

离心泵叶轮进口空化形态的试验测量*

王 勇 刘厚林 王 健 吴贤芳 刘东喜

(江苏大学流体机械工程技术研究中心, 镇江 212013)

摘要: 为研究离心泵叶轮进口部分的空化形态,以一台中等比转数离心泵为对象,在泵进口管路上增加全透明水箱,基于泵产品智能测试系统和图像采集系统,在离心泵闭式试验台上对3种不同流量下叶轮进口的空化形态进行可视化试验研究。试验结果表明:空泡首先在模型泵叶片背面进口边附近初生,空泡的产生位置因运行工况不同而变化;随着装置空化余量 NPSHa 的下降,多个叶片背面有空泡产生,并随着叶轮的转动,呈现明显的初生、生长和溃灭的动态过程;当泵扬程下降较大时,空泡的分布随叶轮转动变化不大,且靠后盖板一侧的空泡分布小于靠前盖板一侧。

关键词: 离心泵 空化 叶轮进口

中图分类号: TH311 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1298(2013)07-0045-05

Experimental Measurement on Cavitation Pattern at Impeller Inlet of Centrifugal Pump

Wang Yong Liu Houlin Wang Jian Wu Xianfang Liu Dongxi

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

Abstract: In order to study the cavitation pattern at impeller inlet of centrifugal pump, a medium specific speed centrifugal pump was selected as an object, and a total transparent water tank was located at inlet pipeline of model pump. Based on pump product testing system and image acquisition system, the cavitation pattern at impeller inlet under three different conditions were measured on the centrifugal pump closed experimental rig. Experimental results showed that the vapors generated at suction side of blade near the leading edge at first, but the location varied with the operation condition. With the decrease of NPSHa, the vapors generated at plurality of blades. The generation, development and collapse process obviously appeared with the rotation of impeller. When the head dropped seriously, the distribution of the vapors hardly varied with the rotation of impeller, and the vapor volume fraction near impeller hub was less than that at shroud side.

Key words: Centrifugal pumps Cavitation Impeller inlet

引言

空化是一种包含汽液相变过程的非定常多相湍流流动,几乎包含了目前人们所认识的所有复杂流动现象,经常出现在水泵、水轮机、航天飞机主发动机涡轮泵和船舶推进器等流体机械内部,严重影响其安全稳定运行,是行业急需解决的关键科学问

题^[1]。试验测量和数值计算是研究空化流动的两种主要手段^[2-6],试验测量可以直观地显示空化流场的结构和空化的初生及发展,因而越来越受到国内外学者的青睐。

对于空化流动的试验研究,主要包括空化流场的测量、空化区域和位置的拍摄以及空化状态下振动噪声信号的监测等方面^[7-11]。目前,直接对中高

收稿日期: 2012-06-11 修回日期: 2012-07-20

* 国家自然科学基金资助项目(51239005,51079062,51179075)、“十二五”国家科技支撑计划资助项目(2011BAF14B03)、江苏高校优势学科建设工程项目、江苏省博士后科研资助项目(1202076C)和江苏大学高级人才基金资助项目(12JDG044)

作者简介: 王勇,助理研究员,博士后,主要从事泵空化特性研究,E-mail: wylq@ ujs. edu. cn

比转数离心泵叶轮进口部分空化形态进行可视化试验测量的研究较少。为深入研究三维扭曲型叶片进口部分的空化形态,进一步揭示离心泵空化非定常流动的机理,本文以一台中比转数离心泵为研究对象,采用有机玻璃铸造加工成全透明的模型泵,并在其进口管路上增设水箱,应用高速摄影技术对模型泵叶轮进口部分的空化形态进行试验研究。

1 试验系统

试验在江苏大学流体机械工程技术研究中心闭式试验台上进行。试验装置由汽蚀筒、稳压罐、进出水管路、阀门、真空泵、电动机、压力变送器、泵产品智能测试系统和图像采集系统等部分组成,为直接观测叶轮进口部分的空化形态,在泵进口管路上增加透明水箱。图 1 为试验装置示意图。

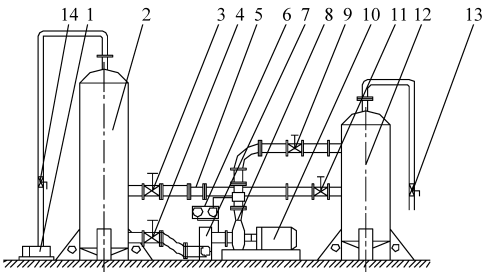


图 1 试验装置示意图

Fig. 1 Sketch map of experimental loop

1. 真空泵 2. 汽蚀筒 3,4,9,11. 碟阀 5. 涡轮流量计 6. 压力变送器 7. 水箱 8. 模型泵 10. 电动机 12. 稳压罐 13,14. 球阀

1.1 试验用泵

试验模型采用单级单吸并加装导叶的结构形式,如图 2 所示。设计工况的运行参数为流量 $Q_d = 32.8 \text{ m}^3/\text{h}$,扬程 $H = 5.8 \text{ m}$,转速 $n = 1\,450 \text{ r/min}$,其主要几何参数为:叶片数 $Z = 5$,叶轮进口直径 $D_1 = 93 \text{ mm}$ 、出口直径 $D_2 = 169 \text{ mm}$ 、出口宽度 $b_2 = 14 \text{ mm}$,叶片出口角 $\beta_2 = 33^\circ$,导叶进口直径为 $D_{in} = 173 \text{ mm}$ 、出口直径 $D_{out} = 238 \text{ mm}$ 、进口宽度 $b_{in} = 16 \text{ mm}$ 、出口宽度 $b_{out} = 24 \text{ mm}$,蜗壳基圆直径 $D_3 = 240 \text{ mm}$,蜗壳进口宽度 $b_3 = 32 \text{ mm}$ 。叶轮、导叶和蜗

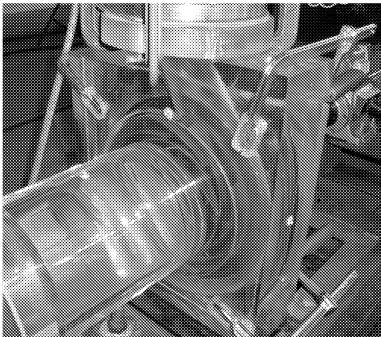


图 2 模型泵

Fig. 2 Model pump

壳的结构如图 3 所示。

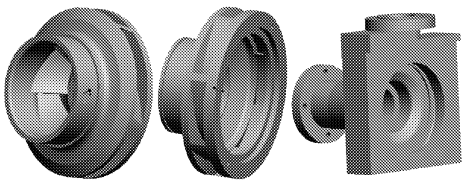


图 3 叶轮、导叶和蜗壳的结构图

Fig. 3 Structure chart of impeller, diffuser and volute

1.2 泵参数采集系统

模型泵和电动机的测量参数由江苏大学自主开发的泵产品智能测试系统进行数据采集,并通过自带的测试分析软件进行数据处理,计算得到泵额定转速下的流量、扬程和效率。测量参数包括:模型泵的进、出口压力,流量,转速,电动机转矩和轴功率等 6 个参数。电动机转矩和轴功率通过扭矩仪测量,进、出口压力变送器量程均为 $-100 \sim 100 \text{ kPa}$ 。蜗轮流量计型号为 LW-80,流量计系数为 11.134 6。

1.3 图像采集系统

模型泵叶轮进口部分的空化形态用美国 IDT 公司生产的高速摄像机采集,型号为 Y-series 4L,最大分辨率为 $1\,024 \text{ 像素} \times 1\,024 \text{ 像素}$;全分辨率下最大拍摄速度为 $4\,000 \text{ 帧/s}$;降分辨率最大拍摄速度为 $256\,000 \text{ 帧/s}$;像素点大小为 $14 \text{ }\mu\text{m} \times 14 \text{ }\mu\text{m}$;内存为 16 GB ,在全分辨率下可连续拍摄约 45 s ;光源采用 LED 灯和卤素灯 2 种,其中 LED 灯为冷光源,长时间工作不会对流体温度产生影响。卤素灯功率为 750 W 。拍摄时,LED 灯的光从泵体侧壁面进入,两盏卤素灯则放在进口管的两侧,起到辅助补光的作用。具体的试验光路系统如图 4 所示。试验中高速摄像机的拍摄速度为 $3\,000 \text{ 帧/s}$,时间间隔 $\Delta T = 0.000\,333 \text{ s}$,这样每拍摄一帧叶轮旋转约 3° 。

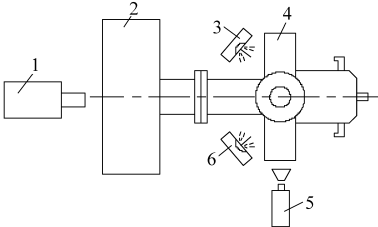


图 4 试验光路系统示意图

Fig. 4 Sketch map of experimental optical system

1. 高速摄像机 2. 水箱 3,6. 卤素灯 4. 泵体 5. LED 光源

2 试验结果及分析

2.1 水箱对模型泵性能的影响

图 5 为水箱增加前后离心泵的能量性能曲线对比图。

从图中可以看出,水箱增加前后模型泵在相同流量下的扬程和效率变化均不大,在 $15 \sim 35 \text{ m}^3/\text{h}$

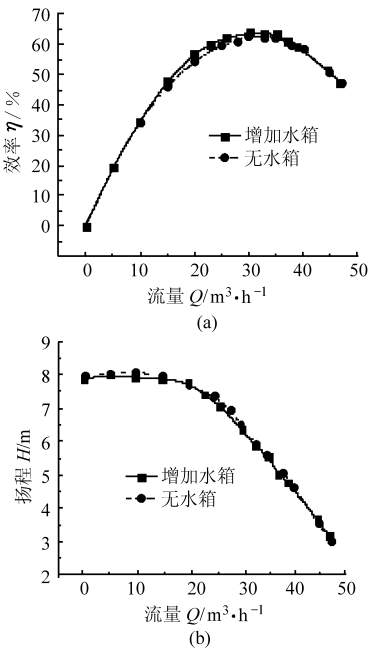


图 5 能量性能曲线对比

Fig. 5 Comparison of energy performance curves
(a) 流量-效率曲线 (b) 流量-扬程曲线

流量范围内,增加水箱后模型泵的效率略有提高,这说明本试验增加的水箱不但没有影响泵的性能,反而起到改善模型泵进口流态的作用,提高了泵的性能参数。

2.2 模型泵空化性能的测量结果

关阀启动模型泵,启动后通过调节泵出口蝶阀来改变泵的运行流量,使泵运行工况分别为 $0.7Q_d$ 、 $1.0Q_d$ 和 $1.3Q_d$,待泵运行稳定后,启动真空泵,降低泵进口压力,减少装置空化余量 $NPSHa$,每次降低 $5 \sim 10 \text{ kPa}$,并要保证整个试验过程模型泵的运行流量始终保持不变。对于不同的 $NPSHa$,分别应用泵产品测试系统和图像采集系统同步采集模型泵的性能参数和叶轮进口的空化形态。图 6 为模型泵在 $0.7Q_d$ 、 $1.0Q_d$ 和 $1.3Q_d$ 工况下的空化性能曲线。

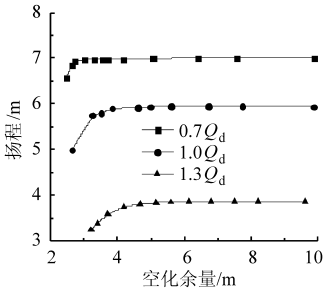


图 6 模型泵空化性能曲线

Fig. 6 Cavitation performance curves of model pump

当 $NPSHa$ 较大时,泵的扬程不受影响,基本保持不变;随着 $NPSHa$ 的逐步降低,泵内的空化程度将逐步恶化,导致泵的扬程下降。取扬程下降 3% 时所对应 $NPSHa$ 为泵的临界空化余量 $NPSHc$,则

3 种工况的临界空化余量分别为 2.74 m 、 3.44 m 和 4.26 m 。

2.3 叶轮进口部分的空化形态

3 种流量下,分别取空化初生、发展和完全发展运行工况时叶轮进口部分的空化形态进行研究。图 7 为 $0.7Q_d$ 工况下, $NPSHa$ 分别为 3.71 m 、 2.62 m 和 2.47 m 时模型泵叶轮进口部分的空化形态。

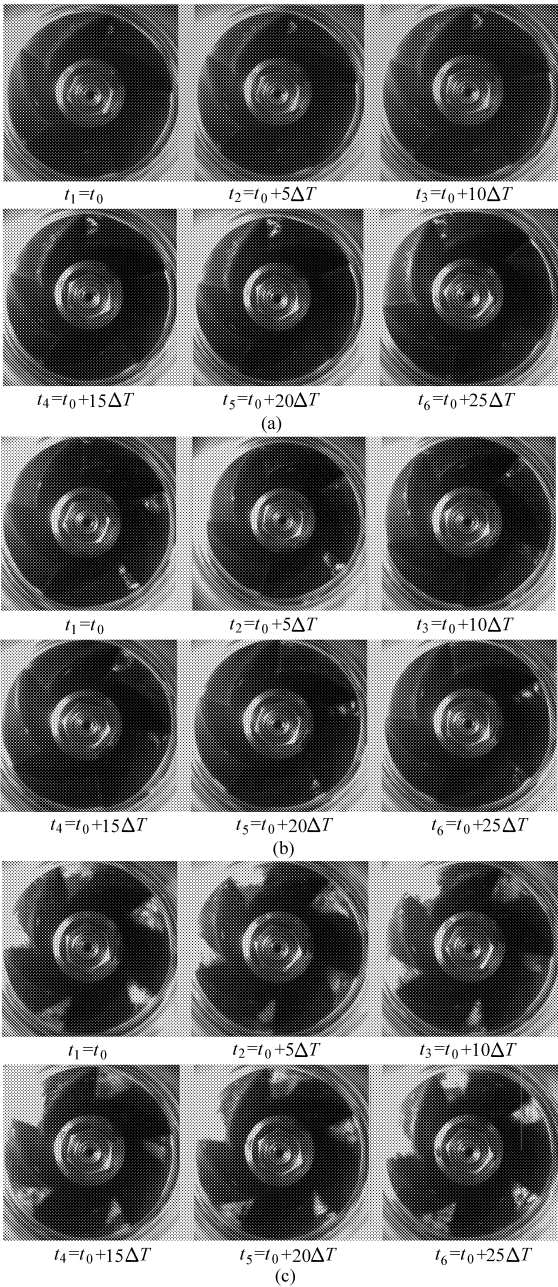


图 7 $0.7Q_d$ 工况下叶轮进口空化形态

Fig. 7 Cavitation at impeller inlet under $0.7Q_d$ condition
(a) $NPSHa$ 为 3.71 m (b) $NPSHa$ 为 2.62 m (c) $NPSHa$ 为 2.47 m

从图 7 中可以看出,当 $NPSHa$ 为 3.71 m 时,叶轮进口部分开始产生空泡,空泡首先在一个叶片背面进口边中部产生,随着叶轮的转动,空泡开始生长,然后溃灭,空泡体积分数减少。当 $NPSHa$ 为 2.62 m 时,叶轮内多个叶片背面有空泡产生,但每

个叶片的空泡体积分数不等,且每个叶片上空泡体积分布随叶轮转动的变化趋势不同,不是同时增加或者减少,表现出强烈的随机性。当 $NPSHa$ 进一步下降到 2.47 m 时,叶轮进口部分的空化较为严重,5 个叶片背面均有空泡产生,随着叶轮的转动,每个叶片背面的空泡分布变化不大,说明此时空泡的数量较多,空泡的产生、发展、溃灭速度加快。

图 8 为 $1.0Q_d$ 工况下, $NPSHa$ 分别为 5.59 m、3.51 m 和 3.24 m 时叶轮进口部分的空化形态。

从图 8 中可以看出, $1.0Q_d$ 的初生空化余量要大于 $0.7Q_d$ 工况, $NPSHa$ 在 5.59 m 时泵内便发生空

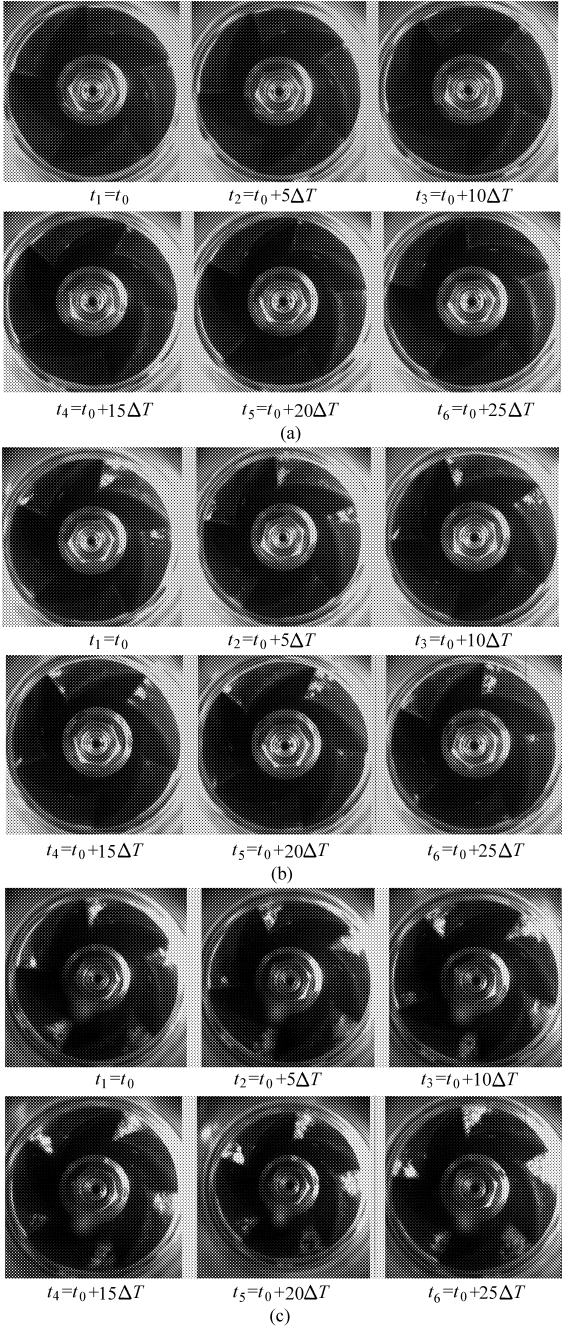


图 8 $1.0Q_d$ 工况下叶轮进口空化形态

Fig. 8 Cavitation at impeller inlet under $1.0Q_d$ condition
(a) $NPSHa$ 为 5.59 m (b) $NPSHa$ 为 3.51 m (c) $NPSHa$ 为 3.24 m

化,空泡在叶片背面进口边靠前盖板端部产生,随着 $NPSHa$ 的下降,离心泵叶轮进口部分空泡分布及其随叶轮旋转的变化规律与 $0.7Q_d$ 工况基本相同。

图 9 为 $1.3Q_d$ 工况下, $NPSHa$ 分别为 6.82 m、4.18 m 和 3.76 m 时模型泵叶轮进口部分的空化形态。

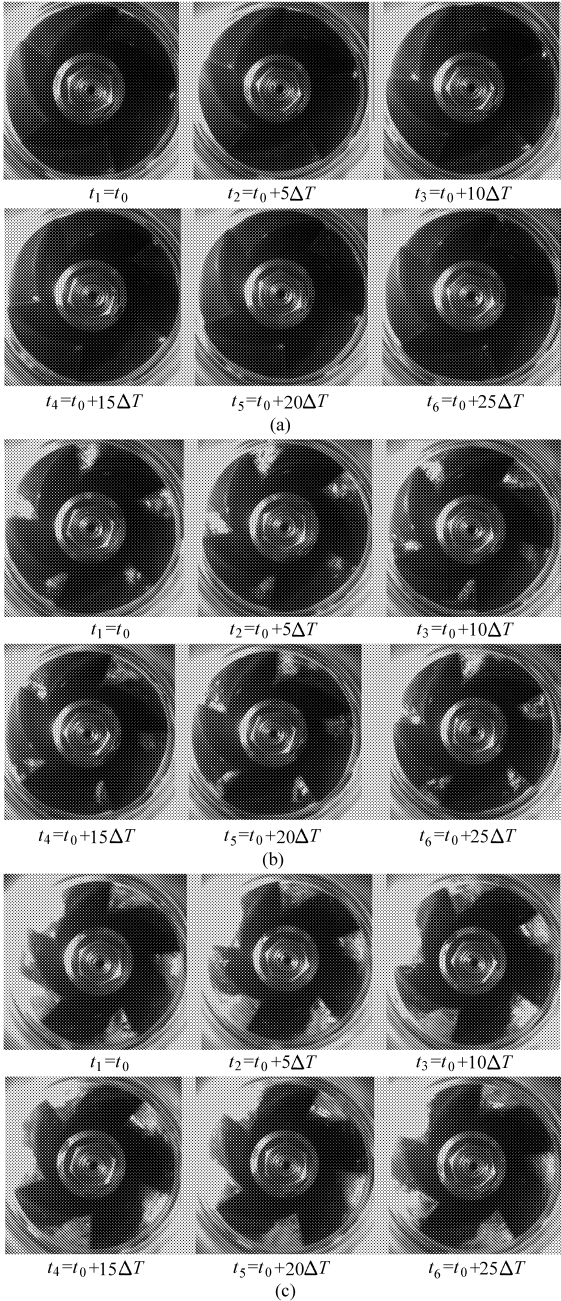


图 9 $1.3Q_d$ 工况下叶轮进口空化形态

Fig. 9 Cavitation at impeller inlet under $1.3Q_d$ condition
(a) $NPSHa$ 为 6.82 m (b) $NPSHa$ 为 4.18 m (c) $NPSHa$ 为 3.76 m

从图 9 中可以看出,与 $0.7Q_d$ 和 $1.0Q_d$ 工况相比, $1.3Q_d$ 工况的初生空化余量为 6.82 m,高于前 2 个工况,并且空泡在多个叶片背面进口边附近产生,但是具体位置各不相同。当 $NPSHa$ 为 3.76 m 时,模型泵扬程明显下降,此时空泡的形态随叶轮的旋转已无明显变化,空泡约占整个叶片的 $1/4$ 左右,且

靠后盖板一侧的空泡体积分数小于靠前盖板一侧。

3 结论

(1) 基于泵产品测试系统和图像采集系统, 在离心泵闭式试验台上建立了离心泵进口部分空化形态的可视化试验系统, 并实现了泵性能参数和空化形态图像的同步采集, 提高了试验测试的准确性。

(2) 空泡首先在模型泵叶片背面进口边附近初生, 但运行工况不同, 空泡的产生位置不同; 随着 NPSHa 的下降, 在多个叶片背面产生空泡。空泡随着叶轮的转动, 表现出强烈的非定常变化。当泵扬程下降较大时, 空泡的形态相对稳定, 其分布随叶轮转动变化不大, 且靠后盖板一侧的空泡分布小于靠前盖板一侧。

参 考 文 献

- 1 Ding H, Visser F C, Jiang Y, et al. Demonstration and validation of a 3D CFD simulation tool predicting pump performance and cavitation for industrial applications[J]. ASME Journal of Fluids Engineering, 2011, 133(1): 1~14.
- 2 Wu Dazhuan, Wang Leqin, Hao Zongrui, et al. Experimental study on hydrodynamic performance of a cavitating centrifugal pump during transient operation [J]. Journal of Mechanical Science and Technology, 2010, 24(2): 575~582.
- 3 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)
- 4 杨敏官, 孙鑫恺, 高波, 等. 离心泵内部非定常空化流流动特征的数值分析[J]. 江苏大学学报: 自然科学版, 2012, 33(4): 408~413.
Yang Minguan, Sun Xinkai, Gao Bo, et al. Numerical analysis of unsteady cavitating flow characteristic in centrifugal pump[J]. Journal of Jiangsu University: Natural Science Edition, 2012, 33(4): 408~413. (in Chinese)
- 5 Zhou L, Wang Z. Numerical simulation of cavitation around a hydrofoil and evaluation of a RNG $k-\varepsilon$ model [J]. Journal of Fluids Engineering, 2008, 130(1): 1~7.
- 6 王勇, 刘厚林, 袁寿其, 等. 离心泵内部空化特性的 CFD 模拟[J]. 排灌机械工程学报, 2011, 29(2): 99~103.
Wang Yong, Liu Houlin, Yuan Shouqi, et al. CFD simulation on cavitation characteristics in centrifugal pump[J]. Journal of Drainage and Irrigation Machinery Engineering, 2011, 29(2): 99~103. (in Chinese)
- 7 Dular M, Bachert R, Stoffel B, et al. Experimental evaluation of numerical simulation of cavitating flow around hydrofoil [J]. European Journal of Mechanics—B/Fluids, 2005, 24(4): 522~538.
- 8 Watanabe S, Ikeda A, Nakamura I, et al. Observation of unsteady cavitating flow in flat plate cascades [C] // 25th IAHR Symposium on Hydraulic Machinery and Systems, Paper 012047, 2010.
- 9 Friedrichs J, Kosyna G. Unsteady PIV flow field analysis of a centrifugal pump impeller under rotating cavitation [C] // Fifth International Symposium on Cavitation, Cav 03-OS-6-005, 2003.
- 10 时素果, 王国玉, 王复峰, 等. 绕三维水翼云状空化现象的试验研究[J]. 应用力学学报, 2011, 28(2): 105~110.
Shi Suguo, Wang Guoyu, Wang Fufeng, et al. Experimental study on unsteady cavitation flows around three-dimensional hydrofoil [J]. Chinese Journal of Applied Mechanics, 2011, 28(2): 105~110. (in Chinese)
- 11 王勇, 刘厚林, 袁寿其, 等. 离心泵非设计工况空化振动噪声的试验测试[J]. 农业工程学报, 2012, 28(2): 35~38.
Wang Yong, Liu Houlin, Yuan Shouqi, et al. Experimental testing on cavitation vibration and noise of centrifugal pumps under off-design conditions[J]. Transactions of the CSAE, 2012, 28(2): 35~38. (in Chinese)
- 12 谭磊, 曹树良, 王玉明, 等. 三维 ALE15 翼型空化流动数值模拟[J]. 农业机械学报, 2012, 43(9): 49~52.
Tan Lei, Cao Shuliang, Wang Yuming, et al. Numerical simulation of cavitation for 3-D ALE15 hydrofoil [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2012, 43(9): 49~52. (in Chinese)

(上接第 54 页)

- 11 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)
- 12 李晓俊, 袁寿其, 潘中永, 等. 离心泵边界层网格的实现及应用评价[J]. 农业工程学报, 2012, 28(20): 67~72.
Li Xiaojun, Yuan Shouqi, Pan Zhongyong, et al. Realization and application evaluation of near-wall mesh in centrifugal pumps [J]. Transactions of the CSAE, 2012, 28(20): 67~72. (in Chinese)
- 13 董亮, 刘厚林, 谈明高, 等. 离心泵全流场与非全流场数值计算[J]. 排灌机械工程学报, 2012, 30(3): 274~278.
Dong Liang, Liu Houlin, Tan Minggao, et al. Numerical calculation of whole and non-whole flow field in centrifugal pumps [J]. Journal of Drainage and Irrigation Machinery Engineering, 2012, 30(3): 274~278. (in Chinese)
- 14 Gülich J F. Centrifugal pump [M]. New York: Springer Berlin Heidelberg, 2008.