

分流叶片对螺旋离心泵径向力的影响^{*}

袁寿其 周建佳 袁建平 张金凤 徐宇平

(江苏大学流体机械工程技术研究中心, 镇江 212013)

【摘要】 为了改善单叶片螺旋离心泵叶轮径向力过大的问题,对单叶片叶轮设计分流叶片,并采用 Navier - Stokes 方程和标准的 $k - \varepsilon$ 湍流模型对带分流叶片和不带分流叶片的螺旋离心泵的内部流场进行非定常数值模拟。通过模拟分别获得了带分流叶片和不带分流叶片的螺旋离心泵的蜗壳出口压力脉动特性以及作用在蜗壳和叶轮上的径向力特性,并对其进行分析比较。结果表明:各个工况下,带分流叶片和不带分流叶片的螺旋离心泵的蜗壳出口压力脉动特性、作用在蜗壳和叶轮上的径向力均呈周期性变化,且主频均为各自叶片通过频率;采用分流叶片后周期变为原模型周期的一半,蜗壳出口压力脉动幅值明显减小,作用在叶轮上的径向力明显减小,作用在叶轮上的径向力的变化趋势关于坐标轴对称性加强,且基本呈椭圆形分布;作用在蜗壳上的径向力虽有小幅提升,但是其脉动幅值减弱,且高频脉动减少。表明单叶片螺旋离心泵叶轮分流叶片的添加不仅可以有效减小叶轮上的径向力,而且对降低蜗壳上的振动特性有一定的积极作用。

关键词: 螺旋离心泵 径向力 分流叶片 压力脉动 数值模拟

中图分类号: TH311 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1298(2012)09-0037-06

Numerical Simulation on Radial Hydraulic Forces for Screw-type Centrifugal Pump with Splitter Blade

Yuan Shouqi Zhou Jianjia Yuan Jianping Zhang Jinfeng Xu Yuping

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

Abstract

In order to solve the overlarge radial hydraulic forces on the impeller of screw-type centrifugal pump with single blade, splitter blade was added. Based on Navier - Stokes equations and $k - \varepsilon$ turbulent model, three-dimensional unsteady flow field of the pump was simulated numerically to the screw-type centrifugal pump with and without splitter blade. Pressure fluctuations in the outlet of pump, radial hydraulic forces on the impeller and volute were obtained at different flow rates. The analysis results indicated that the pressure wave in the outlet of pump, radial hydraulic forces wave on the impeller and volute were always periodic in the two models, impeller blade passing frequency was the dominant frequency. Compared with the result without splitter blade at different flow rates, the period decreased to a half, the amplitudes of pressure fluctuations in the outlet of pump was smaller, the radial hydraulic forces on the impeller decreased a lot, the distribution of radial hydraulic forces on the impeller vector coordinates were more symmetry, and almost ellipses, the radial hydraulic forces on volute increased a little, but the amplitudes of which was decreased, and the high-frequency components were also fewer. The analysis results indicate that the adding of splitter blade in impeller of screw-type centrifugal pump with single blade can not only decrease the radial hydraulic forces on the impeller, but also decrease oscillations in volute as well.

Key words Screw-type centrifugal pump, Radial hydraulic forces, Splitter blade, Pressure fluctuation, Numerical simulation

引言

单叶片螺旋离心泵是一种无堵塞、无缠绕、损伤少的新型杂质泵,且具有优良的抗汽蚀性能,广泛应用于冶金矿山、煤炭、电力、造纸以及污水处理、港口河道疏浚等行业。为了达到良好的无堵塞性能,该叶轮采用单叶片形式。但是单叶片螺旋离心泵叶轮的径向力过大一直是其主要缺陷,并直接制约着该类型泵的推广和应用,所以对螺旋离心泵径向力的研究有很重要的现实意义。

Arai M 等^[1]曾对单叶片螺旋离心泵叶轮上的径向力进行测量,认为对此类型叶轮开展径向力研究十分必要,但并未提出减小径向力的措施。Kazuhiro Tanaka 等^[2]对螺旋离心泵的推力进行分析,通过 CFD 软件进行数值预测,并与 Arai M 的实验数据进行对比发现数值预测可以很好地预测该类型泵的径向力。曹卫东等^[3]针对单叶片螺旋离心泵径向力过大提出了添加短叶片的措施,认为分流叶片应该添加在与叶片出口边对称的 180° 的位置上。尽管国内外众多学者针对普通离心泵的分流叶片进行了广泛而深入的研究^[4-7],但对于螺旋离心泵分流叶片的研究还较少。

本文在袁寿其^[5]针对低比转数泵分流叶片设计和曹卫东的短叶片添加方案的基础上,从 15 种带分流叶片叶轮设计方案中选出优秀模型进行研究。以单叶片叶轮的螺旋离心泵和带分流叶片叶轮的螺旋离心泵为对象,采用标准 $k-\varepsilon$ 模型对其进行三维非定常数值模拟,得到两种模型下作用在叶轮和蜗壳上径向力的时域特征、频域特征和矢量分布特征。

1 计算模型与数值计算方法

1.1 计算模型

单叶片叶轮的模型如图 1a 所示。原型泵的设计参数为流量 $Q = 200 \text{ m}^3/\text{h}$,设计扬程 $H = 32 \text{ m}$,额定转速 $n = 1450 \text{ r}/\text{min}$ 。叶轮采用半开式叶轮,出口直径为 $D_2 = 400 \text{ mm}$,叶片出口宽度为 $b_2 = 82 \text{ mm}$,叶片总包角 $\Phi = 640^\circ$ 。

本文采用的分流叶片出口与原有叶片出口呈 180° 对称布置,小叶片包角选为 235°,出口安放角、出口宽度、出口直径等因素与原有叶片保持一致。

1.2 数值计算方法

采用 ICFM 软件对模型进行前处理得到四面体混合网格,导入 ANSYS CFX12.1 全隐式耦合多网格线性求解器,采用标准 $k-\varepsilon$ 模型,对所有变量整场联立求解,同时求解连续方程和动量方程组。进、出口边界条件分别定义为速度进口和自由出流,定义

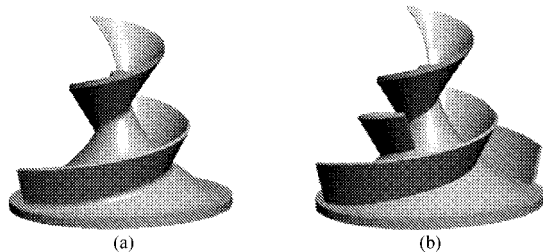


图 1 叶轮三维图

Fig. 1 3-D modeling of impeller

(a) 单叶片叶轮 (b) 带分流叶片叶轮

大气压力为参考压力。将螺旋离心泵实体模型的整个计算域划分成定子和转子 2 个区域,在多参考坐标系下采用 Transient Rotor - Stator 模式,模拟旋转叶轮和静止蜗壳之间的耦合关系^[8],固体壁面为无滑移边界条件,Hansen^[9]与 Tsukamoto^[10]的研究表明,叶轮每转 3° 作为一个时间步长 Δt 为宜。

$$\Delta t = \Delta \Phi \pi / (180 |\omega|) \quad (1)$$

式中 ω ——角速度

$\Delta \Phi$ ——一个时间步长转过的角度

故时间步长为 0.000 344 8 s,计算过程叶轮旋转 6 个周期,总计算时间 0.248 3 s,并选取较为稳定的后 4 个周期的结果用于分析,记录作用在叶轮上的径向力随时间的变化数据。

2 计算结果及分析

2.1 外特性分析

通过数值模拟计算出单叶片和带分流叶片的螺旋离心泵扬程和效率,选取 4 个工况点进行分析,并与实验数据进行对比,其结果如图 2 所示。

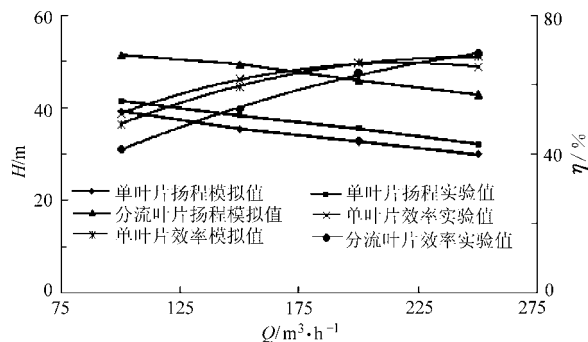


图 2 泵性能对比

Fig. 2 Comparison of performance of pumps

从图 2 中可以看出,单叶片螺旋离心泵模拟所得曲线与外特性实验曲线吻合较好,其中扬程的模拟值比实验值偏低,设计流量下相对误差为 7.8%;设计流量下效率模拟值比实验值偏高 0.7%。可见该数学模型比较准确地预测了泵的外特性,验证了数值模拟的准确性。同时对比带分流叶片与单叶片的叶轮模拟数据可以发现,由于分流叶片对流体作

功在上述4个工况下扬程均有提升,在小流量和设计流量下效率有所下降,设计流量下降3个百分点,而在大流量下微量上升,这与普通离心泵添加分流叶片后最佳工况点向大流量方向偏移^[11-12]的结论一致。

2.2 蜗壳中截面的静压分布

图3为设计流量下,不同时刻单叶片和带分流叶片的螺旋离心泵的泵壳中截面静压分布云图,从图3中可以看到各个时刻叶片轮廓线的位置。

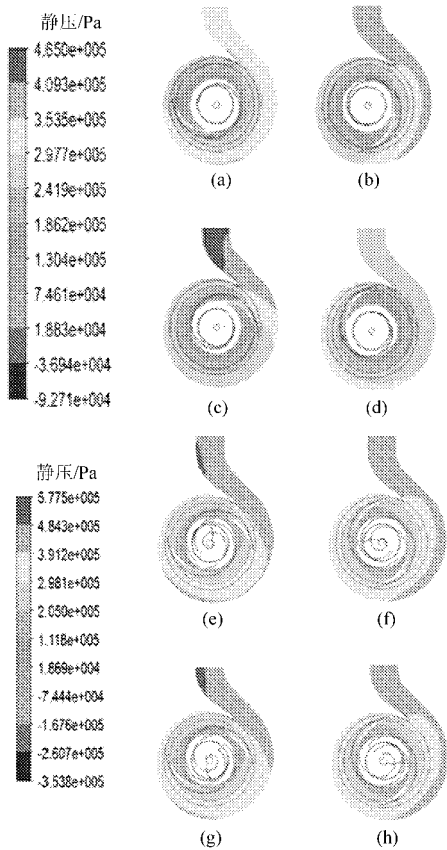


图3 单叶片和带分流叶片不同时刻静压分布云图

Fig.3 Static pressure distributions with and without splitter blade at several impeller positions

- (a) 单叶片,0 s (b) 单叶片,0.005 17 s (c) 单叶片,0.010 34 s
(d) 单叶片,0.015 52 s (e) 分流叶片,0 s (f) 分流叶片,
0.005 17 s (g) 分流叶片,0.010 34 s (h) 分流叶片,0.015 52 s

(1)对比单叶片螺旋离心泵不同时刻的压力图可以发现,泵出口压力变化较大,当叶片旋转到越接近隔舌的时候泵出口的压力越大,当扫过隔舌时压力骤降。同一时刻蜗壳内不同断面压力分布不均匀,叶片工作面后方由于排挤作用而压力较大。同一时刻蜗壳内同一断面越接近蜗壳内壁压力越大。

(2)对比带分流叶片螺旋离心泵不同时刻的压力图可以发现,泵出口压力变化较小,2个叶片扫过隔舌时出口压力较大,对比图3e与图3g、图3f与图3h,可以发现原有叶片与分流叶片对于该断面压

力的作用差别不大。

(3)与单叶片螺旋离心泵相比,带分流叶片的泵出口压力变化趋于平缓,说明分流叶片可以有效降低单叶片螺旋离心泵出口的压力脉动。

2.3 出口压力脉动分析

图4为单叶片和带分流叶片螺旋离心泵蜗壳出口处的压力脉动时域图。由图4可知,不同工况下两种叶片的泵出口压力脉动周期性明显,带分流叶片的泵出口处的脉动周期是单叶片泵的脉动周期的一半,各个工况下脉动的幅值大幅下降,设计流量下最大幅值从27 663 Pa下降到16 512 Pa,说明分流叶片可以有效降低单叶片螺旋离心泵出口的压力脉动。同时各个周期带分流叶片的泵出口压力脉动幅值基本相同,也证明了此分流叶片设计方案的科学性和合理性。

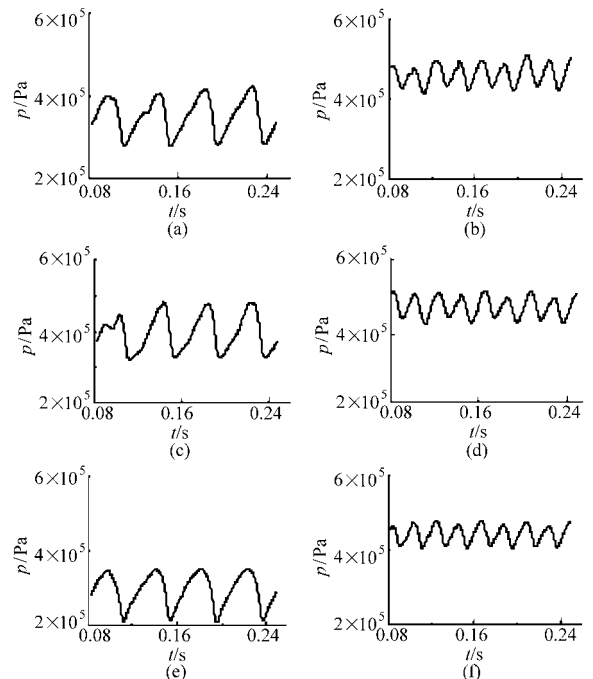


图4 不同工况单叶片和带分流叶片泵出口静压时域特性图

Fig.4 Pump outlet static pressure fluctuations with and without splitter blade under different running conditions

- (a) 单叶片,0.75Q (b) 分流叶片,0.75Q (c) 单叶片,Q
(d) 分流叶片,Q (e) 单叶片,1.25Q (f) 分流叶片,1.25Q

通过傅里叶(FFT)变换得到单叶片和带分流叶片螺旋离心泵蜗壳出口处的压力脉动频域图(图5),单叶片泵出口压力脉动最大幅值出现在叶频处(即轴频24 Hz),带分流叶片的螺旋离心泵的出口压力脉动最大幅值出现在叶频处(48 Hz),轴频处的脉动幅值较大,说明压力脉动的频率都以叶片通过频率为主^[8]。

2.4 叶轮上径向力分析

图6为单叶片和带分流叶片螺旋离心泵叶轮径

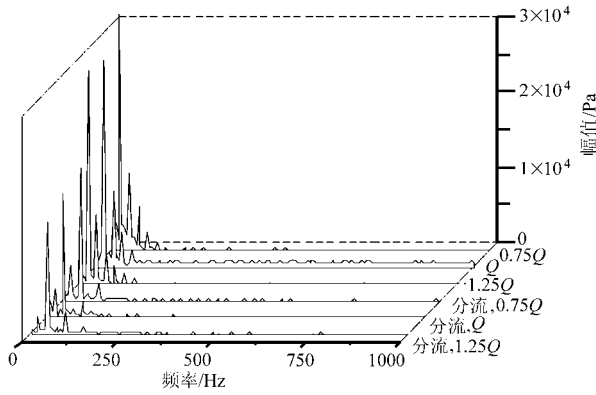


图5 不同工况单叶片和带分流叶片泵出口静压频域特性图

Fig. 5 Frequency spectra of pump outlet static pressure fluctuations with and without splitter blade under different running conditions

向力时域图。与单叶片泵相比,各个工况下带分流叶片的螺旋离心泵叶轮上的最大径向力均大幅下降,在设计流量下叶轮上的最大径向力从3 200 N降低到2 400 N,在1.25Q下径向力从4 600 N降低到1 500 N。而径向力产生的主要原因是由于叶轮的旋转造成叶轮与蜗壳耦合面上的压力不平衡^[12],也间接说明了添加分流叶片使得叶轮出口到蜗壳进口处的压力分布相对均匀,与静压分布处的分析和压力云图所反映的现象吻合。

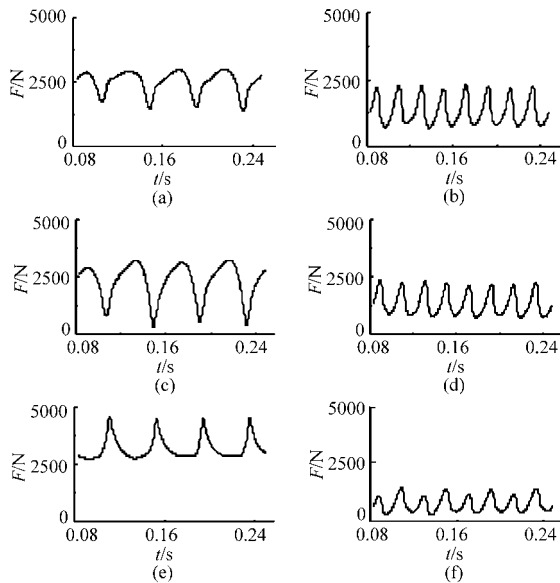


图6 不同工况单叶片和带分流叶片叶轮上径向力时域特性图

Fig. 6 Radial hydraulic forces on impeller with and without splitter blade under different running conditions
(a) 单叶片,0.75Q (b) 分流叶片,0.75Q (c) 单叶片,Q (d) 分流叶片,Q (e) 单叶片,1.25Q (f) 分流叶片,1.25Q

图7为单叶片和带分流叶片螺旋离心泵叶轮径向力频域图。与原型泵相比,各个工况下添加分流

叶片的螺旋离心泵叶轮上径向力最大幅值下降,设计流量下最大幅值从262 N下降到225 N,0.75Q下最大幅值从497 N下降到334 N,1.25Q下最大幅值从283 N下降到211 N,泵径向力最大幅值出现在各自的叶频处,且不同工况下采用分流叶片后高频脉动也逐渐减少,一定程度上可以减小叶轮上的振动噪声。

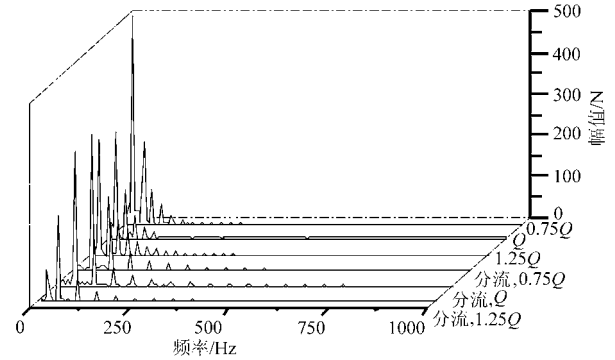


图7 不同工况单叶片和带分流叶片叶轮上径向力频域特性图

Fig. 7 Frequency spectra of radial hydraulic forces on the impeller with and without splitter blade under different running conditions

图8为单叶片和带分流叶片螺旋离心泵叶轮径向力矢量图。单叶片泵的径向力分布在各个工况下关于坐标轴不对称,1.25Q下径向力最大,同时径向力的方向变化剧烈,径向力主要指向X轴的正方向(底座的正上方)。带分流叶片叶轮上的径向力在各个工况下关于坐标轴对称,且最大径向力降低到2 400 N,同时1.25Q下叶轮上径向力的方向变化趋于平缓,这显示了分流叶片的作用。任意时刻在1.25Q下叶轮上的径向力均较小,这也反映了最佳工况点向大流量偏移的结论。

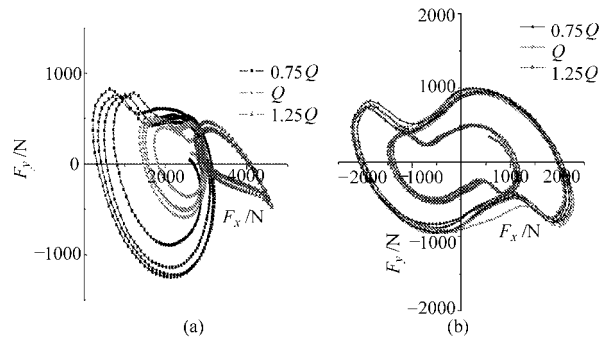


图8 不同工况单叶片和带分流叶片叶轮上径向力矢量图

Fig. 8 Vector diagram of radial hydraulic forces on impeller with and without splitter blade under different running conditions

(a) 单叶片叶轮 (b) 分流叶片叶轮

2.5 蜗壳上径向力分析

图9为单叶片和带分流叶片螺旋离心泵蜗壳径

向力时域图。与原型泵相比,各个工况下带分流叶片的螺旋离心泵蜗壳上最大径向力均有小幅上升,在设计流量下叶轮上的最大径向力从 7 048 N 上升到 7 844 N。造成这种小幅上升的原因仍需要做进一步的分析研究。但是添加分流叶片后,不同工况下各个周期的振幅有明显下降,在一定程度上可以降低蜗壳上的振动噪声。

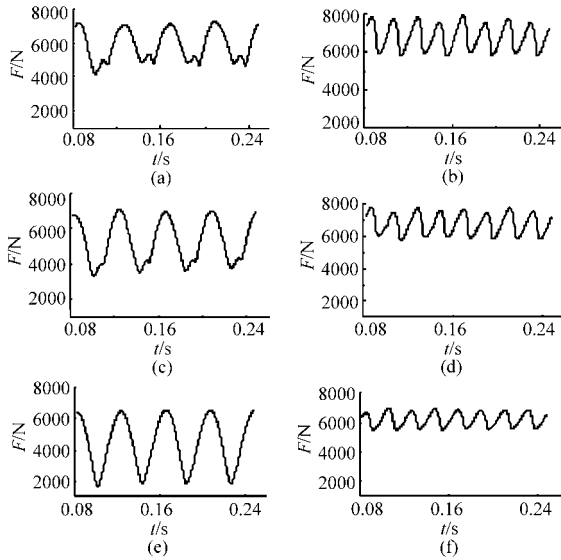


图 9 不同工况单叶片和带分流叶片蜗壳径向力时域特性图

Fig.9 Radial hydraulic forces on volute of pumps with and without splitter blade under different running conditions

(a) 单叶片,0.75Q (b) 分流叶片,0.75Q (c) 单叶片,Q (d) 分流叶片,Q (e) 单叶片,1.25Q (f) 分流叶片,1.25Q

图 10 为单叶片和带分流叶片螺旋离心泵蜗壳径向力频域图。与原型泵相比,各个工况下带分流叶片的螺旋离心泵的蜗壳上径向力最大幅值下降,设计流量下最大幅值从 823 N 下降到 413 N,1.25Q 下最大幅值从 1 122 N 下降到 315 N,且各个工况下

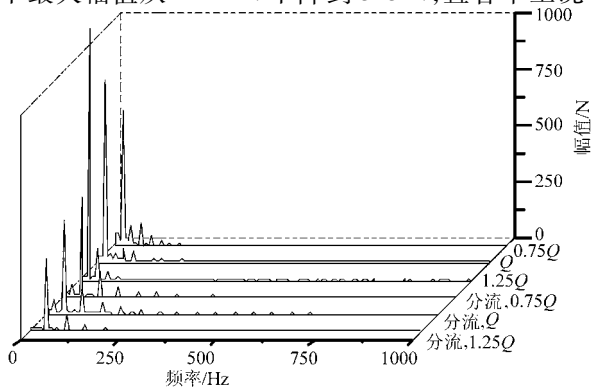


图 10 不同工况单叶片和带分流叶片蜗壳径向力频域特性图

Fig.10 Frequency spectra of radial hydraulic forces on volute of pumps with and without splitter blade under different running conditions

采用分流叶片后高频脉动也逐渐减少,一定程度上可以减小蜗壳上的振动噪声。

图 11 为单叶片和带分流叶片螺旋离心泵蜗壳径向力矢量图。单叶片泵蜗壳径向力分布在各个工况下关于坐标轴不对称,分布不规律,方向变化比较剧烈,径向力主要指向 X 轴的负方向(底座的正下方)。带分流叶片泵蜗壳上的径向力在各个工况下都分布在第 3 象限,呈椭圆形规律分布,方向变化平缓,这也有利于改善蜗壳上的振动噪声。在 1.25Q 下蜗壳上的径向力较小,这也反映了最佳工况点向大流量偏移的结论。

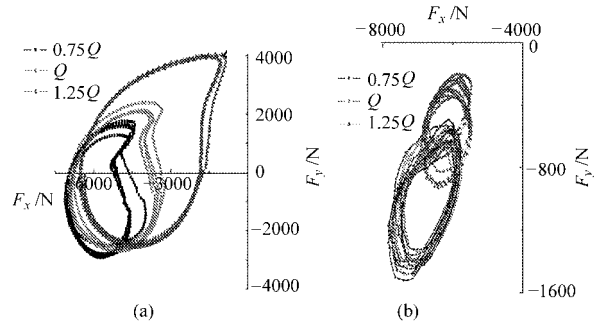


图 11 不同工况单叶片和带分流叶片蜗壳上径向力矢量图

Fig.11 Vector diagram of radial hydraulic forces on volute of pumps with and without splitter blade under different running conditions

(a) 单叶片叶轮 (b) 分流叶片叶轮

3 结论

(1)不同工况下,单叶片和带分流叶片的螺旋离心泵叶轮和蜗壳上径向力呈明显周期性变化,其频率都以各自叶片通过频率为主,说明旋转叶轮与静止蜗壳之间的耦合作用是导致其周期性变化的主要原因。

(2)不同工况下,采用分流叶片后,作用在叶轮上的径向力大幅降低,在设计流量下叶轮上的最大径向力降低为单叶片叶轮最大径向力的 0.75 倍,在 1.25Q 下叶轮最大径向力降低为单叶片叶轮最大径向力的 0.32 倍,且径向力的方向变化趋势更加平缓,说明分流叶片可以较好地改善单叶片螺旋离心泵叶轮上径向力过大的问题。

(3)不同工况下,采用分流叶片后,虽然作用在螺旋离心泵蜗壳上径向力有小幅提升,但可以通过底座传递到地面上。而作用在蜗壳上的径向力幅值有大幅下降,设计工况下为单叶片螺旋离心泵蜗壳上径向力幅值的一半,1.25Q 为单叶片螺旋离心泵蜗壳上径向力幅值的 0.28 倍,且径向力的方向变化趋势更加平缓。

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, Yamada 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)