

# 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 编

源于实践 成就行囊

# CFD

上海软件行业协会 秘书长 杨根兴  
江苏省软件行业协会 副会长 徐雷  
海基盛元信息科技有限公司 技术总监 隋洪涛 博士

### 鼎力推荐

▶ **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),详细讲解ICEM CFD的应用

▶ **26**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),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)

▶ **260**分钟视频讲解及各算例源文件,帮助读者尽快融入实战角色(见光盘)

 **人民邮电出版社**  
POSTS & TELECOM PRESS

# 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 编



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, 王飞飞编. -- 北京 :  
人民邮电出版社, 2011.10  
ISBN 978-7-115-26080-2

I. ①精… II. ①李… ②徐… ③王… III. ①计算流  
体力学—应用软件 IV. ①035-39

中国版本图书馆CIP数据核字(2011)第152772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。全书共分 8 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 CFD 前处理概念和 GAMBIT、ICEM CFD 的使用方法。第 3 章介绍 CFD 求解理论和 FLUENT 的使用方法。第 4 章介绍 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 8 章, 分别是求解综合实战案例, 通过 26 个典型算例, 介绍 FLUENT 在多个领域的应用。

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。

本书可作为航空航天、船舶、能源、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。

## 精通 CFD 工程仿真与案例实战

### ——FLUENT GAMBIT ICEM CFD Tecplot

- 
- ◆ 编 李鹏飞 徐敏义 王飞飞  
责任编辑 张 涛
  - ◆ 人民邮电出版社出版发行 北京市崇文区夕照寺街 14 号  
邮编 100061 电子邮件 315@ptpress.com.cn  
网址 <http://www.ptpress.com.cn>  
北京鑫正大印刷有限公司印刷
  - ◆ 开本: 787×1092 1/16  
印张: 36.25  
字数: 960 千字 2011 年 10 月第 1 版  
印数: 1-3 000 册 2011 年 10 月北京第 1 次印刷

---

ISBN 978-7-115-26080-2

定价: 88.00 元 (附光盘)

读者服务热线: (010)67132692 印装质量热线: (010)67129223  
反盗版热线: (010)67171154

## 推荐序

我在 FLUENT 中国工作时就认识了李鹏飞博士，合作至今已近四年。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国电集团、东方电气、中石油、中海油、国家电网和宝钢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

# 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、燃烧等物理现象的技术。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 8 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 26 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, 将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。

本书由李鹏飞、徐敏义、王飞飞编写。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、华中科技大学环境学院和大连理工大学工程力学系老师和研究生在 CFD 技术上的帮助, 在此表示感谢。本书的编写工作也得到家人的关心和支持, 本书也献给亲爱的你们!

由于篇幅和时间有限, 疏漏和错误在所难免, 如果读者有更多项目模拟难题和模拟需求, 可以通过邮件 (pkucfd@gmail.com) 联系本书作者, 我们将尽力予以答复。编辑联系邮箱为: zhangtao@ptpress.com.cn。

编者

于北京大学畅春园

# 目 录

## 第1章 CFD概述..... 1

- 1.1 计算流体力学概述..... 1
  - 1.1.1 计算流体力学的基本思想和本质.....1
  - 1.1.2 计算流体力学的优势.....2
  - 1.1.3 CFD 学科诞生与工程化背景.....2
  - 1.1.4 计算流体力学的应用领域.....3
- 1.2 计算流体力学问题的解决过程..... 3
  - 1.2.1 前处理.....3
  - 1.2.2 求解.....4
  - 1.2.3 后处理.....4
- 1.3 计算流体力学商业软件介绍..... 4
  - 1.3.1 前处理器.....4
  - 1.3.2 求解器.....5
  - 1.3.3 后处理软件.....10
- 1.4 FLUENT 的操作界面..... 12
  - 1.4.1 启动 FLUENT 界面.....12
  - 1.4.2 FLUENT 主界面.....12
- 1.5 FLUENT 的基础操作..... 14
  - 1.5.1 启动 ANSYS FLUENT 求解器.....15
  - 1.5.2 读入网格文件.....15
  - 1.5.3 网格检查.....16
  - 1.5.4 尺寸检查.....17
  - 1.5.5 网格光顺化.....17
  - 1.5.6 显示网格.....18
  - 1.5.7 模型参数设置.....18
  - 1.5.8 物性参数设置.....19
  - 1.5.9 边界条件参数设置.....19
  - 1.5.10 求解参数设置.....22
  - 1.5.11 迭代求解.....23
  - 1.5.12 利用高阶离散格式获得精确解.....23
- 1.6 显示计算结果与分析结果数据..... 24
  - 1.6.1 显示速度的云图.....24
  - 1.6.2 显示温度的云图.....25
  - 1.6.3 显示速度矢量图.....26
  - 1.6.4 显示出口温度的 XY 点图.....27
- 1.7 本章总结..... 28

## 第2章 网格基础与操作..... 29

- 2.1 CFD 网格前处理理论准备..... 29
  - 2.1.1 划分网格的目的.....29

- 2.1.2 网格几何要素..... 29
- 2.1.3 网格形状..... 29
- 2.1.4 结构化与非结构化网格..... 30
- 2.1.5 壁面和近壁区网格处理原则..... 32
- 2.1.6 网格质量评价标准..... 34
- 2.1.7 选择合适的网格类型..... 35
- 2.1.8 网格自适应..... 36
- 2.2 GAMBIT 网格划分..... 37
  - 2.2.1 GAMBIT 的基本功能与界面..... 37
  - 2.2.2 GAMBIT 基本术语..... 40
  - 2.2.3 GAMBIT 几何通用操作..... 41
  - 2.2.4 GAMBIT 几何造型..... 43
  - 2.2.5 GAMBIT 实体几何操作..... 53
  - 2.2.6 GAMBIT 划分实体网格..... 57
  - 2.2.7 划分体网格..... 61
  - 2.2.8 划分边界层网格..... 66
  - 2.2.9 GAMBIT 指定边界和域类型..... 67
  - 2.2.10 尺寸函数..... 68
  - 2.2.11 网格划分策略分析简介..... 70
  - 2.2.12 网格质量管理及网格输出..... 72
- 2.3 ICEM CFD 网格划分..... 74
  - 2.3.1 ICEM CFD 基本功能与界面..... 74
  - 2.3.2 ICEM CFD 几何体创建与处理..... 78
  - 2.3.3 ICEM CFD 划分非结构网格..... 83
  - 2.3.4 ICEM CFD 划分棱柱边界层网格..... 94
  - 2.3.5 ICEM CFD 划分六面体结构化网格..... 99
  - 2.3.6 ICEM CFD 指定边界和域类型以及输出网格..... 111

## 第3章 FLUENT基础与操作..... 114

- 3.1 FLUENT 求解, 启动 FLUENT 与 FLUENT 并行计算..... 114
- 3.2 FLUENT 脚本文件自动运行..... 116
- 3.3 FLUENT 文件类型..... 117
- 3.4 网格检查..... 117
  - 3.4.1 在 FLUENT 中检查网格..... 117
  - 3.4.2 报告网格统计量..... 119
- 3.5 计算域尺寸设置..... 119
  - 3.5.1 FLUENT 的计算单位系统..... 119
  - 3.5.2 在 FLUENT 中设置计算域尺寸.....120

3.6 定义湍流模型	120	3.15.1 边界条件类型	163
3.6.1 流体与流动的分类	120	3.15.2 边界条件设定	163
3.6.2 判断湍流的标准	122	3.16 控制方程离散化	186
3.6.3 湍流模型的评价与选择	122	3.16.1 离散方法	186
3.6.4 壁面函数的选择	127	3.16.2 离散格式	187
3.6.5 在 ANSYS FLUENT 中 设定湍流模型	127	3.16.3 离散格式的选择	188
3.7 对流换热计算	131	3.16.4 在 FLUENT 中设置离散格式	189
3.7.1 在 FLUENT 中考虑对流换热	131	3.17 求解方法	190
3.7.2 考虑自然对流问题的场合与 方法	132	3.17.1 基于压力的求解器	190
3.8 辐射换热计算	134	3.17.2 基于密度的求解器	192
3.8.1 选择辐射换热模型	134	3.17.3 在 FLUENT 中设置求解器	192
3.8.2 在 ANSYS FLUENT 中设定 P1 辐射模型	135	3.18 设置亚松弛因子	193
3.8.3 在 ANSYS FLUENT 中设定 Discrete Ordinates 辐射模型	136	3.19 设置库朗数	194
3.8.4 辐射物质属性定义	137	3.20 设置求解极限	194
3.9 模拟不考虑化学反应的组分 传输过程	137	3.21 求解初始化	195
3.10 化学反应流与燃烧模拟	138	3.21.1 全局初始化	195
3.10.1 FLUENT 中的燃烧模型 介绍	138	3.21.2 对初始值进行局部修补	196
3.10.2 反应模型的选择	139	3.22 求解器的使用方法	196
3.10.3 通用有限速率模型	141	3.22.1 使用求解器的基本步骤	196
3.10.4 ISAT 算法	146	3.22.2 在 FLUENT 中设置定常 状态的计算	197
3.10.5 导入 CHEMKIN 格式的 化学反应机理	147	3.23 确认收敛性	197
3.10.6 非预混燃烧模型之混合 分数/PDF 模型	148	3.24 网格自适应	198
3.10.7 非预混燃烧模型之层流 火焰面模型	148	3.25 UDF 的基本理论与应用	198
3.10.8 FLUENT 中的煤燃烧模拟 计算器的设置与使用	150	3.25.1 UDF 的基本理论	198
3.10.9 预混燃烧模型	151	3.25.2 UDF 的应用	199
3.10.10 部分预混燃烧模型	152	3.26 FLUENT 中常见警告的 出现原因和解决方法	199
3.10.11 组分概率密度运输燃烧 模型	153	<b>第4章 后处理基础与操作</b>	<b>202</b>
3.10.12 FLUENT 燃烧模拟可能 遇到的点火问题	154	4.1 计算后处理: FLUENT 后处理	202
3.11 表面反应模拟	155	4.1.1 创建点、线和面	202
3.12 设定操作工况参数	156	4.1.2 流场显示	206
3.13 设定单元区域条件	158	4.1.3 显示网格	207
3.13.1 单元区域条件的类型	158	4.1.4 显示等值线云图	207
3.13.2 单元区域条件设定	159	4.1.5 显示矢量图	209
3.14 多孔介质计算域	161	4.1.6 显示轨迹线	210
3.15 设定边界条件	162	4.1.7 显示扫描面	210
		4.1.8 创建动画	211
		4.1.9 显示 XY 曲线	212
		4.1.10 显示柱状图	212
		4.1.11 FLUENT 计算报告	213
		4.1.12 边界通量报告	213
		4.1.13 受力报告	214
		4.1.14 投影面积	215
		4.1.15 表面积分	215
		4.1.16 体积分	217

4.1.17	参考值设定	218	5.4.5	光顺网格	263
4.1.18	算例设置报告	219	5.4.6	生成六面体核心网格	264
4.2	Tecplot 数据处理	219	5.5	网格实例五：二维管道四边形 网格划分	265
4.2.1	Tecplot 360 功能简介	219	5.5.1	新建工程	265
4.2.2	Tecplot 360 文件格式	222	5.5.2	初始化块	266
4.2.3	Tecplot 360 读入 FLUENT 文件	226	5.5.3	分割块	266
4.2.4	在 Tecplot 360 中绘制 XY 曲线	228	5.5.4	删除 Blocks	267
4.2.5	在 Tecplot 360 中显示等值线 云图	229	5.5.5	关联块顶点到几何点	267
4.2.6	在 Tecplot 360 中绘制矢量图	231	5.5.6	关联 Edge 到 Curve	268
4.2.7	在 Tecplot 360 中绘制流线	232	5.5.7	显示关联	269
4.2.8	在 Tecplot 360 中绘制三维流场 剖面图	233	5.5.8	组合 Curves	269
4.2.9	在 Tecplot 360 中制作动画	237	5.5.9	完成边和线的关联	270
4.2.10	在 Tecplot 360 中分析 CFD 数据	240	5.5.10	移动剩余的顶点到几何上	270
			5.5.11	设置网格尺寸	271
			5.5.12	计算并显示网格	271
			5.5.13	网格质量检查	272
			5.5.14	转化成非结构化网格	272
<b>第5章</b>	<b>利用GAMBIT划分网格</b>	<b>242</b>	5.6	网格实例六：三维管道六面体 结构化网格	273
5.1	网格实例一：二维圆筒燃烧器 网格划分	242	5.6.1	新建工程	273
5.1.1	创建几何实体	243	5.6.2	检查几何拓扑	273
5.1.2	对实体进行网格划分	244	5.6.3	创建 Part	274
5.1.3	创建边界条件并输出网格	245	5.6.4	创建材料点并保存工程	274
5.2	网格实例二：燃气灶网格划分	247	5.6.5	初始化块	275
5.2.1	创建燃气灶实体模型	247	5.6.6	分割块并建立拓扑结构	275
5.2.2	对实体进行网格划分	252	5.6.7	关联曲线	276
5.2.3	创建实体的边界条件	255	5.6.8	初步计算网格	278
5.2.4	输出网格	255	5.6.9	初步网格质量评估	278
5.3	网格实例三：引擎模型四面体 划分	256	5.6.10	建立 O-grid	279
5.3.1	打开工程	256	5.6.11	第二次计算网格	279
5.3.2	Repair 几何实体	257	5.6.12	第二次网格质量评估	280
5.3.3	设置网格尺寸	257	5.6.13	网格输出	280
5.3.4	初步计算并查看网格	258	5.7	网格实例七：三维弯管六面体 结构化网格	280
5.3.5	光顺网格	259	5.7.1	打开项目并创建 Parts	281
5.3.6	基于曲率自适应的网格 加密	260	5.7.2	创建体并初始化块	282
5.3.7	再次创建网格	260	5.7.3	切块和删除部分块	282
5.3.8	切面显示	260	5.7.4	关联	283
5.4	网格实例四：机翼翼身组合 体棱柱形网格划分	260	5.7.5	移动顶点(1)	283
5.4.1	打开项目	261	5.7.6	创建第一个 O-grid	284
5.4.2	划分棱柱层网格	261	5.7.7	修饰块	285
5.4.3	创建机翼尾部密度区	262	5.7.8	移动顶点(2)	286
5.4.4	再次计算网格并显示	263	5.7.9	创建第二个 O-grid	286
			5.7.10	设置网格尺寸并预览网格	287
			5.7.11	移动顶点以改善网格质量	288
			5.7.12	重新查看网格	289



5.8	网格实例八：管内叶片三维	6.1.1	介绍	312
	六面体结构化网格	6.1.2	方法和设置	312
5.8.1	打开工程并创建 Parts	6.1.3	前期要求	312
5.8.2	创建体	6.1.4	问题描述	312
5.8.3	初始化块	6.1.5	准备	313
5.8.4	创建关联	6.1.6	设置和求解	313
5.8.5	块分割	6.1.7	总结	317
5.8.6	塌陷	6.2	算例二：管内流动的模拟	317
5.8.7	边关联	6.2.1	介绍	317
5.8.8	设置面网格参数	6.2.2	方法和设置	317
5.8.9	网格质量检查	6.2.3	前期要求	318
5.8.10	创建 O-grid	6.2.4	问题描述	318
5.8.11	中间块删除并计算网格	6.2.5	准备	318
5.8.12	网格质量检查	6.2.6	设置和求解	318
5.9	网格实例九：半球方体三维	6.2.7	总结	328
	六面体结构化网格	6.2.8	参考文献	328
5.9.1	读入工程	6.2.9	练习与讨论	329
5.9.2	初始化块	6.3	算例三：外掠平板的	
5.9.3	建立拓扑(1)		流场与换热	329
5.9.4	关联(1)	6.3.1	介绍	329
5.9.5	设置网格参数(1)	6.3.2	方法和设置	329
5.9.6	预览网格并检查网格质量	6.3.3	前期要求	329
5.9.7	建立拓扑(2)	6.3.4	问题描述	329
5.9.8	关联(2)	6.3.5	准备	330
5.9.9	设置网格参数(2)	6.3.6	设置与求解	330
5.9.10	计算网格	6.3.7	总结	339
5.9.11	检查网格质量	6.3.8	参考文献	339
5.9.12	局部网格参数设置	6.3.9	练习与讨论	340
5.10	网格实例十：托架三维	6.4	算例四：进气歧管的流动模拟	340
	六面体结构化网格	6.4.1	介绍	340
5.10.1	创建新项目	6.4.2	方法和设置	340
5.10.2	初始化块	6.4.3	前期要求	340
5.10.3	移动块顶点	6.4.4	问题描述	340
5.10.4	分块(1)	6.4.5	准备	341
5.10.5	关联并移动顶点	6.4.6	设置和求解	341
5.10.6	创建块	6.4.7	总结	349
5.10.7	关联	6.4.8	参考文献	349
5.10.8	分块(2)	6.4.9	练习与讨论	349
5.10.9	创建 O-grid	6.5	算例五：渐缩渐扩管的	
5.10.10	设置边缘 O-grid		无粘与可压缩流动模拟	349
5.10.11	计算网格	6.5.1	介绍	349
5.10.12	网格质量评估	6.5.2	方法和设置	349
5.10.13	网格镜像	6.5.3	前期准备	350
		6.5.4	问题描述	350
		6.5.5	准备	350
		6.5.6	设置和求解	350
		6.5.7	总结	357
<b>第6章</b>	<b>综合实战案例一</b>			<b>312</b>
6.1	算例一：空调房间室内气流			
	组织模拟			312

6.5.8	参考文献	358	<b>第7章 综合实战案例二</b>	<b>417</b>
6.5.9	练习与讨论	358	7.1	算例十二：使用喷尿素法并 利用选择性非催化还原法 进行 $\text{NO}_x$ 模拟
6.6	算例六：模拟水箱的水波运动	358		417
6.6.1	介绍	358	7.1.1	介绍
6.6.2	方法和设置	358	7.1.2	方法和设置
6.6.3	前期要求	358	7.1.3	前期要求
6.6.4	问题描述	358	7.1.4	问题描述
6.6.5	准备	359	7.1.5	准备
6.6.6	设置和求解	359	7.1.6	设置和求解
6.6.7	总结	367	7.2	总结
6.6.8	练习与讨论	367	7.3	算例十三：使用混合物模型 模拟质量和热量交换
6.7	算例七：水平膜状沸腾	367		424
6.7.1	介绍	367	7.3.1	介绍
6.7.2	前期要求	367	7.3.2	前期要求
6.7.3	问题描述	368	7.3.3	问题描述
6.7.4	设置和求解	368	7.3.4	设置和求解
6.7.5	分析	374	7.4	算例十四：使用用户自定义 标量和用户自定义内存模拟 电加热（欧姆加热）
6.7.6	总结	374		430
6.8	算例八：机翼绕流可压缩 流动的模拟	375	7.4.1	介绍
6.8.1	介绍	375	7.4.2	方法和设置
6.8.2	方法和设置	375	7.4.3	前期要求
6.8.3	前期要求	375	7.4.4	问题描述
6.8.4	问题描述	375	7.4.5	准备
6.8.5	准备	376	7.4.6	设置和求解
6.8.6	设置和求解	376	7.4.7	总结
6.8.7	总结	383	7.4.8	练习与讨论
6.8.8	练习与讨论	383	7.5	算例十五：顶盖驱动的腔体 流动
6.9	算例九：利用欧拉模型解决 搅拌器混合问题	384		441
6.9.1	介绍	384	7.5.1	介绍
6.9.2	方法和设置	384	7.5.2	方法和设置
6.9.3	问题描述	384	7.5.3	前期要求
6.9.4	设置和求解	385	7.5.4	问题描述
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	396	7.5.5	准备
6.10.1	介绍	396	7.5.6	设置和求解
6.10.2	方法和设置	396	7.5.7	总结
6.10.3	问题描述	396	7.5.8	参考文献
6.10.4	设置和求解	396	7.5.9	练习与讨论
6.11	算例十一：对固体燃料电池 进行流体动力学模拟	404	7.6	算例十六：引擎流场模拟
6.11.1	介绍	404		450
6.11.2	方法和设置	405	7.6.1	介绍
6.11.3	问题描述	405	7.6.2	方法和设置
6.11.4	设置与求解	405	7.6.3	前期要求
			7.6.4	问题描述
			7.6.5	准备
			7.6.6	设置和求解

- 7.6.7 总结 .....468
- 7.6.8 练习和讨论 .....469
- 7.7 算例十七：使用 EBU  
(Eddy Break Up, 涡破碎)  
模型模拟煤粉燃烧..... 469
  - 7.7.1 介绍 .....469
  - 7.7.2 技巧和设置 .....469
  - 7.7.3 前期要求 .....469
  - 7.7.4 问题描述 .....469
  - 7.7.5 准备 .....470
  - 7.7.6 设置和求解 .....470
  - 7.7.7 结果 .....483
- 7.8 算例十八：多步焦炭反应模拟.....483
  - 7.8.1 介绍 .....483
  - 7.8.2 技巧和设置 .....483
  - 7.8.3 前期要求 .....483
  - 7.8.4 问题描述 .....484
  - 7.8.5 准备 .....484
  - 7.8.6 设置和求解 .....484
  - 7.8.7 结果 .....493
  - 7.8.8 总结 .....493
- 7.9 算例十九：利用 EDC 燃烧  
模型模拟扩散火焰..... 493
  - 7.9.1 介绍 .....493
  - 7.9.2 前期要求 .....494
  - 7.9.3 问题描述 .....494
  - 7.9.4 准备 .....494
  - 7.9.5 设置和求解 .....494
  - 7.9.6 总结 .....505
- 7.10 算例二十：扩散射流火焰的  
PDF 输运方程模型模拟..... 505
  - 7.10.1 介绍 .....505
  - 7.10.2 技巧和设置 .....505
  - 7.10.3 实验概况 .....506
  - 7.10.4 前期要求 .....506
  - 7.10.5 问题描述 .....506
  - 7.10.6 准备 .....506
  - 7.10.7 设置和求解 .....506
  - 7.10.8 总结 .....514
- 7.11 算例二十一：模拟圆形通道的  
表面反应..... 514
  - 7.11.1 介绍 .....514
  - 7.11.2 准备 .....514

- 7.11.3 设置和求解.....514

## 第8章 综合实战案例三 ..... 520

- 8.1 算例二十二：模拟二维  
流化床的均匀流化作用 .....520
  - 8.1.1 介绍 .....520
  - 8.1.2 前期要求 .....520
  - 8.1.3 问题描述 .....520
  - 8.1.4 设置和求解 .....521
- 8.2 算例二十三：液体燃料燃烧.....525
  - 8.2.1 介绍 .....525
  - 8.2.2 技巧和设置 .....525
  - 8.2.3 前期准备 .....525
  - 8.2.4 问题描述 .....525
  - 8.2.5 准备 .....526
  - 8.2.6 设置和求解 .....526
  - 8.2.7 总结 .....537
- 8.3 算例二十四：偏心环形管道的  
非牛顿流体流动模拟 .....537
  - 8.3.1 介绍 .....537
  - 8.3.2 技巧和设置 .....537
  - 8.3.3 前期要求 .....538
  - 8.3.4 问题描述 .....538
  - 8.3.5 准备 .....538
  - 8.3.6 设置和求解 .....538
  - 8.3.7 总结 .....550
  - 8.3.8 参考文献 .....550
  - 8.3.9 练习与讨论 .....550
- 8.4 算例二十五：离心式鼓  
风机模拟 .....550
  - 8.4.1 介绍 .....550
  - 8.4.2 问题描述 .....551
  - 8.4.3 准备 .....551
  - 8.4.4 设置和求解 .....551
  - 8.4.5 总结 .....559
- 8.5 算例二十六：圆柱绕流模拟.....560
  - 8.5.1 介绍 .....560
  - 8.5.2 问题描述 .....560
  - 8.5.3 准备 .....560
  - 8.5.4 设置和求解 .....560
  - 8.5.5 总结 .....569
  - 8.5.6 参考文献 .....569

# 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, 我们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, 自然界所有的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, 将对计算机的内存和 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, 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。

因此,从根本上来讲,CFD求解的本质就是解方程。比如,如果只求解流场(不考虑温度场),则将连续性方程和 Navier-Stokes 方程联立求解即可。但是这里的方程数虽是两个,但未知数的数目大于2,因此无法求解,必须加入新的方程,使方程式的数目等于未知数的数目。这样加入的新的方程就是人为进行的假设处理,也就是对物理现象建立了模型,即建模。所以,CFD的本质就是解方程,针对具体的物理流动现象选用合适的模型,然后求解方程并得出速度场等结果。

### 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也较为困难。

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,克罗格洛夫的3/5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,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方法合理可信,CFD分析就可在省时又省力的情况下对流动过程进行准确的预测。然而,目前CFD方法还没有标准。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,合理充分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20年来得到了飞跃的发展,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,计算速度有了飞速的提高,从而使用计算机对工程现象进行数值模拟分析逐渐成为可能。流体力学工程者也注意到了计算条件的飞速发展,从而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、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技术的进步,使利用超级计算机、工作站等精确解决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、汽车、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、燃烧室等旋转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、车用空调效果等。
- 航空航天：飞机外流场、机翼设计、导弹发射过程等。
- 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、全面的解决方案，而且这些领域还在迅速扩展，可以认为只要有流动、传热、化学反应、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的作用。

计算域，即 CFD 分析的流动区域。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，可以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；网格的数目也不应过多，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 分析时间的 40% 以上。如果要对实际模型划分高质量的结构化网格,需要进行专门的训练和经验积累。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,即可定义边界条件。边界条件定义好后即完成前处理,此时可以输出文件给求解器计算了。

## 1.2.2 求解

求解器读取之前前处理生成的文件后,设置好各种模型和参数,就可以开始进行迭代计算了。

总之,读入前处理生成的文件后,应首先检查该文件的网格质量是否符合求解器的要求,网格是否出现负体积。没有网格问题后,可以检查计算域单位(如尺寸单位、参数单位等)。然后设置求解器,如是定常还是非定常,显式还是隐式等。再设置各类模型,如湍流模型、多相流模型、组分传输模型、化学反应模型、辐射模型等。再设置流体的物性,如密度、比热、导热速率、粘性等。再具体设置计算域的边界条件。然后设置压力与速度耦合方式、离散格式、欠松弛因子。最后对计算域进行初始化,并设置关键位置的监测点,就可以开始进行迭代计算了。

## 1.2.3 后处理

后处理即对已经计算收敛的结果继续处理,直到得到直观清晰的、便于交流的数据和图表。后处理可以利用商业求解器自带的功能进行,如 FLUENT 和 CFX 都自带了较为完善的后处理功能,可以获得计算结果的矢量图、等值线图、迹线图。后处理也可以利用专业的后处理软件完成,如常用的 TECPLOT、origin、FIELDVIEW 和 EnSight 等。

# 1.3 计算流体力学商业软件介绍

## 1.3.1 前处理器

### 1. GAMBIT

GAMBIT 是 FLUENT 公司开发的前处理软件。GAMBIT 能处理主流 CAD 数据类型的几何文件,生成四面体、六面体、棱锥和棱柱形的结构化与非结构化网格,能生成边界层网格。对于复杂几何体,GAMBIT 能将几何体进行分区,以在每个区内生成高质量的结构化网格。

GAMBIT 通过它的用户界面(GUI)来接受用户的输入。GAMBIT GUI 能简单而又直接地做出建立模型、网格化模型、指定模型区域大小等基本步骤,这对于很多的模型应用来说已经足够了。GAMBIT 软件可对自动生成的 Journal 文件进行编辑,以自动控制修改或生成新几何与网格;可以导入由 Pro/E、UG、CATIA、SolidWorks、ANSYS、PATRAN 等大多数 CAD/CAE 软件所建立的几何和网格,导入过程可利用自动公差修补几何功能,以保证 GAMBIT 与 CAD 软件接口的稳定性和保真性,从而使得几何质量高,减小工程师的工作量;具备几何修正功能,在导入几何时会自动合并重合的点、线、面;具备几何修正工具条,在消除短边、缝合缺口、修补尖角、去除小面、去除单独辅助线和修补倒角时更加快速、自动、灵活,而且准确保证几何体的精度;G/TURBO 模块可以准确而高效地生成旋转机械中的各种风扇以及转子、定子等几何模型和计算

网格；可以划分包括边界层等 CFD 特殊要求的高质量网格；GAMBIT 中专用的网格划分算法可以保证在复杂的几何区域内直接划分出高质量的四面体、六面体网格或混合格网；可高度智能化地选择网格划分方法，可对极其复杂的几何区域划分出与相邻区域网格连续的、完全非结构化的混合格网；可为 FLUENT、POLYFLOW、FIDAP、ANSYS 等解算器生成和导出所需要的网格和格式。

## 2. ICEM CFD

ICEM 是 Integrated Computational Engineering and Manufacturing 的缩写。ICEM CFD Engineering 公司于 1990 年成立，专注于解决网格划分问题。2000 年 ANSYS 公司收购 ICEM CFD，并于 2004 年推出了界面简洁、操作方便的 ICEM CFD/AI\*Environment。它具有基于 Windows 形式的界面，支持当前流行的 CAD 数据类型，能进行几何结构的修补和简化，具有强大的网格划分功能，可输出多达 100 种求解器支持的网格文件。ICEM CFD 出色的网格划分功能体现在其对非结构化四面体网格和结构化六面体网格的处理。在非结构化四面体网格处理方面，ICEM CFD 能根据几何尺寸的主要轮廓自动生成四面体网格，并自动生成三棱柱边界层网格。在结构化六面体网格处理方面，ICEM CFD 通过自顶而下或自下而上的方式创建复杂的拓扑结构，通过创建与几何体形状近似的拓扑结构来创建高质量的六面体结构化网格。ICEM CFD 是目前最优秀的网格划分工具之一。

## 3. GRIDGEN

自 1984 年以来，GRIDGEN 的用途已从起初的航空领域发展到航空、自动化、动力生成、化学流程和其他行业。由于各用户要求继续开发此产品，GRIDGEN 的编程人员在 1994 年成立了 Pointwise 公司，推出了商用化后继产品 GRIDGEN，迄今已有 15 版。GRIDGEN 可以生成多块规则网格、非规则网格和混合格网，可以采用 CAD 的输出几何文件生成网格，如 CATIA、UG 等 CAD 数据，其他 CAD 数据可经由 IGES 转化导入。用户可以自行确定几何形状，生成后的网格可以写成十几种计算流体软件包的数据格式，包括了所有著名商用 CFD 软件包格式，如 PHOENICS、FLUENT、STAR-CD、CFX 等。对于自编 CFD 程序，GRIDGEN 给出了标准 PLOT3D 数据格式（规则格式）和非规则网格数据格式。

# 1.3.2 求解器

## 1. FLUENT

FLUENT 是用于模拟具有复杂外形的流体流动以及热传导的计算机程序。它提供了完全的网格灵活性，用户可以使用非结构网格，例如，二维三角形或四边形网格、三维四面体/六面体/金字塔形网格来解决具有复杂外形的流动，甚至可以用混合型非结构网格。它允许用户根据解的具体情况对网格进行修改（细化/粗化）。

FLUENT 是用 C 语言编写的，因此具有很大的灵活性。除此之外，为了高效地执行，交互地控制，以及灵活地适应各种机器与操作系统，FLUENT 使用 Client/Server 结构，因此它允许同时在用户桌面工作站和强有力的服务器上分离地运行程序。

在 FLUENT 中，解的计算与显示可以通过交互界面和菜单界面来完成。高级用户可以通过写菜单宏和菜单函数自定义和优化界面。

FLUENT 解算器具有如下模拟能力。



- 用非结构自适应网格模拟2D或者3D流场,它所使用的非结构网格主要有三角形/五边形、四边形/五边形,或者混合网格,其中,混合网格有棱柱形和金字塔形(一致网格和悬挂节点网格都可以)。
- 不可压或可压流动。
- 定常状态或者过渡分析。
- 无粘、层流和湍流。
- 牛顿流或者非牛顿流。
- 对流热传导,包括自然对流和强迫对流。
- 耦合热传导和对流。
- 辐射热传导模型。
- 惯性(静止)坐标系非惯性(旋转)坐标系模型。
- 多重运动参考框架,包括滑动网格界面和 rotor/stator interaction modeling 的混合界面。
- 化学组分混合和反应,包括燃烧子模型和表面沉积反应模型。
- 热、质量、动量、湍流和化学组分的控制体源。
- 粒子、液滴和气泡的离散相的拉格朗日轨迹的计算,包括了和连续相的耦合。
- 多孔流动。
- 一维风扇/热交换模型。
- 两相流,包括气穴现象。
- 复杂外形的自由表面流动。

上述各功能使得 FLUENT 具有广泛的应用,主要有以下几个方面。

- 过程工程。
- 油/气能量的产生和环境应用。
- 航天和涡轮机械的应用。
- 汽车工业的应用。
- 热交换应用。
- 电子/HVAC/应用。
- 材料处理应用。
- 建筑设计和火灾研究。

在目前的 CFD 市场上,FLUENT 以其在非结构网格的基础上提供丰富的物理模型而著称,久经考验的数值算法和鲁棒性极好的求解器保证了计算结果的精度,新的 NITA 算法大大缩短了求解瞬态问题所需的时间,成熟的并行计算能力适用于 Windows NT、Linux 或 UNIX 平台,而且既适用于单机的多处理器,又适用于网络连接的多台机器。动态加载平衡功能自动监测并分析并行性能,通过调整各处理器间的网格分配平衡各 CPU 的计算负载。

FLUENT 的湍流模型一直处于商业 CFD 软件的前沿,它提供的丰富的湍流模型中有经常使用到的湍流模型、针对强旋流和各相异性流的雷诺应力模型等。随着计算机能力的显著提高,FLUENT 已经将大涡模拟(LES)纳入其标准模块,并且开发了更加高效的分离涡模型(DES),FLUENT 提供的壁面函数和加强壁面处理的方法可以很好地处理壁面附近的流动问题。

FLUENT 的气动声学模型也备受关注。使用 FLUENT 可以有多种方法计算由非稳态压力脉动引起的噪声,瞬态大涡模拟(LES)预测的表面压力可以使用 FLUENT 内嵌的快速傅立叶变换(FFT)工具转换成频谱。Fflow-Williams&Hawkins 声学模型可以用于模拟从非流线型实体到旋转风机叶片等各式各样的噪声源的传播,宽带噪声源模型允许在稳态结果的基础上进行模