

径流式叶轮机机械理论及设计

Theory and Design of Radial

Flow Turbomachinery

杨策 施新 著

国防工业出版社

·北京·

致 读 者

本书由国防科技图书出版基金资助出版。

国防科技图书出版工作是国防科技事业的一个重要方面。优秀的国防科技图书既是国防科技成果的一部分,又是国防科技水平的重要标志。为了促进国防科技和武器装备建设事业的发展,加强社会主义物质文明和精神文明建设,培养优秀科技人才,确保国防科技优秀图书的出版,原国防科工委于1988年初决定每年拨出专款,设立国防科技图书出版基金,成立评审委员会,扶持、审定出版国防科技优秀图书。

国防科技图书出版基金资助的对象是:

1. 在国防科学技术领域中,学术水平高,内容有创见,在学科上居领先地位的基础科学理论图书;在工程技术理论方面有突破的应用科学专著。
2. 学术思想新颖,内容具体、实用,对国防科技和武器装备发展具有较大推动作用的专著;密切结合国防现代化和武器装备现代化需要的高新技术内容的专著。
3. 有重要发展前景和有重大开拓使用价值,密切结合国防现代化和武器装备现代化需要的新工艺、新材料内容的专著。
4. 填补目前我国科技领域空白并具有军事应用前景的薄弱学科和边缘学科的科技图书。

国防科技图书出版基金评审委员会在总装备部的领导下开展工作,负责掌握出版基金的使用方向,评审受理的图书选题,决定资助的图书选题和资助金额,以及决定中断或取消资助等。经评审给予资助的图书,由总装备部国防工业出版社列选出版。

国防科技事业已经取得了举世瞩目的成就。国防科技图书承担着记载和弘扬这些成就,积累和传播科技知识的使命。在改革开放的新形势下,原国防科工委率先设立出版基金,扶持出版科技图书,这是一项具有深远意义的创举。此举势必促使国防科技图书的出版随着国防科技事业的发展更加兴旺。

设立出版基金是一件新生事物,是对出版工作的一项改革。因而,评审工作需要不断地摸索、认真地总结和及时地改进,这样,才能使有限的基金发挥出巨大的效能。评审工作更需要国防科技和武器装备建设战线广大科技工作者、专家、教授,以及社会各界朋友的热情支持。

让我们携起手来,为祖国昌盛、科技腾飞、出版繁荣而共同奋斗!

国防科技图书出版基金
评审委员会

国防科技图书出版基金 第四届评审委员会组成人员

名誉主任委员 陈达植

顾问 黄 宁

主任委员 刘成海

副主任委员 王 峰 张涵信 张又栋

秘书长 张又栋

副秘书长 彭华良 蔡 镛

委员 于景元 王小谟 甘茂治 冯允成

(按姓氏笔画排序) 刘世参 杨星豪 李德毅 吴有生

何新贵 佟玉民 宋家树 张立同

张鸿元 陈火旺 侯正明 常显奇

崔尔杰 韩祖南 舒长胜

前 言

径流式叶轮机械是叶轮机械中的主要组成部分。叶轮机械作为主要部件广泛应用于各工业领域,是完成能量转换的主要设备。长期以来,研究人员一直致力于研究径流式叶轮机械的理论和设计方法,取得了可喜的成果。在实验方面,国外一些研究机构的科研人员使用激光测量系统完成了径流式叶轮机械内部流场的实验研究,这些实验结果极大地丰富了对径流式叶轮机械内部流动机理的认识,使径流式叶轮机械理论得到了进一步完善。在数值计算方面,随着计算机运行速度和计算流动动力学研究水平的提高,在20年前即实现了采用计算程序完成对径流式叶轮机械内部全三维黏性流场的数值模拟。采用数值计算方法获得的计算结果有很大一部分是依靠实验手段所无法获得的。目前,计算程序已经发展到计算叶轮机械内部非定常流场的水平,在叶轮机械内部流动机理的研究中,数值计算方法发挥着越来越重要的所用。

采用数值计算和实验对径流式叶轮机械内部流场进行研究的目的是为了提高径流式叶轮机械的设计水平。今天,世界上一些著名的研究机构均已使用比较完善的径流式叶轮机械计算机集成设计系统设计径流式叶轮机械,这些设计系统的建立有效地缩短了设计时间,减小了设计风险,降低了设计成本。目前,这种计算机集成设计系统还在不断地发展和完善之中。

和国外相比,国内在径流式叶轮机械的理论和设计方法研究方面还存在着一定的差距。我们在理论方面所取得的原创性成果还不很丰富,在设计方法方面还没有一套成熟的商业软件用于径流式叶轮机械的设计领域。有鉴于此,很有必要写一本介绍径流

式叶轮机械理论及设计方法的书籍,达到丰富国内关于径流式叶轮机械设计方法的目的。

本书是作者在多年研究的基础上,结合大量参考文献编著而成,力求通过本书反映目前径流式叶轮机械理论及设计方法发展水平,使读者在阅读后能够了解掌握径流式叶轮机械的设计方法。由于叶轮机械理论和设计方法是密不可分的,因此本书前半部分简要介绍叶轮机械理论,后半部分是关于径流式叶轮机械的设计方法。

全书分 10 章,第 1 章介绍了径流式叶轮机械的应用实例,目的是对径流式叶轮机械的应用范围有一个较为全面的认识。第 2 章是叶轮机械多维气体动力学方程,在这一章中给出了多种叶轮机械研究中使用的控制方程形式。由于湍流模型在叶轮机械内部流场计算的研究中占有非常重要的地位,因此还给出了多种叶轮机械内部流场计算中广泛使用的湍流模型,包括代数湍流模型和双方程模型。在过去的十几年里,叶轮和扩压器之间的相互匹配关系一直是离心压气机设计中的一个难点,也是一个研究热点,为此在第 3 章中专门对离心压气机叶轮和扩压器之间的匹配问题进行了介绍。第 4 章是关于叶轮机械内叶尖间隙泄漏流动机理内容。考虑到轴流式叶轮机械和径流式叶轮机械叶尖间隙泄漏流动的成因是相同的,因此本章的内容并不局限于径流式叶轮机械,也包括很多轴流式叶轮机械的内容,这将有助于读者全面了解叶轮机械叶尖间隙泄漏流动机理。第 5 章是离心压气机初步设计分析,重点是离心压气机叶轮进出口尺寸和流动参数的确定原则等内容。第 6 章是径流式涡轮初步设计及分析。这一章的重点是关于径流式涡轮进出口几何尺寸和一些气动参数的确定原则。第 5 章和第 6 章的内容并不是完全建立在经验基础上,大部分结论都是在经过理论推导后得到的。第 7 章和第 8 章分别是关于离心压气机的性能预测和径流涡轮的性能预测方法。其中第 8 章提出了结合准三元流动分析的涡轮性能预测方法。第 9 章是关于叶轮叶片成型方法的内容。由于压气机叶片成型方法和涡轮叶片成型方

法相同,因此这一章主要介绍了离心压气机叶片的成型方法。第10章论述了CFD方法在现代叶轮机械内部流场计算中的应用。由于轴流和径流叶轮机械内部流场计算方法相同,为了使读者对CFD在叶轮机械内部流场应用有一个全面的认识,这一章的内容并不局限于在径流式叶轮机械中的应用,而是以很大篇幅介绍了在轴流式叶轮机械中的应用。

本书第1章至第5章、第6章6.3节、第7章、第9章、第10章为杨策编写。第6章6.1节、6.2节、6.4节、6.5节及第8章为施新编写。

本书面向所有研究透平机械理论和设计方法的科技人员,也可以作为动力机械及工程专业高年级本科生和研究生的参考书。

作者感谢清华大学热能工程系蒋滋康教授,中国科学院工程热物理研究所王正明教授的审稿和推荐,感谢他们对本书初稿提出的宝贵意见。感谢总装备部国防科技图书出版基金评审委员会提供资助,使本书得以出版。

限于作者水平,不当之处恳请读者批评指正。

作者
于北京

目 录

第 1 章 概论	1
1.1 径流式叶轮机械的发展历史	1
1.2 径流式叶轮机械的应用实例	4
1.2.1 过程压缩机	4
1.2.2 涡轮增压器	9
1.2.3 燃气轮机	12
1.2.4 径流式叶轮机械在泵中的应用	14
第 2 章 叶轮机械多维气体动力学方程	16
2.1 运动方程	16
2.1.1 积分形式运动方程	16
2.1.2 微分形式运动方程	17
2.1.3 直角坐标系中 $N-S$ 方程的守恒形式	19
2.2 湍流及湍流模型	24
2.2.1 湍流的基本概念	24
2.2.2 湍流模型	27
2.3 旋转坐标系下的控制方程	37
2.4 考虑黏性的叶轮机械内基本方程	44
2.5 任意曲线坐标系中的 $N-S$ 方程	46
参考文献	52
第 3 章 离心压气机叶轮与有叶扩压器的匹配	55
3.1 不同扩压器喉部面积与叶轮的匹配	55
3.2 改变叶轮与扩压器之间间隙的研究	58
3.3 气动叶型扩压器与叶轮的匹配	64

3.4 其他影响扩压器与叶轮匹配的因素	73
参考文献	77
第4章 叶轮机械叶尖间隙泄漏流动机理	78
4.1 引言	78
4.2 理论模型方法	79
4.2.1 Rains 模型	80
4.2.2 Lakshminarayana 刚体涡模型	81
4.2.3 Kirtley 模型	82
4.2.4 Chen 模型	83
4.3 透平叶栅和透平转子叶尖间隙泄漏流动机理	89
4.3.1 攻角及间隙变化对透平叶栅叶尖间隙 泄漏流动的影响	89
4.3.2 透平叶栅叶尖间隙内流动参数分布	91
4.3.3 端壁移动对涡轮叶片叶尖间隙泄露流动 的影响	94
4.3.4 透平叶栅和透平转子叶尖间隙泄漏流动 机理的总结及展望	99
4.4 压气机叶栅和压气机转子叶尖间隙泄漏流动机理	100
4.4.1 压气机叶栅叶尖间隙泄漏流动	101
4.4.2 低速压气机转子叶尖间隙泄漏流动	103
4.4.3 压气机转子内的涡破碎流动现象	106
4.4.4 叶尖顶部间隙变化对压气机性能的影响	112
4.4.5 高速压气机转子叶尖间隙泄漏流动	113
4.4.6 压气机叶栅和转子叶片顶部间隙泄漏流动 研究总结及展望	120
4.5 叶尖顶部间隙泄漏流动研究常用计算方法	121
4.6 总结	122
参考文献	122
第5章 离心压气机初步设计及分析	126
5.1 叶轮进口设计	126

5.1.1 叶轮进口气动参数之间的关系	126
5.1.2 诱导轮	128
5.1.3 诱导轮的堵塞	133
5.1.4 跨声速诱导轮	135
5.2 叶轮出口设计	136
5.2.1 滑移因子的计算	136
5.2.2 出口参数的确定	141
5.3 离心压气机初步设计中的几个无量纲参数	154
5.4 初步设计总结	157
5.5 扩压器初步设计	161
5.5.1 无叶扩压器	162
5.5.2 有叶扩压器	171
参考文献	177
第6章 径流涡轮初步设计及分析	179
6.1 径流涡轮的工作原理	179
6.2 静子初步设计	180
6.2.1 涡壳	181
6.2.2 导流叶片	185
6.3 叶轮初步设计	186
6.3.1 叶轮进口设计	187
6.3.2 最小叶片数目确定原则	195
6.3.3 叶轮出口设计	198
6.4 比转速在设计中的应用	205
6.5 涡轮损失	208
参考文献	210
第7章 离心压气机性能预测方法	212
7.1 引言	212
7.2 数学模型	214
7.2.1 叶轮入口(截面1)计算	214
7.2.2 叶轮出口(截面2)计算	216

7.2.3 叶轮出口和扩压器入口(截面3)间区域计算	218
7.2.4 扩压器出口(截面5)气流参数的计算	221
7.2.5 压气机喘振边界的预测	223
7.2.6 堵塞点的计算	223
7.3 叶轮机械性能预测方法评估	223
7.4 离心压气机内损失特点	225
7.5 各种损失模型	228
7.5.1 叶片表面摩擦损失	229
7.5.2 叶片载荷损失	229
7.5.3 叶片尾迹混合损失	230
7.5.4 转子顶部间隙损失	232
7.5.5 轮盘摩擦损失	232
7.5.6 有叶扩压器内损失	232
7.5.7 扩压器出口损失	233
7.5.8 泄漏损失	234
7.6 性能预测计算步骤	235
7.7 计算实例及计算结果分析	235
参考文献	239
第8章 径流涡轮性能预测	241
8.1 概述	241
8.2 流动损失模型	242
8.2.1 涡壳损失模型	243
8.2.2 叶轮进口攻角损失模型	245
8.2.3 叶轮流动损失模型	247
8.3 应用叶轮准三元流动分析的涡轮性能预测	250
8.3.1 影响涡轮叶轮边界层稳定性的因素	251
8.3.2 涡轮叶轮准三元速度分布评价方法	257
8.3.3 涡轮叶轮损失模型的改进	261
参考文献	263
第9章 叶轮叶片造型方法	264

9.1 叶片造型应注意的问题	264
9.2 离心压气机叶轮几何成型方法简介	265
9.3 叶片造型过程	267
9.3.1 初始流场的计算	267
9.3.2 叶片表面载荷分布的定义	269
9.3.3 叶片中间流面上环量 rC_θ 分布方式	269
9.3.4 轮缘曲线叶片中型线周向坐标的计算	274
9.3.5 直线元叶片中型面的构建	277
9.3.6 叶片叶型表面坐标的求解	282
9.3.7 流场内速度的计算—流线曲率法	282
9.3.8 叶轮叶片成型过程总结	286
9.4 径流式叶轮机械设计的全三维反问题简介	286
9.5 径流式叶轮机械计算机辅助集成设计系统	288
参考文献	294
第 10 章 CFD 方法在叶轮机械内部流场计算中的应用	296
10.1 CFD 方法在叶轮机械内部流场计算中的发展 简介	296
10.2 叶轮机械 S_1 和 S_2 流面计算	299
10.2.1 叶轮机械 S_2 流面计算	299
10.2.2 S_1 流面准三维计算	304
10.3 时间推进法	306
10.3.1 显式时间推进法的应用	309
10.3.2 隐式时间推进法的应用	321
10.4 压力修正法	324
10.5 现代叶轮机械 CFD 方法的评估	330
10.5.1 第一个网格点与壁面无量纲距离 y^+	332
10.5.2 网格数目的选取	333
10.5.3 湍流模型	334
参考文献	336
符号表	343

Contents

Chapter 1	Introduction to turbomachines	1
1.1	Development of radial flow turbomachines	1
1.2	Applications of radial flow turbomachines	4
1.2.1	Processing machinery	4
1.2.2	Turbocharger	9
1.2.3	Gas turbine	12
1.2.4	Pump	14
Chapter 2	Equations of motion for compressible viscous flows for turbomachines	16
2.1	Motion equations	16
2.1.1	Governing equations in integral form	16
2.1.2	Governing equations in differential form	17
2.1.3	N – S equations in conservation form in Carterian coordinate system	19
2.2	Turbulence and turbulence models	24
2.2.1	Basic concepts of turbulence	24
2.2.2	Turbulence models	27
2.3	Governing equations in rotating cylindrical coordinate system	37
2.4	Governing equations used in turbomachinery	44
2.5	Governing equations in body-fitted coordinate system	46
	References	52

Chapter 3 Impeller and vaned diffuser matching of centrifugal compressors	55
3.1 Matching of variable vaned diffuser throat area with impeller	55
3.2 Impeller-diffuser interaction with different radius ratios	58
3.3 Matching of airfoil diffuser with impeller	64
3.4 Other factors affecting the matching of vaned diffuser and impeller	73
References	77
Chapter 4 Tip clearance leakage flow mechanism in turbomachines	78
4.1 Introduction	78
4.2 Theory model analysis methods	79
4.2.1 Rains model	80
4.2.2 Lakshminarayana stiff vortex model	81
4.2.3 Kirtley model	82
4.2.4 Chen model	83
4.3 Tip clearance leakage flow mechanism of turbine cascades and rotors	89
4.3.1 Tip clearance leakage with variable incidence angle and tip clearance height	89
4.3.2 Flow field parameters distributions in turbine cascade tip clearance region	91
4.3.3 Tip clearance leakage flow of turbine blade with moving wall	94
4.3.4 Summary of tip leakage flow in turbine cascades and rotor blades	99
4.4 Tip clearance leakage flow mechanism of compressor cascades and impellers	100
4.4.1 Tip clearance leakage flow in compressor cascades ...	101

4.4.2	Tip clearance leakage flow in low speed compressor impellers	103
4.4.3	Leakage vortex broken-down phenomenon in compressor impellers	106
4.4.4	Compressor performance with variable tip clearance	112
4.4.5	Tip leakage flow in high speed compressor impellers	113
4.4.6	Summary of tip clearance leakage flow in compressor cascades and impellers	120
4.5	Calculating methods for tip leakage flow	121
4.6	Summary	122
	References	122
Chapter 5 Preliminary design and analysis of centrifugal compressors		
5.1	Impeller inlet design	126
5.1.1	Parameter relationships at impeller inlet	126
5.1.2	Inducer design	128
5.1.3	Inducer choke	133
5.1.4	Transonic inducer	135
5.2	Impeller discharge design	136
5.2.1	Slip factor calculation	136
5.2.2	Discharge parameter determination	141
5.3	Non-dimensional parameters in centrifugal compressor preliminary design	154
5.4	Summary of preliminary design	157
5.5	Diffuser preliminary design	161
5.5.1	Vaneless-diffuser design	162
5.5.2	Vaned-diffuser design	171
	References	177

Chapter 6 Preliminary design and analysis of radial

turbines	179
6.1 Principle of radial turbines	179
6.2 Preliminary design of the stator	180
6.2.1 Volute	181
6.2.2 Inlet nozzles	185
6.3 Preliminary design of the rotor	186
6.3.1 Rotor inlet design	187
6.3.2 Criterion for minimum number of blades	195
6.3.3 Rotor discharge design	198
6.4 Specific speed in design	205
6.5 Loss in radial turbine	208
References	210

Chapter 7 Performance prediction of centrifugal

compressors	212
7.1 Introduction	212
7.2 Mathematical model	214
7.2.1 Impeller inlet station calculation	214
7.2.2 Impeller outlet station calculation	216
7.2.3 Impeller outlet and diffuser inlet region model	218
7.2.4 Diffuser outlet station model	221
7.2.5 Surge boundary prediction	223
7.2.6 Choke boundary prediction	223
7.3 Assessment about performance prediction method	223
7.4 Loss characteristics of centrifugal compressor	225
7.5 Loss models	228
7.5.1 Blade surface friction loss	229
7.5.2 Blade load loss	229
7.5.3 Trailing edge loss	230
7.5.4 Tip leakage loss	232

7.5.5	Disk friction loss	232
7.5.6	Vaned-diffuser loss	232
7.5.7	Diffuser discharge loss	233
7.5.8	Leakage loss	234
7.6	Performance prediction procedures	235
7.7	Prediction case and result analysis	235
	References	239
Chapter 8	Performance prediction of radial turbines	241
8.1	Generalized introduction	241
8.2	Loss models	242
8.2.1	Volute loss model	243
8.2.2	Incidence loss model	245
8.2.3	Rotor loss model	247
8.3	Performance prediction with quasi 3 - D flow analysis	250
8.3.1	Impact for rotor boundary layer	251
8.3.2	Evaluation of rotor velocity distribution	257
8.3.3	Improvement of rotor loss model	261
	References	263
Chapter 9	Method of generating blade shape	264
9.1	Some questions in generating blade shape	264
9.2	Introduction of centrifugal compressor impeller design by geometrical method	265
9.3	Blade generation procedure	267
9.3.1	Initial estimation of flow field	267
9.3.2	Definition of blade surface load distribution	269
9.3.3	Angular momentum distribution along the blade camberline	269
9.3.4	Angular coordinates calculation along shroud	274
9.3.5	Calculating straight line element on blade camber plane	277