

工程设计与分析系列

ANSYS CFX

流体分析及仿真(第2版)

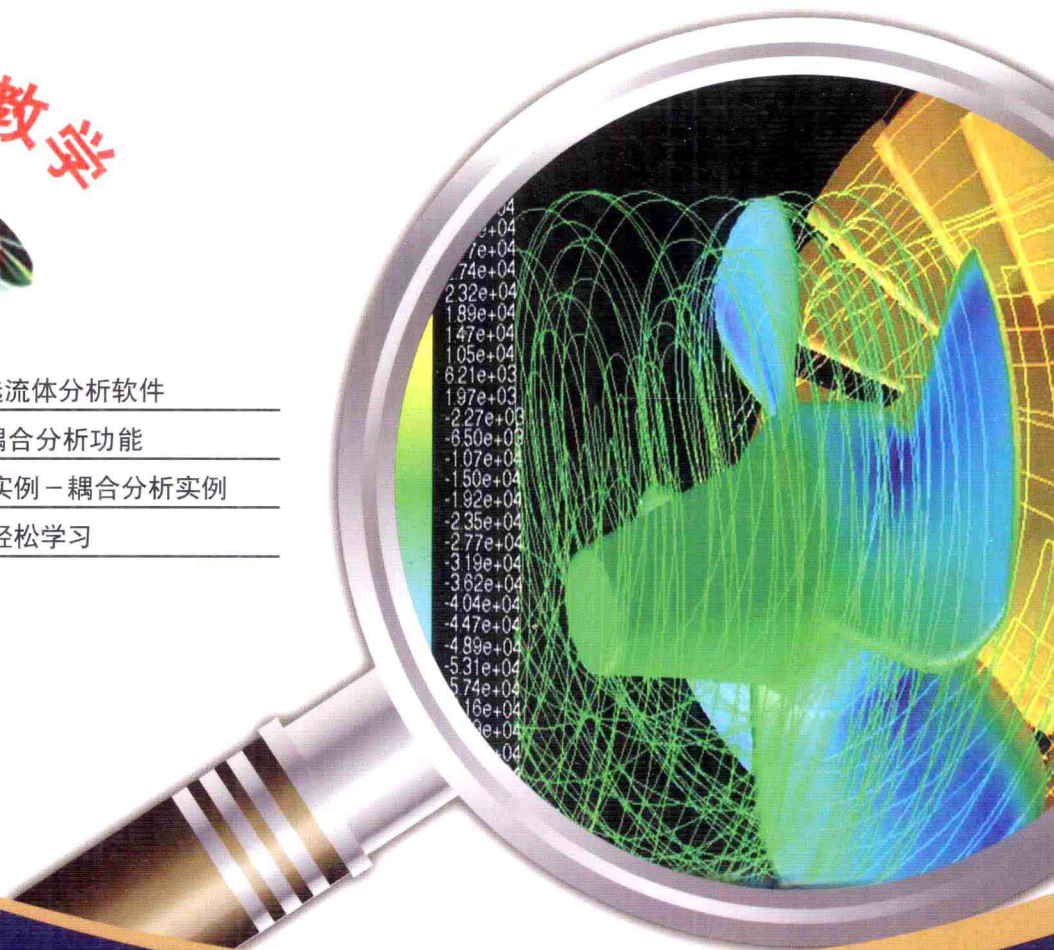
谢龙汉 赵新宇 编著

视频教程



- ★ CFX——全球首选流体分析软件
- ★ CFX——强大的耦合分析功能
- ★ 基础知识—工程实例—耦合分析实例

实例视频讲解, 轻松学习



电子工业出版社

PUBLISHING HOUSE OF ELECTRONICS INDUSTRY

<http://www.phei.com.cn>

工程设计与分析系列

ANSYS CFX 流体分析及仿真 (第2版)

谢龙汉 赵新宇 编著

電子工業出版社

Publishing House of Electronics Industry

北京 • BEIJING

内 容 简 介

CFX 是全球第一个通过 ISO9001 质量认证的大型商业 CFD 软件, CFX 已经遍及航空航天、旋转机械、能源、石油化工、机械制造、汽车、生物技术、水处理、防火安全、冶金、环保等领域, 为全球 6 000 多个用户解决了大量的实际问题。

本书在第一版的基础上进行补充和完善, 以 ANSYS CFX 14.0 为蓝本, 由浅入深、循序渐进地介绍 CFX 的使用方法, 包括 CFX 的基本理论与方法、ICEM CFD 网格生成、CFX 前处理、CFX 求解、CFX 后处理等, 并通过几个典型实例, 详细介绍 CFX 从网格划分到模型建立, 从求解到后处理的全过程, 可以按照实例讲解一步一步地完成 CFX 模拟的实现, 并对 CFX 建模过程、求解理念和后处理方法有一定的认识。

本书适合 CFX 的初学者和使用过其他模拟软件的读者使用, 同时对使用 CFX 有一定经验的读者也很有参考价值。

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

ANSYS CFX 流体分析及仿真/谢龙汉, 赵新宇编著. —2 版. —北京: 电子工业出版社, 2013.9
(工程设计与分析系列)
ISBN 978-7-121-20976-5

I. ①A… II. ①谢… ②赵… III. ①工程力学—流体力学—计算机仿真—应用软件 IV. ①TB126-39

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2013) 第 158067 号

策划编辑: 许存权

责任编辑: 许存权 特约编辑: 马军令

印 刷: 三河市鑫金马印装有限公司

装 订: 三河市鑫金马印装有限公司

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: 787×1092 1/16 印张: 26.5 字数: 679 千字

印 次: 2013 年 9 月第 1 次印刷

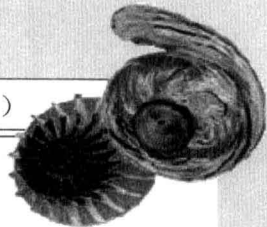
印 数: 4 000 册 定价: 59.00 元 (含 DVD 光盘 1 张)



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 zltts@phei.com.cn, 盗版侵权举报请发邮件至 dbqq@phei.com.cn。

服务热线: (010) 88258888。



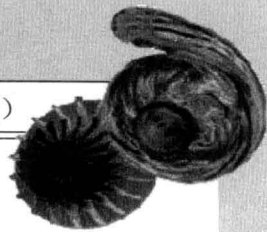
再版前言

“中国制造”必须向“中国创造”转变，这是社会共识。那么，如何转变、怎么转变？其关键就是全社会广泛的自主创新。我们知道，创新的产品需要经过三个阶段：设计、分析和制造。中国经过近三十年的发展，制造业得到了极大的发展，制造的问题基本得到了解决。设计领域在近十年来也取得了长足进步，这主要是得益于广泛普及和三维设计软件的应用，包括 CATIA、UG、Pro/E 等。创新的产品设计是自主创新的第一步，但仅仅设计还不够，还需要分析和优化才能获得满足要求的设计。因此，在创新设计的基础上，加入全面的设计分析和优化，是产品创新的必要和关键环节。传统的设计分析和优化大多是基于理论建模和经验分析，其主要弊端是烦琐、速度慢、且不全面，阻碍了产品创新的快速实现。随着计算机的快速发展，计算机辅助工程 (Computer-Aided Engineering, CAE) 提供了各种快速的分析方法，可以在三维建模的基础上，利用有限元分析技术进行全面的分析，并根据分析结果对设计进行优化，从而获得满意的结果。这不仅提高了设计的质量，还大大缩短了产品设计的周期。

本书所涉及的基于 ANSYS CFX 软件进行流体力学的有限元分析方法，在航空航天、旋转机械、能源、石油化工、机械制造、汽车、生物技术、水处理、火灾安全、冶金、环保等领域，为全球 6000 多企业解决了大量的实际问题。本书第 1 版是国内第一本介绍 CFX 软件应用的图书，在 2012 年出版以来，获得了读者的广泛好评，已多次重印，并且，很多读者来信介绍了他们应用 CFX 的具体情况，还对这本书提出了很多宝贵意见和建议。在此基础上，我们根据用户的建议、结合相关企业研究需求和高校教学需求修订第 1 版内容，现推出第 2 版。第 2 版内容是在最新软件版本 ANSYS CFX 14 的基础上进行写作，更新了大量内容，并且更加贴合实际应用，相信可以更好地帮助读者深入应用 CFX。

本书主要由谢龙汉、赵新宇完成，参加本书编写和光盘开发的还有林伟、魏艳光、林木议、王悦阳、林伟洁、林树财、郑晓、吴苗、卢彩元、苏延全、蔡明京、王文娟、周金华、吕云峰、付应乾、唐长刚、王敏、杨峰、丁圆圆等，同时也非常感谢拓技工作室其他成员的帮助和支持。由于时间仓促，书中难免有疏漏之处，请读者指正。读者可通过电子邮件 tenlongbook@163.com 与我们交流。希望读者一如既往地支持我们，给我们提出更多的宝贵意见，让我们一起助力中国创造。

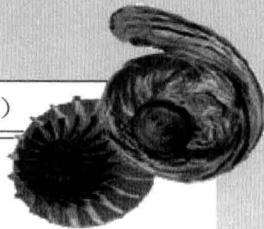
编著者



目 录

第1章 流体流动分析概述	1	3.3.6 网络输出	43
1.1 流体分析的发展	2	3.3.7 操作控制树的使用	43
1.1.1 CFD的提出	2	实例 3-1 圆柱相交水槽的网格划分	44
1.1.2 CFD软件简介	2	3.4 以 CFX-TurboGrid 划分网格	53
1.1.3 流体分析的应用领域	3	实例 3-2 涡轮网格划分	58
1.2 CFX 软件简介	4	本章小结	63
1.2.1 Windows 版本运行方法	6	第4章 稳态和非稳态模拟	64
1.2.2 并行计算	6	4.1 稳态模拟	65
1.3 CFX 与其他软件的数据交换	7	4.1.1 稳态模拟的设定	65
本章小结	7	4.1.2 稳态模拟的输出	67
第2章 CFX 基本理论和方法	8	4.2 非稳态模拟	69
2.1 基本符号和变量	9	4.2.1 非稳态模拟的设定	69
2.2 计算流体力学原理	11	4.2.2 非稳态模拟的输出	75
2.3 ANSYS CFX 中的湍流模型	12	本章小结	76
2.3.1 k- ϵ 模型	12	第5章 物理定义 CFX-Pre	77
2.3.2 BSL k- ω 模型	14	5.1 CFX-Pre 进行物理定义的前期	
2.3.3 Shear Stress Transport 模型	16	工作	78
2.3.4 Reynolds Stress 模型	16	5.1.1 CFX-Pre 窗口工具介绍	78
2.4 壁面函数理论	19	5.1.2 导入网格	79
2.5 多孔介质中的流动理论	22	5.1.3 操作控制	80
2.6 表达式语言和命令语言	24	5.1.4 前处理主要功能	81
本章小结	31	5.2 域	82
第3章 网格生成	32	5.2.1 域前设定	82
3.1 网格生成方法	33	5.2.2 域设定	100
3.2 以 ANSYS ICEM 划分网格	34	5.2.3 子域	122
3.3 ANSYS ICEM CFD 基本用法	36	5.2.4 点源	128
3.3.1 模型接口	36	5.2.5 共轭传热模拟	130
3.3.2 几何功能	36	5.3 边界条件	130
3.3.3 自动网格编辑	38	5.3.1 基本设定	130
3.3.4 生成拓扑	40	5.3.2 边界类型	131
3.3.5 网格编辑	42	5.3.3 入口边界设定	132

5.3.4 出口边界设定	139	8.1.3 物理问题定义	218
5.3.5 开放式出口设定	142	8.1.4 交界面定义	219
5.3.6 壁面边界设定	145	8.1.5 边界条件定义	219
5.3.7 对称面边界条件	149	8.1.6 最后操作	219
5.3.8 初始边界条件设定	149	8.2 旋转机械后处理 Turbo Post	220
5.3.9 边界条件文件	152	8.2.1 初始化	221
5.3.10 域交界面	154	8.2.2 四种可用实体	221
5.4 求解器控制	156	8.2.3 旋转机械宏	223
5.4.1 如何定义求解器设置	156	本章小结	225
5.4.2 求解格式	157	第9章 内部流动分析实例	226
5.4.3 时间步选择	158	实例 9-1 弯管内气体的流动与 传热	227
5.4.4 时间尺度控制	158	实例 9-2 静止混合器中的流动	242
5.4.5 收敛方案	160	本章小结	257
5.4.6 逝去时间控制	161	第10章 外部流动分析实例	258
5.4.7 固体计算域时间尺度控制	161	实例 10-1 物体周围绕流分析	259
5.4.8 方程分类设定	161	实例 10-2 自由表面流动模拟	277
5.4.9 高级设置和关键点	162	本章小结	297
5.4.10 输出文件和监控	162	第11章 换热流动分析实例	298
本章小结	164	实例 11-1 带有共轭换热的流动	299
第6章 数值求解 CFX-Solver	165	实例 11-2 燃料管道辐射换热模拟	319
6.1 定义模拟计算	166	本章小结	333
6.2 并行计算	170	第12章 非稳态分析实例	334
6.3 工作界面	171	实例 12-1 冶金用结晶器钢水液面 波动模拟	335
6.4 求解文件的输出	176	实例 12-2 附加变量非稳态模拟 实例	361
本章小结	177	本章小结	380
第7章 后处理 CFX-Post	178	第13章 多孔介质和气固两相分析 实例	381
7.1 CFX 后处理工作界面	179	实例 13-1 多孔介质模型案例分析	382
7.2 CFX 后处理的工作流程	181	实例 13-2 气固两相流案例分析	398
7.2.1 创建位置	181	本章小结	415
7.2.2 创建对象	193	参考文献	416
7.2.3 创建数据	202		
7.2.4 报告工具和文件	209		
本章小结	213		
第8章 旋转机械前后处理	214		
8.1 旋转机械前处理 Turbo Pre	215		
8.1.1 基本设置	215		
8.1.2 组件定义	216		



第1章 流体流动分析概述

流体力学是研究流体平衡和宏观运动规律的科学。其研究流体平衡的条件及其压强分布, 流体运动的基本规律, 流体绕流某物体或流过某通道时的速度分布、压强分布、能量损失, 以及流体与固体间的相互作用等。

流体力学研究方法分为理论分析方法、试验研究方法和数值计算方法三种, 本章重点介绍数值计算方法, 其实现步骤包括: ①对实际的流体力学问题进行科学抽象, 建立理论模型; ②对模型建立描写流体运动规律的封闭方程组, 以及与之相应的边界条件和初始条件; ③合理选用计算方法, 可以是有限差分方法、特征线方法、有限元方法、边界元方法、谱方法等; ④编程计算或使用商业软件计算; ⑤分析结果。

电子计算机的出现和迅速发展大大改变了科学技术发展的进程。流体力学的发展也因此出现了崭新的面貌。计算流体动力学(CFD)应运而生, 早期的计算流体力学是通过编程实现的, 但编出的程序没有可移植性, 无法广泛应用, 渐渐为商业CFD软件所替代。

CFX 是全球第一个通过 ISO9001 质量认证的大型商业 CFD 软件, 是英国 AEA Technology 公司为解决其在科技咨询服务中遇到的工业实际问题而开发, 诞生在工业应用背景中的 CFX 一直将精确的计算结果、丰富的物理模型、强大的用户扩展性作为其发展的基本要求, 并以其在这些方面的卓越成就, 引领 CFD 技术的不断发展。目前, CFX 已经遍及航空航天、旋转机械、能源、石油化工、机械制造、汽车、生物技术、水处理、防火安全、冶金、环保等领域, 为其在全球 6 000 多个用户解决了大量的实际问题。



本章内容

- 流体分析的发展
- CFD 软件简介

- 流体分析的应用领域

1.1 流体分析的发展

1.1.1 CFD 的提出

CFD (Computational Fluid Dynamics, 计算流体动力学) 是计算技术与数值计算技术的结合体, 是将流体试验用数值模拟方法求解的过程。

数值模拟就是数值求解控制流体流动的微分方程, 得出流场在连续区域上的离散分布, 从而近似模拟流体流动情况。

CFD 在最近 20 年中得到飞速的发展, 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试验的方法都有较大的限制。例如, 由于问题的复杂性, 既无法作分析解, 也因费用昂贵而无力进行试验确定, 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 软件可以拓宽试验研究的范围, 减少成本昂贵的试验工作量。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试验, 历史上也曾有过首先由 CFD 数值模拟发现新现象而后由试验予以证实的例子。

CFD 软件一般都能推出多种优化的物理模型, 如定常或非定常流动、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, 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、后处理工具, 这就省却了科研工作者在计算机方法、编程、前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 软件简介

目前, CFD 软件主要可以分为三类: 第一类是针对具体问题的专用程序, 如 TPS-2D 和 TPS-3D 等; 第二类是针对一种类型问题编制的程序, 专业性较强; 第三类是 CFD 的软件包, 具有完善的前处理和后处理系统, 其求解器部分可以容纳大量的物理模型, 可用于分析涉及流体力学的各类问题, 无论该问题是一维、二维还是三维, 湍流还是层流, 牛顿流体还是非牛顿流体, 都可以求解, 并且可以处理各种不同的、简单的或十分复杂的几何形体。该类大型商业软件较成熟的一般有 ANSYS (CFX)、FLUENT、FLOW3D、PHOENICS、STAR-CD 等。其优点在于不必深入研究控制方程, 只需研究问题的物理本质、问题的提法、边界(初值)条件和计算结果的合理解释等重要方面。

自从 1981 年英国 CHAM 公司首先推出求解流动与传热问题的商业软件 PHOENICS 以来, 迅速在国际软件产业中形成了统称为 CFD 软件的市场。目前, 全世界至少已有 50 余种这样的流动与传热问题的商业软件, 在促进 CFD 技术应用于工业实际中起了很大的作用。下面介绍当今世界上应用较广的 CFD 商业软件。

(1) CFX

该软件采用有限容积法、拼片式块结构化网络, 在非正交曲线坐标(适体坐标)系上

进行离散, 变量的布置采用同位网格方式。对流项的离散格式包括一阶迎风格式、混合格式、QUICK、CONDIF、MUSCI 及高阶迎风格式。压力与速度的耦合关系采用 SIMPLE 系列算法 (SIM2PLEC), 代数方程求解的方法中包括线迭代、代数多重网络、ICCG、STONE 强隐方法及块隐式 (BIM)。软件可计算不可压缩及可压缩流动、耦合传热问题、多相流、化学反应、气体燃烧等问题。

(2) FIDAP

FIDAP (Fluid Dynamics Analysis Package), 是 1983 年由美国 Fluid Dynamics International Inc. 推出的世界上第一个使用有限元法 (FEM) 的 CFD 软件。可以接受如 I-DEAS、PATRAN、ANSYS 和 ICEMCFD 等著名生成网格的软件所产生的网格。该软件可以计算可压缩及不可压缩流、层流与湍流、单相与两相流、牛顿流体及非牛顿流体的流动问题。

(3) FLUENT

这一软件由美国 FLUENT Inc. 于 1983 年推出, 是继 PHOENICS 软件之后的第二个投放市场的基于有限容积法的软件。它包含结构化及非结构化网格两个版本。在结构化网格版本中有适体坐标的前处理软件, 同时也可以纳入 I-DEAS、PATRAN、ANSYS 和 ICEMCFD 等著名生成网格的软件所产生的网格。速度与压力耦合采用同位网格上的 SIM2PLEC 算法。对流项差分格式纳入了一阶迎风、中心差分及 QUICK 等格式。软件能计算可压缩及不可压缩流动、含有粒子的蒸发、燃烧过程、多组分介质的化学反应过程等问题。

(4) PHOENICS

这是世界上第一个投放市场的 CFD 商业软件, 可以算是 CFD 商用软件的鼻祖。这一软件中所采用的一些基本算法, 如 SIMPLE 方法、混合格式等, 正是由该软件创始人 D.B. Spalding 及其合作者 S.V. Patankar 等所提出的, 对以后开发的商业软件有较大的影响。近年来, PHOENICS 软件在功能上与方法方面做了较大的改进, 包括纳入拼片式多网格及细密网格嵌入技术, 同位网格及非结构化网格技术; 在湍流模型方面开发了通用的零方程、低 Reynolds-k-E 模型、RNGk-E 模型等。应用这一软件可计算大量的实际工作问题, 其中包括: 城市污染预测、叶轮中的流动、管道流动。

(5) STAR-CD

该软件名称 STAR 是 Simulation of Turbulent Flow in Arbitrary Region 的缩写, 连字符后的 CD 是开发商 Computational Dynamics Ltd 的简称。这是基于有限容积法的一个通用软件。在网格生成方面, 采用非结构化网格, 单元的形态可以有六面体、四面体、三角形截面的棱柱体、金字塔形的锥体及 6 种形状的其他多面体。应用这一软件可以计算稳态与非稳态流动、牛顿流体及非牛顿流体的流动、多孔介质中的流动、亚声速及超声速流动, 并且这一软件在世界汽车工业中应用的十分广泛。

1.1.3 流体分析的应用领域

流体分析已经在多个领域有了较好的应用, 尤其在涉及空气动力学和流体动力学的方面, 计算流体力学的主要应用范围包括以下几种领域:

(1) 航空航天领域

流体分析可以应用于航空航天领域, 模拟飞机的马赫数和攻角。使用 CFX 强大的并行

功能, 软件自动将网格分为若干部分, 分配到网络上的各个处理器计算, 这使得大规模 CFD 问题的计算能够在短时间内得到结果。CFX 模拟的升力、阻力及力矩系数都与试验值吻合得很好。

(2) 汽车领域

模拟汽车外流场, 计算对称面、地面和车身表面的压力分布。采用 CFD 模拟, 可以有效地减少风洞试验次数、节省经费、加快新车的研发过程。

(3) 船舶工业

应用船舶问题。可以计算某航行速度下, 整船所受的阻力。还可以采用自由液面模型, 使用自适应网格技术来加密自由液面的网格, 从而更精确地捕捉到自由液面。

(4) 建筑业

可以通过流体分析计算建筑的外部风场, 可以为建筑的强度设计提供有效的压力数据, 同时针对建筑物的具体特点, 设计更灵活的通风系统。

(5) 火灾通风

利用 CFD 技术模拟地铁火灾及通风。可以为火灾蔓延的走势做事先的模拟, 为火灾后的人员疏散, 降低人员伤亡提供可靠的依据。

(6) 涡轮水泵

采用 CFX 模拟常规涡壳水泵。其通用网格界面 (GGI) 模型使得能够用更短的时间, 轻松完成涡壳和叶片的网格划分, 而所得到的结果包括水泵内每一点的速度和压力, 这是试验测量所无法完成的。通过 CFX 模拟, 分析水泵内的分离区和回流区产生的原因并加以改进, 提高了水泵的效率。

(7) 管壳换热

管壳换热器的流线及温度分布。CFX 强大的全隐式耦合算法允许其同时考虑管外流体、管内流体, 以及管壁部分的耦合传热。通过 CFX 的模拟, 能得到换热器内局部过热的具体位置, 为进一步改造提供了丰富的信息。

(8) 冶金行业

CFX 模拟的钢水铸造过程, 可以描述铸造模具内的流线及表面温度分布。CFX 丰富的物理模型中包括了凝固模型, 该模型考虑了瞬态的潜热变化、凝固过程中熔融区的阻力, 以及相变过程中的湍流衰减。

(9) 石油化工

利用 CFX 模拟的流化床内气泡的形成和发展过程。可以模拟任何扩散和连续流动的组合, 包括液体、固体、气体和化学物质。

1.2 CFX 软件简介

CFX 是全球第一个通过 ISO9001 质量认证的大型商业 CFD 软件, 是英国 AEA Technology 公司首先为解决核反应堆多相流问题而开发, 并于 1986 年开始作为商业软件向全球发售。目前 CFX 被纳入 ANSYS 软件中, 成为 ANSYS 的一个模块, 当前最新版本是 14.0。自从瑞士 PSI 成为 CFX 第一个商业用户以来的 10 多年时间里, CFX 的用户已近 600

万家,遍及过程工业、能源、机械制造、汽车、航空、水处理、防火安全及环保等各个行业。在欧洲的过程工业,80%的企业使用 CFX 作为主要的 CFD 工具,在过程工业中 CFX 已成为最主要的单元模拟软件。

对于一次具体的设计或优化过程,使用 CFX 的典型过程包括如下 6 个阶段:

(1) 几何造型

通过点、线、面、体等元素最终生成三维几何模型,其目标是描述流体流动区域。

(2) 设置流体介质的物理化学属性和机理模型

CFX 包含一个 6 000 余种流体介质属性的数据库,以及丰富的机理模型,用户通过菜单系统可选定适合特定问题的流体介质和机理模型。同时,CFX 提供足够的开放性,可以修改流体介质属性参数、添加新流体介质、修改机理模型参数,甚至创建自己的机理模型。

(3) 设置边界条件

边界条件是指流动区域的边界(如入口、出口、壁面等)处应满足的物理化学条件。

CFX 中包含大量的边界条件库并给出了详细的指导,通过菜单系统人机交互设置。

(4) 生成网格

网格生成的目标是离散流动区域,流体力学基本方程组就在这些离散化后的网格单元上求解,由于流动区域的形状可能会各种各样,通常网格生成的工作意义重大而又非常烦琐。在 CFX 中,这一步的工作可以进行视具体情况人为控制或自动进行。

(5) 求解

CFX 的求解器可以监视求解的全过程,显示收敛情况,并会在收敛不太好的情况下自动调整求解策略。

(6) 可视化、定性和定量化分析

CFX 的后处理通过现代可视化技术,可以深入了解流场的细节。如速度、压力、温度、浓度等物理量的分布,不仅获得定性结果,而且由于 CFX 后处理提供宏语言,可以在计算结果基础上进一步得到各种宏观量,以进行定量化分析。

CFX 软件有如下几个特点:

(1) 直观友好界面

CFX 软件用户界面简单友好,使用方便。

(2) 精确数值处理

① CFX 采用了基于有限元的有限体积法,在保证有限体积法的守恒特性的基础上,吸收了有限元法的数值精确性。

② CFX 在湍流模型的应用上,除了常用的湍流模型外,最先使用了大涡模拟 (LES) 和分离涡模拟 (DES) 等高级湍流模型。

(3) 稳健快速求解

使用全隐式多网格耦合求解,同时求解动量方程和连续性方程。

(4) 丰富物理模型

CFX 拥有包括流体流动、传热、辐射、多相流、化学反应、燃烧等问题的通用物理模型;还拥有如气蚀、凝固、沸腾、多孔介质、相间传质、非牛顿流体、喷雾干燥、动静干涉、真实气体等大批复杂现象的实用模型。

1.2.1 Windows 版本运行方法

启动 CFX 14.0，弹出的运行窗口如图 1-1 所示。

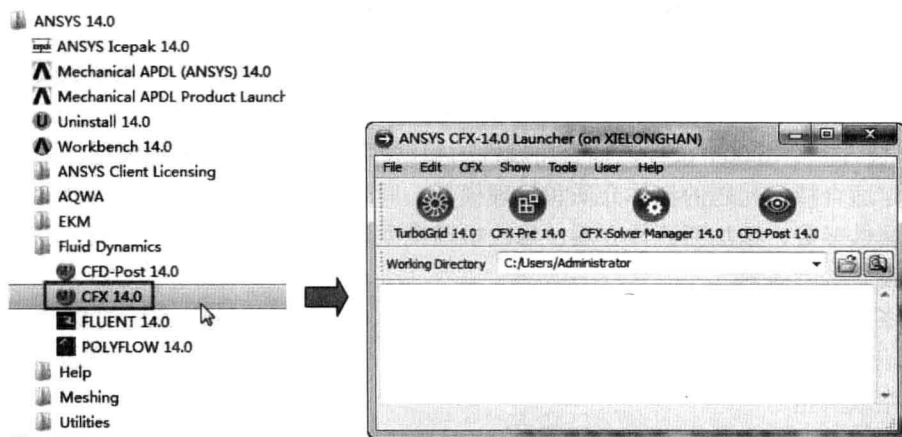


图 1-1 CFX 启动及运行窗口

CFX 运行窗口主要由四个部分组成，其功能分别如下：

- ① TurboGrid 14.0。旋转机械设定，通过此项设定，可以进入旋转机械网格划分界面，通过导入图形，设置拓扑，生成网格等操作生成旋转机械网格文件。
- ② CFX-Pre 14.0。CFX 前处理，通过前处理对所模拟的模型进行设定，选择求解方法，控制方程，设定边界条件初始条件等。
- ③ CFX-Solver Manager 14.0。CFX 求解，对建立的模型进行求解。
- ④ CFX-Post 14.0。CFX 后处理，使用后处理查看求解结果，对结果进行分析。

1.2.2 并行计算

并行性是指在同一时刻或同一时间间隔内完成两种或两种以上性质相同或不同的工作。只要时间上互相重叠就存在并行性。

为提高计算效率或降低单机的计算负担，CFX 求解可以通过并行计算来完成。并行计算模式如图 1-2 所示。

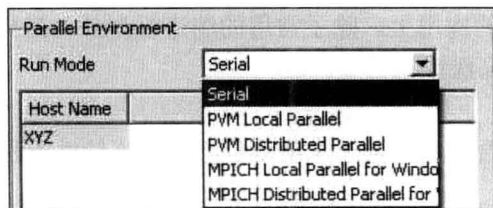


图 1-2 并行计算运行模式设定

并行计算类型可以分为以下三种：

- ① 串联计算（Serial）。默认模式，按常规模式计算模拟。

② 局部并行 (Local Parallel)。分别有两种局部并行模式，分别是 PVM (并行虚拟计算机) 局部并行和 MPICH (开放源代码的消息传递接口) 局部并行，共同点在于局部并行都是基于本机的并行计算，是基于机器硬件的，一般适用于多个处理器的大型计算机。

③ 分布式并行 (Distributed Parallel)。同样有两种分布式并行模式，分别是 PVM (并行虚拟计算机) 局部并行和 MPICH (开放源代码的消息传递接口) 分布式并行，共同点在于分布并行可以通过网络同时使用多台计算机进行计算。

1.3 CFX 与其他软件的数据交换

ANSYS CFX 可以与其他软件进行数据交换，从而实现对其他软件数据库的引入或对 CFX 数据的导出查看，可以与 CFX 进行数据交换的软件有以下三种：

① Fortran。CFX 具有外接软件的功能，可与用户自定义程序之间进行数据交换，目前的位置，CFX 可接受的程序仅限于 Fortran 软件编写的程序。

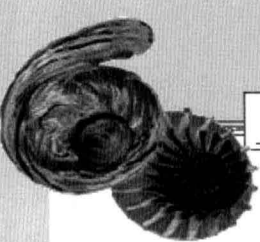
② ANSYS。CFX 可以与 ANSYS 软件并行计算模拟，诸如液固耦合、磁场耦合等算例，二者同时进行计算，并同时进行数据交换。

③ Excel。CFX 的数据可以导出表格形式，通过 Excel 打开查看 CFX 计算结果，CFX 边界条件设定也可通过导入 Excel 表格数据的方法来实现多点指定。

本章小结

随着计算机和数学的飞速发展，计算流体力学得到了越来越广泛的应用。而大型商业 CFX 软件在计算流体力学方面占了越来越大的比重，具有通用性强、适用性广等优点。在空气动力学和流体动力学领域，数学模型和边界条件都极其复杂，研究人员更愿意把更多的时间用在数学方程的建立和模型的选择上，而避开复杂的编程过程，因此，更加倾向于使用商业软件进行模拟。

本章通过对 CFX 软件可以实现的功能及其运行方式进行了介绍，可以对 CFX 可以涉及的领域有一定的了解，继而决定是否选择 CFX 软件作为自己模拟的工具。



第2章 CFX 基本理论和方法

CFX 的物理模型是建立在世界最大的科技工程企业 AEA Technology 的 50 余年科技工程实践经验基础之上，经过近 30 年的发展，CFX 拥有包括流体流动、传热、辐射、多相流、化学反应、燃烧等问题的丰富的通用物理模型；还拥有诸如气蚀、凝固、沸腾、多孔介质、相间传质、非牛顿流、喷雾干燥、动静干涉、真实气体等大批复杂现象的实用模型。

此外，CFX 为用户提供了从方便易用的表达式语言（CEL）到功能强大的用户子程序的一系列不同层次的用户接口程序，允许用户加入自己的特殊物理模型。

本章通过介绍 CFX 模型中流动、传热、质量传输和单相流、单组分和多组分流体使用的数学方程，详细介绍 CFX 求解数学模型的机理，使用户能够熟悉 CFX 模型对应的数学公式，从而能准确的根据自身的需要选择正确的数学模型。

CFX 的模型理论具有大量经验模型和数学方程，本章仅对经常使用的湍流模型，壁面理论和多孔介质流动理论进行详细介绍，其中包含最基本的质量守恒模型和动量守恒模型，供用户参考。



本章内容

- | | |
|-----------------------|--------------|
| ➤ 基本符号和变量 | ➤ 多孔介质中的流动理论 |
| ➤ 计算流体力学原理 CFX 中的湍流模型 | ➤ 表达式语言和命令语言 |
| ➤ 壁面函数理论 | |

2.1 基本符号和变量

CFX 流动、热量、质量传输等数学方程都设定变量, CFX 库文件内变量的表达符号和变量量纲都有固定的格式和数值, CFX 库文件使用的变量符号及量纲参见表 2-1。

表 2-1 变量符号与量纲

符 号	描 述	量 纲	数 值
C_E	线性能量源项系数	$\text{ML}^{-1}\text{T}^{-3}\Theta^{-1}$	
C_h	斯坦顿系数	1	
C_{R_1}	线性阻力系数	$\text{ML}^{-3}\text{T}^{-1}$	
C_{R_2}	二次阻力系数	ML^{-4}	
C_{ε_1}	k-ε湍流模型常数	1	1.44
$C_{\varepsilon 1\text{RNG}}$	RNG k-ε湍流模型系数	1	$1.42 - f_h$
$C_{\varepsilon 2}$	k-ε湍流模型常数	1	1.92
$C_{\varepsilon 2\text{RNG}}$	RNG k-ε湍流模型常数	1	1.68
C_μ	k-ε湍流模型常数	1	0.09
$C_{\mu\text{RS}}$	雷诺压力模型常数	1	
$C_{\mu\text{RNG}}$	RNG k-ε湍流模型常数	1	0.085
C	声速	LT^{-1}	
c_A, c_B	组分 A, B 浓度 (单相流中组分 A, B 浓度)	ML^{-3}	
c_S	雷诺压力模型常数	1	0.22
c_p	比定压热容	$\text{L}^2\text{T}^{-2}\Theta^{-1}$	
c_V	比定容热容	$\text{L}^2\text{T}^{-2}\Theta^{-1}$	
c_{ε_1}	雷诺压力模型常数	1	1.45
c_{ε_2}	雷诺压力模型常数	1	1.9
D_{AB}	组分 A, B 二元扩散率	L^2T^{-1}	
D_ϕ	附加变量的运动扩散率	L^2T^{-1}	
D	长度或距离	L	
E	近壁模型常数	1	9.793
f_μ	零方程湍流模型常数	1	0.01
f_h	RNG k-ε湍流模型系数	1	
g	重力加速度	LT^{-2}	
h, h_{stat}	静态比热焓	L^2T^{-2}	
h_c	传热系数	$\text{MT}^{-3}\Theta^{-1}$	
h_{tot}	比总焓	L^2T^{-2}	
k	单位体积湍动能	L^2T^{-2}	
M	局部马赫数	1	
m	质量流量速率	MT^{-1}	
P_k	湍流剪切产生项	$\text{ML}^{-1}\text{T}^{-3}$	
p, p_{stat}	静态压强	$\text{ML}^{-1}\text{T}^{-2}$	

续表

符 号	描 述	量 纲	数 值
p_{ref}	参考压强	$\text{ML}^{-1}\text{T}^{-2}$	
p_{tot}	总压	$\text{ML}^{-1}\text{T}^{-2}$	
p'	修整压强	$\text{ML}^{-1}\text{T}^{-2}$	
R_0	通用气体常数	$\text{L}^2\text{T}^{-2}\Theta^{-1}$	8314.5
Re	雷诺数	1	
$\mathbf{r}$	局部矢量	L	
r_α	α 相的体积分数	1	
S_E	能量源项	$\text{ML}^{-1}\text{T}^{-3}$	
S_M	动量源项	$\text{ML}^{-2}\text{T}^{-2}$	
S_{MS}	质量源项	$\text{ML}^{-3}\text{T}^{-1}$	
S_{c_i}	湍动能 Sc 数	1	
$s_{\alpha\beta}$	从 α 相到 β 相的质量流量速率	MT^{-1}	
T, T_{stat}	静态温度	Q	
T_{dom}	域温度	Q	
T_{ref}	布辛涅司克近似中使用的浮力参考温度	Q	
T_{sat}	饱和温度	Q	
T_{tot}	总温	Q	
$\mathbf{U}$	X, Y, Z 方向速度矢量	LT^{-1}	
U	速度值	LT^{-1}	
$\mathbf{u}$	湍流波动速度分量	LT^{-1}	
W_f	流体黏度和体积力	$\text{ML}^{-1}\text{T}^{-3}$	
W	相对分子质量（理想气体模型）	1	
Y_A	流体中组分 A 的质量分数		
α	α 相下标		
β	β 相下标		
β	热膨胀系数（布辛涅司克近似）	Θ^{-1}	
β_{RNG}	RNG k- ε 湍流模型常数	1	0.012
Γ	扩散率	$\text{ML}^{-1}\text{T}^{-1}$	
Γ_A	相 A 的分子扩散率	$\text{ML}^{-1}\text{T}^{-1}$	
Γ_ϕ	附加变量动力扩散率	$\text{ML}^{-1}\text{T}^{-1}$	
Γ_t	湍动能扩散率	$\text{ML}^{-1}\text{T}^{-1}$	
δ	单位矩阵或克罗迪尔函数	1	
ε	湍动能耗散率	L^2T^{-3}	
ζ	体积黏度	$\text{ML}^{-1}\text{T}^{-1}$	
κ	卡门常数	1	0.41
λ	导热系数	$\text{MLT}^{-3}\Theta^{-1}$	
μ	分子黏度	$\text{ML}^{-1}\text{T}^{-1}$	
μ_t	湍动能黏度	$\text{ML}^{-1}\text{T}^{-1}$	
μ_{eff}	有效黏度	$\text{ML}^{-1}\text{T}^{-1}$	
ρ	密度	ML^{-3}	

续表

符 号	描 述	量 纲	数 值
Pr	层流 Pr 数	1	
Pr_t	湍流 Pr 数	1	
σ_k	k 方程湍流模型常数	1	1
σ_ε	k - ε 湍流模型常数	1	1.3
σ_w	k - ω 湍流模型常数	1	2
σ_{eRS}	雷诺压力模型常数	1	
σ_{kRNG}	RNG k - ε 湍流模型常数	1	0.7179
$\sigma_{\varepsilon RNG}$	RNG k - ε 湍流模型常数	1	0.7179
τ	剪切应力或亚格子应力模型分子应力张量	$ML^{-1}T^{-2}$	
ν	比容	$M^{-1}L^3$	
Φ	附加变量	ML^{-3}	
ϕ	通用标量变量		
ω	角速度	T^{-1}	

变量单位中 M 为质量, L 为长度, T 为时间, Θ 为温度, A 为化学计量。

2.2 计算流体力学原理

计算流体力学是计算流体动力学的简称, 用离散化的数值方法及电子计算机对流体无黏绕流和黏性流动进行数值模拟和分析的学科, 算力学的一个分支。无黏绕流包括低速流、跨声速流、超声速流等; 黏性流动包括湍流、边界层流动等。计算流体力学是为弥补理论分析方法的不足而于 20 世纪 60 年代发展起来的, 并相应地形成了各种数值解法。主要是有限差分法和有限元法。流体力学运动偏微分方程有椭圆形、抛物形、双曲线形和混合型之分, 计算流体力学很大程度上就是针对不同性质的偏微分方程采用和发展了相应的数值解法。

计算流体力学的兴起推动了研究工作的发展。自从 1687 年牛顿定律公布以来, 直到 20 世纪 50 年代初, 研究流体运动规律的主要方法有两种: 一是试验研究, 以地面试验为研究手段; 另一种是理论分析方法, 利用简单流动模型假设, 给出所研究问题的解析解。理论工作者在研究流体流动规律的基础上建立了各类型主控方程, 提出了各种简化流动模型, 给出了一系列解析解和计算方法。这些研究成果推动了流体力学的发展, 奠定了今天计算流体力学的基础, 很多方法仍是目前解决实际问题时常采用的方法。然而, 仅采用这些方法研究较复杂的非线性流动现象是不够的, 特别是不能满足 20 世纪 50 年代已开始高速发展起来的航天器绕流流场特性研究的需要。

计算流体力学的兴起促进了试验研究和理论分析方法的发展, 为简化流动模型的建立提供了更多的依据使很多分析方法得到发展和完善。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, 即数值模拟方法研究流体运动的基本物理特性。这种方法的特点如下:

- ① 给出流体运动区域内的离散解, 而不是解析解。这区别于一般理论分析方法。