钢铁企业厂区水电一体化智能管控系统的设计与降耗实践

王松伟[1] 王松[1] 赵凌宇[2]
1.河北鑫达钢铁集团有限公司，中国·河北 迁安 064400
2.河北钢谷物联科技股份有限公司，中国·河北 迁安 064400

摘要：本文设计了一套钢铁企业水电一体化智能管控系统，将水系统蓄能调节能力转化为电力需求侧响应资源。系统采用感知—建模—协同三层架构：感知层同步采集水、电数据并对齐时间；建模层构建泵组能耗和蓄能耦合模型；协同层开发分时电价下的水电协同调度策略，以泵组启停和变频转速为决策变量，以综合用能成本最小化为目标。应用后，月度峰段用电占比由 27.4% 降至 23.9%，谷段由 41.2% 升至 45.6%。该方案为钢铁企业水电耦合协同降耗提供了可复制技术方案与实践参考。

关键词：钢铁企业；水电一体化；智能管控系统；设计；降耗；实践

Design and Energy-Saving Practice of an Integrated Water and Electricity Intelligent Control System for Steel Plant Areas

Wang Songwei[1], Wang Song[1], Zhao Lingyu[2]
1. Hebei Xinda Steel Group Co., Ltd., China Hebei Qian'an 064400
2. Hebei Steel Valley IoT Technology Co., Ltd., China Hebei Qian'an 064400

Abstract: This paper designs an integrated water and electricity intelligent control system for steel companies, turning the water system's energy storage and regulation capacity into a power demand-side response resource. The system uses a three-layer architecture: sensing—modeling—coordination. The sensing layer collects water and electricity data synchronously and aligns the timing; the modeling layer builds a coupled model of pump group energy consumption and energy storage; the coordination layer develops a water-electricity coordinated scheduling strategy under time-of-use electricity prices, using pump start-stop and variable frequency speed as decision variables, aiming to minimize overall energy costs. After implementation, the proportion of electricity used during peak periods dropped from 27.4% to 23.9%, while during off-peak periods it rose from 41.2% to 45.6%. This solution provides a replicable technical approach and practical reference for water-electricity coordinated energy saving in steel companies.

Keywords: Steel companies; Integrated water and electricity; Intelligent control system; Design; Energy saving; Practice

0 引言

钢铁企业能源密集，电力和新水是厂区成本占比最高的两种介质，但长期分属不同系统独立管控。水系统的清水池、高位水箱和管网具有蓄能调节能力，泵组启停和变频可等效为可调负荷。笔者作为某钢铁企业能源管理人员，参与设计并实践了水电一体化智能管控系统。该厂区日新水取用量约 2.4 万 m^3，配置 6 台变频泵组（4 用 2 备，单台 280kW），清水池 8000m^3，高位水箱 1500m^3，执行峰谷电价。部署前泵站恒压供水、人工启停，未利用蓄能参与电力成本优化。本文核心论点是：水系统不仅是用水单元，也是可调节电力负荷；将其纳入电力需求侧管理，能在不增加大规模硬件投资下释放协同节能空间。创新点包括：提出让水系统运行节奏服从电系统成本节奏的设计定位；构建感知—建模—协同三层架构；开发分时电价下水电协同调度策略；通过现场应用验证降耗效果，形成可复制经验。

1 水电一体化智能管控系统的整体设计

1.1 设计定位

核心是让水系统运行节奏服从电系统成本节奏。钢企执行分时电价，峰平谷差价常超 2 倍。泵组具灵活性，清

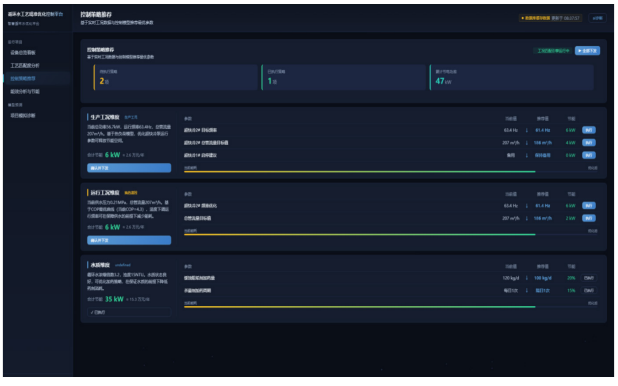
水池、高位水箱和管网可储数小时水量，可在谷电集中运行、峰电少开或停开，对供水质量影响小，却直接降低电费。传统考核可靠性和吨水单耗，电费不由水系统承担，缺乏避峰就谷动力。系统将外部性内部化，把运行方式与电费直接关联，自动生成兼顾供水安全与经济性的调度方案并下发。操作人员由执行者转为监视者，算法承担优化决策。

1.2 三层架构

采用感知—建模—协同架构。感知层部署于泵站、配电室和管网节点。流量计计量分区供回水；电能质量仪表采集泵组和变压器电流、电压、功率因数；液位计、压力变送器监测清水池和管网压力。边缘控制器基于工业 ARM 平台，完成采样、滤波、时间对齐，以统一时钟封装数据。电力 1 秒级、水 5 秒级，本地对齐后每 10 秒上传，兼顾精度与负载。建模层含两模型：泵组能耗模型，基于相似定律描述电功率与流量、扬程、转速关系，流量、扬程、轴功率比分别与转速比一次方、平方、三次方成正比，参数由出厂和实测标定；用电负荷—水系统蓄能耦合模型，将清水池、高位水箱和管网压力波动范围量化为蓄能容量，折算电费节约潜力。协同层是决策核心，基于分时电价调度。输入次日电价、用水预测、清水池液位、泵组状态与效率；输出各泵启停和变频转速。以日综合成本最小为目标，约束供水压力下限、液位安全、启停次数。

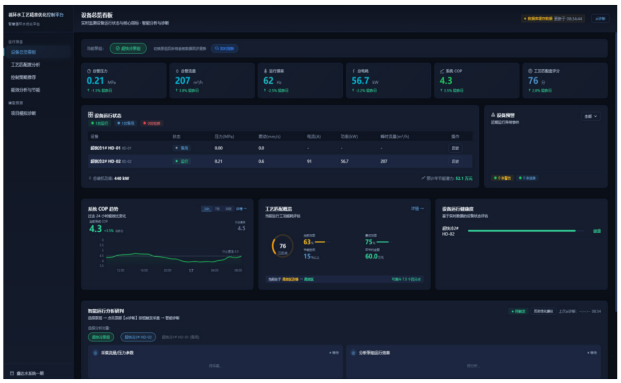
1.3 数据流与控制流

仪表信号经边缘控制器采样滤波对齐后上传建模层；建模层清洗补全、特征提取，计算泵组功率、蓄能容量和电费传导系数；协同层结合状态、电价和 MES 用水预测，求解 24 小时泵组启停与转速方案，下发泵站 PLC 和变频器。执行后实际流量、压力、功率再经感知层反馈，形成闭环。控制流经安全校验下发控制柜，控制启停和频率。通信中断或平台离线时，本地自动切换恒压供水。人机界面支持查看和必要时手动调整。



1.4 与现有系统衔接

系统与能源管控、生产计划和水处理 PLC 衔接。与能源管控通过 OPC UA 共享电力负荷、电量、电价；与生产计划通过数据库视图获取 24—72 小时排产，用于用水预测；与水处理 PLC 通过工业以太网下发指令并接收状态。系统不替代 PLC，而在上层增加协同优化层，形成 PLC 保底、平台优化格局。



2 感知层设计与部署

2.1 计量点布置

按分级计量、分区管控、关键节点全覆盖布置。泵站出口设总流量计和总电能表；供水干管分支设分区流量计，计量烧结、炼铁、炼钢、轧钢等工序；清水池和高位水箱设液位计；管网关键节点设压力变送器；泵组配电回路设电能质量仪表。全厂共部署流量计 18 台、电能质量仪表 12 台、液位计 6 台、压力变送器 22 台，覆盖取水、蓄水、供水、回用环节。

2.2 仪表选型与采样

流量计用电磁式和超声波式：电磁式用于清水和循环水，0.5 级、IP68；超声波外夹式用于大口径管道，1.0 级。电能质量仪表为工业多功能型，0.5 级，带 RS485 和以太网。清水池用雷达液位计，高位水箱用投入式液位计，0.2 级。压力变送器为扩散硅式，0.5 级，4—20mA。采样周期：电力 1 秒，液位和流量 5 秒，压力 2 秒；边缘控制器本地对齐后每 10 秒打包上传。电量累计每小时冻结核对。

2.3 边缘控制器

基于工业级 ARM 平台，具备多路模拟量、数字量输入输出及多种通信接口，运行嵌入式 Linux。完成采集、滤波、时间对齐和协议转换，支持 Modbus RTU、Modbus TCP、OPC UA。滤波采用滑动平均与中值滤波，抑制电磁干扰；以统一时钟对齐数据，封装为 JSON 经 MQTT 上传。具备 72 小时本地缓存，通信恢复自动补传，支持看门狗和远程重启。

2.4 通信网络

采用工业以太网与光纤环网结合。泵站、配电室、清水池等关键节点经光纤环网接入核心交换机，环网冗余保证单点中断自动切换。管网远端节点用工业无线 AP，支持 802.11ac、5.8GHz。仪表与控制器间用 RS485 或 4—20mA，控制器与平台间用 MQTT over TLS 加密传输。

2.5 数据校验与补全

采用量程、变化率、冗余三重校验。量程判断是否超限，变化率判断是否物理合理，冗余校验如总流量与各分区流量之和比对。可疑数据不参与调度并触发人工复核。缺失数据短时用线性插值，长时用历史同期拟合补全，并标注来源，便于追溯。

3 建模层设计

3.1 供水泵组能耗描述

模型基于泵的相似定律：流量比与转速比成正比，扬程比与转速比平方成正比，轴功率比与转速比三次方成正比。转速降至 50%，轴功率理论上降至 12.5%，远优于工频大马拉小车。参数包括额定流量、扬程、功率和效率曲线，由出厂数据与现场实测联合标定。实测采用流量—扬程—功率同步采集，保持管网压力稳定，逐步调整变频器频率，记录各频率运行参数，经滤波拟合形成参数集，每季度更新，以适应泵组磨损和管网阻力变化。

3.2 效率特性标定

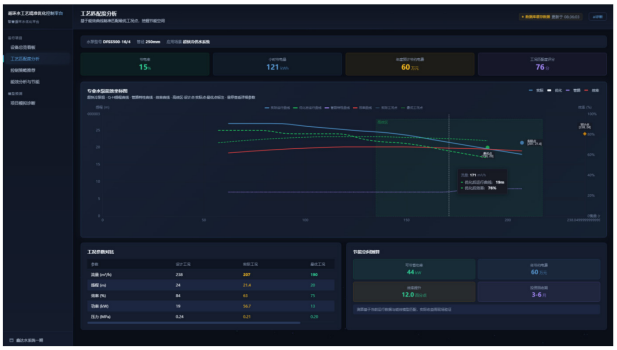
泵组效率随流量和转速变化，存在高效运行区间。系统通过标定确定各泵高效区，调度时优先将泵组分配在高效区。多泵并联时，根据各泵效率特性优化组合与转速分配，使整体运行效率最大化。

3.3 蓄能能力量化

清水池有效容积 8000 m^3，高位水箱 1500 m^3，管网允许压力波动 0.42—0.48 MPa 对应可储水量约 300 m^3，总蓄能约 9800 m^3。按日新水取用 2.4 万 m^3 计算，可覆盖约 9.8 小时。实际保留安全余量，可用蓄能取 70% 即 6860 m^3，覆盖约 6.8 小时，足以支撑峰段 2—3 小时减载。峰谷价差 0.74 元 /kWh，泵组平均功率 761 kW，峰段减载 2 小时可转移电量约 1522 kWh，节约电费约 1126 元 / 日。

3.4 用水需求预测

产线用水由连铸二冷水、轧钢除鳞水、高炉冷却水等叠加，连铸和轧钢用水与生产节奏直接相关。系统接入排产数据，以工序—用水系数映射生成未来 24 小时用水基线。当需求偏离预测值超过 15% 时，触发协同层滚动优化，以 15 分钟为周期重新求解剩余时段调度方案。预测采用时间序列分析与机器学习结合：时间序列提取日、周周期特征，机器学习建立排产与用水量映射。模型每周更新，使用过去 4 周实际数据训练，典型工况预测精度约 92%。



4 协同层与调度策略

4.1 调度模型与求解

以供水安全为前提，追求日运行综合成本最小，成本含电费及药剂、磨损、维护等水系统运行成本。调度周期 24 小时，分 48 个 30 分钟时段，决策变量为各泵启停状态和变频转速，转速取额定 40%—100%。约束包括：供水压力不低于 0.42 MPa，清水池液位 20%—90%，泵组每小时启停≤ 2 次、每日≤ 12 次，流量扬程不超额定；压力接近下限时自动增泵保安全。该问题为混合整数非线性规划，采用分层求解：上层动态规划确定启停组合，状态由液位和泵组集合构成，液位离散精度 5%、泵组全组合；下层用序列二次规划求各时段最优转速。求解时间控制在 30 秒内，满足日前调度。

4.2 运行模式与人机交互

按分时电价自动切换：谷段 23:00—7:00 蓄水优先，液位由 50% 升至 85%，泵组接近额定转速；峰段 8:00—11:00、18:00—21:00 减载优先，转速降至 60%—70%，由蓄水补缺口，压力维持 0.42—0.48 MPa；平段按需平衡，液位 70%—75% 小幅波动。人机界面设总览、水系统、电系统、协同调度、报表五模块，显示实时数据、调度方案、成本预测和历史趋势。操作人员可查看方案并必要时手动调整，系统记录所有干预，便于分析。

5 现场应用与降耗效果

5.1 应用场景与部署

某钢厂含烧结、炼铁、炼钢、轧钢，日新水 2.4 万 m^3。泵站 6 台泵（4 用 2 备），单台 280 kW、1200 m^3/h，变频驱动。清水池 8000 m^3，高位水箱 1500 m^3。电价：峰段 8:00—11:00、18:00—21:00 为 1.12 元 /kWh，平段 0.72 元 /kWh，谷段 23:00—7:00 为 0.38 元 /kWh。2025 年 3 月完成感知层安装、建模层标定、协同层调试，4 月正式运行，

以 2024 年同期为基准。

5.2 运行策略与验证

部署前恒压人工启停，全天压力≥ 0.45 MPa。部署后自动调度：谷段蓄水至 85%，峰段降速 60%—70% 由蓄水补缺，压力 0.42—0.48 MPa，平段按需运行，操作人员转为监视。2025 年 4—9 月运行 6 个月，每 10 秒采集数据，对比基准期峰谷用电占比、吨钢新水电单耗、泵组平均功率、电费及压力波动，数据经量程、变化率、冗余校验。

5.3 量化效果

系统运行 6 个月后的关键指标对比如表 1 所示。吨钢新水电单耗由 3.12 降至 2.86 m^3/t，主要因变频减少压力波动与无效泄放，协同调度减少峰段过压。年度节电效益 420.6 万元，月均电费降 23.5 万元（已扣运维）。峰段用电占比降 3.5 个百分点，谷段升 4.4 个百分点；泵组平均功率降 14.7%。年度综合效益 420.6 万元：月均电费降 23.5 万元，年降 282 万元；变频减少磨损，年维护降 35 万元；吨钢新水单耗下降，年节约 120 万元；扣运维 16.4 万元。投资回收期可控制在 2 年内。吨钢新水单耗 2.86 m^3/t 已达行业先进，某同类企业为 2.3 m^3/t，差距主要因中水回用未扩容，供水侧循环率仍有提升空间。后续可将水质调节纳入协同优化，并探索中水回用水质—水量—电量三维耦合调度。

表 1 系统部署前后关键运行指标对比

指标	基准期（2024 年 4—9 月）	运行期（2025 年 4—9 月）	变化幅度
月度峰段用电占比 / %	27.4	23.9	−3.5 个百分点
月度谷段用电占比 / %	41.2	45.6	+4.4 个百分点
吨钢新水电单耗 / ($m^3 \cdot t^{-1}$)	3.12	2.86	−8.3%
泵组平均运行功率 / kW	892	761	−14.7%
月度电费成本 / 万元	186.3	162.8	−12.6%
年度综合节电效益（推算）/ 万元	—	420.6	—



6 结语

本文设计并实践了钢铁企业厂区水电一体化智能管控系统。技术核心在建模层与协同层对水系统作为可调节电力负荷的显式处理：泵组能耗模型将运行参数映射为电功率，蓄能耦合模型将清水池和管网蓄能量化为电费节约空间，协同调度在分时电价下生成供水安全与成本最优方案。实践表明，峰段用电占比降 3.5 个百分点，吨钢新水电单耗降 8.3%，年度节电效益超 420 万元；变频降功率是节电主因，峰谷结构优化使电费降幅大于用电量降幅。能源管控正从数据汇聚走向介质耦合，水—电耦合潜力尚未充分释放。本文提供可落地方案与量化效果，未来可将水质调节纳入，并探索中水回用水质—水量—电量三维耦合调度。

参考文献：

[1] 王君天，闫江辉，林修奂. 炼钢生产智能管控系统的应用实践[J]. 冶金自动化，2025,49(S1):89−96.

[2] 杨俊涛，卢春雪，卢梓悦等. 新型能量隔离防护智能管控系统的设计与应用[J]. 工业安全与环保，2024,50(1):60−62+65.

[3] 薛军安. 智能生产管控系统在大型钢铁联合企业的应用与实践[J]. 数字技术与应用，2022,40(4):134−136.

[4] 严春良. 产供销智能管控系统在珠海粤钢信息化体系中的地位与作用[J]. 中国信息化，2020(12):74−75.