



世纪高等教育规划教材

工程热力学

ENGINEERING THERMODYNAMICS

刘宝兴 主编



机械工业出版社
CHINA MACHINE PRESS

21 世纪高等教育规划教材

工 程 热 力 学

ENGINEERING THERMODYNAMICS

主 编 刘宝兴
副主编 张世红
参 编 王梅杰
主 审 任禾盛



机 械 工 业 出 版 社

本书是以教育部制定的多学时《高等工业学校工程热力学课程教学基本要求》为基本依据,并参照建筑环境与设备工程、热能工程、热能动力工程等专业的教学大纲,博采众长,特别是参考了当前国际上最新的工程热力学教科书版本,在长期教学实践应用的基础上,根据我国高等工科教学改革的要求编写的面向 21 世纪的工程热力学教材。

本书不要求进行复杂的数学运算,只要求对基本原理有清楚深入的理解、掌握分析热力学问题的方法,而能解决实际工程问题。每章都有许多结合内容的例题,章末都有一组思考题,以及大量选择的习题和习题答案,便于自学和检查。

本书内容包括:基本概念和定义,纯物质的性质,经由功、热量和物质的能量传递,热力学第一定律,热力学第二定律,熵,焓,热力学关系式,流体的流动和喷管,压缩机,气体动力循环,蒸汽动力循环,制冷循环,理想气体混合物和湿空气,化学反应系统,化学平衡和相平衡等共 16 章。本书全部采用国际单位制。

本书可作为高等学校建筑环境与设备工程、热能工程、热能动力工程、环境工程和机械工程各专业的教学用书,也可作为有关工程技术人员自学、进修的教材或参考书,对准备考研的学生也可作为复习参考书。

图书在版编目(CIP)数据

工程热力学/刘宝兴主编. —北京:机械工业出版社, 2006.1

(21 世纪高等教育规划教材)

ISBN 7-111-17928-5

I. 工... II. 刘... 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 (2005) 第 136756 号

机械工业出版社 (北京市百万庄大街 22 号 邮政编码 100037)

责任编辑:刘涛 版式设计:冉晓华 责任校对:申春香

封面设计:王伟光 责任印制:石冉

北京中兴印刷有限公司印刷

2006 年 1 月第 1 版第 1 次印刷

1000mm×1400mm B5·13.5 印张·2 插页·530 千字

定价:33.00 元

凡购本书,如有缺页、倒页、脱页,由本社发行部调换

本社购书热线电话 (010) 68326294

封面无防伪标均为盗版

前 言

“工程热力学”是研究能和物质性质之间关系的基础工程学科，在全世界一直是工程课程的主要部分。它是后继课程“工程流体力学”、“传热学”、“空调工程”和“制冷原理”等专业基础课和专业课的基础，为学生在工程实践中应用工程热力学作准备。其前期课程是基本的物理学和微积分。

本书以教育部制定的多学时《高等工业学校工程热力学课程教学基本要求》为基本依据，并参照建筑环境与设备工程、热能工程、热能动力工程等专业的教学大纲来编写的。本书博采众长，特别是参考了当前国际上最新的工程热力学教科书版本，更多关注内容的生动有趣和结合实际，力求教材的科学性、先进性、启发性、实用性和对我国教学的适用性。为了保证学科的系统性和完整性，对某些章节的内容作了适当扩充和拓宽，超出“课程的基本要求”的范围，一则可使教师有选择的余地，二则可适应不同专业不同学时及不同层次的需要，三则可适应学生报考研究生的复习需要。

本书可作为建筑环境与设备工程专业、能源动力类各专业教学用书，也可作为有关工程技术人员自学、进修的教材或参考书，对准备考研的学生也可作为复习参考书。

本书的主要目标之一是鼓励学生开发有序的解题方法。为此，帮助学生系统思考工程问题的分析方法贯穿于整个课文。

本书从宏观观点出发，立足于从工程实际出发来研究物质的热力学性质、能量转换的规律和方法以及有效合理利用热能的途径。

本书全部采用国际单位制。

本书遵循国际上流行教材的编写方式和顺序。首先，引入各基本

概念和定义,然后讨论纯物质的性质,之后引入理想气体的近似概念以及其他气体的状态方程式。在介绍了热和功之后,讨论闭口系统的能量守恒原理,接着讨论推动功和流动功,进而得到控制容积的能量守恒原理。热力学第一定律是要全面掌握,并能灵活运用的重要内容。第5、6、7章对热力学第二定律进行了详细的研讨。通过强调它与能源有效利用的目标的关系来体现第二定律的重要性。一个特点是使用熵产的概念,它使第二定律以学生容易掌握的方式被有效地应用(第6章)。另一个特点是熵分析的最新介绍,包括熵效率(第7章)。引入和应用熵平衡和焓平衡,并与从闭口系统和控制容积导出的能量平衡一起平行使用,将第一定律和第二定律的应用统一起来。本书的结构安排对不讲述“熵分析”一章的教师没有影响。第11~13章的顺序和内容可灵活掌握。第14章理想气体混合物和湿空气是针对建筑环境与设备工程专业的需要,强化了湿空气及其在工程应用的内容。第15和16章涉及化学反应的系统;提出化学平衡的通用判据,并应用到理想气体混合物的反应中;然后将分析扩大到同时发生的化学反应中。最后讨论非反应系统的相平衡。

本书每一章开始就清楚地说明这一章的目的。每章有一组思考题,以形成对课文的更深入理解,促进创新性思考和测试理解。章末有大量习题,且归类在各标题下以便加以选用。习题的次序与主题内容有关,先易后难。从基本概念题到包含几个部件的系统的较复杂习题。要求学生作图,分析走向,讨论观察结果,以提高分析技能,培养工程判断能力。

参加本书编写工作的有上海理工大学刘宝兴教授(第4、5、6、7、8、9、10、14、15、16章)、北京建筑工程学院张世红教授(第1、2、3章)和华北水利水电学院王梅杰老师(第11、12、13章)。全书由刘宝兴教授统稿。

感谢上海理工大学任禾盛教授对本书的仔细审阅和提出的宝贵意见。

特别感谢上海理工大学李美玲教授和黄晨教授对本书编写工作的支持和关心。

感谢平顶山工学院陈丙义教授、周恒涛副教授、石家庄铁道学院罗勇副教授和湖南工程学院成志明老师对本书编写工作的支持。对本书的编写给予过关心和帮助的各位同志和研究所同仁在此也一并表示衷心感谢。最后，真诚地希望能得到读者的指正意见。

编 者

常用符号

A	面积, m^2	MEP	平均有效压力, Pa
a	声速, m/s	q_m, m	质量, kg
B_T	容积弹性模数	$\dot{q}_m, \dot{m}$	质量流量, kg/s
C	余隙比	n	物质的量, 多变指数
c	比热容, $\text{J}/(\text{kg}\cdot\text{K})$	P	功率, W
c_p	比定压热容, $\text{J}/(\text{kg}\cdot\text{K})$	Pe	势能, J
c_v	比定容热容, $\text{J}/(\text{kg}\cdot\text{K})$	pe	比势能, J/kg
$\bar{c}$	摩尔热容, $\text{J}/(\text{mol}\cdot\text{K})$	p	绝对压力, Pa
$\bar{c}_p$	摩尔定压热容, $\text{J}/(\text{mol}\cdot\text{K})$	p_a	干空气压力, Pa
$\bar{c}_v$	摩尔定容热容, $\text{J}/(\text{mol}\cdot\text{K})$	p_b	背压力, Pa
COP_R	制冷机性能系数	p_c	临界压力, Pa
COP_{HP}	热泵性能系数	p_g	表压力, Pa
E	总能, J	p_i	分压力, Pa
e	比总能, J/kg	p_0	大气环境压力, Pa
Ex	焓, J	p_r	对比压力; 相对压力
ex	比焓, J/kg	p_s	饱和压力, Pa
F	力, N; 自由度	p_{sur}	外界绝对压力, Pa
f	亥姆霍兹函数, J/kg	p_v	水蒸气分压力, Pa
g	吉布斯函数, J/kg	Q	热量, J
$\bar{g}_f^0$	生成吉布斯函数, kJ/kmol	q	比热量, J/kg
HHV	高热值, kJ/kg	R	气体常数, $\text{J}/(\text{kg}\cdot\text{K})$
H	焓, J	R_u	摩尔气体常数, $\text{J}/(\text{mol}\cdot\text{K})$
h	比焓, J/kg	$r_{a/f}$	空气-燃料比
$\bar{h}$	摩尔焓, J/mol	S	熵, kJ/K
$\bar{h}_f^0$	生成焓, kJ/kmol	s	比熵, $\text{kJ}/(\text{kg}\cdot\text{K})$
Ke	动能, J	s_f	比熵流, $\text{kJ}/(\text{kg}\cdot\text{K})$
ke	比动能, J/kg	s_g	比熵产, $\text{kJ}/(\text{kg}\cdot\text{K})$
K_p	反应的平衡常数	$\bar{s}$	摩尔熵, $\text{J}/(\text{mol}\cdot\text{K})$
L	做功能力损失 (焓损失), J	$\bar{s}^0$	标准摩尔绝对熵, $\text{J}/(\text{mol}\cdot\text{K})$
LHV	低热值, kJ/kg	T	热力学温度, K
M	摩尔质量, kg/kmol	T_c	临界温度, K
Ma	马赫数		

T_{DP}	露点温度, K
T_i	转回温度, K
T_r	对比温度
t	摄氏温度, $^{\circ}\text{C}$
t_w	湿球温度, $^{\circ}\text{C}$
U	热力学能, kJ
u	比热力学能, kJ/kg
V	体积, m^3
v	比体积, m^3/kg
v_c	临界比体积, m^3/kg
v_r	对比比体积; 相对比体积
W	体积功, J
W_{net}	净功, J
W_s	轴功, J
W_t	技术功, J
W_u	有用功, J
x	干度; 质量成分
y	摩尔成分
z	压缩因子; 标高, m
z_c	临界压缩因子

希腊字母

α	热膨胀系数
β	临界压比
β_T	定温压缩系数
γ	比热容比; 汽化潜热, J/kg
ϵ	压缩比; 回热器效能
η	效率
θ	单位质量流动流体总能, J/kg
κ	等熵指数
λ	定容增压比
μ	焦汤系数; 化学势
ν	化学计量系数
π	增压比
ρ	密度, kg/m^3 ; 定压预胀比
τ	加热比; 时间, s
ν	速度, m/s

Φ	传热速率, W
φ	相对湿度
ω	含湿量, kg_v/kg_a

下标

a	实际; 空气
abs	绝对; 吸收
adi	绝热
atm	大气状态
av	平均
b	边界
c	燃烧; 压缩; 临界
cri	临界点
CV	控制容积
e	出口状态
eva	蒸发
f	饱和液体
fg	饱和液体到饱和蒸气
g	饱和蒸气
gen	产生
H	高温状态
HE	热机; 换热器
i	进口状态; 理想状态
int	内部
iso	孤立状态
L	低温状态
m	混合物
P	生成物
PW	搅拌轮
R	反应物; 制冷机
r	热源; 对比
reg	回热
rep	推动; 排斥
rev	可逆
s	定熵
sat	饱和
sur	外界
sys	系统

t 热的; 技术的
tot 总量
u 通用

v 水蒸气
w 水
0 滞止状态; 寂态

目 录

前言

常用符号

第 1 章 基本概念和定义	1
1.1 热力学的应用领域	1
1.2 系统的定义	4
1.3 系统的描述及其性质	5
1.4 比体积和压力	9
1.5 温度	10
小结	11
思考题	12
习题	12
第 2 章 纯物质的性质	15
2.1 纯物质	15
2.2 纯物质的相	16
2.3 纯物质的相变过程	16
2.4 相变过程参数图	17
2.5 热力学参数表	19
2.6 理想气体状态方程	21
2.7 压缩因子——偏离理想气体性质的度量	23
2.8 实际气体状态方程	28
2.9 比热容	30
2.10 理想气体的热力学能、焓和比热容	32
2.11 固体和液体的热力学能、焓和比热容	35
小结	36
思考题	36
习题	37
第 3 章 经由功、热量和物质的能量传递	40
3.1 动能、势能和热力学能	40
3.2 经由功的能量传递	41
3.3 经由热量的能量传递	43
3.4 质量守恒原理	44
3.5 推动功和流动流体的能量	46

小结	48
思考题	48
习题	49
第4章 热力学第一定律	51
4.1 热力学第一定律的实质	51
4.2 闭口系统的能量平衡	53
4.3 稳定流动系统的能量平衡	62
4.4 稳定流动的 engineering 设备	64
4.5 三过程循环	71
4.6 非稳定流动过程的能量平衡	72
小结	76
思考题	78
习题	78
第5章 热力学第二定律	85
5.1 第二定律的引入	85
5.2 第二定律的表述	86
5.3 可逆过程和不可逆过程	90
5.4 卡诺循环	92
5.5 卡诺定理	93
5.6 热力学温标	93
5.7 卡诺热机	94
5.8 卡诺制冷机和卡诺热泵	95
小结	95
思考题	97
习题	98
第6章 熵	102
6.1 克劳修斯不等式	102
6.2 熵的定义	104
6.3 熵增原理	105
6.4 纯物质的熵变	106
6.5 等熵过程	108
6.6 温熵图和焓熵图	109
6.7 各种 Tds 的关系式	110
6.8 液体和固体的熵变	111
6.9 理想气体的熵变	112
6.10 稳定流动的技术功	115
6.11 使压缩机功耗最小	116
6.12 稳定流动装置的等熵效率	118

6.13 熵平衡	121
小结	126
思考题	126
习题	127
第 7 章 熵	135
7.1 熵的概念	135
7.2 可逆功和熵损的概念	136
7.3 第二定律效率	137
7.4 系统的熵变	138
7.5 经由热量、功和物质流动传递的熵	142
7.6 熵减原理和熵损	143
7.7 闭口系统的熵平衡	144
7.8 控制容积的熵平衡	147
小结	150
思考题	151
习题	152
第 8 章 热力学关系式	157
8.1 微分和偏导数	157
8.2 一个重要关系式	158
8.3 基本热力学关系式和特性函数	158
8.4 麦克斯韦关系式	159
8.5 比热容、热力学能和焓	160
8.6 克拉贝隆方程	162
8.7 热系数	163
小结	164
思考题	165
习题	166
第 9 章 流体的流动和喷管	167
9.1 滞止参数	167
9.2 声速和马赫数	168
9.3 一维等熵流动	169
9.4 通过喷管的一维等熵流动	171
9.5 扩压管	177
9.6 水蒸气流经喷管	178
小结	180
思考题	180
习题	181
第 10 章 压缩机	184

10.1 没有余隙容积的活塞式压缩机	184
10.2 有余隙容积的活塞式压缩机	185
10.3 容积效率	187
10.4 多级压缩和级间冷却	188
10.5 压缩机性能系数	190
10.6 旋转式压缩机	191
小结	193
思考题	193
习题	194
第 11 章 气体动力循环	196
11.1 动力循环分析中的一些基本概念	196
11.2 实际内燃机循环	198
11.3 空气标准假设	199
11.4 空气标准奥托循环	199
11.5 空气标准狄塞尔循环	203
11.6 空气标准混合加热循环	206
11.7 简单燃气轮机循环	208
11.8 采用回热的布雷顿循环	213
11.9 具有中间冷却和再热的回热型布雷顿循环	216
小结	219
思考题	221
习题	222
第 12 章 蒸汽动力循环	226
12.1 卡诺蒸汽循环	226
12.2 朗肯循环	227
12.3 蒸汽参数对热效率的影响	231
12.4 理想再热朗肯循环	233
12.5 理想回热朗肯循环	234
12.6 蒸汽动力循环的焓分析	240
12.7 热电联产	241
12.8 燃气—蒸汽联合循环	243
小结	244
思考题	245
习题	245
第 13 章 制冷循环	250
13.1 制冷机和热泵	250
13.2 逆向卡诺循环	251
13.3 理想蒸气压缩制冷循环	252

13.4 实际蒸气压缩制冷循环	254
13.5 制冷剂	256
13.6 气体压缩制冷循环	256
13.7 吸收式制冷循环	258
13.8 热泵系统	260
小结	262
思考题	262
习题	263
第 14 章 理想气体混合物和湿空气	267
14.1 理想气体混合物	267
14.2 湿空气	272
14.3 基本空调过程	282
小结	293
思考题	293
习题	295
第 15 章 化学反应系统	302
15.1 碳氢燃料	302
15.2 燃烧过程	303
15.3 理论空气量	304
15.4 空气—燃料比	305
15.5 燃烧生成物	306
15.6 生成焓	309
15.7 稳态反应系统的热力学第一定律分析	310
15.8 绝热火焰温度	313
15.9 燃烧焓和热值	315
15.10 热力学第二定律分析	317
15.11 燃料电池	321
小结	324
思考题	324
习题	325
第 16 章 化学平衡和相平衡	329
16.1 化学平衡判据	329
16.2 理想气体混合物的平衡常数	331
16.3 关于理想气体混合物的平衡常数的几点结论	335
16.4 几个同时发生反应的化学平衡	337
16.5 平衡常数 K_p 随温度的变化	338
16.6 相平衡	340
小结	344

思考题	344
习题	345
附录	348
附表 1 各种单位制常用计量单位换算及常用物理常数	348
附表 2 一些元素或化合物的相对原子质量或摩尔质量及其临界参数	349
附表 3 一些常用液体的参数	350
附表 4 一些常用固体的参数	352
附表 5 一些常用食品的参数	353
附表 6 一些常用气体在 300K 时的理想气体比热容	353
附表 7 一些常用气体在各温度下的理想气体比定压热容 c_p , 比定容热容 c_v , 比热容比 γ	354
附表 8 各种常用气体作为温度函数的理想气体摩尔定压热容 $\bar{c}_p$	355
附表 9 一些常用气体在温度 $0 \sim t^\circ\text{C}$ 间的理想气体平均比定压热容 $c_{p,av}$	356
附表 10 一些常用气体在温度 $0 \sim t^\circ\text{C}$ 间的理想气体平均摩尔定压热容 $\bar{c}_{p,av}$	357
附表 11 一些常用气体在温度 $t_1 \sim t_2^\circ\text{C}$ 间的理想气体平均比定压热容 $c_{p,av}$ 的 直线关系式	358
附表 12 空气的理想气体热力性质	358
附表 13 氮气 N_2 的理想气体热力性质	360
附表 14 氧气 O_2 的理想气体热力性质	361
附表 15 水蒸气 H_2O 的理想气体热力性质	362
附表 16 一氧化碳 CO 的理想气体热力性质	364
附表 17 二氧化碳 CO_2 的理想气体热力性质	365
附表 18 氢气 H_2 的理想气体热力性质	366
附表 19 单原子 O 的理想气体热力性质	367
附表 20 氢氧基 OH 的理想气体热力性质	367
附表 21 饱和水和饱和水蒸气 H_2O 的热力性质 (按温度排列)	368
附表 22 饱和水和饱和水蒸气 H_2O 的热力性质 (按压力排列)	369
附表 23 过热水蒸气 H_2O 的热力性质	371
附表 24 未饱和水 H_2O 的热力性质	377
附表 25 饱和冰—水蒸气 H_2O 的热力性质 (按温度排列)	378
附表 26 制冷剂 R22 饱和液体和饱和蒸气的热力性质 (按温度排列)	378
附表 27 制冷剂 R22 饱和液体和饱和蒸气的热力性质 (按压力排列)	380
附表 28 制冷剂 R22 过热蒸气的热力性质	381
附表 29 制冷剂 R134a 饱和液体和饱和蒸气的热力性质 (按温度排列)	385
附表 30 制冷剂 R134a 饱和液体和饱和蒸气的热力性质 (按压力排列)	386
附表 31 制冷剂 R134a 过热蒸气的热力性质	386
附表 32 氨饱和液体和饱和蒸气的热力性质 (按温度排列)	390
附表 33 氨饱和液体和饱和蒸气的热力性质 (按压力排列)	391

附表 34 氨过热蒸气的热力性质	392
附表 35 丙烷 Propane 饱和液体和饱和蒸气的热力性质 (按温度排列)	396
附表 36 丙烷 Propane 饱和液体和饱和蒸气的热力性质 (按压力排列)	397
附表 37 丙烷 Propane 过热蒸气的热力性质	398
附表 38 一些物质在 298K 和 1atm 时的生成焓, 生成吉布斯函数和绝对熵	402
附表 39 一些反应的平衡常数 K_p 的 $\log_{10} K_p$ 值	403
习题参考答案	404
参考文献	416
附图 1 水的 T - s 图	见书后插页
附图 2 水的 h - s 图	见书后插页
附图 3 制冷剂 R-134a 的 p - h 图	见书后插页
附图 4 焓-湿图 (总压为 1atm)	见书后插页

第 1 章

基本概念和定义

热力学是研究物质性质和能量转换之间关系的基础工程学科。热转换成功，或化学能转换成电能就是能的形式转换。热力学提供了对它们进行分析的科学工具。热力学定律是所有热力学分析的基础，所有问题都与这些基本原理相关。本章简要介绍工程热力学的一些基本概念和定义。

1.1 热力学的应用领域

自然界的所有活动都涉及能和物质之间的相互作用，很难想象哪个领域与热力学无关。在许多工程系统和生活方面常常遇到与热力学有关的问题。心脏不断地将血液泵送到人体全身，各种能量转换出现在无数的体细胞中，产生的体热不停地排放到环境中。人体舒适度与其代谢热排放密切相关，人们按环境状态调节穿衣以控制传热速率。

日常生活中就有许多热力学应用的例子。例如，一间普通的房屋就是一间充满热力学奇妙的展示厅，图 1-1 所示是具有太阳能热水系统的民宅。许多常用的家用器皿和家用电器都多少用到热力学原理。例如电灶或煤气灶、采暖和空调系统、冰箱、增湿器、压力锅、热水器、淋浴器、电熨斗、甚至计算机和电视机。在汽车发动机、火箭、喷气发动机、常规电站，核动力装置、太阳能集热器等的设计和分析中，热力学都起着重要作用。节能住宅的设计就是基于冬天热损最少，夏天接受

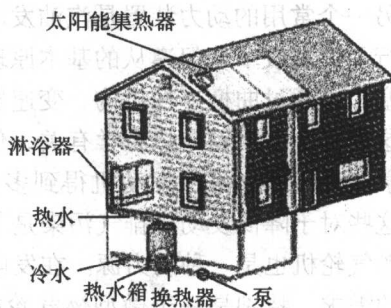


图 1-1 具有太阳能热水系统的民宅