

不确定时变时滞系统的自适应全局鲁棒滑模控制

杨蒲, 倪江帆, 姜斌, 李霄

(南京航空航天大学自动化学院, 南京 210016)

摘要: 针对一类存在时变状态时滞的不确定性系统, 基于全程滑模的思想, 引入一种带状态时滞项的积分型滑模面, 以消除趋近模态, 实现全程滑模控制; 基于一种新颖的自由权矩阵时滞转换模型, 采用线性矩阵不等式(LMI)的方法给出并证明了滑动模态稳定的充分条件, 降低了保守性; 结合自适应控制思想设计出自适应滑模控制器, 克服了不确定性以及时变的时滞影响。

关键词: 不确定性系统; 时滞; 滑模控制; 自适应; 全局鲁棒

中图分类号: TP273

文献标志码: A

Adaptive global robust sliding mode control for uncertain systems with time-varying delay

YANG Pu, NI Jiang-fan, JIANG Bin, LI Xiao

(College of Automation Engineering, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 210016, China.

Correspondent: YANG Pu, E-mail: ppyang@nuaa.edu.cn)

Abstract: The problem of designing global robust sliding mode controllers for a class of uncertain linear system with time-delay is considered. A type of integral sliding surface is introduced and the system exhibits global robustness during the entire response of the system. In terms of LMI, the design of sliding mode surface is obtained through the delay-dependent robust stable conclusions of the nominal time-delay system based on the state transformation mode of a novel free-weighting matrices, so that the conservative for the design of sliding mode surface is lowered. Based on the adaptive control scheme, an adaptive sliding mode controller is investigated, which can overcome uncertainties and time-delay.

Key words: uncertainty system; time-delay; sliding mode; adaptive; global robust

0 引言

时滞现象和不确定性普遍存在于实际系统中, 使系统的性能达不到期望的水平, 甚至会使得系统震荡发散至不稳定. 因此, 针对时滞不确定性系统控制方法的研究尤为重要, 国内外有很多学者对此问题进行了深入研究^[1-3]. 文献[4]用 Jensen 不等式^[5]的方法, 在所得到的时滞依赖稳定性充分条件中没有引入自由变量, 计算量较小. 而文献[6]中引入了少量自由变量, 但系统保守性较前者有所降低.

滑模控制是针对不确定性系统的一种有效鲁棒控制方法, 它对系统存在的匹配性参数摄动以及外部扰动表现出完全的不变性. 通常的滑模控制分为趋近模态和滑动模态. 在趋近模态中, 系统对不确定性仍然是敏感的, 因此, 有学者针对积分滑模面进行了深

入研究^[7-10], 取消趋近模态, 使系统状态从一开始就处于滑模面上, 从而实现全程滑模控制, 使系统对不确定性具有全局鲁棒性.

文献[11]在传统积分滑模面的基础上, 引入了时滞补偿项, 提出一种积分滑模面的构造方法, 可以简化控制律, 但所提出的稳定性是时滞独立的稳定性, 保守性较强. 文献[12]仅针对时滞系统展开研究, 其形式较为简单, 而实际系统大多是参数变动的不确定系统, 且文中引入了太多的自由变量, 所得结果仍然较为保守.

本文针对一类具有时变状态时滞的不确定性系统, 基于全程滑模的思想构造一种带时滞积分项的滑模面, 结合自适应控制设计一种自适应滑模控制策略, 并通过一种新型的自由权矩阵方法, 结合 Jensen 不等

收稿日期: 2013-03-27; 修回日期: 2013-09-01.

基金项目: 国家自然科学基金项目(61203090); 江苏省基础研究计划(自然科学基金)项目(BK2012384).

作者简介: 杨蒲(1977-), 男, 副教授, 从事故障诊断与容错控制的研究; 倪江帆(1990-), 男, 硕士生, 从事时滞系统滑模控制的研究.

式得到了设计时滞依赖性滑模面的一个充分条件. 实验对比结果显示, 本文结果的保守性有所降低.

1 系统描述及相关引理

考虑如下带扰动的状态时滞不确定性系统:

$$\begin{aligned} \dot{x}(t) = & (A + \Delta A)x(t) + (A_d + \Delta A_d)x(t - \tau(t)) + \\ & Bu + f(x, t), \\ x(t) = & \phi(t), t \in [-\tau(t), 0]. \end{aligned} \quad (1)$$

其中: $x(t) \in R^n, A \in R^{n \times n}, B \in R^{n \times m}; \Delta A, \Delta A_d$ 是系统参数摄动; $f \in R^n$ 代表外部扰动; $\tau(t) \in [h_1, h_2]$ 为不确定时滞, 有确定的上下界, 但其变化率未知; $\phi(t) \in R^n$ 是连续的初始函数向量. 系统满足如下假设.

假设 1 $(A + A_d, B)$ 是可控对, B 列满秩, 且状态变量可观测.

假设 2 不确定项满足匹配性条件, 即有 $\Delta A = BE, \Delta A_d = BE_d, f = BF$. 因此, 记 $\omega(x, t) = B[Ex(t) + E_dx(t - \tau(t)) + F]$, 则系统 (1) 可简化为

$$\dot{x}(t) = Ax(t) + A_dx(t - \tau(t)) + Bu + \omega(x, t). \quad (2)$$

假设 3 存在未知的正常数 γ_1, γ_2 , 满足

$$\|\omega(x, t)\| \leq \gamma_1 + \gamma_2 \|x(t)\|, \quad (3)$$

其中 $\|\cdot\|$ 表示 2-范数.

引理 1 (Schur 补定理) 对于给定的对称矩阵

$$S^T = S = \begin{bmatrix} S_{11} & S_{12} \\ S_{21} & S_{22} \end{bmatrix},$$

其中 $S_{11} \in R^{k \times k}, S < 0$ 的充要条件是

$$S_{11} < 0, S_{22} - S_{12}^T S_{11}^{-1} S_{12} < 0$$

成立.

引理 2 (Jensen 不等式) 对于任意给定的对称正定矩阵 $M > 0$, 标量 $\gamma > 0$ 以及向量函数 $\omega : [0, \gamma] \rightarrow R^n$, 下列不等式成立:

$$\begin{aligned} & \left[\int_0^\gamma \omega(s) ds \right]^T M \left[\int_0^\gamma \omega(s) ds \right] \leq \\ & \gamma \left[\int_0^\gamma \omega^T(s) M \omega(s) ds \right]. \end{aligned}$$

2 全程滑模控制器设计

2.1 积分滑模面设计

对于系统 (1), 选择如下积分滑模面:

$$\begin{aligned} S(x, t) = & Gx(t) - \int_0^t G(A - BK)x(\theta) d\theta - \\ & \int_0^t GA_dx(r - \tau(r)) dr - Gx(0). \end{aligned} \quad (4)$$

其中: $G \in R^{m \times n}$ 满足 GB 非奇异 (显然 G 的选择不唯一, 只需满足 GB 非奇异即可), $K \in R^{m \times n}$ 是常数矩阵. 对于任意已知初始条件 $x(0)$, 都能满足 $S(x(0), 0) = 0$, 从而取消了趋近模态, 系统从一开始就在滑模面

上. 式 (4) 沿 (1) 求导, 得

$$\begin{aligned} \dot{S} = & G\dot{x}(t) - G(A - BK)x(t) - GA_dx(t - \tau(t)) = \\ & G[(A + \Delta A)x(t) + (A_d + \Delta A_d)x(t - \tau(t)) + \\ & Bu + f(x, t)] - G(A - BK)x(t) - \\ & GA_dx(t - \tau(t)) \end{aligned}$$

令 $S = 0, \dot{S} = 0$, 解出等效控制律为

$$\begin{aligned} u_{eq} = & - (GB)^{-1} G[BKx(t) + \Delta Ax(t) + \\ & \Delta A_dx(t - \tau(t)) + f(x, t)]. \end{aligned} \quad (5)$$

将式 (5) 代入系统 (1), 并由假设 1 可以得到理想滑动运动方程

$$\begin{aligned} \dot{x}(t) = & (A + \Delta A)x(t) + (A_d + \Delta A_d)x(t - \tau(t)) + \\ & Bu_{eq} + f(x, t) = \\ & (A + \Delta A)x(t) + (A_d + \Delta A_d)x(t - \tau(t)) - \\ & B(GB)^{-1} G[BKx(t) + \Delta Ax(t) + \\ & \Delta A_dx(t - \tau(t)) + f(x, t)] + f(x, t) = \\ & A_c x(t) + A_dx(t - \tau(t)), \end{aligned} \quad (6)$$

其中 $A_c = A - BK$. 由式 (6) 可知, 滑模运动对满足匹配性的不确定性以及扰动均表现出完全的鲁棒性.

2.2 滑模稳定性分析及主要结论

定理 1 对于给定标量 $h_2 > h_1 \geq 0$, 如果存在如下矩阵:

$$\begin{aligned} P = P^T > 0, Q_i = Q_i^T > 0, R_i = R_i^T > 0, i = 1, 2, \\ M = [M_1^T \ M_2^T \ 0 \ 0]^T, N = [N_1^T \ N_2^T \ 0 \ 0]^T, \end{aligned}$$

使得下列线性矩阵不等式成立:

$$\Theta_1 = \begin{bmatrix} \Theta & h_{12}M \\ h_{12}M^T & -h_{12}R_2 \end{bmatrix} < 0, \quad (7)$$

$$\Theta_2 = \begin{bmatrix} \Theta & h_{12}N \\ h_{12}N^T & -h_{12}R_2 \end{bmatrix} < 0, \quad (8)$$

则满足假设 1~假设 3 的时滞不确定系统 (1), 在式 (4) 确定的滑模面上的理想滑动模态 (6) 是渐近稳定的. 其中

$$\begin{aligned} \Theta = & \begin{bmatrix} \psi_{11} & PA_d - M_1 + N_1 & M_1 + R_1 & -N_1 \\ * & \psi_{22} & M_2 & -N_2 \\ * & * & -Q_1 - R_1 & 0 \\ * & * & * & -Q_2 \end{bmatrix} + \\ & \begin{bmatrix} A_c^T \\ A_d^T \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} (h_1^2 R_1 + h_{12} R_2) [A_c \ A_d \ 0 \ 0], \end{aligned} \quad (9)$$

$$h_{12} = h_2 - h_1, \tag{10}$$

$$\psi_{11} = PA_c + A_c^T P + \sum_{i=1}^2 Q_i - R_1, \tag{11}$$

$$\psi_{22} = -M_2 - M_2^T + N_2 + N_2^T. \tag{12}$$

证明 取 Lyapunov-Krasovskii 泛函如下:

$$V = x^T(t)Px(t) + \sum_{i=1}^2 \int_{t-h_i}^t x^T(\sigma)Q_i x(\sigma)d\sigma + \int_{-h_1}^0 \int_{t+\sigma}^t h_1 \dot{x}^T(s)R_1 \dot{x}(s)dsd\sigma + \int_{-h_2}^{-h_1} \int_{t+\sigma}^t \dot{x}^T(s)R_2 \dot{x}(s)dsd\sigma. \tag{13}$$

对其沿着式(6)求导,得

$$\begin{aligned} \dot{V} = & 2x^T(t)P[A_c x(t) + A_d x(t - \tau(t))] + \\ & \sum_{i=1}^2 x^T(t)Q_i x(t) - \sum_{i=1}^2 x^T(t - h_i)Q_i x(t - h_i) + \\ & [A_c x(t) + A_d x(t - \tau(t))]^T (h_1^2 R_1 + h_{12} R_2) \times \\ & [A_c x(t) + A_d x(t - \tau(t))] - \\ & \int_{t-h_1}^t h_1 \dot{x}^T(s)R_1 \dot{x}(s)ds - \int_{t-h_2}^{t-h_1} \dot{x}^T(s)R_2 \dot{x}(s)ds. \end{aligned} \tag{14}$$

由引理 2, 得

$$\begin{aligned} - \int_{t-h_1}^t h_1 \dot{x}^T(s)R_1 \dot{x}(s)ds \leq & \\ - [x(t) - x(t - h_1)]^T R_1 [x(t) - x(t - h_1)]. \end{aligned} \tag{15}$$

令

$$\xi(t) = [x^T(t) \quad x^T(t - \tau(t)) \quad x^T(t - h_1) \quad x^T(t - h_2)]^T,$$

则由牛顿-莱布尼茨公式, 得

$$\begin{aligned} - \int_{t-h_2}^{t-h_1} \dot{x}^T(s)R_2 \dot{x}(s)ds = & \\ - \int_{t-h_2}^{t-\tau(t)} \dot{x}^T(s)R_2 \dot{x}(s)ds - & \\ \int_{t-\tau(t)}^{t-h_1} \dot{x}^T(s)R_2 \dot{x}(s)ds + 2\xi^T(t)M [x(t - h_1) - & \\ x(t - \tau(t)) - \int_{t-\tau(t)}^{t-h_1} \dot{x}(s)ds] + 2\xi^T(t)N [x(t - & \\ \tau(t)) - x(t - h_2) - \int_{t-h_2}^{t-\tau(t)} \dot{x}(s)ds]. \end{aligned} \tag{16}$$

结合式(14)~(16), 得

$$\begin{aligned} \dot{V} \leq & \xi^T(t)\Theta\xi(t) - \int_{t-\tau(t)}^{t-h_1} [2\xi^T(t)M\dot{x}(s) + \\ \dot{x}^T(s)R_2\dot{x}(s)]ds - \int_{t-h_2}^{t-\tau(t)} [2\xi^T(t)N\dot{x}(s) + \\ \dot{x}^T(s)R_2\dot{x}(s)]ds = \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} & h_{12}^{-1} \int_{t-\tau(t)}^{t-h_1} [\xi^T(t)\Theta\xi(t) - \\ & 2h_{12}\xi^T(t)M\dot{x}(s) - h_{12}\dot{x}^T(s)R_2\dot{x}(s)]ds + \\ & h_{12}^{-1} \int_{t-h_2}^{t-\tau(t)} [\xi^T(t)\Theta\xi(t) - \\ & 2h_{12}\xi^T(t)N\dot{x}(s) - h_{12}\dot{x}^T(s)R_2\dot{x}(s)]ds = \\ & h_{12}^{-1} \int_{t-\tau(t)}^{t-h_1} \begin{bmatrix} \xi(t) \\ \dot{x}(s) \end{bmatrix}^T \begin{bmatrix} \Theta & -h_{12}M \\ -h_{12}M^T & -h_{12}R_2 \end{bmatrix} \times \\ & \begin{bmatrix} \xi(t) \\ \dot{x}(s) \end{bmatrix} ds + h_{12}^{-1} \int_{t-h_2}^{t-\tau(t)} \begin{bmatrix} \xi(t) \\ \dot{x}(s) \end{bmatrix}^T \times \\ & \begin{bmatrix} \Theta & -h_{12}N \\ -h_{12}N^T & -h_{12}R_2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \xi(t) \\ \dot{x}(s) \end{bmatrix} ds \leq \\ & -h_{12}^{-1}(\tau(t) - h_1)\lambda_{\min}(-\Theta_1)\|x(t)\|^2 - \\ & -h_{12}^{-1}(h_2 - \tau(t))\lambda_{\min}(-\Theta_2)\|x(t)\|^2 \leq \\ & [-h_{12}^{-1}(\tau(t) - h_1) - h_{12}^{-1}(h_2 - \tau(t))] \times \\ & \min\{\lambda_{\min}(-\Theta_1), \lambda_{\min}(-\Theta_2)\}\|x(t)\|^2. \end{aligned} \tag{17}$$

令

$$\varepsilon = \min\{\lambda_{\min}(-\Theta_1), \lambda_{\min}(-\Theta_2)\} > 0,$$

则有

$$\dot{V} \leq -\varepsilon\|x(t)\|^2, \tag{18}$$

即理想滑动模态(6)是渐近稳定的. □

2.3 自适应滑模控制器设计

设计控制律使得系统保持在滑模面上, 将控制律分为两部分, 即

$$u(t) = u_{con} + u_{dis}. \tag{19}$$

其中: u_{con} 是连续控制部分, u_{dis} 是不连续控制部分. 首先设计连续部分, 它等于原系统对应的标称系统在滑模面上的等效控制, 即

$$u_{con} = -Kx(t). \tag{20}$$

由式(20)可以看出, 连续控制部分只是一个形式上非常简单的状态反馈. 下面设计不连续控制部分. 由系统假设 3, 系统不确定性上界表达式中 γ_1 和 γ_2 是未知的, 取 $\hat{\gamma}_1$ 和 $\hat{\gamma}_2$ 为对应估计值, 参数偏差为

$$\tilde{\gamma}_1 = \hat{\gamma}_1 - \gamma_1, \quad \tilde{\gamma}_2 = \hat{\gamma}_2 - \gamma_2. \tag{21}$$

取自适应律如下:

$$\dot{\hat{\gamma}}_1 = \|S\| \cdot \|G\|, \quad \dot{\hat{\gamma}}_2 = \|S\| \cdot \|G\| \cdot \|x(t)\|, \tag{22}$$

不连续控制律为

$$\begin{aligned} u_{dis} = & -(GB)^{-1}[\varepsilon + \hat{\gamma}_1\|G\| + \\ & \hat{\gamma}_2\|G\|\|x\|] \cdot \text{sign}(S), \end{aligned} \tag{23}$$

其中 ε 为正常数.

将式(20)和(23)代入(19)即可得到完整的自适应

应滑模控制律

$$u(t) = - (GB)^{-1}[\varepsilon + \hat{\gamma}_1 \|G\| + \hat{\gamma}_2 \|G\| \|x\|] \cdot \text{sign}(S) - Kx(t). \quad (24)$$

定理 2 对于满足假设 1 和假设 3 的时滞不确定系统 (1), 采用由式 (24) 确定的控制律, 能够保证系统状态在有限时间内到达并保持在积分滑模面 (4) 上.

证明 取 Lyapunov 函数

$$V = \frac{(S^T S + \tilde{\gamma}_1^2 + \tilde{\gamma}_2^2)}{2}. \quad (25)$$

沿着式 (2) 对其求导, 得

$$\begin{aligned} \dot{V} = & S^T \dot{S} + \tilde{\gamma}_1 \dot{\tilde{\gamma}}_1 + \tilde{\gamma}_2 \dot{\tilde{\gamma}}_2 = \\ & S^T [GBKx(t) + GBu(t) + \\ & G\omega(t)] + \tilde{\gamma}_1 \dot{\tilde{\gamma}}_1 + \tilde{\gamma}_2 \dot{\tilde{\gamma}}_2 = \\ & S^T [-(\varepsilon + \hat{\gamma}_1 \|G\| + \hat{\gamma}_2 \|G\| \|x\|) \cdot \text{sign}(S) + \\ & G\omega(t)] + \tilde{\gamma}_1 \dot{\tilde{\gamma}}_1 + \tilde{\gamma}_2 \dot{\tilde{\gamma}}_2 \leq \\ & -(\varepsilon + \hat{\gamma}_1 \|G\| + \hat{\gamma}_2 \|G\| \|x\|) \|S\|_1 + \\ & \|S\| \|G\| (\gamma_1 + \gamma_2 \|x\|) + \\ & \|S\| \|G\| (\tilde{\gamma}_1 + \tilde{\gamma}_2 \|x\|). \end{aligned}$$

因为 $\|S\|_1 \geq \|S\|$, 所以

$$\dot{V} \leq -\varepsilon \|S\|.$$

当 $S \neq 0$ 时, 有 $\dot{V} < 0$, 即系统 (1) 在控制律 (24) 的作用下有限时间到达并稳定于滑模面 (4) 上. \square

注 1 对于任意起始状态, 总是在滑模面 (4) 上, 而对应的理想滑动运动 (6) 与满足匹配性的不确定性是完全无关的, 所以滑动模态具有全局鲁棒性.

注 2 控制律中连续控制部分是简单的状态反馈, 不连续部分确定好后, 可以通过对滑模运动的性能要求转换为对 A_c 的特征值要求, 从而计算出 K , 再根据实际情况微调矩阵 K , 直到对系统性能满意为止.

注 3 考虑到由于控制律中符号函数 $\text{sign}(S)$ 的不连续性, 会造成滑模抖振严重, 可以用 $\frac{S}{\|S\| + \delta}$ 替换符号函数, 其中 δ 为一小正常数, 即控制律为

$$u(t) = - (GB)^{-1}[\varepsilon + \hat{\gamma}_1 \|G\| + \hat{\gamma}_2 \|G\| \|x\|] \cdot \frac{S}{\|S\| + \delta} - Kx(t). \quad (26)$$

3 数值仿真

考虑如下系统 (形式与系统 (1) 相同):

$$A = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \\ -1 & -1 & 1 \end{bmatrix},$$

$$A_d = \begin{bmatrix} 0 & 0.5 & 0 \\ 0 & 0 & 0.5 \\ 0.5 & 0.5 & 0.5 \end{bmatrix},$$

$$B = [1 \ 1 \ 2]^T,$$

$$\omega(t) =$$

$$B(1.2 + 0.3 \sin(6t) +$$

$$[-0.1 \sin(2t) \ 0 \ 0.2 \sin(2t)]x(t).$$

初始条件

$$x(0) = [1 \ 1 \ 1], t \in [-h_2, -h_1].$$

其中时滞的上下界 h_1, h_2 由定理 1 可以确定. 为了验证定理 1 的保守性小, 在不同 h_1 的情况下, 采用不同方法所得到的 h_2 如表 1 中所示.

表 1 不同 h_1 下各个方法对应的上界 h_2

方法	h_1					
	0.3	0.5	0.8	1.0	2.0	
方法 1 ^[12]	h_2	1.566 0	1.741 0	2.015 1	2.203 2	3.181 6
方法 2 ^[5]	h_2	1.751 0	1.877 0	2.067 5	2.196 2	2.827 2
定理 1	h_2	2.097 5	2.267 2	2.531 4	2.713 3	3.672 7

由表 1 可以看出, 定理 1 中的方法对保守性改善较为明显. 实验仿真中取时滞上下界为 $h_1 = 0.3 \text{ s}$, $h_2 = 2 \text{ s}$, 由定理 1 和定理 2, 在控制律 (24) 的作用下, 对于时变时滞 $\tau(t)$ 满足 $h_1 \leq \tau(t) \leq h_2$ 的情况, 系统都是全局鲁棒稳定的. 为了改善抖振现象, 实验中采用控制律 (26) 代替 (24).

取时变时滞 $\tau(t)$ 为随机时变时滞, 其上下界满足要求, 但对其变化率情况未知. 时滞 $\tau(t)$ 的大小变化如图 1 所示. 滑模面系数取为

$$G = [1 \ 1 \ 2], K = [21.3 \ 21.17 \ -14.5],$$

这里选择

$$\varepsilon = 0.1, \delta = 0.03.$$

其中 K 的选择是考虑将闭环系统矩阵特征值配成一对较大绝对值的负实部共轭特征值, 另外一个特征值配在 -1 左右. 反馈结果 A_c 的特征值为

$$[-0.9086 \ -5.7957 + 2.6507j \ -5.7957 - 2.6507j].$$

将 $G, K, \varepsilon, \delta$ 代入式 (26) 得到控制律具体表达式, 此时系统状态以及控制律如图 2 和图 3 所示.

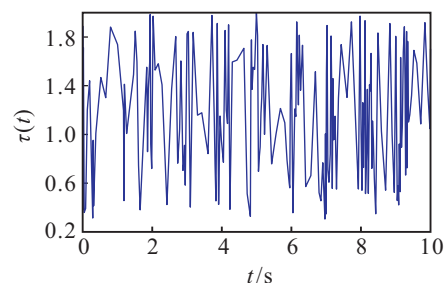
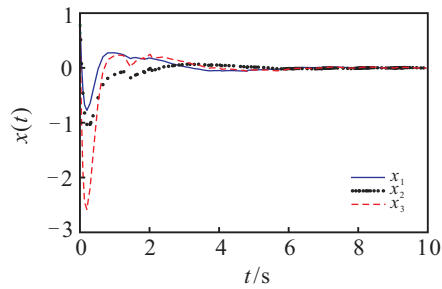
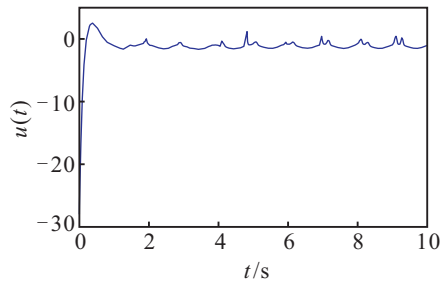


图 1 时变时滞 $\tau(t)$

图2 系统状态变量 $x(t)$ 图3 控制律 $u(t)$

由图1可以看出,时滞 $\tau(t)$ 的变化是完全没有规律的.由图2和图3可以看出,在本文设计的控制律作用下,不确定系统状态变量 $x(t)$ 收敛速度较快,并且超调不大.因此,对于存在随机时变时滞的不确定性系统,所设计的控制律是行之有效的.

4 结 论

针对一类有时变时滞的不确定系统,采用一种带有积分补偿项的积分滑模面,并运用自适应的方法实时估计出不确定性的上界,从而构成自适应切换控制律.该控制律形式较为简单,而且其整个动态过程对匹配性不确定性具有完全的鲁棒性.

参考文献(References)

- [1] Sun J, Liu G P, Chen J, et al. Improved delay-range-dependent stability criteria for linear systems with time-varying delays[J]. *Automatica*, 2010, 46(2): 466-470.
- [2] Yan H, Zhang H, Meng M Q H. Delay-range-dependent robust H_∞ control for uncertain systems with interval time-varying delays[J]. *Neurocomputing*, 2010, 73(7): 1235-1243.

- [3] Liu F, Wu M, He Y, et al. New delay-dependent stability criteria for T-S fuzzy systems with time-varying delay[J]. *Fuzzy Sets and Systems*, 2010, 161(15): 2033-2042.
- [4] Shao H. New delay-dependent stability criteria for systems with interval delay[J]. *Automatica*, 2009, 45(3): 744-749.
- [5] Gu K. An integral inequality in the stability problem of time-delay systems[C]. *Proc of the 39th IEEE Conf on. Sydney: IEEE*, 2000, 3: 2805-2810.
- [6] Shao H, Han Q L. Less conservative delay-dependent stability criteria for linear systems with interval time-varying delays[J]. *Int J of Systems Science*, 2012, 43(5): 894-902.
- [7] Choi H H. LMI-based sliding surface design for integral sliding mode control of mismatched uncertain systems[J]. *IEEE Trans on Automatic Control*, 2007, 52(4): 736-742.
- [8] Zhao F, Liu Y, Yao X, et al. Integral sliding mode control of time-delay systems with mismatching uncertainties[J]. *J of Systems Engineering and Electronics*, 2010, 21(2): 273-280.
- [9] 唐功友, 逢海萍, 孙慧影. 不确定时滞系统的全局鲁棒最优滑模控制[J]. *控制理论与应用*, 2009, 26(8): 850-854. (Tang G Y, Pang H P, Sun H Y. Global robust optimal sliding-mode control for uncertain systems with time-delay[J]. *Control Theory & Applications*, 2009, 26(8): 850-854.)
- [10] 高存臣, 刘振, 任启峰. 时滞离散系统的非线性准滑模鲁棒控制[J]. *控制理论与应用*, 2013, 30(1): 123-130. (Gao C C, Liu Z, Ren Q F. Nonlinear quasi-sliding-mode robust control for discrete-time systems with time-delay[J]. *Control Theory & Applications*, 2013, 30(1): 123-130.)
- [11] 逢海萍, 王璐萍. 含状态时滞不确定性系统的全滑模控制[J]. *计算机仿真*, 2010(11): 159-161. (Pang H P, Wang L P. Global sliding mode control for uncertain systems with state time-delay[J]. *Computer Simulation*, 2010(11): 159-161.)
- [12] He Y, Wang Q G, Lin C, et al. Delay range dependent stability for systems with time-varying delay[J]. *Automatica*, 2007, 43(2): 371-376.

(责任编辑: 曹洪武)