

高等学校通用教材

计算流体力学 方法及应用

阎超 编著

JISUAN LIUTI LIXUE
FANGFA JI YINGYONG

 北京航空航天大学出版社

高等学校通用教材

计算流体力学 方法及应用

阎超 编著



北京航空航天大学出版社

内 容 简 介

本书系统而全面地介绍了 CFD 的全貌——基本理论、计算方法及其工程应用。它从基础讲起,把读者带入 CFD 这个新兴的学科,并介绍了 CFD 发展的前沿内容;还选取一些美观的航空航天飞行器 CFD 计算图表和实例分析。

本书共分两篇:第一篇基础知识,包括绪论,流动控制方程,有限差分法理论基础, Euler 方程及双曲型方程;第二篇计算方法及应用,包括 Godunov 方法和矢量通量分裂方法,中心差分格式, MUSCL 方法、TVD 格式及 ENO 格式,时间格式,计算格式的应用、比较和评价,网格生成简述,多区重叠网格方法,湍流模式,CFD 程序实现简介。

本书可作为流体力学、空气动力学类高年级本科生及研究生教材,也可供从事流体力学、空气动力学、航空航天飞行器总体设计和气动设计等领域的科研人员、工程技术人员以及其他流体力学、流体工程类的研究生和科技人员参考。

图书在版编目(CIP)数据

计算流体力学方法及应用/阎超编著. —北京:北京航空航天大学出版社,2006.6

ISBN 978-7-81077-870-1

I. 计… II. 阎… III. 计算流体力学—高等学校—教学参考资料 IV. 035

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2006)第 051425 号

计算流体力学方法及应用

阎 超 编 著

责任编辑 宋淑娟

*

北京航空航天大学出版社出版发行

北京市海淀区学院路 37 号(100083) 发行部电话:010-82317024 传真:010-82328026

<http://www.buaapress.com.cn> E-mail: bhpress@263.net

涿州市新华印刷有限公司印装 各地书店经销

*

开本:787×960 1/16 印张:18 字数:403 千字

2006 年 6 月第 1 版 2007 年 4 月第 2 次印刷 印数:2 501~4 500 册

ISBN 978-7-81077-870-1 定价:24.00 元



序

近三四十年来,由于流体力学、数值方法和计算机的迅速发展,以及航空、航天飞行器气动设计等方面的迫切需要,计算流体力学(CFD)的基本理论、计算方法都取得了瞩目的成就,在流体力学、空气动力学和其他工程学科中发挥着越来越大的作用。今天,求解 Euler 方程和 Navier - Stokes 方程的 CFD 技术已是解决航空、航天、气象、船舶、水利、建筑、汽车等领域技术问题的重要手段。面对这种发展形势,出版适合不同读者和具有不同特色的 CFD 著作,变得十分必要。

阎超教授编著的《计算流体力学方法及应用》是一本很有特点的书,它强调物理概念,深入浅出地讲解 CFD 的基本理论和方法,使读者能迅速掌握 CFD 的知识和内容;它重视应用,读者能很快地运用到工程实际中;由于书中介绍了 CFD 的前沿研究内容和发展趋势,读者又可进一步了解到 CFD 的发展方向。这是作者多年来的教学心得和科研成果的积累,是经验和成果的总结。

阎超教授是我熟知的年轻学者。从 1994 年参与组建国家计算流体力学实验室起,长期相处,他的勤奋、敬业、热情助人和富有活力的工作精神令我感动,他在 CFD 研究中取得的成绩使我欣喜。我相信,这本著作的出版,将为我国 CFD 的发展推波助澜。

中科院院士、中国空气动力研究与发展中心研究员 张涵信

2006 年 5 月

自序

写这本书的愿望在脑海里已经萦绕很久了,日常科研和教学工作中也一直在有意识地积累相关的素材,但决定静下心来把这个愿望付诸实施却几乎是瞬间的事。

2005年炎热的暑假里,我放下所有繁重的科研和教学工作,闭门谢客、潜心写作,近40万字的书稿,在40天内一气呵成。当最后一章的最后一个字符闪烁在电脑屏幕上时,我的心情激动而又不安,就像一个即将分娩的母亲,期待着孩子来临的幸福,却又有着将为人母的忐忑。

国内外的CFD专著、教材已经不少了,我之所以要再来“添乱”,是因为已经出版的这些书大都是面向CFD专家和专业CFD科研人员,书的起点高、内容深,侧重于反映编著者的研究成果,因此取材上多有取舍。所以这些书更适合研究型专家、学者阅读。而我则一直希望能写一本系统和全面介绍CFD全貌及其发展、应用的书,书的内容由浅入深,使其读者群更加广泛,不但适合专家、学者,而且适合高年级大学生、研究生、航空航天工程技术人员和CFD使用者,等等。

落笔前,在脑海里有了本书的素描:系统、全面地介绍CFD的全貌——基本理论、计算方法及其工程应用,突出物理概念和数学模型的循序渐进、由浅入深;从基础讲起,用通俗易懂、生动活泼的语言把读者带入CFD这个新兴的学科,并介绍CFD发展的前沿内容;题材选取尽量反应最新的研究及其应用并贴近航空航天实际工程;为了结合工程实际和提高读者兴趣,选取一些美观的航空航天飞行器CFD计算图表和实例分析;在计算格式、分区方法等重要领域,还介绍了我多年来的研究成果。

写作中,一直沿着这个方向努力着!

本书共分两篇,第一篇基础知识,介绍的是 CFD 的基础理论,包括绪论,流动控制方程,有限差分法理论基础,Euler 方程及双曲型方程;第二篇系统阐述 CFD 的计算方法及其应用。计算方法主要沿上风格式和中心格式两条主线展开,也就是第 5 章和第 6 章的内容,这两章是 CFD 计算方法的核心和基础。第 7 章延伸地介绍了较高级的 CFD 方法——MUSCL 方法、TVD 格式及 ENO 格式。第 8 章就各类时间格式给出了系统、全面的论述。第 5 章~第 8 章系统地阐述了 CFD 计算方法,是本书的重点,也是读者需要认真阅读、理解、掌握的内容。第 9 章比较、评价了现在流行的 CFD 计算格式,目的是帮助读者选用合适的 CFD 计算方法。第 10 章简述了网格生成概念和技术。第 11 章讲述了多区重叠网格方法,这是一个很实用的 CFD 技术,应用广泛。第 12 章主要讨论湍流模式,是 CFD 领域的一个难点,目前还不很成熟。最后第 13 章简述了 CFD 的程序实现,也就是编程技术。第 9 章~第 13 章是 CFD 的应用部分,读者可根据自己的实际情况选择阅读。

编著这本书时,参阅了国内外很多相关的文献、书籍,在参考文献中都一一列出,如 J. D. Anderson 教授的专著、水鸿寿先生的专著、周雪漪教授的专著等。但令作者不安的是,书中也少量引用了 CFD 网站上的内容,如“流体中文网”,这些网络资料无法查到作者,只能在此致谢并表示歉意了。

我此前也曾出版过几本书,但本书是第一次独立编著完成的,也是第一次完全按照自己的意愿写完的。因此,它不仅凝聚了作者的汗水,更蕴含了作者复杂的情感。在本书即将脱稿付梓之际,我不由得抚卷长思、心潮逐浪,回忆起苦难的童年、如烟的往事。我出身贫寒,父母含辛茹苦把我抚养成成人。15 岁时第一次远离家乡去读大学,此后一直在异乡、异国飘零、拼搏。离开家乡的日子里,母亲殷切慈祥的目光、寒风中飘扬零乱的长发,永远定格在我的心底、飘荡在我的眼前,支撑着我完成了学业,成为我不懈努力的主要源泉。

所以,我愿把这本凝聚着心血的拙作,化作寸草,献给敬爱的父亲、母亲!

感谢妻子黄丽琳女士和儿子阎麟阁,他们无私的支持和默默的奉献是我坚强的后盾!感谢哥哥阎华、姐姐阎萍几十年如一日对我的关怀、呵护和支持。

感谢武汉大学皮积瑞教授、清华大学梅祖彦教授和吴玉林教授、法国 POITIERS 大学 R. Leblanc 教授、中国空气动力研究与发展中心张涵信院士等前辈们,没有他们的教诲、指导和帮助,我不可能成为一名大学教师,也就不会有本书的面世。感谢陈靓、李亭鹤博士等我可爱的学生们,本书同样凝聚了他们的心血、汗水和成果。

感谢中国空气动力研究与发展中心黎作武研究员,他认真地审阅了本书书稿,提出了许多宝贵的修改意见。

感谢所有在我成长路上帮助过我的人们,我实在无法一一列举那么多让我一直心存感激的前辈、同仁和亲友们。

感谢社会对我的厚爱,赐予我紧张、充实而又美好快乐的生活!

由于水平所限,书中难免谬误,敬请读者不吝赐教!我的电子邮箱是:chyan@vip.sina.com,期待您的批评指正,谢谢!

作 者

2006年5月于北京航空航天大学

目 录

第一篇 基础知识

第 1 章 绪 论

- 1.1 概 述 3
- 1.2 计算流体力学的基本原理和特点 5
- 1.3 计算流体力学的发展历史 6
- 1.4 计算流体力学的作用 10

第 2 章 流动控制方程

- 2.1 积分形式的 N-S 方程 15
- 2.2 微分形式的 N-S 方程 17
 - 2.2.1 笛卡儿坐标系下的 N-S 方程 17
 - 2.2.2 一般曲线坐标系下的 N-S 方程 18
 - 2.2.3 N-S 方程组的无量纲化 25
 - 2.2.4 薄层粘性假设 26
- 2.3 其他形式的 N-S 方程 27
 - 2.3.1 拟线性型 N-S 方程 27
 - 2.3.2 有限体积型 N-S 方程 27
- 2.4 流体力学控制方程组的数学性质 28
 - 2.4.1 偏微分方程的分类及其意义 28
 - 2.4.2 偏微分方程的数学分类方法 30
- 2.5 模型方程 33
 - 2.5.1 模型方程的意义 33
 - 2.5.2 几个典型的模型方程 33

第 3 章 有限差分法理论基础

- 3.1 有限差分逼近 35

3.1.1	差商近似	35
3.1.2	差分格式及其构造	38
3.1.3	显式与隐式差分格式	41
3.1.4	截断误差与差分格式精度	42
3.2	差分格式的基本性质及基本定理	43
3.2.1	差分格式的相容性	43
3.2.2	差分格式的稳定性	43
3.2.3	差分格式的收敛性	44
3.2.4	Lax 等价定理	44
3.2.5	差分格式的稳定性分析	44
3.2.6	一维气动方程差分格式的稳定性	50
3.3	数值耗散与数值色散	52
3.3.1	数值耗散	52
3.3.2	数值色散	54
3.3.3	数值耗散的作用	55
3.4	有限差分法与有限体积法的关系	55
3.4.1	有限体积法	55
3.4.2	有限差分法与有限体积法的异同	58
3.4.3	有限差分法与有限体积法的统一表达式	59
第 4 章 Euler 方程及双曲型方程		
4.1	非线性守恒系统和 Euler 方程	62
4.2	双曲型方程基本概念	64
4.2.1	双曲型方程定义	64
4.2.2	双曲型方程的特征性质	64
4.2.3	双曲型方程的特征线与特征方向	66
4.3	上风差分格式基础	67
4.3.1	上风差分格式的基本概念	67
4.3.2	常系数方程组的上风格式	70
4.3.3	拟线性双曲型守恒律组的上风格式	72
4.4	守恒型格式	74
4.5	Riemann 问题	74
4.5.1	Riemann 问题的定义	75
4.5.2	Riemann 问题解的简述	75

4.5.3 Riemann 问题示例:激波管	77
4.6 弱解及熵条件	78

第二篇 计算方法及应用

第 5 章 Godunov 方法和矢通量分裂方法

5.1 上风格式总论	83
5.1.1 上风格式的发展历史和基本特点	83
5.1.2 上风格式的不同发展方向	84
5.2 Godunov 类方法	84
5.2.1 Godunov 方法简述	84
5.2.2 Roe 格式推导	86
5.2.3 三维 Roe 格式公式	89
5.2.4 熵修正	91
5.3 FVS 方法	92
5.3.1 Steger 和 Warming 的 FVS 方法推导	92
5.3.2 van Leer 格式推导	99
5.3.3 三维 van Leer FVS 格式	103
5.4 AUSM 类格式	105

第 6 章 中心差分格式

6.1 Jameson 中心差分格式	109
6.2 人工粘性的改进	111
6.2.1 各向同性人工粘性	111
6.2.2 各向异性人工粘性	112
6.2.3 类 TVD 变量修正	114
6.3 显式时间推进法——Runge - Kutta 方法	115
6.4 加速收敛方法	116
6.4.1 当地时间步长	117
6.4.2 隐式残差平均	117
6.5 应用实例	119

第 7 章 MUSCL 方法、TVD 格式及 ENO 格式

7.1	MUSCL 概念和 TVD 概念	121
7.1.1	MUSCL 概念	121
7.1.2	TVD 概念	122
7.2	限制器	123
7.2.1	限制器的意义	123
7.2.2	限制器的基本描述	124
7.2.3	常用限制器	126
7.2.4	限制器性能分析的数值实验	128
7.3	TVD 格式	131
7.3.1	TVD 格式的构造	131
7.3.2	Harten - Yee 的上风 TVD 格式	132
7.4	ENO 格式和 WENO 格式简述	133
7.5	NND 格式简述	135
7.5.1	格式构造的几个原则	135
7.5.2	半离散化的 NND 格式	136

第 8 章 时间格式

8.1	概 述	138
8.2	显式格式和隐式格式	139
8.2.1	显式格式和隐式格式的基本原理	139
8.2.2	显式格式和隐式格式的特点	143
8.3	多维、非线性隐式格式的推导	143
8.3.1	非线性隐式格式的推导	143
8.3.2	多维非线性隐式格式——近似因子分解(AF)法	144
8.4	实用的时间格式	147
8.4.1	显式格式——Runge - Kutta 多步格式	147
8.4.2	隐式时间离散的一般形式	148
8.4.3	LU - SGS 方法	151
8.4.4	LU - ADI 方法	154
8.4.5	对角化格式	155
8.5	粘性项近似隐式处理	156
8.6	时间步长计算	156

8.6.1	Euler 方程时间步长	157
8.6.2	N-S 方程时间步长	158
8.7	非定常计算方法	160
8.7.1	时间离散	161
8.7.2	采用双时间步(dual-time-step)法的隐式时间离散方法	162
8.7.3	单时间步隐式迭代推进方法	164
8.7.4	几何守恒律	165
8.7.5	非定常流动计算实例	165
第 9 章 计算格式的应用、比较和评价		
9.1	CFD 计算格式的理论分析	168
9.1.1	中心差分格式	168
9.1.2	FDS 格式	169
9.1.3	FVS 格式	170
9.1.4	AUSM 格式	171
9.1.5	TVD 与 ENO 格式	171
9.2	上风格式的比较研究	172
9.2.1	上风格式统一形式	172
9.2.2	上风格式性能分析的数值实验	172
9.3	多种计算格式的粘性分辨率比较研究	176
9.3.1	研究背景	176
9.3.2	数值实验及其分析	177
9.4	二维前向台阶激波反射计算的格式效应	180
9.4.1	二维前向台阶激波反射计算背景	180
9.4.2	计算结果及其分析	182
9.4.3	几点结论	185
第 10 章 网格生成简述		
10.1	网格生成技术基础	186
10.1.1	概 述	186
10.1.2	结构网格的多区技术	189
10.2	代数网格生成技术	191
10.2.1	网格生成方法简述	191
10.2.2	一维分布函数控制方法	192

10.2.3	无限插值代数方法	193
10.3	椭圆网格生成方法	195
10.3.1	主控方程	196
10.3.2	源项控制	196
10.3.3	离散方程及求解	197
10.3.4	松弛法	197
10.4	结构网格质量的检查评估与优化控制	199
第 11 章 多区重叠网格方法		
11.1	引 言	200
11.2	Chimera 方法	201
11.2.1	挖洞技术	201
11.2.2	找点技术	207
11.2.3	国内现状与展望	208
11.3	感染免疫法	209
11.3.1	传统方法	209
11.3.2	感染免疫法	210
11.3.3	应用算例	212
11.4	割补法	214
11.4.1	割补法流程简介	214
11.4.2	方法改进与功能扩展	216
11.4.3	三维算例	219
11.4.4	计算效率	220
第 12 章 湍流模式		
12.1	概 述	221
12.2	零方程模式	223
12.3	半方程模式	225
12.4	一方程模式	228
12.4.1	Baldwin - Barth 湍流模式	229
12.4.2	Spalart - Allmaras 模式	230
12.5	两方程模式	231
12.5.1	标准 $k-\epsilon$ 两方程模式	231
12.5.2	可实现性 $k-\epsilon$ 模式	233

12.5.3	低雷诺数 $k-\varepsilon$ 模式	233
12.5.4	$k-\omega$ 两方程模式	235
12.5.5	Menter SST 两方程模式	236
12.6	湍流模式的性能分析和一般性评价	237
12.6.1	零方程模式	238
12.6.2	一方程模式	239
12.6.3	两方程模式	240
12.6.4	结 论	242
第 13 章 CFD 程序实现简介		
13.1	概 述	244
13.2	总体要求	244
13.3	程序结构	245
13.3.1	程序框图	246
13.3.2	输入输出文件	246
13.4	程序结构实例	250
13.4.1	Jameson 显式中心格式	250
13.4.2	隐式 LU-SGS 和 AUSM 格式	252
13.5	定解条件	254
13.5.1	初始条件	254
13.5.2	边界条件	255
13.6	CFD 商业软件和网站简介	259

参考文献

第一篇

基础知识

第1章 绪论

1.1 概述

目前,一般将流体力学的研究和分析手段分为理论分析、实验研究及数值计算三种。

理论分析的方法是在研究流体运动规律的基础上,建立各种简化的流动模型,形成描述流动的各类控制方程;在一定假设和条件下,经过解析推导及运算,得到问题的解析解或简化解。其最大特点是往往可以给出带普遍性的信息,且在一些情况下可得到封闭的、简单的公式。因此可以用最小的代价给出规律性的结果或变化趋势。但是,由于流体力学的控制方程一般是非线性的,只有极少数情况可以得到解析解;而与工程相关的复杂流体力学问题几乎不可能得到解析解。因此,这类方法主要用于进行定性分析或做初步的设计和分析。

长期以来,实验研究一直是流体力学的主要研究手段。其原理是利用相对运动原理,建立地面实验设备,如水洞、水槽、风洞、激波管、电弧加热器等,直接测量流动参数,获取速度、压力、力、力矩与热力学等相关的流体力学方面的数据。从而形成了流体动力学的一个重要分支——实验流体力学。一般说来,由于它是实际测量的流动参数,比较真实可靠,因此一直是流体力学研究的主要手段。但是,实验研究一般是在模拟条件——一定比尺的缩小模型和一定相似条件的流动环境——下完成的,几乎所有的地面实验设备都不能完全满足所有相似参数、相似定律的要求,而且实验除了存在洞壁效应、支架干扰、测量误差等外,还存在高超声速流动中真实气体的非平衡效应等很难模拟的因素,所以实验研究也受到不少限制。一般说来,实验研究周期长、费用高。

上述的理论分析和实验研究方法历史悠久,伴随着整个流体力学的发展历程;而数值计算方法——通常称为计算流体力学、计算流体动力学(Computational Fluid Dynamics, CFD)、数值计算或数值分析等——则是一个相对年轻的方法,尤其是经过近 30 年的迅速发展,目前已经成为一个独立的学科分支,成为当今流体力学中最活跃、最有生命力的领域之一。

本书就是论述计算流体力学的一本专著。

已经知道,流体的运动学和动力学行为服从质量、动量和能量三大守恒定律,并由这三大守恒定律定量确定。经典流体动力学主要成就之一就是给出了这三大守恒定律的严格数学形式——控制方程。从 18 世纪开始,科学家们陆续创立了各种形式的控制方程,如经典的 Euler 方程和 Navier - Stokes 方程。遗憾的是,这些控制方程绝大多数无解析解,只能采用各种数学手段求其近似解,这就是广义的流体力学数值计算,也就是今天的 CFD 的雏形。所以说,实