

国家自然科学基金重点项目 (No.51536008 和 No. U1709209) 资助


制 · 造 · 业 · 高 · 端 · 技 · 术 · 系 · 列

流程离心泵 融合设计技术及应用

Integration Design Technique and
Application of Processes Centrifugal Pump



朱祖超 贾晓奇 李晓俊 著

 机械工业出版社
CHINA MACHINE PRESS

TH 311.022/2.

国家自然科学基金重点项目
(No. 51536008 和 No. U1709209) 资助

制造业高端技术系列

流程离心泵融合设计 技术及应用

Integration Design Technique and Application
of Processes Centrifugal Pump

朱祖超 贾晓奇 李晓俊 著

机械工业出版社

本书以对我国经济建设和国家安全有着重要现实意义的流程离心泵和航天发动机离心泵为具体工程背景,从基础理论、水力设计、数值计算、结构优化、在线监测以及应用案例等方面,针对实际输送介质的功率流程离心泵提出了基于流体动力、转子动力、在线监测和实际工况的功率流程离心泵机组融合设计方法。同时,设计开发了功率加氢进料离心泵机组、功率高压除焦水泵机组、功率低温高速液氧泵机组等一系列高端石化流程离心泵和航天发动机高速离心泵机组产品。这些高端离心泵机组产品均领先于国内同行业产品性能,达到了国际先进水平。本书研究成果可为功率流程离心泵国产化开发设计及可靠运行提供理论和技术支撑。

本书可作为流体机械和叶轮机械教学和科研人员的参考书,也可为离心泵机组产品设计和实际应用的科研人员提供重要的借鉴和指导。

图书在版编目(CIP)数据

流程离心泵融合设计技术及应用/朱祖超,贾晓奇,李晓俊
著. —北京:机械工业出版社,2019.12
(制造业高端技术系列)
ISBN 978-7-111-64417-0

I. ①流… II. ①朱…②贾…③李… III. ①离心泵—设计
IV. ①TH311.022

中国版本图书馆CIP数据核字(2019)第279111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:何月秋 责任编辑:何月秋 王彦青
责任校对:张征 封面设计:马精明
责任印制:李昂
北京瑞禾彩色印刷有限公司印刷
2020年1月第1版第1次印刷
169mm×239mm·17.75印张·1插页·307千字
标准书号:ISBN 978-7-111-64417-0
定价:128.00元

电话服务

客服电话:010-88361066

010-88379833

010-68326294

网络服务

机工官网: www.cmpbook.com

机工官博: weibo.com/cmp1952

金书网: www.golden-book.com

封底无防伪标均为盗版 机工教育服务网: www.cmpedu.com



朱祖超，男，1966年生，工学博士、教授、博导，钱江特聘教授，现为浙江理工大学流体传输系统技术国家地方联合工程实验室主任，

主要从事流体传输技术的理论研究和工程应用开发。主持国家自然科学基金和国家863计划项目20多项，作为第一完成人获国家科技进步奖二等奖1项和省部级科技进步奖一等奖1项、二等奖4项，曾获教育部新世纪人才培养人员、高等院校霍英东优秀青年教师奖、浙江省有突出贡献中青年专家、151人才重点资助人员、青少年英才一等奖和优秀博士后等荣誉称号。



贾晓奇，男，1987年生，工学博士、讲师。2017年获浙江大学车辆工程专业博士学位，同年12月进入浙江理工大学机械与自动控制学院工作。

主要从事离心泵水力设计与性能预测、转子动力特性计算分析、流体机械减振降噪等研究工作。主持国家自然科学基金项目和浙江省公益性技术项目各1项。作为第一作者和通讯作者发表SCI论文6篇。



李晓俊，1987年生，工学博士，副教授，硕士生导师。2013年获江苏大学流体机械及工程专业博士学位，2014年进入浙江理工大学工

作。主要从事离心泵空化流动特性及机理研究。主持国家自然科学基金项目2项，浙江省自然科学基金杰出青年项目、浙江省重点研发计划项目和浙江省科技厅公益性项目各1项。作为第一作者和通讯作者发表SCI论文12篇。

流程离心泵广泛应用于石油化工、煤化工等行业，是国民经济必不可少的重要流体输送设备。在流程离心泵机组向大功率、多级化、高压及高转速方向发展的过程中，带来的一个不可避免的问题是离心泵的工作稳定性与可靠性。大功率流程离心泵机组必须具备良好的工作稳定性和可靠性才能保证整个石油炼化装置的安全平稳和可靠运行。总体来看，我国流程离心泵尤其是大功率石化流程离心泵基本处于国际液体输送系统设备产业的中低端，流程离心泵的先进设计制造理念及其与运行调控的互联互通还没有引起高度的重视，较为完善的融合设计方法尚未形成。

本书以三元流动理论和经验公式作为初步设计基础，以效率、汽蚀余量、振动等作为优化目标，以试车时的实测数据作为判定准则，根据实际介质进行针对性的结构设计，提出了基于流体动力、转子动力、在线监测和实际工况的大功率流程离心泵机组融合设计方法。提出了基于现场运行状况和实际流体介质的个性化结构设计技术，经独特的结构设计和积木化设计，设计开发了大功率加氢进料离心泵机组、大功率高压除焦水泵机组、大功率液力透平与加氢进料泵机组、大功率加氢反应进料高压注水泵机组、汽轮机驱动冷凝水泵机组、大功率单级高速原料油进料泵机组、高速串联加氢注水离心泵机组、大功率高温油浆泵机组、大功率低温高速液氧泵机组、大功率低温潜液离心泵机组等产品，这些开发产品的性能均领先于同行业的产品性能，达到了国际先进水平。本书的研究成果可为大功率流程离心泵国产化开发设计及可靠运行提供理论和技术支撑。

本书在成书过程中，得到了浙江理工大学、嘉利特荏原泵业有限公司、杭州大路实业有限公司、浙江天德泵业有限公司、利欧集团股份有限公司、杭州新亚低温科技有限公司、昆明嘉和科技股份有限公司、烟台龙港泵业股份有限公司以及大连大耐泵业有限公司等单位有关老师和科技人员的大力支持，他们包括崔宝玲教授、李映教授、翟璐璐副教授、林培锋副教授、陈小平副教授、林德生高级工程师、宿向辉博士、胡建新博士、任芸博士、王德静高级工程师、

郑红海高级工程师、袁静高级工程师等，在此一并表示衷心的感谢！

本书得到了国家自然科学基金重点项目（No. 51536008 和 No. U1709209）
以及浙江省自然科学基金杰出青年项目（LR20E090001）的资助。

对于书中存在的不足，敬请读者批评指正。

朱祖超 贾晓奇 李晓俊

本书字符含义

1. 英文字母含义

a_3	蜗壳喉部高度 (m)
a_d	导叶喉部平面宽度 (m)
A_d	导叶喉部面积 (m^2)
A_w	蜗壳喉部面积 (m^2)
b_1	叶片进口宽度 (m)
b_2	叶片出口宽度 (m)
b_3	蜗壳宽度 (m)
b_d	导叶喉部轴面宽度 (m)
B_2	叶轮前、后盖板总厚度 (m)
C	主阻尼矩系数 ($N \cdot s/m$)
C_q	汽蚀比转速
d_c	小齿轮的直径 (mm)
d_h	叶轮轮毂直径 (m)
D_1	叶轮进口直径 (m)
D_2	叶轮出口直径 (m)
D_3	蜗壳基圆直径 (m)
D_d	泵出口直径 (m)
D_{io}	诱导轮出口直径 (m)
D_s	泵进口直径 (m)
D_t	诱导轮叶尖直径 (m)
F_a	齿轮轴向力 (N)
H	扬程 (m)
$k_{斜}$	叶片载荷分布在主加载区的斜率
m_n	齿轮的模数 (mm)
M	主附加质量 (kg)

p_g	润滑油表压 (Pa)
Q	流量 (m^3/s)
Q_{des}	设计流量 (m^3/h)
Q_L	润滑油量 (m^3/h)
n	转速 (r/min)
n_s	泵比转速
N	轴承转速 (r/min)
R_{d1}	诱导轮进口轮毂比
R_{d2}	诱导轮出口轮毂比
S	叶片静矩 ($\text{N} \cdot \text{m}$)
S_d	诱导轮导程 (m)
\dot{S}_D'''	由平均速度产生的熵产 (W/K)
\dot{S}_D'''	由脉动速度产生的熵产 (W/K)
T	流体质点当地温度 (K)
s_j	诱导轮叶片节距 (m)
u_1	叶轮进口速度 (m/s)
u_2	叶轮出口速度 (m/s)
\bar{u}	流体时均速度 (m/s)
u_τ	壁面摩擦速度 (m/s)
U	齿轮的圆周速度 (m/s)
W_z	轴承载荷 (N)
z	叶片数
z_i	诱导轮叶片数

2. 希腊字母含义

α'_3	导叶进口液流角 ($^\circ$)
α_f	反导叶进口安放角 ($^\circ$)
α'_f	反导叶进口液流角 ($^\circ$)
β_1	叶片进口角 ($^\circ$)
β_2	叶片出口角 ($^\circ$)
β_{i1}	诱导轮进口叶片安放角 ($^\circ$)
β_{i2}	诱导轮出口叶片安放角 ($^\circ$)

θ	叶片总包角 ($^{\circ}$)
θ_1	诱导轮叶片前缘包角 ($^{\circ}$)
θ_2	叶尖包角 ($^{\circ}$)
θ_w	蜗壳隔舌起始角 ($^{\circ}$)
Φ_{ind}	诱导轮进口流量系数
Δc_{ind}	诱导轮叶尖间隙 (m)
δ_{ind}	诱导轮叶片厚度 (m)
μ_t	湍流黏性系数 ($\text{Pa} \cdot \text{s}$)
ε	湍流耗散率 (m^2/s^3)
ν_t	运动黏度系数 (m^2/s)
μ	流体动力黏度 ($\text{Pa} \cdot \text{s}$)
ξ_i	间隙流场进出口压力损失系数
ξ_e	间隙流场进出口压力恢复系数
σ	叶轮盖板圆周方向应力 (Pa)
$[\sigma]$	许用应力 (Pa)
β_L	齿轮螺旋角 ($^{\circ}$)
ρ	密度 (kg/m^3)
ω	主轴转速 (r/min)

目录



前言

本书字符含义

第1章 绪论	1
1.1 背景	1
1.2 国内外研究现状	5
1.2.1 离心泵水力性能预测研究现状	6
1.2.2 离心泵转子系统动力学特性预测研究现状	10
1.2.3 离心泵机组在线监测和故障诊断研究现状	16
1.2.4 智能化流程离心泵机组产品开发研究现状	19
第2章 流程离心泵过流部件的水力设计	21
2.1 离心泵过流部件的初步设计	22
2.1.1 整体设计	22
2.1.2 主要过流部件设计	24
2.2 离心泵全流场数值计算与性能预测	34
2.2.1 计算流体力学基本理论	34
2.2.2 全流场瞬态数值计算参数设置	39
2.2.3 适宜泵实际工况的湍流模型发展	41
2.2.4 离心泵水力性能预测	78
2.3 基于熵产和叶片载荷的离心泵叶片叶型设计	79
第3章 流程离心泵机组转子系统的设计	105
3.1 转子系统动力学方程及受力分析	105
3.2 流体激励力表征及求解	108
3.3 转子系统动力学特性方程	110
3.4 转子系统动力特性分析与预测	111



第4章 流程离心泵机组结构的设计	112
4.1 整体设计	112
4.2 转子系统结构设计	113
4.2.1 叶轮结构设计	113
4.2.2 转轴设计	114
4.2.3 支承系统设计	115
4.3 叶轮的安装形式	115
4.4 润滑系统设计	116
4.5 密封系统设计	118
4.6 轴向力平衡系统设计	119
4.7 在线监控及故障诊断系统设计	121
4.7.1 整体方案设计	121
4.7.2 离心泵信号采集模块设计	126
4.7.3 远程监测系统服务器端设计	132
4.7.4 离心泵状态信号特征提取	135
4.7.5 离心泵运行状态分析	136
第5章 流程离心泵机组设计及应用案例	149
5.1 大功率加氢进料离心泵机组	149
5.2 大功率高压除焦水泵机组	157
5.3 大功率液力透平与加氢进料泵机组	165
5.4 大功率加氢反应进料高压注水泵	178
5.5 汽轮机驱动冷凝水泵机组	196
5.6 大功率高速离心泵机组	214
5.6.1 大功率单级高速原料油进料泵	214
5.6.2 高速串联加氢注水离心泵机组	221
5.7 低温离心泵机组	236
5.7.1 低温高速液氧泵机组	236
5.7.2 大功率低温潜液离心泵机组	246
5.8 大功率高温油浆泵机组	256
参考文献	261

Contents

Preface

Symbol List

Chapter 1	Introduction	1
1.1	Background	1
1.2	Research Actuality	5
1.2.1	Prediction of hydraulic performance	6
1.2.2	Prediction of rotor dynamic characteristic	10
1.2.3	On-line monitoring and fault diagnosis system	16
1.2.4	Intelligent product design of centrifugal pump	19
Chapter 2	Hydraulic design of centrifugal pump	21
2.1	Preliminary hydraulic design	22
2.1.1	Integrated design	22
2.1.2	Hydraulic design of main flow Passage components	24
2.2	The whole flow field numerical calculation and performance prediction	34
2.2.1	The theory of computational fluid dynamics	34
2.2.2	Parameter settings of the whole flow field numerical calculation	39
2.2.3	Development of the appropriate turbulence model under actual working condition of centrifugal pump	41
2.2.4	Performance prediction of centrifugal pump	78
2.3	Blade design based EGR and blade load analytical method	79
Chapter 3	Design of rotor system of centrifugal pump	105
3.1	Rotor dynamic equation and force analysis	105
3.2	Characterization and solution of fluid exciting force	108

3.3	Rotor dynamic equation	110
3.4	Analysis of rotor dynamic characteristic	111
Chapter 4 Structural design of centrifugal pump		112
4.1	Integrated design	112
4.2	Design of rotor system	113
4.2.1	Structural design of impeller	113
4.2.2	Design of pump shaft	114
4.2.3	Design of support system	115
4.3	Installing form of impeller	115
4.4	Design of lubrication system	116
4.5	Design of sealing system	118
4.6	Design of axial force balancing system	119
4.7	Design of on-line monitoring and fault diagnosis system	121
4.7.1	Integrated design	121
4.7.2	Signal acquisition module of centrifugal pump	126
4.7.3	Remote monitoring system server	132
4.7.4	Extraction of status signal of centrifugal pump	135
4.7.5	Analysis of centrifugal pump operating parameters	136
Chapter 5 Design and application of centrifugal pump		149
5.1	High-power hydrogenation feed centrifugal pump unit	149
5.2	High pressure coke removal centrifugal pump unit	157
5.3	Hydraulic turbine and hydrogenation feed pump unit	165
5.4	High pressure water-injection pump unit of hydrogenation feed system	178
5.5	Condensing water pump unit driven by steam turbine	196
5.6	High speed centrifugal pump unit	214
5.6.1	Single stage high speed oil pump unit	214
5.6.2	High speed water-injection pumps in series of hydrogenation feed system	221
5.7	Cryogenic centrifugal pump unit	236

5.7.1	High speed liquid oxygen centrifugal pump unit	236
5.7.2	Cryogenic submersible centrifugal pump unit	246
5.8	High-power oil slurry centrifugal pump	256
References	261



1.1 背景

流程离心泵广泛应用于石油化工、煤化工等行业，是国民经济必不可少的重要流体输送设备。在石油化工领域，一套 180 万 t 的甲醇装置需要 120 台离心泵，一套 12 万 t 的 MTBE（甲基叔丁基醚）装置需要 60 台离心泵，一套 300 万 t 的加氢重整装置需要 70 台离心泵，一套 210 万 t 的延迟焦化装置需要 50 台离心泵。其中加氢重整装置输送高压注水的离心泵，流量 $8\text{m}^3/\text{h}$ ，扬程 1400m，转速 22000r/min，电动机功率 185kW，是目前炼油生产中转速最高的高速离心泵；延迟焦化装置中输送高压除焦水的离心泵，流量 $320\text{m}^3/\text{h}$ ，扬程 3350m，转速 4100r/min，电动机功率 4700kW，是目前石油化工领域采用电动机驱动功率最大的流程离心泵。从上述可以看出，高压（高速或多级）和大功率密度（大型化）是流程离心泵的发展趋势，向大功率发展就要求流程离心泵必须具有很好的工作可靠性。

在当前及今后流程工业安全生产紧迫性和重要性日趋重视的情况下，开展流程离心泵尤其是大功率石化流程离心泵的流体动力、转子动力及运行监控方面的研究非常迫切。在此基础上凝练基于实际运行工况的大功率石化流程离心泵水力设计和结构设计方法，不仅提升流程离心泵和整个液体输送系统的技术水平，而且对保证生产装置连续化安全和可靠运行至关重要。由于对流程离心泵融合设计关键技术研究不够而导致的生产故障甚至安全事故的教训非常深刻。如镇海炼化加氢重整装置中输送碳 4 介质的高速离心泵，由于流体动力设计方面的原因，其扬程流量特性线存在正斜率上升段，小流量工况会出现剧烈的出口压力脉动；而在系统运行中又未能及时监测到突变的压力脉动，导致装置运行故障。中海石油宁波大榭石化低温甲醇洗装置中输送贫甲醇的大功率流程离

心泵，在转子动力设计过程中，由于对系统受力计算不准确，在特定工况下轴向串量和振动均超标；而在泵运行过程中由于未能及时监测，导致推力瓦烧毁和口环摩擦副碰磨，影响了连续化生产。陕西延长石油（集团）柴油加氢项目中制氢装置的锅炉给水泵，由于流体动力及转子动力设计方面的原因，产生了在小流量工况下诱导轮进口处强烈的回流流动和诱导轮叶片受力不均匀，曾两次发生诱导轮进口叶片断裂的情况，而在运行期间并未监测到诱导轮的故障，影响了装置的正常运行。

近年来，在石油化工、核电、南水北调、西气东输、大型火电以及国防等国家重大工程的有力推动下，我国大功率流程离心泵在研制和设计制造方面取得了较大的进展。百千万超超临界锅炉给水泵、长输管线输油泵和高速高压化工流程泵等已经基本实现了国产化，核电用离心泵国产化率已达到 75%。尽管如此，我国流程工业一些关键装置的大功率流程离心泵仍然主要依赖进口，国产大功率石化流程离心泵的工作可靠性和产品性能与国外的相比仍有差距，国内用户对国产大功率石化流程离心泵的认可度也略显不足。镇海炼化仅进口一台 4700kW 高压除焦水泵就需要 2000 万元，进口各类流程泵超过 3.5 亿元；神华集团进口一台超临界锅炉给水泵需要 3000 万元；如考虑已建装置进口设备的维护费用，我国石油化工领域每年需要花费 500 亿元进口各类流程泵产品及其服务。

总体来看，我国流程离心泵尤其是大功率石化流程离心泵基本处于国际液体输送系统设备产业的中低端，流程离心泵的先进设计制造理念及其与运行调控的互联互通还没有引起高度的重视，较为完善的融合设计方法尚未形成。其存在的主要问题：一是在个性化设计方面，目前大都是选用现有的离心泵产品去适应现场使用工况，专门针对具体实际工况而开展的大功率石化流程离心泵个性化设计明显不足；二是在流体动力设计方面，现有设计方法仅仅基于速度系数法或相似换算法设计流程泵，较少采用流体动力学方法对大功率石化流程离心泵进行针对性的设计；三是在机械动力学方面，高速、高压、超大功率的发展趋势导致流体对大功率流程离心泵转子系统的作用愈加明显，而在离心泵转子系统设计时较少考虑到流场与转子系统的耦合作用；四是在实时动态的状态监测与安全诊断关键技术方面，目前大功率高速流程离心泵振动衡量指标以国际及国内行业标准（如 API610、GB/T 3215、JB/T 8097）为依据，但这些标准对振动衡量指标的设定未考虑到运行工况及流场结构引起的流体激励力等因素的影响。目前国内外对上述问题研究得还不够充分，未能有效支撑建立基于



流体动力学、转子动力学、在线监测和实际工况的大功率石化流程离心泵机组的融合设计方法。

存在上述主要问题的原因在于对流程离心泵尤其是大功率流程离心泵的关键科学问题研究得不够充分。大功率流程离心泵的真实运行环境和结构参数复杂，流场中很容易出现分离、漩涡、二次流等，同时存在不同尺度的轴向、径向和周向涡系。因此，流程离心泵内部非定常流动及其造成的转子非线性动力特性严重影响了泵连续可靠运行。

石油化工工业的转型升级对大功率流程离心泵设备存在较大的需求。然而在设备设计和实际运行过程中，由于流程系统运行数据监测不足，以及实际生产中可能出现的特殊状况、产能扩大和工艺需求波动等原因，使得精确掌握流程离心泵的运行特性及其与管网系统的匹配存在很大难题。与普通离心泵相比，大功率石化流程离心泵的结构更为复杂，过流部件的结构形式更为多样。泵内部流体非定常激励及其造成的转子振动问题将严重影响大功率流程离心泵的安全稳定运行。因此，特定工况下的流程离心泵个性化设计以及流程离心泵运行过程中的状态监测和风险评估就显得尤为重要。从长周期运行和高效运行的理念出发，研究大功率石化流程离心泵机组的融合设计方法及其运行监控系统，对提升流程离心泵的产品档次、保障流程泵的安全可靠运行有着极大的意义。

为提升大功率石化流程离心泵的产品竞争力和安全运行水平，本书作者在国家自然科学基金重点项目的支持下，针对大功率石化流程离心泵开展了流动特性、转子动力及在线监测等相关方面的研究。本书创建了理论分析、数值模拟和流动测试相结合的大功率石化流程离心泵机组融合设计方法和在线监控平台，攻克了复杂流动环境下大功率石化流程离心泵机组的流动预测、转子系统动力预测及运行状态安全预估等关键核心技术，形成了适用于广泛应用条件下的大功率石化流程离心泵机组设计的新方法、新技术及新产品。

本书通过对大功率石化流程离心泵在流动特性、转子动力及在线监测等相关关键科学问题的研究，构建了用带螺旋度约束的动态亚格子应力模式精确求解泵内弱可压流动，提出了基于流体激励力考虑的转子动力特性计算分析方法，建立了基于流场计算、转子动力、结构设计和在线监控相结合的大功率流程离心泵机组的融合设计方法，开发出了基于实际工况的大功率石化流程离心泵机组系列产品，并在石化领域得到了广泛的应用。本书的总体结构如下：

- 1) 以三元流动理论和经验公式作为初步设计基础，以效率和振动响应作为