

基于增量式模糊 PID 的复烤机干燥区温度控制研究

郑仕高 杜鹏 王于栋 巴志丹 高桐

云南省烟草烟叶公司, 云南昆明, 650000;

摘要: 针对复烤机干燥区温度控制系统非线性、大滞后、时变的特性, 传统 PID 控制存在超调量大、响应迟缓、抗干扰能力弱等问题, 提出增量式模糊 PID 控制策略。通过现场阶跃响应测试与最小二乘法辨识, 建立二阶滞后被控对象模型。设计以温度偏差 e 和偏差变化率 ec 为输入的模糊 PID 控制器, 构建 7 个模糊子集与 49 条工业经验规则, 采用三角形 - 高斯型隶属度函数组合及重心法去模糊化, 实现 PID 参数在线自整定。仿真结果表明, 与传统 PID 相比, 该策略超调量从 15.7% 降至 9.1%, 调节时间从 215.6s 优化至 138.2s, 稳态误差缩小至 $\pm 0.1^{\circ}\text{C}$; $\pm 1^{\circ}\text{C}$ 外部干扰下, 最大偏差降低 58.3%~63.6%, 恢复时间缩短 52.2%~52.4%, 有效提升了控制精准性、抗干扰能力与鲁棒性, 为成品片烟质量一致性提供技术保障。

关键词: 复烤机; 干燥区; 温度控制; 模糊 PID; 参数自整定

DOI: 10.69979/3041-0673.26.04.014

引言

烟叶复烤是卷烟生产中衔接原料预处理与后续加工的关键工序, 核心任务是通过干燥、冷却、回潮工艺协同, 将打叶后烟叶含水率从 18%~22% 降至 10%~12%, 同时去除田间杂气、改善燃烧性^[1]。干燥区作为深度脱水核心单元, 温度控制精度直接决定成品片烟质量稳定性, 温度波动会导致含水率偏差超标, 增加霉变风险与原材料损耗^[2]。

复烤机干燥区属于典型工业大滞后系统, 控制难点集中于三方面: 一是热交换器与传感器的物理安装距离导致纯滞后显著, 传统 PID 控制器的微分环节失效, 升温阶段超调量大, 易引发烟叶焦糊^[3]; 二是烟叶来料水分波动引起系统时间常数增大, 固定 PID 参数难以适配工况变化^[4]; 三是蒸汽管网压力波动会造成温度扰动, 传统 PID 依赖积分环节消除偏差, 恢复时间长, 导致脱水不均匀^[5]。当前复烤行业正推进数字化转型, 人工经验赋值的传统控制方式已难以满足大模块、大配方的均质化生产需求^[6], 传统 PID 控制的局限性进一步凸显。

现有研究虽针对上述问题开展探索, 但仍存在局限。近年智能控制技术的发展为解决该难题提供了支撑, 模糊 PID 结合传统 PID 稳定性与模糊逻辑灵活性的优势, 在工业温控系统中展现出优异的自适应与抗干扰性能^[7], 其与数字化生产的融合应用已成为复烤加工技术升级的重要方向。基于此, 本文以某 12t/h 打叶复烤

生产线为研究载体, 提出增量式模糊 PID 控制策略, 旨在解决复烤机干燥区温度控制难题。

1 复烤机干燥区控制原理

1.1 控制原理

烟叶复烤机属于大热容设备, 当前烤机采用基本的 PID 分支小回环进行分段控制。干燥区作为复烤机温度控制的核心区段, 其控制链路如下: 操作人员通过控制柜组态屏设定温度目标值, 温度传感器实时采集干燥区实际温度; 控制器计算“设定值 - 实际值”的偏差信号后, 输出 4~20mA 标准电流信号调节气动薄膜阀开度; 通过改变阀门开度, 精确控制进入热交换器的蒸汽流量, 进而实现干燥区温度的闭环调节。整个控制链路的动态响应受热交换效率、烟叶流量、环境温度等多因素影响, 呈现显著的非线性与大滞后特性。

1.2 控制对象建模

采用“机理分析 - 现场测试 - 系统辨识”的联合方法建立被控对象模型。基于传热传质机理与能量守恒与质量守恒定律, 初步确定系统为“滞后 - 惯性”特性, 选用工业大滞后系统常用的二阶滞后模型进行拟合, 传递函数形式为:

$$G(s) = \frac{K e^{-\tau s}}{(T_1 s + 1)(T_2 s + 1)} \quad (1)$$

其中 K 为系统增益; τ 为纯滞后时间; T_1 为大时间常数, 反映系统总热容导致的热惯性; T_2 为小时间常数, 反映执行机构惯性。

通过现场测试与最小二乘法辨识,最终得到被控对象传递函数:

$$G(s)=\frac{e^{-252s}}{(265s+1)(14s+1)} \quad (2)$$

2 增量式模糊 PID 控制策略设计

2.1 工作原理

模糊控制基于模糊集合理论,将“温度远低于设定值时加大蒸汽流量”“温度接近设定值且变化缓慢时微调控制参数”等自然语言描述的控制经验,转化为计算机可执行的算法,无需建立被控对象的精确数学模型即可实现对复杂系统的有效控制。模糊 PID 控制器以温度偏差 e (设定值与实际值之差) 和偏差变化率 $ec=\frac{de}{dt}$ 为输入,通过模糊化、模糊推理、去模糊化三个核心环节,实时输出 PID 参数增量 ΔK_p 、 ΔK_i 、 ΔK_d ,实现 PID 参数的动态调整。

模糊 PID 控制器分为常规式与增量式两类:常规式直接将模糊推理结果作为最终 PID 参数,易因参数突变引发系统振荡;增量式在初始 PID 参数 (K_{p0} 、 K_{i0} 、 K_{d0}) 基础上叠加模糊推理得到的参数增量,确保参数调整缓和,避免系统动态特性突变。考虑到复烤机温度控制对稳定性的严格要求,选用增量式结构,其 PID 参数更新公式为:

$$\begin{cases} K_p(t)=\Delta K_p(t)+K_p(t-1) \\ K_i(t)=\Delta K_i(t)+K_i(t-1) \\ K_d(t)=\Delta K_d(t)+K_d(t-1) \end{cases} \quad (3)$$

式中: $K_p(t)/K_i(t)/K_d(t)$ 为第 t 次采样时最终 PID 参数; $\Delta K_p(t)/\Delta K_i(t)/\Delta K_d(t)$ 为第 t 次采样时模糊 PID 控制器参数; $K_p(t-1)/K_i(t-1)/K_d(t-1)$ 为第 $t-1$ 次采样时最终 PID 参数。

2.2 控制器设计

2.2.1 论域与模糊子集

输入变量: 温度偏差 e 的基本论域为 $[-5,5]^{\circ}\text{C}$, 模糊论域为 $[-3,-2,-1,0,1,2,3]$, 通过线性变换公式 $y=3\times\frac{2x+10}{10}-3$ 实现基本论域与模糊论域的映射; 偏差变化率 ec 的基本论域为 $[-1,1]^{\circ}\text{C}/\text{s}$, 模糊论域与 e 一致, 映射公式为 $y=3\times\frac{2x+2}{2}-3$ 。

输出变量: PID 参数增量 ΔK_p 的基本论域为 $[-0.3,0.3]$ (基于初始 $K_{p0}=1.2$, 调整幅度控制在 25% 以内, 避免参数突变导致系统振荡), ΔK_i 的基本论域为 $[-0.03,0.03]$ (防止积分饱和), ΔK_d 的基本论域为 $[-0.1,0.1]$ (平衡系统阻尼与响应速度), 三者的模糊论域均为 $[-3,-2,-1,0,1,2,3]$ 。

所有变量的模糊子集均定义为 7 个: {负大 (NB)、负中 (NM)、负小 (NS)、零 (ZO)、正小 (PS)、正中 (PM)、正大 (PB)}。

2.2.2 隶属度函数选择

结合复烤机温度控制的需求,对输入输出变量采用差异化的隶属度函数设计。输入变量 (e 、 ec) 选用三角形隶属度函数,其数学表达式为:

$$\mu(x)=\begin{cases} 0, & x < a \\ \frac{x-a}{b-a}, & a \leq x \leq b \\ \frac{c-x}{c-b}, & b < x \leq c \\ 0, & x > c \end{cases} \quad (4)$$

b 、 c 为特征点 ($a < b < c$), 对应模糊子集的论域边界与中心值。函数计算量小、灵敏度高,能快速捕捉温度波动,且在相邻子集交点处隶属度平滑过渡,避免控制信号突变导致的温度振荡。

输出变量 ΔK_p 、 ΔK_i 、 ΔK_d 选用高斯型隶属度函数,其数学表达式为:

$$\mu(x)=\exp\left(-\frac{(x-\sigma)^2}{2\delta^2}\right) \quad (5)$$

σ 为隶属度函数的中心值, δ 为宽度参数。该函数连续光滑,子集重叠度 10%~20%,可有效避免 PID 参数突变导致的系统振荡,确保参数调整平稳过渡。

2.2.3 模糊规则库构建与去模糊化

基于复烤机干燥区温度控制的动态特性、PID 参数调节规律及工业控制经验综合制定。根据温度偏差 e 和偏差变化率 ec 的不同组合,结合 PID 参数对系统性能的影响,制定三大核心控制原则:

(1)当 $|e|$ 较大时,系统显著偏离设定值,优先保障响应速度:增大 K_p 以提速,减小 K_d 避免超调,适度降低 K_i 以防积分过量加剧超调;

(2)当 $|e|$ 中等时,系统趋近设定值,平衡响应速度与超调量:减小 K_p 抑制超调,选用适中 K_d 增强系统阻尼,适度增大 K_i 逐步消除稳态误差;

(3)当 $|e|$ 较小时,较小时,系统处于稳态附近,优先保障控制稳定性与精度:增大 K_p 和 K_i 以提高控制精度, K_d 根据 $|ec|$ 动态调整 ($|ec|$ 较大时减小 K_d 避免系统振荡, $|ec|$ 较小时增大 K_d 增强抗干扰能力)。

基于上述控制原则,采用“IF e is A AND ec is B THEN ΔK_x is C”的标准化形式建立包含 49 条规则的模糊规则库。

采用重心法 (Centroid Method) 进行去模糊化处理,将模糊推理输出的模糊量转换为精确控制量。计算公式

为:

$$u = \frac{\sum_{i=1}^n \mu(x_i)x_i}{\sum_{i=1}^n \mu(x_i)} \quad (6)$$

式中: u 为去模糊化后的精确值(ΔK_p 、 ΔK_i 、 ΔK_d); μ_i 为第 i 个模糊子集的隶属度; x_i 为对应子集的中心值。

3 仿真实验与结果分析

3.1 仿真模型搭建

基于 MATLAB/SIMULINK R2023b 搭建复烤机干燥区温度控制仿真模型, 严格复刻工业控制链路, 核心模块包括参考输入、偏差计算、偏差变化率、模糊 PID 控制器、被控对象及干扰模块。

3.2 实验设计与结果分析

3.2.1 阶跃响应实验

无干扰条件下, 对比模糊 PID 与传统 PID 的阶跃响应特性, 性能指标如表 4 所示。模糊 PID 控制器的超调量从 15.7% 降至 9.1%, 下降幅度达 42.3%; 上升时间从 89.3s 缩短至 57.5s, 效率提升 35.7%; 调节时间从 215.6s 减少至 138.2s, 效率提升 35.9%; 稳态误差从 $\pm 0.3^\circ\text{C}$ 减小至 $\pm 0.1^\circ\text{C}$, 控制精度提升 66.7%, 各项指标均满足复烤机工艺要求。

3.2.2 抗干扰实验

在阶跃响应实验基础上加入 $\pm 1^\circ\text{C}$ 阶跃干扰, 对比两种控制器的抗干扰能力, 结果如表 5 所示。 $+1^\circ\text{C}$ 干扰下, 模糊 PID 的干扰峰值 (0.5°C) 较传统 PID (1.2°C) 降低 58.3%, 恢复时间 (23.3s) 缩短 52.2%; -1°C 干扰下, 干扰峰值 (0.4°C) 降低 63.6%, 恢复时间 (21.5s)

缩短 52.4%, 模糊 PID 能快速抑制外部干扰, 维持温度稳定。

4 结论

针对复烤机温度控制系统非线性、大滞后及时变特性, 设计增量式模糊 PID 控制器。理论分析与仿真实验验证表明: 该控制器以温度偏差 e 和偏差变化率 ec 为输入, 采用三角形 - 高斯型隶属度函数、49 条模糊规则及重心法去模糊化, 实现 PID 参数在线自整定, 可有效适配系统动态特性变化; 与传统 PID 相比, 其超调量降低 42.3%, 上升时间与调节时间均缩短 35% 以上, 稳态误差减小至 $\pm 0.1^\circ\text{C}$, 完全满足复烤机工艺控制要求。

参考文献

- [1] 刘焜. 烟叶复烤的回顾和发展[J]. 烟草科技, 2000(5): 3-5.
- [2] 李剑馨, 雷梦遥. 烟叶复烤工艺与技术[J]. 现代农业科技, 2013(10): 63.
- [3] 国家烟草专卖局. 烟叶复烤工艺规范: YC/T31-2019[S]. 北京: 中国标准出版社, 2019.
- [4] 魏俊红. 先进控制算法在打叶复烤生产线的应用研究[D]. 上海: 东华大学, 2011.
- [5] 何光瑜. 打叶复烤热风润叶机自抗扰控制算法研究[D]. 长沙: 湖南大学, 2018.
- [6] 张飞, 周云. 复烤加工数字化转型中工艺参数寻优与应用[J]. 烟草科技, 2024, 57(11): 78-85.
- [7] 王磊, 陈明. 模糊 PID 在工业温控系统中的优化设计与应用[J]. 自动化仪表, 2025, 46(2): 56-60.