



全国高等师范专科学校教材

热 学

(修订版)

主 审 李振亚

主 编 詹佑邦

副主编 方天华

编写组成员(按姓氏笔划为序)

方天华 胡 华

谢国秋 詹佑邦

华东师范大学出版社

出版说明

1986年,我社受国家教委有关部门的委托,根据国家教委师范司制订的《二年制师范专科学校八个专业教学计划》的要求,与全国各省、市、自治区教委合作,共同组织编写了全国高等师范专科学校教材20余种;并与华东六省教委密切协作,编写了能反映华东地区师专教学和科研水平的、适应经济建设较为发达地区的师专教学需要的教材40余种,师专第一次拥有了比较符合自己培养规格、规律和教学要求而自成系统的教材。实践证明,师专教材建设对于提高师专教学水平,保证师专教学质量起到了重要作用。

近几年来,在邓小平同志建设有中国特色社会主义理论的指引下,我国的教育事业取得了很大发展。国家教委根据《中国教育改革发展纲要》的要求,针对高等师范专科学校的教育特点,颁发了《高等师范专科教育二、三年制教学方案》,进一步明确了高等师范教育面向21世纪的发展目标和战略任务,以及教学内容和教学结构的改革要求。

自出版第一本师专教材以来,我社多年来分阶段地对师专教材的使用情况进行了跟踪分析,又于1995年开展了较为系统的全面调查。调查中,教师普遍反映,现有师专教材尚不同程度存在着与当前师专教学实际相脱节的现象;对各学科中的新发现、新理论、新成果,未能加以必要的反映,已跟不上当前社会、经济、科技等发展的新形势。考虑到师专从二年制向三年制发展的现状和趋势,我社于1996年初与华东六省教委有关部门一起,邀集全国48所师专代表专门研讨了师专教材建设问题,随即开展了部分教材的修订和新编工作。

师专教材建设并不是一个孤立的系统,它必须服务于师范教

育的总体规划。它已经历了从“无”到“有”的过程,并将逐步实现从“有”到“优”的目标。我们相信,通过各方面的努力,修订和新编的师专教材将充分体现基础与能力相结合,理论与实践相结合,当前与未来相结合的特色,日臻完善和成熟。

这次编写和修订工作得到了华东六省教委的大力支持,我们谨在此深表谢忱,并向为师专教材建设付出辛勤劳动的各地师专领导和所有参加编写、修订和审稿的专家、学者等致以衷心的感谢。

华东师范大学出版社
1997年3月

再 版 前 言

按照 1989 年国家教委制定的二年制师专物理专业“热学”教学大纲，由俞维诚主编、王生贵、胡一飞、詹佑邦同志参加编写的《热学》教材，自 1991 年第一版出版以来，在许多师专物理专业使用，受到师生的好评。本书则是根据师专教学改革的发展和 1995 年国家教委颁布的“高等师范专科教育二、三年制教学方案”的要求，由詹佑邦、方天华、胡华和谢国秋同志对第一版重新进行修订后的再版。

詹佑邦等同志依据多年丰富的教学经验和对本书第一版的教学实践，严肃认真地进行修订工作，既保持了第一版的优点和风格，又根据师专和中学教学改革现状和发展，突出了对基本概念和基本定律的分析阐述；加强了师范教育的特点及与中学物理教材的联系；精选了某些热学学科发展的前沿和实际应用的知识内容，统一了物理学单位和名词等。我们相信再版的《热学》教材将更适合当前师专物理专业教学的需要。

随着科学技术和我国国民经济的迅速发展，以及高等学校和中学教学改革的进展，适时编写和修改教材是高校教材建设的重要内容，是保证和提高教学质量的重要举措。基础课的教材建设更是一项非常重要和长期的工作。国家教委十分重视教材建设，多次组织师专教师编写基础课教材。“热学”是物理专业的一门重要基础课。本书在第一版出版六年后就重新修订再版，这充分表明师专的领导和物理教师对基础课教材建设的高度重视，对提高教学质量的高度责任心。这种对基础课教学认真负责的态度值得我们在高校工作的教师学习。

我相信这本教材修订再版定能受到师专物理教师和学生的欢迎。

李振亚

1997年7月于苏州大学

目 录

绪论	1
§ 0.1 热学的研究对象和方法	1
§ 0.2 热学的形成和发展	4
第一章 热学的基本概念	7
§ 1.1 热力学平衡态	7
§ 1.2 温度和温标	9
§ 1.3 热 热容 热传递	15
§ 1.4 统计规律性	22
阅读材料	
几种常用的温度计	27
思考题一	30
习题一	31
第二章 热力学第一定律	33
§ 2.1 热力学过程	33
§ 2.2 理想气体状态方程	36
§ 2.3 准静态过程的功	42
§ 2.4 系统的内能	46
§ 2.5 热力学第一定律	48
§ 2.6 理想气体的内能、热容和焓	52
§ 2.7 热力学第一定律对理想气体的应用	56
§ 2.8 循环过程 卡诺循环	67
§ 2.9 热机和致冷机	73
阅读材料	
能源的利用和开发	85
思考题二	88
习题二	92
第三章 热力学第二定律	99
§ 3.1 热力学第二定律	99

§ 3.2	实际宏观过程的不可逆性	103
§ 3.3	卡诺定理	107
§ 3.4	热力学温标	111
§ 3.5	熵	114
§ 3.6	熵增加原理	122
§ 3.7	热力学第二定律的统计意义	128
阅读材料		
一、	热力学函数	131
二、	热力学第三定律	134
思考题三		135
习题三		137
第四章	分子热运动的统计规律	141
§ 4.1	分子动理论的基本观点	141
§ 4.2	理想气体的压强公式	147
§ 4.3	温度的微观解释	152
§ 4.4	麦克斯韦速率分布律	154
§ 4.5	玻耳兹曼分布律 重力场中微粒按高度的分布	165
§ 4.6	能量按自由度均分定理	167
§ 4.7	理想气体的内能和热容	171
阅读材料		
	负热力学温度	176
思考题四		179
习题四		181
第五章	气体内的输运过程	185
§ 5.1	气体分子的平均自由程	186
§ 5.2	输运过程的宏观规律	191
§ 5.3	输运过程的微观解释	195
阅读材料		
一、	低压气体的热传导和粘滞现象	205
二、	远离平衡态的非平衡过程	207
思考题五		211
习题五		212

第六章 实际气体	215
§ 6.1 实际气体的实验等温线 物质的临界状态	215
§ 6.2 范德瓦耳斯方程	220
§ 6.3 范德瓦耳斯等温线	227
§ 6.4 实际气体的内能 焦耳-汤姆孙效应	231
* § 6.5 气体的液化 低温的获得	236
阅读材料	
范德瓦耳斯气体的焦耳-汤姆孙效应	241
思考题六	243
习题六	245
第七章 固体和液体	247
§ 7.1 晶体的宏观特性和微观结构	247
§ 7.2 固体的热膨胀和热容	253
§ 7.3 液体的微观结构 溶液中的输运过程	258
§ 7.4 液体的表面张力 弯曲液面内外的压强差	263
§ 7.5 液体与固体接触处的表面现象	270
阅读材料	
一、水的反常膨胀	275
二、液晶	276
三、超导体	277
思考题七	278
习题七	279
第八章 相变	282
§ 8.1 单元系一级相变的普遍特征	282
§ 8.2 气液相变 汽化曲线	285
§ 8.3 克拉珀龙方程	295
§ 8.4 固液相变 熔解曲线	298
§ 8.5 固气相变 三相图	301
* § 8.6 大气中的含水	305
阅读材料	
一、二级相变和 λ 相变简介	311

二、物质的第四态与第五态简介	312
思考题八	314
习题八	316
习题答案	318
附录一 本书用到的主要物理量的名称、符号及单位	324
附录二 常用物理常数	325
附录三 热学常用单位换算	325
参考书目	326
再版后记	327

绪 论

§ 0.1 热学的研究对象和方法

一、热学的研究对象

热学是研究物质的热性质和物质热运动规律及其应用的一门学科，是物理学的重要组成部分，也是自然科学中一门基础学科。

经验告诉我们，用一定的方法（如传热或做功）可以使物体的冷热程度发生变化；而当物体的冷热程度发生变化时，物体的大小、状态和许多物理性质也将随着发生变化。例如，一般物体受热后体积膨胀；水冷却到一定程度会结成冰；钢件经过淬火后变硬；导线受热后电阻会增大，等等。这些与物体冷热程度有关的物理性质和运动状态的变化，统称为**热现象**。通常用温度这一物理量来表征物体的冷热程度。因此，也可以说凡是与温度有关的物理现象都是热现象。热现象是自然界中最普遍的现象之一。

人们通过对热现象和其它现象的深入研究，逐步认识到宏观物体是由大量微观粒子（分子、原子或离子）组成的，这些微观粒子以各自的方式相互作用，并处于永恒的杂乱运动之中。人们把这种大量微观粒子永不停息的无规则运动称为**热运动**。正是由于这种微观的热运动才导致了宏观的热现象，可以说，热运动是热现象的微观本质，热现象是微观粒子热运动的宏观表现。就单个粒子而言，它的运动属于机械运动，服从力学的基本规律，但是由于它时刻要受到周围大量的其它粒子的复杂作用，因此，其具体的运动过程变化万端，具有很大的随机性；然而，大量粒子的随机运动在总体上却可以显示出某种规律性。以气体为例，当

温度一定时，虽然气体内部的分子以不同大小和方向的各种速度运动着，且不断发生变化，但在总体上气体分子具有和温度相对应的确定的平均动能，而且温度越高，分子热运动对应的平均动能也越大。由此可见，大量粒子的热运动虽然包含着机械运动，但在整体上却不再能归结为机械运动，实际上这是一种更复杂、更高级的运动形态，遵循着新的基本规律。这些规律是热学要研究的重要内容之一。

在自然界和生产过程中，热运动与机械、电磁、化学等其它运动形式之间存在着广泛而深刻的内在联系，这不但表现在它们之间的相互影响，在实际过程中还经常发生着各种运动形式之间的相互转化。例如，热机将热运动转化为机械运动；电炉将电磁运动转化为热运动；物体相互间的摩擦可实现机械运动向热运动的转化，等等。热运动和其它运动形式之间的相互转化具有十分重大的理论和实际意义，它们也遵循一定的基本规律，这些规律是热学要研究的另一基本内容。

二、热学的研究方法

在热学中，通常把所研究的宏观物体或物体系称为**热力学系统**，简称为**系统**。一个热力学系统的状态，可以从宏观和微观两种观点加以描述。

从宏观看，热力学系统是连续分布的物质。系统的宏观状态可以用一些由实验直接观测的**宏观量**来描述。如一定质量的某种气体的状态，可以用体积、压强、温度、密度等宏观可观测量来描述。这就是热力学系统的所谓**宏观描述**。

从微观看，热力学系统是由大量的处于不停地运动之中的微观粒子组成的体系。每个微观粒子的状态都可用它的空间坐标、速度、动能、动量等**微观量**来描述。从这种微观的角度来描述热力学系统状态的方法称为**微观描述**。

随着对热力学系统状态描述的观点不同，对热现象规律的研究也就有了两种不同的方法：宏观的方法和微观的方法。

热学研究的宏观方法是根据直接由观察、实验总结得到的热力学定律,不考虑分子的微观运动,从能量观点直接研究系统的宏观运动。用这种方法研究的热学部分,称为**热力学**,是热现象的宏观理论。热力学的一切结论都是从三个热力学基本定律出发,通过严密的逻辑推理而得到的,因此具有高度的普遍性和可靠性。但是热力学理论没有涉及到物质的微观结构,它对具体物质的某些特性不能提供其理论。例如,热力学理论不能导出物质的物态方程及比热容公式,对于物质宏观性质的涨落现象,也不能给出任何解释。所以,热力学理论有一定的局限性。

热学研究的微观方法是从物质的微观结构出发,应用微观粒子运动的力学定律和统计方法来研究物质的热性质。用这种方法研究的热学部分,称为**统计物理学**,是热现象的微观理论。在统计物理学中,将物质的宏观性质作为大量微观粒子运动的平均性质,因而成功地解释了涨落现象,揭示了涨落现象的规律。同时,统计物理学对某种物质的微观结构采取一定的简化模型后,利用求微观量的统计平均方法便能从理论上导出物态方程和比热容公式等。但是,统计物理学也有局限性。它对物质结构采用的一些模型只是物质实际结构的近似代表,它的理论只能近似地反映物质的实际性质。可以相信,随着对物质结构的认识的深入,相应地选择更恰当的模式,统计物理学所得到的结果将逐步接近实际情况。

热力学和统计物理学是从不同的侧面来研究热现象的,它们具有不同的特点,起着相辅相成的作用。热力学对热现象给出普遍而可靠的结果,可以用来检验微观理论的正确性;统计物理学则可深入热现象的本质,使宏观理论具有更深刻的物理基础,并可得到宏观测量与微观量的依赖关系。由于两种方法是从不同的角度研究同一对象,因而将两种方法结合起来考虑问题不仅是可能的,而且也是十分必要的。例如,在研究实际气体、液体、固体的性质和相变规律时,两种方法都会用到。

§ 0.2 热力学的形成和发展

热学作为一门研究热现象规律的科学,其形成和发展是建立在人类利用热现象的基础之上的。

热现象是人类生活中最早接触到的现象之一。在有史以前人类已能钻木取火,由于火的广泛应用,人们就逐渐认识了许多热现象。但是,在古代,社会生产力水平很低,人们在生产中和生活中对热的利用还只限于取暖、煮熟食物,最多也不过制造一些简单的金属工具。直到 18 世纪前,人类对热现象仅有粗略的了解。

18 世纪以后,资本主义在欧洲得到了广泛的发展。大生产迫切希望解决生产的动力问题,于是产生了把热转变为机械功的愿望。这个愿望于 1705 年首先由英国的铁匠纽科门实现。他制作了一种叫做“大气蒸汽机”的发动机,并用于矿井提水。但是,纽科门的蒸汽机效率极低,且要人工来开关蒸汽通路,因此实用性很差。1764 年,徒工出身的英国机械师詹姆斯·瓦特(1736~1819)在纽科门大气蒸汽机的基础上,经改进制成了往复式蒸汽机。这种蒸汽机在 1785 年后的工业革命中被广泛地作为纺织等大生产的动力。蒸汽机的出现和后来的广泛应用以及在生产中遇到的大量与热现象有关的问题,促使人们对水、水蒸气和其他物质的热性质,对热现象的规律和本质以及热功转换的效率等进行广泛的研究。1724 年,德国物理学家华伦海特(1686~1736)改良了水银温度计,并确立了以冰与盐水的混合温度为零度,以人体血液温度为 100 度的华氏温标,从而使温度测量有了精确的量具和共同的标准。1761 年法国气体化学家布拉克(1728~1799)引入比热、熔解热、汽化热等概念,后来又设计了量热器对它们进行测量。华伦海特和布拉克等人的工作为系统的计温学和量热学的建立打下了基础。从此以后,热现象的研究走上了实验科学的道路而得到迅速的发展,逐渐形成了一门系统的科学——热学。

在关于热的本质的研究和争论中,热学理论得到了发展。18世纪初,出现了把热看成是一种没有质量、能够流动的物质理论,即所谓的“热质说”。由于“热质说”根据热质守恒的假设成功地说明了有关热传导和量热学的一些实验结果,因此在整个18世纪十分流行,占有统治的地位。“热质说”的致命弱点是不能解释摩擦生热现象。历史上第一个用实验驳斥“热质说”的是德国物理学家本杰明·汤普森,即伦福德伯爵(1753~1814)。1798年,他用钝钢钻钻炮筒,虽然没钻下什么碎屑,但是却有大量的热产生而使大量的冷水沸腾。他认为,热既然可以在摩擦中不断产生,就只能是一种运动,而不可能是一种物质。第二年,伦福德的看法得到了英国化学家戴维(1778~1829)的支持,他把两块冰互相摩擦,而使冰融化成水。这些结果用“热质说”是无法解释的。伦福德与戴维的工作当时在物理学界并未引起广泛注意,原因是还未找到机械功与热之间的数量关系。

最初提出热量与功相当的说法,并且定出热功当量的是德国医生迈尔(德,1814~1878)。他在1842年发表的一篇论文中提出了能量守恒的学说,认为热是一种能量,可以与机械能互相转化,并从空气的定压比热容与定容比热容之差算出了热功当量。在此前后,焦耳(英,1818~1889)花了二十多年时间进行了许多实验来测定热功当量,焦耳所做实验虽多种多样,但得到的结果都是一致的。焦耳的实验最后确定了能量守恒与转化定律,即热力学第一定律。这个定律揭示了自然现象的最普遍规律。焦耳的实验彻底粉碎了热质说,热质说在物理学中就再也没有任何地位了。

紧接着热力学第一定律的建立,在提高热机效率的研究中,英国物理学家威廉·汤姆孙(1824~1907)即开尔文,根据法国工程师卡诺(1796~1832)于1824年发表的有关热机效率的定理,于1848年创立了开氏绝对温标;并于1851年与德国物理学家克劳修斯(1822~1888)几乎同时建立了热力学第二定律。热力学第二定律是反映能量传递和转化方向规律的基本定律。

热力学第一定律和热力学第二定律的建立,奠定了热力学的理论基础。后人在应用它解决具体问题时,又找到了反映物质各种性质的相应的热力学函数,从而发展了热力学的数学理论。1912年,能斯脱(德,1864~1941)在研究化学反应的低温性质时,发现了热力学第三定律,即绝对零度不能达到原理。热力学第三定律的建立使热力学理论更臻完善。

在热力学发展的同时,气体动理论也迅速发展起来。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,气体动理论便是围绕着气体性质的研究发展起来的。克劳修斯首先从气体动理论的观点推导了玻意耳定律。麦克斯韦最初应用统计概念研究分子的运动,得到了分子运动的速度分布定律。玻耳兹曼(奥,1844~1906)认识到统计概念有原则性的意义,他给出了热力学第二定律的统计解释。后来吉布斯(美,1839~1903)进一步发展了麦克斯韦和玻耳兹曼的理论,建立了系综统计理论。从此经典统计物理学也发展成为完整的理论了。

1900年,普朗克(德,1858~1947)提出了辐射能量子的概念。1924~1926年发展起来的量子力学,为量子统计物理学的建立奠定了基础。与此同时,在热学的宏观理论方面,非平衡态热力学也开始发展起来。

热学的发展简史充分说明,一切自然科学都是在生产力发展的推动下发展起来的,而自然科学的发展反过来又推动生产力的进一步发展。热学在今日仍占有非常重要的地位。热学中的许多分支学科,像非平衡态热力学、量子统计、工程热力学、传热学等,它们的理论和方法已经广泛应用于气象学、低温物理、固体物理、表面物理、等离子体、物质结构、空间科学等尖端科学的研究之中。

第一章 热学的基本概念

热学要研究的是热现象的规律。热现象是组成物体的大量微观粒子热运动的宏观表现。热运动虽然包含着机械运动,但却不能归结为机械运动。因此,研究热现象时,一方面必须以力学的基本概念和规律为基础,另一方面又需要引入新的基本概念,探索新的客观规律。

本章介绍热学中最重要几个基本概念:平衡态、温度、热、统计规律性。

§ 1.1 热力学平衡态

一、热力学系统

在热学中,我们常把作为研究对象的物体或物体系称为**热力学系统**,简称**系统**;而把处于系统以外的物体或物体系称为**外界**。例如,当我们研究气缸内的气体的行为时,这部分气体就是系统,而气缸壁、活塞及大气等则属于外界(图 1.1.1)。

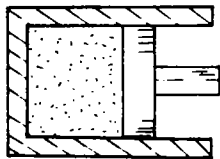


图 1.1.1 系统与外界

根据系统与外界相互作用的情况,系统可分为开放系统、封闭系统和孤立系统。可以与外界交换物质和能量的系统,称为**开放系统**。如敞口容器中的液体可视为开放系统。可以与外界通过作功或传热交换能量,但不交换物质的系统,称为**封闭系统**,如密闭容器中的气体可视为封闭系统。与外界既无物质交换,又无能量交换的系统,称为**孤立系统**。严格说来,自然界并不真正存在这种情形,但当系统与外界的相互作用小到可以忽略不

计时,可近似看成孤立系统。

二、热力学平衡态

一定的热力学系统在一定的条件下总处于某种状态,称之为**热力学状态**。热力学状态可分为热力学平衡态和非平衡态。在不受外界影响(即与外界没有物质和能量交换)的条件下,系统所有的宏观性质不随时间变化的热力学状态,称为**热力学平衡态**,简称**平衡态**,否则称为**非平衡态**。例如,将水装在开口的容器中,则水将不断蒸发,但如果把容器密封(图 1.1.2),则经过一段时间,蒸发现象将停止,即水蒸气达到饱和状态。这时如果没有外界影响,系统的宏观状态将不再发生变化,系统所处的状态就是热力学平衡态。值得注意的是,如果有外界影响,即使系统处于宏观性质不随时间变化的稳定状态,也不是平衡态。例如,将一金属杆的一端浸在沸水中,另一端浸在冰水中。在沸水和冰水的维持下,杆上各处的冷热程度有一不随时间改变的稳定分布。但这时金属杆并不处于平衡态,因为杆与沸水及冰水之间有热交换,热量持续不断地从杆的一端传到另一端。

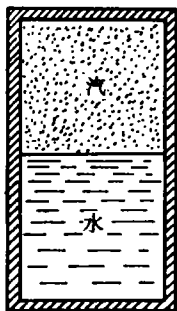


图 1.1.2 饱和蒸汽与水处于热力学平衡态

关于热力学平衡态,还需要说明以下三点:第一,一个系统处于热力学平衡态时,首先必须是处于力学平衡,即系统内部各部分间不发生宏观的相对运动;其次,必须是处于热平衡,即系统同外界及系统内部各部分间没有热交换发生;再次,对于多相系统(如图 1.1.2 所示的水与水蒸气组成的二相系统),还必须是相平衡的;对于含有几种化学成分的系统,还必须是化学平衡的。因此,热力学平衡是比力学平衡更为广义的平衡。第二,平衡态是指系统的宏观性质不随时间变化,从微观角度看,组成系统的分子仍在不停地运动,只是运动的平均效果不随时间变化,宏观上表现为系统达到了平衡态。因而,热力学平衡是一种动态平衡,通常也把这种平