

计算流体力学分析

——CFD软件原理与应用

王福军 编著



清华大学出版社

计算流体力学分析 ——CFD 软件原理与应用

王福军 编著

清华大学出版社
北 京

内 容 简 介

本书是一本介绍计算流体动力学(CFD)最新理论知识和 CFD 软件开发、应用的指导性教材。全书共分八章,前五章以有限体积法为核心,介绍流体流动与传热问题的控制方程、空间及时间离散格式、湍流模型及数值解法,后三章结合 FLUENT 软件,以实例的方式介绍 CFD 软件原理及其在流场分析、传热计算及多相流模拟等方面的最新应用。实用性和新颖性是本书最大的特点。

本书可作为动力、能源、水利、航空、冶金、海洋、环境、气象、流体工程等专业领域的研究生和本科生教材,也可供上述领域的科技人员,特别是从事 CFD 模拟的人员参考。

版权所有,翻印必究。举报电话: 010-62782989 13901104297 13801310933
本书封面贴有清华大学出版社激光防伪标签,无标签者不得销售。

图书在版编目(CIP)数据

计算流体动力学分析——CFD 软件原理与应用/王福军编著. —北京:清华大学出版社,2004.9
ISBN 7-302-09503-5

I.计… II.①王… III.计算流体力学—流体力学—应用软件, CFD IV.O351.2-39

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2004)第 093501 号

出 版 者:清华大学出版社 地 址:北京清华大学学研大厦
<http://www.tup.com.cn> 邮 编:100084
社 总 机:010-62770175 客 户 服 务:010-62776969

组稿编辑:应 勤

文稿编辑:桑任松

封面设计:陈刘源

印 刷 者:北京密云胶印厂

装 订 者:北京市密云县京文制本装订厂

发 行 者:新华书店总店北京发行所

开 本:185×260 印张:17.75 字数:420 千字

版 次:2004 年 9 月第 1 版 2004 年 9 月第 1 次印刷

书 号:ISBN 7-302-09503-5/O·410

印 数:1~4000

定 价:29.00 元

本书如存在文字不清、漏印以及缺页、倒页、脱页等印装质量问题,请与清华大学出版社出版部联系调换。联系电话:(010)62770175-3103 或(010)62795704

前 言

计算流体力学(简称 CFD)是建立在经典流体力学与数值计算方法基础之上的一门新型独立学科,通过计算机数值计算和图像显示的方法,在时间和空间上定量描述流场的数值解,从而达到对物理问题研究的目的。它兼有理论性和实践性的双重特点,建立了许多理论和方法,为现代科学中许多复杂流动与传热问题提供了有效的计算技术。

CFD 的应用与计算机技术的发展密切相关。CFD 软件最早于 20 世纪 70 年代诞生在美国,但真正得到较广泛的应用是近几年的事。CFD 软件现已成为解决各种流体流动与传热问题的强有力工具,成功应用于水利、航运、海洋、环境、食品、流体机械与流体工程等各种技术科学领域。过去只能靠实验手段才能得到的某些结果,现在已完全可以借助 CFD 模拟来准确获取。

但是,CFD 依赖于系统的流体力学知识和较深入的数理基础,虽然商用 CFD 软件减轻了用户在这方面的压力,但学习和掌握 CFD 还不是一件容易的事。到目前为止,国内尚没有关于 CFD 软件开发与应用的参考书,现有的 CFD 书籍只是介绍计算流体力学基本理论,与 CFD 软件联系不多。随着 FLUENT 等商用 CFD 软件的广泛应用,迫切需要一本介绍 CFD 最新理论知识和 CFD 开发与应用的指导性教材。

本书就是在这样的背景下编写的,力求体现如下三个特点:首先是实用性,本书尽量用最通俗的语言解释 CFD 理论与应用过程中最本质、最基础的内容,同时将理论和应用方法与 CFD 软件结合起来介绍,争取让不同层次的读者都能阅读并掌握 CFD 的核心内容及 CFD 软件的基本用法。其次是新颖性,本书充分体现目前 CFD 研究最新的、已被商用软件采纳的成果,例如引入了近两年才发展起来的用于大涡模拟的一些亚格子尺度模型,同时对 CFD 计算中的某些经验系数,按近几年发表的文献进行了校核和更新。第三是重点突出,本书本着有所为、有所不为的原则,重点介绍发展成熟、应用广泛的理论和方法,例如,有限差分法在许多 CFD 教材中占据大量篇幅,但考虑到有限差分法在目前 CFD 软件中远不如有限体积法应用普遍,因此,本书不介绍有限差分法,而重点介绍有限体积法。

全书共分八章,第 1 章至第 5 章介绍 CFD 的基础理论,第 6 章至第 8 章结合 FLUENT 软件介绍 CFD 开发与应用的知识和实例。

本书第 1 章至第 5 章由王福军编写,第 6 章由王海松编写,第 7 章和第 8 章由王海松、戚兰英、王正伟、周凌九、洪益平和李永欣编写,王国玉、王利萍和黎耀军等也为本书编写做了许多工作。全书由王福军统稿。

本书的出版得益于中国农业大学研究生院教改项目的大力支持,书稿曾作为研究生教材在北京部分院校使用。2004 年初,该书被北京市教委批准作为北京市高等教育精品教材

建设项目编写并出版。在本书出版过程中，得到了清华大学出版社的支持和帮助，使得笔者能在较短时间内出版此书。

由于作者水平有限，书中错误和不足之处在所难免，恳请读者批评指正。作者的 Email 地址是 wangfujun@tsinghua.org.cn。

王福军

2004 年 3 月

目 录

第 1 章 计算流体动力学基础知识	1
1.1 计算流体动力学概述	1
1.1.1 什么是计算流体动力学	1
1.1.2 计算流体动力学的工作步骤	2
1.1.3 计算流体动力学的特点	2
1.1.4 计算流体动力学的应用领域	3
1.1.5 计算流体动力学的分支	4
1.2 流体与流动的基本特性	4
1.2.1 理想流体与粘性流体	4
1.2.2 牛顿流体与非牛顿流体	5
1.2.3 流体热传导及扩散	5
1.2.4 可压流体与不可压流体	6
1.2.5 定常与非定常流动	6
1.2.6 层流与湍流	6
1.3 流体动力学控制方程	7
1.3.1 质量守恒方程	7
1.3.2 动量守恒方程	7
1.3.3 能量守恒方程	9
1.3.4 组分质量守恒方程	10
1.3.5 控制方程的通用形式	11
1.4 对控制方程的进一步讨论	11
1.4.1 湍流的控制方程	12
1.4.2 守恒型控制方程	12
1.4.3 非守恒型控制方程	12
1.5 CFD 的求解过程	13
1.5.1 总体计算流程	13
1.5.2 建立控制方程	13
1.5.3 确定边界条件与初始条件	14
1.5.4 划分计算网格	14
1.5.5 建立离散方程	14
1.5.6 离散初始条件和边界条件	15

1.5.7 给定求解控制参数	15
1.5.8 求解离散方程	15
1.5.9 判断解的收敛性	15
1.5.10 显示和输出计算结果	16
1.6 CFD 软件结构	16
1.6.1 前处理器	16
1.6.2 求解器	17
1.6.3 后处理器	17
1.7 常用的 CFD 商用软件	18
1.7.1 PHOENICS	18
1.7.2 CFX	19
1.7.3 STAR-CD	20
1.7.4 FIDAP	21
1.7.5 FLUENT	21
1.8 本章小结	22
1.9 复习思考题	23

第 2 章 基于有限体积分法的控制方程离散	24
2.1 离散化概述	24
2.1.1 离散化的目的	24
2.1.2 离散时所使用的网格	25
2.1.3 常用的离散化方法	25
2.2 有限体积分法及其网格简介	26
2.2.1 有限体积分法的基本思想	26
2.2.2 有限体积分法所使用的网格	27
2.2.3 网格几何要素的标记	28
2.3 求解一维稳态问题的有限体积分法	28
2.3.1 问题的描述	28
2.3.2 生成计算网格	29
2.3.3 建立离散方程	29
2.3.4 离散方程的求解	31
2.4 常用的离散格式	31

2.4.1	术语与约定	32
2.4.2	中心差分格式	33
2.4.3	一阶迎风格式	34
2.4.4	混合格式	36
2.4.5	指数格式	36
2.4.6	乘方格式	37
2.4.7	各种离散格式的汇总	38
2.4.8	低阶格式中的假 扩散与人工粘性	39
2.5	空间离散的高阶离散格式	39
2.5.1	二阶迎风格式	39
2.5.2	QUICK 格式	40
2.5.3	对高阶格式的讨论	43
2.6	各种离散格式的性能对比	44
2.7	一维瞬态问题的有限体积法	45
2.7.1	瞬态问题的描述	45
2.7.2	控制方程的积分	46
2.7.3	显式时间积分方案	48
2.7.4	Crank-Nicolson 时间积分方案	49
2.7.5	全隐式时间积分方案	50
2.8	关于有限体积法的进一步讨论	51
2.8.1	被求函数的离散格式	51
2.8.2	方程组的形式	51
2.8.3	源项的处理	52
2.8.4	有限体积法的 四条基本原则	52
2.9	二维与三维问题的离散方程	54
2.9.1	二维问题的基本方程	54
2.9.2	二维问题的控制体积	54
2.9.3	二维问题控制方程的积分	55
2.9.4	二维问题的离散方程	56
2.9.5	三维问题的离散方程	57
2.9.6	离散方程的通用表达式	57
2.10	本章小结	61
2.11	复习思考题	62

第 3 章 基于 SIMPLE 算法的

流场数值计算

3.1	流场数值解法概述	63
3.1.1	常规解法存在的主要问题	63
3.1.2	流场数值计算的主要方法	65
3.2	交错网格及其应用	67
3.2.1	使用普通网格计算 流场时遇到的困难	67
3.2.2	交错网格的特点	68
3.2.3	动量方程的离散	70
3.3	流场计算的 SIMPLE 算法	74
3.3.1	SIMPLE 算法的基本思想	74
3.3.2	速度修正方程	75
3.3.3	压力修正方程	76
3.3.4	SIMPLE 算法的计算步骤	78
3.3.5	SIMPLE 算法应用实例	78
3.3.6	对 SIMPLE 算法的讨论	81
3.4	SIMPLER / SIMPLEC / PISO 算法	83
3.4.1	SIMPLER 算法	83
3.4.2	SIMPLEC 算法	86
3.4.3	PISO 算法	87
3.4.4	SIMPLE 系列算法的比较	91
3.5	瞬态问题的数值计算	91
3.5.1	瞬态问题的 SIMPLE 算法	91
3.5.2	瞬态问题的 PISO 算法	92
3.6	基于同位网格的 SIMPLE 算法	93
3.6.1	同位网格简介	94
3.6.2	动量方程的离散	94
3.6.3	压力修正方程的建立	95
3.6.4	同位网格上 SIMPLE 算法的计算步骤	97
3.6.5	关于同位网格应用的 几点说明	98
3.7	基于非结构网格的 SIMPLE 算法	99
3.7.1	非结构网格及 控制体积的定义	99

3.7.2 通用控制方程的离散	100	4.5 RNG $k-\varepsilon$ 模型和 Realizable	
3.7.3 动量方程的离散	102	$k-\varepsilon$ 模型	124
3.7.4 速度修正方程的建立	103	4.5.1 RNG $k-\varepsilon$ 模型	124
3.7.5 压力修正方程的建立	104	4.5.2 Realizable $k-\varepsilon$ 模型	125
3.7.6 非结构网格上 SIMPLE		4.6 在近壁区使用 $k-\varepsilon$ 模型的	
算法的计算步骤	105	问题及对策	126
3.7.7 关于非结构网格		4.6.1 近壁区流动的特点	126
应用的几点说明	106	4.6.2 在近壁区使用 $k-\varepsilon$	
3.8 离散方程组的基本解法	107	模型的问题	128
3.8.1 对流-扩散问题的		4.6.3 壁面函数法	128
离散方程组的特点	107	4.6.4 低 Re 数 $k-\varepsilon$ 模型	131
3.8.2 代数方程组的基本解法	108	4.7 Reynolds 应力方程模型(RSM)	132
3.8.3 TDMA 解法	108	4.7.1 Reynolds 应力输运方程	132
3.9 本章小结	110	4.7.2 RSM 的控制	
3.10 复习思考题	111	方程组及其解法	136
第 4 章 三维湍流模型及其		4.7.3 对 RSM 适用性的讨论	137
在 CFD 中的应用	113	4.8 代数应力方程模型(ASM)	137
4.1 湍流及其数学描述	113	4.8.1 ASM 的应力方程	138
4.1.1 湍流流动的特征	113	4.8.2 ASM 的控制	
4.1.2 湍流的基本方程	114	方程组及其求解	138
4.2 湍流的数值模拟方法简介	116	4.8.3 ASM 的特点	138
4.2.1 三维湍流数值		4.9 大涡模拟(LES)	139
模拟方法的分类	116	4.9.1 大涡模拟的基本思想	139
4.2.2 直接数值模拟(DNS)简介	116	4.9.2 大涡的运动方程	139
4.2.3 大涡模拟(LES)简介	117	4.9.3 亚格子尺度模型	140
4.2.4 Reynolds 平均法		4.9.4 LES 控制方程的求解	141
(RANS)简介	118	4.10 本章小结	142
4.3 零方程模型及一方程模型	119	4.11 复习思考题	142
4.3.1 零方程模型	119	第 5 章 边界条件的应用	144
4.3.2 一方程模型	120	5.1 边界条件概述	144
4.4 标准 $k-\varepsilon$ 两方程模型	120	5.1.1 边界条件的类型	144
4.4.1 标准 $k-\varepsilon$ 模型的定义	121	5.1.2 边界条件对网格	
4.4.2 标准 $k-\varepsilon$ 模型的		布置的影响	145
有关计算公式	121	5.1.3 将边界条件引入到	
4.4.3 标准 $k-\varepsilon$ 模型的		离散方程	146
控制方程组	122	5.2 流动进口边界条件	146
4.4.4 标准 $k-\varepsilon$ 模型方程的		5.2.1 流动进口边界	
解法及适用性	123	条件的设置	146

5.2.2 对流动进口边界 条件的说明	147	6.3.5 导出网格文件	172
5.3 流动出口边界条件	148	6.4 AutoCAD 与 GAMBIT 的 联合使用	172
5.3.1 流动出口边界 条件的设置	148	6.4.1 二维离心泵流动 模拟问题概述	172
5.3.2 对流动出口边界 条件的说明	150	6.4.2 在 AutoCAD 内 生成几何模型	173
5.4 壁面条件	150	6.4.3 划分网格	174
5.4.1 壁面边界上的网格布置	150	6.4.4 指定边界类型和 区域类型	176
5.4.2 壁面边界上离散 方程源项的构造	152	6.5 Pro/ENGINEER 与 GAMBIT 的 联合使用	177
5.5 恒压边界条件	154	6.5.1 三维轴流泵流动 模拟问题概述	177
5.6 对称边界条件与周期性边界条件	156	6.5.2 在 Pro/ENGINEER 中 生成叶片实体模型	178
5.6.1 对称边界条件	156	6.5.3 在 GAMBIT 中生成 计算区域的实体模型	179
5.6.2 周期性边界条件	156	6.5.4 三维问题的网格划分	181
5.7 使用边界条件时的注意事项	156	6.5.5 指定边界类型和体的类型	182
5.8 初始条件	158	6.6 本章小结	182
5.9 本章小结	158	6.7 复习思考题	183
5.10 复习思考题	158		
第 6 章 网格的生成	160	第 7 章 FLUENT 软件的基本用法	185
6.1 网格及其生成方法概述	160	7.1 FLUENT 概述	185
6.1.1 网格类型	160	7.1.1 FLUENT 软件构成	185
6.1.2 网格单元的分类	161	7.1.2 FLUENT 适用对象	186
6.1.3 单连域与多连域网格	162	7.1.3 FLUENT 使用的单位制	186
6.1.4 生成网格的过程	162	7.1.4 FLUENT 使用的文件类型	186
6.1.5 生成结构网格的 贴体坐标法	162	7.2 FLUENT 求解步骤	187
6.1.6 生成网格的专用软件	164	7.2.1 制订分析方案	188
6.2 网格生成软件 GAMBIT 简介	164	7.2.2 求解步骤	188
6.2.1 GAMBIT 的特点	164	7.3 FLUENT 的操作界面	189
6.2.2 GAMBIT 的操作界面	165	7.3.1 文本命令与菜单	189
6.2.3 GAMBIT 的操作步骤	166	7.3.2 Scheme 表达式	190
6.3 GAMBIT 的基本用法	167	7.3.3 图形控制及鼠标使用	191
6.3.1 二维自然对流换热 问题的描述	167	7.4 使用网格	191
6.3.2 生成几何模型	168	7.4.1 导入网格	191
6.3.3 划分网格	169	7.4.2 检查网格	193
6.3.4 指定边界类型和区域类型	170		

7.4.3	显示网格	193	7.9.10	周期性	227
7.4.4	修改网格	194	7.9.11	对称	227
7.4.5	光顺网格与交换单元面	195	7.9.12	内部界面	228
7.5	选择求解器及运行环境	196	7.10	设置求解控制参数	228
7.5.1	分离式求解器	196	7.10.1	设置离散格式与 欠松弛因子	228
7.5.2	耦合式求解器	196	7.10.2	设置求解限制项	231
7.5.3	求解器中的显式 与隐式方案	197	7.10.3	设置求解过程的 监视参数	231
7.5.4	求解器的比较与选择	198	7.10.4	初始化流场的解	233
7.5.5	计算模式的选择	199	7.11	流场迭代计算	234
7.5.6	运行环境的选择	199	7.11.1	稳态问题的求解	234
7.6	确定计算模型	200	7.11.2	非稳态问题的求解	235
7.6.1	多相流模型	200	7.12	计算结果的后处理	237
7.6.2	能量方程	201	7.12.1	创建要进行后处理的 表面	237
7.6.3	粘性模型	202	7.12.2	显示等值线图、速度 矢量图和流线图	238
7.6.4	辐射模型	204	7.12.3	绘制直方图 与 XY 散点图	240
7.6.5	组分模型	205	7.12.4	生成动画	241
7.6.6	离散相模型	206	7.12.5	报告统计信息	241
7.6.7	凝固和熔化	207	7.13	FLUENT 应用实例	242
7.6.8	声学特性	207	7.13.1	导入并检查网格	242
7.6.9	污染物模型	207	7.13.2	选择求解器及计算模型	243
7.7	定义材料	208	7.13.3	定义材料	244
7.7.1	材料简介	208	7.13.4	设置边界条件	244
7.7.2	定义材料的方法	208	7.13.5	求解	245
7.8	设置边界条件	210	7.13.6	后处理	246
7.8.1	FLUENT 提供的 边界条件类型	210	7.14	UDF 简介	248
7.8.2	设置边界条件的方法	212	7.14.1	UDF 功能	248
7.8.3	给定湍流参数	214	7.14.2	UDF 基本用法	248
7.9	常用的边界条件	216	7.14.3	UDF 应用实例	249
7.9.1	压力进口	216	7.15	本章小结	252
7.9.2	速度进口	219	7.16	复习思考题	253
7.9.3	质量进口	220	第 8 章	CFD 综合应用实例	254
7.9.4	压力出口	221	8.1	偏心圆环内自然对流换热模拟	254
7.9.5	出流	222	8.1.1	自然对流换热过程模拟	254
7.9.6	压力远场	223			
7.9.7	壁面	223			
7.9.8	流体	225			
7.9.9	固体	226			

8.1.2 计算结果	255	8.4 含有自由表面的河流跌坎分析	262
8.2 轴流泵叶轮的性能预测	256	8.4.1 问题的描述	262
8.2.1 轴流泵内部流动特点	256	8.4.2 网格及模型的处理	263
8.2.2 叶轮内的流动模拟	257	8.4.3 计算模型的设定	263
8.2.3 流场模拟结果	258	8.4.4 边界条件的设定	264
8.3 风机的优化设计	259	8.4.5 求解控制参数的设置	264
8.3.1 问题描述	259	8.4.6 瞬态问题的计算结果	264
8.3.2 计算域与网格处理	260	8.5 温室自然通风模拟	265
8.3.3 计算参数及边界条件设置	260	8.6 本章小结	267
8.3.4 风机内部的流态分析	261	参考文献	268
8.3.5 风机改造思路	261		

参考文献	268
------------	-----

第 1 章 计算流体力学基础知识

流体流动现象大量存在于自然界及多种工程领域中，所有这些过程都受质量守恒、动量守恒和能量守恒等基本物理定律的支配。本章向读者介绍这些守恒定律的数学表达式，在此基础上提出数值求解这些基本方程的思想，阐述计算流体力学的任务及相关基础知识，最后简要介绍目前常用的计算流体力学商用软件。

1.1 计算流体力学概述

1.1.1 什么是计算流体力学

计算流体力学(Computational Fluid Dynamics, 简称 CFD)是通过计算机数值计算和图像显示，对包含有流体流动和热传导等相关物理现象的系统所做的分析。CFD 的基本思想可以归结为：把原来在时间域及空间域上连续的物理量的场，如速度场和压力场，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建立起关于这些离散点上场变量之间关系的代数方程组，然后求解代数方程组获得场变量的近似值^[1-3]。

CFD 可以看做是在流动基本方程(质量守恒方程、动量守恒方程、能量守恒方程)控制下对流动的数值模拟。通过这种数值模拟，我们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，如旋转式流体机械的转矩、水力损失和效率等。此外，与 CAD 联合，还可进行结构优化设计等。

CFD 方法与传统的理论分析方法、实验测量方法组成了研究流体流动问题的完整体系，图 1.1 给出了表征三者之间关系的“三维”流体力学示意图^[10]。

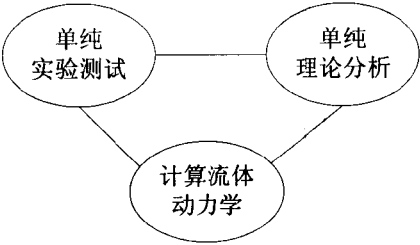


图 1.1 “三维”流体力学示意图

理论分析方法的优点在于所得结果具有普遍性，各种影响因素清晰可见，是指导实验研究和验证新的数值计算方法的理论基础。但是，它往往要求对计算对象进行抽象和简化，

才有可能得出理论解。对于非线性情况，只有少数流动才能给出解析结果。

实验测量方法所得到的实验结果真实可信，它是理论分析和数值方法的基础，其重要性不容低估。然而，实验往往受到模型尺寸、流场扰动、人身安全和测量精度的限制，有时可能很难通过试验方法得到结果。此外，实验还会遇到经费投入、人力和物力的巨大耗费及周期长等许多困难。

而 CFD 方法恰好克服了前面两种方法的弱点，在计算机上实现一个特定的计算，就好像在计算机上做一次物理实验。例如，机翼的绕流，通过计算并将其结果在屏幕上显示，就可以看到流场的各种细节：如激波的运动、强度，涡的生成与传播，流动的分离、表面的压力分布、受力大小及其随时间的变化等。数值模拟可以形象地再现流动情景，与做实验没有什么区别。

1.1.2 计算流体力学的工作步骤

采用 CFD 的方法对流体流动进行数值模拟，通常包括如下步骤：

(1) 建立反映工程问题或物理问题本质的数学模型。具体地说就是要建立反映问题各个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。没有正确完善的数学模型，数值模拟就毫无意义。流体的基本控制方程通常包括质量守恒方程、动量守恒方程、能量守恒方程，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，即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。这里的计算方法不仅包括微分方程的离散化方法及求解方法，还包括贴体坐标的建立，边界条件的处理等。这些内容，可以说是 CFD 的核心。

(3) 编制程序和进行计算。这部分工作包括计算网格划分、初始条件和边界条件的输入、控制参数的设定等。这是整个工作中花时间最多的部分。由于求解的问题比较复杂，比如 Navier-Stokes 方程就是一个十分复杂的非线性方程，数值求解方法在理论上不是绝对完善的，所以需要通过实验加以验证。正是从这个意义上讲，数值模拟又叫数值试验。应该指出，这部分工作不是轻而易举就可以完成的。

(4) 显示计算结果。计算结果一般通过图表等方式显示，这对检查和判断分析质量和结果有重要参考意义。

以上这些步骤构成了 CFD 数值模拟的全过程。其中数学模型的建立是理论研究的课题，一般由理论工作者完成。

1.1.3 计算流体力学的特点

CFD 的长处是适应性强、应用面广。首先，流动问题的控制方程一般是非线性的，自变量多，计算域的几何形状和边界条件复杂，很难求得解析解，而用 CFD 方法则有可能找出满足工程需要的数值解；其次，可利用计算机进行各种数值试验，例如，选择不同流动参数进行物理方程中各项有效性和敏感性试验，从而进行方案比较。再者，它不受物理模型和实验模型的限制，省钱省时，有较多的灵活性，能给出详细和完整的资料，很容易模

拟特殊尺寸、高温、有毒、易燃等真实条件和实验中只能接近而无法达到的理想条件。

CFD 也存在一定的局限性。首先,数值解法是一种离散近似的计算方法,依赖于物理上合理、数学上适用、适合于在计算机上进行计算的离散的有限数学模型,且最终结果不能提供任何形式的解析表达式,只是有限个离散点上的数值解,并有一定的计算误差;第二,它不像物理模型实验一开始就能给出流动现象并定性地描述,往往需要由原体观测或物理模型试验提供某些流动参数,并需要对建立的数学模型进行验证;第三,程序的编制及资料的收集、整理与正确利用,在很大程度上依赖于经验与技巧。此外,因数值处理方法等原因有可能导致计算结果的不真实,例如产生数值粘性和频散等伪物理效应。当然,某些缺点或局限性可通过某种方式克服或弥补,这在本书中会有相应介绍。此外,CFD 因涉及大量数值计算,因此,常需要较高的计算机软硬件配置。

CFD 有自己的原理、方法和特点,数值计算与理论分析、实验观测相互联系、相互促进,但不能完全替代,三者各有各的适用场合。在实际工作中,需要注意三者有机的结合,争取做到取长补短。

1.1.4 计算流体力学的应用领域

近十多年来,CFD 有了很大的发展,替代了经典流体力学中的一些近似计算法和图解法;过去的一些典型教学实验,如 Reynolds 实验,现在完全可以借助 CFD 手段在计算机上实现。所有涉及流体流动、热交换、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。CFD 不仅作为一个研究工具,而且还作为设计工具在水利工程、土木工程、环境工程、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
- 食品中细菌的运移

对这些问题的处理,过去主要借助于基本的理论分析和大量的物理模型实验,而现在大多采用 CFD 的方式加以分析和解决,CFD 技术现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。

1.1.5 计算流体动力学的分支

经过四十多年的发展, CFD 出现了多种数值解法。这些方法之间的主要区别在于对控制方程的离散方式。根据离散的原理不同, CFD 大体上可分为三个分支:

- 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)

有限差分法是应用最早、最经典的 CFD 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。求出差分方程组的解, 就是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)等^[2]。

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, 因此应用不是特别广泛。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。

有限体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。有限体积法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作出某种形式的假定。用有限体积法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》^[12]中对有限体积法作了全面的阐述。此后, 该方法得到了广泛应用, 是目前 CFD 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^[24]。

考虑到目前的 CFD 商用软件大多采用有限体积法, 加之篇幅所限, 本书后续内容主要讨论有限体积法。

1.2 流体与流动的基本特性

流体是 CFD 的研究对象, 流体的性质及流动状态决定着 CFD 的计算模型及计算方法的选择, 决定着流场各物理量的最终分布结果。本节将介绍 CFD 所涉及的流体及流动的基本概念和术语。

1.2.1 理想流体与粘性流体

粘性(viscosity)是流体内部发生相对运动而引起的内部相互作用。

流体在静止时虽不能承受切应力,但在运动时,对相邻两层流体间的相对运动,即相对滑动速度却是有抵抗的,这种抵抗力称为粘性应力。流体所具有的这种抵抗两层流体间相对滑动速度,或普遍说来抵抗变形的性质,称为粘性。

粘性大小依赖于流体的性质,并显著地随温度而变化。实验表明,粘性应力的大小与粘性及相关速度成正比。当流体的粘性较小(如空气和水的粘性都很小),运动的相对速度也不大时,所产生的粘性应力比起其他类型的力(如惯性力)可忽略不计。此时,我们可以近似地把流体看成是无粘性的,称为无粘流体(inviscid fluid),也叫做理想流体(perfect fluid)。而对于有粘性的流体,则称为粘性流体(viscous fluid)。十分明显,理想流体对于切向变形没有任何抗拒能力。应该强调指出,真正的理想流体在客观实际中是不存在的,它只是实际流体在某种条件下的一种近似模型。

1.2.2 牛顿流体与非牛顿流体

依据内摩擦剪应力与速度变化率的关系不同,粘性流体又分为牛顿流体(Newtonian fluid)与非牛顿流体(non-Newtonian fluid)。

观察近壁面处的流体流动,可以发现,紧靠壁面的流体粘附在壁面上,静止不动。而在流体内部之间的粘性所导致的内摩擦力的作用下,靠近这些静止流体的另一层流体受迟滞作用速度降低。

流体的内摩擦剪切力 τ 由牛顿内摩擦定律决定:

$$\tau = \mu \lim_{\Delta n \rightarrow 0} \frac{\Delta u}{\Delta n} = \mu \frac{\partial u}{\partial n} \quad (1.1)$$

其中, Δn 为沿法线方向的距离增量; Δu 为对应于 Δn 的流体速度的增量。 $\Delta u / \Delta n$ 为法向距离上的速度变化率。所以,牛顿内摩擦定律表示:流体内摩擦应力和单位距离上的两层流体间的相对速度成比例。比例系数 μ 称为流体的动力粘度,常简称为粘度。它的值取决于流体的性质、温度和压力大小。 μ 的单位是 $\text{N} \cdot \text{s} / \text{m}^2$ 。

若 μ 为常数,则称该类流体为牛顿流体;否则,称为非牛顿流体。空气、水等均为牛顿流体;聚合物溶液、含有悬浮粒杂质或纤维的流体为非牛顿流体。

对于牛顿流体,通常用 μ 和[质量]密度 ρ 的比值 ν 来代替动力粘度 μ :

$$\nu = \frac{\mu}{\rho} \quad (1.2)$$

通过量纲分析可知, ν 的单位是 m^2 / s 。由于没有动力学中力的因次,只具有运动学的要素,所以称 ν 为运动粘度。

1.2.3 流体热传导及扩散

除了粘性外,流体还有热传导(heat transfer)及扩散(diffusion)等性质。当流体中存在着温度差时,温度高的地方将向温度低的地方传送热量,这种现象称为热传导。同样地,当流体混合物中存在着组元的浓度差时,浓度高的地方将向浓度低的地方输送该组元的物质,这种现象称为扩散。

流体的宏观性质,如扩散、粘性和热传导等,是分子输运性质的统计平均。由于分子的不规则运动,在各层流体间交换着质量、动量和能量,使不同流体层内的平均物理量均匀化。这种性质称为分子运动的输运性质。质量输运在宏观上表现为扩散现象,动量输运表现为粘性现象,能量输运则表现为热传导现象。

理想流体忽略了粘性,即忽略了分子运动的动量输运性质,因此在理想流体中也不应考虑质量和能量输运性质——扩散和热传导,因为它们具有相同的微观机制。

1.2.4 可压流体与不可压流体

根据密度 ρ 是否为常数,流体分为可压(compressible)与不可压(incompressible)两大类。当密度 ρ 为常数时,流体为不可压流体,否则为可压流体。空气为可压流体,水为不可压流体。有些可压流体在特定的流动条件下,可以按不可压流体对待。有时,也称可压流动与不可压流动。

在可压流体的连续方程中含密度 ρ ,因而可把 ρ 视为连续方程中的独立变量进行求解,再根据气体的状态方程求出压力。

不可压流体的压力场是通过连续方程间接规定的。由于没有直接求解压力的方程,不可压流体的流动方程的求解有其特殊的困难。

1.2.5 定常与非定常流动

根据流体流动的物理量(如速度、压力、温度等)是否随时间变化,将流动分为定常(steady)与非定常(unsteady)两大类。当流动的物理量不随时间变化,即 $\frac{\partial()}{\partial t}=0$ 时,为定常流动;当流动的物理量随时间变化,即 $\frac{\partial()}{\partial t}\neq 0$,则为非定常流动。定常流动也称为恒定流动,或稳态流动;非定常流动也称为非恒定流动、非稳态流动,或瞬态(transient)流动。许多流体机械在起动或关机时的流体流动一般是非定常流动,而正常运转时可看作是定常流动。

1.2.6 层流与湍流

自然界中的流体流动状态主要有两种形式,即层流(laminar)和湍流(turbulence)。在许多中文文献中,湍流也被译为紊流。层流是指流体在流动过程中两层之间没有相互混掺,而湍流是指流体不是处于分层流动状态。一般说来,湍流是普遍的,而层流则属于个别情况。

对于圆管内流动,定义 Reynolds 数(也称雷诺数): $Re=ud/\nu$ 。其中: u 为液体流速, ν 为运动粘度, d 为管径。当 $Re\leq 2300$ 时,管流一定为层流; $Re\geq 8000\sim 12000$ 时,管流一定为湍流;当 $2300 < Re < 8000$,流动处于层流与湍流间的过渡区。

对于一般流动,在计算 Reynolds 数时,可用水力半径 R 代替上式中的 d 。这里, $R=A/x$, A 为通流截面积, x 为湿周。对于液体, x 等于在通流截面上液体与固体接触的周界长度,不包括自由液面以上的气体与固体接触的部分;对于气体,它等于通流截面的