doi:10.6041/j.issn.1000-1298.2016.02.004

导叶与隔舌相对位置对离心泵叶轮径向力的影响

江　伟　朱相源　李国君　刘鹏飞

(西安交通大学热流科学与工程教育部重点实验室, 西安 710049)

摘要: 采用 SST 模型对不同导叶与隔舌相对位置下的离心泵进行非定常数值模拟,并通过试验验证,其试验与模拟的效率与扬程误差均在 5% 以内。分析表明:当导叶叶片与蜗壳隔舌安装角度 α 为 25°时,在各个流量工况下,其扬程与效率均高于其他安装位置,当 α 为 5°时,其效率与扬程最小;当流量 Q 为 24、32 m^3/h 时,最大与最小效率差值分别为 1%、1.4%,流量 Q 为 40、48、56 m^3/h 时,其差值分别为 2.2%、2.4%、4.5%;叶轮出口圆周速度随着时间步的不同而改变,导致作用于叶轮上径向力矢量呈现出较不规则的分布;导叶与隔舌不同相对位置对径向力的影响主要在于其对叶轮出口圆周方向静压的影响,从而导致出口静压不对称,进而影响叶轮径向力;当 α 为 41°和 25°时,叶轮出口圆周方向静压对称性明显好于其他相对位置,且其径向力小于 α 为 5°和 59°时径向力。

关键词: 离心泵; 径向力; 相对位置; 数值模拟

中图分类号: TH311　　**文献标识码**: A　　**文章编号**: 1000-1298(2016)02-0028-07

Influence of Relative Installation Positions of Guide Vane and Volute Tongue on Radial Force in Centrifugal Pump

Jiang Wei　Zhu Xiangyuan　Li Guojun　Liu Pengfei

(*Key Laboratory of Thermal Fluid Science and Engineering*, *Ministry of Education*, *Xi'an Jiaotong University*, *Xi'an* 710049, *China*)

Abstract: The unsteady numerical simulation of centrifugal pump using SST model was conducted under different relative installation positions of guide vane and tongue. The errors of efficiency and head between test and simulation were within 5%. Investigation results showed that when the guide vane and volute tongue installation angle α was 25°, the head and efficiency were higher than those at other installation positions under various operating conditions. The minimal efficiency and head were occurred at α of 5°. When the flow rate Q was 24 m^3/h and 32 m^3/h, the maximum and minimum efficiencies differences were 1% and 1.4%, respectively; when Q was 40 m^3/h, 48 m^3/h and 56 m^3/h, the differences of the maximum and minimum efficiencies were 2.2%, 2.4% and 4.5%, respectively. The velocity at impeller outlet changed with different time steps, which caused the radial force vectors acting on the impeller appeared much irregular distribution. The influence of different relative installation positions of guide vane and tongue on the radial force was mainly attributed to its influence on the static pressure at impeller outlet which led to asymmetric output of static pressure, and affected the impeller radial force. When α was 41° and 25°, the symmetry of the impeller outlet static pressure was significantly better than those of other relative positions, and the radial force was smaller than those at α of 5° and 59°. When volute tongue apart gradually closed to guide vane, the efficient and head of pump were lower. The highest efficient and head occurred when volute tongue was in middle of two vane, which can be a guidance to engineering practice.

Key words: centrifugal pump; radial force; relative position; numerical simulation

收稿日期: 2015-07-08　修回日期: 2015-08-04

基金项目: 国家自然科学基金项目(51076126)

作者简介: 江伟(1985—),男,博士生,主要从事流体机械优化设计研究,E-mail: iiibing@126.com

通信作者: 李国君(1963—),男,教授,博士生导师,主要从事叶轮机械优化设计研究,E-mail: liguojun@mail.xjtu.edu.cn

引言

扩压器广泛应用于泵、透平机械及压缩机等叶片式旋转机械。在多级离心泵中，叶片式扩压器主要作用是将流体动能转换成压力能，而在单级离心泵中，叶片式扩压器主要减小作用于叶轮上的径向力。离心泵发生泵轴和密封环损坏等主要原因是作用在叶轮上的径向力过大。杨敏等[1]采用数值模拟方法对双蜗壳离心泵径向力进行了研究，结果表明：在设计工况及大流量下，压力脉动频率以叶片通过频率为主，在小流量下以叶轮转频为主，且因动静干涉影响，其径向力呈现周期性分布。黄思等[2]通过数值模拟方法对单级离心泵内部流场非对称性进行了研究，发现离心泵内部流动不对称是产生径向力的主要原因。祝磊等[3]采用数值模拟方法对带有不同形式隔舌的离心泵进行了研究，发现阶梯型隔舌离心泵进出口压力值及脉动幅值减弱，高频脉动成分减小，作用于蜗壳上的径向力数值和脉动幅值也减小。此外张帆等[4]、任芸等[5]、周佩剑等[6]也分别对离心泵运行时的压力特性做了 PIV 分析及数值分析。

导叶和隔舌相对位置的变化会影响下游内部流场，进而影响离心泵水力性能，这种现象在压缩机中被称为时序效应，在压缩机与透平机械中被广泛关注，在泵中研究较少。刘厚林等[7]针对比转数为 135 的离心泵，采用 CFD 方法研究时序效应对内部流动特性的影响，结果表明在不同的导叶与隔舌相对位置下，泵的外特性、压力脉动、径向力均有较大影响。王文杰等[8]对一台环形蜗壳离心泵的时序效应展开 CFD 分析，结果表明，时序效应对叶轮与导叶动静干涉引起的压力脉动影响较大，对蜗壳平面的压力脉动强度影响较为明显。Feng 等[9-11]和 Gaetani 等[12]采用 CFD 软件及内流测试技术研究了带有叶片式扩压器的离心泵内部流场，结果表明：在设计工况与非设计工况下，泵运行时存在的部分湍流现象是由叶轮与扩压器的动静干涉产生的。因离心泵中时序效应的研究较少，故借助压缩机和透平机械中的研究方法[13-17]，对离心泵时序效应展开研究。

本文采用 CFD 数值分析软件（ANSYS－Fluent）对不同导叶与隔舌相对位置下的离心泵进行稳态与瞬态数值分析，重点研究瞬态情况下，不同导叶时序位置对离心泵径向力的影响。

1　几何模型

单级离心泵比转数为 52，设计流量 40 m^3/h，扬程 60 m，转速 2 900 r/min，叶轮出口直径 223 mm，叶片高度 8 mm，叶片数 6；导叶进口直径 228 mm，出口直径 283 mm，叶片数 5；蜗壳进口宽度 19 mm，基圆直径 284 mm。图 1 为单级离心泵的几何模型。

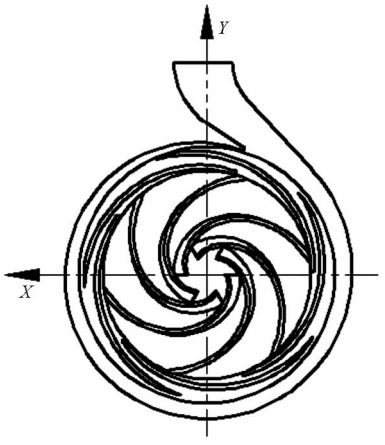

图 1　几何模型

Fig. 1　Geometric model

在数值模拟计算中，选取 4 种不同方案，即扩压器沿顺时针方向分别旋转 45°、90°和 180°，其导叶与隔舌相对安装角 α 分别为 5°、59°和 25°，其中当 $\alpha=41°$时为原始安装位置，如图 2 所示。

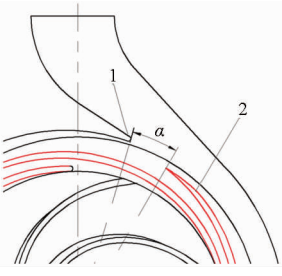

图 2　不同的导叶安放位置

Fig. 2　Different installation positions of guide vane

1. 隔舌　2. 导叶

图 3 为试验模型离心泵。导叶叶片与蜗壳隔舌不同安装角通过销孔来调节。离心泵采用有机玻璃快速成型制造，因叶轮、导叶、泵体等过流部件材料强度有限，故试验在转速 1 450 r/min 下进行，测试结果通过相似换算得到转速在 2 900 r/min 时外特性。转速采用扭矩传感器测量，其测量精度为 ±0.2%；流量采用电磁流量计测量，其测量精度为 ±0.5%；离心泵进出口压力采用压力传感器测量，



图 3　试验台

Fig. 3　Test bench

其测量精度为 ±0.075%。

2 数值模拟

2.1 湍流模型和网格生成

为得到相对稳定的流场,将进出口流动区域延长为管道直径的 5 倍。计算网格由 ICEM 软件生成,采用边界适应性强的非结构化四面体网格对计算域进行网格划分,如图 4 所示。湍流模型采用 SST 模型。稳态计算边界条件:进口边界条件设为质量流量进口,出口为压力出口,壁面条件为无滑移。



图 4 三维模型及网格划分

Fig. 4 3D model and structured mesh

瞬态计算时,以稳态计算结果为初始条件,叶轮每转过 3°为一时间步,其时间步长取 $1.724\,1\times10^{-4}$ s,一个周期迭代 120 步,迭代 6 个周期。

2.2 网格无关性分析

在设计工况下,针对模型泵($\alpha=41°$)选取 4 种不同的网格尺寸进行数值模拟,其结果如表 1 所示,当网格数达 480 万时,继续增加网格数,其模型泵扬程与效率变化较小,因此选取 Grid 3 对其进行数值模拟,网格数:进口段 275 321,叶轮 1 379 712,前后泵腔 537 327,导叶 886 219,蜗壳 1 466 078,出口段 267 836。

表 1 网格无关性分析

Tab. 1 Grid independence analysis

参数	Grid 1	Grid 2	Grid 3	Grid 4
网格数	1 987 625	3 364 560	4 812 493	6 078 259
效率/%	71.50	72.32	72.89	73.01
扬程/m	71.80	72.60	72.90	73.03

2.3 数值模拟验证

对 4 种不同导叶安装位置下的离心泵进行试验,并与数值模拟进行对比。图 5(图中 Q 为实际流量,Q_{des} 为设计流量)为不同导叶安装位置下,外特性试验与模拟值。由图可知,4 种方案下外特性曲线相似;在设计流量工况下,$\alpha=41°$ 时,总扬程的模拟误差为 4.2%,效率误差为 2.1%,模拟值略大于试验值。在 $0.6Q_{des}$ 流量工况时,扬程模拟值小于试验值,产生此现象主要原因是由回流、非定常剧烈湍流引起;在其他流量工况下,其误差主要是由模拟时

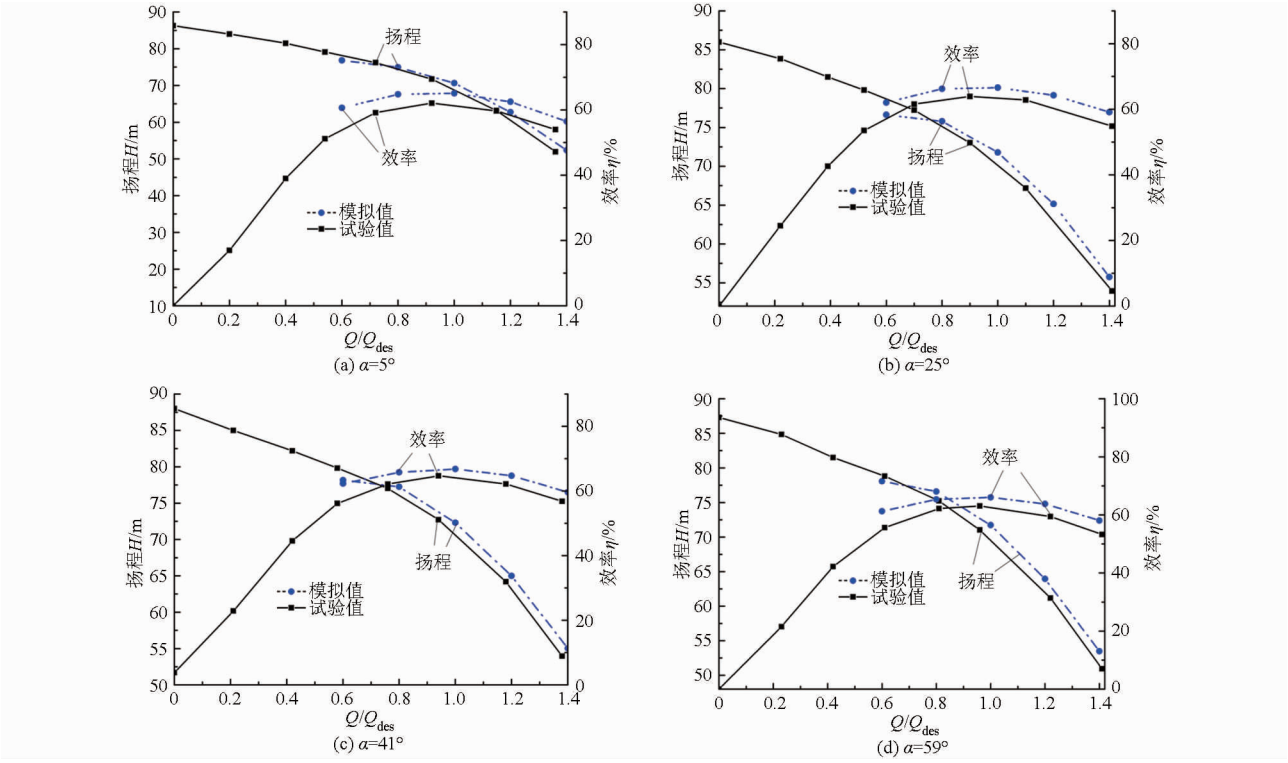

图 5 不同导叶安放位置下的试验值与模拟值比较

Fig. 5 Comparison of numerical and test results under different guide vane installation positions

忽略平衡孔和机械损失引起。对比试验与数值模拟外特性结果可知，网格离散和湍流模型的选择在带叶片扩压器离心泵的数值模拟中是可靠的，数值预测与试验结果较吻合。

图 6 为不同流量下，导叶与隔舌不同相对位置对离心泵外特性数值模拟的对比。结果表明，当顺时针旋转导叶时，离心泵扬程与效率先增后减再增；最大与最小效率差值随着流量增加而增加，当流量 Q 为 24、32 m^3/h 时，最大与最小效率差值分别为 1%、1.4%，流量 Q 为 40、48、56 m^3/h 时，其差值分别为 2.2%、2.4%、4.5%。当导叶叶片与蜗壳隔舌安装角度 $\alpha=25°$ 时，在各个流量点下，其扬程与效率均高于其他安装位置，当 $\alpha=5°$ 时，各个流量工况下，效率与扬程最小。

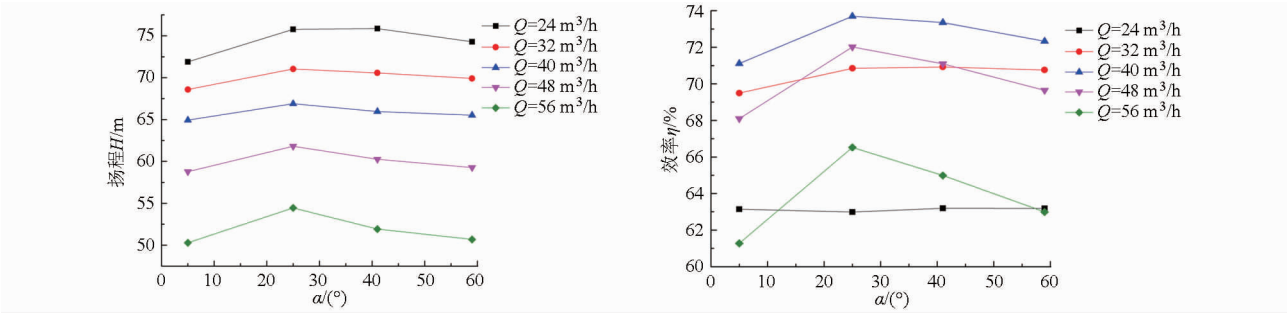

图 6　不同流量下不同导叶安放位置下离心泵外特性对比

Fig. 6　External characteristic comparison of centrifugal pump under different guide vane positions and flows

3　非定常径向力

在 CFD 计算中，径向力计算式为[18]

$$F_x=\iint_{A_2}V_x\rho V_r\mathrm{d}A-\iint_{A_1}V_x\rho V_r\mathrm{d}A-\rho\frac{\partial}{\partial t}\int_V\mathrm{d}QV_x-\iint_{A_2}\cos(\theta+\omega t)p(r_2,\theta)\mathrm{d}A \tag{1}$$

$$F_y=\iint_{A_2}V_y\rho V_r\mathrm{d}A-\iint_{A_1}V_y\rho V_r\mathrm{d}A-\rho\frac{\partial}{\partial t}\int_V\mathrm{d}QV_y-\iint_{A_2}\cos(\theta+\omega t)p(r_2,\theta)\mathrm{d}A \tag{2}$$

$$F=\sqrt{F_x^2+F_y^2} \tag{3}$$

式中　F——径向力合力

A_1、A_2——叶轮进、出口过流面积

V_T——叶轮某一节点处流体质点的径向速度

V_x、V_y——x、y 方向分速度

ω——旋转角速度

θ——流体质点初始角度

t——时间　　ρ——流体密度

p——压力

式中右边前两项表示叶轮内部动量静流量；第三项表示叶轮内部动量随时间的变化率；最后一项为出口压力在 y 方向分量，故式中无进口压力项。

图 7 给出当 $\alpha=41°$ 时，在设计工况下，不同时刻叶轮出口（$D_2=223$ mm）圆周方向动量通量分布，其中 M_x、M_y 分别为 X 方向动量、Y 方向动量；PS 和 SS 分别为压力面和吸力面。由图可知，不同时刻下，沿 X 与 Y 方向动量最小，位于叶轮吸力面处，且压力面处动量大于吸力面；因导叶前缘及动静干涉影响，叶轮出口圆周方向动量分布不均，即对称性较差，由此导致作用于叶轮上径向力的产生。动量大小和方向随流动时间的变化而变化，表明作用于叶轮上径向为交变力。

图 8 为不同导叶安装位置时，叶轮径向力矢量分布。结果表明：相同导叶安装位置，不同流量下，径向力的大小和方向时刻在改变，且分布不规则，产

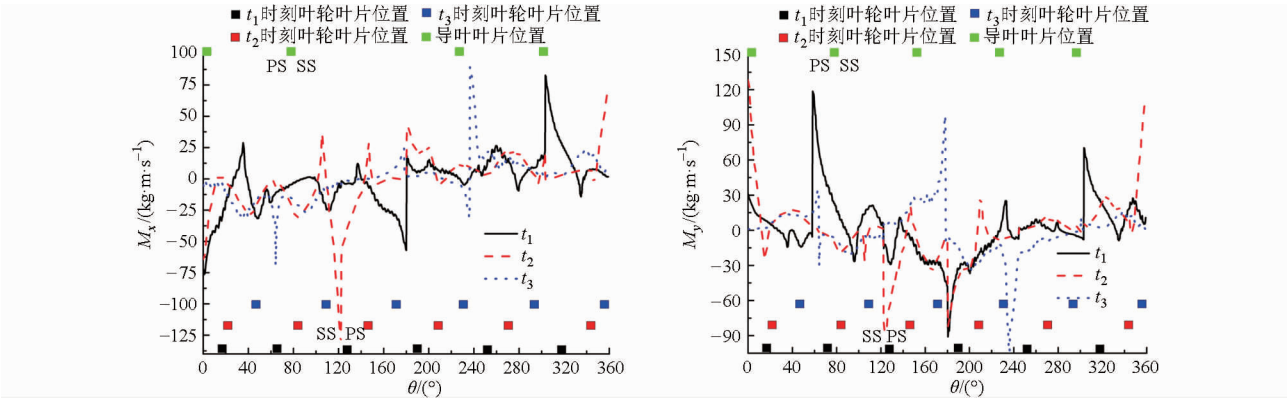

图 7　不同时间步叶轮出口处 X 和 Y 方向动量通量的圆周分布

Fig. 7　Circumferential distributions of momentum flux in impeller outlet in X and Y directions at different time steps

生此现象主要原因是非定常流场中动量净流量和压力在叶轮中分布不均匀,且径向力矢量变化与叶轮出口流体的速度大小与方向有关[15]。图 9 为设计流量下,当 $\alpha=41°$时,不同时刻相对速度与绝对速度分布。由图可知,随着叶轮的转动,其绝对速度与相对速度的大小与方向都在变化,因此可间接表明作用于叶轮上的径向力是非定常变化,即其大小与方向时刻在改变。

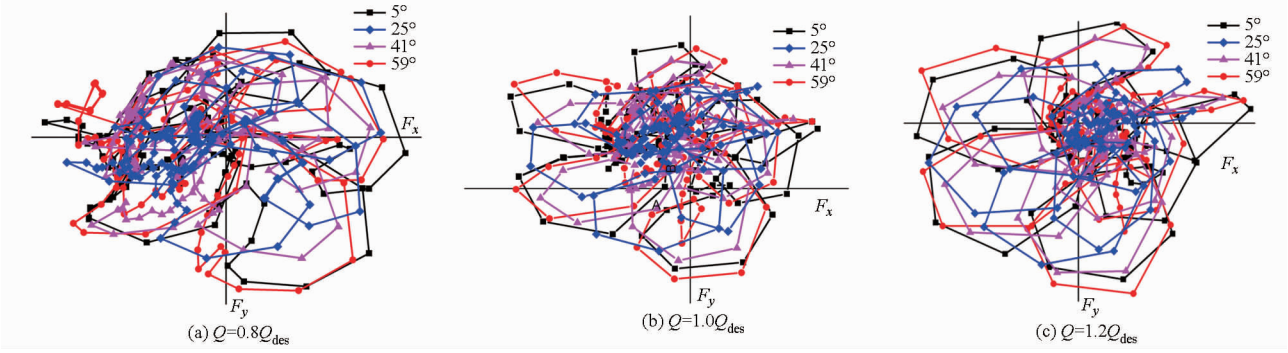

图 8 叶轮径内部向力矢量图

Fig. 8 Vector diagram of unsteady radial force acting on impeller

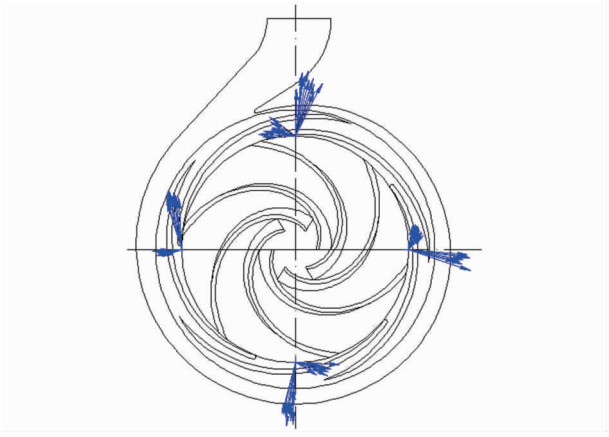

图 9 设计流量下 $\alpha=41°$时绝对速度与相对速度矢量分布

Fig. 9 Distributions of absolute and relative velocities under design flow

图 10 为不同流量,不同导叶安装位置时,作用于叶轮上非定常径向力合力分布。在 CFD 计算过程中,径向力包括压力和粘性力。由图可知,在 Q_{des} 和 1.2Q_{des}流量工况时,径向力具有较好的周期性;在 0.8Q_{des}流量工况时,由于剧烈的湍流运动,周期性较差,且径向力合力随流量的增加而增加。导叶与隔舌相对位置对径向力具有较大影响,当 $\alpha=41°$和 $\alpha=25°$时,作用于叶轮上径向力小于 $\alpha=5°$和 $\alpha=59°$时作用于叶轮上径向力。

图 11 与图 12 分别为 t_1、t_2、t_3时刻下,叶轮出口(D_2=223 mm)圆周方向静压与速度分布。不同时刻时,叶轮出口圆周方向静压分布不均匀,尤其在 t_3 时刻,表明作用于叶片上的径向力合力逐渐变大(图 10b)。不同导叶时序位置时,叶轮出口圆周方向径向速度和周向速度分布类似,间接表明其圆周方向速度分布对径向力合力影响较小。当 $\alpha=25°$时,叶轮圆周方向静压分布比其他安装位置静压分布更均匀,即径向力合力较小;然而,叶轮圆周方向切向速度和径向速度分布与其他导叶位置下速度分布近似,表明相对位置对径向力合力影响主要是受叶轮出口不均匀静压影响,其速度影响较小。

4 结论

(1)当蜗壳隔舌逐渐靠近导叶叶片时,离心泵的扬程与效率逐渐降低,而隔舌位于两导叶叶片之间时,泵的效率与扬程最大,如在设计流量工况下,$\alpha=25°$时,其扬程和效率较 $\alpha=5°$时分别高 1.2 m 和 2.3%。

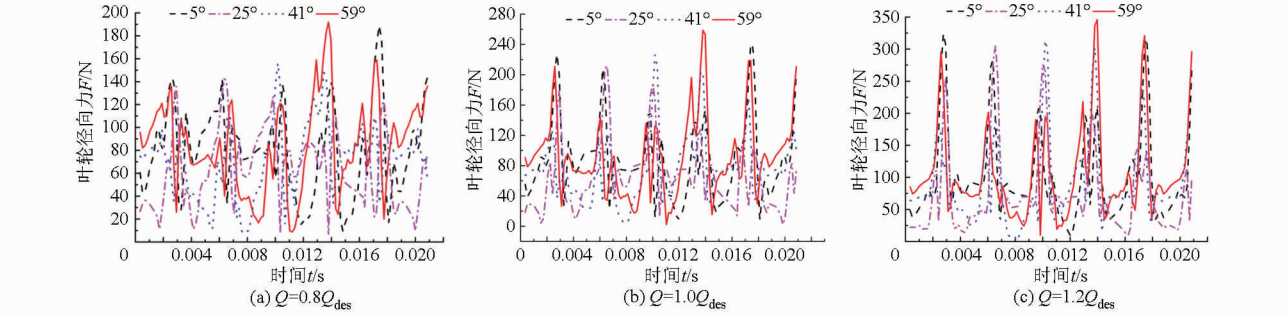

图 10 不同工况下叶轮径向力

Fig. 10 Radial force imposed on impeller under different conditions

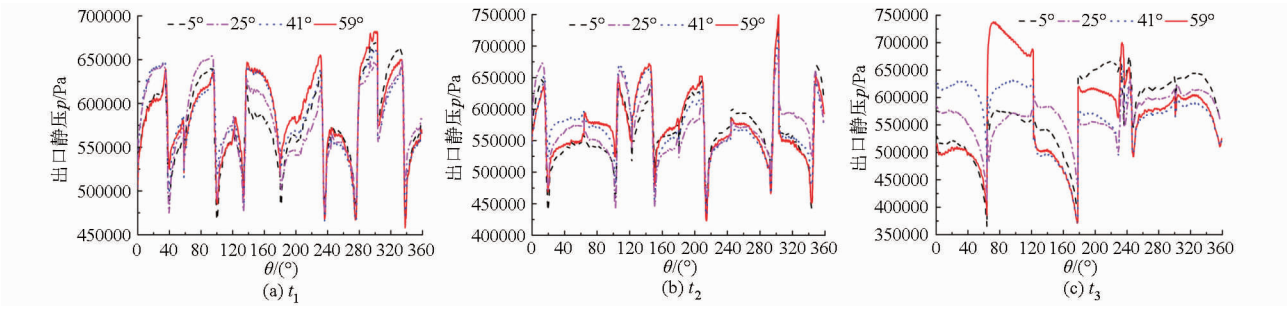

图 11　不同时间步下叶轮出口处静压波动

Fig. 11　Static pressure fluctuations at impeller outlet under different time steps

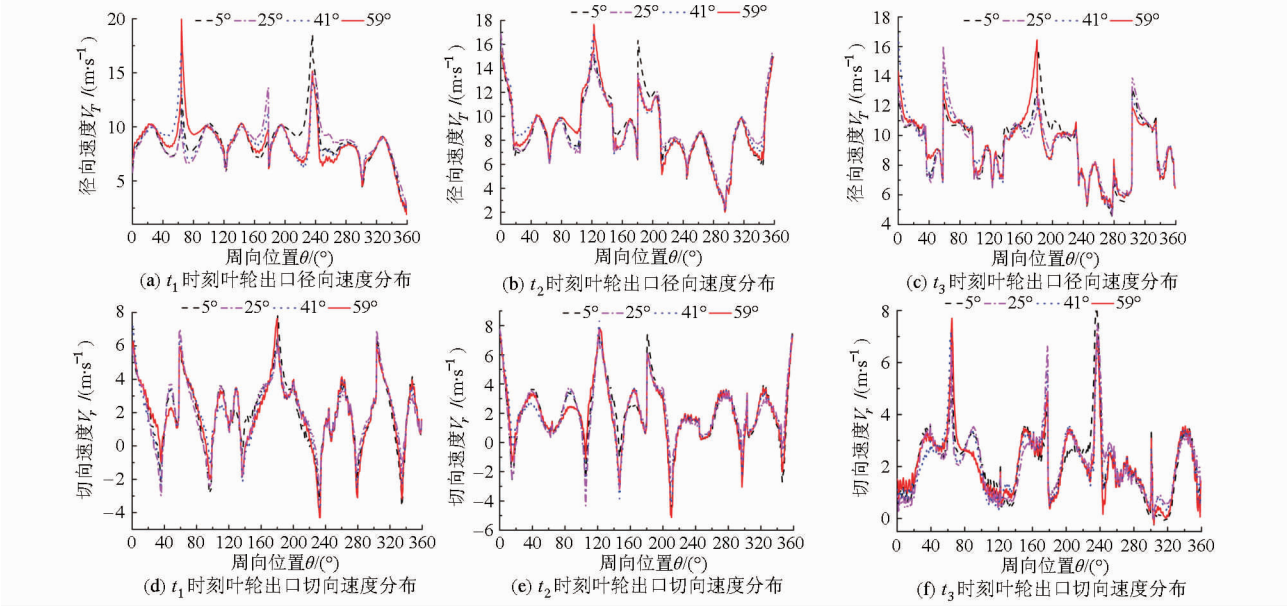

图 12　不同时间步下叶轮出口径向及切向速度分布

Fig. 12　Distributions of radial and tangential velocities at impeller outlet under different time steps

(2)因叶轮出口沿圆周方向的速度大小与方向时刻变化,导致作用于叶轮上径向力为交变力,从而导致泵中轴承与密封失效。不同导叶时序位置时,作用于叶轮上径向力矢量变化分布近似,表明不同时序位置对叶轮出口速度影响较小。

(3)因动静干涉作用影响,作用于叶轮上径向力合力呈现周期性波动。不同时序位置下,当导叶叶片逐渐靠近蜗壳隔舌时,径向力合力逐渐降低,其叶轮出口圆周方向静压分布较均匀,而叶轮出口沿圆周方向速度分布与其他导叶安装位置下分布近似,表明时序位置对径向力合力影响主要受叶轮出口沿圆周方向静压分布影响,其速度影响较小。

参　考　文　献

1　杨敏, 闵思明, 王福军. 双蜗壳泵压力脉动特性及叶轮径向力数值模拟[J]. 农业机械学报, 2009,40(11): 83 - 88.
Yang Min, Min Siming, Wang Fujun. Numerical sinulation of pressure fluctuation and radial force in a double volute pump[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2009,40(11):83 - 88. (in Chinese)

2　黄思, 王国玉. 离心泵内流场非对称性及受力的三维数值分析[J]. 农业机械学报, 2006, 37(10): 66 - 69.
Huang Si, Wang Guoyu. Analysis of flow field asymmetry and force on centrifugal pump by 3-D numerical simulation[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2006,37(10):66 - 69. (in Chinese)

3　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(增刊): 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(Supp.):21 - 26. (in Chinese)

4　张帆, 袁寿其, 付强,等. 双蜗壳式离心泵内部非定常流动压力特性分析[J]. 农业机械学报, 2015, 46(2):52 - 58.
Zhang Fan, Yuan Shouqi, Fu Qiang, et al. Analysis on pressure characteristics during internal unsteady flow in double volute centrifugal pump[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2015,46(2):52 - 58. (in Chinese)

5 任芸, 吴登昊, 刘厚林,等. 离心泵内部不稳定流动的 PIV 测试[J]. 农业机械学报, 2015, 46(2):46 - 51.
Ren Yun, Wu Denghao, Liu Houlin, et al. PIV experiment on flow instabilities in centrifugal pump[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2015, 46(2):46 - 51. (in Chinese)

6 周佩剑,王福军,姚志峰. 旋转失速条件下离心泵叶轮压力脉动特性研究[J]. 农业机械学报,2015,46(10):56 - 61.
Zhou Peijian, Wang Fujun, Yao Zhifeng. Investigation of pressure fluctuation in centrifugal pump impeller under rotating stall conditions[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2015, 46(10):56 - 61. (in Chinese)

7 刘厚林,崔建保,谈明高,等. 离心泵内部流动时序效应的 CFD 计算[J]. 农业工程学报,2013,29(14):67 - 73.
Liu Houlin, Cui Jianbao, Tan Minggao, et al. CFD calculation of clocking effect on centrifugal pump[J]. Transactions of the CSAE, 2013, 29(14):67 - 73. (in Chinese)

8 王文杰,袁寿其,裴吉,等. 时序效应对导叶式离心泵内部压力脉动影响的数值分析[J]. 机械工程学报,2015,51(4):185 - 192.
Wang Wenjie, Yuan Shouqi, Pei Ji, et al. Numerical analysis of the clocking effect on the pressure fluctuation in the centrifugal pump with vaned diffuser[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2015, 51(4):185 - 192. (in Chinese)

9 Feng J, Benra F K, Dohmen H J. Qualitative comparison between numerical and experimental results of unsteady flow in a radial diffuser pump[J]. Journal of Visualization, 2007, 10(4):349 - 357.

10 Feng J, Benra F K, Dohmen H J. Investigation of turbulence and blade orientation effects in a radial diffuser pump by laser doppler velocimetry[J]. Proc. IMech E Part A: Journal of Power and Energy, 2009, 223(8):991 - 999.

11 Feng Jianjun, Benra F K, Dohmen H J. Unsteady flow investigation in rotor-stator interface of a radial diffuser pump[J]. Forschungim Ingenieurwesen, 2010, 74(4):233 - 242.

12 Gaetani P, Boccazzi A, Sala R. Low field in the vaned diffuser of a centrifugal pump at different vane setting angles[J]. ASME Journal of Fluids Engineering, 2012, 136(3): 031101 - 12.

13 Reinmoller U, Stephan B, Schmidt S, et al. Clocking effects in a 1.5 stage axial turbine-steady and unsteady experimental investigations supported by numerical simulations[J]. ASME Journal of Turbomachinery, 2002, 124(2): 52 - 60.

14 Huber F W, Johnson P D, Sharma O P, et al. Performance improvement through indexing of turbine airfoils: part I—experimental investigation[J]. ASME Journal of Turbomachinery, 1996, 118(3): 630 - 635.

15 Andrea Arnone, Michele Marconcini, Alberto Scotti Del Greco, et al. Numerical investigation of three-dimensional clocking effects in a low pressure turbine[J]. ASME Journal of Turbomachinery, 2004, 126(3):375 - 384.

16 Griffin L W, Huber F W, Sharma O P. Performance improvement through indexing of turbine airfoils: part II—numerical simulation[J]. ASME Journal of Turbomachinery, 1996, 118(4):636 - 642.

17 Cizmas P, Dorney D. Parallel computation of turbine blade clocking[J]. International Journal of Turbo & Jet-Engines, 1999, 16(1):49 - 60.

18 Zhang M, Tsukamoto H. Unsteady hydrodynamic forces due to rotor-stator interaction on a diffuser pump with identical number of vanes on the impeller and diffuser[J]. ASME Journal of Fluids Engineering, 2005, 127(3):743 - 751.

(上接第 27 页)

17 王勇,黄浩钦,刘厚林,等. 叶片出口边侧斜对船用离心泵外辐射噪声的影响[J]. 排灌机械工程学报,2015,33(2):104 - 110.
Wang Yong, Huang Haoqin, Liu Houlin, et al. Effect of inclined trailing edge of blade on exterior radiation noise of marine centrifugal pump[J]. Journal of Drainage and Irrigation Machinery Engineering, 2015, 33(2):104 - 110. (in Chinese)

18 刘厚林,丁剑,谈明高,等. 叶轮出口宽度对离心泵噪声辐射影响的分析与试验[J]. 农业工程学报,2013,29(16):66 - 73.
Liu Houlin, Ding Jian, Tan Minggao, et al. Analysis and experimental of centrifugal pump noise based on outlet width of impeller [J]. Transactions of the CSAE, 2013, 29(16):66 - 73. (in Chinese)

19 张德胜,耿琳琳,施卫东,等. 轴流泵水力模型压力脉动和振动特性试验[J]. 农业机械学报,2015,46(6):66 - 72.
Zhang Desheng, Geng Linlin, Shi Weidong, et al. Experimental investigation on pressure fluctuation and vibration in axial-flow pump model[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2015, 46(6):66 - 72. (in Chinese)

20 周盼,张权,率志君,等. 不同叶片数对离心泵流场诱导振动的影响[J]. 排灌机械工程学报,2014,32(7):567 - 571.
Zhou Pan, Zhang Quan, Shuai Zhijun, et al. Impact of blade number on fluid-induced vibration in centrifugal pump[J]. Journal of Drainage and Irrigation Machinery Engineering, 2014, 32(7):567 - 571. (in Chinese)

21 丁剑,刘厚林,王勇,等. 叶片出口角影响离心泵噪声辐射数值研究[J]. 振动与冲击,2014,33(2):122 - 127.
Ding Jian, Liu Houlin, Wang Yong, et al. Numerical study on the effect of blade outlet angle on centrifugal pump noise[J]. Journal of Vibration and Shock, 2014, 33(2):122 - 127. (in Chinese)