

# SCR脱硝系统线性自抗扰鲁棒PID控制

张洪敏<sup>1</sup>, 牛海明<sup>1</sup>, 马增辉<sup>2</sup>

(1. 国能智深控制技术有限公司 北京市电站自动化工程技术研究中心, 北京 102200;

2. 海南热带海洋学院 海洋信息工程学院, 海南 三亚 572022)

**摘要:**火电机组的深度调峰加剧了对选择性催化还原法(selective catalytic reduction, SCR)脱硝系统的干扰,为此提出了一种线性自抗扰鲁棒PID控制方法。2阶线性自抗扰控制(LADRC)可以直接近似为PID,也可以等价理想PID+2阶滤波器的结构。采用实际PID+2阶滤波器的结构控制具有强干扰和不确定性的SCR脱硝系统,利用混合灵敏度的方法整定实际PID和2阶滤波器参数。仿真结果表明,实际PID+2阶滤波器的结构具有较好的抗扰性,更好地继承了LADRC的特点,控制品质优于由LADRC直接近似为PID的控制。

**关键词:**深度调峰;SCR;线性自抗扰控制;鲁棒控制;2阶滤波器;抗干扰

中图分类号:TP273 文献标识码:A DOI:10.16146/j.cnki.rndlgc.2022.10.021

[引用本文格式]张洪敏,牛海明,马增辉. SCR脱硝系统线性自抗扰鲁棒PID控制[J]. 热能动力工程,2022,37(10):169-174.  
ZHANG Hong-min, NIU Hai-ming, MA Zeng-hui. Linear active disturbance rejection robust PID control of SCR denitration system[J]. Journal of Engineering for Thermal Energy and Power, 2022, 37(10):169-174.

## Linear Active Disturbance Rejection Robust PID Control of SCR Denitration System

ZHANG Hong-min<sup>1</sup>, NIU Hai-ming<sup>1</sup>, MA Zeng-hui<sup>2</sup>

(1. Beijing Engineering Research Center of Power Station Automation, CHN Energy Zhishen Control Technology

Co., Ltd., Beijing, China, Post Code:102200; 2. College of Ocean Information Engineering,

Hainan Tropical Ocean University, Sanya, China, Post Code:572022)

**Abstract:** The deep peak regulation of thermal power units intensifies the disturbance of selective catalytic reduction(SCR) denitration system. In this paper, a linear active disturbance rejection robust PID control method is proposed. The 2nd-order linear active disturbance rejection control (LADRC) can be approximated as PID or equivalent to the structure of ideal PID plus 2nd-order filter. The structure of actual PID plus 2nd-order filter is used to control SCR denitration system with strong disturbance and uncertainty. The parameters of actual PID and 2nd-order filter are tuned by robust control design method. The simulation results show that the structure of actual PID plus 2nd-order filter has better disturbance rejection performance, and better inherits the characteristics of LADRC. Its control performance is better than the PID control derived directly from LADRC.

**Key words:** deep peak regulation, SCR, LADRC, robust control, second-order filter, disturbance rejection

收稿日期:2021-10-11; 修订日期:2021-11-04

基金项目:北京市科技计划项目(Z201100004520027);海南热带海洋学院科研项目(RHDC202004)

**Fund-supported Project:** Beijing Science and Technology Planning Project(Z201100004520027); Hainan Tropical Ocean University Initial Scientific Research Fund(RHDC202004)

作者简介:张洪敏(1981-),女,河南新乡人,国能智深控制技术有限公司(北京市电站自动化工程技术研究中心)工程师。

通讯作者:马增辉(1977-),男,陕西绥德人,海南热带海洋学院高级工程师。

## 引 言

随着我国能源转型的进一步推进,可再生能源大规模建设和投运,为了确保可再生能源的消纳能力以及电网的稳定运行,大型火电机组势必要承担起电网深度调峰的重任。机组负荷快速、大范围的波动,会引起锅炉燃烧状况以及烟气中  $\text{NO}_x$  质量分数的剧烈变化,从而加剧对 SCR 烟气脱硝系统的干扰。因此,如何提高 SCR 喷氨系统的抗扰性,使其满足各项环保指标以及机组深度调峰的需求,得到了广泛关注。秦天牧等人<sup>[1]</sup>提出了自适应智能前馈控制策略,实现了喷氨量的精确调整;杨婷婷等人<sup>[2]</sup>以超低排放和经济成本为目标函数,结合神经网络采用预测控制结构实现了喷氨量的优化调整;牛玉广等人<sup>[3]</sup>改进了喷氨格栅的结构并提出了单神经元自适应-模拟退火控制方案;黄宇等人<sup>[4]</sup>采用线性自抗扰控制作为主调,与原有的副调 PID 重新构成串级控制系统;唐振浩等人<sup>[5]</sup>提出了混合数据驱动的 SCR 动态建模方案;许壮等人<sup>[6]</sup>将主成分分析和随机森林相结合建立 SCR 预测模型。由于控制结构和计算比较复杂,还需要对大量的历史数据进行学习,因此实现分布式控制系统(DCS)组态有一定的困难。

自抗扰控制(active disturbance rejection control, ADRC)是结合 PID 技术、跟踪微分器、扩张状态观测器等提出的一种新型控制方法,最大的特点就是只需要知道对象的相对阶和低频增益,无需知道被控对象精确的数学模型。自抗扰控制的工作原理是将被控对象的内扰和外扰视作“总扰动”,设计扩张状态观测器(extended state observe, ESO)进行估计和补偿,然后利用状态反馈控制律进行控制。抗扰性是自抗扰控制的基本特点,更是不变性原理在自抗扰控制中的具体表现<sup>[7]</sup>。文献[8]从原理上分析了自抗扰控制与 PID 的关系;文献[9]提出了 PID 和 ADRC 之间的参数转换公式。线性自抗扰控制(linear active disturbance rejection controller, LADRC)是自抗扰控制的线性化版本<sup>[10]</sup>,周蓉等人<sup>[11]</sup>证明了线性自抗扰反馈控制器与带积分的正则传递函数之间的等价关系,从而表明了线性自抗扰控制的通用性,并给出了将 PID 转化为 2 阶线性

自抗扰控制的方法<sup>[11-12]</sup>。同样,也可以由 2 阶线性自抗扰控制器导出实际 PID 控制参数<sup>[13]</sup>。控制结构改变后,由 2 阶 LADRC 得出的 PID 控制器能否充分发挥 ADRC 的潜在优势值得商榷。

目前,在工业控制中占统治地位的仍然是 PID 控制。为了推广自抗扰控制在实际工程中的应用,很多学者对自抗扰控制和 PID 之间的关系进行了比较深入的探讨,其中有两种观点最具代表性。一是 2 阶线性自抗扰控制可以直接近似为 PID,可由 2 阶线性自抗扰控制直接导出 PID 参数<sup>[13]</sup>;二是指出 2 阶线性自抗扰控制实际上是理想 PID + 2 阶滤波器的结构<sup>[14]</sup>。本文采用实际 PID + 2 阶滤波器的结构,应用于受强干扰影响的 SCR 脱硝系统的控制,采用灵敏度函数的方法整定 PID 和 2 阶滤波器参数,并与文献[13]中提出的方法进行对比。仿真结果表明,实际 PID + 2 阶滤波器结构的控制性能,尤其是抗扰性优于由 2 阶 LADRC 直接近似得到的 PID 控制。采用灵敏度函数整定的实际 PID + 2 阶滤波器的控制结构不仅具有鲁棒 PID 控制的特点,而且发挥了 LADRC 在抗扰性方面的优势,其组态方便、易于整定,在工业过程中应当具有更好的应用前景。

## 1 线性自抗扰控制

自抗扰控制将被控对象的所有不确定因素都看作未知扰动,设计扩张状态观测器 ESO 和反馈控制律进行估计、补偿和控制。非线性自抗扰控制结构非常复杂,需要整定的参数也较多,难以在工程应用中推广。

文献[15]突破了自抗扰控制在应用方面的诸多限制,不仅简化了 ADRC 的结构,提出了线性自抗扰控制(LADRC),而且提出了 LADRC 的带宽整定方法,将 LADRC 参数的整定问题归结为控制器带宽  $\omega_c$ 、观测器带宽  $\omega_o$  以及控制增益  $b_0$  3 个参数的优化选择问题。

LADRC 系统结构如图 1 所示。LESO(linear extended state observe)是线性扩张状态观测器, LSEF(linear state error feedback)为线性状态误差反馈,  $r$  为系统设定值,  $y$  为系统输出,  $u$  为控制器输出,  $b_0$  为控制增益  $b$  的估计,  $z_1, z_2, z_3$  为系统内外扰动的状

态估计。

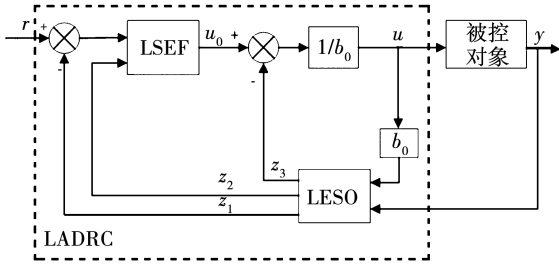


图 1 线性自抗扰系统结构

Fig. 1 Structure of the LADRC system

对于线性定常系统的自抗扰控制,控制器带宽  $\omega_c$  和观测器带宽  $\omega_0$  的整定,等价于在对象参数不确定时,通过调整系统开环零、极点的位置,合理配置系统闭环极点,确保整个系统的稳定性和所期望的动态性能。一般选取  $\omega_0 > \omega_c$ ,为了参数整定方便,减少待调参数的个数,也可以令  $\omega_c = \omega_0$ 。当  $\omega_c = \omega_0$  时,得到的 LADRC 控制器对于对象参数的变化同样不敏感,具有较好的鲁棒性<sup>[16]</sup>。

为了进一步推广线性自抗扰控制的应用,文献[13]指出线性自抗扰控制 LADRC 能够近似为 PID 控制,2 阶线性自抗扰控制器实际上是一个带积分作用的 3 阶严格正则控制器,其传递函数为:

$$C_L(s) = \frac{c_2 s^2 + c_1 s + c_0}{s(a_2 s^2 + a_1 s + a_0)} \quad (1)$$

式中:  $a_0, a_1, a_2, c_0, c_1, c_2$  —不为零的常数。

实际 PID 控制器为:

$$C_{PID}(s) = k_p \left( 1 + \frac{1}{T_i s} + \frac{T_d s}{(T_d/N)s + 1} \right) \quad (2)$$

式中:  $k_p$ —PID 的比例系数;  $T_i$ —积分时间;  $T_d$ —微分时间;  $T_d/N$ —微分滤波时间常数;  $N$ —正整数。

将式(1)的 3 阶控制器近似为式(2)的实际 PID 控制,由于式(2)分母是 2 阶的,可以将式(1)中的  $a_2 s^2$  项去掉,得到:

$$C'_L(s) = \frac{c_2 s^2 + c_1 s + c_0}{s(a_1 s + a_0)} \quad (3)$$

比较式(2)和式(3)可得:

$$k_p = \frac{c_0 T_i}{a_0} \quad (4)$$

$$T_i = \frac{c_1}{c_0} - \frac{a_1}{a_0} \quad (5)$$

$$T_d = \frac{c_2}{c_0 T_i} - \frac{a_1}{a_0} \quad (6)$$

$$N = T_d \frac{a_0}{a_1} \quad (7)$$

至此,完成了 2 阶线性自抗扰控制 LADRC 到实际 PID 控制的近似,可以由基于带宽方法整定好的 LADRC 参数直接得出相应的 PID 控制器参数。该整定方法虽然物理意义明确,调试简单,但是并不能充分发挥自抗扰控制 ADRC 潜在的优越性,尤其是非线性机制的潜在优势<sup>[17]</sup>,控制效果值得商榷;由 LADRC 直接近似为 PID 控制,尽管组态方便,但并没有充分发挥出自抗扰控制的特点;控制器增益  $b_0$  较其他参数对控制系统性能的影响更大<sup>[17]</sup>。

线性自抗扰控制(LADRC)不同于常规 PID 控制器直接对系统输出与设定值之间的偏差  $e$  进行运算(积分和微分),而是利用扩张状态观测器(ESO)对引起系统输出变化的一切扰动进行估计和补偿,避免了误差  $e$  积分反馈的副作用。另外,2 阶线性自抗扰控制器实际上由理想 PID + 2 阶滤波器构成<sup>[14]</sup>,如式(8)~式(10),其中式(9)是理想 PID,式(10)是 2 阶滤波器:

$$C_{LADRC}(s) = C_{PID}^*(s) F(s) \quad (8)$$

$$C_{PID}^*(s) = k_p \left[ 1 + \frac{1}{T_i s} + T_d s \right] \quad (9)$$

$$F(s) = \frac{k_f}{(T_1 s + 1)(T_2 s + 1)} \quad (10)$$

式中:  $T_1, T_2$ —2 阶滤波器的时间常数。

2 阶线性自抗扰控制是由理想 PID + 2 阶滤波器构成,选取合适的目标函数,直接整定实际 PID + 2 阶滤波器式(11):

$$C_{LADRC}(s) = C_{PID}(s) F(s) \quad (11)$$

## 2 SCR 脱硝系统自抗扰鲁棒 PID 控制

### 2.1 SCR 脱硝系统

超超临界机组燃煤锅炉 SCR 烟气脱硝系统如图 2 所示<sup>[1]</sup>。SCR 烟气脱硝系统处于锅炉省煤器与空气预热器之间。氨气站产生的氨气与稀释空气充分混合后,经过喷氨调节阀喷入烟道,在催化剂  $V_2O_5/TiO_2$  的作用下发生选择性催化还原反应,将烟气中的  $NO_x$  还原为无毒无害的  $N_2$  和  $H_2O$ ,从而达到火电厂烟气脱硝的目的。

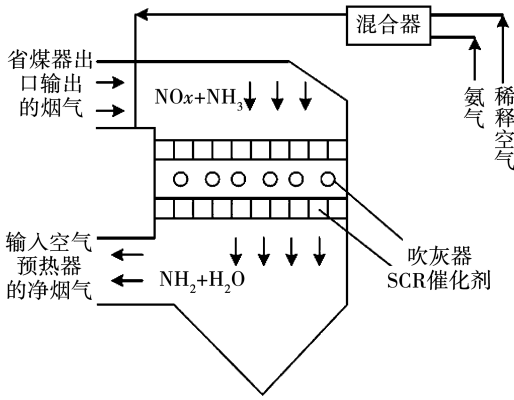


图 2 SCR 烟气脱硝系统  
Fig. 2 SCR denitration system

SCR 烟气脱硝系统的控制目标有两个,一是确保出口烟气  $\text{NO}_x$  质量浓度在环保要求的标准范围内;二是应尽量控制氨气逃逸率。因此,在确保机组脱硝效率的前提下,需要设计精确的 SCR 脱硝自动喷氨系统。然而,煤质、机组负荷、燃烧工况、入口  $\text{NO}_x$  质量浓度、反应温度、催化剂活性、烟气流场、喷氨格栅的布置、烟气反应及测量的滞后性等都会给 SCR 脱硝系统造成干扰,因此 SCR 烟气脱硝系统呈现强干扰、不确定的特点。

### 2.2 SCR 脱硝系统自抗扰鲁棒 PID 控制

SCR 脱硝系统自抗扰鲁棒 PID 控制结构如图 3 所示。其中,  $F(s)$  为 2 阶滤波器,  $C(s)$  为实际 PID 控制器,  $G(s)$  为被控对象,  $D(s)$  为扰动通道传递函数。2 阶线性自抗扰控制器实际上是由理想 PID + 2 阶滤波器构成,采用鲁棒控制器设计方法,选择合理的目标函数设计  $C(s)$  及  $F(s)$  的参数,以突出控制系统的鲁棒性和抗扰性。

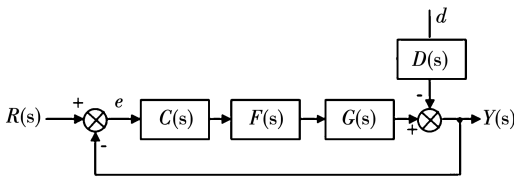


图 3 SCR 脱硝系统线性自抗扰 PID 控制  
Fig. 3 LADRC PID control system of SCR denitration system

### 2.3 鲁棒控制器设计

基于混合灵敏度进行鲁棒控制器设计的根本问题实际上是加权函数的选择问题。对于标准的  $H_\infty$

控制问题,控制器需要满足:

$$\left\| \begin{matrix} W_1(s)S(s) \\ W_2(s)C(s)S(s) \\ W_3(s)T(s) \end{matrix} \right\|_\infty < 1 \quad (12)$$

$$S(s) = E(s)R^{-1}(s) = [I + C(s)G(s)]^{-1} \quad (13)$$

式中:  $W_1(s), W_2(s), W_3(s)$  — 加权函数;  $C(s)$  — 控制器模型;  $S(s)$  — 灵敏度函数;  $T(s)$  — 补灵敏度函数。

$$T(s) = 1 - S(s) \quad (14)$$

灵敏度和补灵敏度是鲁棒控制器设计中评价控制系统性能的主要指标。其中,灵敏度是评价系统设定值跟踪能力的指标,灵敏度越低,系统的定值跟踪能力越强,误差越小,控制系统性能也越好;补灵敏度是决定系统鲁棒稳定性的指标,可以通过调整加权函数  $W_3(s)$  来抑制系统的不确定性,  $W_3(s)$  越大对系统不确定性的抑制越强。

倘若被控对象含有大滞后环节  $e^{-\tau s}$ ,则加权函数可以选择为超前环节:

$$W_i(s) = \frac{k_i(m_i s + 1)}{n_i s + 1}, m_i > n_i, i = 1, 2, 3 \quad (15)$$

参数设计时灵敏度和补灵敏度加权函数的选择相互影响,往往折中取值。

如果  $H(s)$  是控制系统所期望的闭环动态特性,则依据  $H(s)$  可以得到控制系统所期望的性能指标,如阶跃响应指标衰减率  $\phi(x)$ 、超调量  $M_p$  和上升时间  $t_r$  等。令  $T(s) = H(s)$ ,选择合适的性能指标作为目标函数,就可以对控制系统的各项参数进行优化调整。

SCR 脱硝系统是受强干扰的系统,抗扰性也是自抗扰控制的突出特点。在机组实际考核运行当中,一旦 SCR 出口  $\text{NO}_x$  质量浓度受到强干扰发生波动,超标的时间越短越好。因此,为了兼顾系统的过渡过程时间,还可以选取时间与绝对误差乘积积分指标 ITAE 做为系统的性能指标,采用遗传算法求解:

$$\text{ITAE} = \int_0^\infty t |e(t)| dt \quad (16)$$

式中:  $e(t)$  — 闭环系统输出与设定值之间的误差。

### 3 仿真实验

某火电厂 600 MW 超临界燃煤机组 SCR 烟气脱硝系统数学模型如式 (17) 和 (18)<sup>[18]</sup>, 该模型的时间单位是 min。

对图 3 的控制系统进行仿真, 其中控制通道、系统输入喷氨量(喷氨调门开度)与系统输出 SCR 出口 NO<sub>x</sub> 质量浓度(被调量)之间的传递函数  $G(s)$  为:

$$G(s) = \frac{-0.227}{0.304s + 1} e^{-0.5s} \quad (17)$$

扰动通道、输入变量 SCR 入口 NO<sub>x</sub> 质量浓度与系统输出 SCR 出口 NO<sub>x</sub> 质量浓度(被调量)之间的传递函数  $D(s)$  为:

$$D(s) = \frac{3.617714}{s + 0.5} = \frac{7.235428}{2s + 1} \quad (18)$$

采用图 3 的控制系统进行仿真实验, PID 控制器如式(2), 2 阶滤波器如式(10), 控制对象  $G(s)$  和扰动传递函数  $D(s)$  如式(17)和(18)所示。

#### 3.1 设定值跟踪和抗扰动实验

忽略滤波器  $F(s)$ , 采用 2 阶 LADRC 直接近似得到 PID 控制器参数。针对式(17)的被控对象  $G(s)$ , 采用文献[19]中的鲁棒性指标整定方法可以得到 2 阶 LADRC 控制器的参数为  $\omega_c = 9.744$ ,  $\omega_0 = 15.664$ ,  $b_0 = -32.05$ 。

由 2 阶 LADRC 的参数可以得到 2 阶 LADRC 控制器的传递函数为<sup>[13]</sup>:

$$G_L'(s) = -\frac{0.5115s^2 + 3.104s + 1.387}{s(2s + 1)} \quad (19)$$

从而可以得到近似的 PID 控制器参数为  $k_p = -0.33$ ,  $T_i = 0.2379$ ,  $T_d = -0.45$ ,  $N = -0.225$ 。

采用 PID + 2 阶滤波器的结构, 利用鲁棒灵敏度函数的设计方法, 整定得到实际 PID 和 2 阶滤波器的参数为  $k_p = -1.452$ ,  $T_i = 0.61$ ,  $T_d = -0.826$ ,  $N = -0.0413$ ,  $k_f = 1.26$ ,  $T_1 = 0.01$ ,  $T_2 = 0.01$ 。

图 4 是以上两种方法设定值跟踪的仿真结果。两种方法都可以在无超调的情况下跟踪设定值, 但是实际 PID + 2 阶滤波器控制的响应速度更快, 上升时间  $t_r$  和调节时间  $t_s$  更短。综合来看, 实际 PID + 2 阶滤波器的控制性能要优于由 2 阶 LADRC 直接近

似得到 PID 参数的控制。

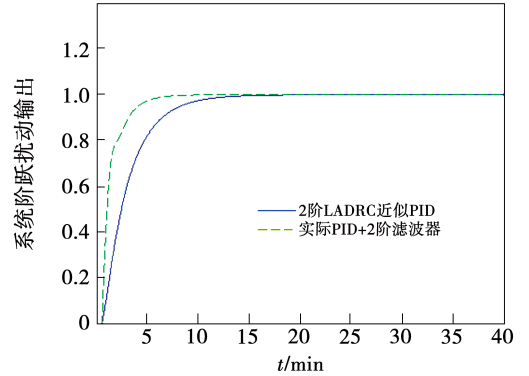


图 4 设定值跟踪仿真结果

Fig. 4 The test results of setpoint tracking

图 5 是以上两种方法的扰动测试仿真结果, 在 50 min 时加入阶跃扰动  $d$ , 实际 PID + 2 阶滤波器的扰动抑制效果更好, 超调量更小, 过渡过程时间也更短。

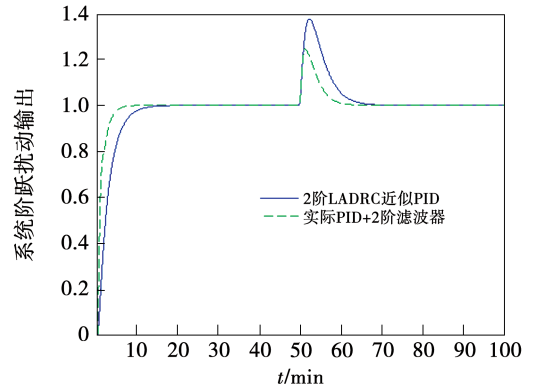


图 5 扰动测试结果

Fig. 5 The test results with disturbance

#### 3.2 鲁棒性测试

除了良好的设定值跟踪能力和突出的扰动抑制能力之外, 鲁棒性也是衡量控制系统性能的重要方面, 在工程应用中尤为重要。当机组承担深度调峰任务, 负荷大范围波动, 控制对象参数也发生较大范围的跃变时, 控制系统是否能维持原来的性能适应火电机组深度调峰的需要, 这一点非常关键。

本文采用蒙特卡洛方法构造与系统参数相近似的概率模型, 并在计算机仿真系统中进行随机试验, 以达到模拟系统的随机特性、验证系统鲁棒性的目的。

首先,使控制对象  $G(s)$  和扰动传递函数  $D(s)$ ,即式(16)和(17)的各项参数,包括比例系数、时间常数、纯滞后时间,同时相对于标称值在  $\pm 20\%$  的范围内随机摄动,得到 30 组随机模型,其中包含参数摄动  $\pm 20\%$  的情况。30 组随机模型阶跃扰动下的仿真结果如图 6 所示。可以看出,当控制对象  $G(s)$  和扰动传递函数  $D(s)$  参数发生变化时,SCR 系统实际 PID + 2 阶滤波器鲁棒控制具有较好的鲁棒性。

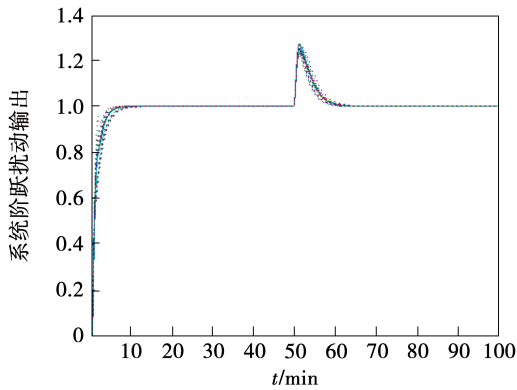


图 6 鲁棒性测试

Fig. 6 Robustness test results

## 4 结 论

(1) 实际 PID + 2 阶滤波器的结构更好地继承了自抗扰控制的抗扰性,其控制性能和抗扰性优于由 2 阶线性自抗扰控制(LADRC)直接近似导出的 PID 控制。

(2) 针对 SCR 脱硝系统的大惯性、大迟延,以及火电机组深度调峰带来的强干扰,本文以实际 PID + 2 阶滤波器等价 2 阶线性自抗扰控制,采用灵敏度函数方法完成实际 PID 和 2 阶滤波器的参数整定。该方法结构简单、易于在 DCS 中组态实现和整定、鲁棒性好、抗干扰能力强,能够适应火电机组负荷的大范围波动,具有更好的工程应用前景。

## 参考文献:

[1] 秦天牧,尤 默,张瑾哲,等.基于自适应智能前馈的 SCR 脱硝系统优化控制[J].中国电机工程学报,2019,39(S1):186-192.

QIN Tian-mu, YOU Mo, ZHANG Jin-zhe, et al. Optimal control of

SCR denitration system based on self-adaptive intelligent feedforward[J]. Proceedings of the CSEE, 2019, 39(S1): 186-192.

- [2] 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. Study on multi-objective optimal control of SCR denitrification system[J]. Proceedings of the CSEE, 2021, 41(14): 4905-4911.
- [3] 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[J].控制理论与应用,2019,36(1):65-72.  
NIU Yu-guang, PAN Yan, CHEN Xi. Depth structure control and depth control of selective catalytic reduction flue gas denitration system[J]. Control Theory & Applications, 2019, 36(1): 65-72.
- [4] 黄 宇,张伟婷,金秀章,等.SCR 脱硝系统的线性自抗扰串级控制研究[J].中国电机工程学报,2018,38(18):5518-5526.  
HUANG Yu, ZHANG Wei-ting, JIN Xiu-zhang, et al. Linear active disturbance rejection cascade control of SCR denitration system [J]. Proceedings of the CSEE, 2018, 38(18): 5518-5526.
- [5] 唐振浩,王世魁,曹生现,等.基于混合数据驱动算法的 SCR 氮氧化物排放量动态预测模型[J/OL].中国电机工程学报:1-12 [2021-08-12]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.2107.tm.20210705.1434.003.html>.  
TANG Zhen-hao, WANG Shi-kui, CAO Sheng-xian, et al. Dynamic prediction model for NO<sub>x</sub> emission of SCR system based on hybrid data-driven algorithms[J/OL]. Proceedings of the CSEE, 1-12 [2021-08-12]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.2107.tm.20210705.1434.003.html>.
- [6] 许 壮,康英伟.基于随机森林的火电机组 SCR 脱硝反应器建模[J].动力工程学报,2020,40(6):486-491,501.  
XU Zhuang, KANG Ying-wei. Modeling of the SCR denitration reactor in a thermal power unit based on random forest algorithm [J]. Journal of Chinese Society of Power Engineering, 2020, 40(6): 486-491, 501.
- [7] 李向阳,高志强.抗扰控制中的不变性原理[J].控制理论与应用,2020,37(2):236-244.  
LI Xiang-yang, GAO Zhi-qiang. The invariance principle in disturbance rejection control [J]. Control Theory & Applications, 2020, 37(2): 236-244.
- [8] HAN J Q. From PID to active disturbance rejection control[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2009, 56(3): 900-906.
- [9] ZHONG Sheng, HUANG Yi, GUO Lei. A parameter formula connecting PID and ADRC [J]. Science China (Information Sciences), 2020, 63(9): 175-187.
- [10] GAO Z Q. Active disturbance rejection control: a paradigm shift in feedback control system design [J]. Proceedings of American Control Conference. Minneapolis, MN, USA: IEEE, 2006: 2399-2405.