

一样的软件，不一样的学习方法

精通CFD

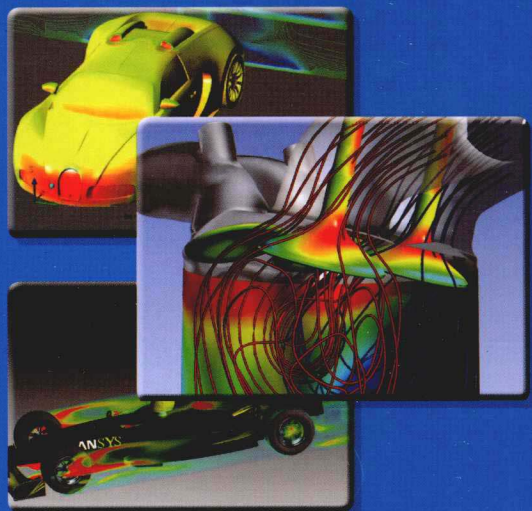
动网格工程仿真 与案例实战

隋洪涛 李鹏飞 马世虎 马富银 胡颖 编著

- 系统讲解了 CFD 动网格技术知识，帮助读者掌握 FLUENT 动网格应用。
- 全面介绍了 FLUENT 动网格算法，并结合实例分析每个知识点的具体应用。
- 14 个典型的 FLUENT 动网格案例
绝热压缩、振动混合器、柔性振动膜、移动阀门、活塞运动、导弹发射、分离过程等。



CD-ROM 源程序



人民邮电出版社
POSTS & TELECOM PRESS

精通 CFD

动网格工程仿真 与案例实战

■ 隋洪涛 李鹏飞 马世虎 马富银 胡颖 编著



人民邮电出版社
北京

图书在版编目 (C I P) 数据

精通CFD动网格工程仿真与案例实战 / 隋洪涛等编著

— 北京 : 人民邮电出版社, 2013. 5

ISBN 978-7-115-31489-5

I. ①精… II. ①隋… 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(2013)第065958号

内 容 提 要

本书共 12 章, 第 1 章主要介绍了 CFD 分析和 FLUENT 的基础知识; 第 2 章介绍动态网格理论知识; 第 3 章至第 9 章详细介绍 FLUENT 动网格方法; 第 10 章介绍了与动网格相关的其他方面的知识; 第 11 章和第 12 章是动网格实战案例。另外, 本书中还讲到了 FLUENT 的一些应用技巧。本书也讲了部分 FLUENT 的基础知识, 基本上都是归纳性的, 主要是为了帮助读者系统性学习动网格技术。

本书适合已经掌握了 FLUENT 的基础应用工程技术人员阅读, 也可作为大中专院校相关专业的教材, 以及培训学校的培训教材。

精通 CFD 动网格工程仿真与案例实战

◆ 编 著 隋洪涛 李鹏飞 马世虎 马富银 胡 颖
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: 18
字数: 469 千字 2013 年 5 月第 1 版
印数: 1-3 500 册 2013 年 5 月北京第 1 次印刷

ISBN 978-7-115-31489-5

定价: 55.00 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

随着计算机的飞速发展，计算流体力学（CFD）技术已在流体模拟的各领域获得广泛应用，但是涉及固体或流体计算域变化的情况，常规固定计算域的 CFD 技术已无法解决这类问题，需要 CFD 动态网格技术专门解决此类问题。无论是对于军事工业还是民用产业，动态计算域的流体模拟都包含十分重要和非常广泛的应用，例如，鸟类翅膀飞行的模拟、鱼尾游动的模拟、发动机活塞运动的模拟、压缩机运动的模拟、飞机投弹的模拟和炮弹出膛的模拟、阀门阀芯的运动模拟等这类 CFD 动网格问题，需考虑的问题较多，模拟起来有一定的技术难度，是 FLUENT 软件较难掌握的内容之一。

FLUENT 是国际上公认的最强的计算流体力学（CFD）软件，具有强大的动网格功能。目前，国内市场上还没有专门介绍 FLUENT 动网格技术的书籍，《精通 CFD 动网格工程仿真与案例实战》一书，就是专门为解决这类问题和满足该领域读者的需求而生的。

本书作者都长期从事 CFD 方面的研究与应用工作。隋洪涛博士曾供职于 FLUENT 中国和 ANSYS 中国，目前是海基盛元的技术总监，他精通复杂问题的 CFD 模拟，在国内 CAE 领域，特别是 CFD 软件应用领域具有较高的知名度，领衔或独立完成了 100 多项 CFD 仿真分析项目；李鹏飞博士目前在北京大学湍流与复杂系统国家重点实验室从事湍流与燃烧方面的研究，已有多篇高质量的学术论文在国际知名期刊上发表，是一位研究兴趣广泛的青年学者，他编写的《精通 CFD 工程仿真与案例实战》一书受到了 CFD 学习者的欢迎，出版不久就已再版了多次；马世虎曾任原 FLUENT 中国技术部经理，曾获得美国、英国、日本、印度等 FLUENT 开发团队的专业培训，精通 FLUENT 多相流流动与传热、燃烧、FLUENT 的二次开发以及工程问题中复杂流体现象的分析。

据我所知，此书的编写是由作者在从事多年 FLUENT 技术支持工作中逐渐积累与总结而成的。先期此书的内部打印稿作为 CAE 培训中心的教材使用，由隋洪涛博士讲授，获得了广大学员的一致好评，经常有人慕名电话求购此书。此次本书正式出版，将有利于更多的计算流体力学工作者学习动网格技术。我相信该书能满足广大读者的技术要求，并促进国内 FLUENT 动网格应用技术的普及。

是为序。

苏州大学教授/FLUENT 日本高级技术工程师 刘皓

前 言

流体是人们日常生活中广泛接触的物质,对其力学特性的研究也一直是工程界非常关注的研究方向之一。对其力学特性的研究主要有三种方法,一是理论分析方法、二是实验方法、三是数值计算方法,分别被称为理论流体力学、实验流体力学和计算流体力学(Computation Fluid Dynamics — CFD)。CFD 是流体力学、计算数学和计算机科学相交叉的一门新兴学科。它主要是通过数值方法求解流体力学控制方程。由于其计算量比较大,因此,其实现过程大多是在高性能计算机(甚至是超级计算机)上完成的。近几年,随着数值方法和计算机技术的快速发展,CFD 的应用越来越广泛,为许多复杂流动问题(如湍流、燃烧、化学反应、噪声、非定常、传热、传质以及边界运动问题)提供了有效的解决方法,甚至可以研究某些流动机理问题。在实际工程应用中,CFD 可以非常有效地分析产品问题所在,减少研发成本,缩短研发周期,而且便于工程优化设计。

FLUENT 软件是目前国际上比较流行的大型商用 CFD 软件包,它可以求解流体的流动、湍流、传热、多相流、相变、化学反应、气动噪声等物理现象。其应用范围非常广泛,涉及航空航天、船舶、汽车、能源、化工、水利、家电、生物医学等。

长期以来,人们一直没有好的方法来模拟鸟扇动翅膀飞行、鱼摆动尾巴游动等这类司空见惯的动边界流体力学问题。这类问题的特点是边界随着时间在变化,以前只能通过准定常的方式对其模拟计算,连实验也不能很好地解决这类问题。CFD 对这类问题模拟时的控制方程与定边界问题相比多一个变量,即网格也是时间的函数。近几年,FLUENT 软件推出完善的动态网格技术专门来解决动边界问题。这个技术非常实用,不仅可以解决鸟扇动翅膀飞行、鱼摆动尾巴游动等仿生学问题,而且可以解决发动机气缸中活塞与阀门的运动、偏心压缩机转动、高速列车相错与穿越隧道、飞机投弹与襟副翼摆动和座椅弹射、导弹水下与井下发射、火箭整流罩分离与级间分离、子弹与炮弹出膛等几乎所有边界运动的流体力学问题。而且,此技术可以与流固耦合(FSI)技术结合自动解决大变形流固耦合问题。

尽管本书中讲到了部分 FLUENT 的基础知识,但基本上都是归纳性的,而且主要是为了帮助读者系统性学习动网格技术。因此,读者在阅读本书时应已经掌握了 FLUENT 的基础应用或系统地参加过 FLUENT 的基础培训。书中也未涉及应用前处理器生成网格的操作,即默认读者已经掌握了一种网格生成软件。

本书由隋洪涛、李鹏飞、马世虎、马富银和胡颖等编写。限于作者的知识水平和经验,书中难免存在疏漏之处,恳请广大读者批评、指正与交流,以便再版时修正,作者联系邮箱为:Pkucfd@gmail.com。编辑联系邮箱为:zhangtao@ptpress.com.cn。

编者

目 录

第1章 FLUENT概述 1

- 1.1 软件介绍 1
 - 1.1.1 概述 1
 - 1.1.2 FLUENT 软件发展 1
 - 1.1.3 FLUENT 软件包介绍 2
- 1.2 CFD 分析方法与基本步骤 3
 - 1.2.1 CFD 分析方法 3
 - 1.2.2 CFD 分析基本步骤 4
- 1.3 FLUENT 基础 8
 - 1.3.1 FLUENT 网格术语的定义 8
 - 1.3.2 FLUENT 边界条件分类 8
 - 1.3.3 比例调整与物理量单位 9
 - 1.3.4 网格自适应 9
 - 1.3.5 加快计算速度小技巧 10
 - 1.3.6 FLUENT 批处理 12

第2章 动态网格理论基础 15

- 2.1 概述 15
- 2.2 守恒型动网格流场计算方程 16
- 2.3 FLUENT 中动网格模型的兼容性 16

第3章 FLUENT动态网格模型算法概要 21

- 3.1 体网格再生方法 22
 - 3.1.1 铺层 (Layering) 22
 - 3.1.2 弹性光顺 (Spring Smoothing) 23
 - 3.1.3 局部重构 (Local Remeshing) 24
 - 3.1.4 体网格再生方法的混合使用 24
- 3.2 边界运动或变形的指定 25
- 3.3 动网格问题设定图形用户界面 GUI 27
- 3.4 FLUENT 中动网格模型的限制 28

第4章 铺层 30

- 4.1 铺层基本特点 30
- 4.2 铺层法动网格设置 30
 - 4.2.1 动网格控制参数 (Dynamic Mesh parameters) 31

- 4.2.2 运动区域 (Dynamic Zones) 31
- 4.3 实例一: 活塞运动 32
 - 4.3.1 实例简介 32
 - 4.3.2 动网格控制参数 33
 - 4.3.3 动网格运动区域指定 34
 - 4.3.4 算例总结 35
- 4.4 区域优先级 35
- 4.5 边界条件的继承性 37
- 4.6 实例二: 传送带 38
 - 4.6.1 实例简介 38
 - 4.6.2 动网格控制参数 39
 - 4.6.3 运动规律指定-Profile 文件 39
 - 4.6.4 动网格运动区域指定 40
 - 4.6.5 网格界面 Interface 的定义 41
 - 4.6.6 算例总结 42
- 4.7 实例三: 玩具枪 42
 - 4.7.1 方法一 42
 - 4.7.2 方法二 43
- 4.8 实例四: 纯旋转运动 44
 - 4.8.1 动态网格控制参数 45
 - 4.8.2 运动区域指定 46
 - 4.8.3 算例总结 47
- 4.9 铺层算法的限制 47
- 4.10 铺层算法的技巧 47

第5章 弹性光顺 48

- 5.1 弹性光顺法的基本特点 48
- 5.2 实例一: 形状不规则的活塞运动 49
 - 5.2.1 动网格控制参数 49
 - 5.2.2 运动区域 50
 - 5.2.3 变形区域 (Deforming Zones) 50
 - 5.2.4 弹性常数 53
 - 5.2.5 边界节点松弛因子 54
 - 5.2.6 实例总结 56
- 5.3 非三角形/四面体网格的光顺 56
 - 5.3.1 方盒往复振动实例 57
 - 5.3.2 止回阀实例 58
- 5.4 弹性光顺方法的限制 59
- 5.5 练习 59

第6章 局部重构法	62		
6.1 局部重构法概要	62	8.2.2 运动区域指定	93
6.2 局部体网格重构算法	65	8.2.3 网格运动	93
6.3 实例一：存储分离	66	8.3 案例简析	95
6.3.1 问题描述	66	8.3.1 三维弹体投放	95
6.3.2 初始网格准备	66	8.3.2 动网格与VOF模型混合	97
6.3.3 动网格控制参数	69	8.4 1DOF UDF	97
6.3.4 运动区域指定	70	8.5 1DOF 案例分析	97
6.3.5 时间步长与网格预览	70	8.5.1 导弹竖井发射	97
6.3.6 网格运动	71	8.5.2 子弹弹膛内运动	99
6.3.7 算例总结	73	8.6 6 DOF 求解技巧	101
6.4 实例二：三维活塞运动	73	第9章 动网格中的UDF	102
6.4.1 概述	73	9.1 UDF 基础	102
6.4.2 区域面网格重构	74	9.2 动网格UDF介绍	103
6.4.3 算例总结	74	9.2.1 DEFINE_CG_MOTION 介绍	103
6.5 实例三：不规则活塞运动	75	9.2.2 DEFINE_GEOM 介绍	105
6.5.1 概述	75	9.2.3 DEFINE_GRID_MOTION 介绍	108
6.5.2 局部面网格重构	75	第10章 动网格辅助功能与非定常	113
6.5.3 算例总结	77	10.1 动网格 Events 功能	113
6.6 维度面网格重构	77	10.2 运动预览	117
6.7 实例四：二点五维度网格重构	79	10.2.1 区域运动预览	117
6.7.1 概述	79	10.2.2 网格运动预览	118
6.7.2 动网格控制参数	79	10.3 动网格与定常解算器	119
6.7.3 运动区域	79	10.4 非定常计算技巧	120
6.7.4 总结	81	10.4.1 NITA 方法加快计算速度	120
6.8 尺度重构间隔 (Size Remesh Interval)	82	10.4.2 ITA 的迭代控制	122
6.9 实例五：二维活塞	82	10.4.3 Patch 功能的应用	123
6.10 局部重构法应用	84	10.4.4 非定常计算动画制作	124
6.10.1 阀门运动	84	第11章 动网格案例实战一	126
6.10.2 飞机副翼摆动	85	11.1 动网格案例实战一：二维绝热	
6.11 局部重构算法技巧	86	压缩(动态层技术)	126
第7章 尺寸函数	87	11.1.1 介绍	126
7.1 概述	87	11.1.2 问题描述	127
7.2 局部重构和尺寸函数 GUI	87	11.1.3 准备	127
7.3 实例一：存储分离	88	11.1.4 设置和求解(一)底部	
7.4 局部重构和尺寸函数技巧	90	动态层	127
第8章 耦合运动	91	11.1.5 设置和求解(二)顶部	
8.1 六自由度运动轨迹计算原理	91	动态层	139
8.2 实例：二维存储分离	92	11.1.6 总结	144
8.2.1 动网格控制参数	93		

11.2	动网格案例实战二：二维绝热压缩（网格重划技术和弹性光滑技术）	144	11.7.3	准备	219
11.2.1	介绍	144	11.7.4	设置和求解	219
11.2.2	问题描述	144	11.7.5	总结	225
11.2.3	准备	145	11.8	动网格案例实战八：利用弹性光滑技术求解不规则活塞问题	225
11.2.4	设置和求解	145	11.8.1	介绍	225
11.2.5	总结	158	11.8.2	问题描述	225
11.3	动网格案例实战三：用动网格模型求解二维振动混合器问题	158	11.8.3	准备	226
11.3.1	介绍	158	11.8.4	总结	231
11.3.2	准备	158	11.9	动网格案例实战九：导弹发射	231
11.3.3	设置和求解	158	11.9.1	介绍	231
11.3.4	总结	168	11.9.2	问题描述	232
11.4	动网格案例实战四：三维绝热压缩（动态层技术、网格重划技术和弹性光滑技术）	168	11.9.3	准备	232
11.4.1	介绍	168	11.9.4	设置和求解	232
11.4.2	网格运动方法	168	第12章 动网格案例实战二		
11.4.3	问题描述	169	12.1	动网格案例实战十：二点五维动网格案例	241
11.4.4	准备	169	12.1.1	介绍	241
11.4.5	设置和求解	170	12.1.2	设置和求解	241
11.4.6	总结	185	12.2	动网格案例实战十一：二维活塞动网格仿真	247
11.5	动网格案例实战五：利用 UDF 控制柔性振动膜的动网格问题	186	12.2.1	介绍	247
11.5.1	介绍	186	12.2.2	设置和求解	247
11.5.2	问题描述	186	12.3	动网格案例实战十二：存储分离过程动网格模拟	252
11.5.3	准备	186	12.3.1	介绍	252
11.5.4	设置和求解	186	12.3.2	设置和求解	252
11.5.5	总结	192	12.4	动网格案例实战十三：三维活塞动网格	263
11.5.6	附录	192	12.4.1	介绍	263
11.6	动网格案例实战六：二维移动阀门	193	12.4.2	设置和求解	263
11.6.1	介绍	193	12.4.3	总结	268
11.6.2	问题描述	193	12.5	动网格案例实战十四：不规则活塞运动	268
11.6.3	准备	193	12.5.1	介绍	268
11.6.4	设置和求解	193	12.5.2	设置和求解	268
11.6.5	后处理	217	12.5.3	总结	273
11.6.6	总结	218	附录 尺寸函数		
11.7	动网格案例实战七：利用局部网格重划技术对蝶阀建模	219	尺寸函数算法		
11.7.1	介绍	219	参考文献		
11.7.2	问题描述	219	278		

第 1 章

FLUENT概述

1.1 软件介绍

1.1.1 概述

FLUENT 软件是目前国际上比较流行的大型商用 CFD 软件包，它可以求解流体的流动、湍流、传热、多相流、相变、化学反应、气动噪声等物理现象。由于其具有先进的数值算法、丰富的物理模型以及强大的前后置处理功能，使得其市场占有率多年来一直保持全球第一位。其应用范围非常广泛，涉及航空航天、船舶、汽车、能源、化工、水利、家电、生物医学等。如上海超级计算中心、GE、Intel、Honeywell、Boeing、Caterpillar、GM、Honda 等都是其全球大客户。

1.1.2 FLUENT 软件发展

1979 年，在英国谢菲尔德大学开发 TEMPEST (FLUENT 的原型)；

1983 年，Creare 公司开始销售 FLUENT 软件；

1988 年，在美国成立 Fluent Inc；

1995 年，加入 Aavid Thermal Technology 集团；

1995 年，收购 FDI 公司，增加 Fidap 软件；

1997 年，收购 Polyflow 公司，增加 Polyflow 软件；

2000 年，归属 Wills Stain & Partners 财团；

2006 年，并入 ANSYS, Inc。

Fluent 全线产品并入 ANSYS 公司后，与 ANSYS 公司先前收购的 CFX 软件统称为 ANSYS-CFD。FLUENT6.3 版是比较稳定的版本，之后为了与 ANSYS 产品版本号统一，版本数字上跳跃到 12。FLUENT 用 C 语言编写，CFX 用 FORTRAN 语言编写。目前 FLUENT 与 CFX

仍然独立发展，功能逐渐相互补充。在 12 版后，FLUENT 将嵌入 ANSYS-workbench 下，用户可以在 ANSYS-workbench 下根据需要选择启动 FLUENT 或 CFX。

1.1.3 FLUENT 软件包介绍

FLUENT 软件包主要包括前处理器 Gambit 与 TGrid，求解器及后处理器 FLUENT。目前同属于 ANSYS 产品的 ICM- CFD 也可以作 FLUENT 的前处理器。从 12 版以后，原来的 Cfx-Post 也可以作 FLUENT 的后处理器。

Gambit 是面向 CFD 分析的高质量的前处理器，其主要功能包括几何建模、复杂几何修正和网格生成。其有一定的 3D 几何生成功能，而没有专业的 CAD 软件功能强大。但是它可以把其他主流 CAD 软件的几何导入到 Gambit 中进行进一步的处理。

TGrid 是专业的网格生成软件，其生成网格不受几何结构复杂性和尺寸限制。它需要从 GAMBIT、ANSYS、Catia、I-DEAS、NASTRAN、PATRAN、Pro/E 或 Hypermesh 等软件中导入面或体网格等边界网格，而后由 TGrid 生成后续网格。其 Wrap 技术，对于复杂几何的处理与网格生成非常方便。

FLUENT 是通用的 CFD 软件包，用来模拟从不可压缩到高度可压缩范围内的复杂流动。由于采用了多种求解方法和多重网格加速收敛技术，因而 FLUENT 能达到最佳的收敛速度和求解精度。灵活的非结构化网格和基于解的自适应网格技术及成熟的物理模型，使 FLUENT 在湍流、传热与相变、化学反应与燃烧、多相流、旋转机械、动态网格、噪声等方面有广泛应用。

FLUENT 软件具有以下特性和功能。

- (1) FLUENT 软件采用有限体积法，具有基于网格节点和网格单元的梯度算法。
- (2) 定常/非定常流动模拟，特别增加快速非定常 NTA 模拟功能。
- (3) FLUENT 软件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、动/变形网格以及滑动网格等。
- (4) FLUENT 软件拥有多种基于解的网格自适应、动态自适应技术以及动网格与网格动态自适应相结合的技术。
- (5) 可自动转换的多面体网格技术增强了 FLUENT 软件的运算能力，使网格数量减少为原来的 1/3 ~ 1/5，计算效率也由此提高 3 ~ 5 倍。
- (6) FLUENT 软件包含两大类四种算法：基于压力的 Simple 算法、基于压力的耦合算法、基于密度的显式算法以及基于密度的隐式算法。
- (7) FLUENT 软件包含丰富而先进的物理模型，使得用户能够精确地模拟无黏流、层流、湍流。湍流模拟方式包含 Spalart-Allmaras 模型、 $k-\omega$ 模型组、 $k-\varepsilon$ 模型组、雷诺应力模型 (RSM) 组、大涡模拟模型 (LES) 组以及最新的分离涡模拟 (DES) 等。另外用户还可以定制或添加自己的湍流模型。
- (8) 适用于牛顿流体与非牛顿流体。
- (9) 含有强制、自然、混合对流的热传导，固体、流体的热传导、辐射模型。
- (10) 包含化学组分的混合、反应，支持 300 种组分 1500 个化学反应。
- (11) 包含自由表面流模型、欧拉多相流模型、混合多相流模型、颗粒相模型、空泡两相流模型、湿蒸汽模型。
- (12) 包含融化/凝固；蒸发、冷凝相变模型。

- (13) 离散相的拉格朗日跟踪计算。
 - (14) 包含非均质渗透性、惯性阻抗、固体热传导，多孔介质模型（考虑多孔介质压力突变）。
 - (15) 包含风扇，散热器，以热交换器为对象的集中参数模型。
 - (16) 包含惯性或非惯性坐标系，复数基准坐标系及滑移网格。
 - (17) 能处理动静翼相互作用模型化后的接续界面。
 - (18) 包含基于精细流场解算的预测流体噪声的声学模型。
 - (19) 包含质量、动量、热、化学组分的体积源项。
 - (20) 拥有丰富的物性参数的数据库。
 - (21) 完备的旋转机械求解方法：SRF、MRF、Mixing Plane 和 Sliding Mesh，而且与其他相关的模型兼容。
 - (22) 高效率的并行计算功能，提供多种自动、手动分区算法，内置 MPI 并行机制大幅度提高并行效率。另外，FLUENT 特有动态负载平衡功能，确保全局高效并行计算。
 - (23) FLUENT 软件提供友好的用户界面，并为用户提供了二次开发接口（UDF）。
 - (24) FLUENT 软件采用 C/C++ 语言编写，从而大大提高了对计算机内存的利用率。
 - (25) 与第三方合作开发的 V2F 湍流模型。
 - (26) FLUNET 中包含三种噪声求解方式：宽带噪声模型（Broadband Noise Model）、FW-H 声类比方式（FW-H Analogy Model）和直接噪声模拟（CCA）。FLUENT 软件包含目前最完善的流动噪声求解模型。
 - (27) 先进的动网格技术，网格变形方式有三种：弹簧压缩式、动态铺层式，以及局部网格重生式。
 - (28) 特有的燃料电池模块（PEMFC/SOFC）。
 - (29) 特有的钢铁磁流体模块。
 - (30) 特有的连续纤维模块。
- 尽管 FLUENT 的功能比较多，但本书将主要介绍动态网格技术。

1.2 CFD 分析方法与基本步骤

计算流体力学（Computational fluid dynamics—CFD）是一门通过数值方法求解流体控制方程组来预测流体的流动、传热、传质、化学反应等相关物理现象的学科。CFD 计算结果对产品的概念设计、产品详细设计、产品问题查找与分析以及重新设计产品都有很大的帮助。最近几年，CFD 分析在工业设计中发挥着越来越大的作用。CFD 分析与实验都是解决问题的工具，两者相互补充。CFD 分析的优点在于能得到流场中任意位置的任意物理量的值，便于问题的分析。在实际应用中，它能够减少实验次数，从而降低实验成本。

1.2.1 CFD 分析方法

CFD 常用的数值方法有有限差分法、有限元法和有限体积法。边界元法在 CFD 中应用较少，在计算电磁学领域应用相对较多一些。有限差分法是最经典的方法，它将微分方程离散到网格点上，将方程中无限小的微分化为有限小的差分来求解。有限差分法在流体力学中应用广泛，发展也比较成熟。但为了能获得高精度的差分格式，通常要求网格十分光滑，否则会导致较大误差。对复杂几何的流动，难以做到网格十分光滑。有限元法是把积分形式的方程离散到有限小的集体

单元里求解。有限元法对网格的要求较小，既可以是结构化网格也可以是非结构化网格。但为了保证解的精确性，有限元法在每隔单元里要进行某种加权积分，计算时内存占用量大且耗时。有限体积（finite volume）法，首先将计算域离散成一组控制体（网格单元）；然后在这组控制体上求解质量守恒、动量守恒、能量守恒、组分守恒等方程组，将偏微分方程组离散为代数方程系统；然后通过数值的方法求解所有的代数方程组，逐渐接近流场的真实解。有限体积法优点是首先是对网格的正交性没有特别要求，可以大量使用非结构化网格，从而可以对复杂几何问题进行求解；其次是计算时该算法对内存的占用很小，便于精细地模拟流场细节。

FLUENT 解算器是基于有限体积法的，Polyflow 和 FIDAP 是基于有限元法的。目前，FLUENT 测试的网格单元数量已经突破 10 亿，并行效率很高。

1.2.2 CFD 分析基本步骤

CFD 软件一般分为三部分：前处理器、解算器和后处理器，如图 1.1 所示。这也就形成了 CFD 分析的基本步骤。

步骤 1： 物理问题的分析与前处理。

步骤 1.1： 定义模拟的目标。

步骤 1.2： 确定模拟的计算域范围。

步骤 1.3： 设计与生成网格。

步骤 2： 解算器执行。

步骤 2.1： 设置数值模型。

步骤 2.2： 计算并监控解的过程。

步骤 3： 后处理。

步骤 3.1： 检查计算结果。

步骤 3.2： 分析并考虑如何修正模型。

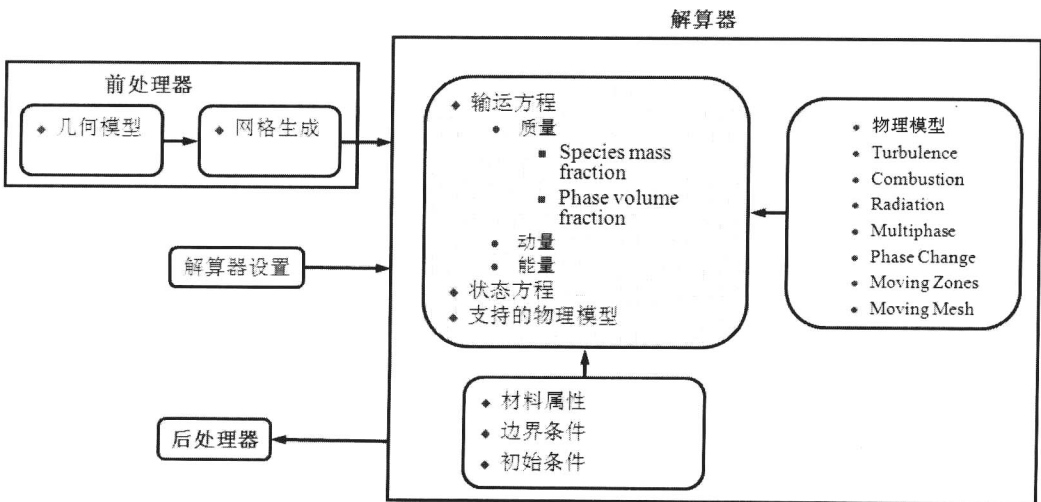


图 1.1 CFD 分析流程

下面较详细地了解每一步的工作。

步骤 1： 物理问题的分析与前处理。

步骤 1.1: 定义模拟的目标。

从多年技术支持工作来看,许多工程师很关注软件的操作或算法的选取,经常忽视对物理问题的分析。而实际上用 CFD 软件解决问题时最重要的是对物理问题的分析,定义适当的模拟目标、对物理问题合理简化、确定合适的模拟方法。在定义模拟目标时,需要很清楚地回答如下一些问题。

(1) 需要得到什么样的结果(如压力降,质量流率或阻力等)?这些结果将被如何使用?

在回答上述问题时,首先需要分析物理问题中包含哪些物理现象(如湍流、可压缩性、辐射等),哪个或哪几个物理现象是主要的,哪些是次要的;然后考虑哪些是必须简化假设的;其次是可以做哪些简化假设(如对称简化、周期性简化等);最后考虑软件中有哪些模型可以解决问题,还有哪些物理现象需要编写特有的 UDF 来解决。

(2) 需要什么样的模拟精度?

模拟的精度要合理,并不是越高越好。

(3) 需要多长时间得到计算结果?

模拟的周期也影响着目标的确定,如果时间紧就需要更多的简化,如果时间宽松就可以模拟得更加详细些。

步骤 1.2: 确定模拟的计算域范围

首先要考虑如何将关心的问题从一个完整的较大的系统中隔离出来;然后取定计算域的起始与终止位置,在确定此计算域范围时要分析在边界上是否有边界条件信息、这些边界条件类型能否与这些信息匹配、是否能将计算域的边界确定在有合理数据的位置;其次分析问题能否简化为二维问题或轴对称问题。

如图 1.2 所示,假如关心的问题是旋流分离器的分离效果,对周围管道、阀等部件不关心。那么就可以将其中的旋流分离器从整个系统中分割出来,而不必对整个系统进行模拟。而分割出来的旋流分离器的进口和出口可以给出一组边界值,通过分析就可以模拟出旋流分离器的特性。

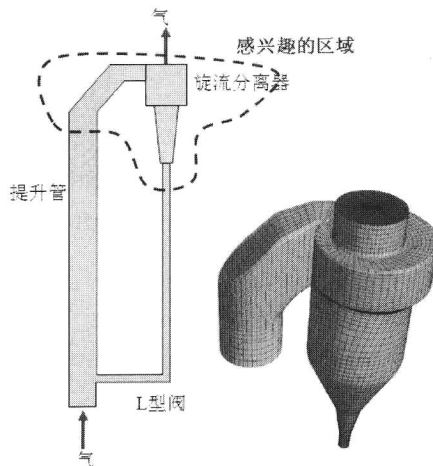


图 1.2 旋流分离器

步骤 1.3: 设计与生成网格

图 1.3 所示是 FLUENT 所支持的网格类型。根据几何的复杂程度和流动特点选择合适的网格单元类型。对于简单的几何,一般情况下四边形、六面体网格的质量较高,而且单元数量较少(相对于三角形、四面体网格而言)。如果网格线与流动方向一致时,四边形、六面体网格还可以

降低伪耗散。对于复杂几何（如图 1.4 所示汽车发动机舱网格），网格线与流动方向一般不会一致，此时四边形、六面体网格并没有特别的优势，而三角形、四面体网格对复杂几何的适应能力很强，建议使用三角形、四面体网格。有些情况下，根据几何特点可使用混合格网。图 1.5 所示为发动机阀门口混合格网，右边直管部分几何规则使用六面体网格；弯管部分有阀门几何复杂，使用四面体网格；从六面体网格到四面体网格由金字塔形五面体网格过渡；到了下面缸体部分，几何又很规则，此时用三棱柱五面体网格。对于一些复杂的比较特殊的几何还可以考虑使用不连续网格（non-conformal mesh），即网格面两侧的网格节点对应，网格线不连续。图 1.6 所示为油膜冷却不连续网格。流体从下部箱体内通过很小的孔喷到上部非常大的空间内，由于上部大空间与喷孔的几何尺度相差太大，很难用统一尺度来生成网格。此时可以上下两部分分别按照自己的尺度生成网格，然后两个区域之间以不连续的网格界面对接，计算时物理量会在此界面上插值。

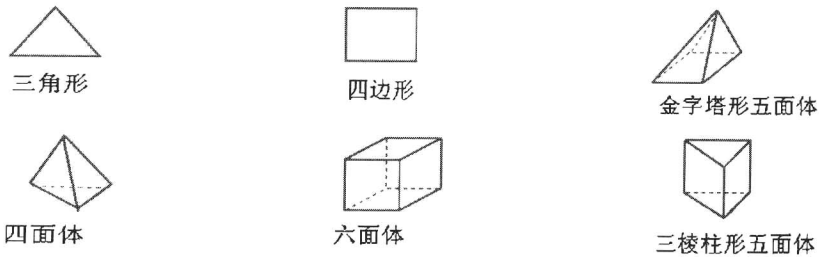


图 1.3 FLUENT 所支持的网格类型

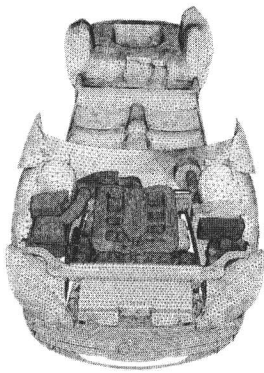


图 1.4 汽车发动机舱的网格

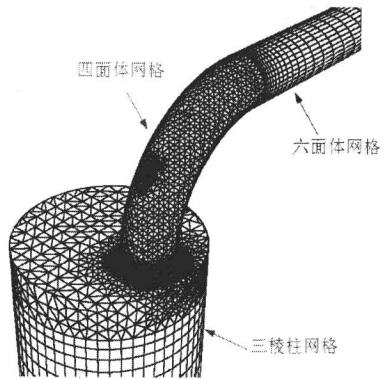


图 1.5 发动机阀门口混合格网

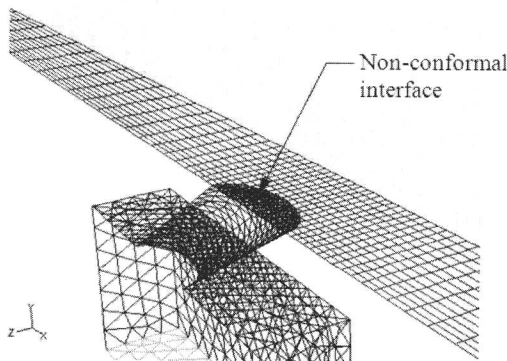


图 1.6 油膜冷却不连续网格

生成网格时，不仅要考虑网格的类型，而且要考虑网格的分辨率问题。首先，考虑网格的密度能否足够分辨出关键的几何，如一个圆形面至少需要 5 个以上网格单元才能近似模拟；其次，考虑梯度大的区域网格是否足够密；再者，考虑是否可使用网格自适应技术提高网格的分辨率。

最后还需要考虑网格的数量与计算机条件（如内存、CPU 数量与速度）相匹配。

综上所述，判定网格质量好坏的标准有如下几条：

- (1) 网格数量要足够，尤其是要能足够分辨关键几何；
- (2) 梯度大的地方网格密，梯度小的地方网格可以疏（以节约计算资源）；
- (3) 网格从密到疏的过渡要均匀；
- (4) 网格等角度扭曲率要尽可能小，一般情况下四面体网格的等角度扭曲率小于 0.85，六面体网格的等角度扭曲率小于 0.8，复杂几何的非关键位置此要求可适当放松；
- (5) 六面体网格长宽比要尽可能小，一般情况下不大于 1 : 3，边界层网格等特殊情况下可适当放松此要求；

(6) 根据几何复杂程度和流动特点合理搭配使用四面体和六面体网格。

根据上述标准和长期的应用实践可以逐渐培养读者对 CFD 网格的审美观，最终能够很顺利地对各种几何作出漂亮的、高质量的 CFD 网格。

步骤 2：解算器执行

步骤 2.1：设置数值模型

对于一个给定的问题，需要作如下工作：

- (1) 选择物理模型，如湍流、燃烧、多相流等；
- (2) 定义材料属性，如流体、固体、混合材料等；
- (3) 指定工作条件；
- (4) 指定边界条件；
- (5) 提供初始值；
- (6) 设置解算器控制参数，如松弛因子、库朗数等；
- (7) 设置收敛监控曲线。

步骤 2.2：计算并监控解的过程

离散守恒型方程是通过数值迭代的过程进行计算的，直到收敛。判断收敛的标准如下：

- (1) 迭代一定的次数；
- (2) 残差降低一定的量级，一般情况下需要降低 3 个以上量级；
- (3) 残差不再进一步降低，即残差曲线参数值随迭代的继续进行基本保持不变；
- (4) 全局守恒量达到平衡（如管道的流量进出口数值相等）或特征物理量曲线平直（如阻力、升力等）；

是否收敛需要使用上述标准综合判断。收敛解的精度也是需要关注的，它主要与下列因素有关：

- (1) 物理模型的精度；
- (2) 网格的分辨率；
- (3) 问题的设置。

因此，为了提高解的精度，需要对上述问题细致地考察。

步骤 3：后处理

步骤 3.1：检查计算结果

当计算收敛之后，需要检查计算结果并提取有用的数据。一般情况下，可以通过彩色图像、曲线和具体物理量的数值报告来提取数据。图像和曲线可以回答如下一些问题：

- (1) 全局流态是否合理?
- (2) 某些区域是否出现了分离?
- (3) 什么地方形成激波、剪切层等?
- (4) 关键的流动特性是否准确计算出来?

回答这些问题时, 需要基于流体力学基础知识。

具体物理量的数值报告可以帮助我们定量的分析结果:

- (1) 力/力矩;
- (2) 平均换热系数;
- (3) 某些物理面的面积分与体积分;
- (4) 通量平衡。

步骤 3.2: 分析并考虑如何修正模型

在对结果进行分析的基础上, 需要考虑如何修正模型改进计算结果。首先考虑物理模型的合理性, 如需要分析流动是否是湍流, 是否是非定常, 是否有可压缩性, 是否有三维效应等; 其次是分析边界条件的正确性, 如计算域是否足够大, 边界条件的类型是否恰当, 边界的值是否合理等; 另外分析网格是否足够, 如网格是否需要自适应以提高计算精度, 解是否与网格无关, 边界的分辨率是否需要改进等。根据上述分析, 相应的对问题设置进行调整以获得更加理想的计算结果。

1.3 FLUENT 基础

1.3.1 FLUENT 网格术语的定义

如图 1.7 所示, 在 FLUENT 中二维网格和三维网格的每个部分的术语定义。单元 cell 指的是由计算域离散而成的控制体, 计算域是由表示流体或固体的网格单元而定义的。面 face 指的是单元的边界。边 Edge 指的是面的边界。节点 Node 指的是边相交的网格节点。在二维网格情况下 edge 已经退化为节点 Node。一组 cell 或 face 或 node 定义为一个区域 zone。边界数据定义为面区域(face zone), 材料数据、原项等定义为单元区域(cell zone)。在 UDF 中区域 zone 被称为线程 thread。了解上述术语的定义不仅对 UDF 的使用很有帮助, 对后面动网格的使用也非常有用。

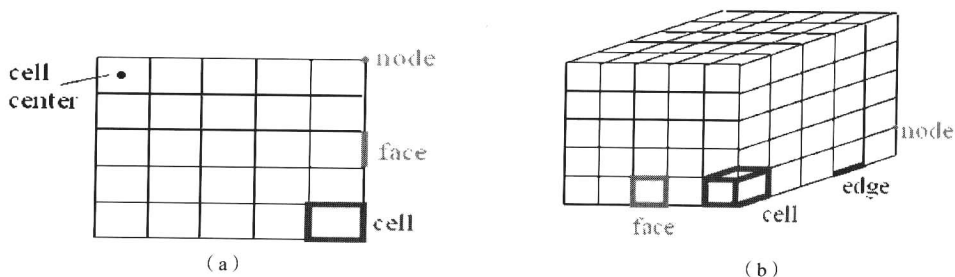


图 1.7 网格术语
(a) 二维网格; (b) 三维网格

1.3.2 FLUENT 边界条件分类

在 FLUENT 中, 边界条件分为三大类。

1. 外部面区域 (External Face Zones)

- (1) 通用的边界——pressure inlet, pressure outlet;
- (2) 不可压流边界——velocity inlet, outflow;
- (3) 可压流边界——mass flow inlet, pressure far-field, mass flow outlet;
- (4) 其他边界——wall, symmetry, axis, periodic;
- (5) 特殊边界——inlet vent, outlet vent, intake fan, exhaust fan。

2. 单元区域 (Cell Zones)

- (1) 流体单元边界——Fluid;
- (2) 固体单元边界——Solid;
- (3) 多孔介质单元边界——Porous media;
- (4) 换热器单元边界——Heat exchanger。

3. 内部面区域 (Internal Face Zones)

Fan, interior, porous jump, radiator, wall。

1.3.3 比例调整与物理量单位

流体力学控制方程在不同的流体力学分支有不同的无量纲形式，为了统一使用的方便性，FLUENT 求解的是有量纲方程。网格读入 FLUENT 解算器后默认的单位是国际标准单位，即单位是“米”。有时生成网格时单位并不一定是“米”，这时读入 FLUENT 解算器后需要对其尺度进行比例调整，否则计算结果将相差巨大，甚至无法计算。

通过 Grid→Scale 打开比例调整面板，如图 1.8 所示，选择网格生成时的单位后，软件会自动计算与单位“米”之间的比例因子（当然也可直接输入比例因子），然后点击 Scale 按钮，网格尺寸将自动乘以比例因子。请注意，一般情况下，Scale 按钮点击一次；如果点击两次，网格将乘 2 次比例因子。

另外，也可以使用非国际标准单位。通过 Define→Units 打开单位设置窗口。如图 1.9 所示，压力默认单位是 pascal（我国法定计量单位为：Pa），也可以选择 atm。如果想用非国际标准单位，最好在做任何设置之前先定义合适的单位。

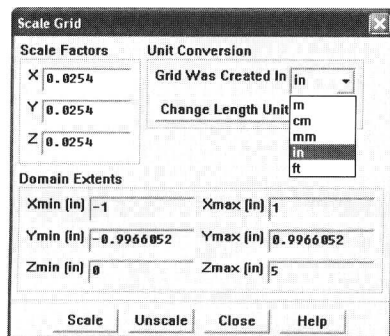


图 1.8 比例因子调整

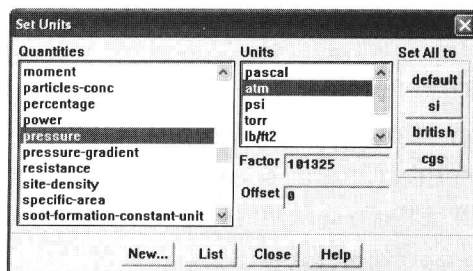


图 1.9 单位设置窗口

1.2.4 网格自适应

网格自适应主要用来提高计算精度的一种工具。它可以在不需要前处理器的情况下由解算器