

The book cover features a dark purple background with a grid of white dots at the top. The title 'ANSYS FLUENT 17.0' is prominently displayed in white and yellow. Below it, the subtitle '流场分析实例教程' is written in white. The authors' names are listed in the center. The bottom of the cover is decorated with colorful, curved patterns of dots in red, yellow, and green.

# ANSYS FLUENT 17.0

## 流场分析实例教程

邵 欣 韩思奇 高芦宝 编著



北京航空航天大学出版社  
BEIHANG UNIVERSITY PRESS

# ANSYS FLUENT 17.0 流场分析实例教程

邵欣 韩思奇 高芦宝 编著



北京航空航天大学出版社

## 内 容 简 介

本书全面介绍了 ANSYS FLUENT 17.0 的各种功能和基本操作方法,及其在各个专业领域的应用。全书采用“项目+任务”的形式编排,共 6 个项目、27 个任务,分别介绍了计算流体力学(CFD)理论和软件基础,包括计算流体的基础理论与方法;FLUENT 前处理——几何模型的建立和 FLUENT 前处理——网格的划分,包括 Gambit、ICEM CFD 的几何建模及网络划分技术;FLUENT 17.0 基础与操作;FLUENT 17.0 计算结果后处理,包括 FLUENT 17.0 内置后处理、Tecplot 后处理、CFD-POST 17.0 后处理。FLUENT 17.0 典型应用实例,包括湍流模型、非稳态问题、凝固和融化模型、多相流模型、DPM 模型、化学反应问题、辐射模型、空化模型的应用案例。

全书实例丰富,电子版资料包含配套课件,可按“前言”中说明申请免费索取,方便读者进行学习。

本书可作为化工、自动化、能源、航空、海洋、水利等专业领域研究人员的参考用书,适合高等院校研究生、本科生学习使用,经任课教师适当取舍后也可供专科层次学生学习使用。

### 图书在版编目(CIP)数据

ANSYS FLUENT 17.0 流场分析实例教程 / 邵欣, 韩思奇, 高芦宝编著. -- 北京: 北京航空航天大学出版社, 2018.10

ISBN 978-7-5124-2830-0

I. ①A… II. ①邵… ②韩… ③高… III. ①工程力学—流体力学—有限元分析—应用软件—高等学校—教材  
IV. ①TB126-39

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2018)第 226165 号

版权所有,侵权必究。

### ANSYS FLUENT 17.0 流场分析实例教程

邵 欣 韩思奇 高芦宝 编著

责任编辑 蔡 喆 李丽嘉

\*

北京航空航天大学出版社出版发行

北京市海淀区学院路 37 号(邮编 100191) <http://www.buaapress.com.cn>

发行部电话:(010)82317024 传真:(010)82328026

读者信箱: [goodtobook@126.com](mailto:goodtobook@126.com) 邮购电话:(010)82316936

涿州市新华印刷有限公司印装 各地书店经销

\*

开本:787×1092 1/16 印张:19 字数:486 千字

2018 年 10 月第 1 版 2018 年 10 月第 1 次印刷 印数: 3 000 册

ISBN 978-7-5124-2830-0 定价:49.00 元

# 前 言

流体力学是力学的一个分支,主要研究流体在力的作用下的静止状态或运动状态,分析流体和固体界壁间发生相对运动时的相互作用方式和流动规律。计算流体力学(CFD)是对流体力学问题进行模拟和分析的一个专业学科,近年来,随着计算机技术的快速发展,计算流体力学的应用领域也越来越广泛,所有涉及流体流动、热交换、组分输运等问题都可以通过计算流体力学的方法来进行模拟和计算。目前在航空航天、交通运输、气象、海洋、水利、液压和石油化工等工程领域都有广泛的应用。

在众多 CFD 软件中,FLUENT 由于其操作界面友好、求解速度及计算精度较高等特点,非常适合初学者学习。而且 FLUENT 的物理模型丰富,包括湍流、传热、组分输运、化学反应、多相流等多种模型,在实际众多工业领域均有广泛的应用。

2006 年,FLUENT 被 ANSYS 公司收购,集成在 ANSYS 软件群中,共享最新的 CAE 技术。作为 ANSYS CFD 的主打软件,FLUENT 在被收购后获得了更多 CFD 核心技术的研发投入,保证了 FLUENT 在 CFD 商业软件中一直处于领先地位。当前,FLUENT 17.0 是 ANSYS 公司推出的最新版本。

本书全面介绍了 ANSYS FLUENT 17.0 的各种功能和基本操作方法,以及在各个专业领域的应用。全书采用“项目+任务”式编排,分为 6 个项目、27 个任务,分别介绍了计算流体力学(CFD)理论和软件基础,包括计算流体的基础理论与方法;FLUENT 前处理——几何模型的建立和 FLUENT 前处理——网格的划分,包括 Gambit、ICEM CFD 的几何建模及网络划分技术;FLUENT 17.0 基础与操作;FLUENT 17.0 计算结果后处理,包括 FLUENT 17.0 内置后处理、Tecplot 后处理、CFD-POST 17.0 后处理。FLUENT 17.0 典型应用实例,包括湍流模型、非稳态问题、凝固和融化模型、多相流模型、DPM 模型、化学反应问题、辐射模型、空化模型的应用案例。

本书由天津中德应用技术大学邵欣、天津现代职业技术学院高芦宝和天津中德应用技术大学韩思奇共同编著,并得到天津市科技计划项目(基金号:17JCTPJC49300)的资助和支持。本书项目 1 的任务 1 至项目 3 的任务 1(约 11.36 万字)由天津中德应用技术大学邵欣负责编写,项目 3 的任务 2 至任务 4(约 6.4 万字)由天津中德应用技术大学王敏负责编写,项目 4 的任务 1 至任务 3 由

(约 8.16 万字)天津中德应用技术大学檀盼龙负责编写,项目 4 的任务 4 至项目 6 的任务 2(约 12.48 万字)由天津现代职业技术学院高芦宝负责编写,项目 6 的任务 3 至任务 8(约 11.84 万字)由天津中德应用技术大学韩思奇负责编写。

本书可作为化工、自动化、能源、航空、海洋、水利等专业领域研究人员的参考用书,适合高等院校研究生、本科生学习使用,经任课教师适当取舍后也可供专科层次学生学习使用。

编 者

2018 年 10 月



扫描二维码,关注“北航理工图书”公众号,回复“2830”获取本书课件下载地址,如有疑问请发送邮件至 [goodtextbook@126.com](mailto:goodtextbook@126.com) 或拨打 010-82317036 联系我们。

# 目 录

项目 1 认识计算流体力学(CFD)软件 .....	1
任务 1 计算流体力学(CFD)的基础知识 .....	1
任务 2 计算流体力学(CFD)软件的应用 .....	7
任务 3 计算流体力学(CFD)的求解流程 .....	12
任务 4 认识 FLUENT 软件 .....	20
项目小结 .....	25
项目 2 FLUENT 前处理——几何模型的建立 .....	26
任务 1 GAMBIT 基础及用户界面 .....	26
任务 2 利用 GAMBIT 建立几何模型 .....	33
任务 3 ICEM CFD 基础及用户界面 .....	42
任务 4 利用 ICEM CFD 建立几何模型 .....	47
项目小结 .....	58
项目 3 FLUENT 前处理——网格的划分 .....	59
任务 1 网格划分的基础知识 .....	59
任务 2 认识结构与非结构网格 .....	64
任务 3 利用 GAMBIT 划分网格 .....	69
任务 4 利用 ICEM CFD 划分网格 .....	85
项目小结 .....	100
项目 4 FLUENT 17.0 基础与操作 .....	101
任务 1 FLUENT 17.0 操作流程 .....	101
任务 2 FLUENT 17.0 计算模型 .....	115
任务 3 FLUENT 17.0 边界条件 .....	136
任务 4 FLUENT 17.0 求解设定 .....	153
项目小结 .....	162
项目 5 FLUENT 17.0 计算结果后处理 .....	163
任务 1 FLUENT 17.0 内置后处理器 .....	163
任务 2 CFD-Post 17.0 后处理器 .....	173
任务 3 Tecplot 后处理 .....	195
项目小结 .....	204



项目 6 FLUENT 17.0 典型应用实例 .....	205
任务 1 管道流动模拟——湍流模型 .....	205
任务 2 水坝泄洪模拟——非稳态问题 .....	215
任务 3 冰块融化过程模拟——凝固与融化模型 .....	227
任务 4 T 型微通道流体混合过程模拟——层流、多相流模型 .....	239
任务 5 管道内颗粒运动模拟——DPM 模型 .....	249
任务 6 高炉煤粉燃烧模拟——化学反应问题 .....	259
任务 7 方腔内热辐射自然对流模拟——辐射模型 .....	277
任务 8 变径管内水流高速流动模拟——空化模型 .....	287
项目小结 .....	298

# 项目 1 认识计算流体力学(CFD)软件

流体力学是力学的一个分支,主要研究流体在力的作用下的自身静止状态或运动状态,以及分析流体和固体界壁间发生相对运动时的相互作用方式和流动规律。计算流体力学(CFD)是对流体力学问题进行模拟和分析一个专业学科,在众多计算流体力学软件中,FLUENT 软件的应用最为广泛。

## 【学习目标】

- 了解流体力学的基础理论;
- 了解计算流体力学(CFD)的基本理论;
- 熟悉计算流体力学(CFD)解决问题的流程;
- 了解 FLUENT 17.0 软件的基本特点。

## 任务 1 计算流体力学(CFD)的基础知识

### 【任务描述】

流体力学是研究气体、液体运动规律及应用的学科,通常是研究流体本身在各种力作用下的状态;而计算流体力学(computational fluid dynamics, CFD),其基本定义是通过计算机进行数值计算,模拟流体流动时的各种相关物理现象,包含流动、热传导、化学反应等。本次任务主要了解流体力学及计算流体力学的基本知识。

### 【知识储备】

## 1. 流体力学基础

流体力学主要研究流体本身的静止状态和运动状态,以及流体和固体壁面间有相对运动时的相互作用和流动的规律,是力学的一个重要分支。

### (1) 流体的基本性质

#### 1) 流体的压缩性

随着作用于流体上的压强增加导致流体体积减小的特性叫作流体的压缩性,流体的压缩性能通常用压缩系数  $\beta$  来衡量。压缩系数具体定义为:一定温度下单位压强提高时流体体积的相对缩小量。公式如下:

$$\beta = \frac{1}{\rho} \frac{d\rho}{dp} \quad (1-1)$$

纯液体由于压缩性比较差,通常认为液体是不可压缩的;而气体的压缩性能主要取决于其热力过程,随着温度发生变化气体的密度也会改变。





## 2) 流体的膨胀性

流体的体积随着温度的提高而增大的特性称为流体的膨胀性,流体的膨胀性能通常用膨胀系数  $\alpha$  来衡量。膨胀系数具体定义为:保证压强恒定,当温度升高  $1^{\circ}\text{C}$  时流体体积的相对增加量。公式如下:

$$\alpha = \frac{1}{\rho} \frac{d\rho}{dT} \quad (1-2)$$

在实际工程问题中,由于液体的膨胀系数非常小,经常忽略不计。

## 3) 流体的黏性

当两相流体间做相对运动时,流体间的接触面存在一种数值相等但方向相反的力,这种力阻碍着流体的相对运动,产生这种力的原因就是流体具备黏性。由流体黏性产生的作用力叫作黏性阻力,根据牛顿黏性定律,流体间产生的剪应力  $\tau$  表达式为:

$$\tau = \mu \frac{du}{dy} \quad (1-3)$$

式中: $\mu$  为流体的黏度; $\frac{du}{dy}$  为法向速度梯度。

黏度的物理本质是分子间的引力和分子的运动与碰撞。流体的黏度变化主要取决于温度,当温度升高时,液体的黏度下降而气体的黏度增加;低压强下流体黏度受压强影响较小,只有当压强高达几十兆帕时才会对流体黏度产生影响。

## 4) 流体的导热性

当流体自身温度分布不均,或与其他介质之间存在温度差时,温度高的地方会向温度低的地方传递热量。热传递方式有 3 种:热传导、热对流、热辐射。根据傅里叶定律,通过热传导方式单位时间内通过单位面积传递的热量表达式如下:

$$q = -\lambda \frac{\partial T}{\partial n} \quad (1-4)$$

式中: $n$  为面积的法向; $\frac{\partial T}{\partial n}$  为法向的温度梯度; $\lambda$  为导热系数。

## (2) 连续介质概念

流体包括气体和液体,从微观角度来看,流体的分子间都存在间隙,而且分子一直在进行随机运动,因此流体的物理量在空间分布是不连续的,且随时间不断变化。从宏观角度看,流体的结构和运动表现出明显的连续性与确定性,研究流体力学正是研究流体的宏观运动。1753 年,欧拉最早提出“连续介质”作为宏观流体模型,连续介质模型认为,物质连续地分布于其所占有的整个空间,物质宏观运动的物理参数是空间及时间的可微连续函数。

流体的密度公式为:

$$\rho = \frac{m}{V} \quad (1-5)$$

式中: $\rho$  为流体密度; $m$  为流体质量; $V$  为流体体积。

根据连续介质模型假设,可以把流体介质的一切物理属性,如密度、速度、压强等都看作是空间的连续函数。因此对于连续介质模型,可以利用微积分等现代数学工具加以分析。

对于非均质流体,流体中任一点的密度公式为:



$$\rho = \lim_{\Delta V \rightarrow 0} \frac{\Delta m}{\Delta V} \quad (1-6)$$

式中： $\Delta V$  代表流体质点的体积，因此连续介质中某一点的流体密度实质上是流体质点的密度。同理，连续介质上的某一点的流体速度也就是某时刻质心在该点的流体质点的质心速度，空间上任意点的物理量都是该点上的流体质点的物理量。

### (3) 层流和湍流

自然界中的流体流动状态通常分为层流和湍流两种。层流是指流体在流动过程中分层明显，流体质点沿直线移动；湍流指流体呈混掺流动状态，流体质点沿直线移动的同时在各个方向有随机脉动。

工程上解决实际问题时需要预先判定流体的流型，对于管道流动而言，大量实验表明流体的流型可以根据雷诺数  $Re$  来判定，公式如下：

$$Re = \frac{du\rho}{\mu} \quad (1-7)$$

式中： $d$  为管道直径； $u$  为流体流速； $\rho$  为流体密度； $\mu$  为流体黏度。

对于圆管内流动，当  $Re \leq 2000$  时，流体呈层流态；当  $Re \geq 4000$  时，流体呈湍流态；当  $2000 < Re < 4000$  时，流体为层流和湍流间的过渡态。

如果从稳定性的概念来理解，任何一个系统如果受到一个瞬时的扰动，使其偏离原有的平衡状态，而扰动消失后系统可以自动恢复到原有的平衡状态，就称该平衡状态是稳定的；相反，如果扰动消失后系统逐渐偏离原有的平衡状态，说明该平衡状态是不稳定的。

层流属于平衡状态，当  $Re < 2000$  时，任何扰动只能使流体状态暂时偏离层流，当扰动结束后流体必将恢复层流态；当  $Re > 4000$  时，微小的扰动就可以触发流型的改变，所以湍流是最常见的流型。需要注意的是，过渡态并不是一种流型，它只是表示在此区间内可能出现层流也可能出现湍流，究竟以哪种流型为主取决于外界的扰动，一般工程中  $Re > 2000$  就可以按照湍流处理。

### (4) 边界层概念

当一个流速均匀的流体与一个固体界面接触时，由于壁面的摩擦阻力等性质会对流体产生阻滞作用，这时与壁面直接接触的流体流速立即下降为零。如果流体不具备黏性，那么第二层的流体会仍然按照原来的速度继续流动。而实际上流体的黏度不可忽略，靠近壁面的流体将相继受到阻碍而降低速度，随着流体沿壁面继续移动，流速受影响的区域也会逐渐增大。通常将边界受到影响的区域叫作边界层，其定义可以描述为，流速降为未受边界壁面影响流速（入口流速）99% 以内的区域叫作边界层。

边界层示意图如图 1.1 所示，入口流速为  $U$ ，受到流体壁面阻滞及流体黏度的影响，靠近壁

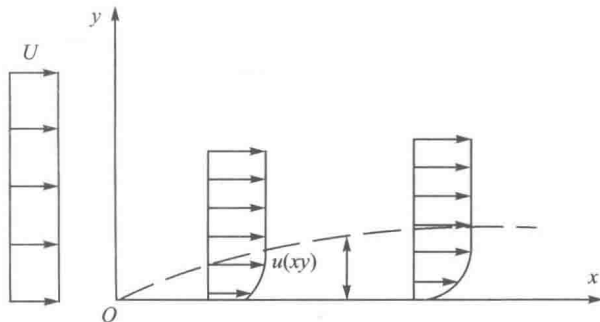


图 1.1 边界层示意图



面的虚线区域存在着速度梯度,此区域即为边界层;而边界层外速度梯度几乎可以忽略,无须考虑流体黏性的影响。因此,在实际工程问题中,只需要重点研究边界层内的流体流动即可。

## 2. 计算流体力学(CFD)基础

### (1) CFD 软件概述

前面介绍了经典流体力学的相关知识,由于传统流体力学的控制方程绝大多数情况下是无法求出解析解的,因此在解决实际工程问题时仅依靠流体力学的理论知识具有很大的局限性。随着计算机领域的快速发展,产生了一种新的流体力学的研究方法,即计算流体力学(CFD)。

CFD的基本思想可以简单总结为:用有限个离散点上的变量值的集合来代替速度场、压力场这种原来在时间域和空间域中连续的物理量的场。利用一定的原则和方法来创建体现这些离散点上场变量之间关系的代数方程组,然后通过数学方法求解代数方程组来解出场变量的近似结果。

利用 CFD 软件可以对流场进行分析、计算流场中的相关物理量并对流体的流动进行预测。根据 CFD 计算的数据可以对流场中现象进行观察和分析,并且根据预测结果来调整参数,以实现最佳的设计方案。

随着计算机技术的进一步发展以及数值计算理论的进一步成熟,CFD 软件使用者的局限性逐渐降低,许多不擅长编程或计算理论的其他专业技术人员也能容易地进行流动数值模拟计算。这样方便研究者将更多的注意力投入到待解决问题的本质、边界条件、计算结果的分析等方面,能够展现不同领域研究者的专业优势。

### (2) CFD 软件特点

传统的实验研究虽然可以得到最能够直接反映出物理现象的结果,但实验通常受到测量精度、几何模型尺寸、实验周期等因素的限制,而且实验中会消耗大量的人力及物力,每一次理想结果的得出都需要进行多次实验。而通过 CFD 模拟可以更方便地从机理方面来研究问题,得到的数值解不受任何实际实验条件的限制,能够模拟实际实验中只能接近而无法达到的理想情况,从而为实验环节提供了有效的指导。

但 CFD 也有一些局限性,由于模拟计算的方法是离散近似方法,其计算精度受到几何模型、网格质量、计算方程、边界条件等因素的影响。此外,如果工程问题比较复杂,对计算机要求的配置也会更高,计算时间相对较长。

### (3) 数值模拟方法和分类

解决实际工程问题时需要 CFD 软件的工作环境、边界条件以及算法等进行设置。尤其是算法的选择,正确的算法对整体计算时间以及模拟结果的精度有很大影响。因此,要正确设置模拟条件就必须对数值模拟过程有初步的了解。

随着当前计算机技术和计算技术的进一步改进,借助计算机技术,采用区域离散化的数值计算方法可以解决许多复杂工程问题并能够得到满足需求的数值解。可以说数值模拟技术是现在工业技术发展的重要基础之一。

区域离散化是指用一组有限个离散的点来代替原来连续的空间,其实现过程就是把所要计算的区域划分成若干互不重叠的子区域,确定每个子区域的节点位置以及该节点所代表的



控制体积。节点是需要求解的位置物理量的几何位置、控制体积、应用控制方程或守恒定律的最小几何单位。

通常把节点看成控制体积的代表。控制体积和子区域并不总是重合的,在区域离散化过程开始时,由一系列与坐标轴相应的直线或曲线所划分出来的小区域成为子区域。网格是离散的基础,网格节点是离散化物理量的存储位置。

### 1) 有限差分法

在计算机数值模拟中最早采用的方法就是有限差分法,直至今日该方法仍然在广泛使用。有限差分法是将求解域划分为差分网格,用有限个网格节点代替连续的求解域。有限差分法的展开形式是泰勒(Taylor)级数,将控制方程中的导数用网格节点上的函数值的差商代替,这样就建立了以网格节点上的值为未知数的代数方程组。有限差分法是最早发展起来且技术成熟的数值方法,其数学概念直观、表达方式简单,可以将微分问题变为代数问题来求近似数值。按照精度来划分,有限差分格式有 3 种,即一阶格式、二阶格式及高阶格式;从差分的空间形式来考虑,可以分为中心格式和逆风格式;考虑到时间因子,差分格式还可以分为显格式、隐格式、显隐交替格式等。当前普遍的差分格式主要是由上述几种形式组合而成,不同的组合构成的差分格式也有所不同。

差分法在结构网格问题中比较适用,关于结构网格的相关知识后续章节会详细介绍。

### 2) 有限单元法

有限单元法是将一根连续的求解域任意分成适当形状的许多微小单元,在各个微小单元分片构造差值函数,然后根据极值原理将问题的控制方程转化为所有单元上的有限元方程,各个单元极值之和就是总体的极值,也就是将局部单元总体合成,形成了嵌入指定边界条件的代数方程组,将该方程组进行求解后就得到了各节点上待求的函数值。

有限单元法最早应用于结构力学领域,之后随着计算机的发展逐渐应用于流体力学的计算模拟。但是由于有限单元法的求解速度非常慢,在 CFD 软件中利用有限单元求解技术不是很普遍。

### 3) 有限体积法

有限体积法也称为控制体积法,该方法是将计算区域划分为一系列互不重复的控制体积,保证每个网格点的周围都有一个控制体积。利用待解的微分方程对每个控制体积进行积分,这样就能得出一组离散方程。

有限体积法的基本思路易于理解,而且能够得出比较直观的物理解释。离散方程的物理意义可以解释为因变量在有限大小的控制体积中的守恒原理,相当于微分方程表示因变量在无限小的控制体积都得到满足,那么在整个区域也就得到满足一样,这也是有限体积法最突出的特点。某些离散方法,例如有限差分法,仅当网格及其细密时,离散方程才满足积分守恒,而有限体积法即使在粗网格情况下也能够显示出准确的积分守恒。

就离散方法而言,有限体积法可以看作是有限单元法和有限差分法的中间物,有限差分法技术成熟、精度可选、易于编程,但在处理不规则区域时局限性较强;有限单元法适用于处理复杂区域,精度可选,但内存和计算量巨大,而且并行计算不如有限差分法直观;有限体积法适用于流体计算,可以应用于不规则的网格,适用于并行,但精度只限定于二阶,当前绝大多数商业 CFD 软件都采用有限体积法。



## 【拓展提高】

### 1. 雷诺实验

1883年,雷诺实验揭示出流体流动的两种不同类型,图1.2所示即为雷诺实验的示意图。

在一个水箱内,水面下安装一个扬声器形进口玻璃管,管下游装有一个阀门,通过控制阀门的开度可以调节流量。在扬声器形进口处中心有一细长小管,管内可以流出带有颜色的水流,其密度与水相同。

当水流量较小时,玻璃管水流中会出现一条稳定而明显的着色直线;随着流速的逐渐提高,着色线从之前的平直光滑逐渐开始弯曲,进而抖动断裂;当着色线完全与水流主题混为一体时整个水流就染上了颜色。

雷诺实验虽然简单,但得到了一个重要的结论,即流体流动中存在着两种不同的流型。第一种流型中,流体质点作直线运动,流体间层次分明、互不混合,呈现分层流动的状态,这种流型叫作层流,如图1.3所示。第二种流型中,流体总体是沿着管道向前流动,与此同时流体质点还在各个方向做随机的脉动,正是这种混乱运动使得着色水流呈现弯曲、抖动甚至断裂现象,这种流型叫作湍流,如图1.4所示。

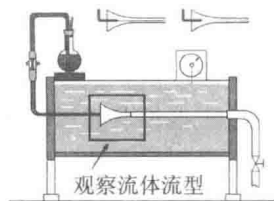


图 1.2 雷诺实验装置

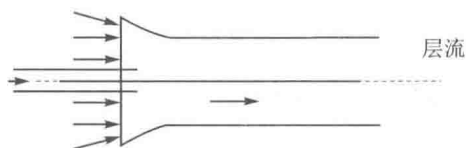


图 1.3 层流示意图

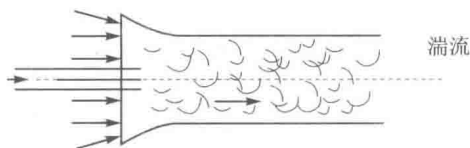


图 1.4 湍流示意图

### 2. 流体流动的控制方程

流体在流动过程中要遵循3个基本守恒定律,分别是质量守恒定律、动量守恒定律以及能量守恒定律,而3种定律的数学表达如下。

#### (1) 质量守恒方程

任何流体流动问题都必须遵守质量守恒定律。该定律可以描述为:单位时间内流体微元体中质量的增加,等于同一时间间隔内流入该微元体的净质量。质量守恒方程表示如下:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho u_i) = S_m \quad (1-8)$$

该方程对可压及不可压流动均适用,等式右边的  $S_m$  是从分散的二级相中加入到连续相的质量,也可以是任意的自定义源相。

#### (2) 动量守恒方程

动量守恒定律可以描述为:微元体中流体的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。

该定律实际上就是牛顿第二定律,动量守恒方程表示如下:



$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho u_i) + \frac{\partial}{\partial x_j}(\rho u_i u_j) = -\frac{\partial p}{\partial x_i} + \frac{\partial \tau_{ij}}{\partial x_j} + \rho g_i + F_i \quad (1-9)$$

式中： $p$  为静压强， $\tau_{ij}$  为应力张量； $g_i$  和  $F_i$  分别代表  $i$  方向上的重力体积力和外部体积力。

### (3) 能量守恒方程

如果流体流动过程中包括热交换过程，则该系统必须满足能量守恒定律。该定律可以描述为：微元体中能量的增加率等于进入微元体的净热流量加上体积力与表面力对微元体所做的功。

实际上该定律也就是热力学第一定律，能量守恒方程表达式如下：

$$\frac{\partial(\rho T)}{\partial t} = \text{div}(\rho u T) = \text{div}\left(\frac{k}{c_p} \text{grad} T\right) + S_T \quad (1-10)$$

式中： $c_p$  代表比热容； $T$  代表温度； $k$  为流体的传热系数； $S_T$  为黏性耗散项。对于大部分不可压缩的流动，当热交换非常小以至于可以忽略时可不考虑能量守恒方程。

### 【思考练习】

1. 边界层的定义是什么？流体在流动过程中为什么会产生边界层？
2. 流体流型的判定条件是什么？
3. 相比于流体力学的理论研究，计算流体力学的最主要特点是什么？
4. 流体流动过程中通常遵循哪几种守恒定律，请列举出来并简要说明定律内容。

## 任务 2 计算流体力学(CFD)软件的应用

### 【任务描述】

近年来，随着计算机技术的快速发展，计算流体力学的应用领域也越来越广泛，所有涉及流体流动、热交换、组分输运等问题都可以通过计算流体力学的方法来进行模拟和计算，目前在航空航天、交通运输、造船、气象、海洋、水利、液压和石油化工等工程领域都有广泛的应用。本次任务主要了解 CFD 商业软件的典型应用领域，加深读者对 CFD 软件强大功能的认识。

### 【知识储备】

## 1. 计算流体力学在化工领域的应用

CFD 是计算流体力学的简称，可通过数值计算方法来求解工业中物理模型在空间内的动量、热量、质量方程等流动主控方程，从而发现化工领域中各种流体的流动现象和规律。其主要以化学方程式中的动量守恒定律、能量守恒定律及质量守恒方程为基础。当前，计算流体力学已成为研究化工实际问题的主要工具。

### (1) 搅拌釜的应用

由于搅拌槽内流场的流动具有复杂性，目前对搅拌槽等混合设备的设计主要采用理论计算加实验验证的方式。在化工领域中，搅拌器普遍存在搅拌不均匀的问题，而且随着反应釜规模的扩大这种情况会更严重，因此，对搅拌槽内部流场进行研究是非常必要的。



图 1.5 所示为 CFD 软件建立搅拌釜模型并进行模拟,随着技术的不断改革与发展,计算流体力学的引进不仅可以节约化工研究成本,还可以获取常规实验手段不能获得的数据。

### (2) 换热器的应用

在化工厂中使用最多的设备就是换热器,通过计算流体力学的计算方式,不仅可以精确、详细地测量换热设备内流场的流动,也可以预测换热器的性能,经济可靠的换热器对化工工业具有重要作用。如图 1.6 所示,对于化工中的管壳式换热设备,其内部的几何形状设备结构复杂,可以利用计算流体力学模拟管壳式换热设备指定位置的流场,进而充分了解管壳式换热设备在瞬间变化中的温度场、速度场,通过 CFD 的模拟有利于分析研究换热器的基本原理和结构构造。

### (3) 化学反应中的应用

在化学反应研究中,传统的实验方法无法准确获取温度、压力场、速度场以及颗粒的移动轨迹等参数。而采用 CFD 软件的计算方式,可以更深入地研究反应器的内部构造和化学反应机理,利用 CFD 软件建立反应器中的几何结构、计算模型等。如图 1.7 所示,经过模拟,可以得出不同环境下的反应器内化学反应组分的生成情况、反应器内部物质的浓度梯度及温度梯度。通过 CFD 软件预测反应器的速度、温度及压力场,可以更进一步地理解化学反应工程中的聚合过程,详细、准确的数据可以改进化学反应中的操作参数。

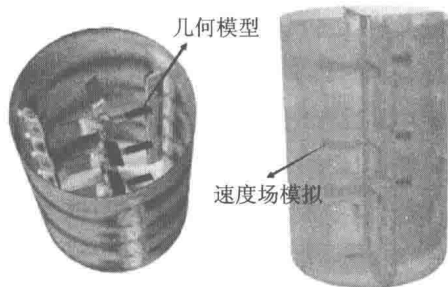


图 1.5 利用 CFD 软件对搅拌釜进行分析

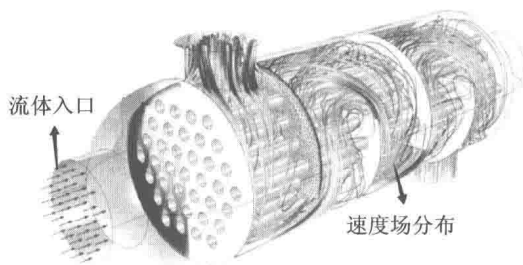


图 1.6 利用 CFD 软件对换热器进行分析

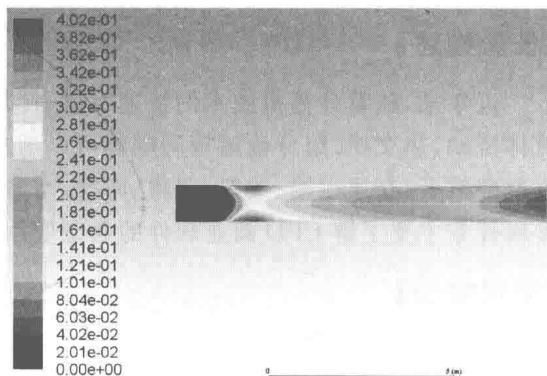


图 1.7 利用 CFD 软件模拟气体燃烧反应

## 2. 计算流体力学在制冷工程中的应用

在传统的暖通空调工程设计及产品研发过程中,产品设计的可行性往往需要进行多次实验,产品开发周期长、费用高,而且设计人员的经验起着很重要的作用。FLUENT 的应用改变了传统的设计过程,由于 FLUENT 软件可以相对准确地给出流体流动的细节,如速度场、压力场、温度场、浓度场在每一时刻的变化情况,因而不仅可以对产品的整体性能进行预测,还能够从计算结果的分析中找到产品存在的问题与不足,根据问题设计改进方案后只需要重新进





行模拟计算就可以看到改进的效果。采用模拟计算的方法对产品进行设计或改进,对实验以及人工经验的依赖度很低,既降低了人工费用,也缩短了研发周期。空调或冰箱等制冷器设计的目的是实现人们所希望的环境之外(如温度、湿度等),还能具备经济技术合理性,那么对这些环境参数进行控制的前提就是掌握相关物理量的分布特性。除了传统实验方法外,FLUENT 是分析三维模型流体分布的最实用的手段,图 1.8 所示为对室内空调制冷效果的模拟过程。

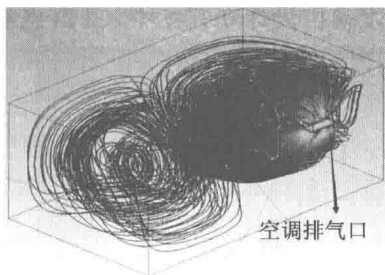


图 1.8 利用 CFD 软件模拟空调制冷过程

正因为 FLUENT 软件的独特优势,其在暖通领域的应用越来越广泛,在日本等发达国家,利用 FLUENT 的数值模拟方法来进行室内环境的设计已进入实用阶段,成为该领域内不可或缺的设计方法。在流体分析研究中,使用 FLUENT 等商业软件通常不需要编程操作,因此,研究人员有更多的时间精力来研究问题本身的物理本质,以及如何选择最优算法、确定操作参数等,极大地提高了工作效率。

### 3. 计算流体力学在汽车工业中的应用

随着湍流理论研究和计算数学算法的发展,汽车研发的各个领域也可以利用 CFD 商业软件进行分析,极大地缩短了汽车开发的周期。

#### (1) 汽车外流场分析

如图 1.9 所示,在汽车外流场的研究分析中需要用到 CFD 的模拟计算。根据大量汽车不同部位的计算结果表明,在修改车身几何外形中不应该只将气动阻力大小作为唯一的参考条件,对汽车局部流场的结构分析同样不能忽视。通过 CFD 模拟能确定在调整车身局部几何形状后气动阻力会有什么样的变化,而且能直观简便地比较不同设计方案下的气动性能,进而得出汽车外形的最优化设计方案,当前 CFD 软件已成

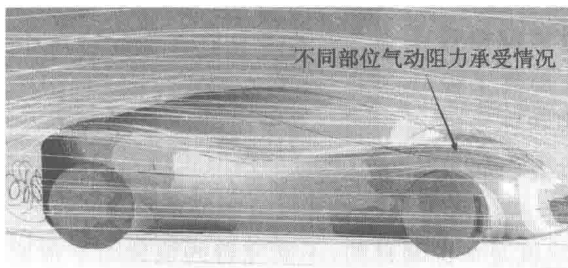


图 1.9 利用 CFD 软件模拟汽车外流场

为进行车型空气动力学性能优化的重要工具。

#### (2) 汽车内流场分析

CFD 还可以对汽车内部流场进行分析,如图 1.10 所示。使用传热模型可以对车内的温度分布及流体速度场进行分析,可以对空调制冷效果进行改进,进而找到降低空调消耗功率及减小汽车耗油量的方法。设计者根据模拟结果可以对汽车座椅进行调整,也可以设计出风口的位置及车窗的形状。





### (3) 汽车发动机设计

在发动机设计和开发中,CFD 也有广泛的应用。FLUENT 软件可以通过预混或非预混模型模拟进气和排气过程,图 1.11 所示为汽车发动机的模型。由于汽车发动机内的气体流动比较复杂,变化性强且分布不均,因此采用一般的方法很难对发动机内部流场情况进行预测。通过 FLUENT 的模拟分析可以为排气阻力的降低、充气效率的提高、气门阀和排气管结构的设计提供有效的指导。

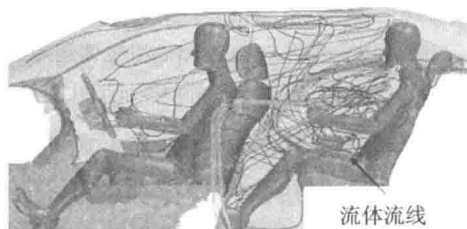


图 1.10 利用 CFD 软件模拟汽车内流场

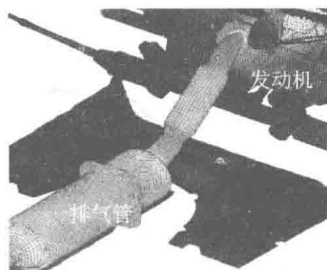


图 1.11 利用 CFD 软件模拟汽车发动机

## 4. 计算流体力学在航空航天领域的应用

CFD 模拟技术在航空航天工程领域的应用是最早的,而且从低速、高速、跨声速、超声速到高超声速,CFD 数值技术应用范围也在不断地拓展,图 1.12 为运载火箭的 CFD 模拟。在工程应用方面,CFD 经历了从平板/翼型到机翼/全机的复杂构型数值模拟,从简单的简谐运动到六自由度多体分离、投放,螺旋桨、直升机滑流,从单一流场的数值模拟到气动噪声、电磁计算、飞行力学、结构变形、等离子体控制等学科的结合。CFD 技术在气动设计、多物理场耦合、气动弹性、等离子体主动控制、数字化飞行方面起着越来越重要的作用。



图 1.12 利用 CFD 软件模拟运载火箭

CFD 模拟对于航空工程领域的贡献与成就是举世瞩目的,不断完善的流体力学理论在数值计算科学及大规模并行计算技术的支持下,在航空工业的各个领域几乎都涉及空气动力学的研究及应用。因此,研究人员不仅将 CFD 看作计算平台,更是飞行器设计过程中不可或缺的工具。

### 【拓展提高】

#### 1. 流体力学的发展历史

流体力学作为力学分支中重要的一支,于 17 世纪下半叶作为一门真正严谨的学科被建立起来,并一直发展至今。流体力学的形成首先要归功于牛顿的微积分原理,1678 年,牛顿提出了黏性流体的剪应力公式,为建立黏性流体的运动方程组创造了条件;1775 年,理论流体力学的奠基人欧拉(见图 1.13)引入了研究流场中固定点参数的流体运动描述方法,建立了研究无