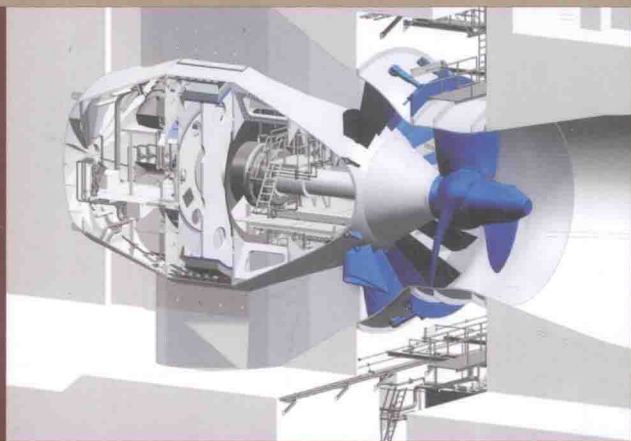


叶片式流体机械动力学 分析及应用

Dynamics Analysis and
Application of Turbomachinery

赖喜德 徐 永◎著



科学出版社

叶片式流体机械动力学 分析及应用

赖喜德 徐 永 著



科学出版社

北 京

内 容 简 介

叶片式流体机械是指以流体为工作介质和能量载体并通过叶轮叶片进行能量转换的旋转机械设备。叶片式流体机械动力学是一个涉及机械、流体、结构、测试、传热和电磁等多领域的综合与交叉学科。本书针对该类机械的设计与运行过程中涉及的机械结构动力学、转子动力学、“流体-结构”耦合动力学等方面的理论及分析方法进行较为系统的探讨,较为全面地反映目前叶片式流体动力机械的动力学分析体系和发展趋势。主要内容包括:叶片式流体机械的振动特征分析、机械结构动力学建模与分析、“流体-结构”耦合动力学建模与数值模拟分析、转子轴系统动力学建模与数值模拟分析、“转子-支撑”系统的动力特性计算与数值模拟分析等,以及叶片式水力机械的水压力脉动与水力振动、叶片式流体机械的振动状态监测与分析、基于轴系动力学仿真的水电机组振动分析系统及应用等专题。结合各章节的内容需要,给出了大量的工程分析与应用实例。

本书从叶片式流体机械及相关领域的实际工程需求出发,注重理论性与应用性相结合,系统性较强。可供流体机械及工程、动力机械及工程、能源动力工程、水利水电工程、机械工程、化工机械等相关专业的教师、工程技术人员阅读和参考,也可作为这些学科的研究生和高年级本科生的教材和参考书。

图书在版编目(CIP)数据

叶片式流体机械动力学分析及应用 / 赖喜德, 徐永著. — 北京: 科学出版社, 2017.3

ISBN 978-7-03-051841-5

I. ①叶… II. ①赖… ②徐… III. ①流体机械-机械动力学-研究 IV. ①TK05

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2017) 第 032545 号

责任编辑: 张 展 唐 梅 / 责任校对: 韩雨舟

责任印制: 罗 科 / 封面设计: 墨创文化

科学出版社出版

北京东黄城根北街16号

邮政编码: 100717

<http://www.sciencep.com>

四川煤田地质制图印刷厂印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2017年3月第 一 版 开本: B5 (720×1000)

2017年3月第一次印刷 印张: 16

字数: 350千字

定价: 98.00元

(如有印装质量问题, 我社负责调换)

作者简介

赖喜德，1962年9月出生，先后获华中理工大学流体机械及工程工学硕士学位及华中科技大学机械工程工学博士学位。四川省学术和技术带头人、享受国务院政府特殊津贴专家、国家二级教授。现任西华大学教授，动力工程及工程热物理、水利工程硕士生导师；西华大学学术委员会委员、流体及动



力机械教育部重点实验室学术委员会委员、《西华大学学报》编委；四川省自动化学会理事、自动化与计算机辅助技术专委会副主任，四川水力发电工程学会水力机械专委会副主任；中国农业机械学会排灌机械分会委员，中国机械工业标准化技术协会排灌专业委员会委员；国家自然科学基金评审专家，国内外多个期刊论文审稿人。

自1982年大学本科毕业以来，先后在东方电气集团东方电机有限公司及西华大学等单位从事科研和教学工作。曾先后八次到德国、美国、加拿大、瑞士、韩国、巴西、澳大利亚等国家进行短期的技术合作并在日本山口大学和美国加州大学圣地哥分校研修。负责或主研完成了多项国家“八五”和“九五”重大科技攻关项目及国家自然科学基金重大项目。负责完成省部级以上科研项目10余项、大型企业委托科研项目40余项，并有10余项通过国家及省部级鉴定或验收，已获国家科技进步二等奖1项，部省级科技进步二、三等奖4项，地市级科技进步一等奖2项。已在国内外公开发表学术论文170余篇（SCI、EI收录50余篇），2007年出版《叶片式流体机械的数字化设计与制造》专著1部，培养硕士和博士研究生80余人。

作者简介



徐永, 1984 年 1 月出生, 先后获得华中科技大学计算数学专业硕士及系统分析与集成专业博士学位, 博士期间师从于李朝晖教授、赖喜德教授。现任四川大学流体机械及工程专业讲师, 为 ASME(美国机械工程师学会)会员, 中国电机工程学会会员。兼任国家自然科学基金评审人、《Journal of Vibration and Control》、《ASME Journal of Vibration and Acoustics》等杂志论文审稿人。主要从事大型水轮发电机组振动故障机理及故障诊断方法研究。曾于德国短期访问一次, 负责国家青年自然科学基金项目 1 项, 负责或作为主要参与者完成省部级纵向科研课题及企业委托科研项目 10 余项。已在国内外公开发表学术论文 10 余篇(SCI、EI 收录 5 篇)。

序

叶片式流体机械是一类应用极为广泛的旋转机械设备,在促进国民经济发展中起着极为重要的作用。随着技术的不断发展,叶片式流体机械的各应用领域对其性能参数和可靠性等的要求也越来越高,要求通过快速和高可靠性的研发手段,不断创新以满足各应用领域的技术进步的需求。叶片式流体机械是通过具有旋转的叶轮来实现流体与机械之间能量转换的一大类旋转机械,在设计与运行过程中除传统的结构静力学和流体动力学问题外,还涉及复杂的机械结构动力学、“流体-结构”耦合动力学、转子动力学、转子-支撑系统动力学等一系列的动力学设计与分析问题。动力学分析与仿真技术是提高现代叶片式流体机械性能参数和可靠性的技术基础。在传统的叶片式流体机械领域研究中,一般将其动力学问题归为流体动力学、结构动力学和转子动力学三大类来研究,但是在实际工程中,这三大类相互融合并对机组的动力学特性产生相互影响。作者根据叶片式流体机械及工程领域研究趋势和近年来研发新技术的发展,试图将叶片式流体机械涉及的三大类动力学分析方法和技术融合在一起探讨,以更好地满足现代叶片式流体机械工程优化设计与可靠运行的需要。

该书作者赖喜德教授长期从事叶片式流体机械的动力学、产品数字化设计与制造技术等方面的研究开发和教学工作,曾负责或主研了十多项国家和部省级科技攻关项目,获得了包括国家科技进步二等奖在内的多项科技进步奖,在流体机械的理论研究、产品设计与制造方面积累了丰富的工程经验。该书是根据作者在该领域的研究成果和参考部分国内外近年来的相关领域研究成果而写成的,较为系统地介绍了目前叶片式流体机械动力学分析与仿真技术的发展趋势。

流体机械动力学分析技术是产品性能预测、结构振动控制、结构动态优化设计、结构可靠性设计、运行过程中的振动监测与故障分析等方面的基础。随着动力学分析方法和技术的最新发展,叶片式流体机械结构设计逐步从静态设计走向动态设计,从频率设计走向响应设计,从解耦分析走向耦合分析。叶片式流体机械的种类繁多、结构千差万别、运行条件各异,再加上流体机械动力学理论与分析技术也在不断发展。作者深知该书不会没有错误、不妥和不足之处,但希望通过该书引起广大读者的共鸣和讨论,以便加以完善和发展。我十分了解作者真挚

的愿望，希望该著作的出版，能够进一步推动叶片式流体机械动力学分析及应用技术的深入研究，促进行业的技术进步。

中国工程院院士、哈尔滨工业大学博士生导师

A handwritten signature in black ink, consisting of the characters '梁世志' (Liang Shizhi) in a stylized, cursive script.

二〇一六年十二月十六日于哈尔滨

前 言

叶片式流体机械是指以流体为工作介质和能量载体并通过叶轮叶片进行能量转换的旋转机械设备,主要包括叶片式泵、水轮机、压缩机、风机、汽轮机、燃气轮机、风力机等。在现代电力工业中绝大部分发电量是由叶片式流体动力机械承担的,其中汽轮机、燃气轮机和风力机约占 70%,水轮机约占 30%。叶片式流体工作机械作为通用机械,据统计,总用电量中约 1/3 是用于驱动泵、风机和压缩机的。叶片式流体机械是一类应用极为广泛的旋转机械设备,在国民经济的很多领域中起着极为重要的作用。叶片式流体机械广泛应用于电力工业、水利工程、动力工程、市政工程、制冷与低温工程、化学工业、石油工业、钢铁工业、采矿工业、航空航天工业等领域。

随着各应用领域的不断发展,对叶片式流体机械产品的性能、可靠性、开发周期等提出了更高的要求。根据能量传递的方向不同,可以将叶片式流体机械分为原动机(如水轮机、汽轮机、燃气轮机、风力机)和工作机(如泵、压缩机)。原动机将流体的能量转换为机械能,工作机则将机械能转换为流体的能量。无论是叶片式原动机还是工作机都在向大型、高速、大功率方向发展,运行工况也非常复杂,其动力学特性方面引起的问题也越来越多、越来越严重。该类机械的设计与运行过程中除需要解决传统的结构静力学和流体动力学问题外,还涉及复杂的机械结构动力学、“流体—结构”耦合动力学、转子动力学、转子—支撑系统的动力学等动力学设计和分析问题。在传统的叶片式流体机械研究中,将其动力学问题主要归为流体动力学、结构动力学和转子动力学三大类来研究,结构动力学和转子动力学问题有所交叉,流体动力学相对独立。但是在实际工程中,这三大类相互融合并对机组的动力学特性产生相互影响。大型机组的支撑系统动力特性对转子和机组结构的动力学特性影响巨大。在运行过程中,“流体—结构”耦合引起的动力学特性非常复杂,流体引起的振动、噪声、运行稳定性等动力学问题也需要深入研究。

动力学分析与数值仿真技术是现代叶片式流体机械的性能参数提高和可靠性保证的技术基础。叶片式流体机械动力学是一个涉及机械、流体、结构、测试、传热和电磁等多领域的综合与交叉学科。叶片式流体机械的动力学主要研究方法

包括理论分析、试验分析和数值模拟分析,随着叶片式流体机械的数字化设计理论及技术研究开发的不断深入,数值模拟分析已成为主要的手段。本书针对该类机械在设计与运行过程中涉及的机械结构动力学、转子动力学、“流体—结构”耦合动力学等方面的理论及分析方法进行较为系统地探讨。针对设计与运行过程中这些动力学问题的分析特点和一些工程实例,根据内容的相关性和紧密程度,全书共分10章。第0章是绪论,主要介绍叶片式流体机械设计与运行过程中涉及的动力学、主要研究内容和研究方法,较为全面地介绍工程中目前叶片式流体机械的动力学分析体系和发展趋势;第1章针对叶片式流体机械结构和运行特点,介绍其结构动力学和振动分析方法,为其后动力学分析的基础;第2章针对叶片式流体机械中的主要振源,讨论在运行过程中来自流体诱发、机械不平衡、电磁和系统其他方面产生的激振力及振动特征,为后续各章计算分析考虑载荷等奠定基础;第3章针对叶片式流体机械中的“流体—结构”耦合问题,介绍目前广泛采用的分离法来求解流固耦合问题的实现方法,并以混流式叶轮动态应力分析的流固耦合数值模拟与实测为例说明在工程中的应用;第4章在第1章基础上介绍考虑流体机械流固耦合问题的结构模态分析及数值模拟方法,以水轮机转轮、水泵叶轮、水轮机座环为例说明结构模态分析在工程问题中的应用,以某核主泵机组的地震安全校核计算为例,介绍地震谱分析在叶片式流体机械工程中的应用;第5章针对大型叶片式流体机械广泛采用的液膜轴承作为转子支撑系统,讨论导轴承、密封等动力学特性的数值模拟分析方法;第6章针对叶片式流体机械转子的结构和受力特点,介绍其转子动力学分析的内容和数值模拟方法,以一个立式水轮发电机组转动部件和一个汽轮发电机组转子的振动模态、转子稳定性及谐响应分析、瞬态分析等转子动力学特性计算分析为例说明在工程问题中的应用;第7章是针对叶片式水力机械的水压脉动与水力振动特征分析专题,讨论叶轮与导叶之间的动静干扰、尾水管的低频涡带、叶道涡及过流部件的绕流体产生的高频卡门涡及空化噪声而引起的压力脉动的主要特征及间隙不均匀、压力管道系统等引起的水力振动特征和数值模拟分析;第8章结合水电机组的振动状态监测,介绍叶片式流体机械振动特性的测量分析方法;第9章是基于轴系仿真模型的水电机组振动分析系统专题,介绍根据大型立式水轮发电机组结构特点,综合应用叶片式流体机械动力学分析建立适当的机组轴系动力学仿真模型,开发出水电机组振动仿真分析系统,基于仿真模型来研究机组动力学性能以及各种振动故障的产生原因。

本书的出版得到了国家自然科学基金项目(51379179、51309172)、四川省科技计划项目(2017JY0047)、流体及动力机械教育部重点实验室(西华大学)学科建设项目的资助,同时也得到了西华大学的领导、研究生部、能源与动力工程学院的大力支持,在此表示感谢。

本书的第0、1、2、3、4、6、7章由西华大学赖喜德教授撰写,第5、8、9章由四川大学徐永博士撰写,全书由赖喜德教授统稿。我国著名的发电工程与设备专家、中国工程院院士、哈尔滨工业大学梁维燕教授自始至终热情关心和支持本书的创作,并为本书作序。本书的各章节分别请华中科技大学李朝晖教授、周云飞教授、严思杰教授,四川大学鞠小明教授,哈尔滨电机厂有限责任公司副总工程师覃大清研究员,西华大学刘清友教授、刘小兵教授、宋文武教授、余波教授、张翔博士等审阅过。科学出版社唐梅编辑为本书的出版作了大量的工作。在此谨向各位致以诚挚的谢意。

本书还凝聚了我的同事、朋友和研究生的心血,书中反映的成果不少是作者曾负责课题组的研究成果,在本书的撰写过程中参阅并引用了不少文献和部分国内外在该领域近年来的研究成果,作者在此一并致谢。

作者要深切地感谢家人的关心和支持,激励我们努力完成本书的创作。

另外,本书为作者所著《叶片式流体机械的数字化设计与制造》(四川大学出版社,2007)的姊妹篇,这两部著作反映了作者多年来在流体机械及工程领域的部分研究成果,希望能为行业的技术进步贡献微薄之力。

最后还应说明的是,虽然我们尽了最大的努力,但限于水平,加之叶片式流体机械动力学的相关理论及分析技术尚处于不断完善、探索和发展之中,书中的观点不一定成熟,不足和错误之处在所难免,敬请读者批评、指正和帮助。

赖喜德

二〇一七年一月于西华大学

目 录

第0章 绪论	1
0.1 叶片式流体机械的特点与动力学问题	1
0.2 叶片式流体机械动力学的主要研究内容	6
0.3 叶片式流体机械动力学的研究方法	10
0.4 叶片式流体机械动力学的研究现状与发展趋势	12
参考文献	14
第1章 叶片式流体机械结构动力学分析基础	15
1.1 叶片式流体机械承受的主要载荷与结构振动响应	15
1.2 叶片式流体机械结构振动的分类	16
1.3 结构振动的力学模型	18
1.3.1 单自由度系统振动的力学模型	19
1.3.2 多自由度系统振动的力学模型	25
1.4 振动数据处理与分析方法	29
1.4.1 振动数据的分类及一般分析方法	29
1.4.2 稳态振动数据的分析方法	31
1.4.3 变工况运行时的振动分析方法	36
参考文献	39
第2章 叶片式流体机械的振动特征	40
2.1 叶片式流体机械运行中的主要激振力	40
2.2 流体诱发的振动特征	41
2.2.1 流体的脉动压力等引起的振动	42
2.2.2 间隙流动不均等引起的振动	45
2.2.3 叶片式气体机械的气流激振	47
2.3 机械和结构引起的振动特征	50
2.3.1 主轴弯曲不直或有挠度	50
2.3.2 机组转动部件的质量不平衡	51
2.3.3 机组转动部件与静止部件的碰摩	52
2.3.4 支撑系统刚度不足引起的振动	52
2.3.5 导轴承轴瓦间隙大	53
2.3.6 推力轴承的推力头松动和推力瓦不平	53
2.4 其他原因引起的振动	54

2.4.1 电磁原因引起的振动	54
2.4.2 转子热变形引起的振动	55
参考文献	56
第3章 叶片流体机械的流固耦合动力学分析	57
3.1 叶片式流体机械的流固耦合动力学分析模型	57
3.1.1 流体动力学控制方程	57
3.1.2 流固耦合动力学控制方程	60
3.2 流固耦合分析的实现方法	62
3.3 水轮机中的流固耦合动力学分析实例	65
3.3.1 针对给定工况的叶轮流固耦合动力学分析	66
3.3.2 水轮机启动过程的流固耦合动力学分析	71
参考文献	74
第4章 叶片流体机械的结构动力学分析	75
4.1 结构动力学的有限元分析方法	75
4.1.1 结构运动方程的有限元模型	75
4.1.2 模态分析的有限元方程	77
4.1.3 模态分析特征值的求解方法	78
4.2 混流式水轮机叶轮的模态分析实例	79
4.2.1 模态的数值计算分析	79
4.2.2 模态的实验分析	80
4.3 水泵水轮机叶轮的模态及振动分析实例	83
4.4 轴流式水轮机固定导叶因卡门涡引起的振动分析实例	86
4.5 轴封式核主泵的地震响应谱分析实例	87
4.5.1 反应谱理论	87
4.5.2 轴封式核主泵机组建模	88
4.5.3 核主泵机组的模态分析	89
4.5.4 核主泵机组的地震谱响应分析	90
参考文献	94
第5章 叶片式流体动力机械的转子支撑系统动力学分析	95
5.1 转子支撑系统的动力特性分析理论与方法	95
5.1.1 雷诺方程及其求解	95
5.1.2 导轴承及密封的液膜动力特性分析模型	101
5.1.3 推力轴承及基座的动力特性分析模型	107
5.1.4 轴承动力特性计算分析软件简介	108
5.2 导轴承动力特性计算分析实例	109
5.2.1 水导轴承	110

5.2.2 上、下导轴承	110
5.3 密封动力特性计算实例	115
5.3.1 定子与转子间的密封形式	115
5.3.2 直通形迷宫密封分析模型	116
5.3.3 各影响因素对密封动力特性的影响分析	117
参考文献	120
第6章 叶片式流体机械的转子动力学分析	123
6.1 转子动力学的研究内容与发展	123
6.2 转子动力学计算分析模型	124
6.3 转子动力学计算分析方法	125
6.3.1 传递矩阵法简介	126
6.3.2 有限元法简介	132
6.4 水轮发电机组转子动力学计算分析实例	136
6.4.1 机组主要参数及分析工况	136
6.4.2 机组转动部件的几何建模及有限元网格	137
6.4.3 数值计算分析中的约束、载荷施加	138
6.4.4 机组的转子动力学计算分析	143
6.5 汽轮机组的轴系动力学计算分析实例	150
参考文献	158
第7章 叶片式水力机械的水压力脉动与水力振动	160
7.1 叶片式水力机械的水压力脉动特征	160
7.2 水压力脉动特征与运行工况关系	163
7.3 尾水管中涡带引起的低频压力脉动	164
7.3.1 水轮机尾水管中的涡带	164
7.3.2 尾水管涡带引起的压力脉动	166
7.3.3 尾水管中涡带的数值模拟及压力脉动预测	169
7.4 水轮机叶轮中叶道涡引起的压力脉动	170
7.4.1 叶道涡的特点	170
7.4.2 叶道涡的数值模拟分析	171
7.5 叶片式水力机械中的动静干涉引起的压力脉动	172
7.5.1 动静叶栅干涉引起的压力脉动	172
7.5.2 叶轮流道几何不对称引起的压力脉动	174
7.5.3 壳体流道的不均匀流场引起的压力脉动	175
7.5.4 动静叶栅干涉引起的压力脉动数值模拟	177
7.6 冯·卡门涡列引起的压力脉动	180
7.6.1 冯·卡门涡列产生及引起的压力脉动特点	180

7.6.2	受冯·卡门涡影响的水力机械过流部件	180
7.6.3	叶片式水力机械中卡门涡流动数值模拟	182
7.7	间隙流动不均等引起的水力振动	183
7.7.1	叶轮密封导致的失稳	184
7.7.2	上冠/下环侧腔的影响	185
7.8	压力管道系统引起的水力振动	185
	参考文献	188
第8章	叶片式流体机械的振动状态监测与分析	191
8.1	叶片式流体机械振动状态监测仪器与分析系统	191
8.1.1	流体机械振动监测的一般要求及监测方法	191
8.1.2	振动监测系统的构成	193
8.1.3	振动监测方式	199
8.2	某贯流式水电机组转动部件的振动离线监测分析	201
8.2.1	测点布置及试验工况	201
8.2.2	机组的振动测试结果及分析	202
8.2.3	机组离线振动测试分析结论	207
8.3	某轴流式水电机组转动部件的振动在线监测分析	207
8.3.1	某电厂及其在线监测系统概况	207
8.3.2	水电机组的振动稳定性在线监测系统	208
8.3.3	部分工况的在线振动监测分析	210
	参考文献	214
第9章	基于轴系动力学仿真的水电机组振动分析系统及应用	215
9.1	基于仿真模型的故障诊断及设备健康状态评价	215
9.1.1	基于仿真模型的故障诊断方法	216
9.1.2	基于仿真模型的设备健康状态评价方法	216
9.2	水电机组振动仿真分析系统的建立	217
9.2.1	振动仿真分析系统的构成	217
9.2.2	轴系动力学模型的建立	220
9.2.3	基于轴系仿真模型的水电机组振动仿真分析系统	229
9.3	基于轴系仿真模型的水电机组振动分析系统的应用	232
9.3.1	考察和分析工况变化对轴系振动特性的影响	232
9.3.2	模拟实际振动试验	234
9.3.3	仿真水力不平衡对机组振动特性的影响	238
	参考文献	241

第 0 章 绪 论

0.1 叶片式流体机械的特点与动力学问题

1. 叶片式流体机械及其应用

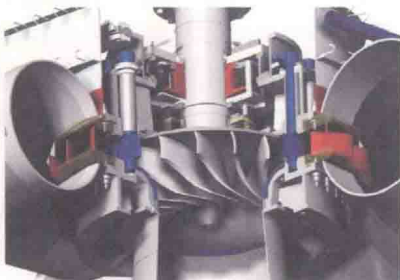
流体机械是指以流体为工作介质和能量载体的机械设备，其工作过程是流体的能量和机械的机械能相互转换的过程。由于在几乎所有的技术和生活领域都需要借助于流体进行能量转换或需要输送流体介质，因此流体机械是一类应用极为广泛的机械设备。各种不同应用场合的流体机械的结构形式和工作特点有很大的差别。根据流体与机械相互作用的方式，流体机械可分为^[1,2]：叶片式、容积式和其他不属于这两类的流体机械。对于不同类型和种类的流体机械，为在工作原理、设计方法和手段上都有很大的差别。水轮机、汽轮机、燃气轮机、风力机、压缩机、泵、可逆式水泵水轮机、透平液力传动装置和船用水力推进器等都是典型的叶片式流体机械。所有的叶片式流体机械都具有旋转的叶轮(转子、转轮)，其能量转换是在带有叶片的叶轮与连续绕流叶片的流体介质之间进行的，叶片与流体的相互作用力是惯性力。叶片使流体的速度(方向或大小)发生变化，由于流体的惯性作用引起作用于叶片的力，该力作用于叶片而使叶轮转动。根据能量传递的方向不同，可以将流体机械分为原动机(如水轮机、汽轮机、燃气轮机、风力机)和工作机(如泵、压缩机)。原动机将流体的能量转换为机械能用于驱动发电机等，工作机则将机械能转换为流体的能量，以使流体输送到高处或有更高压力的空间，或克服管路阻力将流体输送到远处。常见的叶片式流体机械分类如图 0-1 所示，其中大多数叶片式流体机械按叶轮形式在结构上又分为径流式、混流式、轴流式。与其他机械产品相比，叶片式流体机械的设计与运行过程中除了涉及机械结构动力学外，更多涉及的是复杂的转子动力



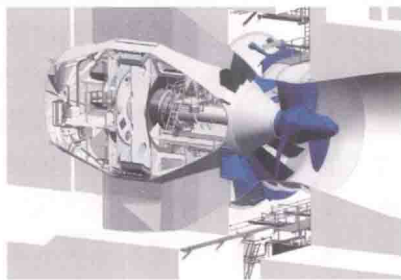
图 0-1 叶片式流体机械分类

学、流体动力学、“流体—结构”耦合动力学、热力学等问题,本书主要介绍叶片式流体机械中这几类动力学问题的分析及其工程应用。

叶片式流体机械在促进国民经济发展中起着极为重要的作用,在现代电力工业中绝大部分发电量是由叶片式流体机械(汽轮机、水轮机、燃气轮机、风力机)承担的。叶片式泵、风机和压缩机作为通用机械,在水利工程、化学工业、石油工业、电力工业、采矿工业、冶金工业、航空航天、市政工程、生物医药工程、环境工程等领域都得到了广泛的应用。据统计^[2],总用电量中约 1/3 用于驱动泵、风机和压缩机。随着科学技术的不断发展,各应用领域对叶片式流体机械的性能参数和可靠性等的要求也越来越高,要求通过快速和高可靠性的研究开发技术和手段的创新来满足各应用领域快捷发展的需求。



(a)混流式水轮机



(b)贯流式水轮机



(c)燃气轮机



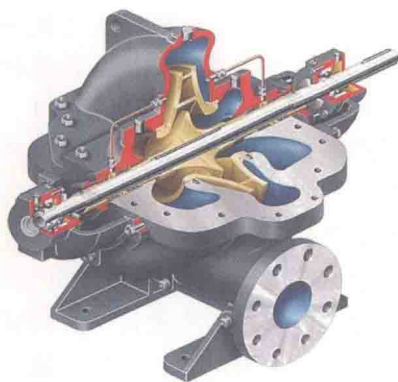
(d)蒸汽轮机



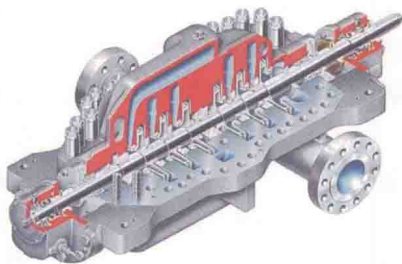
(e)航空涡轮发动机



(f)轴流式水轮机



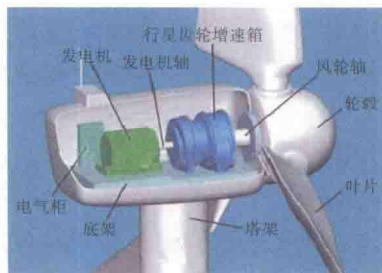
(g) 水平中开式双吸离心泵



(h) 多级离心泵



(i) 离心式压缩机



(j) 风力发电机

图 0-2 典型的叶片式流体机械

如前所述, 叶片式流体机械应用非常广泛, 在不同的应用领域有不同的要求。图 0-2 给出了一些典型的叶片式流体机械图片, 以作为叶片式流体动力机械的汽轮机和 water 轮机为例, 它们都在向高参数、大容量方向快速发展。目前世界上汽轮机机组的单机容量已达 1750MW, 而我国的汽轮机机组主要以超临界、超超临界参数的 600MW、1000MW 等级机型为主, 正在研制单机容量为 1750MW 的机组。水轮发电机组的单机容量已达 850MW, 正在研制单机容量为 1000MW 的机组。目前已运行的尺寸最大的轴流式水轮机转轮直径达到 11.3m(葛洲坝电站), 尺寸最大的混流式水轮机转轮直径(D_1)达到 9.8m(三峡电站)。随着汽轮发电机组的容量和运行参数的不断提高, 转子向大跨度、柔性、重载方向发展, 水轮发电机组的单机容量和尺寸也不断增大, 导致机组的结构刚性不断降低, 各种非线性动力学行为与影响因素越来越显著, 如何提高和保证机组轴系的稳定性、安全性和可靠性, 迫使我们必须加快研究出更加可靠的动力学设计和分析方法等。

2. 叶片式流体机械产品研制的特点与动力学分析问题

因流体机械是以流体作为工作介质来进行能量转换的, 其设计过程中一般首先进行流体动力学(和热力学)设计, 设计出过流部件的流道。对于叶片式流体机