 概率密度和电子云	211
* 13.8 原子的壳层结构	213
13.8.1 自旋	213
13.8.2 元素周期表	217
专题 G 量子光学	220
习题	223

第 14 章 固体物理简介	228
14.1 晶体结构	228
14.2 晶体的结合	231
14.3 晶体的能带及其应用	233
14.3.1 固体能带	233
14.3.2 导体、绝缘体和半导体的能带论解释	235
14.3.3 半导体 PN 结	237
14.4 超导电性	239
14.4.1 超导体的两个基本特征	239
14.4.2 超导的基本理论	240
14.4.3 高温超导	241
14.4.4 超导体的应用	241
习题	242
参考文献	244

第 8 章 气体动理论

我们知道,宏观物体是由大量微观粒子组成,这些微观粒子以各自的方式作永不停息的无规则运动。粒子无规则运动的剧烈程度取决于温度。习惯上人们把与温度有关的现象统称为热现象,如水结成冰等。就其本质而言,热现象就是热运动的宏观表现。

热学就是研究热现象的规律及其应用的学科。历史上,人们通过两种途径来研究热现象,一种是热力学,另一种是统计物理学。

热力学是研究热现象的宏观理论。它的特点是:不涉及物质的微观结构,不需要任何假设,只从普遍成立的基本实验定律出发,应用数学方法,通过逻辑推理及演绎,得出宏观物质系统的各种宏观性质间的关系、宏观物理过程进行的方向和限度等。热力学的优点在于,它得出的结论具有普遍性和可靠性,其局限性是无法由热力学理论导出具体物质的具体特性,且不能解释宏观性质的涨落。

统计物理学是研究热现象的微观理论。它从物质是由大量微观粒子组成这一事实出发,运用统计的方法,把物质的宏观性质看作是由大量微观粒子无规则热运动的统计平均值所决定,由此找出宏观性质与微观运动间的关系,从而揭示物质宏观现象的微观本质。其局限性在于,由于统计物理需要对物质微观结构作出简化假设,因此由它所得到的理论结果往往只是近似的,与实验不能完全符合。

总之,热力学对热现象从宏观上给出普遍而又可靠的结论,而统计物理学则从物质的微观结构出发,能深入到热现象的本质,使人们知其然并知其所以然。因此热学研究往往是这两种方法的综合,相互补充,相得益彰。

本章我们讨论气体动理论,它是统计物理学中最简单最基本的内容,它从力学规律和大量分子杂乱无章的运动所呈现出的统计规律出发,解释气体的宏观热性质,从而揭示气体宏观热性质的微观本质。

8.1 热学的基本概念

8.1.1 热力学系统 平衡态

1. 热力学系统

热学研究的对象是由大量微观粒子组成的宏观物质系统,称为热力学系统(简称系统),与系统发生相互作用的其他物体称为外界。根据系统与外界相互作用的情况,可以对系统

作如下划分:与外界不发生任何能量和物质交换的系统称为孤立系;与外界有能量交换,但无物质交换的系统称为封闭系;与外界既有能量交换,也有物质交换的系统称为开放系。当然,绝对意义下的孤立系是不存在的,因为与外界隔绝的系统在物理学中是无法被测量、被认识的。实际上,当系统与外界间的相互作用能量远小于系统内部能量时,就可以把系统当作孤立系来处理。

2. 系统状态的描述

系统确定后,需要定义一些量来描述系统所处的状态以及状态随时间的变化。由于热学的研究方法有两种,所以对系统状态的描述方法也有两种:一种是热力学所采取的宏观描述法,即用一些可以直接测量的量来描述系统的宏观性质,如体积、压强、温度等,这些物理量称为宏观量;另一种是气体动理论或统计物理所采用的微观描述法,即给出系统中每个微观粒子的力学参量,如质量、速度、位置等,这些物理量称为微观量。微观量一般无法直接测量,但我们可以通过气体动理论和统计物理学分析微观态与宏观态的内在联系,从而得到微观量与宏观量间的统计关系。

3. 平衡态

经验指出,在不受外界条件影响下,一个系统不管其初态如何,经过足够长时间后,总会达到这样的一种状态:系统中的一切宏观性质都不随时间而发生变化,这样的状态称为热力学平衡态,简称平衡态。本书中我们主要对热力学系统的平衡态进行研究。由平衡态的定义可知,平衡态仅指系统的宏观性质不随时间改变,从微观上看,组成系统的大量微观粒子仍处于不断的运动中,保持不变的只是运动的平均效果,所以热力学平衡态是一种动态平衡,称为热动平衡。

处于平衡态的系统,由于其宏观性质不随时间变化,因而可以引进一些描述系统宏观性质的独立参量来描述系统的状态,这组互相独立的宏观量称为状态参量。状态参量的选择通常是可以任意的,如可选压强、体积为状态参量,也可选温度、体积为状态参量等。选定状态参量后,系统的其他宏观量就可以表示为状态参量的函数,称为态函数,例如内能就是一个态函数。

状态参量可以按不同的方式进行分类,在热学中比较重要的一种分类法是按参量与系统质量的关系来分类。把和系统质量成正比的参量称为广延量,如体积、内能等;把另一类和系统质量无关的参量称为强度量,如压强、密度等。广延量的最大特点是:系统的任何广延量均可视为由系统中各部分相应的量相加而得。例如系统的内能可看成是系统各部分能量之和。

8.1.2 热力学第零定律

在描述系统的状态参量中,温度是热力学所特有的一个状态参量。通常我们说热的物体温度高,冷的物体温度低,然而这种感觉往往是不准确的。例如,同样的一盆温水,如果我们先把手放到冰上,再把手放到温水里,会感觉它比较热;反之如果先把手放到热水里,再放到温水中,就会感觉它比较冷。所以必须对温度给予严格而科学的定义。为此,我们需要来了解一下热平衡定律。

如图 8-1 所示,考察 A、B、C 三个各自处于平衡态的系统,现在令 A 和 C 热接触,B 和 C 也热接触,但 A 和 B 本身并不直接热接触。实验表明,A、B、C 原来的平衡态均要被破坏,给予足够长时间后,A、B、C 将处于共同的平衡态。这时,如果把 C 轻轻地移走(即整个系统不受外界影响),再让 A 和 B 接触后,会发现它们的状态都不会发生变化。即:在不受外界影响的情况下,如果 A 和 B 同时和 C 处于热平衡,则 A 和 B 彼此也必处于热平衡,这就是热平衡定律,也称为热力学第零定律,它是大量实验事实的总结,是一个实验规律。

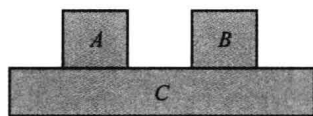


图 8-1 热力学第零定律说明

由热力学第零定律可以看出,两个系统是否热平衡,并不依赖于它们是否有热接触,而是由系统本身的固有属性决定,因此处于同一热平衡态的系统,必然具有一个共同的特征,我们把表征这种特征的物理量称为温度,即:处于同一热平衡态的系统具有相同的温度。换句话说,处于不同热平衡态的系统温度应该是不一样的,那么它们的温度分别是多少,如何来测量呢?

第零定律不仅给出了温度的概念,而且也指出了比较温度的方法。由于互为热平衡的物体具有相同的温度,不需要两物体直接进行热接触,因此我们只需取一个标准物体分别与这两个物体进行热接触就行了,这个作为标准的物体就是温度计。但是为了定量地确定温度,还必须给出温度的数值表示法——温标。确定一种温标需要三个要素:测温物质、测温属性和固定标准点。通常同一温度在不同的温标中具有不同的数值。在日常生活中使用的温标是摄氏温标,用 t 表示,其单位为 $^{\circ}\text{C}$ (摄氏度),它用酒精或水银作为测温物质,以液柱高度为测温属性,取水的冰点为 0°C ,沸点为 100°C ,将两点间均分为 100 等份,每 1 等份代表温差 1°C 。另一种常用的温标,称为热力学温标,也称为开氏温标,用 T 表示,其单位为 K(开[尔文])。一般在热学中所说的温度皆指热力学温度。热力学温标与摄氏温标间的换算关系为

$$T = 273.15 + t \quad (8-1)$$

即摄氏温标和热力学温标之间只是计算温度的起点不同,温度间隔是一样的。表 8-1 给出了一些典型的温度值。

表 8-1 一些典型温度值

	K
大爆炸后的宇宙温度	10^{39}
实验室内已获得的最髙温度	10^8
太阳中心的温度	1.5×10^7
地球中心的温度	4×10^3
水的三相点温度	273.16
星际空间	2.7
两种方法在实验室已获得的最低温度	
核自旋冷却	2×10^{-10}
激光制冷	2.4×10^{-11}

8.1.3 理想气体状态方程

在本章中我们仅讨论气体系统的热力学性质。对于一定量的气体,在平衡态下,如果忽略重力的影响,可以用体积 V 、压强 p 和温度 T 这三个状态参量来描述它的状态。这里的体积是指气体分子所能达到的空间,单位用 m^3 (立方米)。压强是气体作用在容器壁单位面积上的正压力,单位用 Pa (帕[斯卡]),即 N/m^2 ,有时用 atm (标准大气压)和 $\text{cm} \cdot \text{Hg}$ (厘米汞高)等单位。

$$1 \text{ atm} = 1.013 \times 10^5 \text{ Pa} = 76 \text{ cm} \cdot \text{Hg}$$

实验事实表明,表征气体平衡态的三个状态参量 p 、 V 、 T 之间存在着一定的关系,其关系式称为气体的状态方程,可表示为

$$f(p, V, T) = 0 \quad (8-2)$$

一般,气体在压强不太大(与大气压比较)和温度不太低(与室温比较)的范围内,遵守玻意耳-马略特定律、盖-吕萨克定律和查理定律。我们把任何情况下绝对遵守这三条实验定律的气体称为理想气体。由这三条实验定律可知,对于理想气体而言

$$\frac{p_1 V_1}{T_1} = \frac{p_2 V_2}{T_2} = \dots = \text{常量} \quad (8-3)$$

上式对任意平衡态(p 、 V 、 T)都成立。所以,当一定量的理想气体处于标准状态(p_0 、 V_0 、 T_0)和处于另一平衡态(p 、 V 、 T)时,有

$$\frac{p_0 V_0}{T_0} = \frac{pV}{T}$$

利用标准状态条件: $p_0 = 1 \text{ atm}$ 、 $T_0 = 273.15 \text{ K}$ 以及 1 mol 任何理想气体的体积均为 $V_{0\text{mol}} = 22.4 \times 10^{-3} \text{ m}^3$,再考虑到对于质量为 M 、摩尔质量为 μ 的理想气体,其摩尔数为 $\nu = M/\mu$,在标准状态下,理想气体的体积为 $V_0 = \nu V_{0\text{mol}}$,因此

$$\frac{pV}{T} = \frac{p_0 V_0}{T_0} = \frac{M}{\mu} \frac{p_0 V_{0\text{mol}}}{T_0}$$

令

$$R \equiv \frac{p_0 V_{0\text{mol}}}{T_0} = 8.31 \text{ J}/(\text{mol} \cdot \text{K})$$

R 称为气体的普适常量,代入则有

$$pV = \frac{M}{\mu} RT = \nu RT \quad (8-4)$$

这就是理想气体的状态方程。各种实际气体,在通常的压强和不太低的温度下,都近似遵守这个状态方程,而且压强越低,近似程度越高。

由于摩尔数 ν 除了等于 M/μ 外,还可表示成下面形式

$$\nu = N/N_A$$

其中, N 表示体积 V 中的气体分子总数, N_A 为阿伏伽德罗常数(其值为 6.023×10^{23} ,表示 1 mol 的任何气体中有 6.023×10^{23} 个分子)。于是,式(8-4)可改写为

$$p = \frac{\nu RT}{V} = \frac{NRT}{N_A V} = nkT \quad (8-5)$$

其中, $n = N/V$ 为单位体积内的气体分子数,称为分子数密度, $k = R/N_A$ 称为玻耳兹曼常

数,其值为 $1.38 \times 10^{-23} \text{ J/K}$,也是一个普适气体常量。

【例 8-1】 一个温度为 17°C 、容积为 $11.2 \times 10^{-3} \text{ m}^3$ 的真空系统,其真空度为 $1.33 \times 10^{-3} \text{ Pa}$ 。为了提高其真空度,将它放在 300°C 的烘箱内烘烤,使吸附于器壁的气体分子也释放出来。烘烤后容器内压强为 1.33 Pa ,问器壁原来吸附了多少个分子?

解 烘烤前容器内单位体积内的分子数为

$$n_1 = \frac{p_1}{kT_1} = \frac{1.33 \times 10^{-3}}{1.38 \times 10^{-23} \times 300} = 3.2 \times 10^{17}$$

烘烤后容器内单位体积内的分子数为

$$n_2 = \frac{p_2}{kT_2} = \frac{1.33}{1.38 \times 10^{-23} \times 573} = 1.68 \times 10^{20}$$

器壁原来吸附的分子数为

$$N = (n_2 - n_1)V = 1.88 \times 10^{18}$$

8.2 理想气体的压强和温度

前面我们介绍了热学的一些基本概念,知道微观量与宏观量之间存在着联系,下面就以理想气体为例,从微观上来说明宏观量压强和温度的微观意义。

8.2.1 理想气体的压强

为了从微观上解释压强,必须先知道物质的微观结构,因此需要根据实验事实对理想气体分子的表现做出合理假设,在假设的基础上建立一定的微观模型,从而进行理论推导。

1. 理想气体的微观模型和统计假设

根据实验现象的归纳和总结,首先我们可以对理想气体的个体表现作如下假设:

- (1) 气体分子本身的线度比起各个分子之间的平均距离小很多,可以忽略不计,因此可以认为气体分子是质点。
- (2) 除碰撞的瞬间外,分子与分子之间以及分子与容器壁之间均无相互作用。
- (3) 每个分子都在不停地运动着,分子与分子之间以及分子与容器壁之间频繁地发生碰撞,这些碰撞都是完全弹性碰撞。
- (4) 每个分子都遵从经典力学规律。

根据以上假设,可知理想气体的微观模型为:理想气体分子就是一个个极小的彼此间无相互作用的弹性质点。

其次,对于理想气体分子集体可以作如下统计规律假设:

什么是统计规律呢?大量偶然事件在整体上所呈现出来的规律,就称为统计规律。

为了对统计规律有个感性上的认识,我们来看一个模拟实验——伽耳顿板实验。如

图 8-2 所示,顶部有一漏斗状入口的平板竖直放置,平板上部是一排排等间隔的铁钉,所有钉子裸出相同的长度,下面是用隔板隔开的等宽狭槽。首先,使小钢球从入口一个一个落下去,可以看到单个钢球落在哪个槽中是随机、不可预见的。随着钢球数的增加,最后我们看到钢球在各槽中的分布如图 8-3 所示。然后,一次性地把所有钢球同时投入,其分布还是和原来几乎一样。多次重复实验得到的结果均相同。由此可见,虽然小钢球在与任一钉子碰撞后是向左还是向右运动都是随机的,有偶然性,但最终大量小钢球的总体在各槽内的分布却有一定的分布规律,这种规律就称为统计规律。

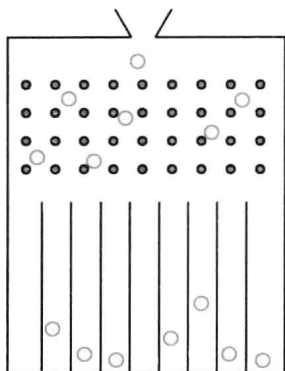


图 8-2 某个小球落入哪个小槽是随机的

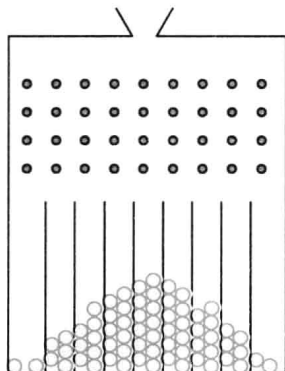


图 8-3 大量小球在槽中的分布具有统计规律性

由于气体系统内有大量分子,分子间的频繁碰撞使得每个分子的运动毫无规律可言,即单个分子运动是随机事件,而大量分子的运动必然要遵循统计规律,也就是说单个分子运动遵从力学规律,分子集体遵从统计规律。因此,对于处于平衡态的理想气体系统,可以认为:

(1) 若忽略重力的影响,气体系统中每个分子在容器内任一位置出现的机会(几率)是一样的,或者说,分子按位置的分布是均匀的。

(2) 每个分子的速度方向沿任何方向的机会(几率)也是一样的,或者说,分子速度按方向的分布是均匀的。

上述两条实际上就是对分子集体无规则运动的假设,是一种统计假设,只适用于大量分子组成的系统。根据以上假设,可知:

(1) 如以 V 表示容器体积,以 N 表示容器内的分子总数,则容器内的分子数密度 n 应处处一样,即

$$n = dN/dV = N/V \quad (8-6)$$

(2) 由速度方向分布的均匀性,有:速度的每个分量的平均值应该相等,且都等于 0,而速度的每个分量的平方的平均值应该相等,即

$$\begin{aligned} \overline{v_x} &= \overline{v_y} = \overline{v_z} = 0 \\ \overline{v_x^2} &= \overline{v_y^2} = \overline{v_z^2} \end{aligned} \quad (8-7)$$

其中各速度分量的平方的平均值定义为

$$\overline{v_x^2} = \frac{v_{1x}^2 + v_{2x}^2 + \cdots + v_{Nx}^2}{N}$$