

# 基于智能控制的电厂热工自动化研究

郑怡慧

晋能控股山西电力股份有限公司 山西 太原 030006

**摘要:** 电厂热工系统因设备非线性、时变及大滞后特性,传统控制方法难保稳定与高效。本研究基于智能控制技术,结合模糊逻辑、神经网络及机器学习算法,构建“机理指导+数据校正”的混合建模框架,精准预测热工参数。通过模糊PID复合控制、LSTM预测控制及多目标优化算法,有效提升锅炉水位、汽轮机转速等关键环节的控制精度与抗干扰能力,助力电厂实现智能化、高效化运行。

**关键词:** 智能控制; 电厂热工; 自动化系统; 建模与优化

引言: 在能源需求持续增长与“双碳”目标推动下,电厂热工系统的运行稳定性与效率至关重要。传统控制方法在面对复杂多变的热工工况时,常因难以处理非线性、时变及大滞后等问题,导致控制精度不足、能耗偏高。智能控制凭借其无需精确建模、自适应学习及强鲁棒性等优势,为解决上述难题提供了新途径。深入开展基于智能控制的电厂热工自动化研究,对提升电厂运行水平、保障能源供应安全意义重大。

## 1 电厂热工自动化系统基础理论

### 1.1 热工系统组成与特性

(1) 锅炉、汽轮机、热力管道等关键设备: 锅炉作为能量转换核心,通过燃料燃烧将化学能转化为热能,生成高温高压蒸汽;汽轮机接收蒸汽能量,将热能转化为机械能驱动发电机发电;热力管道负责输送蒸汽与热水,需具备耐高温、高压及抗腐蚀特性,三者协同构成电厂热力循环核心框架。(2) 系统动态特性: 非线性体现在设备参数(如锅炉水位、汽轮机转速)与控制量间非比例关系,如负荷突变时锅炉热效率非线性变化;时变特性源于设备老化、燃料品质波动等,导致系统参数随时间漂移;大滞后则因热力传递存在延迟,如蒸汽从锅炉传输至汽轮机需一定时间,易造成控制响应滞后。

### 1.2 传统控制方法分析

(1) PID控制原理及局限性: 原理是通过比例(P)、积分(I)、微分(D)环节组合,根据偏差调整控制量,比例环节快速响应偏差,积分环节消除静差,微分环节预测偏差变化趋势。局限性在于难以适应非线性系统,参数整定依赖经验,面对大滞后系统易出现超调或振荡,无法动态优化控制策略。(2) 经典控制策略在热工系统中的适用性: 适用于简单线性、参数稳定的子系统,如锅炉给水流量控制、凝汽器水位控制等,此类系统动态特性较平缓,偏差范围小,经典控制可实现基本稳定控制,但

在全厂协调控制、变负荷运行等复杂场景中,控制精度与稳定性不足<sup>[1]</sup>。

### 1.3 智能控制技术概述

(1) 模糊控制、神经网络控制、专家系统、遗传算法等: 模糊控制基于模糊逻辑,将专家经验转化为控制规则,适应非线性系统;神经网络控制模拟人脑神经网络结构,通过数据训练实现自适应控制;专家系统整合领域知识,实现故障诊断与决策;遗传算法通过模拟生物进化过程,优化控制参数。(2) 智能控制与传统控制的对比优势: 无需建立精确数学模型,可处理非线性、时变系统;具备自学习、自适应能力,能应对工况波动;在复杂多变量系统中,控制精度更高,稳定性更强;可实现故障自诊断与容错控制,提升系统可靠性,尤其适用于电厂变负荷运行、设备故障等复杂场景。

## 2 基于智能控制的电厂热工自动化系统建模与优化

### 2.1 系统建模方法

(1) 机理建模与数据驱动建模结合: 机理建模基于热工系统物理化学规律(如能量守恒、流体力学方程),构建锅炉燃烧、汽轮机做功等核心环节的数学模型,可反映系统本质特性,但难以涵盖复杂干扰与非线性因素;数据驱动建模依托海量运行数据(如温度、压力、流量时序数据),通过机器学习算法挖掘变量关联,无需精确机理认知,却依赖数据质量。二者结合时,机理模型为数据驱动建模提供先验约束(如参数范围、变量逻辑关系),数据驱动模型修正机理模型的简化误差,形成“机理指导+数据校正”的混合建模框架,提升模型在变工况下的精度与泛化能力。(2) 神经网络建模在热工参数预测中的应用: 针对热工系统多变量耦合、大滞后特性,神经网络(如BP神经网络、CNN)可通过多层神经元映射输入(如燃料量、给水量)与输出(如主蒸汽温度、机组负荷)的复杂关系。例如,利用历史运行数据训练神经

网络,预测未来5-10分钟的主蒸汽压力变化,为提前调节阀门开度提供依据;相较于传统机理预测模型,神经网络建模无需推导复杂公式,能自适应工况波动,预测误差可控制在3%以内,满足实时控制需求<sup>[2]</sup>。

## 2.2 智能控制算法设计

(1) 模糊PID复合控制策略:融合模糊控制的非线性处理能力与PID控制的精确调节优势。当系统偏差较大时,模糊控制根据偏差与偏差变化率,依据专家规则输出粗调量,快速缩小偏差;当偏差接近设定值时,切换至PID控制,通过比例、积分、微分环节消除静差。例如,在锅炉水位控制中,模糊PID可解决传统PID在负荷突变时超调大的问题,使水位波动范围从 $\pm 50\text{mm}$ 缩小至 $\pm 20\text{mm}$ ,调节速度提升40%。(2) 基于RNN/LSTM的预测控制算法:针对热工系统大滞后特性,RNN(循环神经网络)通过时序记忆单元捕捉参数动态变化,LSTM(长短期记忆网络)进一步解决长序列依赖问题,精准预测未来时刻系统输出。将预测结果反馈至控制器,提前调整控制量,补偿滞后影响。如在汽轮机转速控制中,LSTM预测控制可提前识别蒸汽压力波动对转速的影响,使转速超调量从8%降至3%,调节时间缩短至2秒以内。(3) 多目标优化算法在参数整定中的应用:热工控制参数(如PID参数、模糊规则阈值)需同时满足超调量小、调节时间短、稳态误差小等多目标需求。NSGA-II(非支配排序遗传算法II)通过种群进化,生成Pareto最优解集,避免传统单目标优化的局限性。例如,在协调控制系统参数整定时,NSGA-II可在保证机组负荷响应速度的同时,降低主蒸汽压力波动,使多目标综合性能提升30%以上,且支持根据运行需求选择最优参数组合。

## 2.3 控制策略仿真与验证

(1) MATLAB/Simulink仿真平台搭建:基于热工系统数学模型,在Simulink中搭建锅炉、汽轮机、协调控制等子系统模块,集成智能控制算法(如模糊PID、LSTM预测控制)模块,设置扰动信号(如燃料量波动、负荷指令变化)与边界条件(如设备额定参数)。通过SimscapeThermal库模拟热力传递过程,提升仿真的物理真实性,实现从稳态到动态的全工况仿真。(2) 对比实验设计:设计三类典型实验场景:①稳态工况(额定负荷、无扰动),验证控制精度;②扰动工况(燃料量 $\pm 10\%$ 波动、负荷指令 $\pm 15\%$ 阶跃变化),验证抗干扰能力;③变工况(负荷从50%BMCR升至100%BMCR),验证动态适应性。每组实验重复3次,记录传统PID与智能控制策略的输出曲线,消除随机误差<sup>[3]</sup>。(3) 性能指标:超调量反映系统稳定性,智能控制策略需将主蒸汽温度

超调量控制在5%以内,低于传统PID的10%;调节时间衡量响应速度,要求负荷变化时调节时间 $\leq 10$ 秒,较传统PID缩短50%;稳态误差体现控制精度,智能控制需将汽轮机转速稳态误差控制在 $\pm 0.1\text{r/min}$ ,优于传统PID的 $\pm 0.5\text{r/min}$ 。通过多指标综合评估,验证智能控制策略的优越性。

## 3 基于智能控制的电厂热工自动化系统实现

### 3.1 系统架构设计

(1) 分层分布式控制结构:现场层部署传感器与执行器,实时采集锅炉温度、汽轮机压力等热工参数,执行阀门开度、电机转速等控制指令,是系统数据采集与指令执行的基础;控制层以PLC/工业PC为核心,运行模糊PID、LSTM预测等智能控制算法,处理现场层数据并生成控制策略,同时实现子系统间协同控制,如锅炉-汽轮机协调控制;管理层通过上位机与服务器,实现数据监控、报表生成与远程运维,支持管理人员实时掌握系统运行状态,三层结构通过网络互联,既保证控制实时性,又实现数据共享与集中管理<sup>[4]</sup>。(2) 智能控制单元与DCS系统的集成:智能控制单元(如嵌入式控制器)通过标准接口(如RS485、以太网)接入电厂现有DCS系统,保留DCS原有逻辑控制功能,将智能算法作为补充模块嵌入。例如,在DCS的锅炉水位控制回路中,新增模糊PID智能控制单元,当系统偏差超阈值时,自动切换至智能控制模式;通过DCS的组态软件实现智能控制单元参数配置与状态监控,确保集成后系统兼容性与稳定性,避免对原有DCS架构的大规模改造。

### 3.2 硬件选型与通信协议

(1) 传感器、执行器、PLC/工业PC配置:传感器选用高精度、高稳定性型号,如锅炉主蒸汽温度采用PT100铂电阻传感器(精度 $\pm 0.1^\circ\text{C}$ ),给水流量采用电磁流量计(量程比1:50);执行器优先选择智能电动执行器(响应时间 $\leq 0.5\text{s}$ ),支持远程控制与故障反馈;PLC选用西门子S7-1500系列(支持多轴控制与高速计数),工业PC配置酷睿i7处理器与16GB内存,满足智能算法实时运行需求;硬件选型需考虑电厂高温、高湿、强电磁干扰环境,确保设备防护等级 $\geq \text{IP65}$ 。(2) 现场总线技术:现场层采用ModbusRTU协议(传输速率115200bps),实现传感器与PLC的短距离数据通信,通信距离 $\leq 1000\text{m}$ ;控制层与管理层采用ProfibusDP协议(传输速率12Mbps),支持多主站通信与分布式设备管理,满足大量数据高速传输需求;总线协议需具备差错校验与重发机制,降低数据传输误码率,保障热工参数与控制指令的可靠传输<sup>[5]</sup>。

### 3.3 软件实现与算法部署

(1) 嵌入式系统开发: 采用C/C++开发PLC嵌入式控制程序, 实现传感器数据采集、执行器驱动与基础逻辑控制, 确保程序实时性(周期 $\leq 1\text{ms}$ ); 利用Python(搭配TensorFlow/PyTorch框架)开发智能算法模块, 如LSTM预测模型训练与模糊PID规则编写, 通过C++与Python混合编程, 将训练好的算法模型移植至工业PC; 开发过程中需进行代码优化与内存管理, 避免嵌入式系统资源占用过高。(2) 实时数据库与历史数据存储方案: 采用InTouch实时数据库(数据更新频率 $\leq 100\text{ms}$ ), 存储热工参数实时数据与控制指令, 支持数据高速读写与多客户端访问; 历史数据采用MySQL数据库(搭配定时备份策略), 按分钟级存储历史数据(保留1年), 通过数据压缩算法(如LZ77)减少存储占用; 设置数据缓存与冗余备份机制, 防止数据丢失, 为智能算法训练与系统故障分析提供数据支撑。

### 3.4 人机交互与故障诊断

(1) 上位机监控界面设计: 基于WinCC或组态王开发上位机界面, 采用模块化设计, 包含工艺流程图(实时显示设备状态与参数)、趋势曲线(如24小时主蒸汽压力变化)、报警窗口(故障分级提示)与控制面板(参数设置与手动操作); 界面设计遵循人性化原则, 采用红黄绿色区分设备正常、预警、故障状态, 支持触屏操作与多窗口切换, 方便运行人员快速掌握系统状态与操作。(2) 基于深度学习的故障预测与自愈控制: 采用CNN-LSTM混合模型, 以历史故障数据(如传感器异常、执行器卡涩)与实时运行参数为输入, 预测未来24小时内系

统故障风险(准确率 $\geq 90\%$ ), 并通过上位机报警窗口提前提示; 当检测到轻微故障时, 自愈控制模块自动调整控制参数(如切换备用传感器、优化阀门开度), 恢复系统正常运行; 严重故障时, 触发紧急停机程序并生成故障处理建议, 降低故障对系统的影响。

### 结束语

智能控制为电厂热工自动化带来了革新性突破。通过融合模糊控制、神经网络等智能算法, 有效解决了传统控制方法在非线性、时变、大滞后系统中的难题, 显著提升了控制精度、稳定性与可靠性。从系统建模到算法设计, 再到实际架构搭建与实现, 智能控制展现出了强大优势。未来, 随着技术不断发展, 智能控制将进一步优化, 推动电厂热工自动化向更高水平迈进, 为电力行业安全、高效运行提供更有有力保障。

### 参考文献

- [1]江顺斌.浅析智能控制在电厂热工自动化中的应用[J].新型工业化,2021,11(07):142-143.
- [2]王更云.智能控制在电厂热工自动化中的应用研究[J].设备管理与维修,2021,(21):128-130.
- [3]王伟平.智能控制在电厂热工自动化中的应运分析[J].电气技术与经济,2020,(05):19-21.
- [4]刘江山.基于智能控制的电厂热工自动化研究[J].科技创新导报,2020,17(19):53-55.
- [5]刘东成.基于智能控制的电厂热工自动化分析[J].新型工业化,2020,(02):140-143.