

DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2012.09.011

离心泵流场流固耦合数值模拟*

江伟¹ 郭涛¹ 李国君¹ 刘三华²

(1. 西安交通大学能源与动力工程学院, 西安 710049; 2. 广东佛山水泵厂, 佛山 528200)

【摘要】 离心泵叶轮在流场中受到的应力及产生的变形对速度场和压力场有一定的影响。采用双向同步求解方法对离心泵流场和叶轮结构响应进行联合求解,分析叶轮流固耦合作用对其内部流场的影响。对不同工况进行的计算结果表明,叶轮和叶片中应力分布明显不均,局部出现应力集中;叶轮出口后盖板在偏离设计工况时变形较大,影响叶轮出口速度,使蜗壳出现分流的部分向出口移动;导致叶轮出口压力不对称状态、不稳定性更严重;各监测点上压力变化较明显。

关键词: 离心泵 流固耦合 内部流场 应力 数值模拟

中图分类号: TH311 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1298(2012)09-0053-04

Numerical Calculation on Flow Field in Centrifugal Pump Based on Fluid-structure Interaction Theorem

Jiang Wei¹ Guo Tao¹ Li Guojun¹ Liu Sanhua²

(1. School of Energy and Power Engineering, Xian Jiaotong University, Xi'an 710049, China

2. Foshan Pump Factory, Foshan 528200, China)

Abstract

The stress and deformation of centrifugal pump impeller have certain impacts on the velocity and pressure fields. A solution for the flow field of centrifugal combined with structure response of impeller was implemented by using two-way coupling method to investigate the effect of FSI of impeller on flow field. By using this method, various flow rate conditions were calculated. The results showed that the stress of the impeller was markedly uneven and the local stress concentration appeared in each operation condition. The back cover board of impeller outlet had large deformation deviating from the design value, which affected the impeller velocity, made the shunt parts in the volute to move export, led to severe unsymmetry phenomena and instability of pressure in impeller outlet. Pressure of every monitoring point changed obviously.

Key words Centrifugal pump, Fluid-structure interaction, Flow field, Stress, Numerical calculation

引言

离心泵内部流动十分复杂,常伴有流动分离、二次流与尾迹流,所以研究离心泵内部复杂流动机理对降低运行时的汽蚀、振动与噪声具有重要意义。

国内外针对离心泵流场的 CFD 分析主要考虑流体对固体的影响,并未考虑叶轮变形对流场的影响^[1-5];也有学者针对固体对流体的影响进行研究,但是主要是研究叶轮的强度^[6-11]。

本文利用流体力学软件 Workbench 对离心泵

收稿日期: 2011-10-12 修回日期: 2011-11-30

* 国家自然科学基金资助项目(51076126)

作者简介: 江伟, 博士生, 主要从事离心泵优化设计及内部流场研究, E-mail: weijianglut@126.com

通讯作者: 李国君, 教授, 博士生导师, 主要从事叶轮机械气动力学及泵优化设计研究, E-mail: liguojun@mail.xjtu.edu.cn

进行流固耦合数值模拟,重点研究耦合前后叶轮在不同工况下的速度分布、压力分布及应力和变形等情况。

1 离心泵基本参数及数值方法

离心泵基本参数:流量 $Q = 150 \text{ m}^3/\text{h}$,扬程 $H = 40 \text{ m}$,转速 $n = 2950 \text{ r/min}$ 。设计参数如下:叶轮外径 $D_2 = 190 \text{ mm}$,进口直径 $D_j = 120 \text{ mm}$,出口角 $\beta_2 = 27^\circ$,叶片数 $Z = 6$,包角 $\phi = 110^\circ$,轮毂直径 $D_h = 50 \text{ mm}$,出口宽度 $b_2 = 25 \text{ mm}$ 。模型离心泵材料选择双相不锈钢,其材料特性为:密度 ρ 为 7850 kg/m^3 ,弹性模量 E 为 206 GPa ,泊松比 μ 为 0.3 。

结构与水体部分采用四面体非结构化网格,水体部分计算模型网格数为 $814\,696$,节点数为 $215\,469$;结构部分计算网格数为 $506\,170$,节点数 $758\,212$,水体部分和结构部分网格如图 1 所示。

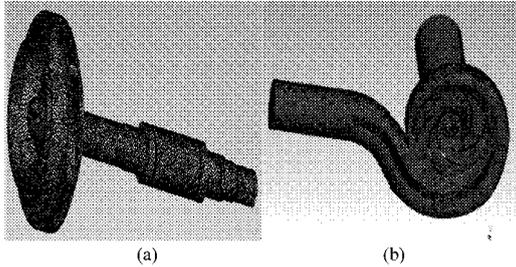


图 1 计算网格

Fig. 1 Computational grid

(a) 结构部分 (b) 水体部分

结构部分边界条件:对轴承处施加外载荷和圆柱约束;定义叶轮转速;将叶轮前后盖板面和叶片表面定义为流固相互作用面;定义与水体计算相同的

时间步长和初始时间。水体部分边界条件定义与非定常定义相同^[5-7],采用 SST $\kappa-\omega$ 湍流模型,时间步长为 $3.45 \times 10^{-5} \text{ s}$,每个时间步长内叶轮转过 6° ,迭代 120 步完成计算。为监测叶轮出口处压力场变化,在叶轮出口处设置 16 个监测点,每 30° 设置 1 个,在 2 个隔舌处每 10° 设置一个,如图 2 所示。

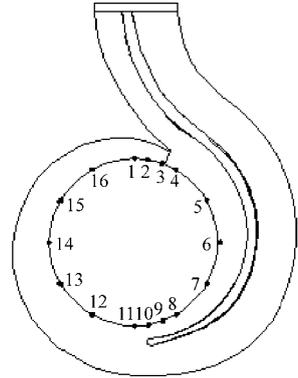


图 2 压力监测点设置示意图

Fig. 2 Monitoring points of pressure

2 计算结果分析

为全面分析离心泵内部流场的速度、压力及叶轮变形和应力情况,分别对离心泵在流量为 $0.8Q$ 、 Q 、 $1.2Q$ 工况下的流场进行分析。

2.1 叶轮变形分析

由图 3 可知,叶轮变形主要发生在叶轮出口后盖板处,在设计工况下变形最小,偏离工况变形较大;小工况点变形最大。比较 3 种工况下叶轮应力,发现叶轮受力不均,叶片与盖板接合出口处出现应力集中,且其峰值为相应工况下最大值。

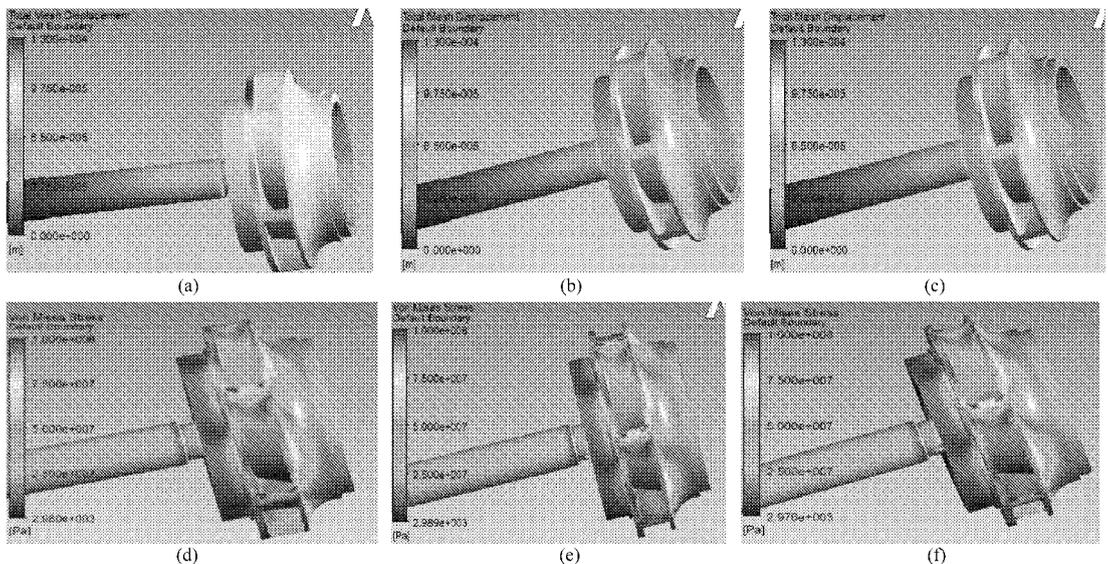


图 3 叶轮变形和应力分布

Fig. 3 Impeller deformation and stress distribution

(a) $0.8Q$, 叶轮变形 (b) Q , 叶轮变形 (c) $1.2Q$, 叶轮变形 (d) $0.8Q$, 叶轮应力 (e) Q , 叶轮应力 (f) $1.2Q$, 叶轮应力

2.2 速度场分析

由图 4 可知,流固耦合作用前后速度场分布非常相近,在叶轮出口处速度较大,随着蜗壳流动一部分动能转化为压能,速度呈下降趋势。但在局部部位,速度分布存在明显的区别。对比可知,未考虑耦合时无分流现象,考虑后存在分流现象;在设计工况下分流现象不明显,但是在 $0.8Q$ 和 $1.2Q$ 工况下分流向蜗壳出口移动。这说明叶片以及叶轮出口后盖板外缘发生变形,直接影响壁面附近的流动状态,使流速发生改变。

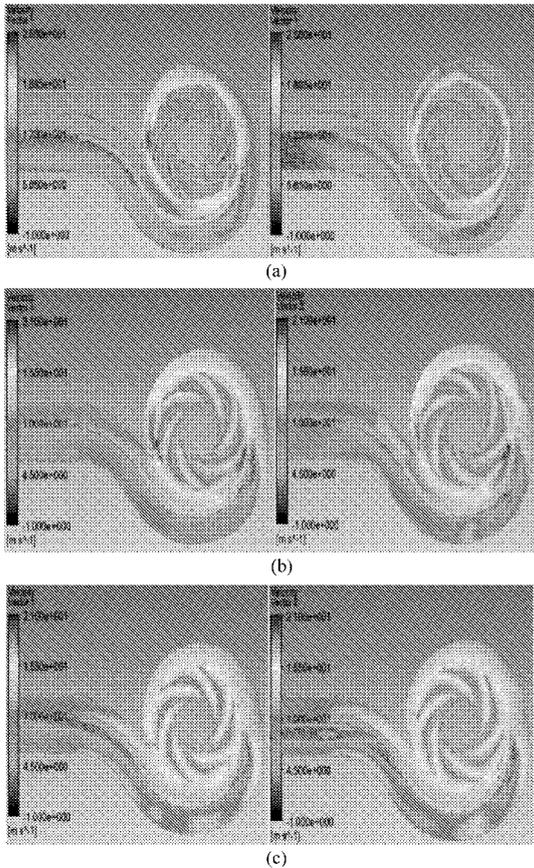


图 4 流固耦合作用前后中间截面速度场分布
Fig.4 Velocity field distribution calculated with and without FSI

(a) $0.8Q$ (b) Q (c) $1.2Q$

2.3 压力场分析

由图 5 可知,流固耦合作用前、后压力分布近似,叶轮上压力分布符合规律,即从进口到出口随叶轮旋转呈递增趋势。在叶轮出口附近,受叶轮与蜗壳动-静干涉影响,静压出现不稳定、局部不对称状态。考虑流固耦合后,静压分布发生变化,在 $0.8Q$ 和 Q 工况时隔舌处静压明显增大,在 $1.2Q$ 工况时隔舌处静压变小且压力梯度分布不均。说明叶轮与叶片后盖板微小变形对压力场造成影响。

2.4 监测点压力对比分析

图 6 是所有监测点在不同工况、不同时刻(叶

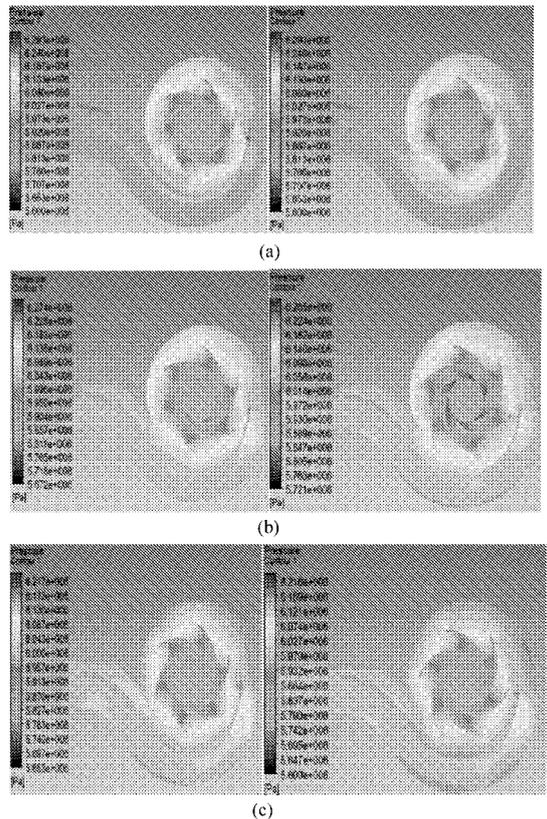


图 5 流固耦合作用前后中间截面压力场分布
Fig.5 Pressure field distribution calculated with and without FSI

(a) $0.8Q$ (b) Q (c) $1.2Q$

轮转过隔舌前、隔舌中、隔舌后)的对比分析。其中横坐标为每个点所在的角度(点 1 所在角度为 0° 开始,顺时针),纵坐标为压力。同一时刻监测点随角度不同静压不同,且在某点附近均出现了压力最低点,该角度恰好与隔舌位置相近,说明叶轮周围静压分布不均,两隔舌之间的压力呈对称分布。比较不同工况可知,在小流量与设计流量下流固耦合作用前、后叶轮出口各监测点压力变化不大,在大流量下,压力变化比较紊乱,说明流固耦合作用与隔舌对流场的影响是一致的:小流量时对流场的影响较小,大流量时对流场的影响较大。比较不同时刻,流固耦合作用对各点的压力都有影响,程度各不相同,规律较复杂,说明流固耦合对离心泵流动诱导振动特性预测影响较显著。

3 结论

(1) 该模型离心泵叶轮在流场中受力不均,叶轮出口后盖板处出现应力集中,且发生变形,对离心泵内部速度场和压力场影响较大,导致叶轮出口处产生较严重的分流,叶轮出口压力出现严重的不稳定和不对称。反映了流固耦合对流场计算结果的影响的确存在,而且规律较复杂。

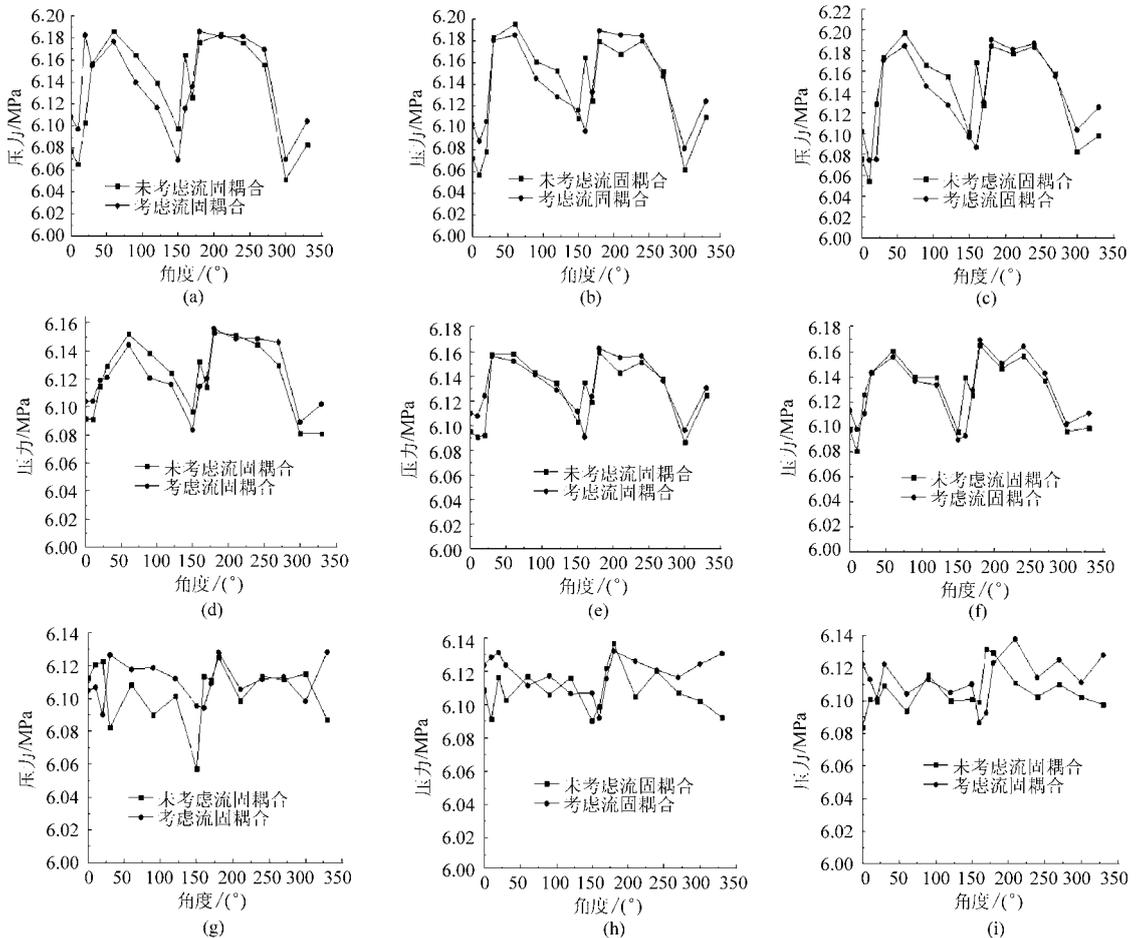


图6 不同工况下不同时刻压力分布

Fig. 6 Pressure distributions at different time and different conditions

(a) 0.8Q, 叶轮转过隔舌前 (b) 0.8Q, 叶轮转过隔舌中 (c) 0.8Q, 叶轮转过隔舌后 (d) Q, 叶轮转过隔舌前 (e) Q, 叶轮转过隔舌中 (f) Q, 叶轮转过隔舌后 (g) 1.2Q, 叶轮转过隔舌前 (h) 1.2Q, 叶轮转过隔舌中 (i) 1.2Q, 叶轮转过隔舌后

(2) 考虑流固耦合后各监测点处压力脉动发生变化, 说明流固耦合作用对预测离心泵诱导振动性能有影响。因此在振动分析过程中应考虑流固耦合的作用。

参 考 文 献

- Majidi K. Numerical study of unsteady flow in a centrifugal pump [J]. ASME Journal of Turbomachinery, 2005, 127(2): 363 ~ 371.
- González J, Santolaria C. Unsteady flow structure and global variables in a centrifugal pump [J]. ASME Journal of Fluids Engineering, 2006, 128(5): 937 ~ 946.
- Spence R, Amaral Teixeira J. A CFD parametric study of geometrical variations on the pressure pulsations and performance characteristics of a centrifugal pump [J]. Computers & Fluids, 2009, 38(6): 1 243 ~ 1 257.
- Yang J, Preidikman S, Balaras E. A strongly coupled, embedded-boundary method for fluid-structure interactions of elastically mounted rigid bodies [J]. Journal of Fluids and Structures, 2008, 24(2): 167 ~ 182.
- 田辉, 郭涛, 孙秀玲, 等. 离心泵内部动静干涉作用的数值模拟 [J]. 农业机械学报, 2009, 40(8): 92 ~ 95.
Tian Hui, Guo Tao, Sun Xiuling, et al. Numerical simulation of unsteady flow in a centrifugal pump [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2009, 40(8): 92 ~ 95. (in Chinese)
- Jiang Y Y, Yoshimura S, Imai R, et al. Quantitative evaluation of flow-induced structural vibration and noise in turbo machinery by full-scale weakly coupled simulation [J]. Journal of Fluids and Structures, 2007, 23(4): 531 ~ 544.
- 王洋, 王洪玉, 张翔. 基于流固耦合理论的离心泵冲压焊接叶轮强度分析 [J]. 农业工程学报, 2011, 27(3): 131 ~ 135.
Wang Yang, Wang Hongyu, Zhang Xiang. Strength analysis on stamping and welding impeller in centrifugal pump based on fluid-structure interaction theorem [J]. Transactions of the CSAE, 2011, 27(3): 131 ~ 135. (in Chinese)

参 考 文 献

- 1 Arai M, Tanaka K, Ikee S. Axial thrust in screw-type centrifugal pump [J]. *Turbomachinery*, 1989,18(10): 617 ~ 622.
- 2 Kazuhiro Tanaka, Toshio Kobayashi. Thrust prediction in screw-type centrifugal pump [C] // *Proceedings of ASME/JSME 2003 4th Joint Fluid Summer Engineering Conference*, 2003,2:621 ~ 626.
- 3 曹卫东,施卫东,潘中永,等. 中高浓度螺旋纸浆泵的设计[J]. *农机化研究*,2002(2):63 ~ 65.
- 4 Mustafa Golc, Yasar Pancar, Yakup Sekmen. Energy saving in a deep well pump with splitter blade [J]. *Energy Conversion and Management*, 2006,47(5):638 ~ 651.
- 5 袁寿其. 低比速离心泵理论与设计[M]. 北京:机械工业出版社,1997.
- 6 袁寿其,何有世,袁建平,等. 带分流叶片的离心泵叶轮内部流场的 PIV 测量与数值模拟[J]. *机械工程学报*,2006,42(5):60 ~ 63.
Yuan Shouqi, He Youshi, Yuan Jianping, et al. PIV measurements and numerical simulations of flow in centrifugal pump impellers with splitting vanes [J]. *Chinese Journal of Mechanical Engineering*, 2006,42(5):60 ~ 63. (in Chinese)
- 7 齐学义,倪永燕. 复合式离心泵叶轮短叶片偏置设计分析[J]. *甘肃工业大学学报*,2003,29(4):60 ~ 63.
Qi Xueyi, Ni Yongyan. Analysis of impeller design of compound centrifugal pumps with offset short blades [J]. *Journal of Gansu University of Technology*, 2003,29(4): 60 ~ 63. (in Chinese)
- 8 祝磊,袁寿其,袁建平,等. 阶梯隔舌对离心泵压力脉动和径向力影响的数值模拟[J]. *农业机械学报*,2010,41(9): 21 ~ 26.
Zhu Lei, Yuan Shouqi, Yuan Jianping, et al. Numerical simulation on pressure fluctuations and radial hydraulic forces in centrifugal pump with step-tongue[J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2010,41(9):21 ~ 26. (in Chinese)
- 9 Hansen T. Comparison of steady-state and transient rotor - stator interaction of an industrial centrifugal pump[C] // *CFX Users Conference*,Berchtesgaden, Germany, 2001.
- 10 Shi F, Tsukamoto H. Numerical study of pressure fluctuations caused by impeller-diffuser pump stage[J]. *ASME Journal of Fluids Engineering*, 2001, 123(3):466 ~ 474.
- 11 张金凤,袁寿其,付跃登,等. 分流叶片对离心泵流场和性能影响的数值预报[J]. *机械工程学报*,2009,45(7):131 ~ 137.
Zhang Jinfeng, Yuan Shouqi, Fu Yuedeng, et al. Numerical forecast of the influence of splitter blades on the flow field and characteristics of a centrifugal pump [J]. *Chinese Journal of Mechanical Engineering*, 2009,45(7):131 ~ 137. (in Chinese)
- 12 袁寿其,周建佳,袁建平,等. 带小叶片螺旋离心泵压力脉动特性分析[J]. *农业机械学报*,2012,43(3):83 ~ 87,92.
Yuan Shouqi, Zhou Jianjia, Yuan Jianping, et al. Characteristic analysis of pressure fluctuation of unsteady flow in screw-type centrifugal pump with small blade[J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2012,43(3): 83 ~ 87,92. (in Chinese)
- 13 关醒凡. 现代泵技术手册[M]. 北京:宇航出版社,1995.

(上接第 56 页)

- 8 裴吉,袁寿其,袁建平. 流固耦合作用对离心泵内部流场影响的数值计算[J]. *农业机械学报*, 2009, 40(12): 107 ~ 112.
Pei Ji, Yuan Shouqi, Yuan Jianping. Numerical calculation for effect of fluid-structure on flow field in centrifugal pump[J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2009, 40(12):107 ~ 112. (in Chinese)
- 9 Benra F K, Dohmen H J. Comparison of pump impeller orbit curves obtained by measurement and FSI simulation[C] // *2007 ASME Pressure Vessels and Piping Division Conference*, 2007.
- 10 Kato C, Yamade Y, Wang Hong, et al. Prediction of the noise from a multistage centrifugal pump [C] // *ASME Fluids Engineering Division Summer Meeting*,2005.
- 11 王洋,王洪玉,徐小敏,等. 冲压焊接离心泵叶轮有限元计算[J]. *排灌机械工程学报*,2011,29(2):109 ~ 113.
Wang Yang, Wang Hongyu, Xu Xiaomin, et al. Finite element computation for impeller of stamping and welding centrifugal pump[J]. *Journal of Drainage and Irrigation Machinery Engineering*, 2011, 29(2): 109 ~ 113. (in Chinese)