
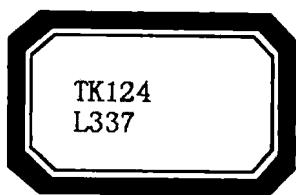




对流传热优化的场协同理论

李志信 过增元 著

 科学出版社
www.sciencep.com



对流传热优化的场协同理论

李志信 过增元 著

科学出版社

北京

TK124
L337

内 容 简 介

当今气候暖化和世界性的能源短缺,迫切要求发展可再生能源和提高能源利用效率。各种能源的利用中有 80%需通过热量的传递和转化,因此传热过程特别是对流传热过程的强化与优化,对节能减排具有十分重要的意义。与现有半经验性的传热强化理论与技术不同,本书从流场与温度场配合的角度阐明对流传热的物理机制,系统论述了对流传热的场协同强化与优化理论,它不仅能统一认识现有各种传热强化技术的物理本质,而且能开发系列的高效节能技术。本书汇集了作者多年的研究成果,第 1 章介绍对流传热的基础知识,第 2、3 章介绍对流传热场协同的基本概念、场协同方程及对流传热过程优化的焓耗散极值原理,第 4、5 章为基于场协同理论发展的高效节能传热元件和换热器优化的场协同理论,第 6~8 章分别介绍周期性脉冲对流传热、热磁对流传热以及对流传质过程的场协同分析。

本书从理论、技术和应用三方面系统介绍了对流传热优化的场协同概念和方法,可供能源、动力、航空航天、化工、石油、机械、电子等领域的科技人员参考,也可作为大专院校工程热物理、热能工程、空调、制冷等相关专业本科生和研究生的教材。

图书在版编目(CIP)数据

对流传热优化的场协同理论/李志信,过增元著. —北京:科学出版社,2010
ISBN 978-7-03-026274-5

I. 对… II. ①李…②过… III. 对流传热 IV. TK124

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2009)第 237350 号

责任编辑:王志欣 闫井夫 / 责任校对:钟 洋

责任印制:赵 博 / 封面设计:鑫联必升

科学出版社出版

北京东黄城根北街 16 号

邮政编码:100717

<http://www.sciencep.com>

双青印刷厂印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2010 年 1 月第 一 版 开本:B5 (720×1000)

2010 年 1 月第一次印刷 印张:23 3/4

印数:1—2 500 字数:466 000

定价:80.00 元

(如有印装质量问题,我社负责调换〈双青〉)

前 言

随着科学技术的进步与发展,人们对提高生活品质的需求越来越迫切。然而,精神文明和物质文明的发展是以消耗地球上的有限能源,特别是石油和煤炭一类化石能源为代价的。人类在消耗地球上有限能源的同时,也对自身赖以生存的环境造成了严重的污染和破坏。进入 21 世纪的人类正面临能源与环境两大挑战。我国有 13 亿多人口,是世界上最大的发展中国家,同时,我国的能源资源短缺,人均能源资源就更加不足,优质能源严重匮乏(我国的人均煤炭可采储量为世界人均水平的 54%,人均石油剩余可采储量仅为世界人均水平的 8%)。目前我国正处在经济建设的重要时期,实现全面小康和现代化战略不可能走多数西方国家大量消耗能源的老路,只能走高效利用能源的可持续发展之路。因此,在未来的经济发展过程中,节能将一直作为我国国民经济可持续发展的基本国策,节能和提高能源使用效率将显得尤为重要。

在能源的利用过程中,80%以上的能源都需要通过传热过程或通过换热器来实现。可见,发展并采用高效节能的传热强化技术对节能具有十分重要的意义。传热学是一门古老的学科,其中有关强化传热理论与技术的研究已有 100 多年的历史。特别是在 20 世纪 70 年代,世界面临石油危机,使得传热强化技术取得了长足发展,各种各样的传热强化技术得到了研发和应用。然而,在有关传热强化技术的研究中,相关的理论研究比较缺乏,大多数传热强化技术的研发具有经验或半经验性质,而且,在强化换热的同时,还会伴随着流动阻力的大幅增加,流动阻力增加的幅度往往大于传热的增强幅度,总体说来并不节能。因此,从节能的角度考虑,需要在理论指导下研发高效节能的传热强化技术,对工业和生活中最常见的对流传热来说,就是要研发同功耗条件下换热显著强化的新型强化换热理论和技术。

本书所介绍的有关对流传热优化的场协同理论,是作者所在研究团队近 20 年研究成果的总结。特别是自 2000 年以来,作者承担了两项 973 项目的课题研究,使得对流传热过程优化的场协同理论得到了系统和深入的研究,并得到了国内外同行的广泛认可。同时,基于场协同理论作者所在研究团队还发展了系列传热强化节能新技术。为此,作者认为有必要对相关的研究成果做进一步总结,以期对我国的节能减排工作尽绵薄之力。

本书的内容与传统的对流传热强化的书籍有着显著差别,主要表现在:①传统的强化传热书籍往往只是对不同强化技术分类介绍,本书则还介绍对流传热优化的场协同理论,它不仅能对已有的强化技术进行统一的解释和认识,而且,基于场

协同理论可发展系列高效节能的传热强化技术；②传统的强化技术大多是经验或半经验性的，缺乏统一的理论指导，而本书则通过场协同理论和求解场协同方程，获得黏性耗散一定条件下换热最优的速度场，从而为研发高效节能的强化技术提供理论指导；③传统的强化技术是无法控制其流动阻力增加幅度的，只能通过不断的改进使得流阻不断减小，而基于场协同理论发展的强化技术，具有同功耗条件下换热显著增强的特点，因此，节能效果显著。

本书共分 8 章。第 1 章介绍对流传热的基础知识。考虑到对流传热可视为具有内热源的导热(能量方程中的对流项可视为当量内热源)，导热则视为流体静止时的对流传热，也就是说，导热与对流是密不可分的，所以本章还同时介绍了导热的基础知识。这一方面是为了便于读者阅读和查阅，另一方面是要从传统的传热学知识中提出问题，阐述传热过程优化的场协同理论的意义。

第 2 章介绍对流传热优化的场协同理论。从最简单的层流边界层换热问题出发，得知对流传热的努塞特数不仅与雷诺数和普朗特数有关，而且与速度和温度梯度的点积在全场的积分(即速度场与温度梯度场或温度场的协同)有关，从而提出了对流传热优化的场协同理论。本章还提出了换热器优化的场协同理论，即在冷流体的热容量流和传热单元数给定的条件下，冷热流体温度场协同得越好，换热器的有效度越高。

第 3 章在分析了目前传热学中只有传热速率而没有传热效率概念的现状之后，通过热电比拟，提出了描述物体传热能力的新物理量——焓(早期称为热量传递势容)，定义了焓耗散函数，并针对导热优化提出了焓耗散极值原理。将该原理应用于对流传热，针对层流换热和湍流换热，分别获得了描述给定黏性耗散条件下换热最优的速度场协同方程。通过求解速度场协同方程，可以获得同功耗条件下的最优速度场，为发展高效节能的传热强化技术奠定了理论基础。

第 4 章介绍基于场协同理论发展的传热强化技术，包括交叉缩放椭圆管、不连续双斜内肋管、不连续交叉肋板片、急扩缩放管、强化换热翅片、纤毛肋强化管等。其共同特点是在传热强化的同时，流动阻力的增加相对较小，同功耗下的传热强化指数均大于 1，具有显著的节能效果。以不连续双斜内肋管为例，由于管内不连续肋的作用，使其管内流场呈现多纵向涡流型，与求解场协同方程获得的最优流场相似，因此具有显著的同功耗条件下的强化效果。

第 5 章介绍换热器优化的场协同理论与应用。本章首先介绍了换热器中的场协同理论以及对数平均温差与换热器冷热流体局部温差之间的关系，而后，介绍了几种典型换热器的场协同数的解析表达式以及几种换热器改进冷热流体温度场协同程度的方法。本章还针对简单的一维换热器，基于第 3 章介绍的焓耗散极值原理证明了换热器场协同理论的正确性。

第 6 章介绍的是周期性脉冲对流传热的场协同分析。对平行平板通道、圆管

以及圆管外的周期性脉冲对流传热进行了理论分析,从周期平均的角度介绍了速度场与温度场的协同关系式,从理论和数值分析的角度介绍了周期性脉冲流能否强化通道内传热的物理机制。

第 7 章介绍热磁对流传热的场协同分析。热磁对流是指在外加磁场情况下弱顺磁性流体的对流传热,考虑到磁场力也是一种体积力,因此借鉴重力场中的浮升力和重力加速度概念,定义了磁浮升力和磁加速度,讨论了理想磁场和梯度磁场作用下的热磁对流,探讨了场协同理论在热磁对流传热中的适用性。

第 8 章探讨了对流传质过程的场协同理论及其应用。类似于表征物体传热能力的焓的概念,定义了表征传质能力的质量积,建立了质量积耗散极值原理,推导了描述对流传质过程的最优速度场的欧拉方程(速度场与浓度梯度场协同方程),并应用于对流传质强化技术的开发和航天载人舱的排污优化设计与分析。

本书在写作过程中,参考了周森泉(力博 91)、李德玉(力博 92)、王崧(力博 95)、夏再忠(力博 97)、杨立军(力博 00)、程新广(力博 00)、孟继安(力博 01)、俞接成(力博 01)、朱宏晔(力博 02)、李晓伟(力博 03)、陈群(力博 03)等的博士学位论文以及魏澍(力硕 01)的硕士学位论文,他们对流传热优化的场协同理论以及基于场协同理论的传热强化技术的研究做出了重要贡献,没有他们的努力工作,本书是不可能完成的,作者在此对他们的辛勤劳动和创造性贡献表示诚挚的谢意。本书第 2 章由过增元撰写,第 4 章由孟继安撰写,第 8 章由陈群撰写,其他各章由李志信撰写。

最后,作者还要感谢国家重点基础研究发展计划(973 计划)项目的资助。正是作者连续获得两个 973 课题的资助:传递过程强化与控制的新理论(G2000026301)和换热设备的场协同分析与应用(2007CB206901),才使得对流传热的场协同理论的研究不断深入、发展和完善。

主要符号

拉丁字母

a	热扩散系数, m^2/s ; 加速度, m/s^2
A	面积, m^2 ; 逆温度, K ; 压力梯度振幅, Pa/m
B	磁通密度, T
B_p	顺磁性流体的磁浮升力, N
B_d	逆磁性流体的磁浮升力, N
c_p	阻力系数
c_p	定压比热容, $\text{J}/(\text{kg} \cdot \text{K})$
C	污染物浓度, kg/m^3
C_e	电容, F
C_h	热容, J/K
C_ϕ	对流传热优化过程中与黏性耗散有关的常数, Pa/K^2
$C_{\phi m}$	对流传质优化过程中与黏性耗散有关的常数, $\text{Pa}/(\text{kg}/\text{kg})^2$
d	直径, m
D	直径, m ; 组分扩散系数, m^2/s
e	肋高, m
e	单位矢量
e_{vm}	单位体积内组分的质量积, $\text{kg} \cdot (\text{kg}/\text{kg})^2/\text{m}^3$
E	Biot 定义的热势, $\text{J} \cdot \text{K}$
E_h	焓, $\text{J} \cdot \text{K}$
E_{be}	焓耗散, $\text{J} \cdot \text{K}$
E_{vm}	质量积, $\text{kg} \cdot (\text{kg}/\text{kg})^2$
E_φ	焓耗散函数(单位时间、单位体积内焓的耗散), $\text{W} \cdot \text{K}/\text{m}^3$
f	摩擦阻力系数; 频率, Hz
F	附加体积力, N/m^3
F_c	场协同数
g	重力加速度, m/s^2
Gr	格拉晓夫数
Gr_m	磁格拉晓夫数
h	表面传热系数, $\text{W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$; 平行平板通道高度的一半, m

h_m	对流传质系数, m/s
H	磁场强度, A/m
j	传热因子; 电流密度, A/m ²
J	广义热力学流
J_p	机械能损失, W
k	热导率, W/(m · K); 光催化氧化反应常数, mol/(m ² · s)
k_{eff}	有效热导率, W/(m · K)
K	传热系数, W/(m ² · K); Langmuir 吸附平衡常数, m ³ /mg
l	分子平均自由程, m
L	长度, m; 线性唯象系数
M	无量纲角频率; 摩尔质量, kg/mol; 磁化强度, A/m
n	法向矢量
Nu	努塞特数
p	节距, m
P	压力, Pa; 截面周长, m
Pr	普朗特数
q	热流密度, W/m ²
q_m	质量流密度, kg/(m ² · s)
Q	热流, W
Q_{vh}	热容量, J
Q_{vm}	混合物中某组分的总质量, kg
r	径向坐标, m; 半径, m; 光催化氧化反应率, mol/(m ² · s)
R	半径, m; 摩尔气体常数, J/(mol · K)
Re	雷诺数
R_e	电阻, Ω
R_h	对流换热热阻, K/W
R_i	单位面积平板导热热阻, m ² · K/W; 热阻, K/W
S	面积, m ² ; 熵, J/K
Sc	施密特数
S_g	熵产, J/K
Sh	舍伍德数
t	温度, K; 时间, s
T	绝对温度, K; 周期, s
u, v, w	直角坐标系下的速度分量, m/s
U	内能, J; 无量纲速度, m/s

U	速度矢量, m/s
U_h	热势(温度), K
V	体积, m^3
x, y, z	直角坐标系的坐标分量, m
X	广义热力学力
Y	质量分数, kg/kg
∇	哈密尔顿算子

希腊字母

β	微翅螺旋角, °; 矢量夹角, °; 体积膨胀系数, 1/K
γ	压力梯度波动的幅度, Pa/m
Γ	边界
δ	厚度, m
δ	变分符号
ε	换热器的有效度; 光催化反应器污染物去除效率
η	效率因子
θ	过剩温度, K; 无因次温度
Θ	无因次温度
λ	拉格朗日乘子
μ	动力黏度, $kg/(m \cdot s)$; 化学势, J/mol; 磁导率, H/m
μ_0	真空磁导率, H/m
μ_r	相对磁导率, H/m
ν	运动黏度, m^2/s
Ξ	复数形式的无量纲温度
π	圆周率
ρ	密度, kg/m^3
τ	时间, s
ϕ_m	单位体积内质量积耗散函数, $kg (kg/kg)^2/(m^3 \cdot s)$
Φ	热流, W; 黏性耗散函数, W/m^3
$\dot{\Phi}$	热源强度, W/m^3
χ	磁化率
χ_s	比磁化率, m^3/kg
ψ	力表述的质量传递过程的耗散函数, $kg/(m^3 \cdot s)$
Ψ	热耗散函数, $W \cdot K/m^3$
ω	角频率, s^{-1} ; 气体分子的平均速度, m/s
Ω	几何空间

		上标
—	平均值	
*	无量纲参数	
		下标
c	低温	
e	强化	
f	流体	
h	高温	
i	管内	
in	入口	
m	平均值, 磁	
max	最大值	
min	最小值	
o	管外	
out	出口	
q	等热流边界	
r	径向	
s	平滑表面圆管, 稳态	
t	湍流, 瞬态	
th	热	
T	等温边界	
w	壁面	
x	直角坐标 x 轴向位置	
φ	周向	
∞	无穷远处	

目 录

前言

主要符号

第 1 章 对流传热基础知识	1
1.1 热传导	1
1.1.1 傅里叶导热定律	1
1.1.2 热导率与导热机理	3
1.1.3 导热问题的数学描述	4
1.1.4 稳态导热	6
1.1.5 非稳态导热	16
1.2 对流传热.....	22
1.2.1 牛顿冷却定律	22
1.2.2 对流传热问题的控制方程组	23
1.2.3 边界层型对流传热问题的控制方程组	24
1.2.4 圆管内层流对流传热	27
1.2.5 对流传热的准则关系式	30
1.2.6 自然对流传热	36
1.3 对流传热过程与热交换器.....	40
1.3.1 传热过程.....	40
1.3.2 热交换器的设计方法	42
1.4 对流传热过程的强化与控制.....	48
1.5 关于传热学的两点思考.....	50
1.5.1 关于热阻概念的讨论	50
1.5.2 传热学与热力学的差别	52
1.6 小结.....	53
参考文献	53
第 2 章 对流传热优化的场协同理论	54
2.1 对流传热的物理机制.....	54
2.1.1 对流传热是有流体运动时的导热	55
2.1.2 对流传热控制和强化的途径	56
2.1.3 对流传热的几个特殊例子.....	57

2.1.4	对流传热的物理机制	60
2.2	对流传热优化的场协同理论	60
2.2.1	对流传热问题的场分析	60
2.2.2	对流传热的场协同	62
2.3	场协同理论的应用	66
2.3.1	现有对流传热现象的分析和讨论	66
2.3.2	发展系列的传热强化新方法和新技术	69
2.4	换热器中的场协同理论	72
2.4.1	换热器优化的场协同理论	72
2.4.2	场协同理论在换热器优化中的应用	74
2.5	小结	76
	参考文献	77
第3章	管内对流传热的场协同方程及其应用	78
3.1	焨与焨耗散	78
3.1.1	焨的定义及其物理意义	79
3.1.2	焨的耗散	81
3.2	焨耗散极值原理	83
3.3	导热问题的优化	85
3.3.1	体点散热问题	85
3.3.2	导热优化的温度梯度均匀化原则	86
3.3.3	体点问题的数值优化	88
3.4	焨耗散极值原理与最小熵产原理的比较	91
3.4.1	对称体点散热问题	91
3.4.2	非对称体点散热问题	92
3.4.3	熵产最小的热导率分布优化方程	93
3.4.4	基于最小熵产原理和焨耗散极值原理的优化结果比较	94
3.5	管内层流对流传热的场协同方程	98
3.6	速度场优化的实例分析	101
3.6.1	矩形腔内层流对流传热的最优速度场	101
3.6.2	管内层流对流传热的最优速度场	104
3.7	纵向涡对管内层流流阻和换热影响的分析	106
3.7.1	纵向涡对管内层流流阻的影响	106
3.7.2	纵向涡对管内层流换热的影响	107
3.8	湍流对流传热的场协同方程	110
3.8.1	湍流换热的场协同关系式	110

3.8.2	湍流对流传热的场协同方程	110
3.8.3	平行平板间湍流泊肃叶流换热的优化速度场	113
3.9	微肋管强化湍流换热的机理分析	117
3.9.1	微肋管简介	117
3.9.2	微肋管的流动与换热性能	118
3.10	小结	127
	参考文献	128
第4章	基于场协同理论的传热强化技术	131
4.1	纵向涡传热强化技术简介	131
4.2	交叉缩放椭圆换热管	133
4.2.1	交叉缩放椭圆管简介	133
4.2.2	交叉缩放椭圆换热管管内对流传热的数值分析	134
4.2.3	交叉缩放椭圆换热管管内对流传热的实验	140
4.3	不连续双斜向内肋管	146
4.3.1	不连续双斜向内肋管简介	146
4.3.2	不连续双斜向内肋管对流传热性能的数值计算	147
4.3.3	不连续双斜向内肋管性能的实验结果	151
4.4	交叉缩放椭圆管和不连续双斜内肋管的综合性能评价	156
4.4.1	单相对流传热强化评价准则	156
4.4.2	典型换热管换热和阻力的关联式	157
4.4.3	各种强化管综合性能的评价与比较	159
4.5	不连续交叉肋板片	162
4.5.1	常用板片简介	163
4.5.2	不连续交叉肋板片	164
4.5.3	不连续交叉肋板片间对流传热的数值分析	167
4.5.4	不连续交叉肋板片间流动与换热的实验	173
4.6	急扩加速流缩放管	178
4.7	强化换热翅片	180
4.8	纤毛肋强化传热管	184
4.9	小结	190
	参考文献	190
第5章	换热器优化的场协同理论与应用	194
5.1	换热器优化的场协同理论	194
5.1.1	换热器中的场协同概念与场协同数	194
5.1.2	几种典型换热器的场协同数	196

5.1.3	换热器优化的场协同理论	201
5.1.4	多股流换热器中冷热流体温度场的协同	204
5.2	换热器场协同理论的证明	207
5.2.1	换热器中的焓耗散	207
5.2.2	换热器场协同理论的证明	208
5.3	对数平均温差与局部温差的关系	212
5.4	逆流换热器场协同的改善方法	213
5.5	顺流换热器场协同的改善方法	217
5.6	叉流换热器场协同的改善方法	219
5.6.1	改善叉流换热器场协同的变面积分布方法	219
5.6.2	改善逆向叉流换热器场协同的方法	223
5.7	汽水热交换器场协同的改善方法	225
5.8	小结	226
	参考文献	226
第6章	周期性脉冲对流传热的场协同分析	228
6.1	脉冲对流传热简介	228
6.2	周期性脉冲对流传热的场协同关系式	229
6.2.1	外掠平板周期性脉冲对流传热的场协同关系式	229
6.2.2	平行平板通道内周期性脉冲对流传热的场协同关系式	231
6.2.3	圆管内周期性脉冲对流传热的场协同关系式	232
6.2.4	流体绕流振动圆柱对流传热的场协同关系式	233
6.3	平行平板通道内脉冲对流传热	235
6.3.1	平行平板通道内脉冲流动的速度分布	235
6.3.2	平行平板通道内脉冲流动的温度分布	239
6.4	平行平板通道内脉冲对流传热数值模拟	247
6.4.1	等热流边界问题	247
6.4.2	等壁温边界问题	249
6.5	圆管内层流脉冲对流传热	251
6.5.1	管内层流脉冲流动的速度分布	251
6.5.2	管内层流脉冲流动的温度分布	255
6.5.3	圆管内层流脉冲对流传热的数值模拟	262
6.5.4	带内环肋圆管层流脉冲对流传热数值分析	266
6.6	流体低速绕流振动圆柱对流传热的数值分析	273
6.6.1	计算模型与参数	273
6.6.2	计算结果	274

6.6.3 壁面振动强化换热的机理	275
6.7 小结	277
参考文献	278
第7章 热磁对流传热的场协同分析	280
7.1 热磁对流研究简介	280
7.2 物质的磁性	282
7.3 磁场力和磁浮升力	283
7.3.1 磁场力	283
7.3.2 磁浮升力	284
7.3.3 磁加速度	285
7.4 梯度磁场作用下对流传热的控制方程	287
7.5 理想梯度磁场作用下封闭腔内的自然对流传热	289
7.6 磁致纯导热和磁致 Bénard 对流	293
7.7 理想梯度磁场作用下的地面微重力流动与换热	294
7.8 梯度磁场作用下的封闭腔内自然对流传热	297
7.8.1 梯度磁场的设计	297
7.8.2 梯度磁场作用下封闭方腔内自然对流传热	298
7.9 四极磁场作用下的自然对流	302
7.10 四极磁场作用下矩形通道内对流传热	305
7.10.1 物理模型与控制方程	305
7.10.2 均匀速度和温度入口的层流对流传热	307
7.10.3 充分发展速度和温度入口的层流对流传热	315
7.11 小结	323
参考文献	324
第8章 对流传质过程的场协同理论及其应用	326
8.1 对流传质中的场协同	326
8.1.1 层流质量传递过程中的场协同	326
8.1.2 湍流质量传递过程中的场协同	328
8.1.3 对流传质过程场协同理论的数值验证	329
8.2 传质过程的不可逆性及最小作用量	331
8.2.1 质量传递过程的不可逆性	331
8.2.2 质量传递过程的最小作用量	333
8.3 质量积耗散极值原理	336
8.3.1 质量积耗散极值原理	336
8.3.2 质量积耗散极值原理的数值验证	339

8.4	光催化反应器的性能优化	344
8.4.1	光催化氧化反应器的物理模型	345
8.4.2	传质过程的数值优化及讨论	346
8.4.3	实验验证	348
8.5	空间站实验舱通风排污过程优化	352
8.5.1	实验舱物理模型	353
8.5.2	舱内对流传质的优化及讨论	354
8.6	小结	358
	参考文献	359

第 1 章 对流传热基础知识

为了便于读者理解传热过程的场协同理论,本章首先介绍传热学的基础知识。鉴于传热过程的场协同理论目前还没有涉及辐射换热,所以只介绍热传导和对流传热的基础知识,其目的在于在了解热传导和对流传热的传统处理方法的同时,分析传热学中需要进一步研究的问题。例如,传统的传热学中广泛使用了热阻的概念,虽然采用热阻概念可以方便地分析许多传热问题,但它实际上仅仅适用于一维稳态问题,对于瞬态导热、具有内热源的稳态导热以及多维问题等并不能严格地定义热阻;传热学的教科书中也没有传热过程的效率的讨论,原因在于在整个传热过程中,能量是守恒的,因此,不能像热力学中讨论热机的热功转换效率那样定义传热过程的效率;正因为没有传热过程的效率,所以传热学教科书中也就没有传热过程优化的讨论。实际上,面对节能这一重大课题,如何使传热这一不可逆过程更为高效是发展高效节能传热技术的关键,这也正是本书介绍对流传热优化的场协同理论的出发点。当然介绍传统的处理方法和准则关系式也可供读者使用时参考。

下面分别介绍热传导、对流传热以及热交换器的基础知识,在 1.5 节,将讨论传热学中需要进一步研究的问题。有关传热学的基础知识,在许多传热学的教科书中都有更详细的介绍,本章所介绍的内容主要参考了杨世铭和陶文铨编著的《传热学》第 4 版^[1]以及 Incropera 和 Dewitt 所著的 *Fundamentals of Heat and Mass Transfer* 第 4 版^[2]。

1.1 热 传 导

热传导,又称导热,是自然界最常见的传热现象。固体或静止流体内部依靠分子、原子、自由电子等微观粒子的热运动而产生的热量输运过程称为热传导,或称为导热。当冷热物体相接触时,热量会从高温物体传至低温物体。比如,夏季在空调的房间里,墙壁内表面的温度低于外表面温度,热量通过墙壁传入室内,墙壁内部高温区向低温区的热量传递过程就是热传导。又比如,冬季用手触摸室外的物体时,感觉很凉,这是由于手与物体接触时热量通过导热方式从手传给温度较低的物体的缘故。

1.1.1 傅里叶导热定律

大量的实践经验表明,单位时间通过单位面积所传导的热量正比于当地垂直