

中学物理教学参考书

热 学

姜国渭 | 张素德 编

R
E

X
U
E

河北人民出版社

中学物理教学参考书

热 学

姜国渭 张素德 编

河北人民出版社

前 言

本书是为中学物理教师编写的教学参考书。全书共九章，分为四个部分。第一章为热学基本概念；第二、三、四章为气体分子运动论；第五、六两章讲述热力学基础；第七、八、九章为物性学基础。内容与深度基本和教育部委托北京大学拟定的综合性大学物理专业的《普通物理（热学）教学大纲》相当，故本书也可作为大专水平的函授、培训教材以及大学普通物理教学参考书。

本书力求便于读者自学，着重讲述解决问题的逻辑思维过程和方法。对学习中的重点和难点也给予多方面的论述和分析。

作为本书内容的重要组成部分，每章末都附有一定数量的思考题和习题，研究和解答这些问题，对于掌握基本概念、基本规律以及建立鲜明的物理图象都是非常重要的。

本书插图是由闻子任等同志绘制的，谨此致谢。

编者

1983年3月

目 录

绪论	(1)
第一章 基本概念	(6)
第一节 热力学系统	(6)
第二节 平衡态	(8)
第三节 状态参量	(11)
第四节 温度	(12)
第五节 状态方程	(26)
思考题	(44)
习题	(46)
第二章 气体分子运动论 (I)	(50)
第一节 物质的微观模型	(50)
第二节 理想气体的微观模型	(54)
第三节 理想气体的压强公式	(55)
第四节 温度的微观解释	(66)
第五节 压强公式的实验验证	(70)
第六节 分子间的力	(72)
第七节 范德瓦耳斯气体的压强	(80)
思考题	(86)
习题	(88)

第三章 气体分子运动论 (I)	(92)
第一节 麦克斯韦速度分布律	(95)
第二节 麦克斯韦速率分布律	(101)
第三节 三种速率	(108)
第四节 速度分量分布律	(112)
第五节 玻耳兹曼分布律	(116)
第六节 重力场中粒子按高度的分布	(120)
第七节 能量按自由度均分定理	(127)
第八节 理想气体的热容量理论	(133)
思考题	(142)
习题	(146)
第四章 气体分子运动论 (II)	(151)
第一节 输运过程的宏观规律	(153)
第二节 气体分子的平均自由程	(158)
第三节 输运过程的初级统计理论	(164)
第四节 对理论结果的分析	(172)
第五节 低压气体的性质	(178)
思考题	(185)
习题	(187)
第五章 热力学第一定律	(191)
第一节 热力学过程	(193)
第二节 准静态过程的功的表达式	(195)
第三节 热量	(202)
第四节 系统的内能 态函数	(205)
第五节 热力学第一定律	(209)

第六节	热容量和热量的计算	(212)
第七节	理想气体的内能与热容量	(215)
第八节	热力学第一定律对理想气体的应用	(219)
	思考题	(234)
	习题	(236)
第六章	热力学第二定律	(241)
第一节	热力学第二定律的定性描述	(241)
第二节	可逆过程与不可逆过程	(244)
第三节	热力学第二定律的微观解释	(249)
第四节	热力学第二定律的应用范围	(253)
第五节	循环过程及其效率	(255)
第六节	热机的工作循环和效率	(257)
第七节	卡诺定理	(269)
第八节	热力学温标	(274)
第九节	热力学第二定律的数学表述 熵	(278)
第十节	熵与几率	(290)
第十一节	熵与混乱度 有序与无序	(293)
	思考题	(295)
	习题	(299)
第七章	固体的性质	(305)
第一节	晶体的宏观特性	(306)
第二节	晶体的微观结构	(310)
第三节	晶体结构的物理本质	(317)
第四节	晶体的结合力与结合能	(323)
第五节	晶体的弹性形变	(329)

第六节	晶体的范性形变	(331)
第七节	晶体的热容量	(333)
第八节	晶体的热膨胀	(338)
第九节	晶体的热传导	(342)
	思考题	(343)
	习题	(344)
第八章	液体的性质	(348)
第一节	液体的分类	(349)
第二节	液体的压缩性	(351)
第三节	液体中分子的热运动 热容量	(353)
第四节	液体的热膨胀	(355)
第五节	液体中的热传导	(357)
第六节	液体表面层的性质	(359)
第七节	表面张力	(360)
第八节	弯曲液面下的压强	(364)
第九节	三相交界处的表面现象	(370)
第十节	毛细现象	(372)
	思考题	(376)
	习题	(377)
第九章	相变	(381)
第一节	相变的一般描述	(381)
第二节	单元系相变的普遍特征	(383)
第三节	液体的汽化——蒸发与沸腾	(387)
第四节	饱和蒸气与饱和蒸气压	(391)
第五节	弯曲液面上方的饱和蒸气压	(396)

第六节	实际气体的液化	(399)
第七节	焦耳—汤姆孙效应	(402)
第八节	临界温度很低的气体的液化	(408)
第九节	对比方程 对应态定理	(411)
第十节	单元系的二相平衡 克拉珀龙方程	(417)
第十一节	固液相变	(426)
第十二节	固气相变	(430)
第十三节	三相图和三相点	(434)
	思考题	(437)
	习题	(439)
	基本物理常数表	(442)
	换算系数表	(443)
	参考书目	(444)

绪 论

热学发展简史

热学这一物理学分支起源于人类对热与冷现象的本质的探求。热与冷的现象是人类生活中最早接触到的现象之一，因而这种探求可以上溯到很长的历史。我国远古时代就有燧人氏钻木取火的传说，可见中国人民在很久以前就知道了摩擦生热的现象。战国时代，驺衍创立了五行说，把热现象的一个突出表现——火当做构成世间万物的根本之一。在古希腊，关于热的本质有两种相互对立的说法。一种是柏拉图（Plato 公元前 427—347）提出来的，他根据摩擦生热的现象，认为热是一种运动的表现；另一种则是赫拉克利特（Heraclitus 公元前 540—480）提出来的，他认为火是构成宇宙万物的基本元素之一。这些古代关于热现象的说法都是没有实验根据的，因而没有重要的科学意义。

由于古代社会的生产水平很低，人们在生产和生活中对热现象的利用，只限于取暖，煮熟食物，最多也不过利用热来制造一些简单的用具。由于生产上没有提出迫切的要求，所以人们对热的本质没有进行深入的探讨。因此，直到 18 世纪，人类对热现象只是粗略地了解。

18 世纪初，资本主义在一些西方国家得到发展，社会生产上对动力的需求大大增加，因而产生了利用热来获得机械功的想法。于是开始了对热现象较深入的研究。1709 年，华伦海特改良了水银温度计并制定了华氏温标，热学的研究才开始走上实验科学的道路。

1768 年，苏格兰人瓦特研制成功近代蒸汽机并很快地被应用于社会生产和交通运输。于是，人们多年来想利用热获得机械功的愿望实现了。随着蒸汽机的广泛应用，提高它的效率便成为一个迫切的问题。这种情况促使人们对热的本质进行深入的研究。

1824 年法国青年工程师卡诺在热质说的基础上得出关于热机效率的普遍结论——卡诺定理。实质上，他已经基本上建立了热力学第二定律。但是由于卡诺站在不正确的热质说的立场上，因而尽管他本人已经接触到了热功当量这一关键问题，但是并没有认清。

1842 年德国医生买厄发表了一篇论文，提出了能量守恒的学说，他认为热量是一种能量，可以与机械功相互转化，并从空气的定压比热与定容比热之差计算出了热功当量。在此前后，焦耳用了 20 多年的时间，进行了多种多样的实验，测定了热功当量。焦耳的实验最后确立了能量守恒与转化定律，即热力学第一定律。这个定律是自然界最普遍的规律之一。焦耳的实验彻底粉碎了热质说，并为以后分子运动论的发展打下了基础。

1848 年开耳芬根据卡诺定理制定了热力学温标。1850 年和 1851 年克劳修斯和开耳芬对卡诺定理重新进行了分析，

他们摒弃了热质说，得出结论，即为了论证卡诺定理，必须根据一个新的原理，这个原理就是热力学第二定律。按照克劳修斯的说法，热力学第二定律指出热量不能自发地从低温物体传到高温物体。

热力学第一定律和第二定律的建立使热力学成为一门完整的科学。1906年能斯特根据低温下化学反应的许多实验事实总结出一个新规律——热力学第三定律。这个定律指出，绝对零度是不能达到的。热力学第三定律的建立，使热力学理论更臻完善。

热力学是热学的宏观理论，它虽然给出了热现象的一般规律，但却不能回答热的本质究竟是什么，热是一种什么运动形态等根本问题。

分子运动论是关于热现象的微观理论。在17世纪和18世纪期间，出现了一些定性的分子运动论的假设。在热力学发展的同时，即19世纪中期，分子运动论也开始了飞跃地发展。为了改进热机的设计，对热机的工作物质——气体的性质进行了广泛的研究。分子运动论便围绕着气体的性质的研究发展起来了。克劳修斯首先从分子运动论的观点推导出了玻意耳定律，麦克斯韦最初应用统计概念研究分子的运动，得到了分子运动速度分布定律，玻耳兹曼认识到统计概念的深刻含义，从而给出了热力学第二定律的本质解释。此后，吉布斯发展了麦克斯韦和玻耳兹曼理论，建立了系综统计法，从而建立了关于热现象的完整的微观理论——统计物理学。

应用统计物理学原理研究热辐射，发现了微观运动的新

的规律性——量子性。普朗克在1900年从热辐射的能谱分布研究中发现振动能谱的量子化。爱因斯坦和德拜利用能量量子化概念顺利地解释了气体比热和固体比热随温度变化的规律。以后一系列的实验事实证明量子性是微观世界的普遍规律，并于1926年建立了量子力学。与此相应，统计物理学就由经典统计物理学发展成为量子统计物理学，它对固体、流体和等离子体中的各种物理性质的研究起着主导作用。

热学的内容和结构

按照教育部委托北京大学拟定的综合性大学物理专业《普通物理（热学）教学大纲》的规定，可以把热学内容概括为四个部分（一般通行的热学教学参考书也大致都包括这四部分内容）：

一、基本概念 这是本书第一章的内容。这一章除讲述了平衡态、状态参量，状态方程以及热力学第零定律外，还着重讨论了“温度”这一热学中极其重要的基本概念。学习这一部分的目的是要建立起能够准确严格地描述宏观系统性质的一些基本概念，为以后各部分的学习打下必要的基础。

二、气体分子运动论 这是本书第二、三、四章的内容，是整个热学课程的重点之一。气体分子运动论是热学的微观理论——统计物理学的一个方面，它从气体分子的运动和它们之间的相互作用出发，通过一些简化模型来研究气体的平衡态性质以及气体从非平衡态向平衡态的转变过程（例

如气体中的输运过程)。

读者要通过对这一部分内容的学习，对一些基本的热学现象建立起鲜明的物理图象。

三、热力学基础 包括本书第五、六章的内容。这是热学的宏观理论基础，论述热力学第一定律和热力学第二定律以及它们的简单应用，是热学课程的另一个重点。

热力学不考虑物质的微观结构，而是概括由大量实验事实总结出来的两个定律，从能量的观点研究宏观系统的宏观性质以及各种运动形态之间的转化。

四、物性学基础 包括本书第七、八、九章。这部分讨论固体和液体的基本性质以及固、液、气三相之间的相互转变。这部分涉及较多知识性内容，在研究方法上，宏观方法和微观方法都要用到。根据《教学大纲》的规定，初学者在内容的取舍上可以有一些灵活性。

第一章 基本概念

什么是概念？概念是客观事物共通性在人们头脑中的映象，这个共通性反映出了事物的本质的特征。

概念是怎样形成的？一个科学的概念是通过从大量的个别事物中抽象出它们共同具有的本质特征而建立起来的。可见，概念是从客观事物本身概括出来的，它必然深刻地反映着现实。

下面，我们以建立“热力学系统”这一概念为例子，较为具体地研究物理概念形成的过程。

第一节 热力学系统

大家知道，热学的研究对象是物质系统（在热力学中称为热力学系统）的热运动规律。什么叫做热力学系统？这是热力学研究的具体对象，它可以很简单和单纯，也可以包罗万象。例如它可以仅由气体，或者液体，或者固体构成的单相系统，也可以是几个相共存的复相系统，例如水的气、液、固三相共存的三相系统。每一个相中可以由一种化学成分的物质构成，称为单元系统；也可由多种不同化学成分的物质构成，称为多元系统。物理学所研究的各种场（如引力场、电磁场等）也是物质存在的一种形式，同时也是热力学

研究的具体对象之一，因而热力学系统也可以由场组成。在各种各样的热力学系统中，我们能抽象出它们的哪些共同的本质的特征呢？显然，第一，不论简单或者复杂，也不论是场还是实物，它们都是物质的；第二，它们本身都应当是有限的宏观客体，都以某种方式为周围环境（环绕着它们的介质，简称外界）所包围并与之发生相互作用。例如，我们研究的对象是气体，则它被容器所包围，并与容器通过压力相互作用着。如果把气体和容器一起当做我们研究的对象，则它们还是为外界环境所包围并与之发生相互作用。于是，我们就可以把热力学系统定义为“以任何方式与其周围介质（外界）相互作用着的宏观物质系统”。这样，我们就通过抽象的方法建立了“热力学系统”这一重要概念。

在本章中，我们还将建立一系列基本概念。当然，由于有了中学物理的基础，我们不必把每一个概念的建立过程都象上面那样作如此具体而详细的讨论。但是，我们应该以那样的思维方式来理解和掌握它们。

综上所述，热力学系统从构成看既可以是简单的系统，也可以是十分复杂的系统；从与外界的相互作用看也有简单与复杂之分。下面我们就根据它们的构成不同以及与外界作用的差异进行分类。

当热力学系统的各部分完全一律的时候，我们便称它为均匀系统；当它的各部分有差别时，就称做非均匀系统。

如果系统的各部分之间的相互作用比它们与外界的作用大得多，以致于系统与外界的相互作用小到可以忽略时，我们便称它为孤立系统；与外界没有物质（应理解为实物）交

换，但可以有能量交换的系统，称为封闭系统。例如，装在封闭容器中的气体，不可能与外界发生物质交换，但可以和外界有功和热量的传递，便是封闭系统。与周围环境既可有物质交换，也可有能量交换的系统，称为开放系统。盛于开口容器中的液体，由于液体分子可以蒸发，外部蒸气分子也可以凝结到液体中来，因此系统与外界既有物质交换，也有能量交换，这便是开放系统的例子。

前面已经提到，我们还可以根据系统的化学成分把系统分为单元系统和多元系统。

第二节 平衡态

“态”是“状态”的简称，实际上是热力学系统的“宏观状态”的简称。在讨论什么是“平衡态”之前，我们先讨论什么是“状态”。

所谓热力学系统的状态是指系统的所有性质的总和，这些性质可以是系统的形状、大小、体积等，称做几何性质；可以是系统的压强、应力、表面张力等，称做力学性质；可以是系统不同化学成分的物质含量（化学组分）等，称做化学性质；在有电磁现象出现的时候，还可以是电场强度、磁场强度、极化率等，称做电磁性质。除了几何性质、力学性质、化学性质和电磁性质这四类性质之外，还有系统的冷热程度这一性质，我们可以称为热学性质。大量的事实告诉我们：系统的热学性质与其它四类性质有关系。例如，气体的体积（几何性质）或压强（力学性质）变化时，它的温度

(热学性质)也随之变化。

可见,我们说系统的状态(态)是系统的力学性质、几何性质、电磁性质、化学性质以及热学性质的总和。

热力学系统的状态(所有的性质)可能随时间而改变,定量地描述状态随时间的变化是一件十分繁难的事情。因此,在热学中,我们常常先讨论一种重要的特殊情形——平衡态。这是一个极其重要的物理概念。为了深刻而具体地理解这个概念,我们从几个例子讲起。

把一定质量的气体盛在一定体积的容器里,经过一段时间以后,气体的各部分就具有相同的温度和相同的压强。如果气体与外界没有能量交换,内部各部分之间也没有能量的变化,则容器中的气体的状态将不再随时间变化。当然,从微观观点看,气体的分子是在作不停止的热运动。

两个冷热程度不同的物体相互接触,热的物体变冷,冷的物体变热,直到最后两个物体达到各处冷热程度均匀一致的状态为止。这时如果没有外界影响,则两物体的状态也将不再随时间变化。

将水盛于开口的容器中,水将不断蒸发。如果把容器封闭,则经过一段时间后,容器内蒸气达到饱和状态,蒸发将停止。这时,如果系统和外界没有功和热的交换,则它的状态也将不再随时间变化。

类似的例子还有许多。从这些例子中,我们能够抽象出什么本质的特征呢?那就是热力学系统在没有外界影响(指和外界没有功和热的交换)的条件下,经过一定时间,它的状态不再随时间变化。热力学的这种在没有外界影响的