

# 单双叶片离心泵 设计与试验

谭林伟

施卫东 © 著

陈刻强



中国石化出版社

[HTTP://WWW.SINOPEC-PRESS.COM](http://www.sinopec-press.com)

# 单双叶片离心泵设计与试验

谭林伟 施卫东 陈刻强 著

中国石化出版社

## 内 容 提 要

全书全面总结了单双叶片离心泵理论研究和产品研发现状,介绍了单双叶片离心泵设计方法及数值模拟方法,并基于数值模拟和外特性试验,分析总结了叶轮主要几何参数与单双叶片离心泵外特性的几何映射关系,系统介绍了单双叶片离心泵的试验研究:外特性试验、压力脉动试验、PIV内流场测试、瞬态径向力测试以及振动试验。

本书可供从事流体机械和泵设计研究工作的相关工程技术人员和高等院校相关专业的师生参考。

### 图书在版编目(CIP)数据

单双叶片离心泵设计与试验 / 谭林伟,施卫东,陈刻强著.—北京:中国石化出版社,2019.4  
ISBN 978-7-5114-5264-1

I. ①单… II. ①谭… ②施… ③陈… III. ①离心泵-设计②离心泵-试验 IV. ①TH311

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2019)第 063180 号

未经本社书面授权,本书任何部分不得被复制、抄袭,或者以任何形式或任何方式传播。版权所有,侵权必究。

### 中国石化出版社出版发行

地址:北京市朝阳区吉市口路9号  
邮编:100020 电话:(010)59964500  
发行部电话:(010)59964526  
<http://www.sinopec-press.com>  
E-mail:press@sinopec.com  
北京富泰印刷有限责任公司印刷  
全国各地新华书店经销

\*

710×1000 毫米 16 开本 11 印张 203 千字  
2019 年 8 月第 1 版 2019 年 8 月第 1 次印刷  
定价:58.00 元

# 前 言

随着科学技术水平的不断提高，泵输送的介质日益增多，输送介质多种多样。无堵塞泵能够输送液体中含有任意形状悬浮固体物及纤维状物质，被广泛应用于市政、环保、污水处理、轻工、矿山、化工、食品等行业。随着我国各地城市快速扩张，城市人口规模不断膨胀，城镇污水排放激增与处理能力不足的矛盾日益突出。为加快建设全国城镇污水处理设施，促进主要污染物减排、改善水环境质量，我国今后对环保与污水处理用泵的需求量有较大幅度的增长，预计年产值可达6~8亿元。污水泵行业发展前景广阔，这是人们生活水平提高带来的必然结果。然而现有国产潜水排污泵存在易堵塞、易磨损、寿命短、能耗高等诸多问题，远远不能满足客户的需求。而国外潜水排污泵虽有过硬的技术支持，却价格不菲，有的甚至高达国产潜水排污泵价格的10倍左右。在国际市场上，由于我们的产品成本低、价格便宜，因此在东南亚等地具有较强的竞争力。国内、国外两个巨大的市场应用前景，为我国无堵塞泵的设计、研发提供了强大动力。

本书作者及所在课题组长期从事无堵塞泵的产品开发及理论研究，开发设计了多种型式的无堵塞泵。无堵塞泵要求通过能力强、耐磨损，同时具有较高的效率。常用的无堵塞泵叶轮型式多样，各具特点：闭式叶轮效率相对较高，但易缠绕，抗堵塞性能差；开式或半开式叶轮效率较低，轴向力大；旋流式叶轮效率低，无损性较差。随着近年无堵塞泵应用场合的不断拓宽，急需进一步开发型式多样的无堵塞泵。单叶片离心泵仅由一枚大包角叶片包络形成单一流道，具有极佳的无堵塞性能，并且高效区宽、扬程曲线较陡、无损性好，适用范围极广，主要以小功率泵为主。双叶片离心泵由两枚对称布置的叶片包络形成

两个流道，其过流断面面积约为叶轮进口的一半，通过能力较强，叶轮结构对称，运行稳定，适合高扬程、大流量泵。

本书在国家科技支撑计划项目“高效环保用泵关键技术研究及工程应用(编号 2011BAF14B01)”、江苏省“六大人才高峰”高层次创新人才团队项目“高效特种环保工程用泵关键技术研究及产业化(编号 JNHB-CXTD-005)”及国家自然科学基金青年基金项目(编号 51609105)的资助下，总结了作者及所在课题组长期对单双叶片离心泵的产品开发及理论研究成果。

本书由谭林伟、施卫东、陈刻强撰写，全书由施卫东负责统稿。本书的撰写得到了江苏大学流体机械工程技术研究中心张德胜研究员、孔繁余研究员、郎涛副研究员以及课题组老师的指导和帮助，并得到了南通大学机械工程学院领导与同事的大力支持，在此一并致以衷心的感谢。

由于作者水平有限，书中难免有不妥之处，恳请读者批评指正。

作者

# 目 录

|  |        |
|--|--------|
| 第 1 章 绪论 .....                               | ( 1 )  |
| 1.1 概述 .....                                 | ( 1 )  |
| 1.2 国内外研究现状 .....                            | ( 1 )  |
| 1.2.1 单双叶片离心泵产品研发现状 .....                    | ( 1 )  |
| 1.2.2 单双叶片离心泵压力脉动及泵内部流场 PIV 试验<br>研究现状 ..... | ( 3 )  |
| 1.2.3 单双叶片离心泵径向力研究现状 .....                   | ( 6 )  |
| 1.3 本书主要研究内容 .....                           | ( 8 )  |
| 第 2 章 单叶片离心泵的设计 .....                        | ( 10 ) |
| 2.1 单叶片离心泵水力设计与绘型 .....                      | ( 10 ) |
| 2.2 数值模拟 .....                               | ( 14 ) |
| 2.2.1 控制方程 .....                             | ( 14 ) |
| 2.2.2 计算域确定 .....                            | ( 14 ) |
| 2.2.3 网格划分 .....                             | ( 14 ) |
| 2.2.4 湍流模型及边界条件 .....                        | ( 16 ) |
| 2.2.5 数值计算结果 .....                           | ( 16 ) |
| 2.2.6 能量损失分析 .....                           | ( 18 ) |
| 2.2.7 叶片出口安放角对单叶片离心泵外特性的影响 .....             | ( 20 ) |
| 2.2.8 叶片包角对单叶片离心泵外特性的影响 .....                | ( 23 ) |
| 2.3 外特性试验与对比 .....                           | ( 25 ) |
| 2.4 本章小结 .....                               | ( 28 ) |
| 第 3 章 双叶片离心泵的设计 .....                        | ( 29 ) |
| 3.1 双叶片离心泵过流部件的水力设计及三维造型 .....               | ( 29 ) |
| 3.2 正交试验研究 .....                             | ( 31 ) |
| 3.2.1 试验目的 .....                             | ( 31 ) |
| 3.2.2 确定试验因素和试验方案 .....                      | ( 32 ) |

|              |                             |               |
|--------------|-----------------------------|---------------|
| 3.2.3        | 正交试验结果分析 .....              | ( 33 )        |
| 3.3          | 二次回归研究 .....                | ( 34 )        |
| 3.3.1        | 回归试验方案设计 .....              | ( 34 )        |
| 3.3.2        | 结果分析 .....                  | ( 35 )        |
| 3.3.3        | 样机试验与回归优化分析 .....           | ( 39 )        |
| 3.3.4        | 优化结果对设计方法的反馈 .....          | ( 39 )        |
| 3.4          | 前缘后掠角对双叶片离心泵性能的影响 .....     | ( 40 )        |
| 3.4.1        | 前缘后掠角的定义 .....              | ( 40 )        |
| 3.4.2        | 模型建立 .....                  | ( 41 )        |
| 3.4.3        | 不同前缘后掠角双叶片离心泵的外特性曲线分析 ..... | ( 41 )        |
| 3.4.4        | 不同前缘后掠角双叶片离心泵的内流场分析 .....   | ( 43 )        |
| 3.5          | 模型试验与对比 .....               | ( 46 )        |
| 3.6          | 本章小结 .....                  | ( 47 )        |
| <b>第 4 章</b> | <b>单叶片离心泵压力脉动数值模拟 .....</b> | <b>( 48 )</b> |
| 4.1          | 非定常数值模拟 .....               | ( 48 )        |
| 4.2          | 不同蜗壳对单叶片离心泵压力脉动的影响 .....    | ( 49 )        |
| 4.2.1        | 蜗壳内的压力脉动 .....              | ( 50 )        |
| 4.2.2        | 叶轮内的压力脉动 .....              | ( 57 )        |
| 4.3          | 叶片出口安放角对单叶片离心泵压力脉动的影响 ..... | ( 64 )        |
| 4.4          | 流道式叶轮的泵内压力脉动 .....          | ( 66 )        |
| 4.5          | 叶片包角对单叶片离心泵压力脉动的影响 .....    | ( 70 )        |
| 4.6          | 本章小结 .....                  | ( 74 )        |
| <b>第 5 章</b> | <b>单叶片离心泵压力脉动试验分析 .....</b> | <b>( 75 )</b> |
| 5.1          | 试验仪器与系统 .....               | ( 75 )        |
| 5.2          | 试验方法与步骤 .....               | ( 76 )        |
| 5.2.1        | 压力脉动测点布置 .....              | ( 76 )        |
| 5.2.2        | 试验方案与步骤 .....               | ( 76 )        |
| 5.3          | 试验结果与分析 .....               | ( 77 )        |
| 5.3.1        | 不同流量工况下蜗壳内的压力脉动 .....       | ( 77 )        |
| 5.3.2        | 不同转速下蜗壳内的压力脉动 .....         | ( 81 )        |
| 5.3.3        | 前泵腔的压力脉动 .....              | ( 84 )        |
| 5.3.4        | 数值模拟压力脉动与试验结果对比 .....       | ( 86 )        |
| 5.4          | 本章小结 .....                  | ( 89 )        |

|                                  |         |
|----------------------------------|---------|
| 第 6 章 双叶片离心泵内部流场的 PIV 试验研究 ..... | ( 90 )  |
| 6.1 试验模型泵 .....                  | ( 90 )  |
| 6.2 PIV 测试系统与试验台的设计 .....        | ( 92 )  |
| 6.2.1 PIV 测量的基本准则 .....          | ( 92 )  |
| 6.2.2 PIV 系统与设备 .....            | ( 93 )  |
| 6.2.3 PIV 试验台的设计 .....           | ( 94 )  |
| 6.3 试验方案与注意事项 .....              | ( 96 )  |
| 6.3.1 外特性试验方法 .....              | ( 96 )  |
| 6.3.2 PIV 试验方法 .....             | ( 96 )  |
| 6.3.3 PIV 试验拍摄方案 .....           | ( 97 )  |
| 6.4 试验结果与分析 .....                | ( 98 )  |
| 6.4.1 试验泵的外特性 .....              | ( 98 )  |
| 6.4.2 流场的后处理 .....               | ( 98 )  |
| 6.4.3 不同流量工况下的速度分布 .....         | ( 98 )  |
| 6.4.4 小流量工况下不同相位的速度流场分布 .....    | ( 101 ) |
| 6.5 本章小结 .....                   | ( 103 ) |
| 第 7 章 单叶片离心泵径向力的数值分析与试验研究 .....  | ( 105 ) |
| 7.1 径向力的理论分析 .....               | ( 105 ) |
| 7.2 蜗壳对单叶片离心泵径向力的影响 .....        | ( 106 ) |
| 7.3 流量对单叶片离心泵径向力的影响 .....        | ( 110 ) |
| 7.4 转速对单叶片离心泵径向力的影响 .....        | ( 112 ) |
| 7.5 叶片出口安放角对单叶片离心泵径向力的影响 .....   | ( 114 ) |
| 7.6 流道式叶轮径向力 .....               | ( 116 ) |
| 7.7 叶片包角对单叶片离心泵径向力的影响 .....      | ( 118 ) |
| 7.8 叶轮偏心对单叶片离心泵径向力的影响 .....      | ( 123 ) |
| 7.9 单叶片离心泵径向力的试验研究 .....         | ( 126 ) |
| 7.9.1 径向力测试原理及试验仪器与系统 .....      | ( 126 ) |
| 7.9.2 试验方法与步骤 .....              | ( 129 ) |
| 7.9.3 试验结果与分析 .....              | ( 129 ) |
| 7.10 单叶片离心泵径向力的平衡 .....          | ( 136 ) |
| 7.10.1 叶轮重心偏心平衡径向力 .....         | ( 136 ) |
| 7.10.2 叶轮中心偏心平衡径向力 .....         | ( 137 ) |
| 7.11 本章小结 .....                  | ( 141 ) |

|                             |       |
|-----------------------------|-------|
| 第 8 章 单叶片离心泵振动试验研究 .....    | (143) |
| 8.1 测量仪器与系统 .....           | (143) |
| 8.2 试验方案与步骤 .....           | (145) |
| 8.3 试验结果与分析 .....           | (146) |
| 8.3.1 泵空转时叶轮口环瞬态位移 .....    | (146) |
| 8.3.2 泵抽水时叶轮口环瞬态位移 .....    | (150) |
| 8.3.3 水力径向力诱导叶轮口环瞬态位移 ..... | (152) |
| 8.3.4 蜗壳振动测试结果 .....        | (155) |
| 8.4 本章小结 .....              | (157) |
| 参考文献 .....                  | (158) |

# 第1章 绪 论

## 1.1 概述

无堵塞泵是近年来国内外泵行业的研究热点,发展迅速、应用广泛,适用于输送液体中含有任意形状悬浮固体物及纤维状物质<sup>[1]</sup>。由于输送介质中常含有长纤维及固体颗粒,无堵塞泵运行中易出现叶轮被缠绕、堵塞,导致机组运行异常,甚至烧毁电机,因此抗缠绕、防堵塞能力成了无堵塞泵的首要性能指标<sup>[2-4]</sup>。减少叶轮叶片数可有效增大叶轮流道过流断面面积,因此单叶片、双叶片离心泵叶轮非常适合无堵塞泵<sup>[5,6]</sup>。单叶片离心泵仅由一枚大包角叶片包络形成单一流道,具有极佳的无堵塞性能,并且高效区宽、扬程曲线较陡、无损性好,适用范围极广<sup>[7]</sup>。但单叶片离心泵叶轮为非轴对称结构,在运行中脉冲出流,水力不平衡引起的径向力很大,泵运行时存在较强的振动及诱导噪声,主要以小功率泵为主<sup>[8]</sup>。双叶片离心泵由两枚对称布置的叶片包络形成两个流道,其过流断面面积约为叶轮进口的一半,通过能力较强,其叶轮结构对称,运行稳定,适合高扬程、大流量泵<sup>[8,9]</sup>。目前单双叶片离心泵已被广泛应用于市政、环保、污水处理、河塘清淤、轻工、矿山、化工流程、食品、造纸、纺织、印染等领域,产生了良好的经济效益和社会价值。无堵塞泵的结构形式主要有潜入式(潜水式)、立式、卧式等,由于潜入式泵本身及选用潜入式泵的泵站工程具有很多优点,目前潜入式应用最为广泛。

## 1.2 国内外研究现状

### 1.2.1 单双叶片离心泵产品研发现状

无堵塞泵主要用来输送污水、泥浆、纸浆等具有长纤维及大颗粒的物质,要求防堵塞、耐磨损。因此与普通离心泵相比,其形状特殊,几何形状复杂。瑞典飞力(Flygt)公司最早从事无堵塞泵设计开发,早在1956年就开发出了潜水排污泵,该公司生产的泵设计新颖,叶轮结构型式多样,并且实现了产品的标准化、系列化,其技术水平位于世界前列<sup>[10]</sup>。单双叶片离心泵性能优异,具有极佳的

无堵塞性能，在飞力公司生产的无堵塞泵中被大量采用。国外对单双叶片离心泵设计、开发较早，应用广泛。美国早在 1958 年就申请了单叶片离心泵相关专利<sup>[11]</sup>。丹麦格兰富(Grundfos)公司近年开发出单流道叶轮以及 S-tube 叶轮，性能优异，振动噪声低，广受用户欢迎。德国 KSB 公司开发的开式单叶片、双叶片叶轮及闭式单叶片、双叶片叶轮适用于含有固体物质、长纤维和粗大污垢的介质，运行平稳可靠。瑞典飞力公司开发的前伸式双叶片环保泵已实现标准化和系列化，其特点在于前缘型线处在垂直于轴线的进口平面内，即进口前伸，并且它的前缘后掠，以便使污物向外输送至前缘外周边，避免缠绕在轮毂上，被称为最先进的高效环保用泵。国际著名的生产厂商有：瑞典 Flygt 公司、瑞士 Sulzer 公司、丹麦 Grundfos 公司、德国 KSB 公司、日本荏原公司等，其产品通过能力强、效率高、耐磨蚀、可靠性高，规格品种较多，已形成标准化和系列化，在水力性能、结构设计、材料选用、自动控制与保护等方面均处于世界发展的领先水平，在全球范围内占有绝大部分市场。

由于单叶片离心泵结构不对称，叶轮脉冲出流产生很大的径向力，这一技术难题国内很多泵厂难以解决，导致我国生产单叶片离心泵的企业较少。目前主要有江苏大学、清华大学、上海大学等高等院校、研究机构以及南京蓝深、上海凯泉等大型泵厂具有单叶片离心泵设计开发能力，产品主要以小功率为主。国内相关研究较晚，我国在借鉴国外先进经验的基础上，对单双叶片离心泵的设计及内部流动规律开展了系列研究。关醒凡等<sup>[12,13]</sup>在 20 世纪 90 年代初就开展了对单叶片离心泵的设计研究工作，在大量研究和设计实践的基础上，总结出了单叶片离心泵叶轮主要尺寸的计算公式，按叶轮形状特点分为薄壁型、厚壁型，并分别给出了叶轮的绘型方法，同时提出了单叶片离心泵压水室的设计方法。关醒凡、朱荣生<sup>[14]</sup>通过对单流道叶轮的结构进行剖析，分析了其无堵塞性能的原因，提出一种用静平衡原理进行质量力动平衡的方法，并对单流道叶轮进行了切割试验研究。陈宣荣<sup>[15]</sup>探讨了单叶片叶轮型线，提出了一种叶片包角变化范围较大的变角螺旋线叶片绘型方法。刘厚林<sup>[16]</sup>在总结归纳现有优秀单流道叶轮水力模型的基础上，给出了速度系数法设计的各系数值，借鉴双流道泵叶轮水力设计方法，提出了通过控制流道中线及过流截面面积变化规律的流道设计方法，该方法便于计算机辅助设计软件开发。康灿、沙毅<sup>[17]</sup>通过数值模拟分析了单流道泵内流场，发现由于单流道叶轮内存在大范围二次流及局部旋涡，使得单流道泵效率偏低。丁剑<sup>[18]</sup>基于单相对涡假设，建立了单流道叶轮内滑移系数的求解公式，并且提出了一种全单调叶片型线函数，改进了叶轮绘型方法。随着科研工作者以及设计人员的努力，我国单叶片离心泵的生产、设计开发能力逐步提升，并且制定了相关标准。

双叶片离心泵无堵塞性以及无损性比单叶片离心泵稍差,但泵运行平稳,效率较高,目前已广泛应用。施卫东首次提出了涡旋前伸式双叶片污水泵的设计方法,设计实例和用户使用表明效果良好<sup>[1]</sup>。王准分析了涡旋前伸式双叶片离心泵中污物通过机理,解释了蜗壳基圆直径加大有利于提高泵性能的原因,并且通过具体的设计实例和试验,表明涡旋前伸式双叶片污水泵通过性能好,效率优于一般污水泵<sup>[19,20]</sup>。程成通过正交试验分析了叶片出口安放角、叶轮进口直径、叶片出口宽度以及叶轮出口直径等几何参数对后掠式双叶片离心泵性能的影响,表明叶轮出口直径是影响泵效率和扬程的主要因素,并且通过固液两相流数值分析表明,双叶片、大包角、叶片前缘后掠的设计方法,可使颗粒杂质向外输送至叶片外周边,确保了固体颗粒或纤维的顺利通过<sup>[21]</sup>。陈刻强分析了不同前缘后掠角对双叶片离心泵性能的影响,表明扬程-流量曲线随前缘后掠角的增加而趋于平坦,而轴功率随之不断增大,最大效率点向大流量工况偏移<sup>[22]</sup>,并且进一步对双叶片离心泵主要几何参数进行了回归分析和优化设计<sup>[23]</sup>。目前施卫东课题组在双叶片离心泵系列产品的设计与开发、成果的推广应用与产业化等方面取得了较大突破,产生了显著的经济和社会效益<sup>[1]</sup>。

随着 CAD/CAM 技术、模块化、智能化的应用,新材料、新技术、新工艺的广泛使用,以及变频技术的运用、二次保护和检测系统的开发,单双叶片离心泵性能必将不断提升。目前单双叶片离心泵设计系列化、标准化和通用化水平不断提高,并且结合一体多轮的设计方法,即一种泵体可配几种叶轮,单双叶片离心泵应用量将逐步增大,使用范围越来越广。

### 1.2.2 单双叶片离心泵压力脉动及泵内部流场 PIV 试验研究现状

随着计算流体力学及测试技术的发展,设计研发人员对泵内非定常三维湍流的认识不断加深,人们逐渐意识到泵内非定常流动压力脉动特性与泵的空化性能、诱导振动、噪声等密切相关,国内外研究人员从理论分析、数值模拟、内流场测试等方面开展了大量研究。动静干涉被认为是泵内压力脉动的重要原因,Dring<sup>[24]</sup>阐述了动静干涉的机理——势流干涉和尾迹干涉,势流干涉是指不考虑液体的黏性,由于叶片与蜗壳的相互运动而产生,而尾迹干涉源于叶轮流道尾迹脱落并且运动到下游与蜗壳内流体相互作用。Guelich<sup>[25]</sup>统计了 36 台泵测试数据,总结出离心泵内的压力脉动主要是由于叶轮尾缘的尾迹流动以及大尺度湍流和流动分离及回流产生的旋涡所诱导产生的,设计参数对离心泵压力脉动影响显著。F. Shi<sup>[26]</sup>采用数值模拟分析了由于动静干涉引起的导叶式离心泵内的压力脉动,表明势流干涉导致了导叶内压力脉动波峰的出现,而尾迹脱落使得导叶内副波峰的产生。Qin W 和 Tsukamoto H 等<sup>[27,28]</sup>采用奇点法分析了叶轮与导叶内的动静干涉作用,将导叶内的非定常流动分为三种非定常涡——叶轮叶片的附着涡、

导叶的附着涡、导叶尾缘脱落的自由涡，分析了各种非定常涡对压力脉动的影响，该计算方法所得结果与试验结果具有较好的一致性，并采用该方法进一步分析了不同蜗壳、流量以及径向间隙对压力脉动的影响。Kaupert<sup>[29,30]</sup>在双吸泵单个叶轮通道内布置了25个压阻式压力传感器并使用遥测系统在旋转叶轮框架中进行采样，测得了旋转叶轮流道内的瞬态压力，基于压力脉动幅值及相位分析了不同体积流量对压力脉动的影响，试验结果表明压力脉动随着偏离最高效率点的增大而增强，在小流量工况点压力脉动达到了扬程的35%。Tsukamoto等<sup>[31,32]</sup>基于旋涡方法分析了导叶泵内的动静干涉，结果表明靠近导叶进口的压力脉动主要是受势流动静干涉的影响，而出口主要受尾迹的影响。Parrondo<sup>[33]</sup>通过在前泵腔布置36个压力传感器测量了泵内的瞬态压力特性，分析了不同隔舌-叶轮间隙的影响，试验结果表明，蜗壳内的压力脉动与圆周位置以及流量关系密切，当隔舌-叶轮间隙与叶轮半径比值从15.8%减小到10%后，压力脉动最大幅值提高了50%左右，叶轮与蜗壳隔舌的动静干涉是蜗壳内压力脉动的决定性因素。Spence<sup>[34]</sup>采用CFX-TASCflow软件计算了双吸泵内压力脉动并与压力脉动试验对比，在额定流量工况下数值模拟结果与试验结果基本一致，而在小流量工况下数值模拟偏差增大，总体上数值计算能较好地获得双吸泵内的压力脉动。数值模拟与瞬态压力测量相结合的方法被广泛用于分析离心泵内压力脉动特性<sup>[35-42]</sup>，初步揭示了离心泵内压力脉动产生机理及影响因素。

我国泵设计和研究人员也对泵的压力脉动开展了大量研究，无论在理论上、试验上还是数值模拟方法等方面都有了大量研究成果。何秀华<sup>[43,44]</sup>从泵内运动方程出发，阐述了泵内叶频压力脉动产生机理，并通过泵内不同流量工况下的压力脉动试验研究，分析获得了三种压力脉动：接近于白噪声的随机脉动、叶频压力脉动、轴频压力脉动。由于动静干涉作用是离心泵压力脉动的主要原因，减弱叶轮转子与蜗壳或导叶的动静干涉作用是减弱泵内压力脉动的有效措施。张宁、杨敏官等<sup>[45-49]</sup>提出一种特殊型式的侧壁式压水室，该压水室隔舌与螺旋段不在同一平面，通过数值模拟与压力脉动试验测试表明，采用侧壁式蜗壳能有效改善泵的压力脉动特性。祝磊、袁寿其等<sup>[50,51]</sup>采用SST模型数值分析对比了采用常规蜗壳隔舌和阶梯蜗壳隔舌时离心泵内的压力脉动特性，表明采用阶梯隔舌的离心泵内压力脉动大小和脉动幅值均显著减小并且高频脉动成分减少。施卫东、牟介刚、刘剑等<sup>[52-54]</sup>分析了蜗壳隔舌对离心泵压力脉动的影响，分析结果表明增大蜗壳隔舌安放角、采用双隔舌均能有效减弱隔舌区域的压力脉动，采用双隔舌蜗壳在偏离额定流量工况下，其压力脉动幅值比单蜗壳最大降幅达到了45.5%。瞿丽霞、施卫东、祝磊等<sup>[55-57]</sup>分析了不同蜗壳隔舌间隙对离心泵压力脉动的影响，表明增大蜗壳隔舌间隙后泵内压力脉动显著减小，但隔舌间隙过大导

致泵效率明显降低。由于动静干涉的作用,泵内的压力脉动频率主要为叶片通过频率及其谐波<sup>[58]</sup>。泵内也存在与主频无关的压力脉动信号。黄先北等<sup>[59]</sup>探讨了离心泵蜗壳内低频压力脉动的产生机理,数值模拟结果表明由于隔舌附近流线扭曲而产生的旋涡导致了蜗壳内低频压力脉动的产生。泵内的流动状态直接影响压力脉动的大小,采用分流叶片能有效改善低比转速泵内的流动<sup>[60]</sup>。袁寿其、张金凤、崔宝玲等<sup>[61-65]</sup>分析了分流叶片对泵内压力脉动的影响,结果表明采用分流叶片时泵内压力脉动幅值明显减小,高频脉动也减少;进一步分析了不同分流叶片起始直径对压力脉动的影响,表明采用大的分流叶片起始直径时蜗壳内压力脉动更大。泵发生汽蚀将导致泵内压力脉动明显增强<sup>[66]</sup>,基于此王永生等<sup>[67]</sup>根据压力脉动和时序分析实现了对离心泵空化特征的识别。

单双叶片离心泵内压力脉动与普通离心泵相似,但由于只有一枚或两枚叶片,对叶轮内流体约束能力差,单双叶片离心泵内流动分离、回流等现象加剧,导致泵内压力脉动也变得更加复杂,目前对单双叶片离心泵内的压力脉动特性只展开了初步研究。Nishi<sup>[68,69]</sup>采用数值模拟与LDV(Laser Doppler Velocimetry,即激光多普勒测速仪)测试分析了单叶片离心泵内的流动,数值模拟与LDV测试结果在速度径向分量上存在差异,但在速度切向分量以及泵性能方面一致性较好;由于流动滑移加剧以及二次流的影响,从叶轮中部往后泵内的压力突然急剧降低。裴吉<sup>[70,71]</sup>采用全流场数值模拟了单叶片离心泵内流场特性,并分析了不同流量工况下的压力脉动强度分布,表明流量越大压力脉动强度也增大。谭林伟<sup>[72]</sup>采用全流场非定场分析结合高频压力传感器,分析了单叶片离心泵压力脉动产生机理,叶轮与蜗壳的动静干涉是单叶片离心泵产生压力脉动产生的主要原因,流动分离也是单叶片离心泵产生压力脉动的重要原因。朱荣生<sup>[73]</sup>采用RNG  $k-\varepsilon$ 湍流模型分析了双叶片离心泵的非定常流动特性,表明双叶片离心泵在靠近隔舌处压力脉动强度最大,在小流量工况下压力脉动幅值最大。

泵内部流场的试验测量主要包括速度场、压力场两个方面,主要有PIV<sup>[74-75]</sup>(Particle Image Velocimetry,即粒子图像测速仪)、LDV<sup>[76]</sup>、高速摄影<sup>[76]</sup>、压力脉动<sup>[78]</sup>等手段。其中,PIV技术相比其他试验测量手段,可以实现非接触无干扰测量,可获得平面流场显示的整体结构和瞬态图像,并且给出测量精度较高的平均速度、流场图谱等。凭借这些优点,PIV测量技术已成为当代流场可视化研究中的主要测量手段<sup>[79]</sup>。近些年来,PIV测量技术凭借无接触式测量等优点在泵内部流场研究中得到了广泛的应用。1989年Paone等<sup>[80]</sup>利用PIV测量技术首次对离心叶轮及压水室中的流场进行了测量;Shpherd等<sup>[81]</sup>分别对离心泵和轴流泵进行了内部流场PIV测量,采用相平均的方法来处理所测的流体速度和旋涡,并对这两种泵内部旋涡的衍生机理进行了探讨;随着CFD(Computational Fluid

Dynamics, 即计算流体动力学)技术的发展,学者为验证数值模拟的准确性,将数值模拟计算结果与 PIV 测量结果作对比。Benra<sup>[82]</sup>采用 CFD 数值模拟与 PIV 测试分析了单叶片离心泵内的速度分布,CFD 数值模拟与 PIV 测试结果具有较高的一致性,分析结果表明单叶片离心叶轮不同位置的速度分布差别较大,在叶轮局部位置出现了驻点和回流。

国内自 20 世纪 90 年代起将 PIV 测量技术应用到泵内部流场研究中,对不同类型的泵进行了 PIV 测量,并已取得了一系列的研究成果,其中也有对单双叶片离心泵的研究成果。赵斌娟等<sup>[83,84]</sup>分别对比转速为 111 的双流道和双叶片两种形式的叶轮进行内部流场二维 PIV 测量,得出泵内部相对速度流场分布,发现在双叶片叶轮内的压力面尾部出现了回流-旋涡区,经过对比分析认为双流道内部流态更为稳定;王凯等<sup>[85]</sup>对比转速为 111 的双叶片离心泵内部流场进行零流量工况下的三维 PIV 测量,发现在所测量的平面上均出现旋涡区,失速现象严重;刘厚林等<sup>[86]</sup>对比转速为 134 的双叶片离心泵内部流场在不同流量工况下进行了三维 PIV 测量,发现随着流量的减小,流动分离首先在叶片的压力面上出现并产生旋涡,随着流量继续减小,旋涡区变大进而产生失速现象。朗涛<sup>[87]</sup>采用 PIV 技术测量了双叶片离心泵内部流场,分析了不同流量工况下叶轮内部流场的相对速度分布,研究了轴向旋涡和低速区随流量变化的形态特性,发现在流道中部靠近叶片压力面上存在低速区以及与叶轮旋转方向相反的轴向旋涡,且随着流量的增大,低速区与轴向旋涡逐渐减小;引入少叶片数离心泵内部流动理论,揭示了低速区和轴向旋涡存在和发展的内在机理。

### 1.2.3 单双叶片离心泵径向力研究现状

随着泵不断向大型化,高速化发展,人们逐渐意识到泵的安全可靠性与泵内流动非定常诱导的径向力直接相关,对此国内外学者进行了大量研究。Stepanoff、Biheller 等<sup>[88,89]</sup>最早提出了径向力经验公式,根据叶轮几何参数、流量及扬程估算叶轮所受径向力,但经验系数具有一定局限性。Brennen 等<sup>[90,94]</sup>全面系统地测试了美国 NASA 高速液氧、液氢涡轮泵的径向力,分析了叶轮偏心、前后泵腔泄漏、涡动频率比等对径向力的影响,建立了径向力的数学模型。Guelich<sup>[95]</sup>在其综述中概括了泵径向力产生的原因:叶轮圆周压力非均匀分布、迷宫密封产生的径向力、叶轮-导叶(蜗壳)动静干涉作用、定常径向力与泵的比转速、叶轮或导叶的型式、叶轮几何参数以及运行工况相关。随着计算流体力学的发展,CFD 数值分析与试验相结合的方法被广泛应用于径向力的研究。Baun<sup>[96]</sup>采用数值模拟分析了叶轮与环形蜗壳相对位置对泵性能及径向力的影响,结果表明叶轮与蜗壳偏心率为 0.545,偏心角为 46°时该泵效率提高,径向力有所减小。Boehning<sup>[97]</sup>采用数值模拟与试验相结合的方法对比了单蜗壳、环形蜗壳、双蜗壳对泵系径向

力的影响,在额定流量工况点单蜗壳、环形蜗壳径向力相当,均有较大的径向力,而双蜗壳几乎无径向力。Alemi<sup>[98]</sup>基于数值模拟分析了不同蜗壳结构对径向力的影响,结果表明蜗壳隔舌位于 $270^\circ$ 位置时,径向力在所有流量工况下均最小,并进一步分析了双蜗壳、三蜗壳、四蜗壳的影响,表明双蜗壳最适合偏离设计点工况。我国科研工作者也在泵径向力产生机理及减小径向力方法上开展了大量研究。刘占生、王洋等<sup>[99,100]</sup>分析了不同流量工况下离心泵叶轮所受径向力,表明在额定流量工况下径向力最小,径向力随偏离额定流量工况点程度的增加而增大。双蜗壳能改善泵内压力圆周对称性,肖若富、牟介刚、刘建瑞等<sup>[101-103]</sup>采用数值模拟与性能试验相结合的方法分析了双蜗壳隔板结构对叶轮径向力的影响,对比单、双蜗壳双吸泵的性能发现,双蜗壳隔板设计不合理导致泵的性能显著下降,通过对隔板设计进行优化表明双蜗壳泵既能保证较高的效率,也可有效减小径向力。改善泵内流动可减小泵所受径向力,袁寿其、张金凤等<sup>[104,105]</sup>采用ANSYS-CFX软件对比分析了有无分流叶片以及分流叶片进口直径对泵径向力的影响,结果表明分流叶片能改善泵内流动,可有效减小叶轮的径向力,径向力随分流叶片进口直径的增大而增大。蒋爱华等<sup>[106,107]</sup>采用非定常数值模拟,通过积分获得了离心泵叶轮及蜗壳所受径向力及力矩,结果表明叶片所受径向力是叶轮所受径向力的主要来源,蜗壳所受径向力以叶片通过频率为基频波动。

双叶片离心泵叶轮结构对称,其径向力特性与普通离心泵相差不大;而单叶片离心泵由于叶轮为非对称结构,其径向力问题尤为突出,使得泵运行稳定性较差,诱导振动、噪声较强。Benra<sup>[108-112]</sup>对单叶片离心泵内流动特性及诱导振动展开了大量开创性工作,采用CFD数值模拟与PIV测试相结合的方法获得了单叶片离心泵内瞬态流场,基于流固耦合和电涡流位移传感器测量了单叶片离心叶轮的流体诱导激振。Aoki<sup>[113]</sup>测量了开式单叶片离心叶轮叶片瞬态压力分布,获得了叶轮的动态及静态径向力。Nishi<sup>[114-118]</sup>采用数值模拟与试验相结合的方法对单叶片离心泵的径向力进行了大量研究,通过在轴承处安装测力环测量了单叶片叶轮所受径向力,分析了叶片出口安放角、叶片出口宽度等对径向力的影响,发现增大叶片出口宽度能减小小流量工况下径向力的时均值。将径向力分为惯性项、动量项、压力项计算,计算结果与数值计算压力积分结果基本一致。刘天宝<sup>[119]</sup>应用动量方程推导了单叶片叶轮受力计算公式。钟峥、乔玉兰等<sup>[120-121]</sup>对单叶片离心泵进行了三维数值模拟,探讨了单叶片离心泵的数值计算方法。陈红勋、邹雪莲<sup>[122-124]</sup>等采用边界元法数值计算了单叶片离心泵内三维非定常流动,获得了叶片表面的压力分布并计算了叶轮所受水力径向力。裴吉<sup>[125]</sup>采用双相流固耦合分析了单叶片离心泵水力诱导激振特性,数值计算结果与试验结果具有较好的一致性。

由于叶轮所受径向力大小及方向均周期变化,并且转轴高速旋转,给径向力的测试带来了一定困难。径向力测量方法主要有间接测量法和直接测量法,间接测量法是通过测量叶轮出口及蜗壳内压力和速度分布并进一步计算径向力,该方法精度取决于测点的个数以及计算方法的选择。González 等<sup>[126]</sup>通过在前泵腔布置一圈压力传感器,获得了泵叶轮出口瞬态压力分布,并计算了叶轮所受径向力,三维数值模拟计算结果与试验测试结果具有较高的一致性。直接测量法是用传感器直接测量叶轮径向力,该方法准确可靠但对试验装备要求较高,试验台搭建难度大。直接测量法可在轴承处或者叶轮与泵轴连接处安装应变片或者测力环。日本茨城大学 NISHI<sup>[116]</sup>通过将测力环安装在泵轴承处获得叶轮转子的瞬态径向力,测力环由四个应变片组成四壁差动电桥实现将变形量转化为电信号采集。荷兰埃因霍温理工大学的 Esch 等<sup>[127]</sup>将测力计安装在叶轮与泵轴间,获得了非均匀进流时混流泵叶轮所受径向力。美国加州理工学院的高速泵径向力试验台由内外两套轴传动系统组成,可测量高速泵在不同偏心量、不同涡动频率比下的径向力<sup>[94]</sup>。目前我国泵径向力的测量主要以间接测量泵内压力及速度分布来计算径向力。卢凤芝、卓震等<sup>[128,129]</sup>对泵径向力传感器设计及应用进行了初步探讨,阐述了泵叶轮径向力弹性传感器的结构选择与标定,提出采用多点应力法测量泵的径向力。但查阅相关文献发现,目前国内还较少有采用传感器直接测量泵叶轮径向力的相关文献,在泵径向力试验测量方面与国外存在一定差距。

### 1.3 本书主要研究内容

单双叶片离心泵具有良好的无堵塞性能,具有十分广阔的应用前景,但其设计方法及理论仍不成熟。本书总结了作者及所在课题组近些年的研究成果,基于理论分析、CFD 数值模拟和试验测试,对单双叶片离心泵设计、数值模拟方法以及流场特征进行了较为系统的研究。本书的主要研究内容有:

(1) 全面分析总结了单双叶片离心泵的应用背景、结构特征以及研究方法和产品研发现状。

(2) 介绍了单叶片离心泵速度系数设计法、三维造型方法以及数值模拟方法,揭示了单叶片离心泵效率偏低的主要原因,分析了叶片出口安放角、叶片包角与单叶片离心泵外特性的响应关系,搭建了单叶片离心泵性能试验台,验证了数值模拟的准确性。

(3) 介绍了双叶片离心泵速度系数设计法、三维造型方法以及数值模拟方法,基于数值模拟对双叶片离心泵叶轮主要几何参数进行了正交试验分析,通过样机试验与回归分析对设计方法进行验证,对原设计方法提出的叶片出口安放角进行了修正,并分析了前缘后掠角对双叶片离心泵性能的影响。