

文章编号: 1001-0920(2007)11-1293-04

多时滞不确定网络控制系统的时滞独立稳定判据

黄心汉, 严怀成, 王 敏

(华中科技大学 控制科学与工程系, 武汉 430074)

摘 要: 针对一类多输入多输出(MIMO)网络控制系统,在考虑多重分布时滞和不确定性的情况下,建立了该系统的连续时间数学模型.利用 Lyapunov 稳定性理论,结合线性矩阵不等式(LMI)方法和 S-过程,给出了基于 LMI 形式的时滞独立渐近稳定判据.通过这些判据,能分析和判定具有多重时滞和不确定性的网络控制系统的时滞独立渐近稳定性.与已有的方法相比,该方法更加有效且求解方便.数值仿真结果表明了该方法的有效性.

关键词: 网络控制系统; 时滞独立稳定; 线性矩阵不等式; 网络诱导时滞

中图分类号: TP13 文献标识码: A

Delay-independent stability criteria of uncertain networked control systems with multiple time-delays

HUANG Xin-han, YAN Huai-cheng, WANG Min

(Department of Control Science and Engineering, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan 430074, China. Correspondent: HUANG Xin-han, E-mail: xhhuang@mail.hust.edu.cn)

Abstract: For a class of multi-input and multi-output (MIMO) networked control systems (NCSs) with distributed time-delays and uncertainties, a continuous time model of the NCSs is proposed. Based on Lyapunov stability theory combined with linear matrix inequality (LMI) technique and S-procedure, some new delay-independent stability criteria are derived in terms of LMI. With these criteria, the delay-independent asymptotic stability for uncertain NCSs with multiple time-delays is analyzed. Compared with other methods, the proposed method is more effective and computationally convenient. Numerical example and simulation show the effectiveness of the proposed method.

Key words: Networked control systems; Delay-independent stability; Linear matrix inequality; Networked-induced delay

1 引言

网络控制系统是指通过一个实时网络构成的闭环反馈控制系统^[1].在网络控制系统中,控制系统的各个组成元件(如传感器、控制器、执行器等)通过一个实时网络相连,其特点是信息通过通讯网络进行交换,其典型结构如图 1 所示.

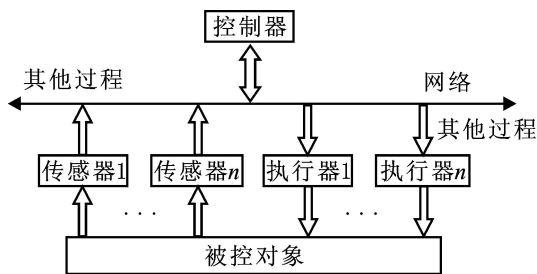


图 1 网络控制系统的典型结构

与传统点对点互连的控制系统相比,网络控制系统具有成本低、安装维护方便、可靠性高、灵活性强、易于扩展、实现信息资源共享等优点^[2].但由于控制网络是分时复用的,这样就不可避免地将网络传输时滞引入系统中,它会降低控制系统的性能甚至导致系统不稳定,从而使网络控制系统的分析和设计变得十分复杂.

近年来,网络控制系统的研究受到广泛关注,并取得了一些研究成果^[1-3].同时,时滞系统的稳定性问题也得到了广泛的研究^[4-11].根据稳定性判据是否包含时滞参数,时滞系统稳定性判据可分为时滞独立稳定判据^[11]和时滞相关稳定判据^[5-10]两类.前者是指不管时滞大小,系统在该条件下都是稳定的;而后者是指系统的稳定性与时滞大小有关,并且通

收稿日期: 2006-07-18; 修回日期: 2007-01-15.

基金项目: 国家自然科学基金项目(60275013).

作者简介: 黄心汉(1946—),男,湖北咸宁人,教授,博士生导师,从事智能控制、智能机器人等研究;严怀成(1977—),男,湖北浠水人,博士生,从事网络控制系统、时滞系统等研究.

常有一个时滞上界. 一般而言, 当时滞较小时, 后者较前者得到的结论保守性小. 但现有的时滞相关稳定性结果仍然比较保守, 特别是对于与时滞无关的系统, 基本上不能得到最大允许时滞为无限大的结论.

本文首先建立了一类 MIMO 网络控制系统新的模型, 在此基础上提出了基于 LMI 形式的多时滞不确定网络控制系统的时滞独立稳定判据. 因为本文的判据是时滞独立的, 所以时滞可以是任意不确定的时滞, 这为系统的设计提供了较大的灵活性. 与其他方法相比(如 Riccati 方程方法), 该方法更加有效且求解更为方便. 另外, 本文建立的模型在形式上与多时滞系统模型一致, 因此, 本文的方法和结论对于一般时滞系统同样适用.

2 系统建模与问题描述

考虑一类实际的 MIMO 网络控制系统, 该系统由被控对象 G_p (包含 r 个传感器, m 个执行器), 控制器 G_c 和公共的通讯网络组成, 其闭环结构如图 2 所示.

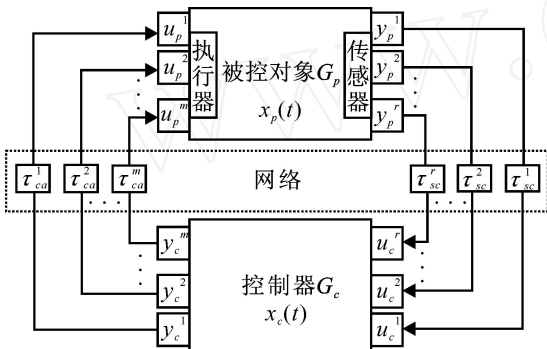


图 2 多时滞 MIMO 网络控制系统结构

线性时不变被控对象 G_p 的状态方程可表示为

$$\begin{cases} \dot{x}_p(t) = A_p x_p(t) + B_p u_p(t), \\ y_p(t) = C_p x_p(t). \end{cases} \quad (1)$$

其中: $x_p(t) \in R^{n_p}$, $u_p(t) \in R^m$, $y_p(t) \in R^r$ 分别是被控对象的状态向量、输入向量和输出向量; n_p, m, r 分别是其对应的维数; $A_p \in R^{n_p \times n_p}$, $B_p \in R^{n_p \times m}$, $C_p \in R^{r \times n_p}$ 是常系数系统矩阵.

假设控制器 G_c 可由下述状态方程描述:

$$\begin{cases} \dot{x}_c(t) = A_c x_c(t) + B_c u_c(t), \\ y_c(t) = C_c x_c(t - c) + D_c u_c(t - c). \end{cases} \quad (2)$$

其中: $x_c(t) \in R^{n_c}$, $u_c(t) \in R^r$, $y_c(t) \in R^m$ 分别是控制器的状态向量、输入向量和输出向量; n_c, r, m 分别是其对应的维数; $A_c \in R^{n_c \times n_c}$, $B_c \in R^{n_c \times r}$, $C_c \in R^{m \times n_c}$, $D_c \in R^{m \times r}$ 分别是常系数系统矩阵; c 是控制器的计算时滞.

由图 2 可知

$$u_c^j(t) = y_p^j(t - \tau_{sc}^j), \quad j = 1, 2, \dots, r; \quad (3)$$

$$y_p^i(t) = y_c^i(t - \tau_{ca}^i), \quad i = 1, 2, \dots, m. \quad (4)$$

其中 τ_{sc}^j 和 τ_{ca}^i 分别是传感器到控制器之间的网络时滞与控制器到执行器之间的网络时滞.

将 $u_c(t)$, $u_p(t)$ 和 C_p, C_c, D_c 分别表示为如下向量形式:

$$u_c(t) = \begin{bmatrix} y_p^1(t - \tau_{sc}^1) \\ y_p^2(t - \tau_{sc}^2) \\ \dots \\ y_p^r(t - \tau_{sc}^r) \end{bmatrix}, \quad u_p(t) = \begin{bmatrix} y_c^1(t - \tau_{ca}^1) \\ y_c^2(t - \tau_{ca}^2) \\ \dots \\ y_c^m(t - \tau_{ca}^m) \end{bmatrix},$$

$$C_p = \begin{bmatrix} C_p^1 \\ C_p^2 \\ \dots \\ C_p^r \end{bmatrix}, \quad C_c = \begin{bmatrix} C_c^1 \\ C_c^2 \\ \dots \\ C_c^m \end{bmatrix}, \quad D_c = \begin{bmatrix} D_c^1 \\ D_c^2 \\ \dots \\ D_c^m \end{bmatrix}. \quad (5)$$

由式(1) ~ (5) 有

$$u_c(t) = E_1 x_p(t - \tau_{sc}^1) + E_2 x_p(t - \tau_{sc}^2) + \dots + E_r x_p(t - \tau_{sc}^r) = \sum_{j=1}^r E_j x_p(t - \tau_{sc}^j), \quad (6)$$

$$u_p(t) = \sum_{i=1}^m F_i x_c(t - \tau_{ca}^i - c) + \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^r G_{ij} x_p(t - \tau_{ca}^i - \tau_{sc}^j - c). \quad (7)$$

其中: 矩阵 $E_j \in R^{r \times n_p}$ 的第 j 行为 C_p^j , 矩阵 $F_i \in R^{m \times n_c}$ 的第 i 行为 C_c^i , 而矩阵 $G_{ij} \in R^{m \times n_p}$ 的第 i 行为 $D_c^i E_j$, 这些矩阵的其余行都为零向量.

由式(1) ~ (7), 定义 $x(t) = [x_p^T(t), x_c^T(t)]^T \in R^{n_p+n_c}$ 为网络控制系统的状态向量, 则有

$$\dot{x}(t) = A x(t) + \sum_{j=1}^r A_j x(t - \tau_{sc}^j) + \sum_{i=1}^m B_i x(t - \tau_{ca}^i) + \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^r C_{ij} x(t - \tau_{ca}^i - \tau_{sc}^j). \quad (8)$$

其中

$$A = \begin{bmatrix} A_p & 0 \\ 0 & A_c \end{bmatrix}, \quad A_j = \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ B_c E_j & 0 \end{bmatrix},$$

$$B_i = \begin{bmatrix} 0 & B_p F_i \\ 0 & 0 \end{bmatrix}, \quad C_{ij} = \begin{bmatrix} B_p G_{ij} & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix}.$$

为讨论方便, 可作如下假设:

$$\begin{cases} A_{r+i} = B_i, \quad A_{m+ir+j} = C_{ij}, \\ j = 1, \dots, r, \quad r+i = 1, 2, \dots, n_p, \\ m+ir+j = 1, 2, \dots, n_c, \quad N = m + r + mr, \\ i = 1, 2, \dots, m, \quad j = 1, 2, \dots, r. \end{cases} \quad (9)$$

则多时滞 MIMO 网络控制系统可表示为

$$\dot{x}(t) = A x(t) + \sum_{j=1}^N A_j x(t - \tau_j). \quad (10)$$

实际系统中,由于环境噪声、缓慢变化的系统参数以及未知的不确定性等,很难获得网络控制系统的精确数学模型.因此,实际的网络控制系统总是不可避免地存在各种不确定性.不失一般性,本文考虑下述具有不确定性和多网络时滞的 MIMO 闭环网络控制系统模型:

$$\begin{cases} \dot{x}(t) = (A + A(t))x(t) + \sum_{j=1}^N (A_j + A_j(t))x(t - \tau_j), t > 0; \\ x(t) = \phi(t), t \in [-\tau, 0]. \end{cases} \quad (11)$$

其中: $x(t) \in R^n$ 是系统状态向量; A, A_j 是合适维数的常系统矩阵; $\tau_j > 0 (j = 1, 2, \dots, N)$ 为系统时滞且满足 $0 < \tau_j < \tau (j = 1, 2, \dots, N)$, 其中 τ 是 τ_j 的上界; $\phi(t)$ 是 $[-\tau, 0]$ 上的已知实值连续初始向量函数; $A(t), A_j(t)$ 表示系统不确定性,可描述为

$$A(t) = DF(t)E, \quad A_j(t) = D_j F_j(t) E_j, \quad j = 1, 2, \dots, N. \quad (12)$$

其中: D, E, D_j 和 E_j 分别是已知合适维数的实常数矩阵; $F(t) \in R^{k \times n}, F_j(t) \in R^{k_j \times n_j}$ 分别是 Lebesgue 可测的未知时变矩阵且满足

$$F^T(t)F(t) \leq I, \quad F_j^T(t)F_j(t) \leq I, \quad \forall t, j = 1, 2, \dots, N. \quad (13)$$

3 主要结论

本节利用 Lyapunov 稳定性理论和 LMI 方法来分析网络控制系统 (10) 和 (11) 的时滞独立渐近稳定性. 下面的定理 1 首先给出标称系统 (10) 的时滞独立稳定判据, 它也是证明定理 2 的基础.

定理 1 若存在正定对称矩阵 $P > 0, Q_j > 0, j = 1, 2, \dots, N$, 使下列 LMI 成立:

$$\begin{bmatrix} \Pi_{11} & \Pi_{12} \\ \Pi_{12}^T & \Pi_{22} \end{bmatrix} < 0, \quad (14)$$

则对任意的时滞 $\tau_j \in [0, +\infty), j = 1, 2, \dots, N$, 系统 (10) 都是时滞独立渐近稳定的. 其中

$$\begin{aligned} \Pi_{11} &= A^T P + PA + \sum_{j=1}^N Q_j, \\ \Pi_{12} &= [PA_1, PA_2, \dots, PA_N], \\ \Pi_{22} &= -\text{diag}\{Q_1, Q_2, \dots, Q_N\}. \end{aligned}$$

证明 选取如下 Lyapunov-Krasovskii 泛函数:

$$V(x_t) = x^T(t)Px(t) + \sum_{j=1}^N \int_{t-\tau_j}^t x^T(\tau)Q_jx(\tau)d\tau,$$

其中 P 和 $Q_j (j = 1, 2, \dots, N)$ 是常实数对称正定矩阵且待定.

函数 $V(x_t)$ 沿系统 (10) 的状态轨迹的导数为

$$\dot{V}(x_t) =$$

$$\begin{aligned} & \dot{x}^T(t)Px(t) + x^T(t)P\dot{x}(t) + \\ & \sum_{j=1}^N \{x^T(t)Q_jx(t) - x^T(t - \tau_j)Q_jx(t - \tau_j)\} = \\ & [Ax(t) + \sum_{j=1}^N A_jx(t - \tau_j)]^T Px(t) + \\ & x^T(t)P[Ax(t) + \sum_{j=1}^N A_jx(t - \tau_j)] + \\ & \sum_{j=1}^N \{x^T(t)Q_jx(t) - x^T(t - \tau_j)Q_jx(t - \tau_j)\} = \\ & x^T(t)[A^T P + PA]x(t) + \\ & 2x^T(t)P \sum_{j=1}^N A_jx(t - \tau_j) + \sum_{j=1}^N x^T(t)Q_jx(t) - \\ & \sum_{j=1}^N x^T(t - \tau_j)Q_jx(t - \tau_j) = \\ & \begin{bmatrix} \Pi_{11} & \Pi_{12} \\ \Pi_{12}^T & \Pi_{22} \end{bmatrix} (t), \end{aligned}$$

其中

$$(t) = [x^T(t) \quad x^T(t - \tau_1) \quad \dots \quad x^T(t - \tau_N)]^T.$$

根据 Lyapunov-Krasovskii 稳定性定理, 若 LMI (14) 成立, 则对任意 $(t) > 0$, 有 $\dot{V}(x_t) < 0$, 因此, 具有多时滞的标称网络控制系统 (10) 是时滞独立渐近稳定的.

将定理 1 推广到含有不确定性的情形, 可得系统 (11) 的时滞独立鲁棒渐近稳定判据.

定理 2 若存在正定对称矩阵 $P > 0, Q_j > 0 (j = 1, 2, \dots, N)$ 和正标量 $e_k > 0, k = 1, 2, \dots, N + 1$, 使下列 LMI 成立:

$$\begin{bmatrix} \Pi_{11} & \Pi_{12} \\ \Pi_{12}^T & \Pi_{22} \end{bmatrix} < 0, \quad (15)$$

则对任意的时滞 $\tau_j \in [0, +\infty) (j = 1, 2, \dots, N)$ 和允许范围内的不确定性, 系统 (11) 时滞独立鲁棒渐近稳定. 其中

$$\begin{aligned} \Pi_{11} &= \begin{bmatrix} M_{11} & M_{12} \\ M_{12}^T & M_{22} \end{bmatrix}, \\ \Pi_{12} &= [P^T, 0, 0, \dots, 0]^T [D, D_1, D_2, \dots, D_N], \\ \Pi_{22} &= -\text{diag}\{e_1 I, e_2 I, \dots, e_{N+1} I\}, \\ M_{11} &= A^T P + PA + \sum_{j=1}^N Q_j + e_1 E^T E, \\ M_{12} &= [PA_1, PA_2, \dots, PA_N], \\ M_{22} &= -\text{diag}\{Q_1 - e_2 E_1^T E_1, Q_2 - e_3 E_2^T E_2, \dots, Q_N - e_{N+1} E_N^T E_N\}. \end{aligned}$$

证明 用 $A + DF(t)E$ 和 $A_j + D_j F_j(t)E_j (j = 1, 2, \dots, N)$ 分别代替式 (14) 中的 A 和 $A_j (j = 1, 2, \dots, N)$, 然后在得到的矩阵两边同时乘以向量 $x_k, k = 1, 2, \dots, N + 1$, 且定义

$p = F(t) Ex_1, q_j = F_j(t) E_j x_{j+1}, j = 1, 2, \dots, N.$
 则对于所有允许范围的不确定性 $F(t)$ 和 $F_j(t), j = 1, 2, \dots, N,$ 可得

$${}^T(t) \begin{bmatrix} 11 & 12 \\ T & 22 \\ 12 & 22 \end{bmatrix} (t) < 0. \quad (16)$$

其中

$${}^T(t) = [x_1^T, x_2^T, \dots, x_{N+1}^T, p^T, q_1^T, q_2^T, \dots, q_N^T]^T,$$

$$11 = \begin{bmatrix} 11 & 12 \\ T & 22 \end{bmatrix}, \quad 22 = 0_{(N+1) \times (N+1)},$$

$$12 = [P^T, 0, 0, \dots, 0]^T [D, D_1, D_2, \dots, D_N].$$

这里: $11, 12, 22$ 的定义同定理 1.

因为 $F(t) \leq 1, F_j(t) \leq 1, j = 1, 2, \dots, N,$ 所以对于正标量 $e_k > 0, k = 1, 2, \dots, N + 1,$ 下列不等式成立:

$$\begin{aligned} e_1 p^T p &= e_1 x_1^T E^T F^T(t) F(t) Ex_1 \\ e_1 x_1^T E^T Ex_1, \\ e_{j+1} q_j^T q_j &= e_{j+1} x_{j+1}^T E_j^T E_j x_{j+1}, \\ j &= 1, 2, \dots, N. \end{aligned} \quad (17)$$

对上述不等式(16)和(17)应用 S-过程^[4], 便可得到 LMI(15).

注 1 定理 1 和定理 2 分别给出了网络控制系统(10)和(11)的时滞独立渐近稳定判据, 通过它们可方便地判定系统是否时滞独立稳定, 即 LMI 是否有解^[4], 而 LMI(14)和(15)都可利用 Matlab LMI 工具箱有效求解.

4 仿真实例

为验证本文方法的有效性, 采用文献[5-11]中的例子和方法进行说明和比较.

考虑线性时不变的不确定时滞系统, 其状态空间模型为

$$\dot{x}(t) = [A + A(t)]x(t) + [A_1 + A_1(t)]x(t - \tau). \quad (18)$$

其中

$$A = \begin{bmatrix} -2 & 0 \\ 1 & -3 \end{bmatrix}, \quad A_1 = \begin{bmatrix} -1 & 0 \\ -0.8 & -1 \end{bmatrix}.$$

该系统的不确定性可描述为式(12)且满足

$$\begin{aligned} A(t) &\leq 0.2, \quad A_1(t) \leq 0.2, \quad \forall t, \\ D = D_1 &= \begin{bmatrix} 0.2 & 0 \\ 0 & 0.2 \end{bmatrix}, \quad E = E_1 = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix}, \\ F(t) &= \begin{bmatrix} \cos t & 0 \\ 0 & \sin t \end{bmatrix}. \end{aligned}$$

根据定理 2 可知, 对任意时滞 $0 < \tau < +\infty,$ 系统(18)都是时滞独立渐近稳定的. 然而, 利用现有的时滞相关稳定判据^[5-8], 所得到的结果十分保守. 事实上, 根据现有的时滞相关稳定性判据得到的保

证系统渐近稳定的最大允许时滞分别是: 0.4428^[5], 0.5557^[6], 3.0369^[7] 和 4.880^[8]. 另一方面, 利用文献[9]中的定理 4 和算法 1 或文献[10]中的推论 1 可知, 最大允许时滞都趋于无穷大. 这表明本例中的系统实际上是时滞独立稳定的系统, 即该系统是否稳定与时滞大小无关, 而这从时滞相关的稳定判据^[5-8]中不可能得到该结论.

另外, 若采用文献[11]中时滞独立稳定判据引理 1 对该系统进行判定, 需求解复杂的 Riccati 方程, 而本文的判据都是标准的 LMI 形式, 可方便地利用 Matlab LMI 工具箱进行求解. 因此, 本文的方法计算更加方便且简单有效.

当网络时滞 $\tau = 10\,000$ s 时, 系统(18)的状态响应曲线如图 3 所示. 可以看出, 在该时滞下系统仍是时滞独立渐近稳定的. 实际上, 本文的结论是时滞独立稳定判据, 与时滞的大小无关. 因此, 对任意的时滞 $0 < \tau < +\infty,$ 系统(18)都是渐近稳定的. 该实例表明了本文方法的有效性.

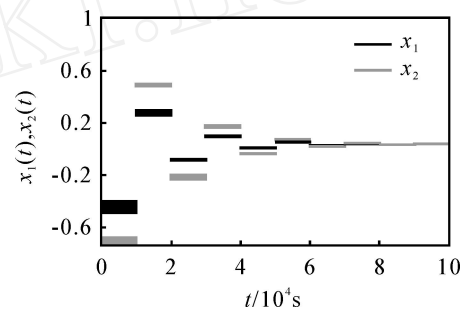


图 3 具有网络时滞的不确定系统的状态响应

5 结 语

本文讨论了具有多重时滞和不确定性的网络控制系统的时滞独立稳定性问题. 针对实际网络控制系统中普遍存在的不确定性和网络时滞, 建立了一类 MIMO 网络控制系统模型. 利用 Lyapunov 稳定性理论和 LMI 方法, 结合 S-过程, 给出了基于 LMI 形式的稳定性判据. 与其他方法相比, 本文方法有效性强且计算方便. 仿真结果表明了该方法的有效性. 这些结果对于研究网络控制环境下的稳定性、镇定性和鲁棒控制问题具有一定的理论和实际意义.

参考文献(References)

[1] Nilsson J. Real-time control systems with delays[D]. Lund: Lund Institute of Technology, 1998.
 [2] Walsh G C, Ye H, Bushnell L G. Stability analysis of networked control systems[J]. IEEE Trans on Control Systems Technology, 2002, 10(3): 438-446.
 [3] Zhang W, Branicky M S, Phillips S M. Stability of networked control systems[J]. IEEE Control Systems Magazine, 2001, 21(1): 84-99.

(下转第 1301 页)

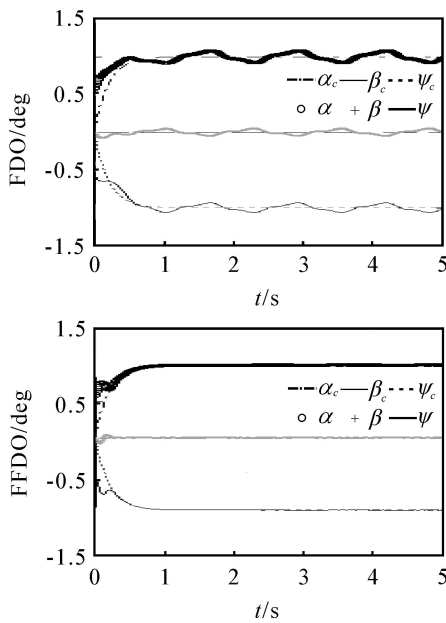


图 3 扰动情况下 TSMC 和自适应 TSMC 的跟踪曲线
快速消除全部干扰的影响,因此闭环系统具有强鲁棒性.

6 结 语

首先针对传统 FDO 在逼近误差较小时学习缓慢的缺点,设计了 FFDO,严格证明了其逼近误差在有限时间内收敛到非常小的区域,然后基于 FFDO

设计了自适应 TSMC 控制方案;最后,通过仿真进一步验证了 FFDO 的快速性和闭环控制方案的鲁棒性.

参考文献(References)

[1] Kim E. A fuzzy disturbance observer and its application to control[J]. IEEE Trans on Fuzzy Systems, 2002, 10 (1): 77-84.

[2] Yu Shuang-he, Yu Xing-huo, Man Zhi-hong. A fuzzy neural network approximator with fast terminal sliding mode and its applications[J]. Fuzzy Sets and Systems, 2004, 148(3): 469-486.

[3] Wu Y Q, Man Z H. Terminal sliding mode control design for uncertain dynamic systems[J]. Systems and Control Letters, 1998, 34(5): 281-287.

[4] Park K B, Tsuji T. Terminal sliding mode control of second-order nonlinear uncertain systems[J]. Int J of Robust and Nonlinear Control, 1999, 9(11): 769-780.

[5] Yuri B Shtessel, McDuffie J. Sliding mode control of the X-33 vehicle in launch and re-entry mode [R]. Boston: Marshall Space Flight Center, 1998.

[6] Wu S F, Engelen C J H, Chu Q P, et al. Fuzzy logic based attitude control of the spacecraft X-38 along a nominal re-entry trajectory [J]. Control Engineering Practice, 2001, 9(7): 699-707.

(上接第 1292 页)

[12] Molina A, Athanasiadou G E, Nix A R. The automatic location of base-stations for optimized cellular coverage: A new combinatorial approach[C]. IEEE 49th Vehicular Technology Conf. Amsterdam: IEEE Press, 1999: 606-610.

[13] Lieska K, Laitinen E, Lahteenmaki J. Radio coverage optimization with genetic algorithms [C]. IEEE Int Symposium on Personal, Indoor and Mobile Radio

Communications. Boston: IEEE Press, 1998: 318-322.

[14] Zhang Hong-hai, Jennifer C Hou. Maintaining sensing coverage and connectivity in large sensor networks[J]. Ad-hoc and Sensor Wireless Networks, 2005, 1(1): 89-124.

[15] Deb K. An introduction to genetic algorithms [J]. Sadhana J, 1999, 24(4): 293-315.

(上接第 1296 页)

[4] Body S, El Ghaoui L, Eron E, et al. Linear matrix inequalities in system and control theory [M]. Philadelphia: SIAM, 1994.

[5] Li X, de Souza C E. Delay-dependent robust stability and stabilization of uncertain linear delay systems: A linear matrix inequality approach[J]. IEEE Trans on Automatic Control, 1997, 42(8): 1144-1148.

[6] Li X, de Souza C E. Criteria for robust stability and stabilization of uncertain linear systems with state delays [J]. Automatica, 1997, 33(1): 1657-1662.

[7] Su T J, Lu C Y, Tsai J S H. LMI delay-dependent robust stability criteria for uncertain systems with multiple-state delays [J]. IEEE Trans on Circuits and

Systems, 2002, 49(2): 253-256.

[8] Su N J, Su H Y, Chu J. Delay-dependent robust H control for uncertain time-delay systems[C]. IEE Proc Control Theory Application. London, 2003: 489-492.

[9] Moon Y S, Park P, Kwon W H, et al. Delay-dependent robust stabilization of uncertain state-delayed systems [J]. Int J of Control, 2001, 74 (14): 1447-1455.

[10] Kwon O M, Park Ju H. On improved delay-dependent robust control for uncertain time-delay systems [J]. IEEE Trans on Automatic Control, 2004, 49 (11): 1991-1995.

[11] Lee J H, Kim S W, Kwon W H. Memoryless H controllers for state delayed systems[J]. IEEE Trans on Automatic Control, 1994, 39(1): 159-162.