

知名 赵振兴 陈小榆 倾力
专家 杨 志 刘平礼 推荐

FLUENT 15.0

流 场 分 析

实 战 指 南

朱红钧 编著

The book cover features a large, stylized 'X' shape that divides the background. The top-left and bottom-right quadrants are dark and contain grayscale images of fluid flow simulations, showing concentric ripples and complex flow patterns. The top-right and bottom-left quadrants are light gray. The title is centered in a black rectangular box.

FLUENT 15.0

**流场分析
实战指南**

朱红钧 编著

图书馆

人民邮电出版社

北京

图书在版编目(CIP)数据

FLUENT 15.0流场分析实战指南 / 朱红钧编著. --
北京: 人民邮电出版社, 2015.1
ISBN 978-7-115-37327-4

I. ①F… II. ①朱… III. ①流体力学—工程力学—
计算机仿真—应用软件—指南 IV. ①TB126-39

中国版本图书馆CIP数据核字(2014)第247657号

内 容 提 要

流动传热问题普遍存在于实际工程和生活中, 涉及流体机械设计、航天设计、汽车设计、生物医学工业、化工处理工业、半导体设计等诸多工程领域。由于流动传热问题的非线性和复杂多维性, 理论流体力学在近几十年来没有显著的突破。另外, 有些流动问题开展实验研究的成本高、风险大, 也制约了问题的深入探究。随着计算机技术的高速发展, 计算流体力学迅速成为国际上一个强有力的研究领域, 成为了进行传热、传质、动量传递及燃烧、多相流和化学反应研究的核心和重要技术。作为计算流体力学通用商业软件的杰出代表, FLUENT 已经更新至 15.0 版本。为了帮助读者迅速掌握计算流体力学的分析思路和熟悉 FLUENT 最新版本的功能, 本书介绍 FLUENT 15.0 各个模型及使用方法, 以及与 FLUENT 15.0 衔接的前后处理方法。全书以“功能讲解+实例演练+视频讲解”的方式, 通过大量实例全面介绍 FLUENT 各功能模型的使用方法, 同时尽可能地展现不同的前后处理工具与 FLUENT 15.0 的有机配合。

本书可作为海洋、土木、建筑、水利、石油、储运、机械、自动化、过程装备等领域研究人员、教师、研究生和高年级本/专科生的学习指南, 也可作为 FLUENT 15.0 自学者学习几何建模与网格划分的教学参考书, 还可作为高等院校教育、培训机构开展 CFD 数值仿真教育的培训指导书。

◆ 编 著 朱红钧

责任编辑 李永涛

责任印制 杨林杰

◆ 人民邮电出版社出版发行 北京市丰台区成寿寺路 11 号

邮编 100164 电子邮件 315@ptpress.com.cn

网址 <http://www.ptpress.com.cn>

三河市海波印务有限公司印刷

◆ 开本: 787×1092 1/16

印张: 32.25

字数: 789 千字

2015 年 1 月第 1 版

印数: 1—3 000 册

2015 年 1 月河北第 1 次印刷

定价: 69.00 元(附光盘)

读者服务热线: (010)81055410 印装质量热线: (010)81055316

反盗版热线: (010)81055315

广告经营许可证: 京崇工商广字第 0021 号

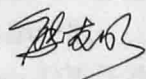
序

计算流体力学 (CFD) 是目前国际上一个强有力的研究领域, 是进行传热、传质、动量传递及燃烧、多相流和化学反应研究的核心和重要技术, 广泛应用于管柱设计、流体机械设计、航天设计、汽车设计、生物医学工业、化工处理工业、半导体设计等诸多工程领域。计算流体力学在最近 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, 还主要因为无论分析的方法或实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实验确定, 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 软件可以拓宽实验研究的范围, 减少成本昂贵的实验工作量。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实验, 历史上也曾有过首先由 CFD 数值模拟发现新现象而后由实验予以证实的例子。CFD 软件一般都能推出多种优化的物理模型, 如定常和非定常流动、层流、紊流、不可压缩和可压缩流动、传热、化学反应, 等等。对每一种物理问题的流动特点, 都有适合它的数值解法, 用户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。

FLUENT 软件是通用的 CFD 软件包, 可以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 在转捩与湍流、传热与相变、化学反应与燃烧、多相流、旋转机械、动/变形网格、噪声、材料加工、燃料电池等方面有广泛应用。

本书详细介绍了 FLUENT 15.0 的各个模型及实际操作设置方法, 通过实例和视频演示了 FLUENT 开展流体分析的思路和流程。全书共分为 13 章, 依次介绍了 FLUENT 15.0 概述、前后处理及各个模型, 包括 UDF 的使用和多场耦合模拟。本书配套光盘中提供的算例文件及视频教学文件, 能够帮助读者较快地学会并熟悉 FLUENT 的操作流程, 用 FLUENT 的相关模型解决实际工程中的问题。

谨祝本书能够帮助你在 FLUENT 流体分析领域有深入的拓展!



教授/博导

海洋完井工程专家

2014 年 10 月于成都

前言

FLUENT 是国际上流行的通用 CFD 软件包,可以用于模拟从不可压缩到高度可压缩范围内的复杂流动。它具有丰富的物理模型、先进的数值算法和强大的前后处理功能,自问世后便拥有了一批忠实的用户,且用户数在全球范围内不断扩大。随着 FLUENT 加入 ANSYS 软件群之后,其前处理、多场耦合、后处理模块都得到了长足的发展。FLUENT 15.0 作为 ANSYS 15.0 的有机组成部分,为目前 ANSYS 公司发布的最新旗舰版本。

本书通过大量实例全面介绍 FLUENT 15.0 各功能模型的使用方法,同时尽可能地展现不同的前后处理工具与 FLUENT 15.0 的有机配合。读者可按照书中的步骤一步一步进行操作,在短时间内掌握软件的相应操作,进而完成流场数值仿真分析。

本书可作为海洋、土木、建筑、水利、石油、储运、机械、自动化、过程装备等领域的研究人员、教师、研究生和高年级本/专科生的学习指南,也可作为 FLUENT 15.0 自学者学习几何建模与网格划分的教学参考书,还可作为高等院校教育、培训机构开展 CFD 数值仿真教育的培训教材。

本书配套 1 张多媒体 DVD 光盘,使用时需要注意的事项如下。

- 本书是基于 FLUENT 15.0 版本进行写作的,读者需要使用不低于上述版本的软件。
- 光盘中的文件是只读文件,因此,需要将光盘上的源文件复制到计算机的硬盘上,并取消文件的“只读”属性,导入 FLUENT 软件后方能进行修改。
- START 文件夹用于存放操作实例的起始文件,对应文中的  启动文件; END 文件夹用于存放操作实例的结果文件,对应文中的  结果文件; AVI 文件夹用于存放所有操作实例的操作录像,对应文中的  操作录像,直接双击需要播放的文件即可观看。
- Ch*文件夹的*号代表某个数字,与本书的章对应。
- 播放文件前要安装配套光盘根目录下的“tscc.exe”插件。

全书由西南石油大学朱红钧编著。另外,西南石油大学 CNPC“石油管工程”重点实验室的研究生韩青华、马粤、赵洪南、巴彬、冯光、戚兴、邹大鹏、杨晓露、张文丽参与了部分模拟操作和文档整理工作,在此一并致以深深的谢意!同时也非常感谢 SimWe 仿真科技论坛、工程流体网论坛、流体论坛广大网友的帮助和支持。

限于编者水平,且时间仓促,书中难免有疏漏之处,望广大读者给予指正。读者可通过电子邮件 swputicky@126.com 与我们交流,不胜感谢!

朱红钧

2014 年 10 月于成都

目 录

第 1 章 概述	1
1.1 CFD 基础	1
1.1.1 CFD 的基本方程	1
1.1.2 CFD 的数值解法	4
1.1.3 CFD 的求解流程	20
1.1.4 CFD 商业软件	20
1.2 FLUENT 15.0 概述	22
1.2.1 FLUENT 15.0 的特性	22
1.2.2 FLUENT 15.0 的操作界面	23
1.2.3 FLUENT 15.0 的计算模型	28
1.2.4 FLUENT 15.0 的基本操作	34
1.2.5 FLUENT 15.0 基础实例演示	43
1.3 小结	52
第 2 章 FLUENT 15.0 前后处理	53
2.1 Gambit 2.4.6 的应用	54
2.1.1 Gambit 2.4.6 基本界面	54
2.1.2 Gambit 2.4.6 几何建模	56
2.1.3 Gambit 2.4.6 网格划分	59
2.1.4 Gambit 2.4.6 基础实例演示	61
2.2 ICEM CFD 15.0 的应用	67
2.2.1 ICEM CFD 15.0 基本界面	67
2.2.2 ICEM CFD 15.0 几何建模	68
2.2.3 ICEM CFD 15.0 网格划分	69
2.2.4 ICEM CFD 15.0 基础实例演示	70
2.3 Meshing 15.0 的应用	74
2.3.1 Meshing 15.0 平台界面	74
2.3.2 Meshing 15.0 基础实例演示	81
2.4 FLUENT 15.0 内置后处理	89
2.4.1 图形显示	90
2.4.2 曲线绘制	94
2.4.3 报告分析	95
2.4.4 数据输出	96
2.5 CFD-Post 15.0 通用后处理	97
2.5.1 图形绘制	97
2.5.2 曲线绘制	99

2.5.3 报告制作	99
2.6 Tecplot 后处理	100
2.6.1 数据输入	100
2.6.2 图形显示	101
2.7 本章小结	107
第 3 章 湍流模型	108
3.1 模型介绍	108
3.1.1 S-A 模型	109
3.1.2 $k-\varepsilon$ 模型	110
3.1.3 RSM 模型	112
3.1.4 LES 模型	113
3.2 湍流模型设置	114
3.3 后台阶流动模拟	116
3.3.1 实例描述与思路分析	116
3.3.2 几何建模	116
3.3.3 流场网格划分	119
3.3.4 FLUENT 求解设置	120
3.3.5 结果后处理及分析	124
3.3.6 不同模型的对比计算与分析	125
3.4 海底管道绕流模拟	127
3.4.1 实例描述与思路分析	127
3.4.2 几何建模	128
3.4.3 网格划分	130
3.4.4 FLUENT 求解设置	132
3.4.5 结果后处理与分析	137
3.5 本章小结	138
第 4 章 传热模型	139
4.1 模型介绍	139
4.1.1 热传导	140
4.1.2 热对流	141
4.1.3 热辐射	142
4.1.4 传热模型的应用领域	145
4.2 地下室的通风换热模拟	146
4.2.1 案例简介和思路分析	146
4.2.2 几何建模	147
4.2.3 网格划分	151
4.2.4 FLUENT 求解设置	152

4.2.5 结果后处理与分析	160
4.3 外掠平板的对流换热模拟	166
4.3.1 案例简介与思路分析	166
4.3.2 几何建模	167
4.3.3 网格划分	167
4.3.4 FLUENT 求解设置	169
4.3.5 结果后处理与分析	173
4.4 本章小结	178
第 5 章 欧拉多相流模型	179
5.1 模型选择	179
5.2 VOF 模型	180
5.3 Mixture 模型	181
5.4 Euler 模型	182
5.5 水槽内推板造波模拟	183
5.5.1 案例简介与思路分析	183
5.5.2 几何建模	184
5.5.3 网格划分	185
5.5.4 FLUENT 求解设置	186
5.5.5 结果后处理与分析	194
5.6 孔口自由出流模拟	197
5.6.1 实例描述与思路分析	197
5.6.2 几何建模	198
5.6.3 网格划分	200
5.6.4 FLUENT 求解设置	202
5.6.5 结果后处理与分析	205
5.7 空化数值模拟	207
5.7.1 实例描述与思路分析	207
5.7.2 几何建模	208
5.7.3 网格划分	210
5.7.4 FLUENT 求解设置	211
5.7.5 结果后处理与分析	215
5.8 磨料射流固液两相流模拟	216
5.8.1 实例描述与思路分析	216
5.8.2 几何建模	217
5.8.3 网格划分	219
5.8.4 FLUENT 求解设置	221
5.8.5 结果后处理与分析	226
5.9 本章小结	227

第 6 章 组分输运与化学反应模型	228
6.1 模型介绍	228
6.2 硫化氢在空气中的扩散过程模拟	233
6.2.1 案例简介与思路分析	233
6.2.2 几何建模	235
6.2.3 网格划分	236
6.2.4 FLUENT 求解设置	238
6.2.5 结果后处理与分析	245
6.3 氮气置换过程模拟	246
6.3.1 案例简介与思路分析	246
6.3.2 几何建模	247
6.3.3 网格划分	248
6.3.4 FLUENT 求解设置	250
6.3.5 结果后处理与分析	256
6.4 预混气体化学反应的模拟	260
6.4.1 案例简介与思路分析	260
6.4.2 几何建模	261
6.4.3 网格划分	262
6.4.4 FLUENT 求解设置	263
6.4.5 结果后处理与分析	271
6.5 本章小结	272
第 7 章 凝固与融化模型	273
7.1 凝固与融化模型介绍	273
7.1.1 凝固与融化模型基础理论	273
7.1.2 凝固与融化的模型设置	274
7.2 冰块融化模拟	275
7.2.1 案例简介与思路分析	275
7.2.2 几何建模	276
7.2.3 流场网格划分	278
7.2.4 FLUENT 求解设置	280
7.2.5 结果后处理及分析	286
7.3 本章小结	287
第 8 章 离散相模型	288
8.1 DPM 模型介绍	288
8.1.1 离散相轨道计算	289
8.1.2 DPM 模型初始条件设置	290
8.1.3 DPM 模型边界条件设置	292

8.2 直管内球形颗粒的运移轨迹模拟	292
8.2.1 几何建模	293
8.2.2 网格划分	295
8.2.3 FLUENT 求解设置	296
8.2.4 结果处理与分析	301
8.3 弯管气流携沙冲蚀模拟	302
8.3.1 几何建模	304
8.3.2 网格划分	305
8.3.3 FLUENT 求解设置	306
8.3.4 结果处理与分析	310
8.4 本章小结	312
第 9 章 噪声模型	313
9.1 噪声模型介绍	313
9.1.1 直接模拟模型 (CAA 模型)	313
9.1.2 噪声比拟模型 (FW—H 模型)	314
9.1.3 宽频噪声模型	314
9.1.4 噪声模型设置	315
9.2 电线气动噪声分析	317
9.2.1 案例简介与思路分析	317
9.2.2 几何建模	318
9.2.3 流场网格划分	320
9.2.4 FLUENT 求解设置	322
9.2.5 结果分析与后处理	327
9.3 本章小结	332
第 10 章 动网格模型	333
10.1 模型介绍	333
10.1.1 守恒型动网格流场计算方程	334
10.1.2 动网格模型的兼容性	335
10.2 体网格再生方法	336
10.2.1 铺层法简介	337
10.2.2 弹性光顺法简介	338
10.2.3 局部重构法简介	340
10.2.4 动网格控制参数	341
10.3 叶轮搅拌器内旋转流场模拟	348
10.3.1 实例描述与思路分析	348
10.3.2 几何建模	349
10.3.3 网格划分	353

10.3.4	FLUENT 求解设置	355
10.3.5	结果分析	359
10.4	落物入水过程模拟	359
10.4.1	实例描述与思路分析	359
10.4.2	几何建模	361
10.4.3	网格划分	364
10.4.4	FLUENT 求解设置	365
10.4.5	结果后处理与分析	372
10.5	本章小结	374
第 11 章	多孔介质模型	375
11.1	模型介绍	375
11.1.1	基于表观速度的多孔介质动量方程	376
11.1.2	Darcy 黏性阻力项	376
11.1.3	惯性损失项	377
11.1.4	黏性阻力系数和惯性阻力系数	377
11.1.5	多孔介质模型面板	379
11.2	地层流体的渗透模拟	380
11.2.1	案例介绍与思路分析	380
11.2.2	几何建模	381
11.2.3	流场网格划分	386
11.2.4	FLUENT 求解设置	389
11.2.5	结果后处理与分析	395
11.3	本章小结	399
第 12 章	UDF 的应用	400
12.1	UDF 基础	400
12.1.1	UDF 概述	401
12.1.2	FLUENT 的数据类型	401
12.2	UDF 宏	402
12.2.1	访问 FLUENT 变量的预定义宏	402
12.2.2	实用工具宏	407
12.2.3	常用 DEFINE 宏	417
12.3	UDF 的解释与编译	420
12.3.1	UDF 的解释	420
12.3.2	UDF 的编译	421
12.4	液体的蒸发相变模拟	421
12.4.1	实例描述与思路分析	421
12.4.2	几何建模	423

12.4.3	网格划分	425
12.4.4	FLUENT 求解设置	426
12.4.5	结果后处理与分析	433
12.5	剪切流越坝模拟	435
12.5.1	实例描述与思路分析	435
12.5.2	几何建模	436
12.5.3	网格划分	439
12.5.4	FLUENT 求解设置	441
12.5.5	结果后处理与分析	446
12.6	本章小结	446
第 13 章	耦合模拟	447
13.1	耦合分析基础	448
13.2	ANSYS 热流固耦合的实现	448
13.3	输油弯管的热流固耦合模拟	450
13.3.1	案例简介与思路分析	450
13.3.2	几何建模	451
13.3.3	流场网格划分	457
13.3.4	FLUENT 求解设置	458
13.3.5	流场结果分析	464
13.3.6	热分析结构网格划分	465
13.3.7	热边界加载与求解	466
13.3.8	热分析后处理	467
13.3.9	应力分析结构网格划分	468
13.3.10	应力加载与求解	469
13.3.11	应力分析后处理	470
13.4	水流冲击平板的流固耦合模拟	471
13.4.1	案例简介与思路分析	471
13.4.2	几何建模	472
13.4.3	流场网格划分	476
13.4.4	FLUENT 求解设置	477
13.4.5	流场分析后处理	481
13.4.6	结构网格划分	483
13.4.7	一端固定时结构加载与求解	484
13.4.8	一端固定时结构分析后处理	486
13.4.9	两端固定时结构加载与求解	486
13.4.10	两端固定时结构分析后处理	488
13.5	圆柱绕流的流固耦合模拟	489
13.5.1	案例简介与思路分析	489

13.5.2	几何建模.....	490
13.5.3	流场网格划分.....	493
13.5.4	FLUENT 求解设置.....	494
13.5.5	流场分析后处理.....	499
13.5.6	结构网格划分.....	500
13.5.7	结构加载与求解.....	501
13.5.8	结构分析后处理.....	503
13.6	小结.....	503
参考文献.....		504

第1章 概述

FLUENT 是国际上流行的通用 CFD 软件包,可以用于模拟从不可压缩到高度可压缩范围内的复杂流动。它具有丰富的物理模型,先进的数值算法和强大的前、后处理功能,自问世后便拥有了一批忠实的用户,且用户数在全球范围内不断扩大。随着 FLUENT 加入 ANSYS 软件群之后,其前处理、多场耦合、后处理模块都得到了长足的发展。FLUENT 15.0 作为 ANSYS 15 的有机组成部分,是目前 ANSYS 公司发布的最新旗舰版本。本章重点介绍 CFD 基础、FLUENT 15.0 的界面与模型,通过一个基础实例帮助读者认识 FLUENT 15.0 并熟悉利用 FLUENT 求解问题的流程和方法。



本章内容

- CFD 的基本方程。
- CFD 的数值解法。
- CFD 的求解流程。
- CFD 的商业软件。
- FLUENT 15.0 的特性。
- FLUENT 15.0 的操作界面。
- FLUENT 15.0 的计算模型。
- FLUENT 15.0 的基本操作。
- FLUENT 15.0 基础实例演示。



本章案例

- 实例: Z 形管流动模拟。

1.1 CFD 基础

1.1.1 CFD 的基本方程

CFD 是计算流体力学的英文缩写,即利用数值解算方法求解流体力学的基本控制方程,包括连续性方程、动量方程和能量方程等。

一、流体力学的连续性方程

连续性方程即质量守恒方程，任何流动问题都必须满足质量守恒定律。按照质量守恒定律，单位时间内流出控制体的流体净质量总和应等于同时间间隔控制体内因密度变化而减少的质量，由此可导出流体流动连续性方程的微分形式为

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u_x)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho u_y)}{\partial y} + \frac{\partial(\rho u_z)}{\partial z} = 0 \quad (1-1)$$

式中， u_x 、 u_y 、 u_z 分别为 x 、 y 、 z 三个方向的速度分量，m/s； t 为时间，s； ρ 为密度，kg/m³。

若用哈密顿微分算子表示，可以写成散度的形式

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \text{div}(\rho \vec{u}) = 0 \quad (1-2)$$

二、流体力学的动量方程

动量方程的本质是满足牛顿第二定律。该定律可描述为：对于一给定的流体微元体，其动量对时间的变化率等于外界作用在该微元体上的各种力之和。依据这一定律，可导出 x 、 y 和 z 三个方向的动量方程为

$$\frac{\partial(\rho u_x)}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho u_x \vec{u}) = -\frac{\partial p}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{xx}}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{yx}}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{zx}}{\partial z} + \rho f_x \quad (1-3 \text{ a})$$

$$\frac{\partial(\rho u_y)}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho u_y \vec{u}) = -\frac{\partial p}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{xy}}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{yy}}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{zy}}{\partial z} + \rho f_y \quad (1-3 \text{ b})$$

$$\frac{\partial(\rho u_z)}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho u_z \vec{u}) = -\frac{\partial p}{\partial z} + \frac{\partial \tau_{xz}}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{yz}}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{zz}}{\partial z} + \rho f_z \quad (1-3 \text{ c})$$

式中， p 为流体微元体上的压强，Pa； τ_{xx} 、 τ_{yy} 、 τ_{zz} 等是因分子黏性作用而产生的作用在微元体表面上的黏性应力 τ 的分量，Pa； f_x 、 f_y 、 f_z 为三个方向的单位质量力，m/s²。

动量方程在实际应用中许多表达形式，其中比较常见的有如下几种。

(1) 可压缩黏性流体的动量方程。

$$\begin{aligned} \rho \frac{du_x}{dt} = & \rho f_x + \frac{\partial p}{\partial x} + \frac{\partial}{\partial x} \left\{ \mu \left[2 \frac{\partial u_x}{\partial x} - \frac{2}{3} \left(\frac{\partial u_x}{\partial x} + \frac{\partial u_y}{\partial y} + \frac{\partial u_z}{\partial z} \right) \right] \right\} \\ & + \frac{\partial}{\partial y} \left[\mu \left(\frac{\partial u_x}{\partial y} + \frac{\partial u_y}{\partial x} \right) \right] + \frac{\partial}{\partial z} \left[\mu \left(\frac{\partial u_x}{\partial z} + \frac{\partial u_z}{\partial x} \right) \right] \end{aligned} \quad (1-4 \text{ a})$$

$$\rho \frac{du_y}{dt} = \rho f_y + \frac{\partial p}{\partial y} + \frac{\partial}{\partial y} \left\{ \mu \left[2 \frac{\partial u_y}{\partial y} - \frac{2}{3} \left(\frac{\partial u_x}{\partial x} + \frac{\partial u_y}{\partial y} + \frac{\partial u_z}{\partial z} \right) \right] \right\} \\ + \frac{\partial}{\partial z} \left[\mu \left(\frac{\partial u_y}{\partial z} + \frac{\partial u_z}{\partial y} \right) \right] + \frac{\partial}{\partial x} \left[\mu \left(\frac{\partial u_x}{\partial y} + \frac{\partial u_y}{\partial x} \right) \right] \quad (1-4 \text{ b})$$

$$\rho \frac{du_z}{dt} = \rho f_z + \frac{\partial p}{\partial z} + \frac{\partial}{\partial z} \left\{ \mu \left[2 \frac{\partial u_z}{\partial z} - \frac{2}{3} \left(\frac{\partial u_x}{\partial x} + \frac{\partial u_y}{\partial y} + \frac{\partial u_z}{\partial z} \right) \right] \right\} \\ + \frac{\partial}{\partial x} \left[\mu \left(\frac{\partial u_z}{\partial x} + \frac{\partial u_x}{\partial z} \right) \right] + \frac{\partial}{\partial y} \left[\mu \left(\frac{\partial u_y}{\partial z} + \frac{\partial u_z}{\partial y} \right) \right] \quad (1-4 \text{ c})$$

(2) 常黏性流体的动量方程。

$$\rho \frac{d\vec{u}}{dt} = \rho \vec{f} - \text{grad} p + \frac{\mu}{3} \text{grad} (\nabla \cdot \vec{u}) + \mu \nabla^2 \vec{u} \quad (1-5)$$

(3) 常密度黏性流体的动量守恒方程。

$$\rho \frac{d\vec{u}}{dt} = \rho \vec{f} - \text{grad} p + \mu \nabla^2 \vec{u} \quad (1-6)$$

(4) 无黏性流体的动量守恒方程。

$$\rho \frac{d\vec{u}}{dt} = \rho \vec{f} - \text{grad} p \quad (1-7)$$

(5) 静力学方程。

$$\rho \vec{f} = \text{grad} p \quad (1-8)$$

实际流体的连续性方程与动量方程组成的方程组就称为纳维-斯托克斯 (N-S) 方程。

三、流体力学的能量方程

能量守恒定律是包含有热交换的流动系统必须满足的基本定律，其本质是热力学第一定律。依据能量守恒定律，微元体中能量的增加率等于进入微元体的净热流通量加上质量力与表面力对微元体所做的功，可得其表达式为

$$\frac{\partial(\rho E)}{\partial t} + \nabla \cdot [\vec{u}(\rho E + p)] = \nabla \cdot \left[k_{\text{eff}} \nabla T - \sum_j h_j J_j + (\tau_{\text{eff}} \cdot \vec{u}) \right] + S_h \quad (1-9)$$

式中， E 为流体微团的总能，J/kg，包含内能、动能和势能之和， $E = h - \frac{p}{\rho} + \frac{u^2}{2}$ ； h 为

焓, J/kg; h_j 为组分 j 的焓, J/kg, 定义为 $h_j = \int_{T_{ref}}^T C_{p,j} dT$, 其中 $T_{ref}=298.15\text{K}$; k_{eff} 为有效热

传导系数, $\text{W}/(\text{m}\cdot\text{K})$, $k_{eff} = k + k_t$, k_t 为湍流热传导系数, 根据所用的湍流模型来确定; J_j 为组分 j 的扩散通量; S_h 为包括了化学反应热及其他用户定义的体积热源项。

1.1.2 CFD 的数值解法

有限体积法 (FVM) 又称有限容积法, 是近年来发展迅速的一种离散化方法, 其特点是计算效率高。有限体积法在 CFD 领域得到了广泛的应用, 大多数商用 CFD 软件都采用了这种方法, 如 FLUENT、STAR-CD 和 CFX 等。

有限体积法将所计算的区域划分成一系列控制体积, 每个控制体积都有一个节点作代表, 通过将控制方程对控制体积作积分来导出离散方程。在积分的过程中, 需要对控制体积界面上的被求函数本身 (对流通量) 及其一阶导数 (扩散通量) 的构成做出假定, 这就形成了不同的格式。由于扩散项多是采用相当于二阶精度的线性插值, 因而格式的区别主要体现在对流通量项上。

用有限体积法导出的离散方程可以保证守恒特性, 而且离散方程系数的物理意义明确, 是目前流动与传热问题的数值计算中应用最普遍的一种方法。

由于流体控制方程较多, 为研究方便, 我们将控制方程写成通用变量方程的形式, 即

$$\frac{\partial(\rho\phi)}{\partial t} + \text{div}(\rho\phi\vec{u}) = \text{div}(\Gamma \cdot \text{grad}\phi) + S_\phi \quad (1-10)$$

式中的 ϕ 、 Γ 、 S_ϕ 的取值见表 1-1。

表 1-1 通用变量方程中的各参量取值

方程	ϕ	Γ	S_ϕ
连续性方程	1	0	0
x-动量方程	u	μ	$-(\partial p / \partial x) + S_{Mx}$
y-动量方程	v	μ	$-(\partial p / \partial y) + S_{My}$
z-动量方程	w	μ	$-(\partial p / \partial z) + S_{Mz}$
能量方程	i	K	$-p \cdot \text{div}(\vec{u}) + \Phi + S_i$
紊动能方程	k	$\mu + \mu_t / \sigma_k$	$-\rho\varepsilon + \mu_t P_G$
紊流耗散率方程	ε	$\mu + \mu_t / \sigma_\varepsilon$	$-\rho C_2 (\varepsilon^2 / k) + \mu_t C_1 (\varepsilon / k) P_G$

写成通用变量的形式, 是为了下一步离散做准备的, 这样只需离散一个通用变量方程即