



普通高等教育“十一五”国家级规划教材

传热学

Heat Transfer

第二版

赵镇南



高等教育出版社
Higher Education Press

普通高等教育“十一五”国家级规划教材

传热学

第二版

赵镇南

高等教育出版社

图书在版编目 (CIP) 数据

传热学/赵镇南. —2 版. —北京: 高等教育出版社,
2008. 6

ISBN 978 - 7 - 04 - 023930 - 0

I. 传… II. 赵… III. 传热学 - 高等学校 - 教材
IV. TK124

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2008) 第 071093 号

策划编辑	宋 晓	责任编辑	薛立华	封面设计	张 楠
责任绘图	朱 静	版式设计	王 莹	责任校对	刘 莉
责任印制	朱学忠				

出版发行	高等教育出版社	购书热线	010 - 58581118
社 址	北京市西城区德外大街 4 号	免费咨询	800 - 810 - 0598
邮政编码	100120	网 址	http://www.hep.edu.cn
总 机	010 - 58581000		http://www.hep.com.cn
经 销	蓝色畅想图书发行有限公司	网上订购	http://www.landaco.com
印 刷	北京明月印务有限责任公司		http://www.landaco.com.cn
		畅想教育	http://www.widedu.com
开 本	787 × 960 1/16	版 次	2000 年 7 月第 1 版
印 张	33		2008 年 6 月第 2 版
字 数	620 000	印 次	2008 年 6 月第 1 次印刷
		定 价	37.40 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

物料号 23930 - 00

内容提要

本书是普通高等教育“十一五”国家级规划教材，是在第一版（面向 21 世纪课程教材）的基础上总结近年来的教学实践经验，针对我国高等工科教育的要求修订而成的。

全书整体上仍保持第一版的体系和风格。在 10 章内容中，以能量守恒原理为主线分别介绍了导热、对流和辐射传热的基本原理、计算方法以及热交换器的热设计计算。本书把建立清晰的物理概念，学习正确的建模和求解方法以及提高解决工程问题的能力放在突出位置。对基本概念和工程传热问题做了深入的分析，引进了若干新内容，使本书的应用范围更宽，工程实用性更强。对传热的最新研发成果也做了简要介绍。例题和习题总量均比第一版有所增加，并向基础概念和工程应用倾斜，习题中仍保留大约 20% 的参数分析和设计型题目。

本书坚持宽专业面向和学以致用等基本宗旨。在内容编排上层次分明、逻辑严密，在表达上准确严格、条理清楚、重点突出。每章最后一节为本章提要。

本书配有一张光盘，内容包括：全部习题的参考答案，数值计算例题的 FORTRAN 源程序，总量达 178 道的课后复习思考题及参考答案，求解器 HTSolvcer 功能的全面介绍和利用求解器完成的所有例题的计算表程序和迭代说明，全套课堂教学幻灯片（600 余张，其中有国内外的各种传热应用和强化传热元件等实物图片百余幅）。

本书可作为高等学校能源动力类、化工与制药类、航空航天类、机械类、环境与安全类、交通运输类、武器类以及土建类专业开设传热学课程的教科书或教学参考书，能对准备考研的学生有所启发和帮助，也可以供企业工程技术人员自学、进修或参考。

第二版序言

本书是普通高等教育“十一五”国家级规划教材，是在第一版（面向21世纪课程教材）的基础上修订而成的。

进入21世纪以来，中国的经济持续高速发展。与此同时，节能减排的形式也从来没有像现在这么紧迫。在工业企业节能和建筑节能这两大重点领域中，传热学的理论和知识必将发挥不可替代的作用。

本书第一版发行至今已经五年多了。第二版教材仍旧遵循宽专业面向和密切结合工程应用的基本宗旨，以建立清晰的物理概念，学习掌握传热建模方法，培养正确的思维模式并最终达到切实提高解决工程问题的能力为主攻目标；继续坚持第一版中确立的强调能量守恒原理对传热问题的指导意义，严格界定重要概念和基本定律必须遵守的条件以及将综合换热贯穿全书等基本理念。

为了更好地达成上述目标，根据第一版的教学经验和来自各方面的反馈意见，在纠正原有疏漏的基础上，对教材进行了全面的修改、补充和删节，以使其内容更加丰富充实，更能满足工程应用的需要，同时也能更好地反映传热研究的最新进展。

第二版在基础理论方面引进了一些新的内容，如在半无限大物体的非稳态导热部分，给出了直接接触和表面施加脉冲能量条件下的温度响应；将多维乘积解法的应用范围拓展到了半无限大物体，使求解类型从3种增加到9种。其他修订还包括：强调利用导热问题本身的对称性以简化求解过程；明确了线性导热问题的前提条件；给出了恒热流外部强迫流动换热平均努塞尔数关联式的由来；对于强化传热，除了主导热阻原则以外，还对场协同原理做了入门性的介绍，给出了评判强化效果的一般原则；论述了自然对流中格拉晓夫数与特征速度雷诺数之间的联系，从而证明了纯自然对流换热中雷诺数是非独立变量；针对混合对流换热，给出了新的 Gr/Re^2 界限划分方法。

其他更多的修改主要涉及工程应用领域。在对流换热部分，给出了外掠管束和粗糙管内湍流摩擦系数的计算式，湍流入口段长度，有未加热起始段的平均表面传热系数，绕流肋片管时的流动阻力计算式以及新的管内过渡流换热计算式，还给出了细长倾斜封闭夹层和以印制线路板散热为背景的开口竖立夹层自然对流换热计算式。在凝结换热部分，对努塞尔理论解的适用范围做了新的划分并给出新的计算关联式，使冷凝计算精度显著提高。在热交换器部分，增强了对近年新出现的常规换热器形式以及微型和紧凑型换热器的介绍。

第二版的例题从第一版的 69 道增加到 77 道, 所增加的例题主要强调对基本概念的理解和运用, 同时删除或替换了部分不适宜的例题 (计算结果以 $\blacktriangleleft$ 标记)。习题从 468 道增加到 527 道, 所增加的习题大部分安排在第 3、第 4 和第 6 章, 多数属于比较简单的基础类题目, 少数为综合性题目。习题中对节能问题给予了一定程度的侧重。为便于师生选题, 对习题进行了分类, 并大致按题目的难易程度排序, 对难度稍高的题目用 “*” 作出标记。考虑到教学和工程技术界的需要, 本版末尾附有部分习题的参考答案, 总量有 170 余道, 基本上可以覆盖布置作业的范围。从加深理解基本概念和提高分析解决问题能力的基本宗旨出发, 在本版习题中仍保留了 20% 以上的无确定解、设计和参数分析型题目 (以 “□” 标记), 以期培养并强化学生的工程意识和工程应用观念。考虑到做这类题目花费时间较多, 推荐采用本教材配套的求解器 HTSolver 解题。

本版教材配有比较完善的教辅材料光盘, 内容包括: (1) 采用数值方法求解的例题的 FORTRAN 源程序。(2) 178 道课后复习思考题 (附参考答案)。(3) 全部习题的参考答案和提示 (数值解题目除外)。(4) 求解器 HTSolver 使用手册及利用该求解器完成的书中所有例题的计算表程序和自动/手动迭代说明。(5) 全套教学内容的课堂幻灯片约 600 余张, 其中有大量传热应用和强化传热元件的实物图片。配套的光盘将单独出版, 可免费提供给使用本教材的学校和教师。需要的老师可以和高等教育出版社相关编辑或者驻当地的高等教育出版社的院校代表联系。对求解器感兴趣的读者请通过电子邮箱直接与作者联系。

有必要指出, 课后思考题是在多年教学积累的基础上编制的, 并经过两次修订。目的在于引导学生对各种相关问题进行深入的分析 and 连贯的思考, 唯此才真正有助于掌握能够学以致用用的知识。在这套思考题中没有诸如 “什么叫导热系数?” 之类的问题。准确地讲, 课后复习思考题应该是教材内容的延续和延伸。实际上, 任何一本教材都不可能把所有的问题在印刷文字中完全讲透, 有大量的问题需要读者自己去理解、分析、思考或推导, 真正掌握一门学问就是在这种分析思考过程中达成的。

作者在此对东南大学施明恒教授表示衷心的感谢。施老师对全书做了极其细致的审阅并提出了一些十分有价值的修改意见。施老师对传热原理的深刻理解和把握以及对教学内容的布局和表达逻辑的合理安排, 都对提高本书的质量起了至关重要的作用。

欢迎使用本书的所有读者对书稿提出改进意见。

赵镇南

2008 年 2 月于天津大学 新园村

电子信箱: zn_zhao@tju.edu.cn

主要符号表

英文字母符号

a	热扩散率 (或称导温系数), m^2/s
A	面积, m^2
c	比热容, $\text{J}/(\text{kg} \cdot \text{K})$
C_f	范宁 (Fanning) 摩擦系数
c_p	比定压热容, $\text{J}/(\text{kg} \cdot \text{K})$
d	直径, m
E	辐射力, W/m^2 ; 总能, J/kg
f	达西 (Darcy) 摩擦系数
F	力, N
g	重力加速度, m/s^2
G	投射辐射, W/m^2
h	对流换热表面传热系数, $\text{W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$
h_r	辐射换热表面传热系数, $\text{W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$
H	高度, m
i	节点编号
I	电流, A
j	节点编号
J	有效辐射, W/m^2
k	总传热系数, $\text{W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$
K_λ	光谱减弱系数, m^{-1}
l	长度, m
L	(定向) 辐射强度, $\text{W}/(\text{m}^2 \cdot \text{sr})$
n	管束的排数; 法向
N	管束的总管数
p	压力, Pa
P	功率, W ; 物体的周长, m
q	热流密度, W/m^2
q_m	质量流量, kg/s
q_v	体积流量, m^3/s
Q	热量, J

r	径向坐标; 汽化潜热, kJ/kg
r_0	半径, m
R	面积热阻, $(\text{m}^2 \cdot ^\circ\text{C})/\text{W}$
S	气体辐射的射线行程长度, m ; 管间距, m ; 导热形状因子, m
t	摄氏温度, $^\circ\text{C}$
T	热力学温度, K ; 周期, s
u	速度, m/s
U	无量纲 ^① 速度
v	速度, m/s ; 比体积, m^3/kg
V	体积, m^3 ; 无量纲速度
w	宽度, m
W	功, J
x	笛卡儿坐标
X	无量纲坐标; 角系数 (必须具有双角码)
y	笛卡儿坐标
Y	无量纲坐标
z	笛卡儿坐标

希腊字母符号

α	吸收比
α_v	体 (膨) 胀系数, K^{-1}
β	肋化系数; 初始相位角, rad
γ	表面张力, N/m
δ	厚度, m ; 边界层厚度, m
ε	发射率 (或称黑度); 换热器效能
η	动力粘度, $\text{Pa} \cdot \text{s}$; (肋) 效率
φ	径向坐标
λ	导热系数, $\text{W}/(\text{m} \cdot \text{K})$; 波长, m
λ_0	变导热系数表达式中的常数, $\text{W}/(\text{m} \cdot \text{K})$
μ	特征值
ν	运动粘度 (或称动量扩散率), m^2/s
θ	过余温度, $^\circ\text{C}$ 或 K ; 球坐标系中的纬度角, rad
Θ	无量纲过余温度比
ρ	密度, kg/m^3 ; 反射比
ρ_e	电阻率, $\Omega \cdot \text{m}$

① 按照现行国家标准 GB 3100—1993, “无量纲”应该称为“量纲 1”, 习惯上称为无量纲, 下同。

σ	斯忒藩 - 玻耳兹曼 (Stefan-Boltzmann) 常量, $W/(m^2 \cdot K^4)$
τ	时间, s; 透射比; 切应力, Pa
τ_c	时间常数, s
ψ	换热器对数平均温差修正系数
Φ	热流量, W
$\dot{\Phi}_v$	内热源的热功率, W/m^3
Ω	立体角, sr
Λ	(周期性导热的) 波长, m
ω	波动的角频率, rad/s

相似特征数

Ar	阿基米德数, $\rho_l g (\rho_l - \rho_v) l^3 / \eta_l^2$
Bi	毕渥数, hl/λ
Bo	邦德数, $g (\rho_l - \rho_v) / \gamma$
Ec	埃克特数, $u_\infty^2 / [c_p (t_w - t_\infty)]$
Eu	欧拉数, $\Delta p / \rho u^2$
Fo	傅里叶数, $a\tau/l^2$
f	达西 (管流) 摩擦系数, $\Delta p / (l/d) / (\rho u^2/2)$
Ga	伽利略数, gl^3/ν^2
Gr	格拉晓夫数, $g\alpha\Delta t l^3/\nu^2$
Gr^*	修正格拉晓夫数, $g\alpha q l^4/\lambda\nu^2$
Gz	格雷茨数, $RePrd/l$
j	科尔本因子, 或称 j -因子, $StPr^{2/3}$
Ja	雅各布数, $c_p(t_w - t_\infty)/r$
Kn	克努森数, λ/l
Nu	努塞尔数, hl/λ
Pe	贝克来数, $RePr$
Pr	普朗特数, ν/a
Ra	瑞利数, $GrPr$
Re	雷诺数, $u_\infty l/\nu$
St	斯坦顿数, $Nu/(RePr) = h/(\rho c_p u_\infty)$
We	韦伯数, $\rho u^2 l/\gamma$

角 码

app	表观的
b	肋基, 沸腾, 黑体
c	冷侧, 临界, 接触, 对流, 凝结
cond	导热

conv	对流: λ, W , 量纲 (Stefan-Boltzmann) 常数 σ 发射率 ϵ 辐射力 E	σ
d	以直径为特征尺寸 d (直径, 间距, 间距, a : 直径比; 间距比, P)	d
e	发射, 当量 e , 效率 η , 效率 η	e
ent	入口段 L_{ent} 入口段长度 L_{ent}	L_{ent}
$e + r$	发射 + 反射 W , 量纲 W	W
f	肋的, 流体的 f 肋效率 f , W , 量纲 W	f
fd	充分发展的 z 坐标 z	z
h	热侧 h 传热系数 (肋效率 f 肋效率 f)	h
in	入口 in 入口, 率 in	in
l	层流的, 凝液的 l 层流, 凝液	l
m	平均 m 平均	m
n	法向 n 法向	n
opt	最佳值 opt 最佳值	opt
out	出口 out 出口	out
r	径向, 辐射 r 径向, 辐射	r
s	太阳, 滞止 s 太阳, 滞止	s
sat	饱和 sat 饱和	sat
st	储存 st 储存	st
sur	环境 sur 环境	sur
t	总的, 湍流, 热的 t 总的, 湍流, 热的	t
w	壁面的 w 壁面的	w
v	蒸气的 v 蒸气的	v
x	局部值 x 局部值	x
λ	光谱的, 导热的 λ 光谱的, 导热的	λ
θ	定向的 θ 定向的	θ

总 目 录

主要符号表	I
第 1 章 绪论	1
1.1 传热的基本概念	2
1.1.1 传热	2
1.1.2 热量传递的基本方式	2
1.1.3 传热学与热力学的关系	3
1.2 传热的工程应用	4
1.2.1 在传统工业中的应用	4
1.2.2 在高新技术中的应用	8
1.3 传热方式与热流速率方程	11
1.3.1 热传导	11
1.3.2 热对流	12
1.3.3 热辐射	14
1.3.4 复合换热	15
1.3.5 传热过程和总传热系数	16
1.4 能量守恒原理	16
1.5 传热问题的研究方法	18
1.6 本章提要	23
习题	24
参考文献	30
第 2 章 导热的理论基础	33
2.1 导热热流速率方程	34
2.1.1 温度场与温度梯度	34
2.1.2 傅里叶定律	35
2.2 物质的导热特性	36

2.2.1	固体	37
2.2.2	液体	38
2.2.3	气体	38
2.2.4	各向异性	39
2.3	导热微分方程与单值性条件	39
2.3.1	直角坐标系	40
2.3.2	径向坐标系	41
2.3.3	单值性条件	42
2.4	本章提要	48
	习题	49
	参考文献	52
第3章 稳态导热分析与计算		54
3.1	一维稳态导热	55
3.1.1	单层与多层平壁: 热阻分析方法	55
3.1.2	接触热阻	58
3.1.3	径向系统中的一维导热	63
3.1.4	有内热源时的导热	68
3.1.5	变导热系数	69
3.2	扩展表面的导热与传热	73
3.2.1	扩展表面导热的理论分析	73
3.2.2	肋壁的传热性能	77
3.2.3	变截面肋及其优化	82
3.2.4	肋壁的工程应用	83
3.3	多维导热问题	84
3.4	稳态导热的数值计算方法	85
3.4.1	求解区域的离散化	86
3.4.2	节点方程的建立	86
3.4.3	差分方程的求解	90
3.5	本章提要	97
	习题	99
	参考文献	117

第4章 非稳态导热	118
4.1 非稳态导热的基本概念	119
4.1.1 非稳态导热问题的类型	119
4.1.2 瞬态导热过程的基本特征	119
4.2 集总参数分析方法	121
4.2.1 基本概念	121
4.2.2 集总参数分析方法	121
4.2.3 适用条件与误差估计	123
4.3 对流边界条件下的一维瞬态导热	128
4.3.1 一维平壁对称冷却(加热)	129
4.3.2 长圆柱与球体	131
4.3.3 正规状况阶段	132
4.4 半无限大固体的非稳态导热	135
4.4.1 恒壁温边界条件	136
4.4.2 恒热流边界条件	137
4.4.3 对流边界条件	138
4.4.4 脉冲加热边界条件	138
4.5 周期性非稳态导热	142
4.5.1 半无限大物体内的温度响应	142
4.5.2 周期性导热过程中的热量传递	144
4.6 多维非稳态导热	146
4.7 非稳态导热数值解	151
4.7.1 差分方程; 能量平衡方法	151
4.7.2 显式格式的稳定性条件	153
4.7.3 隐式差分格式	153
4.8 本章提要	156
习题	158
参考文献	171
第5章 对流换热的理论基础	172
5.1 对流换热问题概述	173
5.1.1 对流换热问题的分类及求解方法	173
5.1.2 影响对流换热的主要因素	175

5.2	对流换热微分方程组	177
5.2.1	连续性方程	178
5.2.2	动量微分方程	178
5.2.3	能量微分方程	178
5.3	边界层概念	180
5.3.1	速度边界层	181
5.3.2	热边界层	182
5.3.3	边界层概念的重要意义	183
5.4	边界层对流换热微分方程组	184
5.4.1	表面传热系数	184
5.4.2	对流换热方程组的简化	184
5.4.3	解的无量纲函数形式	186
5.4.4	层流边界层微分方程精确解	188
5.4.5	层流边界层积分方程近似解	189
5.5	湍流以及动量和热量传递的类比	193
5.5.1	湍流流动和传递特征	193
5.5.2	动量与热量传递的类比	195
5.5.3	类比关系的应用	196
5.5.4	湍流边界层厚度	198
5.6	对流换热的实验研究方法	201
5.6.1	相似原理	201
5.6.2	相似特征数	204
5.6.3	特征数方程	204
5.7	本章提要	207
	习题	209
	参考文献	213
第 6 章 对流换热的工程计算		214
6.1	掠过平板的强迫流动换热	215
6.1.1	层流	215
6.1.2	湍流	216
6.1.3	有未加热起始段	216
6.2	绕流圆柱体的强迫流动换热	220
6.2.1	流动边界层	220
6.2.2	绕流单管	222

6.2.3	绕流光管管束	224
6.2.4	绕流肋片管束	227
6.3	绕流球体的强迫流动换热	229
6.4	管内强迫流动换热	232
6.4.1	管内流动边界层	232
6.4.2	管内热边界层和换热分析	235
6.4.3	截面平均温度的沿程变化	237
6.4.4	管内对流换热的特征数方程	239
6.5	强化传热	247
6.5.1	传热强化的原理	247
6.5.2	强化传热的基本途径	249
6.5.3	强化传热性能的评价	254
6.6	自然对流换热	254
6.6.1	自然对流边界层	256
6.6.2	动量和能量微分方程	257
6.6.3	自然对流的相似特征数	258
6.6.4	大空间自然对流换热计算	259
6.6.5	有限空间自然对流换热计算	264
6.6.6	混合对流换热	268
6.7	本章提要	269
	习题	273
	参考文献	286
第 7 章 沸腾与凝结		289
7.1	相变换热的基本概念	290
7.2	沸腾换热	291
7.2.1	池沸腾换热曲线	291
7.2.2	池沸腾换热的计算关系式	294
7.2.3	影响核态沸腾换热的主要因素	297
7.2.4	强迫对流沸腾	298
7.3	凝结换热	301
7.3.1	表面凝结的形态	301
7.3.2	竖壁层流膜状凝结理论解	302
7.3.3	层流和湍流膜状凝结换热	304
7.3.4	水平管束外的膜状凝结换热	306

7.3.5	影响膜状凝结换热的其他因素	306
7.3.6	珠状凝结简介	308
7.4	相变换热的强化技术	312
7.4.1	沸腾换热的强化	312
7.4.2	凝结换热的强化	314
7.4.3	热管技术简介	316
7.5	本章提要	318
	习题	320
	参考文献	323
第 8 章 热辐射理论基础		326
8.1	基本概念	327
8.1.1	热辐射的基本特点	327
8.1.2	电磁辐射的波谱	327
8.1.3	吸收比、反射比和透射比	328
8.1.4	辐射力与辐射强度	329
8.1.5	有效辐射	331
8.2	黑体辐射	332
8.2.1	黑体辐射的基本性质	332
8.2.2	普朗克定律	333
8.2.3	维恩位移定律	334
8.2.4	斯忒藩-玻耳兹曼定律	334
8.2.5	波段辐射力	335
8.2.6	兰贝特余弦定律	335
8.3	实际表面辐射的波长特性和方向特性	339
8.3.1	发射率	339
8.3.2	实际表面辐射的波长特性	340
8.3.3	实际表面辐射的方向特性	341
8.3.4	实际表面的吸收特性	342
8.3.5	基尔霍夫定律	343
8.3.6	灰表面	345
8.4	太阳辐射与环境辐射	349
8.5	本章提要	352
	习题	353
	参考文献	359

第9章 辐射换热计算 361

9.1	辐射角系数	362
9.1.1	角系数的定义	362
9.1.2	角系数的基本性质	363
9.1.3	角系数的计算方法	365
9.2	黑表面之间的辐射热交换	370
9.3	封闭腔中漫灰表面间的辐射换热计算	371
9.3.1	表面热阻	371
9.3.2	网络方法: 漫灰表面间的辐射热交换	372
9.3.3	重辐射表面	378
9.3.4	辐射屏蔽	380
9.3.5	辐射换热的强化	383
9.4	辐射换热的数值计算	384
9.5	有气体参与时的辐射换热计算	387
9.5.1	气体辐射的基本特征	388
9.5.2	气体的发射率和吸收比	388
9.5.3	气体与包壳间的辐射换热	393
9.6	本章提要	395
	习题	396
	参考文献	408

第10章 热交换器 409

10.1	热交换器的主要型式与应用	410
10.2	换热器的总传热系数	414
10.3	换热器的平均传热温差	415
10.3.1	对数平均温差	415
10.3.2	顺流与逆流	416
10.3.3	多程交叉流	418
10.4	换热器的热计算: 平均温差法	421
10.4.1	换热器热计算的任务	421
10.4.2	设计计算	422
10.4.3	校核计算	423
10.5	换热器的热计算: 效能-传热单元数方法	427