

气动加载系统的无模型自适应控制方法^①任丽娜^② 李小广 高琳琪 刘福才^③

(燕山大学工业计算机控制工程河北省重点实验室 秦皇岛 066004)

摘 要 针对气动加载系统压力跟踪控制中的强耦合性、强非线性、不确定性等问题,将跟踪微分器(TD)作为反馈滤波器加入到无模型自适应控制(MFAC)中。结合 2 种方法的优点,可以有效抑制外界干扰对系统带来的影响,获得更好的输出性能,提高控制系统的鲁棒性。在气动变载荷摩擦磨损实验机控制平台上进行了实验验证,与无模型自适应控制进行对比,实验结果表明,改进的控制器具有抗干扰性强、响应速度快、鲁棒性强等特点。

关键词 气动加载系统;无模型自适应控制(MFAC);跟踪微分器(TD);压力跟踪控制

0 引言

气动加载系统中由于空气的可压缩性、气缸两腔的充排气特性以及气缸摩擦力等因素,导致气动加载系统的强非线性、强耦合性,这些因素给气动加载系统的建模和控制系统设计带来许多困难,这也致使气动系统的压力跟踪控制成为工业应用中的难题^[1-4]。

为了解决这些问题,出现了许多针对气动加载系统的控制策略。文献[5]基于 LuGre 摩擦模型提出了摩擦补偿方案,无需确定摩擦系数,实现了气动伺服制动器的轨迹跟踪控制。文献[6]提出了针对主从气动伺服系统的滑模双边遥操作控制,并做了相关的稳定性分析和闭环频域分析,并且通过增加控制电平减少可开关次数,提高了阀的使用寿命。文献[7]提出非线性自适应反演控制策略来对气动机械手的位置进行控制,实现了高精度的稳定控制。文献[8]中的模糊自适应逆控制方案,将模糊辨识理论应用到气动加载系统的模型建立上,采用离线逆建模的方法,并进一步采用最小均方根滤波算法在线修正控制器参数。

这些控制算法均可以取得不错的控制效果,但是这些方法都或多或少依赖于被控对象的数学模型。而气动系统建模的复杂性以及系统运行过程中存在的各种不确定性扰动增大了控制难度。另外,一些控制方案十分复杂,不利于在实际工程中应用。文献[9]提出了设计无模型自适应控制器(model-free adaptive control, MFAC)来进行气缸压力控制,实验结果证实了控制器的有效性,无模型自适应控制器仅利用受控系统的在线或离线 I/O 数据来设计控制器,算法简单,易于工程实现。文献[10]指出,当系统存在有界的测量扰动时,无模型自适应控制器虽然能保持鲁棒稳定性,但是系统的控制性能会变差。

本文将跟踪微分器(tracking differentiator, TD)与无模型自适应控制方法相结合,设计带有跟踪微分器的无模型自适应控制器,并在气动变载荷加载实验台上进行压力跟踪控制。观察在给系统施加外部扰动之后系统的控制效果,并与无模型自适应控制进行比较。

1 跟踪微分器

最早的跟踪微分器是根据二阶系统的时间最优

① 国家自然科学基金(51605415)和载人航天预先研究(040301)资助项目。

② 女,1982年生,博士,副教授;研究方向:风力发电控制技术,风光储协调控制分析与设计等;E-mail: renlina@ysu.edu.cn

③ 通信作者, E-mail: lfc@ysu.edu.cn

(收稿日期:2019-04-22)

控制得到的,采用的是非线性形式,具有良好的快速性,但是存在一定的颤振现象^[11]。针对这种情况,文献[12]中用“等时区方法”讨论了离散系统的最速控制问题,提出了跟踪微分器的离散形式,不但可以消除颤振,而且动态响应好,稳态精度高。

跟踪微分器对于输入信号 $v(t)$, 将输出 2 个信号 x_1 和 x_2 , 其中 x_1 跟踪 $v(t)$, 而 $x_2 = \dot{x}_1$, 从而把 x_2 作为 $v(t)$ 的近似微分。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。

TD 的离散化公式为

$$\begin{cases} x_1(k+1) = x_1(k) + hx_2(k) \\ x_2(k+1) = x_2(k) + hf(x_1(k), x_2(k), v(k), r, h) \end{cases} \quad (1)$$

其中, x_1 用于跟踪输入信号 v , x_2 用于跟踪 v 的导数, $f(x_1(k), x_2(k), v(k), r, h)$ 用于跟踪输入信号 v 的二阶导数。 r 是决定跟踪快慢的参数, r 越大, x_1 越能更快地跟踪信号 v 。 h 是数值积分步长, 适当的选取 h 能获得很好的滤波效果。

$f(x_1(k), x_2(k), v(k), r, h)$ 是如下的非线性函数:

$$f(x_1(k), x_2(k), v(k), r, h) = -r \cdot \text{sat}(g(k), \delta) \quad (2)$$

其中, $\delta = hr$, $\delta_1 = h\delta$, $e(k) = x_1(k) - v(k)$, $y(k) = e(k) + hx_2(k)$ 。

$$\text{sat}(x, \delta) = \begin{cases} \text{sign}(x) & |x| \geq \delta \\ x/\delta & |x| < \delta \end{cases} \quad (3)$$

$g(k) =$

$$\begin{cases} x_2(k) - \text{sign}(y(k)) \cdot (\delta - \sqrt{8r|y(k)|} + \delta^2) & |y(k)| \geq \delta_1 \\ x_2(k) + x_1(k)/h & |y(k)| < \delta_1 \end{cases} \quad (4)$$

2 带有跟踪微分器的无模型自适应控制器设计

2.1 无模型自适应控制

基于紧格式动态线性化的无模型自适应控制算法最主要的部分是对伪偏导数 $\phi(k)$ 的估计, 下面介绍伪偏导数估计准则函数^[13,14]。

$$J(\phi(k)) = [y^*(k) - y(k-1) - \phi(k)\Delta u(k-1)]^2 + \mu[\phi(k) - \hat{\phi}(k-1)]^2 \quad (5)$$

其中, $y^*(k)$ 表示 k 时刻系统的输出, μ 是权重因子。

对 $\phi(k)$ 求导并令其等于 0, 得到如下的伪偏导数估计算法:

$$\hat{\phi}(k) = \hat{\phi}(k-1) + \frac{\eta_k \Delta u(k-1)}{\mu + |\Delta u(k-1)|^2} [\Delta y(k) - \hat{\phi}(k-1)\Delta u(k-1)] \quad (6)$$

其中, η_k 是步长序列, μ 是关于参数估计变化量的权重因子。

根据上面的参数估计算法以及控制律算法可以得出如下不依赖于受控系统数学模型的 MFAC 控制方案。

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

$$\hat{\phi}(k) = \hat{\phi}(1) \quad \hat{\phi}(k) \leq \varepsilon \quad \text{或} \quad |\Delta u(k-1)| \leq \varepsilon \quad (8)$$

$$u(k) = u(k-1) + \frac{\rho_k \hat{\phi}(k)}{\lambda + |\hat{\phi}(k)|^2} [y^*(k+1) - y(k)] \quad (9)$$

其中, $\eta_k, \rho_k \in (0, 2)$, μ, λ 是权重因子, ε 是一充分小的正数, $\hat{\phi}(1)$ 是 $\hat{\phi}(k)$ 的初值。其基本算法是由泛模型的辨识算法和基本控制算法在线交互而组成的。当经过辨识得到 $\hat{\phi}(k)$ 后, 即可应用控制规律将系统进行反馈控制。控制结果将得到一组新的观测数据, 在已有数据中添加这一组新数据, 再对 $\hat{\phi}(k+1)$ 进行辨识, 如此继续下去, 就是基于紧格式动态线性化的无模型自适应控制算法。

2.2 带有跟踪微分器的无模型自适应控制

跟踪微分器的设计简单, 实用性强, 并且还具有很好的滤波性能^[10]。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来抑制噪声, 让含有干扰的系统先通过跟踪微分器, 将输出信号从噪声中分离出来, 得到误差信号再进行无模型自适应控制, 从而加强 MFAC 对噪声的抑制能力。其结构框图如图 1 所示。其中, ysk

为系统给定信号, $r(k)$ 为干扰噪声信号, $x_1(k)$ 为跟踪微分器去除噪声处理后的信号, $e(k)$ 为误差信号, $u(k)$ 为控制器的输出信号, $y(k)$ 为系统实际输出。

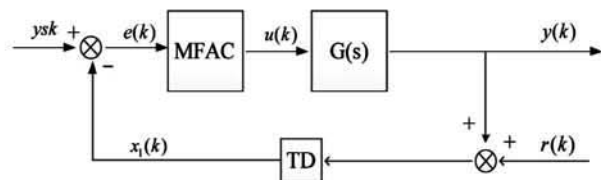


图1 TD-MFAC 结构框图

根据结构框图,本文所设计的带有跟踪微分器的无模型自适应控制算法为

$$u(k) = u(k-1) + \frac{\rho_k \hat{\phi}(k)}{\lambda + |\hat{\phi}(k)|^2} [y^*(k+1) - x_1(k)] \quad (10)$$

其中, $x_1(k)$ 是带有误差的输出信号经过跟踪微分器处理之后的信号。

具体实现方法如下^[15]:

(1) 将带有误差扰动的实际输出首先经过跟踪微分器 TD, 利用跟踪微分器的滤波性能, 得到去除噪声处理后的信号 $x_1(k)$, 并与给定信号 ysk 求取偏差信号 $e(k)$ 。

(2) 利用伪偏导数估计算法式(6), 计算出伪偏导数 $\hat{\phi}(k)$ 。

(3) 将带有跟踪微分器的无模型自适应控制算法式(10)作用于系统, 得到新的系统输出数据 $y(k+1)$, 并由此得到了一组新的数据 $\{u(k), y(k+1)\}$ 。

然后利用新的数据重复进行步骤(1)、(2)、(3), 即可又得到新的系统数据 $\{u(k+1), y(k+2)\}$ 等, 如此不断循环下去, 系统的实际输出 $y(k)$ 会逐渐逼近系统的期望输出 ysk 。

3 实验研究

本文所采用的气动变载荷加载系统主要由稳压气源、SMC 的单杆双作用气缸、ITV 电气比例阀、气动二联件、MCL-ZT 拉压力传感器、信号变送装置及工控机组成。气动加载系统工作原理如图2所示。

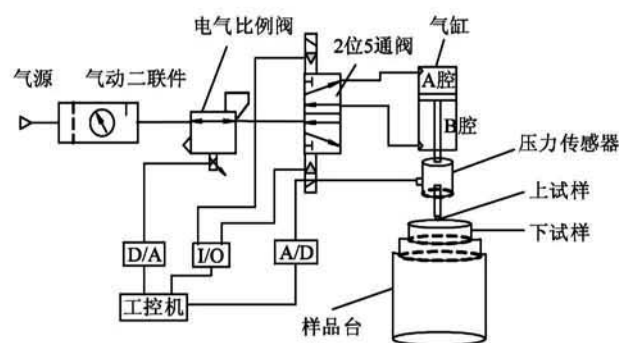


图2 气动加载系统原理图

在图2中, 气泵提供气源, 工控机通过数据采集卡采集压力信号, 离散化的控制程序将采集到的压力传感器输出反馈信号和给定信号作差运算, 通过相应的控制算法, 产生相应的控制量, 然后经过模拟量输出单元转换为电流, 从而控制电气比例阀的开度, 最终控制气体流量和气缸的输出压力; 压力传感器作为检测元件, 位于气缸与受力系统之间, 实时反馈加载压力大小, 实现输出加载压力对输入信号的动态跟踪。其中系统的主要物理参数标称值见表1。

表1 气动加载系统物理参数标称值

名称	参数值	单位
气体常数	287	J/kg · K
气体温度	293	K
粘滞摩擦系数	9.29	N · s/m
气缸 A 腔横截面积	0.00312	m ²
气缸 B 腔横截面积	0.00287	m ²
气缸杆横截面积	0.00025	m ²
活塞和负载总质量	3	kg

该实验机适用于数值连续可变的变载荷加载, 实物如图3所示。控制界面利用 Visual Studio 编程平台编写, 控制算法式(7)~(10)采用 VC++ 语言实现。

在压力传感器处, 利用一个小型步进电机来施加恒定扰动, 代替实际操作系统中的不确定干扰。对气动变载荷加载系统分别输入阶跃信号、正弦信号和方波信号, 待系统稳定之后启动步进电机施加恒定扰动, 观察 MFAC 和 TD-MFAC 在面对外界扰动情况下的控制效果。

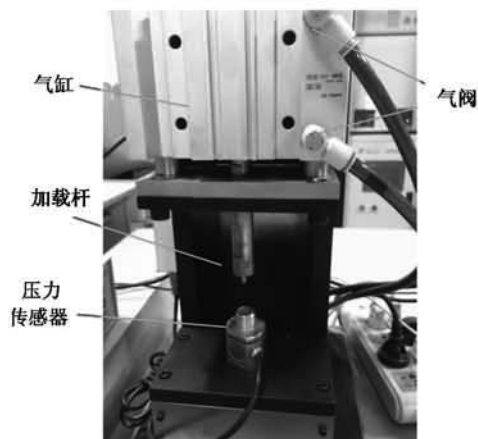


图3 气动变载荷加载实验机

3.1 阶跃加载

压力给定幅值为 500 N 的阶跃信号,将控制器参数都调至最优,MFAC 参数为 $\lambda = 4$, $\mu = 0.1$, $\rho = 1$, $\eta = 1$, TD-MFAC 参数为 $\lambda = 4$, $\mu = 0.1$, $\rho = 1$, $\eta = 1$, $h = 0.1$, $r = 1500$, 等待系统跟踪稳定后利用步进电机施加约为 80 N 的恒值扰动,MFAC 和 TD-MFAC 控制下系统的压力跟踪曲线和误差曲线分别如图 4 和图 5 所示。

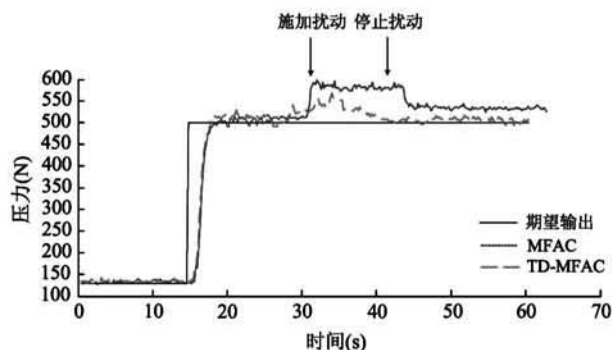


图4 阶跃加载压力跟踪曲线

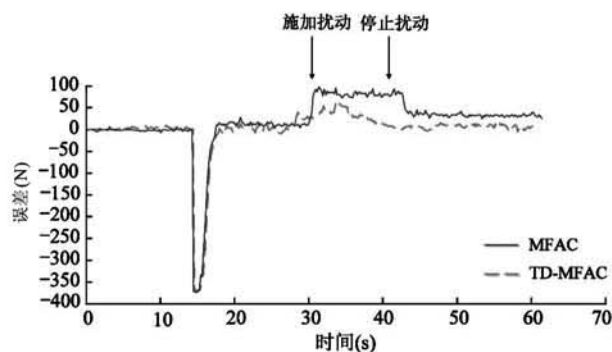


图5 阶跃加载误差曲线

由图 4 和图 5 可知,在不存在外部扰动或外部扰动极小可忽略不计时,2 种控制器控制效果接近,均能达到控制要求。在 30 s 左右,系统跟踪完全稳定后,对系统输出施加持续 10 s 左右的恒值外部扰动,2 种控制器控制下的输出信号均发生突变,产生超调。但是 TD-MFAC 控制下产生的超调小,恢复速度快,系统压力跟踪平滑,鲁棒性更强。

3.2 正弦加载

压力给定幅值为 500 N,周期为 10 s 的正弦信号,将控制器参数都调至最优,MFAC 参数为 $\lambda = 0.1$, $\mu = 0.1$, $\rho = 0.5$, $\eta = 1$, TD-MFAC 参数为 $\lambda = 0.1$, $\mu = 0.1$, $\rho = 0.5$, $\eta = 1$, $h = 0.15$, $r = 2000$, 等待系统稳定加载后利用步进电机施加约为 80 N 的恒值扰动,MFAC 和 TD-MFAC 控制下系统的压力跟踪曲线和误差曲线分别如图 6 和图 7 所示。

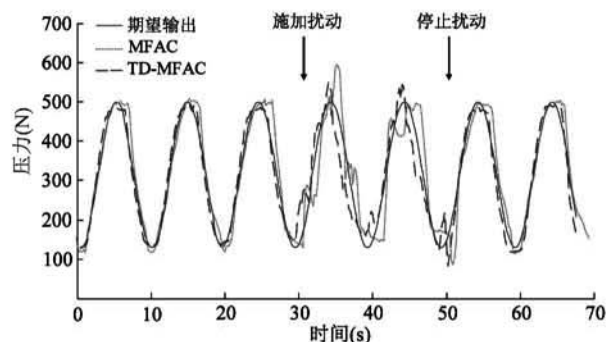


图6 正弦加载压力跟踪曲线

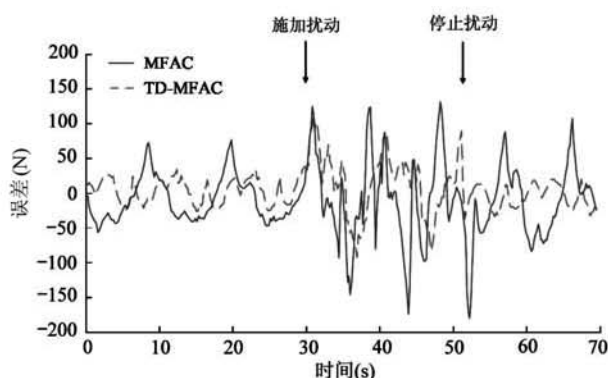


图7 正弦加载误差曲线

由图 6 和图 7 可知,不存在外部扰动或外部扰动极小可忽略不计时,2 种控制器参数调至最优后均跟踪效果良好。在 30 s 左右,待系统跟踪稳定后,对系统输出施加持续 20 s 左右的恒值外部扰

动,此时在 2 种控制器控制下,TD-MFAC 控制下产生的超调小,峰值误差小,输出信号相对平滑,控制精度较高,而 MFAC 控制下,系统在突加干扰后有明显的震荡效果,并在峰值处有较大误差。

3.3 方波加载

压力给定幅值为 500 N、周期为 10 s 的方波信号,将控制器参数都调至最优,MFAC 参数为 $\lambda = 1$, $\mu = 0.2$, $\rho = 1$, $\eta = 1$, TD-MFAC 参数为 $\lambda = 1$, $\mu = 0.2$, $\rho = 1$, $\eta = 1$, $h = 0.5$, $r = 1800$,等待系统跟踪稳定后利用步进电机施加约为 80 N 的恒值扰动,MFAC 和 TD-MFAC 控制下系统的压力跟踪曲线和误差曲线分别如图 8 和图 9 所示。

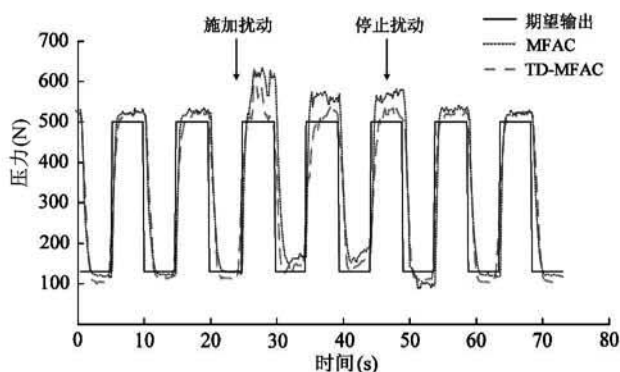


图 8 方波加载压力跟踪曲线

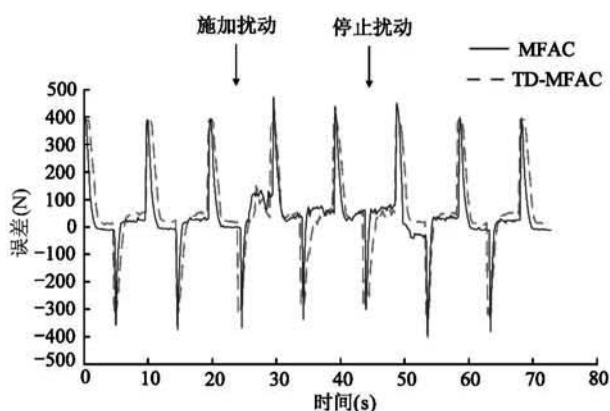


图 9 方波加载误差曲线

由图 8 和图 9 可知,不存在外部扰动或外部扰动极小可忽略不计时,MFAC 与 TD-MFAC 均控制良好,能稳定跟踪期望输出。待系统稳定控制一段时间后,对系统输出施加持续 20 s 左右的恒值外部扰动,2 种控制器控制下的输出信号均发生变化,产生

较大超调,MFAC 控制下系统产生较长时间的震荡,一直持续到停止施加扰动一个周期后才开始恢复稳定跟踪,而 TD-MFAC 控制的系统在施加扰动的情况下只用了 5 s 左右便重新达到平衡,恢复速度更快,因此抗干扰性较强。

4 结 论

本文针对气动变载荷加载系统中无模型自适应控制方法虽然设计简便、跟踪精度高、响应速度快,但是当系统存在有界的外部扰动时系统的控制性能变差的情况,设计了带有跟踪微分器的无模型自适应控制器。改进后的控制系统结合了跟踪微分器和无模型自适应控制的优点,使得系统的抗扰动能力增强。对于阶跃、正弦和方波 3 种不同的输入信号,都能达到很好的跟踪效果,即使对系统施加持续的外界干扰,依旧能够稳定地跟踪期望信号。改进后的无模型自适应控制器更能适应气动变载荷加载这种时滞、时变、强耦合系统。

参考文献

- [1] 刘福才,米巨香,孙静,等. 考虑运动副间隙的齿轮传动效率试验研究[J]. 制造技术与机床, 2018, 2(2):155-160
- [2] Wang J, Pu J, Moore P. A practical control strategy for servo-pneumatic actuator systems[J]. *Control Engineering Practice*, 1999, 7(12):1483-1488
- [3] Sorli M, Pastorelli S. Performance of a pneumatic force controlling servosystem: influence of valves conductance[J]. *Robotics and Autonomous Systems*, 2000, 30(3):283-300
- [4] 周洪. 气动比例控制技术及其应用[J]. 液压与气动, 1999, 3(3):1-3
- [5] Sobczyk M R, Gervini V I, Perondi E A, et al. A continuous version of the LuGre friction model applied to the adaptive control of a pneumatic servo system[J]. *Journal of the Franklin Institute*, 2016, 2(5):178-189
- [6] Hodgson S, Tavakoli M, et al. High-fidelity slidingmode control of a pneumatic haptic teleoperation system[J]. *Advanced Robotics*, 2014, 28(10):659-671
- [7] Ren H, Fan J. Adaptive backstepping slide mode control

- of pneumatic position servo system[J]. *Chinese Journal of Mechanical Engineering*, 2016, 29(5):1003-1009
- [8] 刘福才, 刘砚, 徐文丽, 等. 气动加载系统的模糊自适应逆控制方法[J]. 机械工程学报, 2014, 50(14): 185-190
- [9] 刘昱, 刘昌龙, 吕文洋. 无模型控制器在气缸压力控制系统中的应用研究[J]. 液压与气动, 2018, 326(10):52-56
- [10] 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(1): 61-66
- [11] 韩京清, 黄远灿. 二阶跟踪-微分器的频率特性[J]. 数学的实践与认识, 2003, 33(3):71-74
- [12] 韩京清, 袁露林. 跟踪-微分器的离散形式[J]. 系统与数学, 1999, 19(3):263-273
- [13] 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: 54-56
- [14] 侯忠生. 无模型自适应控制的现状与展望[J]. 控制理论与应用, 2006, 23(4):586-592
- [15] 陈雪. 无模型自适应控制方法的改进设计与仿真[D]. 长春:吉林大学通信工程学院, 2009: 45-47

Model-free adaptive control method for pneumatic loading system

Ren Lina, Li Xiaoguang, Gao Linqi, Liu Fucai

(Key Laboratory of Hebei Province Industrial Computer Control Engineering,
Yanshan University, Qinhuangdao 066004)

Abstract

Aiming at the problems of strong coupling, strong nonlinearity and uncertainty in the pressure tracking control of pneumatic loading system, the tracking differentiator (TD) is added into the model-free adaptive control (MFAC) as a feedback filter. Combined with the advantages of the two methods, it can effectively suppress the influence of external interference on the system, obtain better output performance and improve the robustness of the control system. Compared with the model-free adaptive control, the experiment results show that the improved controller has the characteristics of strong anti-interference, fast response and strong robustness.

Key words: pneumatic loading system, model-free adaptive control (MFAC), tracking differentiator (TD), pressure tracking control