

040047

TK124
4242

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

1984

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。

本书可供各科学技术和工业部门从事传热、传质、流体流动以及其它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

北京朝阳门内大街137号

印刷

新

飞行 各地新华书店经售

*

1984年9月第 一 次印刷 开本: 787×1092 1/32
1984年9月第一次印刷 印张: 7 5/8
印数: 0001—8,350 字数: 165,000

统一书号: 15031·603

本社书号: 3716·15-10

定价: 1.20 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，仍会努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力而愉快的事。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。

美国明尼阿波尼斯

明尼苏达大学

机械工程系教授

S. V. 帕坦卡

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, 进一步发展了斯波丁的方法, 逐渐形成了一套以斯波丁-帕坦卡或帕坦卡-斯波丁命名的计算方法。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

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
中英名词对照	221

第一章 引 论

§ 1.1 本书的范畴

传热与流体流动的重要性

本书的内容包括：在工程设备，自然环境以及生物机体中出现的热、质传递，流体流动，化学反应以及其它一些有关过程。在大量的实际问题中，可以观察到这些过程在起着重要的作用。几乎生产电力的所有方法都以流体流动及传热作为其基本过程。同样的过程控制着大楼建筑的采暖与空调。化学与冶金工业的主要工序使用着诸如加热炉、热交换器、冷凝器以及反应器之类以热流体为工质的单元设备。飞机与火箭依靠流体流动，传热以及化学反应而运动。在电机及电子线路的设计中，传热往往是一个限制因素。自然环境的污染在很大程度上是由热与质传递所致。暴风雨雪，河流泛滥以及着火也都是如此。面对着气候条件的变化，人体凭借着热、质传递进行自身的温度控制。传热和流体流动的过程似乎遍及我们生活中的各个方面。

认识和估计这些过程的必要

既然所考虑的过程对于人类生活有着如此不可抗拒的作用，我们应当有能力卓有成效地处置它们。这种能力可以来自于对过程本质的认识以及用以定量地估计这些过程的一套

方法。在掌握了这些专门知识之后，工程设备的设计师们就能够确保达到所期望的性能——设计师可以从大量可能的方案中决定最佳的设计。估计性能的能力使得我们能够更安全、更有效地操作现有的设备。预测和估计有关过程可以帮助我们预报，甚至控制河流泛滥，海水涨潮以及着火这样一类潜在的危险。在所有这些情况下，预测都将提供经济效益并为人类幸福作出贡献。

预测的本质

对处于一定物理条件下的状态的估计在于给出那些控制有关过程的变量值。现在让我们来讨论一个特殊的例子。对于一个具有一定条件的燃烧室，完整的估计应当为我们提供在整个感兴趣的区域内的速度、压力、温度以及各有关化学组元的浓度分布；同时也应当提供在燃烧室壁面上的摩擦切应力，热流密度以及质量流量。预测应当说明其中每一个物理量究竟是如何随着几何条件，流量以及流体物性等的变化而改变的。

本书的目的

本书主要目的在于发展一种估计热与质传递，流体流动以及有关过程的通用性方法。正如我们马上就要看到的那样，在用来预测过程特性的各种预测方法之中，数值解是一种大有前途的方法。在这本书中，我们就将介绍一个用以估计上述过程的数值方法。

我们要尽可能设计一种具有完全的通用性能的数值方法。因此我们将尽力排除对我们的数值方法采取诸如二维、边界层近似以及常密度流动这样一类的限定性约束条件。如果临时要采取某种限制，那也只是为了表达与理解上的便利，

而决不是方法本身存在什么内在的限制。我们将在非常初等的水平上开始讨论我们的这个课程，再从那儿一直进行到该课题的当今最高水平。

当然，要在了一本中等篇幅的书来完成这一雄心勃勃的任务而不摒弃许多重要的内容，这是不可能的。因此，本书只能简单地讨论控制所述过程的方程的数学形式。读者若需要了解有关方程的完整推导，就必须去查阅有关这一论题的许多标准教科书。对于紊流、燃烧以及辐射这样一类复杂过程的数学模型，我们这里假设读者已经知道或是可以查得的。即便对于数值解的题目本身，我们也不打算在此评述现有的所有方法并讨论它们的优点与缺点。相反，我们将把注意力集中在作者已经使用，发展或有过贡献的一套特定的方法。这里只是在需要突出这种方法的某一方面时，才去参考其它的方法。在尝试推导一个通用的公式时，并没有对超音速流动，自由表面流动，或是两相流动予以专门的注意。

这本书所提出的一些数值方法有一个重要特点，这就是：它们强烈地以物理上的依据为基础，而不只是以数学推演为基础。事实上，本书没有采用任何比简单代数以及基本微积分更为高级的数学方法。这种做法的一个重要优点在于：读者在学习数值方法的同时，可以加深对基本物理过程的认识和理解。对物理意义的这种了解，在分析和解释计算结果时，是很有用的。但是，即便读者从来没有作过数值计算，通过学习这里介绍的数值方法，仍可得到较多的，也是值得注意的有关传热与流体流动物理状况的认识。此外，物理的手段将使读者掌握通用的评定准则，他们应用这些准则就可以对现有的以及未来的数值方法作出评判。

§ 1.2 预测的方法

传热与流体流动过程的预测可以通过两个主要的方法，即实验研究与理论计算的方法得到。我们将对这两种方法进行简要的讨论，并加以比较。

§ 1.2-1 实验研究

一个物理过程的最可靠的数据资料往往要由实验测量得到。采用全比例设备进行实验研究，可以预测由它完全复制的同类设备在相同的条件下将如何运行。

在大多数情况下，这种全比例实验是极其昂贵的，而且往往是不可能的。于是取代的方法是在缩小比例的模型上做实验。但是，由这些实验所得到的结果必须外推到全比例的设备上，然而进行这种外推工作的一般规律往往是无法得到的。此外，这种缩小尺寸的模型并不总是能模拟全比例设备的各方面特征；往往，象燃烧或沸腾这样一类重要特征在模型中就被忽略了。这样就进一步降低了模型试验结果的效能。最后，必须记住，在许多情况下还存在着测量上的严重困难。何况测量仪表本身也有误差。

§ 1.2-2 理论计算

理论的预测出自于一个数学模型的结果，而不是出自于一个实际的物理模型的结果。对于我们这里所要研究的物理过程，数学模型主要由一组微分方程组成。如果打算采用经典的数学方法来求解这些微分方程，那么想要预测在工程实际中许多感兴趣的现象几乎是没有什么希望的。翻一翻热传导或是流体力学的经典教科书就可以得出结论：实际问题中

只有相当小的一部分可以得到闭型解。此外，这些解往往包含有无穷级数，特殊函数以及关于特征值的超越方程等等，以致使这些数值的计算仍然是一个非常艰巨的任务*。

很幸运，数值方法的发展以及大型数字计算机的采用，使得人们有可能对几乎任何一个实际问题求出数学模型的隐含解。参看图 1.1，我们就可以得到用数值方法求解问题的初步概念。设想我们希望求得图中所示域内的温度场。可以认为只要知道域内各离散点上的温度值就足够了。一个可能的方法是想象一个充满该域的网格，并寻求在网格点上的温度值。于是我们就要构成并求解关于这些未知温度值的代数方程组。用代数方程代替微分方程所固有的简化使得数值方法强有力并得以广泛应用。

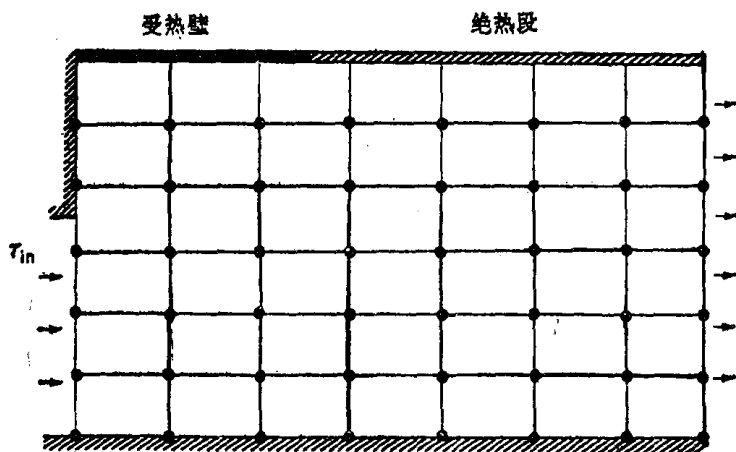


图1.1 温度场数值解的网格布置

* 这并不意味着精确的解析解毫无实际价值。事实上，正如我们将要看到的那样，我们的数值方法的某些方面就是由简单的解析解构成的。此外，检验数值方法的准确度再没有比把它跟精确的解析解相比较这个办法更好的了。但是，经典的数学方法不能为解决复杂的工程问题提供实际途径，这一点看来几乎是没有什么疑问的。

§ 1.2-3 理论计算的优点

下面列举一些有关理论计算胜过相应的实验研究的优点。

成本低 用计算的方法进行预测的最重要优点是它的成本低。在大多数实际应用中，计算机运算的成本要比相应的实验研究的成本低好几个数量级。随着所要研究的物理对象变得愈来愈大，愈来愈复杂，这个因素的重要性还会不断增长。除此而外，与大多数物品价格不断上涨的趋向相反，未来计算机计算的成本或许还会更低。

速度快 计算机计算研究能以极其惊人的速度进行。一个设计者可以在不到一天的时间内研究数百种不同的方案，并从中选择出最佳的设计。另一方面很容易想象得到，相应的实验研究将需要非常多的时间。

资料完备 对一个问题进行计算机求解可以得到详尽而又完备的资料。它能够提供在整个计算域内所有的有关变量（如速度、压力、温度、浓度及紊流强度）的值。与实验的情况不同，在计算中几乎没有达不到的位置，也不会遇到由传感器引起的流场扰动的困难。显然不可能期望实验研究能够测出整个计算域内所有变量的分布。正因为如此，就是在作实验的时候，同时求得计算机的伴随解来补充实验资料也是很有价值的。

具有模拟真实条件的能力 在理论计算中，可以很容易地模拟真实条件。不需要采用缩小的模型或冷态流动模型。就一个计算机的程序而言，无论是具有很大或很小尺寸的物体，不论是处理很低或很高的温度，也不论是控制有毒或易燃的物质，还是跟踪很快或很慢的过程，都几乎不会有任何困难。