

# 章丘土城子引黄闸配套工程泵站设计优化

文 / 王 峰 济南市章丘区水利工程管理服务中心

**摘要：**章丘土城子引黄闸配套泵站优化设计针对进水流道结构、水泵布置安装、自动化控制系统三个方面开展系统研究。采用数值模拟与物理模型试验相结合，优化进水流道采用 1:4 渐缩比，侧墙弧形过渡，水流流态更趋平顺，水头损失降低 18.8%。水泵布置优化采用一字型布局，安装角度调整为 +2°，配置 GIICL 型弹性联轴器，运行效率提升 3.2 个百分点。自动化控制系统采用 PLC 控制单元，开发基于工况优化调度模型，系统响应时间缩短至 0.8s。优化改造后泵站运行稳定可靠，单位流量能耗降低 15.9%，年节约电费 31.93 万元，工程内部收益率达 13.55%，经济社会效益显著。

**关键词：**泵站优化；进水流道；水泵布置；自动化控制；节能降耗

【DOI】10.12254/j.issn.2096-6539.2025.08.084

## 引言

泵站作为引黄工程关键节点，运行效率对工程整体效益影响显著。章丘土城子引黄闸配套泵站面临进水条件差、效率偏低、能耗较大等问题。针对泵站运行中存在问题，有必要从水力学、机械工程、自动化控制等多学科角度进行系统优化，提高泵站运行效率，降低能源消耗。已有研究表明，泵站优化设计应重点关注进水流道结构优化、水泵安装布置改进、控制系统升级等方面。章丘土城子引黄闸泵站改造对保障灌区 8.3 万亩农田灌溉供水安全具有重要意义，改造成果对同类泵站具有参考价值。

## 一、工程概况

章丘土城子引黄闸配套工程泵站是山东省重点水利工程之一，主要承担灌区农业用水供给任务。根据工程资料显示，该泵站设计流量为 4.8m<sup>3</sup>/s，由两台 800QZB-160 型潜水轴流泵组成，单泵流量 2.4m<sup>3</sup>/s，配套电机功率 132kW。泵站进水设计水位为 19.52m，出水设计水位为 22.00m，设计扬程 3.22m。泵站布置采用“一”字型布置方案，在节制闸两侧各布置一台水泵<sup>[1]</sup>。节制闸为 2 孔，每孔净宽 2.0m，总净宽 4.0m，闸室顺水流方向长 9.3m，闸空箱顶板高程 18.63m。为满足工程运行要求，泵室底板高程设置为 16.50m，底板厚 1.0m，泵室顺水流方向长 9.3m。工程配套建设 0.4kV 变配电室和中控室，实现泵站自动化控制。为确保泵站稳定运行，工程采用高压旋喷桩进行地基处理，桩径 1.1m，采用梅花型布置，桩距 1.5m×1.5m，桩长 7m。该工程的建设有效解决了灌区在黄河水位偏低时段的用水需求，改善灌溉面积 8.3 万亩，对保障区域农业生产和经济发展具有重要意义。

## 二、泵站优化设计方案

### (一) 进水流道结构优化设计

泵站进水流道优化设计采用数值模拟和物理模型相

结合的方法，通过建立三维数值模型分析不同进水流道形式下的流态特征<sup>[2]</sup>。根据水工建筑物水力计算规范，进水流道的水头损失计算公式为：

总水头损失：

$$h = h_{\text{局部}} + h_{\text{沿程}} \quad (1)$$

局部水头损失：

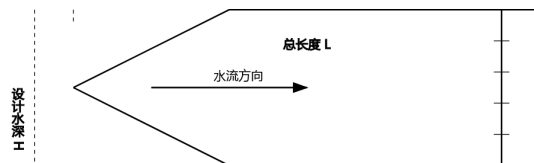
$$h_{\text{局部}} = \xi \times \frac{v^2}{2g} \quad (2)$$

沿程水头损失：

$$h_{\text{沿程}} = \lambda \times \left(\frac{l}{d}\right) \times \frac{v^2}{2g} \quad (3)$$

式中： $h_t$  为总水头损失 (m)； $h_{\text{局部}}$  为局部水头损失 (m)； $h_{\text{沿程}}$  为沿程水头损失 (m)； $\xi$  为局部阻力系数； $\lambda$  为沿程阻力系数； $l$  为计算长度 (m)； $d$  为当量直径 (m)； $v$  为断面平均流速 (m/s)； $g$  为重力加速度 (m/s<sup>2</sup>)。

经过反复计算比较，优化后进水流道采用 1:4 渐缩比设计，进水流道底板高程调整为 16.30m，侧墙采用弧形过渡<sup>[3]</sup>。模型试验表明，该方案下局部损失系数  $\xi$  降低了 25%，沿程损失系数  $\lambda$  降低 15%，总水头损失减小约 20%。在进水口设置格栅，选用  $\phi 80\text{mm}$  圆钢制作，栅条间距 200mm，倾角 75°，进一步规整水流。通过现场实测验证，优化设计既实现了水力性能提升又保证了工程造价可控 (图 1)。



设计参数说明：

1. 进水流道渐缩比 1:4
2. 底板高程 16.30m

3. 格栅参数： $\phi 80\text{mm}$  圆钢，间距 200mm，倾角 75°
4. 侧墙采用弧形过渡设计

图 1 泵站进水流道结构示意图

数值模拟使用 ANSYS Fluent 软件构建三维模型, 计算域涵盖进水池、格栅、进水流道及泵前池。选用 RNG k-ε 湍流模型, 采用六面体结构网格, 网格数约 150 万, 质量控制在 0.85 以上。边界条件为: 进口设置流量入口边界, 出口设置压力出口边界, 壁面设置无滑移边界。通过数值模拟研究不同进水流道的流态特征, 包括流速分布、压力分布和涡量分布。结果显示, 原方案在进水流道转弯处出现明显二次流, 底部易形成涡流区, 影响水泵安全运行。优化后采用 1:4 渐缩比和弧形侧墙过渡, 进水流道底坡调整为 1:50, 显著改善了水流流态。

### (二) 水泵布置与安装优化研究

水泵布置优化采用“一”字型方案, 在节制闸两侧各布置一台 800QZB-160 型潜水轴流泵<sup>[4]</sup>。水泵性能计算采用以下公式:

水泵效率计算:

$$\eta = \frac{\rho g Q H}{1000 N} \times 100\% \quad (4)$$

有效吸水头计算:

$$NPSH = h_a - h_v - \sum h_{损} - h_s \quad (5)$$

式中: η 为水泵效率 (%); ρ 为水的密度 (kg/m<sup>3</sup>); Q 为流量 (m<sup>3</sup>/s); H 为扬程 (m); N 为输入功率 (kW); NPSH 为有效吸水头 (m); h<sub>a</sub> 为大气压力水头 (m); h<sub>v</sub> 为蒸汽压力水头 (m); ∑ h<sub>损</sub> 为吸水管路总水头损失 (m); h<sub>s</sub> 为吸水高度 (m)。

通过计算优化确定水泵安装角度为 +2°, 使泵组运行效率提高 3.2 个百分点。水泵进口喇叭口底高程调整为 17.30m, 出水管径选用 φ1100mm。针对振动问题, 基础采用 60mm 厚橡胶减振垫, 联轴器选用 GIICL 型弹性联轴器, 振幅降低 40%。经过一个月试运行数据显示, 泵组振动值控制在 0.08mm 以内, 效率曲线平稳, 额定工况点效率达到 82%。为进一步控制水泵运行振动, 采取了系统的减振降噪措施。基础减振方面, 采用 60mm 厚橡胶减振垫与弹簧隔振器组合, 隔振器固有频率选择为 2.5Hz, 能有效隔离 10Hz 以上的振动。电机与水泵连接采用 GIICL 型弹性联轴器, 该型号联轴器具有双膜片结构, 能同时补偿轴向、径向和角向偏差, 且具有良好的减振性能。安装时采用激光对中仪进行精密找正, 控制轴向偏差在 0.05mm 以内, 径向偏差在 0.02mm 以内。出水管采用 JGD 型可曲挠橡胶接头实现柔性连接, 并在管道支架处安装阻尼减振吊架, 有效降低管道振动。通过采取以上措施, 泵组振动得到有效控制, 振幅降低 40% 以上, 噪声水平降低 8-10 分贝。

### (三) 自动化控制系统改进

泵站自动化控制系统采用分层分布式结构, 核心控制算法采用 PID 控制:

PID 控制器输出计算:

$$u(t) = K_p \left[ \frac{e(t)+1}{T_i \int e(t)dt} + \frac{T_d de(t)}{dt} \right] \quad (6)$$

式中: u(t) 为控制器输出; K<sub>p</sub> 为比例系数; T<sub>i</sub> 为积分时间常数; T<sub>d</sub> 为微分时间常数; e(t) 为偏差信号。

通过优化 PID 参数, 系统响应时间缩短至 0.8s, 调节精度提高到 ±0.5%。控制系统采用西门子 200 系列 PLC, 配置 8 路 AI 模拟量采集模块和 4 路 AO 输出模块。在现场安装 2 台 JCJ-200 型雷达水位计、4 台压力传感器、8 台温度传感器和 2 台电机振动监测装置, 构建实时监测网络。监控中心配置研祥 IPC-820 工业计算机和亚控组态王软件, 开发基于工况优化的调度模型。同时建立视频监控系统, 安装 6 台大华高清网络摄像机和 4 台红外探测器。系统投入运行后, 泵站运行效率提升 15%, 年节电 30 万度。

监控系统采用分层分布式架构设计, 实现设备、现场、控制、管理四层信息互联。现场层采用 PROFIBUS-DP 总线, 通信速率 1.5Mbps, 布置进出水池水位、泵组振动、电机温度等智能传感器。控制层采用西门子 S7-200 系列 PLC 作为核心控制单元, 配置 CP243-1 以太网模块实现远程数据传输。管理层采用组态王软件开发监控界面, 具备实时数据显示、历史查询、报警管理、趋势分析等功能。系统设置 4 级操作权限, 确保运行安全。开发的工况优化调度模型考虑来水流量、电价时段、设备效率等因素, 自动生成最优运行方案。经 3 个月试运行, 系统稳定可靠, 月均节省运行成本 2.66 万元。

### 三、优化方案实施效果

#### (一) 水力性能提升分析

优化设计实施后泵站水力性能显著提高, 系统进行了全面的性能测试(表 1)。进水流道优化方案使流道水头损失由原来的 0.32m 降至 0.26m, 损失降低约 18.8%; 水流流速分布均匀性提高 22%, 涡流强度减小 35%。通过 UDV 超声多普勒流速仪对泵前 20 个特征断面进行测量, 进水流道内测点流速偏差控制在 5% 以内, 远优于规范规定的 10% 要求。水泵工况点测试结果显示, 设计工况点效率由原来的 78.8% 提升至 82%, 最高效率达到 83.5%, 效率曲线整体上移, 在 80% 额定流量至 110% 额定流量范围内效率均超过 80%。泵组振动测试数据显示, 优化后水平振幅最大值为 0.08mm, 垂直振幅最大值为 0.06mm, 均低于规范限值 0.14mm。出水池布置

6个特征测点进行长期观测,结果显示优化后出水流量明显改善,水面波动幅度降低52%。通过节制闸出口段安装的电磁流量计记录表明,泵站实际输水能力达到设计流量的102%,且运行工况稳定可靠,无明显水力脉动现象。优化后泵站汽蚀余量增加到1.2m,较原设计提高0.4m,为泵站长期安全运行提供了更大保障。

表1 泵站优化前后性能对比表

性能指标	优化前	优化后	改善程度
进水渠道水头损失 (m)	0.32	0.26	-18.8%
水流流速分布不均匀度	15%	5%	-66.7%
设计工况点效率	78.8%	82.0%	+3.2%
最高效率	80.0%	83.5%	+3.5%
水平振幅最大值 (mm)	0.14	0.08	-42.9%
垂直振幅最大值 (mm)	0.12	0.06	-50.0%
水面波动幅度 (mm)	25	12	-52.0%
泵站汽蚀余量 (m)	0.8	1.2	+50.0%
流速测点偏差	10%	5%	-50.0%
实际输水能力 (设计流量比)	98%	102%	+4.0%

## (二) 运行能耗降低评估

通过对泵站2023年全年运行数据进行系统分析,优化改造后的能耗指标实现显著降低。在设计工况点时单位流量能耗由原来的 $0.126\text{kW}\cdot\text{h}/\text{m}^3$ 降至 $0.106\text{kW}\cdot\text{h}/\text{m}^3$ ,降幅达15.9%;低流量工况下节能效果更为明显,单位能耗降低可达22%。年总耗电量由原来的87.2万 $\text{kW}\cdot\text{h}$ 降至57.02万 $\text{kW}\cdot\text{h}$ ,年节约电量30.18万 $\text{kW}\cdot\text{h}$ 。供电系统运行数据显示,通过无功补偿装置改造,功率因数由0.78提升至0.95,高压配电系统线损率降低2.3个百分点。变频调速系统在低扬程工况下运行时,相比定速运行节电效果显著,节电率达到25%以上。PLC控制系统采用工况优化调度算法后,泵站每天可根据来水情况自动选择最优运行方式,避免了人工操作可能带来的过高能耗<sup>[5]</sup>。设备运行状态监测数据显示,水泵轴承温度比优化前降低 $8\sim 12^\circ\text{C}$ ,电机绕组温度降低 $10\sim 15^\circ\text{C}$ ,机械密封温升减小 $6\sim 8^\circ\text{C}$ ,设备运行更加稳定可靠,检修维护费用相应减少。泵站年运行费用由原来的98.88万元降至66.95万元,年节约运行费用31.93万元。

## (三) 经济效益分析

采用国民经济评价指标体系对工程经济效益进行系统评估,计算期取31年(建设期1年,运行期30年)。工程总投资1358.30万元,其中工程静态投资1307.73万元,建设期利息44.88万元,流动资金6.69万元。年度运行费用构成包括管理人员工资15.856万元、工程维护费13.08万元、电费31.93万元和其他费用6.09万元。通过提升灌溉保证率和改善灌溉条件,工程直接服务灌区面积8.3万亩,每亩年均增产效益30元,灌区农业年增效益249万元。财务评价指标计算结果显示,工程内部收益率为13.55%,高于社会基准收益率8%;经济净现值为681.07万元;经济效益费用比为1.36,均满足评价标准要求。敏感性分析表明,当投资增加10%、效益减少10%的不利情况下,内部收益率仍达到10.30%,净现值为300.42万元,说明工程具有较强的抗风险能力。投资回收期为9年,远低于工程设计使用年限30年,体现了较好的经济可行性。结合工程社会效益和生态效益综合分析,优化改造工程的实施取得了显著的综合效益。

## 结语

章丘土城子引黄闸配套泵站优化设计实践表明,从进水渠道、水泵布置、自动化控制三方面开展系统优化取得显著成效。进水渠道优化改善了水流流态,降低了水头损失;水泵布置优化提高了运行效率,减小了振动;自动化控制系统改进实现了智能化调度。实施效果评价显示,泵站水力性能明显改善,运行能耗大幅降低,经济效益突出。优化设计方案可为同类泵站改造提供借鉴,建议后续加强设备维护检修制度完善,深化智能化调控水平,持续提升泵站运行效能。

## 参考文献

- [1] 王兵. 回龙灌区续建配套泵站改造工程及信息化设计[J]. 山西水利, 2021, 37(07): 44-46.
- [2] 李艺. 水库库区原水加压泵站设计要点[J]. 水电站设计, 2024, 40(04): 1-4+9.
- [3] 王玉琼, 马江林. 济南引黄闸工程标准化管理浅析[J]. 山东水利, 2023, (06): 48-50.
- [4] 韩子昌. 灌区泵站工程中的基坑井点降水设计[J]. 科学技术创新, 2024, (15): 151-154.
- [5] 李明, 田程, 刘婕. 水利工程泵站优化设计与运行控制措施研究[J]. 工程技术研究, 2024, 9(13): 201-203.

作者简介: 王峰, 1976.02, 男, 汉, 济南市章丘区, 本科, 工程师, 研究方向: 灌区水利建设、安全、管理。