

导叶位置对双向竖井贯流泵装置水力性能的影响

孟凡 裴吉 李彦军 袁寿其 陈佳
(江苏大学国家水泵及系统工程技术研究中心, 镇江 212013)

摘要: 为了研究导叶位置对双向竖井贯流泵水力性能与流态的影响,利用 CFX14.5 对 6 种导叶位置方案的双向竖井贯流泵在正向运转与反向运转时分别进行小流量工况 ($0.8Q_{des}$)、设计流量工况与大流量工况 ($1.1Q_{des}$) 的定常计算,总计共 36 个工况。将数值模拟结果与泵装置外特性试验数据进行验证对比,并对计算结果进行水力性能与流态分析。研究表明:泵装置数值模拟结果与试验数据吻合度良好,最大相对误差小于 5%。泵装置正向运转时,在小流量下,泵装置效率随导叶位置 S 增加而下降, $S=40\text{ mm}$ 时的导叶水力损失最大;但是在设计流量与大流量下,泵装置效率随导叶位置 S 增加而上升, $S=100\text{ mm}$ 时的导叶水力损失最小。泵装置反向运转时,导叶位置对泵装置水力性能与流态没有显著影响,综合考虑,选择导叶位置 $S=100\text{ mm}$ 作为最终方案。

关键词: 双向竖井贯流泵; 导叶位置; 水力性能; 流态分析

中图分类号: TH312 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1298(2017)01-0135-06

Effect of Guide Vane Position on Hydraulic Performance of Two-direction Tubular Pump Device

MENG Fan PEI Ji LI Yanjun YUAN Shouqi CHEN Jia
(National Research Center of Pumps, Jiangsu University, Zhenjiang 212013, China)

Abstract: Two-direction tubular pump device can be adopted to meet the drainage and water transfer, so it was often used along Yangtze River and sea area. The analysis of hydraulic performance and internal flow becomes research hotspot. The two-direction tubular pump device consists of inlet flow passage, two-direction impeller, straight blade guide vane and outlet flow passage. In order to analyze the effect of guide vane position on hydraulic performance and flow pattern, the CFX14.5 was used to obtain the steady flow field in pump device of six different guide vane positions under positive and reverse conditions. The SST model was chosen, and mass flow rate and total pressure were set at inlet and outlet, respectively. The interfaces between inlet flow passage and impeller, and between impeller and guide vane were set as “Frozen Rotor”. The interface between guide vane and outlet flow passage was set as “None”. In addition, a smooth wall condition was used for the wall function. The results showed that good agreements between simulated and experimental results can be obtained, and the maximum relative error was less than 5%. Under positive rotation, for part-load condition, the efficiency was declined with the increase of guide vane position S and the maximum loss value in diffuser passage can be observed when S was 40 mm. However, for over-load condition and design condition, the efficiency was increased with the increase of S and the minimum loss value in diffuser passage can be obtained when S was 100 mm. Under negative rotation, the effect of guide vane position on hydraulic performance was not obvious. In summary, the guide vane position S with value of 100 mm was optimal. The results can provide reference opinion for two-direction tubular pump device.

Key words: two-direction tubular pump device; guide vane position; hydraulic performance; flow pattern analysis

收稿日期: 2016-05-30 修回日期: 2016-07-20
基金项目: “十二五”国家科技支撑计划项目(2015BAD20B01)、国家自然科学基金项目(51409123)和江苏省自然科学基金青年基金项目(BK20140554)
作者简介: 孟凡(1988—),男,博士生,主要从事流体机械研究,E-mail: 15862987401@163.com
通信作者: 裴吉(1984—),男,副研究员,主要从事流体机械研究,E-mail: jpei@ujs.edu.cn

引言

竖井贯流式机组由于发电机装置布置在开敞的竖井内,防潮、通风条件好,运行以及维护方便,机组结构简易,造价较低,广泛应用于平原地区的排灌工程^[1],也逐渐成为学者们的研究对象。不少学者采用外特性试验方法,得到了模型泵在不同叶片角度下运行的能量特性、汽蚀性能和飞逸转速特性,在此基础上换算得出原型泵的水力特性^[2-3]。随着 CFD 技术的发展,数值模拟技术逐渐应用到轴流泵的水力性能预测、压力脉动分析以及优化设计方面等^[4-14],因此学者们也开始采用数值模拟为主、试验测试为辅的方法研究泵装置。刘君等^[15]将前、后置竖井泵装置的流态进行分析对比,研究了产生水力损失的机理。徐磊等^[16]利用数值模拟与试验的方法详细分析了竖井贯流泵装置进、出水流道的内部流动机理。杨帆等^[17]研究分析了 S 形贯流泵装置过流部件的压力分布与水力性能。随着竖井贯流泵设计理论趋于成熟,朱红耕等^[18]设计出一种采用虹吸管作为出水流道的新型竖井贯流泵装置,并对进出水流道进行了流态分析。

然而泵站大多需要兼顾排涝和调水,普通竖井贯流泵装置已经不能满足需求。双向竖井贯流泵中采用直导叶叶片,双向对称形叶轮叶片使其可以兼顾正向与反向运行效率,配以合理的进出水流道,可使双向竖井贯流泵获得较高的正反运行效率。目前对双向竖井贯流泵的研究不多,主要是采用 CFD 软件对不同叶片角度情况下双向竖井贯流泵的水力性能进行预测以及针对进出水流道在正反向运行工况下进行优化设计^[19-21],但是针对导叶位置对水力性能影响的研究极少。一般情况下,导叶进口边和叶片出口边平行,其间距 $S = (0.1 \sim 0.15)D$, D 表示叶轮直径。然而在双向竖井贯流泵装置中,叶轮为双向对称形叶轮,导叶为直导叶叶片,有别于一般情况,最佳叶轮-导叶间距很难通过该公式确定。因此本文利用 CFX14.5 软件对 6 种不同导叶位置方案下的双向竖井贯流泵进行定常计算,分析导叶位置对正、反运转下泵装置水力性能的影响。

1 数值模拟

1.1 计算模型

如图 1 所示,双向竖井贯流泵装置由竖井流道、双向叶轮、直叶片导叶以及直管扩散流道组成;叶轮叶片数与导叶叶片数均为 3,叶轮直径为 300 mm,叶顶间隙为 0.5 mm。主要设计参数为:设计流量 $Q_{des} = 0.28 \text{ m}^3/\text{s}$,额定转速 $n = 1\,109 \text{ r/min}$ 。图 2 为

叶轮与导叶间距 S 示意图,如图所示本文共研究了 6 种导叶位置,每种导叶位置间隔 30 mm。

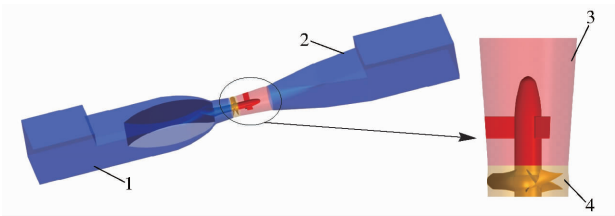


图 1 双向竖井贯流泵装置 3D 模型
Fig.1 3D model for two-direction tubular pump device
1. 竖井流道 2. 直管扩散流道 3. 导叶 4. 叶轮

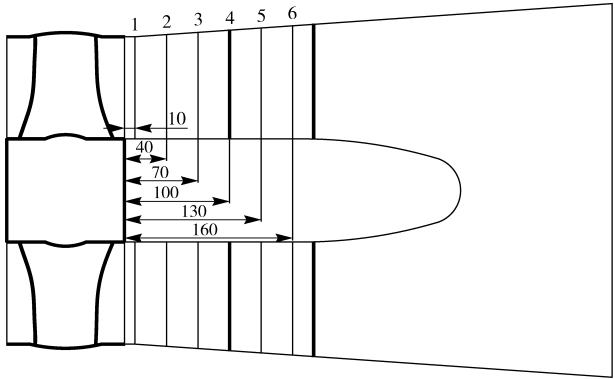


图 2 导叶位置示意图(单位:mm)
Fig.2 Sketch of guide vane position

1.2 网格划分及边界设置

如图 3 所示,利用 ICEM 对流体域进行网格划分,为了保证计算精度,所有区域均采用结构网格划分,其中,叶轮网格数为 1 983 129,竖井流道网格数为 389 954,直管扩散流道网格数为 142 272,由于导叶位置不同导叶网格不完全相同,保持在 1 500 000 左右。

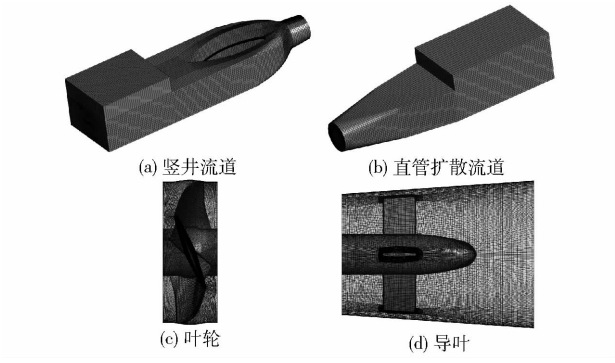


图 3 双向竖井贯流泵装置结构网格
Fig.3 Structure meshes of two-direction tubular pump device

边界条件设置中,进水池与出水池的表面设置为自由水面,自由水面对速度和湍动能均采用对称平面处理,进水流道进口采用质量流量,出水流道出口采用固定总压,总压设定为 101 325 Pa,采用自由出流边界条件。所有壁面为光滑壁面,采用无滑移

边界条件。将叶轮与进水流动道,叶轮与导叶的交界面设置为 Frozen Rotor;将导叶与出水流动道的交界面设置为 None。采用 SST 湍流模型,收敛精度设置为 1.0×10^{-4} 。

2 外特性试验验证

本试验采用闭式试验台结构,如图 4 所示,总容量为 50 m^3 ,主要由真空压力箱、压力箱、电动阀门、蝶阀、电磁流量计、压差变送计、扭矩仪组成。流量计为智能电磁流量计,测量精度在 $\pm 0.2\%$ 范围内,采用水平布置,位于 -3 m 层面,其前后直管段长度满足大于 5 倍管路直径要求,以保证各种工况下流量测量的准确性。扬程测量采用 WT2000DP5S 型智能差压变送器,测量范围为 $0 \sim 10\text{ m}$,经原位率定扬程传感器测量,不确定度在 $\pm 0.1\%$ 范围内。转矩转速采用 ZJYW1/ZJ 200N·m 智能型转矩转速传感器测量,精度在 $\pm 0.1\%$ 范围内,传感器在使用时只承受扭矩,不承受其他外力作用。



图 4 双向竖井贯流泵装置试验

Fig. 4 Test on two-direction tubular pump device

如图 5 所示,在 2 种运转方向下,试验值与数值模拟值的变化趋势均相同。泵装置正向运转时,在小流量工况下,数值模拟效率略小于试验效率,而在设计流量 ($Q_{\text{des}} = 0.28\text{ m}^3/\text{s}$) 与大流量工况下,数值模拟效率曲线与试验效率曲线吻合度很好。泵装置反向运转时,数值模拟外特性曲线与试验外特性曲线吻合度略低于泵装置正向运转时,但最大相对误差仍然小于 5%。

3 结果与分析

3.1 正向运转下导叶位置对泵装置外特性的影响

如图 6 所示,正向运转下,在小流量工况 ($Q = 0.8Q_{\text{des}}$) 下,随着导叶位置 S 逐步增大,扬程呈微弱的下降趋势。在设计流量 ($Q = Q_{\text{des}}$) 和大流量 ($Q = 1.1Q_{\text{des}}$) 工况下,随着导叶位置 S 逐步增大,扬程呈缓慢上升趋势。由此可知,竖井贯流泵装置扬程不随导叶位置发生明显变化。

如图 6 所示,正向运转下,在小流量工况 ($Q =$

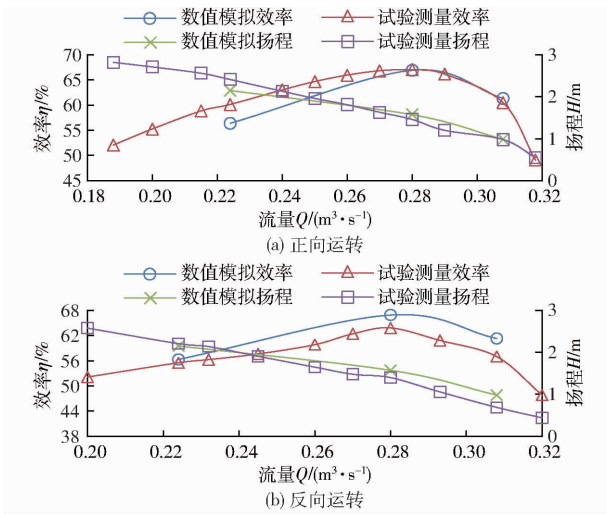


图 5 导叶位置 $S = 100\text{ mm}$ 的外特性曲线

Fig. 5 Characteristic curves for pump device with straight guide vane ($S = 100\text{ mm}$)

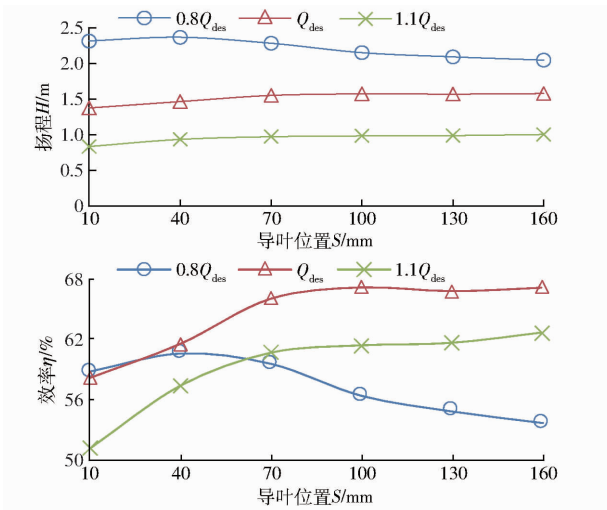


图 6 正向运转下泵装置外特性曲线

Fig. 6 Characteristic curves for pump device under positive rotation

$0.8Q_{\text{des}}$ 下,竖井贯流泵装置效率随着导叶位置 S 增加呈现先上升后下降的趋势。在设计流量 ($Q = Q_{\text{des}}$) 和大流量 ($Q = 1.1Q_{\text{des}}$) 工况下,导叶位置由 $S = 10\text{ mm}$ 增加到 $S = 100\text{ mm}$ 的过程中,泵装置效率呈现上升趋势;但是导叶位置由 $S = 100\text{ mm}$ 增加到 $S = 160\text{ mm}$ 的过程中,泵装置效率已不受导叶位置 S 明显影响。

3.2 正向运转下导叶位置对泵装置内流场的影响

叶轮正向旋转时,直叶片导叶为后导叶,主要起支撑与分流作用。由于叶轮与导叶之间存在强烈的动静干涉现象,而叶轮-导叶间距对叶轮-导叶的动静干涉强度有直接影响,所以叶轮-导叶间距对泵段内部流态有明显影响。此外,叶轮-导叶间距间接影响了导水锥长度,从而导致进入出水流动道的流体流态也受到叶轮-导叶间距的影响。

(1)导叶位置对泵段内流场的影响

如图 3 所示,设定与导叶进口轴向 461 mm 处的截面为导叶出口处,计算由进口到出口区域内的导叶水力损失。图 7 为导叶水力损失随导叶位置 S 变化曲线。如图所示,导叶位置 S 相同时,导叶水力损失随流量增加逐渐降低。在小流量工况下,导叶水力损失曲线呈现先下降后上升的趋势,当 $S = 40$ mm 时,导叶水力损失最小。在设计流量和大流量工况下,导叶水力损失随导叶位置 S 呈现微弱的波动,在 $S = 100$ mm 时,导叶水力损失最小。

以水力损失曲线波动最明显的小流量工况为例,对导叶内部流动进行分析。图 8 为小流量工况下泵段部分的竖直截面流线图。如图所示,小流量工况下,当导叶位置 $S = 10$ mm 时,回流现象主要发

生在导叶叶片附近,回流面积较大,当导叶位置 $S = 40$ mm 时,导叶内部流态平稳无明显回流现象,当导叶位置处于 70 ~ 160 mm 范围内时,随着导叶位置 S 逐渐增大,导水锥长度逐渐减小,流体在导水锥尾部收缩过快,导致直到导叶段出口流体仍有速度环量残余,导水锥尾部有明显漩涡出现,且漩涡随着导叶位置 S 增加逐渐增大。

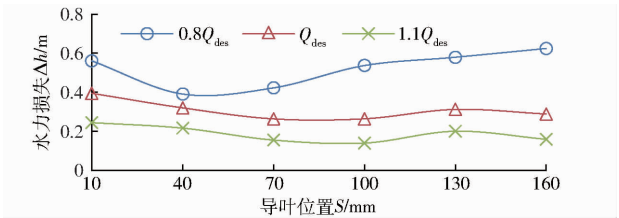


图 7 正向运转下导叶水力损失

Fig. 7 Hydraulic loss for guide vane under positive rotation

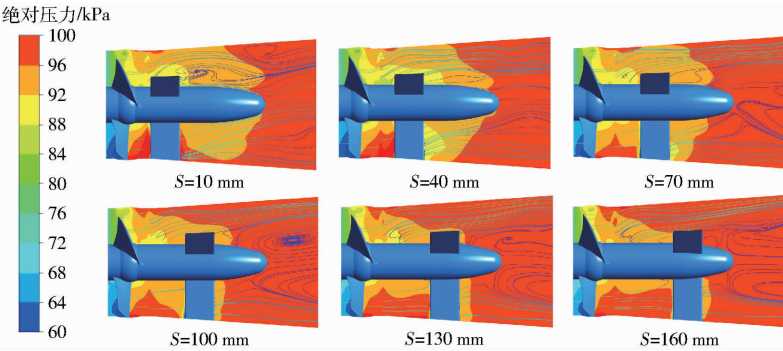


图 8 正向运转下泵段内部流场

Fig. 8 Internal flow field for pump under positive rotation

(2)导叶位置对出水流道的影响

图 9 为正向运转下出水流道水力损失曲线。如图所示,导叶位置 S 为 10 ~ 100 mm 时,出水流道水力损失不随流量增加出现规律性变化,导叶位置 S 为 100 ~ 160 mm 时,小流量工况水力损失最大,设计流量工况水力损失最小。在小流量工况下,随着导叶位置 S 增加,水力损失出现先快速上升后趋于稳定,导叶位置 $S = 10$ mm 时,水力损失最小。在设计流量工况下,水力损失随着导叶位置 S 增加呈现先下降后趋于平稳的趋势,导叶位置 $S = 100$ mm 时,水力损失最低。在大流量工况下,水力损失曲线随导叶位置 S 变化呈现波动,在导叶位置 $S = 100$ mm 时,水力损失最小。由于出水流道内部流态不稳定,而设计流量工况下的流态变化最有规律,因此以设计流量工况为例,如图 10 所示,当导叶位置 $S = 40$ mm 时,出水流道内部回流面积最大,漩涡数量最多,当导叶位置 $S = 70$ mm 与 $S = 100$ mm 时,出水流道内部流态平稳,无明显漩涡。

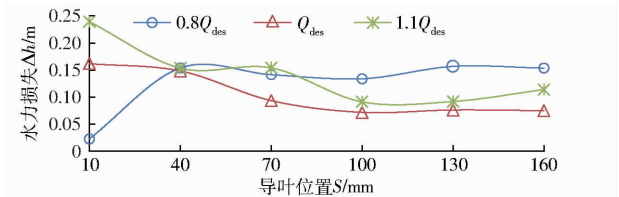


图 9 正向运转下出水流道水力损失

Fig. 9 Hydraulic loss for outflow runner under positive rotation

变。泵装置效率在小流量工况下,基本不随导叶位置发生变化。在设计流量工况和大流量工况下,泵装置效率曲线呈现先下降后上升最后保持平稳的趋势。

3.4 反向运转下导叶位置对泵装置内流场的影响

叶轮反向运转时,直叶片导叶为前导叶,主要起防止预漩和支撑作用,导叶位置 S 会对泵段内流动产生一定影响,但对出水流道与进水流道影响较小。因此,叶轮反向运转时,只分析导叶位置 S 对泵段内流场的影响。

如图 12 所示,与泵装置正向运转时相比,泵装置反向运转下的导叶水力损失较小,且随流量增大而增加。在 3 种流量工况下,导叶水力损失曲线的

3.3 反向运转下导叶位置对泵装置外特性的影响

如图 11 所示,泵装置反向运转时,扬程流量增加逐渐下降,且随着导叶位置 S 增加,基本保持不

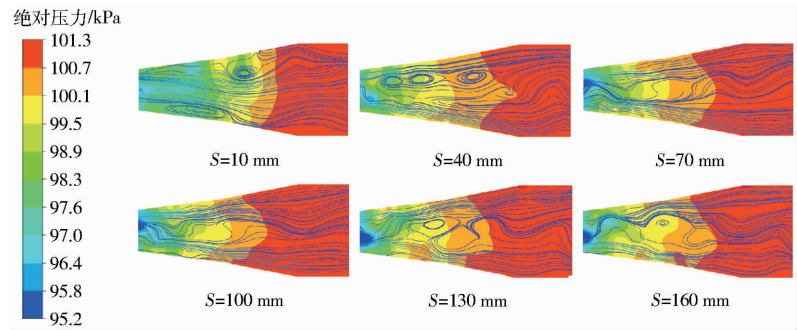


图 10 正向运转下水流道竖直截面流线分布

Fig. 10 Streamline distributions in section of outflow runner under positive rotation

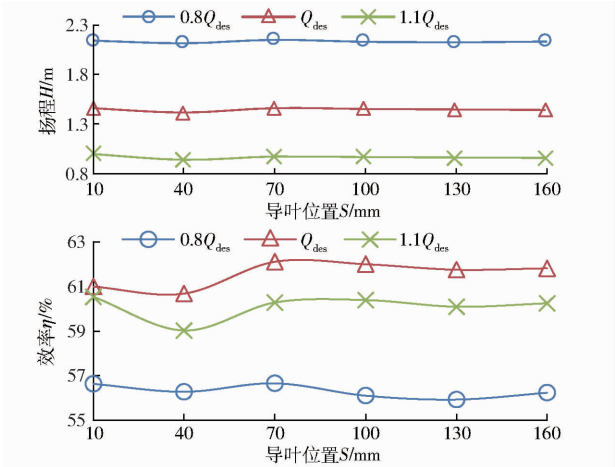


图 11 反向运转下泵装置外特性曲线

Fig. 11 Characteristic curves of pump device under negative rotation

变化趋势基本相同,在导叶位置 $S = 40\text{ mm}$ 与 $S = 130\text{ mm}$ 处,存在峰值,在导叶位置 $S = 100\text{ mm}$ 处,存在谷值。

由于 3 种流量工况下的水力损失曲线变化相

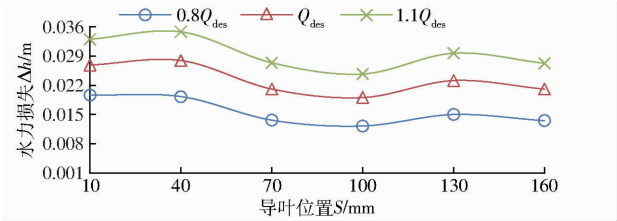


图 12 反向运转下导叶水力损失

Fig. 12 Hydraulic loss for guide vane under negative rotation

同,本文选取设计流量为例进行研究分析。如图 13 所示,导叶由导水锥和导叶叶片组成,导叶的高压区主要分布在导水锥顶部,导叶低压区主要分布在导叶叶片前缘与尾缘。随着导叶位置 S 增加,导叶叶片低压区面积不断减小,所受压力逐渐增大,当导叶位置 $S = 100\text{ mm}$ 时,导叶叶片压力分布最均匀。

在设计流量与大流量工况下,导叶位置 $S = 100\text{ mm}$ 时,泵装置正、反转下的水力性能都保持较高水平,且由于结构布置因素(导叶-叶轮间距过大会影响泵装置的受力平衡情况),综合考虑,该导叶位置选为最终方案。

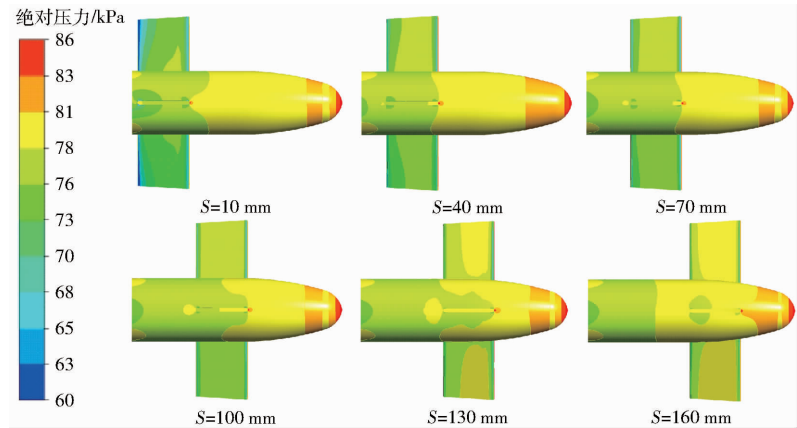


图 13 反向运转下导叶压力分布

Fig. 13 Pressure distributions for guide vane under negative rotation

4 结论

(1) 泵装置正向运转时,泵装置扬程不受导叶位置明显影响。在小流量下,泵装置效率随导叶位置 S 增加而下降,但是在设计流量和大流量下泵装

置效率随导叶位置 S 增加而上升。当 S 增加到 100 mm 后,所有流量下的效率不再受到导叶位置的明显影响。

(2) 泵装置正向运转时,在小流量工况下,导叶位置 $S = 40\text{ mm}$ 时,导叶水力损失最小,导叶段内部

流态最好;在设计流量与大流量工况下,导叶位置 $S = 100 \text{ mm}$ 时,导叶水力损失最小。

(3)泵装置正向运转时,在大流量工况下,出水流动道水力损失不受导叶位置明显影响;在小流量与设计流量工况下,导叶位置 $S = 40 \text{ mm}$ 时,出水流动道水力

损失最大; $S = 100 \text{ mm}$ 时,出水流动道水力损失最小。

(4)泵装置反向运转时,泵装置外特性性能受导叶位置影响很小。导叶位置 $S = 100 \text{ mm}$ 时,导叶水力损失最小。

参 考 文 献

- 1 郑源,张德虎,廖锐,等. 竖井贯流泵能量特性试验研究[J]. 排灌机械,2003,21(3):31-34.
ZHENG Yuan,ZHANG Dehu,LIAO Rui, et al. Experimental study on equipment energy characteristic for shaft tubular pump[J]. Drainage and Irrigation Machinery, 2003,21(3):31-34. (in Chinese)
- 2 徐磊,陆林广,陈伟,等. 邳州站竖井式贯流泵装置模型试验研究[J]. 灌溉排水学报,2012,31(2):120-123.
XU Lei,LU Linguang,CHEN Wei, et al. Model test for pit tubular pump system of Pizhou of pumping station[J]. Journal of Irrigation and Drainage, 2012,31(2):120-123. (in Chinese)
- 3 陆伟刚,张旭. 特低扬程竖井贯流泵装置水力特性试验研究[J]. 灌溉排水学报,2012,31(6):103-106,125.
LU Weigang,ZHANG Xu. Research on model test of hydraulic characteristics for super-low head shaft-well tubular pump unit[J]. Journal of Irrigation and Drainage, 2012,31(6):103-106,125. (in Chinese)
- 4 WANG Zhengwei, PENG Guangjie, ZHOU Lingjiu, et al. Hydraulic performance of a large slanted axial-flow pump[J]. Engineering Computations, 2010, 27(2): 243-256.
- 5 WU Yulin, LIU Shuhong, DOU Shuhua, et al. Numerical prediction and similarity study of pressure fluctuation in a prototype Kaplan turbine and the model turbine[J]. Computers & Fluids, 2012, 56: 128-142.
- 6 KIM Jin Hyuk, AHN Hyung Jin, KIM Kwang Yong. High-efficiency design of a mixed-flow pump[J]. Science China Technological Sciences, 2010, 53(1): 24-27.
- 7 LIU Chao, JIN Yan, ZHOU Jiren, et al. Numerical simulation and experimental study of a two-floor structure pumping system[C]// Proceedings of 2010 ASME 2010 Power Conference, 2010:777-784.
- 8 TANG Xuelin, WANG Fujun, LI Yaojun, et al. Numerical investigations of vortex flows and vortex suppression schemes in a large pumping station[J]. Journal of Mechanical Engineering Science, 2011, 225(6): 1459-1480.
- 9 TOKYAY T E, CONSTANTINESU S G. Validation of a large-eddy simulation model to simulate flow in pump intakes of realistic geometry[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2006, 132(12): 1303-1315.
- 10 ZHU H G, ZHANG R T, ZHOU J R. Optimal hydraulic design of new-type shaft tubular pumping system[C]// IOP Conference Series: Earth and Environmental Science, 2012, 15(5): 2026.
- 11 HEO M W, KIM K Y, KIM J H, et al. High-efficiency design of a mixed-flow pump using a surrogate model[J]. Journal of Mechanical Science and Technology, 2016, 30(2): 541-547.
- 12 ZHANG D S, PAN D Z, XU Y, et al. Numerical investigation of blade dynamic characteristics in an axial flow pump[J]. Thermal Science, 2013, 17(5): 1511-1514.
- 13 LI Y J, WANG F J. Numerical investigation of performance of an axial-flow pump with inducer[J]. Journal of Hydrodynamics, Ser. B, 2007, 19(6): 705-711.
- 14 ZHANG D S, SHI W D, CHEN B, et al. Unsteady flow analysis and experimental investigation of axial-flow pump[J]. Journal of Hydrodynamics, Ser. B, 2010, 22(1): 35-43.
- 15 刘君,郑源,周大庆,等. 前、后置竖井贯流泵装置基本流态分析[J]. 农业机械学报,2010,41(增刊):32-38.
LIU Jun,ZHENG Yuan,ZHOU Daqing, et al. Analysis of basic flow pattern in shaft front-positioned and shaft rear-positioned tubular pump systems[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2010, 41(Supp.): 32-38. (in Chinese)
- 16 徐磊,陆林广,陈伟,等. 南水北调工程邳州站竖井贯流泵装置进出水流态分析[J]. 农业工程学报,2012,28(6):50-56.
XU Lei,LU Linguang,CHEN Wei, et al. Flow pattern analysis on inlet and outlet conduit of shaft tubular pump system of Pizhou pumping station in South-to-North Water Diversion Project[J]. Transactions of the CSAE,2012,28(6): 50-56. (in Chinese)
- 17 杨帆,刘超,汤方平,等. S形贯流泵装置多工况过流部件水力性能分析[J/OL]. 农业机械学报,2014,45(5):71-77.
http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?file_no=20140511&flag=1. DOI: 10.6041/j.issn.1000-1298.2014.05.011.
YANG Fan,LIU Chao,TANG Fangping, et al. Analysis on vibration characteristics of S-shaped shaft-extension tubular pumping system[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2014, 45(5):71-77. (in Chinese)
- 18 朱红耕,戴龙洋,张仁田,等. 新型竖井贯流泵装置研发与数值分析[J]. 排灌机械工程学报,2011,29(5):418-422.
ZHU Honggeng, DAI Longyang, ZHANG Rentian, et al. Development and numerical analysis of new-type shaft tubular pumping system[J]. Journal of Drainage and Irrigation Machinery Engineering, 2011,29(5):418-422. (in Chinese)
- 19 成立,刘超,汤方平,等. 对称翼型转轮双向竖井贯流泵装置[J]. 排灌机械,2008,26(5):50-54.
CHENG Li,LIU Chao,TANG Fangping, et al. Shaft tubular pump system with symmetric aerofoil blade[J]. Drainage and Irrigation Machinery, 2008,26(5):50-54. (in Chinese)
- 20 杨帆,金燕,刘超,等. 双向潜水贯流泵装置性能试验与数值分析[J]. 农业工程学报,2012,28(16):60-67.
YANG Fan,JIN Yan,LIU Chao, et al. Numerical analysis and performance test on diving tubular pumping system with symmetric aerofoil blade[J]. Transactions of the CSAE, 2012, 28(16):60-67. (in Chinese)
- 21 谢荣盛,吴忠,何勇,等. 双向竖井贯流泵进出水流道优化研究[J/OL]. 农业机械学报,2015,46(10):68-74. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?file_no=20151011&flag=1. DOI: 10.6041/j.issn.1000-1298.2015.10.011.
XIE Rongsheng, WU Zhong, HE Yong, et al. Optimization research on passage of bidirectional shaft tubular pump[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2015, 46(10):68-74. (in Chinese)