

# 基于改进自抗扰控制和数据驱动的脱硝系统设计及应用

李炳楠<sup>1</sup>, 朱峰<sup>1</sup>, 梁正玉<sup>1</sup>, 吴振龙<sup>2†</sup>

(1. 润电能源科学技术有限公司, 河南 郑州 450000; 2. 郑州大学 电气与信息工程学院, 河南 郑州 450001)

**摘要:** 具有多源扰动、强非线性、大滞后等特性的燃煤机组脱硝系统一直面临着如何提高控制品质的挑战。为提高脱硝系统的跟踪性能和抗干扰性能, 本文提出了一种结合改进自抗扰控制与前馈设计的复合控制策略, 并在 330 MW 亚临界机组的脱硝系统中进行了成功应用。首先, 通过分析改进自抗扰控制参数对控制效果的影响, 提出了一种适用于脱硝系统的实用参数整定方法, 并利用数据驱动的方法, 通过扰动量的相关性分析设计合理的前馈控制策略。现场运行数据表明, 提出的复合控制策略具有更强的扰动抑制能力和消除反应器两侧出口浓度偏差的能力, 显示了很强的应用潜力。

**关键词:** 脱硝系统; 改进自抗扰控制; 数据驱动; 前馈控制; 相关性分析

**引用格式:** 李炳楠, 朱峰, 梁正玉, 等. 基于改进自抗扰控制和数据驱动的脱硝系统设计及应用. 控制理论与应用, 2023, 40(6): 1034–1042

DOI: 10.7641/CTA.2022.11201

## Modified ADRC and data-driven for the denitration system design with its application

LI Bing-nan<sup>1</sup>, ZHU Feng<sup>1</sup>, LIANG Zheng-yu<sup>1</sup>, WU Zhen-long<sup>2†</sup>

(1. Rundian Energy Science and Technology Co.Ltd., Zhengzhou Henan 450000, China;

2. School of Electrical and Information Engineering, Zhengzhou University, Zhengzhou Henan 450001, China)

**Abstract:** The denitration systems of coal-fired units are facing many control challenges, which have dynamic characteristics such as multi-source disturbance, strong nonlinearity and large hysteresis. In order to improve the tracking performance and disturbance rejection performance of the denitration systems, this paper proposes a composite control strategy combining modified active disturbance rejection control (MADRC) and feedforward control, and the proposed hybrid control strategy is applied to the denitration systems of a 330MW subcritical unit successfully. By analyzing the influence of MADRC parameters on the control performance, a practical parameter tuning method is summarized which is suitable for the denitration system, and then a reasonable feedforward control strategy is designed through the correlation analysis for related disturbance factors based on the data-driven method. The field running data show that the proposed hybrid control strategy has stronger disturbance rejection ability. Besides, it can also effectively eliminate the concentration deviation at the outlet of both sides of the reactor. The successful application shows strong industrial application potential.

**Key words:** denitration system; modified active disturbance rejection; data-driven; feedforward control; correlation analysis

**Citation:** LI Bingnan, ZHU Feng, LIANG Zhengyu, et al. Modified ADRC and data-driven for the denitration system design with its application. *Control Theory & Applications*, 2023, 40(6): 1034–1042

## 1 引言

燃煤机组系统的强非线性、大惯性特性使得其控制面临着许多挑战。随着新能源大规模并入电网, 燃

煤机组需要通过快速升降负荷保证电网稳定性<sup>[1]</sup>, 这会给机组各系统的高质量运行带来更多的挑战。此外, 机组系统在运行过程中还面临着多源扰动, 如燃烧变

收稿日期: 2021–12–08; 录用日期: 2022–06–30.

†通讯作者. E-mail: wuzhenlong2020@zzu.edu.cn; Tel.: +86 371-67783113.

本文责任编辑: 陈增强.

国家自然科学基金项目(52106030), 河南省科技攻关项目(212102311052), 电力系统国家重点实验室开放课题项目(SKLD21KM14), 郑州大学教授团队助力企业创新驱动发展专项项目(JSZLQY2022016), 郑州大学青年人才企业合作创新团队支持计划项目资助。

Supported by the National Natural Science Foundation of China (52106030), the Science & Technology Research Project in Henan Province of China (212102311052), the State Key Laboratory of Power System and Generation Equipment (SKLD21KM14), the Zhengzhou University Professor Team for Enterprise Innovation-Driven Development Project (JSZLQY2022016) and the Zhengzhou University Youth Talent Enterprise Cooperative Innovation Team Support Plan.

化、负荷升降、参量波动等。其中, 燃煤机组的脱硝系统由于脱硝反应过程涉及化学反应、烟气流动等复杂过程, 其精确数学模型难以建立, 且随着负荷的变化脱硝系统的特性变化明显, 如何提高脱硝系统参与深度调峰过程中的控制品质变得越来越重要。

为提高脱硝系统的跟踪性能和抗干扰性能并增加机组系统应对不确定性的能力, 学者设计了多种控制策略<sup>[2]</sup>, 如: 经典的比例-积分-微分(proportional-integral-derivative, PID)控制<sup>[2-3]</sup>、模型预测控制<sup>[4-6]</sup>和基于神经网络控制<sup>[7-8]</sup>。经典PID控制器由于其自身的“基于误差消除误差”反馈结构, 控制性能提升空间受到限制<sup>[9]</sup>。模型预测控制在模型精确时能够取得满意的控制效果, 当模型偏离设计工况时控制效果会出现较大的下降。基于神经网络、强化学习等人工智能的控制策略不依赖精确数学模型, 但由于计算量大、现场实施难、依赖大量数据等缺点, 使得其在现场应用具有较大的难度。因此研究一种鲁棒性强、易于工程实现、抗干扰能力突出等优点并适用于脱硝系统的控制策略十分必要。

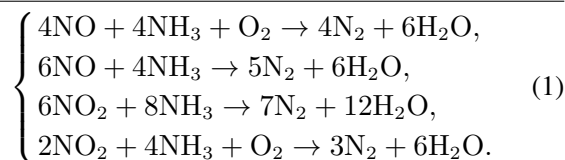
自抗扰控制(active disturbance rejection control, ADRC)是韩京清研究员结合PID优点和现代控制理论长处的先进控制技术, 由于其具有简单的结构、易于工程实现、抗干扰能力强、鲁棒性好等优点, 使得其在电动机系统<sup>[10]</sup>、无人车辆系统<sup>[11]</sup>、航空航天系统<sup>[12]</sup>、热力系统<sup>[13]</sup>等方面具有广泛的应用。文献[14]设计了脱硝系统串级ADRC控制策略, 并通过仿真验证了ADRC在扰动抑制和系统鲁棒新方面的优势, 但设定值跟踪时速度较慢。为提高如脱硝系统、过热汽温系统等大惯性过程的跟踪速度和抗干扰能力, 文献[15]设计一种改进自抗扰控制(modified ADRC, MADRC), 分析其稳定性, 并在过热汽温系统和协调控制系统<sup>[16]</sup>中得到成功应用。

本文在以MADRC为反馈控制器, 以数据驱动的前馈控制设计方法, 设计适用脱硝系统的先进控制策略, 通过现场运行数据验证所提控制策略的有效性。首先, 对脱硝系统的反应过程和控制特点分析进行介绍。其次, 在此基础上介绍适用于脱硝系统的MADRC和前馈控制设计方法, 并通过单一变量法分析总结出适用于脱硝系统的实用参数整定流程。最后, 通过仿真验证和现场数据说明所提方法在消除两侧偏差、扰动抑制方面的优势。

## 2 脱硝系统及问题描述

### 2.1 脱硝系统的反应过程

燃煤机组脱硝系统的示意图如图1所示, 燃煤机组脱硝系统将烟气与经过稀释的氨气在反应器入口混合后进入反应器进行如式(1)所示的化学反应如下:



根据反应过程是否采用催化剂, 脱硝系统的反应一般分为选择性催化还原脱硝法(selective catalytic reduction, SCR)和选择性非催化还原脱硝法(selective non-catalytic reduction, SNCR), 目前SCR反应是燃煤机组常见的脱硝方式也是本文研究的脱硝方法。通过改变喷氨阀门的开度调节喷氨量, 保证烟气中氮氧化物( $\text{NO}_x$ )充分反应并确保氨逃逸量不超标。根据不同机组的需要可以选择控制SCR反应器出口 $\text{NO}_x$ 浓度或者是脱硝系统出口 $\text{NO}_x$ 浓度。需要说明的是图1只给出了脱硝系统一侧的喷氨阀门, 实际系统一般都有两个喷氨阀门位于SCR反应器两侧, 需要设计两套相同的控制策略分别进行控制。

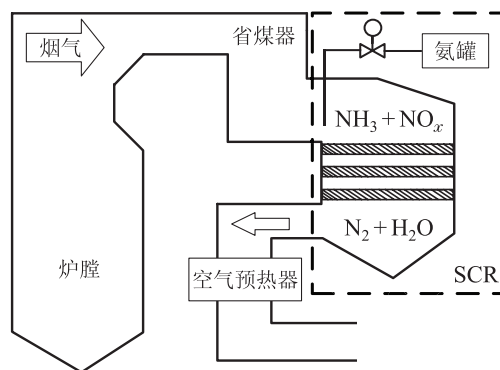


图1 燃煤机组脱硝系统流程示意图

Fig. 1 The flow diagram of the denitration system for coal fired units

### 2.2 脱硝系统的控制问题分析

文献[17-18]基于式(1)中的反应机理建立了脱硝系统的动态机理模型, 即

$$\begin{aligned} \frac{dC_{\text{NO}}}{dt} &= \theta(R_{\text{ox}} - R_{\text{red}}) + \frac{F}{V}(C_{\text{NO}}^{\text{in}} - C_{\text{NO}}), \\ \frac{d\theta_{\text{NH}_3}}{dt} &= R_{\text{ads}} - R_{\text{des}} - R_{\text{red}} - R_{\text{ox}}, \\ \frac{dC_{\text{NH}_3}}{dt} &= \theta(R_{\text{des}} - R_{\text{ads}}) + \frac{F}{V}(C_{\text{NH}_3}^{\text{in}} - C_{\text{NH}_3}), \end{aligned} \quad (2)$$

其中:  $F$ 和 $V$ 分别为烟气流量( $\text{m}^3/\text{s}$ )和SCR反应器的体积( $\text{m}^3$ );  $C_{\text{NO}}^{\text{in}}$ 和 $C_{\text{NH}_3}^{\text{in}}$ 分别为SCR反应器入口氮氧化物浓度( $\text{mol}/\text{m}^3$ )和SCR反应器喷氨量( $\text{mol}/\text{m}^3$ );  $C_{\text{NO}}$ ,  $\theta_{\text{NH}_3}$ 和 $C_{\text{NH}_3}$ 分别为SCR反应器中NO的摩尔浓度( $\text{mol}/\text{m}^3$ )、催化剂表面 $\text{NH}_3$ 的覆盖率和SCR反应器中 $\text{NH}_3$ 的摩尔浓度( $\text{mol}/\text{m}^3$ );  $R_{\text{ox}}$ ,  $R_{\text{red}}$ ,  $R_{\text{ads}}$ ,  $R_{\text{des}}$ 分别为化学反应过程中的变量, 具体含义和表达式见文献[17-18], 即

$$R_{\text{ox}} = k_{\text{ox}} \exp\left(\frac{-E_{\text{ox}}}{RT}\right),$$

$$R_{red} = k_{red} \exp\left(\frac{-E_{red}}{RT}\right),$$

$$R_{ads} = k_{ads} \exp\left(\frac{-E_{ads}}{RT}\right),$$

$$R_{des} = k_{des} \exp\left(\frac{-E_{des}}{RT}\right).$$

其中:  $R$ 和 $T$ 分别为气体常数( $\text{m}^3 \cdot \text{Pa}/(\text{mol} \cdot \text{K})$ )和温度(K);  $k_{ox}$ ,  $k_{red}$ ,  $k_{ads}$ 和  $k_{des}$ 分别氧化速率指前系数、脱硝速率指前系数、吸附速率指前系数和解吸附速率指前系数, 单位均为  $\text{m}^3/(\text{mol} \cdot \text{s})$ ;  $E_{ox}$ ,  $E_{red}$ ,  $E_{ads}$ 和  $E_{des}$ 分别为氧化反应活化能、脱硝反应活化能、氨吸附反应活化能和氨解吸附反应活化能, 单位均为  $\text{J}/\text{mol}$ . 相关待辨识参数通过运行数据进行辨识得到.

基于上述分析可知脱硝系统的控制是通过调节喷氨阀门的开度达到控制反应器出口 $\text{NO}_x$ 浓度或者是脱硫系统出口 $\text{NO}_x$ 浓度的目的. 基于式(2)中的非线性模型动态分析可知, 采用Vinnicombe间隙度分析可知, 入口浓度为  $200 \text{ mg}/\text{m}^3$  和  $400 \text{ mg}/\text{m}^3$  之间的 Vinnicombe间隙度为0.42, 这意味着系统具有较强的非线性程度<sup>[16]</sup>. 此外, 脱硝系统从入口浓度波动到脱硫出口系统稳态所需时间约为1800 s左右, 可知脱硝系统是一个典型大惯性过程, 一般将反应过程建模为多个惯性环节串联的高阶对象形, 如  $K/(Ts + 1)^n$ . 脱硝反应过程会受到负荷变化、磨煤机启停、二次风量升降、反应器入口 $\text{NO}_x$ 浓度波动等多种因素的影响. 以某300 MW亚临界燃煤机组为例, 其脱硝系统需要控制脱硫系统出口 $\text{NO}_x$ 浓度, 其基本的控制框图如图2所示, 其中设定值为脱硫系统出口 $\text{NO}_x$ 浓度的设定值.

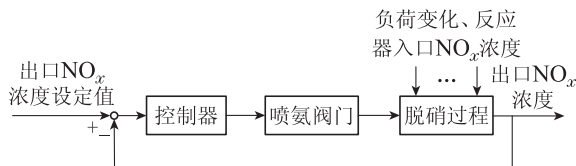


图2 脱硝系统的基础控制框图

Fig. 2 The basic control diagram of the denitration system

结合工程实际, 脱硝系统采用结合前馈控制和反馈控制的复合控制策略. 其中, 前馈控制策略通过相关性分析找出关键扰动量, 设计合理的前馈控制器, 尽可能多的消除已知扰动, 未知和不匹配扰动采用MADRC作为反馈控制器进行消除, 从而得到如图3所示的复合控制结构.

脱硝系统的控制目标主要有:

- 1) 脱硫系统出口 $\text{NO}_x$ 浓度不能超过超低排放标准 $50 \text{ mg}/\text{m}^3$ 或者当地环保要求;
- 2) 脱硫系统出口 $\text{NO}_x$ 浓度在设定值的附近波动, 波动范围 $\leq 10 \text{ mg}/\text{m}^3$ 以内;
- 3) 反应器两侧出口浓度偏差 $\leq 15 \text{ mg}/\text{m}^3$ ;

4) 喷氨量在满足1)–3)控制目标的基础上尽可能少, 满足经济性要求.

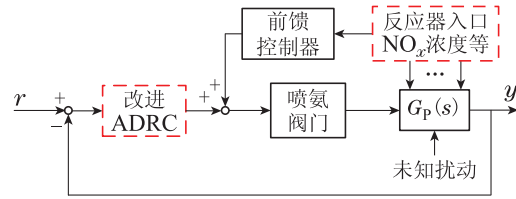


图3 脱硝系统的复合控制策略

Fig. 3 The compound control strategy of the denitration system

### 3 控制策略设计

#### 3.1 改进自抗扰控制及参数整定

本文在文献[15]提出的针对一类高阶系统的MADRC基础上, 考虑到系统输出 $y$ 是已知, 可以直接应用于控制律的设计, 提出如图4所示的结构, 其中 $G_{cp}(s)$ 为高阶系统的补偿部分

$$G_{cp}(s) = \frac{1}{(Ts + 1)^{n-1}}. \quad (3)$$

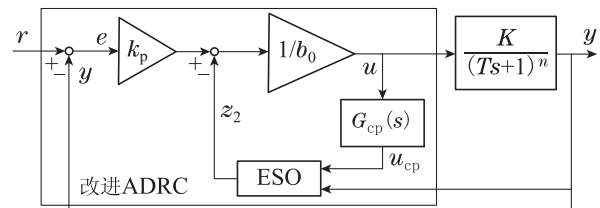


图4 改进自抗扰控制结构

Fig. 4 The control structure of the MADRC

那么, 进入扩张状态观测器 (extended state observer, ESO)为高阶系统的输出 $y$ 和补偿部分的输出 $u_{cp}$ , 通过ESO对系统的总扰动 $f$ 进行估计, 即

$$\begin{cases} \dot{z}_1 = z_2 + \beta_1(y - z_1) + b_0 u_{cp}, \\ \dot{z}_2 = \beta_2(y - z_1), \end{cases} \quad (4)$$

其中:  $\beta_1, \beta_2$ 为ESO的参数,  $b_0$ 为补偿后对象的增益估计值. 当ESO参数整定合适时, ESO的输出 $z_2$ 可以很好的跟踪系统的总扰动 $f$ , 并通过控制律对总扰动 $f$ 进行补偿, 即

$$u = \frac{\omega_c(r - y) - z_2}{b_0}, \quad (5)$$

其中 $\omega_c$ 为控制律的带宽且为可调参数.

为简化ESO的参数整定, 文献[19]提出了参数带宽化的方法, 将 $\beta_1$ 和 $\beta_2$ 通过ESO的带宽进行简化, 即

$$\begin{cases} \beta_1 = 2\omega_o, \\ \beta_2 = \omega_o^2. \end{cases} \quad (6)$$

需要说明的是, 尽管MADRC是针对形如  $K/(Ts + 1)^n$ 设计的, 通过将延迟占主导地位的一阶惯

性加纯延迟系统或者二阶惯性加纯延迟系统通过两点法近似为 $K/(Ts+1)^n$ 形式的高阶系统<sup>[20]</sup>, MADRC仍然是适用的, 并且可以避免由于时滞不匹配带来的控制量震荡的问题<sup>[15]</sup>.

### 3.2 考虑前馈控制作用的MADRC参数整定

为了总结适用于有前馈控制作用的MADRC参数整定方法, 首先采用单一变量法分析参数 $\omega_c$ ,  $\omega_o$ 和 $b_0$ 对控制效果的影响. 由于脱硝系统具有大惯性特性, 为了保持较高的建模精度, 热工中常常将脱硝系统近似成多个惯性环节串联的高阶系统, 将上述亚临界燃煤机组脱硝系统通过开环试验建立的传递函数模型为

$$G_p(s) = \frac{-3}{(130s+1)^5}. \quad (7)$$

针对式(7)中的脱硝系统模型, 首先, 选择能够保证满意控制效果的参数 $\omega_c = 0.015$ ,  $\omega_o = 0.2$ 和 $b_0 = -0.05$ . 在保证其他两个参数不变的前提下, 逐一改变 $\omega_c$ ,  $\omega_o$ 和 $b_0$ 进行变化, 可以得到如图5-7所示的结果.

从图5可知, 随着 $\omega_c$ 的增加, MADRC的作用逐渐增强, 当 $\omega_c$ 增大到某一定值时, 闭环系统具有严重的震荡和超调. 可知 $\omega_c$ 对系统的输出具有明显的影响. 因此, 需要选择合理的数值保证闭环系统的控制效果.

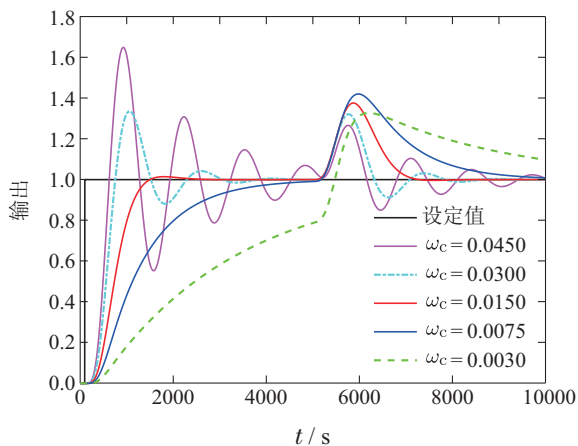


图5 不同 $\omega_c$ 下的系统输出

Fig. 5 The system outputs with different  $\omega_c$

从图6可知, 当 $\omega_o$ 较小时, 系统的跟踪速度较慢, 抗干扰性能也会有明显的下降. 当 $\omega_o$ 超过0.1以后, 系统的输出基本保持不变, 这一点与常规ADRC有非常大的区别. 通过大量的仿真表明, 针对常见的热工对象, 在超过0.2之后系统输出都基本保持不变. 由于 $\omega_o$ 的值越大意味着ESO的观测能力越强, 同时ESO对测量噪声也越敏感, 通过权衡ESO的观测能力与对测量噪声敏感程度, 一般建议选择 $\omega_o \in [0.2, 0.5]$ .

从图7可知, 越大系统的跟踪性能与抗干扰性能越弱, 反之亦然. 当 $b_0$ 小到一定值时, 系统会出现严重的

震荡和超调, 结合图5可知,  $b_0$ 和 $\omega_c$ 在选择时需要相互配合, 才能达到满意的控制效果.

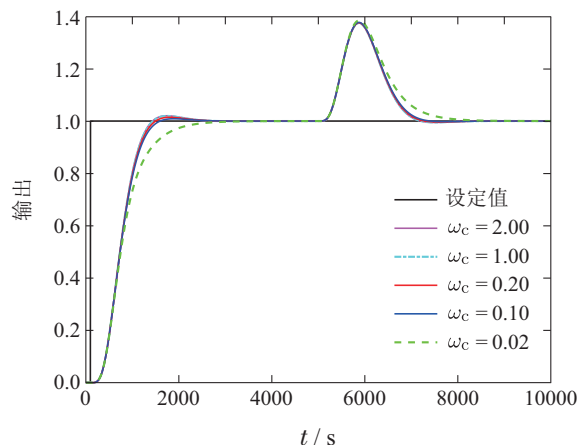


图6 不同 $\omega_o$ 下的系统输出

Fig. 6 The system outputs with different  $\omega_o$

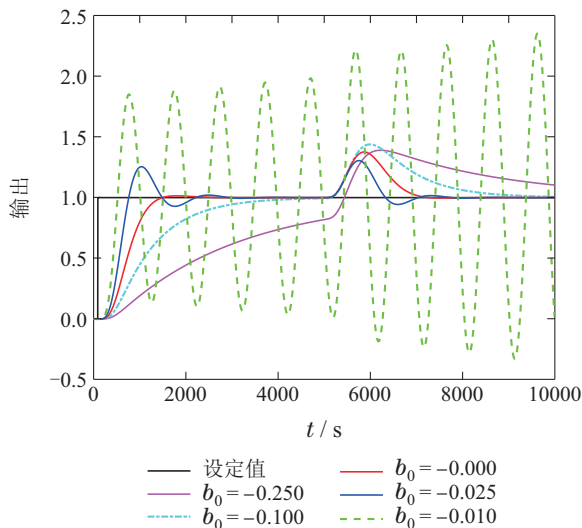


图7 不同 $b_0$ 下的系统输出

Fig. 7 The system outputs with different  $b_0$

由于脱硝系统的大滞后特性, 采用结合前馈控制和反馈控制的复合控制结构, 此时前馈控制作用对于控制效果的影响不能忽略. 为了分析不同前馈控制作用强度对控制效果的影响, 保持 $\omega_c = 0.027$ ,  $\omega_o = 0.2$ 和 $b_0 = -0.1$ 不变, 逐渐增强前馈控制的强度, 可以得到图8所示的结果. 从图中可知, 前馈控制对于闭环系统的抗干扰性能没有影响, 但随着前馈控制强度的增强, 跟踪速度会明显提升, 与此同时系统的超调量也逐渐增加. 当前馈作用占比超过20%时闭环系统具有较大的超调量, 在实际应用时, 在增强前馈控制的同时也需要适当削弱MADRC的控制作用强度, 比如减小 $\omega_c$ 值或者增加 $b_0$ 的值, 保证系统的小超调跟踪. 需要说明的是由于反馈控制过弱会带来抗干扰性能的下降, 在实际调整时需要权衡前馈控制和反馈控制的权重.



通过上面的分析, 基于大量仿真的基础上, 总结出含前馈控制作用时MADRC的参数整定流程如下图9所示或者下述步骤:

- i) 首先分析脱硝系统前馈控制作用的权重, 确定反馈控制作用的强度;
- ii) 选择合适的 $b_0$ , 结合图7, 其值范围建议为 $|b_0| \in [0.5 \frac{K}{T}, +\infty)$ , 更进一步推荐 $|b_0| \in [1, 100] \frac{K}{T}$ ;
- iii) 结合图6, 建议从 $\omega_0 \in [0.2, 0.5]$ 中选择合适的 $\omega_0$ ;
- iv) 基于图5可知, 能够从小到大逐渐增强 $\omega_c$ 直至达到满意的控制效果, 否则重复步骤ii)–iv).

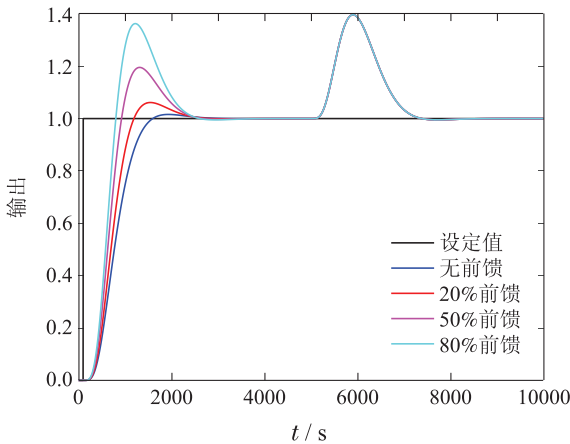


图8 不同前馈控制作用下的系统输出

Fig. 8 The system outputs with different feedforward control

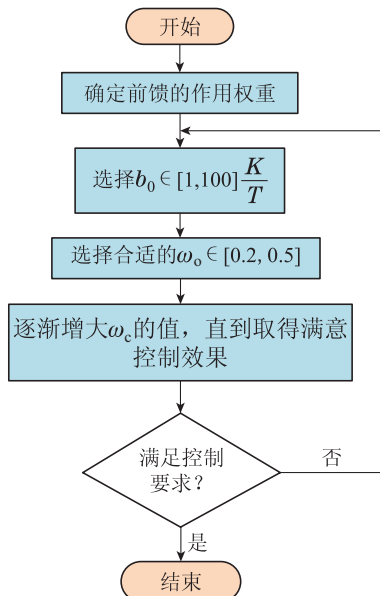


图9 含前馈控制作用时MADRC参数整定流程

Fig. 9 The tuning procedure of the MADRC with feedforward control

### 3.3 基于数据驱动的前馈控制设计

由于脱硝系统是一个大惯性过程, 仅依靠反馈控制进行调节会出现调节时间较长、控制效果下降等情

况. 由于系统中影响脱硝系统 $\text{NO}_x$ 出口浓度的多种扰动可以测量得到, 充分利用已知扰动的信息, 设计前馈控制信号, 让执行器提前喷氨既可以加快脱硝系统的效应速度, 又可以增加脱硝系统的扰动抑制能力. 前馈控制的设计是通过已知扰动量进行分析, 选择能够有效影响系统输出量的扰动量, 并设计合理的前馈控制策略, 从而提高系统的响应速度. 通过上述分析可知, 脱硝系统的扰动量非常多, 选择其中数个常见扰动量, 如入口 $\text{NO}_x$ 浓度、SCR出口 $\text{NO}_x$ 浓度、SCR出口氧量以及两侧出口 $\text{NO}_x$ 浓度差值等相关物理量与脱硝出口 $\text{NO}_x$ 浓度进行相关性分析, 定义考虑时滞时间的相关性分析函数, 即

$$r = \frac{\sum_{i=1}^n (x_i(t-d) - \bar{x})(y_i(t-d) - \bar{y})}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (x_i(t-d) - \bar{x})^2} \sqrt{\sum_{i=1}^n (y_i(t-d) - \bar{y})^2}} \quad (8)$$

采用式(8)进行计算, 可以得到图10所示不同相关物理量与脱硝系统出口 $\text{NO}_x$ 浓度的相关性指标.

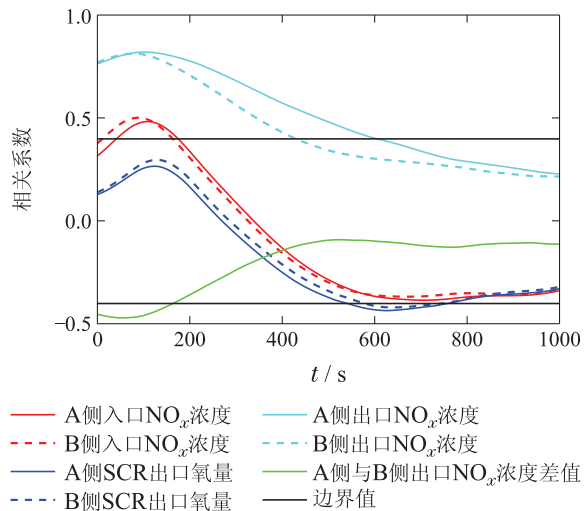


图10 不同扰动量的相关性指标

Fig. 10 Correlation indexes of different disturbances

一般地, 相关性指标的绝对值超过0.4时, 即认为两者具有较强的相关性, 反之亦然. 从图10可知, 入口 $\text{NO}_x$ 浓度、SCR出口 $\text{NO}_x$ 浓度和两侧出口 $\text{NO}_x$ 浓度差值与脱硝系统出口 $\text{NO}_x$ 浓度具有较强的相关性, 本文采用上述物理量设计前馈控制策略, 结合物理量的含义以及在脱硝系统的位置, 入口 $\text{NO}_x$ 浓度、SCR出口 $\text{NO}_x$ 浓度和两侧出口 $\text{NO}_x$ 浓度差值分别采用比例-微分(proportional differential, PD)控制器、D控制器和P控制器. 将传感器测得的入口 $\text{NO}_x$ 浓度、SCR出口 $\text{NO}_x$ 浓度和两侧出口 $\text{NO}_x$ 浓度差值分别通过前馈PD控制器、D控制器和P控制器, 将控制器输出量加到喷氨调门指令, 用于喷氨调门的调整, 从而保证脱硝系统出口 $\text{NO}_x$ 浓度在设定值附近. 控制器的参数

更具现场情况采用试凑法进行整定和调整. 综上所述, 脱硝系统设计的控制策略如图11所示, 控制策略包含3个前馈控制器和MADRC.

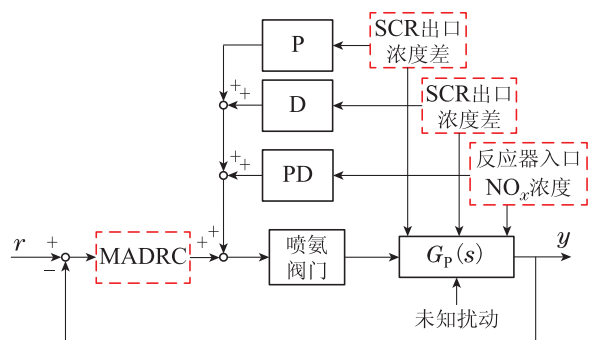


图 11 设计的结合MADRC和前馈控制的控制策略

Fig. 11 The designed control strategy combining MADRC and feedforward control

### 4 仿真验证和工程应用

控制策略在实际应用之前需要通过仿真验证设计控制策略的有效性, 为比较MADRC的控制效果, 分别设计了基于带宽参数化法整定的常规ADRC与基于Skogestad内模控制(skogestad internal model control, SIMC)法整定的比例-积分(proportional integral, PI)控制器. 需要说明的是控制器参数整定均是在前馈控制占比50%时整定得到的, 其控制器参数如表1所示. 相比于常规ADRC, MADRC增加了一个补偿部分 $G_{cp}(s)$ , 且ESO带宽比常规ESO的带宽高很多, 能够显著提高ESO对总扰动的估计能力.

表 1 不同控制器的参数

Table 1 Parameters of different controllers

控制器	参数
MADRC	$\omega_c = 0.028, b_0 = -0.2, \omega_o = 0.2,$ $G_{cp}(s) = 1/(130s + 1)^4$
ADRC	$\omega_c = 0.007, b_0 = -0.2, \omega_o = 0.015$
PI	$k_p = -0.040, k_i = -1/4070$

#### 4.1 仿真验证

首先考虑标称工况下的控制效果, 即式(7)中脱硝系统模型为准确的, 相关的仿真设置为: 前馈控制占比40%, 闭环系统的设定值在100 s时进行幅值为1的阶跃, 在3000 s时添加幅值为0.2的控制量扰动, 得到如图12所示的结果. 从图中可知, MADRC具有最快的跟踪速度, 几乎没有超调. 当扰动产生, MADRC也具有最小的波动幅值. 常规ADRC与PI具有比较接近的跟踪速度, 常规ADRC具有强于PI的抗干扰性能. 统计仿真过程中的偏差绝对值积分(integral absolute error, IAE), 可知MADRC, 常规ADRC和PI的IAE指标分别为 $1.18 \times 10^3, 1.35 \times 10^3$ 和 $1.67 \times 10^3$ , 可知MADRC在针对标称工况下的系统时具有明显的优势.

由于随着负荷变化, 脱硝系统的特性也会发生明显变化, 即脱硝系统存在着较强的不确定性. 为了检验上述几种控制器在脱硝系统存在不确定性时的控制效果, 本文采用蒙特卡洛实验的方法进行验证: 保持控制器参数不变, 将式(7)中脱硝系统模型参数 $K, T$ 和 $n$ 在其标称值附近的 $\pm 20\%$ 进行摄动, 进行图12所示的仿真600次. 需要说明的是由于模型阶次 $n$ 只能取正整数, 故 $n$ 从4, 5和6中随机选取, 每次仿真均统计从100 s到3000 s的跟踪性能IAE指标( $IAE_{tracking}$ )和从3000 s到8000 s的抗干扰性能IAE指标( $IAE_{disturbance}$ ), 其分布如图13所示.

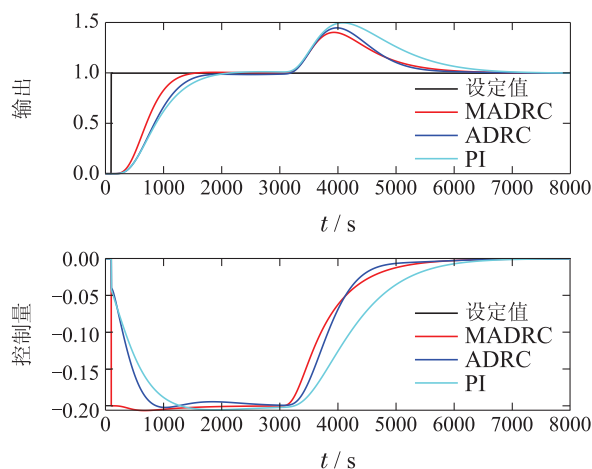


图 12 标称模型下的系统输出

Fig. 12 System outputs with nominal models

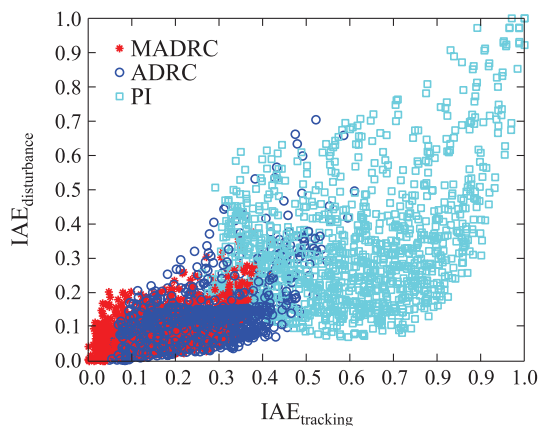


图 13 不确定性模型下的 $IAE_{tracking}$ 和 $IAE_{disturbance}$ 分布

Fig. 13 The distributions of  $IAE_{tracking}$  and  $IAE_{disturbance}$  with uncertain models

性能指标值越小表示控制效果越好, 性能指标越集中表示控制器的鲁棒性越强, 即应对被控对象的不确定性越强. 从图中可知, MADRC分布最集中, 且性能指标较小, 可知MADRC在系统存在不确定性是仍能保持很好的控制效果, 显示了很强的应用潜力.

为了更好的分析控制器参数的鲁棒性,  $M_s$ 指标用

来定量计算闭环系统的鲁棒性指标,  $M_s$ 定义如下:

$$M_s = \max_{0 \leq \omega < \infty} \left| \frac{1}{1 + G_c(j\omega)G_p(j\omega)} \right|, \quad (9)$$

其中 $G_c$ 为反馈控制器.  $M_s$ 一般在1.2~2.0之间,  $M_s$ 值越小, 意味着闭环系统的鲁棒性越强, 具有更强应对系统不确定性的能力, 反之亦然. MADRC和ADRC的等价反馈控制器可以分别通过文献[21-22]得到. 通过计算可以得到MADRC, ADRC和PI的 $M_s$ 值分别为1.14, 1.25和1.33, 如图14所示, 可知MADRC在保证最佳控制效果的前提下, 其鲁棒性也是最强, 与图13所示的结论保持一致.

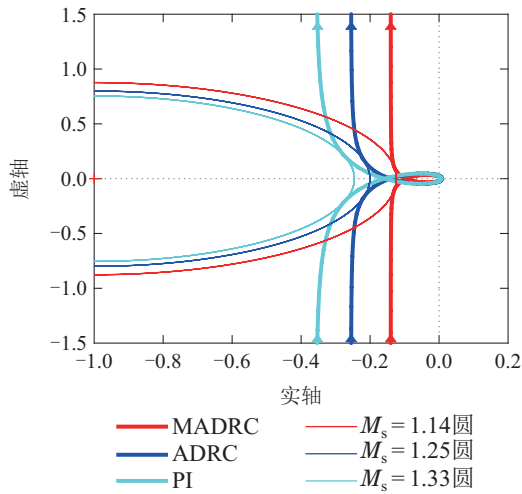


图14 标称模型下的Nyquist曲线

Fig. 14 The Nyquist diagram with nominal models

上述仿真是针对建立的线性模型即式(7)中模型进行仿真验证的, 接下来针对式(2)中非线性模型进行仿真验证. 依然采用表1中控制器参数进行仿真, 可以得到图15所示的控制效果. 尽管建立的脱硝系统非线性模型与线性模型存在一定的偏差, MADRC仍具有最佳的控制效果. 综上所述, 通过基于线性模型(式(7))和非线性模型(式(2))的仿真可知, MADRC在标称系统和系统存在不确定性时仍能保持很好的控制效果.

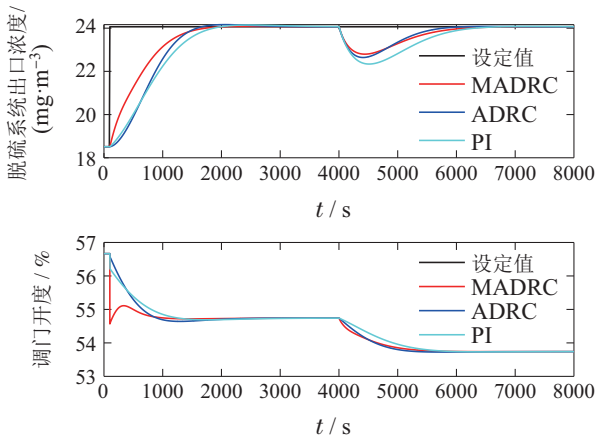


图15 非线性模型下的系统输出

Fig. 15 System outputs with nonlinear models

### 4.2 现场应用

在上述仿真的基础上, 本文控制策略应用于330 MW亚临界机组的脱硝系统, 机组为一次中间再热、三缸双排汽, 磨煤机为双进双出型磨煤机, 锅炉采用四角切圆燃烧方式. 该机组额定汽温、额定汽压和额定流量分别为540 °C, 17.5 MPa和1100 ton/h. 所提控制策略通过外挂服务器采用合适的开发平台实现, 在必要的限幅、无扰切换等保护逻辑基础上, 完成所设计控制策略的工程化实现, 外挂服务器与分散控制系统的通讯接口按照标准的RS232, RS485/422连接方式, 使用MODBUS通讯协议. 针对式(7)所示的脱硝系统完成控制器参数整定表1中参数. 需要说明的是, 现场使用的MADRC参数在第4.1节的基础上根据现场情况进行了微调, 分别为 $\omega_c = 0.026$ ,  $b_0 = -0.2$ ,  $\omega_o = 0.2$ 和 $G_{cp}(s) = 1/(130s + 1)^4$ . 前馈控制器参数采用试凑法进行了整定, 前馈PD控制器、D控制器和P控制器的参数分别为 $k_{ppd} = 0.35$ ,  $k_{d_{pd}} = 0.91$ ,  $k_{d_d} = 0.83$ 和 $k_{pp} = 0.47$ . 在负荷接近的工况即保持在80%负荷左右, 本文方法与原始方法的控制效果如图16和图17所示.

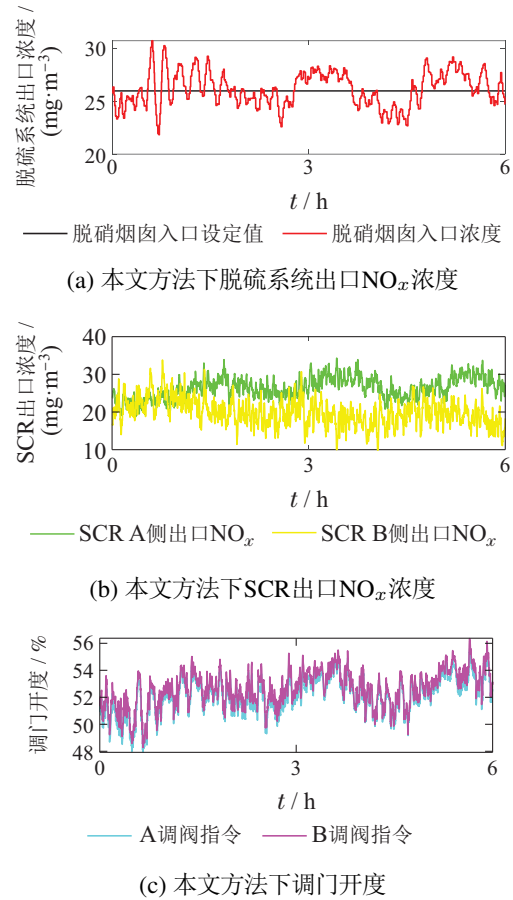
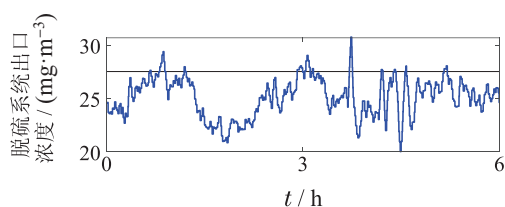


图16 本文方法投入运行6小时结果

Fig. 16 The results of the proposed method in 6-hour time span

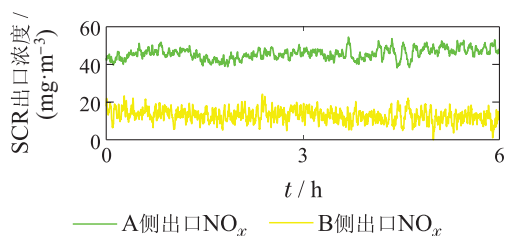
图16(a)和图17(a)为脱硝系统出口 $NO_x$ 浓度在设定值附近波动的情况; 图16(b)和图17(b)为SCR两侧

出口NO<sub>x</sub>浓度的波动情况;图16(c)和图17(c)为两侧喷氨阀门的开度. 为了更加直观的比较, 图18给出了NO<sub>x</sub>浓度偏差的分布. 从图中可知本文所提方法能够很好的将脱硫系统出口NO<sub>x</sub>浓度控制在设定值附近, 原始方法的脱硫系统出口NO<sub>x</sub>浓度低于设定值; 由于SCR出口NO<sub>x</sub>浓度和两侧出口NO<sub>x</sub>浓度差值前馈控制作用的存在, 两侧浓度偏差较原来得到更加明显的改善.



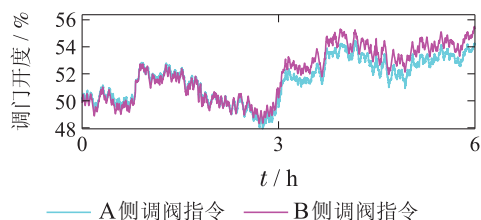
— 脱硝烟囱入口设定值 — 脱硝烟囱入口浓度

(a) 原始方法下脱硫系统出口NO<sub>x</sub>浓度



— A侧出口NO<sub>x</sub> — B侧出口NO<sub>x</sub>

(b) 原始方法下脱硫系统出口NO<sub>x</sub>浓度



— A侧调阀指令 — B侧调阀指令

(c) 原始方法下调门开度

图 17 原始方法投入运行6小时结果

Fig. 17 The results of the original method in 6-hour time span

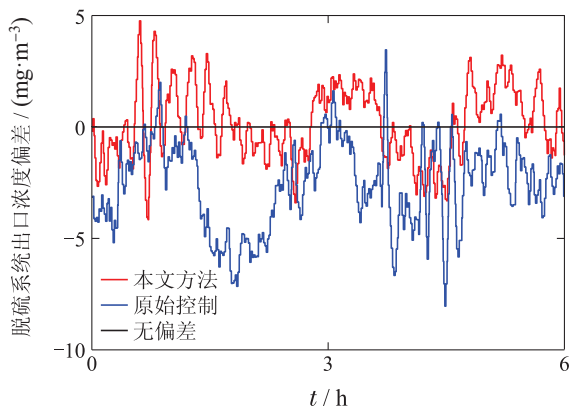


图 18 本文和原始方法的NO<sub>x</sub>浓度偏差分布

Fig. 18 The deviation distribution of NO<sub>x</sub> between the proposed and the original methods

为了定量地比较上述控制策略的控制性能, 分别计算6小时的本文方法和原始方法的相关性能指标(脱

硫系统出口NO<sub>x</sub>浓度的波动范围、偏差绝对值平均值、脱硫系统出口NO<sub>x</sub>浓度的标准差和SCR出口A、B侧NO<sub>x</sub>浓度偏差的积分)见表2. 从表2中可知, 本文方法将脱硫系统出口NO<sub>x</sub>浓度波动范围缩小了2.93 mg/m<sup>3</sup>, 偏差绝对值平均值为原始方法的58.7%, 标准差为原始方法的69.5%. 表2统计指标进一步验证了本文方法的有效性.

表 2 不同控制策略时的控制性能统计指标

Table 2 Statistical indexes of control performance under different control strategies

控制性能/(mg·m <sup>-3</sup> )	本文方法	原始方法
波动范围	[-4.16, 4.76]	[-8.39, 3.46]
偏差绝对值平均值	1.59	2.71
标准差	1.37	1.97
两侧出口NO <sub>x</sub> 偏差积分	1.51 × 10 <sup>5</sup>	7.08 × 10 <sup>5</sup>

## 5 结论

本文针对燃煤机组脱硝系统的控制难点, 设计了基于改进自抗扰控制的反馈控制器和基于相关性分析的前馈控制器. 通过单一变量法分析改进自抗扰控制参数对控制效果的影响, 总结了一种实用的改进自抗扰控制参数整定方法, 仿真进一步验证了改进自抗扰控制在跟踪性能、扰动抑制和应对系统不确定性的能力. 通过现场的应用, 6h运行数据表明, 本文方法将脱硫系统出口NO<sub>x</sub>浓度波动范围缩小了2.93 mg/m<sup>3</sup>, 偏差绝对值平均值为原始方法的58.7%, 标准差为原始方法的69.5%, 说明本文提出的复合控制策略具有更强的扰动抑制能力和两侧偏差消除能力, 显示了很强的应用潜力.

## 参考文献:

- [1] LI Ling, LIU Xiping. Control strategy optimization for thermal power unit adapted to deep peak shaving for large-scale new energy source integration. *Electric Power*, 2020, 53(1): 155 – 161. (李玲, 刘鑫屏. 新能源大规模并网条件下火电机组深度调峰控制策略优化. *中国电力*, 2020, 53(1): 155 – 161.)
- [2] NIU Yuguang, PAN Yan, LI Xiaobin. Review and prospect of automatic control system for flue gas SCR denitration in steam power station. *Journal of Engineering for Thermal Energy and Power*, 2019, 34(4): 1 – 9. (牛玉广, 潘岩, 李晓彬. 火力发电厂烟气SCR脱硝自动控制研究现状与展望. *热能动力工程*, 2019, 34(4): 1 – 9.)
- [3] ZHAN S, FANG Q, YIN C, et al. New fuel air control strategy for reducing nox emissions from corner-fired utility boilers at medium-low loads. *Energy & Fuels*, 2017, 31(7): 6689 – 6699.
- [4] ZENG L, LI Y, LIAO P, et al. Adaptive disturbance rejection model predictive control and its application in a selective catalytic reduction denitration system. *Computers & Chemical Engineering*, 2020, 140: 106963.
- [5] ZHANG Jinying. Denitration control of thermal power unit based on gamma incremental SGPC. *Proceedings of the CSEE*, 2019, 39(19): 5824 – 5828.



- (张金营. 基于 $\gamma$ 增量型SGPC的火电机组脱硝控制. 中国电机工程学报, 2019, 39(19): 5824 – 5828.)
- [6] WANG Tiankun. The denitration strategy of predictive dynamic matrix control (DMC) combined with BP neural network in fossil fuel power plant. *Electric Power*, 2019, 52(12): 140 – 145.  
(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. 中国电力, 2019, 52(12): 140 – 145.)
- [7] NIU Yuguang, PAN Yan, CHEN Xi. Depth structure control and depth control of selective catalytic reduction flue gas denitration system. *Control Theory & Applications*, 2019, 36(1): 65 – 72.  
(牛玉广, 潘岩, 陈曦. 选择性催化还原烟气脱硝深度结构和深度控制. 控制理论与应用, 2019, 36(1): 65 – 72.)
- [8] YANG Tingting, BAI Yang, LÜ You, et al. Study on multi-objective optimal control of SCR denitrification system. *Proceedings of the CSEE*, 2021, 41(14): 4905 – 4911.  
(杨婷婷, 白杨, 吕游, 等. SCR脱硝系统多目标优化控制研究. 中国电机工程学报, 2021, 41(14): 4905 – 4911.)
- [9] HAN J. From PID to active disturbance rejection control. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 2009, 56(3): 900 – 906.
- [10] WANG L, WANG X, LIU G, et al. Improved auto disturbance rejection control based on moth flame optimization for permanent magnet synchronous motor. *IEEJ Transactions on Electrical and Electronic Engineering*, 2021, 16(8): 1124 – 1135.
- [11] HU J, GE Y, ZHOU X, et al. Research on the course control of USV based on improved ADRC. *Systems Science & Control Engineering*, 2021, 9(1): 44 – 51.
- [12] ZHUANG H, SUN Q, CHEN Z, et al. Back-stepping active disturbance rejection control for attitude control of aircraft systems based on extended state observer. *International Journal of Control, Automation and Systems*, 2021, 19(6): 2134 – 2149.
- [13] WU Z, GAO Z, LI D, et al. On transitioning from PID to ADRC in thermal power plants. *Control Theory and Technology*, 2021, 19(1): 3 – 18.
- [14] LI Jian, TAN Wen, ZHANG Binwen. Linear active disturbance rejection control of SCR flue gas denitrification systems. *Journal of Chinese Society of Power Engineering*, 2019, 39(3): 203 – 207.  
(李健, 谭文, 张彬文. SCR烟气脱硝系统线性自抗扰控制研究. 动力工程学报, 2019, 39(3): 203 – 207.)
- [15] WU Z, HE T, LI D, et al. Superheated steam temperature control based on modified active disturbance rejection control. *Control Engineering Practice*, 2019, 83: 83 – 97.
- [16] WU Z, HE T, LIU Y, et al. Physics-informed energy-balanced modeling and active disturbance rejection control for circulating fluidized bed units. *Control Engineering Practice*, 2021, 116: 104934.
- [17] YAO Chu, LONG Dongteng, LÜ You, et al. Study on mechanism modelling and control of SCR denitration system in thermal power plant. *Journal of Engineering for Thermal Energy and Power*, 2018, 33(5): 78 – 84.  
(姚楚, 龙东腾, 吕游, 等. 火电厂SCR脱硝系统机理建模与控制研究. 热能动力工程, 2018, 33(5): 78 – 84.)
- [18] QIN Tianmu, LIN Daohong, YANG Tingting, et al. Comparative study on dynamic modeling methods of SCR denitration system. *Proceedings of the CSEE*, 2017, 37(10): 2913 – 2919.  
(秦天牧, 林道鸿, 杨婷婷, 等. SCR烟气脱硝系统动态建模方法比较. 中国电机工程学报, 2017, 37(10): 2913 – 2919.)
- [19] GAO Z. Scaling and bandwidth-parameterization based controller tuning. *Proceedings of the American Control Conference*. Denver: IEEE, 2003, 6: 4989 – 4996.
- [20] HE T, WU Z, LI D, et al. A tuning method of active disturbance rejection control for a class of high-order processes. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 2019, 67(4): 3191 – 3201.
- [21] WU Z, LI D, XUE Y, et al. Modified active disturbance rejection control for fluidized bed combustor. *ISA Transactions*, 2020, 102: 135 – 153.
- [22] WU Zhenlong, HE Ting, LI Donghai, et al. The calculation of stability and robustness regions for active disturbance rejection controller and its engineering application. *Control Theory & Applications*, 2018, 35(11): 1635 – 1647.  
(吴振龙, 何婷, 李东海, 等. 自抗扰控制器稳定域与鲁棒稳定域计算及工程应用. 控制理论与应用, 2018, 35(11): 1635 – 1647.)

#### 作者简介:

**李炳楠** 高级工程师, 目前研究方向为先进控制算法及其在过程控制中的应用, E-mail: libingnan5@crpower.com.cn;

**朱峰** 高级工程师, 目前研究方向为智能控制在火电机组中的应用, E-mail: zhufeng109@crpower.com.cn;

**梁正玉** 高级工程师, 目前研究方向为机器学习、强化学习算法及其在能源行业中的应用, E-mail: liangzhengyu@crpower.com.cn;

**吴振龙** 副教授, 目前研究方向为自抗扰控制和分数阶控制及其在能源系统中的应用, E-mail: wuzhenlong2020@zzu.edu.cn.