

基于 T-S 模型的一类非线性系统自适应滑模跟踪控制及仿真*

高子林, 熊江, 潘勇, 李洪兵, 罗卫敏

(重庆三峡学院 计算机科学与工程学院, 重庆 万州 404100)

摘要:针对一类带有内部干扰和未知非线性函数的非线性系统,首先基于伸缩器和饱和器的概念,将一个时变伸缩因子 ρ^{-1} 引入到 T-S 模糊逻辑系统的输入而形成扩展模糊逻辑系统,然后利用该模糊逻辑系统给出一种时变伸缩因子参数的自适应滑模控制器的设计方法。其中非线性系统中的未知非线性函数采用 T-S 模糊逻辑系统进行逼近,故只需较少的模糊规则即可达到逼近要求,而且参数自适应率的个数与模糊逻辑系统中的模糊规则数无关,因此该方法不仅有效地减少在线运算量,而且在有限的时间内实现跟踪控制。最后,对带有干扰项和未知非线性函数的 Duffing 混沌系统完成了目标跟踪仿真,仿真结果验证了该控制算法的有效性和可行性。

关键词:非线性系统; T-S 模糊系统; 自适应滑模控制; Duffing 混沌系统

中图分类号: TP273

文献标志码: A

文章编号: 1672-6693(2016)05-0128-05

无论是理论研究还是工程应用,带有未知非线性项的非线性系统的控制问题一直是研究热点,正是在众多研究人员的努力下,得到了一系列有价值的研究成果^[1-3]。以往的一些非线性控制算法由于不能识别未知非线性项而导致控制目标无法实现,如反馈线性化控制方法^[4]等。为了解决这一难题,研究人员提出了非线性系统的模糊自适应控制^[5-6]、滑模控制^[7-8]和神经网络控制^[9]等智能控制算法。其中,滑模控制(SMC)具有鲁棒性强、设计简单和算法运算量小等优点,故该方法广泛应用于非线性系统跟踪或稳定控制中。

近年来,T-S 模糊逻辑系统被广泛应用于非线性控制中^[10-11]。然而,用 T-S 模糊逻辑系统来逼近整个非线性系统毫无意义,因为一些非线性系统对初始值和外界干扰均特别敏感,如混沌系统^[12]。因此,T-S 模糊系统只用来精确地描述非线性系统的动力学模型或者非线性系统中未知非线性项的数学模型。基于 T-S 模糊模型,可以设计出模糊控制器从而实现非线性系统的跟踪控制。

一般来说,非线性系统中的未知非线性项和干扰会增加解决跟踪或稳定控制问题的难度。基于模糊系统的万能逼近性^[13],非线性系统中的未知非线性项可以采用模糊逻辑系统进行逼近,如在文献^[5]中,使用模糊自适应控制方法完成了一类非线性系统的跟踪控制器的设计,其中 Mamdani 型模糊逻辑系统被用于逼近非线性系统中的未知非线性项,并且参数自适应率的个数由模糊规则数决定,即自适应率的个数等于模糊规则数。为了满足逼近精度的要求,模糊规则数量通常需要大量增加,从而导致参数自适应率的个数急剧增多,加大了在线运算量,产生的时延容易造成系统的不稳定。与 Mamdani 型模糊逻辑系统相比,T-S 型模糊逻辑系统的最大优点是可以很少的模糊规则来描述高度复杂的未知非线性函数,从而弥补了 Mamdani 型模糊逻辑系统的不足。

基于以上特点,本文提出了一种基于 T-S 模糊逻辑系统的自适应滑模目标跟踪算法。该算法利用 T-S 模糊逻辑系统逼近非线性系统中的未知非线性函数,然后根据控制目标,将 T-S 模糊逻辑系统应用于控制器中,设计出带有参数自适应率的滑模控制器,从而实现控制目标。值得注意的是,其中的参数自适应率只有 3 个,且与模糊规则数无关,从而减少了运算量,减小了系统的时滞,提高了系统的实时性。最后,对带有未知非线性函数和干扰的 Duffing 混沌系统完成了目标跟踪仿真,仿真结果验证了该控制算法的有效性和可行性。

* 收稿日期:2015-04-20 修回日期:2015-09-17 网络出版时间:2016-07-13 14:05

资助项目:国家自然科学基金(No. 61273219);重庆市教委科学技术研究项目(No. KJ131108;No. KJ1401029);重庆三峡学院科学研究项目计划(No. 14QN30)

作者简介:高子林,男,研究方向为非线性系统控制、模糊自适应控制,E-mail:gaozilin321@163.com;通信作者:熊江,教授,E-mail:Xjqc123@yahoo.cn

网络出版地址:http://www.cnki.net/kcms/detail/50.1165.N.20160713.1405.060.html

1 系统描述

考虑如下—类单输入单输出(SISO)的 n 阶非线性系统

$$\dot{x}^{(n)} = f(\mathbf{X}, t) + bu(t) + d(\mathbf{X}, t), y = x, \quad (1)$$

其中, $f(\mathbf{X}, t)$ 是未知非线性函数, b 是一个常数, 且 $b > 0$, 状态向量 $\mathbf{X}^T = [x, \dot{x}, \dots, x^{(n-1)}] = [x_1, x_2, \dots, x_n] \in \mathbf{R}^n$, $d(\mathbf{X}, t)$ 是未知干扰项, y 是系统的控制输出, $u \in \mathbf{R}$ 是系统的控制输入。

假设 1 内部干扰 $d(\mathbf{X}, t)$ 是有界的, 且与已知函数 D 满足如下条件:

$$|d(\mathbf{X}, t)| \leq D. \quad (2)$$

假设 2 在紧致集合 $W \subseteq \mathbf{R}^n$ 上, 未知非线性函数 $f(\mathbf{X}, t)$ 必须满足 Lipschitz 条件, 对任意的 $\mathbf{X}_1, \mathbf{X}_2 \in W$, 总是存在一个未知的正常数 L 满足不等式 $|f(\mathbf{X}_1, t) - f(\mathbf{X}_2, t)| \leq L \|\mathbf{X}_1 - \mathbf{X}_2\|$ 。

2 T-S 模糊逻辑系统设计

考虑如下带有 N 条模糊规则的一阶 T-S 模糊逻辑系统 F :

$$R^i: \text{ 设 } x_1 \text{ 为 } A_1^i, x_2 \text{ 为 } A_2^i, \dots, x_n \text{ 为 } A_n^i, \text{ 则有 } y^i = F_i(x), i = 1, 2, \dots, N, \quad (3)$$

其中, 模糊集合 $A_j^i, j = 1, 2, \dots, n$ 的隶属函数记为 $\mu_j^i(x_j), y^i = F_i(\mathbf{X})$ 在 $U \subseteq \mathbf{R}^n$ 为连续的函数。

若采用乘积推理、中心解模糊及单点模糊化的方法, 那么 T-S 模糊逻辑系统(3)的输出可以表示为:

$$y = F(\mathbf{X}) = \frac{\sum_{i=1}^N F_i(\mathbf{X}) \prod_{j=1}^n \mu_j^i(x_j)}{\sum_{i=1}^N \prod_{j=1}^n \mu_j^i(x_j)}. \quad (4)$$

定理 1 假设非线性系统(1)的输入论域 U 是 \mathbf{R}^n 上的一个紧致集, 则任何定义在该输入论域 U 上的实连续函数 $g(\mathbf{X})$ 和任意的 $\epsilon > 0$, 一定存在一个形如(4)式的模糊逻辑系统 $f^*(\mathbf{X})$ 满足如下不等式:

$$\sup_{\mathbf{X} \in U} |f^*(\mathbf{X}) - g(\mathbf{X})| < \epsilon. \quad (5)$$

定理 1 保证了模糊逻辑系统可以以任意精度逼近任何实连续函数。这也意味着模糊逻辑系统 $F(\mathbf{X})$ 可以用于比较非线性系统(1)中的未知非线性函数 $f(\mathbf{X}, t)$ 。

为了控制设计的需要, 现考虑一个非零的时间变量参数 $\rho = \rho(t)$, 将其引入(4)式, 可得:

$$\tilde{y} = F\left(\frac{\mathbf{X}}{\rho}\right) = \frac{\sum_{i=1}^N F_i\left(\frac{\mathbf{X}}{\rho}\right) \prod_{j=1}^n \mu_j^i\left(\frac{x_j}{\rho}\right)}{\sum_{i=1}^N \prod_{j=1}^n \mu_j^i\left(\frac{x_j}{\rho}\right)}. \quad (6)$$

3 滑模自适应控制器设计

针对非线性系统(1)中的未知非线性函数 $f(\mathbf{X}, t)$, 使用 T-S 模糊逻辑系统(4)对其进行逼近, 并需进行如下假设。

假设 3 针对非线性系统(1)中的未知非线性函数 $f(\mathbf{X}, t)$, 存在一个正常数 ϵ (可能是未知的) 和形如(4)式的模糊逻辑系统满足如下不等式:

$$\sup_{\mathbf{X} \in U} |F(\mathbf{X}) - f(\mathbf{X})| < \epsilon, \quad (7)$$

为了便于表示, 用 $\hat{\epsilon} = \hat{\epsilon}(t), \hat{L} = \hat{L}(t)$ 分别表示 ϵ 和 L 的估计值, 而 $\tilde{\epsilon} = \hat{\epsilon} - \epsilon$ 和 $\tilde{L} = \hat{L} - L$ 表示估计误差。

控制目标: 设计控制器 u 及参数自适应率, 使非线性系统(1)的输出 y 在有限时间内能跟踪上一个有界且可微的参数信号 $y_d = y_d(t)$, 即 $y - y_d \xrightarrow{t \rightarrow +\infty} 0$ 。

定义跟踪误差为:

$$e = y - y_d, \quad (8)$$

则 $e^{(n)} = y^{(n)} - y_d^{(n)}$, 可以用 $\mathbf{E} = [e, \dot{e}, \dots, e^{(n-1)}]^T$ 表示跟踪误差的状态向量。

根据系统(1)定义如下滑模面:

$$s = e^{(n-1)} + k_{n-1} e^{(n-2)} + \dots + k_2 \dot{e} + k_1 e, \quad (9)$$

其中, 系数 $k_i, i = 1, 2, \dots, n-1$ 使多项式 $\lambda^{(n-1)} + k_{n-1} \lambda^{(n-2)} + \dots + k_2 \lambda + k_1$ 满足 Hurwitz 判定条件; 如果初始条件 $E(0) = 0$, 则微分方程 $s(E) = 0$ 的唯一解是 $E(t) = 0$ 。因此, 只要设计出的控制器 u 在有限的时间内使状态轨迹

到达滑模面 $s(\mathbf{E})=s(\mathbf{X},t)=0$, 就可以实现跟踪的控制目标。

为了实现控制目标, 控制器必须满足如下条件:

$$\frac{1}{2} \frac{d}{dt} s^2 \leq -\eta |s| \Rightarrow s \dot{s} \leq -\eta |s| \quad \eta > 0, \quad (10)$$

其中, $\dot{s} = \sum_{i=1}^{n-1} k_i e^{(i)} + f(\mathbf{X}, t) + bu(t) - y_d^{(n)} + d(\mathbf{X}, t)$ 。将 \dot{s} 带入(10)式中, 得到如下不等式:

$$s \left(\sum_{i=1}^{n-1} k_i e^{(i)} + f(\mathbf{X}, t) + bu(t) - y_d^{(n)} + d(\mathbf{X}, t) \right) \leq -\eta |s|. \quad (11)$$

针对等式(9)和不等式(11), 可得如下控制方案:

$$u = u_{eq} - u_{sw}, \quad (12)$$

其中, $u_{eq} = \frac{1}{b} \left[-\sum_{i=1}^{n-1} k_i e^{(i)} - F\left(\frac{\mathbf{X}}{\rho}\right) + y_d^{(n)} \right]$; $u_{sw} = \frac{\eta}{b} \operatorname{sgn}(s)$, 其中 $\operatorname{sgn}(s) = \begin{cases} 1, & s > 0 \\ 0, & s = 0 \\ -1, & s < 0 \end{cases}$, 且参数自适应率分别为:

$$\dot{\hat{\epsilon}} = \beta_1 |s|, \quad (13)$$

$$\dot{\hat{L}} = \beta_2 |s| \cdot \left\| \mathbf{X} - \frac{\mathbf{X}}{\rho} \right\|, \quad (14)$$

$$\dot{\hat{\rho}} = -\frac{\beta_3}{\rho} |s| \left(\hat{L} \left\| \mathbf{X} - \frac{\mathbf{X}}{\rho} \right\| + \hat{\epsilon} + D \right), \quad (15)$$

其中, $\beta_1, \beta_2, \beta_3$ 分别是调节正常数。

定理 2 考虑非线性系统(1), 在控制器(12)和自适应率(13)~(15)的作用下, 如果假设 1~假设 3 成立, 则控制目标可以在有限的时间内实现。

证明 考虑 Lyapunov 函数 $V = \frac{1}{2} s^2 + \frac{1}{2} \beta_1^{-1} \tilde{\epsilon}^2 + \frac{1}{2} \beta_2^{-1} \tilde{L}^2 + \frac{1}{2} \beta_3^{-1} \rho^2$ 。若假设 1~假设 3 成立, 通过控制器(12)和自适应率(13)~(15), 该正定函数 V 关于时间 t 的导数如下:

$$\begin{aligned} \dot{V} &= s \dot{s} + \beta_1^{-1} \tilde{\epsilon} \dot{\tilde{\epsilon}} + \beta_2^{-1} \tilde{L} \dot{\tilde{L}} + \beta_3^{-1} \rho \dot{\rho} = s \left[\sum_{i=1}^{n-1} k_i e^{(i)} + f(\mathbf{X}, t) + bu(t) - y_d^{(n)} + d(\mathbf{X}, t) \right] + \\ &\beta_1^{-1} \tilde{\epsilon} \dot{\tilde{\epsilon}} + \beta_2^{-1} \tilde{L} \dot{\tilde{L}} + \beta_3^{-1} \rho \dot{\rho} = s \left[f(\mathbf{X}, t) - f\left(\frac{\mathbf{X}}{\rho}, t\right) + f\left(\frac{\mathbf{X}}{\rho}, t\right) - F\left(\frac{\mathbf{X}}{\rho}, t\right) + d(\mathbf{X}, t) - \frac{\eta}{b} \operatorname{sgn}(s) \right] + \\ &\beta_1^{-1} \tilde{\epsilon} \dot{\tilde{\epsilon}} + \beta_2^{-1} \tilde{L} \dot{\tilde{L}} + \beta_3^{-1} \rho \dot{\rho} \leq |s| \left[L \left\| \mathbf{X} - \frac{\mathbf{X}}{\rho} \right\| + \epsilon + D \right] - s \frac{\eta}{b} \operatorname{sgn}(s) + \beta_1^{-1} \tilde{\epsilon} \dot{\tilde{\epsilon}} + \beta_2^{-1} \tilde{L} \dot{\tilde{L}} + \beta_3^{-1} \rho \dot{\rho} = \\ &|s| \left[(\hat{L} - \tilde{L}) \left\| \mathbf{X} - \frac{\mathbf{X}}{\rho} \right\| + (\hat{\epsilon} - \tilde{\epsilon}) + D \right] - s \frac{\eta}{b} \operatorname{sgn}(s) + \beta_1^{-1} \tilde{\epsilon} \dot{\tilde{\epsilon}} + \beta_2^{-1} \tilde{L} \dot{\tilde{L}} + \beta_3^{-1} \rho \dot{\rho} = \\ &\tilde{\epsilon} (\beta_1^{-1} \dot{\tilde{\epsilon}} - |s|) + \tilde{L} \left(\beta_2^{-1} \dot{\tilde{L}} - |s| \cdot \left\| \mathbf{X} - \frac{\mathbf{X}}{\rho} \right\| \right) + |s| \left(\hat{L} \left\| \mathbf{X} - \frac{\mathbf{X}}{\rho} \right\| + \hat{\epsilon} + D \right) + \beta_3^{-1} \rho \dot{\rho} - s \frac{\eta}{b} \operatorname{sgn}(s) = \\ &-s \frac{\eta}{b} \operatorname{sgn}(s) \leq 0. \end{aligned} \quad (16)$$

从(16)式可以得出, $s, \rho, \hat{L}, \hat{\epsilon}$ 均是有界的。从(9)式和(12)式以及假设 1~假设 3 容易得出, $E(t)$ 也是有界的, 根据 Barbalat 引理可知 $e(t) \xrightarrow{t \rightarrow +\infty} 0$ 。证毕

值得注意的是, 在跟踪控制器的设计过程中, 带有伸缩器的 T-S 模糊逻辑系统只用于逼近非线性系统(1)中的未知非线性项, 不需要用参数识别方法对 T-S 模糊逻辑系统后件的参数进行识别, 而且自适应率(13)~(15)与 T-S 模糊逻辑系统的前件或后件无关。换言之, 参数自适应率的个数与模糊逻辑系统的模糊规则数无关, 从而有效地减少在线运算量。

4 仿真实例

考虑如下 Duffing 混沌系统:

$$\dot{x}_1 = x_2, \quad \dot{x}_2 = -x_1^3 - 0.25x_2 + 0.4 \cos t, \quad (17)$$

其中, $f(\mathbf{X}, t) = -x_1^3 - 0.25x_2$, 内部干扰 $d(\mathbf{X}, t) = 0.4\cos t$, 需要跟踪的理想信号 $y_d = y_d(t) = \sin(t)$ 。

在仿真过程中, 假定内部非线性函数 $f(\mathbf{X}, t)$ 和干扰项 $d(\mathbf{X}, t)$ 都是未知的, 故 T-S 模糊逻辑系统 F 被用于逼近未知非线性函数 $f(\mathbf{X}, t)$ 。状态变量 x_1, x_2 的论域均为 $[-2, 2]$, 并将论域划分成 3 个模糊集, 具体为: {负(N), 零(Z), 正(P)}, 隶属度函数分别为: $\mu_z(x) = e^{-x^2}$, $\mu_N(x) = e^{-(x+2)^2}$, $\mu_P(x) = e^{-(x-2)^2}$, 模糊规则的设定如下: 如果 x_1 为 ‘Z’ 则 $F_1 = 0.001$; 如果 x_1 为 ‘N’ 且 x_2 为 ‘N’ 则 $F_2 = |x_1^3| + |0.25x_2|$; 如果 x_1 为 ‘P’ 且 x_2 为 ‘N’ 则 $F_3 = -|x_1^3| + |0.25x_2|$ 。

根据证明推导过程对参数的要求, 可选择 $\beta_1 = \beta_2 = \beta_3 = 0.001, b = 10, \eta = 1$; 根据假设 $1 |d(\mathbf{X}, t)| \leq D$ (其中 $d(\mathbf{X}, t) = 0.4\cos t$) 的要求, 可选择 $D = 1$; 根据(9)式和(17)式, 要求系数 $k_i, i = 1, 2$, 使多项式 $k_2\lambda + k_1$ 满足 Hurwitz 判定条件, 可选择 $k_2 = 2, k_1 = 1$ 。状态变量的初始值为: $x_1(0) = x_2(0) = 1, \rho(0) = 1, \hat{\epsilon}(0) = 0.5, \hat{L}(0) = 0.5$ 。图 1~图 5 为跟踪仿真结果。

通过仿真图 1 和图 2 可以看出, 带有干扰项和未知非线性函数的 Duffing 混沌系统在有限的时间内实现了跟踪控制, 而且跟踪精度高; 从图 3~图 5 的仿真可以看到 3 个参数在自适应率(13)~(15)的调节及滑模控制器(12)作用下的实时变化情况, 并且每个参数都是有界的, 具有实际的工程意义。

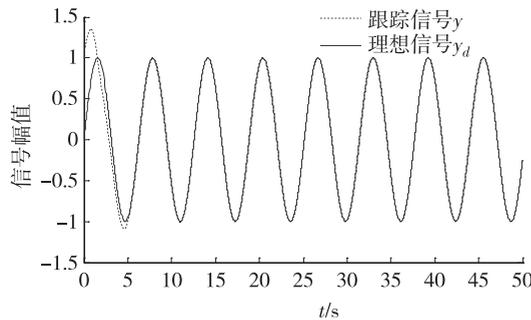


图 1 跟踪效果曲线

Fig. 1 The tracking effect curve

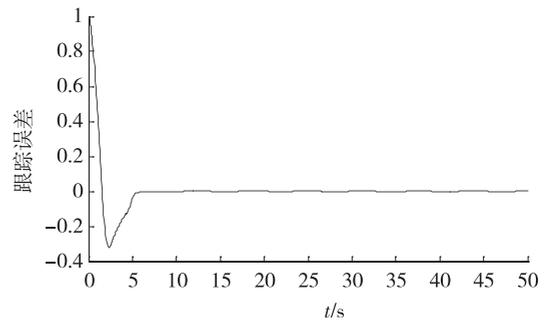


图 2 跟踪误差曲线

Fig. 2 The tracking error curve

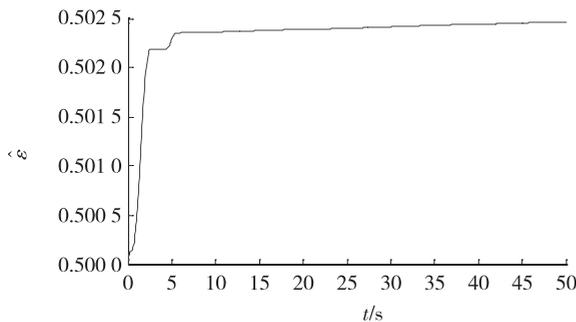


图 3 参数 $\hat{\epsilon}$ 时间响应曲线

Fig. 3 The time response curve of parameter $\hat{\epsilon}$

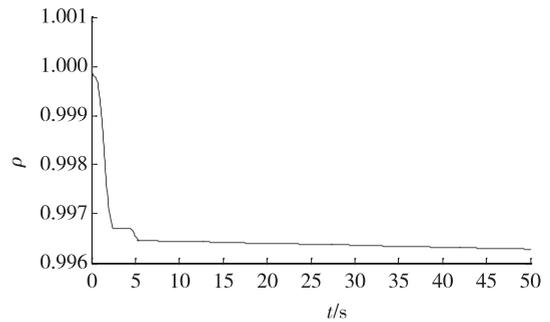


图 4 参数 ρ 时间响应曲线

Fig. 4 The time response curve of parameter ρ

5 结语

本文针对一类带有内部干扰和非线性函数的非线性系统, 通过自适应滑模控制方法, 将一个时变伸缩参数 $\rho = \rho(t)$ 引入到带有非线性后件的 T-S 模糊逻辑系统, 并将该模糊逻辑系统应用于滑模控制器中, 提出了一种带有参数自适应率的滑模控制算法, 并在 Duffing 混沌系统中完成了跟踪控制的数值仿真, 其仿真结果验证了该方法的有效性和可行性。在上述设计过程中, T-S 模糊逻辑系统只用于逼近非线性系统中的未知非线性函数, 而且只用了 3 条模糊规则, 在整个控制算法的设计过程中, 参数自适应率的个数只有 3 个, 且与模糊规则数无关, 从而减小了在线运算

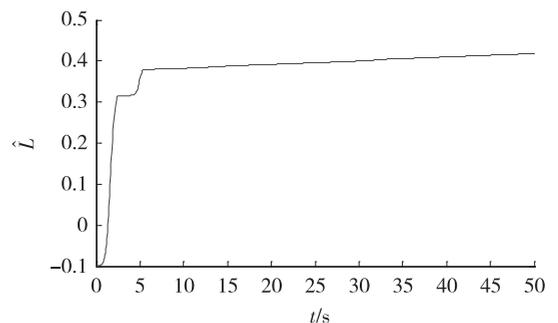


图 5 参数 \hat{L} 时间响应曲线

Fig. 5 The time response curve of parameter \hat{L}

量和时延,整个系统的实时性大大提高,给实际的工程应用奠定了理论基础。

参考文献:

- [1] Bellomo D, Naso D, Babuska R. Adaptive fuzzy control of a nonlinear servo-drive: theory and experimental results[J]. Engineering Application of Artificial Intelligence, 2008, 21(6):846-857.
- [2] Wang L X. Stable adaptive fuzzy control of nonlinear systems[J]. IEEE Trans on Fuzzy Systems, 1993, 1(2):146-155.
- [3] Yau H T. Design of adaptive sliding mode controller for chaos synchronization with uncertainties[J]. Chaos, Solitons and Fractals, 2004, 22(2):341-347.
- [4] 程代展, 秦化淑, 金观友. 非线性系统的输出反馈完全线性化[J]. 系统科学与数学, 1988, 8(1):79-87.
Chen D Z, Qin H S, Jin G Y. Total linearization of nonlinear systems with output feedback[J]. Journal of Systems Science and Mathematical Sciences, 1988, 8(1):79-87.
- [5] Wang L X. Stable adaptive fuzzy controllers with application to inverted pendulum tracking[J]. IEEE Trans on Systems, 1996, 26(5):677-691.
- [6] 王银河, 李志远. 一类基于模糊逻辑系统的非线性系统自适应跟踪控制[J]. 控制与决策, 2004, 19(10):1121-1124.
Wang Y H, Li Z Y. Adaptive tracking control for a class of nonlinear systems based on fuzzy logic systems[J]. Control and Decision, 2004, 19(10):1121-1124.
- [7] Zhang X X, Liu X P, Zhu Q Z. Adaptive chatter free sliding mode control for a class of uncertain chaotic systems[J]. Applied Mathematics and Computation, 2014, 232:431-435.
- [8] 丛爽, 梁艳阳. 时变不确定非线性系统自适应滑模跟踪控制[J]. 控制工程, 2009, 16(4):383-387.
Cong S, Liang Y Y. Adaptive sliding mode tracking control of nonlinear system with time-varying uncertainty[J]. Control Engineering of China, 2009, 16(4):383-387.
- [9] Zhu Q, Fei S M, Zhang T P, et al. Adaptive RBF neural-networks control for a class of time-delay nonlinear systems[J]. Neurocomputing, 2008, 71(s16-18):3617-3624.
- [10] Liu Y, Zhao S W. T-S fuzzy model-based impulsive control for chaotic systems and its application[J]. Mathematics and Computers in Simulation, 2011, 81(11):2507-2516.
- [11] Tseng C S. Fuzzy tracking control design for nonlinear dynamic systems via T-S fuzzy model[J]. IEEE Trans on Fuzzy Systems, 2001, 9(3):381-392.
- [12] Lam H K, D. Seneviratne L. Chaotic synchronization using sampled-data fuzzy controller Based on fuzzy-model-based approach[J]. IEEE Transactions on Circuits and Systems—I: Regular Papers, 2008, 55(3):883-892.
- [13] Wang L X, Mendel J M. Fuzzy basis functions, universal approximation and orthogonal least squares learning[J]. IEEE Trans on Neural Networks, 1992, 3(5):807-814.

Adaptive Sliding Tracking Control and Simulation for a Class of Nonlinear Systems Based on T-S Model

GAO Zilin, XIONG Jiang, PAN Yong, LI Hongbing, LUO Weimin

(College of Computer Science and Engineering, Chongqing Three Gorges University, Wanzhou Chongqing 404100, China)

Abstract: For a class of nonlinear systems with disturbances and unknown nonlinearities, at first, the inputs of the T-S fuzzy logic system by introducing a time varying scaling factor ρ^{-1} be constructed to form the extended fuzzy logic system based on the definitions of scalars and saturators, then a design method of adaptive sliding control with adjustable scalars parameters is proposed by employing the extended fuzzy logic systems. As the T-S fuzzy logic systems is employed to approximate the unknown nonlinearities in the nonlinear systems, and can reach the requirement of approximation by small number of fuzzy rules, and the number of adaptive laws is no matter with the number of rules, so the tracking control algorithm proposed in this paper is able not only to reduce the online computation but also to achieve tracking control in limited time. Finally, the simulation of target tracking is achieved for the Duffing chaotic system with disturbances and unknown nonlinearities, and the simulation results show the validity and feasibility of the proposed control algorithm.

Key words: nonlinear systems; T-S fuzzy logic systems; adaptive sliding control; duffing chaotic system

(责任编辑 游中胜)