



面向 21 世纪 课 程 教 材
Textbook Series for 21st Century

热 工 基 础

张学学 李桂馥 编



高 等 教 育 出 版 社
HIGHER EDUCATION PRESS

面向 21 世纪课程教材
Textbook Series for 21st Century

热工基础

张学学 李桂馥 编



高等教育出版社
HIGHER EDUCATION PRESS

图书在版编目(CIP)数据

热工基础/张学学, 李桂馥编. —北京: 高等教育出版社, 2000.9

面向 21 世纪课程教材

ISBN 7-04-008637-9

I. 热… II. ①张…②李… III. 热工学-教材
IV. TK122

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2000)第 66053 号

热工基础

张学学 李桂馥 编

出版发行	高等教育出版社		
社 址	北京市东城区沙滩后街 55 号	邮政编码	100009
电 话	010-64054588	传 真	010-64014048
网 址	http://www.hep.edu.cn		
经 销	新华书店北京发行所		
印 刷	中国科学院印刷厂		
开 本	787×960 1/16	版 次	2000年9月第1版
印 张	26.5	印 次	2000年9月第1次印刷
字 数	490 000	定 价	22.30 元

本书如有缺页、倒页、脱页等质量问题, 请到所购图书销售部门联系调换。

版权所有 侵权必究

前 言

本书是教育部“高等教育面向 21 世纪教学内容和课程体系改革计划”中“热工课程教学内容和课程体系的改革与实践”项目的研究成果，是在总结编者在清华大学多年热工课程教学经验的基础上编写而成的。在编写过程中参考了国内已有的热工基础、热工学、工程热力学及传热学教材和国外有关文献^[1~31]。

本书在结构上仍然保持了传统的热工基础教材的体系，分为工程热力学篇与传热学篇，但根据现代工程与科学技术发展对人才培养的需要，适当地拓宽了传热学篇，增加了导热的数值解法基础、热管的工作原理、太阳辐射等内容，使传热学篇和工程热力学篇在篇幅上大体相同。

构成热工基础理论的工程热力学与传热学是伴随着第一次工业革命中热能的利用、热机的发明逐渐形成和发展起来的，所以热工基础的基本内容，尤其是工程热力学篇的基本概念、基本定律的论述都是以热能利用、热机工作原理为背景展开的。但是，随着现代工业与科学技术的发展，热科学已深入到能源动力之外的机械、冶金、化工、环境、交通运输、电子、信息工程、航空航天及生物医学工程等领域，为解决这些领域中与热现象有关的技术难题发挥着重要作用。对热现象的了解和认识是现代工程技术人才必备的技术基础知识，是 21 世纪工科各类专业人才工程素质的重要组成部分。因此，为使本书适应 21 世纪人才培养的需要，一方面，对工程热力学和传热学的内容加以精选，力求做到传统经典的内容与现代科学技术的最新成果相结合，对基本概念、基本定律的阐述力求严谨、精练、准确，并突出了工程热力学、传热学的宏观研究方法与应用；另一方面，为了拓宽本书的专业面和适用性，加强了热工基础理论的一般性、普适性的论述，在精心选择例题进行示范性分析的同时选编了适量的密切联系工程实际的思考题和习题，用以培养和提高学生的工程观点和理论联系实际、分析问题、解决问题的能力，并且适当地扩大了例题、思考题及习题的专业面，力求使本书在内容的深度和广度上适应不同专业人才培养的需要。

本书采用我国法定计量单位。

本书可作为非能源动力类专业大学本科 48~64 学时热工基础、热工学或工程热力学与传热学课程的教材或教学参考书，也可供有关工程技术人员参

JAN 1998

考。由于本书在结构上分为相对独立的工程热力学篇和传热学篇，所以也可作为低学时(如 32 学时)工程热力学或传热学课程的教材或教学参考书。本书是按 64 学时编写的，对于低学时热工基础课程，打 * 号的内容可讲、可不讲，可根据教学要求自行选择。

本书由清华大学张学学教授、李桂馥副教授合编，张学学教授主编。李桂馥编写了工程热力学篇的初稿。张学学对工程热力学篇初稿进行了改写，并编写了绪论及传热学篇。全书的统稿及审稿后的修改定稿由张学学完成。

本书书稿由哈尔滨工业大学杨玉顺教授和天津大学赵镇南副教授主审。教育部热工课程教学指导委员会于 1999 年 10 月在南京召开了审稿会，主审人和其他与会代表对书稿进行了认真审阅，提出了许多宝贵的意见和建议，使本书的质量得到保证。清华大学陈宏芳教授对本书工程热力学篇的初稿进行了审阅。在书稿的编写过程中，还得到了清华大学及兄弟院校热工界许多老师的关心和帮助。在此谨向所有给予支持和帮助的同志表示诚挚的谢意。

由于编者水平有限，书中疏漏谬误之处在所难免，敬请读者批评指正。

编者

2000 年 5 月于清华大学

主要符号

拉丁字母

- a 热扩散率, m^2/s
 A 面积, m^2
 b 宽度, m
 c 比热容(质量热容), $\text{J}/(\text{kg}\cdot\text{K})$; 声速、光速, m/s
 c_f 流速, m/s ; 范宁摩擦系数
 c_p 比定压热容, $\text{J}/(\text{kg}\cdot\text{K})$
 c_v 比定容热容, $\text{J}/(\text{kg}\cdot\text{K})$
 C_m 摩尔热容, $\text{J}/(\text{mol}\cdot\text{K})$
 d 含湿量, kg/kg (干空气); 直径, m
 e 比总能量, J/kg
 E 总能量, J ; 辐射力, W/m^2
 E_k 宏观动能, J
 E_p 宏观位能, J
 e_x 比焓, J/kg
 E_x 焓, J
 $e_{x,H}$ 比焓焓, J/kg
 $E_{x,H}$ 焓焓, J
 $e_{x,Q}$ 比热量焓, J/kg
 $E_{x,Q}$ 热量焓, J
 f 阻力系数; 频率, Hz
 F 作用力, N
 g 重力加速度, m/s^2
 h 比焓, J/kg ; 高度, m ; 表面传热系数, $\text{W}/(\text{m}^2\cdot\text{K})$
 H 焓, J ; 高度, m
 I 作功能力损失, J
 J 有效辐射, W/m^2
 k 传热系数, $\text{W}/(\text{m}^2\cdot\text{K})$
 l 长度, m ; 特征长度, m
 m 质量, kg
 M 摩尔质量, kg/mol
 n 物质的量, mol ; 多变指数; 折射率
 p 绝对压力, Pa
 p_b 大气压力, Pa
 p_e 表压力, Pa
 p_i 混合物组元 i 的分压力, Pa
 p_v 真空度, Pa ; 水蒸气分压力, Pa
 p_s 饱和压力, Pa
 P 功率, W
 q 比热量, J/kg ; 热流密度, W/m^2
 q_m 质量流量; kg/s
 Q 热量, J
 r 汽化潜热, J/kg ; 半径, m
 R 摩尔气体常数, $\text{J}/(\text{mol}\cdot\text{K})$; 热阻, K/W
 R_g 气体常数, $\text{J}/(\text{kg}\cdot\text{K})$
 s 比熵, $\text{J}/(\text{kg}\cdot\text{K})$; 管间距, m
 S 熵, J/K ; 形状因子
 t 摄氏温度, $^{\circ}\text{C}$
 t_d 露点温度, $^{\circ}\text{C}$
 t_w 湿球温度, $^{\circ}\text{C}$
 t_s 饱和温度, $^{\circ}\text{C}$
 T 热力学温度, K ; 周期, s
 u 比热力学能, J/kg ; 速度, m/s
 U 热力学能, J
 v 比体积, m^3/kg ; 速度, m/s
 V 体积, m^3
 V_m 摩尔体积, m^3/mol
 V_c 余隙容积, m^3
 w 比膨胀功, J/kg

w_i 混合物组元 i 的质量分数
 w_s 比轴功, J/kg
 w_t 比技术功, J/kg
 w_f 比流动功, J/kg
 w_{net} 比循环净功, J/kg
 W 膨胀功, J
 W_s 轴功, J
 W_t 技术功, J
 W_f 流动功, J
 W_{net} 循环净功, J
 x 干度; 笛卡尔坐标
 x_i 混合物组元 i 的摩尔分数
 y, z 笛卡尔坐标

希腊字母

α 抽气量; 体胀系数, K^{-1} ; 吸收比
 β 肋化系数
 γ 比热容比
 δ 厚度, m
 ε 压缩比; 制冷系数; 发射率
 ε' 供热系数
 η 效率; 动力粘度, $Pa \cdot s$
 κ 绝热指数

θ 过剩温度, K 或 $^{\circ}C$; 平面角, rad
 λ 升压比; 波长, m 或 μm ; 热导率, $W/(m \cdot K)$
 π 增压比
 ν 运动粘度, m^2/s
 ρ 密度, kg/m^3 ; 预胀比; 反射比
 φ 相对湿度; 平面角, rad
 φ_i 混合物组元 i 的体积分
 Ω 立体角, sr

特征数

$$Bi = \frac{hl}{\lambda} \quad \text{毕渥数}$$

$$Fo = \frac{a\tau}{l^2} \quad \text{傅里叶数}$$

$$Gr = \frac{g\alpha\Delta t l^3}{\nu^2} \quad \text{格拉晓夫数}$$

$$Nu = \frac{hl}{\lambda} \quad \text{努塞尔数}$$

$$Pr = \frac{\nu}{a} \quad \text{普朗特数}$$

$$Re = \frac{ul}{\nu} \quad \text{雷诺数}$$

$$St = \frac{Nu}{Re Pr} = \frac{h}{\rho u c_p} \quad \text{斯坦顿数}$$

内 容 简 介

本书是教育部“高等教育面向 21 世纪教学内容和课程体系改革计划”中“热工系列课程教学内容和课程体系的改革与实践”项目的研究成果，是面向 21 世纪课程教材和教育部热工课程“九五”规划教材。

本书是由工程热力学和传热学两部分基本内容组成的综合性热工技术理论基础，主要研究热能的有效利用以及与此有关的热现象的基本规律。全书分为工程热力学与传热学两篇。工程热力学篇主要介绍工程热力学的基本概念和基本定律、常用工质的热物理性质、基本热力过程与典型热力循环分析及提高循环效率的途径；传热学篇主要介绍导热、对流换热、辐射换热的基本规律、求解方法以及控制(强化或削弱)热量传递过程的技术措施，换热器的热计算方法。

热工基础知识是工科各类专业人才工程素质的重要组成部分。为适应 21 世纪人才培养的需要，本书对工程热力学和传热学的内容进行了精选，力求做到传统的经典内容与现代科学技术的发展相结合，并选编了适量的密切联系工程实际的例题、思考题及习题，有利于提高学生的工程观点和理论联系实际、分析解决实际问题的能力。

本书可以作为非能源动力类专业大学本科 48~64 学时热工基础、热工学、工程热力学与传热学课程教材或教学参考书，也可供有关工程技术人员参考。

责任编辑	杨宪玲
封面设计	张楠
责任绘图	杜晓丹
版式设计	马静如
责任校对	马桂兰
责任印制	宋克学

目 录

主要符号	1
绪论	1
0-1 能量与能源	1
0-2 热工基础的研究内容	4
第一篇 工程热力学	
第一章 基本概念	9
1-1 热力系统	9
1-2 平衡状态及状态参数	10
1-3 状态方程与状态参数坐标图	13
1-4 准平衡过程和可逆过程	13
1-5 功量与热量	15
思考题	17
习题	18
第二章 热力学第一定律	20
2-1 热力系统的储存能	20
2-2 热力学第一定律的实质	21
2-3 闭口系统的热力学第一定律表达式	21
2-4 开口系统的稳定流动能量方程式	22
2-5 稳定流动能量方程式的应用	26
思考题	29
习题	29
第三章 理想气体的性质与热力过程	32
3-1 理想气体状态方程式	32
3-2 理想气体的热容、热力学能、焓和熵	35
3-3 理想混合气体	42
3-4 理想气体的热力过程	49
*3-5 气体压缩	63
*3-6 气体在喷管中的流动	70
*3-7 绝热滞止	77
思考题	78

习题	79
第四章 热力学第二定律	83
4-1 自发过程的方向性与热力学第二定律的表述	83
4-2 卡诺循环与卡诺定理	84
4-3 嫡	90
*4-4 焓	98
思考题	102
习题	103
第五章 水蒸气与湿空气	106
5-1 水蒸气的产生过程	106
5-2 水蒸气的状态参数	109
*5-3 水蒸气的基本热力过程	113
5-4 湿空气的性质	117
5-5 湿空气的基本热力过程	125
*5-6 干湿球温度计	127
思考题	128
习题	128
第六章 动力装置循环	131
6-1 蒸汽动力装置循环	131
6-2 活塞式内燃机循环	141
*6-3 燃气轮机装置的理想循环	150
思考题	152
习题	153
第七章 制冷装置循环	155
7-1 空气压缩制冷循环	155
7-2 蒸气压缩制冷循环	158
*7-3 吸收式制冷循环	162
*7-4 热泵	163
思考题	164
习题	165

第二篇 传 热 学

第八章 热量传递的基本方式	169
8-1 热传导	169
8-2 热对流	170
8-3 热辐射	172
8-4 传热过程简介	174
思考题	176

习题	177
第九章 导热	178
9-1 导热理论基础	178
9-2 稳态导热	191
9-3 非稳态导热	211
9-4 导热问题的数值解法基础	227
思考题	236
习题	237
第十章 对流换热	240
10-1 概述	240
10-2 对流换热的数学描述	244
10-3 外掠等壁温平板层流换热分析解简介	254
10-4 对流换热的实验研究方法	261
10-5 单相流体强迫对流换热特征数关联式	270
10-6 自然对流换热	285
10-7 凝结与沸腾换热	295
思考题	307
习题	308
第十一章 辐射换热	310
11-1 热辐射的基本概念	310
11-2 黑体辐射的基本定律	314
11-3 实际物体的辐射特性, 基尔霍夫定律	318
11-4 辐射换热的计算方法	324
11-5 遮热板原理	337
11-6 太阳辐射	339
思考题	342
习题	343
第十二章 传热过程与换热器	346
12-1 传热过程	346
12-2 换热器	353
12-3 传热的强化与削弱	363
思考题	366
习题	366
参考文献	368
附录	370
附表1 常用单位换算	370
附表2 常用气体的平均比定压热容	371
附表3 常用气体的平均比定容热容	372

附表4	空气的热力性质	373
附表5	饱和水与饱和水蒸气的热力性质(按温度排列)	374
附表6	饱和水与饱和水蒸气的热力性质(按压力排列)	378
附表7	未饱和水与过热水蒸气的热力性质	382
附表8	氨(NH ₃)饱和液与饱和蒸气的热力性质	389
附表9	氟里昂12(CCl ₂ F ₂)饱和液与饱和蒸气的热力性质	391
附表10	氟里昂 134a 饱和液与饱和蒸气的热力 性质(按温度排列)	392
附表11	氟里昂 134a 饱和液与饱和蒸气的热力 性质(按压力排列)	394
附表12	氟里昂 134a 过热蒸气的热力性质(按温度排列)	396
附表13	金属材料的密度、比热容和热导率	400
附表14	保温、建筑及其他材料的密度和热导率	402
附表15	几种保温、耐火材料的热导率与温度的关系	403
附表16	干空气的热物理性质($p = 1.013\ 25 \times 10^5$ Pa)	404
附表17	大气压力($p = 1.013\ 25 \times 10^5$ Pa)下烟气 的热物理性质	405
附表18	饱和水的热物理性质	405
附表19	干饱和水蒸气的热物理性质	407
附表20	几种饱和液体的热物理性质	409
附表21	一些气体的摩尔质量、气体常数、低压下 的比热容和摩尔热容	411
附表22	大气压力($p = 1.013\ 25 \times 10^5$ Pa)下过热 水蒸气的热物理性质	411
附 图	湿空气的 $h-d$ 图	412

绪 论

0-1 能量与能源

1. 能量

世界由物质构成。一切物质都处于运动状态，能量是物质运动的度量。一切物质都具有能量，如果没有能量，世界就会永远处于静止状态，也就不会有生命。

能量也是人类社会进步的动力。人类在日常生活和生产过程中需要各种形式的能量。随着人类社会的发展，人们对能量的认识和利用水平不断提高。到目前为止，人类所认识的能量主要有以下几种形式：

(1) 机械能

机械能主要包括物体的动能和势能，二者统称为宏观机械能，是人类最早认识和利用的能量。

(2) 热能

热能是指物质分子的热运动(包括移动、转动、振动)动能和由于分子间相互作用力而具有的位能，即不涉及化学变化和原子核反应时的热力学能，习惯上也称为内热能。温度的高低反映物质分子热运动的强度，因此也是物体具有热能多少的宏观标志之一。热能是人类较早认识和利用的能量。

(3) 电能

电能是与电荷的运动与积蓄有关的能量，也是目前人类利用最为普遍的能量之一。工业上和日常生活中所利用的电能通常由其他形式的能量转换而来。

(4) 化学能

化学能与物质的化学结构有关，是通过物质化学反应所释放的能量。

(5) 核能

核能蕴藏在物质原子核的内部，是通过核反应(核裂变或核聚变)释放的能量。

(6) 辐射能

按照电磁理论，辐射能是物体以电磁波的形式向外发射的能量，例如投射

到地球表面的太阳能就是一种辐射能。

2. 能源

能源是指能够直接或间接提供能量的物质资源。地球上存在各种形式的能源,通常人们按照以下几种分类方式对能源分类。

(1) 根据初始来源

- 1) 地球本身蕴藏的能源,如核能、地热能等;
- 2) 来自地球以外天体的能源,如太阳能以及由太阳能转化而来的风能、水能、海洋波浪能、生物质能以及化石燃料(如煤、石油、天然气等);
- 3) 地球与其他天体的相互作用产生的能源,如潮汐能。

(2) 按照开发的步骤

- 1) 一次能源,即在自然界以自然形态存在可以直接开发利用的能源,如煤、石油、天然气、风能、水能、太阳能、地热能、海洋能等;
- 2) 二次能源,即由一次能源直接或间接转化而来的能源,如电力、煤气、汽油、沼气、氢气、甲醇、酒精等。

(3) 按照开发利用的情况及其在社会经济生活中的地位

- 1) 常规能源,指开发时间较长、技术比较成熟、被广泛利用的能源,如煤、石油、天然气、水能等;
- 2) 新能源,指开发时间较短、技术尚不成熟、尚未被大规模开发利用的能源,如太阳能、风能、地热能、海洋能、生物质能以及核能等。

(4) 按照能否再生

- 1) 可再生能源,指不会因被开发利用而减少,具有天然恢复能力的能源,如太阳能、风能、海洋能、生物质能等;
- 2) 非再生能源,指储量有限,随被开发利用而日益减少,最终将会枯竭的能源,如煤、石油、天然气等。

(5) 按照开发利用过程中对环境的污染情况

- 1) 清洁能源,即对环境无污染或污染很小的能源,如太阳能、风能、水能、海洋能等;
- 2) 非清洁能源,即对环境污染较大的能源,如煤、石油、天然气等。

能源是人类社会生存的基础,能源的开发和利用是人类社会发展的动力,而能源开发和利用水平又是人类社会文明的重要标志之一。回顾人类的历史可以看出,能源和人类社会的发展密切相关。从原始的人力、畜力、水力、柴薪燃料的使用到今天化石燃料(煤、石油、天然气)的大量开采以及核能和各种新能源的开发,能源的利用极大地促进了人类社会的发展。

世界各国的经济发展实践证明,正常情况下,每个国家能源消费总量及增

长速度与其国民经济总产值及增长速度成正比，而能源的人均消耗量的多少则反映国民生活水平的高低。因此，能源问题是全世界关注的重大问题，从20世纪70年代起，能源问题成为世界5大问题(能源、人口、粮食、环境、资源)之一。

我国是能源资源比较丰富的国家，能源建设是我国四化建设的战略重点之一。我国的能源建设面临的主要问题有：

(1) 人均能源储备量少，远低于世界平均水平。例如，1994年的统计资料表明，世界人均原煤储备量为209 t，而我国人均原煤储备量只有95 t；世界人均原油储备量为28 t，而我国人均原油储备量只有3 t；世界人均天然气储备量为28 400 m³，而我国人均天然气储备量只有1 416 m³。

(2) 能源开发利用设备和技术落后，能源利用效率低，浪费严重。目前，我国能源终端利用效率仅为33%，比发达国家低10%；单位产品的能耗平均比发达国家高约40%；单位国民经济产值的能耗是日本的6倍，美国的3倍，韩国的4.5倍。

(3) 环境污染严重。由于我国能源构成以煤炭为主，约75%的能源需求由煤炭提供，绝大多数的工业锅炉以煤为燃料，众多城市人口的生活和取暖还在用煤，加上农村8.6亿人口的生活用能还以燃烧柴薪和秸秆为主，烟气的排放使大气受到严重的污染。据世界银行报导，我国城市空气污染对人体健康和生产造成的损失估计每年超过200亿美元；酸雨使农作物每年减产损失达50亿美元。目前我国的CO₂排放量仅次于美国，居世界第二位，占世界总排放量的13.6%^[32]。

我国的能源建设要走可持续发展的道路，必须两条腿走路：一是合理利用能源，提高能源利用率，包括从技术上改进现有的能源利用系统和设备，将可用能的损失减少到最低限度，并积极开发高效、低污染的能源利用系统和先进的节能设备；二是大力开发对环境无污染或污染很小的新能源，如太阳能、风能、水能、地热能、海洋能、生物质能以及核能等。

3. 能量的转换与利用

能量的利用过程实质上是能量的传递与转换过程。

在上述能源中，风能、水能、海洋能可以通过风车、水轮机直接转换成机械能或者再通过发电机由机械能转换成电能；太阳能可以通过光合作用转换成生物质能，也可以通过太阳能集热器转换成热能，还可以通过光电反应直接转换成电能；氢、酒精等一些二次能源中的化学能可通过燃料电池直接转换成电能。除此之外，其他能源的能量(如煤、石油、天然气中的化学能以及核燃料中的核能等)通常都是通过燃烧或核反应转换成热能直接或间接加以利用。据统

计,目前,通过热能形式被利用的能源在我国占总能源利用的90%以上,世界其他国家也平均超过85%。由此可见,在能量转换与利用过程中,热能不仅是最常见的形式,而且具有特殊重要的作用。热能的有效利用对于解决我国的能源问题乃至对人类社会的发展有着重大意义。

热能利用有两种基本方式:一种是热利用,即将热能直接用于加热物体,以满足烧饭、采暖、烘干、熔炼等需要,这种利用方式已具有几千年的历史;另一种是动力利用,通常是指通过各种热力发动机(热机)将热能转换成机械能或者再通过发电机转换成电能,为人类的日常生活、工农业生产及交通运输提供动力。自从18世纪中叶发明蒸汽机以来,至今虽然只有200多年的历史,但却开创了热动力利用的新纪元,使人类社会的生产力和科学技术的发展突飞猛进。然而,热能通过各种热机转换为机械能的有效利用程度(热效率)较低,早期蒸汽机的热效率只有1%~2%,现代燃气轮机装置的热效率约为37%~42%,蒸汽电站的热效率也只有40%左右。如何更有效地实现热能和机械能之间的转换,提高热机的热效率,是十分重要的课题。

我国目前的热能利用技术水平与世界发达国家相比还有很大差距,主要是热能利用系统落后,热能利用率低,经济性差。为了更加有效、合理地利用热能,促进国民经济的发展,工程技术人员要熟悉和掌握热能利用的规律和提高热能利用率的方法。

0-2 热工基础的研究内容

热工基础(或称为热工理论基础)是由工程热力学和传热学两部分基本内容组成的综合性热工技术理论基础,主要研究热能利用的基本规律、提高热能利用率的方法,以及热能利用过程和其他热现象中的热量传递的基本规律。

1. 工程热力学的研究内容与研究方法

工程热力学是热力学的一个分支,是热力学理论在工程上的具体应用。

工程热力学主要研究热能和机械能及其他形式的能量之间相互转换的规律。因为热能和机械能之间的相互转换是通过工质在热工设备中的循环状态变化过程来实现的,所以热能与机械能转换所必须遵循的基本规律——热力学第一定律和热力学第二定律是工程热力学的理论基础。工质的热力性质、热力过程和热力循环以及提高能量转换经济性的途径和技术措施,是工程热力学的主要研究内容。随着工业生产和科学技术的发展,工程热力学的研究范围逐步延伸到燃烧化学、溶液、低温超导、高能激光、海水淡化、气象以及生物各个领域。