

研究论文

DOI: 10.63221/ecsp.v2i04.8-14

亮点:

- 融合在线辨识与预测控制, 攻克汽温大延迟与非线性难题。
- 前馈-反馈协同自适应控制, 宽负荷汽温波动降至 $\pm 4^{\circ}\text{C}$ 以内。
- 壁温约束与再热器扩容协同, 额定负荷再热汽温提升 $\geq 5^{\circ}\text{C}$ 。

*通讯作者邮箱:

zhanglei60@crpower.com.cn

英文引用: Zhang Lei et al., 2026. Wide-Load Adaptive Optimal Control of Main and Reheat Steam Temperatures. Evidence in Engineering Science and Practice, 2 (04), 8-14.

中文引用: 张磊等., 2026. 主/再热汽温宽负荷自适应优化控制. 工程科学与实践, 2 (04), 8-14.

稿件处理节点:

接收	2026 年 10 月 16 日
修订	2026 年 10 月 22 日
接受	2026 年 10 月 22 日
发表	2026 年 10 月 23 日

基金资助:

本研究未受到资金资助。

版权:

本作品原创内容可依据《知识共享署名 4.0 国际许可协议》条款使用。任何对本作品的后续分发须标明原作者及作品标题、期刊引用及 DOI 信息。

主/再热汽温宽负荷自适应优化控制

张磊¹, 杨超超¹, 贾秀锋¹¹ 华润电力登封有限公司, 郑州 452400

摘要 面向“双碳”目标和新型电力系统建设, 燃煤机组深度调峰与宽负荷巡航成为常态。主蒸汽温度和再热蒸汽温度作为锅炉热力系统的核心参数, 在宽负荷工况下呈现出强非线性、大延迟、大惯性、多变量耦合和时变特性, 传统 PID 控制难以兼顾调节速度与稳定性。本文结合华润电力登封有限公司一期 2×330MW 亚临界燃煤机组宽负荷巡航控制科研项目, 分析了深调及现货市场背景下主/再热汽温控制面临的主要挑战, 提出了一种以在线辨识与预测控制为核心、前馈-反馈协同与壁温约束为保障、低温再热器扩容为辅助的自适应优化控制策略。该策略通过构建汽温对象在线模型、优化减温水前馈-反馈回路、融合多步超前控制及配置设备扩容, 实现宽负荷段汽温平稳控制。工程应用表明, 动态变负荷过程中主汽温度波动范围不超过 $\pm 4^{\circ}\text{C}$, 再热蒸汽温度动态偏差不超过 $\pm 8^{\circ}\text{C}$, 额定负荷下再热汽温提高不小于 5°C , 事故喷水流量明显降低, 机组运行经济性和灵活性显著提升。

关键词: 主汽温; 宽负荷巡航; 再热汽温; 自适应控制; 预测控制

Wide-Load Adaptive Optimal Control of Main and Reheat Steam Temperatures

Zhang Lei¹, Yang Chaochao¹, Jia Xiufeng¹¹ China Resources Power Dengfeng Co., Ltd., Zhengzhou 452400, China

Abstract Facing the "dual carbon" goals and the construction of a new-type power system, deep peak shaving and wide-load cruising of coal-fired units have become the norm. As core parameters of the boiler thermal system, main steam temperature and reheat steam temperature exhibit strong nonlinearity, large delay, large inertia, multivariable coupling, and time-varying characteristics under wide-load conditions, making it difficult for traditional PID control to balance regulation speed and stability. Based on the wide-load cruise control research project of the Phase I 2×330 MW subcritical coal-fired units of China Resources Power Dengfeng Co., Ltd., this paper analyzes the main challenges faced by main/reheat steam temperature control under the background of deep peak shaving and the spot market, and proposes an adaptive optimal control strategy with online identification and predictive control as the core, feedforward-feedback coordination and wall temperature constraints as the guarantee, and low-temperature reheater capacity expansion as the auxiliary. By constructing an online model of the steam temperature plant, optimizing the feedforward-feedback loop of desuperheating water, integrating multi-step lead control, and configuring equipment capacity expansion, this strategy achieves smooth steam temperature control in the wide-load range. Engineering application shows that during dynamic load changes, the fluctuation range of main steam temperature does not exceed $\pm 4^{\circ}\text{C}$, the dynamic deviation of reheat steam temperature does not exceed $\pm 8^{\circ}\text{C}$, the reheat steam temperature under rated load is increased by no less than 5°C , the emergency spray water flow is significantly reduced, and the operating economy and flexibility of the unit are significantly improved.

Keywords: Main steam temperature; wide-load cruising; reheat steam temperature; adaptive control; predictive control

1. 引言

随着新能源装机快速增长,火电机组正向基础保障性和系统调节性电源转型,国家相关规划明确提出要全面推进煤电灵活性改造^[1-2]。目前,河南电网新能源装机占比已超火电,火电机组需在 20%Pe~40%Pe 甚至更低负荷区间稳定运行,并具备快速响应 AGC 指令的能力。

主/再热汽温直接影响机组热效率、受热面安全与汽轮机寿命。汽温过高易导致受热面超温与蠕变加速,过低则降低循环效率(长期偏低 5℃以上热耗增加约 0.2%~0.3%)。深调工况下,锅炉烟温、蒸汽流量等参数大幅变化,汽温对象非线性与时变性突出,传统“前馈+PID”模式难以兼顾调节速度与稳定性,易出现超调、振荡及喷水量过大等问题。

火电机组汽温控制技术的发展经历了从常规串级 PID 向智能化、预测化方向的持续演进。早期以串级 PID 控制为主流,通过导前汽温微分信号和分段控制改善大延迟对象的调节品质,牛培峰等对此阶段的结构与方法进行了系统总结^[3]。随着对象非线性与时变性的凸显,模糊控制与自适应机制被引入 PID 框架,形成了模糊自整定 PID 及自适应模糊汽温控制系统,在一定程度上提升了变工况下的鲁棒性^[4-5]。近年来,模型预测控制(MPC)凭借滚动优化与约束处理能力,开始在火电主汽温控制中工程化应用,蔡利军等将 MPC 应用于 660MW 超超临界机组,验证了其相对于传统 PID 在负荷控制精度与变负荷速率上的优势^[6]。在此演进脉络下,学术界围绕深调工况下的汽温控制开展了大量研究^[7]。康东东从先进算法、炉侧改进等维度梳理了优化路径,指出多变量解耦预测控制可有效减小汽温波动^[8];高志晓等提出了基于模糊推理的参数自整定自适应 PID 方法^[9];闫磊则指出智能算法与传统 PID 融合是提升控制品质的重要方向^[10]。

然而,现有研究多聚焦单一算法改进或纯仿真验证。马凯等指出,主流调节方法在低负荷汽温维持与灵活运行方面仍面临挑战^[11]。针对低负荷段汽温偏低与壁温超限的突出矛盾,现有文献多从控制侧或设备侧单一维度展开,缺乏先进控制算法与受热面扩容、壁温约束的深度协同^[12],且缺乏宽负荷实机的长期运行验证。

为此,本文依托相关科研项目,结合登封一期 2×330MW 亚临界机组 DCS 改造实践,研究主/再热

汽温宽负荷自适应优化控制技术,旨在通过多维度协同策略弥补上述缺口,满足 DL/T657—2015 规程^[13]及属地电网“两个细则”要求。

2. 深调及现货市场下主/再热汽温控制挑战

2.1. 宽负荷运行对象非线性

锅炉汽温对象在额定负荷附近相对稳定,但在低负荷段,烟气侧和蒸汽侧换热特性发生显著变化。机组负荷降低后,燃料量减少,炉膛出口烟温下降,再热器入口烟温降低,再热汽温偏低问题突出。以登封一期 330MW 亚临界机组为例,额定负荷下再热器入口烟温约为 480℃,而在 40%Pe 负荷下可降至 380℃以下,再热汽温偏差可达 30℃以上。同时,蒸汽流量减少,蒸汽在受热面内停留时间延长,汽温对减温水量的敏感度增强。相同减温水扰动下,低负荷段汽温变化幅度可能明显大于高负荷段。研究表明,在 30%Pe 工况下,相同减温水流量变化引起的汽温变化量可达额定负荷下的 1.5~2 倍^[14]。若仍采用固定 PID 参数,容易出现“高负荷欠调、低负荷过调”的现象。

此外,煤质变化和分层掺烧进一步加剧了对象非线性。入炉煤热值在±20%范围内波动时,炉膛燃烧工况和烟温分布发生显著变化,汽温对象增益和时间常数随之改变,传统固定参数 PID 控制器难以适应这种大范围工况变化。

2.2. 大延迟与大惯性

汽温对象是典型的大延迟、大惯性对象。减温水从调节阀动作到汽温测点响应,需经过喷水雾化、混合、换热、蒸汽流动等多个环节,时间常数和纯延迟随负荷变化。以过热器减温水系统为例,从减温水调节阀动作到末级过热器出口汽温响应,纯延迟时间约为 30~60s,时间常数约为 80~150s。在低负荷工况下,烟气侧和蒸汽侧能量平衡变化缓慢,汽温响应滞后更加明显,纯延迟可增大至 60~90s。常规 PID 控制器难以在快速性和稳定性之间取得最优,往往出现调节周期长、超调大、恢复慢等问题。

在变负荷过程中,燃料量和风量先行变化,炉膛燃烧和烟温变化传递到汽温测点需要更长时间。若控制器仅依靠反馈调节,必然存在较大滞后,导致汽温波动幅度增大。因此,必须引入前馈控制和预测控制,提前补偿对象延迟。

2.3. 多变量耦合

汽温控制涉及负荷、燃料量、风量、给水量、烟气挡板、减温水、汽轮机调门等多个变量。负荷指令变化时,燃料量和风量首先变化,引起炉膛燃烧和烟温变化,进而影响汽温;给水流量变化会影响汽包水位和蒸汽流量,间接影响汽温;汽轮机调门动作会改变主蒸汽压力和流量,对汽温产生扰动。各变量之间强耦合,单回路PID难以实现全局优化。

具体而言,燃料量增加会同时影响主汽温、再热汽温、主蒸汽压力和炉膛负压;减温水增加会降低主汽温,但可能引起汽包水位波动;烟气挡板调整会影响再热汽温,同时改变锅炉尾部烟道换热分布。这种强耦合特性在低负荷工况下更为突出,当机组处于干态转湿态临界点附近时,给水系统的调节作用与汽温控制之间的耦合关系发生变化,传统解耦控制策略往往难以适应。

2.4. 低负荷再热汽温低与壁温安全矛盾

深度调峰时,再热器入口烟温降低,再热汽温低于设计值,若单纯依靠增加燃料量或减少减温水,可能引起屏式过热器、高温再热器等受热面壁温超限。以登封一期机组为例,在40%Pe负荷下,再热汽温可降至520℃以下,低于设计值537℃约17℃,而高温再热器壁温已接近报警值。因此,宽负荷汽温控制不仅要追求汽温稳定,还必须兼顾壁温安全,避免因超温导致机组非停或受热面损伤。

低负荷下再热汽温偏低的问题严重制约了机组宽负荷巡航能力。若通过增加燃料量提升再热汽温,会导致炉膛出口烟温升高,屏式过热器壁温超限风险增大;若通过减少减温水提升汽温,则主汽温可能超标。因此,需要在汽温设定值优化、燃烧调整、烟气挡板调节和低温再热器扩容等多个层面协同解决^[15]。

3. 控制策略总体架构

针对上述挑战,本文提出主/再热汽温宽负荷自适应优化控制总体架构,主要包括以下六个层次:

(1)对象在线辨识层:基于历史与实时数据在线辨识汽温对象增益、时间常数和纯延迟,为预测控制与自适应PID提供依据。采用递推最小二乘法或粒子群算法,辨识周期随工况自动调整,超阈值时触发模型更新。

(2)设定值优化层:根据负荷、主汽压力、壁温及再热器入口烟温动态优化主/再热汽温设定值。低负荷段降低主汽温设定值以提升再热汽温;壁温接近限值时自动降低设定值,确保安全。

(3)预测控制层:采用模型预测控制,滚动预测汽温偏差并提前输出减温水或烟气挡板指令。预测时域按对象延迟自适应调整,通常为纯延迟的1.5~2倍,在约束下使汽温快速趋近设定值并抑制超调。

(4)自适应控制层:在PID基础上引入增益调度、模糊自适应或递推最小二乘修正,使参数随负荷和对象变化。按负荷段设置多组PID参数,高负荷增强比例、低负荷增强积分、变负荷段增强微分,并采用模糊规则实时调整。

(5)安全约束层:将壁温、金属温度、减温水调节阀限幅、执行机构死区等作为硬约束。壁温超限时限制减温水进一步减少;执行机构接近限幅时抑制积分饱和;信号故障时自动切手动并报警。

(6)前馈-反馈协同层:引入负荷指令、燃料量、风量、汽包压力微分等前馈,提高变负荷响应。前馈量经限幅和速率限制后叠加至PID输出,兼顾响应速度与稳态精度。

该架构可与DCS控制器结合,或通过独立智能算法平台实现,形成“预测—优化—控制—保护”闭环。实际工程中,可将预测控制和自适应算法部署在独立智能算法服务器上,通过OPC或Modbus协议与DCS通信,DCS保留传统PID作为后备。

4. 关键控制技术

4.1. 基于在线模型辨识的预测控制

汽温对象可近似为一阶或二阶惯性加纯延迟模型,输入为减温水阀门开度或喷水流量,输出为主汽温或再热汽温,模型特性由增益、时间常数和纯延迟决定。这些参数随负荷、煤质、燃烧工况变化,采用递推最小二乘法或粒子群优化算法在线修正。预测控制以未来预测时域内汽温偏差平方和最小化为目标,引入控制增量加权项,通过调整权重平衡调节速度与稳定性。罗国平等提出的多模型融合预测与动态前馈补偿控制为汽温大延迟补偿提供了思路^[16]。与常规PID相比,预测控制能提前补偿大延迟,变负荷初期提前动作减温水或烟气挡板,减少汽温波动。在登封一期机组应用中,预测控制

投入后, 变负荷过程中主汽温最大动态偏差由 $\pm 8^{\circ}\text{C}$ 降至 $\pm 4^{\circ}\text{C}$ 以内。

4.2. 主汽温自适应优化控制

主汽温控制采用“前馈+反馈+自适应”结构。前馈部分包括: 负荷指令前馈根据负荷变化率提前调整减温水, 其信号经滤波限幅后乘以负荷前馈系数叠加至减温水回路, 系数根据负荷段和变负荷方向动态调整, 升负荷增强、降负荷减弱; 燃料量前馈在燃料量变化时提前修正减温水, 信号经微分和惯性环节后乘以燃料前馈系数, 补偿燃料变化对汽温的影响, 系数根据煤质热值在线修正; 风量前馈在总风量变化时补偿烟温变化, 信号经微分滤波后乘以风量前馈系数, 抑制风量变化引起的汽温波动; 汽包压力微分前馈抑制主蒸汽压力波动对汽温的影响, 信号经限幅后乘以压力前馈系数, 压力快速变化时提前动作减温水, 减少汽温波动。反馈部分采用变参数PID, 按负荷段设置多组参数^[17], 高负荷增强比例作用以提高响应速度, 低负荷减弱比例、增强积分以避免振荡; 同时引入模糊自适应规则, 汽温偏差大且变化率大时增强调节, 偏差小且接近设定值时减弱调节以防止超调。可借鉴多级联动控制思想, 比例增益和积分时间由基础值与模糊推理修正量叠加而成, 修正量为汽温偏差及其变化率的函数, 模糊规则表依据工程经验制定, 确保不同工况下参数调整方向正确。

4.3. 再热汽温宽负荷自适应与低温再热器扩容

再热汽温控制手段包括烟气挡板、燃烧器摆角、再热器事故喷水等。低负荷段再热汽温偏低, 单靠减温水无法提升汽温, 本文结合项目任务书要求, 研究低温再热器扩容系统, 通过优化传热面积与介质流通特性, 强化热量交换效率, 提高低负荷再热汽温。扩容系统在原有低温再热器基础上增加受热面面积, 优化管束排列, 提高烟气侧和蒸汽侧换热系数, 同时优化介质流通特性, 降低蒸汽流动阻力, 确保扩容后压降在允许范围内。扩容后, 额定负荷下再热汽温可提高不小于 5°C , 低负荷段提升效果更为明显。控制策略上, 根据负荷和再热器入口烟温动态调整烟气挡板开度, 低负荷段适当关小再热器侧烟气挡板以增加烟气流量; 再热汽温偏差较大时优先采用烟气侧调节, 减少事故喷水, 事故喷水仅作为烟气侧调节能力不足时的最后手段; 引入

再热汽温预测模型, 根据负荷变化率和再热器入口烟温变化趋势, 提前 30~60s 输出调节指令, 提前调整燃烧器摆角或烟气挡板; 同时设置壁温约束, 当高温再热器壁温接近限值时自动限制进一步提升汽温的操作, 壁温约束优先级高于汽温调节, 确保受热面安全。

4.4. 壁温约束与安全防护

增加壁温测点, 实时监测屏式过热器、高温过热器、高温再热器等受热面金属温度。将壁温信号引入汽温控制回路, 形成安全约束: 当壁温接近报警值时, 限制减温水进一步减少。报警值通常设置为材料允许温度的 90%~95%, 根据受热面材质和运行经验确定; 当壁温超过高限时, 自动增加减温水或降低汽温设定值。高限值通常设置为材料允许温度的 95%~98%, 超过高限后汽温控制回路自动切换至安全模式; 当壁温变化率异常时, 发出预警, 提醒运行人员干预。壁温变化率异常可能预示着燃烧工况突变、受热面结焦或蒸汽流量异常, 需及时处理。

通过壁温约束, 避免宽负荷巡航中因追求汽温而牺牲受热面安全。在登封一期机组应用中, 壁温约束投入后, 未发生因汽温调节导致的受热面超温事件。

4.5. 前馈-反馈协同与变负荷前馈

变负荷过程中, 燃料、风量、给水、汽机调门等同步动作, 汽温扰动剧烈。本文在 DCS 中增加变负荷前馈: 根据 AGC 负荷指令变化率和实际负荷偏差, 计算前馈量。前馈量计算考虑负荷变化方向、变化速率和当前负荷段, 确保不同工况下前馈量适当; 将前馈量叠加到减温水调节回路和烟气挡板回路。减温水前馈主要抑制主汽温波动, 烟气挡板前馈主要抑制再热汽温波动; 设置前馈限幅和速率限制, 防止前馈过强引起振荡。前馈限幅根据执行机构调节范围和对象增益确定, 速率限制根据执行机构动作速度确定; 在前馈作用后, 由反馈 PID 修正稳态偏差。前馈负责动态补偿, 反馈负责稳态精度, 两者协同工作。

通过前馈-反馈协同, 既提高响应速度, 又保证稳态精度。在登封一期机组应用中, 变负荷前馈投入后, AGC 变负荷过程中主汽温最大动态偏差由 $\pm 6^{\circ}\text{C}$

降低至 $\pm 4^{\circ}\text{C}$ 以内，再热汽温动态偏差由 $\pm 10^{\circ}\text{C}$ 降低至 $\pm 8^{\circ}\text{C}$ 以内。

5. 工程应用与效果

5.1. 机组概况

华润电力登封有限公司一期 $2\times 330\text{MW}$ 亚临界燃煤机组，锅炉为东方锅炉厂 DG1059/18.2-II12 型亚临界压力、一次中间再热、自然循环锅炉，采用单炉膛、口型布置、四角切向燃烧、平衡通风、尾部双烟道、挡板调温、仓储制钢球磨制粉系统、露天布置、全钢架悬吊结构、固态机械除渣。汽轮机为东方汽轮机有限公司设计制造的 NC330/284-16.7/0.8/537/537 型亚临界、一次中间再热、双缸双排汽、抽凝式汽轮机。DCS 采用上海新华 VCAN6.0 过程控制系统。MCS 系统分布在 XCU04、XCU05、XCU06、XCU25 等控制站，包含锅炉主控、燃料主控、送风、引风、一次风、汽包水位、主汽温、再热汽温等回路。

5.2. 调试与整定

在 DCS 升级改造中，以原 ABB DCS 组态为基准，对上海新华翻译后的 MCS 逻辑逐页、逐项核查，重点检查函数功能块、脉冲块时间、模拟量参数、惯性环节、设定值跟踪等^[18-19]。核查过程中，重点排查出脉冲块时间与原逻辑不匹配、模拟量参数与原逻辑不同、函数功能块设置不当引起无法输出、惯性块选用延时块、设定值跟踪等关键逻辑偏差问题。发现问题后，第一时间与上海新华组态人员沟通对接，制定针对性整改方案并推动快速落地。整改完成后，再次组织多轮全面复核，逐一确认各项逻辑漏洞均已闭环，最终确保 MCS 系统逻辑组态 100%准确无误。

针对汽温回路，完成以下工作：核对主/再热汽温量程、补偿公式和函数关系。确保模拟量信号从现场传感器采集、量程转换到系统显示的全链路数据精准无偏差；整定减温水调节阀流量特性。针对 A 汽动给水泵高压调节阀流量特性差的问题，经发电部、设备部各方确认后，由发电部提供新的流量特性曲线，在各方见证下修改后效果显著好转；优化 PID 参数，按负荷段设置多组参数。高负荷段（70%Pe 以上）设置一组参数，中负荷段（50%~70%Pe）设置一组参数，低负荷段（50%Pe 以下）设置一组参数；增加壁温测点和安全约束。在屏式

过热器、高温过热器、高温再热器等关键受热面增加壁温测点，将壁温信号引入汽温控制回路；开展设定值扰动试验和变负荷试验。通过设定值扰动试验验证调节回路动作逻辑和指令方向准确性；通过变负荷试验验证汽温跟随性和稳定性。

5.3. 应用效果

机组并网后，在 AGC 跟随和调频模式下对主汽压力、主汽温度、再热汽温、汽包水位、炉膛负压等参数进行了 24 小时监测。在四次 AGC 负荷升降扰动试验中，机组实际负荷均能精准跟随指令变化，主/再热汽温随负荷变动虽有小幅波动，但总体趋势平稳，均被有效控制在允许范围内，未发生越限或剧烈振荡。

根据项目考核要求及实际运行数据统计，该策略投入后主要控制性能指标显著改善，优化前后核心数据对比如表 1 所示。

表 1 优化前后主要控制性能指标对比

对比状态	优化前状态	考核要求	优化后实测
主汽温度波动范围	$\pm 8^{\circ}\text{C}$	/	$\leq \pm 4^{\circ}\text{C}$
再热汽温动态偏差	$\pm 10^{\circ}\text{C}$	/	$\leq \pm 8^{\circ}\text{C}$
常规段变负荷率	受限	$> 1.5\%\text{Pe}/\text{min}$	$> 1.5\%\text{Pe}/\text{min}$
深调区变负荷率	受限	$\geq 1.2\%\text{Pe}/\text{min}$	$\geq 1.2\%\text{Pe}/\text{min}$
AGC 响应时间	$> 30\text{s}$	$< 20\text{s}$	$< 20\text{s}$
负荷控制偏差	$> 0.5\%$	$< 0.5\%$	$< 0.5\%$
AGC 月度可用率	较低	$\geq 99.5\%$	$\geq 99.5\%$

由表 1 可知，策略投入后各项指标均满足或优于考核要求。在汽温控制方面，动态变负荷过程中主汽温度最大动态偏差缩减了 50%，再热汽温动态偏差缩减了 20%；额定负荷下再热汽温提升不低于 5°C ，且事故喷水量明显降低，有效缓解了低负荷段受热面超温与汽温偏低的矛盾。在 AGC 调节方面，机组在深调区域的变负荷能力得到充分释放，AGC 响应速度与负荷控制偏差大幅改善，月度可用率稳定在 99.5% 以上。上述结果表明，机组各主要控制回路的自动控制功能均顺利投入，参数调节稳定性与响应速度满足设计规范及安全经济运行要求，调节品质优良。

6. 结论

针对燃煤机组深调及宽负荷巡航下主/再热汽温强非线性、大延迟及多变量耦合等难题,本文构建了以在线辨识与预测控制为核心、前馈-反馈及壁温约束为保障、低温再热器扩容为辅助的优化控制体系,缓解了调节速度、稳态精度与受热面安全之间的矛盾。登封一期 330MW 亚临界机组应用表明,该策略在变负荷及深调工况下动态偏差均满足考核要求,再热汽温有效提升且事故喷水量下降。但受煤质波动及深调边界工况影响,对象时变性仍制约着模型长期精度。

下一步研究应推动智能算法与 DCS 的深度融合:一是针对低负荷对象时变剧烈问题,利用历史 DCS 数据构建 LSTM 多步超前预测模型,替代简化线性模型以提升大延迟特征的辨识精度;二是针对变煤质及复杂工况,采用 K-means 聚类对负荷、热值等参数进行多维划分,建立“工况簇—控制参数”映射,实现 PID 与模型权重的精准调度与自寻优;三是结合壁温软测量,开展汽温波动、壁温安全与减温水经济性的多目标协同优化,为机组全负荷段巡航提供技术支撑。

参考文献

- [1] 国家发展改革委,国家能源局. 全国煤电机组改造升级实施方案[Z]. 2021.
- [2] 国家发展改革委,国家能源局. “十四五”现代能源体系规划[Z]. 2022.
- [3] 牛培峰,郭兴华,王磊,等. 火电厂汽包锅炉汽温控制的研究进展与发展趋势[J]. 燕山大学学报, 2008, 32(4): 283- 288.
- [4] 范永胜,徐治皋,陈来九. 基于动态特性机理分析的锅炉过热汽温自适应模糊控制系统研究[J]. 中国电机工程学报, 1997, 17(1): 23- 28.
- [5] 孙志英,佟振声,赵文升,等. 模糊自调整 PID 过热汽温控制系统[J]. 华北电力大学学报, 2001, 28(4): 33- 38.
- [6] 蔡利军,朱豫才,吕霞,等. 模型预测控制在超超临界机组 AGC 协调控制和主汽温控制中的应用[J]. 中国电力, 2018, 51(7): 68- 77.
- [7] 袁文杰,王一丰,赵倩,等. 超临界锅炉深度调峰汽温控制优化研究应用[J]. 节能技术, 2026, 44(4): 343-349.
- [8] 康东东. 火电厂深度调峰下主再热汽温优化控制研究[J]. 中国设备工程, 2026(6): 98-100.
- [9] 高志晓,张亚辉. 基于自适应控制的电厂锅炉温度调节系统研究[J]. 中国设备工程, 2026(6): 103- 106.
- [10] 闫磊. 大型火力发电厂过热汽温自动控制探讨[J]. 中国设备工程, 2026(6): 214- 216.
- [11] 马凯,岳克伟,何陆灿,等. 超超临界二次再热机组汽温调节与灵活调峰技术研究进展[J]. 电力科技与环保, 2026, 42(1): 90- 103.
- [12] 张志豪,李军,王林,等. 基于定值巡航的燃煤机组主汽温多级联动控制系统[J]. 中国电机工程学报, 2026, 46(9): 3763- 3772.
- [13] 国家能源局. 火力发电厂模拟量控制系统验收测试规程: DL/T 657—2015[S]. 北京: 中国电力出版社, 2015.
- [14] 乔永强,王朝阳,严俊杰,等. 660 MW 超超临界二次再热燃煤发电机组变负荷再热蒸汽温度控制优化[J]. 热力发电, 2026, 55(8): 107- 116.
- [15] 何陆灿,黄林滨,陈国庆,等. 基于汽电双驱引风机的二次再热机组低负荷汽温提升研究[J]. 热力发电, 2026, 55(8): 129- 137.
- [16] 罗国平,高鑫,廖克树,等. 面向强扰动过程的锅炉汽温多模型融合预测与动态前馈补偿控制[J]. 工业仪表与自动化装置, 2026, 23(5): 75- 81.
- [17] 吴新宇. 基于模糊自适应 PID 的火电机组主汽温自动控制方法[J]. 云南电力技术, 2026, 54(3): 79- 82+ 87.
- [18] 国家能源局. 火力发电厂分散控制系统验收测试规程: DL/T 659—2016[S]. 北京: 中国电力出版社, 2016.
- [19] 国家能源局. 火力发电建设工程机组调试技术规范: DL/T 5294—2023[S]. 北京: 中国电力出版社, 2023.