

离心泵动静干涉作用机理 及低噪声水力设计

司乔瑞 袁寿其 袁建平 著


江苏大学出版社
JIANGSU UNIVERSITY PRESS

国家杰出青年科学基

键技术研究” (50825902)

国家自然科学基金项目“离心泵进口畸变流诱导噪声作用机理研究”(51509108)

江苏省自然科学基金项目“离心泵低噪声水力优化设计及关键技术研究”(BK20150516)

中国博士后科学基金项目(2015M581735, 2016T90422)

资助

离心泵动静干涉作用机理 及低噪声水力设计



Rotational-Stator Interaction Mechanism and
Low Noise Hydraulic Design of
Centrifugal Pumps

司乔瑞 袁寿其 袁建平 著

 江苏大学出版社
JIANGSU UNIVERSITY PRESS

镇江

图书在版编目(CIP)数据

离心泵动静干涉作用机理及低噪声水力设计 / 司乔瑞, 袁寿其, 袁建平著. — 镇江: 江苏大学出版社, 2016.11

ISBN 978-7-5684-0330-6

I. ①离… II. ①司… ②袁… ③袁… III. ①离心泵—设计 IV. ①TH311.022

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2016)第 282766 号

离心泵动静干涉作用机理及低噪声水力设计

Lixinbeng Dongjingganshe Zuoyong Jili Ji Dizaosheng Shuili Sheji

著 者/司乔瑞 袁寿其 袁建平

责任编辑/常 钰 孙文婷

出版发行/江苏大学出版社

地 址/江苏省镇江市梦溪园巷 30 号(邮编: 212003)

电 话/0511-84446464(传真)

网 址/http://press.ujs.edu.cn

排 版/镇江华翔票证印务有限公司

印 刷/南京精艺印刷有限公司

开 本/890 mm×1 240 mm 1/32

印 张/5.875

字 数/170 千字

版 次/2016 年 11 月第 1 版 2016 年 11 月第 1 次印刷

书 号/ISBN 978-7-5684-0330-6

定 价/42.00 元

如有印装质量问题请与本社营销部联系(电话:0511-84440882)

作者简介



司乔瑞 男,1986年6月生,助理研究员,硕士生导师。一直致力于离心泵内部流动及其致声机理的研究。在《Journal of Fluids Engineering; Transactions of the ASME》《机械工程学报》《振动与冲击》等期刊上发表研究论文20余篇。已获授权发明专利9项,授权实用新型专利5项。参与完成国家杰出青年科学基金、国家科技支撑计划课题、江苏省自然科学基金创新学者攀登计划等国家及省部级科研项目4项;正在主持国家自然科学基金项目1项,江苏省自然科学基金项目1项,中国博士后科学基金面上资助、特别资助项目各1项和流体及动力机械教育部重点实验室开放基金项目1项,参与国家自然科学基金项目2项。受2013年国家建设高水平大学公派研究生项目资助赴法国巴黎高科国立高等工程技术大学校(Arts et Métiers Paris Tech)留学1年。获2013年“江苏省优秀研究生干部”称号,课题荣获“LMS公司高校奖学金”、第十三届“挑战杯”全国大学生课外学术科技作品竞赛一等奖。是江苏大学“青年骨干教师培养工程”青年学术带头人培养人选,美国机械工程师学会(ASME)会员。目前主要研究方向为旋转机械流动诱导振动噪声、水力机械压力脉动特性及可靠性分析、泵水力设计及其运行节能机理研究等。



袁寿其 男,1963年4月生,研究员,博士生导师,全国人大代表,国家杰出青年科学基金获得者。现任江苏大学校长、国家重点学科流体机械及工程学科带头人、国家水泵及系统工程技术研究中心主任。兼任中国农业工程学会副理事长、中国农业机械学会副理事长、教育部能源动力类专业教学指导委员会副主任、《排灌机械工程学报》主编、《江苏大学学报》(自然版)主编、《农业机械学报》副主编、《农业工程学报》编委会副主任、《International Journal of Agricultural and Biological Engineering》编委会副主任、《Journal of Hydrodynamics》编委、《中国农业科技导报》编委、《机械工程学报》编委等。

长期从事排灌机械工程和流体机械及工程领域的科研工作。曾主持完成国家杰出青年科学基金项目、国家863项目、国家自然科学基金项目、国家科技支撑计划项目、江苏省自然科学基金重点项目等国家和省部级课题30余项。申请发明专利112项,其中已授权发明专利30项。在《农业工程学报》《机械工程学报》等杂志和美国ASME学术讨论会等发表论文400余篇,被SCI和EI收录300余篇。出版著作8部。获国家科技进步二等奖2项,国家级教学成果二等奖1项,省部级科技进步一等奖4项、二等奖13项。2006年被评为“新世纪百千万人才工程”国家级人选,2010年获何梁何利基金科学与技术创新奖,2010年获中国农业机械发展贡献奖,2012年被评为全国优秀科技工作者,2013年被列为国家“万人计划”专家。指导的学生获全国百篇优秀博士论文1篇、提名奖1篇,江苏省优秀博士和硕士论文9篇。



袁建平 男,1970 年 12 月生;研究员,博士生导师。现任江苏大学流体机械工程技术研究中心主任、国家水泵及系统工程技术研究中心副主任,是江苏特聘教授、国际空化研究所委员会委员、IAHR 亚洲分会秘书、ISROMAC 2016 分论坛组织者、流体机械及工程国际会议 (ISFMFE 2012) 分会场主席,以及《Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part A Journal of Power and Energy》、《Engineering Applications of Computational Fluid Mechanics》、《机械工程学报》(英文版)等国内外学术期刊论文评审专家。

长期致力于流体机械及工程专业的科研工作,在离心泵内部不稳定流动及其流动诱导振动与噪声、离心泵的运行节能关键技术等方面做出了一些创新性工作。曾主持或主要参与国家 863 项目、国家科技支撑计划项目、国家杰出青年科学基金项目、国家自然科学基金项目、江苏省创新学者攀登项目、江苏省“青蓝工程”科技创新团队项目等国家、省级科研项目 20 余项。作为主要研究人员参与的成果获国家科技进步二等奖 2 项,高等学校科学技术进步一等奖、二等奖各 1 项,江苏省科技进步一等奖、二等奖各 1 项;获授权发明专利 19 项,授权实用新型专利 12 项;在美国流体机械工程等国内外学术刊物上发表学术论文 40 余篇,其中被 SCI 收录 15 篇。

前 言

随着环境法规的出台,用户对产品的振动噪声指标提出了更高的要求。作为重要的能量转换设备,离心泵广泛应用于国民经济各个部门,是流体输送设备的“心脏”。掌握离心泵噪声产生机理及如何在传统离心泵设计方法的基础上,通过优化几何参数提高离心泵的水力效率和降低离心泵的噪声水平,已成为一个重要的研究课题。同时,离心泵内动静干涉作用及流动诱导噪声现象是多学科交叉领域,目前已成为国内外学者的研究热点。本书的研究工作是在国家杰出青年科学基金项目“离心泵基础理论和节能关键技术研究”(50825902)、国家自然科学基金项目“离心泵进口畸变流诱导噪声作用机理研究”(51509108)、江苏省自然科学基金项目“离心泵低噪声水力优化设计及关键技术研究”(BK20150516)和中国博士后科学基金项目(2015M581735, 2016T90422)的资助下展开的。

本书采用机理分析、试验测试和数值模拟相结合的方法对离心泵动静干涉作用机理及流动诱导噪声的特性进行研究,旨在建立若干高效率低噪声离心泵水力设计准则。系统总结分析了离心泵噪声的分类和产生原因,提出现有的离心泵噪声测量和评价标准已不能满足其噪声评估的需要,离心泵流动诱导噪声是离心泵机组噪声测量和评估的关键。基于法国巴黎高科国立高等工程技术大学校的动静干涉试验台,在某导叶式离心泵模型上进行了三孔探针、PIV、导叶叶片静压和进口流动诱导噪声的瞬态测量等试



验,通过评估导叶压力恢复能力和分析叶轮上、下游流场的瞬态特性,对离心泵动静干涉作用引起的湍流脉动机理及流动诱导噪声作用机理进行了研究。搭建了离心泵流动诱导噪声测试平台,建立了无源四端网络法声学测试模型,试验研究了离心泵流动诱导噪声随运行工况(变流量和变转速)的变化规律,分析了回流和空化发生时的流动诱导噪声特性。通过研究叶轮切割对模型泵流动噪声声压级和空化性能的影响,提出了叶轮和隔舌之间的最佳间隙值。采用结合计算流体力学和计算声学(CFD/CA)的混合算法对IS65-50-165模型泵的流动诱导噪声进行了求解,并分析了声振耦合作用对流动诱导噪声计算的影响。研究发现流场求解时,采用Scale Adaptive Simulation(SAS)湍流模拟既能避免对网格和计算资源的过高要求,又能满足计算声源信息的需要。本书首次采用权矩阵方法借助数值模拟技术对离心泵叶轮进行了多指标优化设计,得到一组水力模型优化方案,并试验验证了该数值优化方法的可行性。研究发现,高效率低噪声离心泵叶轮设计的关键是选择合理的叶轮和隔舌间隙,以及减弱叶轮出口的尾流脉动等。

事实上,离心泵动静干涉作用机理和流动诱导噪声现象极其复杂,离心泵低噪声水力设计影响因素繁多,研究内容又是多学科交叉的,目前国内外对其的研究仍处于起步阶段。作者所做的研究工作仍是探索和初步尝试,无论是在试验研究还是在数值研究和理论分析方面都需要进一步系统化和深化。作者希望本书的出版能在一定程度上拓展水力机械(离心泵)降噪领域的思维方式。限于作者的能力和水平,加之时间仓促,书中难免有不当之处,敬请读者批评指正。

本书可供从事流体机械设计和节能降噪研究工作的工程技术人员及高等院校相关专业的师生参考。

本书的部分工作是作者在国家留学基金委员会(China Schol-



arship Council)的资助下在法国巴黎高科国立高等工程技术大学校 (Arts et Métiers Paris Tech) 里尔力学实验室 (Laboratoire de Mécanique de Lille) 完成的, 在研究过程中得到了 Gérard Bois 教授及其团队的大力支持, 离心泵动静干涉作用机理的研究工作是建立在 Guillaume Wuibaut 博士、Giovanna Cavazzini 博士、Patrick Cherdieu 博士、Antoine Dazin 教授、Patrick Dupont 副教授、Annie-Claude Bayeul-Lain 老师和 Olivier Roussette 工程师等的工作基础上的, 谨在此向他们致以衷心的感谢。此外, 感谢江苏大学国家水泵及系统工程技术研究中心的领导和同事们的支持与鼓励, 感谢课题组裴吉副研究员、张金凤副研究员、骆寅副研究员、王川博士和衡亚光硕士的帮助。在本书撰写过程中, 参考和引用了大量国内外相关文献, 在此对这些文献的作者一并表示感谢。

作 者

2016 年 6 月于江苏大学

主要符号说明

符号	物理意义	单位	符号	物理意义	单位
Q	流量	m^3/h	β_1	叶轮叶片进口安放角 ($^\circ$)	
Q_d	设计流量	m^3/h	β_2	叶轮叶片出口安放角 ($^\circ$)	
H_t	理论扬程	m	β_{1F}	进口液流角 ($^\circ$)	
H	扬程	m	β_{2F}	出口液流角 ($^\circ$)	
H_d	设计扬程	m	$\Delta\beta$	绝对液流角和相对液流角的差值 ($^\circ$)	
P	轴功率	kW	v_1	叶片进口绝对速度	m/s
η	效率	$\%$	v_2	叶片出口绝对速度	m/s
η_h	水力效率	$\%$	u_1	进口圆周速度	m/s
η_v	容积效率	$\%$	u_2	出口圆周速度	m/s
η_m	机械效率	$\%$	R_2	叶轮出口半径	mm
η_d	设计流量下效率	$\%$	ψ_2	叶轮出口排挤系数	
n	转速	r/min	α_0	蜗壳隔舌螺旋角 ($^\circ$)	
n_s	比转速		δ_1	叶轮表面粗糙度	μm
M	扭矩	$\text{N} \cdot \text{m}$	p	压力	Pa
Z	叶轮叶片数		F_r	径向力	N
D_j	叶轮进口当量直径	mm	f	频率	Hz
d_h	叶轮轮毂直径	mm	g	重力加速度	m/s^2
D_2	叶轮出口直径	mm	ω	角速度	rad/s
D_3	基圆直径	mm	ν	运动黏性系数	m^2/s
b_1	叶片进口宽度	mm	ρ	密度	kg/m^3
b_2	叶片出口宽度	mm	Re	雷诺数	
S	叶片厚度	mm	SPL	声压级	dB



符号	物理意义	单位	符号	物理意义	单位
ϕ_1	叶片包角	($^{\circ}$)	L_p	总声压级	dB
p_{in}	叶轮进口压力	Pa	δ	叶轮和隔舌间隙率	%
p_{ref}	参考声压	Pa	b_4	导叶出口宽度	mm
H_0	空化前扬程	m	Z_d	导叶叶片数	
$NPSHR$	必需空化余量	m	α_3	导叶叶片进口角	($^{\circ}$)
$NPSHA$	装置空化余量	m	α_4	导叶叶片出口角	($^{\circ}$)
C_p	无量纲压力系数		Q_{imp}	叶轮流量	m^3/h
p_t	参考静压	Pa	Q_{vc}	进口管内流量	m^3/h
K_p	压力波动系数		Q_{vl}	叶轮进口泄漏流量	m^3/h
C_{padv}	压力脉动强度系数		Q_{diff}	导叶流量	m^3/h
c_0	声速	m/s	Q_{shr}	前盖板叶顶泄漏流量	m^3/h
f_{BPF}	叶片通过频率	Hz	Q_{hub}	后盖板叶顶泄漏流量	m^3/h
f_{imp}	叶轮通过频率	Hz	p_l	探针左孔压力	Pa
D_4	隔舌安放直径	mm	p_c	探针中心孔压力	Pa
ΔD_2	叶轮切割量	mm	p_r	探针右孔压力	Pa
D_s	进口管直径	mm	C_α	探针角度系数	
D_d	出口管直径	mm	C_{po}	探针总压系数	
d_y	引射管直径	mm	C_{ps}	探针速度系数	
c_m	比热容	$J/(kg \cdot ^{\circ}C)$	v_R	半径 R 处绝对速度	m/s
Φ	热量	J	v_r	径向速度分量	m/s
α_h	对流换热系数		v_u	切向速度分量	m/s
L	长度	m	α	隔板处流量系数	
Δt_{0-i}	进出口温差	$^{\circ}C$	v^*	速度系数	
s_{ij}	极差		p_t^*	总压系数	
ω_{avg}	权重矩阵		p_{st}^*	静压系数	
$T_u(x, y)$	湍动能	J	S_a	沉箱隔板面积	m^2

注:书中对符号有注释的优先;多于一个含义的符号在书中另做说明。

目 录

主要符号说明 /// I

第 1 章

绪 论 ///001

- 1.1 研究目的和背景 /001
- 1.2 国内外研究现状 /002
- 1.3 小结 /006
- 1.4 本书主要内容 /007

第 2 章

离心泵声学基础 ///009

- 2.1 离心泵噪声评价 /009
 - 2.1.1 离心泵机组声源分类及传播途径 /009
 - 2.1.2 离心泵噪声测量与评估方法 /011
- 2.2 离心泵流动诱导噪声的产生及传播模型 /013
- 2.3 离心泵内非定常流体力和非定常流动现象 /015
 - 2.3.1 径向力 /016
 - 2.3.2 动静干涉 /016
 - 2.3.3 进口不稳定来流和叶轮出口黏性尾流 /018
 - 2.3.4 不稳定流动现象 /019
- 2.4 本章小结 /022

第 3 章

离心泵动静干涉作用机理研究 ///024

- 3.1 动静干涉试验台 /024
 - 3.1.1 试验台搭建 /024
 - 3.1.2 模型泵外特性 /026



3.2 叶轮下游压力恢复能力评估 /029

3.2.1 三孔探针试验装置 /029

3.2.2 探针特性曲线 /031

3.2.3 导叶进口面探针测量结果 /032

3.2.4 导叶内静压测试结果和压力恢复能力评估 /039

3.3 PIV 试验 /043

3.3.1 PIV 测试系统 /043

3.3.2 PIV 测试速度场结果 /045

3.3.3 PIV 试验结果与探针试验结果的对比 /050

3.4 导叶内瞬态压力特性试验 /051

3.4.1 试验装置 /051

3.4.2 压力脉动测试结果 /052

3.5 模型泵进口流动诱导噪声特性试验 /054

3.5.1 试验装置 /054

3.5.2 进口流动噪声测试结果 /055

3.6 本章小结 /057

离心泵流动诱导噪声试验研究 //059

4.1 离心泵流动诱导噪声测试方法 /059

4.1.1 影响离心泵流动诱导噪声测量精度的因素 /059

4.1.2 测试方法 /060

4.2 离心泵流动诱导噪声试验台 /064

4.3 离心泵流动诱导噪声随流量变化的关系 /069

4.4 离心泵流动诱导噪声随转速变化的关系 /073

4.5 叶轮切割对离心泵流动诱导噪声的影响 /075

4.6 离心泵进口回流噪声分析 /077

4.6.1 进口回流流场特性 /078

4.6.2 回流发生时离心泵流动诱导噪声特性 /080

4.7 离心泵空化噪声分析 /081

4.7.1 空化试验方法 /081

4.7.2 空化发生时离心泵流动诱导噪声特性 /083

4.7.3 叶轮切割对离心泵空化性能的影响 /085



4.8 本章小结 /087

第5章

离心泵流动诱导噪声数值模拟 ///089

5.1 离心泵流动诱导噪声数值模拟方法 /089

5.2 离心泵流场计算 /093

5.2.1 流场计算模型 /094

5.2.2 流场计算域、网格划分及湍流模型选择 /095

5.2.3 外特性计算结果 /097

5.2.4 径向力和流场压力脉动分析 /099

5.3 基于 CFD 与声学边界元的离心泵流动诱导噪声计算 /106

5.3.1 声学边界元网格模型及场点设置 /107

5.3.2 声场计算结果 /109

5.3.3 进、出口场点声压级频域响应计算 /110

5.4 基于 CFD 与声学有限元的离心泵流动诱导噪声计算 /111

5.4.1 声学有限元计算理论 /112

5.4.2 声场计算结果 /114

5.4.3 出口场点声压级频域响应计算 /115

5.5 声振耦合作用对离心泵流动诱导噪声求解的影响 /116

5.5.1 泵体结构有限元计算 /116

5.5.2 声场计算结果 /118

5.6 声场计算方案的选择 /120

5.7 本章小结 /121

第6章

离心泵低噪声水力优化设计 ///123

6.1 低噪声离心泵水力设计流程 /123

6.2 模型泵设计参数和优化方法 /125

6.2.1 初步设计 /125

6.2.2 多目标优化方法 /126



6.3 离心泵低噪声优化数值计算 /129

6.3.1 计算域 /129

6.3.2 流场计算 /130

6.3.3 声场计算 /131

6.3.4 数值计算结果 /132

6.4 离心泵低噪声优化结果分析 /133

6.4.1 直观分析 /133

6.4.2 权矩阵优化方法分析 /134

6.5 优化模型与原模型试验对比 /135

6.5.1 外特性和出口流动噪声结果对比 /136

6.5.2 内流场 PIV 试验对比 /138

6.6 本章小结 /144

第7章

总结与展望 ///146

7.1 研究总结 /146

7.2 研究展望 /149

参考文献 ///150

附录1 Wuibaut 博士 PIV 测量的流场绝对速度分布 ///165

附录2 进口可视化试验结果 ///167

附录3 压力脉动频域测量结果 ///169

第1章 绪论

1.1 研究目的和背景

作为重要的能量转换设备及流体输送装置,泵广泛应用于国民经济各部门及潜艇、舰船和航空航天等尖端技术领域,其中约70%为离心泵^[1]。由于离心泵存在较强的动静干涉作用,其内部流动结构复杂,运行过程中常伴有强烈的噪声。随着泵向高速化、大功率方向发展,其噪声问题日趋严重,已成为降低环境噪声污染和军事国防声隐身领域重要的研究对象^[2,3]。以往对离心泵的水力设计多注重其性能和成本,而对产品的噪声优化不够重视。在客户需求不断提高、环境标准日益严格的背景下,如何形成有效的低噪声离心泵水力设计方法已成为亟待解决的问题。

离心泵产生的噪声一般通过壳体直接向外辐射或通过附属管道内的媒质向上下游传播,主要分为机械噪声和流动诱导噪声。随着制造加工和安装精度的不断提高,离心泵的机械噪声得以控制,流动诱导噪声逐渐成为主要的声源类型^[4]。离心泵流动诱导噪声危害巨大,主要表现为:由于水的比重较大,管道内容易形成平面波,不易衰减,流动诱导噪声在传播过程中极易与结构发生强耦合作用,引发泵体或管路的振动而产生新的辐射噪声;若管路布置不当,噪声还会在管路中形成驻波,引起管路共振;舰船用离心泵产生的流动诱导噪声经管路排出后,向水中直接辐射噪声,成为舰船隐蔽性的重要安全隐患。但到目前为止,对离心泵动静干涉作用机理及离心泵流动诱导噪声特性的研究还不够深入,更没有



形成有效的低噪声离心泵水力设计方法。对离心泵动静干涉作用机理及低噪声水力设计进行研究不仅涉及泵内部流动、压力分析及转子系统与导叶或蜗壳等静止部件间动静干涉机理的研究,还事关泵的基础设计理论和优化方法,是解决系统“安静型设计”的关键,意义重大。



1.2 国内外研究现状

离心泵低噪声水力设计方法的研究离不开对离心泵噪声尤其是流动诱导噪声根源的分析。按照发声机理,流动诱导噪声主要由非定常流动引起,包括运动流体与固体边界的耦合、流体间的相互干涉及流体内部的不稳定流动等。自从 20 世纪 50 年代 Lighthill^[5,6]做出开创性工作以来,许多学者针对流体发声机理进行了一系列的理论推导工作。1955 年,Curle^[7]在考虑静止固体边界影响的基础上,采用 Kirchhoff 方法将 Lighthill 理论进行推广,成功地解决了诸如湍流中静止小物体的风鸣声、圆柱漩涡脱落诱发的噪声等问题。1969 年,Ffowcs Williams 和 Hawkings^[8]针对运动物体在流体中的发声问题,采用广义函数法将 Curle 的结果进行扩展,并考虑了运动固体边界对声波传播的影响。此后,Farassat^[9]对 Ffowcs Williams-Hawkings 方程(简称 FW-H 方程)进行相关变换,得出了更易于求解的时域计算方法。1973 年,Goldstein^[10]研究了运动物体在流动介质内的发声问题,推导出广义 Lighthill 方程。与此同时,流体中噪声测量技术与相关理论也随着流体发声机理研究的深入而不断地发展,并在泵噪声研究领域得到推广和应用。

早在 1967 年,Simpson 等^[11]就提出由叶轮旋转产生的离散噪声和尾流噪声比泵壳辐射噪声更具有研究价值,通过对两个单蜗壳离心泵模型的噪声测试,认为泵流动噪声产生的主要原因是结构与流体间的相互作用,并通过试验数据建立模型,提出了经验公式用来预估泵出口噪声。Chu 和 Dong 等^[12,13]采用粒子图像测速