

21 世纪高等院校教材
新编大学物理立体化系列教材

新编

大学物理(下册)

王济民 罗春荣 陈长乐 编 ◆



科学出版社

www.sciencep.com

21 世纪高等院校教材
新编大学物理立体化系列教材

新编大学物理

(下 册)

王济民 罗春荣 陈长乐 编

科学出版社
北 京

内 容 简 介

本书是“新编大学物理立体化系列教材”之二。此系列教材是着眼于新世纪物理教育的一套革新教材,在教材内容现代化、体系结构科学化、习题模式多元化、版式设计最佳化等方面均做了有益的探索 and 改革。

本书包括热学、振动和波及近代物理学三部分,热学分为气体动理论、热力学的物理基础;振动和波分为振动、波动、光的干涉、光的衍射和光的偏振;近代物理学分为狭义相对论基础、量子力学的实验基础和量子力学初步。此外,部分章末附有专题阅读材料,以介绍物理学科前沿的最新进展及其物理原理在现代技术中的重要应用等。

本书可作为工科大学各专业、理科及师范学院非物理专业的教材或参考书,也可作为电视大学、函授大学师生以及有关工程技术人员的参考书。

图书在版编目(CIP)数据

新编大学物理(下册)/王济民,罗春荣,陈长乐编.—北京:科学出版社,2004

21 世纪高等院校教材·新编大学物理立体化系列教材

ISBN 7-03-013096-0

I. 新… II. ①王…②罗…③陈… III. 物理学-高等学校-教材
IV. O4

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2004)第 022300 号

责任编辑:刘俊来 昌盛 姚庆爽 / 责任校对:陈丽珠

责任印制:安春生/封面设计:黄华斌 陈敬

科学出版社 出版

北京东黄城根北街16号

邮政编码:100717

<http://www.sciencep.com>

双青印刷厂 印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2004 年 7 月第 一 版 开本:B5(720×1000)

2005 年 2 月第二次印刷 印张:24 3/4

印数:4 001—6 500 字数:485 100

定价:29.00 元

(如有印装质量问题,我社负责调换〈双青〉)

前 言

回顾刚刚过去的 20 世纪,物理学研究成果对人类文明进程及生活方式的影响是惊人的.1905 年爱因斯坦建立了闻名遐迩的质能关系,给了人类打开核能宝库的钥匙,使人类进入了原子能时代.1917 年爱因斯坦又提出了受激辐射理论,为 20 世纪 60 年代激光器的诞生奠定了理论基础.1932 年回旋加速器的发明,1934 年电子显微镜的制成,1936 年射电望远镜的诞生,1957 年人造卫星的上天以及随后发展起来的宇航技术,20 世纪 60 年代建造的用作强中子源的实验性反应堆和电子同步加速器等,它们无一不是物理学研究成果.还有固体及半导体物理的研究成果使得半导体器件及集成电路的问世,促进电子计算机迅速更新换代,使人类迈步跨入了信息时代.量子物理理论指导了扫描隧道显微镜的诞生(1981 年),在此基础上发展起来的纳米技术在世界范围内引起了巨大反响.科学家普遍认为,纳米技术将会引发一次新的工业革命,对人类社会产生深远的影响.很显然,物理学已渗透到人类活动及文明社会的各个层面及领域.物理学,特别是近代物理学,已成为各类人才所必须具备的基础知识.

但是,近年来国家组织的几次公民科学素质调查结果表明,我国公民对 20 世纪 40 年代以前的学说、理论、发明和创造比较熟悉,但对近 60 年来的许多理论与科技进展却知之不多.其主要原因是我们的教材更新缓慢,教学内容不能与时俱进所致,加之近年来物理学及其相关学科群也出现了一系列令人鼓舞的新进展.因此面向 21 世纪的高等教育,大学物理传统教材的改革势在必行.

适应时代需求,革新物理教材,满足 21 世纪高素质人才培养的需要,这正是编写本书的目的.致力于教材内容的现代化,以更新学生的知识结构;优化教材的体系结构,以突出物理学知识的结构框架;改革传统习题的设置模式,以加强教学实践环节;重视物理原理在现代技术中的应用,以缩小学校教育与社会需求之间的差距;控制教材篇幅及内容深度,以适应高等教育大众化的实际需要.这些就是本书追求的改革目标.

为了实现上述目标,本书在编写上力求体现以下特点.

1. 用现代观点审视和组织教材内容

在教材内容的组织上,“承袭传统精华,注重革新扩展”是我们的基本思想.用现代观点审视和组织教材内容,实现了近代物理思想向经典理论的有机渗透.利用“开窗口、留接口”和设立专题阅读材料等方式介绍学科前沿的最新进展,重视物理原理在现代技术中的应用,达到了“优化经典、加强近代”的改革目标,实现教材内容的现代化.

2. 以结构逻辑和教学逻辑的双重标准优化教材的体系结构

知识体系上的结构逻辑与人们认识事物过程上的渐进性、直观性等教学逻辑并不完全统一。在教材的体系结构上,我们兼顾体系结构上的科学性和教学上的可接受性。在章、节以至段落标题的设置上,力求简洁准确,寓意清晰,对相应节、段的内容能够起到画龙点睛的作用。并优化教材的版式设计及其插图设计,使教材图文并茂,层次分明,结构合理,系统性强,符合教学规律,便于教学操作。

3. 改革传统习题的设置模式,强化学生能力的培养

为了加强实践性教学环节,强化学生能力的培养,本书大幅度地改革传统习题的设置模式,创立了成套结构式习题。其主要特点是:

(1) 与教学同步配合,知识点覆盖全面。

(2) 题型丰富多样,设问角度多样化。注意对学生综合、类比、联想能力的考察,启发学生多角度开放式思维,注重对学生掌握物理理论、思想及方法的训练。

(3) 增设难度系数较大的附加题,题目涉及较多的知识内容,有些是对教材内容的适当延伸。附加题可作为学有余力的同学探讨的较为高级的课题,这样有利于对学生因势利导,使拔尖的优秀人才脱颖而出。附加题可不作为基本要求。

(4) 注重物理原理在工程技术中的应用(不少题目来自于工程实际问题),培养学生解决实际问题的能力。

4. 注意教材的普遍适应性

考虑到教学层次的多样性以及高等教育大众化所带来的问题,本书在教材内容深浅的把握上、内容安排的技巧上以及教材篇幅的控制上均给以恰当的处理,以保证教材的普遍适应性。

本书是编者在多年教学实践的基础上,吸收了国内外许多教材之所长编写的,期望能在工科物理教育中发挥更大的作用。全书共计5篇18章,分为上、下两册。上册包括力学(第1~3章)、电磁学(第4~8章),下册包括热学(第9~10章)、振动和波(第11~15章)、近代物理学(第16~18章)。

参加本书编写工作的有:王济民、罗春荣、陈长乐。具体分工为:王济民编写绪论、第1~3、7、8、12、13~15章以及阅读材料A、C、G;罗春荣编写第4~6、11、16章以及阅读材料B、D、F;陈长乐编写第9、10、17、18章以及阅读材料E、H。全书的统稿工作由王济民完成。文喜星、郭晓枫参加了部分习题的编写工作。全书插图由李普选用计算机绘制。

在本书编写过程中,得到了西北工业大学理学院以及应用物理系领导和许多同仁的大力支持和帮助,在此谨致谢忱。

由于编者水平所限,书中的疏漏和错误之处在所难免,恳请读者不吝指正。

编 者
2003年9月

目 录

第三篇 热 学

第 9 章 气体动理论	3
§ 9.1 统计物理学的基本概念	4
§ 9.2 气体分子数按速率分布的统计规律	12
§ 9.3 分子数按能量分布的统计规律	17
§ 9.4 理想气体压强与温度的统计意义	21
§ 9.5 能量按自由度分配的统计规律	24
§ 9.6 气体分子的平均碰撞频率及平均自由程	27
思考题 9	30
习题 9	31
物理原理与现代技术(E)——真空与低温	33
第 10 章 热力学的物理基础	38
§ 10.1 热力学的基本概念	39
§ 10.2 热力学第一定律	43
§ 10.3 绝热过程与多方过程	48
§ 10.4 循环过程	53
* § 10.5 真实气体的焦耳-汤姆孙实验	61
§ 10.6 热力学第二定律	63
§ 10.7 熵	68
思考题 10	72
习题 10	73

第四篇 振动和波

第 11 章 振动	78
§ 11.1 简谐振动	79
§ 11.2 阻尼振动	91
§ 11.3 受迫振动与共振	93
§ 11.4 简谐振动的合成	95
思考题 11	105

习题 11	106
第 12 章 波动	110
§ 12.1 波动的基本概念	111
§ 12.2 波动的描述	113
§ 12.3 波动方程	120
§ 12.4 波的能量传输	123
§ 12.5 波的干涉	128
§ 12.6 驻波	133
§ 12.7 多普勒效应	138
§ 12.8 电磁波	143
思考题 12	147
习题 12	148
物理原理与现代技术(F)——超声、次声与噪声	152
第 13 章 光的干涉	157
§ 13.1 光波的相干叠加	158
§ 13.2 杨氏双缝干涉	165
* § 13.3 光场的时空相干性	172
§ 13.4 薄膜干涉	177
§ 13.5 迈克耳孙干涉仪	190
思考题 13	192
第 14 章 光的衍射	193
§ 14.1 光的衍射现象与惠更斯-菲涅耳原理	194
§ 14.2 单缝的夫琅禾费衍射	197
§ 14.3 光栅的夫琅禾费衍射	204
§ 14.4 圆孔衍射与光学仪器的分辨率	212
§ 14.5 X 射线的晶体衍射	216
思考题 14	219
物理原理与现代技术(G)——激光全息术	220
第 15 章 光的偏振	229
§ 15.1 自然光和偏振光	230
§ 15.2 偏振片的起偏与检偏	233
§ 15.3 反射和折射时光的偏振	237
§ 15.4 双折射起偏振法	239
* § 15.5 椭圆偏振光和圆偏振光	243
* § 15.6 偏振光的干涉及应用	245

思考题 15	252
习题 13、14、15	252

第五篇 近代物理学

第 16 章 狭义相对论基础	259
§ 16.1 狭义相对论产生的历史背景	260
§ 16.2 狭义相对论的基本假设与洛伦兹变换	263
§ 16.3 狭义相对论的时空观	266
§ 16.4 相对论的速度变换	275
§ 16.5 狭义相对论动力学简介	278
思考题 16	287
习题 16	288
第 17 章 量子力学的实验基础	290
§ 17.1 黑体辐射	291
§ 17.2 光电效应	295
§ 17.3 康普顿效应	300
§ 17.4 玻尔的氢原子理论	303
§ 17.5 实物粒子的波粒二象性	308
思考题 17	312
第 18 章 量子力学初步	314
§ 18.1 微观粒子状态的描述——波函数	315
§ 18.2 薛定谔方程	322
§ 18.3 一维定态问题	326
§ 18.4 氢原子的量子理论	332
§ 18.5 电子的自旋 四个量子数	339
§ 18.6 多电子原子系统的壳层结构	341
§ 18.7 固体的能带理论	347
§ 18.8 激光	355
思考题 18	365
习题 17、18	365
物理原理与现代技术(H)——扫描隧道显微镜	368
参考文献	371
附录 诺贝尔物理学奖颁发情况一览表	372
部分习题答案	382

第三篇

热 学

热学(thermal physics)是研究物质热运动的规律及其应用的学科,它涉及热运动对物质宏观性质和物态转变的影响以及热运动与物质其他运动形式之间相互转化等范围广泛的问题.作为物理学的一个分支学科,热学理论不仅被应用在物理学的各个领域,而且也被广泛地应用于化学、气象学、天体物理学、近代电子学、冶金学及其他自然科学领域.热学理论是具有普遍意义的基础理论,对许多不同学科和技术领域均有重要的实际意义.

按照物质的微观结构理论,自然界的宏观物体都是由大量微观粒子(分子、原子等)组成的,而且这些微观粒子在不停息地运动着,每个粒子的运动都具有随机性.按照现代观点,热在本质上是大量微观粒子随机运动的整体表现,故将这种运动称为热运动.热运动的随机性使得我们无法跟踪每一个分子的运动而探究其因果规律,但它却服从一定的统计规律.物质体系的宏观热学规律与这些统计规律之间存在着某种必然的联系,这就使得热学形成它自己独特的研究方法.

按照研究方法的不同,热学形成了它的宏观理论和微观理论.热学的宏观理论叫做热力学(thermodynamics),它以实验事实为依据,从功能观点出发,通过逻辑推理和演绎,归纳总结出物质各种宏观热学性质之间的关系以及宏观过程进行方向和限度的规律.由于它是以客观实验事实为基础的,故其相关结论是可靠的.热力学的缺陷在于它对热现象及其规律的描述是唯象的,对其缺乏内在的本质的认识.热学的微观理论叫做统计物理学(statistical physics),它从物质的微观结构出发,以每个分子所遵循的力学规律为基础,运用统计方法,找出宏观量与微观量之间的关系,以确认宏观热学规律的本质.统计物理学揭示了宏观现象

的微观本质,对探索未知领域具有一定的导向作用.其缺陷在于它以统计基本假设为基础,所得结果需要实验验证.热学的这两种理论分别从不同角度研究物质的热运动,它们彼此联系,相辅相成,殊途同归.

本篇阐述统计物理学和热力学的基本概念和基本方法.考虑到分子之间的相互作用对探讨问题所带来的复杂性,为了简化问题,突出重点,除了具有普遍性的概念外,本篇仅以最简单的热力学体系——气体作为具体的讨论对象.

第 9 章

气体动理论



大大小小的各式气球五彩缤纷,或悬挂条幅,或扶摇直上,具有浓厚的喜庆色彩.对于气球人们司空见惯,但是,你是否深思过,气球中气体的压强是怎么产生的,你能否从微观角度对气体的压强做出科学的解释.理想气体压强的定量研究,要用到平衡态的概念,要用到统计基本假设,还要运用统计平均的方法,建立微观量与相应宏观量之间的联系,非常集中地体现了统计物理学的思想及处理问题的基本方法.统计物理学的基本概念和方法以及有关的统计规律,这正是本章所要介绍的内容.

统计物理学 (statistical physics) 是研究物质热运动的微观理论. 它以对微观粒子群体的统计规律来描述物质系统的宏观现象及性质. 认为物质的宏观性质是构成系统的大量微观粒子热运动 (thermal motion) 的集体表现, 而描述系统宏观性质的宏观量 (macroscopic quantity) 则是表征粒子个体特性的微观量 (microscopic quantity) 的统计平均值. 统计物理的雏形形成于对气体运动的研究, 本章讨论的气体动理论 (kinetic theory of gases) 是统计物理中最基本最简单的内容. 我们首先介绍统计基本概念, 然后介绍几个有关气体分子热运动的统计规律, 并阐述相应宏观量的统计意义, 以期使读者对统计物理学的内容和方法有一个基本的了解.

§ 9.1 统计物理学的基本概念

9.1.1 统计规律

自然界的各种过程往往是复杂的, 有许多事件的结果存在着不确定性. 按照结果是否可以预知, 我们将事件分为两类. 在一定条件下, 事件可能出现的结果不止一个, 而究竟哪一个结果出现, 事先无法确知的事件称为随机事件 (也叫偶然事件); 在一定条件下必定发生的事件则称为必然事件.

在给定条件下对大量偶然事件进行统计而发现的规律, 亦即大量偶然事件集体所遵从的规律叫做统计规律 (statistical regularity). 例如, 一对夫妻究竟生男还是育女事先谁也无法确知, 但是全国人口普查结果表明, 总人口中男女性别的分布大约各占 $1/2$, 这就是一个统计规律. 又如抛掷一枚硬币, 究竟正面朝上还是反面朝上, 这完全是随机的. 如果抛掷的次数足够多, 你就会发现正反两面朝上的次数大约各占 $1/2$, 这也是一个统计规律. 很显然, 这个统计规律是由硬币的形状所决定的. 如果我们抛掷的是游戏用具色子, 其形状为正六面体, 六个面上分别刻有一、二、三、四、五、六个点. 若抛掷次数足够多, 如 100 000 次, 就会发现每个面朝上的次数非常接近, 大约各占总抛掷次数的 $1/6$, 这个统计规律显然取决于色子本身的形状.

热学的研究对象是由大量微观粒子所组成的热力学系统, 这些微观粒子的运动状态千差万别, 并且由于相互碰撞, 每个粒子的状态都在频繁地改变着, 它们的运动完全是随机的, 我们不可能对每个粒子的运动做出精确的描述, 正如我们无法确定某时刻系统中每个分子的速率各是多少, 但是在给定条件 (比如给定体积和温度) 下, 可以确定具有什么速率的分子数目有多少. 显然, 分子数按照速率快慢的分布就像一张分子运动状况的调查统计表, 它所反映出的规律就是统计规律. 统计规律反映了大量偶然事件中所存在的必然性, 这种必然性是由组成系统的粒子本身的性质所决定的.

综上所述, 我们不难看出统计规律具有如下特点:

● 统计规律只有对大量偶然事件的统计才是正确可信的,对少量偶然事件无规律可言.

● 统计规律永远与涨落相伴随.对随机事件所做的多次重复实验中,每次的实验结果与统计平均值都有一定的偏差.我们把随机变量相对于它的统计平均值所表现出的随机起伏叫做涨落(fluctuation),涨落现象是统计规律的基本特征之一.统计事件的量越大,涨落相对越小.

9.1.2 概率

1. 概率的定义

概率是统计学中的一个基本概念,它是对偶然事件发生的可能性大小的量度.其定义如下:

在 N 次试验中,如果事件 x_i 出现了 N_i 次,当 N 无限增大时, N_i/N 的极限就叫做事件 x_i 出现的概率(probability),以 p_i 表示,则

$$p_i = \lim_{N \rightarrow \infty} \frac{N_i}{N} \quad (9.1)$$

2. 概率密度

用来描述随机事件的变量叫做随机变量,随机变量有离散随机变量和连续随机变量之分.例如,移动通讯台单位时间内收到的呼叫次数,学生的考试分数等都是离散随机变量;而系统中分子热运动的速率却是连续随机变量,在经典理论中,它可以取从零到无穷大范围内的任何值.对于随机变量离散分布的随机事件,我们可以说随机变量 x_i 取某一精确值的概率是多少,但是当随机变量连续时,却不能说随机变量具有某一精确值的概率是多少.其原因就在于实际测量总是有误差的,如一维随机变量 x 的测量值为

$$x = \bar{x} + \Delta x$$

这就是说,对于连续随机变量的每一次测量,都只能测出它们的值在哪一个区间,而不能得到它们的精确值.无论是实验观测还是理论分析,都只能得到随机变量在某一区间中的概率,而不是取某一精确值的概率.

对于一维随机变量 x ,我们进行 N 次观测,若 x 的值在 $(x, x + dx)$ 区间内出现的次数为 dN ,则随机变量 x 在该区间中出现的概率为 $\frac{dN}{N}$.可以设想这一概率与区间宽度 dx 成正比,可表示为

$$\frac{dN}{N} = f(x)dx$$

由此得

$$f(x) = \frac{dN}{Ndx} = \frac{dp(x)}{dx} \quad (9.2)$$

显然, $f(x)$ 表示随机变量在 x 附近的单位区间隔内出现的概率, 它反映出事件概率 $p(x)$ 随 x 变化的规律, 故称之为概率密度, 也叫概率分布函数 (distribution function).

在经典物理统计中随机变量(如速率、速度分量和能量等)多为连续分布, 且事件的随机变量往往不止一个, 故概率分布函数也常是多元函数.

概率密度是概率论的基本概念, 知道了概率密度, 便可由它求出随机变量落入任何一个区间范围的概率以及随机变量的统计平均值(详见后面的介绍).

3. 概率的归一化条件

在所有可能发生的事件中, 各事件出现的概率的总和等于 1 (所有百分率的总和为 1), 即

$$\sum_{i=1}^n p_i = p_1 + p_2 + \cdots + p_n = 1 \quad (9.3)$$

这一结论叫做概率的归一化条件 (normalizing condition). 对于连续随机变量, 概率的归一化条件可用概率密度 $f(x)$ 表示为(设 x 的取值范围为 $0 \sim \infty$)

$$\int_0^{\infty} f(x) dx = 1 \quad (9.4)$$

9.1.3 统计平均值

统计物理认为, 物质系统的宏观热学特性是构成系统的大量微观粒子热运动的集体表现, 也就是说, 描述系统热学特性的宏观量是构成系统粒子的相应微观量的统计平均值. 显然, 确定微观量的统计平均值是统计物理学的基本任务之一.

随机变量的统计平均值与随机变量出现的概率密切相关, 例如, 在测量某一随机变量 x 的过程中, x_1 出现了 N_1 次, x_2 出现了 N_2 次, $\cdots$, x_n 出现了 N_n 次, 则变量的总和为

$$x_1 N_1 + x_2 N_2 + \cdots + x_n N_n = \sum x_i N_i$$

总测量次数为

$$N_1 + N_2 + \cdots + N_n = N$$

故被测量的统计平均值 $\bar{x}$ 为

$$\bar{x} = \frac{\sum x_i N_i}{N} = x_1 \frac{N_1}{N} + x_2 \frac{N_2}{N} + \cdots + x_n \frac{N_n}{N} = x_1 p_1 + x_2 p_2 + \cdots + x_n p_n$$

亦即随机变量 x 的统计平均值 (statistical mean value) 为

$$\bar{x} = \sum x_i p_i \quad (9.5)$$

式中 x_i 为随机变量的可能取值, p_i 为 x_i 出现的概率.

式(9.5)表示, 一个随机变量的统计平均值等于该变量的各种可能取值与其相应概率乘积的代数和. 当随机变量 x 为连续随机变量时, 式(9.5)中的求和要用积分式来代替, 即

$$\bar{x} = \int x f(x) dx \quad (9.6)$$

9.1.4 热力学系统的状态及其描述

与经典力学中的“隔离体法”相类似, 在热学中, 被人为地分割出来以对它做热力学分析的物质体系称为热力学系统 (thermodynamic system), 简称为系统, 以下我们来说明系统状态的分类以及系统状态的描述方法等问题.

1. 宏观态及其宏观参量

系统的状态可以分为宏观状态(简称宏观态)和微观态, 而宏观态 (macroscopic state) 又有平衡态与非平衡态之分.

① 平衡态与非平衡态: 为了便于说明平衡态和非平衡态的概念, 我们设想有一封闭容器, 内有隔板把容器分成 A、B 两部分. A 部分充有气体, B 部分为真空. 当把隔板去掉之后, A 部分的气体分子就会向 B 部分运动. 在此过程中, 系统内各处气体的状态, 如分子数密度、压强和温度等是不相同的, 而且是随时间变化的, 这样的状态叫做非平衡态 (non-equilibrium state). 如果系统不受外界影响 (即系统与外界既无能量交换, 也无物质交换), 那么经过一定时间后, 系统内各处的状况将不再随时间变化. 这种不受外界影响的孤立系统, 其内部各处的宏观特性稳定不变的状态叫做平衡态 (equilibrium state).

对于实际的热力学系统来说, 绝对不受外界影响是不可能的, 因而系统内各处的宏观性质绝对不变的状态也是不存在的. 故平衡态只是一种理想状态, 它是对一定条件下气体处于相对稳定状态的理想化. 只要系统由其初始的非平衡态达到平衡态所经历的时间, 亦即系统的弛豫时间远小于扰动或操作过程的特征时间, 平衡态就可以很好地实现.

还应指出的是, 热力学中的平衡态概念与力学中的平衡状态是不相同的. 处于平衡态的热力学系统, 虽然其宏观性质不随时间变化, 但系统内大量微观粒子实际上仍在不停息地运动着, 只是大量粒子运动的平均效果不随时间变化. 显然, 平衡态是一种热运动平衡状态.

② 状态参量与状态方程: 处于平衡态的热力学系统, 其宏观性质稳定不变, 系

统内无宏观粒子流动,压强均匀,温度处处相同.显然,热力学系统的平衡态可以用一组状态参量来描述.一般来说,系统的平衡态需要用几何参量(体积 V)、力学参量(压强 p)、化学参量(描述系统化学组成的变数以及各种化学成分的质量或物质的量)、电磁参量(系统所处电磁场的电场强度或磁场强度)等来描述.这些表征平衡状态参量叫做状态参量(非平衡态没有确定的状态参量).对于一定量的某种化学纯的气体,且不涉及电磁现象时,系统的平衡态可以用 (p, V, T) 三个状态参量来描述.

在平衡状态时,系统的状态参量之间并不相互独立,它们之间满足一定的关系.状态参量之间所满足的关系式叫做状态方程(equation of state).状态方程可由实验来确定,理想气体(ideal gas)的状态方程为

$$pV = \frac{M}{\mu}RT \quad (9.7)$$

式中的 p 、 V 、 T 分别为气体的压强、体积和热力学温度, M 和 μ 分别为气体的质量和摩尔质量, R 为普适气体常量(universal gas constant),其值为

$$R = 8.31 \text{ J}/(\text{mol} \cdot \text{K})$$

由式(9.7)可以看出,对一定质量的气体,其状态参量只有两个是独立的.故只须用两个参量(如 p 、 V)便可确定气体的平衡状态.以 p 、 V 为坐标轴构成的图形称为 $(p-V)$ 图, $(p-V)$ 图中的每一点给出一组确定的 p 、 V 值,故 $(p-V)$ 图上的每一点都表示一个平衡态.同理也可作出 $(T-V)$ 图、 $(p-T)$ 图等.这些图中的每一点也都表示一个平衡态.

设系统的总分子数为 N , 摩尔分子数为 N_A , 每个分子的质量为 m , 则气体的总质量和摩尔质量可表示为

$$M = Nm, \quad \mu = N_A m$$

将这两个关系式代入式(9.7)可得

$$p = \frac{N}{V} \frac{R}{N_A} T$$

式中 $\frac{N}{V}$ 为气体分子数密度,以 n 表示,即 $n = \frac{N}{V}$; R 和 N_A 这两个普适常量之比为另一个常量,称之为玻尔兹曼常量,以 k 表示,即

$$k = \frac{R}{N_A} = 1.38 \times 10^{-23} \text{ J/K}$$

这样,理想气体的状态方程便可改写为

$$p = nkT$$

(9.8)

综上所述,处于平衡态的宏观态可以用一组完备的状态参量(宏观量)来描述.系统的宏观态与一组完备的宏观量是一一对应的,一组确定的宏观量对应一个确定的宏观态.热力学所涉及的就是系统的宏观态.

2. 系统的微观态

平衡态是一种热动平衡状态,处于平衡态的热力学系统,虽然其宏观状态不随时间变化,但组成系统的大量微观粒子仍在不停息地运动着,它们的位置、速度仍在不断地变化着.我们把组成系统的所有微观粒子的运动状态的任一种可能组合叫做系统的一个微观态(microscopic state).在任一时刻 t ,系统中任一微观粒子的坐标 r_i 和速度 v_i 都有其确定值,它们的组合

$$(r_1, v_1; r_2, v_2; \cdots; r_i, v_i; \cdots; r_N, v_N)$$

就确定了系统的一个微观态.如果任意两个粒子交换了它们在状态空间的位置,则系统的宏观状态不变,但却构成了系统的一个新的微观态.很显然,一个确定的宏观态,可以有很多个不同的微观态与之对应,或者说一个宏观态包含了众多可能的微观态.

3. 宏观态的统计描述——概率分布函数

如前所述,系统的宏观态可以用一组宏观参量来描述,这正是热力学所要涉及的问题.为了揭示热力学系统的状态及其演变规律的微观本质,故需要建立从微观角度描述系统状态的理论,这正是统计物理所要解决的问题.

处于平衡态下的热力学系统,一个确定的宏观态可以有很多个微观态与之对应.由于组成热力学系统的微观粒子是大量的,故对应一个宏观态的微观态的数目也是大量的,而且这些微观态还在进行极其复杂的变化.这使得我们无法跟踪所有粒子而研究其因果规律,不可能、也没有必要精确确定系统的微观态极其复杂的变化.事实上,大量微观粒子的复杂运动以及由它们所构成的微观态完全是随机事件.而随机事件所服从的统计规律可以用概率分布函数(即概率密度)来描述.例如,对于一个由 N 个分子所构成的气体系统来说,在给定的宏观条件(p, V, T)下,虽然我们无法对每个分子的速率做出精确的描述,但气体分子按速率大小的分布却是一个确定的统计规律.如果在速率区间($v, v + dv$)内出现的分子数为 dN ,则气体分子以速率 v 为随机变量的概率分布函数为

$$f(v) = \frac{dN}{Nd v}$$

在给定的宏观条件下, $f(v)$ 是完全确定的.显然,气体系统的一种宏观状态对应一种概率分布函数.知道了系统的概率分布函数,就可以运用统计方法,求出相应随