

DOI:10.3876/j.issn.1000-1980.2018.06.013

转速对贯流泵装置流道水力参数影响的数值分析

杨帆¹,高慧¹,刘超²,汤方平¹

(1. 扬州大学水利与能源动力工程学院,江苏扬州 225127; 2. 江苏省水利动力工程重点实验室,江苏扬州 225009)

摘要: 为了研究贯流泵装置进出水流道水力性能受转速的影响规律,以贯流泵装置为研究对象进行全流道的数值计算,通过将能量性能数值预测结果与物理模型试验结果对比,验证了数值模拟结果的有效性。在考虑水泵与进出水流道内流相互影响条件下定量分析转速对进出水流道水力性能参数的影响规律。结果表明:(a)不同转速时进水流道水力损失比与流量系数的关系曲线变化趋势基本相同。相同转速时,随着流量系数的增大,进水流道水力效率逐渐减小,流道出口环量先减小、后增大;相同流量系数时,进水流道出口面的平均环量随转速的增加而增加。(b)不同转速时,随着流量系数的增大,出水流道进口入流涡角相对值先减小、后增大。在相同流量系数时,随着转速的增加,出水流道的静压比逐渐增加,出水流道进口面的偏流角分布基本相同。

关键词: 贯流泵;泵装置;流道;水力性能;转速;水力参数;数值分析

中图分类号:TV136.2;TV675 **文献标志码:**A **文章编号:**1000-1980(2018)06-0551-07

Numerical analysis of the effect of rotational speed on the hydraulic parameters for flow conduits of shaft extension tubular pumping system

YANG Fan¹, GAO Hui¹, LIU Chao², TANG Fangping¹

(1. School of Hydraulic, Energy and Power Engineering, Yangzhou University, Yangzhou 225127, China;

2. Hydrodynamic Engineering Laboratory of Jiangsu Province, Yangzhou University, Yangzhou 225009, China)

Abstract: In order to investigate the effect of rotational speed on the hydraulic performance of inlet and outlet conduits for S-shaped shaft extension tubular pumping system, three dimensional and steady turbulent flow in the pumping system was simulated by the computational fluid dynamics technology. Then, the CFD results are compared with the experiment results to validate the application of numerical analysis. The hydraulic performance parameters of inlet and outlet conduits were quantitatively analyzed considering the hydraulic interaction of conduits and impeller. Results indicated that the change trend of relationship curves between hydraulic loss ratio and flow rate coefficient is same in different rotational speed. With the increase of flow rate coefficient, the hydraulic loss ratio gradually increases, the hydraulic efficiency increases firstly then decreases gradually, and the average velocity circulation of outlet section firstly increases then decreases gradually under the same rotational speed. Meanwhile, with the increase of rotational speed, the average velocity circulation gradually increases under the same flow rate coefficient. In addition, the relative swirl angle decreases firstly, then increases with the increase of flow rate coefficient under different rotational speed. It could also be concluded that with the increase of rotational speed, the static pressure ratio of outlet conduit increases gradually and the distribution of drift angle in inlet section of outlet conduit is same. There is no linear functional relationship between square of hydraulic loss and flow rate for outlet conduit.

Key words: tubular pump; pumping system; conduit; hydraulic performance; rotational speed; hydraulic parameters; numerical simulation

基金项目: 国家自然科学基金(51609210);江苏省自然科学基金(BK20150457);中国博士后自然科学基金(2016M591932)

作者简介: 杨帆(1985—),男,副教授,博士,主要从事泵装置内流机理及优化研究。E-mail:fanyang@yzu.edu.cn

引用本文: 杨帆,高慧,刘超,等. 转速对贯流泵装置流道水力参数影响的数值分析[J]. 河海大学学报(自然科学版),2018,46(6):551-557.

YANG Fan, GAO Hui, LIU Chao, et al. Numerical analysis of the effect of rotational speed on the hydraulic parameters for flow conduits of shaft extension tubular pumping system[J]. Journal of Hohai University(Natural Sciences), 2018, 46(6): 551-557.

流道是低扬程泵装置的重要组成部分,对低扬程泵装置水力性能有着显著影响^[1-2],为此流道的水力性能得到了学者们的高度重视,为提高低扬程泵装置的水力性能,学者们已对低扬程泵装置流道的水力特性开展了一些研究工作,研究内容主要集中于几个方面:进出水流道的三维形体优化^[3-6],进出水流道的内流场分析^[7-12],不同工况时水泵与流道内流相互影响机理的研究^[13-17]。通过对以往文献资料的分析,低扬程泵装置的能量性能受流道水力性能的影响较大,但流道内流特性受转速变化的影响如何在前人研究的内容中未有涉及。在实际泵站运行中常采用变速调节方式,那么当转速变化时低扬程泵装置的进出水流道水力性能参数的变化规律如何是研判变速后低扬程泵装置能量性能的关键因素之一,为明晰该问题,笔者以轴伸贯流泵装置为研究对象,采用三维数值计算方法研究分析转速对贯流泵装置流道水力性能参数的影响规律。

1 研究对象及模拟方法

1.1 研究对象

轴伸贯流泵装置采用江苏省水利动力工程重点实验室研发的ZM30水力模型,计算额定转速为1450 r/min。计算区域包括进水段、进水流道、转轮、导叶体、出水流道及出水段共6部分。贯流泵装置三维模型如图1所示。

1.2 模拟方法

贯流泵装置的转轮和导叶体采用TurboGrid软件中H/J/L-Grid和H-Grid拓扑结构进行结构化网格剖分,流道采用ICEM CFD软件进行结构化网格剖分。网格质量需满足计算域内无负体积、网格正交性和纵横比的要求。对设计工况时贯流泵装置数值计算所需网格数量进行网格无关性分析,以文献[3,18-21]中泵装置网格数量作为研究对象网格数量的参考值,网格数量无关性分析结果如图2所示。当泵装置扬程系数和效率随网格数量增加相关性都低于1%时,认为网格数量达到计算要求,计算结果是稳定的,最后确定了贯流泵装置的网格单元总数为1 516 416,网格节点总数为1 628 407。

贯流泵装置湍流场数值计算选用RNG $k-\epsilon$ 湍流模型,近壁区采用可伸缩壁面函数(scalable wall functions)进行处理,收敛精度设置为 1.0×10^{-5} ,数值计算求解器选用CFX-Slover Manager。本研究共计算5个不同转速时贯流泵装置的能量性能,5个转速分别为额定转速的1.0倍(1450 r/min)、0.9倍(1 305 r/min)、0.8倍(1 160 r/min)、0.7倍(1 015 r/min)和0.6倍(870 r/min)。

2 性能预测与验证

2.1 试验设计

为进一步验证数值计算结果的有效性,在江苏省水利动力工程重点实验室的高精度水力机械试验台上进行泵装置的能量性能试验,该高精度水力机械试验台的综合不确定度符合SL 140—2006《水泵模型及装置模型验收试验规程》^[22]的精度要求,并于2015年通过国家计量复检。贯流泵装置物理模型试验按照SL 140—2006《水泵模型及装置模型验收试验规程》中6.1节的能量试验要求进行测试,试验过程中共采集15个以上的不同流量点。

加工制作与数值模拟同尺寸的物理模型装置,模型泵装置如图3所示,试验的额定转速为1450 r/min,叶片安放角为0°。

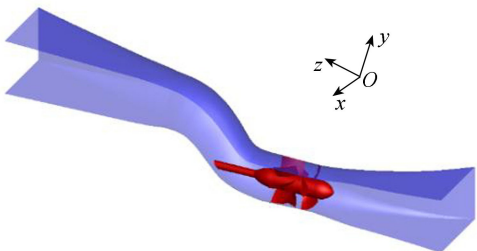


图1 贯流泵装置三维模型

Fig.1 Shaft extension tubular pumping system

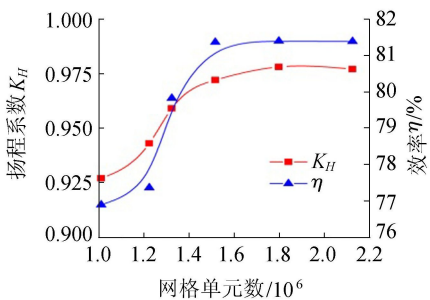


图2 泵装置网格数量无关性分析

Fig.2 Analysis of grid independence for the pumping system



图3 贯流泵装置物理模型

Fig.3 Physical model of the tubular pumping system

2.2 模拟与试验验证

为更好地对比分析数值预测与模型试验结果,采用流量系数 K_Q 和扬程系数 K_H 进行对比分析,数值计算预测结果和物理模型试验结果对比如图 4 所示。 K_Q 和 K_H 的计算式为

$$K_Q = \frac{Q}{n D^3} \qquad K_H = \frac{gH}{n^2 D^2} \qquad (1)$$

式中: Q —— 泵装置流量; n —— 转轮的转速; D —— 转轮的名义直径; g —— 重力加速度; H —— 泵装置扬程。

预测的贯流泵装置 $K_Q - K_H$ 曲线与物理模型试验所得曲线趋势基本一致,预测的贯流泵装置 $K_Q - \eta$ (η 为进水流道水力效率) 曲线与试验所得曲线吻合度较好,表明了数值计算结果的有效性和可靠性。

3 转速对流道内流性能的影响分析

3.1 进水流道内流性能分析

为了分析转速对流道水力损失的影响规律,引入流道水力损失比 β , 其为流道水力损失 Δh 与泵装置扬程 H 的比值,计算式为

$$\beta = \frac{\Delta h}{H} \times 100\% \qquad (2)$$

通过计算可得转速对进水流道水力损失比的影响曲线(图 5)。不同转速时,进水流道水力损失比与流量系数的关系曲线变化趋势基本相同;相同转速时,进水流道水力损失比随流量系数的增大而增大,当 $K_Q > 0.55$ 时,进水流道水力损失比增加明显,主要是由于此时贯流泵装置处于大流量工况运行范围,随着流量系数增加,泵装置扬程逐渐减小,进水流道水力损失与流量的 2 次方呈线性关系,进水流道水力损失增幅较大且泵装置扬程逐渐减小,由式(2)可知进水流道水力损失比的增幅将增大。 $K_Q = 0.40 \sim 0.65$ 时,相同流量系数时进水流道的水力损失比随转速的增加而减小; $K_Q < 0.40$ 时,转速对进水流道水力损失比的影响较小。叶轮旋转引起水流预旋增加了水流动能,相同工况时转速越大则水流动能增加越多,故转速越大时进水流道的水力损失比有所减小。

为进一步分析进水流道的能量转换效率,采用文献[11]中流道的均化效率式(3)进行计算,不同转速时进水流道水力效率与流量系数的关系曲线如图 6 所示。

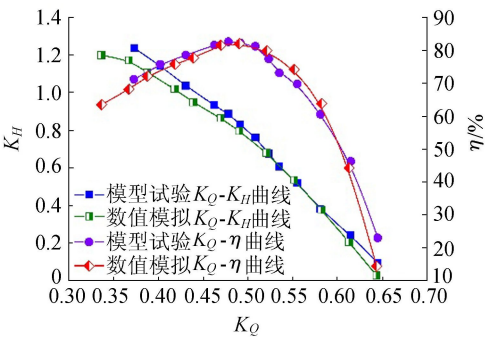


图 4 泵装置外特性对比曲线
Fig. 4 Comparison of the external characteristics of pumping system

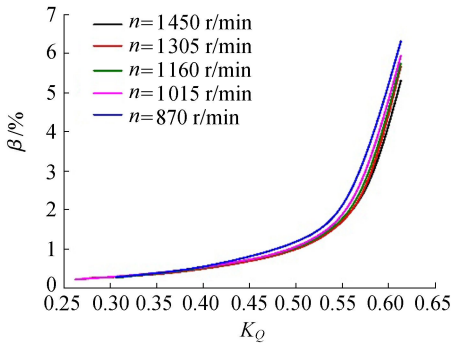


图 5 不同转速时进水流道水力损失比

Fig. 5 Hydraulic loss ratio of the inlet conduit under different rotational speeds

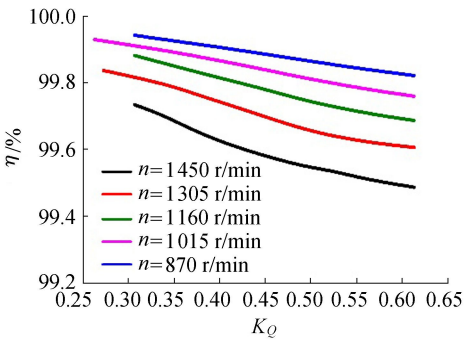


图 6 不同转速时进水流道水力效率

Fig. 6 Hydraulic efficiency of outlet section in inlet conduit under different rotational speeds

$$\eta_{av} = \frac{\sum_{i=1}^m \eta_i}{m} \qquad (i = 1, 2, \cdots, m) \qquad (3)$$

其中 $\eta_i = \frac{E_{out}}{E_{in}} \times 100\%$

式中: η_{av} ——流道的均化效率; m ——计算工况总数; η_i ——工况*i*时进水流道水力效率; E_{out} ——流道出口面总能量; E_{in} ——流道进口面总能量。

相同转速时,进水流道水力效率随流量系数的增大而逐渐减小,但减小幅度很小,流量系数 $K_Q=0.25 \sim 0.64$ 时,进水流道水力效率的极差为 0.264%,表明转速的改变对进水流道水力效率的影响很小。进水流道的均化效率随转速的降低而增大, $n=870\text{ r/min}$ 时进水流道的均化效率为 99.88%,相比转速 $n=1450\text{ r/min}$ 时进水流道的均化效率增加了约 0.29%。

不同转速时,进水流道出口的平均环量 $\bar{\Gamma}$ 与流量系数的关系曲线如图 7(a) 所示。相同转速时,进水流道出口环量均随流量系数的增大而先减小、后增大,在计算工况范围内平均环量的极差仅为 $0.084\text{ m}^2/\text{s}$,差值较小。相同流量系数时,进水流道出口面的平均环量随转速的增加而增加,叶轮的旋转对进水流道出口面的切向速度具有一定的影响,在计算工况范围内相同流量系数时平均环量的极差仅为 $0.087\text{ m}^2/\text{s}$,在稳定工况运行时转速的改变对进水流道出口水力性能的影响较小,与文献[15]通过物理模型试验所得结论相同。

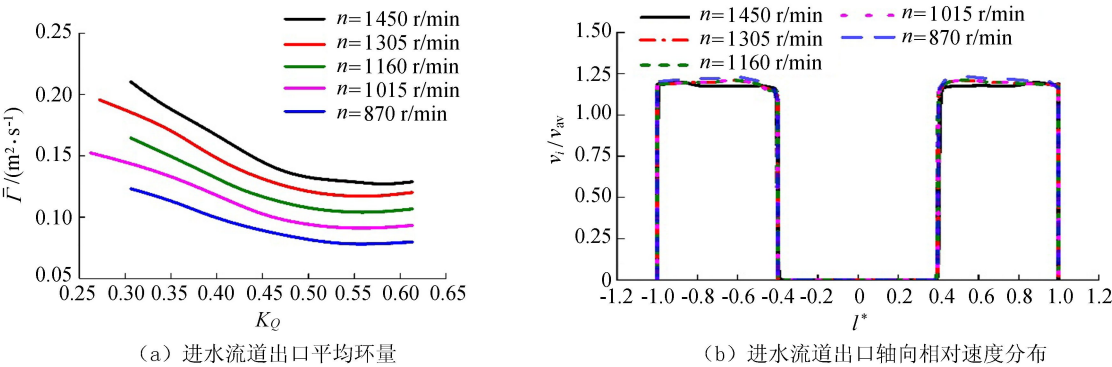


图7 不同转速时进水流道出口平均环量及轴向速度分布

Fig.7 Average velocity circulation and relative axial velocity distribution of outlet section in inlet conduit under different rotational speeds

为定量分析转速对进水流道出口速度场的影响,选择进水流道出口面 x 方向(xyz 坐标方向定义如图 1 所示, z 轴为泵轴方向, x 轴为水平方向, y 轴为铅垂方向)水平中心线上轴向速度分布为研究对象,定义无量纲距离 l^* 为

$$l^* = \frac{l_q}{l_b} \tag{4}$$

式中: l_q ——各测点至测线中点的距离(q 为测点编号); l_b ——50%的测线总长。

不同转速、相同流量系数($K_Q=0.50$)时进水流道出口面 x 轴方向测线的轴向相对速度分布如图 7(b) 所示。图 7(b) 中轴向速度为各点轴向速度与平均速度的比值 v_z/v_{av} 。不同转速时进水流道出口面水平中心测线上的轴向相对速度分布趋势基本相同,速度分布均匀,无回流等不良流态出现,表明转速的改变对进水流道出口流场的影响很小。

3.2 出水流道内流性能分析

不同转速时出水流道入流涡角相对值 α 与流量系数的关系曲线如图 8 所示, α 定义为

$$\alpha = \frac{\theta_i}{\theta_{min}} \tag{5}$$

其中

$$\theta_i = \arctan \frac{v_t}{v_z}$$

式中: θ_{min} ——计算工况中入流涡角最小值; v_t ——平均切向速度; v_z ——平均轴向速度。

不同转速时,随着流量系数的增大入流涡角相对值均先减小、后增大,入流涡角相对值与流量系数间的

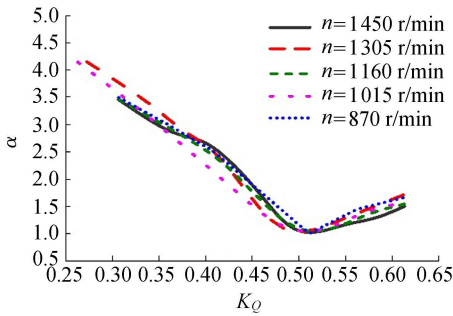


图8 不同转速出水流道入流涡角相对值

Fig.8 Relative swirl angle of inlet section in outlet conduit under different rotational speeds

关系为一开口向上的曲线, $K_Q=0.48 \sim 0.52$ 时入流涡角相对值存在最小值,表明在叶轮转速不变时,出水流道的入流在某工况时存在最小入流涡角,主要因导叶体的设计是依据某单一工况条件。出水流道进口的入流涡角受导叶体出口剩余环量和出水流道进口边界条件等因素共同约束,出水流道进口流场分布复杂,以至于相同流量系数时入流涡角相对值未与转速呈某一特定规律。

采用静压比 δ 对不同转速时出水流道内部静压变化进行分析。 δ 计算式为

$$\delta = \frac{P_{\text{out}}}{P_{\text{in}}}$$

(6)

式中: p_{out} ——流道出口面的静压; p_{in} ——流道进口面的静压。

不同转速时,出水流道的静压比计算结果如图 9 所示。在 $K_Q > 0.52$ 时,出水流道的静压比增幅较大;在 $K_Q < 0.52$ 时,出水流道的静压比变化范围相对较小,在计算工况范围内出水流道的静压比极差为 0.107,在相同流量系数时,出水流道的静压比随转速的增加略有提高,随转速的增加,出水流道的静压比也增加,在 n 从 870 r/min 增加至 1450 r/min 时静压比均值仅增大了 0.069,说明转速变化对出水流道静压比的影响较小。

不同转速、相同流量系数 ($K_Q=0.50$) 时,出水流道进口面的偏流角 γ 分布如图 10 所示。 γ 计算式为

$$\gamma = \arctan \left| \frac{u_{vj}}{u_{aj}} \right|$$

(7)

式中: u_{vj} ——出水流道进口面单元 j 的横向速度; u_{aj} ——出水流道进口面单元 j 的轴向速度。

相同流量系数时出水流道进口面的偏流角分布基本相同,靠近后导水帽环形出口处存在若干偏流角较大的小区域,但各区域面积并不相同,进口面各水流质点的偏流角未成对称分布,水流未按某一固定偏流角进入出水流道,偏流角 $\gamma=6^\circ \sim 10^\circ$ 的分布区域较大, γ 的分布受导叶体出口剩余环量的影响,采用进口给定相同的偏流角边界条件计算出水流道内流场易导致出水流道内的流场出现偏差,且与实际情况有较大差别。

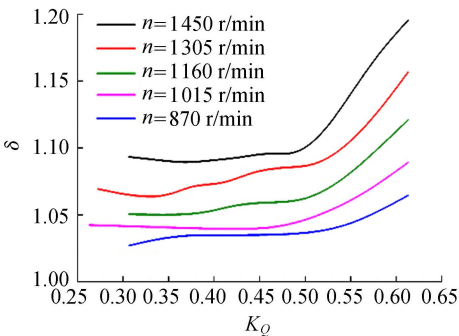


图 9 不同转速时出水流道静压比

Fig.9 Static pressure ratio of outlet conduit under different rotational speeds

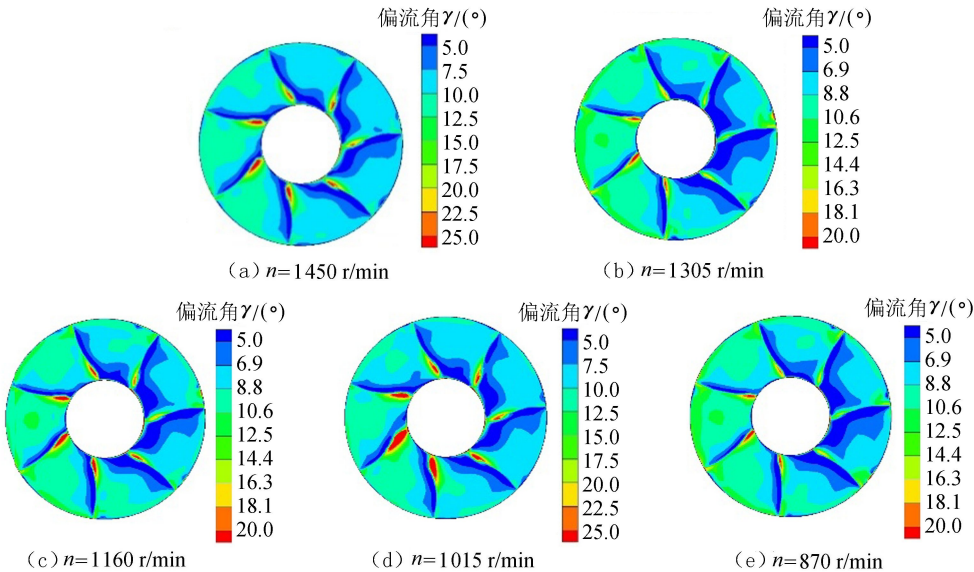


图 10 不同转速时出水流道进口偏流角分布

Fig.10 Distribution of drift angle in the inlet section of outlet conduits under different rotational speeds

不同转速时,出水流道水力损失比 β 与流量系数的关系曲线如图 11 所示。在流量系数 $K_Q < 0.50$ 、不同转速运行时出水流道的水力损失比与流量系数的关系变化曲线差异明显,出水流道的水力损失比随转速的变化关系未成某一特定规律;在 $K_Q > 0.50$ 时,不同转速下出水流道的水力损失比与流量系数的变化趋势近似相同; $K_Q=0.50 \sim 0.60$ 、相同流量系数时出水流道的水力损失比随转速的增加而减小;当 $K_Q > 0.58$ 时出水流道的水力损失比已超过 30%。在不同工况运行时,出水流道水力损失的主导因素在横向流速和轴向流速

导致的水力损失之间互相交替,大流量时出水流道的水力损失由轴向流速主导,小流量时出水流道的水力损失由横向流速主导,此时导叶体出口剩余环量较大,与进水流道的水力损失比变化规律相比,出水流道的水力损失随流量系数的变化规律更为复杂,表明出水流道的水力损失与流速的 2 次方不满足线性的函数关系。

4 结 论

a. 不同转速时,进水流道水力损失比与流量系数的关系曲线变化趋势基本相同。相同转速时,随流量系数的增大,进水流道水力损失比也增大,进水流道水力效率逐渐减小。相同转速时,进水流道出口环量均随流量系数的增大呈现先减小、后增大趋势。相同流量系数时,进水流道出口面的平均环量随转速的增加而增加。

b. 不同转速时,随着流量系数的增大,出水流道进口入流涡角相对值均先减小、后增大,入流涡角相对值存在最小值。在相同流量系数时,出水流道的静压比随转速的增加略有提高,随着转速的增加,出水流道的静压比也增加。相同流量系数时出水流道进口面的偏流角分布基本相同,进口面各水流质点的偏流角未成对称分布。

参考文献:

[1] 刘超. 轴流泵系统技术创新与发展分析[J]. 农业机械学报,2015,46(6):49-59. (LIU Chao. Researches and developments of axial-flow pump system[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2015, 46(6): 49-59. (in Chinese))

[2] 陆林广. 高性能大型低扬程泵装置优化水力设计[M]. 北京:中国水利水电出版社,2013.

[3] 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.

[4] 施卫东,张德胜,关醒凡,等. 后置灯泡式贯流泵装置模型的优化与试验研究[J]. 水利学报,2010,41(10):1248-1253. (SHI Weidong, ZHANG Desheng, GUAN Xingfan, et al. Optimization and experimental investigation on post bulb type tubular pump device model[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2010, 41(10): 1248-1253. (in Chinese))

[5] 黄良勇,吴忠,张啸,等. 大型双向流道泵装置优化匹配与试验研究[J]. 排灌机械工程学报,2016,34(7):602-607. (HUANG Liangyong, WU Zhong, ZHANG Xiao, et al. Hydrodynamic optimization of large pump installation with two-way channel and experiment[J]. Journal of Drainage and Irrigation Machinery Engineering, 2016, 34(7): 602-607. (in Chinese))

[6] 石丽建,汤方平,刘雪芹,等. 大型箱涵式泵装置优化设计与试验[J]. 农业机械学报,2017,48(1):96-103. (SHI Lijian, TANG Fangping, LIU Xueqin, et al. Optimization design and experiment of large cube-type pump device[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2017, 48(1): 96-103. (in Chinese))

[7] 刘厚林,周孝华,王凯,等. 泵站装置蜗形进水池流态与水力性能分析[J]. 华中科技大学学报(自然科学版),2013,41(11):12-16. (LIU Houlin, ZHOU Xiaohua, WANG Kai, et al. Analyzing flow patterns and hydraulic performance of volute intake sump for pump station[J]. Journal of Huazhong University of Science and Technology(Natural Science Edition), 2013, 41(11): 12-16. (in Chinese))

[8] 常景彩,王志强,李兴平,等. 大型泵站新型钟形进水流道流动特性的研究[J]. 水力发电学报,2011,30(1):165-169, 179. (CHANG Jingcai, WANG Zhiqiang, LI Xingping, et al. Study on hydraulic characteristics of new bell suction duct in large-scale pumping stations[J]. Journal of Hydroelectric Engineering, 2011, 30(1): 165-169, 179. (in Chinese))

[9] 燕浩,刘梅清,赵文胜,等. 速度环量对大型轴流泵站水力性能的影响[J]. 中南大学学报(自然科学版),2016,47(6): 2125-2132. (YAN Hao, LIU Meiqing, ZHAO Wensheng, et al. Influence of velocity circulation on hydraulic performance of large axial-flow pumps station[J]. Journal of Central South University (Science and Technology), 2016, 47(6): 2125-2132. (in Chinese))

[10] 陈松山,颜红勤,周正富,等. 泵站前置竖井进水流道三维湍流数值模拟与模型试验[J]. 农业工程学报,2014,30(2):63-71. (CHEN Songshan, YAN Hongqin, ZHOU Zhengfu, et al. Three-dimensional turbulent numerical simulation and model test of front-shaft tubular inlet conduit of pumping system[J]. Transactions of the CSAE, 2014, 30(2): 63-71. (in Chinese))

[11] 周大庆,刘敏,陈会向. 虹吸式出水流道轴流泵装置全流道空化特性[J]. 华中科技大学学报(自然科学版),2017,45

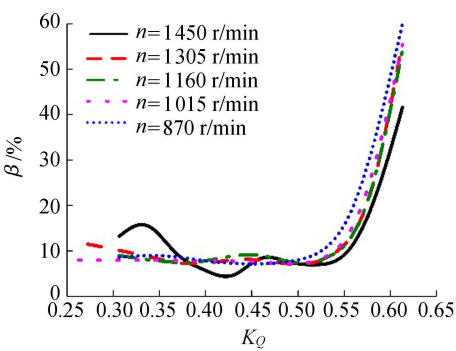


图 11 不同转速时出水流道水力损失比
Fig. 11 Hydraulic loss ratio of outlet conduit under different rotational speeds

- (1):128-132. (ZHOU Daqing, LIU Min, CHEN Huixiang. Siphon outlet conduit on full passage cavitation characteristics of axial-flow pumping unit[J]. Journal of Huazhong University of Science and Technology (Nature Science Edition), 2017, 45(1): 128-132. (in Chinese))
- [12] 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]. 农业机械学报,2014,45(5):71-77. (YANG Fan, LIU Chao, TANG Fangping, et al. Hydraulic performance analysis of flow passage components in S-shaped shaft extension tubular pumping system under multi-conditions[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2014, 45(5): 71-77. (in Chinese))
- [13] 杨敏官,孟宇,李忠,等. 轴流泵叶轮导水锥型式设计及其流道水力特性模拟[J]. 农业工程学报,2015,31(11): 81-88. (YANG Minguan, MENG Yu, LI Zhong, et al. Design of axial-flow impeller guide cone and simulation on hydraulic performance of its passage[J]. Transactions of the CSAE, 2015, 31(11): 81-88. (in Chinese))
- [14] 杨帆,谢传流,刘超,等. 轴流泵装置运行工况对肘形进水流道水力性能的影响[J]. 农业机械学报,2016,47(2):15-21. (YANG Fan, XIE Chuanliu, LIU Chao, et al. Influence of axial-flow pumping system operating conditions on hydraulic performance of elbow inlet conduit[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2016, 47(2): 15-21. (in Chinese))
- [15] LU Weigang, DONG Lei, WANG Zhaoifei, et al. Cross influence of discharge and circulation on head loss of conduit of pump system with low head[J]. Applied Mathematics and Mechanics(English Edition), 2012, 33(12): 1533-1544.
- [16] 陈伟,陆林广,王刚,等. 轴流泵运行工况对叶轮室进口预旋的影响[J]. 水力发电学报,2012,31(1):213-219,225. (CHEN Wei, LU Linguang, WANG Gang, et al. Influence of axial-flow pump operating condition on the pre-swirl at impeller chamber inlet[J]. Journal of Hydroelectric Engineering, 2012, 31(1): 213-219, 225. (in Chinese))
- [17] 郑源,刘君,陈阳,等. 基于 Fluent 的贯流泵数值模拟[J]. 排灌机械工程学报,2010,28(3):233-237. (ZHENG Yuan, LIU Jun, CHEN Yang, et al. Numerical simulation of tubular pump based on Fluent[J]. Journal of Drainage and Irrigation Machinery Engineering, 2010, 28(3): 233-237. (in Chinese))
- [18] KIM J H, AHN H J, KIM K Y. High-efficiency design of a mixed-flow pump[J]. Science China Technology Science, 2010, 53(1): 24-27.
- [19] 王玲,黎珉,王福军,等. 用于确定双吸离心泵 Suter 曲线的三维内特性法研究[J]. 水利学报,2017,48(1):113-122. (WANG Ling, LI Min, WANG Fujun, et al. Study on three-dimensional internal characteristics method of suter curves for double-suction centrifugal pump[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2017, 48(1): 113-122. (in Chinese))
- [20] LIU Jiantao, LIU Shuhong, SUN Yuekun, et al. Three-dimensional flow simulation of transient power interruption process of a prototype pump-turbine at pump mode[J]. Journal of Mechanical Science and Technology, 2013, 27(5): 1305-1312.
- [21] LUCIUS A, BRENNER G. Unsteady CFD simulations of a pump in part load conditions using scale-adaptive simulation[J]. International Journal of Heat and Fluid Flow, 2010,31: 1113-1118.
- [22] 中国农业机械化科学研究院,中国水利水电科学研究院. 水泵模型及装置模型验收试验规程:SL 141—2006 [S]. 北京:中华人民共和国水利部,2007.

(收稿日期:2017-07-20 编辑:高建群)