

大流量竖井贯流泵站流道优化及试验

王拯谦¹, 程蒙召¹, 姚 猛², 贺怀杰¹, 张 璿¹, 高 超², 柴永刚², 丰淑云²

(1. 中国电建集团华东勘测设计研究院有限公司, 浙江 杭州 311122; 2. 天津市永定河管理中心, 天津 300130)

摘要: 为提高低扬程、大流量竖井贯流泵站的运行效率和安全性, 以天津某大型泵站为例, 通过 CFD 模拟分析其进水与出水流道的优化设计, 研究了流道水头损失、流速均匀性、电机井空间与启闭设备容量等实际问题, 结合泵站特征流量与扬程, 选取了优选水力模型与流道组合, 并对泵站装置整体能量性能进行模拟, 评估其适用性和效率表现, 采用装置模型试验进一步验证设计方案。结果表明, 进水流道方案 J1、J2 在流速均匀度与水损方面表现良好, 其中方案 J1 略优于方案 J2; 出水流道方案 C1 与 C2 差异不大, 但 C2 由于流道渐变段较短, 设备布置更为合理。方案 J2+C2 综合考虑电机井尺寸和闸门设计, 适合低扬程、大流量泵站的设计与优化。最终推荐 TJ04-ZL-06 水力模型(叶轮直径 4 m, 转速 88.9 r/min, 叶片安装角度 -6°), 可确保泵站在扬程与流量范围内安全、高效运行。

关键词: 低扬程泵站; 水力性能; 流道优化; CFD 数值模拟; 装置模型试验

中图分类号: TV675

文献标志码: A

文章编号: 1000-7709(2026)01-0157-06

Optimization and Experimental Study on Flow Channels of Large-flow Vertical Shaft Tubular Pump Station

WANG Zheng-qian¹, CHENG Meng-zhao¹, YAO Meng², HE Huai-jie¹, ZHANG Jin¹,
GAO Chao², CHAI Yong-gang², FENG Shu-yun²

(1. PowerChina Huadong Engineering Corporation Limited, Hangzhou 311122, China;

2. Tianjin Yongding River Management Center, Tianjin 300130, China)

Abstract: To enhance operational efficiency and safety of low-lift, high-flow vertical shaft tubular pumping station, taking a large-scale pumping station in Tianjin for an example, the optimization design of inlet and outlet flow passages was conducted by the CFD numerical simulations. The practical aspects including flow passage head loss, velocity uniformity, motor chamber space, and hoisting equipment capacity were studied. By considering the characteristic flow rates and lift of the pumping station, optimal combinations of hydraulic models and flow passages were selected. The overall energy performance of the pumping station system was simulated to evaluate its applicability and efficiency. The design scheme was further validated through physical model tests. The results demonstrate that inlet flow passage schemes J1 and J2 exhibited favorable velocity uniformity and head loss characteristics, with scheme J1 showing marginally superior performance. For outlet flow passages, schemes C1 and C2 displayed comparable performance, though C2 offered a more rational equipment layout due to its shorter transition section. The combined scheme J2+C2 proved suitable for low-lift, high-flow pumping stations when considering motor chamber dimensions and gate design. Ultimately, the TJ04-ZL-06 hydraulic model (impeller diameter of 4 m, rotational speed of 88.9 r/min, blade installation angle of -6°) was recommended, ensuring safe and efficient operation across the specified lift and flow rate ranges.

Key words: low-lift pump station; hydraulic performance; flow passage optimization; CFD numerical simulation; device model test

收稿日期: 2025-03-15, 修回日期: 2025-04-09, 接受日期: 2025-04-12

基金项目: 蓟运河河口泵站工程(01SL242630A)

作者简介: 王拯谦(1991-), 男, 硕士、高级工程师, 研究方向为水利工程、泵站设计, E-mail: wang_zq5@hdec.com

通讯作者: 贺怀杰(1993-), 男, 博士、工程师, 研究方向为生态水利、泵站设计, E-mail: hehuaijie2016@163.com

1 引言

竖井贯流泵装置因具有进出水流道顺直、装置效率高、结构简单等优点而广泛应用于平原地区河网工程的低扬程、大流量泵站中^[1-10]。低扬程、大流量泵站的水力性能对泵站安全性、运行效率等具有重要意义^[8,10]。因此,有必要对低扬程、大流量泵站流道、装置开展模拟研究,通过参数和型线的优化设计,从而减少流道水头损失和改善水流流态^[1-3,11]。近年来通过数值模拟和物理模型手段针对低扬程、大流量竖井贯流泵装置进出水流道进行优化方面的研究已较多^[1-4,6,9],如徐磊等^[1]基于 CFD 软件分析了竖井贯流泵装置流道表面流场和垂直方向剖面流场,揭示了竖井贯流泵装置内、外特性之间的联系,结果表明邳州站前置竖井贯流泵装置水力性能优异,设计流量时的水力损失仅为 0.11 m;刘艺平等^[3]利用 CFD 软件对泵站进出水流道、叶轮及导叶内的流动进行三维紊流数值模拟,结果表明缩短进水流道长度、采用渐变收缩及圆弧尾部的设计可改善水力性能。大流量竖井贯流泵站进出水流道的优化对水泵的运行稳定性和设备适应性具有直接影响。为此,本文以天津某竖井贯流泵装置为例,基于 CFD 数值模拟优化进出水流道的几何参数,在减少水头损失、保持流速均匀的同时,兼顾电机井空间和设备布置等实际因素,选择了合适的流道方案,并通过数值模拟与试验验证,确保了水力模型泵站装置的可行性与泵站的运行效率。

2 工程概况

以天津某竖井贯流泵装置为例,该工程排涝设计流量为 300 m³/s,采用 6 台竖井贯流泵机组,单机设计流量为 50 m³/s,叶轮直径 4 m,转速 88.2 r/min,水泵安装高程-6.70 m。泵站运行设计扬程 1.8 m,最大扬程 4.1 m,最小扬程 0.3 m,预泄工况扬程 2.6 m。该工程为典型的低扬程、大流量竖井贯流泵,泵站特征运行水位见表 1。

表 1 泵站特征运行水位

Tab.1 Characteristic operating water level of pumping station

运行 工况	水位		运行工况	水位	
	进水池	出水池		进水池	出水池
最高	2.03	2.89	预泄水位	-0.94	1.26
设计	1.20	2.64	常水位	1.00	1.00
最低	-0.74	0			

3 进出水流道优化

在流道优化过程中,通常遵循以下原则:①进、出水流道水头损失小,流速分别为 0.8~1.0、1.0~1.5 m/s;②进水流道形线变化均匀、水流收缩均匀、无涡流及其他不良流态,出口流道变化平缓,避免水流在扩散过程中产生脱流、涡流;③进入叶轮处断面流速均匀、水流方向垂直于出口断面。

竖井贯流泵的布置特点为电机和齿轮箱需布置在进水流道中,为满足设备安装、接线、通风、检修和巡查等需求,通常需要较大的电机井。然而,在确保流道损失与流态的同时,还需考虑设备的合理布置,这使得电机井空间相对局促,影响后期散热与检修。对于单机大流量的出水流道,工作闸门和事故闸门尺寸较大,从而导致启闭机容量较大,给金属结构设计带来挑战。因此,本文在常规流道优化的基础上,提出了新的优化目标:①确保电机井与井壁间的最小检修和巡视尺寸为 80 cm(参考《泵站设计标准》(GB50265-2022))^[12];②选择规则的出口流道工作闸门和事故闸门,简化设备布置,提高设计可行性。

3.1 进水流道优化

3.1.1 进水流道优化方案

根据理论计算可初步确定进水流道控制尺寸,进口断面宽度 $B_j=10.0$ m、断面高度 $H_j=6.2$ m。在控制尺寸范围内,根据优化目标,选定以下两种流道方案:①方案 J1。流道上盖板倾斜角 5.2°,下盖板倾斜角 0.7°,竖井段长度 16.95 m、宽度 4.8 m,方形变圆形收缩段长度 8.95 m,竖井末端处(喇叭口)流道宽度(高度)4.6 m,竖井末端处(喇叭口)至叶轮中心距离 3.05 m。②方案 J2。为改善电机井空间问题,在保持方案 J1 主要尺寸不变的前提下,仅对竖井宽度进行调整,即将流道宽度先扩散至 10.7 m,再逐渐收缩,竖井宽度由 4.8 m 增加至 5.4 m。尺寸对比详见表 2、图 1。

表 2 进水流道方案主要尺寸

Tab.2 Main dimensions of inlet channel design

方案	倾斜角/(°)		竖井尺寸/m	
	上盖板	下盖板	长度	最大宽度
J1	5.2	0.7	16.95	4.8
J2	5.2	0.7	16.95	5.4

3.1.2 CFD 模拟分析结果

采用流体动力学通用计算软件 ANSYS CFX,分别对 40、45、50、55、60 m³/s 五种流量工

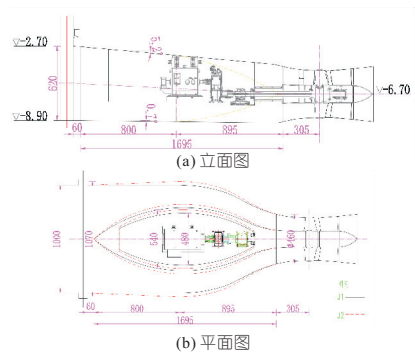


图 1 进水流道单线图(单位:cm)

Fig. 1 Single-line diagram of intake channel

况进行分析。

(1)水损、流速分布和流速加权平均角。两种方案进水流道水损、流速分布、流速加权平均角对比见表 3。由表 3 可看出,两个方案进水流道的水损值均较小,均小于 80 mm;两方案流速均匀度均接近或超过 95%,流速加权平均角均超过 88%,流态较好;方案 J1 在各工况下水损略小于方案 J2,流速均匀度和流速加权平均角均优于方案 J2,主要由于方案 J2 扩大电机井尺寸,导致线型变化角度略大。

表 3 水损、流速分布均匀度和流速加权平均角对比

Tab. 3 Comparison of head loss, flow velocity distribution uniformity and flow-velocity-weighted average angle

流量 Q $/(m^3 \cdot s^{-1})$	水损/mm		流速均匀度/%		加权平均角/ $^{\circ}$	
	方案 J1	方案 J2	方案 J1	方案 J2	方案 J1	方案 J2
40	32.76	35.75	95.64	94.82	88.26	88.05
45	40.71	44.42	95.80	94.99	88.26	88.05
50	49.46	53.96	95.93	95.13	88.26	88.05
55	58.98	64.35	96.06	95.27	88.26	88.05
60	69.27	75.59	96.17	95.38	88.26	88.05

(2)流道内部流动特性。在设计流量 50 m^3/s 下,取进水流道剖面绘制速度云图和三维流线图见图 2。由图 2 可看出,水流在进水流道中流速分布左右对称,沿流动方向流速逐步增大,变化较均匀;水流通过竖井末端汇流流速明显增大,

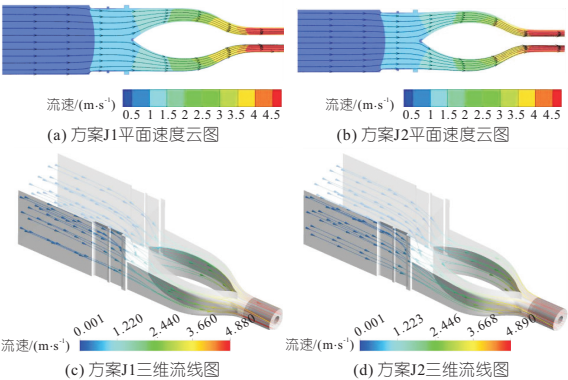


图 2 方案 J1、J2 平剖面速度云图和三维流线图

Fig. 2 Plan-section velocity contour maps and 3D streamline diagram of schemes J1 and J2

经水泵喇叭管调整后,在水泵进口断面流速分布比较均匀,速度矢量几乎垂直水泵进口断面,两个方案均符合水泵吸水要求。

3.2 出水流道优化

3.2.1 出水流道优化方案

理论计算可初步确定出水流道控制尺寸:出水流道出口断面宽度 $B_c = 11.8\text{ m}$ 、断面高度 $H_c = 6.0\text{ m}$ 。在控制尺度范围内,根据优化目标,选定以下两种流道方案:①方案 C1。流道上盖板的上翘角为 7.5° ,下盖板的上翘角为 2.2° ,平面扩散角改为 8.0° ,流道渐变、扩散长度 22 m,其中在圆形变方形扩散段增加方形扩散段 5 m。②方案 C2。在保持方案 C1 尺寸不变的前提下,下盖板的上翘角为 2.9° ,平面扩散角为 10.3° ,流道渐变、扩散长度 17 m。尺寸对比详见图 3、表 4。

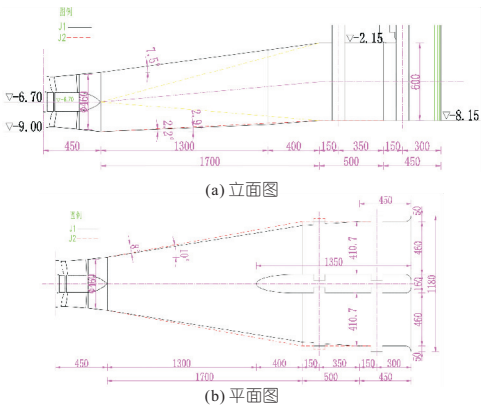


图 3 出水流道单线图(单位:cm)

Fig. 3 Single-line diagram of outlet channel

表 4 出水流道优化方案主要尺寸

Tab. 4 Main dimensions of optimized outlet channel design

方案	倾斜角/ $^{\circ}$		平面扩散 角/ $^{\circ}$	圆变方形 扩散段/m	方形扩 散段/m
	上盖板	下盖板			
C1	7.5	2.2	8.0	17	5
C2	7.5	2.9	10.3	17	0

3.2.2 CFD 模拟分析结果

(1)水损、流速分布和流速加权平均角。针对出水流道不带泵和带泵两种工况,分别对出水流道进行 CFD 仿真模拟分析,其中带泵情况为出水流道和工程推荐的 TJ04-ZL-06 水力模型(叶片角度 0°)进行组装。两种方案出水流道水损对比见表 5。由表 5 可看出,带泵出水流道水损曲线与

表 5 出水流道水损对比

Tab. 5 Comparison of head loss in outlet channel mm

工况	方案	流量 $Q/(m^3 \cdot s^{-1})$				
		40	45	50	55	60
不带泵	C1	47.83	76.15	107.56	141.63	178.34
	C2	78.1	111.07	148.37	189.3	233.69
带泵 0°	C1	102.51	78.26	13.18	49.25	179.95
	C2	109.44	86.89	21.01	54.16	192.29
带泵 -4°	C1	38.62	64.88	67.72	71.32	
	C2	42.21	65.41	75.59	100.61	

不带泵存在差异,因水泵出口速度环量影响,带泵水损更接近实际情况;带泵水损曲线呈极小值形态,叶片角度为 0° 时,极小值出现在流量 $50\text{ m}^3/\text{s}$ 附近;方案 C2 在各工况下水损大于方案 C1,带泵 0° 时差值较小,介于 $6.93\sim 12.34\text{ mm}$ 之间;带泵 -4° 时差值也较小,介于 $3.59\sim 29.29\text{ mm}$ 之间。

(2) 流道内部流动特性。在设计流量 $50\text{ m}^3/\text{s}$ 下绘制的速度云图和三维流线图,见图 4。由图 4 可看出,出水流道内流速分布近似中心对称,沿程速度逐渐减小,梯度变化均匀,出水池出口上部存在低速区。两方案在流速分布与流线特性上差异不大,均满足设计要求。方案 C1、C2 出水流道流速分布基本呈中心对称,沿程速度均匀减小,出水池出口上部存在低速区。两方案在水损与流态表现相近,但方案 C1 因渐变段较长,事故闸门设置受限,设计难度较大;相比之下,方案 C2 在空间布置上更为合理。

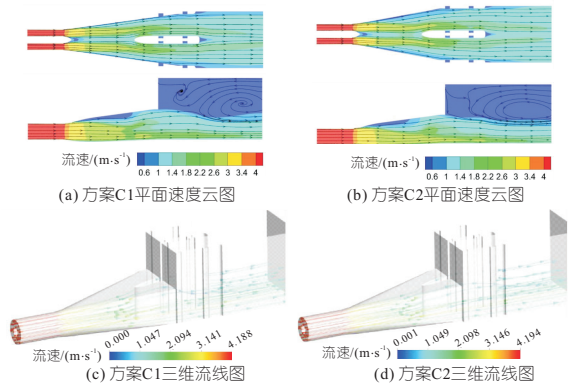


图 4 方案 C1、C2 主要剖面速度云图和三维流线图

Fig. 4 Key-section velocity contour maps and 3D streamline diagram of schemes C1 and C2

4 水泵装置 CFD 数值模拟

4.1 水力模型

结合本文工程流量与扬程需求,参考南水北调工程及近年低扬程、大型竖井贯流泵站应用经验,推荐 TJ04-ZL-06、TJ04-ZL-07、SJGM-03、SJGM-04 等水力模型。这些模型具有效率高、高效区宽、空蚀性能好等优点,具有成熟的工程应用经验,相关参数见表 6。

表 6 水力模型有关设计参数

Tab. 6 Design parameters of hydraulic model

型号	流量 $/(m^3 \cdot s^{-1})$	最优扬程/m	平均效率/%	汽蚀比 转速 C	比转速 n_s
TJ04-ZL-06	0.402	4.80	85.60	1 002	1 034
TJ04-ZL-07	0.360	3.28	83.40	1 278	1 303
SJGM-03	0.335	3.48	81.60	1 244	1 199
SJGM-04	0.388	4.80	82.80	1 021	1 024

SJGM-03 为 TJ04-ZL-07 的改型,虽设计效率较高,但从综合特性曲线来看,其最高扬程与马鞍区距离较近,高效区稳定性较差,效率衰减明显,工程适应性较弱。SJGM-04 则为 TJ04-ZL-06 在竖井贯流泵中的改型应用,具备良好的稳定性和实际应用经验,因此优先选用 TJ04-ZL-06 作为数值模拟计算的水力模型。

4.2 边界条件

最终将进水流道、水泵段与出水流道组装,构建完整三维水泵装置计算模型。CFD 计算中,进口设为进水池与质量流量边界,出口设为出水池与静压边界。各流道交界面采用 general connection,叶轮区参考坐标系为 frozen rotor,其余为静止系。设叶轮区为旋转区域,轮毂及叶片相对旋转区域静止,其他区域均为静止;除叶轮部分外,固体壁面设为无滑移条件,自由水面设为对称面。

4.3 模拟工况

采用 TJ04-ZL-06 水力模型分别与两组进出水流道进行组装,研究叶轮直径 4 m 、转速 88.2 r/min 时叶片安放角 -4° 、 -5° 下运行的性能情况。组合方案如下:①组合 1。进水流道方案 J1+TJ04-ZL-06 水力模型 -4° +出水流道方案 C1;②组合 2。进水流道方案 J1+TJ04-ZL-06 水力模型 -5° +出水流道方案 C1;③组合 3。进水流道方案 J2+TJ04-ZL-06 水力模型 -4° +出水流道方案 C2;④组合 4。进水流道方案 J2+TJ04-ZL-06 水力模型 -5° +出水流道方案 C2。以满足设计工况下(装置设计扬程 1.8 m ,设计流量 $50\text{ m}^3/\text{s}$)泵装置模型效率不低于 70% 的要求。

4.4 模拟结果

各组合在不同扬程下的流量与效率值见表 7,图 5 为 J2+C2 进出水流道组合下叶片角度 -4° 、 -5° 泵装置方案能量性能曲线。

表 7 不同工况组合下 CFD 模拟结果

Tab. 7 CFD simulation results under different operating condition combinations

方案 组合	叶片角 度/ $(^{\circ})$	进出水 流道工况	扬程 /m	流量 $/(m^3 \cdot s^{-1})$	效率 /%
组合 1	-4	J1+C1	1.8	52.58	71.35
			2.6	47.50	74.21
			4.1	34.82	76.15
组合 2	-5	J1+C1	1.8	51.43	70.93
			2.6	46.12	73.84
			4.1	33.24	75.92
组合 3	-4	J2+C2	1.8	51.65	69.17
			2.6	47.20	77.13
			4.1	34.39	69.23
组合 4	-5	J2+C2	1.8	49.56	71.68
			2.6	45.32	78.89
			4.1	33.05	70.02

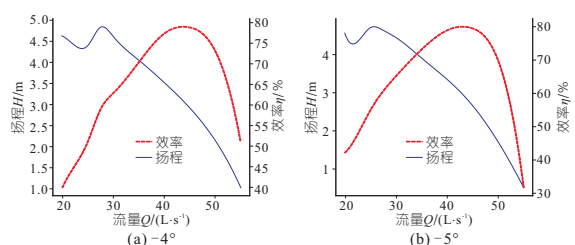


图 5 J2+C2 进出水流道组合下叶片角度 -4° 、 -5° 泵装置方案能量性能曲线

Fig. 5 Energy performance curves of pump unit designs with blade angles of -4° and -5° under J2+C2 intake and outlet channel combination

由表 7、图 5 可看出:①当采用 J1+C1 流道组合时,叶片角度调整至 -4° ,扬程 1.8 m 时流量大于泵站设计流量 $50\text{ m}^3/\text{s}$,泵装置效率为 71.35%。根据以往类似泵站设计经验和运行情况,当采用 J2+C2 流道组合时,将叶片角度调整至 -4.3° ,在设计工况点流量 $50\text{ m}^3/\text{s}$ 、扬程 1.8 m,泵装置效率为 70.1%。②在 J1+C1 或 J2+C2 流道组合下,不同叶片安装角度均能满足泵装置效率不低于 70% 的设计要求。虽 J1+C1 效率略优,但考虑工程为排涝泵站,运行时长有限,稳定性与管理便利性更为重要,故选用 J2+C2 组合更为适宜。

5 装置模型试验

在数值模拟结果的基础上进一步开展 TJ04-ZL-06 水力模型 -8° 、 -6° 、 -4° 、 -2° 、 0° 共五个水泵叶片角度(试验转速 $1\,185.3\text{ r/min}$)下的水泵装置模型试验。

5.1 能量特性

图 6、7 分别为模型泵、原型泵装置能量特性曲线汇总图。由图 6、7 可知,叶片安装角度为 -6° 时,设计净扬程 1.80 m 下流量为 $50.89\text{ m}^3/\text{s}$,效率达 70.26%,高于单泵设计流量 $50\text{ m}^3/\text{s}$;在最低扬程 0.30 m 时流量达 $58.57\text{ m}^3/\text{s}$,效率为 22.61%;最高扬程 4.10 m 时流量为

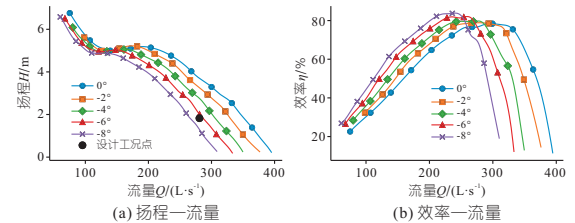


图 6 模型泵装置特性曲线汇总图(试验转速 $1\,185.3\text{ r/min}$)

Fig. 6 Summary of characteristic curves of model pump unit (test speed: $1\,185.3\text{ r/min}$)

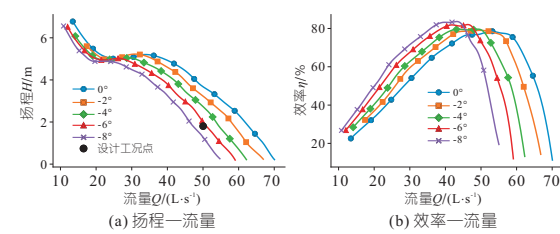


图 7 原型泵装置特性曲线汇总图(原型转速 88.9 r/min)

Fig. 7 Summary of characteristic curves of prototype pump unit (prototype speed 88.9 r/min)

$37.54\text{ m}^3/\text{s}$,效率为 77.87%,最大轴功率 $2\,106.67\text{ kW}$,小于电机额定功率 $2\,300\text{ kW}$ 。综合性能良好,推荐叶片安装角度为 -6° 。

5.2 空化特性

图 8 为原型泵、模型泵装置空化特性曲线。由图 8 可知:①在相同叶片角度下,临界空化余量曲线呈开口向上的极小值形态;②同一净扬程下,临界空化余量随叶片角度增大而增加;③在叶片角度 -6° 时,设计扬程 1.80 m 对应临界空化余量为 6.30 m,最低扬程 0.30 m 对应临界空化余量为 9.17 m,最高扬程 4.10 m 对应临界空化余量为 5.35 m。泵装置安装高程为 -6.70 m ,满足空化性能要求。

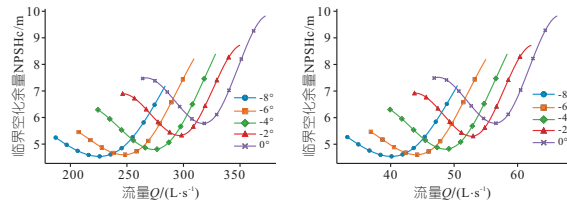


图 8 模型泵与原型泵装置空化特性曲线

Fig. 8 Cavitation characteristics of model and prototype pump units

5.3 模型泵、原型泵对比分析

模型泵与原型泵之间的试验误差可能源于以下方面:①几何尺度差异。模型泵与原型泵之间的尺寸差异可能导致边界层效应和流动不均匀性,特别是在大流量、低扬程工况下,影响试验结果;②试验环境差异。实验室与实际工况环境的不同,可能导致温度、气压等因素的变化;③测量误差。流量、扬程和功率等参数的测量存在一定误差。通过进一步分析这些误差来源,能够更好地确保试验结果的可靠性,并为后续的优化设计提供更精确的数据支持。

6 结论

a. 通过水泵装置 CFD 模拟,J1+C1 或 J2+C2 流道组合采用不同叶片安装角度时泵装置效

率均满足设计要求。结合工程实际需求、考虑后期管理便利性(加大电机井尺寸、优化出口闸门尺寸),优化方案(J2+C2)对进出水流道损失影响较小,且对整体流态、流线基本无影响。

b. 推荐采用 TJ04-ZL-06 水力模型,叶轮直径 4 m,转速 88.9 r/min,安装角度采用 -6° ,可保证泵站在扬程、流量范围内安全、高效地运行。水泵模型装置在扬程 0.3~4.1 m 范围内运行状态平稳,无明显不良噪音和振动。

参考文献:

- [1] 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 L, LU L G, CHEN W, 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 Chinese society of agricultural engineering, 2012, 28(6): 50-56. (in Chinese))
- [2] 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 R S, WU Z, HE Y, 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))
- [3] 刘艺平,袁素勤,卫仁娟,等. 竖井式贯流泵进出水流道优化 CFD 仿真计算[J]. 四川水利, 2024,45(1): 13-19, 31. (LIU Y P, YUAN S Q, WEI R J, et al. CFD simulation calculation of inlet and outlet channel optimization of shaft-well tubular pump[J]. Sichuan water resources, 2024, 45(1): 13-19, 31. (in Chinese))
- [4] LUO C, DU K, QI W J, et al. Investigation on the effect of the shaft transition form on the inflow pattern and hydrodynamic characteristics of the pre-shaft tubular pump device[J]. Frontiers in energy research, 2022, 10: 955492.
- [5] 颜红勤. 梅梁湖泵站竖井贯流泵装置主要参数的确定[J]. 水利水电科技进展, 2005,25(6): 91-94. (YAN H Q. Determination of main parameters for shaft tubular pumping system[J]. Advances in science and technology of water resources, 2005, 25(6): 91-94. (in Chinese))
- [6] 陈松山,葛强,严登丰,等. 低扬程泵站进出水流道匹配与装置特性试验[J]. 中国农村水利水电, 2005(4): 39-41. (CHEN S S, GE Q, YAN D F, et al. Matching of inlet and outlet channels of low-lift pumping station and device characteristics test[J]. China rural water and hydropower, 2005(4): 39-41. (in Chinese))
- [7] 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]. 农业机械学报, 2014,45(3): 83-89. (YANG F, LIU C, TANG F P, et al. Analysis of hydraulic performance of outlet passage based on simulation of steady flow in whole passage of axial-flow pumping system[J]. Transactions of the Chinese society for agricultural machinery, 2014, 45(3): 83-89. (in Chinese))
- [8] 孙晨光,王芳芳,高昂,等. 基于 CFD 的底部上翘角度对直管式出水流道水流性能的影响研究[J]. 中国农村水利水电, 2023(1): 164-170, 175. (SUN C G, WANG F F, GAO A, et al. Research on the influence of the bottom upturn angle on the water flow performance of the straight-pipe outlet channel based on CFD[J]. China rural water and hydropower, 2023(1): 164-170, 175. (in Chinese))
- [9] 徐磊,李非凡,孙世宏,等. 前置竖井贯流泵出水流道设计参数对其水力性能的影响[J]. 灌溉排水学报, 2021,40(11): 73-78, 97. (XU L, LI F F, SUN S H, et al. Influence of outlet conduit parameters on the performance of shaft tubular pump[J]. Journal of irrigation and drainage, 2021, 40(11): 73-78, 97. (in Chinese))
- [10] 黄滨,刘艺涵,卢尚翔,等. 进出口流道对轴流泵性能影响的数值模拟分析[J]. 大电机技术, 2024(3): 63-68. (HUANG B, LIU Y H, LU S X, et al. Numerical simulation analysis on influence of inlet and outlet flow-passage on performance of axial flow pump[J]. Large electric machine and hydraulic turbine, 2024(3): 63-68. (in Chinese))
- [11] 钱忠裕,周晓润,焦海峰,等. 基于 CFD 的竖井贯流泵装置进出水流道及前导叶优化[J]. 中国农村水利水电, 2022(5): 101-106, 112. (QIAN Z Y, ZHOU X R, JIAO H F, et al. Research on the channel and front guide vane of the shaft tubular pump unit based on CFD[J]. China rural water and hydropower, 2022(5): 101-106, 112. (in Chinese))
- [12] 中华人民共和国住房和城乡建设部,国家市场监督管理总局. 泵站设计标准:GB 50265-2022[S]. 北京:中国计划出版社,2022. (Ministry of Housing and Urban-rural Development of the People's Republic of China, General Administration of Quality Supervision, Inspection and Quarantine. Standard for pumping station design: GB 50265-2022[S]. Beijing: China Planning Press, 2022. (in Chinese))