计算传热学的近代进展

陶文铨 著

科学出版社

中国科学院科学出版基金资助出版

计算传热学的近代进展

陶文铨 著

科学出版社

2000

内 容 简 介

本书参考国内外60余种刊登流动与传热问题数值计算方法及应用的权威杂志共900余篇论文，结合作者自己的研究成果与长期从事研究生教学的体会，介绍下列八个方面：(1)网格生成技术；(2)对流项差分格式的研究进展；(3)压力与速度耦合关系的处理方法的新发展；(4)边界条件的数值处理方法；(5)加速代数方程求解收敛速度的技术；(6)基准解及数值误差的估计；(7)计算传热学的大型商用软件及因特网上的资源；(8)近年来新发展起来的数值方法介绍。对这10余年来在计算传热学的各个领域中发展起来的每一种新方法，本书一般都选择其中一种方案作较透彻的介绍，然后扼要地说明其他方法的特点，使读者能通过一种方案的学习了解该类方法的实质，而又能对其他方案有概要的了解，便于读者通过自己的编程予以在计算机上实现。本书附录中还给出了非结构化网格等程序块，便于读者参考。

本书内容丰富，参考文献详尽。它不仅可作为研究生计算传热学课程的教材，而且对从事计算传热学与计算流体力学的科学技术工作者也是一本很好的参考书。

图书在版编目(CIP)数据

计算传热学的近代进展/陶文铨著. -北京：科学出版社，2000.6

ISBN 7-03-007593-5

Ⅰ.计… Ⅱ.陶… Ⅲ.传热计算-进展 Ⅳ.TK124

中国版本图书馆CIP数据核字(2000)第02197号

科学出版社 出版

北京东黄城根北街16号

邮政编码：100717

中国科学院印刷厂 印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2000年6月第 一 版 开本：787×1092 1/16

2000年6月第一次印刷 印张：31¼

印数：1—1 200 字数：726 000

定价：78.00元

(如有印装质量问题，我社负责调换〈科印〉)

前　言

随着计算机工业日新月异的发展，在过去的10余年中数值计算方法及其在计算传热学中的应用也得到了飞速的进步，新的数值处理方法不断地问世，原有的方法则得到进一步的充实与完善。在应用于传热与流动问题数值计算的众多方法中，有限容积法由于其概念简明、实施过程简便、数值特性优良而获得了特别广泛的应用。根据不同的统计资料，世界上每年发表的计算传热学的论文中有50%～75%是用有限容积法完成的。1986年前的国内外关于有限容积法在计算传热学中应用的研究成果，已在Patankar教授的著作《传热与流体流动的数值计算》及拙作《数值传热学》中得到比较充分的反映，但1986年后国内外在计算传热学中的许多研究成果（如分析差分格式的规正变量图、通用二阶格式、SIMPLE算法向可压缩流体的推广、同位网格与非结构化网络、数值计算结果误差的估计，等等）则仍散见在大量的文献中，而没有一本专著来加以总结与归纳。从1995年春季起，著者开始在西安交通大学为博士研究生开出一门《计算传热学的近代进展》的课程，其目的在于使已经学习过上述两本教材的博士研究生（一般是在硕士阶段学的）能对近10余年中计算传热学的发展有一个比较清晰和详细的了解，以使他们的研究工作能更快地接近并赶上国际先进水平。本书就是在著者五次讲稿的基础上经扩充、完善而写成的。

在准备本书稿时，著者假定读者已经掌握了拙作《数值传热学》中的基本内容，并以该书为起点，将这10余年中有限容积法的研究成果按八个专题予以介绍。为此，著者对这10余年中刊载于60余种著名国际杂志和数种国内杂志上的计算传热学的论文作了检索，从中选出近千篇代表性的论文，将其研究成果（包括著者自己的工作）分别纳入到这八个专题中。书中还介绍了由著者及其学生们开发的一些新的数值方法的程序段。对于这10余年中新发展起来的不属于有限容积法范畴的一些新的数值方法，也辟出专章作了介绍，以使读者在深入掌握有限容积法的同时，对其它数值方法的发展也有所了解。根据作者在过去10余年中的教学与研究工作的经历，作数值模拟必须对数值方法"明其全而晰其微"：掌握方法的原理和特点固然重要，但真正要上机计算则必须对一个算法的各个细节都明白无误，否则差一个标点符号都会导致计算的失败，或者即使获得了某种结果，但它实际上并不是所要算法的结果。著者写作本书时努力按这种思想去组织材料，而附上一些参考程序段也正是为了对读者在实施算法时有所裨益。

本书可供研究生（特别是博士研究生）的计算传热学课作为教材或教学参考书，也可供具有一定的计算传热学基础及实践经验的科学、技术工作者深入学习及进一步钻研之用。

在过去10余年中，著者在数值计算方面的研究工作得到了教育部（国家教委）博士学科点专项基金及国家自然科学基金委员会的多次资助，其中与本书内容直接有关的有：

国家自然科学基金项目：

冲击冷却及其在玻璃钢化等技术部门中的应用（No. 5880275）；

有限空间自然对流换热的等价性及分歧与混沌现象研究(No. 59376280)；

非结构化网格及可控稳格式在工程传热数值计算中的应用(No. 59676019)。

国家博士学科点专项基金：

复杂几何系统中的对流换热的实验研究与数值分析(No. 8969821)；

叶片内冷结构的对流换热与流动阻力的研究(No. 9269805)；

对流项差分格式稳定性及有界性的研究(No. 98069835)。

著者在此深表谢意。

著者还要感谢曾经指导与帮助过自己的师友与学生。首先，著者怀着深深的敬意，感谢引导自己走上传热学研究道路的导师：上海交通大学杨世铭教授及美国工程院院士 Minnesota 大学 E M Sparrow 教授，他们的工作精神、研究风格及思维方法对著者的学术生涯产生了深远的影响，并且体现在本书的写作过程中。在 Minnesota 大学进修期间，著者从 Patankar 教授那儿学到了有限容积法这一有力的工具，使著者终身受益。在书稿准备过程中，著者得到了英国 CHAM 公司的吴振亚博士、英国计算动力学公司的罗建扬博士、美国 FLUENT 公司的戴毅博士、美国 Florida A & M 大学-Florida 州立大学的陈景仁教授、美国 Florida 大学的史维教授、美国工程科学公司的尚欢民博士、美国 Bristol 压缩机公司的辛荣昌博士及西安交通大学能源与动力工程学院席光教授、何雅玲副教授的许多帮助。著者还特别要提到的是在过去 10 年中所指导过的博士研究生们，他们是杨沫教授、李沛文博士、王秋旺副教授、赵长颖博士、魏建国高工、王良璧副教授、刘继平博士、林明杰博士、倪明玖博士、陈民博士、苑中显副教授、宇波博士和聂建虎博士。正是他们在读期间的出色工作及所完成的学位论文丰富了本书的内容；同时在本书的写作过程中又从不同的角度给著者提供了帮助。例如，本书所附的非结构化网格的生成与求解的程序是林明杰、宇波博士所完成的；SCSD 格式是倪明玖博士所提出的；多面法生成网格的程序是由王良璧博士完成的，他还为著者拟写了 2-4 节的初稿；关于一般非均分网格上 QUICK 格式的表述方式是由杨沫博士完成的；处理出口边界条件的局部质量守恒方法及其实验是由李沛文博士完成的，等等。著者的在读博士研究生李增耀、徐明海、邓斌、张东升、刘星、张华俊等，也都对书稿的顺利完成作出过努力。在此一并表示谢意。

本书的准备与写作过程历时三年多，正好是著者担任西安交通大学能源与动力工程学院院长的这三年。每周的工作日除了必须的教学工作以外，主要时间都用在处理学院行政事务上，本书的资料消化及全部写作过程都是利用业余时间完成的。因此这对著者来说不能不是一个十分艰苦的写作历程。正是由于上面所鸣谢的许多师友、同事、学生的帮助以及我家人的全力支持，才使著者得以完成此书。我的妻子几乎承担了全部家务劳动，我的儿子帮助我查询了不少网上的资料，著者从内心里感谢他们。

中国科学院科学出版基金委员会资助了本书的出版，特此致谢。在本书书稿的准备过程中，还得到国家重点基础研究项目《高效节能中的关键科学问题》的资助，谨致谢忱。著者特别要感谢中国科学院院士、清华大学教授王补宣及中国工程院院士、西安交通大学教授林宗虎的推荐。感谢清华大学工程力学系周力行教授在评审本书时所给予的热情支持。著者还特别要感谢科学出版社责任编辑陈文芳同志，本书是在她的鼓励与帮助下才得以出版的。

在本书即将完稿之际，我国振兴教育的“行动计划”已启动了西安交通大学作为国家

若干所重点大学的建设工程，"国家重点基础研究发展规划"中列入了"高效节能的关键科学问题"的专项。发展大规模工程科学计算是"行动计划"中学科建设的一个重要内容；传热与流动是节能技术中的基本物理过程，先进、高效的数值模拟方法是执行国家重点基础研究课题的有力工具。希望本书的出版对促进我国传热与流动问题数值计算的发展有所裨益，也希望"行动计划"及国家重点基础研究课题的实施，能为进一步发展我国的大规模工程科学计算创造更好的环境与条件。

著者热切希望本书能得到广大读者的批评和指正。

陶文铨
千禧年前夕
于西安交通大学
wqtao@xjtu.edu.cn

目　录

第一章　绪　　论

计算传热学(或数值传热学)是指用数值方法通过计算机来求解各类热量传递问题的传热学的一门分支学科。它与以实验方法为主要研究手段的实验传热学及以获得分析解为主要目标的分析传热学,共同构成了现代传热学的研究大厦。而且随着计算机工业的进一步发展(计算速度的提高,硬件成本的下降),它在热流科学研究及热力设备的计算机辅助设计(CAD)中的作用会越来越重要。本章将简要综述计算传热中所使用的数值方法及计算传热学的发展简史,以为讨论其近代发展打下基础。在本书以下的叙述中,笔者假设读者已掌握了文献[1]、[2]的基本内容,但为了讨论的方便与完整,有时对文献[1]、[2]中的某些内容仍会作简要的介绍。

§1-1　计算传热学所应用的数值方法

从学科的内容而言,计算传热学所研究的基本内容也就是传热学中的四大模块:热传导、对流换热、辐射换热及传热过程、复杂换热过程与各类换热设备的传热特性。近 30 年来,为了对这些热传递过程进行数值模拟,已经发展出了多种数值方法。一般地说,数值方法与所研究的问题密切相关。目前,大多数应用研究中所涉及到的传热与流动问题可以分成三大类。以下将简述这三大类问题及其常用的数值计算方法。

一、导热、对流换热问题的场模拟

这一类问题的控制方程是一组描写守恒原理的偏微分方程组,已发展出来的主要数值方法有:

1. *有限差分法*(Finite difference method,FDM)

这是求得偏微分方程数值解的最古老的方法,对简单的几何形状中的流动与传热问题也是一种最容易实施的方法。其基本实施方法是,将求解区域用网格线的交点(节点)所组成的点的集合来代替。在每个节点上,描写所研究的流动与传热问题的偏微分方程中的每一个导数项用相应的差分表达式来代替,从而在每个节点上形成一个代数方程,其中包含了本节点及其附近一些节点上的所求量的未知值。求解这些代数方程组就获得了所需的数值解。关于有限差分法在三种类型(抛物型、双曲型及椭圆型)偏微分方程数值求解中的应用及相应的一些数学问题,在文献[3]中有详细的介绍。文献[4]是应用有限差分法求解初值问题的专著,而在文献[5]～[9]中则讨论了应用有限差分法求解流动与传热问题的一些内容。在规则区域的结构化网格上,有限差分法是十分简便而有效的,而且很容易引入对流项的高阶格式。其不足的是离散方程的守恒特性难以保证,而最严重的缺点则是对不规则区域的适应性差。

2. 有限容积法(Finite volume method,FVM)

有限容积法从描写流动与传热问题的守恒型控制方程出发,对它在控制容积上作积分,在积分过程中需要对界面上被求函数的本身(对流通量)及其一阶导数的(扩散通量)构成方式作出假设,这就形成了不同的格式。由于扩散项多是采用相当于二阶精度的线性插值,因而格式的区别主要表现在对流项上。用有限容积法导出的离散方程可以保证具有守恒性(只要界面上的插值方法对位于界面两侧的控制容积是一样的即可),对区域形状的适应性也比有限差分法要好,是目前应用最普遍的一种数值方法。顺便指出,文献中曾有过把有限容积法作为有限差分法的一种实施方法来看待的观点[2,6,9]。但这两种方法在获得离散方程的原理上完全不同,因而把它们看成为获得离散方程的两种方法更加合适,虽然在不少情形下,两种方法会导致相同的离散结果。文献[1]、[10]是关于有限容积法的专著,文献[2]中主要也是介绍有限容积法,在文献[5]~[9]中也都有相应的介绍。

3. 有限元法(Finite element method, FEM)

有限元法中把计算区域划分成一组离散的容积或者叫元体(在二维情形下元件的形状常常是三角形或四边形),然后通过对控制方程作积分来得出离散方程。它与有限容积法的主要区别在于:

(1) 对每个元体要选定一个形状函数(最简单的为线性函数),通过元件中节点上的被求变量之值来表示该形状函数,并在积分之前把所假设的形状函数代入到控制方程中去;

(2) 控制方程在积分之前应乘上一个选定的权函数,并要求在整个区域上控制方程余量的加权平均值为零,从而导出一组关于节点上被求变量的代数方程。

有限元法的最大优点是,对不规则几何区域的适应性好。有限元法在对流项的离散处理及不可压缩 Navier-Stokes 方程的原始变量法求解方面不如有限容积法发展成熟。但随着有限容积法中非结构化网格的应用,有限容积法与有限元法之间的差别正在缩小之中,对此本书以后还要述及。介绍有限元法求解流动与传热问题的著作有如文献[11]~[16]。

4. 有限分析法(Finite analytic method, FAM)

在有限分析法中也像有限差分法、有限容积法那样,用一系列网格线将计算区域进行离散,所不同的是在这里每一个节点(网格线的交点)与其相邻的四个网格(二维问题)组成一个计算单元,即每一个计算单元由一个内点及由八个邻点所组成。在计算单元内把控制方程的非线性项(如 N-S 方程中的对流项)局部线性化(即认为流速已知),并对该单元边界上未知函数的变化型线作出假设,把所选定型线表达式中的常数或系数项用单元边界节点的函值来表示,这样在该单元内的被求问题转化成了第一类边界条件下的问题,设法找出其分析解,并利用这一分析解找出该单元的内节点及其八个邻点上未知函数值之间的代数关系式,这就是该内点的离散方程。逐一对求解区域内的每一节点建立离散方程,并对计算区域边界上不是第一类条件的每节点补充一个方程,就完成了整个计算区域的离散方程的建立过程。

有限分析法是 80 年代初发展起来的一种数值方法[17],它可以克服在高 Reynolds 数

下有限差分法及有限容积法的数值解容易发散或振荡的缺点，但其计算工作量较大，对计算区域几何形状的适应性也较差。在本书第八章中将进一步介绍这种方法。

5. 边界元法(Boudary element method, BEM)

上面四种方法都必须对整个区域作离散化处理，用分布在整个区域上的有限个节点上函数的近似值来代替连续问题的解。在边界元方法中应用格林函数公式，并通过选择适当的权函数把空间求解域上的偏微分方程转换成为其边界上的积分方程，它把求解区中任一点的求解变量(如温度)与边界条件联系了起来。通过离散化处理，由积分方程导出边界节点上未知值的代数方程。解出边界上的未知值后就可以利用边界积分方程来获得内部任一点的被求函数之值[18~20]。边界元法的最大优点是，可以使求解问题的空间维数降低一阶，从而使计算工作量及所需计算机容量大大减小。边界元法推广应用的一个最大限制是，需要已知所求解偏微分方程的格林函数基本解。虽然对不少偏微分方程这种基本解业已找出，但对 Navier-Stoles 方程这样的非线性偏微分方程，至今尚未找到其基本解。目前的一种处理方式是，把 Navier-Stokes 方程中的非线性项看作是扩散方程的源项并通过迭代的方式来求解，但一般只能获得 Re 较低情形的解。最近文献[21]、[22]中采用高阶涡量-流函数方程的边界元方法，已使获得顶盖驱动流稳定解的 Re 高达 10000。

6. 谱分析方法(Spectral method, SM)

在谱方法中被求解的函数用有限项的级数展开来表示。例如，有限项的傅里叶展开、多项式展开等。显然，只要这种级数中每一项的系数一一确定，这个被求解的函数的近似形式也就完全确定了。因而与前面五种离散方法不同的是，在谱方法中要建立的代数方程是关于这些系数的代数方程，而不是节点上被求函数值的代数方程。显然，级数的项越多，其精度也越高。建立未知系数的代数方程的基本方法是加权余数法。即首先将近似解代入控制方程(设控制方程中所有的项均移到了等号左边)，再乘以近似解级数中的一个项称为权函数(不包括该项中待定的系数)，然后对整个求解区域作积分，并要求该积分式等于零，就得出一个关于待定系数的代数方程。这样以系数解中每一个含有待定系数的项作权函数，就可以得到总数与待定系数数量相等的代数方程组。求解该方程组，就得出了被求函数的近似解。

谱分析方法用于偏微分方程的近似求解始于 20 世纪 70 年代末[23]，其优点是可以获得高精度的解，但不适宜用来编制通用程序，目前只在比较简单的流动与传热问题中已经应用得比较成功。

7. 数值积分变换法(Integral transformation method, ITM)

我们知道在偏微分方程的分离变量法求解中，一个被求函数表示成了两个特征值问题所规定的特征函数乘积的线性组合。一般地说，任意一个函数可用相应的特征值问题的特征函数来表示[24]。对不具备分析解的非线性偏微分方程，设法把它的解表示成一个特征值问题的解及一个降维的定解问题解的组合：其中特征值问题具有分析解，而定解问题则应包含该问题的诸多非线性复杂因素，因而要采用数值解法，这就是数值积分变换法。由于该定解问题降低了维数(常常变为常微分方程的初值问题或两点边值问题)，因而数

值求解比较方便。这一方法是分析解法与数值解法的混合方法。对于数值解问题而言，只需要得出某个降维了的空间内(对二维问题或者是时间坐标或者是某个空间坐标)的数值解，整个求解区域内的值则可以用分析解与数值解的组合来得到。在获得降维的定解问题过程中需要进行积分变换与反变换，而该降维问题的求解是采用数值方法的，因而称其为数值积分变换法。

这一方法在文献[25]中作了比较全面的介绍，其优点是计算精度可以较高，降维问题是一个常微分方程，有成熟的数值方法可以采用，但这种方法不容易形成通用程序，特征值问题的选取有一定的任意性，对非线性强烈的问题，计算工作量比较大。

8. 格子-Boltzmann 方法(Lattice-Boltzman method, LBM)

格子-Boltzmann 方法是基于分子运动论的一种模拟流体流动的数值方法。在上述各种数值方法中，把本质上是离散的介质先假定是连续的，在此基础上建立起了 N-S 方程，然后又再把它离散化。在 LMB 中不再基于连续介质的假设，而是把流体看成是许多只有质量没有体积的微粒所组成，这些微粒可以向空间若干个方向任意运动。通过其质量、动量守恒的原理，建立起表征质点在给定的时刻位于空间某一个位置附近的概率密度函数。再通过统计的方法来获得质点微粒的概率密度分布函数与宏观运动参数间的关系。这一方法从提出至今只有 10 余年的历史，但已显示出其巨大的发展潜力。

此外，应用于流动与换热计算的数值方法还有控制容积有限元法(CVFEM)及微分求积法(DQM)等，我们将在第八章中作简要介绍。

二、热辐射及辐射换热的数值模拟

热辐射及辐射换热是本质上与导热-对流换热过程不同的一种热量传递方式，其间主要区别可从以下三个方面来说明：

(1) 导热与对流换热只能发生在直接接触的物体之间，亦即空间某一个元体只能与其相邻的元体之间发生导热或对流形式的热量交换，因而其过程的控制方程为微分方程；而辐射换热则可发生在两个不直接接触的表面之间，辐射能量可以远距离传递，因而描写传递过程的方程是积分方程或积分-微分方程；

(2) 导热与对流是依靠分子不规则的热运动或流体微团的宏观位移来实现的，因而控制方程中有扩散项与对流项；辐射是电磁波的传播，因而没有这种迁移项；

(3) 导热与对流换热的实际传递速度都是有限的，因而控制方程中可能有非稳态项，而且在过程达到稳态以前一直存在，而辐射换热过程由于是以光的速度传递电磁波的，一般工程计算中都不考虑非稳态项的影响。由此可见，在导热与对流换热计算中所依据的微分型式的守恒方程在辐射计算中不能应用。

工程中常见的辐射换热问题的数学描写可以分为三种类型[26]：

(1) 代数方程，例如被透明介质隔开的等温漫射表面间(每个表面的有效辐射是均匀的)的辐射换热问题即属之；

(2) 积分方程，属于这种情况的有如被透明介质隔开的固体表面间的辐射换热，其中每个表面或者温度不均匀，物性不均匀，辐射不均匀，或者表面不是漫射的；

(3) 积分-微分方程，属于这种情形的有：流体中的导热和对流与辐射换热耦合时的

复合换热（不论流体本身是否参与辐射换热）；温度分布未知时参与性介质中的辐射换热，此时因为介质辐射强度取决于其温度，而介质温度的确定则与辐射及导热-对流都有关，因而控制方程成为积分-微分型的。由于辐射换热是通过电磁波来传递能量的，因而在辐射换热计算中除了与导热-对流换热问题中一样的位置及方向是主要的参量以外，还有一个辐射能的波长分布问题。在一般工程辐射换热计算中，或者假定物体为灰体，对波长无选择性（第一种类型问题大多采用这一假定），或者用平均当量参数来代替对波长有选择性的辐射物性参数，例如气体的平均吸收系数，这样可使所建立起来的辐射能传递方程中不出现单色的光谱参数。

辐射换热的数值计算，严格地说只对第二类、第三类问题才存在。第一类问题控制方程本身就是一组代数方程，求解不存在更多的复杂性。对于用积分方程或积分-微分方程来描写的复杂辐射换热现象，近几十年来已经发展出许多数值处理方法，包括：热通量法[27,28]、区域法[28,29]、蒙特-卡洛法[30,31]及离散坐标法[32,33,34]等。特别值得指出，在导热-对流换热的场模拟中，行之有效的有限容积法已成功地应用于控制方程为积分-微分型的辐射换热数值计算中[35~37]，而处理不规则边界的区域扩充法[1,2]也已推广应用到处理不规则区域中的辐射换热问题[38]。

三、流动与换热设备或系统的稳态特性及动态性能的数值模拟

在计算传热发展的前期，由于受到计算方法及计算机硬件发展程度的限制，研究的重点集中在基本的单元热传递过程；在最近 10 余年中，对于发生在大型或复杂流动与换热设备中的物理过程的模拟也日益得到重视与发展，而且正是对这些有密切工程应用背景的复杂物理过程数值模拟的成功才给计算传热学的发展提供了进一步的动力。对这一类流动与传热问题的数值计算有三方面的特点值得指出。首先，由于许多工程设备结构的复杂性，在对发生于其间的流动与传热过程进行数值计算时，常常需要对结构或过程作合理的简化，对于大型凝汽器中管束间流场的计算引入多孔介质的概念来代替实际的管束就是典型一例[39]。其次，这种数值计算的主要目的在于获得对工程设计具有指导意义的物理结果，而不在于发展数值方法，因而常常采用已经过广泛考核比较成熟的算法、格式等。例如，在文献[40]中，对大型电站锅炉炉膛内的流动与传热的计算采用成熟的结构化交叉网格、SIMPLER 算法、k-ε 紊流模型及交替方向 TDMA 求解方法。最后，发生在许多工程设备中的传热与流动的过程，不仅包括热量传递的三种方式，而且常常伴随有质交换、化学反应及燃烧等，因而需要综合应用各相应分支学科中发展起来的数值方法。

为掌握所设计的换热设备在事故工况及各种扰动下各参数的变化规律，以保证设备的安全、经济运行，需要掌握设备的动态响应特性。如果采用非稳态、全三维的数学模型，像计算导热-对流换热场模拟问题那样来求解，则目前大多数研究人员及使用者所具备的计算机资源还无法进行那样的计算；另一方面，工程实践中所需要知道的常常是某种平均特性。因此，目前对换热设备与系统所进行的动态响应特性的研究一般不采用场模拟的方法，而是采用降维的简化模型。常常假定：

(1) 在垂直于流动方向的通道或容器的截面上或在某一空间区域内，速度、温度及压力是各自均匀的；

(2) 流体与壁面间换热的表面传热系数、阻力系数都是已知的。

在这种简化条件下，能量、动量等控制方程是一组常微分方程，或含有对空间、对时间一阶偏导数的一阶偏微分方程组，数值计算可以采用比较成熟的常微分方程初值问题的数解法或有限差分法。这类数值计算结果的准确程度，主要取决于所建立的简化模型及所选用的换热与阻力的关系式的合适程度，在文献[41]～[44]中有这种动态响应特性的数值模拟例子及方法介绍。

以上我们概述了传热学的三种类型的数值计算问题，其中以第一类问题数值方法的研究最为活跃。本书中也仅涉及第一类问题的数值求解方法。在第一类问题所采用的几种数值方法中，从实施的难易及发展成熟程度而言，有限容积方法无疑列为首位。据文献[45]对1991—1993这三年中发表在"Int J Heat Mass Transfer"及"ASME J Heat Transfer"杂志上数值计算论文的统计，使用有限容积法的占47%，而笔者对"Numerical Heat Transfer, Part A"的统计，这一比例还要高。因此，本书主要是以有限容积方法为背景来展开讨论的。但为便于读者了解近年内其它数值方法的发展概况，本书第八章也要对此作进一步的介绍。

§ 1-2　计算传热学的发展史

在简述计算传热学的发展史之前，有必要说明一下计算传热学或数值传热学(Numerical Heat Transfer, NHT)与计算流体动力学(Computational Fluid Dynamics, CFD)之间的关系。可以认为，数值传热学与计算流体动力学的主要研究内容是一致的，不少文献把热流问题的数值计算一概称为CFD[10]。因而计算传热的发展史在很大程度上也就是计算流体动力学的发展史。当然，CFD与NHT之间也还有不少区别。本书采用计算传热学而不采用计算流体动力学的名称，主要因为本书中不讨论无粘流动及跨、超音速流动数值计算中的一些特殊问题(如激波的捕获等)，而后者却是CFD中的一个重要研究内容。

虽然早在1933年，英国科学家Thom应用手摇计算机完成了对一个外掠圆柱流动的数值计算[46]，但应用计算机和数值方法求解流动及传热问题在全世界范围内逐渐形成规模而且得出有益的结果，大致始于60年代。因而这里的讨论从60年代开始。从60年代开始至今，我们可以把NHT的发展过程分为三个阶段，每一个阶段中的主要发展事件如下。

一、萌芽初创时期(1965—1974)

在这一历史时期中有以下一些重大的事件：

(1) 交错网格的提出。

初期的NHT发展过程中所碰到的两个主要困难之一是，网格设置不适当时会得出具有不合理的压力场的解。1965年美国科学家Harlow/Welch提出了交错网格的思想[47]，即把速度分量与压力存放在相差半个步长的网格上，使每个速度分量的离散方程中同时出现相邻两点间的压力差，这样有效地解决了速度与压力存放在同一套网格上时会出现的棋盘式不合理压力场的问题，促使了求解Navier-Stokes方程的原始变量法(即以速度、压力为求解变量的方法)的发展。

(2) 对流项差分迎风格式的再次确认。

初期的发展过程中所遇到的另一困难是，对流项采用中心差分时，对流速较高的情况的计算会得出振荡的解。虽然早在1952年，Courant，Issacson 和 Rees 三人已经在数值求解双曲型微分方程中引入了迎风差分的思想[48]，但迎风差分对克服振荡解的应用并未得到重视。1966年，Gentry，Martin 及 Daly 三人，以及 Barakat 和 Clark 等，各自撰文介绍了迎风格式在求解可压缩流及非稳态层流流动中的应用[49,50]。交错网格的提出及对流项迎风差分的采用，使流动与对流换热的求解建立在一个比较健壮的数值方法基础上。

(3) 世界上第一本介绍计算流体及计算传热学的杂志——"Journal of Computational Physics"于1966年创刊。

Gentry 等关于确认迎风差分的论文[49]就发表在该刊第一卷第一期上。

(4) Patankar 与 Spalding 于1967年发表了求解抛物型流动的 P-S 方法。

在计算流体力学与计算传热学发展的早期，由于受到计算机资源的限制，边界层类型问题的数值计算得到较多的关注。在边界层类型问题的数值计算中，如何把有限个节点数目都充分利用起来是一个重要的问题。在 P-S 方法中，把 x-y 平面上的计算区域(边界层)转换到 x-ω 平面上(ω 为无量纲流函数)，从而不论在边界层的起始段还是在其后的发展段，所设置的计算节点均可落在边界层范围内[51]。

(5) 1969年 Spalding 在英国帝国理工学院(Imperial College)创建了 CHAM(Concentration，Heat and Mass，Limited)，旨在把他们研究组的成果推广应用到工业界。

在30年前就重视 CFD/NHT 研究成果向工业应用转化，确实是一种远见卓识的创举。同年，Gosman 等五人所著"Heat and Mass Transfer in Reciranlating Flows"一书出版。这是世界上第一本 CFD/ NHT 的专著[52](采用涡量-流函数法)。

(6) 1972年 SIMPLE 算法问世。

在求解不可压缩流体的流动问题时，如果对所形成的包含速度分量及压力的代数方程仍采用直接求解的方法，则就可以同时得出速度与压力的解。但这样的求解方法，不仅在 CFD/NHT 发展初期的计算机工业水平不能满足，即使在今天，这种方法也尚未得到广泛采用。于是所谓分离式的求解方法就应运而生，即先求解有关一个速度分量如 $u_{i,j,k}$ 的方程，而把 $v_{i,j,k}$，$w_{i,j,k}$ 及 $p_{i,j,k}$ 作为常数，而再逐一求解其它变量。于是就产生了这样的问题：压力 $p_{i,j,k}$ 是以源项的形式出现在动量方程中的，如何去求解压力，或者说如何利用连续性方程去改进所假定的压力值，这就是所谓速度与压力的耦合问题。SIMPLE 算法成功地解决了这一个问题[53]。SIMPLE 算法的一个基本思想是，在流场迭代求解的任何一个层次上，速度场都必须满足质量守恒方程，这一思想被以后的大量数值计算实例证明，是保证流场迭代计算收敛的一个十分重要的原则。

(7) 1974年美国学者 Thompson，Thames 及 Mastin 提出了采用微分方程来生成适体坐标的方法(TTM 方法)[54]。

早在50年代，在结构力学中逐渐发展起来了有限元法。由于它对不规则区域有很强的适应性而显出了其活力。有限差分法与有限容积法则对复杂计算区域的适应能力很差，但对于流动问题的数值处理则要比有限元法容易得多。TTM 方法的提出，为有限差分法与有限容积法处理不规则边界问题提供了一条崭新的道路——通过变换把物理平面上的不规则区域(二维问题)变换到计算平面上的规则区域，从而在计算平面上完成计算，再将结果传递到物理平面上。由于不规则计算区域的处理对于将 CFD/NHT 技术应用到实际

工程问题具有重要的意义，因而在TTM方法提出后，逐渐地在CFD/NHT领域中形成了“网格生成技术”这一分支，并成为目前世界上很活跃的研究方向。每隔2～3年，世界上要举行一次专门会议(Conference on Numerical Grid Generation in CFD and Related Fields)。

初创时期以TTM方法的提出为结束的标志。从此CFD/NHT的发展成果已为向工程实际的应用推广创造了基本的条件。

二、开始走向工业应用阶段(1975—1984)

1977年由Spalding及其学生开发的GENMIX程序公开发行。这是一个应用P-S方法对二维边界层型的迁移现象进行数值求解的程序[55]，其结构及设计思想对以后其它热流科学通用软件的开发具有积极的影响。

1979年在计算传热学的发展进程中有三件大事应载入史册：

(1) 由美国Illinois大学的Minkowycz教授任主编的国际杂志“Numerical Heat Transter”创刊，为全世界数值传热学的研究与使用者开辟了一个发表研究结果的国际论坛。该杂志创刊后，稿件数量不断增长，使该杂志由增加每年中出版的卷数进而把杂志分为两种，即A:Applications(应用篇)及B:Fundamentals(基础篇)。

(2) 由Spalding教授及其合作者开发的流动传热计算的大型通用软件PHOENICS第一版问世。PHOENICS是英语Parabolic,Hyperbolic or Elliptic Numerical Integration Code Series的缩写(意为对抛物型、双曲型、椭圆型方程进行数值积分的系列程序)。当时仅限在英国帝国理工CFD研究组内使用，为工业界计算一些应用问题。

(3) 在CFD/NHT的发展过程中，构造一种稳定性好、精度较高而计算工作量又较合理的对流项差分格式一直是一个重要的课题。Leonard在1979年发表了著名的QUICK格式[56]。这是一个具有三阶精度的(从界函面数插值而言)的对流项离散格式，其稳定性优于中心差分。目前，QUICK已在CFD/NHT研究与应用中得到广泛的应用。

从数值传热学的教学而言，1980年是值得纪念的一年。该年中Patankar教授的名著“Numerical Heat Transfer and Fluid Flow”出版[57]。这本书内容精炼，说理透彻，注重物理概念的阐述，深受全世界数值传热的研究者与使用者的欢迎。出版后不久，被相继译成俄文、日文、波兰文及中文等，成为数值传热学领域中的一本经典著作。

计算机工业继续不断的迅速发展深入地影响着人类生活的各个方面，也使工业界产品设计与改进的方法发生了变化。在热与流体科学的应用领域中，人们由传统的依靠实验的方法转而采用实验及计算机数值模拟并举的方法。为了适应这一需要，1981年英国CHAM公司把PHOENICS软件正式投放市场，开创了CFD/NHT商用软件市场的先河。同时，Spalding还著文[58]介绍了这一软件并对商用软件的构造及应具备的基本功能提出了颇具见地的看法，对以后的热流科学商用软件的发展具有重要影响。此后，热与流体科学的新的商用软件不断问世，直至今日全世界已经有数以半百的有关热流问题商用软件，其中最著名的有PHOENICS,FLUENT,STAR-CD,CFX等，本书将在第八章中作进一步介绍。

随着计算机工业的进一步发展，CFD/NHT的计算逐步由二维向三维，由规则区域向不规则区域，由正交坐标系向非正交坐标系发展。于是，为克服棋盘形压力场而引入的交