

文章编号: 1001-0920(2007)09-1058-03

具有时滞的 Liao 混沌神经元系统的自适应同步

谢英慧^{1,2}, 张化光¹

(1. 东北大学 信息科学与工程学院, 沈阳 110004; 2. 沈阳炮兵学院 基础部, 沈阳 110163)

摘要: 针对一类具有时滞的部分参数未知的 Liao 混沌神经元系统, 研究不同结构时滞 Liao 混沌神经元系统的自适应同步问题. 基于 Lyapunov 稳定理论, 给出了自适应控制器的设计方法及参数自适应律的解析表达式. 所设计的控制器实用有效, 易于实现, 能够使具有时滞的两个不同结构的 Liao 混沌神经元系统渐近同步. 仿真示例验证了该方法的有效性.

关键词: Liao 混沌神经元系统; 时滞; 自适应同步; 不同结构; 部分参数未知

中图分类号: TP18 **文献标识码:** A

Adaptive synchronization of Liao chaotic neural systems with time delay

XIE Ying-hui^{1,2}, ZHANG Hua-guang¹

(1. College of Information Science and Engineering, Northeastern University, Shenyang 110004, China; 2. Foundation Department, Artillery Institute of Shenyang, Shenyang 110063, China. Correspondent: XIE Ying-hui, E-mail: xyh8367@163.com)

Abstract: The adaptive synchronization of delayed Liao chaotic neural systems with different structure and partly unknown parameters is presented. By using Lyapunov stability theory, an adaptive synchronization controller is developed, the adaptive laws of parameters are also given. The designed controller is easily implemented in practice to guarantee the global asymptotic synchronization of state trajectories for two different delayed Liao chaotic neural systems. An illustrative example shows the effectiveness of the presented method.

Key words: Liao chaotic neural systems; Time delay; Adaptive synchronization; Different structure; Partly unknown parameters

1 引言

自从 Pecora 和 Carroll^[1] 提出混沌同步的原理, 并在电路中得到实现以来, 混沌同步受到广泛的重视和研究. 目前, 人们已提出了混沌同步的方法, 如: 驱动-响应混沌、自适应控制、变结构控制、脉冲控制、激活控制、耦合控制、滞后以及指数同步方法等^[2-9].

1994 年, Gopalsmay 和 Issic^[10] 首次对时滞混沌神经元系统的稳定性在 $f(x) = \tanh(x)$ 的情况下进行了分析. Liao 等^[11] 在 $f(x) = \sum_{i=1}^2 a_i [\tanh(x + k_i) - \tanh(x - k_i)]$ 的情况下讨论了系统的混沌行为. Peng 等^[12] 在 $g(z) = \sum_{i=1}^2 a_i [\arctan(z + k_i) - \arctan(z - k_i)]$ 的情况下讨论了系统的同步问题. 最近, Li 等^[6,7] 讨论了耦合时滞混沌神经元系统的滞后同步问题. 但这些研究都属于相同结构、相同参数的时滞混沌神经元系统的同步问题, 在实际中是难以应用的. 特别是时滞混沌神经元系统的同步用于保密通信时, 系统的参数随着环境的改变, 常常是不相同的, 并且在实际控制中可能遇到结构不相同和系统部分参数未知的情况. 到目前为止, 作者还没看到关于结构不同、参数不同的时滞混沌神经元系统同步问题的研究文献. 因此, 考虑不同结构且参数不同的时滞混沌神经元系统的同步问题更具有实际意义.

本文研究两个不同的具有时滞的部分参数未知的 Liao 混沌神经元系统的同步问题. 基于

tan(z + k_i)] 的情况下讨论了系统的同步问题. 最近, Li 等^[6,7] 讨论了耦合时滞混沌神经元系统的滞后同步问题. 但这些研究都属于相同结构、相同参数的时滞混沌神经元系统的同步问题, 在实际中是难以应用的. 特别是时滞混沌神经元系统的同步用于保密通信时, 系统的参数随着环境的改变, 常常是不相同的, 并且在实际控制中可能遇到结构不相同和系统部分参数未知的情况. 到目前为止, 作者还没看到关于结构不同、参数不同的时滞混沌神经元系统同步问题的研究文献. 因此, 考虑不同结构且参数不同的时滞混沌神经元系统的同步问题更具有实际意义.

收稿日期: 2006-07-07; 修回日期: 2006-09-28.

基金项目: 国家自然科学基金项目(60274017, 60325311); 教育部博士点基金项目(20011045023).

作者简介: 谢英慧(1972—), 女, 吉林省吉林市人, 讲师, 博士生, 从事混沌控制、神经网络的研究; 张化光(1959—), 男, 吉林省吉林市人, 教授, 博士生导师, 从事模糊控制、自适应控制等研究.

Lyapunov 稳定理论, 设计了自适应同步控制器, 给出了参数自适应律的解析表达式. 所设计的控制器实用有效, 易于实现.

2 问题描述

考虑如下时滞 Liao 混沌神经元系统:

$$\dot{x}(t) = -x(t) + af(x(t) - bx(t - \tau) + c). \quad (1)$$

其中: $\tau > 0$ 为有界时滞; $\tau = \max(\tau_i)$; a, b 为系统 (1) 的参数, 且 $a, b > 0$. 假设 \tilde{a}, \tilde{b} 是系统 (1) 的未知参数, a 和 b 是系统 (1) 的已知参数. 系统 (1) 的初始条件为 $x(t) = \phi_x(t) \in C([- \tau, 0], \mathbf{R})$, $C([- \tau, 0], \mathbf{R})$ 表示从 $[- \tau, 0]$ 到 \mathbf{R} 的所有连续函数的集合. $f(x)$ 是一维有界的连续非线性函数, 满足 Lipschitz 条件 $|f(\xi) - f(\eta)| \leq L_x |\xi - \eta|, \forall \xi, \eta \in \mathbf{R}$, 其中 Lipschitz 常数 $L_x > 0$.

假设系统 (1) 为驱动系统, 而响应系统的数学表达式为

$$\dot{z}(t) = -z(t) + mg(z(t) - nz(t - \tau) + c) + u(t). \quad (2)$$

其中: 初始条件为 $z(t) = \phi_z(t) \in C([- \tau, 0], \mathbf{R})$; m, n 为系统 (2) 的参数, 且 $m, n > 0$. 假设 \tilde{m}, \tilde{n} 是系统 (2) 的未知参数, m 和 n 是系统 (2) 的已知参数. 激励函数 $g(z)$ 是一维有界的连续非线性函数, 满足 Lipschitz 条件 $|g(\xi) - g(\eta)| \leq L_z |\xi - \eta|, \forall \xi, \eta \in \mathbf{R}$ 且 $L_z > 0$. $u(t)$ 表示待设计的外部控制输入.

令 $e(t) = z(t) - x(t)$ 表示同步误差信号, 本文目标是设计控制器 $u(t)$, 使响应混沌神经元系统 (2) 的轨迹能够渐近同步驱动混沌神经元系统 (1) 的轨迹, 即 $\lim_{t \rightarrow \infty} e(t) = \lim_{t \rightarrow \infty} z(t) - x(t) = 0$, 其中

$\|\cdot\|$ 表示欧几里德范数.

注 1 根据混沌系统的有界性, 设 $\|x(t)\| \leq B_d, \|z(t)\| \leq B_r$, 其中 B_d, B_r 可从仿真中得到.

定义 1 定义函数 $p(\cdot)$ 为

$$p(\cdot) = \begin{cases} 1, & \cdot > 0; \\ -1, & \cdot < 0. \end{cases}$$

3 自适应混沌同步控制器的设计

定理 1 取控制器为

$$u(t) = -\tilde{m}x(t) - h_1 p(e) + \tilde{m}z(t) - h_2 p(e) - ke(t), \quad (3)$$

参数自适应律为

$$\begin{cases} \dot{\tilde{a}} = e^T(t)x(t), \\ \dot{\tilde{b}} = -e^T(t)z(t). \end{cases} \quad (4)$$

则系统 (2) 与系统 (1) 全局渐近同步. 其中

$$\begin{cases} h_1 = a(1 + b)L_x B_d + caL_x, \\ h_2 = m(1 + n)L_z B_r + cmL_z; \end{cases} \quad (5)$$

$k > 0$ 为常数; \tilde{a}, \tilde{b} 是对未知参数 a, b 的估计.

证明 由式 (1) ~ (3) 可得误差系统为

$$\begin{aligned} \dot{e}(t) = & -(\tilde{a} - a)z(t) + (\tilde{a} - a)x(t) + \\ & mg(z(t) - nz(t - \tau) + c) - \\ & af(x(t) - bx(t - \tau) + c) - \\ & ke(t) - h_1 p(e) - h_2 p(e). \end{aligned} \quad (6)$$

定义 $\Delta = [e^T(t), \tilde{a}, \tilde{b}]^T$, 选取 Lyapunov 函数为

$$V(\Delta) = \frac{1}{2}(e^T(t)e(t) + (\tilde{a} - a)^2 + (\tilde{b} - b)^2). \quad (7)$$

则 $V(\Delta)$ 沿着式 (6) 的导数为

$$\begin{aligned} \dot{V}(\Delta) = & e^T(t)\dot{e}(t) + (\tilde{a} - a)(\dot{\tilde{a}} - \dot{a}) + \\ & (\tilde{b} - b)(\dot{\tilde{b}} - \dot{b}) = \\ & e^T(t)(-\tilde{a}z(t) + (\tilde{a} - a)x(t) - \\ & (\tilde{a} - a)z - (\tilde{b} - b)z - ke^T(t)e(t) + \\ & e^T(t)(mg(z(t) - nz(t - \tau) + c) - \\ & af(x(t) - bx(t - \tau) + c) - \\ & h_1 p(e) - h_2 p(e)). \end{aligned} \quad (8)$$

将式 (4) 代入 (8) 得

$$\begin{aligned} \dot{V}(\Delta) = & e^T(t)(mg(z(t) - nz(t - \tau) + c) - \\ & af(x(t) - bx(t - \tau) + c) - h_1 p(e) - \\ & h_2 p(e) - ke^T(t)e(t) \\ & e(t)(mL_z z(t) - nz(t - \tau) + c + \\ & aL_x x(t) - bx(t - \tau) + c - h_1 - h_2) - \\ & ke^T(t)e(t) \\ & e(t)(mL_z(\tilde{a}z(t) + n z(t - \tau) + \\ & c) + aL_x(\tilde{a}x(t) + bx(t - \tau) + \\ & c) - h_1 - h_2) - ke^T(t)e(t) \\ & e(t)(mL_z((1 + n)B_r + c) + \\ & aL_x((1 + b)B_d + c) - h_1 - h_2) - \\ & ke^T(t)e(t). \end{aligned} \quad (9)$$

将式 (5) 代入 (9) 得

$$\dot{V}(\Delta) = -e^T(t)ke(t) \leq 0.$$

若 $e(t) \neq 0$, 则 \dot{V} 负定, 所以 $e, \tilde{a}, \tilde{b} \in L_2$. 由

$$\int_0^t e^{-2k(t-\tau)} dt = \frac{1}{k}[V(e(0)) - V(e(t))] \leq \frac{V(e(0))}{k}$$

可得 $e \in L_2$. 由式 (6) 可知 $\dot{e} \in L_2$, 所以根据 Barbalat 引理^[13] 可得 $\lim_{t \rightarrow \infty} e = 0$. 因此系统 (2) 与系统 (1) 全局渐近同步.

注 2 在系统 (1) 和 (2) 中, 当满足 $f(x(t) - bx(t - \tau) + c) = g(z(t) - nz(t - \tau) + c)$ 时, 驱动系统的结构与响应系统的结构相同, 所以定理 1 也适用于含有不确定参数的两个相同的时滞混沌神经元系统的同步控制.

4 数值仿真

设如下时滞 Liao 混沌神经元系统^[11] 为驱动系统:

$$\dot{x}(t) = -x(t) + af(x(t) - bx(t - \tau) + c), \tag{10}$$

其中激励函数为

$$f(x) = \frac{1}{2} \sum_{i=1}^2 a_i [\tanh(x + k_i) - \tanh(x - k_i)].$$

当初始条件为 $x(s) = 0.5, \tau = 1, a = 3, b = 4.5, c = 0, a_1 = 2, a_2 = -1.5, k_1 = 1, k_2 = 4/3, \sigma = 1$ 时, Liao 混沌神经元系统(10) 的状态曲线如图 1 所示.

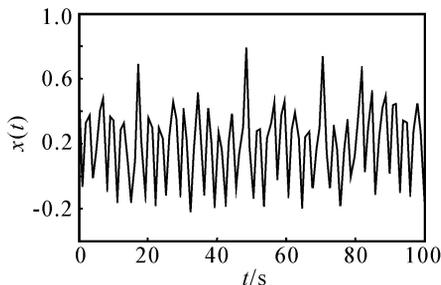


图 1 驱动系统 x 的状态曲线

于是如下 Liao 混沌神经元系统^[12] 为响应系统:

$$\dot{z}(t) = -z(t) + mg(z(t) - nz(t - \tau) + c), \tag{11}$$

其中激励函数为

$$g(z) = \frac{1}{2} \sum_{i=1}^2 a_i [\arctan(z + k_i) - \arctan(z - k_i)].$$

当初始条件为 $z(s) = 1, \tau = 1, m = 3, n = 4.5, c = 0, a_1 = 2, a_2 = -1.5, k_1 = 1, k_2 = 4/3, \sigma = 1$ 时, Liao 混沌神经元系统(11) 的状态曲线如图 2 所示.

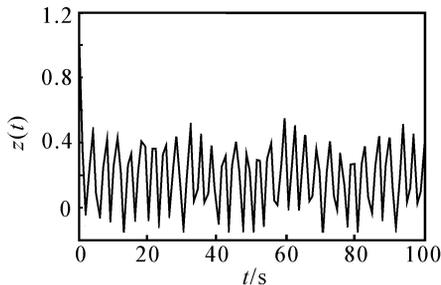


图 2 响应系统 z 的状态曲线

根据定理 1, 在仿真中, 系统状态初始值为 $x(0) = 0.7, z(0) = 1.2$. 选取“未知”参数的初始值为 $\tilde{\alpha}(0) = 0.7, \tilde{\beta}(0) = 1.1$, 参数 $k = 1$. 从图 1 和图 2 中可知, $B_d = 1, B_r = 0.6$. 同步误差 e , 参数 $\tilde{\alpha}$ 和 $\tilde{\beta}$ 随时间的变化曲线如图 3 ~ 图 5 所示. 由图可知, 同步误差逐渐趋于零值, 参数估计值最终收敛于常值. 这表明时滞 Liao 混沌神经元系统(10) 与(11) 全局渐近同步.

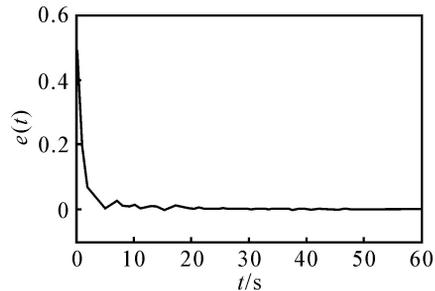


图 3 同步误差 e 的曲线

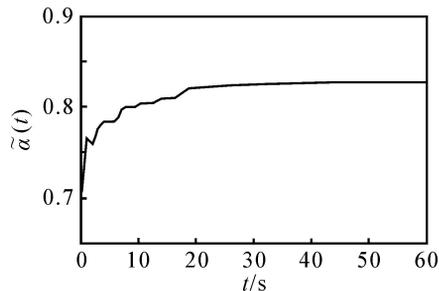


图 4 自适应参数 alpha-tilde 的曲线

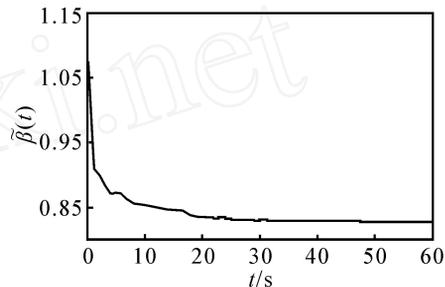


图 5 自适应参数 beta-tilde 的曲线

5 结 语

本文研究了两个不同的具有时滞的部分参数未知的时滞 Liao 混沌神经元系统的同步问题. 基于 Lyapunov 稳定理论, 设计了自适应同步控制器, 并给出了参数自适应律的解析表达式. 理论证明和数值模拟表明了该控制器的有效性. 本文方法不仅适用于时滞 Liao 混沌神经元系统, 也适用于任何状态有界的连续时间时滞混沌神经网络的同步问题.

参考文献(References)

[1] Pecora L M, Carroll T L. Synchronization in chaotic systems [J]. Physics Review Letters, 1990, 64 (8): 821-824.
 [2] Yang X S, Duan C K, Liao X X. A note on mathematical aspects of drive-response type synchronization [J]. Chaos, Solitons and Fractals, 1999, 10(9): 1457-1462.
 [3] Yin X H, Ren Y, Shan X M. Synchronization of discrete spatiotemporal chaos by using variable structure control [J]. Chaos, Solitons and Fractals, 2002, 14 (7): 1077-1082.

(下转第 1069 页)

3], $l \in [2, 3]$, $k_h = k_f = 2$. 由系统对象的状态方程可知, 该对象是不稳定的.

取 $N = 10$, $L = [8.525 \quad -6.525]^T$, $K = [-0.1 \quad 0]$, 可以验证满足定理 1 条件. 经 Matlab 仿真, 系统输出曲线如图 3 所示. 从图 3 可以看出, 闭环预估控制系统在网络中存在掉包和延迟变化时是稳定的.

6 结 语

本文针对网络控制系统中的可变延迟和掉包情况, 使用网络反馈补偿器和前向补偿器, 将随机变化的掉包过程转化成静态问题; 采用状态预估和网络状态观测器, 保证系统的正常运行. 该系统较好地克服了延迟和掉包对系统的影响, 仿真算例验证了该系统的有效性.

参考文献(References)

- [1] 刘磊明, 童朝南, 袁立. 关于网络控制系统中的延迟对系统性能影响的研究[J]. 信息与控制, 2005, 34(3): 263-268.
(Liu Lei-ming, Tong Chao-nan, Yuan Li. Research on effects of delays on the performance of networked control systems[J]. Information and Control, 2005, 34(10): 263-268.)
- [2] Montestruque L A, Antsaklis P J. On the model-based control of networked systems[J]. Automatica, 2003, 39(10): 1837-1843.
- [3] Zhivoglyadov P V, Middleton R H. Networked control design for linear systems[J]. Automatica, 2003, 39(4): 743-750.
- [4] Liu G P, Xia Yuan-qing, Rees D. Predictive control of networked systems with random delays [C]. IFAC World Congress. 2005.
- [5] 席裕庚. 预测控制[M]. 北京: 国防科技出版社, 1993.
(Xi Yu-geng. Model predictive control [M]. Beijing: National Defense Publishing House, 1993.)
- [6] 于之训, 陈辉堂, 王月娟. 基于 Markov 延迟特性的闭环网络控制系统研究[J]. 控制理论与应用, 2002, 19(2): 263-267.
(Yu Zhi-xun, Chen Hui-tang, Wang Yue-juan. Based on markov delay characteristic-based closed loop networked control system [J]. Control Theory and Applications, 2002, 9(2): 263-267.)
- [7] Decarlo R A, Branicky M S, Pettersson S, et al. Perspectives and results on the stability and stabilizability of hybrid systems[J]. Proc of the IEEE, 2000, 88(7): 1069-1082.
- [4] Chen S H, Lü J H. Synchronization of an uncertain unified chaotic system via adaptive control[J]. Chaos, Solitons and Fractals, 2002, 14: 643-647.
- [5] Wang Y W, Guan Z H, Xiao J W. Impulsive control for synchronization of a class of continuous systems [J]. Chaos, 2004, 14(1): 199-203.
- [6] Li C D, Liao X F, Wong K W. Chaotic lag synchronization of coupled time-delayed systems and its applications in secure communication [J]. Physica D, 2004, 194: 187-202.
- [7] Li C D, Liao X F, Zhang R. An unified approach for impulsive lag synchronization of chaotic systems with time delay[J]. Chaos, Solitons and Fractals, 2005, 23(4): 1177-1184.
- [8] Shahverdiev E M, Sivaprakasam S, Shore K A. Lag synchronization in time-delayed systems [J]. Physics Letters A, 2002, 292(6): 320-324.
- [9] Cheng C J, Liao T L, Hwang C C. Exponential synchronization of a class of chaotic neural networks[J]. Chaos, Solitons and Fractals, 2005, 24(1): 197-206.
- [10] Gopalsmay K, Issic L K C. Convergence under dynamical thresholds with delays [J]. IEEE Neural Networks, 1994, 8(2): 341-8.
- [11] Liao X F, Wang K W, Leung C S. Hopf bifurcation and chaos in a single delayed neuron equation with non-monotonic activation function[J]. Chaos, Solitons and Fractals, 2001, 12(8): 1535-1547.
- [12] Peng J, Liao X F. Synchronization of a coupled time-delay chaotic system and its application to secure communications [J]. Computer Research and Development, 2003, 40(2): 263-268.
- [13] Gopalsamy K. Stability and oscillations in delay differential equations of population dynamics [M]. Dordrecht: Kluwer Academic Publishers, 1992.

(上接第 1060 页)