doi:10.6041/j.issn.1000-1298.2018.05.020

# 离心泵水力诱导激振试验研究

谭林伟'施卫东<sup>1,2</sup> 张德胜'周 岭' モ 川'

(1. 江苏大学流体机械工程技术研究中心,镇江 212013; 2. 南通大学机械工程学院,南通 226019)

摘要:离心泵的水力诱导激振影响泵的安全稳定运行。为了揭示离心泵水力诱导激振特性,以一台单叶片离心泵 为试验对象,采用两个垂直布置的涡电流位移传感器测量离心泵空转及抽水时叶轮口环的瞬态位移,获得了叶轮 口环瞬态位移的时域图、频域图以及口环位移轨迹图。基于霍尔感应器的键相信息,采用华科水力机械综合测试 仪获得了离心泵在不同流量工况的水力诱导激振特性。试验结果表明,离心泵空转及抽水时时域图、频域图相似, 波形均为周期性重复的畸变正弦曲线,主频均为叶轮转频,口环位移轨迹图均为畸变的椭圆形,但抽水时口环位移 幅值有所减小。离心泵的水力诱导口环位移轨迹图在不同流量工况下均为畸变的椭圆形,在 210°~300°之间出现 一个突变区域,水力诱导激振在小流量工况显著增强,在额定工况及大流量工况水力诱导激振基本不变。 关键词:离心泵;水力激振;试验

中图分类号: TH311 文献标识码: A 文章编号: 1000-1298(2018)05-0179-07

# **Experiment on Fluid Force Induced Vibration for Centrifugal Pumps**

TAN Linwei<sup>1</sup> SHI Weidong<sup>1,2</sup> ZHANG Desheng<sup>1</sup> ZHOU Ling<sup>1</sup> WANG Chuan<sup>1</sup>

(1. Research Center of Fluid Machinery Engineering and Technology, Jiangsu University, Zhenjiang 212013, China

2. School of Mechanical Engineering, Nantong University, Nantong 226019, China)

Abstract: The trend toward large and high speed centrifugal pump brings a great challenge for the safe and stable operation of centrifugal pumps. And fluid force induced vibration of centrifugal pumps is increased significantly. In order to reveal the fluid force induced vibration characteristic of centrifugal pumps, a single-blade centrifugal pump was used as the test pump. Based on the pump performance experiment, two vertically arranged eddy current displacement sensors were used to measure the transient displacement of impeller wear ring when pumping air and water. Time history and frequency spectrum of the displacement of the wear ring and locus of the wear ring displacement were obtained. Fluid force induced vibration characteristics of the centrifugal pump at different flow rates were obtained by using Huake hydraulic machinery tester based on the key phase information of the Hall sensor. The experimental results showed that the time history and frequency spectrum of the displacement of centrifugal pump were similar in both pumping air and water. Waveforms were periodically repeated distortion sinusoids and the dominant frequency was the rotational frequency of impeller. Locus of the wear ring displacement was distorted oval, and there was a mutation when pumping water. Fluid force induced locus of the wear ring displacement under different flow conditions were also distorted oval. And there was a mutation between 210° and 300°, the maximum appeared at around 130°. Fluid force induced vibration was significantly increased at the small flow rates, corresponding to the pump efficiency was significantly reduced, and it became weak at the design flow rate and large flow rates, corresponding to the higher efficiency of the pump. The research result provided a reference for the stable operation of centrifugal pumps and on-line fault diagnosis.

Key words: centrifugal pump; fluid force induced vibration; experiment

收稿日期: 2018-01-05 修回日期: 2018-03-01

基金项目: 国家自然科学基金项目(51609106)、江苏省第五期"333 工程"科研项目(BRA2017353)、江苏省"六大人才高峰"高层次创新人 才团队项目(JNHB-CXTD-005)、江苏省重点研发计划项目(BE2016163)和江苏省普通高校研究生科研创新计划项目(KYLX\_ 1043)

作者简介:谭林伟(1987—),男,博士生,主要从事流体机械及工程研究,E-mail: donggua1310@163.com

通信作者:施卫东(1964—),男,研究员,博士生导师,主要从事流体机械理论及工程技术研究,E-mail: wdshi@ ujs. edu. cn

## 0 引言

离心泵是一种应用最为广泛的流体输送设备, 在多种领域发挥了重要作用<sup>[1]</sup>。随着科技的进步, 离心泵不断向大型化、高速化发展,水力诱导激振力 随之也呈几何级数增长<sup>[2]</sup>。BRENNEN等<sup>[3-6]</sup>系统 测试了高速液氧涡轮泵叶轮的水力径向力,建立了 离心泵水力诱导激振力的数学模型。JONKEK等<sup>[7]</sup> 采用有限元法数值计算了离心泵的水力激振力,表 明水力激振力是叶轮和蜗壳的几何形状、流量以及 涡动频率比的函数。窦唯等<sup>[8]</sup>、刘占生等<sup>[9]</sup>采用数 值模拟的方法分析了隔舌及不同流量工况对高速离 心泵流体激振力的影响,激振力随隔舌厚度以及流量 的增加而增大,并且其主频是叶片通过隔舌的频率。

周期性波动的水力诱导激振力导致离心泵振动 加剧,该振动即为水力诱导激振,严重时甚至导致叶 轮口环碰撞或者机组共振,对离心泵的运行稳定性 及可靠性造成极大影响。采用数值模拟分析离心泵 的振动,其精度还有待进一步提高,目前主要以试验 测试为主,如在泵体或者轴承箱处安装加速度位移 传感器测量振动信号<sup>[10-11]</sup>,或者通过电涡流位移传 感器测量轴心轨迹[12-15],但测量的振动数据包含多 种成分,其值并非水力诱导激振。为了准确测试离 心泵的水力激振,本文以一台单叶片离心泵为试验 对象,在泵体靠近口环处安装两个垂直分布的电涡 流位移传感器,通过对比叶轮口环在空转及抽水时 的瞬态位移,近似获得水力诱导叶轮口环的瞬态位 移即水力诱导激振。通过分析不同流量工况离心泵 水力诱导激振特性,以期为离心泵的稳定运行及在 线故障诊断提供参考。

## 1 测试仪器及系统

### 1.1 试验对象

本文以一台 2.2 kW 单叶片离心泵为试验对象, 主要设计参数为流量  $Q_d = 20 \text{ m}^3/\text{h}$ ,扬程 H = 11 m, 转速 n = 2 940 r/min。泵的主要几何参数为:叶轮进 口直径  $D_j = 45 \text{ mm}$ ,出口直径  $D_2 = 125 \text{ mm}$ ,出口宽 度  $b_2 = 30 \text{ mm}$ ,叶片包角  $\phi = 360^\circ$ ,蜗壳基圆直径  $D_3 = 135 \text{ mm}$ 。单叶片离心泵具有极佳的无堵塞性 能,广泛应用于具有长纤维和大颗粒介质的输送,但 其水力诱导激振明显<sup>[16-17]</sup>。

### 1.2 试验装置

试验包括两部分,即外特性试验和水力诱导激 振试验,水力诱导激振试验在外特性试验基础上进 行。试验在江苏大学机械工业排灌机械产品质量监 督检测中心(镇江)开式试验台上进行,测试台精度 为2级,试验台如图1所示。泵扬程的测量是通过 测试泵进出口压力求得,本试验采用上海威尔泰工 业自动化股份有限公司生产的WT2000型智能压力 变送器,在测试泵进、出口2倍管径处各开一个测压 孔并与压力变送器相连。流量的测量采用上海自动 化仪表九厂生产的涡轮流量计,信号经过放大器输 入到数据采集系统。通过变频器控制输入电流频率 来调整泵的转速。外特性数据采集采用江苏大学自 行设计的泵类产品测试系统。



图1 试验台

Fig. 1 Experiment setup

出口阀 2. 流量计 3. 进口阀 4. 出口测压管 5. 进口测压
 管 6. 单叶片离心泵

水力诱导激振试验采用非接触式本特利 3300 型电涡流位移传感器测量叶轮口环的瞬态位移,传 感器系统主要由探头、前置器、延伸电缆、输出电缆 等组成,传感器系统如图 2 所示。前置器是整个传 感器系统的信号处理中心,通过特殊电路感应出探 头的头部体与头部体前金属导体的间隙变化,产生 随间隙线性变化而变化的电压输出信号。叶轮转动 相位测试采用霍尔感应器,在叶轮前盖板嵌入一枚 永磁铁,并在蜗壳壁面加工一个螺纹通孔,测试时将 霍尔感应器拧入。霍尔感应器如图 3 所示。泵运转 时当永磁铁扫过霍尔感应器时产生一个脉冲电压信 号。采用华科水力机械综合测试仪采集水力诱导激 振试验信号,并由配套的软件进行数据分析。



图 2 本特利 3300 型电涡流位移传感器 Fig. 2 Bentley 3300 eddy current displacement sensor 1. 前置器 2. 延伸电缆 3. 探头 4. 输出电缆

#### 2 试验方法与步骤

外特性试验测试时保持进口阀全开,通过调节



图 3 霍尔感应器和叶轮实物图 Fig. 3 Hall sensor and impeller 1. 叶轮 2. 永磁铁 3. 霍尔感应器

出口阀来改变流量,从关死点到大流量工况共测试 不少于13个工况点。通过采集进出口压力信号、流 量、转速、电动机输入电流电压等信号,得到泵的外 特性曲线。单叶片离心泵往往采用单级单吸悬臂式 结构,在叶轮口环处挠度最大,并且口环表面加工水 平较高,形状误差小。因此本文采用双向动态法测 量水力诱导激振<sup>[18]</sup>,两个垂直布置于泵体同一横截 面上的传感器分别测量口环表面与探头端面的相对 位置。安装探头时应将探头的安装间隙设在传感器 的线性中点,本文所使用传感器测试范围为距被测 靶面 0.25~2.3 mm, 对应的电压为-17~-1 V, 灵 敏度为7.87 V/mm。通过万用表测量输出电压确保 图 4 中 d<sub>0</sub>为 1.2 mm 左右。水力诱导激振传感器安 装实物图如图5所示。离心泵运行时引起口环振动 原因较为复杂,如转子质量不平衡、联轴器不对中、 水力诱导激振力等[19-20]。为了准确测量水力诱导 口环位移,测试时先测量泵空转时口环瞬态位移,再 测量泵正常抽水时口环的瞬态位移,由于离心泵叶 轮为后弯叶片,并且叶片数较少,空转时抽送空气做 功极小,两者之差即可近似认为是水力诱导激振。 为确保后处理求差时叶轮空转和抽水时位于同一相 位,采用霍尔感应器对叶轮的转动相位进行测量,并 月通过微调变频器来确保泵在各工况下的转速 一致。







图 5 水力诱导激振传感器安装实物图 Fig. 5 Hydrodynamic induced vibration sensor installation diagram 1、2. 位移传感器 3. 霍尔感应器

(1)在外特性试验完成后拆除进口管路,将位 移传感器和霍尔感应器安装在泵体上,调整传感器 位置,确保位移传感器与口环端面的距离位于线限 中点附近(1.2 mm),霍尔感应器与前盖板永磁铁距 离在 2 mm 以内。

(2) 在华科水力机械综合测试仪配套软件上对 各传感器进行率定,设定采样频率为3072 Hz。

(3) 开启电源,调节变频器使转速达到额定转速2940 r/min,待泵稳定运行后开始录波,记录泵空转30 s 传感器信号。

(4) 连接进口管路,将进口阀全开,出口阀关闭。开启电源,调整出口阀开度,共测量 0.2Q<sub>d</sub>、0.6Q<sub>d</sub>、Q<sub>d</sub>和1.4Q<sub>d</sub>4个工况点,调整阀门的同时观察转速的变化微调变频器,使转速保持在2940 r/min 左右,待稳定后开始录波,记录每个流量工况下 30 s 传感器信号。

(5)将上述测试重复3遍,将试验数据导入后 由处理软件进行分析。

# 3 试验结果与分析

### 3.1 外特性试验结果

图 6 为单叶片离心泵外特性曲线,从图中可看 出单叶片离心泵 H-Q 曲线为陡降直线,扬程随流 量的减小迅速增加;功率随流量的增大而显著增大, 但流量达到 24 m<sup>3</sup>/h 后功率变得平稳;效率随流量 减小迅速降低,最高效率偏大流量工况运行。

## 3.2 泵空转时叶轮口环瞬态位移

单叶片离心泵由于加工及安装的原因不可避免 存在一定不平衡量,因此首先测量泵空转的口环振 动。图7为额定转速下泵空转时叶轮口环瞬态位移 时域图及频谱图(x、y方向分别对应图5中传感器 1和传感器2)。从图中可看出,泵空转时 x、y方向 的波形图均为周期性的畸变正弦曲线,并且周期重 复性极高,表明泵空转时运行平稳。从频域图可看



displacement of wear ring when pumping air

出 x、y 方向口环位移幅值均在转频出现最大值,即 口环位移的主频为叶轮转频,这表明泵空转时口环 振动位移的主要原因是质量不平衡、偏心等引起的 离心力。

将 x、y 方向的位移合成一个平面内的运动,即 可得到叶轮口环位移轨迹图。为剔除测试结果包含 的噪声、电磁干扰等高频信号,采用巴特沃斯低通数 字滤波器对原始数据进行低通滤波。由频谱图可知 叶轮口环瞬态位移幅值主要集中在 5f<sub>a</sub>(f<sub>a</sub>是转速 n 对应的频率)以内,另一方面由于转子质量不平衡、 偏心、弯曲主要对应工作频率,不对中易产生2倍频 率振动<sup>[19]</sup>,因此将截止频率分别设置为*f<sub>a</sub>、2f<sub>a</sub>*和 5*f<sub>a</sub>。图8为额定转速叶轮口环位移轨迹图,从图中* 可看出,采用5*f<sub>a</sub>滤波滤掉了毛刺及细微波动,滤波* 后的口环位移轨迹图与原始数据基本一致。2*f<sub>a</sub>滤* 波后的口环位移轨迹图变得光顺,形状为椭圆形,大 小与初始数据差别不大,*f<sub>a</sub>滤波*后的口环位移轨迹 图轮廓显著减小,形状为标准的椭圆形,表明2倍转 频对口环位移轨迹影响显著,转子系统存在一定量 不对中。





#### 3.3 泵抽水时叶轮口环瞬态位移

通过泵空转叶轮口环位移轨迹图可看出泵安装 良好,适合试验,接通进口管路,测量泵抽水时叶轮 口环的瞬态位移。图9为泵抽水时额定工况 Q<sub>d</sub>叶 轮口环瞬态位移时域图及频谱图。从图中可看出,



图 9 叶轮抽水时口环位移时域图、频域图 Fig. 9 Time history and frequency spectrum of displacement of wear ring when pumping water 泵抽水时口环位移与空转时相似, x、y 方向的波形 图均为周期波动的正弦曲线,由于单叶片离心泵叶 轮转频与叶片通过频率(f<sub>b</sub>)一致,因此抽水时主频 也为叶轮转频。单叶片离心泵空转时转子不平衡诱 导的离心力与流场结构不对称导致的水力诱导激振 力周期一致,均随叶轮旋转一圈而波动一个周期,因 此抽水时水力诱导激振力将会与转子不平衡的离心 力矢量叠加从而影响口环位移幅值,从图中可看出 抽水时口环位移幅值有所减小,表明水力诱导激振 力与转子不平衡的离心力方向不一致,抵消了部分 值。图 10 为抽水时叶轮口环位移轨迹图,从图中可 看出,抽水时口环位移轨迹图与泵空转时相似,其形 状也为畸变的椭圆形,重复性良好。但在5f,滤波后 口环位移轨迹图出现了一个明显突变区域,其可能 原因是叶轮与蜗壳隔舌的动静干涉作用导致了流场 结构的突变,诱导了较强的振动。



#### 3.4 水力诱导激振

当安装在叶轮上的永磁铁扫过霍尔感应器探头 时产生一个脉冲电压信号,两个脉冲信号即为叶轮 旋转一个周期。图 11 为霍尔感应器脉冲信号图,脉 冲波段表明叶轮出口扫过霍尔感应器探头。通过霍 尔感应器即可获得叶轮的键相位置,同时还可以监 测叶轮的动态转速。定义脉冲信号对应的第1个数 据为叶轮旋转周期的起始时刻,将电涡流位移传感 器在泵抽水与空转同一时刻的数据求差值即获得水 力诱导叶轮瞬态口环位移。



离心泵由于叶轮、蜗壳的动静干涉作用以及叶 片出口处的射流-尾迹结构使得流场结构呈非对称 分布并且随着叶轮的旋转而周期性改变,从而导致 了随叶轮旋转而周期变化的水力诱导径向力。周期 变化的水力诱导径向力作用于叶轮转子必然导致叶 轮产生水力激振。图 12 为叶轮在转速 2 940 r/min 时 不同流量工况的水力诱导叶轮口环位移轨迹图。从 图中可看出,各流量工况下位移轨迹图相似,均为畸 变的椭圆形,在 130°附近位移最大,而在 210°~ 300°之间出现了一个突变区域。对比不同流量可发



图 12 水力诱导叶轮口环位移轨迹图 Fig. 12 Hydrodynamic radial force induced displacement of impeller wear ring

现,在小流量时最大位移大于其他流量,在0.2Q<sub>d</sub>即 4 m<sup>3</sup>/h 时最大位移达到了 1.6 mm,在额定流量及大 流量工况最大位移变小。对比泵外特性曲线可发 现,小流量工况泵效率明显降低,此时离心泵内流动 恶化,叶轮内流动分离、回流严重<sup>[21]</sup>,并且叶轮出口 液流与蜗壳内流体冲击加剧,流场圆周非对称性进 一步加剧,水力诱导径向力明显增大,因此对应的口 环位移也最大,而在额定流量及大流量工况,泵内流 动情况显著改善,泵的效率较高,水力诱导径向力较 小,水力诱导激振也明显减弱。图 13、14 分别为叶 轮在不同流量工况下的时域图及频域图。从图中可 看出,水力诱导叶轮口环瞬态位移 x、y 分量均为周 期重复的畸变正弦曲线,x方向位移在每个周期内 均出现一个副波峰,与压力脉动的测试波形相似,因 此推断流体的粘性尾迹流导致了该副波峰的出 现<sup>[22-23]</sup>,并且导致了口环位移轨迹图在210°~300° 之间出现了突变。从频域图中可看出,水力诱导口 环瞬态位移主频特征明显,各流量工况下均为 49 Hz,与叶频f,一致,并且倍频处均出现较大的幅







Fig. 14 Frequency spectrum of hydrodynamic radial force induced displacement of impeller wear ring

值, x 方向位移在 98 Hz 处出现仅次于主频的幅值, 这与时域图中的 2 倍频副波峰一致。

# 4 结论

(1)单叶片离心泵空转时叶轮口环瞬态位移波 形图为重复的畸变正弦曲线,主频为叶轮转频,引起 振动的主要原因是转子不平衡引起的离心力,空转 时口环瞬态位移信号基本在 5f<sub>a</sub>以内,2 倍转频对口 环位移轨迹影响明显。

(2)单叶片离心泵抽水时叶轮口环瞬态位移与 空转时相似,但振幅有所减小,水力激振力平衡了部 分离心力。

(3)单叶片离心泵水力诱导激振随叶轮的旋转 而周期性波动,水力诱导叶轮口环位移轨迹图为畸 变椭圆形,在叶轮旋转到130°附近振幅最大,由于 粘性尾流的影响,在210°~300°之间出现了一个振 幅突变区域。

(4)在不同流量工况下,离心泵水力诱导激振主 频均为叶频(f<sub>b</sub>),水力激振随流量的减小而显著增强, 在额定流量到大流量工况水力诱导激振基本稳定。

参考文献

- 1 关醒凡. 现代泵理论与设计[M]. 北京:中国宇航出版社, 2011.
- 2 袁寿其,施卫东,刘厚林. 泵理论与技术[M]. 北京:机械工业出版社, 2014.
- 3 CHAMIEHD S, ACOSTA A J, BRENNEN C E, et al. Experimental measurements of hydrodynamic radial forces and stiffness matrices for a centrifugal pump-impeller[J]. ASME Journal of Fluids Engineering, 1985, 107(3): 307-315.
- 4 UY R V, BRENNEN C E. Experimental measurements of rotordynamic forces caused by front shroud pump leakage [J]. ASME Journal of Fluids Engineering, 1999, 121(3): 633-637.

- 5 HSU Y, BRENNEN C E. Effect of swirl on rotordynamic forces caused by front shroud pump leakage[J]. ASME Journal of Fluids Engineering, 2002, 124(4): 1005 1010.
- 6 BRENNEN C E, ACOSTA A J. Fluid-induced rotordynamic forces and instabilities[J]. Structural Control and Health Monitoring, 2006, 13(1): 10-26.
- 7 JONKER J B, ESSEN T G. A finite element perturbation method for computing fluid-induced forces on a centrifugal impeller rotating and whirling in a volute casing [J]. International Journal for Numerical Methods in Engineering, 1997, 40(2): 269 294.
- 8 窦唯,刘占生.高速离心泵隔舌对流体激振力的影响研究[J].振动工程学报,2012,25(6):705-713. DOU Wei, LIU Zhansheng. The investigation of the effect of volute tongue on hydrodynamic forces for high speed centrifugal pump [J]. Journal of Vibration Engineering, 2012, 25(6):705-713. (in Chinese)
- 9 刘占生,刘全忠,王洪杰. 离心泵变工况流场及叶轮流体激振力研究[J]. 哈尔滨工程大学学报,2008,29(12):1304-1308. LIU Zhansheng, LIU Quanzhong, WANG Hongjie. Analysis of off-design flow fields in centrifugal pumps and hydrodynamic forces on impellers[J]. Journal of Harbin Engineering University, 2008, 29(12):1304-1308. (in Chinese)
- 10 龚卫锋,李兵,孙卫平,等. 电动离心泵振动特性试验研究[J]. 流体机械, 2012, 40(4):10-12.
   GONG Weifeng, LI Bing, SUN Weiping, et al. Experimental study on the electric centrifugal pump's vibration characteristic[J].
   Fluid Machinery, 2012, 40(4):10-12. (in Chinese)
- 11 吴英友,赵耀,陈炯. 汽轮给水泵机组振动频率特性分析[J]. 中国舰船研究, 2006, 1(5):90-93.
   WU Yingyou, ZHAO Yao, CHEN Jiong. Study on vibration frequency characteristics of turbine driven feed pump unit[J].
   Chinese Journal of Ship Research, 2006, 1(5):90-93. (in Chinese)
- 12 黄智勇,李昌奂,黄红. 高工况涡轮泵轴系状态对工作可靠性的影响[J]. 火箭推进,2007,33(1):32-35.
   HUANG Zhiyong, LI Changhuan, HUANG Hong. The effect of high operating condition turbopump shafting status on reliability
   [J]. Journal of Rocket Propulsion, 2007, 33(1):32-35. (in Chinese)
- 13 胡敬宁,薛岩,张德胜,等. 高压多级离心泵启动瞬态轴心轨迹研究[J]. 农业工程学报,2015,31(增刊1):61-70. HU Jingning, XUE Yan, ZHANG Desheng, et al. Research on transient axis trajectory of high-pressure multistage centrifugal pump on starting[J]. Transactions of the CSAE, 2015, 31(Supp. 1):61-70. (in Chinese)
- 14 蒋小平,朱嘉炜,冯琦,等. 基于多重激励的悬臂式多级离心泵轴心轨迹研究[J/OL]. 农业机械学报, 2017, 48(12): 105-113. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view\_abstract.aspx? file\_no = 20171212&flag = 1&journal\_id = jcsam. DOI: 10.6041/j.issn.1000-1298.2017.12.012.
  HANC Xiaoping ZHU Jiawai, FENC Qi, et al. Axia trajectory of apptileurs publication proteined areas by the second second

JIANG Xiaoping, ZHU Jiawei, FENG Qi, et al. Axis trajectory of cantilever multistage centrifugal pump based on multiple excitation [J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2017, 48(12):105-113. (in Chinese) 杨敏, 马光辉, 吴乃军. 大功率高速泵的振动监测系统及其应用[J]. 火箭推进, 2013, 39(1):77-83.

- 15 杨敏,马光辉,吴乃军. 大功率高速泵的振动监测系统及其应用[J]. 火箭推进, 2013, 39(1):77-83. YANG Min, MA Guanghui, WU Naijun. Vibration monitoring system for high-power high-speed pump and its application [J]. Journal of Rocket Propulsion, 2013, 39(1):77-83. (in Chinese)
- 16 陈红勋, 邹雪莲. 单流道泵内部非定常流动特性[J]. 机械工程学报, 2005, 41(11): 163-170. CHEN Hongxun, ZOU Xuelian. Unsteady flow characteristic within single channel pump[J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 2005, 41(11): 163-170. (in Chinese)
- 17 BENRA F K, DOHMEN H J. Comparison of pump impeller orbit curves obtained by measurement and FSI simulation [C] // ASME 2007 Pressure Vessels and Piping Conference, 2007: 41-48.
- 18 周苏波. 主轴轴心轨迹测量和动平衡实验研究[D]. 哈尔滨:哈尔滨工业大学,2011. ZHOU Subo. The experimental research of testing on spindles axis locus and dynamic balance[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2011. (in Chinese)
- 19 尹成红. 离心泵的故障诊断方法及故障评定[D]. 大庆:大庆石油学院, 2005.
   YIN Chenghong. The methods and judgment of a fault diagnosis for centrifugal pump[D]. Daqing: Daqing Petroleum College, 2005. (in Chinese)
- 20 吴英友,邢维升,朱显明,等. 某型离心水泵振动特性分析[J].中国舰船研究,2008,3(1):51-54.
   WU Yingyou, XING Weisheng, ZHU Xianming, et al. Study on vibration characteristic of centrifugal pump[J]. Chinese Journal of Ship Research, 2008, 3(1):51-54. (in Chinese)
- 21 任芸. 离心泵内不稳定流动的试验及数值模型研究[D]. 镇江:江苏大学, 2013. REN Yun. Experimental investigation and numerical model on flow instabilities in centrifugal pump[D]. Zhenjiang: Jiangsu University, 2013. (in Chinese)
- 22 SHI F. Numerical study of pressure fluctuations caused by impeller-diffuser interaction in a diffuser pump stage [J]. ASME Journal of Fluids Engineering, 2001, 123(3):466-474.
- 23 WANG H, TSUKAMOTO H. Fundamental analysis on rotor-stator interaction in a diffuser pump by vortex method [J]. ASME Journal of Fluids Engineering, 2001, 123(4):737 747.