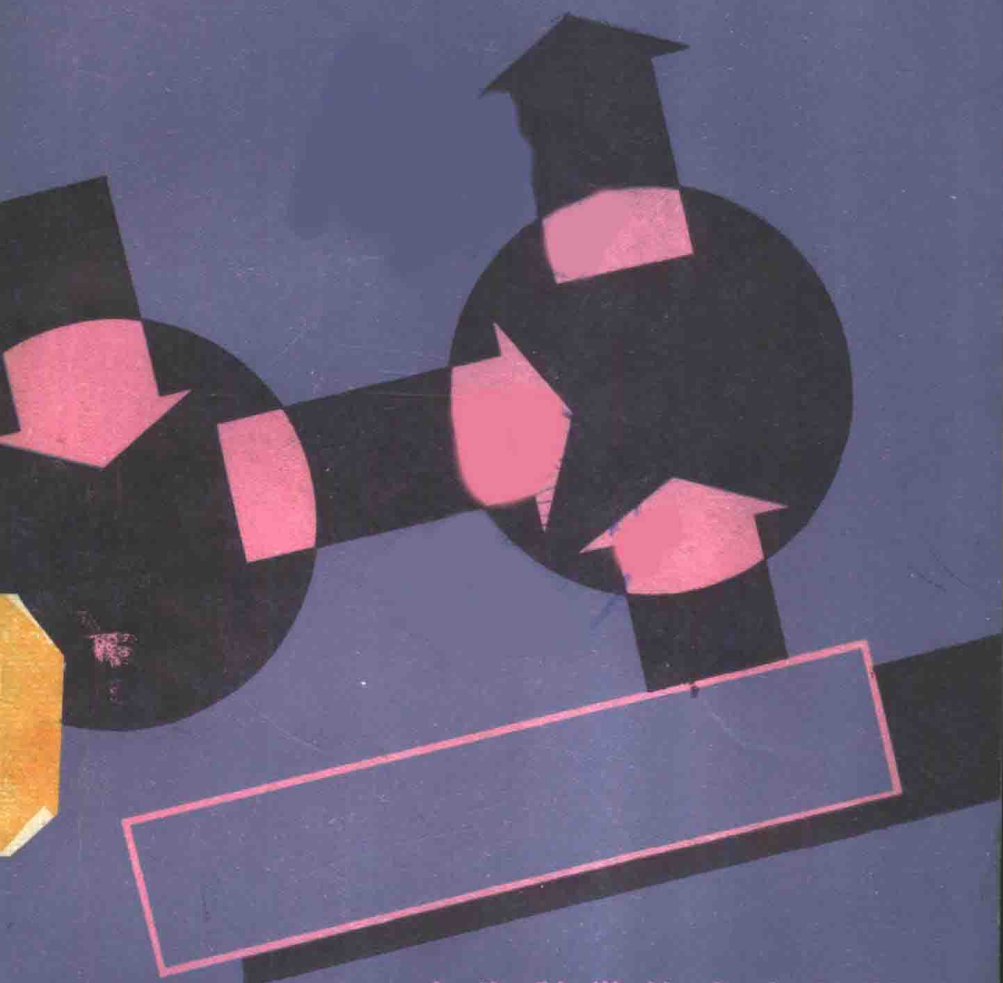


大学基础物理学习与解题指导

热学

方小敏 沈启舜 陆汉忠 编



上海科学技术出版社

大学基础物理学习与解题指导

热 学

方小敏 沈启舜 陆汉忠 编

贾起民 审

0.

上海科学技术出版社

内 容 提 要

本书为热学篇。全书共分九章,根据丛书的统一格式,每章有四个部分组成。第一部分介绍目的和要求。第二部分是内容提要,重点、扼要地阐述有关物理概念、定理、公式和结论。第三部分是例题,大量例题是四个组成部分的主体部分,主要消化第二部分内容,以进一步深化和巩固物理概念、物理定律,培养解题能力、技巧和方法。第四部分是大量习题,每题均附答案,以供读者做完练习之后进行自我检查。

本书适用面较广。可供理、工科大学的学生及具有同等学历的自学者阅读,尤其适用于理科物理专业或相近专业的大学生,同时也可供有关教师参考。

大学基础物理学习与解题指导

热 学

方小敏 沈启舜 陆汉忠 编

贾起民 审

上海科学技术出版社出版

(上海瑞金二路 150 号)

本书在上海发行所发行 上海东方印刷厂印刷

开本 787×1092 1/32 印张 11.75 字数 258,000

1989年11月第1版 1989年11月第1次印刷

印数: 1-3,000

ISBN 5323-0052-6/O·70

定价: 4.95 元

序 言

本书系上海科学技术出版社出版的《大学基础物理学习与解题指导》丛书中的热学分册。

大学基础物理是一门概念性很强的课程，深刻理解基本物理概念无疑是学好这门课的关键。为要做到这一点，除课堂教学外，习题训练也是教学中的一个重要环节。通过做习题，不但可以帮助读者复习和巩固所学的知识，乃至对其加深理解，亦可达到培养运用所学原理解决实际问题的能力以及扩大知识面的目的。为此，我们编写了这本书，以期有助于学习热学的读者。

本书共分九章(第一、二、三、四章由方小敏执笔，第五、六、八、九章由沈启舜执笔，第七章由陆汉忠执笔)。每章均由“本章目的”、“内容提要”、“解题示例”以及“习题”四部分组成。前两部分除示明教学要点和对课程的内容提纲挈领外，还对课程内容的重点、难点进行了分析，并列出了基本公式。“解题示例”是本书的主要部分，鉴于各类读者的不同需要，在这部分中，我们从国内外各种教材、试题以及美国一些大学的研究生入学试题中选编了158题各种不同层次的例题(加上“习题”中的188题共346题)，难易程度覆盖面较广。在解题过程中力求做到思路清晰、概念准确、说理透彻。考虑到“热学”说理性较强的特点，在例解中加强了概念性的题目。有的例题还采用一题多解的方法，帮助读者从不同角度去分析问

题,以达培养读者的解题技巧和加深理解之目的。本书适用于综合性大学、师范院校物理类专业的学生,也可供其它有关专业师生参考。

本书在编写过程中,贾起民教授仔细审阅了“本章目的”、“内容提要”以及部分“解题示例”,并提出了许多宝贵意见。

由于编者水平有限,错误与不妥之处在所难免,恳请读者给予批评指正。

编者 1987年9月

目 录

序言

第一章 温度1

本章目的1

内容提要1

解题示例13

习题36

第二章 气体分子运动论的基本概念.....41

本章目的41

内容提要41

解题示例52

习题69

第三章 气体分子运动的统计分布律.....71

本章目的71

内容提要71

解题示例85

习题113

第四章 气体内的输运过程117

本章目的117

内容提要117

解题示例128

习题154

第五章 热力学第一定律158

本章目的158

内容提要	158
解题示例	173
习题	206
第六章 热力学第二定律	213
本章目的	213
内容提要	213
解题示例	225
习题	253
第七章 固体	258
本章目的	258
内容提要	258
解题示例	270
习题	289
第八章 液体	291
本章目的	291
内容提要	291
解题示例	304
习题	319
第九章 相与相变	322
本章目的	322
内容提要	322
解题示例	336
习题	357
习题答案	358

第一章 温 度

本章目的

1. 分清系统与外界、孤立系统与开放系统; 掌握热力学系统, 以及了解宏观量和微观量等概念.

2. 深刻理解平衡态的概念, 明白平衡态是一种热动平衡, 并始终伴随着涨落现象. 掌握处于平衡态系统的状态参量.

3. 明白温度是热学中极其重要的物理量, 准确理解温度的概念, 了解温标以及建立温标的三个要素.

4. 掌握理想气体温标, 了解摄氏温标以及这两种温标之间的变换关系.

5. 掌握理想气体状态方程, 熟练运用理想气体状态方程解决具体问题.

6. 了解道耳顿分压定律以及混合理想气体状态方程.

内 容 提 要

I. 热力学系统、平衡态及状态参量

系统与外界

在热学中, 通常把确定作为研究对象的一个或一组物体称为系统. 在系统以外的所有对系统施加影响的物体称为

外界。

宏观量与微观量

任何宏观物体都是由大量分子、原子等微观粒子组成的，因此，对系统状态的描述一般有两种方法：一种是宏观描述，另一种是微观描述。

对系统的状态用其宏观上的属性加以描述的方法称为宏观描述。在这种描述中，表征系统各个宏观属性的物理量称为宏观量。用宏观量所确定的系统状态称为宏观的状态或宏观态。

对系统中所有微观粒子进行描述，并以此作为对系统的描述的方法称为微观描述。用微观描述方法所确定的系统在任一时刻的状态称为微观态。在微观描述中，表征微观粒子各个属性的物理量称为微观量。

处于平衡态的气体系统，可以用其体积、压强、温度等宏观量来描述其宏观态。而气体分子的质量、速率、能量、碰撞频率、自由程等均是微观量。宏观量与微观量之间有着非常密切的联系。这是因为它们仅是描述同一系统状态的两种不同方法中所用的两个量。系统的各种宏观状态应该是它所包含的大量微观粒子的运动的集体表现，因此，宏观量总是这些粒子的某些微观量的统计平均值。例如，气体的压强就是气体分子在热运动中对单位面积容器壁撞击力的平均值，即是这些分子由于与器壁碰撞所引起的动量变化率的平均值。

热力学系统

热学研究的是物质的热性质，而物质的热性质是与组成物质的大量原子、分子等微观粒子的运动紧密联系的，那些描写物质热性质的宏观量则是这些数目宏大的微观粒子的某些微观量的统计平均值。因而在热学中，把由足够多的微观粒

子组成的、并用某些与物质热性质有关的宏观量以及其他一些宏观量来描述状态的系统称为热力学系统。这里所说的“足够多”是为在对微观量求统计平均值时能得到足够精确的结果。

热力学系统按其于外界的相互作用情况，可分为以下几类。这里所指的相互作用包括能量的交换与物质的交换。

1. 孤立系统 与外界无任何相互作用的系统称为孤立系统。显然，绝对意义下的孤立系统是不存在的，只要系统与外界的相互作用与系统内部各部分之间的相互作用相比小到可以忽略时，就可以把系统看成是孤立系统。

2. 封闭系统 与外界只有能量交换，而无物质交换的系统称为封闭系统。

3. 绝热隔离系统 与外界只有力学相互作用或其他相互作用，而无热学相互作用的系统称为绝热隔离系统。

4. 开放系统 与外界既有能量交换，又有物质交换的系统称为开放系统。

平衡态

在不受外界影响或只受恒定外力场作用的条件下，系统的宏观性质不随时间发生变化的状态称为平衡态。这里所说的“不受外界影响”，是指系统与外界之间既不相互作用，也不传热，即无能量的交换。

实际上，当系统处于平衡态时，组成系统的大量分子等微观粒子仍在不停顿地作无规则的运动，只是这些微观粒子运动的平均效果不变，因此这种平衡称为热动平衡。此外，这里所谓的平均效果不变，是指描写系统状态的宏观量的平均值不变，而其瞬时值仍可能发生对平衡态的微小偏差，这种现象称为涨落。事实上，绝对不变是不存在的，涨落现象始终存在。

处在平衡态的系统,如果受到外界的影响,平衡状态即被破坏,此时系统所处的状态称为非平衡态。当外界对系统的作用停止后,系统又将自发地趋于一个新的平衡态。系统自发地由非平衡态转变到平衡态的过程称为弛豫过程,而弛豫过程所需的时间称为弛豫时间,用 τ 表示。可见,孤立系统或只在恒定外力场(如重力场、静电场等)作用下的系统,总会自发地趋于某一平衡态。这一性质可以用来判别某一系统是否处在平衡态,即可以设想用一个绝热刚性包把该系统包起来,其作用是使系统与外界之间既不相互作用功,又无热量的相互传递,这样,系统最后一定达到平衡态。如果此过程的前后系统的状态不变,则表明该系统原来就处在平衡态;否则就处在非平衡态。

状态参量

当系统处在平衡态时,系统具有一些可以用确定的宏观量来表征的属性。对应不同的平衡态,表征这些属性的宏观量值也就不同。这样,可以选择其中几个量作为描述系统状态的变量,这些变量称为状态参量。

在一般情况下,对热力学系统平衡态的描述,需用几何参量、力学参量、化学参量和电磁参量等四类参量,这四类参量可以完全确定热力学系统的平衡态。但这四类参量还不能直接表达物体的冷热程度。为此,还必须引进一个与物体冷热程度有关的新的物理量,这就是温度。温度是上述四类参量的函数。

II. 温度与温标

热力学第零定律

如果两个热力学系统各自处在不同的平衡态,现将此两

系统互相接触，使它们之间发生热传递，这种接触称为热接触。经过若干时间后，两个系统便达到一个新的共同的平衡态，这种在热传递条件下达到的平衡称为热平衡。

有时，两个系统热接触后，它们的状态都不发生变化，这说明它们在刚接触时就已达到了热平衡。为此，热平衡的概念还可用于两个相互间不发生热接触的系统，即有时两个系统不通过热接触也能达到热平衡。实验还证明，当两个系统达到热平衡后，如果再把它们分开，并不会改变各自的热平衡状态。这说明，热平衡并不依赖于热接触，热接触只是为热平衡的建立创造了条件。

如果两个热力学系统中的每一个都与第三个热力学系统处于热平衡，则它们彼此之间也必定热平衡。此结论就称为热力学第零定律，或称为热平衡定律。

温度的概念

由热力学第零定律可知，两个相互处于热平衡状态的热力学系统，必定具有某一共同的宏观性质，表征此宏观性质的物理量就是温度。这就是说，互为热平衡的系统具有相同的温度。

从微观意义上说，温度是系统内部大量微观粒子作无规则热运动的剧烈程度的标志。

热力学第零定律的“一切互为热平衡的系统具有相同的温度”的结论，为设计一个标准系统，并用以定量测量待测系统的温度提供了理论依据。测量时，只须将此标准系统与待测系统进行热接触，当它们达到热平衡后，标准系统的某个状态参量所指示的数值就是待测系统的温度值。这种标准系统就是温度计。

温标以及建立温标的三要素

温度的数值表示法就称为温标。建立一种温标，有以下三个要素：

(1) 选择某种物质的某一随温度变化的属性来标志温度。这种被选定的物质称为测温物质，其某一随温度变化的属性称为测温属性。例如，把水银作为测温物质，一般可把它的体积随温度变化的属性作为测温属性。

(2) 对测温属性随温度的变化关系作出规定。原则上，这种关系是可任意规定的，但为了简单起见，一般规定为线性关系。

(3) 制定温标的分度法。一般须将一定间隔的冷热程度分为若干度，并把一个或二个确定的冷热程度作为固定点。

经验温标

按照建立温标的三个要素，首先选定一个测温物质，比如水银、金属铂、氧气等。再确定该测温物质的测温属性，比如玻璃管中水银柱的长度随温度的变化、铂的电阻随温度的变化、气体在定容或定压情况下压强或体积随温度的变化等。令 X 代表这些测温属性，则当温度计与待测系统达到热平衡时的共同温度值 T 与测温属性 X 的函数关系可写成以下的线性关系：

$$T(X) = \alpha X, \quad (1-1)$$

式中 α 是待确定的常数。

为了确定常数 α ，必须确定一个或二个固定点。1954 年以后，国际上规定只用一个固定点。在这个固定点处，所有的温度计都要给出相同的温度值。这个固定点选的是水的三相点（即冰、水与水蒸气三者共存的状态），并规定它的温度为 273.16 度，这里的度是热力学温度的单位，用 K 表示。1 K 等于水的三相点温度的 $1/273.16$ 。

如果用 X_{tr} 表示测温属性 X 在水的三相点时的值, 并代入式(1-1), 可得:

$$a = \frac{273.16 \text{ K}}{X_{tr}},$$

于是就得到

$$T(X) = 273.16 \text{ K} \frac{X}{X_{tr}}. \quad (1-2)$$

至此, 温标已经建立。此后只需将测温时温度计上显示的数值 X 代入式(1-2)后, 即可标出温度计的(也是待测系统的)温度 $T(X)$ 。

按以上方法建立起来的温标是依赖于测温物质和测温属性的, 这就是说, 如果规定了某种测温物质的某一测温属性随温度作线性变化, 并由此建立起温标, 则其他测温物质的各种测温属性(即使是同种测温物质的其他测温属性)一般就不再与该温标指示的温度成严格的线性关系, 即对同一温度的测量可得到不同的结果。这种依赖于测温物质与测温属性选择的温标称为经验温标。

III. 理想气体温标

在热学中, 温度是一个极为重要的物理量。需要建立一个统一的温标来确定温度, 并以它为标准来校正其他各种温标。理想气体温标就是温度计量工作中采用的标准温标。这种温标是用气体温度计来实现的。

气体温度计

气体温度计有定压气体温度计和定容气体温度计两种。它们都是以气体为测温物质, 分别以体积(压强保持不变)和压强(体积保持不变)随温度的变化为测温属性的。定压气体温度计结构较为复杂, 操作也麻烦, 故一般都使用定容气体温

度计。

图 1-1 是定容气体温度计的示意图。测温泡 B 内贮有一定量的气体(如氢、氮、氧和空气等)。测温时, 只需上下移动压强计 MN 的右臂 N , 使左臂的水银面保持在固定位置 O 上, 以保持 B 泡内气体的体积不变。气体的压强可由两臂内水银面的高度差 h 和 N 臂内水银面上的大气压强求得。这样, 就可由气体压强随温度的变化来确定温度。

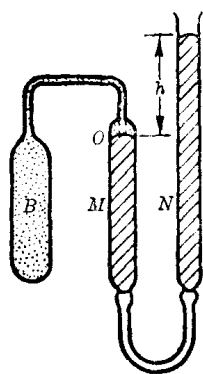


图 1-1

理想气体温标

实验表明, 用不同气体所确定的定容温标或定压温标, 除水的三相点的读数完全相同外, 其他温度的读数都不严格相同, 但差别并不大, 而且气体越稀薄, 差别就越小。对定容气体温度计而言, 当气体在水的三相点时的压强 p_{tr} 趋于零时, 差别就完全消失, 都给出相同的读数。图 1-2 给出了使用四种不同气体的定容温度计在测量水的汽点时所确定的温度值与 p_{tr} 的关系。从图上即可看出当 p_{tr} 趋于零时, 各种气体的温度计都给出相同的温度值(都是 373.15 K)。同样, 对定压气体温度计而言, 当气体的压强趋于零时, 用不同气体所确定的定压温标都趋于一致。据此, 将气体在水的三相点时的压强 p_{tr} 趋于零的极限情况下建立的气体定容温标, 或在气体压强 p 趋于零的极限情况下建立的气体定压温标称为理想气体温标。其定义式为

$$T = 273.16\text{ K} \lim_{p_{tr} \rightarrow 0} \frac{p}{p_{tr}} \quad (\text{定容}) \quad (1-3)$$

或

$$T = 273.16\text{ K} \lim_{p \rightarrow 0} \frac{V}{V_{tr}} \quad (\text{定压}), \quad (1-4)$$

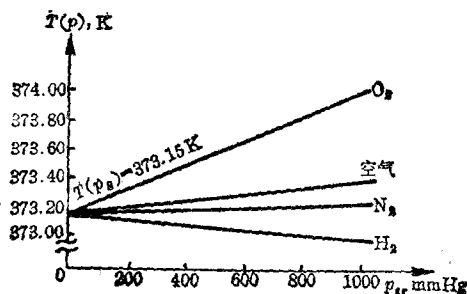


图 1-2

式中 p 和 p_{tr} 分别是在定容情况下气体在温度 T 时和在水的三相点时的压强； V 和 V_{tr} 分别是在定压情况下气体在温度 T 时和水的三相点时的体积。

理想气体温标不依赖于任何一种气体的个性，因此可将它作为一种标准温标。但它仍有赖于气体的共性，对于高温和极低温（气体液化点以下）的情况就不适用。为此，将在热力学第二定律的基础上引入绝对热力学温标，简称热力学温标。这是一种完全不依赖于测量物质及测温属性的温标。在理想气体温标所能确定的温度范围内，与热力学温标是完全一致的，都可用 T 表示温度，单位是开尔文(K)。

摄氏温标

摄氏温标是目前国际上最通用的一种温标。它是采用两个固定点：一个是冰点，另一个是汽点。在常用的摄氏分度法中，取冰点为 0°C ，汽点为 100°C 。

为了与热力学温标相统一，现规定摄氏温标由热力学温标导出。摄氏温标所确定的温度用 t 表示，它的定义为

$$t = T - 273.15. \quad (1-5)$$

摄氏温度的单位叫摄氏度，写成 $^{\circ}\text{C}$ 。在新的定义下，摄氏温

标的零点与冰点并不严格相等,汽点也不严格等于 100°C ,但它们之间的差别极其微小,一般情况下可不必考虑。

IV. 气体的状态方程

状态方程

热力学系统所处的平衡态可以用一组参量(几何的、力学的、化学的和电磁的)来描述。在一定的平衡态,这一组参量具有一定的数值,同时,系统又具有确定的温度。可见,温度一定是其他状态参量的函数。对于一定质量的气体系统,可以用压强 p 和体积 V 两个独立参量来描述其平衡态。因此温度 T 就是 p 和 V 的函数,即可表示为

$$T=f(p, V)$$

或 $F(T, p, V)=0$ 。

上述描述系统平衡态各状态参量之间的函数关系称为系统的状态方程。其具体形式需由实验确定。

理想气体的状态方程

实验证明,一定质量的气体,在温度保持不变时,它的压强和体积的乘积是一个常数:

$$pV=C, \quad (1-6)$$

常数 C 在不同的温度时有不同的数值。这个关系叫做玻意耳-马略特定律。

完全精确地遵从玻意耳-马略特定律的气体称为理想气体。对于实际气体,只要它的压强不太高、温度不太低,都可近似地看作理想气体。

设有一定质量的理想气体,由一个状态 (T_1, p_1, V_1) 变为另一个状态 (T_2, p_2, V_2) 。这个变化可以分为两步来完成:第一步,保持其体积 V_1 不变,而使温度和压强分别变为 T_2 和 p'_2 ,则从气体定容温标公式