



普通高等教育“十三五”规划教材

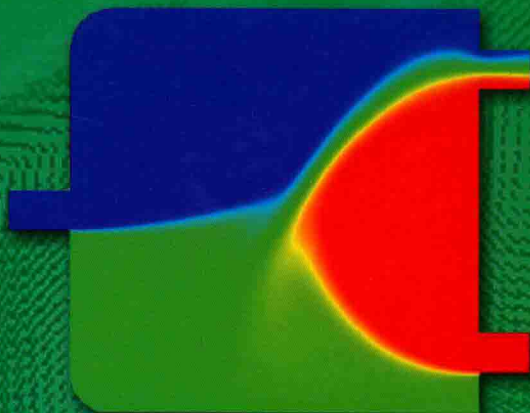
PUTONG GAODENG JIAOYU “13·5” GUIHUA JIAOCAI

流体仿真与应用

——基于Fluent仿真计算与应用实例

刘国勇 编著

内含240分钟范例详细操作视频



冶金工业出版社
www.cnmp.com.cn



普通高等教育 “十三五” 规划教材

流体仿真与应用

——基于 Fluent 仿真计算与应用实例

刘国勇 编著

Fluent 是目前国际上广泛流行的 CFD 软件之一，是流体工程仿真中应用最广泛的工业均可使用。本书以 Fluent 软件为平台，结合工程实例，详细介绍了 Fluent 软件的应用。本书共分 10 章，第 1 章介绍了 Fluent 软件的基本概念，第 2 章为速度场计算，第 3 章为速度场计算，第 4 章为速度场计算，第 5 章为速度场计算，第 6 章为速度场计算，第 7 章为速度场计算，第 8 章为速度场计算，第 9 章为速度场计算，第 10 章为速度场计算。本书可作为相关专业本科生及研究生课程教材，也可供从事工程技术人员参考。

北京
冶金工业出版社
2017

内 容 提 要

本书既重视实例操作及应用,也兼顾 CFD 的基础理论知识介绍。本书采用 Gambit 前处理几何建模和网格生成、Fluent 设置和求解以及 Tecplot 后处理等完整的 CFD 仿真算例操作过程及步骤。实例操作包括网格生成、流场、温度场、多相流仿真及 Tecplot 后处理应用等。通过本书的学习,可使学生较容易掌握 CFD 的相关基础理论知识,也能快速、熟练掌握 Fluent 流体仿真基本操作,更重要是能够利用 Fluent 软件进行流体流动与传热相关问题的分析及研究。

本书配有丰富的数字化资源,通过扫描二维码获得本书的基础知识 PPT、Gambit 建模及 Fluent 求解实例的操作视频、实例操作生成相关软件算例文件。以便读者更好了解及学习 CFD 的基础理论知识、Fluent 软件实例仿真的一般过程。

本书既可以作为高等院校相关专业本科生的教学用书,也可供从事流体仿真计算相关专业的技术人员参考。

图书在版编目(CIP)数据

流体仿真与应用:基于 Fluent 仿真计算与应用实例/
刘国勇编著. —北京:冶金工业出版社, 2017. 1

普通高等教育“十三五”规划教材
ISBN 978-7-5024-7408-9

I. ①流… II. ①刘… III. ①流体力学—工程力学—
计算机仿真—应用软件—高等学校—教材 IV. ①TB126-39

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2017)第 002924 号

出 版 人 谭学余

地 址 北京市东城区嵩祝院北巷 39 号 邮编 100009 电话 (010)64027926

网 址 www.cnmp.com.cn 电子信箱 yjcb@cnmp.com.cn

责任编辑 戈 兰 夏小雪 美术编辑 彭子赫 版式设计 彭子赫

责任校对 石 静 责任印制 李玉山

ISBN 978-7-5024-7408-9

冶金工业出版社出版发行;各地新华书店经销;固安华明印业有限公司印刷

2017 年 1 月第 1 版, 2017 年 1 月第 1 次印刷

787mm×1092mm 1/16; 16.75 印张; 400 千字; 254 页

49.00 元

冶金工业出版社 投稿电话 (010)64027932 投稿信箱 tougao@cnmp.com.cn

冶金工业出版社营销中心 电话 (010)64044283 传真 (010)64027893

冶金书店 地址 北京市东四西大街 46 号(100010) 电话 (010)65289081(兼传真)

冶金工业出版社天猫旗舰店 yjgycbs.tmall.com

(本书如有印装质量问题,本社营销中心负责退换)

前 言

气体及液体统称为流体，具备流动的特性。研究流体运动规律的主要方法有：实验研究、理论分析及数值模拟。实验研究以实验为研究手段，耗费巨大，面临部分实验实现较困难或无法实现的难题；理论分析利用简单流动模型假设，只有极少数的简化模型可以通过数学方法获得理论分析解，对于较复杂的非线性流动现象目前还无能为力。20世纪70年代以来，由于高速计算机以及相应的数值计算技术的快速发展，计算流体动力学（CFD）对实验研究及理论分析都起到了促进作用，也为简化流动模型提供了更多的依据。CFD应用计算流体力学理论与方法，利用具有超强数值运算能力的计算机，编制计算机运行程序，数值求解满足不同种类流体的运动、传热传质规律及附加的各种模型方程所组成的非线性偏微分方程组，得到确定边界条件下的数值解。它兼有理论性和实践性的双重特点，为现代科学中许多复杂流动与传热问题提供了有效的解决方法。

Fluent是目前国际上比较流行的商用CFD软件包，流体、热传递和化学反应等相关的工业均可使用。它具有丰富的物理模型、先进的数值方法和强大的前后处理功能，在水利、环境、航空航天、气象、冶金、工业制造、土木工程、造船（潜水艇）、能源及化工等方面有着广泛的应用。

本书向读者简要介绍流计算体力学发展过程及基本理论，通过典型示例介绍Fluent应用。本书共12章，第1章~第6章介绍了CFD基础理论；第7章~第8章介绍了Fluent基础知识及软件界面；第9章~第11章为Fluent应用示例，第9章为速度场计算示例，第10章温度场计算示例；第11章多相流模型基础知识及应用示例；第12章介绍Tecplot软件界面及应用示例。本书配套光盘附有各章的示例，可以参考学习。

本书的主要内容在北京科技大学大学工程相关专业的本科生学位课中讲授多次。读者通过本书的阅读，可以系统地掌握CFD的基本原理与主要求解方法，通过示例的参考可以去解决工程应用中各种具体问题。

本书可作为相关专业本科生及研究生的教学参考书，也可作为从事流体相关等工程技术人员的参考书。

作者在编写本书的过程中,参考了部分文献,在此对这些文献的作者表示衷心感谢。北京科技大学张少军教授及青岛科技大学尹凤福研究员对本书给出了宝贵建议,在此表示诚挚的感谢。

由于编者水平所限,加之计算流体力学内容丰富且发展日新月异,书中的失误与疏漏在所难免,恳请广大读者批评指正。

作者

2016年8月于北京科技大学

目 录

1 计算流体力学发展概述	1
1.1 计算流体力学概述	1
1.1.1 计算流体力学发展	1
1.1.2 数值模拟过程	3
1.1.3 控制方程的离散方法	3
1.1.4 数值模拟的优点及局限性	4
1.2 计算流体力学软件的结构	5
1.3 常用的计算流体力学软件	5
习题	6
2 流体力学基础知识	7
2.1 流体力学基本概念	7
2.1.1 流体的属性	7
2.1.2 流体力学的力与压强	9
2.1.3 亚音速与超音速流动	10
2.1.4 研究流体运动的方法	10
2.1.5 流体运动的描述	10
2.2 流体力学基本方程及边界条件	11
2.2.1 连续性方程	11
2.2.2 运动(动量)方程	12
2.2.3 能量方程	13
2.2.4 组分质量守恒方程	14
2.2.5 牛顿型流体的控制方程	14
2.2.6 流体流动控制方程的通用形式	16
2.2.7 初始条件和边界条件	17
习题	19
3 湍流的数学模型	20
3.1 湍流的基本方程	21
3.2 湍流时均运动控制方程组封闭性方法介绍	22
3.2.1 雷诺应力类模型	22
3.2.2 湍动黏度类模型	22

3.3 湍流 $\kappa-\varepsilon$ 两方程模型	24
3.3.1 标准 $\kappa-\varepsilon$ 两方程模型	24
3.3.2 RNG $\kappa-\varepsilon$ 模型	25
3.3.3 Realizable $\kappa-\varepsilon$ 模型	26
3.4 近壁区使用 $\kappa-\varepsilon$ 模型的问题及对策	26
3.4.1 近壁区流动的特点	26
3.4.2 近壁区使用 $\kappa-\varepsilon$ 模型的问题	27
3.5 雷诺应力模型	29
3.5.1 雷诺应力输运方程	29
3.5.2 RSM 的控制方程及其解法	30
3.5.3 对 RSM 适用性的讨论	31
3.6 大涡模拟	31
3.6.1 大涡模拟的控制方程	31
3.6.2 亚网格模型	32
3.6.3 大涡模拟的边界条件	33
习题	33
4 有限体积法	34
4.1 扩散问题的有限体积法	34
4.1.1 一维稳态扩散问题的有限体积法	35
4.1.2 二维和三维稳态扩散问题的有限体积法	37
4.1.3 非稳态扩散问题的有限体积法	39
4.1.4 线性方程组的求解	42
4.2 对流-扩散问题的有限体积法	44
4.2.1 一维稳态对流-扩散问题的有限体积法	44
4.2.2 离散格式的性质	45
4.2.3 中心差分格式	48
4.2.4 迎风格式	49
4.2.5 混合格式	50
4.2.6 幂指数格式	50
4.2.7 对流-扩散问题的高阶差分格式——QUICK 格式	51
4.2.8 多维对流-扩散问题的离散格式	54
习题	55
5 流场计算数值算法	56
5.1 引言	56
5.2 交错网格	56
5.2.1 基本变量法求解的有关困难	56

5.2.2 解决方案——交错网格	57
5.3 运动方程的离散	59
5.4 SIMPLE 算法	59
5.4.1 压力与速度的修正	59
5.4.2 压力修正方程	61
5.4.3 SIMPLE 算法的基本思路	61
5.4.4 SIMPLE 算法的讨论	62
5.4.5 SIMPLE 算法压力修正方程的边界条件	63
5.5 SIMPLER 算法	63
5.6 SIMPLEC 算法	64
5.7 PISO 算法	66
习题	68
6 网格生成方法	69
6.1 引言	69
6.2 结构网格	70
6.2.1 贴体坐标法	71
6.2.2 块结构化网格	76
6.3 非结构网格	79
6.3.1 概述	79
6.3.2 阵面推进法	80
6.3.3 Delaunay 三角划分	82
6.3.4 四叉树 (2D) 与八叉树 (3D) 方法	83
6.3.5 阵面推进法和 Delaunay 三角划分结合算法	84
6.4 网格生成软件	84
6.4.1 Gambit	84
6.4.2 ICEM CFD	85
6.4.3 TrueGrid	86
6.4.4 Gridgen	88
习题	88
7 Fluent 概述	89
7.1 Fluent 的工程应用背景	89
7.2 Fluent 软件包相关知识	90
7.2.1 Fluent 软件组成	90
7.2.2 各软件之间协同关系	91
7.3 Fluent 软件包的安装及运行	91
7.3.1 Fluent 软件包的安装	91

7.3.2	Fluent 的新特性	92
7.3.3	Fluent 软件包的运行	93
	习题	94
8	Fluent 软件介绍	95
8.1	Fluent 前置模块——Gambit	95
8.1.1	Gambit 图形用户界面 (GUI)	95
8.1.2	Gambit 实例简介	97
8.1.3	Gambit 实例操作步骤	98
8.2	Fluent 求解器求解	103
8.2.1	Fluent 图形用户界面	103
8.2.2	Fluent 数值模拟步骤简介	103
8.2.3	Fluent 模拟结果显示	108
	习题	112
9	速度场计算	113
9.1	概述	113
9.2	二维定常速度场计算	113
9.2.1	概述	113
9.2.2	实例简介	113
9.2.3	实例操作步骤	114
9.3	非定常速度场计算	133
9.3.1	概述	133
9.3.2	实例简介	133
9.3.3	实例操作步骤	133
	习题	156
10	温度场计算	157
10.1	概述	157
10.2	实例简介	157
10.3	实例操作步骤	157
10.3.1	利用 Gambit 建立计算区域和指定边界条件类型	157
10.3.2	利用 Fluent 求解器求解	166
	习题	179
11	多相流模型	180
11.1	概述	180
11.1.1	多相流	180

11.1.2	多相流研究方法	181
11.1.3	Fluent 中多相流模型	182
11.1.4	Fluent 中多相流模型的选择	182
11.2	VOF 模型	183
11.2.1	概述	183
11.2.2	实例简介	183
11.2.3	实例操作步骤	184
11.3	Mixture 模型	199
11.3.1	概述	199
11.3.2	实例简介	200
11.3.3	实例操作步骤	201
	习题	232
12	Tecplot 软件	233
12.1	Tecplot 概述	233
12.2	Tecplot 使用	234
12.2.1	Tecplot 软件界面	234
12.2.2	菜单介绍	234
12.2.3	边框工具栏选项介绍	237
12.2.4	XY 图形绘制实例	237
12.2.5	2D 图形的编辑	244
12.2.6	3D 图形的编辑	248
	习题	253
	参考文献	254

1

计算流体力学发展概述

教学目的:

- (1) 了解计算流体力学 (Computational Fluid Dynamics, CFD) 概念及思想。
- (2) 了解 CFD 发展及动向。
- (3) 了解并掌握控制方程离散方法。
- (4) 理解数值模拟的优点及局限性。



第1章课件

1.1 计算流体力学概述

1.1.1 计算流体力学发展

研究流体传统方法有实验方法 (17 世纪法国和英国) 与分析方法 (18 世纪和 19 世纪欧洲), 自从计算机问世以来, 进而发展成为计算机数值方法。

计算流体力学 (Computational Fluid Dynamics, CFD) 是一门用数值计算方法直接求解流动主控方程 (Euler 或 Navier - Stokes 方程) 以发现各种流动现象规律的学科。它综合了计算数学、计算机科学、流体力学、科学可视化等多种学科。广义的 CFD 包括计算水动力学、计算空气动力学、计算燃烧学、计算传热学、计算化学反应流动, 甚至数值天气预报也可列入其中。

计算流体力学的基本思想: 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。

CFD 的发展主要是围绕着流体力学计算方法 (或称计算格式) 这条主线不断进步的。

计算流体力学是一门由多领域交叉而形成的一门应用基础学科, 它涉及流体力学理论、计算机技术、偏微分方程的数学理论、数值方法等学科。一般认为计算流体力学是从 20 世纪 60 年代中后期逐步发展起来的, 大致经历了四个发展阶段: 无黏性线性、无黏性非线性、雷诺平均的 $N-S$ 方程以及完全的 $N-S$ 方程。

自 20 世纪 60 年代以来 CFD 技术得到飞速发展, 其原动力是不断增长的工业需求, 而航空航天工业自始至终是最强大的推动力。传统飞行器设计方法, 试验昂贵、费时, 所获信息有限, 迫使人们需要用先进的计算机仿真手段指导设计, 大量减少原型机试验, 缩短研发周期, 节约研究经费。1970 年, CFD 运用在二维流动模型中。1990 年, 已经可以进行三维流场模拟。

四十年来, CFD 在湍流模型、网格技术、数值算法、可视化、并行计算等方面取得飞速发展, 并给工业界带来了革命性的变化。如在汽车工业中, CFD 和其他计算机辅助工程 (CAE) 工具一起, 使原来新车研发需要上百辆样车减少为目前的十几辆车; 国外飞机厂商用 CFD 取代大量实物试验, 如美国战斗机 YF-23 采用 CFD 进行气动设计后比前一代 YF-17 减少了 60% 的风洞试验量。目前在航空、航天、汽车等工业领域, 利用 CFD 进行的反复设计、分析、优化已成为标准的必经步骤和手段。

当前 CFD 问题的规模为: 机理研究方面如湍流直接模拟, 网格数达到了 10^9 (十亿) 量级, 在工业应用方面, 网格数最多达到了 10^7 (千万) 量级。现在 CFD 发展到完全可以分析三维黏性湍流及旋涡运动等复杂问题。

近十年来, CFD 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 CFD 的方法进行分析和模拟。CFD 不仅作为一个研究工具, 而且还作为设计工具应用在航空航天、汽车和发动机、工业制造、土木工程、环境工程和造船 (潜水艇)、食品工程、海洋结构工程等领域。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; 飞机和航天器等飞行器的设计; 汽车流线外形对性能的影响; 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; 离心泵的空化模拟。

空化现象会造成流体机械的振动、噪声、气蚀, 影响产品的性能和寿命。现在 CFD 技术可以有效地预测空化现象, 帮助改善原有设计, 减少空化的损害。

随着计算机技术的发展和所需要解决的工程问题的复杂性的增加, 计算流体力学已经发展成为以数值手段求解流体力学物理模型、分析其流动机理为主线, 包括计算机技术、计算方法、网格技术和可视化后处理技术等多种技术的综合体。目前, 计算流体力学主要向两个方向发展: 一方面是研究流动非定常稳定性以及湍流流动机理, 开展高精度、高分辨率的计算方法和并行算法等的流动机理与算法研究; 另一方面是将计算流体力学直接应用于模拟各种实际流动, 解决工业生产中的各种问题。

计算流体力学研究工作的优势、存在的问题和困难如下:

(1) 优势。“数值实验”比“物理实验”具有更大的自由度和灵活性, 例如“自由”地选取各种参数等。“数值实验”可以进行“物理实验”不可能或很难进行的实验, 例如: 天体内部的温度场数值模拟, 可控热核反应的数值模拟; “数值实验”的经济效益极为显著, 而且将越来越显著。

(2) 问题与不足。流动机理不明的问题, 数值工作无法进行; 数值工作自身仍然有许多理论问题有待解决; 离散化不仅引起定量的误差, 同时也会引起定性的误差, 所以数值工作仍然离不开实验的验证。

CFD 面临的挑战及主要任务: (1) 多尺度复杂流动的数学模型化, 湍流的计算模型, 转捩的预测模型, 燃烧及化学反应模型, 噪声模型等。(2) 可处理间断及多尺度流场的高分辨率、强鲁棒性、高效数值方法; 高精度激波捕捉法; 间断有限元法等。(3) 可处理复杂外形、易用性强的算法; 复杂外形——网格生成工作量大, 多块分区算法; 无网格法及粒子算法。

1.1.2 数值模拟过程

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——数值实验（P. J. Roache, 1983）。

具体过程如下：

- (1) 建立反映工程问题或物理问题本质的数学模型。
- (2) 寻求高效率、高精度的计算方法。
- (3) 编制程序和进行计算。
- (4) 显示计算结果。

其数值模拟过程框图如图 1-1 所示。

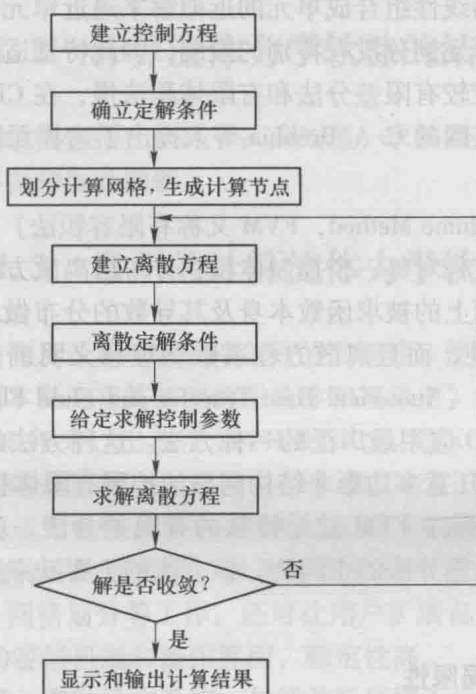


图 1-1 数值模拟过程框图

1.1.3 控制方程的离散方法

1.1.3.1 有限差分法

有限差分法（Finite Difference Method, FDM）是应用最早、最经典的数值方法，它是将求解区域划分为矩形或正交曲线网格（或称为差分网格），将控制方程中的每一个微商用差商来代替，从而将连续函数的微分方程离散为网格节点上定义的差分方程，每个方程中包含了本节点及其附近一些节点上的待求函数值，通过求解这些代数方程就可获得所需的数值解。较多用于求解双曲形和抛物形问题。

有限差分法的优点是它建立在经典的数学逼近理论的基础上，容易为人们理解和接受；有限差分法的主要缺点是对于复杂流体区域的边界形状处理不方便，处理得不好将影响计算精度。

在此发展基础上有：PIC(Particle-in-Cell)、MAC(Marker-and-Cell)、美籍华人陈景仁提出的有限分析法(Finite Analytic Method, FAM)。

1.1.3.2 有限元法

有限元法(Finite Element Method, FEM)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。

有限元法的基本原理是把适定的微分问题的解域进行离散化,将其剖分成相联结又互不重叠的具有一定规则几何形状的有限个子区域(如:在二维问题中可以划分为三角形或四边形;在三维问题中可以划分为四面体或六面体等),这些子区域称之为单元,单元之间以节点相联结。函数值被定义在节点上,在单元中选择基函数(又称插值函数),以节点函数值与基函数的乘积的线性组合成单元的近似解来逼近单元中的真解。有限元法的主要优点是对于求解区域的单元剖分没有特别的限制,因此特别适合处理具有复杂边界流场的区域。有限元法求解速度较有限差分法和有限体积法慢,在CFD中运用不是很广泛。

在有限元法基础上,英国的C. A. Brebbia等人提出了边界元法和混合元法等。

1.1.3.3 有限体积法

有限体积法(Finite Volume Method, FVM又称有限容积法)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具有守恒性,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》中对有限体积法进行全面阐述。FVM目前是CFD应用最广泛的一种方法。这种方法的研究和扩展也在不断进行,如P. Chow提出适用于任意多边形非结构网格的扩展有限体积法等。

就划分和求解的结果而言,FVM就是特殊的有限差分法。就离散方法而言,有限体积法可视作有限元法和有限差分法的中间物,该方法的主要缺点是不便对离散方程进行数学特性分析。

1.1.4 数值模拟的优点及局限性

相对实验流体力学而言,数值模拟的优点有:

- (1) 数值模拟可以大幅减少新设计所需的时间和成本。
- (2) 能研究难以进行或不可能进行受控实验的系统。
- (3) 能超出通常的行为极限,研究危险条件下的系统。
- (4) 比实验研究更自由、更灵活。
- (5) 可以无限量地提供研究结果的细节,便于优化设计。
- (6) 具有很好的重复性,条件容易控制。

数值模拟的局限性:

(1) 数值模拟要有准确的数学模型(非线性偏微分方程数值解现有理论尚不充分,还没有严格的稳定性分析、误差分析或收敛性证明)。

(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零的极限条件下才能获得原方程的精确解。即使有了可靠的理论方程,数值模拟的可靠性仍需要得到

实践的验证,必须在一定范围内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。

(4) 数值模拟受到计算机条件的限制。直接用湍流的雷诺平均 N-S 方程数值模拟湍流还不可能,由于网格最小尺度难以达到湍流的最小尺度,目前只能就几个简单的情形进行模拟。

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大容量、高性能的计算机系统是计算流体力学近期需要解决的问题。

1.2 计算流体力学软件的结构

计算流体力学软件的结构包括三个环节:前处理、求解和后处理,与之相对应的程序模块称为前处理器、求解器和后处理器。

1.3 常用的计算流体力学软件

由于流动问题的复杂性及计算机软硬件条件的多样性,使得用户各自的应用程序往往缺乏通用性,而流动问题本身又有其鲜明的系统性和规律性,因而比较适合于被制成通用性的商用软件。自从 1981 年来,出现了如 PHOENICS、CFX、STAR-CD、Fluent、FINE 及 Fire 等软件,这些软件的显著特点(见表 1-1)如下:

(1) 功能比较全面,适用性强,几乎可以解决工程上的各种复杂问题。

(2) 具有比较易用的前后处理系统,以及与其他 CAD 及其他 CFD 软件的接口能力,便于用户快速完成造型、网格划分等工作,还可让用户扩展自己的开发模块。

(3) 具有比较完备的容错机制和操作界面,稳定性高。

(4) 可在多种计算机、多种操作系统,包括并行环境下运行。

表 1-1 各种 CFD 软件

名称	离散方法	所属公司	功能特点	备注
PHOENICS	FVM	英国 CHAM	开放性; CAD 接口; 运动物体功能; 多种模型选择; 双重算法选择; 多模块选择	第一套 CFD 商用软件, 1981 年发布第一个正式版本; 可在 Windows、Linux/Unix 环境下运行
CFX	FVM	英国 AEA Technology (2003 年被 ANSYS 收购)	除可以使用有限体积法之外, 还可使用基于有限元的有限体积法, 吸收了有限元法的数值精确性; 是第一个发展和使用全隐式多网格耦合求解技术的商用软件; 可自动对边界网格加密、流场变化区域局部加密、分离流模拟	除了常用的湍流模型外, 最先使用大涡模拟 (LES) 和分离涡模拟 (DES) 等高级湍流模型; 1995 年 CFX 推出了专业的旋转机械设计与分析模块——CFX TASCflow, 可在 Windows、Linux/Unix 环境下运行

续表 1-1

名称	离散方法	所属公司	功能特点	备注
STAR-CD	FVM	英国 CD-adapco	将前处理、求解器和后处理器集成；非牛顿流体的计算；较强的 CAD 建模功能和数据接口；尤其是内燃机中流场分析	适应复杂计算区域的能力具有一定的优势，可以处理滑移网格的问题；用户可根据需要编制 Fortran 子程序，并通过 STAR-CD 提供的接口函数来达到预期的目的
Fluent	FVM	美国 FLUENT 公司（2006 年被 ANSYS 收购）	提供非常灵活的网格特性，使用结构网格或非结构网格或它们的混合来解决复杂外形的流动；定义多种边界条件，且边界条件可随时间和空间变化；提供用户自定义子程序功能，可自行设定相关方程或组分输运方程的体积源项；C 语言编写程序，可实现动态内存分配及高数据结构	1983 年推出，继 PHOENICS 之后第二个投放市场的商用流体软件；Fluent 使用 Client/Server 结构，可在 Windows、Linux/Unix 环境下运行，支持并行处理；还包括：FIDAP、POLYFLOW、ICEPAK、MIXSIM、AIRPAK 等
FINE	FVM	比利时尤迈克 (NUMECA) 公司	求解流动与传热问题的 CFD 软件，尤其是叶轮机械的设计优化和仿真	
Fire	FVM	奥地利 AVL (李斯特内燃机及测试设备公司)	Fire 能解决所有和发动机有关的 CFD 问题	

注：PHOENICS 是 Parabolic Hyperbolic or Elliptic Numerical Integration Code Series 的缩写，由著名学者 D. B. Spalding 和 S. V. Patankar 提出。CHAM 是 Concentration Heat and Momentum Limited 的缩写。

ANSYS CFD 软件包括 Fluent、CFX、专门用于聚合物流动模拟的 POLYFLOW 及后处理 CFD-Post 等。

习 题

1-1 CFD 发展的方向及局限性？

1-2 主流 CFD 软件控制方程离散方法？

教学目的:

- (1) 了解流体的属性,尤其是黏性及流体分类。
- (2) 了解研究流体运动的方法。
- (3) 了解流体运动的描述,理解流线、迹线及层流、湍流概念。
- (4) 了解并掌握流体运动的方程:连续性方程、运动(动量)方程、能量方程。
- (5) 牛顿型流体的控制方程(N-S方程、伯努利方程)。
- (6) 流体流动控制方程的定解条件。



第2章课件

2.1 流体力学基本概念

2.1.1 流体的属性

气体与液体总称为流体,相比固体而言,流体分子间作用力较小。

2.1.1.1 流体的密度、重度和比重

流体的密度: $\rho = \frac{M}{V}$ 或 $\rho = \lim_{\Delta V \rightarrow 0} \frac{\Delta M}{\Delta V}$, 它随温度和压强的变化而变化。

流体的重度: $\gamma = \rho g$ (单位: N/m^3)。

流体的比重: 流体的密度与 4°C 时水的密度之比。

2.1.1.2 流体的黏性

流体的黏性: 阻止流体剪切变形或角变形运动的一种量度。

由牛顿平板实验知道,所有流体满足牛顿内摩擦定律。

流体内摩擦力的大小与流体的性质有关,与流体的速度梯度和接触面积成正比,即切应力与剪切变形速度成正比,其关系图如图 2-1 所示,关系式由式 (2-1) 来表示。

$$\tau = \frac{F}{A} = \mu \frac{U}{Y} = \mu \frac{du}{dy} \quad (2-1)$$

式中, F 为外力; U 为速度。

式 (2-1) 为牛顿黏性公式,式中 $\mu = \frac{\tau}{du/dy}$ 称为黏性系数,或绝对黏度,或动力黏度,简称为流体的黏度 (单位: $\text{Pa} \cdot \text{s}$ 或 $\text{N} \cdot \text{s}/\text{m}^2$)。