文章编号: 1001-0920(2006)11-1224-05

时滞不确定组合系统的鲁棒分散输出控制

刘恩东[1], 井元伟[1], 刘粉林[2], 张嗣瀛[1]
(1. 东北大学 信息科学与工程学院, 沈阳 110004; 2. 解放军信息工程大学 信息工程学院, 郑州 450002)

摘 要: 讨论了时滞不确定组合系统的鲁棒分散输出控制问题. 不确定项存在于子系统内部, 可以是非线性或时变的, 而且时滞存在互联项中, 并满足匹配条件. 不确定项是有界的, 但界是未知的. 利用自适应律来估计未知的上界, 设计出分散无记忆输出控制器. 基于Lyapunov稳定性理论和Lyapunov-Krasovskii函数, 该控制器能够保证闭环系统的解是终极一致有界的. 最后的仿真结果说明该设计方法是有效的.

关键词: 时滞不确定组合系统; 输出反馈; 自适应控制; 终极一致有界
中图分类号: TP13 **文献标识码**: A

Robust Decentralized Output Feedback Control for Uncertain Delay Composite Systems

LIU En-dong[1], *JING Yuan-wei*[1], *LIU Fen-lin*[2], *ZHANG Si-ying*[1]
(1. College of Information Science and Engineering, Northeastern University, Shenyang 110004, China; 2. Information Engineering Institute, Information Engineering University of PLA, Zhengzhou 450002, China. Correspondent: LIU En-dong, E-mail: liued69@163.com)

Abstract: The problem of robust decentralized stabilization is discussed for a class of uncertain delay composite systems. The system under consideration is with uncertainties in each subsystem and delayed states perturbations in the interconnections. The upper bounds of the uncertainties 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 memoryless output feedback controllers is constructed. Based on Lyapunov stability theory and Lyapunov-Krasovskii function, the solutions to the closed-loop composite systems can be guaranteed to be uniformly ultimately bounded. Simulation results show that the control scheme is effective.

Key words: Uncertain delay composite systems; Output feedback; Adaptive control; Uniform ultimate boundedness

1 引 言

在工程系统中, 由于时滞的存在常导致系统不稳定[1,2], 因此时滞不确定系统的鲁棒稳定性问题受到了广大学者的关注[3,4].

近年来, 对时滞不确定系统的研究大都是基于不确定项的界是已知的, 且控制器的设计也是基于这样的界. 但实际系统的上界难以确定, 尤其是互联组合大系统, 各子系统之间的互联项的不确定性信息是极其有限的. 若不确定项的界超过了所估计的上界, 用估计界所得到的控制器[3~6]就不再保证系统的稳定性. 文献[7]对未知界的互联系统用状态反馈的方法进行了研究.

本文主要考虑了互联项具有时滞的不确定组合大系统的鲁棒输出反馈分散镇定问题, 给出了输出反馈镇定的条件, 不确定项满足匹配条件, 且是有界的, 但上界是未知的. 同时, 所设计的分散无记忆输出反馈控制器, 能够保证闭环系统的解是终极一致有界的.

2 问题阐述

考虑由下述N个互联不确定子系统S_i组成的组

收稿日期: 2005-05-31; **修回日期**: 2005-12-16.
基金项目: 国家自然科学基金项目(60274009); 高等学校博士学科点专项科研基金项目(20020145007).
作者简介: 刘恩东(1969—), 男, 辽宁灯塔人, 博士, 从事非线性组合系统的研究; 张嗣瀛(1925—), 男, 山东章丘人, 中国科学院院士, 教授, 博士生导师, 从事微分对策、复杂系统结构等研究.

合大系统，子系统 $S_i(i\in N)$ 可由下式给出:

$$\begin{aligned}\dot x_i &= A_ix_i + B_i[I_i + G_i(x_i,t)]u_i + \\ &\sum_{j=1}^{N}A_{ij}(\zeta_i,t)x_j(t-h_{ij}),\\ y_i &= C_ix_i.\end{aligned}\tag{1}$$

其中: $x_i\in R^{n_i}$ 是状态变量, $u_i(t),y_i(t)\in R^{m_i}$ 分别是控制输入和量测输出; $A_i\in R^{n_i\times n_i}$, $B_i\in R^{n_i\times m_i}$, $C_i\in R^{m_i\times n_i}$ 分别是第 i 个标称子系统的状态矩阵、输入矩阵和输出矩阵; $A_{ij}(\cdot)$ 是子系统 S_i 和 S_j 之间的互联项，它关于自变量是连续的，且不确定项 $\zeta_i\in\Psi_i\subset R^{l_i}$ 是Lebesgue可测的; $h_{ij}(i,j=1,2,\cdots,N)$ 是非负的未知常数，表示互联项的时滞. $x(\cdot)\in R^n$ 表示向量 $[x_1^{\mathrm T}(\cdot),x_2^{\mathrm T}(\cdot),\cdots,x_N^{\mathrm T}(\cdot)]^{\mathrm T}$，其中 $n=n_1+n_2+\cdots+n_N$. 每个子系统的初始条件如下:

$$x_i(t)=\chi_i(t),\ t\in[t_0-h_i,t_0].\tag{2}$$

关于系统(1) 有如下假设:

假设 1　$\det(C_iB_i)\neq 0$(非奇异高频增益).

假设 2　(A_i,B_i,C_i) 是能稳和能检测的.

假设 3　传递函数矩阵 $C_i(SI_i-A_i)^{-1}B_i$ 是最小相位的.

假设 4　$A_{ij}(\zeta_i,t)$ 是连续函数，它满足如下的匹配条件:

$$A_{ij}(\zeta_i,t)=B_iA_{ij}^*(\zeta_i,t).$$

假设 5　存在非负函数 $\mu_i(t)$, $\rho_{ij}(t)$ 和非负常数 μ_i^*, $\rho_{ij}^*(i,j=1,2,\cdots,N)$ 使得

$$\|G_i(x_i,t)\|\le\mu_i(t)<1,$$
$$\|A_{ij}^*(\zeta_i,t)\|\le\rho_{ij}(t).$$

其中: $\mu_i(t)$, $\rho_{ij}(t)$, μ_i^*, ρ_{ij}^* 是未知的，且 $\mu_i(t)\le\mu_i^*$, $\rho_{ij}(t)\le\rho_{ij}^*$.

注 1　假设 5 中 $\mu_i^*<1$，表明各子系统输入通道中的不确定性增益要小于正常的输入增益[8]，这样的假设是合理的.

引理 1　考虑系统

$$\begin{cases}\dot z = Az+Bu,\\ y=Cz.\end{cases}\tag{3}$$

其中: $z\in R^n$, $u,y\in R^m$, (A,B,C) 是能稳和能检测的. 系统(3) 满足:

1) $C(sI-A)^{-1}B$ 是最小相位的,

2) $\det(CB)\neq 0$,

则存在正定对称矩阵 P 和非奇异矩阵 K，使得

$$\begin{aligned}&(A+\alpha I-\beta BKC)^{\mathrm T}P+\\ &P(A+\alpha I-\beta BKC)+\gamma I=0,\end{aligned}\tag{4}$$

$$B^{\mathrm T}P=KC.\tag{5}$$

其中: α,β,γ 是正常数，且系统(3) 与 $u=-\beta Ky$ 构成的闭环系统是渐近稳定的.

本文的目的是设计出分散输出反馈控制器，保证闭环系统的状态是稳定的.

3　控制器设计

3.1　自适应分散鲁棒渐近稳定控制器的设计

提出如下的分散输出反馈控制器:

$$u_i=-\varphi_i(t)K_iy_i.\tag{6}$$

其中: 控制增益 $\varphi_i(t)$ 是关于未知参数 $\varphi_i^*=\dfrac{1}{2(1-\mu_i^*)}\Big[2\beta_i+\sum_{j=1}^{N}\dfrac{N}{\gamma_j}(\rho_{ij}^*)^2\Big]$ 的估计, K_i 由式(4) 和式(5) 给出. 采用的自适应律由下式描述:

$$\dot\varphi_i=\Gamma_i\|K_iy_i\|^2,\ \varphi_i(0)=\varphi_{i0}\ge 0,\tag{7}$$

式中 Γ_i 是正的设计参数.

定理 1　对于时滞不确定组合大系统(1)，满足假设 1～假设 5，采用分散输出反馈控制器(6)，则组合系统(1) 渐近稳定，自适应变量 φ_i 保持有界，且有 $\lim\limits_{n\to\infty}\dot\varphi_i=0$.

证明　选取如下的Lyapunov 函数:

$$\begin{aligned}V(t)=&\sum_{i=1}^{N}\{x_i^{\mathrm T}P_ix_i+(1-\mu_i^*)\Gamma_i^{-1}\tilde\varphi_i^2\}+\\ &\sum_{i=1}^{N}\sum_{j=1}^{N}\frac{\gamma_j}{N}\int_{t-h_{ij}}^{t}x_j^{\mathrm T}(\tau)x_j(\tau)\mathrm d\tau,\end{aligned}\tag{8}$$

对上式求导且代入式(1) 和式(6)，可得

$$\begin{aligned}\dot V=&\\ &\sum_{i=1}^{N}\Big\{x_i^{\mathrm T}(A_i^{\mathrm T}P_i+P_iA_i)x_i-2x_i^{\mathrm T}P_i\varphi_iB_iK_iy_i+\\ &2x_i^{\mathrm T}P_i\Big(-B_iG_i\varphi_iK_iy_i+\sum_{j=1}^{N}A_{ij}(\zeta_i,t)x_j(t-h_{ij})\Big)\Big\}+\\ &\sum_{i=1}^{N}\sum_{j=1}^{N}\frac{\gamma_j}{N}(x_j^{\mathrm T}(t)x_j(t)-x_j^{\mathrm T}(t-h_{ij})x_j(t-h_{ij}))+\\ &\sum_{i=1}^{N}2(1-\mu_i^*)\Gamma_i^{-1}\tilde\varphi_i\dot{\tilde\varphi}_i.\end{aligned}\tag{9}$$

由假设 5 及下式:

$$2ab\le ca^2+\frac{1}{c}b^2,\tag{10}$$

式(9) 可变为

$$\begin{aligned}\dot V\le&\sum_{i=1}^{N}\{x_i^{\mathrm T}(A_i^{\mathrm T}P_i+P_iA_i)x_i\}-\\ &\sum_{i=1}^{N}2(1-\mu_i^*)\varphi_i\|B_i^{\mathrm T}P_ix_i\|^2+\\ &\sum_{i=1}^{N}\sum_{j=1}^{N}\frac{N}{\gamma_j}(\rho_{ij}^*)^2\|B_i^{\mathrm T}P_ix_i\|^2+\\ &\sum_{i=1}^{N}\sum_{j=1}^{N}\frac{\gamma_j}{N}x_j^{\mathrm T}(t)x_j(t)+\\ &\sum_{i=1}^{N}2(1-\mu_i^*)(\varphi_i^*-\varphi_i)\|K_iy_i\|^2.\end{aligned}\tag{11}$$

注意到

$$\sum_{i=1}^{N}\sum_{j=1}^{N}\frac{\gamma_i}{N}x_j^{\mathrm{T}}(t)x_j(t)=\cdots=\sum_{i=1}^{N}\gamma_i\|x_i(t)\|^2, \tag{12}$$

则式(11) 可表示为

$$\overset{\circ}{V}\le\sum_{i=1}^{N}\{x_i^{\mathrm{T}}(A_i^{\mathrm{T}}P_i+P_iA_i)x_i\}-\sum_{i=1}^{N}\Big(2\beta_i+\sum_{j=1}^{N}\frac{N}{\gamma_j}(\rho_{ij}^*)^2\Big)\|B_i^{\mathrm{T}}P_ix_i\|^2+\sum_{i=1}^{N}\sum_{j=1}^{N}\frac{N}{\gamma_j}(\rho_{ij}^*)^2\|B_i^{\mathrm{T}}P_ix_i\|^2+\sum_{i=1}^{N}\gamma_i\|x_i(t)\|^2. \tag{13}$$

利用式(4),则式(13) 可写为

$$\overset{\circ}{V}\le\sum_{i=1}^{N}\{x_i^{\mathrm{T}}((A_i-\beta_iB_iK_iC_i)^{\mathrm{T}}P_i+P_i(A_i-\beta_iB_iK_iC_i)+\gamma_iI_i)x_i\}\le 0. \tag{14}$$

所以,时滞不确定组合系统(1) 是渐近稳定的,自适应变量 φ 保持有界,且有 $\lim\limits_{n\to\infty}\overset{\circ}{\varphi}=0$.

3.2 自适应分散鲁棒实用稳定控制器的设计

令

$$\Psi_i=\frac{1}{(1-\mu_i^*)}\Big[2\beta_i+\sum_{j=1}^{N}\frac{N}{\gamma_j}(\rho_{ij})^2\Big], \tag{15}$$

其中 Ψ_i 为每个子系统的集中扰动参量.

由假设 5 可知 Ψ_i 对 $\forall t\in R^+$ 也是连续有界函数,故存在未知的常数 Ψ_i^* 使得

$$\Psi_i\le\Psi_i^*=\frac{1}{(1-\mu_i^*)}\Big[2\beta_i+\sum_{j=1}^{N}\frac{N}{\gamma_j}(\rho_{ij}^*)^2\Big] \tag{16}$$

因此,采用如下自适应分散鲁棒输出反馈实用稳定控制器:

$$u_i=-\frac{\hat{\Psi}_i(t)}{2}K_iy_i, \tag{17}$$

其中控制增益函数中的 $\hat{\Psi}_i$ 是关于参量 Ψ_i 的估计. 采用的自适应律构造如下:

$$\dot{\hat{\Psi}}_i=-\delta_i\lambda_i\hat{\Psi}_i+\frac{1}{2}\lambda_i\|K_iy_i\|^2, \tag{18}$$

其中 δ_i,λ_i 是正的设计参数. 另一方面,令 $\varphi_i=\hat{\Psi}_i-\Psi_i^*$. 则式(18) 可变为

$$\dot{\varphi}_i=-\delta_i\lambda_i\varphi_i+\frac{1}{2}\lambda_i\|K_iy_i\|^2-\delta_i\lambda_i\Psi_i^*. \tag{19}$$

定义向量如下:

$$\varphi=[\varphi_1\quad\varphi_2\quad\cdots\quad\varphi_N]^{\mathrm{T}},$$

则系统(1) 和控制器(17) 及自适应律(18) 构成的闭环系统有以下结论:

定理 2 对于时滞不确定组合大系统(1),满足假设 1～ 假设 5,采用输出反馈控制器(17),自适应律(18),则构成的闭环系统的解 $(x,\varphi)(t;t_0,x(t_0),\varphi(t_0))$ 将是终极一致有界的,且保证系统(1) 的状态按指数收敛于 $x=0$ 附近的指定区域.

证明 选取如下的 Lyapunov 函数:

$$V(t)=\sum_{i=1}^{N}x_i^{\mathrm{T}}P_ix_i+\varphi^{\mathrm{T}}\Gamma^{-1}\varphi+\sum_{i=1}^{N}\sum_{j=1}^{N}\frac{\gamma_i}{N}\int_{h_{ij}}x_j^{\mathrm{T}}(\tau)x_j(\tau)\mathrm{d}\tau, \tag{20}$$

其中: P_i 满足式(4) 和式(5),且矩阵 Γ^{-1} 定义如下:

$$\Gamma^{-1}=\mathrm{diag}\{\sigma_1^{-1},\sigma_2^{-1},\cdots,\sigma_N^{-1}\},$$

$$\sigma_i=\frac{\lambda_i}{(1-\mu_i^*)},\quad i=1,2,\cdots,N.$$

对上式求导并将控制律(17) 代入,可得

$$\overset{\circ}{V}=\sum_{i=1}^{N}\Big\{x_i^{\mathrm{T}}(A_i^{\mathrm{T}}P_i+P_iA_i)x_i-x_i^{\mathrm{T}}P_i\hat{\Psi}_iB_iK_iy_i+2x_i^{\mathrm{T}}P_i\Big(-\frac{1}{2}B_iG_i\Psi_iK_iy_i+\sum_{j=1}^{N}A_{ij}(\zeta_j,t)x_j(t-h_{ij})\Big)\Big\}+\sum_{i=1}^{N}2(1-\mu_i^*)\lambda_i^{-1}\varphi_i\dot{\varphi}_i+\sum_{i=1}^{N}\sum_{j=1}^{N}\frac{\gamma_i}{N}(x_j^{\mathrm{T}}(t)x_j(t)-x_j^{\mathrm{T}}(t-h_{ij})x_j(t-h_{ij})). \tag{21}$$

根据式(10) 并将自适应律式(18) 代入式(21),可得

$$\overset{\circ}{V}\le\sum_{i=1}^{N}\{x_i^{\mathrm{T}}(A_i^{\mathrm{T}}P_i+P_iA_i)x_i\}-\sum_{i=1}^{N}(1-\mu_i^*)\hat{\Psi}_i\|B_i^{\mathrm{T}}P_ix_i\|^2+\sum_{i=1}^{N}\sum_{j=1}^{N}\frac{N}{\gamma_j}(\rho_{ij}^*)^2\|B_i^{\mathrm{T}}P_ix_i\|^2+\sum_{i=1}^{N}\sum_{j=1}^{N}\frac{\gamma_i}{N}x_j^{\mathrm{T}}(t)x_j(t)+\sum_{i=1}^{N}(1-\mu_i^*)(\hat{\Psi}_i-\Psi_i^*)\|B_i^{\mathrm{T}}P_ix_i\|^2-\sum_{i=1}^{N}(1-\mu_i^*)\delta_i(\|\hat{\Psi}_i\|^2+\|\varphi_i\|^2-\|\Psi_i^*\|^2). \tag{22}$$

利用式(12) 和(16),可得

$$\overset{\circ}{V}\le-\sum_{i=1}^{N}2\alpha_ix_i^{\mathrm{T}}P_ix_i-\varphi^{\mathrm{T}}\Sigma\varphi+\sum_{i=1}^{N}(1-\mu_i^*)\delta_i|\Psi_i^*|^2. \tag{23}$$

其中

$$\Sigma=\mathrm{diag}\{\theta_1,\theta_2,\cdots,\theta_N\};$$

$$\theta_i=(1-\mu_i^*)\delta_i,\quad i=1,2,\cdots,N.$$

选取

$$\epsilon = \sum_{i=1}^{N}(1-\mu_i^*)\delta_i|\Psi_i^*|^2,$$

$$\eta = \min\{\lambda_{\min}(2\alpha_i P_i),\ i = 1, 2, \cdots, N,\ \lambda_{\min}(\Sigma_i)\},$$

所以式(23) 可写为

$$\overset{\circ}{V} \leq -\eta\|\tilde{x}(t)\|^2 + \epsilon, \tag{24}$$

其中 $\tilde{x}(t) = [x^{\mathrm{T}}(t), \Psi^{\mathrm{T}}(t)]^{\mathrm{T}}$.

因此, 根据时滞方程的 Lyapunov 稳定性理论, 并由式(24) 可得, 由系统(1) 和自适应律(18) 组成的闭环系统的解 $(x, \Psi)(t; t_0, x(t_0), \Psi(t_0))$ 是终极一致有界的

注 2　在本节中, 采用带有 σ- 修正项的自适应律(18), 这样分散自适应鲁棒无记忆控制器可以保证不确定时滞组合系统是终极一致有界的; 如果采用没有 σ- 修正项的自适应律(7), 则闭环系统的状态是渐近稳定的 然而, 需要指出的是, 应用不带 σ- 修正项的自适应律, 将导致高增益的控制器 因此, 在实际控制问题中, 设计者应设计出多种自适应律来满足实际系统的需求

4　仿真例子

考虑如下的时滞不确定组合系统:

$$\overset{\circ}{x}_1 = \begin{bmatrix} -3 & 0 \\ 2 & 0.5 \end{bmatrix} x_1 + \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \end{bmatrix}(I_1 + G_1)u_1 + \sum_{j=1}^{2} A_{1j}(\zeta_1, t)x_j(t - h_{1j}),$$

$$y_1 = [1\quad 1]x_1;$$

$$\overset{\circ}{x}_2 = \begin{bmatrix} 0.5 & 3 \\ 0 & -3 \end{bmatrix} x_2 + \begin{bmatrix} 0 \\ 1 \end{bmatrix}(I_2 + G_2)u_2 + \sum_{j=1}^{2} A_{2j}(\zeta_2, t)x_j(t - h_{2j}),$$

$$y_2 = [1\quad 1]x_2.$$

其中

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

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

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

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

$$G_1 = 0.2\sin(10t),\ G_2 = 0.2\sin(5t).$$

当 $\alpha_1 = 0.2, \beta_1 = 3.8, \gamma_1 = 0.5$ 时, 选取 $P_1 = \begin{bmatrix} 1 & 1 \\ 1 & 2 \end{bmatrix}, K_1 = 1$; 当 $\alpha_2 = 0.2, \beta_2 = 3.2, \gamma_2 = 0.5$ 时, 选取 $P_2 = \begin{bmatrix} 1.5 & 1 \\ 1 & 1 \end{bmatrix}, K_2 = 1$, 组合系统满足式(4) 和式(5).

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

$$\zeta_1(t) = 1 + 0.5\sin(2t),$$

$$\zeta_2(t) = 1 + 0.5\cos(2t),$$

$$h_{i1} = 1,\ h_{i2} = 1,\ i = 1, 2,$$

$$x_1 = x_2 = [2\quad 2]^{\mathrm{T}},\ t \in [-2, 0];$$

$$\hat{\Psi}_1(0) = \hat{\Psi}_2(0) = 1.0$$

当组合系统的控制律 u_1, u_2 分别采用式(6), 自适应律采用式(7) 时, 设计参数选取如下:

$$\Gamma_1 = 6,\ \Gamma_2 = 8.$$

仿真结果如图 1 和图 2 所示 从图中可以看出, 经 8.5 s 后状态 x_{11} 和 x_{12} 收敛于 0; 经 8 s 后状态 x_{21} 和 x_{22} 收敛于 0, 说明组合系统的状态渐近稳定的

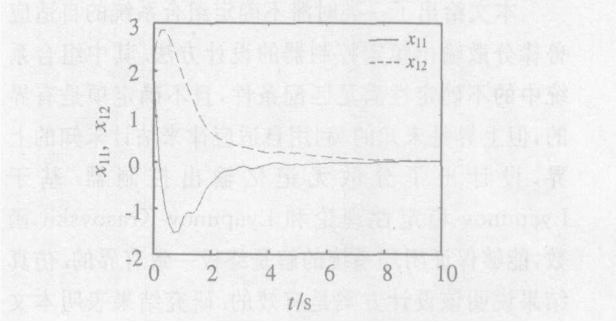

图 1　系统状态轨迹 x_{11} 和 x_{12}

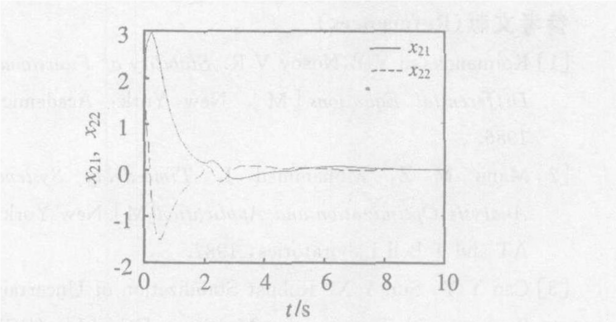

图 2　系统状态轨迹 x_{21} 和 x_{22}

当组合系统的控制律 u_1, u_2 分别采用式(19), 自适应律采用式(20) 时, 设计参数选取如下:

$$\lambda_1 = 6,\ \delta_1 = 0.01;\ \lambda_2 = 8,\ \delta_2 = 0.01.$$

仿真结果如图 3 和图 4 所示 从图中可以看出, 经 8.5 s 后状态 x_{11} 和 x_{12} 收敛于 0 附近; 经 8 s 后状

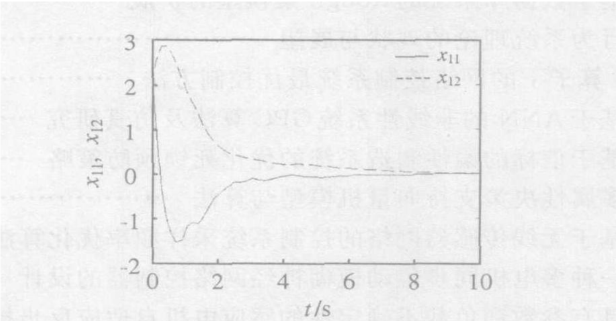

图 3　系统状态轨迹 x_{11} 和 x_{12}

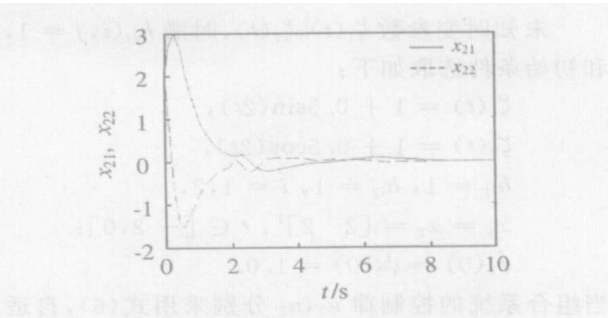

图 4 系统状态轨迹 x_{21} 和 x_{22}

态 x_{21} 和 x_{22} 收敛于 0 附近, 说明组合系统的状态具有终极一致有界的特性, 表明了该控制器设计方法的有效性.

5 结 论

本文给出了一类时滞不确定组合系统的自适应鲁棒分散输出镇定控制器的设计方法. 其中组合系统中的不确定性满足匹配条件, 且不确定项是有界的, 但上界是未知的. 利用自适应律来估计未知的上界, 设计出了分散无记忆输出控制器. 基于 Lyapunov 稳定性理论和 Lyapunov-Krasovskii 函数, 能够保证闭环系统的解是终极一致有界的. 仿真结果说明该设计方案是有效的. 研究结果表明本文的方法运用范围较广, 更利于工程实现.

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 and T Bell Laboratories, 1987.

[3] Cao Y Y, Sun Y X. Robust Stabilization of Uncertain Systems with Time-varying Multistate Delay[J]. *IEEE Trans on Automatic Control*, 1998, 43(10): 1484-1488.

[4] 郑连伟, 刘晓平, 张庆灵. 具有时变不确定性的线性时滞系统的鲁棒 H_∞ 控制[J]. *自动化学报*, 2001, 27(3): 377-380.
(Zheng L W, Liu X P, Zhang Q L. Robust H_∞ Control for Linear Delay Systems with Time-varying Uncertainties[J]. *Acta Automatica Sinica*, 2001, 27(3): 377-380.)

[5] Hu Z Z. Decentralized Stabilization of Large Scale Interconnected Systems with Delays[J]. *IEEE Trans on Automatic Control*, 1994, 39(1): 180-182.

[6] 高会军, 王常虹. 不确定离散多时滞系统的时滞相关鲁棒镇定[J]. *自动化学报*, 2004, 30(5): 789-795.
(Gao H J, Wang C H. Delay-dependent Robust Stabilization for Uncertain Discrete-time System with Multiple State Delays[J]. *Acta Automatica Sinica*, 2004, 30(5): 789-795.)

[7] Kharitonova V L, Zhabkob A P. Lyapunov-Krasovskii Approach to the Robust Stability Analysis of Time-delay Systems[J]. *Automatica*, 2003, 39(1): 15-20.

[8] Wu H. Adaptive Stabilizing State Feedback Controllers of Uncertain Dynamical Systems with Multiple Time Delays[J]. *IEEE Trans on Automatic Control*, 2000, 45(9): 1697-1701.

[9] Wu H. Robust Output Feedback Controllers for Dynamical Systems Including Delayed Perturbations[J]. *Int J of Systems Science*, 1999, 30(2): 211-218.

[10] Gong Z M, Wen C Y, Dinesh Pmital. Decentralized Robust Controller Design for a Class of Interconnected Uncertain Systems: With Unknown Bound of Uncertainty[J]. *IEEE Trans on Automatic Control*, 1996, 41(6): 850-854.

[11] Ikeda M, Silijak D D. Decentralized Stabilization of Linear Time-varying Systems[J]. *IEEE Trans on Automatic Control*, 1980, 25(1): 106-107.

下 期 要 目