

双蜗壳式双吸泵隔板结构对叶轮径向力的影响*

肖若富 吕腾飞 王福军

(中国农业大学水利与土木工程学院, 北京 100083)

【摘要】 分别对单、双蜗壳式双吸泵 10 个工况点进行全三维流道的数值模拟和试验测试,发现由于双蜗壳式泵内部隔板设计不合理,导致双蜗壳泵较单蜗壳泵在原设计工况点的扬程、效率分别相对下降了 21.8% 和 41.3%。依据双蜗壳设计基本原理,对隔板结构提出 3 种改进方案,利用雷诺时均方法(RANS)和 SST $k-\omega$ 湍流模型对每一方案进行全三维流道的定常数值模拟。模拟和试验结果表明:2 号双蜗壳泵既保持了泵原有的水力性能,又能够有效地减小叶轮径向力,因此得到双蜗壳式双吸泵中隔板结构的最优设计模型;起始位置为隔舌绕基圆旋转 180°、曲线方程为对数螺旋线、终止位置为隔板起始点旋转 180°。

关键词: 离心泵 计算流体动力学 双蜗壳 径向力

中图分类号: TH311 文献标识码: A 文章编号: 1000-1298(2011)09-0085-04

Influence of Rib Structure in Double-volute Centrifugal Pumps on the Impeller Radial Force

Xiao Ruofu Lü Tengfei Wang Fujun

(College of Water Conservancy and Civil Engineering, China Agricultural University, Beijing 100083, China)

Abstract

Double-volute casings were introduced to reduce the radial force that is inherent in single-volute designs. A general three-dimensional computational fluid dynamics (CFD) simulation of a double-volute centrifugal pump was presented to predict hydraulic performance and impeller radial force. By using the shear stress transport (SST) $k-\omega$ turbulent model, the simulation results in the form of characteristic curves were compared with the experimental data. The result presented that the head and efficiency of the original double-volute pump drop were 21.8% and 41.3% respectively at design point due to the failed dividing rib (splitter) in the volute casing. Thus, with the aim to analyze the effects of rib structure on pumps, three optimized rib schemes were designed to reduce the impeller radial force and keep the hydraulic performance. Three factors were considered in the rib design: start point, end point and curve equation. According to the steady numerical simulation result in each optimized scheme by CFD, No. 2 scheme reduced about half of the radial force while keeping the hydraulic performance. A method in designing the rib structure for double-volute centrifugal pumps was provided.

Key words Centrifugal pumps, Computational fluid dynamics, Double-volute casing, Radial force

引言

双蜗壳式双吸泵作为一种新型泵,不仅继承了单蜗壳双吸离心泵高扬程、大流量、平衡轴向力等优点,理论上还可以有效地减少泵运行过程中产生的叶轮径向力,改善泵站系统的振动情况。但目前对双蜗壳的设计研究很少,其隔板位置、形状的设计方

法对泵的水力特性及叶轮径向力的影响效果尚不明确。因此,对双蜗壳式双吸泵隔板的设计方法进行深入研究,探讨不同隔板形式对其内部流场的影响关系,具有重要的工程实用价值。

目前,对离心泵径向力的研究方法可分为试验法和 CFD 数值模拟法^[1]。试验法直接、简单,但由于蜗壳内部隔板的存在,使得试验装置较单蜗壳泵

收稿日期: 2010-11-11 修回日期: 2011-01-06
* 国家自然科学基金资助项目(50809073)和中央高校基本科研业务费专项资助项目(2009-2-12)
作者简介: 肖若富,副教授,主要从事流体机械优化设计及流固耦合研究,E-mail: xrf@cau.edu.cn

而言复杂、昂贵、试验精度不高、周期较长。Val S Lobanoff 等^[2]通过大量试验得出:与单蜗壳泵相比,设计合理的双蜗壳在大、小流量区域内的叶轮径向力明显降低;泵的最高效率点略有下降但高效区扩大。随着计算流体动力学的迅速发展,通过数值模拟得到流场中的非对称性受力已成为可能。杨敏等^[3]对双蜗壳隔板区压力脉动进行了频谱分析,结果表明双蜗壳内存在比较明显的压力脉动。刘建瑞等^[4]分别对双蜗壳和单蜗壳进行对比分析,发现在大、小流量区域内,双蜗壳在隔板处区域的静压力明显小于单蜗壳的静压力。但到目前为止,均无相关文献对双蜗壳式双吸泵隔板的设计方法进行数值研究。

本文采用雷诺时均方法(RANS),以 HL703 型双蜗壳式双吸泵为模型,对其隔板提出 3 种改进方案。对每一方案的过流部件进行整机定常数值模拟,得到水力特性和叶轮径向力并进行比较分析。在保持泵的原有水力性能的条件下,以减少叶轮径向力为目标,提出双蜗壳式双吸泵中隔板结构的最优设计模型,为实际工程应用提供理论依据。

1 计算模型

HL703 型双蜗壳式双吸泵,设计流量 $Q_d = 1\,750\text{ m}^3/\text{h}$,设计扬程 $H_d = 94.8\text{ m}$,泵进口直径 $D_s = 400\text{ mm}$,出口直径 $D_t = 300\text{ mm}$,叶轮出口直径 $D_2 = 558\text{ mm}$,叶轮叶片数为 6,转速 $n = 1\,480\text{ r/min}$ 。

计算域包括半螺旋形吸水室流道、叶轮流道和蜗壳流道 3 个部分。为使模拟更加逼近真实场景,计算域对双吸离心泵的进口延长 0.8 m ,出口延长 0.5 m 。采用对复杂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,在叶片周围、蜗壳隔舌及隔板处进行网格加密。

通过 5 组计算域网格总数从 60 万增至 160 万的计算结果对比,发现当网格数大于 100 万时,泵的扬程、功率和效率的波动分别稳定在 0.1% 、 0.2% 、 0.1% 以内,因此本文计算中双蜗壳双吸泵的最终网格划总数为 1 198 896 个网格单元,如图 1 所示。其中半螺旋形吸水室流道、叶轮流道和蜗壳流道网格单元数分别为 394 029、295 957、508 910 个。

2 原双蜗壳泵存在的问题

对单蜗壳泵和双蜗壳泵的 10 个工况进行数值模拟。湍流模型采用 SST $k-\omega$ 模型,其优点是低雷诺数条件下的近壁处理,对分离预测的准确度更高^[5]。边界条件采用进口流量条件,取值范围为 $250 \sim 2\,500\text{ m}^3/\text{h}$;出口给定压力条件,静压相对值为 0 Pa ,参考压力为 1 个标准大气压。假设壁面为水

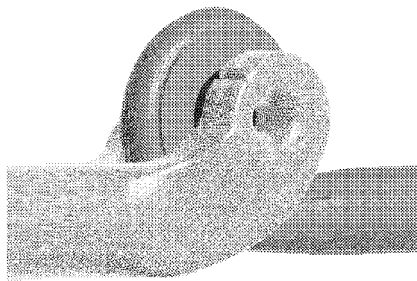


图 1 计算区域及其网格划分

Fig. 1 Computational grid for flow field

力光滑壁面,并按对数律给定无滑移边界条件。通过数值模拟计算得到泵的流量-扬程曲线和流量-效率曲线,如图 2 所示。由图可看出,单蜗壳泵试验值和计算值基本吻合,各项相对误差控制在 2.0% 以内;双蜗壳泵试验值和计算值也基本吻合,各项相对误差控制在 1.5% 以内,因此可得 SST $k-\omega$ 湍流模型预测准确,为进一步模拟计算提供了保证。

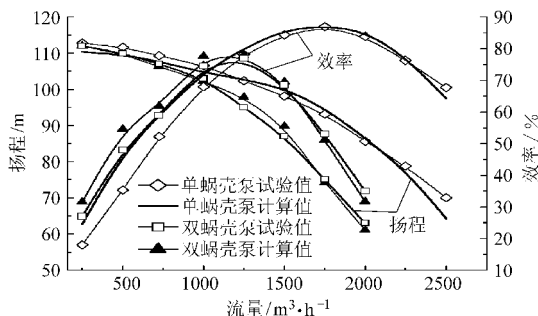


图 2 水泵性能曲线

Fig. 2 Comparison of the performance curves

通过单蜗壳泵和双蜗壳泵外特性曲线的对比,发现该双蜗壳泵在设计工况时,扬程仅为 74.1 m 、效率为 51.1% ,较单蜗壳泵分别相对下降了 21.8% 和 41.3% 。且随着流量的增大,扬程、效率急剧下降。取设计工况对双蜗壳的内部流场做进一步分析,发现由于隔板设计不合理,使隔板末端外侧及蜗壳扩散段出现较大的涡流区(图 3),使蜗壳内水力损失增加,导致泵的扬程、效率减小。因此,需要对隔板结构进行改进。

3 隔板改进

3.1 改进方案

隔板结构的设计原则:保持泵的原有水力性能,同时削减叶轮径向力。主要影响因素为隔板起始点、曲线方程、终止位置。

经以往数值模拟和试验表明^[6],隔板的最佳起始点为隔舌绕基圆旋转 180° ,这种结构可使蜗壳内部形成均匀包围叶轮出口的两个流道,阻止叶片出口高速液流与低速液流的相遇撞击,使液流的动能较少地转换为压力能,减小蜗壳内部压力。同时,对

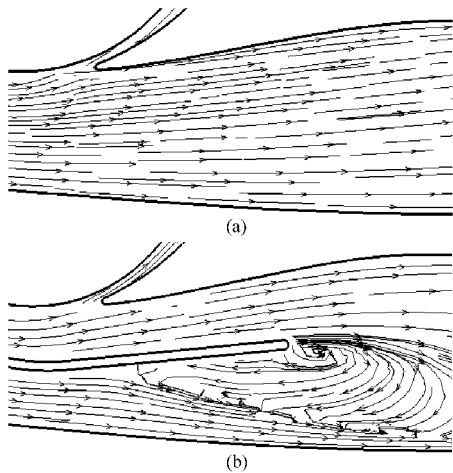


图3 设计工况下蜗壳扩散段区域流线图
Fig.3 Streamlines in the extend region of volute
(a) 单蜗壳泵 (b) 双蜗壳泵

称的两个流道可削减从叶轮流出液体的动反力对叶轮的作用,减小叶轮径向力。当隔板起始点为隔舌绕基圆旋转 180°时,液流可较平稳地绕过隔板头部,流入蜗壳内部。

根据蜗壳沿封闭周线的速度环量等于零的设计理论,隔板也应满足这一理论,即隔板的曲线方程应符合对数螺旋线^[7]

$$R = R_3 e^{\varphi \tan \alpha_3} \tag{1}$$

其中 $\tan \alpha_3 = \frac{v_m}{v_u} = \frac{2\pi R b}{K_2} = \frac{Q}{2\pi b K_2}$ $K_2 = \frac{g H t}{\omega}$

由于蜗壳宽度 b 多为扩散以减少泵体的径向尺寸,因此隔板的曲线方程也应随着 b 的增大而逐渐收敛,至第 8 断面处沿曲线的切线方向延伸,代入泵的几何参数,得到隔板的对数螺旋线为 $R = 287e^{0.13 \varphi}$ 。

以下着重对隔板的终止位置进行讨论。由隔板不同的终止位置,提出 3 种改进方案,如图 4 所示。1 号双蜗壳泵、2 号双蜗壳泵、3 号双蜗壳泵的终止位置分别为 F_1 、 F_2 、 F_3 。其中 F_1 为隔板起始位置旋转 90°, F_2 为隔板起始位置旋转 180°, F_3 为沿曲线的切线方向延伸至蜗壳第 9 断面。

3.2 改进方案的水力特性比较

对 1~3 号双蜗壳泵的全三维流道进行定常流动数值模拟计算,得到泵的流量-扬程曲线、流量-效率曲线,并与单蜗壳泵进行对比,如图 5 所示。通过对比发现,在小流量工况时,1 号双蜗壳泵较单蜗壳泵的扬程有所下降,2、3 号双蜗壳泵扬程略有升高,其效率也相应提高;大流量工况时,2、3 号双蜗壳扬程稍有降低,相对单蜗壳最多下降量为 1.25%,仍满足工作需要。从流量-效率曲线中可看出泵的高效区有所变宽,最高效率为 85.5%,模拟结果与 Val

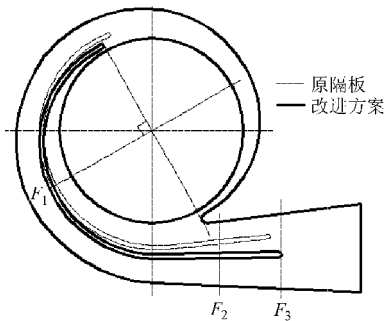


图4 改进方案隔板位置示意图
Fig.4 End point location in each optimum rib schemes

S Lobanoff 试验结果基本吻合。就水泵的水力性能而言,单蜗壳和双蜗壳泵扬程和效率都较为接近,其中 2 号双蜗壳泵和 3 号双蜗壳的水力性能比 1 号双蜗壳泵的好。

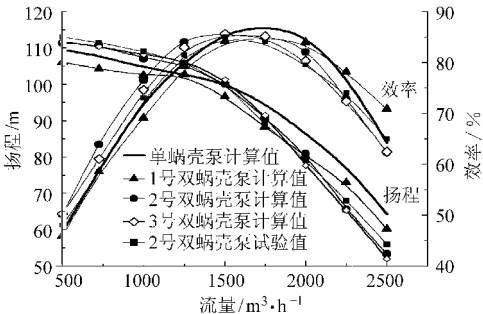


图5 双蜗壳泵性能曲线
Fig.5 Comparison of the performance curves in each double-volute pump

3.3 改进方案的叶轮径向力比较

在保持泵的原有水力性能的条件下,对不同的隔板结构所产生的叶轮径向力进行分析。通过数值模拟和计算,得到 4 台泵的流量-叶轮径向力曲线图,如图 6 所示。在设计工况点,所有改进方案产生的叶轮径向力均不同程度地有所减小;非设计工况却各不相同。在小流量工况时,1 号双蜗壳泵和 3 号双蜗壳的径向力远高于单蜗壳泵,2 号双蜗壳泵与单蜗壳相差不大。当 $Q > 1\,000\text{ m}^3/\text{h}$ 时,2 号双蜗壳泵和 3 号双蜗壳的径向力明显削减,且随着流量的增加,削减效果愈加显著,可见隔板不同的终止位置直接影响着叶轮径向力的大小。通过流量-叶轮径向力曲线的比较可得出:2 号双蜗壳泵对减小叶轮径向力的效果最突出。

3.4 改进方案的内部流场分析比较及试验验证

图 7 是 2 号双蜗壳泵和 3 号双蜗壳泵在设计工况下隔板终止位置的流线图。可看出,经过隔板的结构改进设计,液流在 2 号双蜗壳泵中流动顺畅,没有发生液流和隔板的撞击或阻断,隔板两侧同时受到液流的动反力的作用,有效地平衡了叶轮径向力。3 号双蜗壳泵中,液流在隔板末端的外侧面产生一

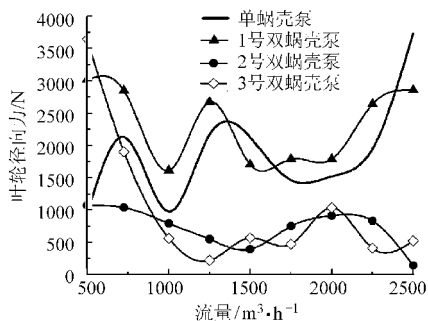


图6 双蜗壳泵叶轮径向力的比较曲线

Fig. 6 Comparison of the impeller radial force in each double-volute pump

个涡流,但其尺度较原双蜗壳泵的涡流区尺度小,由此得出:隔板的终止位置不可无限延伸,以避免在蜗壳的扩散段产生涡流区,使液体能量损失增加,最终导致泵扬程和效率的下降。

对2号双蜗壳泵进行水力性能试验测试,得到其流量-扬程曲线、流量-效率曲线,如图5所示。通过比较可知,2号双蜗壳泵水力性能的试验值与计算值基本吻合,满足泵的工作要求,符合“保持泵的原有水力性能,同时削减叶轮径向力”的隔板结构设计原则,因此得到:2号双蜗壳泵为3个隔板改进方案中的最优方案。

4 结论

(1) 单、双蜗壳泵的数值模拟及试验结果表明:在单蜗壳式双吸泵中增加合理的隔板结构,可使该双蜗壳式双吸泵保持原有的水力性能,同时削减叶

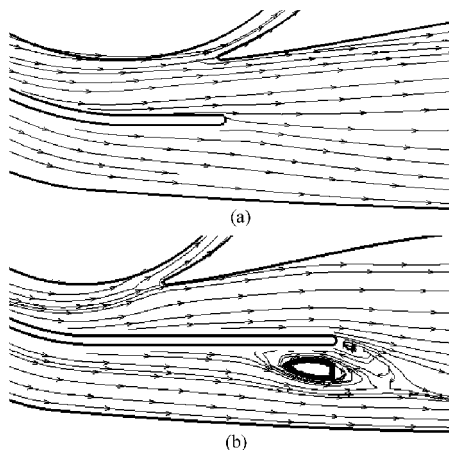


图7 设计工况下改进方案的扩散段区域流线图

Fig. 7 Streamlines in the extend region of volute

(a) 2号双蜗壳泵 (b) 3号双蜗壳泵

轮径向力。

(2) 原双蜗壳泵的数值模拟及试验结果表明:隔板的不合理设计会使蜗壳内水力损失增加,导致泵的扬程、效率减小,已无法满足泵的工作要求,也不能达到减小叶轮径向力的初衷。

(3) 通过3种改进方案的数值模拟结果对比及2号双蜗壳泵水力性能试验结果可得到:在隔板起始点、曲线方程、终止位置3个影响因素中,隔板结构的最优设计模型是起始点为隔舌绕基圆旋转 180° 、曲线方程为 $R = R_3 e^{\pi \tan \alpha_3}$ 、终止位置为隔板起始点旋转 180° 。此时的双蜗壳泵在设计流量和非设计流量时的径向力均为最小,隔板对叶轮径向力的削减效果最为明显。

参考文献

- 赵啸冰, 许洪元, 王晓东, 等. 水力机械蜗壳的研究进展[J]. 农业机械学报, 2003, 34(2): 136 ~ 140.
Zhao Xiaobing, Xu Hongyuan, Wang Xiaodong, et al. Research and development on volute of hydraulic machinery [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2003, 34(2): 136 ~ 140. (in Chinese)
- Val S Lobanoff, Robert R Ross. Centrifugal pumps: design and application [M]. Houston: Gulf Publishing Company, 1992.
- 杨敏, 阎思明, 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 simulation 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)
- 刘建瑞, 徐永刚, 苏起钦, 等. 基于 FLUENT 的单-双蜗壳离心泵径向力分析[J]. 排灌机械, 2009, 27(2): 83 ~ 86.
Liu Jianrui, Xu Yonggang, Su Qiqin, et al. Analysis of radial force in centrifugal pump with single and double volute based on FLUENT [J]. Drainage and Irrigation Machinery, 2009, 27(2): 83 ~ 86. (in Chinese)
- 朱嵩, 王振宇, 毛根海, 等. 弯肘形尾水管流场的三维数值模拟研究[J]. 水力发电学报, 2006, 25(1): 76 ~ 80.
Zhu Song, Wang Zhenyu, Mao Genhai, et al. Study on flow in an elbow draft tube by 3D numerical simulation [J]. Journal of Hydroelectric Engineering, 2006, 25(1): 76 ~ 80. (in Chinese)
- 周兵, 陈乃祥. 双蜗壳内部定常湍流数值研究[J]. 青岛大学学报: 工程技术版, 2004, 19(2): 72 ~ 75.
Zhou Bing, Chen Naixiang. Numerical study of the steady turbulent flow in a double volute [J]. Journal of Qingdao University: Engineering & Technology Edition, 2004, 19(2): 72 ~ 75. (in Chinese)
- 关醒凡. 现代泵技术手册[M]. 北京: 宇航出版社, 1995: 244.