

隔墩对轴流泵装置直管式出水流道内流及脉动的影响

杨帆¹ 陈世杰¹ 刘超¹ 王茂运² 周济人¹

(1. 扬州大学水利与能源动力工程学院, 扬州 225127; 2. 江苏省防汛抗旱抢险中心, 南京 211500)

摘要: 为分析隔墩对直管式出水流道内部流态及压力脉动的影响规律,基于立式轴流泵装置物理模型,采用在直管式出水流道壁面布置丝状红线和压力脉动传感器的方法进行了试验。结果表明,小流量工况时,有无隔墩的直管式出水流道内壁面红色丝线均呈大角度倾斜状;在最优工况和大流量工况时,直管式出水流道内壁面红色丝线趋于水平状,流量越大红色丝线越趋于水平。无隔墩的直管式出水流道脉动幅值均方根的平均值均高于有隔墩的直管式出水流道脉动幅值均方根的平均值。相同转速时,有无隔墩的直管式出水流道各监测点的脉动幅值均方根均随流量的增大而减小;相同流量比时,各监测点的脉动幅值均方根随转速的增加而增加。不同转速下各最优工况时,有隔墩的直管式出水流道各监测点的脉动主频与转频呈整数倍关系。隔墩对直管式出水流道内部水流流态有一定的调整作用,可降低脉动幅值,但不同工况时隔墩对直管式出水流道内流的改善效果还取决于导叶体出口剩余环量和流量。

关键词: 轴流泵装置; 出水流道; 隔墩; 流场; 压力脉动; 模型试验

中图分类号: S277.1; TV136+.2 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1298(2018)05-0212-06

Influence of Division Pier on Pressure Fluctuation and Internal Flow Pattern in Outlet Conduit of Axial-flow Pumping System

YANG Fan¹ CHEN Shijie¹ LIU Chao¹ WANG Maoyun² ZHOU Jiren¹

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

2. Jiangsu Provincial Flood Control and Drought Relief Center, Nanjing 211500, China)

Abstract: In order to investigate the influence of division pier on the pressure fluctuation and internal flow of outlet conduit at different rotational speeds, some high-precision digital pressure sensors CY302 and red threads were installed in the straight outlet conduit, fluctuating pressure signals were obtained and recorded under different operating conditions. The results showed that red threads were inclined under the small flowrate condition, while red threads were horizontal approximately under the optimal and large flowrate conditions. With the increase of flowrate, red threads were more horizontal. Under the same conditions of rotational speed and flowrate, the average values of pulsating amplitude root mean square in the straight outlet conduits without division pier were larger than that in the straight outlet conduits with division pier. With the increase of flowrate, the root mean square of pulsating amplitude was decreased gradually at the same rotational speed for straight outlet conduits with and without division pier. At the same flowrate, with the increase of rotational speed, the root mean square of pulsating amplitude was increased gradually for straight outlet conduits with and without division pier. The main frequency of each measuring points was the integer multiple relationship with the rotational frequency under the optimal operating condition of different rotational speeds for the straight outlet conduit with division pier, while the main frequency of each measuring points was not that. Division pier can improve flow pattern of straight outlet conduit, decrease the pulsating amplitude, but the improvement effect was also depended on guide vane outlet velocity circulation and flowrate under different operating conditions.

Key words: axial-flow pumping system; outlet conduit; division pier; flow field; pressure fluctuation; model test

收稿日期: 2017-10-13 修回日期: 2017-11-24

基金项目: 国家自然科学基金项目(51609210)、江苏省自然科学基金项目(BK20150457)、中国博士后科学基金项目(2016M591932)、江苏省博士后科研计划项目(1601161B)、流体及动力机械教育部重点实验室开放课题项目(szjj2016-078)和江苏省高校自然科学研究面上项目(15KJB570003)

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

0 引言

轴流泵站在我国大中型泵站中应用最为广泛,轴流泵装置是轴流泵站的工作主体,由轴流泵、进水流道和出水流道 3 个过流部件组成。轴流泵装置的综合水力性能是各过流部件总体特征的综合反映,低扬程水泵进、出水流道的水力损失对泵装置效率影响很大,其中出水流道的水力性能对轴流泵装置综合性能的影响更为显著^[1-2],国内外学者已对出水流道进行了相关研究工作,如:出水流道的三维形体优化^[3-5];出水流道内流场的数值计算分析^[6-9];出水流道结构型式的比较分析^[10-11];隔墩对出水流道水力损失影响的试验和定常数值计算分析^[12-14]。泵装置内部流动及脉动的研究对象主要集中于泵本身^[15-21],对出水流道内流脉动研究的报道较少^[3, 22-24]。文献[23]采用 BME-1100 型压力传感器测试分析了不同工况时虹吸式出水流道进口弯管侧壁面处单点的压力脉动变化规律。文献[24]采用 HM90 型中高频动态压力传感器测试分析了不同转速各工况时双向出水流道盲端壁面处单点的压力脉动变化规律。出水流道是泵装置的重要组成部分,承担着进一步扩散水流、回收水流动能的作用,进行出水流道的研究具有重要意义。

为进一步探究出水流道内部流动性能,本文采用物理模型试验方法,借鉴文献[23-24]的测试方法,定量和定性地研究分析不同转速各工况时隔墩对直管式出水流道内部流态及其内流脉动的影响规律,为同类出水流道结构的设计提供一定的参考。

1 试验装置与测试方法

立式轴流泵装置物理模型包括肘形进水流道、叶轮、导叶体和直管式出水流道 4 部分。叶轮型号为 ZM55,叶轮名义直径为 120 mm,轮毂比为 0.40,叶轮的叶片数为 4,导叶体的叶片数为 5。直管式出水流道的主要控制尺寸包括:流道长为叶轮名义直径的 6.05 倍,进口面直径为叶轮名义直径的 1.17 倍,出口面积为进口面积的 2.06 倍,等效扩散角为 2.41°。测试段进口面与泵轴线的水平距离为叶轮名义直径的 1.87 倍。

立式轴流泵装置物理模型试验在 $\Phi 120$ 型水力机械闭式循环试验台上进行测试,试验台如图 1 所示。在直管式出水流道圆管段中间沿水流方向左、右侧壁面各布置 1 个压力传感器,压力传感器采用 CY302 型高精度数字压力传感器,探头尺寸为 $\Phi 5$ mm,精度为 0.1%,采样率为 1 000 次/s。压力数据的采集通过 485 集线器和数据采集软件来实

现,每次采样约 10 s,对采集的压力时域数据进行短时傅里叶变换分析,脉动试验共测试了 1 450、1 800、2 200 r/min 共 3 个转速时流道壁面区的压力脉动。直管式出水流道内部流态采用内贴红色丝线方法进行观察,每根红色丝线的长度约 45 cm,红色丝线具有较好的水流跟随性,可较好地反映水流的流动状态,通过在试验过程中观察红色丝线的偏移方向及偏移角度来评断直管式出水流道测试段内部水流流态特征。为便于观察流态,直管式出水流道测试段采用透明的亚克力材料进行加工制作。直管式出水流道测试段内红色丝线及压力传感器安装如图 2 所示。

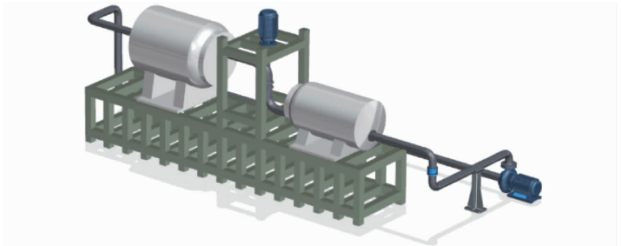


图 1 立式轴流泵装置模型试验台

Fig. 1 Pumping system model test bench

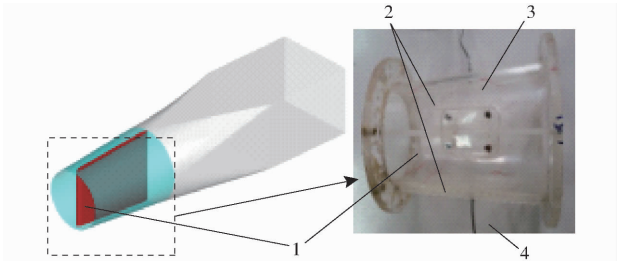


图 2 红色丝线及脉动传感器安装示意图

Fig. 2 Sketch of outlet conduit and pulsation sensors locations

1. 隔墩 2. 红色丝线 3. 测点 1 的压力传感器 4. 测点 2 的压力传感器

2 试验可靠性分析

立式轴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》中能量试验要求进行测试,为验证试验台的可靠性,在相同测试条件下对转速 2 200 r/min 时立式轴流泵装置能量性能进行了 3 次重复性测试,各工况采用流量比进行比较,流量比为各工况流量 Q 与最优工况流量 Q_{bep} 的比值,测试结果如图 3 所示。

3 隔墩对直管式出水流道水力性能的影响

3.1 出水流道内流场

不同工况时,有、无隔墩的直管式出水流道测试段内部流态分别如图 4、5 所示。通过对不同工况时立式轴流泵装置的直管式出水流道测试段内部红色

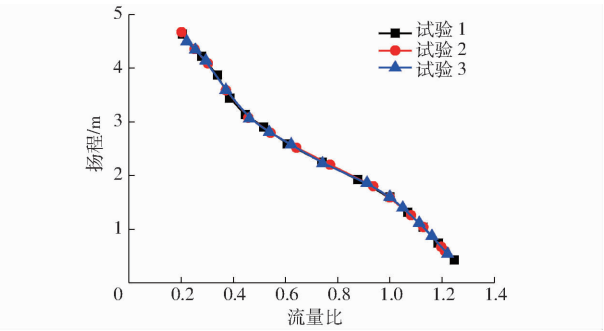


图 3 立式轴流泵装置能量性能重复性试验结果

Fig. 3 Energy performance curves of repetitive experiment

丝线的观察,小流量工况时有、无隔墩的直管式出水
流道测试段红色丝线均呈大角度倾斜,最优工况和
大流量工况时大多数红色丝线呈水平状,流量越大
时红色丝线的水平状越明显,表明了小流量工况时
直管式出水流道内部水流呈螺旋状运动状态,最优
工况和大流量工况时直管式出水流道内部近壁面区
域水流近似平顺。直管式出水流道测试段内隔墩两
侧的红色丝线呈相反的倾斜状,表明此时水流在隔
墩两侧呈反对称运动状态,主要因小流量工况时导
叶体出口的剩余速度环量较大。

3.2 出水流道内流脉动

直管式出水流道测试段的压力脉动幅值分析采
用脉动幅值均方根(Root mean square,RMS)方法进
行分析,均方根具有较小的数值离散程度,脉动幅值
均方根可较好地表征压力脉动的能量水平,是信号
幅值分析的主要参数之一,脉动幅值均方根 P_{RMS} 的
计算式为

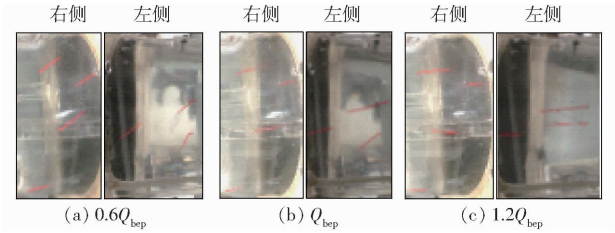


图 4 直管式出水流道测试段出口区流态(有隔墩)

Fig. 4 Flow patterns at outlet of test section in straight outlet conduit with dividing pier

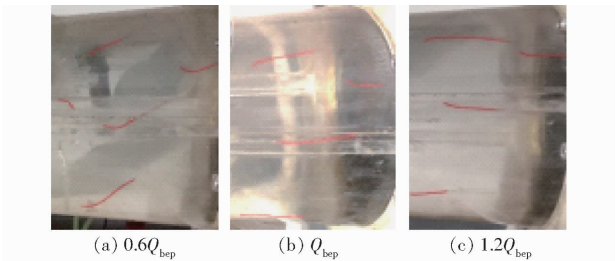


图 5 直管式出水流道测试段出口区流态(无隔墩)

Fig. 5 Flow patterns at outlet of test section in straight outlet conduit without dividing pier

$$P_{RMS} = \sqrt{\frac{P_1^2 + P_2^2 + \cdots + P_i^2 + \cdots + P_N^2}{N}} \quad (1)$$

式中 P_i ——压力的第 i 次测量值
 N ——数据采集个数

有、无隔墩的直管式出水流道测试段的脉动幅
值均方根如图 6 所示,图中 P1 为有隔墩出水流道沿
水流方向右侧水平壁面的脉动监测点,P2 为有隔墩
出水流道沿水流方向左侧水平壁面的脉动监测点,
P1' 为无隔墩出水流道沿水流方向右侧水平壁面的

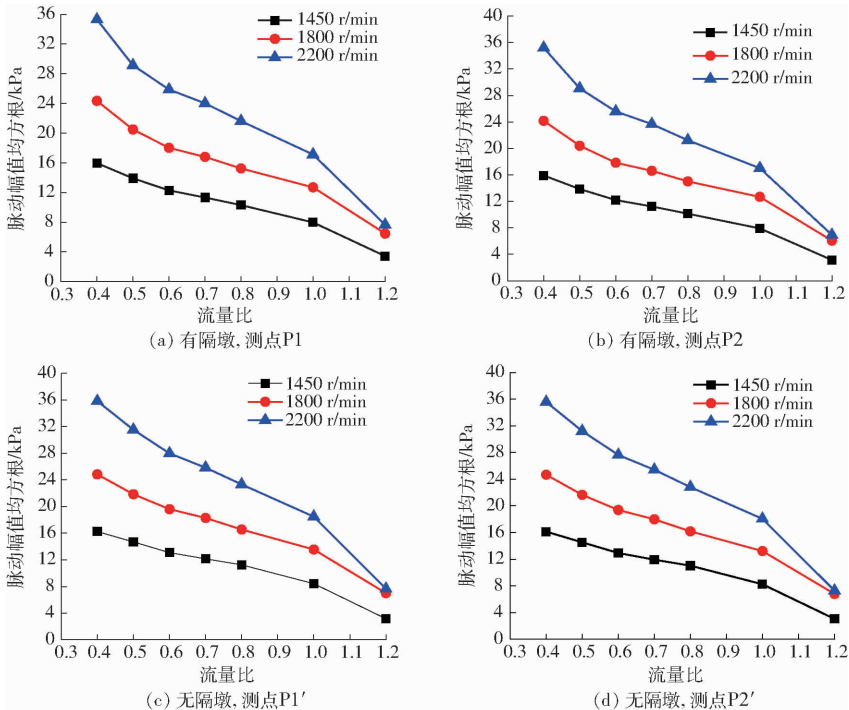


图 6 直管式出水流道测试段压力脉动幅值均方根

Fig. 6 P_{RMS} values of different measuring points

脉动监测点,P2'为无隔墩出水流动沿水流方向左侧水平壁面的脉动监测点。相同转速时,有无隔墩的直管式出水流动两监测点压力脉动幅值均方根均随流量比的增大而减小;相同流量比时,直管式出水流动两监测点压力脉动幅值均方根随转速的增加而增加,且流量比越小,随转速增大时压力脉动幅值均方根的增量越大。

不同转速时有、无隔墩的直管式出水流动测试段各监测点压力脉动幅值均方根的平均值如图 7 所示。在测试流量范围内,无隔墩时直管式出水流动测试段脉动幅值均方根的平均值均高于有隔墩时。不同转速各流量比时,无隔墩时直管式出水流动脉动幅值均方根的平均值比有隔墩时直管式出水流动脉动幅值均方根的平均值增加了 6.21%。相同转速时,随流量比的增加,无隔墩时脉动幅值均方根的平均值与有隔墩时脉动幅值均方根的平均值比值呈先增大后减小的趋势,在流量比为 0.4、1.0 和 1.2 时,有、无隔墩时直管式出水流动测试段脉动幅值均方根的差异均较小。在流量比为 1.0 时,导叶体出口剩余速度环量最小,直管式出水流动进口面的水流横向速度较小,这是隔墩对水流的影响较小所致;在小流量比(小于 0.45)时,导叶体出口剩余环量较大,直管式出水流动进口面的横向速度较大,水流的螺旋状运动更为明显,此时隔墩可起到进一步约束水流,增大水流的压能,降低流速的作用,有隔墩时出水流动内部水流更加平顺,水流脉动值相对减小。流量比大于 1.0 时,在直管式出水流动进口面的速度分布中轴向速度占主导,导叶体出口剩余速度环量较小,对主流运动方向的改变所起作用较小,水流沿轴向运动,隔墩对水流流态的影响很小,故有、无隔墩时直管式出水流动测试段压力脉动幅值均方根的差异较小。

对脉动时域信号进行短时傅里叶变换,获得有无隔墩的直管式出水流动测试段内各监测点的脉动

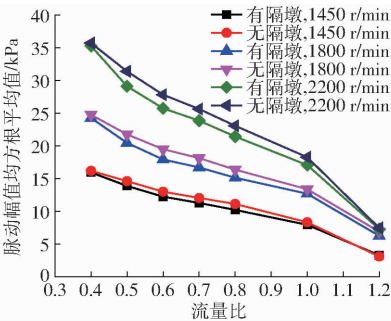


图 7 不同转速时直管式出水流动脉动幅值均方根的平均值

Fig. 7 Average P_{RMS} values of straight outlet conduit with and without division pier

频谱图,不同转速时有无隔墩的直管式出水流动测试段脉动频谱分别如图 8 ~ 10 所示。相同流量比时,有、无隔墩的直管式出水流动测试段内同一监测点的脉动主频与脉动主频幅值均不相同。在转速 n 为 1 450 r/min 和 2 200 r/min 时,有隔墩的直管式出水流动内两监测点在 3 个特征工况的脉动主频均为 1 倍转频;在转速 n 为 1 800 r/min 时,有隔墩的直管式出水流动内两监测点在最优工况的脉动主频均为 6 倍转频,在小流量工况和大流量工况时有隔墩的直管式出水流动内两监测点的脉动主频未与转频呈固定整数倍关系;相同转速不同工况时无隔墩的直管式出水流动两监测点的脉动主频均存在较大差异,脉动主频与转频未呈整数倍关系。结果表明:隔墩对直管式出水流动内部流态具有一定的调整作用,可降低脉动幅值。

4 结论

(1)小流量工况时有、无隔墩的直管式出水流动内壁面红色丝线均呈大角度倾斜状,无隔墩的直管式出水流动内部水流呈螺旋状运动状态,有隔墩的直管式出水流动内部水流在隔墩两侧呈反对称运动状态,隔墩对直管式出水流动内部水流流态有一定的调整作用,但流态的改善效果还取决于导叶体

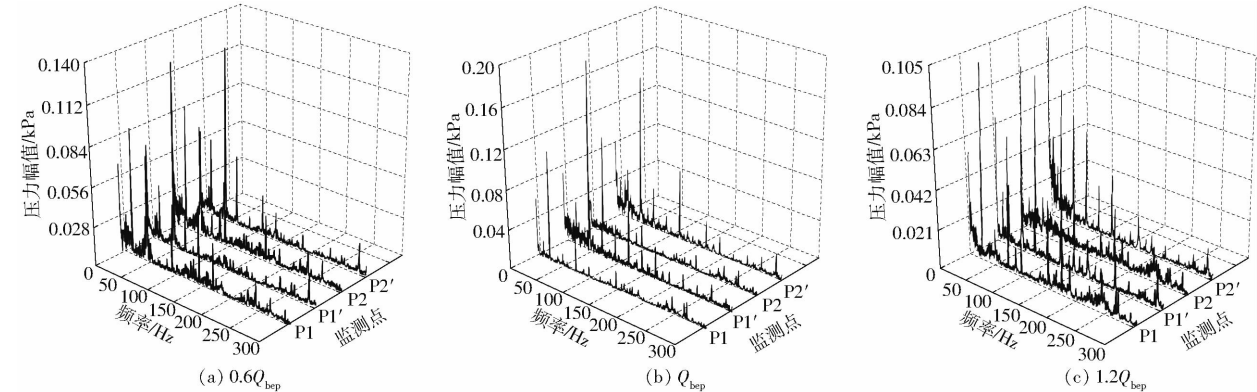


图 8 各监测点的脉动频谱图 ($n = 1\,450\text{ r/min}$)

Fig. 8 Frequency domain diagrams of different measuring points at 1 450 r/min

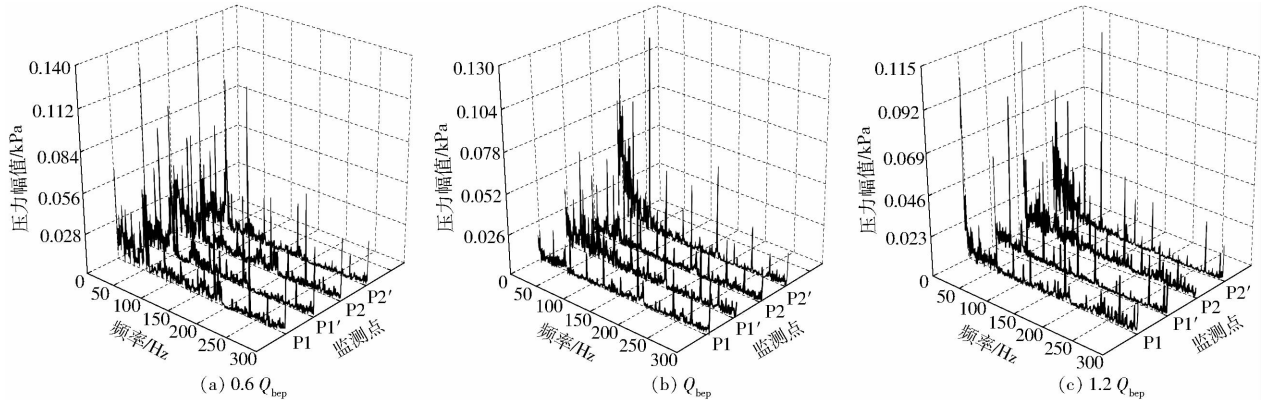


图9 各监测点的脉动频谱图($n=1\,800\text{ r/min}$)

Fig. 9 Frequency domain diagrams of different measuring points at 1 800 r/min

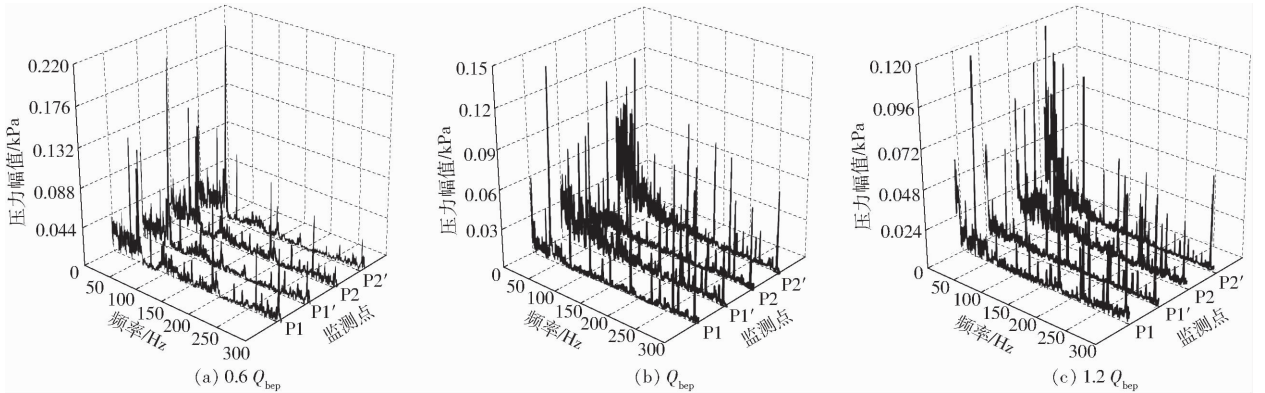


图10 各监测点的脉动频谱图($n=2\,200\text{ r/min}$)

Fig. 10 Frequency domain diagrams of different measuring points at 2 200 r/min

出口剩余环量和流量。

(2)在测试流量范围内,无隔墩的直管式出水水道测试段脉动幅值均方根的平均值均高于有隔墩的直管式出水水道测试段脉动幅值均方根的平均值。相同转速时,有无隔墩的直管式出水水道各监测点的压力脉动幅值均方根均随流量比的增大而减小;相同流量比时,随转速的增加各监测点的压力脉动幅值均方根也增加,且流量比越小,压力脉动幅值

均方根随转速增大的增量越大。

(3)相同转速同一流量比时,有无隔墩的直管式出水水道测试段内同一监测点的脉动主频与脉动幅值存在差异。相同转速时,无隔墩的直管式出水水道两监测点的脉动主频均有较大差异,脉动主频与转频未呈整倍数关系。不同转速最优工况时有隔墩的直管式出水水道两监测点的脉动主频与转频呈整倍数关系。

参 考 文 献

1 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.

2 刘超. 轴流泵系统技术创新与发展分析[J/OL]. 农业机械学报,2015,46(6):49-59. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20150608&journal_id=jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2015.06.008.

LIU Chao. Researches and developments of axial-flow pump system[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2015, 46(6): 49-59. (in Chinese)

3 WANG Zhengwei, PENG Guangjie, ZHOU Lingjiu, et al. Hydraulic performance of slanted axial pump system[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 ZHU Honggeng, ZHANG Rentian, ZHOU Jiren. Optimal hydraulic design of new-type shaft tubular pumping system[C]//26th IAHR Symposium on Hydraulic Machinery and System, 2012.

6 王晓升,冯建刚,陈红勋,等. 泵站虹吸式出水管虹吸形成过程气液两相流数值模拟[J/OL]. 农业机械学报,2014,45(5):78-83. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20140512&journal_id=jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2014.05.012.

WANG Xiaosheng, FENG Jian'gang, CHEN Hongxun, et al. Numerical simulation for two-phase flow of siphon outlet in pumping

- station[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2014, 45(5): 78–83. (in Chinese)
- 7 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(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: Natural Science Edition, 2017, 45(1): 128–132. (in Chinese)
- 8 杨帆,刘超,汤方平,等. 大型立式轴流泵装置流道内部流动特性分析[J]. 农业机械学报,2011,42(5):39–43,55.
- YANG Fan, LIU Chao, TANG Fangping, et al. Characteristics of flow in large vertical axial-flow pumping system[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2011, 42(5): 39–43, 55. (in Chinese)
- 9 谢荣盛,汤方平,刘超,等. 轴伸式出水流道内流场数值模拟分析[J/OL]. 农业机械学报,2016,47(8):29–34,81. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20160805&journal_id=jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2016.08.005.
- XIE Rongsheng, TANG Fangping, LIU Chao, et al. Numerical simulation analysis of internal flow in S-shaped outlet conduit[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2016, 47(8): 29–34, 81. (in Chinese)
- 10 张仁田,朱红耕,姚林碧. 竖井贯流泵不同出水流道型式的对比研究[J]. 水力发电学报,2014,33(1):198–201.
- 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): 198–201. (in Chinese)
- 11 雍成林,汤正军,朱红耕,等. 虹吸式出水贯流泵结构特点及对比试验研究[J]. 南水北调与水利科技,2014,12(5):34–38.
- YONG Chenglin, TANG Zhengjun, ZHU Honggeng, et al. Structural features and comparison tests of different tubular pumping systems with siphon outflows[J]. South-to-North Water Transfers and Water Science & Technology, 2014, 12(5): 34–38. (in Chinese)
- 12 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.
- 13 梁金栋,陆林广,刘荣华,等. 中隔墩对大型泵站出水流道水力性能的影响[J]. 排灌机械工程学报,2011,29(1):77–81.
- LIANG Jindong, LU Linguang, LIU Ronghua, et al. Influence of middle division pier on hydraulic performance in pumping station outlet conduit[J]. Journal of Drainage and Irrigation Machinery Engineering, 2011, 29(1): 77–81. (in Chinese)
- 14 杨帆,刘超,汤方平,等. 基于全流道模拟的泵装置出水流道水力特性分析[J/OL]. 农业机械学报,2014,45(3):83–89. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20140315&journal_id=jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2014.03.015.
- 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/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2014, 45(3): 83–89. (in Chinese)
- 15 QIAN Zhongdong, WANG Fan, GUO Zhiwei, et al. Performance evaluation of an axial-flow pump with adjustable guide vanes in turbine mode[J]. Renewable Energy, 2016(99): 1146–1152.
- 16 KANG Can, MAO Ning, PAN Chen, et al. Turbulent flow characteristics in an axial-flow pump at direct and reverse modes[J]. Journal of Applied Science and Engineering, 2016, 19(4): 447–458.
- 17 郑源,陈宇杰,毛秀丽,等. 混流泵压力脉动特性及其对流动诱导噪声的影响[J]. 农业工程学报,2015,31(23):63–67.
- ZHENG Yuan, CHEN Yujie, MAO Xiuli, et al. Pressure pulsation characteristics and its impact on flow-induced noise in mixed-flow pump[J]. Transactions of the CSAE, 2015, 31(23):63–67. (in Chinese)
- 18 LI Xiaojun, YU Benxu, JI Yucheng, et al. Statistical characteristics of suction pressure signals for a centrifugal pump under cavitating conditions[J]. Journal of Thermal Science, 2017, 26(1): 47–53.
- 19 KIM Sang-won, KIM Youn-jea. The effect of the thickness and angle of the inlet and outlet guide vane on the performance of axial-flow pump[C]// ASME 2016 Fluids Engineering Division Summer Meeting. Washington DC, 2016.
- 20 张德胜,刘俊龙,耿琳琳,等. 斜流泵小流量工况压力脉动数值模拟与实验[J/OL]. 农业机械学报,2017,48(2):117–125. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20170216&journal_id=jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2017.02.016.
- ZHANG Desheng, LIU Junlong, GENG Linlin, et al. Numerical simulation and experiment of pressure fluctuation in mixed flow pumps under low flow conditions[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2017, 48(2): 117–125. (in Chinese)
- 21 BARZDAITIS V, MAŽEIKAK P, VASYLIUS M, et al. Investigation of pressure pulsations in centrifugal pump system[J]. Journal of Vibroengineering, 2016, 18(3): 1849–1860.
- 22 朱荣生,燕浩,付强,等. 贯流泵内部压力脉动特性的数值计算[J]. 水力发电学报,2012,31(1):220–225.
- ZHU Rongsheng, YAN Hao, FU Qiang, et al. Numerical calculation of characteristics of tubular pump internal pressure pulsation[J]. Journal of Hydroelectric Engineering, 2012, 31(1): 220–225. (in Chinese)
- 23 郑源,刘君,周大庆,等. 大型轴流泵装置模型试验的压力脉动[J]. 排灌机械工程学报,2010,28(1):51–55.
- ZHENG Yuan, LIU Jun, ZHOU Daqing, et al. Press pulsation of model test in large-size axial-flow pump[J]. Journal of Drainage and Irrigation Machinery Engineering, 2010, 28(1): 51–55. (in Chinese)
- 24 杨帆,刘超,汤方平,等. 灌排双向立式泵装置内部水流压力脉动特性[J]. 排灌机械工程学报,2011,29(4):316–321.
- YANG Fan, LIU Chao, TANG Fangping, et al. Analysis on pressure fluctuation of interior flow in reversible pumping system for irrigation and drainage[J]. Journal of Drainage and Irrigation Machinery Engineering, 2011, 29(4): 316–321. (in Chinese)