



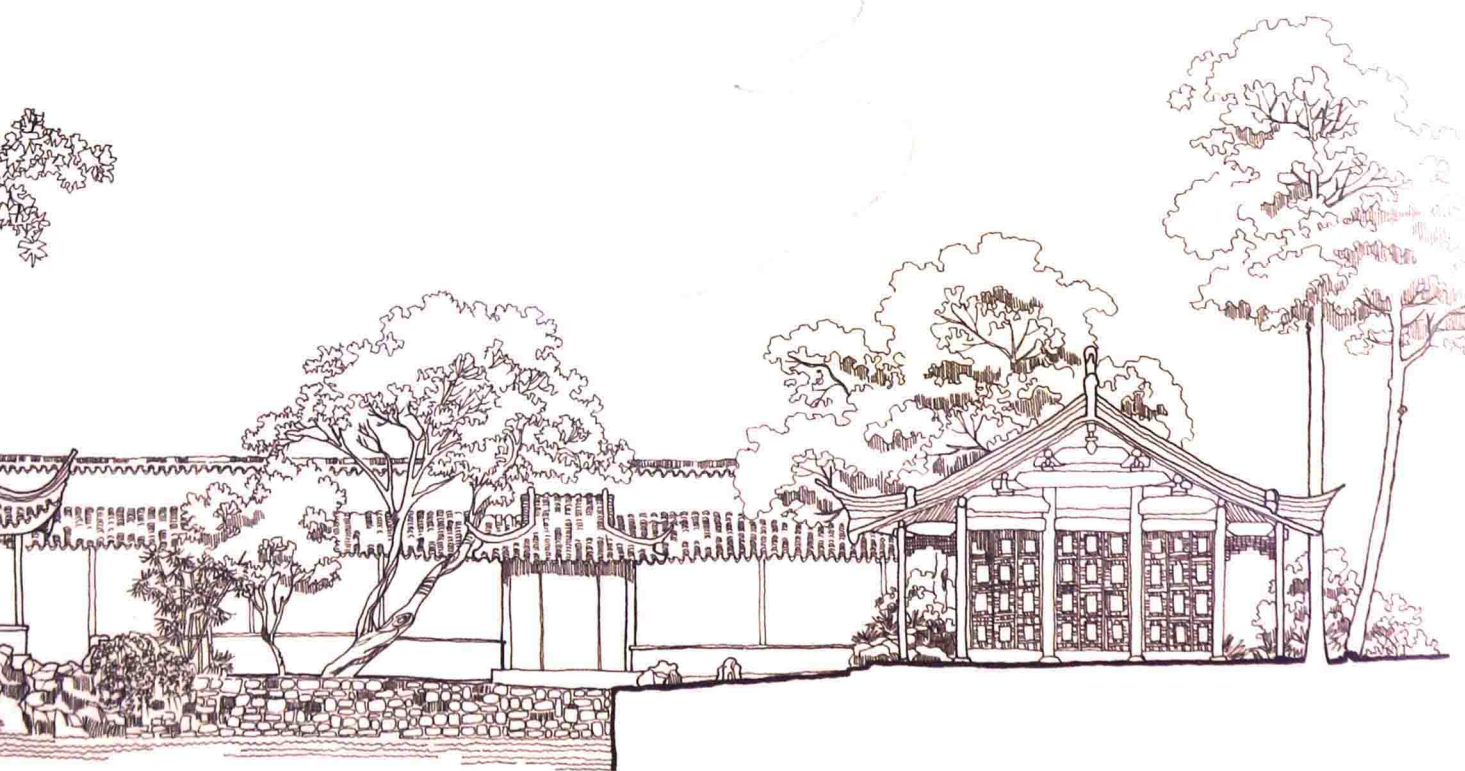
“十二五”普通高等教育本科国家级规划教材
高校建筑环境与能源应用工程学科专业指导委员会规划推荐教材

传热学

(第六版)

Heat Transfer

章熙民 朱 彤 安青松 任泽霈 梅飞鸣 编著
陈钟頔 主审



中国建筑工业出版社

“十二五”普通高等教育本科国家级规划教材
高校建筑环境与能源应用工程学科专业指导委员会规划推荐教材

传 热 学

(第六版)

章熙民 朱 彤 安青松 任泽霈 梅飞鸣 编著
陈钟頔 主审

中国建筑工程工业出版社

图书在版编目 (CIP) 数据

传热学/章熙民等编著. —6 版. —北京: 中国建筑工程出版社, 2014. 7

“十二五”普通高等教育本科国家级规划教材. 高校建筑环境与能源应用工程学科专业指导委员会规划推荐教材

ISBN 978-7-112-16553-7

I. ①传… II. ①章… III. ①传热学-高等学校-教材
IV. ①TK124

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2014)第 046908 号

责任编辑: 齐庆梅

责任设计: 张 虹

责任校对: 姜小莲 刘 钰

“十二五”普通高等教育本科国家级规划教材
高校建筑环境与能源应用工程学科专业指导委员会规划推荐教材

传 热 学

(第 六 版)

章熙民 朱 彤 安青松 任泽霈 梅飞鸣 编著
陈钟硕 主审

*

中国建筑工程出版社出版、发行 (北京西郊百万庄)

各地新华书店、建筑书店经销

北京红光制版公司制版

北京云浩印刷有限责任公司印刷

*

开本: 787×1092 毫米 1/16 印张: 22½ 字数: 560 千字

2014 年 8 月第六版 2014 年 8 月第三十六次印刷

定价: 42.00 元

ISBN 978-7-112-16553-7

(25400)

版权所有 翻印必究

如有印装质量问题, 可寄本社退换

(邮政编码 100037)

第 六 版 前 言

从本书 1980 年发行第一版起, 历经 34 年, 在这期间为使本教材能够紧随教育事业的发展, 满足专业教学的基本要求, 已经进行了 6 次改版。

由于很多新兴学科和技术的发展都离不开传热学, 传热学在理论、计算和应用等方面都获得了巨大的发展, 它已经成为一门重要的技术基础学科, 与新兴学科和技术的相互渗透和结合, 使新技术、新材料、新换热设备不断涌现, 传热学学科呈现出生机勃勃的景象。但对于一个初学传热学的读者来说, 通过学习努力掌握传热学的基本概念、基本理论和基本计算方法, 仍然是最为重要的目的, 只有这样才能为今后应用传热学解决科学研究和实际工程问题打下坚实的基础。

在第六版的改版中, 进一步完善了各章的一些重要例题的解算、分析和讨论; 更新部分插图; 增加新技术新材料的叙述。鉴于近年来对流传热数值计算日渐受到重视和广泛应用, 编者感到有必要使读者对这方面的知识有些入门性的了解, 以便日后需要时可以进一步学习, 为此编者尝试在第五章增加了一节“对流传热过程的数值求解方法简介”。目前此项内容尚未列入本专业传热学教学的基本要求, 因此使用本教材时, 可以根据学生的实际情况进行取舍。此外, 为了尽量不增加学生负担, 实现内容的新陈代谢, 本版删去了“边界层换热积分方程”一节。本版的这些改动是否恰当有待在教学实践中检验。

本版按“传热学”课程的基本要求, 在紧密地联系建筑环境与能源应用工程专业的同时, 适当的扩大了知识面, 以兼顾一些涉及能源利用的专业, 如机械制造、能源工程、食品工业、军工专业, 以及农林水利等专业的需要。

特别值得指出的是, “节能”是我国重要国策, 在这方面传热学将发挥十分重要的作用。在第六版中, 把“节能”作为一个的重要问题予以关注。

本版与前版一样仍然没有在习题后附注答案, 作者认为只要在掌握基本理论和基本计算式的基础上, 理解了各章例题的解题思路、步骤、方法, 以及求解结果的讨论和对各类传热过程强度的数量级分析, 就能顺利解题, 这是促使读者去深入理解教材内容的必由之路, 是培养计算能力的一个重要环节, 也是工程技术人员解决工程计算最基本的训练; 判断计算结果是否准确更是工程设计和各类考试所必须。为增强读者解题能力, 本书着力于每一章节例题的构思、设计, 着力于阐述例题的解答题目的、思路、步骤以及公式和物性常数的选用, 并对解题结果进行深入讨论, 扩展解题结论的理解, 以此引导读者消化各章内容, 判断计算结果的正确性。我们认为通过这些措施, 将从根本上解决习题不附答案给读者带来的困惑。而对于新担任教学的教师, 没有现成的答案, 也能起到督促他们去深入理解教学内容的作用。

这次改版工作历时两年, 值得指出与改版工作同步进行了本书新老编著人的交替。参与改版工作的是: 天津大学章熙民(主编)、安青松老师; 同济大学朱彤老师; 西安交通大学陈钟頔老师(主审)。由朱彤与安青松两位老师执笔改版, 朱彤为主要执笔人。从改版开始的研讨会到最后的审稿会, 都曾得到许多院校老师们热情支持和帮助, 提出了很多宝贵意见, 为了感谢, 特在本版的附录“传热学研讨会备忘录”中列出与会老师名单。为方便任课教师制作电子课件, 制作了公式、图表等素材库, 可发送邮件至 jiangongshe@163.com 免费索取。今后我们还希望得到更多读者的支持、帮助、批评指正。

第五版前言

本书 1980 年发行第一版，历经 27 年，如今已是第五版。紧随教育事业的发展步伐，力求不断满足建筑环境与设备专业对“传热学”教学的基本要求，一直是编著者的基本目的。

经过近一个世纪，传热学在理论、计算和应用等方面都获得了巨大的发展，她已经成为一门重要的技术基础学科，由于很多新兴学科和技术的发展都离不开传热学，促进了这些学科和技术的相互渗透和结合，新成果不断涌现，传热学学科呈现出生机勃勃的景象。但对于一个初学传热学的读者来说，通过学习努力掌握传热学的基本概念、基本理论和基本计算方法，仍然是最为重要的目的，只有这样才能为今后应用传热学解决科学研究和实际工程问题打下坚实的基础。

在第五版中，我们仍然坚持把对基本概念、基本理论和基本计算的教学作为第一的任务。对全书的一些重要概念和计算，在前一版的基础上，进一步进行了深入的探讨，力图精益求精，准确地阐述最基本的内容；按“传热学”的基本要求，在紧密地联系建筑环境与设备工程专业实际的同时，也适当扩大知识面，兼顾一些非能源专业的需要。

特别值得指出的是，“节能”是我国的重要国策，在这方面传热学将发挥十分重要的作用。近年，我国在建筑领域为“建筑节能”建立了一些强制性标准，为此，在第五版中，把“节能”作为一个重要的问题予以关注。

书中每个例题都附有讨论，对扩展解题思路、引导读者解题、消化各章内容、判断计算结果等能够起到很好的作用。本版把这一方法进一步深化，意图通过例题，使读者能结合实际理解并扩大对基本内容的掌握，能够判断计算的准确性。本版与前版一样仍然没有在习题后附注答案，作者认为只要在掌握基本概念的基础上，理解了各章例题的解题思路和方法，求解习题就无困难。解答习题，不仅能检验理解教材内容的程度，也是培养判断计算是否准确的能力的一个重要环节，是工程技术人员解决工程计算最基本的训练；独立判断计算结果是否准确更是各类考试所必须的。

这次改版，同济大学朱彤和天津大学汪健生积极地参与了改版的部分工作；清华大学姜培学、哈尔滨工业大学谭羽非、重庆大学王厚华以及天津城市建设学院王泽生为改版提出了宝贵意见，在此对他们表示衷心的感谢。

为方便任课教师制作电子课件，我们制作了包括本书中公式、图表等内容的素材库，可发送邮件至 jiangongshe@163.com 免费索取。

在新版发行时，我们希望继续得到读者的支持和帮助，给予批评指正。

基 本 符 号 表

符 号	物 理 量	常 用 单 位
A	温度振幅	开(K)
A	表面积	米 ² (m ²)
a	热扩散率(导温系数)	米 ² /秒(m ² /s)
B	大气压强	牛顿/米 ² (N/m ²); 帕(Pa); 千克/(米·秒 ²)[kg/(m·s ²)]
C	辐射系数	瓦/(米 ² ·开 ⁴)[W/(m ² ·K ⁴)]; [J/(m ² ·s·K ⁴)]
$C_{f,x}$	局部摩擦系数	
C_i	组分 i 的质量浓度	摩尔/米 ³ (mol/m ³); 千摩尔/米 ³ (kmol/m ³)
c	比 热 容	焦耳/(千克·开) [J/(kg·K)]
c'	体积比热容	焦耳/(标米 ³ ·开)[J/(N m ³ ·K)]
D	质扩散率	米 ² /秒(m ² /s)
d	直 径	米(m); 毫米(mm)
E	辐 射 力	瓦/米 ² (W/m ²)
f	摩擦系数	
f	流通截面积	米 ² (m ²)
G	投射辐射	瓦/米 ² (W/m ²)
g	重力加速度	米/秒 ² (m/s ²)
H	焓	焦耳/千克 (J/kg)
H	高 度	米(m); 毫米 (mm)
h	表面传热系数	瓦/(米 ² ·开) [W/(m ² ·K)]
h_D	表面传质系数	米/秒(m/s)
I	辐射强度	瓦/(米 ² ·球面度)[W/(m ² ·sr)]
J	有效辐射	瓦/米 ² (W/m ²)
k	传热系数	瓦/(米 ² ·开) [W/(m ² ·K)]
l	长度、定型尺寸	米(m)
M	质 流 量	千克/秒(kg/s)
M	质 量	千克(kg)
m	质流密度	千克/(米 ² ·秒)[kg/(m ² ·s)]
NTU	传热单元数	
P	功 率	瓦(W); 焦耳/秒(J/s)
p	压 强	帕(Pa); 牛顿/米 ² (N/m ²); 千克/(米·秒 ²)[kg/(m·s ²)]
Q	热 量	焦耳(J)
q	热流密度	瓦/米 ² (W/m ²)
R	热 阻	米 ² ·开/瓦(m ² ·K/W)
r	半 径	米(m); 毫米(mm)
r	气化潜热	焦耳/千克(J/kg)
S	距 离	米(m)

续表

符 号	物 理 量	常 用 单 位
T	热力学温度	开尔文(K)
t	摄氏温度	度(°C)
U	周边长度	米(m)
u	速 度	米/秒(m/s)
V	容 积	米 ³ (m ³)
v	速 度	米/秒(m/s)
w	速 度	米/秒(m/s)
X	角 系 数	
Z	周 期	秒(s); 时(h)
α	吸 收 比	
α	体积膨胀系数	1/开(1/K)
β	肋化系数	
δ	厚 度	米(m); 毫米(mm)
Δ	差 值	
ε	发 射 率	
ε	换热器效能	
η	效 率	
Θ	无量纲过余温度	
θ	过余温度	开(K)
λ	热导率	瓦/(米·开) [W/(m·K)]
μ	分 子 量	
μ	动力黏度	牛顿·秒/米 ² (N·s/m ²); 千克/(秒·米)[kg/(s·m)]
ν	运动黏度	米 ² /秒(m ² /s)
ν	温度波振幅衰减度	
ξ	温度波延迟	
ρ	密 度	千克/米 ³ (kg/m ³)
ρ	质量浓度	千克/米 ³ (kg/m ³)
ρ	反 射 比	
τ	穿 透 比	
τ	时 间	秒(s); 时(h)
τ	剪 应 力	牛顿/米 ² (N/m ²)
Φ	热 流 量	焦耳/ 秒(J/s); 瓦(W)
ω	角 速 度	弧度/ 秒(rad/s)

相似准则名称：

$$Bi = \frac{hl}{\lambda} \text{——毕渥(Biot)准则} (\lambda \text{ 为固体的热导率})$$

$$Co = h \left[\frac{\lambda^3 \rho^2 g}{\mu^2} \right]^{-1/3} \text{——凝结(Condensation)准则} (\lambda \text{ 为凝结液的热导率})$$

$$Fo = \frac{a\tau}{l^2} \text{——傅里叶(Fourier)准则}$$

$$Ga = \frac{gl^3}{\nu^2} \text{——伽利略(Galileo)准则}$$

$$Gr = \frac{gl^3 \alpha \Delta t}{\nu^2} \text{——格拉晓夫(Grashof)准则}$$

$$Le = \frac{a}{D} \text{——刘伊斯(Lewis)准则}$$

$$Nu = \frac{hl}{\lambda} \text{——努谢尔特(Nusselt)准则} (\lambda \text{ 为流体的热导率})$$

$$Pr = \frac{\nu}{a} \text{——普朗特(Prandtl)准则}$$

$$Pe = Re \cdot Pr = \frac{ul}{a} \text{——贝克利(Peclet)准则}$$

$$Ra = Gr \cdot Pr \text{——瑞利(Rayleigh)准则}$$

$$Re = \frac{ul}{\nu} \text{——雷诺(Reynolds)准则}$$

$$Sc = \frac{\nu}{D} \text{——施米特(Schmidt)准则}$$

$$Sh = \frac{h_D l}{D} \text{——宣乌特(Sherwood)准则}$$

$$St = \frac{Nu}{Re \cdot Pr} = \frac{h}{uc_p \rho} \text{——斯坦登(Stanton)准则}$$

$$St_D = \frac{Sh}{Re \cdot Sc} = \frac{h_D}{u} \text{——对流传质斯坦登准则}$$

主要注角符号：

f —— 流体(Fluid)

w —— 壁面(Wall)

c —— 临界(Critical)

e —— 当量，等效(Equivalent)

s —— 饱和(Saturation)

m —— 平均(Mean)

min —— 最小(Minimum)

max —— 最大(Maximum)

此外本书还使用基本符号做注角，如对流传热热阻 R_h 等。

目 录

基本符号表

绪论	1
小结	7
思考题与习题	8
第一章 导热理论基础	10
第一节 基本概念及傅里叶定律	10
第二节 热导率	13
第三节 导热微分方程式	18
第四节 导热过程的单值性条件	20
小结	24
思考题与习题	25
参考文献	26
第二章 稳态导热	28
第一节 通过平壁的导热	28
第二节 通过复合平壁的导热	34
第三节 具有内热源的平壁导热	36
第四节 通过圆筒壁的导热	36
第五节 通过肋壁的导热	43
第六节 通过接触面的导热	49
第七节 二维稳态导热	50
小结	52
思考题与习题	53
参考文献	56
第三章 非稳态导热	57
第一节 非稳态导热过程的类型和特点	57
第二节 无限大平壁的瞬态导热	58
第三节 半无限大物体的瞬态导热	69
第四节 其他形状物体的瞬态导热	72
第五节 周期性非稳态导热	77
小结	83
思考题与习题	84
参考文献	86

第四章 导热数值解法基础	87
第一节 建立离散方程的方法	87
第二节 稳态导热的数值计算	90
第三节 非稳态导热的数值计算	96
小结.....	103
思考题与习题.....	104
参考文献.....	105
第五章 对流传热分析.....	106
第一节 对流传热概述.....	106
第二节 对流传热微分方程组.....	109
第三节 边界层传热微分方程组.....	114
第四节 动量传递和热量传递的类比.....	124
第五节 相似理论基础.....	130
第六节 对流传热过程的数值求解方法简介.....	139
小结.....	145
思考题与习题.....	146
参考文献.....	149
第六章 单相流体对流传热.....	151
第一节 管内受迫对流传热.....	151
第二节 外掠圆管对流传热.....	164
第三节 自然对流传热.....	170
小结.....	180
思考题与习题.....	182
参考文献.....	187
第七章 凝结与沸腾传热.....	189
第一节 凝结传热.....	189
第二节 沸腾传热.....	199
第三节 热管.....	206
小结.....	207
思考题与习题.....	208
参考文献.....	209
第八章 热辐射的基本定律.....	211
第一节 基本概念.....	211
第二节 热辐射的基本定律.....	215
小结.....	226
思考题与习题.....	227
参考文献.....	229
第九章 辐射传热计算.....	231

第一节	黑表面间的辐射传热	231
第二节	灰表面间的辐射传热	235
第三节	角系数的确定方法	246
第四节	气体辐射	252
第五节	太阳辐射	261
小结		266
思考题与习题		267
参考文献		272
第十章	传热和换热器	273
第一节	通过肋壁的传热	273
第二节	复合传热时的传热计算	275
第三节	传热的强化和削弱	281
第四节	换热器的形式和基本构造	285
第五节	平均温度差	289
第六节	换热器计算	294
第七节	换热器性能评价简述	303
小结		304
思考题与习题		305
参考文献		308
第十一章	传质过程	309
第一节	传质及其基本定律	310
第二节	动量、热量、质量传递的类比	316
第三节	对流传质的准则关联式	319
第四节	液体蒸发时的传热传质	322
小结		325
思考题与习题		327
参考文献		328
附录		329
附录 1	单位换算表	329
附录 2	干空气的热物理性质 ($p=1.013\times10^5\text{Pa}$)	330
附录 3	饱和水的热物理性质	331
附录 4	干饱和水蒸气的热物理性质	332
附录 5	几种饱和液体的热物理性质	333
附录 6	几种油的热物理性质	334
附录 7	各种材料的热物理性质	335
附录 8	几种保温、耐火材料的热导率与温度的关系	337
附录 9	常用材料表面的法向发射率 ϵ_n	338
附录 10	不同材料表面的绝对粗糙度 k_s	338

附录 11 传热设备的 h 及 k 概略值 339

附录 12 污垢系数的参考值 ($\text{m}^2 \cdot \text{K}/\text{W}$) 339

附录 13 双曲函数表 340

附录 14 高斯误差补函数的一次积分值 341

附录 15 层流传热边界层方程的精确解 342

附录 16 传热学教学研讨会备忘录 346

绪 论

传热学是研究在温差作用下热量传递过程和传递速率的科学。

自然界和生产过程中，到处存在温度差，热量将自发地由高温物体传递到低温物体，热量传递（简称热传递）就成为一种极为普遍的物理现象。因此，传热学有着十分广泛的应用领域。就各类工业领域而言，诸如，锅炉和换热设备的设计以及为强化传热和节能而改进锅炉及其他换热设备的结构；化学工业生产中，为维持工艺流程的温度，要求研究特定的加热、冷却以及余热的回收技术；电子工业中解决集成电路或电子仪器的散热方法；机械制造工业测算和控制冷加工或热加工中工件的温度场；交通运输业在冻土地带修建铁路、公路；核能、航天等尖端技术中也都存在大量传热问题需要解决；太阳能、地热能、工业余热利用及其他可再生能源工程中高效能换热器的开发和设计等；应用传热学知识指导强化传热或削弱传热达到节能目的；其他如农业、生物、医学、地质、气象、环境保护等部门，无一不需要传热学。因此，传热学已是现代技术科学的主要技术基础学科之一。近几十年来，传热学的成果对各部门技术进步起了很大的促进作用，而传热规律的深入研究，又推动了学科的迅速发展。

随着国民经济的发展和人民生活水平的提高，我国建筑能耗与社会总能耗之比逐年上升，目前已经接近 1/3，其中供暖、空调、通风的能耗约占建筑能耗的 65%，建筑节能已成为我国实现节能减排目标的关键举措之一。在各种建筑围护结构材料、门窗、供热设备管道的保温材料等的研制、生产、施工及其热物理性质的测试、热损失的分析计算；热源和冷源设备的选择、配套和合理有效利用；供热通风空调及燃气产品的开发、设计和实验研究；各类供暖散热器和换热器的设计、选择和性能评价；建筑物的热工计算和环境保护等过程中，都需要应用传热学知识。因此，传热学是重要的专业基础课程之一。

热传递过程有时还伴随着由于物质浓度差引起的质量传递过程，即传质过程。如空调系统中，冷的喷淋水与空气的热质交换过程；湿空气参数的测量；蒸发式冷凝器中冷却水蒸发时的传热和传质；建筑围护结构中水分的转移过程；水果蔬菜等农产品的气调保鲜等等，都与传质密切相关。为此，本书在着重阐述传热问题之后，还以专门的一章，讨论由浓度差引起的质传递问题的基本规律和计算。

一、热传递的基本方式

为了由浅入深地认识和掌握热传递规律，先来分析一些常见的热传递现象。例如密实的房屋砖墙或混凝土墙在冬季的散热，整个过程如图 0-1 所示，可分为三段：首先热由室内空气以对流传热和墙与室内物体间的辐射传热方式传给墙内表面；再由墙内表面以固体导热方式传递到墙外表面；最后由墙外表面以空气对流传热和墙与周围物体间

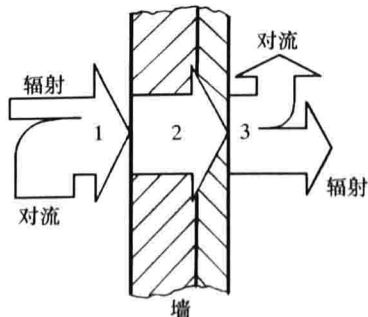


图 0-1 墙壁的散热

的辐射传热方式把热传递到室外环境。显然在其他条件不变时，室内外温度差越大，传递的热量也越多。又如，热水供暖散热器的热传递过程，热水先以对流传热方式向散热器壁内侧传递热量，再由导热方式通过散热器壁，然后散热器壁外侧以空气对流传热和壁与周围物体间的辐射传热方式将热量传给室内。从实例不难了解，热传递过程是由导热、热对流、热辐射三种基本热传递方式组合形成的。要了解传热过程的规律，就必须首先分别分析三种基本热传递方式。绪论将对这三种基本热传递方式做扼要解释，并给出它们的最基本的表达式，使读者对传热学的全貌和学习目的有一梗概认识。

1. 导热

导热又称热传导，是指物体各部分无相对位移或不同物体直接接触时依靠分子、原子及自由电子等微观粒子热运动而进行的热量传递现象，导热是物质的属性，导热过程可以在固体、液体及气体中发生。但在引力场下，单纯的导热一般只发生在密实的固体中，因为在有温差时，液体和气体中可能出现热对流而难以维持单纯的导热。

大平壁导热是导热的典型问题之一。由前述墙壁的导热过程看出，平壁导热量与壁两侧表面的温度差和平壁面积成正比；与壁厚成反比；并与材料的导热性能有关。因此，通过平壁的导热量计算式是：

$$\Phi=\frac{\lambda}{\delta}\Delta tA \quad (\text{W}) \tag{0-1a}$$

或热流密度（每平方米的热流量）

$$q=\frac{\lambda}{\delta}\Delta t \quad (\text{W/m}^2) \tag{0-1b}$$

式中 A ——壁面积， m^2 ；
 δ ——壁厚， m ；
 Δt ——壁两侧表面的温差， $\Delta t=t_{w1}-t_{w2},^{\circ}\text{C}$ ；

λ ——热导率或称导热系数，其意义是指单位厚度的物体具有单位温度差时，在它的单位面积上每单位时间的导热量，它的国际单位是 $\text{W}/(\text{m}\cdot\text{K})$ 。它表示材料导热能力的大小。热导率一般由实验测定，例如，普通混凝土 $\lambda=0.75\sim 0.8\text{W}/(\text{m}\cdot\text{K})$ ，纯铜的 λ 将近 $400\text{W}/(\text{m}\cdot\text{K})$ 。

在传热学中，常用电学欧姆定律的形式（电流=电位差/电阻）来分析热传递过程中热量与温度差的关系。即把热流密度的计算式改写为欧姆定律的形式。

热流密度：
$$q=\text{温度差}\Delta t/\text{热阻}R_{\lambda} \quad (\text{W/m}^2) \tag{0-1c}$$

与欧姆定律对照，可以看出热流相当于电流；温度差相当于电位差；而热阻相当于电阻。于是，得到一个在传热学中非常重要而且实用的概念——热阻。对不同的热传递方式，热阻 R_{λ} 的具体表达式将不一样。以平壁为例改写式（0-1b），得

$$q=\frac{\Delta t}{\delta/\lambda}=\frac{\Delta t}{R_{\lambda}} \quad (\text{W/m}^2) \tag{0-2}$$

用 R_{λ} 表示导热热阻，则平壁导热热阻为 $R_{\lambda}=\delta/\lambda, \text{m}^2\cdot\text{K}/\text{W}$ 。可见平壁导热热阻与壁厚成正比，而与热导率成反比。 R_{λ} 大，则 q 小。利用式（0-1a），对于面积为 $A \text{ m}^2$ 的平壁，则热阻为 $\delta/(\lambda\cdot A), \text{K}/\text{W}$ 。不同情况下的导热过程，导热的表达式亦不同。本书将就几种典型情况下导热的宏观规律及其计算方法分章论述。

2. 热对流

在本科阶段所学习的传热学中,一般都将流体看做是连续的物质。那么,在流体内部,仅依靠流体的宏观运动传递热量的现象称为热对流,是热传递的另一种基本方式。设热对流过程中,质流密度为 m [单位时间内,在垂直于流动方向上单位面积的质量流量,单位 $\text{kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$]、定压比热容为 c_p [$\text{J}/(\text{kg} \cdot \text{K})$] 的流体沿流线由温度 t_1 变化至 t_2 ,则此热对流传递的热流密度应为:

$$q = mc_p(t_2 - t_1) \quad (\text{W}/\text{m}^2) \quad (0-3)$$

值得注意的是,上述热对流传递的热流密度中,所谓的单位面积是针对垂直于流动方向的面积,并且,该流体与周围流体以及流体内部存在相互混合或通过分子、原子等微观粒子热运动而进行的热传递过程。注意,这里所说的热对流是发生在流体内部。

但是,工程上经常涉及的传热现象往往是流体在与它温度不同的壁面上流动时,两者间产生的热量交换,传热学把这一热量传递过程称为“对流传热”过程。因为对流传热过程的热量传递涉及诸多影响因素,是一个复杂的传热过程,因此它已不再属于热传递的基本方式,这种情况下可采用对流传热计算式^①计算热流密度——通称“牛顿冷却公式”,即:

$$q = h(t_w - t_f) = h\Delta t \quad (\text{W}/\text{m}^2) \quad (0-4a)$$

$$\text{或面积 } A \text{ m}^2 \text{ 上的热流量: } \Phi = h(t_w - t_f)A = h\Delta t A \quad (\text{W}) \quad (0-4b)$$

式中 t_w ——壁表面温度, $^{\circ}\text{C}$;

t_f ——流体温度, $^{\circ}\text{C}$;

Δt ——壁表面与流体间温度差, $^{\circ}\text{C}$;

h ——表面传热系数,其意义是指单位面积上,流体与壁之间在单位温差下及单位时间内所能传递的热量。常用的表面传热系数单位是 $\text{J}/(\text{m}^2 \cdot \text{s} \cdot \text{K})$ 或 $\text{W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$,注意,这里的单位面积是针对对流传热所涉及的壁表面。 h 的大小表达了对流传热过程的强弱程度。例如供暖热水散热器外壁和空气间的表面传热系数约为 $1 \sim 10 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$,而它的内壁和热水之间的 h 则可达数千 $\text{W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$ 。附录 11 列有一些典型条件下换热设备 h 的概略范围,供读者参考。由于 h 受制于多项影响因素,故研究对流传热问题的关键是如何确定表面传热系数。本书将对一些工程中常见的典型对流传热过程进行分析,并提供理论解或实验解。

按式 (0-2) 式提出的热阻概念,改写式 (0-4a) 得

$$q = \frac{\Delta t}{1/h} = \frac{\Delta t}{R_h} \quad (\text{W}/\text{m}^2) \quad (0-4c)$$

式中, $R_h = 1/h$ 即为单位壁表面积上的对流传热热阻, ($\text{m}^2 \cdot \text{K}/\text{W}$), 利用式 (0-4b), 则表面积为 $A \text{ m}^2$ 的壁面上的对流传热热阻为 $1/(h \cdot A)$, 单位是 K/W 。

3. 热辐射

导热或热对流都是以冷、热物体的直接接触来传递热量,热辐射则不同,它依靠物体表面对外发射可见和不可见的射线(电磁波,或者说光子)传递热量。物体表面每单位时

^① 1701 年牛顿在分析热物体被流经其表面的冷流体冷却的现象时,提出了物体表面温度随时间变化率正比于温差的表达式,后人在此基础上改写为式(0-4a),为纪念牛顿的原始贡献,称之为牛顿冷却公式。

间、单位面积对外辐射的热量称为辐射力，用 E 表示，它的常用单位是 $\text{J}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ 或 W/m^2 ，其大小与物体表面性质及温度有关。对于黑体（一种理想的热辐射表面），理论和实验证实，它的辐射力 E_b 与表面热力学温度的 4 次方成比例，即斯蒂芬—玻尔茨曼定律：

$$\begin{aligned} E_b &= \sigma_b T^4 \quad (\text{W}/\text{m}^2) \\ \Phi &= \sigma_b T^4 A \quad (\text{W}) \end{aligned} \quad (0-5a)$$

上式亦可写作：

$$\begin{aligned} E_b &= C_b \left(\frac{T}{100} \right)^4 \quad (\text{W}/\text{m}^2) \\ \Phi &= C_b \left(\frac{T}{100} \right)^4 A \quad (\text{W}) \end{aligned} \quad (0-5b)$$

式中 E_b ——黑体辐射力， W/m^2 ；

σ_b ——斯蒂芬—玻尔茨曼常量，亦称黑体辐射常数， $\sigma_b = 5.67 \times 10^{-8} \text{W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K}^4)$ ；

C_b ——黑体辐射系数， $C_b = 5.67 \text{W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K}^4)$ ；

T ——黑体表面的热力学温度， K 。

一切实际物体的辐射力都低于同温度下黑体的辐射力，等于

$$\begin{aligned} E &= \epsilon \sigma_b T^4 \quad (\text{W}/\text{m}^2) \\ E &= \epsilon C_b \left(\frac{T}{100} \right)^4 \quad (\text{W}/\text{m}^2) \end{aligned} \quad (0-5c)$$

式中 ϵ ——实际物体表面的发射率，也称黑度，其值处于 $0 \sim 1$ 之间。

物体间靠热辐射进行的热量传递称为辐射传热。它的特点是：在热辐射过程中伴随着能量形式的转换（物体热力学能 $\rightarrow$ 电磁波能 $\rightarrow$ 物体热力学能）；不需要冷热物体直接接触；不论温度高低，物体都在不停地相互发射电磁波能，相互辐射能量。高温物体辐射给低温物体的能量大于低温物体向高温物体辐射的能量，总的结果是热由高温物体传到低温物体。

两个无限大的平行平面间的热辐射是最简单的辐射传热问题。设它的两表面热力学温度分别为 T_1 和 T_2 ，且 $T_1 > T_2$ ，则单位面积高温表面在单位时间内以辐射方式传递给低温表面的辐射传热热流密度的计算式是：

$$q = C_{1,2} \left[\left(\frac{T_1}{100} \right)^4 - \left(\frac{T_2}{100} \right)^4 \right] \quad (\text{W}/\text{m}^2) \quad (0-5d)$$

$$\text{或 } A \text{m}^2 \text{ 上的辐射热流量 } \Phi = C_{1,2} \left[\left(\frac{T_1}{100} \right)^4 - \left(\frac{T_2}{100} \right)^4 \right] A \quad (\text{W}) \quad (0-5e)$$

式中 $C_{1,2}$ 称为 1 和 2 两表面间的系统辐射系数，它取决于辐射表面材料性质及状态，其值在 $0 \sim 5.67$ 之间。关于辐射传热热阻的表述，将在第九章讨论。本书的辐射传热部分将论述热辐射的宏观规律及若干典型条件下的辐射传热计算方法。

二、传热过程

工程中经常遇到冷热两种流体隔着固体壁面的传热，即热量从壁一侧的高温流体通过壁传给另一侧低温流体的过程，称为传热过程。在初步了解前述基本热传递方式后，即可导出传热过程的基本计算式。设有一大平壁，面积为 A ；它的一侧为温度 t_n 的热流体，

另一侧为温度 t_{f2} 的冷流体；两侧的表面传热系数分别为 h_1 及 h_2 ；壁面温度则分别为 t_{w1} 和 t_{w2} ；壁的材料热导率为 λ ；厚度为 δ ，如图 0-2 所示。又设传热过程不随时间变化，即各处温度及传热量不随时间改变，传热过程处于稳态；壁的长和宽均远大于它的厚度，可认为热量传递方向与壁面处的等温面垂直（可见，热量传递即热流在空间上是个矢量）。若将该传热过程中各处的温度描绘在 $t-x$ 坐标图上，将如图中的曲线所示，即该传热过程的温度分布线。按图 0-1 的分析方法，整个传热过程分三段，分别用下列三式表达。

热量由热流体以对流传热方式传给壁左侧，按式 (0-4)，其热流密度为：

$$q = h_1 (t_{f1} - t_{w1})$$

该热量又以导热方式通过壁，按式 (0-1)，即

$$q = \frac{\lambda}{\delta} (t_{w1} - t_{w2})$$

它再由壁右侧以对流传热方式传给冷流体，即

$$q = h_2 (t_{w2} - t_{f2})$$

在稳态传热情况下，以上三式的热流密度 q 相等，把它们改写为：

$$\left. \begin{aligned} t_{f1} - t_{w1} &= q/h_1 \\ t_{w1} - t_{w2} &= q/\left(\frac{\lambda}{\delta}\right) \\ t_{w2} - t_{f2} &= q/h_2 \end{aligned} \right\}$$

三式相加，消去 t_{w1} 及 t_{w2} ，整理后得该壁传热热流密度

$$\begin{aligned} q &= \frac{1}{\frac{1}{h_1} + \frac{\delta}{\lambda} + \frac{1}{h_2}} (t_{f1} - t_{f2}) \\ &= k (t_{f1} - t_{f2}) \quad (\text{W/m}^2) \end{aligned} \quad (0-6a)$$

对 Am^2 的平壁，传热热流量 Φ 则为：

$$\Phi = qA = k(t_{f1} - t_{f2})A \quad (\text{W}) \quad (0-6b)$$

式中

$$k = \frac{1}{\frac{1}{h_1} + \frac{\delta}{\lambda} + \frac{1}{h_2}} \quad [\text{W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})] \quad (0-7)$$

k 称为传热系数，它表明单位时间、单位壁面积上，冷热流体间温差为 1K 时所传递的热量， k 的单位是 $\text{J}/(\text{m}^2 \cdot \text{s} \cdot \text{K})$ 或 $\text{W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$ ，故 k 值的大小反映了传热过程的强弱。为理解它的意义，按热阻形式改写式(0-6a)，得

$$q = \frac{t_{f1} - t_{f2}}{\frac{1}{k}} = \frac{\Delta t}{R_k} \quad (\text{W/m}^2) \quad (0-6c)$$

R_k 即为平壁单位面积传热热阻：

$$R_k = \frac{1}{k} = \frac{1}{h_1} + \frac{\delta}{\lambda} + \frac{1}{h_2} \quad (\text{m}^2 \cdot \text{K/W}) \quad (0-8)$$

可见传热过程的热阻等于冷、热流体与壁之间的对流传热热阻及壁的导热热阻之和，相当

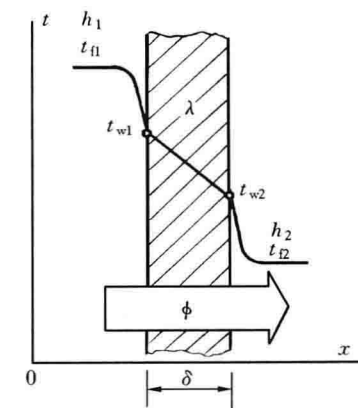


图 0-2 两流体间的热传递过程