



赖喜德 编著

叶片式流体机械的数字化设计与制造

Digital Design and
Manufacturing
of Turbomachinery



四川大学出版社

TH3/15

2007

Digital Design and
Manufacturing
of Turbomachinery

叶片式流体机械的数字化 设计与制造

赖喜德 编著



四川大学出版社

责任编辑:周树琴 马 娜
责任校对:王 平 李思莹
封面设计:冀虎书装
责任印制:李 平

图书在版编目(CIP)数据

叶片式流体机械的数字化设计与制造 / 赖喜德编著.
成都:四川大学出版社, 2007.10
ISBN 978-7-5614-3852-7

I. 叶… II. 赖… III. ①流体机械-计算机辅助设计:
机械设计②流体机械-计算机辅助制造:机械制造 IV. TH3
中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2007) 第 157031 号

书名 叶片式流体机械的数字化设计与制造

编 著 赖喜德
出 版 四川大学出版社
地 址 成都市一环路南一段 24 号 (610065)
发 行 四川大学出版社
书 号 ISBN 978-7-5614-3852-7/TH·6
印 刷 郫县犀浦印刷厂
成品尺寸 185 mm × 260 mm
印 张 19
字 数 446 千字
版 次 2007 年 10 月第 1 版
印 次 2007 年 10 月第 1 次印刷
印 数 0 001 ~ 1 500 册
定 价 30.00 元

版权所有◆侵权必究

◆读者邮购本书, 请与本社发行科
联系。电 话: 85408408/85401670/
85408023 邮政编码: 610065
◆本社图书如有印装质量问题, 请
寄回出版社调换。
◆网址: www.scupress.com.cn

内容简介

叶片式流体机械是一类应用极为广泛的机械设备，在国民经济中起着极为重要的作用。随着现代流体机械先进设计与制造理论及技术的发展，数字化技术不仅成为流体机械产品创新的主要工具，而且是缩短产品开发周期和提高性能的有效手段。叶片式流体机械数字化设计与制造的理论及技术正在成为行业中研究开发的热点，并逐步成为产品创新、性能优化、降低成本和提高产品竞争力的主要途径。本书是根据国内外研究人员、技术人员及作者在相关领域的研究开发成果而写成，介绍叶片式流体机械研究开发过程的数字化设计与制造的理论及技术和最新进展。本书从叶片式流体机械及相关领域的实际工程要求出发，注重理论性与应用性相结合，系统性强。主要内容包括：叶片式流体机械的过流部件的流体动力学数字化设计、产品的数字化几何设计、流体动力性能预测方法及优化设计、结构数值模拟分析与优化设计等数字化设计理论及技术；叶片式流体机械的数字化制造基础、复杂零部件的多轴联动加工刀具轨迹生成方法与数字化加工编程、仿真加工、典型零部件的数字化制造工艺规划、复杂曲面类零部件的数字化测量和检测与逆向工程等数字化制造理论及技术。本书结合各章节的内容需要，给出了大量的实例，并对有关的数字化设计与制造的软件也进行了简单介绍，较为全面地反映了目前已初步形成的叶片式流体机械的数字化设计与制造理论及技术体系和发展趋势。

本书可作为流体机械、动力机械、能源电力、水利水电、机械制造、化工机械、供热通风等相关专业的教师、研究生和本科生的教材和参考书，也可供上述领域的科技人员参考或培训使用。

序

叶片式流体机械是指通过叶轮与连续绕流叶片的流体介质之间进行能量转换的一大类机械，在国民经济中起着极为重要的作用。在现代电力工业中，几乎所有的发电量都是由叶片式流体机械（水轮机、汽轮机、燃气轮机、风力机）承担的。据统计，在总用电量中，约三分之一是用于驱动泵、风机和压缩机等叶片式流体机械。与其他机械产品相比，叶片式流体机械在研究开发、设计与制造过程中都有其独特之处。长期以来，一些叶片式流体机械产品采用基于实物模型试验验证为主的产品研制方法，导致整个研制周期太长、研制成本过高。随着技术的不断发展，各个应用领域对叶片式流体机械的性能参数和可靠性等要求也越来越高，研制周期越来越短，要求通过不断创新来满足各个应用领域的技术进步的需求。

中国是一个制造业大国，随着世界经济一体化和制造业全球化的形成，我国的流体机械制造企业面临着全球范围内的竞争。激烈的市场竞争对叶片式流体机械行业提出了诸多新的挑战，为了迎接这些新的挑战，现代叶片式流体机械行业也必须加强技术创新。在人类社会进入知识经济和信息时代的 21 世纪，知识化是创新的资源，数字化是创新的手段，可视化是创新的虚拟检验。信息化的核心是数字化，先进设计制造技术的核心也是数字化，数字化设计与制造技术是流体机械产品的技术创新的主要手段。为了在更短的时间内开发出富有竞争力的流体机械产品，产品数字化开发方法和工具是不可缺少的有力手段。流体机械制造业竞争的焦点是产品创新和提高产品性能的竞争，为了满足市场竞争的需要，流体机械数字化产品技术正在成为研究开发的热点。数字化产品即存储在计算机内部的产品数据模型，亦称数字化试验原型或虚拟产品。数字化技术融入叶片式流体机械产品开发过程中，使得产品的性能、机构、质量、价格、外形、功能、可靠性等都将发生深刻的变化。数值模拟与性能预测代替模型试验、基于性能预测的优化设计、仿真加工等数字化设计与制造技术可以大大加快产品开发速度，提高产品开发的可靠性，改善产品开发的并行性。通过信息化技术和数字化技术来改造和提升叶片式流体机械制造业，具有重要的研究意义和广泛的应用前景。随着数字化技术在流体机械中的研究、开发和应用的不断深入，叶片式流体机械的产品开发方法将彻底改变。叶片式流体机械数字化设计与制造技术的发展将对叶片式流体机械行业产生深远的影响，为流体机械制造业注入强大的活力。

本书作者赖喜德教授长期从事叶片式流体机械的流体动力学设计与试验、产品数字化

设计与制造技术的研究开发和教学工作。他曾负责或参与了十余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研究成果,在水力机械水力模型的研究开发、水力机械产品的设计与制造方面积累了丰富的工程实践经验。该书较为系统地介绍了目前叶片式流体机械的数字化设计与制造技术及其发展趋势,总结了作者多年来在叶片式流体机械数字化技术方面的研究开发与教学成果。

叶片式流体机械的数字化设计与制造技术发展方兴未艾,随着现代先进设计与制造理论及技术的发展,叶片式流体机械数字化设计与制造的理论及技术也将不断发展和完善。作者深知本书会存在错误、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,加以完善和发展。我十分理解作者真挚的愿望,希望该著作的出版,能够进一步推动我国叶片式流体机械的数字化设计与制造技术的研究开发工作,促进行业的技术进步。谨以诗序之!

叶片流机设计难,

喜凭数字化千端;

得来不易新技术,

但愿书成大壮观。

程良駿印

华中科技大学教授、博士生导师

2007年2月16日于瑜园

本书为“十一五”国家重点图书出版规划项目,也是“十一五”国家重点图书出版规划项目。

前 言

在 21 世纪,人类开始进入以数字化信息为特征的信息社会时代,数字化是信息化的基础。自 1998 年美国首先提出“数字地球”的概念以来,诸如数字化流域、数字化城市、数字化部队等以数字化为前缀的新概念和新思想大量涌现出来。其中,数字化设计与制造乃是全球数字化浪潮中的最重要的一环,就制造业而言,以计算机为基础的数字化技术正在改变制造业的面貌。

叶片式流体机械是一类应用极为广泛的设备,在国民经济中起着极为重要的作用。随着各个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。同时,随着世界经济一体化和制造业全球化模式的形成,流体机械行业面临的竞争已是全球范围内的竞争。激烈的竞争对流体机械行业提出诸多新的挑战,为了迎接这些新的挑战,必须不断创新。数字化设计与制造技术不仅是流体机械产品创新的主要工具,而且是缩短产品开发周期和提高性能最有效的手段。

近 20 年来,计算机辅助技术在流体机械中的应用取得了巨大的进展,大大地减少了设计中的几何建模与工程图纸所需要的时间。在叶片式流体机械设计技术方面已经历了数字化图纸、数字化模型阶段,现正在经历数字化过程、预测工程阶段,并朝着基于知识驱动的设计自动化方向发展。产品的开发过程从串行工程逐步转变到企业范围的并行协作工程,从基于二维图纸的开发过程转变到以三维实体模型为中心的开发过程,从传统的机械加工逐步转变到数控加工……总之,数字化技术已成为叶片式流体机械技术创新的主要手段。数字化设计与制造技术作为流体机械产品数字化开发技术的主体,已成为行业中重点的研究开发领域。随着对数字化技术研究开发的不断深入,叶片式流体机械的数字化设计与制造技术也将逐步成熟和系统化,并将彻底改变传统的流体机械产品开发方式。为了加强叶片式流体机械的数字化设计与制造技术的研究开发,并促进其在行业中的推广应用,作者根据国内外研究人员、技术人员及作者在相关领域的研究开发成果而写成了这本书。本书综合并归纳了叶片式流体机械研究开发过程的数字化设计与制造的理论及技术和一些最新进展,较为系统地介绍了目前已成熟的叶片式流体机械的数字化设计与制造技术。

叶片式流体机械的数字化设计与制造的理论及技术涉及多学科、多领域、多种技术的综合研究开发与应用。按产品开发中的设计与制造流程,并根据内容的相关性和紧密程度,全书共分为五大部分。最开始是绪论,主要介绍叶片式流体机械产品研究开发的特点、数字化技术在其研制过程中的作用和一些相关的基本概念;第一部分主要介绍叶片式流体机械过流部件的流体动力学数字

化设计理论与方法,包括第1~4章,分别为叶轮、扩压部件(蜗壳、导叶)、吸出(吸入)部件的流体动力学设计理论及其数字化设计方法;第二部分主要介绍叶片式流体机械的几何数字化设计,包括第5~6章,首先介绍有关几何造型的基础知识及建立各零部件的几何数字化技术,然后针对叶片式流体机械中一些典型零部件来介绍如何建立其数字化几何模型;第三部分为叶片式流体机械的性能预测及优化设计,包括第7~9章,主要介绍基于性能预测的叶片式流体机械优化设计的技术路线和实现方法,全流道的三维粘性流动数值模拟、结构的静力学和动力学数值模拟以及性能预测过程中所涉及的理论、方法和实现技术;第四部分是流体机械的数字化制造基础,包括第10~12章,主要针对叶片式流体机械数字化制造的一些特点和涉及的数字化加工理论及方法,介绍有关的一些基本概念、多轴联动数字化加工的刀具轨迹计算与编程理论及方法;第五部分为叶片式流体机械的数字化制造技术专题,包括第13~16章,根据叶片式流体机械零部件的特点和特征,简要介绍了如何制定复杂零部件数字化制造的工艺规划,并以大型水轮机转轮制造为主介绍叶轮类零件的数字化制造中的五轴联动数控加工编程、三维数字化测量、计算机辅助定位技术、数控加工仿真、数字化测量检测与反求工程等一些关键技术。

本书的出版受到了四川省重点学科建设项目——“流体机械及工程(SZD0412)”和四川省教育厅自然科学重点项目——“水轮机叶片数字化制造关键技术研究(2004A113)”的资助,同时也得到了西华大学的校领导、研究生部、能源与环境学院的大力支持,在此表示感谢。

我国著名的水力机械专家、华中科技大学程良骏教授(博士生导师)自始至终热情关心和支持本书的创作,并为本书写了序。本书的各章节分别请华中科技大学周云飞教授(博士生导师)、严思杰副教授,西华大学能源与环境学院刘小兵教授、余波教授、李庆刚副教授等审阅过。在此谨向各位致以深切的谢意。

本书还凝聚了我的同事、朋友和研究生的心血,书中介绍的成果不少是作者曾负责课题组的研究开发成果,在本书的编写过程中参阅并引用了不少文献与研究成果,作者在此一并致谢。

我个人深切地感谢我的父母、妻子和女儿,是他(她)们给我的关心和支持,激励我努力完成本书的创作。

最后还应说明的是,虽然我尽了最大的努力,但限于水平,再加之叶片式流体机械的数字化设计与制造的相关理论及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

2007年3月于西华大学

目 录

第 0 章 绪 论	(1)
0.1 叶片式流体机械及其产品开发过程	(1)
0.2 叶片式流体机械产品开发与数字化技术	(3)
0.3 数字化设计与制造技术的相关概念	(6)
0.4 叶片式流体机械数字化技术的现状与发展趋势	(11)
0.5 叶片式流体机械的数字化关键技术及本书的结构	(13)
主要参考文献	(15)

第一部分 叶片式流体机械的流体动力学数字化设计

第 1 章 叶轮的流体动力学数字化设计	(18)
1.1 叶轮流体动力学数字化设计的任务	(18)
1.2 叶轮的流体动力学设计理论与方法	(19)
1.2.1 叶轮的流体动力学设计理论及其发展	(19)
1.2.2 叶轮流体动力学初步数字化设计中的设计方法选择	(21)
1.3 基于性能预测的叶轮流体动力学数字化设计方法	(27)
1.3.1 基于性能预测的叶轮流体动力学优化设计思想	(27)
1.3.2 基于性能预测的叶轮流体动力学数字化设计过程	(28)
1.4 叶轮流体动力学数字化设计技术的发展	(29)
1.5 混流式转轮的流体动力学数字化设计软件开发	(31)
1.5.1 转轮设计参数的确定	(31)
1.5.2 转轮轴面流道形状的设计	(33)
1.5.3 确定计算流面的数字化方法	(34)
1.5.4 轴面流速和轴面流线的数值计算方法	(35)
1.5.5 叶片骨面的数字化设计方法	(38)
1.5.6 流面上叶型加厚的数值方法	(42)
1.5.7 叶片设计结果的表达方式	(44)
1.6 商业通用叶轮数字化设计软件介绍	(44)
主要参考文献	(47)

第 2 章 蜗壳的流体动力学数字化设计	(50)
2.1 蜗壳的作用与分类	(50)
2.2 水轮机蜗壳流道的数字化设计	(50)
2.2.1 水轮机蜗壳的流体动力学设计理论	(50)
2.3.2 水轮机蜗壳流道的数字化设计模型	(51)

2.3.3 水轮机蜗壳流道的数字化设计软件开发	(52)
2.4 离心泵蜗壳流道的数字化设计	(54)
2.4.1 离心泵蜗壳流道的数字化设计模型	(55)
2.4.2 离心泵蜗壳流道的数字化设计软件开发	(56)
主要参考文献	(57)
第3章 导水机构的流体动力学数字化设计	(58)
3.1 导水机构的类型与流体动力学设计要求	(58)
3.2 固定导叶的数字化设计方法	(58)
3.2.1 有关参数的确定和计算	(58)
3.2.2 固定导叶的骨线方程	(59)
3.2.3 固定导叶加厚的数字化方法	(60)
3.2.4 固定导叶的叶型曲线拟合方法	(61)
3.3 活动导叶的数字化设计方法	(61)
3.3.1 几何参数的确定	(62)
3.3.2 活动导叶的骨线方程	(62)
3.3.3 活动导叶加厚的数字化方法	(63)
3.3.4 活动导叶的叶型曲线拟合	(64)
3.4 导水机构的数字化设计软件开发	(64)
主要参考文献	(65)
第4章 吸出(吸入)部件的数字化设计	(66)
4.1 吸出(吸入)部件的流体动力学设计方法	(66)
4.2 标准型尾水管流道的数字化设计模型	(66)
4.2.1 标准型尾水管的基本参数及坐标系的建立	(66)
4.2.2 标准型尾水管流道的解析方程	(67)
4.2.3 标准型尾水管的工程解算方法	(69)
4.3 非标准型尾水管流道的数字化设计模型	(69)
4.3.1 非标准型尾水管的基本参数定义	(69)
4.3.2 非标准型尾水管的形状变化规律	(71)
4.3.3 非标准型尾水管流道的变化规律检查及校核计算	(71)
4.3.4 非标准型尾水管的工程解算方法	(72)
主要参考文献	(72)

第二部分 叶片式流体机械的几何数字化设计

第5章 产品数字化造型技术的基础	(74)
5.1 形体的数字化表示	(74)
5.1.1 表示形体的坐标系	(74)
5.1.2 几何元素的定义	(75)
5.1.3 表示形体的线框、表面和实体模型	(78)

5.1.4 形体边界及其拓扑关系	(79)
5.1.5 几何造型系统中常用的形体表示方式	(80)
5.2 实体造型及集合运算	(82)
5.3 特征造型	(83)
5.4 曲线、曲面几何基础	(84)
5.4.1 曲线论预备知识	(85)
5.4.2 曲线论基本公式	(85)
5.4.3 曲面论基本公式	(87)
5.5 均匀 B-spline 曲线、曲面	(88)
5.5.1 B-spline 曲线	(88)
5.5.2 B-spline 曲面	(90)
5.6 NURBS 曲线、曲面	(91)
5.6.1 NURBS 曲线的定义	(91)
5.6.2 NURBS 曲面的定义	(93)
5.6.3 NURBS 方法的优缺点	(93)
5.6.4 曲线、曲面生成	(93)
5.7 曲面造型的运算	(98)
5.7.1 曲线、曲面求交	(98)
5.7.2 过渡曲面	(101)
5.7.3 曲线曲面的光顺	(102)
5.8 产品数据与产品数据交换标准	(103)
5.8.1 产品数据与产品数据交换	(103)
5.8.2 常用的产品数据交换标准	(104)
主要参考文献	(107)
第6章 流体机械中典型零件的几何数字化设计	(109)
6.1 几何数字化设计软件平台	(109)
6.1.1 几何数字化设计软件的基本功能要求	(109)
6.1.2 商业化的几何数字化设计软件的发展状况	(110)
6.2 叶轮类部件的三维几何造型	(111)
6.2.1 叶轮几何模型与其他分析模型的关系	(111)
6.2.2 叶轮的几何设计方法	(111)
6.3 叶轮几何设计的数字化建模方法	(113)
6.3.1 叶片曲面数字化的几何模型选择	(113)
6.3.2 叶片曲面原始数据参数化	(114)
6.3.3 叶片的三维几何造型	(115)
6.3.4 叶片的几何计算和曲面性态分析	(119)
6.4 流体机械的其他零件三维几何造型	(120)
6.4.1 以特征造型为主的零部件造型示例	(120)
6.4.2 以自由曲面为主的零件造型示例	(121)
6.5 流体机械产品的数字化装配	(122)
主要参考文献	(123)

第三部分 叶片式流体机械的性能预测及优化设计

第 7 章 基于性能预测的叶片式流体机械优化设计	(126)
7.1 叶片式流体机械运行特点与性能预测	(126)
7.2 基于性能预测的流体机械的数字化优化设计技术	(128)
7.3 三维流场数值模拟分析软件	(129)
7.3.1 Numeca/FINE™ 系列软件	(130)
7.3.2 Fluent® 软件	(132)
7.3.3 CFX 软件	(133)
7.4 结构数值模拟分析与优化软件	(134)
7.4.1 ANSYS® 软件	(134)
7.4.2 MSC. NASTRAN® 软件	(135)
7.5 叶片式流体机械优化设计实例	(135)
7.5.1 离心压缩机优化设计	(135)
7.5.2 离心泵优化设计	(136)
7.5.3 水轮机转轮优化实例	(136)
主要参考文献	(137)
第 8 章 叶片式流体机械的流场数值模拟及性能预测	(139)
8.1 流体机械内部全三维流动的控制方程	(139)
8.2 流体机械内部湍流的数值模拟方法及湍流模型简介	(142)
8.2.1 湍流的数值模拟方法	(142)
8.2.2 湍流模型	(142)
8.2.3 过流表面的近壁面流动处理	(149)
8.3 CFD 软件中流场数值计算的主要方法	(151)
8.4 叶片式流体机械中动静区域的流场数值模拟方法	(153)
8.4.1 单参考系(SRF)模型	(154)
8.4.2 多参考系(MRF)模型	(155)
8.4.3 混合平面(MPM)模型	(157)
8.4.4 滑移网格(SMM)模型	(159)
8.5 叶片式流体机械中多工况流场数值模拟实例	(160)
8.5.1 混流式水轮机全流道流场数值模拟	(160)
8.5.2 双吸离心泵全流道流场数值模拟	(162)
8.6 流体动力性能预测与优化设计	(164)
8.6.1 流体动力性能预测计算的方法	(164)
8.6.2 叶片式流体机械流体动力性能预测实例	(166)
主要参考文献	(167)
第 9 章 叶片式流体机械的结构力学特性数值模拟	(169)
9.1 流体机械结构力学特性分析的内容	(169)

9.2 流体机械的结构静力分析	(170)
9.2.1 静力分析的弹性力学基础	(171)
9.2.2 静力分析的有限元方程	(174)
9.2.3 载荷及边界条件确定	(175)
9.2.4 强度理论及静力分析结果评价	(177)
9.2.5 静力分析实例	(179)
9.3 叶片式流体机械旋转部件的模态分析	(183)
9.3.1 结构运动方程及有限元方程	(183)
9.3.2 零部件模态分析的特征方程	(184)
9.3.3 模态分析的特征值求解方法	(185)
9.3.4 模态分析实例	(185)
主要参考文献	(186)

第四部分 流体机械的数字化制造基础

第10章 数字化加工基础	(190)
10.1 数字化控制设备	(190)
10.2 数控加工的基本概念	(191)
10.3 数控加工中的坐标系	(191)
10.3.1 数控机床的坐标系	(191)
10.3.2 工件坐标系	(194)
10.3.3 局部坐标系	(194)
10.4 数控系统	(194)
10.5 数控加工中插补原理	(196)
10.6 数控加工编程的基本概念	(197)
10.6.1 数控加工编程的定义	(197)
10.6.2 数控编程的过程	(198)
10.6.3 数控加工编程的指令及程序结构	(199)
主要参考文献	(202)

第11章 数字化加工的手工编程方法	(203)
11.1 手工编程及适应范围	(203)
11.2 数控加工中的刀具补偿	(203)
11.3 车削数控加工及其手工编程	(205)
11.3.1 数控车床形式与车削加工的特点	(205)
11.3.2 数控车削加工编程举例	(206)
11.4 铣、镗、钻数控加工及其手工编程	(208)
11.4.1 铣、镗、钻数控加工中的基本工艺问题	(208)
11.4.2 数控铣削加工编程示例	(209)
主要参考文献	(211)

第 12 章 数字化加工的自动编程与刀具轨迹计算	(212)
12.1 自动编程方法与过程	(212)
12.2 二维曲线、轮廓及型腔加工的刀具轨迹生成	(213)
12.2.1 曲线加工	(213)
12.2.2 二维轮廓加工	(214)
12.2.3 二维型腔加工	(215)
12.3 多坐标联动加工的刀具轨迹生成	(216)
12.3.1 多坐标数控加工的基本概念和加工对象	(217)
12.3.2 刀具轨迹的生成方法	(218)
12.4 三坐标加工曲面的刀具轨迹生成	(221)
12.4.1 走刀步长和加工行距	(221)
12.4.2 三坐标加工曲面中的刀具干涉避免	(223)
12.5 五坐标加工曲面的刀具轨迹生成	(223)
12.5.1 刀位数据及其计算	(224)
12.5.2 走刀步长的确定	(224)
12.5.3 走刀行距的确定	(227)
12.5.4 干涉检测与处理	(227)
12.6 曲面零件粗加工的刀具轨迹生成	(230)
12.7 曲面交线加工的刀具轨迹生成	(231)
12.7.1 曲面交线的加工方法	(231)
12.7.2 三坐标加工曲面交线的处理过程	(231)
12.7.3 五坐标加工曲面交线的处理过程	(231)
12.8 加工曲面间过渡区域的刀具轨迹生成	(232)
12.8.1 截平面法	(232)
12.8.2 半径递减法	(233)
12.9 进刀与退刀的刀具轨迹生成与编辑	(233)
12.9.1 进刀与退刀的刀具轨迹生成	(233)
12.9.2 刀具轨迹编辑	(234)
12.10 后置处理	(234)
12.10.1 后置处理的任务与流程	(234)
12.10.2 通用后置处理系统的原理	(236)
主要参考文献	(237)

第五部分 叶片式流体机械的数字化制造技术

第 13 章 流体机械中复杂零件数字化加工的工艺规划	(242)
13.1 叶片式流体机械中零部件的主要特征与加工工艺规划	(242)
13.2 加工机床与刀具的选择	(242)
13.2.1 机床类型及其工艺特点	(242)

13.2.2 刀具类型及其工艺特点	(244)
13.3 复杂形状零件数控加工的工艺规划	(246)
13.3.1 二维轮廓加工	(246)
13.3.2 二维型腔加工	(247)
13.3.3 曲面零部件的三轴联动加工	(248)
13.3.4 曲面零部件的五轴联动加工	(249)
13.4 曲面零件的粗加工	(252)
13.5 加工参数的确定	(252)
主要参考文献	(253)
第14章 叶轮类零件的数字化制造技术	(254)
14.1 叶轮类零件的特点及数字化制造过程	(254)
14.2 转轮制造工艺中的数字化技术	(255)
14.3 大型叶片数控加工的工艺规划及优化	(257)
14.4 大型叶片数控加工的编程	(261)
14.5 大型叶片数控加工实例	(264)
14.6 整体叶轮的数控加工技术	(265)
14.6.1 整体叶轮数控加工工艺规划	(266)
14.6.2 刀具轨迹规划及生成	(266)
14.6.3 刀具轨迹仿真验证	(268)
14.6.4 后置处理	(268)
14.6.5 加工实例	(268)
主要参考文献	(269)
第15章 流体机械中复杂零件的加工仿真	(271)
15.1 刀具轨迹或加工程序验证的必要性	(271)
15.2 复杂零件数控加工仿真系统的要求	(272)
15.3 数控加工仿真的实现方法	(273)
15.4 复杂零件的五轴联动加工仿真实例	(276)
15.4.1 大型水轮机叶片加工仿真	(276)
15.4.2 整体叶轮加工仿真	(278)
主要参考文献	(278)
第16章 流体机械中的数字化检测与逆向工程	(279)
16.1 数字化测量与叶片式流体机械数字化设计制造	(279)
16.2 数字化测量方法与设备	(280)
16.3 大型水轮机叶片制造中的数字化检测技术	(281)
16.4 叶轮的逆向工程技术	(283)
16.5 逆向工程软件和模块介绍	(285)
主要参考文献	(287)

第0章 绪论

0.1 叶片式流体机械及其产品开发过程

0.1.1 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，主要是以流体为工作介质的各种机械，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。

在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，可将流体机械分成：①叶片式；②容积式；③其他不属于这两类的流体机械。不同类型和种类的流体机械在工作原理、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、水泵、可逆式水泵水轮机、透平液力传动装置和水力推进器等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叶片流动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。叶片使流体介质的速度（方向或大小）发生变化，由于介质的惯性作用产生作用于叶片的力，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、风力机）

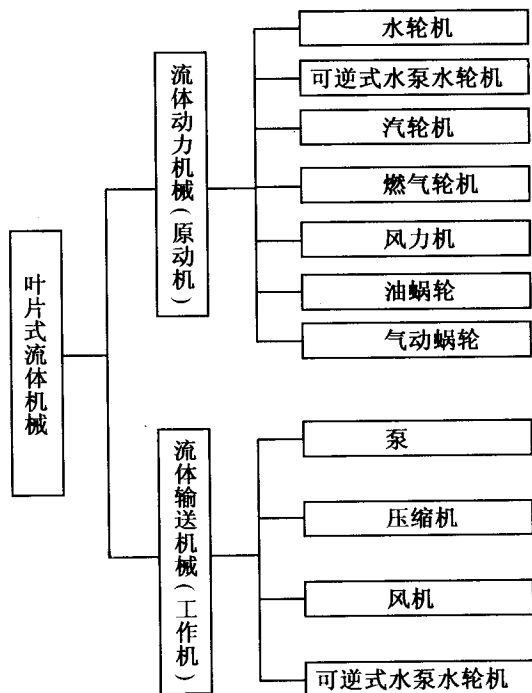


图 0-1 叶片式流体机械分类

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，从而将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如图 0-1 所示，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，叶片式流体机械在研究开发、设计与制造过程中都有其独特之处。本书主要介绍叶片式流体机械的数

字化设计与制造的理论及技术。

叶片式流体机械在国民经济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、风力机、燃气轮机)承担的。其中汽轮机和燃气轮机约占70%,水轮机约占30%。我国还有极为丰富的水力资源可以开发,水力发电所占的比例还会不断提高。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,总用电量中约1/3是用于驱动泵、风机和压缩机的。随着技术的不断发展,各个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,要求通过研究开发、不断创新来满足各个应用领域的技术进步的需求。

0.1.2 叶片式流体机械产品开发过程的特点

因流体机械以流体作为工作介质来转换能量,故在设计过程中一般首先进行流体动力学设计,设计出过流部件的流道(对于叶片式流体机械,其过流部件表面多由一些曲面组成),然后在设计出流道的基础上才能进行产品的结构设计、结构分析等后续工作。叶片式流体机械的传统研究开发一般过程包括流体动力学及几何设计、试验模型设计、结构计算分析、模型制造、模型试验验证与修改设计、产品(真机)的设计与制造、检测等多个环节。例如,水轮机产品的传统研制过程可分为过流部件的流体动力学和流道几何设计、试验模型结构设计与制造、“模型的流体动力性能试验及结构的刚强度试验”与优化修改设计等研究开发阶段。通过研究开发,得到满足电站要求的水轮机模型,再进行产品(真机)设计、结构计算分析、制造与检测等产品开发阶段。长期以来,水轮机的研究开发方法基本上都是采用经验设计和模型试验验证相结合,并通过不断修改来逐步完善的方式。在设计过程中,很难综合考虑全面的运行性能、设计的可制造性和经济性问题。转轮叶片设计水平和制造质量对于整个水轮机的性能影响极大,而叶片制造质量取决于其制造工艺方法。在传统的水轮机制造工艺方法中,对于水轮机中最关键的转轮叶片也一直采用传统的“砂型铸造→砂轮铲磨加工→立体样板检查”制造工艺,使得制造出来的转轮难以满足其综合性能要求。总体来看,在叶片式流体机械领域的传统研制过程中,主要采用基于实物模型试验验证为主的产品研制方式,整个研制周期太长,研制成本过高,已很难满足激烈的市场竞争的需要。

叶片式流体机械作为一类特殊的机械产品,其产品开发过程中除了一般机械产品开发所涉及的理论、方法和技术外,还涉及一些特殊领域,如流体机械的流体动力学设计理论、复杂的三维流动理论、多相流理论、涡动力学理论、空化与空蚀理论、流体机械的刚强度与疲劳特性研究、流体机械振动特性研究以及稳定性分析等等。从流体机械学科来看,也是一个涉及面很广的综合学科,它以数学、力学、机械学、材料学等为理论基础。在产品开发技术方面,还涉及机械设计理论方法、信息技术、计算机技术、软件技术、实验与测试、制造技术等很多的技术领域。随着这些学科和领域的研究不断深入、现代先进设计与制造理论及技术的发展、计算机及相关技术在叶片式流体机械中的广泛应用,现代流体机械研制过程已逐步变为包括流体动力学设计、流体动力学数值模拟、流体动力性能