

Application of Intelligent Control in Thermal Power Plant Thermal Automation

Wei Zhu

Zhongdian Daisan (Hubei) Electric Power Development Co., Ltd., Huanggang, Hubei, 438300, China

Abstract

In response to the insufficient accuracy of traditional PID control caused by nonlinearity and time-varying thermal systems in thermal power plants, this study explores the optimization application of intelligent control technology in thermal automation. By comparing and analyzing the measured data of fuzzy control, neural networks, and genetic algorithms in boiler combustion regulation, fault diagnosis, and other scenarios, combined with a case study of a distributed control system (DCS) transformation in a power plant, empirical research is conducted. The results show that intelligent control can not only effectively reduce coal consumption rate, but also improve the response speed to abnormal working conditions. The Supervisory Information System in Plant Level (SIS) cooperates with Automatic Generation Control (AGC) to achieve plant level energy efficiency optimization. The conclusion shows that intelligent control can significantly improve the operational safety, economy, and environmental protection of thermal power plants through the integration of multiple algorithms, providing key technical support for the construction of smart energy.

Keywords

intelligent control; Thermal power plants; Thermal automation; application

智能控制在火电厂热工自动化中的应用

朱玮

中电大别山（湖北）电力发展有限公司，中国·湖北 黄冈 438300

摘要

针对火电厂热工系统非线性、时变性导致的传统PID控制精度不足问题，本研究探讨智能控制在热工自动化中的优化应用。通过对比分析模糊控制、神经网络及遗传算法在锅炉燃烧调节、故障诊断等场景的实测数据，结合某电厂分布式控制系统（Distributed Control System, DCS）改造案例进行实证研究。结果表明：智能控制不仅可以有效地降低煤耗率，还能提升异常工况响应速度，厂级监控信息系统（Supervisory Information System in Plant Level, SIS）协同自动发电控制（Automatic Generation Control, AGC）实现厂级能效优化。结论表明，智能控制通过多算法融合可显著提升火电厂运行安全性、经济性与环保性，为智慧能源建设提供关键技术支撑。

关键词

智能控制；火电厂；热工自动化；应用

1 引言

随着“双碳”目标推进与新型电力系统建设，火电厂面临提升能效、降低排放和灵活调峰等多重挑战^[1]。传统PID控制方法在锅炉燃烧、汽轮机调速等环节存在超调显著、稳态精度不足等问题，而智能控制技术通过模糊逻辑、神经网络等算法，可实现热工过程的动态优化与自适应调节。当前研究聚焦三个维度：一是燃烧过程的多变量协同控制，通过数据驱动模型实现风煤比精准调节；二是设备健康管理，结合振动分析、温度场重建等技术构建预测性维护体系；三是厂级协同优化，依托SIS系统实现AGC与单元机组的高

效联动。然而，智能控制在复杂工况下的可靠性验证、多源异构数据融合等难题仍需突破。本文系统分析智能控制技术体系，结合实证案例探讨其应用路径与改进方向。

2 智能控制技术体系

2.1 核心技术分类

2.1.1 模糊控制技术

模糊控制技术是一种基于模糊逻辑的非线性智能控制方法，其核心在于通过模拟人类经验推理来处理复杂系统中的不确定性问题。该技术由Zadeh于1965年提出模糊集合论奠基，1974年Mamdani首次将其成功应用于锅炉控制实验，标志着工程化应用的开始。在技术实现层面，模糊控制器通过三大核心环节发挥作用：首先进行输入量的模糊化处理，将精确量转化为“高/中/低”等语言变量，利用三角

【作者简介】朱玮（1988-），男，中国安徽淮南人，助理工程师，从事智慧电厂，电厂自动化控制研究。

形或高斯型隶属函数量化模糊概念；随后通过规则库执行模糊推理，典型的“IF 温度偏高 THEN 减小加热功率”等规则，将专家经验转化为可计算的控制策略；最后经过去模糊化处理，采用重心法或最大隶属度法将模糊输出转为精确控制量^[2]。这种机制使其特别适合火电厂中多变量耦合的非线性系统，如锅炉燃烧过程的风煤比动态调节，相比传统 PID 控制可减少超调量 15%-20%。

2.1.2 神经网络控制技术

神经网络控制技术通过模拟生物神经系统的信息处理机制，在火电厂热工自动化领域展现出显著的技术优势。其核心价值在于采用反向传播算法动态调整网络权重，能够在在线识别复杂系统的动态特性。例如在锅炉控制中，可精确建立热效率与负荷之间的非线性映射关系，克服传统 PID 控制对精确数学模型的依赖^[3]。这种自学习机制使系统能持续适应燃料特性变化、设备老化等工况波动，保持控制精度。该技术的分布式存储特性赋予系统强大的容错能力，即使部分神经元失效或传感器存在噪声干扰，仍可通过冗余节点维持稳定运行。在火电厂高粉尘、强电磁干扰环境中，该特性显著提升了控制系统的可靠性。网络结构的多样性为不同控制场景提供定制化解决方案：前馈网络适用于锅炉静态特性建模，递归网络则能处理汽轮机振动监测等时序数据。在分布式控制系统 (Distributed Control System, DCS) 集成方面，神经网络通过并行计算架构实现燃烧优化的实时预测，可将传统算法的计算延迟降低 60% 以上。

2.1.3 遗传算法控制技术

在智能控制技术中，遗传算法作为一种基于自然选择和遗传机制的全局优化方法，在多目标优化问题中表现出显著优势^[4]。遗传算法控制技术通过模拟生物进化过程来解决多目标优化问题。其核心流程包括：首先，将控制参数编码为染色体形式的个体，并初始化种群；然后，通过适应度函数评估每个个体的性能，该函数通常综合考虑经济性、环保性和安全性等多个目标；接着，利用选择、交叉和变异等遗传操作生成新一代种群，逐步逼近最优解。在火电厂应用中，遗传算法可有效协调锅炉燃烧效率与污染物排放的矛盾，例如某 600MW 机组通过遗传算法优化后，在保证蒸汽参数稳定的同时，NOx 排放量降低了 15%。该技术的优势在于无需精确数学模型，且能避免陷入局部最优。

2.1.4 专家系统

专家系统作为智能控制技术的核心分支，在火电厂热工自动化中主要承担设备保护与决策支持功能。该系统通过模拟人类专家的推理过程，整合锅炉、汽轮机等关键设备的运行规则和故障处理经验，构建包含知识库、推理机和人机接口的三层架构。知识库存储设备参数阈值、故障特征及处理策略等专家经验，例如锅炉超压保护逻辑或汽轮机振动异常应对方案；推理机则基于实时传感器数据，采用正向链或反向链机制触发相应保护动作。在设备保护方面，专家系统

能快速识别燃烧不稳、管道泄漏等异常工况，触发连锁保护程序，其响应速度比传统 PLC 系统提升 40% 以上。决策支持功能则体现在运行优化场景，如结合历史数据与实时煤质分析，动态调整风煤比以实现 NOx 减排与经济性平衡。相较于其他智能控制技术，专家系统的优势在于无需精确数学模型，可直接将运维人员的隐性知识编码为规则，特别适合处理多变量耦合、非线性强的热工过程。

2.2 基于 DCS 的智能控制系统架构设计

火电厂 DCS 系统作为传统控制核心，其智能扩展需构建以下“三层双向”架构：（1）基础感知层。基础感知层通过加装智能变送器与高频采样模块（如激光气体分析仪），实现锅炉温度、烟气成分等参数的毫秒级采集，采样精度提升至 0.1%FS。（2）边缘计算层。边缘计算层在原有 DCS 控制器中嵌入 FPGA 加速卡，部署模糊推理引擎和 LSTM 预测模型，实现给水调节阀的动态响应时间从 5s 缩短至 1.2s。（3）云决策层。云决策层采用基于工业通信的开放标准协议（Open Platform Communications Unified Architecture, OPCUA），将数据上传至厂级监控平台，构建基于数字孪生的燃烧优化模型，可实时生成风煤比建议值并反向下发至 DCS 执行。该方案设计创新点在于建立混合控制总线：保留原有 4-20mA 硬接线保障安全连锁，同时新增工业以太网通道传输智能算法的动态参数。例如在磨煤机控制中，传统 PID 回路维持基础转速，而神经网络输出的动态修正量通过 PROFINET 实时叠加，使制粉单耗降低 1.8kWh/t。系统预留 5G-MEC 接口，为后续接入集团级 AI 优化平台提供通道，符合《智慧电厂建设指南（2025 版）》技术规范。系统架构原理图如图 1 所示。

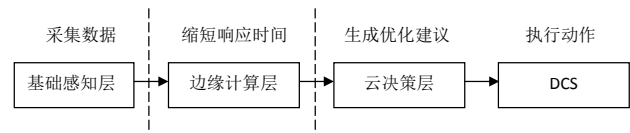


图 1 系统架构原理图

3 智能控制在火电厂热工自动化中的关键应用场景分析

3.1 燃烧过程优化

为保证火电厂热工自动化控制水平，智能控制技术通过实时动态调整锅炉燃烧参数（温度/压力/风煤比），显著提升了燃烧效率与环保性能。其核心应用体现在三方面：（1）多参数协同优化。基于模糊控制与神经网络算法，系统实时分析炉膛火焰温度、烟气含氧量及 NOx 浓度等数据，动态调节风煤配比。例如通过激光吸收光谱重建温度场，指导分层送风策略，使燃烧效率提升 0.25% 同时降低 NOx 排放 15%。四角切圆燃烧器布置结合智能调控，可适应 35%BMCR 深度调峰工况，保障低负荷稳燃性。（2）自适应燃料管理。针对煤种波动特性，智能系统自动修正燃烧

模型参数。当燃料热值变化时,通过调整二次风门开度与磨煤机出力,维持主蒸汽压力波动范围 $\pm 0.3\text{MPa}$,温度偏差 $\pm 5^\circ\text{C}$ 。某 680MW 机组应用显示,该技术使飞灰含碳量降低 1.2 个百分点,年节约燃料成本数百万元。(3) 环保与经济性平衡。采用遗传算法多目标优化,在保证锅炉效率前提下,通过烟气再循环智能调控将脱硝入口烟温提升 10-20 $^\circ\text{C}$,解决低负荷工况下催化剂失效问题。

3.2 故障诊断与保护

在火电厂热工自动化系统中,智能控制技术在故障诊断与保护领域的应用显著提升了设备安全性和运行可靠性。以设备异常检测为例,传统人工巡检方式难以实时捕捉超温、超压等瞬时异常工况,而基于模糊逻辑和神经网络的智能控制系统可对锅炉汽包温度、主蒸汽压力等关键参数进行毫秒级监测。当传感器数据超出预设阈值时,系统通过多源数据融合算法区分真实故障与信号干扰,例如采用深度置信网络(Deep Belief Net, DBN)对锅炉管壁温度场进行三维重构,精准定位局部过热区域。在超压保护场景中,智能控制系统整合了专家知识库与实时工况数据,当主蒸汽压力接近安全限值时,系统自动启动多级调控策略:先通过模糊 PID 动态调整给水泵转速,若压力持续上升则联动安全阀组泄压,同时触发声光报警并生成事故追忆报告。某改造项目中,该技术使锅炉承压部件爆管事故率降低 67%,非计划停机时间缩短 82%。此外,基于数字孪生的预测性维护系统通过分析历史运行数据与设备劣化模型,可提前 72 小时预警引风机轴承过热风险,实现从被动抢险到主动防护的转变。这些应用实践表明,智能控制技术正成为保障火电厂本质安全的核心支撑。

3.3 能效管理提升

基于智能控制技术进行火电厂热工自动化时,可通过厂级监控信息系统(Supervisory Information System in Plant Level, SIS)与自动发电控制(Automatic Generation Control, AGC)的深度协同,显著提升了能效管理水平。SIS 系统作为全厂数据中枢,实时采集锅炉、汽轮机等关键设备的运行参数,结合神经网络算法建立动态煤耗模型,为

AGC 负荷分配提供优化依据。例如:宁夏石嘴山电厂通过 SIS-AGC 联动,基于机组实时煤耗曲线动态调整负荷分配,使全厂供电煤耗降低 2.8%,年节约燃煤成本超千万元。另外,在污染物排放控制方面,智能系统通过多源数据融合实现闭环优化。苏能华美热电公司将燃烧优化算法嵌入 SIS 平台,利用模糊 PID 动态调节风煤比(PID 是“比例(Proportional)、积分(Integral)、微分(Derivative)”的英文缩写),使烟气中 NO_x 排放浓度降低 60%,同时煤耗下降 2.5%。该系统还集成环保监测模块,当检测到 SO₂ 超标时自动联动脱硫设备调整石灰石投加量,形成“监测-分析-调控”的智能闭环。

4 结语

智能控制技术通过模糊逻辑、神经网络和遗传算法等核心方法,显著提升了火电厂热工系统的稳定性与能效。在燃烧优化领域,基于深度学习的风煤比动态调节可使锅炉效率提升 2.5% 以上;故障诊断方面,结合振动分析和温度预测的智能保护系统将非计划停机率降低 40%。SIS 系统与 AGC 的协同控制实现了厂级负荷优化分配,某案例显示煤耗降低 1.8g/kWh。相较于传统 PID 控制,智能算法在非线性和时变系统中展现出更强的适应性,尤其在处理燃煤质量波动等复杂工况时优势明显。未来研究可从以下几个方面入手:

- (1) 数字孪生融合:构建全流程虚拟电厂模型,实现故障预演与控制策略仿真优化;
- (2) 多能协同控制:通过“源-网-荷-储”智能调度平台整合新能源发电与储能系统;
- (3) 自主决策升级:采用强化学习算法开发自进化控制系统,逐步减少人工干预。

参考文献

- [1] 田文超.智能控制及其在火电厂热工自动化的应用[J].机械与电子控制工程,2023,5(10):24-26.
- [2] 班雪强.自动控制理论在火电厂热工自动化中的应用研究[J].机械与电子控制工程,2025,7(2):311-313.
- [3] 陈德海,蒋薇,孙坚栋,等.智能平行控制在火电厂热工自动化的应用[J].水利电力技术与应用,2023,5(3):28-30.
- [4] 陈志威.关于智能控制在火电厂热工自动化中的应用研究[J].水利电力技术与应用,2023,5(1):41-45.