

GONGKE WULI
JIAOCHENG

工科物理教程

主编 颜晓红 赵近芳 邓水凤

(下册)

 湖南科学技术出版社
Hunan Science & Technology Press

GONGKE WULI
JIAOCHEN

工科物理教程

(下册)

主编 颜晓红 赵近芳 邓水凤

编著 杨友田 谢文力 陶霞 黄克立 黎培德 崔洪农

内 容 简 介

本书是根据教育部《高等教育面向 21 世纪教学内容和课程体系改革计划》的精神编写的. 全书分上、下两册, 并配有光盘. 上册: 力学基础、相对论和电磁学; 下册: 热学、振动与波、波动光学和量子论. 与之配套的还有《大学物理学习指导》和《大学物理实验指导》两本书. 两者既可彼此独立、又可相互配套使用. 本书作为工科物理及理科非物理专业大学物理教材的改革尝试, 在理论叙述上坚持“高、宽、新、活、宜”的原则, 即高视点选择经典内容, 努力拓宽知识面, 尽力反映新科技发展概况, 注意各部分知识之间的活化联系, 且内容的难度较适宜. 同时, 在各章节合理切入相关的实验内容, 使理论与实验紧密结合, 浑然一体.

本书可作为高等工科院校各专业的物理教材, 也可作为综合性大学和师范院校非物理专业的教材或参考书.

工科物理教程 (下册)

主 编: 颜晓红 赵近芳 邓水凤

责任编辑: 曹 阳

出版发行: 湖南科学技术出版社

社 址: 长沙市湘雅路 280 号

<http://www.hnstp.com>

印 刷: 国防科技大学印刷厂

(印装质量问题请直接与本厂联系)

厂 址: 长沙市砚瓦池正街 47 号

邮 编: 410073

出版日期: 2005 年 1 月第 1 版第 1 次

开 本: 730mm × 960mm 1/16

印 张: 23.75

字 数: 416000

书 号: ISBN 7-5357-4139-8/O·236

上下册套价: 59.00 元

(版权所有·翻印必究)

前言

本书是为适应当前教学改革的需要,根据教育部《高等教育面向 21 世纪教学内容和课程体系改革计划》的精神,作为“工科物理理论课与实验课的整体优化”部教改项目的成果之一,在总结我们多年教材改革实践的基础上,汲取了当前国内外优秀教学改革成果而编写的.教材既包括了工科大学物理课程指导委员会制定的教学基本要求所指定的全部内容,又特别加强了关于近代物理知识和新科技物理基础的介绍,使全书内容更丰富,更符合工科物理教学的要求.这套教材的主要特点是:

1. 高视点选择,整合经典内容,优化知识结构

在尊重基础科学的科学性、系统性的前提下,将理论、实验两个教学环节模块式地整合在一起,精选了经典内容,加强了矢量性、能量及守恒定律等重要概念的阐述,加强了势能曲线和相图、微振动的简谐近似教学等.教材把相对论纳入力学篇,使牛顿力学与相对论时空观紧密相联,开拓了学生的视野.由于波动的规律普遍适用于力学、电磁学、光学及物质波,教材把它们整合在一起,既精减篇幅又加强了联系.同时,各部分将理论与实验教学融为一体,注重物理实验的时代性和先进性,将现代科技知识、科技成果融入普通物理实验教学中,增强了教材整体的时代特色.

2. 拟用“模块式教学”使理论、实验两门课程的知识体系融为一体

例如在经典部分是两个基本点并重,一是经典物理理论框架的建立,二是基本实验理论的建立和基本实验技能的培养;在近、现代部分理论课的讲授和实验课的设计都是围绕着使学生正确地建立现代时空观和量子思想而展开的,通过介绍现代物理技术和前沿课题,激发学生的求知欲和鼓励学生创新思维.

3. 突出教材在培养学生素质方面的作用

21 世纪是科学技术迅猛发展的新时代,培养学生的综合素质尤为重要.教材既要保证知识的完整性和系统性,又要体现近、现代物理新观念、新理论、新方法;既要给学生传授知识更要启迪学生创造性的开放思维,因此,在现代物理部分大胆地“渗透”一些科技前沿信息及开一定的非线性物理“窗口”.尽管有些内容学生不一定能完全清楚,但这将有益于培养学生的学习兴趣和独立思考能力,同时鼓励学生在教师指导下,自己设计实验,自己准备仪器完成实验,从而培养和提高学生的综合思维和创造能力.

4. 加强从全局观点掌握、运用知识的综合能力

教材突出主干,删除枝节,精选了例题和习题,尽量避免烦琐的叙述和冗长的数学推导,力求对物理概念、原理阐述准确、简洁、透彻,重点突出,便于学生阅读和理解.加强重要概念在各部分内容中的联系,如势能概念在力学、热学和电学中一直互相呼应,一脉相承,使学生整体把握知识的能力受到必要的训练,有利于用全局观点掌握、运用知识和综合思考.

5. 大力加强近、现代物理内容的介绍

教材在相对论、量子论和非线性物理三个方面,除系统介绍必要和可能的基本理论外,还选择接近普通物理的内容,经过改编作为基本要求编入.例如,教材增加了电磁场的相对论变换和电磁场的统一性、相对性,力的洛伦兹变换,一维定态问题和非线性振动、非线性波,非线性光学等方面的一些典型内容.又如,在实验方面引入现代科技新成果,如传感器技术、计算机数据采集与处理技术,计算机智能检测,光纤的研究与应用、光电效应等.

6. 适当反映高新科技和物理前沿的发展

教材介绍的激光、超导、光纤通讯和纳米技术等都突出其物理基础并注意了内容的可接受性;对耗散结构、孤波、混沌、黑洞以及凝聚态物理等前沿问题则重在启迪学生的开放思维,了解非平衡态和非线性是普遍存在的,克服僵化和片面性,扩大知识面.

说明:(1)本书教学参考学时数为120学时;

(2)教材中打*号的章节多为开“窗口”的内容,教师可自行取舍;

(3)书中小字部分是相关章节的延伸内容,不作要求;

(4)若将打*号的章节和小字部分除去,仍不影响教材的整体性.

本书由颜晓红(教育部物理教学指导委员会委员)和赵近芳、邓水凤担任主编.赵近芳、邓水凤负责全书的修改和定稿工作.编著者具体分工为:黎培德、谢力编写力学、振动与波、超导电性;黄克立、邓水凤编写电磁学、激光原理;杨友田、陶霞编写热学;赵近芳、邓水凤编写波动光学、量子物理基础、固体的能带结构、纳米科学技术;崔洪农编写相对论、原子核物理和粒子物理.学习指导的相关章节仍由以上编者分工编写.在编写过程中,许多学校的老师提出了一些很中肯的建议,尤其是得到了北京航空航天大学、北京邮电大学、厦门大学、华北工学院、武汉理工大学、湘潭大学、中南大学、长沙理工大学、南华大学、湖南大学、华南理工大学、中南林学院等学校老师的帮助和指导,在此一并致谢.

编写适合教学改革需要的教材是一种探索,加之编者水平所限,书中难免有不妥和疏漏之处,恳请读者批评指正.

编者

2004年8月

目 录

第三篇 气体动理论和热力学

第八章 气体动理论基础	(3)
§ 8-1 平衡态 温度 理想气体状态方程	(3)
§ 8-2 理想气体压强公式	(7)
§ 8-3 温度的统计解释	(9)
§ 8-4 能量均分定理 理想气体的内能	(11)
§ 8-5 麦克斯韦分子速率分布定律	(13)
*§ 8-6 玻尔兹曼分布律	(19)
§ 8-7 分子平均碰撞次数和平均自由程	(21)
习题八	(28)
第九章 热力学基础	(31)
§ 9-1 内能 功和热量 准静态过程	(31)
§ 9-2 热力学第一定律	(34)
§ 9-3 气体的摩尔热容量	(38)
§ 9-4 绝热过程	(40)
§ 9-5 循环过程 卡诺循环	(44)
§ 9-6 热力学第二定律	(50)
§ 9-7 热力学第二定律的统计意义 玻尔兹曼熵	(54)
§ 9-8 卡诺定理 克劳修斯熵	(58)
*§ 9-9 熵与信息	(65)
*§ 9-10 耗散结构	(70)
习题九	(77)

第四篇 振动与波 波动光学

第十章 机械振动	(81)
§ 10-1 简谐振动的动力学特征	(81)
§ 10-2 简谐振动的运动学	(84)
§ 10-3 简谐振动的能量	(90)
§ 10-4 简谐振动的合成 振动的频谱分析	(92)

§ 10-5 阻尼振动 受迫振动 共振	(101)
*§ 10-6 非线性振动简介	(105)
习题十	(109)
第十一章 机械波	(112)
§ 11-1 机械波的形成和传播	(112)
§ 11-2 平面简谐波的波动方程	(118)
§ 11-3 波的能量 *声强	(124)
§ 11-4 惠更斯原理 波的叠加和干涉	(130)
§ 11-5 驻波	(137)
§ 11-6 多普勒效应 *冲击波	(144)
*§ 11-7 色散 波包 群速度	(149)
*§ 11-8 非线性波 孤波	(151)
习题十一	(153)
第十二章 光的干涉	(158)
§ 12-1 光源 光的相干性	(159)
§ 12-2 杨氏双缝干涉实验	(162)
§ 12-3 薄膜干涉	(169)
§ 12-4 迈克尔逊干涉仪	(177)
习题十二	(182)
第十三章 光的衍射	(185)
§ 13-1 光的衍射 惠更斯-菲涅耳原理	(185)
§ 13-2 单缝夫琅禾费衍射	(187)
§ 13-3 衍射光栅	(193)
§ 13-4 圆孔衍射 光学仪器的分辨率	(201)
§ 13-5 X射线的衍射	(203)
习题十三	(205)
第十四章 光的偏振	(207)
§ 14-1 自然光和偏振光	(207)
§ 14-2 起偏和检偏 马吕斯定律	(210)
§ 14-3 反射与折射时光的偏振	(213)
§ 14-4 光的双折射	(216)
*§ 14-5 偏振光的干涉 人为双折射现象	(218)
*§ 14-6 旋光现象	(221)
习题十四	(222)
*第十五章 现代光学简介	(224)
§ 15-1 全息照相	(224)
§ 15-2 非线性光学简介	(229)

§ 15-3 光纤通信	(232)
§ 15-4 傅立叶光学的空间频谱与空间滤波实验	(239)
习题十五	(240)

第五篇 量子论

第十六章 量子物理基础	(244)
§ 16-1 黑体辐射 普朗克量子假设	(244)
§ 16-2 光的量子性	(248)
§ 16-3 粒子的波动性	(256)
§ 16-4 测不准关系	(259)
§ 16-5 波函数 薛定谔方程	(262)
§ 16-6 薛定谔方程在几个一维问题中的应用	(266)
§ 16-7 氢原子理论	(271)
§ 16-8 斯特恩-盖拉赫实验	(285)
§ 16-9 电子自旋	(288)
§ 16-10 原子的壳层结构	(290)
习题十六	(296)
*第十七章 原子核物理和粒子物理简介	(298)
§ 17-1 原子核的基本性质	(298)
§ 17-2 原子核的放射性衰变	(304)
§ 17-3 原子核能的利用	(307)
§ 17-4 粒子物理简介	(311)
习题十七	(318)
第十八章 新技术的物理基础	(319)
§ 18-1 导体 半导体 绝缘体	(319)
§ 18-2 激光原理	(332)
*§ 18-3 超导电性	(340)
*§ 18-4 纳米科学技术简介	(351)
习题十八	(363)
部分习题参考答案	(365)

第三篇 气体动理论和热力学

热学是研究物质的各种热现象的性质和变化规律的一门学科. 与温度有关的现象称为热现象. 从微观看, 热现象就是宏观物体内部大量分子或原子等微观粒子的永不停息的、无规则热运动的平均效果.

18 到 19 世纪, 蒸汽机的广泛应用, 有力地推动了热现象及其规律的研究. 迈耶 (R. J. Mayer)、焦耳 (J. P. Joule)、亥姆霍兹 (Hermann von Helmholtz) 等人建立了与热现象有关的能量转化和守恒定律, 即热力学第一定律, 接着开尔文 (Kelvin)、克劳修斯 (R. Clausius) 等人建立了描述能量传递方向的热力学第二定律. 这种以观察和实验为基础, 运用归纳和分析方法总结出热现象的宏观理论称为热力学. 另一种研究热现象规律的方法是从物质的微观结构和分子运动论出发, 以每个微观粒子遵循力学规律为基础, 运用统计方法, 导出热运动的宏观规律, 再由实验确认. 用这种方法所建立的理论系统称为统计物理学 (或叫气体动理论). 19 世纪, 克劳修斯 (R. Clausius)、麦克斯韦 (J. C. Maxwell)、玻尔兹曼 (L. Boltzmann)、吉布斯 (J. W. Gibbs) 等人在经典力学基础上建立起经典统计物理. 20 世纪初, 由于量子力学的建立, 狄拉克 (P. A. M. Dirac)、爱因斯坦 (Albert. Einstein)、费米 (E. Fermi)、玻色 (S. Bose) 等人又创立了量子统计物理. 热学包括统计物理和热力学两部分. 热力学的结论来自实验, 可靠性好, 但对问题的本质缺乏深入的刻画. 统计物理的分析对热现象的本质给出了解释, 但是只有当它与热力学结论相一致时, 统计物理才能得到确认, 因此, 两者相辅相成, 缺一不可.

经验告诉我们, 自然界中宏观物体的各种性质, 大都随着它的冷热状态的变化而变化, 物体的冷热状态通常用“温度”这个量来表述. 例如, 物体的体积会因温度变化而变化. 很硬的钢件烧红后会变软, 若经过突然冷却 (淬火) 又会变得更坚硬. 一般金属导体, 随着温度升高其电阻跟着增大, 而另一些金属或化合物在低温下其电阻会突然消失, 变成超导体. 室温下的半导体, 在高温下会变成导体, 而当它冷却到很低温度时, 又会变成绝缘体. 有很强剩磁的铁磁

质,当加热到它们的居里温度以上时,又会变成没有剩磁的顺磁体.宏观物体在各种温度下都存在热辐射,温度越高,对应于辐射强度极大值的光波波长越短,因而辐射光的颜色随温度的升高由红向黄、蓝、紫端变化.化学反应快慢、生物的繁殖生长等都与温度有关.总之,与物体冷热状态相关联的热现象在自然界中是一种普遍存在的现象.所以学习和掌握热学规律对于从事生产和发展现代科技都是非常重要和不可或缺的.

第八章 气体动理论基础

本章介绍热学中的系统、平衡态、温度等概念,从物质的微观结构出发,阐明平衡状态下的宏观参量压强和温度的微观本质,并导出理想气体的内能公式,最后讨论理想气体分子在平衡状态下的几个统计规律.

§ 8-1 平衡态 温度 理想气体状态方程

一、平衡态

热学的研究对象是大量微观粒子(分子、原子等微观粒子)组成的宏观物体,通常称这样的研究对象为热力学系统,简称系统.在研究一个热力学系统的热现象规律时,不仅要注意系统内部的各种因素,同时也要注意外部环境对系统的影响.研究对象以外的物体称为系统的外界(或环境).一般情况下,系统与外界之间既有能量交换(例如做功、传递热量),又有物质交换(例如蒸发、凝结、扩散、泄漏).根据系统与外界交换的特点,通常把系统分为三种:

一种是不受外界影响的系统,称为孤立系统.孤立系统是与外界既无能量交换,又无物质交换的理想系统.另一种是封闭系统,即与外界只有能量交换,而无物质交换的系统.第三种是开放系统,即与外界既有能量交换,又有物质交换的系统.

热力学系统按所处的状态不同,可以区分为平衡态系统和非平衡态系统.对于一个不受外界影响的系统,不论其初始状态如何,经过足够长的时间后,必将达到一个宏观性质不再随时间变化的稳定状态,这样的状态称为热平衡态,简称平衡态.

在此我们必须注意平衡态的条件是:“一个不受外界影响的系统”.若系统受到外界的影响,如把一金属棒的一端置入沸水中,另一端放入冰水中,在这样的两个恒定热源之间,经过长时间后,金属棒也能达到一个稳定的状态,称为定态,但不是平衡态,因为在外界影响下,不断地有热量从金属棒高温热源端传递到低温热源端.因此,系统处于平衡态时,必须同时满足两个条件:一是系统与外界在宏观上无能量和物质的交换;二是系统的宏观性质不随时间变

化. 换言之, 系统处于热平衡态时, 系统内部任一体元均处于力学平衡、热平衡(温度处处相同)、相平衡(无物态变化)和化学平衡(无单方向化学反应)之中. 孤立系统的定态就是平衡态.

需要指出: ① 平衡态仅指系统的宏观性质不随时间变化, 从微观的角度来说, 组成系统的大量粒子仍在不停地、无规则地运动着, 只是大量粒子运动的平均效果不变, 这在宏观上表现为系统达到平衡, 因此这种平衡态又称热动平衡态. ② 热平衡态是一种理想状态. 实际中并不存在孤立系统, 但当系统受到外界的影响可以忽略, 宏观性质只有很小变化时, 系统的状态就可以近似地看做平衡态.

反之, 如果系统不具备两个平衡条件之一的状态, 都叫非平衡态, 如存在未被平衡的力, 则会出现物质流动; 如果存在冷热不一致(温差), 则会出现热量流动; 如果存在未被平衡的相(物态)则会出现相变(物态变化); 如果存在单方向化学反应, 则会出现成分的变化(新物质增加, 旧物质减少), 即系统中存在任何一种流或变化时(宏观过程), 系统的状态都不是平衡态.

系统在热平衡状态下, 具有各种不同的宏观属性, 如几何的(体积)、力学的(压强)、热学的(温度)、电磁的(磁感应强度、电场强度)、化学的(摩尔质量、摩尔数)等. 用来描写热平衡态下各种宏观属性的物理量叫系统的宏观参量. 从诸多参量中选出来描写系统热平衡态的一组相互独立的宏观参量叫系统的状态参量. 对于给定的气体、液体和固体, 常用体积(V)、压强(p)和温度(T)等宏观参量. 实验表明, 这些宏观参量在平衡态下, 它们各有确定的值, 且不随时间变化.

在国际单位制中, 压强的单位是帕斯卡, 简称帕(Pa), 它与大气压(atm)及毫米汞柱(mmHg)的关系为

$$1 \text{ atm} = 760 \text{ mmHg} = 1.013 \times 10^5 \text{ Pa}.$$

体积的单位为: 立方米(m^3), 它与升(L)的关系是 $1 \text{ m}^3 = 10^3 \text{ L}$.

需要指出的是, 每一个运动着的微观粒子(原子、分子等)都有其大小、质量、速度、能量等, 这些用来描述个别微观粒子特征的物理量称为微观量. 而在实验中观测得到的气体体积、压强、温度、热容量等都是宏观量, 即描述大量微观粒子(分子或原子)的集体量叫宏观量. 气体动理论的任务之一就是要揭示气体宏观量的微观本质, 亦即建立宏观量与微观量统计平均值之间的关系.

二、温度

温度表征物体的冷热程度. 冷热是人们对自然界的一种体验, 对物质世界的直接感觉. 但是单凭人的感觉, 认为热的系统温度高, 冷的系统温度低, 这不

但不能定量地表示出系统的温度,有时甚至会得出错误的结论.因此,要定量地表示出系统的温度,必须给温度一个严格而科学的定义.

温度概念的建立是以热平衡为基础的.假设有 A, B 两个系统,各自处在一定的平衡态.现使 A, B 两系统相互接触,让两系统之间发生传热,一般地,两系统的状态都会发生变化.经过一段时间后,两个系统的状态不再发生变化,两系统就处在一个新的共同的平衡态.即使两系统分开,它们仍然保持这个平衡态.

再考虑由 A, B, C 表示的三个系统,相互隔绝的 A, B 两系统同时与 C 系统热接触,过一段时间后, A 与 C 处于平衡状态, B 与 C 也处于平衡状态.然后将 A, B 两系统与 C 系统隔离开,让 A 和 B 热接触,则 A, B 两系统的平衡状态不会发生变化.

实验结果表明:如果两个系统分别与第三个系统达到热平衡,那么,这两个系统彼此也处于热平衡.这个结论称热力学第零定律.

热力学第零定律说明,处在相互热平衡状态的系统必定拥有某一个共同的宏观物理性质.若两个系统的这一共同性质相同,当两系统热接触时,系统之间不会有热传导,彼此处于热平衡状态;若两系统的这一共同性质不相同,两系统热接触时就会有热传递,彼此的热平衡态会发生变化.决定系统热平衡的这一共同的宏观性质称为系统的温度.也就是说,温度是决定一系统是否与其他系统处于热平衡的宏观性质. A, B 两系统热接触时,如果彼此处于平衡态,则说两系统温度相同;如果发生 A 到 B 的热传导,则说 A 的温度比 B 的高.一切互为热平衡的系统具有相同的温度.

实验表明,当几个系统作为一个整体处于热平衡状态,若将它们分离开,在没有其他影响的情况下,各个系统的热平衡状态不会发生变化.这说明各个系统在热平衡状态时的温度仅决定于系统本身内部热运动状态.以后将看到温度反映的是系统大量分子无规则运动的剧烈程度.

热力学第零定律也指出了比较和测量温度的方法.由于一切处于相互热平衡的系统具有相同的温度,因此,我们可以选定一个合适的系统作为标准,通过这个标准系统的与温度有关的特性来测量其他系统的温度,这个合适的系统就成了一个温度计,这个合适的系统就成了一个温度计.温度计要能定量表示和测量温度,还需要选定一种合适的物质(称测温质).实验表明,物质的许多性质都随温度的改变而发生变化,一般选定测温物质的某种随温变化、且作单调显著变化的性质作为测温特性来表示温度.如定压下气体的体积,金属丝的电阻等随温度变化的特性.选定温度的标准点,并把一定间隔的冷热程度分为若干度,这样就可读取温度的数值,即温标.

常用的摄氏(Celsius)温标,是用液体(酒精或水银)作测温物质,用液柱高度随温度变化作测温特性.规定纯水的冰点为 0°C ,汽点为 100°C ,并认定液柱高度(体积)随温度作线性变化.在 0°C 到 100°C 之间等分分度,一分表示 1°C .另一种温标是开尔文(Lord Kelvin)在热力学第二定律的基础上建立起的温标,称热力学温标.用 T 表示热力学温度,单位用开(K),是SI制中7个基本单位之一.并规定水的三相点(水、冰和水蒸气平衡共存的状态)为 273.16 K .热力学温度与摄氏温度的关系为

$$t = T + 273.15,$$

即规定热力学温标的 273.15 K 为摄氏温标的 0°C .

三、理想气体状态方程

实验表明,当系统处于热平衡态时,描写该状态的各个状态参量之间存在一定的函数关系,我们把热平衡态下,各个状态参量之间的关系式叫系统的状态方程式.状态方程式的具体形式是由实验来确定的,比如实验告知,在压强不太大(与大气压相比)、温度不太低(与室温比)的条件下,各种气体都遵守三大实验定律:玻义尔(Boyle)定律,查理(Charles)定律,盖-吕萨克(Goy-Lussac)定律.在任何情况下都能严格遵从上述三个实验定律的气体称为理想气体.

由气体的三个实验定律得到一定质量的理想气体状态方程为:

$$pV = \frac{M}{M_{\text{mol}}}RT, \quad (8-1)$$

式中 p, V, T 为理想气体在某一平衡态下的三个状态参量; M_{mol} 为气体的摩尔质量; M 为气体的质量; R 为普适气体常量,国际单位制中 $R = 8.31\text{ J} \cdot \text{mol}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$; p 为气体压强; T 为气体温度的热力学温标; V 为气体分子的活动空间.在常温常压下,实际气体都可近似地当做理想气体来处理.压强越低,温度越高,这种近似的准确度越高.

平衡态除了由一组状态参量表述之外,还常用状态图中的一个点表示,比如对一定量的理想气体,其一个平衡态可由 $p-V$ 图中对应的一个点来代表(或 $p-T$ 图、或 $V-T$ 图中一个点),不同的平衡态对应于不同的点.一条连续曲线代表一个由平衡态组成的变化过程,曲线上的箭头表示过程进行的方向,不同曲线代表不同过程.如图 8-1 所示.

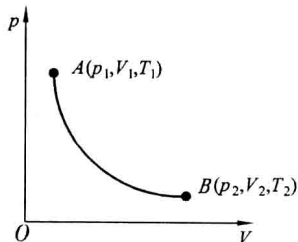


图 8-1 平衡状态示意图

§ 8-2 理想气体压强公式

热力学系统是由大量分子、原子等微观粒子组成,那么系统的宏观状态参量(如温度、压强等)与这些微观粒子的运动有什么关系呢?

根据气体动理论,单个分子对器壁的碰撞是间断的、随机的;而大量分子对器壁的碰撞是连续的、恒定的,也就是说气体对器壁的压强应该是大量分子对容器不断碰撞的统计平均结果.因此,推导压强公式的基本思路是:按力学规律计算每个分子对器壁的作用(冲量 $\bar{f}_i \delta t$),然后将所有分子对器壁的作用

进行统计平均($\bar{F} = \frac{\sum \bar{f}_i \delta t}{\Delta t}$),得出理想气体压强($p = \frac{\bar{F}}{S}$)公式的统计表述.

为此,必须明确平衡态下理想气体分子模型和性质.

一、分子模型

从分子运动和分子相互作用来看,理想气体的分子模型为:

1. 分子可以看做质点

在标准状态下,气体分子间的平均距离约为分子有效直径的 50 倍.气体越稀薄,分子间距比其有效直径越大,所以,一般情况下,气体分子可视为质点.

2. 除碰撞外,分子力可以略去不计

气体分子间距很大,除碰撞瞬间有力作用外,分子间的相互作用力可以忽略.因此,在两次碰撞之间,分子做匀速直线运动,即自由运动.

3. 分子间的碰撞是完全弹性的

处于平衡态下气体的宏观性质不变,这表明系统的能量不因碰撞而损失.因此分子间及分子与器壁之间的碰撞是完全弹性碰撞.

综上所述,理想气体的分子模型是弹性的自由运动的质点.

二、分子性质

1. 平均而言,沿各个方向运动的分子数相同.

2. 气体的性质与方向无关,即各个方向上速率的各种平均值相等,如

$$\overline{v_x} = \overline{v_y} = \overline{v_z}, \quad \overline{v_x^2} = \overline{v_y^2} = \overline{v_z^2}.$$

3. 不因碰撞而丢失具有某一速度的分子.

下面根据上述思路和条件,推导平衡态下理想气体的压强公式.

假设有一边长分别为 l_1 , l_2 和 l_3 的长方形容,储有 N 个质量为 m 的同类

气体分子. 如图 8-2 所示, 在平衡态下器壁各处压强相同, 任选器壁的一个面, 例如选择与 x 轴垂直的 A_1 面, 计算其所受压强.

在大量分子中, 任选一个分子 i , 设其速度为

$$\boldsymbol{v}_i = v_{ix}\boldsymbol{i} + v_{iy}\boldsymbol{j} + v_{iz}\boldsymbol{k}.$$

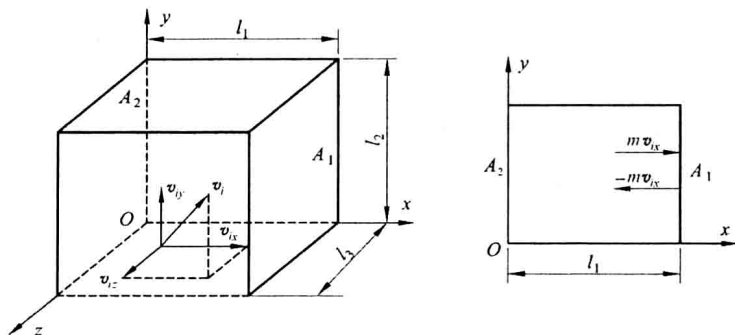


图 8-2 气体压强公式的推导图

当分子 i 与器壁 A_1 碰撞时, 由于碰撞是完全弹性的, 故该分子在 x 方向的速度分量由 v_{ix} 变为 $-v_{ix}$, 所以在碰撞过程中该分子的 x 方向动量增量为

$$\Delta p_{ix} = (-mv_{ix}) - (mv_{ix}) = -2mv_{ix}.$$

由动量定理知, 它等于器壁施于该分子的冲量, 又由牛顿第三定律知, 分子 i 在每次碰撞时对器壁的冲量为 $2mv_{ix}$.

分子 i 在与 A_1 面碰撞后弹回做匀速直线运动, 并与其他分子相碰, 由于两个质量相等的弹性质点完全弹性碰撞时交换速度, 故可等价 i 分子直接飞向 A_2 , 与 A_2 面碰撞后又回到 A_1 面再做碰撞, 分子 i 在相继两次与 A_1 面碰撞过程中, 在 x 轴上移动的距离为 $2l_1$, 因此分子 i 相继两次与 A_1 面碰撞的时间间隔为 $\Delta t = 2l_1/v_{ix}$, 那么, 单位时间内 i 分子对 A_1 面的碰撞次数 $Z = 1/\Delta t = v_{ix}/2l_1$, 所以, 在单位时间内 i 分子对 A_1 面的冲量 $= 2mv_{ix} \frac{v_{ix}}{2l_1}$, 根据动量定理,

该冲量就是 i 分子对 A_1 面的平均冲力 ($\bar{F}_{ix}$); 即

$$\bar{F}_{ix} = 2mv_{ix} \frac{v_{ix}}{2l_1}.$$

所有分子对 A_1 面的平均作用力为上式对所有分子求和, 即

$$\bar{F}_x = \sum_{i=1}^N \bar{F}_{ix} = \frac{m}{l_1} \sum_{i=1}^N v_{ix}^2.$$

由压强定义有:

$$p = \frac{\bar{F}_x}{l_2 l_3} = \frac{m}{l_1 l_2 l_3} \sum_{i=1}^N v_{ix}^2 = \frac{mN}{l_1 l_2 l_3 N} \sum_{i=1}^N v_{ix}^2,$$

分子数密度 $n = \frac{N}{l_1 l_2 l_3}$, x 轴方向速度平方的平均值 $\overline{v_x^2} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N v_{ix}^2$.

有

$$p = nm \overline{v_x^2}.$$

又平衡态下有

$$\overline{v_x^2} = \overline{v_y^2} = \overline{v_z^2},$$

及

$$\overline{v^2} = \overline{v_x^2} + \overline{v_y^2} + \overline{v_z^2},$$

所以有

$$\overline{v_x^2} = \frac{1}{3} \overline{v^2},$$

$$p = \frac{1}{3} nm \overline{v^2} = \frac{2}{3} n \left(\frac{1}{2} m \overline{v^2} \right).$$

令

$$\overline{w} = \frac{1}{2} m \overline{v^2},$$

$\overline{w}$ 表示分子的平动动能的平均值, 简称分子的平均平动动能, 则

$$p = \frac{2}{3} n \overline{w}. \quad (8-2)$$

(8-2) 式称为理想气体的压强公式, 它表明气体作用于器壁的压强正比于单位体积内的分子数 n 和分子平均平动动能 $\overline{w}$. 分子数密度越大, 压强越大; 分子的平均平动动能越大, 压强越大.

压强公式建立了宏观量 p 与微观量的统计平均值 $\overline{w}$ 和 n 之间的相互关系, 表明了压强是个统计量. 由于单个分子对器壁的碰撞是不连续的, 产生的压力起伏不定. 只有在气体分子数足够大时, 器壁所受到的压力才有确定的统计平均值; 因此, 论及个别或少量分子的压强是无意义的.

§ 8-3 温度的统计解释

一、温度的统计解释

温度是热学中特有的一个物理量, 它在宏观上表征了物质冷热状态的程度. 那么温度的微观本质是什么呢?

我们可将理想气体状态方程改写为如下表达式:

$$\text{由} \quad pV = \frac{M}{M_{\text{mol}}} = RT,$$

$$\text{有} \quad p = \frac{Nm}{Vm} \cdot \frac{R}{N_A} T = \frac{2}{3} n \overline{w},$$

其中 $N_A = 6.022 \times 10^{23} \text{ mol}^{-1}$ 为阿伏伽德罗常数, 令 $k = \frac{R}{N_A} = 1.38 \times$