

清华大学教材

张三慧 主编

大学物理学(第二册)

热 学

(第二版)

清华大学出版社

(京)新登字 158 号

内 容 简 介

本书是清华大学教材《大学物理学》的第二册,讲述热学基本理论,包括温度的概念、气体动理论、热力学第一定律和第二定律。书中特别加强了统计概念的讲述,包括气体分子速度分布律和熵的统计概念等。除了基本内容外,还专题介绍了宇宙大爆炸、耗散结构等今日物理趣闻和若干现代技术以及著名科学家传略,以扩大学生的现代知识领域。基本内容简明扼要,附加内容通俗易懂。

本书宜作为各类工科院校的大学物理教材,也可以作为其他高等院校师生及中学物理教学和自学参考书。

图书在版编目(CIP)数据

大学物理学 第2册:热学/张三慧主编 .- 2版 .- 北京:清华大学出版社,1999.6

ISBN 7-302-03485-0

. 大... . 张... . 热学-高等学校-教材 .04

中国版本图书馆 CIP 数据核字(1999)第 17196 号

出版者:清华大学出版社(北京清华大学校内,邮编 100084)

<http://www.tup.tsinghua.edu.cn>

印刷者:昌平环球印刷厂

发行者:新华书店总店北京发行所

开 本: 850× 1168 1/32 印张: 7.75 字数: 199 千字

版 次: 1999 年 7 月第 1 版 1999 年 12 月第 3 次印刷

书 号: ISBN 7-302-03485-0/O · 210

印 数: 116001 ~ 127000

定 价: 9.50 元

目 录

热学概述	1
第 1 章 温度	4
1.1 宏观与微观	4
1.2 温度的概念	6
1.3 理想气体温标	8
1.4 理想气体状态方程.....	12
提要	15
思考题	15
习题	16

今日物理趣闻 A 大爆炸和宇宙膨胀

A.1 现时的宇宙	19
A.2 宇宙膨胀和大爆炸	21
A.3 从大爆炸到今天	25
A.4 宇宙的未来	29
A.5 至大和至小的理论结合起来了.....	32

第 2 章 气体动理论	34
2.1 理想气体的压强.....	36
2.2 温度的微观意义.....	41

目录

2.3	能量均分定理.....	43
2.4	麦克斯韦速率分布律.....	47
2.5	麦克斯韦速率分布律的实验验证.....	57
* 2.6	玻耳兹曼分布律.....	60
2.7	实际气体等温线.....	63
* 2.8	范德瓦耳斯方程.....	66
2.9	气体分子的平均自由程.....	73
* 2.10	输运过程.....	76
	提要.....	83
	思考题.....	85
	习题.....	86
	科学家介绍 玻耳兹曼.....	92
	物理学与现代技术 真空的获得.....	95
第3章	热力学第一定律.....	100
3.1	准静态过程.....	100
3.2	功.....	102
3.3	热量 热力学第一定律.....	106
3.4	热容.....	109
3.5	绝热过程.....	118
3.6	循环过程.....	124
3.7	卡诺循环.....	128
3.8	致冷循环.....	132
	提要.....	135
	思考题.....	137
	习题.....	139
	科学家介绍 焦耳.....	147
	物理学与现代技术 热泵.....	150
	物理学与现代技术 低温的获得.....	153

今日物理趣闻 B 能源与环境

B.1 各式能源	158
B.2 我国能源的利用	162
B.3 人类环境问题	164

第 4 章 热力学第二定律

4.1 自然过程的方向	167
4.2 不可逆性的相互依存	170
4.3 热力学第二定律及其微观意义	172
4.4 热力学概率与自然过程的方向	175
4.5 玻耳兹曼熵公式与熵增加原理	180
4.6 可逆过程	184
4.7 克劳修斯熵公式	187
4.8 熵增加原理举例	195
* 4.9 温熵图	197
* 4.10 熵和能量退降	199
提要	202
思考题	203
习题	205

今日物理趣闻 C 负热力学温度

C.1 温度及其值的正负	209
C.2 实际的负热力学温度	211
C.3 负温度下的热力学定律	214

今日物理趣闻 D 耗散结构

D.1 宇宙真的正在走向死亡吗?	217
D.2 生命过程的自组织现象	218
D.3 无生命世界的自组织现象	219
D.4 开放系统的熵变	221
D.5 偏离平衡的系统	223
D.6 远离平衡的系统	224
D.7 通过涨落达到有序	226

数值表	228
习题答案	229
索引	233

热 学 概 述

热学研究的是自然界中物质与冷热有关的性质及这些性质变化的规律。

冷热是人们对自然界的一种最普遍的感觉,人类文化对此早有记录。我国山东大汶口文化(6 000年前)遗址发现的陶器刻划符号,就有如图 0.1 所示的“热”字。该符号是“繁体字”,上面是日,中间是火,下面是山。它表示在太阳照射下,山上起了火。这当然反映了人们对热的感觉。现今的“热”字虽然和这一符号不同,但也离不开它下面那四点所代表的火字。

图 0.1 古老的“热”字

对冷热的客观本质以及有关现象的定量研究约起自 300 年前。先是人们建立了温度的概念,用它来表示物体的冷热程度。伽利略就曾制造了一种“验温器”(图 0.2)。他用一根长玻璃管,上端和一玻璃泡连通,下端开口,插在一个盛有带颜色的水的玻璃容器内,他根据管内水面的高度来判断其周围的“热度”。他的玻璃管上没有刻度,因此还不能定量地测定温度。此后,人们不断设计制造了比较完善的能定量测定温度的温度计,并建立了几种温标。今天仍普遍使用的摄氏温标就是 1742 年瑞典天文学家摄尔修斯(A. Celsius)建立的。

温度概念建立之后,人们就探讨物体的温度为什么会有高低
此为试读,需要完整PDF请访问: www.ertongbook.com

的不同。最初人们把这种不同归因于物体内容所的一种假想的无重量的“热质”的多少。利用这种热质的守恒规律曾定量地说明了许多有关热传递、热平衡的现象,甚至热机工作的一些规律。18世纪末伦福特伯爵(Count Rumford)通过观察大炮膛孔工作中热的不断产生,否定了热质说,明确指出热是“运动”。这一概念随后就被迈耶(R. J. Mayer)通过计算和焦耳(J. P. Joule)通过实验得出的热功当量加以定量地确认了。此后,经过亥姆霍兹(Hermann von Helmholtz)、克劳修斯(R. Clausius)、开尔文(Kelvin, William Thomson, Lord)等人的努力,逐步精确地建立了热量是能量传

图 0.2 伽利略验温器

递的一种量度的概念,并根据大量实验事实总结出了关于热现象的宏观理论——热力学。热力学的主要内容是两条基本定律——热力学第一定律和热力学第二定律。这些定律都具有高度的普遍性和可靠性,但由于它们不涉及物质的内部具体结构,所以显得不够深刻。

对热现象研究的另一途径是从物质的微观结构出发,以每个微观粒子遵循的力学定律为基础,利用统计规律来导出宏观的热学规律。这样形成的理论称为统计物理或统计力学。统计力学是从19世纪中叶麦克斯韦等对气体动理论的研究开始,后经玻耳兹曼(L. Boltzmann)、吉布斯(J. W. Gibbs)等人在经典力学的基础上发展为系统的经典统计力学。20世纪初,建立了量子力学。在量子力学的基础上,狄拉克(P. A. M. Dirac)、费米(E. Fermi)、玻色(S. Bose)、爱因斯坦等人又创立了量子统计力学。由于统计力学

是从物质的微观结构出发的, 所以更深刻地揭露了热现象以及热力学定律的本质。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, 也使得人们在实践中, 例如在控制材料的性能以及制取新材料的研究方面, 大大提高了自觉性。因此, 统计力学在近代物理各个领域都起着很重要的作用。

在本书《热学》中, 我们将介绍统计物理的基本概念和气体动理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。

第 1 章 温 度

本章先介绍热学的最基本的概念,如系统、外界、宏观、微观、平衡状态等,然后借助于宏观现象引入温度的概念。最后介绍一个与温度有直接关系的最简单的物质性质的规律——理想气体状态方程。

1.1 宏观与微观

在热学中,一般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、发动机的其它部分以及大气等都是外界(图 1.1)。

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、内能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。

图 1.1 系统和外界

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,其线度一般约 $10^{-9} \sim 10^{-10}$ m。很多有机物分子比

这大得多。任何宏观物体中所包含的微观粒子数都是非常巨大的,典型的数值是阿伏伽德罗常量 $N_A = 6.023 \times 10^{23} / \text{mol}$ 。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。可以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,这种方法称为微观描述。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,一般也不能直接测量。

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。对热现象的研究,一方面要发现热力学系统的各宏观参量之间的关系——宏观热力学规律,另一方面,更重要的是,通过求微观量的统计平均值的方法来了解宏观规律的本质。

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从微观统计的角度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分的气体,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 1.4 节将

要介绍的理想气体状态方程为

$$pV = \frac{m}{M}RT$$

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 温度的概念

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。刚性板可以隔断两系统的机械相互作用,如相互推力。但是实际的刚性板并不能隔绝两系统的所有的相互作用,它们仍可以通过刚性板或快或慢地传递能量而发生相互影响。为了便于理论分析,我们设想两类刚性板。一类叫“隔能板”,它能隔绝两系统间的能量传递,被它隔开的两个系统的状态可以各自独立地改变而互不影响。厚的石棉板、水泥板或聚苯乙烯板等可近似地当做隔能板。另一种叫做“导能板”,被它隔开的两个系统

图 1.2 两个系统用刚性板隔开

可以通过它传递能量,因而发生相互影响,其中一个系统的状态改变会引起另一系统的状态也发生改变。金属板就是一种导能板(两个系统通过硬的边界直接接触而能发生相互影响时,也可以认为是有导能板隔开的情形)。

被导能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。由导能板隔开(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。

关于热平衡有一个很重要的实验规律(参看图 1.3)是:如果系统 A 和系统 B 分别与系统 C 的同一状态处于热平衡,那么当 A 和 B 接触时,它们也必定处于热平衡。这一规律叫做热力学第零定律。这条定律看起来

图 1.3 热力学第零定律说明

简单,但并不是什么逻辑推理的结果。因为,例如,A 和 B 两人都和另一人 C 相识,A 和 B 两人不一定就相互认识。

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,最后它们的状态都不再变化时,其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。

温度的测量就是根据热力学第零定律和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, 把它叫做温度计。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。

以上所讲的温度的概念是它的宏观定义。温度的微观本质, 即它和分子运动的关系将在第 2 章 2.2 节中介绍。

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意义的温标。下面介绍它的确定方法。

玻意耳定律指出: 一定质量的气体, 在一定温度下, 其压强 p 和体积 V 的乘积是个常量, 即

$$pV = \text{常量} \quad (\text{温度不变}) \quad (1.1)$$

对不同的温度, 这一常量的数值不同。各种气体都近似地遵守这一定律, 而且压强越小, 与此定律符合得也越好。为了表示气体的这种共性, 我们引入理想气体的概念。理想气体就是在各种压强下都严格遵守玻意耳定律的气体。它是各种实际气体在压强趋于零时的极限情况, 是一种理想模型。

既然对一定质量的理想气体, 它的 pV 乘积只决定于温度, 所以我们就可以定义一个温标, 叫理想气体温标, 这一温标指示的温度值与该温度下一定质量的理想气体的 pV 乘积成正比, 以 T 表示理想气体温标指示的温度值, 则应有

$$pV \propto T \quad (1.2)$$

这一定义只能给出两个温度数值的比, 为了确定某一温度的数值,

还必须规定一个特定温度的数值。1954 年国际上规定的标准温度定点为水的三相点,即水、冰和水汽共存而达到平衡态时(图 1.4 所示装置的中心管内)的温度(这时水汽的压强是 4.58mmHg,约 609Pa)。这个温度称为水的三相点温度,以 T_3 表示此温度,它的数值规定为

$$T_3 = 273.16\text{K} \quad (1.3)$$

式中 K 是理想气体温标的温度单位的符号,该单位的名称为开[尔文]。

图 1.4 水的三相点装置

以 p_3, V_3 表示一定质量的理想气体在水的三相点温度下的压强和体积,以 p, V 表示该气体在任意温度 T 时的压强和体积,由

$$1\text{mmHg} = 13.6 \times 10^3 \text{kg/m}^3 \times 9.80 \text{m/s}^2 \times 10^{-3} \text{m} = 133.3 \text{Pa}$$

(1.2)和(1.3)式, T 的数值可由下式决定:

$$\frac{T}{T_3} = \frac{pV}{p_3V_3}$$

或
$$T = T_3 \frac{pV}{p_3V_3} = 273.16 \frac{pV}{p_3V_3} \quad (1.4)$$

这样,只要测定了某状态的压强和体积的值,就可以确定和该状态相应的温度数值了。

实际上测定温度时,总是保持一定质量的气体的体积(或压强)不变而测它的压强(或体积),这样的温度计叫定体(或定压)气体温度计。图 1.5 是定体气体温度计的结构示意图。在充气泡 B(通常用铂或铂合金做成)内充有气体,通过一根毛细管 C 和水银压强计的左臂 M 相连。测量时,使 B 与待测系统相接触。上下移动压强计的右臂 M,使 M 中的水银面在不同的温度下始终保持与指示针尖 O 接触,以保持 B 内气体的体积不变。当待测温度不同时,由气体实验定律知,气体的压强也不同,它可以由 M 与 M 中的水银面高度差 h 及当时的大气压强测出。如以 p 表示测得的气体压强,则根据(1.4)式可求出待测温度数值应是

图 1.5 定体气体温度计

$$T = 273.16 \frac{p}{p_3} \quad (1.5)$$

由于实际仪器中的充气泡内的气体并不是“理想气体”,所以利用此式计算待测温度时,事先必须对压强加以修正。此外,还需要考虑由于容器的体积、水银的密度随温度变化而引起的修正。

理想气体温标利用了气体的性质,因此在气体要液化的温度下,当然就不能用这一温标表示温度了。气体温度计所能测量的最低温度约为 0.5K(这时用低压 ^3He 气体),低于此温度的数值对

理想气体温标来说是无意义的。

在热力学中还有一种不依赖于任何物质的特性的温标叫热力学温标(也曾叫绝对温标)。它在历史上最先是由开尔文引进的(见 2.7 节),通常也用 T 表示,这种温标指示的数值,叫热力学温度(也曾叫绝对温度)。它的国际制单位叫开[尔文],符号为 K 。可以证明,在理想气体温标有效范围内,理想气体温标和热力学温标是完全一致的,因而都用 K 作单位。

表 1.1 一些实际的温度值

激光管内正发射激光的气体	$< 0K$ (负温度)
宇宙大爆炸后的 $10^{-43}s$	$10^{32}K$
氢弹爆炸中心	10^8K
实验室内已获得的最高温度	6 10^7K
太阳中心	1.5 10^7K
地球中心	4 10^3K
乙炔焰	2.9 10^3K
金的凝固点*	1337.33K
铝的凝固点*	933.473K
锡的凝固点*	505.078K
月球向阳面	4 10^2K (127)
地球上出现的最高温度(利比亚)	331K(58)
吐鲁番盆地最高温度	323K(50)
水的三相点*	273.16K(0.01)
地球上出现的最低温度(南极)	185K(- 88)
月球背阴面	90K(- 183)
氮的沸点(1atm)	77K
氧的三相点*	54.3584K
氢的三相点*	13.8033K
氦的沸点(1atm)	4.2K
星际空间	2.7K
实验室内已获得的最低温度:核自旋冷却法	2 $10^{-10}K$
激光冷却法	2.4 $10^{-11}K$

$$1\text{atm} = 1.013\ 25 \times 10^5\text{Pa}$$