

清华大学教材

张三慧 主编

工科大学物理学

第三册

分子物理与热力学

张三慧 沈慧君 编

北京科学技术出版社

0561
170

清华大学教材

张三慧 主编

工科大学物理学

第三册

分子物理与热力学

张三慧 沈慧君编

北京科学技术出版社

清华大学教材
张三慧 主编
《工科大学物理学》
第三册

分子物理与热力学

张三慧 沈慧君 编
北京科学技术出版社出版
(北京西直门外南路 19 号)

新华书店北京发行所发行 各地新华书店经售
固安县印刷厂印刷

850×1168 毫米 32 开本 7.25 印张 182,000 字

1987 年 12 月第一版 1989 年 7 月第二次印刷

印数 8801—14800 册

ISBN7-5304-0023-1/Z·18 定价 2.80 元

内 容 简 介

本书是清华大学教材《工科大学物理学》第三册，讲述了各类工科学生所需的物理学基础理论的热学部分，包括温度概念、分子物理学和热力学定律。书中特别加强了统计概念的讲述，包括分布定律和熵的意义。内容力求系统化和现代化。除了基本内容外，还专题介绍了宇宙大爆炸、耗散结构理论等今日物理趣闻和著名科学家传略，以扩大学生的知识领域。

本书可作为各类工科大学及专科学校的物理学教科书，也可作为其它高校师生及中学物理教师教学或自学参考书。

前 言

摆在你面前的这部《工科大学物理学》是编者近十年来在清华大学讲授物理学所用的讲义的基础上编写的。

物理学是工科大学生必修的基础理论课。随着工业技术和物理科学本身的发展（这种发展在近几十年里更加快了步伐），物理学内容和讲授方法应该有相应的革新。但是，在我国，近几十年来的物理教学，特别是反映在物理教材上，并没有很好地适应这种时代的变化。这主要表现在：①内容基本未变，近代物理的基本概念与方法没有得到恰如其份的反映。②讲述方法基本未变，某些重要物理现象与规律相对孤立，没有反映出近代物理对自然规律的深刻的系统化的理解。③与目前我国中学物理教学衔接不好。不少内容是简单重复。这就破坏了学生学习物理学的兴趣，妨碍了他们学习积极性的发挥。

针对这些我们认为的缺点，在本书的编写上力求体现以下的特点。

首先是起点较高。凡是中学教学大纲已列内容，我们都认为学生已基本掌握。除为了本书的讲述系统所需要的以外，一般不再做简单的重复。

其次是着重加强了讲述的系统性。陈述物理学的内容可以按照两种系统进行。一种是遵循历史发展的顺序——历史逻辑，从早到晚依次讲述。一种是遵循物理学规律自身的相互联系所确定的顺序——结构逻辑或教学逻辑，从最基本的规律逐渐展开。虽然在不少地方这种系统是一致的，但二者确有明显的不同。为了使工科大学生在较短的学时内对现代物理学的内容有一个尽可能整体的理解，

我们在本书中采用了后一种讲述系统。

力学部分当然是以牛顿定律为基础展开的。书中着重阐明了守恒定律。作为牛顿力学的发展，最后讲了狭义相对论。

电磁学部分以库仑定律或高斯定律、电荷不变性以及狭义相对论为基础，讲述了静电场、运动电荷的电场以及磁场的规律。这样就更深刻地阐明了电场和磁场的相互联系。相对论不再只作为知识介绍，而是作为理解和阐述物理现象本质的基本规律了。

热学部分可以说是以统计概念和统计规律为基础加以讲述的。分子运动论当然是这样。对热力学第一定律也阐明了其微观意义。对热力学第二定律更是突出了它的统计意义。熵的概念是从统计的角度引入的。

振动与波部分是牛顿力学的延伸。物理光学实际上是作为波的基本规律在电磁波现象中的应用而讲述的。在量子物理部分我们也大胆地采用了演绎的讲述系统。这样可以使学生更深刻地掌握微观世界的基本特征——二象性和量子性。

第三是尽可能使内容现代化。书中着重介绍了近代物理的观点。例如守恒定律与对称性的关系，相对论的时空观，原子观点，统计的观点，微观粒子的二象性和量子性等。关于近代物理知识包括物理学前沿的介绍，除了散见于各章的实例、例题或习题外，本书特辟了两类特殊的章节：一是“今日物理趣闻”，一是“物理学与技术”。前者着重介绍当今物理学前沿的发展，例如粒子理论、广义相对论、超导、等离子体、大爆炸、耗散结构理论等。后者着重介绍物理学的近代应用，例如同步卫星的发射、等离子体发电、热泵、隧穿扫描显微镜等。根据工科教学计划限定的时间，这些内容是不可能作为教学要求进行课堂讲授的。但是，我们热切地希望所有的工科学生都能在课余阅读这些材料（为此，我们已在写法上尽可能地通俗化了，相信他们都是能看懂的）。这对于提高他们学习物理的兴趣、扩大他们的视野以及在各自的专业范围内开拓自己

的思路一定会有帮助的。

本书还辟了“科学家介绍”这一栏目。简要地介绍了重要的物理学家的生平与贡献。这样做，一方面是为了向学生提供必要的物理学史知识，另一方面也希望学生能从这些科学家的开创精神、治学态度以及思想境界方面获得教益。

关于习题，我们并不赞同那种越多越好的观点，考虑到工科大学生的全面发展以及理解和掌握物理基本概念和规律的需要，本书中只编选了比在规定时间内能完成的稍多的思考题和习题。我们希望大学生在做题时不要贪多，而要求精。要真正把做过的每一道题从概念原理上彻底弄清楚，并且用尽可能简洁明确的语言、公式、图象表述出来。

本书每章都列有“本章要求”和“本章提要”。我们希望通过这些来发挥学生学习的主动性和帮助他们进行自我检查。

本书在清华大学各系使用的过程中，是在规定的 120 小时（60 分钟）内全部授完的（其中包括 10—15 小时的习题讨论课）。讲课有粗有细，有些属于要求的章节也未在课堂上讲而是留给学生自学。学生中的大多数都是怀着很大的兴趣阅读这部教材的，也都取得了较好的学习成绩。

本书也吸收了本校物理系其他物理教师的宝贵经验。在编写，试用过程中，许崇桂、邓新元，高炳坤、黄天麟等老师曾提出过许多宝贵的意见。刘凤英、谢起成等老师参加了本书的核算习题答案的工作。张礼教授，李兴中副教授审阅了部分文稿。本校建筑系程远老师为本书绘制了全部科学家的肖像。对于以上这些热情的帮助，我们表示衷心的感谢。

在本书的编写（以及以往的教学）过程中，我们还借鉴了国外的许多教材，特别是帕塞尔的《电磁学》（E.M. Purcell: Electricity and Magnetism）和奥哈尼安的《物理学》（H.C. Ohanian: Physics）。对这两本书的作者，我们也谨致以谢意。

我等有志于物理教学的改革久矣，然而鲜有成效。仅以此书献给广大的物理教师和工科大学生。我们热切地盼望着他们对本书的各方面的批评。

编者 1987 年 5 月

数 值 表

真空中的光速

$$c = 3.00 \times 10^8 \text{ m/s}$$

普朗克常数

$$h = 6.63 \times 10^{-34} \text{ J} \cdot \text{s}$$

玻耳兹曼常数

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

阿佛加德罗常数

$$N_A = 6.02 \times 10^{23} / \text{mol}$$

电子的静止质量

$$m_e = 9.11 \times 10^{-31} \text{ kg}$$

等价能量

$$E_e = 0.511 \text{ MeV}$$

1 电子伏特能量

$$1 \text{ eV} = 1.602 \times 10^{-19} \text{ J}$$

水的三相点温度

$$T_3 = 273.16 \text{ K}$$

1 标准大气压

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

理想气体在标准状态下的

摩尔体积

$$v_o = 22.41 / \text{mol}$$

普适气体常数

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

$$= 8.20 \times 10^{-2} \text{ l} \cdot \text{atm/mol} \cdot \text{K}$$

1 卡的定义

$$1 \text{ cal} = 4.1855 \text{ J}$$

目 录

第一章 温度	1
§1.1 宏观与微观	1
§1.2 温度	4
§1.3 理想气体温标	5
§1.4 理想气体状态方程	8
思考题	11
习题	11
今日物理趣闻 A·大爆炸和宇宙膨胀	13
第二章 气体分子运动论	27
§2.1 理想气体的压强和温度	29
§2.2 能量均分定理	36
§2.3 麦克斯韦速率分布律	40
§2.4 麦克斯韦速率分布律的实验验证	45
§2.5 玻耳兹曼分布定律	47
§2.6 实际气体等温线	51
§2.7 范德瓦耳斯方程	53
§2.8 气体分子的平均自由程	59
§2.9 输运过程	63
科学家介绍 玻耳兹曼	70
物理学与技术 I 真空的获得	75
思考题	80
习题	81
§2.附 麦克斯韦速度分布律和速率分布律的推导	84

第三章 热力学第一定律	88
§3.1 准静态过程	88
§3.2 功	90
§3.3 热量、热力学第一定律	94
§3.4 热容量	96
§3.5 理想气体的绝热过程	103
§3.6 循环过程	108
§3.7 卡诺循环	112
§3.8 致冷循环	115
科学家介绍 焦耳	119
物理学与技术 II 热泵	123
物理学与技术 III 低温的获得	126
思考题	129
习题	131
今日物理趣闻 B·能源与环境	136
第四章 热力学第二定律	150
§4.1 自然过程的方向	150
§4.2 不可逆性的相互沟通	153
§4.3 热力学第二定律及其微观意义	155
§4.4 热力学几率与自然过程的方向	158
§4.5 玻耳兹曼熵公式与熵增加原理	162
§4.6 可逆过程	164
§4.7 克劳修斯熵公式	166
§4.8 熵增加原理举例	170
§4.9 温熵图	172
*§4.10 熵和能量退化	175
思考题	178
习题	180

§4 附 1	卡诺定理	181
§4 附 2	热力学温标	183
§4 附 3	克劳修斯熵的引入	135
今日物理趣闻	C· 负热力学温度	187
今日物理趣闻	D· 耗散结构	201
习题答案		217

第一章 温 度

本章要求

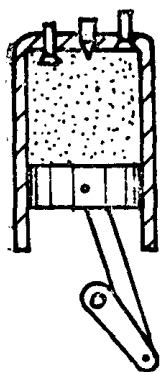
1. 理解系统和外界的意义，了解微观描述与宏观描述的不同和联系。
2. 理解平衡态的概念。
3. 理解热平衡的意义及它和温度概念的关系。
4. 了解理想气体温标的确定方法及它和热力学温标的关系。
5. 理解理想气体状态方程的意义并能用它解有关气体状态的问题。

§1.1 宏观与微观

热学研究自然界物质与冷热有关的性质以及这些性质变化的规律。它所涉及的现象非常广泛，最常见的例如气体、固体、液体的性质及其相互转化等。

在热学中，具体的研究对象都是一些相对较大的，能为我们感官所察觉的物体，这些物体称为热力学系统或简称系统。系统以外的物体统称外界。例如研究气缸内气体的体积，压强等变化时，这气体就是系统，而气缸壁、活塞、发动机的其他部分以及大气等都是外界。

要研究一个系统的性质及其变化规律，首先要对系统的状态加以描述。对于一个系统的状态从整体上加以描述的方法叫宏观描述。这时所用的表征系统状态和属性的物理量称宏观量。例如描述气



缸内气体的整体属性所用的化学组成、体积、压强、温度等物理量就是宏观量。宏观量可以直接用仪器测量，而且一般能被人的感官所觉察。

任何宏观物体都是由大量分子或原子组成的。分子或原子统称为微观粒子，其线度小于 $10^{-7} \sim 10^{-8}$ 厘米。任何宏观物体中所包含的微观粒子数都是非常巨大的，典型的数值是阿佛加德罗数 $N_A = 6.023 \times 10^{23} / \text{mol}$ 。分子或原

子都以不同的形式不停地运动着，它们之间存在着或强或弱的相互作用。如果给出了系统中所有微观粒子在某个时刻的运动状态，也就给出了该系统在该时刻的状态。这种通过对微观粒子运动状态的说明而对系统的状态加以描述的方法称为**微观描述**。描述一个微观粒子运动状态的物理量叫**微观量**，如分子质量、速度、位置、能量等等。微观量不能被我们的感官直接观察到，也不能直接测量。

宏观描述和微观描述是描述同一物理现象的两种不同方法，因此它们之间有一定的内在联系。由于宏观物体所发生的各种现象都是它所包含的大量微观粒子运动的集体表现，因此宏观量总是一些微观量的统计平均值。例如，气体对容器壁的压力是大量气体分子撞击容器壁的集体效果，所以气体的压强就和气体分子因撞击器壁而引起的动量变化率的平均值有关。

热学的研究按描述方法不同分为两门学科。一是**热力学**，它采用宏观描述方法，根据由实验确定的基本规律（热力学定律）来研究系统的宏观的热学规律。热力学是随着十八世纪工业革命而开始发展的，其基本理论主要形成于十九世纪上半叶，焦耳、迈尔、克劳修斯、开尔文（又名威廉·汤姆逊）等都作了重要贡献。由于热力学不涉及物质的各种微观结构，只从普遍成立的基本实验定律出

发,所以具有普遍性和可靠性,但因它未深入到物质内部结构,在这方面显得不够深刻。另一是统计物理或统计力学,它是从物质微观结构出发,按每个粒子遵循的力学规律,用统计的方法求出系统的宏观的热学规律。统计力学是从十九世纪中叶麦克斯韦等对气体分子运动论的研究开始,后经玻耳兹曼、吉布斯等人在经典力学的基础上发展为系统的经典统计力学。二十世纪初普朗克提出了能量子的假设,二十年代又建立了量子力学,在这个基础上狄拉克、爱因斯坦等人又发展成量子统计力学。热力学和统计力学在对热现象的研究上起到了相辅相成的作用。热力学对热现象给出普遍而又可靠的结果,可以用来验证微观理论的正确性;统计力学从物质的微观结构出发,更深刻地揭露了热现象的本质。这不但使人们对自然界的认识深入了一大步,而且由于了解了物质的宏观性质和微观因素的关系,也使得人们在实践上,例如在控制材料性能及其变化的研究上大大提高了自觉性。因此,统计力学在近代物理的各个领域都起着很重要的作用。

在物理学《热学》这一部分我们将介绍统计物理的基本概念和气体分子运动论的基本内容以及热力学的基本定律,并尽可能相互补充地加以讲解。

在本书中,我们将主要涉及热力学系统的平衡态的研究。所谓平衡态,是指在不受外界影响的条件下,一个系统的宏观性质不随时间改变的状态。平衡态只是一种宏观上的寂静状态,在微观上系统并不是静止不变的。在平衡态下,组成系统的大量分子还在不停地运动着,这些微观运动的总效果也随时间不停地急速地变化着,只不过其总的平均效果不随时间变化罢了。因此我们讲的平衡态应该理解为动态平衡。

系统的平衡态可以用不多的几个宏观状态参量来描述。如在一定体积内单一成份的气体,在平衡态下,如果忽略重力的影响,其压强、温度是处处一样的。因此就可以用体积 V 、压强 P 和温度 T

来描述它的状态。实验结果表明，对一定的系统，在平衡态下，它的状态参量满足一定的关系。这个关系叫状态方程。例如理想气体状态方程为

$$PV = \frac{M}{\mu}RT$$

由于一个系统总要受到外界的干扰，所以严格的不随时间变化的平衡态是不存在的。平衡态是一个理想的概念，是在一定条件下对实际情况的概括和抽象。但在许多实际问题中，往往可以把系统的实际状态近似地当作平衡态来处理，而比较简便地得出与实际情况基本相符的结论。因此，平衡态是热学理论中的一个很重要的概念。

§1.2 温 度

热学中用来描述系统状态的一个独特的宏观状态参量是温度。它是和热平衡概念直接相联系的。设两个系统 A 、 B 被一刚性板隔开，如图 1.2 所示。实验指出，各种隔板把两个系统间的相互影

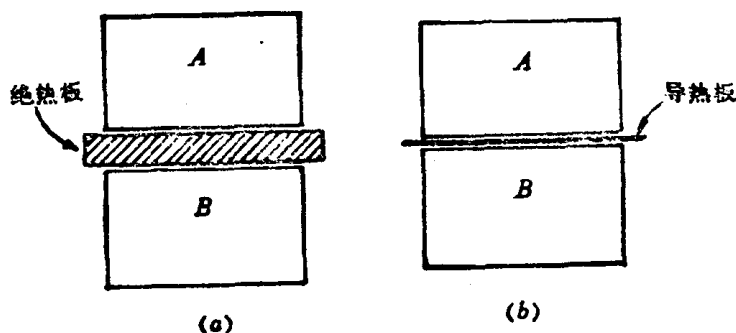


图 1.2 两个系统用刚性板隔开

响隔绝的程度不同。为了便于理论分析，我们设想两类隔板。一类叫做“绝热板”，被它隔开的两个系统的状态可以各自独立地进行

变化而互不影响。厚的石棉板，水泥板等可近似地当作绝热板。另一种叫做“导热板”，被它隔开的两个系统的状态不能相互独立地改变，其中一个系统的状态改变会引起另一个系统状态的改变，如金属板就是导热板（两个系统因直接接触而能发生相互影响时，也可以认为是有导热板隔开的情形）。

很明显，被导热板隔开的两个系统不可能任意地各自达到自己的任一平衡态。二者的平衡态总是联系在一起的。由导热板隔开（或直接接触）的两个系统达到一个共同的平衡态（即二者的状态同时都不再改变）时，我们说这两个系统处于热平衡状态，或者说，它们达到了热平衡。两个（或许多）热力学系统处于同一热平衡状态时，它们必然具有某种共同的宏观性质。我们将这一共同的宏观性质称为系统的温度，并因而说处于热平衡的多个系统具有相同的温度。同样地，具有相同温度的几个系统放到一起，它们也必然处于热平衡。可见，温度就是决定一个系统是否能与其它系统处于热平衡的宏观性质。

这样的温度概念和我们日常对温度的理解（冷热程度）是一致的。日常经验告诉我们，当两个冷热不同的物体接触时，热的变冷，冷的变热，最后冷热程度一样即温度相同。反过来，把冷热程度一样的物体放到一起，那么它们不会再发生什么变化。这就是说温度相同的物体放到一起是会处于热平衡的。

温度的测量实际上是根据温度的这种概念进行的。我们可以选择合适的系统作为标准，把它叫温度计，测量时，使温度计与待测系统接触，经过一段时间待它们达到热平衡后，温度计的温度就等于待测系统的温度。

§1.3 理想气体温标

为了定量地进行温度的测量，必须确定温度的数值表示方法。温度的数值表示法叫温标。理想气体温标是一种有重要理论和实际