



离心泵叶轮不同磨损程度下的振动信号分析

尹江南,袁寿其*,骆寅,孙慧,龚波

(江苏大学国家水泵及系统工程技术研究中心,江苏 镇江 212013)



尹江南

摘要:为了研究离心泵不同程度磨损后叶片进口边的振动特性,在虚拟仪器平台搭建试验泵系统,选用IS-50-160-00单级单吸离心泵分析不同磨损程度下振动信号的时域和频域特征。以6个叶片离心泵为研究对象,分别破坏对称2,4,6个进口叶片进行试验,采集泵在不同磨损程度下径向、纵向、轴向和基座方向的振动信号,并进行时域和频谱分析。在时域上采用峭度分析方法,发现磨损后每个叶轮的峭度变化是一致的,通过检测基座方向和轴向的振动信号峭度,可诊断离心泵的磨损程度。利用峰值因子分析得出磨损后叶轮产生更高的尖峰,尤其是轴向峰值因子较大。在频域分析中采用最大熵谱估计方法,得出磨损后离心泵在高频信号中出现振动能量的变化,将高频段(2 500~5 000 Hz)的振动变化作为诊断磨损程度的特征频段,同时发现振动信号功率谱在基座方向和轴向的能量变化较大。

关键词:离心泵;磨损;振动;时域分析;频域分析

中图分类号:TH311;S277.9 **文献标志码:**A **文章编号:**1674-8530(2020)02-0139-06

Doi:10.3969/j.issn.1674-8530.18.0079

尹江南,袁寿其,骆寅,等.离心泵叶轮不同磨损程度下的振动信号分析[J].排灌机械工程学报,2020,38(2):139-144.

YIN Jiangnan, YUAN Shouqi, LUO Yin, et al. Analysis of vibration signal characteristics of centrifugal pump impeller under different wear degrees[J]. Journal of drainage and irrigation machinery engineering (JDIME), 2020, 38(2):139-144. (in Chinese)

Analysis of vibration signal characteristics of centrifugal pump impeller under different wear degrees

YIN Jiangnan, YUAN Shouqi*, LUO Yin, SUN Hui, GONG Bo

(National Research Center of Pumps, Jiangsu University, Zhenjiang, Jiangsu 212013, China)

Abstract: In order to study the characteristics of the vibration signal under different wear degrees of the inlet edge of centrifugal pump, based on the platform of virtual instrument, the IS-50-160-00 single-suction centrifugal pump was used as the research object, the vibration signal was conducted by means of time domain and frequency domain. The method of kurtosis analysis was taken in time domain analysis. The result shows the kurtosis of different wear impellers with the same variation degree. The kurtosis of vibration signal in the direction of base and axis was monitored to judge the wear degree of centrifugal pump. Based on the analysis of peak factors, there is a higher peak in the domain spectrum of wear impeller, especially in the direction of axis. The variation of vibration energy would appear at high frequency in the method of maximum entropy spectrum analysis. The variation of vibration energy at high frequency(2 500~5 000 Hz) can be used to determine the wear level of impeller. It can be found that there is the greatest variation of energy of PSD in the directions of base and axis. The cha-

收稿日期:2018-04-13;修回日期:2018-05-31;网络出版时间:2018-09-19

网络出版地址:<http://kns.cnki.net/kcms/detail/32.1814.TH.20180919.1632.002.html>

基金项目:国家自然科学基金资助项目(51409125);江苏省自然科学基金面上项目(BK20171403);江苏高校优势学科建设工程项目第一作者简介:尹江南(1990—),男,河南商丘人,硕士研究生(404983229@qq.com),主要从事泵运行状态研究。

通信作者简介:袁寿其(1963—),男,上海金山人,研究员,博士生导师(shouqiy@ujs.edu.cn),主要从事流体机械及排灌机械研究。

racteristics of the vibration signal of the centrifugal pump impeller under different wear degrees can provide reference for the monitoring and analysis of the centrifugal pump fault.

Key words: centrifugal pump; wear; vibration; time domain analysis; frequency domain analysis

泵是输送液体或给液体增压的机械,其种类繁多,广泛应用于国民经济各个生产部门以及航空航天等尖端技术领域,在人民生活中也占据着举足轻重的地位^[1].泵作为河流水力输送的动力设备,广泛用于矿山、冶金、农业生产等领域,而河流中通常会掺杂悬浮的泥沙、固体颗粒以及其他杂质,含沙水质的输送对泵的过流部件会产生较大的空蚀和磨损^[2].固体颗粒高速冲击物体表面时,会在表面留下冲击痕,其痕迹的形状和位置受到物体材质、流体流速及冲击角度^[3-4]等因素的影响.研究人员往往通过观察不同位置、不同形状的痕迹,来判断流体机械经受何种破坏.SALIK 等^[5]研究发现,不同固体颗粒形状对冲蚀磨损速率会产生不同的影响.BELL-MAN 等^[6]通过对多晶陶瓷冲蚀磨损进行研究,提出了基于晶粒网格破裂和塑性流动的冲蚀磨损观点,认为入射粒子的应力波导致靶材晶体网格破裂,进而导致材料脱落.TILLY^[7]研究发现,在管道运输介质时,弯管处的磨蚀速率要高出直管处几十倍.AZ-IMIAN 等^[8]在离心式旋转磨损试验台测试了转盘转速、泥沙入射角对冲蚀磨损的影响,发现固体颗粒的浓度越大,表面磨蚀程度越深.

离心泵在运转过程中所产生的振动特性与泵的整体设计结构、输送物质、转子设计等因素密切相关,利用振动信号对离心泵进行故障监测与诊断是一种较常用的方法^[9].赵志宏等^[10]通过分析不同工况下轴承振动信号的特点,并总结振动的规律以及特征频率,对轴承进行监测和诊断.张伟等^[11]采用不同的振动信号分析方法,对机械主轴的故障特征进行在线分析和诊断.唐一科等^[12]利用不同叶片之间压力变化特性,对离心泵的叶轮进行状态监测和故障诊断.周云龙等^[13]通过分析离心泵出口的压力脉动振动特性,对离心泵转子系统进行早期故障监测.国外研究者利用电阻应变测量、声发射多普勒检测方法、激光多普勒检测方法、振动信号测量方法,对叶轮机械叶片进行状态监测和故障诊断^[14-18].

目前,磨损监测主要用于一些重要的流程泵,且一套监测系统适用一台机组,设备价格偏高、性价比低,而在磨损故障最为严重的离心泵上几乎尚未开展应用.文中研究离心泵叶轮不同破坏程度下振动信号的特征,旨在为离心泵叶轮故障的监测分

析提供借鉴和参考.

1 试验装置和数据采集

1.1 试验方法与外特性

试验装置由外接罐体、进出口阀门、压力传感器等部分组成.通过虚拟仪器平台搭建试验泵系统,同时利用数据采集板卡 USB6343 将信号传输到计算机,完成信号的采集与分析.

为研究叶片磨损故障后离心泵的振动信号规律,设计了 IS-50-160-00 标准离心泵.它的基本设计参数如表 1 所示,表中 Q 为流量; H 为设计扬程; n 为额定转速; Z 为叶片数; D_1 为叶轮进口直径; D_2 为叶轮出口直径; b_2 为叶片出口宽度.

表 1 基本参数
Tab.1 Basic parameters

参数	取值
$Q/(m^3 \cdot h^{-1})$	50
H/m	34
$n/(r \cdot min^{-1})$	2 900
Z	6
D_1/mm	74
D_2/mm	174
b_2/mm	12

由于自然磨损时间周期长、经济性高,加之考虑到磨损故障主要发生在叶片的进口边等特点,因此,文中人为损坏叶轮不同数量的进口叶片,对其进行故障分析.试验台装置示意图如图 1 所示.

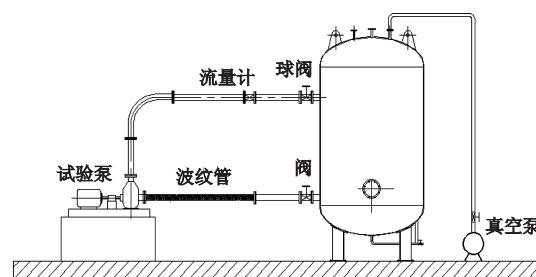


图 1 试验回路
Fig.1 Test pump unit

2 磨损条件的振动特性

2.1 峰度分析验证

为了更加直观地分析叶片磨损后离心泵受流

体冲击的程度,并早期诊断叶片的损伤故障,文中采用峭度分析方法。峭度是反映振动信号分布特性的数值,用以统计和描述波形总能量和信号冲击成分所占的比重。峭度 K 的表达式^[19]为

$$K = \frac{E(x - \mu)^4}{\sigma^4}, \quad (1)$$

式中: x 为试验取得的振动信号; μ 为信号 x 的均值; E 为采集信号的频率; σ 为信号 x 的标准差。由于径向和纵向振动的峭度变化无规律可循,因此,文中对基座及轴向的峭度变化进行分析(见图 2)。

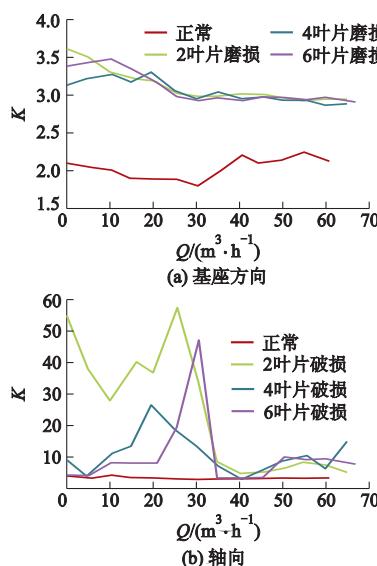


Fig.2 Kurtosis of vibration signal under design operating condition

分析图 2 发现,在小流量时各个方向 K 值均较大,并且每个破损叶片离心泵在各个方向的峭度变化趋势一致。在基座方向上,当 $Q > 30 \text{ m}^3/\text{h}$ 时,由于小流量下流体对过流部件的不适应,加之叶轮叶片进口边破损,因此流体对叶轮的冲击及泵系统的机械振动加重, K 值相对保持平稳。离心泵在破损情况下运转,也会促使过流部件内部发生空化、流体产生大量空泡,而空泡的破裂会造成其内部产生大量冲击波,所以,不同流量下 K 值变化幅度较大。在轴向,破损后离心泵的 K 值远远大于正常离心泵的。从图 2 中可以看出,当基座方向 $K > 2.5$ 和轴向 $K < 0.6$ 时,可判断离心泵发生磨损。根据该分析信号的峭度,可诊断振动信号,实时监测离心泵的磨损情况。

2.2 峰值因子分析验证

为了观察物体元件发生磨损后产生的脉冲和波峰的尖峰度在故障中的变化,采用峰值因子 $C(P/R)$ 分析方法。峰值因子 C 表示信号的峰值

(Peak) 与均方根(RMS)的比值关系,适用于物体元件不同磨损程度下的故障诊断。峰值因子^[19]

$$C = \frac{x_{\max} - x_{\min}}{X_{\text{rms}}}, \quad (2)$$

式中: x 为试验取得的振动信号; X_{rms} 为信号的均方根。由于径向和纵向振动的峰值因子不具备参考价值,故仅对基座方向和轴向进行分析。

破损叶轮进口边后,随流量 Q 的变化,流体峰值因子 C 变化情况如图 3 所示。由于叶轮遭到破坏,离心泵处于极不稳定甚至是危险的状态,此时的振动相对剧烈。同时,进口叶片的破坏致使流体进入叶轮时的流场相对错乱、不平稳,流体和过流部件之间产生冲击和大量摩擦,使磨损后的振动信号峰值因子相对不稳定。在基座方向上,磨损后的离心泵呈现出相同的变化趋势,随着流量的增加,峰值因子先变小然后逐渐平稳;在相同流量下,进口 6,4,2 叶片磨损离心泵的峰值因子依次变小。在轴向上,由于叶轮的不平衡,离心泵的转动轴出现跳动,轴和轴承之间的摩擦较为严重,从而产生变化更为强烈的峰值因子。在 $0 \sim 25 \text{ m}^3/\text{h}$ 的小流量下,峰值因子在磨损进口 2,4 叶片达到最大值;在设计流量处,峰值因子按磨损进口 4,6,2 叶片依次减小。

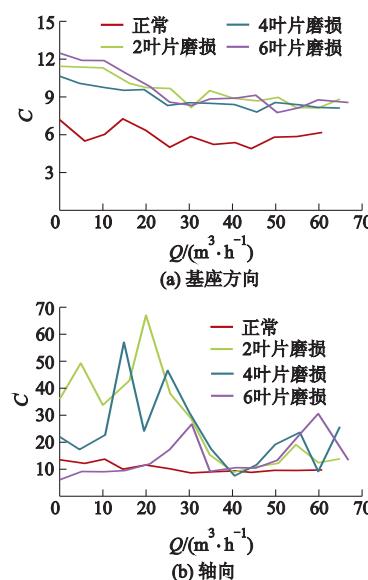


Fig.3 C of vibration signal under design operating condition

3 最大熵功率谱估计分析

最大熵功率谱估计方法^[19-21]的思路是对所观测的有限数据以外的数据不作任何确定性的假设。该方法通过功率谱衡量振动信号的物理量,并以该物理量

为信息量进行分析研究.信息量 $I(x_k)$ 可表示为

$$I(x_k) = I(X = x_k) = -\log p_k, \quad (3)$$

假设随机变量 X 取值为 x_k 的概率 $p_k = P\{X = x_k\}$, $x_k \in \Omega$, 则定义信息量 $I(x)$ 在字符集合 Ω 的平均值为离散随机变量 X 的熵, 记作

$$H(X) = E[I(x)] = -\sum_{x_k \in \Omega} p_k \ln p_k, \quad (4)$$

随机变量 X 的分布函数为熵. $p(x)$ 是连续随机变量 x 的分布密度函数, 则其熵可以表示为

$$H(X) = E[\ln p(x)] = -\int_{-\infty}^{+\infty} p(x) \ln p(x) dx. \quad (5)$$

基于熵的概念, 功率谱熵的公式可总结为

$$H[P(\omega)] = \frac{1}{2\pi} \int_{-\pi}^{+\pi} \ln P(\omega) d\omega. \quad (6)$$

在谱熵公式(5)基础上, Burg 提出在估计功率谱时, 要使式(6)的熵谱最大: 这就是最大熵估计方法. 功率谱密度可表达为

$$P(\omega) = \frac{\left| \sum_{k=0}^q b_k e^{-j\omega k} \right|^2}{\left| 1 + \sum_{k=0}^p a_k e^{-j\omega k} \right|^2}, \quad (7)$$

式中: b_k 为 MA 模型的平均系数; q 为 MA 模型的阶次. 一般工程应用中, 往往会采用式(8)来表示 Burg 最大熵功率谱密度.

$$P(\omega) = \frac{\sigma^2}{\left| 1 + \sum_{k=0}^p a_k e^{-j\omega k} \right|^2}, \quad (8)$$

式中: σ^2 为预测误差的方差; a_k 为 m 阶线性预测滤

波器的系数. 预测滤波器的系数 a_k 可由式(9)求得, 即

$$a_i^m = a_i^{m-1} + K_m a_{m-i}^{m-1}, \quad a_m^m = K_m \quad (9)$$

式中: K_m 为反射系数.

参数的求解是在满足 Levinson-Durbin 递推算法约束条件的前提下, 比较各预测系数的误差功率. 计算 m 阶预测误差的递推公式^[22-23] 为

$$\begin{cases} e_m^f(n) = e_{m-1}^f(n) + K_m e_{m-1}^b(n-1), \\ e_m^b(n) = e_{m-1}^b(n-1) + K_m e_{m-1}^f(n), \\ e_0^f(n) = e_0^b(n) = x(n), \end{cases} \quad (10)$$

式中: $e_m^f(n)$ 为 m 阶前向预测误差; $e_m^b(n)$ 为 m 阶后向预测误差. 而 m 阶前、后向预测误差的平均功率 P_m 为

$$P_m = \frac{1}{2} \sum_{n=m}^N [|e_m^f(n)|^2 + |e_m^b(n)|^2]. \quad (11)$$

从以上公式可以看出, 通过已知条件计算出 $P_0, e_m^f(n)$ 与 $e_m^b(n)$, a_k 以及 K_m , 可以推出不再变小的预测误差的平均功率 P_m .

图 4 为人为破坏叶轮在基座方向、径向、纵向和轴向最大熵谱估计, 其中 PSD 为功率谱. 从图中各方向可知, 破损叶轮进口叶片的振动信号能量与正常叶片进口比较, 产生了较明显的变化. 由于进口叶片遭破坏, 液体进入过流部件时的流场相对错乱、不平稳, 流体和过流部件之间产生大量的冲击和摩擦. 同时叶轮进口破损导致的不平衡性还会造成转轴和密封环、转轴与轴瓦、转轴与密封瓦等动静部件之间发生摩擦, 从而引起振动.

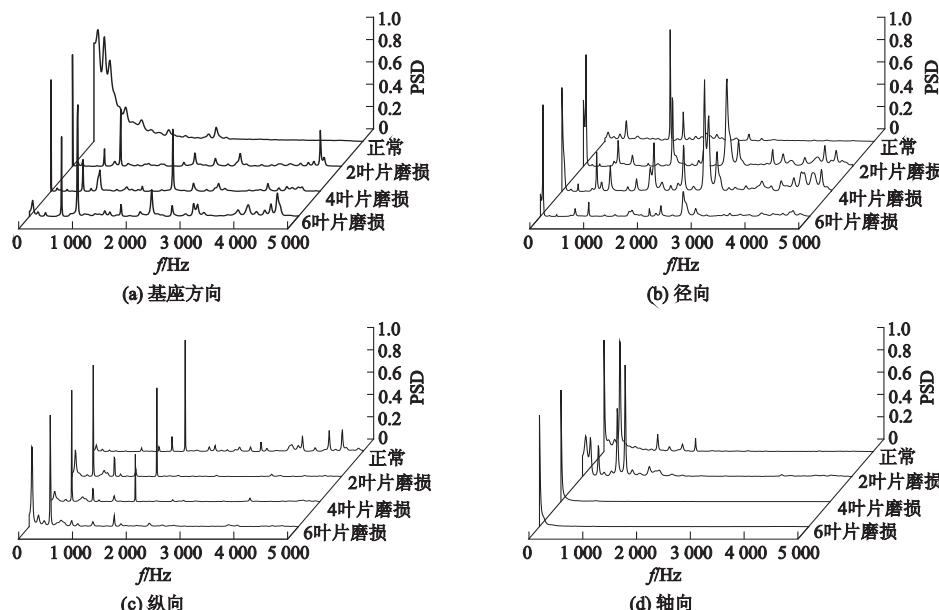


图 4 振动信号功率谱图
Fig.4 Power spectrum of vibration signal

由于机械的故障信号发生在高频段,因此,文中主要分析轴频、倍频和频率的高频段。在基座方向上,发现正常离心泵的功率谱在1 000~2 000 Hz 频带内振动信号能量相对集中;由于环境条件的限制和电动机、管道本身的振动,该方向上偶然发生共振,出现振动能量的骤增。在径向上,破损后的叶轮在2 600~2 800 Hz 频带内振动能量变化幅度较大,而4叶片磨损进口边振动能量变化幅度最大,此时正常离心泵的振动能量较小。在纵向上,由于进口破坏会使液体进入离心泵后产生大量的空化现象,某个频率点可能出现振动能量较大。由于发生空化,正常离心泵在高频段也会出现振动能量的波动。在轴向上,转动轴由于叶轮的不平衡而出现跳动,不同结构物体的振动会产生共振,不同频率振动的周期性叠加使振动能量增加,振动能量集中在0~100 Hz 频段内。

4 结 论

文中通过对因人为破坏而发生磨损的离心泵进行试验分析,尤其对磨损故障后离心泵的外特性和振动信号加以分析,主要得出如下结论:

- 1) 当离心泵的振动峭度在基座方向大于2.5,且在轴向上大于0.6时,可判断离心泵发生磨损。离心泵发生磨损后,液体冲击叶轮而产生更高的峰值因子,尤其在基座和轴向上表现得更为突出。
- 2) 采用最大熵谱估计方法,发现在径向上各频率的波动最为剧烈,破坏对称的2叶片进口在2 600~2 800 Hz 频带内最不稳定。在轴向上,转动轴由于叶轮的不平衡而发生跳动,不同结构物体的振动会产生共振,振动能量集中在0~100 Hz 频段内。

参考文献(References)

- [1] 孙慧,袁寿其,骆寅,等.水机电共同作用的离心泵内部非定常流动分析[J].排灌机械工程学报,2016,34(2):122~127, 150.
SUN Hui, YUAN Shouqi, LUO Yin, et al. Unsteady flow analysis of centrifugal pumps influenced by flow, motor and electricity [J]. Journal of drainage and irrigation machinery engineering, 2016, 34 (2) :122~127, 150. (in Chinese)
- [2] 曹卫东,姜昕,张骞,等.半开式切割泵固液两相流动与特性分析[J].江苏大学学报(自然科学版),2019,40(5):531~537.
CAO Weidong, JIANG Xin, ZHANG Qian, et al. Characteristics analysis of solid-liquid two-phase flow in semi open cutting pump [J]. Journal of Jiangsu University (natural science edition), 2019, 40 (5) :531~537. (in Chinese)
- [3] 陈汇龙,吴远征,孙冬冬,等.泵口环圆柱面螺旋槽造型的流体动力特性[J].江苏大学学报(自然科学版),2019,40(2):145~151.
CHEN Huilong, WU Yuanzheng, SUN Dongdong, et al. Hydrodynamic characteristics of cylindrical spiral grooves modeling for pump annular seals[J]. Journal of Jiangsu University (natural science edition), 2019, 40 (2) :145 ~ 151. (in Chinese)
- [4] 曹卫东,张骞,李伟,等.基于ANSYS的轴流泵转子系统有限元分析[J].江苏大学学报(自然科学版),2019,40(3):282~287.
CAO Weidong, ZHANG Qian, LI Wei, et al. Finite element analysis for rotor system of axial flow pump based on ANSYS [J]. Journal of Jiangsu University (natural science edition), 2019, 40(3):282~287. (in Chinese)
- [5] SALIK J, BUCKLEY D, BRAINARD W A. The effect of mechanical surface and heat treatments on the erosion resistance of 6061 aluminum alloy[J]. Wear, 1981, 65 (3) :351~358.
- [6] BELLMAN R, LEVY A. Erosion mechanism in ductile metals[J]. Wear, 1981, 70(1):1~27.
- [7] TILLY G P. Erosion caused by impact of solid particles [J]. Treatise on materials science & technology, 1979, 13:287~319.
- [8] AZIMIAN M, BART H J. Erosion investigations by means of a centrifugal accelerator erosion tester [J]. Wear, 2015, 328~329:249~256.
- [9] 刘小兵.水力机械泥沙磨损的数值模拟[J].四川工业学院学报,2000,19(2):79~84.
LIU Xiaobing. Numerical simulation of silt abrasive erosion in hydraulic machinery [J]. Journal of Sichuan Institute of Technology, 2000, 19 (2) :79~84. (in Chinese)
- [10] 赵志宏,杨绍普.一种基于样本熵的轴承故障诊断方法[J].振动与冲击,2012,31(6):136~140, 154.
ZHAO Zhihong, YANG Shaopu. Sample entropy-based roller bearing fault diagnosis method [J]. Journal of vibration and shock, 2012, 31 (6) :136~140, 154. (in Chinese)
- [11] 张伟,吴玉林,陈乃祥,等.蓄能机组主轴密封故障监测与诊断[J].农业机械学报,2001,32(1):52~55.
ZHANG Wei, WU Yulin, CHEN Naixiang, et al. Monitoring and diagnosis of the main shaft sealing for a pumped storage unit [J]. Transactions of the CSAM,

- 2001, 32(1):52–55. (in Chinese)
- [12] 唐一科, 柯研, 谢志江. 叶轮机械叶片状态监测与故障诊断的现状与发展[J]. 噪声与振动控制, 2003, 23(6):5–8.
TANG Yike, KE Yan, XIE Zhijiang. The actuality and development of turbo machine's status monitoring and fault diagnose [J]. Noise and vibration control, 2003, 23(6):5–8. (in Chinese)
- [13] 周云龙, 吕远征. 基于出口压力脉动奇异值的离心泵早期汽蚀故障诊断[J]. 化工自动化及仪表, 2015 (11):1220–1225.
ZHOU Yunlong, LYU Yuanzheng. Fault diagnosis of early-stage cavitations of centrifugal pump based on SVDs of pressure fluctuation at outlet [J]. Control and instruments in chemical industry, 2015 (11): 1220 – 1225. (in Chinese)
- [14] KAWASHIMA T, IINUMA H, WAKATSUKI T, et al. Turbineblade vibration monitoring system [C]//Structures & dynamics, 1992, No.92-GT-159:372–376.
- [15] SIMMONS H R. Measuring of rotor and blade dynamic using an optical blade tip sensor[J]. 1990, No.90-GT-91:581–584.
- [16] ASL M G, TORABI R, NOURBAKHS S A. Experimental and FEM failure analysis and optimization of a centrifugal-pump volute casing[J]. Engineering failure analysis, 2009, 16(6):1996–2003.
- [17] YU Rui, LIU Jinxian. Failure analysis of centrifugal pump impeller[J]. Engineering failure analysis, 2018, 92:343–349.
- [18] 杨加力.船用离心泵的故障分析与处理[J].浙江国际海运职业技术学院学报,2012,8(2):6–9,25.
YANG Jiali. Failure analysis of marine centrifugal pump and countermeasures [J]. Journal of Zhejiang International Maritime College, 2012, 8 (2): 6 – 9, 25. (in Chinese)
- [19] 秦树人. 工程信号处理[M]. 北京:高等教育出版社, 2008.
- [20] XU H, WU L, HUI L, et al. Research on the periodicity of wind power based on the maximum entropy spectrum estimation[C]// International Conference on Probabilistic Methods Applied to Power Systems, 2016.
- [21] SASIKIRAN P, GOWRIMANOHAR T, KOTESWARA-RAO S, et al. Evaluation of maximum entropy method of spectrum estimation [J]. Digital signal processing, 2018: 328–340.
- [22] 肖飞. 钛合金铣削颤振过程振动非线性特征研究[D]. 哈尔滨:哈尔滨理工大学, 2013.
- [23] XU Yonggang, LI Lingjun, HE Zhengjia. Approximate entropy and its applications in mechanical fault diagnosis [J]. Information and control, 2002, 31(6):547–551.

(责任编辑 顾艳)

(上接第 126 页)

- [8] 高波, 王孝军, 倪丹, 等. 离心泵变转速压力脉动特性的试验研究[J]. 流体机械, 2018, 46(8):1–5.
GAO Bo, WANG Xiaojun, NI Dan, et al. Experimental research on pressure pulsation of a centrifugal pump at variable rotating speeds[J]. Fluid machinery, 2018, 46 (8):1–5. (in Chinese)
- [9] 田少强, 潘虹. 轴流泵装置模型试验压力脉动特性研究[J]. 四川水力发电, 2010, 29(5):116–120.
TIAN Shaoqiang, PAN Hong. Study on pressure pulsation characteristics of axial flow pump device model test[J]. Sichuan water power, 2010, 29(5):116–120. (in Chinese)
- [10] LU W G, DONG L, WANG Z F, et al. Cross influence of discharge and circulation on head loss of conduit of pump system with low head [J]. Applied mathematics and mechanics, 2012, 33(12):1533–1544.
- [11] HABAN V, KOUTNIK J, POCHYLY F. 1-D Mathematical model of high-frequency pressure oscillations in-
- duced by RSI including an influence of fluid second viscosity[C]//Proceedings of the 21st IAHR Symposium on Hydraulic Machinery and Systems, Switzerland, 2002:735–740.
- [12] WUIBAUT G, BOIS G, CAIGNAERT G, et al. Experimental analysis of interactions between the impeller and the vaned diffuser of a radial flow pump[C]//International Association on Hydraulic Research 2002 Symposium, Switzerland, 2002:1–11.
- [13] 袁丹青, 王航, 丛小青, 等. 径向力对螺旋离心泵转子系统动力学响应的影响[J]. 江苏大学学报(自然科学版), 2018, 39(3):290–295.
YUAN Danqing, WANG Hang, CONG Xiaoqing, et al. Effect of radial force on dynamic response of screw centrifugal pump rotor system [J]. Journal of Jiangsu University(natural science edit), 2018, 39(3):290–295. (in Chinese)

(责任编辑 顾艳)