水泵站智能化控制与能效优化实践

李 明[1], 彭 波[2], 杜佳乐[2], 丁 倩[2], 刘 靖[1]

(1. 包钢集团节能环保科技产业责任公司, 内蒙古 包头 014010;
2. 内蒙古包钢钢联股份有限公司轨梁轧钢厂, 内蒙古 包头 014010)

摘 要: 循环水系统作为轧线冷却与设备保护的核心环节, 其泵站运行效率直接影响轧制质量与能源消耗。文章以包钢长材厂无人泵站改造项目为研究对象, 系统阐述通过集成变频调速控制、动态压力闭环调节、智能语音预警及远程监控等技术构建智慧泵站的全流程实践。项目创新性地采用稀土永磁同步电机变频控制替代传统异步电机工频驱动模式, 结合基于轧制需求的自适应压力调节算法, 实现了泵组状态的远程集中控制与水平衡智能管理。改造后年节约电费 102.53 万元, 管网压力波动幅度压缩至 ±0.08 MPa, 投资回收期约 2.18 年。

关键词: 变频永磁电机; 智慧运维; 压力闭环; 水平衡管理
中图分类号: TP212.6 **文献标识码**: B **文章编号**: 1009 - 5438(2025)06 - 0005 - 06

Practices on Intelligent Control and Energy Efficiency Optimization of Water Pumping Station

Li Ming[1], *Peng Bo*[2], *Du Jiale*[2], *Ding Qian*[2], *Liu Jing*[1]

(1. *Baotou Steel Group Energy Saving and Environmental Protection Technology Industry Co., Ltd., Baotou* 014010, *Inner Mongolia Autonomous Region, China*;
2. *Rail and Beam Rolling Plant of Inner Mongolia Baotou Steel Union Co., Ltd., Baotou* 014010, *Inner Mongolia Autonomous Region, China*)

Abstract: The operating efficiency of pump station for circulating water system (the core link of cooling for rolling production line and equipment protection) directly affects rolling quality and energy consumption. In the paper, it is systematically elaborated the full process practices of establishing intelligent pump station through such technologies as integrated variable frequency speed control, closed - loop regulation of dynamic pressure, intelligent voice warning and long - distance monitoring by taking the transformation project of unmanned pump station in Long Products Plant of Baotou Steel as the object of study. The long - distance centralized control for status of pumping set and intelligent management of water balance are realized through innovatively replacing traditional power frequency drive pattern of asynchronous machine with frequency conversion control of rare earth permanent magnet synchronous motor combining with adaptive pressure regulation algorithm based on the rolling requirements in project. As a result, the electricity cost is saved by CNY 1.025 3 million Yuan annually, fluctuation range of pipe network pressure is reduced to ±0.08 MPa and investment recovery period is about 2.18 years.

Key words: variable - frequency permanent magnet motor; intelligent operation and maintenance; closed loop of pressure; water balance management

收稿日期: 2025 - 07 - 22
作者简介: 李 明(1966 -), 男, 内蒙古包头市人, 正高级工程师, 现从事电气自动化技术管理工作。

在“双碳”目标与智能制造双重驱动下,钢铁行业正加速推进传统生产模式的数字化、智能化转型。在全球制造业智能化转型的浪潮中,钢铁行业作为典型的高耗能产业,正面临着节能减排与效率提升的双重压力。作为包钢长材厂的核心动力单元,循环水系统泵站的运行效率直接影响轧制工序的稳定性和生产成本。目前该厂泵站仍采用三相交流异步电机工频驱动模式,面临几大突出问题:其一,异步电机恒速运行模式导致低负荷工况下,能效显著下降,电能浪费严重;其二,人工调节阀门响应滞后,管网压力波动频繁,影响冷却水供应精度。此外,传统运行维护模式依赖人工值守,不仅使成本提高,而且存在安全隐患。这种传统控制模式已经难以适应智能制造对精细化管控的需求,更无法满足“双碳”战略下的能效考核要求。

1 项目概况

长材厂于2024年启动泵站智能化改造工程,旨在通过设备升级与系统重构,实现四大核心目标:其一,通过引入稀土永磁同步电机变频控制替代传统异步电机工频驱动模式,在满足轧制工艺动态需求的前提下,显著提升系统能效水平;其二,构建无人值守的远程监控体系,依托物联网技术与人机交互界面WINCC实现泵站参数的可视化与远程操控,降低人工成本与操作风险;其三,开发动态压力闭环控制算法,融合轧制节奏预测与管网压力反馈功能,实现冷却水流量的精准匹配与快速调节;其四,建立智能预警与自诊断机制,基于设备状态监测,实现故障预判、分级报警。项目团队以“数据驱动、智能协同”为核心理念,通过多技术融合创新,成功打造了集节能降耗、智慧运维于一体的新一代泵站系统。本文系统地梳理该项目的技术路径与实践经验,以期为行业提供可借鉴的改造范例。

2 改造需求

长材厂循环水系统的稳定运行是保障轧制工艺连续性的关键。传统泵站普遍采用三相交流异步电机工频驱动模式,其固有缺陷在近年来的高负荷生产场景中愈发凸显。首先,在异步电机恒速运行机制下,泵组输出功率无法随轧制需求动态调整,导致低负荷工况时电能浪费严重。实测数据表明,当轧线仅需50%冷却水流量时,电机仍以额定功率的80%运行,造成年冗余耗电超200万kWh。其次,人工调节阀门开度的滞后性,导致管网压力波动幅度达±0.5 MPa。频繁的压力波动不仅加速阀门密封件磨损(年更换费用超15万元),还易引发水锤效应,威胁管道安全。此外,三班倒的人工值守模式不仅提高了运维成本,而且会因人员技能差异导致故障处理效率参差不齐,2024年发生多次非计划停机,平均影响生产时长45分钟。

企业亟需通过智能化改造实现三个维度的突破:①在控制层面,需建立压力-流量-转速的协同调节机制,消除人工干预滞后性;②在能效层面,需引入动态负载匹配技术,提升电能与水资源利用效率;③在运维层面,需构建远程监控与智能预警体系,实现从“被动抢修”到“主动维护”的转型。这些需求亟待泵站系统的全面智能化升级。

3 技术方案设计与实现

3.1 系统总体架构

改造方案采用分层分布式系统总体架构图(详见图1),形成“感知-决策-执行”的闭环控制链条[1]。在感知层,通过安装高精度管道压力传感器及温度传感器,构建覆盖泵组进出口、主管网分支的36个数据采集节点,实时监测压力、温度等关键参数。控制层采用S7-1500系列PLC作为核心控制器,其10 ms级的高速处理能力确保能够对6台矢量控制变频器的精准调度。应用层则基于WinCC平台开发可视化监控界面,集成设备状态显示、报警管理、能效分析等功能。

3.2 变频调速与能效优化

针对三相交流异步电机能效低的问题,项目团队创新性地采用稀土永磁同步电机搭配高性能变频器的技术方案。同步电机凭借其转子永磁体结构,可在宽转速范围内保持高效率运行,实测额定效率达96.5%,较原三相交流异步电机提升12个百分点。变频器采用矢量控制技术,通过实时计算电机转矩电流与励磁电流分量,实现转速的精确调节。具体控制逻辑包含两个关键环节:

(1)负载预测:基于历史数据建立轧制计划与冷却水需求的映射模型,提前5分钟生成转速设定值;

(2)动态调频:根据管网压力反馈动态调整输出频率,确保电机始终运行于高效区间。

该系统的节能机理在于打破“恒压供水”的传统思维,转而采用“按需供能”的动态调节模式。例如,在轧制间隙的低负荷时段,系统自动将泵的运行

速度从 1 500 rpm 降至 750 rpm，节电效果可以达到 16%。

3.3　压力闭环控制与水平衡管理

为实现管网压力的精准控制，项目开发了前馈－反馈复合控制算法。前馈环节根据轧制品种、速度等工艺参数预测瞬时需水量，快速设定初始泵速与阀门开度。在反馈控制环节，系统通过安装在管网关键节点的压力传感器实时采集实际压力值，并与目标设定值进行动态比较，生成压力偏差信号。基于此偏差信号，采用自适应 PID 控制算法动态调整泵组转速与调节阀开度：当检测到实际压力低于目标值时，算法自动提高变频器输出频率以增加泵速，同时按比例开大调节阀；反之，当压力超出设定范围时，则降低泵的运行速度并关小阀门，形成压力—转速—阀位的三重闭环调节。其控制策略将压力波动幅度从改造前的 ±0.5 MPa 显著减小至 ±0.08 MPa，且响应时间缩短至 0.7 s 以内。为进一步增强系统鲁棒性，算法内置模糊逻辑补偿模块，可根据压力变化速率智能调整 PID 参数，有效抑制轧制负荷突变引发的超调振荡，确保水压调节过程平稳无冲击。

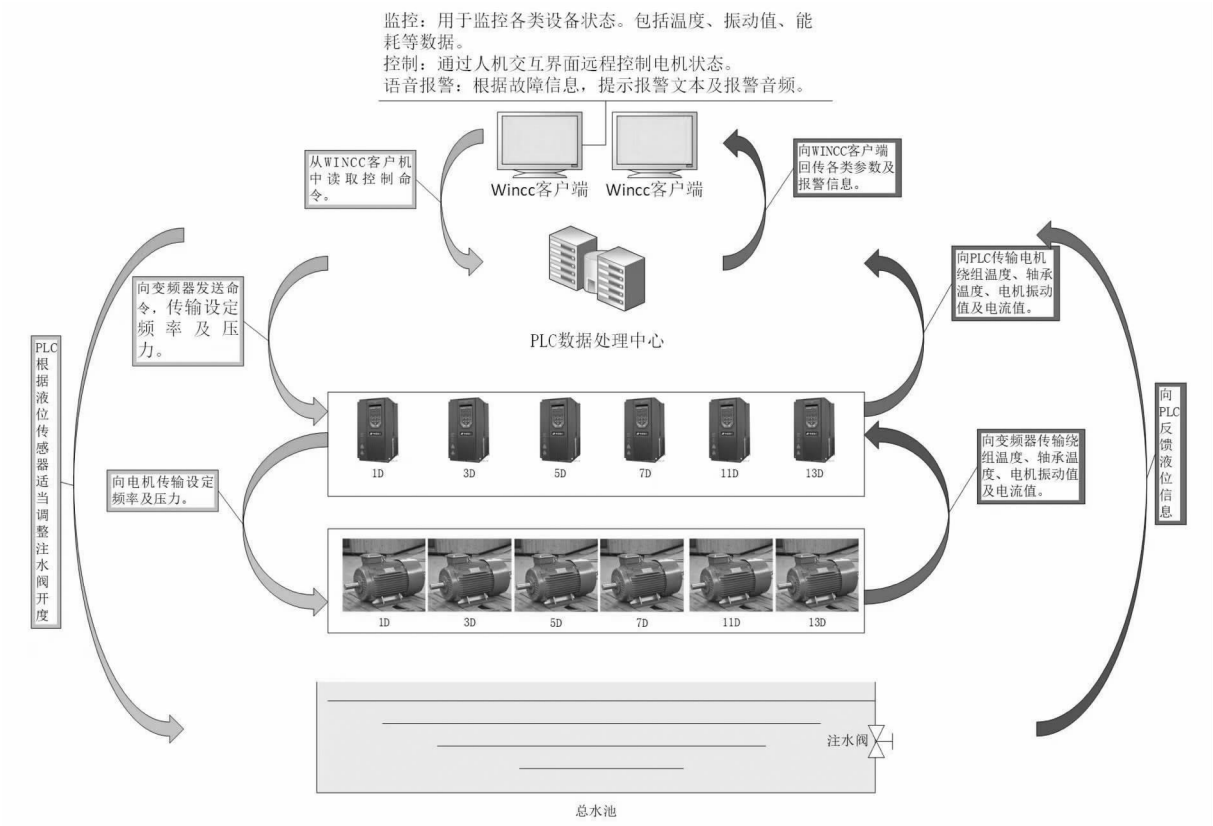


图 1　系统总体架构图

3.4　智慧运维平台构建

该远程监控系统以 WinCC 上位机为控制核心，构建了参数设定、设备启停与闭环调节联动的全流程控制架构[2]。操作界面设有独立压力控制模块，操作人员选定目标泵编号后，输入管网目标压力值，系统自动将该参数关联至对应泵组控制序列。启动指令下达后，PLC 同步执行多环节协同操作。通过变频器以安全模式渐进启动电机，基于实时压力反馈动态调整运行频率；同时联动电动调节阀按工艺模型校准开度，直至管网压力稳定至目标范围。

泵组的启动停止功能采用智能负载分配策略。在设备管理界面中，操作人员可灵活选取需启用的泵组编号，系统依据选用泵的数量及管网工况自动优化运行模式。单泵运行时，直接闭环控制目标压力；多泵并联时，主控单元通过动态均衡算法协调各泵出力权重，并基于流量模型同步调节阀门开度。

运行过程中,系统持续迭代优化调节参数,确保不同生产条件下的压力过渡平稳。

智能预警系统构建了“趋势预判 - 特征识别 - 分级响应”的预警机制,重点强化事故预防能力。当监测到某台泵轴承温度异常攀升速率超过安全阈值,或振动频谱中特定频率分量持续增强时,系统即刻启动预报警流程:WinCC 界面弹出橙色预警框,同时触发语音播报“泵振动特征异常,疑似地脚螺栓预紧力下降,建议停机检查”。该联动机制大幅度地缩短了应急切换时间,有效避免了生产中断风险[3]。

系统投运后,通过"选泵 - 设压 - 自整定"的标准化操作流程,实现了复杂供水工况的快速部署。运行数据表明,该系统显著提升了多泵协同控制精度与工艺稳定性,充分验证了自动化控制架构在工业供水场景中的技术优势。

4 电动机铭牌参数表

4.1 三相异步电机

改造前,泵站系统共配置6台三相异步电机,其铭牌参数是评估系统原始能耗水平和改造潜力的基础。表1详细列出了各台电机的具体参数。

表1 改造前三相异步电机铭牌参数表

泵组	型号	额定功率/kW	额定电压/V	额定电流/A	生产厂家
1#	YRNT450 - 61 - 6	560	6 000	63.7	长沙电机厂
2#	Y355 - 48 - 4	315	6 000	36.8	长沙电机厂
3#	Y400 - 40 - 4	355	6 000	40.7	长沙电机厂
4#	YKK400 - 40 - 6	315	6 000	39.3	佳木斯电机厂
5#	Y355 - 35 - 4	220	6 000	26.1	长沙电机厂
6#	Y355 - 35 - 4	280	6 000	32.7	内蒙古电机厂

原有电机均为6 000 V高压电机,驱动方式为工频直驱,无法根据负载变化调节转速。这种恒速运行模式,在轧制负荷波动时,只能通过调节出口阀门开度来控制流量,导致了显著的节流损失和能量浪费,这也是本次智能化改造旨在解决的核心问题之一。

4.2 永磁同步电机

为实现节能降耗与精准控制的双重目标,本次改造采用高效节能的稀土永磁同步电机,全面替代了原有的异步电机。改造后各电机铭牌参数如表2所示。

表2 改造后稀土永磁同步电机参数表

泵组	型号	额定功率/kW	额定电压/V	额定电流/A	cosφ	额定效率/%
1#	EP - 560 - 1000 - 450 - 380	560	380	894.0	0.97	98.1
2#	EP - 315 - 1500 - 355 - 380	315	380	502.5	0.97	98.2
3#	EP - 355 - 1500 - 400 - 380	355	380	591.4	0.96	95.0
4#	EP - 315 - 1000 - 355 - 380	315	380	524.8	0.96	95.0
5#	EP - 220 - 1500 - 355 - 380	220	380	524.8	0.96	95.0
6#	EP - 280 - 1500 - 355 - 380	280	380	447.1	0.96	98.1

5 数据分析与实施成效

5.1 试验条件

为准确量化节能效果,我们选取了一个典型的生产工况作为能耗对比的基准。该基准下的关键运行参数如表3所示,它为后续能耗计算提供了统一的分析前提条件。

表 3　典型工况下系统运行参数

泵组编号	运行流量 /($m^3 \cdot h^{-1}$)	出口阀门开度 /(°)	总管压力 /MPa
1#	2 100	90°	0.401
2#	1 100	90°	0.411
3#	984	90°	0.675
4#	2 000	90°	0.124
5#	1 837	90°	0.285
6#	1 047	90°	0.306

基于表 3 设定的稳定工况,我们分别采集了改造前后的电气数据。接下来的分析将以此为据,精确计算并对比两种方案的实际能耗差异。

5.2　耗电量计算

三相电动机的有功功率计算公式为:

$$P_{有} = \sqrt{3}UI\cos\varphi \tag{1}$$

式中:$P_{有}$ 为有功功率,kW;$\sqrt{3}$ 为三相电路相位系数,约 1.732;U 为电机的线电压,V;I 为电动机的实际运行线电流,A;$\cos\varphi$ 为电动机功率因数(异步电机空载时约 0.2 ~ 0.4,满载时约 0.7 ~ 0.9)。

三相电动机年耗电量计算公式为:

$$W_{年} = P_{有} \cdot t_{年} \tag{2}$$

式中:$W_{年}$ 为电机年耗电量,kWh;t 年为电机一年实际运行时间,h。耗电量(电能)等于电机有功功率 $P_{有}$ 与实际运行时间 t 的乘积,需结合三相电路特性、功率因数等关键参数计算。

三相异步电机电费的核心计算公式为:

$$E = W_{年} \cdot \rho \tag{3}$$

式中:E 为电费,元;ρ 为用电单价,元 /kWh。需按实际时段单价计算电费。全年运行按照 7 000 小时,电价 0.5 元 /kWh 计算。

5.2.1　改造前的三相异步电机

以 1# 泵为例,根据公式(1)、(2) 和(3) 计算可得:

有功功率:$P_{有} = \sqrt{3}UI\cos\varphi = 1.732 \times 6 \times 58 \times 0.88 \approx 530.41$(kW)

年耗电量:$W_{年} = P_{有} \cdot t_{年} = 530.41 \times 7\,000 \approx 371.29$(万 kWh)

年电费:$E = W_{年} \cdot \rho = 371.29 \times 0.5 \approx 185.65$(万元)

改造前三相异步电机实际运行数据如表 4 所示。

表 4　改造前的三相异步电动机实际运行数据表

泵组	运行电流 /A	运行电压 /V	$\cos\varphi$	有功功率 /kW	年耗电量 /万 kWh	年电费总额 /万元
1#	58	6 000	0.88	530.41	371.29	185.65
2#	32	6 000	0.87	289.31	202.52	101.26
3#	38	6 000	0.87	343.56	240.49	120.25
4#	35	6 000	0.86	312.80	218.96	109.48
5#	20	6 000	0.88	182.90	128.03	64.02
6#	25	6 000	0.88	228.62	160.03	80.02
合计				1 887.60	1 321.32	660.68

5.2.2　改造后的稀土永磁同步电机

以 1#泵为例,根据公式(1)、(2)和(3)计算可得:

有功功率:$P_{有} = \sqrt{3}UI\cos\varphi = 1.732 \times 0.38 \times 726 \times 0.97 \approx 463.49$(kW)

年耗电量:$W_{年} = P_{有} \cdot t_{年} = 463.49 \times 7\,000 \approx 324.44$(万 kWh)

年电费:$E = W_{年} \cdot \rho = 324.44 \times 0.5 = 162.22$(万元)

改造后稀土永磁同步电动机电动机实际运行数据如表 5 所示。

表5 改造后稀土永磁同步电动机实际运行数据表

泵组	运行电流/A	运行电压/V	cosφ	有功功率/kW	年耗电量/万kWh	年电费总额/万元
1#	726	380	0.97	463.49	324.44	162.22
2#	400	380	0.97	255.37	178.76	89.38
3#	538.3	380	0.94	333.03	233.12	116.56
4#	284.7	380	0.94	176.14	123.30	61.65
5#	215.8	380	0.94	133.51	93.46	46.73
6#	369	380	0.96	233.15	163.21	81.61
合计				1 594.69	1 116.29	558.15

5.3 年节电率和投资回收期

5.3.1 年节电率

年节约电量=改造前电量总额-改造后电量总额=1 321.32-1 116.29=205.03(万kWh)

年节约电费=改造前电费总额-改造后电费总额660.68-558.15=102.53(万元)

$$\text{年节电率}=\frac{\text{改造前电量总额}-\text{改造后电量总额}}{\text{改造前电量总额}}=\frac{1\,887.60-1\,594.69}{1\,887.60}=15.52\%$$

5.3.2 投资回收期

改造总投资约为398万元(含设备采购费310万元、施工费88万元);改造后年节约总成本182.53万元(年节约电费102.53万元、间接创效80万元)。

投资回收期=总投资额÷年节约总成本=398万元÷182.53万元/年≈2.18年;

项目投入使用后,通过对连续12个月的运行数据进行跟踪分析,验证了改造方案取得显著经济效益。在能效方面,年耗电量由1 887.60万kWh降至1 594.69万kWh,综合节电率15.52%,年节约电费102.53万元;水资源利用率从68%提升至83%,节水率22.3%,年节约水费26万元。运行维护成本方面,系统响应速度的质变带来隐性效益:轧制品种切换时的调节时间从8 min缩短至40 s,冷却水人工干预频次从日均32次降至2次,年节约人力成本18万元;故障导致的非计划停机损失从35万元压缩至5万元。尤为重要的是,流量控制精度提升至±3%,轧辊使用寿命延长10%,年间接创效超80万元。

6 结论

包钢长材厂无人智能泵站改造项目的成功实施,标志着钢铁行业传统动力单元向智能化运维的跨越式转型。通过变频控制、压力闭环、智能预警等技术的深度融合,不仅实现了可量化的节能降耗效益,更重构了泵站系统的运行模式——从依赖人工经验的被动调节,转变为数据驱动的自主决策。实践验证了智能化技术在重工业场景中的普适性:当轧制需求波动时,系统能快速完成调整泵速与阀门联动;当设备出现异常状况时,智能预警机制可提前数十分钟发出风险提示。这种"感知-分析-响应"的闭环能力,正是智能制造体系的核心特征。

本项目的行业价值体现在三个维度:其一,技术方案的可复制性,通过模块化设计支持快速部署,同类泵站改造周期可控制在3个月内;其二,经济效益的显著性,平均投资回收期仅2.18年,为中小企业提供了低风险技术改造路径;其三,管理模式的革新性,推动运维团队从"操作员"向"分析师"角色转型,为行业人才结构升级提供实践样本。未来,随着数字孪生技术与边缘计算技术的成熟,泵站系统可进一步实现虚拟调试、参数自优化等高级功能,推动钢铁行业向"黑灯工厂"目标持续迈进。

参考文献

[1] 王磊.稀土永磁同步电机在钢铁厂循环水泵站的节能应用[J].电气传动,2024,54(2):51-55.

[2] 田彪.无人值守智能泵站系统设计探讨[J].设备管理与维修,2022(7):23-25.

[3] 胡锡春,李小凯.基于PLC的无人泵站全自动控制系统[J].自动化博览,2015(6):86-88.