

Mc
Graw
Hill Education



国际著名力学图书

—— 翻译版系列

Computational Fluid Dynamics

The Basics with Applications

计算流体力学入门

(美) John D. Anderson, JR. 著
姚朝晖 周强 编译

清华大学出版社



国际著名力学图书

Computational Fluid Dynamics

The Basics with Applications

计算流体力学入门

(美) John D. Anderson, JR. 著

姚朝晖 周强 编译

清华大学出版社

北京

内 容 简 介

本书从基本概念出发,结合实际应用,系统介绍了计算流体力学的基本原理、控制方程、数值分析、计算方法、网格生成等内容。内容组织循序渐进,语言表达通俗易懂,便于自学。本书是原版的编译版,在翻译原版的基础上补充了一些新的内容。本书适合于计算流体力学的初学者,可作为力学、数学、工科相关专业的本科生或研究生教材,也可供相关领域科研、工程技术人员参考。

John D. Anderson, JR.

Computational Fluid Dynamics: the Basics with Applications

ISBN: 0-07-001685-2

Copyright © 1995 by The McGraw-Hill Companies, Inc.

Original language published by The McGraw-Hill Companies, Inc. All Rights reserved. No part of this publication may be reproduced or distributed by any means, or stored in a database or retrieval system, without the prior written permission of the publisher.

This authorized Chinese adaptation is jointly published by McGraw-Hill Education (Asia) and Tsinghua University Press. This edition is authorized for sale in the People's Republic of China only, excluding Hong Kong, Macao SAR and Taiwan.

Copyright © 2011 by McGraw-Hill Education (Asia), a division of the Singapore Branch of The McGraw-Hill Companies, Inc. and Tsinghua University Press.

版权所有。未经出版人事先书面许可,对本出版物的任何部分不得以任何方式或途径复制或传播,包括但不限于复印、录制、录音,或通过任何数据库、信息或可检索的系统。

本授权中文简体字改编版由麦格劳-希尔(亚洲)教育出版公司和清华大学出版社合作出版。此版本经授权仅限在中华人民共和国境内(不包括香港特别行政区、澳门特别行政区和中国台湾地区)销售。

版权 © 2011 由麦格劳-希尔(亚洲)教育出版公司与清华大学出版社所有。

北京市版权局著作权合同登记号 图字:01-2006-7229

本书封面贴有 McGraw-Hill 公司防伪标签,无标签者不得销售。

版权所有,侵权必究。侵权举报电话:010-62782989 13701121933

图书在版编目(CIP)数据

计算流体力学入门/(美)安德森(Anderson, J. D.)著;姚朝晖,周强编译. —北京:清华大学出版社, 2010. 12

ISBN 978-7-302-23487-6

I. ①计… II. ①安… ②姚… ③周… III. ①计算流体力学 IV. ①O35

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2010)第 155694 号

责任编辑:石磊 李嫚

责任校对:王淑云

责任印制:王秀菊

出版发行:清华大学出版社 地 址:北京清华大学学研大厦 A 座

<http://www.tup.com.cn> 邮 编:100084

社 总 机:010-62770175 邮 购:010-62786544

投稿与读者服务:010-62776969, c-service@tup.tsinghua.edu.cn

质 量 反 馈:010-62772015, zhiliang@tup.tsinghua.edu.cn

印 装 者:清华大学印刷厂

经 销:全国新华书店

开 本:175×245 印 张:26.75 字 数:523 千字

版 次:2010 年 12 月第 1 版 印 次:2010 年 12 月第 1 次印刷

印 数:1~3000

定 价:42.00 元

编译者的话

Anderson 是著名的计算流体力学家,具有丰富的计算流体力学教学经验,他的《计算流体力学入门》系统介绍了计算流体力学的基本原理、控制方程、数值分析、计算方法、网格生成及其在工程中的应用,对计算流体力学的现状和发展前景也作了概要综述。该书的最大特色是作者将知识面很宽、专业知识很深、数学要求很高的计算流体力学用通俗易懂的语言深入浅出地表达出来。作者从基本概念和术语出发,一步步地引导读者深入到计算流体力学的整个领域,再配以相应的应用和实践,增强了读者的学习兴趣和信心。因此,它非常适合作为力学、计算数学及工科相关专业的本科生、研究生以及有关领域的科研、工程技术人员学习计算流体力学的第一本书。译者希望在展现原书特色的同时,能稍微增加一些计算流体力学的近期发展,因此在原书的基础上,对目前不可压缩流动常用的 SIMPLE 算法,增添了其改进型 SIMPLER 和 PISO 算法,在专题介绍中增添了 NND 格式和目前高精度格式的研究热点紧致格式的基本概念。鉴于原书应用部分介绍的喷管流动和 Prandtl-Meyer 流均是双曲线方程的应用,在计算上均采用 MacCormack 格式,所以译者在译著中去掉了 Prandtl-Meyer 流的计算。希望这样的编排可以使本书结构更紧凑,内容更丰富,并且具有一些新意。本书由姚朝晖和周强编译,本组的研究生宋昱硕士和崔新光硕士参与了部分翻译工作,在此表示衷心的感谢!此外还要感谢清华大学流体力学所的任玉新教授,他对本书进行了仔细的审阅,提出了很多宝贵的修改意见。由于编译者水平有限,时间紧张,书中难免有不足之处,请读者多提宝贵意见。

姚朝晖 周 强

2010 年 10 月于清华大学

前 言

这本计算流体力学(CFD)教材是真正为 CFD 初学者提供的。如果读者在此之前从来没有学习过 CFD,或者从未在 CFD 领域工作过,甚至对 CFD 这一学科没有基本的认识,那么本书将是非常适合的。学习本书绝对不需要 CFD 的任何知识,只需要有想了解 CFD 这一学科的愿望就可以了。

作者希望用一种简单、有趣的方式向初次学习 CFD 的读者展示这一学科。在数学上,今天的 CFD 是非常复杂的学科。在大学里,CFD 一般被认为是研究生阶段的课程,现有的教科书和大多数的专业短期培训课程都将其定位于研究生阶段的学习内容。本书的目的就是为读者在阅读 CFD 领域现有的教科书和文献之前,在参加短期 CFD 培训课程之前提供坚实的基础。本书的特点是简单和目标明确,本书旨在给读者提供一个基本的体系和概念,这对读者将来接触更复杂的 CFD 是非常有意义的。本书所用的数学和流体力学知识相当于工程和物理学专业高年级本科生的水平。实际上,本书主要面对本科高年级一个学期 CFD 课程的学生,同时也适用于研究生先期阶段的 CFD 课程教学。

本科生 CFD 方面的书尚没有固定的模式,可谓仁者见仁,智者见智。本书以这样一种形式呈现给读者,尽管可能不够完美,却是基于作者多年的教学经验和思考。为了实现本书的编写目标,作者在内容的组织方面进行了艰难的抉择。本书在介绍最近的、复杂的 CFD 时没有引入“专门”的处理方式,作者深知毫无经验的读者往往被这些高深的“专门”处理弄得一头雾水。经常发生这样的现象:一些想了解 CFD 的学生,因为这些先进复杂的处理方法半途而废,失去了继续学习 CFD 的信心和动力。因此,本书的目的就是为读者以后学习和应用先进的 CFD 处理方法做准备。本书给出了 CFD 的发展前景,使得读者有兴趣转向 CFD 的研究。作者从直观和物理角度来组织相关的 CFD 的材料。当一个 CFD 专家阅读本书时,也许其第一印象是本书有点“过时”,因为本书的一些内容是 20 世纪 80 年代的材料,然而正是这些“过时”但是被证明是可靠的思想对初学者来说是非常宝贵的经验。通过本书的学习,读者将在研究生阶段和工作阶段,在复杂的 CFD 方面不断取得进步。然而,为了扩展读者的视野,第 11 章将讨论 CFD 的一些“专门”的处理方法,一些比较超前且有用的 CFD 算例将在第 12 章展示。因此,当读者完成了本书最后几页的学习时,就已经在 CFD 学科上上了一个台阶。

本书的部分内容来自作者十年来在比利时冯·卡门流体力学研究所(VKI)的一

周短期培训课程“计算流体力学引论”和近年来在英国 Rolls-Royce 公司的培训课程。通过多年的教学经验,作者探索出了一种易被初学者接受的、具有学习成就感和吸引力的教学方法,本书便直接反映了作者在此方面的经验。作者特别感谢 VKI 的主任 John Wendt 博士,他首先意识到需要这种导论性的 CFD 课程,且早在十年前就让作者在 VKI 准备这样的课程。在后来的年份,这种对“计算流体力学引论”的需求已远远超出了我们当初最大胆的想象。最近由 John F. Wendt 博士主编的, Springer-Verlag 出版社 1992 年出版的《计算流体力学:引论》一书即是 VKI 课程笔记。本书是这一 VKI 版的极大扩充,适用于一学期的 CFD 课程教学,但是仍保持了简洁和激励的基本精髓。

本书由 4 部分组成。第 I 部分介绍了与 CFD 相关的基本思想和体系和与之相联系的对流体力学的控制方程的广泛讨论,这对学生充分认识 CFD 和感知其相关物理方程是非常重要的,它们是 CFD 的生命线。作者强烈感受到对控制方程的充分认识和理解的必要性,因此第 2 章着力于方程的获取和深入讨论,在某种意义上,第 2 章是相对独立的,可看成是控制方程的“小型课程”。经验表明,学习 CFD 的学生往往来自不同的背景,因此他们对流体力学控制方程的认识程度也相当不同,从几乎一无所知到相当了解的均有。不同背景的学生已经对本章学到的内容表达了感激之情,那些对流体力学控制方程一无所知的学生,非常高兴有机会对这些方程产生亲切感;那些对流体力学控制方程有一定了解的学生很高兴本书剥去各种形式控制方程的神秘外衣,给出其完整的描述和深入的阐述。第 2 章重点强调的哲学思想是一名优秀的计算流体力学家首先必须是一名优秀的流体力学家。

第 II 部分展示了控制方程数值离散的基本方面,详细介绍了偏微分方程的离散(有限差分方程),引入了基本数值问题,给出了几种求解流动问题的常用数值方法,最后通过几个家庭作业来简单介绍了积分形式方程的有限体积离散。

第 III 部分包含了 4 个经典动力学问题的 CFD 应用,众所周知,这些问题是涉及精确解析解的问题,可以作为 CFD 数值结果的比较基础。很明显,CFD 将要求解的真实世界的问题是没有已知的解析解的。事实上,CFD 是求解那些不能用其他方法求解的问题的工具。然而,本书的目的是为读者介绍 CFD 方面的基础知识,选择那些难以验证的应用范例对此毫无益处,因此作者宁愿选择那些简单的具有精确解的问题,这样读者可以根据已知的精确解来判别某一给定的计算方法的优缺点。书中对这 4 种应用进行了详细的介绍,读者可以清晰地看到在第 I 和第 II 部分所提到的 CFD 基础知识的直接应用。本书也鼓励读者自己编写计算机程序来求解这些问题,并用第 7~10 章中给出的结果来进行校核。从某种意义上讲,尽管本书是计算流体力学教程,但事实上也是读者获取更全面的流体力学知识的载体,作者有意识地强调各种流体问题的物理背景,目的就是加强读者的全面理解。有这样一种说法:当学生学习了第 $N+1$ 门课,才能真正掌握第 N 门课的内容。在流体力学的某些方面本书

是这一说法的一个佐证,本书就是第 $N+1$ 门课。

本书的前几部分是 CFD 算法和应用方面的基础知识,而第 IV 部分介绍了比本书前几章讨论的方法更先进的反映当代专门算法的一些专题。对这些高层次专题,本书没有详细讨论,因为这将超出本书的范围。这些专题等待读者在以后的学习中多多关注。因此只是在第 11 章中对这些专题进行了简单介绍,以使读者提前对未来的学习产生兴趣。第 11 章的目的就是让读者对当今的 CFD 技术有一些基本思想和概念。第 12 章阐述了 CFD 的未来,给出了一些近期的应用。第 12 章通过在一定程度上扩展第 1 章中具有激励性的讨论来结束本书。

事实上,在计算程序的编排上作者面临着艰难的选择,是否应该将计算程序详细地列在书中,以帮助读者进行计算机编程,认识计算效率的重要性以及 CFD 的模式化计算程序?最后作者决定不采用这种形式。本书除了在附录 A 中给出了在求解库埃特流所用到的 Thomas 算法的计算程序外,没有再给出其他计算程序。虽然给出好的和差的计算方法的相应程序有助于读者熟习和理解计算效率,但这并不是本书的目的。当读者尝试自己动手编写计算程序而不是抄写作者预先列出的程序,来求解第 III 部分中的应用题并得到合适的结果时,这将是莫大的鼓励。这一点被看成是学习过程的一部分。自己编写 CFD 程序是 CFD 学习阶段认知过程的重要组成部分。另一方面,第 III 部分所讨论的应用,其详细计算程序全部列在为本书服务的求解手册中,该手册是为讲课教师服务的。教师可以自由地将所列的计算程序根据需要部分或全部提供给学生。

关于计算图形需要说明一下,一位审稿者建议本书中应该涉及一些计算图形,这是一个好建议,因此第 6 章用了一整节的篇幅解释和说明 CFD 经常用到的各种计算图形技术,而且标准的计算图形样式遍布书中。

另外,对于像本书这种导论性的本科高年级 CFD 课程,家庭作业问题需要说明一下。关于本书中的家庭作业问题,作者是经过深思熟虑的。CFD 的实际应用,即使是列在本书中的最简单技术,在读者能够确实做出合理的计算之前也需要一个扎实的学习过程。因此在本书的前几章,读者没有较多的机会通过家庭作业来练习计算。这不同于更典型的本科生工程课题,可以通过立即布置的家庭作业,使学生沉浸于边做边学的过程中。本书的读者在学习前期未接触到第 III 部分的应用之前,完全沉浸于 CFD 的基本词汇、体系、思想和概念中,事实上读者在这些应用中应当做一些计算以使自己得到一些 CFD 的经验,即使在这些部分,这些应用实质上也大多数属于小计算项目,而不是家庭作业。本书的审稿者在家庭作业的问题上也分两派,一半审稿者认为需要留家庭作业,而另一半的审稿者则认为家庭作业没有必要。对此作者采用了折衷的立场,本书中有一些家庭作业,但不是很多。有几章有家庭作业,以帮助读者对文中讨论的概念进行深入的思考。由于本科生阶段关于 CFD 的书尚未建立相应的模式,因此本书无规可循,作者宁愿将何为适当的家庭作业的问题留给读

者和授课者来思考,让他们在此方面发挥自己的想象力。

本书保持了作者以前著作的特点,即尽力用读者容易理解的书写方式来论述。本书以对话的方式和读者交流,使得读者能够很容易地理解那些原本不容易理解的内容。

如上所述,本书的一个特色是主要针对工科和理科的本科生。自从 17 世纪以来,科学和工程沿着两条平行的轨道发展着,一个用纯实验方法处理问题,一个用纯理论方法处理问题。事实上现在的本科生工程和科学课程反映了这一传统,他们给学生提供了坚实的实验和理论基础,然而在技术发达的今天,随同实验方法和理论方法,计算力学作为新的第三种方法已经出现。在未来,每位毕业生都会以某种方式接触计算力学,因此为了让学生对当今的三种研究方法有全面了解,在流体力学方面将 CFD 课程加入本科生课程中是非常必要的。本书旨在本科生中开设 CFD 课程,希望尽可能使学生和教师体会其中的快乐。

说到本书的“偏好”,由于作者是位空气动力学家,因此讨论与航空相关的课题有种自然趋势,然而 CFD 是多学科的,除去航空航天领域,在机械、土木、化工,甚至电子工程以及在物理学和化学中都有 CFD 的应用。在写本书时,作者考虑了所有这些领域读者的要求。事实上在作者教授的 CFD 短期课程中,学生就来自上述领域,作者很高兴有此经历。因此本书所包含的材料不仅与航天航空工程有关,还与其他学科有关。机械和土木工程师在第 1 章将会看到许多熟悉的应用,也将对第 6 章中讨论的 ADI 方法和压力修正技术特别感兴趣。事实上,第 9 章中的黏性不可压缩流动的压力修正技术的求解就是针对机械和土木工程师的。然而不管应用的对象是谁,请记住本书中提供的材料是最基础的,它面向各领域的读者。

本书中所提供的素材是如何安排的?读者如果没有时间综观全书,他(她)能否跳过某些章节呢?答案基本上是肯定的。尽管作者编写本书使得按顺序连贯阅读本书的读者对基础 CFD 有一广泛的了解,但是我也认识到很多时候读者是没有这么多时间的。因此作者从战略高度来综观全书,特别是通过醒目的路标来指导读者如何阅读本书,如何根据自己的特殊需要来查找所需的内容,这些路标也出现在目录表中,随时供读者参考。

作者特别感谢美国空军学会的航空学教授 Col. Wayne Halgren。Colonel Halgren 教授花时间阅读了本书的手稿,在学会的一期高级讲座上还用到了本书,使本书在 1993 年的春天在课堂上得以接受检验。随后他不仅花时间拜访 Park 学院的作者来分享他教学实践中的经验。这些来自不同地方的信息是相当珍贵的,本书中的一些特色即出自这些相互交流。事实上,为了加强这样的交流,Wayne 几年前曾来做作者的博士生,作者很自豪能有这样高水平的学生。

我还要感谢我在 CFD 领域的所有同事,他们在 CFD 基本结构上给出了很有价值的意见,特别是书稿的评阅人,他们是 Clarkson University 的 Ahmed Busnaina,

Alabama-Huntsville University 的 Chien-Pin Chen, Pennsylvania State University 的 George S. Dulikravich, University of Virginia 的 Ira Jacobson, Old Dominion University 的 Osama A. Kandil, University of Kentucky 的 James McDonough, University of Notre Dame 的 Thomas J. Mueller, Iowa State University 的 Richard Pletcher, Florida Institute of Technology 的 Paavo Repri, University of Michigan-Ann Arbor 的 Roe P. L., University of Wisconsin 的 Christopher Rutland, Mississippi State University 的 Joe F. Thompson 和 Florida State University 的 Susan Ying, 本书的部分内容是与他们讨论的结果。同时还要特别感谢 Susan Cunningham 女士, 她是作者的特别助理, 她为本书进行了细致的准备工作, 包括公式的录入, 在本书编排过程中她得到了很大的乐趣。当然, 特别的感谢还要送给作者生命中最重要的两个组成部分——为本书的编写提供了必需的人文环境的 University of Maryland(马里兰大学)和我的妻子 Sarah-Allen, 作者在家里花费难以计数的时间写作本书时, 她给予了充分的理解和支持。对以上各位, 我谨表示衷心的感谢!

现在让我们开始学习吧! 希望在快乐阅读和计算时, 读者将有丰富的收获和乐趣。学海无涯, 乐在其中。

作 者

目 录

第 I 部分 基本思想和方程

第 1 章 计算流体力学的基本定律	3
1.1 计算流体力学:为什么?	3
1.2 计算流体力学:研究工具	5
1.3 计算流体力学:设计工具	8
1.4 计算流体力学的影响:一些应用举例	11
1.4.1 在汽车和发动机中的应用	11
1.4.2 在制造工业中的应用	15
1.4.3 在土木工程中的应用	15
1.4.4 在环境工程中的应用	17
1.4.5 在造船业中的应用(以潜艇为例)	20
1.5 计算流体力学到底是什么?	21
1.6 本书的目的	24
第 2 章 流体力学控制方程:推导、物理含义和适用于 CFD 计算的 表达形式	29
2.1 简介	29
2.2 流动模型	31
2.2.1 有限控制体	32
2.2.2 无穷小流体元	32
2.2.3 一些注释	32
2.3 物质导数(随运动流体元的时间变化率)	33
2.4 速度的散度及其物理意义	36
2.5 连续方程	38
2.5.1 空间固定的有限控制体模型	38
2.5.2 随流体一起运动的有限控制体模型	41

2.5.3	空间固定的无穷小体积元模型	41
2.5.4	随流体运动的无穷小流体元模型	43
2.5.5	各方程的统一性及操作	44
2.5.6	方程的积分与微分形式:一个明显的差异	47
2.6	动量方程	47
2.7	能量方程	52
2.8	对流体力学控制方程的总结及评论	58
2.8.1	黏性流动方程(纳维-斯托克斯方程)	59
2.8.2	无黏流动方程(欧拉方程)	60
2.8.3	控制方程评述	61
2.9	物理边界条件	63
2.10	特别适用于 CFD 的控制方程形式:关于守恒型、激波匹配和激波 捕捉的论述	65
2.11	总结	73
	习题	73
第 3 章	偏微分方程的数学特性:对 CFD 的影响	75
3.1	简介	75
3.2	拟线性偏微分方程的分类	76
3.3	确定偏微分方程类型的通用方法:特征值方法	81
3.4	不同类型偏微分方程的一般特性:对流体物理学物理和 计算的影响	84
3.4.1	双曲型方程	85
3.4.2	抛物型方程	88
3.4.3	椭圆型方程	92
3.4.4	一些评论:超声速钝头体问题回顾	94
3.5	适定问题	95
3.6	总结	95
	习题	96
第 II 部分 数值学基础		
第 4 章	离散化基础	99
4.1	绪论	99
4.2	有限差分简介	101

4.3	差分方程	113
4.4	显式和隐式算法:定义和对比	115
4.5	误差及稳定性分析	121
4.6	总结	130
	阅读路标	131
	习题	132
第 5 章	网格和相应变换	133
5.1	绪论	133
5.2	方程的一般变换	136
5.3	度量系数和雅可比行列式	140
5.4	特别适合于 CFD 应用的控制方程形式:变换的控制方程	145
5.5	一些评论	147
5.6	拉伸(压缩)网格	147
5.7	贴体坐标系统:椭圆网格生成法	152
	阅读路标	153
5.8	自适应网格	158
5.9	网格生成中的一些现代进展	164
5.10	有限体积方法中网格生成的一些现代技术:非结构网格和 笛卡儿网格的回归	166
5.11	总结	169
	习题	170
第 6 章	一些简单的 CFD 技术:入门	171
6.1	简介	171
6.2	Lax-Wendroff 格式	172
6.3	MacCormack 格式	175
	阅读路标	178
6.4	一些注释:黏性流动,守恒形式,空间推进	178
6.4.1	黏性流动	178
6.4.2	守恒形式	179
6.4.3	空间推进	179
6.5	松弛技术及其在低速无黏流动中的应用	182
6.6	数值耗散,数值色散,人工黏性	185
6.7	交替隐式方法(ADI)	193

6.8 压力修正技术:应用于不可压缩黏性流动	197
6.8.1 关于不可压缩纳维-斯托克斯方程的一些评述	197
6.8.2 关于不可压缩纳维-斯托克斯方程采用中心差分的评述: 需要交错网格	200
6.8.3 压力修正理论	202
6.8.4 压力修正方程	203
6.8.5 数值计算过程:SIMPLE 算法	208
6.8.6 压力修正方法的边界处理	209
6.8.7 SIMPLER 算法	210
小结	212
6.8.8 PISO 算法	212
阅读路标	215
6.9 CFD 中使用的计算机图形技术	215
6.9.1 xy 图	215
6.9.2 等值线图	216
6.9.3 矢量图和流线图	222
6.9.4 散斑图	222
6.9.5 网格图	223
6.9.6 组合图	224
6.9.7 计算机图形技术总结	225
6.10 总结	226
习题	228

第Ⅲ部分 应用实例

第 7 章 准一维喷管流动的数值解	231
7.1 引言:第Ⅲ部分的章节布局	231
7.2 物理问题简介:亚声速-超声速等熵流动	232
7.3 亚声速-超声速等熵流动的 CFD 解:MacCormack 方法	234
7.3.1 问题设定	235
7.3.2 中间数值结果:前几个时间步	249
7.3.3 最终数值结果:稳态解	253
7.4 完全亚声速等熵喷管流动的 CFD 解	263
7.4.1 边界条件和初始条件	264
7.4.2 最终数值解:MacCormack 方法	266

7.4.3	失败算例的分析	269
7.5	亚声速-超声速等熵流动的进一步讨论:守恒型控制方程的应用	271
7.5.1	守恒型基本方程	272
7.5.2	设定	275
7.5.3	中间步的计算:第一个时间步	279
7.5.4	最终数值解:定常状态解	285
7.6	激波捕捉一例	289
7.6.1	问题设定	290
7.6.2	时间推进的中间过程:人工黏性的添加	294
7.6.3	数值解	295
7.7	总结	301
第 8 章	不可压缩 Couette 流动:由隐式方法和压力修正方法	
	得到的数值解	303
8.1	引言	303
8.2	物理问题和精确解	304
8.3	数值方法:隐式 Crank-Nicolson 技术	306
8.3.1	数值方法	306
8.3.2	参数设定	309
8.3.3	中间结果	311
8.3.4	最终结果	315
8.4	另一种数值方法:压力修正方法	319
8.4.1	问题设定	319
8.4.2	计算结果	324
8.5	总结	326
	习题	327
第 9 章	平板上的超声速流动:完整的纳维-斯托克斯方程	
	的数值求解	328
9.1	引言	328
9.2	物理问题	329
9.3	数值计算过程:二维完整纳维-斯托克斯方程的显式有限差分	330
9.3.1	流动的控制方程	330
9.3.2	问题设定	332

9.3.3	有限差分方程	333
9.3.4	空间和时间方向步长的计算	334
9.3.5	初始条件和边界条件	336
9.4	组织纳维-斯托克斯方程的程序代码	337
9.4.1	总论	337
9.4.2	主程序	339
9.4.3	MacCormack 子程序	339
9.4.4	最后几点	342
9.5	最后的数值解:稳态解	343
9.6	总结	348

第Ⅳ部分 其他专题

第 10 章	现代 CFD 中的某些高等专题的讨论	351
10.1	简介	351
10.2	流动控制方程的守恒形式——回顾:方程的雅可比	352
10.2.1	一维流动	353
10.2.2	小结	359
10.3	隐式方法的附加考虑	359
10.3.1	方程的线化:Beam 和 Warming 方法	360
10.3.2	多维问题:近似因式分解	362
10.3.3	块三对角矩阵	365
10.3.4	小结	366
10.4	迎风格式	366
10.4.1	矢通量分裂	368
10.4.2	Godunov 方法	370
10.4.3	总结	374
10.5	二阶迎风格式	375
10.6	高分辨格式:TVD 和通量限制器	376
10.7	结论	377
10.8	NND 格式	379
10.9	紧致格式	381
10.10	多重网格	382
10.11	总结	383
	习题	384

第 11 章 CFD 的未来	385
11.1 再论 CFD 的重要性	385
11.2 CFD 中的计算机绘图	386
11.3 CFD 的未来:增强设计过程	386
11.4 CFD 的未来:增强理解	394
11.5 总结	400
附录 A 三对角方程组的 Thomas 算法	401
参考文献	405

第 I 部分

基本思想和方程

作为本书其他部分的踏板,我们将在第 I 部分中引进计算流体力学的一些基本定律和思想。此外,我们还将推导和讨论流体力学的基本方程,这些基本方程是计算流体力学的物理基础,在我们能够认识和应用任一方面的计算流体力学之前,我们必须充分理解这些基本方程,包括其数学形式和它们所描述的物理本质。这就是第 I 部分的精髓。