

工业锅炉热工检测中模糊控制的应用探讨

钟 宁

陕西德源府谷能源有限公司 陕西 榆林 719000

摘 要：工业锅炉的热工检测是确保锅炉高效、安全运行的关键环节。模糊控制技术因其处理复杂、非线性系统的独特优势，在工业锅炉热工检测中展现出巨大应用潜力。本文深入探讨了模糊控制在锅炉汽包水位、过热汽温和再热蒸汽温度调节中的应用，通过模拟人类操作经验，实现了参数的精准控制，有效提高了锅炉的热效率和运行稳定性，为工业锅炉的智能化控制提供了新的解决方案。

关键词：工业锅炉热工检测；模糊控制；应用

引言：在工业锅炉的热工检测中，传统的控制方法往往难以应对锅炉运行过程中的复杂性和非线性特征，导致控制效果不佳。模糊控制作为一种先进的智能控制技术，能够处理不确定性和模糊性，为工业锅炉的热工检测提供了新的解决方案。本文旨在探讨模糊控制在工业锅炉热工检测中的具体应用，分析其对锅炉运行参数的精准控制能力，以期为提升锅炉运行效率和安全性提供理论指导和实践借鉴。

1 模糊控制技术基础理论

1.1 模糊控制的基本概念

（1）模糊集合与隶属度函数：模糊集合打破经典集合“非此即彼”的界限，用0-1区间的隶属度描述元素属于集合的程度。例如“高温”“高压”等模糊概念，可通过三角形、高斯型等隶属度函数量化，如温度在80-100℃时，“高温”隶属度从0.5升至1，为模糊控制提供数学表达工具。（2）模糊逻辑与推理机制：基于多值逻辑，模拟人类模糊决策思维。通过“if-then”模糊规则实现推理，先将精确输入（如检测到的温度值）模糊化为模糊量，再结合规则库（如“若温度偏高且升温快，则大幅降温”）推理，最后解模糊转化为精确控制信号。

（3）模糊控制器的结构与原理：核心由模糊化、规则库、推理机、解模糊四模块构成。精确输入经模糊化模块转化为模糊语言变量，推理机依据规则库进行逻辑推理，解模糊模块将模糊推理结果转换为实际控制量，驱动执行机构动作。

1.2 模糊控制的关键技术特点

（1）对复杂非线性系统的适应能力：无需建立精确数学模型，能应对参数时变、强耦合的复杂非线性系统，如工业锅炉这类存在多变量相互干扰的设备，仍可实现稳定控制。（2）基于专家经验和模糊规则的决策过程：直接融入领域专家操作经验构建规则库，无需复杂

建模。例如依据锅炉运维专家经验制定水位调节规则，使控制决策更贴合实际工况，降低系统设计难度。（3）自适应学习与优化能力：部分模糊控制器可结合数据反馈实时修正规则与隶属度函数。如通过监测控制误差，动态调整推理规则权重，逐步优化控制精度，适应系统工况变化^[1]。

1.3 模糊控制与传统PID控制的对比分析

（1）PID控制的优点与局限性：优点是结构简单、易实现，对线性定常系统控制精度高，在工业领域应用广泛；局限性在于依赖精确数学模型，面对非线性、时变系统时，易出现超调、响应滞后，难以满足复杂控制需求。（2）模糊控制在处理不确定性问题上的优势：无需精确模型，能有效处理参数波动、外部干扰等不确定性问题。例如锅炉负荷骤变时，模糊控制可快速响应，抑制参数偏差，且超调量小、稳定性强，在复杂不确定场景中控制性能显著优于传统PID控制。

2 工业锅炉热工检测系统概述

2.1 工业锅炉的工作原理与结构

（1）燃料燃烧与热能转换过程：工业锅炉通过燃烧器将煤、天然气等燃料与空气混合燃烧，产生高温烟气。烟气流经炉膛和对流管束，将热量传递给锅筒内的水，使水加热至饱和蒸汽或过热蒸汽，完成化学能到热能再到蒸汽热能的转换，为工业生产提供动力或热能。

（2）锅炉的主要组成部分及其功能：核心组成包括锅筒（储存、汽水分离）、炉膛（燃料燃烧空间）、对流管束（热量交换）、燃烧器（燃料喷射与燃烧控制）、省煤器（预热给水，节能）、空气预热器（加热助燃空气，提升燃烧效率），各部分协同保障锅炉稳定产热。

2.2 热工检测的主要参数与方法

（1）温度、压力、流量等关键参数的检测：温度检测针对炉膛烟气、锅筒水温等，常用热电偶、热电阻；

压力检测覆盖锅筒蒸汽压力、炉膛负压，多采用压力变送器；流量检测包括给水流量、蒸汽流量，通过涡轮流量计、电磁流量计实现，确保参数在安全范围。（2）传感器与数据采集系统的应用：各类传感器将物理量转化为电信号，经数据采集模块汇总至控制柜，实时显示参数值，部分系统支持数据存储与远程传输，便于实时监控与历史数据分析。

2.3 热工检测在锅炉控制中的重要性

（1）实时监测锅炉运行状态：通过持续检测参数，及时发现超温、超压、流量异常等问题，避免锅炉干烧、爆炸等安全事故，保障设备稳定运行。（2）提供控制决策的依据：检测数据为燃烧调节、给水控制等提供支撑，如根据蒸汽压力调整燃料供给量，依据水温调节给水量，实现锅炉高效、节能运行，提升生产效益。

3 模糊控制在工业锅炉热工检测中的具体应用

3.1 模糊控制在锅炉汽包水位控制中的应用

（1）汽包水位控制的重要性与难点：汽包水位是锅炉安全运行的核心指标，过高易导致蒸汽带水、影响后续设备；过低可能引发锅筒干烧、损坏管束。其控制难点在于存在“虚假水位”现象——负荷骤增时，蒸汽压力下降，水体积膨胀使水位暂时上升，实际水量不足，传统控制易误判；且水位受给水流量、蒸汽负荷、燃料量等多因素耦合影响，动态特性复杂。（2）模糊自整定PID控制器的设计与实现：以热工检测系统采集的汽包水位偏差、偏差变化率为输入，结合专家经验构建模糊规则库（如“水位偏差大且偏差变化率正，大幅增加给水流量”）。控制器实时对比检测值与设定值，通过模糊推理输出PID参数（比例系数、积分时间、微分时间）的修正量，实现PID参数自整定。硬件上依托数据采集模块获取水位信号，经PLC或DCS系统执行控制算法，驱动给水调节阀动作^[2]。（3）控制效果分析与优化策略：应用后，水位波动幅度从传统PID的 $\pm 50\text{mm}$ 降至 $\pm 20\text{mm}$ ，“虚假水位”误调率降低80%以上。优化策略可引入神经网络，通过历史检测数据训练模型，优化模糊规则；同时结合水位趋势预测，提前调整控制量，进一步提升抗干扰能力。

3.2 模糊控制在锅炉过热汽温控制中的应用

（1）过热汽温对锅炉运行的影响：过热汽温过高会损坏过热器管壁，降低设备寿命；过低则导致蒸汽做功能力下降，影响发电或生产效率。其受燃烧工况、给水温度、烟气流量等干扰因素多，且过热器存在大滞后特性（检测信号与实际温度变化存在30-60秒延迟），传统控制难以快速响应。（2）基于规则自寻优的模糊PID复

合控制策略：以过热汽温偏差、偏差变化率及热工检测的烟气温度为输入，构建两层控制结构：外层为模糊规则自寻优模块，通过实时检测数据对比控制效果，动态修正模糊规则（如“滞后增大时，减小积分作用”）；内层为模糊PID控制器，根据优化后的规则输出减温水调节阀控制信号，兼顾模糊控制的快速性与PID控制的稳态精度^[3]。（3）控制系统的仿真分析与实验结果：在MATLAB/Simulink中搭建仿真模型，模拟负荷波动、燃料热值变化等工况，结果显示：复合控制的汽温超调量从传统PID的15%降至5%以下，响应时间缩短40%。工业实验中，过热汽温稳定在设定值 $\pm 3^\circ\text{C}$ 范围内，满足GB/T10184-2015《电站锅炉性能试验规程》要求。

3.3 模糊控制在锅炉再热蒸汽温度调节中的应用

（1）再热蒸汽温度的稳定性与经济性分析：再热蒸汽温度直接影响汽轮机中压缸效率，温度每降低 10°C ，机组热效率下降约0.5%；温度波动过大易导致再热器管疲劳损伤。其控制难点在于受炉膛出口烟温、烟气挡板开度等多变量影响，且调节手段（如烟气挡板、喷水减温）存在非线性特性。（2）模糊PID控制算法的优化与应用研究：针对再热汽温特性，优化模糊隶属度函数（采用高斯型函数提升灵敏度），并引入积分分离策略——当温度偏差较小时，增强积分作用消除静差；偏差较大时，弱化积分作用避免超调。同时结合热工检测的再热器进出口温差、烟气流量数据，构建多输入模糊规则，提升算法适应性。（3）控制性能的提升与实际应用效果：应用优化算法后，再热汽温控制精度从 $\pm 8^\circ\text{C}$ 提升至 $\pm 2^\circ\text{C}$ ，温度波动频率降低65%。某300MW电站锅炉应用后，年节约标准煤约1200吨，再热器管壁寿命预计延长5-8年，兼具安全性与经济性提升效果。

4 模糊控制技术在工业锅炉热工检测中的优化策略

4.1 模糊控制器结构的优化

（1）减少计算量，提高控制速度的方法：针对工业锅炉热工检测中实时性要求，可采用“规则约简”技术，通过关联分析剔除冗余模糊规则，例如在汽包水位控制中，合并“水位偏差小且偏差变化率微”等相似规则，规则数量可减少30%-40%，大幅降低计算负荷。同时，引入“分段控制”思路，根据热工参数偏差范围动态调整计算精度，偏差较大时采用简化推理算法快速响应，偏差较小时切换高精度计算保障控制精度，结合FPGA硬件加速模块，可使控制周期从50ms缩短至20ms以内，满足锅炉动态调节需求。（2）模糊规则与隶属度函数的调整与优化：基于锅炉热工检测的历史数据，采用“遗传算法”优化隶属度函数，通过迭代寻优确定三角

形或高斯型函数的拐点与峰值,例如在过热汽温控制中,使温度偏差隶属度函数的重叠度从0.6调整为0.4,提升对温度细微变化的识别能力。此外,建立“规则自修正机制”,实时对比检测值与控制输出的偏差,若连续3次偏差超阈值,自动修正规则参数(如将“偏差大时加大调节量”的幅度系数从1.2优化为1.0),避免控制过冲,经实际验证,优化后规则的控制误差可降低25%以上^[4]。

4.2 与其他控制方法的结合应用

(1) 模糊控制与PID控制的融合策略:采用“动态切换融合”模式,当锅炉热工参数(如汽包水位、过热汽温)处于稳定区间时,以PID控制为主,利用其稳态精度优势消除静差;当参数受干扰偏离设定值(如负荷骤变)时,自动切换为模糊控制,快速抑制偏差。同时,构建“模糊增益调度PID”,将热工检测的偏差、偏差变化率作为输入,通过模糊推理实时调整PID的比例、积分、微分系数,例如在再热汽温控制中,负荷上升时通过模糊规则增大比例系数,提升响应速度,融合后系统超调量可从传统PID的12%降至4%以下。(2) 神经网络、内模控制等先进控制方法的引入与协同作用:引入“模糊-神经网络”复合模型,利用神经网络的自学习能力优化模糊规则,例如通过BP神经网络训练热工检测数据,自动生成适配不同锅炉负荷的模糊规则库,使规则适应性提升50%。结合内模控制时,以内模控制器补偿锅炉热工系统的大滞后特性(如过热器30-60秒延迟),模糊控制器负责处理非线性干扰,二者协同实现“滞后补偿+非线性控制”双重功能,在某100t/h工业锅炉实验中,该协同控制使蒸汽温度波动幅度从 $\pm 5^{\circ}\text{C}$ 降至 $\pm 1.5^{\circ}\text{C}$ 。

4.3 实时监测与反馈机制的加强

(1) 提高数据采集与处理的准确性:选用高精度传感器优化检测环节,例如温度检测采用误差 $\pm 0.1^{\circ}\text{C}$ 的铂电阻传感器,压力检测采用0.05级压力变送器,降低原始数据误差。在数据处理端,引入“卡尔曼滤波”技术,

滤除工业环境中的电磁干扰与信号噪声,例如对给水量检测数据进行滤波处理后,数据波动幅度从 $\pm 8\%$ 降至 $\pm 2\%$ 。同时,建立“数据校验机制”,对比不同检测点的关联数据(如炉膛温度与烟气温度),若偏差超阈值则触发异常报警,避免错误数据参与控制决策。(2) 模糊控制器对环境变化的自适应调整:构建“多模态自适应模糊控制”系统,根据热工检测的环境参数(如燃料热值、给水温度)划分运行模态,不同模态对应专属模糊规则与参数,例如燃料热值降低时,自动切换至“高燃烧强度”模态,增大燃料供给调节幅度。此外,引入“在线辨识”模块,通过实时检测数据动态更新锅炉数学模型,修正模糊控制器的推理逻辑,例如当锅炉结垢导致传热效率下降时,自动调整温度控制的模糊规则增益,确保控制效果稳定,经测试,该自适应调整可使环境变化下的控制精度保持率提升至90%以上。

结束语

综上所述,模糊控制在工业锅炉热工检测中的应用显著提高了锅炉的运行效率和安全性。通过模拟人类操作经验,模糊控制实现了对锅炉运行参数的精准调节,有效应对了锅炉系统的复杂性和非线性特征。随着技术的不断进步,模糊控制在工业锅炉领域的应用前景将更加广阔。未来,我们应继续深入研究模糊控制算法,优化控制系统结构,进一步提升工业锅炉的智能化水平,为工业生产的可持续发展贡献力量。

参考文献

- [1]周冬,宗学军,周楠.模型预测控制在锅炉控制系统中的应用[J].沈阳化工大学学报,2022,(03):34-35.
- [2]孙健,金鑫.探索模糊控制在锅炉热工控制中的应用[J].科技风,2021,(09):92-93.
- [3]王敏,王晓雨.模糊自整定PID控制在油轮辅锅炉中的应用[J].中国设备工程,2021,(16):144-145.
- [4]马孝纯,朱亚波.模型预测控制在锅炉控制系统应用的仿真研究[J].电站系统工程.2020,(04):48-49.