

文章编号: 1006-4710(2015)01-0061-06

带有跟踪微分器的无模型自适应控制方法研究

邓毅, 蒋娟, 杨延西

(西安理工大学 自动化与信息工程学院, 陕西 西安 710048)

摘要: 针对无模型自适应控制方法对一类存在测量扰动的 SISO 非线性系统控制效果不佳的情况, 将自抗扰控制器中的跟踪微分器作为反馈滤波器加入到无模型自适应控制中, 提出了一种论述无模型自适应控制方法。该方法将测量信号通过反馈通道的跟踪微分器滤波后, 再与给定信号求差得到误差信号进行控制, 从而有效抑制测量干扰带来的影响, 获得更好的输出性能, 提高无模型自适应方法的鲁棒性。仿真结果验证了此方法的有效性。

关键词: 无模型自适应控制; 跟踪微分器; 滤波性能; 测量扰动

中图分类号: TP14

文献标志码: A

Research on model-free adaptive control method with tracking differentiator

DENG Yi, JIANG Juan, YANG Yanxi

(Faculty of Automation and Information Engineering, Xi'an University of Technology, Xi'an 710048, China)

Abstract: With an aim to solve the problem that the basic MFAC (model-free adaptive control) method has had a poor control performance for a class of SISO nonlinear system with measurement disturbance, the tracking differentiator (TD) in the active disturbance rejection control (ADRC) is added to the model-free adaptive control as a feedback filter so that a kind of new method for enhancing the ability to suppress interference is suggested. This method first makes the measured signals filter through the tracking differentiator of the feedback channel and then seek for the differences with given signals to obtain the error signals for carrying out control, whereby effectively suppressing the interference brought about by the measurement. Thus far, better output performance are obtained and the robustness of the model-free adaptive method has been improved. The simulation results verify the effectiveness of this method.

Key words: model-free adaptive control; tracking differentiator; filter performance; measurement disturbance

无模型控制理论与方法, 它是指控制器的设计不显含受控系统的数学模型信息, 仅利用受控系统的在线或离线 I/O 数据以及经过数据处理而得到的知识来设计控制器, 并在一定假设下有收敛性、稳定性保障和鲁棒性结论的控制理论与方法^[1]。无模型控制理论与方法中应用最广泛的就是侯忠生教授于 1993—1994 年提出的无模型自适应控制 (MFAC, model-free adaptive control), 它的基本思想是在受控系统当前工作点处用一个等价的线性动态化模型 (“泛模型”) 来代替一般的离散时间非线性系统, 并利用被控对象的输入输出数据来在线估计动态线性化模型中的伪偏导数 (PPD, pseudo-par-

tial-derivative), 进而实现无模型自适应控制^[2], 该方法已在多个生产领域取得成功应用^[3-7]。

然而, 关于无模型自适应控制方法的鲁棒性问题研究较少。传统的基于模型的控制理论与方法的鲁棒性研究主要是针对外部的未知扰动和内部的未建模动态两方面进行的^[8], 由于 MFAC 方法仅利用受控系统的在线或离线 I/O 数据, 传统的鲁棒控制研究并不适用。文献[9]中指出, 从数据角度来看, 系统产生的 I/O 数据可能受到外部扰动或是由于传感器、执行器的失灵或数据传输故障进而产生数据丢失和不完备的现象, 因此 MFAC 方法的鲁棒性研究应着眼于当系统存在数据噪声扰动和数据丢失

收稿日期: 2014-09-12

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(61174101)。

作者简介: 邓毅, 男, 讲师, 研究方向为智能控制、检测技术与自动化装置。E-mail: yideng@xaut.edu.cn。

时,受控系统的控制性能能否保持。本文主要针对测量扰动对无模型自适应控制系统的影响,提出改进的带有跟踪微分器的无模型自适应控制方法,并进行仿真验证。

1 无模型自适应控制方法

一般离散时间单输入单输出非线性系统为^[10]:

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

其中, $y(k)$ 和 $u(k)$ 分别表示在时刻 k 系统的输出和输入, n_y 和 n_u 分别表示系统的未知阶数, $f(\cdot)$ 为未知的非线性函数。

对于非线性系统(1),在满足一定的假设条件^[10]前提下,当 $\Delta u(k) \neq 0$ 时,一定存在一个被称为是伪偏导数的量 $\hat{\varphi}(k)$,使得:

$$\Delta y(k+1) = \hat{\varphi}(k) \Delta u(k) \quad (2)$$

并且 $|\hat{\varphi}(k)| \leq b$, 其中 b 是一个常数,式(2)称为该系统的紧格式动态线性化(compact form dynamic linearization, CFDL)数据模型,也称为“泛模型”。

基本的无模型自适应控制算法,即基于紧格式动态线性化的无模型自适应控制算法(CFDL-MFAC),描述如下^[10]:

$$\hat{\varphi}(k) = \hat{\varphi}(k-1) + \frac{\eta \Delta u(k-1)}{\mu + |\Delta u(k-1)|^2} \quad (3)$$

$$(\Delta y(k) - \hat{\varphi}(k-1) \Delta u(k-1))$$

$$\hat{\varphi}(k) = \hat{\varphi}(1), \text{ 如果 } |\hat{\varphi}(k)| \leq \epsilon$$

$$\text{或 } |\Delta u(k-1)| \leq \epsilon \text{ 或 } \text{sign}(\hat{\varphi}(k)) \neq \text{sign}(\hat{\varphi}(1)) \quad (4)$$

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

式中, $\lambda > 0$ 是一个权重因子, $\mu > 0$ 也为一个权重因子, $\rho \in (0, 1]$, $\eta \in (0, 1]$ 是步长因子, ϵ 为一个小正数, $\hat{\varphi}(k)$ 是伪偏导数, $\hat{\varphi}(1)$ 是 $\hat{\varphi}(k)$ 的初值, $y^*(k+1)$ 为期望的输出信号。算式(4)的引入是为了使式(3)估计算法具有更强的对时变参数的跟踪能力。无模型自适应控制算法的实质就是由基本的泛模型伪偏导数估计算法(3)和控制算法(5)这两个算法在线交互组成的^[11]。

2 无模型自适应控制扰动作用分析

工业过程中的测量扰动是由于在测量过程中引入外部扰动信号,而导致无法对系统的真实输出进行测量而产生的,这类扰动大多数为随机噪声信号。

当存在输出量测扰动时,无模型自适应控制系统结构如图1所示:

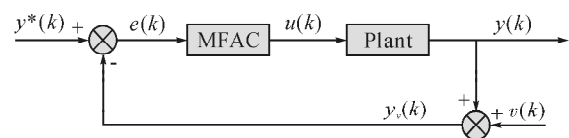


图1 存在输出量测扰动的 MFAC 系统

Fig. 1 Model-free adaptive control system with output measurement disturbance

其中, $y_v(k)$ 为测量输出, $v(k)$ 为测量扰动信号, $y(k)$ 为系统实际输出, $e(k)$ 为偏差。文献[12]中指出,在存在外部测量扰动情况下,CFDL-MFAC 方案将有小的变化,即式(3)中的 $\Delta y(k)$ 被 $\Delta y_v(k)$ 代替,式(5)中的 $[y^*(k+1) - y(k)]$ 被 $[y^*(k+1) - y_v(k)]$ 代替,公式中其他部分保持不变, $\Delta y_v(k) = y_v(k) - y_v(k-1)$, $y_v(k) = y(k) + v(k)$ 。

文献[12]中还指出针对非线性系统(1),当系统不存在测量扰动时,输出误差收敛到0,当系统存在测量扰动且测量噪声满足 $|v(k)| < b_v$ 时,采用修改后的CFDL-MFAC方法(存在外部测量扰动时的方案),MFAC方案可以保证跟踪误差有界,输出误差收敛到一个不为0的常数。因此,当系统存在有界的测量扰动时,无模型自适应控制虽然能保持鲁棒稳定性,但是系统的控制性能变差,为此,本文将跟踪微分器与无模型自适应控制方法相结合,提出带有跟踪微分器的无模型自适应控制方法。

3 跟踪微分器

跟踪微分器(TD, Tracking differentiator)是“自抗扰控制器”的重要组成部分,具有较好的滤波、安排过渡过程和相位超前等功能。文献[13]给出了自抗扰技术应用于滤波效果的研究成果,并指出选取合适的参数可以获得很好的滤波效果。文献[14]和文献[15]分别将跟踪微分器应用于着航导引系统中的滤波模块和提高独立电源系统有源滤波器性能,均取得了较好的效果。

跟踪微分器是这样—个动态系统,对其输入信号 $v(t)$,它将给出两个输出信号 $x_1(t)$ 和 $x_2(t)$,其中 $x_1(t)$ 跟踪输入信号 $v(t)$, $x_2(t)$ 是 $x_1(t)$ 的微分,由跟踪微分器得到的微分信号是输入信号广义导数的一种光滑逼近。韩京清教授提出的离散形式的非线性跟踪微分器在一些运动控制系统中得到应用^[16]。

常用的一种离散化的跟踪微分器如下^[17]:

$$\begin{cases} x_1(k+1) = x_1(k) + T x_2(k) \\ x_2(k+1) = x_2(k) + T \text{fst}[x_1(k), x_2(k), u(k), r, h] \end{cases} \quad (6)$$

其中 $\text{fst}(\cdot)$ 是最速控制综合函数,如下所示:

$$\delta = rh, \delta_1 = \delta h \quad (7)$$

$$y(k) = x_1(k) - u(k) + hx_2(k) \quad (8)$$

$$a_0 = \sqrt{\delta^2 + 8r|y(k)|} \quad (9)$$

$$a(k) = \begin{cases} x_2(k) + y(k)/h \\ (|y(k)| \leq \delta_1) \\ x_2(k) + 0.5(a_0 - \delta)\text{sign}(y(k)) \\ (|y(k)| > \delta_1) \end{cases} \quad (10)$$

$$fst(x_1(k), x_2(k), u(k), r, h) = \begin{cases} -ra(k)/\delta \\ (|a(k)| \leq \delta) \\ -r\text{sign}(a(k)) \\ (|a(k)| > \delta) \end{cases} \quad (11)$$

式中, $u(k)$ 是输入信号, $x_1(k)$ 是输入信号的跟踪输出, $x_2(k)$ 是输入信号微分的输出, T 是离散化采样步长, h 是滤波因子, 是可调参数, r 是反映跟踪快慢的速度因子, 是可调参数, 当输入信号 $u(k)$ 被噪声污染时, 信号 x_1 也会被污染, 可以选取合适的 h , 滤掉 x_1 中所含的噪声。

4 带有跟踪微分器的无模型自适应控制算法

目前, 针对测量扰动信号, 控制算法中常引用衰减因子或死区环节来处理, 文献[18]中提出带有死区的无模型自适应控制, 死区的引入使得系统可以获得较好的平稳性, 有效减小测量扰动带来的影响, 但是阈值难以确定。文献[19]中提出一种带有衰减因子的无模型自适应控制方法, 该方法主要是在控制算法中引入衰减因子, 使得控制算法的更新随着时间的增加而逐步减小, 从而逐渐削弱测量扰动的影响。但是衰减因子的引入使得某时刻后控制量不再更新, 当系统存在时变参数、结构变化或期望值变化时, 该方法就不再适用, 有一定的局限性。

本文将跟踪微分器作为反馈滤波器加入到 MFAC 中, 利用跟踪微分器的滤波性能, 将输出信号从噪声中分离出来, 得到误差信号进行无模型自适应控制, 充分利用两种方法的优点, 从而增强无模型自适应控制方法抑制干扰的能力, 带有跟踪微分器的无模型自适应控制算法(MFAC-TD)框图如图 2。

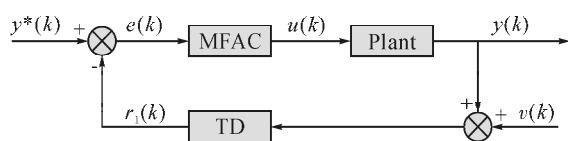


图 2 带有跟踪微分器的无模型自适应控制算法框图
Fig. 2 Block diagram of model-free adaptive control with tracking differentiator

设计带有跟踪微分器的控制算法如下:

$$u(k) = u(k-1) + \frac{\rho \hat{\varphi}(k)}{\lambda + |\hat{\varphi}(k)|^2} [y^*(k+1) - r_1(k)] \quad (12)$$

其中, $r_1(k)$ 是误差信号经过跟踪微分器处理后的信号。

具体实现步骤如下:

1) 利用跟踪微分器的滤波性能, 使用跟踪微分器的第一个输出 $r_1(k)$, 即输入信号的跟踪输出, 使得输出信号能够从噪声信号中分离出来, 然后与给定输入 $y^*(k)$ 求得偏差 $e(k)$;

2) 根据泛模型伪偏导数估计算法(式(3)中的 $\Delta y(k) = r_1(k) - r_1(k-1)$) 估计出伪偏导数 $\hat{\varphi}(k)$;

3) 将控制律算法式(12)作用于系统, 得到新的输出值 $y(k+1)$, 这样便组成了一组新的观察数据对 $\{u(k), y(k+1)\}$;

最后利用这组数据对重复以上步骤, 得到新的数据对 $\{u(k+1), y(k+2)\}$, 如此循环, 系统的输出 $y(k)$ 会逐步逼近给定输入 $y^*(k)$, 完成控制过程。

5 仿真研究

本文采用 MATLAB 软件进行仿真实验。

仿真实例 1 举例说明跟踪微分器的滤波性能。输入信号是频率为 1、幅值为 2 的方波信号与噪声信号的叠加; 噪声信号是均值为 0、均方差为 0.1 的高斯白噪声。离散跟踪微分器中, 三个参数分别为采样时间 $T=0.001$, 速度因子 $r=500$, 滤波因子 $h=0.001$ 。仿真结果如图 3 所示。

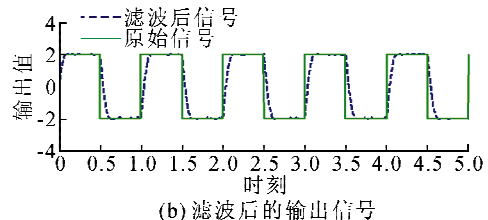
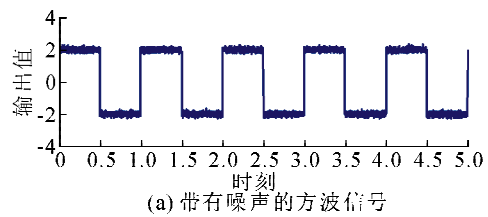


图 3 带噪声信号与滤波后信号
Fig. 3 Signal with noise and Signal filtered

仿真实例 2 考虑如下非线性系统:

$$y(k+1) = \frac{y(k)y(k-1)y(k-2)u(k-1)(y(k)-1) + 2u(k)}{1 + y^2(k) + y^2(k-1) + y^2(k-2)}$$

系统的期望输出是幅值为 0.5 的方波信号： $y^*(k+1)=0.5 \times (-1)^{fix(k/200)}$ 。

采用无模型自适应控制算法对该非线性系统进行控制,系统初始条件设置为 $u(1:2)=0, y(1:2)=0$, 伪偏导数的初值 $\hat{\varphi}(1)=0.5, \epsilon=10^{-5}$; 控制器参数为 $\lambda=0.2, \rho=0.15, \eta=0.5, \mu=1$ 。仿真结果如图 4 所示。图 5 表示系统存在测量扰动时 MFAC 的控制效果。测量扰动为均值为 0, 均方差 0.1 的白噪声信号。

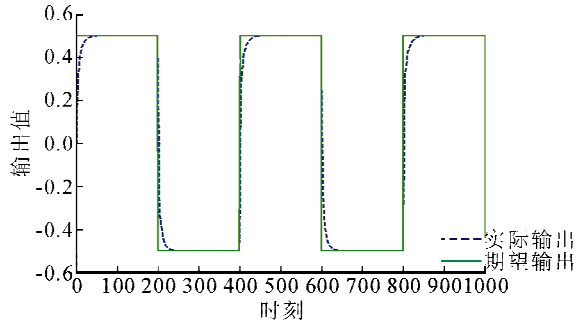


图 4 MFAC 控制算法仿真结果图
Fig. 4 MFAC algorithm simulation result

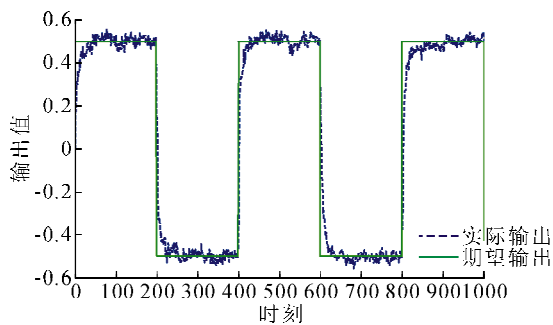


图 5 带有测量噪声的 MFAC 仿真结果
Fig. 5 MFAC result with measurement noise

由图 4 可以看出无模型自适应控制算法可以很好的控制这类非线性对象,系统输出可以很好的跟踪期望输出。控制参数保持不变,当系统存在测量扰动时, MFAC 方法的控制效果变差,系统输出有很大的波动,如图 5 所示。

仿真实例 3 仿真对象依旧为仿真实例 2 中的非线性系统,采用 MFAC 和 MFAC-TD 两种控制算法进行比较。系统初值和伪偏导数保持不变,测量干扰是均值为 0、均方差 0.1 的白噪声信号。MFAC 方法控制器参数为 $\lambda=2, \rho=0.1, \eta=0.5, \mu=1$, MFAC-TD 方法控制器参数为: $\lambda=2, \rho=0.1, \eta=0.5, \mu=1, T=0.001, h=0.001, r=800$ 。仿真结果如图 6 所示,其中实线为期望输出。

将图 5 与图 6 对比可以看出,当系统存在测量干扰且干扰较小时,改变 MFAC 的控制参数,可以在一定程度上减小噪声所带来的干扰,使得系统的输出抖

动幅度减小,体现出 MFAC 方法具有一定的鲁棒性,但是系统的响应速度变慢;采用 MFAC-TD 方法不仅使得系统输出抖动减小,并且与 MFAC 方法相比,系统响应速度较快,能较好地跟踪期望信号。

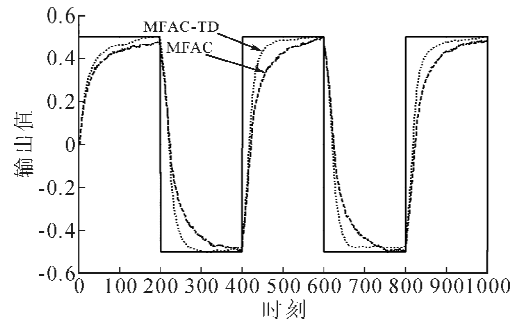


图 6 MFAC 和 MFAC-TD 跟踪性能对比 1
Fig. 6 MFAC and MFAC-TD tracking performance comparison 1

控制参数保持不变,系统干扰变大,测量干扰为均值为 0、均方差 0.2 的白噪声信号,对比两种算法仿真结果,控制效果如图 7 所示,其中实线为期望输出。

由图 7 可以看出,在保持两种算法控制参数不变的情况下,增大噪声干扰,采用 MFAC 方法得到的输出信号抖动明显变大,控制性能变差,噪声带来的影响比较明显。而 MFAC-TD 控制方法得到的输出信号抖动不明显,响应速度依旧比 MFAC 控制方法快。由此,可以很好的体现 MFAC-TD 方法在存在干扰时强的鲁棒性。

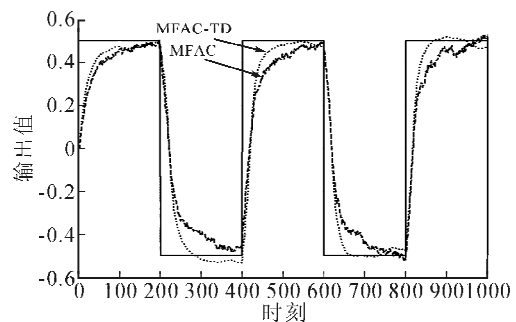
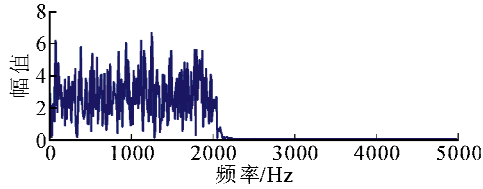


图 7 MFAC 和 MFAC-TD 跟踪性能对比 2
Fig. 7 MFAC and MFAC-TD tracking performance comparison 2

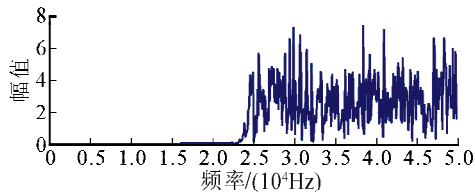
仿真实例 4 实际应用过程中,噪声干扰的类型可能是白噪声,也有可能是有色噪声,为了验证跟踪微分器对有色噪声的滤波性能,下面针对有色噪声进行仿真实验(有色噪声可通过白噪声经过滤波器滤波^[20]得到)。

被控对象依旧为上述非线性对象,噪声类型为某低频噪声和某高频噪声。白噪声通过低通滤波器得到低频噪声,低通滤波器的通带临界频率为 2 kHz,通带衰减小于 0.5 dB,阻带衰减大于 50 dB。

白噪声通过高通滤波器得到高频噪声,高通滤波器的通带临界频率为 25 kHz,通带衰减小于 0.5 dB,阻带衰减大于 50 dB。通过滤波器得到的有色噪声频谱如图 8 所示。



(a) 高斯低频噪声频谱



(b) 高斯高频噪声频谱

图 8 低频和 高频信号频谱

Fig. 8 Low frequency and High frequency spectrum

在保持 MFAC 和 MFAC-TD 控制器参数不变的情况下,分别使用这两种方法对带有低频噪声干扰和带有高频噪声干扰的系统进行仿真实验,仿真结果如图 9 和图 10 所示,其中实线为期望输出。

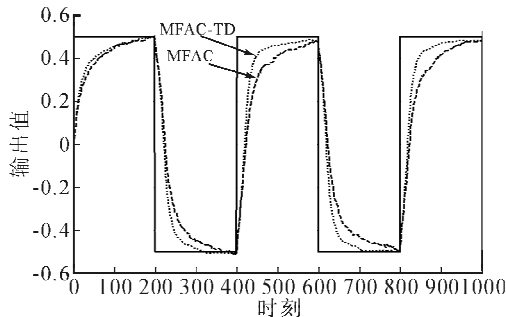


图 9 带有低频噪声的 MFAC 和 MFAC-TD 跟踪性能对比曲线

Fig. 9 MFAC and MFAC-TD tracking performance comparison curve for low frequency signal

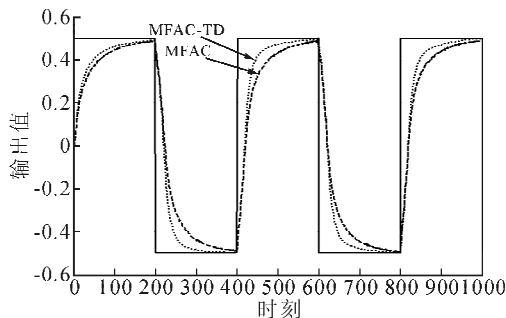


图 10 带有高频噪声的 MFAC 和 MFAC-TD 跟踪性能对比曲线

Fig. 10 MFAC and MFAC-TD tracking performance comparison curve for high frequency signal

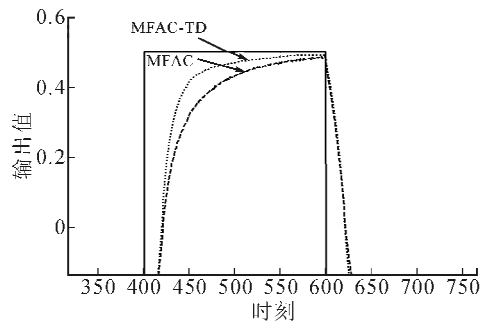


图 11 图 10 的局部放大图

Fig. 11 Local amplification of Fig. 10

对比图 6、图 9、图 10 和图 11 可以看出,在参数固定不变时,对被控系统采用 MFAC 方法控制时,只有高频噪声所带来的系统输出抖动较小,白噪声和低频噪声带来的输出抖动都较大,并且系统响应速度慢,体现出 MFAC 对高频噪声有较强的抑制作用。对被控系统采用 MFAC-TD 方法控制时,不论是白噪声还是低频或高频噪声,系统的输出曲线均比较光滑,响应速度快,可以较好的跟踪期望输出,体现出改进的无模型自适应控制方法对白噪声和有色噪声都有很好的抑制作用。

从以上的仿真实例中可以看出,存在测量扰动时,调节 MFAC 算法的参数,可以使得系统的输出颤振的幅值减小,但是系统的快速性变差。可见 MFAC 方法虽然有一定抑制噪声干扰的能力(特别是针对高频噪声),但是控制效果不好。不论系统的测量扰动是白噪声还是低频或高频噪声,采用 MFAC-TD 方法,既可以使系统输出抖动较小,输出曲线光滑(特别的,测量干扰越大, MFAC-TD 方法的滤波性能越明显),又在一定程度上提高了响应速度,有效地抑制噪声对系统带来的影响。

6 结 论

本文针对系统存在有界的测量扰动时,无模型自适应控制方法虽然能保持鲁棒稳定性,但是系统的控制性能变差的情况,将跟踪微分器作为反馈滤波器引入到无模型自适应控制中,提出一种增强无模型自适应控制算法鲁棒性的改进算法。改进的 MFAC-TD 方法在系统存在有界噪声干扰的情况下,充分利用跟踪微分器的滤波特性,得到较为平滑的输出,有效减小测量扰动带来的影响,提高响应速度,进一步提高基本 MFAC 方法的抗干扰性。仿真结果验证了该方法的有效性。

参考文献:

[1] Hou Zhongsheng, Wang Zhuo. From model-based to

- data-driven control: survey, classification and perspective[J]. *Information Sciences*, 2013, (235): 3-35.
- [2] 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.
- [3] 曹荣敏, 侯忠生. 直线电机的非参数模型直接自适应预测控制[J]. *控制理论与应用*, 2008, 25(3): 587-590.
Cao Rongmin, Hou Zhongsheng. Non-parametric model direct adaptive predictive control for linear motor[J]. *Control Theory & Applications*, 2008, 25(3): 587-590.
- [4] 马洁, 陈智勇, 侯忠生. 大型舰船综合减摇系统无模型自适应控制[J]. *控制理论与应用*, 2009, 26(11): 1289-1292.
Ma jic, Chen Zhiyong, Hou Zhongsheng. Model-free adaptive control of integrated roll-reducing system for large warships [J]. *Control Theory & Applications*, 2009, 26(11): 1289-1292.
- [5] 胡元胜, 张广林, 刘超, 等. 工业串联非线性系统无模型自适应控制[J]. *工业仪表与自动化装置*, 2011, (4): 81-83.
Hu Yuansheng, Zhang Guanglin, Liu Chao, et al. Model-free adaptive control for cascade industrial nonlinear system [J]. *Industrial Instrumentation & Automation*, 2011, (4): 81-83.
- [6] 刘昱, 王涛, 范伟, 等. 气动肌肉群驱动球关节机器人的无模型自适应控制[J]. *机器人*, 2013, 35(2): 129-134.
Liu Yu, Wang Tao, Fan Wei, et al. Model-free adaptive control for the ball-joint Robot driven by PMA group [J]. *Robot*, 2013, 35(2): 129-134.
- [7] 刘纯国, 隋振, 付文智, 等. 板材多点成形过程的非参数模型自适应控制[J]. *控制工程*, 2004, 11(4): 306-308.
Liu Chunguo, Sui Zhen, Fu Wenzhi, et al. Non-parametric model and adaptive control for multi-point forming process[J]. *Control Engineering*, 2004, 11(4): 306-308.
- [8] 李江, 钱富才. 具有双重不确定性非线性系统输出反馈鲁棒控制[J]. *西安理工大学学报*, 2012, 28(2): 161-167.
Li Jiang, Qian Fucai. Output feedback robust control for nonlinear systems with dual uncertainties[J]. *Journal of Xi'an University of Technology*, 2012, 28(2): 161-167.
- [9] 侯忠生, 许建新. 数据驱动控制理论及方法的回顾和展望[J]. *自动化学报*, 2009, 35(6): 650-667.
Hou Zhongsheng, Xu Jianxin. On Data-driven Control Theory: the state of the art and perspective [J]. *Acta Automatica Sinica*, 2009, 35(6): 650-667.
- [10] 侯忠生. 非参数模型及其自适应控制理论[M]. 北京: 科学出版社, 1999.
- [11] 韩志刚. 关于建模与自适应控制的一体化途径[J]. *自动化学报*, 2004, 30(3): 380-390.
- Han Zhigang. An integrated approach to modeling and adaptive control[J]. *Acta Automatica Sinica*, 2004, 30(3): 380-390.
- [12] 卜旭辉. 数据驱动无模型自适应控制与学习控制的鲁棒性问题研究[D]. 北京: 北京交通大学, 2011.
Bu Xuhui. On robustness of data-driven model free adaptive control and learning control[D]. Beijing: Beijing Jiaotong University, 2011.
- [13] 宋金来, 甘作新, 韩京清. 自抗扰控制技术滤波特性的研究[J]. *控制与决策*, 2003, 18(1): 110-112.
Song Jinlai, Gan Zuoxin, Han Jingqing. Study of active disturbance rejection controller on filtering[J]. *Control and Decision*, 2003, 18(1): 110-112.
- [14] 李冀鑫, 侯志强, 郑小洪. 离散跟踪微分跟踪器在着航导引滤波中的应用[J]. *飞行力学*, 2008, 26(4): 69-72.
Li Jixin, Hou Zhiqiang, Zheng Xiaohong. Application of discrete tracking differentiator to carrier landing guidance filtering [J]. *Flight Dynamics*, 2008, 26(4): 69-72.
- [15] 弥寒光, 袁海文, 郭鑫, 等. 利用跟踪微分器提高独立电源系统有源滤波器滤波性能的研究[J]. *电力自动化设备*, 2012, 32(2): 76-80.
Mi Hanguang, Yuan Haiwen, Guo Xin, et al. Improving active filter performance by tracking differentiator for islanded power system[J]. *Electric Power Automation Equipment*, 2012, 32(2): 76-80.
- [16] Su Y X, Duan B Y, Zheng C H, et al. Disturbance-rejection high-precision motion control of a Stewart platform[J]. *IEEE Transaction on Control Systems Technology*, 2004, 12(3): 264-274.
- [17] 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): 651-654.
Wu Liqiang, Lin Hao, Han Jingqing. Study of tracking differentiator on filtering[J]. *Journal of System Simulation*, 2004, 16(4): 651-654.
- [18] 李俊玲. 预测控制、无模型控制若干问题的研究[D]. 长春: 吉林大学, 2008.
Li Junling. Research on predictive control and model free control[D]. Changchun: Jilin University, 2008.
- [19] Bu X, Hou Z, Yu F, et al. Robust model free adaptive control with measurement disturbance [J]. *IET Control Theory & Applications*, 2012, 6(9): 1288-1296.
- [20] 孟桥, 董志芳, 王琼. 信号与系统 Matlab 实践[M]. 北京: 高等教育出版社, 2008.

(责任编辑 周蓓)