

FLUENT

基础入门与案例精通

吴光中 宋婷婷 张毅 编著

基础 + 案例 + 经验 = 快速入门与应用



DVD-ROM



电子工业出版社
PUBLISHING HOUSE OF ELECTRONICS INDUSTRY

FLUENT 基础入门与案例精通

吴光中 宋婷婷 张毅 编著

電子工業出版社

Publishing House of Electronics Industry

北京 · BEIJING

内 容 简 介

本书全面系统地介绍了 FLUENT 14 的用法,从基本理论和基础实例出发,依次介绍 FLUENT 在辐射与自然对流模型、混合网格、周期性流动、旋转参考系、多孔介质、多参考系、混合平面、多模块、多相流、UDF、动网格及大涡模拟模型的使用,以及复杂实例的建模、分析和后处理技巧。

本书内容从实际应用出发,侧重于 FLUENT 的实际操作和工程问题的解决,针对每个知识点进行详细讲解,并辅以相应的实例,使读者能够快速、熟练、深入地掌握 FLUENT 相应的功能。每个实例都以图文并茂的形式详细介绍 FLUENT 计算及后处理的操作流程。此外,书中还着重讨论了用户常犯的错误和经常遇到的疑难问题,以及常见的错误信息和警告信息,并给出了相应的解决方法。

本书结构严谨、条理清晰、重点突出,非常适合 FLUENT 初中级用户使用,也可作为大中专院校、高职院校,以及社会相关培训班的教材。

未经许可,不得以任何方式复制或抄袭本书之部分或全部内容。
版权所有,侵权必究。

图书在版编目(CIP)数据

FLUENT 基础入门与案例精通 / 吴光中, 宋婷婷, 张毅编著. —北京: 电子工业出版社, 2012.8
ISBN 978-7-121-17688-3

I. ①F… II. ①吴… ②宋… ③张… III. ①流体力学—工程力学—计算机仿真—应用软件 IV. ①TB126-39

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2012) 第 164058 号

策划编辑: 许存权

责任编辑: 许存权 特约编辑: 王燕 刘海霞

印 刷: 三河市鑫金马印装有限公司
装 订:

出版发行: 电子工业出版社

北京市海淀区万寿路 173 信箱 邮编 100036

开 本: 787×1 092 1/16 印张: 25 字数: 640 千字

印 次: 2012 年 8 月第 1 次印刷

印 数: 4 000 册 定价: 56.00 元 (含 DVD 光盘 1 张)

凡所购买电子工业出版社图书有缺损问题, 请向购买书店调换。若书店售缺, 请与本社发行部联系, 联系及邮购电话: (010) 88254888。

质量投诉请发邮件至 zltz@phei.com.cn, 盗版侵权举报请发邮件至 dbqq@phei.com.cn。

服务热线: (010) 88258888。

前 言

FLUENT 是目前国际上比较流行的商用计算流体力学 (CFD) 的软件包, 在美国的市场占有率为 60%, 凡是与流体、热传递和化学反应等有关的工业均可使用。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, 在航空航天、汽车设计、石油天然气和涡轮机设计等方面都有着广泛的应用。FLUENT 将不同领域的计算软件组合起来, 成为 CFD 计算机软件群, 软件之间可以方便地进行数值交换, 并采用统一的前后处理工具, 省去了科研工作者在计算方法、编程、前后处理等方面投入的重复、低效的劳动, 而将主要精力和智慧用于物理问题本身的探索上。广大 FLUENT 用户, 尤其是初学者都面临一个普遍问题, 即如何快速有效地理解和掌握 FLUENT 丰富的分析功能和操作方法, 因而一本系统的 FLUENT 教材是每个用户的必备参考书。

本书特色

本书是由从事多年 FLUENT 工作和实践的一线从业人员编写的, 在编写的过程中, 不只注重绘图技巧的介绍, 还重点讲解了 FLUENT 和工程实际的关系。

本书基础和实例详解并重, 既可以作为 FLUENT 初学者的教材, 也可以作为对 FLUENT 有一定基础的读者制定工程问题分析方案、精通高级前后处理与求解技术的参考书。本书内容全面, 除详细讲解了基本知识外, 还介绍了 FLUENT 中各种模型和模块的运用。

本书图文并茂, 可帮助读者快速入门。书中详细介绍了 FLUENT 各个功能模块的常用设置和使用技巧, 帮助读者全面了解 FLUENT 有限元软件, 并且详细介绍了每个工程实例的操作步骤, 读者可以很轻松地按照书中的指示, 一步步地完成软件操作。此外, 本书还提及了一些近些年 FLUENT 应用的新领域, 如转捩模式、SAS 模式和大涡模拟模型等。

重点内容

本书分为两部分: FLUENT 基础和案例讲解, 其中, 基础知识包括第 1~4 章, 案例部分包括第 5~20 章, 第 21 章作为一个单独的模块, 主要介绍了 FLUENT 常见问题。

第 1 章 简要介绍 CFD 的基本概念及原理, 并阐述 FLUENT 的基本特点及分析思路。

第 2 章 简要介绍流体力学的基础知识, 阐述在工程及科研中, 人们对于流体力学这一学科的思考方式及研究成果。

第 3 章 简要介绍 CFD 的相关基础知识, 提高读者分析和解决问题的能力。

第 4 章 简要阐述 FLUENT 的基本特点及分析思路。

第 5 章 主要介绍 CFD 中的经典算例——圆柱绕流, 包括圆柱绕流条件下从低雷诺数到高雷诺数的流场全貌。

第 6 章 简要介绍使用 FLUENT 14 计算辐射与自然对流模型, 解决三维方腔中六面体网格的计算问题。

第 7 章 向读者介绍一个使用混合网格计算该模型的实例。

第 8 章 介绍 FLUENT 中周期性流动模型的应用,着重展示周期性边界条件在 FLUENT 中的设置方法与实际运用,并介绍相关的传热计算方法。

第 9 章 介绍使用 FLUENT 计算旋转参考系模型的实例。

第 10 章 介绍使用 FLUENT 14 解决多孔介质模型的实例。

第 11 章 主要介绍 FLUENT 14 中多参考系的应用实例。

第 12 章 介绍一个典型的单级轴流涡轮机模型,该模型考虑转子和定子在一起的计算,可以得出组建之间的相互作用关系。

第 13 章 介绍 FLUENT 中多种模块功能及相关模块的应用,读者通过对 FLUENT 中不同模块的学习将学会其基本功能及操作。

第 14 章 介绍 FLUENT 在多相流方面的应用,详细讲解两个多相流实例。

第 15 章 介绍 UDF 的基本用法,并详细讲解 UDF 用于物性参数修改及多孔介质的基本思路。

第 16 章 介绍利用 GAMBIT, ICEM 对复杂外形的飞行器进行建模并划分网格,同时介绍如何利用 FLUENT 设置飞行器气动计算问题。

第 17 章 介绍 FLUENT 在动网格技术中的高级应用,并详细讲解一个动网格实例。

第 18 章 主要介绍使用 FLUENT 14 进行一个二维大涡模拟的实例,通过本章的介绍,读者可以掌握 FLUENT 中大涡模拟模型的使用方法。

第 19 章 主要介绍使用 FLUENT 14 进行并行计算的实例,通过学习,读者可以掌握并行计算相关知识与应用。

第 20 章 主要向读者介绍 Tecplot 360 在 CFD 计算后处理中的应用,通过学习,读者可以更好地将计算结果可视化。

第 21 章 对 FLUENT 中一些常见的原理和错误提示进行汇总与分析,并向读者介绍一些求解经验,方便读者查阅,以便更好地解决实际问题。

本书作者

本书主要由吴光中、宋婷婷、张毅编著,另外,李猛、陈晓、赵洪雷、王旻、马松柏、张军荣、王辉、许云龙、姚亮、陈洁、王珂、祝少清、丁金滨等参与了部分章节的编写工作。虽然在本书的编写过程中力求叙述准确、完善,但由于水平有限,书中欠妥之处在所难免,希望读者和同仁能够及时指出,共同促进本书质量的提高。

技术支持

读者在学习过程中遇到难以解答的问题,可以到为本书专门提供技术支持的“中国 CAX 联盟”网站求助或直接发邮件到编著者邮箱,我们会尽快给予解答。

编者邮箱: comshu@126.com

技术支持: www.ourcax.com

编著者

目 录

第 1 章 FLUENT 14 概述	(1)	1.8 本章小结	(24)
1.1 CFD 基础入门	(1)	第 2 章 流体力学基础知识	(25)
1.1.1 CFD 概述	(1)	2.1 流体力学的基本概念	(25)
1.1.2 CFD 的数值解法	(2)	2.1.1 流体的物理性质	(25)
1.1.3 CFD 软件结构	(3)	2.1.2 描述流体运动的两种方法	(26)
1.2 FLUENT 14 介绍	(4)	2.2 流体力学的基本方程	(28)
1.2.1 FLUENT 软件简介	(4)	2.2.1 纳维-斯托克斯方程组	(28)
1.2.2 FLUENT 软件功能	(5)	2.2.2 定解条件	(28)
1.2.3 网格技术	(5)	2.3 黏性流体力学基础	(29)
1.2.4 FLUENT 求解器	(6)	2.3.1 黏性流体与无黏流体	(29)
1.2.5 动网格	(7)	2.3.2 边界层	(30)
1.2.6 材料库	(8)	2.3.3 层流与湍流	(31)
1.2.7 UDF	(8)	2.4 本章小结	(31)
1.2.8 后处理功能	(8)	第 3 章 计算流体力学基础	(32)
1.2.9 并行技术	(8)	3.1 CFD 简介	(32)
1.3 FLUENT 计算模型	(9)	3.1.1 从流体力学到 CFD	(32)
1.3.1 湍流模型	(9)	3.1.2 CFD 的优势与劣势	(33)
1.3.2 燃烧模型	(11)	3.2 CFD 的基础理论	(34)
1.3.3 辐射模型	(12)	3.2.1 流体力学微分方程的数学 性质	(34)
1.3.4 多相流模型	(12)	3.2.2 离散方法	(35)
1.4 FLUENT 分析流程	(13)	3.2.3 湍流模型	(37)
1.5 简单实例	(15)	3.2.4 求解算法	(41)
1.5.1 物理问题简介	(15)	3.3 网格技术	(41)
1.5.2 物理问题分析	(15)	3.3.1 结构网格	(42)
1.6 求解计算步骤	(16)	3.3.2 非结构网格	(43)
1.6.1 导入并检查网格	(17)	3.4 常用的 CFD 软件简介	(44)
1.6.2 选择求解器	(18)	3.5 本章小结	(45)
1.6.3 选择模型定义和材料性质	(18)	第 4 章 ANSYS FLUENT 的前后处理	(46)
1.6.4 定义求解区域的性质及边 界条件	(18)	4.1 前处理模块	(46)
1.6.5 求解设置及其控制	(20)	4.1.1 ICEM CFD 基本功能	(46)
1.6.6 进行迭代计算	(21)	4.1.2 ICEM CFD 网格划分模型	(48)
1.7 计算结果整理	(22)	4.1.3 ICEM CFD 基本用法	(50)
1.7.1 FLUENT 结果后处理	(22)	4.2 后处理模块	(52)
1.7.2 使用 Tecplot 后处理	(23)		

4.2.1	FLUENT 自带的后处理简介	(52)	9.2.1	操作步骤	(134)
4.2.2	CFD-Post 的启动与流程	(54)	9.2.2	后处理	(142)
4.2.3	CFD-Post 的主要功能	(55)	9.3	本章小结	(148)
4.2.4	CFD-post 的高级功能	(60)	第 10 章	多孔介质模型	(149)
4.2.5	CFD-post 处理的文件格式	(66)	10.1	问题描述	(149)
4.3	本章小结	(67)	10.2	问题求解	(150)
第 5 章	经典算例——圆柱绕流	(68)	10.2.1	操作步骤	(150)
5.1	物理模型简介	(68)	10.2.2	后处理	(158)
5.2	小雷诺数下典型流场	(69)	10.3	本章小结	(162)
5.2.1	求解计算步骤	(69)	第 11 章	多参考系的应用	(163)
5.2.2	计算结果整理	(75)	11.1	问题描述	(163)
5.3	卡门涡街	(76)	11.2	问题求解	(164)
5.3.1	非定常计算条件	(76)	11.2.1	操作步骤	(164)
5.3.2	非定常流场	(79)	11.2.2	后处理	(172)
5.3.3	计算结果整理	(80)	11.3	本章小结	(174)
5.4	转捩与湍流	(82)	第 12 章	混合平面模型	(175)
5.4.1	转捩计算	(82)	12.1	问题描述	(175)
5.4.2	全湍流计算	(85)	12.2	问题求解	(176)
5.5	本章小结	(88)	12.2.1	操作步骤	(176)
第 6 章	辐射与自然对流模型	(89)	12.2.2	后处理	(188)
6.1	问题描述	(89)	12.3	本章小结	(193)
6.2	问题求解	(90)	第 13 章	多模块的应用	(194)
6.2.1	操作步骤	(90)	13.1	模型介绍	(194)
6.2.2	后处理	(98)	13.1.1	FLUENT 软件中的动网 格模型	(194)
6.3	本章小结	(103)	13.1.2	FLUENT 软件中的 传热和辐射模型	(195)
第 7 章	混合网格的应用	(104)	13.1.3	FLUENT 软件中的气动 噪声模型	(196)
7.1	问题描述	(104)	13.1.4	FLUENT 软件中高精度 的自由表面模型	(198)
7.2	问题求解	(105)	13.1.5	FLUENT 软件中的离散 相模型	(198)
7.2.1	操作步骤	(105)	13.1.6	FLUENT 软件中的欧拉 多相流模型	(199)
7.2.2	后处理	(114)	13.1.7	FLUENT 软件中的混合分数 多相流模型和空泡模型	(199)
7.3	本章小结	(119)	13.1.8	FLUENT 软件中的湍流 模型	(199)
第 8 章	周期性流动模型	(120)			
8.1	问题描述	(120)			
8.2	问题求解	(121)			
8.2.1	操作步骤	(121)			
8.2.2	后处理	(128)			
8.3	本章小结	(132)			
第 9 章	旋转参考系的应用	(133)			
9.1	问题描述	(133)			
9.2	问题求解	(134)			

13.1.9	FLUENT 软件中的化学 反应模型	(200)	15.2.2	问题描述	(272)
13.2	PDF 模型应用实例	(202)	15.2.3	问题求解	(272)
13.2.1	概述	(202)	15.3	利用 UDF 求解多孔介质问题	(280)
13.2.2	问题描述	(203)	15.3.1	概述	(280)
13.2.3	问题求解	(203)	15.3.2	问题描述	(280)
13.2.4	总结	(218)	15.3.3	问题求解	(281)
13.3	燃料电池应用	(218)	15.4	本章小结	(288)
13.3.1	概述	(218)	第 16 章	飞行器气动计算应用	(289)
13.3.2	实例描述	(218)	16.1	计算模型概述	(289)
13.3.3	GAMBIT 建模步骤	(220)	16.1.1	介绍	(289)
13.3.4	FLUENT 中的设置及操 作步骤	(223)	16.1.2	飞行器模型介绍	(289)
13.3.5	总结	(233)	16.1.3	求解方案	(290)
13.4	本章小结	(233)	16.2	GAMBIT 建模与网格划分	(291)
第 14 章	FLUENT 多相流应用	(234)	16.2.1	简介	(291)
14.1	综述	(234)	16.2.2	划分结构网格并设定边 界条件	(291)
14.1.1	FLUENT 中的多相流 模型	(235)	16.2.3	划分非结构网格并设定 边界条件	(301)
14.1.2	FLUENT 的多相流模 型解决的问题	(236)	16.2.4	总结	(305)
14.2	旋转镀膜	(237)	16.3	ICEM CFD 建模及网格划分	(305)
14.2.1	概述	(237)	16.3.1	简介	(305)
14.2.2	问题描述	(237)	16.3.2	划分结构网格	(305)
14.2.3	问题求解	(238)	16.3.3	划分非结构网格	(313)
14.2.4	总结	(251)	16.3.4	总结	(315)
14.3	湿蒸汽在拉瓦尔喷管中的凝结	(251)	16.4	FLUENT 14 计算设置与分析	(315)
14.3.1	概述	(251)	16.4.1	模型设置与计算	(315)
14.3.2	问题描述	(251)	16.4.2	数据分析与后处理	(324)
14.3.3	问题求解	(252)	16.4.3	总结	(327)
14.3.4	总结	(263)	16.5	本章小结	(327)
14.4	本章小结	(263)	第 17 章	动网格高级应用	(328)
第 15 章	UDF 基础应用	(265)	17.1	动网格介绍	(328)
15.1	UDF 介绍	(265)	17.1.1	简介	(328)
15.1.1	UDF 的基本用法	(265)	17.1.2	动网格更新方法	(329)
15.1.2	UDF 编写基础	(266)	17.1.3	总结	(331)
15.1.3	UDF 中的 C 语言基础	(267)	17.2	水中落物	(331)
15.2	利用 UDF 自定义物性参数	(271)	17.2.1	概述	(331)
15.2.1	概述	(271)	17.2.2	问题描述	(332)
			17.2.3	问题求解	(332)
			17.2.4	总结	(347)
			17.3	本章小结	(347)

第 18 章 大涡模拟应用	(348)	第 20 章 Tecplot 后处理软件简介	(369)
18.1 问题描述	(348)	20.1 Tecplot 360 简介	(369)
18.2 问题求解	(348)	20.1.1 软件界面	(369)
18.2.1 操作步骤	(348)	20.1.2 常用功能介绍	(369)
18.2.2 后处理	(356)	20.2 Tecplot 后处理实例	(371)
18.3 本章小结	(359)	20.3 Tecplot 数据格式	(377)
第 19 章 并行计算	(360)	20.4 本章小结	(383)
19.1 并行计算简介	(360)	第 21 章 FLUENT 常见问题汇总	(384)
19.2 并行计算实例	(361)	21.1 常见原理与应用	(384)
19.2.1 问题描述	(361)	21.2 求解经验	(388)
19.2.2 问题求解	(361)	21.3 常见错误提示及其解决办法	(390)
19.3 本章小结	(368)	21.4 本章小结	(392)

第 1 章

FLUENT 14 概述

FLUENT 是世界领先的 CFD 软件，在流体建模中被广泛应用。由于它一直以来以用户界面友好而著称，所以对初学者来说非常容易掌握。

FLUENT 的软件设计基于 CFD 软件群的思想，从用户需求角度出发，针对各种复杂流动的物理现象，采用不同的离散格式和数值方法，以期在特定的领域内使计算速度、稳定性和精度等方面达到最佳组合，从而高效率地解决各个领域的复杂流动计算问题。本章简要介绍 CFD 的基本概念及原理，并阐述 FLUENT 的基本特点及分析思路。

主要内容：

- CFD 软件简介。
- FLUENT 的功能和特点。
- 通过一个简单的实例分析，初步了解 FLUENT 14 的操作过程。

1.1 CFD 基础入门

在介绍 FLUENT 软件之前，首先介绍软件的相关背景。

1.1.1 CFD 概述

CFD 是目前国际上一个强有力的研究领域，是进行传热、传质、动量传递及燃烧、多相流和化学反应研究的核心和重要技术，广泛应用于航天设计、汽车设计、生物医学工业、化工处理工业、涡轮机设计、半导体设计、HAVC&R 等诸多工程领域，板翅式换热器设计是 CFD 技术应用的重要领域之一。

CFD 在最近 20 年中得到了飞速发展，除了计算机硬件工业的发展给它提供了坚实的物质基础外，还主要因为无论是分析的方法还是实验的方法都有较大的限制，例如，由于问题的复杂性，既无法作为分析解，也因费用昂贵而无力进行实验确定，而 CFD 的方法正具有成本低和能模拟较复杂或较理想的过程等优点。

经过一定考核的 CFD 软件可以拓宽实验研究的范围，减少成本昂贵的实验工作量。在给定的参数下用计算机对现象进行一次数值模拟相当于进行一次数值实验，历史上也曾有过首先由 CFD 数值模拟发现新现象而后由实验予以证实的例子。

CFD 软件一般都能推出多种优化的物理模型, 如定常和非定常流动、层流、紊流、不可压缩和可压缩流动、传热、化学反应等。

对每一种物理问题的流动特点, 都有适合它的数值解法, 用户可对显式或隐式差分格式进行选择, 以期在计算速度、稳定性和精度等方面达到最佳。

CFD 软件之间可以方便地进行数值交换, 并采用统一的前处理、后处理工具, 这就省去了科研工作者在计算机方法、编程、前处理、后处理等方面投入的重复、低效的劳动, 而可以将主要精力和智慧用于物理问题本身的探索上。

1.1.2 CFD 的数值解法

CFD 的数值解法有好多分支, 这些方法之间的区别主要在于对控制方程的离散方式。根据离散原理的不同, CFD 大体上可以分为有限差分法 (FDM)、有限元法 (FEM) 和有限体积法 (FVM) 三种。

1. 有限差分法 (FDM)

该方法是计算机数值模拟最早采用的方法, 至今仍被广泛运用。该方法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。

有限差分法以 Taylor 级数展开的方法, 把控制方程中的导数用网格节点上的函数值的差商代替, 从而创建以网格节点上的值为未知数的代数方程组。

该方法是一种直接将微分问题变为代数问题的近似数值解法, 数学概念直观, 表达简单, 是发展较早且比较成熟的数值方法。

从有限差分格式的精度来划分, 有一阶格式、二阶格式和高阶格式; 从差分的空间形式来考虑, 可分为中心格式和逆风格式; 考虑时间因子的影响, 差分格式还可分为显格式、隐格式、显隐交替格式等。

目前, 常见的差分格式, 主要是上述几种形式的组合, 不同的组合构成不同的差分格式。差分方法主要适用于有结构网格, 网格的步长一般根据实际情况和柯郎稳定条件来决定。

2. 有限元法 (FEM)

有限元法的基础是变分原理和加权余量法, 其基本求解思想是把计算域划分为有限个互不重叠的单元, 在每个单元内, 选择一些合适的节点作为求解函数的插值点, 将微分方程中的变量改写成由各变量或其导数的节点值与所选用的插值函数组成的线性表达式, 借助于变分原理或加权余量法, 将微分方程离散求解。

采用不同的权函数和插值函数形式, 便于构成不同的有限元法。有限元法最早应用于结构力学, 后来随着计算机的发展慢慢用于流体力学的数值模拟。

在有限元法中, 把计算域离散剖分为有限个互不重叠且相互连接的单元, 在每个单元内选择基函数, 用单元基函数的线性组合来逼近单元中的真解, 整个计算域上总体的基函数可以看做由每个单元基函数组成的, 而整个计算域内的解可以看作由所有单元上的近似解构成的。

3. 有限体积法 (FVM)

有限体积法的基本思路易于理解,并能得出直接的物理解释。离散方程的物理意义,就是因变量在有限大小的控制体积中的守恒原理,如同微分方程表示因变量在无限小的控制体积都得到满足,在整个计算区域,自然也就得到满足。

有一些离散方法,如有限差分法,仅当网格极其细密时,离散方程才满足积分守恒;而有限体积法即使在粗网格情况下,也可显示出准确的积分守恒。

就离散方法而言,有限体积法可视为有限元法和有限差分法的中间物,有限元法必须假设值在网格点之间的变化规律(即插值函数),并将其作为近似解;有限差分法只考虑网格点上的数值而不考虑其在网格点之间如何变化;有限体积法只寻求节点值,这与有限差分法相类似,但有限体积法在寻求控制体积的积分时,必须假设值在网格点之间的分布,这又与有限单元法相类似。

在有限体积法中,插值函数只用于计算控制体积的积分,得出离散方程后,便可忘掉插值函数;如果需要的话,可以对微分方程中不同的项采取不同的插值函数。

CFD 一般要通过数值方法求解以下的控制方程组:

- 动量守恒方程。
- 能量守恒方程。
- 组分守恒方程。
- 体积力等。

1.1.3 CFD 软件结构

CFD 软件由前处理 (Preprocessor)、求解器及后处理 (Postprocessor) 三部分组成。前处理、求解器及后处理三大模块,各有其独特的作用。

(1) 前处理器用于完成前处理工作。

前处理环节中向 CFD 软件输入所求问题的相关数据,该过程一般借助与求解器相对应的对话框等图形界面来完成。流动问题的解是在单元内部的节点上定义的,解的精度由网格中单元的数量所决定。

一般来讲,单元越多,尺寸越小,所得到的解的精度越高,但所需要的计算机内存资源及 CPU 时间也会相应增加。为了提高计算精度,在物理量梯度较大的区域,以及我们感兴趣的区域,往往要加密计算网格。

在前处理阶段生成计算网格时,关键是要把握好计算精度与计算成本之间的平衡。在前处理阶段需要用户进行以下工作:

- 定义所求问题的几何计算域。
- 将计算域划分成多个互不重叠的子区域,形成单元组成的网格。
- 对所研究的物理和化学现象进行抽象,选择相应的控制方程。
- 定义流体的属性参数。
- 为计算域边界处的单元指定边界条件。
- 对于瞬态问题,指定初始条件。

(2) 求解器 (Solver) 核心是数值求解算法。

常用的数值求解方案如上所述。总体上, 这些方法的求解过程大致相同, 包括以下步骤。

- 使用简单函数近似待求的流动变量。
- 将该近似关系代入连续性的控制方程中, 形成离散方程组。
- 求解代数方程组。
- 各种数值求解方案的主要差别在于流动变量被近似的方式及相应的离散化过程。

(3) 后处理的目的是有效地观察和分析流动计算结果。

随着计算机图形处理功能的提高, 目前的 CFD 软件均配备了后处理, 且提供了较为完善的后处理功能, 包括以下几个方面。

- 计算域的几何模型及网格显示。
- 矢量图 (如速度矢量线)。
- 等值线图。
- 填充型的等值线图 (云图)。
- XY 散点图。
- 粒子轨迹图。
- 图像处理功能 (平移、缩放、旋转等)。
- 借助后处理功能, 可以动态模拟流动效果, 直观地了解 CFD 的计算结果。

1.2 FLUENT 14 介绍

在本节中, 将向读者展示最新版本的 FLUENT 14 的一些基本特征, 方便读者对于最新版本的 FLUENT 有一个大概的了解。

1.2.1 FLUENT 软件简介

FLUENT 软件采用有限体积法, 提供了三种数值算法: 非耦合隐式算法、耦合显式算法、耦合隐式算法, 分别适用于不可压、亚声速、跨声速、超声速乃至高超声速流动。下面具体说明一下。

1. 非耦合隐式算法 (Segregated Solver)

该算法源于经典的 SIMPLE 算法。其适用范围为不可压缩流动和中等可压缩流动。这种算法不对纳维-斯托克斯 (Navier-Stokes, N-S) 方程联立求解, 而是对动量方程进行压力修正。

该算法是一种很成熟的算法, 在应用上经过了很广泛的验证。这种方法拥有多种燃烧、化学反应及辐射、多相流模型与其配合, 适用于低速流动的 CFD 模拟。

2. 耦合显式算法 (Coupled Explicit Solver)

这种算法由美国 FLUENT 公司与 NASA 联合开发, 主要用来求解可压缩流动。该

方法与 SIMPLE 算法不同，其对整个 N-S 方程组进行联立求解，空间离散采用通量差分分裂格式，时间离散采用多步 Runge-Kutta 格式，并采用了多重网格加速收敛技术。

对于稳态计算，还采用了当地时间步长和隐式残差光顺技术。该算法稳定性好，内存占用小，应用极为广泛。

3. 耦合隐式算法 (Coupled Implicit Solver)

该算法是其他所有商用 CFD 软件都不具备的。该算法也对 N-S 方程组进行联立求解，由于采用隐式格式，因而计算精度与收敛性要优于 Coupled Explicit 方法，但却占用较多的内存。该算法另一个突出的优点是可以求解全速度范围，即求解范围从低速流动到高超声速流动。



在最新版本的 FLUENT 中，已经将原来使用的这三种算法去掉，取而代之的是压力基准 (Pressure-Based) 算法和密度基准 (Density-Based) 算法。

一般来说，压力基准算法用于求解不可压缩流动，密度基准算法用于求解可压缩流动。但新版的 FLUENT 为了提升适用性，在一些情况下，两者区分不是非常明显。

1.2.2 FLUENT 软件功能

FLUENT 软件几乎已成为航空领域 CFD 分析的标准，特别是在 ANSYS 公司收购 FLUENT 以后针对航空领域做了大量高技术含量的开发工作。FLUENT 可以用于但不限于以下技术领域：

- 内置六自由度刚体运动模块配合强大的动网格技术用于模拟飞行器外挂物分离；
- 领先的转捩模型精确计算层流到湍流流场；
- 非平衡壁面函数和增强型壁面函数及压力梯度修正大大提高边界层回流计算精度；
- 多面体网格技术大大减小网格量并提高计算精度、基于密度算法解决高超声速流动；
- 高阶格式可以精确捕捉激波、噪声模块解决航空领域的气动噪声问题；
- 非平衡火焰模型用于航空发动机燃烧模拟；
- 旋转机械模型及虚拟叶片模型广泛用于螺旋桨旋翼 CFD 模拟；
- 先进的多相流模型及动网格技术，用于恶劣飞行条件下的结冰数值模拟；
- 中文 (HPC) 大规模高效并行技术。

1.2.3 网格技术

网格是 FLUENT 求解的基础，下面介绍 FLUENT 计算中采用的网格技术。

1. 网格自适应技术

FLUENT 采用网格自适应技术, 可根据计算中得到的流场结果反过来调整和优化网格, 从而使得计算结果更加准确。

该技术是目前在 CFD 技术中提高计算精度最重要的技术之一, 尤其对于有波系干扰、分离等复杂物理现象的流动问题, 采用自适应技术能够有效地捕捉到流场中的细微的物理现象, 可大大提高计算精度。

FLUENT 软件具有多种自适应选项, 可以对物理量值、物理量的空间微分值 (如压力梯度)、网格容积变化率、壁面 y^*/y_+ 值等进行自适应。

2. 多重网格初始化 (FMG) 技术

较好的初始流场能够大大提高问题的收敛速度。FLUENT 提供了自动在后台操作的 FMG 方法, 在粗网格上先用一阶精度的无黏欧拉方程计算得到较好的初始化流场, 然后一步步细化网格求解 N-S 方程得到精确解。

FMG 方法对于包含较大压力、速度梯度的流动问题非常有用, 在某些情况下收敛时间可缩短至原来的 1/5。

3. 多面体网格技术

FLUENT 新版本增加了多面体网格功能, 可以把四面体网格量减少约 2/3, 而且计算精度可大大提高。多面体网格的最大的优点是有很多邻居单元 (通常为 10), 所以, 能更精确地计算控制体的梯度 (采用线性分布和利用最近的邻居单元即可)。甚至在边部和角部, 多面体网格通常也会有多个邻居单元, 这样可以正常计算梯度和局部流动分布。当然邻居控制体越多, 需要内存和每个网格上计算量越大, 这些可在精度上得到补偿。

多面体网格尤其适用于处理回流问题。测试表明在顶盖驱动流要达到一定精度, 需要的多面体网格数量甚至比四面体网格还少。

这种现象可这样解释: 对于四面体网格, 它有 3 个流动方向可能导致最大的精度, 而对于有 12 个面的多面体网格由于它有更多的邻居单元, 存在 6 个最优的方向, 这样可能采用更少的网格就能取得更高的精度。



说明

通过很多例子比较可知, 采用多面体网格, 相比于四面体网格, 只需要 1/4 网格量, 1/2 的内存, 1/10 的计算时间就能得到相同的计算精度, 此外收敛性能更好, 而且通常不需要调整求解器的参数。

1.2.4 FLUENT 求解器

FLUENT 软件基于有限体积法, 提供了三种数值算法, 包括基于压力的分离算法 (Pressure Based Segregate Solver)、基于密度的耦合显式算法 (Density Based Explicit Solver)、基于密度的耦合隐式算法 (Density Based Implicit Solver), 是商用软件中最多的。

1. 基于压力的分离算法

该算法源于经典的 SIMPLE 算法，其适用范围为不可压缩流动和中等可压缩流动。这种算法不对 N-S 方程联立求解，而是对动量方程进行压力修正，是一种很成熟的算法，在应用上经过了很广泛的验证。这种方法可以与燃烧、化学反应、辐射、多相流模型配合，解决流动传热问题。

2. 基于密度的耦合显式算法

这种算法是由 FLUENT 公司与 NASA 联合开发的，主要用来求解可压缩流动（跨声速、超声速流动乃至高超声速）。该方法与 SIMPLE 算法不同，其对整个 N-S 方程组进行联立求解，空间离散采用通量差分分裂格式，包括 ROE-FDS 格式及目前最先进的算法之一 AUSM 格式，在间断分辨率、黏性分辨率及稳定性方面均有良好表现，时间离散采用多步 Runge-Kutta 格式，并采用了自动多重网格加速收敛技术。

3. 基于密度的耦合隐式算法

该算法对 N-S 方程组进行联立求解，由于采用隐式格式，因而计算精度与收敛性要优于基于压力的分离算法，但却占用较多的内存。该算法另一个突出的优点是可以求解全速度范围，即求解范围从低速流动到高超声速流动。



说明

FLUENT 6.3 版本以后在压力-速度耦合方法中新增了耦合压力基算法，比压力基算法有更好的收敛性，比密度基算法计算代价小。

在方程离散格式新增了三阶精度的 MUSCL 格式，而且新增的密度基算法可以用于高马赫 (Ma) 数流动计算中，可以实现隐式耦合计算（和 ANSYS CFX 算法类似），在通量离散中 ROE 格式基础上新增 AUSM 三阶离散精度格式，可以更好地捕捉高马赫数下的激波。

ANSYS FLUENT 14 在算法的稳定性和精确性上也有明显改进，借鉴 ANSYS CFX 算法，可以实现一阶到高阶的混合格式。而且在激波处理上也作了改进，可以选择不可压、亚声速、跨声速、超声速、高超声速四种不同的流动计算类型，FLUENT 求解器中可以自动选择不同的 Courant Number 开始计算。这种处理方法可以大大提高激波计算的收敛性和稳定性。

1.2.5 动网格

FLUENT 的动网格功能在商业 CFD 软件中是非常强大的，它提供了弹簧压缩法、动态铺层法、局部重构法三种网格重建方法，三种方法可以任意组合模拟流场的复杂运动。FLUENT 还提供了三种专用的动网格模型：活塞运动、六自由度投放及两维半模型。

1.2.6 材料库

FLUENT 具有丰富的物质材料库，包括常用的流体物质（如液态水、蒸汽状态水、酒精、煤油、空气等）、固体物质（如铝、铜、石墨等）及混合物，各种物质的密度、比热容、导热系数、黏度、汽化潜热等参数都可以直接从数据库中得到，并且这些物质属性可以为常数、函数形式的变量，或者用用户自定义函数（User Defined Function, UDF）设置成用户想要的形式。

例如，传热计算中，比热容对系统的温度模拟结果影响非常大，采用输入变比热容的形式可以提高计算精度。如果自带的材料库不能满足用户需求，那么 FLUENT 会提供方便的界面供用户输入自己所需要材料的物性，以便在计算中使用。

1.2.7 UDF

FLUENT 软件不仅提供了以上各种丰富的物理模型及灵活的参数设置方式，而且为了满足用户的特殊需求还提供了二次开发接口功能。

UDF 采用用户所熟悉的 C/C++ 语言编写，然后动态加载到 FLUENT 环境中使用，可以使用户方便地在 FLUENT 中实现自己所需要的特定功能。

1.2.8 后处理功能

FLUENT 12 版本采用 CFD-Post 做通用后处理，CFD-Post 具有强大的后处理功能，能够显示 CFD 计算所需要的参数，包括矢量图、等值线图、等值面图、流动轨迹图；可以清晰地显示压强、 Ma 数、 Re 数、温度等参数；并具有积分功能，可以求得通过壁面的热流量、辐射热流量、质量流率等。

对于用户关心的参数和计算中的误差可以随时进行动态跟踪显示；对于多相流，还提供组分、蒸发率分布等参数。

CFD-Post 的后处理可以生成有实际意义的图片、动画、报告，这使得 CFD 的结果可非常容易地被转换成工程师和其他人员可以理解的图形。

1.2.9 并行技术

单 CPU 计算往往难以满足现代设计的要求，因而并行计算能力也是考核 CFD 软件的重要指标之一。涉及点火初始流场压力的剧变、燃烧、火焰面的捕捉等一系列复杂的物理过程，而且几何非常复杂；燃烧和复杂化学反应等问题要计算多组分方程组，比单相流动的计算量要大得多；另外，整个计算要考虑动边界问题，这种非定常过程的计算量也相当巨大，传统单 CPU 的计算是难以承受的。FLUENT 并行功能具有以下技术和特点。