



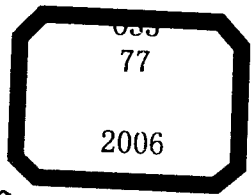
实用计算

吴德铭 郜冶 / 编

流体力学基础

• SHIYONG JISUAN LIUTILIXUE JICHU

哈尔滨工程大学出版社



哈尔滨工程大学“十五”研究生教材建设专项资金资助出版

实用计算 流体力学基础

吴德铭 郜 冶 编

哈尔滨工程大学出版社

图书在版编目(CIP)数据

实用计算流体力学基础/吴德铭, 郜冶编. —哈尔滨:
哈尔滨工程大学出版社, 2006
ISBN 7-81073-761-9

I. 实… II. ①吴…②郜… III. 计算流体力学-高等
学校-教材 IV. O35

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2006)第 035479 号

内 容 简 介

本书对 CFD 软件的基本方程、数值方法和软件使用中的基本问题进行了系统阐述。共分 4 编。第一编着重解决实际问题的基本技能, CFD 的常识性基础。第二编在有限容积法基础上, 对 CFD 偏微分方程、数值方法和边界条件进一步深化理解, 以及非稳态流场数值解应注意的问题。第三编是对湍流物理基础和湍流模型的介绍, 同时, 给出了在工业和工程中常用的湍流模型及其特点, 并给出了一些典型算例和程序设计。第四编介绍了 7 个有代表性的与湍流相关的工程实际算例。

本书可作为流体力学专业硕士、博士研究生教材, 也可供有关专业高年级本科生参考。

哈尔滨工程大学出版社出版发行
哈尔滨市东大直街 124 号
发行部电话: (0451)82519328 邮编: 150001
新华书店经销
黑龙江省地质测绘印制中心印刷厂印刷

*

开本 787mm×960mm 1/16 印张 35.25 字数 756 千字

2006 年 6 月第 1 版 2006 年 6 月第 1 次印刷

印数: 1—1 000 册

定价: 45.00 元

目 录

第一编 CFD 与商用软件基础

第 1 章 绪论	1
1.1 CFD(Computational Fluid Dynamics)技术的目标	1
1.2 CFD 软件及其主要功能	2
1.3 CFD 数值方法的基本原则	5
1.4 国外通用计算流体力学商用软件现状	7
1.5 本书主要内容	9
第 2 章 流体运动的一般情况	11
2.1 流体的运动特性	11
2.2 描述流体运动的方程	15
2.3 进一步理解流体的流动	21
第 3 章 偏微分方程数值解法概述	22
3.1 数值离散方法	22
3.2 简单方程的数值离散	26
3.3 离散方法的比较	33
3.4 离散方程组的解	34
3.5 解联立的流体运动方程组	37
参考文献	43
第 4 章 一般形式微分方程的数值求解与 SIMPLE 算法初步	44
4.1 本章的范围和限制	44
4.2 数学表达式	45
4.3 区域的离散化	49
4.4 一般形式的离散方程的导出	50
4.5 离散方程的解与 SIMPLE 算法初步	54
4.6 流场的计算	57
4.7 完整的计算过程概要	61
4.8 收敛准则和欠松弛的应用	62

4.9	线性化源项的特殊用法	63
4.10	结束语	64
	参考文献	65
第5章	CFD 软件实用技术的准备	66
5.1	用计算机解决工程问题	66
5.2	描述工程中的流动问题	73
5.3	建立网格	78
5.4	设定流体流动的参数	92
5.5	如何获得结果	101
5.6	对计算结果进行分析	107
	参考文献	116

第二编 有限容积方法和 SIMPLE 改进算法

第6章	扩散问题的理解示例	117
6.1	概述	117
6.2	一维定常扩散的有限容积法	117
6.3	一维定常状态扩散的实际算例	119
6.4	二维扩散问题的有限容积法	126
6.5	关于三维问题的有限容积法	127
6.6	对扩散问题的离散方程的总结	128
	参考文献	129
第7章	对流—扩散问题的理解示例	130
7.1	概述	130
7.2	定常一维对流和扩散	130
7.3	中心差分格式	132
7.4	离散格式的特性	137
7.5	用中心差分格式求解对流—扩散问题的评价	140
7.6	上风差分格式	142
7.7	混合差分格式	147
7.8	幂函数格式	151
7.9	对流—扩散问题中更高阶的差分格式	152
7.10	其他的高阶格式	159
7.11	小结	160
	参考文献	161

第 8 章 SIMPLE 及其改进算法的详尽解释	163
8.1 概述	163
8.2 交错网格	164
8.3 动量方程的离散	166
8.4 SIMPLE 算法	169
8.5 SIMPLE 算法的流程	172
8.6 SIMPLER 算法	173
8.7 SIMPLEC 算法	174
8.8 PISO 算法	176
8.9 SIMPLE, SIMPLER, SIMPLEC 和 PISO 算法的一般性评论	179
8.10 小结	180
参考文献	180
第 9 章 离散方程解法示例	182
9.1 概述	182
9.2 三对角矩阵运算法则	183
9.3 TDMA 在二维问题中的应用	184
9.4 TDMA 在三维问题中的应用	185
9.5 例子	186
9.6 在 CFD 中使用的其他求解技巧	191
9.7 小结	191
参考文献	192
第 10 章 非定常流动的有限容积法示例	194
10.1 概述	194
10.2 一维非定常热传导	194
10.3 瞬态问题的典型例子	198
10.4 用于二维和三维问题的隐式方法	205
10.5 瞬态对流—扩散方程的离散	206
10.6 用 QUICK 差分法的瞬态对流—扩散工程实例	207
10.7 非定常流计算求解程序	211
10.8 用假瞬态法进行定常状态计算	213
10.9 其他瞬态格式的简述	214
10.10 小结	214
参考文献	215
第 11 章 边界条件的详尽解释	217

11.1	概述	217
11.2	入口边界条件	218
11.3	出口边界条件	220
11.4	壁面边界条件	222
11.5	定压边界条件	226
11.6	对称边界条件	227
11.7	周期性或循环边界条件	227
11.8	潜在的问题和评论	228
	参考文献	230
第 12 章	曲线坐标系中的 SIMPLEC 和 SIMPLEX 算法	231
12.1	概述	231
12.2	质量守恒的离散	234
12.3	能量方程及其他标量方程的离散	235
12.4	代数方程的解	245
12.5	动量方程	251
12.6	质量和动量耦合方程的解	257
12.7	正交曲线坐标系下湍流模型的计算	263
12.8	正交网格生成的几个问题	266
	参考文献	268
第三编 流体运动方程与湍流模式		
第 13 章	流体运动基本方程	270
13.1	流体运动的控制方程	270
13.2	状态方程	279
13.3	牛顿流体的 N-S 方程	279
13.4	流体运动控制方程的守恒形式	281
13.5	通用输运方程的微分形式和积分形式	282
13.6	守恒方程的物理特征和分类	284
13.7	双曲型方程的主要特点	287
13.8	简单偏微分方程的分类方法	289
13.9	流动方程的分类	290
13.10	黏性流体力学控制方程的补充条件	292
13.11	小结	293
	参考文献	294

第 14 章 湍流及其模式	295
14.1 湍流的概念	295
14.2 从层流到湍流的转换	297
14.3 湍流的物理性质	300
14.4 湍流模拟发展情况简介	313
参考文献	315
第 15 章 雷诺平均应力方程及其封闭	317
15.1 雷诺平均	318
15.2 相关性	321
15.3 雷诺平均方程	322
15.4 雷诺应力方程	323
15.5 湍流尺度	325
参考文献	330
第 16 章 时间平均 N-S 方程应用于工程计算	331
16.1 时间平均 N-S 方程对湍流的表达能力	331
16.2 工程中典型的湍流现象	335
16.3 适用于工程典型问题的湍流模型	342
16.4 小结	360
参考文献	360

第四编 CFD 商用软件和工程应用算例

第 17 章 典型 Phoenics 和 STAR-CD 计算程序举例	363
17.1 算例程序 1: 流经方块的二维湍流场的 Q1 程序	363
17.2 算例程序 1 编译后给出的计算使用程序	372
17.3 算例程序 1 的应用: 来流速度型变化对三维立体块顶部 湍流回流区长度的影响	383
17.4 算例程序 2: 浮力引起的容器中非稳态振荡流动的 Q1 程序	391
17.5 算例程序 3: 气流流过上下对称圆柱体的 Q1 程序	397
17.6 算例程序 4: 水流流过平面上的圆柱体	401
17.7 算例程序 5: 喷射两种物质喷嘴的 Q1 程序	408
17.8 算例程序 6: 多股横向射流和主流混合流动的 Q1 程序	427
17.9 算例程序 7: 二维钝体绕流湍流流动的 STAR-CD 程序	442
17.10 特种剖面鳍/舵的 CFD 结果分析	448
参考文献	457

第 18 章 近年来国外典型 CFD 成功算例介绍	458
18.1 多种湍流模型在计算立方体周围流场比较	458
18.2 LES 和 RANS 三维流场数值计算比较	476
18.3 侧风条件下运动火车周围 CFD 数值分析	493
18.4 BFC 网格和正交网格计算复杂地形大气流动的比较	505
18.5 LES 在车辆气动力学 CFD 中的应用与进展	514
18.6 直升机着陆舰船甲板上流场的涡受限法计算	523
18.7 ICCM 船舶流体动力学 CFD 最新进展	532
参考文献	546

第一编 CFD 与商用软件基础

第 1 章 绪 论

1.1 CFD(Computational Fluid Dynamics)技术的目标

计算流体力学在 20 世纪 70 年代以来的成就,显示出它在人类深入研究各种流动现象,以及在工业和工程应用方面的强大生命力。在航空、气象、海洋、流体机械、建筑和车辆设计等各个领域都显示出巨大威力。近年来,由于计算机速度和存储信息能力的大幅度提高,特别是计算机自动生成三维物体网格能力的迅速发展,计算机软件水平突飞猛进,给科学发展和工程设计带来了根本性的变化。

作为一门崭新的学科,计算流体力学主要研究描述各种流动现象,它的目标是在工程上尽可能用数值实验代替实物实验,用计算机模拟自然环境、设计生物体和工程机械装置。计算机的大量使用,计算流体力学通用大型软件的成熟,彻底改变了人们在工程和工业产品实验和设计中的传统观念。通过数值模拟对工作过程细节的了解,使得工程装置的优化设计现在已经作为一种新的手段。可以做到预报真实的流体机械、换热与燃烧装置、工业炉、大气污染等现象的全过程。可以得到设计所需的各种定量数据,又能把实验所需的人力、物力及财力减到最低限度,实现了真正意义的设计革命。通用计算机软件的发展,使数值仿真技术成为与模拟实验同样有效的手段。在计算机程序中,改变物理和化学因素以及改变环境条件都比在实验室中改变这些参数要容易得多。既可以加快研究速度,又可以拓宽研究参数的变化范围,从而增加科研的广度和深度。20 世纪 90 年代以前,一部轿车的空气动力和车外型设计计算需要几个月,而使用通用软件,可以在一个星期内完成一部新车的网格生成、力学计算和造型分析工作。

CFD 技术在工业和非工业领域显示出强大的功能,主要领域是:

- 各种飞行器和汽车空气动力学
- 船舶水动力学
- 环境工程中污染物的排放和流出
- 水力和海洋学
- 各种机车中的发动机和燃气轮机
- 涡轮机械、泵和风机中旋转通道内部的流动、扩散等

- 燃烧空气动力学,火灾和爆炸
- 电气和电子工程设备的冷却
- 化学工艺过程中的混合、分离和聚合
- 建筑物内部和外部环境
- 海上建筑物的负荷
- 气象学中的天气预报

CFD 技术的最终发展目标是提供一个可与其他计算机辅助工程学 (CAE) 工具 (例如应力分析软件) 相类似的工具。CFD 发展缓慢的主要原因在于流体的基本流动特性错综复杂,使得人们无法对流体流动行为进行有效而充分完整的描述。近年来,高性能计算机硬件价格的下降,在软件中引入了更好的图形用户界面,使得人们使用 CFD 的兴趣有所高涨。20 世纪 90 年代以后,CFD 已被应用到更广泛的工业领域中。

总体来说,对 CFD 软件的投资并不大,整个花费通常远远没有一个高性能实验装置那样大。CFD 应用于流动系统设计中有如下优点:

- 研制时间和费用大大减少
- 能够对那些实验设计困难和不可能进行实验的系统进行研究 (例如非常大的系统)
- 能够在危险的情况下对系统的安全工况和超出安全工况的界限进行研究 (例如安全性研究和事故分析)
- 给出实际情况更细致和必要的信息

实验花费取决于实验装置和人力耗费,也与实验数据的数量和测试结构的数量成比例。相反,CFD 可以提供大量的结果而不增加费用,用它进行不同流动和热力参数变化过程的研究是非常廉价的。

1.2 CFD 软件及其主要功能

CFD 建立在数值计算的基础上,可以解决关于流动的许多问题。为了便于操作和发挥它解决问题的功能,所有的商业 CFD 软件都打包有高级图形用户界面用以输入计算参数和检查结果,因此所有的软件包括三个主要部分:前处理、求解和后处理。下面我们简单介绍一下这三个部分的功能。

前处理

前处理由一个友好界面构成,这个界面用于给出计算程序输入与流动问题有关的参数,接下来将这些参数转化成求解所需的合适形式。前处理阶段的功能包括以下各项。

- (1) 求解区域的几何定义:计算区域
- (2) 网格生成—将区域划分成大量更小的相互无重叠的子区域:控制容积或元素小网格

(3)选择需要建模的物理现象或化学现象

(4)定义流动特性

(5)确定网格的边界条件,使它和主区域的边界条件一致

解决流动问题(速度、压力、温度等)首先要定义子区域节点值。CFD的计算精度取决于网格中子区域的数量多少。在一定的硬件条件和计算时间下,计算精度和误差取决于网格划分的正确性。最佳的网格通常并不是唯一的。在相邻点的物理量变化较大的地方,网格应更精细一些;而在物理量相对变化较小的地方网格可稀疏一些。人们已经发展了一种称为自适应网格的计算方法,会自动地在求解变量变化剧烈的地方将节点加密。这种强有力的方法已经被引入商业化的CFD软件。目前,网格生成的水平仍要依赖于CFD软件使用者的技巧。

工业CFD应用中,所耗费时间中超过一半被用于几何区域的定义和网格的生成。为了最大限度地发挥CFD软件使用者的工作效率,所有CFD软件现在都有自身携带的计算机图形用户界面或工具,以便于和专用的网格生成软件相连接。例如用PATRAN和I-DEAS导入数据,使用ICEM软件生成复杂系统的网格再接入计算分析软件。在给出主要流动方程的同时,前处理也给使用者提供了常见流体的物性参数库、特殊的物理和化学过程模型,如湍流模型、热辐射模型、燃烧模型,以供使用者选用。

求解

数值求解的方法可分为三个分支:有限差分法、有限元法、谱分析法和后来已发展成为比较独立的有限容积法。求解的基本步骤可分以下几步:

(1)用简单的函数描述未知的流动参数变量之间的关系

(2)适当离散流体运动控制方程并进行数学处理

(3)求解代数方程

这几个分支的主要区别在于流动参数变量的近似的方法和离散的过程。

有限差分法

有限差分法在直角坐标系中通过网格节点上的 ϕ 值来描述整个流动问题的未知变量 ϕ 。通常将在网格节点上的 ϕ 用截断的泰勒级数展开,将导数项近似地表示成有限差分的形式。这个导数项可用此节点及其附近的一些节点的未知量,表示出现在控制方程中的导数项。通过有限差分代替,从而得到一个用各个节点上的 ϕ 值表示的代数方程组。

有限元法

有限元法用简单分段曲线函数(线性或二次函数)在节点的值来描述流体 ϕ 在当地的變化。控制方程的精度通过对 ϕ 的正确分解来决定。如果用线性方程近似代替控制方程,它不会完全精确,它的余项用来衡量误差。第二,余项在一定意义上可以通过增加质量方程及其完整性来减小,于是就得到了表示近似方程的一组系数未知的代数方程。有限元理论最初是为进行结构强度分析而发展起来的。在流体力学的一个成功应用是由Zienkiewicz和Taylor(1989)完成的。

谱分析法

谱分析法是用有限项的傅立叶级数展开式和切比雪夫展开多项式来近似表示未知项。与有限元法和有限差分法不同的是,这种近似并不意味着多项式仅对当地的节点函数值有用,而是对整个区域都有效,然后我们用有限级数来代替控制方程中的未知项。与有限元法或基于大量网格节点近似求解方程一样,求解傅立叶或切比雪夫代数方程组的局限性在于存在一个余项和近似性。有关这种特殊方法的更多资料可参考 Gottlieb 和 Orszag (1997) 的著作。

有限容积法

有限容积法最初源于一种特殊的有限差分法,现在已从物理上的守恒定律出发,成为独立的数值方法。本书将集中介绍这种已建立的并被多年实践认为有效的数值方法。现在已经获得广泛商业化的 5 种 CFD 软件中有 4 种都主要采用有限容积法,如 PHOENICS、FLUENT、STAR-CD 和 CFX。这种方法主要包括以下几个步骤:

- 在求解区域的所有控制容积上建立完备的流体运动控制方程组
- 离散化包括用某种有限差分格式表示通用方程组中的各个流动过程项,如对流项、扩散项和源项,将通用方程组转化成代数方程组
- 用迭代法求解代数方程组

首先,控制容积的守恒性使有限容积法有别于其他的 CFD 技术。对于每一个容积元来说都有这种性质。有限容积法的主要优点之一就是这种数值方法和基本的物理守恒定律之间联系是非常清晰的。相对于有限元法和谱分析法来说,它使工程师们更容易理解有关概念。一般变量 ϕ 的守恒性,例如速度分量或焓的守恒,在一个有限的容积内,物理量变化总的平衡关系是

$$\text{控制容积内 } \phi \text{ 对时间的变化率} = \text{对流引起控制容积内 } \phi \text{ 的变化率} + \text{扩散引起控制容积内 } \phi \text{ 的变化率} + \text{控制容积内 } \phi \text{ 的生成率}$$

CFD 软件中的离散化方法适合处理一些主要输运现象,例如由于流体的流动而引起的对流现象、由于 ϕ 的变化而引起的扩散现象,同时还包括与 ϕ 的产生或消失有关的源项以及和时间有关的变化率。实际中的物理现象是复杂的,并且是非线性的。因此,需要采用迭代方法求解。目前求解代数方程最流行的方法是逐级推进的三对角矩阵法(TDMA),将压力与速度正确相关联的 SIMPLE 算法。近年来,商业软件提供更多的方法以供使用者选择,如 STONE 算法和共轭梯度法。

有限容积法从描写流动与传热问题的守恒型控制方程出发,对它在控制容积上进行积分。在积分过程中需要对界面上被求函数的本身(对流量)及其一阶导数的(扩散通量)构成方程作出假设,这就形成了不同的格式。由于扩散项多是采用相当于二阶精度的线性插值,因而格式的区别主要表现在对流项上。用有限容积法导出的离散方程可以保证具有守恒性(只要界面上的插值方法对位于界面两侧的控制容积是一样的即可)。对区域形状的适应性也比有限差分法要好,是目前应用最普遍的一种数值方法。顺便指出,文献中曾有过把有限容积法作为

有限差分法的一种实施方法来对待的观点。但这两种方法在获得离散方程的原理上完全不同,因而把它们看作获得离散方程的两种方法更加合适。虽然在不少情况下,两种方法可以导致相同的离散结果。

后处理

如同在前处理过程中一样,近年来,人们在后处理方面也做了大量的工作。由于图形工作平台的直观性,先进的 CFD 软件包目前都具有多种数据可视化工具,这包括:

- 几何区域和网格的显示
- 矢量图绘制
- 曲线图和阴影图的绘制
- 2D 和 3D 表面图绘制
- 视图处理(转换、旋转、缩放等)
- 色彩填充输出

这些工具还包括计算结果的动态显示。除了图形处理外,所有的软件都有可靠的数据输出功能,并且有数据接口以便在外部对这些数据作进一步处理。

1.3 CFD 数值方法的基本原则

流体运动的基本物理现象是复杂的,CFD 软件计算出的结果应尽量同流体的物理现象一致。在建立并模拟一个流动问题之前,我们应根据物理和化学现象,建立一个描述流动现象的方程。其中最基本的一条就是对一个问题是用二维来描述还是用三维来描述,是否排除周围温度的影响,是否考虑压力变化对流体密度变化的影响,是否采用湍流方程去描述问题,是否可以忽略流体中的小气泡。要作出正确的选择必须具有熟练的建模技巧,因为即使对最简单的流动问题,我们也必须作一些假设,以便使问题的复杂程度降低到可以处理的水平,这同时也保留了问题的主要特征。合适的简化过程在一定程度上决定了 CFD 软件计算结果的正确性。因此,使用者必须依据假设条件忽略那些次要因素。

真正的理解数值求解方法是非常重要的。决定算法是否成功并且对算法的其他方面有影响的三个数学概念是:收敛性、相容性和稳定性。

收敛性是网格尺寸、控制容积尺寸或单元尺寸趋于零时数值方法的求解结果接近于精确解的特性。

相容性是当网格尺寸趋于零时,代数方程接近于原控制方程组的程度。

稳定性是用数值方法求解过程中保持误差不扩大的特性。如果一个方法是不稳定的,原舍入误差将导致计算数值大幅振荡或发散。

通常,我们很难在理论上建立收敛性的判断规则,实际上我们常使用 Lax 等价定理。Lax

等价定理可表述为:对一个线性问题,收敛的充分和必要条件是这种方法是稳定的,而且还是相容的。第2章中我们将看到,这个定理的作用是有限的,因为控制方程是非线性的。在这些问题中相容性和稳定性的假设是必要的而不是充分的。

从理论上,我们往往还无法充分证明某种数值求解格式是收敛的。但我们不必太关心这一点,由于我们的计算机存储数字的位数是有限的,所以网格大小趋于零的过程是不可能的。当网格尺寸远远未达到达零之前,舍入误差已经淹没了求解值。工程人员需要那些能在有限网格下也能取得精确结果的 CFD 软件。帕坦卡(1980)系统地阐述了强有力的有限(有时甚至是稀疏的)格式的计算规则。在第4章我们将对此进一步的讨论。这里我们将强调这种方法的三个主要特性:守恒性、有界性和输运性。

有限容积法能够保证在每一个控制容积内相关物理量的守恒性。具有收敛性的数值格式可以保证在整个区域上流动都是守恒的,这在实际中也是非常重要的。只要保证相容性就可得到从相邻的控制容积通过表面进入的 ϕ 通量。有界性和稳定性是一致的,它要求在无“源”问题中,求解结果在最大与最小的边界条件值之间变动。边界条件可以通过代数方程系数的大小和符号来确定。尽管流动问题是非线性的,但是研究有限容积法,线性的边界问题对于更进一步的求解非线性问题是非常重要的。

所有的流动过程都包含有对流和扩散的效应。在扩散现象中,如热传导中,某一点的温度变化或多或少地影响它周围与其相邻节点的温度。而对流是涉及到与流动方向有关的现象,即某一点的值主要受它上游条件的影响。有限容积格式的输运特性可以解释为扩散与对流的相对大小对流动方向的影响。

守恒性、有界性和输运性被引进到所有的有限容积格式中,在 CFD 模拟中取得了很大的成功。因此,目前它们被看作是替代收敛性、相容性和稳定性的更加严格的数学概念。一个好的 CFD 算法通常会在精度和稳定性之间作出权衡。使用者应对一个软件的守恒性、有界性和输运性作出完整的评价。

实际进行 CFD 计算时需要具有各种操作技巧。几何区域和网格的生成是输入阶段的主要任务。其次,使用者要想获得正确的模拟结果必须注意的两个方面是迭代过程的收敛性和网格的独立性,求解的方法自然是迭代法。在一个收敛的方法中,衡量流动参数收敛性的余项是非常小的。一个求解过程可以通过细心设置各种相关参数以达到收敛。希望达到较快的求解速度需要对软件本身相当熟悉,只有通过大量的实践才能获得。在一般的流动中我们没有正规的方法来评价由于网格设计不适当而引入的误差的大小。一个好的网格在很大程度上依赖于对所求流动问题的理解。要衡量由于网格的稀疏而引起的误差的唯一办法就是对网格的划分进行研究,这是一个对网格不断加密的过程,直到满足结果的需要为止。模拟和网格是相互独立的,对独立于网格进行系统的研究一直是高品质 CFD 软件的基本任务之一。

每种数值算法都有其自身的数学误差。CFD 对错误结果的处理是用一些非常专业的术语表达的,如数值发散、伪扩散和数值溢出。只有对算法有完全的了解才有可能知道是哪种错

误。在模拟结束后,使用者必须判断运算的结果是否足够好,我们不可能对像 CFD 这种复杂的软件中嵌入的物理和化学模型的有效性进行评估,也不能用除了实验以外的方法对它的准确性进行评估,任何人必须意识到在一些关键的问题中,CFD 软件不能代替实验,但它却是一个有用的求解工具。确定 CFD 软件的有效性需要知道与边界条件有关的大量详细资料和实验结果。为了确定这些信息和结果是否有效,获得相似条件下的实验数据是非常必要的。这就涉及到利用热线风速仪或激光多普勒测速仪来测量流场中各点的流体速度。

CFD 的一个优点是使用者几乎可以得到任意详细程度的结果,进而了解流动的内部机理。可以肯定,对 CFD 算例的计算结果进行分析可以加深对其物理问题的理解。

经过再三验证和有效的经验对最终计算结果的可靠性起着关键性作用。CFD 软件的使用取得成功的三个因素是:经验、对流体运动问题的深度理解及基本的数值计算方法。本书的目的是为了让使用者更好地理解 CFD 软件的内部工作机理,提供必需的背景资料及进行成功运算的数值方法。

1.4 国外通用计算流体力学商用软件现状

通用性是要求一个程序可以用于研究众多不同的有公共特性的问题,经过较少的变化就可以研究新的和不同方面的问题,要求程序在编制时善于发现和抓住问题的共性。就程序的通用性而言,大体可以分为针对所研究的具体问题的专用程序和针对各种情况的通用程序。前者比较精练,可靠性和经济性都比较好。后者便于控制和使用、便于引进新技术,缺点是程序较大、不易掌握。下面介绍几个当前被广泛使用并获得巨大成功的软件。

PHOENICS 程序是英国 CHAM 公司 20 世纪 70 年代后逐渐完成的曾经享誉世界的通用计算流体力学软件。是英国帝国理工学院著名学者 D. B. Spalding 教授及科研团队和几十位博士集 20 多年不断努力的典范之作。它是流体力学、气体动力学、传热传质、化学反应及相关学科的通用计算软件。可以计算二维、三维、稳态、瞬态、黏性、非黏性、可压、不可压、层流、湍流、单相及多相流等各种流动与传热现象。该程序具有强大的前后处理功能,具有贴体坐标生成、滑移边界处理,和可编辑功能,用户可以编写自己的用户子程序来代替原程序中的部分功能。CHAM 公司已经使 PHOENICS 从 80 年代的 1.6 版本发展到 1998 年的 3.2 版本。不断补充新的实用的湍流模型以及其他改进。曾经广泛应用于航空航天、船舶、水利、汽车、环保、电站、冶金、核工业、生物医学和农业等行业,并带来了可观的经济效益。30 余年来 CHAM 公司定期发行自己的杂志“*The PHOENICS Journal of Computational Fluid Dynamics and Its Applications*”。PHOENICS 软件的网址为:<http://www.cham.co.uk>。

近年来,PHOENICS 程序在前后处理方面、在复杂形状物体网格生成的适用性方面,受到了后来新发展的大型通用程序的挑战。主要是 AEA - T(Atomic Engineering Authority)公司开发

的 CFX 软件、FLUENT 欧洲联合开发的 FLUENT 软件和 CD(Computational Dynamics)公司开发的 STAR - CD 软件。

CFX 作为 AEA - T 公司的大型计算软件,具有 PHOENICS 程序的众多功能,在旋转机械、混合流、多相反应及生物医学等方面有过全面的成功使用。该公司定期出版 CFX Update 杂志,传播和交流 CFX 的消息和成功算例。CFX 软件的网址为:<http://www.aeat.co.uk>。AEA - T 公司 1996 年推出了最新的 CFX5,比原来推出的 CFX - TASC flow 和 CFX4 更便于使用。以往,CFX - TASC flow 在旋转机械、加工工业、发电设备和安全方面有多年成功的应用。CFX4 不仅在燃烧、化学反应器、阀门设计等方面很成功,在生物医学方面也表现良好。例如成功完成过人体上呼吸道气流特征、脑内流体流动状况、心脏辅助泵的设计等。

FLUENT 欧洲公司是多家软件公司的联合体,相对保持各家软件公司的独立性。这些软件主要是:FLUENT、FLUENT/UNS、RAMPANT、MixSim、GeoMesh、Tgrid 以及 Nektonics 公司的 NEKTON。各自都有自己的长期用户,各软件都有自己的特点。该程序在航空和宇航器设计、自动化机械设计、生物医学和化学处理工业、电站、半导体仪器、涡轮机,特别在高超音速激波模拟与捕获等方面都显示出极其特殊的性能。FLUENT 定期发行杂志 FLUENT NEWS。FLUENT 软件的网址为:<http://fluent.com>。FLUENT 和 FDI(Fluid Dynamics International)在 1996 年联合之前,都曾致力于复杂形状物体结构与非结构化连接网格生成软件研究。FDI 有自己的 FIDAP 软件,FLUENT 也扩展了自己可产生混合网格的 Tgrid 软件。FDI 在 1997 年发行的 FIDAP8 为今后独立的网格生成能力打下了坚实的基础。FLUENT 欧洲公司也在继续致力于有限元(FEM)和有限容积(FVM)两个方面网格生成软件的开发。

由 CD(Computational Dynamics)公司发行的软件 STAR - CD 经历了近十年的不断完善。它具有更为广泛的功能,在内燃机燃烧,以及瞬态动网格生成方面有自己的特点,在 CFD 计算的不同方面都显示出先进性。该软件在其他机械的 CAD 设计和基础设计方面,也同具有相当好的能力。STAR - CD 软件的网址为:<http://www.cd.co.uk>。在 STAR - CD 新推出的版本中,可以完成瞬态流高阶变化的混合网格,可以适用于任意一侧边界变化造成的动力响应的模拟等等。在完成高精度自动产生网格方面,其开发的 MARS 网格生成软件与过去的 Gamma 网格生成软件相比,具有二阶精度,并可以传输变量和变化密度,有更稳定的特性和更快的收敛能力。

ICEM 公司在网格生成和集合形状 CAD 方面处于世界领先地位,其主要产品有 ICEM Surf, ICEM CFD, ICEM DDN, ICEM Metrix,其网址为:<http://www.icem.com>。ICEM Surf 可以生成复杂形状的三维实体和外表面图形、可以完成艺术造型,ICEM DDN 可以用来工业产品造型设计,而 ICEM CFD 具有 CAD 和分析功能。PHOENICS 和 STAR - CD 均可以和 ICEM 的网格生成软件进行连接。

由于计算机软件拥有巨大的市场和商业利益,竞争很是激烈。各软件发行公司每年在世界上不同的国家都开几十次培训和学术研讨会,以使程序使用者有学术交流和交换意见的机会,也是为了普及和扩展自己软件的市场。可以预见,随着上述软件在工程设计和实验中的大