

Unsteady Flow and Fluid-Structure Interaction in Centrifugal Pumps

国家杰出青年科学基金项目 (No.50825902) 资助

离心泵

非定常流动特性 及流固耦合机理

裴吉 袁寿其 著



机械工业出版社
CHINA MACHINE PRESS

国家杰出青年科学基金项目 (No. 50825902) 资助

离心泵非定常流动特性 及流固耦合机理

Unsteady Flow and Fluid-Structure
Interaction in Centrifugal Pumps

裴吉 袁寿其 著



机械工业出版社

本书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”(No. 50825902)的资助下撰写完成的。全书共7章,包括离心泵非定常水力激振现象的试验测量,离心泵非定常流固耦合现象的高精度数值模拟,流固耦合振动数值模拟结果与试验测量结果的对比研究,离心泵内部周期性流动非定常强度分布规律的研究等。本书提出了一套离心泵的非定常流动诱导振动试验测量和数据分析方法;建立了适用于分析离心泵流固耦合问题的数值求解策略,并得到了振动试验结果的验证;提出了能够快速评价离心泵内部流动非定常强度特性的计算方法。

本书可供从事流体机械设计和运行稳定性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。

图书在版编目(CIP)数据

离心泵非定常流动特性及流固耦合机理/裴吉,袁寿其著. —北京:机械工业出版社,2014.2

ISBN 978-7-111-44883-9

I. ①离… II. ①裴… ②袁… III. ①离心泵—流动特性—研究
IV. ①TH311

中国版本图书馆CIP数据核字(2013)第279422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:李万宇 责任编辑:李万宇

版式设计:常天培 责任校对:刘秀芝

封面设计:马精明 责任印制:李洋

三河市宏达印刷有限公司印刷

2014年1月第1版第1次印刷

169mm×239mm·14印张·2插页·164千字

0001—2000册

标准书号:ISBN 978-7-111-44883-9

定价:48.00元



凡购本书,如有缺页、倒页、脱页,由本社发行部调换

电话服务

策划编辑:(010) 88379732

社服务中心:(010) 88361066

教材网:<http://www.cmpedu.com>

销售一部:(010) 68326294

机工官网:<http://www.cmpbook.com>

销售二部:(010) 88379649

机工官博:<http://weibo.com/cmp1952>

读者购书热线:(010) 88379203

封面无防伪标均为盗版

前 言

泵是重要的能量转换装置和流体输送设备，其中离心泵的应用最为广泛，其比例约占泵类设备总量的70%。离心泵不仅应用在石油、化工、水利、灌溉等工农业领域，而且是核电、航空、舰船和潜艇等高新技术领域的关键设备。随着社会进步和科学技术的发展，离心泵的可靠性越来越受到重视，可靠性问题已经成为制约离心泵技术进一步发展的瓶颈问题。离心泵内部的非定常水力激振现象被公认为是影响可靠性的最主要因素之一。同时，水力激振伴随着复杂的流固耦合作用，即水力激励作用在结构上会改变结构的动力学特性，并使结构发生变形，这反过来会影响内部流场的分布，从而产生流动不稳定现象。由于离心泵非定常流动和耦合振动现象的复杂性，且是多学科交叉的研究领域，近年来已经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）、国家科技支撑计划项目“百万千瓦级核电离心泵关键技术研究”（2011BAF14B04）的资助下展开的。

本书采用理论推导、试验研究和数值计算相结合的方法，以典型离心泵为研究对象，对叶轮的瞬态水力激振规律、流固耦合机理以及泵内部非定常流动特性进行了研究。系统总结了三维流固耦合求解方法相关理论的研究进展和发展趋势，并根据耦合算法的适用性、离心泵转子系统的振动特性以及内部非定常流动特性，给出了求解离心泵瞬态水力激振流固耦合问题的耦合求解方式。提出了离心泵转子系统水力激振测量方案以及数据采集处理方法，发展了适用于离心泵的电涡量非接触式转子振动测量系统，成功地获得了各个转速及流量工况



下离心泵转子系统周期性水力激振位移轨迹，并分析了影响该测量结果准确性的主要因素。此外，初步建立了离心泵高精度流固耦合计算模型和参数组合，耦合求解结果得到了试验验证，并在此基础上对离心泵水力径向力和结构等效应力分布规律进行了探讨。同时，根据离心泵内部周期性非定常流动特性，在求解非定常雷诺时均方程的基础上，定义了压力脉动强度系数和湍流强度系数，并基于速度三角形理论推导得到了相对速度非定常强度系数、绝对速度非定常强度系数，初步获得了泵内部流动的非定常强度特征。

事实上，离心泵非定常流动现象和流固耦合作用是极其复杂的，其影响因素是繁多的，研究内容是多学科交叉的，目前国内外的研究处于起步阶段。作者所做的研究工作仍是探索和初步尝试，无论在试验研究还是在数值计算和理论分析方面都需进一步系统和深化。作者希望本书的出版，能在一定程度上拓展水力机械（泵）领域流固耦合和非定常流动现象研究的途径和思维方式。限于作者的能力和水平，加之时间仓促，书中不当之处，敬请读者批语指正。

本书部分研究工作是作者在国家留学基金委（CSC）资助下在德国杜伊斯堡埃森大学（University of Duisburg-Essen）涡轮机械研究所完成的，在研究过程中得到了 F-K Benra 教授及其团队的大力支持，此外，意大利帕多瓦大学（University of Padova）的 Giorgio Pavesi 教授、西安理工大学的冯建军教授和中国矿业大学的万波博士也给予作者许多指导和帮助，谨在此向他们致以衷心的感谢。此外，感谢江苏大学流体机械工程技术研究中心的领导和同事们的支持和鼓励。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。最后向参与本书审稿工作的专家表示真诚的感谢。

作者

目 录

前言

◆ 第1章 绪论 >>>>

- 1.1 研究背景 1
- 1.2 瞬态水力激振流固耦合机理研究现状 3
 - 1.2.1 流固耦合理论及求解方法 3
 - 1.2.2 离心泵瞬态水力激振及流固耦合特性 7
- 1.3 动静干涉湍流场非定常特性研究现状 11
- 1.4 本书主要研究内容 14

◆ 第2章 离心泵三维湍流-结构耦合方法相关理论 >>>>

- 2.1 计算流体动力学理论基础 17
 - 2.1.1 流体动力学基本方程 17
 - 2.1.2 SST $k-\omega$ 湍流模型 19
 - 2.1.3 壁面函数 19
- 2.2 固体弹性结构的有限元理论 20
- 2.3 流固耦合求解的理论依据 20
 - 2.3.1 ALE 描述 20
 - 2.3.2 耦合求解策略 22
 - 2.3.3 数据传递动力学条件及耦合收敛标准 24

◆ 第3章 离心泵转子系统水力激振试验研究 >>>>

- 3.1 试验系统 27
 - 3.1.1 试验回路系统 27
 - 3.1.2 测量传感器及其系统校准 30
 - 3.1.3 数据采集系统 44

3.2	试验方案与步骤	50
3.3	水力激振数据处理方式	54
3.4	离心泵转子水力激振试验结果与分析	58
3.4.1	模型离心泵性能曲线	59
3.4.2	转子“湿”条件下距离测量结果	59
3.4.3	转子“干”条件下距离测量结果	61
3.4.4	各转速及流量工况下转子瞬态水力激振结果	62
3.5	本章小结	64

◆ 第4章 单叶片离心泵叶轮瞬态流固耦合数值计算 >>>

4.1	计算模型及网格划分	66
4.2	流固耦合模拟方法及关键参数确定	72
4.2.1	流固耦合计算的边界及初始条件	72
4.2.2	单向和双向流固耦合计算实现方法	79
4.2.3	流固耦合交界面数据传递和映射	79
4.2.4	动静坐标系下流固耦合振动结果的转换	84
4.2.5	耦合计算过程中的阻尼系数	85
4.2.6	耦合计算过程中的网格刚度	89
4.2.7	松弛因子和收敛目标	92
4.3	模态理论及其结果分析	93
4.3.1	模态理论	93
4.3.2	单叶片叶轮模态求解结果与分析	94
4.4	径向水力激振力求解结果与分析	96
4.5	瞬态流固耦合振动位移计算结果与分析	104
4.6	流固耦合作用对非定常压力场影响的对比分析	111
4.7	基于双向耦合的单叶片离心泵叶轮动应力分析	114
4.8	本章小结	121

◆ 第5章 单叶片离心泵内部流动非定常强度分析 >>>

5.1	离心泵内部流动非定常强度定义方法	123
5.1.1	压力脉动强度系数	125

5.1.2	速度非定常强度系数和湍流强度系数	126
➤ 5.2	单叶片离心泵内部压力脉动试验研究	130
5.2.1	瞬态压力传感器测量系统及校准	130
5.2.2	试验测量结果与数值计算的对比	133
➤ 5.3	额定转速下内部流动非定常强度结果及分析	136
5.3.1	压力脉动强度分布及分析	136
5.3.2	速度非定常强度及湍流强度分布及分析	141
➤ 5.4	低转速运行工况下内部流动非定常强度分析	144
5.4.1	压力脉动强度分布及分析	145
5.4.2	速度非定常强度及湍流强度分布及分析	149
➤ 5.5	本章小结	156
◆	第 6 章 普通离心泵流固耦合数值模拟及流动非定常强度分析 >>>>	
➤ 6.1	计算模型及网格划分	157
➤ 6.2	蜗壳式普通离心泵流固耦合数值模拟	160
6.2.1	瞬态双向流固耦合数值模拟的参数条件	160
6.2.2	离心泵叶轮模态分析	163
6.2.3	离心泵叶轮瞬态双向耦合计算结果及分析	168
➤ 6.3	蜗壳式普通离心泵内部流动非定常强度分析	175
6.3.1	离心泵内部流动三维空间上非定常强度定义	175
6.3.2	离心泵内部压力脉动强度特性分析	176
6.3.3	离心泵内部流动三维非定常强度分析	182
➤ 6.4	本章小结	191
◆	第 7 章 总结与展望 >>>>	
➤ 7.1	研究总结	193
➤ 7.2	研究展望	196
	参考文献	198



第1章

绪 论

1.1 研究背景

泵是重要的能量转换装置和流体输送设备，其中离心泵应用最为广泛，约占泵类设备总量的 70%^[1]。离心泵不仅应用在石油、化工、水利、灌溉等工农业领域，而且是核电、航空、舰船和潜艇等高新技术领域的关键设备。

离心泵设备正向高速化、大型化和大功率化的方向发展，越来越多的离心泵需要在高温高压等恶劣工况下运转，因此离心泵的可靠性问题越来越受到人们的重视^[2]。例如，国外已经研制成功了 1.8MW 发电机组的给水泵，驱动功率达到 55147kW，锅炉给水泵的驱动功率已经接近 60000kW，水泵压力已经达到 25.6 ~ 29.4MPa，且有向更高压力发展的趋势。国内离心式锅炉给水泵的驱动功率目前也达到了 55000kW，转速已经提高到 7500r/min，扬程已经可达 1100m^[3]。同时，应用在国防军事、航空航天、核能发电以及石油化工等领域的离心泵设备更是需要绝对可靠地稳定运行，因此，离心泵可靠性问题在很多尖端技术领域是重中之重。离心泵的设计者会在考虑提高离心泵的运行效率之前，首先保障其运行的可靠性。



离心泵运行过程中伴随的振动现象，一直是其稳定运行的最重要威胁之一。在存在声音传播介质的条件下，振动会引起噪声的传播。对于隐秘性极高的舰船、潜艇等国防装备，有效避免振动的发生进而提高其隐蔽特性的意义是不言而喻的。早期，因为人们对离心泵的振动问题认识不够全面，仅能从离心泵的结构本身以及制造加工问题入手分析。随着制造加工技术的不断发展，改进的加工工艺被不断地应用在高端离心泵制造过程中，但仍无法避免严重的离心泵振动问题，这让科研和工程技术人员开始认识到，离心泵内部复杂的非定常流动是诱导其产生振动的更深层次的原因。

目前，离心泵瞬态水力激振问题是国内外工程技术领域研究的热点和难点，其主要需关注两个方面：

- 1) 离心泵内部复杂非定常流动的不稳定现象。
- 2) 瞬态不稳定流动与振动结构间的相互作用关系以及能量的传递机理，即水力激振流固耦合问题。

这两方面问题相互联系、相互影响，研究过程中需要同时考虑，缺一不可。早期的研究工作往往把离心泵内部非定常流动研究与其部件结构振动特性研究分开单独考虑，这就忽略了流场与结构场之间瞬时的相互作用，与实际的物理问题存在差距。随着三维粘性非定常流动及流固耦合力学问题在理论推导、模型建立以及求解方法等诸多方面的研究工作日趋深入，以及流动和振动测量技术的快速发展，使得考虑离心泵内部流场与结构场相互作用的瞬态水力激振研究成为了可能。

目前，对于离心泵内部非定常流动机理的研究还不完善，非定常流动现象与振动结构间的耦合激振作用机理研究也处于起步阶段。因此，研究离心泵瞬态水力激振特性及其流固耦合规律，具有很高的理论价值

和广阔的应用前景，特别是在可靠性及振动指标要求苛刻的极端工况应用场合，例如核电、航空航天、锅炉给水、化工等领域。相关研究可以为揭示离心泵内部流固耦合作用的规律提供依据，为更准确地获得水力激振现象中流场和结构场特性提供帮助，并最终能够指导低压力脉动、低振动噪声离心泵的优化设计^[4]。

1.2 瞬态水力激振流固耦合机理研究现状

1.2.1 流固耦合理论及求解方法

流固耦合作用是自然界客观存在的一种特殊现象，是指流体与固体之间的相互作用。流固耦合现象在自然界随处可见，在台风中剧烈弯曲的棕榈树就是一个流固耦合现象的例子，台风的剧烈载荷作用在棕榈树上使得树发生了明显摇摆，同时弯曲变形的棕榈树也在改变它周围的气流流动情况。在一般情况下，棕榈树的耦合变形对流动的影响不是决定性的，并不会给耦合系统带来严重的后果。然而，当耦合效应下作用在结构上的流体载荷力与结构的固有频率非常接近的时候，流体和固体组成的耦合系统就会发生共振，产生灾难性后果。最典型的例子莫过于1940年11月发生在美国华盛顿州塔科马海峡的吊桥（Tacoma-Narrows Bridge）崩塌事故^[5]。从技术角度分析，大桥与风场组成了耦合系统，耦合状态下风流场产生了一定频率的特殊卡门涡脱落现象，而这个频率与耦合系统中的结构固有频率相近，因此系统发生了共振，使得大桥剧烈晃动直至崩塌。

流固耦合问题可由其耦合方程组来定义，这组方程的定义域同时有



流体域与固体域，而未知变量包括描述流体现象的变量及描述固体现象的变量，一般具有以下两点特征^[6]：

- 1) 流体域或固体域均不可能单独求解。
- 2) 无法显式地消去描述流体运动的独立变量或描述固体运动的独立变量。

流固耦合问题的研究历史可追溯到 19 世纪初，人们对于流固耦合现象的早期认识源于机翼及叶片的气动弹性问题。气动弹性是研究气动力对固体的作用以及固体对流场的反作用的一门科学，核心内容就是气流激振问题。弹性体的叶片在气动力作用下形成气弹耦合的振动，当叶片在振动位移过程中，从气流中吸收的能量大于阻尼功时，振动加剧，颤振发作，也就是通常所说的失速颤振。叶片颤振涉及气动力特性和叶片固体动力特性，叶片颤振的发生与其工作状态有关。失速颤振发生时，大幅的剧烈振动会使叶片在短时间内裂断，后果极为严重。此外，流固耦合问题还在很多工程技术领域得到了研究，例如涡轮机械设计、海岸海洋工程、高层建筑工程、流体管路输送以及人体动脉流动等^[7]，而这些工程领域的共同特点就是流体载荷对弹性结构的影响十分重要。

流固耦合的数值求解方法在过去数十年间取得了长足的发展，并已经成为研究领域最热门的主题之一。耦合求解过程的核心是计算带有移动边界和移动网格的非定常流动问题，这是因为流动域的大小和形状随着结构的移动或变形在不断变化着。同时，正由于耦合系统中混合了线性和非线性问题，存在了对称和非对称矩阵，包括了显性和隐性的耦合机理，并且出现了物理不稳定条件，使得耦合问题求解十分困难。根据不同的耦合边界处理方法，流固耦合求解方法主要分为两类^[8]：浸入边界法（Immersed Boundary Method）和动边界法（Moving Boundary Method）。

浸入边界法最初由 Peskin 和 McQueen^[9,10] 在 1972 年提出, 并用于模拟人类心脏中的血液流动。它的基本思想是将复杂结构的边界模化成 Navier-Stokes 动量方程中的一种体力, 并使用简单的笛卡儿网格有效地避开贴体网格生成的困难, 提高了计算效率。经过 40 多年的不断发展和改进, 目前浸入边界法已成功应用于生物流体问题、流固耦合问题、物体绕流问题以及多相流问题等^[11-15]。

动边界法是目前工程技术研究领域使用最广泛的流固耦合求解方法。为了能够表征边界的移动, 通常使用流体方程的任意拉格朗日-欧拉 (Arbitrary Lagrangian-Eulerian, 简称 ALE) 形式^[16-19]。该形式的方程可以直接处理移动的边界和耦合面 (包括自由表面), 但需要确立一个连续的计算网格移动方式。动边界法的流固耦合计算主要关注两个方面的问题, 即耦合系统方程的时间积分算法和流固耦合面的处理方法^[8]。耦合系统的时间积分算法根据物理问题的相对时间尺度分为显式算法 (Explicit Coupling) 和隐式算法 (Implicit Coupling)^[20]; 耦合面的处理主要是流体和固体子域间的信息传递, 需要考虑 3 个问题: ①流体网格与固体网格间的载荷传递; ②流体网格与固体网格间的几何变形传递; ③不同时间步长上解的同步问题^[20-23]。因此, 根据以上耦合问题的物理特性, 有两种求解策略: 直接耦合求解 (Monolithic/Direct Method) 和迭代耦合求解 (Partitioned/Iteration/Staggered Method)。

最早直接耦合求解由 Blom^[24] 提出, 用来处理声流体和可压欧拉流体的流固耦合问题。这种方法是全隐式的, 且在同一个时间尺度上将流体和固体作为一个强耦合的完整系统进行求解。其中, 对于欧拉方程的 ALE 形式, 处理方法较为特殊, 通常使用高阶迎风有限体积法进行空间离散, 然后使用标准隐式算法进行时间推进。此外, 为了使直接耦合



求解方法能够更好地在工程实践中得到应用，直接求解过程可以通过分块求解流体与固体域，并使用同一个系数矩阵来同时求解这些方程。这个矩阵在不同的求解域包含相同的流体和固体矩阵，并使用一个Jacobian矩阵对应流固耦合面条件^[25]。直接耦合求解方法已经得到了一些应用，例如时间域上的结构声学问题^[26,27]、波的传递问题^[28]、弹性罐晃动问题^[29]、弹性多体动力学分析问题^[30]和自由表面流动问题^[31]等。值得一提的是，直接耦合求解方法中的声流体方法在水力机械领域，特别是水轮机流固耦合研究方面已经得到了较多应用。流体假设为声流体，即流动响应的计算是通过势流理论方程进行的。流体有限元离散结果是一个对称的系数矩阵，并将这个矩阵耦合到结构的刚度矩阵中。在水轮机转轮的流固耦合分析中，为了分析随着结构振动的流体质量对结构振动频率的影响，采取这种声-固耦合的计算方法。该方法忽略了流体粘性和湍流效应对结构的影响，是一种简化模型的算法。肖若富等^[32]分析了固体在空气中和液体中的相似关系，通过转轮在空气中的模态分析，研究了转轮在水中的动态特性。Rodriguez等^[33]以及曹良等^[34]提出了一种附加质量的计算方法，简化了部件结构的流固耦合效应，并将附加质量模型与压力-位移格式的计算模型进行比较，证明了其可行性。张立翔等^[35-37]在水轮机叶片流固耦合振动分析的理论推导和建模方面做了大量工作。谷朝红等^[38]自行编制程序SFCVAP进行了水轮机部件流固耦合振动特性的研究。罗永要等^[39]运用全流固耦合的三维有限元方法对混流式水轮机转轮在水介质中的模态特性进行了研究，得到了转轮在水中的自振频率和振型等振动特性。结果表明，转轮在水中的第1阶固有频率与叶片旋转频率相近，额定工况下的卡门涡频率又接近于转轮的高阶固有频率，极有可能引发结构的共振。

迭代耦合求解方法是由 Park 等^[40]最早提出的。这种耦合求解方法具有一些独特的优点,例如可以根据具体流固耦合问题的特点灵活建立流场和结构场的求解方法;可以直接利用流场和结构场独立的研究成果等。然而,这种方法在最初阶段也存在一个致命缺陷,即不合适的耦合迭代方式会导致求解过程的不稳定和不准确,但这些问题通过后续研究和设计得到了解决。其中值得提到的是 Farhat 团队所做的工作^[41-45],他们将耦合问题的求解分为 3 个方程,即流体方程、结构方程和动态网格方程。这样,可压的二维和三维欧拉方程可以使用 ALE 形式下的高阶非结构化有限体积法进行求解。除此之外,还有大量针对迭代耦合求解算法的研究正在进行,并取得了突破性成果,相关工作见文献 [8]。该方法已经越来越多地应用到主流多物理场求解软件中。由于很多工程实际问题的早期研究都没有考虑流固耦合效应,很多研究成果主要集中在计算流体动力学(Computational Fluid Dynamics, 简称 CFD)和结构有限元分析方面。因此,迭代耦合求解方法可以直接利用这些研究成果,在成熟 CFD 和 FEM 求解的条件下,直接引入流固耦合问题进行求解,这为求解实际的工程流固耦合问题提供了巨大帮助。

1.2.2 离心泵瞬态水力激振及流固耦合特性

离心泵瞬态水力激振是指离心泵部件在复杂的非定常流动作用下,例如空化、旋转失速、动静干涉以及进出口回流等,所表现出来的振动特性。由于流固耦合作用的存在,离心泵瞬态水力激振特性研究不能与泵内部非定常流动现象分开来单独考虑。相关研究工作主要从以下两个方面展开:

1) 从离心泵水力激振主动控制的研究思路出发,为了掌握水力激

振现象的发生机理，并在设计阶段尽可能地降低水激振动，学者们对离心泵水力激振及流固耦合特性本身进行了深入研究。美国加州理工学院的 Brennen^[46]早在 20 世纪 90 年代就已经认识到了离心泵中存在流固耦合现象，并进行了理论推导和试验研究，分析了流固耦合作用下流体诱导振动的现象。近年来，Benra 等^[47]利用 CFD 软件和有限元软件，分别采用单向耦合和双向耦合计算方法，分析了单叶片无堵塞离心泵转子振动位移和所受的水力激励，对比了两种耦合方式下的计算结果，并使用非接触式电涡量传感器对转子系统的水力激振位移进行测量。通过试验数据与数值计算结果的对比分析，发现数值计算所得的转子振动位移和流体激振力大于试验测得的值，且双向耦合的计算结果更接近试验值。Kato 等^[48]在预测多级离心泵噪声的研究工作中使用了基于流场大涡模拟的单向流固耦合方法。Langthjem 等^[49]的研究结果指出，流体和旋转叶轮叶片之间的相互作用是离心泵重要的噪声源之一。Campbell 等^[50]建立了适用于离心泵叶片流体激振变形的流固耦合求解方法，并对一个典型涡轮叶片进行了定常流固耦合计算和水洞试验分析，两者结果吻合较好。Muench 等^[51]对一个由非定常湍流诱导振动的 NACA 翼型进行了流固耦合计算，结果与理论分析和试验值吻合较好，并提出该流固耦合算法可以扩展到涡轮机械叶片的流固耦合分析方面。Jiang 等^[52]采用大涡模拟计算了离心泵的内部流场，利用有限元程序计算离心泵部件的瞬态动力学特性，以叶轮内表面压力脉动作为边界条件，计算并分析了离心泵壳的流体诱导振动特性。Zhu 等^[53,54]对离心泵内部动-静干涉流场引起的流体诱导振动现象进行了研究。

此外，有部分研究工作主要立足于试验测量获得的振动信号，通过对振动信号的深入解析，对离心泵不同水力部件的瞬态水力激振现象进

行分析。Guo 等^[55]使用安装在叶轮流道内并随叶轮旋转的高频压力传感器,对叶轮流道内的压力脉动进行了测量,进而对叶轮在此压力脉动作用下的振动特性进行了分析。Srivastav 等^[56]通过测定振动速度,研究了离心泵在不同工况下叶轮与隔舌间的间隙对振动的影响,结果表明振动和噪声随该间隙的增大而降低,而离心泵效率降低不多。Al-Qutub 等^[57]采用试验的方法研究了离心泵叶片角度、叶片间距与叶轮偏心三种情况下的非定常流体力,结果表明水力激振力的幅值随着制造偏差程度的增加而增大。Wu 等^[58]利用非接触激光振动计对油泵径向的流动诱导振动进行了测量和分析。Zhang 等^[59]基于试验测量和流体动力学分析,揭示了水泵流动中的脱流与旋转失速现象的关系,指出在小流量运行工况下,叶轮进口处的脱流是叶轮内部旋转失速的真正和主要的原因;同时,不稳定的旋转失速流动现象是引起水力激振的原因之一。Ullum 等^[60]通过测量获得了旋转失速现象的试验数据,并采用速度频谱分析和压力频谱两种方法,研究了离心泵旋转失速的初始和识别频率。Berten 等^[61,62]采用试验测量的方法,对高扬程离心泵的旋转失速以及流动不稳定性进行了研究,对各工况下压力脉动不稳定分量进行了提取和分析,预测了旋转失速现象激励结构振动的特性。

国内对离心泵瞬态水力激振及流固耦合特性研究得较少,还处于起步阶段。蒋爱华^[3]利用 CFD 技术分析了离心泵内流场的激励力,在建立包含离心泵基座转子动力学模型的基础上,研究了叶轮表面流体所诱发的基座振动。何希杰等^[63]研究了离心泵水力设计对振动的影响。吴仁荣^[64]以及黄国富等^[65,66]对离心泵振动噪声的水力设计方法作了较全面、系统的分析,并提出了几种减小水激振动的水力设计原则。倪永燕^[67]运用 Fluent 软件对离心泵进行了全流道非定常湍流模拟,研究了叶轮和蜗