

ANSYS 技术丛书

CAE大神
★流沙★
倾情之作

ANSYS CFD

入门指南

计算流体力学基础及应用



以实际应用为出发点

实现建模、网格划分、求解、后处理一站式学习

助力读者搭建起完整的CFD入门学习体系



扫码享增值福利



胡坤 胡婷婷 马海峰 等编著

机械工业出版社
CHINA MACHINE PRESS

ANSYS 技术丛书

ANSYS CFD 入门指南

——计算流体力学基础及应用

胡 坤 胡婷婷 马海峰 顾中浩 编著

 **机械工业出版社**
CHINA MACHINE PRESS

本书借助ANSYS Workbench平台,全面讲述了CFD解决工程问题的完整流程,主要内容包括流体计算域创建、计算网格生成、物理问题计算求解、计算后处理等。本书注重理论和实践相结合,结构脉络清晰,可以帮助读者迅速掌握CFD学习的流程、方法和思路,并建立起自己的一套CAE问题解决方案。

本书可以作为机械、力学、水利、汽车、航空航天、能源动力、电子工程等领域本科生、研究生和教师的参考书及教学用书,也可以供相关领域从事产品设计、仿真和优化的工程技术人员及广大CAE爱好者参考。

图书在版编目(CIP)数据

ANSYS CFD 入门指南: 计算流体力学基础及应用 / 胡坤等编著.
—北京: 机械工业出版社, 2018.10

(ANSYS 技术丛书)

ISBN 978-7-111-61198-1

I. ①A… II. ①胡… III. ①工程力学—流体力学—有限元分析—应用软件 IV. ①TB126-39

中国版本图书馆CIP数据核字(2018)第243660号

机械工业出版社(北京市百万庄大街22号 邮政编码100037)

策划编辑: 徐强 责任编辑: 徐强

责任校对: 陈越 封面设计: 鞠杨

责任印制: 孙炜

保定市中国画美凯印刷有限公司印刷

2019年1月第1版第1次印刷

184mm×260mm·16印张·406千字

标准书号: ISBN 978-7-111-61198-1

定价: 65.00元

凡购本书,如有缺页、倒页、脱页,由本社发行部调换

电话服务

网络服务

服务咨询热线: 010-88361066 机工官网: www.cmpbook.com

读者购书热线: 010-68326294 机工官博: weibo.com/cmp1952

010-88379203 金书网: www.golden-book.com

封面无防伪标均为盗版

教育服务网: www.cmpedu.com

前 言

计算流体力学是一门汇集了流体力学、数学、计算机科学等内容的综合学科，所涉及内容繁多，既包含了流体流动的众多物理模型，还包括了数值计算的诸多理论，同时还涉及数值算法在计算机中的实现等。要将如此复杂的理论体系应用于工程中，无疑对使用者自身的素质提出了极高的要求。

目前有众多成熟的计算流体力学软件包可供使用，如 Fluent、STAR CD、STAR CCM+、CFX 等，这些成熟的软件都提供了良好的前后处理接口，通过将复杂的 CFD 计算理论进行封装，大大降低了 CFD 软件的工程应用门槛。

CFD 的工程应用包含了前处理、计算求解以及后处理三个主要过程。其中前处理主要用于计算区域创建、网格划分以及计算参数指定。计算求解主要用于离散方程的数值计算。后处理则主要将计算获得的数据进行可视化显示，以方便实现工程应用。

ANSYS Workbench 提供了一整套 CFD 解决方案，其 DesignModeler 模块可用于前处理几何计算域的创建，Mesh 模块可用于计算网格的生成，而 Fluent 及 CFX 可用作计算求解，CFD-Post 用于计算后处理。

本书借助 ANSYS Workbench 平台，全面讲述 CFD 解决工程问题的完整流程，主要内容包括：

流体计算域创建。主要介绍计算域几何创建，包括 ANSYS DesignModeler 模块的详细使用方法以及常见的流体计算区域创建方式。

计算网格生成。包括 Mesh 模块介绍以及常用的网格生成方法。

物理问题计算求解。包括 Fluent 软件的使用介绍，以及物理模型、边界条件、求解控制参数等的设置方法。

计算后处理。主要包括 CFD-Post 模块的应用以及常见的后处理方式，如平面创建、云图显示、曲线图及数据输出等。

本书面向的读者为无任何 CFD 基础的工程师或科研人员，虽然本书不要求读者具备此类基础，但是拥有流体力学、数值计算以及计算机程序设计基础的人员，则能够更好地利用本书的内容。

本书中的案例文件保存在网盘中（链接：<https://pan.baidu.com/s/1CtMxjEVJp5TftrNRZC0pJg> 密码：allS），读者可自行下载。同时也欢迎读者加入 QQ 群（29446893）对本书中的内容进行交流和探讨。



群名称：ANSYS CFD
入门指南
群号：29446893

目 录

前 言

第 1 章 计算流体力学概述

| | |
|---------------------------|---|
| 1.1 计算流体力学 | 1 |
| 1.2 计算流体力学的应用领域 | 2 |
| 1.3 计算流体力学的发展 | 2 |
| 1.4 CFD 解决工程问题的基本流程 | 4 |

第 2 章 ANSYS CFD 软件简介

| | |
|-----------------------------|----|
| 2.1 CFD 工程应用一般流程 | 6 |
| 2.1.1 计算前处理 | 6 |
| 2.1.2 计算求解 | 6 |
| 2.1.3 计算后处理 | 7 |
| 2.2 ANSYS CFD 软件族简介 | 7 |
| 2.2.1 前处理软件: ICEM CFD | 7 |
| 2.2.2 CFD 求解器: Fluent | 8 |
| 2.2.3 CFD 求解器: CFX | 10 |
| 2.2.4 后处理模块: CFD-Post | 12 |
| 2.3 本章小结 | 13 |

第 3 章 计算域基础

| | |
|----------------------------------|----|
| 3.1 流体域的基本概念 | 14 |
| 3.1.1 内流计算域 | 14 |
| 3.1.2 外流计算域 | 15 |
| 3.1.3 混合计算域 | 15 |
| 3.1.4 流体域简化 | 15 |
| 3.1.5 多区域计算模型 | 16 |
| 3.2 流体域的创建方法 | 17 |
| 3.3 流体域创建工具 | 17 |
| 3.4 ANSYS DesignModeler 简介 | 17 |
| 3.4.1 启动 DM | 18 |
| 3.4.2 DM 的操作界面 | 19 |
| 3.5 草图功能 | 24 |
| 3.5.1 基准面 | 24 |
| 3.5.2 草图绘制 | 26 |
| 3.5.3 草图修改 | 27 |
| 3.5.4 尺寸指定 | 27 |
| 3.6 特征建模 | 27 |
| 3.6.1 拉伸特征 | 28 |
| 3.6.2 旋转特征 | 30 |

| | |
|-------------------------------|----|
| 3.6.3 扫掠特征 | 30 |
| 3.6.4 放样特征 | 31 |
| 3.6.5 抽壳特征 | 32 |
| 3.6.6 圆角特征 | 32 |
| 3.6.7 切割几何 | 32 |
| 3.7 几何操作 | 33 |
| 3.7.1 阵列 | 33 |
| 3.7.2 布尔运算 | 34 |
| 3.8 流体域抽取 | 35 |
| 3.8.1 Fill 功能 | 35 |
| 3.8.2 Enclosure 功能 | 36 |
| 3.9 实例 1: DM 建模基础 | 36 |
| 3.9.1 模型分析 | 36 |
| 3.9.2 第一种建模方式 | 37 |
| 3.9.3 第二种建模方式 | 40 |
| 3.10 实例 2: 汽车外流场计算域 | 42 |
| 3.11 实例 3: 汽车排气歧管内流场计算域 | 44 |
| 3.12 本章小结 | 46 |

第 4 章 网格基础

| | |
|----------------------------------|----|
| 4.1 流体网格基础概念 | 47 |
| 4.1.1 网格术语 | 47 |
| 4.1.2 网格形状 | 47 |
| 4.1.3 结构网格与非结构网格 | 48 |
| 4.2 网格的度量 | 48 |
| 4.2.1 网格数量 | 48 |
| 4.2.2 网格质量 | 49 |
| 4.3 ANSYS Mesh 软件 | 49 |
| 4.3.1 ANSYS Mesh 启动 | 49 |
| 4.3.2 软件界面 | 50 |
| 4.3.3 网格流程 | 50 |
| 4.4 网格质量评价 | 53 |
| 4.4.1 Element Quality | 53 |
| 4.4.2 Aspect Ratio | 54 |
| 4.4.3 Parallel Deviation | 55 |
| 4.4.4 Maximum Corner Angle | 56 |
| 4.4.5 Skewness | 56 |
| 4.4.6 Orthogonal Quality | 56 |

| | | | | | |
|---------------------------|-----------------|-----|----------------------|-------------------------|-----|
| 4.5 | 实例 1: T 型管 | 56 | 5.6.7 | Mixture 模型设置 | 121 |
| 4.6 | 实例 2: 反应器 | 63 | 5.6.8 | Eulerian 模型设置 | 122 |
| 4.7 | 实例 3: 划分扫掠网格 | 71 | 5.7 | 组分输运模型 | 122 |
| 4.7.1 | 几何模型 | 71 | 5.7.1 | Fluent 中的组分输运及反 应流模型 | 123 |
| 4.7.2 | 切分几何 | 72 | 5.7.2 | 组分输运模型前处理 | 124 |
| 4.7.3 | 划分网格 | 74 | 5.8 | 动区域模型 | 127 |
| 4.7.4 | 添加边界层 | 75 | 5.8.1 | 单运动参考系模型 | 128 |
| 4.8 | 实例 4: 局部控制 | 77 | 5.8.2 | 多运动参考系模型 | 131 |
| 4.8.1 | 参数优先级 | 77 | 5.8.3 | 滑移网格模型 | 134 |
| 4.8.2 | 实例描述 | 78 | 5.9 | 动网格模型 | 135 |
| 4.8.3 | 网格划分 | 78 | 5.9.1 | Fluent 中使用动网格 | 135 |
| 4.9 | 本章小结 | 91 | 5.9.2 | 网格更新方法 | 136 |
| 第 5 章 Fluent 求解器基础 | | | | | |
| 5.1 | Fluent 软件介绍 | 92 | 5.9.3 | 运动指定 | 141 |
| 5.1.1 | Fluent 工作界面 | 92 | 5.9.4 | 运动区域定义 | 144 |
| 5.1.2 | Fluent 模型树节点 | 93 | 5.9.5 | 网格预览 | 147 |
| 5.1.3 | Fluent 解决工程问题流程 | 96 | 5.10 | 案例 1: T 型管混合温度场计算 | 148 |
| 5.1.4 | Fluent 的应用领域 | 97 | 5.10.1 | 案例描述 | 148 |
| 5.2 | Fluent 边界条件 | 98 | 5.10.2 | 案例学习目标 | 148 |
| 5.2.1 | 边界条件分类 | 98 | 5.10.3 | 计算仿真目标 | 148 |
| 5.2.2 | 边界条件设置 | 99 | 5.10.4 | Fluent 设置 | 149 |
| 5.3 | 初始条件 | 100 | 5.10.5 | 计算后处理 | 160 |
| 5.3.1 | Fluent 中进行初始化 | 100 | 5.11 | 案例 2: Tesla 阀门内流场计算 | 166 |
| 5.3.2 | Patch | 102 | 5.11.1 | 案例描述 | 166 |
| 5.4 | 湍流模型 | 104 | 5.11.2 | Fluent 设置 | 168 |
| 5.4.1 | 湍流和层流判断 | 104 | 5.11.3 | 计算后处理 | 175 |
| 5.4.2 | 湍流求解方法 | 105 | 5.12 | 案例 3: 非牛顿流体流动计算 | 178 |
| 5.4.3 | Fluent 中的湍流模型 | 105 | 5.12.1 | 案例描述 | 178 |
| 5.4.4 | y^+ 的基本概念 | 107 | 5.12.2 | Fluent 设置 | 179 |
| 5.4.5 | 壁面函数 | 109 | 5.13 | 案例 4: 风扇流场计算 | 184 |
| 5.4.6 | 边界湍流设置 | 110 | 5.13.1 | 案例描述 | 184 |
| 5.5 | 传热模型 | 112 | 5.13.2 | Fluent 设置 | 185 |
| 5.5.1 | 壁面热边界 | 112 | 5.14 | 案例 5: 颗粒负载流动 | 192 |
| 5.5.2 | Fluent 中的辐射模型 | 113 | 5.14.1 | 案例描述 | 192 |
| 5.5.3 | 辐射模型的选择 | 114 | 5.14.2 | Fluent 设置 | 192 |
| 5.6 | 多相流模型 | 115 | 5.15 | 本章小结 | 199 |
| 5.6.1 | 多相流定义 | 115 | 第 6 章 计算后处理基础 | | |
| 5.6.2 | 多相流形态 | 115 | 6.1 | 流体计算后处理概述 | 200 |
| 5.6.3 | Fluent 中的多相流模型 | 116 | 6.2 | CFD-Post 软件介绍 | 200 |
| 5.6.4 | 多相流模型的选择 | 117 | 6.2.1 | CFD-Post 软件工作界面 | 200 |
| 5.6.5 | Fluent 多相流模拟步骤 | 119 | 6.2.2 | CFD-Post 的菜单项 | 201 |
| 5.6.6 | VOF 模型设置 | 120 | 6.2.3 | 工具栏按钮 | 202 |

| | | | | | |
|-------|--------------------|-----|-------|----------------------|-----|
| 6.2.4 | CFD-Post 计算后处理一般流程 | 203 | 6.3.4 | 其他工具 | 223 |
| 6.2.5 | CFD-Post 的启动方式 | 203 | 6.4 | 案例 1 : CFD-Post 基本操作 | 224 |
| 6.3 | CFD-Post 后处理功能 | 204 | 6.5 | 案例 2 : 定量后处理 | 237 |
| 6.3.1 | 创建后处理位置 | 204 | 6.6 | 案例 3 : 比较多个 CASE | 243 |
| 6.3.2 | 生成后处理对象 | 212 | 6.7 | 案例 4 : 瞬态后处理 | 246 |
| 6.3.3 | 数据操作 | 219 | 6.8 | 本章小结 | 250 |

1.1 计算流体力学

计算流体力学 (Computational Fluid Dynamic, 简称 CFD) 是 20 世纪 60 年代伴随计算机科学迅速崛起而形成的, 它是通过计算机数值模拟和可视化处理, 对流体流动和热传导等相关物理现象进行数值分析和研究的一门力学分支学科。传统的流体力学主要研究流体流动 (流体动力学) 或静止问题 (流体静力学), CFD 主要研究前一部分, 即流体动力学部分, 对于流体静力学问题, 虽然可以采用 CFD 解决, 但这并非 CFD 的初衷所在。

流体流动的物理特性通常以偏微分方程的方式进行描述, 这些方程控制着流体的流动过程, 常将其称为“CFD 控制方程”。宏观尺度的流动控制方程通常为 Navier-Stokes 方程 (不可压缩粘性流体的运动微分方程), 也简称为 NS 方程, 对于该方程的解析求解至今仍是世界难题, 因此在工程上常采用数值求解的方式。为了求解这些数学方程, 计算机科学家应用高级计算机语言, 将其转换为计算机程序或软件包。“计算”部分代表通过数值模拟的方式对流体流动问题的研究, 包括应用计算程序或软件包在高速计算机上获得数值计算结果。存在的问题是: 在开发 CFD 程序或是进行 CFD 模拟过程中, 是否需要流体工程、数学和计算机科学的专业人员一起工作? 答案是否定的, CFD 更需要的是对上述每一学科知识都有一定了解的人。

对于流体流动问题的研究, 传统方法有两种: 一种是纯理论的分析流体力学方法, 另一种是实验流体力学方法。CFD 方法与这两种传统方法间的关系如图 1-1 所示。这三种方法并非完全独立, 它们之间存在着密切的内在联系。在 CFD 技术发展以前, 实验手段和理论分析的方式被用于研究流体流动问题的各个方面, 并帮助工程师进行设备设计及含有流体流动问题的工业流程设计。随着计算机技术的发展, 数值计算已成为另一种有用的方法。在工程应用中, 尽管理论分析方法仍然被大量的使用, 实验方法也继续发挥着重要的作用, 但发展趋势明显趋于数值方法, 尤其是在解决复杂流动问题时。

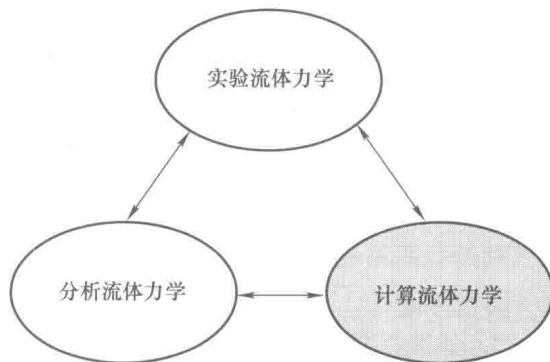


图 1-1 解决流体力学的三种方法

之前,初学者学习 CFD 需要投入大量时间用于编写计算机程序。而今,工业界甚至科学领域希望在非常短的时间内获得 CFD 知识的需求在不断增长,人们不再有兴趣也没有足够的时间用于编写计算程序,而是更加乐于使用成熟的商业软件包。多功能 CFD 程序正在逐步得到认可,随着流体物理学模型的更趋成熟,这些软件包已经得到广泛认可。

尽管商用软件中包含了诸多先进的计算方法,然而 CFD 并不是仅仅熟练运用软件那么简单。要想将 CFD 应用于工程领域,软件使用者至少应具备以下素质:一是对于所模拟的物理现象有深入的了解;二是对软件的每一步操作及相应参数设置有确切的认识;三是能够准确地解读计算结果,并能够将计算结果应用于工程设计。

1.2 计算流体力学的应用领域

CFD 是一种基于计算机仿真解决涉及流动、传热以及其他诸如化学反应等物理现象的分析方法。CFD 方法涵盖了广大的工业及非工业领域,以下是 CFD 方法的传统应用领域:

- 1) 飞行器空气动力学。
- 2) 船舶水动力学。
- 3) 动力装置,如内燃机或气体透平机器的燃烧过程。
- 4) 旋转机械,如旋转通道及扩散器内的流动等。
- 5) 电器及电子工程,包含微电路的装置散热等。
- 6) 化学过程工程,如混合及分离、聚合物模塑过程等。
- 7) 建筑物内部及外部环境,如风载荷及供暖通风等。
- 8) 海洋工程,如近海结构载荷等。
- 9) 水利学及海洋学,如河流、海洋等。
- 10) 环境工程,如污染物及废水排放等。
- 11) 气象学,如天气预报等。
- 12) 生物工程,如动脉及静脉的血液流动等。

1.3 计算流体力学的发展

计算流体力学作为流体力学的一个分支产生于第二次世界大战前后,在 20 世纪 60 年代左右逐渐形成了一门独立的学科。总的来说 CFD 的发展分为三个阶段。

1. 萌芽初创时期(1965—1974)

1) 交错网格的提出。初期 CFD 发展过程中所碰到的两个主要困难之一是,网格设置不当时会得出具有不合理的压力场的解。1965 年美国 Harlow 和 Welch 提出了交错网格的思想,即把速度分量与压力存放在相差半个步长的网格上,使每个速度分量的离散方程中同时出现相邻两点间的压力差。这样有效地解决了速度与压力存放在同一套网格上时会出现的棋盘式不合理压力场的问题,促使了求解 Navier-Stokes 方程的原始变量法(即以速度、压力为求解变量的方法)的发展。

2) 对流项差分迎风格式的再次确认。初期 CFD 发展过程中所遇到的另一困难是,对流项采用中心差分时,对流速较高的情况的计算会得出振荡的解。早在 1952 年, Courant、Issacson 和 Rees 三人已经在数值求解双曲型微分方程中引入了迎风差分思想,但迎风差分对克服振荡的应用并未得到重视。1966 年, Gentry、Martin 及 Daly 三人,以及 Barakat 和 Clark 等,各自

撰写介绍了迎风格式在求解可压缩流及非稳态层流流动中的应用方式。

交错网络的提出及对流项迎风差分的采用,使流动与对流换热的求解建立在一个比较健壮的数值方法基础上。

3) 世界上第一本介绍计算流体及计算传热学的杂志 *Journal of Computational Physics* 于 1966 年创刊。Gentry 等关于确认迎风差分的论文就发表在该刊第 1 卷第 1 期上。

4) Patankar 与 Spalding 于 1967 年发表了求解抛物型流动的 P-S 方法。在 P-S 方法中,把 x - y 平面上的计算区域(边界层)转换到 x - w 平面上(w 为无量纲流函数),从而不论在边界层的起始段还是在其后的发展段,所设置的计算节点均可落在边界层范围内。

5) 1969 年 Spalding 在英国帝国理工学院(Imperial College)创建了 CHAM 公司,旨在把他们研究组的成果推广应用到工业界。

6) 1972 年 SIMPLE 算法问世。在求解不可压缩流体的流动问题时,若对所形成的包含速度分量及压力的代数方程仍采用直接求解的方法,则可以同时得出速度与压力的解。但这样的求解方法,即使在今天尚未得到广泛采用。于是所谓分离式的求解方法应运而生,即先求解一个速度分量,而把其他作为常数,随后再逐一求解其他变量。于是就产生了这样的问题,即所谓速度与压力的耦合问题。SIMPLE 算法成功地解决了这一问题。SIMPLE 算法的一个基本思想是在流场迭代求解的任何一个层次上,速度场都必须满足质量守恒方程,这是保证流场迭代计算收敛的一个十分重要的原则。

7) 1974 年美国学者 Thompson、Thames 及 Mastin 提出了采用微分方程来生成适体坐标的方法(TTM 方法)。TTM 方法的提出为有限差分法与有限容积法处理不规则边界问题提供了一条崭新的道路——通过变换把物理平面上的不规则区域(二维问题)变换到计算平面上的规则区域,从而在计算平面上完成计算,再将结果传递到物理平面上。在 TTM 方法提出后,逐渐地在 CFD 领域中形成了“网格生成技术”这一分支,并成为目前世界上很活跃的研究方向。

2. 工业应用阶段(1975—1984)

1) 1977 年由 Spalding 及其学生开发的 ENMIX 程序公开发行。

2) 1979 年在计算传热学的发展进程中有一件大事应载入史册:

① 由美国 Illinois 大学的 Minkowycz 教授任主编的国际杂志 *Numerical Heat Transfer* 创刊。杂志分为两种: A: Applications(应用篇)及 B: Fundamentals(基础篇)。

② 由 Spalding 教授及其合作者开发的流动传热计算的大型通用软件 PHOENICS 第一版问世。PHOENICS 是英语 Parabolic, Hyperbolic or Elliptic Numerical Integration Code Series 的缩写(意为对抛物型、双曲型、椭圆型方程进行数值积分的系列程序)。

③ Leonard 在 1979 年发表了著名的 QUICK 格式。这是一个具有三阶精度的(从界面函数插值而言)的对流项离散格式,其稳定性优于中心差分。目前 QUICK 已在 CFD/NHT 研究与应用中得到广泛的应用。

3) 1980 年 Patankar 教授的名著 *Numerical Heat Transfer and Fluid Flow* 出版。这本书内容精炼,说理透彻,注重物理概念的阐述,深受全世界数值传热的研究者与使用者的欢迎。出版后不久,被相继译成俄文、日文、波兰文及中文等,成为数值传热学领域中的一本经典著作。

4) 1981 年英国的 CHAM 公司把 PHOENICS 软件正式投入市场,开创了 CFD/NHT 商用软件市场的先河。

随着计算机工业的进一步发展,CFD 的计算逐步由二维向三维,由规则区域向不规则区域,

由正交坐标系向非正交坐标系发展。于是，为克服棋盘形压力场而引入的交错网格的一些弱点，1982年 Rhie 与 Chou 提出了同位网格方法。这种方法吸取了交错网格成功的经验而又把所有的求解变量布置在同一套网格上，目前在非正交曲线坐标系的计算中得到广泛的应用。关于处理不可压缩流场计算中流速与压力的耦合关系的算法，在这一段时期内也有进一步的发展，先后提出了 SIMPLER、SIMPLEC 算法。

3. 兴旺发达的近期（1985—至今）

1) Singhal 撰文指出了促使 CFD/NHT 应用于工程实际应解决的问题。他认为当时工业界的应用之所以不够踊跃，除了数值计算方法及模型有待完善外，软件使用的方便及友好性不够完善也是重要原因。

2) 前、后处理软件的迅速发展。

3) 巨型机的发展促使了并行算法及紊流直接数值模拟（DNS）与大涡模拟（LES）的发展。

4) PC 机成为 CFD 研究领域中的一种重要工具是该时期的一个特色。

5) 多个计算传热与流动问题的大型商业通用软件陆续投放市场。继 1981 年 PHOENICS 上市以后，相继有 Fluent（1983 年），FIDAP（1983 年），STAR-CD（1987 年），FLOW-3D（1991 年，现改为 CFX）等进入市场，其中除 FIDAP 为有限元法外，其余产品均采用有限容积法。FIDAP 以后又与 Fluent 合并，成为该软件家族中的一个部分。

6) 1989 年著名学者 S.V.Patankar 教授推出了计算流动传热 - 燃烧等过程的 Compact 系列软件。

7) 1993 年底欧共体解除对 PHOENICS 的禁运，商用软件正式进入中国的市场。

8) 数值计算方法向更高的计算精度、更好的区域适应性及更强的健壮性（鲁棒性）的方向发展。

1.4 CFD 解决工程问题的基本流程

利用 CFD 进行工程问题求解，一般采用以下工作流程：

1. 物理问题抽象

这一步主要解决的问题是决定计算的目的。在对物理现象进行充分认识后，确定要计算的物理量，同时决定计算过程中需要关注的细节问题。

2. 计算域确定

决定了计算内容之后，紧接着要做的工作是确定计算空间。这部分工作主要体现在几何建模上。在几何建模的过程中，若模型中存在一些细小特征，则需要评估这些细小特征在计算时是否需要考虑，是否需要移除这些特征。

3. 划分计算网格

计算域确定之后，需要对计算域几何模型进行网格划分。

4. 选择物理模型

对于不同的物理现象，需要选择合适的物理模型进行描述。在第一步工作中确定了需要模拟的物理现象，在此需要选择相对应的物理模型。如若需要考虑传热，则需要选择能量模型；若考虑湍流，则需要选择湍流模型等。

5. 确定边界条件

确定计算域实际上是确定了边界位置。在这一步工作中，需要确定边界位置上物理量的分

布，通常需要考虑边界类型及边界位置上物理量的分布。

6. 设置求解参数

在上面的工作均进行完毕后，则需要设定求解参数。包括一些监控物理量设定、收敛标准设定、求解精度控制等。若为瞬态计算，则可能还涉及自动保存、动画设定等。针对不同的物理问题，需要设定的求解参数也存在差异。

7. 初始化并迭代计算

在进行迭代计算之前，往往需要进行初始化。对于稳态计算，选择合适的初始值有助于加快收敛，初始值的设定不会影响到最终的计算结果。而对于瞬态计算，则需要根据实际情况设定初始值，初始值会影响到后续时间点上的计算结果。

8. 计算后处理

计算完毕后，通常需要进行数据后处理，将计算结果以图形图表的方式展现出来，从而方便进行问题分析。后处理一般包含的内容包括表面或截面上物理量云图显示、线上曲线图显示、计算结果输出和动画生成等。

9. 模型的校核与修正

在后处理过程中，往往需要对计算结果进行评估，一般情况下是与试验值进行比较。评估的内容包括网格独立性、收敛性、计算模型、计算结果有效性与误差等。在评估的过程中通常需要不断地调整模型，最终使模型计算结果贴近于实验值，以方便后续的研究工作。

本章主要描述工程应用中常见的 CFD 软件。主要包括 CFD 前处理软件、求解器以及后处理软件。

2.1 CFD 工程应用一般流程

对于利用 CFD 进行模拟仿真计算，通常可以分为三个相互独立的阶段：计算前处理、计算求解及计算后处理。它们的主要目标为：

计算前处理：将现实世界抽象为计算机可以识别的数据模型，方便计算机进行计算。

计算求解：这部分工作主要是由求解器完成，同时是读取前处理数据，进行运算求解，输出一系列时空物理量。

计算后处理：对求解器输出的物理量进行处理，以图表或数据的方式展示给用户。用户读取计算机输出的数据，指导产品设计。

2.1.1 计算前处理

计算前处理在一些场合也称为“预处理”，其主要包括以下流程：

1) 物理现象的抽象简化。现实世界是一个复杂的系统，要想对感兴趣的现象进行研究，必须进行简化处理。通常需要排除一些干扰因素，以便于研究分析。

2) 计算域几何模型构建。计算域指求解计算时的积分空间。流体计算域与几何实体常常存在差异。后面章节提到的“计算区域抽取”将会专门针对这部分做阐述。

3) 计算网格划分。目前绝大多数通用流体计算软件采用的是有限体积法，该方法要求对计算区域进行离散处理，表现在前处理过程中为计算网格划分。

4) 设定计算区域属性。在 CFD 计算中，通常需要指定计算区域的工作介质属性、计算区域的运动状态等。

5) 设定计算模型及边界条件。选择合理的计算模型以及边界条件，是获得正确计算结果的必要条件。

6) 设定求解控制参数。为了加快计算收敛过程及提高计算精度，一些商用 CFD 软件通常允许用户对求解过程参数进行控制。

7) 设定输出参数。CFD 计算数据量通常很大，通常可以设定需要输出的物理量，这样不仅可以减少输出的数据，还可以降低计算机硬盘读写时间，提高计算效率。

前处理的工作一般是通过前处理器完成。

2.1.2 计算求解

计算求解的工作是通过计算求解器完成的。通常 CFD 求解器的工作职责为：从前处理器读入数据（网格数据、边界信息、求解控制参数等），利用内置的求解算法进行求解计算，最后输

出计算结果。

实际上商业通用 CFD 计算软件为了满足用户操作上的需要,其求解器通常还带有大部分的前处理内容,如 ANSYS CFD 中的 CFX 及 Fluent 软件,其包含了网格导入、计算模型选择、边界条件设置、求解控制参数设置等前处理内容,真正求解器的功能是从用户单击“计算”按钮后开始的。

2.1.3 计算后处理

计算后处理的主要工作是将求解器计算的数据以图形、曲线,或数据表的方式呈现给用户。常见的图形类型包括云图、矢量图、流线、XY 曲线图、数据输出等。计算后处理的工作一般是通过后处理器完成的。

提示: 前处理器的目的是让计算机识别真实的世界,求解器的目的是利用计算机求解前处理器生成的计算模型,后处理器则是将计算结果以直观的方式展现给人们。这三个过程可以相互独立,只要它们之间存在相同的数据接口即可。因此,市面上可以找到单纯的前处理软件、求解器软件和后处理软件。

2.2 ANSYS CFD 软件族简介

ANSYS CFD 是一个完整的 CFD 解决方案,包含了流体仿真的全部过程。其包含有顶级流体网格生成工具 ICEM CFD、旋转机械网格生成工具 TurboGrid、强大的通用 CFD 求解器 Fluent 及 CFX、模塑成型 CFD 仿真工具 Polyflow、以及后处理工具 CFD-Post。

2.2.1 前处理软件: ICEM CFD

ICEM CFD 是一个高度智能化的高质量网格生成软件,其具有两大主要特色:先进的网格剖分技术及一劳永逸的 CAD 模型处理工具。

1. 先进的网格剖分技术

在 CFD 计算中,网格质量及数量直接影响计算精度与计算速度。ICEM CFD 强大的网格划分功能可满足 CFD 计算对网格的严格要求:边界层自动加密、流场变化剧烈区域局部网格加密、高质量的全六面体网格、复杂空间的混合网格划分等。

主要优势包括:

- 1) 采用映射技术的六面体网格划分功能。通过雕塑方法在拓扑空间进行网格划分,然后自动映射至物理空间,可以在任意形状模型中剖分出六面体网格。
- 2) 映射技术自动修补几何表面的裂缝和空洞,从而生成光滑的贴体网格。
- 3) 采用独特“O”型网格生成技术来生成六面体边界层网格。
- 4) 网格质量检查功能可以轻松检查、标识出质量差的单元。利用“网格光滑”功能可以对已有网格进行均匀化处理,从而提高网格质量。
- 5) ICEM CFD 提供了强大的网格编辑功能,可以对已有的网格进行编辑处理,如转化单元类型。
- 6) ICEM CFD 提供了良好的脚本运行机制,可以通过录制脚本方便地实现命令流自动处

理。

2. 一劳永逸的 CAD 模型处理工具

ICEM CFD 处理除提供自身的集合建模工具之外，它的网格生成工具也可以集成在 CAD 环境中。用户可以在自己的 CAD 系统中进行 ICEM CFD 的网格划分设置，如在 CAD 系统中选择面、线并分配网格大小属性等，这些数据可存储在 CAD 的原始数据库中，用户在对几何模型进行修改时也不会丢失相关的 ICEM CFD 设置信息。另外 CAD 软件中的参数化几何造型可与 ICEM CFD 中的网格生出及网格优化等模型通过直接接口连接，大大缩短了几何模型变化之后网格的再生时间。该直接接口适用于多数主流 CAD 系统，如 UG NX、Creo、CATIA、SolidEdge、SolidWorks 等。

ICEM CFD 的几何模型工具的另一特色是其方便的模型清理功能。CAD 软件生成的模型通常包含所有细节，甚至还有粗糙的建模过程形成的不完整曲面等。这些特征对网格剖分过程带来了巨大挑战，ICEM CFD 提供的清理工具可以轻松处理这些问题。

2.2.2 CFD 求解器：Fluent

Fluent 是 ANSYS CFD 的核心求解器，其拥有广泛的用户群。ANSYS Fluent 的主要特点及优势包括：

1. 湍流和噪声模型

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。

气动声学在很多工业领域中倍受关注，模拟起来却相当困难，如今，使用 Fluent 可以有多种方法计算由非稳态压力脉动引起的噪音，瞬态大涡模拟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&Hawkings 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拟，这是一个快速评估设计是否需要改进的非常实用的工具。

2. 动网格和运动网格

内燃机、阀门、弹体投放和火箭发射都是包含有运动部件的例子，Fluent 提供的动网格模型满足这些具有挑战性的应用需求。它提供了几种网格重构方案，根据需要用于同一模型中的不同运动部件，仅需要定义初始网格和边界运动。动网格与 Fluent 提供的其他模型如雾化模型、燃烧模型、多相流模型、自由表面预测模型和可压缩流模型相兼容。搅拌槽、泵、涡轮机械中的周期性运动可以使用 Fluent 中的动网格模型（moving mesh）进行模拟，滑移网格和多参考坐标系模型被证实非常可靠，并和其他相关模型如 LES 模型、化学反应模型和多相流等有很好的兼容性。

3. 传热、相变、辐射模型

许多流体流动伴随传热现象，Fluent 提供了一系列应用广泛的对流、热传导及辐射模型。对于热辐射，P1 和 Rossland 模型适用于介质光学厚度较大的环境，基于角系数的 surface to surface 模型适用于介质不参与辐射的情况，DO 模型（Discrete ordinates）适用于包括玻璃在内的任何介质。太阳辐射模型使用光线追踪算法，包含了一个光照计算器，它允许光照和阴影面积的可视化，这使得气候控制的模拟更加有意义。

其他与传热紧密相关的有汽蚀模型、可压缩流体模型、热交换器模型、壳导热模型、真实气体模型和湿蒸汽模型。相变模型可以追踪分析流体的融化和凝固。离散相模型 (DPM) 可用于液滴和湿粒子的蒸发及煤的液化。易懂的附加源项和完备的热边界条件使得 Fluent 的传热模型成为满足各种模拟需要的成熟且可靠的工具。

4. 化学反应模型

化学反应模型, 尤其是湍流状态下的化学反应模型在 Fluent 软件中自其诞生以来一直占有重要的地位, 多年来, Fluent 强大的化学反应模拟能力帮助工程师完成了对各种复杂燃烧过程的模拟。涡耗散概念模型、PDF 输运模型以及有限速率化学反应模型已经加入到 Fluent 的主要模型中。预测 NO_x 生成的模型也被广泛地应用与定制。

许多工业应用中涉及发生在固体表面的化学反应, Fluent 表面反应模型可以用来分析气体和表面组分之间的化学反应及不同表面组分之间的化学反应, 以确保表面沉积和蚀刻现象被准确预测。对催化转化、气体重整、污染物控制装置及半导体制造等的模拟都受益于这一技术。

Fluent 的化学反应模型可以和大涡模拟及分离涡湍流模型联合使用, 这些非稳态湍流模型耦合到化学反应模型中, 我们才有可能预测火焰稳定性及燃尽特性。

5. 多相流模型

多相流混合物广泛应用于工业中, Fluent 软件是在多相流建模方面的领导者, 其丰富的模拟能力可以帮助工程师洞察设备内那些难以探测的现象, Eulerian 多相流模型通过分别求解各相的流动方程的方法分析相互渗透的各种流体或各相流体, 对于颗粒相流体可以采用特殊的物理模型进行模拟。很多情况下, 占用资源较少的混合模型也用来模拟颗粒相与非颗粒相的混合。Fluent 可用来模拟三相混合流 (液、颗粒、气), 如泥浆气泡柱和喷淋床的模拟。其可以模拟相间传热和相间传质的流动, 使得对均相及非均相的模拟成为可能。

Fluent 标准模块中还包括许多其他的多相流模型, 对于其他的一些多相流流动, 如喷雾干燥器、煤粉高炉、液体燃料喷雾, 可以使用离散相模型 (DPM)。

VOF 模型 (Volume of fluid) 可以用于对界面的预测比较感兴趣的自由表面流动, 如海浪。汽蚀模型已被证实可以很好地应用到水翼艇、泵及燃料喷雾器的模拟。沸腾现象可以很容易地通过用户自定义函数实现。

6. 前处理和后处理

Fluent 提供专门的工具用来生成几何模型及进行网格创建。GAMBIT 允许用户使用基本的几何构建工具创建几何模型, 它也可用来导入 CAD 文件, 然后修正几何模型以便于 CFD 分析, 为了方便灵活地生成网格, Fluent 还提供了 TGrid, 这是一种采用最新技术的体网格生成工具。这两款软件都具有自动划分网格及通过边界层技术、非均匀网格尺寸函数及六面体为核心的网格技术快速生成混合网格的功能。对于涡轮机械, 可以使用 G/Turbo, 熟悉的术语及参数化的模板可以帮助用户快速地完成几何模型的创建及网格的划分。

Fluent 的后处理可以生成有实际意义的图片、动画、报告, 这使得 CFD 的结果非常容易被转换成工程师和其他人员可以理解的图形, 表面渲染、迹线追踪仅是该工具的一部分特征却使 Fluent 的后处理功能独树一帜。Fluent 的数据结果还可以导入到第三方的图形处理软件或者 CAE 软件中进行进一步的分析。

7. 定制工具

用户自定义函数在用户定制 Fluent 时很受欢迎。功能强大的资料库和大量的指南提供了全

方位的技术支持。Fluent 的全球咨询网络可以提供或帮助创建任何类型装备设施的平台，如旋风分离器、汽车 HVAC 系统和熔炉。另外，一些附加应用模块，如质子交换膜（PEM）、固体氧化物燃料电池、磁流体、连续光纤拉制等模块已经投入使用。

8. 子模块

1) FloWizard: 为产品设计提供快速流动模拟。FloWizard 软件是以设计产品或工艺为目的的快速流体建模软件。该计算流体动力学软件是专门为那些需要了解所设计产品的流体动力学特性的设计工程师和工艺工程师研制的。设计者不再需要是流体模拟方面的专家就可以非常成功地使用 FloWizard。因为它易学易用。在产品设计周期的初期，工程师就可以用快速流动模拟对产品方案进行流动分析，这就提高了设计的性能，降低了产品到达市场的时间。另外，FloWizard 能够执行多个流体动力学设计任务。

2) Fluent for CATIA V5: PLM 的快速流动模型应用。Fluent for CATIA V5 将流体流动和换热分析带入 CATIA V5 的产品生命周期管理（PLM）环境。它将 Fluent 的快速流动模拟技术完全集成到 V5 的 PLM 过程，所有的操作完全基于 CATIA V5 的数据结构。Fluent for CATIA V5 为用于制造的几何模型和流动分析模型之间提供了完全的创成关系。它减少了 CFD 分析周期的 60% 时间甚至更多，它提供了基于模拟的设计方法。设计、分析和优化可以在 CATIA V5 PLM 的单一工作流之内完成。

3) Icepak: 电子产品散热分析软件。能够对电子产品的传热或流动进行模拟。Icepak 采用的是 Fluent 求解器，该软件是基于 Fluent 的行业定制软件，嵌入的各类电子器件子模型能大大加快仿真人员的建模过程，自动化的网格划分以及高效的求解器能够满足电子散热仿真的需求。

4) Airpak: HVAC 领域工程师的专业人工环境系统分析软件。Airpak 可以精确地模拟所研究对象内的空气流动、传热和污染等物理现象，并依照 ISO 7730 标准提供舒适度、PMV、PPD 等衡量室内空气质量（IAQ）的技术指标，从而减少设计成本，降低设计风险，缩短设计周期。Airpak 软件的应用领域包括建筑、汽车、楼宇、化学、环境、加工、采矿、造纸、石油、制药、电站、办公、半导体、运输等行业。

2.2.3 CFD 求解器：CFX

CFX 是全球第一款通过 ISO9001 质量认证的大型商业 CFD 软件，目前 CFX 的应用已遍及航空航天、旋转机械、能源、石油化工、机械制造、汽车、生物技术、水处理、火灾安全、冶金、环保等领域。

CFX 是全球第一个在复杂集合、网格、求解这三个 CFD 传统瓶颈问题上均获得重大突破的商业 CFD 软件。其主要特点包括：

1. 精确的数值方法

目前绝大多数商业 CFD 软件采用的是有限体积法，然而 CFX 采用的是基于有限元的有限体积法。该方法在保证有限体积法的守恒特性基础上，吸收了有限元法的数值精确性。其中，基于有限元的有限体积法，对六面体网格使用 24 点积分，而单纯的有限体积法仅采用 6 点积分。基于有限元的有限体积法，对四面体网格采用 60 点积分，而单纯的有限体积法仅采用 4 点积分。

ANSYS CFX 是全球第一个发展和使用全隐式多网格耦合求解技术的商业 CFD 软件，此方法克服了传统分离算法所要求的“假设压力项—求解—修正压力项”的反复迭代过程，而是同