

DOI:10.3969/j.issn.1001-4551.2015.11.008

离心泵空化现象的模拟试验研究^{*}

夏远志, 明廷锋^{*}, 苏永生, 曹玉良
(海军工程大学 动力工程学院, 湖北 武汉 430033)

摘要:针对离心泵空化状态识别难的问题,对离心泵空化前后进、出口的压力、振动和水声信号进行了研究。设计并搭建了双离心泵综合试验平台,构建了信号检测与采集系统,利用 LabVIEW 工具开发了状态监测系统。在保持离心泵流量恒定的前提下,通过调节进出口阀门开度,控制其扬程变化,完成了空化模拟试验。试验中,分别测取了机组 3 种工况下的流量、转速和进出口压力等数据,绘制了各工况的临界汽蚀余量判别曲线。并根据离心泵的结构特点与空化特性,对离心泵的压力、振动和水声信号进行了深入地分析比较,提取了其空化特征信息。研究结果表明,空化前后进、出口压力信号、振动信号以及水声信号可作为空化监测的特征量,且相对于水声,离心泵发生空化现象后,对进、出口压力和振动参数影响更明显。

关键词:离心泵;空化;汽蚀余量;状态监测

中图分类号:TH17;TH311

文献标志码:A

文章编号:1001-4551(2015)11-1433-05

Experimental study on cavitation of centrifugal pump

XIA Yuan-zhi, MING Ting-feng, SU Yong-sheng, CAO Yu-liang
(College of Power Engineering, Naval University of Engineering, Wuhan 430033, China)

Abstract: Aiming at the problem of identifying the centrifugal pump cavitation state, the vibration, inlet and outlet pressure, acoustic signals were investigated before and after the centrifugal pump cavitation. The experiment operation was done through designing and constructing the comprehensive test platform of centrifugal pump. Signal detection and acquisition system was constructed, and the condition monitoring system was developed by using LabVIEW. Under the premise of keeping the constant flow of the centrifugal pump, the cavitation experiment was simulated through adjusting the opening degree of the inlet and outlet. Under three kinds of working conditions, the pump flow, rotating speed and pressure of inlet and outlet, etc., were measured. The cavitation allowance of the pump was calculated obtained and NPSHA discriminant curves were plotted. Finally, according to the structure feature and cavitation properties of centrifugal pump, the pressure of centrifugal pump, vibration and acoustic signal were analyzed detailedly for extracting the pump's cavitation feature information. The results indicate that, before and after the cavitation, the pressure, vibration and acoustic signal can be used as the characteristic of cavitation monitoring, and the influence of the pressure of centrifugal pump on the inlet and outlet and vibration parameters is more obvious than that of the acoustic signal.

Key words: centrifugal pump; cavitation; cavitation allowance; condition monitoring

0 引 言

离心泵与其他类型的泵相比较具有体积小、扬程高、性能平稳等特点,广泛应用于工业和城市给排水、

炼化、远距离送水、采油等配套设备中。

在离心泵运行过程中,较易发生空化现象,空化现象对离心泵的危害巨大,影响机械的运行效率,严重时会使泵产生汽蚀故障^[1-2]。因此,对空化现象进行监测

收稿日期:2015-06-19

基金项目:国家自然科学基金资助项目(51306205);湖北省自然科学基金资助项目(2015CFB700)

作者简介:夏远志(1990-),男,湖北黄冈人,主要从事机电设备状态监测与故障诊断方面的研究. E-mail:jxxy_xyz@163.com

通信联系人:明廷锋,男,副教授,硕士生导师. E-mail:13397191973@189.cn

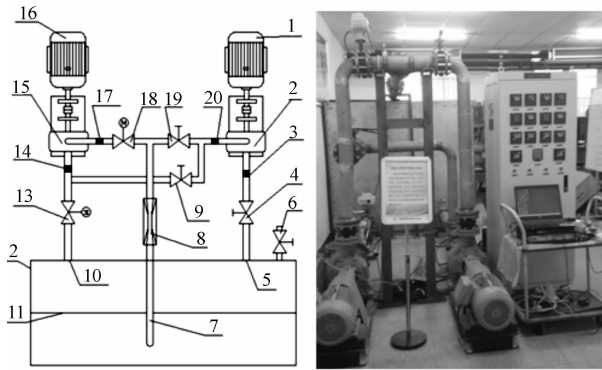
研究,为离心泵的科学合理使用提供重要保障,不仅能够有效防止离心泵因长时在空化区工作而产生空化汽蚀故障,提高装备使用寿命,还可以节省大量维修经费,具有较高的应用价值^[3]。

国内外学者对空化监测方法主要有噪声法、压力法、振动法、高速摄影法以及超声监测法等^[4]。本研究开展离心泵空化现象模拟试验研究,设计并搭建一个离心泵综合试验平台,使用美国 NI 公司的 LabVIEW 软件来编制离心泵空化监测系统,模拟离心泵空化现象,通过记录离心泵进、出口瞬态压力值,判断空化状态,并对离心泵空化状态前后的振动信号和水声信号的变化进行特征提取,为空化状态的识别提供判断依据。

1 综合试验平台及试验方案

1.1 离心泵综合试验平台设计及组成

试验台主要由离心泵机组、水箱、管道、流量计、传感器、阀门等组成。离心泵机组选用顺达公司型号为 CIS-125-100-200 的卧式离心泵机组,采集系统为北京阿尔泰科技发展有限公司生产的 USB2815 数据采集卡,最高采样频率为 250 kHz,16 通道 A/D 输出,并附带 4 通道 D/A 输入,可实现利用软件对离心泵进、出口电动阀、电动机转速进行调整控制。离心泵测试平台结构图如图 1(a)所示,离心泵测试平台实物图如图 1(b)所示。



(a) 离心泵测试平台结构图

(b) 离心泵测试平台实物图

图 1 试验台的结构图及实物图

1—电动机 I;2—离心泵 I;3,14,17,20—压力传感器;4,9,19—手动蝶形阀;5,10—进水口;6—水箱放水口;7—出水口;8—出口流量计;11—隔层;12—水箱;13—电动蝶形阀 1;15—离心泵 II;16—电动机 II;18—电动蝶形阀 2

1.2 空化模拟试验方案

1.2.1 空化模拟的基本原理

汽蚀余量 $NPSHA$,又称为有效汽蚀余量,其值越

大越不易汽蚀^[5]。装置汽蚀余量是由泵提供的,随流量和进水口处压力改变而改变,单位为 m ,其数学表达式为^[6-7]:

$$NPSHA = \frac{P_{\text{绝}}}{\rho g} + \frac{V_1^2}{2g} - \frac{P_{\text{汽}}}{\rho g} - H_g \quad (1)$$

式中: $P_{\text{绝}}$ —泵入口处绝对压力,Pa; $P_{\text{汽}}$ —常温下,液体的汽化压力,Pa; V_1 —泵进口截面处液体的速度,m/s; ρ —液体的密度, kg/m^3 ;g—重力加速度,取 $9.8 N/kg$; H_g —泵安装高度(泵进口中心线距离水箱液面高度差),m。

离心泵在电机的驱动下以一定的转速运行,水箱中的水不停地从低处吸到高处,分别利用安装在离心泵进、出口处的压力传感器、转速传感器、电磁流量计便能测出其进口压力 P_1 、出口压力 P_2 、转速 n 、流量 Q ,进而计算出扬程 H ,离心泵的扬程 H 数学表达式可写为:

$$H = Z_2 - Z_1 + \frac{P_2 - P_1}{\rho g} + \frac{8}{g\pi^2} \cdot \frac{D_1^4 - D_2^4}{D_1^4 D_2^4} \cdot Q^2 \quad (2)$$

式中: P_1, P_2 —泵进口、出口截面处液体的压强,Pa; Z_1, Z_2 —泵进口、出口截面中心到基准面的距离,m; D_1, D_2 —泵进口和出口的截面内径,m; Q —水泵流量, m^3/s 。

在定转速 N 和定流量 Q 条件下,通过改变电动蝶阀的开度,实现空化现象。通过测量离心泵进、出口压力和流量,就能计算出装置汽蚀余量 $NPSHA$ 和扬程 H 的值。

1.2.2 空化试验方案

离心泵的空化模拟试验选取 3 个工况点^[8]:全部以额定流量 Q_C 为参考点,具体分点如下: $0.6 Q_C, 0.8 Q_C, Q_C$ 。

试验时,可通过对各阀门的开关状态调节,实现双泵串联、并联等各项综合试验。本研究中的空化模拟试验只对离心泵 II 机组进行操作,进行泵的空化试验时,利用相应阀门的开、闭和调节,形成离心泵 II 的单泵工作回路,水泵抽水时,为了使流量保持不变,需要在改变泵入口处电动蝶阀的开度的同时,及时改变泵出口处电动蝶阀的开度,通过测量离心泵进、出口压力和流量,计算出扬程 H 和装置汽蚀余量 $NPSHA$ 值,绘制出规定转速下,流量为定值时的 $H \sim NPSHA$ 曲线。当扬程下降值 $\Delta H = H_0 - H' \geq 3\% H$ 时,本研究认为发生了空化现象,得出此时的汽蚀余量 $NPSHA$ 值,即为临界汽蚀余量 $NPSH_3$ ^[9-11]。最后,本研究记录空化前、后离心泵进、出口瞬态压力值、振动信号和水声信号,进行频谱分析,通过空化前、后各参数的特征对比,提取出反应空化现象的有效特征参数,为离心泵的监测提供实

时数据,及时发现并防止空化现象的发生和发展。

2 状态监测系统设计

运用虚拟仪器技术开发监测系统的方式较多,如 VB、VC、各类组态软件等。其中 LabVIEW 是一种语言功能强大,程序开发效率高、形象直观,便于修改和移植的编程工具。此外 LabVIEW 程序易与各种数据采集硬件集成,在通讯与互连接口方面有一定的优势,故本研究选用该工具作为监测系统的开发软件。

该系统包括数据采集部分,数据处理与显示部分以及空化判断部分。数据采集部分将流量、压力转换成计算机能监测的电流信号,通过数据处理与显示,最后判断是否发生空化现象。离心泵空化监测系统流程图如图 2 所示。

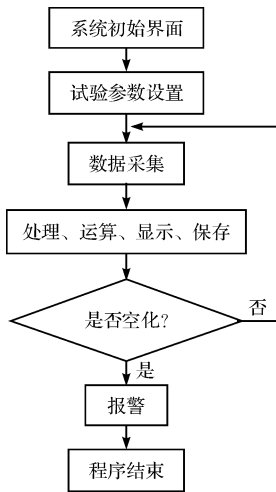


图 2 离心泵空化监测系统流程图

系统可采集的数据有:水泵进口压力、出口压力、流量、转速、泵外壳振动信号、泵入口水声信号等。软件对采样模式和采样通道、采样频率等参数进行设置,并设置了单通道最低采样率判断模块,通过比较单通道采样率与单通道允许能对采样率过低及时提出反馈,需要用户修改设置。

软件设置了空化前后数据对比模块,通过比较试验过程中,离心泵扬程 $\Delta H/H$ 是否大于等于 3%,如果条件成立,系统能及时对空化现象进行报警,并终止程序和保存数据,并画出其 $H \sim NPSHA$ 曲线,记录此时的临界汽蚀余量 $NPSH_3$ 值。监测系统主界面如图 3 所示。软件利用阿尔泰公司的 USB2815 数据采集卡的 D/A 模拟量输出功能,使用 DAC7625U 转换器,输出 4 通道(0~5)V 电压,分别控制电动蝶阀 1 和 2,调节离心泵 I 进、出口的开度。调节过程可使用 LabVIEW 软件面板完成,具有响应速度快、操作安全、方便等优点。

为了对程序进行频域分析,本研究使用“FFT Power Spectrum. vi”来进行信号的频谱分析,利用“提取单频信息”控件,提取转速信号,通过数字滤波器控件来实现转速信号的滤波功能。监测系统主界面如图 3 所示。其主要由参数设置模块、波形和数值显示模块以及数据保存模块等组成。



图 3 监测系统主界面

3 试验结果分析

本研究通过对比空化前、后压力信号、振动信号、水声信号,进行频谱分析,提取空化发生后泵的特征参数,为空化及时判断提供科学依据。

3.1 性能试验结果

各工况状态下的 $H \sim NPSHA$ 曲线如图 4 所示。由各工况状态下的 $H \sim NPSHA$ 曲线图可知,各流量下临界汽蚀点基本集中分别在扬程为 14.5 m、13.7 m、12.8 m 附近,由各工况状态下临界汽蚀余量值为:1.35 m,1.95 m,2.10 m。

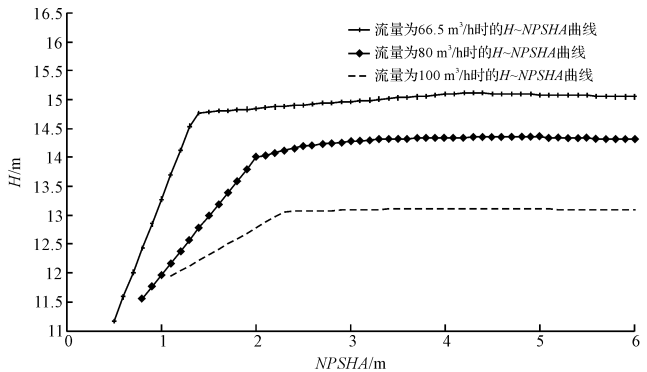


图 4 各工况状态下的 $H \sim NPSHA$ 曲线

3.2 空化模拟试验数据分析

在汽蚀发生前、后,离心泵进、出口压力,振动以及水声信号有明显的变化。本研究将采集到的数据进行分析后发现,频域信号特性比时域信号特性更容易区分^[12]。

3.2.1 空化前、后进、出口压力信号分析

流量 66.5 m³/h 工况条件下,进、出口压力频域信号在空化前后的比较图如图 5(a)、5(b)所示。流量 80 m³/h 工况条件下,进、出口压力频域信号在空化前后的比较图如图 5(c)、5(d)所示。流量 100 m³/h 工况条件下,进、出口压力频域信号在空化前后的比较图如图 5(e)、5(f)所示。从该频谱图可以看出空化前、后压力信号变化主要集中在低频,出口处压力信号对空化较敏感,在 400 Hz ~ 500 Hz 频段上,压力信号在空化后都有明显的增强。而在 80 Hz ~ 100 Hz 频段上,进口压力信号在空化发生后都有明显的减弱,其主要由空化状态下离心泵进出口压力的能量交换受到影响导致。

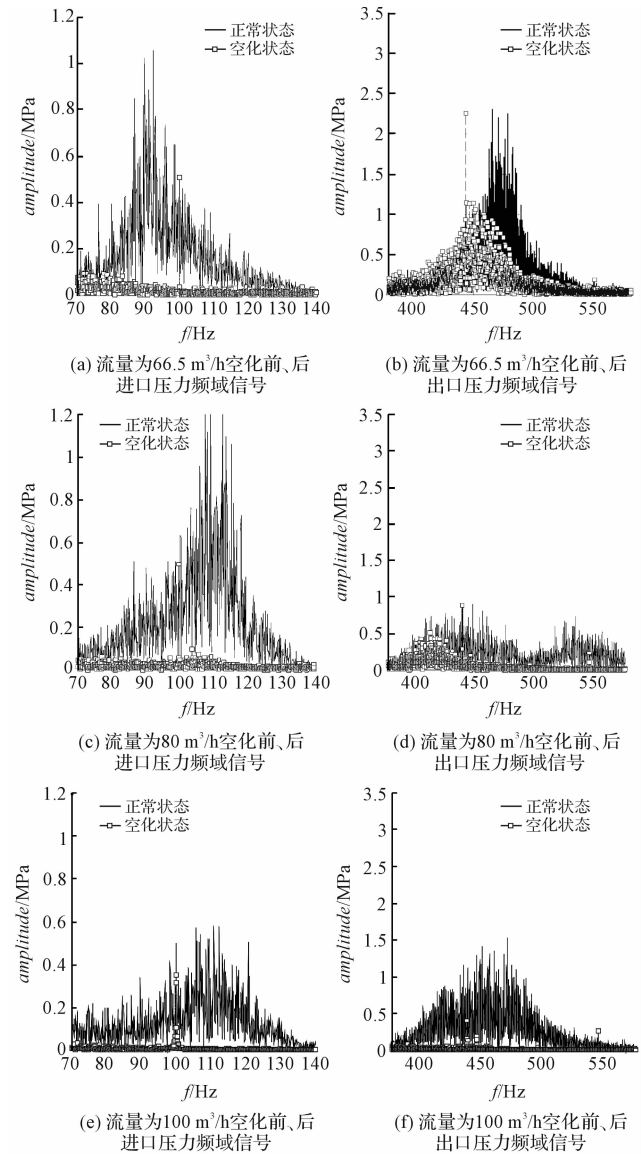


图 5 各工况状态下空化前后进、出口压力频谱图

3.2.2 空化前、后进、出口振动信号分析

流量 66.5 m³/h 工况条件下,进、出口振动频域信号在空化前、后的比较图如图 6(a)、6(b)所示。流量

80 m³/h 工况条件下,进、出口振动频域信号在空化前后的比较图如图 6(c)、6(d)所示。流量 100 m³/h 工况条件下,进、出口振动频域信号在空化前后的比较图如图 6(e)、6(f)所示。从该频谱图可以看出,振动信号主要集中在高频^[13]。空化后,进口振动信号在 0.9 kHz ~ 1.3 kHz 频带上以及出口振动信号在 0.8 kHz ~ 1.1 kHz 频带上有明显增加,其主要原因是空化状态下,空泡溃灭,就会形成压力脉动,撞击流道表面,形成振动。当频率与其他零件相近时,会产生共振现象。

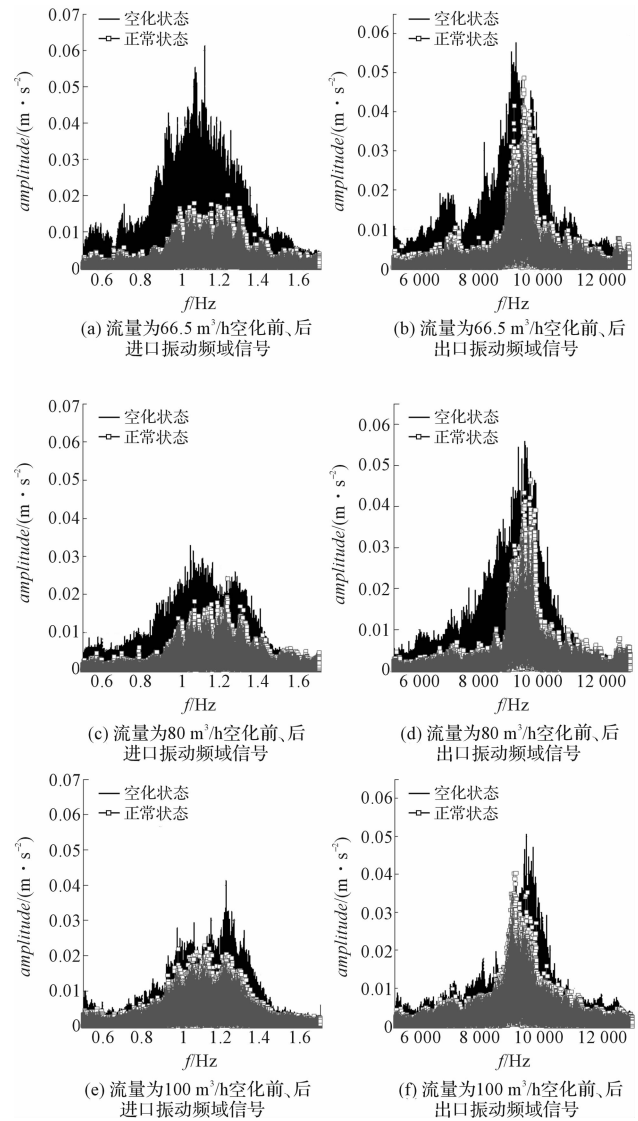


图 6 各工况状态下空化前后进、出口振动信号频谱图

3.2.3 空化前、后水声信号分析

流量 66.5 m³/h 工况条件下,水声频域信号在空化前、后的比较图如图 7(a)、7(b)所示。流量 80 m³/h 工况条件下,水声频域信号在空化前、后的比较图如图 7(c)、7(d)所示。流量 100 m³/h 工况条件下,水声频域信号在空化前后的比较图如图 7(e)、7(f)所示。从该图可以看出空化前后水声信号在整个频域上都有能量分

布,且频域比时域更易区分。空化后,水声信号在 12 kHz 附近出现明显的峰值,由图可知,水声信号主要体现宽频特性,各频段幅值均有变化,但变化程度有所不同,这与不同空化程度下的空泡数量与大小有关系^[14]。

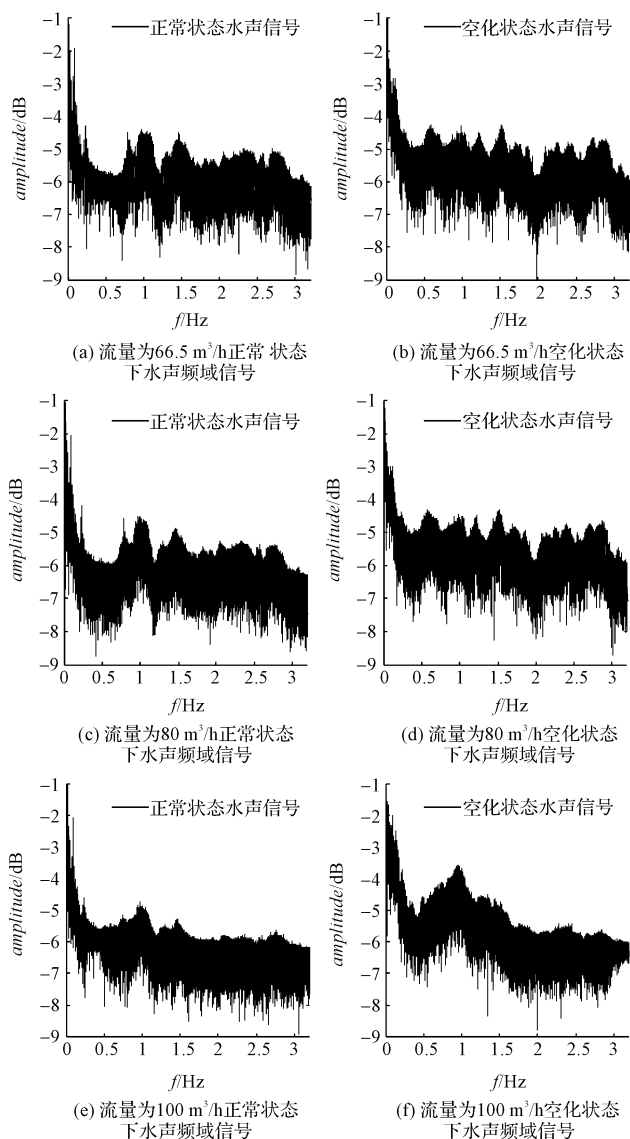


图 7 各工况状态下空化前、后水声信号频谱图

4 结束语

本研究通过对离心泵空化前后进、出口压力信号、振动信号以及水声信号的测量与分析,得出空化前、后的特征参数,对离心泵的运行维护有较高的应用价值。其结论如下:

(1)空化前后进、出口压力信号、振动信号以及水声信号变化都较明显,可以作为空化监测的特征量。

(2)空化时压力信号特性主要集中在低频,出口处 400 Hz ~ 500 Hz 时,压力信号在空化后都有明显的增强。而进口处 80 Hz ~ 100 Hz 在空化发生后都有明显的减弱。

(3)空化时振动信号特性主要集中在高频,进口振动信号在 0.9 kHz ~ 1.3 kHz 频带上以及出口振动信号在 0.8 kHz ~ 1.1 kHz 频带上有明显增加。

(4)水声信号在整个频域上都有能量分布,空化后,频率在 12 kHz 附近出现明显的峰值。

参考文献 (References):

- [1] 段向阳. 基于水声和振动测量与分析的喷水推进泵空化监测技术研究[D]. 武汉:海军工程大学船舶与动力学院,2011.
- [2] 柳伟,郑玉贵,姚治铭,等. 金属材料的空蚀研究进展[J]. 中国腐蚀与防护学报,2001,21(4):250-255.
- [3] FRANZ R J. Experimental investigation of the effect of cavitation on the retordynamic forces on a whirling centrifugal pump impeller[D]. California Institute of Technology,1989.
- [4] 宋启策,赵伟国,杨军虎,等. 泵空化现象的研究综述[J]. 机械制造,2014,52(1):1-4.
- [5] 段向阳,王永生,苏永生,等. 喷水推进器空化监测技术研究[J]. 舰船科学技术,2009,31(5):39-41.
- [6] 肖周勇. 基于 LabVIEW 的水泵性能测试系统研究[D]. 湖南:中南林业科技大学机电工程学院,2012.
- [7] 马文华. 浅谈水泵密封问题的分析与改进[J]. 液压气动与密封,2013(5):78-79,84.
- [8] 郑梦海. 泵测试实用技术[M]. 北京:机械工业出版社,2006.
- [9] 王勇. 离心泵空化及其诱导振动噪声研究[D]. 江苏:江苏大学机械工程学院,2011.
- [10] 王其磊,陈国栋. 多级离心泵转子的流固耦合特性及试验分析[J]. 流体机械,2015(7):10-15.
- [11] 蔡亚光,于文华,宋杨. 多级离心式森林消防泵汽蚀性能的研究[J]. 北京林业大学学报,2013,35(6):118-123.
- [12] WEN Y, HENRY M. Time frequency characteristics of the vibroacoustic signal of hydrodynamic cavitation[J]. *Journal of Vibration and Acoustics*,2002,124(4):469-475.
- [13] 黄景泉,龚光寅,武延祥,等. 空化噪声的实验研究[J]. 水动力学研究与进展,1988,3(4):8-15.
- [14] 周云龙,郭柯. 离心泵空化超声信号频谱特征研究[J]. 化工机械,2014,41(4):418-421.

[编辑:李辉]

本文引用格式:

夏远志,明廷锋,苏永生,等. 离心泵空化现象的模拟试验研究[J]. 机电工程,2015,32(11):1433-1437.

XIA Yuan-zhi, MING Ting-feng, SU Yong-sheng, et al. Experimental study on cavitation of centrifugal pump[J]. *Journal of Mechanical & Electrical Engineering*, 2015,32(11):1433-1437.

《机电工程》杂志: <http://www.meem.com.cn>