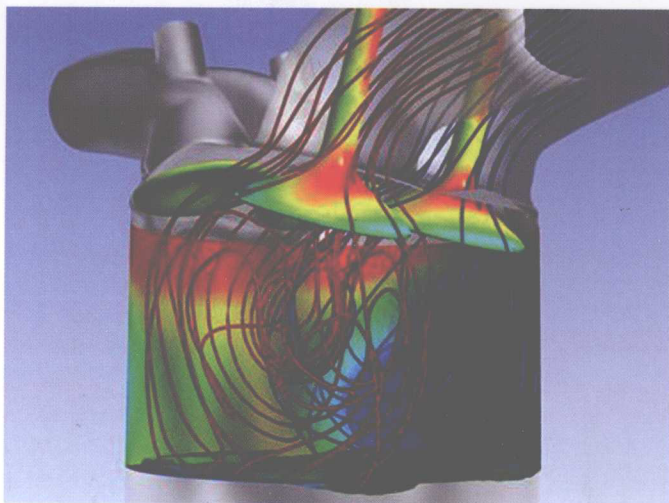


万水CAE技术丛书

FLUENT



周俊杰 徐国权 张华俊 编著

FLUENT

工程技术与实例分析

深入浅出FLUENT流体分析技术

详细剖析FLUENT计算结果所隐藏的含义

配套实际案例模型文件



中国水利水电出版社
www.waterpub.com.cn

万水 CAE 技术丛书

FLUENT 工程技术与实例分析

周俊杰 徐国权 张华俊 编著



中国水利水电出版社
www.waterpub.com.cn

内 容 提 要

本书通过大量实例系统介绍了 FLUENT 建模和计算以及后处理的详细过程,可以让读者在短时间内系统掌握数值模拟的基础知识,掌握 FLUENT 的高级应用技术,学会采用 FLUENT 软件进行产品开发。本书共分三篇,第一篇为基础篇,包括 1~4 章,主要讲解流体计算基础、网格划分基础以及 Gambit 工具的应用,并结合计算流体和传热学中的经典算例熟悉 FLUENT 分析问题的过程和方法;第二篇为工程应用篇,包括 5~9 章,系统讲解了 FLUENT 在各种工程背景下的应用,内容涵盖流体机械领域、化工设备领域、换热和制冷领域、热力设备领域和汽车工程领域,通过丰富而细致的应用实例讲解如何应用 FLUENT 来解决应用中出现的問題;第三篇为提高与专题篇,包括 10~15 章,讲解 UDF、UDS、并行计算的专题,针对工程实际的需求,还特别讲解了与 FLUENT 配合使用的数据后处理工具的应用技巧,最后对多相流和动网格模型进行了讲解。

本书在写作过程中注重层次递进,深入浅出地讲解 FLUENT 流体分析方面的技术,通过大量丰富、有深度的应用案例讲解 FLUENT 的应用,并且实例来自科研和生产一线,对解决实际工程和科研问题会有很大帮助。此外,为了方便读者学习,本书还配套模型文件,以提高读者的学习效率。

本书既是利用 FLUENT 软件进行高级应用计算的工程技术相关计算指导书,又可作为高等院校相关专业本科生和硕士生的教学参考书。

图书在版编目(CIP)数据

FLUENT 工程技术与实例分析 / 周俊杰, 徐国权, 张华俊编著. — 北京: 中国水利水电出版社, 2010.5
(万水CAE技术丛书)
ISBN 978-7-5084-7491-5

I. ①F… II. ①周… ②徐… ③张… III. ①流体力学—工程学—计算机仿真—应用软件, Fluent IV. ①TB126-39

中国版本图书馆CIP数据核字(2010)第084412号

策划编辑: 杨元泓

责任编辑: 张玉玲

封面设计: 李 佳

书 名	万水 CAE 技术丛书 FLUENT 工程技术与实例分析
作 者	周俊杰 徐国权 张华俊 编著
出版发行	中国水利水电出版社 (北京市海淀区玉渊潭南路 1 号 D 座 100038) 网址: www.waterpub.com.cn E-mail: mchannel@263.net (万水) sales@waterpub.com.cn 电话: (010) 68367658 (营销中心)、82562819 (万水)
经 售	全国各地新华书店和相关出版物销售网点
排 版	北京万水电子信息有限公司
印 刷	北京市天竺颖华印刷厂
规 格	184mm×260mm 16 开本 31.5 印张 820 千字
版 次	2010 年 6 月第 1 版 2010 年 6 月第 1 次印刷
印 数	0001—4000 册
定 价	68.00 元

凡购买我社图书,如有缺页、倒页、脱页的,本社营销中心负责调换
版权所有·侵权必究

前 言

工业发展是我国经济发展的主要推动力，但也是污染物排放的主要来源，随着节能减排和低碳经济压力的不断提高，高耗能高污染企业研发重点转向大量设备的开发。为早日实现节能减排目标，本书从几个典型行业选取过程设备和机械进行分析计算，为产品开发和设计者提供一个可供参考的例子。

任何流体运动的规律均是以质量守恒定律、动量守恒定律、能量守恒定律和组分守恒定律为基础的。这些基本定律可由数学方程组来描述。采用数值计算方法，通过计算机求解这些控制流体流动的数学方程组，进而研究流体的运动规律，这就是计算流体动力学（CFD）。计算流体动力学是建立在经典流体动力学与数值计算方法基础上的一门新学科，通过计算机数值计算和图像显示方法，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进行研究的目的。

目前，比较著名的有 FLUENT、CFX、STAR-CD 和 PHOENICS 等，而 FLUENT 是国际上比较流行的商用 CFD 软件包，市场占有率高、计算准确、界面友好、使用简单、应用领域广、物理模型多。

正是因为 FLUENT 在流体工程模拟计算中的重要作用，高校和企业科技人员对学习 FLUENT 的热情很高，但往往很难应用到产品开发过程中，本书从 FLUENT 基础、工程应用到提高系统介绍 FLUENT 相关知识以及典型行业的实例。

本书内容共分三篇，15 章，本书通过大量实例系统介绍了 FLUENT 建模和计算以及后处理的详细过程，可以让读者在短时间内系统掌握数值模拟的基础知识，掌握 FLUENT 的高级应用技术，学会采用 FLUENT 软件进行产品的开发。本书第一篇为基础篇，包括 1~4 章，主要讲解流体计算基础、网格划分基础以及 Gambit 工具的应用、结合计算流体和传热学中的经典算例熟悉 FLUENT 分析问题的过程和方法；第二篇为工程应用篇，包括 5~9 章，系统讲解了 FLUENT 在各种工程背景下的应用，内容涵盖流体机械领域、化工设备领域、换热和制冷领域、热力设备领域和汽车工程领域，其中通过丰富而细致的应用实例来讲解如何应用 FLUENT 解决应用中出现的问题；第三篇为提高与专题篇，包括 10~15 章，讲解了 UDF、UDS、并行计算的专题，针对于工程实际的需求，还特别讲解了与 FLUENT 配合使用的数据后处理工具的应用技巧，最后对多相流和动网格模型进行了讲解。

本书在写作过程中注重层次递进，深入浅出地讲解 FLUENT 流体分析方面的技术，并通过大量丰富且有深度的应用案例来讲解 FLUENT 的应用，实例均来自于科研和生产一线，对于解决实际工程和科研问题会有很大的帮助。此外，为了方便读者的学习，本书还配套有模型文件，以提高读者的学习效率。

本书第一篇由周俊杰教授编写；第二篇、7.4 节和 7.5 节由西安交通大学的张华俊教授编写，第 9 章由通用泛亚技术中心的徐国权工程师编写，剩余章节由周俊杰教授编写；第三篇共 6 章，第 10 章和 14.3 节由通用泛亚技术中心的徐国权工程师编写，其余章节由周俊杰编写，全书由周俊杰教授统稿。

本书在编写过程中研究生刘博完成大量算例和插图，并参与编写部分章节初稿，博士生

刘兵参与第一章编写，研究生耿艳辉完成风机的算例，张钰、赵书臣、喻舒婷、陶钧、宋晓磊、李召召和邓继容等参与文字和图片的处理，参与具体工作的还包括：王斌、张强林、万雷、张赛桥、王晓、陈军、赵会春等，在此一并感谢。在本书的编写过程中，得到院领导魏新利院长和王定标副院长的大力支持，也得到同事曹海亮博士、李言钦博士、付卫东博士等同事帮助，在此感谢。本书部分材料参考流体中文网和清洁能源网等论坛，感谢同行的交流。

本书在编写过程中，得到了编辑的热心指导和大力协助，编写共花费一年半的时间，在此期间也获得了合作者的理解与支持，也正是你们的宽容和谅解，使得本书能够顺利出版。由于编者水平有限，书中难免有不当之处，还请广大读者批评指正。

编 者

2010 年元月

目 录

前言

第1章 概述	1
1.1 序言	1
1.2 基本思想	2
1.3 主要应用领域	3
1.4 常用流体分析软件比较	4
1.5 本章小结	6
第2章 FLUENT 基础	7
2.1 概述	7
2.2 流体流动基本特性	8
2.2.1 基本的物理概念	9
2.2.2 流动状态	9
2.2.3 湍流模型	9
2.2.4 多相流模型	13
2.3 控制方程	14
2.3.1 连续性方程	14
2.3.2 N-S 方程	14
2.3.3 能量守恒方程	15
2.3.4 其他方程	16
2.3.5 通用控制方程	16
2.4 数值求解方法	17
2.4.1 概述	17
2.4.2 有限差分法	17
2.4.3 有限元法	19
2.4.4 有限容积法	20
2.4.5 谱方法	20
2.4.6 边界元法	22
2.5 离散格式	25
2.5.1 概述	25
2.5.2 一阶差分格式	25
2.5.3 高阶差分格式	25
2.6 边界条件	27
2.6.1 概述	27
2.6.2 边界条件	27

2.6.3 初始条件	34
2.6.4 UDF 与边界条件	34
2.7 软件基本结构	35
2.7.1 概述	35
2.7.2 前处理	35
2.7.3 求解器	35
2.7.4 后处理	35
2.8 求解过程	36
2.8.1 建立控制方程	37
2.8.2 确定边界条件与初始条件	37
2.8.3 划分计算网格	37
2.8.4 建立离散化方程	37
2.8.5 离散初始条件和边界条件	37
2.8.6 给定求解控制参数	38
2.8.7 求解离散方程	38
2.8.8 判断解的收敛性	38
2.8.9 输出结果	38
2.9 本章小结	38
第3章 网格生成技术	39
3.1 概述	39
3.2 结构化网格	40
3.2.1 单块结构网格生成技术	40
3.2.2 分区结构网格生成方法	41
3.3 非结构化网格	42
3.4 Gambit 的使用	44
3.4.1 Gambit 的用户界面	45
3.4.2 绘制几何图形	46
3.4.3 绘制网格	47
3.4.4 Gambit 几何图形绘制实例	49
3.4.5 FLUENT 的安装与运行	67
3.4.6 FLUENT 的用户界面	68
3.4.7 数值模拟步骤简介	71
3.5 本章小结	72

第4章 FLUENT 基本算例	73	5.2.4 求解计算	121
4.1 概述	73	5.2.5 结果分析与讨论	128
4.2 顶盖驱动流	73	5.3 风机分析实例	134
4.2.1 物理模型	73	5.3.1 概述	134
4.2.2 在 Gambit 中建立模型	74	5.3.2 数学物理建模	138
4.2.3 求解计算	75	5.3.3 边界条件	146
4.2.4 计算结果	78	5.3.4 求解计算	146
4.3 后台阶流动	80	5.3.5 结果分析与讨论	154
4.3.1 物理模型	81	5.4 本章小结	158
4.3.2 在 Gambit 中建立模型	81	第6章 FLUENT 在化工设备领域的应用	159
4.3.3 求解计算	83	6.1 搅拌设备	159
4.3.4 计算结果	85	6.1.1 概述	159
4.4 圆柱绕流	86	6.1.2 数学物理建模	162
4.4.1 基本理论与物理模型	86	6.1.3 边界条件	166
4.4.2 在 Gambit 中建立模型	87	6.1.4 求解计算	166
4.4.3 求解计算	89	6.1.5 结果分析与讨论	169
4.4.4 计算结果	92	6.2 混合设备	174
4.5 圆管流动	95	6.2.1 概述	175
4.5.1 物理模型	95	6.2.2 数学物理建模	176
4.5.2 在 Gambit 中建立模型	95	6.2.3 边界条件	182
4.5.3 求解计算	97	6.2.4 求解计算	182
4.5.4 计算结果	99	6.3 本章小结	192
4.6 弯通道流动	101	第7章 FLUENT 在换热及制冷领域的应用	193
4.6.1 物理模型	101	7.1 概述	193
4.6.2 在 Gambit 中建立模型	101	7.2 管壳式换热器	194
4.6.3 求解计算	103	7.2.1 概述	194
4.6.4 计算结果	106	7.2.2 数学物理建模	196
4.7 方腔自然对流	107	7.2.3 边界条件	205
4.7.1 物理模型	107	7.2.4 求解计算	205
4.7.2 在 Gambit 中建立模型	107	7.2.5 结果分析与讨论	215
4.7.3 求解计算	108	7.3 管翅式换热器	222
4.7.4 计算结果	112	7.3.1 概述	222
4.8 本章小结	114	7.3.2 数学物理建模	222
第5章 FLUENT 在流体机械领域的应用	115	7.3.3 边界条件	232
5.1 概述	115	7.3.4 求解计算	232
5.2 泵分析实例	115	7.3.5 结果分析与讨论	237
5.2.1 概述	116	7.4 空气对流换热的场协同原理分析	244
5.2.2 数学物理建模	117	7.4.1 场协同基本思想介绍	244
5.2.3 边界条件	121	7.4.2 场协同评价指标的分析和探讨	244

7.4.3	带芯棒圆管换热的场协同原理分析	246	9.2.5	结果分析与讨论	334
7.5	制冷剂管内换热的场协同原理分析	251	9.3	轿车整车室内冬季空调环境模拟	339
7.5.1	制冷剂蒸气光管内换热的场协同分析	251	9.3.1	概述	340
7.5.2	内横槽管制冷剂蒸气换热的场协同分析	258	9.3.2	数学物理建模	340
7.5.3	光管内液体制冷剂换热的场协同分析	264	9.3.3	边界条件的设置	341
7.5.4	液体制冷剂内横槽管换热的场协同分析	267	9.3.4	求解计算	343
7.6	减阻节能	274	9.3.5	结果分析与讨论	346
7.7	本章小结	275	9.4	加入有人模型下的探讨	355
第 8 章	FLUENT 在热力设备领域的应用	276	9.4.1	概述	355
8.1	概述	276	9.4.2	数学物理模型	356
8.2	锅炉	276	9.4.3	边界条件设置	357
8.2.1	概述	277	9.4.4	边界条件设置	357
8.2.2	数学物理建模	277	9.4.5	结果分析与讨论	359
8.2.3	边界条件	283	9.5	本章小结	365
8.2.4	求解计算	284	第 10 章	UDF	366
8.2.5	结果分析与讨论	286	10.1	UDF 综述	366
8.3	燃烧器	288	10.1.1	基本概念	366
8.3.1	概述	289	10.1.2	编写环境	367
8.3.2	数学物理建模	291	10.1.3	多相流应用写 UDFs	369
8.3.3	边界条件	297	10.1.4	编译 UDF 到 FLUENT 中	370
8.3.4	求解计算	298	10.2	UDF 的宏基础	371
8.3.5	结果分析和讨论	305	10.2.1	常用的宏工具	373
8.4	本章小结	312	10.2.2	有关宏的访问工具	374
第 9 章	FLUENT 在汽车工程领域的应用	313	10.3	综合应用实例	377
9.1	概述	313	10.3.1	试验环境与测试条件	377
9.1.1	夏季空调的试验标准	313	10.3.2	试验项目以及测试方法	377
9.1.2	冬季空调的试验标准	314	10.3.3	试验结果	378
9.1.3	湍流流动及其数值模拟概述	314	10.3.4	UDF 设置	379
9.1.4	室内气流分布的性能评价	315	10.3.5	算例相关设置	381
9.1.5	离散传播辐射模型 (DTRM)	316	10.4	本章小结	393
9.2	轿车整车室内夏季空调环境的模拟	318	第 11 章	UDS 的应用	394
9.2.1	概述	318	11.1	概述	394
9.2.2	数学物理模型	318	11.1.1	自定义标量 UDS 的定义	394
9.2.3	边界条件的设置	320	11.1.2	对流项的设置	395
9.2.4	求解计算	324	11.1.3	时间项的设置	395
			11.1.4	扩散系数的设置	395
			11.1.5	源项 S 的设置	396
			11.2	综合实例	397
			11.3	本章小结	402

第 12 章 并行计算	403	第 14 章 多相流模型	453
12.1 概述	403	14.1 概述	453
12.2 环境设置	405	14.2 VOF 模型在射流纺织工程中的应用	454
12.3 综合应用实例	405	14.2.1 概述	454
12.3.1 配置计算节点	406	14.2.2 物理模型和网格划分	456
12.3.2 检测网络连通性	406	14.2.3 求解计算	456
12.3.3 网格的分割	407	14.2.4 计算结果	462
12.3.4 读入 case 文件	408	14.3 Mixture 模型	464
12.3.5 检查网格分割	409	14.3.1 主要方法	464
12.3.6 负载分布的检查	409	14.3.2 理论方程	464
12.3.7 进行其他设置并计算	410	14.3.3 mixture 模型相变流动中的简单 应用	466
12.4 本章小结	410	14.4 本章小结	473
第 13 章 常用数据后处理工具	411	第 15 章 动网格模型	474
13.1 Tecplot	411	15.1 概述	474
13.1.1 概述	411	15.2 方法简介	474
13.1.2 使用技巧	412	15.2.1 弹簧光滑模型	474
13.1.3 综合应用实例	421	15.2.2 动态层模型	475
13.2 Origin	425	15.2.3 局部网格重划法	476
13.2.1 概述	425	15.3 动网格模型在内燃机汽缸中的应用	477
13.2.2 使用技巧	425	15.3.1 问题描述	477
13.2.3 综合实例	430	15.3.2 利用 FLUENT 3D 求解器进行计算	477
13.3 Digitizer	447	15.3.3 结果分析	485
13.3.1 概述	447	15.4 本章小结	488
13.3.2 使用技巧	447	附录	489
13.3.3 综合应用实例	448	参考文献	494
13.4 本章小结	452		

第1章 概述

知识要点

- 计算流体力学简介
- CFD 软件主要应用领域
- 常用流体分析软件简介

1.1 序言

计算流体力学 (Computational Fluid Dynamics, 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, 求解代数方程组获得场变量的近似值。

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, 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流体力学示意图。

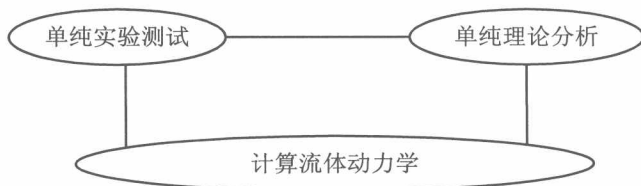


图 1-1 三维流体力学示意图

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, 只有少数流动问题才能给出解析结果。

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, 有时可能很难通过实验方法得到结果。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, 即可看到

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,与实际做实验毫无区别。

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,这是整个工作中花费时间最多的部分。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。

1.2 基本思想

根据所求解的实际问题建立合理的数学模型,利用离散化处理的数值方法,再通过计算机编程或应用商业软件来求解流体和传热问题。

CFD 最常用的求解方法有:

(1) 有限差分法。

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值。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。

(2) 有限元法。

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。

(3) 有限体积法。

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分得出离散方程。有限体积法的关键是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。用有限体积法导出的离散方程可以保证具有守恒特性,而离散方程系数物理意义明确,计算量相对较小。该方法应用广泛,是目前 CFD 应用最为广泛的一种方法。目前的 CFD 商用软件大多采用有限体积法。

CFD 的优点是适应性强、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;其次,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;再者,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来克服或弥补。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,需要注意三者的有机结合,争取做到取长补短。

1.3 主要应用领域

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。

1.4 常用流体分析软件比较

为了完成 CFD 计算,过去多是用户自己编写计算程序,但由于 CFD 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 CFD 本身又有其鲜明的系统性和规律性,因此,比较适合于被制成通用的商用软件。自 1981 年以来,出现了如 PHOENICS、FLUENT、STAR-CD、AVL、CFX、NUMECA 等多个商用 CFD 软件,这些软件的显著特点是:

- 各种 CFD 通用软件的数学模型的组成都是以纳维—斯托克斯方程组和各种湍流模型为主体,再加上多相流模型、燃烧与化学反应流模型、自由面流模型以及非牛顿流体模型等。大多数附加的模型是在主体方程组上补充一些附加源项、附加输运方程与关系式。
- 离散方法采用有限体积法 (FVM) 或有限元素法 (FEM)。
- 为了体现通用性,CFD 通用软件应能适应从低速到高超音速的宽广速度范围。
- 功能比较全面、适用性强,几乎可以求解工程界的各种复杂问题。
- 具有比较易用的前后处理系统和与其他 CAD 及 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。同时,还可让用户扩展自己的开发模块。
- 具有比较完备的容错机制和操作界面,稳定性高。
- 可在多种计算机、多种操作系统,包括并行环境下运行。

随着计算机技术的快速发展,这些商用软件在工程界正在发挥着越来越大的作用。

表 1-1 给出了常用 CFD 软件的基本信息对比。

表 1-1 常用 CFD 软件简介

软件名称	开发或经营单位	国别	适用机型	主要功能	网址
FLUENT	FLUENT, Inc	美国	个人机 工作站	求解流动与传热问题的通用软件	http://www.FLUENT.com/
PHOENICS	PHOENICS 软件公司	英国	个人机 工作站	PHOENICS 软件以低速热流输运现象为主要模拟对象,求解流动、传热、燃烧的大型通用软件	http://www.cham.co.uk/
STAR-CD	CD-adapco 集团公司	英国	工作站 巨型机	求解流动、传热、燃烧的大型通用软件,尤其适用于内燃机中的流场分析	http://www.cd-adapco.com/
AVL	AVL	美国	个人机 工作站	世界范围公认的顶尖发动机模型分析最佳软件	http://www.avl.com/ http://www.avlchina.com/
CFX	AEA Technology	英国	个人机 工作站	求解流动与传热问题的通用软件,符合 ISO9001 标准	http://www.aeot.com.cfx
NUMECA	NUMECA 国际公司	比利时	个人机 工作站	具有高速度、高精度、低内存需求,以及使用方便等特点,是现代流体工程企业实现其设计、制造自动化体系的首选 CFD 软件	http://www.numeca.be/

下面对 FLUENT 软件进行简单介绍。

FLUENT 是由美国 FLUENT 公司于 1983 年推出的 CFD 软件。它是继 PHOENICS 软件之后的第二个投放市场的基于有限体积法的软件,用于计算流体流动和传热问题的程序,其设计基于“CFD 计算机软件群的概念”,针对每一种流动的物理问题的特点,采用适合于它的数值解法在计算速度、稳定性和精度等方面达到最佳,不同领域的计算软件组合起来,成为 CFD 软件群。

FLUENT 提供的非结构网格生成程序对相对复杂的几何结构网格生成非常有效,可以生成的网格包括二维的三角形和四边形网格;三维的四面体、六面体及混合网格。FLUENT 还可根据计算结果调整网格,这种网格的自适应能力对于精确求解有较大梯度的流场有很实际的作用。由于网格自适应和调整只是在需要加密的流动区域里实施,而非整个流场,因此可以节约计算时间。

FLUENT 是目前功能最全面、适用性最广、国内使用最广泛的 CFD 软件之一。在美国的市场占有率为 60%,只要涉及流体、热传递及化学反应等的工程问题,都可以用 FLUENT 进行解算。它具有丰富的物理模型、先进的数值方法以及强大的前后处理功能,在航空航天、汽车设计、石油天然气、涡轮机设计等方面都有着广泛的应用。例如,石油天然气工业上的应用就包括燃烧、井下分析、喷射控制、环境分析、油气消散/聚积、多相流、管道流动等。

FLUENT 的软件包由以下几部分组成:

(1) 前处理器。

Gambit 用于网格的生成,它是具有超强组合建构模型能力的专用 CFD 前置处理器。FLUENT 系列产品皆采用 FLUENT 公司自行研发的 Gambit 前处理软件来建立几何形状及生成网格。

(2) 求解器。

它是流体计算的核心,根据专业领域的不同,求解器主要分为以下几种类型:

- FLUENT 4.5: 基于结构化网格的通用 CFD 求解器。
- FLUENT 6.2.16: 基于非结构化网格的通用 CFD 求解器。
- Fidap: 基于有限元方法,主要用于流固耦合的通用 CFD 求解器。
- Polyflow: 针对粘弹性流动的专用 CFD 求解器。
- Mixsim: 针对搅拌混合问题的专用 CFD 软件。
- Icepak: 专用的热控分析 CFD 软件。

(3) 后处理器。

FLUENT 求解器本身就附带有比较强大的后处理功能。另外, Tecplot 也是一款比较专业的后处理器,可以把一些数据可视化,这对于数据处理要求比较高的用户来说是一个理想的选择。

FLUENT 的主要优势体现在以下几个方面:

- FLUENT 具有强大的网格支持能力,支持界面不连续的网格、混合网格、变形网格以及滑动网格等,并且 FLUENT 软件还拥有多种基于解的网格自适应技术以及网格动态自适应技术,对于捕捉非常复杂的物理现象非常有利。
- FLUENT 主要解决边界运动的问题,用户只需指定初始网格和运动壁面的边界条件,余下的网格变化完全由求解器自动生成。这种技术可广泛应用于非结构网格、变形较大问题以及物体运动规律事先不知道而完全由流动所产生的力所决定的问题。
- FLUENT 具有先进的数值解法,包含 3 种算法:非耦合隐式算法、耦合显式算法和耦合隐式算法。从而使 FLUENT 软件适用于低速不可压流动、跨声速流动乃至压缩

性强的超声速和高超声速流动。

- FLUENT 拥有众多的物理模型，可以满足用户精确地模拟无粘流、层流、湍流、传热和传质、多孔介质、化学反应、颗粒运动、多相流、自由表面流、相变流等复杂的流动现象的需要。
- FLUENT 具有高效率的并行计算功能，提供多种自动分区算法；内置的 MPI 并行机制可以大幅度提高分布式并行效率。FLUENT 还具有动态负载平衡功能，当并行计算的 CPU 负载不平衡时可自动调整分区以确保全局高效率并行计算。
- FLUENT 具有强有力的图形后处理功能。可以以动画、图形、曲线以及具体数字报告的方式对计算结果进行方便的处理，而且还有专门针对旋转机械的后处理功能。
- FLUENT 可让用户定义多种边界条件，如流动入口及出口边界条件、壁面边界条件等，可采用多种局部的笛卡尔和圆柱坐标系的分量输入，所有边界条件均可随空间和时间变化，包括轴对称和周期变化等。
- FLUENT 提供的用户自定义子程序功能，可让用户自行设定连续方程、动量方程、能量方程或组分输运方程中的体积源项，自定义边界条件、初始条件、流体的物性、添加新的标量方程和多孔介质模型等。

1.5 本章小结

本章简要介绍了利用 CFD 求解复杂流体流动与热传导问题的基本思想和基本工作过程；介绍了通用 CFD 软件的特点及 FLUENT 软件的功能。

本章的目的是让读者对 CFD 有一个总体上的认识，了解 CFD 的基本工作思路。这一章的内容是学好 CFD 技术的基础和关键所在，读者必须将其中的基本概念弄清，因为本章介绍的基本思想和技术路线将贯穿于后续各章。

需要说明的是，CFD 所涉及的基础知识远不止这些，如控制方程的分类（椭圆型、抛物线型、双曲型）及控制方程中源项的表达式等内容，是需要通过阅读相关文献来掌握的，本书中将在以后的章节中有所介绍。

第 2 章 FLUENT 基础

知识要点

- 流体流动的基本概念与流动模型
- 数值求解方法简介
- FLUENT 软件的基本结构

2.1 概述

计算流体力学在 20 世纪 70 年代以来有了突飞猛进的发展,而且正在以更快的速度前进。推动这一发展的原因一方面是实际需求,另一方面是计算技术的飞速发展和高速巨型计算机的出现,使其发展成为一门独立的学科。计算流体力学是多领域的交叉学科。它所涉及的学科有流体力学、偏微分方程的数学理论、数值方法和计算机科学等。它的发展进一步促进了这些学科的发展。为了掌握该学科的基本内容,首先必须了解什么是计算流体力学、它的特征是什么。

任何流体运动的动力学特性都是由质量守恒定律、动量守恒定律和能量守恒定律所确定的。这些基本定律可由数学方程组(偏微分方程组或积分方程组)来描述,如欧拉方程(Euler 方程)、纳维-斯托克斯方程(Navier-Stokes 方程,简称 N-S 方程)等。利用数值方法通过计算机求解描述流体运动的数学方程,揭示流体运动的物理规律,研究定常流体运动的空间物理特性和非定常流体运动的时-空物理特征,这样的学科称为计算流体力学。

计算流体力学的兴起推动了流体力学研究工作的发展。自从 1687 年牛顿定律公布以来,直到 20 世纪 50 年代初,研究流体力学的主要方法是两种:一是实验研究——以地面实验为研究手段;二是理论分析方法——利用简化的流动模型假设,给出所研究问题的解析解或简化方程。理论工作者在研究流体运动基本规律的基础上,提出了各种简化流动模型,给出了一系列解析解和数值方法。这些研究成果推动了流体动力学的发展,奠定了今天计算流体力学的基础,很多方法仍在目前解决实际问题中采用。然而,仅采用这些方法研究复杂非线性流体运动规律是不够的,它已不能满足 20 世纪 50 年代开始高速发展起来的近代科学技术的需求。

现在随着实际的需要,计算流体力学已发展成为流体动力学的第三种研究方法。它的兴起促进了实验研究和理论分析方法的发展,将实验研究与理论分析方法联系起来,为简化流动模型的建立提供了更多的依据,使很多简化方法得到了发展和完善。然而,更重要的是计算流体力学采用它独有的新的研究方法——数值模拟方法——研究流体运动的物理特性。

计算流体力学是采用数值方法直接求解描述流体运动基本规律的非线性数学方程组,通过数值模拟方法研究流体运动的规律。它不同于实验研究和理论分析方法。其特点主要有以下几点:

(1) 扩大了研究范围。

一些原来认为难以解决的问题,采用数值模拟方法可能得到解决。例如,研究汽车运动时,必须考虑相对于汽车运动的地面。这在实验中难以做到,但采用数值模拟方法求解 N-S

方程不难得到所需的数值解；又如超声速、高超声速钝体绕流、分离流、涡运动、真实气体效应、湍流自接数值模拟等问题都是原来认为难以求解的问题，今天通过数值模拟方法很多问题已得到解决。

(2) 能给出较完整的定量结果。

若物理问题的数学方法（包括数学方程及其边界条件）正确，则数值模拟所能研究问题的流动参数（如雷诺数、流体性质、模型尺度、来流条件等）范围广泛，且能给出定常流动的空间流场和非定常流动的时一空流场的定量结果。这常常是实验研究和理论分析方法难以做到的。

(3) 数值解总是离散近似解。

因为数值模拟的基本方法是通过离散方程逼近描述流体运动基本规律的数学方程及其边界条件，并需采用一定方法来求解这些离散方程。故即使所选择的数学方程是所研究物理问题的准确方程，由于在数值解中将引入误差，如离散误差、求解方法中的误差（迭代误差、舍入误差等），故所得到的数值解也是按一定精度逼近准确物理解的近似解。也就是说数值解总是离散的近似解。由于正确模拟不同的物理问题所能允许的数值误差是不相同的，故一方面计算方法应当是针对不同的物理问题进行选择 and 构造；另一方面，必须认识数值解引入的误差。

应当指出，要建立正确的数学方程，特别是对于复杂的流动问题，如燃烧、多相流、湍流等，还必须与实验研究和理论分析方法相结合。更重要的是计算流体力学中所求解的是非线性偏微分（积分）方程组，其数值方法的现有数学理论尚不够充分，严格的稳定性分析、误差估计和收敛性证明等理论工作的发展还跟不上数值模拟方法的进展。虽然关于广义解唯一存在性等问题的严格数学理论已取得了长足进展，但还不足以对一些复杂流动的求解问题给出明确的回答。所以，在计算流体力学中，一方面仍必须依靠对一些简单的、线性的、与原有问题有一定关系的数学方程进行严格的数学分析，依靠启发性的推理，分析非线性问题，给出数值解的理论依据；另一方面，依靠对线性和非线性数学方程的数值实验及数值解与试验值或他人典型算例的计算结果的比较和物理特性分析，验证计算结果，进一步改进计算方法。所以实验研究、理论分析和数值模拟方法是研究流体运动的三种基本方法，它们的发展是相互依赖、相互促进的。

2.2 流体流动基本特性

流体是由大量的不断地作热运动而且无固定平衡位置的分子构成的，它的基本特征是没有一定的形状和具有流动性。流体都有一定的可压缩性，液体可压缩性很小，而气体的可压缩性较大，在流体的形状改变时，流体各层之间也存在一定的运动阻力（即粘滞性）。当流体的粘滞性和可压缩性很小时，可近似看做是理想流体，它是人们为研究流体的运动和状态而引入的一个理想模型。

流体只有在运动状态下才能够同时有法向应力和切向应力的作用，静止状态下其作用面上仅能够承受法向应力，这一应力是压缩应力，即静压强。流体则是与角变形速度和剪切应力有关，层流和紊流状态它们之间的关系有所不同，在层流状态下，二者之间服从牛顿内摩擦定律。当作用力停止作用时，流体只能够停止变形，而不能返回原来的位置。流体由于其变形所需的剪切力非常小，所以很容易使自身的形状适应容器的形状，并在一定的条件下可以维持下来。

与液体相比气体更容易变形，因为气体分子比液体分子稀疏得多。在一定条件下，气体和液体的分子大小并无明显差异，但气体所占的体积是同质量液体的 103 倍。所以气体的分子距与液体相比要大得多，分子间的引力非常微小，分子可以自由运动，极易变形，能够充满所