

未知干扰下混沌系统的修正函数投影滞后同步

柴秀丽 王玉璟 袁光耀 史春晓

(河南大学图像处理与模式识别研究所 开封 475004)

摘要 针对一类驱动系统和响应系统均存在未知干扰的混沌系统的修正函数投影滞后同步的问题,提出了一种修正函数投影滞后同步方案。基于 Lyapunov 稳定性定理和自适应控制方法,设计了两种响应系统,构建了自适应控制器和干扰控制强度更新规则,在系统不确定干扰未知的情况下,实现了混沌系统的修正函数投影滞后同步,干扰控制强度也可以自适应确定。最后以一个超混沌系统为例,验证了理论分析的正确性、有效性和鲁棒性。控制器设计简单实用,在保密通信等领域具有广阔的应用前景。

关键词 混沌系统,修正函数投影滞后同步,干扰控制强度

中图法分类号 O415.5, TP273+.2

文献标识码 A

Modified Function Projective Lag Synchronization of Chaotic Systems Subject to Unknown Disturbance

CHAI Xiu-li WANG Yu-jing YUAN Guang-yao SHI Chun-xiao

(Institute of Image Processing and Pattern Recognition, Henan University, Kaifeng 475004, China)

Abstract In the paper, modified function projective lag synchronization (MFPLS) of a class of chaotic systems of which the drive system and response system are all subjected to unknown external disturbance was investigated, and a general theorem of MFPLS was introduced. Based on Lyapunov stability theorem and adaptive control method, two different response systems were given, and adaptive controller and disturbance controlling strength update law were constituted. MFPLS of chaotic system was achieved under the condition of unknown system uncertain disturbances, and disturbance controlling strength could also be estimated automatically. Finally, numerical simulation results of a hyperchaotic system verify the validity, effectiveness and robustness of our theoretical results. The designed controller is simple and practical, and has broad application in secure communication and other fields.

Keywords Chaotic system, Modified function projective lag synchronization, Disturbance controlling strength

1 引言

混沌同步由于其在保密通信、生命科学、金融系统等领域的广泛应用,迅速成为研究热点^[1-3]。许多同步现象被发现,诸如完全同步^[4]、反同步^[5]、相位同步^[6]、滞后同步^[7]、投影同步^[8]、函数投影同步^[9,10]、修正函数投影同步^[11]等等。最近,修正函数投影滞后同步(modified function projective lag synchronization, MFPLS)这一新的同步现象被发现,引起了科研人员的广泛关注^[12-16]。这种同步现象中,驱动系统和响应系统按照一定的函数比例关系实现同步,同时考虑了延时。函数比例系数的多变性在增加系统复杂性的同时,提高了保密通信的安全性。在非线性系统的控制过程中,延时是不可避免的。因此,对 MFPLS 的研究具有重要的实际应用价值。

现实中的混沌系统不可避免地受到模型不确定和外加干扰因素的影响。2010年, Du 等^[12]基于 Lyapunov 稳定性定理,提出了一种 MFPLS 控制策略,分析认为驱动系统和响应系统的参数是已知的,没有考虑外加干扰等不确定因素的影

响。Cai 等^[13]研究了一个金融超混沌系统的 MFPLS,考虑了参数未知情况下的参数辨识,针对的是一个具体的系统,没有给出一般系统的控制规律。Liu 等^[14]采用模糊自适应控制方法研究了多涡卷混沌系统的 MFPLS,研究中认为只有响应系统存在未知外部干扰。最近, Gao 等^[15]利用滑膜变结构控制技术研究了存在外加未知干扰下的混沌系统的 MFPLS。文献^[16]研究了参数不确定的不同维混沌系统的修正函数投影滞后同步,没有考虑外加干扰因素的影响。实际应用中,发生同步的驱动系统和响应系统不可避免地遭受不确定干扰,而且干扰还常常是不断变化的^[17,18]。而这些因素在以往的研究中还没有被充分考虑。在以往考虑未知干扰的同步研究中,有些设计的同步控制器中含有未知干扰^[18]。换句话说,只有在已知外界干扰的情况下,才可能有效地消除干扰信号,实现驱动-响应系统的同步,而这是非常不现实的。

在上述研究的基础上,本文针对一类驱动—响应系统均受干扰存在不确定项的混沌系统,构造两种不同的响应系统;基于 Lyapunov 稳定性定理和自适应控制技术,提出一种

到稿日期:2013-06-16 返修日期:2013-09-20 本文受国家自然科学基金(61004006, 61203094)资助。

柴秀丽(1980—),女,博士,副教授,主要研究方向为混沌控制与同步, E-mail: chaixiuli@henu.edu.cn; 王玉璟(1979—),女,硕士,讲师,主要研究方向为混沌控制与同步; 袁光耀(1989—),男,硕士生,主要研究方向为混沌控制与同步; 史春晓(1988—),男,硕士生,主要研究方向为混沌控制与同步。

混沌系统修正函数投影滞后同步控制策略,设计了控制器和干扰控制强度参数自适应规律。最后通过对超混沌 CYQY 系统的数值仿真验证所提方案的有效性和鲁棒性。所设计的控制器中不含未知干扰,具有很强的实用性。

2 修正函数投影滞后同步方案的描述

考虑耦合的驱动系统和响应系统表示如下:

$$\dot{x}(t) = Ax(t) + f(x(t)) + \Delta f(x(t)) \quad (1)$$

$$\dot{y}(t) = By(t) + g(y(t)) + \Delta g(y(t)) + U(t) \quad (2)$$

式中, $x(t) = (x_1, x_2, \dots, x_n)^T \in R^n$ 和 $y(t) = (y_1, y_2, \dots, y_n)^T \in R^n$ 分别表示驱动系统(1)和响应系统(2)的状态向量; $A \in R^n$ 和 $B \in R^n$ 是未知参数向量; $f, g: R^n \rightarrow R^n$ 是两个连续的非线性向量函数; $\Delta f(x(t))$ 和 $\Delta g(y(t))$ 分别是驱动系统和响应系统未建模部分、模型扰动及外部干扰的总和; $U(t)$ 是自适应控制器。

定义 1 对于驱动系统(1)和响应系统(2),在控制器 $U(t)$ 的作用下,驱动、响应系统从任意的初始值出发,若存在一个比例函数矩阵 $M(t)$ 使得

$$\lim_{t \rightarrow \infty} \|x(t-\tau) - M(t)y(t)\| = 0 \quad (3)$$

$$\lim_{t \rightarrow \infty} \|y(t) - M(t)x(t-\tau)\| = 0 \quad (4)$$

则称系统(1)和(2)达到了修正函数投影滞后同步。 $M(t) = \text{diag}(m_1(t), m_2(t), \dots, m_n(t))$, $m_i(t) \neq 0 (i=1, 2, \dots, n)$ 称为比例函数因子,时间延迟向量 $\tau = (\tau_1, \tau_2, \dots, \tau_n)^T$ 。

注 1: $A=B, f=g$ 时,定义 1 也可用于两个完全相同的系统。

注 2: 当 $m_i(t)=1, m_i(t)=-1, m_i(t)=\text{常数}$ 和 $m_i(t)=\text{函数}$ 时,修正函数投影滞后同步演化为滞后同步、滞后反同步、广义投影滞后同步和修正函数投影滞后同步。

2.1 实现误差系统为式(3)的修正函数投影滞后同步方案

以式(1)作为驱动系统,构造如下形式的响应系统,

$$\dot{y}(t) = M^{-1}\{AMy(t) + f(My(t)) + \Delta g(My(t)) - My(t) + U(t)\} \quad (5)$$

其中,比例函数矩阵 $M(t) = \text{diag}(m_1(t), m_2(t), \dots, m_n(t))$, $m_i(t) \neq 0 (i=1, 2, \dots, n)$ 称为比例函数因子。定义系统(1)和系统(5)的同步误差为

$$\begin{aligned} e &= x(t-\tau) - M(t)y(t) \\ &= [x_1(t-\tau_1) - m_1(t)y_1(t), x_2(t-\tau_2) - m_2(t)y_2(t), \\ &\quad \dots, x_n(t-\tau_n) - m_n(t)y_n(t)] \end{aligned} \quad (6)$$

同步误差动态方程为

$$\begin{aligned} \dot{e} &= \dot{x}(t-\tau) - \dot{M}(t)y(t) - M(t)\dot{y}(t) \\ &= Ax(t-\tau) + f(x(t-\tau)) + \Delta f(x(t-\tau)) - \dot{M}(t)y(t) - \\ &\quad AMy(t) - f(My(t)) - \Delta g(My(t)) + \dot{M}y(t) - U(t) \\ &= Ae + f(x(t-\tau)) - f(My(t)) + \Delta f(x(t-\tau)) - \Delta g(My(t)) - U(t) \end{aligned} \quad (7)$$

假设 1 假设存在正数 l_1 ,使得对于任意的 x 和 y 都满足下面的关系式,

$$\begin{aligned} \|f(x(t-\tau)) - f(My(t))\| &\leq \\ l_1 \|x(t-\tau) - My(t)\| &= l_1 \|e(t)\| \end{aligned} \quad (8)$$

定理 1 对于任意给定的非零比例函数矩阵 $M(t)$ 、时间

延迟向量 τ 和系统(1)和(5)的初始值 $x(0)$ 和 $y(0)$,自适应同步控制器和干扰控制强度更新规则满足如下形式时,驱动系统(1)和响应系统(5)将达到修正函数投影滞后同步,并实现干扰控制强度参数的自适应确定。

$$U = Ke + q \hat{\rho} \text{sgn}(e) \quad (9)$$

$$\dot{\hat{\rho}} = q \|e\| \quad (10)$$

$$A^T + l_1 I - K < 0 \quad (11)$$

$$F_1 + F_2 - \rho q \leq 0 \quad (12)$$

式中, K 是控制器的控制强度矩阵; I 是单位矩阵; ρ, q 是用于抑制干扰的非零常数, $\hat{\rho}$ 是 ρ 的估计值; F_1 和 F_2 分别是驱动系统和响应系统的未知干扰的上限, $\|\Delta f(x(t-\tau))\| \leq F_1$, $\|\Delta g(My(t))\| \leq F_2$ 。

证明:

选择如下形式的 Lyapunov 函数:

$$V = \frac{1}{2} e^T e + \frac{1}{2} (\rho - \hat{\rho})^2 \quad (13)$$

将式(13)沿着式(7)求导,同时把式(7)一式(12)代入,可得到

$$\begin{aligned} \dot{V} &= \dot{e}^T e - (\rho - \hat{\rho}) \dot{\hat{\rho}} \\ &= [Ae + f(x(t-\tau)) - f(My(t)) + \Delta f(x(t-\tau)) - \\ &\quad \Delta g(My(t))]^T e - U^T(t)e - (\rho - \hat{\rho}) \dot{\hat{\rho}} \\ &\leq (A^T + l_1 I) \|e\|^2 + (\Delta f^T(x(t-\tau)) - \Delta g^T(My(t)) \\ &\quad - U^T(t))e - (\rho - \hat{\rho}) \dot{\hat{\rho}} \\ &\leq (A^T + l_1 I) \|e\|^2 - e^T Ke + \|\Delta f(x(t-\tau))\| \|e\| + \\ &\quad \|\Delta g(My(t))\| \|e\| - q \hat{\rho} \|e\| - \rho q \|e\| + \hat{\rho} q \|e\| \\ &= (A^T + l_1 I - K) \|e\|^2 + \{\|\Delta f(x(t-\tau))\| + \|\Delta g(My(t))\| - \rho q\} \|e\| \end{aligned} \quad (14)$$

通过选择一个合适的矩阵 K ,总是可以使得 $A^T + l_1 I - K \leq 0$ 。同时,大多数时候,驱动、响应系统受到的干扰都是有界的,假设 $\|\Delta f(x(t-\tau))\| \leq F_1$, $\|\Delta g(My(t))\| \leq F_2$,则总是存在这样的 ρ, q ,使得 $F_1 + F_2 - \rho q \leq 0$ 。换言之,我们不需要知道系统不确定干扰的确切函数关系式,只要选择足够大的 ρq ,就可以把不确定干扰对同步性能的影响消除掉。本文所设计的控制器中不含有未知干扰项,控制策略简单实用。

因此, $\dot{V}(t)$ 是负定的, V 是正定的。根据非线性系统的 Lyapunov 稳定性定理可知,系统是一致渐进稳定的。根据 Barbalat 引理,当 $t \rightarrow \infty, e(t) \rightarrow 0, \rho - \hat{\rho} \rightarrow 0$,实现了系统(1)和(5)的修正函数投影滞后同步,同时参数 ρ 的数值也可以自适应确定。

2.2 实现误差系统为式(4)的修正函数投影滞后同步方案

以式(1)作为驱动系统,构造如下形式的响应系统,

$$\dot{y}(t) = M\{A(M^{-1}y(t)) + f(M^{-1}y(t)) + \Delta g(M^{-1}y(t)) - \frac{d}{dt}(M^{-1})y(t) + U(t)\} \quad (15)$$

其中,比例函数矩阵 $M(t) = \text{diag}(m_1(t), m_2(t), \dots, m_n(t))$, $m_i(t) \neq 0 (i=1, 2, \dots, n)$ 称为比例函数因子。定义系统(1)和

系统(15)的同步误差为

$$\begin{aligned} e &= x(t-\tau) - M^{-1}(t)y(t) \\ &= [x_1(t-\tau_1) - m_1^{-1}(t)y_1(t), x_2(t-\tau_2) - m_2^{-1}(t)y_2(t), \\ &\quad \dots, x_n(t-\tau_n) - m_n^{-1}(t)y_n(t)] \end{aligned} \quad (16)$$

同步误差状态方程为

$$\begin{aligned} \dot{e} &= \dot{x}(t-\tau) - \frac{d}{dt}(M^{-1}(t))y(t) - M^{-1}(t)\dot{y}(t) \\ &= Ax(t-\tau) + f(x(t-\tau)) + \Delta f(x(t-\tau)) - \frac{d}{dt}(M^{-1}(t))y(t) - A(M^{-1}y(t)) - f(M^{-1}y(t)) - \Delta g(M^{-1}y(t)) + \frac{d}{dt}(M^{-1})y(t) - U(t) \\ &= Ae + \{f(x(t-\tau)) - f(M^{-1}y(t))\} + \Delta f(x(t-\tau)) - \Delta g(M^{-1}y(t)) - U(t) \end{aligned} \quad (17)$$

与式(7)相比,可以得到类似的结论。

定理 2 存在干扰的驱动系统(1)和响应系统(15)在自适应同步控制器和参数更新规则满足式(9)~式(12)的情况下,可以实现修正函数投影滞后同步,消除干扰的参数也可以自适应确定。

3 数值仿真

本文选择 CYQY 超混沌系统,其动力学方程为

$$\begin{cases} \dot{x}_1 = l(x_2 - x_1) + kx_2x_3 \\ \dot{x}_2 = nx_1 - jx_1x_3 + x_2 + x_4 \\ \dot{x}_3 = x_1x_2 - mx_3 \\ \dot{x}_4 = -sx_2 \end{cases} \quad (18)$$

当 $l=35, m=4.9, n=25, j=5, k=35, s=100$ 时,在不加控制的情况下,系统(18)是超混沌的。驱动系统和响应系统的初始值分别选为 $(x_1(0), x_2(0), x_3(0), x_4(0)) = (-1, 2, 0, 0.5), (y_1(0), y_2(0), y_3(0), y_4(0)) = (1, -3, 0, 0)$ 。则超混沌系统的吸引子见图 1。

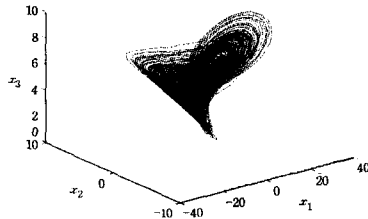


图 1 超混沌系统的吸引子

3.1 实现误差系统为式(3)的修正函数投影滞后同步数值仿真

以系统(18)作为驱动系统,选择实现误差系统为式(3)的 MFPLS 方案,相应的响应系统为:

$$\begin{cases} \dot{y}_1 = \frac{1}{m_1(t)} [l(m_2(t)y_2(t) - m_1(t)y_1(t)) + km_2(t)y_2(t) - m_3(t)y_3(t) - \dot{m}_1(t)y_1(t) + u_1] \\ \dot{y}_2 = \frac{1}{m_2(t)} [nm_1(t)y_1(t) - jm_1(t)y_1(t)m_3(t)y_3(t) + m_2(t)y_2(t) + m_4(t)y_4(t) - \dot{m}_2(t)y_2(t) + u_2] \\ \dot{y}_3 = \frac{1}{m_3(t)} [m_1(t)y_1(t)m_2(t)y_2(t) - mm_3(t)y_3(t) - \dot{m}_3(t)y_3(t) + u_3] \\ \dot{y}_4 = \frac{1}{m_4(t)} [-sm_2(t)y_2(t) - \dot{m}_4(t)y_4(t) + u_4] \end{cases} \quad (19)$$

控制器设计如下:

$$\begin{cases} u_1 = k_1 e_1 + q \hat{\rho}_1 \operatorname{sgn}(e_1) \\ u_2 = k_2 e_2 + q \hat{\rho}_2 \operatorname{sgn}(e_2) \\ u_3 = k_3 e_3 + q \hat{\rho}_3 \operatorname{sgn}(e_3) \\ u_4 = k_4 e_4 + q \hat{\rho}_4 \operatorname{sgn}(e_4) \end{cases} \quad (20)$$

干扰控制强度参数的自适应更新规则为: $\dot{\rho}_1 = q \|e_1\|$, $\dot{\rho}_2 = q \|e_2\|$, $\dot{\rho}_3 = q \|e_3\|$, $\dot{\rho}_4 = q \|e_4\|$ 。选择比例函数矩阵时,注意使得比例函数因子不为零,令 $M(t) = \operatorname{diag}(m_1(t), m_2(t), m_3(t), m_4(t))$, 则 $\dot{M}(t) = \operatorname{diag}(\dot{m}_1(t), \dot{m}_2(t), \dot{m}_3(t), \dot{m}_4(t))$, 其中,

$$\begin{cases} m_1(t) = 6.1 + \sin t + 2\sin(2t) + 3\sin(3t) \\ m_2(t) = 0.1 + 2\sin^2(2t) \\ m_3(t) = 0.1 + 2\sin^2(2t) + 3\sin^2(3t) \\ m_4(t) = 10.1 + \sin t + 2\sin(2t) + 3\sin(3t) + 4\sin(4t) \end{cases} \quad (21)$$

为了研究所设计控制器的鲁棒性,在驱动系统和响应系统中均加入干扰信号。驱动-响应系统各个状态变量遭受的干扰信号随机选择为 $(d_{11}, d_{12}, d_{13}, d_{14}, d_{21}, d_{22}, d_{23}, d_{24}) = (0.6\sin(6t), 0.4\cos(5t), 0.9\sin(0.1t), 0.2\sin(t), 0.5\sin(2t), 0.2\cos(2t), 0.1\cos(0.5t), \cos(t))$, 式中 $d_{11}, d_{12}, d_{13}, d_{14}$ 代表驱动系统的 4 个状态变量在通道中传输时遭受的不确定干扰信号, $d_{21}, d_{22}, d_{23}, d_{24}$ 则代表响应系统遭受的不确定干扰信号。

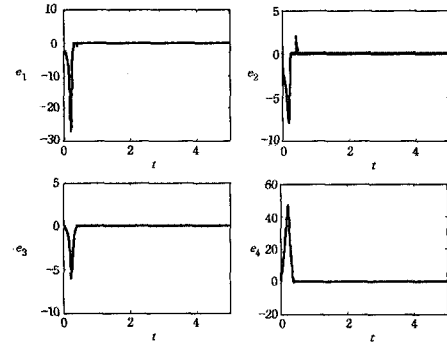


图 2 修正函数投影滞后同步误差曲线

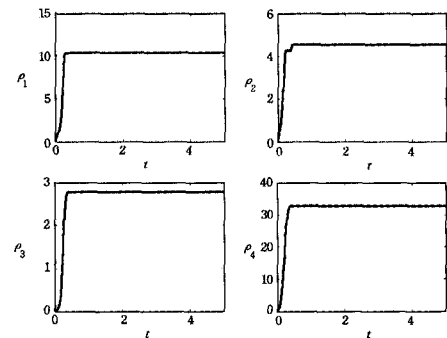


图 3 干扰控制强度参数自适应曲线

这样,驱动系统和响应系统的未知干扰的上限 F_1 和 F_2 可以取为 1,控制增益 $k_i = 10$ ($i=1, 2, 3, 4$), $q=4$,延迟滞后时间选择为 $\tau_1=0.4, \tau_2=0.4, \tau_3=0.4, \tau_4=0.4$ 。仿真结果见图 2 和图 3。由图可知,在存在干扰的情况下,驱动系统和响

应系统的同步误差分量 e_1 、 e_2 、 e_3 和 e_4 在短时间内迅速趋近于零,实现了修正函数投影滞后同步,同时干扰控制强度参数 ρ_1 、 ρ_2 、 ρ_3 和 ρ_4 也可以自适应确定, $\rho_1 \rightarrow 10.36$ 、 $\rho_2 \rightarrow 4.53$ 、 $\rho_3 \rightarrow 2.78$ 和 $\rho_4 \rightarrow 32.69$,这表明,我们设计的控制器对于外界干扰具有很强的鲁棒性。

3.2 实现误差系统为式(4)的修正函数投影滞后同步数值仿真

以系统(18)作为驱动系统,选择实现误差系统为(4)的修正函数投影滞后同步方案,相应的响应系统为

$$\begin{cases} \dot{y}_1 = m_1(t) \left[l \left(\frac{1}{m_2(t)} y_2(t) - \frac{1}{m_1(t)} y_1(t) \right) + \right. \\ \quad \left. k \frac{1}{m_2(t)} y_2(t) \frac{1}{m_3(t)} y_3(t) + \frac{\dot{m}_1(t)}{m_1^2(t)} y_1(t) + u_1 \right] \\ \dot{y}_2 = m_2(t) \left[n \frac{1}{m_1(t)} y_1(t) - j \frac{1}{m_1(t)} \frac{1}{m_3(t)} y_3(t) + \right. \\ \quad \left. \frac{1}{m_2(t)} y_2(t) + \frac{1}{m_4(t)} y_4(t) + \frac{1}{m_2^2(t)} \dot{m}_2(t) y_2(t) + u_2 \right] \\ \dot{y}_3 = m_3(t) \left[\frac{1}{m_1(t)} y_1(t) - \frac{1}{m_2(t)} y_2(t) - m \frac{1}{m_3(t)} y_3(t) + \right. \\ \quad \left. \frac{1}{m_3^2(t)} \dot{m}_3(t) y_3(t) + u_3 \right] \\ \dot{y}_4 = m_4(t) \left[-s \frac{1}{m_2(t)} y_2(t) + \frac{1}{m_4^2(t)} \dot{m}_4(t) y_4(t) + u_4 \right] \end{cases} \quad (22)$$

驱动系统和响应系统遭受的不确定干扰信号大小同上,控制器和参数自适应律选择如式(10)~式(13),其它参数选择同上,仿真结果见图4和图5。由图可知,在驱动系统和响应系统均存在干扰的情况下,驱动-响应系统迅速实现了修正函数投影滞后同步,干扰控制强度参数 ρ_1 、 ρ_2 、 ρ_3 和 ρ_4 也可以自适应确定, $\rho_1 \rightarrow 12.11$ 、 $\rho_2 \rightarrow 5.29$ 、 $\rho_3 \rightarrow 4.26$ 和 $\rho_4 \rightarrow 19.38$ 。研究结果表明,在外界干扰存在的情况下,本文所设计的控制器具有很强的鲁棒性,且不需要事先知道系统干扰不确定项的确切函数关系式。

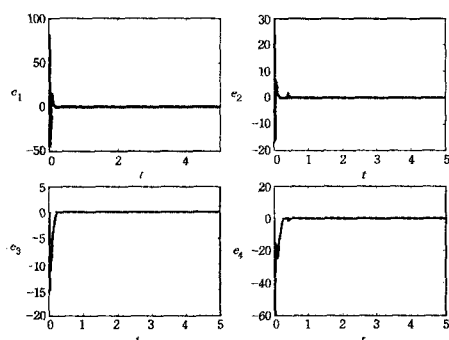


图4 修正函数投影滞后同步误差曲线

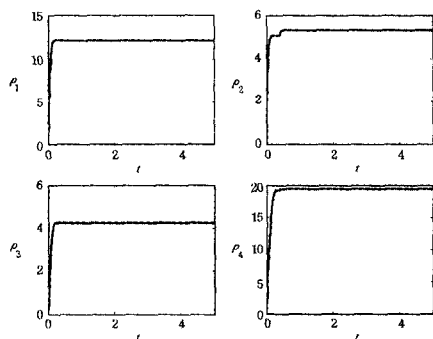


图5 干扰控制强度参数自适应曲线

与文献[18]相比,本文设计的控制器中不含未知干扰项,更实用。如果不考虑时滞,修正函数投影滞后同步变为修正函数投影同步,可以得到与文献[19]相同的结果。不同的是,文献[19]仅考虑了驱动系统的不确定干扰。而本文同时考虑了驱动系统和响应系统的未知干扰,还考虑了实际应用时候的延时因素,更具一般性和实用性。

结束语 本文针对一类驱动—响应系统均受干扰存在不确定项的混沌系统,构造了两种不同的响应系统,基于Lyapunov稳定性定理和自适应控制技术,提出一种混沌系统修正函数投影滞后同步方法,设计了相应的控制器和参数自适应规律。该控制技术不仅可以实现任意干扰下驱动系统和响应系统的修正函数投影滞后同步,而且干扰控制强度还可以自适应确定,从而避免了参数的盲目选择带来的较多的能量消耗。最后通过对超混沌CYQY系统的数值仿真,进一步验证了所提方案的有效性和鲁棒性。所设计的控制器克服了以往设计中含有未知干扰项的不足,简单实用,在保密通信等领域具有广阔的实际应用前景。

参考文献

- [1] Chen Guan-rong, Dong Xiao-ning. From Chaos to Order: Methodologies, Perspectives and Applications [M]. World Scientific, Singapore, 1998
- [2] 张小红,王伟. 异维异构混沌系统同步及其在保密通信中的应用[J]. 计算机科学, 2012, 39(4): 220-222
- [3] Li Xiao-di, Fu Xi-lin. Synchronization of chaotic delayed neural networks with impulsive and stochastic perturbations [J]. Communications in Nonlinear Science and Numerical Simulation, 2011, 16(2): 885-894
- [4] Pecora L M, Carroll T L. Synchronization in chaotic systems [J]. Physical Review Letters, 1990, 64(8): 821-824
- [5] 吕翎,夏晓岚. 非线性耦合时空混沌系统的反同步研究[J]. 物理学报, 2009, 58(2): 814-818
- [6] Breve F A, Zhao Liang, Quiles M G, et al. Chaotic phase synchronization and desynchronization in an oscillator network for object selection [J]. Neural Networks, 2009, 22(5/6): 728-737
- [7] 穆文英,籍艳,崔宝同. 神经网络的滞后同步及其在保密通信中的应用[J]. 计算机应用研究, 2010, 27(9): 3456-3461
- [8] Sebastian Sudheer K, Sabir M. Adaptive function projective synchronization of two-cell quantum-CNN chaotic oscillators with uncertain parameters [J]. Physics Letters A, 2009, 373(21): 1847-1851
- [9] Du Hong-yue, Zeng Qing-shuang, Wang Chang-hong, et al. Function projective synchronization in coupled chaotic systems [J]. Nonlinear Analysis-Real World Applications, 2010, 11(2): 705-712
- [10] 方洁,邓玮,姜长生,等. 具有扇区非线性输入的混沌系统函数投影同步[J]. 系统工程与电子技术, 2012, 34(9): 1872-1877
- [11] 李建芬,李农. 一类混沌系统的修正函数投影同步[J]. 物理学报, 2011, 60(8): 080507
- [12] Du Hong-yue, Zeng Qing-shuang, Lue Ning. A general method for modified function projective lag synchronization in chaotic systems [J]. Physics Letters A, 2010, 374(13/14): 1493-1496

(下转第 301 页)

保证这一前提,因此算法存在一些问题有待进一步研究,即一些类别的多样本性,一些类别的无样本性。这些问题导致空间结构信息的不平衡,影响特征提取效果。

参 考 文 献

- [1] Peng H, Li B, Luo X, et al. A learning-based audio watermarking scheme using kernel Fisher discriminant analysis [J]. *Digital Signal Processing*, 2013, 23(1): 382-389
 - [2] Meng Y, Zou J, Gan X, et al. Adaptive WNN aerodynamic modeling based on subset KPCA feature extraction [J]. *Journal of Central South University*, 2013, 20: 931-941
 - [3] 胡益, 王丽, 马贺贺, 等. 基于核 PLS 方法的非线性过程在线监控[J]. *化工学报*, 2011, 62(9): 2555-2561
 - [4] Gan J Y, Liu J F. Fusion and recognition of face and iris feature based on wavelet feature and KFPA [C]// *International Conference on Wavelet Analysis and Pattern Recognition*, 2009. IC-WAPR 2009. IEEE, 2009: 47-50
 - [5] Zhang X, Yan W, Zhao X, et al. Nonlinear biological batch process monitoring and fault identification based on kernel fisher discriminant analysis [J]. *Process biochemistry*, 2007, 42(8): 1200-1210
 - [6] 郑建伟, 王万良, 姚晓敏, 等. 张量局部 Fisher 判别分析的人脸识别[J]. *自动化学报*, 2012, 38(9): 1485-1495
 - [7] Jin L W, Ding K, Huang Z B. Incremental learning of FDA model for Chinese writer adaptation [J]. *Neurocomputing*, 2010, 73(10): 1614-1623
 - [8] Xiong T, Ye J, Li Q, et al. Efficient kernel discriminant analysis via QR decomposition [J]. *Advances in neural information processing systems*, 2005, 17: 1529-1536
 - [9] Golub G H, Van Loan C F. *Matrix computations* [M]. Johns Hopkins University Press, 1996
 - [10] Zhang X, Yan W W, Zhao X, et al. Performance monitoring and fault identification based on DKPCA and PSVM [J]. *Journal of Shanghai Jiaotong University*, 2008, 42(2): 181-185
 - [11] Chiang L H, Russell E, Braatz R D. *Fault detection and diagnosis in industrial systems* [M]. Springer Verlag, 2001
 - [12] Bo C M, Zhang S, Zhang G M, et al. Fault identification of Tennessee Eastman process based on FS-KPCA [J]. *Journal of Chemical Industry and Engineering*, 2008, 59(7): 1783-1789
 - [13] Ricker N L, Lee J H. Nonlinear model predictive control of the Tennessee Eastman challenge process [J]. *Computers & chemical engineering*, 1995, 19(9): 961-981
 - [14] 张熠卓, 徐光华, 梁霖, 等. 利用增量式非线性流形学习的状态监测方法[J]. *西安交通大学学报*, 2011, 45(001): 64-68
 - [15] 王迎, 王新明, 赵小强. 基于小波去噪与 KPCA 的 TE 过程故障检测研究[J]. *化工机械*, 2011, 38(1): 49-53
 - [16] http://blog.sina.com.cn/s/blog_02b6f23d0100eq88.html
-
- (上接第 279 页)
- [18] Li H, Jiang T, Zhang K. Efficient and robust feature extraction by maximum margin criterion [J]. *IEEE Transactions on Neural Networks*, 2006, 17(1-3): 157-165
 - [19] Duchon J. Splines minimizing rotation-invariant semi-norms in Sobolev spaces [C]// *Constructive theory of functions of several variables*. 1977: 85-100
 - [20] Meinguet J. Multivariate interpolation at arbitrary points made simple [J]. *Journal of Applied Mathematics and Physics*, 1979, 30: 292-304
 - [21] Wahba G. *Spline models for observational data* [M]. SIAM Press, 1990
 - [22] Söderkvist O. Computer vision classification of leaves from Swedish trees [D]. Master's Thesis, Linköping University, 2001
 - [23] Ye J. Characterization of a family of algorithms for generalized discriminant analysis on undersampled problems [J]. *Journal of Machine Learning Research*, 2006, 6: 483-502
 - [24] Belhumeur P N, Hespanha J P, Kriegman D J. Eigenfaces vs. fisherfaces: Recognition using class specific linear projection [J]. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 1997, 19(7): 711-720
 - [25] Cai D, He X, Han J. Using graph model for face analysis [R]. Univ. Illinois Urbana-Champaign, Urbana, IL, Department of Computer Science, Technical Report, 2005
 - [26] Zhang T, Yang J, Zhao D, et al. Linear local tangent space alignment and application to face recognition [J]. *Neurocomputing*, 2007, 70(7-9): 1547-1553
 - [27] De Silva V, Tenenbaum J B. Global versus local methods in nonlinear dimensionality reduction [C]// *Proceedings of Advances in Neural Information Processing Systems*. 2003, 15: 721-728
-
- (上接第 286 页)
- [13] Cai Guo-liang, Hu Pei, Li Yu-xiu. Modified function lag projective synchronization of a financial hyperchaotic system [J]. *Nonlinear Dynamics*, 2012, 69(3): 1457-1464
 - [14] 刘恒, 余海军, 向伟. 带未知扰动的多涡卷混沌系统修正函数时滞投影同步 [J]. *物理学报*, 2012, 61(18): 180503
 - [15] Gao Yan-bo, Sun Bing-hua, Lu Guo-ping. Modified function projective lag synchronization of chaotic systems with disturbance estimations [J]. *Applied Mathematical Modelling*, 2013, 37(7): 4993-5000
 - [16] Chai Xiu-li, Gan Zhi-hua, Shi Chun-xiao. Adaptive modified function projective lag synchronization of uncertain hyperchaotic dynamical systems with the same or different dimension and structure [J]. *Mathematical Problems in Engineering*, 2013, 2013: 282064
 - [17] Fu Gui-yuan. Robust adaptive modified function projective synchronization of different hyperchaotic systems subject to external disturbance [J]. *Communications in Nonlinear Science and Numerical Simulation*, 2012, 17(6): 2602-2608
 - [18] Yu Fei, Wang Chun-hua, Hu Yan, et al. Antisynchronization of a novel hyperchaotic system with parameter mismatch and external disturbances [J]. *Pramana-Journal of physics*, 2012, 79(1): 81-93
 - [19] 邓玮, 方洁, 吴振军, 等. 含有不确定项的混沌系统自适应修正函数投影同步 [J]. *物理学报*, 2012, 61(14): 140503