

蜗壳进口宽度对离心泵非定常性能的影响研究

张明祯¹, 符杰², 常方圆², 王辉艳²

(1. 西华大学 流体及动力机械教育部重点实验室, 四川 成都 610039; 2. 西华大学 能源与动力工程学院, 四川 成都 610039)

摘要:为分析蜗壳进口宽度对离心泵非定常性能的影响,以一台比转速为126的离心泵为研究对象,采用ANSYS CFX软件的标准 $k-\varepsilon$ 湍流模型对同一叶轮、不同蜗壳进口宽度(56、63、66.5和70 mm)时,不同流量工况(0.8~1.2设计流量)条件下泵的外特性、内部流场以及压力脉动进行研究。结果表明:在设计流量下,适当改变蜗壳进口宽度对离心泵的扬程、效率影响不大;但随着蜗壳进口宽度的增大,蜗壳隔舌处的湍动能增大并向扩散段延伸;同时,蜗壳隔舌处压力脉动的压力值增大了4.2%,压力脉动幅值增大了3.4倍。设计时为提高中比转速离心泵的综合性能,应取蜗壳进口宽度为叶轮出口直径的1.8倍。

关键词:离心泵;蜗壳;压力脉动

中图分类号:TH311 文献标识码:A DOI:10.16146/j.cnki.rndlgc.2020.03.012

[引用本文格式]张明祯,符杰,常方圆,等.蜗壳进口宽度对离心泵非定常性能的影响研究[J].热能动力工程,2020,35(3):87-92. ZHANG Ming-zhen, FU Jie, CHANG Fang-yuan, et al. Effect of volute Inlet width on the unsteady performance of centrifugal pumps [J]. Journal of Engineering for Thermal Energy and Power, 2020, 35(3): 87-92.

Effect of Volute Inlet Width on the Unsteady Performance of Centrifugal Pumps

ZHANG Ming-zhen¹, FU Jie², CHANG Fang-yuan², WANG Hui-yan²

(1. Key Laboratory of Fluid and Power Machinery, Ministry of Education, Xihua University, Chengdu, China, Post Code: 610039; 2. School of Energy and Power Engineering, Xihua University, Chengdu, China, Post Code: 610039)

Abstract: To study the effect of the volute inlet width on the unsteady performance of centrifugal pumps, a centrifugal pump with a specific speed of 126 was taken as the research object. The standard $k-\varepsilon$ turbulent model in ANSYS CFX software was used to simulate the external characteristics, internal flow field and pressure pulsations of the pump with the same impeller, different volute inlet widths (56 mm, 63 mm, 66.5 mm and 70 mm) and at different flow rates (0.8 to 1.2 times of the design flow rate). The results show that the appropriate changes of volute inlet width have a little effect on the lift and efficiency of the centrifugal pump at the design condition. As the inlet width increases, the turbulent energy at the volute tongue increases and extends toward the diffuser. Meanwhile, the pressure value of the pressure pulsation at the volute tongue is increased by 4.2%, and the pressure pulsation amplitude is increased by 3.4 times. To improve the comprehensive performance of the medium specific speed centrifugal pump, the volute inlet width should be 1.8 times of the impeller outlet diameter.

Key words: centrifugal pump, volute, pressure pulsation

收稿日期:2018-03-09; 修订日期:2018-06-05

基金项目:四川省教育厅项目(18ZB0560);西华大学研究生创新基金项目(yejj2018038)

Fund-supported Project: Sichuan Provincial Education Department Project (18ZB0560), The Graduate Innovation Found of Xihua University (yejj2018038)

作者简介:张明祯(1993-),男,山西汾阳人,西华大学硕士研究生。

通讯作者:符杰(1978-),男,四川达县人,西华大学副教授, E-mail: f909xh@163.com.

引 言

离心泵在运行过程中因压力脉动常常会产生振动和噪声,而诱发压力脉动的主要原因有动静干涉、流道内部二次流及泵内汽蚀^[1]。目前,研究离心泵压力脉动的主要手段有数值模拟和试验,国内外学者对压力脉动的研究主要集中在其起因和特性分析两个方向。DRING 等人^[2]研究发现动静干涉作用中的势流和尾流是引起压力脉动的重要诱因。戴菡葳等人^[3]通过试验和数值模拟的方法对离心泵泵腔内压力脉动强度与叶轮出口宽度的关系进行了探究,发现在叶轮出口宽度和泵腔间隙的比值为 1.81 时能显著改善离心泵泵腔内的压力脉动。姚志峰等人^[4]对不同叶轮形式离心泵的压力脉动和空化特性进行试验研究,结果发现叶轮形式对离心泵压力脉动的频率及其特性影响较小,但对压力脉动的幅值大小影响较大。王洋等人^[5]采用 CFD 技术验证了离心泵压力脉动的主要脉动源来源于叶轮与隔舌间的动静干涉。窦唯等人^[6]采用数值模拟完成隔舌厚度对高速离心泵压力脉动的影响研究,发现高速离心泵隔舌厚度与流体激振力的幅值成正比。万伦等人^[7]通过研究发现,适当增大隔舌安放角能改善离心泵的压力脉动,且离心泵存在一个最佳隔舌安放角使其压力脉动幅值最小。孟根其其格等人^[8]对离心泵蜗壳内非定常流动特性进行数值模拟,表明蜗壳内的压力脉动最大幅值在非空化时位于蜗舌处,空化时在第Ⅰ断面附近。王松林等人^[9]对离心泵蜗壳内的非定常流动特性进行研究,发现蜗壳内压力脉动的最大幅值在第Ⅱ断面附近。由此可知,当前针对离心泵压力脉动的研究主要以隔舌为主,而研究蜗壳进口宽度对压力脉动的影响较少。顾延东等人^[10]对低比转速离心泵叶轮出口宽度进行探究,发现对叶轮出口宽度进行合理取值能改善不同工况下蜗壳内的压力脉动。江伟等人^[11]采用数值模拟方法进行离心泵蜗壳进口边对叶轮径向力的影响研究,结果表明减小离心泵蜗壳进口宽度能改善小流量工况下的径向力,而增大蜗壳进口宽度能改善大流量工况下的径向力。这也说明蜗壳进口宽度对离心泵的压力脉动有较大影响。因此,研究蜗壳进口宽度对离心泵性能的影响具有一定的现实意义。

本文以比转速为 126 的中比转速离心泵为例,在保证蜗壳进口扩散角不变的前提下,根据蜗壳进口宽度选取原则: $b_3 = (1.6 \sim 2.0)b_2$,蜗壳进口宽度 b_3 分别为 56、63、66.5 和 70 mm,在相同转速下,对泵的不同流量工况(0.8 Q_d 、0.9 Q_d 、1.0 Q_d 、1.1 Q_d 和 1.2 Q_d)利用 CFD 软件进行数值模拟,分析不同蜗壳进口宽度对同一叶轮离心泵的外特性、内部流场以及压力脉动的影响。

1 几何参数及网格划分

1.1 几何参数

离心泵设计参数和结构尺寸如表 1 所示。

表 1 离心泵设计参数及结构尺寸
Tab. 1 Centrifugal pump design parameters
and structural dimensions

参 数	数 值
流量 $Q_d/\text{m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$	340
扬程 H/m	30
转速 $n/\text{r} \cdot \text{min}^{-1}$	1 475
叶轮叶片数 Z	6
叶轮吸入口直径 D_f/mm	160
叶轮轮毂直径 d_h/mm	0
叶轮进口直径 D_1/mm	182
叶轮出口直径 D_2/mm	320
叶轮出口宽度 b_2/mm	35
叶片出口安放角 $\beta_2/(\circ)$	20
叶片包角 $\varphi/(\circ)$	140
蜗壳基圆直径 D_3/mm	370

在保证泵其它几何参数不变的前提下,对蜗壳进口宽度 b_3 分别为 56、63、66.5 和 70 mm 的 4 种离心泵进行模型建立,并在 CFturbo 软件中生成对应模型流体域的三维模型。叶轮和蜗壳流体域的几何模型如图 1 所示。

1.2 网格划分

在三维制图软件 UG(Unigraphics)中对 4 种蜗壳进口宽度的离心泵模型的进口段和出口段进行适当的延伸,并采用 ICEM 软件选取适应性能良好的非结构化四面体网格进行网格划分。为了提高计算域的网格质量和数值模拟计算的精确度,在泵的进出口、叶片和隔舌曲率较大位置处采用网格加密技术进行网格划分,网格划分的壁面 y^+ 数值范围为

53 ~ 168,符合模型壁面 y^+ 要求范围^[12]。并在进、出口延长段和叶轮网格数不变的前提下,只改变蜗壳网格数对模型进行网格无关性验证,其结果如表 2 所示,最终确定全流道计算域网格单元数为 2 081 356。



图 1 叶轮和蜗壳计算域

Fig.1 Computational domain of impeller and volute

表 2 网格无关性验证
Tab.2 Verification of grid independence

网格	全流道网格数	相对扬程	相对效率
1	1719305	1.0082	0.9651
2	1885026	1.0169	0.9774
3	2015150	1.0235	0.9888
4	2067971	1.0103	0.9942
5	2081356	1.0000	1.0000

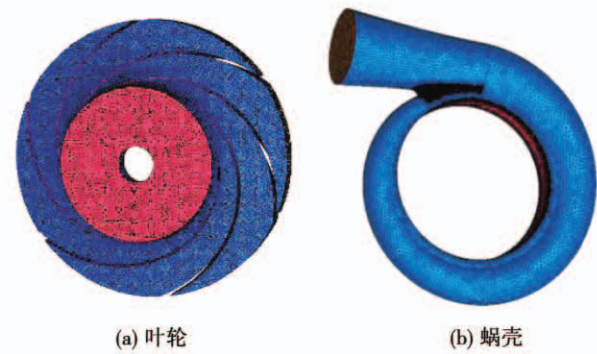


图 2 叶轮和蜗壳的网格图

Fig.2 Grid of impeller and volute

2 计算方法及监测点的选取

2.1 计算方法及边界条件

在 Ansys CFX 软件中采用标准 $k - \varepsilon$ 湍流模型

对所建立的模型进行定常和非定常数值模拟。进口边界条件设置为总压进口,出口边界条件设置为质量流出口。所有流体域的固体壁面均采用无滑移的壁面函数,控制方程中的对流离散项均采用二阶高精度格式。定常计算时流体域中的动静交界面设置为冻结转子模型(Frozen rotor),非定常计算时动静交界面设置为瞬态动静交界面(Transient rotor),网格节点采用通用网格界面 GGI (general grid interface)模式的匹配方式。非定常计算以定常计算结果为基础,为了确保计算结果的精度,取叶轮每旋转 3° 所用的时间为一个时间步长,即 $\Delta t = 3.448 \times 10^{-4}$ s,叶轮一个周期需 120 个时间步长,叶轮旋转 6 个周期后计算结果趋于稳定,所以选用第 6 个周期的数据作相应的分析。残差收敛设置为 10^{-5} 。

2.2 监测点的选取

为了清楚地分析不同蜗壳进口宽度对离心泵内部流动和压力脉动特性的影响,在蜗壳流道内选取了 6 个监测点对蜗壳流道的压力情况进行监测。各监测点的位置如图 3 所示, P_1 表示蜗壳隔舌处的监测点, $P_2 - P_5$ 监测点表示蜗壳流道内的监测点, P_6 表示蜗壳出口处的监测点。

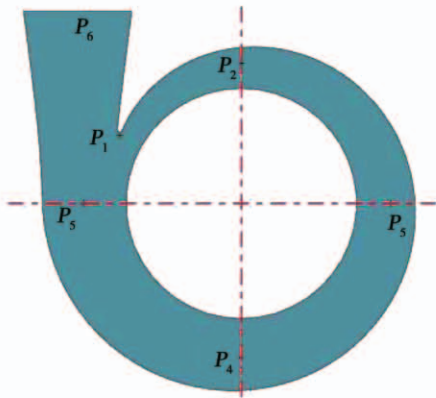


图 3 监测点位置

Fig.3 Location of monitoring points

3 结果分析

3.1 外特性分析

外特性通常作为判断离心泵综合性能的重要依据。其扬程和效率的计算式分别为:

$$H = \frac{p_{out} - p_{in}}{\rho g} + \Delta Z$$

(1)

$$\eta = \frac{\rho g Q H}{M \omega}$$

(2)

式中： p_{in} —泵进口总压，Pa； p_{out} —泵出口总压，Pa； ρ —流体密度， kg/m^3 ； g —重力加速度， m/s^2 ； ΔZ —泵出口与进口高度差，m； Q —设计流量， m^3/s ； H —设计扬程，m； M —旋转产生的扭矩， $\text{N} \cdot \text{m}$ ； ω —叶轮旋转产生的角速度， rad/s 。

图 4 表示 4 种不同蜗壳进口宽度下该泵的外特性曲线。从流量 - 扬程曲线中可知，不同蜗壳进口宽度的泵在相同工况下扬程相差较小，蜗壳进口宽度 b_3 为 70 mm 时泵的扬程略高于其他进口宽度的扬程。在设计流量下， b_3 为 70 mm 的泵比 b_3 为 63 mm 的泵的扬程高了 0.35 m。从流量 - 效率曲线中可知，4 种蜗壳进口宽度的泵效率在各工况点下都较为接近，当 b_3 为 70 mm 时，高效区的范围稍大。

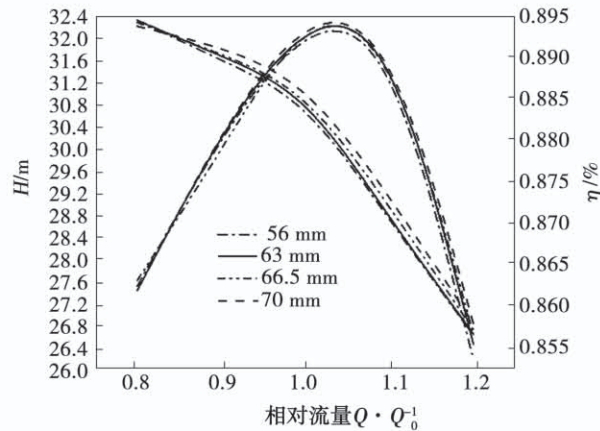


图 4 离心泵外特性曲线

Fig. 4 Centrifugal pump external characteristic curve

由此可见，蜗壳进口宽度对泵的外特性影响较小，为减少压力脉动分析的计算量，对压力脉动分析时选择蜗壳进口宽度差值为 7 mm 的 56、63 和 70 mm 3 种模型进行分析。

3.2 压力分布

图 5 表示不同蜗壳进口宽度在设计流量 ($Q_d = 340 \text{ m}^3/\text{h}$) 下叶轮和蜗壳截面的静压力分布。从图 5 可知，不同蜗壳进口宽度下叶轮和蜗壳部分的静压分布特征相近。在同一工况下，叶轮内部的静压随其半径的增加而增大，且叶轮内最大静压值在其出口处。蜗壳内静压力存在明显的梯度变化，蜗壳壁面的高压区范围随着蜗壳进口宽度的增大有所减小，在隔舌处变化最大。

3.3 湍动能分布

湍动能是衡量离心泵压力脉动大小的重要指

标，湍动能越小表示流体流动越稳定，反之表示流体流动越剧烈，流体流动越没有规律性。设计流量下 3 种模型隔舌处的湍动能有显著变化。其结果如图 6 所示，流道中的湍动能随蜗壳进口宽度 b_3 的增加逐渐增大，表示流体流动更剧烈。当蜗壳进口宽度较小时，湍动能主要集中在隔舌附近，而 b_3 增加到 70 mm 时，流道中湍动能已经蔓延到了蜗壳出口端，表明此时流体流动变得更加剧烈。这表明适当减小蜗壳进口宽度能够显著地降低蜗壳内的湍动能，增加流体在隔舌处的稳定性。

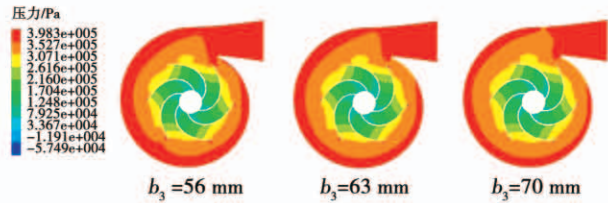


图 5 叶轮和蜗壳压力分布

Fig. 5 Pressure distribution of impeller and volute

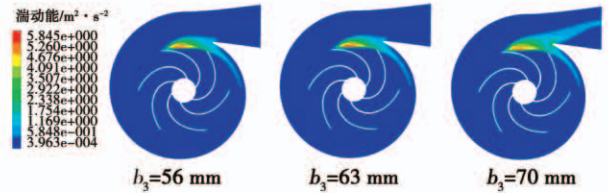


图 6 叶轮和蜗壳流道内湍动能分布

Fig. 6 Turbulent kinetic energy distribution in impeller and volute flow passage

3.4 压力脉动分析

离心泵内产生压力脉动的主要原因是叶轮与蜗壳的相互作用。对 3 个模型的离心泵非定常计算结果进行相应的分析和处理，得到相同叶轮不同蜗壳宽度下不同监测点的压力脉动时域图，如图 7 所示。从图 7 可知，设计工况下 3 种模型隔舌处的压力随时间的变化具有周期性，且变化趋势相近。隔舌处压力脉动的强度与蜗壳进口宽度 b_3 的变化有一定关系。当 b_3 为 63 和 56 mm 时， $P_1 \sim P_6$ 监测点压力脉动变化趋势基本相近。当 b_3 增大到 70 mm 时，隔舌处监测点 P_1 的压力脉动变化最剧烈，压力值从 479.67 kPa 达到了最大值 499.82 kPa，增加了 4.2%；监测点 P_2 和 P_5 的压力脉动剧烈程度略高于其他两种模型。各模型在监测点 P_3 、 P_4 和 P_6 处的压力脉动变化规律一致。

由以上分析可知,适当改变蜗壳进口宽度会对离心泵蜗壳内压力脉动强度产生一定的影响,增大蜗壳进口宽度,离心泵压力脉动强度也增大。在同

一工况下压力脉动的强度变化与隔舌密切相关,监测点越靠近隔舌处,离心泵内压力脉动强度越大,在隔舌处的压力脉动强度最剧烈。

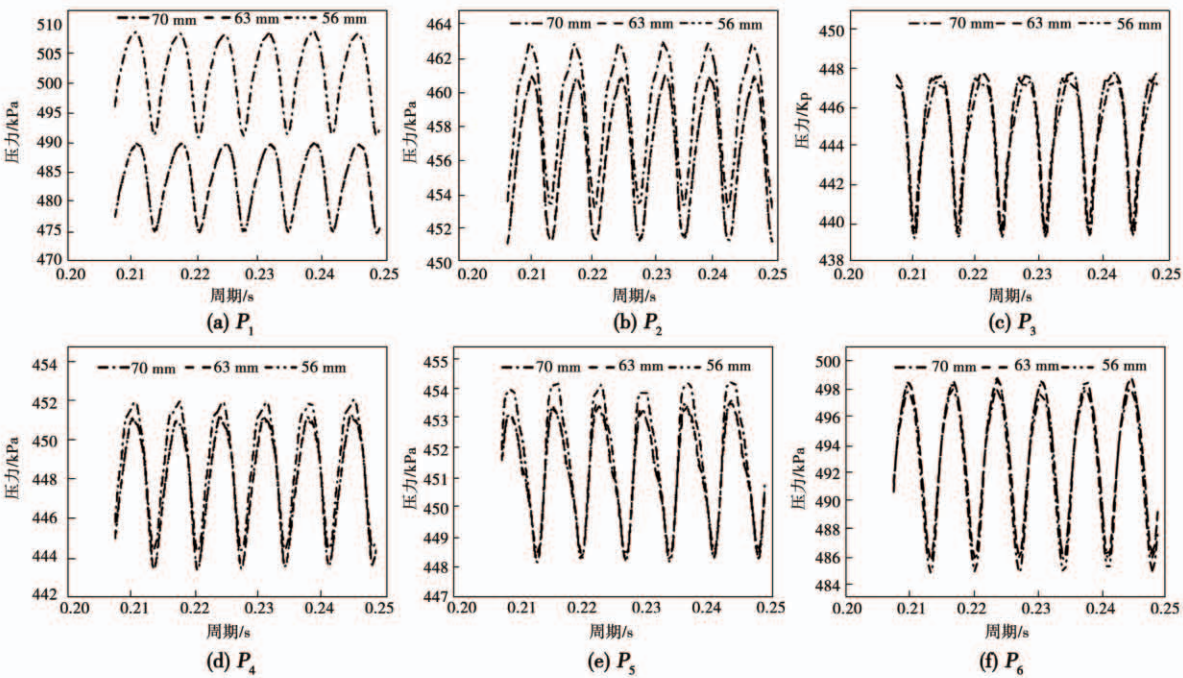


图7 不同监测点的时域图

Fig. 7 Time-domain diagram of different monitoring points

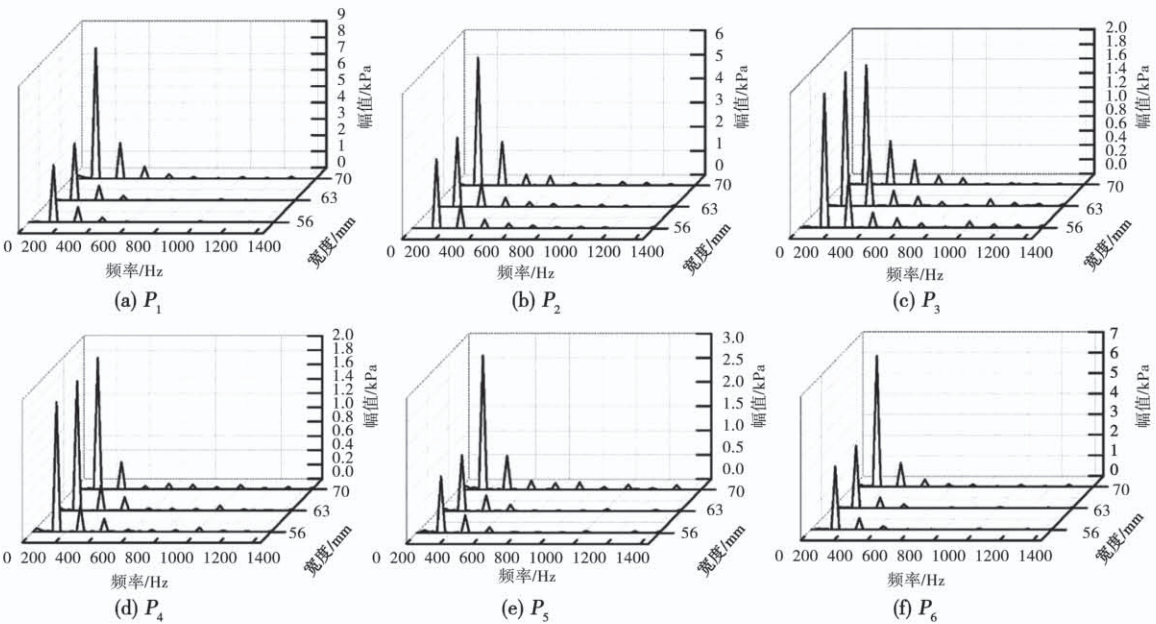


图8 不同监测点的频域图

Fig. 8 Frequency domain diagram of different monitoring points

为得到压力脉动的频域特性,对所选监测点一个周期内的静压值采取快速傅里叶变换得到如图8

所示的频域图。从图8可知,不同监测点的压力脉动幅值均以叶频为主。当蜗壳进口宽度 b_3 为56 mm

和 63 mm 时, $P_1 \sim P_6$ 监测点的频域变化相似, 蜗壳进口宽度对压力脉动幅值基本无影响; 随着蜗壳进口宽度的增加, 除去压力脉动幅值最小的 P_3 和 P_4 点外, 其余监测点的幅值明显增加, 在隔舌处达到最大 7.48 kPa, 其次是蜗壳出口段为 5.98 kPa。当蜗壳进口宽度 b_3 增大到 70 mm 时, $P_1 \sim P_4$ 监测点的压力脉动幅值从 7.3 kPa 逐渐降低到 1.7 kPa, 在距离隔舌位置最远的 P_3 和 P_4 点达到最小幅值; 从监测点 P_5 开始逐渐增加, 在蜗壳出口 P_6 处到达 6 kPa。并且同一工况下蜗壳进口宽度 b_3 为 70 mm 时隔舌处的压力脉动幅值比其他宽度增大了 3.4 倍。这表明适当地减小离心泵蜗壳进口宽度有利于减小其压力脉动, 提高离心泵的性能。

4 结 论

(1) 适当改变蜗壳进口宽度对离心泵的扬程、效率影响较小。

(2) 较小的蜗壳进口宽度能够显著降低蜗壳内的湍动能, 增加流体在隔舌处的稳定性。

(3) 随着蜗壳进口宽度的增大, 蜗壳隔舌处的湍动能增大并向扩散段延伸, 同时隔舌处的压力值增大了 4.2%, 压力脉动幅值增大了 3.4 倍。

(4) 中比转速离心泵蜗壳进口宽度设计时, 结合泵的振动和压力脉动, 为提高其综合性能, 应选择蜗壳进口宽度为叶轮出口直径的 1.8 倍。

参考文献:

- [1] 朱相源, 江 伟, 李国君, 等. 导叶与隔舌相对位置对离心泵非定常压力脉动影响的数值模拟[J]. 排灌机械工程学报, 2015, 33(10): 829-834.
ZHU Xiang-yuan, JIANG Wei, LI Guo-jun, et al. Numerical investigation into influence of installation location between guide vane and volute on unsteady pressure fluctuations in centrifugal pump with vane diffuser[J]. Journal of Drainage and Irrigation Machinery Engineering, 2015, 33(10): 829-834.
- [2] Dring R P, Joslyn H D, Hardin L W, et al. Turbine rotor stator interaction[J]. Journal of Engineering for Gas Turbines and Power, 1982, 104(4): 729-742.
- [3] 戴菡葳, 刘厚林, 丁 剑, 等. 离心泵叶轮出口宽度对泵腔内压力脉动分布的影响[J]. 排灌机械工程学报, 2015, 33(1): 20-25.
DAI Han-wei, LIU Hou-lin, DING Jian, et al. Effects of impeller outlet width on pressure pulsation in two side chambers of centrifugal pump[J]. Journal of Drainage and Irrigation Machinery Engineering, 2015, 33(1): 20-25.

- [4] 姚志峰, 陆 力, 高忠信, 等. 不同叶轮形式离心泵压力脉动和空化特性试验研究[J]. 水利学报, 2015, 46(12): 1444-1452.
YAO Zhi-feng, LU Li, GAO Zhong-xin, et al. Experimental investigation of pressure fluctuation and cavitation for a centrifugal pump with different impeller configurations[J]. Journal of hydraulic engineering, 2015, 46(12): 1444-1452.
- [5] 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.
- [6] 窦 唯, 刘占生. 高速离心泵隔舌对流体激振力的影响研究[J]. 振动工程学报, 2012, 25(6): 705-713.
DOU Wei, LIU Zhan-sheng. The investigation of the effect of volute tongue on hydrodynamic forces for high speed centrifugal pump[J]. Journal of Vibration Engineering, 2012, 25(6): 705-713.
- [7] 万 伦, 宋文武, 符 杰, 等. 隔舌安放角对中比转速离心泵非定常性能的影响[J]. 灌溉排水学报, 2018, 37(9): 84-90.
WAN lun, SONG Wen-wu, FU jie, et al. The effect of the angle of separated tongue on the performance of centrifugal pump under transient flow condition[J]. Journal of Drainage and Irrigation Machinery Engineering, 2018, 37(9): 84-90.
- [8] 孟根其其格, 谭 磊, 曹树良, 等. 离心泵蜗壳内非定常流动特性的数值模拟及分析[J]. 机械工程学报, 2015, 51(22): 183-190.
MENG Gen-qiqige, TAN Lei, CAO Shu-liang, et al. Numerical simulation and analysis of unsteady flow characteristics in centrifugal pump volute[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2015, 51(22): 183-190.
- [9] 王松林, 谭 磊, 王玉川. 离心泵蜗壳内非定常流动特性[J]. 振动与冲击, 2014, 33(11): 43-48.
WANG Song-lin, TAN Lei, WANG Yu-chuan. Characteristics of unsteady flow in a centrifugal pump volute[J]. Journal of Vibration and Shock, 2014, 33(11): 43-48.
- [10] 顾延东, 袁寿其, 裴 吉, 等. 泵叶轮出口宽度对蜗壳内压力脉动强度的影响[J]. 哈尔滨工程大学学报, 2017, 38(7): 1023-1030.
GU Yan-dong, YUAN Shou-qi, PEI Ji, et al. Influence of pump impeller outlet width on pressure fluctuation intensity in spiral case[J]. Journal of Harbin Engineering University, 2017, 38(7): 1023-1030.
- [11] 江 伟, 李国君, 张新盛, 等. 离心泵蜗壳进口边对叶轮径向力影响的数值模拟[J]. 水利学报, 2014, 45(2): 248-252.
JIANG Wei, LI Guo-jun, ZHANG Xin-sheng, et al. Numerical simulation of radial force on impeller in a centrifugal pump with different volute inlet edges[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2014, 45(2): 248-252.
- [12] 王福军. 流体机械旋转湍流计算模型研究进展[J]. 农业机械学报, 2016, 47(2): 1-14.
WANG Fu-jun. Research progress of computational model for rotating turbulent flow in fluid machinery[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2016, 47(2): 1-14.

(姜雪梅 编辑)