

双向竖井贯流泵装置优化设计与试验

石丽建¹ 刘新泉² 汤方平¹ 姚悦铃³ 谢荣盛¹ 张文鹏¹

(1. 扬州大学水利与能源动力工程学院, 扬州 225100; 2. 江苏省水利勘测设计研究院有限公司, 扬州 225100;
3. 浙江同济科技职业学院信息系, 杭州 311231)

摘要: 为探求双向竖井流道水力设计方法和完善双向竖井流道优化型式,对双向竖井流道进行内外型线及分叉段型式进行优化设计。基于标准 $k-\varepsilon$ 紊流模型和雷诺时均的 $N-S$ 方程,结合龙山水力枢纽工程运用 CFD 软件对双向竖井贯流泵装置进行优化设计。计算并比较了不同竖井出水流道方案的水力损失,揭示了不同方案竖井流道内部各段水力损失分布规律,比较分析了不同方案竖井出水流道内部流场及速度分布规律,最后结合模型试验结果,证实了双向竖井流道优化设计的可靠性。优化结果表明:竖井分叉段设计好坏直接决定竖井后半段水力损失,通过调整竖井内外轮廓线可以有效减小竖井出水流道的水力损失,提升贯流泵装置外特性。优化后竖井贯流泵装置反向运行最高效率达 60.5%,较优化前提高 3.8 个百分点;正向效率达到 72.18%,较优化前提高 1.67 个百分点。模型试验反向运行最高效率 57.56%,正向运行最高效率 72.67%。

关键词: 双向泵; 竖井流道; 优化设计; 数值计算

中图分类号: TV131 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1298(2016)12-0085-07

Design Optimization and Experimental Analysis of Bidirectional Shaft Tubular Pump Device

Shi Lijian¹ Liu Xinquan² Tang Fangping¹ Yao Yueling³ Xie Rongsheng¹ Zhang Wenpeng¹

(1. School of Hydraulic Energy and Power Engineering, Yangzhou University, Yangzhou 225100, China
2. Jiangsu Surveying and Design Institute of Water Resources Co., Ltd., Yangzhou 225100, China
3. Department of Engineering and Economic Management, Zhejiang Tongji Vocational College of Science and Technology, Hangzhou 311231, China)

Abstract: To explore hydraulic design method and improve optimization type of the bidirectional shaft passage, the design optimization research of inside and outside line and bifurcation segment type of the bidirectional shaft passage was done. Based on the standard $k-\varepsilon$ turbulence model and the Reynolds averaged $N-S$ equation, and combined Longshan hydraulic project, the bidirectional shaft tubular pump device was optimized and designed by using CFD software. The hydraulic loss and velocity distribution in different shaft outlet conduit schemes were calculated and compared, and the different segments hydraulic loss distribution of different shaft outlet conduit schemes was revealed. Finally, combined with the model test results, the reliability of the optimization design of bidirectional shaft flow passage was confirmed. Optimization results showed that the shaft bifurcated segment design directly determined the hydraulic loss of the latter part shaft passage. Through adjusting the shaft inner and outer contour lines, the hydraulic loss of the shaft outlet conduit can be effectively reduced, and the tubular pump device hydraulic characteristics were enhanced. The efficiency curve of the optimized scheme was high, the range of the high efficiency area was wider than that of the initial scheme, and the lift curve was also slightly higher

收稿日期: 2016-04-07 修回日期: 2016-04-30
基金项目: 国家自然科学基金项目(51376155、51609210)、江苏省自然科学基金项目(BK20150457)、“十二五”农村领域科技计划项目(2012BAD08B03-2)、江苏高校优势学科建设工程项目(PAPD)和江苏省科研创新计划项目(KYLX15_1365)
作者简介: 石丽建(1989—),男,博士生,主要从事流体功能曲面多学科优化设计研究,E-mail: yzdxslj@126.com
通信作者: 汤方平(1964—),男,教授,博士生导师,主要从事流体机械设计和泵站自动化研究,E-mail: tangfp@yzu.edu.cn

than that of the initial scheme. After optimization, the maximum reverse operation efficiency of the shaft tubular pump system was up to 60.5%, which was increased by 3.8 percentage points compared with the prior optimization, and the forward operation efficiency was 72.18%, which was improved by 1.67 percentage points. The highest efficiency of reverse operation and forward operation model test was 57.56% and 72.67%, respectively. The research would provide guidance for design optimization of low head bidirectional tubular pump device.

Key words: bidirectional pump; shaft passage; design optimization; numerical calculation

引言

随着南水北调东线工程的兴建,以及对我国农业排涝、城市防洪的重视,近几年来在沿河、沿江等地区已兴建了一批扬程在 0~2 m 的大型泵站,这种超低扬程泵站大多采用的是竖井贯流泵装置^[1-4]。竖井贯流泵装置电机安装于竖井内,是介于灯泡贯流泵装置和轴伸贯流泵装置之间的一种新型特低扬程泵站结构型式,其结构简单、进出水流道顺直、装置效率相对较高,且开挖深度小、工程投资少,便于维护管理。

对于竖井贯流泵装置的研究,国内外已有不少报道。谢伟东等^[5]、陈容新等^[6]比较分析了几组泵装置型式,认为低扬程泵站采用竖井贯流泵装置型式具有诸多优点。陆林广等^[7]指出泵装置流道水力损失占比较大,应着重提高流道效率。成立等^[8]对双向竖井贯流泵装置进行了三维湍流数值模拟。张仁田^[9]通过对双向泵装置的 CFD 计算,得出进口速度均匀度与装置最优效率点呈正相关。刘军^[10]、刘君等^[11]比较了竖井前置和竖井后置对泵装置水力性能的影响,得出竖井前置优于竖井后置的结论。徐磊等^[12]分析了竖井贯流泵装置内部流态。此外还有一些学者对竖井贯流泵装置进出水流道进行了优化分析^[13-20],认为竖井作为出水流道时流态紊乱,竖井喉部流道水力损失较大,竖井贯流泵装置应尽可能降低竖井流道水力损失,提高装置效率。

扬程低于 2 m 的特低扬程泵站中泵装置的性能很大一部分取决于流道的水力损失。在前人研究的基础上,本文结合龙山水力枢纽双向贯流泵站,采用 CFD 数值模拟手段对竖井出水流道进行优化设计,对竖井喉部形状进行比较分析,以及通过增加后导叶改善出水流态、提高泵站运行稳定性,最后通过物理模型试验对数值模拟结果进行验证。

1 工程概况

龙山水利枢纽工程主要任务是防洪排涝、改善市区的水环境。该工程包括泵站和节制闸,节制闸共 2 孔,单孔净宽 12 m,泵站为双向泵站,正向排

水、反向引水,设计总排水流量 70 m³/s。泵站采用 5 台竖井贯流泵,单机正向排水流量 14 m³/s,反向引水单机流量 12.5 m³/s,节制闸与泵站采用集中紧凑型的“合建”布置方案。泵站采用平直管进出水流道,快速闸门断流,主电机的供电电压为 10 kV,单机功率约 500 kW,转速 118 r/min。龙山水利枢纽工程运行水位及净扬程见表 1。

表 1 泵站运行水位及净扬程
Tab.1 Running level and head of pump station m

运行工况	水位组合		净扬程
	外河侧	内河侧	
排水工况(正向)	设计扬程	5.66	4.70
	最大扬程	6.65	4.70
	最小扬程	0	0
引水工况(反向)	设计扬程	2.89	3.60
	最大扬程	2.70	3.90
	最小扬程	0	0

根据泵站初步设计要求,双向泵流道门槽及拦污栅的水力损失为 0.3 m。考虑流道门槽及拦污栅损失之后,得到竖井贯流泵装置各特征扬程,如表 2 所示。

表 2 泵站运行特征扬程
Tab.2 Special running head of pump station

类别	设计流量/ (m ³ ·s ⁻¹)	设计扬程/ m	最高扬程/ m	最低扬程/ m
双向泵	14.0	1.26(正向)	2.25	0.3
	12.5	1.01(反向)	1.50	0.3

2 泵装置数值模拟

2.1 计算模型及网格划分

竖井贯流泵装置数值模拟计算域包括进水流道、双向泵叶轮、导叶、导水锥和出水流道。本文数值模拟计算以原型泵装置为基础,泵装置总长 32 m。正向运行时竖井为进水流道,导叶为后置导叶;反向运行时竖井为出水流道,导叶为前置导叶。双向泵叶轮直径 *D* 为 2 400 mm,额定转速 *n* 为 118 r/min,轮毂比为 0.4,叶片数为 4,叶顶间隙设置为 1.6 mm,导叶叶片数为 5。叶轮导叶直接采用

Turbo-Grid建模,其余通流部件均采用UG建模,原型泵装置如图1所示。

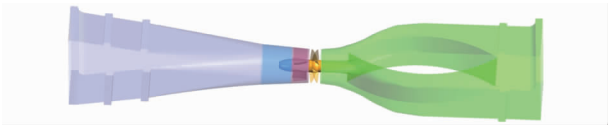


图1 竖井贯流泵装置图

Fig. 1 Compute model of bidirectional shaft tubular pump

双向泵叶轮和导叶在 Turbo-Grid 中进行结构化网格划分,经检验,网格质量较好,同时能够满足正交性要求。进出水流道和导水锥在 ICEM 软件中进行网格划分,网格质量均在 0.4 以上,质量较好,满足计算要求。对泵装置进行网格无关性分析,发现泵装置网格增加至一定数量时,泵装置效率值趋于稳定,不再随着网格数量的增加而增加。在满足网格无关性要求时,取泵装置双向叶轮网格数 48 万左右,导叶网格数 40 万左右,竖井流道网格数为 86.62 万,总网格数 285 万左右。叶轮和导叶网格如图 2 所示。

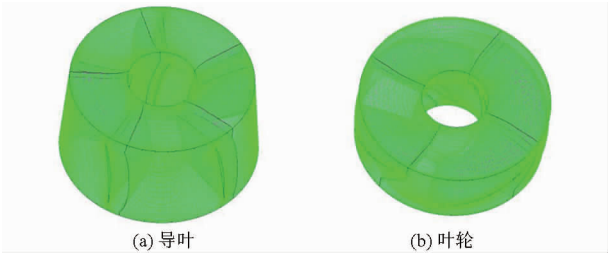


图2 叶轮和导叶网格图

Fig. 2 Impeller and guide vane grid graphs

2.2 边界条件

控制方程采用雷诺时均 N-S 方程,紊流模型采用标准 $k-\epsilon$ 模型,计算采用“stage”交界面模型处理叶轮与进水流道、导叶之间的动静耦合参数传递,静静交界面采用 None 交界面类型。因为以原型装置进行数值计算,考虑进出水流道为混凝土结构,设表面粗糙度为 2.5 mm。计算域进口边界条件设

置为总压条件,总压设置为 1 个标准大气压。计算域出口边界设置为质量流量出口,叶轮设为旋转域,其中叶轮轮缘壁面边界设置为相对于叶轮反向同速旋转,其余计算域均为静止域。

2.3 竖井出水流道优化

竖井流道作为进水流道时,优化进水流道对泵装置性能影响不大,故在竖井流道优化时以反向性能为主。在竖井出水流道优化过程中带泵进行数值计算。

优化目标主要考虑竖井出水流道设计工况点水力损失最小、泵装置效率最高,同时兼顾出水流道流场分布。流道水力损失计算公式为

$$\Delta h = (p_{out} - p_{in}) / (\rho g) \tag{1}$$

式中 Δh ——水力损失

$p_{out}、p_{in}$ ——竖井流道进、出口的总压

ρ ——水的密度

g ——重力加速度

初步设计方案记为方案 1 (FA1),不断改变竖井内外轮廓线以致水力损失最小记为方案 2 (FA2),在方案 2 的基础上改变竖井内侧喉部圆弧过渡记为方案 3 (FA3),在方案 2 的基础上改变竖井内侧喉部为尖头记为方案 4 (FA4),在方案 2 的基础上在竖井出水流道进口加 5 片直导叶记为方案 5 (FA5),各方案竖井流道如图 3 所示。

2.4 数值计算结果

竖井作为出水流道时,由 FA1 至 FA2 改变竖井内外轮廓线,尤其是喉部线型,以流道断面面积逐渐变大、水流速度逐渐减小为原则,通过数值模拟计算出水流道水力损失,当其最小时确定最终的 FA2。各方案设计工况下水力损失计算结果如表 3 所示。为了方便地比较分析竖井出水流道内水力损失分布,将各方案竖井内各段水力损失取出。其中出口为竖井流道的出口,进口为竖井流道的进口,如图 4 所示。

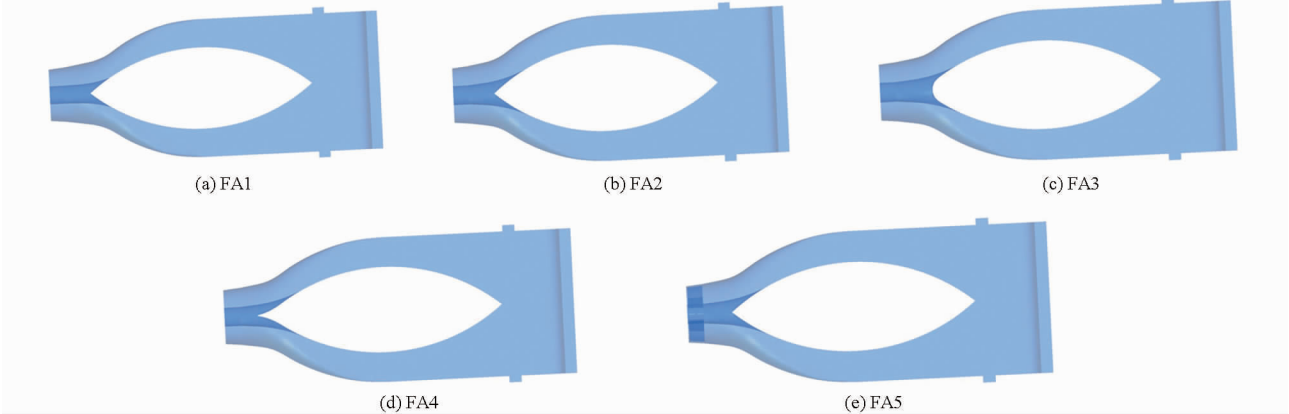


图3 竖井出水流道图

Fig. 3 Shaft outlet passage graphs

表 3 不同设计方案出水流道水力损失
Tab.3 Outlet passage hydraulic loss of different design schemes

设计方案	出口总压/Pa	进口总压/Pa	水力损失/cm
FA1	114 248	120 093	59.64
FA2	115 005	120 113	52.12
FA3	114 683	120 090	55.17
FA4	114 555	120 096	56.54
FA5	113 627	119 813	63.12

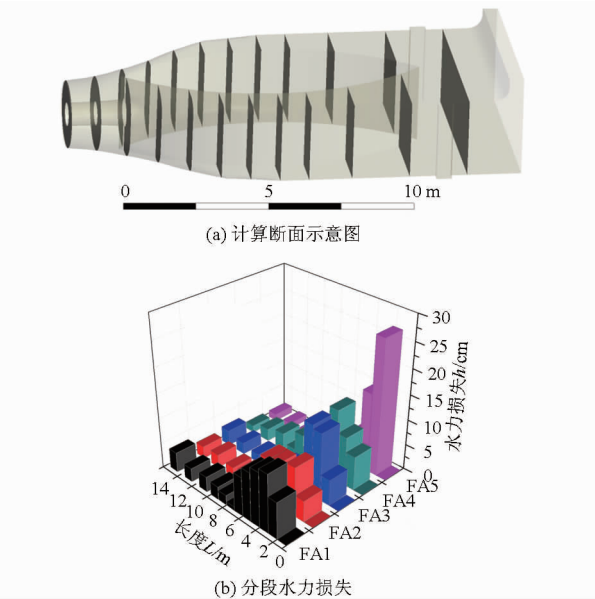


图 4 竖井出水流道分段计算结果
Fig.4 Hydraulic loss of shaft passage at each section

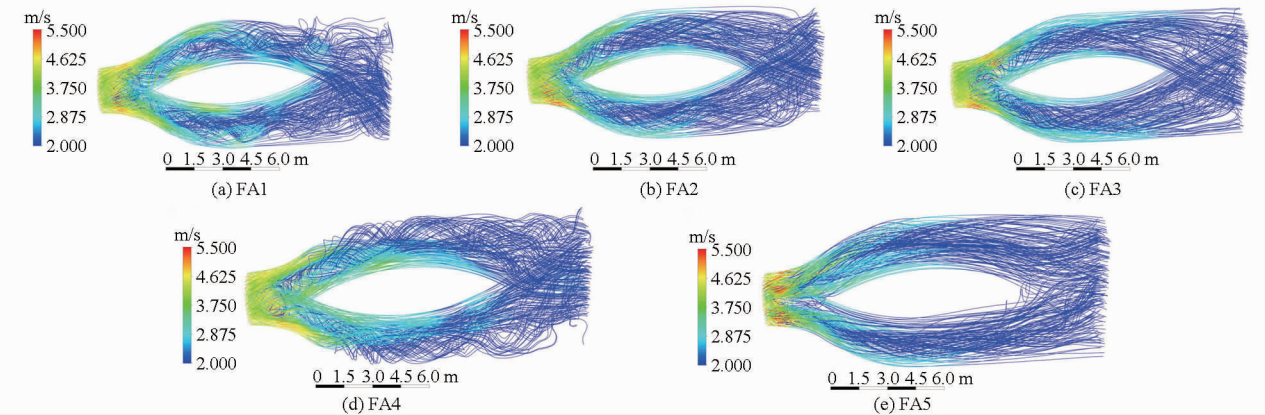


图 5 各工况流线图
Fig.5 Streamline charts of different flow conditions

加,流速撞击区域加大,产生了局部速度较大的区域,并且出现回流,导致该区域水力损失较大。FA4 流场更为紊乱,流线呈螺旋状,说明分叉段改成锥形回收环量能力降低,导致竖井流道水力损失增加。将 FA2 和 FA1 反向设计工况下竖井流道内部流速分布图取出对比分析如图 6 所示。

根据图 6,分析比较初始方案和优化方案竖井出水流道内流速在 3 ~4 m/s 的速度分布云图可知,

根据表 3,由 FA1 到 FA2,通过不断调整竖井流道内外轮廓线,水力损失降幅达到 7.5 cm,优化效果较为明显。FA2 总的水力损失最小,加入直导叶后带来很大的流道损失。改变竖井流道内侧分叉口形状效果并不理想。根据图 4 可知,从 FA1 至 FA5 主要水力损失都发生在竖井喉部分叉口位置,说明竖井喉部极为重要,也是竖井流道水力损失最为严重的区域,今后竖井贯流泵站竖井流道的优化应着重优化该区域的水力损失。通过 FA2、FA3 和 FA4 在竖井分叉段水力损失对比可知,竖井内侧分叉位置改变形状对环量回收和水力损失减小并无益处。根据第 1 段水力损失对比可知,FA5 在竖井进口侧加入 5 片直导叶会带来很严重的水力损失,高达 25 cm,为其他方案该区域水力损失的 5 倍之多。根据分段水力损失图还可以看出,在第 6 个断面以后各段水力损失均比较小,其中 FA5 最小,FA2 次之,说明叶轮出口环量主要靠竖井分叉和竖井通道回收,竖井分叉段设计越好,回收环量越多,竖井后半段水力损失就越小。将各设计方案流程图取出如图 5 所示。

由图 5 可知,FA1 流场非常紊乱,通过型线的改变流态较好,流速分布较为均匀。加入导叶后的 FA5 流态最好,且流线没有呈螺旋状,说明直板导叶回收了绝大部分叶轮出口的速度环量。FA3 竖井内侧改成圆弧后,由于在竖井分叉段内侧断面面积增

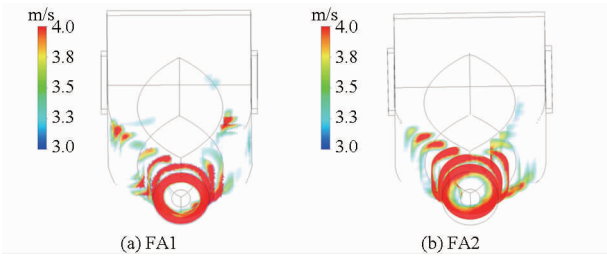


图 6 竖井流道各断面流速分布云图
Fig.6 Velocity distributions of shaft passage

初始方案内外轮廓线设置不够合理,从竖井进口到出口出现流速忽大忽小的情况,必然会带来较大的流道损失,甚至会出现局部漩涡区,加大机组振动及泵站运行噪声。优化方案流速分布较为合理,从叶轮进口开始在该速度范围的区域越来越小。

选择方案 2 和初始方案做进一步对比分析。分别计算初始方案和方案 2 在 0.6*Q*、0.8*Q*、*Q*、1.1*Q*、1.3*Q* 流量工况下水力特性,计算结果如图 7 所示。*Q* 为设计流量,正向设计流量为 12.5 m³/s,反向设

计流量为 14 m³/s。
根据图 7 反向性能曲线可知,优化后的方案效率曲线整体较高,高效区范围较初始方案宽,扬程曲线也略高于初始方案;反向性能曲线在设计工况点,效率最高,由初始方案的 56.7% 提高至 60.5%,效率提高 3.8 个百分点,优化效果明显。正向运行时,竖井流道作为进水流道,水力损失较小,优化前、后扬程曲线基本重合,优化后效率达到 72.18%,较优化前提高 1.67 个百分点。

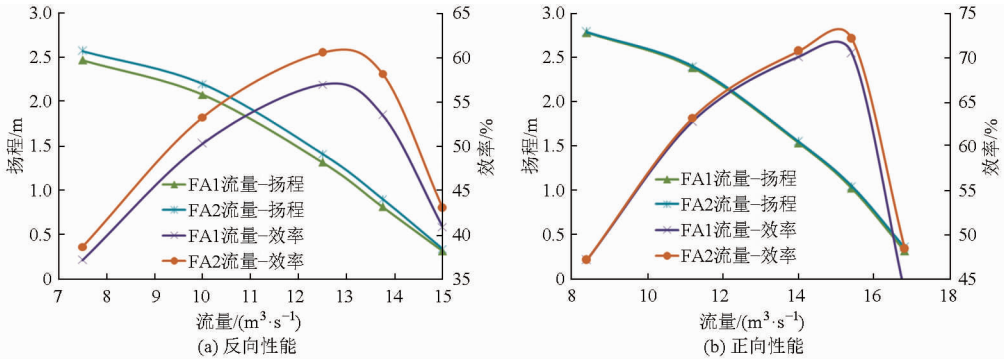


图 7 双向泵装置性能曲线
Fig. 7 Hydraulic curves of bidirectional pump device

3 模型试验分析

龙山泵站为双向竖井贯流泵装置,正向运行时进水采用双向竖井流道进水,出水采用圆变方直管出水流道。叶轮为双向泵水力模型,模型泵名义叶轮直径 $D=300\text{ mm}$,实际叶轮直径 $D=299.65\text{ mm}$,水泵装置模型比例为 1:8。模型叶轮轮毂比为 0.4,叶片数为 4,用黄铜材料经数控加工成型。模型导叶轮毂直径为 120 mm,叶片数为 5,用钢质材料焊接成型。竖井流道采用钢板焊接制作,模型泵叶轮室和竖井流道开有观察窗,便于观测叶片和竖井流道内的水流和汽蚀。将设计方案 2 的各通流部件加工成型,模型泵装置如图 8 所示。模型泵安装检查,导叶体与叶轮室定位面轴向跳动 0.10 mm,轮毂外表面径向跳动 0.08 mm,叶顶间隙控制在 0.20 mm 以内。模型泵叶轮直径 300 mm,根据 nD 值相等原则(n 表示转速),得到模型装置试验转速 944 r/min。试验条件与数值模拟计算保持一致。双向竖井贯流泵装置模型试验在高精度实验台上进行,试验方法按照 SL 140—2006《水泵模型及装置模型验收试验规程》执行。

将模型泵装置试验性能曲线根据相似公式换算成原型泵装置曲线,公式为

$$Q_p = Q_m \frac{D_p^3}{D_m^3} \frac{n_p}{n_m} \tag{2}$$

$$H_p = H_m \frac{D_p^2}{D_m^2} \frac{n_p^2}{n_m^2} \tag{3}$$

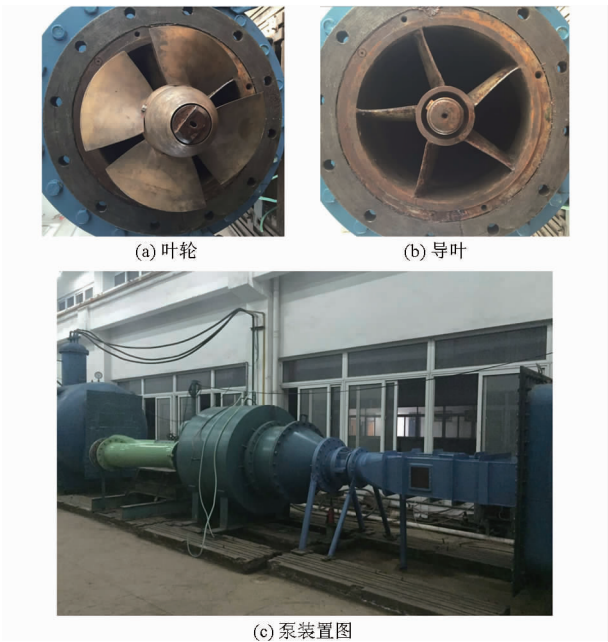


图 8 模型试验装置图
Fig. 8 Pictures of model test pump device

式中 Q_p ——原型泵流量
 H_p ——原型泵扬程
 Q_m ——模型泵流量
 H_m ——模型泵扬程
 D_p ——原型泵直径
 D_m ——模型泵直径
 n_p ——原型泵转速
 n_m ——模型泵转速

将方案 2 双向竖井模型泵装置能量性能试验数据通过式(2)和式(3)换算成原型泵装置性能曲线,

并与原型泵装置数值模拟结果作对比分析,如图 9 所示。

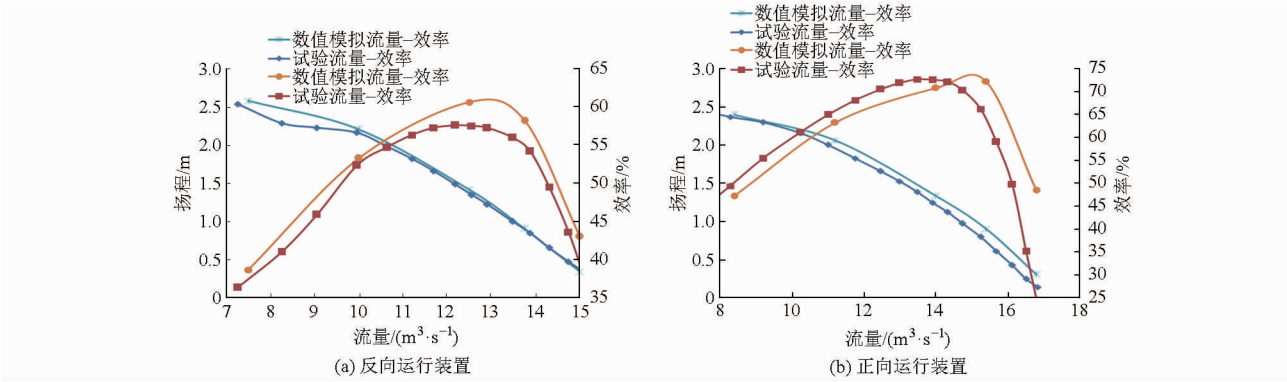


图 9 双向泵装置性能曲线对比

Fig. 9 Comparison of hydraulic performace curves of bidirectional pump device

根据图 9 的泵装置性能曲线可知,在该叶片角度下,反向试验最高效率达到 57.56%,数值模拟最高效率达到 60.5%,误差小于 3%,满足工程应用要求。正向最高效率达到 72.67%,数值模拟最高效率点 72.18%,误差范围较小。说明数值模拟的可靠性,同时也证实了竖井流道的优化效果。泵站正向运行时,竖井前置作为进水流道运行,导叶后置可有效回收叶轮出口环量,因此正向泵装置效率较高;反向运行时,竖井后置作为出水流道运行,竖井流道水力损失较大,占比较大,泵装置效率较低。因此对于低扬程竖井泵而言,降低竖井流道的水力损失,可有效提高泵装置运行效率。

4 结论

(1)对竖井出水流道进行优化设计,对比多个竖井设计方案,竖井流道分叉段内外轮廓线对流道水力损失影响较大,且直接影响竖井流道后半段水力损失。对于特低扬程双向泵站而言,减小竖井出水流道水力损失对提高泵装置效率有着重要意义。

(2)通过对竖井出水流道水力性能优化,优化后泵装置反向效率达到 60.5%,较优化前提高 3.8 个百分点;正向效率达到 72.18%,较优化前提高 1.67 个百分点。通过对竖井的优化,降低了泵站运行成本,优化效果明显。

参 考 文 献

1 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 station[J]. Transactions of the CSAE, 2014, 30(2): 63-71. (in Chinese)

2 何钟宁,陈松山,周正富,等. 大型泵站竖井进水流道水力优化设计研究[J]. 灌溉排水学报, 2010, 29(6):97-99,132.
HE Zhongning, CHEN Songshan, ZHOU Zhengfu, et al. Hydraulic optimization of turbulent flow inside inlet duct in large shaft tubular pumping stations[J]. Journal of Irrigation and Drainage, 2010, 29(6):97-99,132. (in Chinese)

3 杨帆. 低扬程泵装置水动力特性及多目标优化关键技术研究[D]. 扬州:扬州大学,2013.
YANG Fan. Research on hydraulic performance and multi-objective optimization design of low-lift pump system [D]. Yangzhou: Yangzhou University, 2013. (in Chinese)

4 徐磊. 斜式轴伸泵装置水力特性及优化设计研究[D]. 扬州:扬州大学,2009.
XU Lei. Study on hydraulic characteristic and optimum design of pump system with slanting and extensive shaft[D]. Yangzhou: Yangzhou University, 2009. (in Chinese)

5 谢伟东,蒋小欣,刘铭峰,等. 竖井式贯流泵装置设计[J]. 排灌机械,2005(1):10-12.
XIE Weidong, JIANG Xiaoxin, LIU Mingfeng, et al. The design of shaft-well tubular pump unit [J]. Drainage and Irrigation Machinery, 2005(1):10-12. (in Chinese)

6 陈容新,陈建良,易锡玲,等. 竖井双向贯流泵站机组设备选型设计与研究[J]. 中国农村水利水电,2007(7):69-71.
CHEN Rongxin, CHEN Jianliang, YI Xiling, et al. The design and research on devices selection for bifurcate silo tubular pumping station[J]. China Rural Water and Hydropower, 2007(7): 69-71. (in Chinese)

7 陆林广,刘成云,陈玉明. 进水流道对轴流泵装置水力性能的影响[J]. 水泵技术,1997(3):25-26,39.
LU Linguang, LIU Chengyun, CHEN Yuming. Influence of inlet conduit on hydraulic performance of axial flow pump [J]. Pump Technology, 1997(3):25-26,39. (in Chinese)

8 成立,刘超,周济人,等. 基于 RNG 湍流模型的双向泵站出水流道流动计算[J]. 水科学进展,2004,15(1):109-112.
CHENG Li, LIU Chao, ZHOU Jiren, et al. Numerical simulation of flow in the outlet passages of reversible pumping station by

- RNG $k-\varepsilon$ turbulent model with wall function law[J]. *Advances in Water Science*, 2004, 15(1): 109–112. (in Chinese)
- 9 张仁田. 双向泵站进水流道优化水力设计与试验研究[J]. *农业机械学报*, 2003, 34(6): 73–76, 72.
ZHANG Rentian. Optimum hydraulic design and experiment for dual-directional inlet passage in pumping station[J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2003, 34(6): 73–76, 72. (in Chinese)
- 10 刘军. 竖井式贯流泵装置水力特性及优化设计研究[D]. 扬州: 扬州大学, 2010.
LIU Jun. Study on hydraulic characteristic and optimization design of pit tubular pump system [D]. Yangzhou: Yangzhou University, 2010. (in Chinese)
- 11 刘君, 郑源, 周大庆, 等. 前、后置竖井贯流泵装置基本流态分析[J]. *农业机械学报*, 2010, 41(增刊): 32–38.
LIU Jun, ZHENG Yuan, ZHOU Daqing, et al. Analysis of basic flow pattern in shaft front-positioned and shaft rear-positioned tubular pump systems[J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2010, 41(Suppl.): 32–38. (in Chinese)
- 12 徐磊, 陆林广, 陈伟, 等. 南水北调工程邳州站竖井贯流泵装置进出水流态分析[J]. *农业工程学报*, 2012, 28(6): 50–56.
XU Lei, LU Linguang, CHEN Wei, et al. Flow pattern analysis on inlet and outlet conduit of shaft tubular pump system of Pizhou Pumping Station in South-to-North Water Diversion Project[J]. *Transactions of the CSAE*, 2012, 28(6): 50–56. (in Chinese)
- 13 杨帆, 刘超, 汤方平, 等. 竖井型线演变及对泵装置水力性能的影响分析[J]. *应用基础与工程科学学报*, 2014, 22(1): 129–139.
YANG Fan, LIU Chao, TANG Fangping, et al. Shaft shape evolution and analysis of its effect on the pumping system hydraulic performance [J]. *Journal of Basic Science and Engineering*, 2014, 22(1): 129–139. (in Chinese)
- 14 徐磊, 陆林广, 王海, 等. 竖井式进水流道尺寸对水力性能的影响[J]. *水利水运工程学报*, 2014(5): 47–52.
XU Lei, LU Linguang, WANG Hai, et al. Influence of control size of shaft inlet conduit on hydraulic performance[J]. *Hydro-Science and Engineering*, 2014(5): 47–52. (in Chinese)
- 15 王秋景, 郑源, 阚阚. 竖井贯流泵装置进出水流道优化分析[J]. *水电能源科学*, 2015, 33(8): 132–135.
WANG Qiuqing, ZHENG Yuan, KAN Kan. Inlet and outlet flow channel optimization analysis of shaft tubular pump system[J]. *Water Resources and Power*, 2015, 33(8): 132–135. (in Chinese)
- 16 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)
- 17 谢荣盛, 吴忠, 何勇, 等. 双向竖井贯流泵进出水流道优化研究[J]. *农业机械学报*, 2015, 46(10): 68–74.
XIE Rongsheng, WU Zhong, HE Yong, et al. Optimization research on passage of bidirectional shaft tubular pump [J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2015, 46(10): 68–74. (in Chinese)
- 18 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): 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)
- 19 程千, 冯卫民, 周龙才, 等. 前置导叶对轴流泵马鞍区工况回流涡特性的影响[J]. *农业机械学报*, 2016, 47(4): 8–14.
CHENG Qian, FENG Weimin, ZHOU Longcai, et al. Effects of inlet guide vane on characteristics of backflow vortex in hump region of axial flow pump[J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2016, 47(4): 8–14. (in Chinese)
- 20 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)

(上接第 138 页)

- 20 董勤各, 许迪, 章少辉, 等. 一维畦灌地表水流-土壤水动力学耦合模型 I: 建模[J]. *水利学报*, 2013, 44(5): 570–577.
DONG Qin'ge, XU Di, ZHANG Shaohui, et al. Coupled surface-subsurface hydrodynamic model for border irrigation I, model development[J]. *Journal of Hydraulic Engineering*, 2013, 44(5): 570–577. (in Chinese)
- 21 董勤各, 许迪, 章少辉, 等. 一维畦灌地表水流-土壤水动力学耦合模型 II: 验证[J]. *水利学报*, 2013, 44(6): 726–733.
DONG Qin'ge, XU Di, ZHANG Shaohui, et al. Coupled surface-subsurface hydrodynamic model for border irrigation II, validation [J]. *Journal of Hydraulic Engineering*, 2013, 44(6): 726–733. (in Chinese)
- 22 GARCÍA-NAVARRO P, PLAYÁN E, ZAPATA N. Solute transport modeling in overland flow applied to fertigation[J]. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, 2000, 126(1): 33–40.
- 23 MANZINI G, FERRARIS S. Mass-conservative finite volume methods on 2-D unstructured grids for the Richards' equation[J]. *Advances in Water Resources*, 2004, 27(12): 1199–1215.
- 24 王志超, 李仙岳, 史海滨, 等. 农膜残留对土壤水动力参数及土壤结构的影响[J]. *农业机械学报*, 2015, 46(5): 101–106.
WANG Zhichao, LI Xianyue, SHI Haibin, et al. Effects of residual plastic film on soil hydrodynamic parameters and soil structure[J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2015, 46(5): 101–106. (in Chinese)
- 25 BAUTISTA E, ZERIHUN D, CLEMMENS A J. Iterative coupling strategy for surface-subsurface flow calculations in surface irrigation[J]. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, 2010, 136(10): 692–703.