

# 离心泵隔舌区压力脉动测量与分析\*

蔡建程<sup>1</sup> 潘杰<sup>2</sup> Guzzomi Andrew<sup>2</sup>

(1. 浙江师范大学工学院, 金华 321004; 2. 西澳大学机械与化学工程学院, 珀斯 6009)

**摘要:** 离心泵内部的压力脉动是引起机组振动及噪声的主要原因,这一现象在隔舌区尤为严重。对某单吸离心泵在变转速和变流量工况下的性能及隔舌区的压力脉动进行了定量试验研究。试验结果表明:离心泵运行在小流量工况时,其性能随转速工况的变化基本符合离心泵一维设计理论。隔舌区压力脉动测量结果表明:压力脉动以离散分量为主,其整体强度占参考动压的1%左右,且随转速近似以二次函数形式变化。定转速时,随着流量的减小隔舌外侧压力脉动强度变化不明显,但舌尖及内侧压力脉动强度有明显提高,这归因于低频压力脉动的增大。研究结果对泵类系统的减振降噪和安全性改善具有指导意义。

**关键词:** 离心泵 变转速 变工况 压力脉动 频谱

**中图分类号:** TH311 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1298(2015)06-0092-05

## Pressure Fluctuations around Volute Tongue of Centrifugal Pump

Cai Jiancheng<sup>1</sup> Pan Jie<sup>2</sup> Guzzomi Andrew<sup>2</sup>

(1. College of Engineering, Zhejiang Normal University, Jinhua 321004, China

2. School of Mechanical and Chemical Engineering, The University of Western Australia, Perth 6009, Australia)

**Abstract:** Pressure fluctuations inside centrifugal pump, especially those near the volute tongue, are the primary excitations to pump vibration and noise. The performance and pressure fluctuations of a centrifugal pump running at different flow rates and variable speeds were experimentally studied. The pump performance measurement showed that the pump worked at low flow rate condition, and the pump hydraulic performance varied with the rotational speed according to one-dimensional design theory. The pressure fluctuation measurement showed that discrete components were the main contributions in the pressure fluctuation spectra, especially the blade passing frequency (BPF) and its second harmonic. The overall strength of pressure fluctuation was approximately 1% of the reference dynamic pressure, and it varied in a quadratic function form with rotary speed. At a constant rotation speed, the pressure fluctuation magnitude at the outlet side of volute tongue had no obvious change with the decrease of flow rate, but places at the inner side and tongue tip experienced noticeable increase at sufficiently low flow rates owing to the pressure fluctuations below BPF. The study provided a basis for future study of flow-induced pump vibration and noise.

**Key words:** Centrifugal pump Variable rotational speed Off-design condition Pressure fluctuation Spectrum

## 引言

离心泵压水室(蜗壳)型线多采用螺旋型,蜗壳

与隔舌的不对称性造成了叶轮出口流动的环形畸变,这种流动作用于静止部件,导致离心泵内部产生周期性的压力脉动,引起泵结构振动及声辐射。特

收稿日期: 2015-01-27 修回日期: 2015-04-01

\* 国家自然科学基金资助项目(51306163)、浙江省自然科学基金资助项目(LQ13E060001)和澳大利亚合作研究中心计划(CRC)资助项目

作者简介: 蔡建程, 讲师, 主要从事流体机械内流及流动噪声研究, E-mail: cai\_jiancheng@foxmail.com

通讯作者: 潘杰, 教授, 博士生导师, 主要从事振动及声学领域研究, E-mail: jie.pan@uwa.edu.au

别地,当离心泵运行工况偏离设计点时,流动畸变更为剧烈<sup>[1]</sup>,过高的压力脉动对机器的安全运行造成威胁。由于泵在实际运行过程中,变工况的应用越来越普遍,因此,有必要对离心泵在非设计工况下的内部压力脉动进行研究。

由于隔舌离叶轮出口最近,所以两者之间的动静干涉在隔舌区最为严重,大量的研究表明:隔舌部位通常是离心泵内诱发振动噪声的主要激励源<sup>[2-3]</sup>。Parrondo-Gayo等<sup>[4]</sup>测量了离心泵压水室内的叶片压力脉动,发现压力脉动的大小主要取决于隔舌与叶轮的动静干涉强度。随着计算流体动力学(CFD)技术的发展,用数值模拟方法预测离心泵内三维非定常湍流流场成为可能<sup>[5-7]</sup>。文献[1]对离心泵压力脉动特性的数值研究表明,设计工况和大流量工况下,叶片通过频率(叶频)是主要影响频率,而在小流量工况下,轴频是主要影响频率,压力脉动幅值随工况的变化而变化。文献[8]对某一双吸泵隔舌区的压力脉动进行数值研究,表明在设计工况及大流量工况下,隔舌区压力随时间变化的周期性明显,压力脉动频谱以叶频为主,而在小流量工况下,压力脉动周期性不明显,以低于叶频为主。文献[9]的数值研究表明,隔舌区叶轮和蜗壳间隙内的压力脉动随着距离的减小而增大,流量越大隔舌处的压力脉动越剧烈,在保证水力性能的前提下适当增大间隙有助于降低压力脉动。上述文献都为定转速不同流量工况的研究,而变转速的研究相对较少。由于变频技术的普及,变转速调节目前已能方便实现,它比变流量调节节能,所以有必要进行泵变转速工况的研究。

压力脉动不仅是蜗壳及管道结构振动的外激励<sup>[10]</sup>,也是水动噪声的声源<sup>[11-12]</sup>。因此,离心泵振动及噪声的研究与控制,首先需要对泵内的压力脉动有比较清楚的认识。本文试验研究某一离心泵在变流量及变转速工况下隔舌附近压力脉动的特点,以期后续CFD仿真、振动及噪声的产生机理分析及控制研究打下基础。

## 1 试验离心泵及变工况性能特性

试验泵为ITT公司生产的Goulds MTX 3196型单级离心泵,半开式叶轮由5个主叶和5个背叶组成,如图1所示。叶轮外径 $d_2 = 0.195\text{ m}$ ,它由原始叶轮(外径 $0.254\text{ m}$ )切削后得到,这一处理使得隔舌间隙与叶轮外径之比为 $0.347$ ,大于文献[13]的推荐值 $0.10 \sim 0.15$ 。图2为该离心泵的螺旋式压水室(蜗壳)。笔者对该离心泵内部流动的初步数值研究表明,蜗壳壁面的压力脉动仍有明显的叶频分量<sup>[14]</sup>。

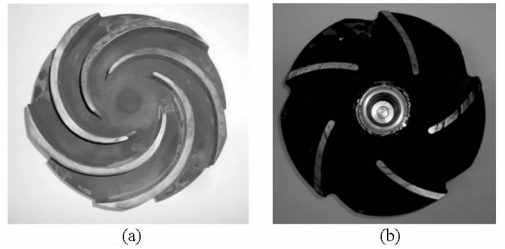


图1 叶轮实物图

Fig. 1 Front and back sides of impeller

(a) 正面 (b) 背面

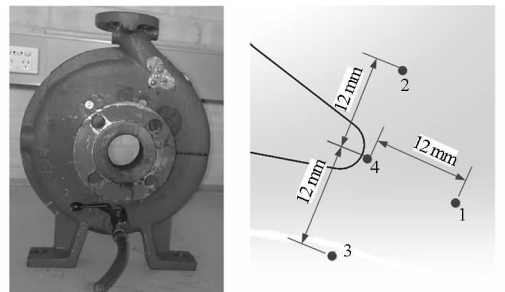


图2 蜗壳(压水室)及压力测点位置

Fig. 2 Volute casing and pressure measuring points

离心泵的性能及内部压力脉动测量试验台如图3所示。流量 $Q$ 由排水管上的阀门调节,阀门设置了6个开度,依次从完全打开到完全关闭。分别采用流量计、“U”型管和压力表测量泵流量、泵进口压力以及出口压力。转速通过变频器调节,并由手持式转速测量仪测得。由流量换算得到泵进出口管道中的平均流速,得到相应的动压。泵的扬程 $H$ 为进出口总压之差,通过测量电动机输入电压、电流,根据电动机效率得到离心泵的输入功率 $P$ 。泵效率计算公式为

$$\eta = \frac{\rho g Q H}{P} \times 100\%$$

式中  $\rho$ ——流体密度  $g$ ——重力加速度

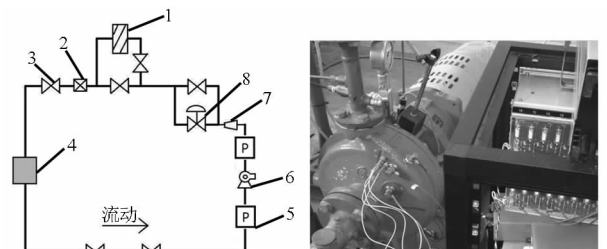


图3 离心泵试验台示意图及现场照片

Fig. 3 Schematic of pump test rig

1. 过滤器 2. 流量计 3. 阀门 4. 水箱 5. 压力传感器 6. 试验泵 7. 渐缩管 8. 压力阀

采用微型高灵敏度Kulite XCL-100压电型压力传感器测量隔舌附近压力脉动,测点位置如图2所示。其中4号传感器位于舌尖,1号正对来流方向,2号和3号分别位于隔舌的外侧和内侧,1~3

号传感器与舌尖(4号)的距离均为12 mm。试验过程中,传感器的大小以及安装方式对压力脉动的准确测量至关重要,它应尽量减小对流场的干扰。文献[4]在传感器安装过程中,使用了2 mm的孔连通到9.5 mm直径的压力传感器,形成了Helmholtz共振腔。本文进行了细致处理,使用外径为2.6 mm的传感器直接伸入到蜗壳内表面,并与其平齐,从而能更真实地探测壁面压力脉动。传感器的共振频率为300 kHz,远高于10倍离心泵叶频,满足压力脉动特征的研究。传感器通过屏蔽电缆接到NI数据采集卡,电压模拟信号转换成数字信号后存储到计算机中。压力传感器的误差在 $\pm 1.5\%$ 范围内。

当离心泵运行在设计转速1450 r/min时,4号压力传感器过载,为了研究压力脉动随流量变化特性,把运行转速下调至1088 r/min左右。图4a给出了该离心泵性能随流量变化情况。随着流量 $Q$ 增大,扬程 $H$ 单调减小,而效率 $\eta$ 提高。但阀门最大开度时,效率未达到高效点,可以判断该泵运行在小流量工况。

离心泵水力性能随转速的变化情况如图4b所示,从图中可以看出,流量 $Q$ 随着转速呈线性变化,而扬程 $H$ 随转速近似为二次函数形式变化。这符合离心泵一维设计的结论<sup>[15]</sup>: $Q \propto \omega d_2^3$ ,  $H \propto \omega^2 d_2^2$ 。其中 $\omega$ 为泵转速(rad/s)。另外,效率随转速的提高呈线性增大,由于隔舌间隙较大,研究对象泵效率较低。

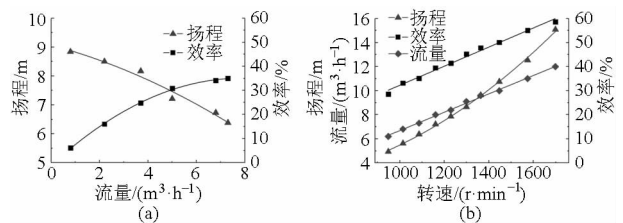


图4 离心泵性能随流量及转速的变化情况

Fig. 4 Pump performance with different flow rates and rotational speeds

## 2 隔舌区压力脉动的测量及分析

### 2.1 变流量压力脉动特性

离心泵运行在1088 r/min附近叶频为90.67 Hz左右。以20 kHz的采样频率对隔舌区的4个测点进行数据采集,总采样时间为10 s。图5显示了最大流量工况下4个测点的压力频谱图。从图5可以看出,隔舌区的压力脉动以离散分量为主,特别是叶频及其二次、三次谐波,而大于4倍叶频之后的压力脉动幅度已很小。另外,频谱中12.78倍轴频分量也十分突出,这一脉动分量在变转速工况也存在,其产生的原因待进一步研究,笔者认为可能与主叶和背叶之间的流动干涉有关。

图6为不同流量下舌尖(4号测点)的压力脉动频谱。可以看出,随着流量减小,压力脉动强度并无明显变化,当流量继续减小直至流量为零时,低频压力脉动幅度明显增大。用压力脉动时间序列的方差来衡量压力脉动的整体强度,如图7显示其随流量

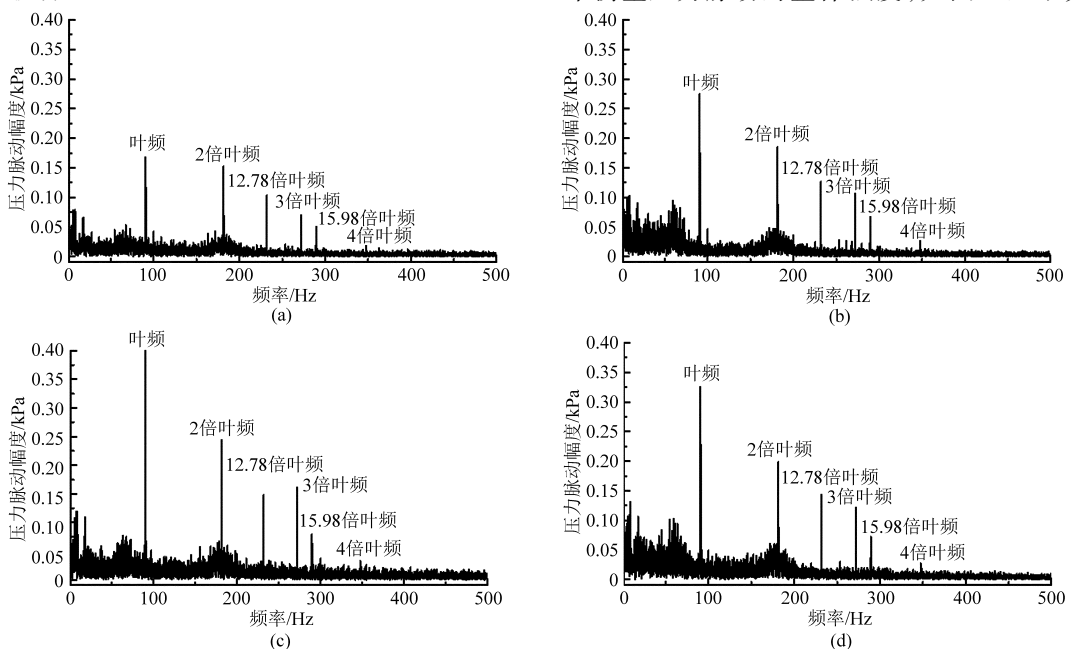


图5 隔舌区压力脉动频谱

Fig. 5 Spectra of pressure fluctuations around volute tongue

(a) 测点1 (b) 测点2 (c) 测点3 (d) 测点4

的变化特征。测点1和2(舌尖前部以及隔舌外侧)的压力脉动强度随流量变化不大;而对于测点3和4(隔舌内侧及舌尖处)的压力脉动强度起初随流量减小变化不明显,但当流量进一步减小直至流量为零时,脉动强度明显提高,特别是对舌尖处,这是由于此时压水室隔舌内隔的流动已相当紊乱。此发现与文献[8,16-17]的数值研究结果吻合。总体上,

各测点处压力脉动的标准差在1 kPa的量级上。设参考动压为 $\rho v_2^2/2$ ( $v_2 = \omega d_2/2$ 为叶轮出口的周向速度),4个测点的压力脉动整体强度为参考动压的1%左右。另外,隔舌内侧的压力波动强度比外侧的大,这与该离心泵运行在小量流工况有关,因为小流量时压水室里的流体对隔舌的冲击角为负值,所以在隔舌区内侧流动分离严重。

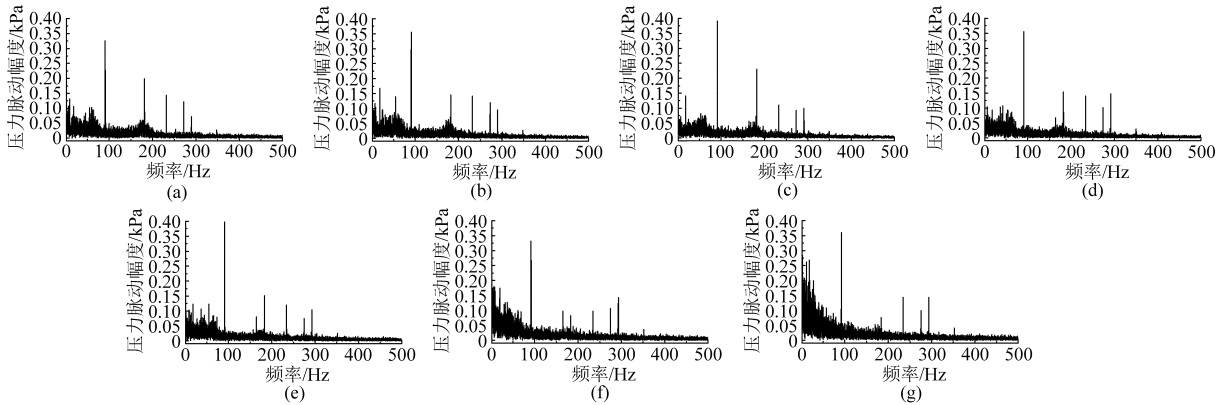


图6 舌尖压力波动随流量变化特性

Fig. 6 Changing characteristics of pressure fluctuations with flow rates

(a) 7.3 m<sup>3</sup>/h (b) 6.8 m<sup>3</sup>/h (c) 5.0 m<sup>3</sup>/h (d) 3.7 m<sup>3</sup>/h (e) 2.2 m<sup>3</sup>/h (f) 0.8 m<sup>3</sup>/h (g) 0 m<sup>3</sup>/h

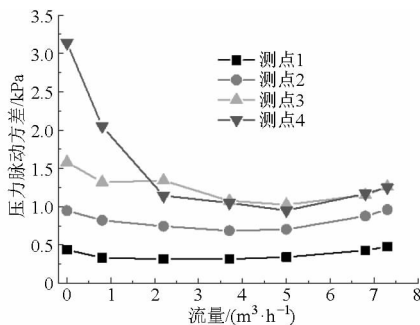


图7 隔舌区压力脉动强度随流量变化情况

Fig. 7 Changing of pressure fluctuations strength vs flow rates

## 2.2 变转速压力脉动变化特性

进一步对隔舌区压力脉动随转速的变化特性进行研究。试验中发现转速超过1 250 r/min时,4号传感器过载,本文选择3号测点的压力脉动频谱进行分析,见图8。从图8可以看出压力脉动以离散频谱为主,即轴频、叶频及其各次谐波处的压力脉动为主要频谱分量,特别是叶频及其二次谐波。随着转速提高,2倍叶频的压力脉动幅度迅速提高,在1 699 r/min时已大于叶频分量。

以压力脉动时间序列方差表示其整体脉动强度,如图9显示的脉动强度随转速的变化情况。图

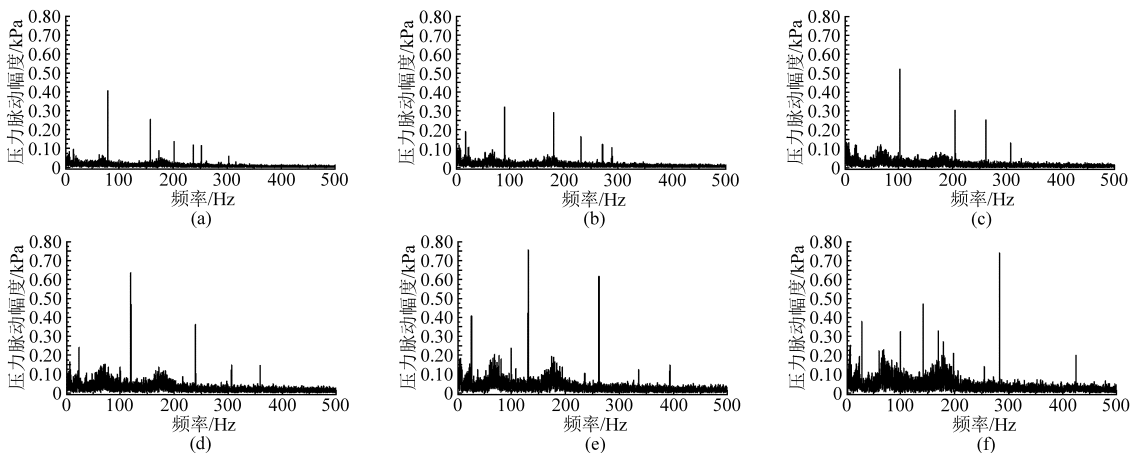


图8 测点3处压力脉动转速变化特性

Fig. 8 Changing characteristics of pressure fluctuations with variable rotation speeds

(a) 948 r/min (b) 1 086 r/min (c) 1 229 r/min (d) 1 437 r/min (e) 1 574 r/min (f) 1 669 r/min

中曲线为离散点的二次曲线拟合。可以看出压力脉动强度随转速以二次曲线形式增大,并且隔舌区内侧比外侧增加速度快。图10显示的压力脉动序列的标准差代表的波动整体幅度与参考动压 $\rho v_2^2/2$ 之间的关系,可见它在参考动压的1%量级上。

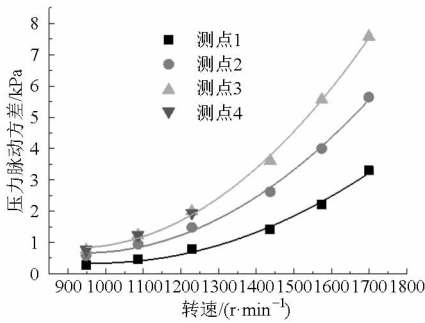


图9 隔舌区压力脉动强度随转速变化情况

Fig.9 Changing of pressure fluctuations strength vs rotation speeds

### 3 结论

(1) 对于变流量情况,随流量增大,扬程单调减小,而效率增加但未达到高效点;对于变转速工况,离心泵的流量及效率随着转速的提高而线性增大,而扬程则以二次曲线的形式增加,基本符合离心泵

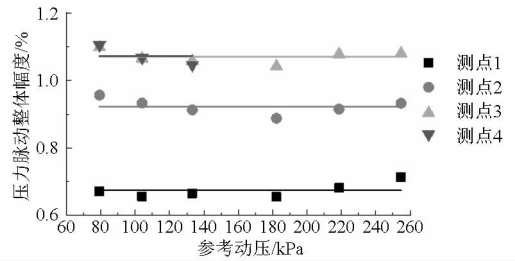


图10 隔舌区压力脉动标准差与参考动压的关系

Fig.10 Standard deviation of pressure fluctuations vs reference dynamic pressure

一维设计理论。

(2) 隔舌区的压力脉动以离散分量为主,且主要频率分量分布在4倍叶频之内。压力脉动整体幅度约为参考动压头 $\rho v_2^2/2$ ( $v_2$ 为叶轮出口周向速度)的1%,且隔舌内侧的压力脉动强度比外侧大。

(3) 对于变流量工况,随着流量减小,隔舌外侧的压力脉动强度无明显变化,但舌尖及内侧处的压力脉动强度在极小流量工况下有显著提高,这归因于低频压力脉动强度的增大。

(4) 对于变转速工况,隔舌区的压力脉动强度随转速以二次函数形式提高。在高转速情况下,叶频二次谐波分量的脉动幅度高于基频分量。

### 参 考 文 献

- 朱荣生, 苏保稳, 杨爱玲, 等. 离心泵压力脉动特性分析[J]. 农业机械学报, 2010, 41(11): 43-47.  
Zhu Rongsheng, Su Baowen, Yang Ailing, et al. Numerical investigation of the unsteady pressure in centrifugal pump[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2010, 41(11): 43-47. (in Chinese)
- Spence R, Amaral-Teixeira J. A CFD parametric study of geometrical variations on the pressure pulsations and performance characteristics of a centrifugal pump[J]. ASME Computers & Fluids, 2009, 38(6): 1243-1257.
- Dong R, Chu S, Katz J. Effect of modification to tongue and impeller geometry on unsteady flow, pressure fluctuations, and noise in a centrifugal pump[J]. ASME Journal of Turbomachinery, 1997, 119(3): 506-515.
- Parrondo-Gayo J L, Gonzalez-Perez J, Fernandez-Francos J. The Effect of the operating point on the pressure fluctuations at the blade passage frequency in the volute of a centrifugal pump[J]. ASME Journal of Fluids Engineering, 2002, 124(3): 784-790.
- 张兄文, 李国君, 李军. 离心泵叶轮内变流量流动特性的数值模拟[J]. 农业机械学报, 2005, 36(10): 62-65.  
Zhang Xiongwen, Li Guojun, Li Jun. Numerical simulation of flow characteristics in centrifugal pump impeller with variant mass flow[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2005, 36(10): 62-65. (in Chinese)
- 郭鹏程, 罗兴琦, 刘胜柱. 离心泵内叶轮与蜗壳间耦合流动的三维紊流数值模拟[J]. 农业工程学报, 2006, 21(8): 1-5.  
Guo Pengcheng, Luo Xingqi, Liu Shengzhu. Numerical simulation of 3D turbulent flow fields through a centrifugal pump including impeller and volute casing[J]. Transactions of the CSAE, 2006, 21(8): 1-5. (in Chinese)
- Pei J, Yuan S Q, Li X J, et al. Numerical prediction of 3-D periodic flow unsteadiness in a centrifugal pump under part-load condition[J]. Journal of Hydrodynamics, Ser. B, 2014, 26(2): 257-263.
- 丛国辉, 王福军. 双吸离心泵隔舌区压力脉动特性分析[J]. 农业机械学报, 2008, 39(6): 60-63.  
Cong Guohui, Wang Fujun. Numerical Investigation of unsteady pressure fluctuations near volute tongue in a double-suction centrifugal pump[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2008, 39(6): 60-63. (in Chinese)
- 王维军, 王洋, 刘洋, 等. 低比转数变曲率叶型离心泵非定常流动分析[J]. 农业机械学报, 2013, 44(11): 61-66.  
Wang Weijun, Wang Yang, Liu Yang, et al. Analysis on unsteady flow in low specific speed centrifugal pump with curvature blade[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2013, 44(11): 61-66. (in Chinese)
- 何涛, 尹志勇, 孙玉东. 离心泵流动诱发振动特性数值计算分析[J]. 振动与冲击, 2012, 31(12): 96-102.  
He Tao, Yin Zhiyong, Sun Yudong. Numerical analysis for flow induced vibration of a centrifugal pump[J]. Journal of Vibration and Shock, 2012, 31(12): 96-102. (in Chinese)

- 7 Tsukamoto H, Uno M, Nagal Y, et al. Pressure fluctuation downstream of a diffuser pump impeller[J]. Transactions of the Japan Society of Mechanical Engineers, Series, 1995, 61(586):2149-2156.
- 8 Shi F, Tsukamoto H. 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.
- 9 杨爱玲,徐洋,李国平,等. 叶片载荷对离心泵内流动激振力及噪声的影响[J]. 排灌机械工程学报, 2014, 32(1):23-28. Yang Ailing, Xu Yang, Li Guoping, et al. Effect of blade loading on fluid-induced exciting force and noise in centrifugal pumps[J]. Journal of Drainage and Irrigation Machinery Engineering, 2014, 32(1):23-28. (in Chinese)
- 10 王福军,张玲,张志民. 轴流泵不稳定流场的压力脉动特性研究[J]. 水利学报, 2007, 38(8):1003-1009. Wang Fujun, Zhang Ling, Zhang Zhimin. Analysis on pressure fluctuation of unsteady flow in axial-flow pump[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2007, 38(8):1003-1009. (in Chinese)
- 11 Arndt N, Acosta A J, Brennen C E, et al. Rotor-stator interaction in a diffuser pump[J]. ASME Journal of Turbomachinery, 1989, 111(3):213-221.
- 12 Arndt N, Acosta A J, Brennen C E, et al. Rotor-stator interaction in a centrifugal pump with several vaned diffusers[J]. ASME Journal of Turbomachinery, 1990, 112(1):98-108.
- 13 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. Research of the test pressure fluctuation about the axial-flow device model[J]. Sichuan Water Power, 2010, 29(5):116-120. (in Chinese)
- 14 Shi Weidong, Zhang Desheng, Guan Xingfan, et al. Numerical and experimental investigation on high-efficiency axial-flow pump[J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 2010, 23(1):38-44.
- 15 李忠,杨敏官,张宁,等. 变工况下轴流泵装置振动特性试验研究[J]. 工程热物理学报, 2013, 34(5):866-868. Li Zhong, Yang Minguan, Zhang Ning, et al. Experimental study on vibration characteristic of axial-flow pump under different operating conditions[J]. Journal of Engineering Thermophysics, 2013, 34(5):866-868. (in Chinese)
- 16 李忠,杨敏官,高波,等. 空化诱发的轴流泵振动特性试验研究[J]. 工程热物理学报, 2012, 33(11):1888-1891. Li Zhong, Yang Minguan, Gao Bo, et al. Experiment study on vibration characteristic induced by cavitation of axial-flow pump[J]. Journal of Engineering Thermophysics, 2012, 33(11):1888-1891. (in Chinese)
- 17 施卫东,姚捷,张德胜,等. 采样频率和时间对轴流泵压力脉动特性的影响[J]. 排灌机械工程学报, 2013, 31(3):190-194. Shi Weidong, Yao Jie, Zhang Desheng, et al. Influence of sampling frequency and time on pressure fluctuation characteristics of axial-flow pump[J]. Journal of Drainage and Irrigation Machinery Engineering, 2013, 31(3):190-194. (in Chinese)
- 18 陈婕,杨祖强. 离心泵转子质量不平衡振动特性分析[J]. 中国农村水利水电, 2013(12):151-153. Chen Jie, Yang Zuqiang. An analysis of vibration characteristics of rotor mass unbalance of centrifugal pumps[J]. China Rural Water and Hydropower, 2013(12):151-153. (in Chinese)
- 19 张德胜,王海宇,施卫东,等. 轴流泵多工况压力脉动特性试验[J]. 农业机械学报, 2014, 45(11):139-145. Zhang Desheng, Wang Haiyu, Shi Weidong, et al. Experimental investigation of pressure fluctuation with multiple flow rates in scaled axial flow pump[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2014, 45(11):139-145. (in Chinese)

(上接第96页)

- 11 Langthjem M A, Olhoff N. A numerical study of flow-induced noise in a two-dimensional centrifugal pump. Part II. Hydroacoustics[J]. Journal of Fluids and Structures, 2004, 19(3):369-386.
- 12 袁寿其,司乔瑞,薛菲,等. 离心泵蜗壳内部流动诱导噪声的数值计算[J]. 排灌机械工程学报, 2011, 29(2):93-98. Yuan Shouqi, Si Qiaorui, Xue Fei, et al. Numerical calculation of internal flow-induced noise in centrifugal pump volute[J]. Journal of Drainage and Irrigation Machinery Engineering, 2011, 29(2):93-98. (in Chinese)
- 13 施卫东,张磊,陈斌,等. 离心泵间隙对压力脉动及径向力的影响[J]. 排灌机械工程学报, 2012, 30(3):260-264. Shi Weidong, Zhang Lei, Chen Bin, et al. Influence of gap on pressure pulsation and radial force in centrifugal pump[J]. Journal of Drainage and Irrigation Machinery Engineering, 2012, 30(3):260-264. (in Chinese)
- 14 Cai J, Pan J, Guzzomi A. The flow field in a centrifugal pump with a large tongue gap and back blades[J]. Journal of Mechanical Science and Technology, 2014, 28(11):4455-4464.
- 15 Brennen C E. Hydrodynamics of pumps[M]. Cambridge, UK: Cambridge University Press, 2011.
- 16 张德胜,王海宇,施卫东,等. 轴流泵多工况压力脉动特性试验[J]. 农业机械学报, 2014, 45(11):139-145. Zhang Desheng, Wang Haiyu, Shi Weidong, et al. Experimental investigation of pressure fluctuation with multiple flow rates in scaled axial flow pump[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2014, 45(11):139-145. (in Chinese)
- 17 朱荣生,龙云,林鹏,等. 螺旋轴流泵内部流场与压力脉动研究[J]. 农业机械学报, 2014, 45(7):103-110. Zhu Rongsheng, Long Yun, Lin Peng, et al. Internal flow and pressure pulsation characteristics of screw axial-flow pumps[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2014, 45(7):103-110. (in Chinese)