



JIANZHU HUANJING YU SHEBEI GONGCHENG
XILIE JIAOCAI

建筑环境与设备工程系列教材

计算流体力学

JISUAN LIUTI LIXUE

- 总策划 付祥钊
- 编 著 龙天渝 苏亚欣
向文英 何 川
- 主 审 蔡增基



重庆大学出版社

<http://www.cqup.com.cn>

035
81
2007



JIANZHU HUANJING YU SHEBEI GONGCHENG
XILIE JIAOCAI

建筑环境与设备工程系列教材

计算流体力学

JISUAN LIUTI LIXUE

- 总策划 付祥钊
- 编 著 龙天渝 苏亚欣
 向文英 何 川
- 主 审 蔡增基

重庆大学出版社

重庆 八一路

重庆 800000

重庆 800000

重庆 800000

重庆 800000

重庆 800000

重庆 800000

重庆 800000

重庆 800000

重庆 800000

重庆 800000

重庆 800000

重庆 800000

重庆 800000

重庆 800000

重庆 800000

重庆 800000

重庆 800000

重庆 800000

重庆 800000

重庆 800000

重庆 800000

重庆 800000

重庆 800000

重庆 800000

重庆大学出版社

内 容 提 要

本书是“建筑环境与设备工程系列教材”之一。全书从应用计算流体力学和使用商用 CFD 软件的角度讨论了数值模拟的基本概念和基本方法,并主要介绍了工程流动与传热计算中最常用的有限体积法,内容包括:流体动力学的诸方程和湍流模型及其数学性质、扩散方程的离散方法与格式、对流扩散方程的离散方法与格式、流场的压力速度耦合算法与离散格式、网格生成技术和计算流体力学在专业中的一些应用实例等。

本书可作为建筑环境与设备工程、环境工程、热能与动力工程、市政工程等相关专业高年级本科生、研究生的教学用书或参考书;还可以供科技工作者参考。

图书在版编目(CIP)数据

计算流体力学/龙天渝等编著. —重庆:重庆大学出版社, 2007. 3

建筑环境与设备工程系列教材

ISBN 978-7-5624-3956-1

I. 计… II. 龙… III. 计算流体力学—高等学校—教材
IV. 035

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2007)第 017722 号

建筑环境与设备工程系列教材

计算流体力学

总策划 付祥钊

编 著 龙天渝 苏亚欣

向文英 何 川

主 审 蔡增基

责任编辑:陈红梅 周怀改 版式设计:李长惠 陈红梅

责任校对:谢 芳 责任印制:赵 晟

*

重庆大学出版社出版发行

出版人:张鸽盛

社址:重庆市沙坪坝正街 174 号重庆大学(A区)内

邮编:400030

电话:(023)65102378 65105781

传真:(023)65103686 65105565

网址:<http://www.cqup.com.cn>

邮箱:fxk@cqup.com.cn(市场营销部)

全国新华书店经销

重庆现代彩色书报印务有限公司印刷

*

开本:787×1092 1/16 印张:10.25 字数:256千

2007年3月第1版 2007年3月第1次印刷

印数:1—3 000

ISBN 978-7-5624-3956-1 定价:17.00元

本书如有印刷、装订等质量问题,本社负责调换

版权所有,请勿擅自翻印和用本书

制作各类出版物及配套用书,违者必究

编审委员会

- 顾 问 田胜元(重庆大学)
彦启森(清华大学)
刘安田(解放军后勤工程学院)
- 主任委员 付祥钊(重庆大学)
- 委 员 (排名按姓氏笔画)
- 卢 军(重庆大学)
付祥钊(重庆大学)
安大伟(天津大学)
李长惠(重庆大学出版社)
李永安(山东建筑大学)
刘光远(扬州大学)
李 帆(华中科技大学)
李安桂(西安建筑科技大学)
连之伟(上海交通大学)
张 旭(同济大学)
张国强(湖南大学)
吴祥生(解放军后勤工程学院)
段常贵(哈尔滨工业大学)
徐 明(中国建筑西南设计研究院)
龚延风(南京工业大学)
黄 晨(上海理工大学)
裴清清(广州大学)
- 秘 书 肖益民(重庆大学)
陈红梅(重庆大学出版社)

序 (第一版)

建筑环境与设备工程专业是按新的教育思想,以原供热供燃气通风与空调工程专业为主,与建筑设备等专业一起整合拓宽的一个新专业。学生毕业后从事的主要工程领域是公用设备工程,执业身份是注册公用设备工程师。

公用设备工程是一幢建筑、一个城市、一个国家现代化程度的主要标志之一,是一个十分广阔而且正在不断发展扩大的工程领域。为了学生能在有限的时间内全面完成注册公用设备工程师所要求的专业教育,必须构建好建筑环境与设备工程专业学科体系。在全国高校建筑环境与设备工程学科专业指导委员会的组织与指导下,各高校合作开展教学改革,构建了建筑环境学和流体输配、传热传质等工程学原理与关键技术组成的学科平台,并编写出版了推荐教材。

建成学科平台之后,紧接着需要在平台上展开公用设备工程的技术体系。

本系列教材就是为了满足上述要求而组织编写的。其目标是充分利用学科平台,全面展开公用设备工程技术体系的教学,显著拓宽专业口径,增强学生驾驭工程技术的能力。

本系列教材的突出特点是内容体系上的创新。它特别注意与学科平台的联系,努力消除原专业课程中的重复现象,突出公用设备工程的主体技术,提高学时效率,符合教学改革的要求。

本系列教材的编者既有教学经验又有工程实践经验,而且一直同时处于教学和工程第一线。他们在编写这套教材时,十分重视理论联系实际,重视引入最新工程技术成果。

通过本系列教材的学习,学生能够掌握建筑环境与设备工程专业的学科技术;结合生产实习、课程设计和毕业设计等实践教学环节的训练,掌握工程技术问题的综合处理方法,达到注册公用设备工程师所要求的专业技术水平。

这套系列教材也可用于学生和工程技术人员自学来系统掌握公用设备工程技术。

预祝本系列教材在编者、授课教师和学生的共同努力下,通过教学实践,获得进一步的完善和提高。

付祥利

2002年3月

序(第二版)

重庆大学教学改革成果——《建筑环境与设备工程系列教材》，在编著者和重庆大学出版社的共同努力下，从2002年至2004年陆续出版，满足了该专业教学的迫切需要，2005年获得重庆市优秀成果奖。

2003年11月13日，《全国高等学校土建类专业本科教育培养目标和培养方案及主干课程教学基本要求——建筑环境与设备工程专业》正式颁布。重庆大学城市建设与环境工程学院、重庆大学出版社联合组织来自清华大学、重庆大学、华中科技大学、东南大学、南京航空航天大学、解放军后勤工程学院、重庆科技学院、西南石油学院、福建工程学院等高校的专家、学者同编著者一起，进行了学习和研讨，并决定立即启动《建筑环境与设备工程系列教材》(第二版)及扩展新教材的编写和出版工作。各位编著者都做出了积极的响应，更多学术造诣高，富有教学和工程实践经验的老师们加入了编写、主审和编委队伍。

《建筑环境与设备工程系列教材》的及时更版和扩展，为解决长期以来学生和社会反映强烈的教学内容陈旧问题创造了条件。各位编著者认真总结了第一版使用中的经验教训，仔细领会专业指导委员会的意见和公用设备工程师注册的专业教育要求，密切关注相关科学技术的发展，使第二版从体系到内容都有明显改进。第二版更注意在保持各门课程的完整性的同时，加强各门课程之间的呼应与协调，理论与工程实践相结合的特色更加鲜明。扩展新教材是该系列教材的进一步补充和完善，有助于拓宽专业口径。燃气方向的选题，丰富了我国该方面急需的技术专业书籍。

教材建设是一个精益求精、永无止境的奉献过程。祝愿编著者和出版社积极进取，努力奉献，保持本系列教材及时改版，更臻完美的好做法。编著者亲自在教学第一线讲授自己编写的教材，对于教材质量的提高是必须的；同时，通过广泛交流和调查研究，听取意见和建议，吸取各校师生使用教材的经验教训，对于教材的完善更是非常重要的。

如何解决专业教学内容日益丰富，而讲授学时显著减少的矛盾，是当前专业教学面临的困难之一。全国各高校的专业老师们都在努力寻找或创造解决这一矛盾的方法。总结和提炼这方面的教学实践经验，可使本系列教材内容新颖而丰富，所需的讲授学时相对减少。

近几年，现代教材手段正在各高校迅速普及。基于现代教学手段，我们这套系列教材的教学方法也应努力创新。

本系列教材第二版的完成及扩展教材的出版，既要祝贺编审和出版社，更要感谢使用每本系列教材的教师和同学们，他们献出了很多极有价值的意见。

付祥利

2005年10月

前 言

在现代工业的很多领域,如暖通空调、环境工程、热能工程、化学工程、航空航天、大气物理、水利工程、汽车工程等,都涉及大量的与流动相关的问题。对流动过程及流动状态的正确描述在很多情况下是解决这些问题的基础。研究流动问题或流体力学问题的方法有理论分析方法、实验研究方法和数值分析方法。一般来说,理论分析方法只能在很少数的、简单的流动条件下才能得到有意义的解析解;实验研究方法是过去及目前研究流动问题的重要方法,对于推动流体力学的发展,以及推动相关学科和工业的技术进步发挥了巨大的作用,但实验方法费时费力,精细的实验结果要求有精密的现代测试仪器与技术,对于复杂的流动,开展实验研究的难度很大;随着高性能计算机的普及与数值计算技术的提高,流动问题的数值分析(或通常所称的计算流体力学,Computational Fluid Dynamics, CFD)已经成为研究复杂流动问题的重要方法。它可以在较短时间内比较精细地描述流场,模拟流动过程、传热过程、燃烧过程、污染物扩散和迁移等过程。目前,计算流体力学已经在许多行业得到成功应用,在科学研究、设计和生产中发挥了越来越大的作用。掌握和熟练地使用计算流体力学已经成为现代科研人员和工程技术人员从事有关行业工作所需要掌握的一项重要技能。

针对一般工科专业的需要,我们编写了这本《计算流体力学》教材。全书以简短的篇幅介绍了计算流体力学的基础理论,并对几个典型领域的应用进行了讨论,希望能为有志于学习和应用数值计算方法解决流动问题的读者提供一个关于计算流体力学的入门指导。

本书由重庆大学龙天渝、东华大学苏亚欣、重庆大学向文英、重庆大学何川共同编写。其中,龙天渝编写第1,7章及8.2节;苏亚欣编写第4,5章及8.1节;向文英编写第6章及8.4节;何川编写第2,3章及8.3节。全书由龙天渝统稿,由重庆大学蔡增基教授担任主审。

在编写过程中,编者参考了许多国内外的有关教材、专著和研究论文,特此致谢!同时,本书得到东华大学2006年研究生教材建设基金的支持,特此致谢!重庆大学出版社编辑陈红梅女士在整个编写和出版过程中给予了热情的鼓励和支持,特此致谢!

作为重庆大学出版社出版组织编写的“建筑环境与设备工程系列教材”之一,本书同样可作为热能与动力工程、化学工程、市政工程、环境工程等专业的低年级本科生和研究生“计算流体力学”课程的教材,也可供有关工程技术人员和研究人员参考。

本书为计算流体力学的初学者打开了一扇窗口,更多的计算流体力学理论和实践能力需要在今后的不断学习和应用中掌握和提高。作者深知计算流体力学的博大精深和自身水平有限,对书中的错误、缺点,诚挚地期待着来自读者的批评和建议。

编 者

2006年10月

目 录

1 绪 论	1
1.1 计算流体力学概述	1
1.2 数值模拟过程	2
1.3 控制方程的离散方法	3
1.4 数值模拟的局限性和发展前景	4
1.5 计算流体力学软件的结构	6
1.5.1 前处理器	6
1.5.2 求解器	6
1.5.3 后处理器	7
1.6 常用的计算流体力学商用软件	7
1.6.1 PHOENICS	7
1.6.2 CFX	8
1.6.3 STAR-CD	9
1.6.4 FIDAP	10
1.6.5 FLUENT	11
2 流体流动的数学模型	13
2.1 流体流动和传热的基本方程	13
2.1.1 连续性方程	13
2.1.2 运动方程	14
2.1.3 能量方程	15
2.1.4 组分质量守恒方程	16
2.1.5 状态方程	17
2.2 牛顿型流体流动的控制方程	17
2.3 流体流动控制方程的通用形式	19
2.4 流动现象及其数学模型的类别	19
2.5 流体流动控制方程的定解条件	21
2.5.1 关于椭圆型和抛物型方程定解条件的一般提法	21
2.5.2 不可压缩流体流动控制方程定解条件的常用提法	21

2.5.3	关于流动控制方程定解条件的思考	22
	参考文献	23
3	湍流的数学模型	24
3.1	湍流现象	24
3.2	湍流的基本方程	26
3.3	关于湍流时均运动控制方程组封闭性方法的一般介绍	27
3.4	湍流 κ - ϵ 两方程模型	29
3.4.1	标准 κ - ϵ 两方程模型	29
3.4.2	RNG κ - ϵ 模型	32
3.4.3	Realizable κ - ϵ 模型	33
3.5	在近壁区使用 κ - ϵ 模型的问题及对策	35
3.5.1	近壁区流动的特点	35
3.5.2	在近壁区使用 κ - ϵ 模型的问题	36
3.6	雷诺应力模型(RSM)	40
3.6.1	雷诺应力输运方程	41
3.6.2	RSM 的控制方程组及其解法	44
3.6.3	对 RSM 适用性的讨论	45
	参考文献	46
4	扩散问题的有限体积法	47
4.1	一维稳态扩散问题的有限体积法	48
4.1.1	节点划分	48
4.1.2	方程的离散	49
4.1.3	方程的求解	50
4.1.4	示例	50
4.2	二维和三维稳态扩散问题的有限体积法	57
4.2.1	二维稳态扩散问题	57
4.2.2	三维稳态扩散问题	58
4.3	非稳态扩散问题的有限体积法	59
4.3.1	一维非稳态扩散问题	59
4.3.2	示例	62
4.3.3	多维问题的隐式格式	65
4.4	线性方程组的求解	65
4.4.1	TDMA 算法	66
4.4.2	迭代法	68
4.4.3	超松弛和欠松弛	69
	参考文献	70

5	对流-扩散问题的有限体积法	71
5.1	一维稳态对流-扩散问题的有限体积法	71
5.2	中心差分格式	72
5.3	离散格式的性质	76
5.3.1	守恒性	76
5.3.2	有界性	77
5.3.3	迁移性	78
5.3.4	中心差分格式的性质	79
5.4	迎风格式	80
5.5	混合格式	82
5.6	幂指数格式	83
5.7	对流-扩散问题的高阶差分格式——QUICK 格式	83
5.8	多维对流-扩散问题的离散格式	87
5.9	边界条件的处理	88
5.9.1	入口边界条件	88
5.9.2	出口条件	89
5.9.3	壁面条件	90
	参考文献	93
6	流场的计算	95
6.1	引言	95
6.2	交错网格	96
6.2.1	基本变量法求解的有关困难	96
6.2.2	解决方案——交错网格	97
6.3	运动方程的离散	98
6.4	SIMPLE 算法	99
6.4.1	压力与速度的修正	99
6.4.2	压力修正方程	100
6.4.3	SIMPLE 算法的基本思路	101
6.4.4	SIMPLE 算法的讨论	102
6.4.5	SIMPLE 算法压力修正方程的边界条件	103
6.5	SIMPLER 算法	103
6.6	SIMPLEC 算法	106
6.7	PISO 算法	107
	参考文献	108
7	网格生成技术	110
7.1	引言	110

7.2 贴体坐标	111
7.2.1 贴体坐标的基本概念	111
7.2.2 贴体坐标变换	113
7.2.3 控制方程的转换及离散化	114
7.2.4 边界条件的转换	116
7.3 贴体结构性计算网格的生成	117
7.3.1 椭圆型微分方程生成法	117
7.3.2 贴体正交坐标	119
7.4 调整网格疏密	119
7.5 分区与并行计算的网格	121
7.6 非结构性计算网格的生成	122
7.7 结构/非结构混合网格	124
参考文献	125
8 应用实例	126
8.1 室内污染物的扩散	126
8.2 建筑物顶部结构对街道峡谷内流场及污染物扩散的影响	134
8.2.1 流场的计算结果	135
8.2.2 污染物扩散分析	136
8.3 方形空间内的混合对流换热	138
8.3.1 基本流动图	138
8.3.2 入口射流角度对流动的影响	139
8.3.3 Re 的影响	140
8.3.4 几何结构的影响	140
8.4 混合器内的流动与换热	140

1 绪 论

自 20 世纪中叶第一台电子计算机问世以来,计算方法继实验方法与分析方法之后,成为科学研究的第三种研究方法。计算流体力学亦逐渐发展成流体力学学科中的独立分支。随着计算机技术和性能的不断提高,计算流体力学已经渗透到许多相关学科和工程应用之中。

1.1 计算流体力学概述

流体流动与传热现象大量存在于自然界及多种工程领域中,在一般工科本科的“流体力学”课程中,主要讨论一元流动或引入平均速度后的近似一元流动(例如,管流)。所谓一元流动,是指有关物理量仅与一个空间坐标有关。然而,在实际流动中,大部分流动为非一元流动,即使是等直径圆管中的流动,当考虑实际的流动速度时,在圆柱坐标系中当 z 轴与管轴线相重合时,认为该流动仍为二元流动;在直角坐标系中,则为三元流动。为了了解和预测流动状况,须给出控制该流动过程的有关物理量(例如,速度和压力等),在流场中各点的具体数值及其变化情况,理论上的方法是求解物理量所满足的连续性方程、运动方程和能量方程等流动基本方程。但是,对于非一元流动,这些方程通常为非线性的偏微分方程,仅有极少数的流动问题可以得到解析解或摄动解。因此,寻找数值解是解决流体流动与传热问题的重要方法之一。

计算流体力学的基本思想可概括为:把原来在时间域及空间域上连续的物理量用一系列有限个离散点上的变量值的集合来代替,通过一定的原则和方式对流动基本方程进行离散,建立起离散点上变量值之间关系的代数方程组,然后求解代数方程组获得变量的近似值。

计算流体力学是研究在流动基本方程控制下流动的数值模拟方法。数值模拟是“在计算机上实现的一个特定的计算,通过数值计算和图像显示履行一个虚拟的物理实验——数值试验(P. J. Roache, 1983)”。通过这种数值模拟,可以得到极其复杂问题的流场内各个位置上的基本物理量(如速度、压力、温度、浓度等)的分布,以及这些物理量随时间的变化情况,确定旋涡分布特性、空化特性及脱流区等;还可据此算出相关的其他物理量(例如,旋转式流体机械的转矩、流动损失和效率等)。此外,与 CAD 结合还可进行结构

优化设计等。

近十多年来,计算流体力学有了很大的发展,所有涉及流体流动、热质交换、分子输运等现象的问题,几乎都可以通过计算流体力学的方法进行分析和模拟。计算流体力学不仅作为一个研究工具,而且还作为设计工具在土木工程、环境工程、水利工程、食品工程、海洋结构工程、工业制造等领域发挥作用。典型的应用场合及相关的工程问题包括:

- 水轮机、风机和泵等流体机械内部的流体流动;
- 飞机和航天飞机等飞行器的设计;
- 汽车流线外型对性能的影响;
- 洪水波及河口潮流计算;
- 风载荷对高层建筑物稳定性及结构性能的影响;
- 温室及室内的空气流动及环境分析;
- 电子元器件的冷却;
- 换热器性能分析及换热器片形状的选取;
- 河流中污染物的扩散;
- 汽车尾气对街道环境的污染;
- 食品中细菌的转移。

对这些问题的处理,过去主要是借助于基本的理论分析和大量的物理模型实验来实现的,而现在大多采用数值模拟的方法加以分析和解决。目前,计算流体力学技术已发展到完全可以分析三维粘性湍流及旋涡运动等复杂问题的程度。

1.2 数值模拟过程

对流体流动进行数值模拟,通常包括以下步骤:

1) 建立反映工程问题或物理问题本质的数学模型

建立反映问题各物理量之间关系的微分方程及相应的定解条件,这是数值模拟的出发点。没有正确的数学模型,数值模拟就毫无意义。流体流动的基本方程,即控制方程通常包括连续性方程、运动方程和能量方程,以及这些方程相应的定解条件。

2) 寻求高效率、高准确度的计算方法

建立针对控制方程的数值离散化方法,如有限差分法、有限元法、有限体积法等。这里,计算方法不仅包括微分方程的离散化方法及求解方法,还包括计算网格与贴体坐标的建立、边界条件的处理等。这些均是计算流体力学研究的主要内容。

3) 编制程序和进行计算

该步骤是整个工作的主体。

4) 显示计算结果

通常,计算结果是通过图像和曲线等方式显示的,这对检查和分析计算结果具有重要的作用。

对于恒定流动问题,数值模拟过程可用图 1.1 表示。如果为非恒定问题,则可将该图的过程理解为一个时间步的计算过程,循环这一过程求解下一个时间步的变量值。

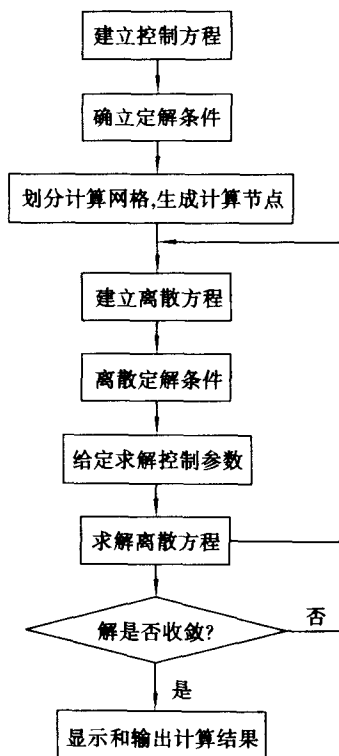


图 1.1 数值模拟过程

1.3 控制方程的离散方法

经过半个世纪的发展,形成了多种计算流体力学的数值解法。这些方法之间的主要区别在于对控制方程的离散方式。广泛应用的有以下 3 种解法:

- 有限差分法(Finite Difference Method, FDM);
- 有限元法(Finite Element Method, FEM);
- 有限体积法(Finite Volume Method, FVM)。

1) 有限差分法

有限差分法是应用最早、最经典的数值方法,它将求解域划分为差分网格,用有限个网格节点代替连续的求解域,然后将偏微分方程的导数用差商代替,推导出含有离散点上有限个未知数的差分方程组。求解差分方程组,即微分方程定解问题的数值近似解。它是一种直接将微分问题变为代数问题的近似数值解法,这种方法发展较早,比较成熟,较多地用于求解双曲型和抛物型问题。在此基础上发展起来的方法有:PIC(Particle-in-Cell)法、MAC(Marker-and-Cell)法,以及由美籍华人学者陈景仁提出的有限分析法(Finite Analytic Method, FAM)等。

2) 有限元法

有限元法是20世纪80年代开始应用的一种数值解法,它吸收了有限差分法中离散处理的内核,又采用了变分计算中“选择逼近函数对区域进行积分”的合理方法。有限元法因求解速度较有限差分法和有限体积法慢,因此,在计算流体力学中应用得不是特别广泛。在有限元法的基础上,英国C. A. Brebbia等提出了边界元法和混合元法等方法。

3) 有限体积法

有限体积法(又称为有限容积法)是将计算区域划分为一系列控制体积,将待解微分方程对每一个控制体积积分得出离散方程。它的关键是在导出离散方程过程中,需要对界面上的被求函数本身及其导数的分布做出某种形式的假定。用它导出的离散方程可以保证具有守恒特性,而且离散方程系数物理意义明确,计算量相对较小。1980年,S. V. Patanker在其专著——*Numerical Heat Transfer and Fluid Flow*中对有限体积法做了全面的阐述。此后,该方法得到了广泛的应用,是目前计算流体力学中应用最广的一种方法。当然,对这种方法的研究和扩展也在不断进行,如P. Chow提出了适用于任意多边形非结构网格的扩展有限体积法等。

考虑到目前的计算流体力学商用软件大多采用有限体积法,本书后续内容主要讨论有限体积法。

1.4 数值模拟的局限性和发展前景

计算流体力学不只是探求流体力学中偏微分方程的各种数值解法,其实质是在物理直观和力学实验的基础上建立各种流体运动的有限的数值模型。当问题本身遵循的规律比较清楚,且所建立的数学模型能够比较准确地反映问题本质时,数值模拟具有较大的优越性。相对于流体实验方法而言,数值模拟有其独特的优点:数值模拟可以大幅度地减少完成新设计所需的时间和成本;能研究难以进行或不可能进行受控实验的系统;能超出通

常的行为极限,研究危险条件下的系统;比实验研究更自由、更灵活;可以无限量地提供研究结果的细节,便于优化设计。同时,它具有很好的重复性,条件容易控制,这对湍流的数值模拟尤为重要。

另一方面,数值模拟也有一定的局限性,并面临不少问题。了解这些局限性既有助于适当地评价数值模拟的结果,又有助于人们在陷入困境时找到解决问题的对策。

1) 数值模型要有准确的数学模型

流动现象的机理尚未完全清楚前,其数学模型很难准确化。流体力学曾极大地推动了偏微分方程理论、复变函数、向量和张量分析,以及非线性方法的发展。但是,计算流体力学不是纯理论分析,非线性偏微分方程数值解的现有理论尚不充分,还没有严格的稳定性分析、误差估计或收敛性证明。在计算流体力学中,必须依赖一些对简单化、线性化的相关问题的严格数学分析,以及启发性的物理直观、推理、试验等方法。

2) 数值试验不能代替物理试验或理论分析

数值模拟只有在网格尺度为0的极限情况下才能获得原方程的精确解,而这种极限是无法达到的。离散化的结果不仅在数值上可能影响计算的精度,而且在性质上还可能改变流动的特性。即使有了可靠的理论方程,数值模型的可靠性仍需要得到实践的验证。另外,数值模型的有效性,需要提供与一个问题有关的边界条件的详尽信息。为此,必须在一定范围获得实验数据以提供边界条件。

3) 计算方法的稳定性和收敛性问题

在数值模拟中,对数学方程进行离散化时,需要对计算中所遇到的稳定性和收敛性等进行分析。这些分析方法大部分对线性方程是有效的,对非线性方程来说只有启发性,没有完整的理论。对边界条件影响的分析,困难就更大些。所以,计算方法本身的正确与可靠也要通过实际计算加以确定,在计算过程中有时还需要一定的技巧。

4) 数值模拟受到计算机条件的限制

计算流体力学必须给出实行数值模拟的快速算法,但是计算机的运行速度和容量限制了模拟的实现,数值模拟还不能完成达到工程实用的要求。直接用湍流的雷诺平均N-S方程数值模拟湍流一般还不可能,目前只能就几个最简单的情形进行模拟。由于网格的最小尺度难以达到湍流的最小尺度,因而湍流的最小尺度可能影响大范围的流动性质。

总之,关于一次模拟的精确度的绝对保证还没有,需要经常地、严格地验证其结果的有效性。成功的数值模拟来自于对流体流动物理及数值算法基础的透彻的理解和经验,没有这些,就不能得到最好的结果。

寻找高效率、高准确度的计算方法和发展高容量高性能的计算机系统是计算流体力学在近期需要解决的问题。计算流体力学的方法在各相关学科中得到广泛应用并获得成

果;反之,应用成果也会促进计算流体力学自身的发展。

1.5 计算流体力学软件的结构

掌握数值模拟的基本原理和过程等基本知识后,能更好地理解 CFD 软件内部的基本运作和成功地进行运算。所有的商用 CFD 软件均包括 3 个基本环节:前处理、求解和后处理,与之对应的程序模块常简称为前处理器、求解器和后处理器。

1.5.1 前处理器

前处理器(preprocessor)用于完成前处理工作。前处理环节是向 CFD 软件输入所求问题的相关数据,该过程一般是借助与求解器相对应的对话框等图形界面来完成的。在前处理阶段需要用户进行以下工作:

- ①定义所求问题的几何计算域。
- ②将计算域划分成多个互不重叠的子区域,形成了由单元组成的网格。
- ③对所研究的流动现象进行抽象,建立物理模型,选择相应的控制方程。
- ④定义流体的属性参数。
- ⑤为计算域边界处的单元指定边界条件。
- ⑥对于非恒定流动问题,指定初始条件。

流动问题的解是在单元内部的节点上定义的,解的精度由网格中单元的数量所决定。一般来讲,单元越多、尺寸越小,所得到的解的精度越高,但所需要的计算机内存资源(即 CPU)也相应地增加。为了提高计算精度,在物理量梯度较大的区域,以及人们感兴趣的区域往往要加密计算网格。在前处理阶段生成计算网格时,关键是要把握好计算精度与计算成本之间的平衡。

目前,在使用商用软件进行计算时,有超过 50% 以上的时间花在几何区域的定义及计算网格的生成上。可以使用 CFD 软件自身的前处理器来生成几何模型,也可以借用其他商用 CFD 或 CAD/CAE 软件(如 PATRAN, ANSYS, I-DEAS, Pro/ENGINEER)来提供几何模型。此外,指定流体参数的任务也是在前处理阶段进行的。

1.5.2 求解器

求解器(solver)的核心是数值求解方案。常用的数值求解方案包括有限差分、有限元和有限体积法等。总体上讲,这些方法的求解过程大致相同,一般包括以下步骤:

- ①借助简单函数来近似表示待求的流动变量。
- ②将该近似关系代入连续型控制方程中,形成离散方程组。
- ③求解代数方程组。

一般来讲,各种数值求解方案的主要差别在于流动变量被近似的方式及相应的离散