

doi:10.6041/j.issn.1000-1298.2014.03.009

蜗壳式离心泵内部非定常数值计算与分析*

施卫东 徐磊 王川 陆伟刚 周岭

(江苏大学流体机械工程技术研究中心, 镇江 212013)

摘要: 为研究设计工况下蜗壳式离心泵内部瞬态流动的状态和规律,基于高质量结构化网格和快速成型技术,利用商业计算软件 CFX 对某型号蜗壳式离心泵进行了全流场非定常数值模拟。通过与定常数值模拟结果及试验结果比较,表明非定常数值模拟能够更为准确地预测蜗壳式离心泵的性能参数,其中扬程最大偏差在 4% 以内,效率最大偏差在 3% 以内。受叶轮-蜗壳耦合作用影响,蜗壳式离心泵内部压力脉动周期性明显,监测点压力脉动主频均为叶片通过频率。非定常下的压力场表明,各叶轮流道进口及中间位置的压力分布相近,靠近叶轮出口的压力分布差异明显;蜗壳内部存在明显的二次流动现象,并且随主流运动向前发展。

关键词: 蜗壳式离心泵 非定常 性能预测 流场分布 压力脉动

中图分类号: TH311 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1298(2014)03-0049-05

引言

由于蜗壳几何结构的非对称性,离心泵内部流动呈现出明显的非定常特性。叶轮和蜗壳间的动静干涉作用对水泵效率、机组稳定性、振动噪声等都有着直接影响^[1]。

近年来,随着计算流体动力学的不断发展,相关学者指出因叶轮、蜗壳相对位置不同,定常模拟结果与试验结果有较大差异。基于非定常理论的性能参数预测、压力脉动分析、机组过渡过程分析和振动分析等日渐成为研究的热点。

本文基于高质量结构化网格,对某型号蜗壳式离心泵在不同工况下进行非定常数值模拟,以分析该方法预测性能参数的可行性。同时,在设计点对内部脉动特性和流动规律也进行分析与探讨,以加深对瞬态流动特点的认识,为设计性能优良、运行稳定的泵类产品提供参考。

1 计算模型与计算网格

1.1 计算模型

选用蜗壳式离心泵的设计参数分别为:流量 $Q_d = 78 \text{ m}^3/\text{h}$,扬程 $H = 22 \text{ m}$,转速 $n = 2\,900 \text{ r/min}$ 。该泵比转数 $n_s = 153$,属于高比转数离心泵。该泵叶轮的主要几何参数为进口直径 $D_j = 90 \text{ mm}$,出口直径 $D_2 = 160 \text{ mm}$,出口宽度 $b_2 = 15.1 \text{ mm}$,进口安放角 $\beta_1 = 12.5^\circ$,出口安放角 $\beta_2 = 20^\circ$,叶片包角 $\varphi =$

120° ,叶片数 $Z = 6$ 。

离心泵口环处的容积泄漏损失和前后泵腔内的圆盘摩擦损失对内部流场及外部特性影响显著^[2],为了尽可能反映离心泵内部流动状态,本文采用 PTC 公司的 Pro/E 绘图软件进行全流场三维几何造型,并利用快速成型(RPM)技术对叶轮、蜗壳等部件进行制造加工,确保计算模型和试验样机的一致性。该模型的全流场计算域如图 1 所示。

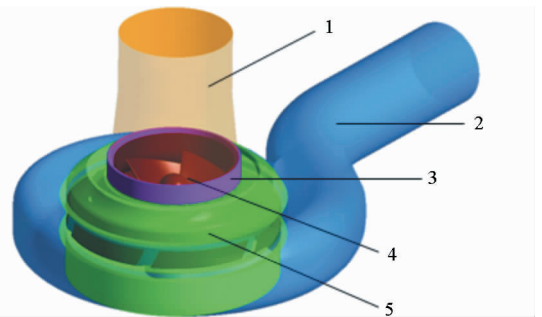


图 1 计算域

Fig. 1 Computational domain

1. 进口段 2. 蜗壳 3. 口环 4. 叶轮 5. 泵腔

1.2 计算网格

离心泵叶轮和蜗壳是能量转换的核心部件,其网格质量对数值模拟的可信度及准确性有着直接影响。叶轮和蜗壳几何造型复杂,采用自动生成的非结构网格很容易生成坏点,影响计算结果^[3]。本文采用 ICEM CFD 网格划分软件对整个计算域过流部件进行六面体结构网格划分,在交界面及壁面附近进行网格加密处理,合理控制边界层厚度及网格数

收稿日期: 2013-04-24 修回日期: 2013-05-28

* 国家自然科学基金资助项目(51279069)、江苏高校科研成果产业化推进项目(JHB 2012-38)和江苏高校优势学科建设工程资助项目

作者简介: 施卫东,教授,博士生导师,主要从事流体机械及工程研究,E-mail: wdshi@ujs.edu.cn

量。其中叶轮网格数为 568 062, 蜗壳网格数为 525 756, 泵腔网格数为 962 280, 进口段网格数为 248 080, 口环网格数为 30 020, 计算域网格总数约为 2.33×10^4 。数值模拟收敛精度达到 10^{-5} , 且收敛速度较快。图 2 所示分别为叶轮、蜗壳及蜗壳隔舌处的网格。

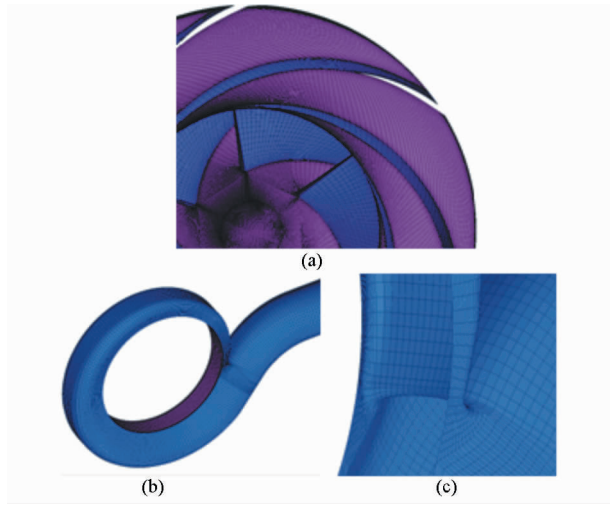


图 2 结构网格

Fig. 2 Structural grids

(a) 叶轮网格 (b) 蜗壳网格 (c) 蜗壳隔舌处网格

2 数值模拟方法

2.1 定常计算设置

进口边界设置为速度进口条件; 出口管路进行了适当延伸, 保证出口流态充分发展, 设置为自然出流条件; 固体壁面设置为无滑移条件; 动静转子间的交界面设置为“冻结转子”滑移界面进行全流场定常计算^[4]。过流部件表面根据加工精度分别设置粗糙度, 其中加工表面设置为 $12.5 \mu\text{m}$, 非加工表面设置为 $100 \mu\text{m}$ 。

2.2 非定常计算

在定常计算结果的基础上进行非定常计算。动静转子间的交界面采用“瞬态转子-定子”法代替“冻结转子”法。时间步长设置为 $1.724 \times 10^{-4} \text{ s}$, 每一步时间步长叶轮转过 3° 。当被监测参数呈现规律性的周期变化之后, 完成全流场的非定常运算。

为监测设计工况下蜗壳式离心泵内部压力脉动变化情况^[5-6], 在叶轮吸力面上从进口到出口分别设置点 S1、S2、S3 和 S4; 在叶轮压力面上相同半径处分别设置点 P1、P2、P3 和 P4; 在蜗壳上从隔舌位置开始在蜗壳横断面中心点处分别设置点 0、1、2、...、8 共 9 个点。如图 3 所示。

3 计算结果与分析

3.1 性能预测及试验测试

为验证非定常模拟方法的准确性, 对该蜗壳式

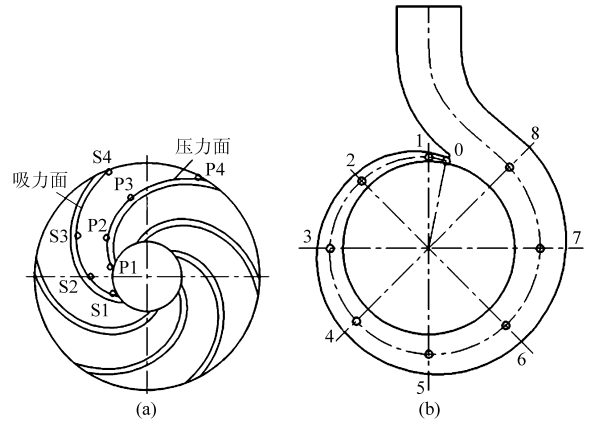


图 3 中截面内的监测点布置

Fig. 3 Positions of monitoring points in mid-span section

(a) 叶轮流道内监测点位置 (b) 蜗壳流道内监测点位置

离心泵在 $0.65Q_d$ 、 $0.85Q_d$ 、 $1.0Q_d$ 、 $1.1Q_d$ 、 $1.3Q_d$ 及 $1.4Q_d$ 流量下进行性能预测并进行外特性试验。试验系统如图 4 所示。

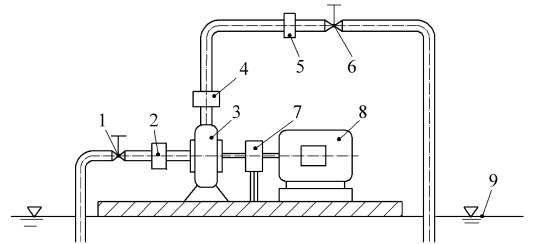


图 4 试验系统示意图

Fig. 4 Schematic diagram of experiment system

1. 入口调节阀 2. 真空表 3. 试验泵 4. 压力表 5. 涡轮流量传感器 6. 流量调节阀 7. 转速扭矩仪 8. 电动机 9. 试验水池

将得到的试验结果与两种计算方法下的性能预测结果进行对比分析, 其扬程和效率曲线分别如图 5 所示。

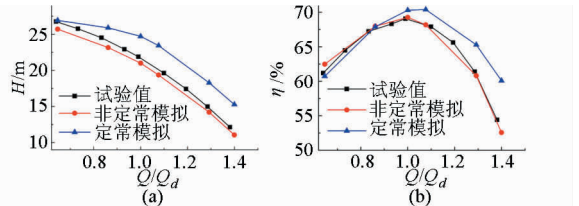


图 5 模拟数据与试验数据对比

Fig. 5 Comparisons of pump performance between calculation and test

(a) 流量-扬程曲线 (b) 流量-效率曲线

试验结果表明, 非定常模拟得到的性能曲线与试验得到的性能曲线在模拟范围内吻合较好, 趋势一致。在模拟区间内扬程最大偏差小于 4%, 效率最大偏差小于 3%, 表明非定常数值模拟可以准确地预测离心泵的性能参数, 确保了进一步分析的准确性。

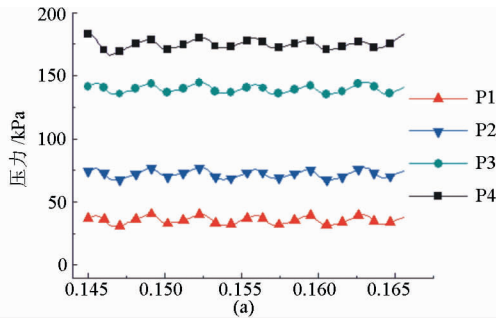
定常模拟得到的性能曲线与试验得到的性能曲线相差较大, 在设计点扬程偏差达到 12%。同时其

效率偏差随着流量增加而不断增大,在大流量工况点偏差达到 10%。由此可见,通过单一相位的定常模拟方式在预测离心泵性能方面尚存在较大误差,虽然可以人为调整相位角进行多次模拟,但过程繁琐复杂,在工程应用中不利于批量自动化作业^[7]。

3.2 压力脉动分析

3.2.1 叶轮内部压力脉动

图 6 所示为设计工况下叶片压力面和吸力面各



监测点的压力脉动时域图。可以看出,叶片表面的静压均值从叶片前缘到后缘不断增大;相同半径处压力面的静压均值明显高于吸力面的静压均值。各点压力脉动特性明显,在一个周期内出现了 6 次波峰及波谷。相比叶轮流道出口而言,叶轮流道进口及中间位置的的压力脉动更具有规律性。由于离心泵 6 个叶片对称布置,当叶轮转过 60°,流场刚好变化一个周期^[8]。图 7 所示为叶轮转过 60°过程中,不同时刻叶轮流道静压分布云图。

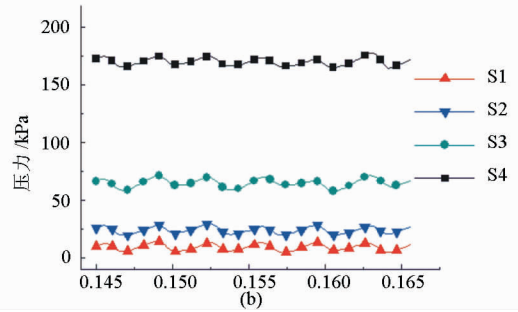


图 6 叶轮流道压力脉动时域图

Fig. 6 Pressure fluctuation in impeller flow passage

(a) 压力面 (b) 吸力面

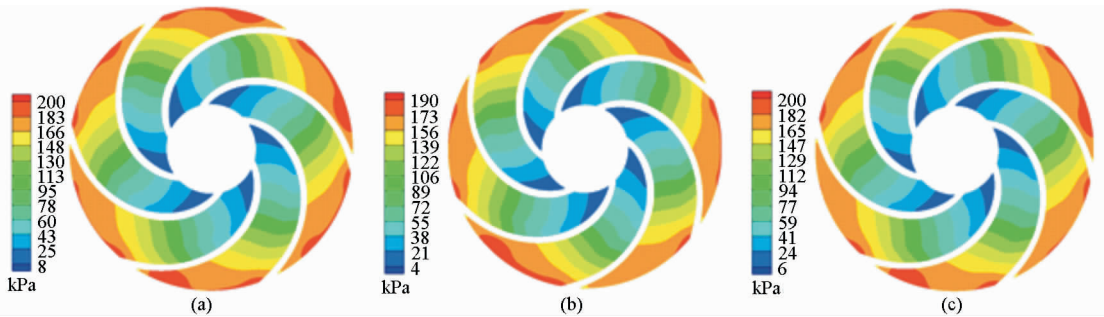


图 7 叶轮流道静压分布云图

Fig. 7 Static pressure distribution in impeller flow passage

(a) 0.144 827 s (b) 0.146 551 s (c) 0.148 103 s

从图 6 及图 7 分析可知,在设计工况下任一时刻叶轮流道进口及中间位置压力分布相似,而在流道出口处压力分布差异明显。这表明设计工况下叶轮流道出口处受到动静耦合干扰比较强烈,随着半

径的减小流道壁面约束作用增强,进而呈现较均匀的压力分布。

对时域图进行傅里叶变换(FFT)得到压力脉动频域图,图 8 为叶轮流道压力脉动频域图。从图中

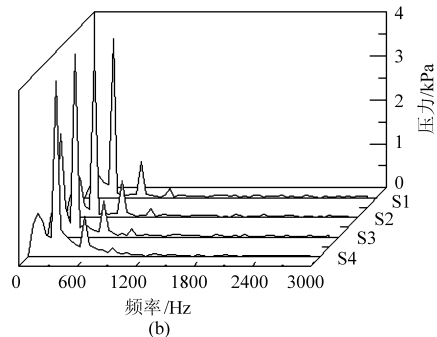
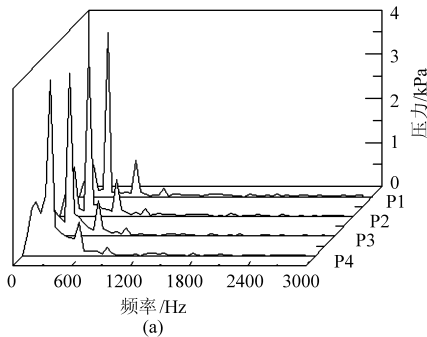


图 8 叶轮流道压力脉动频域图

Fig. 8 Frequency spectra of pressure fluctuations in impeller passage

(a) 压力面 (b) 吸力面

可以看出,叶轮流道内没有出现明显的高频压力脉动。流道内各点压力脉动最大幅值都出现在叶片通过频率 $f=290\text{ Hz}$ 处,该值为叶轮转频 48.3 Hz 与叶片数 6 的乘积。

3.2.2 蜗壳内部压力脉动

图9所示为设计工况下蜗壳内部各个断面监测点的压力脉动时域图,可以发现断面上的各点也存在6个明显的波峰和波谷。隔舌附近位置处的静压均值较小,远离隔舌位置处的静压均值较大。由于受到叶轮出口处的射流-尾迹作用及蜗壳断面几何形状影响,脉动波形之间差异明显,在隔舌附近位置处的压力波动最为剧烈,远离隔舌位置处的压力波动相对较为平缓。图10所示为各点压力脉动频域图,可以看出蜗壳断面各点的压力脉动同样在叶片通过频率 $f=290\text{ Hz}$ 处幅值最大。

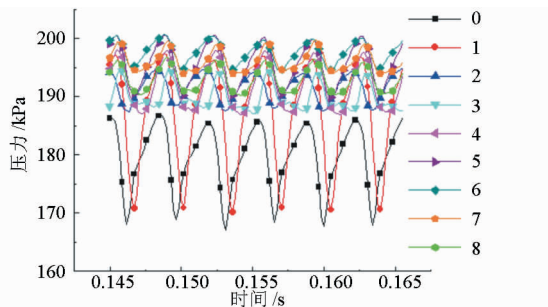


图9 蜗壳内压力脉动时域图

Fig.9 Pressure fluctuation in casing flow passage

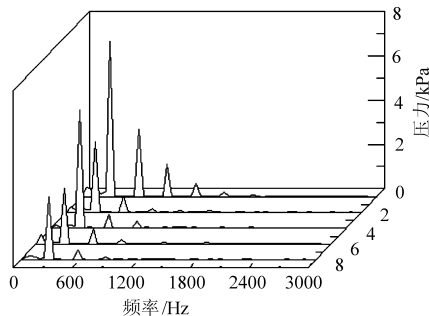


图10 蜗壳内压力脉动频域图

Fig.10 Frequency spectra of pressure fluctuations in casing flow passage

图11所示为不同时刻蜗壳断面上压力及速度分布。可以看出,在全流场下蜗壳内部静压分布呈明显不对称性,最大静压均出现在蜗壳壁面。蜗壳断面上存在明显的二次流动现象,在断面3、断面5及断面7上可以看到其内部存在两个完整的、方向相反的旋涡,其中靠近蜗壳前侧的旋涡区域较小,靠近蜗壳后侧的旋涡区域较大,并且在蜗壳进口边靠近前侧位置存在明显的回流现象。断面上压力大小随时间变化明显,但蜗壳内部旋涡的中心-涡核位置基本保持不变。这表明蜗壳内部压力由于受动静干涉作用变化明显,但同时受蜗壳壁面几何作用影响,使其内部流动形态相对较为稳定。

4 结论

(1) 蜗壳式离心泵内部流动具有明显的非定常

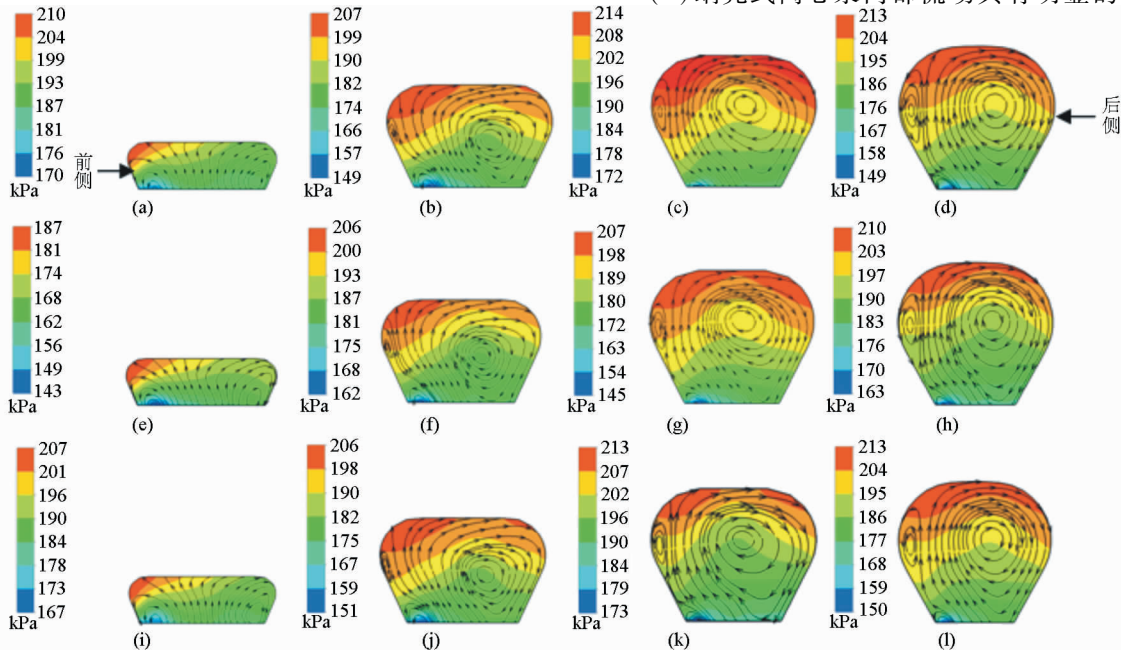


图11 蜗壳断面压力和速度分布

Fig.11 Pressure and velocity distributions of the volute section

- (a) 0.144 827 s, 断面1
- (b) 0.144 827 s, 断面3
- (c) 0.144 827 s, 断面5
- (d) 0.144 827 s, 断面7
- (e) 0.146 551 s, 断面1
- (f) 0.146 551 s, 断面3
- (g) 0.146 551 s, 断面5
- (h) 0.146 551 s, 断面7
- (i) 0.148 103 s, 断面1
- (j) 0.148 103 s, 断面3
- (k) 0.148 103 s, 断面5
- (l) 0.148 103 s, 断面7

周期特点,全流场非正常数值计算能够较为准确地预测离心泵的外特性及捕捉泵体内部三维流动的细节特征。

(2)在设计工况下,叶轮和蜗壳内部都呈现出明显的周期脉动特性,脉动频率为叶片通过频率。蜗壳内部压力波动在隔舌偏向旋转方向附近的一段区域内最为剧烈,远离隔舌的断面压力波动幅度相

对较小。

(3)设计工况下,蜗壳式离心泵动静干涉作用对叶轮流道内部压力分布的干扰强度从出口到进口逐渐减弱。蜗壳内除了沿旋转方向的主流运动外还伴随着明显的二次流动,其涡核位置不随断面压力变化而发生明显改变。

参 考 文 献

- 1 Spence R, Amaral J. A CFD parametric study of geometrical variations on the pressure pulsations and performance characteristics of a centrifugal pump [J]. *Computer & Fluids*, 2009, 38(6): 1243 - 1257.
- 2 关醒凡. 现代泵理论与设计[M]. 北京: 中国宇航出版社, 2011.
- 3 袁寿其, 何有世, 黄良勇, 等. 带分流叶片的离心泵叶轮三维贴体网格生成[J]. *农业机械学报*, 2004, 35(6): 69 - 71.
Yuan Shouqi, He Youshi, Huang Liangyong, et al. 3-D body-fitted grid generation of centrifugal pump impeller with splitting vanes [J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2004, 35(6): 69 - 71. (in Chinese)
- 4 王福军. 计算流体动力学分析[M]. 北京: 清华大学出版社, 2004.
- 5 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 of centrifugal pumps [J]. *Journal of Drainage and Irrigation Machinery Engineering*, 2012, 30(3): 260 - 264. (in Chinese)
- 6 王洋, 代翠. 离心泵内部不稳定流场压力脉动特性分析[J]. *农业机械学报*, 2010, 41(3): 91 - 95.
Wang Yang, Dai Cui. Analysis on pressure fluctuation of unsteady flow in a centrifugal pump [J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2010, 41(3): 91 - 95. (in Chinese)
- 7 王洋, 代翠. 低比转数离心泵多相位定常全三维数值模拟[J]. *农业机械学报*, 2009, 40(11): 89 - 93.
Wang Yang, Dai Cui. 3-D numerical simulation for low specific-speed centrifugal pump with multi-phase position [J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2009, 40(11): 89 - 93. (in Chinese)
- 8 张韬, 张淑佳, 毛鹏展, 等. 定常多相位方法与非定常方法用于离心泵数值模拟的比较研究[J]. *浙江工业大学学报*, 2009, 37(6): 644 - 647.
Zhang Tao, Zhang Shujia, Mao Pengzhan, et al. A numerical study of centrifugal pump using unsteady method compared with steady multi-phase position method [J]. *Journal of Zhejiang University of Technology*, 2009, 37(6): 644 - 647. (in Chinese)
- 9 王福军, 黎耀军, 王文娥, 等. 水泵 CFD 应用中的若干问题与思考[J]. *排灌机械*, 2005, 23(5): 1 - 10.
Wang Fujun, Li Yaojun, Wang Wen'e, et al. Analysis on CFD application in water pumps [J]. *Drainage and Irrigation Machinery*, 2005, 23(5): 1 - 10. (in Chinese)
- 10 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)
- 11 Yuan Shouqi, Ni Yongyan, Pan Zhongyong, et al. Unsteady turbulent simulation and pressure fluctuation analysis for centrifugal pumps [J]. *Chinese Journal of Mechanical Engineering*, 2009, 22(1): 64 - 69.
- 12 施卫东, 汪永志, 孔繁余, 等. 旋流泵无叶腔内部流场数值模拟[J]. *农业工程学报*, 2005, 21(9): 72 - 75.
Shi Weidong, Wang Yongzhi, Kong Fanyu, et al. Numerical simulation of internal flow field within the volute of vortex pump [J]. *Transactions of the CSAE*, 2005, 21(9): 72 - 75. (in Chinese)
- 13 Spence R, Amaral J. Investigation into pressure pulsations in a centrifugal pump using numerical methods supported by industrial tests [J]. *Computer & Fluids*, 2008, 37(6): 690 - 704.
- 14 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]. *Journal of Drainage and Irrigation Machinery Engineering*, 2011, 42(7): 66 - 69. (in Chinese)
- 15 Shi Weidong, Wang Chuan, Lu Weigang, et al. Optimization design of stainless steel stamping multistage pump based on orthogonal test [J]. *International Journal of Fluid Machinery and System*, 2010, 3(4): 309 - 314.
- 16 Shojaeefard M H, Tahani M, Eshghaghi M B, et al. Numerical study of the effects of some geometric characteristics of a centrifugal pump impeller that pumps a viscous fluid [J]. *Computers & Fluids*, 2012, 60: 61 - 70.
- 17 Pavese G, Cavazzini G, Ardizzon G. Time-frequency characterization of the unsteady phenomena in a centrifugal pump [J]. *International Journal of Heat and Fluid Flow*, 2008, 29(5): 1527 - 1540.

Numerical Simulation and Testing Analysis of Three Dimensional Turbulence Flow in Flow-ejecting Self-priming Centrifugal Pump

Wang Weijun Wang Yang Li Guidong Yin Gang Cao Puyu

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

Abstract: In order to gain the inner flow field of flow-ejecting self-priming centrifugal pump, a flow-ejecting self-priming centrifugal pump equipped with a jet in the front of impeller inlet was chosen as the study object. The geometric model including all parts was built up by Pro/E software. The turbulence model chosen was RNG $k-\varepsilon$ turbulence model and the mesh independence was checked by six meshes with different grid number. The external performances and the inner flow fields under seven different working conditions were simulated by CFX 14.0. The profiles, such as static pressure and velocity, were obtained. Then, the numerical results were compared with the testing results gotten on open test bed. The results show that the errors of head, shaft power and efficiency between the simulation and the testing under designed condition are 2.63%, 6.16% and 14.29%, respectively. The simulating and the testing power curves are almost horizontal lines and change slowly when the flow rate is smaller than $3.5 \text{ m}^3/\text{h}$. The absolute velocity distribution between the nozzle and the line segment is axial symmetry. However, between the diffusion section and the impeller inlet, the upper velocity is larger than the lower velocity. And the velocity of the flow entering the impeller inlets is not uniform. The location, $L = 0.148 \text{ m}$, is a critical location where the static pressure is the smallest and the turbulence dissipation rate achieves its maximum value. The numerical results provide a directly theoretical guideline for the pump design.

Key words: Flow-ejecting self-priming centrifugal pump Performance prediction Numerical simulation

(上接第 53 页)

Numerical Calculation and Analysis of Inner Unsteady Flow for Volute Centrifugal Pump

Shi Weidong Xu Lei Wang Chuan Lu Weigang Zhou Ling

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

Abstract: In order to study the flow characteristics in centrifugal pump at design condition, the inner unsteady flow was simulated based on high-quality structured grid and rapid prototyping technology by using the commercial software CFX. The results indicate that the method of unsteady numerical simulation can accurately predict the performance parameters of the centrifugal pump with the test. The maximum deviation of head and efficiency are less than 4% and 3%, respectively. Impacted by the impeller-volute coupling, the pressure pulsation in volute centrifugal pump has strong periodicity, and the basic frequency is the blade passing frequency. There is a similar pressure field between the impeller passage inlet and the middle of impeller passage, but the pressure distribution near the impeller outlet has a significant difference. Significant secondary flow phenomena exist in the volute and move forward with the mainstream.

Key words: Volute centrifugal pump Unsteady flow Performance prediction Flow field distribution Pressure fluctuation