第16卷第4期 控 制 与 决 策 2001年7月
Vol 16 No. 4 CONTROL AND DECISION July 2001

文章编号: 1001-0920(2001)04-0404-06

基于分散反馈控制的时滞混沌大系统

关新平, 彭海朋, 范正平, 李丽香
(燕山大学 电气工程学院, 河北 秦皇岛 066004)

摘　要: 研究一类具有时滞关联的时滞大系统的混沌现象和分散反馈控制问题。应用线性矩阵不等式(LMI)方法, 基于李雅普诺夫定理, 分别得到了系统存在分散时滞反馈控制器和分散标准反馈控制器的充分条件, 并利用分散时滞反馈控制器对系统中存在的不稳定周期轨道的追踪控制问题进行研究。仿真结果表明控制器具有很强的鲁棒性。

关键词: 时滞关联; 时滞混沌大系统; 分散反馈控制
中图分类号: TP 27　　　**文献标识码**: A

Decentralized Feedback Control of Chaotic Large-scale Systems with Delay Interconnected

GUAN Xin-ping, PENG Hai-peng, FAN Zheng-ping, LI Li-xiang
(Institute of Electrical Engineering, Yanshan University, Qinhuangdao 066004, China)

Abstract: The chaotic phenomenon and the decentralized feedback control problem of time-delay interconnected large-scale systems are studied. Sufficient conditions for the existence of the decentralized time-delay feedback controller, and the decentralized standard feedback controller are derived based on Lyapunov theory and the linear matrix inequality (LMI). The tracking problem of unstable periodic orbit in time-delay interconnected chaotic large-scale systems is discussed by using the decentralized time-delay feedback controller. Simulation results show that the controller has strong robustness.

Key words: time-delay; interconnected time-delay chaotic systems; decentralized feedback control

1 引　　言

自从Mackey和Glass[1]首次发现时滞系统中的混沌现象以来, 时滞混沌系统便引起了人们浓厚的兴趣[2~5]。但是由于时滞系统具有无穷维状态空间, 使得时滞混沌系统的分析和控制变得十分困难, 因此相关的文章并不多见。

对于时空混沌系统, 神经网络混沌系统和电网混沌系统等大系统目前已有一些研究成果[6~10]。由于子系统间各处的传输测量的不灵敏性, 并且系统关联中常会出现时滞, 所以对于时滞关联大系统的分散控制问题进行研究具有重要的理论价值和实际意义。然而, 对于具有时滞关联的时滞大系统的混沌现象和控制方面的研究却很鲜见。

本文首先推广文献[2]中的结论, 构造并分析了一类具有时滞关联的时滞混沌大系统, 然后通过对误差系统的讨论, 应用LMI方法研究了更一般化的具有时滞关联的时滞混沌大系统的稳定控制问

收稿日期: 2000-04-13; **修回日期**: 2000-07-31
基金项目: 河北省自然科学基金项目(601226)
作者简介: 关新平(1963—), 男(满族), 黑龙江齐齐哈尔人, 教授, 博士生导师, 从事鲁棒控制、H_∞控制等研究; 彭海朋(1976—), 男, 河北滦南人, 硕士生, 从事时滞控制、混沌控制等研究。

题, 最后研究了系统中不稳定周期轨道的追踪控制问题。本文的分散反馈控制器仅要求解一个LMI而得到, 且LMI方法具有一次求解多个参数, 以及计算简单、求解效率高等优点。数值仿真表明控制器具有很强的鲁棒性。

2　具有时滞关联的时滞混沌大系统

Tian 和 Gao[2] 研究了如下一阶系统

$$\epsilon \dot{X} = -X + f(X(t-\tau)) \tag{1}$$

得出的结论是: 如果函数 f 满足 8 个条件, 那么系统就可能成为混沌系统。不妨称满足这 8 个条件的函数 f 为 T-G 函数。本文进一步推广文献[2] 的结论, 构造如下时滞大系统

$$\dot{X}_i(t) = A_i X_i(t) + g_i(X_i(t-\tau_i)) + \sum_{j=1}^{N} A_{ij} X_j(t-\tau_{ij}) \tag{2}$$

其中, $X_i(t) \in R^{n_i}$ 为系统的状态向量, $\tau_{ij} = \tau_i$, τ_{ij} 表示关联项中的滞后时间, τ_i 表示子系统 i 的滞后时间, A_i 为具有适当维数的常数矩阵, A_{ij} 为第 j 个子系统对第 i 个子系统的关联矩阵, g_i 为非线性函数, $i = 1, 2, \cdots, N$。

研究发现, 取函数 $g_i(X_i(t-\tau_i))$ 为 T-G 函数, 如果关联矩阵 A_{ij} 中每个元素所对应的数值的绝对值均不太大, 即子系统间的关联为弱关联, 那么只要适当选择系统参数以及时滞 τ_{ij} 和 τ_i, 系统(2) 就会成为时滞混沌大系统。我们对由符合 T-G 函数的M-G 函数[1], 时滞 Logistic 函数[2], 以及分段线性时滞函数[3, 4]等函数组成的时滞大系统(2) 进行仿真研究, 发现系统中出现了周期 - 混沌等各种状态。如何控制系统的混沌, 使之达到所需要的状态, 是本文讨论的重点。

3　不动点控制问题

考虑由 N 个子系统 L_i 构成的具有时滞关联的混沌大系统 L, 其子系统方程 L_i 为

$$\dot{X}_i(t) = A_i X_i(t) + B_i U_i(t) + f_i(X_i(t)) + g_i(X_i(t-d_i)) + \sum_{j=1, j\neq i}^{N} A_{ij} X_j(t-d_{ij}) + C_i X_i(t-d_i) \tag{3}$$

其中, A_i, B_i, C_i 为具有适当维数的常数矩阵, 且 (A_i, B_i) 能控, $U_i(t) \in R^{m_i}$ 为系统的控制向量, f_i 和 g_i 为非线性函数。下面讨论系统(3) 的控制问题: 对每一个子系统采用如下分散时滞反馈控制

$$U_i(t) = K_i(X_i(t) - X_i(t-d_i)) \tag{4}$$

其中, K_i 为控制参数矩阵, d_i 为控制时滞, $i = 1, 2, \cdots, N$。设系统(3) 存在不稳定不动点 $\overline{X}_i(t) =$ 常数, 且 $\overline{X}_i(t) = \overline{X}_i(t-d_i)$, 则有

$$\dot{\overline{X}}_i(t) = A_i \overline{X}_i(t) + f_i(\overline{X}_i(t)) + g_i(\overline{X}_i(t-d_i)) + \sum_{j=1, j\neq i}^{N} A_{ij} \overline{X}_j(t-d_{ij}) + C_i \overline{X}_i(t-d_i) + B_i K_i(\overline{X}_i(t) - \overline{X}_i(t-d_i)) \tag{5}$$

将式(4) 代入(3) 后减(5), 得误差系统

$$\dot{e}_i(t) = A_i e_i(t) + F_i(e_i(t)) + G_i(e_i(t-d_i)) + \sum_{j=1, j\neq i}^{N} A_{ij} e_j(t-d_{ij}) + C_i e_i(t-d_i) + B_i K_i e_i(t) - B_i K_i e_i(t-d_i) \tag{6}$$

其中

$$e_i(t) = X_i(t) - \overline{X}_i(t)$$
$$e_i(t-d_i) = X_i(t-d_i) - \overline{X}_i(t-d_i)$$
$$e_{ij}(t-d_{ij}) = X_{ij}(t-d_{ij}) - \overline{X}_{ij}(t-d_{ij})$$
$$F_i(e_i(t)) = f_i(e_i(t) + \overline{X}_i(t)) - f_i(\overline{X}_i(t))$$
$$G_i(e_i(t-d_i)) = g_i(\overline{X}_i(t-d_i) + e_i(t-d_i)) - g_i(\overline{X}(t-d_i))$$

设 $F_i(0) + G_i(0) = 0$, 则在零点对 $F_i(e_i(t)) + G_i(e_i(t-d_i))$ 进行泰勒展开, 得到

$$F_i(e_i(t)) + G_i(e_i(t-d_i)) = \alpha e_i(t) + [HOD]_i\big|_{e_i(t)} + \beta e_i(t-d_i) + [HOD]_i\big|_{e_i(t-d_i)}$$

其中 $\alpha_i = \dfrac{dF_i}{de_i}$, $\beta_i = \dfrac{dG_i}{de_i(t-d_i)}$, $[HOD]_i\big|_{e_i(t)}$ 和 $[HOD]_i\big|_{e_i(t-d_i)}$ 分别为 $e_i(t)$ 和 $e_i(t-d_i)$ 的高阶项。函数 $\alpha e_i(t) + \beta e_i(t-d_i)$ 称为函数 $f_i(X_i(t)) + g_i(X_i(t-d_i))$ 关于参考态(定态) $\overline{X}_i$ 的线性化方程。在 $e_i(t)$ 非常小的情况下, 它能较好地近似非线性函数 $f_i(X_i(t)) + g_i(X_i(t-d_i))$。

由以上分析知, 误差系统(6) 可变为

$$\dot{e}_i(t) = (A_i + B_i K_i + \alpha) e_i(t) + \sum_{j=1}^{N} A_{ij} e_j(t-d_{ij}) + [HOD]_i\big|_{e_i(t)} + [HOD]_i\big|_{e_i(t-d_i)} \tag{7}$$

其中 $A_{ii} = \beta_i - B_i K_i + C_i$, $d_{ii} = d_i$。对于系统(7), 当 $t \to \infty$ 时, $e_i(t) \to 0$, $i = 1, 2, \cdots, N$。则称系统(7) 是渐近稳定的, 于是 $X_i(t)$ 渐近收敛于 $\overline{X}_i(t)$。

定理 1　对于误差大系统(7), 若存在矩阵 $Y_i \in R^{m_i \times n_i}$, 对称正定矩阵 $W_i, Z_i \in R^{n_i \times n_i}$, 使得如下线性

不等式

$$\begin{bmatrix} \bar{A}_i & A_{i1}W_1 & \cdots & A_{iN}W_N \\ W_1A_{i1}^{T} & -Z_1 & \cdots & \vdots \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ W_NA_{iN}^{T} & \cdots & \cdots & -Z_N \end{bmatrix} < 0 \qquad (8)$$

成立, 其中

$$\bar{A}_i = W_iA_i^{T} + W_i\alpha_i^{T} + A_iW_i + W_i\alpha_i + Y_i^{T}B_i^{T} + Y_iB_i + \sum_{j=1}^{N} Z_j$$

$$A_{ii} = \beta_i + C_i - B_iY_iW_i^{-1}$$

如果 $|e_i(t)|$ 充分小, 则由系统(3)～(5)组成的闭环系统渐近稳定。即当 $t\to\infty$ 时, $X_i(t)$ 被控制到系统的不稳定不动点 $\bar{X}_i(t)$, 且分散时滞反馈控制律为

$$U_i(t) = Y_iW_i^{-1}(X_i(t) - X_i(t-d_i))$$

证明 对于误差系统(7), 取Lyapunov函数

$$V(e) = \sum_{i=1}^{N}\Big[e_i^{T}(t)P_ie_i(t) + \sum_{j=1}^{N}\int_{d_{ij}} e_j^{T}(\sigma)R_je_j(\sigma)\mathrm{d}\sigma\Big] \qquad (9)$$

其中 P_i 和 R_i 均为正定对称矩阵。为方便起见, 在不产生歧义的前提下, 将在以下的叙述中省略自变量 t。对式(9)求时间函数, 则得

$$\dot{V} \le \sum_{i=1}^{N}\begin{bmatrix} e_i \\ e_i(t-d_{ij}) \\ \vdots \\ e_N(t-d_{iN}) \end{bmatrix}^{T} \times \begin{bmatrix} \tilde{A}_i & P_iA_{i1} & \cdots & P_iA_{iN} \\ A_{i1}^{T}P_i & -R_1 & \cdots & \vdots \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ A_{iN}^{T}P_i & \cdots & \cdots & -R_N \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} e_i \\ e_1(t-d_{i1}) \\ \vdots \\ e_N(t-d_{iN}) \end{bmatrix} + 2\Big|[\mathrm{HOD}]_i\big|_{e_i(t)} + [\mathrm{HOD}]_i\big|_{e_i(t-d_i)}\Big|P_ie_i$$

其中

$$\tilde{A}_i = A_i^{T}P_i + P_iA_i + K_i^{T}B_i^{T}P_i + P_iB_iK_i + \alpha_i^{T}P_i + P_i\alpha_i$$

$$A_{ii} = \beta_i + C_i - B_iK_i, \quad d_i = d_{ii}$$

若 $|e_i(t)|$ 充分小, 则可省略高阶项。由Lyapunov稳定性理论知, 若

$$\begin{bmatrix} \tilde{A}_i & P_iA_{i1} & \cdots & P_iA_{iN} \\ A_{i1}^{T}P_i & -R_1 & \cdots & \vdots \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ A_{iN}^{T}P_i & \cdots & \cdots & -R_N \end{bmatrix} < 10 \qquad (10)$$

成立, 则系统(7)鲁棒稳定。

对式(10)左乘和右乘矩阵 $\begin{bmatrix} P_i^{-1} & & \\ & \ddots & \\ & & P_n^{-1} \end{bmatrix}$, 则得

$$\begin{bmatrix} \bar{A}_i & P_i^{-1}A_{i1} & \cdots & P_i^{-1}A_{iN} \\ A_{i1}^{T}P_i^{-1} & -P_1^{-1}R_1P_1^{-1} & \cdots & \vdots \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ A_{iN}^{T}P_i^{-1} & \cdots & \cdots & -P_N^{-1}R_NP_N^{-1} \end{bmatrix} < 0 \qquad (11)$$

其中

$$A_{ii} = \beta_i + C_i - B_iK_i$$

$$\bar{A}_i = P_i^{-1}A_i^{T} + A_iP_i^{-1} + P_i^{-1}\alpha_i^{T} + \alpha_iP_i^{-1} + P_i^{-1}K_i^{T}B_i^{T} + B_iK_iP_i^{-1} + P_i^{-1}\sum_{j=1}^{N}R_jP_i^{-1}$$

令 $W_i = P_i^{-1}$, $Y_i = K_iP_i^{-1}$, $Z_i = P_i^{-1}R_iP_i^{-1}$, 则式(11)等价于定理1中的式(8), 所以若式(8)满足, 且 $|e_i(t)|$ 充分小, 则由系统(3)～(5)组成的闭环系统渐近稳定, 即 $X_i(t)\to\bar{X}_i(t)$, $t\to\infty$, $i=1,2,\cdots,N$。(证毕)

对系统(3)采用如下分散标准反馈控制

$$U_i(t) = K_i(\bar{X}_i(t) - X_i(t)) \qquad (12)$$

可以得到误差系统

$$\dot{e}_i(t) = (A_i + B_iK_i + \alpha_i)e_i(t) + \sum_{j=1}^{N}A_{ij}e_j(t-d_{ij}) + [\mathrm{HOD}]_i\big|_{e_i(t)} + [\mathrm{HOD}]_i\big|_{e_i(t-d_i)} \qquad (13)$$

其中, $A_{ii} = \beta_i + C_i$, $d_{ii} = d_i$。

定理2 对于误差大系统(13), 若存在矩阵 $Y_i \in R^{n_i\times n_i}$, 对称矩阵 $W_i, Z_i \in R^{n_i\times n_i}$, 使得如下线性矩阵不等式

$$\begin{bmatrix} \hat{A}_i & A_{i1}W_1 & \cdots & A_{iN}W_N \\ W_1A_{i1}^{T} & -Z_1 & \cdots & \vdots \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ W_NA_{iN}^{T} & \cdots & \cdots & -Z_N \end{bmatrix} < 0$$

成立, 其中

$$A_{ii} = \beta_i + C_i$$

$$\hat{A}_i = W_iA_i^{T} + W_i\alpha_i^{T} - B_iY_i -$$

$$Y_i^{\mathrm{T}} B_i^{\mathrm{T}} + A_i W_i + \alpha_i W_i + \sum_{j=1}^{N} Z_i$$

如果 $|e_i(t)|$ 充分小, 则由系统(3), (5), (12) 组成的闭环大系统渐近稳定, 即当 $t \to \infty$ 时, $X_i(t)$ 被控制到系统的不稳定不动点 $\overline{X}_i(t)$, 且分散标准反馈控制器为

$$U_i(t) = Y_i W_i^{-1}(\overline{X}_i(t) - X_i(t))$$

4　追踪控制问题

下面利用分散时滞反馈控制, 研究系统(3) 中存在的不稳定周期轨道的追踪控制问题。设系统(3) 具有不稳定周期轨道 $\overline{X}_i(t)$, 其周期为 $t_p > 0$。本节的目的是利用分散时滞反馈控制器

$$U_i(t) = K_i(X(t) - X_i(t - \tau)) \tag{14}$$

使得
$$\lim_{t\to\infty} |X_i(t) - \overline{X}_i(t)| = 0$$

因为 $\overline{X}_i(t)$ 是系统(3) 的不稳定周期轨道, 则有

$$\dot{\overline{X}}_i(t) = A_i \overline{X}_i(t) + f_i(\overline{X}_i(t)) + g_i(\overline{X}_i(t - d_i)) + \sum_{j=1, j\neq i}^{N} A_{ij} \overline{X}_{ij}(t - d_{ij}) + C_i \overline{X}_i(t - d_i) \tag{15}$$

并且

$$\begin{aligned}
&\dot{\overline{X}}_i(t - t_p) = \\
&A_i \overline{X}_i(t - t_p) + f_i(\overline{X}_i(t - t_p)) + \\
&g_i(\overline{X}_i(t - d_i - t_p)) + \sum_{j=1, j\neq i}^{N} A_{ij}\overline{X}_{ij}(t - \\
&d_{ij} - t_p) + C_i \overline{X}_i(t - d_i - t_p)
\end{aligned}$$

类似地, 易得如下误差系统

$$\begin{aligned}
\mathring{e}_i' = {} & A_i e_i' + F_i(e_i'(t)) + G_i(e_i'(t - d_i)) + \\
& \sum A_{ij} e_{ij}'(t - d_{ij}) + C_i e_i'(t - d_i) + \\
& K_i(X_i(t) - X_i(t - \tau))
\end{aligned} \tag{16}$$

其中

$$\begin{aligned}
F_i(e_i'(t)) &= f_i(X_i(t)) - f_i(\overline{X}_i(t - t_p)) \\
G_i(e_i'(t)) &= g_i(X_i(t - d_i)) - \\
&\quad\; g_i(\overline{X}_i(t - t_p - d_i)) \\
e_i' &= X_i(t) - \overline{X}_i(t - t_p) \\
e_i'(t - d_i) &= X_i(t - d_i) - \overline{X}_i(t - d_i - t_p) \\
e_{ij}' &= X_{ij}(t - d_{ij}) - \overline{X}_{ij}(t - t_p - d_{ij})
\end{aligned}$$

控制目标是: 当 $t \to \infty$ 时, $X_i(t) \to \overline{X}_i(t)$, $i = 1, 2, \cdots, N$ 。

将文献[11] 中的结果推广到具有时滞耦合的时滞混沌大系统, 可得如下推论:

推论 1　对于混沌大系统(3), 采用控制器 $U_i(t) = K_i(X_i(t) - X_i(t - \tau))$, 若受控轨迹 $X_i(t)$ 追踪不稳定周期轨迹 $\overline{X}_i(t)$, 且矩阵 K_i 非奇异, 则时滞 τ 等于 t_p 或 t_p 的整数倍。

由推论 1 得 $\overline{X}_i(t) = \overline{X}_i(t - t_p) = X_i(t - \tau)$, 于是误差系统(16) 成为

$$\begin{aligned}
\mathring{e}' = {} & (A_i + B_i K_i) e_i' + F_i(e_i'(t)) + \\
& G_i(e_i'(t - d_i)) + \sum_{j=1, j\neq i}^{N} A_{ij} e_{ij}'(t - \\
& d_{ij}) + C_i e_i'(t - d_i)
\end{aligned}$$

设 $F_i(0) + G_i(0) = 0$, 对 $F_i(e_i'(t)) + G_i(e_i'(t - d_i))$ 在零点处泰勒展开为

$$\begin{aligned}
& F_i(e_i'(t)) + G_i(e_i'(t - d_i)) = \\
& \alpha_i e_i'(t) + [\mathrm{HOD}]_i \big|_{e_i'(t)} + \beta_i e_i'(t - d_i) + \\
& [\mathrm{HOD}]_i \big|_{e_i'(t - d_i)}
\end{aligned}$$

其中 $[\mathrm{HOD}]_i \big|_{e_i'(t)}$ 和 $[\mathrm{HOD}]_i \big|_{e_i'(t - d_i)}$ 为高阶项。则得如下误差系统

$$\begin{aligned}
\mathring{e}_i'(t) = {} & (A_i + B_i K_i + \alpha_i) e_i'(t) + \\
& \sum_{j=1}^{N} A_{ij} e_j'(t - d_{ij}) + [\mathrm{HOD}]_i \big|_{e_i(t)} + \\
& [\mathrm{HOD}]_i \big|_{e_i(t - d_i)}
\end{aligned} \tag{17}$$

定理 3　对于误差大系统(17), 若存在矩阵 $Y_i \in R^{n_i \times n_i}$, 对称矩阵 $W_i, Z_i \in R^{n_i \times n_i}$, 使得如下线性矩阵不等式

$$\begin{bmatrix}
\hat{A}_i & A_{i1} W_1 & \cdots & A_{iN} X_N \\
W_1 A_{i1}^{\mathrm{T}} & -Z_1 & \cdots & \vdots \\
\vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\
W_N A_{iN}^{\mathrm{T}} & \cdots & \cdots & -Z_N
\end{bmatrix} < 0$$

成立, 其中

$$\begin{aligned}
A_{ii} &= \beta_i + C_i \\
\hat{A}_i &= W_i A_i^{\mathrm{T}} + W_i \alpha_i^{\mathrm{T}} - B_i Y_i - \\
&\quad Y_i^{\mathrm{T}} B_i^{\mathrm{T}} + A_i W_i + \alpha_i W_i + \sum_{j=1}^{N} Z_i
\end{aligned}$$

如果 $|e_i(t)|$ 充分小, 则由系统(3), (14), (15) 组成的闭环大系统渐近稳定, 即当 $t \to \infty$ 时, $X_i(t)$ 追踪系统的不稳定周期轨道 $\overline{X}_i(t)$, 且分散时滞反馈控制器为

$$U_i(t) = Y_i W_i^{-1}(X_i(t) - X_i(t - \tau))$$

其中 $\tau = \tau_p$。

5　数值仿真

由分段线性时滞函数[3, 4] 构造如下混沌神经网络系统

$$\dot{X}_i = A_i X_i - f_i(X_i(t-\tau_i)) + \begin{bmatrix} 0 & -0.3 & -0.2 & 0.3 & 0.2 \\ -0.5 & 0 & 0.1 & 0.5 & -0.2 \\ -0.3 & 0.5 & 0 & -3 & -0.2 \\ 0.3 & 0.5 & -0.5 & 0 & -0.1 \\ -0.1 & -0.2 & 0.5 & -0.5 & 0 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} X_1(t-\tau_1) \\ X_2(t-\tau_2) \\ X_3(t-\tau_3) \\ X_4(t-\tau_4) \\ X_5(t-\tau_5) \end{bmatrix}$$

其中

$$f_i(X_i(t)) = 0.5m_i\left\{\left(1+\frac{D_1}{D_2-D_1}\right)(|X_i+D_1| - |X_i-D_1|) - \frac{D_1}{D_2-D_1}(|X_i+D_2| - |X_i-D_2|)\right\}$$

并且 $\tau_1 = 1, \tau_2 = 2, \tau_3 = 0.5, \tau_4 = 1.3, \tau_5 = 2.5$; $\tau_{ij} = \tau_i, i = 1, 2, \cdots, 5$; $D_1 = 1, D_2 = 1.34$; $m_1 = 2.2, m_2 = 3.3, m_3 = 2.5, m_4 = 3, m_5 = 2.7$; $A_1 = 2.2, A_2 = 3.3, A_3 = 2.5, A_4 = 3, A_5 = 2.7$。易知, $\overline{X}_i = 0 (i = 1, 2, \cdots, 5)$ 为系统的一个不稳定不动点。

采用分散时滞反馈控制, 令 $B_i = 1$, 则得 $\alpha_i = 0$, $\beta_i = m_i$, 并且高阶项为零。根据定理 1, 易得 $K_1 = 5$, $K_2 = 6, K_3 = 3, K_4 = 9, K_5 = 3$, 满足控制条件。图 1(a)～(e) 给出了系统控制的仿真曲线(从 70s 开始加入控制)。

采用分散标准反馈控制, 类似于上面的分析, 根据定理 2 得到: 当 $K_1 = 550, K_2 = 500, K_3 = 500, K_4 = 600, K_5 = 500$ 时, 满足控制所需的条件。(图略)

通过大量仿真发现, 如果系统的非线性部分存在参数摄动, 即 $f_i(X_i(t)) + g_i(X_i(t-\tau_i))$ 变为 $\delta_i(f_i(X_i(t)) + g_i(X_i(t-\tau_i)))$, 并且 $\|1-\delta_i\|$ 不是很大, 则有

$$F_i(e_i(t)) + G_i(e_i(t-\tau_i)) = \alpha_i e_i(t) + [\mathrm{HOD}]'_i\big|_{e_i(t)} + \beta_i e_i(t-\tau_i) + [\mathrm{HOD}]''_i\big|_{e_i(t-\tau_i)} + \Delta_i$$

其中 $[\mathrm{HOD}]'_i\big|_{e_i(t)} + [\mathrm{HOD}]''_i\big|_{e_i(t-\tau_i)} + \Delta_i$ 充分小。根据定理 1 和定理 2, 无须改变两种控制器的参数, 仍能得到很好的控制结果。这说明本文设计的两种控制器都具有很强的鲁棒性。

利用 Chen 和 Yu[12] 给出的方法, 易知系统存在一个周期为 $t_p = 1.4$ 的不稳定周期 2 轨道。利用分散时滞反馈控制来追踪这个不稳定周期轨道, 根据推

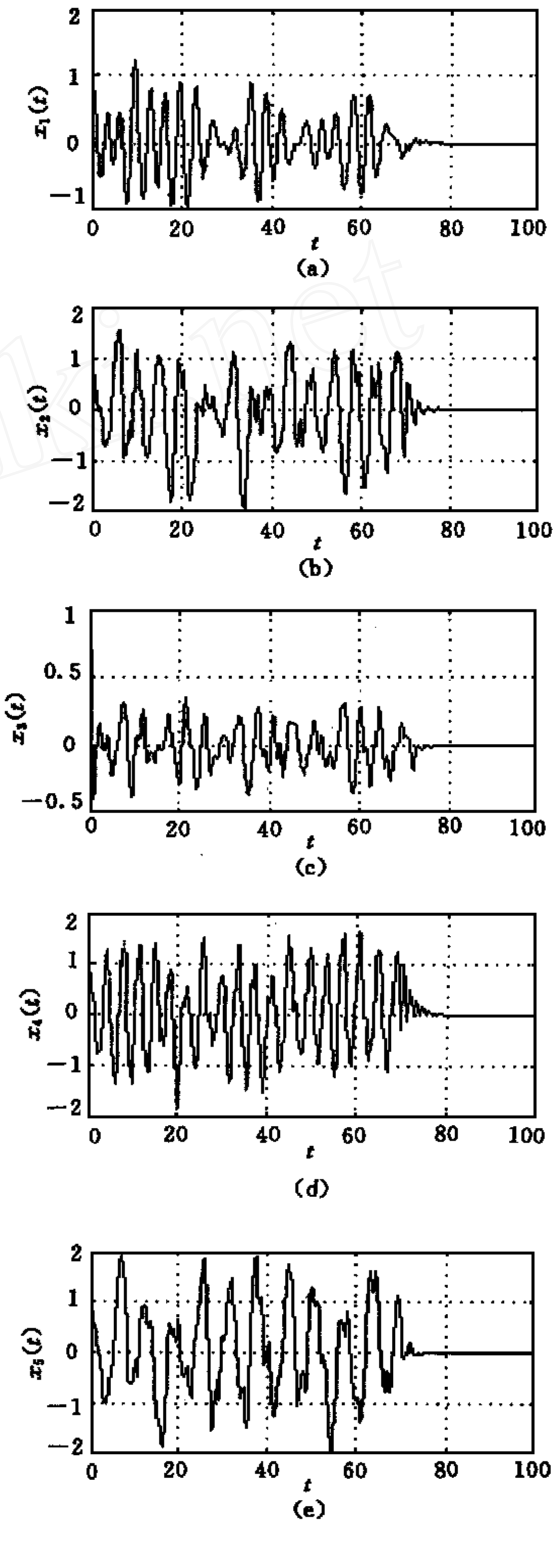

图 1 子系统的控制曲线

(a) 第 1 个子系统 (b) 第 2 个子系统
(c) 第 3 个子系统 (d) 第 4 个子系统
(e) 第 5 个子系统

论 1 和定理 3 得到: 当 $K_1 = 550$, $K_2 = 500$, $K_3 = 500$, $K_4 = 600$, $K_5 = 500$, $t_p = \tau = 1.4$ 时, 满足追踪控制所需的条件。(图略)

6 结 论

本文研究了一类具有时滞关联的时滞大系统的混沌现象和分散反馈控制问题, 控制器的存在性依赖于相应的LMI的解。LMI中虽含有多个未知参数, 但利用Matlab 软件中LMI工具箱可一次性求出, 无需调整参数, 求解非常方便、有效。通过仿真进一步发现两种控制器都具有很强的鲁棒性。

关于时滞大系统的混沌现象和控制的研究工作, 目前国内外才刚刚开始, 有待进一步解决的问题还很多。可以预料今后这一方向将会成为时滞混沌系统研究的主要方向。

参考文献:

[1] Mackey M C, Glass L. Oscillation and chaos in physiological control system[J]. Science, 1977, 197(3): 287-289.

[2] Tian Y C, Gao F R. Adaptive control of chaotic continuous-time system with delay[J]. Physica, 1998, 117: 1-12.

[3] Lu H, He Z. Chaotic behavior in first-order autonomous continuous-time systems with delay[J]. IEEE Trans on Cirs Syst, 1996, 43(8): 700-702.

[4] Lu H, He Y, He Z. A chaos-generator: Analyses of complex dynamical of a cell equation in delayed cellular neural networks[J]. IEEE Trans on Cirs Syst, 1998, 45(2): 178-181.

[5] Farmer J D. Chaotic attractors of infinite dimensional dynamical systems. Physica, 1982, 4: 366-370.

[6] Srivastava K N, Srivastava S C. Elimination of dynamic bifurcation and chaos in power systems using facts devices[J]. IEEE Trans on Cirs Syst, 1998, 45(1): 72-79.

[7] Ding E J, Lu Y N. Universal scaling behavior in the weakly coupled map lattices[J]. Phys Lett, 1992, 161: 357.

[8] 田钢, 杨世平, 徐树山. 耦合反对称立方映象晶格中的时空混沌与控制[J]. 中国科学, 1996, 26(9): 846-849.

[9] Liu Z, Chen S. Control of coupled standard map[J]. Int J Bifurc & Chaos, 1998, 8(6): 1355-1361.

[10] Aihara K, Takabe T, Toyodi M. Chaotic neural networks[J]. Phys Lett, 1990, 144: 333-338.

[11] Wang Y Y, Xie L H, Souza E. Robust control of uncertain nonlinear systems[J]. Syst & Contr Lett, 1992, 19(2): 139-149.

[12] Chen G, Yu X. On time-delayed feedback control of chaotic systems[J]. IEEE Trans on Cirs Syst, 1999, 146(8): 767-772.

下 期 要 目