

ANSYS 仿真分析系列丛书

ANSYS Fluent

**流体数值计算
方法与实例**

◎王海彦 刘永刚 等 编著

中国铁道出版社
CHINA RAILWAY PUBLISHING HOUSE

ANSYS 仿真分析系列丛书

ANSYS Fluent 流体数值 计算方法与实例

王海彦 刘永刚 等 编著

中国铁道出版社

2015年·北京

内 容 简 介

本书基于 ANSYS Fluent 软件介绍工程流体数值计算的理论与实现方法, 内容包括 CFD 技术的基本概念和理论知识、建模方法以及 CFD 分析方法, 涉及湍流、传热、动网格、多相流、旋转机械流动分析等内容, 并提供一系列典型例题的建模和计算过程。本书的一个写作特点是基于 ANSYS Workbench 中的 Fluent 分析流程来组织相关内容, 系统介绍了建立分析流程、几何建模、网格划分、Fluent 求解及后处理等过程, 结合算例对相关的集成组件的使用方法和操作要点进行了全面的讲解。

本书适合于作为工科专业高年级本科生或研究生学习 CFD 课程或 Fluent 软件的参考书, 也可以供从事 CFD 分析的技术人员学习 CFD 技术或 Fluent 软件时参考。

图书在版编目(CIP)数据

ANSYS Fluent 流体数值计算方法与实例/王海彦等编著.

—北京:中国铁道出版社,2015.10

(ANSYS 仿真分析系列丛书)

ISBN 978-7-113-20903-2

I. ①A… II. ①王… III. ①工程力学—流体力学—
有限元分析—应用软件 IV. ①TB126-39

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2015)第 203818 号

ANSYS 仿真分析系列丛书

书 名:ANSYS Fluent 流体数值计算方法与实例

作 者:王海彦 刘永刚 等

策 划:陈小刚

责任编辑:陶赛赛

编辑部电话:010-51873065

编辑助理:黎 琳

封面设计:崔 欣

责任校对:马 丽

责任印制:郭向伟

出版发行:中国铁道出版社(100054,北京市西城区右安门西街8号)

网 址:<http://www.tdpress.com>

印 刷:北京市昌平开拓印刷厂

版 次:2015年10月第1版 2015年10月第1次印刷

开 本:787 mm×1 092 mm 1/16 印张:20.75 字数:610 千

书 号:ISBN 978-7-113-20903-2

定 价:49.00 元

版权所有 侵权必究

凡购买铁道版图书,如有印制质量问题,请与本社读者服务部联系调换。电话:(010)51873174(发行部)

打击盗版举报电话:市电(010)51873659,路电(021)73659,传真(010)63549480

前 言

本书基于 ANSYS Fluent 软件系统介绍了工程流体数值计算的实现方法,内容包括 CFD 技术的基本概念和理论基础知识、建模方法、Fluent 计算模型及求解方法,涉及湍流、传热、动网格、多相流、旋转机械流动分析等分析模型或技术,各章还提供了一系列典型计算例题,给出具体的建模、计算、后处理过程。本书的一大特点是围绕 ANSYS Workbench 中基于 Fluent 的流体分析流程来组织相关内容,系统介绍了创建分析流程、几何模型及处理、网格划分、物理模型、分析选项设置、迭代求解以及计算结果后处理相关的各集成组件程序的使用方法和操作要点。本书中所有的例题都是基于 Workbench 平台上的标准流程进行操作,前处理的几何建模及划分网格方面都统一采用 ANSYS DM 模块及 ANSYS Mesh 模块;分析设置及求解在 Fluent 界面中进行;后处理则统一采用 CFD-Post 后处理器,部分例题也结合采用了 Fluent 软件自带的后处理功能。

本书各章的内容安排如下:

第 1 章介绍流体力学的主要基本概念和方程、CFD 分析的一般流程、常用的 CFD 分析算法的原理等,其中重点介绍了有限体积法,在此基础上对 Fluent 求解器采用的几种算法进行了简要的介绍。第 2 章介绍了 Fluent 软件的功能、Workbench 环境的技术特点及基本使用以及在 Workbench 中基于 ANSYS Fluent 进行 CFD 分析的流程。第 3 章介绍了 CFD 几何建模以及模型处理工具 ANSYS DM 的建模及模型处理方法。第 4 章介绍了基于 ANSYS Mesh 的 CFD 分析网格划分技术,包括网格参数控制及划分方法、质量评价等内容,还介绍了与后续分析边界条件设定相关的 Named Selection 功能。第 5 章介绍了 Fluent 流体分析软件界面的基本使用、物理模型及求解控制方法。第 6 章介绍了 Fluent 的两种后处理方法,即:Fluent 自带后处理功能以及 CFD-Post 专用后处理组件。第 7 章为一般流动模拟问题举例,结合圆柱绕流问题介绍了一般流动问题的分析方法和要点。第 8 章为流动及换热分析实例,给出了一个冷热水混合弯管流动的例题。第 9 章为动网格技术应用例题,结合例题介绍了 Profile 的使用。第 10 章为多相流动数值模拟例题,涉及 VOF 及 Mixture 等常用的多相流分析模型的使用方法及 UDF 技术的使用。第 11 章介绍了旋转机械流动分析中的两种方法:MRF 方法及滑移网格方法,并给出了二维、三维分析的具体算例。

本书可作为工科专业高年级本科生或研究生学习 CFD 课程或 Fluent 软件的参考书,也可以供从事 CFD 分析的相关专业的工程技术人员学习 CFD 技术或 Fluent 软件时参考。

本书由王海彦、刘永刚等编著,参与本书例题测试和文字处理工作的还有胡凡金、李冬、王睿、熊令芳、张永刚、夏峰等,是大家的共同努力和辛苦工作,才使本书得以顺利编写完成。此外,还要感谢中国铁道出版社陈小刚编辑对本书的支持和帮助。

由于 CFD 技术涉及面广,加上成书仓促以及作者认识水平的不足,本书的不当和错误之处在所难免,恳请读者批评指正。与本书相关的技术问题咨询或讨论,欢迎发邮件至邮箱:consult_cfd@126.com。

作者

2015 年 3 月

目 录

第 1 章	CFD 分析的基本概念和原理	1
1.1	CFD 技术及其发展应用概述	1
1.2	流动的基本概念和方程	5
1.3	CFD 算法的基本原理及常用算法简介	15
第 2 章	ANSYS Fluent 功能简介及分析流程	19
2.1	ANSYS Fluent 软件功能简介	19
2.2	ANSYS Workbench 环境及 CFD 分析流程	23
第 3 章	CFD 分析几何建模技术	31
3.1	ANSYS DM 的功能、界面及基本使用	31
3.2	DM 几何模型的创建、导入与编辑修复	35
3.3	命名选择集、几何分析工具及参数化建模	56
第 4 章	CFD 网格划分技术	60
4.1	ANSYS Mesh 的操作界面及基本使用	60
4.2	划分方法选项、网格划分及质量检查	63
4.3	Mesh 参数化及 Named Selections 的使用	74
第 5 章	Fluent 流体分析界面及使用	77
5.1	Fluent 软件的启动器及操作界面	77
5.2	Fluent 的物理设置选项	81
5.3	Fluent 的求解控制选项	105
第 6 章	Fluent 计算结果的后处理	113
6.1	Fluent 自带后处理功能的使用	113
6.2	CFD-Post 后处理器的使用	127
第 7 章	流动模拟例题:黏性流体的圆柱绕流	137
7.1	问题描述	137
7.2	创建分析模型	138
7.3	求解及后处理	144

* * * * *	
第 8 章 流动及传热模拟例题:混合弯管	162
8.1 问题描述	162
8.2 建立分析模型	162
8.3 求解及后处理	173
第 9 章 动网格技术例题:球阀	194
9.1 问题描述	194
9.2 创建分析模型	195
9.3 求解及后处理	200
第 10 章 多相流的数值模拟例题	227
10.1 VOF 模型应用例题:打印机喷墨过程模拟	227
10.2 Mixture 模型应用案例:气穴现象	252
第 11 章 MRF 及 SMM 技术应用	276
11.1 运动域流动问题分析的方法	276
11.2 二维搅拌器流场的数值模拟	278
11.3 三维双层搅拌设备流场的数值模拟	299
参考文献	325

第 1 章 CFD 分析的基本概念和原理

本章介绍 CFD(计算流体力学)技术的背景知识,包括流体力学的基本概念、方程以及算法等,是读者正确应用 ANSYS Fluent 等 CFD 程序进行工程流体计算所必备的基础知识。其中,第 1 节介绍 CFD 技术的发展现状及优势、工程应用领域及一般分析流程;第 2 节介绍流体特性及流动分类的基本概念、流体力学的各种控制方程及边界条件;第 3 节介绍目前求解流体力学方程常用的几种 CFD 算法,对 Fluent 软件的各种算法也做了初步的介绍。

1.1 CFD 技术及其发展应用概述

1.1.1 CFD 技术的发展现状及优势

CFD 即 Computational Fluid Dynamics 的英文缩写,即:计算流体力学。CFD 是近代流体力学、数值计算方法和计算机技术相结合的产物。作为一门新兴的学科,计算流体力学在 20 世纪 70 年代以来获得迅猛发展,它主要通过数值手段来分析自然界和工程中的各种流体的流动传热及相关的物理化学现象,通过计算流体系统控制微分方程的数值解,给出流体系统质量传递、动量传递、能量传递以及化学反应的近似规律。目前,在流体力学学科体系中,计算流体力学已经与理论流体力学、实验流体力学呈现出三足鼎立的局面,成为流体力学领域不可或缺的研究手段和重要分支学科。

近年来,随着计算机的运算、存储能力的大幅提升和 CFD 软件的逐步发展成熟,CFD 技术为人们提供了一种全新的流体力学研究途径,在科学研究和工程技术中产生了巨大而深远的影响,成为当前流体力学领域的一个很有潜力的发展方向。现在,CFD 分析基本上都是借助于大型 CFD 软件来实现的。CFD 领域在国际上用户较多的软件包括 ANSYS Fluent、ANSYS CFX、Star-CD、PHOENICS、FIDAP、NUMECA 等等。这些 CFD 软件求解的流体系统方程包括关于质量、能量、动量、组分以及自定义标量的微分方程组,其计算结果可以有效地预报流动、传热、传质、燃烧、多相流动和反应等过程的特征,为工业设计及方案优化提供依据。

与高性能的流体实验装置(如风洞、水洞等)相比,CFD 软件及硬件的投资并不大,而且 CFD 技术还具有如下的一系列独特优势。

1. 可显著降低研究成本

CFD 在很大程度上可以减少耗资巨大的流体力学实验,节省研发时间以及人力物力成本,加快研发的进度,经济效益十分显著。对于无法替代的实验研究,前期进行初步的 CFD 模拟,可以更有针对性地进行实验设计,或对实验测试方案等提供理论指导。

2. 具有较大的灵活性和自由度

在 CFD 软件中,改变各种物理和化学因素或改变操作环境条件(如边界条件等)都比在实验室中改变这些条件方便得多,具有更大的灵活性和自由度。

3. 比实验得到的信息更加细致全面

CFD 分析可以给出比实验测量更加细致和全面的信息,可以提供各个时刻全场的分布细节以及发展变化过程,从而有效地增加研究的深度和广度。

4. 能模拟无法进行实验的情况

CFD 分析还能够对实验设计难度大或不可能进行实验的系统,比如体量非常大的体系、各种危险条件下(如:高温、有毒环境下)的系统等。此外,通过 CFD 技术还可以模拟人体器官中的各种流动问题,如:血液流动等。

5. 便于进行参数化分析和方案优化

基于 CFD 软件还可以对所研究的流动系统进行全参数化的分析,进行参数敏感性分析,在参数的合理变化范围中寻求最优化的设计方案。

以上这些优势,使得 CFD 技术被日益广泛地应用于各种工业以及非工业领域,逐渐显现出其巨大的威力和应用价值,有力地推动了相关领域研究理念和设计方法的变革。

1.1.2 CFD 技术应用领域

当前,CFD 技术应用十分广泛,本节简单介绍一些 CFD 技术的相关应用领域及涉及到的相关应用方向。

1. 飞行器及车辆的外气动分析

CFD 技术的发展极大地促进了各种飞行器、汽车、高速铁路列车的外气动分析。基于 CFD 技术开展外气动分析,有助于设计更加合理的外形,进而有效地改善外气动性能,降低空气的阻力。近年来,随着 CFD 软件网格生成及计算效率的提高,外气动分析的时间也显著缩短。以轿车的外气动分析和车型设计为例,在 20 世纪 90 年代以前,一个新的车型设计大约需要几个月的时间,而目前使用 CFD 软件,可以在一周到两周的时间内完成一个新车型的网格划分、流场分析以及造型优化工作。

2. 船舶水动力分析

船舶的水动力性能由绕船的流场特性而决定,从理论上讲通过求解描述流场特性的流体动力学方程就能对相应的水动力性能做出预报。然而,由于自由面的存在、船体几何形状复杂、附体较多,导致自由面水波、流体分离、旋涡等现象的出现,使得流场中的流动结构很复杂,即使有了描述流动过程的微分方程式也不可能得到解析解。在此背景下,CFD 是船舶水动力性能设计的一个有力工具。基于 CFD 分析可以预报各类船舶在静水中航行时的阻力和推进性能。船舶 CFD 技术的长远目标,是代替船模试验,为船舶水动力性能设计提供一个全雷诺数的数值模拟工具。基于 CFD 模拟各种风、浪、流等环境载荷的作用,预报实尺度的船舶在海浪中的航行性能。

3. 发动机的内部流场及温度场分析

通过 CFD 软件的动网格技术,可以对发动机内部以及配气机构中的流动循环过程进行瞬态模拟。此外,还可以对发动机热管理系统进行流动以及散热过程的模拟,以优化冷却风扇的设计,使得发动机可以在最佳温度下工作,减少其磨损,又达到节省燃油的目的。

4. 旋转机械的内部流动分析

CFD 技术可以准确地研究旋转机械各类相关流动问题,可用于模拟泵、台扇、吹风机、用于冷却的轴流风扇等各种机器的工作流场。基于 CFD 技术可以方便地考虑叶片的转速、形状

或者安装方向改变引起的流场变化,为设计中改善叶片设计和设备工作性能提供依据。

5. 电子设备散热系统的设计和分析

电子产品的散热性能是其重要的工作性能指标,通过 CFD 技术可以进行电子产品的散热分析,预测产品的热工作性能,进而合理安排电子产品的扩展设备及热源布局,优化散热系统设计及带风扇产品的风道配置,提高产品的热可靠性。

6. 燃烧及化学反应过程模拟

基于 Fluent 等 CFD 软件,可以模拟锅炉、内燃机、航天发动机以及火灾过程的燃烧现象,与燃烧相关的模型包括有限化学反应速率模型、非预混燃烧模型、预混燃烧模型、部分预混燃烧模型、PDF 输运方程模型等。有限化学反应速率模型适合于模拟化学组分的混合、输运及反应问题;非预混模型适合于模拟湍流扩散火焰反应且接近化学平衡的系统,可计算各组分的浓度;预混模型适合于模拟完全预先混合的系统,可预测火焰前缘的位置;部分预混模型可用于模拟变化等值比率的预混火焰情况;PDF 模型可以模拟湍流和化学反应之间的相互作用,被认为是目前较为精确的模拟湍流燃烧的方法。

7. 污染物的排放和扩散模拟

通过 CFD 技术可以模拟各种污染物在大气和水体中的扩散和传播过程。常见的污染物包括有害气体(二氧化硫、 NO_x 等)、固体颗粒污染物等。CFD 分析可以给出各种污染物的扩散速度、范围、污染区域的污染物浓度等环境参数。现阶段,CFD 在环保领域的一个重点应用领域是在电力环保领域。火电厂的脱硫设施、脱硝设施以及除尘设施都需要满足行业性的排放标准。设计单位需要针对这些系统的流场分布情况进行系统的分析和优化设计。借助 ANSYS Fluent 等 CFD 软件,可以有效地模拟和预报相关的温度场、压力场、速度场以及浓度场,可以对上述环保减排系统的优化设计及改造提供有价值的理论指导。

8. 混合、分离、聚合等化工过程分析

由于化工过程中经常出现流体,因此流体力学研究一直是化工过程中的重要内容。相对于实验研究而言,CFD 在化工过程中的应用具有信息完备、不受模型尺寸和工作条件限制、计算速度快等优势,获得日益广泛的应用。基于 Fluent 等 CFD 软件丰富的多相流、传热、燃烧以及化学反应模型,可以模拟流化床、搅拌设备、萃取设备、填料设备、燃料喷嘴、干燥设备、分离设备等化工设备中的各种混合、分离、聚合等流动及化学反应过程。

9. 建筑物外部风环境及室内通风分析

基于 CFD 技术,可以对建筑物外部风环境以及室内通风环境进行模拟,计算出与居住环境相关的风速、温度等参数的分布。基于 CFD 技术可以模拟建筑物迎风面的阻塞、建筑上表面及侧表面的流体分离、下风向的尾流漩涡,可以模拟相邻建筑物对流场的影响,比如建筑物之间形成的强风区,可以模拟建筑物附近风速骤变等不稳定现象,改善建筑风环境,避免形成不舒适的风环境。如果在流场中加入污染源,则可以模拟污染物排放及扩散现象,对环境质量做出评价。基于 CFD 技术,还可以对复杂不规则体型的建筑或构筑物进行不同方向的绕流分析,确定其表面风压的最不利分布,作为设计依据。

10. 生物医学领域的应用

CFD 在生物医学领域也显示出很大的应用价值,如用于模拟人体上呼吸道气流、颅内液体流动、血液在血管中的流动、心脏辅助泵等。CFD 分析结果可以为制订治疗方案提供有力的理论支撑。

综上所述,CFD 技术正在越来越多的领域中获得日益深入和广泛的应用,这些应用有力地促进了相关领域的发展进步。在大量的工业和科学研究部门中,CFD 正在或已经成为一种不可或缺的重要的分析计算手段,并展现出十分广阔的发展前景。

1.1.3 CFD 分析的一般过程

尽管 CFD 技术被用于分析大量不同行业和领域的问题,这些问题的背景、性质、控制条件千差万别,但是基于 CFD 计算软件进行 CFD 分析的基本过程却是一致的,都包括三个阶段,即:前处理阶段、求解阶段以及后处理阶段。概括来说,前处理阶段的任务是建立分析模型,求解阶段的任务是进行仿真计算,后处理阶段的任务则是进行计算结果的分析 and 处理。本节对三个阶段的具体任务和主要的工作环节进行简要的说明。

1. 前处理阶段

前处理阶段的任务是建立 CFD 分析的数学模型。以 ANSYS Fluent 为例,这一阶段的工作内容主要包括:建立流场区域的几何模型、几何域的离散化(划分网格)、流动问题定义及求解设置(设置定解条件、流体模型参数以及求解参数)。前处理阶段的最终输出物是 CFD 求解器可以读取的分析数据文件,此文件中包括了按照 CFD 软件所规定的格式写入的流动问题的全部相关信息。下面对前处理阶段的各环节作简要的介绍。

(1) 建立几何模型

流体区域的几何模型一般通过专业的三维设计软件得到,也可通过与 CFD 求解器相配套的几何前处理工具(如:ANSYS DM)来创建或抽取。在 ANSYS DM 中,内流场区域的几何模型可通过几何抽取的方式得到,外流场区域的几何模型可通过创建包围体的方式创建。

(2) 进行流场网格的划分

这一工作环节的任务是对流场区域几何模型进行离散化,得到 CFD 计算所需的网格。目前,Fluent 软件通常采用 ANSYS Mesh 进行网格划分。3D 分析常见的网格形状包括四面体网格、六面体网格以及棱柱体网格等。2D 分析中则常用三角形、四边形的网格。

在网格划分过程中,要特别注意所采用的网格密度要能够模拟重要区域的流动特征。常见的流动特征包括:漩涡的形成、边界层的存在、流速和压力显著变化的区域以及分离区的出现等。网格划分对 CFD 模拟精度有重要影响。由于沿固体表面存在边界层,边界层内的速度梯度大,所以表面附近垂直于表面方向的网格必须加密。当物体表面附近的网格太粗糙时,就可能无法预测其表面的流动分离。有的情况下,在分析之前无法准确地预知流动特征出现的位置,这种情况下可以采用所谓的自适应网格技术来修正网格以获取精确解答。

(3) 流动问题定义与求解选项设置

在流动问题定义及求解设置环节,主要任务是指定流动问题的边界条件,指定与 CFD 分析相关的流体模型及参数,指定数值计算方法的选项和参数。流动的边界条件是流动方程的定解条件,需要按照流动的实际情况进行指定,常见边界条件在下一节中有详细的说明。在流体参数及模型方面,除基本的材料特性(如:密度、黏性系数、比热等)以外,还需要选择有关的计算模型,如:湍流模型、多相流模型、辐射模型、燃烧模型等等,用户还需要为所选择的计算模型指定相关的参数。此外,用户还需要指定求解算法、求解控制参数以及与计算结果输出格式有关的控制参数。

通过这一环节的操作,实际上已经定义了一个完整的待求的流体力学问题。此环节操作

的结果体现为一个可以被 CFD 求解器所读取的分析数据文件,此文件中包括了待求解流动问题的全部信息。

2. 求解

求解阶段的任务是通过线性方程组求解器求解离散的流体控制方程。目前常用的求解算法包括有限体积法、有限差分法、有限单元法等。这些求解器的共同特点是借助简单的近似函数来表示待求的流动变量,将这一假设的近似关系代入连续型控制方程,形成离散的线性方程组,之后求解此线性方程组得到流动的解答。基于 Fluent 等商用 CFD 软件进行分析时,数值求解的细节对用户是隐藏的,程序将按照用户指定的数值模型、算法和计算参数,完成与之相对应的计算分析任务。三维的 CFD 计算过程通常会耗用大量的计算资源和机时,建议采用 Fluent 等 CFD 程序的并行版本进行计算,可以显著地降低计算时间,考虑更多的模型细节,提高分析的效率和精度。

3. 后处理

后处理阶段的任务是对 CFD 计算的结果进行直观的图形显示、数据的提取分析以及相关导出量的计算。CFD 分析可以提供的结果项目十分丰富,在后处理过程中常见的计算结果通常包括微分方程的残差、流场的压力、速度、温度、流(通)量、力、力矩、多相流动的体积分数等等。通过后处理工具,结合流动的基本概念和工程经验,分析计算结果的正确性及合理性。由于在 CFD 分析中不可避免地会作一些简化,或使用一些物理模型,因此对计算结果进行后处理分析是必须的。如果分析结果不正确,则需要修正前面采用的有关模型或参数,重新进行分析。

ANSYS Fluent 软件后处理的相关操作方法将在本书的第 6 章中进行详细介绍。

1.2 流动的基本概念和方程

1.2.1 流体的特性及流动分类

流体运动的过程和现象是十分复杂的,CFD 软件的计算结果应当尽可能与实际流动过程和现象相一致。由于实际的流动问题总是充满复杂性和不确定性,因此对流体的各种力学特性及流动分类作必要的了解,是正确使用 CFD 软件对流动问题进行成功数值模拟的前提。本节介绍流体的各种力学特性、流动的一般分类以及流动的若干基本概念。如果对这部分内容已经比较了解,则可跳过本节。

1. 流体及其基本特性

流体是液体以及气体的总称,它们虽然也属于连续介质,但同时具有和固体截然不同的物理力学性质。流体的基本特性包括连续性、流动性、惯性、黏性、可压缩性、热膨胀性以及表面张力特性等。下面对这些特性进行介绍。

(1) 流体的连续性

流体是由一系列流体微团组成的。流体微团,也称为流体质点,是由足够数量的分子所组成的,连续地充满其所占据的空间,流体微团彼此间无任何间隙,这一假设被称为流体的连续性。

基于流体是连续介质的基本观点,其质量分布、运动参数的分布、内应力的分布都是连续

的。于是,流体的物性和运动参数物理量均可被表示为连续的函数。因此,大量的数学方法特别是微分方程方法可以被应用到流体力学的研究中来。

(2)流体的流动性

流体质点是由大量的、不间断地作热运动而且无固定平衡位置的分子所组成。在流体中,由于各质点之间的内聚力极小,不能承受拉力,静止流体也不能承受剪切力。因此,流体具有较大的流动性,不能形成固定的边界和形状,其形状取决于限制它的固体边界。当流体受到任何微小剪切应力作用时会连续地发生变形。受到剪切应力的作用而发生连续变形的流体被称之为运动流体,不受剪切应力的流体就不发生变形,称之为静止流体。总而言之,流体中存在切应力是流体处于流动状态的充分必要条件。充分认识流体的这一基本特征,研究流体处于静止或运动状态的力学规律,才能很好地把流体按人们的意愿进行输送和利用,为人们的日常生活和生产服务。

(3)流体的黏性

流体在运动时由于内摩擦力(剪切应力)的作用,使其具有抵抗相对变形(运动)的性质,称为流体的黏滞性,简称黏性。流体的黏性可通过简单的实验来验证。

如图 1-1 所示的扭丝下悬挂一个圆筒,圆筒外放置一个能绕竖直轴旋转的同心圆筒容器。在内、外圆筒体缝隙中充以某种液体(流体)。当外筒以某个固定角速度匀速转动时,内圆筒和扭丝也随之同方向转动,且能够平衡在一定的扭转角度上;当外筒停止转动时,内圆筒和扭丝也回到初始位置。由这个实验可知,当流体在外力作用下层间出现相对运动时,会随之产生阻抗液体层间相对运动的内摩擦力。这种在存在着相对运动的流体层间产生内摩擦力的性质即流体的黏性。黏性的作用表现为阻碍流体内部的相对滑动,但黏性只能延缓而不会消除这种相对滑动,这是黏性的主要特征。黏性流体流动过程中,必须克服黏性引起的内摩擦阻力,因此要不断消耗运动流体所具有的能量。还需要注意的一点是,只有在流体流动时才会表现出黏性,在静止的流体中不会呈现出黏性。

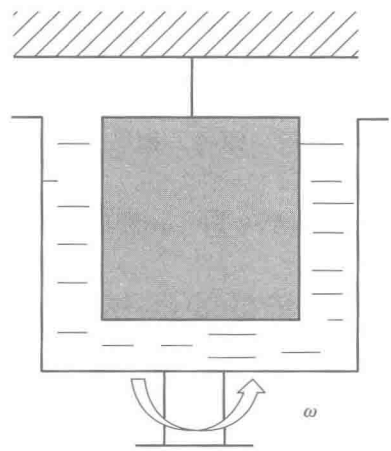


图 1-1 流体的黏性实验

流体的黏性特性还体现在很多常见的流动现象中。比如,观察流动的河流上漂浮的小颗粒物时,在靠近河岸边的漂浮物比在中心河面的漂浮物在单位时间漂移的距离小得多,且靠近岸边的流动有旋转。流体在管道中的流动中也有类似的现象,用流速仪可测得流体管道中某一断面的流速分布,流体沿管道直径方向分成很多流层,各层的流速不同,管轴心的流速最大,向着管壁的方向逐渐减小,直至管壁处的流速最小,几乎为零,流速按某种曲线规律连续变化。管道中的流速之所以有这种分布规律,正是由于在相邻流体层间的接触面上产生了阻碍流层相对运动的内摩擦力,这是流体黏性特性的体现。此外,绕流现象也表明流体具有黏性,流体流过固体障碍物的表面时,固体会减缓流体的流动,流体流过固体后方部位时,流体流动方向不再与固体表面平行,而是会旋转,并且形成涡,与固体的表面相分离。

(4)流体的惯性

流体和其他固体物质一样都具有惯性,即牛顿第一定律。流体的惯性即流体维持其原有

运动状态的特性。通常来说,流体惯性的大小可通过质量来度量,质量大的流体,其惯性也大,反之亦然。

(5)流体的可压缩性和热膨胀性

一般地,流体的密度通常随温度和压力的变化而变化,因此流体的密度通常不是固定的数值。在实际工程中,液体的密度和重度随温度和压力的变化而变化的数值不大,可视为一个固定的值;而气体的密度和重度随温度和压力的变化而变化的数值较大,设计计算中通常不能被视为固定值。当流体的压力增大时,其体积缩小而密度增大的性质,称为流体的可压缩性。流体的温度升高时,其体积增大而密度减小的特性称为流体的热膨胀性。

液体的可压缩性和热膨胀性都很小。例如,从1个大气压增加到100个大气压时,每增加1个大气压,水的体积只缩小0.05%;在10~20℃的范围内,温度每增加1℃,水的体积只增加0.15%;在90~100℃的范围内,温度每增加1℃,水的体积也只增加0.7%。因此,在很多工程技术领域中,可以把液体的压缩性和热膨胀性忽略不计。但是,在研究有压管路中的水击现象和热水供热系统时,就要考虑水的压缩性和热膨胀性。

气体与液体的情况有很大不同,一般具有显著的压缩性和热膨胀性。但是,在流速较低(远低于音速)的情况下,气体压力与温度变化不大时,密度的变化也很小,这时可以把气体近似看成是不可压缩流体。供热通风工程中大部分问题就是属于这种情况,如果通风机中的空气的流速较低,压强的变化也不大时,可被视为不可压缩流体。在标准状态下,当气体的流速为102 m/s($Ma=0.3$)时,不考虑压缩性所引起的计算相关误差仅为2.3%,这在工程上是允许的。在其他情况下,温度和压强的变化对气体密度的影响很大,气体的压缩性和热膨胀性必须加以考虑。在温度不过低,压强不过高的条件下,气体的密度、压力和温度三者之间的关系可通过气体状态方程来表达。

(6)流体的表面张力特性

表面张力是液体特有的一种力学特性,我们经常看到水滴悬挂在水龙头出口、水银在平滑表面成球状滚动等现象,液体的表面有欲成球形的收缩趋势,引起这种收缩趋势的力即液体的表面张力。表面张力是由于液体分子之间存在吸引力而引起的,其作用的结果是使得液体表面看起来像一张均匀受力的弹性膜。处于液体表面附近的分子,由于液体分子对它的作用力远小于相应距离另一侧液体分子的作用力,这部分分子受到的合力将其拉向液体内部。受这种作用力最大的是自由液面上的分子,随着离开自由液面的距离的增加,内部液体分子受到的作用力逐渐减少,远离自由液面的液体分子,其周围分子所施加的力彼此平衡。表面张力不仅在液体表面上,在液体与固体的接触周界面上也有张力。由于表面张力的作用,如果把两端开口的玻璃管竖在液体中,液体会在细管中上升或下降一定高度,这种现象被称作毛细现象。表面张力的数值是很小的,一般计算中不予考虑。但是当流体自由表面的边界尺寸非常小,如通过很细的玻璃管、很狭窄的缝隙等情况,必须计及表面张力特性的影响。

2. 常用的流体参数及其意义

流体的以上各种特性可通过一系列物性参数来表示,下面介绍几个常用的流体物性参数。

(1)流体的压力

流体在密闭状态下能承受较大的压力称为流体的压力。一般所指的流体压力是作用于流体单位面积上的压力,用 p 表示,其单位与压强单位一致,如式(1-1)所示:

$$p = \lim_{\Delta A \rightarrow 0} \frac{\Delta P}{\Delta A} = \frac{dP}{dA} \quad (1-1)$$

流体压力如果以绝对真空为零点计算,则称为绝对压力。流体压力如果以大气压强 p_a 为零点计算的压力称为相对压力。在实际工程中,更常用的是相对压力。相对压力可以是正值,也可以是负值。当绝对压力大于大气压力时,相对压力为正值,即正压,可用压力表测出,又被称为表压;当绝对压力小于大气压时,则相对压力为负值,即负压,这时该流体处于真空状态,通常用真空度(大气压与绝对压力之差值)来表示流体的真空程度。真空度是某一点的绝对压力不足一个大气压的数值,可通过真空表测出。某点的真空度愈大,说明它的绝对压力愈小。真空度的最大数值为一个大气压,即绝对压力为零,处于完全真空状态;真空度的最小值为零,即在一个大气压下。

在 Fluent 中进行 CFD 分析时,可能会遇到各种不同的压力。如:静压(static pressure)、动压(dynamic pressure)以及总压(total pressure),这几个压力之间的关系如式(1-2)所示:

$$\text{总压} = \text{静压} + \text{动压} \quad (1-2)$$

总压又称为滞止压力,即速度为 0 时的压力,此时动压为 0。此外,还有操作压力(operating pressure)和表压(gauge pressure)两个压力,它们之间的关系如式(1-3)所示:

$$\text{绝对压力} = \text{操作压力} + \text{表压} \quad (1-3)$$

在 Fluent 中,操作压力的缺省值就是一个大气压。

(2) 流体的速度

流体的速度是指流体在单位时间内流动所通过的位移。流场的速度通常用三个分量 u 、 v 、 w 来描述。任一时刻流体的速度在空间上是连续分布的,如果 t 时刻空间内存在这样的一条曲线,在该曲线上任何一点上的切线与该点处流体质点的速度方向相同,则称这条曲线为时刻 t 流场的流线。流线一般不相交,是光滑的曲线或直线,其形状与固体边界的形状有关。断面小处,流速大、流线密;断面大处,流速小,流线稀疏。

流体运动时,由于流体黏性的影响,过流断面上的流速不等且一般不易确定,为便于分析和计算,在实际工程中通常采用过流断面上各质点流速的平均值即平均流速。平均流速通过过流断面的流量应等于实际流速通过该断面的流量,这是得到平均流速的假定条件。在单位时间内流体通过过流断面的体积或质量称为流量。一般流量指的是体积流量,但也可用质量流量来表示。

压力与速度又被称为基本流场参数,流体力学中一般采用欧拉法描述,即把这些基本流场参数表示为空间坐标与时间的函数的形式,如式(1-4)所示:

$$\begin{cases} p = p(x, y, z, t) \\ u = u(x, y, z, t) \\ v = v(x, y, z, t) \\ w = w(x, y, z, t) \end{cases} \quad (1-4)$$

(3) 流体的黏性系数

流体的黏性系数可通过牛顿内摩擦实验来加以说明。如图 1-2 所示,两块水平放置的平行平板,间距为 h ,两平板间充以某种液体,假定上板以匀速度 u 水平向右平动,下板保持静止不动。由实验可知,各流体层之间都有相对运动,产生内摩擦力。若要维持该摩擦力,必须在上板施加与内摩擦力 F

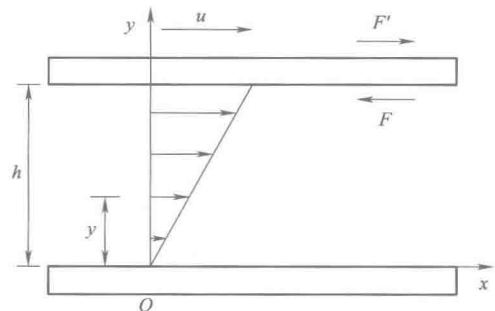


图 1-2 平行板之间的流动

大小相等而方向相反的力 F' 。

流体黏滞性的大小,通常用动力黏滞性系数 μ 或运动黏滞性系数 ν 来反映,它们是与流体类型有关的系数。黏滞性大的流体, μ 和 ν 的值也大。同时,流体的黏滞性还与流体的温度和所受压力有关,受温度影响大,受压力影响小。实验证明,水的黏滞性随温度的增高而减小,而空气的黏滞性却随温度的增高而增大。根据牛顿内摩擦定律,内摩擦力的大小可用式(1-5)表示:

$$F = \mu A \frac{du}{dy} \quad (1-5)$$

式中 F ——流体的内摩擦力;

μ ——流体的动力黏性系数;

A ——层间的接触面积;

du/dy ——流体的速度梯度。

流体黏性内摩擦应力则表示为式(1-6):

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

由上式可知,当流体的速度梯度 $du/dy=0$ 时,即流体处于相对静止或静止状态时,流体中不存在剪切应力。

流体的动力黏性系数 μ 与运动黏性系数 ν 有如式(1-7)所示关系:

$$\mu = \rho \nu \quad (1-7)$$

在各种流体中,满足上述牛顿内摩擦定律的流体称为牛顿流体,牛顿流体的剪切应力和垂直剪切平面的速度梯度呈正比。常见的流体,例如水以及空气,在地表的正常环境下,其特性都很接近牛顿流体。不满足牛顿内摩擦定律的流体,即:流体的剪切应力和垂直剪切平面的速度梯度不呈正比的流体,统称非牛顿流体。在搅动非牛顿流体时,会在流体表面产生一个“凹洞”,此“凹洞”在一小段时间后会慢慢消失。这种特性出现在像布丁、太白粉水悬浊液以及大部分有长分子链的流体中。搅拌非牛顿流体会使其黏度降低。非牛顿流体有很多种,无法通过某一个特定的公式来对其黏性特性加以定义。

(4)流体的密度

对一般的流体而言,在流体中任意取一面积为 ΔV 的微元,其质量为 Δm 。微元体积 ΔV 应该是使物理量统计平均值与分子随机运动无关的最小微元 ΔV_i ,并将该微元定义为流体质点,该微元的平均密度定义为流体的密度,如式(1-8)所示:

$$\rho = \lim_{\Delta V \rightarrow \Delta V_i} \frac{\Delta m}{\Delta V} \quad (1-8)$$

对于均质流体,单位体积的质量称为流体的密度。单位体积的流体所受的重力称为流体的重力密度,简称为流体的重度。此外流体质量与同体积 4°C 下纯水的质量之比,称为流体的比重,是一个无量纲的数。

(5)流体的导热系数

在计算流动传热问题时,必须为流体定义导热系数。流体的导热系数单位为 $\text{W}/(\text{m} \cdot \text{K})$,反映了单位时间内单位距离两侧表面温差 1°C 条件下通过单位面积的热量。液体分金属液体和非金属液体,前者导热系数较高,后者较低。在非金属液体中,水的导热系数最大,除去水和甘油外,绝大多数液体的导热系数随温度升高而略有减小。一般来说,溶液的导热系数低于纯液体的导热系数。气体的导热系数随温度升高而增大。在通常的压力范围内,其导热系数随压

力变化很小,因此工程计算中常可忽略压力对气体导热系数的影响。气体的导热系数一般很小,对导热不利,但有利于保温。在 ANSYS Fluent 中,导热系数可以是各向同性或各向异性,也可以指定为与温度相关的函数形式。

(6) 流体的比热容

在计算中考虑能量方程时需要指定流体的比热容(specific heat capacity),比热容简称比热(specific heat),是表示物质热性质的物理量,其物理意义是单位质量物体改变单位温度时吸收或释放的热量。比热单位是 J/(kg·K)。比热与物质的状态有关。在 Fluent 中采用定压比热容 C_p ,即压强不变条件下温度随体积改变时的热容, C_p 可以是常量,也可以是随温度变化。对于燃烧过程的模拟,建议采用与温度相关的比热。

(7) 流体的体积压缩系数

流体的体积压缩系数是指在一定温度下,单位压力增量产生的体积相对减少率,通过式(1-9)定义:

$$\alpha_p = -\frac{dV/V}{dp} = -\frac{1}{V} \frac{dV}{dp} \quad (1-9)$$

式中,体积压缩系数的单位为 m^2/N 。

(8) 流体的体积弹性模量

体积弹性模量为体积压缩系数的倒数,其单位为 N/m^2 ,通过式(1-10)表示:

$$E_v = \frac{1}{\alpha_p} = -\frac{dp}{dV/V} = -V \frac{dp}{dV} \quad (1-10)$$

(9) 流体的体积膨胀系数

流体热膨胀性可通过体积膨胀系数来表示。流体热膨胀系数的意义是当压强保持不变时,单位温升所引起的体积变化率,单位是 $1/K$,用式(1-11)表示:

$$\alpha_T = \frac{dV/V}{dT} \quad (1-11)$$

(10) 液体的表面张力系数

如假想液体自由表面上取一条线将其分开,则表面张力将使得两边彼此吸引,表面张力的作用方向与此线相垂直,其大小与分界线的长度成正比,用式(1-12)表示:

$$f = \sigma l \quad (1-12)$$

式中,比例系数 σ 为表面张力系数,单位是 N/m 。

3. 流动的分类

根据标准的不同,流动可以有不同的分类,常见的分类有如下几种。

(1) 按流动的维度分类

流动根据其在空间的变化特性,可以分为一维流动、二维流动和三维流动,分别是指流体速度沿一个、两个或三个空间坐标变化的流动。

(2) 稳态流动与非稳态流动

如果流场的物理量(流速、压力等)仅随位置变化而不随时间变化,则称此流动为稳态的流动(steady)或定常流动。如果流场的任何一个物理量不仅与位置有关还随时间变化,则称此流动为非稳态的流动(unsteady)或非定常流动。

(3) 可压缩流动与不可压缩流动

前已述及,流体流动过程中密度随着压力、温度等的改变而发生改变的称为压缩性,