



普通高等教育“十一五”国家级规划教材

清华大学能源动力系列教材

工程热力学

(第2版)

Engineering Thermodynamics
(Second Edition)

朱明善 刘颖 林兆庄 彭晓峰 编著
史琳 吴晓敏 段远源 改编

清华大学出版社



普通高等教育“十一五”国家级规划教材

清华大学能源动力系列教材

工程热力学

(第2版)

Engineering Thermodynamics
(Second Edition)

朱明善 刘颖 林兆庄 彭晓峰 编著
史琳 吴晓敏 段远源 改编

清华大学出版社
北京

内 容 简 介

本书是根据我国高等工业学校“工程热力学课程教学基本要求”并参照清华大学热能工程、动力工程、空调、内燃机及反应堆热工专业的教学大纲,在清华大学试用教材及多年教学实践的基础上修订而成的,并注意吸收了国内外同类教科书的经验与优点。

本书充实并强化了基本概念与基本定律的论述,力求严谨深入、由浅及深,并且还突出工程观点,使理论密切联系实际,注重培养学生灵活分析问题的能力。在编排方面注意与“物理”、“化学”等课程的衔接,起点较高,避免不必要的重复,并且将气体动力循环、蒸气动力循环、制冷循环以及湿空气过程紧接在基本定律之后,依理想气体、蒸汽与湿空气三个层次循序渐进,引导学生加深对热力学基本规律的理解、掌握与运用。全书取材广泛,内容有所拓宽,着意反映一些最新科技进展,加强了焓的概念、计算及应用的叙述;介绍了保护臭氧层对制冷剂提出的新要求,首次引入了作为 CFC12 最有希望的替代物 HFC134a 的 $\ln p-h$ 图等。

本书可用作高等工业学校热能工程、动力工程、空调制冷、供暖通风、内燃机、反应堆热工以及工程热物理等专业的教科书或参考书,也可供有关科技人员参考。

版权所有,侵权必究。侵权举报电话:010-62782989 13701121933

图书在版编目(CIP)数据

工程热力学/朱明善等编著.--2版.--北京:清华大学出版社,2011.6

(清华大学能源动力系列教材)

ISBN 978-7-302-25738-7

I. ①工… II. ①朱… III. ①工程热力学—高等学校—教材 IV. ①TK123

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2011)第 112185 号

责任编辑:张占奎

责任校对:王淑云

责任印制:何 芊

出版发行:清华大学出版社

地 址:北京清华大学学研大厦 A 座

<http://www.tup.com.cn>

邮 编:100084

社 总 机:010-62770175

邮 购:010-62786544

投稿与读者服务:010-62776969, c-service@tup.tsinghua.edu.cn

质 量 反 馈:010-62772015, zhiliang@tup.tsinghua.edu.cn

印 刷 者:清华大学印刷厂

装 订 者:三河市李旗庄少明装订厂

经 销:全国新华书店

开 本:185×230 印 张:22 字 数:480 千字

版 次:2011 年 6 月第 2 版 印 次:2011 年 6 月第 1 次印刷

印 数:1~5000

定 价:35.00 元

产品编号:023428-01

前言

P R E F A C E

本书是根据教育部制定的“工程热力学课程教学基本要求”并参照清华大学四年制机械学院平台及暖通专业的教学大纲,在清华大学多年教学实践的基础上,由第1版修订而成的。本修订版被列入普通高等教育“十一五”国家级规划教材。

本书基本反映了我们在清华大学讲授“工程热力学”课程的教学内容,并吸收了国内外同类教科书的优点与经验。

在体系编排方面,本书将气体动力循环、水蒸气和蒸汽动力循环以及制冷循环等几章紧接在热力学第一、第二定律之后,以便加深学生对基本定律的理解,能更好地掌握与运用基本定律。

在内容方面,本书力图对基本概念和基本理论部分进行严密而深入的论述,充实热力学基本定律的本质及其数学表达式。例如开口系统能量方程、熵的性质及熵方程、焓及焓的计算、热力学微分关系式及其应用等内容,并且突出工程观点,使理论密切联系实际,注重培养学生运用热力学理论解决工程问题的能力。为适应学科发展的需要,本书还注意引进国内外科学研究的新成果与新技术,更新与充实了内容。例如,考虑到能源合理利用和节能工作的需要,本书深化了热力学第二定律及其分析方法的叙述,加强了物理焓与化学焓,焓分析、焓损失等概念;又如,结合全球环境保护的热点——臭氧层保护,着重介绍了环保方面对制冷工质提出的要求与挑战,首次在教材中引入了作为 CFC12 目前的替代物 HFC134a 的基本物性及我们自行开发的 HFC134a 的 $\ln p-h$ 图;再如,较为详细地介绍了各种热泵和一些很有前景的吸附制冷技术的基本原理等。

在编写安排方面,本书尽量避免与物理化学等课程不必要的重复,但又注意保持相应的衔接。例如对理想气体状态方程、理想气体基本热力过程、理想混合气体等部分采用总结归纳的方法加以叙述,不从头推导。化学热力学部分中,对于化学反应方程式等反映质量守恒规律的内容,融合在化学热力学的整个叙述中,而不另列一节。这样,使本书在取材方面有一定的深度,起点较高。

为了帮助学生复习以及培养学生独立思考和解决问题的能力,本书每章附有例题、思考题和习题,这些题的针对性、启发性与工程性较强,并与正文内容配合较好。全书采用我国法定计量单位。在本修订版中,专门编制了水蒸气物性软件。本软件不仅便于阅读者进行水蒸气性质的计算,还

设置了焓熵图,可与计算点直观对应。

参加本书第1版编写工作的有朱明善(绪论、第3章、第9章与第10章)、林兆庄(第1章、第5章、第8章与第11章)、刘颖(第4章、第6章与第7章)、陈宏芳(第12章)和邓小雪(第2章)。第1版中,绪论、第1、9与10章由朱明善改编;第2、3、4、6与7章由刘颖改编;第5、8与11章由林兆庄改编;第12章由彭晓峰改编。全书由朱明善统稿。

本次修订中,史琳、吴晓敏和段远源进行主要改编工作,刘颖和林兆庄进行审定。其中,第1~4章由史琳改编,第5~12章由吴晓敏改编,水蒸气物性软件由段远源编写,全书由吴晓敏统稿。

鉴于编者水平有限,难免有疏漏与不妥之处,请读者指正。

编者

2010年冬于清华园

主要符号表

拉丁字母

A	截面积
a	声速
A_n, a_n	总焓; 比焓
C, c	热容, 临界点; 比热容, 速度
c_p, c_v	比定压热容; 比定容热容
C'	容积热容
C_m	摩尔热容
d	比湿度, 汽耗率
E, e	总能; 比能
E_k, E_p	动能; 位能
E_x, E_{xm}, e_x	总焓; 摩尔焓; 比焓
F, f	亥姆霍兹函数; 比亥姆霍兹函数
G, G_m, g	吉布斯函数; 摩尔吉布斯函数, 比吉布斯函数
\bar{g}_f	标准生成吉布斯函数
H, H_m, h	总焓; 摩尔焓; 比焓
\bar{h}_f	标准生成焓
$[-\Delta H_f^l], [-\Delta H_f^g]$	低发热量; 高发热量
i	分子运动自由度
K_p, K_x	平衡常数
k	比热比
M	摩尔质量
Ma	马赫数
m, \dot{m}	质量; 质量流率
n	摩尔数, 准静态功的数目, 多变指数
P	功率
p	压力
p_b, p_g, p_v	大气压力; 表压力; 真空度
Q, q	传热量, 反应热; 单位质量的传热量

Q_p	定压过程传热量, 定压热效应
Q_v	定容过程传热量, 定容热效应
r	汽化潜热
R, R_m	气体常数; 摩尔气体常数
S, S_m, s	总熵; 摩尔熵; 比熵
$S_m^0, S_m^0(T)$	标准状态的绝对熵; $TK, 101.325 \text{ kPa}$ 下的绝对熵
T, t	热力学温度; 摄氏温度
U, U_m, u	总热力学能(亦称总内能); 摩尔热力学能(亦称摩尔内能); 比热力学能(亦称比内能)
V, V_m, v	容积; 摩尔容积; 比容
W, w	容积变化功, 闭口系统净功; 比容积变化功, 闭口系统比净功
$W_{\text{net}}, w_{\text{net}}$	开口系统净功; 开口系统比净功
W_s, w_s	轴功; 比轴功
W_t, w_t	技术功; 比技术功
x	干度
x_i	摩尔成分
Z	压缩因子
z	高度

希腊字母

α	抽汽量, 离解度
α_v, α_p	弹性系数; 定压热膨胀系数
β_T, β_s	定温压缩系数; 绝热压缩系数
γ_i	容积成分
ε	制冷系数, 内燃机压缩比, 反应度
ε'	供热系数
η, η_i	效率, 热效率
η_{oi}	相对内效率
η_V	压气机容积效率
λ	内燃机定容增压比
μ	化学势
μ_J	焦-汤系数
ν_{cr}	临界压力比
π	单位质量工质做功能力损失或焓损失, 燃气轮机循环增压比

ρ	密度, 内燃机定压预胀比
σ	回热度, 表面张力
τ	时间, 燃气轮机循环增温比
φ	相对湿度, 速度系数
ω_i	质量成分
ζ	能量损失系数
	下 标
a	干空气
c	卡诺循环, 临界状态, 冷凝器; 压气机
$c. v$	开口系统或控制容积
d	露点
ex	焔(亦称有效能)
f	燃料, (焔)流
g	(焔)产, 气体
i	第 i 种组元
in	进口条件
iso	孤立系统
IR	不可逆机
l	液体
m	混合加热内燃机循环
max	最大
min	最小
mix	混合
n	多变过程
opt	最佳
out	出口条件
p	定压, 定压加热内燃机循环
P	生成物, 水泵
Q, q	热量
Q_c	冷量
R	可逆循环, 朗肯循环, 反应物
RG, RH	回热循环; 再热循环
r	热源, 对比状态

rev	可逆
s	饱和状态, 定熵
T	定温
tu	管道
U, u	内能
V, v	定容; 水蒸气, 定容加热内燃机循环
w	湿球
0	死态, 环境
1, 2	状态 1 与 2, 瞬时 1 与 2
	上 标
' , "	饱和液; 饱和气
*	滞止状态
—	平均
•	单位时间的物理量
°	环境参数, 标准态

目 录

C O N T E N T S

绪论	1
0-1 热能及其利用	1
0-2 热能转换装置的工作过程	2
0-2-1 蒸汽动力装置的工作原理	2
0-2-2 燃气轮机装置的工作原理	3
0-2-3 内燃机的工作原理	3
0-2-4 压缩制冷装置的工作原理	4
0-3 工程热力学的研究对象及其主要内容	5
0-4 热力学的研究方法	6
第1章 基本概念	7
1-1 热力系统	7
1-1-1 系统与外界	7
1-1-2 闭口系统与开口系统	8
1-1-3 简单系统、绝热系统与孤立系统	8
1-1-4 均匀系统与非均匀系统,单元系统与多元系统	9
1-2 状态和状态参数	9
1-2-1 热力系统的状态和状态参数	9
1-2-2 状态参数的数学特性	9
1-2-3 广延参数与强度参数	10
1-3 基本状态参数	11
1-3-1 压力	11
1-3-2 比容及密度	14
1-3-3 温度	14
1-4 平衡状态	16
1-4-1 平衡状态的概念	16
1-4-2 实现平衡的充要条件	17
1-5 状态方程和状态参数坐标图	17
1-5-1 状态公理	17
1-5-2 状态方程	18

1-5-3	状态参数坐标图	18
1-6	准静态过程与可逆过程	19
1-6-1	准静态过程	19
1-6-2	耗散效应	20
1-6-3	可逆过程	20
1-7	功量	21
1-7-1	功的定义	21
1-7-2	准静态过程中的容积变化功——膨胀功和压缩功	22
1-7-3	其他形式的准静态功	23
1-8	热量与熵	24
1-8-1	热量	24
1-8-2	熵	24
1-8-3	T-S 图	25
1-9	热力循环	26
	思考题	27
	习题	27
第2章	热力学第一定律	30
2-1	热力学第一定律的实质	30
2-2	储存能	30
2-2-1	内部储存能——内能	30
2-2-2	外部储存能	31
2-2-3	系统的总储存能	32
2-3	闭口系统的能量方程	32
2-4	开口系统的能量方程	33
2-4-1	推进功	33
2-4-2	开口系统的能量方程	34
2-4-3	焓	36
2-5	稳定流动能量方程	37
2-5-1	稳定流动能量方程	37
2-5-2	稳定流动过程中几种功的关系	39
2-5-3	准静态条件下的技术功 w_t	40
2-5-4	准静态条件下热力学第一定律的两个解析式	40
2-5-5	机械能守恒关系式	41
2-6	稳定流动能量方程的应用	41

2-6-1	热交换器	41
2-6-2	动力机械	42
2-6-3	压缩机械	43
2-6-4	喷管	43
2-6-5	绝热节流	43
	思考题	45
	习题	45
第 3 章	理想气体的性质与过程	49
3-1	理想气体状态方程	49
3-2	热容	50
3-2-1	热容的定义和单位	50
3-2-2	比定容热容和比定压热容	51
3-3	理想气体的内能、焓和比热容	52
3-3-1	理想气体内能和焓的特性	52
3-3-2	理想气体的比热容	53
3-3-3	理想气体内能和焓的计算	55
3-4	理想气体的熵	57
3-5	研究热力过程的目的和方法	58
3-6	绝热过程	59
3-6-1	绝热过程的过程方程	59
3-6-2	过程初、终态基本状态参数间的关系	60
3-6-3	过程曲线	60
3-6-4	绝热过程中的能量转换	61
3-7	基本热力过程的综合分析	62
3-7-1	多变过程方程	62
3-7-2	多变过程的分析	62
3-7-3	应用 $p-v$ 图与 $T-s$ 图分析多变过程	64
3-8	变比热容的可逆绝热过程	68
3-9	气体的压缩	70
3-10	活塞式压气机的过程分析	71
3-10-1	压气机理论压气功	71
3-10-2	分级压缩、中间冷却	72
3-10-3	活塞式压气机的余隙影响	74
	思考题	76

习题	78
第4章 热力学第二定律与熵	81
4-1 自然过程的方向性	81
4-1-1 摩擦过程	81
4-1-2 传热过程	81
4-1-3 自由膨胀过程	81
4-1-4 混合过程	82
4-1-5 燃烧过程	82
4-2 热力学第二定律的实质与表述	82
4-3 卡诺循环与卡诺定理	84
4-3-1 卡诺循环	84
4-3-2 卡诺定理	85
4-4 热力学温标	88
4-5 熵的导出	90
4-6 克劳修斯不等式	94
4-7 不可逆过程熵的变化	96
4-7-1 不可逆过程熵变分析	96
4-7-2 熵变的计算	97
4-8 孤立系统熵增原理	99
4-8-1 孤立系统熵增原理	99
4-8-2 做功能力损失	101
4-8-3 热力学第二定律的局限性	102
4-9 熵方程	102
4-9-1 封闭系统的熵方程	102
4-9-2 开口系统的熵方程	103
4-9-3 关于熵的小结	104
4-10 焓及其计算	104
4-10-1 焓与能	105
4-10-2 物理焓的计算	106
思考题	111
习题	112
第5章 气体动力循环	115
5-1 活塞式内燃机动力循环	115

5-1-1	活塞式内燃机实际循环的抽象与概括	115
5-1-2	活塞式内燃机的理想循环	117
5-2	活塞式内燃机各种理想循环的比较	123
5-2-1	具有相同的压缩比和吸热量的比较	123
5-2-2	具有相同的最高压力和最高温度的比较	124
5-2-3	最高压力和热负荷 q_1 相同的比较	124
5-3	斯特林循环	125
5-4	勃雷登循环	127
5-4-1	燃气轮机装置的理想循环	127
5-4-2	燃气轮机装置的实际循环	130
5-5	提高勃雷登循环热效率的其他途径	133
5-5-1	采用回热	133
5-5-2	回热基础上的分级压缩中间冷却	133
5-5-3	回热基础上的分级膨胀中间再热	134
5-6	喷气式发动机简介	136
	思考题	137
	习题	137
第 6 章	水蒸气	140
6-1	纯物质的热力学面及相图	140
6-2	汽化与饱和	143
6-3	水蒸气的定压发生过程	144
6-3-1	水的定压预热过程	144
6-3-2	饱和水定压汽化过程	145
6-3-3	干饱和蒸气的定压过热过程	145
6-4	水及水蒸气状态参数的确定及其热力性质图表	146
6-4-1	水及水蒸气状态参数的确定原则	146
6-4-2	水及水蒸气热力性质表	147
6-4-3	水蒸气焓熵图	150
6-5	水蒸气的热力过程	151
6-5-1	定压过程	152
6-5-2	绝热过程	153
6-5-3	定温过程	155
	思考题	156
	习题	156

第7章 蒸汽动力循环	158
7-1 概述	158
7-2 朗肯循环	158
7-2-1 朗肯循环定量计算方法	159
7-2-2 朗肯循环定性分析	161
7-2-3 蒸汽参数对热效率的影响	162
7-3 实际蒸汽动力循环分析	164
7-3-1 热效率法	165
7-3-2 焓分析法	167
7-3-3 两种方法比较	170
7-4 蒸汽再热循环	170
7-5 回热循环	173
7-5-1 回热循环概念	173
7-5-2 回热循环计算	174
7-5-3 回热循环与朗肯循环比较	174
7-5-4 多级回热循环	175
7-6 热电联产循环	177
7-7 燃气-蒸汽联合循环简介	178
思考题.....	180
习题.....	180
第8章 制冷及热泵循环	182
8-1 空气压缩制冷循环	183
8-2 蒸气压缩制冷循环	186
8-3 制冷剂	188
8-3-1 对制冷剂的热力学要求	188
8-3-2 环境保护对制冷剂提出的新要求	189
8-3-3 制冷剂 HFC134a	189
8-3-4 制冷剂命名规则	190
8-4 吸收式制冷循环	191
8-5 吸附式制冷循环	192
8-6 热泵循环	194
思考题.....	195
习题.....	196

第 9 章 理想混合气体和湿空气	198
9-1 混合气体的成分	198
9-1-1 成分	198
9-1-2 成分表示方法的换算	199
9-1-3 混合气体的平均摩尔质量和折合气体常数	199
9-2 分压定律与分容积定律	200
9-2-1 分压力与分压定律	200
9-2-2 分容积与分容积定律	200
9-3 混合气体的参数计算	202
9-3-1 总参数的加和性	202
9-3-2 比参数的加权性	203
9-3-3 理想混合气体的焓焈	204
9-4 理想气体绝热混合过程的熵增	205
9-5 湿空气的性质	207
9-5-1 饱和与未饱和	208
9-5-2 结露和露点	208
9-5-3 相对湿度及含湿量	209
9-6 湿空气的焓、熵与容积	210
9-6-1 湿空气的焓值	210
9-6-2 湿空气的熵值	210
9-6-3 湿空气的容积	211
9-7 比湿度的确定和湿球温度	213
9-7-1 绝热饱和温度	213
9-7-2 湿球温度	214
9-8 湿空气的焓焈图与热焈比	216
9-9 湿空气的基本热力过程	219
9-9-1 加热或冷却过程	219
9-9-2 冷却去湿过程	219
9-9-3 绝热加湿过程	219
9-9-4 加热加湿过程	220
9-9-5 绝热混合过程	220
思考题	223
习题	223

第 10 章 热力学微分关系式及实际气体的性质	227
10-1 研究热力学微分关系式的目的	227
10-2 特征函数	228
10-2-1 亥姆霍兹函数和吉布斯函数	228
10-2-2 特征函数	229
10-3 数学基础	230
10-3-1 全微分的条件	230
10-3-2 循环关系式与倒数式	230
10-3-3 链式与不同下标式	231
10-3-4 麦克斯韦关系	231
10-4 热系数	232
10-5 熵、内能和焓的微分关系式	233
10-5-1 熵的微分关系式	233
10-5-2 内能的微分关系式	234
10-5-3 焓的微分关系式	235
10-6 比热容的微分方程	237
10-6-1 比热容与压力及比容的关系	237
10-6-2 定压比热容与定容比热容的关系	238
10-7 克拉贝龙方程和焦-汤系数	239
10-7-1 克拉贝龙方程	240
10-7-2 焦-汤系数	241
10-8 实际气体对理想气体性质的偏离	242
10-9 维里方程概念	243
10-9-1 维里方程	243
10-9-2 截断形维里方程	244
10-10 经验性状态方程	245
10-10-1 范德瓦尔状态方程	245
10-10-2 R-K 状态方程	247
10-11 普遍化状态方程与对比态原理	247
10-11-1 普遍化状态方程	248
10-11-2 对比态原理	249
10-11-3 通用压缩因子图	249
思考题	254
习题	254