

● 精·益·工·程·视·频·讲·堂 (CAD/CAM/CAE) ●

Fluent 12

流体分析及工程仿真



● 腾龙科技

朱红钧 林元华 谢龙汉 编著



- “精益生产”精神，造就了丰田汽车王国，振兴了日本
- 精选、精简、精细、高效——功能简洁必要、组织紧凑合理、学习高效方便。
- 短篇教学、全视频。



清华大学出版社

精益工程视频讲堂 (CAD/CAM/CAE)

FLUENT 12 流体分析及工程仿真

腾龙科技

朱红钧 林元华 谢龙汉 编著

清华大学出版社

北 京

内 容 简 介

FLUENT 为通用的 CFD 软件包,是目前相对成熟且使用广泛的商用流体分析软件,可以模拟从不可压缩到高度可压缩范围内的复杂流动,其灵活的非结构化网格、基于解的自适应网格技术及成熟的物理模型,使它在转捩与湍流、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、材料加工和燃料电池等方面有广泛应用。

本书以最新版本 FLUENT 12 为蓝本,主要介绍 FLUENT 12 的各个模型功能及操作步骤,包括 FLUENT 操作基础、前处理网格生成、湍流模型、非定常模型、传热模型、多相流模型、离散相模型、组分输运与化学反应模型、转动模型、用户自定义函数和图形后处理等,第 2~11 讲每讲均配有 3 个实例进行详细讲解。全书以“功能讲解+典型实例+全书视频讲解”的方式,通过大量的典型实例与重点知识相结合的方法全面介绍 FLUENT 12 的流动及传热分析功能与操作步骤。

本书可作为核工业、石油化工、机械制造、能源、管道集输、造船和水利等领域研究人员的参考书,也可作为 FLUENT 12 初学者入门和提高的学习宝典,还可作为各大中专院校教育、培训机构的专业 CFD 教材。

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 12 流体分析及工程仿真/腾龙科技编著. —北京:清华大学出版社,2011.1

(精益工程视频讲堂(CAD/CAM/CAE))

ISBN 978-7-302-23772-3

I. ①F… II. ①腾… III. ①流体力学:工程力学—计算机仿真—应用软件,FLUENT 12

IV. ①TB126-39

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2010)第 168845 号

责任编辑:许存权 朱 俊

封面设计:刘 超

版式设计:魏 远

责任校对:王 云

责任印制:杨 艳

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 装 者:北京国马印刷厂

经 销:全国新华书店

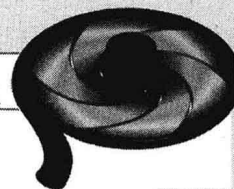
开 本:185×260 印 张:21.5 字 数:497 千字

(附 DVD 光盘 1 张)

版 次:2011 年 1 月第 1 版 印 次:2011 年 1 月第 1 次印刷

印 数:1~4000

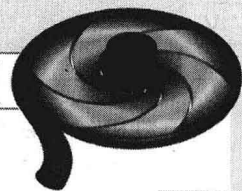
定 价:48.00 元



腾龙科技

主编：谢龙汉

编委：林 伟 魏艳光 林木议 郑 晓 吴 苗
林树财 林伟洁 王悦阳 辛 栋 刘艳龙
伍凤仪 张 磊 刘平安 鲁 力 张桂东
邓 奕 马双宝 王 杰 刘江涛 陈仁越
彭国之 光 耀 姜玲莲 姚健娣 赵新宇
莫 衍 朱小远 彭 勇 潘晓烨 耿 煜
刘新东 尚 涛 张炯明 李 翔 朱红钧
李宏磊 唐培培 刘文超 刘新让 林元华



前言

丰田汽车的“精益生产”精神造就了丰田汽车王国，也直接影响了日本的整个工业体系，包括笔者曾经工作过的本田汽车公司。精益生产的精髓是“精简”和“效率”，简单地说，只有拥有精简的组织结构，才能达到最大的生产效率。开发设计阶段是精益生产中的关键一环，产品设计开发是复杂、繁琐、反复的设计过程，只有合理组织设计过程，使用合理的设计方法，才能最大限度地提高设计开发效率。因此，将精益生产的理念运用于设计开发阶段有重要的现实意义。本丛书所提出的“精益工程”，包括精益设计（针对设计领域）、精益制造（针对数控加工领域）和精益分析（针对工程分析），其主要理念是“功能简洁必要，组织紧凑合理，学习高效方便”。众所周知，计算机辅助设计软件都包含繁杂的功能，有些功能只是针对某些特定用途，对于读者来说，并没有必要把这些繁杂功能全部掌握，如果把所有功能都堆积到书中，那么读者浪费的不仅仅是金钱，还有时间。

FLUENT 是目前国际上流行的商用 CFD 软件包，凡是与流体、热传递及化学反应等有关的领域均可使用其进行流体分析。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、石油天然气和涡轮机设计等方面都有着广泛的应用。如其在石油天然气工业上的应用包括燃烧爆炸、井下分析、喷射控制、环境分析、油气消散/聚积、多相流动、管输流动、三相分离、钻井液流动和地下渗流等，基本覆盖了整个石油天然气工业的各个领域。本书从用户需求角度出发，针对各种复杂流动的物理现象，采用不同的离散格式和数值方法对相关知识点进行详细讲解，并以丰富的案例和全视频讲解等方式进行全方位教学。

本书的特色

本书中除第 1 讲外，各讲以“实例·模仿→功能讲解→实例·操作→实例·练习”为步骤，通过适量的典型实例操作和重点知识讲解相结合的方式，对 FLUENT 的各功能进行讲解。在讲解中力求紧扣操作、语言简洁、形象直观，避免冗长的解释说明，省略对不常用功能的讲解，使读者能够快速掌握 FLUENT 的使用方法和操作步骤。

本书将实例讲解、功能讲解和练习等内容，按照上课教学的形式录制多媒体视频，让读者如亲临教室，学习效果更好。读者甚至可以抛开书本，按照书中列出的视频路径，从光盘中打开相应的视频直接学习观看，这样学习起来会更轻松。视频包含语音讲解，可以用 Windows Media Player 等常用播放器进行观看。如果播放不了，可安装光盘中的 tssc.exe 插件。

本书内容

本书共分为 11 讲，依次介绍了 FLUENT 操作基础、前处理网格生成、湍流模型、非定常模型、传热模型、多相流模型、离散相模型、组分输运与化学反应模型、转动模型、用户自定义

函数和图形后处理等内容。

第 1 讲为 FLUENT 操作基础。介绍流体力学基本理论、计算流体力学的基本方程及 FLUENT 12、GAMBIT、Tecplot 的操作界面。

第 2 讲为前处理网格生成。介绍 GAMBIT 几何建模、网格划分、边界与介质类型定义的具体操作,并通过实例的讲解,帮助读者了解 GAMBIT 的操作步骤,掌握实际模型的建立与网格划分的方法。

第 3 讲为湍流模型。介绍几种常用的湍流模型方程,并通过 3 个实例介绍如何在 FLUENT 12 中进行湍流流动的模拟。

第 4 讲为非定常模型。介绍非定常模型的应用条件及设置方法,并通过一系列由浅入深的圆柱绕流问题的仿真模拟来介绍该模型的使用。

第 5 讲为传热模型。介绍传热的各种方法及其相应的应用领域,并通过 3 个实例的讲解帮助读者掌握传热分析的过程。

第 6 讲为多相流模型。介绍 FLUENT 12 中的多相流模型——VOF、Mixture 和 Euler 模型,并通过 3 个实例的讲解帮助读者掌握多相流动的模拟过程。

第 7 讲为离散相模型。针对离散相模型的计算模型、设置方法展开讲解,并通过 3 个实例阐述离散相模型的模拟过程。

第 8 讲为组分输运与化学反应模型。阐述组分输运与化学反应模型的设置方法和步骤,并列举 3 个实例帮助读者认识和掌握该模型的实际操作。

第 9 讲为转动模型。介绍 FLUENT 12 中用于模拟移动和变形区域的流体流动问题的动参考系模型、滑移网格模型及动网格模型,并通过 3 个实例的讲解帮助读者掌握转动模型的模拟过程。

第 10 讲为用户自定义函数。介绍 UDF 的基础知识,包括 UDF 宏及 UDF 的解释与编译,并通过 3 个实例的讲解帮助读者掌握 UDF 的基本用法及相关操作过程。

第 11 讲为图形后处理。介绍利用 FLUENT 及 Tecplot 进行模拟结果后处理的操作过程,并通过 3 个实例的讲解帮助读者熟悉两个软件的后处理功能。

本书读者对象

本书可作为理工科院校土木、建筑、水利、石油、储运、机械、自动化、过程装备等相关专业高年级本科生、研究生和教师的参考书,也可作为在科研院所、工业园、大型企业等从事核工业、石油化工、机械制造、能源、管道集输、造船、水利等领域学科研究及产品开发的工程技术人员从事 CFD 研究的参考书,还可作为 FLUENT 12 初学者入门和提高的学习宝典,以及各大中专院校教育、培训机构的专业 CFD 教材。

学习建议

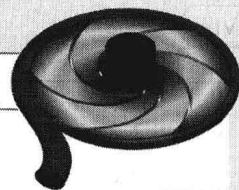
建议读者按照图书编排的先后次序学习 FLUENT 软件。从第 2 讲开始,首先浏览“实例·模仿”,然后打开该案例的光盘视频仔细观看一遍视频,然后根据实例的操作步骤一步步在 FLUENT 中进行操作。如果遇到操作困难的地方,可以再次观看视频。对于功能讲解部分,可以先观看每一节的视频,然后动手进行操作。对于“实例·操作”部分,建议首先直接根据书

中的操作步骤动手进行操作，完成后再观看视频以加深印象，并解决自己动手操作中所遇到的问题。对于“实例·练习”部分，建议根据案例的要求自行练习，遇到不懂的地方再查看书中的操作步骤或观看操作动画。

感谢您选用本书进行学习，恳请您把对本书的意见和建议告诉我们，电子邮箱为 swputicky@126.com 或者 xielonghan@yahoo.com.cn。

祝您学习愉快。

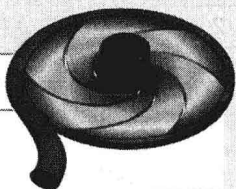
编 者
2010 年 6 月



目 录

第1讲 FLUENT 操作基础	1	2.2.5 其他辅助操作	58
1.1 CFD 基础	1	2.3 GAMBIT 网格划分	58
1.1.1 流体力学基本理论	2	2.3.1 边界层	59
1.1.2 CFD 基本方程	6	2.3.2 线	60
1.1.3 CFD 的发展	11	2.3.3 面	60
1.1.4 有限体积法基础	14	2.3.4 体	61
1.2 FLUENT 软件简介	18	2.4 GAMBIT 边界与介质类型定义	62
1.2.1 FLUENT 的功能	19	2.4.1 边界定义	63
1.2.2 FLUENT 的操作界面	21	2.4.2 介质定义	64
1.2.3 FLUENT 的文件类型	26	2.5 实例·操作——三维圆柱体	65
1.2.4 FLUENT 与其他软件的数据交换	27	2.6 实例·练习——三维同心环空柱体	73
1.3 前处理简介	28	第3讲 湍流模型	79
1.3.1 GAMBIT 的操作界面	28	3.1 实例·模仿——90° 弯管内水的 流动	79
1.3.2 网格生成方法	33	3.2 湍流模型控制方程	87
1.4 后处理简介	34	3.2.1 S-A 模型	88
1.4.1 FLUENT 的后处理功能	35	3.2.2 $k-\epsilon$ 模型	88
1.4.2 Tecplot 界面及后处理功能	36	3.2.3 RSM 模型	91
1.5 FLUENT 模型简介	37	3.2.4 LES 模型	92
1.5.1 湍流模型	38	3.3 湍流模型设置	92
1.5.2 非定常模型	39	3.4 实例·操作——偏心大小头渐扩 管内油品流动	93
1.5.3 传热模型	39	3.5 实例·练习——气体流经节 流嘴的流动	101
1.5.4 多相流模型	40	第4讲 非定常模型	109
1.5.5 离散相模型	41	4.1 实例·模仿——单圆柱绕流	109
1.5.6 组分输运与化学反应模型	41	4.2 非定常流动	116
1.5.7 凝固与融化模型	42	4.3 非定常模型设置	117
1.5.8 动网格模型	43	4.4 实例·操作——双圆柱绕流	118
第2讲 前处理网格生成	44	4.5 实例·练习——柱群绕流	124
2.1 实例·模仿——二维偏心圆环	44	第5讲 传热模型	131
2.2 GAMBIT 几何建模	51	5.1 实例·模仿——偏心圆环内自然 对流换热	131
2.2.1 点	52		
2.2.2 线	54		
2.2.3 面	55		
2.2.4 体	57		

5.2 传热方法概述.....	136	第 9 讲 转动模型.....	235
5.2.1 热传导.....	136	9.1 实例·模仿——十字搅拌器 周围液体流动.....	235
5.2.2 热对流.....	137	9.2 动参考系模型.....	241
5.2.3 热辐射.....	138	9.3 滑移网格模型.....	242
5.3 传热模型的应用领域.....	140	9.4 动网格模型.....	243
5.4 传热模型的设置.....	141	9.5 实例·操作——活塞泵内 流体流动.....	246
5.5 实例·操作——冷热水混合器 内部流动及换热.....	143	9.6 实例·练习——齿轮泵内 流体流动.....	253
5.6 实例·练习——室内空调传热.....	149		
第 6 讲 多相流模型.....	156	第 10 讲 用户自定义函数.....	260
6.1 实例·模仿——T 型管内气 固两相流.....	156	10.1 实例·模仿——入口非匀速管流.....	260
6.2 VOF 模型.....	164	10.2 FLUENT 的网格拓扑.....	265
6.3 Mixture 模型.....	165	10.3 UDF 基础.....	266
6.4 Euler 模型.....	166	10.4 UDF 宏.....	267
6.5 实例·操作——河流跌坎流动.....	167	10.4.1 访问 FLUENT 变量的预定义宏.....	267
6.6 实例·练习——上升管内气液 两相流.....	173	10.4.2 实用工具宏.....	272
		10.4.3 常用 DEFINE 宏.....	281
第 7 讲 离散相模型.....	179	10.5 UDF 解释与编译.....	284
7.1 实例·模仿——液固两相流 冲刷腐蚀.....	179	10.5.1 UDF 的解释.....	284
7.2 DPM 模型概述及应用.....	186	10.5.2 UDF 的编译.....	285
7.3 离散相轨道计算.....	187	10.6 实例·操作——液体蒸发.....	286
7.4 传热与传质计算.....	188	10.7 实例·练习——物体受冲运动.....	294
7.5 喷雾模型.....	189		
7.6 DPM 模型初始条件设置.....	190	第 11 讲 图形后处理.....	300
7.7 DPM 模型边界条件设置.....	191	11.1 实例·模仿——90° 弯管水流的 FLUENT 后处理.....	300
7.8 DPM 模型介质属性设置.....	192	11.2 FLUENT 12 后处理.....	306
7.9 实例·操作——气动喷砂流场.....	194	11.2.1 Graphics and Animations 面板.....	307
7.10 实例·练习——水力旋流器的 颗粒分离.....	200	11.2.2 Plots 面板.....	311
		11.2.3 Reports 面板.....	313
第 8 讲 组分输运与化学反应模型.....	207	11.3 Tecplot 后处理.....	316
8.1 实例·模仿——甲烷燃烧器模拟.....	207	11.3.1 FLUENT 数据的调入.....	316
8.2 组分输运与化学反应模型概述.....	215	11.3.2 Tecplot 绘图环境设置.....	318
8.3 组分输运与化学反应模型设置.....	217	11.3.3 Tecplot 的后处理功能.....	319
8.4 实例·操作——输气管路泄漏 扩散.....	220	11.4 实例·操作——单圆柱绕流的 Tecplot 后处理.....	325
8.5 实例·练习——液体燃料燃烧.....	226	11.5 实例·练习——混合器内部流动 的 Tecplot 后处理.....	329
		参考文献.....	334



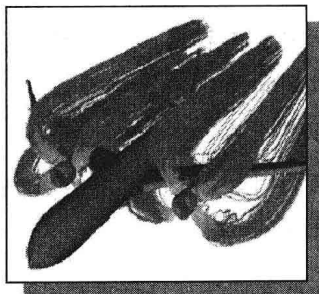
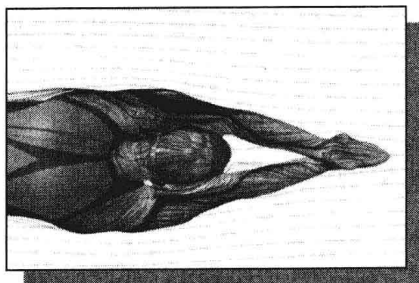
第 1 讲 FLUENT 操作基础

CFD 是基于离散化的数值计算方法, 是利用计算机对流体相对于不同固体边界的内外流场进行数值模拟和分析的学科。随着计算机技术的高速发展, 商用 CFD 软件逐渐兴起, FLUENT 是 CFD 软件中相对成熟和运用最为广泛的商业软件, 因用户界面友好、算法健壮、新用户容易上手等优点, 一直在用户中有着良好的口碑。长期以来, 功能强大的模块、易用性和专业的技术支持等因素使得 FLUENT 受到企业的青睐, 全球数以千计的公司得益于 FLUENT 这一工程设计与分析软件。它的不断完善与更新, 使其不仅可以作为一个研究工具, 而且还可以作为设计工具, 在水利工程、土木工程、石油工程、天然气工程、环境工程、食品工程和海洋结构工程等领域发挥着巨大的作用。本章主要介绍 FLUENT 的最新版 FLUENT 12 的功能、操作界面及基本操作, 使读者认识并了解 FLUENT。



本讲内容

- CFD 基础
- FLUENT 的功能
- FLUENT 与其他软件的数据交换
- FLUENT 的操作界面
- 前处理简介
- 后处理简介
- FLUENT 模型简介



1.1 CFD 基础

计算流体力学是计算流体动力学的简称, 英文名为 Computational Fluid Dynamics (简称 CFD)。它是基于离散化的数值计算方法, 是利用电子计算机对流体相对于不同固体边界的内外流场进行数值模拟和分析的学科, 属于流体力学的一个分支。由于流体流动的复杂性, 理论分析无法求得详细的解析解, 计算流体力学正是为弥补此不足而于 20 世纪 60 年代发展起来的, 并相应地形成了各种数值解法, 主要包括有限差分法、有限元法和有限体积法。流体力学运动偏

微分方程有椭圆型、抛物型、双曲型和混合型之分，计算流体力学很大程度上就是针对不同性质的偏微分方程采用并发展了相应的数值解法。

1.1.1 流体力学基本理论

流体是指在任何微小切应力作用下都会发生连续不断变形的物质，我们把这种连续不断的变形称为流动，即流体不能在承受剪切力的同时，使自己保持静止状态。

流体与固体的区别在于，当施加一定外力时，固体也要发生变形，但变形量达到一定程度时，其内部的变形抗力就会阻止固体继续变形，因此，固体能承受压力、拉力和切力，不呈现流动性。

流体力学就是以流体为研究对象，研究其平衡、运动时宏观物理量的变化规律，及流体与固体之间相互作用的力学特点的一门学科。计算流体力学则主要利用数值计算方法来完成流体力学的研究任务，属于流体力学的分支。在利用计算流体力学方法进行流体流动的数值仿真之前，应首先了解流体力学相关的基本理论。

1. 流体质点与连续介质模型

流体由分子组成，分子之间有间距、不连续。由于我们研究的是平衡、运动时流体宏观物理量的变化规律及流体与固体之间的相互作用力，若通过研究分子运动来研究流体的运动是极其复杂且没有必要的。因此，流体力学研究的最小单元不是分子，而是具有确定统计平均特性且体积很小的流体微团，称为流体质点，它具有宏观小、微观大的性质。

连续介质模型是将流体视为没有空隙的由流体质点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，这样就可以引用连续函数的解析方法来研究流体平衡和运动状态下有关物理参数之间的数量关系。

🔊 提示：当所研究的工程实际尺寸与分子的自由行程为相同或相近的数量级时，就不能应用连续介质模型，如稀薄气体。

2. 流体的物理性质

流体具有惯性、压缩性、膨胀性、粘性和表面张力特性等物理性质，其中粘性是其区别于固体的最主要的物理性质。

(1) 惯性

惯性是物质保持原有运动状态的特性，即使流体在不受外力作用时，也具有保持原有运动状态的属性。质量是流体惯性大小的量度，质量越大，惯性越大。而表示质量大小的物理参数是密度 ρ ，其表达式如下：

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

式中： ρ 为流体密度， kg/m^3 ； m 为流体质量， kg ； V 为流体体积， m^3 。

(2) 压缩性

流体的压缩性是指温度不变时，流体体积和密度随所受压强的变化而变化的性质。度量压缩性大小的物理参数为体积压缩率，其表达式如下：

$$\beta = -\frac{dV/V}{dp} \quad (1-2)$$

式中: β 为体积压缩率, Pa^{-1} ; p 为所受的外部压强, Pa 。

(3) 膨胀性

流体的膨胀性为压强不变时, 体积随温度而变化的性质。用温度变化 1K 时体积的相对变化来表示膨胀性的大小, 称为体胀系数, 表达式为:

$$\alpha_v = \frac{dV/V}{dT} \quad (1-3)$$

式中: α_v 为体胀系数, K^{-1} ; T 为流体温度, K 。

(4) 粘性

粘性是流体运动状态下具有抵抗剪切变形的能力。当流体微团发生相对运动时产生切向阻力, 其产生原因主要为流体分子间的引力以及固体边壁对流体分子的吸附力和流层间分子的动量交换。此切向阻力又称为切应力, 其大小可由牛顿内摩擦定律计算得出:

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

式中: τ 为切应力, Pa ; μ 为流体动力粘度, $\text{Pa}\cdot\text{s}$; du/dy 为速度梯度, s^{-1} 。

表示流体粘性的物理量有动力粘度 μ 与运动粘度 ν 两种, 分别表示为 $\mu = \tau/(du/dy)$ 和 $\nu = \mu/\rho$ 。

流体粘性的本质是由流动流体的内聚力和分子动量交换引起的。一般地, 在相同条件下, 液体的粘度要大于气体粘度, 并随着温度和压强的变化而变化。随着温度的升高, 所有液体的粘度都减小, 而气体的粘度增大。这是由于液体分子间距较小, 相互吸引力即内聚力较大, 粘性主要由内聚力造成。随着温度升高, 分子间距增大, 内聚力减小, 从而使液体粘度减小。气体分子间距大, 内聚力很小, 粘性主要是气体分子动量交换的结果。温度升高时, 气体分子运动加快, 分子的动量交换速率加剧, 切应力随之增加, 从而造成粘度的增加。

(5) 表面张力特性

液体表面由于分子引力不均衡而产生的沿表面作用于任一界线上的张力, 称为表面张力。如自由表面上, 气体分子内聚力与液体分子内聚力有显著差别, 使液体分子有向内部收缩倾向, 这一性质称为表面张力特性。由表面张力引起的最为典型的物理现象为毛细现象, 即当细管插入液体时, 表面张力会使管中液体自动上升或下降一个高度。当液体与固体壁面接触时, 若固体壁面吸附力大于液体内聚力, 则液体与固体壁面的接触面有扩大的趋势, 称为浸润现象(如水), 反之称为不浸润现象(如水银)。

3. 流体的分类

根据流体的压缩性与粘性两个重要的物理性质, 可以将流体分为如下几类。

(1) 理想与实际流体

根据是否考虑流体的粘性, 把流体分为理想流体与实际流体两类。理想流体只是在理论研究初期或简化问题时才采用。

(2) 可压缩与不可压缩流体

根据流体压缩性的大小, 可以将流体分为可压缩流体与不可压缩流体。密度随压强变化较大且不可视为常数的流体, 称为可压缩流体; 反之, 密度随压强变化很小且可视为常数的流

体,称为不可压缩流体。

除水击现象外,液体均可视为不可压缩流体。而气体分为低速气体($v < 50\text{m/s}$)和高速气体($v > 50\text{m/s}$),低速气体也可视为不可压缩流体,这是由于低速气体的压力和温度在整个流动过程中变化很小,重度和密度变化也很小,可近似看成常数。高速气流则需考虑密度变化的影响,视为可压缩流体。

(3) 牛顿与非牛顿流体

根据流体是否满足牛顿内摩擦定律,可以把流体分为牛顿流体与非牛顿流体。符合牛顿内摩擦定律,切应力与速度梯度成正比的流体为牛顿流体。切应力与速度梯度不符合线性分布,不满足牛顿内摩擦定律的流体为非牛顿流体,其又可分为塑性流体、假塑性流体与膨胀性流体3种。

塑性流体有油漆、稀润滑脂等,它们受力后不能立刻变形,必须施加足以破坏其结构性的力才能发生剪切变形,即存在屈服切应力 τ_0 ,只有克服屈服切应力后,才能开始流动。其切应力与速度梯度满足 $\tau = \tau_0 + \mu(du/dy)$ 。

假塑性流体有高分子溶液、乳化液等,粘度随速度梯度的增大而减少,其切应力与速度梯度的关系为 $\tau = k(du/dy)^n$, $n < 1$ 。 k 为稠度系数,取决于流体性质, n 为流变指数,无因次。

膨胀性流体有淀粉糊、石灰浆等,其粘度随速度梯度的增大而增大,其切应力与速度梯度的关系与假塑性流体的表达形式一样,只是指数 $n > 1$ 。

4. 作用在流体上的力

无论是平衡还是运动状态的流体都受到各种力的作用。作用在流体隔离体上的力,按其表现形式可以分为质量力和表面力两种。

(1) 质量力

作用在流体每一质点上,且与所作用流体的质量成正比的力为质量力。单位质量流体所受的质量力为单位质量力,形式如下:

$$\vec{f} = \frac{\vec{F}}{m} = f_x \vec{i} + f_y \vec{j} + f_z \vec{k} \quad (1-5)$$

式中:下标 x 、 y 、 z 表示 X 、 Y 、 Z 3个方向; f 为单位质量力, m/s^2 。

最常见的质量力有重力和惯性力两种。重力 $G=mg$,其3个单位质量分力为 $f_x=f_y=0$ 、 $f_z=-g$ 。直线惯性力 $I=-ma$,其3个单位质量分力为 $f_x=-a_x$ 、 $f_y=-a_y$ 、 $f_z=-a_z$ 。离心惯性力 $R=m\omega^2 r$,绕 Z 轴旋转时3个单位质量分力为 $f_x=\omega^2 x$ 、 $f_y=\omega^2 y$ 、 $f_z=0$ 。

(2) 表面力

作用在流体表面上,并与受作用流体表面积成正比的力称为表面力。表面力可分为垂直于作用面的压力和平行于作用面的切力两种,单位面积上的压力称为压应力(压强),单位面积上的切力称为切应力。

通过上述分析可知,流体受质量力和表面力两类力的共同作用,在一般运动中,这些力都有可能存在。但在一些特例中,可能只存在其中几个。因此,正确分析作用在流体上的力是研究流体平衡和运动规律的基础。

5. 流体流动的描述

流体运动是由无数质点构成的连续介质的流动，描述流体运动的方法有拉格朗日法和欧拉法两种。

(1) 拉格朗日法

拉格朗日法着眼于观察质点的流动情况，通过研究每个质点的位置、压强和流速等物理量随时间的变化规律，综合流场中所有流体质点，得到整个流场的流体运动规律。若以初始坐标 a, b, c 作为标记区别不同质点，则 t 时刻质点位置坐标可表示为 $r=r(a, b, c, t)$ ，可得流速为 $\vec{u} = \frac{dr}{dt} = \frac{\partial r(a, b, c, t)}{\partial t}$ ，质点加速度为 $a = \frac{du}{dt} = \frac{\partial^2 r(a, b, c, t)}{\partial t^2}$ 。

(2) 欧拉法

欧拉法着眼于整个流场中各空间点流动参数随时间的变化，研究流体压强、流速等物理量在空间点上的分布规律，综合流场中的所有点，便可得到整个流场流动参数的变化规律。用欧拉法描述的流场内各处流速分布可表示为 $\vec{u} = \vec{u}(x, y, z, t)$ ，加速度的表达式为 $\vec{a} = \frac{d\vec{u}}{dt} = \frac{\partial \vec{u}}{\partial t} + (\vec{u} \cdot \nabla)\vec{u}$ 。可见，加速度由两项组成，其中， $\frac{\partial \vec{u}}{\partial t}$ 称为时变加速度（或当地加速度），即表示流动过程中流体质点由于速度随时间变化而引起的加速度； $(\vec{u} \cdot \nabla)\vec{u}$ 称为迁移加速度（或位变加速度），即表示流动过程中流体质点由于速度随位置变化而引起的加速度。

由于研究流体运动常需要从整个流场角度分析流速、压强分布及变化规律，因此，欧拉法运用得更为广泛。

6. 流体流动的分类

根据流体流动过程中物理属性的变化及流体的结构、流态等，可以将流体流动进行下面几种分类。

(1) 定常流动与非定常流动

按流动要素是否随时间变化，可以将流体流动分为定常流动与非定常流动。定常流动（又称稳定流或恒定流）是指流场中任一空间点上各运动要素均不随时间变化的流动，而非定常流动（又称非稳定流或非恒定流）中至少有一个运动要素要随时间变化。因此，可用时变加速度来区分定常流或非定常流。若 $\frac{\partial \vec{u}}{\partial t} = 0$ ，可认为是定常流动；若 $\frac{\partial \vec{u}}{\partial t} \neq 0$ ，则为非定常流动。

(2) 均匀流与非均匀流

均匀流是指流场中沿流动方向各点的流速（包括大小与方向）均相同的流动，而非均匀流是指流场中相应点的流速大小和方向只有一个沿程发生改变的流动。因此，可用迁移加速度来区分均匀流或非均匀流。若 $(\vec{u} \cdot \nabla)\vec{u} = 0$ ，如等直径直管中的流体流动，可近似为均匀流动；若 $(\vec{u} \cdot \nabla)\vec{u} \neq 0$ ，如收缩管、扩张管和弯管内的流体流动为非均匀流动。

(3) 渐变流与急变流

非均匀流又可以分为渐变流与急变流，渐变流是指非均匀流中流动沿程变化缓慢，因加速度产生的（离心）惯性力很小，相对于重力可以忽略不计的流动，因此渐变流可近似为均匀流求解问题。而急变流是指流动沿程急剧改变的非均匀流动，其流线间夹角很大或曲率半径较小或两者兼有，因而惯性力不能忽略。

(4) 层流与湍流

若流体质点互不掺混, 有条不紊地做有序的成层流动, 这种流动状态称为层流。反之, 流体质点相互掺混, 做无序的随机运动, 此时的流动状态称为湍流(紊流)。对于湍流而言, 其局部速度、压力等物理量在时间和空间中都可能发生不规则的脉动。

根据雷诺数的大小可以判别流体是在做层流还是湍流流动。雷诺数的表达式为 $Re=vl/\nu$, 对于圆管内流动, 特征长度 l 可取为圆管管径 d , 其临界雷诺数通常为 2000, 即 $Re=vd/\nu < 2000$ 为层流, 否则为湍流。

对于非圆管流动, 特征长度 l 取为当量直径 d_H , 临界雷诺数根据实际问题而定, 如正方形和正三角形管的临界雷诺数仍可近似取为 2000, 而偏心环空缝隙仅为 1000。其中, $d_H=4A/\chi$, A 为过流断面面积, 单位为 m^2 ; χ 为湿周, 单位为 m 。

(5) 有旋流与无旋流

流体具有连续变形的性质, 因此, 除了可表现出刚体质点运动的平移与旋转外, 还可以表现出变形运动。按照流体微团运动是否存在旋转, 可以将流动分为无旋流动和有旋流动, 区分它们的依据为旋转角速度 ω 是否等于 0, 其表达式为:

$$\omega = \frac{1}{2} \begin{vmatrix} i & j & k \\ \frac{\partial}{\partial x} & \frac{\partial}{\partial y} & \frac{\partial}{\partial z} \\ u_x & u_y & u_z \end{vmatrix} \quad (1-6)$$

若 $\omega=0$, 则为无旋流动, 否则为有旋流动。

(6) 内部流动与外部流动

根据流体所在的流动空间区域, 可以将流动分为内部流动和外部流动。内部流动是指在一定结构的限制空间内的流动, 如管道和渠道内的流动。外部流动是指流体从物体外侧绕过的流动, 如圆柱绕流等。

1.1.2 CFD 基本方程

流体流动要遵循质量守恒定律、动量守恒定律和能量守恒定律等物理守恒定律。下面详细介绍这些基本守恒定律对应的控制方程。

1. 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。由单位时间内流出控制体的流体净质量等于同时间间隔控制体内因密度变化而减少的质量, 可导出流体流动连续性方程的微分形式为:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u_x)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho u_y)}{\partial y} + \frac{\partial(\rho u_z)}{\partial z} = 0 \quad (1-7)$$

式中: u_x 、 u_y 、 u_z 分别为 X 、 Y 、 Z 3 个方向的速度分量, m/s ; t 为时间, s ; ρ 为密度, kg/m^3 。

引入哈密顿微分算子:

$$\nabla = i \frac{\partial}{\partial x} + j \frac{\partial}{\partial y} + k \frac{\partial}{\partial z} \quad (1-8)$$

则式 (1-7) 可表示为:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \vec{u}) = 0 \quad (1-9)$$

对于圆柱坐标系, 连续性方程形式为:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\rho u_r}{r} + \frac{\partial(\rho u_r)}{\partial r} + \frac{\partial(\rho u_\theta)}{r \partial \theta} + \frac{\partial(\rho u_z)}{\partial z} = 0 \quad (1-10)$$

上面给出的是通用的一般形式的连续性方程。若对于恒定流, $\frac{\partial \rho}{\partial t} = 0$, 其形式变为:

$$\frac{\partial(\rho u_x)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho u_y)}{\partial y} + \frac{\partial(\rho u_z)}{\partial z} = 0 \quad (1-11)$$

若为不可压缩流动, ρ 为常数, 则有:

$$\frac{\partial u_x}{\partial x} + \frac{\partial u_y}{\partial y} + \frac{\partial u_z}{\partial z} = 0 \quad (1-12)$$

其柱坐标系形式为:

$$\frac{u_r}{r} + \frac{\partial u_r}{\partial r} + \frac{\partial u_\theta}{r \partial \theta} + \frac{\partial u_z}{\partial z} = 0 \quad (1-13)$$

2. 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, 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 、 Z 3 个方向的动量方程为:

$$\frac{\partial(\rho u_x)}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho u_x \vec{u}) = -\frac{\partial p}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{xx}}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{yx}}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{zx}}{\partial z} + \rho f_x \quad (1-14)$$

$$\frac{\partial(\rho u_y)}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho u_y \vec{u}) = -\frac{\partial p}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{xy}}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{yy}}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{zy}}{\partial z} + \rho f_y \quad (1-15)$$

$$\frac{\partial(\rho u_z)}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho u_z \vec{u}) = -\frac{\partial p}{\partial z} + \frac{\partial \tau_{xz}}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{yz}}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{zz}}{\partial z} + \rho f_z \quad (1-16)$$

式中: p 为流体微元体上的压强, Pa; τ_{xx} 、 τ_{xy} 、 τ_{xz} 等是因分子粘性作用而产生的作用在微元体表面上的粘性应力 τ 的分量, Pa; f_x 、 f_y 、 f_z 为 3 个方向的单位质量力, m/s^2 , 若质量力只受重力, 且 Z 轴垂直向上, 则 $f_x=f_y=0$, $f_z=-g$ 。

由广义内摩擦定律(本构方程)可得:

$$\tau_{xx} = 2\mu \frac{\partial u_x}{\partial x} + \lambda \nabla \cdot \vec{u} \quad (1-17)$$

$$\tau_{yy} = 2\mu \frac{\partial u_y}{\partial y} + \lambda \nabla \cdot \vec{u} \quad (1-18)$$

$$\tau_{zz} = 2\mu \frac{\partial u_z}{\partial z} + \lambda \nabla \cdot \vec{u} \quad (1-19)$$

$$\tau_{xy} = \tau_{yx} = \mu \left(\frac{\partial u_x}{\partial y} + \frac{\partial u_y}{\partial x} \right) \quad (1-20)$$

$$\tau_{xz} = \tau_{zx} = \mu \left(\frac{\partial u_x}{\partial z} + \frac{\partial u_z}{\partial x} \right) \quad (1-21)$$

$$\tau_{yz} = \tau_{zy} = \mu \left(\frac{\partial u_y}{\partial z} + \frac{\partial u_z}{\partial y} \right) \quad (1-22)$$

式中： μ 为动力粘度，Pa·s； λ 为第二粘度，Pa·s，通常取为 $-2/3$ 。则式(1-14)~式(1-16)可转化为：

$$\frac{\partial(\rho u_x)}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho u_x \vec{u}) = -\frac{\partial p}{\partial x} + \nabla \cdot (\mu \text{grad} u_x) + S_{u_x} \quad (1-23)$$

$$\frac{\partial(\rho u_y)}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho u_y \vec{u}) = -\frac{\partial p}{\partial y} + \nabla \cdot (\mu \text{grad} u_y) + S_{u_y} \quad (1-24)$$

$$\frac{\partial(\rho u_z)}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho u_z \vec{u}) = -\frac{\partial p}{\partial z} + \nabla \cdot (\mu \text{grad} u_z) + S_{u_z} \quad (1-25)$$

式中： S_{u_x} 、 S_{u_y} 、 S_{u_z} 为广义源项， $S_{u_x} = \rho f_x + s_x$ ， $S_{u_y} = \rho f_y + s_y$ ， $S_{u_z} = \rho f_z + s_z$ ，其中 s_x 、 s_y 、 s_z 为：

$$s_x = \frac{\partial}{\partial x} \left(\mu \frac{\partial u_x}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\mu \frac{\partial u_y}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\mu \frac{\partial u_z}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial x} (\lambda \nabla \cdot \vec{u}) \quad (1-26)$$

$$s_y = \frac{\partial}{\partial x} \left(\mu \frac{\partial u_x}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\mu \frac{\partial u_y}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\mu \frac{\partial u_z}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial y} (\lambda \nabla \cdot \vec{u}) \quad (1-27)$$

$$s_z = \frac{\partial}{\partial x} \left(\mu \frac{\partial u_x}{\partial z} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\mu \frac{\partial u_y}{\partial z} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\mu \frac{\partial u_z}{\partial z} \right) + \frac{\partial}{\partial z} (\lambda \nabla \cdot \vec{u}) \quad (1-28)$$

对于粘性为常数的不可压缩流体， s_x 、 s_y 、 s_z 通常取为 0。

3. 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：

$$\frac{\partial(\rho E)}{\partial t} + \nabla \cdot [\vec{u}(\rho E + p)] = \nabla \cdot \left[k_{\text{eff}} \nabla T - \sum_j h_j J_j + (\tau_{\text{eff}} \cdot \vec{u}) \right] + S_h \quad (1-29)$$

式中： E 为流体微团的总能，J/kg，包含内能、动能和势能之和， $E = h - p/\rho + u^2/2$ ； h 为焓，J/kg； h_j 为组分 j 的焓，J/kg； k_{eff} 为有效热传导系数，W/(m·K)， $k_{\text{eff}} = k + k_t$ ， 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。

提示：尽管能量方程是流动、传热问题的基本方程，但对于不可压缩流动，若热交换小到可以忽略时，可不考虑能量方程。

4. 气体动力学方程

流体包括气体，而气体具有明显的可压缩性，即在流动过程中其密度是变量，需要充分考虑其压缩性对流动的影响，气体动力学正是以可压缩气体流动规律为研究对象的。