

不同断面型式蜗壳对离心泵性能影响的数值模拟

郭鹏程, 罗兴锜, 周 鹏, 丁 况

(西安理工大学 水利水电学院, 陕西 西安 710048)

摘要: 基于 SST $k-\omega$ 模型封闭的雷诺平均方程, 应用 ANSYS CFX 11.0 软件, 在原离心泵马蹄形断面蜗壳的基础上重新设计了圆形断面和矩形断面两种蜗壳, 并分别将 3 种不同断面的蜗壳与同一叶轮组合进行三维数值模拟。计算结果表明, 不同型式断面的蜗壳对离心泵性能有一定的影响, 矩形和圆形蜗壳在大流量工况区的效率比马蹄形蜗壳略有提高, 在设计点, 矩形蜗壳的效率比马蹄形的略低, 但大流量工况却高; 在小流量工况圆形蜗壳的扬程比马蹄形蜗壳的扬程低, 而矩形蜗壳和马蹄形蜗壳相差不大, 在设计点矩形蜗壳和马蹄形蜗壳略高于圆形蜗壳, 在大流量工况马蹄形蜗壳的扬程有所降低。不同的断面型式对蜗壳的水力损失也有一定的影响, 而且随着流量的变化损失也在变化。矩形蜗壳壁面上的压力脉动的幅值在设计流量工况较马蹄形蜗壳和圆形蜗壳要小一些。

关键词: 离心泵; 蜗壳; 断面型式; 数值模拟

中图分类号: S277.9; TH311 文献标志码: A 文章编号: 1674-8530(2010)04-0300-05

Numerical simulation of influence of volute with different sections on centrifugal pump performance

Guo Pengcheng, Luo Xingqi, Zhou Peng, Ding Kuang

(School of Hydropower Engineering, Xi'an University of Technology, Xi'an, Shaanxi 710048, China)

Abstract: Based on Reynolds-averaged equations closed by SST $k-\omega$ model, numerical simulations of flow in a low-specific-speed single-stage centrifugal pump with three different volutes were carried out by using ANSYS CFX 11.0 software. For the volute geometry, the cross-section of the original volute was a horseshoe section, and the other two new ones were designed as fully circular and rectangular geometries, respectively. The numerical results show that the differences in the performance of different volutes are quite small. At large flow rate operating regime, the efficiency of the pump with the circular and rectangular volutes is higher appreciably than that of the original one, while at the best efficiency point it is a little lower than that of the original one. For the head differences of the pumps, at low flow rate the head of the pump with the rectangular and original volutes is higher than that of the circular one, and at high flow rate the head of the original volute pump drops obviously, and is lower than that of the rectangular one. In addition, the hydraulic losses in the pump with three different volutes are dissimilar with the flow variation. At low flow rate the hydraulic loss in the original volute pump is the minimum, and the one in the circular volute pump is maximum. While at high flow rate the hydraulic loss in the circular volute pump is the minimum, and the one in the rectangular volute pump is maximum.

Key words: centrifugal pump; volute; section type; numerical simulation

收稿日期: 2009-11-10

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(50979091); 国家 863 计划项目(2009AA05Z202)

作者简介: 郭鹏程(1975—), 男, 陕西府谷人, 副教授(guoyicheng@126.com), 主要从事水力机械技术研究。

罗兴锜(1962—), 男, 江西泰和人, 教授, 博士生导师(luoxq@xaut.edu.cn), 主要从事水力机械技术研究。

目前,数值模拟研究离心泵内部流场已成为改进和优化离心泵叶轮及其他过流部件设计的重要手段^[1-2].对离心泵内部流场的模拟研究已经从以揭示叶轮内部流动的直观现象为主,扩展到对泵内部各过流部件的水力特性和部件间相互作用以及对泵整体性能影响的研究^[3-4].许多学者开展了离心泵叶轮与蜗壳的匹配关系研究. Eduardo B M 等^[5]进行了离心泵内三维非定常流动计算,给出了不同流量下蜗壳内的压力变化规律,并发现叶轮与蜗壳间距的变化诱发了蜗壳内的二次流流动. González J 等^[6]的蜗壳泵三维非定常流动数值计算结果表明蜗舌对叶轮出口流动结构的影响是蜗壳内压力脉动产生的主要原因.李海权^[7]提出了通过选择合适的喉部面积能使泵在大流量工况获得陡降的扬程-流量曲线,从而使泵的运行更加稳定. Guo Pengcheng 等^[8]对离心泵叶轮与蜗壳径向间隙变化及不同类型蜗舌对离心泵性能及其内部流动特性的影响进行了研究,分析了离心泵各过流部件间的匹配关系. Matsui J 等^[9]研究了环形蜗壳和螺旋形蜗壳对整机流场的影响,发现随环形蜗壳外径尺寸的增大,扬程逐渐降低.可见蜗壳几何参数的变化对于离心泵内部流动的影响较大.

文中根据蜗壳设计理论^[10],在原离心泵马蹄形断面蜗壳的基础上重新设计了圆形断面和矩形断面两种蜗壳,并分别将3种不同断面的蜗壳与同一叶轮组合进行了三维定常及非定常数值计算,对比分析不同蜗壳对离心泵性能以及内部流动的影响,为离心泵蜗壳的优化设计提供理论参考.

1 不同断面蜗壳的设计

研究对象为一单级单吸离心泵,蜗壳与叶轮的轴截面如图1a所示.该泵的比转速 $n_s = 66$,设计扬程 $H = 20 \text{ m}$,设计流量 $Q_d = 12.5 \text{ m}^3/\text{h}$,额定转速 $n = 2900 \text{ r/min}$.其主要几何参数为叶轮出口直径 $D_2 = 130 \text{ mm}$,叶轮出口宽度 $b_2 = 6 \text{ mm}$,叶轮进口直径 $D_1 = 50 \text{ mm}$,叶片数 $Z = 6$,叶片包角 $\psi = 125^\circ$,蜗壳进口基圆直径 $D_3 = 140 \text{ mm}$,蜗壳进口宽度 $b_3 = 16 \text{ mm}$.

该离心泵蜗壳的原设计断面为马蹄形,将其改为矩形和圆形断面时,主要遵循以下原则:^①基圆直径不变, $D_{3\text{矩形}} = D_{3\text{圆形}} = D_{3\text{马蹄形}}$;^②蜗壳进口宽度不变, $b_{3\text{矩形}} = b_{3\text{圆形}} = b_{3\text{马蹄形}}$;^③各个断面的面积不变.

3种蜗壳的断面型式如图1所示.

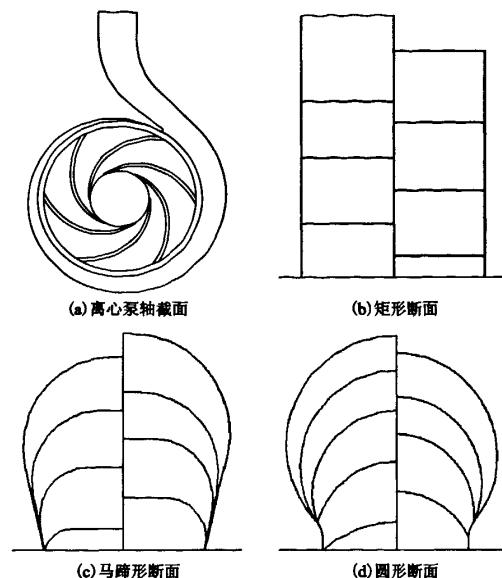


图1 离心泵轴截面及3种蜗壳断面示意图

Fig. 1 Cross-sectional view of centrifugal pump and its three volutes with different cross-sections

2 计算条件

叶轮与蜗壳联合计算,采用商业软件 ANSYS CFX 11.0,雷诺平均方程运用 SST $k - \omega$ 湍流模型封闭,近壁区采用 Wilcox $k - \omega$ 模型,并且修正了湍流剪切应力在逆压梯度边界层的输运.计算中在进口给定流量,出口给定平均压力;定常计算叶轮出口界面与蜗壳进口界面定义为“Frozen Rotor”滑移界面,非定常计算采用“Transient Rotor Stator”处理叶轮与蜗壳间动静耦合流动的参数传递,其时间步长 Δt 取为叶轮旋转一周的 $1/360$.根据叶轮的旋转速度 $n = 2900 \text{ r/min}$,叶片数 $Z = 6$,取非定常流动计算的时间步长为 $5.747 \times 10^{-5} \text{ s}$,每一时间步长叶轮旋转 1° .计算区域网格单元数为 2.1×10^6 ,其中蜗壳区 1.1×10^6 、叶轮区约 1.0×10^6 .对于3种不同蜗壳的网格数相差不超过 0.2%.

3 计算结果分析

3.1 不同型式蜗壳对离心泵性能的影响

对每种组合分别进行了 $0.6Q_d$, $0.8Q_d$, Q_d , $1.2Q_d$, $1.4Q_d$ 5 种工况的定常计算,其中设计流量 $Q_d = 12.5 \text{ m}^3/\text{h}$.图2为不同工况下离心泵的水力效率和扬程随蜗壳断面型式变化的曲线图.从图2a 可

以看出,矩形蜗壳和圆形蜗壳在大流量工况区的效率比马蹄形蜗壳略有提高,致使曲线变得平坦些,高效区有所扩大,但扩大范围较小。在设计工况点,矩形蜗壳的效率比马蹄形蜗壳低0.14%,但在大流量工况高1.6%。由图2b可以看出,在小流量工况下,扬程差别相对明显一些,但差值较小,圆形蜗壳的扬程与其他两种蜗壳相比扬程较低。在 $0.6Q_d$ 小流量工况下,圆形蜗壳的扬程比马蹄形蜗壳的扬程低0.5 m,矩形蜗壳和马蹄形蜗壳相差不大。在设计工况点,圆形蜗壳的扬程(20.76 m)最接近原水泵设计扬程(20.00 m),矩形蜗壳和马蹄形蜗壳略高,且差值也很小。在大流量工况,马蹄形蜗壳的扬程有所降低。

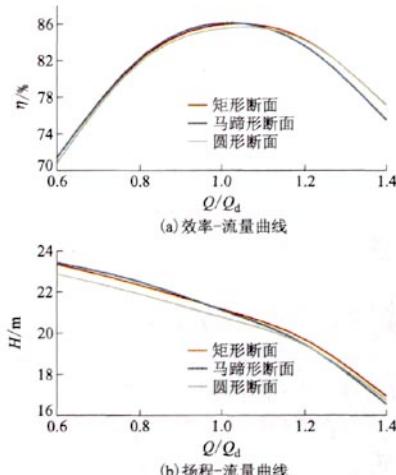


图2 不同蜗壳的离心泵性能曲线

Fig. 2 Performance curves of pump with different volutes

3.2 不同蜗壳的损失分析

定义一个无量纲损失率

$$\delta = \frac{p_{in} - p_{out}}{H_{in}} \times 100\%,$$

式中 p_{in} 和 p_{out} 分别为进出口的总压头; H_{in} 为蜗壳进口的动能头。计算结果如图3所示。可以看出,矩形蜗壳和马蹄形蜗壳的损失相差不大;在设计流量点,3种蜗壳的损失率均为最低,且3种蜗壳的损失率几乎没有差别。以设计流量点为界,随着流量的减小和增大,损失率都有所增加。在小流量工况区,马蹄形蜗壳的损失最小,其次是矩形然后是圆形,最大差值出现在 $0.6Q_d$ 点,马蹄形蜗壳比圆形蜗壳的损失率低了4.5%;在大流量工况区,圆形蜗壳的损失最小,矩形的最大,最差大值出现在 $1.4Q_d$ 点,矩形蜗壳比圆形蜗壳的损失率高了6.2%。可见,不同的断

面型式蜗壳对泵的水力损失有影响,而且随着流量的变化而变化。

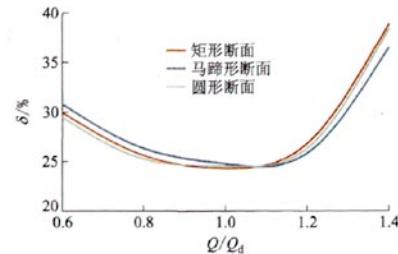


图3 不同蜗壳离心泵的损失率
Fig. 3 Loss rate of pump with different volutes

3.3 不同蜗壳离心泵非定常特性分析

为便于对流场进行详细分析,在前后盖板中心截面上选取16个监测点。图4为这些点在0时刻(即定常流动计算时)的位置。为便于对不同蜗壳的监测点进行区分,在上述测点的名字前分别加上H(马蹄形)、R(矩形)、C(圆形),如HSW1-HSW8表示马蹄形蜗壳壁面上对应的监测点,以此类推。

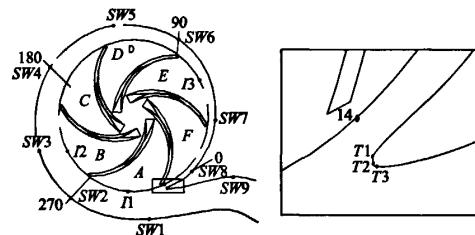


图4 监测点的位置

Fig. 4 Position of monitoring points

图5为小流量工况和大流量工况下,不同时刻3种蜗壳进口压力沿周向的分布。可以看出,小流量工况下,蜗壳进口压力沿周向分布不对称,随着包角ψ的增大而减小,大流量工况和小流量工况下蜗壳进口压力沿周向分布的趋势相反,并且在非设计工况,蜗舌处的压力均出现了较大的波动,说明在非设计工况螺旋形蜗壳内存在不对称的径向力。对比不同断面蜗壳进口压力分布可以发现,各工况下的压力分布变化不大,说明蜗壳断面形状对蜗壳进口压力分布影响很小。

图6为小流量工况和大流量工况下某时刻蜗壳进口径向速度沿周向的分布。可以看出,非设计工况时,径向速度沿周向分布明显不对称,在蜗舌部位均出现了比较大的波动。小流量工况下,在靠近蜗壳出口两个叶道的范围内均出现了负值,说明在该范围内存在回流现象,造成这种现象的原因可能是受到

叶道出口尾迹的影响。大流量工况下,径向速度均为正值,并且靠近蜗壳出口的一个叶道范围内的径向速度分布最大。对比3种蜗壳的径向速度分布图,可以发现蜗壳断面型式的变化对径向速度的分布影响不大。

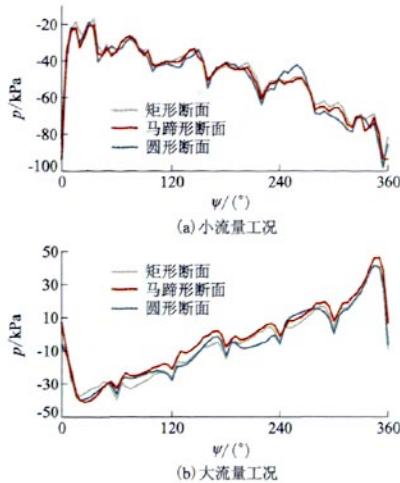


图5 小流量和大流量工况下蜗壳进口周向压力分布
Fig. 5 Circumferential pressure distribution of volute inlet at small and large flow rates

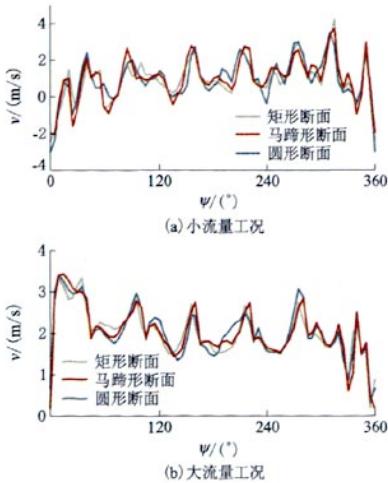


图6 小流量和大流量工况下蜗壳进口径向速度分布
Fig. 6 Radial velocity distribution of volute inlet at small and large flow rates

图7为设计流量工况下3种蜗壳的蜗舌部位监测点T2和蜗壳壁面上监测点SW2的瞬时压力随时间的变化曲线。对比各个工况下3种断面蜗壳壁面各测点的压力脉动曲线,可以看出,在设计流量下,蜗舌上3个测点的时均压力相对比较接近,且压力脉动均呈现出周期性,但蜗壳断面的形状对蜗壳内

的脉动压力有一定的影响。在蜗舌部位,矩形蜗壳测点T2的压力脉动的幅值比马蹄形蜗壳和圆形蜗壳的小。矩形蜗壳壁面上各测点的压力脉动的幅值比马蹄形蜗壳和圆形蜗壳的小。

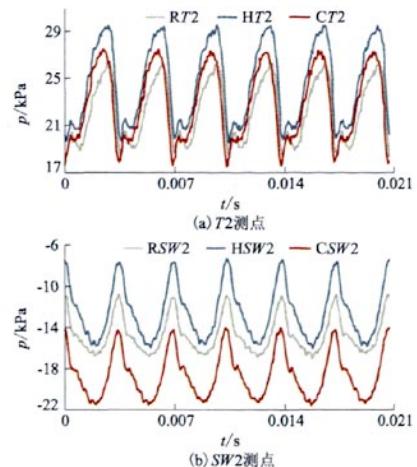


图7 设计流量工况蜗壳测点的压力脉动时域图
Fig. 7 Time histories of pressure fluctuation at monitoring points under designed flow rate

4 结论

(1) 大流量工况下,矩形蜗壳与圆形蜗壳的效率比马蹄形蜗壳的稍高;而在设计工况点比马蹄形的低一些。

(2) 扬程的不同主要是由于不同蜗壳的水力损失不同。小流量工况下,圆形蜗壳的扬程比马蹄形蜗壳的低,矩形蜗壳和马蹄形蜗壳相当;在设计工况点矩形蜗壳和马蹄形蜗壳的扬程略高于圆形蜗壳,大流量工况下,马蹄形蜗壳的扬程有所降低。

(3) 蜗壳断面的形状对蜗壳内的压力脉动有一定的影响。在设计流量工况,矩形蜗壳壁面上各测点的压力脉动幅值比马蹄形蜗壳和圆形蜗壳的小。

参考文献(References)

- [1] Yuan Shouqi, Ni Yongyan, Pan Zhongyong, et al. Unsteady turbulent simulation and pressure fluctuation analysis [J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 2009, 22(1):64–69.
- [2] 张伟,余运超,陈红勋.离心泵叶轮非设计工况下内部湍流场的模拟[J].排灌机械工程学报,2010, 28(1):38–42.
Zhang Wei, Yu Yunchao, Chen Hongxun. Numerical simulation of flow in centrifugal pump impeller at off-design conditions [J]. Chinese Journal of Irrigation and Drainage Engineering, 2010, 28(1):38–42.

sign conditions [J]. *Journal of Drainage and Irrigation Machinery Engineering*, 2010, 28 (1): 38 - 42. (in Chinese)

- [3] 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)
- [4] 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)
- [5] Eduardo B M, Joaquin F F, José G P. Numerical flow simulation a centrifugal pump with impeller-volute interaction [C] // *Proceedings of ASME 2000 Fluids Engineering Division Summer Meeting*. Boston, Massachusetts: [s. n.], 2000.
- [6] González J, Santolaria C, Blanco E. The effect of the volute tongue on the pressure oscillations inside centrifugal pump [C] // *Proceedings of the 21st IAHR Symposium on Hydraulic Machinery and Systems*. Lausanne: [s. n.], 2002.

n.], 2002.

- [7] 李海权. 离心泵喉部面积对泵性能的影响 [J]. *通用机械*, 2003 (11): 41 - 43.
Li Haiquan. Effect of the throat area on its performance in centrifugal pump [J]. *General Machinery*, 2003 (11): 41 - 43. (in Chinese)
- [8] Guo Pengcheng, Liao Weili, Luo Xingqi, et al. Numerical investigation on impeller-volute interaction in the centrifugal pump with radial gap and tongue profile variation [C] // *Proceedings of ASME 2008 Fluids Engineering Conference*. USA, Florida, Jacksonville: [s. n.], 2008.
- [9] Matsui J, Kurokawa J, Choi Y D, et al. Flow in the low-specific-speed centrifugal pump with circular casing [C] // *Proceedings of the 23rd IAHR Symposium on Hydraulic Machinery and Systems*. Japan, Yokohama: [s. n.], 2006: 17 - 21.
- [10] 徐伟利. 离心泵蜗壳八个断面的设计研究 [J]. *农业工程学报*, 1996, 12 (2): 97 - 100.
Xu Weili. Research and design of eight profiles of flow duct in spiral casing of centrifugal pumps [J]. *Transactions of the CSAE*, 1996, 12 (2): 97 - 100. (in Chinese)

(责任编辑 陈建华)