

煤化工电站锅炉智能控制技术应用实践

柳 佳

国家能源集团宁夏煤业有限责任公司煤制油分公司 宁夏 银川 750411

摘 要：煤化工电站锅炉运行呈现多变量耦合与非线性动态特性，传统控制方法难以满足高效清洁运行需求。本文聚焦智能控制技术应用，构建涵盖感知层、决策层与执行层的核心体系架构，阐述多变量耦合控制、工况自适应调节及故障预警容错控制等关键技术原理，提出控制目标与指标体系构建、技术选型匹配及系统集成联动机制设计的实施路径。为煤化工电站锅炉智能控制提供理论支撑与技术方案，推动锅炉运行向自动化、精准化与智能化方向升级。

关键词：煤化工电站锅炉；智能控制技术；多变量耦合控制；故障预警容错

引言：煤化工产业作为能源转化关键领域，电站锅炉运行效率与稳定性直接影响生产效益与环保水平。传统锅炉控制依赖PID与经验规则，面对煤种变化、负荷波动及环境干扰时，存在参数整定困难、适应性差等问题，导致燃烧效率低、污染物排放超标及设备损耗加剧。智能控制技术通过数据驱动与模型融合，突破传统控制局限，具备自学习、自组织与自优化能力，可实时感知系统状态并动态调整控制策略，成为提升锅炉运行性能的核心手段。研究智能控制在煤化工电站锅炉的应用，对推动产业绿色转型与智能化升级具有重要意义。

1 煤化工电站锅炉运行特性与智能控制需求

1.1 锅炉工艺系统核心构成

煤化工电站锅炉工艺系统由燃烧系统、汽水系统及辅助系统三大模块构成。燃烧系统涵盖燃料供给装置、空气预热器、燃烧器及炉膛结构，通过燃料与氧化剂的混合燃烧实现能量释放。燃料供给装置需根据煤种特性调整给料速率与粒度分布，空气预热器利用烟气余热提升助燃空气温度，燃烧器设计直接影响火焰形态与燃烧效率，炉膛结构则决定热辐射强度与烟气流动路径。汽水系统包含省煤器、汽包、水冷壁、过热器及再热器等部件，通过水循环与相变过程将燃烧热能转化为蒸汽动能。省煤器利用烟气余热加热给水，汽包实现汽水分离与压力平衡，水冷壁吸收炉膛辐射热产生蒸汽，过热器与再热器进一步提升蒸汽温度以满足汽轮机做功需求。辅助系统涉及吹灰装置、除渣设备、烟气净化单元及控制系统，吹灰装置定期清除受热面积灰以维持传热效率，除渣设备排除燃烧产生的灰渣，烟气净化单元通过脱硝、除尘、脱硫等工艺降低污染物排放，控制系统则协调各子系统运行参数以实现整体优化。

1.2 锅炉运行关键参数特征

锅炉运行参数呈现多变量耦合、非线性动态及时变

特性^[1]。负荷需求变化时，燃料量、送风量、引风量需协同调整以维持蒸汽压力与温度稳定，但各参数响应速度存在差异，导致系统出现短暂失衡。煤种变化直接影响燃烧特性，挥发分含量影响点火延迟时间，灰分含量改变结渣倾向，水分含量影响燃烧效率，要求控制系统具备快速适应能力。环境温度与湿度波动通过影响空气密度与燃料水分间接改变燃烧工况，需实时修正控制策略。关键参数间存在强耦合关系，燃料量增加需同步提升送风量以维持最佳空燃比，否则将导致燃烧不完全或NO_x生成量激增；蒸汽压力变化通过影响汽包水位产生虚假液位现象，干扰给水调节准确性。参数动态特性表现为大滞后与快时变并存，燃料从进入炉膛到完全燃烧需数秒至数十秒，而蒸汽压力对负荷变化的响应仅需数毫秒，这种时间尺度差异增加了控制难度。

1.3 智能控制技术适配性基础

传统控制方法难以应对锅炉运行复杂性，为智能控制技术应用提供必要性。PID控制依赖精确数学模型，但锅炉系统存在强非线性与不确定性，导致参数整定困难且鲁棒性不足。经验规则控制依赖专家知识，面对新型煤种或极端工况时适应性受限。智能控制技术通过数据驱动与模型融合突破传统局限，神经网络可逼近任意非线性函数，通过历史数据训练建立输入输出映射关系，实现参数自适应调整；模糊控制将专家经验转化为语言规则，通过隶属度函数处理不确定性信息，增强系统容错能力；模型预测控制基于滚动优化策略，在有限时域内求解多变量优化问题，有效协调冲突目标。这些技术具备自学习、自组织与自优化能力，可实时感知系统状态变化并动态调整控制策略，满足锅炉高效清洁运行需求。

2 智能控制技术核心体系架构

2.1 感知层数据采集架构

感知层数据采集架构是智能控制体系的信息输入核

心,主要负责锅炉运行全参数的实时采集与初步处理,为后续决策调控提供可靠数据支撑^[2]。架构以分布式采集为核心模式,部署多类型高精度传感器与数据采集模块,覆盖锅炉燃烧系统、汽水系统、烟气处理系统及辅助设备的关键运行参数。采集范围包括燃料组分、炉膛温度、汽包水位、蒸汽压力、烟气污染物浓度等核心参数,采用高频采集与异步传输模式,减少数据传输延迟。架构集成数据预处理模块,实现采集数据的降噪、滤波与标准化转换,剔除异常数据干扰,保障数据完整性与准确性。数据采集架构采用工业以太网与无线传感网络融合的传输方式,兼顾数据传输的实时性与可靠性,符合工业过程控制数据采集的通用技术规范,为决策层提供高质量的原始数据输入。

2.2 决策层控制策略架构

决策层控制策略架构是智能控制体系的核心中枢,基于感知层传输的标准化数据,完成锅炉运行状态研判与控制指令生成。架构融合模型预测控制、模糊控制、自适应控制等先进控制算法,构建多算法协同的控制策略体系,适配煤化工电站锅炉运行工况的动态变化。架构内置锅炉运行状态研判模型,通过对实时采集数据的分析,识别运行工况的变化趋势,结合锅炉运行的工艺要求,生成最优控制策略。控制策略架构具备自主学习能力,可根据锅炉长期运行数据,优化控制参数与算法模型,适配不同负荷、不同燃料组分下的运行需求。架构采用集中式决策与分布式处理相结合的模式,实现多系统控制指令的协同生成,避免控制指令冲突,保障控制策略的科学性与合理性,符合智能控制领域分层决策的主流技术路径。

2.3 执行层控制执行架构

执行层控制执行架构是智能控制指令的落地载体,负责接收决策层输出的控制指令,并精准转化为锅炉设备的运行动作,实现对锅炉运行状态的精准调控。架构由执行机构、驱动模块与反馈模块组成,执行机构涵盖燃料供给调节装置、配风调节机构、水位控制阀门、温度调节设备等核心部件,采用智能化驱动模块,保障控制指令的快速响应与精准执行。架构集成闭环反馈机制,实时采集执行机构的运行状态数据,反馈至决策层,形成“采集-决策-执行-反馈”的闭环控制流程。执行层架构具备抗干扰能力,可适应煤化工电站复杂的工业环境,减少环境因素对控制执行精度的影响,同时采用模块化设计,便于设备维护与升级,契合工业控制设备标准化、模块化的发展趋势,确保控制指令能够精准落地,实现锅炉运行状态的稳定调控。

3 关键智能控制技术原理与应用逻辑

3.1 多变量耦合控制技术原理

多变量耦合控制技术针对锅炉系统中燃料量、送风量、引风量、蒸汽压力等参数间的强交互作用设计。传统解耦方法通过构建逆传递函数矩阵消除变量间关联,但锅炉动态特性随工况变化显著,固定解耦矩阵难以适应全负荷范围。智能解耦策略采用神经网络补偿器,利用历史数据训练网络参数,实时估计并抵消耦合效应^[3]。模型预测控制框架内嵌动态解耦机制,将多变量优化问题分解为单变量子问题,通过滚动优化逐步协调各变量调整步长。交叉限制逻辑通过设定燃料量与送风量的动态约束边界,确保空燃比始终处于安全区间,当燃料量增加时,送风量调整速率受限于燃烧稳定性要求,避免局部缺氧导致燃烧恶化。协调控制层引入虚拟变量概念,将蒸汽压力、炉膛负压等被控量映射为统一控制目标,通过权重分配实现多目标协同优化,权重系数根据运行优先级动态调整,负荷变化时侧重压力稳定,稳态运行时强化效率优化。

3.2 工况自适应调节技术原理

工况自适应调节技术通过实时感知系统状态变化自动修正控制策略。基于在线辨识的参数自适应方法利用递推最小二乘法持续更新锅炉动态模型参数,当煤种或环境条件改变时,模型结构保持不变而参数动态调整,确保控制算法基于最新系统特性运行。模式识别模块采用模糊聚类算法对历史工况数据分类,建立典型工况特征库,新工况下通过计算当前状态与特征库的相似度匹配最优控制模式,实现经验知识的迁移应用。强化学习机制构建工况-动作-奖励映射关系,智能体在交互过程中学习不同工况下的最优控制动作,值函数近似采用径向基函数网络,提升高维状态空间的处理能力。迁移学习技术将相似锅炉的控制经验迁移至当前系统,通过特征提取层共享通用控制知识,个性化调整层适配具体设备特性,缩短自适应周期并降低数据需求量。

3.3 故障预警与容错控制技术原理

故障预警与容错控制技术构建分层防御体系保障系统可靠性。数据驱动故障检测层采用主元分析法提取正常运行数据的主成分空间,通过监测新数据在残差空间的投影判断故障发生,结合核密度估计确定故障阈值,避免误报与漏报。知识推理故障诊断层构建基于产生式规则的专家系统,将设备结构、运行规律与故障现象编码为规则库,通过正向推理定位故障源,反向推理验证诊断结果。容错控制层设计重构控制律,当传感器故障时,利用状态观测器估计真实值替代故障信号,执行机

构故障时,通过调整其他执行机构输出补偿失效通道影响,控制律重构基于伪逆矩阵理论确保系统稳定性。恢复控制策略根据故障严重程度分级响应,轻度故障触发参数调整机制维持运行,严重故障启动安全保护程序,通过降负荷运行或紧急停炉避免事故扩大,故障排除后实施自恢复流程逐步恢复原始工况。

4 智能控制技术实施路径设计

4.1 控制目标与指标体系构建

控制目标构建需立足煤化工电站锅炉运行核心需求,契合新一代煤电升级对智能控制的核心要求,以强化负荷调节自动化性能、提升控制精准度、减少人工干预为核心导向,兼顾安全运行、能效提升与环保达标三大维度^[4]。指标体系构建需依托煤电智能控制相关技术规范,细化量化控制目标,涵盖运行稳定性、控制精准度、能耗控制及环保控制等关键维度,明确各指标的合理取值范围与判定标准。指标设定需结合锅炉工艺系统运行参数特征,确保与智能控制技术适配性基础相契合,既体现智能控制的技术优势,又符合煤化工电站生产实际需求,为后续技术选型、系统集成提供明确的导向依据。

4.2 控制技术选型与匹配原则

控制技术选型需遵循安全性、先进性、成熟性、开放性和可维护性的核心原则,优先选用经过工业场景验证、适配煤化工电站锅炉复杂运行工况的技术类型。选型过程中需充分考量锅炉运行关键参数特征,结合感知层、决策层、执行层的架构需求,合理选择控制算法与硬件设备。硬件选型需注重设备可靠性与运行适配性,传感器、执行器及控制器的选择需匹配锅炉高温、高湿、强干扰的运行环境,确保数据采集的准确性与控制执行的稳定性。软件算法选型需适配多变量耦合、工况波动等运行特点,兼顾控制精度与响应速度,同时考量技术的扩展性,为后续控制逻辑迭代优化预留空间,实现技术与锅炉运行需求的精准适配。

4.3 系统集成与联动机制设计

系统集成需以分层分布式架构为基础,整合感知层

数据采集设备、决策层控制单元与执行层执行设备,实现各层级功能的有机衔接与高效协同。集成过程中需遵循统一的工业通信协议,确保各设备、各模块间的数据高效传输与交互,打破信息孤岛,构建完整的智能控制闭环^[5]。联动机制设计需聚焦锅炉运行全流程,涵盖燃料供给、燃烧调节、参数调控等关键环节,建立各子系统间的协同调控逻辑,实现“智能监盘—自动决策—精准执行”的闭环运行模式。联动逻辑需充分考虑锅炉运行的非线性、强耦合特性,通过数据驱动实现各控制环节的精准配合,提升系统整体控制效能,保障锅炉运行的稳定性与高效性,契合煤化工电站智能转型的核心需求。

结束语

智能控制技术在煤化工电站锅炉的应用,通过构建多层级体系架构与融合先进控制算法,有效解决了传统控制方法在多变量耦合、工况波动及故障处理等方面的局限性。研究提出的实施路径从目标构建、技术选型到系统集成,形成完整的技术落地方案,为锅炉高效清洁运行提供保障。实际应用中需持续优化控制策略与算法模型,强化数据安全与系统可靠性,推动智能控制技术与锅炉工艺的深度融合,助力煤化工产业高质量发展。

参考文献

- [1]杨凯,薛美盛.智能控制策略在燃气锅炉燃烧优化中的应用[J].化工自动化及仪表,2021,48(2):114-117,174.
- [2]赖小明,陈昊,邹婷,等.燃煤电站锅炉炉膛温度的TDLAS测量研究[J].应用激光,2021,41(2):412-415.
- [3]马宁,刘磊,杨振勇,等.考虑输入变量时延-特征提取的燃煤电站NO_x排放动态建模[J].华北电力大学学报(自然科学版),2025,52(1):110-117.
- [4]郁雷,邱全山,刘自民,等.自备电厂煤粉锅炉掺烧生物质试验[J].能源研究与利用,2023,(06):45-48.
- [5]刘鹏宇,李德波,刘彦丰,等.燃煤电厂煤粉燃烧过程中辐射传热计算方法研究进展与展望[J].广东电力,2022,35(04):11-20.