

3×3MW 余热发电智控仪表与 APC 应用工艺研究

太荣山

云南天安化工有限公司, 云南 昆明 650000

DOI:10.61369/ME.2026060034

摘 要 : 针对云南天安化工 3×3MW 背压余热发电机组存在蒸汽计量失真、仪表故障率高、单回路 PID 多变量耦合、机组非计划停机频发、蒸汽梯级利用率低等问题, 搭建 “现场感知 – 过程控制 – APC 优化 – 经营管理” 四层一体化智控平台, 配套部署中控 APC–Suite 多变量预测控制系统 (MPC), 完成防腐智能仪表分区选型、关键测点双冗余、光纤冗余通信改造。现场运行结果表明: 蒸汽计量误差由 10%~15% 降至 2% 以内, 仪表年故障率下降 85.7%, 机组年非停机次数由 11 次降至 1 次; APC 长期投运率 ≥ 95%, 机组发电出力提升 3.2%, 年减少放空蒸汽 1.2 万 t, 年节约标准煤 4672 t, 项目静态投资回收期仅 1.65 a。该成套改造方案可为磷复、煤化工余热发电智能化升级提供工程借鉴。

关 键 词 : 余热余压发电; 智能仪表; 测点冗余; APC; 节能增效

Research on Intelligent Control Instrument and APC Application Process of 3 × 3MW Waste Heat Power Generation

Tai Rongshan

Yunnan Tian'an Chemical Co., Ltd. Kunming, Yunnan 650000

Abstract : Aiming at the problems of steam metering distortion, high instrument failure rate, single loop PID multivariable coupling, frequent unplanned unit shutdown, and low steam cascade utilization of Yunnan Tian'an chemical 3 × 3MW back pressure waste heat generator unit, a four-layer integrated intelligent control platform of "field perception – process control – APC optimization – business management" was built, and the Central Control APC suite multivariable predictive control system (MPC) was deployed to complete the selection of anti-corrosion intelligent instruments, the transformation of dual redundancy of key measurement points, and optical fiber redundant communication. The field operation results show that: the steam metering error is reduced from 10% to 15% to less than 2%, the annual failure rate of the instrument is reduced by 85.7%, and the annual non shutdown times of the unit is reduced from 11 to 1; The long-term operation rate of APC is ≥ 95%, the power generation output of the unit is increased by 3.2%, the annual venting steam is reduced by 12000 T, the annual standard coal is saved by 4672 T, and the static investment payback period of the project is only 1.65 a. the complete set of transformation scheme can provide engineering reference for the intelligent upgrading of phosphorus recovery and coal chemical waste heat power generation.

Keywords : waste heat and pressure power generation; intelligent instrument; redundancy of measuring points; APC; energy saving and efficiency increase

引言

硫磺制酸生产副产大量高温中压蒸汽, 蕴藏丰富余热势能, 传统工艺直接减温减压供给磷酸浓缩, 梯级能源价值完全浪费。原有 3×3MW 配套测控系统存在明显短板: 老式孔板流量计无实时温压补偿, 计量偏差大; 普通仪表不耐酸性腐蚀、机组振动, 故障频发; 关键测点无冗余设计, 仪表故障易触发机组联锁停机; 常规独立 PID 无法消解蒸汽压力、机组负荷、供热参数强耦合, 负荷波动依赖人工频繁调阀, 蒸汽放空、厂用电损耗突出, 余热发电潜力难以充分释放。

本文依托厂区余热余压 EPC 技改项目, 从智能仪表硬件、冗余监测架构、冗余通信网络、MPC 先进控制四个维度构建一体化智控平台, 重点分析 APC 投用后的工艺改善效果, 量化测算项目经济与环保收益。

一、项目概况与原系统缺陷

（一）工程概况

本项目为节能 EPC 改造，总投资 3735 万元，其中 APC 软硬件投入 480 万元，建设周期 12 个月。3 台 3 MW 背压机组 2021 年 5 月完成并网，配套高低压蒸汽管网、DCS 集散系统、双光纤环网、工业防火墙与 APC 服务器。装置设计总进汽量 240 t/h，单机额定功率 3150 kW，年有效运行时长 21600 h，基础工况年发电量 5184 万 kWh，厂用电率稳定控制在 8% 以内。

（二）改造前核心问题

1) 测控仪表性能不足：孔板流量计缺少在线温压补偿，0.6 MPa 饱和蒸汽工况计量偏差 10%~15%；仪表无防腐、抗震专用结构，年均故障 42 次；多数仪表仅支持就地显示，无 HART/Modbus 数字化接口，各工段形成数据孤岛；油压、轴振、主蒸汽流量等关键测点单点布置，年均引发 11 次机组非计划停机。2) 常规 PID 调控局限性：进汽压力、机组转速、低压供热参数相互耦合，固定 PID 参数无法适配硫酸、磷酸装置负荷频繁波动，人工干预易加剧工况震荡，大量控制回路频繁退出自动模式，蒸汽放空与辅机空载耗电问题显著。

二、四层一体化智控仪表平台总体设计

本次技改搭建四层协同智控架构，覆盖集汽箱、汽轮机、润滑油站、减温减压、磷酸浓缩五大热能单元，以标准化智能仪表为 APC 提供高精度、高实时性数据源。

（一）现场感知层：分区仪表 + 双冗余测点

1. 差异化智能仪表选型

全部仪表防护等级 IP65、防爆等级 Ex ia II CT4，支持 HART/Modbus 双协议、1 s 高频数据采集，适配 APC 实时运算需求：主蒸汽管网选用 316L 衬四氟智能涡街流量计，集成一体化温压补偿模块，流量测量精度 $\pm 0.5\%$ ，配套冗余温压变送器；汽轮机本体配套磁电式振动变送器、一体化 PT100 测温元件，实时监测轴振、轴瓦温度；润滑油系统油压、压差、液位全部采用双冗余变送器；低压供热管网、电气系统配置高精度差压流量计与 Modbus 智能电度表，同步采集供热流量、机组发电量、功率因数。

2. 三重冗余监测架构

选取润滑油压、机组轴振、主蒸汽流量、汽轮机排汽压力四类安全核心参数，采用双仪表、双铠装线缆、双卡件独立监测架构，两路信号同步上传 DCS 与 APC。系统内置故障判别逻辑：双表测量偏差 $\leq 5\%$ 取平均值；偏差 $> 5\%$ 自动标记故障并远程告警；两路信号同时失效时 APC 无扰切回基础 PID 调节。可靠性计算：单台仪表年可靠度 $\lambda(R=e^{-\lambda t}) \approx 0.9048$ ，双冗余系统可靠度 $\lambda(R_s=2R-R^2 \approx 0.9909)$ ，仪表年故障率降低 91%。

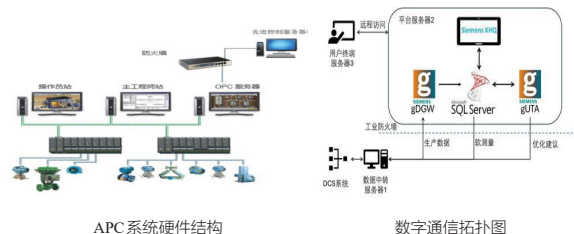
（二）过程控制层：冗余 DCS 与光纤环网

余热电站配置带冗余电源、冗余主控的 DCS 子站，完成信号预处理、单回路 PID、设备联锁运算；余热子站与全厂总控采用

一主一备千兆光纤环网，主链路故障毫秒级切换。DCS 部署 OPC 服务器，通过 OPC DA 协议完成 DCS 与 APC 双向数据交互。

（三）APC 优化层：MPC 控制系统软硬件

APC 采用 DELL R760xs 冗余服务器，配置工业防火墙隔离生产网，搭载中控 APC-Suite10.6 软件，核心为 MPC 多变量预测控制，配套数据预处理、软测量、前馈补偿、PID 自整定、无扰切换功能模块。



1. MPC 控制核心逻辑

MPC 遵循“模型预测、滚动优化、反馈校正”闭环逻辑，区别于 PID 事后纠偏。本项目预测时域 20 min、控制时域 5 min，每分钟滚动求解全局最优操作量，分级划分安全、供热、发电变量约束，自动消解多参数耦合干扰。

2. 核心功能模块说明

1) 数据预处理：冗余校验、信号滤波、坏点剔除，净化 APC 输入数据；2) MPC 解耦控制器：分汽缸压力设最高安全优先级，限制阀门单次调节幅度，协同汽轮机调门、减温水阀小幅微调；3) 软测量模型：在线推算机组汽耗、蒸汽腐蚀浓度、磷酸浓缩指标，弥补离线化验滞后缺陷；4) 负荷前馈补偿：提前 5~10 min 预判产汽、用汽负荷波动，提前调整机组出力，减少蒸汽放空；5) 三级安全联锁：轻微偏移 APC 预警微调、中度异常切换备用辅机、重大故障 DCS 硬停机，APC 同步闭锁输出；6) 自适应校正：分高、中、低负荷三套工艺模型，定期自动整定 PID，保障基础回路自控率高于 95%。

（四）经营管理层

APC 实时数据同步对接企业 MIS/ERP 能耗平台，自动归档发电量、蒸汽消耗、设备故障台账，支撑全厂能耗统计、生产调度与设备运维考核。

三、APC 投用后工艺优化成效

依托冗余智能仪表稳定数据源，MPC 先进控制从计量精度、工况稳定性、余热回收、自动化运维四个维度实现全流程优化。

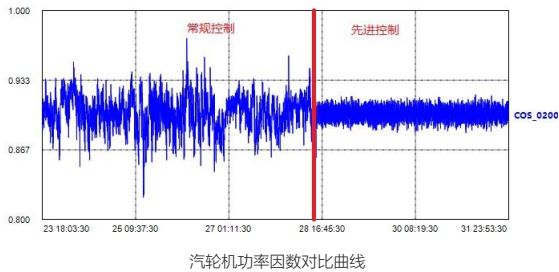
（一）蒸汽计量精准管控

搭建一体化温压补偿计量模型： $\lambda(Q_m=Q_v \times \rho(T,P))$ 式中： $\lambda(Q_m)$ 为标准蒸汽质量流量，t/h； $\lambda(Q_v)$ 为工况体积流量； $\lambda(\rho(T,P))$ 为实时温压下蒸汽密度。系统以 1 s 周期动态换算标准流量，计量误差由 10%~15% 降至 2% 以内；APC 依托精准数据实时测算机组汽耗，稳定锁定 33.238 kg/kWh 最优经济区间，为节能优化提供可靠数据底座。

（二）热力工况波动显著收窄

APC 投用前主蒸汽压力持续剧烈震荡，投用后参数标准差下

降 30% 以上；功率因数曲线大幅收敛，机组长期稳定运行在发电出力上限，有效降低无功热能损耗。



MPC 多执行机构协同微调，彻底解决“调压扰动供热、调负荷波动管网”耦合振荡，蒸汽系统运行平稳性大幅提升。

（三）蒸汽梯级利用率提升

负荷前馈机制提前预判工况波动，年减少放空蒸汽 1.2 万 t，高品质中压蒸汽全部用于发电与磷酸供热；三级主动联锁将机组年非计划停机由 11 次降至 1 次，避免停机阶段蒸汽直接减温减压放空，最大化回收余热势能。

（四）自动化运维改善

APC 投运后关键回路自控率稳定超 95%，人工操作频次下降 30%；月度人工巡检时长由 120 h 缩减至 30 h，仪表年故障由 42 次降至 6 次；软测量实时在线推算工艺指标，省去离线化验等待，保障磷酸装置连续稳定用汽。

表 1 改造前后核心运行指标对比

对比指标	改造前	改造后	优化幅度
蒸汽流量计量偏差	10%~15%	≤2%	精度提升 87%
仪表年均故障 / 次	42	6	故障率下降 85.7%
机组年非计划停机 / 次	11	1	停机频次下降 90.9%
月度人工巡检时长 / h	120	30	人力消耗减少 75%
工艺参数波动幅度	剧烈震荡	标准差下降 30%+	系统稳定性大幅提升

四、技改综合经济效益分析

（一）基础发电与节煤收益

装置基础年发电量 5184 万 kWh，工业电价 0.38 元 /kWh，基础发电年收入 1969.92 万元；APC 使机组出力提升 3.2%，辅机年节电 120 万 kWh，节电收益 45.6 万元；全年节约标准煤 4672 t，大幅削减 CO₂、SO₂ 排放，满足企业能耗双控考核要求。

参考文献

[1] GB 50131-2014 自动化仪表工程施工及质量验收规范 [S]. 北京：中国计划出版社，2014.

[2] 崔靖涵，刘向杰，孔小兵. 汽轮机系统的模糊经济模型预测控制 [J]. 控制理论与应用，2018, 35(3): 308-316.

[3] 席永胜. 一种基于决策树的智能流量仪表选型方法 [J]. 石油化工自动化，2025, 61(5): 42-45.

[4] 徐巍，刘文超，钟飞. 测控系统软件的可靠性分析 [J]. 计算机与现代化，2005, (2): 6-9.

[5] 毕晓云. 先进过程控制技术在大型硫磺制酸装置中的应用 [J]. 硫酸工业，2025, (2): 58-61.

[6] 郭伟，王汉杰，夏友亮，等. 多变量 FOPID-MAC 在机炉协调控制中的应用 [J]. 动表，2015, 36(8): 69-73+77.

[7] 王晓光. APC 系统在化工装置中的应用 [J]. 化工管理，2021, (29): 152-153+155.

[8] 丁伟，李蒙，谭显东，等. 负荷管理节能效益量化研究 [J]. 华东电力，2007, (6): 59-63.

[9] 曾琦. 电力工程中基于物联网技术的智能仪表网络化管理系统应用研究 [J]. 仪器仪表用户，2024, 31(9): 16-17+20.

[10] 韩洁. 基于 PLC 的仪器仪表控制系统在化工机电工程中的应用 [J]. 石化技术，2026, 33(6): 228-229+232.

（二）APC 年度增量收益

表 2 APC 系统年度增量经济效益

表格		
收益项目	年增量收益 / 万元	效益说明
发电增量收益	63.04	机组出力提升新增发电量
减少蒸汽放空收益	144.00	回收放空蒸汽用于生产发电
硫酸降耗收益	20.16	蒸汽稳定降低产品单耗
人工运维节约	16.00	现场值守人员优化
增量合计	288.80	多维度节能叠加收益

（三）投资回报测算

项目总投资 3735 万元，基础发电收益与 APC 增量收益叠加，年综合总收益 2258.72 万元，静态投资回收期仅 1.65 a。间接效益包括仪表备件、检修人工成本下降，同时保障两套 30 万吨磷酸装置连续稳产，稳定主产品营收。

五、现存优化方向

1) 理论仿真体系不完善：仪表零点漂移、高精度温压补偿缺少系统性仿真验证；2) 故障管控体系不完整：未建立标准化软硬件故障数据库，故障溯源与长效防控流程有待梳理；3) 成套技术文档标准化不足，不利于行业快速复制推广。后续将补充算法仿真试验、搭建故障知识库、统一技术资料规范，开发全自动模型辨识功能，逐步实现装置全流程自适应无人优化。

六、结论

针对磷复肥硫磺制酸余热发电机组高温腐蚀、高频振动、多参数强耦合、蒸汽梯级利用率低等共性难题，本文构建“防腐智能仪表 + 双冗余测点 + 光纤冗余通信 + MPC 先进控制”四层一体化智控平台，打通硬件感知、基础调控、智能优化、能耗统计完整闭环。

工艺层面，APC-MPC 突破传统单回路 PID 调控局限，有效消解多变量耦合干扰，蒸汽计量精度、机组运行稳定性、装置自动化水平全面提升，蒸汽放空损耗大幅减少，余热梯级利用效率显著提高；经济环保层面，项目年综合收益超 2200 万元，静态投资回收期不足 2 年，年节约标煤 4672 t，兼具经济效益与低碳环保价值。整套仪表选型、冗余架构、APC 控制方案通用性强，可为磷复肥、煤化工同类余热发电智能化改造提供成熟工程实践参考。