

文章编号:1674-7607(2025)12-2017-09

DOI:10.19805/j.cnki.jcspe.2025.250374

基于模糊智能预测控制的直流炉过热汽温优化控制

张明琦^{1,2}, 李军^{1,2}, 高林^{1,2}, 周俊波^{1,2},
高耀焄^{1,2}, 王文毓^{1,2}, 王大伟³, 王立成³

(1. 西安热工研究院有限公司, 陕西西安 710000; 2. 高效灵活煤电及碳捕集利用封存全国重点实验室, 陕西西安 710000; 3. 陕西延长石油富县发电有限公司, 陕西延安 716000)

摘要: 提出基于模糊智能预测控制的直流炉过热汽温优化控制方案, 在模糊集理论和预测控制算法的基础上, 结合专家系统对控制决策进行优化调整, 并设计控制信号滤波与无扰切换功能, 提出模糊智能预测控制算法。结果表明: 在外部扰动、环境噪音与模型参数摄动等干扰下, 智能预测控制算法对机组过热汽温的控制效果良好; 智能预测控制算法可以满足直流炉过热汽温系统大惯性、大延迟、多扰动的控制需求。

关键词: 模糊预测控制; 参数摄动; 过程控制; 专家系统; 过热汽温

中图分类号: TP273 **文献标志码:** A **学科分类号:** 470.30

Optimized Control of Superheated Steam Temperature of Once-through Boilers Based on Fuzzy Intelligent Predictive Control

ZHANG Mingqi^{1,2}, LI Jun^{1,2}, GAO Lin^{1,2}, ZHOU Junbo^{1,2},
GAO Yaokui^{1,2}, WANG Wenyu^{1,2}, WANG Dawei³, WANG Licheng³

(1. Xi'an Thermal Power Research Institute Co., LTD, Xi'an 710000, Shaanxi Province, China;
2. National Key Laboratory of High-Efficiency and Flexible Coal Power with Carbon Capture, Utilization and Storage, Xi'an 710000, Shaanxi Province, China; 3. Shaanxi Yanchang Petroleum Fuxian Power Generation Co., Ltd., Yan'an 716000, Shaanxi Province, China)

Abstract: Based on fuzzy intelligent predictive control, a control scheme for optimizing superheated steam temperature of DC boiler was proposed. The scheme was based on fuzzy set theory and predictive control algorithm, combined with the expert system for optimizing the control decisions. The control signal filtering and non-disruptive switching functions were designed, and a fuzzy intelligent predictive control algorithm was proposed. Results show that under such disturbances as external disturbances, environmental noise and model parameter perturbations, the intelligent predictive control algorithm performs well in controlling the superheated steam temperature of the unit. The intelligent predictive control algorithm can meet the control requirements of the DC boiler superheated steam temperature system with large inertia, large delay and multiple disturbances.

Key words: fuzzy predictive control; parameter perturbation; process control; expert system; superheated steam temperature

收稿日期:2025-06-19 修订日期:2025-07-25

作者简介:张明琦(2001—),男,陕西西安人,工学硕士,主要从事智能发电控制技术等方面的研究,E-mail:1196137309@qq.com.

在新型电力系统下,煤电正在从主体性电源向支撑性、调节性电源转型,深度调峰与快速变负荷已成为常态。超临界燃煤发电机组作为煤电的主力机型,其蒸汽参数不断提高,尤其过热汽温已临近机组金属材料所能达到的极限值,在机组深度调峰与快速变负荷过程中,严重影响机组运行的安全性与经济性^[1]。过热蒸汽温度过高会降低蒸汽管道金属材料的强度,容易引发爆管等安全事故;过热蒸汽温度过低,会导致机组的运行效率下降,降低机组运行的经济性^[2]。同时,过热蒸汽温度波动过大,还会使得材料产生金属疲劳热应力损伤,危害到机组的安全运行^[3]。

目前,国内火电厂单元机组多采用喷水减温的方式控制汽温,其主要作用是调节蒸汽温度,保护过热器、汽轮机及蒸汽管道等设备。过热汽温系统涉及烟气对流换热和辐射换热等过程,其温度变化具有强分布参数以及大惯性、大延迟的特性^[4]。传统比例积分微分(PID)控制虽然设计简单、参数整定方便,在固定工况下效果较好,但在负荷频繁变化和随机扰动条件下控制效果显著下降,导致温度波动大、滞后及稳定性差,增加了运行人员调整的难度和负担^[5]。许多学者针对过热汽温系统设计了不同的控制策略,尝试对常规 PID 控制进行优化改进,并尝试将先进的控制算法及技术应用到汽温系统控制中。闫丹等^[6]将模糊理论和 PID 引入到预测控制框架中,以形成预测模糊 PID 控制策略。安硕等^[7]提出将动态矩阵控制(DMC)与传统 PID 控制相结合,并在主汽温上测试其控制性能。陈祎璠等^[8]基于锅炉间接能量平衡,利用广义预测控制(GPC)提出了一种新型的主汽温串级控制策略。马平等^[9]设计了基于预测模型的动态预测 PID 控制算法,通过仿真验证了其在抗干扰方面的优势。但是,由于季节交替和设备损耗会引起参数变化,通常需要技术人员频繁整定 PID 参数,这增加了工作量和任务复杂性,在实际应用中仍没有得到很好的解决。

随着人工智能技术的发展和计算机算力的增强,基于神经网络的过热汽温控制系统也快速发展。Tong 等^[10]提出了一种基于残差的 LSTM-Attention(长短期记忆网络)模型,仿真表明该方法可以准确地对蒸汽温度进行预测。张国斌等^[11]提出一种基于 LSTM 预估补偿的火电机组主蒸汽温度控制系统,工程应用表明,这种系统可以有效改善汽温控制品质。曹越等^[12]提出一种基于机理与数据混合的深度神经网络(PFNN)辨识方法和基于深度神经网络(DNN)的动态前馈策略,其在机组调峰时有

效抑制了主蒸汽温度波动。Zeng 等^[13]提出采用基于神经网络的预测控制策略对锅炉主汽温进行控制。王炳淇等^[14]采用径向基(RBF)神经网络辨识一阶纯延迟对象模型,并将其作为脑神经网络(PFC)预测模型克服系统延迟性。Savran^[15]构建了具有 PID 补偿环节的神经网络逆控制器。但是,现有神经网络算法在汽温控制中的应用主要集中在预测温度和前馈补偿方面,并未对控制方法进行系统性研究,且神经网络算法对数据和算力有较高要求,存在训练发散、原理不透明等劣势,因此在工业应用中该方法仍不成熟。

作为一种智能控制方式,模糊逻辑可以利用日常操作经验来设计控制器,近年来在工业中逐步得到应用。钱虹等^[16]和姚伟等^[17]均将模糊 PID 控制运用到串级控制系统,且取得了良好的控制效果,但是在面对大滞后、不确定性等复杂情况下,控制效果仍有较大的提升空间。模型预测控制(MPC)是一种基于模型的预测控制算法,对于具有大滞后和不确定性等特点的控制系统具有很好的控制效果,在各种复杂的空子系统中得到了广泛应用。胡宇航等^[18]将模糊理论和 PID 引入到 MPC 框架中,以形成多变量预测模糊 PID 控制策略。孙优贤等^[19]和曾德良等^[20]采用自适应预测控制,以满足工况变化的控制要求,但存在自适应控制收敛速度慢的缺点。宋伟鑫等^[21]首先获得对象在各工况点下的数学模型,并据此设计多模型预测函数控制器,在各负荷点有较好的定值跟踪性能,但当工况大范围变化时超调严重。综上所述,模糊控制结合预测控制在面对机组过热汽温系统这种大延迟、大滞后的被控对象时具有良好的控制效果,但仍存在响应速度较慢、抗干扰能力较弱的问题。

基于上述分析可知,过热汽温系统的控制器应具有强抗干扰能力、鲁棒性、快速性和易于实现等特点。本文将模糊集理论和预测控制方法有机结合,在保留模糊预测控制对被调节量具有超调抑制的优良特性的基础上,针对工程实际设计有效的降噪方法,结合专家规则设计控制器参数的自适应优化调节因子,不仅提升了系统的抗干扰能力,还加快了被控量的快速响应特性,改善了被调量的调节控制品质。

1 专家规则改进的模糊智能预测控制

专家规则改进的智能预测控制算法是将模糊集理论和预测控制算法有机结合,同时利用专家系统自适应优化调节因子来优化结果决策,适用于直流炉过热汽温多扰动、非线性过程的优化控制过程。

1.1 序列预测

假设被控过程的动态特性由如下形式的时间离散方程^[22]描述。

$$y(k) = g[y(k-1), \dots, y(k-n), u(k-l), \dots, u(k-m)] \quad (1)$$

式中: k 为常数; y 和 g 分别为过程的输出和控制作用函数; n 为过程的阶次; l 为过程的滞后常数; m 为常数; u 为输出函数。

其中,递推算法为

$$\hat{y}(k+i) = g(\hat{u}(k+i-m)) + \hat{d}(k+i) \quad (2)$$

$$\hat{y}(k-j) = y(k-j) \quad (3)$$

$$u(k+h) = u_0 \quad (4)$$

$$\hat{d}(k+i) = d(k) \quad (5)$$

式中: $i \in [1, N]$; $j \in [0, n-1]$; $h \in [0, N-l]$; N 为预测的步数; $\hat{y}(k-j)$ 为 $k-j$ 时刻过程输出的预测值; $\hat{u}(k+h)$ 为假设的未来时刻过程的控制输入; u_0 为表示控制量大小的常数; $\hat{d}(k+i)$ 为 $k+i$ 时刻扰动的预测值; $d(k)$ 为 k 时刻的具体扰动量。

在对过程输出的预测过程中进行 2 点假设,即过程未来的控制输入量恒定为定值 u_0 且过程未来的扰动量恒定为 $d(k)$ 。

1.2 性能评估

控制系统的运行中,性能评估往往可以根据控制偏差和控制偏差变化率的大小来决定。在控制输入量 u_0 作用下,定义 N 步预测的偏差 $\widehat{K}_{PE}(k+N)$ 以及预测偏差变化率 $\widehat{K}_{CPE}(k+N)$ 分别为

$$\widehat{K}_{PE}(k+N) = p_0 - y(k+N) \quad (6)$$

$$\widehat{K}_{CPE}(k+N) = \widehat{K}_{PE}(k+N) - \widehat{K}_{PE}(k+N-1) \quad (7)$$

式中: p_0 为控制系统过程输出的设定值。

控制输入量 u_0 的控制效果通过 $\widehat{K}_{PE}(k+N)$ 以及 $\widehat{K}_{CPE}(k+N)$ 共同进行评判。假设 $\widehat{K}_{PE}(k+N)$ 结果偏差为正, $\widehat{K}_{CPE}(k+N)$ 结果偏差变化率为负,则证明控制输入量 u_0 的控制效果较好。为此,建立关于 2 个变量的控制性能测量指标。将 $\widehat{K}_{PE}(k+N)$ 和 $\widehat{K}_{CPE}(k+N)$ 的论域划分为 5 个模糊集(见图 1),分别为 NB(负大)、NS(负小)、ZE(零)、PS(正小)、PB(正大),再通过性能测量查询表确定性能指标,见表 1。

模糊查询规则为:若 $\widehat{K}_{PE}(k+N)$ 为 A_m 并且 $\widehat{K}_{CPE}(k+N)$ 为 B_n ,那么 $J_0 = \lambda_i$ 且 $i \in [1, 25]$ 。其中, A_m 和 B_n 为模糊集, J_0 为性能测量指标, λ_i 为表

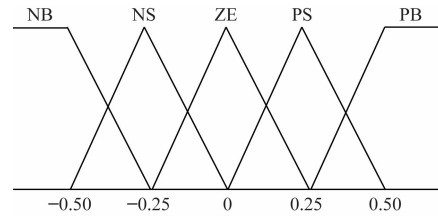


图 1 $\widehat{K}_{PE}(k+N)$ 和 $\widehat{K}_{CPE}(k+N)$ 的模糊集

Fig. 1 Fuzzy sets of $\widehat{K}_{PE}(k+N)$ and $\widehat{K}_{CPE}(k+N)$

表 1 性能指标的模糊查询表

Tab. 1 Fuzzy query table for performance indicators

项目	NB	NS	ZE	PS	PB
NB	-1.0	-0.8	-0.6	-0.3	0.0
NS	-0.8	-0.6	-0.3	0.0	0.3
ZE	-0.6	-0.3	0.0	0.3	0.6
PS	-0.3	0.0	0.3	0.6	0.8
PB	0.0	0.3	0.6	0.8	1.0

1 中的性能测量值。计算得到控制输入量 u_0 控制效果下的性能指标 J_0 , $|J_0|$ 越小, u_0 的控制效果越好;反之,控制效果越差。

1.3 结果决策

为了提升控制系统的灵活性和精确性,基于机组实际运行数据,设计了专家系统自适应优化调节因子来限定预测控制过程中的控制偏差 $\widehat{K}_{PE}(k+N)$ 和偏差变化率 $\widehat{K}_{CPE}(k+N)$,适时地改变模糊规则中的隶属度,计算更符合实时工况的匹配度和性能输出,用于最优的控制量选择。

专家规则结合智能预测控制器算法系统框图如图 2 所示。其中,PE 表示偏差;CPE 表示偏差变化率; r 为控制量设定值; $\Delta e(k)$ 为控制量偏差变化率。

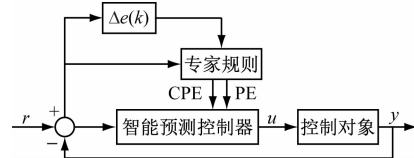


图 2 专家规则结合智能预测控制器算法系统框图

Fig. 2 System block diagram of expert rules combined with intelligent predictive controller algorithm

根据过热汽温控制中不同的实际工况,本文设计了控制规则。首先,对各参数变量和阈值进行界定,设定 e_h, e_l 分别为偏差量的上限和下限, β_1 为控制偏差增大因子 ($\beta_1 > 1$), β_2 为控制偏差减小因子 ($1 > \beta_2 > 0$), γ_1 为偏差变化率小幅增大因子 ($\gamma_1 > 1$), γ_2 为偏差变化率小幅减小因子 ($0 < \gamma_2 < 1$), ϕ_1 为偏差变化率大幅增大因子 ($\phi_1 > \gamma_1 > 1$), ϕ_2 为偏差变化率大幅减小因子 ($1 > \gamma_2 > \phi_2 > 0$)。具体规则

如下所示。

规则 1。当控制偏差的绝对值 $|e(k)| > e_h$ 时, 将控制器设置为最大(或最小)输出模式, 大幅增大控制偏差 $\widehat{K}_{PE}(k+N)$ 和偏差变化率 $\widehat{K}_{CPE}(k+N)$ 以迅速消除误差, 令

$$\widehat{K}_{PE}(k+N) = \widehat{K}_{PE}(k+N-1) \times \beta_1 \quad (8)$$

$$\widehat{K}_{CPE}(k+N) = \widehat{K}_{CPE}(k+N-1) \times \phi_1 \quad (9)$$

规则 2。当 $e_h > |e(k)| > e_l$ 时, 引入偏差增量 $\Delta e(k) = e(k) - e(k-1)$, 为保证控制过程的稳定性和平滑性, 通过微调偏差变化率来达到优化控制的目的。

当 $\Delta e(k)e(k) > 0$ 或 $\Delta e(k) = 0$, 表明偏差量的绝对值增加或为固定值。如果 $\Delta e(k) - \Delta e(k-1) > 0$, 说明偏差量变化率仍有增大的趋势, 需要将控制器调整为较强的控制模式, 使得偏差量变化率趋势扭转, 以达到偏差量快速减小的效果, 令 $\widehat{K}_{CPE}(k+N) = \widehat{K}_{CPE}(k+N-1) \times \phi_1$ 。

当 $\Delta e(k)e(k) > 0$ 或 $\Delta e(k) = 0$, 且如果 $\Delta e(k) - \Delta e(k-1) \leq 0$, 说明虽然偏差量的绝对值正在增加或为固定值, 但偏差量变化率有减小的趋势, 此时应进行适度控制来扭转变化趋势, 使得偏差量绝对值处于持续减小的趋势, 此时令 $\widehat{K}_{CPE}(k+N) = \widehat{K}_{CPE}(k+N-1) \times \gamma_1$ 。

当 $\Delta e(k)e(k) < 0$ 或 $\Delta e(k) = 0$, 且如果 $\Delta e(k) - \Delta e(k-1) > 0$, 系统正逐步趋于稳定, 此时应当保持控制器各参数不变。

当 $\Delta e(k)e(k) < 0$ 或 $\Delta e(k) = 0$, 且如果此时 $\Delta e(k) - \Delta e(k-1) < 0$, 系统出现了平衡状态附近的振荡现象, 此时应当以较低的控制模式消除系统的振荡, 令 $\widehat{K}_{CPE}(k+N) = \widehat{K}_{CPE}(k+N-1) \times \gamma_2$ 。

规则 3。当 $|e(k)| < e_l$ 时, 说明偏差量较小, 控制目标聚焦在解决系统静差上, 应主动降低控制偏差 $\widehat{K}_{PE}(k+N)$ 和偏差变化率 $\widehat{K}_{CPE}(k+N)$, 以消除静态误差, $\widehat{K}_{PE}(k+N) = \widehat{K}_{PE}(k+N-1) \times \beta_2$, $\widehat{K}_{CPE}(k+N) = \widehat{K}_{CPE}(k+N-1) \times \phi_2$ 。

因此, 假定未来控制输入量 u_0 后, 通过上述专家系统自适应优化的比例调节因子计算得到更合理的未来第 N 个预测步数的控制偏差 $\widehat{K}_{PE}(k+N)$ 和偏差变化率 $\widehat{K}_{CPE}(k+N)$, 再依据表 1 计算出对应控制指令下的性能指标 J_0 。

设 U_L 和 U_H 分别为控制指令输入的下限和上限, δ_m 为每个采样周期内指令的最大允许改变量,

以抑制过快的控制作用, 未来控制指令 $u(k)$ 寻优选择范围为 $[U_{k,LL}, U_{k,HL}]$, $U_{k,LL}$ 为寻优范围的下限, $U_{k,HL}$ 为寻优范围的上限。

$$U_{k,LL} = \max[u(k-1) - \delta_m, U_L] \quad (10)$$

$$U_{k,HL} = \min[u(k-1) + \delta_m, U_H] \quad (11)$$

将控制指令寻优范围 $[U_{k,LL}, U_{k,HL}]$ 进行 M 等分, 得到控制参考分量 u_i 。

$$u_i = \frac{U_{k,LL} + i \cdot (U_{k,HL} - U_{k,LL})}{M} \quad i = 0, 1, \dots, M \quad (12)$$

根据对于 u_i 的预测控制性能指标 J_i , 找出对应最小 $|J_i| = J_L$ (J_L 为特值) 的控制指令 u_L , 最优控制指令 u_{bst} 处于控制指令 u_L 附近, 且根据模糊查询规则表(表 1)可知, 最优控制指令对应的指标 J_{bst} 应为 0。因此, 可根据 J_{L-1}, J_L, J_{L+1} 的数值正负情况, 推理计算出 u_{bst} 。

如果 J_{L-1} 和 J_L 异号, J_L 和 J_{L+1} 同号, 则 u_{bst} 处于 u_{L-1} 和 u_L 之间。此时通过线性插值的方法可得:

$$u_{bst} = u_{L-1} + \frac{|J_{L-1}|}{|J_L| + |J_{L-1}|} (u_L - u_{L-1}) \quad (13)$$

如果 J_{L-1} 和 J_L 同号, J_L 和 J_{L+1} 异号, 则 u_{bst} 处于 u_L 和 u_{L+1} 之间。此时通过线性插值的方法可得:

$$u_{bst} = u_L + \frac{|J_L|}{|J_L| + |J_{L+1}|} (u_{L+1} - u_L) \quad (14)$$

如果 J_{L-1}, J_L 与 J_{L+1} 均同号, 则

$$u_{bst} = u_L \quad (15)$$

综上, 智能预测控制算法(IPC)计算流程如下:

(1) 确定指令寻优范围与分量。计算未来控制指令 $u(k)$ 的寻优选择范围, 再计算该范围内各指令分量 u_i 。

(2) 计算偏差与偏差变化率。计算对应各指令分量 u_i 在第 N 个采样时刻的控制偏差 $\widehat{K}_{PE}(k+N)$ 和偏差变化率 $\widehat{K}_{CPE}(k+N)$, 并结合专家系统自适应优化的调节因子优化计算结果。

(3) 计算性能指标。依据图 1 和表 1, 计算对应各锅炉负荷指令分量 u_i 的预测控制性能指标 J_i 。

(4) 选择最优指令与指标, 即选出 J_L 和对应的控制指令。

(5) 获取最优化负荷指令。计算获得最优化的锅炉负荷指令 u_{bst} , 令 $u(k) = u_{bst}$ 。

(6) 循环计算。令 $k = k+1$, 在下个采样时刻, 返回第 1 步重复计算过程。

2 控制信号的处理、跟踪与无扰切换

在实际控制过程中, 输入信号中的噪声可能会

干扰模糊预测控制器对系统真实状态的感知,使得控制输出产生较大偏差,进而影响系统的稳定性甚至引起振荡。因此,在智能预测控制算法输入信号处添加低通滤波器^[23],低通滤波器的数学表达 $f(s)$ 如下。

$$f(s) = \frac{1}{(T_f s + 1)^p} \quad (16)$$

式中: T_f 为滤波器时间常数; p 为滤波阶次; s 为复变量。

在热工控制进程中,实际投入运行的控制器必须充分考量各类非线性条件下的手动干预以及控制模式切换问题,尤其对于包含预测控制的控制器而言,切换之后,预测模型需能够精准预测热工过程的输出^[24]。

为达成这一目标,在控制器中的跟踪模式下,预测控制器的预测模型需依据其他控制器(如 PID 控制器)的输出开展实时预测工作,确保预测模型可实时且准确地预知被控量未来的变化趋向。图 3 为控制量无扰切换的系统图。其中, $y_1(t)$ 为输入值, $y_2(t)$ 为反馈值, d_T 为系统中的纯迟延, Z^{-1} 为离散系统中的迟延算子。当由其他控制器切换至预测控制器时,保证控制信号 $u(t)$ 不会发生突变。

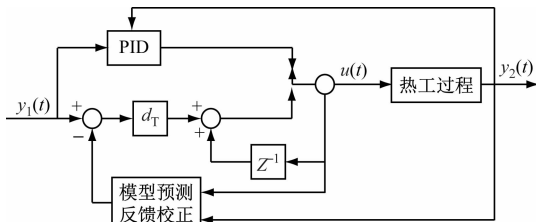


图 3 控制量信号无扰跟踪系统框图

Fig. 3 Block diagram of disturbance free tracking system for control signal

3 仿真验证

本文的研究是在某电厂 300 MW 机组过热汽温对象在 80% 额定负荷下的仿真模型^[25]的基础上进行的,该模型能够较好地反映机组过热汽温的动态特性,模型精度可以满足控制系统设计和验证的基本要求。

该过热汽温系统导前区传递函数 $W_1(s)$ 为

$$W_1(s) = \frac{-1.1081}{(14.1091s + 1)^2} \quad (17)$$

惰性区传递函数 $W_2(s)$ 为

$$W_2(s) = \frac{1.0247}{(45.6781s + 1)^2} \quad (18)$$

过热汽温系统采用 PID 串级控制,如图 4 所示,内回路采用比例积分(PI)控制,参数通过 ZN

(Ziegler-Nichols)整定,可得比例系数 $K_p = 1.6666$,积分时间 $T_i = 20$ s;外回路中的主控制器采用 PID 控制器。其中,传统 PID 控制器参数通过 ZN 整定,可得 $K_p = 0.1, T_i = 378$ s。

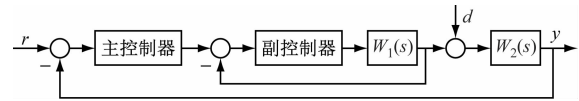


图 4 串级汽温 PID 控制系统框图

Fig. 4 Block diagram of series steam temperature PID control system

同时,本文采用基于阶跃响应的最小二乘法,根据对象的阶跃响应曲线、最小偏差获得模型预测所需的广义被控对象模型,即对象模型 $G_m = \frac{1.2047}{110s+1} \times e^{-90s}$ 。如图 5、图 6 所示,选择传统模糊预测控制器与模糊智能预测控制器分别对控制器进行仿真。



图 5 模糊预测控制系统框图

Fig. 5 Block diagram of fuzzy prediction control system

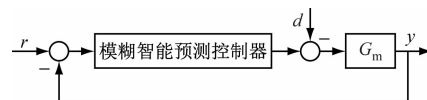


图 6 模糊智能预测控制系统框图

Fig. 6 Block diagram of fuzzy intelligent prediction control system

为验证模糊智能预测控制器对于机组过热汽温优化控制的有效性,本文利用 Matlab 进行仿真,针对传统串级 PID 控制、传统模糊预测控制器和改进后的智能预测控制器仿真结果进行性能对比。

3.1 跟踪性

假设系统无扰动,以阶跃信号作为系统输入,模拟过热汽温设定值的变化,分别对传统串级 PID 控制、传统模糊预测控制器和改进后的模糊智能预测控制器 3 种控制手段下的过热蒸汽温度控制系统的阶跃响应进行对比,结果如图 7 所示。

3 种控制下系统性能指标评价如表 2 所示。由

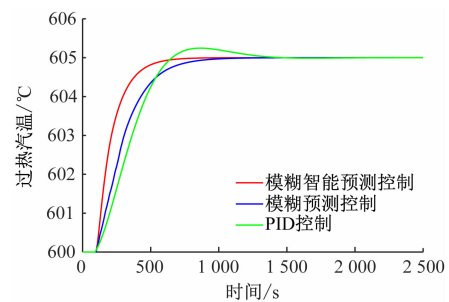


图 7 3 种控制方式下的跟踪性能对比

Fig. 7 Comparison of tracking performance under three control modes

表 2 可得,面对大延迟、大惯性的被控对象时,相比常规串级 PID 温度控制系统,模糊预测控制系统的超调量优势明显,系统能够直接达到稳定阶段,超调量为 0,调节时间较短;而相比其他 2 种控制,基于模糊智能预测控制的过热汽温控制系统的跟踪效果更优,不但具有模糊预测控制的优势,超调量为 0,而且响应速度大幅提高。

表 2 性能指标评价对比

Tab. 2 Performance index evaluation comparison

项目	超调量/%	调节时间/s	绝对误差积分
PID 串级控制	5.1	892.15	355.4
模糊预测控制	0	584.02	257.1
智能预测控制	0	461.72	212.6

3.2 抗扰性

在系统运行 2 500 s 时加入阶跃干扰(蒸汽流量扰动)再进行仿真实验,扰动量为 -2.5 °C,从而得到 3 种过热温度控制在加入扰动后的响应曲线,如图 8 所示。由图 8 可知,在蒸汽流量扰动下,串级 PID 控制系统出现的超调量最大,模糊预测控制系统和模糊智能预测控制系统均无超调,其中模糊智能预测控制系统的响应速度最快,可见这种控制系统对于扰动因素能够快速地进行响应并消除干扰,具有良好的抗扰性,控制品质要明显优于模糊预测和常规串级 PID 控制系统。

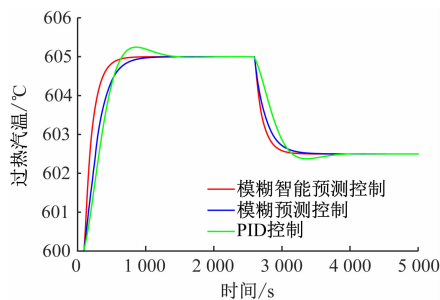


图 8 3 种控制方式下的抗扰性能对比

Fig. 8 Comparison of anti-interference performance under three control modes

3.3 抗噪性

上述均为理想信号下不同方法的控制性能对比,实际过程中控制输出信号均带有噪音扰动,假设控制器输入汽温设定值提升 10 K,分别对噪音扰动下的过热器出口温度控制结果进行仿真对比。在总计算时域内,对控制输出量叠加高斯噪音,噪音频率为 0.01 Hz,期望值为 0 Hz,标准差为 0.5 Hz,其余控制参数均与上文相同。

图 9 为叠加高斯噪音时不同控制方法下过热蒸汽温度的控制结果。在系统有噪音扰动时,模糊智

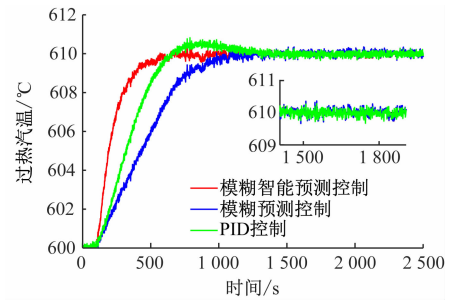


图 9 3 种控制方式下的抗噪性能对比

Fig. 9 Comparison of anti-noise performance under three control modes

能预测控制系统响应更加迅速,系统振荡的幅度更小,控制更加稳定,抗噪能力更强,更符合工程控制需求。

3.4 鲁棒性

为分析系统的鲁棒性,将被控对象的导前区和惰性区的传递函数依次换成参数数值增加 10%、50%、80% 的过热汽温控制对象传递函数,得到在阶跃输入的情形下,各控制系统响应曲线,分别如图 10~图 12 所示。

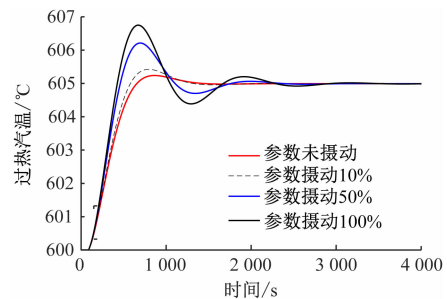


图 10 变工况下 PID 串级控制效果

Fig. 10 Effect of PID cascade control under off-designed conditions

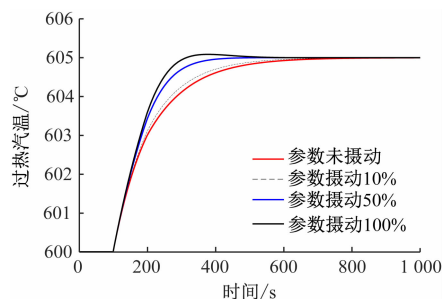


图 11 变工况下模糊预测控制效果

Fig. 11 Effect of fuzzy predictive control under off-designed conditions

由图 8~图 10 可知,随着工况变化,基于串级 PID 控制的过热蒸汽温度控制系统,其特性曲线的超调量逐渐增大,系统到达稳定状态的时间随之增加,甚至出现多次减幅振荡情况。可以得出,串级 PID 控制系统在一定运行范围内具有一定的鲁棒

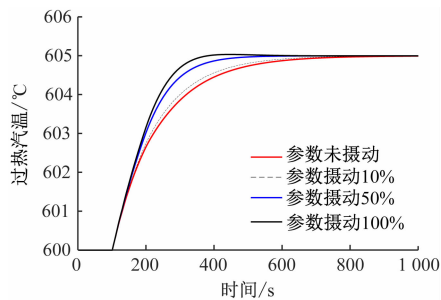


图 12 变工况下改进后的模糊智能预测控制效果

Fig. 12 Effect of improved fuzzy intelligent predictive control under off-designed conditions

性,然而随着工况发生显著变化,系统未必能够维持良好的稳定性能。而模糊预测控制和改进后的模糊智能预测控制系统仍然能迅速达到稳定状态,超调量受到的影响也较小。

4 工程实际应用及效益分析

本文所设计的智能预测控制算法已成功内嵌至华能睿渥分散控制系统,并已成功应用于华能某 650 MW 超超临界机组汽温控制中。图 13 为实际运行过程中,在不同负荷下机组汽温系统的运行情况。

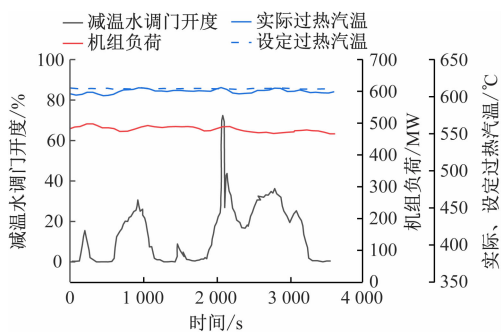


图 13 稳态时投入智能预测控制后的汽温效果

Fig. 13 Effect of implementing intelligent predictive control on steam temperature in steady state

如图 13 所示,此时机组负荷稳定在 485 MW 附近,机组处于协调控制模式,负荷指令在一定范围内保持不变。智能汽温系统优化控制投入使用后,在稳态过程中能够实现蒸汽温度超前调节,在减温阀有调节裕度的情况下,蒸汽温度与设定值的偏差小于 ± 3 K,平均汽温提高了约 2 K。

如图 14 所示,此时机组负荷从 450 MW 降低到 400 MW 附近,机组处于协调控制模式;智能汽温系统优化控制投入使用后,在降负荷过程中能够实现蒸汽温度超前调节,在减温阀有调节裕度的情况下,蒸汽温度与设定值的偏差小于 ± 8 K,平均汽温提高了约 4 K。

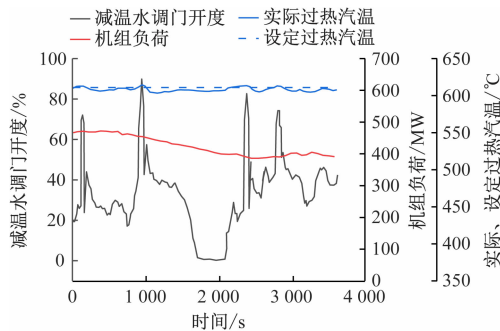


图 14 变负荷时投入智能预测控制后的汽温效果

Fig. 14 Effect of implementing intelligent predictive control on steam temperature under off-designed condition

综上所述,模糊智能预测控制算法投入机组汽温系统使用后,在稳态过程中减温水调节过程提前动作,蒸汽温度控制平稳,波动幅度小于 ± 3 K。动态过程中,减温水调节过程超前,大幅减小了过热汽温波动幅度,动态偏差小于 ± 8 K。

5 结论

本文针对直流炉汽温系统大迟延、大惯性、多变量、非线性、强耦合、多扰动等特点,从实际工程应用出发,提出一种基于智能预测控制的机组过热汽温系统优化控制方案。

(1) 算法以模糊预测控制为基础,融合专家自适应参数调节控制理念,优化后的算法显著提升了过热汽温的控制性能。

(2) 通过将新型控制算法与传统 PID 控制进行仿真对比,验证了算法的合理性,为实际工程应用提供了有力的支持。

(3) 工程应用的实际情况表明,模糊智能预测控制加强了机组过热汽温系统的控制性能,更好地保证了机组的安全、稳定、经济、灵活运行。

参考文献:

- [1] 侯晓宁. 1 000 MW 超超临界机组主汽温建模及其精度研究[D]. 保定: 华北电力大学, 2015.
- [2] 张志豪, 李军, 王林, 等. 基于内模控制和改进自抗扰控制的主汽温串级控制系统[J]. 中国电机工程学报, 2024, 44(23): 9331-9341.
ZHANG Zhihao, LI Jun, WANG Lin, et al. Cascade control system of main steam temperature based on internal model control and improved active disturbance rejection control[J]. Proceedings of the CSEE, 2024, 44(23): 9331-9341.
- [3] 吴铮, 张悦, 董泽. 基于多图卷积神经网络的主汽温系统故障诊断[J]. 动力工程学报, 2023, 43(2): 237-245.

- WU Zheng, ZHANG Yue, DONG Ze. Fault diagnosis of main steam temperature system based on multi-graph convolutional neural network[J]. **Journal of Chinese Society of Power Engineering**, 2023, 43(2): 237-245.
- [4] 常耀华, 韦根原, 赵深, 等. 基于神经网络的过热汽温改进自抗扰控制策略[J]. **动力工程学报**, 2025, 45(6): 887-894, 912.
- CHANG Yaohua, WEI Genyuan, ZHAO Shen, et al. Neural network-based improved active disturbance rejection control strategy for superheated steam temperature[J]. **Journal of Chinese Society of Power Engineering**, 2025, 45(6): 887-894, 912.
- [5] 申世龙, 邓拓宇, 袁振森. 考虑稳定性的双事件触发过热汽温串级控制[J]. **电力科学与工程**, 2024, 40(10): 67-78.
- SHEN Shilong, DENG Tuoyu, YUAN Zhensen. Cascade control of superheated steam temperature with dual-event trigger considering stability[J]. **Power Science and Engineering**, 2024, 40(10): 67-78.
- [6] 闫丹, 苏淑靖, 吴梦香, 等. 基于改进灰色预测的变论域模糊 PID 温控方法[J]. **仪表技术与传感器**, 2023(10): 93-99.
- YAN Dan, SU Shujing, WU Mengxiang, et al. Variable theory domain fuzzy PID temperature control method based on improved grey prediction[J]. **Instrument Technique and Sensor**, 2023(10): 93-99.
- [7] 安硕, 冯旭刚, 王正兵, 等. 基于 PI-DMC 的发电机组主蒸汽温度串级前馈预测控制策略[J]. **安徽工业大学学报(自然科学版)**, 2023, 40(3): 302-312.
- AN Shuo, FENG Xugang, WANG Zhengbing, et al. Cascade feedforward predictive control strategy for main steam temperature of generator units based on PI-DMC[J]. **Journal of Anhui University of Technology (Natural Science)**, 2023, 40(3): 302-312.
- [8] 陈祎璠, 曹越, 司凤琪. 燃煤机组过热汽温宽负荷模型前馈控制[J]. **动力工程学报**, 2024, 44(1): 76-83.
- CHEN Yifan, CAO Yue, SI Fengqi. Feedforward control of superheated steam temperature with wide load model for coal-fired units[J]. **Journal of Chinese Society of Power Engineering**, 2024, 44(1): 76-83.
- [9] 马平, 赵倩. 锅炉过热蒸汽温度动态预测 PID 控制算法[J]. **热力发电**, 2016, 45(8): 104-108.
- MA Ping, ZHAO Qian. Application of dynamic predictive PID control algorithm in boiler superheated steam temperature prediction[J]. **Thermal Power Generation**, 2016, 45(8): 104-108.
- [10] TONG Zheming, CHEN Xin, TONG Shuiguang, et al. Dense residual LSTM-attention network for boiler steam temperature prediction with uncertainty analysis[J]. **ACS Omega**, 2022, 7(13): 11422-11429.
- [11] 张国斌, 郭瑞君, 杜荣华, 等. 基于 LSTM 预估补偿的火电机组主蒸汽温度控制系统[J]. **发电设备**, 2023, 37(1): 51-58.
- ZHANG Guobin, GUO Ruijun, DU Ronghua, et al. Main steam temperature control system based on prediction and compensation with LSTM in a thermal power unit[J]. **Power Equipment**, 2023, 37(1): 51-58.
- [12] 曹越, 郑亮, 陈祎璠, 等. 基于 PFNN 的火电机组过热汽温辨识方法及控制策略[J]. **东南大学学报(自然科学版)**, 2022, 53(3): 417-424.
- CAO Yue, ZHENG Liang, CHEN Yifan, et al. Identification method and control strategy for superheated steam temperature of thermal power unit based on PFNN[J]. **Journal of Southeast University (Natural Science Edition)**, 2022, 53(3): 417-424.
- [13] ZENG Jing, XIE Youcheng, CHEN Lei. Design of main steam temperature cascade control system based on fuzzy self-tuning PID controller[C]//**2008 International Conference on Intelligent Computation Technology and Automation**. Changsha: IEEE, 2008: 878-881.
- [14] 王炳淇, 韩小渠, 张程, 等. 褐煤锅炉蒸汽温度模糊控制仿真研究[J]. **工程热物理学报**, 2017, 38(1): 27-32.
- WANG Bingqi, HAN Xiaoqu, ZHANG Cheng, et al. Simulation on fuzzy control of steam temperature for a lignite-fired boiler[J]. **Journal of Engineering Thermophysics**, 2017, 38(1): 27-32.
- [15] SAVRAN A. A multivariable predictive fuzzy PID control system[J]. **Applied Soft Computing**, 2013, 13(5): 2658-2667.
- [16] 钱虹, 冯裕卿. 针对过热汽温控制的自适应预测控制器设计[J]. **系统仿真学报**, 2019, 31(5): 1002-1009.
- QIAN Hong, FENG Yuqing. Design of adaptive predictive controller for superheated steam temperature control[J]. **Journal of System Simulation**, 2019, 31(5): 1002-1009.
- [17] 姚伟, 孙海顺, 文劲宇, 等. 基于 Laguerre 模型的过热汽温自适应预测 PI 控制系统[J]. **中国电机工程学报**, 2012, 32(5): 119-125.
- YAO Wei, SUN Haishun, WEN Jinyu, et al. An adaptive predictive PI control system of super-heated steam temperature based on Laguerre model[J]. **Pro-**

- ceedings of the CSEE, 2012, 32(5): 119-125.
- [18] 胡宇航, 徐振华, 王林, 等. 基于多模型加权调度的锅炉过热汽温广义预测串级控制[J]. 广东电力, 2023, 36(10): 121-129.
HU Yuhang, XU Zhenhua, WANG Lin, et al. Generalized predictive cascaded control of boiler superheated steam temperature based on multi-model weighted scheduling[J]. **Guangdong Electric Power**, 2023, 36(10): 121-129.
- [19] 孙优贤, 王慧, 宋春跃. 自动控制原理[M]. 北京: 化学工业出版社, 2023: 394.
- [20] 曾德良, 高耀岩, 胡勇, 等. 基于阶梯式广义预测控制的汽包炉机组协调系统优化控制[J]. 中国电机工程学报, 2019, 39(16): 4819-4826.
ZENG Deliang, GAO Yaokui, HU Yong, et al. Optimized control of the drum boiler power plant's coordination system based on stair-like generalized predictive control[J]. **Proceedings of the CSEE**, 2019, 39(16): 4819-4826.
- [21] 宋伟鑫, 许必熙, 顾廉, 等. 基于GA的主汽温系统内模控制研究[J]. 计算机测量与控制, 2015, 23(5): 1519-1521.
SONG Weixin, XU Bixi, GU Lian, et al. Internal model control for main steam temperature system based on GA[J]. **Computer Measurement & Control**, 2015, 23(5): 1519-1521.
- [22] 苏焯, 凌路加, 段亚灿, 等. 基于神经网络预测控制的主汽温优化控制[J]. 计算机仿真, 2021, 38(9): 114-118.
SU Ye, LING Lujia, DUAN Yacan, et al. Optimization control of main steam temperature based on neural network predictive control[J]. **Computer Simulation**, 2021, 38(9): 114-118.
- [23] 于静, 金秀章. 基于RBF神经网络的PFC-PID主汽温串级预测控制[J]. 华北电力大学学报, 2020, 47(6): 91-98.
YU Jing, JIN Xiuzhang. PFC-PID main steam temperature cascade predictive control based on RBF neural network[J]. **Journal of North China Electric Power University**, 2020, 47(6): 91-98.
- [24] 马良玉, 燕梦. PID补偿神经网络逆控制在超临界机组过热汽温控制中的应用[J]. 热能动力工程, 2020, 35(1): 178-184.
MA Liangyu, YAN Meng. Application of neural network inverse control with PID compensation in superheated steam temperature control of supercritical boiler unit[J]. **Journal of Engineering for Thermal Energy and Power**, 2020, 35(1): 178-184.
- [25] 余俊, 林沛文, 龚卓敏, 等. 智能预测控制算法在600 MW超临界机组协调控制中的应用[J]. 工业控制计算机, 2019, 32(1): 47-49.
YU Jun, LIN Peiwen, GONG Zhuomin, et al. Application of intelligent predictive control algorithm to the coordinated control system of 600 MW supercritical power units [J]. **Industrial Control Computer**, 2019, 32(1): 47-49.