

# 离心泵小流量工况不稳定空化特性研究\*

卢加兴<sup>1</sup> 袁寿其<sup>1</sup> 任旭东<sup>2</sup> 刘莹莹<sup>1</sup> 司乔瑞<sup>1</sup>

(1. 江苏大学国家水泵及系统工程技术研究中心, 镇江 212013; 2. 江苏大学机械工程学院, 镇江 212013)

**摘要:** 为了研究离心泵小流量工况不稳定空化特性,通过数值模拟和试验,研究了离心泵小流量工况不同空化程度泵的内流特性及泵进出口压力脉动特性。结果表明:小流量工况下,蜗壳隔舌与叶轮间的动静干涉对离心泵内部不稳定流动具有重要影响,叶轮流道内受空化影响所产生的漩涡与受蜗壳隔舌影响所产生的漩涡的流动方向相反。随着空化的发展,离心泵进口压力脉动的主频由2倍轴频逐渐向低频段迁移,且存在一定的波动;泵进口压力脉动存在于2倍叶频处的峰值,随着空化发展到一定程度而消失;受叶轮与隔舌动静干涉的影响,泵出口压力脉动的主频为叶频,在2倍轴频处存在波动较大的峰值;泵进出口压力脉动的宽频脉动随着空化余量的降低存在明显变化。

**关键词:** 离心泵 小流量 空化 压力脉动

**中图分类号:** TH311 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1298(2015)08-0054-05

## Investigation of Instabilities of Cavitation at Low Flow Rate of Centrifugal Pump

Lu Jiaying<sup>1</sup> Yuan Shouqi<sup>1</sup> Ren Xudong<sup>2</sup> Liu Yingying<sup>1</sup> Si Qiaorui<sup>1</sup>

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

(2. School of Mechanical Engineering, Jiangsu University, Zhenjiang 212013, China)

**Abstract:** In order to investigate the instabilities of cavitation at low flow rate of centrifugal pump, with the development of cavitation in a centrifugal pump, the characteristics of the internal flow, inlet and outlet pressure pulsations of the pump were researched through numerical simulation and experiment. It was found that the rotor-stator interaction between the volute tongue and impeller made a significant influence on the internal flow instabilities of a centrifugal pump under low flow rate condition. The vortexes generated by the influence of cavitation and volute tongue presented in opposite directions. The dominant frequency of the pump inlet pressure pulsations was two times shaft frequency, which migrated to low frequency with certain fluctuations with the development of cavitation. The peak which existed at two times blade passing frequency of the pump inlet pressure pulsations vanished when the cavitation developed to a certain degree. The dominant frequency of the pump outlet pressure pulsations was the blade passing frequency resulted from the rotor-stator interaction between the volute tongue and impeller. The peak which existed at two times shaft frequency presented intensive fluctuations. The broadband pulsations of both pump inlet and outlet pressure pulsations changed obviously with the decrease of available net positive suction head.

**Key words:** Centrifugal pump Low flow rate Cavitation Pressure pulsation

收稿日期: 2014-09-23 修回日期: 2014-10-21

\* 国家自然科学基金资助项目(51239005, 51479082)、“十二五”国家科技支撑计划资助项目(2011BAF14B04)和江苏高校优势学科建设工程资助项目

作者简介: 卢加兴, 博士生, 主要从事流体机械空化不稳定性研究, E-mail: ljx\_0813@163.com

通讯作者: 袁寿其, 研究员, 博士生导师, 主要从事流体机械及排灌机械研究, E-mail: shouqi@ujs.edu.cn

## 引言

离心泵是应用十分广泛的一种通用机械,离心泵空化不仅会导致扬程效率的急剧下降<sup>[1-2]</sup>,而且大量空泡的产生和溃灭过程中伴随着强烈的水击,诱导产生振动和噪声,影响机组运行的稳定性<sup>[3-9]</sup>。为了满足不同情况的需要,离心泵常会偏离设计工况(如在小流量工况下)运行。小流量工况下离心泵内部流动极其复杂,主要表现为在叶轮入口和出口处的回流现象,同时伴随着小涡列出现,及速度场和压力场的变化<sup>[10-12]</sup>。回流漩涡的出现会影响泵的性能,增强压力脉动,加剧泵内的空化,进一步加强振动和噪声<sup>[13-14]</sup>。小流量下空化不稳定性和回流有密切联系<sup>[15-17]</sup>,回流空化不仅导致流动的强烈波动,还会引起轴的剧烈振动<sup>[18]</sup>。因此,对离心泵小流量工况的空化不稳定性研究具有重要意义。

本文对一单级单吸离心泵进行研究,通过数值模拟,分析 0.4 倍设计流量下不同空化程度工况离心泵的内流特性。同时,在闭式试验台上不仅对数值模拟结果进行试验验证,而且还研究 0.4 倍设计流量离心泵不同进口压力条件下进出口压力脉动特性。

## 1 试验用泵

本文所研究模型泵主要设计参数:扬程  $H_d = 20.2 \text{ m}$ , 流量  $Q_d = 50.6 \text{ m}^3/\text{h}$ , 转速  $n = 2910 \text{ r}/\text{min}$ , 比转数  $n_s = 132.2$ , 叶片数  $Z = 6$ , 叶轮进口直径  $D_j = 79 \text{ mm}$ , 轴频  $f_0 = 48.5 \text{ Hz}$ 。模型泵的三维水体结构如图 1 所示。

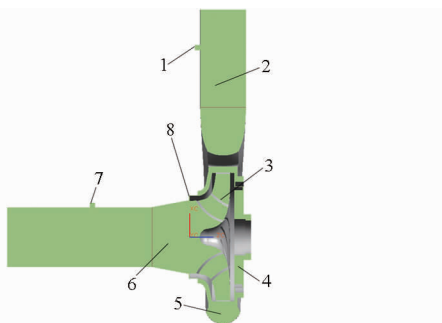


图 1 离心泵的三维水体图

Fig. 1 3D model of flow passage of the centrifugal pump

1. 泵出口压力脉动测点 2. 泵出口 3. 叶轮 4. 泵腔 5. 蜗壳
6. 泵进口 7. 泵进口压力脉动测点 8. 口环

## 2 模拟方法

### 2.1 网格划分

为了使模拟更接近真实流动,根据模型泵的几何参数,用 UG 进行全流场的三维实体造型。采用

ICEM 对水体域进行六面体结构化网格划分,如图 2 所示。结构化网格的优势之一是可以灵活控制各节点的密度对边界层进行调整<sup>[19]</sup>。为了确保数值模拟的精度,对近壁区的网格进行了加密。其中计算域包括:泵进口管段、口环、泵腔、叶轮、蜗壳和泵出口管段。为了使蜗壳和泵出口交界处衔接更好,造型过程中将蜗壳与泵出口管段造成一整体。各计算域的网格参数如表 1 所示。



图 2 网格划分

Fig. 2 Grid meshing

表 1 模型泵结构化网格参数

Tab. 1 Structural grid parameters of model pump

参数	泵进口管段	口环	叶轮	泵腔	蜗壳和出口
网格单元数	469 400	45 220	859 106	572 124	908 058
网格节点数	453 675	39 176	805 075	497 376	881 804
网格质量	0.8	0.7	0.6	0.85	0.4
网格角度/(°)	45	45	18	54	18

### 2.2 边界条件

采用商用 ANSYS CFX14.5 软件,选择  $k-\varepsilon$  湍流模型进行数值计算。离心泵进口边界条件采用总压进口,出口边界条件给定质量流量,叶轮形成的壁面设置为旋转边界,其旋转速度为叶轮转速,其余壁面设置为无滑移边界。收敛精度设置为  $10^{-5}$ 。

## 3 试验

试验在江苏大学国家水泵及系统工程技术研究中心的闭式试验台上进行,试验装置如图 3 所示。试验系统主要包括汽蚀罐、稳压罐、试验模型泵、真空泵、输水管路和各试验参数采集仪器。试验过程中,通过静压传感器、涡轮流量计和电参数仪来获取泵的外特性,通过安装在泵进出口的动压传感器和美国 NI 公司生产的虚拟仪器采集不同工况下泵进出口的压力脉动。压力脉动采样频率为  $5000 \text{ Hz}$ 。

## 4 结果与分析

### 4.1 试验与数值计算结果对比

为了获得离心泵在较宽流量范围的外特性结

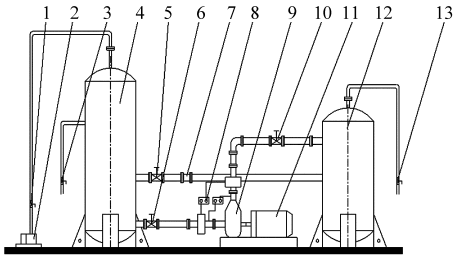


图3 试验装置示意图

Fig.3 Schematic of experimental test rig

1,3,6,13. 球阀 2. 真空泵 4. 汽蚀罐 5,10. 蝶阀 7. 涡轮流量计 8. 压力传感器 9. 模型泵 11. 电动机 12. 稳压罐

果,试验测试了0~1.5倍设计流量范围泵的扬程、效率和功率特性,采用数值模拟方法计算了倍设计流量范围泵的外特性。泵的外特性曲线如图4所示,数值计算和试验结果在整个流量范围内保持了较好的一致性,特别是小流量工况,两者非常吻合。而在大流量工况,模拟和试验结果存在一定的偏差。在设计工况点,离心泵的扬程试验值为19.76 m,扬程模拟值为20.7 m;效率试验值为73.26%,效率模拟值为77%。设计点扬程和效率的相对误差值都在5%以内。从整个流量范围来看,多数工况点的相对误差值都在5%以内。造成模拟和试验的偏差可能是由于模拟过程中未考虑各壁面的粗糙度所致。

在空化数值计算中,给定泵出口质量流量,通过逐渐降低离心泵进口压力的方法来降低空化余量,并计算不同进口压力条件下泵的扬程。但在空化试验中,由于系统原因,此流量工况试验难以使泵进口压力达到扬程骤降的条件,因而无法对离心泵临界空化余量进行数值模拟与试验结果的比较。为了验证在0.4倍设计流量工况下离心泵内部空化流动数值计算结果的准确性,图5(其中 $H$ 为泵扬程, $H_d$ 为设计扬程)对比了0.4倍设计流量工况数值计算和试验获得的空化特性曲线。从图中可知,在试验所能达到的条件范围内,数值预测结果与试验结果吻合较好,验证了CFD方法预测离心泵空化特性的可行性。

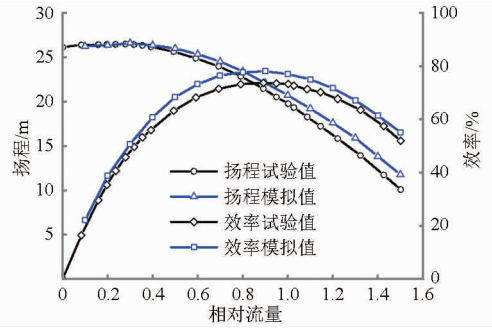


图4 离心泵性能曲线

Fig.4 Performance curves of centrifugal pump

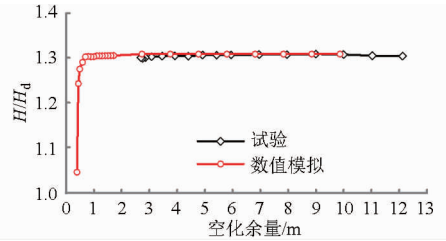


图5 0.4倍设计流量下离心泵的空化性能曲线

Fig.5 Cavitation performance curves of centrifugal pump at  $0.4Q_d$

### 4.2 离心泵内流特性分析

图6展示了0.4倍设计流量不同空化程度条件下离心泵叶轮中截面上的流线分布。从图6a中可知,在空化余量为9.87 m的无空化条件下,受静止的蜗壳隔舌与旋转的叶轮间动静干涉的影响,在靠近隔舌的叶轮流道内出现了明显的漩涡。这是由于在小流量工况下,受蜗壳内水流及隔舌的影响,加上叶轮流道内叶片工作面附近的水流速度相对较小而导致漩涡的旋转方向与叶轮转向相反。因此,小流量工况下,蜗壳隔舌对离心泵内部不稳定流动具有重要影响。

随着空化余量的降低,首先在叶片吸力面低压区产生了相对稳定的附着型空泡,并在空泡尾流区产生与叶轮旋转方向相同的漩涡,且紧靠叶片吸力面。如图6c所示随着空化的进一步发展,空化对叶轮内水流流动的影响加剧,在每个叶片间的流道内都产生了与叶轮转向一致的漩涡,且此时空化对离

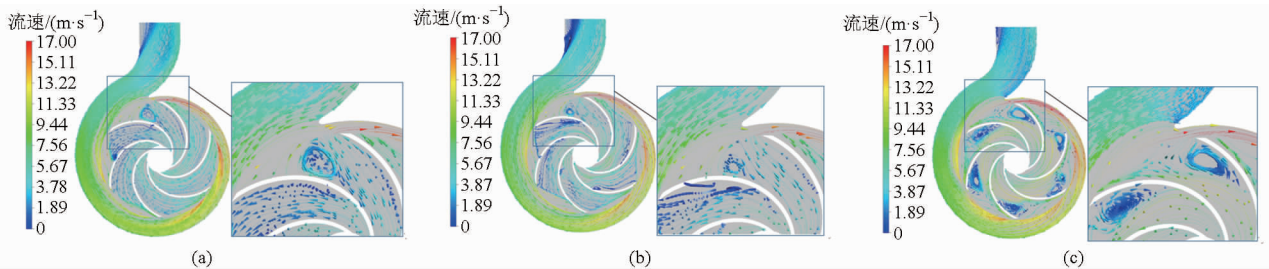


图6 0.4倍设计流量不同空化余量条件下泵内流线分布

Fig.6 Streamline distribution under different available net positive suction head conditions at  $0.4Q_d$

(a) 空化余量9.87 m (b) 空化余量0.49 m (c) 空化余量0.39 m



心泵内流特性的影响已超过了蜗壳隔舌与叶轮动静干涉的效应。笔者认为这是由于该工况下叶轮流道内大量空泡的产生阻塞了流道,而掩盖了蜗壳隔舌对内流特性的影响。

### 4.3 离心泵进出口压力脉动分析

0.4倍设计流量工况不同空化程度离心泵进口压力脉动的功率谱密度变化如图7所示。可以发现,模型泵进口压力脉动的主频为2倍轴频,随着空化的发展,主频幅值出现了先减小、后增加、又降低、而后又增加再减小的变化规律。当空化余量降低至3.92 m以下时,进口压力脉动的主频由2倍轴频向低频段迁移,最后以较小的幅值保持在10 Hz左右的低频区。泵进口压力脉动主频的这种变化可能是因为空化发展到一定阶段,具有弹性的大量空泡的产生并汇聚在一起,对进口水流的冲击起到一定的缓冲作用。未发生空化时,由于小流量下泵进口回流和隔舌的作用而造成泵进口压力在叶频附近存在明显的宽频脉动。随着空化余量的降低,宽频脉动逐渐向低频区移动。移动到主频处时,由于进口压力的宽频脉动和主频相互叠加而导致主频脉动幅值明显增加。同时,由于蜗壳隔舌与叶片间动静干涉的作用,空化余量从12.12 m降低至5.94 m以内,泵进口压力脉动在2倍叶频处存在明显峰值。随着空化余量的进一步降低,存在于2倍叶频处的峰值消失。因此,在空化余量低于5.94 m后,与蜗壳隔舌相比,空化对泵进口压力脉动的影响逐渐占据主导作用。

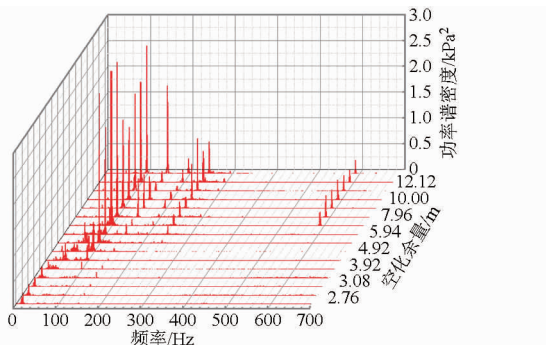


图7 0.4倍设计流量泵进口压力脉动功率谱密度  
Fig. 7 Power spectral density of pump inlet pressure pulsation at  $0.4Q_d$

图8展示了模型泵在0.4倍设计流量工况不同空化程度条件泵出口压力脉动的功率谱密度。受叶轮与蜗壳动静干涉的影响,泵出口压力脉动的主频

为叶频,其幅值随着空化的发展存在较小的波动。在2倍叶频(约580 Hz)处存在明显的峰值,但幅值波动较小。随着空化余量的降低,泵出口压力脉动功率谱密度幅值在2倍轴频处存在较大的峰值,且波动较大。未发生空化条件下,泵出口压力脉动在0~300 Hz范围上存在一定的宽频脉动,随着空化的发生发展,宽频脉动明显增强。当空化余量降低到3.92 m以下时,在10 Hz左右的低频段有较小的峰值产生。当空化余量降低到5.94 m时,进口压力在700~900 Hz范围有幅值很小的宽频脉动产生。这是由于大量空泡的产生和溃灭对泵出口压力脉动所造成的影响。

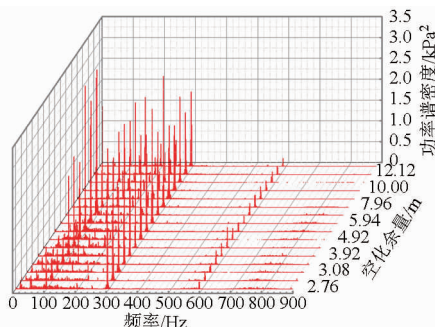


图8 0.4倍设计流量泵出口压力脉动功率谱密度  
Fig. 8 Power spectral density of pump outlet pressure pulsation at  $0.4Q_d$

## 5 结论

(1) 小流量工况下,蜗壳隔舌与叶轮间的动静干涉对离心泵内部不稳定流动具有重要影响。叶轮流道内受空化影响所产生的漩涡与受蜗壳隔舌影响所产生的漩涡的流动方向相反,而与叶轮旋转方向相同;空化对叶轮内不稳定流动的影响随着空化的发展逐渐超过隔舌的影响。这对小流量工况离心泵内不稳定流动机理的研究提供了一定的参考。

(2) 随着空化的发展,离心泵进口压力脉动的主频由2倍轴频逐渐向低频段移动,且存在一定波动;存在于叶频附近的宽频脉动随着空化余量的降低逐渐向低频区移动。泵进口压力脉动存在于2倍叶频处的峰值,随着空化发展到一定程度而消失。

(3) 受叶轮与隔舌动静干涉的影响,泵出口压力脉动的主频为叶频,在2倍轴频处存在波动较大的峰值。泵进出口压力脉动的宽频脉动随着空化余量的降低存在明显变化。

## 参 考 文 献

- 王松林, 谭磊, 王玉川. 离心泵瞬态空化流动及压力脉动特性 [J]. 振动与冲击, 2013, 32(22): 168-173.  
Wang Songlin, Tan Lei, Wang Yuchuan. Characteristic of transient cavitation flow and pressure fluctuation for a centrifugal pump [J]. Journal of Vibration and Shock, 2013, 32(22): 168-173. (in Chinese)

- 2 李晓俊, 袁寿其, 潘中永, 等. 诱导轮离心泵空化条件下扬程下降分析 [J]. 农业机械学报, 2011, 42(9): 89-93.  
Li Xiaojun, Yuan Shouqi, Pan Zhongyong, et al. Analysis of cavitation head drop in centrifugal pump with inducer [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2011, 42(9): 89-93. (in Chinese)
- 3 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: 516-551.
- 4 苏永生, 王永生, 段向阳. 离心泵空化试验研究 [J]. 农业机械学报, 2010, 41(3): 77-80.  
Su Yongsheng, Wang Yongsheng, Duan Xiangyang. Cavitation experimental research on centrifugal pump [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2010, 41(3): 77-80. (in Chinese)
- 5 Chudina M. Noise as an indicator of cavitation in a centrifugal pump [J]. Acoustical Physics, 2003, 49(4): 463-474.
- 6 Cernetic J. The use of noise and vibration signals for detecting cavitation in kinetic pumps [J]. Proc. IMechE, Part C: Journal of Mechanical Engineering Science, 2009, 223(7): 1645-1655.
- 7 倪永燕, 潘中永, 李红, 等. 出口压力波动特性在离心泵汽蚀监测中的应用 [J]. 排灌机械工程学报, 2006, 24(5): 40-43.  
Ni Yongyan, Pan Zhongyong, Li Hong, et al. Application of characters of discharge pressure fluctuation to monitor of centrifugal pump [J]. Journal of Drainage and Irrigation Machinery Engineering, 2006, 24(5): 40-43. (in Chinese)
- 8 司乔瑞, 袁寿其, 李晓俊, 等. 空化条件下离心泵泵腔内不稳定流动数值分析 [J]. 农业机械学报, 2014, 45(5): 84-89.  
Si Qiaorui, Yuan Shouqi, Li Xiaojun, et al. Numerical simulation of unsteady cavitation flow in the casing of a centrifugal pump [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2014, 45(5): 84-89. (in Chinese)
- 9 黄先北, 刘竹青, 杨魏. 离心泵口环间隙附近的空化特性研究 [J]. 农业机械学报, 2015, 46(2): 59-63.  
Huang Xianbei, Liu Zhuqing, Yang Wei. Cavitation characteristics of centrifugal pump near wear-ring clearance [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2015, 46(2): 59-63. (in Chinese)
- 10 史宏超, 李意民. 离心泵进口回流及其控制的研究 [J]. 水泵技术, 2000(3): 27-29.  
Shi Hongchao, Li Yimin. Research on the inlet backflow and its control in a centrifugal pump [J]. Pump Technology, 2000(3): 27-29. (in Chinese)
- 11 黄建德. 开式和闭式离心泵进口回流的研究 [J]. 工程热物理学报, 1997, 18(1): 43-47.  
Huang Jiande. Study on inlet reverse flow for open-type and closed-type centrifugal pump [J]. Journal of Engineering Thermophysics, 1997, 18(1): 43-47. (in Chinese)
- 12 付燕霞, 袁寿其, 袁建平, 等. 离心泵小流量工况下的内部流动特性 [J]. 排灌机械工程学报, 2014, 32(3): 185-190.  
Fu Yanxia, Yuan Shouqi, Yuan Jianping, et al. Internal flow characteristics of centrifugal pump at low flow rates [J]. Journal of Drainage and Irrigation Machinery Engineering, 2014, 32(3): 185-190. (in Chinese)
- 13 Güllich J F. Centrifugal pumps [M]. New York: Springer, 2007: 187-258.
- 14 Tatebayashi Y, Tanaka K, Kobayashi T. Pump performance improvement by restraining back flow in screw-type centrifugal pump [J]. ASME Journal of Turbomachinery, 2005, 127(4): 755-762.
- 15 Watanabe S, Inoue N, Ishizaka K, et al. A study on back flow structure in a 2-bladed helical inducer at a partial flow rate [C] // Proceedings of the ASME 2009 Fluids Engineering Division Summer Meeting, 2009; FEDSM2009-78254.
- 16 李意民. 多级离心式水泵中回流对汽蚀的影响 [J]. 中国矿业大学学报, 1995, 24(3): 116-120.  
Li Yimin. Influence of whirling current on cavitation in the multistage centrifugal pumps [J]. Journal of China University of Mining & Technology, 1995, 24(3): 116-120. (in Chinese)
- 17 Qiao X Y, Horiguchi H, Tsujimoto Y. Response of backflow to flow rate fluctuations [J]. ASME Journal of Fluids Engineering, 2006, 129(3): 350-358.
- 18 Tsujimoto Y, Yoshida Y, Maekawa Y, et al. Observations of oscillating cavitation of an inducer [J]. ASME Journal of Fluids Engineering, 1997, 119(4): 775-781.
- 19 周水清, 孔繁余, 王志强, 等. 基于结构化网格的低比转数离心泵性能数值模拟 [J]. 农业机械学报, 2011, 42(7): 66-69.  
Zhou Shuiqing, Kong Fanyu, Wang Zhiqiang, et al. Numerical simulation for low specific-speed centrifugal pump with structured grid [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2011, 42(7): 66-69. (in Chinese)