

研究生教学用书

专业基础课系列

计算流体力学

Computational Fluid Dynamics

李万平 编

BOOKS FOR GRADUATE STUDENTS

华中科技大学出版社

研究生教学用书
专业基础课系列

计算流体力学

李万平 编

华中科技大学出版社

图书在版编目(CIP)数据

计算流体力学/李万平 编
武汉:华中科技大学出版社,2004年10月
ISBN 7-5609-3214-2

- I. 计…
- II. 李…
- III. 计算流体力学-研究生-教材
- IV. O35

计算流体力学

李万平 编

责任编辑:万亚军
责任校对:朱霞

封面设计:刘奔
责任监印:张正林

出版发行:华中科技大学出版社

武昌喻家山 邮编:430074 电话:(027)87557437

录排:华大图文设计室
印刷:湖北恒吉印务有限公司

开本:787×960 1/16

印张:14

字数:251 000

版次:2004年10月第1版

印次:2004年10月第1次印刷

定价:21.00元

ISBN 7-5609-3214-2/O·321

(本书若有印装质量问题,请向出版社发行部调换)

内 容 简 介

本书主要介绍了工程流动计算最常用的有限差分法和有限体积法。内容包括有限差分法的概念和一般的有限差分格式,有限体积法的交错网格和压强速度耦合算法,离散格式的数学特性和物理特性等。书中还介绍了结构性和非结构性网格的基本生成方法,混合网格和自适应直角网格生成法的特点。最后一章以粘性流体绕圆柱的二维流动为例,具体说明了数值模拟流动现象的过程。

本书强调基础、突出应用,可作为工程类专业硕士研究生和高年级本科生计算流体力学课程的教材。本书用一定篇幅给出了与流体力学数值模拟有关的基本原理和主要的湍流模型,可供使用CFD商业软件的读者阅读参考。

ABSTRACT

This book covers basic fundamentals to the understanding and application of finite difference methods and finite volume methods, which are most extensively used in engineering flow computations. The text contains the concepts and schemes of the finite difference, the staggered grid and pressure-velocity coupling algorithm of the finite volume methods, and the mathematical and physical characteristics of discrete schemes. The text describes also the basic grid generation techniques of structured and unstructured meshes, and the features of adaptive Cartesian grid. The book illustrates the process of flow simulation in details at the last chapter by using two-dimensional viscous flow round a circle cylinder as a typical example.

This book emphasizes the basic concepts and applications in engineering. It can be served as a textbook of the computational fluid dynamics for advanced undergraduates and graduate students of various engineering specialties.

The book provides readers, who want to operate CFD commercial codes successfully, the fundamental material needed for a good simulation of fluid flows in three dimensions and turbulence by means of the finite difference methods or finite volume methods.

前 言

计算流体力学(Computational Fluid Dynamics, 简称CFD)不仅是现代流体力学与应用数学的重要基础,而且以其为学科基础的CFD技术具有强大的模拟能力。CFD作为计算流体力学工程应用的代名词,已经深深地渗透到现代科学的各个相关学科和工程应用之中。

全书共分7章。第1章介绍有限差分如何从纯粹的数学公式成为计算流体力学最重要的计算方法的过程,讨论流体力学数值模拟的局限性和发展前景。

第2章从推导直角坐标下控制流体运动的偏微分方程开始,得到了一般的输运方程和必要的辅助条件,这是发展随后的数值算法的基本公式。

第3章叙述湍流概念的发展,介绍湍流物理和一些简单湍流的特征,讨论用于工程CFD的主要湍流模型。这是很多工程应用中充分评估CFD功能所必需的。

第4章构筑了计算流体力学中最常用的有限差分法。

第5章致力于有限体积法的数值算法。有限体积法起源于特殊的有限差分格式,是当前CFD所采用的最完善且普遍有效的技术。

第6章提供了计算网格的基本生成方法,介绍了最常用的几种结构性网格生成法和非结构性网格生成法的工作原理,以及混合网格生成法和自适应直角网格生成法的新发展。

第7章详细说明计算不可压缩粘性流体绕流圆柱的流体力学的方法和生成染色线图的方法,帮助读者完成一次数值模拟的全过程。

本书强调基础,突出应用,力求反映最新的学科进展。读者通过本课程的学习可达到的目标是,对计算流体力学的原理和方法有较全面的了解,具备模拟流动问题的实际能力。鉴于以上考虑,本书采众家之长,内容参考了参考文献所列专著和文献。读者可以根据本书所提供的线索在互联网上和专门论著中找到计算流体力学的更多专题和相关应用实例。

敬请读者指出本书的不足与谬误,联系地址为武汉华中科技大学力学系。

编 者

2004年2月于喻园

写在“研究生教学用书”出版15周年前夕

“接天莲叶无穷碧，映日荷花别样红。”今天，我国的教育正处在一个大发展的崭新时期，而高等教育即将跨入“大众化”的阶段，蓬蓬勃勃，生机无限。在高等教育中，研究生教育的发展尤为迅速。在盛夏已临，面对池塘中亭亭玉立的荷花，风来舞举的莲叶，我深深感到，我国研究生教育就似夏季映日的红莲，别样多姿。

党的十六大报告以空前的力度强调了“科教兴国”的发展战略，强调了教育的重大作用，强调了教育的基础性全局性先导性，强调了在社会主义建设中教育的优先发展的战略地位。从报告中，我们可以清楚看到，对高等教育而言，不仅赋予了重大的历史任务，而且更明确提出了要培养一大批拔尖创新人才。不言而喻，培养一大批拔尖创新人才的历史任务主要落在研究生教育肩上。“百年大计，教育为本；国家兴亡，人才为基。”国家之间的激烈竞争，在今天，归根结底，最关键的就是高级专门人才，特别是拔尖创新人才的竞争。由此观之，研究生教育的任务可谓重矣！重如泰山！

前事不忘，后事之师。历史经验已一而再、再而三地证明：一个国家的富强，一个民族的繁荣，最根本的是要依靠自己，要以“自力更生”为主。《国际歌》讲得十分深刻，世界上从来就没有什么救世主，只有依靠自己救自己。寄希望于别人，期美好于外力，只能是一种幼稚的幻想。内因是发展的决定性的因素。当然，我们决不应该也决不可能采取“闭关锁国”，自我封闭，固步自封的方式来谋求发展，重犯历史错误。外因始终是发展的必要条件。正因为如此，我们清醒看到了，“自助者人助”，只有“自信、自尊、自主、自强”，只有独立自主，自强不息，走以“自力更生”为主的发展道路，才有可能在向世界开放中，争取到更多的朋友，争取到更多的支持，充分利用好外部的各种有利条件，来扎扎实实地而又尽可能快地发展自己。这一切的关键就在于，我们要有数量与质量足够的高级专门人才，特别是拔尖创新人才。何况，在科技高速发展与高度发达，而知识经济已初见端倪的今天，更加如此。人才，

高级专门人才,拔尖创新人才,是我们一切事业发展的基础。基础不牢,地动山摇;基础坚牢,大厦凌霄;基础不固,木凋树枯;基础深固,硕茂葱绿!

“工欲善其事,必先利其器。”自古凡事皆然,教育也不例外。教学用书是“传道授业解惑”培育人才的基本条件之一。“巧妇难为无米之炊”。特别是在今天,学科的交叉及其发展越来越多及越快,人才的知识基础及其要求越来越广及越高,因此,我一贯赞成与支持出版“研究生教学用书”,供研究生自己主动地选用。早在1990年,本套用书中的第一本即《机械工程测试·信息·信号分析》出版时,我就为此书写了个“代序”,其中提出:一个研究生应该博览群书,博采百家,思路开阔,有所创见。但这不等于他在一切方面均能如此,有所不为才能有所为。如果一个研究生的主要兴趣与工作不在某一特定方面,他也可选择一本有关这一特定方面的书作为了解与学习这方面知识的参考;如果一个研究生的主要兴趣与工作在这一特定方面,他更应选择一本有关的书作为主要的学习用书,寻觅主要学习线索,并缘此展开,博览群书。这就是我赞成要为研究生编写系列的“研究生教学用书”的原因。今天,我仍然如此来看。

还应提及一点,在教育界有人讲,要教学生“做中学”,这有道理;但须补充一句,“学中做”。既要在实践中学习,又要在学习中实践,学习与实践紧密结合,方为全面;重要的是,结合的关键在于引导学生思考,学生积极主动思考。当然,学生的层次不同,结合的方式与程度就应不同,思考的深度也应不同。对研究生特别是对博士研究生,就必须是而且也应该是“研中学,学中研”,在研究这一实践中,开动脑筋,努力学习,在学习这一过程中,开动脑筋,努力研究;甚至可以讲,研与学通过思考就是一回事了。正因为如此,“研究生教学用书”就大有英雄用武之地,供学习之用,供研究之用,供思考之用。

在此,还应进一步讲明一点。作为一个研究生,来读“研究生教学用书”中的某书或其他有关的书,有的书要精读,有的书可泛读。记住了书上的知识,明白了书上的知识,当然重要;如果能照着用,当然更重要。因为知识是基础。有知识不一定有力量,没有知识就一定没有力量,千万千万不要轻视知识。对研究生特别是博士研究生而言,最为重要的还不是知识本身这个形而下,而是以知识作为基础,努力通过某

种实践,同时深入独立思考而体悟到的形而上,即《老子》所讲的不可道的“常道”,即思维能力的提高,即精神境界的升华。《周易·系辞》讲了:“形而上谓之道,形而下谓之器。”我们的研究生要有器,要有具体的知识,要读书,这是基础;但更要有“道”,更要一般,要体悟出的形而上。《庄子·天道》讲得多么好:“书不过语。语之所贵者意也,意有所随。意之所随者,不可以言传也。”这个“意”,就是孔子所讲的“一以贯之”的“一”,就是“道”,就是形而上。它比语、比书,重要多了。要能体悟出形而上,一定要有足够数量的知识作为必不可少的基础,一定要在阅读去获得知识时,整体地读,重点地读,反复地读;整体地想,重点地想,反复地想。如同韩愈在《进学解》中所讲的那样,能“提其要”,“钩其玄”,以达到南宋张孝祥所讲的“悠然心会,妙处难与君说”的体悟,化知识为己之素质,为“活水源头”。这样,就可驾驭知识,发展知识,创新知识,而不是为知识所驾驭,为知识所奴役,成为计算机的存储装置。

这套“研究生教学用书”从第一本于1990年问世以来,到明年,就经历了不平凡的15个春秋。从研究生教育开始以来,我校历届领导都十分关心研究生教育,高度重视研究生教学用书建设,亲自抓研究生教学用书建设;饮水思源,实难忘怀!“逝者如斯夫,不舍昼夜。”截至今天,“研究生教学用书”的出版已成了规模,蓬勃发展。目前已出版了用书69种,有的书发行了数万册,有22种分别获得了国家级、省部级教材奖、图书奖,有数种已为教育部列入向全国推荐的研究生教材,有20种一印再印,久销不衰。采用此书的一些兄弟院校教师纷纷来信,称赞此书为研究生培养与学科建设做出了贡献。我们深深感激这些鼓励,“衷心藏之,何日忘之?!”没有读者与专家的关爱,就没有我们“研究生教学用书”的发展。

唐代大文豪李白讲得十分正确:“人非尧舜,谁能尽善?”我始终认为,金无足赤,物无足纯,人无完人,文无完文,书无完书。“完”全了,就没有发展了,也就“完”蛋了。江泽民同志在党的十六大报告中讲得多么深刻:“实践没有止境,创新也没有止境。”他又指出,坚持“三个代表”重要思想的关键是与时俱进。这套“研究生教学用书”更不会例外。这套书如何?某本书如何?这样的或那样的错误、不妥、疏忽或不足,必然会有。但是,我们又必须积极、及时、认真而不断地加以改进,与时俱进,奋发前进。我们衷心希望与真挚感谢读者与专家不吝指教,及时批

评。当局者迷，兼听则明；“嚶其鸣矣，求其友声。”这就是我们肺腑之言。当然，在这里，还应该深深感谢“研究生教学用书”的作者、审阅者、组织者（华中科技大学研究生院的有关领导和工作人员）与出版者（华中科技大学出版社的编辑、校对及其全体同志）；深深感谢对“研究生教学用书”的一切关心者与支持者，没有他们，就决不会有今天的“研究生教学用书”。

我们真挚祝愿，在我们举国上下，万众一心，在“三个代表”重要思想的指引下，努力全面建设小康社会，加速推进社会主义现代化，为实现中华民族伟大复兴，“芙蓉国里尽朝晖”这一壮丽事业中，让我们共同努力，为培养数以千万计高级专门人才、特别是一大批拔尖创新人才，完成历史赋予研究生教育的重大任务而做出应有的贡献。

谨为之序。

中国科学院院士
华中科技大学学术委员会主任
杨叔子
2003年7月于喻园

主要符号表

x, y, z	直角坐标分量	Φ	耗散函数、 φ 的时均量
ξ, η, ζ	曲线坐标分量	K	湍流时均动能
ψ	流函数	k	湍流脉动动能、热传导率
ζ	平面法向涡量分量	ε	湍流动能耗散率、扰动量
t	时间	q, q_x, q_y, q_z	热通量矢量及分量
f	频率	θ	湍流大涡速度尺度、辐角
U	x 时均速度、特征速度	l	湍流大涡长度尺度、混合长度
V	y 时均速度、体积	η_t	湍流最小长度尺度
W	z 时均速度	v_t	湍流最小速度尺度
A	面积	u_r	摩擦速度
U	时均速度矢量	V_ξ, V_η	曲线坐标速度分量
u, u, v, w	瞬时速度矢量及分量	u_ξ, u_η	计算域速度分量
u', u', v', w'	脉动速度矢量及分量	J	雅克比行列式
T_i	湍流强度	h_ξ, h_η	拉梅系数
T	温度	ω	松弛系数
p	压强	i	比内能
P	时均压强	h, h_0	比焓、总比焓
p'	脉动压强	E	比能
ρ	密度	c_v	比定容热容
a	对流速度、圆半径	c_p	比定压热容
c	Courant 数、波速	μ	流体动力粘度
L	特征长度	ν	流体运动粘度
F	对流通量	λ	流体第二粘度, 特征值
D	扩散传导率、直径	α	粘性扩散系数
Re	雷诺数	Γ	扩散系数
Pe	佩克莱特数	δ	边界层厚度, 横向尺度
St	斯特鲁哈数	τ_{ij}	粘性应力分量
M	马赫数	e_{ij}	变形率分量
σ	普朗特数	$\nabla \cdot ()$	散度算子
S	输运方程的源项	∇	梯度算子
φ	流体物体量、标量	∇^2	拉普拉斯算子

目 录

主要符号表

第1章 绪论	(1)
1.1 计算流体力学的形成与早期发展	(1)
1.2 计算流体力学的新进展	(2)
1.3 数值模拟的过程	(3)
1.4 数值模拟的局限性和发展前景	(6)
第2章 流体流动的数学模型	(9)
2.1 流体流动和热传导的基本方程	(9)
2.2 状态方程	(16)
2.3 牛顿流体的 Navier-Stokes 方程	(17)
2.4 流体流动控制方程的守恒形式	(21)
2.5 一般输运方程的微分形式和积分形式	(21)
2.6 流体流动方程的分类	(23)
2.7 粘性流动方程的辅助条件	(30)
第3章 湍流与湍流模型	(34)
3.1 什么是湍流	(34)
3.2 层流向湍流转捩	(36)
3.3 湍流对时均 Navier-Stokes 方程的影响	(38)
3.4 简单湍流的特征	(43)
3.5 湍流模型	(49)
第4章 发展方程的有限差分法	(63)
4.1 有限差分法的概念和一般的有限差分格式	(63)
4.2 有限差分方程的相容性	(72)
4.3 有限差分法的隐式格式和迎风格式	(73)
4.4 有限差分方程的收敛性和稳定性	(77)
4.5 几种常用的差分格式及其稳定性条件	(88)
4.6 边界条件及其对稳定性的影响	(94)
4.7 修正方程及其应用	(96)
第5章 有限体积法	(101)
5.1 扩散问题的有限体积法	(101)
5.2 对流扩散问题的有限体积法	(107)
5.3 定常流动的压强速度耦合算法	(127)

5.4	非定常流动的有限体积法	(137)
5.5	确定边界条件	(149)
第6章	网格生成技术	(160)
6.1	贴体坐标变换	(161)
6.2	单域贴体结构性计算网格的生成	(165)
6.3	调整网格疏密	(169)
6.4	分区与并行计算的网格	(172)
6.5	非结构性计算网格的生成	(175)
6.6	结构/非结构混合格网	(181)
6.7	自适应直角网格	(182)
第7章	数值模拟二维不可压缩粘性流体绕圆柱的流动	(186)
7.1	钝物体绕流的流体动力特性	(186)
7.2	流函数-涡量法解圆柱绕流问题的差分格式	(189)
7.3	初始条件和边界条件	(194)
7.4	流体动力计算	(198)
7.5	动态流动显示的染色线生成法	(201)
	参考文献	(206)

第1章 绪 论

自1946年第一台电子计算机问世,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一门独立学科。短短几十年里,随着计算机技术和性能的提高,计算流体力学已迅速发展成为现代流体力学与应用数学的重要基础,深深渗透到现代科学的许多相关学科和工程应用之中。

本章介绍计算流体力学的形成、早期发展和新成果,以及有限差分如何从纯粹的数学公式成为计算流体力学最重要的计算方法的过程。计算流体力学在上个世纪后半叶迅速发展,主要体现在两个方面:一是计算有旋涡和分离的复杂流场;二是模拟转捩与湍流。计算流体力学以计算机模拟手段为基础,对涉及流体流动、传热及相关现象,如化学反应等的系统进行分析,在几何模型和网格生成、数值算法、湍流模型、流态显示等方面均取得重大进展。以计算流体力学为学科基础的CFD技术有强大的模拟能力,覆盖了工程的或非工程的广大领域。

本章还将介绍数值模拟的实现过程并讨论数值模拟的局限性和发展前景。

1.1 计算流体力学的形成与早期发展

17世纪末叶到19世纪末叶,流体力学理论在实验的基础上得到了极大的丰富和发展,建立了流体运动所遵循的,普遍而精确的Navier-Stokes方程(简称N-S方程)。20世纪初,人类进入航空时代,理论流体力学和实验流体力学都获得了极大的发展。但由于N-S方程是非线性方程,实际流动又非常复杂,仅有极少数的问题可以得到解析解或摄动解。实验流体力学在方法和技术迅速发展的同时,亦遇到实验研究费用高昂和场地、安全等要求的限制。在这种情况下,解决流动问题的实际需要促成了流体力学的第三支柱——计算流体力学的诞生和发展。

计算机问世前,偏微分方程数值分析研究的重点是椭圆型方程或所谓判定问题。1928年,R. Courant, K. Friedrichs 和H. Lewy发表经典论文,证明了连续的椭圆型、抛物型和双曲线方程组的有限差分解的存在性和惟一性定理。他们本来的兴趣在于用有限差分公式作为纯粹的数学工具,这些工作后来成了计算流体力学实际应用有限差分法的指南。

计算流体力学方面的许多先驱工作是在Los Alamos的科学实验室中完成

的。在第二次世界大战中,正是在Los Alamos, J. von Neumann建立了抛物型有限差分方程的稳定性准则,并且提出了分析线性化方程的方法。直到1950年,方法的简要描述才在公开的文献中出现(J. G. Charney等,1950)。

1953年, E. C. Dufort和S. P. Frankel对抛物型方程提出了“跳点”方法,像ADI方法一样,它也允许任意大的时间步长(在没有对流项的情况下),而且具有全显式的优点。F. H. Harlow和J. E. Fromm(1963)在他们著名的非定常涡街的数值解中,应用了这个方法。1965年,他们发表在杂志《Scientific American》上的文章特别激起了研究者对计算流体力学潜力的广泛兴趣。几乎同时, E. O. Macagno写的一篇类似的文章登在法国杂志《La Houille Blanche》上。这两篇文章中,清楚地叙述了数值模拟或计算机试验的概念。由于这两篇文章的出现,计算流体力学作为一门独立学科出现的日子得以确定。

1.2 计算流体力学的新进展

从20世纪60年代后期以来的短短几十年里,随着计算机技术和性能的提高,计算流体力学已迅速发展。它能计算理论流体力学所不能求解的、复杂几何形状下的流动;它省钱省时,已代替了很大一部分风洞试验;采用计算手段已发现了一些理论上还解不出、实验上还测不到的流动中的新现象。

这个时期,计算流体力学的发展主要体现在两个方面:一是计算更加复杂的有旋涡流和分离流的流场;二是为理解物理机制而模拟转换与湍流的流动现象。了解第二部分的内容需要参考专门著作的论述,这里只介绍与复杂流场计算有关的数值计算方法的发展:几何模型和网格生成、N-S方程解的算法、湍流模型、数值流动显示和后处理技术。

计算流体力学以计算机模拟手段为基础,对涉及流体流动、传热及相关现象,如化学反应等的系统进行分析。以计算流体力学为学科基础的所谓CFD技术有强大的模拟能力,已覆盖了工程的或非工程的广大领域,如:

- 飞机或车辆空气动力学:升力、阻力;
- 船舶流体动力学;
- 电厂:内燃机和气轮机中的燃烧;
- 涡轮机械:在旋转通道和扩散段等的内部流动;
- 电力和电子工程:具有微电路的设备的冷却;
- 化学处理工程:混合和分离,聚合物熔融;
- 建筑物内、外环境:风载与暖通;
- 海洋工程:离岸结构的载荷;
- 水文学与海洋学:河流、港湾、海洋中的流动;

- 环境工程: 污染物质、排放的气体与液体的流布;
- 气象学: 天气预报、海浪和风暴的预报;
- 生物医学工程: 动脉与静脉中的血流、生物芯片内的流动。

1960年以来,CFD技术大规模进入飞机和喷气发动机的研发、设计和制造,可控核反应堆温度场分布以及航天飞机飞行和返回时复杂流场的预测等领域。随后,这一技术又应用于内燃机、气轮机燃烧室和熔炉的设计。在汽车制造业,用CFD预报阻力、分析车壳内部流动和车内环境等已成为常规。CFD的应用日益成为工业生产中工艺设计的关键因素,其发展的终极目的是提供与其他计算机辅助工具,如应力分析软件相当的能力。CFD长期落后于应力分析软件的主要原因是流动本身极其复杂,而在许多情况下,既要完全地描述流体流动状况,又要承受高昂的计算费用。在20世纪90年代,便宜的高性能计算机硬件和CFD软件对用户友好的界面导致CFD打开了进入广阔工业领域的大门。

随着计算技术的发展,数值计算作为一种研究手段,已越来越多地渗入到各种学科中去。反过来,各种问题的需要,又促进了计算方法的研究和发展。由于流体力学计算的需要,有限差分法、有限元法、谱法等计算方法已在实际中得到应用。本书主要介绍流体力学计算方法中最成熟、最常用的有限差分法。

湍流数值模拟方法的研究对计算机的速度和内存提出了更高的要求,单纯提高机器速度及内存已无法满足要求。波尔兹曼格子气是一种全新的概念和方法,这种格子气在微观的层次上考虑物理机制,将流体力学问题离散化,使每一步的计算大大简化。随着计算机硬件技术的发展,人们已提出大规模并行运算的设想,并正在研究和设计快速有效的并行算法及与之配套的并行计算机。20世纪90年代初,人们发现量子计算机的计算速度有可能超过任何一种经典计算机。IBM Almaden Research Center(2001)的分子试验将核磁共振量子计算提升到了一个新的水平,这将有助于研制新一代的计算机。

1.3 数值模拟的过程

计算流体力学的任务是流体力学的数值模拟。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)”。数值模拟包括以下几个步骤。

首先,要建立反映问题(工程问题、物理问题等)本质的数学模型。建立反映问题各量之间的微分方程及相应的定解条件,这是数值模拟的出发点。牛顿型流体流动的数学模型就是著名的N-S方程及其相应的定解条件。

其次,数学模型建立以后需要解决的问题是寻求高效率、高准确度的计算方法。计算方法不仅包括数学方程的离散化及求解方法,还包括计算网格的建立、

边界条件的处理。

再次,在确定了计算方法和坐标系统后,编制程序和进行计算是整个工作的主体。当求解的问题比较复杂,如求解非线性的N-S方程,还需要通过实验加以验证。

最后,当计算工作完成后,流场的图像显示是不可缺少的部分。随着人们研究的流动问题日益深入和复杂,计算结果也更加纷繁浩瀚,难以把握。只有把数值计算的结果以各式各样的图像和曲线形式输出才能有效判断结果的正确性,进而得出结论和获取需要的数据。随着计算机图像显示系统和相应软件的发展,流场数值的图像显示在快速及时、三维扫描、形象逼真等方面发展迅速。通过利用录像设备存储、显示动态过程,数值模拟可以充分发挥数值实验的作用。

掌握数值模拟的原理和过程等背景材料后,能更好地理解CFD软件内部的运作和成功地实现计算任务。商业CFD软件通常应用计算流体力学比较成熟的数值方法,有比较典型的配置和操作过程。所有商业CFD软件都包括预处理、运算和后处理三个主要部分。

一、预处理

预处理就是通过操作界面将流动问题输入CFD程序,然后将输入数据转换为适合运算部分使用的合适格式。预处理阶段的用户行为是:①定义有关的几何区域,即计算域;②网格生成,即将计算域划分为较小的、不重叠的子域或单元(网格);③选择需要模拟的物理、化学现象的模型;④在与边界重叠或接触边界的单元定义适当的边界条件。

流动问题的解(速度、压力、温度等)定义在每一单元的节点上。CFD的精度由网格单元的数目决定。解的精度、必需的计算机硬件和计算时间取决于网格的细密程度。最佳网格多是非均匀的:点到点之间变化快的区间网格较细,变化相对较慢的区间网格较粗。发展CFD的目标之一是自适应网格生成能力。最终这样的程序将自动在迅速变化的区域细分网格。目前在高级软件中这一目标尚未实现,需要CFD用户有设计网格的技巧,以达到满足解题精度和降低成本的要求。

网格生成技术是计算流体力学发展的一个重要分支,是CFD作为工程应用的有效工具所面临的关键技术之一。成功生成复杂外形的网格依赖于专业队伍的协作和努力。经验表明,工程上,CFD项目耗费的人工时间中超过50%用于定义计算域几何结构和网格生成。为了获得最大的CFD人工效率,主要的CFD软件都有它们自己的CAD形式的界面,或通过专门的表面建模器和网格生成器输入数据,如著名的PATRAN和I-DEAS。时至今日,预处理能给用户一般流体的性能参数库和调用特别的物理、化学过程模型(如湍流模型、辐射热传导模

型、燃烧模型)。这些都是主要的流体流动方程要用到的。

二、运算

数值方法有三个不同的流派:有限差分法、有限元法和谱法。它们大致上都要进行三个步骤形成运算基础:利用简单函数形式近似表达未知的变量;将近似式代入流动控制方程并离散化,随后进行数学处理得到代数方程组;解代数方程组。三种不同流派的主要差别是流动变量的近似处理和离散处理的方式不同。

有限差分法用坐标线网格节点上的点样本描述未知的流动问题的变量。有限差分法多采用泰勒级数展开的截断式得到流动变量在一点导数的近似表达式,其中用到这一点和邻点的样本。在控制方程中用有限差代替这些导数后得到节点流动变量值的代数方程。G. D. Smith(1985)介绍了详细的有限差分方法。

有限元法在单元内用简单的片函数(如线性的或二次的)描述未知的流动变量的局部变化。精确解准确满足控制方程,但是分片近似函数代入方程后不能准确成立,于是通过定义残差来度量这一误差。随后用一组权函数与残差(或误差)项相乘并积分,为在加权积分的意义上消除残差而令此积分为零,结果给出一组近似的、系数未知的代数方程。有限元理论最初是为分析结构应力而发展起来的,标准的流体有限元法应用见O. C. Zienkiewicz和R. L. Taylor(1991)的论著。

谱法用傅氏级数或切比雪夫多项式级数的截断式来近似表达未知量。谱法与有限差分法和有限元法不同,它不是局部的近似;近似式对整个计算域有效。将截断级数代入控制方程,方程的约束条件产生关于傅氏级数或切比雪夫级数的系数的代数方程。类似于有限元法,谱法用加权残差概念和节点上与准确解一致的近似函数提供约束条件。更多细节见D. Gottlieb和S. A. Orszag(1977)的论著。大涡模拟法计算湍流时就要用到谱法的概念。

实际物理现象是复杂的和非线性的,因此要用迭代解法求解代数方程组。常用的解法有代数方程的TDMA逐行算子和能保证压力、速度正确联系的SIMPLE算法。商业软件也给用户提供了其他选择,如STONE算法和共轭梯度法等。

三、后处理

如同前处理一样,后处理领域已有大量开发工作。由于具有高超绘图能力的计算机日益增多,优秀的CFD软件包都装备有数据可视化工具。这包括:区域几何结构和网格显示,矢量图,等值线图或阴影图,二维、三维曲面图,粒子踪迹图(又称脉线图或染色线图),图像处理(移动、旋转、缩放等),彩色图像的存储、打印、输出。