

基于 PLC 的电厂锅炉温度智能控制系统设计

刘佳明 江丹丹 朱睿 冼海玲 谢峰 张涵

长春电子科技学院 吉林长春 130114

摘要: 电厂锅炉作为电力生产关键设备,其温度控制精度直接关系能源转换效率与设备安全,传统 PID 控制在应对锅炉温度非线性、大滞后特性时,存在动态响应欠佳的问题。本文提出基于 PLC 的电厂锅炉温度智能控制系统设计方案,深入剖析锅炉温度控制需求与特性,构建以 PLC 为核心控制器的硬件架构,设计融合模糊控制与 PID 控制的智能算法,开发人机交互界面及安全保护模块,并通过仿真与实验验证系统性能,该设计实现了锅炉温度的精确控制,提升了系统抗干扰能力和鲁棒性,为电厂自动化控制提供技术支持。

关键词: 电厂锅炉;温度控制;PLC;智能算法;模糊 PID 控制

引言

随着人类环保意识的逐渐觉醒,环保问题已成为当世界经济发展不可或缺的一部分,各行业都开始向新能源方向发展,发电行业作为工业的重要组成部分,为响应国家号召,实现“节能减排”工业生产,各大发电企业开始重视高效低排生产工作。锅炉燃烧优化技术可以有效提高生产效率,同时兼顾降低污染排放,因此对锅炉燃烧过程进行优化的研究具有重要意义^[1]。电厂锅炉运行过程里,温度调控与燃烧优化、设备安全及能源利用率紧密相连,以往的控制手段存在反应滞后、调控精度不足、自动化水平有限等问题,难以契合现代电厂高效环保的生产要求,可编程逻辑控制器(PLC)以其可靠性高、抗干扰能力强、编程灵活多变的特性,为锅炉温度控制带来全新思路。基于 PLC 设计打造的智能控制系统,能够达成精准的温度控制与智能化管理模式,这对发电行业推进节能减排、提升生产效益有着重要意义。

1. 电厂锅炉温度控制需求与特性分析

1.1 锅炉温度控制工艺需求

电厂锅炉温度调控涉及炉膛温度、过热蒸汽温度、再热蒸汽温度等核心参数的调节操作,各参数控制目标与精度要求不尽相同,炉膛温度需稳定在燃料充分燃烧的适宜区间,温度过高易引发炉管结焦,过低则会降低燃烧效率、增加污染物排放;过热蒸汽温度必须严格限定在额定数值附近,偏差过大会削弱汽轮机做功效能、威胁设备安全;再热蒸汽温度保持稳定对提升机组热循环效率起着关键作用。锅炉温度控制既要满足负荷变动的动态响应需求,在机组升降负荷

时,温度控制系统需迅速调节并维持稳定状态,防止因剧烈温度波动触发保护机制或造成设备损坏,还得具备出色的抗干扰性能,有效抵御燃料热值波动、送风风量改变等外部干扰因素。

1.2 锅炉温度系统动态特性

电厂锅炉温度系统的动态特性呈现显著非线性与大滞后特点,燃料燃烧至蒸汽温度变化的能量传递进程中,存在多个时间常数各异的惯性环节,致使温度响应滞后于控制输入,燃料量变动对过热蒸汽温度的作用往往存在数十秒到数分钟的延迟。系统增益特性随负荷状况改变而变化,低负荷工况时,温度系统惯性更强、滞后更突出,传统固定参数的 PID 控制器难以适配这种变参数特性^[2]。锅炉各温度参数间存在耦合关联,燃料量变化既影响炉膛温度,又会经热传递过程作用于蒸汽温度,此类耦合性提升了控制难度。精准掌握温度系统的动态特性,是设计高效智能控制系统的前提。

2. 基于 PLC 的控制系统硬件设计

2.1 PLC 控制器选型与配置

依据电厂锅炉温度控制 I/O 点数需求、控制精度与响应速度指标,选用高性能中型 PLC 作核心控制器,基于温度信号采集精度考量,配备专用模拟量输入模块,其分辨率契合温度测量精度标准,常选取 16 位及更高分辨率模块,为达成对执行机构精准操控,设置模拟量输出模块,输出 4-20mA 标准电流信号或 0-10V 电压信号。鉴于锅炉系统安全保护需要,配备高速数字量输入模块,采集压力开关、温度开关等保护信号,保障异常时快速响应,PLC 的 CPU 模

块应具备强劲运算与数据处理能力,支持浮点运算及复杂算法运行,存储容量满足程序存储与数据缓存要求,且配备冗余电源模块增强系统供电可靠性。

2.2 传感器与执行机构选型

温度传感器选型对控制精度影响显著,炉膛温度测量宜选用耐高温且响应迅速的热电偶传感器,像 S 型或 K 型热电偶,并配置对应的温度变送器,把热电偶的毫伏信号转换成标准模拟量信号;蒸汽温度测量可采用高精度的热电阻传感器,例如 Pt100 铂电阻,借助三线制或四线制接法降低引线电阻误差,流量、压力等辅助参数测量选用相应的差压变送器、压力变送器等,保证与温度控制的协同性。执行机构涵盖燃料调节阀、送风挡板、减温水调节阀等,选用具备优良调节特性的电动执行机构或气动执行机构,其行程时间、定位精度需符合温度控制的动态响应要求,电动执行机构一般采用伺服电机驱动,搭配高精度位置反馈装置,实现调节阀的精准定位。

2.3 系统硬件架构设计

基于 PLC 的电厂锅炉温度智能控制系统采用分层分布式架构设计,包含现场设备层、控制层和监控层,现场设备层由各类传感器、执行机构及一次仪表构成,承担实时数据采集与控制指令执行任务;控制层以 PLC 为核心,通过工业现场总线与现场设备层相连,完成数据处理、控制算法运算及控制指令输出,为提升系统可靠性,可采用双 PLC 冗余配置方案;监控层设置工业控制计算机,安装人机交互软件,实现温度数据的实时显示、历史数据存储、控制参数调整及故障报警等功能,监控层与控制层之间通过以太网通信,保障数据传输的实时性和稳定性。系统硬件架构还需考虑抗干扰措施,如传感器信号线缆采用屏蔽电缆,动力电缆与信号电缆分开敷设,PLC 控制柜进行良好接地,增强系统在复杂电磁环境下的运行可靠性。

3. 智能控制算法设计与实现

3.1 模糊 PID 控制算法原理

针对锅炉温度系统非线性、大滞后特性,设计模糊 PID 智能控制算法,该算法融合模糊控制灵活性与 PID 控制精确性,借助模糊推理在线调节 PID 控制器比例系数(K_p)、积分系数(K_i)和微分系数(K_d),以适配系统特性变化^[3]。模糊控制部分以温度偏差(e)和偏差变化率(ec)为输入变量,经模糊化、模糊推理及清晰化过程,输出 PID 参数调整量

(ΔK_p 、 ΔK_i 、 ΔK_d);PID 控制部分依据调整后参数对温度实施闭环控制,模糊控制规则制定基于锅炉温度控制操作经验,如温度偏差大且偏差变化率为正时,需增大比例系数以提升响应速度;温度趋近设定值时,减小比例系数并适度增加积分系数,以降低静态误差,模糊 PID 控制算法可依据系统运行状态自动优化控制参数,增强控制器对复杂工况的适应能力。

3.2 PLC 程序设计与实现

基于 PLC 的模糊 PID 控制算法程序采用模块化设计,涵盖数据采集模块、模糊推理模块、PID 计算模块和输出控制模块。数据采集模块读取温度传感器模拟量信号,实施滤波与归一化处理;模糊推理模块把温度偏差及偏差变化率转化为模糊量,依照预设模糊规则开展推理,获取 PID 参数调整量;PID 计算模块依据当前温度值、设定值及调整后的 PID 参数,计算控制量输出;输出控制模块将控制量转换为执行机构控制信号,同时进行限幅和防积分饱和处理。PLC 程序运用结构化文本(ST)或梯形图(LD)语言编写,针对复杂模糊推理过程,优先选用结构化文本语言,以此提升程序执行效率与可读性,程序中还需加入故障诊断与处理逻辑,当检测到传感器故障或执行机构异常时,自动切换至安全控制模式,并发出报警信号。

3.3 抗干扰与优化策略

为提升控制系统抗干扰能力,设计多重滤波与优化策略,数据采集环节采用中值滤波与滑动平均滤波相结合的方式,消除温度信号中的随机噪声;控制算法中加入惯性滤波环节,降低系统对高频干扰的敏感度^[4]。针对锅炉温度系统大滞后特性,引入 Smith 预估器与模糊 PID 控制结合的复合控制策略,通过建立系统数学模型预估温度变化趋势,提前调整控制量,减小滞后对控制效果的影响,负荷变化等大扰动情况下,采用前馈控制与反馈控制相结合的方式,依据负荷变化信号提前调整燃料量和减温水量,降低温度波动幅度,通过这些抗干扰与优化策略,提升系统在不同工况下的控制性能与鲁棒性。

4. 系统软件设计与实验验证

4.1 人机交互界面设计

基于监控组态软件开展人机交互界面设计,实现锅炉温度系统的实时监控与操控,主界面运用模块化布局形式,把炉膛温度、过热蒸汽温度等关键参数的实时数值与设定数值

分区进行展示,借助数字和仪表盘相结合的办法直观呈现,趋势曲线运用双轴坐标体系,支持多个时段的对比,以动态热力图的方式叠加显示锅炉各个区域的温度分布情况,立体展现运行状况。参数设置界面采用树状层级架构,分区域对温度设定、PID 控制参数等功能进行管理,引入多级权限认证机制,利用加密密钥和身份校验双重验证,避免非授权操作的发生,历史数据界面配备智能检索引擎,支持按照时间、参数类型等多个维度进行查询,集成数据筛选和过滤功能,能够自动生成包含数据统计、趋势分析的可视化报表。故障报警界面采用分级预警体系,按照故障的严重程度划分颜色标识,搭配高分贝蜂鸣器和闪烁警示灯,完整记录报警全生命周期的信息,保证异常情况得到及时响应和处理,人机交互界面整体采用扁平化设计风格,关键参数用红、绿颜色区分状态,操作按钮配备动态提示,简化操作层级,确保操作人员可以快速了解系统状态并开展必要的操作。

4.2 系统仿真与实验验证

在系统实际安装前,借助 MATLAB/Simulink 对模糊 PID 控制算法开展仿真验证,构建锅炉温度系统的数学模型,模拟不同工况下的温度变化进程,将传统 PID 控制与模糊 PID 控制的仿真结果进行对比,对控制算法的性能指标诸如超调量、调节时间、稳态误差等加以评估。仿真结果显示,模糊 PID 控制算法在温度响应速度和控制精度层面都优于传统 PID 控制,特别是在负荷阶跃变化时,温度超调量明显减小,调节时间得以缩短,系统硬件安装完毕后,开展现场调试与实验验证,在不同负荷工况下测试温度控制系统的性能,记录温度响应曲线和控制参数的变化状况,依据实验结果对控制算法参数进行优化调整,确保系统符合设计要求。实验验证结果表明,基于 PLC 的智能控制系统能够实现锅炉温度的稳定控制,各项性能指标达到或超过设计标准。

4.3 应用效果与效益分析

基于 PLC 的电厂锅炉温度智能控制系统在实际应用中收获了突出的技术经济成效,技术层面,系统实现锅炉温度的精准调控,把温度波动范围控制在设定值的 $\pm 1^{\circ}\text{C}$ 以内,相较传统控制手段提升 50% 以上的控制精度,负荷变化时

的温度响应速度提高 30% 以上,有效改进锅炉的运行稳定性;经济层面,精准的温度控制提升燃料燃烧效率,降低发电煤耗,同时减少因温度波动导致的设备损耗和维护成本,据估算,系统投用后每年可节约燃料成本达数百万元;安全层面,系统的多重保护机制和故障诊断功能,增强锅炉运行的安全性,降低因温度异常引发事故风险,保障电厂的安全生产^[5]。该系统的应用推动电厂自动化控制技术的升级,为智能电厂建设奠定基础。

结语

基于 PLC 的电厂锅炉温度智能控制系统设计,借助智能控制算法与 PLC 技术的融合,切实解决锅炉温度系统的复杂控制难题,本文从系统需求分析、硬件设计、算法实现至实验验证,构建起完整的温度控制解决方案,实践显示,该系统达成锅炉温度的精确调节,增强系统的抗干扰能力与鲁棒性,收获良好的技术经济成效。伴随工业自动化与智能化技术的进步,未来可进一步将深度学习、预测控制等先进算法与 PLC 技术结合,提升系统的预测性和自适应能力,同时强化系统与电厂管理信息系统的集成,实现更全面的优化控制,为电力生产的高效、安全、经济运行提供更坚实的技术支撑。

参考文献:

- [1] 刘棒棒.基于智能算法的锅炉燃烧优化控制系统的研究与应用[D].兰州理工大学,2024.
- [2] 程相澳.生物质锅炉燃烧特性分析及配风自动控制系统研究[D].河南农业大学,2024.
- [3] 黄宇婧,胡宁峪,韦联琦.工业锅炉燃烧自动控制系统设计[J].装备制造技术,2025,(03):166-170+180.
- [4] 丁艳玲.基于 PLC 的智能温度控制系统设计[J].无线互联科技,2023,20(16):22-24.
- [5] 区杰勇.广义预测控制在电热锅炉温度控制中的应用研究[D].东华大学,2020.

作者简介:刘佳明(2004.01—),男,吉林省长春市,学生,本科,研究方向:自动化。