

一种简化的自适应模糊动态面控制

郭 涛¹, 张军英²

(1. 安阳师范学院 计算机与信息工程学院, 河南 安阳 455002; 2. 西安电子科技大学 计算机学院, 陕西 西安 710071)

摘要: 针对一类不确定非线性时变时滞系统, 提出了一种简化的自适应模糊动态面控制方法. 该方法取消了对系统时滞常做的假设, 仅采用一个模糊逼近器便使所有的未知函数得到补偿, 简化了控制器的结构. 通过构造合适的Lyapunov-Krasovskii泛函, 闭环系统的所有信号被证明为半全局一致最终有界. 仿真实例进一步验证了控制方案的有效性.

关键词: 非线性时滞系统; 动态面控制; 模糊逻辑系统; 输出反馈

中图分类号: TP273 **文献标识码:** A

A simplified adaptive fuzzy dynamic surface control

GUO Tao¹, ZHANG Jun-ying²

(1. School of Computer and Information Engineering, Anyang Normal University, Anyang Henan 455002, China;

2. School of Computer Science and Technology, Xidian University, Xi'an Shaanxi 710071, China)

Abstract: A simplified adaptive fuzzy dynamic surface control approach is proposed for a class of uncertain nonlinear time-varying time-delay systems. The common assumptions on the time-delays of the system are not required; only one fuzzy approximator is needed for compensating all the unknown functions. Thus, the structure of the controller is simplified. By constructing an appropriate Lyapunov-Krasovskii functional, we proved all the signals of the closed-loop system are semi-globally uniformly bounded. Simulation results are presented to demonstrate the effectiveness of the proposed control approach.

Key words: nonlinear time-delay systems; dynamic surface control; fuzzy logic system; output feedback

1 引言(Introduction)

近年来, 基于反推法(backstepping)对不确定非线性时滞系统控制问题的研究引起了众多学者的关注^[1~6]. 通过引入一类积分型的Lyapunov函数, 文献[1]将神经网络和反推法结合, 采用自适应技术处理由引入逼近器带来的未知参数, 并避免了控制奇异性问题. 这种应用逼近器的思想还被延伸到输出反馈^[4]系统、大系统^[2]和不确定随机时滞系统^[6]等. 针对反推法设计过程中的计算膨胀问题, 文献[7]提出了动态面控制(dynamic surface control, DSC)方法, 旨在避免对虚拟控制量求导产生的大量导数项. 针对不确定非线性系统, 文献[8]进行了基于神经网络的动态面控制的研究, 接着又进一步改进了参数自适应律, 改善了系统的过渡过程品质^[9].

然而在反推法和动态面控制中, 对于含有 n 个未知非线性函数的 n 阶系统, 需要引入 $O(n)$ 个逼近器, 从而带来 $O(n)$ 个未知参数^[1,5], 这使得控制器的复杂程度大大增加. 文献[4]通过减少逼近器的

个数, 在一定程度上简化了控制器结构, 但其基于backstepping设计思想, 对虚拟控制量的连续微分仍会带来计算膨胀问题. 其次, 现有方法往往对系统时滞做了一些限制, 如要求系统时滞有界^[1], 未知非线性时滞函数被一已知函数界定^[5], 未知时变时滞 $d_i(t)$ 满足 $\dot{d}_i(t) < \eta_i < 1$ 的条件^[4,6]等, 其中 η_i 为常数, 具有完全未知时滞的系统的控制问题仍没有解决.

本文研究了一类输出反馈的未知非线性时滞系统的镇定问题. 所有的未知非线性函数对系统的影响仅通过一个模糊逻辑系统补偿, 简化了控制器的结构, 同时避免了计算膨胀问题. 放松了现有文献对时滞的要求, 所考虑的时变时滞是完全未知的. 通过构造Lyapunov-Krasovskii泛函, 闭环系统的所有信号被证明为半全局一致最终有界, 同时系统误差可以收敛到原点附近的一个小邻域内.

文中: $\|*\|$ 表示 $*$ 的2-范数, $\hat{*}$ 表示 $*$ 的估计, $\tilde{*} = * - \hat{*}$. 此外, $\lambda_{\max}(A)$ 表示矩阵 A 的最大特征值.

2 系统描述(System description)

考虑下述输出反馈的未知时变时滞非线性系统:

$$\begin{cases} \dot{x}_i = x_{i+1} + f_i(y, y(t - d_i(t))), \\ i = 1, \dots, n-1, \\ \dot{x}_n = u + f_n(y, y(t - d_n(t))), \\ y = x_1. \end{cases} \quad (1)$$

其中: $x = [x_1, \dots, x_n]^T \in \mathbb{R}^n$, $u \in \mathbb{R}$, $y \in \mathbb{R}$ 分别表示系统状态、控制输入和输出; f_i 为未知光滑非线性时滞函数; $d_i(t)$ 是系统输出 y 的未知时变延迟, $y(t - d_i(t))$ 将简记为 y_{id} ; 仅系统输出 y 可测. 控制目标是设计简化的输出反馈控制器, 使得闭环系统所有信号半全局一致最终有界, 同时系统输出可以收敛到原点附近的一个小邻域内.

未知非线性时滞函数 $f_i(\cdot)$ 满足如下假设^[6]:

假设 1 $f_i(0, 0) = 0$, 且满足

$$|f_i| \leq \varphi_{i,1}(|y|) + \varphi_{i,2}(|y_{id}|). \quad (2)$$

其中: $\varphi_{i,1}(|y|)$, $\varphi_{i,2}(|y_{id}|)$ 为未知光滑非负函数, 且满足 $\varphi_{i,1}(0) = 0$, $\varphi_{i,2}(0) = 0$.

由假设1, 对于光滑非负函数 $\varphi_{i,1}(\cdot)$, $\varphi_{i,2}(\cdot)$, 根据微分中值定理, 可得

$$\varphi_{i,1}(|y|) = |y| \bar{\varphi}_{i,1}(|y|). \quad (3)$$

$$\varphi_{i,2}(|y_{id}|) = |y_{id}| \bar{\varphi}_{i,2}(|y_{id}|). \quad (4)$$

定义

$$f_{i,1}(y) = \begin{cases} \bar{\varphi}_{i,1}(-y), & y < 0; \\ \bar{\varphi}_{i,1}(y), & y \geq 0. \end{cases} \quad (5)$$

同理可定义 $f_{i,2}(y_{id})$. 那么, 根据式(3)(4), 式(2)可进一步写为

$$|f_i| \leq |y| f_{i,1}(y) + |y_{id}| f_{i,2}(y_{id}). \quad (6)$$

其中 $f_{i,1}(y)$ 和 $f_{i,2}(y_{id})$ 为未知光滑非线性函数.

注 1 假设1来自文献[6], 但其要求光滑非负函数 $\varphi_{i,1}(\cdot)$ 和 $\varphi_{i,2}(\cdot)$ 已知. 此外, $f_i(0, 0) = 0$ 是为了保证原点是系统的平衡点, 这也是研究非线性系统镇定问题时常常需要的条件^[5,6].

3 控制器设计(Controller design)

由于系统(1)中的状态不可测, 因此引入如下观测器^[10]对系统状态重构:

$$\begin{cases} \dot{\hat{x}}_i = \hat{x}_{i+1} + k_i \tilde{x}_1, & i = 1, \dots, n-1, \\ \dot{\hat{x}}_n = u + k_n \tilde{x}_1. \end{cases} \quad (7)$$

其中参数 $k = [k_1, \dots, k_n]^T$ 的选择要使得矩阵

$$A = \begin{bmatrix} -k_1 & & & \\ & I & & \\ & & \ddots & \\ & & & -k_n \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 0 \\ \vdots \\ 0 \end{bmatrix} \quad (8)$$

为Hurwitz矩阵. 结合系统(1), 可知误差方程为

$$\dot{\tilde{x}} = A\tilde{x} + F(y, y_d). \quad (9)$$

其中 $F(y, y_d) = [f_1(y, y_{1d}, \dots, f_n(y, y_{nd})]^T$. 由式(6)可知, $F(y, y_d)$ 满足下述不等式:

$$\|F(y, y_d)\|^2 \leq 2 \sum_{i=1}^n [y^2 f_{i,1}^2(y) + y_{id}^2 f_{i,2}^2(y_{id})]. \quad (10)$$

由系统(1)、观测器(7)可组成下式:

$$\begin{cases} \dot{\hat{x}}_1 = \hat{x}_2 + \tilde{x}_2 + f_1(y, y_{id}), \\ \dot{\hat{x}}_i = \hat{x}_{i+1} + k_i \tilde{x}_1, & i = 2, \dots, n-1, \\ \dot{\hat{x}}_n = u + k_n \tilde{x}_1. \end{cases} \quad (11)$$

整个控制器的构造过程共需 n 步. 在第1步, 可根据式(11)设计面函数及虚拟控制量如下:

$$S_1 = y, \quad (12)$$

$$\tau_1 \dot{\alpha}_1 + \alpha_1 = -K_1 S_1 - S_1 [\hat{\theta}^T \xi(y) + \hat{\delta}]. \quad (13)$$

式(13)中: K_1 为控制增益, τ_1 为滤波器时间常数. $\hat{\theta}^T \xi(y) + \hat{\delta}$ 为引入的模糊逼近器, 见式(26). 对于第 i 步 ($i = 2, \dots, n-1$), 重复上述步骤

$$S_i = \hat{x}_i - \alpha_{i-1}, \quad (14)$$

$$\tau_i \dot{\alpha}_i + \alpha_i = -K_i S_i - k_i \tilde{x}_1 + \dot{\alpha}_{i-1}. \quad (15)$$

其中: K_i 为控制增益, τ_i 为滤波器时间常数. 最后, 在第 n 步, 有

$$S_n = \hat{x}_n - \alpha_{n-1}, \quad (16)$$

$$u = -K_n S_n - k_n \tilde{x}_1 + \dot{\alpha}_{n-1}. \quad (17)$$

未知参数 $\hat{\theta}$ 和 $\hat{\delta}$ 的自适应律选择为

$$\begin{cases} \dot{\hat{\theta}} = \Gamma \xi(y) y^2 - r \Gamma \hat{\theta}, \\ \dot{\hat{\delta}} = \beta y^2 - r \beta \hat{\delta}. \end{cases} \quad (18)$$

其中: $\Gamma = \Gamma^T$ 和 $\beta > 0$ 为自适应增益, $r > 0$ 为设计参数.

4 稳定性分析(Stability analysis)

定义

$$z = [z_1, \dots, z_{n-1}]^T,$$

其分量为 $z_i = -\tau_i \dot{\alpha}_i$. 对于 S_1 , 有

$$\dot{S}_1 = \dot{x}_1 = S_2 + \alpha_1 + \tilde{x}_2 + f_1.$$

从式(13)中解出 α_1 , 并代入到 $\dot{S}_1$ 中, 得

$$\begin{aligned} \dot{S}_1 &= S_2 + z_1 - K_1 S_1 - y [\hat{\theta}^T \xi(y) + \hat{\delta}] + \\ &\quad \tilde{x}_2 + f_1(y, y_{1d}). \end{aligned} \quad (19)$$

同理可得

$$\dot{S}_i = S_{i+1} + z_i - K_i S_i, \quad 2 \leq i \leq n-1, \quad (20)$$

$$\dot{S}_n = -K_n S_n. \quad (21)$$

根据式(13)和式(15), 对 z 求导可得

$$\dot{z}_1 = \dot{\alpha}_1 + K_1 \dot{S}_1 + \dot{y} [\hat{\theta}^T \xi(y) + \hat{\delta}] + y \frac{\partial [\hat{\theta}^T \xi(y) + \hat{\delta}]}{\partial x_1} = -\frac{z_1}{\tau_1} + \eta_1. \quad (22)$$

$$\dot{z}_i = \dot{\alpha}_i + K_i \dot{S}_i + k_i \dot{x}_1 + \frac{\dot{z}_{i-1}}{\tau_{i-1}} = -\frac{z_i}{\tau_i} + \eta_i. \quad (23)$$

其中 η_1 和 η_i 均为连续函数.

定理 1 对于由系统(1)、控制律(17)、自适应律(18)和观测器(7)组成的闭环系统, 给定初始紧集 $\Omega: \sum_{i=1}^n S_i^2 + \sum_{i=1}^{n-1} z_i^2 + \tilde{\theta}^T \Gamma^{-1} \tilde{\theta} \leq 2p$, p 为任意正数, 在假设1的条件下, 存在参数 $K_i, k_i, \tau_i, \Gamma, \beta$ 和 r , 使得闭环系统的解一致最终有界, 控制误差可以收敛到原点附近的一个小邻域内.

证 定义下述正定函数为

$$V_x = \tilde{x}^T P \tilde{x}, \quad V_s = \sum_{i=1}^n \frac{S_i^2}{2} + \sum_{i=1}^{n-1} \frac{z_i^2}{2}, \\ V_\xi = \frac{\tilde{\theta}^T \Gamma^{-1} \tilde{\theta}}{2} + \frac{\beta^{-1} \tilde{\delta}^2}{2}, \quad V_\sigma = \sum_{i=1}^n \int_{t-d_i(t)}^t G(\sigma) d\sigma.$$

其中: 正定矩阵 P 满足 $A^T P + P A = -I$, A 的定义见式(8). G 的定义为

$$G(\sigma) = \left(\frac{1}{\lambda} + 2\varsigma \|P\|^2 \right) S_1^2(\sigma) f_{i,2}^2(y(\sigma)). \quad (24)$$

其中: $\lambda > 0, \varsigma > 0$. 对上述正定函数求导可得

$$\dot{V}_x = -\tilde{x}^T P \tilde{x} + 2\tilde{x}^T P F(y, y_d) \leq \frac{1-\varsigma}{\varsigma} \tilde{x}^T \tilde{x} + 2\varsigma \|P\|^2 \sum_{i=1}^n [y^2 f_{i,1}^2 + y_{id}^2 f_{i,2}^2].$$

上式中, 用到了Young不等式

$$x^T y \leq \frac{\pi}{2} x^T x + \frac{1}{2\pi} y^T y,$$

不等式 $\|Ax\| \leq \|A\| \|x\|$ 和式(10). 对 V_s 求导, 并考虑到在紧集 Ω 内, 连续函数 η_i 有最大值 M_i , 则有

$$\dot{V}_s \leq \sum_{i=1}^n S_i \dot{S}_i + \sum_{i=1}^{n-1} \left(-\frac{z_i^2}{\tau_i} + |z_i \eta_i| \right) \leq \sum_{i=1}^{n-1} (S_i S_{i+1} + S_i z_i - K_i S_i^2) - K_n S_n^2 - S_1^2 [\hat{\theta}^T \xi(y) + \hat{\delta}] + S_1 (\tilde{x}_2 + f_1) + \sum_{i=1}^{n-1} \left[-\frac{1}{\tau_i} z_i^2 + \frac{M_i^2 z_i^2}{2e} \cdot \frac{\eta_i^2}{M_i^2} + \frac{e}{2} \right].$$

令 $K_i = 2 + a_0, a_0 > 0$, 并选择式(15)中1阶滤波器的时间常数为 $1/\tau_i = 1 + \frac{M_i^2}{2e} + a_0, e > 0$, 可得 V_s 的导数为

$$\dot{V}_s \leq -a_0 \left(\sum_{i=1}^n S_i^2 + \sum_{i=1}^{n-1} z_i^2 \right) - S_1^2 [\hat{\theta}^T \xi(y) + \hat{\delta}] +$$

$$\frac{1}{2\varsigma} \tilde{x}^T \tilde{x} + \frac{\lambda + \varsigma}{2} S_1^2 + ne + \frac{1}{\lambda} \sum_{i=1}^n [y^2 f_{i,1}^2 + y_{id}^2 f_{i,2}^2].$$

对 V_ξ 和 V_σ 求导, 得

$$\dot{V}_\xi = -S_1^2 [\hat{\theta}^T \xi(y) + \hat{\delta}] + r (\tilde{\theta}^T \hat{\theta} + \tilde{\delta} \hat{\delta}), \\ \dot{V}_\sigma = \left(\frac{1}{\lambda} + 2\varsigma \|P\|^2 \right) \sum_{i=1}^n [S_1^2 f_{i,2}^2 - S_{1id}^2 f_{i,2}^2].$$

取Lyapunov函数为 $V = V_x + V_s + V_\xi + V_\sigma$, 有

$$\dot{V} \leq -\left(1 - \frac{3}{2\varsigma}\right) \tilde{x}^T \tilde{x} + S_1^2 \left[\frac{\lambda + \varsigma}{2} + \left(\frac{1}{\lambda} + 2\varsigma \|P\|^2 \right) \sum_{i=1}^n (f_{i,1}^2 + f_{i,2}^2) \right] - a_0 \left(\sum_{i=1}^n S_i^2 + \sum_{i=1}^{n-1} z_i^2 \right) + ne - S_1^2 [\hat{\theta}^T \xi(y) + \hat{\delta}] + r (\tilde{\theta}^T \hat{\theta} + \tilde{\delta} \hat{\delta}). \quad (25)$$

令 $H(y) = \frac{(\lambda + \varsigma)}{2} + \left(\frac{1}{\lambda} + 2\varsigma \|P\|^2 \right) \sum_{i=1}^n (f_{i,1}^2(y) + f_{i,2}^2(y))$, 在紧集 Ω 内, 它可以由一个模糊逼近器来逼近^[11]

$$H(y) = \theta^T \xi(y) + \varepsilon(y). \quad (26)$$

其中逼近误差 $\varepsilon(y)$ 满足 $|\varepsilon(y)| < \delta$. 在式(13)中, 笔者引入了这个逼近器来进行控制器的构造, 并在式(18)中设计了逼近器的未知参数和逼近误差上界的自适应律.

取 $b_0 = 1 - 3/(2\varsigma)$, 固定 $\varsigma > 3/2$, 那么就有 $b_0 > 0$. 将式(26)代入式(25), 并应用不等式

$$2\tilde{\theta}^T \hat{\theta} \leq -\tilde{\theta}^T \tilde{\theta} + \theta^T \theta, \quad 2\tilde{\delta} \hat{\delta} \leq -\tilde{\delta}^2 + \delta^2,$$

有

$$\dot{V} \leq -c_0 [2\tilde{x}^T P \tilde{x} + \sum_{i=1}^n S_i^2 + \sum_{i=1}^{n-1} z_i^2 + \tilde{\theta}^T \Gamma^{-1} \tilde{\theta} + \beta^{-1} \tilde{\delta}^2] + C. \quad (27)$$

式中: $0 < c_0 < \min \left\{ \frac{b_0}{2\lambda_{\max}(P)}, a_0, \frac{r}{2\lambda_{\max}(\Gamma^{-1})}, \frac{r\beta}{2} \right\}$, $C = \frac{r}{2} (\|\theta\|^2 + \delta^2) + ne$. 上式可进一步写为

$$\dot{V} \leq -c_0 (2V - V_\sigma) + C. \quad (28)$$

式(28)说明, 当 $c_0 > C/(2V - V_\sigma)$ 时, 在 $V = p$ 上有 $\dot{V} < 0$, 也就是说, $V \leq p$ 是一个不变集. 这也说明, 当 $V_0 \leq p$ 时, 对于所有的 $t > 0$, 有 $V(t) \leq p$, 即信号 $\tilde{x}, S, z, \tilde{\theta}, \tilde{\delta}$ 半全局一致最终有界, 从而 $\hat{\theta}, \hat{\delta}$ 有界. 根据式(12)~(16)可知信号 $\alpha_1, \dots, \alpha_{n-1}, \hat{x}$ 均有界, 因此根据式(17)可知 u 有界. 最后, 根据 $\tilde{x}, \hat{x}$ 的有界性, 可知 x 有界. 从式(27)可以看出, 通过增大 c_0 和减小 C , 即调节参数 $K_i, \Gamma, \beta, r, \tau_i$, 可以减小紧集 D ,

因而系统的输出 $y(=x_1=S_1)$ 可收敛到系统原点附近的一个小邻域内。

5 仿真(Simulation)

考虑下述状态未知的输出反馈非线性系统:

$$\begin{cases} \dot{x}_1 = x_2 + f_1(y, y(t-d_1(t))), \\ \dot{x}_2 = u + f_2(y, y(t-d_2(t))), \\ y = x_1. \end{cases} \quad (29)$$

其中: $f_1(\cdot)$ 和 $f_2(\cdot)$ 为未知光滑非线性函数, $d_1(t)$ 和 $d_2(t)$ 为未知时变时滞. 首先根据式(7)构造如下观测器:

$$\begin{cases} \dot{\hat{x}}_1 = \hat{x}_2 + k_1 \tilde{x}_1, \\ \dot{\hat{x}}_2 = u + k_2 \tilde{x}_1. \end{cases} \quad (30)$$

控制器可设计如下:

$$u = -K_2 S_2 - k_2 \tilde{x}_1 + \dot{\alpha}_1, \quad (31)$$

其中 $\dot{\alpha}_1$ 可由式(13)确定.

选择如前所述的模糊逻辑系统, 模糊隶属函数为 $\mu_j(y) = a_j e^{-((y-\bar{y}_j)/b_j)^2}$, 其中: $a_j = 1, 1/b_j^2 = 10, y_j = 1 - 0.2j, j = 0, 1, \dots, 10$. 仿真过程中, 为了构造系统模型, 未知非线性函数取为 $f_1 = y \sin(y(t-d_1(t)))$, $f_2 = y + y^2(t-d_2(t))$, 未知时变时滞取为 $d_1(t) = 0.5(1 + \sin t)$, $d_2(t) = 0.5(1 + \cos t)$. 系统参数选择为 $k_1 = 1, k_2 = 1, K_1 = 5, K_2 = 7, \Gamma = 1.5I, \beta = 0.8, r = 10^{-6}, \tau = 0.01$. 仿真结果如图1所示, 其中实线为采用本文方法得到的系统输出, 虚线为采用文献[12]中方法时的系统输出. 从图中可以看出, 本文方法使得系统输出响应更快, 更平稳, 这进一步验证了本文方法的有效性.

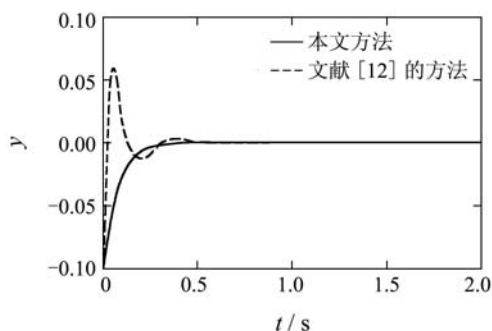


图1 系统输出 y

Fig. 1 System output y

6 结束语(Conclusion)

本文研究了一类不确定非线性时滞系统的简化控制方法. 取消了现有文献对未知时滞的假设, 仅采

用一个模糊逼近器便使得系统所有不确定项得到补偿, 简化了控制器的结构. 如何将本文方法推广到自适应跟踪控制领域, 是有待于继续研究的问题.

参考文献(References):

- [1] HONG F, GE S S, LEE T H. Practical adaptive neural control of nonlinear systems with unknown time delays[J]. *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics-Part B: Cybernetics*, 2005, 35(4): 849 – 854.
- [2] TONG S C, LI H X, CHEN G R. Adaptive fuzzy decentralized control for a class of large-scale nonlinear systems[J]. *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics*, 2004, 34(1): 770 – 775.
- [3] 佟绍成, 王巍. 一类非线性时滞互联系统模糊分散输出反馈控制[J]. 控制与决策, 2007, 22(10): 1108 – 1112. (TONG Shaocheng, WANG Wei. Fuzzy decentralized output feedback control for a class of nonlinear interconnected systems with time-delay[J]. *Control and Decision*, 2007, 22(10): 1108 – 1112.)
- [4] CHEN W S, LI J M. Adaptive output-feedback regulation for nonlinear delayed systems using neural network[J]. *International Journal of Automation and Computing*, 2008, 5(1): 103 – 108.
- [5] FU Y S, TIAN Z H, SHI S J. Output feedback stabilization for a class of stochastic time-delay nonlinear systems[J]. *IEEE Transactions on Automatica Control*, 2005, 50(6): 847 – 851.
- [6] 赵平, 刘淑君. 一类虚拟控制系数未知的随机非线性时滞大系统的适应镇定控制[J]. 自动化学报, 2008, 34(8): 912 – 919. (ZHAO Ping, LIU Shujun. Adaptive stabilization control of a class of large-scale stochastic nonlinear systems with time-delay and unknown virtual control coefficients[J]. *Acta Automatica Sinica*, 2008, 34(8): 912 – 919.)
- [7] SWAROOP D, HEDRICK J K, YIP P P, et al. Dynamic surface control for a class of nonlinear systems[J]. *IEEE Transactions on Automatic Control*, 2000, 45(10): 1893 – 1899.
- [8] WANG D, HUANG J. Neural network-based adaptive dynamic surface control for a class of uncertain nonlinear systems in strict-feedback form[J]. *IEEE Transactions on Neural Networks*, 2005, 16(1): 195 – 202.
- [9] 周丽, 姜长生. 改进的非线性鲁棒自适应动态面控制[J]. 控制与决策, 2008, 23(8): 938 – 943. (ZHOU Li, JIANG Changsheng. Improved robust and adaptive dynamic surface control for nonlinear systems[J]. *Control and Decision*, 2008, 23(8): 938 – 943.)
- [10] DENG H, KRSTIC M. Output-feedback stochastic nonlinear stabilization[J]. *IEEE Transactions on Automatic Control*, 1999, 44(2): 328 – 333.
- [11] WANG L X. *Adaptive Fuzzy Systems and Control Design and Stability Analysis*[M]. Prentice Hall: New Jersey, 1994.
- [12] CHEN W S, LI J M. Adaptive output feedback control for nonlinear time-delay systems using neural network[J]. *Journal of Control Theory and Applications*, 2006, 4(4): 313 – 320.

作者简介:

郭涛 (1976—), 男, 博士, 主要研究方向为自适应控制、非线性控制, E-mail: myit_02@126.com;

张军英 (1961—), 女, 教授, 博士生导师, 主要研究方向为信号处理、智能控制, E-mail: jy Zhang@mail.xidian.edu.cn.