

## 无模型自适应去噪控制及其应用

董娜<sup>†</sup>, 朱硕

(天津大学 电气自动化与信息工程学院, 天津 300072)

**摘要:**为了使无模型自适应控制(Model-Free Adaptive Control, MFAC)更好地解决伴有噪声干扰系统的控制问题,在无模型自适应控制方法的基础上,针对伴随噪声干扰的系统进行分析研究,引入带有滤波作用的跟踪微分器,在反馈过程进行滤波操作,提出一种基于改进跟踪微分器(Improved Tracking Differentiator, ITD)的无模型自适应去噪控制方法,同时给出了该算法的收敛性证明.并通过仿真证明了本文改进的控制方法可以快速跟踪给定信号并且具有良好的抵抗噪声干扰特性.最后,将其应用在循环流化床锅炉汽包水位的控制中.

**关键词:**控制算法;工业锅炉的控制;无模型自适应控制;跟踪微分器;去噪;CFB 锅炉  
**中图分类号:**TP273 **文献标志码:**A

## Model-free Adaptive De-noising Control and Its Application

DONG Na<sup>†</sup>, ZHU Shuo

(School of Electrical and Information Engineering, Tianjin University, Tianjin 300072, China)

**Abstract:** In order to make the model-free adaptive control (MFAC) better solve the control problem with noisy system, this paper examines the noise system and applies improved tracking differentiator in MFAC. Filtering is performed in the feedback process, and a MFAC method based on improved tracking differentiator(ITD) is proposed. The convergence of the algorithm is also proved. The simulation experiment proves that the improved control method can quickly track a given signal and has good resistance to noise interference. Finally, it is applied to the control of the drum water level of circulating fluidized bed (CFB) boiler.

**Key words:** control algorithm; control of industrial boilers; model-free adaptive control; tracking differentiator; de-noise; circulating fluidized bed(CFB) boiler

在工业生产过程中,尤其是复杂工业过程,数据量越来越大.因此,很难建立精确的数学模型,由此导致基于模型的控制方法难以达到期望的控制结果.

无模型控制是解决此类问题的一种有效的选择.典型的无模型控制方法当属 PID (Proportional Integral Differential)<sup>[1]</sup> 以及 PID 与其他算法相结合的方法<sup>[2]</sup>.

\* 收稿日期:2019-09-06

基金项目:国家自然科学基金资助项目(61773282), National Natural Science Foundation of China(61773282)

作者简介:董娜(1983—),女,天津人,天津大学副教授,博士

<sup>†</sup> 通讯联系人, E-mail: dongna@tju.edu.cn

同时也有一些其他的无模型控制方法,如文献[3]基于同步扰动随机算法进行了聚表二元驱优化;文献[4]关于迭代学习控制的研究;以及虚拟参考反馈整定<sup>[5]</sup>等,经过众多科研人员的钻研与推广,这些方法取得了不同程度的发展,并且应用到了不同场景中。

侯忠生<sup>[6]</sup>于1994年提出了无模型自适应控制,相比前面提到的无模型方法,MFAC形式更加简单,参数调节更容易,并且有严格的理论证明.经过多年的发展,无模型自适应控制理论趋于完善,众多学者基于MFAC方法也提出了一些有效的改进算法<sup>[7-8]</sup>.而且,MFAC算法已经在实际工业过程得到了应用<sup>[9]</sup>.

对于受环境干扰的复杂工业过程,MFAC的研究十分重要,然而MFAC在去噪领域的相关研究还比较少.目前在去噪领域,小波去噪是一种典型的去噪方法,基于小波变换发展出了不同的去噪方法<sup>[10-12]</sup>,其中一些方法已经被应用到实际中.本文在MFAC理论的基础上,通过对不同的去噪方法进行分析研究,为了使MFAC方法更简单、易操作地解决噪声干扰问题,将带滤波作用的改进跟踪微分器<sup>[13]</sup>应用到MFAC方法中,并且通过对一些典型对象的数值仿真验证所提方法的有效性,最后将本文方法应用到循环流化床锅炉汽包水位控制中。

## 1 无模型自适应控制简介

### 1.1 动态线性化模型

针对如下一般离散非线性系统:

$$y(k+1) = f(y(k), y(k-1), \dots, y(k-n_y), u(k), u(k-1), \dots, u(k-n_u)) \quad (1)$$

式中: $y(k)$ 、 $u(k)$ 分别表示系统的输出和输入; $n_y$ 、 $n_u$ 表示系统的输出和输入阶数; $f(\dots)$ 是输出关于输入的函数。

**假设1** 式(1)是输入输出能观能控的系统,即对外界有界期望输出信号 $y^*(k)$ ,总是存在一个有界可行控制输入信号,使系统在此控制输入信号的驱动下其输出等于系统的期望输出。

**假设2**  $f(\dots)$ 关于系统当前控制输入信号 $u(k)$ 的偏导数是连续的。

**假设3** 式(1)是广义Lipschitz的,即对任意的 $k$ 和 $\Delta u \neq 0$ ,存在 $b > 0$ ,使得 $|\Delta y(k+1)| \leq b |\Delta u(k)|$ ,其中 $\Delta y(k+1) = y(k+1) - y(k)$ , $\Delta u(k) = u(k) - u(k-1)$ , $b$ 为常数。

**定理:**对于式(1),若满足假设1~3,那么当 $\Delta u \neq 0$ 时,有一个称为伪偏导数的值 $\phi(k)$ ,使得:

$$\Delta y(k+1) = \phi(k) \Delta u(k) \quad (2)$$

上述定理的详细证明参见文献[14],其中 $|\phi(k)| \leq b$ , $b$ 为常数.式(2)为动态线性化模型。

### 1.2 控制策略

引入输入准则函数:

$$J(u(k)) = [y^*(k+1) - y(k+1)]^2 + \lambda [u(k) - u(k-1)]^2 \quad (3)$$

式中: $\lambda$ 为加权系数, $\lambda [u(k) - u(k-1)]^2$ 的引入就是为了限制控制输入 $u(k)$ 的变化。

将式(2)代入式(3),对 $u(k)$ 求导并利用极小化方法,可得:

$$\frac{\partial J(u(k))}{\partial u(k)} = 0 \quad (4)$$

整理得,

$$u(k) = u(k-1) + \frac{\rho \phi(k)}{\lambda + |\phi(k)|^2} [y^*(k+1) - y(k)] \quad (5)$$

$\rho \in [0, 1]$ 是步长因子.由于式(5)中的 $\phi(k)$ 是未知的,因此不能直接应用于控制律计算中,这里使用 $\phi(k)$ 的在线估计值 $\hat{\phi}(k)$ ,由此得到控制律为:

$$u(k) = u(k-1) + \frac{\rho \hat{\phi}(k)}{\lambda + |\hat{\phi}(k)|^2} [y^*(k+1) - y(k)] \quad (6)$$

式(6)中只有 $\hat{\phi}(k)$ 是需要求取的。

### 1.3 伪偏导数估计

伪偏导数的估计算法运用如下估计准则函数:

$$J(\phi(k)) = [y(k) - y(k-1) - \phi(k) \Delta u(k-1)]^2 + \mu |\phi(k) - \hat{\phi}(k-1)|^2 \quad (7)$$

式中: $y(k)$ 表示系统真实的输出,由于 $\mu |\phi(k) - \hat{\phi}(k-1)|^2$ 的引入,能够有效地限制时变参数 $\phi(k)$ 的变化.运用式(4)方法对 $\phi(k)$ 进行求导操作,可得:

$$\hat{\phi}(k) = \hat{\phi}(k-1) + \frac{\eta \Delta u(k-1)}{\mu + |\Delta u(k-1)|^2} \times (\Delta y(k) - \hat{\phi}(k-1) \Delta u(k-1)) \quad (8)$$

式中: $\hat{\phi}(k)$ 是伪偏导数的估计值.为了保证控制器的鲁棒性以及为伪偏导数估计算法式(8)具有更强的对时变参数的跟踪能力,这里引入重置算法,当 $|\hat{\phi}(k)| \leq \varepsilon$ 时, $\hat{\phi}(k) = \hat{\phi}(1)$ ,其中 $\varepsilon$ 是一个充分小的正数<sup>[14]</sup>.

## 2 无模型自适应去噪控制

针对伴随噪声干扰的系统,引入跟踪微分器,相比小波去噪相关方法,跟踪微分器形式简单,易于调节。

2.1 跟踪微分器简介

跟踪微分器(Tracking Differentiator, TD)离散形式由文献[15]给出,形式如下:

$$\begin{cases} x_1(k+1)=x_1(k)+hx_2(k) \\ x_2(k+1)=x_2(k)+h\text{fst}(x_1(k)-y(k), x_2(k), r, h_0) \end{cases} \quad (9)$$

式中:  $x_1$  为跟踪系统的输出  $y$ ;  $x_2$  为跟踪系统输出的微分(导数)信号;其他参数说明见文献[15].

此方法涉及的计算过程复杂且存在相位延迟现象,在下文的仿真实验中将改进的跟踪微分器跟踪效果作出对比来说明这一问题.虽然文献[16]中提出了一种方法可以克服这个缺点,但是增加了额外参数且不易调节.

为了解决这一问题,文献[13]提出一种改进的非线性跟踪微分器设计,不仅解决了相位延迟的问题,还解决了跟踪缓慢的问题,达到快速跟踪的效果.其形式如下:

$$\begin{cases} x_1=x_2 \\ x_2=-a_1R^2[(\beta x_1-y)^{p/q}+x_1-y]-a_2R^2[(\beta x_2/R)^{p/q}-x_2/R] \end{cases} \quad (10)$$

式中:  $x_1$  为跟踪输出信号  $y$ ;  $x_2$  为跟踪输出信号  $y$  的微分信号;一般取  $a_1>1, a_2>1, p/q \geq 3, \beta \geq 1$ .  $a_1, a_2, p/q, \beta$  确定后可不再改变;  $R$  为可调参数,决定跟踪的快慢,增大  $R$ ,将加快跟踪速度,噪声放大也越大.

2.2 基于改进跟踪微分器的无模型自适应去噪控制

将上述改进的跟踪微分器应用到无模型自适应控制中,控制框图(仿真系统图)如图1所示.

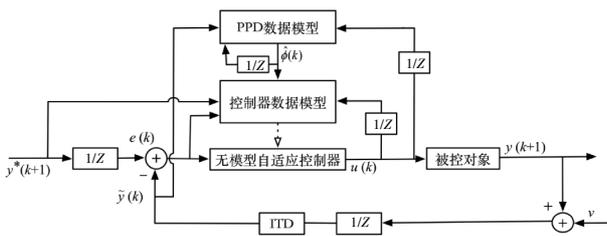


图1 无模型自适应去噪控制框图  
Fig.1 MFAC block diagram

图1中,  $y^*$  为给定信号,  $y$  为输出信号,  $v$  是噪声干扰.其中 PPD 数据模型用于接收所需数据并进行  $\hat{\phi}(k)$  的计算,将  $\hat{\phi}(k)$  传给控制器数据模型,控制器数据模型用于接收所需数据并进行控制信号  $u(k)$  的计算,然后将控制信号传给控制器,由控制器输出,  $1/Z$  的作用是得到上一时刻的值.在反馈中加入改进的跟踪微分器,将输出信号  $y$  进行去噪处理,得到处理后的输出信号  $\hat{y}(k)$ .通过这一过程减少噪声对计算控

制律  $u$  的影响.因此,使用的输入输出数据由原来的  $\{u(k), y(k+1)\}$  改为  $\{u(k), \hat{y}(k+1)\}$ ,其中,  $\hat{y}(k)$  是经过去除噪声之后的输出信号.

因此,得到新的控制律及伪偏导数算法如下:

$$u(k)=u(k-1)+\frac{\rho\hat{\phi}(k)}{\lambda+|\hat{\phi}(k)|^2}[y^*(k+1)-\tilde{y}(k)] \quad (11)$$

$$\hat{\phi}(k)=\hat{\phi}(k-1)+\frac{\eta\Delta u(k-1)}{\mu+|\Delta u(k-1)|^2} \times (\Delta\tilde{y}(k)-\hat{\phi}(k-1)\Delta u(k-1)) \quad (12)$$

2.3 稳定性分析

$\hat{\phi}(k)$  的收敛性证明参考文献[14].接下来证明当  $y^* = \text{const}$  的情况下算法输入输出是收敛的.为了使证明过程严谨,给出如下假设.

假设4 对任意  $k$ ,当  $\Delta u \neq 0$  时,伪偏导数的符号保持不变,均为正数.

首先证明  $\tilde{y}(k)$  是收敛的,由式(11)得:

$$\Delta u(k)=\frac{\rho\hat{\phi}(k)}{\lambda+\hat{\phi}(k)^2}(y^*(k)-\tilde{y}(k)) \quad (13)$$

由式(2)得:

$$\tilde{y}(k+1)=\tilde{y}(k)+\phi(k)\Delta u(k) \quad (14)$$

式(14)两边同时减去  $y^*$ ,并整理得:

$$|\tilde{y}(k+1)-y^*| \leq \left| 1-\frac{\rho\hat{\phi}(k)\phi(k)}{\lambda+\hat{\phi}(k)^2} \right| |\tilde{y}(k)-y^*| \quad (15)$$

令  $\varepsilon(k+1)=|\tilde{y}(k+1)-y^*|$ ,式(15)可以表示为:

$$\varepsilon(k+1) \leq \left| 1-\frac{\rho\hat{\phi}(k)\phi(k)}{\lambda+\hat{\phi}(k)^2} \right| |\varepsilon(k)| \quad (16)$$

其中,  $\hat{\phi}(k)^2 \geq 0$ ,令  $\lambda_{\min} = b^2/4$ ,利用不等式  $\alpha^2 + \beta^2 \geq 2\alpha\beta$ .假设4和  $\phi(k)$  的收敛性.如果选择  $\lambda > \lambda_{\min}$ ,那么一定存在一个常数  $0 < M_1 < 1$  使得式(17)成立,

$$0 < M_1 < \frac{\hat{\phi}(k)\phi(k)}{\lambda+|\hat{\phi}(k)|^2} \leq \frac{b\hat{\phi}(k)}{\lambda+|\hat{\phi}(k)|^2} \leq \frac{b\hat{\phi}(k)}{2\sqrt{\lambda}\hat{\phi}(k)} < \frac{b}{2\sqrt{\lambda_{\min}}} = 1 \quad (17)$$

根据式(17),  $0 < \rho \leq 1$  和  $\lambda > \lambda_{\min}$ ,一定存在一个常数  $l < 1$ ,使得式(18)成立,

$$\left| 1-\frac{\rho\hat{\phi}(k)\phi(k)}{\lambda+|\hat{\phi}(k)|^2} \right| = 1-\frac{\rho\hat{\phi}(k)\phi(k)}{\lambda+|\hat{\phi}(k)|^2} \leq 1-\rho M_1 = l < 1 \quad (18)$$

结合式(16)(18),可得:

$$|\varepsilon(k+1)| \leq l|\varepsilon(k)| \leq l^2|\varepsilon(k-1)| \leq \dots \leq l^k|\varepsilon(1)| \quad (19)$$

因此 $\tilde{y}(k)$ 是收敛的,接下来证明 $y(k)$ 是收敛的,根据文献[13]中对跟踪信号,即是本文 $\tilde{y}(k)$ 的稳定性分析,我们可以定义 $y(k) = \tilde{y}(k) + \delta$ ,其中 $|\delta|$ 是一个小正数.

因此:

$$|y(k+1)-y^*| = |\tilde{y}(k+1)+\delta-y^*| = \left| (\tilde{y}(k)-y^*) \left(1 - \frac{\rho \hat{\phi}(k)\phi(k)}{\lambda + \hat{\phi}^2(k)}\right) + \delta \right| \leq \left| (\tilde{y}(k)-y^*) \left(1 - \frac{\rho \hat{\phi}(k)\phi(k)}{\lambda + \hat{\phi}^2(k)}\right) \right| + |\delta| \leq |\tilde{y}(k)-y^*| \left| \left(1 - \frac{\rho \hat{\phi}(k)\phi(k)}{\lambda + \hat{\phi}^2(k)}\right) \right| + |\delta| \quad (20)$$

综合式(18)(19),可得 $|y(k+1)-y^*| \leq l|\varepsilon(k)| + |\delta|$ ,所以 $y(k)$ 是收敛的.

证明了 $y(k)$ 的收敛性之后, $u(k)$ 的收敛性证明可以参考文献[14].

### 3 仿真和实验

本节第一小节通过对几个典型被控对象的仿真来验证所提出方法的有效性.第二小节,将本文方法应用到 CFB 锅炉汽包水位的控制中.

#### 3.1 数值仿真

本节分为 3 组仿真,在每组仿真中,本文方法都与使用原始跟踪微分器去噪效果进行比较.以此来验证本文提出方法的可行性及有效性.仿真系统见图 1.

第一组仿真被控系统为:

$$y(k+1) = \frac{y(k)}{1+y(k)^2} + u(k)^3 + v \quad (21)$$

其中 $v$ 是加入的 30 dBW 能量的白噪声.给定信号为前 500 个时刻 $y^* = 1$ ,后 500 个时刻 $y^* = 0.5$ .在第二组实验中,被控对象为式(21),给定信号为前 500 个时刻 $y^* = 0.5$ ,后 500 个时刻为:

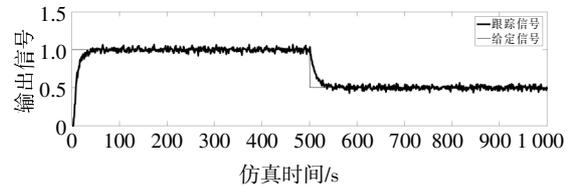
$$y^*(k) = 0.5 \sin\left(\frac{\pi k}{100}\right) + 0.3 \cos\left(\frac{\pi k}{50}\right) \quad (22)$$

第三组为系统伴随扰动情况下的仿真,被控对象为:

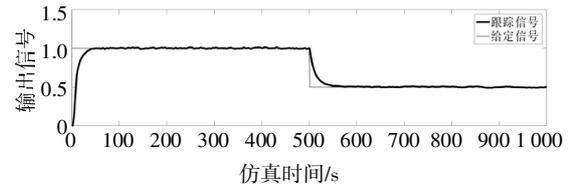
$$\begin{cases} y(k+1) = \frac{y(k)}{1+y(k)^2+y(k-1)^2} + u(k), k \leq 500 \\ y(k+1) = \frac{y(k)}{1+y(k)^2} + u(k)^3 + v, k > 500 \end{cases} \quad (23)$$

给定信号 $y^* = 0.5$ .

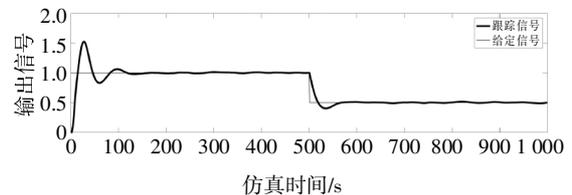
在第一组仿真中,MFAC 算法的相关参数 $\rho = 1, \eta = 1, \mu = 0.9, \lambda = 40$ .改进跟踪微分器参数为 $a_1 = 2, a_2 = 2, \beta = 3, p/q = 4, R = 19$ .仿真结果如图 2 所示.



(a)常规输出信号下 MFAC 方法输出信号图



(b)常规输出信号下 MFAC-ITD 方法输出信号图



(c)常规输出信号下 MFAC-TD 方法输出信号图

图 2 常规输出情况下的信号比较

Fig.2 Output signal comparison in normal output

图 2(a)为原始 MFAC 方法输出信号.图 2(b)为 MFAC-ITD 方法输出,即本文方法;图 2(c)为 MFAC-TD<sup>[17]</sup>方法输出,即反馈回路使用原始跟踪微分器.(图 3、图 4 同).

由图 2 和表 1 的误差相关指标可以看出,由于原始跟踪微分器存在相位延迟的问题,不能及时将输出反馈,导致出现了严重的超调现象,大大降低了 MFAC 算法快速响应的良好特性.而改进的跟踪微分器不存在相位延迟现象,能快速地将输出信号反馈,在去除噪声的同时保持了原始 MFAC 算法的快速响应特性,MFAC-ITD 方法控制器输出更容易达到相对稳定的状态.MFAC-TD 方法的 MAE 和 MSE 分别为 MFAC-ITD 方法的 4 倍和 6 倍,进一步说明 MFAC-ITD 方法的快速跟踪效果.

表 1 第一组仿真输出误差比较

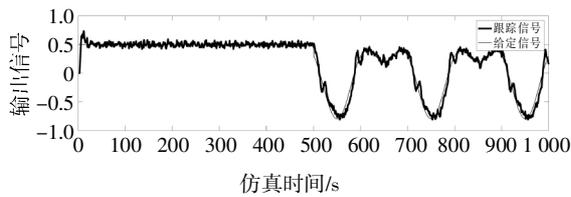
Tab.1 Output error comparison of the first group

算法	MAE	MSE
MFAC-TD	0.085 6	0.040 2
MFAC-ITD	0.020 2	0.006 6

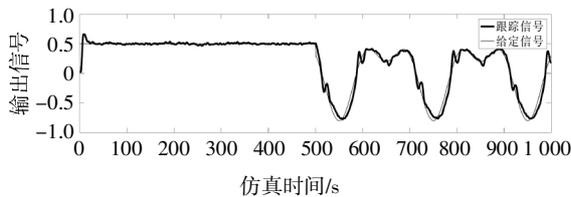
注:MAE 为平均绝对误差,公式为 $\frac{1}{k} \sum_{i=1}^k |y_i - y_i^*|$ ;MSE 为均方差,公式为 $\frac{1}{k} \sum_{i=1}^k (y_i - y_i^*)^2$ .

第二组仿真输出结果比较如图 3 所示, MFAC 算法相关参数  $\rho=1, \eta=1, \mu=0.9, \lambda=15$ . 改进跟踪微分器参数为  $a_1=2, a_2=2, \beta=3, p/q=4, R=16$ .

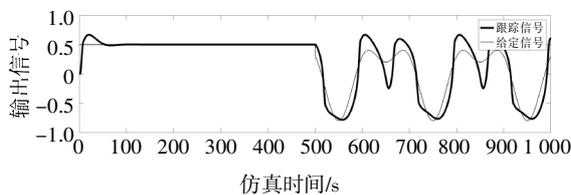
结合图 3 和表 2 的相关误差指标更能直观地看出, 对于变信号系统, MFAC-TD 方法跟踪效果同样不如 MFAC-ITD 方法, MFAC-TD 方法的 MAE 和 MSE 分别为 MFAC-ITD 方法的 2 倍多和 7 倍左右. 这种差别在第 500 s 时刻给定信号变复杂后表现得更加明显.



(a)跟踪信号变化下的 MFAC 方法输出信号图



(b)跟踪信号变化下的 MFAC-ITD 方法输出信号图



(c)跟踪信号变化下的 MFAC-TD 方法输出信号图

图 3 跟踪信号变化情况下的输出信号比较

Fig.3 Output signal comparison in the case of tracking signal changes

表 2 第二组仿真输出误差比较

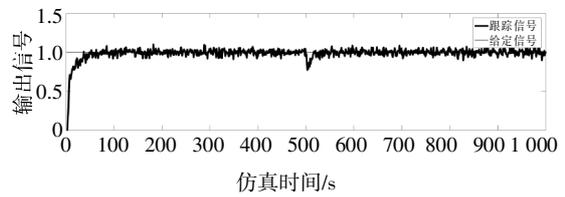
Tab.2 Output error comparison of second group

算法	MAE	MSE
MFAC-TD	0.095 0	0.028 8
MFAC-ITD	0.038 8	0.004 3

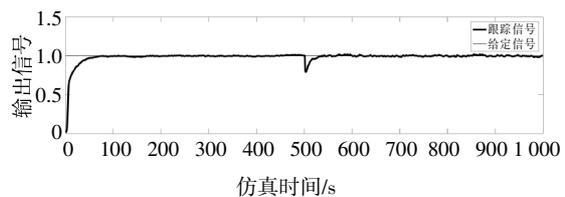
第三组实验仿真输出结果比较如图 4 所示, MFAC 算法相关参数  $\rho=1, \eta=1, \mu=0.9, \lambda=20$ . 改进跟踪微分器参数为  $a_1=2, a_2=2, \beta=3, p/q=4, R=15$ .

结合图 4 和表 3 的相关误差指标可以看出, MFAC-TD 方法的 MAE 和 MSE 均比 MFAC-ITD 方法高, 而且在初始时刻和第 500 s 时刻, MFAC-TD 方

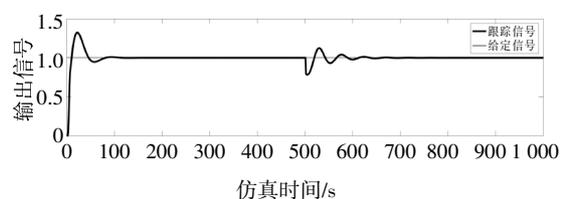
法均出现超调现象, 均不能保持 MFAC 方法良好的快速响应特性, 而 MFAC-ITD 方法在保持 MFAC 方法良好特性的同时有效地去除了噪声干扰.



(a)系统伴随扰动下的 MFAC 方法输出信号图



(b)系统伴随扰动下的 MFAC-ITD 方法输出图



(c)系统伴随扰动下的 MFAC-TD 方法输出信号图

图 4 系统伴随扰动下的输出信号比较

Fig.4 Output signal comparison in the case of system accompanying disturbance

表 3 第三组仿真输出误差比较

Tab.3 Output error comparison of the third group

算法	MAE	MSE
MFAC-TD	0.018 1	0.004 6
MFAC-ITD	0.016 4	0.003 8

根据上述在不同仿真环境中得到的结果, 可以看出, 由于 MFAC-ITD 方法消除了 MFAC-TD 方法自身存在的相位延迟现象, 既保持了 MFAC 方法快速响应的良好特性, 又保持了跟踪微分器去除噪声的良好特性, 对带有噪声干扰的系统达到了较为理想的控制效果, 更为重要的是 MFAC-ITD 方法参数调节更加简单, 更具有操作性.

### 3.2 循环流化床锅炉汽包水位控制

循环流化床 (Circulating Fluidized Bed, CFB) 锅炉汽水系统控制的目标是控制锅炉给水流量跟踪蒸气负荷要求, 控制蒸气温度在一定范围内, 同时确保锅炉及汽机的安全、经济运行. 根据汽水系统的特

点,可以在两个方面进行控制,即汽包水位控制和主蒸气温度控制.

在 CFB 锅炉的汽水系统(图 5 虚线框内)中,水从给水装置流出, 经过省煤器适度加热后去汽包,

使主蒸气的温度变化不至于过大. 主蒸气经过蒸气-水分离装置和过热器,最后通过减温器成为成品蒸气<sup>[18-19]</sup>. 图 5 中虚线框中的汽水系统简化为图 6 的流程图.

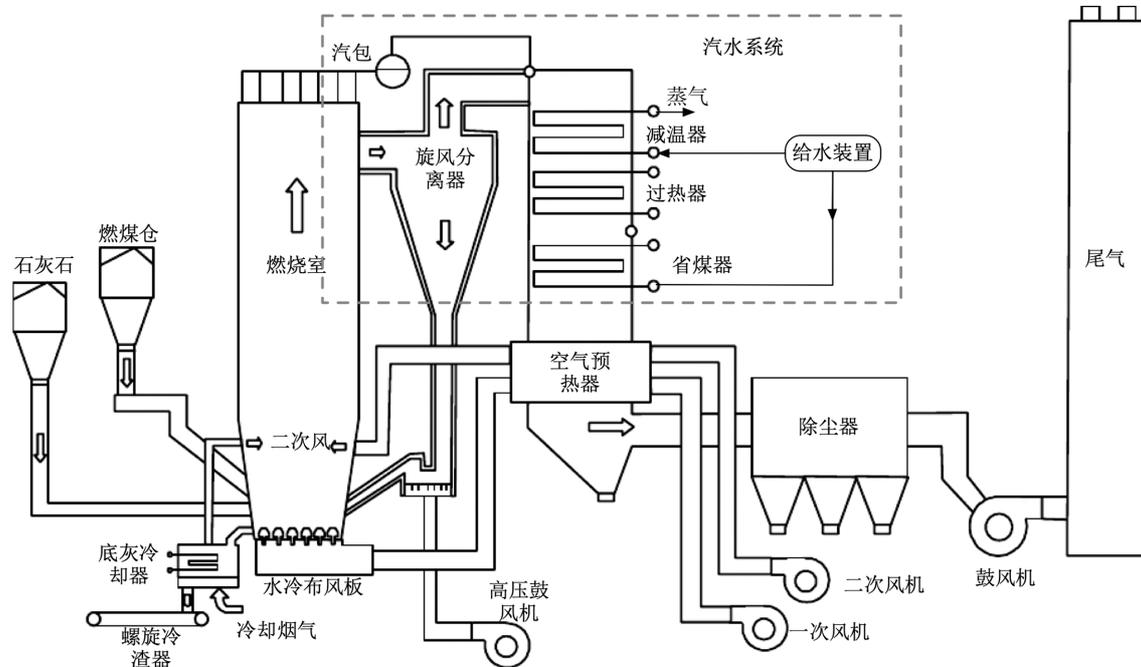


图 5 CFB 锅炉运行流程框图  
Fig.5 Flow chart of CFB boiler

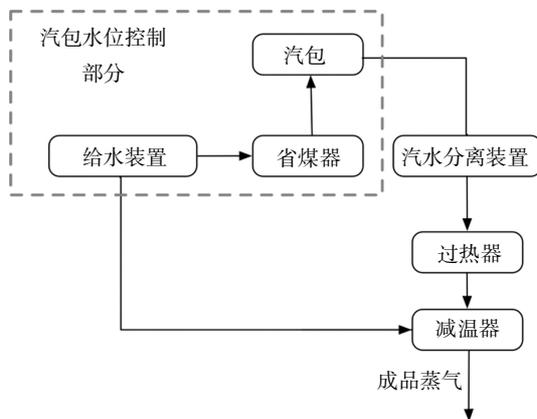


图 6 汽水系统简易流程图  
Fig.6 Simple flow chart of steam-water system

在 CFB 锅炉中,汽包水位代表了锅炉负荷与给水之间的平衡关系,因此,为了保证锅炉稳定高效,保持水位在合理的工作区非常关键.

图 6 中虚线框内是汽水系统中汽包水位部分. 汽包水位的控制目的:1) 保持汽包水位在合理工作区,如果过高,超过正常水位,会导致汽水分离过程出现问题,另外,如果蒸气中携带水太多,会使过热

器壁上、涡轮叶片上造成过多的污垢,甚至叶片会因水的冲击而破坏;如果水位过低,会导致水循环过程不正常,从而破坏整个系统的正常运行. 2) 维持给水量一直在合理的工作区间内,进而保证省煤器正常工作和供水管无损坏.

由于炉体内影响汽水变化的对流管束的物理特性变化,所以,水位系统是一个慢时变系统. 根据锅炉汽包容量大小, 阀位变化需要一定的时间才能反映到水位变化,可见系统具有延时,而且系统存在着较大的干扰,因此,汽包水位系统是一个具有大的扰动和非线性特性的系统<sup>[19]</sup>.

综上所述可知,汽包水位系统不存在一个精确的数学模型,而且伴随扰动,因此,应用无模型控制方法是一很好的选择.

从上面可以看出,作为两个主要因素的给水量和蒸气量对汽包水位的变化影响最大,考虑给水量对汽包水位的影响,该对象仅存在一个如下动态的数学模型<sup>[20]</sup>:

$$G(s) = \frac{1}{Ts(T_d s + 1)} \tag{24}$$

式中:  $T$  为给水扰动下的纯滞后时间;  $T_d$  为水位反应时间;  $G(s)$  是该控制系统的传递函数;  $s$  是传递函数中的复变量。

通常情况下,  $T$  取值 30 ~ 100 s,  $T_d$  取值 30 ~ 150 s, 在本次实验中, 参数取  $T = 50$  s,  $T_d = 30$  s, 该模型仅用来提供输入输出数据. 给定信号  $y^* = 5$ . MFAC-ITD 算法的相关参数为  $\eta = 0.1, \mu = 0.1, \rho = 1, \lambda = 78$ . 改进跟踪微分器参数为  $a_1 = 2, a_2 = 2, \beta = 3, p/q = 4, R = 14.5$ .

汽包水位简易控制框图如图 7 所示.

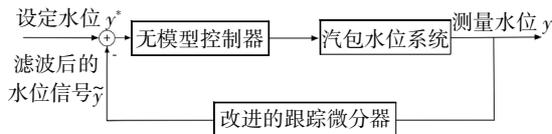
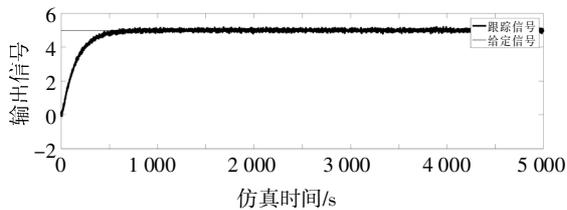


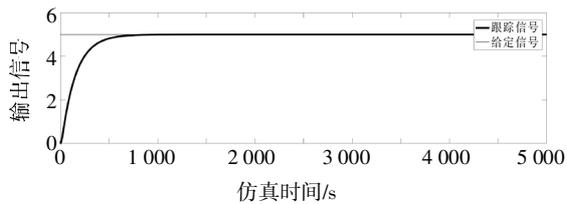
图 7 控制框图

Fig.7 Control block diagram

由图 8 和表 4 可以看出, 本文提出 MFAC-ITD 方法有效去除了噪声带来的干扰, 同时很大程度上保持了 MFAC 算法的快速跟踪特性, 使得汽包水位保持稳定.



(a)MFAC 方法输出



(b)MFAC-ITD 方法输出

图 8 输出比较

Fig.8 Output comparison

表 4 输出误差比较

Tab.4 Output error comparison

算法	MAE	MSE
MFAC	0.285 2	0.589 5
MFAC-ITD	0.226 5	0.467 3

## 4 结论

本文针对伴随噪声干扰的系统, 提出一种基于

改进跟踪微分器的无模型自适应控制方法, 并给出了相关的收敛性证明, 最后将改进的方法应用到 CFB 锅炉汽包水位的控制中, 进一步完善了 MFAC 方法在伴随噪声系统中的应用. 同时在不同的仿真环境下进行了实验, 实验结果表明: 本文提出的 MFAC-ITD 方法在不同仿真条件下, 输出误差的相关指标均远优于 MFAC-TD 方法, 具有响应快速、超调小的特性, 将跟踪速度提高了 2~3 倍, 很大程度保持了 MFAC 方法快速响应的优良特性和鲁棒性. 下一步工作将对多输入输出系统进行研究.

## 参考文献

- [1] 沙毅, 范倩雯, 张立立, 等. 自校正模糊 PID 控制的 FAST 节点位移控制方法 [J]. 东北大学学报 (自然科学版), 2018, 39(4): 487—491.  
SHA Y, FAN Q W, ZHANG L L, *et al.* FAST node displacement control method using self-tuning fuzzy PID control [J]. Journal of Northeastern University (Natural Science), 2018, 39(4): 487—491. (In Chinese)
- [2] 邱占芝, 李世峰. 基于神经网络的 PID 网络化控制系统建模与仿真 [J]. 系统仿真学报, 2018, 30(4): 1423—1432.  
QIU Z Z, LI S F. Modeling and simulation of PID networked control systems based on neural network [J]. Journal of System Simulation, 2018, 30(4): 1423—1432. (In Chinese)
- [3] 张凯, 张秀清, 张黎明, 等. 基于改进的同步扰动随机逼近算法的聚表二元驱优化 [J]. 中国石油大学学报 (自然科学版), 2017, 41(5): 102—109.  
ZHANG K, ZHANG X Q, ZHANG L M, *et al.* A novel approach for optimization of polymer-surfactant flooding based on simultaneous perturbation stochastic approximation algorithm [J]. Journal of China University of Petroleum (Edition of Natural Science), 2017, 41(5): 102—109. (In Chinese)
- [4] 周颖, 何磊, 郑凤. 具有时延和数据丢失的直线电机迭代学习控制 [J]. 控制理论与应用, 2017, 34(12): 1631—1636.  
ZHOU Y, HE L, ZHENG F. Iterative learning control for linear motor system with time delay and data dropout [J]. Control Theory and Applications, 2017, 34(12): 1631—1636. (In Chinese)
- [5] CAMPI M C, LECCHINI A, SAVARESI S M. Virtual reference feedback tuning: a direct method for the design of feedback controllers [J]. Automatica, 2002, 38(8): 1337—1346.
- [6] 侯忠生. 非线性系统参数辨识、自适应控制及无模型自适应控制 [D]. 沈阳: 东北大学信息科学与工程学院, 1994: 26—92.  
HOU Z S. Nonlinear system parameter identification, adaptive control and model-free adaptive control [D]. Shenyang: College of Information Science and Engineering, Northeastern University, 1994:

- 26—92. (In Chinese)
- [7] 侯明冬,王印松. 一种无模型自适应积分终端滑模控制方法[J]. 控制与决策, 2018, 33(9): 1591—1597.  
HOU M D, WANG Y S. A model-free adaptive integral terminal sliding mode control method [J]. Control and Decision, 2018, 33(9): 1591—1597. (In Chinese)
- [8] ZHU Y M, HOU Z S. Data-driven MFAC for a class of discrete-time nonlinear with RBFNN [J]. IEEE Transactions on Neural Networks and Learning Systems, 2014, 25(5): 1013—1020.
- [9] 韩志刚, 徐明新. 无模型控制律的一般形式及其在石化工业中的应用[J]. 黑龙江大学自然科学学报, 2001, 18(3): 24—34.  
HAN Z G, XU M X. The general form of model-free control law and its application in petrochemical industry [J]. Journal of Natural Science of Heilongjiang University, 2001, 18(3): 24—34. (In Chinese)
- [10] 田江龙, 屈卫东. 基于小波去噪的阈值函数改进方法分析[J]. 化工自动化及仪表, 2017, 44(3): 243—247.  
TIAN J L, QU W D. Analysis of modified method for threshold functions based on wavelet de-noising [J]. Chemical Automation and Instrumentation, 2017, 44(3): 243—247. (In Chinese)
- [11] 陈晓曦, 王延杰, 刘恋. 小波阈值去噪法的深入研究[J]. 激光与红外, 2012, 42(1): 105—110.  
CHEN X X, WANG Y J, LIU L. Deep study on wavelet threshold method for image noise removing [J]. Laser & Infrared, 2012, 42(1): 105—110. (In Chinese)
- [12] 涂建成, 席旭刚, 罗志增. 一种改进阈值的平移不变量小波消噪方法[J]. 信息与控制, 2011, 40(2): 150—154.  
TU J C, XI X G, LUO Z Z. A translation-invariant wavelet de-noising method based on improved threshold [J]. Information and Control, 2011, 40(2): 150—154. (In Chinese)
- [13] 史永丽, 侯朝楨. 改进的非线性跟踪微分器设计[J]. 控制与决策, 2008, 23(6): 647—651.  
SHI Y L, HOU C Z. Design of improved nonlinear tracking differentiator [J]. Control and Decision, 2008, 23(6): 647—651. (In Chinese)
- [14] 侯忠生, 金尚泰. 无模型自适应控制——理论与应用[M]. 北京: 科学出版社, 2013: 2—122.  
HOU Z S, JIN S T. Model-free adaptive control—theory and application [M]. Beijing: Science Press, 2013: 2—122. (In Chinese)
- [15] 韩京清, 王伟. 非线性跟踪-微分器 [J]. 系统科学与数学, 1994, 14(2): 177—183.  
HAN J Q, WANG W. Nonlinear tracking-differentiator [J]. Journal of Systems Science and Mathematical Sciences, 1994, 14(2): 177—183. (In Chinese)
- [16] 武利强, 林浩, 韩京清. 跟踪微分器滤波性能研究[J]. 系统仿真学报, 2004, 16(4): 651—652.  
WU L Q, LIN H, HAN J Q. Study of tracking differentiator on filtering [J]. Journal of System Simulation, 2004, 16(4): 651—652. (In Chinese)
- [17] 邓毅, 蒋娟, 杨延西. 带有跟踪微分器的无模型自适应控制方法研究[J]. 西安理工大学学报, 2015, 31(1): 61—66.  
DENG Y, JIANG J, YANG Y X. Research on model-free adaptive control method with tracking differentiator [J]. Journal of Xi'an University of Technology, 2015, 31(1): 61—66. (In Chinese)
- [18] 阎维平. 洁净煤发电技术 [M]. 北京: 中国电力出版社, 2002: 79—128.  
YAN W P. Clean coal power generation technology [M]. Beijing: China Electric Power Press, 2002: 79—128. (In Chinese)
- [19] 孙雅茹. 循环流化床锅炉自动控制系统的研究与设计 [D]. 大连: 大连理工大学电子信息与电气工程学部, 2003: 2—50.  
SUN Y R. Research and design of automatic control system for circulating fluidized bed boilers [D]. Dalian: Faculty of Electronic Information and Electrical Engineering, Dalian University of Technology, 2003: 2—50. (In Chinese)
- [20] 张冀, 马永光, 高建强, 等. 循环流化床锅炉燃烧系统动态特性分析[J]. 能源研究与信息, 2001, 17(4): 187—192.  
ZHANG J, MA Y G, GAO J Q, et al. Dynamic characteristic analysis of the combustion system on the circulating fluidized bed boiler [J]. Energy Research and Information, 2001, 17(4): 187—192. (In Chinese)