

# 燃煤机组智能化系统的设计与实现

刘德明, 杨占海, 薄庆瑶

国家电投集团内蒙古能源有限公司, 内蒙古 通辽 028000

DOI:10.61369/ETQM.2026060016

**摘 要 :** 为满足燃煤机组安全、经济、高效运行需求, 本文聚焦燃煤机组智能化系统的设计与实现开展研究。通过需求分析明确系统业务、功能及非功能性要求, 其中业务需求覆盖燃料管理、燃烧发电等全流程, 功能需求聚焦五大核心模块, 非功能性需求强调实时性、可靠性等工业级标准; 进而设计“感知-数据-平台-应用-安全”五层总体架构与“控制网-数据网-管理网”三层网络架构, 构建“感知-分析-决策-执行”智能闭环。系统核心功能模块包含智能监控与预警中心、智能燃烧优化、汽轮机及热力系统优化、设备预测性维护、运行辅助决策五大模块, 分别采用LSTM、改进多目标粒子群算法等技术, 实现异常预警、燃烧参数动态优化、热力损失降低、运维模式转型及场景化决策支持。在系统实现阶段, 基于边缘-云端协同架构选型工业级软硬件, 通过标准化接口与服务总线完成跨系统集成, 并建立三级测试体系验证。

**关 键 词 :** 燃煤机组; 智能化系统; 架构设计; 预测性维护

## Design and Implementation of Intelligent System for Coal-fired Units

Liu Deming, Yang Zhanhai, Bo Qingyao

State Power Investment Corporation Limited Inner Mongolia Energy Co., Ltd., Tongliao, Inner Mongolia 028000

**Abstract :** To meet the requirements for the safe, economic, and efficient operation of coal-fired units, this paper focuses on the design and implementation of an intelligent system for coal-fired units. Through requirement analysis, the system's business, functional, and non-functional requirements are clarified. Business requirements cover the entire process, including fuel management and combustion power generation, while functional requirements focus on five core modules. Non-functional requirements emphasize industrial-grade standards such as real-time performance and reliability. Subsequently, a five-tier overall architecture of "perception-data-platform-application-security" and a three-tier network architecture of "control network-data network-management network" are designed to construct an intelligent closed loop of "perception-analysis-decision-execution". The core functional modules of the system include an intelligent monitoring and early warning center, intelligent combustion optimization, turbine and thermal system optimization, equipment predictive maintenance, and operational decision support. These modules employ technologies such as LSTM and improved multi-objective particle swarm optimization algorithms to achieve abnormal early warning, dynamic optimization of combustion parameters, reduction of thermal losses, transformation of operation and maintenance modes, and scenario-based decision support. During the system implementation phase, industrial-grade hardware and software are selected based on an edge-cloud collaborative architecture. Cross-system integration is accomplished through standardized interfaces and service buses, and a three-level testing system is established for verification.

**Keywords :** coal-fired unit; intelligent system; architecture design; predictive maintenance

## 引言

当前传统燃煤机组运行模式普遍存在依赖人工经验、调控响应滞后、运维效率偏低等问题, 这些问题不仅制约燃煤机组经济性提升, 也难以满足当前电力系统对灵活性、低碳性的更高要求。随着工业互联网、人工智能(AI)、数字孪生等技术的快速发展, 为燃煤机组从“经验驱动”向“数据驱动”的智能化转型提供了技术支撑。通过构建覆盖机组全流程的感知网络, 融合多源数据建立智能决策模型, 可实现燃烧优化、设备运维、热力调控等核心环节的精准化、自动化管理, 成为解决传统运行痛点的关键路径。基于此, 本文开展智能化系统的设计与实现研究, 旨在为燃煤机组智能化升级提供可落地的技术方案, 助力其在保障能源安全的同时, 实现经济性与环保性的协同提升。

## 一、燃煤机组智能化系统需求分析与总体设计

### （一）系统业务需求分析

燃煤机组的核心业务围绕“燃料转化为电能”的全流程展开，涵盖燃料管理、燃烧发电、汽水循环、设备运维、调度响应等关键环节。燃料管理涉及煤矿协调、全厂生产调度、入厂接卸、计量管理、采制样及化验、煤场烧旧存新、合理掺烧、合同计划与结算等相关工作，其管理水平直接影响到电厂盈利能力和发展<sup>[1]</sup>。在燃料管理环节，利用在线分析实时监测煤质，联动燃烧系统与配煤方案，从源头保障燃烧稳定。在发电核心环节，构建智能模型自动优化风煤配比，实现高效低排的动态平衡。同时建立热力循环模型，动态调控汽水参数以降低热耗<sup>[2]</sup>。在运维上，依托实时监测与寿命预测，将传统“定期检修”升级为精准的“状态修”。整合负荷、设备、煤质等数据，自动生成最优运行方案，实现机组安全、经济、高效的智能响应与决策。

### （二）系统功能需求分析

基于业务需求，系统需实现五大核心功能模块。智能监控与全景感知模块实时采集全厂数据，通过3D建模与机器学习实现异常工况的提前预警与溯源<sup>[3]</sup>。智能燃烧优化模块利用红外测温与煤质分析，以算法自动调控关键参数，实现锅炉效率与排放的最优平衡。汽轮机与热力系统优化模块通过仿真模型动态调整蒸汽参数与凝汽器真空，有效降低机组热耗。智能设备预测性维护模块对关键辅机进行健康度评估与寿命预测，自动生成精准的维护计划<sup>[4]</sup>。智能运行辅助决策模块则整合多源信息，针对不同运行场景生成并量化对比优化方案，辅助人员做出最佳决策，最终指令自动下发执行。

### （三）系统非功能性需求分析

为保障系统在工业环境下的稳定运行，需在实时性、可靠性、安全性、可扩展性与易用性上满足严苛要求。系统需实现毫秒级的数据采集与指令响应，确保全年99.9%的高可用率，并通过冗余设计保障故障快速切换<sup>[5]</sup>。同时必须构建网络隔离、数据加密和权限审计的多层安全防护体系，架构上应支持设备与算法的灵活扩展，以适应未来发展。此外，界面设计需贴合行业操作习惯，提供模拟训练，确保用户能快速上手，打造一个响应迅速、稳定可靠、安全可控且易于使用和运维的智能化平台。

### （四）系统总体架构设计

系统采用“感知-数据-平台-应用-安全”五层架构，实现数据贯通与模块化集成，支撑“感知-分析-决策-执行”的智能闭环<sup>[6]</sup>。感知层通过各类传感器与边缘网关采集数据；数据层利用多种数据库实现全量数据的存储与管理；平台层提供算法、模型与服务总线等核心能力；应用层部署五大核心功能模块，面向用户提供服务；安全层则贯穿始终，全方位保障系统安全。

### （五）系统网络架构设计

系统采用“控制网-数据网-管理网”三层隔离架构，兼顾实时性与安全性，支持边缘-云端协同<sup>[7]</sup>。控制网连接DCS等核心设备，通过工业协议和物理隔离保障毫秒级实时控制；数据网

作为高速传输层，承载大流量数据并经防火墙加密；管理网面向业务应用，通过严格认证与授权保障操作安全。同时系统支持边缘-云端协同，厂区边缘节点处理实时任务，云端负责大数据分析 & 模型训练，实现高效分工。

## 二、系统核心功能模块设计与实现

### （一）智能监控与预警中心

智能监控与预警中心作为机组运行的“神经中枢”，通过“数据采集-全景呈现-智能识别-分级预警”实现风险前置管控<sup>[8]</sup>。系统融合DCS数据与新增红外、振动等传感器信息，构建三维数字孪生模型，直观映射机组状态。异常检测采用LSTM与孤立森林双模型架构，精准识别参数偏差与工况突变。预警机制按严重程度分级，从界面提示到联动应急指挥中心，并自动提供故障溯源线索，确保运行透明化与风险快速响应。

### （二）智能燃烧优化模块

智能燃烧优化模块聚焦锅炉燃烧过程的“效率-排放”双目标平衡，通过燃烧状态实时感知、煤质自适应调节与参数动态寻优，解决传统人工调控滞后性强、多因素耦合难平衡的问题。系统融合红外测温、火焰图像与烟气分析数据，构建三维燃烧场模型实时评估状态；同时根据煤质在线分析结果，自适应调整燃烧策略。核心采用改进多目标粒子群算法，以效率最高、排放最低为目标，动态优化风煤比等12个关键参数，指令每3分钟下发至DCS执行，实现从“经验驱动”到“数据驱动”的精准、自动调控。

### （三）智能汽轮机及其热力系统优化模块

智能汽轮机及其热力系统优化模块以“提升通流效率、降低热力循环损失”为核心目标，通过汽轮机状态精细感知、热力系统能效诊断与动态参数优化，解决传统定曲线调控难以适应工况变化的问题，实现全负荷段的经济性最优<sup>[9]</sup>。系统实时监测振动、温度等参数，构建三维状态模型以诊断通流故障；同时建立热力系统仿真模型，精准定位加热器端差、凝汽器真空等能效损失点。优化策略按负荷区间差异化，高负荷时变压运行减少节流损失，中低负荷时优化抽汽分配，低负荷时联动循环水泵变频调节，目标是将汽轮机热耗降低3-5kJ/(kW·h)。

### （四）智能设备管理与预测性维护模块

智能设备管理与预测性维护模块旨在通过设备状态实时感知、健康度评估与故障精准预测，推动运维模式从“定期检修”向“状态检修”转型，降低非计划停机风险与运维成本<sup>[10]</sup>。系统融合固定传感器与移动巡检数据，利用随机森林算法计算设备健康指数，并通过GRU神经网络精准预测剩余寿命。当预测寿命临近阈值时，系统自动结合检修窗口与备件库存，生成精准的维护计划并推送至移动端，从而降低非计划停机风险与运维成本。

### （五）智能运行辅助决策模块

智能运行辅助决策模块整合多源信息生成场景化最优方案，解决传统决策依赖经验、响应滞后的问题，支撑机组在基荷、调峰、启停等复杂场景下的高效运行。其核心逻辑是“信息融合-

场景建模－方案生成－人机协同”，实现决策的量化与动态优化。系统整合电网指令、煤质计划、设备健康及环境数据，针对基荷、调峰等不同场景训练强化学习模型。面对具体工况，系统能生成并量化对比多套优化方案，运行人员可交互调整并模拟效果，最终方案经审批后下发执行，实现全局协同与高效运行。

### 三、系统实现与集成测试

#### （一）开发环境与技术选型

系统实现基于“边缘－云端协同”架构，结合工业级硬件与轻量化软件技术，确保实时性、可靠性与可扩展性。硬件上，边缘节点负责实时决策，3200余个传感器实现全流程感知，云端数据中心支持海量数据存储。软件上，前端构建响应式3D界面，后端采用微服务架构实现模块解耦，数据存储采用时序与关系数据库分层设计，AI模型支持在线迭代。通信层面，通过 OPC UA、Modbus 及 MQTT 等协议，实现了与 DCS/SIS 系统、传感器及云端的高效数据交互。

#### （二）数据接口与系统集成

系统集成以“标准化接口、模块化协同、数据一致性”为核心原则，实现跨系统、跨模块的无缝联动。接口设计采用分层架构，底层设备接口通过 OPC UA Server 封装 DCS 实时数据，提供统一的数据读写服务；模块间接口基于 RESTful API 设计，采用 JSON 格式传输数据；与外部系统的接口通过 Webservice 实现，支持数据批量导入导出。系统集成通过服务总线（Apache Kafka）实现模块协同，各模块作为消息生产者或消费者接入总线，例如智能监控模块检测到异常时，向 topic\_anomaly 发送预警消息，智能运行辅助决策模块订阅该主题并触发应急预案生成；燃烧优化模块生成的参数指令先发送至 topic\_optimization，经 DCS 接口服务校验后再下发执行，避免误操作。为保障数据一致性，采用时间戳对齐机制，解决多源数据时序偏差问题；通过 Redis 分布式锁控制并发写入，避免数据冲突；每日凌晨执行数据校验任务，对比边缘节点与数据中心的关键参数，差异超 0.5% 时自动补录修正，确保全链路数据可靠。

#### （三）系统测试与验证

系统测试分为单元测试、集成测试与现场验证三个层级，全

面验证功能有效性与运行可靠性。单元测试针对各模块核心功能，采用仿真平台与历史数据驱动，智能监控模块在模拟平台输入 300MW 机组典型故障数据，测试异常预警响应时间 $\leq 3$ 秒，准确率 95%；智能燃烧优化模块基于某 600MW 机组 1 年历史数据仿真，优化后锅炉效率平均提升 0.8%，NO<sub>x</sub> 排放降低 8.2%；设备预测性维护模块在磨煤机故障数据集上测试，剩余寿命预测平均误差 7.8%，满足实用需求。集成测试验证模块协同与接口兼容性，构建闭环测试场景，模拟“炉膛超温”事件，智能监控模块触发预警后，智能运行辅助决策模块在 8 秒内生成减温水调整方案，经燃烧优化模块修正参数后下发至 DCS，仿真结果显示 150 秒内炉膛温度恢复正常区间，各模块数据交互无丢包，接口响应延迟 $\leq 500$ ms；测试高负荷（600MW）与低负荷（300MW）切换场景，汽轮机优化模块与运行决策模块协同调整主蒸汽压力与抽汽参数，热力循环效率波动 $\leq 0.3\%$ ，验证跨模块协同稳定性。现场验证在某电厂 600MW 燃煤机组进行，连续运行 6 个月。结果显示，经济性方面，供电煤耗从 302g/kW·h 降至 299.5g/kW·h，年节约标煤约 8000 吨；安全性方面，设备非计划停机次数从年均 6 次降至 2 次，异常预警准确率 92.3%，提前预警时间平均 8 分钟。

### 四、结束语

本文围绕燃煤机组“安全提效、低碳降耗”的核心需求，完成了智能化系统从需求分析、架构设计、模块开发到集成验证的全流程研究与实践。通过构建“感知－数据－平台－应用－安全”五层总体架构与“控制网－数据网－管理网”三层网络架构，实现了多源数据的贯通与模块协同；聚焦智能监控、燃烧优化、热力调控、预测性维护、辅助决策五大核心环节，运用 LSTM、改进多目标粒子群算法等技术，解决了传统机组依赖经验调控、运维效率低、热力损失大等痛点，形成了“感知－分析－决策－执行”的智能闭环。未来可进一步深化数字孪生技术的应用，提升系统对复杂工况的模拟与预判精度；探索智能化系统与储能技术的耦合机制，增强机组灵活调峰能力。

### 参考文献

- [1] 冯佐江, 李红建, 杨勇, 等. 1000 MW 燃煤机组燃料智能管控系统整体解决方案及应用 [J]. 华电技术, 2020, 42(2): 22–27. DOI: 10.3969/j.issn.1674–1951.2020.02.005.
- [2] 刘铸. 燃煤热电厂智能化适应性供热监测监控系统开发与应用 [D]. 山西: 太原理工大学, 2022.
- [3] 王述宝. 燃煤机组智能喷氨优化控制系统研发与应用 [D]. 山东: 山东大学, 2020.
- [4] 易雪东. 燃煤火电机组自启停控制系统研究 [D]. 华北电力大学, 华北电力大学 (北京), 2023.
- [5] 张海林, 杨博, 董玉亮, 等. 面向燃煤机组高效灵活运行的智能化配煤掺烧优化决策方法 [J]. 热力发电, 2022, 51(4): 30–37. DOI: 10.19666/j.rlfd.202110222.
- [6] 秦志, 薛念杰, 于波, 等. 某 600 MW 燃煤机组脱硫智能氧化风系统改造效果分析 [J]. 科技与创新, 2024(9): 43–45, 48. DOI: 10.15913/j.cnki.kjyx.2024.09.011.
- [7] 刘吉臻, 王庆华, 张效宁, 等. 支撑我国能源转型的灵活燃煤发电新技术: 燃煤耦合储能系统及智能控制系统 [J]. 中国电机工程学报, 2024, 44(17): 6855–6882. DOI: 10.13334/j.0258–8013.pcsee.240384.
- [8] 丁湧, 赵闫涛. 百万燃煤机组智能监盘系统的研究和应用 [J]. 电力设备管理, 2021(13): 193–194.
- [9] 屠学伟. 1000MW 燃煤机组智慧电厂建设研究 [J]. 自动化博览, 2023, 40(11): 68–71. DOI: 10.3969/j.issn.1003–0492.2023.11.027.
- [10] 沈丛奇, 单英雷, 归一数, 等. 超临界机组智能化协调控制系统研究和实施 [J]. 电力与能源, 2011(1): 52–56.