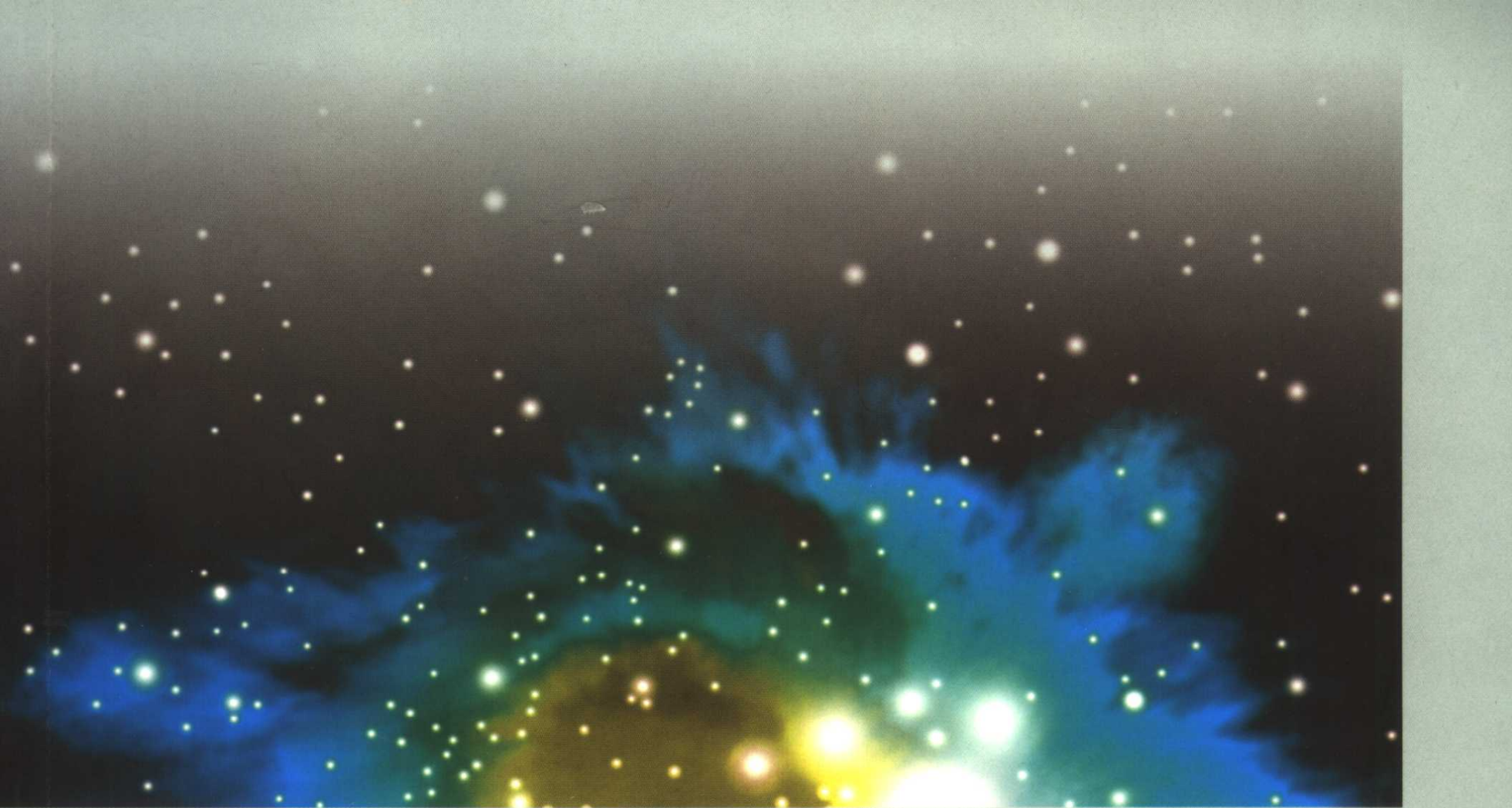




REWULIXUE GAILUN

热物理学概论

胡汉平 程文龙 编著



中国科学技术大学出版社

内 容 简 介

本书主要介绍热物理的基本知识,内容包括研究平衡态的“热力学”和非平衡态的“传热学”。其特点是用现代的观点改革传统的教学内容及讲授方法,注重热物理知识间内在的逻辑联系和热物理本质的阐述,力求用通俗的笔法讲清概念、规律和方法,同时对热物理方面的一些最新进展、学科交叉和具体应用也加以介绍。

本书可作为热科学、能源工程、热能动力与工程热物理,以及机械、化工、冶金、交通运输、建筑环境、航空航天等专业的本科生、研究生、教师及从事相关工作的科技人员的教学或参考用书。

图书在版编目(CIP)数据

热物理学概论/胡汉平,程文龙编著. —合肥:中国科学技术大学出版社,2006.2
ISBN 7-312-01885-8

I. 热… II. ①胡… ②程… III. 热学-高等学校-教材 IV. O551

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2006)第 004348 号

中国科学技术大学出版社 出版发行

(安徽省合肥市金寨路 96 号,邮编:230026)

中国科学技术大学印刷厂印刷

全国新华书店经销

开本: 787×1092/16 印张: 22.25 字数: 560 千

2006 年 2 月第 1 版 2006 年 2 月第 1 次印刷

印数: 1—3000 册

ISBN 7-312-01885-8/O · 327 定价: 30.00 元

前 言

本书为中国科学技术大学“十五”规划教材，主要介绍有关热物理的一些基本概念、基本规律和基本方法，内容包括研究平衡态的“热力学”和非平衡态的“传热学”。

热物理是关于热的产生、输运和转换的科学。它是目前应用范围最为广泛的学科之一，从尖端科技到日常生活都离不开热物理知识的指导。只要有能量存在的地方，就不可避免地会遇到热的现象，它往往与其他现象耦合在一起。因此，不论从事什么方面的研究，如不把热的因素考虑进去，可能会有较大误差，或得不到正确的解释。换言之，不掌握一定的热物理知识，就很难准确地解决本专业所遇到的一些科学问题。热物理学的基础知识应成为当代大学生所必备的基本常识。有鉴于此，笔者所在的中国科学技术大学工程科学学院已将其列为院学科群基础课，全院学生，不论是何系何专业，都必须上，以适应加强基础、拓宽专业面的教改要求。

目前针对热物理专业的学生写的专门性的热物理教材已有很多，但具有良好的可读性，便于各个专业学生掌握和使用的较为系统完整的热物理教材还不多见。为此，我们根据自己多年来从事热物理教学的经验和体会，并参阅国内外大量文献资料，历时两载，写成此书，期望能收抛砖引玉之效。

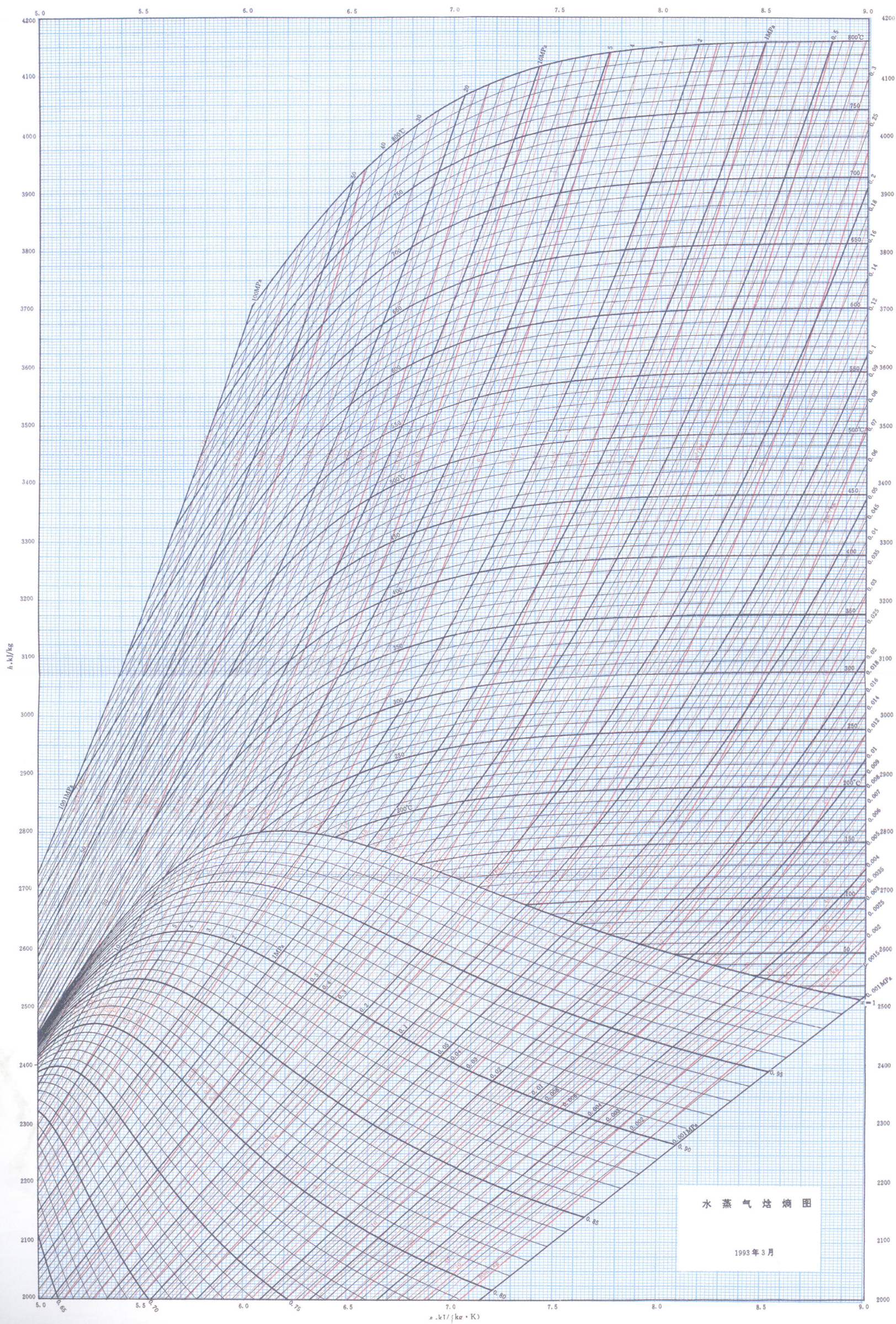
本书尝试着对现有热物理教材编写体系进行一些改革。注重热物理知识间内在的逻辑联系，抓住重点，突出本质。如考虑到热物理研究的是一切与温度有关的现象，温度概念在热物理学中占有中心的地位，故专辟一章予以系统介绍。可用能（也称焓）这一概念为热力学的精华，为使读者对其能有清晰透彻的理解，也用一章的篇幅详细讲述。对较难掌握的概念，诸如熵、熵流与熵产等，也用较多的篇幅予以阐释。另外，对热物理在其它学科的应用，以及当今一些热点研究课题，如太阳能热利用、燃料电池、磁流体发电、生物传热、热管等也都有涉及。每章后附有小结，以方便读者把握整章内容。

本书的绪论、第1~6章，第9章以及第13.6小节由胡汉平撰写，第7、8章，第10~16章，附录由程文龙撰写。经过初稿试讲、相互校阅、反复修改，最后定稿。本书的写作得到了中国科学技术大学教务处的大力支持和赞助，在此深表感谢。

我们谨记严济慈老校长的教导：“读书要深入浅出，教书要浅入深出。”给本书的写作制定了十二字方针：清楚，简洁；通俗，深刻；实用，特色。但限于我们的学识水平，虽竭尽所能，上述目标恐难达到，疏漏之处在所难免，还望各位读者不吝赐教。

编著者

2005年1月



目 录

绪 论	(1)
-----------	-----

第一篇 热 力 学

第一章 热力学的性质	(5)
1.1 何谓热力学	(5)
1.2 热 力 系 统	(5)
1.3 平 衡 状 态	(6)
1.4 状 态 方 程	(8)
1.5 准平衡过程	(9)
1.6 可 逆 过 程	(11)
1.7 热 与 功	(12)
1.8 热 力 循 环	(15)
小 结	(16)
思 考 题	(16)
习 题	(17)
第二章 温度与热力学第零定律	(19)
2.1 热量与温度	(19)
2.2 热平衡——热力学第零定律	(20)
2.3 温度测量——温度计与温标	(21)
2.4 绝 对 温 度	(22)
小 结	(28)
思 考 题	(28)
习 题	(29)
第三章 内能与热力学第一定律	(30)
3.1 能量守恒——热力学第一定律的实质	(30)
3.2 内 能	(30)

3.3 焓	(32)
3.4 能量方程式——热力学第一定律的表达式	(34)
3.5 能量方程式的应用	(39)
小 结	(44)
思 考 题	(44)
习 题	(45)
 第四章 熵与热力学第二定律	(47)
4.1 自然发生过程的方向性	(47)
4.2 热力学第二定律的表述	(48)
4.3 热机理论——卡诺定理与卡诺循环	(50)
4.4 克劳修斯不等式	(53)
4.5 熵	(57)
4.6 熵 增 原 理	(69)
4.7 熵 方 程	(71)
小 结	(73)
思 考 题	(75)
习 题	(76)
 第五章 焓与热力学定律的综合	(79)
5.1 热力系的焓	(79)
5.2 自由能与自由焓	(83)
5.3 热量焓和冷量焓	(85)
5.4 焓 损	(86)
5.5 焓平衡方程	(88)
小 结	(93)
思 考 题	(95)
习 题	(95)
 第六章 热力学函数与基本热力学关系式	(97)
6.1 状态函数的数学特性	(97)
6.2 基本热力学关系式	(99)
6.3 热 系 数	(102)
6.4 熵、内能和焓的一般关系式	(104)
6.5 比热的一般关系式	(109)
6.6 热力学基本函数的确定	(112)

6.7 热力学关系式的若干应用	(113)
小 结	(116)
思 考 题	(118)
习 题	(118)
 第七章 工质的热力学性质	(120)
7.1 理想气体的热力学性质	(120)
7.2 实际气体状态方程和对比态原理	(129)
7.3 水蒸气的性质	(130)
7.4 湿 空 气	(136)
小 结	(142)
思 考 题	(143)
习 题	(143)
 第八章 气体的热力过程	(145)
8.1 理想气体的热力过程	(145)
8.2 气体压缩的热力过程	(151)
小 结	(156)
思 考 题	(157)
习 题	(157)
 第九章 气体和蒸气的流动	(159)
9.1 稳定流动的基本方程	(159)
9.2 流速变化的条件	(161)
9.3 喷管的计算	(164)
9.4 有摩阻的绝热流动	(172)
9.5 绝 热 节 流	(173)
小 结	(177)
思 考 题	(179)
习 题	(180)
 第十章 相平衡与相变	(182)
10.1 平 衡 判 据	(182)
10.2 化 学 势	(183)
10.3 平表面的相平衡	(185)
10.4 表面张力系统与曲界面的相平衡	(187)

小 结	(192)
思 考 题	(192)
习 题	(192)
第十一章 热力循环与能量转换	(194)
11.1 蒸气动力循环	(194)
11.2 气体动力循环	(199)
11.3 制 冷 循 环	(207)
11.4 其他能量转化和利用形式	(210)
小 结	(213)
思 考 题	(213)
习 题	(214)

第二篇 传 热 学

第十二章 传热学概述	(219)
12.1 热量传递的基本方式	(219)
12.2 热 传 导	(220)
12.3 热 对 流	(220)
12.4 热 辐 射	(221)
小 结	(221)
思 考 题	(222)
习 题	(222)
第十三章 热 传 导	(223)
13.1 导热的基本定律	(223)
13.2 导热的微分方程	(224)
13.3 一维稳态导热问题	(226)
13.4 非稳态导热	(234)
13.5 导热问题的有限差分法	(245)
13.6 生物传热方程简介	(248)
小 结	(249)
思 考 题	(249)
习 题	(250)

第十四章 对 流 换 热	(252)
14.1 对流换热概述	(252)
14.2 边界层对流换热微分方程组	(254)
14.3 相似性原理及量纲分析	(256)
14.4 强 迫 对 流	(260)
14.5 自然对流换热	(269)
14.6 相 变 换 热	(270)
小 结	(273)
思 考 题	(274)
习 题	(274)
第十五章 热 辐 射	(276)
15.1 热辐射的基本概念	(276)
15.2 黑体辐射的基本规律	(277)
15.3 灰体与基尔霍夫定律	(279)
15.4 角 系 数	(281)
15.5 封闭系统中灰体表面间的辐射换热	(286)
小 结	(290)
思 考 题	(290)
习 题	(291)
第十六章 换热器及其热计算基础	(293)
16.1 传 热 过 程	(293)
16.2 换热器的种类	(298)
16.3 平 均 温 差	(300)
16.4 换热器的热计算(平均温差法)	(304)
16.5 强化传热与保温隔热	(306)
小 结	(308)
思 考 题	(308)
习 题	(308)
附 录	(310)
附表 1 各种理想气体特性	(310)
附表 2 气体的平均定压比热容 $c_{p,m}$	(311)
附表 3 气体的平均定容比热容 $c_{v,m}$	(312)

附表 4	饱和水与饱和水蒸气性质表（按温度排列）	（313）
附表 5	饱和水与饱和水蒸气性质表（按压力排列）	（315）
附表 6	未饱和水与过热蒸气表	（317）
附表 7	干空气的热物理性质（ $p=1.01\left(325\right) \times 10^5 \text{Pa}$ ）	（324）
附表 8	饱和水的热物理性质	（325）
附表 9	干饱和水蒸气的热物理性质	（326）
附表 10	某些金属固体的物理性质	（327）
附表 11	某些非金属固体的物理性质	（333）
附表 12	常用结构建筑材料与隔热材料的热物理性质(300K)	（336）
附表 13	其他常用材料的热物理性质	（338）

绪 论

一、热物理的研究对象及与其他学科间的关系

热是什么？对热的本质的探求可一直追溯到古代——公元前八世纪我国商周时期的“五行”说和公元前六世纪西方古希腊时期的“本源”说，近代的热质说与热动说之争也困扰人类达几个世纪。直到十九世纪中叶，由于迈尔、焦耳等人的工作，人们才终于弄清：热是一种能量，一种可使房间变暖、物体膨胀、冰块融化等事件发生的能量，一种与温度有关的能量（增加动能、化学能、核能不能改变物体的温度）。实际上，它是组成物体的微观粒子杂乱运动（亦称热运动）的能量。热可储存在物体内部，也能从一个物体“流”到另一个物体。加热和冷却是热的输运，它改变着物体的温度进而其聚集状态。温度在热现象中扮演了一个中心角色。

何谓热物理？与研究力、声、光、电等现象的其他物理分支类似，热物理是研究热现象，即研究热的运动变化（产生、传递、转换）规律及其与物质性质之间关系的学科。简言之，凡是与温度有关的现象都属于它的研究范畴。我们知道，热往往与自然界中的其他物理现象并存和交织在一起，如热应力、热电、光热、光声以及各种物性随温度的变化（如超导）等。事实上，不同类型的物理现象正是通过能量的方式相联系。能量可游走其间，在所有现象中出现，虽形式发生变化，但保持总量守恒。在能量形式的变幻中，往往会有热的身影，即发生热能和其他形式能量间的相互转换。另外，各种能量在其运动变化中都不可避免地发生品级的蜕化，最终耗散成品级最低的热能（关于这一点，只要打开计算机机箱，数数里面有多少散热片和风扇就明白了）。故，即使是其他学科的研究者，在对与之相关现象的研究中若不注意同时发生的热的现象，其结果难免有时错误丛生或根本无法解释。从这一意义来说，热物理的研究范围实际上已扩大到包括物体或由物体所成系统的一切变化，在所有复杂的变动中指明事物发展的方向和人类活动的可能范围。

二、热物理学的应用范围、主要内容及研究方法

热物理学的触角伸得很广，可谓无所不至。从最尖端的基础研究（如冷冻原子）、最重大的应用研究（如载人航天）到人们的日常生活（如生火做饭、取暖保温）几乎都有热物理问题。其最重要的应用领域当属能源利用。虽然目前自然界中可被人们利用的能源有煤、石油等矿物燃料的化学能以及风能、水力能、太阳能、地热能、原子能等，但其中除了风能和水利能等少数几种是以机械能的形式提供能量外，其他则主要以热能的形式或转换为热能（如煤、油燃烧及原子核反应）的形式供人们利用，可见能量的利用过程实质上是能量的传递和

转换过程。世界上经过热能形式而被利用的能量平均超过 85%，我国则占 90%以上，因此，热能的开发利用对人类社会的发展有着重要意义。而热能的有效利用，包括直接的热利用（如冶金、化工、食品等工业和生活中所需的各种加热）和间接的动力利用（将其转换成机械能或电能以提供动力）以及节能都离不开热物理学的指导。此外，它在制冷与热泵、空气分离、空气调节、太阳能利用、化学反应过程、生物工程、高能激光、超导传输、航空航天等许多方面都有广泛应用。

为使各学科尤其是非热物理学科的人士对热能与其他形式能量间转化与输运的基本规律及计算方法有一个初步然而清楚的了解，以便对他们的研究工作有所助益，本书介绍热物理学的一些基本理论及其在热科学和能源工程以及其他各学科的若干重要应用。主要内容涵盖研究平衡态的热力学与非平衡态的传热学。具体有：

- (1) 能量转换的客观规律，即热力学的基本定律；
- (2) 物质的基本热力性质；
- (3) 热力过程与热力循环及热力学定律的各种应用；
- (4) 热能输运的模式、计算定律及物质的热输运性质。

热物理学的研究方法可分为宏观和微观两种。宏观研究方法是以一些基本的唯象定律为基础，针对具体问题采用抽象、概括、理想化和简化的方法，抽出共性，突出本质，建立分析模型，推导出一系列有用的公式，得到若干重要结论。由于这些基本定律为大量的经验观察所证实，是可靠和普适的，故采用宏观研究方法所得到的结果也是可靠的。缺憾是其不能对热现象的本质及内在原因给予解释。微观研究方法是从物质是由大量分子和原子等粒子所组成的事实出发，将宏观性质作为在一定宏观条件下大量分子和原子的相应微观量的统计平均值，利用牛顿力学或量子力学以及统计方法，将大量粒子在一定宏观条件下一切可能的微观运动状态予以统计平均，得到物质的宏观特性和有关热的基本定律。因而其可阐明热现象的本质，解释其发生原因。但其对微观粒子（分子或原子）的结构及相互作用做出的模型假设只能是近似的，这就导致所求得理论结果往往不够精确。热物理学主要应用宏观的研究方法以确保结果的可靠实用，辅之以统计物理的微观解释以加深理解。

第一篇

热力学

第一章 热力学的性质

1.1 何谓热力学

我们知道，描述少量粒子的运动规律和相互作用的科学，统称之为“力学”，这包括经典力学、量子力学等等。少量粒子组成的系统，可称之为力学系统，譬如少量的原子、分子以及只需考虑质心运动的物体如刚体、甚至天体如星球的集团等。描述力学系统，使用的是系统内反映每个粒子运动的物理量如位置、速度等“微观变量”，以求得变化过程的细节，常采用的是运动方程。即使方程复杂一些，原则上也可以使用计算机求出与实验符合很好的结果。

对于宏观系统即由大量客体组成的系统，力学是无能为力的。即使知道了宏观系统的精确组成和全部微观的相互作用，也无法写出全部力学方程和这些方程的初始条件，更谈不上求解这些方程和由此计算宏观系统的物理性质。对于宏观系统，另有一套行之有效的描述方法。这就是使用温度、体积、压力、能量、熵（这个特别的字，后面要专门介绍）等反映系统整体性质的“宏观变量”，以及比热、压缩率、磁化率等“物质参数”进行的热力学描述。这种描述的基础是能量守恒、热量不可能自动从低温物体流向高温物体等很少几条来自实践经验的基本定律。采用的是能量方程和熵方程。热力学的成功已被工业革命以来整个生产技术的突飞猛进所证明。热力学早就成为许多技术科学的理论基础。

力学和热力学是分别针对着微观和宏观这两个极端情形发展起来的然而却是相反相成的科学。

不究过程的细节而能对系统的状态下结论，这是一切守恒定律的特点与优点。经典热力学摒弃了详尽的图像，因而，对热传递的能量理论只做出一般性的叙述（这一缺憾将由后面的传热学弥补）。它局限于平衡态（静态），故其所研究的变化过程只能是近似看成由平衡态系列组成的十分缓慢发生的过程，又叫准平衡过程。准平衡变化过程的时间相对于状态调整所需时间可视为无限长。因而除了时间的方向外，在热力学中，时间并不表现为变量，其至多是通过初态“以前”和终态“以后”的概念潜入。涉及有限时间的热力学称为非平衡态热力学或不可逆过程热力学，本书不打算讲述那方面的内容。

1.2 热力系统

与力学中的隔离体概念类似，为便于分析，热力学中常将一定量的物质或空间人为分割

出来作为研究对象，此即为热力系统（简称热力系或系统）。环绕系统的外部物体统称为外界或环境。系统与外界交界面称为边界。外界可以是自然存在的，如大气环境，也可以是人为设置的，如恒温设备一类，总之应是真正对系统状态产生直接影响的部分。系统的边界既可以是固定的又可以是活动的，既可以是真实的，又可以是虚构的（见图 1-1）。

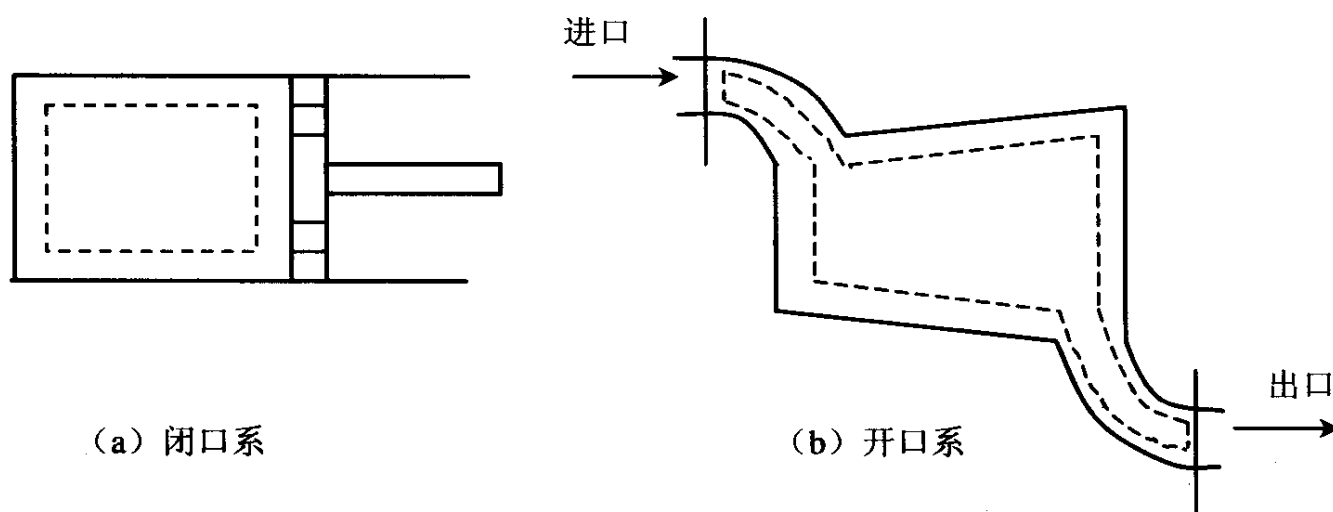


图 1-1 系统与边界

根据系统与外界相互作用中质量和能量交换情况，热力系又可分为闭口系、开口系和孤立系。

闭口系：与外界之间只有能量交换而无质量交换的系统。物质不能透过其边界，系统质量保持恒定不变，故闭口系统又叫做控制质量。

开口系：与外界之间既有能量交换又有质量交换的系统。物质可透过边界在其与外界间流动。系统内的能量和质量均可变化，但这种变化的空间范围不变，故开口系统又叫做控制容积，或控制体。

孤立系：与外界之间既无能量交换又无质量交换的系统。孤立系统的一切相互作用都发生在系统内部。

以上是最常用的热力系分法。当然根据系统的其它特点还可有一些别的分法，如根据物质种类划分的单元系与多元系；根据物质聚集状态划分的单相系与多相系等。另外还有与外界无热交换的绝热系；具有无限大热容量以致吸入或放出有限的热量其温度不变的特殊系统——热源或冷源；以及由可压缩物质构成的可压缩系统。热力工程中最常用的工作物质（简称工质）即是可压缩流体。

系统既可以是某一个或几个物体，也可以是物体的某一部分，甚至只是由某些边界围成的空间，故热力学中系统的概念较物体的概念要宽泛得多。正确选择热力系是进行热力学分析的前提。热力系选得好，可使分析过程简单、明了。

1.3 平衡状态

热力系在某一瞬间所呈现的宏观物理状况称为热力系的状态。它可有各种不同的表现形式，其中具有特别重要的是所谓的平衡状态。在没有外界影响的条件下，若系统的各部分在长时间内不再发生任何宏观上可观测的变化，即称其进入了平衡状态。

从本质上讲,平衡状态是一些过程的结果。设想系统内或系统与外界间有不同温度的物体热接触,则经验告诉我们,必然有热自发地从高温物体传向低温物体,系统的状态不断变化,最终达到一个温度均匀的状态。可见温差驱动了热流,直至温差消失,系统建立起了热平衡。同样,如果系统内或系统与外界间有压力差存在,必将引起物体宏观上的位形变化,系统状态不断变化直至力差消失而建立起力平衡。这里,诸如温度、压力等可统称为势。不平衡势(势差)是使系统状态发生变化的驱动力。对于有相变或化学反应的系统,是化学势差引起相转变或化学组成的变化。总之,对于一个状态可以自由变化的热力系,如果系统内及系统与外界之间的一切不平衡势都不存在,则热力系的一切可见的宏观变化均将停止,此时热力系所处的状态即是平衡状态。

各种不平衡势的消失是系统建立起平衡状态的必要条件。因而,处于平衡状态的单相热力系,若重力场造成的差别可忽略,应具有均匀一致的温度 T 、压力 p 等,故可以用确定的 T 、 p 等物理量来描述。用来描述热力系平衡状态的物理量称为状态参数。

经典热力学以平衡态这样一种最简单的热力学状态作为自己的主要研究对象。这是它不问细节只求结果的简捷研究方法所决定的。抛开使用“运动”方程计算实际复杂的不平衡过程进行的细节,只计算过程的结果,即系统状态的最终变化。这样只要抓住系统变化的初始和终了两个平衡态即可。

应当指出:当一个热力学系统处于平衡状态时,所有微观粒子(分子、原子、离子)都在不停地运动着,只是运动的某一些统计平均量不随时间改变而已。这样一种平衡是动态平衡,称为热动平衡。

非平衡态热力系的状态参数是不确定的,在对非平衡热力系进行分析时常采用连续介质力学的研究方法,将热力系分割为一些小的微团。当所分的微团宏观足够小而微观足够大,以致可将微团视为一平衡热力系时,也可用状态参数来描述。在连续体内所谓一点处的热力参数,实际是指围绕此点的某微团所具有的热力参数。这种连续统模型用场的概念去描述物体的几何点,而不区分构成物体的一个个粒子间的差异。我们后面将要讲到的传热学采用的就是这种方法。

热力学中常用的状态参数有6个,它们是压力 p 、体积 V 、温度 T 、内能 U 、焓 H 、熵 S 。其中,前三个是可测物理量,称为基本状态参量。后面将会看到,仅从几个热力学基本定律出发,后三个不可测物理量就可用前三个可测物理量来表示。这是一件非常令人惊异的事,也是热力学强大的体现。

状态参数还有许多,如自由能 F 、自由焓 G 等,它们是上述常用状态参数的某种组合。另外,若是电介质处于电场中或磁性物质处于磁场中,还应有电场强度 E 、总极化强度 P 、磁场强度 H 、总磁化强度 M 。

以上这些物理量可分为两大类。一类与系统的质量有关,称为广延量。如上述的 V 、 U 、 H 、 S 、 F 、 G 、 P 、 M 等。这些量可以“分割”,系统总量等于各部分之和。因而,可以问譬如系统某一部分(甚至某一微元)的体积、能量是多少,但不能问某一“点”的体积、能量是多少。另一类与系统的质量无关,称为强度量。如上述的 p 、 T 、 E 、 H 等。强度量不具有加和性,但可以逐点地测量和改变,可以造成空间均匀或不均匀的分布。广延量除以质量即可转化为强度量,但在其相应的名称前须冠以“比”字,并用小写字母表示,如比体积 v 、比内能 u 、比焓 h 、比熵 s 等。