



普通高等教育“十二五”规划教材

ANSYS FLUENT 技术基础与工程应用

——流动传热与环境污染控制领域

陈家庆 俞接成 刘美丽 邹玉 编著

中国石化出版社

[HTTP://WWW.SINOPEC-PRESS.COM](http://www.sinopec-press.com)

ANSYS 核心产品应用系列

ANSYS FLUENT 技术基础与工程应用

——流动传热与环境污染控制领域

陈家庆 俞接成 刘美丽 邹玉 编著

中国石化出版社

内 容 提 要

《ANSYS FLUENT 技术基础与工程应用》是能源环境领域第一本系统介绍 ANSYS FLUENT 软件操作使用的技术参考书。编著者根据亲身感受,从计算流体动力学理论与应用基础、CFD 实体模型建立与网格划分(前处理)、FLUENT 求解设置与后处理、流动传热工程问题数值模拟、环境污染控制工程问题数值模拟、FLUENT 动网格及 UDF 的应用简介等方面系统地阐述 CFD 数值分析的基本理论和工程应用的基本方法;基于知识循序渐进、能力逐步提高的原则,精心安排展示了能源环境工程领域多个独具特色、且兼顾先进性和实用性的数值分析案例。

本书可作为高等院校能源与动力工程、环境工程、过程装备与控制工程、油气储运工程等相关专业师生用书;也可作为 ANAYS FLUENT 软件用户的使用操作指导书、学习进阶宝典。

图书在版编目(CIP)数据

ANSYS FLUENT 技术基础与工程应用 / 陈家庆等编著.
—北京:中国石化出版社,2014.7
ISBN 978-7-5114-2735-9

I. ①A… II. ①陈… III. ①流体力学-工程力学-有限元分析-应用软件-高等学校-教材 IV. ①TB126-39

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2014)第 086395 号

未经本社书面授权,本书任何部分不得被复制、抄袭,或者以任何形式或任何方式传播。版权所有,侵权必究。

中国石化出版社出版发行

地址:北京市东城区安定门外大街 58 号

邮编:100011 电话:(010)84271850

读者服务部电话:(010)84289974

<http://www.sinopec-press.com>

E-mail:press@sinopec.com

北京富泰印刷有限责任公司印刷

全国各地新华书店经销

*

787 × 1092 毫米 16 开本 23 印张 553 千字
2014 年 8 月第 1 版 2014 年 8 月第 1 次印刷
定价:45.00 元

前 言

著名科学家钱学森先生 1997 年曾说过,“展望 21 世纪,力学加计算机将成为工程设计的主要手段”。计算流体动力学(Computational Fluid Dynamics, CFD)就是通过计算机数值计算和图像显示,对包含有流体流动和热传导等相关物理现象的系统所做的分析。CFD 既属于典型的力学与计算机相结合的产物,又可以看作是利用计算机进行各种数值模拟实验。与传统的物理模型实验相比,计算机数值模拟实验不受场地、仪器、环境、资金等诸多因素的限制,因而具有较大的灵活性。正是得益于此,随着数值计算理论和计算机软硬件技术的不断发展,CFD 技术已经越来越广泛地被应用于流动传热问题的基础研究、复杂流动结构的工程设计、各种物理分离和化学反应过程的特性预测等,而且应用领域不断向汽车工程、航空航天、机械工程、化学工程、能源环境等行业拓展渗透。

聚焦能源环境行业领域,由于近年来国外在单元过程强化、流动精密计量、大气污染治理、水污染治理和污水再生利用等方面使用 CFD 软件进行工程辅助设计或科学研究已经非常普遍,从而带动了国内相关领域科研、设计人员对 CFD 软件应用的日益重视。从能源环境领域相关从业人员的学科知识体系背景来看,多数人员在校期间没有接受过 CFD 知识的系统学习和专门培养训练,而缺少有专业针对性的 CFD 课程配套教材和既懂专业又懂 CFD 知识的师资队伍则是深层次制约掣肘的关键因素。显然,编写出版一本紧密围绕解决能源环境领域实际工程问题的高水平出版物,其人才培养推动作用和工程实用价值都毋庸置疑。

作为一所培养高级应用型人才的普通本科院校,北京石油化工学院自 2003 年以来就开始尝试在能源与动力工程、环境工程等本科专业中以开设选修课的方式培养学生的 FLUENT 软件应用能力,2009 年与出版社达成了编写以 FLUENT 软件应用为题材之系列出版物的意向。客观而言,当时直接与 FLUENT 实战应用相关的出版物尚为数不多,带有明显行业背景色彩者堪谓凤毛麟角。但因教学、科研事务繁重等原因,致使本书的结集定稿工作一再推后延迟。与此形成鲜明对比的是,过去 3~4 年间市场上出现了多本 FLUENT 行业应用关联出版物,虽然相关编写人员的关注点和研究积累深度各不相同,但这无疑给编著者的工作进程带来了一些压力和挑战。

扼腕叹息之余和审时度势之下,编著者们商定从以下两个大的方面进一步强化本书的特色:一是及时跟随 ANSYS FLUENT 软件的最近发展动态,介绍展示 ICEM 等最新的建模技术,全部算例和界面重新在 ANSYS FLUENT 14.0 环境下调试运行;二是进一步从所精选的实际案例上下功夫,在流动传动领域列举了基于国家重点基础研究发展计划(973 计划)研究成果的“圆管内层流脉冲流动的对流传热”等算例,在环境污染控制领域国内首次列举了“污水紫外线杀菌消毒”等算例,并应用了国家自然科学基金面上项目(51079006)在油水分离方面的部分研究成果,对部分出版物已间或提及的同类算例则从建模准确性和工程实际可参考性方面予以大幅度完善提高,以便从侧面展示 CFD 在编

著者们近几年科研工作中所扮演的重要角色。

全书共6章,根据编著者们多年来亲身学习、使用CFD软件的感受,结合ANSYS FLUENT软件这一当今世界CFD领域最为全面的软件包,努力从计算流体动力学理论与应用基础、CFD实体模型建立与网格划分(前处理)、FLUENT求解设置与后处理、流动传热工程问题数值模拟、环境污染控制工程问题数值模拟、FLUENT动网格及UDF的应用简介等方面较为系统地阐述CFD数值分析的基本理论和工程应用的基本方法;基于知识循序渐进、能力逐步提高的原则,精心安排展示了能源环境领域多个独具特色、且兼顾先进性和实用性的数值分析案例,力图让读者切身产生一种开卷有益、物有所值的认同感。

北京石油化工学院编写团队的各位同事为本书最终定稿付梓倾注了大量心血,展示了致力于共同提升发展的坦诚胸怀。全书由陈家庆教授统筹策划和定稿,并承担了部分算例的调试编写工作;邹玉博士承担第1章、第3章部分内容并承担第4章、第6章部分算例的调试编写工作,刘美丽博士负责第2章并承担第5章、第6章部分算例的调试编写工作,俞接成副教授承担了第4~6章部分算例的调试编写工作,初庆东老师承担了第5章部分算例的调试编写工作。本书的编写得到了北京市属高等学校人才强教深化计划之“创新人才建设计划”项目(PHR200906214)、“创新团队—环境治理与调控技术优秀教学团队”项目(PHR201107213)和“教育部高等学校专业综合改革试点—环境工程”项目的资助;韩占生副校长、曹建树、周翠红、姬宜朋、雷俊勇等领导或同事,安世亚太科技股份有限公司的行业总监赵亚辉先生等对该书提出了宝贵意见和建议,在此表示感谢。在资料收集、整理、分析、筛选的过程中,美国ANSYS公司网站资料、ANSYS FLUENT软件包的User's Guide/Tutorial Guide、国内外同行的相关研究文献、国内外同类出版物、国内外CFD交流网站论坛等,也使编著者们受到了较大启发,虽难免挂一漏万但仍在此一并表示诚挚的谢意。

本书可以作为高等院校能源与动力工程、环境工程、过程装备与控制工程、油气储运工程等相关专业高年级本科生、研究生的教学用书,为日后从事能源环境领域的CFD分析工作打下坚实基础;也可以作为ANSYS FLUENT软件用户的使用操作指导书、学习进阶宝典,同时也是能源环境领域第一本系统全面介绍ANSYS FLUENT软件操作使用的技术参考书,读者可以根据自身的实际情况灵活选择使用本书的相关内容。希望本书的内容不仅对高等院校的师生,更希望对投身流动传热、环境污染控制行业的相关科研人员、工程设计人员和运行管理人员有所帮助,推动我国CFD软件整体应用水平的提高,进而共同促进我国节能减排目标的实现和节能环保等战略性新兴产业的发展。

限于学术见解、软件使用经验以及部分工程实际问题的复杂性,同时由于时间仓促,书中的缺点和错误在所难免,恳请广大读者、专家以及业内前辈提出宝贵意见,以使本书在再版中得以不断更新和完善。考虑到书中对各算例的操作步骤已经展示得十分详尽,故不再附网格和数据计算文件等,读者若有相关技术细节等方面的特殊需求,请直接与编著者联系:jiaqing@bipt.edu.cn。

再次感谢您选用本书,祝您愉快!

目 录

第 1 章 计算流体力学理论与应用基础	(1)
§ 1.1 计算流体力学简介	(1)
§ 1.2 CFD 商用软件包概述	(6)
§ 1.3 物理现象的数学描述	(13)
§ 1.4 离散方法与数值求解	(18)
§ 1.5 FLUENT 的启动运行	(40)
第 2 章 CFD 实体模型建立与网格划分(前处理)	(45)
§ 2.1 前处理概述	(45)
§ 2.2 基于 GAMBIT 软件的前处理	(47)
§ 2.3 基于 ICEM 软件的前处理	(68)
第 3 章 FLUENT 的求解设置与后处理	(86)
§ 3.1 FLUENT 的操作界面	(86)
§ 3.2 计算模型的处理与设置	(88)
§ 3.3 数学模型的确定	(90)
§ 3.4 材料定义	(117)
§ 3.5 边界条件设置	(119)
§ 3.6 求解控制的设置	(128)
§ 3.7 求解数据的后处理	(135)
第 4 章 流动传热工程问题的数值模拟案例	(144)
§ 4.1 孔板流量计的数值模拟	(144)
§ 4.2 圆管等热流边界充分发展层流对流传热	(156)
§ 4.3 罐车装油过程的数值模拟	(171)
§ 4.4 CPU 芯片散热的数值模拟	(188)
§ 4.5 套管换热器对流换热的数值模拟	(209)
第 5 章 环境污染控制工程问题的数值模拟案例	(226)
§ 5.1 水力旋流器油水分离的模拟	(226)
§ 5.2 旋风除尘器的数值模拟	(238)
§ 5.3 烟气脱硝 SCR 装置的数值模拟	(251)
§ 5.4 普通 Caroussel 氧化沟升级改造后流场的数值模拟	(267)

§ 5.5	竖流式沉淀池内液固两相流动数值模拟	(278)
第6章	动网格及 UDF 的应用简介	(289)
§ 6.1	移动与变形区域中流动问题的数值模拟	(289)
§ 6.2	用户自定义函数(UDF)及初步应用	(317)
§ 6.3	空气绕流振动圆管对流传热的数值模拟	(325)
§ 6.4	圆管层流脉冲流动对流传热的数值模拟	(335)
§ 6.5	污水处理用紫外消毒器的数值模拟	(344)
参考文献	(358)

第 1 章 计算流体动力学理论与应用基础

§ 1.1 计算流体动力学简介

计算流体动力学(Computational Fluid Dynamics, 简称 CFD)于 20 世纪 60 年代伴随着计算机科学的迅速崛起而形成。1965 年, 美国 Los Alamos 国家实验室的 Francis H. Harlow 和美国加州大学 Berkeley 分校的 Jacob E. Fromm 在 *Scientific American* 上共同发表了学术论文“流体力学中的计算机实验(*Computer Experiments in Fluid Dynamics*)”, 受到各国学者的普遍关注。同年, E. O. Macagno 在 *La Houille Blanche* 杂志上发表了学术论文“流体力学模拟的某些新概念”。这两篇论文的发表标志着“计算流体动力学”作为一门独立学科正式被确立。

计算流体动力学以计算数学、近代流体力学和计算机科学为基础, 通过计算机进行数值模拟和可视化处理, 来探索分析自然界、工程实践和社会生活中各种流体流动和传热等物理现象的机理, 研究和发现其规律和特点, 实现对其进行准确分析和预报。在过去的半个世纪里计算流体动力学得到了飞速发展, 已经深入到流体力学的各个领域。目前, 计算流体动力学作为流体力学一个重要分支, 仍然以旺盛的生命力不断地向前发展和开拓, 并将对流体力学的发展产生重要影响。

根据流体力学知识, 自然界所有与流体有关的现象都可以用连续性方程、运动方程(Navier - Stokes 方程)和能量方程等控制方程来描述。在 CFD 技术出现之前, 人们主要通过实验测量和理论分析来研究流体力学问题。实验测量是研究流体力学问题最根本的方法。但实验往往受到模型尺寸、流场扰动、人身安全、测量精度和测量方法的限制, 且测量仪器难免会对真实流场造成干扰, 很难通过实验方法得到准确的结果。另外, 受测量方法的限制, 对于某些流场难以通过实验获得详细数据。此外, 进行实验研究还会遇到经费投入、人力和物力的巨大耗费及周期长等诸多问题。理论分析是针对具体流体问题在给定边界条件下用数学知识对其控制方程直接进行求解、从而获得速度、压强等流动参数解析解的方法。理论上, 只要给出了具体的控制方程和相应的边界条件, 就可以求出该物理问题的解析解。解析解具有普遍性, 各种影响因素清晰可见, 但因描述流体流动方程的强非线性以及边界条件处理的困难, 除少数简单问题可以获得解析解外, 理论求解极具挑战性。

随着计算机硬件和软件的发展, 计算流体动力学应运而生。从根本上来讲, CFD 的本质就是通过数值方法来求解流体力学的控制方程组。在确定了具体问题的基本控制方程组后, 将其在网格节点上离散, 把原来在时间域及空间域上描述流动的连续物理量, 如速度场、密度场、压力场和温度场等, 用有限离散节点上的变量集合来代替; 通过一定的数值处理原则和计算方法, 建立离散节点上各变量之间所满足的代数方程组, 并进行数值求解, 获得这些物理量在这些离散节点上的近似值以及它们随时间的变化情况, 并结合计算机辅助设计(CAD), 对各种科学问题、工程应用和生产实践进行预报和结构优化设计。

1.1.1 CFD 数值模拟的优缺点

目前, CFD 数值模拟与传统的理论分析方法、实验测量方法构成了研究流体流动问题的完整体系, 下面将阐述计算流体动力学相比于实验测量和理论分析所独有的特点。

与理论分析和实验测量相比, CFD 数值模拟方法具有很多优势: ①由于实际流动问题控制方程组的强非线性, 在复杂几何形状和边界条件情况下很难求得它们的解析解, 而 CFD 数值模拟就有可能找出满足工程设计需要的数值解; ②通过各种 CFD 数值模拟仿真实验, 可以对工程设计进行优化, 例如, 能够选择不同流动参数进行物理方程中各项有效性和敏感性试验, 从而进行方案比较并给出详细和完整的计算资料; ③CFD 数值模拟不受几何模型和实验条件的限制, 可模拟具有特殊尺寸、高温、有毒、易燃等在实际模拟实验中无法实现的复杂物理问题; ④CFD 数值模拟能在较短时间内预测流场、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。

CFD 数值模拟也存在一定的局限性: ①CFD 数值模拟是一种离散近似求解算法, 计算结果并不能提供解析表达式, 只是给出在有限离散节点上的数值结果, 并有一定的计算误差; ②CFD 数值模拟不能像物理实验那样一开始就能给出清晰和客观的流动现象并定性地描述, 而且需要由现场或实验测量提供某些流动参数对数学模型和计算结果进行验证; ③CFD 数值模拟的程序编制及资料收集、整理与正确分析很大程度上依赖于计算者的经验与技巧; ④由于某些原因, CFD 数值模拟有可能得不到真实的物理解(如由数值黏性和频散所产生的伪物理效应); ⑤CFD 数值模拟经常需要配备较高性能的计算机硬件设备。当然, 上述某些缺点或局限性可以通过某种方式克服或弥补。

由此可知, CFD 数值模拟虽然有自身的理论、算法、特点和应用范围, 但又不能完全替代理论分析和实验测量。流体力学的三种研究方法各有优势, 又相互联系、相互补充和相互促进, 同为研究流动问题服务。在实际研究中, 需要注意三者有机的结合, 争取做到取长补短, 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, 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, 合理充分地使用好这个强大的工具。

1.1.2 CFD 的应用领域

目前, 计算流体动力学已经广泛应用于航空航天、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、风机、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动力学进行分析。具体的工程应用场合包括但不限于以下行业。

- (1) 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。
- (2) 航空航天: 飞机外流场、机翼设计、导弹发射过程等。
- (3) 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。
- (4) 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、导热过程和辐射换热过程等。

(5) 热能工程、化工工程、石油石化及冶金工程行业：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、钻头井底高压射流流动过程、油/气/水/砂多相分离过程、油水分离和钢水铸造过程模拟等。

(6) 流体机械：水轮机、风机与泵等流体机械内部流动分析。

(7) 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、有限空间内污染物的扩散、污水处理厂各种构筑物 and 生化反应器的内部流动、污染物在重力或离心力作用下的分离过程、污水消毒/杀菌处理等。

(8) 舰船领域：舰船潜水推流器非稳态流动分析等。

(9) 生物工程行业：血管内血液流动过程模拟、人工肝/人工肺等仿生器管工作过程的模拟等。

上述问题过去主要靠经验或通过实验进行设计或研究，而今可采用 CFD 数值模拟技术提供快捷、全面的解决方案，而且这些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、传质存在的过程，都可以尝试利用 CFD 手段进行模拟分析。

1.1.3 CFD 数值模拟的工作步骤

1.1.3.1 CFD 数值模拟的技术思路

采用 CFD 方法进行数值模拟，整个过程通常遵循图 1-1-1 所示的技术路线或技术思路。对于稳态问题而言主要包括：建立反映工程问题或物理问题本质的数学模型(也称控制方程)；建立离散方程，寻求高效率、高准确度的计算方法；编制程序和进行计算；显示计算结果。

(1) 建立反映工程问题或物理问题本质的数学模型(也称控制方程)

具体而言就是要建立描述具体问题各个量之间相互关系的微分方程及相应的定解条件，这是数值模拟求解任何问题的出发点和前提。没有正确完善的数学模型，数值模拟将无法进行。因此首先要对具体问题进行分析，比如，流动是否定常、是否是湍流、是二维还是三维、是否有内热源等，然后将通用的控制方程进行简化，得到该具体问题的控制方程。当然，数学模型的建立往往是理论研究的课题，一般由理论工作者完成。

(2) 建立离散方程，寻求高效率、高准确度的计算方法

这里的计算方法不仅包括微分方程的离散化方法及求解方法，还包括贴体坐标的建立、边界条件的处理等，该部分内容是计算流体动力学的核心。由于所引入的因变量在节点之间的分布假设及推导离散化方程的方法不同，就形成了有限差分法、有限元法、有限元体积法等不同类型的离散化方法。在同一种离散化方法中，对对流项所采用的离散格式不同，也将导致最终有不同形式的离散方程。对于瞬态问题，除了在空间域上的离散外，还要涉及在时间域上的离散。离散时，将要涉及使用何种时间积分方案的问题。将所建立的控制方程在所建立的网格上离散，得到一组关于这些未知量的代数方程组，然后通过求解代数方程组来得到物理量在这些节点上的值，而计算域内其他位置上的值则通过插值函数根据节点上的值来确定。

(3) 编制程序和进行计算

这部分工作包括计算网格划分、初始条件和边界条件的输入、控制参数的设定等。这是整个数值模拟工作中花时间最多的部分。由于求解问题的复杂性，数值求解方法在理论上并非绝对完善，所以需要通过实验加以验证。从这种意义上讲，数值模拟又叫数值试验。

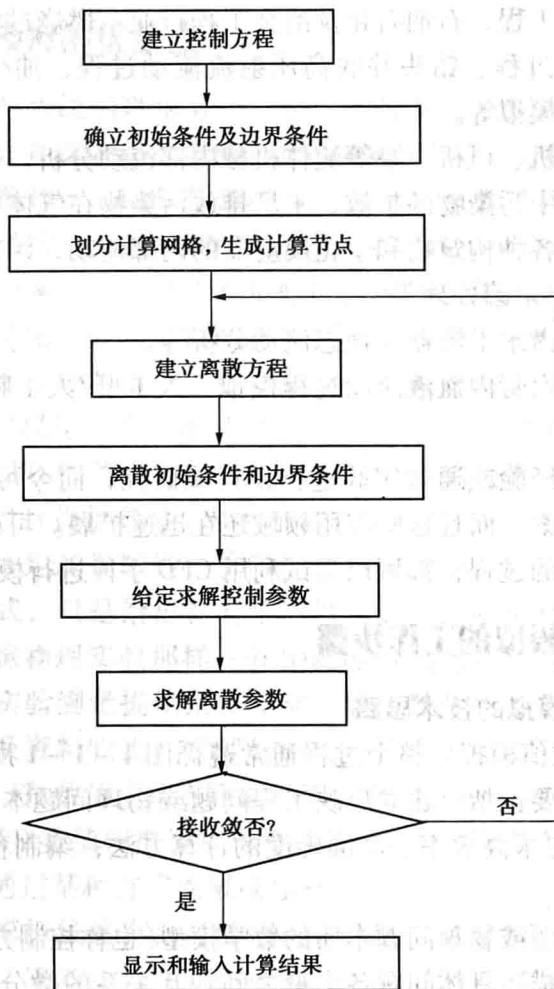


图 1-1-1 CFD 数值模拟的技术路线示意图

(4) 显示计算结果

计算结果一般通过云图、线图或表格等方式显示，这对检查和判断分析结果有重要参考意义。

如果所求解的问题为非稳态问题，则可以将上述过程理解为一个时间步的计算过程，完成该时间步的计算过程后继续循环求解下个时间步的解。

1.1.3.2 CFD 数值模拟的实施

概括地讲，对流动或传热问题实施 CFD 数值模拟可以分为前处理、求解、后处理三个过程。

(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，即建立计算域并划分网格。这是求解过程的准备工作，对求解结果的精确度起决定性的作用。

① 计算域

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，例如，对于具有对称性的流动，可以设置一个含对称面(或对称轴)的计算域处理。又例如，如果只关心流场的某一局部，可以只对该局部的计算域进行 CFD 分析，无须求解整个流场。

② 网格

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。采用数值方法求解控制方程时，需要将控制方程在空间区域上进行离散，然后求解得到的离散方程组，这一过程必须使用网格。现已发展出多种对各种区域进行离散以生成网格的方法，统称为网格生成技术。不同的问题采用不同数值解法时，所需要的网格形式可能不同，但生成网格的方法基本相同。目前，网格分结构化网格和非结构化网格两大类。简单地讲，结构化网格在空间上比较规范，如对一个四边形区域，网格往往是成行成列分布的，行线和列线比较明显。而非结构化网格在空间分布上没有明显的行线和列线。对于二维问题，常用的网格单元有三角形和四边形等形式；对于三维问题，常用的网格单元有四面体、六面体、三棱体等形式。在整个计算域上，网格通过节点联系在一起。在网格的质量方面，应该尽量使用结构化网格，即：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。

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。目前各种 CFD 软件都配有专用的网格生成工具，多数 CFD 软件还可接收采用其他 CAD 或 CFD/FEM 软件产生的网格模型。

(2) 求解

求解器读取前处理生成的网格文件后，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。然后根据具体问题设置求解器类型，如流动是定常还是非定常、是隐式还是显式等；再选择计算模型，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；再设置介质的物性，如密度、比热、导热速率、黏性等；给定计算域的边界条件，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，并根据需要设置关键位置的监测点，接下来就可以开始迭代计算。具体而言应包括以下步骤：

① 确定边界条件与初始条件

对计算域划分好网格后，即可定义相应的边界条件。初始条件与边界条件是控制方程有确定解的前提，控制方程与相应的初始条件、边界条件的组合构成对一个物理过程完整的数学描述。初始条件是所研究对象在过程开始时刻各个求解变量的空间分布情况。边界条件是在求解区域的边界上所求解的变量或其导数随地点和时间的变化规律。例如，对于锥管内的流动而言，在锥管进口断面上需要给定速度、压力沿径向的分布，而在管壁上一般取无滑移边界条件。

在商用 CFD 软件中，往往在前处理阶段完成了网格划分后，直接在边界上指定初始条件和边界条件，然后由前处理软件自动将这些初始条件和边界条件按离散方式分配到相应的节点上去。

② 给定求解控制参数

在离散空间上建立了离散化的代数方程组，并施加离散化的初始条件和边界条件后，还需要给定流体的物理参数和湍流模型的经验系数等。此外，还要给定迭代计算的控制精度、瞬态问题的时间步长和输出频率等——它们在实际计算时对计算的精度和效率有着重要影响。

③ 求解离散方程

在进行了上述设置后，生成了具有定解条件的代数方程组。对于这些方程组，数学上已

有相应的解法，如线性方程组可采用 Gauss 消去法或 Gauss - Seidel 迭代法求解，而对非线性方程组，可采用 Newton - Raphson 方法。在商用 CFD 软件中，一般采用迭代法进行求解。

④ 判断解的收敛性

对于稳态问题的解，或是非稳态问题在某个特定时间步上的解，往往要通过多次迭代才能得到。有时因网格形式或网格大小、对流项的离散插值格式等原因，可能导致解的发散。对于非稳态问题，若采用显式格式进行时间域上的积分，当时间步长过大时，也可能造成解的振荡或发散。因此，在迭代过程中，要对解的收敛性随时进行监视，并在系统达到指定精度后结束迭代过程。这部分内容属于实践经验之类，需要针对不同情况进行分析。

(3) 后处理

后处理是通过适当的手段，将整个计算域上已经计算收敛的结果继续处理，直到获得计算结果的线值图、矢量图、等值线图、流线图、云图等直观清晰的、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，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。用户也可以自己编写后处理程序进行结果显示。

§1.2 CFD 商用软件包概述

通过本章的相关介绍读者不难发现，完整的计算流体动力学模拟应该包括区域离散、方程离散以及求解方法确定、迭代求解等过程，这要求研究者不仅具有深厚的数学功底，而且拥有强大的程序编写调试能力。因此，数值模拟技术在初期阶段的发展受到了很大限制，属于“阳春白雪”式的高端研究工作；另外，研究者采用的程序语言不同、方程离散和求解方法不同时，所获得的结果存在很大差异，研究结果也缺乏可比性，这使得人们对计算流体动力学的实用性产生了误解和怀疑。在之后的半个世纪里，数值计算理论和计算机软硬件得到了突飞猛进的发展，各种计算流体动力学通用软件包陆续出现，其将成熟、稳定的计算方法集中在一起形成了商业化的数值软件，为解决工程实际问题提供了道路。

目前，市场占有率较高的计算流体动力学(CFD)商用软件包有 ANSYS FLUENT、ANSYS CFX、PHOENICS、STAR - CD 等，此外还包括前/后处理软件 GAMBIT、Tecplot、ParaView 等，本节予以简单介绍。

1.2.1 ANSYS FLUENT

位于美国新罕布什尔州 Hanover 的 Create Inc. 是一家私营工程服务公司，在 20 世纪 60 年代、70 年代期间专门致力于涡轮机械和核工业领域的流体动力学问题。基于在 CFD 领域的长期积累和专门研究，该公司于 1983 年推出了 FLUENT 软件的第一版，1988 年分拆成立 FLUENT 公司致力于该软件的市场化推广。FLUENT 软件是目前国内外使用最多、最流行的商业计算流体动力学软件之一作为原 FLUENT 公司旗下的一款通用计算流体力学软件，FLUENT 软件被 ANSYS 收购之前的最高版本是 6.3.26。2006 年被 ANSYS 公司斥资 5.65 亿美元收购。当然，ANSYS 公司收购 FLUENT 与早些年收购 ICEM CFD 和 CFX 出于不同的战略考虑，收购 ICEM CFD 和 CFX 主要是看中其技术的先进性，而收购 FLUENT 主要是看中其互补的工程仿真解决方案市场。

FLUENT 软件在被整合成该公司软件产品中的一部分后，仍然能够独立运行且保持原有风格，并能与 ANSYS 公司的其他软件产品共享数据。总体来看，FLUENT 软件在被收购后得到了更快的发展，当前的最新版本是 ANSYS FLUENT 14.5，但 ANSYS FLUENT 15 版本已经面向用户进行公测。

FLUENT 软件采用 C/C++ 语言编写，通过交互界面和菜单界面进行操作，具有高效执行、交互控制、易操作以及灵活适应各种机器与操作系统的特点。FLUENT 软件包含基于压力的分离求解器、基于压力的耦合求解器、基于密度的隐式求解器、基于密度的显式求解器，多求解器技术使 FLUENT 软件可以模拟从不可压缩到高超音速范围内的各种复杂流场。与其他 CFD 软件相比，FLUENT 软件包含有非常丰富、经过工程确认的物理模型，如湍流模型、噪声模型、化学反应模型、多相流模型等。此外，FLUENT 软件还提供了其他与传热紧密相关的汽蚀模型、可压缩流体模型、热交换器模型、壳导热模型、真实气体模型、湿蒸汽模型、相变模型和表面反应模型等。相变模型可以追踪分析流体的融化和凝固，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。

ANSYS FLUENT 软件是目前使用最多、最通用的商业计算流体动力学软件，与其他商业计算流体软件相比，ANSYS FLUENT 软件除了应用范围广之外，还具有以下一些突出的特点：

(1) 网格灵活性和平台适应性

用户可以使用非结构化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化网格，并允许用户根据解的具体情况对网格进行修改(细化/粗化)；FLUENT 软件产品可以在 32 位/64 位 Windows、LINUX 或 UNIX 平台上运行。

(2) 便捷的并行计算

针对网格数较多的工程问题，用户可以很容易的运用 FLUENT 软件提供的并行计算功能，充分利用单机或服务器上多处理器同时计算。FLUENT 软件能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 软件的并行计算由软件自动完成，而用户要做的只是在进入 FLUENT 软件时选择并行计算选项即可。

(3) 强大的用户定制功能

当标准的 FLUENT 软件界面不能满足用户的需要时，用户可以通过用户自定义函数 (User Defined Functions, UDFs) 来满足特殊要求、提高求解器的性能。用户可以通过 UDFs 定制 FLUENT 软件输运方程中的边界条件、材料属性、表面和体积反应率、源项等。此外，用户还可以自定义标量输运方程 (User - Defined Scalar, UDS) 中的源项、扩散率等，利用 FLUENT 求解器对其他标量输运方程进行求解。

(4) 强大的后处理功能

FLUENT 软件的后处理可以生成有实际意义的图片、动画、报告，这使得 CFD 的结果非常容易地被转换成工程师和其他人员可以理解的图形，虽然表面渲染、迹线追踪仅是该工具的几个特征，但却使 FLUENT 的后处理功能独树一帜。除此之外，FLUENT 软件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。

总而言之，对于模拟复杂流场结构的不可压缩/可压缩流动来说，FLUENT 是很理想的软件。此外，对于不同的流动领域和模型，ANSYS 公司还提供了其他几种解算器，其中包

括 NEKTON、FIDAP、POLYFLOW、IcePak 以及 MixSim。FIDAP 是一款专门解决流体力学传质及传热等问题的分析软件，是全球第一套将有限元法应用于 CFD 领域的软件，本身含有完整的前后处理系统及流场数值分析系统，典型应用领域包括汽车、化工、聚合物处理、薄膜涂层、玻璃应用、半导体晶体生长、生物医学、冶金、环境工程、食品、玻璃处理等。POLYFLOW 是针对粘弹性流动的专用 CFD 求解器，用有限元法仿真聚合物加工的 CFD 软件，主要应用于塑料射出成形机、挤型机和吹瓶机的模具设计。IcePak 作为专用的热控分析 CFD 软件，专门仿真电子电机系统内部气流、温度分布，特别是针对系统的散热问题作仿真分析，藉由模块化的设计快速建立模型。MixSim 则是针对搅拌混合问题的一个专业化前处理器，其图形人机接口和组件数据库能够让工程师直接设定或挑选搅拌槽大小、底部形状、折流板配置、叶轮的型式等，然后随即自动产生三维网络，并启动 FLUENT 做后续的模拟分析。

1.2.2 ANSYS CFX

CFX 是全球首个通过 ISO 9001 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。1995 年，CFX 推出了全隐式多网格耦合算法，该算法以其稳健的收敛性能和优异的运算速度，成为 CFD 技术发展的重要里程碑。作为世界上唯一采用全隐式多网格耦合算法的大型商业软件，其算法上的独特性、丰富的物理模型和前/后处理的完善性，使得 CFX 在结果精确性、计算稳定性、计算速度和灵活性上都有着优异的表现。CFX 软件的应用遍及航空航天、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几何、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，具有异于其他 CFD 软件的一些技术特点和优势。

(1) 精确的数值方法

与大多数 CFD 软件不同的是，CFX 采用了基于有限元的有限体积法，在保证有限体积法守恒特性的基础上，吸收了有限元法的数值精确性。CFX 在湍流模型的应用上也一直处于业界领先地位，除了常用的湍流模型外，CFX 最先使用了大涡模拟 (LES) 和离散涡模拟 (DES) 等高级湍流模型。

(2) 快速稳健的求解技术

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化软件，这种革命性的求解技术克服了传统算法需要“假设压力项 - 求解 - 修正压力项”的反复迭代过程而同时求解动量方程和连续性方程，加上其采用的多网格技术，使 CFX 的计算速度和稳定性较传统方法提高了 1~2 个数量级。更为重要的是，CFX 求解器获得了对并行计算最有利的、几乎线性的“计算时间 - 网格数量”求解性能，这使工程技术人员第一次敢于计算大型工程的真实流动问题。CFX 突出的并行功能还表现在，它可以借助网络在 UNIX、LINUX、WINDOWS 平台之间随意并行。

(3) 丰富的物理模型

CFX 的物理模型建立在世界最大科技工程企业 AEA Technology 公司 50 余年实践经验基础之上，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、燃烧等问题的丰富通用物理模型；还拥有诸如汽蚀、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等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。

(4) 旋转机械一体化解决方案

在旋转机械领域, CFX 向用户提供了从设计到 CFD 分析的一体化解决方案, 尤其是提供了三个旋转机械设计分析的专用工具: BladeGen、TurboGrid、TASCFlow。

BladeGen 是交互式涡轮机械叶片设计工具。用户通过修改元件库参数或完全依靠 BladeGen 中的工具设计各种旋转和静止叶片元件及新型叶片, 对各种轴向流和径向流叶型, 从 CAD 设计到 CFD 分析在数分钟即可完成。

TurboGrid 为叶栅通道网格生成工具, 它采用了创新性的网格模板技术, 结合参数化能力, 工程师不仅可以既快捷又简单地为绝大多数叶片类型生成高质量叶栅通道网格。所需用户提供的只是叶片数目、叶片及轮毂和外罩的外形数据文件。

TASCflow 是全球公认最好的旋转机械工程 CFD 软件, 由于专为旋转机械裁制的完整软件体系, 以及在旋转机械行业十多年的专业经验, TASCflow 被旋转机械领域 90% 以上的企业作为主要的气动/水动力学分析和设计工具, 其中包括 GE、Pratt & Whitney、Rolls Royce、Westing House、ABB、Siemens、Voith Hycho 等企业界巨擎。

2003 年, CFX 被 ANSYS 公司出资 2100 万美元收购, 成为 ANSYS 公司的 CAE 仿真软件中的一部分。收购 CFX 是 ANSYS 公司在 CFD 领域的第二次收购, 此前 ANSYS 公司于 2000 年 8 月收购了 ICEM CFD 公司。ICEM CFD 由于其先进的网格生成技术被 ANSYS 公司保留并作为通用的 CFD 软件前处理器而继续得到发展。目前, ANSYS CFX 也被集成在 ANSYS Workbench 环境下, 方便用户在单一操作界面上实现对整个工程问题的模拟。从 CFX 与 FLUENT 的比较来看, CFX 采用的是混合了有限元的有限体积法, 而 FLUENT 是纯粹的有限体积法。CFX 软件对内存的占用要比 FLUENT 多很多, 而收敛速度则要比 FLUENT 快, 单步计算时间 CFX 要比 FLUENT 长。

1.2.3 其他商用软件

1.2.3.1 PHOENICS

PHOENICS 是英国 CHAM(Concentration Heat and Momentum Limited)公司开发的模拟传热、流动、反应、燃烧过程的通用 CFD 软件, 是 Parabolic Hyperbolic or Elliptic Numerical Integration Code Series 的缩写, 这意味着只要有流动和传热, 都可以使用 PHOENICS 程序来模拟计算。CHAM 公司由布赖恩·斯伯丁(Brian Spalding)教授 1974 年创立, 总部位于英国伦敦的 Wimbledon Village, 1981 年正式推出了 PHOENICS 软件。作为公司主席和管理经理, 布赖恩·斯伯丁教授因其对机械工程行业的服务而荣获 2010 年本杰明·富兰克林奖(Franklin Institute Award)。

布赖恩·斯伯丁教授与 STAR-CD™ 软件的创始人当年都是帝国理工学院(Imperial College)同一教研室的教授, 因此这两个软件的核心算法大同小异。与 Fluent、CFX、Star-CD 这几个 CFD 软件相比, PHOENICS 软件的 VR(虚拟现实)彩色图形界面菜单系统最为方便, 可以直接读入 Pro/E 建立的模型(需转换成 STL 格式), 使复杂几何体的生成更为方便, 在边界条件的定义方面也极为简单, 并且网格自动生成, 但其缺点是网格比较单一、粗糙, 针对复杂曲面或曲率小的地方网格不能细分, 也就是说不能在 VR 环境里采用贴体网格。另外 VR 的后处理也不是很好, 要进行更高级的分析则要采用命令格式进行, 使得易用性比其他软件要差。

PHOENICS 软件的网格系统包括直角、圆柱、曲面(包括非正交和运动网格,但在其 VR 环境不可以)、多重网格、精密网格。可以对三维稳态或非稳态的可压缩流或不可压缩流进行模拟,包括非牛顿流动、多孔介质中的流动,并且可以考虑黏度、密度、温度变化的影响。在流体模型上,PHOENICS 软件内置了 22 种适合于各种雷诺数(Re)场合的湍流模型,包括雷诺应力模型、多流体湍流模型和通量模型及 $k-\varepsilon$ 模型的各种变异。另外,PHOENICS 软件自带了 1000 多个例题与验证题,附有完整的、可读可改的输入文件。PHOENICS 软件的开放性很好,提供了对软件现有模型进行修改、增加新模型的功能和接口,可以用 FORTRAN 语言进行二次开发。

1.2.3.2 STAR-CD 和 STAR-CCM+

STAR-CD 是目前世界上使用最广泛的专业 CFD 分析软件之一,由全球最大的 CFD 和 CAE 私有控股供应商英国 CD-adapco 公司于 1987 年开发。作为 CD-adapco 公司创始人之一,英国帝国理工学院的教授 David Gosman 先生带领开发了该软件。David Gosman 教授本科毕业于英哥伦比亚大学的化工专业,接着获得帝国理工学院机械工程博士学位,继而留校并成为计算流体力学教授——是布赖恩·斯伯丁教授的同事。CD-adapco 公司的首要目标是“工程成功(Engineering Success)”,目前开发和销售 STAR-CD、STAR-CCM+、es-ice、SPEED、Battery Design Studio、STAR-Cast 和 DARS 软件产品。每一款软件产品作为世界领先的产品设计和开发工具,为各行各业的产品创新起到了不可超越的作用,已经在航空航天、汽车、电池、医疗、建筑、化工、电子、能源、环境、海洋、石油和天然气、透平机械和其他领域得到了证实。目前,CD-adapco 公司已经在中国上海成立了独资子公司——西递安科软件技术(上海)有限公司,向中国市场直接提供 CD-adapco 公司的所有软件和解决方案。

多年来,STAR-CD 一直是计算流体动力学模拟的通用平台,并获得了良好的声誉。STAR-CD 的解析对象涵盖基础热流解析、导热/对流/辐射(包含太阳辐射)传热问题、多相流问题、化学反应/燃烧问题、旋转机械问题、流动噪声问题等。在 V4 版本中,STAR-CD 更是将解析对象扩展到流体/结构热应力问题、电磁场问题和铸造领域,成为了分析流动、传热和应力模拟的一体化通用软件。在完全不连续网格、滑移网格和网格修复等关键技术,STAR-CD 经过了超过 200 名知名学者的补充与完善。2013 年 7 月,STAR-CD 和 es-ice 内燃机模拟软件 V4.20 发布,给用户带来了更多全新的物理功能和前处理功能,能提供更迅速准确的缸内模拟仿真。首次发布的全新燃烧模型,即进度变量模型-多燃料(PVM-MF),将水平集(g -方程)模型和小火焰单元方法集成到单一合并模型中,从而消除了单个模型中预混或扩散控制燃烧的限制。

作为 CD-adapco 公司推出的新一代 CFD 软件,STAR-CCM+ (Computational Continuum Mechanics)采用连续介质力学数值技术,不仅可以进行流体分析,还可以进行结构等其他物理场的分析。STAR-CCM+ 搭载了 CD-adapco 公司独创的最新网格生成技术,可以完成复杂形状数据输入、表面准备、表面网格重构、自动体网格生成(包括多面体网格、六面体核心网格、十二面体核心网格、四面体网格)等生成网格所需的一系列作业。STAR-CCM+ 使用 CD-adapco 公司倡导的多面体网格,相比于原来的四面体网格,在保持相同计算精度的情况下,可以使计算性能提高 3~10 倍。2013 年 10 月 23 日,CD-adapco 公司发布了 STAR-CCM+ V8.06 版,引入了 Simulation Assistant 工具,通过引入适用于 Eulerian 多相流(Eulerian Multiphase)的雷诺应力模型(Reynolds Stress Modeling),进一步增强了多相流分析能力。

此外必须指出的是,除了商业 CFD 软件外,还有很多开源 CFD 平台因其可以提供方便快