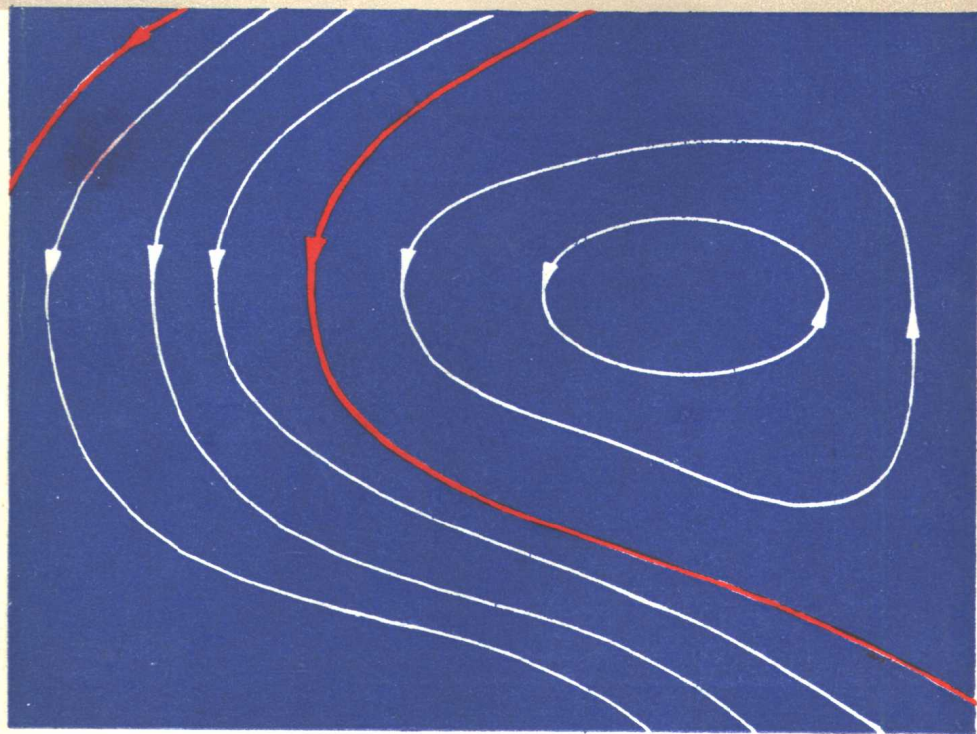


(美) S. V. 帕坦卡著
郭宽良译 葛新石校

传热和流体流动的数值方法



安徽科学技术出版社

[美] S.V.帕坦卡著

郭宽良 译 葛新石 校

传热和流体流动的数值方法

安徽科学技术出版社

责任编辑：刘海山

封面设计：徐捷

传热和流体流动的数值方法

〔美〕S. V. 帕坦卡 著

郭宽良 译 葛新石 校

安徽科学技术出版社出版

（合肥市跃进路1号）

安徽省新华书店发行 安徽新华印刷厂印刷

开本：850×1168 1/32 印张：7 字数：172,000

1984年2月第1版 1984年2月第1次印刷

印数：1—4,450

统一书号：13200·51 定价：0.90元

译者的话

为了研究和解决能源、交通、动力、化工和冶金等工程技术领域中的大量传热问题，传统上都是采用基于相似理论指导下的实验研究或近似模型计算。近十年来，计算机技术和计算方法的发展，大大地推动了数计传热学——用数值计算方法研究传热问题的进展。数计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来说，它的这个优点就更为突出。虽然数计传热学不可能替代实验研究，但大量成功的算例表明，它确实是一种研究和解决复杂的实际传热问题的有力工具。将数计传热学和实验研究相结合，不仅有助于实验方案的设计和改进，且能减少实验工作量和缩短实验周期，因此，是最有效和经济的传热研究的手段。

本书作者帕坦卡(S. V. Patankar)教授在数计传热学方面取得了较大的成就，并得到了国际上的公认。由于过去没有出版过如此系统地论述数计传热学方面的书，所以，本书原版问世后，受到了广大读者的欢迎。

我最早接触这本书是在1980年，当时，我正在美国进修，从事数计传热学的研究工作。初读一遍后，我就对帕坦卡教授在写本书时所遵循的指导原则产生了深刻的印象。这些原则的主要点是：重视物理概念和物理现象的分析；避免繁琐的数学处理，几乎不用高深的数学；由浅入深，从数值方法的基础入手，直到介绍当前最新的实用方法；通过学习，读者不仅能掌握数值方法，

而且对物理过程有更清晰的了解。因此，在1981年10月我就将本书译成了中文。

回国后，我曾以译稿作为教材，先后在中国科技大学工程热物理专业，中国科技大学研究生院(北京)讲授了数计传热学，并在中国科学院工程热物理所传热研究室讲授了主要内容，校内外的同行反映是良好的。近一年来，不少兄弟院校向我系索取译稿，并打算试用。

本书的出版，得到中国科技大学教材科的热情帮助，在此表示谢意。

限于我的水平，书中难免有误译和不妥之处，恳请读者批评指正。

译 者

1982.12.

序 言

一九七二年我在伦敦帝国学院给一小部分研究工作者讲授了非正式的传热和流体流动的数值方法课程。后来，这个材料被扩展了，并且正式成为加拿大滑铁卢大学(1974)、特隆赫姆市的挪威技术学院(1977)以及明尼苏达大学(1975、1977和1979)的研究生课程的教材。在最近两年里，我也在美国机械工程师学会的全国会议上以短期课程的形式讲授了这个材料。这些讲授所受到的热烈的反响促使我写成这本书。它可用作研究生的教材，也可以作为传热和流体流动计算工作的一本参考书。

虽然有大量的计算热流体分析的文献，但是可以给初入这个领域的新手有效地借助的则没有。研究生、研究工作者以及在第一线的工程师必须通过杂志上的文章去奋斗，否则，就只好满足于一些数值分析书上的初步介绍。常常是微妙的细节决定了计算工作的成败；而且，计算方面有成就的人们通过实践获得的经验很少出现在书上，结果是许多工作者不是经过旷日持久无效的研究而放弃了计算的手段，就是用一个效能差的计算机程序奋斗到最后。

由于意识到这种情况，我试图在本书中对主题提出一个自成体系的、简单的以及实际的处理。本书在体裁上是导论性的，它的读者对象是有可能从事传热和流体流动数值计算的工作者；本书不是为这个领域的专家们写的。在建立数值方法时，我着重于物理意义而不是数学处理。实际上，本书所用的大部分数学局限于

简单代数。因此，本书能使读者通过所有途径进入当前本主题的前沿，这个历程是通过令人喜悦的、简单和鲜明的物理概念的讨论进行的。在用这种方法讲授本书时，常常使我感到意外高兴的是：学生们不但学习了数值方法，而且还能对有关的物理过程建立较好的鉴别能力。

作为一个数学方法的使用者，我已开始喜欢某一类方法和某一套做法。这些技能一部分是从文献中收集到的，并且随后加以丰富、改进和修正。因此，由于对现有方法已做了大量的分类和筛选工作(尽管存在着个人的倾向)，我在本书中只给出了一些我想推荐的方法，我不想对所有的现有方法给出一个比较性的研究；其它的方法只是在用它来说明所论问题的具体特征时偶而提及。在这个意义上说，本书代表了我个人对该主题的看法。当然，我热心于这个观点，我承认我的选择是受我的背景、个人的爱好和技术目的所影响的。工作在不同环境的其他人，可能喜欢另外的方法。

为了说明这些方法的用途，在有些章的末尾给出了一些问题。大部分问题可以用袖珍计算器求解，而有些问题应编成计算机程序后求解。这些问题并不意味着为了测验读者，而主要是为了扩展和丰富学习过程。它们提出了另外的方法和给出了另外的材料。有时在对题解给出的一些提示中，我几乎透露了问题的全部答案。在这种情况下，得到正确的答案并不是主要的目的；读者尤应注意寓于这些问题中的启示。

对数值方法的描述，本书常常是做到可使读者开始编写计算机程序的地步。实际上，读者应该能编制出得到本书未给出的那些结果的计算机程序。根据一些求解问题的性质，可以设计出一套通用性可改变的计算机程序。许多读者可能已经发现如果一个代表性的计算机程序在本书中列入的话，它是会有帮助的。我确实考虑了这种可能性。然而，提供一个合理的通用的计算机程序，

给出它的详细说明以及若干使用范例，这样的任务看来是很艰巨的，以致于会大大地推迟本书的出版。现在我写了一节关于计算机程序的编制和试验(7·4节)，在这一节里叙述了许多有用的方法，以及通过经验得到的技巧。

本书的完成实现了我多年的希望和梦想。那是在1971年，D. B. 斯波尔丁教授曾和我计划写一本这类的书，并且还写了一个初步的概要。然而，进一步的进展由于我们之间地理上的间隔以及我们卷入种种需要参加的活动中而变得困难起来。最后，合著书似乎是不能实现了，我就着手把我的讲授笔记改写成这本教科书。现在的这本书和我们计划合著的书有某些相似之处，这是由于我无拘束地用了斯波尔丁的演讲稿和文稿，如果他本人直接参加的话，会使本书更完美。

在这件事中，我领受到斯波尔丁教授的最大恩惠，是他把我引进了计算方法这个迷人的世界，我们一起完成的工作，代表了我职业生活中最令人高兴和最有创造性的经历。在本书中到处可以发现他的想法对我的思想的影响，“单通道”和“双通道”坐标的概念(以及该术语本身)都是他的想象力的产物，是他用标准形式的一般微分方程概括了所有相关的物理过程。首先，我们在计算工作上的快速进展是来自于斯波尔丁的下述远见和信念；有一天所有实际问题都将可以用计算机分析。

我希望记下我对D. B. 斯波尔丁教授的真诚的谢意。感谢他对我职业活动的深刻的影响，持续不断的情谊，以及他对本书的直接的和间接的贡献。

E. M. 斯帕罗教授是我写这本书的最热情的支持者，他的兴趣甚至在他参加我关于这个课题的研究生课程之前就开始了。我从他的质疑和后来的讨论中得到了很大的收益。他为阅读本书的手稿以及提出许多有益的修改建议化去了无数时间。正是由于他的批评性的评述，我才能在本书中达到某种程度的清晰和完整性。

我非常感谢他对本书的积极的兴趣以及他个人对我的关心。

许多其他的同事和朋友也通过他们对我工作的特殊关心给予了我不断的鼓励。特别是我想感谢R.J. 戈尔茨坦教授的支持和鼓励，以及感谢G.D. 雷斯拜教授的许多起促进作用的讨论。我也要感谢许多参加我研究生课程的学生，他们通过提问和讨论以及热心和支持对本书作出了重要的贡献。我感谢L.R. 莱茵夫人，她仔细而乐意地打印了本书的文稿。我愿意对半球出版公司经理W. 贝奇尔先生对本书的出版给予的关心，以及对该公司职员有成效地实现出版计划表示谢意。

在我写本书期间，我的家庭给予我很大的谅解和支持。现在该书已经完成，我将花更多的时间与我的妻子和孩子们在一起。

S.V. 帕坦卡

目 录

第一章 引言	1
1.1 本书的范围	1
1.2 预测的方法	3
1.2-1 实验研究	3
1.2-2 理论计算	3
1.2-3 理论计算的长处	5
1.2-4 理论计算的不足之处	6
1.2-5 预测方法的选择	7
1.3 本书的概貌	8
第二章 物理现象的数学描述	10
2.1 控制微分方程	10
2.1-1 微分方程的含义	10
2.1-2 化学组分的守恒	11
2.1-3 能量方程	12
2.1-4 动量方程	13
2.1-5 取时间平均的湍流流动方程	13
2.1-6 湍流-动能方程	14
2.1-7 通用的微分方程	14
2.2 坐标性质	16
2.2-1 自变量	16

2.2-2 合适的坐标选择	17
2.2-3 单通道和双通道坐标	19
问题	22
第三章 离散化方法	23
3.1 数值方法的本质	23
3.1-1 任务	23
3.1-2 离散化概念	24
3.1-3 离散化方程的构造	24
3.2 得到离散化方程的方法	25
3.2-1 泰勒级数表示式	25
3.2-2 变分表示式	26
3.2-3 权余方法	27
3.2-4 控制容积表示式	28
3.3 示例	29
3.4 四个基本规则	34
3.5 小结	38
问题	38
第四章 热传导	40
4.1 本章的目的	40
4.2 稳定的一维热传导	41
4.2-1 基本方程	41
4.2-2 网格间隔	42
4.2-3 交界面的导热系数	43
4.2-4 非线性性质	46
4.2-5 热源项的线性化	47
4.2-6 边界条件	49
4.2-7 线性代数方程组的求解	52
4.3 非稳定的一维热传导	54

4.3-1	一般的离散化方程	54
4.3-2	显式, 克兰克-尼科尔森格式和全隐式格式	56
4.3-3	全隐式离散化方程	58
4.4	二维和三维情况	59
4.4-1	二维问题的离散化方程	59
4.4-2	三维问题的离散化方程	61
4.4-3	代数方程组的求解	62
4.5	超松弛和欠松弛法	68
4.6	某些几何上的考虑	70
4.6-1	控制容积面的位置	70
4.6-2	其它坐标系	74
4.7	小结	76
	问题	76
第五章	对流和扩散	82
5.1	任务	82
5.2	稳定的一维对流和扩散	83
5.2-1	初步性的推导	84
5.2-2	迎风格式	86
5.2-3	严格解	88
5.2-4	指数格式	90
5.2-5	混合格式	91
5.2-6	乘方定律格式	94
5.2-7	通用的表示式	95
5.2-8	各种格式的结果	99
5.3	二维问题的离散化方程	100
5.3-1	推导过程	101
5.3-2	最终的离散化方程	103
5.4	三维问题的离散化方程	105

5.5	单通道空间坐标	106
5.5-1	什么情况下可使空间坐标成为单通道坐标	106
5.5-2	流体自求解域流出的边界条件	107
5.6	虚假扩散	109
5.6-1	对虚假扩散的通常认识	109
5.6-2	对虚假扩散的正确认识	111
5.7	小结	115
	问题	115
第六章	流场的计算	118
6.1	特殊方法的需要	118
6.1-1	主要困难	118
6.1-2	基于湍流度的方法	119
6.2	若干有关的困难	120
6.2-1	压力梯度项的表述	120
6.2-2	连续方程的表述	122
6.3	一个补充——交错网格	124
6.4	动量方程	126
6.5	压力和速度的校正	129
6.6	压力校对方程	130
6.7	SIMPLE算法	132
6.7-1	运算次序	132
6.7-2	压力校对方程的讨论	133
6.7-3	压力校对方程的边界条件	136
6.7-4	压力的相对性质	137
6.8	一个修正算法——SIMPLER	138
6.8-1	算法修正的出发点	138
6.8-2	压力方程	139
6.8-3	SIMPLER算法	140

6·8-4 讨论	140
6·9 小结	141
问题	142
第七章 最后需做的工作	145
7·1 所述方法的迭代性质	145
7·2 热源项的线性化	149
7·2-1 讨论	149
7·2-2 对恒为正值变量的源项线性化	152
7·3 不规则的几何形状问题	153
7·3-1 正交曲线坐标	153
7·3-2 具有被挡住区域的有规则网格	154
7·3-3 耦合的传热问题	155
7·4 对计算机程序准备和试验的建议	157
第八章 特殊课题	160
8·1 二维抛物线型的流动	160
8·2 三维抛物线型的流动	161
8·3 不完全抛物线型的流动	163
8·4 有限元方法	163
8·4-1 起因	163
8·4-2 若干困难	165
8·4-3 基于控制容积的有限元方法	165
第九章 示范性的应用	169
9·1 弯曲管道内开展的流动	171
9·2 水平管内的混合对流	173
9·3 垂直管周围的熔化	174
9·4 内部加肋管中的湍流流动和换热	178
9·5 偏转的湍流射流	179
9·6 推力增大喷射器内的过混合射流	181

9·7 周期性的充分开展的通道流动.....	186
9·8 蒸汽发生器的热力——水力学分析	187
9·9 结束语	190
符号表	192
参考资料	195
内容索引	204
英汉人名对照	208

第一章 引言

1.1 本书的范围

传热和流体流动的重要性 本书讨论传热和传质、流体流动、化学反应以及其它有关过程，在工程设备、自然环境及有生命体中经常发生这些过程；在大量各种各样的实际场合，都能观察到这些过程所起的重要作用。几乎所有生产动力的方法都包含着流体流动和传热这样的基本过程。建筑物的取暖和空调也是由这些过程决定的。化学和冶金工业的主要环节都用了诸如炉子、热交换器、冷凝器以及反应器等部件，在这些部件中都包含有载热流体的流动和传热过程。飞机和火箭的功能应归功于流体流动、传热和化学反应。在电机和电子线路的设计中，传热常常是个限制因素。自然环境的污染很大程度上是由于传热和传质所引起的，暴风雨、洪水和着火也都是如此。在面临天气条件发生变化的情况下，人体求助于传热和传质来实现其温度调节。传热和流体流动过程似乎遍及我们生活的一切方面。

认识和预测的必要性 因为所讨论的这些过程对人类生活具有如此重大的影响，我们应能有效地处理它们。这种能力可从对这些过程的本质认识以及借助于能定量地预测它们的方法得到。掌握了这种技能，工程装置的设计者就能获得所需的性能，设计者就能在一些可能的方案中选择最佳的设计。预测的威力能使我们更安全 and 有效地操纵现有的设备。对有关过程的预测可以帮助我们预报、甚至控制潜在的诸如洪水、涨潮以及着火的危险。

在所有这些情况中，预测提供了经济效益，并为人类造福。

预测的性质 预测在给定的物理环境中的性能在于预先给出控制所论过程的各有关变量的值。让我们讨论一个特殊的例子。在一个确切描述的燃烧室里，完整的预测应该给出我们所关心的整个区域里的速度、压力、温度、有关组分的浓集度等值；它也应该提供在给定的燃烧室壁面处的切应力、热流强度以及质量流率。预测应能说明随着几何尺寸、流动速率及流体性质等发生设想的变化时，上述这些量将怎样变化。

本书的目的 本书的主要目的在于对传热和传质、流体流动及有关过程建立一种普遍的预测方法。我们能很快地看到，在各种预测方法中，数值解具有很大的前途。本书中，我们将建立一种用以预测一些重要过程的数值方法。

我们的目的将是尽可能地设计一种具有最普遍意义的数值方法。因此，我们将不采用任何最终的诸如二维、边界层近似以及常密度流动等限制条件。如果暂时地采用了某些限制条件的话，也只是为了易于描述和理解，而不是任何固有的限制。本书将从非常基础的水平开始，由此进展到接近于所论问题的前沿。

当然，这样庞大的任务不能用一本篇幅不大而又不漏掉许多重要课题的书来完成。所以，对描述一些重要过程的方程的表示式，本书只能扼要地讨论它。对所需方程的完整推导，读者可以查阅这类课题的一般教科书。对于象湍流、燃烧以及辐射这样一些复杂过程的数学模型，将假定读者是已知或可以搞懂的。即使在论及数值方法时，我们也不去综述所有现用的方法以及讨论它们的优缺点。相反，我们将把注意力集中在作者使用、发展过或作出了贡献的一系列特殊方法，其它方法只是在用来突出一定的结果时才被引用。在我们设法得到一般的表示式时，我们将不对超声速流动、自由表面流动或两相流动予以特别的注意。

本书中所建立的数值方法的一个重要特点在于它们是牢固地