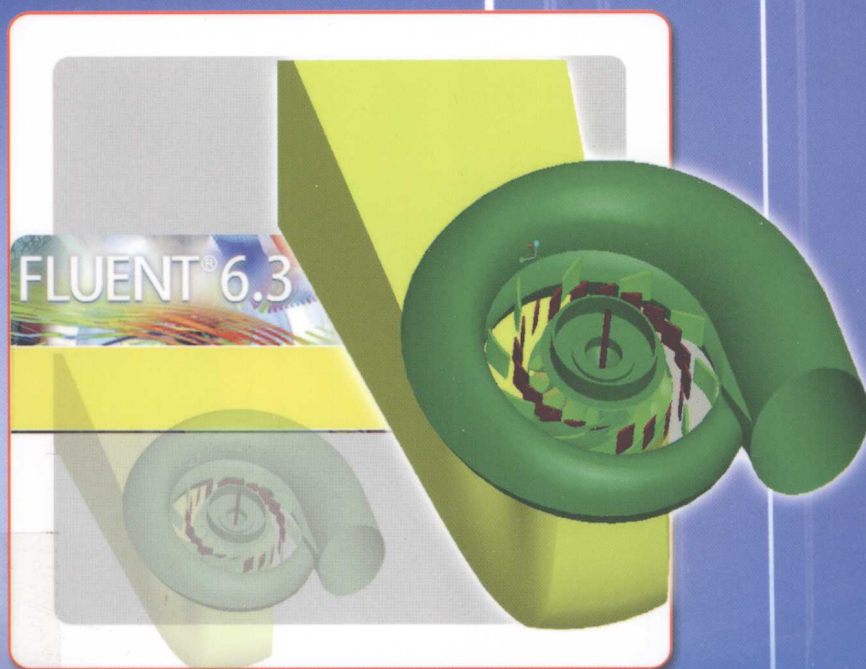


# Fluent

## 高级应用与实例分析

江帆 黄鹏 编著



清华大学出版社

# Fluent 高级应用与实例分析

江 帆 黄 鹏 编著

清华大学出版社  
北 京

## 内 容 简 介

本书是 Fluent 在多相流、动网格、滑移网格等高级应用方面的指导性教材。全书共分 14 章,第 1 章介绍流体力学基本知识,第 2 章至第 4 章分别介绍 Fluent、Gambit 和 Tecplot 的基本使用,第 5 章介绍多相流理论,第 6 章为多相流的计算实例,第 7 章介绍动网格基础知识,第 8 章介绍 UDF 基本知识,第 9 章为动网格计算实例,第 10 章为滑移网格基本知识,第 11 章为滑移网格计算实例,第 12 章介绍 Fluent 的并行计算,最后两章为 Fluent 的二次开发应用。本书以详细的实例方式说明 Fluent 高级应用的计算操作,具有较强的实用性。

本书可作为水利、动力、能源、航空、冶金、环境、建筑、机械、材料、流体工程等专业的研究生和本科生教材,也可供上述领域的科研人员,特别是进行 CFD 应用计算的人员参考。

本书封面贴有清华大学出版社防伪标签,无标签者不得销售。

版权所有,侵权必究。侵权举报电话:010-62782989 13701121933

### 图书在版编目(CIP)数据

Fluent 高级应用与实例分析/江帆,黄鹏编著.—北京:清华大学出版社,2008.7  
ISBN 978-7-302-17714-2

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

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2008)第 072383 号

责任编辑:刘建龙 桑任松

封面设计:杨玉兰

版式设计:北京东方人华科技有限公司

责任校对:李玉萍

责任印制:孟凡玉

出版发行:清华大学出版社

地 址:北京清华大学学研大厦 A 座

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

邮 编:100084

社 总 机:010-62770175

邮 购:010-62786544

投稿与读者服务:010-62776969, c-service@tup.tsinghua.edu.cn

质 量 反 馈:010-62772015, zhiliang@tup.tsinghua.edu.cn

印 刷 者:北京密云胶印厂

装 订 者:北京市密云县京文制本装订厂

经 销:全国新华书店

开 本:185×260 印 张:21.25 字 数:512 千字

版 次:2008 年 7 月第 1 版 印 次:2008 年 7 月第 1 次印刷

印 数:1~4000

定 价:33.00 元

---

本书如存在文字不清、漏印、缺页、倒页、脱页等印装质量问题,请与清华大学出版社出版部联系调换。联系电话:(010)62770177 转 3103 产品编号:026870-01

# 前 言

计算流体力学(Computational Fluid Dynamics, CFD)是一门发展迅速的学科,与此学科相关的新的理论、算法和软件层出不穷。作为一门独立的学科,计算流体力学出现于20世纪60年代,经过几十年的发展,已经成为流体科学领域与理论流体力学和实验流体力学鼎足而立的重要学科。CFD通过计算机数值计算和图形显示的方法,在时间和空间上定量描述流场的数值解,从而达到对物理问题进行细致研究的目的。正是由于CFD兼有理论性和实践性的双重特点,为许多复杂流动与传热计算问题提供了有效的计算技术,使得它的应用遍及所有与流动现象有关的学科及工业领域。

现有CFD软件包较多,如Phoenics、CFX、Fluent、Star-CD等,而Fluent是目前国际上比较流行的商用CFD软件包,在美国的市场占有率为60%(注:FLUENT、GAMBIT等软件在其界面上显示为全大写的形式,但其拼写并非几个单词的缩写形式,在使用时也有全大写、首字母大写及全小写等多种形式,并不统一。本书中按专有名词的格式将其统一为首字母大写的形式,如Fluent和Gambit)。它具有丰富的物理模型、先进的数值方法以及强大的前后处理功能,在航空航天、汽车设计、石油天然气、涡轮机设计等方面都有着广泛的应用,其在石油天然气工业上的应用包括燃烧、井下分析、喷射控制、环境分析、油气消散/聚积、多相流、管道流动等。Fluent的软件设计基于CFD软件群的思想,从用户需求角度出发,针对各种复杂流动的物理现象,Fluent软件采用不同的离散格式和数值方法,以期在特定的领域内使计算速度、稳定性和精度等方面达到最佳组合,从而高效率地解决各个领域的复杂流动计算问题。

正是因为Fluent在流体工程模拟计算中发挥着重要的作用,高校和企业相关科技人员对于学习Fluent的热情很高,特别是多相流、运动边界、快速计算等复杂问题的实现,急需一本Fluent高级应用方面的指导性教材。

本书正是针对目前Fluent高层次学习的需要编写的,在作者们几年的应用实践经验的基础上,力求使本书体现独特性。首先是实践性。本书的实例来源于工程实践,如泄洪坝的气液两相流、辐流式沉淀池的液固两相流、悬浮载体的浮动、齿轮泵的计算、车辆交会的计算,等等,突出了工程应用背景,使得本书的计算实例具有较强的借鉴性,使读者通过仿照实例操作,能掌握Fluent的高级使用操作。其次是全面性。本书除包括Fluent和Gambit两个联系紧密的软件基础知识和Fluent高级计算外,还介绍了通用后处理软件Tecplot及Fluent和Gambit与其他建模和CAE软件的数据传递,并给出Fluent二次开发、UDF的VC编译平台等,便于读者学习深化。再次就是新颖性。本书采用较新的Fluent 6.2软件包进行介绍和实例操作,并给出Fluent在刚出现不久的双核计算机上的并行计算,紧跟时代步伐。

全书共分14章,第1章介绍流体力学基本知识,第2章至第4章分别介绍Fluent、

Gambit 和 Tecplot 的基本使用, 第 5 章介绍多相流理论, 第 6 章为多相流的计算实例, 第 7 章介绍动网格基础知识, 第 8 章介绍 UDF 基本知识, 第 9 章为动网格计算实例, 第 10 章为滑移网格基本知识, 第 11 章为滑移网格计算实例, 第 12 章介绍 Fluent 的并行计算, 最后两章为 Fluent 的二次开发应用。

本书第 1 章~第 7 章、第 9 章~第 12 章由江帆编写, 陈瑞萍参加了部分文字编辑工作, 第 8 章、第 12 章~第 14 章由黄鹏编写, 全书由江帆统稿。

本书部分材料来源于科研中国网、流体中文网、清洁能源论坛等, 感谢网友所做的工作。本书的编写得到作者的三位导师田红旗教授、陈维平教授、李元元教授的帮助和支持, 也得到华南理工大学金属新材料中心、广州大学机电系和肇庆学院物理系的老师的支持, 以及黄永安博士、作者的父母和兄妹的支持, 得到清华大学出版社的大力支持, 在此一并致以深深的谢意!

本书既是利用 Fluent 软件进行高级应用计算的工程技术相关计算的指导书, 又可作为高等院校相关专业本科和硕士研究生的流体工程教学的参考书。

限于编者的水平, 书中难免有不当之处, 还请广大读者给予指正, 请致信 [jiangfan2008@126.com](mailto:jiangfan2008@126.com) 或 [huangpeng8@163.com](mailto:huangpeng8@163.com), 不胜感激。

江 帆

2008 年 5 月于广州

# 目 录

<b>第 1 章 CFD 基础</b> ..... 1	
1.1 流体力学的基本概念..... 1	
1.1.1 流体的连续介质模型..... 1	
1.1.2 流体的性质..... 1	
1.1.3 流体力学中的力与压强..... 2	
1.1.4 流体运动的描述..... 4	
1.2 CFD 基本模型..... 8	
1.2.1 基本控制方程..... 8	
1.2.2 湍流模型..... 11	
1.2.3 初始条件和边界条件..... 17	
1.3 CFD 模型的离散——有限体积法..... 19	
1.3.1 CFD 模型的数值求解 方法概述..... 19	
1.3.2 有限体积法..... 20	
1.3.3 有限体积法中常用的 离散格式..... 28	
1.4 流场数值计算算法分析..... 29	
1.4.1 SIMPLE 算法详解..... 31	
1.4.2 其他算法介绍..... 39	
<b>第 2 章 Fluent 基本介绍</b> ..... 46	
2.1 Fluent 概述..... 46	
2.1.1 Fluent 软件组成..... 46	
2.1.2 Fluent 的文件类型..... 46	
2.1.3 Fluent 的特点..... 47	
2.2 Fluent 的操作界面..... 49	
2.2.1 图形用户界面..... 49	
2.2.2 文本用户界面(TUI)及 Scheme 表达式..... 50	
2.2.3 图形控制及鼠标使用..... 54	
2.3 Fluent 简单操作实例..... 54	
2.3.1 Fluent 计算流程..... 54	
2.3.2 简单流动与传热的计算..... 55	
2.4 Fluent 读取 Ansys 网格的操作..... 70	
2.4.1 Fluent 读取 Ansys 网格的方法..... 71	
2.4.2 Fluent 读取 Ansys 网格的实例..... 71	
<b>第 3 章 Gambit 的使用</b> ..... 73	
3.1 Gambit 功能及界面..... 73	
3.1.1 特点及功能..... 73	
3.1.2 基本界面..... 73	
3.1.3 Gambit 的文件组成..... 75	
3.1.4 Gambit 中鼠标的使用..... 76	
3.2 Gambit 建模及网格划分..... 77	
3.2.1 二维建模..... 77	
3.2.2 二维网格划分..... 80	
3.2.3 三维建模..... 83	
3.2.4 三维网格划分..... 85	
3.2.5 与 CAD 软件的接口..... 87	
3.3 建模及网格划分实例..... 88	
3.3.1 二维轴对称维多辛斯基 曲线喷嘴..... 88	
3.3.2 三维贯通管..... 91	
<b>第 4 章 通用后处理 Tecplot</b> <b>使用入门</b> ..... 112	
4.1 Tecplot 基本功能..... 112	
4.1.1 Tecplot 的界面..... 112	
4.1.2 基本功能..... 117	
4.2 Tecplot 的数据格式..... 117	
4.2.1 Tecplot 数据层次..... 117	
4.2.2 多数据区域..... 119	
4.2.3 数据区域中的数据结构..... 119	
4.3 Tecplot 对 Fluent 数据进行后处理..... 125	
4.3.1 Tecplot 识别的数据格式..... 125	
4.3.2 Tecplot 读取 Fluent 文件步骤..... 125	

4.4	Tecplot 绘图环境设置 .....	127	5.6.9	定义欧拉模型中的相 .....	171
4.4.1	网格和标尺的设定 .....	127	5.6.10	包含体积力 .....	174
4.4.2	坐标系统 .....	127	5.6.11	为 VOF 模型设置时间 依赖参数 .....	175
4.5	Tecplot 使用实例 .....	128	5.6.12	为欧拉多相流计算选择 紊流模型 .....	175
4.5.1	绘制 XY 曲线 .....	128	5.6.13	设置边界条件 .....	176
4.5.2	绘制矢量图 .....	129	5.6.14	设置初始体积分数 .....	180
4.5.3	绘制等值线图 .....	131	5.6.15	可压缩 VOF 和混合模型 计算的输入 .....	180
4.5.4	绘制流线图 .....	134	5.6.16	凝固/熔解 VOF 计算的输入 .....	181
4.5.5	绘制散点图 .....	136	5.7	一般多相流问题的求解策略 .....	181
4.5.6	绘制三维流场图 .....	138	5.7.1	VOF 模型的求解策略 .....	181
<b>第 5 章</b>	<b>多相流基本模型 .....</b>	<b>140</b>	5.7.2	混合模型的求解策略 .....	182
5.1	VOF 模型 .....	140	5.7.3	欧拉模型的求解策略 .....	182
5.1.1	VOF 模型概述及其局限 .....	140	<b>第 6 章</b>	<b>多相流计算实例 .....</b>	<b>184</b>
5.1.2	控制方程 .....	140	6.1	沉淀池活性污泥沉降的计算 .....	184
5.2	混合模型 .....	146	6.1.1	问题描述 .....	184
5.2.1	混合模型概述及其局限 .....	146	6.1.2	具体计算 .....	185
5.2.2	控制方程 .....	147	6.2	泄洪坝气固液三相流的计算 .....	196
5.3	欧拉模型 .....	149	6.2.1	问题描述 .....	196
5.3.1	欧拉模型概述及其局限 .....	149	6.2.2	具体计算 .....	196
5.3.2	控制方程 .....	150	<b>第 7 章</b>	<b>动网格计算方法概述 .....</b>	<b>205</b>
5.4	气穴影响 .....	163	7.1	动网格计算模型 .....	205
5.4.1	气穴模型概述及其局限 .....	163	7.2	动网格更新方法 .....	205
5.4.2	体积和气泡数量 .....	164	7.2.1	基于弹性变形的网格调整 .....	205
5.4.3	体积分数方程 .....	164	7.2.2	动态网格层变方法 .....	206
5.4.4	气泡动力学 .....	164	7.2.3	局部网格重构方法 .....	207
5.5	选择通用多相流模型 .....	164	7.3	Fluent 中动网格相关设置 .....	208
5.6	设置一般的多相流问题 .....	165	7.3.1	启动动网格计算 .....	208
5.6.1	使用一般多相流模型的 步骤 .....	165	7.3.2	运动边界文件的 准备与导入 .....	212
5.6.2	选用多相流模型 并指定相数 .....	166	7.3.3	运动边界(动态区域)的 相关设置 .....	213
5.6.3	选择 VOF 公式 .....	166			
5.6.4	定义均匀多相流 .....	167			
5.6.5	包含气穴影响 .....	167			
5.6.6	定义相概述 .....	168			
5.6.7	定义 VOF 模型中的相 .....	168			
5.6.8	定义混合模型中的相 .....	170			

<b>第 8 章 UDF 使用指南</b> .....217	<b>第 10 章 滑移网格基础</b> ..... 271
8.1 UDF 基础 .....217	10.1 滑移网格概述..... 271
8.1.1 Fluent 的求解次序 .....217	10.1.1 滑移网格的应用及 运动方式..... 271
8.1.2 Fluent 网格拓扑 .....217	10.1.2 滑移网格的原理..... 274
8.1.3 Fluent 的数据类型 .....218	10.2 滑移网格的基本设置..... 275
8.2 UDF 中访问 Fluent 变量的宏.....218	10.2.1 网格的前提条件..... 275
8.2.1 访问单元的宏.....218	10.2.2 问题的建立..... 275
8.2.2 访问面的宏 .....221	<b>第 11 章 滑移网格的计算实例</b> ..... 277
8.2.3 访问几何的宏.....222	11.1 转笼生物反应器的内部流场计算 ... 277
8.2.4 访问节点的宏.....223	11.1.1 问题描述..... 277
8.2.5 访问多相的宏.....224	11.1.2 具体计算过程..... 278
8.3 UDF 实用工具宏.....224	11.2 车辆交会的动态模拟..... 289
8.3.1 一般的循环宏.....224	11.2.1 问题描述..... 289
8.3.2 查询多相组分的宏.....226	11.2.2 具体计算过程..... 289
8.3.3 设置面变量 .....228	11.3 滑移网格模型和动网格模型 计算比较..... 295
8.3.4 访问没有赋值的自变量.....229	11.3.1 数学模型上的区别..... 296
8.3.5 访问邻近网格和 线索的变量 .....234	11.3.2 在建模处理上的区别..... 297
8.3.6 矢量工具 .....234	11.3.3 计算速度的比较..... 298
8.4 UDF 常用 DEFINE 宏 .....236	11.3.4 转笼生物反应器计算 结果上的区别..... 298
8.4.1 通用求解宏 .....236	11.3.5 结论..... 301
8.4.2 模型指定宏 .....237	<b>第 12 章 UDF 的高级用法</b> ..... 302
8.4.3 多相流模型宏.....240	12.1 求取任意几何点的物理场值 ..... 302
8.5 UDF 的解释和编译.....242	12.1.1 基本 C++类的说明..... 302
8.5.1 UDF 的解释运行.....242	12.1.2 求取任何一点的物理场值的 方法..... 303
8.5.2 UDF 的 C 编译.....243	12.2 Fluent 和有限元软件的数据交换 .... 305
8.5.3 UDF 的 VC++编译.....245	12.2.1 两数值模拟软件进行 数据交换的方式条件..... 306
8.5.4 编译相关问题.....248	12.2.2 Fluent 和 FEPG 的 数据交换..... 306
<b>第 9 章 动网格计算实例</b> .....250	<b>第 13 章 开发基于 Gambit 和 Fluent 的数值模拟软件</b> ..... 308
9.1 悬浮生物载体在 移动床运动的模拟.....250	13.1 用 VC++操纵 Gambit..... 308
9.1.1 问题描述 .....250	
9.1.2 具体计算过程.....251	
9.2 齿轮泵的动态模拟.....263	
9.2.1 问题描述 .....263	
9.2.2 具体计算过程.....263	



13.1.1 批处理文件的构建.....	308	14.1.5 并行 Fluent 中的网格面.....	321
13.1.2 Gambit 的启动和批处理 文件的运行.....	309	14.2 并行 UDF 节点的数据传递和 同步.....	322
13.1.3 Gambit 的进阶编程初步.....	309	14.2.1 主进程传递数据到 节点进程.....	322
13.2 用 VC 操纵 Fluent.....	311	14.2.2 节点进程传输数据到 主进程.....	323
13.2.1 Fluent 的命令行操纵方法.....	311	14.2.3 消息传输宏.....	323
13.2.2 VC 操纵 Fluent 的步骤.....	312	14.2.4 节点线程全局宏.....	323
13.3 边界条件的自动识别和施加.....	314	14.3 用 Fluent_VC_Programmer 编写 并行 UDF.....	324
13.4 用 VC 打开 Tecplot.....	315	14.4 程序实例.....	325
<b>第 14 章 并行 Fluent 的 UDF</b> .....	317	14.5 启动并行 Fluent.....	327
14.1 并行 Fluent 的域、线索、 面和单元.....	317	<b>参考文献</b> .....	329
14.1.1 进程通信概述.....	317		
14.1.2 进程全局变量.....	318		
14.1.3 并行 Fluent 中的线索.....	318		
14.1.4 并行 Fluent 中的 网格单元.....	319		

# 第 1 章 CFD 基础

计算流体动力学(computational fluid dynamics, CFD)是流体力学的一个分支,它通过计算机模拟获得某种流体在特定条件下的有关信息,实现了用计算机代替试验装置完成“计算试验”,为工程技术人员提供了实际工况模拟仿真的操作平台,已广泛应用于航空航天、热能动力、土木水利、汽车工程、铁道、船舶工业、化学工程、流体机械、环境工程等领域。

本章介绍 CFD 一些重要的基础知识,帮助读者熟悉 CFD 的基本理论和基本概念,为计算时设置边界条件、对计算结果进行分析与整理提供参考。

## 1.1 流体力学的基本概念

### 1.1.1 流体的连续介质模型

流体质点(fluid particle):几何尺寸同流动空间相比是极小量,又含有大量分子的微元体。

连续介质(continuum/continuous medium):质点连续地充满所占空间的流体或固体。

连续介质模型(continuum/continuous medium model):把流体视为没有间隙地充满它所占据的整个空间的一种连续介质,且其所有的物理量都是空间坐标和时间的连续函数的一种假设模型:  $u = u(t, x, y, z)$ 。

### 1.1.2 流体的性质

#### 1. 惯性

惯性(fluid inertia)指流体不受外力作用时,保持其原有运动状态的属性。惯性与质量有关,质量越大,惯性就越大。单位体积流体的质量称为密度(density),以  $\rho$  表示,单位为  $\text{kg/m}^3$ 。对于均质流体,设其体积为  $V$ ,质量为  $m$ ,则其密度为

$$\rho = \frac{m}{V} \quad (1-1)$$

对于非均质流体,密度随点而异。若取包含某点在内的体积  $\Delta V$ ,其中质量  $\Delta m$ ,则该点密度需要用极限方式表示,即

$$\rho = \lim_{\Delta V \rightarrow 0} \frac{\Delta m}{\Delta V} \quad (1-2)$$

#### 2. 压缩性

作用在流体上的压力变化可引起流体的体积变化或密度变化,这一现象称为流体的可压缩性。压缩性(compressibility)可用体积压缩率  $k$  来量度

$$k = -\frac{dV/V}{dp} = \frac{d\rho/\rho}{dp} \quad (1-3)$$

式中： $p$  为外部压强。

在研究流体流动过程中，若考虑到流体的压缩性，则称为可压缩流动，相应地称流体为可压缩流体，例如高速流动的气体。若不考虑流体的压缩性，则称为不可压缩流动，相应地称流体为不可压缩流体，如水、油等。

### 3. 粘性

粘性(viscosity)指在运动的状态下，流体所产生的抵抗剪切变形的性质。粘性大小由粘度来量度。流体的粘度是由流动流体的内聚力和分子的动量交换所引起的。粘度有动力粘度  $\mu$  和运动粘度  $\nu$  之分。动力粘度由牛顿内摩擦定律导出：

$$\tau = \mu \frac{du}{dy} \quad (1-4)$$

式中： $\tau$  为切应力，Pa； $\mu$  为动力粘度，Pa·s； $du/dy$  为流体的剪切变形速率。

运动粘度与动力粘度的关系为

$$\nu = \frac{\mu}{\rho} \quad (1-5)$$

式中： $\nu$  为运动粘度， $m^2/s$ 。

在研究流体流动过程中，考虑流体的粘性时，称为粘性流动，相应的流体称为粘性流体；当不考虑流体的粘性时，称为理想流体的流动，相应的流体称为理想流体。

根据流体是否满足牛顿内摩擦定律，将流体分为牛顿流体和非牛顿流体。牛顿流体严格满足牛顿内摩擦定律且  $\mu$  保持为常数。非牛顿流体的切应力与速度梯度不成正比，一般又分为塑性流体、假塑性流体、胀塑性流体 3 种。

塑性流体，如牙膏等，它们有一个保持不产生剪切变形的初始应力  $\tau_0$ ，只有克服了这一个初始应力后，其切应力才与速度梯度成正比，即

$$\tau = \tau_0 + \mu \frac{du}{dy} \quad (1-6)$$

假塑性流体，如泥浆等，其切应力与速度梯度的关系是

$$\tau = \mu \left( \frac{du}{dy} \right)^n, \quad n < 1 \quad (1-7)$$

胀塑性流体，如乳化液等，其切应力与速度梯度的关系是

$$\tau = \mu \left( \frac{du}{dy} \right)^n, \quad n > 1 \quad (1-8)$$

## 1.1.3 流体力学中的力与压强

### 1. 质量力

与流体微团质量大小有关并且集中在微团质量中心的力称为质量力(body force)。在重力场中有重力  $mg$ ；直线运动时，有惯性力  $ma$ 。质量力是一个矢量，一般用单位质量所具

有的质量力来表示, 其形式如下:

$$f = f_x i + f_y j + f_z k \quad (1-9)$$

式中:  $f_x$ ,  $f_y$ ,  $f_z$  为单位质量力在各轴上的投影。

## 2. 表面力

大小与表面面积有关而且分布作用在流体表面上的力称为表面力(surface force)。表面力按其作用方向可以分为两种: 一是沿表面内法线方向的压力, 称为正压力; 另一种是沿表面切向的摩擦力, 称为切向力。

对于理想流体的流动, 流体质点只受到正压力, 没有切向力; 对于粘性流体的流动, 流体质点所受到的作用力既有正压力, 也有切向力。

作用在静止流体上的表面力只有沿表面内法线方向的正压力。单位面积上所受到的表面力称为这一点处的静压强。静压强具有两个特征: ①静压强的方向垂直指向作用面; ②流场内一点处静压强的大小与方向无关。

## 3. 表面张力

在液体表面, 界面上液体间的相互作用力称为张力。在液体表面有自动收缩的趋势, 收缩的液面存在相互作用的与该处液面相切的拉力, 称为液体的表面张力(surface tension)。正是这种力的存在, 引起弯曲液面内外出现压强差以及常见的毛细现象等。

试验表明, 表面张力大小与液面的截线长度  $L$  成正比, 即

$$T = \sigma L \quad (1-10)$$

式中:  $\sigma$  为表面张力系数, 它表示液面上单位长度截线上的表面张力, 其大小由物质种类决定, 其单位为 N/m。

## 4. 绝对压强、相对压强及真空度

标准大气压的压强是 101325Pa(760mm 汞柱), 通常用  $p_{\text{atm}}$  表示。若压强大于大气压, 则以该压强为计算基准得到的压强称为相对压强(relative pressure), 也称为表压强, 通常用  $p_r$  表示。若压强小于大气压, 则压强低于大气压的值就称为真空度(vacuum), 通常用  $p_v$  表示。如以压强 0Pa 为计算的基准, 则这个压强就称为绝对压强(absolute pressure), 通常用  $p_s$  表示。这三者的关系如下:

$$p_r = p_s - p_{\text{atm}} \quad (1-11)$$

$$p_v = p_{\text{atm}} - p_s \quad (1-12)$$

在流体力学中, 压强都用符号  $p$  表示, 但一般来说有一个约定: 对于液体, 压强用相对压强; 对于气体, 特别是马赫数大于 0.1 的流动, 应视为可压缩流, 压强用绝对压强。

压强的单位较多, 一般用 Pa, 也可用 bar, 还可以用汞柱、水柱, 这些单位换算如下:

$$1\text{Pa}=1\text{N/m}^2$$

$$1\text{bar}=10^5\text{Pa}$$

$$1p_{\text{atm}}=760\text{mmHg}=10.33\text{mH}_2\text{O}=101325\text{Pa}$$

## 5. 静压、动压和总压

对于静止状态下的流体, 只有静压强。对于流动状态的流体, 有静压强(static pressure)、

动压强(dynamic pressure)、测压管压强(manometric tube pressure)和总压强(total pressure)之分。下面从伯努利(Bernoulli)方程(也有人称其为伯努里方程)中分析它们的意义。

伯努利方程阐述一条流线上流体质点的机械能守恒,对于理想流体的不可压缩流动其表达式如下:

$$\frac{p}{\rho g} + \frac{v^2}{2g} + z = H \quad (1-13)$$

式中:  $p/\rho g$  称为压强水头,也是压能项,为静压强;  $v^2/2g$  称为速度水头,也是动能项;  $z$  称为位置水头,也是重力势能项,这三项之和就是流体质点的总的机械能;  $H$  称为总的水头高。

将式(1-13)两边同时乘以  $\rho g$ , 则有

$$p + \frac{1}{2}\rho v^2 + \rho g z = \rho g H \quad (1-14)$$

式中:  $p$  称为静压强,简称静压;  $\frac{1}{2}\rho v^2$  称为动压强,简称动压;  $\rho g H$  称为总压强,简称总压。对于不考虑重力的流动,总压就是静压和动压之和。

## 1.1.4 流体运动的描述

### 1. 流体运动描述的方法

描述流体物理量有两种方法,一种是拉格朗日描述;一种是欧拉描述。

拉格朗日(Lagrange)描述也称随体描述,它着眼于流体质点,并将流体质点的物理量认为是随流体质点及时间变化的,即把流体质点的物理量表示为拉格朗日坐标及时间的函数。设拉格朗日坐标为  $(a, b, c)$ , 以此坐标表示的流体质点的物理量,如矢径、速度、压强等等在任一时刻  $t$  的值,便可以写为  $a$ 、 $b$ 、 $c$  及  $t$  的函数。

若以  $f$  表示流体质点的某一物理量,其拉格朗日描述的数学表达式为

$$f = f(a, b, c, t) \quad (1-15)$$

例如,设时刻  $t$  流体质点的矢径即  $t$  时刻流体质点的位置以  $r$  表示,其拉格朗日描述为

$$r = r(a, b, c, t) \quad (1-16)$$

同样,质点的速度的拉格朗日描述是

$$v = v(a, b, c, t) \quad (1-17)$$

欧拉描述,也称空间描述,它着眼于空间点,认为流体的物理量随空间点及时间而变化,即把流体物理量表示为欧拉坐标及时间的函数。设欧拉坐标为  $(q_1, q_2, q_3)$ , 用欧拉坐标表示的各空间点上的流体物理量如速度、压强等,在任一时刻  $t$  的值,可写为  $q_1$ 、 $q_2$ 、 $q_3$  及  $t$  的函数。从数学分析知道,当某时刻一个物理量在空间的分布一旦确定,该物理量在此空间形成一个场。因此,欧拉描述实际上描述了一个个物理量的场。

若以  $f$  表示流体的一个物理量,其欧拉描述的数学表达式是(设空间坐标取用直角坐标)

$$f = F(x, y, z, t) = F(r, t) \quad (1-18)$$

如流体速度的欧拉描述是

$$v = v(x, y, z, t) \quad (1-19)$$

## 2. 拉格朗日描述与欧拉描述之间的关系

拉格朗日描述着眼于流体质点，将物理量视为流体坐标与时间的函数；欧拉描述着眼于空间点，将物理量视为空间坐标与时间的函数。它们可以描述同一物理量，必定互相关。设表达式  $f = f(a, b, c, t)$  表示流体质点  $(a, b, c)$  在  $t$  时刻的物理量；表达式  $f = F(x, y, z, t)$  表示空间点  $(x, y, z)$  在时刻  $t$  的同一物理量。如果流体质点  $(a, b, c)$  在  $t$  时刻恰好运动到空间点  $(x, y, z)$  上，则应有

$$\begin{cases} x = x(a, b, c, t) \\ y = y(a, b, c, t) \\ z = z(a, b, c, t) \end{cases} \quad (1-20)$$

$$F(x, y, z, t) = f(a, b, c, t). \quad (1-21)$$

事实上，将式(1-16)代入式(1-21)左端，即有

$$\begin{aligned} F(x, y, z, t) &= F[x(a, b, c, t), y(a, b, c, t), z(a, b, c, t), t] \\ &= f(a, b, c, t) \end{aligned} \quad (1-22)$$

或者反解式(1-16)，得到

$$\begin{cases} a = a(x, y, z, t) \\ b = b(x, y, z, t) \\ c = c(x, y, z, t) \end{cases} \quad (1-23)$$

将式(1-23)代入式(1-21)的右端，也应有

$$\begin{aligned} f(a, b, c, t) &= f[a(x, y, z, t), b(x, y, z, t), c(x, y, z, t), t] \\ &= F(x, y, z, t) \end{aligned} \quad (1-24)$$

由此，可以通过拉格朗日描述推出欧拉描述，同样也可以由欧拉描述推出拉格朗日描述。

## 3. 随体导数

流体质点物理量随时间的变化率称为随体导数(substantial derivative)，或物质导数、质点导数。

按拉格朗日描述，物理量  $f$  表示为  $f = f(a, b, c, t)$ ， $f$  的随体导数就是跟随质点  $(a, b, c)$  的物理量  $f$  对时间  $t$  的导数  $\partial f / \partial t$ 。例如，速度  $v(a, b, c, t)$  是矢径  $r(a, b, c, t)$  对时间的偏导数，

$$v(a, b, c, t) = \frac{\partial r(a, b, c, t)}{\partial t} \quad (1-25)$$

即随体导数就是偏导数。

按欧拉描述，物理量  $f$  表示为  $f = F(x, y, z, t)$ ，但  $\partial F / \partial t$  并不表示随体导数，它只表示物理量在空间点  $(x, y, z, t)$  上的时间变化率。而随体导数必须跟随  $t$  时刻位于  $(x, y, z, t)$  空间点上的那个流体质点，其物理量  $f$  的时间变化率。由于该流体质点是运动的，即  $x$ 、 $y$ 、 $z$  是变的，若以  $a$ 、 $b$ 、 $c$  表示该流体质点的拉格朗日坐标，则  $x$ 、 $y$ 、 $z$  将依式(1-16)变化，从而  $f = F(x, y, z, t)$  的变化依连锁法则处理。因此，物理量  $f = F(x, y, z, t)$  的随体导数是

$$\begin{aligned}
 \frac{DF(x,y,z,t)}{Dt} &= DF[x(a,b,c,t), y(a,b,c,t), z(a,b,c,t), t] \\
 &= \frac{\partial F}{\partial x} \frac{\partial x}{\partial t} + \frac{\partial F}{\partial y} \frac{\partial y}{\partial t} + \frac{\partial F}{\partial z} \frac{\partial z}{\partial t} + \frac{\partial F}{\partial t} \\
 &= \frac{\partial F}{\partial x} u + \frac{\partial F}{\partial y} v + \frac{\partial F}{\partial z} w + \frac{\partial F}{\partial t} \\
 &= (\mathbf{v} \cdot \nabla) F + \frac{\partial F}{\partial t}
 \end{aligned} \tag{1-26}$$

式中： $D/Dt$  表示随体导数。

从中可以看出，对于质点物理量的随体导数，欧拉描述与拉格朗日描述大不相同。前者是两者之和，而后者是直接的偏导数。

#### 4. 定常流动与非定常流动

根据流体流动过程以及流动过程中的流体的物理参数是否与时间相关，可将流动分为定常流动(steady flow)与非定常流动(unsteady flow)。

定常流动：流体流动过程中各物理量均与时间无关，这种流动称为定常流动。

非定常流动：流体流动过程中某个或某些物理量与时间有关，则这种流动称为非定常流动。

#### 5. 流线与迹线

常用流线和迹线来描述流体的流动。

迹线(track)：随着时间的变化，空间某一点处的流体质点在流动过程中所留下的痕迹称为迹线。在  $t=0$  时刻，位于空间坐标  $(a,b,c)$  处的流体质点，其迹线方程为

$$\begin{cases} dx(a,b,c,t) = u dt \\ dy(a,b,c,t) = v dt \\ dz(a,b,c,t) = w dt \end{cases} \tag{1-27}$$

式中： $u$ 、 $v$ 、 $w$  分别为流体质点速度的三个分量； $x$ 、 $y$ 、 $z$  为在  $t$  时刻此流体质点的空间位置。

流线(streamline)：在同一个时刻，由不同的无数多个流体质点组成的一条曲线，曲线上每一点处的切线与该质点处流体质点的运动方向平行。流场在某一时刻  $t$  的流线方程为

$$\frac{dx}{u(x,y,z,t)} = \frac{dy}{v(x,y,z,t)} = \frac{dz}{w(x,y,z,t)} \tag{1-28}$$

对于定常流动，流线的形状不随时间变化，而且流体质点的迹线与流线重合。在实际流场中除驻点或奇点外，流线不能相交，不能突然转折。

#### 6. 流量与净通量

流量(flux)：单位时间内流过某一控制面的流体体积称为该控制面的流量  $Q$ ，其单位为  $m^3/s$ 。若单位时间内流过的流体是以质量计算，则称为质量流量  $Q_m$ ；不加说明时“流量”一词概指体积流量。在曲面控制面上有

$$Q = \iint_A \mathbf{v} \cdot n dA \tag{1-29}$$

净通量(net flux): 在流场中取整个封闭曲面作为控制面  $A$ , 封闭曲面内的空间称为控制体。流体经一部分控制面流入控制体, 同时也有流体经另一部分控制面从控制体中流出; 此时流出的流体减去流入的流体, 所得出的流量称为流过全部封闭控制面  $A$  的净流量(或净通量), 通过式(1-30)计算:

$$q = \oiint_A \mathbf{v} \cdot n dA \quad (1-30)$$

对于不可压缩流体来说, 流过任意封闭控制面的净通量等于 0。

### 7. 有旋流动与有势流动

由速度分解定理, 流体质点的运动可以分解为:

- (1) 随同其他质点的平动;
- (2) 自身的旋转运动;
- (3) 自身的变形运动(拉伸变形和剪切变形)。

在流动过程中, 若流体质点自身做无旋运动(irrotational flow), 则称流动是无旋的, 也就是有势的, 否则就称流动是有旋流动(rotational flow)。流体质点的旋度是一个矢量, 通常用  $\omega$  表示, 其大小为

$$\omega = \frac{1}{2} \begin{vmatrix} i & j & k \\ \frac{\partial}{\partial x} & \frac{\partial}{\partial y} & \frac{\partial}{\partial z} \\ u & v & w \end{vmatrix} \quad (1-31)$$

若  $\omega=0$ , 则称流动为无旋流动, 否则就是有旋流动。

$\omega$  与流体的流线或迹线形状无关; 粘性流动一般为有旋流动; 对于无旋流动, 伯努利方程适用于流场中任意两点之间; 无旋流动也称为有势流动(potential flow), 即存在一个势函数  $\varphi(x, y, z, t)$ , 满足:

$$V = \text{grad}\varphi \quad (1-32)$$

即

$$u = \frac{\partial \varphi}{\partial x}, \quad v = \frac{\partial \varphi}{\partial y}, \quad w = \frac{\partial \varphi}{\partial z} \quad (1-33)$$

### 8. 层流与湍流

流体的流动分为层流流动(laminar flow)和湍流流动(turbulent flow)。从试验的角度来看, 层流流动就是流体层与层之间相互没有任何干扰, 层与层之间既没有质量的传递也没有动量的传递; 而湍流流动中层与层之间相互有干扰, 而且干扰的力度还会随着流动而加大, 层与层之间既有质量的传递又有动量的传递。

判断流动是层流还是湍流, 是看其雷诺数是否超过临界雷诺数。雷诺数的定义如下:

$$Re = \frac{VL}{\nu} \quad (1-34)$$

式中:  $V$  为截面的平均速度;  $L$  为特征长度;  $\nu$  为流体的运动粘度。

对于圆形管内流动, 特征长度  $L$  取圆管的直径  $d$ 。一般认为临界雷诺数为 2320, 即



$$Re = \frac{vd}{\nu} \quad (1-35)$$

当  $Re < 2320$  时, 管中是层流; 当  $Re > 2320$  时, 管中是湍流。

对于异型管道内的流动, 特征长度取水力直径  $d_H$ , 则雷诺数的表达式为

$$Re = \frac{Vd_H}{\nu} \quad (1-36)$$

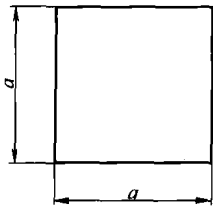
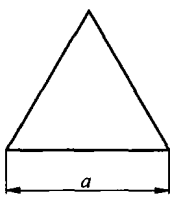
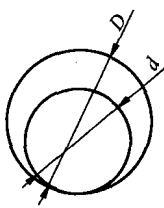
异型管道水力直径的定义如下:

$$d_H = 4 \frac{A}{S} \quad (1-37)$$

式中:  $A$  为过流断面的面积;  $S$  为过流断面上流体与固体接触的周长。

临界雷诺数根据形状的不同而有所差别。根据试验几种异型管道的临界雷诺数如表 1-1 所示。

表 1-1 几种异型管道的临界雷诺数

管道截面形状	正方形 	正三角形 	偏心缝隙 
$Re = \frac{Vd_H}{\nu}$	$\frac{Va}{\nu}$	$\frac{Va}{\sqrt{3}\nu}$	$\frac{V}{\nu}(D-d)$
$Re_c$	2070	1930	1000

对于平板的外部绕流, 特征长度取沿流动方向的长度, 其临界雷诺数为  $5 \times 10^5 \sim 3 \times 10^6$ 。

## 1.2 CFD 基本模型

流体流动所遵循的物理定律, 是建立流体运动基本方程组的依据。这些定律主要包括质量守恒、动量守恒、动量矩守恒、能量守恒、热力学第二定律, 加上状态方程、本构方程。在实际计算时, 还要考虑不同的流态, 如层流与湍流。

### 1.2.1 基本控制方程

#### 1. 系统与控制体

在流体力学中, 系统是指某一确定流体质点集合的总体。系统以外的环境称为外界。分隔系统与外界的界面, 称为系统的边界。系统通常是研究的对象, 外界则用来区别于系统。系统将随系统内质点一起运动, 系统内的质点始终包含在系统内, 系统边界的形状和所围空间的大小可随运动而变化。系统与外界无质量交换, 但可以有力的相互作用, 及能