

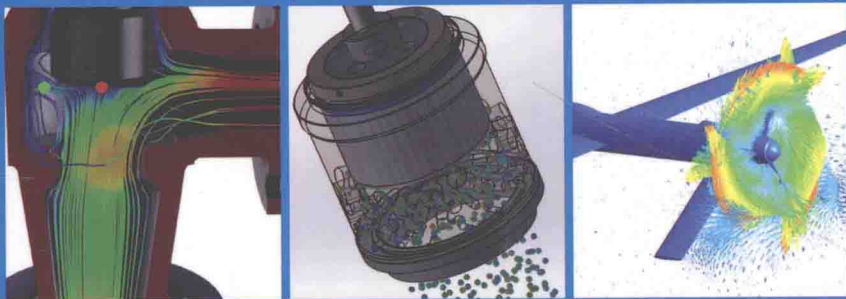
# 精通CFD

## 工程仿真与案例实战

——FLUENT GAMBIT ICEM CFD Tecplot

李鹏飞  
徐敏义 ◎主编  
王飞飞

第2版



程序和视频文件

★ 8个经典网格 ICEM CFD 划分实例 (非结构网格、块结构网格、O-grid 网格划分、边界层网格等), 详细讲解 ICEM CFD 的应用

★ 37个经典的 FLUENT 案例 (气流组织、管流、换热、可压缩流动、水波、翼型绕流、各类多相流模型、固体燃料电池、SNCR、燃烧与化学反应、催化反应、非牛顿流体、风机、圆柱绕流、UDF 等), 全面解读 FLUENT 的应用

★ 典型的 Tecplot 后处理应用 (矢量图、等值线图、三维剖面图、XY 点图)

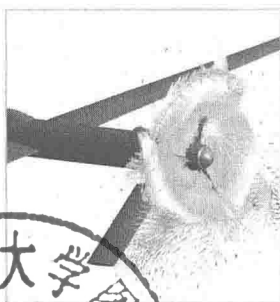
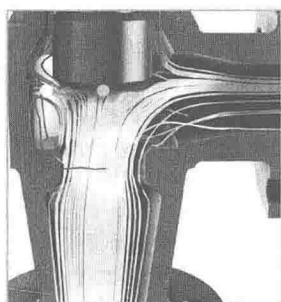
★ 255分钟的算例视频讲解及各算例源文件, 帮助读者尽快融入实战角色

# 精通CFD

## 工程仿真与案例实战

—FLUENT GAMBIT ICEM CFD Tecplot

李鹏飞 徐敏义 王飞飞◎主编



第2版



人民邮电出版社  
北京

## 图书在版编目 (CIP) 数据

精通CFD工程仿真与案例实战 : FLUENT GAMBIT ICEM  
CFD Tecplot / 李鹏飞, 徐敏义, 王飞飞主编. -- 2版  
— 北京 : 人民邮电出版社, 2017.6  
ISBN 978-7-115-45313-6

I. ①精… II. ①李… ②徐… ③王… III. ①计算流  
体力学—应用软件 IV. ①O35-39

中国版本图书馆CIP数据核字(2017)第092608号

## 内 容 提 要

本书详细介绍了 FLUENT、GAMBIT、ICEM CFD 和 Tecplot 基础理论、具体操作和典型的应用案例。本书是在原有第一版的基础上,增加了近几年 CFD 的热点应用,结合读者意见进行完善和改进后的第二版。

全书共分 9 章。第 1 章介绍了 CFD 基本理论及软件的基本应用,并通过简单实用的算例,说明了 FLUENT 的求解过程和后处理步骤。第 2 章介绍了 CFD 前处理概念和 GAMBIT、ICEM CFD 的使用方法。第 3 章介绍了 CFD 求解理论和 FLUENT 的使用方法。第 4 章介绍了 FLUENT 后处理和 Tecplot 使用方法。第 5 章是网格应用实战,以 10 个网格应用的典型实例为讲解主线,详细介绍 GAMBIT 和 ICEM CFD 创建四面体网格、六面体网格的功能应用,涉及局部加密法、边界层网格和块结构化网格的划分方法。第 6 章至第 9 章都是综合实战案例,通过 37 个典型算例,介绍 FLUENT 在多个领域的应用。第 9 章的 11 个算例为此次第二版图书的新加算例。

本书理论讲解详细、操作介绍直观、实例内容丰富,全面介绍了 FLUENT、GAMBIT、ICEM CFD 和 Tecplot 应用于流体工程计算的操作,具有较强的实用性。本书包含的大量实例基本涵盖了 ICEM CFD 和 FLUENT 在各大领域中的典型应用,本书的这些经典算例是对 ICEM CFD 和 FLUENT 功能应用很全面的总结。

本书可作为能源、航空航天、船舶、石油、化工、机械、制造、汽车、生物、环境、水利、火灾安全、冶金、建筑、材料等众多领域的研究生和本科生学习 CFD 基本理论和软件应用的教材,也可供上述领域的科研人员、企业研发人员,特别是从事 CFD 基础和应用计算的人员学习参考。

---

◆ 主 编 李鹏飞 徐敏义 王飞飞

责任编辑 张 涛

责任印制 焦志炜

◆ 人民邮电出版社出版发行 北京市丰台区成寿寺路 11 号

邮编 100164 电子邮件 315@ptpress.com.cn

网址 <http://www.ptpress.com.cn>

三河市海波印务有限公司印刷

◆ 开本: 787×1092 1/16

印张: 39

字数: 1 099 千字

2017 年 6 月第 2 版

印数: 11 001—14 000 册

2017 年 6 月河北第 1 次印刷

---

定价: 108.00 元 (附光盘)

读者服务热线: (010)81055410 印装质量热线: (010)81055316

反盗版热线: (010)81055315

广告经营许可证: 京东工商广登字 20170147 号

## 第一版推荐序

我在 FLUENT 中国工作时就认识了李鹏飞博士，合作至今已近 4 年。目前，他是海基公司的 CFD 高级培训讲师，他对技术的理解和痴迷令我印象深刻。他思想敏锐，是一位非常踏实且有才华的青年学者。几年来，他的学术论文和各种科研成果接连被国际顶级杂志刊登，其质量都很高，这印证了我对他的印象。

海基盛元信息科技有限公司最早把 FLUENT 软件引进了中国，为 CFD 软件在中国的推广与应用起到了重要作用。李鹏飞博士在海基公司主要负责 ICEM CFD 和 FLUENT 软件的基础和高级培训，开课有 ICEM CFD 与 FLUENT 标准培训、FLUENT 高级燃烧模拟培训等课程。目前该培训课程已经成功举办五期，参加培训的学员有来自东方电气、中石油、中海油、国家电网和宝钢（简称）等大型企业的研发技术人员；还有来自清华大学、北京大学、中国科学院、中国科技大学、国防科技大学等科研机构的教师和研究生。学员们经过培训后，都反映收获很多，对李鹏飞博士的评价很高。

李鹏飞博士的研究主要涉及工业过程的节能减排，致力于通过数值模拟研究流动、传热与反应流过程细节，并弄清提高工业过程效率和节能的途径。他曾经在华中科技大学煤燃烧国家重点实验室做过相关研究，目前在北京大学湍流与复杂系统国家重点实验室做学术研究。在这些国家重点科研机构里，他参与了很多国家重大项目，如国家重大科技专项、973、863 和国家自然科学基金等项目，积累了大量数值模拟的基础研发和工业应用经验。

李鹏飞博士持续对 CFD 保持着高度的热爱，并对 FLUENT 软件技术问题提出了许多很有价值的宝贵建议，当他提出要写一本 CFD 方面的书时，我就大力支持并鼓励他创作。现在，他与北京大学徐敏义博士、王飞飞博士一同将他们的宝贵经验和体会总结成书，在他们的 CFD 专著即将出版时，我祝贺他们在 CFD 方面取得的成绩，也祝愿他们在今后的工作生活中获得更大的成功！

是为序。

上海海基盛元信息科技有限公司  
技术总监 隋洪涛博士

## 第二版自序

5年前,有出版社到北京大学联系我,说经他们调研,读者对 FLUENT 的技术普及图书需求很广,问我能不能准备相关书稿。我当时写过 CFD 方面的论文,做过 CFD 方面的技术培训和项目咨询,基于对 CFD 的理解与研究经验,我想把这项任务接下来,编写一部较全面的 FLUENT 技术图书。我拟了内容提纲,试写了部分章节,交给了出版社。经过评审和立项,这件事情就敲定了。由于 FLUENT 软件涉及学科门类多,应用范围广,为提高图书质量,我和同在北京大学进行 CFD 研究的徐敏义博士和王飞飞博士一起合作准备书稿,书最终于 2011 年年底面世。

当时市面 FLUENT 技术书籍还不多,也还没有介绍 ICEM CFD 和 Tecplot 内容的图书。本书介绍了较多 ICEM CFD 和 Tecplot 的内容,也引入了很多网格划分和 CFD 模拟在各个领域应用的案例,吸引了不少读者的兴趣,第一版图书目前已重印了 9 次。随着销量的增加,获得的好评也越来越多,也收到了不少读者来信。目前第一版图书已出版了 5 年,这期间作者一直继续从事 CFD 研究。我们根据这几年读者的反馈,结合我们对 CFD 的理解,融合目前 CFD 市场对热门案例的需求,我们对第一版图书进行了仔细修订。修订主要从 4 方面进行:(1)增加了 FLUENT 在更多领域应用的案例,第二版图书已经包含了 FLUENT 的 37 个算例;(2)修改完善了 ICEM CFD 网格划分案例;(3)对全书进行了语言润色和文字勘误修订;(4)根据读者意见对细节内容进行了修改。期望这本改版的图书能受到更多读者的欢迎。

本书仍是 CFD 在 FLUENT 领域的技术工具书,供 CFD 工作者了解 FLUENT 操作与案例使用。虽然本书第 2 章至第 4 章对网格划分、求解器和后处理进行了基础知识介绍,但这些内容主要针对 FLUENT 求解器,因此,严格意义上本书不是 CFD 专业学术专著,而是对 FLUENT 求解器涉及的基础理论与应用案例的汇总。学术方面,编者在湍流反应流和高效低污染燃烧领域进行了较多研究,本书修订新版后,我也将推出学术专业性和原创性更强的英文学术专著,供与该领域的学术研究者交流。

感谢北京大学湍流与复杂系统国家重点实验室、华中科技大学能源与动力工程学院、海基科技公司、ANSYS 公司、Tecplot 公司、南京佳力图机房环境技术股份有限公司和大连海事大学对笔者的支持。本书的编写汇总了不少 ICEM CFD、FLUENT 和 Tecplot 的各方技术资料,也参考了 ICEM CFD、FLUENT 和 Tecplot 的官方教程,在此向 ANSYS 和 Tecplot 公司表示感谢。感谢人民邮电出版社,他们卓有成效的工作,使本书成了 FLUENT 畅销书。也许可以说,本书对促进 CFD 与 FLUENT 软件在中国的技术应用是有一些影响的。编者也会继续跟踪 CFD 在各领域的最新进展,并及时将这些内容介绍给读者。

一如既往,期望读者对改版图书提出意见和反馈。

李鹏飞  
于华中科技大学

# 前 言

计算流体力学 (Computational Fluid Dynamics, CFD), 是通过计算机模拟流体流动、传热、化学反应等物理现象的技术。通过 CFD 技术, 可利用计算机分析并显示流场中的现象, 能在较短时间内预测流场。CFD 模拟能帮助理解流体力学问题, 为实验提供指导, 为设计提供参考, 节省人力、物力和时间。随着计算机硬件和算法的发展, CFD 技术的应用越来越广泛。

本书是针对从事 CFD 工作的科研人员和企业研发人员的需要编写的, 内容涉及基础操作、高级应用和大量应用案例。本书的实例均来源于各领域的实际研发项目, 既涉及基础研究, 又包括工程实用算例, 应用性和借鉴性较强。无论是初学者还是已有经验的 CFD 工作人员都会从本书中有所收获。

本书第 1 章至第 4 章分别详细介绍了 GAMBIT 和 ICEM CFD 前处理、FLUENT 求解和 Tecplot 后处理的基本技术和操作方法。第 5 章至第 9 章分别介绍了网格和综合求解案例。网格实例方面, 本书通过 10 个典型的网格实例, 给用户学习各类网格划分方法的技术。这些算例都是精心挑选的, 应用方法全面。通过学习这些算例, 读者将掌握 GAMBIT 和 ICEM CFD 最核心和关键的功能, 并能依靠这些方法解决绝大多数实际网格问题。综合求解实例方面, 本书通过 37 个经典算例, 介绍 FLUENT 在各个领域中的应用。这些实例涵盖了 FLUENT 在各大领域中的应用, 是对 FLUENT 求解功能应用最全面的总结。读者可以通过这些经典算例的学习, 迅速地掌握所在领域中 FLUENT 应用方法和技巧, 并帮助解决实际项目问题。

各章介绍的实例可以从本书的配套光盘中找到, 光盘中有典型实例讲解视频。

本书第一版由李鹏飞、徐敏义、王飞飞编写, 第二版由李鹏飞修订及编写。第二版对第一版内容进行了修订与更新, 并大幅增加了 CFD 在各个领域应用的算例。本书的编写得到上海海基盛元信息科技有限公司研发总监隋洪涛博士的帮助和支持。感谢北京大学湍流与复杂系统国家重点实验室、华中科技大学能源与动力学院、大连海事大学轮机工程学院和大连理工大学工程力学系师生在 CFD 技术上的帮助。

虽然本书的第二版经过了内容修订, 但由于篇幅和时间有限, 书中疏漏和错误在所难免。技术上, 如果读者有更多 CFD 项目模拟需求, 可以通过邮件 (pfli@hust.edu.cn) 联系本书笔者。本书编辑和投稿联系邮箱为: zhangtao@ptpress.com.cn。

作者

# 目 录

第 1 章 CFD 概述	1	1.7 本章总结	25
1.1 计算流体力学概述	1	第 2 章 网格基础与操作	26
1.1.1 计算流体力学的基本思想和本质	1	2.1 CFD 网格前处理理论准备	26
1.1.2 计算流体力学的优势	2	2.1.1 划分网格的目的	26
1.1.3 CFD 学科诞生与工程化背景	2	2.1.2 网格几何要素	26
1.1.4 计算流体力学的应用领域	2	2.1.3 网格形状	27
1.2 计算流体力学问题的解决过程	3	2.1.4 结构化与非结构化网格	27
1.2.1 前处理	3	2.1.5 壁面和近壁区网格处理原则	29
1.2.2 求解	4	2.1.6 网格质量评价标准	31
1.2.3 后处理	4	2.1.7 选择合适的网格类型	32
1.3 计算流体力学商业软件介绍	4	2.1.8 网格自适应	33
1.3.1 前处理器	4	2.2 GAMBIT 网格划分	34
1.3.2 求解器	5	2.2.1 GAMBIT 的基本功能与界面	34
1.3.3 后处理软件	10	2.2.2 GAMBIT 基本术语	37
1.4 FLUENT 的操作界面	11	2.2.3 GAMBIT 几何通用操作	37
1.4.1 启动 FLUENT 界面	11	2.2.4 GAMBIT 几何造型	40
1.4.2 FLUENT 主界面	12	2.2.5 GAMBIT 实体几何操作	49
1.5 FLUENT 的基础操作	13	2.2.6 GAMBIT 划分实体网格	53
1.5.1 启动 ANSYS FLUENT 求解器	14	2.2.7 划分体网格	57
1.5.2 读入网格文件	14	2.2.8 划分边界层网格	60
1.5.3 网格检查	15	2.2.9 GAMBIT 指定边界和域类型	62
1.5.4 尺寸检查	16	2.2.10 尺寸函数	63
1.5.5 网格光顺化	16	2.2.11 网格划分策略分析简介	65
1.5.6 显示网格	16	2.2.12 网格质量管理及网格输出	66
1.5.7 模型参数设置	17	2.3 ICEM CFD 网格划分	68
1.5.8 物性参数设置	17	2.3.1 ICEM CFD 基本功能与界面	68
1.5.9 边界条件参数设置	18	2.3.2 ICEM CFD 几何体创建与处理	72
1.5.10 求解参数设置	20	2.3.3 ICEM CFD 划分非结构网格	77
1.5.11 迭代求解	21	2.3.4 ICEM CFD 划分棱柱边界层网格	86
1.5.12 利用高阶离散格式获得精确解	21	2.3.5 ICEM CFD 划分六面体结构化网格	90
1.6 显示计算结果与分析结果数据	22	2.3.6 ICEM CFD 指定边界和域类型以及输出网格	102
1.6.1 显示速度的云图	22	第 3 章 FLUENT 基础与操作	105
1.6.2 显示温度的云图	23	3.1 FLUENT 求解, 启动 FLUENT 与 FLUENT 并行计算	105
1.6.3 显示速度矢量图	24		
1.6.4 显示出口温度的 XY 点图	25		

3.2	FLUENT 脚本文件自动运行	107	3.10.9	预混燃烧模型	140
3.3	FLUENT 文件类型	108	3.10.10	部分预混燃烧模型	141
3.4	网格检查	108	3.10.11	组分输运概率密度函数 PDF 燃烧模型	142
3.4.1	在 FLUENT 中检查网格	108	3.10.12	FLUENT 燃烧模拟可能遇到的 点火问题	142
3.4.2	报告网格统计量	109	3.11	表面反应模拟	143
3.5	计算域尺寸设置	110	3.12	设定操作工况参数	144
3.5.1	FLUENT 的计算单位系统	110	3.13	设定单元区域条件	146
3.5.2	在 FLUENT 中设置计算域 尺寸	110	3.13.1	单元区域条件的类型	146
3.6	定义湍流模型	111	3.13.2	单元区域条件设定	147
3.6.1	流体与流动的分类	111	3.14	多孔介质计算域	149
3.6.2	判断湍流的标准	112	3.15	设定边界条件	150
3.6.3	湍流模型的评价与选择	113	3.15.1	边界条件类型	150
3.6.4	壁面函数的选择	117	3.15.2	边界条件设定	151
3.6.5	在 FLUENT 中设定湍流模型	118	3.16	控制方程离散化	171
3.7	对流换热计算	121	3.16.1	离散方法	171
3.7.1	在 FLUENT 中考虑对流换热	121	3.16.2	离散格式	172
3.7.2	考虑自然对流问题的场合与 方法	122	3.16.3	离散格式的选择	173
3.8	辐射换热计算	124	3.16.4	在 FLUENT 中设置离散格式	175
3.8.1	选择辐射换热模型	124	3.17	求解方法	175
3.8.2	在 FLUENT 中设定 P1 辐射 模型	125	3.17.1	基于压力的求解器	175
3.8.3	在 FLUENT 中设定 Discrete Ordinates 辐射模型	125	3.17.2	基于密度的求解器	177
3.8.4	辐射物质属性定义	126	3.17.3	在 FLUENT 中设置求解器	177
3.9	模拟不考虑化学反应的组分传输 过程	127	3.18	设置欠松弛因子	178
3.10	化学反应流与燃烧模拟	127	3.19	设置库朗数	179
3.10.1	FLUENT 中的燃烧模型介绍	127	3.20	设置求解极限	179
3.10.2	反应模型的选择	128	3.21	求解初始化	180
3.10.3	通用有限速率模型	130	3.21.1	全局初始化	180
3.10.4	ISAT 算法	135	3.21.2	对初始值进行局部修补	181
3.10.5	导入 CHEMKIN 格式的化学 反应机理	136	3.22	求解器的使用方法	181
3.10.6	非预混燃烧模型之混合分数/PDF 模型	137	3.22.1	使用求解器的基本步骤	181
3.10.7	非预混燃烧模型之层流火焰面 模型	138	3.22.2	在 FLUENT 中设置定常状态的 计算	182
3.10.8	FLUENT 中的煤燃烧模拟计算器的 设置与使用	139	3.23	确认收敛性	182
			3.24	网格自适应	182
			3.25	UDF 的基本理论与应用	183
			3.25.1	UDF 的基本理论	183
			3.25.2	UDF 的应用	183
			3.26	FLUENT 中常见警告的出现原因和 解决方法	184



第 4 章 后处理基础与操作	186
4.1 计算后处理: FLUENT 后处理	186
4.1.1 创建点、线和面	187
4.1.2 流场显示	190
4.1.3 显示网格	191
4.1.4 显示等值线云图	191
4.1.5 显示矢量图	192
4.1.6 显示轨迹线	193
4.1.7 显示扫描面	194
4.1.8 创建动画	194
4.1.9 显示 XY 曲线	195
4.1.10 显示柱状图	195
4.1.11 FLUENT 计算报告	196
4.1.12 边界通量报告	196
4.1.13 受力报告	197
4.1.14 投影面积	198
4.1.15 表面积分	198
4.1.16 体积分	200
4.1.17 参考值设定	201
4.1.18 算例设置报告	201
4.2 Tecplot 数据处理	202
4.2.1 Tecplot 360 功能简介	202
4.2.2 Tecplot 360 文件格式	204
4.2.3 Tecplot 360 读入 FLUENT 文件	208
4.2.4 在 Tecplot 360 中绘制 XY 曲线	210
4.2.5 在 Tecplot 360 中显示等 值线云图	211
4.2.6 在 Tecplot 360 中绘制矢量图	213
4.2.7 在 Tecplot 360 中绘制流线	214
4.2.8 在 Tecplot 360 中绘制三维流场 剖面图	215
4.2.9 在 Tecplot 360 中制作动画	218
4.2.10 在 Tecplot 360 中分析 CFD 数据	221
第 5 章 网格划分案例	223
第一部分: 利用 GAMBIT 划分网格	223
5.1 网格实例一: 二维圆筒燃烧器网格 划分	223
5.1.1 创建几何实体	224
5.1.2 对实体进行网格划分	225
5.1.3 创建边界条件并输出网格	226
5.2 网格实例二: 燃气灶网格划分	227
5.2.1 创建燃气灶实体模型	228
5.2.2 对实体进行网格划分	232
5.2.3 创建实体的边界条件	234
5.2.4 输出网格	235
第二部分: 利用 ICEM CFD 划分网格	235
5.3 网格实例三: 引擎模型四面体划分	235
5.3.1 打开工程	235
5.3.2 Repair 几何实体	236
5.3.3 设置网格尺寸	237
5.3.4 初步计算并查看网格	237
5.3.5 光顺网格	238
5.3.6 基于曲率自适应的网格加密	238
5.3.7 再次创建网格	239
5.3.8 切面显示	239
5.4 网格实例四: 机翼翼身组合体棱柱形 网格划分	239
5.4.1 打开项目	239
5.4.2 划分棱柱层网格	240
5.4.3 创建机翼尾部密度区	241
5.4.4 再次计算网格并显示	242
5.4.5 光顺网格	242
5.4.6 生成六面体核心网格	242
5.5 网格实例五: 二维管道四边形网格 划分	243
5.5.1 新建工程	244
5.5.2 初始化块	244
5.5.3 分割块	244
5.5.4 删除 Blocks	245
5.5.5 关联块顶点到几何点	245
5.5.6 关联 Edge 到 Curve	246
5.5.7 显示关联	247
5.5.8 组合 Curves	247
5.5.9 完成边和线的关联	247
5.5.10 移动剩余的顶点到几何上	248
5.5.11 设置网格尺寸	248
5.5.12 生成并显示网格	249
5.5.13 网格质量检查	249
5.5.14 转化成非结构化网格	250

5.6 网格实例六：三维管道六面体结构化	5.8.11 中间块删除并计算网格	270
网格	5.8.12 网格质量检查	270
5.6.1 新建工程	5.9 网格实例九：半球方体三维六面体	
5.6.2 检查几何拓扑	结构化网格	271
5.6.3 创建 Part	5.9.1 读入工程	271
5.6.4 创建材料点并保存工程	5.9.2 初始化块	272
5.6.5 初始化块	5.9.3 建立拓扑(1)	273
5.6.6 分割块并建立拓扑结构	5.9.4 关联(1)	273
5.6.7 关联曲线	5.9.5 设置网格参数(1)	273
5.6.8 初步生成网格	5.9.6 预览网格并检查网格质量	274
5.6.9 初步网格质量评估	5.9.7 建立拓扑(2)	275
5.6.10 建立 O-grid	5.9.8 关联(2)	275
5.6.11 第二次生成网格	5.9.9 设置网格参数(2)	276
5.6.12 第二次网格质量评估	5.9.10 计算网格	276
5.6.13 网格输出	5.9.11 检查网格质量	277
5.7 网格实例七：三维弯管六面体结构化	5.9.12 局部网格参数设置	277
网格	5.10 网格实例十：托架三维六面体结构化	
5.7.1 打开项目并创建 Parts	网格	277
5.7.2 创建体并初始化块	5.10.1 创建新项目	278
5.7.3 切块和删除部分块	5.10.2 初始化块	278
5.7.4 关联	5.10.3 移动块顶点	279
5.7.5 移动顶点(1)	5.10.4 分块(1)	279
5.7.6 创建第一个 O-grid	5.10.5 关联并移动顶点	280
5.7.7 修饰块	5.10.6 创建块	280
5.7.8 移动顶点(2)	5.10.7 关联	281
5.7.9 创建第二个 O-grid	5.10.8 分块(2)	281
5.7.10 设置网格尺寸并预览网格	5.10.9 创建 O-grid	282
5.7.11 移动顶点以改善网格质量	5.10.10 设置边缘 O-grid	283
5.7.12 重新查看网格	5.10.11 计算网格	283
5.8 网格实例八：管内叶片三维六面体	5.10.12 网格质量评估	284
结构化网格	5.10.13 网格镜像	285
5.8.1 打开工程并创建 Parts	第 6 章 综合实战案例一	286
5.8.2 创建体	6.1 算例一：空调房间室内气流组织	
5.8.3 初始化块	模拟	286
5.8.4 创建关联	6.1.1 介绍	286
5.8.5 块分割	6.1.2 方法和设置	286
5.8.6 塌陷	6.1.3 前期要求	286
5.8.7 边关联	6.1.4 问题描述	287
5.8.8 设置面网格参数	6.1.5 准备	287
5.8.9 网格质量检查	6.1.6 设置和求解	287
5.8.10 创建 O-grid	6.1.7 总结	291

6.2 算例二：管内流动的模拟	291	6.6 算例六：模拟水箱的水波运动	327
6.2.1 介绍	291	6.6.1 介绍	327
6.2.2 方法和设置	291	6.6.2 方法和设置	327
6.2.3 前期要求	291	6.6.3 前期要求	327
6.2.4 问题描述	291	6.6.4 问题描述	328
6.2.5 准备	291	6.6.5 准备	328
6.2.6 设置和求解	292	6.6.6 设置和求解	328
6.2.7 总结	301	6.6.7 总结	335
6.2.8 参考文献	301	6.6.8 练习与讨论	335
6.2.9 练习与讨论	301	6.7 算例七：水平膜状沸腾	336
6.3 算例三：外掠平板的流场与换热	301	6.7.1 介绍	336
6.3.1 介绍	301	6.7.2 前期要求	336
6.3.2 方法和设置	301	6.7.3 问题描述	336
6.3.3 前期要求	302	6.7.4 设置和求解	336
6.3.4 问题描述	302	6.7.5 分析	341
6.3.5 准备	302	6.7.6 总结	342
6.3.6 设置与求解	302	6.8 算例八：机翼绕流可压缩流动的 模拟	342
6.3.7 总结	310	6.8.1 介绍	342
6.3.8 参考文献	310	6.8.2 方法和设置	343
6.3.9 练习与讨论	310	6.8.3 前期要求	343
6.4 算例四：进气歧管的流动模拟	311	6.8.4 问题描述	343
6.4.1 介绍	311	6.8.5 准备	343
6.4.2 方法和设置	311	6.8.6 设置和求解	343
6.4.3 前期要求	311	6.8.7 总结	350
6.4.4 问题描述	311	6.8.8 练习与讨论	350
6.4.5 准备	312	6.9 算例九：利用欧拉模型解决搅拌机 混合问题	350
6.4.6 设置和求解	312	6.9.1 介绍	350
6.4.7 总结	319	6.9.2 方法和设置	351
6.4.8 参考文献	319	6.9.3 问题描述	351
6.4.9 练习与讨论	319	6.9.4 设置和求解	351
6.5 算例五：渐缩渐扩管的无粘与可压缩 流动模拟	319	6.10 算例十：利用多相流混合模型和欧拉模型 求解 T 形管流动	360
6.5.1 介绍	319	6.10.1 介绍	360
6.5.2 方法和设置	319	6.10.2 方法和设置	360
6.5.3 前期准备	319	6.10.3 问题描述	361
6.5.4 问题描述	320	6.10.4 设置和求解	361
6.5.5 准备	320	6.11 算例十一：对固体燃料电池进行流体动 力学模拟	368
6.5.6 设置和求解	320	6.11.1 介绍	368
6.5.7 总结	327		
6.5.8 参考文献	327		
6.5.9 练习与讨论	327		

6.11.2 方法和设置	368	7.6.1 介绍	407
6.11.3 问题描述	368	7.6.2 方法和设置	407
6.11.4 设置与求解	368	7.6.3 前期要求	407
第 7 章 综合实战案例二	378	7.6.4 问题描述	408
7.1 算例十二: 使用喷尿素法并利用选择性非催化还原法 (SNCR) 进行 $\text{NO}_x$ 模拟	378	7.6.5 准备	408
7.1.1 介绍	378	7.6.6 设置和求解	408
7.1.2 方法和设置	378	7.6.7 总结	423
7.1.3 前期要求	378	7.6.8 练习和讨论	424
7.1.4 问题描述	379	7.7 算例十七: 使用 EBU (Eddy Break Up, 涡破碎) 模型模拟煤粉燃烧	424
7.1.5 准备	379	7.7.1 介绍	424
7.1.6 设置和求解	379	7.7.2 技巧和设置	424
7.2 总结	384	7.7.3 前期要求	424
7.3 算例十三: 使用混合物模型模拟质量和热量交换	384	7.7.4 问题描述	424
7.3.1 介绍	384	7.7.5 准备	425
7.3.2 前期要求	384	7.7.6 设置和求解	425
7.3.3 问题描述	384	7.7.7 结果	436
7.3.4 设置和求解	385	7.8 算例十八: 多步焦炭反应模拟	436
7.4 算例十四: 使用用户自定义标量模拟电加热 (欧姆加热)	390	7.8.1 介绍	436
7.4.1 介绍	390	7.8.2 技巧和设置	436
7.4.2 方法和设置	390	7.8.3 前期要求	436
7.4.3 前期要求	390	7.8.4 问题描述	436
7.4.4 问题描述	390	7.8.5 准备	437
7.4.5 准备	391	7.8.6 设置和求解	437
7.4.6 设置和求解	391	7.8.7 结果	444
7.4.7 总结	399	7.8.8 总结	444
7.4.8 练习与讨论	399	7.9 算例十九: 利用 EDC 燃烧模型模拟扩散火焰	445
7.5 算例十五: 顶盖驱动的腔体流动	400	7.9.1 介绍	445
7.5.1 介绍	400	7.9.2 前期要求	445
7.5.2 方法和设置	400	7.9.3 问题描述	445
7.5.3 前期要求	400	7.9.4 准备	445
7.5.4 问题描述	400	7.9.5 设置和求解	445
7.5.5 准备	400	7.9.6 总结	453
7.5.6 设置和求解	400	7.10 算例二十: 扩散射流火焰的 PDF 输运方程模型模拟	454
7.5.7 总结	406	7.10.1 介绍	454
7.5.8 参考文献	407	7.10.2 技巧和设置	454
7.5.9 练习与讨论	407	7.10.3 实验概况	454
7.6 算例十六: 引擎流场模拟	407	7.10.4 前期要求	454
		7.10.5 问题描述	454

7.10.6 准备	455	8.5.1 介绍	498
7.10.7 设置和求解	455	8.5.2 问题描述	498
7.10.8 总结	461	8.5.3 准备	498
7.11 算例二十一：模拟圆形通道的表面 反应	461	8.5.4 设置和求解	498
7.11.1 介绍	461	8.5.5 总结	506
7.11.2 准备	461	8.5.6 参考文献	506
7.11.3 设置和求解	461	<b>第 9 章 综合实战案例四</b>	<b>507</b>
<b>第 8 章 综合实战案例三</b>	<b>465</b>	9.1 算例二十七：求解流固耦合换热 问题	507
8.1 算例二十二：模拟二维流化床的均匀 流化作用	465	9.1.1 介绍	507
8.1.1 介绍	465	9.1.2 问题描述	507
8.1.2 前期要求	465	9.1.3 准备工作	508
8.1.3 问题描述	465	9.1.4 设置和求解	508
8.1.4 设置和求解	466	9.2 总结	519
8.2 算例二十三：液体燃料燃烧	469	9.3 算例二十八：使用太阳光辐射加载模型模 拟室内通风过程	519
8.2.1 介绍	469	9.3.1 介绍	519
8.2.2 技巧和设置	470	9.3.2 问题描述	520
8.2.3 前期准备	470	9.3.3 准备工作	520
8.2.4 问题描述	470	9.3.4 设置与求解	520
8.2.5 准备	470	9.4 附录	527
8.2.6 设置和求解	471	9.5 算例二十九：利用 FLUENT 模拟核状沸 腾换热过程	527
8.2.7 总结	478	9.5.1 介绍	527
8.3 算例二十四：偏心环形管道的非牛顿 流体流动模拟	478	9.5.2 问题描述	528
8.3.1 介绍	478	9.5.3 准备工作	528
8.3.2 技巧和设置	479	9.5.4 步骤和求解：单相流动	528
8.3.3 前期要求	479	9.5.5 求解设置：沸腾流	532
8.3.4 问题描述	479	9.6 算例三十：使用 FLUENT 的 VOF 多相 流模型模拟大坝泄洪过程	541
8.3.5 准备	479	9.6.1 问题描述	541
8.3.6 设置和求解	479	9.6.2 准备工作	542
8.3.7 总结	489	9.6.3 设置与求解	542
8.3.8 参考文献	489	9.7 总结	546
8.3.9 练习与讨论	489	9.8 算例三十一：模拟离心泵的空化 现象	546
8.4 算例二十五：离心式鼓风机模拟	489	9.8.1 问题描述	546
8.4.1 介绍	489	9.8.2 准备工作	547
8.4.2 问题描述	490	9.8.3 设置与求解	547
8.4.3 准备	490	9.9 总结	551
8.4.4 设置和求解	490	9.10 算例三十二：模拟喷雾蒸发过程	552
8.4.5 总结	498		
8.5 算例二十六：圆柱绕流模拟	498		

9.10.1 准备工作	552	9.20.1 网格	591
9.10.2 问题描述	552	9.20.2 前期准备	592
9.10.3 设置和求解	552	9.20.3 问题描述	592
准备工作	552	9.20.4 准备工作	592
9.11 总结	568	9.20.5 设置和求解	592
9.12 进一步改进	568	9.21 总结	601
9.13 算例三十三: 使用非预混燃烧模型模拟 燃烧问题	568	9.22 算例三十六: 壁面温度正弦状变化的 UDF 设置及模拟	601
9.13.1 前提条件	568	9.22.1 问题描述	601
9.13.2 问题描述	569	9.22.2 准备工作	601
9.13.3 设置和求解	569	9.22.3 设置和求解	602
9.14 总结	581	9.23 结果	603
9.15 参考文献	581	9.24 总结	604
9.16 进一步改进	581	9.25 算例三十七: 随温度而变化之粘性的 UDF 设置及模拟	604
9.17 算例三十四: 使用有限速率化学反应 模型分析锥形室内的预混化学 反应流	581	9.25.1 问题描述	604
9.17.1 问题描述	582	9.25.2 准备工作	604
9.17.2 设置和求解	582	9.25.3 设置和求解	604
9.17.3 结果	590	9.26 结果	607
9.18 总结	590	9.27 总结	607
9.19 参考文献	591	参考文献	608
9.20 算例三十五: 选择性催化还原 (SCR) 的脱硝过程模拟	591		

# 第 1 章

## CFD 概述

### 1.1 计算流体力学概述

#### 1.1.1 计算流体力学的基本思想和本质

计算流体力学 (Computational Fluid Dynamics, CFD) 是通过计算机进行数值模拟, 分析流体流动和传热等物理现象的技术。通过 CFD 技术, 可利用计算机分析并显示流场中的现象, 从而能在较短的时间内预测流场。CFD 模拟能帮助理解流体力学问题, 为实验提供指导, 为设计提供参考, 从而节省人力、物力和时间。

根据流体力学知识, 自然界不涉及化学反应的单相流动现象都可以用两个方程来描述: 连续性方程 (即质量守恒方程) 和 Navier-Stokes 方程 (即动量守恒方程)。理论上, 如果已知某一时刻流场的参数 (如速度分布), 将之设为初值, 然后代入这两个方程中直接求解, 即可求得任一时刻、任一地点流场的参数。然而, 基于 Navier-Stokes 方程本质的非线性以及边界条件处理的困难, 除少数简单的问题外, 解析和数值求解 Navier-Stokes 方程都是极具挑战性的任务。证明 Navier-Stokes 方程解的存在性与光滑性仍是美国克雷数学研究所 (Clay Mathematics Institute) 悬赏 100 万美元征解的世纪难题。

实际上对于湍流, 如果直接求解三维非稳态的控制方程, 对计算机的内存和 CPU 要求非常高, 目前还无法应用于工程计算。工程中, 为降低计算过程对内存和 CPU 的要求, 一般需将非稳态的 Navier-Stokes 方程对时间做平均处理, 期望得到对时间做平均化的流场。但 Navier-Stokes 方程对时间做平均处理后, 控制方程组并不封闭 (即方程组的未知数大于方程数), 因此需要人为构造额外的方程, 使方程组封闭, 这个构造额外方程的过程就是建立湍流封闭模式, 即建立湍流模型的过程。这样处理后的时均化的控制方程, 采用目前的计算机求解, 求解速度已可以接受, 可应用于工程问题的计算。这就是当前商业软件 (如 FLUENT、CFX 和 STAR-CD 等) 广为采用的 CFD 处理方法。

## 1.1.2 计算流体力学的优势

计算流体力学是流体力学的一个分支。当前,研究流体力学问题有 3 类方法,即实验分析、理论分析和 CFD 模拟。

实验测量的结果较为真实可信,它是研究流体力学问题的基础。CFD 新算法的提出和理论分析的结果都需要具体实验的验证。目前,实验测量仍是研究流体力学问题的重要方法。然而,实验测量耗时长、成本高,而且往往由于测量方法的限制,测量设备难免会对真实流场造成干扰,从而使从实验设备(如风洞)中获得某些细部数据较为困难。

理论分析的结果一般具有普遍性,从而为实验设计和新 CFD 算法提供了理论基础。目前,流体力学问题,尤其是湍流问题,机理方面的进展十分缓慢。但每一次湍流新理论的提出都伴随着湍流研究的新进展,例如,普朗特的边界层理论,克罗格洛夫(kolmogorov)的-5/3 理论等。但是,要对湍流这个复杂的随机流动过程提出新的机理方面的解释,也十分困难。

CFD 克服了实验测量和理论分析的某些缺点,且具有优势,如 CFD 方法成本低,耗时短,获得流场中的数据比较容易。在计算机上进行一次 CFD 分析,就好比在计算机上进行了一次虚拟的流体力学实验。如果采用的 CFD 方法合理,CFD 分析就可在省时又省力的情况下对流动过程进行准确预测。然而,目前 CFD 方法还没有标准,即对某种流动现象采用什么模型、什么网格、什么方法处理,还没有形成标准化的处理方法(只有推荐方法)。因此,一方面应该把 CFD 看成一种研究手段、一个工具,将 CFD 技术与实验测量、理论分析结合起来,发挥分析人员的主观能动性,才可能比较顺利地解决问题;另一方面,CFD 分析人员应该加强 CFD 基本理论的学习和应用经验的积累,提高职业水平,合理地使用好这个强大的工具。

总而言之,流体力学的 3 类分析方法(理论分析、实验测量和 CFD 模拟)各有优势,不能武断地认为 CFD 未来的发展会取代实验和理论分析,CFD 虽然克服了实验和理论分析方面的某些劣势,但其也只是研究流动问题的手段之一,三者应该相辅相成、相互补充,同为研究流动问题服务。

## 1.1.3 CFD 学科诞生与工程化背景

计算流体力学近 30 年来得到了飞速发展,其与计算物理、计算化学、计算力学一样,都是计算科学领域的学科。随着近几十年计算机技术的进步,计算机处理速度有了飞速的提高,从而使计算机对工程现象进行数值模拟分析逐渐成为可能。流体力学工作者也注意到了计算条件的飞速发展,并开发和开发了适合当前计算机处理速度的湍流模型和计算方法。目前,学术界和工业界都已公认 CFD 是解决流动和传热相关问题强有力的工具。因此,CFD 学科的发展与计算机处理速度的进步是密不可分的。正是计算速度的大幅提升,刺激了 CFD 技术的快速发展,也由于 CFD 数值处理方法的进步,使利用超级计算机、工作站等计算设备求解实际工程问题成为了可能。

## 1.1.4 计算流体力学的应用领域

流体动力学应用如今已遍及航空航天、船舶、能源、石油、化工、机械、制造、生物、水处理、火灾安全、冶金、环境等众多领域。从高层建筑结构通风到微电机散热,从发动机、风扇、涡轮、燃烧室等机械到整机外流气动分析,可以认为只要有流动存在的场合,都可以利用计算流体力学进行分析。具体的工程应用场合包括但不限于以下行业。



- 汽车与交通行业：分析行驶中的汽车外流场、两车相撞过程、地铁进站过程、车用空调效果、汽车内燃机燃烧效果、汽车尾气处理设备化学反应模拟等。
- 航空航天：飞机外流场、机翼设计、导弹发射过程、航空发动机燃烧效果、飞行器内空调效果等。
- 土木与建筑：建筑群风场、计算风工程、风荷载对建筑的影响、室内气流组织、排烟、隧道通风、建筑自然通风效果等。
- 热科学与热技术：电子仪器的散热分析、传热与流动过程、工业换热器、导热过程、辐射换热过程等。
- 热能工程、化工及冶金行业：燃烧过程的分析、加热炉与锅炉的模拟、工业窑炉的工作过程、钢水铸造过程模拟等。
- 流体机械：水轮机、风机与泵等流体机械内部流动分析。
- 环境工程：河流中污染物的扩散、工厂排放污染物在气体中的扩散、污水处理工厂设计、旋转搅拌器模拟等。
- 舰船领域：舰船推进器非稳态流动分析等。
- 生物技术行业：血管内血液流动过程模拟、旋转生物反应器内多相流的模拟等。

这些问题过去主要靠经验与实验获得设计参考，而今可采用 CFD 技术提供更快捷和全面的解决方案，而且 CFD 技术的应用领域还在迅速扩展，可以认为只要有流动、传热、化学反应、多相流、相变存在的过程，都可以尝试利用 CFD 进行模拟分析。

## 1.2 计算流体力学问题的解决过程

采用 CFD 解决某一实际问题分为 3 步：前处理、求解、后处理。下面对这 3 个过程进行具体说明。

### 1.2.1 前处理

前处理的目的是将具体问题转化为求解器可以接受的形式。这里，求解器可以接受的形式就是计算域和网格，即前处理需要建立计算域并划分网格。这两者虽然只是求解过程的准备工作，但都很耗时，且对求解结果的精确度起决定性影响。

计算域，即 CFD 分析的区域，一般为流动区域。对计算域进行合理处理可以极大地减小计算量，如果是具有对称性的流动，可以设置一个含对称面（或对称轴）的计算域处理。又如，如果只关心流场的某一细部，通过设置合理边界条件和该细部的计算域，可只对该细部的计算域进行 CFD 分析，无须求解整个流场。

网格，即对计算域划分的单元。网格的数目和质量对求解过程有重要的影响。网格的数目应该够多，以确保能合理描述流动过程；但网格的数目不应过分地多，以免浪费计算资源。在网格的质量方面，应该尽量使用结构化网格。对于二维流动的模拟，应尽量使用四边形网格；对于三维流动的模拟，应尽量使用六面体网格，以提高求解精度。网格划分通常要占到 CFD 总体模型与参数设置时间的 40% 以上。对实际模型划分高质量的结构化网格，需要进行专门的网格划分训练和经验积累。网格划分技术并不神秘，只要经过训练，人人都可以成为复杂模型结构化网格划分的高手。

对计算域划分好网格后，可定义边界条件。边界条件定义好后即完成前处理，此时可以输出网格文件给求解器计算了。