

可调导叶对双向潜水贯流泵 装置性能影响的试验分析

刘金生¹, 丁 平^{1,2}, 杨 澎¹, 吕玉婷², 杨 帆^{2*}

(1. 扬州市水利工程建设中心, 江苏 扬州 225000; 2. 扬州大学水利科学与工程学院, 江苏 扬州 225009)

摘要:为确保扬州闸泵站双向潜水贯流泵装置水力性能的优越性,采用物理模型试验方法测试了配有双可调导叶的双向潜水贯流泵装置的能量性能、空化性能和飞逸特性,并对比分析灯泡体位置对双向贯流泵装置水力性能的影响。结果表明:在排涝工况时泵装置采用后置灯泡体(HZ),引水工况为前置灯泡体(QZ)的技术方案。叶片安放角 -2° 时,扩散可调导叶的调节角 20° 下HZ泵装置效率为66.2%,流量为267.03 L/s;直可调导叶的调节角 12° 下QZ泵装置效率为64.1%,流量为250.46 L/s。在排涝工况最高扬程3.81 m时,叶轮的必需汽蚀余量为6.9 m;在引水工况最高扬程1.2 m时,叶轮的必需汽蚀余量为5.8 m。在校核电机和水泵强度时建议采用2.5倍额定转速,确保电机和水泵能在排涝工况381.42 r/min时运转2 min以上。

关键词:扬州闸泵站;潜水贯流泵装置;可调导叶;模型试验

中图分类号:TV698

文献标识码:A

文章编号:1007-7839(2023)01-0013-0005

Experimental analysis of the influence of adjustable guide vane on the performance of bidirectional submersible tubular pump device

LIU Jinsheng¹, DING Ping^{1,2}, YANG Peng¹, LYU Yuting², YANG Fan^{2*}

(1. Water Conservancy Project Construction Center of Yangzhou City, Yangzhou 225000, China;

2. College of Hydraulic Science and Engineering, Yangzhou University, Yangzhou 225009, China)

Abstract: In order to ensure the superiority of the hydraulic performance of the bidirectional submersible tubular pump device in Yangzhou Sluice Pumping Station, the physical model test method was used to test the energy performance, cavitation performance and runaway characteristics of the bidirectional submersible tubular pump device with double adjustable guide vanes, and the influence of the position of the bulb body on the hydraulic performance of the bidirectional tubular pump device was compared and analyzed. The results show that : in the drainage conditions, the pump device adopts rear bulb (HZ), and the water diversion condition is front bulb (QZ). When the blade angle is -2° , the efficiency of the HZ pump device is 66.2 % and the flow rate is 267.03 L/s when the adjustment angle of the diffusion adjustable guide vane is 20° . The efficiency of QZ pump is 64.1 % and the flow rate is 250.46 L/s when the straight adjusting guide vane adjustable angle is 12° . When the maximum head of drainage is 3.81 m, the necessary cavitation margin of impeller is 6.9 m. When the maximum head of water diversion

收稿日期: 2022-09-15

基金项目: 国家自然科学基金项目(51609210,51779214);江苏省高校自然科学研究重大项目(20KJA570001);江苏省水利科技项目(2022074)

作者简介: 刘金生(1970—),高级工程师,主要从事泵站管理与科研工作。E-mail: 1978767372@qq.com

通信作者: 杨帆(1985—),教授,硕士生导师,主要从事泵站工程的教学与科研。E-mail: fanyang@yzu.edu.cn

is 1.2 m, the necessary cavitation margin of the impeller is 5.8 m. When checking the strength of the motor and pump, it is recommended to use 2.5 times the rated speed to ensure that the motor and pump can operate for more than 2 minutes at 381.42 r/min under drainage conditions.

Key words: Yangzhou Sluice Pumping Station; submersible tubular pump device; adjustable guide vane; model test

双向潜水贯流泵装置具有效率高、水泵机组结构简单、布置紧凑及安装维修方便等优点,被广泛应用于具有双向抽水功能需求的城市泵站工程中。导叶体是双向贯流泵装置中用以回收叶轮出口水流环量、提高泵装置水力效率的主要过流结构。针对潜水泵装置水力效率提高的问题,国内外学者已开展了大量的研究工作并取得了不少的研究成果。研究主要集中于潜水泵装置的结构及流道几何尺寸的比选及数值优化^[1-4]、叶轮和导叶体几何参数的优化^[5-7]等方面,研究方法主要采用数值模拟和物理模型试验。采用可调导叶提高泵及泵装置水力效率的研究工作较少,但也有学者取得了一些研究成果^[8-13],如:钱忠东等^[8-9]采用物理模型试验和数值模拟方法分析了不同导叶安放角对轴流泵运行工况调节的影响规律,调节导叶安放角能够提高动能回收的比例,从而提高轴流泵的扬程和效率。杨帆等^[11]采用数值模拟技术分析了不同安放角的可调进口导叶对轴流泵水力性能的影响规律,获得了进口可调导叶对轴流泵水力性能调节的综合特性曲线。Kim Youn Sung等^[12]采用数值模拟方法定性定量分析了进口导叶片的安放角对潜水轴流泵内流场及水力性能参数的影响。在分析总结已有文献研究成果的基础上,本文基于扬州闸泵站双向潜水贯流泵装置的结构特点,提出了采用双侧可调导叶的技术方案,采用物理模型试验方法探析双可调导叶对双向潜水贯流泵装置水力性能的影响规律,旨在为扬州闸泵站双向潜水贯流泵装置的高效安全稳定运行提供技术支撑。

1 工程概况及设计参数

扬州闸泵站承担扬州市城区涝水及周边区域汇水排放、有效控制古运河水位、提高城市防洪能力,并保证古运河和仪扬河干流生态基流的任务。该泵站安装有2台2400GZBWBS型双向潜水贯流泵装置机组,原型水泵叶轮直径2 400 mm,配套电机为YQGN990-10-1000/400(抽排/抽引)kW/10kV带行星齿轮双速潜水干式电机,抽排转速158 r/min,抽引转速127 r/min。双向潜水贯流泵装置单线图

如图1所示。引水设计净扬程0.65 m,引水最高净扬程0.80 m,引水平均净扬程0.33 m,排涝设计净扬程2.44 m,排涝最高净扬程3.41 m,排涝平均净扬程1.35 m,拦污栅及进出口门槽损失按0.4 m设计,排涝设计流量为16.57 m³/s,引水设计流量为15.17 m³/s。

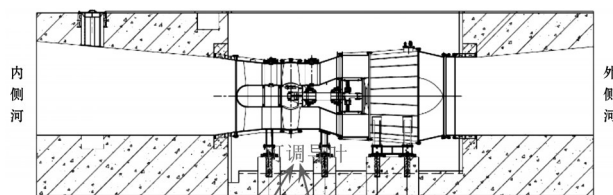


图1 双向潜水贯流泵装置单线图

双向潜水贯流泵装置的进出水侧流道长度均为 $5.104D$,流道的进口高度均为 $1.72D$ 、宽度为 $2.21D$,灯泡体段长 $1.888D$,灯泡体支撑件为5片,支撑件长度 $0.449D$,其中 D 为叶轮的名义直径。叶轮两侧均采用了可调节导叶体,叶轮的两侧分别为常规导叶体和扩散导叶体,扩散导叶体的单边扩散角为 13° ,扩散导叶体与灯泡体相连,根据文献[11]中的研究成果,采用对称平板翼型的直可调导叶片,旋转调节机构位于翼型的几何形心。双向泵叶轮采用扬州大学江苏省水利动力工程重点实验室研发的SZM35,叶轮的叶片数为4,可调导叶体的叶片数均为5。根据水泵相似律换算,引水设计扬程时泵装置设计流量为237.03 L/s,排涝设计扬程时泵装置设计流量为258.91 L/s。

2 泵装置模型试验

2.1 泵装置物理模型及试验内容

双向潜水贯流泵装置的模型泵叶轮名义直径为300 mm,导叶体和叶轮的定位表面的轴向跳动为0.10 mm,轮毂的外表面的径向跳动为0.08 mm,叶顶间隙控制在0.15 mm以内,双向潜水贯流泵装置的物理模型如图2所示。依据 nD 值相等原则(n 为叶轮的转速),双向潜水贯流泵装置引水工况时模型泵叶轮转速为1 016 r/min,排涝工况时模型泵叶轮转速为1 264 r/min。开展了灯泡体前后置对双向潜水贯流泵装置能量性能的影响分析、不同可调导

叶的调节角对泵装置能量性能的影响分析以及在固定可调导叶的调节角下不同叶片安放角时泵装置的空化性能和飞逸特性试验。

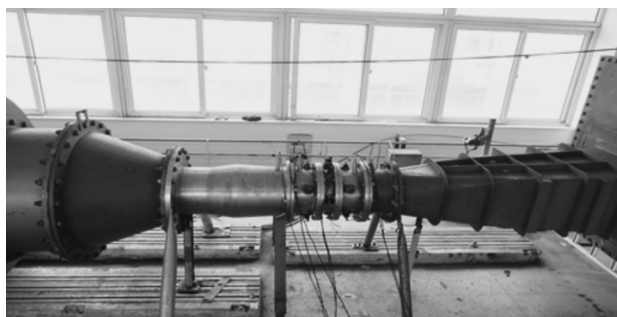
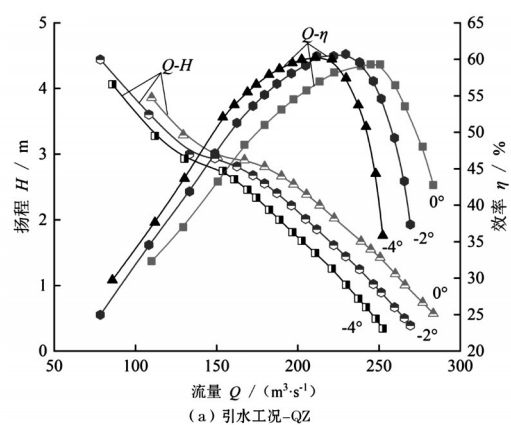


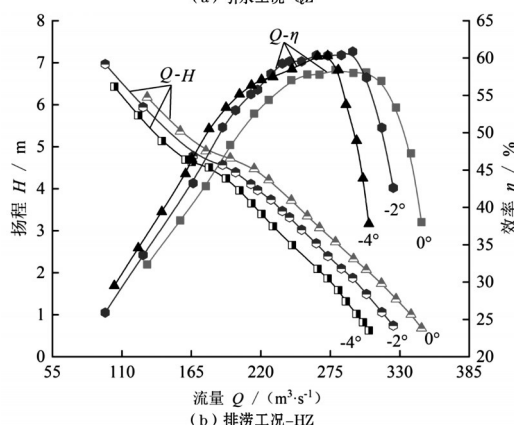
图2 双向潜水贯流泵装置的物理模型

2.2 双向潜水贯流泵装置的能量性能

定义灯泡体位于外河侧时,引水工况时泵装置的灯泡体前置,排涝工况时泵装置的灯泡体后置;灯泡体位于内河侧时,引水工况时泵装置的灯泡体后置,排涝工况时泵装置的灯泡体前置。为便于说明,定义QZ为灯泡体前置,HZ为灯泡体后置,泵装置能量性能试验参照文献[14]的规定要求,灯泡体位于外河侧时潜水贯流泵装置的能量性能曲线如图3所示,灯泡体位于内河侧时潜水贯流泵装置的能量性能曲线如图4所示。在灯泡体位于外河侧、叶片安放角 0° 且可调导叶片调节角 0° 条件下,引水设计扬程时泵装置的流量为 264.37 L/s ,效率为 54.34% ;排涝设计扬程时泵装置的流量为 275.4 L/s ,效率为 58.26% 。在灯泡体位于外河侧、叶片安放角 -2° 条件且可调导叶片调节角 0° 下,引水设计扬程时泵装置的流量为 245.13 L/s ,效率为 57.23% ;排涝设计扬程时泵装置的流量为 257.36 L/s ,效率为 60.02% 。在灯泡体位于内河侧、叶片安放角 0° 且可调导叶片调节角 0° 条件下,引水设计扬程时泵装置的流量为 257.16 L/s ,效率为 56.25% ;排涝设计扬程时泵装置的流量为 289.63 L/s ,效率为 59.29% 。在灯泡体位于内河侧、叶片安放角 -2° 且可调导叶片调节角 0° 条件下,引水设计扬程时泵装置的流量为 247.27 L/s ,效率为 59.12% ;排涝设计扬程时泵装置的流量为 265.19 L/s ,效率为 60.03% 。无论灯泡体在外河侧还是内河侧,在叶片安放角 -2° 和 0° 时双向潜水贯流泵装置的流量均满足引水设计工况和排涝设计工况的流量要求,叶片安放角 -2° 时泵装置效率高于叶片安放角 0° 泵装置效率,但效率均低于扬州闸泵站双向潜水贯流泵装置的设计效率要求,建议叶片安放角选择在 -2° ,排涝工况采用灯泡体后置方

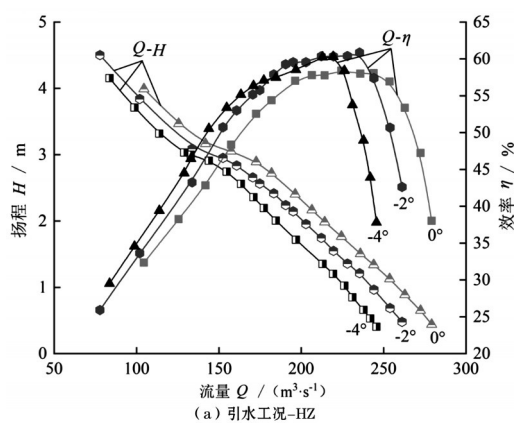


(a) 引水工况-QZ

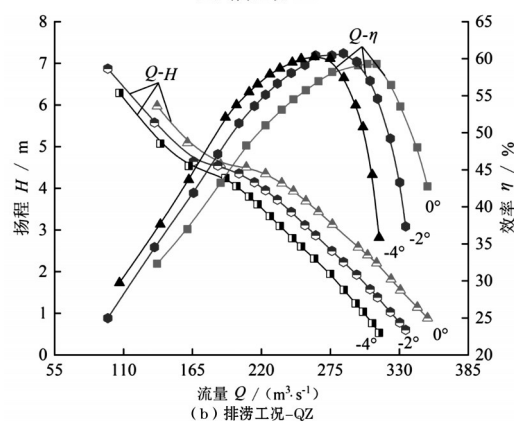


(b) 排涝工况-HZ

图3 双向潜水贯流泵装置的能量性能曲线
(灯泡体位于外河侧)



(a) 引水工况-HZ



(b) 排涝工况-QZ

图4 双向潜水贯流泵装置的能量性能曲线
(灯泡体位于内河侧)

案、调节可调扩散导叶的导叶片角度,引水工况采用灯泡体前置方案、调节可调直导叶的导叶片角度。

针对引水设计扬程 1.05 m 和排涝设计扬程 2.84 m,在叶片安放角 -2° 时开展了可调导叶片不同调节角时泵装置的能量性能试验,试验结果如图 5 所示。在引水工况设计扬程 1.05 m 时,在直可调导叶的调节角 12° 时灯泡体前置的泵装置效率为 64.1%,流量为 250.46 L/s,为设计引水流量的 1.056 倍;在直可调导叶的调节角 16° 和 20° 时灯泡体前置的泵装置效率分别为 62.86%、62.01%,流量分别为 250.02 L/s、249.86 L/s,均约是设计引水流量的 1.054 倍。依据相同扬程时流量大效率高的原则,引水设计扬程工况时选择灯泡体前置、直可调导叶的叶片安放角 12° 方案,相比直可调导叶 0° 时泵装置效率提高了 6.87%,原型泵装置机组流量为 16.02 m^3/s 。在排涝工况设计扬程 2.84 m 时,在扩散可调导叶的调节角 20° 时灯泡体后置的泵装置效率为 66.2%,流量为 267.03 L/s,是排涝设计流量的 1.031 倍;在扩散

可调导叶的调节角 16° 时灯泡体后置的泵装置效率为 66.01%,流量为 265.93 L/s,是排涝设计流量的 1.027 倍。依据相同扬程时,流量大效率高的原则,排涝设计扬程工况时选择灯泡体后置、扩散可调导叶的叶片调节角 20° 方案,相比扩散可调导叶 0° 时泵装置效率提高了 6.18%,原型泵装置机组流量为 17.08 m^3/s ,满足泵装置排涝设计流量要求。相比可调导叶的调节角 0° 时,可调导叶的调节角分别为 12° 和 20° 时泵装置效率平均提高了约 6.23%。

2.3 双向潜水泵装置的空化性能

双向潜流泵装置的空化性能试验采用定流量的能量法^[14],取泵装置模型效率较其能量性能点下降 1%的有效空化余量作为必需汽蚀余量(以叶轮中心为基准)。可调导叶的叶片调节角 12° 时 QZ 潜流泵装置空化曲线如图 6(a)所示,相同叶片安放角时,随着流量的增大叶轮的必需汽蚀余

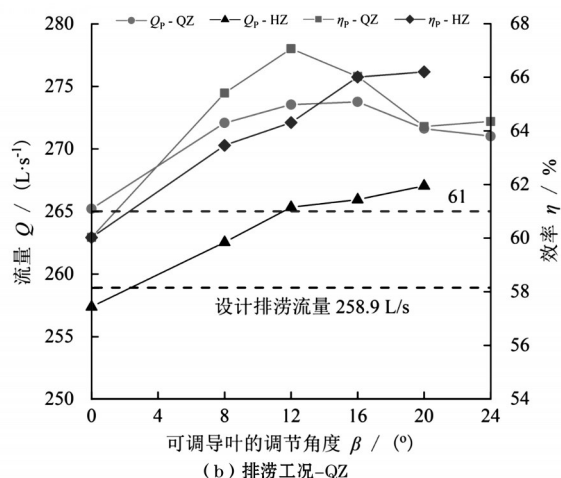
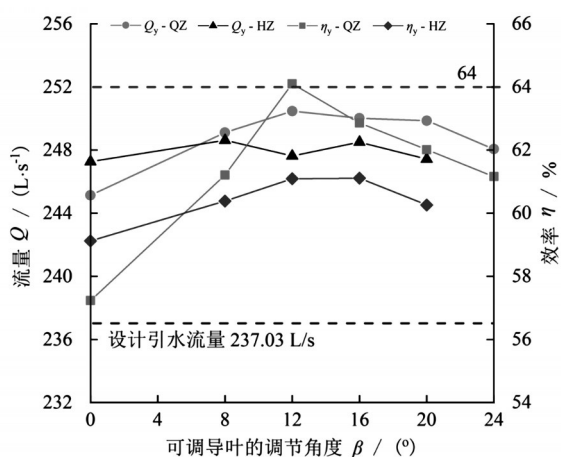


图5 设计扬程工况时泵装置的性能曲线
(叶片安放角 -2°)

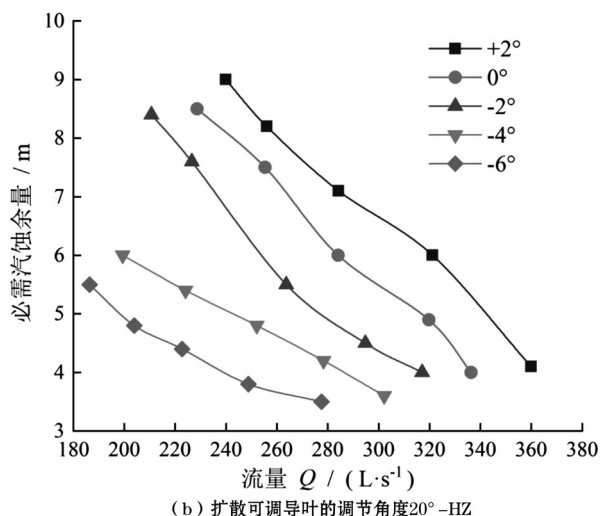
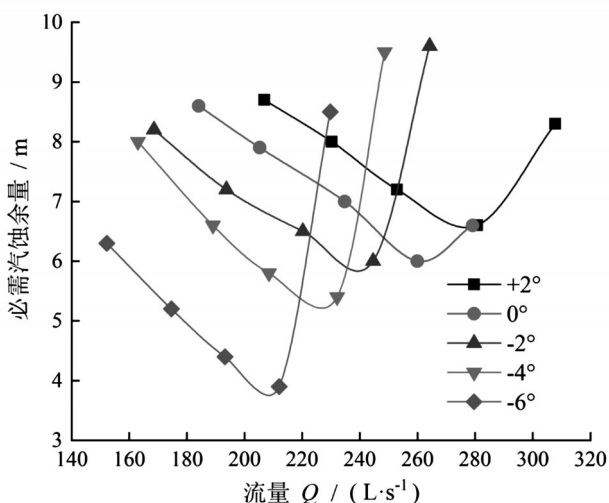


图6 不同叶片安放角时泵装置的空化性能曲线

量呈先减小后增大的变化趋势,在排涝工况最高扬程 3.81 m、叶片安放角 -2° 时,叶轮的必需汽蚀余量为 6.9 m;排涝工况设计扬程 2.84 m 时,叶轮的必需汽蚀余量为 5.13 m。可调导叶的叶片调节角 20° 时 HZ 潜水贯流泵装置的泵装置空化曲线如图 6(b) 所示,在相同叶片安放角时,随流量的增大,叶轮的必需汽蚀余量呈逐渐减小的趋势,在叶片安放角 -2° 、引水工况最高扬程 1.2 m 时,叶轮的必需汽蚀余量为 5.8 m;引水工况设计扬程 1.05 m 时,叶轮的必需汽蚀余量为 5.91 m。潜水贯流泵装置的叶轮安装高程均满足要求。

2.4 双向潜水泵装置的飞逸特性

泵装置的飞逸特性试验通过对试验台流动系统的管路切换,调节辅助泵使泵装置反向运行,扭矩仪不受力,测试不同反向水头时泵装置模型的叶轮转速。直可调导叶的叶片调节角 12° 时 QZ 潜水贯流泵装置的飞逸特性曲线如图 7(a) 所示,扩散可调导叶的叶片调节角 20° 时 HZ 潜水贯流泵装置的飞逸特性曲线如图 7(b) 所示。不同叶片安放角时随着反向水头的增大,叶轮的飞逸转速逐渐增大;相同反向水头时,随着叶片安放角的减小,叶轮的飞逸转速逐渐增大。在叶片安放角 -2° 时,排涝工况最大净扬程 3.41 m 时,原型泵最大飞逸转速为 381.42 r/min,是电机额定转速的 2.41 倍。引水工况最大净扬程 0.8 m 时,原型泵最大飞逸转速为 181.05 r/min,是电机额定转速的 1.43 倍。在校核电机和水泵强度时建议采用 2.5 倍额定转速,确保电机和水泵能在排涝工况 381.42 r/min 时运转 2 min 以上。

3 结 论

(1) 通过物理模型试验对比分析了灯泡体位置对双向运行时潜水贯流泵装置能量性能的影响,扬州闸泵站双向潜水贯流泵装置优选了排涝工况灯泡体后置的技术方案,叶片安放角建议选择在 -2° 。

(2) 在叶片安放角 -2° 时,直可调导叶的调节角 12° 下灯泡体前置的泵装置效率为 64.1%,流量为 250.46 L/s,为设计引水流量的 1.056 倍;在排涝工况设计扬程 2.84 m 时,扩散可调导叶的调节角 20° 下灯泡体后置的泵装置效率为 66.2%,流量为 267.03 L/s,是排涝设计流量的 1.031 倍。可调导叶的调节角 12° 和 20° 时泵装置效率相比可调导叶的调节角 0° 时泵装置效率平均提高了约 6.23%。

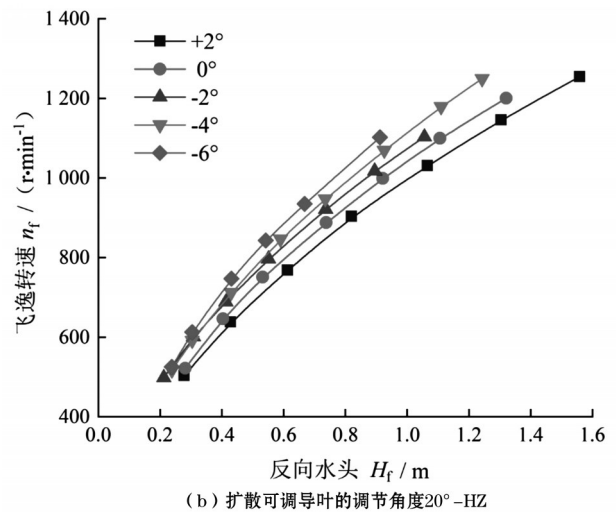
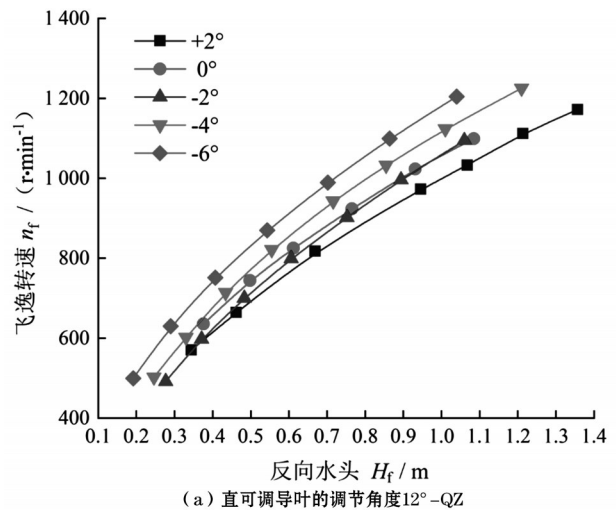


图7 不同叶片安放角时泵装置的飞逸特性曲线

(3) 在叶片安放角 -2° 时,排涝工况最高扬程 3.81 m 下叶轮的必需汽蚀余量为 6.9 m,引水工况最高扬程 1.2 m 下叶轮的必需汽蚀余量为 5.8 m。在叶片安放角 -2° 时,排涝工况最大净扬程 3.41 m 下原型泵最大飞逸转速为 381.42 r/min,是电机额定转速的 2.41 倍,引水工况最大净扬程 0.8 m 下原型泵最大飞逸转速为 181.05 r/min,是电机额定转速的 1.43 倍。

参考文献:

- [1] 陆伟刚,王东伟,施伟,等. 电动机前置和电动机后置潜水贯流泵装置水力性能比较[J]. 排灌机械工程学报, 2020,38(4):325-331.
- [2] 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.
- [3] YANG F, CHANG P C, LI C, et al. Numerical analysis of pressure pulsation in vertical submersible axial flow pump

(下转第 27 页)

件等,拆分设计时必须考虑这类材料的合理安装。

(5)连接和安装施工的要求。连接和安装施工是实现预制构件组装成结构整体并协同工作的必要环节,合理的拆分方案,应在能满足结构功能的同时,也能方便施工,简化现场的施工难度是提高结构安全可靠性的重要举措。此外,与地上构筑物不同,小型水工建筑物除了满足一般结构受力需求之外,对防渗止水有更高的要求,拆分设计应能有效处理构件与构件之间的防渗。

(6)具有分类化和典型化。小型水工建筑物的拆分不能脱离当地的地形条件和生产需求,比如丘陵、平原、圩洼等不同地形的拆分重点有所差异,应分门别类并做好典型化设计。

(7)预制构件标准化设计的要求。预制构件的标准化设计应通过多方面的考虑,最终达到“少规格、多组合”^[4]的目的。“少规格”指的是,减少预制构件的模具种类,降低模具成本也就是降低工程项目的成本,减小或降低预制构件的尺寸及规格,同时能简化现场安装的复杂程度,加快安装施工进度。“多组合”指的是,根据项目、结构、安装运输等方面的综合考虑,化整为零,以多个标准化构件,通过不同组合形式达到预制构件拼装成整体结构的目的。

拆分工作主要包括:①确定现浇与预制的范

围、边界;②确定结构构件在哪个部位拆分;③确定后浇区与预制构件之间的关系,包括相关预制构件的关系;④确定构件之间的拆分位置,尤其是分缝部位。

3 结 论

本文针对小型水工建筑物的结构及功能特点,提出了适用于不同类型水工构件的模数建议方案,并从结构功能、受力、生产、运输、施工、连接处理和地形特点等方面,分析了此类预制构件实现标准化设计而必须考虑的要素,指出“少规格、多组合”是拆分设计的最终目的,对国内小型水工建筑物的装配化生产具有一定的借鉴和指导意义。

参考文献:

- [1] 李唐友. 小型水工建筑设计问题探究[J]. 中国水运, 2014, 14(3): 240-241.
- [2] 洪晓林, 武世翔, 刘复新. 农田水利装配式建筑物技术研究与推广[J]. 水利水电工程学报, 2001, 1(3): 62-67.
- [3] 郭学明. 装配式混凝土结构建筑的设计、制作与施工[M]. 北京: 机械工业出版社, 2017.
- [4] GB/T 51231 装配式混凝土建筑技术标准[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2017.
- [5] 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.
- [6] 肖宇, 叶晓琰, 周岭, 等. 基于叶轮子午面田口试验的潜水泵水力优化设计[J]. 水电能源科学, 2020, 38(11): 164-168.
- [7] 程效锐, 张雪莲. 基于正交设计法的潜水泵空间导叶水力优化[J]. 兰州理工大学学报, 2020, 46(5): 61-67.
- [8] 陈斌, 李贞彬, 张华, 等. 基于轮毂比的潜水轴流泵优化设计研究[J]. 中国给水排水, 2019, 35(23): 91-95.
- [9] 钱忠东, 王凡, 王志远, 等. 可调导叶式轴流泵马鞍区水力特性试验研究[J]. 排灌机械工程学报, 2013, 31(6): 461-465.
- [10] QIAN Z D, WANG Y, HUAI W X, et al. Numerical simulation of water flow in an axial flow pump with adjustable guide vanes[J]. Journal of Mechanical Sciences and Technology, 2010, 24(4): 971-976.
- [11] 王凡, 钱忠东, 郭志伟, 等. 可调导叶式轴流泵压力脉动数值分析[J]. 农业机械学报, 2017, 48(3): 119-123.
- [12] 杨帆, 刘超, 汤方平, 等. 带可调进口导叶轴流泵装置水力性能数值分析[J]. 农业机械学报, 2014, 45(5): 51-58.
- [13] Kim Youn Sung, Shim Hyeon Seok, Kim Kwang Yong. Effect of inlet guide vane and blade pitch angles on the performance of a submersible axial-flow pump [J]. Proceedings of the institution of Mechanical Engineers, Part A: Journal of Power and Energy, 2021, 235(4): 718-732.
- [14] 周强, 李宏坤, 仲作文, 等. 离心泵导叶流道进口处压力脉动研究[J]. 工程热物理学报, 2020, 41(7): 1679-1684.
- [15] 水泵模型及装置模型验收试验规程 SL140—2006[S].

(上接第17页)

device under bidirectional operation [J]. AIP Advances, 2022, 12(2): 1-15.