

COMPUTATIONAL FLUID DYNAMICS

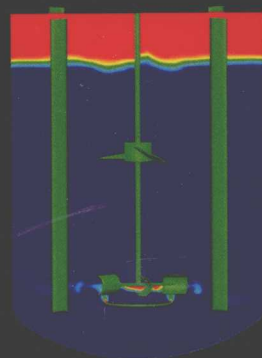
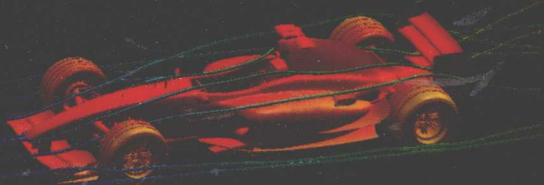
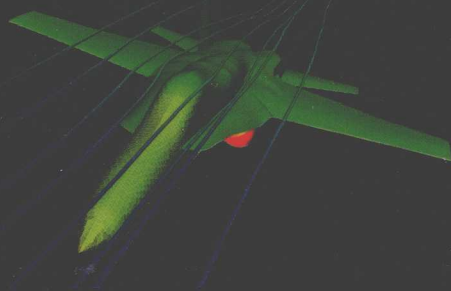
A Practical Approach

计算流体力学

—— 从实践中学习

[澳] Jiyuan Tu Guan Heng Yeoh [美] Chaoqun Liu 著

王晓冬 译



東北大學出版社
Northeastern University Press

COMPUTATIONAL FLUID DYNAMICS

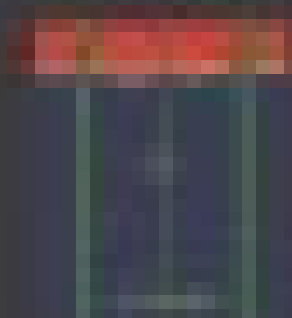
A Practical Approach

CFD 2000

A PRACTICAL APPROACH

by J. D. Anderson, Jr., Professor of Engineering, Princeton University

1996, 184 pp.



计算流体力学

——从实践中学习

Computational Fluid Dynamics

A Practical Approach

[澳]Jiyuan Tu Guan Heng Yeoh [美]Chaoqun Liu 著

王晓冬 译

东北大学出版社

• 沈 阳 •

© 王晓冬 2009

First edition 2008

Copyright © 2008, Elsevier Inc. All rights reserved.

图书在版编目 (CIP) 数据

计算流体力学：从实践中学习 / (澳) 屠基元等著；王晓冬译. —沈阳：东北大学出版社，2009.10

书名原文：Computational Fluid Dynamics: A Practical Approach

ISBN 978-7-81102-752-5

I. 计… II. ①屠… ②王… III. 计算流体力学—流体力学 IV. O351.2

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2009)第 179507 号

出 版 者：东北大学出版社

地址：沈阳市和平区文化路 3 号巷 11 号

邮编：110004

电话：024—83687331 (市场部) 83680267 (社务室)

传真：024—83680180 (市场部) 83680265 (社务室)

E-mail: neuph @ neupress.com

http: // www. neupress. com

印 刷 者：沈阳市市政二公司印刷厂

发 行 者：东北大学出版社

幅面尺寸：184mm×235mm

印 张：21.5

字 数：474 千字

出版时间：2009 年 10 月第 1 版

印刷时间：2009 年 10 月第 1 次印刷

责任编辑：刘乃义

封面设计：唐敏智

责任校对：郎 坤

责任出版：杨华宁

ISBN 978-7-81102-752-5

定 价：38.00 元

译者序

本书译自英国 Elsevier 出版社于 2008 年出版的《COMPUTATIONAL FLUID DYNAMICS—A Practical Approach》。该书是澳大利亚墨尔本皇家理工大学 (RMIT UNIVERSITY) 屠基元 (Jiyuan Tu) 教授等著者长期科研和教学工作的总结和升华。正如题目给出的那样, 本书是将 CFD 基本理论、CFD 软件操作和 CFD 最新研究成果有机结合的具有很强实用性的一本新书。

译者于 2006 年 10 月至 2007 年 10 月期间作为教育部公派访问学者, 到 RMIT 大学屠教授的科研团队从事多相流动的学习和合作研究, 参与了澳洲自然科学基金项目, 从屠教授那里学到了很多。在听取屠教授为本科生开设的 CFD 课程时, 开始接触本书原著的初稿。通过学习, 译者认为它是一本独具特色的 CFD 书。国内关于 CFD 的中文书籍虽然已经不少, 但或着重计算流体力学的基本理论, 或围绕 CFD 软件的使用展开, 因此确实需要这样一本适于 CFD 教学和 CFD 初学者的书。基于此认识, 译者在澳洲期间即着手对原著的翻译工作。

随着翻译工作的深入, 本项工作之浩繁、任务之艰难常使译者有力不从心之感。好在有屠教授的大力支持和热情帮助, 译稿亦得到原著者屠基元教授和刘超群教授的校对, 才有本书的出版。

本书的第 3 章、第 4 章是译者在刘超群教授对肖国庆老师初译稿详细修订之上的补充和完善。肖国庆老师对本书上述章节的翻译付出了大量的富有成效的工作。

本书的出版得到了英国 Elsevier 出版社的版权许可和原著者的授权, 并得到了东北大学的资助。本书的出版得到了东北大学出版社的高度重视, 编辑们付出了辛勤的汗水, 在此表示衷心的感谢。

由于 CFD 发展很快, 涉及的应用领域很多, 新的名词和术语不断出现, 普遍缺少对应的中文翻译, 这给译者的翻译工作带来了很多困难和挑战. 译者在翻译不同专业领域各种名词和术语时, 业已考虑国内现有的通行译法, 并在文中给出了相应的英文原文.

由于译者 CFD 理论和应用水平的局限, 加之原著中的某些内容确已超出译者研究所及, 译文中的不妥之处恳请读者批评指正.

译 者

2009 年 5 月于东北大学

原著前言

计算流体力学 (CFD), 过去只是学术研究、博士后或相关专业专家涉及的领域, 现正逐步成为许多大学毕业生们的研究工具, 他们将 CFD 应用于工程研究、产品开发和设计等方面. CFD 在处理复杂流动和传热问题中的作用越来越重要. 从事实际工作的工程师面临着来自流体流动和传热问题的不断挑战, 对于缺乏流体力学和传热学基础知识以及基本概念的工程师, CFD 的学习和训练是相当艰苦的历程.

如今的工程师越来越趋向使用一些 CFD 商业软件来解决实际问题, 这些商业软件有 ANSYS-CFX, ANSYS-FLUENT 以及 STAR-CD 等. 如果没有适当的指导就使用这些软件, 犹如没有受过训练的士兵能对手中的先进武器运用自如是不可能的一样. 通过软件可能获得各种计算结果, 但如果训练不当, 就可能导致诸多错误的分析, 这样危害会更大. 因此, 进行系统的 CFD 知识和应用方面的培训显得尤为重要. 此外, 使用者可以从经常出现的错误中逐渐了解 CFD 软件的缺陷. 然而, 应用环境的千差万别严重制约了对 CFD 软件这些缺陷的发现. 大量的 CFD 使用者拥有高性能的计算机, 他们在自己的实践中正在快速扩大 CFD 的应用范围.

本书的目的是为现在和将来使用 CFD 的读者提供一本合适的教材. CFD 是一门与数学相关的复杂学科, 本书旨在为读者提供通俗易懂的 CFD 基础理论、基本技术和实用指南, 而非计算技术中的复杂数学和理论. 本书尝试用各种方式来讨论所涉及的素材, 以引起读者的兴趣. 本书的特色在于从实践中理解 CFD. 基于在 CFD 教学方面的经验, 作者能够确认初学者在最开始时应掌握的基本概念. 本书精心设计的系列 CFD 计算实例可以促进读者的学习, 同时可以更好地理解 CFD 的基本原理. 本书所采用的方法是专为致力于 CFD 技术工程实践的初学者而设计的.

本书的内容安排如下.

第 1 章是流体动力学概述, 说明 CFD 技术的特有优势、CFD 作为研究和设计工具在工业领域的应用范围以及未来发展趋势.

第 2 章的目的是为满足首次使用 CFD 的读者对 CFD 问题一般处理和求解过程的了解而编写的. 读者将从商业软件以及自编 CFD 程序的基本求解过程中有所收益. 更为重要的是, 本章为读者指出了与本章相关的其他章节中的 CFD 基础知识. 与现有的许多传统 CFD 书籍相比, 本书的第 2 章是特别安排的.

第 3 章通过对流体动力学和传热学控制方程的处理及讨论, 介绍与 CFD 相关的基本

计算思想。这对读者充分理解和掌握 CFD 基本物理方程和内在原理都是非常重要的。通过书中精心设计的实例，读者将对质量守恒、动量守恒和能量守恒控制方程有更好的理解。

第 4 章介绍了计算求解过程的两个阶段。第一阶段为数值离散，本章中介绍目前常用的求解流动问题的数值离散化技术，如有限差分法和有限体积法（该方法被大多数商业软件采用）。第二阶段涉及代数方程的特殊求解技术。本章介绍的压力-速度耦合方法（SIMPLE 及其扩展形式）是本书的核心内容。该方法已经被大多数商业 CFD 软件所采用，并且在复杂工业问题的模拟中获得成功。

第 5 章讨论稳定性、收敛性、相容性以及计算精度等概念。对流体流动和热量传递基本方程的了解是 CFD 的基础，而了解 CFD 求解技术才是最终目的。本章将使读者更好地评价应用不同数值方法获得的数值模拟结果。

著者经过仔细考虑后还是把 CFD 中的湍流模型包括在本书中，因为在现实世界中，CFD 所涉及的问题毕竟多是湍流问题。因此，为更好地理解湍流模型以及其他常用模型，著者在第 6 章中为读者提供了一些实用的指导。另外，著者还精心编选了一些实例以帮助读者理解复杂的模型。

涵盖 CFD 不同方面的书籍和刊物的数量在不断增加，专家们结合工程实践提出了各种新的术语。在第 7 章中，通过一系列重要工程领域中的相关应用，阐述了 CFD 的求解能力。本章特别想通过某些 CFD 应用实例来激发读者的兴趣。

尽管介绍先进的 CFD 技术的细节已经超出本书的范围，但我们还是在第 8 章中对其中的基本概念作了一般性的介绍，希望对那些将 CFD 进一步应用于科学和工程新领域中的读者有所帮助。

Jiyuan Tu
Guan Heng Yeoh
Chaoqun Liu

原著致谢

本书呈现的材料部分源于著者在澳大利亚墨尔本皇家理工 (RMIT) 大学航空、机械与制造学院为高年级本科生开设的“计算流体力学基础”课程的教学积累。我们要感谢那些学习本门课程的学生们，他们提供的很多反馈意见有助于更好地设计课程内容以及对本门课程的理解。

著者还要感谢很多研究生和同事们，他们为本书的完成在诸多方面给予了大量的帮助。我们特别要感谢 Kiao Inthavong, Zhaofeng Tian, Krishna Mohanarangam, Weng Chan, Patrick Li, Gokul Rajamani, Huafeng Li, Sherman Cheung 以及 Mark Ho，他们为本书终稿的复习题和外观设计等进行了精心准备。

Elsevier Science & Technology 出版社的高级编辑 Mr Jonathan Simpson 以及他的同事们在本书的出版过程中，以他们的科学素养和职业技能给我们以极大的帮助。

我们的感谢特别要送给美国 Rochester 技术学院的 Dr Risa Robinson 副教授，他在非常短的时间内对全书进行了评述，给予我们极有价值的建议并且在本书中得到了体现。

Tu 博士要对妻子 Xue 和儿子 Tian 表达深深的谢意，在准备和撰写本书的过程中，他们给予坚定的支持。

Yeoh 博士也要感谢妻子 Natalie 以及女儿 Genevieve 和 Ellana 的长期支持，感谢她们对本书长期准备和撰写过程中给予的理解和鼓励。

衷心感谢对本书作出贡献的所有人员。

目 录

译者序

原著前言

原著致谢

1 绪 论	1
1.1 计算流体力学的概念	1
1.2 计算流体力学的优点	3
1.3 计算流体力学的应用	4
1.3.1 研究工具	4
1.3.2 基础热流体科学的教学工具	5
1.3.3 设计工具	6
1.3.4 航 空	6
1.3.5 汽车工程	7
1.3.6 生物科学与工程	8
1.3.7 化学和采矿业	10
1.3.8 民用和环境工程	12
1.3.9 能 源	13
1.3.10 体 育	15
1.4 计算流体力学展望	17
1.5 小 结	18
复习题	18
2 CFD 求解入门	20
2.1 概 述	20
2.1.1 CFD 共享软件	21
2.1.2 商业 CFD 软件	21
2.2 问题的确定: 前处理	23
2.2.1 第一步: 几何模型创建	23
2.2.2 第二步: 网格生成	25
2.2.3 第三步: 物理特性和流体特性选择	26

2.2.4 第四步: 边界条件设定	28
2.3 数值求解: CFD 求解器	32
2.3.1 第五步: 初值设定和求解控制	32
2.3.2 第六步: 收敛监视	34
2.4 计算结果报告及其可视化: 后处理	37
2.4.1 X-Y 直角坐标图	38
2.4.2 矢量图	39
2.4.3 云图	39
2.4.4 其他图形	42
2.4.5 数据报告及输出	43
2.4.6 动画	43
2.5 小结	44
复习题	45
3 CFD 基本控制方程	46
3.1 概述	46
3.2 连续性方程	46
3.2.1 质量守恒	46
3.2.2 物理意义	49
3.2.3 说明	52
3.3 动量方程	53
3.3.1 力的平衡	53
3.3.2 物理意义	56
3.3.3 说明	64
3.4 能量方程	64
3.4.1 能量守恒	64
3.4.2 物理意义	66
3.4.3 说明	71
3.5 湍流附加方程	72
3.5.1 何谓湍流	72
3.5.2 $k-\epsilon$ 两方程湍流模型	73
3.5.3 说明	78
3.6 CFD 控制方程的通式	80
3.7 控制方程的物理边界条件	85
3.8 小结	87

复习题	88
4 CFD 求解技术基础	92
4.1 概 述	92
4.2 控制方程的离散	93
4.2.1 有限差分法	93
4.2.2 有限体积法	97
4.2.3 控制方程向代数方程的转化	100
4.3 代数方程的数值解法	109
4.3.1 直接方法	109
4.3.2 迭代方法	112
4.3.3 压力-速度耦合: SIMPLE 算法	116
4.4 小 结	125
复习题	125
5 CFD 计算结果分析基础	129
5.1 概 述	129
5.2 相容性	129
5.3 稳定性	132
5.4 收 敛	137
5.4.1 何谓收敛	137
5.4.2 残差和收敛条件	138
5.4.3 收敛难点和欠松弛的使用	139
5.4.4 加速收敛	141
5.5 计算精度	142
5.5.1 计算误差源	143
5.5.2 计算误差的控制	147
5.5.3 数值求解的检查和验证	148
5.6 求解效率	149
5.7 实例研究	150
5.7.1 例 1: 管道内流动	151
5.7.2 例 2: 90°弯管内的流动	153
5.8 小 结	157
复习题	157
6 CFD 模拟与分析实用技巧	159
6.1 概 述	159

6.2 网格生成	160
6.2.1 网格生成概述	160
6.2.2 网格品质与网格设计	166
6.2.3 局部网格细化和自适应性求解	168
6.3 边界条件	171
6.3.1 边界条件设置概述	171
6.3.2 入口边界条件	173
6.3.3 出口边界条件	174
6.3.4 壁面边界条件	175
6.3.5 对称和周期性边界条件	176
6.4 湍流模型	177
6.4.1 湍流建模方法回顾	177
6.4.2 湍流模型选择策略	179
6.4.3 近壁面处理	184
6.4.4 边界条件设置	187
6.4.5 算例:翼面流动中的两方程湍流建模	189
6.5 小结	193
复习题	194
7 CFD 应用实例	197
7.1 概述	197
7.2 设计过程中的辅助设计工具	197
7.3 作为研究的工具:增进对物理现象的理解	203
7.4 其他一些重要应用	210
7.4.1 与流体流动耦合的热量传递	210
7.4.2 浮力作用下的自由火焰	223
7.4.3 车队中的空气流动	229
7.4.4 人鼻腔内的空气/颗粒流动	234
7.4.5 高速流动	238
7.5 小结	256
复习题	257
8 CFD 中的某些前沿课题和探究方法	262
8.1 概述	262
8.2 最新数值方法和技术	262
8.2.1 不可压缩流动	262

8.2.2 可压缩流动	265
8.2.3 移动网格	269
8.2.4 多重网格	272
8.2.5 并行计算	274
8.2.6 浸入边界方法	275
8.3 最新计算模型	277
8.3.1 直接数值模拟 (DNS)	277
8.3.2 大涡模拟 (LES)	279
8.3.3 湍流流动的 RANS-LES 耦合	281
8.3.4 多相流	283
8.3.5 燃 烧	284
8.3.6 流-固耦合	286
8.3.7 生物流体动力学	287
8.4 CFD 中的其他数值方法	289
8.4.1 格子 Boltzmann 方法	289
8.4.2 Monte Carlo 方法	290
8.4.3 粒子方法	292
8.5 小 结	293
复习题	294
附录 A 守恒方程的推导	296
附录 B 迎风格式	300
附录 C 显式及隐式方法	301
附录 D 学习进程和学时安排	303
附录 E CFD 作业及 CFD 课程设计指导	305
参考文献	316
建议进一步阅读的书籍	330

1 绪 论

1.1 计算流体力学的概念

计算流体力学(Computational fluid dynamics, 简称 CFD)已经进入了工业应用和科学研究的时代. 计算流体力学的字头缩写为 CFD, 尽管其最初的研究仅在航空、航天等高新技术工程领域, 但 CFD 已经迅速成为现代工程应用中用于解决复杂问题的一种常用方法. CFD 起源于流体动力学和传热学的一些领域, 但在其他一些重要领域, 特别是在加工、化工、民用和环境工程中, 也得到了应用. 通过计算机模拟进行的新结构设计和现有设备的改进以及系统优化, 可以提高效率和降低成本. 出于对全球变暖和日益增加的世界污染的关注, 能源工业的工程师们越来越依赖于 CFD 的帮助来降低设备的研发和维修成本. 最新的计算研究成果将被用于解决与清洁和可再生能源相关的技术问题, 以满足政府对排放和环境污染的严格限制.

什么是计算流体力学? 计算流体力学不仅是流体力学和数学的新分支, 正如图 1.1 所示, 它已经成为流体力学、数学与计算机科学交叉的一个全新的重要学科. 我们可以简单讨论一下上述各学科. 流体力学主要研究流体的流动(流体动力学)或静止问题(流体静力学). CFD 只研究流体力学中的前一部分, 即流体动力学部分, 研究流体流动对包含热量传递以及燃烧流动中可能的化学反应等过程的影响. 这直接反映了 CFD 技术中“流体动力学”的相关内容. 此外, 流体流动的物理特性通常用数学方程, 一般以偏微分方程的形式加以描述, 而这些方程控制着流动过程, 所以常常被称为

“CFD 的控制方程”(详见第 3 章). 为了求解这些数学方程, 计算机科学家应用高级计算机程序语言, 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对流体流动的研究, 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. 问题是: 是否需要流体工程、数学和计算机科学的专业技术人员一起开发 CFD 程序或进行 CFD 模拟. 答

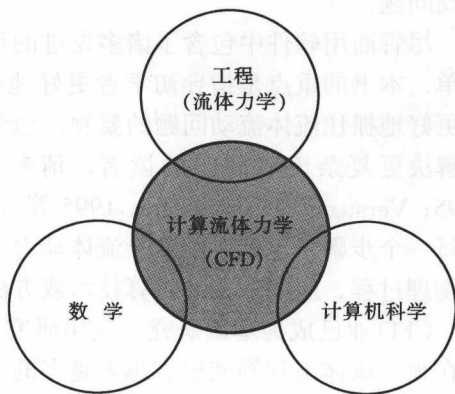


图 1.1 计算流体力学包含的不同学科关系

案显然是否定的。CFD 更需要的是对上述每一学科知识都有一定了解的人。

CFD 已经成为如图 1.2 所示的解决流体力学和热量传递问题的三种基本方法之一。每一种方法并非完全独立，它们之间存在着密切的内在联系。过去，实验测试和理论分析方法曾被用于研究流体动力学的各个方面，并协助工程师进行设备设计以及含有流体流动和热量传递的工业流程设计。随着计算机的出现，数值计算已经成为另一种有用的方法。在工业设计中，尽管理论分析方法仍在大量使用，实验方法继续发挥着重要的作用，但发展趋势明显趋于数值方法，特别是在非常复杂的流动情况下更是如此。

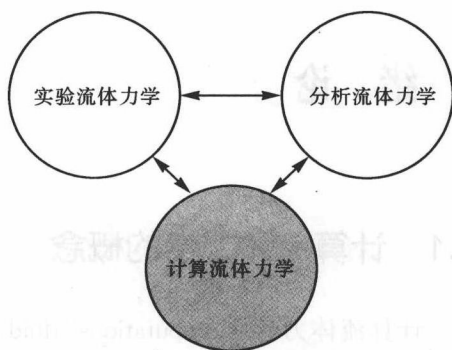


图 1.2 解决流体动力学和热量传递问题的三种方法

过去，初学者学习 CFD 或许要投入大量时间用于自己编写计算程序。而今，工业界甚至科学领域中希望在非常短的时间内获得 CFD 知识的需求在不断增长，人们不再有兴趣自己编写计算程序，而是更乐于使用商业软件包。多功能 CFD 程序正在逐步得到认可，随着流动物理学模型的更趋成熟，这些软件包已经得到广泛认可。由于世界上有不同的软件公司已经开发和测试了 CFD 程序，当今的 CFD 使用者避免了编程和测试的麻烦，可以直接应用这样的程序去求解大量的流体流动问题。

尽管商用软件中包含了诸多先进的计算方法，但 CFD 并不是仅仅熟练运用软件那么简单。本书的重点是指导初学者更好地使用 CFD，同时增加对基本概念的理解，以及如何更好地抓住流体流动问题的要领。想继续深入学习 CFD 以及希望发展新的数学模型用于解决更复杂流动问题的读者，请参考其他 CFD 书籍（如 Fletcher, 1991; Anderson, 1995; Versteeg, Malalasekera, 1995 等），以及本书作者的后续著作。我们将描述求解问题的每一个步骤，包括对新涉及流体动力学问题的物理解，开发新的数学模型来描述流动的物理过程，应用适当的计算技术或方法验证这些模型等。

CFD 业已成为基础研究、应用研究和工业应用中强大的计算工具。计算机模拟和分析在很多流体工程领域中有越来越多的应用，包括飞机（航空工程）、汽车（汽车工程）、呼吸和血液流动（生物工程）、流体在泵和管道中的流动（化学工程）、河流及污染物（民用和环境工程）、涡轮和工业炉（能源工程）以及游泳和高尔夫球（体育）等。通过应用 CFD，人们可以获得更多的关于系统预期运行的知识，进而可以进行设计改进和优化研究。在项目改进设计付诸实施之前，CFD 通常允许使用者问诸如“如果……会怎样”之类的问题。当人们考察我们生活的地球时，会发现几乎每一种事物都为流体所包围或者在流体中运动。

最近，CFD 通过复杂流体流动的可视化技术，正在给高等教育中流体力学和热力学的

教学带来一场革命。一些基于 CFD 的教学软件,如 ANSYS-FLUENT 公司的 FlowLab 的“虚拟流体实验室”,可以帮助学生巩固流体流动和热量传递的概念。该软件还可以由教师创建他们自己的教学算例或者改变软件内已有的算例。学生通过使用精心构建的实例,可以学会正确使用 CFD 去求解流体流动问题的方法,并建立对流动物理特性的直观感受。下一节中,我们将讨论 CFD 的一些主要优点,并进一步说明 CFD 的发展历程以及实际应用。

1.2 计算流体力学的优点

随着计算机技术的飞速发展,CFD 已经居于流体动力学和热传递科学研究的前沿。此外,CFD 作为现代工程实践中的一种实用工具,已经引起更多的关注。

计算流体力学有很多优点。首先,计算科学的理论发展集中在控制方程的构建和求解以及对方程的各种近似解法的研究上。CFD 提供了研究特定条件下控制方程某些特定细节问题的绝好机会。人们认识到理论发展之路不可能离开数值分析方法。其次,作为实验研究和理论分析的一个补充和替代,CFD 可以高效、低成本地模拟真实流体的流动。特别是与实验方法相比,CFD 大幅度地减少了研制时间、降低了设计成本,并且可能解决理论分析无法处理的复杂流动问题。这些优点随计算机硬件性能的增强和硬件成本的降低得以实现。第三,CFD 可以模拟通常在地球物理学和生物流体动力学实验中无法再现的流动条件,如假想的核事故,或实验无法仿制的庞大或细小的假想事件(如 2004 年发生在印度尼西亚的海啸)。第四,与理论和实验流体动力学相比,CFD 可以提供更细致、可视、全面的信息。

在实际应用中,CFD 允许包括雷诺(Reynolds)数、马赫(Mach)数、瑞利(Rayleigh)数等无量纲参数在一定范围内变化,借此来评估不同的设计。这种方法在流体系统设计的初始阶段通常是非常有效的。与不断上升的试验运行成本相比,CFD 也是非常廉价的。在流体流动细节十分重要的场合下,CFD 可以提供细节信息,帮助了解将要获得的流动过程,比如是否发生流动分离或者壁面温度是否超过极限值等。随着技术进步和技术竞争,需要优化设计以及对流动行为进行精确预测,由于实验研究的成本太高,CFD 就成为合理的选择。

尽管如此,但这并不意味着 CFD 作为获得设计信息的手段将很快取代实验测试,而是说明 CFD 是一种可行的选择。例如,风洞试验作为典型的按比例建造的实验装置,仍然为模拟真实流动提供重要的信息。对于工程零件设计,特别是在主要依靠流动特性的飞机零件设计中,缩小尺寸的风洞试验与整机测试相比是经济可行的。风洞可以非常有效地获得整机机体升力和阻力及其在关键位置处的表面分布信息。在其他复杂流动过程中,特别是包括多相流、沸腾或浓缩等过程中,CFD 仍然处于初始应用阶段,实验方法仍然是获得信息的基本来源。