

DOI: 10. 20040/j. cnki. 1000-7709. 2023. 20220629

扬州闸泵站潜水贯流泵装置性能试验与流场分析

丁平^{1,2}, 刘金生², 葛恒军³, 吕玉婷¹, 杨帆¹

(1. 扬州大学水利科学与工程学院, 江苏扬州 225009; 2. 扬州市水利工程建设中心, 江苏扬州 225000;
3. 扬州市勘测设计研究院有限公司, 江苏扬州 225007)

摘要:为明晰扬州闸泵站潜水贯流泵装置的水力性能,采用数值模拟结合物理模型试验的方法分析该潜水贯流泵装置内流及水力性能,通过综合特性指标 C.P.I 对比分析了前后置灯泡体对泵装置能量性能的影响,优选了灯泡体后置的潜水贯流泵装置方案,灯泡体后置的潜水贯流泵装置最高效率达 78.86%,此时流量为 314.86 L/s,扬程为 3.594 m,叶片安放角为 +2°。在叶片安放角为 -4°时,原型泵的飞逸转速达 295.19 r/min,该飞逸转速为原型泵额定转速的 1.75 倍。各流量工况时直管式进水流道流线平顺,小流量工况时导叶体局部区域出现了回流且直管式出水流道内部螺旋状水流明显。随着流量的增大,灯泡体和出水流道的水力损失占比呈先减小后增大的趋势,灯泡体和出水流道占泵装置整个流道的水力损失比例最大。研究结果可为工程实践提供参考。

关键词: 潜水贯流泵; 泵装置; 水力性能; 流场; 模型试验

中图分类号: TV675 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-7709(2023)03-0202-05

1 概况

扬州闸泵站是扬州市城市防洪工程的重要组成部分,共 4 台潜水贯流泵装置,其中 2 台为 2400GZBW 型单向潜水贯流泵装置,叶轮直径为 2 400 mm,转速为 169 r/min,配套电机为 YQGN990-8-900kW 带行星齿轮传动的潜水干式电机。扬州闸泵站的单向潜水贯流泵装置各工况特征扬程时设计参数见表 1。扬州闸泵站单向潜水贯流泵装置的泵房剖面见图 1。为确保扬州闸泵站潜水贯流泵装置的高效、稳定、安全运行,采用物理模型试验结合数值模拟技术分析该泵站单向潜水贯流泵装置的水力性能,通过对比分析综

表 1 泵站设计参数

Tab. 1 Design parameters of pump station

工况	净扬程/m	流量/(m ³ ·s ⁻¹)	备注
设计扬程	2.44	20.56	泵站总扬程应考虑
最高扬程	3.41	18.45	拦污栅及进出口门
平均扬程	1.35	22.82	槽损失 0.4 m

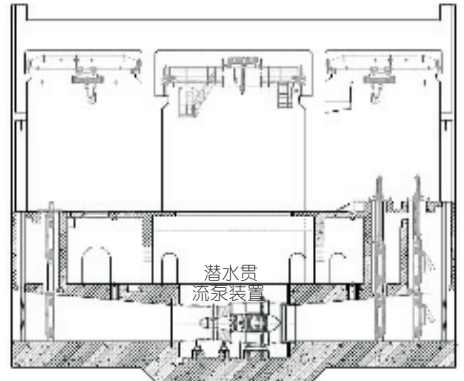


图 1 泵房剖面图

Fig. 1 Pump room profile

合特性指标,优选了灯泡体后置的潜水贯流泵装置方案,以期指导工程实践。

2 物理模型试验及分析

2.1 试验台及测试内容

潜水贯流泵装置水力模型采用扬州大学研发的 ZM25N 轴流泵水力模型,叶轮名义直径为 300

收稿日期: 2022-04-01, 修回日期: 2022-06-10

基金项目: 国家自然科学基金项目(51609210);江苏省高校自然科学基金研究重大项目(20KJA570001);江苏省水利科技项目(2022074);江西省水工安全工程技术研究中心开放课题(2021SKSG06)

作者简介: 丁平(1987-),男,工程师,研究方向为泵站管理,E-mail:346212242@qq.com

通讯作者: 杨帆(1985-),男,教授、硕导,研究方向为泵站工程,E-mail:fanyang@yzu.edu.cn

mm,叶片数为 3,根据原模型 nD (转速 \times 叶轮名义直径)值换算模型泵叶轮转速为 1 352 r/min,叶顶间隙在 0.15 mm 以内,导叶体叶片数为 5,水泵模原型几何比尺为 1:8,根据水泵相似律换算可知模型泵装置在设计扬程工况时流量为 321.25 L/s,最高扬程工况时流量为 288.28 L/s,平均扬程工况时流量为 356.56 L/s。叶轮采用黄铜材料经数控车床加工制作,导叶体采用钢质材料焊接成型,导叶体和叶轮的定位表面的轴向跳动为 0.1 mm,轮毂外表面的径向跳动为 0.08 mm。流道采用钢质材料焊接成型,流道内壁面加涂层以满足粗糙度相似。直管式进水流道长为 $6.01D$,进口高 $1.72D$,进口宽 $2.21D$;直管式出水流道长 $5.42D$,出口高 $1.72D$,出口宽 $2.21D$,当量扩散角为 5.43° ;灯泡体长为 $1.67D$,筒体直径为 $0.56D$,支撑件长度为 $0.58D$,支撑件个数为 5。

潜水贯流泵装置的物理模型试验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,该试验台的相关参数及数据采集方法见文献[1,2],测试内容主要有泵装置的能量性能、空化性能和飞逸特性,各项试验内容均按照《水泵模型及装置模型验收试验规程(SL140-2006)》^[3]要求进行。

2.2 试验结果与分析

2.2.1 灯泡体位置对泵装置能量性能的影响

为探究灯泡体位置对潜水贯流泵装置能量性能的影响规律,对 3 个叶片安放角时灯泡体前置的潜水贯流泵装置(编号:QZ)和灯泡体后置的潜水贯流泵装置(编号:HZ)进行能量性能试验,泵装置的能量性能曲线对比见图 2,各叶片安放角不同灯泡体位置时潜水贯流泵装置的最优工况性能参数见表 2。在相同叶片安放角和相同扬程时,灯泡体前置的潜水贯流泵装置的流量略大于灯泡体后置;相比灯泡体后置的潜水贯流泵装置流量—扬程曲线,灯泡体前置的潜水贯流泵装置流量—扬程曲线整体向右侧偏移。在叶片安放角 $-2^\circ\sim+2^\circ$ 范围内,灯泡体后置的潜水贯流泵装置的效率整体高于灯泡体前置潜水贯流泵装置,灯泡体后置的潜水贯流泵装置最高效率为 78.86%,此时叶片安放角为 $+2^\circ$,流量为 314.86 L/s,扬程为 3.594 m。叶片安放角为 $+2^\circ$ 时,设计扬程 2.84 m,灯泡体后置潜水贯流泵装置流量为 342.66 L/s,效率为 77.08%;灯泡体前置潜水贯流泵装置流量为 322.27 L/s,效率为 75.45%,采用文献[4]中综合特性指标 C.P.I 对比分析两

种潜水贯流泵装置的性能,结果见图 3,在设计扬程 2.84 m 时,灯泡体后置、灯泡体前置的潜水贯流泵装置的综合特性指标 C.P.I 分别为 0.724、0.666,灯泡体后置的潜水贯流泵装置 C.P.I 是灯泡体前置的潜水贯流泵装置 C.P.I 的 1.087 倍,在平均扬程 1.75 m 和最高扬程 3.81 m 时,灯泡体后置潜水贯流泵装置的综合特性指标均高于灯泡体前置的潜水贯流泵装置。在设计扬程时,灯泡体后置潜水贯流泵装置流量是设计流量的 1.067 倍,满足泵装置设计流量的要求,灯泡体后置的潜水贯流泵装置的综合性能优于灯泡体前置的潜水贯流泵装置,建议扬州闸泵站单向潜水贯流装置采用灯泡体后置方案,经物理模型试验测试,灯泡体后置的潜水贯流泵装置的综合特性曲线见图 4,在测试的 5 个叶片安放角 (-4° 、 -2° 、 0° 、 $+2^\circ$ 、 $+4^\circ$) 范围内,泵装置的最高效率均大于 76%,其中 4 个叶片安放角 (-2° 、 0° 、 $+2^\circ$ 、 $+4^\circ$) 的泵装置最高效率均大于 78%。

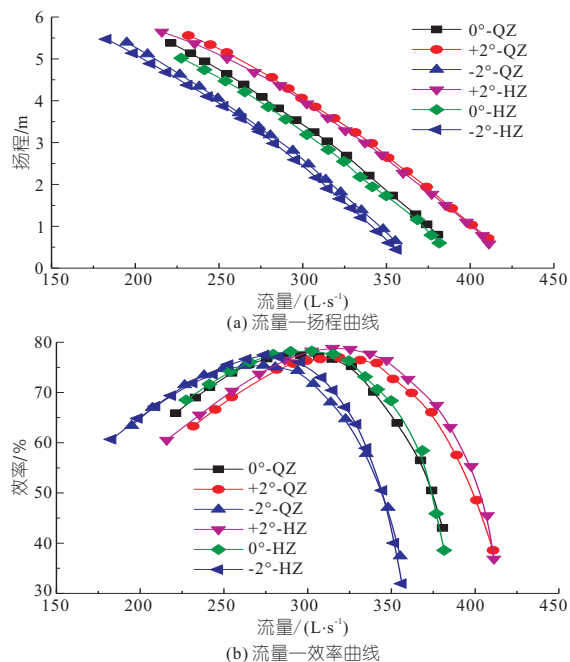


图 2 潜水贯流泵装置能量性能曲线

Fig. 2 Energy performance curve of submersible tubular pump device

表 2 不同灯泡体位置时潜水贯流泵装置最优工况参数
Tab. 2 Optimal operating parameters of submersible tubular pump device with different bulb body positions

类别	叶片安放角	流量 ($L \cdot s^{-1}$)	扬程/m	效率/%
QZ	$+2^\circ$	318.80	3.578	76.95
HZ	$+2^\circ$	314.86	3.594	78.86
QZ	0°	295.94	3.537	77.39
HZ	0°	302.48	3.191	78.26
QZ	-2°	273.60	3.376	75.36
HZ	-2°	274.42	3.265	77.49

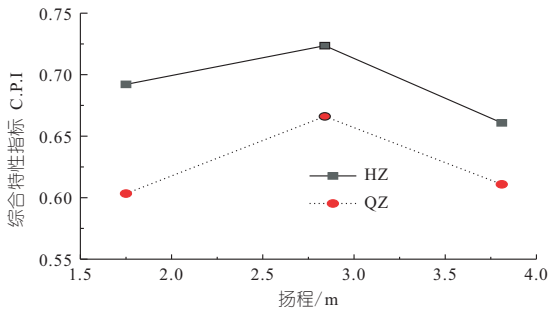


图3 灯泡体前后置潜水贯流泵装置综合特性指标

Fig. 3 Comprehensive characteristic indexes of submersible tubular pump device with front and rear bulb body

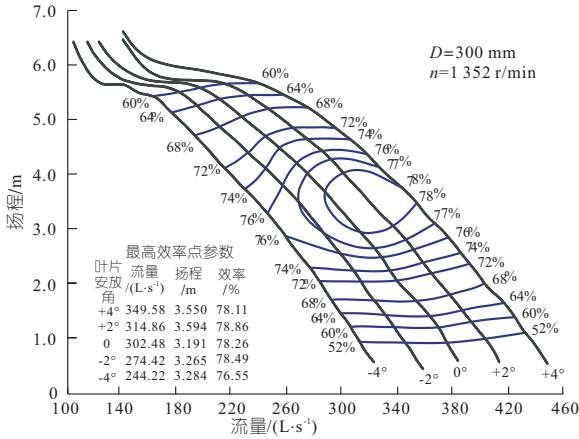


图4 潜水贯流泵装置综合特性曲线

Fig. 4 Comprehensive characteristic curve of submersible tubular pump device

2.2.2 空化及飞逸性能试验

5个叶片安放角时泵装置的必需汽蚀余量见图5,相同叶片安放角时必需汽蚀余量随着流量的增大呈先减小后增大的趋势,在叶片安放角+2°时,最高扬程3.81 m,泵装置的必需汽蚀余量低于5.5 m。5个叶片安放角时泵装置的飞逸转速见图6,相同叶片安放角时,随着反向水头的增加泵的飞逸转速也在增加。相同反向水头时,随着叶片安放角由正角度向负角度逐渐减小,飞逸转速呈递增的整体变化趋势。采用文献[5]中原模型泵飞逸转速的换算方法,在叶片安放角为-4°时,原型泵的飞逸转速达295.19 r/min,该飞逸转速为原型泵额定转速的1.75倍。

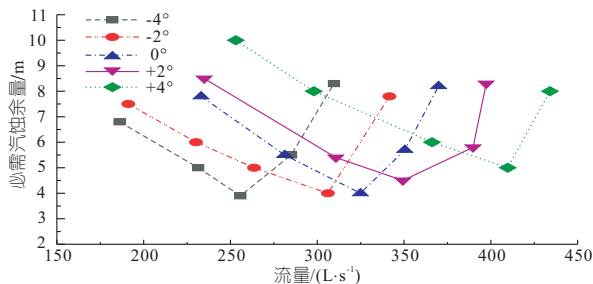


图5 泵装置的必需汽蚀余量

Fig. 5 Necessary cavitation amount for Pump Device

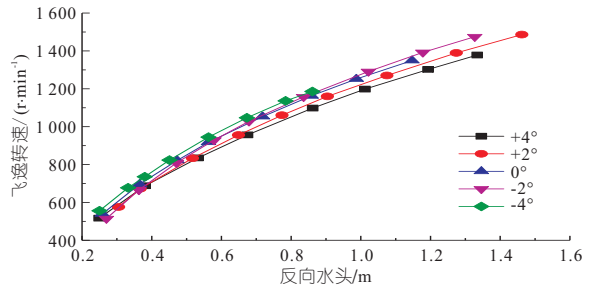


图6 不同反向水头时泵装置的飞逸转速

Fig. 6 Runaway speed of pump device with different reverse heads

3 泵装置流场分析

潜水贯流泵装置由直管式进水流道、叶轮、导叶体、灯泡体和直管式出水流道共5部分组成,潜水贯流泵装置三维模型见图7,各过流结构的控制几何参数与模型试验的相同。直管式进水流道、叶轮、导叶体和直管式出水流道采用结构化网格,灯泡体采用非结构化网格剖分,整个计算域网格数为5 854 427个,叶轮和导叶体的网格见图8。泵装置进口边界条件设置于进水流道进口的延伸段,采用压力进口;出口边界条件设置于出水流道出口的延伸段,采用质量流出口;叶轮和导叶体、直管式进水流道的交界面采用 Stage 动静交界面;灯泡体和导叶体、直管式出水流道的交界面采用 None 静静交界面[6,9,10]。泵装置固体壁面采用无滑移壁面条件,湍流模型选择 SST C-C,数值计算精度设置为 10^{-5} 。数值计算预测与模型试验对比的泵装置能量性能见图9。由图9可知,数值预测的泵装置流量—扬程曲线和模型试验所得曲线整体相同,预测的流量—效率曲线和模型试验所得曲线整体趋势一致,在200~400

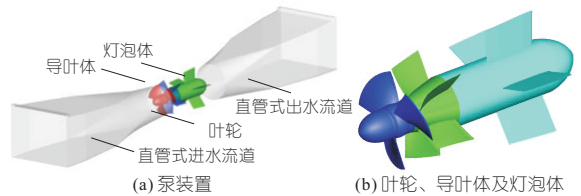


图7 潜水贯流泵装置三维模型

Fig. 7 3D model of submersible tubular pump

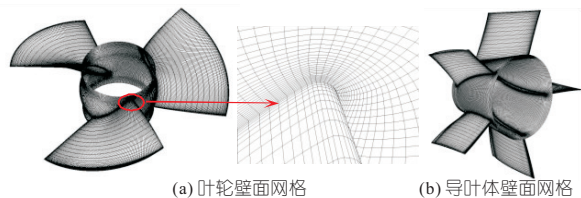


图8 叶轮和导叶体的网格

Fig. 8 Grid of impeller and guide vane

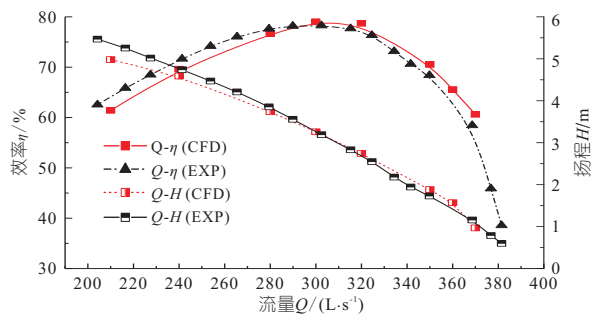


图 9 潜水贯流泵装置性能

Fig. 9 Performance of submersible tubular pump device

L/s 流量范围内, 预测的泵装置效率与模型试验效率最大绝对差值均小于 3.5%, 效率最小绝对差值为 0.31%。

选取小流量工况 $Q=240$ L/s、高效工况 $Q=300$ L/s 和大流量工况 $Q=360$ L/s 共 3 个特征

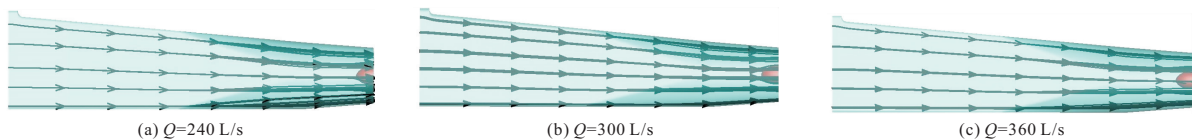


图 10 不同工况时直管式进水水道内部流线

Fig. 10 Internal streamlines of straight pipe inlet under various working

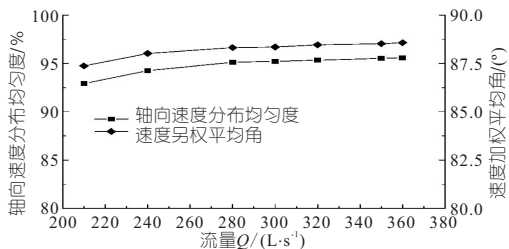


图 11 直管式进水水道出口面水力性能参数

Fig. 11 Hydraulic performance parameters of outlet surface of straight inlet conduit

为进一步分析导叶体和灯泡体内部流态, 截取导叶体和灯泡体中间横截面进行分析, 3 个特征工况时横截面流线见图 12, 小流量工况时导叶体出口区出现了旋涡, 灯泡体尾部水流出现缠绕, 而在高效工况和大流量工况时导叶体和灯泡体段横截面流线较平顺, 未见明显不良流态。采用文献[7]中偏流角的计算公式, 3 个特征工况时导叶体出口面的偏流角分布见图 13, 不同流量工况时, 水流未按某一固定偏流角离开导叶体出口, 相

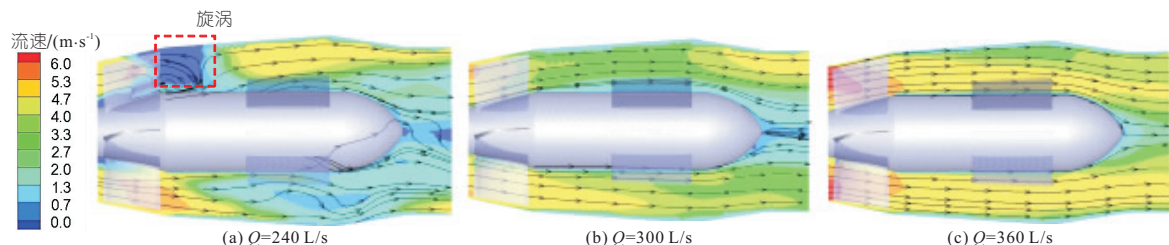


图 12 不同工况时导叶体和灯泡体流线图

Fig. 12 Streamlines of guide vane and bulb body under various working

工况分析单向潜水贯流泵装置各过流结构内部流动规律, 不同流量工况时直管式进水水道内部流线见图 10, 不同流量工况时直管式进水水道内部流线平顺, 受进水水道壁面约束流线呈收缩汇集状且流速逐渐增大, 至水道出口时流速垂直进入叶轮进口, 为叶轮提供良好的入流条件。为定量分析不同流量工况时直管式进水水道出口面的水力性能, 采用文献[6]的轴向速度分布均匀度和速度加权平均角进行分析, 结果见图 11, 不同流量工况时直管式进水水道出口面的轴向速度分布均匀度均大于 90%, 平均值为 94.85%; 不同流量工况时直管式进水水道出口面的速度加权平均角均大于 87°, 平均值为 88.23°, 与直管式进水水道内部流线平顺的流态相一致, 表明该泵装置的进水水道水力性能优异, 可为水泵提供良好的入流条件。

邻导叶片间偏流角基本呈相同分布规律, 3 个流量工况时导叶体出口面的偏流角平均值均小于 1.5°, 表明导叶体对水流速度环量回收的效果较好, 小流量工况时导叶体出口面的偏流角略大于高效工况和大流量工况, 主要是因为小流量工况时导叶体出口剩余环量较大。

直管式出水水道的内部流线见图 14, 小流量工况时导叶体出口水流在环流和壁面约束下呈螺旋状进入出水水道, 水流具有一定切向速度且切向速度沿泵轴方向未对称, 导致流线交错缠绕, 水流经在出水水道内部进一步扩散至水道出口时流线较为平顺。高效工况和大流量工况时, 出水水道内部水流较为平顺。

定义水力损失占比为各流量工况时水道水力损失与对应扬程之比的百分数。各流量工况时直管式进水水道、灯泡体和直管式出水水道的水力损失占比见图 15, 在流量 200~380 L/s 范围内, 随着流量的增大, 进水水道的水力损失占比逐渐

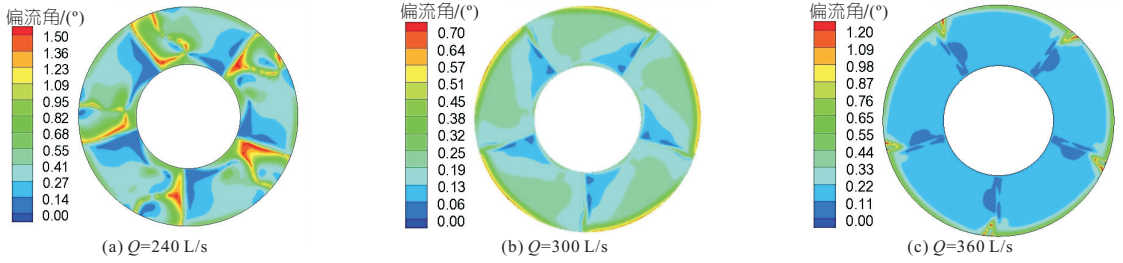


图 13 不同工况时导叶体出口偏流角分布

Fig. 13 Deviation angle distribution of guide vane outlet under various working

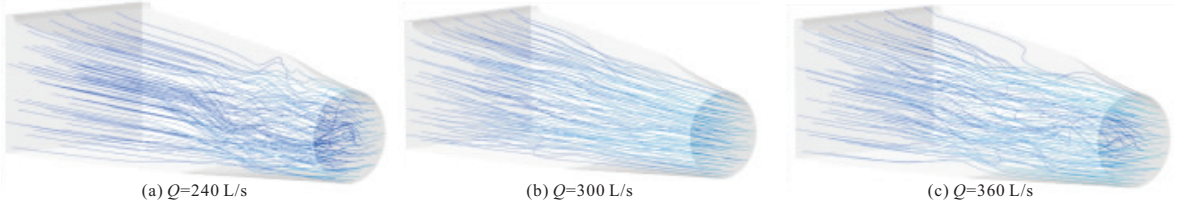


图 14 不同工况时出水水道内部流线

Fig. 14 Internal streamlines of outlet conduits under various working

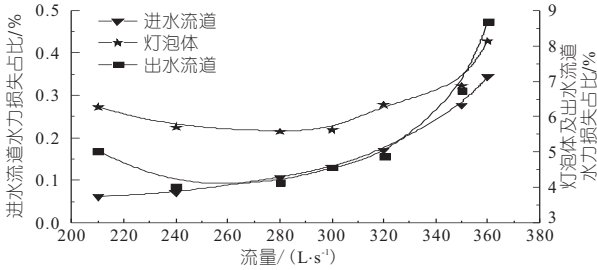


图 15 各过流结构的水力损失占比

Fig. 15 Hydraulic loss ratio of different flow structures

增加,但灯泡体和出水水道的水力损失占比呈先减小后增大的趋势,灯泡体和出水水道的总水力损失占比最大达 9.1%,灯泡体和出水水道的水力损失受导叶体出口剩余环量的影响较大,导叶体出口剩余环量在高效区范围内较小,在小流量工况时导叶体出口剩余环量较大而诱发电机灯泡体内部流态紊乱导致的水力损失增大。直管式进水流道的水力损失受叶轮旋转影响较小,进水流道的最大水力损失占比为 0.344%。

4 结论

a. 通过模型试验对比分析了灯泡体位置对潜水贯流泵装置能量性能的影响,扬州闸泵站优选了后置灯泡体的潜水贯流泵装置,该泵装置最高效率达 78.86%,此时流量为 314.86 L/s,扬程为 3.594 m,叶片安放角为 +2°。在叶片安放角 -4°时,原型泵的飞逸转速达 295.19 r/min,该飞逸转速是原型泵额定转速的 1.75 倍。

b. 不同流量工况时,潜水贯流泵装置的进水流道流线平顺,未出现不良流态;小流量工况时导叶体出口区出现了局部旋涡,高效工况和大流量

工况导叶体内部流态良好,导叶体出口面的偏流角平均值均小于 1.5°。

c. 随流量的增大,灯泡体和直管式出水水道的水力损失占比呈先增大后减小的趋势,水力损失占比最大达 9.1%,进水流道的水力损失占比比较小,灯泡体和直管式出水水道是影响此类泵装置水力效率的主要因素。

参考文献:

- [1] JIN YAN, HE XIAOKE, ZHANG YE, et al. Numerical and experimental investigation of external characteristics and pressure fluctuation of a submersible tubular pumping system [J]. Process, 2019, 7(12): 949.
- [2] YANG FAN, LI ZHONGBIN, HU WENZHU, et al. Analysis of flow loss characteristics of slanted axial-flow pump device based on entropy production theory [J]. Royal society open science, 2022, 9(1): 211208.
- [3] 中华人民共和国水利部. 水泵模型及装置模型验收试验规程: SL140-2006 [S]. 北京: 电子工业出版社, 2006.
- [4] 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.
- [5] 杨帆. 低扬程泵装置内流特性及水力稳定性 [M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2020.
- [6] 夏臣智, 成立, 蒋红樱, 等. 潜水贯流泵装置过流部件水力性能分析与优化 [J]. 农业工程学报, 2018, 34(7): 45-51, 301.
- [7] 孙丹丹, 陈世杰, 王斌, 等. 睢宁县凌城泵站轴流泵装置模型试验 [J]. 中国农村水利水电, 2018(2): 126-130.

Research on Vibration Characteristics of Shafting System of Hydroelectric Generating Set Under Different Load Conditions

ZOU Jia-jie¹, ZHOU Da-qing¹, GUO Jun-xun², DONG Wen-chang¹, WANG Yin-song¹, YOU Jun-song²
(1. College of Energy and Electrical Engineering, Hohai University, Nanjing 211100, China;

2. College of Water Conservancy and Hydropower Engineering, Hohai University, Nanjing 210024, China)

Abstract: The flow channel model and the shafting model of the turbine unit were established, and the fluid-solid coupling method was used to analyze the dynamic characteristics of the shafting system vibration of turbine unit induced by hydraulic factors under the steady-state conditions with different loads. The measured data were compared to verify the feasibility of the method. And then the correlation mechanism between the vibration characteristics and the internal flow characteristics under typical steady-state conditions was studied. The results show that the vibration characteristics of the guide bearing obtained by this method are basically consistent with the experimental values, and the trend of vibration changes with the change of load is consistent. Due to the positional relationship, the vibration characteristics of the water guide bearing and the upper guide bearing have a certain amplitude difference. The horizontal vibration amplitude of the unit is the largest due to the obvious vortex belt in the draft tube when running at 75% load condition. The research results can provide a scientific reference for the stable operation of hydropower turbine units under different loads.

Key words: hydropower unit; vibration characteristics; guide bearing ; fluid solid coupling

(上接第 22 页)

Sensitivity Analysis of Influencing Factors of Flow Characteristics on Asphalt Slope

WANG Xiao¹, QIU Zi-ping², LI Qi-rong³, HUA Kai-cheng³, CHEN Hui⁴

(1. Research Institute of Highway Ministry of Transport, Beijing 100088, China; 2. College of Civil Engineering, Guangdong Communication Polytechnic, Guangzhou 510800, China; 3. Guangdong Huiqing Expressway Co., Ltd., Guangzhou 510900, China; 4. State Key Laboratory of Simulation and Regulation of Water Cycle in River Basin, China Institute of Water Resources and Hydropower Research, Beijing 100038, China)

Abstract: In order to illustrate the influence mechanism of flow distribution on slope of urban asphalt road, two-dimensional shallow water equations were applied to simulate runoff characteristics on asphalt slope. Comprehensive sensitivity analysis was performed on multiple factors (cross slope, longitudinal slope, slope width, slope length, rainfall intensity and roughness coefficient) which caused different degrees of ponding on asphalt slope. The maximum flow depth was taken as the sensitivity analysis index. Both range and variance analysis were performed, through which the sensitivity ranking of the influencing factors were obtained and the significance level can be clarified as well. The results show that under overflow drainage condition, cross slope, pavement width and rainfall intensity have significant effects on flow depth; Slope length has no significant effect on flow depth. Flow depth is negatively correlated with cross slope, and positively correlated with rainfall intensity, pavement width and slope length, and negatively correlated first and then positively correlated with the roughness coefficient. The research results can provide reference for engineering practice.

Key words: asphalt slope; hydrodynamics; sensitivity analysis; slope width; cross slope; rainfall intensity

(上接第 206 页)

Performance Test and Flow Field Analysis of Submersible Tubular Pump Device in Yangzhou Sluice Pump Station

DING Ping^{1,2}, LIU Jin-sheng², GE Heng-jun³, LV Yu-ting¹, YANG Fan¹

(1. College of Hydraulic Science and Engineering, Yangzhou University, Yangzhou 225009, China; 2. Water Conservancy Project Construction Center of Yangzhou City, Yangzhou 225000, China; 3. Yangzhou Survey Design Research Institute Co., Ltd., Yangzhou 225007, China)

Abstract: In order to clarify the hydraulic performance of the submersible tubular pump device in Yangzhou Gate Pumping Station, the internal flow and hydraulic performance of the submersible tubular pump device were analyzed by numerical simulation combined with physical model test. The influence of the front and rear bulbs body on the energy performance of the pump device was compared and analyzed through the comprehensive characteristic index C. P. I, and the scheme of the submersible tubular pump device with the rear bulb body was optimized. The maximum efficiency of the submersible tubular pump device with the rear bulb body is 78.86 %, the flow rate is 314.86 L/s, the lift is 3.594 m, and the blade placement angle is +2°. When the blade angle is -4°, the runway speed of the prototype pump device is 295.19 r/min, which is 1.75 times the rated speed of the prototype pump device. The streamline of straight pipe inlet is smooth under each flow rate conditions, the local area of guide vane appears backflow and the spiral flow inside straight outlet conduit is obvious under small flow rate conditions. With the increase of flow rate, the proportion of hydraulic loss of bulb body and outlet conduit decreases firstly and then increases, and the proportion of hydraulic loss of bulb body and outlet conduit in the whole flow conduits of pump device is the largest. The research results can provide reference for pumping station engineering.

Key words: submersible tubular pump; pump device; hydraulic performance; flow field; model test