

DOI: 10.20040/j.cnki.1000-7709.2026.20250369

侧向进水轴流泵站进出水流道优化研究

刘燕强¹, 陈景茹¹, 王晓苹¹, 张延忠¹, 陈松山², 韩荣生³, 胡慧涛¹, 张永旭¹

(1. 河北省水利规划设计研究院有限公司, 河北 石家庄 050021; 2. 扬州大学水利科学与工程学院, 江苏 扬州 225009; 3. 河北省水利工程局集团有限公司, 河北 石家庄 050021)

摘要: 针对河北省尖冢泵站改造工程, 利用 CFD 技术对侧向进水轴流泵前池整流措施及进、出水流道进行优化, 同时预测水泵装置能量性能。在水泵装置进、出水流道 CFD 优化的基础上, 开展了优选方案的水泵装置模型试验研究。试验结果表明, 设计扬程下水泵装置效率达 73.8%, 与 CFD 方法预测结论基本一致。研究表明, 轴流泵装置的流道设计优化时, 先利用 CFD 技术对水泵进、出水流道方案进行优选, 再通过水泵装置模型进行试验验证, 可大大节省投资成本、加快工程进度, 为类似工程提供参考。

关键词: 泵站; CFD; 水力性能; 流道优化

中图分类号: TV136⁺.2 文献标志码: A 文章编号: 1000-7709(2026)01-0198-05

Research on Optimization of Inflow and Outflow Channels for Axial Flow Pumping Stations with Lateral Water Intake

LIU Yan-qiang¹, CHEN Jing-ru¹, WANG Xiao-ping¹, ZHANG Yan-zhong¹, CHEN Song-san²,
HAN Rong-sheng³, HU Hui-tao¹, ZHANG Yong-xu¹

(1. Hebei Provincial Water Conservancy Planning, Design and Research Institute Co., Ltd., Shijiazhuang 050021, China; 2. College of Hydraulic Science and Engineering, Yangzhou University, Yangzhou 225009, China; 3. Hebei Water Conservancy Engineering Bureau Group Limited, Shijiazhuang 050021, China)

Abstract: This paper focuses on the renovation project of Jianzhong Pumping Station in Hebei Province. The computational fluid dynamics (CFD) technology was used to optimize the rectification measures of the forebay of the side-inlet axial flow pump, as well as the inlet and outlet flow passages, and simultaneously predict the energy performance of the pump unit. Based on the CFD optimization of the inlet and outlet flow passages of the pump unit, a model test study of optimization scheme for pump unit was carried out. The test results show that the efficiency of the pump unit reaches 73.8% under the design lift, which is basically consistent with the prediction conclusion of the CFD method. This study indicates that when optimizing the flow passage design of the axial flow pump unit, giving priority to using the CFD technology to select the optimal schemes for the inlet and outlet flow passages of the pump unit and then verifying through the model test of the pump unit can greatly save the investment cost and accelerate the project progress, providing a reference for similar projects.

Key words: pumping station; CFD; hydraulic performance; flow channel optimization

1 概况

尖冢灌区位于河北省临西县, 灌溉面积 1.87×10^4 ha, 是一个拥有多年历史的中型灌区。灌区建成运行以来, 在保证农业灌溉、抵御旱灾等

方面发挥了很大作用。位于灌区渠首的尖冢泵站设计流量 $30 \text{ m}^3/\text{s}$, 始建于 1958 年, 历经多次改建, 达到现状规模。尖冢泵站经过 60 多年的运行, 主机设备存在诸多问题。2022 年进行泵站安全鉴定工作, 综合评定为四类泵站, 拟拆除重建。重建尖冢泵站共设置 8 台立式轴流泵, 中间布置

收稿日期: 2025-03-02, 修回日期: 2025-03-25, 接受日期: 2025-04-15

基金项目: 河北省“三三三人才工程”资助项目(332015)

作者简介: 刘燕强(1986-), 男, 高级工程师, 研究方向为水力机械、金属结构, E-mail: liuyanqiang123@126.com

通讯作者: 张延忠(1982-), 男, 正高级工程师, 研究方向为水力机械、金属结构, E-mail: hbslzyz@163.com

4 台大泵,两侧各布置 2 台小泵。泵站进、出水池设计水位参数见表 1,泵站平面布置见图 1。

表 1 泵站特征水位

Tab. 1 Characteristic water level of pumping station					
项目	特征水位	参数 值/m	项目	特征水位	参数 值/m
进水池	最高运行水位	32.8	净扬程	最低运行水位	30.0
	设计运行水位	29.0		最大净扬程	4.7
	最低运行水位	28.0		设计净扬程	3.7
出水池	最高运行水位	32.7		最小净扬程	0
	设计运行水位	32.7			

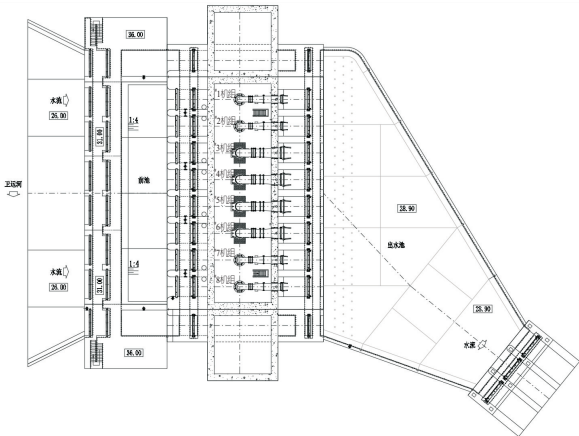


图 1 泵站平面布置图

Fig. 1 Schematic diagram of the section of the pumping station

参考已建工程实例及查阅厂家型谱,大泵型号初选为 1400ZLB-100,叶片安放角度 0°,单泵设计流量 4.96 m³/s,扬程 5.34 m,配套电机功率 400 kW。鉴于该泵站扬程较低,适合偏低扬程的水力模型较少。经优选,大泵模型泵采用扬州大学研制的 ZBM791-1000 水力模型,该模型泵叶轮采用青铜材料,模型泵叶轮直径 300 mm,转轮 3 片,导叶 5 片。叶轮外壳采用中开结构,便于拆装及叶片角度调节。该模型比转速 1 000 为高比转速轴流泵,模型泵 nD (水泵转速 n 乘以叶轮直径 D)值为 444。按照泵站设计参数初选水泵叶轮直径为 1.2 m,转速 370 r/min, nD 值为 444,与模型泵 nD 值相同。鉴于大泵机组规模为大中型,若水泵进、出水流道设计不合理,会导致泵站能耗增加,甚至造成机组运行不稳定,因此对该水泵进、出水流道进行水力性能分析优化尤为重要。

在现有研究中,CFD 技术和模型试验已广泛应用于提升泵站性能和稳定性。BOZH'EVA S M 等^[1-2]利用 CFD 模拟泵站内部流动,得到关键内部流体运动状态,为其提供可靠运行的依据;CHENG B 等^[3]基于可实现的 κ - ϵ 湍流模型和 SIMPLEC 算法分析侧向引水和进水泵站的流量,选择导向分流器作为此类泵站的优化方法,进一步提高集水坑的水流分布均匀性;孙翀等^[4-5]通

过 CFD 模拟,分别优化了王道泵站“S”型卧式轴流泵和九顷泵站立式轴流泵进、出水流道设计方案,有效提高了泵装置的效率和水力性能;张刘^[6]的模型试验和赵智磊等^[7]的 CFD 方法均验证了泵站在特定工况下的性能和流态稳定性;徐海宁等^[8]强调了设计中最小化水力损失的重要性,而孙丹丹等^[9]的模型试验为泵站运行维护提供了依据;林伟强等^[10]则对比了不同泵型在巴基斯坦大型取水泵站的应用,考虑了泵站设计的多方面因素;向旭东等^[11]通过模型试验研究了改进侧向进水富池口泵站进口流态的措施,最终提出的方案改善了整个泵站进口的水流条件。现有研究均表明 CFD 技术和模型试验在泵站进、出水流道优化中的重要作用,可为提升泵站长期运行效率和可靠性提供支持。

针对河北省尖冢泵站存在的问题,利用 CFD 技术对侧向进水轴流泵前池整流措施、进出水流道方案进行优选,同时预测优选后的水泵装置能量性能;在水泵装置 CFD 分析的基础上,开展水泵装置优选方案的模型试验研究,进一步验证水泵装置及进、出水流道设计优化的合理性。研究成果可为评估不同进、出水流道设计方案的水力性能,确定最优的进、出水流道设计方案,优选水泵流道方案模型试验,评估优化后的泵装置整体性能提供理论依据。

2 泵站前池流态改进研究

受现场条件限制,尖冢泵站采用侧向进水前池,经数值模拟,泵站 8 台机组全部运行,前池流速分布见图 2(a)。由图 2(a)可知,前池流态存在水流偏斜及低流速区等不良现象。考虑泵站安全

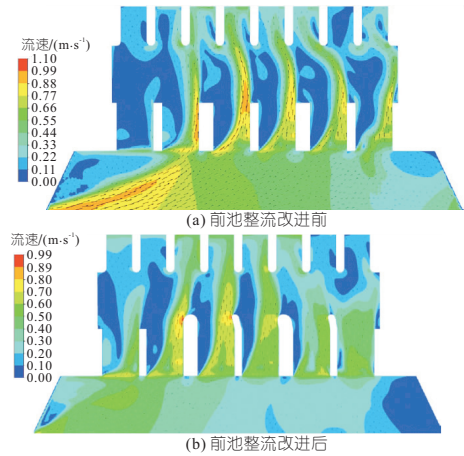


图 2 泵站前池流态改进前后流速分布

Fig. 2 Flow velocity distribution diagram before and after improvement of flow state in the pump station forebay

3.2.3 泵装置能量特性

从计算结果中提出相应数据,计算得到各方案泵装置能量性能参数(表 2、图 6)。由表 2、图 6 可知,泵扬程随流量的增加不断减小,曲线呈“一次函数”形状;而效率随流量的增加先增大后减小,效率图线在流量 4.7 m³/s 开始减小,曲线呈开口向下的具有极大值的抛物线形状;在设计扬程下,水泵装置流量为 5.25 m³/s,装置效率 72%,该泵装置效率属于中高水平,满足泵站设计规范节能评价要求。

表 2 原型泵装置能量特性表

Tab. 2 Energy characteristic table of prototype pump unit							
流量 Q	泵装置 扬程 H/m	功率 P /kW	效率 η/%	流量 Q	泵装置 扬程 H/m	功率 P /kW	效率 η/%
3.47	6.87	339.12	69.02	4.96	3.45	227.43	73.81
3.97	5.37	389.32	72.25	5.46	2.45	194.18	67.53
4.46	4.40	260.52	73.96	5.95	1.41	142.24	57.47

注:流量 Q 单位为 m³/s。

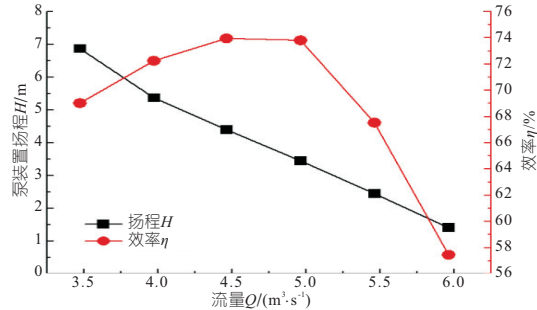


图 6 泵装置能量特性图

Fig. 6 Diagram of the energy characteristics of the pump unit

4 泵模型装置试验

4.1 泵模型装置及试验方法

尖峯泵站大泵模型水泵装置包括簸箕进水流道、水泵段和低驼峰出水流道。模型泵进、出水流道与原型满足几何相似和阻力相似,用钢板制作,模型泵装置进、出水流道结构现场安装见图 7。进、出水流道尺寸采用 CFD 优化组合方案,包括



图 7 安装在试验台上的水泵装置模型

Fig. 7 Model pump device installed on the test bench

簸箕型进水流道、泵段(转轮和导叶)、低驼峰型。

水泵装置模型试验在扬州大学流体动力学工程实验室高精度泵站试验台上进行。试验方法按照《回转动力泵水力性能验收试验 1 级、2 级和 3 级》^[12] 和《水泵模型及装置模型验收试验规程》^[13] 进行。扬程测点分别布置在流道外侧的进水箱和出水箱,从大流量到小流量依次测试 15~20 点。

4.2 试验结果分析

尖峯泵站水泵装置模型能量性能测试数据见表 3。模型泵及原型泵装置能量特性曲线见图 8。

表 3 水泵装置模型能量性测试数据表(叶片角度 0°)

Tab. 3 Energy performance test date for pump device model									
序 号	流量	扬程	功率	效率	序 号	流量	扬程	功率	效率
		/m	/kW	/%			/m	/kW	/%
1	389.48	0.827	9.063	34.86	12	283.13	6.116	22.235	76.40
2	385.54	1.063	9.731	41.31	13	265.88	6.815	23.960	74.18
3	378.68	1.473	10.772	50.79	14	252.60	7.345	25.250	72.08
4	368.80	2.012	12.270	59.32	15	246.24	7.552	25.753	70.83
5	358.98	2.541	13.651	65.55	16	229.70	8.046	27.054	67.01
6	349.63	3.051	14.979	69.87	17	212.05	8.392	28.035	62.27
7	343.99	3.311	15.623	71.53	18	191.07	8.529	28.356	56.38
8	339.98	3.514	16.083	72.87	19	170.64	8.528	28.147	50.72
9	329.07	4.010	17.314	74.77	20	150.97	8.961	29.133	45.56
10	316.33	4.648	18.875	76.42	21	134.44	9.752	31.420	40.94
11	307.53	4.984	19.604	76.70					

注:流量单位为 L/s。

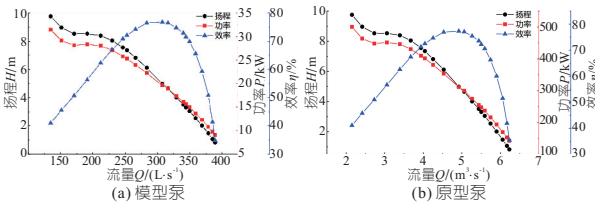


图 8 泵装置能量特性图(叶片角度 0°)

Fig. 8 Diagram of the energy characteristics of the pump unit

由能量特性试验结果可知,水泵模型装置在净扬程约 0.7 m 左右至进入马鞍区前运行状态平稳,无明显不良噪音和振动。泵站设计净扬程 3.70 m 工况时,水泵流量为 5.38 m³/s,满足设计要求,此时装置效率为 73.8%。临界空化余量曲线呈现具有极小值开口向上的曲线。各工况下的脉动幅值差异不大,叶轮进口测点振幅均小于 0.1 m,叶轮出口测点、导叶体出口测点的振幅均小于 0.16 m,脉动主频主要为水泵叶频及其倍频,水压力脉动对机组运行无影响。

对比图 6、8 可知,泵装置数值模拟与装置模型试验均表明泵装置性能符合轴流泵的流量扬程变化规律,即随着流量增大,扬程下降;效率曲线呈开口向下的具有极大值的抛物线形状。在设计净扬程 3.7 m 工况运行时,二者单泵流量分别为

5.25、5.38 m³/s,效率分别为 72.0%、73.8%。泵装置模型试验较数值模拟效率略大,可能是模型泵叶片的加工精度和安放角度与数值模拟建模数据存在误差导致。泵装置数值模拟与装置模型试验水泵流量、扬程及效率偏差均较小,表明利用数值模拟优化水泵装置具有较高的准确性。

5 结论

受现场条件限制,侧向进水前池存在水流偏斜及低流速区等不良现象。采取前池流态改进措施后,前池水流偏斜及低流速区得到明显改善,为各水泵运行提供较好的进水条件。泵装置数值模拟表明,流道压力从进口到出口逐渐增大,低压区域主要集中在出水流道上升段的内层,高压区域主要集中在出水流道上升段的外侧及驼峰顶部区域;优化后的流道整体流态平稳顺畅,无明显回流、脱流,符合工程预期目标;但小流量工况下,出水流道内会产生较为强烈的螺旋流动,应尽量避免在小流量工况下运行。泵装置数值模拟和模型试验均表明泵装置性能符合轴流泵的流量扬程变化规律,效率曲线呈开口向下的具有极大值的抛物线形状;两者流量与扬程、效率变化趋势是一致且合理的;在设计工况运行时,运用数值模拟和模型试验预测水泵流量、扬程和效率偏差均较小,表明利用数值模拟优化水泵装置具有较高的准确性,模拟结果可作为水泵性能的预估参考。

参考文献:

- [1] BOZHEVA S M, LOMAKIN V O. The importance of computational modeling of large pumping stations [J]. Mašiny i Ustanovki: Proektirovanie, Razrabotka i Èkspluataciã, 2015(4): 53-75.
- [2] CHENG X D, CHEN X. Hydraulic optimization of closed transformation of open sump for the water treatment pumping station [J]. Processes, 2022, 10(4): 644.
- [3] CHENG B, YU Y H. CFD simulation and optimization for lateral diversion and intake pumping stations [J]. Procedia engineering, 2012, 28: 122-127.
- [4] 孙翀, 李四海, 韩鹏. 泵站“S”型进、出水流道优化设计研究 [J]. 水利水电技术, 2022(3): 84-90. (SUN C, LI S H, HAN P. Optimal design of “S” type inlet and outlet flow channel of pumping station [J]. Water resources and hydropower engineering, 2022(3): 84-90. (in Chinese))
- [5] 贾西鹤, 张鸿伟. 中山市横栏镇九顷泵站进出水流道 CFD 优化分析设计 [J]. 水利建设与管理, 2023, 43(3): 15-21. (JIA X H, ZHANG H W. CFD optimization analysis and design of inlet and outlet flow channels of Jiuqing pump station in Henglan Town, Zhongshan City [J]. Water conservancy construction and management, 2023, 43(3): 15-21. (in Chinese))
- [6] 张刘. 泵站工程水泵装置模型试验分析 [J]. 水利科技与经济, 2024, 30(6): 49-52, 63. (ZHANG L. Model test analysis of water pump device in pumping station project [J]. Water conservancy science and technology and economy, 2024, 30(6): 49-52, 63. (in Chinese))
- [7] 赵智磊, 李乃回, 陆文君, 等. 基于 CFD 方法的水泵站压力前池设计优化研究 [J]. 中国水运(下半月), 2019(11): 196-197, 212. (ZHAO Z L, LI N H, LU W J, et al. Research on optimization design of pressure forebay of water pump station based on CFD method [J]. 1, 2019(11): 196-197, 212. (in Chinese))
- [8] 徐海宁, 马龙飞. 水库取水泵站结构设计和施工关键技术 [J]. 特种结构, 2022, 39(5): 63-68. (XU H N, MA L F. Key techniques of structural design and construction for reservoir water intake pump station [J]. Special structures, 2022, 39(5): 63-68. (in Chinese))
- [9] 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. (SUN D D, CHEN S J, WANG B, et al. Model test of axial-flow pump unit for Lingcheng pumping station in Suining County [J]. China rural water and hydropower, 2018(2): 126-130. (in Chinese))
- [10] 林伟强, 郑博一, 杨楠, 等. 巴基斯坦某大型固定式取水泵站方案对比研究及优化 [J]. 给水排水, 2021, 47(增刊 1): 79-82. (LIN W Q, ZHENG B Y, YANG N, et al. Comparative study and optimization analysis of large fixed water intake pumping station [J]. Water & wastewater engineering, 2021, 47(S1): 79-82. (in Chinese))
- [11] 向旭东, 张劲松, 田明旺, 等. 富池口泵站进口整流试验研究 [J]. 水电与新能源, 2016, 30(7): 6-11. (XIANG X D, ZHANG J S, TIAN M W, et al. Experimental study on the intake flow rectification in fuchikou pumping station [J]. Hydropower and new energy, 2016, 30(7): 6-11. (in Chinese))
- [12] 国家质量监督检验检疫总局, 中国国家标准化管理委员会. 回转动力泵 水力性能验收试验 1 级、2 级和 3 级: GB/T 3216-2016[S]. 北京: 中国标准出版社, 2017. (General Administration of Quality Supervision, Inspection and Quarantine of the People's Republic of China, Standardization Administration of the People's Republic of China. Rotodynamic pumps-hydraulic performance acceptance tests-grades 1, 2 and 3: GB/T 3216-2016[S]. Beijing: Standards Press of China, 2017. (in Chinese))
- [13] 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. (Ministry of Water Resources of the People's Republic of China. Code for model pump acceptance tests: SL 140-2006[S]. Beijing: Electronic Industry Press, 2006. (in Chinese))