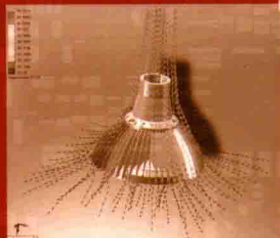
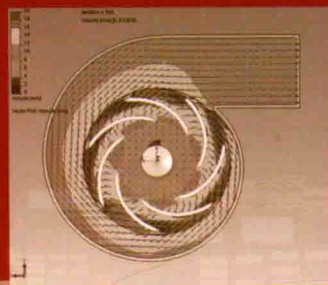
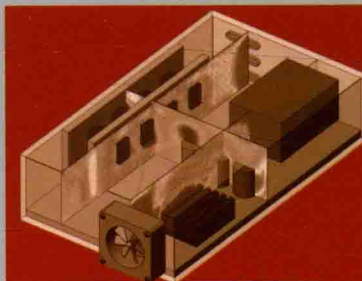


# CFD 技术原理



# 应用

张师帅 / 编



华中科技大学出版社

<http://www.hustp.com>

CAD-CFD-CAE 技术丛书

# CFD 技术原理与应用

张师帅 编

华中科技大学出版社

中国·武汉

## 内 容 提 要

本书是一本介绍 CFD 技术原理与应用的指导性教材。全书分为 10 章。第 1~6 章介绍 CFD 技术的基本理论,包括 CFD 基本知识、控制方程的离散、流场的求解计算、湍流模型及其应用、边界条件与网格生成、格子 Boltzmann 方法等。第 7~10 章介绍 CFD 软件的基本知识,以及软件 GAMBIT、FLUENT、TECPLOT 的基本用法。理论与实践并重,实用性强,是本书的最大特点。

本书可以作为能源动力、航空航天、机械工程、环境工程、化学工程、交通工程、土木工程等领域的高年级本科生、研究生教材,也可供上述领域的科研人员,特别是研究和应用 CFD 技术的人员参考。

### 图书在版编目(CIP)数据

CFD 技术原理与应用/张师帅编. —武汉:华中科技大学出版社,2016.3  
ISBN 978-7-5680-1579-0

I. ①C… II. ①张… III. ①计算流体力学-教材 IV. ①O35

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2016)第 046756 号

## CFD 技术原理与应用

张师帅 编

CFD Jishu Yuanli yu Yingyong

策划编辑:王新华

责任编辑:王新华

封面设计:刘 卉

责任校对:刘 竣

责任监印:周治超

出版发行:华中科技大学出版社(中国·武汉)

武昌喻家山 邮编:430074 电话:(027)81321913

录 排:华中科技大学惠友文印中心

印 刷:武汉市籍缘印刷厂

开 本:787mm×1092mm 1/16

印 张:21.25

字 数:555 千字

版 次:2016 年 3 月第 1 版第 1 次印刷

定 价:46.00 元



华中出版

本书若有印装质量问题,请向出版社营销中心调换  
全国免费服务热线:400-6679-118 竭诚为您服务  
版权所有 侵权必究

# 前 言

计算流体力学(computational fluid dynamics, CFD)是一门新兴的独立学科,它将数值计算方法和数据可视化技术有机结合起来,对流动、传热等相关物理现象进行模拟分析,是当今除理论分析、实验测量之外,解决流动与传热问题的又一种技术手段。尽管其发展的时间不长,但随着计算机性能的不不断提高,目前计算流体力学分析已经广泛渗透到各种现代科学研究和工程应用之中。

CFD 软件早在 20 世纪 70 年代就已在美国诞生,但在国内真正得到广泛应用则是最近十几年的事。目前,CFD 软件已经成为解决各种流动、传热问题的强有力工具,并成功应用于能源动力、石油化工、汽车设计、建筑暖通、航空航天以及生物医学等各个科技领域。过去只能依靠实验手段才能获得的某些结果,现在已经完全可以借助 CFD 软件的模拟计算来准确获取。

随着计算机性能的提高,CFD 软件在工程模拟计算中所发挥的作用日益增强,高校和企业的广大科技人员对于 CFD 软件的学习热情空前高涨,为他们提供一本理论与实践并重的指导性教材非常必要。

本书正是针对高校学生和企业相关科技人员学习 CFD 软件的需要而编写的。编者结合自身多年的理论教学和应用实践经验,采用最通俗的语言解释 CFD 原理与应用中最核心、最本质的内容,同时将理论方法与软件应用结合起来介绍,力争让不同层次的读者能够掌握 CFD 的基本原理和 CFD 软件的基本用法。

本书重点介绍当前经典的商用 CFD 软件 FLUENT 以及通用后处理软件 TECPLOT 的基本用法。理论与实践并重,实用性强,是本书的最大特点。

全书分为 10 章。第 1~6 章以 CFD 原理为核心,重点介绍 CFD 软件的基本原理。第 7~10 章结合具体软件(FLUENT 6.3、GAMBIT 2.3 和 TECPLOT 10.0),重点介绍 CFD 软件的实践应用,并给出 CFD 软件在流动分析、传热计算等方面的应用实例。

在本书编写过程中,得到了华中科技大学能源学院蔡兆麟教授、周怀春教授以及研究生罗亮、李伟华、秦松江、仇生生、杨勤、黄书才和匡海云的支持和帮助,同时还得到了北京海基科技发展有限公司和上海明导电子科技有限公司的支持和帮助。在本书出版过程中,得到华中科技大学出版社的大力支持。在此一并致以深深的谢意!

由于编者水平有限,书中不足之处在所难免,恳请读者批评指正,不胜感激。

编者邮箱:shishuai@mail.hust.edu.cn

张师帅

2016 年 1 月于武汉

# 目 录

<b>第 1 章</b>	<b>CFD 基本知识</b>	(1)
1.1	CFD 概述	(1)
1.1.1	CFD 的基本思想	(1)
1.1.2	CFD 的发展历程	(2)
1.1.3	CFD 的应用领域	(3)
1.2	流体与流动的基本特性	(3)
1.2.1	理想流体与黏性流体	(3)
1.2.2	牛顿流体与非牛顿流体	(4)
1.2.3	流体热传导和扩散	(4)
1.2.4	可压缩流体与不可压缩流体	(4)
1.2.5	定常流与非定常流	(5)
1.2.6	层流与湍流	(5)
1.3	流体动力学的控制方程	(5)
1.3.1	质量守恒方程	(5)
1.3.2	动量守恒方程	(6)
1.3.3	能量守恒方程	(7)
1.3.4	组分质量守恒方程	(8)
1.3.5	湍流控制方程	(8)
1.3.6	控制方程的通用形式	(9)
1.3.7	控制方程的守恒形式与非守恒形式	(10)
1.4	CFD 的工作流程	(10)
1.4.1	CFD 的工作流程概述	(10)
1.4.2	建立数学模型	(11)
1.4.3	确定离散化方法	(11)
1.4.4	对流场进行求解计算	(12)
1.4.5	显示计算结果	(12)
<b>第 2 章</b>	<b>控制方程的离散</b>	(13)
2.1	离散化方法概述	(13)
2.1.1	有限差分法	(13)
2.1.2	有限元法	(13)
2.1.3	有限体积法	(14)
2.2	有限体积法原理	(14)
2.2.1	有限体积法概述	(14)
2.2.2	有限体积法的区域离散	(15)
2.3	一维稳态问题的有限体积法	(16)

2.3.1	问题的描述	(16)
2.3.2	生成计算网格	(17)
2.3.3	建立离散方程	(17)
2.3.4	求解离散方程	(19)
2.4	多维稳态问题的有限体积法	(19)
2.4.1	二维稳态问题的有限体积法	(19)
2.4.2	三维稳态问题的离散方程	(21)
2.4.3	离散方程的通用表达式	(23)
2.5	一阶离散格式	(23)
2.5.1	离散格式的特性	(23)
2.5.2	问题的描述	(26)
2.5.3	中心差分格式	(27)
2.5.4	一阶迎风格式	(28)
2.5.5	混合格式	(29)
2.5.6	指数格式与乘方格式	(30)
2.6	高阶离散格式	(31)
2.6.1	二阶迎风格式	(31)
2.6.2	QUICK 格式	(32)
2.6.3	QUICK 格式的改进	(33)
2.6.4	各种离散格式的性能对比	(33)
2.7	一维瞬态问题的有限体积法	(34)
2.7.1	问题的描述	(34)
2.7.2	方程的离散	(35)
2.7.3	显式格式	(37)
2.7.4	Crank-Nicolson 格式	(37)
2.7.5	全隐式格式	(38)
2.8	多维瞬态问题的有限体积法	(38)
2.8.1	二维瞬态问题的有限体积法	(38)
2.8.2	三维瞬态问题的离散方程	(40)
2.8.3	离散方程的通用表达式	(40)
<b>第 3 章 流场的求解计算</b>		(41)
3.1	流场求解计算概述	(41)
3.1.1	求解计算的难点	(41)
3.1.2	求解计算的方法	(42)
3.2	交错网格技术	(43)
3.2.1	常规网格	(44)
3.2.2	交错网格	(44)
3.2.3	方程的离散	(46)
3.3	SIMPLE 算法	(50)
3.3.1	SIMPLE 算法的基本原理	(50)

3.3.2 关于 SIMPLE 算法的两点说明 .....	(52)
3.4 SIMPLE 算法的改进 .....	(53)
3.4.1 SIMPLER 算法 .....	(53)
3.4.2 SIMPLEC 算法 .....	(54)
3.4.3 PISO 算法 .....	(56)
3.4.4 SIMPLE 系列算法的比较 .....	(59)
3.5 瞬态问题的求解算法 .....	(59)
3.5.1 瞬态问题的 SIMPLE 算法 .....	(59)
3.5.2 瞬态问题的 PISO 算法 .....	(60)
3.6 基于同位网格的 SIMPLE 算法 .....	(61)
3.6.1 同位网格 .....	(61)
3.6.2 方程的离散 .....	(61)
3.6.3 基于同位网格的 SIMPLE 算法步骤 .....	(63)
3.6.4 关于同位网格应用的几点说明 .....	(64)
3.7 基于非结构网格的 SIMPLE 算法 .....	(65)
3.7.1 非结构网格 .....	(65)
3.7.2 方程的离散 .....	(66)
3.7.3 基于非结构网格的 SIMPLE 算法步骤 .....	(69)
3.7.4 关于非结构网格应用的几点说明 .....	(70)
3.8 离散方程组的基本解法 .....	(70)
3.8.1 代数方程组的基本解法 .....	(70)
3.8.2 TDMA 算法 .....	(71)
3.8.3 TDMA 算法在二维问题中的应用 .....	(72)
3.8.4 TDMA 算法在三维问题中的应用 .....	(73)
<b>第 4 章 湍流模型及其应用 .....</b>	<b>(75)</b>
4.1 湍流的数学描述 .....	(75)
4.1.1 湍流的流动特征 .....	(75)
4.1.2 湍流的基本方程 .....	(76)
4.2 湍流的数值模拟方法 .....	(77)
4.2.1 湍流数值模拟方法的分类 .....	(77)
4.2.2 直接数值模拟方法 .....	(78)
4.2.3 大涡模拟方法 .....	(79)
4.2.4 Reynolds 平均法 .....	(79)
4.3 零方程模型及一方程模型 .....	(80)
4.3.1 零方程模型 .....	(80)
4.3.2 一方程模型 .....	(80)
4.4 标准 $k-\epsilon$ 模型 .....	(81)
4.4.1 标准 $k-\epsilon$ 模型的定义 .....	(81)
4.4.2 标准 $k-\epsilon$ 模型的控制方程组及适用性 .....	(82)
4.5 RNG $k-\epsilon$ 模型和 Realizable $k-\epsilon$ 模型 .....	(83)



4.5.1	RNG $k-\epsilon$ 模型	(84)
4.5.2	Realizable $k-\epsilon$ 模型	(84)
4.6	采用 $k-\epsilon$ 模型处理近壁问题	(85)
4.6.1	近壁区流动的特点	(86)
4.6.2	壁面函数法	(87)
4.6.3	低 $Re$ $k-\epsilon$ 模型	(89)
4.7	Reynolds 应力方程模型	(90)
4.7.1	Reynolds 应力输运方程	(90)
4.7.2	RSM 的控制方程组及适用性	(93)
4.8	大涡模拟	(94)
4.8.1	大涡模拟的基本原理	(94)
4.8.2	大涡运动方程	(95)
4.8.3	亚格子尺度模型	(95)
4.8.4	大涡模拟控制方程组的求解	(96)
<b>第 5 章 边界条件与网格生成</b>		(97)
5.1	边界条件概述	(97)
5.1.1	边界条件的类型	(97)
5.1.2	边界条件的离散	(98)
5.2	进、出口边界条件	(99)
5.2.1	进口边界条件	(99)
5.2.2	出口边界条件	(100)
5.3	固壁边界条件	(101)
5.3.1	固壁边界上的网格布置	(101)
5.3.2	固壁边界上离散方程源项的构造	(102)
5.4	恒压边界条件、对称边界条件与周期性边界条件	(105)
5.4.1	恒压边界条件	(105)
5.4.2	对称边界条件	(106)
5.4.3	周期性边界条件	(106)
5.5	边界条件应用时的注意事项及初始条件	(106)
5.5.1	边界条件应用时的注意事项	(106)
5.5.2	初始条件	(107)
5.6	网格生成技术	(107)
5.6.1	网格类型	(108)
5.6.2	网格生成	(109)
<b>第 6 章 格子 Boltzmann 方法</b>		(111)
6.1	格子气自动机	(111)
6.1.1	基本思想	(111)
6.1.2	HPP 模型	(111)
6.1.3	FHP 模型	(112)
6.1.4	格子气自动机模型的宏观动力学	(114)



6.2 格子 Boltzmann 方程 .....	(115)
6.2.1 从 LGA 到 Boltzmann 方程 .....	(116)
6.2.2 从连续 Boltzmann 方程到格子 Boltzmann 方程 .....	(118)
6.3 格子 Boltzmann 方法的初始条件 .....	(121)
6.3.1 非平衡态校正方法 .....	(121)
6.3.2 迭代方法 .....	(122)
6.4 格子 Boltzmann 方法的边界条件 .....	(123)
6.4.1 平直边界条件 .....	(124)
6.4.2 曲面边界条件 .....	(128)
6.4.3 压力边界条件 .....	(132)
<b>第 7 章 CFD 软件的基本知识 .....</b>	<b>(134)</b>
7.1 CFD 软件的结构 .....	(134)
7.1.1 前处理器 .....	(134)
7.1.2 求解器 .....	(135)
7.1.3 后处理器 .....	(135)
7.2 常用的 CFD 软件 .....	(135)
7.2.1 PHOENICS .....	(135)
7.2.2 CFX .....	(136)
7.2.3 STAR-CD .....	(137)
7.2.4 FIDAP .....	(138)
7.2.5 FLUENT .....	(138)
7.2.6 FloEFD .....	(139)
<b>第 8 章 GAMBIT 的基本用法 .....</b>	<b>(141)</b>
8.1 GAMBIT 概述 .....	(141)
8.1.1 GAMBIT 的基本功能 .....	(141)
8.1.2 GAMBIT 的操作界面 .....	(141)
8.1.3 GAMBIT 的操作步骤 .....	(144)
8.2 几何建模 .....	(145)
8.2.1 GAMBIT 常用的造型功能 .....	(145)
8.2.2 GAMBIT 常用的编辑功能 .....	(149)
8.3 网格划分 .....	(150)
8.3.1 二维网格划分 .....	(151)
8.3.2 三维网格划分 .....	(154)
8.4 指定边界类型和区域类型 .....	(157)
8.5 基于 GAMBIT 的二次开发 .....	(159)
8.5.1 日志文件的构建 .....	(159)
8.5.2 日志文件的编写 .....	(159)
8.5.3 GAMBIT 二次开发应用实例 .....	(161)
8.6 GAMBIT 应用实例 .....	(166)
8.6.1 二维模型 .....	(166)

8.6.2	三维模型 .....	(175)
<b>第9章</b>	<b>FLUENT 的基本用法 .....</b>	<b>(191)</b>
9.1	FLUENT 概述 .....	(191)
9.1.1	FLUENT 的基本功能 .....	(191)
9.1.2	FLUENT 的操作界面 .....	(191)
9.1.3	FLUENT 的求解步骤 .....	(192)
9.2	使用网格 .....	(193)
9.2.1	导入网格 .....	(193)
9.2.2	检查网格 .....	(194)
9.2.3	显示网格 .....	(195)
9.2.4	修改网格 .....	(195)
9.2.5	光顺网格与交换单元面 .....	(196)
9.3	选择求解器及运行环境 .....	(197)
9.3.1	分离求解器 .....	(197)
9.3.2	耦合求解器 .....	(198)
9.3.3	求解器中的显式与隐式方案 .....	(198)
9.3.4	求解器的比较与选择 .....	(199)
9.3.5	计算模式的选择 .....	(199)
9.3.6	运行环境的选择 .....	(200)
9.4	确定计算模型 .....	(201)
9.4.1	多相流模型 .....	(201)
9.4.2	能量方程 .....	(202)
9.4.3	黏性模型 .....	(202)
9.4.4	辐射模型 .....	(204)
9.4.5	组分模型 .....	(204)
9.4.6	离散相模型 .....	(206)
9.4.7	凝固和熔化模型 .....	(206)
9.4.8	噪声模型 .....	(207)
9.5	定义材料 .....	(207)
9.5.1	材料简介 .....	(208)
9.5.2	定义材料的方法 .....	(208)
9.6	设置边界条件 .....	(209)
9.6.1	边界条件的类型 .....	(209)
9.6.2	边界条件的设置方法 .....	(210)
9.6.3	设定湍流参数 .....	(212)
9.6.4	常用的边界条件 .....	(213)
9.7	设置求解控制参数 .....	(222)
9.7.1	设置离散格式与欠松弛因子 .....	(222)
9.7.2	设置求解限制项 .....	(224)
9.7.3	设置求解过程的监视参数 .....	(224)

9.7.4 初始化流场的解 .....	(226)
9.8 流场迭代计算 .....	(227)
9.8.1 稳态问题的求解 .....	(227)
9.8.2 瞬态问题的求解 .....	(227)
9.9 计算结果后处理 .....	(229)
9.9.1 创建需要进行后处理的表面 .....	(229)
9.9.2 显示等值线图、速度矢量图和流线图 .....	(230)
9.9.3 绘制直方图与 XY 散点图 .....	(232)
9.9.4 生成动画 .....	(234)
9.9.5 报告统计信息 .....	(235)
9.10 UDF 的使用 .....	(238)
9.10.1 UDF 的基础 .....	(238)
9.10.2 UDF 中访问 FLUENT 变量的宏 .....	(243)
9.10.3 UDF 实用工具宏 .....	(248)
9.10.4 UDF 的解释和编译 .....	(252)
9.10.5 UDF 应用实例 .....	(254)
9.11 FLUENT 应用实例 .....	(257)
9.11.1 二维实例 .....	(258)
9.11.2 三维实例 .....	(277)
<b>第 10 章 通用后处理软件——TECPLOT .....</b>	<b>(299)</b>
10.1 TECPLOT 概述 .....	(299)
10.2 TECPLOT 的操作界面 .....	(299)
10.3 TECPLOT 的使用方法 .....	(306)
10.4 TECPLOT 的应用实例 .....	(309)
<b>参考文献 .....</b>	<b>(328)</b>

# 第 1 章 CFD 基本知识

计算流体动力学(computational fluid dynamics,简称 CFD)是一门新兴的独立学科,它将数值计算方法和数据可视化技术有机结合起来,对流动、换热等相关物理现象进行模拟分析,是当今除理论分析、实验测量之外,解决流动与换热问题的又一种技术手段。尽管其发展的时间不长,但随着计算机性能的不不断提高,目前 CFD 分析已经广泛渗透到各种现代科学研究和工程应用之中。

本章主要介绍 CFD 的基本知识。

## 1.1 CFD 概述

### 1.1.1 CFD 的基本思想

CFD 的基本思想可以归结为:把原来在时间域和空间域上连续的物理量场,用一系列离散点上的变量值的集合来代替,并通过一定的原则和方式建立起反映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从而获得场变量的近似值。

CFD 可以看作在流动基本方程(质量守恒方程、动量守恒方程、能量守恒方程)控制下对流动过程进行的数值模拟。通过这种数值模拟,可以得到极其复杂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;此外,CFD 与 CAD 结合,还可以进行优化设计。

CFD 是除理论分析方法和实验测量方法之外的又一种技术手段,它不能代替实验测量方法,也不能代替理论分析方法。准确地说,理论分析、实验测量与 CFD 之间是一种互相补充、互相促进的关系,它们共同构成流动、换热问题研究的完整体系。它们三者之间的关系可以通过图 1.1 来表征。

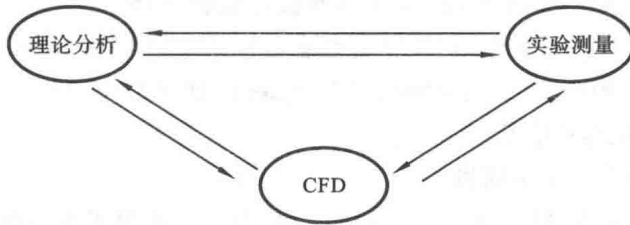


图 1.1 理论分析、实验测量与 CFD 之间的关系

理论分析方法通常是在研究流体运动规律的基础上提出简化流动模型,建立各类主控方程,并在一定条件下,经过推导和运算获得问题的解析解。它的最大特点是往往可以给出具有普遍性的结果,可以用最小的代价和时间给出规律性的结果(如变化趋势)。理论分析方法仍然是目前解决实际问题常常采用的方法,但理论分析方法无法用于研究复杂的、以非线性为主的流动现象。

长期以来,实验测量方法是研究流动机理、分析流动现象、探讨流动新概念、推动流体力学

发展的主要研究手段,是获得和验证流动新现象的主要方法,在今后相当长的时期内仍将是流动研究的重要手段。然而,实验测量方法往往受到模型尺寸、外界干扰、测量精度和人身安全的限制,有时甚至难以获得实验结果。此外,实验测量还会遇到经费投入、人力和物力的巨大耗费及周期长等许多困难。

CFD 技术恰好弥补了理论分析方法和实验测量方法的不足。通常,流动问题的控制方程一般是非线性的,其自变量多,计算域的几何形状和边界条件复杂,很难求得解析解,而采用 CFD 技术则有可能找出满足工程需要的数值解;其次,在计算机上进行一次数值计算,就好像在计算机上做一次实验,CFD 技术可以形象地再现流动情景,与进行实验没有太大区别;此外,采用 CFD 技术还可以选择不同的流动参数进行各种数值实验,从而可以方便地进行方案比较,并且这种数值实验不受物理模型和实验模型的限制,具有较好的灵活性,能给出完整而详细的资料,省时省钱,非常经济,还可以模拟特殊条件和实验中只能接近而无法达到的理想条件。

然而 CFD 也存在一定的局限性。首先,数值求解是一种离散近似的计算方法,最终的结果为有限离散点上的数值解,并具有一定的计算误差;其次,它不像物理模型实验那样一开始就能给出流动现象并定性描述,而往往需要由理论分析或模型实验提供某些流动参数,还需要对获得的数值解进行验证;再者,程序的编制及资料的收集、整理与利用,在很大程度上依赖于经验与技巧;还有,CFD 涉及大量的数值计算,通常需要较高的计算机软硬件配置;此外,数值计算方法等可能导致计算结果的不真实,产生伪物理效应,当然,这需要将数值模拟与实验测量和理论分析结合起来,验证数值解的可靠性。

总之,CFD、实验测量和理论分析有各自的特点,只有将三者有机地结合起来,取长补短,灵活运用,才能有效地解决各类工程实际问题,并推动流体动力学向前发展。

### 1.1.2 CFD 的发展历程

早在 1933 年,英国科学家 Thom 应用手摇计算机完成了对一个外掠圆柱流动的数值计算。大约从 20 世纪 60 年代开始,CFD 便在全世界范围内形成规模,发展至今,已经取得了许多丰硕的成果。其具体发展历程可以划分为以下三个阶段。

#### 1. 初创阶段(1965—1974 年)

(1) 1965 年,美国科学家 Harlow 和 Welch 提出交错网格。

(2) 1966 年,世界上第一本介绍 CFD 的杂志《Journal of Computational Physics》创刊。

(3) 1969 年,英国帝国理工学院(Imperial College)创建 CHAM 研究小组,旨在把他们研究小组的成果推广应用到工业界。

(4) 1972 年,SIMPLE 算法问世。

(5) 1974 年,美国学者 Thompson、Thames 和 Mastin 提出了采用微分方程来生成适体坐标的方法(简称 TTM 方法)。

#### 2. 工业应用阶段(1975—1984 年)

(1) 1977 年,由 Spalding 及其学生开发的 GENMIX 程序公开发行。

(2) 1979 年,大型通用软件 PHOENICS 问世。当时该软件仅限在英国帝国理工学院 CFD 研究小组内使用,为工业界计算一些应用问题。

(3) 1979 年,Leonard 发表了著名的 QUICK 格式,这是一种具有三阶精度对流项的离散格式,其稳定性优于中心差分。

(4) 1981年,英国 CHAM 公司把 PHOENICS 软件正式投放市场,开创了 CFD 商用软件市场的先河。

(5) 在这一阶段,求解算法获得了进一步发展,先后出现了 SIMPLER、SIMPLEC 算法。

### 3. 蓬勃发展阶段(1985年至今)

(1) 前、后台处理软件迅速发展。

(2) 巨型机的研制促进了并行算法及紊流直接数值模拟(DNS)与大涡模拟(LES)的研究与发展。

(3) 个人计算机成为 CFD 研究领域中的一种重要工具。

(4) 各国都把 CFD 作为工科高层次人才培养的一门重要课程。

(5) 多个计算流动与传热问题的大型商用软件陆续投放市场。

(6) 数值计算方法向更高的计算精度、更好的区域适应性及更强的稳定性的方向发展。

## 1.1.3 CFD 的应用领域

近十多年来,CFD 有了很大发展,它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 CFD 的方法进行分析和模拟。CFD 不仅作为一种研究工具,而且作为设计工具在流体机械、动力工程、汽车工程、船舶工程、航空航天、建筑工程、环境工程、食品工程等领域发挥作用。与之相关的工程问题及典型应用场合包括:①风机、水泵等流体机械的内部流动;②汽轮机、锅炉等动力设备的设计;③汽车流线外形对性能的影响;④船后螺旋桨转动对船体的影响;⑤洪水波及河口潮流的计算;⑥飞机、航天飞机等飞行器的设计;⑦风载荷对高层建筑物稳定性及结构性能的影响;⑧电子元器件的散热;⑨换热器性能分析及换热器片形状的选取;⑩温室及室内的空气流动及环境分析;⑪河流中污染物的扩散;⑫汽车尾气对街道环境的污染;⑬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理论分析和大量物理模型实验,而现在大多采用 CFD 方法加以分析和解决,CFD 现已发展到完全可以用来分析三维黏性湍流及旋涡运动等复杂问题的程度。

## 1.2 流体与流动的基本特性

流体是 CFD 的研究对象,流体性质及流动状态决定着 CFD 中的计算模型及计算方法的选择,决定着流场中各物理量的最终分布。本节将介绍 CFD 中所涉及的流体与流动的基本特性。

### 1.2.1 理想流体与黏性流体

黏性是指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剪切应力,但在运动时,对相邻两层流体间的相对运动,即相对滑动是有抵抗力的,这种抵抗力称为黏性应力。流体所具有的这种抵抗两层流体间相对滑动,或者抵抗变形的性质,称为黏性。

黏性的大小取决于流体性质,并随温度变化而显著变化。实验表明,黏性应力的大小与黏性及相对速度成正比。当流体的黏性较小(如空气和水的黏性都很小),运动的相对速度也不

大时,所产生的黏性应力相比其他类型的力可忽略不计。此时,可以近似地把流体看成无黏性的,称为无黏流体,也称为理想流体。而对于黏性较大的流体,则称为黏性流体。显然,理想流体对于切向变形没有任何抗拒能力。但应该强调的是,真正的理想流体在客观实际中是不存在的,人们常说的理想流体只不过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

根据内摩擦力(剪切应力)与速度变化率的关系,可将黏性流体又分为牛顿流体和非牛顿流体。

观察近壁面处的流体流动,可以发现,紧靠壁面的流体黏附在壁面上,静止不动。而靠近静止流体的另一层流体,则在流体黏性所导致的内摩擦力(剪切应力)作用下,速度降低。

流体的内摩擦力  $\tau$  由牛顿内摩擦定律决定,即

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

式中: $\Delta n$  为沿法线方向的距离增量; $\Delta u$  为流体速度的增量; $\Delta u / \Delta n$  为法向距离上的速度变化率; $\mu$  为流体的动力黏度,简称为黏度,它的大小取决于流体的性质、温度和压力大小。

若  $\mu$  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,通常用运动黏度  $\nu$  来代替动力黏度  $\mu$ ,两者之间存在如下关系:

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

式中: $\rho$  为流体的密度。

### 1.2.3 流体热传导和扩散

除了黏性外,流体还有热传导及扩散等性质。当流体中存在着温度差时,热量将由温度高的地方向温度低的地方传递,这种现象称为热传导。同样,当流体中存在着某种成分的浓度差时,该成分将由浓度高的地方向浓度低的地方输运,这种现象称为扩散。

黏性、热传导和扩散等是流体的宏观性质,实质上是分子输运性质的一种统计平均。由于分子的不规则运动,在各层流体间存在着质量、动量和能量的交换,使得不同流体层内的物理量均匀化,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,动量输运表现为黏性现象,能量输运则表现为热传导现象。

对于理想流体忽略了黏性,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理。

### 1.2.4 可压缩流体与不可压缩流体

根据密度  $\rho$  是否为常数,可将流体分为可压缩与不可压缩两大类。当密度  $\rho$  为常数时,流体为不可压缩流体;否则,为可压缩流体。空气为可压缩流体,水为不可压缩流体。有些可压缩流体在特定的流动条件下,可以按不可压缩流体处理。

在可压缩流体的连续性方程中含密度  $\rho$ ,因而可把密度  $\rho$  视为连续性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。

不可压缩流体的压力场是通过连续性方程间接描述的,由于没有直接求解压力的方程,不



可压缩流体的流动方程的求解有其特殊的困难。

### 1.2.5 定常流与非定常流

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,可将流动分为定常流与非定常流两大类。当物理量不随时间变化,即 $\frac{\partial(\quad)}{\partial t}=0$ 时,为定常流动;当流动的物理量随时间变化,即 $\frac{\partial(\quad)}{\partial t}\neq 0$ 时,则为非定常流动。定常流动也称为恒定流动、稳态流动,非定常流动也称为非恒定流动、非稳态流动、瞬态流动。流体机械在启动或停机时,其中流体的流动一般是非定常流动,而正常运转时可看作定常流动。

### 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,即层流和湍流。在许多中文文献中,湍流也被称为紊流。层流是指流体在流动过程中两层之间没有相互掺混,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,而层流则属于特殊情况。

对于圆管内流动,定义 Reynolds 数(也称雷诺数,用  $Re$  表示)为

$$Re = \frac{ud}{\nu}$$

式中: $u$  为液体流速, $\nu$  为运动黏度, $d$  为管径。

当  $Re$  小于或等于 2300 时,管流为层流;当  $Re$  大于或等于 8000 时,管流为湍流;当  $Re$  大于 2300 而小于 8000 时,流动处于层流与湍流间的过渡区。

对于一般流动,在计算  $Re$  时,可用当量半径  $r$  代替上式中的  $d$ 。这里, $r=A/x$ , $A$  为通流截面积, $x$  为周长。对于液体, $x$  等于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,等于通流截面的周界长度。

## 1.3 流体动力学的控制方程

流体流动遵守物理守恒定律,基本的守恒定律包括质量守恒定律、动量守恒定律、能量守恒定律。如果流动包含不同成分(组元)的混合或相互作用,系统还要遵守组分守恒定律。如果流动处于湍流状态,系统还要遵守附加的湍流输运方程。控制方程是这些守恒定律的数学描述。

### 1.3.1 质量守恒方程

任何流动问题都满足质量守恒定律,即:单位时间内流体微元体中质量的增加,等于同一时间间隔内流入该微元体的净质量。根据质量守恒定律,可写出质量守恒方程,质量守恒方程又称连续性方程,即

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial \rho u}{\partial x} + \frac{\partial \rho v}{\partial y} + \frac{\partial \rho w}{\partial z} = 0 \quad (1.3)$$

引入矢量符号  $\text{div} \mathbf{a} = \frac{\partial a_x}{\partial x} + \frac{\partial a_y}{\partial y} + \frac{\partial a_z}{\partial z}$ , 式(1.3)可写成

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \text{div}(\rho \mathbf{u}) = 0 \quad (1.4)$$

有的文献中使用符号  $\nabla$  表示散度, 即  $\nabla \cdot \mathbf{a} = \text{div} \mathbf{a} = \frac{\partial a_x}{\partial x} + \frac{\partial a_y}{\partial y} + \frac{\partial a_z}{\partial z}$ , 因此式(1.3)又可写成

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \mathbf{u}) = 0 \quad (1.5)$$

在式(1.3)~式(1.5)中,  $\rho$  为密度,  $t$  为时间,  $\mathbf{u}$  为速度矢量。

上面给出的是瞬态三维可压缩流体的连续性方程。若流体不可压缩, 密度  $\rho$  为常数, 式(1.3)变为

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} = 0 \quad (1.6)$$

若流动处于稳态, 则密度  $\rho$  不随时间变化, 式(1.3)变为

$$\frac{\partial \rho u}{\partial x} + \frac{\partial \rho v}{\partial y} + \frac{\partial \rho w}{\partial z} = 0 \quad (1.7)$$

### 1.3.2 动量守恒方程

动量守恒定律也是任何流动系统都必须满足的基本定律, 即微元体中流体动量对时间的变化率等于外界作用在该微元体上的各种力之和, 该定律实际上是牛顿第二定律。根据动量守恒定律, 可写出  $x$ 、 $y$  和  $z$  三个方向的动量守恒方程, 即

$$\frac{\partial \rho u}{\partial t} + \text{div}(\rho \mathbf{u} u) = -\frac{\partial p}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{xx}}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{yx}}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{zx}}{\partial z} + F_x \quad (1.8a)$$

$$\frac{\partial \rho v}{\partial t} + \text{div}(\rho \mathbf{u} v) = -\frac{\partial p}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{xy}}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{yy}}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{zy}}{\partial z} + F_y \quad (1.8b)$$

$$\frac{\partial \rho w}{\partial t} + \text{div}(\rho \mathbf{u} w) = -\frac{\partial p}{\partial z} + \frac{\partial \tau_{xz}}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{yz}}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{zz}}{\partial z} + F_z \quad (1.8c)$$

式中:  $p$  为流体微元体上的压力;  $\tau_{xx}$ 、 $\tau_{xy}$  和  $\tau_{xz}$  等为因分子黏性作用而产生的作用在微元体表面上的黏性应力  $\boldsymbol{\tau}$  的分量;  $F_x$ 、 $F_y$  和  $F_z$  为微元体上的体积力, 若体积力只有重力, 且  $z$  轴竖直向上, 则  $F_x=0$ ,  $F_y=0$ ,  $F_z=-\rho g$ 。

式(1.8)是对任何类型的流体(包括非牛顿流体)均成立的动量守恒方程。对于牛顿流体, 黏性应力  $\boldsymbol{\tau}$  与流体的变形率成比例, 则有

$$\left. \begin{aligned} \tau_{xx} &= 2\mu \frac{\partial u}{\partial x} + \lambda \text{div} \mathbf{u} \\ \tau_{yy} &= 2\mu \frac{\partial v}{\partial y} + \lambda \text{div} \mathbf{u} \\ \tau_{zz} &= 2\mu \frac{\partial w}{\partial z} + \lambda \text{div} \mathbf{u} \\ \tau_{xy} &= \tau_{yx} = \mu \left( \frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x} \right) \\ \tau_{xz} &= \tau_{zx} = \mu \left( \frac{\partial u}{\partial z} + \frac{\partial w}{\partial x} \right) \\ \tau_{yz} &= \tau_{zy} = \mu \left( \frac{\partial v}{\partial z} + \frac{\partial w}{\partial y} \right) \end{aligned} \right\} \quad (1.9)$$

式中:  $\mu$  为动力黏度;  $\lambda$  为第二黏度, 一般可取  $\lambda = -2/3$ 。将式(1.9)代入式(1.8), 可得

$$\frac{\partial(\rho u)}{\partial t} + \text{div}(\rho \mathbf{u} u) = \text{div}(\mu \cdot \text{grad} u) - \frac{\partial p}{\partial x} + S_x \quad (1.10a)$$