

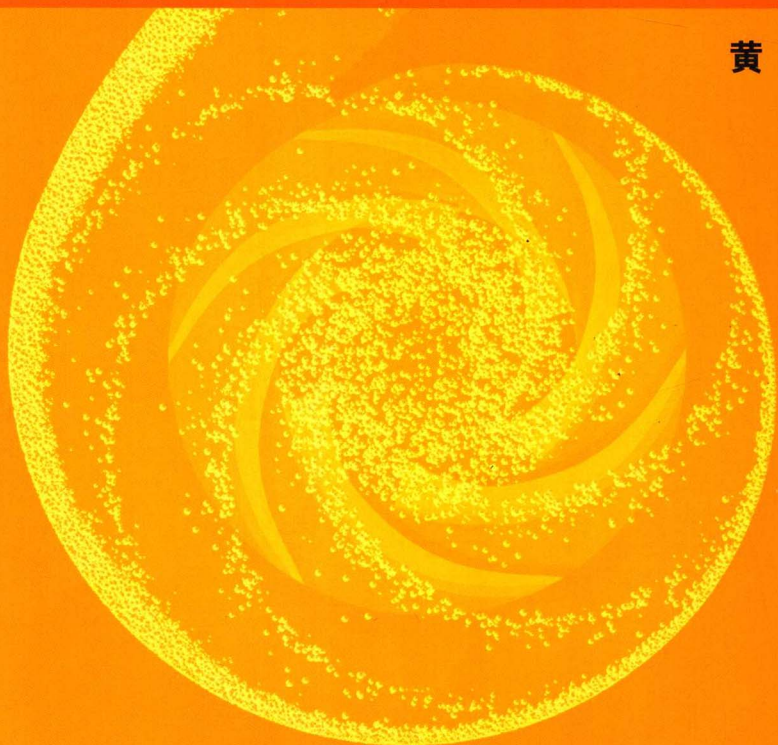


流体机械

数值仿真研究及应用

IUTI JIXIE SHUZZHI FANGZHEN YANJIU JI YINGYONG

黄 思 著



华南理工大学出版社
SOUTH CHINA UNIVERSITY OF TECHNOLOGY PRESS

流体机械 数值仿真研究及应用

黄 思 著



华南理工大学出版社
SOUTH CHINA UNIVERSITY OF TECHNOLOGY PRESS

· 广州 ·

内容简介

本书是作者近几年关于流体机械模拟仿真研究成果的积累和总结。全书内容共分为八章,主要包括:流体机械及其数值仿真基础、叶片泵全工况流动仿真及性能预测、流体机械的气液两相流动仿真、流体机械内固液两相流和固体颗粒运动及磨损、多相介质的分离和混合、流体机械的流固耦合分析、流体机械变转速问题的模拟计算及动网格技术在模拟流体机械流动的应用。每一章既是当今流体机械数值模拟的独立热点专题,彼此又形成一个相对完整的体系。书中每一章都有仿真算例,有关算例的动画图片和视频附在光盘内供读者参考。

本书试图构建起点较高的基础理论平台,借助流体商用软件仿真,侧重于研究探讨流体机械的多相介质、多物理场及非定常的流动特性,可作为已具备一定流体商用软件使用经验的理工科学生及专业人士的技术资料,也可供相关专业的教师、技术人员阅读和参考。

图书在版编目(CIP)数据

流体机械数值仿真研究及应用/黄思著. —广州:华南理工大学出版社, 2015. 10
ISBN 978 - 7 - 5623 - 4780 - 4

I. ①流… II. ①黄… III. ①流体机械 - 数值分析 - 计算机仿真 IV. ①TH3 - 39

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2015) 第 222285 号

流体机械数值仿真研究及应用

黄思 著

出版人: 韩中伟

出版发行: 华南理工大学出版社

(广州五山华南理工大学 17 号楼, 邮编 510640)

<http://www.scutpress.com.cn> E-mail: scutc13@scut.edu.cn

营销部电话: 020 - 87113487 87111048 (传真)

责任编辑: 黄冰莹

印刷者: 广州星河印刷有限公司

开本: 787mm × 1092mm 1/16 印张: 13 字数: 325 千

版次: 2015 年 10 月第 1 版 2015 年 10 月第 1 次印刷

定 价: 49.00 元 (含光盘)

版权所有 盗版必究 印装差错 负责调换

前 言

随着当今计算机技术的更新换代,近年来计算机辅助工程(Computer Aided Engineering, CAE)和计算流体动力学(Computational Fluid Dynamics, CFD)已成为包括流体机械在内的工程问题的重要分析工具和手段。CAE/CFD技术具有性能预测、数值试验和故障诊断等作用,它使许多过去无法分析的复杂问题,通过计算机数值仿真得到满意的解答;另一方面,CAE/CFD使工程分析更快、更准确,信息资料更完整,使流体机械这个传统的行业进入了一个新的发展时期,有力地推动了相关工业的技术进步,减少了研发时间和成本,提高了设计效率。CAE/CFD在产品的研发、设计分析等方面正发挥着越来越重要的作用,成为众多高校、研究单位及企业工作中不可或缺的一部分。

作者从20世纪80年代中期就开始学习吴仲华教授创立的叶片机械三元理论,专注于叶片机械正、反问题流动计算及其应用的研究,亲身经历了叶片机械流场研究的三个阶段:①无粘流动计算;②无粘流动与边界层流动的耦合计算;③三维粘性流动计算,较系统地了解和掌握了流体机械的有关求解方法。本书是作者多年来有关流体机械模拟工作的体会及近几年研究成果的积累和总结。全书共分为八章,主要内容包括:流体机械及其数值仿真基础、叶片泵全工况流动仿真及性能预测、气液两相流动仿真、固液两相流和固体颗粒运动及磨损、多相介质的分离和混合、流固耦合分析、变转速问题的模拟计算及动网格技术的应用。书中每一章既是当今流体机械数值模拟的独立热点专题,彼此又形成一个相对完整的体系;每一章都有作者完成的仿真算例,有关算例的动画图片和视频附在光盘内供读者参考。

因作者学识所限,书中难免会有疏漏和错误之处,敬请读者指正。

本书作为华南理工大学出版基金资助项目出版与读者见面,在此向学校出版基金管理委员会给予的大力支持深表谢意!本书的部分素材来自与有关单位、企业合作完成的项目成果以及作者所指导的研究生毕业论文,在此向有关单位、企业及研究室历届研究生们的鼎力协助与热心奉献深表谢意!最后衷心感谢为本书的面世出力劳心的家人,你们的支持与鼓励一直是我前进的动力!

黄 思
2015年9月于广州

目 录

1	流体机械及其数值仿真基础	1
1.1	流体机械概述	1
1.2	流动控制方程	4
1.3	运动参考系下的流动问题	7
1.4	湍流理论简介	10
1.5	边界条件与初始条件	17
1.6	仿真计算的前处理、求解及后处理	21
1.7	CFD 商用软件简介	28
1.8	本章小结	29
2	叶片泵全工况流动仿真及性能预测	30
2.1	概述	30
2.2	叶片泵外特性半经验计算方法	31
2.3	基于 CFD 的泵外特性计算方法	34
2.4	单级泵流动仿真及性能预测实例	36
2.5	多级泵流动仿真及性能预测实例	56
2.6	本章小结	65
3	气液两相流动仿真	66
3.1	概述	66
3.2	气液两相流基本概念	67
3.3	欧拉—欧拉方法	70
3.4	基于气液两相流的离心泵汽蚀仿真实例	76
3.5	液环真空泵内气液两相流动的仿真实例	79
3.6	离心泵自吸过程的气液两相流仿真实例	84
3.7	本章小结	91
4	固液两相流和固相颗粒运动及磨损	93
4.1	概述	93
4.2	欧拉—拉格朗日方法	95
4.3	DEM - CFD 耦合	102
4.4	固液两相流磨损模型	105
4.5	运用 EDEM - Fluent 耦合计算离心泵内固液两相流实例	106
4.6	运用 DPM 模型计算离心泵固液两相流的磨损实例	113
4.7	本章小结	118

5	多相介质的分离和混合	119
5.1	多相介质分离	119
5.2	多相介质的搅拌混合	122
5.3	水力旋流器固液两相分离模拟实例	124
5.4	两相介质混合过程的仿真实例	132
5.5	本章小结	138
6	流固耦合分析	139
6.1	概述	139
6.2	基于流固耦合结构静力分析	141
6.3	模态分析	144
6.4	液环泵转子静力学性能的计算实例	146
6.5	基于离心泵全流场的流固耦合分析实例	150
6.6	本章小结	157
7	变转速问题的模拟计算	158
7.1	概述	158
7.2	流体机械变转速特性的研究现状	158
7.3	变转速阶段的流动特性	159
7.4	运用变转速方法模拟计算离心泵启动停机过程实例	162
7.5	运用变转速方法模拟计算泵作透平 (PAT) 启动过程实例	166
7.6	本章小结	171
8	动网格技术的应用	172
8.1	概述	172
8.2	动网格的控制体守恒方程	172
8.3	动网格方法简介	173
8.4	滚动转子式压缩机的二维非定常流动仿真实例	175
8.5	罗茨风机的准三维非定常流动仿真实例	179
8.6	离心泵的三维非定常流动仿真实例	183
8.7	旋喷泵的三维非定常流动仿真实例	187
8.8	本章小结	191
	参考文献	192

1 流体机械及其数值仿真基础

1.1 流体机械概述

流体机械是以流体或流体与固体的混合物为对象进行能量转换、处理，包括提高其压力进行输送的机械。其广泛应用于工农业生产、国民经济建设等诸多领域中。在许多产品的生产中，其原料、半成品和产品往往就是流体，因此给流体增压与输送流体，使其满足各种生产条件的工艺要求，保证连续性的管道化生产，参与生产环节的制作，以及在辅助性生产环节中作为动力气源、控制仪表的用气、环境通风等都离不开流体机械。故流体机械往往直接或间接地参与从原料到产品的各个生产环节，使物质在生产过程中发生状态、性质的变化或进行物质的输送等。它是产品生产的能量提供者、生产环节的制作者和物质流通的输送者。因此，可以说它是一个工厂的心脏、动力和关键设备。

流体机械是过程装备中的动设备，它的许多结构和零部件在高速地运行，并与其中不断流动着的流体发生相互作用，因而它比过程装备中的静设备、管道、工具等要复杂得多，对这些流体机械所实施的控制也十分复杂。因此，开展有关流体机械理论和技术方面的研究和探索是很有必要的。

1.1.1 流体机械分类

1.1.1.1 按能量转换分类

流体机械按其能量的转换分为原动机和工作机两大类。原动机是将流体的能量转换为机械能，用来输出轴功，如汽轮机、燃气轮机、水轮机等。工作机是将动力能转变为流体的能量，用来改变流体的状态（提高流体的压力、使流体分离等）与输送流体，如压缩机、泵、分离机等。

1.1.1.2 按流体介质分类

通常，流体是指具有良好流动性的气体与液体的总称。在某些情况下又有不同流动介质的混合流体，如气固、液固两相流体或气液固多相流体。在流体机械的工作机中，主要有提高气体或液体的压力、输送气体或液体的机械，有的还包括多种流动介质分离的机械，其分类如下。

(1) 压缩机

将机械能转变为气体的能量，用来给气体增压与输送气体的机械称为压缩机。按照气体压力升高的程度，又分为压缩机、鼓风机和通风机等。

(2) 泵

将机械能转变为液体的能量，用来给液体增压与输送液体的机械称为泵。在特殊情况下流经泵的介质为液体和固体颗粒的混合物，人们将这种泵称为杂质泵，亦称为液固两相流泵。

(3) 分离机

用机械能将混合介质分离开来的机械称为分离机。这里所提到的分离机是指分离流体介质或以流体介质为主的分离机。

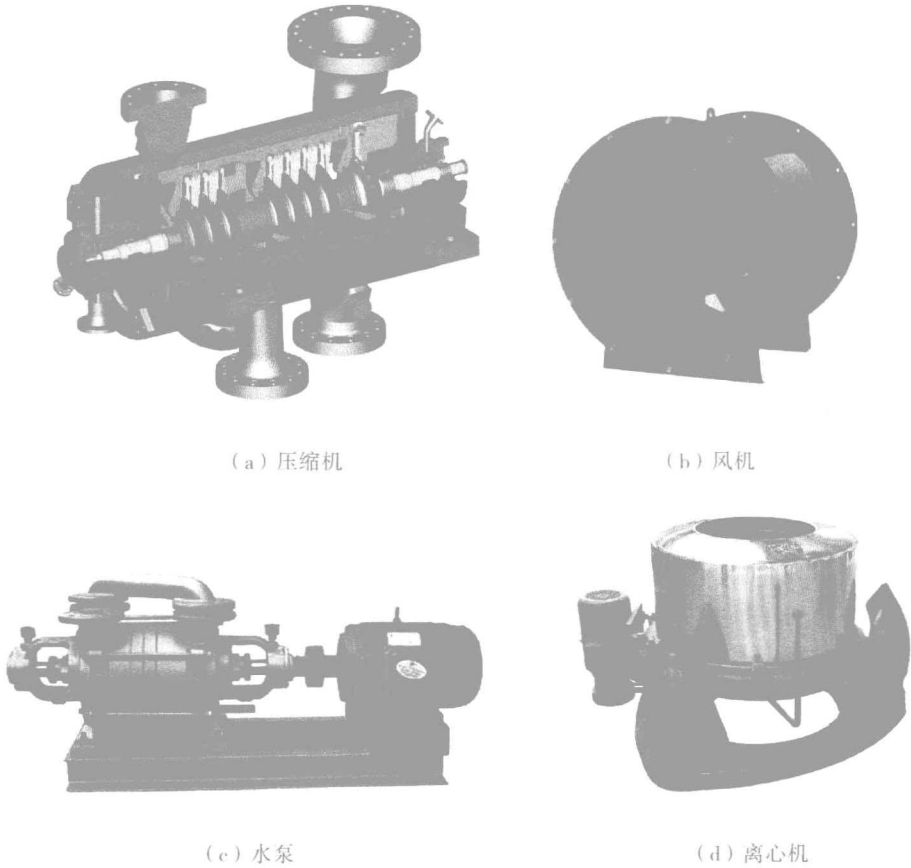


图 1-1 流体机械分类

1.1.1.3 按流体机械结构分类

(1) 往复式结构的流体机械

往复式结构的流体机械主要有往复式压缩机、往复式泵等。这种结构的特点在于通过能量转换使流体提高压力的主要运动部件是在工作腔中做往复运动的活塞，而活塞的往复运动是靠做旋转运动的曲轴带动连杆、进而驱动活塞来实现的。这种结构的流体机械具有输送流体的流量较小而单级压升较高的特点，一台机器就能使流体上升到很高的压力。

(2) 旋转式结构的流体机械

旋转式结构的流体机械主要有各种回转式、叶轮式（透平式）的压缩机和泵以及分离机等。这种结构的特点在于通过能量转换使流体提高压力或分离的主要运动部件是转轮、叶轮或转鼓，该旋转件可直接由原动机驱动。这种结构的流体机械具有输送流体的流量大单级压升不太高的特点。为使流体达到很高的压力，机器需由多级组成或由几台多级的机器串联成机组。

本书涉及的内容主要以旋转式结构的流体机械为主。

1.1.1.4 按应用领域分类

除上述的几种分类外，人们还习惯根据使用场合进行分类，如水力机械有水轮机、水斗、水波轮等；汽轮机械有蒸汽轮机、废气轮机、燃气轮机等；化工机械有压缩机、泵、

制冷机等；通风机械有通风机、鼓风机、风扇等；透平机械有涡轮机、透平压缩机、飞机发动机等；液压机械有液压泵、液压马达、液压缸等；液力机械有液力变矩器、液力偶合器、液力制动器等。

1.1.2 流体机械的流动性能

1.1.2.1 流体机械的内流场与外特性

流体机械是种类多、应用量大面广的机械，在国民经济建设中发挥着至关重要的作用。流体机械同时也是耗能机械，在与流动介质的能量转换过程中，受过流部件壁面摩擦和机械内流场结构等因素的影响，不同程度地消耗部分能量。这个能量损失越小，流体机械的效率就越高，对能源的不合理消耗就越少。据统计，我国每年仅水泵的耗电量就占全国发电量的20%，耗能相当惊人。随着流体机械应用范围的扩大，其工作环境也愈加复杂，现代工程技术对机械的性能要求也愈来愈高，因此探索新的流体机械设计方法，提高流动效率、降低能耗以及提高运行的可靠性具有十分重要的意义。

流体机械的性能在很大程度上取决于内部流动状况，一个稳定高效的流场不仅确保流体机械具有高性能和高经济性，也是高可靠性的保证。流体机械内部流体运动的应力应变率十分复杂，不同方向上有不同的压力梯度，同时还有动静部件间的相互干涉和表面曲率等作用，还伴有二次流、间隙流、尾迹及各种旋涡，是复杂的三维非定常粘性流体运动。另一方面，当流道中的局部压力低于该处温度下液体的饱和蒸汽压而产生空化汽蚀引起大量微气泡急剧生长并在高压处溃灭，对机械壁面产生高压高温及高频的持续冲击，造成壁面材料剥蚀失效。汽蚀的产生使机械的效率下降、能头降低，引起振动和噪声。因此，对流体机械内部流场的结构和能量损失机理、汽蚀破坏机理进行研究，掌握流体流动规律及其对机械性能的影响，对于缩短流体机械设计周期、降低设计风险，提高流体机械效率、改善性能和工作可靠性具有重大意义。

1.1.2.2 流体机械的结构可靠性

流体机械在实际工作中经常遇到冲蚀磨损、空蚀、液滴冲蚀（闪蒸）和腐蚀等情况，造成失效或影响使用寿命。同时，流体机械在运行过程中难免会产生振动和噪声，影响运行的效率、安全性和可靠性。因此，仅对流体机械内部流场分析已很难准确判断机械材料的刚度、强度以及运动过程中的安全性和可靠性等问题，也同时需要考虑机械结构特性的研究。

1.1.3 流体机械数值仿真

近年来随着计算机技术和计算流体动力学（Computational Fluid Dynamics, CFD）技术的大力发展，CFD技术已经成为工程实践和科学研究的有力工具，被广泛应用于航空航天、汽车设计、半导体设计、化学处理、发电、生物医学等各种领域，被许多著名的企业作为主要的气动、水动力学分析和设计的工具。在流体机械方面，CFD技术已在流体机械的内流场数值模拟、内部流动规律以及结构特性研究等方面得到了广泛的应用，很大程度上解决了理论研究和实验研究无法解决的复杂流动问题，和实验研究相比节约了大量的费用和时间、边界条件容易控制、能给出详细和完整的资料，并且有很好的重复性，可以模拟出高温、有毒、易燃易爆等真实条件和实验室只能接近而无法达到的理想条件。CFD使

得人们对流体机械过流部件内部的流动分析和模拟更加准确和可靠，甚至能预见理论分析和实验研究中尚未发现的新的流动现象和规律。

流体机械传统的设计方法一般需要经历设计、样机性能试验检测、制造三大过程，该方法需要经过多次样品试制和性能检测，整个设计也要经过多次重复，可见，传统设计方法具有设计周期长、设计成本高等缺点。20世纪80年代以来，流体机械开始了用数值模拟代替模型试验的时期。近10多年来，流体机械内部流动的数值研究已不再局限于性能预测，已经被国内外学者广泛应用于改善机械性能方面。流体机械的设计方法正由传统的一元设计方法向基于数值模拟的二元或三元设计方法转变。通过CFD技术分析研究流体机械内部流动情况已经成为改进与优化机械流动部件设计的重要辅助手段。具体过程为：根据流动参数、流场分布的变化规律，初步设计出流体机械，进行三维数值模拟，根据计算结果修正某些几何边界，再进行流场计算，直到设计出性能优良、效率高并满足其他要求的产品。在仿真中可综合考虑现实中存在的多方面的影响因素，称之为“多物理场仿真分析”。能够模拟流体流动、传热传质、化学反应和其他复杂的物理现象。例如，以往的研究常常是将流体机械内流场与结构的特性研究分开进行，忽略了流场与结构间的相互作用。随着计算机技术和数值模拟方法的不断发展，流固耦合技术（Fluid Structure Interaction, FSI）应运而生，从而使流体机械的流场和结构场的耦合分析成为现实。

1.2 流动控制方程

实际工程中，所有的流动问题应满足质量、动量守恒定律。对于涉及传热或可压缩性的流动，需要考虑能量守恒定律。对于包括多组分或多相流动，需要求解组分或流动相的守恒方程。当流动是湍流时，还要求解附加的湍流输运方程。

1.2.1 质量守恒方程

流动质量守恒定律可表述为：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。按照这一定律可以得出以下质量守恒方程：

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

式中， ρ 是流体密度， t 是时间， v_i 是速度矢量 \mathbf{v} 在笛卡尔直角坐标系 i 方向的分量。该方程是质量守恒方程的一般形式，也称做连续方程，它适用于可压流动和不可压流动。源项 S_m 是多相流动中由分散相中加入到连续相的质量（例如液滴的蒸发），对于单相流动 $S_m = 0$ 。

1.2.2 动量守恒方程

动量守恒定律实际上是由牛顿第二定律推导出来的，该定律同样是任何流动系统都必须满足的基本定律。该定律可表述为：微元体小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。按照这一定律，可导出惯性坐标系中 i 方向上的动量守恒方程：

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho v_i) + \frac{\partial}{\partial x_j}(\rho v_i v_j) = -\frac{\partial p}{\partial x_i} + \frac{\partial \tau_{ij}}{\partial x_j} + \rho g_i + F_i \quad (1-2)$$

其中, p 是静压, ρg_i 和 F_i 分别是 i 方向上的重力体积力和外部体积力。 F_i 包含了相关源项, 如多相流中相互作用力、多孔介质等源项。式 (1-2) 中的 τ_{ij} 称为粘性应力张量, 它是由流体运动引起的, 当运动停止后, 其值等于零。 τ_{ij} 的各分量是局部速度梯度张量 $\partial u_i / \partial x_j$ 各分量的线性齐次函数。应力张量由下式给出:

$$\tau_{ij} = \left[\mu \left(\frac{\partial v_i}{\partial x_j} + \frac{\partial v_j}{\partial x_i} \right) \right] - \frac{2}{3} \mu \frac{\partial v_l}{\partial x_l} \delta_{ij} \quad (1-3)$$

其中, δ_{ij} 为克罗内克符号 (当 $i=j$ 时, $\delta_{ij}=1$; 当 $i \neq j$ 时, $\delta_{ij}=0$, $i, j=1, 2, 3$)。关于张量表达的具体约定, 可参考文献中的有关书籍。则式 (1-2) 可写成:

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho v_i) + \frac{\partial}{\partial x_j}(\rho v_i v_j) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\mu \frac{\partial v_i}{\partial x_j} \right) + S_i \quad (1-4)$$

其中,

$$S_i = -\frac{\partial p}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\mu \frac{\partial v_j}{\partial x_i} - \frac{2\mu}{3} \frac{\partial v_l}{\partial x_l} \delta_{ij} \right) + \rho g_i + F_i \quad (1-5)$$

式 (1-2) 或式 (1-4) 是动量守恒方程, 简称动量方程、运动方程或 Navier-Stokes 方程。

1.2.3 能量方程

能量守恒定律实际就是热力学第一定律, 该定律是含有热交换流动系统必须满足的基本定律。该定律可表述为: 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力与面力对微元体所做的功。能量方程的通用形式为:

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho E) + \frac{\partial}{\partial x_j}(v_i(\rho E + p)) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\lambda \frac{\partial T}{\partial x_j} - \sum_j h_j J_j + v_j \tau_{ij} \right) + S_h \quad (1-6)$$

其中, λ 是热传导系数, J_j 是组分 j 的扩散流量。方程式 (1-6) 右边的前三项分别描述了热传导、组分扩散和粘性耗散带来的能量输运。 S_h 包括了化学反应热、辐射及其他的体积热源项。式 (1-6) 中, 物质的能量 E 通常是内能、动能和势能三项之和:

$$E = i + \frac{p}{\rho} + \frac{v_i^2}{2} = h - \frac{p}{\rho} + \frac{v_i^2}{2} \quad (1-7)$$

其中, i 、 h 分别是物质的内能和焓。

对于涉及热传导或可压缩性的流动, 可根据内能 i 与温度 T 间的关系, 即 $i = c_p T$, 由式 (1-7) 可得到温度 T 为变量的能量守恒方程:

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho T) + \frac{\partial}{\partial x_j}(\rho v_i T) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\frac{\lambda}{c_p} \frac{\partial T}{\partial x_j} \right) + S_T \quad (1-8)$$

其中,

$$S_T = \frac{\partial}{\partial x_j} \left(- \sum_j h_j J_j + v_j \tau_{ij} \right) + S_h \quad (1-9)$$

S_T 为流体中包括了组分扩散、粘性耗散、化学反应、辐射及其他体积热源项。式 (1-6) 或式 (1-8) 简称为能量方程。

综合各基本方程式 (1-1)、式 (1-4) 和式 (1-8), 可知有 v_i 、 p 、 T 和 ρ 等六个未知量, 还需补充一个联系压力 p 和密度 ρ 的状态方程, 方程组才能封闭。例如对理想气

体,可补充状态方程式(1-10):

$$\rho = \frac{1}{v} = \frac{p}{RT} \quad (1-10)$$

其中, v 为气体比容,即单位质量气体所占的体积, R 为普适气体常数。对实际气体,可补充范德瓦尔(Van der Wals)提出的经典状态方程式(1-11):

$$\left(p + \frac{a}{v^2}\right)(v - b) = RT \quad (1-11)$$

式中的常数 a 和 b 称为范德瓦尔常数,它们随物质不同而异,与分子的大小和相互作用力有关,可由实验方法确定。

需要说明的是,虽然能量方程式(1-6)或式(1-8)是流动与传热问题的基本控制方程,但对于不可压流动,若热交换量很小可忽略不计时,可不考虑能量守恒方程。这样只需要联立求解连续方程式(1-1)及动量方程式(1-4)。

1.2.4 组分质量守恒方程

在一个具有多种化学组分的特定系统中,一般会存在质量的交换,每一种组分都要遵守组分质量守恒定律。组分质量守恒定律可表述为:系统内某种化学组分质量对时间的变化率,等于通过系统界面净扩散流量与通过化学反应产生的该组分的生产率之和。由组分质量守恒定律,可写出组分 s 的组分质量守恒方程:

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho c_s) + \frac{\partial}{\partial x_j}(\rho v_j c_s) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left(D_s \frac{\partial(\rho c_s)}{\partial x_j} \right) + S_s \quad (1-12)$$

式中, c_s 为组分 s 的体积浓度, ρc_s 是组分 s 的质量浓度, D_s 为组分 s 的扩散系数, S_s 为系统单位时间内单位体积通过化学反应产生组分 s 的质量。式(1-12)左侧第一项、第二项分别称为组分的时间变化率、对流项,右侧第一项和第二项分别称为扩散项和反应项。

组分质量守恒方程常简称为组分方程。组分的质量守恒方程实际就是一个浓度传输方程,反映了组分的浓度随时间和空间的变化,因此组分方程在某些情况下也称为浓度方程。

1.2.5 控制方程的通用形式

比较流动传热四个基本控制方程式(1-1)、式(1-4)、式(1-8)和式(1-12)可以看出,虽然这些方程中因变量各不相同,但均反映了单位时间单位体积内物理量的守恒性质。如果用 ϕ 表示通用变量,则上述各控制方程都可以表示成以下通用形式:

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho\phi) + \frac{\partial}{\partial x_j}(\rho v_j \phi) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\Gamma_\phi \frac{\partial\phi}{\partial x_j} \right) + S_\phi \quad (1-13)$$

式中, ϕ 为通用变量,代表着 v_i 、 T 、 c_s 等求解变量; Γ_ϕ 为广义扩散系数, S_ϕ 为广义源项。式(1-13)中各项依次为瞬态项、对流项、扩散项和源项。针对不同的方程, ϕ 、 Γ_ϕ 和 S_ϕ 具有不同的形式,表1-1给出了三个符号与各方程的对应关系。

表 1-1 通用控制方程式 (1-13) 中各符号的具体形式

方程	符号		
	ϕ	Γ_ϕ	S_ϕ
连续方程	1	0	0
动量方程	v_i	μ	$-\partial p/\partial x_i + S_i$
能量方程	T	λ/c_p	S_T
组分方程	c_s	$D_s\rho$	S_s

因此,所有控制方程都可将因变量、时间项、对流项和扩散项写成标准形式,然后将方程右端的其余各项集中在一起定义为源项,转换成通用微分方程形式,便于计算中使用通用程序对各控制方程进行求解。

1.3 运动参考系下的流动问题

1.3.1 运动参考系下的流动控制方程

上述流体控制方程是在静止参考系(惯性系)下的形式。然而,许多流体机械问题常常涉及运动部件(例如旋转的转子叶片、桨片以及固体运动壁面),而且这些运动部件的流动区域正是所需要关注的研究对象,运动部件的存在导致在静止参考系中的流动变成非稳态问题。若通过使用运动参考系(非惯性系),可以将运动部件的流动问题转化为稳态问题进行分析。例如对于一个旋转速度为常数的流体机械,如果将其流动控制方程转换到旋转参考系中,可以求解它的稳态解,同样也可以进行瞬态模拟计算。

下面考虑图 1-2 所示的一个相对于静止参考系以角速度 ω 旋转的坐标系,旋转参考系原点以位置向量进行定位。

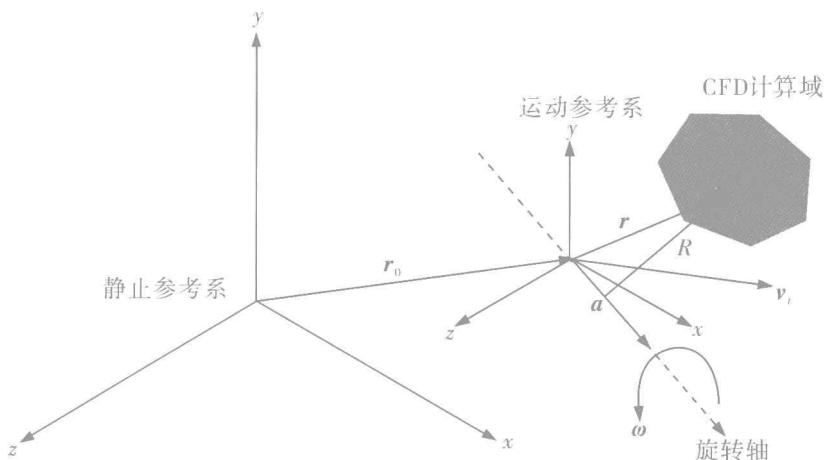


图 1-2 静止和运动参考系的关系

旋转轴通过单位向量进行定义：

$$\boldsymbol{\omega} = \omega \boldsymbol{a} \quad (1-14)$$

因此旋转系中任意点位置可通过位置向量及旋转参考系的原点进行确定。使用以下关系式将速度从静止系转化到旋转系：

$$\boldsymbol{v}_r = \boldsymbol{v} - \boldsymbol{u}_r \quad (1-15)$$

式(1-15)中：

$$\boldsymbol{u}_r = \boldsymbol{v}_r + \boldsymbol{\omega} \times \boldsymbol{r} \quad (1-16)$$

\boldsymbol{v}_r 是相对速度（旋转系中观察的速度）， \boldsymbol{v} 是绝对速度（静止系中观察的速度）； \boldsymbol{u}_r 为运动参考系在静止参考系下的速度，其中 \boldsymbol{v}_r 是平动速度， $\boldsymbol{\omega}$ 是角速度。需要说明的是 \boldsymbol{v}_r 和 $\boldsymbol{\omega}$ 可以是常数（恒速），也可以是时间 t 的函数（变速）。将上述关系带入静止惯性系的流体控制方程式(1-1)和式(1-2)，分别得到运动参考系下的连续方程：

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \boldsymbol{v}_r) = 0 \quad (1-17)$$

和动量方程：

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho \boldsymbol{v}_r) + \nabla \cdot (\rho \boldsymbol{v}_r \boldsymbol{v}_r) + \rho(2\boldsymbol{\omega} \times \boldsymbol{v}_r + \boldsymbol{\omega} \times (\boldsymbol{\omega} \times \boldsymbol{r}) + \boldsymbol{\varepsilon} \times \boldsymbol{r} + \boldsymbol{a}) = -\nabla p + \nabla \cdot [\boldsymbol{\tau}_r] + \boldsymbol{F} \quad (1-18)$$

其中， $\boldsymbol{\varepsilon} = d\boldsymbol{\omega}/dt$ 和 $\boldsymbol{a} = d\boldsymbol{v}/dt$ 分别为运动参考系在静止参考系下的角加速度和平动加速度， $[\boldsymbol{\tau}_r]$ 是运动参考系下的粘性应力张量。

动量方程式(1-18)中含有4个加速度项，其中哥氏（Coriolis）加速度 $2\boldsymbol{\omega} \times \boldsymbol{v}_r$ 和离心加速度 $\boldsymbol{\omega} \times (\boldsymbol{\omega} \times \boldsymbol{r})$ 无论是恒速运动参考系还是变速参考系都是存在的；另外两个加速度项 $\boldsymbol{\varepsilon} \times \boldsymbol{r}$ 和 \boldsymbol{a} 在恒速旋转或恒速平动时为零，但在变速旋转或变速平动的场合不能为零，因此式(1-17)和式(1-18)可看做是变速参考系下的流动控制方程组。另外，式(1-18)中的粘性应力除使用了相对速度导数外在形式上与式(1-2)相同。可见在运动参考系下，运动方程包含了由静止参考系转化为运动参考系所形成的额外加速度项。

能量方程式(1-6)的形式不变，但其中的内能需要采用相对内能或相对总焓，这些变量定义为：

$$E_r = h - \frac{p}{\rho} + \frac{1}{2}(v_r^2 - u_r^2) \quad (1-19)$$

$$H_r = E_r + \frac{p}{\rho} \quad (1-20)$$

1.3.2 单参考系

对于许多流体机械问题如仅研究其转子内的流动问题，则整个计算区域可采用一个运动参考系，称之为单参考系（Single Reference Frame, SRF）。在 SRF 模型下，对该问题采取适当的边界条件可进行稳态求解，此时在相对参考系下，转子壁面上的相对流速为零，因此边界为无滑移条件。

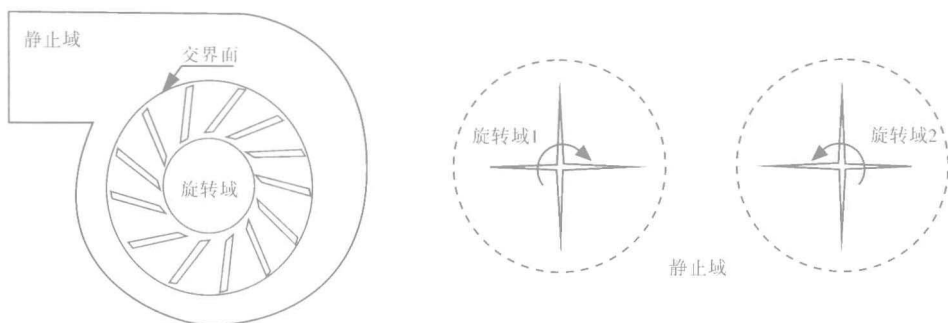
在旋转运动参考系下也经常使用关于旋转轴的周期性边界条件。例如，当模拟透平机械中的叶片流动时，可采用其中一个叶片周围区域建立周期计算域，也能很好地求解叶片表面的流动并减少计算所耗费的时间。有关边界条件的内容详见 1.5.2 节。

1.3.3 多参考系

流体机械的大部分问题同时涉及运动部件（转子）和静止部件（定子），如图 1-3 所示，无法单独使用 SRF 参考系或静止参考系求解，必须将模型分成多个计算区域，使用分界面（图中虚线部分）将各区域分隔和关联，这种处理方式就是多参考系（Multiple Reference Frame, MRF）的计算方法。MRF 模型是多区域计算方法中最常用的一种。它采用稳态近似，运动部件的区域通过运动参考系方程式（1-17）~式（1-20）求解，而静止区域则通过静止参考系方程式（1-1）~式（1-6）求解。

图 1-3a 是旋转机械流动仿真中最典型的问题，除了静止壳体还有一个旋转叶轮，对该问题可使用 2 个参考系：除了静止参考系，还可定义一个包含叶轮及其周围流体的旋转参考系。图 1-3b 所示的流动问题包含两个转向和转速不同的叶轮，这种问题则可使用 3 个参考系：外部静止参考系及两个旋转参考系。

对于多参考系下的非稳态问题需要采用滑移网格方法捕捉流动的瞬态行为，这部分内容在 1.6.5 节中讨论。



(a) 风机计算域

(b) 两个旋转叶轮的计算域

图 1-3 多参考系

对于温度、压力、密度、湍动能等标量，在参考系之间进行传递时不发生改变，因此不同参考系中不需要做专门处理。但对于速度及速度梯度等矢量，在不同参考系下其大小和方向都可能发生改变。因此，在两个子区域之间的分界面需要保持绝对速度的连续性，以提供正确的衔接关系。按照式（1-15）和式（1-16），得到绝对流速：

$$\boldsymbol{v} = \boldsymbol{v}_r + \boldsymbol{\omega} \times \boldsymbol{r} + \boldsymbol{v}_t \quad (1-21)$$

绝对速度梯度可以表示为：

$$\nabla \boldsymbol{v} = \nabla \boldsymbol{v}_r + \nabla (\boldsymbol{\omega} \times \boldsymbol{r}) \quad (1-22)$$

需要说明的是，作为一个稳态近似方法，MRF 方法不需要使相邻的两个运动区域间产生相对运动，计算的网格依然是固定不动的，这如同在某个瞬间对运动部件“定格”进行观测。因此，MRF 方法也常称为“冻结转子法”。MRF 对许多流体机械仿真提供了一个有效的流动模型。例如，在一些转子与定子弱耦合的透平机械问题中，可以使用 MRF 模型。MRF 模型也可为瞬态的滑移网格计算提供一个很好的初始条件。

1.4 湍流理论简介

流体机械及工程应用中绝大多数流动处于湍流状态，是流动仿真中需要考虑的问题。流体试验表明，当 Reynolds 数小于某一临界值时，流动是平稳的，相邻的流体层次分明有序地流动，这种流动称做层流。当 Reynolds 数大于临界值时，流动呈无序的混乱状态，相邻的流体层互相掺混。此时流动是不稳定的，速度等流动特性都随机变化，这种状态称为湍流。

从物理结构上看，湍流是由各种不同尺度的涡叠加成的流动，这些涡的大小及旋转的方向是随机的。大尺度涡的尺寸与流场的大小相当，它主要由惯性、边界条件所决定，是引起低频脉动的原因；小尺度涡主要由粘性力决定，其尺寸可能只有流场尺度的千分之一-的数量级，是引起高频脉动的原因。湍流不同尺度涡的随机运动造成了物理量的脉动，图 1-4 是在湍流状态下某一点流速随时间的变化情况。

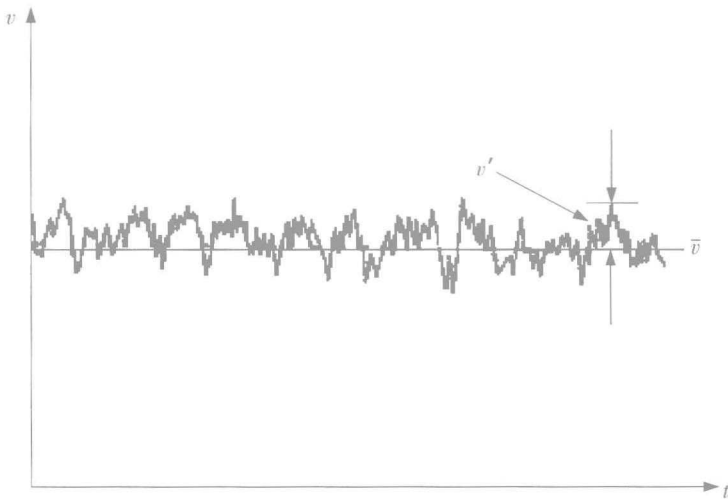


图 1-4 湍流某特定点的实际速度

1.4.1 湍流计算方法的分类

湍流计算方法大体上可分为直接数值模拟和非直接计算方法，其分类如图 1-5 所示。直接数值模拟是指直接求解瞬时湍流控制方程式 (1-1) 和式 (1-2)。它最大的优点是无需对湍流做任何简化或近似，理论上可以得到相对准确的计算结果。但湍流脉动是小尺度且高频率的，例如在一个 $(0.1 \times 0.1 \times 1.0) \text{ m}^3$ 的流动域内，要捕捉所有尺度的涡，计算的网格节点数将高达 10^9 到 10^{12} 。同时，时间的计算步长要求在 $100 \mu\text{s}$ 以下，才能分辨出湍流的结构及时间特性。对如此计算要求，以现有的计算机条件还无法用于真正意义上的工程计算，所以在此不做进一步介绍。非直接计算方法是不直接计算湍流的脉动特性，而是设法对湍流做某种程度的近似和简化处理，例如采用时均的 Reynolds 平均法。

非直接计算方法中包括了大涡模拟方法、Reynolds 平均法 (RANS) 及统计平均法。统计平均法是基于湍流相关函数的统计理论，主要用相关函数及谱分析的方法来研究湍流结构，在工程中应用不是很广泛，在此也不做进一步介绍。

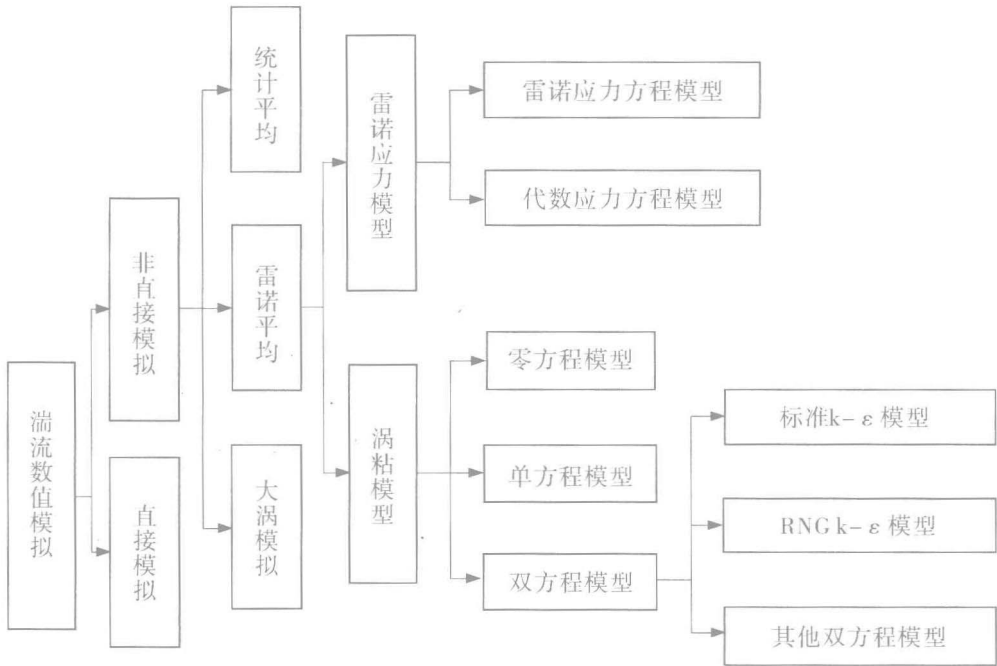


图 1-5 湍流数值模拟方法及相应的湍流模型

1.4.2 Reynolds 平均法 (RANS)

1.4.2.1 Reynolds 时均方程

湍流使得流体介质之间的动量、能量和浓度交换发生变化，并引起数量的脉动。一般认为，无论湍流运动多么复杂，非稳态的连续方程和 Navier - Stokes 方程对于湍流的瞬时运动仍然是适用的。在此以连续方程式 (1-1) 和运动方程式 (1-2) 为例，写出湍流瞬时控制方程。为了考察脉动的影响，现引入 Reynolds 平均法，即把湍流运动看做由两个流动叠加而成，一是时间平均流动，一是瞬时脉动流动，如图 1-4 所示。任一变量 ϕ (如流速、压力、能量或粒子浓度) 的时间平均值定义为：

$$\bar{\phi} = \frac{1}{\Delta t} \int_t^{t+\Delta t} \phi(t) dt \quad (1-23)$$

这里，上画线“-”代表对时间的平均值。如果用上标“'”代表脉动值，物理量的瞬时值 ϕ 、时均值 $\bar{\phi}$ 及脉动值 ϕ' 之间有如下关系：

$$\phi = \bar{\phi} + \phi' \quad (1-24)$$

将式 (1-24) 代入瞬时的连续方程式 (1-1)、动量方程式 (1-2) 及控制方程的通用形式 (1-13)，并对时间取平均，得到湍流时均流动的控制方程如下式 (为简化起见，除脉动值的时均值外，下式中去掉了表示时均值的上画线符号“-”，如 $\bar{\phi}$ 用 ϕ 来表示)：

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_i} (\rho v_i) = S_m \quad (1-25)$$

$$\frac{\partial}{\partial t} (\rho v_i) + \frac{\partial}{\partial x_j} (\rho v_j v_i) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\mu \frac{\partial v_i}{\partial x_j} - \rho \overline{v'_i v'_j} \right) + S_i \quad (1-26)$$