

DOI: 10.19666/j.rlfed.202406158

过热汽温系统改进自抗扰控制及其 工程应用研究

王永¹, 史耕金¹, 吴振龙²

(1. 中国电力国际发展有限公司, 北京 100080;

2. 郑州大学电气与信息工程学院, 河南 郑州 450001)

[摘要] 过热汽温对于燃煤机组的安全性、经济性十分重要, 然而, 由于过热汽温系统的大惯性和强不确定性使得其控制难度较大。为此, 提出了一种基于改进自抗扰控制的串级控制结构, 内环采用常规 PI 控制器, 外环采用改进自抗扰控制器, 并给出了改进自抗扰控制的工程整定方法, 同时针对补偿环节时间常数难以得到的难点, 设计了基于响应曲线的补偿环节时间常数优化方法。最后通过对比仿真和实际工程应用, 验证了所提控制策略在大范围变负荷下的设定值跟踪和抗干扰性能的优势, 工程应用的运行数据显示所提方法能够保证更小的偏差、平均绝对偏差与偏差标准差, 具有明显的优势和工程应用潜力。

[关键词] 过热汽温系统; 改进自抗扰控制; 参数整定; 工程应用

[引用本文格式] 王永, 史耕金, 吴振龙. 过热汽温系统改进自抗扰控制及其工程应用研究[J]. 热力发电, 2025, 54(3): 150-157. WANG Yong, SHI Gengjin, WU Zhenlong. Research on modified active disturbance rejection control and its engineering application for superheated steam temperature system[J]. Thermal Power Generation, 2025, 54(3): 150-157.

Research on modified active disturbance rejection control and its engineering application for superheated steam temperature system

WANG Yong¹, SHI Gengjin¹, WU Zhenlong²

(1. China Power International Development Limited, Beijing 100080, China;

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

Abstract: Superheated steam temperature is crucial for safety and economy of coal-fired power units. However, the large inertia and strong uncertainty of superheated steam temperature system make it difficult to control. To solve these difficulties, a cascade control structure based on modified active disturbance rejection control is proposed. The inner loop uses a conventional PI controller and the outer loop uses a modified active disturbance rejection controller. An engineering tuning method for modified active disturbance rejection control is provided, and a response curve to optimize the compensation time constant is designed to address the difficulty of obtaining the compensation time constant. Finally, the advantages of the proposed control strategy in tracking and disturbance rejection performance under large-scale variable loads are verified through comparative simulations and practical engineering applications. The operational data of engineering applications shows that the proposed method can ensure smaller maximum positive and negative deviations, average absolute deviation, and deviation standard deviation, which has significant advantages and potential for engineering applications.

Key words: superheated steam temperature system; modified active disturbance rejection control; parameter tuning; engineering application

收稿日期: 2024-06-05 网络首发日期: 2024-11-27

基金项目: 国家自然科学基金项目(52106030); 电力系统国家重点实验室开放课题(SKLD21KM14); 郑州大学教授团队助力企业创新驱动发展专项(JSZLQY2022016)

Supported by: National Natural Science Foundation of China (52106030); Open Project of State Key Lab of Power Systems (SKLD21KM14); Zhengzhou University Professor Team for Enterprise Innovation-Driven Development Project (JSZLQY2022016)

第一作者简介: 王永(1984), 男, 工程师, 主要研究方向为火电机组运行与控制, wangyong@cpibj.com.cn.

通信作者简介: 吴振龙(1992), 男, 博士, 副教授, 主要研究方向为自抗扰控制及其工程应用, wuzhenlong2020@zzu.edu.cn.

过热汽温是燃煤机组安全、稳定和经济运行的关键参数之一。过热汽温过高或过低,将对机组造成不可逆的损害。若汽温过高,则管道容易发生爆裂;若汽温过低,则机组整体热效率下降。大部分燃煤机组的二级过热汽温应设定在 500~620 °C 之间,为了保证燃煤机组的运行经济性和安全性,理想情况下汽温与其设定值之间的偏差应在 ± 5 °C^[1]。为了构建新型电力系统,越来越多的燃煤机组参与深度调峰,大范围升降负荷对过热汽温的控制带来了更大的难度。

然而,过热汽温系统涉及烟气的对流换热、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特性^[2],这对于过热汽温系统的控制带来巨大的挑战。热工控制中为了描述过热汽温系统的动态特性,一般采用 $G_p(s)=K/(Ts+1)^n$ 进行描述,其中 K 、 T 和 $n \in [3,5]$ 分别为过热汽温系统的稳态增益、时间常数和阶次。

为了提升过热汽温系统对于由于负荷升降、其他未知扰动等带来温度波动的抑制能力,许多学者针对过热汽温系统设计了不同的控制策略。文献[3]提出了面向过热汽温系统的具有比例-积分-微分 (proportional integral derivative, PID) 补偿环节的控制策略,用于提升变负荷过程中的汽温偏差抑制能力。文献[4]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。结合高阶滑模观测器,文献[5]构建了非线性抗干扰控制方法,仿真验证了所提方法在抑制多种扰动和维持过热汽温稳定的能力。为了提升燃煤机组过热汽温控制系统在自启停控制系统中的设定值跟踪能力,文献[6]设计了包含扰动前馈的多模型阶梯式预测控制策略,并通过仿真验证了该策略的有效性。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逐步开始尝试设计^[7-9]。文献[7]提出一种基于物理引导神经网络的预测前馈信号模型用于提升过热汽温系统的响应速度。文献[8]设计了基于深度神经网络的动态前馈控制策略,提高了过热器蒸汽出口温度波动的抑制能力。文献[9]设计了基于长短时记忆神经网络的动态模型与模型预测控制的先进控制策略,实现了大范围变工况下的汽温波动范围有效缩小。尽管 PID 具有算法可靠、参数易于整定、工程易于实现等优点,但由于其依赖误差反馈,对于非线性、大惯性系统的控制能力有限^[10]。依赖精确数学模型

的模型预测控制在标称工况下具有满意的控制品质,然而当过热汽温系统偏离标称工况,其控制品质有明显下降。尽管神经网络在动态特性拟合方面性能突出,然而其现场部署和实际应用依旧面临着较大的挑战。

综上所述,过热汽温系统的控制器应该具有强抗干扰能力、鲁棒性和不依赖精确数学模型,并具有易于实现的特性。近年来,自抗扰控制 (active disturbance rejection control, ADRC) 由于具有强抗干扰能力、鲁棒性、不依赖精确数学模型和易于实现的优点得到广泛应用。ADRC 已经成功应用在燃煤机组脱硝系统^[11]、主蒸汽压力系统^[12]、大延迟系统^[13-14]、加热器水位系统^[15]、压电智能结构系统^[16]、湿式烟气脱硫系统^[17]、机器人系统^[18]、汽包水位系统^[19]和光伏逆变器母线电压控制系统^[20]等。此外,ADRC 也尝试在过热汽温系统中进行应用,文献[21-23]分别报道了基于人群搜索算法优化的 ADRC、多目标粒子群算法优化的 ADRC 和改进 ADRC (modified active disturbance rejection control, MADRC) 在过热汽温系统中的应用。上述文献中提到的 ADRC 都是针对模型已知工况下设计的,然而由于过热汽温系统频繁受到其他回路的干扰,使得其高阶惯性传递函数模型难以通过开环响应曲线获得。本文关注模型未知的情况下基于闭环曲线下优化 MADRC 参数,并将 MADRC 应用在实际机组中,通过实际机组的过热汽温系统的运行数据验证 MADRC 的性能提升。

1 过热汽温系统工作原理

燃煤机组过热汽温系统如图 1 所示。由图 1 可见,过热汽温系统包含有一级过热汽温系统和二级过热汽温系统,后者的出口温度比前者的出口温度要高很多,控制难度也更大,并且其出口温度的稳定对于机组的经济性和安全性都十分重要。因此,本文研究二级过热汽温系统的控制。

二级减温水阀布置在二级过热器之前和屏式过热器之后,用于精准调节过热蒸汽的温度。二级过热汽温系统采用串级控制结构如图 2 所示。图 2 中:二级过热器的入口温度和出口温度分别为串级控制结构中的 y_1 和 y_2 ; 二级减温水阀开度为 u_1 ; d_1 和 d_2 分别为二级过热汽温系统的副对象和主对象受到的外部扰动;此外, $G_1(s)$ 和 $G_2(s)$ 分别为串级控制结构中的副对象和主对象。

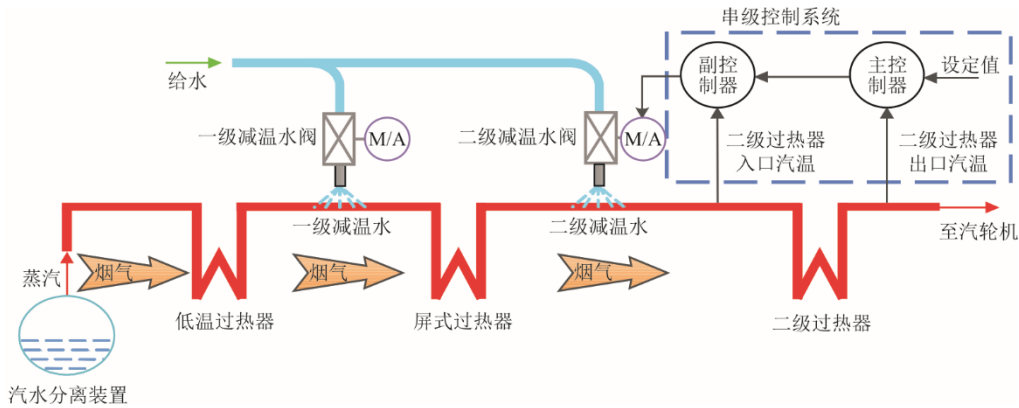


图 1 燃煤机组过热汽温系统示意

Fig.1 Schematic diagram of superheated steam temperature system

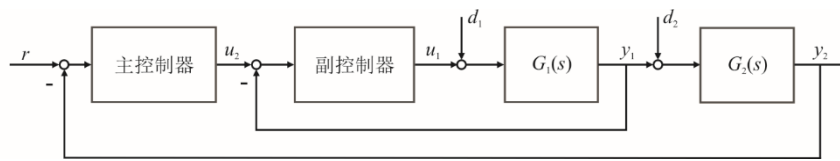


图 2 过热汽温串级控制结构

Fig.2 The cascade control structure of superheated steam temperature

2 改进自抗扰控制原理

常规 ADRC 已经得到广泛的应用，然而在应对具有大惯性和高阶特性的过热蒸汽系统时存在带宽受限的问题，造成扩张状态观测器 (extended state observer, ESO) 收敛性较慢，使得控制品质下降。文献[11]从控制量输入延迟角度出发提出 MADRC 的结构，通过设计补偿环节实现控制量和输出量的同步，从而提高 ESO 的带宽上限，提升具有大惯性和高阶特性的过热蒸汽系统的控制品质。

针对采用高阶传递函数 $G_p(s)=K/(Ts+1)^n$ 描述的过热蒸汽系统，选择补偿环节为：

$$G_{cp}(s) = \frac{1}{(\tilde{T}s+1)^{n-1}} \quad (1)$$

式中： \tilde{T} 为补偿环节的时间常数，理想工况下 $\tilde{T}=T$ ，补偿环节的输出为 u_f ，

式(1)等价于：

$$y = \frac{K}{(Ts+1)^n} u = \frac{K}{Ts+1} u_f \quad (2)$$

可以得到：

$$\tilde{y} = \frac{1}{T} y + \frac{K}{T} u_f \quad (3)$$

考虑到过热蒸汽系统的 K/T 随着工况变化而波动，并不能精确已知。定义 b_0 为式(3)中的系统增益，式(3)等价于：

$$\tilde{y} = b_0 u_f + \frac{1}{T} y + \left(\frac{K}{T} - b_0 \right) u_f = b_0 u_f + f \quad (4)$$

式中： $f = \frac{1}{T} y + \left(\frac{K}{T} - b_0 \right) u_f$ 为过热汽温系统的“总扰动”， f 可以通过 ESO 进行估计：

$$\begin{cases} \dot{z}_1 = z_2 + \beta_1 (y - z_1) + b_0 u_f \\ \dot{z}_2 = \beta_2 (y - z_1) \end{cases} \quad (5)$$

式中： β_1 和 β_2 均为观测器增益； z_1 和 z_2 均为 ESO 的输出。在 β_1 和 β_2 合理整定时， z_1 和 z_2 可以分别跟踪 y 和 f [24]。为了简化 β_1 和 β_2 的整定，文献[25]提出了基于参数带宽化的简化方法：

$$\begin{cases} \beta_1 = 2\omega_0 \\ \beta_2 = \omega_0^2 \end{cases} \quad (6)$$

式中： ω_0 为 ESO 的带宽。

基于 z_1 和 z_2 ，设计控制律如下：

$$u = \frac{k_1 (r - z_1) - z_2}{b_0} \quad (7)$$

式中： k_1 和 r 分别为控制律的增益和过热汽温系统的设定值。MADRC 的控制结构如图 3 所示。此时需要整定的 MADRC 参数为 b_0 、 ω_0 和 k_1 。

基于大量仿真的经验，本文总结了适用于 MADRC 的参数整定流程 (图 4)，具体步骤如下。

1) 需要首先固定 b_0 ，推荐 b_0 的值位于区间 $[K/2T, \infty]$ 。

2) 固定较小的 k_1 和 ω_0 , 然后逐步增加 ω_0 直到控制效果不发生明显改变时, ω_0 选择该值。 ω_0 的合理区间在[0.3, 0.6]。

3) 此时逐步增加 k_1 , 直到闭环系统达到满意的控制效果。如果控制效果满意, 则停止, 否则重复步骤 1)~步骤 3)。

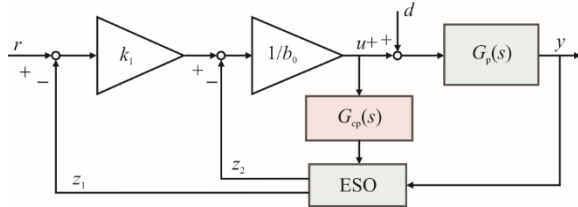


图3 MADRC 的控制结构
Fig.3 The control structure of MADRC

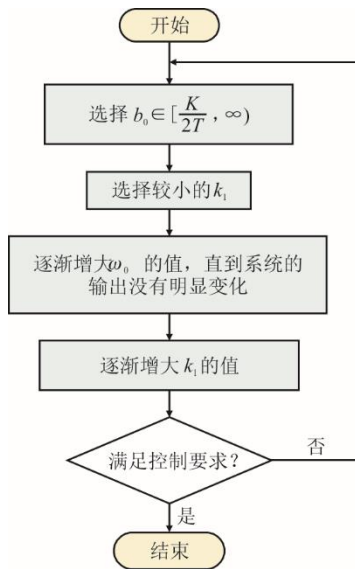


图4 MADRC 的控制结构
Fig.4 The control structure of MADRC

需要说明的是, 上述 MADRC 设计和参数整定是基于 $\tilde{T} = T$ 下展开的。在实际应用过程, 过热汽温系统频繁受到其他回路干扰, 使得其高阶惯性传递函数模型难以通过开环响应曲线获得。在这种情况下, 补偿环节中 \tilde{T} 仅能根据响应曲线进行整定。

根据 MADRC 的设计目标, \tilde{T} 的变化主要影响控制信号与系统输出之间的同步性。对于过热汽温系统而言, 最理想的情况是, 当汽温开始出现上升趋势时, 减温水阀门开度应增大开度避免超温; 当汽温开始出现下降趋势时, 减温水阀门开度应减小避免温度过低。

下面通过仿真说明不同 \tilde{T} 对于 MADRC 的过热汽温控制效果影响。考虑文献[23]给出的过热汽温

主对象与副对象的传递函数模型分别为:

$$G_1(s) = \frac{-1.726}{(19.775s + 1)^2} \tag{8}$$

$$G_2(s) = \frac{1.474}{(28.774s + 1)^4} \tag{9}$$

主控制器和副回路的控制器分别采用 MADRC 和 PI 控制器。需要说明的是, 主控制器的设计是基于内回路与主对象的等效传递函数, 传递函数为:

$$G_{eq}(s) = \frac{1.474}{(35s + 1)^4} \tag{10}$$

内回路 PI 控制器参数分别为 $k_{p1}=-1$ 和 $k_{i1}=-1/40$; MADRC 参数为 $k_1=0.032$ 、 $\omega_0=0.5$ 、 $b_0=0.04$, 基于上述参数分析不同 \tilde{T} 对于 MADRC 的过热汽温控制效果影响, 结果如图 5 所示。仿真过程中, 设定值在 100 s 时给定单位阶跃, 并分别在 1 000 s 与 2 000 s 时添加内外回路扰动。

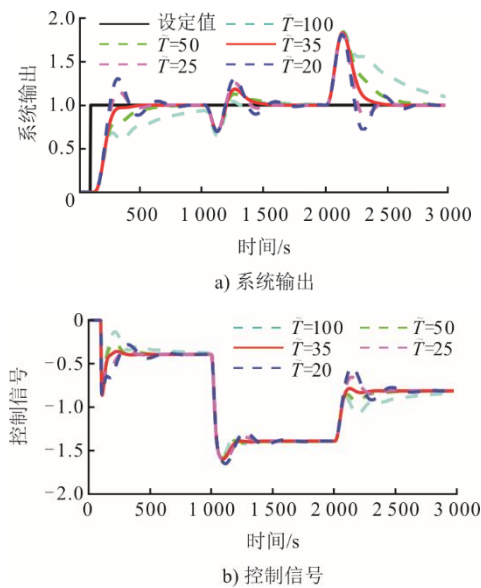


图5 MADRC 的控制结构
Fig.5 The control structure of MADRC

由图 5 可知: 当 \tilde{T} 较大时, 系统的跟踪响应与抗扰响应均较慢; 当 \tilde{T} 较小时, 系统的跟踪响应与抗扰响应均产生明显振荡。而只有当 \tilde{T} 与 T 相同时, 系统的控制性能最好, 说明对于同一组 ADRC 参数而言, 若 \tilde{T} 过于偏离 T , 即 ESO 的输入不同步时, 过热汽温的控制性能较差。

在调整 \tilde{T} 的过程中, 针对确定 b_0 、 ω_0 和 k_1 的 MADRC, 应将 \tilde{T} 由一较大值逐渐减小, 直至控制信号与系统输出同步。对于 MADRC 而言, b_0 、 ω_0 和 k_1 的整定可参考图 4 所示的工程整定方法。

3 仿真验证和现场应用

3.1 仿真验证

为了验证所提MADRC在过热汽温系统中的控制效果,本节将MADRC应用在式(8)—式(9)所示的过热汽温系统中。将基于SIMC整定的串级PI控制策略(PI_{SIMC})^[26]、常规一阶ADRC、常规二阶ADRC和二阶改进ADRC(二阶MADRC)^[27]作为对比控制策略。内环PI控制器参数相同,分别为: $k_{p1}=-1$ 和 $k_{i1}=-1/40$ 。外环控制策略参数分别为:对于MADRC, $k_1=0.032$ 、 $\omega_0=0.5$ 、 $b_0=0.04$ 、 $G_{cp}(s)=1/(35s+1)^3$;对于 PI_{SIMC} -PI, $k_{p2}=0.1628$ 、 $k_{i2}=1/263$;对于一阶ADRC, $k_1=0.018$ 、 $b_0=0.1$ 、 $\omega_0=0.06$;对于二阶ADRC, $\omega_c=0.06$ 、 $b_0=0.01$ 、 $\omega_0=0.1$;对于二阶MADRC, $\omega_c=0.07$ 、 $b_0=0.01$ 、 $\omega_0=0.5$ 、 $G_{cp}(s)=1/(35s+1)^2$ 。

仿真过程中,设定值在10s时有1个单位阶跃,在1000s与2000s时添加内外回路扰动。标称工况下的控制效果如图6所示。从图6可知,MADRC具有最快的跟踪速度和最强的抗干扰能力,取得了最佳的控制品质。此外,二阶MADRC也具有较好的控制品质。考虑到二阶MADRC比MADRC具有更加大的实现难度,因此本文推荐MADRC。

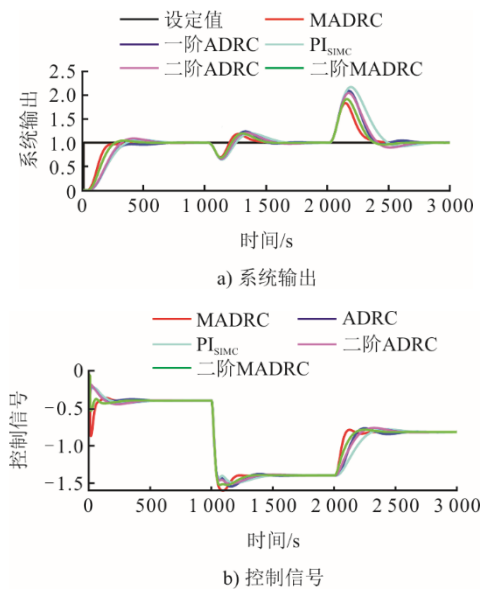


图6 标称工况下的控制效果

Fig.6 The control performance under nominal condition

考虑到过热汽温系统存在着较大的不确定性,设计的控制器需要考虑应对过热汽温系统不确定性的能力。接下来通过Monte Carlo实验验证控制器的鲁棒性。式(8)—式(9)所示过热汽温系统中 K 和 T 的不确

定性为 $\pm 10\%$ 。将不确定性对象的阶跃和跟踪实验重复500次,可以得到 IAE_{sp} 、 IAE_{ud1} 和 IAE_{ud2} 的分布,如图7所示。 IAE_{sp} 、 IAE_{ud1} 和 IAE_{ud2} 分别为从10~1000s的误差绝对值积分、从1000~2000s的误差绝对值积分和从2000~3000s的误差绝对值积分。从图7可知,MADRC具有最小的 IAE_{sp} 、 IAE_{ud1} 和 IAE_{ud2} 区间,即MADRC具有很强的鲁棒性,能够很好地应对系统的不确定性。二阶MADRC具有仅次于MADRC的鲁棒性,一阶ADRC的 IAE_{sp} 、 IAE_{ud1} 和 IAE_{ud2} 区间比 PI_{SIMC} 更小,具有比 PI_{SIMC} 更强的鲁棒性。可知MADRC的串级控制策略具有很强的鲁棒性,具有很强的工程应用价值。

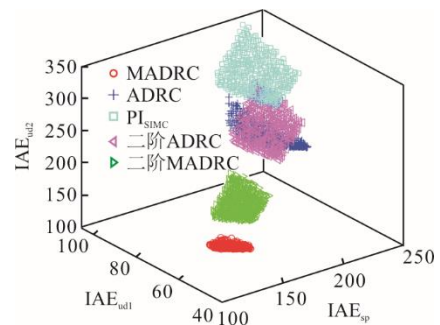
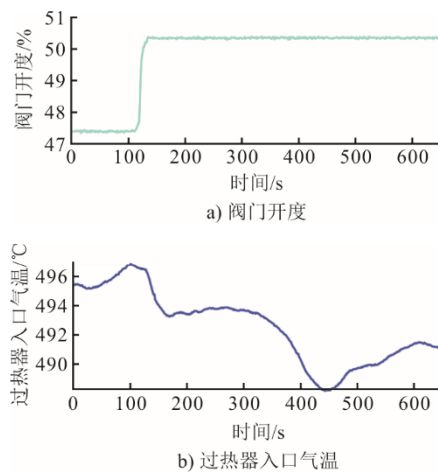


图7 不确定对象的 IAE_{sp} 、 IAE_{ud1} 和 IAE_{ud2} 分布
Fig.7 The distributions of IAE_{sp} , IAE_{ud1} and IAE_{ud2} for uncertain systems

3.2 现场应用

基于仿真验证效果,将MADRC应用于辽宁某600MW机组的二级过热汽温系统。当机组在其额定负荷的80%时,进行开环试验,试验中减温水阀门给定幅值为3%的正阶跃,开环试验结果如图8所示。由图8可知,根据二级过热汽温的开环试验结果,难以确定汽温的时间常数 T 。因此,在试验过程中,仅能通过减温水阀门响应与末级过热汽温响应的同步性对补偿环节的 \tilde{T} 进行调整。



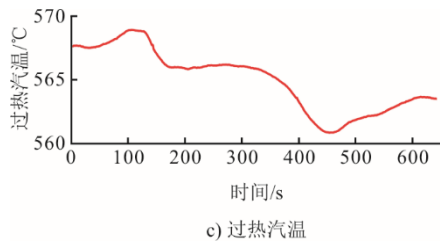


图8 二级过热汽温开环试验结果

Fig.8 The open-loop experimental results of the secondary steam temperature

机组中原控制策略是主控制器为PID，副控制器为PI的串级控制策略，记作“PID_f-PI”。MADRC也是基于串级控制策略进行设计的，记作“MADRC-PI”。表1给出了各控制策略的控制器参数。

基于表1给出的控制器参数，将MADRC-PI投入。图9给出了当机组负荷在490~520 MW变化时，MADRC-PI与PID_f-PI之间相互切换的试验结果。

表1 二级过热汽温系统的各控制器参数

Tab.1 The controller parameters of the secondary steam temperature system

控制策略	主控制器参数	副控制器参数
PID _f -PI	$k_{p2}=10/57, T_{i2}=330, T_{d2}=72$	$k_{p1}=-10/42,$ $T_{i1}=180$
MADRC-PI	$K_1=0.036, b_0=0.07,$ $\omega_0=0.25, \tilde{T}=30$	

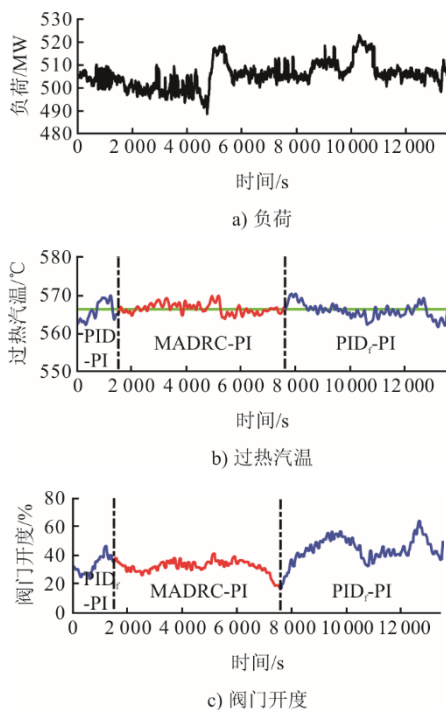


图9 MADRC-PI与PID_f-PI的切换试验结果

Fig.9 Switching test results of MADRC-PI and PID_f-PI

由图9可知，在过热汽温系统上实现了MADRC-

PI与PID_f-PI的相互无扰切换。根据切换试验结果，可知，MADRC-PI投入后，过热汽温的波动范围明显减小。特别地，当机组负荷突然急速变化30 MW时，也未产生过大的动态偏差，体现了其在抗干扰方面的优势。为定量评价各控制策略下过热汽温系统控制性能，计算最大正偏差(e_+)、最大负偏差(e_-)、偏差绝对值均值(\bar{e}_{abs})和偏差方差(σ_e)，表2给出了切换试验的动态性能指标。

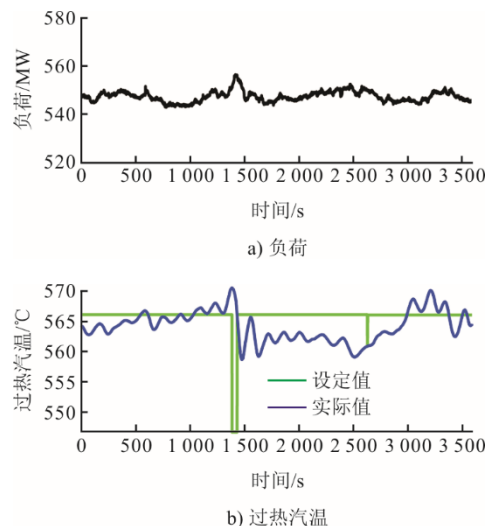
由表2可知，当采用MADRC-PI与PID_f-PI进行试验时，前者机组负荷变化范围略大一些，但总体上二者机组负荷变化范围几乎一致。根据各误差指标可知，MADRC-PI控制策略相比PID_f-PI控制策略具有更小的最大正负偏差、平均绝对偏差与偏差标准差，说明MADRC-PI具有良好的抗干扰性能。

表2 二级过热汽温系统切换试验的性能指标

Tab.2 The performance indicators for switching experiments of the secondary steam temperature system

控制策略	负荷范围/MW	$e_+ / ^\circ C$	$e_- / ^\circ C$	$\bar{e}_{abs} / ^\circ C$	$\sigma_e / ^\circ C$
PID _f -PI	[498.5, 523.2]	4.03	4.62	1.61	1.95
MADRC-PI	[488.8, 518.5]	3.52	2.47	1.01	1.26

当机组在更高负荷段运行时，同样测试了2种控制策略的控制性能。图10、图11展示了当机组负荷在540~560 MW变化时PID_f-PI与MADRC-PI的过热汽温控制效果。由图10和图11可知，当机组负荷较为稳定时，MADRC-PI的过热汽温控制效果更加平稳，产生的动态偏差较小。而PID_f-PI由于出现了超过570 °C的情况，使得运行人员不得不设置2次过热汽温设定值偏置，以防过高温出现管道爆裂。



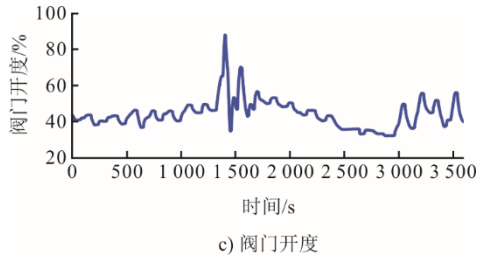


图 10 540~560 MW 负荷下 PID_f -PI 控制效果
Fig.10 Control performance of PID_f -PI at 540~560 MW

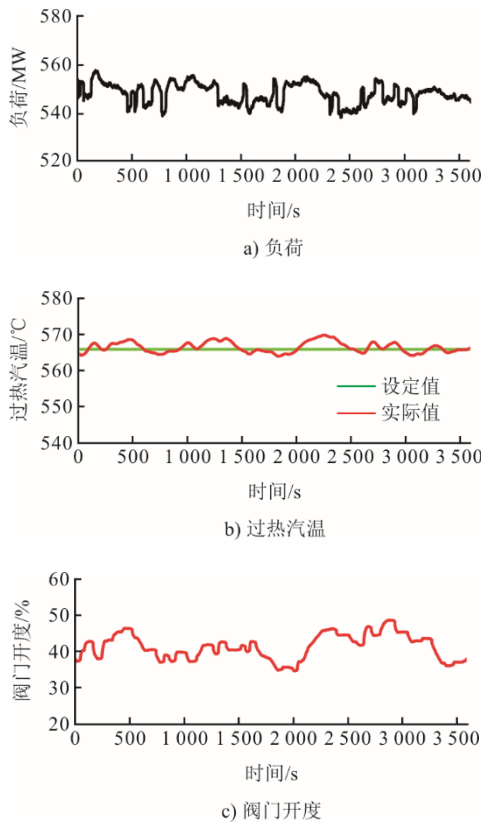


图 11 540~560 MW 负荷下 MADRC-PI 控制效果
Fig.11 Control performance of MADRC-PI at 540~560 MW

需要说明的是, 由于第 1 次的人工干预, 设定值向下设置使得减温水阀门开度快速开大, 后面的过热汽温出现较大的下降, 这也是 PID_f -PI 中 e_+ 明显小于 e_- 的原因。为定量评价各控制策略在机组负荷较为稳定时的过热汽温系统控制性能, 给出 540~560 MW 负荷下二级过热汽温系统的性能指标, 见表 3。

表 3 540~560 MW 负荷下二级过热汽温系统的性能指标
Tab.3 The performance indicators of the secondary steam temperature system at 540~560 MW

控制策略	负荷范围/MW	$e_+ / ^\circ\text{C}$	$e_- / ^\circ\text{C}$	$\bar{e}_{\text{abs}} / ^\circ\text{C}$	$\sigma_{\text{d}} / ^\circ\text{C}$
PID_f -PI	[543.1, 556.7]	4.43	7.47	2.64	2.53
MADRC-PI	[538.5, 558.0]	3.91	1.91	1.25	1.46

由表 3 可知, MADRC-PI 投入时机组负荷变化范围稍大于 PID_f -PI 投入时。另外, 根据表 3 中各误差指标可知, MADRC-PI 控制策略相比 PID_f -PI 控制策略具有更小的最大正负偏差、平均绝对偏差与偏差标准差, 进一步说明了 MADRC-PI 具有良好的干扰性能。

4 结 语

本文针对燃煤机组过热系统由于大惯性和强不确定性带来的控制难点, 提出了一种基于改进自抗扰控制的串级控制结构, 内环采用常规 PI 控制器, 外环采用改进自抗扰控制器。给出了改进自抗扰控制的工程整定方法, 并针对补偿环节时间常数难以得到的问题, 设计了基于响应曲线的补偿环节时间常数优化方法。最后通过对比仿真和实际工程应用验证了所提控制策略在大范围变负荷下的设定值跟踪和抗干扰性能的优势, 表明本文方法具有很强的工程应用潜力。

[参 考 文 献]

- [1] WU Z L, GAO Z Q, LI D H, et al. On transitioning from PID to ADRC in thermal power plants[J]. Control Theory and Technology, 2021, 19(1): 3-18.
- [2] HE T, WU Z L, LI D H, et al. A tuning method of active disturbance rejection control for a class of high-order processes[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2020, 67(4): 3191-320.
- [3] 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.
- [4] 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.
- [5] 范赫, 苏志刚, 彭献永, 等. 耦合过热汽温调节的直流炉燃煤机组抗干扰机炉协调控制系统[J]. 中国电机工程学报, 2025, 45(3): 1010-1022.
FAN He, SU Zhigang, PENG Xianyong, et al. Anti-disturbance coordinated control system of once-through boiler coal fired units coupled with superheated steam temperature regulation[J]. Proceedings of the CSEE, 2025, 45(3): 1010-1022.
- [6] 冯旭阳, 王斌, 杨春来, 等. 面向 APS 的过热汽温系统抗扰预测控制[J]. 计算机仿真, 2022, 39(11): 141-145.
FENG Xuyang, WANG Bin, YANG Chunlai, et al. APS oriented disturbance rejection predictive control for

- superheated steam temperature system[J]. *Computer Simulation*, 2022, 39(11): 141-145.
- [7] 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.
- [8] 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, 52(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, 52(3): 417-424.
- [9] ZHU H Y, TAN P, HE Z Q, et al. Modelling and regulation of steam temperatures of a 1 000 MW double-reheat boiler with long short-term memory[J]. *IET Control Theory & Applications*, 2023, 17(16): 2190-2204.
- [10] HAN J Q. From PID to active disturbance rejection control[J]. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 2009, 56(3): 900-906.
- [11] WU Z L, LIU S J, LI S Y, et al. Modified active disturbance rejection control design based on gain scheduling for selective catalytic reduction denitrification processes[J]. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 2024, 71(12): 16441-16451.
- [12] WU Z L, LI D H, LIU Y H, et al. Performance analysis of improved ADRCs for a class of high-order processes with verification on main steam pressure control[J]. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 2023, 70(6): 6180-6190.
- [13] LIU C L, YANG C J, LIU W L, et al. Comprehensive quantitative tuning method for multiple LADRCs in high order plus time delay processes[J]. *IEEE Transactions on Automation Science and Engineering*, 2024, Early Access. DOI: 10.1109/TASE.2024.3375931.
- [14] 刘长良, 杨超杰, 刘卫亮, 等. 高阶时滞系统的改进线性自抗扰控制及参数整定方法[J]. *动力工程学报*, 2024, 44(4): 599-606.
LIU Changliang, YANG Chaojie, LIU Weiliang, et al. Improved linear active disturbance rejection control and parameters tuning method for high-order plus time-delay systems[J]. *Journal of Chinese Society of Power Engineering*, 2024, 44(4): 599-606.
- [15] SU Z G, SUN L, XUE W C, et al. A review on active disturbance rejection control of power generation systems: fundamentals, tunings and practices[J]. *Control Engineering Practice*, 2023, 141: 105716.
- [16] LI J, ZHANG L Y, LI S Q, et al. Active disturbance rejection control for piezoelectric smart structures: a review[J]. *Machines*, 2023, 11(2): 174.
- [17] CHNE Z, HAO Y S, SU Z G, et al. Predictor-based active disturbance rejection control of wet flue gas desulfurization system with delay robustness and simplified tuning[J]. *IEEE Transactions on Automation Science and Engineering*, 2024, Early Access. DOI: 10.1109/TASE.2024.3398776.
- [18] FAREH R, KHADRAOUI S, ABDALLAH M Y, et al. Active disturbance rejection control for robotic systems: a review[J]. *Mechatronics*, 2021, 80: 102671.
- [19] 姜家国, 刘延泉, 郭曼利. 汽包水位线性自抗扰控制系统[J]. *热力发电*, 2016, 45(7): 110-114.
JIANG Jianguo, LIU Yanquan, GUO Manli. Linear auto disturbance rejection control system for water level in drum[J]. *Thermal Power Generation*, 2016, 45(7): 110-114.
- [20] 谢宝平, 曾江, 刘佩, 等. 基于改进一阶 LADRC 光伏逆变器母线电压控制[J]. *电机与控制应用*, 2024, 51(4): 1-11.
XIE Baoping, ZENG Jiang, LIU Pei, et al. Bus voltage control of photovoltaic inverter based on improved first-order LADRC[J]. *Electric Machines & Control Application*, 2024, 51(4): 1-11.
- [21] 周志刚, 马永光, 董子健, 等. 基于人群搜索算法的自抗扰控制器参数优化[J]. *热力发电*, 2018, 47(9): 1-8.
ZHOU Zhigang, MA Yongguang, DONG Zijian, et al. Parameter optimization of active disturbances rejection controller based on seeker optimization algorithm[J]. *Thermal Power Generation*, 2018, 47(9): 1-8.
- [22] SUN L, HUA Q S, SHEN J, et al. Multi-objective optimization for advanced superheater steam temperature control in a 300 MW power plant[J]. *Applied Energy*, 2017, 208: 592-606.
- [23] WU Z L, HE T, LI D H, et al. Superheated steam temperature control based on modified active disturbance rejection control[J]. *Control Engineering Practice*, 2019, 83: 83-97.
- [24] HHUANG Y, XUE W C. Active disturbance rejection control: methodology and theoretical analysis[J]. *ISA Transactions*, 2014, 53(4): 963-976
- [25] GAO Z. Scaling and bandwidth-parameterization based controller tuning[C]//*Proceedings of American Control Conference*, 2003: 4989-4996.
- [26] SKOGESTAD S. Simple analytic rules for model reduction and PID controller tuning[J]. *Journal of Process Control*, 2003, 13(4): 291-309.
- [27] WU Z L, LI D H, XUE Y L, et al. Modified active disturbance rejection control for fluidized bed combustor[J]. *ISA Transactions*, 2020, 102: 135-153.

(责任编辑 杜亚勤)