

# 控制策略在火电厂热工控制中的应用

白文强

山西国际能源集团宏光发电有限公司 山西 吕梁 033300

**摘要:** 火电厂热工控制中,传统PID控制因非线性、时滞性等局限难以满足高精度需求。现代控制策略如模型预测控制(MPC)通过滚动优化提升燃烧效率,降低氮氧化物排放;模糊控制与神经网络控制分别在过热汽温调节与负荷预测中实现 $\pm 2^{\circ}\text{C}$ 精度与3%误差率;鲁棒控制与自适应控制应对参数波动,确保系统稳定。混合控制与数据驱动优化进一步整合多策略优势,推动火电厂向智能化、低碳化转型。

**关键词:** 控制策略;火电厂热工控制;应用

**引言:** 随着能源需求增长与环保要求提升,火电厂热工控制系统面临高精度、高可靠性及低碳化转型的挑战。传统PID控制策略难以处理热工系统的非线性、强耦合及时滞特性,在复杂工况下易导致参数波动、效率下降。为此,模型预测控制、智能控制、鲁棒自适应控制等先进策略逐步应用于锅炉燃烧优化、负荷跟踪及故障诊断等领域,结合数据驱动与工业互联网技术,推动火电厂热工控制向智能化、低碳化方向发展,成为保障火电厂安全经济运行的关键。

## 1 火电厂热工控制系统基础

### 1.1 火电厂热工系统组成与特点

(1) 主要热工过程涵盖锅炉燃烧、汽轮机调节、蒸汽循环等关键环节。锅炉燃烧需精准把控燃料与空气配比,保障高效燃烧;汽轮机调节通过控制进汽量,调节转速以适配发电需求;蒸汽循环则涉及蒸汽的产生、做功、冷凝再利用,是能量转化的核心流程。(2) 系统动态特性呈现非线性、时滞性、强耦合性。非线性体现在参数变化时系统响应规律非直线;时滞性源于介质传输、设备反应等,导致控制指令与实际效果存在延迟;强耦合性使各子系统参数相互影响,如锅炉压力变化会波及蒸汽温度与流量。(3) 典型控制需求包括温度、压力、流量、负荷跟踪等。需维持锅炉出口蒸汽温度、汽轮机缸体温度稳定;控制锅炉汽包压力、主蒸汽压力在设定范围;保证各类介质流量符合工况要求,同时根据电网负荷变化及时调整发电负荷。

### 1.2 传统控制策略分析

(1) PID控制原理是通过比例、积分、微分环节组合,根据偏差调整输出。比例环节快速响应偏差,积分环节消除静差,微分环节预判偏差变化趋势。但其局限性明显,难以应对系统非线性与时滞性,参数整定复杂,适应工况变化能力弱。(2) 串级控制将主副控制器

串联,副控制器快速克服副回路扰动,提升主参数稳定性;前馈控制依据扰动信号提前调节,减少扰动对系统的影响,二者均是对PID控制的改进,一定程度上优化了控制效果。(3) 传统控制在复杂工况下不足凸显,如电网负荷大幅波动、设备故障时,难以快速精准调整参数,易导致系统稳定性下降,影响发电效率与安全性,无法满足火电厂高精度、高可靠性的控制需求<sup>[1]</sup>。

## 2 先进控制策略在火电厂热工控制中的应用研究

### 2.1 模型预测控制(MPC)

(1) MPC原理是基于系统数学模型,通过滚动优化和反馈校正实现控制。先构建反映热工系统动态特性的模型,如采用机理建模结合数据辨识的方法,机理建模依据热工过程物理化学规律推导方程,数据辨识利用现场运行数据修正模型参数,确保模型能精准描述锅炉燃烧、蒸汽循环等过程的输入输出关系。(2) 在锅炉燃烧优化中,某300MW火电厂应用MPC,以降低氮氧化物排放和提高燃烧效率为目标,将燃料量、送风量、引风量等作为控制变量,实时采集炉膛温度、烟气成分等数据。MPC根据模型预测不同控制变量组合下的燃烧效果,动态调整各参数,实现燃烧过程的精准调控。(3) 效果分析显示,应用MPC后,锅炉燃烧稳定性显著提升,炉膛温度波动幅度降低20%;动态响应速度加快,面对燃料热值变化时,参数调整滞后时间缩短30%;经济性改善,单位发电量煤耗降低1.5g/kWh,氮氧化物排放量减少15mg/m<sup>3</sup>。

### 2.2 智能控制策略

(1) 模糊控制在过热蒸汽温度控制中,利用模糊逻辑将操作人员的经验转化为模糊规则。过热蒸汽温度受负荷、给水温度等多因素影响,模糊控制器将温度偏差及偏差变化率模糊化,通过模糊推理输出控制量,调节减温水量,使过热蒸汽温度控制精度提高,波动范围

控制在 $\pm 2^{\circ}\text{C}$ 内。(2)神经网络控制在负荷预测与控制中,采用BP神经网络构建模型,以历史负荷数据、气象条件、电网调度指令等为输入,通过大量数据训练优化网络权重,实现短期负荷预测,预测误差率低于3%。基于预测结果,提前调整汽轮机进汽量、锅炉燃料供给,使负荷跟踪响应速度提升25%。(3)专家系统在故障诊断与自适应调节中,整合火电厂设备故障案例和专家经验构建知识库。当热工系统出现异常,如给水泵压力异常,系统通过推理机匹配故障特征,10秒内完成故障定位,同时自动启动自适应调节策略,调整相关阀门开度,恢复系统正常运行,减少故障停机时间<sup>[2]</sup>。

### 2.3 鲁棒控制与自适应控制

(1)鲁棒控制应对参数不确定性时, $H_{\infty}$ 控制应用广泛。火电厂热工系统参数易受设备老化、介质成分变化影响, $H_{\infty}$ 控制通过设计鲁棒控制器,在保证系统稳定性的同时,抑制参数摄动对控制效果的影响。某火电厂锅炉汽包压力控制中,采用 $H_{\infty}$ 控制后,即使汽包体积、传热系数等参数发生 $\pm 10\%$ 变化,压力波动仍控制在设定值的 $\pm 1\%$ 以内。(2)自适应控制能实时调整控制参数以适应工况变化。当电网负荷从50%额定负荷升至100%额定负荷时,自适应控制器通过在线辨识系统动态特性,实时修正控制算法参数,使汽轮机转速偏差始终小于 $0.5r/\text{min}$ ,确保机组稳定运行。

### 2.4 多变量解耦控制

(1)协调控制系统中存在显著多变量耦合问题,如锅炉燃料量增加会同时影响主蒸汽压力和温度,汽轮机进汽量调整会关联发电量与蒸汽压力,各变量相互干扰,导致传统控制难以精准调控。(2)解耦控制方法中,相对增益矩阵通过计算变量间相对增益,判断耦合程度并设计解耦网络,削弱变量间相互作用;特征结构配置通过调整系统极点和特征向量,实现多变量系统解耦。某火电厂协调控制系统应用相对增益矩阵解耦后,主蒸汽压力与温度的耦合度降低60%,参数调整独立性大幅提升,系统响应速度加快40%。

## 3 火电厂热工控制策略的优化与集成

### 3.1 混合控制策略设计

(1)PID与智能控制的融合成为重要方向,模糊PID与神经PID是典型代表。模糊PID结合模糊控制的非线性处理能力与PID控制的稳态精度优势,通过模糊逻辑实时调整PID的比例、积分、微分参数。例如在汽轮机转速控制中,当转速偏差较大时,模糊算法加大比例系数以快速响应;偏差较小时,优化积分系数消除静差,使转速控制精度提升15%。神经PID则利用神经网络的自学习

能力,通过大量运行数据训练网络,自适应调整PID参数,面对锅炉负荷波动时,参数调整响应速度比传统PID快20%,有效改善系统动态性能<sup>[3]</sup>。(2)分层递阶控制架构通过“上层优化+下层稳控”实现高效控制。上层以系统经济性、环保性为目标,结合电网负荷需求与热工系统运行状态,利用优化算法(如遗传算法、粒子群算法)制定锅炉燃烧量、汽轮机进汽量等最优设定值;下层则采用鲁棒控制、PID控制等策略,精准跟踪上层设定值,稳定温度、压力等关键参数。某火电厂应用该架构后,机组在负荷变化时,上层优化环节可在10秒内生成最优参数,下层稳控环节将参数波动控制在 $\pm 1\%$ 以内,兼顾了系统优化性与稳定性。

### 3.2 基于数据驱动的控制优化

(1)大数据分析在热工参数优化中发挥关键作用。通过采集火电厂历史运行数据(如燃料成分、设备工况、环境参数)与实时数据,利用大数据分析技术(如聚类分析、关联规则挖掘)挖掘参数间潜在规律。例如分析海量燃烧数据,发现燃料热值与送风量的最优匹配关系,据此优化锅炉燃烧参数,使燃烧效率提高2%,同时降低氮氧化物排放8%。(2)强化学习在实时决策中的探索逐步深入。将热工控制过程建模为马尔可夫决策过程,智能体通过与系统交互,不断尝试不同控制动作,以累积奖励(如能耗降低、参数稳定)最大化为目标优化策略。在蒸汽循环系统控制中,强化学习智能体可实时调整凝汽器真空度、给水温度等参数,经过长期训练后,系统能耗比传统控制降低1.2%,且在工况突变时能快速做出最优决策<sup>[4]</sup>。

### 3.3 仿真与实验验证

(1)仿真平台搭建主要依赖MATLAB/Simulink与DCS模拟器。利用MATLAB/Simulink构建热工系统数学模型,模拟锅炉燃烧、汽轮机运行等过程,可快速测试新控制策略的可行性;DCS模拟器则还原实际集散控制系统操作环境,模拟设备故障、负荷波动等场景,为控制策略调试提供贴近现场的测试环境。某研究团队通过MATLAB/Simulink搭建300MW机组热工模型,结合DCS模拟器,实现了控制策略从仿真测试到现场应用的平滑过渡。(2)实验结果对比清晰体现先进控制的优势。在相同工况下,对比传统控制与先进控制的运行数据:动态响应方面,先进控制(如MPC、模糊控制)使温度、压力等参数的调节时间缩短30%-40%;稳定性方面,先进控制下参数波动幅度比传统控制降低25%-35%;经济性方面,先进控制可使单位发电量煤耗降低1.0-1.8g/kWh,充分验证了先进控制策略的应用价值。

## 4 火电厂热工控制的挑战与未来发展方向

### 4.1 当前面临的挑战

(1) 模型精度与实时性矛盾突出。火电厂热工系统复杂,构建高精度模型需考虑多因素耦合与动态变化,往往需大量计算资源,导致模型响应延迟,难以满足实时控制需求。例如锅炉燃烧模型,若追求精准反映燃料燃烧、热量传递等过程,计算周期会延长至数秒,而实际控制需毫秒级响应,二者难以兼顾,影响控制效果。

(2) 控制系统可靠性与安全性要求严苛。火电厂一旦发生控制故障,可能引发停机、设备损坏甚至安全事故,因此对控制系统稳定性、抗干扰能力要求极高。但热工系统长期运行中,设备老化、电磁干扰、数据传输误差等因素,易导致控制系统参数漂移、指令执行偏差,威胁系统可靠安全运行,现有冗余设计与故障检测机制仍需进一步完善以应对复杂风险。(3) 新能源接入对热工控制的冲击显著。风电、光伏等新能源发电具有间歇性、波动性,大量接入电网后,要求火电机组频繁调整负荷以平衡电网供需。这使得火电厂热工系统需在更宽工况范围内运行,传统控制策略难以快速适应负荷骤升骤降,易导致参数波动,影响机组稳定性与发电质量,增加了热工控制的难度。

### 4.2 未来发展趋势

(1) 人工智能与工业互联网的深度融合将重塑热工控制模式。工业互联网实现火电厂各设备、系统数据的实时采集与共享,人工智能算法则对海量数据进行分析挖掘,实现控制策略的智能优化与自主决策。例如通过工业互联网获取全厂区热工参数,结合AI算法实时调整锅炉燃烧、汽轮机调节参数,使系统始终处于最优运行状态,提升控制精度与效率。(2) 数字孪生技术在热工系统中的应用将成为重要方向。通过构建与实际热工系

统完全一致的数字孪生模型,可实时映射现场设备运行状态,实现虚拟仿真测试、故障预演与控制优化。工作人员可在虚拟环境中测试新控制策略,模拟设备故障场景,提前制定应对方案,减少现场试验风险,同时通过数字孪生模型实时监控运行,及时发现潜在问题并优化控制参数。(3) 碳中和目标下的低碳控制策略将加速发展。为实现减排目标,火电厂需降低碳排放,这推动热工控制向低碳方向转型。未来将开发基于碳排放量监测与控制的热工控制策略,例如通过优化燃烧过程减少碳排放,结合碳捕捉系统的控制协调,实现经济发电与低碳排放的平衡,助力火电厂向清洁低碳方向发展。

### 结束语

火电厂热工控制中,控制策略的迭代与创新是提升发电效率、保障系统稳定与实现低碳转型的核心驱动力。从传统PID到模型预测、智能控制及混合策略的应用,不仅解决了非线性、强耦合等复杂工况难题,更通过数据驱动与工业互联网融合,推动控制向自主优化迈进。未来,随着数字孪生、人工智能技术的深化,热工控制将进一步实现精准预测、故障预判与碳排放协同优化,为火电厂智能化、清洁化发展提供坚实支撑。

### 参考文献

- [1] 崔馨,崔敏.热工优化控制在火电厂节能中的应用[J].通信电源技术,2021,36(02):140-141.
- [2] 张立本.热工优化控制在火电厂节能中的应用[J].通信电源技术,2020,35(02):133-134.
- [3] 赵锴.先进控制策略在火电厂热工控制中的应用研究[J].科学技术创新,2020,(20):25-26.
- [4] 范新明.先进控制策略在火电厂热工控制中的应用分析[J].通信电源技术,2020,37(4):242-243.