118

计算传热学

郭宽良 等编著

中国科学技术大学出版社

国家教委工程热物理专业教材委员会推荐教材

计 算 传 热 学

郭宽良　孔祥谦　陈善年　编著

中国科学技术大学出版社
1988 · 合肥

内 容 简 介

计算传热学是近十几年来才发展形成的一个传热学分支学科，本书系工程热物理专业教材规划书目之一，并由委员会委托浙江大学陈越南副教授审订。

本书较全面和系统地讨论了有关导热、对流和辐射换热问题的基本的和最新实用的数值方法（包括有限差分、有限元和边界元法等），内容分基本和拓展两部分，有较大的适应面，在讨论数值方法时，重概念、重应用，在书末还给出了几个常用的计算机程序。

本书可作为高等院校的动力、化工、机械、制冷、运输、航空航天、冶金、食品、能源、建筑、热物理等专业的大学生和研究生的教科书，也是有关教师和科技人员的有价值的参考书。

计 算 传 热 学

郭宽良　孔祥谦　陈善年　编著

*

中国科学技术大学出版社出版

（安徽省合肥市金寨路96号）

中国科学院开封印刷厂印刷

安徽省新华书店发行

*

开本：787×1092／16　印张：21.5　字数：492千

1988年12月第 1 版　1988年12月第 1 次印刷

印数：1—3000

ISBN 7-312-00038-X/O · 11　定价：4.30元

序

本书是国家教委工程热物理专业教材委员会推荐的教材，供本科生和研究生使用.

大家知道，和物理学及其它工程科学一样，传热现象的研究不外乎采用数学物理(数理分析)和实验物理两种方法。虽然早在1822年，法国数学家傅里叶在其《热的分析理论》一书中就完全采用了数理分析方法研究热传导问题，但长期以来，基于相似理论的实验方法却一直在传热学研究中占有统治地位. 这是因为许多实际传热问题都非常复杂(不规则的几何形状；物性随温度变化；按特殊规律变化的边界条件等)，纯数理方法尚无能为力.

近十五年来，借助于计算机技术和计算方法的新成就，利用数值计算方法研究传热问题得到了很快的发展，并由此而形成了传热学的一个新分支——计算传热学. 许多实践经验表明，利用数值计算方法研究传热问题是十分有效的；实际上，可把这种方法看作是进行传热研究的一种特殊的“实验”手段. 目前，利用数值方法研究复杂的传热问题，已有许多成功的例子. 数值计算和实验研究相结合，是最有效和经济的传热研究的手段：研究或设计人员可根据数值计算所预示的结果来选择和改进实验研究方案，从而大大缩短实验周期和减少实验工作量. 当然，为得到符合实际情况的计算结果，首先必须建立基于对物理现象正确认识的数学物理模型以及具有可靠的物性参数.

近年来，美、苏等国出版的传热学教材中都增加了用数值方法分析传热过程的内容，但一般都局限于固体导热问题. 本书是一本系统而较全面地论述利用数值方法研究、分析传热现象的教材，编著者在内容的选择和编排上充分考虑了学习者已有的有关工程热力学、传热学、流体力学和高等数学方面的基础知识，使学习时能顺利地衔接；在叙述上重视对传热现象的物理剖析和清晰地阐明物理概念，在此基础上建立物理模型和引出控制方程，并通过实例使学习者加深对所述内容的理解和逐步掌握正确的解题步骤和方法. 本书的取材不仅吸收了国外同类教科书的主要内容，也包含了我国（特别是编著者自己）的科研成果，因此，可以认为，本书基本上反映了当前国内外计算传热学的发展和水平.

本书作者郭宽良(中国科学技术大学)、孔祥谦(哈尔滨船舶工程学院)和陈善年(南京工学院）三位同志很早就在各自任教的学校进行计算传热学的科研和教学工作，他们不仅积累了丰富的教学经验，而且取得了丰硕的科研成果. 本书也是他们多年来在计算传热学这个新分支学科领域内辛勤劳动的结晶. 由于本书的内容分基本部分和拓展部分，故可以适应不同层次的需要：它既是本科生和研究生的教科书，也是科研和工程技术人员有益的参考书.

葛新石

1987年10月于合肥

前　言

随着传热学研究的深入、计算机技术和计算方法的发展，逐渐形成了传热学的一个分支学科—— 计算传热学. 至今，她虽只有十多年的历史，却已显示了巨大的生命力：数值计算和实验的有机结合将成为解决各类传热问题的最有效的途径.

近些年来，我国的计算传热学研究得到了异常迅速的发展，其突出表现是：成立了全国工程热物理学会传热传质学分会下属的计算传热学科组；召开了两次全国性的计算传热学学术报告会；出版了多种有关的专著和译著；更多的院校开设了计算传热学课程；多种多样的学术交流活动更加频繁.

本书是为顺应国内外计算传热学发展的总趋势，普及推广计算传热学现有的研究成果，满足当前人才培养的需要，并进一步推动计算传热学向前发展而编著的，同时又是作者多年来科研和教学经验体会的综合.

在编著本书时，作者注意到以下几点：

1. 兼顾到理工科院校的特点，使本书有较大的适应面.

2. 考虑到本科大学生和研究生，工程技术人员和科研人员的不同需要，内容分基本部分和拓展部分(带 * 的章节为拓展部分)，适合于课堂教学和自学时对内容的取舍.

3. 在阐述基本数值方法时，重概念，重应用，由浅入深，辅以实例，给出必要的程序段，易于理解和掌握.

4. 给出传热研究中常用的几个计算机程序及其说明，可供使用和结合自己所研究的实际传热问题作进一步发展和创新.

本书的第 2，4.4，4.5，6，7，9.1，11.6 章和附录Ⅴ由中国科学技术大学郭宽良编写；第 1，5，8，10 章和附录Ⅰ—Ⅳ由哈尔滨船舶工程学院孔祥谦编写；第 3，4.1—4.3，9.2，9.3，11.1—11.5 章和附录Ⅵ由南京工学院陈善年编写. 作者之间虽有上述分工，但和谐的合作，坦诚的讨论，使每个章节都浸透着集体的劳动. 1986年在全国的一次讨论会上，曾对本教材的内容进行了试讲，并得到了充分的肯定和热情的鼓励. 在此基础上，进行了正式的修订.

在完成本书的过程中，作者首先要感谢全国工程热物理专业教材委员会对本书的推荐；对浙江大学陈越南副教授仔细而认真的审定本书稿和提出的宝贵意见予以致谢；最后还要感谢中国科学技术大学工程热物理系系主任葛新石教授对本书给予的热情帮助.

限于作者水平，书中难免有错误和不妥之处，恳望批评和指正！

作　者

1987年11月

符 号 表

A	对流-扩散系数；面积
a	离散化方程中的系数；导温(或热扩散)系数
B	对流-扩散系数
b	离散化方程中的常数项
C	常数；$\equiv \rho c$ (容积比热)
c	比热
D	扩散的传导性；求解区域
d	压力差项的系数
E	自身辐射力；
F	通过控制容积面的流率；辐射角系数
$\mathbf{F}$	单位体积的沏体力
f	长度比；加权因子
G	被积函数；投射辐射力
h	比热焓；空间步长
I	在 x 方向上的结点总数；辐射强度
i	结点的 x 方向标号
$\mathbf{i}$	x 坐标的单位向量
J	总流量；在 y 方向上的结点总数；有效辐射力
$\lvert J \rvert$	雅可比行列式
j	结点的 y 方向标号
$\mathbf{j}$	y 坐标的单位向量
k	导热系数
$\mathbf{k}$	z 坐标的单位向量
L	微分算子
l	线元长度
M	$\equiv (\mathrm{d}^2\phi/\mathrm{d}x^2)$；在 x 方向上的结点总数
m	$\equiv (\mathrm{d}\phi/\mathrm{d}x)$
m_l	化学组分 l 的质量比数
N	结点数；在 y 方向上的结点总数；形状函数
n	外法线方向
$\mathbf{n}$	外法线单位向量
P	空间的任意点；贝克来数(Pe)；TDMA 的系数
p	压力
p'	压力校正值

Q	TDMA 的系数；热流量
q	热流密度或热流
q_v	单位体积的热产生率
q_r	辐射热流密度向量
R	圆管半径；微分方程的余量；表面的反射率
r	极坐标系的径向坐标
Δr	控制容积的径向宽度
$\boldsymbol{r}$	空间位置或线段长度向量
S	源项；最小二乘法的误差
s	两相界面位置
T	温度
T_f	环境温度；流体温度
t	时间
Δt	时间增量或时间步长
U	无量纲的 x 方向速度
u	x 方向速度
$\boldsymbol{u}$	速度向量
u^*	基于试探压力的 x 方向速度
$\hat{u}$	x 方向的假速度
V	无量纲的 y 方向速度
$\boldsymbol{v}$	速度向量
v	y 方向速度
$v^*, \hat{v}$	和 $u^*, \hat{u}$ 类似
W	加权函数
w	z 方向速度
$w^*, \hat{w}$	和 $u^*, \hat{u}$ 类似
X	无量纲的 x 坐标；无量纲坐标；脉冲式敏感系数
x	x 坐标
Δx	控制容积的 x 方向宽度
Y	无量纲的 y 坐标
y	y 坐标
Δy	控制容积的 y 方向宽度
Z	阶梯式敏感系数
z	z 坐标
Δz	控制容积的 z 方向宽度
α	对流换热系数；吸收率
β	倾斜角
γ	梯形肋倾斜角
δ	狄拉克函数；变分符号

$\delta_x,\delta_y,\delta_z$	两结点在 x，y，z 方向上的间距
ε	发射率
η	相似参数；局部坐标
θ	无量纲温度；周向坐标；倾斜角
λ	第二粘度；相变潜热
μ	动力粘度
μ_l	流体的层流（分子）粘度
μ_t	流体的湍流（微团）粘度
ν	运动粘度，$\equiv\mu/\rho$
ξ	局部坐标
ρ	密度
σ	斯蒂芬-玻尔兹曼常数
τ	无量纲的时间
ϕ	通用变量；任意函数；倾斜角
Φ	粘性耗散函数
ψ	流函数；任意函数
Ψ	无量纲的流函数
ω	松弛因子；数值积分中的权数；涡量；立体角
Ω	无量纲的涡量；求解区域
Γ	扩散系数；求解域的边界
Γ_l	化学组分 l 的扩散系数

下标

B	边界点
b	控制容积的底面；流体的截面混合平均
e	控制容积的东面
I	内部结点
m	平均值
n	控制容积的北面
nb	邻近结点
P	所讨论的结点
s	控制容积的南面
t	控制容积的顶面
w	控制容积的西面；在壁面上

上标

1	因变量的新值（$t+\Delta t$ 的）
0	因变量的旧值（t 的）
*	共轭符号；前次迭代值；试探值

特殊符号

TDMA	三对角线矩阵解法
$[K]$	矩阵 K
$\{A\}$	向量 A
$[[A,B,C,\cdots]]$	取 A, B, C, … 中最大者
SOR	连续超松弛迭代
SIMPLE	有压力方程的半隐式方法
Re	雷诺数
Ra	瑞利数
Pr	普朗特数
Nu	努塞尔数
Gr	格拉晓夫数
Pe	贝克来数

目　次

第一章 绪 论

1.1传热问题的数值计算

计算传热学是研究用数值方法求解传热问题的一门科学．它可以理解为：根据所需求解的实际问题建立合理的数学模型，利用离散化处理的数值方法，再通过用计算机高级语言编制的程序，以电子数字计算机作为工具来求解传热问题的，与工程实践密切结合的一门应用基础科学．它是传热学学科领域中的一个分支，也是计算物理领域中的一个分支，与计算流体力学，计算燃烧学等互相依存，互相促进．有时，它称为传热的数值方法，数计传热学或传热学计算机分析等．

现代工程技术，诸如能源、机械、动力、化工、冶金、交通、空调、制冷、电子、航天、建筑、材料、食品等专业领域中，传热学都起着愈来愈重要的作用．近十余年来，计算机技术和计算方法的发展，大大地推动了计算传热学的进展．计算传热学的主要优点是：能以较少的费用和较短的时间预示出有实用意义的研究结果．对投资大及周期长的实验研究课题来说，这个优点更为突出．当然，计算传热学不可能全部代替传热学的实验研究．在还未建立起微分方程式的地方，实验传热学是唯一能够给出研究结果的重要方法．事实上，计算传热学与实验传热学在很多地方是相辅相成的．大量成功的算例表明，数值计算确实是一种研究和解决复杂实际传热问题的有效方法．将计算传热学和实验传热学相结合，不仅有助于实验方案的设计和改进，减少实验工作量和缩短实验周期，而且推动和促进了实验传热学的研究，并加深对物理概念和实验机理的理解．同样，数值计算与解析求解相结合也是一种行之有效的工作方法．因此，在计算机辅助下的数值分析方法是一种有效和经济的传热学研究手段．

1.2计算传热学的发展

长期以来，传热学是一门以实验为主的科学．相似理论的成功应用使传热学理论得到了迅速的发展；另一方面，数学物理方法也被成功地应用到传热学领域中来．从质量、动量和能量守恒定律出发，在微元体或控制体上形成微分方程或积分方程．这个工作在三十年代已接近成熟，但是这些方程在定解条件下的求解却是比较困难的．解析解法诸如分离变量法、积分方程的近似解法、运算微积、特殊函数、正交函数理论与级数解以及摄动法等近似方法，已对一些特定的传热问题求得了正确的结果，并将继续对传热学理论的发展作出贡献．

由于能够获得解析解的范围太窄，近似求解方法又存在较大的局限性，而基于相似理论所要求的完全模化又不易实现，并且实验测量也会遇到很多困难，有时甚至是不可能的，因此，为了实现对多变量非线性复杂边界问题求解的目的，就产生了数值求解方

法．以有限差分法为代表的数值计算和图解法曾得到了发展，并使一部份工程课题得到了解决，但数值解法的主要缺点是计算工作量太大．本世纪三十年代，由于缺乏计算工具，所以这种方法进展缓慢．随着计算机技术的迅速发展，给传热学问题的数值计算开辟了广阔的前景．在国外，传热数值计算的较大发展是从七十年代开始的．

计算传热学的发展基于如下三个条件：（1）建立传热问题的数学物理模型；（2）数值计算中各种有效的离散化方法；（3）计算机工具．

近代数值方法发展的明显特征，是与计算机的发展密切相关．例如，六十年代的数值方法侧重于求解常微分方程组，对于偏微分方程的传热问题则求助于相似变换或分离变量等方法把它转变成常微分方程，然后用龙格-库塔积分法数值求解常微分方程。这种方法的优点是节省计算机内存和机时，缺点是解题的功能较差，况且很多偏微分方程问题并不总是能转变成常微分方程的。接着就是有限差分法的应用。因为它能对一切偏微分方程或积分方程求解，所以到现在为止还是一种最通用的方法．它的缺点是对复杂区域和边界条件的适应性较差，这就导致了有限元法的发展。有限元法以其适应于求解复杂边界问题而著称，但它的计算过程较复杂，要占用较多的计算机内存和机时，从某种程度上说，这又促进了计算机向高速度和大内存的方向发展．

有限差分法、有限元法、有限容积法和有限分析法等可以统称为有限区域法．因为这些方法都是把求解区域分成子域，然后在子域中得到离散的线性代数方程，最后求解整体的线性代数方程组。近代的数值计算方法包括了形式多样的有限区域法和新兴的边界元法，或者是它们之间的结合，或者是数值法与解析法的结合等等。

近年来，由于微型计算机的迅速完善和普及，很多课题已逐步转移到微机上来运行。微机的内存虽小，但它拥有几乎无限的外存。随着微机内存与外存间数据传递功能的增强，现在像有限元法等较为复杂的程序也可在微机上进行中等规模工程问题的计算。这样对计算方法和程序编制又提出了新的要求。

文献[1]代表了六十年代末计算传热学的水平，文献［2—5］则反映了七十年代和八十年代初期的研究成果。在国外，这些都是比较流行的研究生教材或参考书。在国内，则刚公开发行计算传热学教材[6,7]，各高等学校大都处于还未成熟的自编自用的探索阶段。

目前，基于有限差分法和有限元法[1-12]的密实物体导热问题的数值计算已经比较成熟。这方面的工作正向变物性问题、相变导热问题、导热反问题、热应力以及含湿多孔体传热传质问题的纵深发展。

对流换热问题的数值求解要比导热问题更加复杂[1-5,7-9]。最初的尝试是建立了边界层的近似数学物理模型，并且用相似变量求解取得了很大的成功。目前已经发展到带有回流问题的完全纳维-斯托克斯方程的求解，但其中的对流项和压力梯度项在计算中都会带来迭代不易收敛的困难。为了消除原始变量（指压力和速度变量）法中压力梯度项造成的计算困难，又出现了流函数-涡量法、速度-涡量法和流函数双调和方程法等方法。边界层流动问题是抛物线型方程，可用推进积分求解，而回流问题则是椭圆型方程，求解较为复杂。此外，随着 Re 数的增大，数值计算的难度也不断增大，而湍流模型到现在还没有十分成熟。

基于积分方程求解的边界单元法[13-17]是目前开始流行的又一种数值离散方法。它

在导热、热应力和对流换热问题的求解中都已初露头角，并以具有降维的特性而著称，对于反问题形式的求解更能显示出它的优越性。它以占用较少的计算机内存和机时但能获得较高的计算精度而受到各个科学技术领域的重视。当然，这种方法还有待进一步的发展和完善。

基于概率统计随机模拟的蒙特卡洛法已经在辐射换热和导热的数值计算中取得应用[18-20]。它的优点是方法简单，占用计算机内存少；缺点是计算耗费的机时较多和得到的精度较低。由于它能数值模拟随机过程，因此对某些复杂问题的求解有其特殊的适应性。

3.1本书的主要内容和学习方法

编著者希望本书能够在广度和深度上成为具有适应面较宽的，可作为读者入门和提高的一本教材。本书的主要内容偏重于导热和对流换热问题的数值求解，并且包括多种实用的数值方法；在辐射换热方面只作较少的介绍。

本书第一章是课程性质和学习方法的介绍；第二、三章是数值方法的理论基础准备，对全书有指导和总结的意义；第四、五、六章是对导热问题数值计算的具体展开；第七、八、九章是对流换热问题的数值计算理论基础和具体方法；第十章对辐射换热计算作一简要介绍；第十一章介绍几个有实用价值的计算机程序；最后，在附录中对部份数学推导和计算方法作了通俗的介绍，对数学不太熟悉的读者可资利用。

传热学或工程传热学是学习本书的基础和先行课程。凡是在传热学基本教材中已经介绍过的定义、定律和方程，本书将直接利用这些结果或只作概括的复习。此外，还要较多地应用流体力学、数学物理方法、计算方法和计算机算法语言等知识。本书将遵照由浅入深、循序渐进的原则作为读者对计算传热学入门的向导。

本教材的内容将分成基本和拓展两部份。对成熟的基本数值方法要讲深讲透，注意把细节说清楚，把方法讲明白，并辅以一定的算例和计算机程序，使读者学了会用，真正取得效益。在拓展部份的章节上打有 * 号，这部份内容或者是不够成熟，或者是难度较大，所以不宜展开过多，可作为读者开扩眼界或供研究生参考和提高之用。

学习数值计算方法应该加强实践，也就是现在教学法中强调的精讲多练。如果对学习内容感到抽象不好理解的话，经过亲自动手计算的数值实践就会觉得不抽象了；如果认为内容都已理解而不作计算实践，将不能真正掌握计算过程中的技巧和细节。

对于本书给出的或者是已有的传热问题计算机程序，一是要切实搞清程序中所用的数值方法；二是要学会正确使用并不断地发展与创新。正确的数值方法是成功地进行数值求解的核心与关键，只有吃透了数值方法，才能正确使用程序并得到物理上的真实结果。此外，迄今为止尚没有一个能解决所有传热问题的通用程序（这也许是不可能的）。即使功能较强的程序也是有其局限性的，更不是一成不变的。它将随着物理模型的进一步完善，数值方法的发展以及计算机技术的提高而有所前进。

所以，只有深入学习，反复使用，不断创新，才能推动计算传热学的研究工作向前发展。