

燃煤机组自动化控制系统的优化与研究

杨占海, 刘德明, 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/EPTSM.2025110007

摘 要 : 为应对“双碳”目标推进与新能源并网背景下, 燃煤机组深度调峰需求增加, 而现有以 DCS 为核心的自动化控制系统存在适应性、协同性及智能性不足的问题, 本文聚焦燃煤机组自动化控制系统优化展开研究, 旨在提升系统灵活运行能力与综合效益。文章梳理燃煤机组“燃料化学能→热能→机械能→电能”的核心工艺流程, 分析现有 DCS 分层分布式架构及辅助子系统互联模式, 明确系统在变工况下的核心痛点。针对锅炉燃烧、主蒸汽温度、协调控制系统 (CCS) 三大关键子系统, 采用“机理分析 + 数据驱动”融合建模方法构建全负荷适配模型, 并针对性优化控制策略。为平衡经济性、环保性与安全性, 提出基于改进 NSGA-II 的全局多目标协同优化方案, 通过负荷区间划分与熵权-TOPSIS法筛选最优参数组合, 并设计“边缘计算节点 + DCS 通信接口”的集成架构, 实现优化策略与 DCS 无缝对接, 保障单次参数计算耗时 $\leq 100\text{ms}$ 及三级安全联锁。

关 键 词 : 燃煤机组; 自动化控制系统; 系统优化; 融合建模

Optimization and Research on the Automatic Control System of Coal-fired Units

Yang Zhanhai, Liu Deming, Bo Qingyao

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

Abstract : In response to the increasing demand for deep peak shaving of coal-fired units amid the advancement of the "dual carbon" goals and the integration of renewable energy into the grid, as well as the existing issues of inadequate adaptability, coordination, and intelligence in automation control systems centered around Distributed Control Systems (DCS), this paper focuses on optimizing the automation control system of coal-fired units to enhance their flexible operation capabilities and overall efficiency. The article outlines the core process flow of coal-fired units, from "fuel chemical energy \rightarrow thermal energy \rightarrow mechanical energy \rightarrow electrical energy," and analyzes the existing hierarchical distributed architecture of DCS and the interconnection modes of auxiliary subsystems, identifying key pain points under varying operating conditions. For the three critical subsystems—boiler combustion, main steam temperature, and coordinated control system (CCS)—a hybrid modeling approach combining "mechanism analysis + data-driven" methods is employed to construct full-load adaptive models, with tailored optimization of control strategies. To balance economic efficiency, environmental protection, and safety, a global multi-objective collaborative optimization scheme based on an improved NSGA-II algorithm is proposed. This scheme involves dividing load ranges and selecting optimal parameter combinations using the entropy weight-TOPSIS method, while designing an integrated architecture of "edge computing nodes + DCS communication interfaces" to seamlessly integrate the optimization strategies with DCS, ensuring that single parameter calculation time is $\leq 100\text{ms}$ and maintaining three-level safety interlocks.

Keywords : coal-fired units; automation control system; system optimization; hybrid modeling

引言

当前燃煤机组自动化控制以分散控制系统 (DCS) 为核心, 采用“分层分布式”架构实现全流程监控, 但受限于传统控制算法的线性特性与子系统独立调节模式, 在深度调峰场景下逐渐暴露出显著短板。基于此, 本文以提升燃煤机组深度调峰能力与综合效益为核心目标, 开展自动化控制系统优化研究。剖析燃煤机组工艺流程与现有控制系统架构, 明确核心痛点; 针对锅炉燃烧、主蒸汽温度、协调控制系统 (CCS) 三大关键子系统, 构建“机理分析 + 数据驱动”的融合模型, 设计适配宽负荷波动的控制策略; 进而引入改进智能算法实现全局多目标协同优化, 筛选全工况最优运行参数; 提出优化策略与 DCS 的集成方案, 保障工程落地性。

一、燃煤机组自动化控制系统理论基础与现状分析

（一）燃煤机组工艺流程概述

锅炉的燃烧控制系统通常由互相耦合的三个子系统构成，即燃料量控制系统、送风控制系统、引风控制系统，它们分别实现保持主汽压力、保持最佳空燃比和保持炉膛负压不变的任务。由于耦合严重，实现以上三个子系统的调节需要根据机组发电负荷的变化，实时调节风量与煤量的配比^[1]。燃煤机组的核心是实现“燃料化学能→热能→机械能→电能”的梯级转化，整体流程通过四大核心环节的物料与能量闭环传递完成。原煤制成煤粉送入锅炉燃烧；燃烧产生的热量将水加热为高温高压蒸汽；蒸汽推动汽轮机带动发电机发电；做完功的乏汽冷却成水，经加热后返回锅炉，同时烟气经净化后排放，从而构成一个完整的能量与物料闭环。

（二）现有自动化控制系统架构

燃煤机组自动化控制以DCS为核心，采用“分层分布式”架构，协同实现机组全流程的集中监控与分散控制^[2]。该架构自下而上分为四层，现场设备层负责采集工艺参数与执行控制指令；控制层通过DCS控制器与算法实现闭环控制与联锁保护；监控层作为人机交互核心，提供状态监控与指令下达；管理层则聚焦数据统计与性能分析。同时燃烧优化（BOC）、汽轮机调节（DEH）等辅助子系统与核心DCS互联，共同构成覆盖机组全流程的协同控制网络。

（三）现有控制系统存在的问题与挑战

随着“双碳”目标推进与新能源并网需求增加，燃煤机组需频繁参与深度调峰（负荷波动范围扩大至30%~100%额定负荷），现有控制系统逐渐暴露出适应性、协同性与智能性不足的问题，难以满足灵活运行需求^[3]。在变工况适应性方面，传统PID控制响应迟缓、超调严重，威胁机组安全；同时系统难以平衡效率、环保与安全等多重目标，常顾此失彼，制约综合效益；此外，数据利用不足，依赖人工干预，响应慢且缺乏故障预警，增加了运维成本与安全隐患。

二、面向灵活运行的机组关键子系统建模与控制优化

（一）建模方法概述

燃煤机组关键子系统在灵活运行场景下，存在非线性、强耦合、大滞后及参数时变特性，单一建模方法难以兼顾“动态精度”与“工况适应性”，因此采用“机理分析+数据驱动”的融合建模方法，构建适配全负荷范围的子系统模型^[4]。基于热力学等理论建立机理模型以确保物理可解释性，然后利用LSSVM、RNN等数据驱动算法，结合历史数据对机理模型进行误差补偿与修正，同时通过粒子群优化（PSO）算法提升模型的实时性。构建出一个能精准反映全负荷动态特性、快速响应参数变化的融合模型，为后续控制优化提供坚实基础。

（二）锅炉燃烧系统建模与优化

锅炉燃烧系统是机组能量转化的核心，其建模与优化需同时满足“高效燃烧”与“低排放”目标，且适配煤质波动、负荷变化的灵活运行需求^[5]。基于燃烧动力学和热平衡建立核心机理模

型，并利用5000组历史数据通过LSSVM算法修正煤质波动带来的误差，将预测精度控制在 $\pm 3\%$ 以内。在控制上，采用模糊PID实时识别负荷与煤质变化，动态调整参数以克服传统控制的响应滞后。同时引入熵权法对燃尽率、NO_x排放和炉膛温度波动进行多目标权重分配，在深度调峰时优先保障稳定，在额定负荷时侧重降低排放，从而实现不同工况下的燃烧优化平衡。

（三）主蒸汽温度系统建模与优化

主蒸汽温度是影响机组安全与效率的关键参数，其系统具有大惯性、大滞后及受负荷、烟气扰动影响显著的特性，建模与优化需重点解决变工况下的温度稳定性问题^[6]。建模上，基于传热定律建立过热器动态机理模型，并利用RNN算法学习变负荷下的烟气扰动时序数据，对模型输出进行动态修正，将预测误差控制在 $\pm 1^{\circ}\text{C}$ 以内。控制上，Smith预估器用于补偿系统滞后，提前预判温度变化；自适应PID则根据负荷实时调整增益，抑制超调^[7]。此外，通过引入减温水“分段调节”逻辑，在偏差较小时精细微调，偏差较大时快速响应，共同确保变工况下主汽温的稳定。

（四）协调控制系统建模与优化

协调控制系统（CCS）是实现机炉协同运行、响应电网负荷指令的核心，其建模与优化需解决“锅炉惯性大（响应时间约2~3分钟）、汽轮机响应快（响应时间约10~20秒）”的动态特性差异，确保灵活调峰时负荷跟踪与参数稳定的协同^[8]。建模过程中，通过机理分析构建机炉协调动态模型，以电网负荷指令、锅炉燃料量、汽轮机调门开度为输入变量，以机组实发功率、主蒸汽压力、再热蒸汽压力为输出变量，基于能量平衡原理建立锅炉侧“燃料-蒸汽”的动态方程，基于汽轮机功率方程建立“调门开度-实发功率”的动态方程，同时引入耦合项描述机炉间的相互作用；针对机炉耦合关系的非线性特性，采用长短期记忆网络（LSTM）算法，利用机组不同负荷指令下的800组阶跃响应数据，优化模型中的耦合系数，使实发功率与主蒸汽压力的预测误差分别控制在 $\pm 1\%$ 额定功率、 $\pm 0.2\text{MPa}$ 以内。控制优化方面，采用“模型预测控制（MPC）+负荷前馈补偿”的策略，MPC控制器以未来5分钟的负荷指令预测值为输入，结合协调模型的动态特性，在满足主蒸汽压力偏差 $\leq \pm 0.3\text{MPa}$ 、再热蒸汽压力偏差 $\leq \pm 0.15\text{MPa}$ 的约束条件下，优化锅炉燃料量与汽轮机调门开度的控制序列，实现负荷的平稳跟踪；负荷前馈补偿环节则根据负荷指令的变化速率，提前调整锅炉燃料量，抵消锅炉的惯性滞后。

三、基于智能算法的全局多目标协同优化研究

（一）多目标优化问题数学描述

燃煤机组全局优化需平衡“经济性（低煤耗）、环保性（低排放）、安全性（参数稳定）”三大目标，各目标间存在耦合冲突，因此需通过数学建模明确优化边界与目标优先级^[9]。模型选取原煤量、风量、减温水量等关键运行参数为决策变量，并设定设备安全、工艺指标和变量边界三类约束。目标函数则无量纲化地追求最小化供电煤耗、NO_x排放、主蒸汽温度与压力波动。优化问题旨在求解满足所有约束条件下的Pareto最优解集，以揭示各目标间的

权衡关系，为机组在不同工况下的最优运行提供决策支持。

（二）智能优化算法选择与改进

传统多目标优化算法在机组优化中存在短板，NSGA-Ⅱ对高维变量收敛速度慢，MOPSO 易陷入局部最优，结合机组“多变量、强耦合、动态工况”特性，选择改进型非支配排序遗传算法（NSGA-Ⅱ）作为核心优化工具，其优势在于通过非支配排序快速筛选最优解，且引入拥挤度距离保证解集多样性，能适配不同负荷下的优化需求^[10]。算法通过三项关键改进提升性能，一是设计自适应交叉变异算子，动态平衡全局搜索与局部收敛；二是采用“机理约束+随机采样”的混合初始化，提升效率30%；三是引入粒子群引导机制，加速高维变量下的收敛。在某300MW机组上的验证表明，改进算法的收敛速度提升33%，解集多样性提升38%，且在70%负荷下，其最优解在降低煤耗和NO_x排放方面均显著优于基础算法。

（三）机组运行参数全局寻优

结合机组负荷波动特性（30%~100% 额定负荷），采用“负荷区间划分-分区间寻优-解集聚类”的流程确保全工况下的优化适配性，先按负荷变化速率与子系统特性将负荷分为低负荷（30%~50%）、中负荷（50%~80%）、高负荷（80%~100%）三个区间，各区间设定差异化目标权重；再对每个负荷区间以改进NSGA-Ⅱ为工具，输入该区间的历史运行数据，迭代求解 Pareto 最优解集，每区间迭代100次，确保解集覆盖“效率-环保-安全”的平衡区域；采用“熵权-TOPSIS法”对各区间 Pareto 解集进行多属性决策，通过熵权法计算目标权重，再通过 TOPSIS 法计算各解与理想解的贴近度，选取贴近度最大的解作为该区间的“最优运行参数组合”。

（四）优化策略与DCS的集成实现

为实现优化策略与现有 DCS 的无缝对接，采用“边缘计算节点+DCS通信接口”的分层集成架构，分为数据采集层、优化计算层与控制执行层三层，数据采集层通过 DCS 的 OPC UA 协议实

时采集机组运行数据，采样频率设定为1Hz，确保数据时效性；优化计算层部署边缘计算节点（搭载改进 NSGA-Ⅱ 算法与寻优模型），核心功能包括数据预处理（剔除异常值、归一化）、实时判断当前负荷区间并调用对应区间的最优参数模型、根据实时数据偏差动态修正优化参数并生成控制指令；控制执行层通过边缘计算节点与 DCS 的 AO（模拟量输出）接口，将优化后的控制指令下发至现场执行器，同时通过 DI（数字量输入）接口接收设备状态信号，确保指令执行安全。关键技术实现方面，实时性保障上，边缘计算节点采用工业级 CPU，优化算法通过 C++ 编译加速，单次参数计算耗时控制在 100ms 以内，满足机组控制的实时性要求（控制周期≤1s）；安全联锁机制设置三级安全防护，第一级为参数边界联锁，当优化指令超出设备阈值时自动截断；第二级为偏差联锁，当实际参数与优化值偏差超过5%时暂停优化，切换为 PID 控制；第三级为紧急停机联锁，当炉膛压力超限时立即触发 DCS 紧急保护逻辑；数据交互兼容性上，针对不同厂家 DCS，开发标准化通信驱动模块，支持 OPC UA、Modbus-TCP 等多种协议，有效解决异构系统的数据交互问题。

四、结束语

本文围绕“双碳”目标与新能源并网背景下燃煤机组的灵活运行需求，针对现有自动化控制系统在深度调峰场景下的适应性、协同性与智能性短板，系统开展了燃煤机组自动化控制系统的优化研究，形成了从理论建模、子系统优化到全局协同与工程集成的完整技术方案。然而本研究仍存在可深化方向，一是模型对极端煤质的适应性需进一步验证，可后续补充多煤种实验数据以优化模型鲁棒性；二是优化策略尚未与新能源出力预测数据联动，未来可探索“燃煤机组-新能源”协同优化模式，提升整体系统的调峰效率；三是可结合数字孪生技术构建机组全生命周期虚拟仿真平台，实现优化策略的离线验证与在线迭代。

参考文献

- [1] 张超峰. 超超临界机组的锅炉燃烧控制系统的优化 [D]. 华北电力大学, 华北电力大学 (保定), 2017.
- [2] 黄焕袍, 杨宏强, 肖红兵, 等. 1000MW 二次再热超超临界机组国产化控制系统研发与应用 [C]// 中国电机工程学会电力建设专委会 2016 年年会论文集. 2016: 1-5.
- [3] 罗剑. 煤矿发电机电机风闸制动系统自动化改造 [J]. 煤炭技术, 2013(11): 66-67, 68. DOI: 10.3969/j.issn.1008-8725.2013.11.035.
- [4] 孙灵芳, 任栋, 张玉恒, 等. 改进 DRNN 在单元机组协调控制系统参数整定中应用 [J]. 电力自动化设备, 2009, 29(8): 106-109. DOI: 10.3969/j.issn.1006-6047.2009.08.024.
- [5] 张楷. 燃煤机组 SCR 脱硝控制系统设计与应用研究 [D]. 华北电力大学, 华北电力大学 (保定), 2019.
- [6] 秦腾腾. 基于 LMI 的电站燃煤机组协调控制系统设计 [D]. 华北电力大学, 华北电力大学 (保定), 2017.
- [7] 茅依群. 大型燃煤火电机组仿真控制系统仿真的概念与实现 [C]// 2000 年全国电网调度自动化, 仿真技术学术年会论文集. 北京: 中国电机工程学会, 2000: 366-376.
- [8] 黄焰. 300MW 燃煤机组热工自动化系统设计研究 [D]. 江苏: 东南大学, 2001. DOI: 10.7666/d.Y463530.
- [9] 张传胜. 1000MW 超超临界机组自动化控制系统研究与分析 [C]// 清洁高效燃煤发电技术协作网 2007 年会论文集. 2007: 292.
- [10] 吴松涛, 吴光学. 超超临界燃煤机组 DCS 系统控制安全的设计与实现 [J]. 自动化博览, 2018, 35(6): 72-75. DOI: 10.3969/j.issn.1003-0492.2018.06.022.