

工程热力学

基础和应用

第一卷 单元物质系统

〔德〕 K. 史蒂芬 著
F. 玛因谔

同 济 大 学
哈尔滨船舶工程学院 译
清 华 大 学

高等教育出版社

TK123
22-1

TK123
22-1
号S11(京)

工程热力学

基础和应用

第一卷 单元物质系统

[德] K. 史蒂芬 著
F. 玛因特

同 济 大 学
哈尔滨船舶工程学院 译
清 华 大 学

江苏工业学院图书馆
藏书章

高等教育出版社

(京)112号

内 容 提 要

本书是根据1986年德国Springer出版社出版的K. Stephan与F. Mayinger合著的《工程热力学》(第十二版)第一卷翻译的,专门论述单元物质系统的热力学。书中精辟地阐明了热力学基本概念、基本定律、物质的热力学特性、各种热力过程与气体流动的分析和计算。各章末皆附有习题,有助于读者对有关概念的深入理解。

本书可供热能动力机械及其动力装置、热能工程等各专业教师、研究生以及高年级大学生作为教材或教学参考书,也可供有关工程技术人员参考。

本书原文版权为德国Springer出版社所有,中文版授权我社出版。

工程热力学

基础和应用

第一卷 单元物质系统

[德] K. 史蒂芬 著

F. 玛因谭

同 济 大 学
哈尔滨船舶工程学院 译
清 华 大 学

高等教育出版社出版

新华书店总店北京科技发行所发行

河北省香河县印刷厂印装

开本 787×1092 1/16 印张24.5 插页 3 字数610 000

1992年5月第1版 1992年5月第1次印刷

印数0001—1 100

ISBN7-04-003615-0/TH·287

定价14.85元

译者前言

本书根据慕尼黑工业大学教授施密特(E.Schmidt),波洪鲁尔大学教授史蒂芬(K.Stephan)和汉诺威工业大学教授玛因谔(F.Mayinger)合著的《工程热力学》(Technische Thermodynamik)第十二版译出。该书为工程热力学方面的世界名著之一,早在40年代,同济大学即选为机械系的教科书。根据学科的发展,该书不断修订再版,始终保持理论的严密性和取材的先进性。第十二版是紧随着近期科学技术的发展,在第十一版(1975年)的基础上,由史蒂芬和玛因谔参加增订编写而成。全书共分两卷,第一卷1986年出版,第二卷1988年出版。

第一卷主要论述单元物质系统的热力学,这部分内容适应德国高等学校在前期教学阶段的学习要求,也基本上满足我国一般专业学习工程热力学的需要。而第二卷主要论述多元物质系统的热力学,它提供深入钻研和要求有较高造诣的专业需要。全书十分注意推陈出新,如对新的状态参数焓的系统论述,特别是以多元物质系统为对象的第二卷,其内容的丰富和深入,非一般同类书籍所能匹比。此外,新版本仍保持老版本的特色,理论密切结合实际,为便于理解,书中附有适量的习题,并在书末附有解答,以供读者参考。为适应工程实际的需要,对旧版中收入的并为实践证明是可信的一些物性资料,在新版中仍然保留。

本书第一卷共分九章,序言与第一章由哈尔滨船舶工程学院唐后启与同济大学陈元春合译,第二、三章由唐后启译,第四、六、七、八章分别由同济大学陈元春、徐超远、陈立小、苏仲银译,第五章由苏仲银、徐超远合译,第九章由清华大学张学学译。第一卷第十一版的全部译稿由唐后启整理、统稿。由于在翻译过程中,1986年西德又出版发行了第十二版,该版本除增添了第九章外,其他章节稍有改动,改动部分由同济大学过晓宇负责翻译整理。在翻译过程中,得到同济大学蒋汉文教授的指导与帮助,全部译稿最后由该校肖友瑟审校,同济大学邱信立和哈尔滨船舶工程学院周寅西、郑兆熊、王乃义对译文也进行了很多审校工作,书末所附汉德名词对照表,参考原文索引词条重新按汉语译名整理汇编而成,以供读者参考。谨此一并致谢。

由于译者水平所限,译文中难免有疏漏之处,谨希读者批评指正。

第十二版序言

第十二版对以前版本重新进行了全面的修订，虽然改动较多，但我们仍努力使它保持原来的宗旨和体系。

本书作为学习热力学的教材可使学习者，特别是工程技术人员熟悉热力学的基本内容和在工程中的应用。书中仍保留了比其它教材更丰富的物性参数，以前的版本已证明了这些数据的可靠性。这样可减少做习题的困难，使读者不必再费力地寻找物性值。

本版特别重视内容的直观描述，并注意面向工程实际，这样有利于学生应用所学的知识，也有利于从事实际工作的人员更清楚地论证技术的可行性。

虽然热力学只有较少的定律、新概念和数学知识，但学习者一般仍把它看成一门较难的学科。困难之处首先在于把几个抽象的基本概念应用到具体的工程实际和物理过程之中。所以，我们努力把基本概念在充分提供科学严密性的前提下尽量直观地表述出来。此外，与以前的版本一样，我们直接在定律提出后介绍它的应用。大量的习题应独立计算，以加深对本书的认识，习题答案见附录。

交换变量的概念能特别直观和清晰地描述第一定律和第二定律，这是一种使系统与外界发生联系的变量。在这个理论体系中，熵除了是一种在热量传递时反映系统与外界联系的变量外并无其它意义。热量通过坐标熵流入系统的同时环境失去了熵。本书首先直观地讨论了熵的特征，然后严格地引入熵的概念，通过这种方法自然地描述了第二定律，并着重进行了仔细的推导。在最基本关系式的基础上，论述了各种应用实例。我们比其它教材更详细地讨论了耗散功和耗散能的概念。借助耗散能，在没有第二定律知识的条件下也能完全清楚地描述第一定律。首先，耗散功不能为负与第二定律有关；其次，耗散功和耗散能的概念也能用于讨论有损耗的工程实际过程；再次，它也能帮助理解不可逆过程热力学。虽然不可逆过程热力学不属于本书的范围，而这方面有大量专著。

考虑到实际应用的需要，详细介绍了一些工程循环过程，对蒸气动力循环进行了广泛的讨论。在实际应用中，动力机械不是由理想气体而是由实际气体驱动的，今天，由于这方面的计算一般使用电子计算机，因此也介绍了实际气体的状态方程，其中特别详细地介绍了水蒸气的状态方程。

第十二版又重新恢复了十一版以前都有的简捷的传热学导论知识(第九章)，篇幅大约与机械和工艺方法工程师^①基础讲座相同。我们之所以这样做是因为传热学基本定律来自热力学定律，在许多高等学校传热学导论知识也放在热力学中讲授。

我们对流动过程这一章进行了压缩，有关二元流动这节全部删去，因为这方面已出现了许多专著。

剩下的一些主要改动包括如下：第一定律的描述进行了扩充，前面增加了第一定律的一

^① 译者注：Verfahreningenieur是“化工”工艺方法工程师

般性叙述，以前的版本也有这一内容。在接着的几节讨论了第一定律在特殊过程中的应用：即闭口系统过程，开口系统稳定过程和不稳定过程。用焓对动力循环，制冷循环和热泵进行了较以前更详细地论述，焓对理解这些过程很有帮助。所有的图表都重新进行了计算，有关说明都使用最新观点。

虽然引入了国际单位制，今后，工程技术人员有时仍要遇到工程单位制或其它工业国家使用的单位制，特别是很多物性数据的图表均用这些单位制编制的。因此，本书有一章用表格列出了有关各种单位制的重要换算因子。

我们的学生，许多同事和朋友提出了一些有价值的建议和意见，在此向他们表示感谢。

我们还要感谢泰姆(M. Tamm)博士和布茨(D. Butz)工程师，他们校对了对本书并给予了许多的鼓励。对斯普林格出版社给予的令人满意的合作和认真地校订了新版本也一并表示感谢。

斯图加特

K. 史蒂芬

慕尼黑，1986年夏

F. 玛因诤

第十一版序言

自从1963年第十版问世以来，热力学基础的论述方法发生了明显的变化。许多概念的阐述更加严密了，焓已被证实，可用来有效地评定各种技术过程，同时，特别是由于反应堆、火箭和化工工艺等工程的迅速发展，热力学基础对某些新颖工程的应用变得重要起来，而对另外一些工程的应用却不那么重要了。由此可见，将本书进行全面的和彻底的修订是必要的。本书第一章至第五章的第三节由史蒂芬(K. Stephan)撰写，而第五章的第四节至第八章则由玛因愕(F. Mayinger)撰写。

现在的新版分两卷出版。我们采取分卷出版的主要原因是由于未来的化工工艺工程师在分离方法、化学反应以及与此有关的工程过程等所涉及的热力学基础知识方面，需要有较深的造诣。此外，因为几乎在所有的高等学校里，在前期考试之后还要进行讲授，所以把这一部分内容编入第二卷，看来是合适的。本书第一卷论述有关单元物质系统的热力学，这部分内容是德国高等学校学生在前期考试前应该学习的范围。

在新的版本中，我们也力图保持本书的宗旨和体系。本书可作为学生的教科书，尤其是工科学生，可以从中学到有关热力学基础理论及其工程应用等方面的知识。本书与其他热力学教科书相比，它提供了大量物质特性数据的图表，而这些数据图表在以前的各版中业已证明是适用的，故在新版中仍然保留。这样在解决实际问题时，就可以节省读者常常需要辛劳地去寻找物性数据所花费的时间。

本书特别重视提供明晰的且以实践为依据的内容。这就可以减轻学生在学习使用时的困难；而且这些内容已在实际工作中明显地显示出它们在工程应用上的价值。

对于学生来说，热力学虽然仅涉及到少量的定律、新的概念和数学知识，但是一般却被认为是一门较难的学科。学习这门学科的主要困难在于如何把这些为数不多的抽象的基本概念应用在一些具体的工程和物理过程中。因此，我们一方面力图使得这些基本概念的论述建立在严谨的科学基础之上，另一方面总是尽可能论述得直观而又生动。此外，和以前各版一样，我们在论述这些定律之后，接着就介绍它们的实际应用。本书提供丰富的习题，并在附录中列出这些习题的答案，读者可以自己进行计算，以加深对教材内容的理解。

采用交换变量的概念阐述热力学第一与第二定律，就显得特别生动易懂，而又印象深刻，一个系统可以通过这种变量与其周围环境进行接触。例如，由于周围环境的作用促使系统的容积减小，这样容积功就流入系统。在这种情况下，容积就是一种交换变量。在这种概念系统中，熵不是别的东西，而是这样一种变量，如果系统要获得热量，就必须通过这个交换变量与周围环境进行接触。这时，由于周围环境熵的减少而获得的热量就由熵坐标而流入系统。我们首先是直观而又较详细地讨论熵的性质，而后引入熵的严格概念，这样必然导致热力学第二定律的建立。本书重视对熵的概念细致的处理，从最一般的形式出发，恰当地阐明它的各种不同的特殊应用。较之一般课本，本书比较详细地讨论耗散功和耗散能的概念。借助于耗散功这个概念，在不了解第二定律的情况下，就可以完善地阐明第一定律。以后在讨论有关第二定律时才得出耗散功决不可能有负值的结论。耗散功与耗散能的概念进一步证

明：从耗散的角度出发评定各种工程过程是很有用的。同时，这些概念也有助于不可逆过程的热力学研究，当然不可逆过程的热力学不是本书的研究对象，关于这个问题可参阅很多专门论著。

为了便于从实际出发来编写教材，有意识地、详细地讨论各种工程循环过程。为此，我们也将讨论一些新的过程，如飞利浦过程(Philips-Prozess)。蒸气热力过程的讨论将占有相当大的篇幅。实际上，发动机不是用理想气体工作，而是用实际气体工作的，目前一般均采用电子计算机对发动机工作过程进行计算。因此，对于实际气体状态方程，特别是水蒸气的状态方程也要进行详尽的探讨。

大部分流动过程都具有热力学性质。这些过程对于从事能量研究和化工技术人员的日常工作具有重要的意义。在核技术中主要涉及两相流动问题，因此，在气体与蒸气流动的章节中增补了关于两相流动的篇幅。

在新版中，我们选用国际单位制。图表中涉及的单位也都是用国际单位。然而，工程师们总会在今后工作中遇到工程单位制或其他工业国家继续采用的单位制，而且现在还有很多物性数据的图表是用这些单位绘制的。因此，本书有一章用表格列出有关各种单位制的重要换算因子。

我们向提出宝贵建议和意见的同事和朋友们表示感谢。我们感谢卢卡斯(K.Lucas)工学博士，夏贝尔(A.Schaber)教授和乌尔利希(J.Ulrich)工学士等参与校阅并给予很多热情鼓励。我们也感谢斯普林格(Springer)出版社对新版的出版给予大力协助和仔细的编排。

慕尼黑 E.施密特

波 洪 K.史蒂芬

汉诺威 F.玛因诺

1974年10月

主要符号

(计量单位用方括弧表示, 不附有方括弧的量为无量纲的量)

1. 拉丁字母

粗体拉丁字母表示物理学中的通用常数

A	面积[m ²]	f	比自由能[kJ/kg]
A'	电容器的几何因子[m ² /m]	g	重力加速度[m/s ²]
a	辐射过程的吸收系数	g	比自由焓[kJ/kg]
a	范德瓦尔状态方程中的内聚常数[Nm ⁴ /kg ²],	H	焓[kJ]
a	距离[m]	H	亮度[W/m ²]
a	导温系数[m ² /s]	H	磁场强度[A/m]
a_λ	单色吸收率	\bar{H}	摩尔焓[kJ/kmol]
B	磁感应[N/(Am)]	h	比焓[kJ/kg]
b	范德瓦尔状态方程中的余容(即与气体分子容积有关的修正数) [m ³ /kg]	h', h'', h'''	在相界曲线上的比焓 [kJ/kg]
C	辐射交换常数[W/(m ² K ⁴)]	h	普朗克常数[Js]
C	容量[As/V]	I	电流[A]
$\bar{C}, \bar{C}_p, \bar{C}_v$	摩尔热量, 摩尔热容 [kJ/(kmol K)]	J	动量[kgm/s]
c	真空中的光速[m/s]	J	强度[W/m ³]
c	比热容[kJ/(kg K)]	k	波尔茨曼常数[J/K]
c_p	定压比热容 [kJ/(kg K)]	L	功[J], [Nm]
c_v	定容比热容 [kJ/(kg K)]	L_{ex}	焓[J], [Nm]
D	电位移[As/m ²]	L_m	机械功[J], [Nm]
d	直径, 标准长度[m]	L_n	有用功[J], [Nm]
E	电场强度[V/m]	L_t	技术功[J], [Nm]
E	辐射力[W/m ²]	l	比功[J/kg], [Nm/kg]
E	能量[kJ]	M	磁化率[N/(Am)]
E^*	弹性模数[N/m]	M	摩尔质量[kg/kmol]
e	基本电荷[C]	M_d	扭矩[Nm]
e	单色辐射率	\dot{M}	质量流量[kg/s]
F	力[N]	m	质量, 量[kg]
		m	喷嘴与孔板的孔径比
		\dot{m}	流量密度[kg/(m ² s)]
		N_A	罗斯密特数, 阿伏伽德罗常数[1/mol], [1/kmol]
		n	转速[1/s], [1/min]
		n	摩尔数, 千摩尔数[mol], [kmol]
		n	多变指数

P 电极化[As/m²]
 P 功率[W]
 P_m 机械功率[W]
 P_i 有用功率[W]
 p 压力[N/m²],[bar]
 p_k 临界压力[bar]
 p_r 标准压力[bar]
 p_s 拉伐尔压力[bar]
 p_u 环境压力[bar]
 Q 传入的热量[J]
 Q_{rev} 可逆供热量[J]
 q 比供热量[kJ/kg]
 q 热流密度[W/m²]
 R 气体常数 [kJ/(kg K)], [Nm/(kg K)]
 R 通用气体常数[kJ/(kg K)], [Nm/(kg K)]
 r 汽化潜热[kJ/kg]
 S 熵[kJ/K]
 \bar{S} 摩尔熵[kJ/kmol K]
 \dot{S} 熵流[W/K]
 \dot{S} 推力[N]
 s 比熵[kJ/(kg K)]
 s', s'', s''' 在相界曲线上的比熵 [kJ/(kg K)]
 s_{abs} 比熵的绝对值[kJ/(kg K)]
 T 绝对温度[K]
 T_k 临界温度[K]
 T_r 标准温度[K]
 T_s 饱和温度[K]
 T_u 环境温度[K]
 t 冰点以上的温度[°C]
 t 时间[s]
 U 内能[J]
 U 圆周[m]
 U_0 电压[V]
 \bar{U} 摩尔内能[kJ/kmol]
 u 比内能[kJ/kg]
 u', u'', u''' 在相界曲线上的比内能

[kJ/kg]
 V 容积[m³]
 \bar{V} 摩尔容积[m³/kmol]
 v 比容[m³/kg]
 v', v'', v''' 在相界曲线上的比容[m³/kg]
 v_k 临界比容[m³/kg]
 v_r 标准比容
 W 热力学概率
 w 电阻[Ω]
 w 速度, 音速[m/s]
 w_s 拉伐尔速度, 在最窄截面处的音速[m/s]
 \bar{X} 摩尔广延状态参数[与kmol有关]
 Z 实际气体因子
 z 长度, 路程[m]
2. 希腊字母
 α 流出系数
 α 转角, 角度
 α 流量系数
 α 对流换热系数[W/(m²K)]
 α_a 倾角
 α_i 倾角
 β 膨胀系数[1/K]
 γ 应力系数[1/K]
 δ 壁厚, 脉冲空间的棱长[m], [cm]
 ϵ 延伸率
 ϵ 介电常数[c²/(Nm²)]
 ϵ 发射率
 ϵ 压缩比
 ϵ_0 真空中的介电常数 [c²/(N n²)]
 ζ 效率
 ζ 流动时粘性系数的修正因子
 η 效率
 η 动力粘性系数[kg/(ms)]
 Θ 德拜(Debye) 温度[K]

θ	经验温度[°C],[K]	τ	剪应力[N/m ²]
κ	比热容之比	τ	时间[s]
λ	燃烧时的过量空气系数	Φ	热流率[W]
λ	导热系数[W/(mK)]	Φ	电势
λ	辐射波长[m]	Φ	电位差[V]
μ	通过隔板流动时的收缩系数	φ	柴油机的喷射比
μ	磁导率[V _s /(Am)]	φ	几何宽度
μ_0	真空中的磁导率[V _s /(Am)]	φ	速度系数
ν	运动粘性系数[m ² /s]	φ	林纳德-琼斯 (Lennard-Jones) 电势[J],[Nm]
ν	无量纲容积	φ	角度
π	无量纲压力	χ	定温压缩系数[m ² /N]
ρ	密度[kg/m ³]	Ψ	耗散能[kJ]
σ	法向应力[N/m ²]	ψ	流出函数
σ	黑体辐射交换常数 [W/(m ² K ⁴)]	ψ	柴油机压力升高比
σ'	表面张力[N/m]	ψ	摩擦率
τ	无量纲温度	ω	无量纲速度, 角速度[1/s]

目 录

第十二版序言	i
第十一版序言	iii
主要符号	1
第一章 热力学的任务和基本概念	1
1. 热力学的任务	1
2. 热力系统	2
3. 系统的坐标	3
4. 状态参数的一些性质	4
第二章 热力平衡与经验温度	6
1. 热平衡	6
2. 第零定律和经验温度	7
3. 国际温标	10
4. 实际温度测量	12
a) 液体温度计	12
b) 电阻温度计	14
c) 热电偶	15
d) 辐射温度计	16
5. 单位制与单位·数量方程	16
6. 理想气体的热状态方程	21
6.1 物质单位、气体常数和阿伏 加德罗定律	25
第三章 热力学第一定律	28
1. 第一定律的一般公式	28
2. 能量形式——功	29
2.1 机械能	30
2.2 容积功	31
2.3 几种其他过程的功·功的概念 的推广	33
2.4 耗散功	41
3. 内能	42
3.1 内能的动力学意义	43
4. 能量的形式——热量	46
5. 第一定律在闭口系统中的应 用	46
6. 内能与热量的测量及其特性	47

7. 第一定律在开口系统中稳流 过程的应用	49
8. 第一定律在开口系统中非稳 流过程的应用	54
9. 量热状态方程与比热容	55
9.1 量热状态方程与理想气体比热 容	57
9.2 实际气体比热容	59
10. 理想气体的简单状态变化	66
a) 定容或等容时的状态变化	66
b) 定压或等压时的状态变化	67
c) 定温或等温时的状态变化	67
d) 准静态绝热状态变化	68
e) 多变过程的状态变化	70
f) 用对数图表示状态变化过程	72
11. 气体的压缩和气体膨胀所做 的功	73
第四章 热力学第二定律	76
1. 不可逆性原理	76
2. 熵与绝对温度	79
3. 作为全微分的熵和作为积分 分母的绝对温度	82
4. 利用积分分母引进熵的概念 和绝对温标	86
5. 第二定律的统计学意义	88
5.1 一个状态的热力学概率	88
5.2 熵与热力学概率	91
5.3 热力学概率的最终值, 量子理 论, 奈恩斯特热学理论	92
6. 在交换过程时熵的特性	93
7. 热力学第二定律的普遍公式	95
7.1 第二定律的其他公式	96
7.2 由不同公式得出的热力学第二 定律的结论	98
7.3 关于准静态过程和不可逆过程 的第一和第二定律的论述	100

7.4	基本方程	103	态方程	174
7.5	理想气体和其他物体的熵	104	第六章 热力循环	176
7.6	熵图	106	1. 卡诺循环及其在理想气体中的应用	179
7.7	理想气体的熵图	108	2. 逆向卡诺循环	181
7.8	理想气体的内能仅与温度有关的证明	109	3. 热气机与燃气轮机	183
8.	特殊的不可逆过程	110	4. 斯特林循环和菲利浦发动机	187
a)	带有摩擦的过程	110	4.1 斯特林逆循环	189
b)	温差导热	114	5. 内燃机的工作循环, 奥托发动机与狄塞尔发动机	190
c)	节流	115	a) 奥托循环或爆燃循环	191
d)	混合与扩散	117	b) 狄塞尔循环或等压循环	193
9.	第二定律在能量转换中的应用	119	c) 混合循环	194
9.1	环境对能量转换的影响	119	d) 实际发动机的工作过程和理论循环之间的差异; 效率	195
9.2	焓的计算	120	e) 循环的焓效率	196
9.3	不可逆过程的损耗	126	6. 工业用的压气机	197
第五章 物质的热力学特性		130	7. 蒸汽动力装置——克劳修斯-朗肯循环	199
1.	用状态方程描述特性; 状态参数的测量	130	7.1 与克劳修斯-朗肯循环有关的特殊工作循环	204
2.	气体与蒸气的 p, V, T 图	131	8. 蒸汽机的逆向循环	210
2.1	蒸气的量热状态参数	138	a) 作为制冷机的冷冻机	210
2.2	蒸气状态参数的图表	140	b) 可逆供热设备与热泵	211
2.3	蒸气的简单状态变化	144	第七章 气体与蒸汽的流动	215
2.4	克劳修斯-克拉贝隆方程	147	1. 层流与紊流, 速度分布与平均速度	215
2.5	重水	150	2. 质量、动量和能量的守恒定律	217
3.	凝固与固体状态	151	3. 测量技术的应用, 测压管、喷管与孔板	219
3.1	结冰与三相点	151	4. 流动的焓与动能	221
3.2	比热容与固体的熵	152	5. 理想气体通过喷嘴与孔口的流动	222
4.	实际气体与理想气体状态方程的差异	154	6. 在气体与蒸汽中的音速	225
4.1	实际气体的状态方程	154	7. 拉瓦尔喷嘴后的扩张喷管	227
4.2	范德瓦尔状态方程	157	8. 激波	232
4.3	广义对应原理	161	第八章 喷气发动机	239
4.4	实际应用的状态方程	162	1. 冲压管[罗林(Lorin)喷管]	240
4.5	量热状态参数与热状态方程之间的关系	167	2. 涡轮喷气发动机	242
4.6	熵是简单状态参数的函数	168		
4.7	焓与内能是简单状态参数的函数	171		
4.8	比热容	172		
4.9	实际气体的节流和从热量的测量求解热状态方程及量热状			

a) 固定式涡轮喷气发动机.....	243	8. 换热器——顺流, 逆流, 交叉流.....	285
b) 航空涡轮喷气发动机.....	243	8.1 顺流	286
c) 借助补燃与喷水以提高功率.....	245	8.2 逆流	287
第九章 传热的基本概念	246	8.3 交叉流	287
1. 概述	246	9. 辐射传热	290
2. 稳定导热	246	9.1 基本概念, 发射, 吸收, 克希霍夫定律	290
3. 对流换热与传热	250	9.2 黑体辐射	293
4. 非稳定导热.....	252	9.3 工程表面的辐射	295
5. 传热问题的相似理论	257	9.4 辐射换热	297
6. 对流换热基础.....	261	附录 蒸气表	302
6.1 无量纲数与简单流场中热量传递的描述	263	习题解答	327
6.2 无相变传热的个别问题	268	汉德名词对照	347
7. 沸腾和凝结时的传热	276		
7.1 沸腾时的对流换热	276		
7.2 凝结时的对流换热	282		

第一章 热力学的任务和基本概念

1. 热力学的任务

热力学是物理学的一个分支，是一种普通的能量学。它包括能量的各种存在形式，能量的转换，且由于能量转换与物质特性有密切关系，因此它又包括物质的特性。

由于几乎没有一种物理过程不进行能量转换，所以热力学是自然科学领域中的一门基础学科。它同时又是很多工程学科的基础；它对从事物质分离的化工技术人员，提供物质分离过程中能量转换的普遍规律；它对从事制冷和空调的技术人员，提供产生低温和进行空调的基本规律；它对机械和电气工程师提供能量转换的规律。热力学研究方法的本质是，不局限于特殊的工程过程，而是寻求普遍而又关键的内在联系。

在内燃机、核电站、燃料电池或空气液化装置中所进行的各种工程过程，均可借助热力学定律，用统一的观点进行概括。因此，如不透彻地掌握热力学规律，就不可能准确评定过程的进行和能量之间的关系。当然，工程师在规划和设计内燃机、核电站、燃料电池或空气液化装置时，还必须掌握与这些过程有关的许多其他细节知识，如：材料，结构与加工，所需机器和仪表的特性以及经济上甚至还要涉及到政治上的关系等。

因此，对工程师来说，学习热力学应达到如下三个目的：

1. 需要提供能量转换的普遍规律；
2. 需要研究物质的特性；
3. 需要选择有代表性的例子来说明这些规律在工程过程中是如何应用的。

本书主要限于讨论从一个平衡状态过渡到另一个平衡状态时的能量转换和研究在平衡状态下的物质特性。因此，对于过程在时间上的变化不作深入的讨论。这个限制对于大多数工程过程是无关系要的，因为这时实际上系统总是从一个平衡状态过渡到另一个平衡状态，在两个平衡状态之间的过程在时间上的变化，对评价一个工程过程并不重要。此外，大量的过程进行得如此缓慢，以至可以认为在系统内存在着近似的平衡，因此，中间状态也可以近似地用仅对平衡适用的形式加以描述。人们也可把研究平衡的这一部分热力学更确切地称为热静力学(Thermostatik)。然而，对于这个领域习惯上仍使用热力学(Thermodynamik) ^① 这个名称，所以我们还是保留这一术语。

除了很少几个例外，本书采取的另一个限制是，仅仅探讨物质在平衡状态下的宏观状况，也就是说，我们不讨论单个分子的运动。在描述这种微观现象时，必须给出每个分子的速度和位置。与这种煞费周折的研究方法相反，宏观现象的描述仅需少量的变量就够了。这个事实，很容易用发动机气缸中活塞运动的例子清楚地加以说明。在运动的每一瞬间，封闭在气缸中的气体（见图1）将随着活塞所处的不同位置而占有一定的容积。描述过程的另一个有用的参数是压力，压力可用压力表测得。它也象容积那样，随着活塞运动而变化。其

^① 该词的正确译名应为“热动力学”——译者注。

他一些可测特性量是温度和气体的成分。我们可以用这些特性量来描述气缸中的气体。这些特性量是一些可以测量的宏观特性量，测量这些特性量，可以不必知道个别气体分子的复杂运动。人们对这类特性量称为宏观坐标。

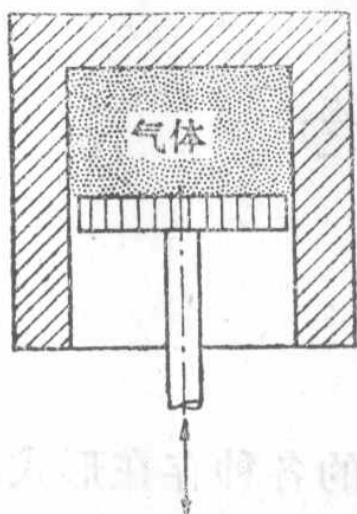


图1 气缸中活塞的运动

从这个例子可以看出，宏观的描述无需具备物质原子结构方面的专门知识。此外，宏观坐标是容易进行测量的，而且正如该例中指出的那样，过程仅需用少量宏观坐标就可说明。

2. 热力系统

热力系统或简称系统，是指这样一种需要研究其热力特性的物质集合体。热力系统的例子可以是一定量的气体、液体和它的蒸汽、两种液体的混合物、溶液或晶体等。系统是用系统的边界使它与被称为它的外界的环境分开。系统边界并非固定不动的，而是在所要研究的过程中，边界也是可移动的，并且还允许能量和物质通过边界。

我们考察一个在具有进、排气阀门的气缸内活塞运动的例子，如图2所示。

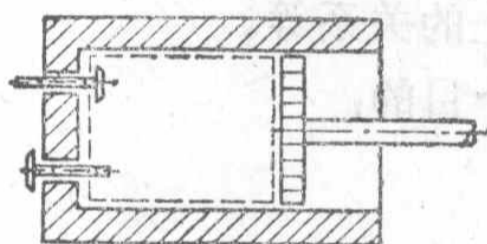


图2 有关系统的概念

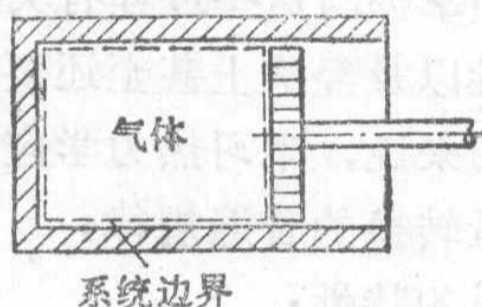


图3 闭口系统的例子

如果只需要研究气体的性质，则须围绕气体空间划出系统边界，在图2中如虚线所示。凡是位于这个边界之外的所有一切，均属于系统的外界。随着活塞的移动，系统边界也随之移动。气体也可通过阀门流进或流出气缸，从而产生了与外界的物质交换。此外还可能发生与外界的能量交换，例如用水冷却气缸壁。

我们规定如果物质不能通过系统边界，则这个系统就称为闭口系统；当物质可以通过系统边界时，则这个系统称为开口系统。如图3所示的系统，它是由气体构成的，并由气缸和活塞形成边界，因而称为闭口系统，它与活塞是否运动或静止无关。

其他关于闭口系统的一些例子，如力学中的固体或质量微团。

图4所示为一个开口系统的例子。

其他一些开口系统的例子，如气轮机、喷气发动机和管道中流动的介质。如果在一定的时间内，在系统中流入的质量和流出的质量并不相等，则这种开口系统的质量将随时间而变化。

与此相反，闭口系统内的质量是恒定的。

当一个系统与其外界一切影响隔绝，即在系统的边界上没有进行物质与能量的交换时，则此系统称为孤立系统。

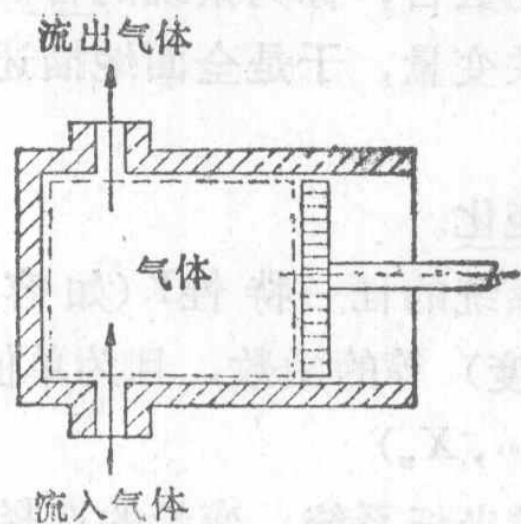


图4 开口系统的例子

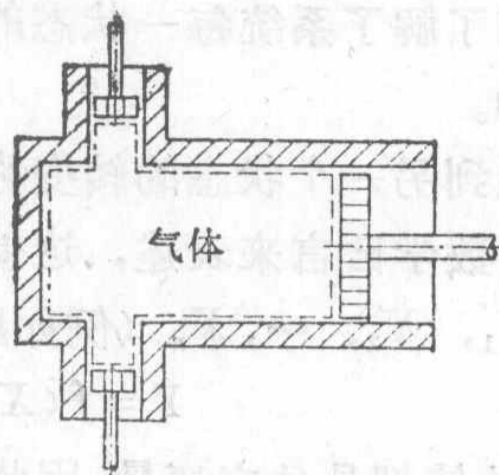


图5 根据图4所示的系统转变为闭口的代用系统

每个开口系统均能转变为闭口系统，反之亦然。为此我们考察一种流体运动的例子，选取一个小的质量微团作为系统，在确定质量微团的坐标作为时间的函数后，就可以描述微团的运动。每一个质量微团的本身就是一个闭口系统。另一个常用而且较简单的描述运动的方法是在流体空间中划定一个微元体积，然后研究通过这个微元体积的流体的流动情况。因为其他流体质点不断地通过这个微元体积，所以它可以被看作开口系统。因此，图4所示的开口系统能够转变为图5所示的闭口系统。这时，我们只要在流入和流出截面处设想各安装一个活塞，于是活塞将随着流入的气体向内移动和随着流出的气体向外移动。

3. 系统的坐标

为了求解热力学问题，在首先给系统下定义之后，其次的任务在于通过对其特性的描述来近似地标定该系统。系统的特性是指物理特性，如压力、温度、密度、容积、导电率、折射率、磁化率和其他一些特性。

举例来说，如给一个气球充气，这时人们会问气体的质量是怎样随着容积发生变化的。虽然气体还可用很多其他的变量来表征，例如，温度、介电常数、折射率、热辐射的吸收率等，但在充气期间，只有少量参数在变动，大量参数仍然保持恒定，故可以忽略不计。因此，如要近似地描述一个系统，仅需注意研究有哪些特性在该过程中发生变化。所以从一开始就可把变量限制在一定的数目之内。每个这样的变量都有一定的量纲，并可用一种单位制中的若干单位来计量。如果用来描述某一系统的每一个变量都具有一定的值，则可简称这个系统处于某一确定的状态。因此系统的状态是由系统的物理特性的固定值来表征的。众所周知，我们提不出一些关于描述系统特性所需的规则。这仅取决于人们用怎样的观点来描述一个系统的状态。如描述一个由一种气体、一种液体或由混合气体、混合液体构成的热力系统时，举例来说，可选择不同本质的各种量，如它们的压力和容积作为系统的特性变量。反之，如要描述某一系统的状态，这时若着眼于液体薄膜表面情况的探讨，则可采用象表面张力那样的物理特性；当描述一个系统的磁性状态时，则采用磁场强度和磁化率。

经验表明，一个系统的所有物理特性，并不是彼此无关的。例如，一根金属导线的电阻是与它的温度有关的；一种液体的折射率是随着它的压力和密度而变化的。不过，我们也可以使某些特性彼此独立地变化。假定这些独立变量或坐标都具有一个确定值，则一些与它们有关的特性也就确定了。这时我们对这些独立变量的每项选择称之为一个坐标系统。坐标的