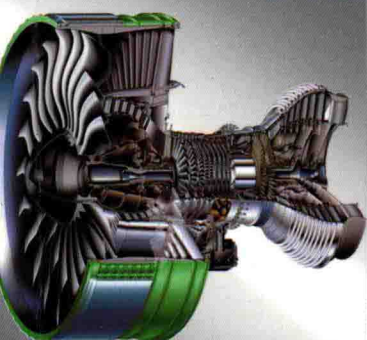


普通高等教育“十三五”规划教材



流体机械内流 理论与计算

张楚华 琚亚平 编著



机械工业出版社
CHINA MACHINE PRESS

普通高等教育“十三五”规划教材

流体机械内流 理论与计算

张楚华 琚亚平 编著
戴 韧 主审

机械工业出版社

本书系统地介绍了流体机械内流理论、计算方法及应用,内容包括:张量的基本概念及运算,流体机械内部全三维、准三维与二维流动理论,计算流体力学的数值方法,流体机械内部三维可压缩黏性流动的数值方法及其应用。全书共分8章,通过对本书的阅读与学习,读者不但会对流体机械内流理论及主要简化模型、流体机械内流计算的主流数值方法有系统深入的了解,同时还能解决流体机械设计和分析中遇到的一些实际问题。

本书为高等院校能源与动力工程专业的高年级本科生教材,也可供相关专业的本科生、研究生及科技人员参考。

图书在版编目(CIP)数据

流体机械内流理论与计算/张楚华, 琚亚平编著. —北京: 机械工业出版社, 2016.1

普通高等教育“十三五”规划教材

ISBN 978-7-111-52797-8

I. ①流… II. ①张… ②琚… III. ①流体机械-机械计算-高等学校-教材 IV. ①TH3

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2016) 第 019790 号

机械工业出版社 (北京市百万庄大街 22 号 邮政编码 100037)

策划编辑: 蔡开颖 责任编辑: 蔡开颖 李 乐 任正一

版式设计: 霍永明 责任校对: 张 征

封面设计: 张 静 责任印制: 乔 宇

北京铭成印刷有限公司印刷

2016 年 3 月第 1 版第 1 次印刷

184mm × 260mm · 11.25 印张 · 275 千字

标准书号: ISBN 978-7-111-52797-8

定价: 29.00 元

凡购本书, 如有缺页、倒页、脱页, 由本社发行部调换

电话服务

服务咨询热线: 010-88379833

读者购书热线: 010-88379649

网络服务

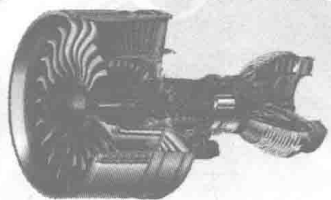
机工官网: www.cmpbook.com

机工官博: weibo.com/cmp1952

教育服务网: www.cmpedu.com

金书网: www.golden-book.com

封面无防伪标均为盗版



前言

流体机械主要包括叶片式压缩机、鼓风机、通风机、泵、水轮机和风力机等以气体或液体为工作介质的旋转机械，广泛应用于石油化工、冶金电力、制冷空分、航空航天、能源动力等国民经济诸多支柱性行业。此外，流体机械还是航机燃机、西气东输、南水北调、深海开发等国家超大型工程中的核心设备。目前，工业流体机械正朝着大型化、高效化、高转速、宽工况方向发展，其先进设计理论、安全运行方法和流动控制技术几乎完全依赖于人们对流体机械内部流动的认识与研究水平，对流体机械内流理论与计算方面的专门人才有着长期稳定的市场需求。

流体机械内流理论与计算是一门已有 60 多年发展历史且目前仍处于快速发展阶段的学科，如何把握教材内容的系统性、先进性和本科生的认知规律给本书编写提出了不小的挑战。作者在内容取舍、行笔构思、章节编排时注重形成如下特色：

1) 理论性与实践性的统一。阅读本书的读者应该具备流体机械原理和流体力学的专业基础知识，此外，本书涉及偏微分方程、张量分析和计算方法等数学知识。根据作者的教学经验，如果教学内容过分注重理论推导的严密性，而忽略必要的动手实践环节，可能会把学生带进“只见树木，不见森林”的误区；反之，如果对理论知识重视程度不够，盲目动手操作，不仅事倍功半，还可能得不到正确的计算结果。本书力求深入浅出，在进行必要的理论推导的同时，尽可能给出主要算法的实施步骤或流程图，同时针对书中的重点和难点还配备一些例题演算和课后练习，力争做到理论严密性与认知规律性的统一。

2) 系统性与先进性的统一。流体机械内流理论与计算覆盖面很广，作为一部本科生教材，既不可能也无必要囊括所有关于此方向的研究成果。作者在教材内容取舍方面，将主要篇幅用以介绍流体机械内流基本理论、流体机械内流计算主流方法上，同时，作为抛砖引玉，本书还专门安排两章内容介绍这些理论和方法在透平压缩机内流中的应用，为读者进一步学习本领域前沿知识奠定理论和实践基础。

本书为高等院校能源与动力工程专业的高年级本科生教材，也可供相关专业的本科生、研究生和科技人员参考。全书由西安交通大学张楚华教授和琚亚平讲师编写，由上海理工大学戴韧教授主审。参加过本门课程学习的历届学生对书稿提出了很好的反馈意见，在此一并致谢。

由于作者水平有限，书中肯定还存在缺点和不妥之处，我们殷切地期望专家、读者随时给予批评与指教。

最后，谨将此书敬献给母校双甲子、我国流体机械及工程专业一甲子生日庆典！

张楚华 (chzhang@mail.xjtu.edu.cn)

琚亚平 (yapingju@mail.xjtu.edu.cn)

于西安交通大学

常用符号表

英文字母符号

符号	名 称	单位	符号	名 称	单位
$A、B、C$	速度梯度方程的系数		Pe	贝克来数	
a_{ij}	系数矩阵		Pr	普朗特数	
b_i	方程源项		p	压力	Pa
c	波速	m/s	q	热流密度	W/m ²
c_p	比定压热容	J/(kg·K)	$q、\varphi、m$	自然坐标	m、rad、m
c_v	比定容热容	J/(kg·K)	$\dot{q}$	内热源密度	J/(kg·s)
D	位移张量	s ⁻¹	q_m	质量流量	kg/s
D	界面扩导系数	kg/s	R	摩尔气体常数	J/(K·mol)
e	比热力学能	J/kg	$r、\theta、z$	绝对圆柱坐标	m、rad、m
F	界面质量流量	kg/s	$r、\varphi、z$	相对圆柱坐标	m、rad、m
f	单位质量的体积力	N/kg	r_c	子午流线曲率半径	m
G	放大因子		r_p	位置矢量	m
$G_{\bar{v}}$	湍流生成项	kg/(m·s ²)	S	二阶变形率张量	s ⁻¹
h	比焓	J/kg	S	对流扩散方程的源项	
I	二阶单位张量		s	比熵	J/(kg·K)
I_h^{2h}	限制算子		T	温度	K
I_{2h}^h	插值算子		t	周期,时间	s
i	转子焓	J/kg	t_φ	叶片周向厚度	m
$i_r、i_\theta、i_z$	圆柱坐标基矢量		u	水平速度	m/s
$k^{(2)}、k^{(4)}$	人工黏性系数		$u_1、u_2、u_3$	笛卡儿坐标基矢量	
L	特征长度	m	v	绝对速度	m/s
L_h	细网格上的差分算子		v	垂直速度	m/s
L_{2h}	粗网格上的差分算子		$v_r、v_\theta、v_z$	绝对速度圆柱分量	m/s
l	拟流线长度	m	w	相对速度	m/s
Ma	马赫数		$w_x、w_y、w_z$	相对速度笛卡儿分量	m/s
m	多变过程指数		$w_r、w_\varphi、w_z$	相对速度圆柱分量	m/s
N	叶片数		$x、y、z$	笛卡儿坐标	m
n	单位外法向		$Y_{\bar{v}}$	湍流破坏项	kg/(m·s ²)
n	转速	r/min	$\gamma_1、\gamma_2、\gamma_3$	笛卡儿坐标	m
P	二阶应力张量	Pa			

希腊字母符号

符号	名 称	单位	符号	名 称	单位
β	流动方向角	rad	$\xi、\eta、\zeta$	贴体坐标	
β_A	叶片角	rad	π	高阶张量	
γ	比热比		ρ	密度	kg/m ³
δ_{ij}	克罗内克符号		σ	流动倾斜角	rad
δv	微元系统的体积	m ³	τ	二阶黏性应力张量	Pa
δS	微元系统的表面积	m ²	v	运动黏度	m ² /s
ε	压比、误差		φ	相对角坐标	rad
ε_{ijk}	置换符号		ψ	q 线与 r 线夹角	rad
η_{pol}	多变效率		ω	旋转角速度矢量	rad/s
κ	热导率	W/(m·K)	ω	旋转角速度	rad/s
λ	特征法向		∇	梯度算子	m ⁻¹
λ	角动量	m ² /s	Γ	扩散系数	kg/(m·s)
$\lambda_1、\lambda_2、\lambda_3$	特征分量		Φ	输运变量	
μ	动力黏度	Pa·s			



角标符号

上角标	含 义	下角标	含 义
n	时间层	a	绝对流动
T	转置	c	对流参数
$'$	一阶导数	f	网格界面
$''$	二阶导数	f	流体
I	第一波特征	h	轮盘侧
II	第二波特征	n	单位外法向
0	流特征	nb	相邻节点
		P	主节点
		p	叶片压力面
		w	固壁
		W,E,S,N	左、右、上、下节点
		WW,EE	更远的左、右节点
		w,e,s,n	左、右、上、下界面
		l	层流
		s	叶片吸力面
			轮盖侧
		t	湍流
		0	总的,参考
		1	进口
		2	出口

目 录

前言

常用符号表

第 1 章 绪论	1
1.1 流体机械内流的特点	1
1.2 流体机械内流的研究方法	3
1.3 流体机械内流理论的发展	4
1.4 流体机械内流计算的作用	5
1.5 本书内容介绍	6
参考文献	7
第 2 章 张量的基本概念及运算	9
2.1 张量的定义	9
2.2 流体力学中常用的张量	10
2.3 笛卡儿张量分析	10
2.3.1 坐标基矢量	10
2.3.2 矢量的代数运算	11
2.3.3 矢量的微分运算	12
2.3.4 二阶张量举例	13
2.3.5 二阶张量的代数运算	19
2.3.6 二阶张量的微分运算	19
2.4 圆柱坐标系下的张量分析	20
2.4.1 圆柱坐标系的基本要素	20
2.4.2 圆柱坐标系下的张量运算	21
习题	25
参考文献	26
第 3 章 流体机械内部三维流动的基本方程	27
3.1 绝对流动	28
3.1.1 连续性方程	28
3.1.2 动量方程	29
3.1.3 能量方程	30
3.1.4 状态方程	31



3.1.5 理想流动的控制方程组	31
3.2 相对流动	32
3.2.1 绝对流动与相对流动的关系	33
3.2.2 相对流动的控制方程组	38
3.2.3 理想相对流动的控制方程组	38
3.3 笛卡儿坐标系下的相对流动控制方程组	39
3.4 圆柱坐标系下的相对流动控制方程组	40
3.5 定解条件	41
3.5.1 初始条件	41
3.5.2 边界条件	42
3.6 模型方程及性质	43
习题	46
参考文献	47
第4章 流体机械内部准三维流动理论	48
4.1 两类流面理论简介	48
4.2 速度梯度方程	50
4.3 S1 回转流面正问题	52
4.3.1 回转流面上的速度梯度方程	52
4.3.2 回转流面上的快速分析法	53
4.3.3 回转流面上的质量守恒方程	54
4.4 周向平均 S2m 流面反问题	55
4.4.1 子午面上的速度梯度方程	55
4.4.2 子午面上的质量守恒方程	56
4.5 离心叶轮叶片的准三维设计算例	57
4.5.1 叶轮主要设计参数	57
4.5.2 计算过程	57
4.5.3 环量分布对叶片型线及气动载荷的影响	60
习题	64
参考文献	64
第5章 平面叶栅二维流动理论	66
5.1 平面叶栅流动基本方程	66
5.1.1 平面叶栅模型	66
5.1.2 平面叶栅理想流动方程	67
5.2 一阶偏微分方程的特征理论	68
5.2.1 一维线性波动方程	68
5.2.2 一维非定常欧拉方程组	69
5.2.3 高维线性偏微分方程组	72
5.3 平面叶栅理想流动的特征分析	73
5.3.1 控制方程组的特征分析	73
5.3.2 边界上的特征分析	76
5.4 平面叶栅理想流动的定解条件及处理方式	80
5.4.1 边界条件	80
5.4.2 初始条件	82



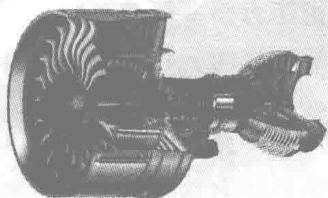
5.5 三维黏性流动定解条件的讨论	83
习题	84
参考文献	85
第6章 计算流体力学的数值方法	86
6.1 计算流体力学的发展简史	86
6.2 计算流体力学的基本过程	88
6.3 区域离散方法	91
6.3.1 网格的基本概念	91
6.3.2 贴体坐标网格的生成方法	93
6.4 有限差分法	96
6.4.1 泰勒级数展开式与有限差分	96
6.4.2 一维对流扩散方程的有限差分法	97
6.4.3 有限差分方程的数学特性	99
6.5 有限体积法	105
6.5.1 有限体积法的基本步骤	105
6.5.2 对流扩散方程的基本离散格式	107
6.5.3 对流扩散方程的高阶离散格式	113
6.5.4 高维对流扩散方程的离散格式	115
6.6 非定常项的离散格式	116
6.6.1 简单差分格式	116
6.6.2 多步格式	116
6.6.3 双重时间格式	118
6.7 代数方程组求解方法	118
6.7.1 TDMA 方法	119
6.7.2 PDMA 方法	120
6.7.3 ADI 方法	121
6.7.4 迭代方法	122
6.8 对流扩散方程的编程算例	122
习题	126
参考文献	128
第7章 时间推进法及其应用	129
7.1 气动方程组	129
7.1.1 绝对流动控制方程组的张量形式	129
7.1.2 相对流动控制方程组的张量形式	130
7.1.3 相对坐标系下的绝对流动方程的张量形式	130
7.1.4 笛卡儿坐标系下的流动控制方程组	131
7.2 Spalart-Allmaras 湍流模型	132
7.2.1 湍流输运方程	133
7.2.2 湍流黏度计算公式	133
7.2.3 湍流生成项	133
7.2.4 湍流破坏项	134
7.2.5 考虑旋转和弯曲的改进模型	134
7.2.6 模型常数	135





7.3 定解条件	136
7.3.1 初始条件	136
7.3.2 边界条件	137
7.4 数值方法	138
7.4.1 二阶中心格式	138
7.4.2 人工黏性	140
7.4.3 显式时间推进	141
7.4.4 加速收敛技巧	141
7.4.5 收敛准则	145
7.5 跨声速轴流压缩机转子内部三维可压缩湍流计算与分析	145
7.5.1 NASA Rotor37 简介	145
7.5.2 计算程序及参数设置	146
7.5.3 气动性能曲线	147
7.5.4 流场分析	148
参考文献	152
第8章 全速度压力修正法及其应用	155
8.1 笛卡儿坐标系下的流动方程及定解条件	155
8.2 非结构化网格上的全速度 SIMPLE 算法	156
8.2.1 非结构化网格上的方程离散	156
8.2.2 对流项的高阶离散格式	158
8.2.3 代数方程组解法	159
8.2.4 界面流速的动量插值法	159
8.2.5 全速度 SIMPLE 算法	160
8.2.6 计算流程	162
8.2.7 全速度算例考核	163
8.3 离心叶轮内部三维可压缩湍流计算与分析	164
8.3.1 NASA LSCC 简介	164
8.3.2 计算程序及参数设置	164
8.3.3 气动性能曲线	165
8.3.4 流场分析	165
参考文献	168





第 1 章

绪 论

1.1 流体机械内流的特点

流体机械的通流部件主要由交替排列的转子与静子组成，转子及静子上通常安装着空间扭曲的叶片，而且风机和泵的内部流动还是逆压流动。旋转、弯曲和逆压流动条件使得其内部流动非常复杂，具体流动特点介绍如下。

1. 三维流动

三维流动（或三元流动）是指流动参数为三个空间坐标的函数。首先，根据风机和泵的增压以及水轮机和风力机的降压特点，沿着流动方向上压力有变化，其他流动参数亦随之变化；其次，由于转子叶片的做功能力以及静子叶片的导流作用，转静子叶片两侧的压力面及吸力面之间存在压力差，使流动参数沿圆周方向发生周期性变化；最后，转子在不同叶高处的圆周速度不同，使得流动参数沿叶高方向上亦有变化。

受早期计算机条件及计算方法的限制，完全求解三维流动的计算量超出了当时的计算能力，故在历史上出现了一些简化的降维流动模型，并在流体机械内流分析及设计中发挥过重要作用。按照流动方程中的空间自变量从少到多，计算量从小到大，流体机械内流理论模型先后从早期的通流横截面平均的一维模型，叶栅及子午面上的二维方法，基于两类流面理论的准三维方法，发展到目前广泛应用的全三维方法。相应地，按照不同的流动模型所设计出的流体机械性能水平具有明显差异，以典型离心压缩机模型级的设计效率为例，采用一维模型的设计效率一般低于 80%，准三维方法可以达到 80% ~ 82%，全三维方法可以提高到 84% ~ 87%。

2. 黏性流动

实际流体总是有黏性的，而流体的黏性与流动损失密切相关。流体的黏性效应首先体现在沿着叶片及环端面等固壁表面的边界层内，边界层内流动速度变化剧烈，黏性摩擦损失主要发生在边界层内；当边界层内的低速流体无法克服逆压梯度时还会发生分离流动现象，出现分离损失、冲击损失；叶片下游的尾流区与主流区互相掺混过程中还会产生尾迹损失。此外，在与主流方向垂直的截面上压力分布并不均匀，压力面与吸力面之间的压力差驱动周向



二次流,叶道内外壁方向上的压力差驱动叶展方向上的二次流,通流部件中的主流与二次流相互作用,产生复杂的二次流损失;实际转动部件与静止部件之间总留有一定的间隙,对于半开式叶轮,叶顶附近的流体在叶片两侧压力差的驱动下,将由压力面一侧通过叶顶间隙流向吸力面一侧,导致叶顶间隙流损失;闭式叶轮的轮盖外侧与机匣之间、轮盘外侧与隔板之间的间隙流动还会导致泄漏损失以及轮阻损失等。

上述各类黏性流动现象相互耦合、相互影响,如何定量描述这些黏性流动现象,并建立起可靠的流动损失模型是分析设计流体机械的关键。尤其是流体机械内部黏性流动一般表现为湍流,这一因素更增加了研究黏性流动及其流动损失的难度。按照流动控制方程来分,流体机械内部黏性流动理论及计算模型有:近似黏性流动方程(如边界层流动方程);完全黏性流动纳维-斯托克斯(Navier-Stokes)方程组。按照湍流计算方法来分有:代数湍流黏性系数模型、一方程模型、两方程模型、雷诺应力模型、大涡模拟和直接数值模拟等。其中,Spalart-Allmaras 方程模型、 $k-\varepsilon$ 两方程模型以及 $k-\omega$ 两方程模型经过大量的计算实践与模型完善后,已在各类流体机械内流分析与设计领域中获得了广泛应用,而基于大涡模拟及直接数值模拟的湍流计算方法由于计算量太大,目前只能用在简单湍流计算当中,与流体机械内部复杂黏性湍流分析设计的实际应用尚有很大距离。

3. 非定常流动

引起流体机械内部非定常流动的主要因素包括:动静叶片排相互干扰、叶片振动、分离流动、变工况运行及湍流脉动。按照非定常流动结构随时间的变化速度由快到慢,空间尺寸由小到大,流体机械内部非定常流动现象主要表现在湍流脉动、尾缘涡脱落、尾迹—叶片相互干扰、颤振、时序效应、旋转失速、喘振及瞬态工况等宽广变化范围内的非定常流动结构,其中,从最小的湍流脉动结构,到最大的瞬态工况流动结构(发生在启动、停机、调节、进口畸变等动态过程)的时空尺度跨越5、6个数量级。这些复杂的具备不同时空尺度及各自发展支配规律的三维非定常流动结构相互耦合和激励,构成了流体机械特有的非定常流动现象和丰富的科学内涵。

目前的计算机运算能力及计算方法尚不能完全刻画出上述时空尺度跨越5、6个数量级的非定常流动结构。为了便于应用,常用的近似计算模型可分成如下两大类:

(1) 准定常模型 主要包括混合平面法与叶道平均法。混合平面法假设所有流动参数在一个叶片通过周期内的平均值与定常流动数值解近似相等,这样就可以先分别求解转子单个叶道内部的相对定常流动,以及静子单个叶道内部的绝对定常流动,然后在动静叶片排之间的交界面(即混合平面)上进行界面平均计算后交换流动参数,从而实现多级定常流动联算。叶道平均法也叫作确定应力模型,它将非定常流场参数分解成叶道平均定常部分与脉动部分,然后将非定常流动方程组经过周期积分后转换为定常流动方程组,但其中包括由叶片排相对旋转引起的脉动应力项。

(2) 非定常模型 流体机械转子的叶片数与静子的叶片数一般并不相等,这给非定常流动计算造成很大困难,近似解决方案是在每个时间步上,先分别求解转子及静子内部的非定常流场,然后通过滑移网格方法在动静交界面上衔接、转换非定常流动参数,例如:①模型缩放法,在保证叶片稠度不变的原则下,适当放大或缩小转子及静子叶片几何尺寸,这样可用部分环叶道,即较少的叶片数近似模拟整圈非定常流动;②相偏移法或时间倾斜算子法,通过适当改造周期性边界条件,同样用较少的叶片数近似模拟整圈非定常流动;③多级



整圈非定常流动模型,这种方法在每个时间步上求解整圈叶片排内的非定常流动,这样可以准确模拟旋转失速、喘振等大尺度非定常流动结构,但其计算量很大,往往需要借助于并行计算机才能加以解决。

4. 可压缩性

透平压缩机和高速鼓风机的转速一般比较高,当内部气体流动马赫数高于0.3时需要考虑气体可压缩性的影响。按照马赫数从小到大,风机内部可压缩流动可分为亚声速流动($0.3 < Ma < 1.0$)、跨声速流动(Ma 在1附近)、超声速流动($Ma > 1$)。这三类可压缩流动的物性、数学方程及计算方法有着很大的不同,在边界层以外,亚声速流场中的扰动波是无界的,对应的无黏定常流动控制方程为椭圆型,适合于中心格式计算;在超声速流场中的扰动限制在马赫锥以内,对应的方程为双曲型,适合于迎风类格式计算;跨声速流场中会出现激波间断面,其流动方程为混合型。在边界层内,通过激波的逆压流动和边界层流动相互作用,可能会诱发边界层分离,激波损失加剧。

可压缩流动的数值求解一般采用时间推进法,无论是亚声速流动、跨声速流动,还是超声速流动,非定常无黏流动方程组总是双曲型的,非定常黏性流动方程组总是抛物型的,数学方程的统一给数值计算方法带来很大的便利。

5. 其他特征

根据应用领域的不同,流体机械内部流动还会出现其他一些流动特征。如在化工、空分、制冷低温等行业中的离心压缩机,其工作介质的热物性偏离理想气体,需要考虑实际气体效应;在冶金、水泥等行业中风机内部气流还夹带着粉尘和固体颗粒,需要考虑气-固两相流动问题;在水轮机、泵中还会发生气蚀现象,需要考虑气-液两相流动问题。

1.2 流体机械内流的研究方法

如上所述,流体机械内部流动非常复杂,包含着丰富的科学内涵,受到了流体机械以及所配套的燃气轮机、航空发动机、化工机械等行业和学科领域的高度重视。与其他技术科学类似,流体机械内部流动的研究方法主要分成三个分支,即理论分析法、实验测量法及数值计算法,具体来讲,包括:

(1) 流体机械内流理论 即从质量、动量、能量三大守恒定律出发,利用张量分析、数学物理方程等数学工具,并针对流体机械动静叶片排相间排列的特点,建立起流体机械内部绝对流动和相对流动的控制方程组及其相应的定解条件。由于流体机械内流的复杂性,很难找出其解析解,同时受计算机条件和计算方法的限制,其数值解的计算量及计算精度也需要仔细考虑。受此影响,需要对流体机械内流的物理模型及控制方程组进行必要的简化分析,如平面叶栅流动模型、无限多叶片通流模型,以及由我国学者吴仲华提出的两类流面模型,这些简化模型在流体机械内流理论及其分析设计方法的发展历史中发挥过极其重要的作用。

(2) 流体机械内流测试技术 即在实验室环境下,利用压力传感器、温度传感器、探针、热线(膜)仪、激光多普勒测速仪、图像粒子测速仪、压敏涂层技术等流场测试手段,通过放大、缩小或原型实验,获得流体机械内流场的实验数据。自20世纪70年代以来,无介入式流速测量技术,尤其是三维激光多普勒测试技术的引入为研究流体机械旋转部件内部三维流动提供了一批可靠的流速测量数据,如德国航空航天中心(DLR)公开发布了 Krain



高亚声速离心叶轮、跨声速分流叶片式离心叶轮, 以及美国航天航空管理局 (NASA) 公开发布了低速大尺寸 NASA-LSCC 离心叶轮、高亚声速分流叶片式离心叶轮 NASA-CC3、跨声速轴流风扇转子 NASA-Rotor67、跨声速轴流压缩机转子 NASA-Rotor37、跨声速轴流压缩机模型级 NASA-Stage37 的详细实验数据, 包括完整的几何参数、运行条件、性能曲线及流动测量数据等, 这些实验成果及其公开发布为深入认识流体机械内部流动规律, 验证和发展流体机械内流理论与计算方法起到了推动作用。

(3) 流体机械内流计算方法 即利用计算流体动力学方法求解流体机械内流控制方程组或其简化形式, 从而获得流体机械内流场的数值解, 目前已成为流体机械内流分析与设计的重要手段。由于流体机械内流的复杂性、理论模型及其简化形式的多样性、计算流体力学方法的广泛性, 在流体机械内流计算领域中出现了众多的计算模型与方法, 这些模型与方法有各自的优势与缺点, 需要根据计算目的、应用场合加以取舍。其中由 Patankar 提出的压力修正算法、由 Jameson 发展的基于密度的显式时间推进法是最具代表性的两类计算流体力学方法, 已成为众多计算流体力学软件、自主研发流场计算程序的主流数值方法, 在流体机械内流计算领域, 尤其是性能预测与优化设计中获得了广泛应用。

显然, 上述三种研究手段相辅相成、缺一不可。理论分析是基础, 对实验测量、数值计算起理论指导意义; 实验测量对理论模型及其简化处理方式、数值计算结果起验证与完善作用; 数值计算则拓展了理论分析、实验测量的研究范围。

1.3 流体机械内流理论的发展

按照流动方程从低维到高维、计算量从小到大来分, 流体机械内流理论模型从早期的截面平均一维经验模型、叶栅/子午面上的二维流动理论, 基于两类流面的准三维流动理论, 发展到目前广泛应用的全三维流动理论, 而关于三维非定常流动理论目前仍处于探索阶段。

1. 一维流动模型

第二次世界大战以后, 航空工业的飞速发展, 尤其是跨声速航空发动机的研制需求, 对透平压缩机气动理论与计算方法提出了重大需求。受当时计算机条件不发达的限制, 研究人员为了能够简便快速地获得透平压缩机的大致气动性能和主要流动规律, 采用了较为简单的一维流动模型。根据空间自变量的选取方向, 这种模型主要有两类, 一类是沿流动方向上的一维流动, 即取各流道的中心流线作为坐标, 所有气动热力参数都看成中心流线长度的函数 (即气动热力参数取为与中心流线垂直的横截面上的平均值); 另外一类是沿半径方向上的一维流动, 其方程即为简单径向平衡方程, 该方程主要用在轴流压缩机气动方案设计中, 把动静叶片排间的轴向间隙流动分布简化为只是半径的函数。

2. 二维流动理论

为了改进上述的一维计算模型, 但同时为了避免直接求解全三维流动, 人们便发展了二维计算模型。它的基本特点是: 在一维流动的基础上, 再增加考虑另外某个方向的流场变化。根据二维空间的几何特性, 这种模型通常分为两类: 一类是平面叶栅模型, 在叶片高度适中、子午通道扩张角度较小的条件, 轴流压缩机内部气流基本沿着圆柱面上流动, 进一步在叶片数无限多的假设条件下, 展开圆柱面流面, 即可形成平面叶栅模型。另外一类是通流理论, 即无限多叶片理论, 该理论假设叶片数目无限多、叶片厚度忽略不计, 介于相邻叶片



间的流面形状趋近于叶片中心面,叶片的作用则通过另行引入一个假想的质量力场来描述,于是只需求解该极限流面上的流动就可以获得叶道内大致流动情况。这两类二维模型其实就是下述准三维流动理论中的任意 S1 回转流面及周向平均 S2m 流面的雏形。

3. 准三维流动理论

为了能够较为简单地求解叶轮机械内的三维流动,吴仲华在 20 世纪 50 年代提出了基于两类流面(S1 流面和 S2 流面)的三维流动理论,该理论将叶轮机械内部三维流动分解为若干个 S1 流面及若干个 S2 流面上的二维流动,并通过迭代求解这两族流面上的二维流场获得叶轮机械内部全三维流动的细节。其中 S1 流面是以旋转轴为中心的同一圆弧上各流体质点的流线所形成的流面;S2 流面是由同一径向线上各流体质点的流线所形成的流面。一般来说,S1 流面并非回转面,S2 流面也并非与叶片中线面或叶片表面相切,它们都是复杂的空间曲面,需要在流面流动计算中迭代修正两类流面的空间形状。

基于两类流面的全三维流动理论的简化形式,即准三维流动理论,在流体机械反问题中获得了普遍应用。反问题是相对正问题而言的:正问题是给定几何参数与运行条件,求解内部流动分布,属于分析问题;反问题是给定部分流动参数,反求出几何形状和其他流动参数,属于设计问题。基于准三维流动理论的反问题一般是这样给定的:将 S1 流面简化为一些回转面,其初始形状根据子午面流面的形状估定,在迭代计算中通过旋转 S2 流面上的若干条流线来修正;而对于 S2 流面,只取一个周向平均 S2m 流面进行计算,其初始形状取为叶片中心面(叶片数越多越相似),在迭代计算中根据 S1 回转流面上的中间流线形状加以修正。如此迭代循环,直至 S1 回转流面及周向平均 S2m 流面的几何形状不再变化为止。在反问题设计中,需要给定 S2m 流面上的控制参数分布,如在“全可控涡”设计方法中给定角动量,即环量的分布。

4. 全三维黏性流动理论

在 20 世纪 80 年代以前,流体机械内流分析基本上是在无黏流动的框架下开展的。由于无黏假设改变了流体的基本物理属性,许多重要的流动现象无法通过无黏数值模拟得到,如“射流/尾迹”结构、尾迹的形成和传播、边界层的发展和分离等。自进入 20 世纪 90 年代以来,为了能够准确理解流体机械内部的三维细微结构,提高其流动性能,国内外许多研究者采用湍流模型来模拟流体机械内部实际三维黏性流动。每一种湍流模型都有其适用范围,没有一种湍流模型能够适用于所有黏性流动情况。尽管如此,湍流模型的引入在一定程度上提高了流体机械的分析与设计水平。作为全三维黏性流动的主要研究方法,计算流体力学(CFD)正朝着商品化和实用化的方向发展,许多 CFD 商用软件,如 Ansys-Fluent、Ansys-CFX、Numeca 等都提供了专门的流体机械内流计算模块,应用这些 CFD 商业软件有效地加速了先进流体机械的研制进程。

1.4 流体机械内流计算的作用

随着计算机技术日新月异的发展和计算方法的逐步完善,计算流体力学方法已成为计算机辅助工程(CAE)中最重要的分析工具之一。计算流体力学的应用领域主要分为两大类:外流及内流。流体机械内流计算则是计算流体力学在内流中应用最广的领域之一。

工业流体机械正朝着大型化、高压比、高效率、高转速、宽工况、低噪声等方向发展,



计算流体力学已在先进流体机械研发过程中发挥着无法替代的重要作用。具体来讲,流体机械内流计算的作用主要表现在如下几个方面。

(1) 流体机械内流规律及损失机理的认识 通过流场计算,可以获得流体机械内部流动参数在时间及空间上的分布细节,为深入认识流体机械内部复杂流动现象和流动损失机理提供有用的流动数值解,从而能够定量分析流动规律,并发展和完善流动损失模型。

(2) 流体机械性能预测与优化设计 通过流场计算结果的后处理,能够获得流体机械主要部件或者整机的流动性能参数,包括进出口的压力、流量、效率、功率等性能参数,从而获得流体机械在不同转速下的性能曲线。目前流体机械内流计算方法及软件对设计点的性能预测精度较高,与性能试验的测量值误差在2%左右,能够满足一般工程分析要求,可以用于流体机械优化设计中的多“电子样机”的性能预测。但在偏离设计点时,尤其在接近喘振或堵塞点情况下,通流部件中出现明显的三维非定常分离流动现象,计算误差增大,约在2%~5%范围内。

(3) 流体机械安全运行与控制 流体机械具有旋转、弯曲、逆压等运行特点,其内部流动在非设计工况下运行时会出现三维非定常分离现象,进而导致旋转失速、喘振等明显的非定常、非稳定过程,对流体机械及系统管网造成低频大尺度非定常流体作用力。同时,旋转叶片周期性扫过上游静子叶片尾迹的过程中,受到了高频小尺度非定常气动交变应力,对流体机械的长期安全可靠运行构成严重威胁。开展流体机械安全可靠运行方法及其控制技术的研究,需要开展流体机械内流计算工作。

(4) 流体机械降噪 由涡流脉动引起的流动噪声是发展低噪环保型流体机械技术的重要内容,为了获得涡流脉动及其流动噪声源分布,需要开展流体机械内流尤其是非定常流的计算工作。

1.5 本书内容介绍

流体机械内流理论与计算的理论性较强,无论是理论模型的推导与简化、边界条件的给定与处理,还是计算格式的设计与分析,都离不开较深的数学、力学知识,如张量分析、数学物理方程、流体力学等。如果忽略了理论知识学习而盲目计算,不仅事倍功半,而且计算还可能得到不正确的结果,甚至计算过程发散。再者,计算流体力学的实践性和经验性很强,这主要是由于流动控制方程组的非线性、湍流模型的经验性、计算条件的局限性所造成的。此外,在流体机械内流设计中,一些重要的简化模型,如准三维流动模型,仍然具有广泛的工程应用市场,其中所采用的经验模型的有效性和可靠性还需要借助于计算流体力学的实践检验。正确的做法是在重视理论知识学习的同时,需要进行必要的上机编程实践或者利用CFD商业软件解决一些实际流动问题。

本书取名为《流体机械内流理论与计算》,顾名思义,内容包括两大部分:流体机械内流理论以及流体机械内流计算,从第2章到第5章为理论部分,从第6章到第8章为计算部分。下面简要说明第2章及以后各章的主要内容。

第2章是张量概念与运算的基本知识。考虑到在流体机械内流理论中要利用到大量的张量运算及其在各种坐标系尤其是圆柱坐标系下的分量表达式,而理解张量知识对于工科背景的学生和科技人员而言具有一定的难度,为此,本章由简入难,首先介绍最简单的笛卡儿坐



标系下的张量概念及其代数运算与微分运算知识,然后再将这些内容推广到圆柱坐标系中。本章的重点和难点是二阶应力张量的物理意义及其与表面力之间的关系,其次是在圆柱坐标系下的张量微分运算关系式及其坐标基矢量沿圆周方向的导数。

从第3章到第5章中分别介绍流体机械的全三维流动理论、准三维流动理论和二维流动理论,并详细给出了从全三维流动理论出发建立准三维和二维流动理论的简化思想和推导过程。第3章是流体机械全三维流动理论,重点介绍绝对流动和相对流动之间的变换关系式,以及这两种流动的控制方程组的张量形式和分量形式。考虑到在理想无黏绝热流动在流体机械内流初步分析设计中也有应用,还推导了理想流动控制方程组的简化代数方程。

第4章是基于两类流面的流体机械准三维流动理论,重点研究基于S1回转流面和周向平均S2m流面的准三维设计方法。首先介绍S1流面和S2流面的基本思想以及基于该两类流面的全三维和准三维流动理论的基本概念和求解方法;然后研究S1回转流面正问题和周向平均S2m反问题的流线曲率法;最后给出了离心压缩机叶轮的准三维流动设计算例。

第5章是平面叶栅的二维流动理论,着重研究理想流动的特征理论和定解条件问题。本章利用一阶拟线性偏微分方程组的特征分析方法,结合平面叶栅模型,解决非定常可压缩理想流动的物理边界条件和计算边界条件问题,还分析了三维黏性流动的定解条件问题,以及理想流动和黏性流动定解条件的主要异同点。

第6章介绍计算流体力学中的区域离散方法、方程离散方法和代数方程组求解方法,着重研究有限差分法和有限体积法的离散格式。考虑到编程实践环节的重要性,本章最后还专门安排了一节介绍对流扩散方程的编程算例,考核稳定性条件对计算流体力学方法的重要性。

第7章和第8章分别研究时间推进法和压力修正算法,这两种数值方法是应用计算流体力学中最典型的方法,也是流体机械内流计算的主流方法。第7章着重介绍三维可压缩湍流的时间推进法以及若干加速收敛技术,并利用这些方法编程计算了典型跨声速轴流压缩机转子NASA-Rotor 37内部流动,验证该数值方法和计算程序的有效性。第8章着重研究非结构化网格上的全速度SIMPLE算法,同时还介绍非结构化网格上高阶离散格式的构造方法,并对离心压缩机叶轮NASA LSCC内部流动及气动性能进行数值计算。

参 考 文 献

- [1] Wu C H. A General Theory of Three-dimensional Flow in Subsonic and Supersonic Turbomachines of Axial-, Radial-, and Mixed-flow Types [R]. NACA TN-2604, 1952.
- [2] 刘高联,王甲升. 叶轮机械气体动力学基础 [M]. 北京:机械工业出版社,1980.
- [3] 苗永森,王尚锦. 径、混流式三元叶轮“全可控涡”设计的理论和方法 [J]. 工程热物理学报, 1981, 2 (2): 157-159.
- [4] Casey M V, Robinson C. A New Streamline Curvature Throughflow Method for Radial Turbomachinery [J]. ASME Journal of Turbomachinery, 2010, 132 (3): 031021-1-10.
- [5] Zangeneh M. Inviscid-viscous Interaction Method for Three-dimensional Inverse Design of Centrifugal Impellers [J]. ASME Journal of Turbomachinery, 1994, 116 (3): 280-290.
- [6] Denton J D. Loss Mechanisms in Turbomachines [J]. ASME Journal of Turbomachinery, 1993, 115: 621-656.

