

DOI:10.3876/j.issn.1000-1980.2018.04.012

贯流泵装置出水流道进口区压力及速度场分析

杨帆¹,陈世杰¹,刘超^{1,2},金燕²

(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:为分析贯流泵装置出水流道进口区流场的非定常特性,在考虑水泵与流道的水力相互作用基础上,采用 RNG $k-\varepsilon$ 湍流模型对贯流泵装置进行全流道的非定常数值计算。通过非定常求解预测的贯流泵装置能量性能数据与物理模型试验值进行对比,验证数值计算方法的可信度,分析出水流道进口区非定常压力及速度场的演变规律。结果表明:(a)贯流泵装置数值预测的扬程系数与模型试验结果的最大相对误差为 3.15%,效率的最大相对误差为 3.07%。(b)出水流道进口区轴面速度场的波谷数与导叶体的叶片数相同。(c)随着流量系数的减小,出水流道进口区的轴面速度场的波峰特征越趋明显,轴面速度的尾迹特征逐步增强。(d)水流传经出水流道扩散,速度逐步减小而压力逐渐增大,出水流道进口区的脉动主频受叶轮旋转的影响很小,压力波动主要受导叶体进口流态和导叶体结构的双重影响。(e)不同工况时各监测点的主频及次主频均为低频脉动。

关键词:贯流泵;出水流道;流场;压力脉动;非定常流动

中图分类号:TV136⁺.2;TV675 **文献标志码:**A **文章编号:**1000-1980(2018)04-0360-06

Analysis on the unsteady pressure and velocity in the inlet region of outlet conduit of a tubular pumping system

YANG Fan¹, CHEN Shijie¹, LIU Chao^{1,2}, JIN Yan²

(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 study the unsteady pressure and velocity of the inlet region in the outlet conduit for the S-shaped shaft tubular pumping system, the whole flow passage of the pumping system was simulated based on the CFD technology. Comparison of numerical simulation results and experimental values under different operation conditions verifies the accuracy of the numerical model. The results show that, the maximum relative deviation of head coefficient is 3.15%, and the maximum deviation of efficiency is 3.07% in the range of simulated operating conditions compared with the experimental data. The distribution of axial velocity is affected by the number of the guide vane blades in the circumferential direction, and the wave trough number of the axial velocity filed in the circumferential direction is the same as the guide vane blade number. With the decrease of flow rate coefficient, the wave peak characteristic of the axial velocity filed is more obvious, and the wake characteristics increases gradually as well. When water flows through the outlet conduit, the pressure will increase and the velocity will decrease gradually. The rotation speed of impeller has little effect on the main frequency of inlet region in the outlet conduit. Both the inlet flowing pattern and flow improvement of guide vane have effects on the pressure fluctuation. The main and secondary frequency of every monitoring points are low frequency pulsation in different operating conditions.

Key words: tubular pump; outlet conduit; flowing pattern; pressure fluctuation; unsteady flow

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);江苏省博士后自然科学基金(1601161B);流体及动力机械教育部重点实验室开放课题(SZJJ2016-078)

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,陈世杰,刘超,等.贯流泵装置出水流道进口区压力及速度场分析[J].河海大学学报(自然科学版),2018,46(4):360-365.

YANG Fan, CHEN Shijie, LIU Chao, et al. Analysis on the unsteady pressure and velocity in the inlet region of outlet conduit of a tubular pumping system[J]. Journal of Hohai University(Natural Sciences), 2018, 46(4): 360-365.

贯流泵装置具有结构简单、安装检修方便、投资较少和水力效率高等优点,适用于 3 m 以下的大中型低扬程泵站。贯流泵装置由进水流动、叶轮、导叶体和出水流动 4 部分组成,出水流动对贯流泵装置能量性能的影响较为明显^[1]。为提高泵装置水力效率,学者们已对出水流动水力性能开展了较多研究工作,主要集中在:出水流动三维形体参数的优化^[2-5],多工况出水流动的内流场分析^[6-9],出水流动结构形式的比较分析^[10-11],环量对出水流动水力性能的影响分析^[12-14]等方面。当前学者们对出水流动水力性能的研究主要采用三维定常流场的分析方法,出水流动内部流场受进口区流态的影响较大且该流场具有明显的三维非定常特征,出水流动进口区的非定常压力及速度场分布如何尚无明确结果。开展出水流动的水力设计优化需考虑进口流态对出水流动水力性能的影响,为解决该问题,笔者采用 CFD (Computational Fluid Dynamics) 方法对贯流泵装置全流动进行三维非定常数值计算,重点分析出水流动进口区的压力变化过程和速度演变规律,以期阐明出水流动进口区的非定常流场特性提供信息,也为进一步提高贯流泵装置水力稳定性和出水流动的水力优化提供理论基础。

1 物理模型及模拟方法

贯流泵装置由进水流动、叶轮、导叶体及出水流动 4 部分组成,如图 1 所示。水力模型采用比转数为 1 350 的轴流泵,叶轮名义直径为 300 mm,轮毂比为 0.40,叶片安放角为 0°,叶轮叶片数为 3,导叶体的叶片数为 7,额定转速为 1 450 r/min。计算区域包括贯流泵装置、进水段和出水段 3 部分。

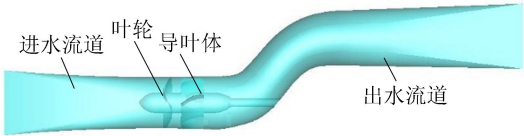


图 1 贯流泵装置三维模型
Fig. 1 3D model of the S-shaped shaft tubular pumping system

叶轮和导叶体为泵装置的核心水力部件,其网格质量和分布对泵装置水力性能的预测有直接影响。叶轮选用 H/J/L-Grid 拓扑结构,导叶体采用 H-Grid 拓扑结构进行结构化网格剖分,并在叶片周围进行了网格加密处理,数值计算中考虑了叶顶间隙,叶顶间隙均值为 0.15 mm。进水流动和出水流动均采用 ICEM CFD 软件进行结构化网格剖分。网格质量对泵装置数值计算的结果影响较大,需满足计算区域内无负体积、网格正交性和纵横比的要求,网格正交性由单元任意 2 个面之间的夹角来保证,最低正交性夹角在 15°~165°之间,借鉴文献[2,15-20]对泵装置内流场非定常计算所需的网格数量,同时通过网格数量无关性分析,并将预测结果与物理模型试验结果进行对比分析,最后确定泵装置数值计算的网格节点总数为 1 628 407,网格单元总数为 1 516 416。贯流泵装置出水流动进口区定义如图 1 所示。

数值计算主要基于雷诺时均 Navier-Stokes 控制方程和 RNG $k-\epsilon$ 湍流模型。RNG 湍流模型通过修正湍动黏度,考虑了平均流动中的旋转及旋转流动情况,能更好地处理高应变率及流线弯曲程度较大的流动,主要应用于旋转坐标系下的流动问题。控制方程采用基于有限元的有限体积法进行离散化,离散方程采用全隐式耦合代数多重网格方法进行求解,在离散过程中对流项采用了高分辨率格式,其他项采用中心差分格式。

进口边界采用速度进口条件,出口边界采用压力出口条件,近壁区采用可伸缩壁面函数处理,计算收敛精度设置为 10^{-5} 。定常计算中动静交界面类型选用 Stage 界面,瞬态计算中动静交界面选用 Transient Rotor-Stator 界面,非定常数值计算以定常数值计算结果为初始条件。叶轮每转过 1°为一时间步,其时间步长 $t = 1.14942 \times 10^{-4}$ s,一个周期时间步长数为 360,总时间为 8 倍叶轮旋转周期,叶轮每旋转 3°压力监控点采样 1 次。

2 数值计算结果与分析

2.1 数值计算值与试验值对比

为验证贯流泵装置非定常流场数值计算结果的可靠性,对同尺寸的贯流泵装置物理模型进行了能量性能测试,能量性能测试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,该试验台的综合不确定度为 $\pm 0.39\%$,符合文献[21]的规定要求,并于 2015 年通过国家计量复检,测试按照文献[21]中 6.1 节能量试验的要求进行,模型泵装置的试验效率为扣除机械损失扭矩后的数值,模型泵装置能量性能试验参数与数值计算设置的相关参数相同,贯流泵装置的进水流动和出水流动的物理模型如图 2 所示。泵装置非定常数值预测的能量性能与物理模型所得结果的对比如图 3 所示。贯流泵装置预测的流量系数 K_Q 与扬程系

数 K_H 的曲线与模型试验所得性能曲线的趋势基本一致,泵装置数值预测的 K_H 与模型试验结果的最大相对误差为 3.15%,效率的最大相对误差为 3.07%,表明贯流泵装置非定常数值计算结果可信,验证了本文的网格数量及湍流模型的适用性。

2.2 非定常速度分析

为便于分析,将 1 个物理周期时间平均分为 6 个时间段,即 7 个时间点,则在完整物理周期内的各时间点 t 分别为 $0/T/6, 2 T/6, 3 T/6, 4 T/6, 5T/6$ 和 T 。依据叶片旋转位置,在时刻 0 和 T 时叶片的位置相同则流场特性相同,记 $t_1=T/6, t_2=2 T/6, t_3=3 T/6, t_4=4 T/6, t_5=5T/6$ 和 $t_6=T$ 。选取出水水道进口区半径为 210 mm 的轴面速度进行分析,则出水水道该处的轴面速度演变规律如图 4 所示。不同工况时出水水道进口的轴面速度分布均呈现 7 个速度波峰和 7 个速度波谷,有明显的周期性,这与导叶体的叶片数量相同,表明出水水道进口的轴面速度分布受导叶体叶片数的影响;在导叶体叶片数和叶片厚度的作用下有明显的尾迹特征,轴面速度分布相位已不随叶轮的旋转而发生变化。随着贯流泵装置流量系数的增大,出水水道进口的轴面速度的尾迹特征逐步减弱,在小流量工况 $K_Q=0.368$ 时,出水水道进口有明显的回流,且随 K_Q 的增大,导叶体的整流效果越明显,出水水道进口区的轴面速度分布越趋于稳定。

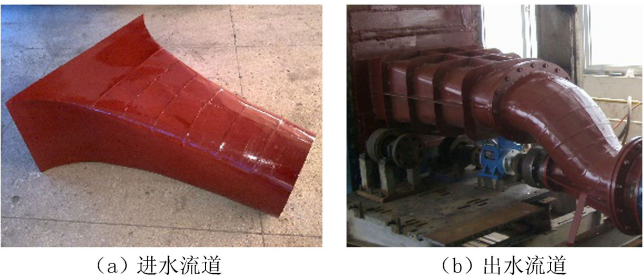


图 2 流道的物理模型
Fig. 2 Physical model of inlet and outlet conduits

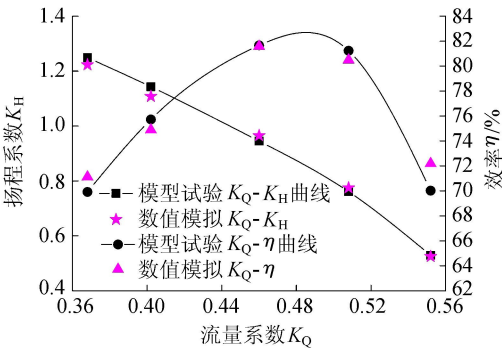


图 3 外特性预测值与模拟值对比
Fig. 3 Performance comparison of calculated values and test values

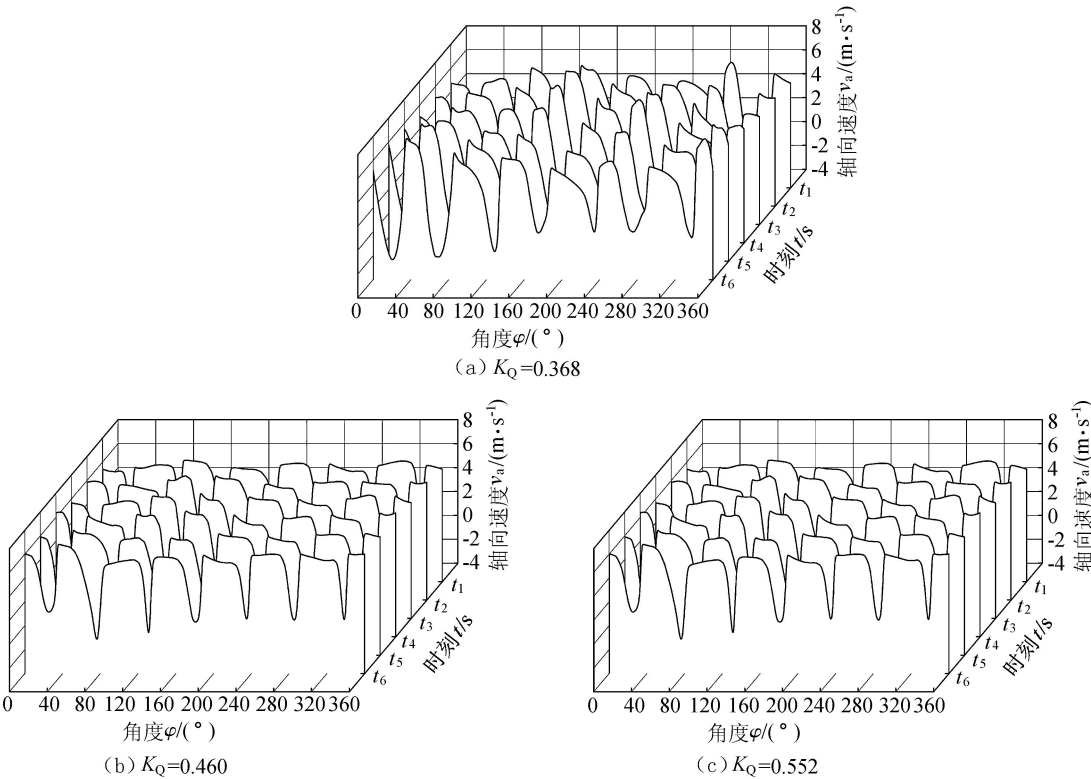


图 4 不同工况时出水水道进口轴面速度演变规律
Fig. 4 Axial velocity revolution in the inlet region of outlet conduit under different conditions

2.3 非定常压力分布分析

选取工况 $K_Q=0.460$ 分析出水通道进口区域的非定常压力分布情况,在出水通道进口边界和导叶体出口边界条件的双重约束下,出水通道进口区域压力随时间的变化如图 5 所示(图中 N 代表叶轮旋转的圈数)。出水通道进口区压力在 110 ~ 111 kPa 间变化区域较明显,后导水锥区域压力均在 111 ~ 114 kPa 区域范围明显变大,表明水流经出水通道前段扩散,速度逐步降低,压力逐渐增大,进一步回收能量,将动压能转化为静压能。出水通道进口区的压力波动主要受导叶体进口流态和导叶体结构的双重影响。

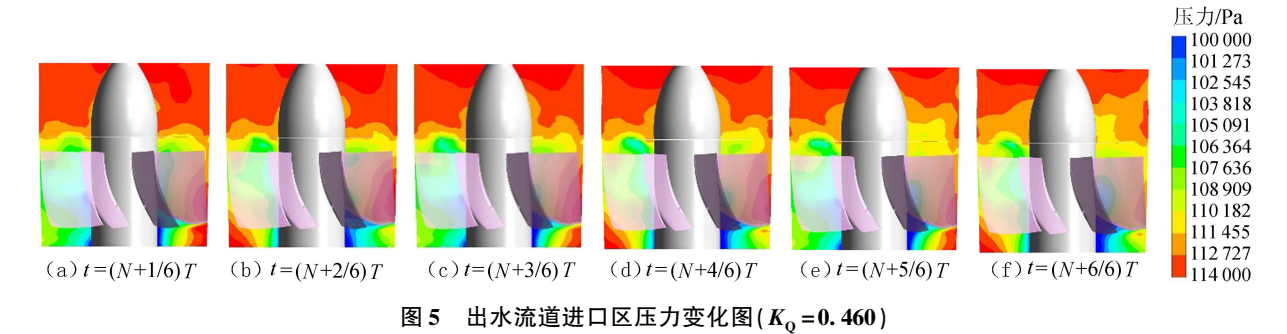


Fig. 5 Static pressure contours in the inlet region of outlet conduit($K_Q=0.460$)

2.4 非定常压力脉动特性

为监测贯流泵装置出水通道进口区压力脉动特性,在出水通道进口区布置监测点 P01 ~ P06。监测点位于出水通道进口圆形断面,6 个监测点以水泵轴为对称轴进行轴对称布置,监测点的位置示意图如图 6 所示。

借鉴文献[19]中压力系数 C_p 的定义进行分析,采用快速傅里叶变换(FFT)对压力脉动的时域数据进行处理,各监测点的脉动频谱如图 7 所示。在 $K_Q=0.368$ 时,出水通道进口区监测点 P01 ~ P03 的脉动主频为 1.125 倍的转

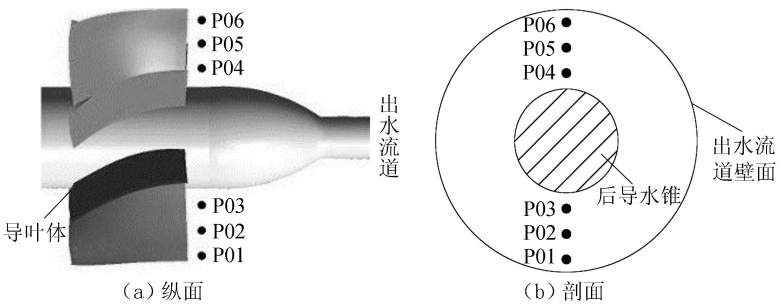


图 6 脉动监测点位置示意图
Fig. 6 Locations of pressure fluctuation monitoring

点的脉动频谱如图 7 所示。在 $K_Q=0.368$ 时,出水通道进口区监测点 P01 ~ P03 的脉动主频为 1.125 倍的转

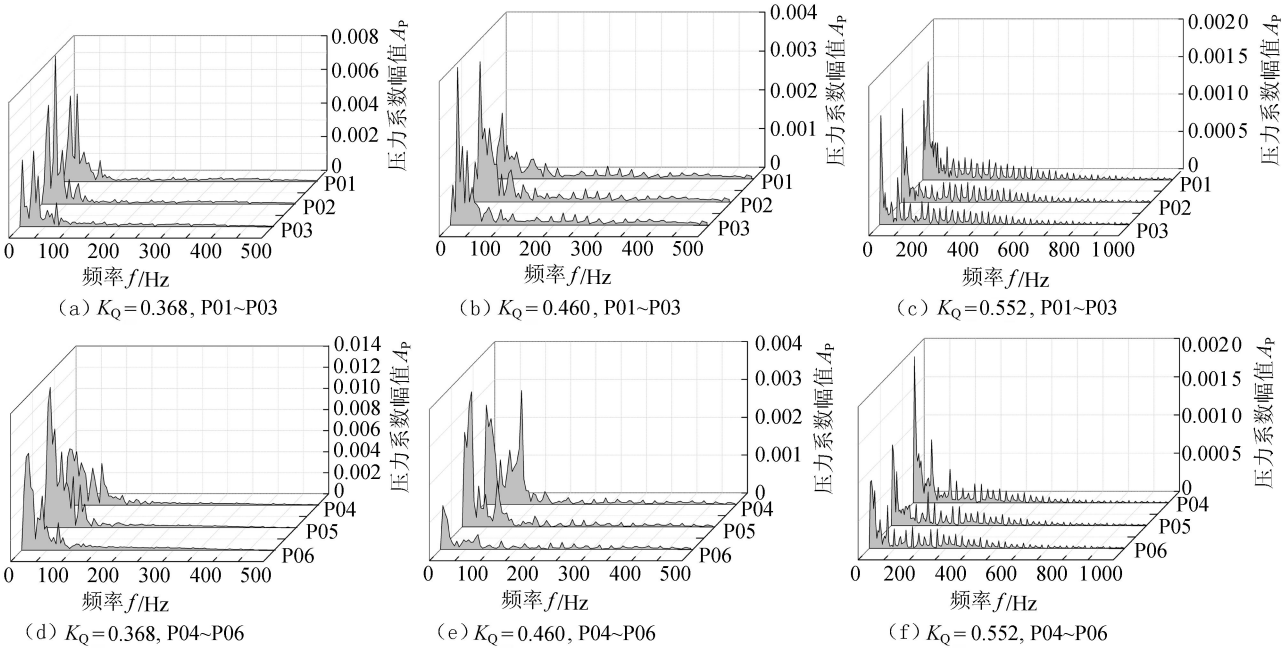


图 7 不同监测点的脉动频谱

Fig. 7 Spectrum charts for pulsations of P01~P06 under different operating conditions

频;监测点 P04、P05 的脉动主频为 0.375 倍的转频,监测点 P06 的脉动主频为 0.563 倍的转频。出水流道进口区各监测点的脉动数据差异较大,各监测点脉动幅值的最大差值为 0.0072,最小差值为 0.0002,间接表明了出水流道进口区流态较紊乱,也验证了图 5 所得结论,整体脉动幅值变化呈双峰曲线状。在 $K_Q=0.460$ 时,出水流道进口区监测点 P01~P03 的脉动主频为 0.563 倍的转频,监测点 P04 的脉动主频为 3 倍的转频,监测点 P05 的脉动主频为 0.75 倍的转频,监测点 P06 的脉动主频为 0.188 倍的转频。各监测点间脉动幅值的最大差值为 0.0029,最小差值为 0,相比工况 $K_Q=0.368$ 时出水流道进口区各监测点的脉动变化较小。在 $K_Q=0.552$ 时,出水流道进口区 P01 的脉动主频为 0.882 倍的转频,监测点 P02~P05 的脉动主频均为 0.176 倍的转频,监测点 P06 的脉动主频为 0.353 倍的转频。各监测点间脉动幅值的最大差值为 0.001,最小差值为 0.0001,相比工况 $K_Q=0.368$ 和 $K_Q=0.460$ 出水流道进口区的脉动幅值变化最小。不同工况时各监测点的主频及次主频均为低频脉动。不同工况时相同监测点的脉动主频存在差异主要因不同工况时出水流道进口区的流态存在差异,不同工况导叶体内部流态紊乱程度及导叶体对叶轮出口速度环量的回收效果不一样所致。

3 结 论

- a. 不同工况时出水流道进口的轴面速度分布均呈 7 个速度波峰和 7 个速度波谷,有明显的周期性,与导叶体的叶片数量相同,出水流道进口区的轴面速度分布受导叶体叶片数的影响。随着贯流泵装置流量系数的增大,出水流道进口区的轴面速度的尾迹特征逐步减弱。
- b. 水流经出水流道逐渐扩散,速度逐渐降低,压力逐渐增大,出水流道能进一步回收能量,将动压能转化为静压能。出水流道进口区的脉动主频受叶轮的旋转影响很小,压力波动主要受导叶体进口流态和导叶体结构的双重影响,且与导叶体叶片数未成规律。不同工况时各监测点的主频及次主频均为低频脉动。

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] 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.

[3] 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))

[4] ZHU Honggeng, ZHANG Rentian, ZHOU Jiren. Optimal hydraulic design of new-type shaft tubular pumping system[C]// Anon. 26th IAHR Symposium on Hydraulic Machinery and System. UK: Institute of Physics Publishing, 2012: Article number 052026.

[5] 张仁田,JAAP Arnold,朱红耕,等. 变频调速灯泡贯流泵装置结构开发与优化[J]. 水力发电学报,2010,29(5):226-231. (ZHANG Rentian, JAAP Arnold, ZHU Honggeng, et al. Development of optimization of bulb tubular pump system structure with VFD[J]. Journal of Hydroelectric Engineering, 2010, 29(5): 226-231. (in Chinese))

[6] 唐学林,陈雄盛,王福军,等. 灯泡式贯流泵内湍流流动数值模拟和性能预测[J]. 排灌机械工程学报,2013,31(10):1025-1029. (TANG Xuelin, CHEN Xiongsheng, WANG Fujun, et al. Numerical simulations of turbulent flows in bulb tubular pump and performance predictions[J]. Journal of Drainage and Irrigation Machinery Engineering, 2013, 31(10): 1025-1029. (in Chinese))

[7] 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))

[8] 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))

[9] 刘超,杨帆,金燕,等. 高效 S 形轴伸贯流泵装置内流动特性研究[J]. 水力发电学报,2014,33(5):198-203. (LIU Chao,

- YANG Fan, JIN Yan, et al. Numerical study on high efficiency S-shaped shaft extension tubular pump system[J]. Journal of Hydroelectric Engineering, 2014, 33(5): 198-203. (in Chinese))
- [10] 张仁田,朱红耕,姚林碧. 竖井贯流泵不同出水通道型式的对比研究[J]. 水力发电学报,2014,33(1):197-201. (ZHANG Rentian, ZHU Honggeng, YAO Linbi. Comparison of shaft-type tubular pump systems with different outflow structures[J]. Journal of Hydroelectric Engineering, 2014, 33(1): 197-201. (in Chinese))
- [11] 陆林广,刘荣华,梁金栋,等. 虹吸式出水通道与直管式出水通道的比较[J]. 南水北调与水利科技,2009,7(1):91-94. (LU Linguang, LIU Ronghua, LIANG Jindong, et al. Comparison between siphon outlet conduit and straight outlet conduit[J]. South-to-North Water Transfer and Water Science & Technology, 2009, 7(1): 91-94. (in Chinese))
- [12] 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))
- [13] 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.
- [14] 杨帆,刘超,汤方平,等. 基于全流道模拟的泵装置出水通道水力特性分析[J]. 农业机械学报,2014,45(3):83-89. (YANG Fan, LIU Chao, TANG Fangping, et al. Analysis of hydraulic performance of outlet passage based on simulation of steady flow in whole passage of axial-flow pumping system[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2014, 45(3): 83-89. (in Chinese))
- [15] LI Zhongjie, BI Huili, WANG Zhengwei, et al. Three-dimensional simulation of unsteady flows in a pump-turbine during start-up transient up to speed no-load condition in generating mode[J]. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part A: Journal of Power and Energy, 2016, 230(6): 570-585.
- [16] ZHANG Desheng, SHI Lei, SHI Weidong, et al. Numerical analysis of unsteady tip leakage vortex cavitation cloud and unstable suction-side-perpendicular cavitating vortices in an axial flow pump[J]. International Journal of Multiphase Flow, 2015, 77: 244-259.
- [17] 杨帆,刘超,许旭东,等. S形贯流泵装置水力模型非定常水力特性分析[J]. 应用基础与工程科学学报,2016,24(3): 442-453. (YANG Fan, LIU Chao, XU Xudong, et al. Unsteady hydrodynamic performance of hydraulic model in S-shaped shaft extension tubular pumping system[J]. Journal of Basic Science and Engineering, 2016, 24(3): 442-453. (in Chinese))
- [18] 牟介刚,刘剑,谷云庆,等. 仿生蜗壳离心泵内部非定常流动特性分析[J]. 浙江大学学报(工学版),2016,50(5):927-933. (MOU Jiegang, LIU Jian, GU Yunqing, et al. Analysis on unsteady flow characteristics in centrifugal pump with bionic volute[J]. Journal of Zhejiang University(Engineering Science), 2016, 50(5): 927-933. (in Chinese))
- [19] 施卫东,邹萍萍,张德胜,等. 高比转速斜流泵内部非定常压力脉动特性[J]. 农业工程学报,2011,27(4):147-152. (SHI Weidong, ZOU Pingping, ZHANG Desheng, et al. Unsteady flow pressure fluctuation of high-specific-speed mixed-flow pump [J]. Transactions of the CSAE, 2011, 27(4): 147-152. (in Chinese))
- [20] 谈明高,丁荣,刘厚林,等. 双流道污水泵内非定常压力脉动特性研究[J]. 振动与冲击,2016,35(14):155-162,221. (TAN Minggao, DING Rong, LIU Houlin, et al. Unsteady characteristics of pressure pulsation in a double channel sewage pump [J]. Journal of Vibration and Shock, 2016, 35(14): 155-162, 221. (in Chinese))
- [21] 水利部水利水电规划设计管理局. 水泵模型及装置模型验收试验规程:SL 140—2006[S]. 北京:中国水利水电出版社, 2007.

(收稿日期:2017-02-13 编辑:刘晓艳)