

传热与流体流动的 数值计算

[美] S. V. 帕坦卡 著

科学出版社

传热与流体流动的 数值计算

〔美〕 S. V. 帕坦卡 著

张 政 译

蒋章焰 校

科 学 出 版 社

1 9 8 9

内 容 简 介

计算传热学与流体力学是应用电子计算机研究传热与流体流动过程的一个新的学科分支。帕坦卡-斯波尔丁方法是其中最活跃、也是最实用的方法之一。它在国外已被广泛地应用于工业、宇航、海洋、大气、地质、能源、化工等领域,成为研究其中有关传热与流体流动过程的一个重要工具。本书介绍了作者本人数值传热与流体力学的基本思想与理论。

全书共分九章。前三章是预备性知识,其中包括对数学与数值方法的基本讨论以及本方法的一些原则。第四章至第六章包括了数值方法的主要推演,其中第四章处理热传导问题;第五章集中讨论对流与热传导的相互作用;第六章处理速度场本身的计算。第七章至第九章作为对方法的补充,致力于进一步解释与应用说明。书末附录是译者最近撰写的,它着重介绍帕坦卡方法近期发展的某些侧面。

本书可供各科学技术和工业部门从事传热、传质、流体流动以及其他有关过程工作的工程技术人员与科研人员参考,也可用作大专院校有关专业的研究生与高年级学生的教学参考书。

Suhas V. Patankar

NUMERICAL HEAT TRANSFER AND FLUID FLOW

McGraw-Hill, 1980

传热与流体流动的数值计算

[美] S. V. 帕坦卡 著

张 政 译

蒋章焰 校

责任编辑 陈文芳

科学出版社出版

北京东黄城根北街16号

邮政编码 100707

中国科学院印刷厂印刷

新华书店北京发行所发行 各地新华书店经售

*

1984年9月第一版 开本: 787×1092 1/32

1989年12月第二次印刷 印张: 8 1/2

印数: 8,351—9,560 字数: 165,000

ISBN 7-03-001420-0/TB·40

定价: 2.90元

中文版序言

这本书是我经过整整八年的计划、教学与研究实践之后才完成的。得知本书在美国以及其它国家受到高度的评价，我非常高兴。在私人通信以及各种书评中听到或读到满意的评语是令人欣慰的。某些读者想把这本书译成其它国家的文字出版。正在计划进行中的有俄文、日文、波兰文及葡萄牙文。由于张政先生的倡议和努力，现在这本中文版已经展现在读者们的面前。

按照我的意见，本书的特点就在于简单。我充分相信，如果过于复杂化了，就会影响读者学习和掌握它。因为本书的对象是一些初学者，书中仅仅包含那些只够读者领会数值方法的关键内容，这样做不致使读者被许多其它方法及细节搞糊涂。因此，书中没有竭尽全力去处理所有有关的技巧。不管忽略许多其它重要方法可能带来什么样的严重后果，我仍然只把我的注意力集中于讨论自成体系的一大类方法。我常常想象：我的这种做法有点类似于只给旅行者指出一条穿过树林的路，而不是描述许多可能的途径去迷惑他。当然，我相信读者在掌握了本书的内容之后是有能力去学习其它的一些高级方法的。

在考虑用于本书中处理问题的主要方法时，我已经选择了一种可以由方程的物理意义，而不是通过数学推演来开发的程序。这样的结果使读者不仅学会了数值方法而且也加深了对传热与流体流动的物理过程的理解与领会。

尽管我们的着眼点只限于一种简单的方法，但是随之而

产生的却是构成数值方法的一套思维哲理。本书的这一特征应当使读者有能力理解和估价其它的一些方法。这样，即使在本书中所引进的特定的方法已为某些更新的方法所代替之后很久很久，本书中的精髓仍然会具有它的现实价值。

对我来说，用数值方法求解传热与流动问题是一件非常有劲而愉快的事。在这本书中，我试图与广大读者一起享受对这一学科无限乐趣与热爱。要是读者也能像我一样对这个学科发生兴趣的话，那么可以说本书所要达到的目的实现了。

在最近几年中，我已经有机会与许多中国学生、教授和学者们共事。我特别满意他们在工作中的合作和赞赏他们对这一领域所发生的强烈兴趣与专心致志的研究。通过本书中译本的发行，我希望将使我能够与更多的中国读者接触。在此我愿对我的读者们致以衷心的祝愿。

美国明尼阿波利斯

明尼苏达大学

机械工程系教授

S. V. 帕坦卡

中文版再版前言

本书的中文版已与广大读者见面整四年了，它的出版得到全国同行的热情支持。译者高兴地看到全国许多有传热与流体力学或相关专业的高等学校把它选作高年级学生及研究生的教科书或指定参考书。国内有关专业的广大科技人员已把本书所提供的方法应用于自己的科研工作并作出了贡献。本书发行不久，便在市场上销售一空。为此，不少读者相继给译者和科学出版社来信，要求尽快再版，同时希望能提供帕坦卡方法的进一步信息。本书能在全国范围内受到如此广泛的重视是译者始料未及的。

这本书的原版发行至今已有八个年头。八年来传热与流体力学的数值计算方法有了较大的发展，而帕坦卡方法本身也有了进一步的充实。应广大读者的要求，科学出版社决定再版本书，并请译者就帕坦卡方法近期发展的某些侧面补充一些内容作为附录放在书后。鉴于篇幅所限，仅就译者自己的体会，重点介绍几个比较重要而大家又感兴趣的问题，其中包括：(1)非给定边界 ϕ 值的边界条件处理问题；(2)块修正技术；(3)沿通道周期性流的传热问题；(4)贴体非正交坐标系下的控制容积法。前面两个问题主要是为了提高求解的收敛速度，而后面两个问题则在于扩充有关方法的应用范围。

译者衷心地希望这本书的再版能进一步为我国计算传热与流体力学的发展作出贡献，也热切期望读者能对本书提出宝贵意见和要求。

张 政

1988年10月

于 北京化工学院

译者的话

S. V. 帕坦卡 (Patankar) 教授是有名的美籍印度学者。他早在60年代初期就跟随“计算传热与流体力学”开拓者、英国著名教授 D. B. 斯波尔丁 (Spalding) 学习和研究数值传热和流体流动的计算方法。从那时候起帕坦卡教授已经在这一领域中发表了许多的论文与专著, 进一步发展了斯波尔丁的方法, 逐渐形成了一套以斯波尔丁-帕坦卡或帕坦卡-斯波尔丁命名的计算方法。本书就是作者在这个领域内对自己方法的科学总结, 其中浸透了教授与他的学生们的汗水。正如作者在序言和中文版序言中所指出的那样, 这本书以它的简洁为特点。读者通过对本书的学习不用费很大的力气就可以到达当今世界该领域的前沿。译者与许多在美国明尼苏达大学机械系工作的中国访问学者对此都深有体会。我们在那里学到了方法的要领, 并卓有成效地解决了各自在科研、教学与生产中所遇到的许多实际问题。正因为如此译者愿意把这本书推荐给国内研究传热、传质、燃烧以及流体流动过程的广大读者, 愿它在我们国家四个现代化的建设中作出一定的贡献。我在明尼苏达大学的中国同事们也都鼓励我这样做。

在翻译出版本书的过程中, 我首先要感谢自己在研究生时期的导师王补宣教授, 感谢他对本书翻译出版的关心与支

持。还要感谢国内同行对出版此书的浓厚兴趣和积极鼓励。一些学校已经决定把本书作为工程热物理专业研究生的教材或重要参考书。化工部兰州化机院的一些同事为我校对和誊抄了部分译稿，在此表示深切的谢意。

由于译者水平有限，错误难免，敬请读者批评指正。

张 政

1984年3月15日

于北京化工学院

序 言

1972年，我在伦敦帝国理工学院为一个研究小组开过一门有关应用数值法求解传热与流体流动的非正式课程。后来，我把这个教材加以扩充和定型，并在加拿大的滑铁卢 (Waterloo) 大学 (1974年)、特伦汗 (Trondheim) 的挪威工学院 (1977年) 以及明尼苏达 (Minnesota) 大学 (1975、1977及1979年) 为研究生讲授这门课。在最近两年中，我又在美国机械工程师学会 (ASME) 的几次全国性会议上以短期课程的方式讲授了同一材料。这些课程所引起的热烈反响一直在鼓舞我写这本书。这本书既可以作为研究生课程的教科书，又可以用作传热与流体流动计算工作的参考书。

尽管存在有大量计算热工流体分析方面的文献，但是对于这个领域的新手来说，由此所能得到的帮助是不多的。研究生，研究人员以及从事实际工作的工程师，必须花相当大的力气去查阅杂志中的论文，不然就只能满足于数值分析书中所作的初步介绍。决定一次计算工作成败的往往是一些微妙之处；至今，成功的计算小组通过自身经验学习到的技巧在文献中还是罕见的。结果，许多研究工作者不是在做了许多个月的徒劳研究之后放弃他们的计算工作，就是要同那些无效的计算机程序周旋到底。

有鉴于此，我试图在这本书内对这个题目提出一套自成体系的、简单而又实用的处理方法。本书在体例上是本入门书，其对象是可能从事数值传热与流体流动工作的专业人员，而不是这一个领域的专家们。在建立数值方法时，我强调的

是物理意义，而不是数学推演。确实，本书所用的大部分数学内容只限于简单代数。其结果是，读者在充满着令人欣喜的、简单而又明了的物理概念与见解的过程中学完本书，就能达到当今该领域的前沿。按照这样一种方法讲授这份教材时，我常常欣慰地看到：学生们不仅学到了数值方法，而且也加深了对有关物理过程的理解。

作为数值方法的一名使用者，我已经拥有我所喜爱的一批方法与一套习惯做法。它们部分取自于文献，随后又经提炼、改写与修正。由于已经对现有的方法进行了相当大量的分类与筛选（虽然其中带有我个人的偏爱），因而我把本书的范围限定在我所希望推荐的那些方法中。我并不想对现有的一切方法进行比较；其它的方法只是在用来说明所考虑的某个特殊问题时才偶尔提到。就这个意义上讲，本书代表了我个人对这一课题的观点。当然，虽则我热衷于这一观点，但是我承认我的选择受到我的知识基础、个人经历以及技术目标的影响。在不同环境下工作的其它一些人可能更乐意选择另外的一些方法。

为了说明本教材的应用，在某些章的末尾编排了一些习题。尽管其中一部分习题需要编制计算机程序，但是大多数习题都可以用袖珍计算器求解。这些习题并不是用来考核学习者的，它主要是为了补充和强化学习过程而编入的。这些题目为学生们提出了一些可供选择的方法，并介绍了补充材料。有时在我试图给出习题解法的提示时，我几乎揭示了整个解答。在这种情况下，获得正确的解答并不是主要的目的；读者应当把注意力集中于习题所给出的启示上。

本书对数值方法的论述程度，是要使读者能够自己着手编写一个计算机程序。确实，读者应当能够编制出可以用来得到本书最后一章所介绍的那一类结果的计算机程序。可以

根据所要解决问题的性质设计具有不同通用程度的计算机程序范围。许多读者可能会发现，要是本书能包括一个典型的计算机程序的话，将会是有助益的。我确实考虑过这种可能性。但是，要提供一个相当通用的计算机程序，对它进行详细描述并给出它的几个应用实例，这一任务看来是过于繁重艰难了，这样做会大大推迟本书的出版。暂时，我在本书中加进了一节关于计算机程序的准备和调试的内容(第7.4节)，其中叙述了许多有用的方法以及通过经验总结出来的习用技巧。

本书的完成，实现了我多年来的一个宿愿。那是在1971年，斯波尔丁(D. B. Spalding)教授与我就曾计划写一本这一类型的书，并为它写出了一个初步提纲。然而，进一步的工作，由于我们互相远离两地，加之受各种活动的牵连而变得十分困难。最后，合作完成一本书的愿望看来是无法实现了。于是我便着手把我的讲课笔记改编成这本书。现在的这本书与我们曾经计划要合作写的书有一些相似之处，这是因为充分利用了斯波尔丁的讲义与手稿。不过，要是他能直接参与的话，一定会使这本书写得更好。

在数值传热与流体流动这一事业中，斯波尔丁教授对我的教导和帮助使我终生难忘。他把我带入计算方法的这一引人入胜的天地。我们在一起所完成的工作代表着我的专业生涯中最令人愉快、最富有创造性的一段经历。在整个这本书中，到处可以看到他的观念对我的思想上的影响。“单向”及“双向”坐标的概念(以及这些术语本身)是他的创造力的产物。正是他，把所有有关的物理过程用一个标准形式的通用微分方程式来加以描述。除此之外，我们在计算工作上的迅速进展还来自于斯波尔丁的远见和信心：有朝一日所有的实际问题都能够用计算机来进行分析。

我愿对斯波尔丁教授表示最衷心的感谢，感谢他对我的专业活动所给予的创造性的影响，感谢他所给予我的始终不渝的温暖的友谊以及他对本书的直接与间接的贡献。

斯帕罗 (E. M. Sparrow) 教授是我写这本书的最热忱的支持者。甚至早在他旁听我给研究生讲这门课的时候，他就开始有了兴趣。从他的提问以及随后的讨论中，我受益非浅。他花费了很多时间来阅读本书的手稿，提出了许多修改与改进的建议。由于他的批评性的评论，使这本书趋于更加完美。我非常感谢他对这本书的浓厚兴趣以及他个人对我的关心。

其它许多同事和朋友对我的工作也都特别关心，从而给予我以不断的启发和鼓励。我愿意对戈尔茨坦 (R. J. Goldstein) 教授的支持和鼓励以及雷思比 (G. D. Raithby) 教授的尖锐意见表示特别感谢。我也同样感谢那些听我所授的研究生课程的学生们。通过他们所提出的问题和讨论，通过他们的热情与反响，他们对这本书也作出了相当大的贡献。我要感谢莱恩 (L. R. Laing) 夫人，她打印手稿快而仔细。我还应该感谢半球出版股份有限公司的董事长威廉·贝格 (William Begell) 先生，感谢他对这本书的兴趣。这里还要感谢出版公司的工作人员，是他们出色地完成了本书的出版工作。

在我写作的过程中，我的家庭非常理解与支持；现在写作已告结束，我要花更多的时间同我的妻子和孩子们在一起了。

目 录

序言

第一章 引论	1
§ 1.1 本书的范畴	1
§ 1.2 预测的方法	4
§ 1.2-1 实验研究	4
§ 1.2-2 理论计算	4
§ 1.2-3 理论计算的优点	6
§ 1.2-4 理论计算的缺点	7
§ 1.2-5 预测方法的选择	9
§ 1.3 本书概要	9
第二章 物理现象的数学描述	12
§ 2.1 控制微分方程	12
§ 2.1-1 微分方程的意义	12
§ 2.1-2 化学组分的守恒	14
§ 2.1-3 能量方程	15
§ 2.1-4 动量方程	15
§ 2.1-5 紊流的时间平均方程	16
§ 2.1-6 紊流动能方程	17
§ 2.1-7 通用微分方程	17
§ 2.2 坐标的性质	19
§ 2.2-1 自变量	20
§ 2.2-2 坐标的合适选择	21
§ 2.2-3 单向与双向的坐标	22
习题	25

第三章 离散化方法	27
§ 3.1 数值方法的本质	27
§ 3.1-1 任务	27
§ 3.1-2 离散化的概念	28
§ 3.1-3 离散化方程的结构	29
§ 3.2 推导离散化方程的方法	30
§ 3.2-1 泰勒级数公式	30
§ 3.2-2 变分公式	31
§ 3.2-3 加权余数法	31
§ 3.2-4 控制容积公式	33
§ 3.3 一个说明性的例子	34
§ 3.4 四项基本法则	40
§ 3.5 结语	44
习题	44
第四章 热传导	46
§ 4.1 本章的对象	46
§ 4.2 一维稳态热传导	47
§ 4.2-1 基本方程	47
§ 4.2-2 网格间距	48
§ 4.2-3 界面导热系数	49
§ 4.2-4 非线性	53
§ 4.2-5 源项的线性化	54
§ 4.2-6 边界条件	57
§ 4.2-7 线性代数方程的解	59
§ 4.3 不稳态一维热传导	62
§ 4.3-1 通用的离散化方程	62
§ 4.3-2 显式, 克兰克-尼科尔森 (Crank-Nicolson) 模式, 以及全隐式模式	64
§ 4.3-3 全隐式离散化方程	67

§ 4.4	二维与三维问题	68
§ 4.4-1	二维问题的离散化方程	68
§ 4.4-2	三维问题的离散化方程	69
§ 4.4-3	代数方程的解	70
§ 4.5	超松弛与欠松弛	77
§ 4.6	某些几何上的考虑	80
§ 4.6-1	控制容积面的位置	80
§ 4.6-2	其它坐标系	84
§ 4.7	结语	86
	习题	86
第五章	对流与扩散	91
§ 5.1	任务	91
§ 5.2	一维稳态对流与扩散	92
§ 5.2-1	预备性的推导	93
§ 5.2-2	上风方案	96
§ 5.2-3	精确解	98
§ 5.2-4	指数方案	99
§ 5.2-5	混合方案	101
§ 5.2-6	幂函数方案	104
§ 5.2-7	一个通用化的公式	106
§ 5.2-8	各种方案(格式)的结果	110
§ 5.3	二维问题的离散化方程	111
§ 5.3-1	推导的细节	112
§ 5.3-2	最终的离散化方程	114
§ 5.4	三维问题的离散化方程	116
§ 5.5	单向空间坐标	117
§ 5.5-1	使空间坐标成为单向坐标的条件	117
§ 5.5-2	出流边界条件	118
§ 5.6	假扩散	120
§ 5.6-1	关于假扩散的一般观点	121

§ 5.6-2 有关假扩散的正确看法	122
§ 5.7 结语	126
习题	126
第六章 流场的计算	130
§ 6.1 制订一个特殊程序的必要性	130
§ 6.1-1 主要的困难	130
§ 6.1-2 以涡量为基础的方法	131
§ 6.2 某些有关的困难	132
§ 6.2-1 压力梯度项的表达	132
§ 6.2-2 连续性方程的表达	135
§ 6.3 一种解决困难的妙法——交错的网格	136
§ 6.4 动量方程	139
§ 6.5 压力与速度的修正	142
§ 6.6 压力修正方程	143
§ 6.7 “SIMPLE”算法	146
§ 6.7-1 计算进行的顺序	146
§ 6.7-2 压力修正方程的讨论	146
§ 6.7-3 压力修正方程的边界条件	150
§ 6.7-4 压力的相对特性	151
§ 6.8 一个修订的算法: “SIMPLER”	153
§ 6.8-1 问题的提出	153
§ 6.8-2 压力方程	154
§ 6.8-3 “SIMPLER”算法	155
§ 6.8-4 讨论	156
§ 6.9 结语	157
习题	157
第七章 最后的修饰	161
§ 7.1 方法的迭代性质	161
§ 7.2 源项的线性化	165

§ 7.2-1 讨论	165
§ 7.2-2 常正变量的源项线性化	168
§ 7.3 不规则的几何形状	169
§ 7.3-1 正交曲线坐标系	169
§ 7.3-2 具有隔离(blocked off)区域的规则网格	171
§ 7.3-3 共轭传热	173
§ 7.4 关于准备与调试计算机程序的几点建议	174
第八章 一些专题	178
§ 8.1 二维抛物型流动	178
§ 8.2 三维抛物型流动	179
§ 8.3 部分抛物型流动	181
§ 8.4 有限元法	182
§ 8.4-1 问题的提出	182
§ 8.4-2 困难	183
§ 8.4-3 以控制容积为基础的有限元法	184
第九章 应用举例	187
§ 9.1 弯曲圆管内的发展中流动	189
§ 9.2 水平管内的复合对流	191
§ 9.3 围绕垂直圆管的熔化	193
§ 9.4 带内肋的圆管内的紊流与传热	195
§ 9.5 一股吹斜的紊流射流	198
§ 9.6 助推喷射器内的超混射流	201
§ 9.7 周期性的充分发展通道流	205
§ 9.8 蒸汽发生器的热工水力分析	208
§ 9.9 结语	210
术语符号表	211
参考文献	214
附录	221
中英名词对照	245