

清华大学教材 张三慧 主编

大学物理学

第二册

热学

张三慧 沈慧君 编著

清华大学出版社

内 容 简 介

本书是清华大学教材《大学物理学》第二册,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。

本书是为各类工科院校的物理学教材而编写的,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。

大学物理学

第二册

热 学

张三慧 沈慧君 编著

☆

清华大学出版社出版

北京 清华园

人民教育出版社印刷厂印刷

新华书店总店科技发行所发行

☆

开本: 850×1168 1/32 印张: 6.75 字数: 169 千字

1991年2月第1版 1991年2月第1次印刷

印数: 0001~8000

ISBN 7-302-00690-3/O·106

定价: 2.10 元



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(定义)	$T_3=273.16 \text{ K}$
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	$v_o=22.4 \text{ l/mol}$
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.....	6
§ 1.4 理想气体状态方程.....	9
思考题.....	11
习题.....	11
今日物理趣闻 A. 大爆炸和宇宙膨胀	14
第二章 气体分子运动论	28
§ 2.1 理想气体的压强和温度.....	30
§ 2.2 能量均分定理.....	36
§ 2.3 麦克斯韦速率分布律.....	40
[附] 麦克斯韦速度分布律和速率分布律的推导.....	45
§ 2.4 麦克斯韦速率分布律的实验验证.....	47
§ 2.5 玻耳兹曼分布定律.....	50
§ 2.6 实际气体等温线.....	53
§ 2.7 范德瓦耳斯方程.....	56
§ 2.8 气体分子的平均自由程.....	62
§ 2.9 输运过程.....	65
思考题.....	71
习题.....	72
科学家介绍 玻耳兹曼.....	76

物理学与现代技术 I 真空的获得	80
第三章 热力学第一定律	86
§ 3.1 准静态过程	86
§ 3.2 功	88
§ 3.3 热量、热力学第一定律	91
§ 3.4 热容量	94
§ 3.5 理想气体的绝热过程	100
§ 3.6 循环过程	104
§ 3.7 卡诺循环	108
§ 3.8 致冷循环	111
思考题	115
习题	117
科学家介绍 焦耳	122
物理学与现代技术 II 热泵	126
物理学与现代技术 III 低温的获得	129
今日物理趣闻 B. 能源与环境	133
第四章 热力学第二定律	144
§ 4.1 自然过程的方向	144
§ 4.2 不可逆性的相互沟通	147
§ 4.3 热力学第二定律及其微观意义	149
§ 4.4 热力学几率与自然过程的方向	152
§ 4.5 玻耳兹曼熵公式与熵增加原理	157
§ 4.6 可逆过程	159
§ 4.7 克劳修斯熵公式	161
§ 4.8 熵增加原理举例	164
§ 4.9 温熵图	166
* § 4.10 熵和能量退化	168

思考题.....	172
习题.....	173
[附]克劳修斯熵公式的宏观导出.....	175
今日物理趣闻 C·负热力学温度.....	180
今日物理趣闻 D·耗散结构.....	189
习题答案	205

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(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。

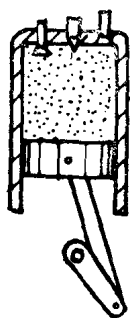


图 1.1 系统与外界

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 $10^{-9} \sim 10^{-10}$ 米。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,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。

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，按每个微观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、爱因斯坦等人又建成了量子统计力学。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

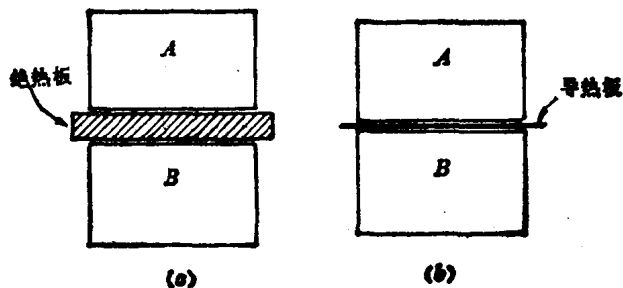


图 1.2 两个系统用刚性板隔开

互影响隔绝的程度不同。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意义的温标。下面介绍它的确定方法。

波义耳定律指出:一定质量的气体,在一定温度下,其压强 P 和体积 V 的乘积是个常数。即:

$$PV = \text{常数} \quad (\text{温度不变}) \quad (1.1)$$

对不同的温度,这一常数的数值不同。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波义耳定律的气体**。它是各种实际气体在压强趋于零时的极限情况,是一个理想模型。

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,即水、冰和水汽共存而达到平衡态时的温度(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

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

式中 K 表示理想气体温标的温度单位,读作“开”。

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. 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), 这样的温度计叫定容(或定压)气体温度计。图 1. 3 是定容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

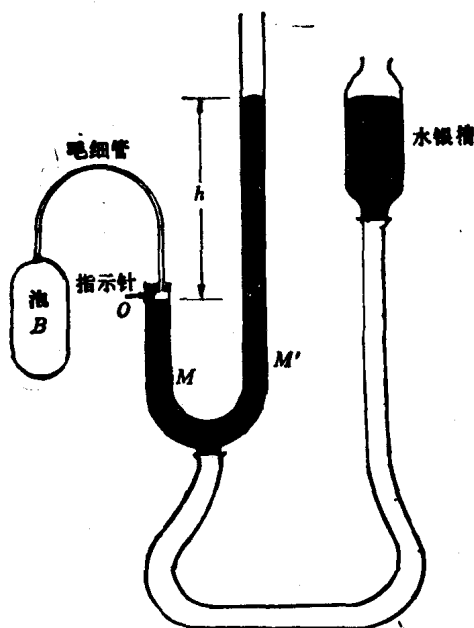


图 1. 3 定容气体温度计

强计的水银槽,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' 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

$$T = 273.16 \frac{P}{P_3} \quad (1.5)$$

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 0.5 K (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。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”,简称“开”记作 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。

生活和技术中常用的温标有摄氏温标。以 t 表示摄氏温度(单位记作 $^{\circ}\text{C}$),它的定义是

$$t = T - 273.15 \quad (1.6)$$

表1.1给出了一些实际的温度值。

表1.1 一些实际的温度值

激光管内正发射激光的气体	$< 0\text{K}$ (负温度)*
宇宙大爆炸后的 10^{-43} 秒	10^{32}K **
氢弹爆炸中心	10^8K
实验室内获得的最高温度	$6 \times 10^7\text{K}$
太阳中心	$1.5 \times 10^7\text{K}$
地球中心	$4 \times 10^3\text{K}$
乙炔焰	$2.9 \times 10^3\text{K}$
月球向阳面	$4 \times 10^2\text{K}$ (127°C)
地球上出现的最高温度(利比亚)	331K (58°C)
吐鲁番盆地最高温度	323K (50°C)
地球上出现的最低温度(南极)	185K (-88°C)
月球背阴面	90K (-183°C)
氮的沸点(1 atm)	77K
氦的沸点(1 atm)	4.2K
星际空间	2.7K **
实验室内获得的最低温度	$5 \times 10^{-4}\text{K}$

* 参看“今日物理趣闻 C” ** 参看“今日物理趣闻 A”

§ 1.4 理想气体状态方程

由(1.4)式可得, 对一定质量的同种理想气体, 任一状态下的 PV/T 值都相等(都等于 P_3V_3/T_3), 因而可以有

$$\frac{PV}{T} = \frac{P_0V_0}{T_0} \quad (1.7)$$

其中 P_0, V_0, T_0 为标准状态下相应的状态参量值。

实验又指出, 在一定温度和压强下, 气体的体积和它的质量 M 或摩尔数 ν 成正比。若以 v_0 表示气体在标准状态下的摩尔体积, 则 ν 摩尔气体在标准状态下的体积应为 $V_0 = \nu v_0$, 以此 V_0 代入(1.7)式, 可得

$$PV = \nu \frac{P_0 v_0}{T_0} T \quad (1.8)$$

阿佛加德罗定律指出,在相同温度和压强下,1摩尔的各种理想气体的体积都相同,因此上式中的 $P_0 v_0 / T_0$ 的值就是一个对各种理想气体都一样的常数。用 R 表示此常数,即令

$$R \equiv \frac{P_0 v_0}{T_0} = \frac{1.013 \times 10^5 \times 22.41 \times 10^{-3}}{273.15} = 8.31 \text{ J/mol} \cdot \text{K} \quad (1.9)$$

而称 R 为普适气体常数,则(1.8)式可写做

$$PV = \nu RT \quad (1.10)$$

或
$$PV = \frac{M}{\mu} RT \quad (1.11)$$

上式中 M 是气体的质量, μ 是气体的摩尔质量。(1.10)或(1.11)式表示了理想气体在任一平衡态下各宏观状态参量之间的关系,称理想气体状态方程。它是由实验结果(波义耳定律、阿佛加德罗定律)和理想气体温标的定义综合得到的。各种实际气体,在通常的压强和温度不太低的情况下,都近似地遵守这个状态方程,而且压强越低,近似程度越高。

1 摩尔的任何气体中有 N_A 个分子, N_A 叫阿佛加德罗数

$$N_A = 6.023 \times 10^{23} / \text{mol}$$

若以 N 表示体积 V 中的气体分子总数,则 $\nu = N / N_A$, 引入另一普通常数,称为玻耳兹曼常数,用 k 表示

$$k \equiv \frac{R}{N_A} = 1.38 \times 10^{-23} \text{ J/K} \quad (1.12)$$

则理想气体状态方程(1.10)式又可写作

$$PV = NkT \quad (1.13)$$

或
$$P = nkT \quad (1.14)$$

其中 $n = N / V$ 是单位体积内气体分子的个数,叫气体分子数密度。

本章提要

1. 系统和外界,宏观量和微观量。

2. 平衡态: 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。

3. 热平衡: 导热刚性隔板隔开的两个(或多个)系统所达到的共同的平衡状态。

4. 温度: 决定一个系统能否与其它系统处于热平衡的宏观性质。处于热平衡的各系统的温度相同。

5. 理想气体温标:

$$PV \propto T, \quad T_3 = 273.16 \text{ K}$$

6. 理想气体状态方程: 在平衡态下,

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

$$P = nkT$$

普适气体常数 $R = 8.31 \text{ J/mol} \cdot \text{K}$

思考题

- 1.1 对热力学系统的宏观描述和微观描述的方法有何不同? 有何联系?
- 1.2 什么是热力学系统的平衡态? 气体在平衡状态时有何特征? 当气体处于平衡态时还有分子热运动吗? ✓
- 1.3 什么是热平衡? 怎样根据热平衡来引进温度的概念? 对于非平衡态能否用温度概念? X
- 1.4 平衡态和热平衡态的意义有何异同?
- 1.5 用温度计测量温度, 是根据什么原理?
- 1.6 理想气体温标是利用气体的什么性质建立的?
- 1.7 理想气体状态方程是根据什么定律导出的?

习题

1.1 定容气体温度计的测温气泡放入水的三相点管的槽内时, 气体的压强为 $6.65 \times 10^3 \text{ Pa}$

(1) 用此温度计测量 373.15 K 的温度时, 气体的压强是多大?

$$T = 273.16 \cdot \frac{P_1}{P_3}$$

$$P_1 = \frac{373.15}{273.16 \times 6.65 \times 10^3} = 9.08 \times 10^3$$