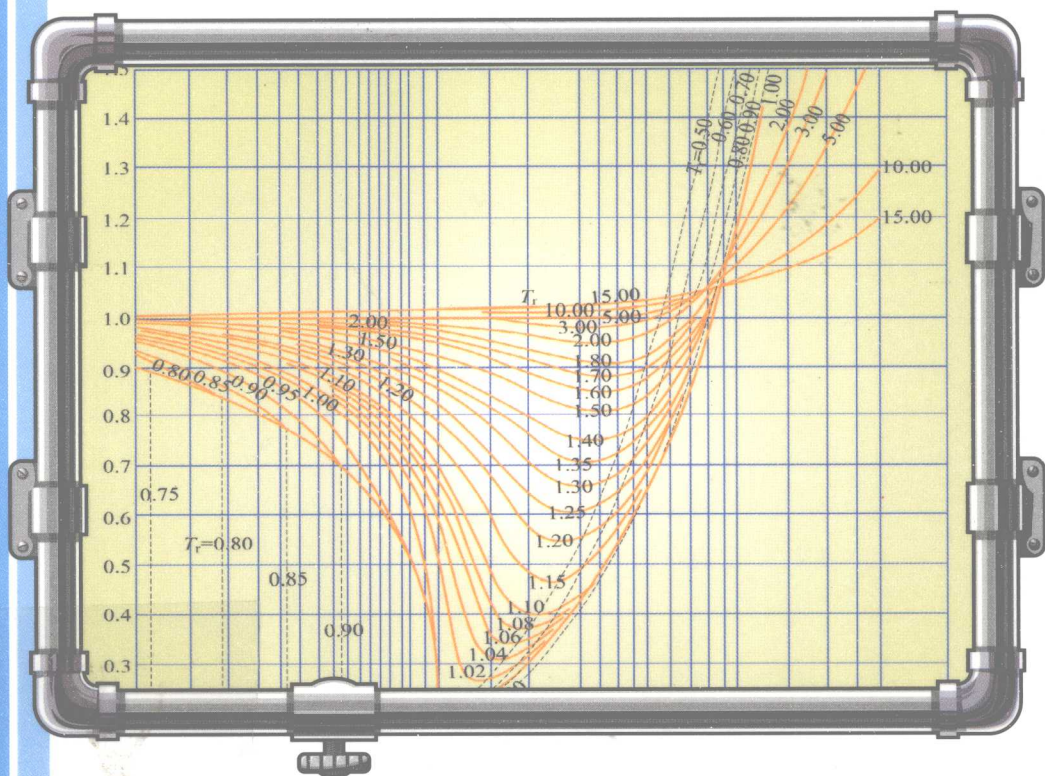




21世纪全国高等院校汽车类**创新型**应用人才培养规划教材

高等工程热力学

曹建明 李跟宝 主编



北京大学出版社
PEKING UNIVERSITY PRESS

21 世纪全国高等院校汽车类创新型应用人才培养规划教材

高等工程热力学

曹建明 李跟宝 主编



北京大学出版社
PEKING UNIVERSITY PRESS

内 容 简 介

本书是工程热力学的延伸、拓展、扩大与深化。全书共有9章：内容包括变质量系统热力学的基本概念、热力学第一定律、变质量系统热力学的基本方程、瞬变流动分析、制冷机的变质量循环、热力学第二定律、管内气体流动、实际气体状态方程、实际气体的热力学性质与过程。本书不仅研究热力系统是“如何”工作的，而且还深入研究“为什么”会这样工作。全书有大量的公式推导，推导过程详尽，便于理解。

本书可作为交通运输工程、车辆工程、动力机械及工程、流体机械及工程、低温及制冷工程、交通新能源及节能工程、交通环境与安全技术、环境科学和环境工程等专业的研究生教材和高年级本科生的选修课教材，也可供在相关领域工作的教师、科研人员和工程技术人员参考。

图书在版编目(CIP)数据

高等工程热力学/曹建明,李跟宝主编. —北京:北京大学出版社,2010.1

(21世纪全国高等院校汽车类创新型应用人才培养规划教材)

ISBN 978-7-301-16077-0

I. 高… II. ①曹…②李… III. 工程热力学—高等学校—教材 IV. TK123

中国版本图书馆CIP数据核字(2009)第197546号

书 名: 高等工程热力学

著作责任者: 曹建明 李跟宝 主编

责任编辑: 童君鑫

标准书号: ISBN 978-7-301-16077-0/TK·0001

出 版 者: 北京大学出版社

地 址: 北京市海淀区成府路205号 100871

网 址: <http://www.pup.cn> <http://www.pup6.com>

电 话: 邮购部 62752015 发行部 62750672 编辑部 62750667 出版部 62754962

电子邮箱: pup_6@163.com

印 刷 者: 世界知识印刷厂

发 行 者: 北京大学出版社

经 销 者: 新华书店

787毫米×1092毫米 16开本 17.75印张 413千字

2010年1月第1版 2010年1月第1次印刷

定 价: 30.00元

未经许可,不得以任何方式复制或抄袭本书之部分或全部内容。

版权所有,侵权必究

举报电话: 010-62752024

电子邮箱: fd@pup.pku.edu.cn

前 言

高等工程热力学是介于工程热力学和专题文献之间的课程。高等工程热力学方面的书籍不多,但由于其涉及专业广泛,有动力工程、环境工程、化学工程、机械工程、交通运输和电子工程等诸多专业,导致其内容往往繁复。近年来,各专业课程设置有逐渐细化的趋势,单门课程学时数有限。针对交通运输领域的专业教学工作需要,我们编写了这本《高等工程热力学》教材,建议授课40~60学时。本书以交通运输工程、车辆工程、动力机械及工程、流体机械及工程、低温及制冷工程、交通新能源及节能工程、交通环境与安全技术、环境科学和环境工程等专业的研究生、教师和有关科技人员为读者对象,使他们在学习和研究中能够很快地触及学科的前沿问题,并抛砖引玉,为交通运输类专业的发展做一块铺路石。

本书属于经典热力学范畴,是工程热力学的延伸、拓展、扩大与深化。从某种意义上讲,工程热力学是研究常质量热力系统是“如何”工作的,而高等工程热力学不仅是研究常质量系统和变质量系统是“如何”工作的,还要研究“为什么”会这样工作。如在进行液化石油气、天然气、二甲醚等气体代用燃料发动机的研究中,仅具备常质量热力系统分析方法是远远不够的,还要掌握变质量热力系统热功转换的规律和方法、基本定律的表达式、热力过程和热力循环等。本书涉及大量的公式推导,由于主要作为教材使用,因此推导过程尽量做到详尽,便于理解。

全书内容共分9章,针对交通运输工程、车辆工程、动力机械及工程、流体机械及工程、低温及制冷工程和交通新能源及节能工程等专业,论述了变质量系统热力学的基本概念、基本方程、瞬变流动分析和制冷机的变质量循环。针对交通环境与安全技术、环境科学和环境工程等专业,论述了实际气体的热力性质、过程和状态方程。本书删节了工程热物理、热能工程、化工过程机械和电子工程等非交通类专业的量子统计热力学、化学热力学、生物热力学、不可逆过程热力学和汽液相平衡等内容,使本书更适合于交通类专业读者的需求。

本书由长安大学曹建明、李跟宝合作编写,其中第4章、第8章和第9章由曹建明编写,第1章~第3章、第5章~第7章由李跟宝编写。

本书编写过程中参考了有关的文献资料,谨向这些文献的著作者表示衷心的感谢!本书在出版过程中,得到了北京大学出版社的大力支持,也在此深表谢意!

限于作者的水平和知识范围,疏漏和不妥之处在所难免,敬请读者批评指正。

曹建明 李跟宝

2009年10月于西安

参考文献

- [1] 苏长荪, 谭连成, 刘桂玉. 高等工程热力学 [M]. 北京: 高等教育出版社, 1987.
- [2] 吴沛宜, 马元. 变质量系统热力学及其应用 [M]. 北京: 高等教育出版社, 1983.
- [3] 童钧耕, 吴孟余, 王平阳. 高等工程热力学 [M]. 北京: 科学出版社, 2006.
- [4] 陈国邦. 最新低温制冷技术 [M]. 2版. 北京: 机械工业出版社, 2003.
- [5] 林宗涵. 热力学与统计物理学 [M]. 北京: 北京大学出版社, 2007.
- [6] 王竹溪. 热力学 [M]. 2版. 北京: 北京大学出版社, 2005.
- [7] 朱明善. 能量系统的火用分析 [M]. 北京: 清华大学出版社, 1988.
- [8] Schmidlin A E. Rapid filling of a cylinder with a compressible fluid. Trans. ASME, 1967, 89(3): 570-572.
- [9] 何雅玲, 陶文铨, 吴明, 等. 脉管制冷机性能数值模拟方法的研究进展及发展方向 [J]. 工程热物理学报, 2004, 25(1): 9-12.
- [10] 周光炯, 严宗毅, 许世雄, 等. 流体力学 [M]. 北京: 高等教育出版社, 2000.
- [11] Wark K. Thermodynamics, 3'nd edition. New York: McGraw - Hill Book Company, 1977.
- [12] Zemansky M. W. Heat and Thermodynamics, 5'nd edition. New York: McGraw - Hill Book Company, 1998.
- [13] Cravalho E G., Smith J. L. Engineering Thermodynamics. Boston: Pitman, 1981.
- [14] Benson R. S. Advanced Engineering Thermodynamics. 2'nd edition. New York: Pergamon Press, 1977.
- [15] 严家禄. 一个新的实际气体通用状态方程 [J]. 哈尔滨工业大学学报, 1980(1).
- [16] 严家禄. 饱和蒸汽通用状态方程(多重复合分子模型) [J]. 工程热物理学报, 1982(1).
- [17] 童景山, 李敬. 流体热物理性质的计算 [M]. 北京: 清华大学出版社, 1982.
- [18] 谭连城. 含有热力偏导数的流体热力性质的计算——Lee-Kesler 方程的导数压缩性系数及其应用 [J]. 化工学报, 1981(4).
- [19] 侯虞均, 张彬, 唐宏青. 马丁-侯状态方程向液相发展 [J]. 化工学报, 1981(1).
- [20] 朱自强, 徐汛. 化工热力学 [M]. 2版. 北京: 化学工业出版社, 1991.

质检5

目 录

主要符号	1	3.2.3 均匀系统质量守恒	29
第 1 章 变质量系统热力学的基本概念	5	3.3 控制体积热力学第一定律表达式	30
1.1 热力学的研究对象和方法	5	3.3.1 控制体积热力学第一定律表达式的导出——一维流动	31
1.1.1 常质量系统	6	3.3.2 稳态、稳定流动	33
1.1.2 变质量系统	7	3.3.3 均态、不稳定流动	34
1.2 平衡状态	7	3.4 控制体积热力学第二定律表达式	34
1.2.1 热动平衡	8	3.4.1 常质量系统	34
1.2.2 平衡、均匀和稳定	8	3.4.2 热力学第二定律表达式	35
1.3 热力学系统	10	3.4.3 稳态、稳定流动	36
1.4 过程	12	3.4.4 均态、不稳定流动	37
1.4.1 准静态过程	12	3.4.5 控制体积熵增原理	37
1.4.2 可逆过程	12	3.4.6 熵变的计算	38
1.4.3 准静态过程的功和热量	13	3.5 基本方程	39
1.5 循环	14	3.5.1 准静态过程	39
习题	16	3.5.2 化学势 μ	40
第 2 章 热力学第一定律	17	3.6 多元系统的化学势	40
2.1 热力学第一定律的一般表达式	17	3.6.1 多元系统的基本概念	41
2.2 功	18	3.6.2 化学势 μ 的表达式	42
2.3 热量	20	3.6.3 熵	44
2.4 闭口系统能量平衡方程	21	3.6.4 化学计量方程	45
2.5 开口系统能量平衡方程	22	3.7 过程方程	46
习题	24	习题	47
第 3 章 变质量系统热力学的基本方程	25	第 4 章 瞬变流动分析	49
3.1 状态方程及热力性质	25	4.1 刚性容器的快速充气——绝热充气	50
3.1.1 状态方程	25	4.2 刚性容器的慢速充气——等温充气	51
3.1.2 热力学能和焓	25	4.3 非刚性容器的等压绝热充气——非等容绝热充气	53
3.2 质量守恒方程	26	4.4 非刚性容器的非等压绝热充气	54
3.2.1 控制质量和控制体积分析法	26	4.5 刚性容器的充气	56
3.2.2 非均匀系统质量守恒	28		



4.6	刚性容器的快速放气——绝热放气	57	5.4	分置式制冷机循环	95
4.6.1	温度和放气量的计算	57	5.4.1	工作过程	95
4.6.2	最大理论功	59	5.4.2	循环分析	97
4.7	刚性容器的慢速放气——等温放气	61	5.4.3	优缺点及应用概况	97
4.8	刚性容器的快速放汽——绝热放汽	62	5.5	吉福特-麦克马洪制冷机循环	98
4.9	刚性容器的慢速放汽——等温放汽	62	5.5.1	吉福特-麦克马洪制冷机的基本结构	98
4.10	充放气过程的影响因素	63	5.5.2	工作过程	99
4.10.1	充气时间 t 和容器长径比 L/D	63	5.5.3	循环分析	100
4.10.2	充气过程中的传热——确定瞬时体积平均表面传热系数 α	64	5.5.4	优缺点及应用概况	102
4.10.3	放气过程中的传热	66	5.6	索尔凡制冷机循环	103
4.11	变质量膨胀和压缩过程	67	5.6.1	工作过程	103
4.11.1	等温过程	67	5.6.2	循环分析	104
4.11.2	绝热过程	69	5.6.3	优缺点及应用概况	106
4.12	有漏气的压缩过程	72	5.7	脉管制冷机循环	106
4.12.1	压气机模型	73	5.7.1	工作过程	106
4.12.2	内燃机模型	77	5.7.2	表面泵热原理	108
习题		79	5.7.3	泵热率和制冷量	109
			5.7.4	优缺点及应用概况	110
			习题		111
第5章	制冷机的变质量循环	81	第6章	热力学第二定律	112
5.1	回热式制冷机	81	6.1	热力学第二定律的表述	112
5.1.1	回热器原理	81	6.1.1	开尔文-普朗克说法	112
5.1.2	制冷量计算通式	82	6.1.2	克劳修斯说法	113
5.1.3	低温制冷机的应用	83	6.1.3	喀喇氏说法	114
5.2	斯特林制冷机循环	84	6.1.4	能质贬低原理	114
5.2.1	经典斯特林循环	85	6.1.5	卡诺循环和卡诺定理	114
5.2.2	基本结构与工作过程	86	6.2	熵函数	115
5.2.3	循环分析——施密特等温气缸模型	88	6.2.1	克劳修斯法	115
5.2.4	应用和发展	90	6.2.2	喀喇氏法	116
5.3	维勒米尔制冷机循环	91	6.3	熵增原理	119
5.3.1	热力工作过程	91	6.4	熵的性质和计算	121
5.3.2	循环分析——等温气缸模型	93	6.4.1	证明广延量	121
5.3.3	优缺点及应用概况	95	6.4.2	熵与热力学能和焓的比较	122
			6.5	能量的可用性	125
			6.5.1	卡诺定理	125
			6.5.2	可用能	126
			6.6	稳定气流能量的可用性	128

6.7 不可逆损失	131	8.3.2 第二维里系数的拟合及 截断型维里方程	177
6.7.1 不可逆损失与绝热系 熵增	131	8.4 二常数半经验状态方程	177
6.7.2 不可逆过程举例	132	8.4.1 范德瓦尔斯方程	178
习题	133	8.4.2 瑞里奇-邦方程	180
第7章 管内气体流动	135	8.4.3 彭-罗宾逊方程	182
7.1 基本概念、基本定律和一般流动的 热力学规律	135	8.5 多常数半经验状态方程	182
7.1.1 基本概念	135	8.5.1 贝蒂-布里奇曼方程	182
7.1.2 基本定律	137	8.5.2 本-韦伯-鲁宾方程	184
7.1.3 一般流动的热力学 规律	140	8.5.3 马丁-侯方程	186
7.2 理想气体的定常等熵流	141	8.6 对比态原理及气体对比态状态 方程	186
7.2.1 无轴功定常等熵流的一般 特征	141	8.6.1 二参数对比态原理	187
7.2.2 喷管的对比态参数 计算	143	8.6.2 三参数对比态原理	191
7.3 实际喷管	147	8.6.3 李-凯斯勒对比态方程	193
7.3.1 摩擦损失	147	8.6.4 严家禄对比态方程	194
7.3.2 不同压力比时喷管的工作 情况	148	8.7 实际气体混合物的混合法则	196
7.3.3 理想气体正激波的热力学 分析	150	8.7.1 实际气体的道尔顿定律和 亚麦加特定律	197
7.4 等截面摩擦管流	155	8.7.2 维里方程的混合法则	198
7.4.1 绝热流	155	8.7.3 其他状态方程的混合 法则	199
7.4.2 等温流	160	8.7.4 混合气体的假临界 常数	203
7.5 等截面传热管流	163	习题	204
习题	168	第9章 实际气体的热力性质与 过程	205
第8章 实际气体状态方程	169	9.1 导出热力性质的常用关系式	205
8.1 实际气体与理想气体的区别	169	9.1.1 闭口系统	205
8.1.1 气体分子间的相互 作用力	169	9.1.2 数学关系式	206
8.1.2 实际气体的区分	172	9.1.3 麦克斯韦关系式	206
8.2 实际气体的压缩因子	173	9.1.4 热力偏导数变换常用 关系式	206
8.2.1 $Z=f(p, T)$ 图	173	9.2 热力性质的一般表达式	207
8.2.2 实际气体状态方程的一般 热力学特性	175	9.2.1 热力学能的一般 表达式	207
8.3 维里状态方程	176	9.2.2 比焓的一般表达式	207
8.3.1 方程的形式	176	9.2.3 比熵的一般表达式	208
		9.2.4 比定压热容和比定容热容 的一般表达式	208



9.2.5 焦汤系数的一般 表达式	211	9.5.1 热力过程的功和热量	233
9.2.6 逸度及逸度系数的一般 表达式	212	9.5.2 确定给定初终态间热力 性质变化量的方法	233
9.3 偏差函数、余函数和余函数 方程	213	9.6 实际气体多变过程	235
9.3.1 偏差函数法和 余函数法	214	9.6.1 多变过程方程及多变过程 指数通用表达式	235
9.3.2 实际气体的余比焓 方程	215	9.6.2 多变过程特征比 e 表达式	237
9.3.3 实际气体的余比熵 方程	218	9.6.3 典型多变过程的实际气体 多变指数表达式	238
9.3.4 实际气体的余比热容 方程	222	9.7 实际气体典型热力过程的 计算	240
9.3.5 李-凯斯勒方程的 余函数	223	9.7.1 等体积过程	240
9.3.6 不同余函数的关系	224	9.7.2 等压过程	240
9.4 导数压缩因子	228	9.7.3 等温过程	241
9.4.1 导数压缩因子 Z_p, Z_T 的 推导过程	228	9.7.4 等熵过程	241
9.4.2 导数压缩因子 Z_p, Z_T 与 流体的热力性质的函数 关系	228	9.7.5 绝热节流过程	242
9.4.3 李-凯斯勒方程的导数压缩 因子 Z_p, Z_T 分析表达式	230	9.7.6 不可逆绝热过程	242
9.5 实际气体热力过程分析方法	233	习题	243
		附录 A L-K 方程的参数值	244
		附录 B 一些常见物质的热物性	273
		参考文献	276

主要符号

符 号	名 称
拉丁字母	
A	表面积；化学亲和势；亥姆霍兹函数(自由能)
a	声速；比自由能；热扩散率
C	流体流速；热容
c	比热容
c_p	比定压热容
c_v	比定容热容
D	直径
E	广义能量；电场强度
E_D	分子间的诱导势能
E_k	理论功；相互作用的分子间的平均势能
E_L	色散力势能
E_x	焓
e	流入、流出系统的比能量；电荷；多变过程特征比
F	广义力
Fo	傅里叶数
f	逸度；摩擦因数
G	吉布斯函数(自由焓)
g	重力加速度；比自由焓
H	焓；磁场强度
h	比焓；普朗克常量
I	总磁矩；有效能损失；电离能
k	玻尔兹曼常数；绝热指数；换热系数
k_T	等温压缩系数
L	长度
l	正负电荷质点间的距离
M	分子量
Ma	马赫数
M_r	余函数
M'_r	偏差函数
m	质量；实际气体的多变指数
\dot{m}	质量流率
N	摩尔数



符 号	名 称
Nu	努塞尔数
n	转速; 脉管脉动速率; 常质量系统多变指数; 实际气体的多变指数
n_1, n_2	变质量系统多变指数
Pr	普朗特数
p	压力; 总电矩
Q	热量
Q_0	循环净热量
\dot{Q}	热流率
q	比热量
q_0	比循环净热量
R	气体常数
Ra	瑞利数
Re	雷诺数
R_m	通用气体常数
r	两偶极距中心的距离
S	熵; 相对死体积
S_f	熵流
S_p	熵产
s	比熵
s_f	比熵流
s_p	比熵产
T	热力学温度
T_r	环境热源温度; 对比温度
T_w	壁面温度
T_0	环境温度
t	摄氏温度; 时间
U	热力学能
u	比热力学能
V	体积; 速度; 化学反应速率
v	比体积
W	广义功; 膨胀功
W_0	循环净功
W_f	流动功
W_{mag}	可逆磁化功
W_{net}	净功
W_{pol}	可逆极化功
$W_{sur, ten}$	表面张力功
W_s	轴功
W_t	技术功

(续)

符 号	名 称
W_{tot}	总功
$W_{\text{内}}$	内功
$W_{\text{外}}$	外功
\dot{W}_{net}	净功率
w	比广义功; 比膨胀功
w_b	比循环净功
w_f	比流动功
w_s	比轴功
w_t	比技术功
x	位移; 摩尔百分数
Z	高度; 压缩因子
Z_p	$= Z - p \left(\frac{\partial Z}{\partial p} \right)_T$, 导数压缩因子
Z_T	$= Z + T \left(\frac{\partial Z}{\partial T} \right)_p$, 导数压缩因子
希腊字母	
α	表面传热系数; 极化率; 流体的等压体积膨胀系数; 曲轴转角
β	流体的等温体积压缩系数
$\Gamma(x, y)$	$= \max(x, y)$
γ	扫气比
ϵ	压缩比; 制冷、制热系数; 微量
ϵ_0	介电常数; 最大吸引势能
ϵ_c	逆卡诺循环制冷系数
η	喷管效率
η_c	卡诺循环热效率
η_t	热效率
λ	速度系数; 导热系数
μ	化学势; 热力学完善程度系数; 偶极矩
μ_j	焦汤系数
ν	极化轨道频率
ν_i	化学计量系数
ρ	密度
σ	表面张力; 零势能时的分子间距; 压力比
τ	温度比
φ	逸度系数; 广义能量; 广义状态参数; 喷管速度损失系数
ϕ	$= \int_0^T c_p(T) \frac{dT}{T}$



符 号	名 称
ψ	耗散能(摩擦热); 一个循环的总时间
ω	偏心因子
下角标	
0	管内状态的; 滞止的
ad	绝热的
b	标准沸点下的
c	气液相临界的
cm	控制质量的; 假临界数的
cv	控制体积的
e	出口的
h	定焓的
i	进口的; 组分的、组元的
id	理想的
irr	不可逆的
iso	孤立系统的
l	饱和液体的
loss	损失的
p	定压的
pt	脉管的
r	对比态的
re	可逆的
rr	法线方向的
s	定熵的
sys	系统的
sur	环境的
T	定温的
V	饱和蒸汽的
v	定容的
上角标	
0	基准的
*	理想气体的; 临界截面气体参数的; 参考状态的
a	绝对的
(0)	简单流体的
(R)	参考流体的
上标	
.	率

第 1 章 变质量系统热力学的基本概念

1.1 热力学的研究对象和方法

人们基于对于各种热现象加以利用的需求而建立了热学，研究的对象包括物质的热运动和各种与热现象相联系的规律。热力学属于热学理论的一个重要分支，它是在一系列实验结果的基础上，综合整理而形成的系统的理论。热力学的研究对象包括能量、能量转化以及能量与物质性质之间的关系。

人们在很早的时候就开始在生产和生活中利用各种热现象，19 世纪中后期，热的本质逐渐被认识，并且以无数的实践经验为基础总结并相继确立了热力学第一定律和热力学第二定律。从 1840—1850 年，焦耳 (James Prescott Joule) 先后通过电的热效应以及不同的机械生热方法来求得热功当量，并取得了一致的结果，焦耳的实验结论使得能量守恒定律成为科学界公认的自然规律，而能量守恒定律就是热力学第一定律。热力学第一定律建立后，在物理学乃至生产实际中得到了广泛的应用，大大推动了整个自然科学的发展。在接下来的时间里，卡诺 (Sadi Carnot) 在 1824 年发表了著名的卡诺定理，开尔文 (Lord Kelvin) 在 1848 年根据卡诺定理制定了热力学温标，克劳修斯 (Rudolf Clausius) 于 1850 年同样根据卡诺定理，建立了热力学第二定律。热力学第一、第二定律使得热力学成为一个系统完整的学科，并成为热力学分析研究实际问题的理论基础。

热力学是在对热现象进行大量观测基础上总结出的普遍的系统理论。热力学基本理论是普适的理论，对于一切与热运动有关的现象与物质都适用。热力学所研究的对象分布广泛，涉及自然界的各种现象，其主要范围包括物理学、化学、工程学、气象学以及生物学等领域。传统热力学主要研究的问题可以归纳为以下三个方面：

(1) 热现象过程中能量相互转化的规律性以及数量关系，如过程功、热量以及热功转化效率的计算等。研究时常常需要以热力学第一定律为理论基础。

(2) 判断不可逆过程进行的方向。研究时常常需要以热力学第二定律为理论基础，其目的在于使过程沿所期望的方向进行，改善热能工程和能量转换装置的设计，以尽可能充分地提高能源效益。

(3) 物质的平衡性质。能量的转换必须以物质为媒介，因此对于物质性质的研究将成为系统状态与系统性质研究的出发点。热力学将研究工质的一系列基本热力性质，并分析计算工质在各种热工设备中所经历的状态变化过程和循环，探讨影响能量转换效果的实际因素。

此外，热力学还将研究与实际热力学直接相关的一些物理、化学现象。例如，当前热能的一个主要来源是各种燃料的燃烧，由于燃烧过程本身就是一个剧烈的化学反应过程，因此讨论时需要利用一些化学热力学的基础知识。

热力学的研究方法可以分为宏观研究方法和微观研究方法两种。因此，可以将热力学



分为宏观热力学和统计热力学，其中宏观热力学忽视了物质的原子结构，处理物质性质时把物质看成连续的整体，从而用确定的连续函数来表述物质的性质。宏观热力学利用宏观物理量来描述物质所处的状况，通过实验来确定一些物理量之间的变化关系，根据热力学的基本定律，推导出各宏观物理量之间的内在联系，并与实验结果相结合来研究热现象中的基本规律。由于其研究过程中未考虑物质内部的分子结构及其行为，宏观热力学无法深刻阐明热现象的本质。

统计热力学是从微观角度来分析研究热现象，因此正好可以弥补宏观热力学的缺陷。它应用力学理论来研究单个分子的运动，用统计方法来说明大量分子紊乱运动的统计平均性质，从而确定宏观热现象所服从的基本规律。因此，统计热力学能够从物质内部分子运动的微观机理更好地说明各种热现象的物理实质。但其分析过程较为复杂、抽象，并且由于其对于物质的分子结构模型所作的简化假设只是实际情况的某种近似，其分析结果与实际情况不能完全符合，在可靠性上往往存在一定局限。

工程热力学是热力学的一个分支，主要研究有关热能和机械能相互转换的规律及物性。其目的在于以热力学两条基本定律为基础，分析热能工程中有关的各种热力过程和热力循环，从理论上研究提高热能和机械能转换有效程度的途径。此外，工程热力学的研究范围还涉及化学热力学的领域，如燃烧包括化学反应的热现象。本书的研究方法将以宏观平衡的经典热力学为主，以利于实际工程应用；同时，还将适当利用微观理论的某些结论来帮助理解宏观现象的本质问题。

在本书的论述中，通常将所研究的热力学对象称为热力学系统，或简称为系统。系统具体可以为气体、液体、液体表面膜以及磁体、超导体等实物类型的物质系统，也可以是热辐射场，范围非常广泛。可以对系统发生影响的外部环境称为外界，例如，当研究置于大气中的某容器内的气体时，可以把气体作为“系统”，而容器和大气则可以通过容器壁对气体发生影响，相应归入“外界”范畴。

系统与外界的划分有一定的随意性。上例中也可以将容器与所容纳的气体一起划为“系统”，大气划为“外界”。但不管怎样，不同的划分不应该影响最终的物理结果。

1.1.1 常质量系统

通常情况下，工程热力学的研究对象为常质量系统，即认为在热力过程和热力循环中系统的质量始终保持不变，而且每个工质微团经历的热力过程和热力循环相同。例如活塞和气缸所组成的装置，分析时一般取气体工质为热力系统，取活塞、缸壁乃至热源为外界，认为活塞与气缸内壁间实现完全密封，从而保证系统与外界之间不会发生物质交换，此时称系统为闭口系。当闭口系膨胀对外界做功时，系统的边界随同活塞一起运动，没有任何物质穿越边界而进入或者离开系统。

对于开口系来说，常质量系统只是研究稳定流动，即进入和离开系统的质量流率时时相等，系统中工质的质量保持恒定不变。例如涡轮机中，气体工质不断地从进口稳定流入，通过膨胀而推动叶轮旋转对外界做功，然后从出口稳定流出的情况。对于常质量热力系统，可以任取单位工质作为分析对象，而全部工质的总效果只是单位工质效果的简单放大。

对于常质量系统，表征系统状态的参数主要有压力 p 、比体积 v 、热力学温度 T 、比热力学能 u 、比焓 h 、比熵 s 。

1.1.2 变质量系统

在实际工程实践中,许多情况下伴随着热力过程的进行,系统中工质的质量也在发生变化,由此引出了变质量系统的概念。其中一类典型的例子就是对固定体积容器的充、放气过程,压缩机对固定容器的充灌或抽吸、液体火箭发动机气压制燃料系统中高压气体对燃料的挤代过程均属此类;另一类典型的变质量热力过程的例子是工质在气缸中膨胀或压缩时工质的数量在同时发生变化。譬如活塞式内燃机中由于气门以及活塞环处的泄漏导致过程中工质质量不断发生变化。泄漏量是影响过程参数变化的一个因素,与无泄漏情况相比,过程中参数的变化规律在定性和定量上均不尽相同。

在这种热力过程中,每个工质微团所经历的热力变化是不尽相同的,对其进行分析需要借助变质量热力学的方法,将工质质量发生变化的系统称为变质量热力系统,这种系统所经历的状态变化过程称为变质量热力过程。

与常质量系统相比较,变质量系统状态参数主要包括压力 p 、体积 V 、温度 T 、热力学能 U 、焓 H 、熵 S 、烟 Ex 、焦汤系数 μ_j 、逸度 f 和逸度系数 φ 等,同时,由于系统的工质质量随时间发生变化,因此还要考虑质量 m 和时间 t 两个参数。

变质量系统热力学是工程热力学的延伸,属宏观热力学的范畴,有关工程热力学的基本概念和许多基础知识在研究变质量系统问题时仍十分有用。由于传统热力学研究中热力系统的变化过程都是一系列平衡状态或者近似于平衡状态的准静态过程。而变质量过程则涉及瞬态的工质状态不平衡现象,需要依据近年来发展起来的非平衡热力学(又称不可逆过程热力学)方法进行研究分析。

变质量热力学以变质量热力系为研究对象,其内容主要包括:适应于变质量系统的热力学基本定律的表达式,变质量热力过程的参数变化规律,系统与外界进行热量、功量以及质量交换的规律,以变质量热力过程为主要过程的热机循环。

接下来以内燃机为例,进一步阐述变质量系统热力学在分析典型工程实际问题中的应用情况。常见四冲程内燃机的一个完整工作循环可分为四个基本冲程,即进气冲程、压缩冲程、做功冲程和排气冲程。进排气过程中气缸内完成新旧充量的更换,气流在进排气道以及缸内处于非常复杂的非稳态流动形式,具体表现为进气涡流、压气挤流、反挤流、翻滚流、湍流以及微涡流等形式,研究对象无疑应为一个变质量系统。同时,在压缩与膨胀过程中,难免有一部分工质气体从气门以及活塞环间隙中泄漏至外界中,因此缸内工质数量也是在时刻变化的。进一步讲,除了工质数量的变化,缸内气体燃烧前后,工质的成分也将因化学反应的存在而变化着。以上内容均属变质量系统热力学的研究范畴。

1.2 平衡状态

平衡状态是热力学中的一个非常重要的概念。无论物系处于平衡状态还是非平衡状态,都可以用宏观或微观两种不同的观点进行研究,因此又有平衡状态热力学和非平衡状态热力学之分。平衡状态热力学又称经典热力学,其研究的热力过程都是一系列的平衡状态或准静态的连续变化。而对于过程中迅速的不平衡的现象,平衡状态热力学只能做一些



定性的说明,进一步的宏观分析需要借助于非平衡状态热力学来进行。非平衡状态热力学又称不可逆过程热力学。

1.2.1 热动平衡

为了研究系统的性质,必须首先确定其所处的状态。热力学分析中所涉及的系统的状态,通常都要求是热力学平衡状态,简称平衡状态。具体来讲,当系统内部没有热量的迁移时,认为系统处于热平衡状态;当系统内部各部分间没有相对位移时,系统处于力平衡状态;同时处于热平衡和力平衡状态的系统状态称为热力学平衡状态。当系统内部还存在相变或化学反应时,则还应该包括相变平衡或化学平衡。

应当指出,热力学中的平衡是指系统的宏观状态而言,热力学的平衡有别于力学上的绝对平衡。力学中的平衡状态只是单纯静止的问题,而热平衡是建立在系统内部分子运动的基础上的热动平衡。处于平衡状态的系统,其宏观状态不随时间发生变化,但其分子仍可以任何方式自由地相互作用。

平衡状态是指在没有外界影响的条件下,系统的各部分在长时间内不发生任何变化。换言之,如果外界的影响不存在,系统将长期维持着它的平衡状态。由此可见,平衡状态的概念是在研究热现象的过程中,为了简化系统中工质状态随时间变化的复杂性而提出的。一般认为,当系统中存在各种平衡条件时,只要没有外界影响,系统的状态在长时间内就不会发生变化。平衡状态是热运动的一种特殊形态,处于平衡状态的系统具有如下特征:

(1) 处于热动平衡的系统一切宏观变化都停止,表征系统宏观状态的参数也都不随时间发生变化。

(2) 处于热动平衡的系统在不变的外界条件下,可以在很长但仍有限的时间内,一直停留在这个状态。此处的不变的外界条件是指所研究的系统是孤立的,除了恒定的外力场外,没有任何其他的相互作用。

1.2.2 平衡、均匀和稳定

1. 平衡和均匀

平衡和均匀是不同性质的概念。处于平衡状态的系统状态不随时间改变,平衡和时间的概念联系在一起,系统不受外界影响,内部宏观参数既不随时间变化,也不随地点变化。而均匀则是相对于空间而言的,处于均匀状态的系统内部空间各点的状态均匀一致,系统内部宏观参数可以随时间变化,但不随地点变化。

均匀系又称单相系,与此相对应,内部各点参数不尽相同的系统被称为非均匀系,又称复相系。

不平衡系是不均匀系,但不等于说,处于平衡状态的系统一定是均匀的。譬如,处于重力场中的气体或液体平衡时上部和下部的密度不同,不能称为均匀系。但若物体的高度有限,重力场对气体密度的影响甚微,可以忽略不计,从而可以把处于平衡状态的单相物系看作均匀系。至于处于两相平衡状态下的水和水蒸气,即使忽略重力场的影响,由于汽液两相的密度差异很大,这一复相平衡不能被作为均匀系对待。