

高等学校教学用书

# 热 学

李 平 编

北京师范大学出版社

高等学校教学用书

热 学

李 平 编

•

北京师范大学出版社出版

新华书店北京发行所发行

天津宝坻黎明印刷厂印刷

•

开本: 850×1168 1/32 印张: 11.625 字数: 200 千

1987 年 6 月第 1 版 1987 年 6 月第 1 次印刷

印数: 1—6 000

统一书号: 13243·139 定价: 1.90 元

## 内 容 简 介

本书是为适应当前物理教育的发展所编写的一本改革型的教材。在编写过程中注意以现代教育理论为指导。主要是在提高学生能力、反映学科发展、有利于自学等三个方面进行了探索。

本书内容共有：概念与方法，温度与理想气体状态方程，热力学第一定律，热力学第二定律，气体分子速度分布，能量的分布，非平衡过程，实际气体与相变，表面现象等九章。特点是取材较新，重视方法，深入浅出，便于自学。

本书可做为高等学校物理专业的教材或参考书，也可作教师进修学院、师专、函授等的教材或教学参考书，也适合自学者学习之用。

## 前 言

当前教育改革的核心问题，主要表现在培养人才的规格上。在高等学校更强调培养具有开创精神的人材，以适应高科技时代的发展和我国四个现代化建设的需要。教材的改革也符合这一目标，改革所涉及的问题是多方面的，做为一个尝试我们在以下的三个方面做了一些探索，并以此为指导编写这本教材。

- 一、如何提高学生的能力水平。
- 二、如何反映学科的发展。
- 三、如何有利于学生自学。

学生的能力是在掌握知识和技能的基础上，通过一定的实践过程迁移而形成的。良好的知识结构应有利于理解、记忆和应用。这就要求知识要具有一定的准确性、逻辑性和时代性。技能的基础是各种方法。在基础物理的教学中，所提供的物理思想和物理方法，对于培养学生获取和开拓知识的能力是不可缺少的一个方面。因此，从培养能力的角度出发，在教材的编写过程中不只是注意知识体系，同时也注意方法体系，体现二者的统一。理论联系实际是使学生获得感性知识、培养解决问题能力的一个重要方面。因此也是教材编写过程中考虑的一个因素。

新的科学成就反映在相应学科的基础课教材中，是需要时间的。随着科技发展速度的增大，这个周期越来越短，在目前只不过是几年。我国传统的普物《热学》教学大纲对学科发展的反映是很不够的，基本上还是50年代的模式。例如，热物理的系统方法已经成功的被移植到其他领域，“熵”已经不是物理学或自然科学的专有概念。而在传统大纲中有关熵的内容却很少，甚至可

以不讲。又如，1902年吉卜斯的《统计力学原理》的出版，说明在本世纪初统计力学的方法体系便已经形成。发展至今已经成为现代物理学中的普通常识。所以，最近二十年来国外的不少普物教材都编入有关统计力学方法的内容。而我国的大纲中却反映很少。以上只是个别的例子。但也足以说明在反映学科发展方面的差距，在教材中如何反映学科的发展，还要做许多工作，我们在编写过程中所做的只是一些初步的努力。

知识信息量的激增已促使传统的教学方法发生变化。从发展来看，高等学校的教学过程中学生自学的成份将越来越多。为了适应这一情况，在编写过程中注意的另一个方面就是使教材的知识结构与学生认知结构的发展相适应，以便于自学。

具体措施如下。

1. 在体系方面，为了使学生便于掌握研究热运动的两种方法，采取了宏观理论与微观理论分别讲述的方案。宏观理论的逻辑结构与《力学》的很相似，而且是微观理论的基础，所以先讲宏观理论。微观理论的方法要涉及统计规律性，这对于学生来说是崭新的概念，所以放在后面讲为宜。最后几章体现了两种方法在解决实际实际问题中的结合和相互补充。

2. 统计规律性是热运动的最基本特点。这个特点在教材的各个部分都注意给予强调。在微观理论部分，适当地引入统计力学的方法。为此增加了“概率论基本知识”一节内容。

3. 在教材中适当地引入新的概念和方法。例如，在热力学部分引入了熵产生的概念，并将其应用于平衡态。增加了有关熵的意义和性质的内容。在微观部分，改变过去普物中只介绍以分子间“力”为出发点的动力学方法，而是较多地用“态”来描述分子运动，并用统计的方法建立宏观量与微观量间的关系。从而适当地介绍了统计力学的方法。在“非平衡过程”一章中，对现代的进化论物理学的基础“耗散结构”做了初步的介绍，可使学生

了解只讨论“退化”现象的经典热力学的局限性。表面张力一章改为表面现象是适应表面科学的发展。

4. 为了适应知识信息量激增所引起的教学方法上的变化,本教材在知识结构上和叙述方法上做了一些努力。

(1) 注意知识的直观性和实践性。例如,基本概念和规律尽量从客观现象归纳出来,对实验的讲述尽量具体,如实验装置,实验曲线,数据表格,尽量给出准确的数据和采用原始数据。

(2) 注意知识的逻辑结构。尽量使新的概念和理论建立在已有知识的发展上,因此,有利于产生学习中的正迁移。在注意实验的同时,也注意理论的指导作用。

(3) 注意知识的精确性。每引入一个新的概念都尽量给出明确的定义。每一个定律、定理的讲述均尽量说明其存在条件和适用范围。对某些疑难、易混或有争议的问题,尽量不回避而是进行一些有益的讨论。

(4) 注意深入浅出。本教材讲述的概念与理论比传统大纲加深了。使用的数学工具除概率加法和乘法外,其他与传统大纲相同。为了便于自学,在讲述的深入浅出方面做了一定的努力。

(5) 增加了助学环节。例如,每一章均有内容小结、基本概念、基本规律、习题指导、思考题、习题等内容,以帮助学生自学。

我国的高等教育研究刚刚开始,这种研究深入到具体学科还待开展。用教育理论为指导进行教材改革,在目前还只是一种尝试。改革是多方面的,我们只是在某些方面做了一些努力。考虑到现有的教学情况和遵循从量变到质变的原则,为了使改革教材能与传统的教学相衔接,使较多的教师愿意试用,我们并未完全抛弃原来的大纲。但是有一些内容的改变还是较大的。

由于编者经验不足,可能存在不少问题,请读者提出宝贵意见,共同探讨,以便进一步改进。

编者

# 目 录

<b>第一章 方法与概念</b> .....	1
1-1 热力学的对象 .....	1
1-2 宏观态 微观态 平衡态 .....	2
1-3 宏观理论与微观理论 .....	4
1-4 统计规律性 .....	5
1-5 系统的状态参量 .....	8
1-6 过程 .....	10
1-7 功 .....	11
1-8 绝热过程 热量 .....	14
1-9 热学发展简史 .....	16
本章小结 .....	18
思考题 .....	22
<b>第二章 温度与理想气体状态方程</b> .....	25
2-1 热力学第零定律 温度 .....	25
2-2 状态方程 .....	27
2-3 温标 .....	28
2-4 理想气体温标 .....	30
2-5 定标点的改变 .....	34
2-6 理想气体状态方程 .....	37
2-7 混合气体的状态方程 .....	39
本章小结 .....	45
思考题 .....	48
习题 .....	49
<b>第三章 热力学第一定律</b> .....	51
3-1 可逆过程 .....	51
3-2 热量的量度 热库 .....	55

3-3	焦耳实验 .....	56
3-4	热力学第一定律 .....	58
3-5	不同过程的热容量 焓 .....	61
3-6	理想气体的内能与热容量 .....	63
3-7	热力学第一定律对理想气体的应用 多方过程 .....	67
3-8	循环过程的效率 .....	78
3-9	卡诺循环 .....	79
3-10	致冷机 .....	84
3-11	奥托循环 .....	87
	本章小结 .....	90
	思考题 .....	97
	习题 .....	98
<b>第四章</b>	<b>热力学第二定律</b> .....	<b>101</b>
4-1	实际过程的不可逆性 .....	101
4-2	热力学第二定律 .....	102
4-3	卡诺定理 .....	106
4-4	热力学温标 .....	109
4-5	第二定律的数学表示 熵 .....	111
4-6	熵流与熵产生 自由能 .....	124
4-7	热力学基本方程 .....	131
4-8	熵的性质与意义 .....	134
4-9	热力学第三定律 .....	137
	本章小结 .....	138
	思考题 .....	143
	习题 .....	144
<b>第五章</b>	<b>气体分子的速度分布</b> .....	<b>146</b>
5-1	实验基础 .....	147
5-2	概率的基本概念 .....	151
5-3	理想气体的统计特性 .....	161
5-4	理想气体的压力 .....	172



5-5	温度的微观意义 .....	178
5-6	麦克斯韦分布律 .....	182
5-7	特征速率 .....	187
5-8	麦克斯韦分布律的实验证明 .....	197
	本章小结 .....	200
	思考题 .....	206
	习题 .....	208
<b>第六章</b>	<b>能量的分布 .....</b>	<b>210</b>
6-1	分子的能态 .....	210
6-2	麦克斯韦-玻尔兹曼分布律 .....	212
6-3	配分函数 .....	215
6-4	玻尔兹曼分布律 重力场中的气体 .....	217
6-5	能均分定理 .....	220
6-6	理想气体的内能与热容量 .....	225
6-7	能均分定理的应用 .....	229
6-8	涨落 .....	230
	本章小结 .....	234
	思考题 .....	233
	习题 .....	233
<b>第七章</b>	<b>非平衡过程 .....</b>	<b>240</b>
7-1	气体输运过程的宏观规律 .....	240
7-2	分子的碰撞和平均自由程 .....	243
7-3	气体输运过程的分子理论 .....	248
7-4	稀薄气体 .....	259
7-5	耗散结构 .....	262
	本章小结 .....	265
	思考题 .....	270
	习题 .....	270
<b>第八章</b>	<b>实际气体与相变 .....</b>	<b>271</b>
8-1	实际气体 .....	271

8-2	实际气体的内能	281
8-3	物态	285
8-4	相变	292
8-5	单元气-液二相系	294
8-6	气-液二相的等温相变	299
8-7	范德瓦尔斯等温线	304
8-8	克拉珀龙-克劳修斯方程	308
8-9	固-液相变	310
8-10	固-气相变	317
8-11	气体的液化与低温的获得	313
	本章小结	320
	思考题	325
	习题	326
<b>第九章</b>	<b>表面现象</b>	<b>327</b>
9-1	表面	327
9-2	液体的表面张力——液-气界面	328
9-3	表面能	331
9-4	弯曲液面	335
9-5	润湿现象——液-固界面	339
9-6	液面上的膜——液-液界面	344
9-7	吸附作用——固-气界面	348
	本章小结	350
	思考题	354
	习题	355
	习题答案	356

# 第一章 方法与概念

## 1-1 热力学的对象

物质的运动形式是多种多样的。力学所研究的是物体的机械运动，即研究宏观物体的整体运动。其应用的模型为质点、刚体等，并不涉及物体的内部结构和运动。

实际上，任何物体不但存在整体的运动，同时也存在内部的运动。我们已知，任何宏观物体都是由大量的微观粒子（分子或其它粒子）构成的。这些微观粒子不停地进行着无规的运动。物体内部大量微观粒子的无规运动叫做热运动。热学便是研究热运动的一门学科。热学所研究的具体对象就是由大量微观粒子组成的宏观客体。在热学中我们把所研究的这一部分客体叫做系统。与热学系统相互作用着的周围环境叫做外界。热学的内容便是研究热学系统的性质、变化过程、及其与外界的相互作用。

系统的选择可根据处理问题的方便而定。系统的边界可以是真实的，也可以是假想的；可以是静止的，也可以是运动的。边界面的尺寸和形状都可以随时间变化。

例如，一气体封闭在某容器中，如果把此气体看做是所研究的对象，它就是一个热学系统，而限制气体分子活动空间的容器及其外的大气便属于外界。在方法上，可以把外界归结为加在系统上的一定的外界条件。

通常可以根据加在系统上的外界条件来对系统进行分类。例如，与外界没有任何相互作用的系统叫做孤立系统；与外界只有

能量交换而无物质交换的系统叫做封闭系统；与外界有能量和物质交换的系统叫做开放系统。

## 1-2 宏观态 微观态 平衡态

当一个系统选定后，下一步就是要用适当的物理量来描述这个系统的性质。一般说来有两种描述方法：即微观描述和宏观描述。

**宏观描述** 对于一个选定的热学系统，其所表现的宏观性质都是可以测量的。例如封闭在某一容器中的气体，其体积、压力等宏观性质便都是可以测量的。这些用以描述系统宏观性质的量叫做宏观量。用宏观量来描述系统状态的方法叫做宏观描述。它所确定的态叫做宏观状态。通常我们也把描述宏观态的宏观量叫做状态参量。宏观描述的特点是不需要知道具体物质的结构。在某些特殊的情况下，一个系统的宏观态只需有限的少数几个量便可以完全确定。

**微观描述** 宏观系统是由大量微观粒子组成的，只要是给出所有每个粒子的状态则此时这个系统的状态就确定了。我们把这种意义下的状态叫做系统的微观状态；把这种描述方法叫做微观描述。微观描述的特点是必须首先给出物质结构和微观粒子的模型。微观描述所需的变量是非常之多的。

**非平衡态** 当一个系统中存在有某种宏观量（如质量、能量、动量、电量等）的流时，则此时系统的态叫做非平衡态。系统处于非平衡态时，一般说来其宏观性质在各点上是不相同的，且随时间而变化。

**稳态** 是非平衡态的一种特殊情形。在非平衡态中，虽然有宏观量的流，但系统中各点的宏观性质不随时间变化时的态叫做稳态。

**平衡态** 当系统不存在宏观量的流时，系统所处的态叫做平衡态。当系统处于平衡态时，其中各点的宏观性质不再随时间而变化。

系统处于平衡态时，其中各点的宏观性质不一定相同。例如，在重力场中处于平衡态的气体；由水及其蒸气组成的系统处于平衡态时，它们中各点的宏观性质也不相同。

孤立系的一个重要特点就是趋向于平衡，孤立系经过足够长的时间后，最后总能达到平衡态。非孤立系在一定条件下也可以处于平衡态。事实上，孤立系中的一个子系统就是非孤立系。当此孤立系处于平衡态时，这个子系统显然也是处于平衡态。

经验表明，在外场可以忽略的情况下，系统处于平衡态时各点的状态参量的数值是相同的，此时只需少数几个状态参量便可完全确定系统的宏观态。虽然系统的宏观态处于一个确定的平衡态，但其微观态还是不断发生变化的。

**弛豫时间** 系统从非平衡态到达平衡态所经历的过程叫做弛豫过程，弛豫过程所需的时间叫做弛豫时间。在外界条件不变的情况下，弛豫时间的长短决定于系统的性质和弛豫机制。例如，气体压力的弛豫时间为 $10^{-10}$ 秒左右，扩散则需要10秒以上。

**经典粒子与量子粒子** 在物理学中描述微观粒子的运动规律时有两种模型：一种模型叫做经典粒子，在这种模型中粒子的运动符合经典力学规律，即遵从牛顿运动方程；另一种模型叫做量子粒子，在这种模型中粒子的运动符合量子力学规律，即遵从薛定格方程。

实际上，微观粒子更符合于量子粒子模型。经典粒子只是量子粒子在一定条件下的近似。

量子力学的基本出发点就是粒子的波、粒二象性，即一个粒子在运动过程中同时既有粒子的性质又有波动的性质。这些均已为电子衍射、光电效应等实验所证实。根据当前所流行的理论解释为：粒子运动所表现的波性为一种几率波，即粒子在运动过程中出现的几率是按波动的规律来分布的。

根据粒子的波、粒二象性，它们的坐标和动量不能同时无限精确地给

定，其不确定性满足测不准关系

$$\Delta x \cdot \Delta p_x \geq h$$

其中  $x$  为坐标， $p_x$  为动量， $h = 6.626 \times 10^{-34} \text{J} \cdot \text{s}$  为普朗克常数，是一个很小的量。

经典粒子在运动过程中，其状态永远是连续变化的，因此其能量只具有连续谱。与经典粒子不同，量子粒子在运动过程中其状态不是永远连续变化的，在某些情况下可以出现分立的态，此时它的能量具有分立的值  $\epsilon_1, \epsilon_2, \epsilon_3, \dots$ ，而形成分立谱。也就是说能量是量子化的。

当粒子的尺度和运动范围比较大时，测不准关系中所表示的不确定性比该粒子的坐标和动量测量值的误差小得多时，便可近似地当做经典粒子。

在经典粒子的情况下用给定的每个粒子的坐标和动量来确定系统的微观态。在量子粒子的情况下，由于有测不准关系便不能这样做，此时只能用给定每个粒子的能量来确定系统的微观态。如果能量是量子化的而形成能级，则每个粒子状态决定于它处在哪一个能级上。

### 1-3 宏观理论与微观理论

根据对热学系统描述方法的不同，相应地发展了两种理论：一种是宏观理论叫做热力学；另一种是微观理论叫做统计力学。它们的特点如下所述：

**热力学** 热力学方法是以宏观描述为基础，应用能量转换和守恒的观点，根据大量经验事实，经过归纳得出几个基本定律做为出发点的一种方法。热力学方法并不需要规定物质结构的具体模型，所以其所得的结果具有高度的可靠性和普遍性。

**统计力学** 统计力学方法是从宏观物体是由大量微观粒子组成这一事实出发，不需考虑每个粒子的个体行为，而认为物质的宏观性质是大量微观粒子运动的平均效果；宏观量是微观量的统计平均值。统计力学方法须给出物质结构和微观粒子模型，因此其所得的结果可以给出具体物质的特性。

由于热力学的可靠性与普遍性，我们可以应用热力学理论研究一切宏观系统，但是由于从热力学所得到的结论是关于宏观系统的共同性质，而与具体物质的结构无关，因此不可能导出物质的具体特性。在实际应用中还必须结合实验观测的数据才能得到具体的结果。

统计力学在对物质的微观结构做出某些假设之后，可以得出具体物质的特性，但由于对物质微观结构所做的往往是简化的模型假设，所得的理论也往往是近似的。

因此，在应用中这两种理论方法是相辅相成的。

## 1-4 统计规律性

热力学方法与统计力学方法虽然不同，但由于它们所研究的对象是相同的，所以它们之间存在着深刻的联系。这种联系的基础就是热运动所具有的统计规律性。

牛顿力学是遵循力学规律性的。在研究质点的运动时，根据牛顿动力学方程，只要是起始条件已知则以后任何时刻的状态都是可以确定的。这一特点是机械运动所特有的，叫做“动力学规律性”。但是对于由大量粒子所组成的热学系统来说情况就完全不同。如果对每一个粒子都列出牛顿动力学方程，则方程的数目非常之多，实际上是无法求解的。同时由于粒子之间的相互碰撞是无规的，在无规的碰撞中，每个分子如何运动则是偶然的，它们的起始条件也是无法一一确定的。虽然每个粒子如何运动是偶然的，但是对大量粒子的集体来说必然存在着某些平均的效果。例如，在一定的外界条件下，某一气体中每个分子有多大的速度是偶然的，但这些分子的平均速度则是一定的。

例如在观测气体的密度时，可以在气体中取一小体积  $\Delta V$  (图1-4-1)。由于分子的热运动，从微观的角度来看，在任何短

暂的时间中都有大量的分子出入于  $\Delta V$ ，所以  $\Delta V$  内的分子数是涨落不定的。但在相当长的时间中，虽然  $\Delta V$  内的分子数在不断地变化，其平均值却是稳定的，即等于  $n \cdot \Delta V$  ( $n$  = 分子数密度)

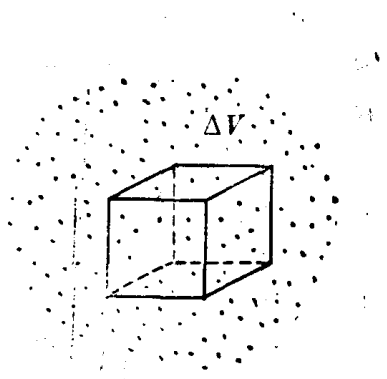


图 1-4-1

又例如观测气体对容器器壁所施加的压力<sup>①</sup>时，在器壁上取一个小面积  $\Delta A$  (图1-4-2)。从微观的角度来看，在任何短暂的时间中都有大量的分子与  $\Delta A$  碰撞，所以  $\Delta A$  所受的力是涨落不定的。但在相当长的时间中  $\Delta A$  所受力的平均值则是稳定的。

以上的例子都说明，客观世界普遍地存在这样一种现象，对于这种现象我们无法利用动力学规律性严格控制或准确预测。这种现象是属于偶然性质的，而必须从大量的观测中综合分析、归

① 从宏观角度来看，气体是一种流体。因此当把气体充满容器后，气体作用在器壁上的力必然与器壁正交。在流体力学中，把作用于受力面单位面积上的力叫做压力。在SI制中压力的单位是帕(Pa)。

$$1 \text{帕} = 1 \text{牛顿} \cdot \text{米}^{-2}$$

另外还有几种不同的单位，现将它们与帕的换算关系列表如下：

$$\text{大气压 (atm)} \quad 1 \text{atm} = 1.01325 \times 10^5 \text{Pa}$$

$$\text{厘米汞高 (cmHg)} \quad 1 \text{cmHg} = 1.33224 \times 10^3 \text{Pa}$$

$$\text{达因} \cdot \text{厘米}^{-2} (\text{dyne} \cdot \text{cm}^{-2}) \quad 1 \text{dyne} \cdot \text{cm}^{-2} = 0.1 \text{Pa}$$

$$\text{巴 (bar)} \quad 1 \text{bar} = 10^5 \text{Pa}$$

$$\text{克} \cdot \text{厘米}^{-2} (\text{g} \cdot \text{cm}^{-2}) \quad 1 \text{g} \cdot \text{cm}^{-2} = 98.0665 \text{Pa}$$

$$\text{工程大气压 (E-atm)} \quad 1 \text{E-atm} = 98066.5 \text{Pa}$$



纳出一些“大量现象”的规律来。偶然性的大量积累而导致必然性，这一规律就叫做统计规律性。

统计规律性是来源于大量的偶然性，大量粒子系统的运动所以符合统计规律性，只是由于它产生大量的偶然性。所以关键在于存在大量的偶然性。例如以投掷分币为例，投掷一次分币落在桌面后其正面朝上或背面朝上则是偶然的，但是将一个分币投掷1万次而积累统计的结果，正面或背面朝上的次数便都非常接近于5千次。同样，若将1万个分币同时投掷，也可得到同样的结果。这两种做法没有什么区别，都表现出大量偶然性的积累而产生必然性。

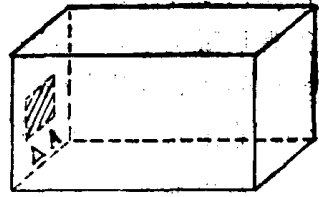


图 1-4-2

在自然和社会现象中，有一些现象，从其个别来看是偶然的、无规则的随机现象，但从其整体来看则呈现出一种严格的必然性和规律性。这是对大量偶然事件的整体起作用的规律，反映了这些事物整体的本质和必然的联系。

例如，在经典系统中，每一个别粒子的运动虽然服从动力学规律性，但当系统中包含的粒子数很多时，就导致在性质上全新的运动形式——热运动的出现。这里运动形式发生了从量到质的飞跃。

在“大量现象”中出现的这种新现象，其主要特点就是在一一定宏观条件下的稳定性。这是由统计规律性所制约的。有一种观点认为，在科学中应用统计的概念和方法仅仅是由于人们知识的不完备，随着测量的精确和认识的深化，并应用电子计算机这样先进的计算手段，便有可能把统计规律还原为动力学规律。这种观点实际上是否定了运动形式从量到质的变化，和因果关系的多样性。这种把一切运动规律都归结为动力学规律性的观点叫做“机械决定论”。在物理学中，动力学规律性和统计规律性具有同等重要的地位。一个适用于单个或少数的粒子，一个适用于大量粒子构成的系统，它们之间互相补充，而不能相互取代。

下面再来讨论一下宏观量与微观量的关系。