

流固耦合作用对螺旋离心泵流场影响的数值分析*

袁寿其 徐宇平 张金凤 裴吉 周建佳

(江苏大学流体机械工程技术研究中心, 镇江 212013)

摘要: 为研究流固耦合作用对螺旋离心泵内部流场的影响,以 ZJ200-25 型螺旋离心泵为研究对象,应用计算流体力学软件 CFX12.1 和有限元软件 ANSYS Workbench 对螺旋离心泵进行了考虑内部流场和结构相互作用的两场交替联合求解,并以相同的设置对不考虑流固耦合作用的内部流场进行了计算。对比分析两种计算方法得到的流场发现,考虑流固耦合作用后:泵进口处的压力波动加剧,出口压力波动强度降低,进出口波动频率不变,但相位有改变;速度分布满足共同的规律,但在小流量工况下差别最大,同时在叶片与隔舌处于相干位置时,隔舌附近流动也受到明显影响;径向力大小随时间变化规律一致,但波动范围减小;考虑流固耦合作用后叶轮流道内流动更加不对称。

关键词: 螺旋离心泵 双叶片 双向流固耦合 数值分析 动静干涉

中图分类号: TH311 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1298(2013)01-0038-05

Numerical Analysis for Effect of Fluid-structure Interaction on Flow Field in Screw Centrifugal Pump

Yuan Shouqi Xu Yuping Zhang Jinfeng Pei Ji Zhou Jianjia

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

Abstract: In order to analyze the effect of fluid-structure interaction (FSI) on flow field in screw centrifugal pump, a ZJ200-25 screw type centrifugal pump with double screw blades was chosen as the study subject. The two-way coupling method was established to study the effect of FSI of impeller on flow field in screw centrifugal pump. CFX12.1 and ANSYS Workbench were used to the combined calculation for turbulent flow and structure response of impeller. And the unsteady flow field of the pump was simulated numerically under several operating conditions without effect of FSI. Compared the result of the two calculation methods, it's found that, with the effect of FSI, pressure fluctuations in pump inlet intensified. The dominant frequency of pressure in inlet and outlet do not change but the phase position was different after FSI. The inner velocity distributions satisfy the common characteristic, but the largest differences were appeared under the condition of small flow rate. The flow field near volute tongue was affected by FSI most obviously when blades passing by the tongue. Magnitude of radial trust changing with time has similar regularities, but the fluctuation range with FSI method was reduced. Flow filed in impeller was more dissymmetrical under the effect of fluid-structure interaction. The conclusion obtained in this investigation will provide an essential guide to analyze the inner flow filed and master characteristics of rotor vibration characters and inducing factors of the pressure fluctuation in the screw type centrifugal pump.

Key words: Screw type centrifugal pump Double blade Fluid-structure interaction Numerical analysis Rotor-stator interaction

引言

螺旋离心泵是一种传统的无堵塞泵,其核心部件为半开式螺旋形叶轮。这种泵叶片少,叶片薄而相对扭曲,包角大,结构特殊。螺旋离心泵运行过程中,在流场内复杂的水力激励作用下,叶轮会发生变形及振动,变形后的叶轮又会引起流场的改变。以往关于螺旋离心泵内部流动的数值研究中,都没有考虑到结构变形和振动对流场的反作用^[1-5],而双向流固耦合方法已经被用于普通离心泵内流场的研究中^[6-8],但还没有在泵领域得到推广,成果有限。目前应用较多的是将流场载荷加载到结构上的单向流固耦合方法^[9-11],这种方法忽略了阻尼作用,准确度低,常用于求解结构响应的静力学分析。

本文使用 CFD 软件 CFX12.1 及有限元分析软件 ANSYS Workbench 对螺旋离心泵进行双向流固耦合数值模拟,对比研究耦合与不耦合各工况下流场压力、速度及叶轮受力的差别,分析流固耦合作用对流场产生的影响。

1 计算模型与模拟方法

1.1 模型参数

螺旋离心泵模型设计参数为:流量 $Q_d = 200 \text{ m}^3/\text{h}$,扬程 $H = 25 \text{ m}$,转速 $n = 1450 \text{ r}/\text{min}$,比转数 $n_s = 116$,叶片数 $Z = 2$ 。叶轮进口直径 $D_1 = 160 \text{ mm}$,出口直径 $D_2 = 328 \text{ mm}$,出口宽度 $b_2 = 70 \text{ mm}$,蜗壳基圆直径 $D_3 = 360 \text{ mm}$,叶轮外缘与吸水壳体内壁间隙为 0.9 mm 。叶轮材料为不锈钢 316L,密度 $8030 \text{ kg}/\text{m}^3$,弹性模量 175 GPa ,泊松比 0.4 。

1.2 网格生成

将螺旋离心泵的三维模型导入网格划分软件 ICEM 生成计算区域的网格。考虑到螺旋离心泵结构特殊,叶片边缘存在一尖角区域,且计算区域中存在比较复杂的流动,如二次流、交叉流以及小流量工况下的分离旋涡等流动现象,采用六面体网格单元不能保证网格质量和更好地反映这些流动。故采用适应范围更广的四面体网格单元对全流道模型进行网格划分,并对间隙内流体进行局部网格加密处理,流体网格总数为 1 399 178(图 1)。转子固体有限元网格在 Workbench Transient Structure 模块中生成,单元数为 125 662(图 2)。

1.3 数学模型及模拟方法

数值模拟在 ANSYS CFX12.1 全隐式耦合多网格线性求解器中进行。采用 SST $k-\omega$ 湍流模型进行非定常全流场计算,采用适宜于瞬态求解的 SIMPLeC 算法进行求解。进出口边界条件分别定

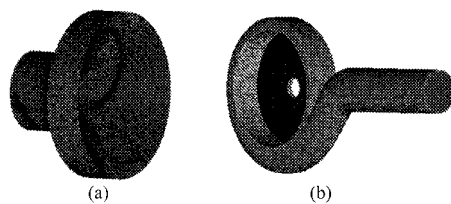


图 1 流体区域网格

Fig. 1 Mesh of fluid region

(a) 叶轮计算区域网格 (b) 蜗壳计算区域网格

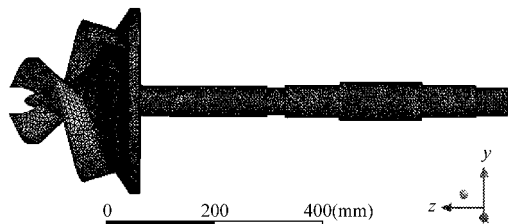


图 2 固体区域网格

Fig. 2 Mesh of solid region

义为速度进口和自由出流,设置参考压力为大气压,给定不同工况下的进口速度进行计算。固体壁面定义无滑移边界条件,粗糙度 0.025 mm 。将进口与叶轮、叶轮与蜗壳间的交界面设置为 Transient Rotor Stator^[12]。以叶轮旋转 9° 作为一个时间步,每个时间步长 $\Delta T = 0.001035 \text{ s}$,每个旋转周期包含 40 个时间步。选择 5 个旋转周期作为采样对象,200 步的总时间 $T = 0.207 \text{ s}$ 。

在双向流固耦合计算的基础上,以相同的时间步长及设置,进行了不考虑流固耦合作用的解耦计算,以此结果作为参照,能够更直观地对比得出流固耦合作用对流场所产生的影响。

2 结果与分析

为全面了解流场随工况的变化差异,进行了 5 个流量工况下 ($0.5Q_d$ 、 $0.75Q_d$ 、 $1.0Q_d$ 、 $1.25Q_d$ 及 $1.5Q_d$) 的非定常数值计算,并选择有代表性的结果进行分析。

2.1 进出口压力波动对比分析

选择隔舌头部、叶轮进口与蜗壳出口端面圆心作为参考点,分别读取其在第 4、5 旋转周期内的静压值,得到其压力变化如图 3 所示,其中横坐标为时间,以第 4 周期起始时刻为零时刻,纵坐标为参考点静压值。

由图 3 可以看出,流固耦合作用使得进出口压力随时间的变化规律发生了明显的改变,进口参考点的压力在考虑流固耦合作用后,波峰位置上移,波谷位置下移,压力波动范围增大,强度加大。出口压力的变化规律与进口处相反,考虑流固耦合作用后,出口监测点的压力波峰位置下移,波谷位置上移,压

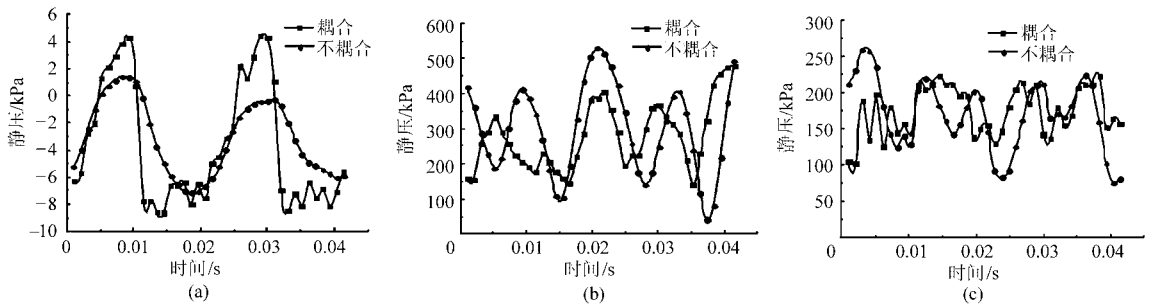


图3 监测点压力对比

Fig. 3 Pressure comparison of monitoring points

(a) $0.75 Q_d$ 进口参考点 (b) $1.0 Q_d$ 出口参考点 (c) $1.5 Q_d$ 隔舌参考点

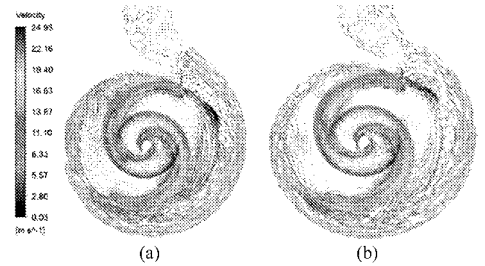
力波动范围减小,强度减弱;同时,在考虑耦合与不耦合的情况下,两曲线波峰与波谷的位置也相差了一定角度。隔舌参考点的压力波动与出口参考点相似,耦合后的曲线波动幅度减小,但不稳定性相对增加,可见耦合作用使隔舌处的流动更加紊乱。总体上看,流固耦合作用前后流动趋势一致,进出口压力波动仍然呈现明显的周期性,但其幅值和相位都有不同程度的改变。

压力波动的前后差别,是因为不考虑耦合的情况下,假设转子是不发生形变的刚体,不考虑固体对流场压力的响应信息;而在耦合情况下,转子系统是作为弹性体研究的,考虑了各种变形及阻尼振动。因此,轴的弯曲以及叶片进口段的变形破坏了叶轮结构的对称性,使得进口流场的不对称性和不稳定性增强,导致了进口压力脉动的强度加大。进口参考点压力曲线在波峰下降之后的位置存在周期较短的小幅波动,这些波动反映了叶片的弹性形变对流场压力产生的小幅波动影响。叶片出口段的变形对来自流场的压力产生了一定的缓冲作用,减弱了动静干涉的强度,因此,耦合后出口压力脉动强度减弱。转轴在转矩的作用下发生扭转变形,导致叶轮结构与变形前相错一个角度,造成耦合前后压力的相位差。

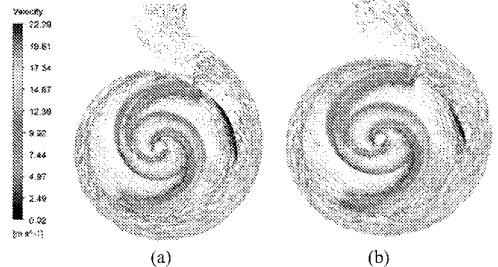
2.2 动静干涉时的速度场对比分析

由参考点的压力变化规律发现,叶片与蜗壳隔舌处于相干位置时,其压力差别最大,故选择不同工况下叶片与隔舌处于动静相干位置时的速度矢量进行分析,结果如图4~6所示。

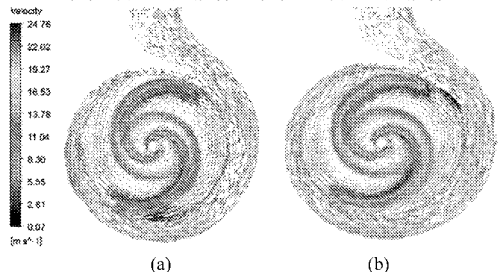
通过对比发现,考虑流固耦合作用对泵内各处的流速都有不同程度的影响,但两种计算方法得到的速度矢量的总体分布规律是一致的。设计工况下,隔舌附近的速度在耦合前后变化最大,考虑耦合后,第VII断面附近的高速流动区域沿圆周方向扩大,同时叶片离心段压力面上的流速减小;大流量下,流固耦合作用使得扫过隔舌的叶片出口流速降

图4 $Q = 0.5 Q_d$ 工况下速度分布Fig. 4 Velocity distributions under $Q = 0.5 Q_d$

(a) 考虑流固耦合 (b) 不考虑流固耦合

图5 $Q = 1.0 Q_d$ 工况下速度分布Fig. 5 Velocity distributions under $Q = 1.0 Q_d$

(a) 考虑流固耦合 (b) 不考虑流固耦合

图6 $Q = 1.5 Q_d$ 工况下速度分布Fig. 6 Velocity distributions under $Q = 1.5 Q_d$

(a) 考虑流固耦合 (b) 不考虑流固耦合

低,而另一叶片的出口流速增高,两个叶片压力面上的流速都有小幅度降低;小流量工况下,叶片出口速度在考虑耦合作用后降低,与设计流量的情况相似,位于第VII断面的漩涡在考虑流固耦合作用之后向第VIII断面偏移,隔舌前方的高速流动也向隔舌偏移。综合各工况下的速度分布可知,在非设计工况尤其是小流量下,流固耦合作用产生的影响是最明

显的,在其他位置影响不大;对比叶轮与隔舌处于不同相对位置时的速度分布可知,流固耦合作用对流速的改变在叶片出口与隔舌相遇时是最明显的,这与出口监测点压力波动的对比情况相吻合。

2.3 叶轮径向力对比分析

计算分别得到了耦合与不耦合情况下,径向力大小随时间变化的曲线,如图 7 所示,图中横坐标表示第 5 个旋转周期的时间步。观察得到,不同工况下流固耦合作用对径向力的影响不同,小流量下,两曲线吻合程度最佳,耦合计算曲线值低于非耦合的

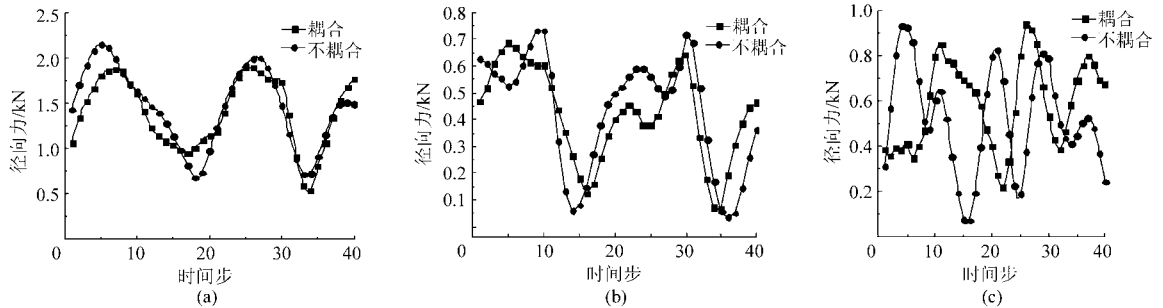


图 7 不同流量下叶轮径向力曲线

Fig. 7 Magnitude of radial thrust under different flow rates

(a) $Q = 0.5Q_d$ (b) $Q = 1.0Q_d$ (c) $Q = 1.5Q_d$

2.4 叶轮流道内流动对比分析

图 8 所示为设计工况下,叶轮质心在两个周期内的位移随旋转角度的分布图,其中叶轮起始位置对应角度为 0° 。从图中可以看出:随着叶轮旋转,叶轮质心点在每个旋转角度都存在径向位移,这种偏心现象使得叶轮与吸水室间隙大小发生改变,并呈不对称分布。叶轮旋转角 $\Omega = 215^\circ$ 时,质心位移最大,为 0.036 mm ,位于第三象限内。由于叶轮的偏心及叶片变形现象,两叶片与吸水室内壁间隙也有所改变,不考虑流固耦合时间隙 $\delta = 0.9 \text{ mm}$,考虑流固耦合后间隙 δ 为 $0.855 \sim 9.041 \text{ mm}$ 。为分析质心位移变化对叶轮流道及间隙内流动造成的影响,选取 $\Omega = 215^\circ$ 时刻的流场进行分析,读取叶轮中截面上的速度及压力进行对比分析,如图 9 所示。其中上图为不考虑流固耦合作用的计算结果,下图为考虑流固耦合的计算结果。

图 9a 为叶轮流道中截面上的静压分布。可以发现,流固耦合前后压力分布无明显差别,耦合后间隙附近压力梯度增大,处于对称位置的间隙内静压值也有更大的差别,相对于螺旋段,这种现象在叶轮离心段更加明显。图 9b 为流道内的绝对速度分布,可以发现考虑流固耦合作用后,叶轮进口处的速度分布更加不均匀,两边间隙内流速差别更加明显;轮毂两侧的速度梯度明显增大,这是由于叶片变形及叶轮质心位移使得转子结构不对称,对液流的扰动

计算值,同时两曲线峰值与谷值相位相差明显,耦合曲线在一个波峰与两个波谷处相对滞后于非耦合曲线,而在另一个波峰位置相对超前;设计流量及大流量下也存在相位超前或滞后的现象,这正说明了流固耦合作用使轴对称结构的转子发生了形变,从而改变了流场分布及其对结构的反馈。综合来说,耦合作用对径向力的影响随工况改变而不同,在小流量下影响最小,而在大流量下最明显;流固耦合作用使得各工况下都存在相位差,说明流固耦合作用对叶轮受力及力矩的影响不可忽略。

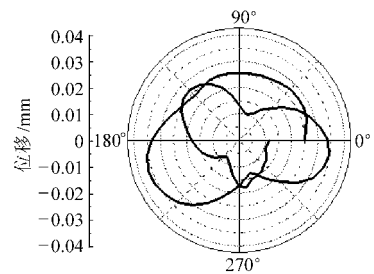


图 8 设计流量下叶轮质心位移

Fig. 8 Impeller centroid displacement under designed flow rate

作用增强所致,这解释了进口压力波动加剧的原因,也进一步说明了耦合作用确实存在对压力脉动的影响。图 9c 为绝对速度轴向分量的分布云图,从中可以更明显地看到流速的差别,特别是考虑流固耦合后叶轮进口处轮毂两侧流速更加不对等;同时,出口位置叶片压力面流速增大,对比图 9a 发现,相同位置的静压值也低于非耦合流场,这反映了流固耦合作用对叶轮径向力存在影响。

综合以上分析发现:

(1) 流固耦合作用增强了进口及间隙流动的不对称性,间隙附近的压力梯度及速度梯度都要大于非耦合流场。

(2) 考虑流固耦合后,叶片吸力面附近的流场分布改变大于压力面;耦合前后,速度与压力分布在叶轮进出口处的差别尤为明显。

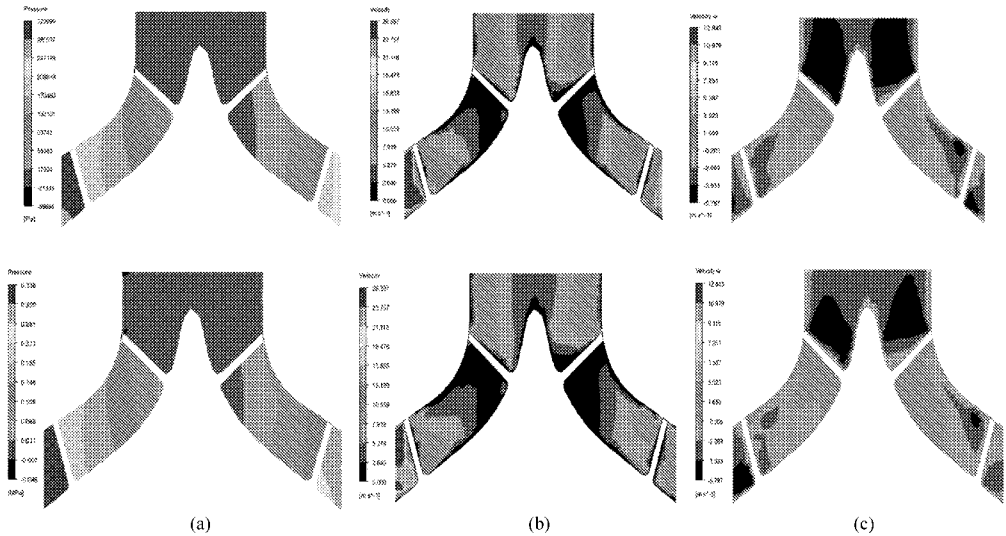


图9 流场静压和速度分布

Fig.9 Static pressure and velocity distributions

(a) 静压分布 (b) 绝对速度 (c) 绝对速度轴向分量

2.5 外特性对比分析

将两种计算得到的进出口压力做时均化处理,计算出各工况下的扬程,绘制 $Q-H$ 曲线并与开式试验台上测得的数据对比,如图 10 所示。

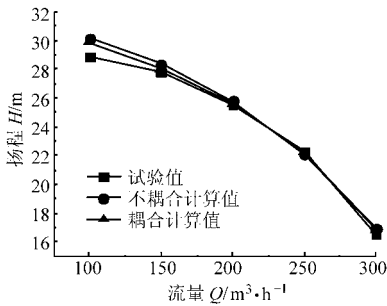


图 10 性能曲线对比

Fig. 10 Comparison of performance curves

从图 10 中可以看出:

(1) 数值计算所得曲线与外特性试验曲线趋势一致,扬程曲线在小流量点和设计工况二者吻合良好,大流量点计算值略高于模拟值,但误差不超过总扬程的 3.5%,故所选用的计算模型比较准确地预

测了该泵的外特性,这也证实了本数值计算的可靠性和可行性,为进一步的流场对比分析提供了保证。

(2) 耦合与不耦合计算值相差很小,说明考虑流固耦合后对扬程的影响极小,但考虑耦合计算出的扬程略低于不耦合计算值,相对更接近试验值。

3 结论

(1) 流固耦合作用使得进口压力波动强度增大,出口压力波动强度减弱,隔舌处波动紊乱,但流固耦合前后的流场也满足共同的规律,耦合作用并未改变整体流动趋势。

(2) 不同工况下,流固耦合作用在非设计流量下影响最明显,小流量下对压力影响最明显,大流量下对径向力影响最明显;一个旋转周期内,当叶片与隔舌处于相干位置时,耦合前后的流动差异最大。

(3) 由于叶轮变形以及质心偏移,破坏了转子结构的对称性,对泵进口处液流形成扰动,并对下游流道内流动形成不同程度的影响,这种影响随时间及空间积累,会在流道内局部产生明显的差别。

参 考 文 献

- 刘胜. 螺旋离心泵内部流场全三维数值模拟[D]. 兰州:兰州理工大学,2006.
Liu Sheng. Numeration simulation of the flow field 3-dimensional in a screw centrifugal pump[D]. Lanzhou; Lanzhou University of Technology, 2006. (in Chinese)
- 丁思云,杨博峰,郑国运,等. 叶片数对螺旋离心泵内部流场影响研究[J]. 流体机械,2009,37(7):33~37.
Ding Siyun, Yang Bofeng, Zheng Guoyun, et al. Influence of blade number on interior flow of screw centrifugal pump[J]. Fluid Machinery, 2009, 37(7): 33~37. (in Chinese)
- 李仁年,王秋红,熊祖鸿. 计算域和离散方法对数值求解螺旋离心泵的影响[J]. 甘肃科学学报 2005,17(4):57~59.
Li Rennian, Wang QiuHong, Xiong Zuhong. Influence of the model and the method of dispersion on the screw centrifugal pump in numerical simulation[J]. Journal of Gansu Sciences, 2005, 17(4): 57~59. (in Chinese)
- You-teak Kim. Influence of tip clearance on pump performance of two phase flow in a screw centrifugal pump[C]//Pumps and Fans Proceedings of the 3rd International Conference on Pumps and Fans,1998:346~357.

- Journal of Gansu University of Technology, 1991, 17(4): 15 ~ 19. (in Chinese)
- 3 赵雪华, 徐语, 雷桥. 立式自吸泵输气性能的理论及试验研究[J]. 华东理工大学学报, 1996, 22(4): 455 ~ 461.
Zhao Xuehua, Xu Yu, Lei Qiao. Theoretical and experimental research on characteristics of vertical self-priming pump[J]. Journal of East China University of Science and Technology, 1996, 22(4): 455 ~ 461. (in Chinese)
 - 4 李红, 王涛. 自吸泵内部流场的数值模拟及性能预测[J]. 排灌机械工程学报, 2010, 28(3): 194 ~ 197.
Li Hong, Wang Tao. Numerical simulation of interior flow and performance prediction for self-priming pump[J]. Journal of Drainage and Irrigation Machinery Engineering, 2010, 28(3): 194 ~ 197. (in Chinese)
 - 5 王春林, 丁剑, 史亚婷, 等. 旋流自吸泵突台结构数值模拟及对性能的影响[J]. 排灌机械工程学报, 2010, 28(6): 474 ~ 478.
Wang Chunlin, Ding Jian, Shi Yating, et al. Numerical simulation of boss structure and its impact on rotational flow self-priming pump performance[J]. Journal of Drainage and Irrigation Machinery Engineering, 2010, 28(6): 474 ~ 478. (in Chinese)
 - 6 施卫东, 叶忠明, 刘建瑞. 一种新型射流式自吸泵进口流场的数值模拟[J]. 农业机械学报, 2006, 37(10): 50 ~ 52.
Shi Weidong, Ye Zhongming, Liu Jianrui. Numerical simulation of inlet flow of new-jetted self-priming pump[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2006, 37(10): 50 ~ 52. (in Chinese)
 - 7 Huang Si, Xue Dunsong. Three-dimensional calculation of gas-oil two-phase flow in helicon-axial booster-pump impeller[C] // Proceedings of the 1st International Conference on Engineering Thermophysics, 1999: 674 ~ 679.
 - 8 Muggli Felix A, Holbein Peter, Dupont Philippe. CFD calculation of a mixed flow pump characteristic from shutoff to maximum flow[J]. ASME Journal of Fluids Engineering, 2002, 124(3): 798 ~ 802.
 - 9 关醒凡. 现代泵理论与设计[M]. 北京: 宇航出版社, 2010.
 - 10 王彤, 谷传刚, 杨波, 等. 非定常流动的 PISO 算法[J]. 水动力学研究与进展, A 辑, 2003, 18(2): 233 ~ 239.
Wang Tong, Gu Chuangang, Yang Bo, et al. PISO algorithm for unsteady flow field [J]. Journal of Hydrodynamics, Ser. A, 2003, 18(2): 233 ~ 239. (in Chinese)
 - 11 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.

(上接第 42 页)

- 5 You-teak Kim, Kazuhiro Tanaka, Yoichiro Matsumoto. Tipclearance and bubble size of a screw-type centrifugal pump operating in two-phase flow[C] // Proceeding of ASME, 1999(7): 519 ~ 526.
- 6 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 and structure interaction on flow field in centrifugal pump[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2009, 40(12): 107 ~ 112. (in Chinese)
- 7 Benra F K, Dohmen H J. Comparison of pump impeller orbit curves obtained by measurement and FSI simulation[C] // ASME PVP2007-26149, 2007, 4: 41 ~ 48.
- 8 Kato C, Yamade Y, Wang Hong, et al. Prediction of the noise from a multi-stage centrifugal pump[C] // ASME FEDSM2005, 2005, 1(Part B): 1 273 ~ 1 280.
- 9 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)
- 10 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.
- 11 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.
- 12 张金凤, 徐宇平, 袁寿其, 等. 双叶片螺旋离心泵非定常压力脉动数值分析[J]. 农业机械学报, 2011, 42(12): 102 ~ 106.
Zhang Jinfeng, Xu Yuping, Yuan Shouqi, et al. Numerical analysis on pressure fluctuation of unsteady flow in double blade screw type centrifugal pump [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2011, 42(12): 102 ~ 106. (in Chinese)