

多模型切换 DMC-PID 串级预测控制在 SCR 脱硝系统中应用的仿真分析

方 垒

(杭州和利时自动化有限公司, 浙江 杭州 310018)

摘 要:针对火电厂 SCR 脱硝系统的强非线性、大惯性和大延迟的问题,提出一种新型多模型切换 DMC-PID 串级预测控制方案。利用改进最小二乘法辨识得到不同运行工况下的局部线性系统模型;根据约束条件,基于二次规划有效集法,求解不同运行工况下的控制器参数;通过负荷指令确定当前的工作条件,设计不同工况下各 DMC 控制器间的跟踪和无扰切换,基于负荷指令切换开关,提出 SCR 脱硝系统变工况条件下的多模型切换 DMC-PID 串级预测控制,实现 SCR 脱硝非线性系统的全局优化控制。仿真结果表明:与传统的串级 PID 相比,变工况试验中 DMC-PID 串级预测控制出口 NO_x 排放浓度超调量减小 55.14%、响应速度提高 44.23%;外部干扰试验中 DMC-PID 串级预测控制的氨气阀门开度波动幅度减小 85.71%、出口 NO_x 浓度的恢复时间减少 26.67%。

关 键 词:DMC-PID;SCR 系统;多模型切换;无扰切换;串级预测控制

中图分类号:X773 文献标识码:A DOI:10.16146/j.cnki.rndlgc.2023.04.010

[引用本文格式]方 垒.多模型切换 DMC-PID 串级预测控制在 SCR 脱硝系统中应用的仿真分析[J].热能动力工程,2023,38(4):75-81. FANG Lei. Simulation analysis of multi-model switching DMC-PID cascade predictive control in SCR denitration system[J]. Journal of Engineering for Thermal Energy and Power, 2023, 38(4): 75-81.

Simulation Analysis of Multi-model Switching DMC-PID Cascade Predictive Control in SCR Denitration System

FANG Lei

(Hangzhou Hollysys Automation Co., Ltd., Hangzhou, China, Post Code: 310018)

Abstract: Aiming at the problems of strong nonlinearity, large inertia and large delay of SCR system in thermal power plant, a new multi-model switching DMC-PID cascade predictive control scheme is proposed. The improved least square method is used to identify the local linear system model under different operating conditions. According to the constraint conditions, the controller parameters under different operating conditions are solved based on the quadratic programming effective set method. The current working conditions are determined by the load command, the tracking and bumpless switching between DMC controllers under different working conditions are designed, and switching is performed based on the load command, a multi-model switching DMC-PID cascade predictive control under variable working conditions of SCR denitrification system is proposed to realize the global optimization control of SCR denitrification nonlinear system. The simulation results show that compared with the traditional cascade PID, the overshoot of outlet NO_x emission concentration under the DMC-PID cascade predictive control is reduced by 55.14% and the response speed is increased by 44.23%; in the external disturbance test, the fluctuation range of ammonia valve opening under the DMC-PID cascade predictive control is reduced by 85.71%, and the recovery time of outlet NO_x concentration is reduced by 26.67%.

Key words: DMC-PID, SCR system, multi-model switching, bumpless switching, cascade predictive control

引 言

选择性催化还原(Selective Catalytic Reduction, SCR)脱硝技术是燃煤电厂脱除烟气中氮氧化物(NO_x)的重要方法。其工作原理为,在烟气中注入适量氨气,在催化剂的作用下生成 N_2 和 H_2O 。与其他脱硝技术相比,SCR 脱硝技术具有脱硝效率高、工作温度范围大及工程造价低等显著优势。在环境污染严重的背景下,SCR 脱硝技术已成为火电厂煤粉炉首选的脱硝措施。SCR 脱硝系统具有大惯性、大滞后、多扰动和非线性等特点。目前,广泛采用的脱硝控制策略只是在某一负荷点上设计。当机组负荷发生变化时,机组和 SCR 动态特性会发生变化。多数 SCR 脱硝控制系统采用比例积分微分(Proportion Integral Derivative, PID)控制器。随着负载指令的变化, PID 控制器在某一负荷点难以满足性能要求,造成过量喷氨增加氨逸出,使下游设备加速腐蚀;或者喷氨量过少,难以达到超低排放目标。在实际运行中,为了保证达到超低排放标准,电厂运行人员通常会将出口 NO_x 排放浓度设定值调低,但这会导致更多的氨消耗和氨逸出,腐蚀设备^[1-2],增加运行成本。

针对 SCR 脱硝系统的控制器设计问题,文献[3-8]对各种控制策略进行了深入分析。文献[9]基于一种串级约束动态矩阵预测控制(Dynamic Matrix Predictive Control, DMC)提出了 DMC-PID,实现了喷氨量的良好控制。文献[10]为了提高选择性非催化还原烟气脱硝系统的控制性能和调节品质,提出了一种能更好控制复杂系统的广义预测控制方法。文献[11]利用子空间辨识技术为火电厂选择性催化还原 SCR 系统开发了基于数据驱动的扰动抑制预测控制器。文献[12]提出了一种使用在线最小二乘支持向量机的自适应抗干扰模型预测控制(Model Predictive Control, MPC),并使用卡尔曼滤波器来评估过程模型中不可测的干扰,克服不同干扰的能力更强。文献[13]将反向传播(Back Propagation, BP)神经网络与预测控制相结合,利用 BP 网络建立出口 NO_x 的预测模型,然后通过 MPC 进行滚

动优化控制,仿真表明, BP-MPC 具有更好的控制品质。

但是,上述工作都没有考虑 SCR 脱硝系统在变工况下的动态特性,并相应改变控制器设计。因此,本文提出了一种多模型切换 DMC-PID 串级预测控制方法,以解决 SCR 脱硝系统在变工况下的污染物控制问题。基于改进的最小二乘法,辨识得到不同工况下的线性局部模型,结合控制量和被控量约束条件,利用二次规划有效集法设计了相应的 DMC 控制器参数。结合各 DMC 间的跟踪和无扰切换控制方法,将得到的控制器组设计为多模型切换 DMC-PID 串级预测控制器,实现对 SCR 脱硝系统的有效控制。

1 动态矩阵控制

1.1 动态矩阵控制器

DMC 具有控制效果好、鲁棒性强等优点,能有效克服过程中的不确定性和非线性^[14-15],并且便于处理过程中控制变量和被控变量的各种约束。DMC 算法包括预测模型、滚动优化和反馈校正 3 部分。

在 DMC 算法中,需要得到被控对象的单位阶跃响应。在适当的采样周期内,当阶跃响应基本达到稳定值时截断模型,便得到限定时间内的响应序列:

$$\mathbf{a} = [a_1, a_2, a_3, \dots, a_N]^T \quad (1)$$

式中: N —建模时域。

当 k 时刻控制量有 1 个增量 $\Delta u(k)$ 时,则 $k+i$ 时刻的预测值为:

$$\begin{aligned} \tilde{y}_1(k+i|k) &= \tilde{y}_0(k+i|k) + a_i \Delta u(k), \\ i &= 1, \dots, N \end{aligned} \quad (2)$$

式中: $\tilde{y}_0(k+i|k)$ —预测初始值。

未来各时刻的输出值为:

$$\begin{aligned} \tilde{y}_M(k+i|k) &= \tilde{y}_0(k+i|k) + \\ &\sum_{j=1}^{\min(M,i)} a_{i-j+1} \Delta u(k+j-1), \\ i &= 1, \dots, N \end{aligned} \quad (3)$$

式中: M —控制时域。

将式(3)改写为向量形式:

$$\tilde{\mathbf{y}}_{PM}(k) = \tilde{\mathbf{y}}_{P0}(k) + \Delta \mathbf{A} \mathbf{u}_M(k) \quad (4)$$

其中,

$$\begin{aligned}\tilde{\mathbf{y}}_{PM}(k) &= \begin{bmatrix} \tilde{y}_M(k+1|k) \\ \vdots \\ \tilde{y}_M(k+P|k) \end{bmatrix} \\ \tilde{\mathbf{y}}_{P0}(k) &= \begin{bmatrix} \tilde{y}_0(k+1|k) \\ \vdots \\ \tilde{y}_0(k+P|k) \end{bmatrix} \\ A &= \begin{bmatrix} a_1 & \cdots & 0 \\ \vdots & & \vdots \\ a_M & \cdots & a_1 \\ \vdots & & \vdots \\ a_N & \cdots & a_{N-M+1} \end{bmatrix}_{N \times M}\end{aligned}$$

控制率变化量构成的向量表示为:

$$\Delta \mathbf{u}(k) = [\Delta u(k), \cdots, \Delta u(k+M-1)]^T \quad (5)$$

在每个时刻 k , 为了使输出预测值尽可能接近给定的期望值, 同时考虑控制增量变化的速度, 在时刻 k 增加软约束处理。使用二次型性能指标函数:

$$\begin{aligned}\min J(k) &= \|\mathbf{w}_p(k) - \tilde{\mathbf{y}}_{PM}(k)\|_Q^2 + \|\Delta \mathbf{u}_M(k)\|_R^2 \\ \mathbf{w}_p(k) &= [w(k+1), \cdots, w(k+P)]^T \\ Q &= \text{diag}(q_1, \cdots, q_P) \\ R &= \text{diag}(r_1, \cdots, r_M)\end{aligned} \quad (6)$$

式中: Q 和 R —误差权重矩阵和控制权重矩阵。

将式(4)代入式(6)中, 得到性能指标函数的标准二次规划形式, 采用有效集法求解, 使性能指标函数最小, 便可得到最优控制序列。

火电厂实际运行过程中存在各种噪声和干扰, 为使 DMC 控制器的预测值不与实际输出产生发散偏离, 需对预测模型进行反馈校正, 输出误差为:

$$\mathbf{e}(k+1) = \mathbf{y}(k+1) - \tilde{\mathbf{y}}_1(k+1|k) \quad (7)$$

修正后的输出为:

$$\begin{aligned}\tilde{\mathbf{y}}_{\text{cor}}(k+1) &= \tilde{\mathbf{y}}_{N1}(k) + \mathbf{h}\mathbf{e}(k+1) \\ \mathbf{h} &= [h_1, \cdots, h_N]^T \\ \tilde{\mathbf{y}}_{\text{cor}}(k+1) &= \begin{bmatrix} \tilde{y}_{\text{cor}}(k+1|k+1) \\ \vdots \\ \tilde{y}_{\text{cor}}(k+N|k+1) \end{bmatrix}\end{aligned} \quad (8)$$

式中: $\mathbf{h}$ —权重系数组成的校正向量; $\tilde{\mathbf{y}}_{N1}(k)$ — $k+1$ 时刻的初始预测值。

由于 SCR 系统运行的复杂性和实际物理约束, 输入和输出必须满足约束:

$$\begin{cases} \min \Delta u(k) \leq \Delta u(k) \leq \max \Delta u(k) \\ \min u_2 \leq u_2 \leq \max u_2 \\ \min y_1 \leq y_1 \leq \max y_1 \end{cases} \quad (9)$$

式中: $\Delta u(k)$ —氨气阀开度的改变速率, %/s; u_2 —喷氨阀开度, %; y_1 —SCR 出口 NO_x 质量浓度, mg/m^3 。

1.2 控制器参数优化

当 SCR 系统在变工况条件下运行时, 系统的对象模型也发生剧烈变化, 可能会造成系统的不稳定。对于 DMC 控制器, 为了使控制器稳定, 需满足条件:

$$\left(\sum_{i=1}^P a_i q_i\right) a_N > 0 \quad (10)$$

式中: P —预测时域, q_i —误差权重系数。

这是 DMC 稳定性的必要条件^[16]。在求得典型工况点的 SCR 局部模型下, 利用有效集法求解 DMC 二次规划问题时增加约束式(10), 求得不同工况下满足稳定性条件的控制器参数。

2 多模型切换 DMC-PID 串级预测控制

2.1 SCR 多模型辨识及约束条件

电厂实际运行环境复杂, 为解决有色噪声对模型参数估计的影响, 采用辅助变量最小二乘法^[17-19]进行 SCR 对象参数辨识。针对某电厂 $2 \times 600 \text{ MW}$ 超临界机组, 选取高、中、低 3 个负荷工况点进行 SCR 控制系统内环和外环模型辨识。不同负荷下的模型参数如表 1 所示。辨识所得外环模型与实际运行数据对比如图 1 所示。

表 1 不同工况点 SCR 脱硝系统模型

Tab. 1 Model of SCR denitration system under different operating conditions

负荷/MW	内环传递函数	外环传递函数
340	$\frac{1.605\ 3}{2s+1}$	$-\frac{2.575\ 5e^{-15}}{(38s+1)^2}$
450	$\frac{1.368\ 4}{2s+1}$	$-\frac{2.012\ 4e^{-13}}{(34s+1)^2}$
540	$\frac{1.293\ 4}{2s+1}$	$-\frac{1.832\ 2e^{-13}}{(31s+1)^2}$

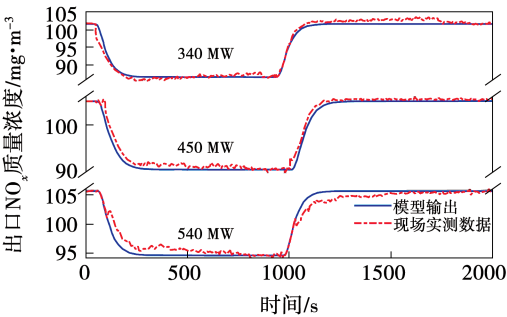


图 1 不同负荷工况下 SCR 出口 NO_x 质量浓度模型验证

Fig. 1 Model verification of NO_x mass concentration at SCR outlet under different load conditions

从图 1 可知,在高、中、低 3 个典型负荷工况下,SCR 脱硝系统的现场实测数据与辨识模型输出的拟合精度均较为理想。虽然因为氨气阀门的非线性特性以及运行过程中内、外扰动等因素的影响,使模型输出和现场实际数据之间存在一定的静态和动态偏差,但都不是很大。所以 3 个负荷工况下的 SCR 脱硝控制系统模型能较好地反映 600 MW 超临界机

组脱硝系统的动态特性和稳态特性。

为了实现 SCR 脱硝系统的全局最优控制,将运行区域划分为 300 ~ 405, 405 ~ 495 和 495 ~ 600 MW 3 个区域,相关约束条件:

$$\begin{cases} \min \Delta u(k) = -0.05 (\text{s}^{-1}) \\ \max \Delta u(k) = 0.05 (\text{s}^{-1}) \\ \min u_2 = 0 (\%) \\ \max u_2 = 100 (\%) \\ \min y_1 = 0 (\text{mg}/\text{m}^3) \\ \max y_1 = 100 (\text{mg}/\text{m}^3) \end{cases} \quad (11)$$

2.2 DMC-PID 串级模型

SCR 脱硝系统由内环和外环组成。内环是从喷氨阀开度到氨气流量的模型,外环是从氨气流量到 SCR 出口 NO_x 质量浓度的模型。针对 SCR 脱硝系统的动态特性,提出了一种多模型切换 DMC-PID 串级预测控制方法。内环采用 PID 控制器,外环采用 DMC 控制器。DMC-PID 串级预测控制系统的结构如图 2 所示。

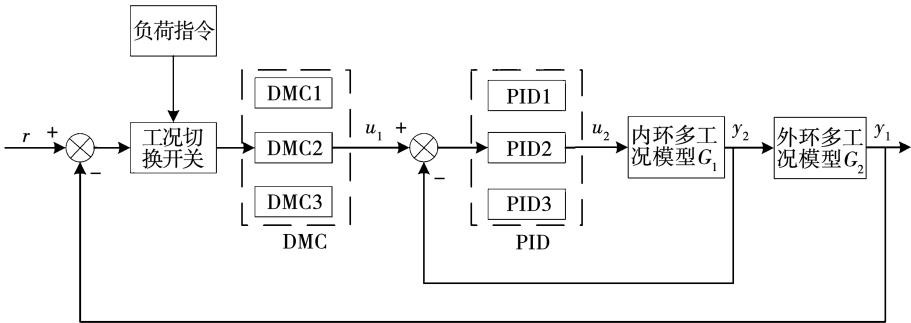


图 2 多模型 DMC-PID 串级预测控制

Fig. 2 Multiple model DMC-PID cascade prediction control

图中: r —NO_x 质量浓度设定值; y_2 —实际氨气流量; u_1 —氨气流量设定值。 G_1 —不同工况下的内环模型, G_2 —不同工况下的外环模型。

2.3 多 DMC 控制器的跟踪和无扰切换

外环设计了 3 个典型负荷工况的 DMC 控制器,在 SCR 控制系统的实际应用中,需考虑人为干预和控制模式切换,由此涉及到 DMC 预测控制器的跟踪和无扰切换问题。实现无扰切换的关键是保证控制器的输出在切换的瞬间不跃变。对于 DMC 预测控制器来说,预测模型应该始终能够准确地预测出口 NO_x 质量浓度值。要实现这一目标,则某一工况下

处于跟踪模式的 DMC 控制器(DMC1),其预测输出必须基于其他运行工况下 DMC 控制器(如 DMC2)的输出进行实时计算,以确保跟踪模式下的 DMC 控制器能够准确预测被控变量的变化。在这种情况下,当控制逻辑从 DMC1 切换到 DMC2 时,预测控制器计算出的控制律可以沿着正确的方向前进。切换结构如图 3 所示。

DMC-PID 串级控制系统根据当前负荷指令确定运行区域,无扰切换至相应的控制模块和控制对象,从而实现 SCR 脱硝非线性系统的全局优化控制。

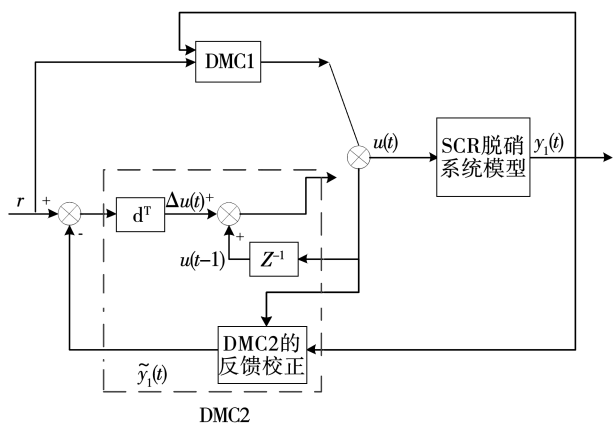


图 3 多 DMC 无扰切换结构

Fig. 3 Multi-DMC bumpless switching structure

3 仿真验证

3.1 变工况试验

为验证多模型切换 DMC-PID 串级预测控制器的有效性,首先进行变工况试验。

450 MW 工况控制器参数设置:外环采用 DMC 控制器,采样周期 $T=1\text{ s}$,预测时域 $P=1\ 000$,控制时域 $M=4$,建模时域 $N=1\ 000$,误差加权矩阵 $Q=4$,控制加权矩阵 $R=0.9$;内环采用 P 控制器,比例 $P=1.224$;串级 PID 内环比例 $P_2=0.315$,积分 $I_2=0.71$,外环比例 $P_1=-0.113$,积分 $I_1=-0.020\ 3$,微分 $D_1=-10.276$ 。

初始负荷为 300 MW。当系统稳定运行后,在第 800 s 负荷指令以 12 MW/min 的速度上升到 450 MW。仿真结果如图 4 和图 5 所示。

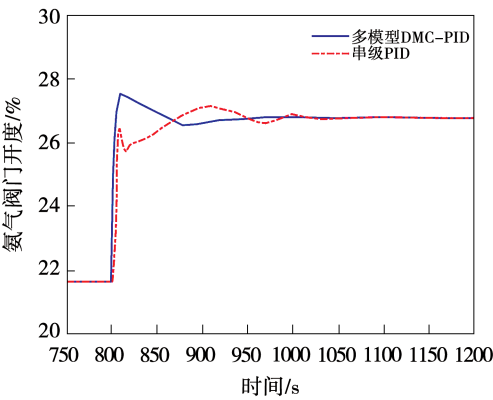


图 4 变负荷工况下的氨气阀门开度响应曲线
Fig. 4 Ammonia valve opening response curve under variable load conditions

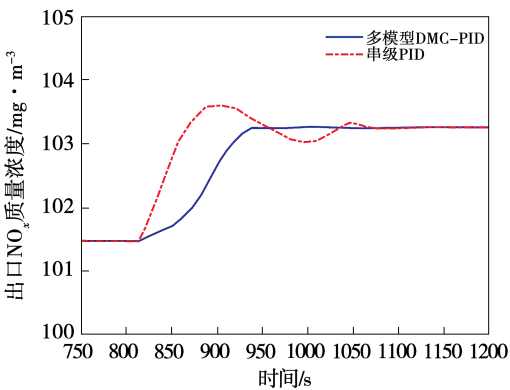


图 5 变负荷工况下的 SCR 出口 NO_x 质量浓度响应曲线
Fig. 5 Response curve of NO_x mass concentration at SCR outlet under variable load conditions

在串级 PID 控制策略的作用下,氨气阀会出现较为剧烈的波动。多模型切换的 DMC-PID 串级预测控制系统几乎没有出现氨气阀门开度的波动,从而避免了阀门的频繁动作。多模型切换的 DMC-PID 串级预测控制可以减小系统的超调,缩短调节时间。其中,出口 NO_x 质量浓度的超调量减小 55.14%,响应速度提高 44.23%。

3.2 外扰试验

当系统处于稳态运行时,通过添加外部干扰来验证其抗干扰能力。在 450 MW 的工况下,当机组稳定运行时,煤质、烟气流量、烟气温度和氨气质量浓度等的变化均会引起 SCR 入口 NO_x 质量浓度的突然变化。因此,在第 400 s,给系统添加阶跃值为 10 mg/m³ 的 SCR 入口 NO_x 质量浓度的扰动。仿真结果如图 6 和图 7 所示。

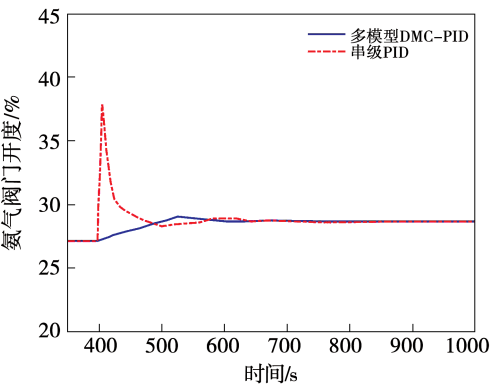


图 6 SCR 入口 NO_x 质量浓度扰动下氨气阀开度响应曲线
Fig. 6 Ammonia valve opening response curve under the disturbance of NO_x mass concentration at SCR inlet

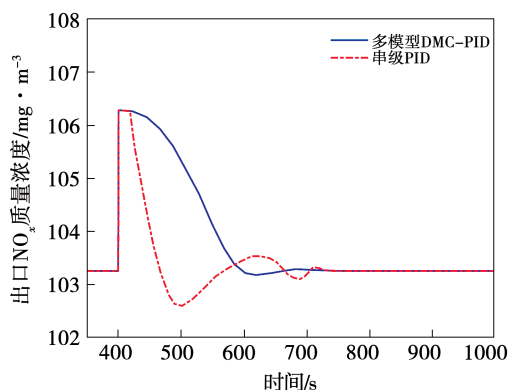


图7 SCR入口 NO_x 质量浓度扰动下出口 NO_x 质量浓度响应曲线

Fig.7 Response curve of outlet NO_x mass concentration under the disturbance of NO_x mass concentration at SCR inlet

可以看出,在外环加入 SCR 入口 NO_x 质量浓度的干扰后,与传统的串级 PID 相比,所提出的控制策略可以防止氨气阀的开度急剧变化,波动幅度降低了 85.71%。同时,出口 NO_x 质量浓度的恢复时间减少 26.67%。

综上,多模型切换 DMC-PID 串级预测控制策略在变工况运行条件下是有效的,具有很强的抗干扰性,很好地解决了 SCR 脱硝系统的控制问题。

4 结 论

针对 SCR 脱硝系统的大延迟、大惯性和非线性特点,结合多模型无扰切换控制方法,提出了 SCR 脱硝的多模型切换 DMC-PID 串级预测控制策略,较好地解决了变工况运行条件下 SCR 系统调节过程中出口 NO_x 质量浓度超标的问题。与传统的串级 PID 在变工况和抗干扰两个方面相比,多模型切换 DMC-PID 串级预测控制策略减少了超调,缩短了调节时间,缓解了阀门的振荡,可以满足超低排放标准并保证系统的稳定运行。

参考文献:

[1] HU Y, JIA X, LEI X, et al. Multiple model switching DMC-PID cascade predictive control for SCR denitration systems [C]// Xi'an: 2018 Chinese Automation Congress (CAC), 2018.

[2] 闫来清. SCR 烟气脱硝系统数据驱动建模与优化控制研究

[D]. 北京: 华北电力大学, 2020.

YAN Lai-qing. Research on data-driven modeling and optimal control of SCR flue gas denitrification system [D]. Beijing: North China Electric Power University, 2020.

- [3] 黄宇, 高珊, 李其贤, 等. SCR 脱硝系统的分数阶 $\text{PI} \sim \lambda \text{D} \sim \mu$ 参数优化控制 [J]. 动力工程学报, 2022, 42(2): 122–128.
- HUANG Yu, GAO Shan, LI Qi-xian, et al. Optimal control of fractional $\text{PI} \sim \lambda \text{D} \sim \mu$ parameters of SCR denitrification system [J]. Journal of Chinese Society of Power Engineering, 2022, 42(2): 122–128.
- [4] 杜鸣, 牛玉广, 潘翔峰, 等. 基于改进型模糊线性自抗扰控制器的 SCR 脱硝系统优化控制 [J]. 动力工程学报, 2021, 41(9): 743–748, 757.
- DU Ming, NIU Yu-guang, PAN Xiang-feng, et al. Optimal control of SCR denitration system based on improved fuzzy linear auto disturbance rejection controller [J]. Journal of Chinese Society of Power Engineering, 2021, 41(9): 743–748, 757.
- [5] 杨婷婷, 白杨, 吕游, 等. SCR 脱硝系统多目标优化控制研究 [J]. 中国电机工程学报, 2021, 41(14): 4905–4911.
- YANG Ting-ting, BAI Yang, LYU You, et al. Research on multi-objective optimal control of SCR denitration system [J]. Proceedings of the CSEE, 2021, 41(14): 4905–4911.
- [6] 钱虹, 柴婷婷, 张超凡. 基于可变遗忘因子的 SCR 烟气脱硝建模与自适应预测控制研究 [J]. 热能动力工程, 2020, 35(8): 70–76.
- QIAN Hong, CHAI Ting-ting, ZHANG Chao-fan. Research on SCR denitrification system modeling and adaptive predictive control based on variable forgetting factor [J]. Journal of Engineering for Thermal Energy and Power, 2020, 35(8): 70–76.
- [7] 俞基安, 杜伟, 胡勇, 等. 基于阶梯式广义预测控制的脱硝优化控制应用 [J]. 锅炉技术, 2020, 51(4): 7–14.
- YU Ji-an, DU Wei, HU Yong, et al. Application of optimized denitration control based on stair-like generalized predictive control [J]. Boiler Technology, 2020, 51(4): 7–14.
- [8] 王天堃. 基于神经网络模型及预测控制 DMC 的火电机组脱硝控制策略 [J]. 中国电力, 2019, 52(12): 140–145.
- WANG Tian-kun. Denitration control strategy for thermal power units based on neural network model and predictive control DMC [J]. Electric Power, 2019, 52(12): 140–145.
- [9] ZHANG Y, SHEN J, LI Y, et al. Cascade constrained DMC-PID control for SCR denitrification system [C]// Hangzhou: 34th Chinese Control Conference (CCC), 2015.
- [10] 来长胜, 白建云, 印江. 广义预测控制算法在 CFB 锅炉 SNCR 烟气脱硝系统中的应用 [J]. 热力发电, 2016, 45(12): 109–113.
- LAI Chang-sheng, BAI Jian-yun, YIN Jiang. Application of gener-

alized predictive control algorithm in selective non-catalytic reduction flue gas denitrification system[J]. Thermal Power Generation,2016,45(12):109-113.

[11] WU X, SHEN J, SUN S, et al. Data-driven disturbance rejection predictive control for SCR denitrification system[J]. Industrial/Engineering Chemistry Research,2016,55(20):5923-5930.

[12] ZENG L, LI Y, LIAO P, et al. Adaptive disturbance rejection model predictive control and its application in a selective catalytic reduction denitrification system[J]. Computers & Chemical Engineering,2020,140:106963.

[13] 王富强,李晓理,于学斌. 基于 GA-BP 预测控制的燃煤机组脱硝系统优化研究[J]. 控制工程,2021,28(7):1490-1495.

WANG Fu-qiang, LI Xiao-li, YU Xue-bin. Study on optimization of denitrification system for coal-fired units based on GA-BP predictive control[J]. Control Engineering of China,2021,28(7):1490-1495.

[14] 黄德胜,王忠凯,邓继军,等. 基于多模型动态矩阵控制的喷氨优化装置及应用[J]. 热能动力工程,2020,35(6):280-286.

HUANG De-sheng, WANG Zhong-kai, DENG Ji-jun, et al. An ammonia injection optimization device based on multiple dynamic matrix control and its application[J]. Journal of Engineering for Thermal Energy and Power,2020,35(6):280-286.

[15] 邢益超,张广明,俞 辉,等. 多变量动态矩阵控制的优化与仿真[J]. 计算机工程与科学,2019,41(7):1285-1290.

XING Yi-chao, ZHANG Guang-ming, YU Hui, et al. Optimization and simulation of multivariable dynamic matrix control[J]. Computer Engineering & Science,2019,41(7):1285-1290.

[16] 席裕庚. 预测控制[M]. 北京:国防工业出版社,2013.

XI Yu-geng. Predictive control[M]. Beijing:National Defense Industry Press,2013.

[17] 王志超,张志杰,赵晨阳. 基于改进型辅助变量法的压力传感器建模[J]. 科学技术与工程,2019,19(32):166-172.

WANG Zhi-chao, ZHANG Zhi-jie, ZHAO Chen-yang. Pressure sensor modeling based on improved auxiliary variable method[J]. Science Technology and Engineering,2019,19(32):166-172.

[18] 侯玉婷,薛建中,王 林,等. 用于 SCR 喷氨量模型参数辨识的辅助变量递推最小二乘法[J]. 热力发电,2015,44(11):75-80.

HOU Yu-ting, XUE Jian-zhong, WANG Lin, et al. Recursive instrumental variable estimation algorithm for ammonia flow model in SCR denitration reactors[J]. Thermal Power Generation,2015,44(11):75-80.

[19] 严晓久,周爱国,林建平,等. 基于辅助变量法的系统参数辨识[J]. 机床与液压,2006(12):180-181,184.

YAN Xiao-jiu, ZHOU Ai-guo, LIN Jian-ping, et al. Parametric system identification based on instrumental variable method[J]. Machine Tool & Hydraulics,2006(12):180-181,184.

(丛 敏 编辑)