

基于先进控制算法的火力发电厂过程控制优化研究

任晓斌

大唐蒲城第二发电有限责任公司 陕西渭南 715501

【摘要】随着可再生能源大规模接入电网与电力系统调峰压力持续增加,火力发电企业必须在确保安全生产和稳定输出的基础上,构建更具弹性、高效且环境友好的运行机制。传统过程控制技术在应对多参数耦合、剧烈扰动及工况变化时表现出明显不足,无法有效实现深度调峰、能效提升与动态响应的多重目标。本研究聚焦智能控制策略在火力发电厂过程优化中的实践应用,系统分析分数阶PID调节、预测模型控制及自适应抗扰控制等先进算法的核心原理,并深入探究其在机组协同调控、燃烧效率提升、污染物减排等重点环节的改进空间。借助多方法协同与整体优化设计,力求改善火力发电过程的控制精度、工况适应能力与整体能效水平,为传统火电企业智能化改造与绿色转型提供方法论支撑与实践指南。

【关键词】先进控制算法;火力发电厂;过程控制

Research on Process Control Optimization for Thermal Power Plants Based on Advanced Control Algorithms

Ren Xiaobin

Datang Pucheng No.2 Power Generation Co., Ltd., Weinan, Shaanxi 715501

【Abstract】With the large-scale integration of renewable energy into power grids and the continuous increase in peak load regulation pressure, thermal power plants must establish more resilient, efficient, and environmentally friendly operational mechanisms while ensuring safe production and stable output. Traditional process control technologies demonstrate significant limitations in addressing multi-parameter coupling, severe disturbances, and operational variations, failing to effectively achieve multiple objectives such as deep peak shaving, energy efficiency improvement, and dynamic response. This study focuses on the practical application of intelligent control strategies in process optimization for thermal power plants. It systematically analyzes the core principles of advanced algorithms including fractional-order PID regulation, predictive model control, and adaptive disturbance rejection control, while exploring improvement opportunities in key areas such as coordinated unit regulation, combustion efficiency enhancement, and pollutant emission reduction. Through multi-method synergy and holistic optimization design, the research aims to improve control precision, operational adaptability, and overall energy efficiency in thermal power processes, providing methodological support and practical guidance for the intelligent transformation and green transition of traditional thermal power enterprises.

【Key words】advanced control algorithm; thermal power plant; process control

1 引言

火力发电作为我国电力系统的核心供给方式,其过程调控能力对机组的运行效能、安全指标及环境表现具有决定性影响。在能源结构调整步伐加快的背景下,火电机组不仅需要执行更为频繁的深度负荷调节任务,还持续面临着降低燃料消耗和减少污染排放的双重挑战。传统PID调节机制及常规反馈控制方案在处理具有多参数耦合、非线性特征、显著滞后效应和强扰动特性的复杂热力系统时,逐渐暴露出适应能力欠缺和调节精度不足等局限性。当前,以分数阶PID调节器、动态模型预测控制和自抗扰调节技术为代表的新型控制策略,凭借其出色的模型兼容性、约束条件处理能力和抗干扰性能等优势,为火电过程优化控制开辟了新途径。本研究致力于深入解析先进控制算法的理论基础,结合火电机组

关键调控环节,系统探讨其在机组协调控制、燃烧过程优化及环保运行管理等领域的应用方案,以期促进火电厂控制体系向智能化、精准化方向升级,为行业实现高效节能、清洁环保和灵活运行的战略目标提供技术支撑。

2 火力发电过程控制与先进算法概述

2.1 火力发电主要热工过程与控制需求

火力发电系统的核心热力过程涵盖燃烧系统调控、水汽循环管理、蒸汽参数优化及汽轮机转速调节等多个相互关联的环节,这些环节呈现出明显的非线性特征、响应滞后及时变特性。在锅炉运行层面,必须确保燃料供给、空气输送及烟气排放三者之间的动态平衡,既要维持蒸汽参数稳定,又要兼顾燃烧效率与排放标准。而汽轮机运行则着重考虑功率

输出响应特性与主蒸汽压力稳定性。特别值得注意的是,在机组参与电网深度调峰运行时,如何在低功率输出条件下保持系统参数稳定并减少有害物质排放已成为亟待解决的技术难题。目前普遍采用的比例积分微分控制结合前馈补偿和解耦控制策略,在面对大范围负荷变化及快速工况切换时,往往难以同时满足动态响应要求与系统稳定性需求,这促使业界必须探索更智能化的控制算法来全面提升机组运行性能。

2.2 先进过程控制算法基础理论

2.2.1 分数阶 PID 控制

分数阶 PID 控制器实现了对传统整数阶 PID 架构的突破性改进。该控制器在保留基本比例、积分、微分功能的同时,创新性地引入了可自由配置的分数阶积分与微分参数,大幅提升了控制器的调节灵活性及频域适应性。这种改进使其能够更精确地刻画和调控具有特殊动态特性的系统,尤其是那些呈现遗传特性、长时记忆效应或参数分布特征的复杂过程,典型如锅炉汽温控制中的大滞后问题。通过合理优化分数阶次参数与增益系数,FOPID 控制器可以在维持较小超调量的条件下显著提升系统响应速度,或在确保稳定性的同时增强对模型偏差的适应能力,为解决火电厂中难以用常规整数阶模型准确描述的控制难题提供了更有效的解决方案。

2.2.2 模型预测控制

模型预测控制作为一类融合模型驱动与实时优化的控制方法,其运作机理可概括为:首先构建被控系统的动态数学模型,据此推演特定控制输入下未来时段内的输出响应;随后在有限时间窗口内求解带约束的最优化命题,获取使预测轨迹与目标轨迹偏差最小的控制指令序列;最终仅实施该序列的首个控制动作,并在每个采样周期循环执行上述流程。该技术的突出特点体现在能够有效协调多变量系统间的交互影响,同时将执行机构限幅、过程变量边界及动态响应速率等工程约束直接融入优化框架,确保系统运行在安全工况下实现性能最优。这一特性使其成为解决火电厂机组协调控制这类具有显著耦合特性和多重约束条件的复杂工业过程控制难题的理想选择。

2.2.3 自抗扰控制

自抗扰控制技术是一种具备强鲁棒特性的控制方法,其优势在于无需依赖被控对象的精确数学模型。该技术的核心原理是将系统内部未建模动态特性、参数波动以及外部环境干扰统一归类为“综合扰动项”,并借助独特的扩张状态观测器实现动态跟踪与补偿。该控制系统架构包含三个关键模块:轨迹跟踪微分器、扩张状态观测装置以及基于非线性状态误差的反馈调节机制。其中,扩张状态观测装置作为核心技术,能够将“综合扰动项”转化为新增状态量进行实时监测,进而在控制策略中实现主动补偿。这种创新方法显著提升了系统应对内外不确定因素的抗干扰能力,有效降低了控制器对模型精度的依赖性。在火电厂这类存在剧烈扰动和参数时变特性的工业场景中,特别是针对功率调节和燃烧控制

等关键环节,自抗扰控制技术表现出卓越的环境适应能力和系统稳定性。

3 面向关键控制场景的先进算法应用

3.1 面向深度调峰的机组协调智能控制

火电机组深度调峰运行需要维持在极低负荷条件下持续稳定工作,同时具备根据电网需求迅速调整输出功率的能力。这种特殊工况对机组的协调控制系统提出了极高要求。常规协调控制方案通常采用固定参数的 PID 调节器配合静态前馈补偿,当机组处于低负荷区间时,锅炉蓄热特性发生明显改变,燃料输入与功率输出之间的动态耦合关系变得更为复杂。这种状况容易造成主蒸汽压力剧烈波动、过热蒸汽温度超出允许范围,严重时可能导致燃烧系统失稳。

针对上述问题,建议采用模型预测控制技术作为高级优化控制策略。该方案通过建立综合考虑锅炉蓄热效应、燃烧滞后特性以及汽轮机调节性能的多变量预测模型,能够预先计算出燃料供给量、给水流量和汽轮机调节阀开度的最优配比指令。在实施滚动优化过程中,该控制策略不仅可以实现对功率指令的快速响应,还能将主蒸汽压力、温度等重要运行参数的变化趋势控制在安全阈值之内。这种控制方式在保证响应速度的同时,有效提升了系统过渡过程的稳定性和安全性。

3.2 多变量强耦合过程的解耦与预测控制

在火电厂运行过程中,锅炉与汽轮机各子系统之间存在着显著的动态关联。以送风量调节为例,其变化不仅会改变炉膛内的氧气浓度,还会对炉膛负压和主蒸汽压力产生连锁反应。而汽轮机调门的开度调整在影响机组负荷和主汽压力的同时,也会反过来作用于锅炉的燃烧状态。这种复杂的相互作用如果控制失当,容易导致系统出现不稳定波动,严重影响运行效率。模型预测控制技术凭借其处理多变量系统的独特优势,为这类耦合问题提供了创新性的解决方案。不同于常规控制方法需要预先构建复杂的解耦网络,该技术将所有输入输出通道及其动态关联统一纳入预测模型框架。在优化计算过程中,控制器能够自动平衡各调节变量对受控参数的综合作用,实现动态解耦效果。以再热蒸汽温度控制为例,通过协调烟气挡板、燃烧器倾角和减温水阀的联合动作,在有效抑制系统耦合的同时,还能以最优经济性维持汽温稳定。

针对耦合特性复杂且工况多变的对象,仅依赖静态机理模型往往难以实现准确解耦。这种情况下,可以考虑采用基于数据驱动的自调节机制来提升 MPC 控制效果。运用递推最小二乘法、深度学习网络等技术,结合实时采集的运行参数动态调整预测模型的系数或框架,使其具备适应对象特性渐变的能力。这种具备自学习功能的预测控制体系构建了“监测-建模-优化-调控”的智能循环回路。该体系能够持续从运行状态数据中提取特征,逐步修正其对多元耦合特性

的理解,使得解耦效果与控制品质随着运行时间的延长而持续改善。此类技术方案尤其适合燃用混合煤质、设备处于性能衰退阶段的火力发电机组,可确保控制系统在整个服役周期内保持稳定运行状态。

3.3 燃烧系统与环保运行的优化控制

火电厂的能源转换效率与环境排放指标主要取决于燃烧系统的运行状态,其控制策略的优化对机组的经济性和环保性能具有决定性影响。传统的燃烧调节方式往往采用预设的风煤配比曲线和固定氧浓度目标值,在面对煤质波动、负荷变化及制粉系统运行模式调整时表现出明显局限性。分数阶比例积分微分控制器凭借其独特的调节特性,在此类复杂工况下展现出显著优势。通过科学设置其微分和积分的非整数阶次,该控制器能够更准确地描述送风装置与燃料供给系统的动态响应过程,使风量调节对火力变化变化的跟随性更加平稳精确,进而提升空气与燃料混合比例的实时控制精度,有效降低因配风失调引发的化学燃烧不充分损耗及烟气余热损失。

为实现经济效益与环保性能的协同提升,必须构建多层次的智能调控体系。可采用基于模型预测控制的上层优化平台,该平台以锅炉热效率与污染物排放为双重优化目标,融合燃烧机理分析与数据建模方法。在确保主蒸汽参数稳定的条件下,该体系实时调整燃烧器负荷分布、二次风门调节、燃尽风配比以及 SNCR 系统氨水喷射量等核心参数。底层则由具备快速响应能力的 FOPID 或自抗扰控制器实现设定值的精确跟踪,同时有效抑制燃料波动带来的干扰。这种分级优化架构不仅保障了机组对负荷变化的快速适应能力,更能持续探寻不同工况下热效率最大化与污染物最小化的最佳平衡点,引领火电生产向清洁化、高效化与智能化方向转型升级。

4 基于先进控制算法的火力发电厂过程控制优化

4.1 协调控制系统优化

火电机组控制系统的核心在于协调控制系统 (CCS),其主要任务在于实现机组负荷指令的快速跟踪与关键运行

参数的平稳控制之间的动态平衡。常规 CCS 系统由于采用固定参数的 PID 调节器及相对单一的前馈补偿机制,其性能提升存在明显瓶颈。通过将增益调度技术与模型预测控制有机结合,可显著改善机组在各种运行工况下的控制品质。增益调度机制依据可测量的运行参数实时调整控制器特性参数或结构配置,确保系统在不同负荷水平下均能维持理想的控制效果和稳定裕度。进一步将 MPC 技术应用于锅炉主控回路和汽机主控回路,取代或辅助传统控制策略,利用其多参数预测和在线优化特性,能够更合理地分配锅炉与汽轮机之间的能量调节任务,生成更为平滑的控制指令,有效消除因执行机构动作不匹配导致的参数波动问题,在维持机组负荷响应能力的同时,显著提高主汽压力等关键参数的调节精度和稳定性。

4.2 燃烧系统精细化控制

火电机组节能降耗潜力的深度开发依赖于燃烧系统的精准调控。其本质在于突破以往固定氧量配置的粗放型管理方式,达成风量、燃料与烟气等参数的动态协同优化。首要步骤是运用大数据分析机器学习算法,从长期积累的运行数据中提取不同工况、燃料特性及环境变量下的最佳氧量配置规律,建立智能化设定模型,为调控系统提供即时、准确的氧量参考基准。接下来,可选用响应特性更优异的分数阶 PID 调节器完成送风量的精密跟随,这种改进型 PID 算法能够更有效地应对送风管网的动态响应特性,显著降低超调现象与响应延迟,保证实测氧量迅速且稳定地趋近智能设定目标,从源头实现燃烧所需空气量的最优配置。

5 结论

综上所述,先进控制技术为解决当前火电生产调控所遇到的复杂问题开辟了崭新的技术路线与实施方法。从发展态势来看,智能控制策略与机器学习、海量数据分析、虚拟仿真等创新科技的有机整合,必将促使火电生产调控体系朝着更加智能、自主适应及全流程优化的方向演进,从而为维护现代化电网可靠运行、促进能源产业绿色升级提供关键性的调控解决方案。

参考文献

- [1]张雅婕,杨洁.电气传动系统的智能控制[J].流体测量与控制,2024,5(06):34-37.
 - [2]周金龙.火力发电机组再热汽温建模及先进控制算法研究[D].华北电力大学(北京),2024.
 - [3]崔岚,赵闯,吴明辉.基于先进控制算法的本钢冷轧设备效率提升探究[J].冶金与材料,2024,44(04):28-30.
 - [4]王升升.先进控制算法在DCS控制系统中的应用[J].南方农机,2020,51(21):29-31.
 - [5]杨宣,张保生.基于先进控制算法的CFBB床温控制系统研究[J].自动化与仪表,2018,33(01):84-88.
 - [6]朱凌起,张艳梅,冯丽辉.基于OPC的先进控制算法与工控软件结合应用研究[J].价值工程,2016,35(18):166-169.
- 作者简介:任晓斌,1973.3,男,汉族,陕西大荔人,本科,工程师,研究方向:热工控制。