第 21 卷 第 3 期 控 制 与 决 策 2006 年 3 月
Vol 21 No. 3 Control and Decision Mar. 2006

文章编号: 1001-0920(2006)03-0356-05

不确定时滞组合系统的分散鲁棒镇定

王 珂, 高立群, 刘 佳, 韩 杰
(东北大学 信息科学与工程学院, 沈阳 110004)

摘 要: 讨论不确定时滞组合系统的分散自适应鲁棒镇定问题. 外部扰动存在于子系统内部, 可以是非线性或时变的, 且不确定项和时滞存在于互联项中. 不确定项和外部扰动是有界的, 但上界未知. 利用自适应律估计未知的上界, 设计了非线性无记忆控制器. 采用非线性控制器可保证闭环组合系统的解一致有界, 且系统状态是一致渐近稳定的. 仿真结果表明了该设计方法的有效性.

关键词: 时滞不确定组合系统; 鲁棒镇定; 自适应控制; 一致有界
中图分类号: TP273 **文献标识码**: A

Decentralized Robust Stabilization for Uncertain Delay Composite Systems

WANG Ke, GAO Li-qun, LIU Jia, HAN Jie
(School of Information Sciences and Engineering, Northeastern University, Shenyang 110004, China. Correspondent: WANG Ke, E-mail: wangk@lnecp.com)

Abstract: The problem of robust stabilization is discussed for a class of uncertain delay composite systems. The system under consideration is with external disturbances in each subsystem and delayed states perturbations in the interconnections. The upper bounds of the uncertainties and external disturbances are assumed to be unknown. The adaptive laws are proposed to estimate such unknown bounds, and by making use of their updated values, a class of decentralized nonlinear memoryless controllers is constructed. The solutions to the closed-loop delay composite system can be guaranteed to be uniformly bounded, and the states are uniformly asymptotically stable. Simulation results show that the control scheme is effective.

Key words: Uncertain delay composite systems; Robust stabilization; Adaptive control; Uniform boundedness

1 引 言

在实际工程系统中经常会遇到时滞现象, 时滞的存在可能导致系统不稳定[1,2]. 在控制系统中, 传输延时、测量的不灵敏性和设备的物理特性等因素会产生时滞, 而建模误差、线性化近似以及系统工作环境的变化会带来不确定因素, 所以许多实际系统用时滞不确定系统描述. 时滞不确定组合系统的鲁棒稳定性问题已引起人们的广泛关注[3~5]. 文献[4]讨论了互联项含有时滞的时变组合系统的分散控制问题, 设计了分散线性状态反馈控制器, 保证了闭环系统的状态最终一致有界.

本文主要考虑互联项具有时滞和外部扰动的组合大系统的分散鲁棒镇定问题. 不确定项和外部扰动是有界的, 且上界未知. 首先设计了自适应律来估计不确定项和外部扰动的未知上界; 然后利用这些未知上界的自适应估计值, 设计了非线性无记忆状态反馈控制器. 该控制器可保证闭环组合系统的解一致有界, 且系统状态一致渐近稳定.

2 问题阐述

考虑由下述 N 个互联的不确定子系统 S_i($i \in$

收稿日期: 2005-02-28; **修回日期**: 2005-06-07.
基金项目: 国家自然科学基金项目(60274009).
作者简介: 王珂(1957—), 男, 沈阳人, 高级工程师, 博士, 从事输变电工程及自动化的研究; 高立群(1952—), 男, 沈阳人, 教授, 博士生导师, 从事复杂系统、模式识别等研究.

N) 组成的组合大系统:

$$\dot{x}_i = A_i x_i + B_i u_i + \sum_{j=1}^{N} A_{ij}(\zeta_i, t) x_j (t - h_{ij}) + w_i(q_i, t), \ i = 1, 2, \cdots, N. \quad (1)$$

其中: $x_i \in R^{n_i}$ 为状态变量; $u_i(t) \in R^{m_i}$ 为控制输入; $A_i \in R^{n_i \times n_i}$, $B_i \in R^{n_i \times m_i}$ 分别为第 i 个名义子系统的状态矩阵和输入矩阵; $w_i(q_i, t) \in R^{n_i}$ 为系统的外部扰动, 它也是连续的; $A_{ij}(\cdot)$ 为子系统 S_i 与 S_j 之间的互联项, 它关于自变量是连续的, 而且不确定项 $\zeta_i \in \Psi_i \subset R^{l_i}$ 是 Lebesgue 可测的; h_{ij} 为非负的未知常数, $i, j = 1, 2, \cdots, N$, 它表示互联项的时滞; $x(\cdot) \in R^n$ 表示向量 $[x_1^{\mathrm{T}}(\cdot) \quad x_2^{\mathrm{T}}(\cdot) \quad \cdots \quad x_N^{\mathrm{T}}(\cdot)]^{\mathrm{T}}$, 其中 $n = n_1 + n_2 + \cdots + n_N$. 每个子系统的初始条件如下:

$$x_i(t) = \Omega_i(t), \ t \in [t_0 - h_i, t_0]. \quad (2)$$

其中: $h_i = \max\{h_{ij}, i, j = 1, 2, \cdots, N\}$, 在区间 $[t_0 - h_i, t_0]$ 上, $\Omega_i(t)$ 是连续函数

为研究方便, 引入如下定义:

定义 1　系统

$$\dot{x}_i = A_i x_i(t) + B_i u_i(t), \ i = 1, 2, \cdots, N \quad (3)$$

称为系统(1) 的名义子系统, 而系统

$$\dot{x}_i = A_i x_i + B_i u_i + w_i(q_i, t), \quad i = 1, 2, \cdots, N \quad (4)$$

则称为系统(1) 的孤立子系统

对于系统(1), 引入如下假设:

假设 1　在名义子系统(3) 中, $\{A_i, B_i\}$ 是完全可控的

假设 2　存在合适维数的连续有界的函数矩阵 $D_{ij}(\cdot)$, $\overline{w}_i(\cdot)$, 它满足如下匹配条件:

$$A_{ij}(\zeta_i, t) = B_i D_{ij}(\zeta_i, t), \ j = 1, 2, \cdots, N;$$
$$w_i(q_i, t) = B_i \overline{w}_i(q_i, t).$$

假设 3　存在函数 $\rho_{ij}(t)$ 和 $\phi_i(t)$ 满足

$$\rho_{ij}(t) = \max_{\zeta_i} \| D_{ij}(\zeta_i, t) \|, \quad (5a)$$

$$\phi_i(t) = \max_{q_i} \| \overline{w}_i(q_i, t) \|. \quad (5b)$$

其中: $\|\cdot\|$ 表示一个矩阵范数; 函数 $\rho_{ij}(t)$ 和 $\phi_i(t)$ 是未知的, 且它们是一致连续和有界的

假设 4　存在常数 ρ_{ij}^* 和 ϕ_i 满足

$$\rho_{ij}^* = \max\{\rho_{ij}(t) : t \in R^+\}, \quad (6a)$$

$$\phi_i = \max\{\phi_i(t) : t \in R^+\}, \quad (6b)$$

其中常数 ρ_{ij}^* 和 ϕ_i 是未知的

由假设 1 可知, 对于给定的对称正定矩阵 $Q_i \in R^{n_i \times n_i}$, 存在对称正定矩阵 $P_i \in R^{n_i \times n_i}$ 是如下代数 Riccati 方程的解:

$$A_i^{\mathrm{T}} P_i + P_i A_i - \eta P_i B_i B_i^{\mathrm{T}} P_i = - Q_i, \quad (7)$$

其中 η 为给定的正常数

于是, 问题可转化为针对不确定时滞组合系统(1), 设计分散自适应控制器, 保证闭环系统的状态是稳定的

3　鲁棒控制器设计

定义参数

$$\Psi_i^* = 1 + \sum_{j=1}^{N} (\rho_{ij}^*)^2, \quad (8)$$

其中 Ψ_i^* 是未知的正常数

选取控制律

$$u_i = u_{i1} + u_{i2}, \quad (9a)$$

$$u_{i1} = - \frac{1}{2} \eta \hat{\Psi}_i(t) B_i^{\mathrm{T}} P_i x_i(t), \quad (9b)$$

$$u_{i2} = - \frac{\hat{\phi}_i(t) B_i^{\mathrm{T}} P_i x_i(t)}{\| B_i^{\mathrm{T}} P_i x_i(t) \| \hat{\phi}_i(t) + \sigma_i(t)}. \quad (9c)$$

其中 $\sigma_i(t)$ 为正的一致连续和有界的函数, 且满足

$$\lim_{t \to \infty} \int_{t_0}^{t} \sigma_i(\tau) \mathrm{d}\tau \le \overline{\sigma_i} \le \infty. \quad (9d)$$

式中: $\overline{\sigma_i}$ 为正常数; η 为正的设计常数, 它满足

$$Q_i - N \eta^{-1} I_i > 0. \quad (9e)$$

η 定义为 $\eta := \min\{\eta_i, i = 1, 2, \cdots, N\}$, $\hat{\Psi}_i$ 和 $\hat{\phi}_i$ 分别为 Ψ_i^* 和 ϕ_i 的估计值

选取自适应律

$$\dot{\hat{\Psi}}_i(t) = - \gamma_{i1} \sigma_i(t) \hat{\Psi}_i(t) + \gamma_{i1} \eta \| B_i^{\mathrm{T}} P_i x_i(t) \|^2, \quad (10a)$$

$$\dot{\hat{\phi}}_i(t) = - \gamma_{i2} \sigma_i(t) \hat{\phi}_i(t) + 2\gamma_{i2} \| B_i^{\mathrm{T}} P_i x_i(t) \|, \quad (10b)$$

其中 γ_{i1}, γ_{i2} 为正的设计常数

将控制律代入系统(1), 可得

$$\dot{x}_i = \left[A_i - \frac{1}{2} \eta \hat{\Psi}_i(t) B_i B_i^{\mathrm{T}} P_i\right] x_i(t) + B_i u_{i2} + \sum_{j=1}^{N} A_{ij}(\zeta_i, t) x_j (t - h_{ij}) + w_i(q_i, t). \quad (11)$$

设 $\Phi_i(t) = \hat{\Psi}_i(t) - \Psi_i^*$, $\tilde{\phi}_i(t) = \hat{\phi}_i(t) - \phi_i$, 则式(10) 可写为

$$\dot{\Phi}_i(t) = - \gamma_{i1} \sigma_i(t) \Phi_i(t) + \gamma_{i1} \eta \| B_i^{\mathrm{T}} P_i x_i(t) \|^2 - \gamma_{i1} \sigma_i(t) \Psi_i^*, \quad (12a)$$

$$\dot{\tilde{\phi}}_i(t) = - \gamma_{i2} \sigma_i(t) \tilde{\phi}_i(t) + 2\gamma_{i2} \| B_i^{\mathrm{T}} P_i x_i(t) \| - \gamma_{i2} \sigma_i(t) \phi_i. \quad (12b)$$

用 $(x_i, \tilde{\Psi}_i, \tilde{\phi}_i)(t)$ 表示闭环系统(11) 及误差系统(12) 的解, 则有如下定理成立:

定理 1　考虑闭环系统(11) 和(12), 满足假设 1～ 假设 4, 则闭环系统(11) 和误差系统(12) 的解 $(x_i, \Phi_i, \tilde{\phi}_i)(t)$ 是全局有界的, 且

$$\lim_{t \to \infty} x_i(t; t_0, x_i(t_0)) = 0. \quad (13)$$

证明 选取Lyapunov-Krasovskii函数

$$V=\sum_{i=1}^{N}\Big\{x_i^{\mathrm T}P_ix_i+\frac{1}{2}\tilde\Psi_i^{\mathrm T}\Gamma_i^{-1}\tilde\Psi_i+\sum_{j=1}^{N}\eta_i^{-1}\int_{t-h_{ij}}^{t}x_j^{\mathrm T}(\tau)x_j(\tau)\mathrm d\tau\Big\}.\tag{14}$$

其中: P_i 满足式(7), $\tilde\Psi_i=[\tilde\varphi_i,\tilde\phi_i]^{\mathrm T}$, $\Gamma_i^{-1}=\mathrm{diag}\{\gamma_{i1}^{-1},\gamma_{i2}^{-1}\}$.

对上式求导, 并将控制律(9)代入, 可得

$$\begin{aligned}\dot V\le&\sum_{i=1}^{N}\Big\{-x_i^{\mathrm T}(t)Q_ix_i(t)-\eta\hat\psi_i\|B_i^{\mathrm T}P_ix_i(t)\|^2+\\&\eta\|B_i^{\mathrm T}P_ix_i(t)\|^2-\\&\frac{2\hat\phi_i(t)\|B_i^{\mathrm T}P_ix_i(t)\|^2}{\|B_i^{\mathrm T}P_ix_i(t)\|\hat\phi_i(t)+\sigma_i(t)}+\\&2\|B_i^{\mathrm T}P_ix_i(t)\|\sum_{j=1}^{N}\rho_{ij}^*\|x_j(t-h_{ij})\|+\\&2\phi_i\|B_i^{\mathrm T}P_ix_i(t)\|+\sum_{j=1}^{N}\eta_i^{-1}[\|x_j(t)\|^2-\\&\|x_j(t-h_{ij})\|^2]+\tilde\Psi_i^{\mathrm T}(t)\Gamma_i^{-1}\dot{\tilde\Psi}_i(t)\Big\}.\end{aligned}\tag{15}$$

注意下列事实:

$$2ab\le ca^2+\frac{1}{c}b^2.\tag{16}$$

根据式(16), 式(15)可变为

$$\begin{aligned}\dot V\le&\sum_{i=1}^{N}\Big\{-x_i^{\mathrm T}(t)Q_ix_i(t)+\sum_{j=1}^{N}\eta_i^{-1}\|x_j(t)\|^2+\\&\Big[-\eta\hat\psi_i\|B_i^{\mathrm T}P_ix_i(t)\|^2+\\&\eta\Big(1+\sum_{j=1}^{N}(\rho_{ij}^*)^2\Big)\|B_i^{\mathrm T}P_ix_i(t)\|^2-\\&\frac{2\hat\phi_i\|B_i^{\mathrm T}P_ix_i(t)\|^2}{\|B_i^{\mathrm T}P_iz_i(t)\|\hat\phi_i+\sigma_i(t)}+\\&2\phi_i\|B_i^{\mathrm T}P_ix_i(t)\|\Big]+(\gamma_{i1}^{-1}\tilde\varphi_i\dot{\tilde\varphi}_i+\gamma_{i2}^{-1}\tilde\phi_i\dot{\tilde\phi}_i)\Big\}.\end{aligned}\tag{17}$$

根据 η 的定义, 并注意下列事实:

$$\sum_{i=1}^{N}\sum_{j=1}^{N}\eta_i^{-1}\|x_j(t)\|^2\le\sum_{i=1}^{N}\eta_i^{-1}N\|x_i(t)\|^2.$$

根据式(9e)和(12), 式(17)可变为

$$\begin{aligned}\dot V\le\sum_{i=1}^{N}\Big\{&-\lambda_{\min}(\bar Q_i)\|x_i(t)\|^2+\\&2\frac{\|B_i^{\mathrm T}P_ix_i(t)\|\hat\phi_i(t)\sigma_i(t)}{\|B_i^{\mathrm T}P_ix_i(t)\|\hat\phi_i(t)+\sigma_i(t)}+\\&(-\sigma_i(t)\tilde\varphi_i^2(t)-\sigma_i(t)\tilde\varphi_i(t)\psi_i^*-\\&\sigma_i(t)\tilde\phi_i^2(t)-\sigma_i(t)\tilde\phi_i(t)\phi_i)\Big\},\end{aligned}\tag{18}$$

其中 $\bar Q_i=Q_i-\eta_i^{-1}NI_i>0$. 同时, 注意下列事实:

$$0\le ab/(a+b)\le a,\ \forall a,b>0.$$

则式(18)可变为

$$\begin{aligned}\dot V\le\sum_{i=1}^{N}\Big\{&-\lambda_{\min}(\bar Q_i)\|x_i(t)\|^2+2\sigma_i(t)+\\&\frac{1}{4}\sigma_i(t)\big(|\psi_i^*|^2+|\phi_i|^2\big)\Big\}.\end{aligned}\tag{19}$$

选取

$$\begin{aligned}&z_i=[x_i^{\mathrm T}\quad\Psi_i^{\mathrm T}]^{\mathrm T},\\&z(t)=[z_1^{\mathrm T}(t),z_2^{\mathrm T}(t),\cdots,z_N^{\mathrm T}(t)];\\&m=\min\{\lambda_{\min}(\bar Q_i),i=1,2,\cdots,N\},\\&\epsilon_i=\Big(2+\frac{1}{4}|\psi_i^*|^2+\frac{1}{4}|\phi_i|^2\Big),\\&\epsilon=\max\{\epsilon_i,i=1,2,\cdots,N\},\\&\bar\epsilon=N\epsilon,\\&\sigma(t)=\max[\sigma_i(t),i=1,2,\cdots,N].\end{aligned}$$

则式(19)可变为

$$\dot V\le-m\|x(t)\|^2+\bar\epsilon\sigma(t).\tag{20}$$

又根据Lyapunov函数的定义, 存在两个正常数 $\delta_{\min}$ 和 $\delta_{\max}$ 满足

$$\bar\gamma_1(\|z(t)\|)\le V\le\bar\gamma_2(\|z(t)\|).\tag{21}$$

其中

$$\bar\gamma_1(\|z(t)\|)=\delta_{\min}\|z(t)\|^2,\tag{22a}$$

$$\begin{aligned}&\bar\gamma_2(\|z(t)\|)=\\&\delta_{\max}\|z(t)\|^2+\\&\sum_{i=1}^{N}\sum_{j=1}^{N}\eta_i^{-1}h_{ij}\sup_{\tau\in[t-h_{ij},t]}\|x_j(t)\|^2.\end{aligned}\tag{22b}$$

由式(20)～(22)可知, 闭环时滞系统的解 $z(t)$ 是一致连续的, 且状态变量 $z(t)$ 渐近趋于零.

由式(20)和(21)可得

$$\begin{aligned}&0\le\bar\gamma_1(\|z(t)\|)\le\\&\bar\gamma_2(\|z(t_0)\|)-\\&\int_0^t\bar\gamma_3(\|x(\tau)\|)\mathrm d\tau+\int_0^t\bar\epsilon\sigma(\tau)\mathrm d\tau\end{aligned}\tag{23}$$

其中标量函数 $\bar\gamma_3(\|x(t)\|)$ 的定义如下:

$$\bar\gamma_3(\|x(t)\|)=m\|x(t)\|^2.\tag{24}$$

由式(23)可得下面两个结果: 首先

$$\begin{aligned}&0\le\\&\bar\gamma_2(\|z(t_0)\|)-\\&\lim_{t\to\infty}\int_0^t\bar\gamma_3(\|x(\tau)\|)\mathrm d\tau+\lim_{t\to\infty}\int_0^t\bar\epsilon\sigma(\tau)\mathrm d\tau\end{aligned}\tag{25}$$

根据式(9d), 定义变量 $\bar\sigma$ 为

$$\lim_{t\to\infty}\int_0^t\sigma(\tau)\mathrm d\tau\le\bar\sigma\tag{26}$$

由式(25)和(26)可得

$$\begin{aligned}&\lim_{t\to\infty}\int_0^t\bar\gamma_3(\|x(\tau)\|)\mathrm d\tau\le\\&\bar\gamma_2(\|z(t_0)\|)+\bar\epsilon\bar\sigma\end{aligned}\tag{27}$$

其次, 由式(23) 可得

$$0 \le \bar{\gamma}_1(\|z(t)\|) \le \bar{\gamma}_2(\|z(t_0)\|) + \int_0 \bar{\epsilon}\sigma(\tau)\mathrm{d}\tau, \tag{28}$$

由式(27) 和(28) 可得

$$0 \le \bar{\gamma}_1(\|z(t)\|) \le \bar{\gamma}_2(\|z(t_0)\|) + \bar{\epsilon}\bar{\sigma}, \tag{29}$$

可知 $z(t)$ 是一致有界的. 因为 $z(t)$ 是连续的, 所以它是一致连续的, 从而可得到 $x(t)$ 是一致连续的. 根据定义可知, $\bar{\gamma}_3(\|x(t)\|)$ 是一致连续的, 对式(28) 应用 Barbalat 引理可得

$$\lim_{t\to\infty} \bar{\gamma}_3(\|x(t)\|) = 0, \tag{30}$$

且因为 $\bar{\gamma}_3(\|x(t)\|)$ 是正的标量函数, 所以

$$\lim_{t\to\infty} \|x(t)\| = 0. \tag{31}$$

由此定理 1 得证. □

注 1　众所周知, 文献[6] 提出了所谓的带有 σ-修正项的自适应律. 需要指出的是, 带有 σ-修正项的自适应律只能保证闭环系统是最终一致有界的, 它不能保证闭环系统的状态渐近趋于零. 而本文提出的改进 σ-修正项的自适应律, 可以保证闭环系统是一致连续的, 且闭环系统的状态渐近趋于零. 本文提出的改进 σ-修正项的自适应律可应用于实际控制问题, 可获得精确的控制效果.

4　仿　　真

考虑如下时滞不确定组合系统

$$\dot{x}_1 = \begin{bmatrix} 3 & 0 \\ -2 & -1 \end{bmatrix} x_1 + \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \end{bmatrix} u_1 + \sum_{j=1}^{2} A_{1j}(\zeta, t) x_j(t - h_{1j}) + w_1(q_1, t),$$

$$\dot{x}_2 = \begin{bmatrix} -3 & -1 \\ 1 & 2 \end{bmatrix} x_2 + \begin{bmatrix} 0 \\ 1 \end{bmatrix} u_2 + \sum_{j=1}^{2} A_{2j}(\zeta, t) x_j(t - h_{2j}) + w_2(q_2, t).$$

其中

$$A_{11}(\zeta, t) = \begin{bmatrix} -1 & \zeta_1(t) \\ 0 & 0 \end{bmatrix},$$

$$A_{12}(\zeta, t) = \begin{bmatrix} \zeta_1(t) & 2 \\ 0 & 0 \end{bmatrix},$$

$$w_1(q_1, t) = \begin{bmatrix} q_1(t) \\ 0 \end{bmatrix},$$

$$A_{21}(\zeta, t) = \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ -\zeta_2(t) & \zeta_2(t) \end{bmatrix},$$

$$A_{22}(\zeta, t) = \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 1 & \zeta_2(t) \end{bmatrix},$$

$$w_2(q_2, t) = \begin{bmatrix} 0 \\ q_2(t) \end{bmatrix}.$$

选取 $\eta_1 = 2, \eta_2 = 4$. 求解 Riccati 方程, 可得

$$P_1 = \begin{bmatrix} 3.2758 & -0.2018 \\ -0.2018 & 0.4593 \end{bmatrix},$$

$$P_2 = \begin{bmatrix} 0.2039 & 0.1686 \\ 0.1686 & 1.1447 \end{bmatrix}.$$

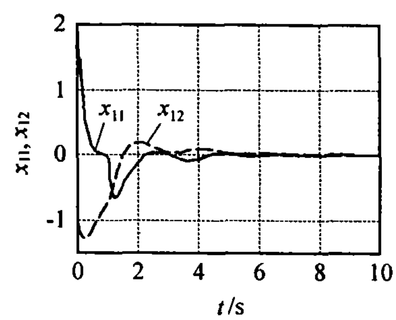
未知时变参数 $\zeta_1(t)$ 和 $\zeta_2(t)$, 时滞 $h_{ij}(i, j = 1, 2)$ 和初始条件选取如下:

$$\zeta_1(t) = 1 + 0.5\sin(2t),$$
$$\zeta_2(t) = 1 + 0.5\cos(2t);$$
$$q_1(t) = 0.5\sin(3t),$$
$$q_2(t) = 0.5\sin(2t);$$
$$h_{i1} = 1, h_{i2} = 1, i = 1, 2;$$
$$x_1 = x_2 = [2, -1]^{\mathrm{T}}, t \in [-2, 0];$$
$$\hat{\psi}_1(0) = \hat{\psi}_2(0) = 1.0;$$
$$\hat{\phi}_1(0) = \hat{\phi}_2(0) = 1.0.$$

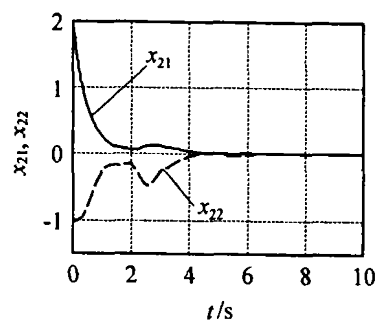
当组合系统的控制律 u_1, u_2 分别采用式(9), 自适应律采用式(10) 时, 设计参数选取如下:

$$\gamma_{11} = 0.4, \gamma_{12} = 0.5;$$
$$\gamma_{21} = 0.3, \gamma_{22} = 0.6;$$
$$\sigma_1(t) = \sigma_2(t) = 10\exp\{-0.5t\}.$$

由图 1 可以看出, 9s 后, 状态 x_{11} 和 x_{12} 收敛于零; 7 s 后, 状态 x_{21} 和 x_{22} 收敛于零. 这说明组合系统的状态是渐近稳定的.



(a)　子系统 1 状态 x_{11} 和 x_{12} 的轨迹



(b)　子系统 2 状态 x_{21} 和 x_{22} 的轨迹

图 1　仿真结果

5　结　　论

本文讨论了一类带有不确定性和外部扰动的时滞组合系统的鲁棒控制问题. 其中不确定性和外部

扰动是有界的, 满足匹配条件. 设计了非线性无记忆控制器和改进的带有 σ-修正项自适应律, 保证了闭环组合系统的解一致有界, 且系统状态是一致渐近稳定的. 仿真结果表明, 该设计方案是可行而有效的, 它可以解决实际系统中存在的含有不确定性和外部扰动的不确定时滞组合系统的分散控制问题.

参考文献(References)

[1] Kolmanovskii V B, Nosov V R. *Stability of Functional Differential Equations* [M]. New York: Academic, 1986.

[2] Manu M Z, Mohammad J. *Time-delay Systems Analysis, Optimization and Application* [M]. New York: AT&T Bell Laboratories, 1987.

[3] Wu H. Decentralized Adaptive Robust Control for a Class of Large Scale Systems with Uncertainties in the Interconnections[J]. *Int J of Control*, 2003, 76(3): 253-265.

[4] Wu H. Decentralized Adaptive Robust Control for a Class of Large-scale Systems Including Delayed State Perturbations in the Interconnections[J]. *IEEE Trans on Automatic Control*, 2002, 47(10): 1745-1751.

[5] Gong Zhiming, Wen Changyan, Dinesh P M ital. Decentralized Robust Controller Design for a Class of Inter-connected Uncertain Systems: With Unknown Bound of Uncertainty[J]. *IEEE Trans on Automatic Control*, 1996, 41(6): 850-854.

[6] Ioannou P A, Kokotovic P V. Robust Redesign of Adaptive Control[J]. *IEEE Trans on Automatic Control*, 1984, 29(3): 202-211.

(上接第 346 页)

[3] 秦永元, 张洪钺, 汪叔华. *卡尔曼滤波与组合导航原理* [M]. 西安: 西北工业大学出版社, 1998.
(Qin Y Y, Zhang H Y, Wang S H. *Kalman Filter and Integrated Navigation Thoery* [M]. Xi'an: Northwestern Polytechnical University Press, 1998.)

[4] 房建成, 申功勋, 万德钧. 车载 GPS/DR/地图匹配组合导航系统的自适应联合卡尔曼滤波模型[J]. *控制与决策*, 1999, 14(5): 448-452.
(Fang J C, Shen G X, Wan D J. An Adaptive Federated Kalman Filter Model for GPS/DR/Map Matching Integrated Navigation System in Land Vehicle[J]. *Control and Decision*, 1999, 14(5): 448-452.)

[5] 刘准, 陈哲. INS/GPS/TERCOM 组合制导系统中的信息融合方法研究[J]. *宇航学报*, 2001, 22(3): 56-61.
(Liu Z, Chen Z. Research on Information Fusion Method in INS/GPS/TERCOM System[J]. *J of Astronautics*, 2001, 22(3): 26-32.)

[6] 刘瑞华, 刘建业. 联邦滤波信息分配新方法[J]. *中国惯性技术学报*, 2001, 9(2): 28-32.
(Liu R H, Liu J Y. A New Method of Information Sharing in Federated Filter[J]. *J of Chinese Inertial Technology*, 2001, 9(2): 28-32.)

[7] 顾启泰, 王颂. 联邦滤波器的最优性[J]. *清华大学学报(自然科学版)*, 2003, 43(11): 1460-1463.
(Gu Q T, Wang S. Optimized Federated Filter[J]. *J of Tsinghua University (Sci and Tech)*, 2003, 43(11): 1460-1463.)

(上接第 355 页)

参考文献(References)

[1] Cao Y Y, Frank P M. Stability Analysis and Synthesis of Nonlinear Time-delay Systems via Linear Takagi-Sugeno Fuzzy Models [J]. *Fuzzy Sets and Systems*, 2001, 124(2): 213-229.

[2] Lee K R, Kim J H, Jeung E T, et al. Output Feedback Robust H_∞ Control of Uncertain Fuzzy Dynamic Systems with Time-varying Delay [J]. *IEEE Trans on Fuzzy Systems*, 2000, 8(6): 657-664.

[3] Zhang Y, Heng P A. Stability of Fuzzy Control Systems with Bounded Uncertain Delays[J]. *IEEE Trans on Fuzzy Systems*, 2002, 10(1): 92-96.

[4] Li C G, Wang H J, Liao X F. Delay-dependent Robust Stability of Uncertain Fuzzy Systems with Time-varying Delays[J]. *IEE Proceedings: Control Theory and Applications*, 2004, 151(4): 417-421.

[5] Guan X P, Chen C L. Delay-dependent Guaranteed Cost Control for T-S Fuzzy Systems with Time Delays[J]. *IEEE Trans on Fuzzy Systems*, 2004, 12(2): 236-249.

[6] Xie L, De Souza C. Robust H_∞ Control for Linear Systems with Norm-bounded Time Varying Uncertainty [J]. *IEEE Trans on Automatic Control*, 1992, 37(8): 1188-1191.

[7] Yue D, Han Q L, Peng C. State Feedback Controller Design of Networked Control Systems[J]. *IEEE Trans on Circuits and Systems-II: Express Briefs*, 2004, 51(11): 640-644.

[8] Wu M, He Y, She J H, et al. New Delay-dependent Stability Criteria and Stabilizing Method for Neutral Systems[J]. *IEEE Trans on Automatic Control*, 2004, 49(12): 2266-2271.

[9] Boyd S, Ghaoui E, Feron E, et al. *Linear Matrix Inequalities in Systems and Control Theory* [M]. Philadelphia, PA: SIAM, 1994.