

## 一类带有未知参数的受扰混沌系统的观测器同步\*

李秀春<sup>†</sup> 谷建华 王云岚 赵天海

(西北工业大学高性能计算研究与发展中心, 西安 710072)

(2010年4月2日收到; 2010年6月29日收到修改稿)

在系统参数未知的情形下, 观测器方法和自适应方法相结合, 实现了一类受扰混沌系统的同步. 借助于 Lyapunov 稳定性理论和 Barbalat 引理, 给出了观测器的设计方法. 此方法约束条件较少, 适应于大部分常见的混沌系统. 最后, 通过对典型混沌系统的同步数值仿真, 证实了方法的有效性和正确性.

**关键词:** 混沌系统, 外界干扰, 同步, 观测器法

**PACS:** 05.45.Gg, 05.45.Pq

## 1. 引言

20世纪90年代 Pecora 和 Carroll 驱动-响应同步法<sup>[1]</sup>的提出和成功运用燃起了人们对混沌同步研究的极大热情. 近年来, 实现混沌同步的方法不断涌现, 如驱动-响应同步法<sup>[1]</sup>、主动-被动同步法<sup>[2]</sup>、自适应控制同步法<sup>[3,4]</sup>、脉冲同步法<sup>[5]</sup>、滑模控制同步法<sup>[6,7]</sup>、观测器同步法<sup>[8-15]</sup>等, 其应用领域也从物理学迅速扩展到生物学、化学、医学、电子学、信息科学和保密通信等领域.

目前, 人们关注比较多的是以系统的所有状态变量都能得到并可以参加控制为前提的混沌同步方案, 并取得了丰富的研究成果<sup>[3-7]</sup>. 但从实际物理过程来看, 一般非线性系统的状态并非都可以得到, 而利用观测器理论可以顺利地解决此类混沌系统的同步问题. Gao 等<sup>[8]</sup>基于状态观测器方法和极点配置技术使混沌系统达到广义同步. Liu 等<sup>[9]</sup>借助于非线性观测器理论实现了一类混沌系统的同步. Hua 等<sup>[10,11]</sup>假设系统参数已知设计了自适应观测器使系统达到混沌同步. 但在系统实现过程中, 外界干扰几乎是不可避免的. 因此, 对于受外界扰动的混沌系统, Guan 等<sup>[12]</sup>和 Chen 等<sup>[13]</sup>首先将原系统进行变换得到降阶混沌系统, 进而设计相应的观测器来实现混沌的同步. 不难发现, 文献[8-13]都是在参数已知的情形下设计的观测器, 而在实际

工程应用中, 系统参数通常不能提前知道, 因此研究带有未知参数的混沌系统具有很重要的实际意义. Bowong 等<sup>[14]</sup>和 Zhu<sup>[15-16]</sup>分别针对某一类参数未知的混沌系统, 利用自适应观测器法使驱动系统和响应系统达到混沌同步, 但约束条件较苛刻, 不方便在实际中的应用.

针对上述问题, 本文基于观测器法和自适应法研究了参数未知情形下受扰混沌系统的同步问题, Lyapunov 稳定性理论和 Barbalat 引理相结合给出了实现受扰混沌系统同步所需的条件以及反馈增益阵的选取方法. 此方法约束条件较少, 适应于大部分常见的混沌系统, 其中包括文献[8-16]所研究各类系统. 最后, 通过对典型三维 Chua's 混沌系统和新四维超混沌系统<sup>[17]</sup>进行数值仿真, 进一步验证了方法的有效性与正确性.

## 2. 系统模型描述

考虑如下—类混沌系统:

$$\begin{aligned} \dot{x} &= Ax + f(x) + Bg(x)\theta + d(t), \\ y &= Cx, \end{aligned} \quad (1)$$

这里  $x \in R^n$  为系统的状态,  $y \in R^p$  为系统的输出,  $\theta \in R^q$  为系统的未知参数,  $d(t) \in R^n$  为外界扰动,  $A \in R^{n \times n}$ ,  $B \in R^{n \times p}$ ,  $C \in R^{p \times n}$  是已知的常数矩阵, 且  $(A, C)$  可测. 另外  $f: R^n \rightarrow R^n$  和  $g: R^n \rightarrow R^{p \times q}$  为混沌系统(1)的非线性函数, 满足李普希茨条件, 即有

\* 国家自然科学基金(批准号:11002114)和国家高技术研究发展计划(863计划)(批准号:2009AA01Z142)资助的课题.

<sup>†</sup> E-mail: lixiuchun@nwpu.edu.cn

$\|f(x) - f(\hat{x})\| \leq k_f \|x - \hat{x}\|$  和  $\|g(x) - g(\hat{x})\| \leq k_g \|x - \hat{x}\|$  成立, 其中  $k_f, k_g$  为李普希茨常数.

表达式(1)代表着大部分常见的混沌系统模型. 当取  $g(x) = 0$  时, (1)式代表参数已知的一大类混沌系统, 其中包括文献[8—13]所讨论的各类系统. 另外, (1)式也包括了文献[14—16]研究的带有未知参数的混沌系统等等.

将系统(1)看作驱动系统, 设计其观测器

$$\begin{aligned} \dot{\hat{x}} = & A\hat{x} + f(\hat{x}) + Bg(\hat{x})\theta \\ & + L(y - C\hat{x}) + Bu, \end{aligned} \quad (2)$$

其中  $\hat{x} \in R^n$  为观测器的状态,  $L \in R^{n \times p}$  为待定观测器增益矩阵,  $u \in R^p$  为非线性输入.

设系统(1)和系统(2)之间的状态误差为  $e = x - \hat{x}$ , 由(1)式减去(2)式得到误差系统方程为

$$\begin{aligned} \dot{e} = & (A - LC)e + f(x) - f(\hat{x}) + B(g(x)\theta \\ & - g(\hat{x})\hat{\theta}) + d(t) - Bu. \end{aligned} \quad (3)$$

同步的目标为寻找合适的增益阵  $L$  和非线性输入  $u$ , 使受控系统(2)与目标系统(1)达到混沌同步.

### 3. 观测器的设计

为实现受扰混沌系统同步, 首先有如下假设.

**假设 1** 系统(1)中的未知参数  $\theta$  与外界扰动  $d(t)$  有界, 即存在正常数  $l_\theta, l_d$  有  $\|\theta\| \leq l_\theta$  和  $\|d(t)\| \leq l_d$  成立.

**假设 2** 选择观测器增益阵  $L$  满足如下条件:

$$\begin{aligned} (A - LC)^T P + P(A - LC) &= -Q, \\ B^T P &= C, \end{aligned}$$

这里  $P \in R^{n \times n}, Q \in R^{n \times n}$  为正定矩阵.

**说明 1** 对于受控系统(2)的反馈增益阵  $L$  可以按如下方式选取: 由 Kalman-Yakubovich-Popov 引理<sup>[15]</sup>可知, 如果选择反馈增益阵  $L$  使传递函数

$$H(s) = C(sI_n - (A - LC))^{-1}B,$$

严格正实, 则必存在正定矩阵  $P \in R^{n \times n}, Q \in R^{n \times n}$  满足假设 2.

**定理 1** 若系统(1)和系统(2)满足假设 1, 2, 且非线性输入  $u$  为

$$u = \hat{\gamma} \text{sgn}(y - C\hat{x}), \quad (4)$$

其中参数  $\hat{\gamma}$  的更新规则为

$$\dot{\hat{\gamma}} = \delta \|y - C\hat{x}\|, \quad (5)$$

这里  $\delta > 0$ . 另外, 参数  $\theta$  更新规则的表达式为

$$\dot{\hat{\theta}} = g^T(\hat{x})(y - C\hat{x}), \quad (6)$$

则对任意的初始条件就可以实现驱动系统(1)与响应系统(2)的混沌同步.

**证明** 令 Lyapunov 函数为

$$V = e^T P e + (\theta - \hat{\theta})^T (\theta - \hat{\theta}) + \frac{1}{\delta} (\gamma - \hat{\gamma})^2,$$

对  $V$  关于时间  $t$  求导数得到

$$\begin{aligned} \dot{V} = & e^T P \dot{e} + e^T P \dot{e} - 2(\theta - \hat{\theta})^T \dot{\hat{\theta}} - \frac{2}{\delta} (\gamma - \hat{\gamma}) \dot{\hat{\gamma}} \\ = & e^T ((A - LC)^T P + P(A - LC)) e \\ & + 2e^T P(f(x) - f(\hat{x})) \\ & + 2e^T P B(g(x)\theta - g(\hat{x})\hat{\theta}) \\ & + 2e^T P d(t) - 2\hat{\gamma} \|e^T P B\| - 2(\theta - \hat{\theta})^T g^T(\hat{x}) \\ & \times (y - C\hat{x}) - 2(\gamma - \hat{\gamma}) \|y - C\hat{x}\| \\ = & -e^T Q e + 2e^T P(f(x) - f(\hat{x})) + 2e^T P B(g(x) \\ & - g(\hat{x}))\theta + 2e^T P B g(\hat{x})(\theta - \hat{\theta}) \\ & + 2e^T P d(t) - 2\hat{\gamma} \|e^T P B\| - 2(\theta - \hat{\theta})^T g^T \\ & \times (\hat{x}) B^T P e - 2(\gamma - \hat{\gamma}) \|B^T P e\| \\ = & -e^T Q e + 2e^T P(f(x) - f(\hat{x})) + 2e^T P B(g(x) \\ & - g(\hat{x}))\theta + 2e^T P d(t) - 2\gamma \|B^T P e\| \\ \leq & -e^T Q e + 2 \|e^T P(f(x) - f(\hat{x}))\| \\ & + 2 \|e^T P B\| \|g(x) - g(\hat{x})\| \|\theta\| \\ & + 2 \|e^T P d(t)\| - 2\gamma \|B^T P e\|. \end{aligned}$$

我们知道, 不管系统是处于平衡点、周期或混沌运动下, 系统的状态恒有界. 因此存在常数  $k_x, k_{\hat{x}}$ , 对于系统(1)与系统(2)的状态  $x(t), \hat{x}(t)$  有

$$\begin{aligned} \|x(t)\| &\leq k_x, \forall t \in [0, \infty), k_x \in R^+, \\ \|\hat{x}(t)\| &\leq k_{\hat{x}}, \forall t \in [0, \infty), k_{\hat{x}} \in R^+, \end{aligned}$$

这样取  $m = k_x + k_{\hat{x}}$ , 有

$$\begin{aligned} \|e(t)\| &= \|x(t) - \hat{x}(t)\| \leq m, \\ \forall t \in [0, \infty), m \in R^+, \end{aligned}$$

令  $\sigma = \|(BB^T)^{-1}\|^T B$ , 此时有

$$\begin{aligned} &\|e^T P(f(x) - f(\hat{x}))\| \\ = &\|e^T P B B^T (BB^T)^{-1} (f(x) - f(\hat{x}))\| \\ \leq &\|e^T P B\| \|B^T (BB^T)^{-1}\| \|f(x) \\ &- f(\hat{x})\| \leq \sigma m k_f \|e^T P B\|, \\ &\|g(x) - g(\hat{x})\| \|\theta\| \\ \leq &k_g \|e\| \|\theta\| \leq m k_g l_\theta, \\ &\|e^T P d(t)\| = \|e^T P B B^T (BB^T)^{-1} \\ &d(t)\| \leq \sigma l_d \|e^T P B\|. \end{aligned}$$

选取  $\gamma = \sigma m k_f + m k_g l_\theta + \sigma l_d$ , 可得

$$\dot{V} \leq -e^T Q e \leq -\lambda_{\min}(Q) \|e\|^2 = -\omega(t), \quad (7)$$

我们对(7)式进行积分,

$$\begin{aligned} V(0) &\geq V(t) + \int_0^t \omega(s) ds \\ &\geq \int_0^t \omega(s) ds, \end{aligned}$$

当  $t \rightarrow \infty$  时,  $V(0)$  正定且有界, 所以  $\lim_{t \rightarrow \infty} \int_0^t \omega(s) ds$  存在且有界. 此时, 根据 Barbalat 引理可得到

$$\lim_{t \rightarrow \infty} \omega(t) = \lambda_{\min}(Q) \lim_{t \rightarrow \infty} \|e(t)\|^2 = 0,$$

从而有  $\lim_{t \rightarrow \infty} \|e(t)\| = 0$ , 可见误差系统随着时间的演化渐近趋于零. 证毕.

**说明 2** 对于未知参数和外界干扰的界  $l_\theta, l_d$  (假设 1)、李普希茨常数  $k_f, k_g$ 、以及系统状态误差的界  $m$  和与矩阵  $B$  相关的  $\sigma$ , 它们只在证明推导过程中被使用, 因此在这些参数未知的情形下, 我们也可以根据定理 1 设计观测器来实现受扰混沌系统的同步.

**说明 3** 定理 1 虽然是针对系统参数未知时设计的观测器, 但此方法也适用于系统参数已知的情形, 此时选取  $g(x) = 0$  即可. 因此, 此方法既适用于文献[8—13]所讨论的参数已知的混沌系统, 也适用于文献[14—16]研究的带有未知参数的混沌系统等等, 故而本文提出的方法应用范围更广.

## 4. 仿真示例

### 4.1. Chua's 电路系统的同步

首先以 Chua's 系统为例, 选择合适的观测器和自适应控制律使其满足定理 1, 从而最终实现混沌系统的同步.

三维 Chua's 电路系统为

$$\begin{aligned} \dot{x}_1 &= -\alpha_1 x_1 + \alpha_2 (x_2 - f(x_1)), \\ \dot{x}_2 &= x_1 - x_2 + x_3, \\ \dot{x}_3 &= -\beta_1 x_2 - \beta_2 x_3, \end{aligned} \quad (8)$$

其中非线性函数  $f(x_1) = bx_1 + 0.5(a-b)(|x_1+1| - |x_1-1|)$ .

选取参数  $\alpha_1 = 10, \alpha_2 = 10, \beta_1 = 15, \beta_2 = 0.0385, a = -1.28, b = -0.69$ , 系统(8)是混沌的. 图 1 给出了 Chua's 混沌系统在不同相平面上的轨线图.

模拟仿真时, 假设参数  $\alpha_1$  未知, 并且考虑到系统受到外界因素的干扰, 方程可写为(1)式的形式

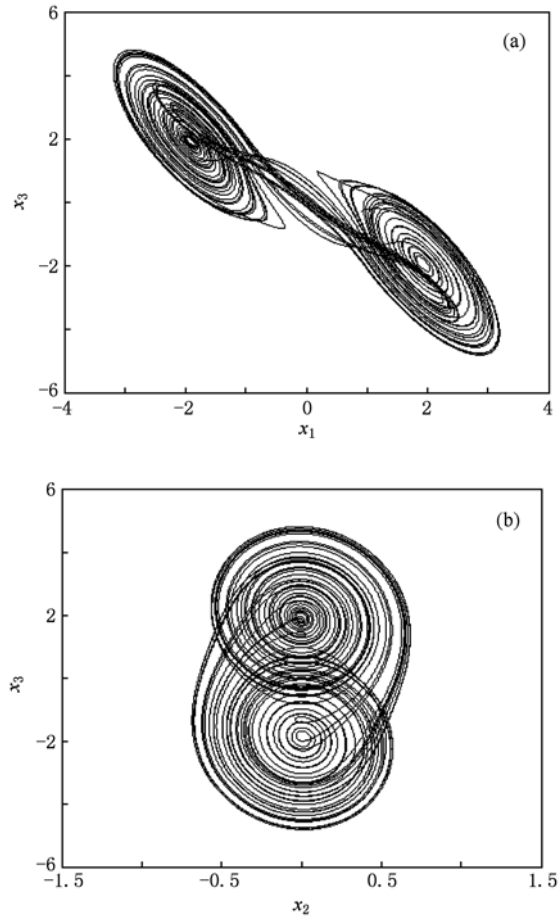


图 1 Chua's 混沌系统的相轨图 (a)  $x_1-x_3$  平面; (b)  $x_2-x_3$  平面

$$\begin{aligned} \begin{pmatrix} \dot{\hat{x}}_1 \\ \dot{\hat{x}}_2 \\ \dot{\hat{x}}_3 \end{pmatrix} &= \begin{pmatrix} 0 & 10 & 0 \\ 1 & -1 & 1 \\ 0 & -15 & -0.0385 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} x_1 \\ x_2 \\ x_3 \end{pmatrix} \\ &+ \begin{pmatrix} -10f(x_1) \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} 1 \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix} (-x_1)\theta + d(t), \\ y = x_1 &= (1 \ 0 \ 0)x, \end{aligned} \quad (9)$$

此时,  $A = \begin{pmatrix} 0 & 10 & 0 \\ 1 & -1 & 1 \\ 0 & -15 & -0.0385 \end{pmatrix}, C = \begin{pmatrix} 1 \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix}^T$ , 容易验证,  $(A, C)$  可测.

将(9)式看作驱动系统, 相应地观测器为

$$\begin{pmatrix} \dot{\hat{x}}_1 \\ \dot{\hat{x}}_2 \\ \dot{\hat{x}}_3 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0 & 10 & 0 \\ 1 & -1 & 1 \\ 0 & -15 & -0.0385 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \hat{x}_1 \\ \hat{x}_2 \\ \hat{x}_3 \end{pmatrix}$$

$$\begin{aligned}
 & + \begin{pmatrix} -10f(\hat{x}_1) \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} 1 \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix} (-\hat{x}_1)\hat{\theta} \\
 & + L(x_1 - \hat{x}_1) + \begin{pmatrix} 1 \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix} u. \tag{10}
 \end{aligned}$$

根据(4)式选取改进后的非线性输入

$$u = \hat{\gamma} \text{sgn}(x_1 - \hat{x}_1), \tag{11}$$

参数  $\hat{\gamma}$  的更新规则为

$$\dot{\hat{\gamma}} = \delta |x_1 - \hat{x}_1|, \delta > 0,$$

参数  $\hat{\theta}$  的更新规则为

$$\dot{\hat{\theta}} = -\hat{x}_1(x_1 - \hat{x}_1).$$

选择观测器增益阵  $L = (5.9615 \quad 2.6195 \quad -0.3231)^T$ , 可得矩阵  $A - LC$  的特征值分别为  $-3.4574$  和  $-1.7713 \pm 4.6946i$ , 且传递函数

$$\begin{aligned}
 H(s) &= C(sI - (A - LC))^{-1}B \\
 &= \frac{s^2 + 1.039s + 15.04}{s^3 + 7s^2 + 37.42s + 87.04}
 \end{aligned}$$

严格正实.

选取驱动系统(9)的初值为  $x(0) = (-1 \quad 1 \quad 0)^T$ , 响应系统(10)的初值为  $\hat{x}(0) = (-2 \quad -0.5 \quad 1)^T$ , 参数初值为  $\hat{\gamma}(0) = 1.0, \hat{\theta}(0) = 8.2$ , 另外, 参数  $\delta = 1.2$ , 外界扰动选取  $d(t) = (0.05\cos 8t \quad 0.023\sin 5t \quad 0.0047\sin 4t)^T$ , 图2给出了Chua's误差系统  $e_1, e_2, e_3$  的时间历程图. 从图2(a)可以看到, 反馈项和非线性输入未作用于响应系统时, 随着时间的演化误差系统不可能实现混沌同步. 此时根据定理1将非线性输入(11)和反馈项  $L(x_1 - \hat{x}_1)$  作用于响应系统, 从图2(b)可以看到, 随着时间的演化, 系统(9)与系统(10)很快地实现了混沌的同步, 验证了本文方法的有效性.

#### 4.2. 四维超混沌系统的同步

我们选取 Wang 等<sup>[17]</sup>提出的一个新的四维超混沌系统进行数值仿真, 系统方程为

$$\begin{aligned}
 \dot{x}_1 &= \alpha_1(x_2 - x_1) + x_2x_3, \\
 \dot{x}_2 &= 25x_1 - a_2x_1x_3 - x_2 - x_4, \\
 \dot{x}_3 &= -x_1x_2 - 8/3x_3, \\
 \dot{x}_4 &= a_3x_1 + 0.5x_2x_3 + x_4. \tag{12}
 \end{aligned}$$

当选取参数  $a_1 = 35, a_2 = 1.0, a_3 = 13$  时, 四维系统(12)是超混沌的. 图3给出了系统(12)在不同

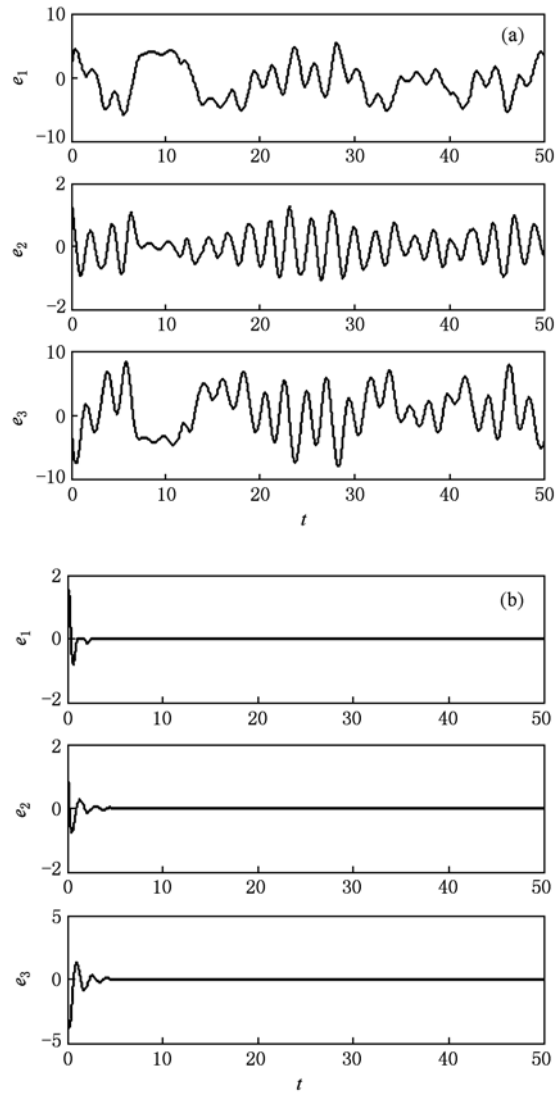


图2 Chua's 误差系统  $e_1, e_2, e_3$  的时间历程图 (a) 反馈项和非线性输入未作用的情形下; (b) 反馈项和非线性输入作用的情形下

相平面上的轨线图.

模拟仿真时, 我们设系统(12)的参数  $a_2$  未知, 且系统受到的外界干扰为  $d(t) = (0.0012\sin 3t \quad 0.0043\sin 7t \quad 0.0027\cos 6t \quad 0.009\cos 2t)^T$ , 这里取  $B = (0 \quad 1 \quad 0 \quad 0)^T, C = (0 \quad 1 \quad 1/2 \quad 1)$ . 选取驱动系统的初值为  $x(0) = (5 \quad 5 \quad 20 \quad 15)^T$ , 相应响应系统的初值为  $\hat{x}(0) = (4.8 \quad 5 \quad 18 \quad 14)^T$ , 参数初值为  $\hat{\gamma}(0) = 1.0, \hat{a}_2(0) = 1.1$ , (5)式中的参数  $\delta = 1.35$ , 并选取观测器增益阵为  $L = (36.1702 \quad 0.1022 \quad 1.6282 \quad -3.0130)^T$ . 图4给出了四维超混沌系统误差系统  $e_1, e_2, e_3, e_4$  的时间历程图. 从图4(a)可以看到, 当反馈项和非线性输

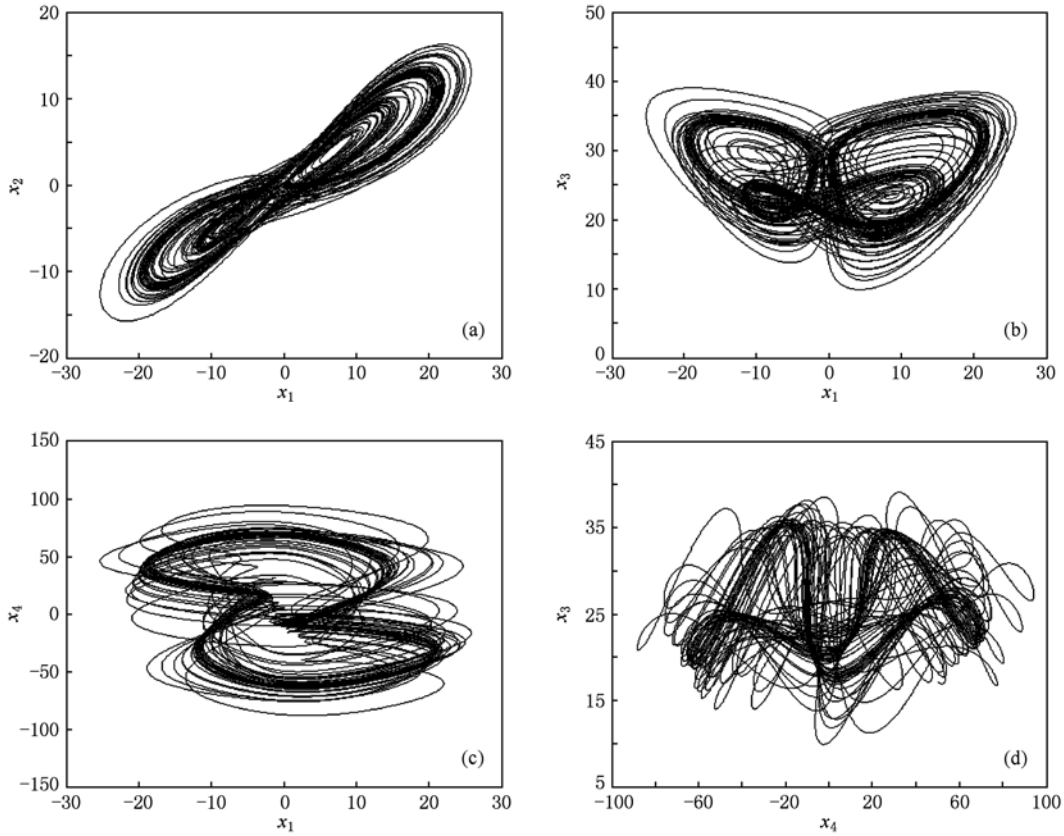


图3 四维超混沌系统的相轨图 (a)  $x_1-x_2$  平面; (b)  $x_1-x_3$  平面; (c)  $x_1-x_4$  平面; (d)  $x_4-x_3$  平面

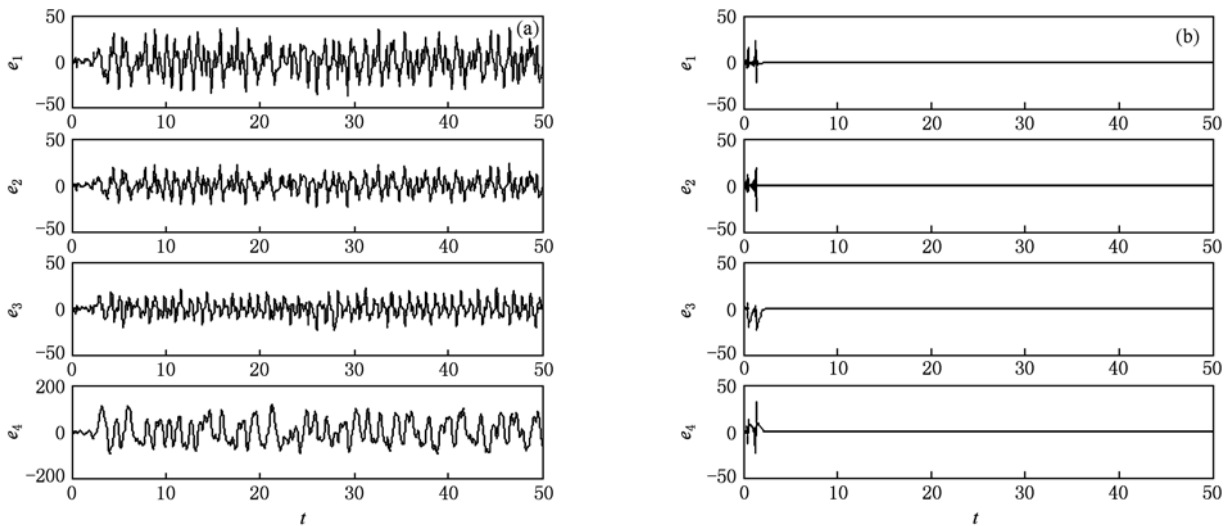


图4 四维超混沌误差系统  $e_1, e_2, e_3, e_4$  的时间历程图 (a) 反馈项和非线性输入未作用的情形下; (b) 反馈项和非线性输入作用的情形下

入未作用于响应系统时,随着时间的演化,误差系统不能实现混沌同步.图4(b)给出了非线性输入和反馈项作用于响应系统时误差系统的时间历程图,此时,随着时间的增加,状态误差  $e_1, e_2, e_3, e_4$  很快地趋于零.

### 5. 结 论

在系统受到外界干扰的情形下,利用观测器法并结合自适应法实现了一类带有未知参数的混沌

系统的同步. 借助于 Lyapunov 稳定性理论和 Barbalat 引理给出了实现受扰混沌系统同步所需的条件以及反馈增益阵的选取方法. 通过典型混沌系统的数值仿真, 进一步验证了方法的有效性与正确

性. 本文提出的方法约束条件较少, 适应范围较广, 它既可以实现受扰混沌系统的完全同步, 也可尝试将其推广用来实现混沌系统的反同步、投影同步和广义同步等.

- [1] Pecora L M, Carroll T L 1990 *Phys. Rev. Lett.* **64** 821  
 [2] Kocarev L, Parlitz U 1995 *Phys. Rev. Lett.* **74** 5208  
 [3] Huang D B 2005 *Phys. Rev. E* **71** 037203  
 [4] Wu Y, Zhou X B, Chen J, Hui B 2009 *Chaos Solitons Fract.* **42** 1812  
 [5] Zhang L P, Jiang H B, Bi Q S 2010 *Chin. Phys.* **19** 010507  
 [6] Liu D, Yan X M 2009 *Acta Phys. Sin.* **58** 3747 (in Chinese)  
 [刘 丁, 闫晓妹 2009 物理学报 **58** 3747]  
 [7] Feng J W, He L, Xu C, Francis A, Wu G 2010 *Commun. Nonlinear Sci. Numer. Simul.* **15** 2546  
 [8] Gao T G, Chen Z Q, Yuan Z Z, Gu Q L 2004 *Acta Phys. Sin.* **53** 1305 (in Chinese) [高铁杠、陈增强、袁著祉、顾巧论 2004 物理学报 **53** 1305]  
 [9] Liu F, Ren Y, Shan X M, Qiu Z L 2001 *Chin. Phys.* **10** 0606  
 [10] Hua C C, Guan X P 2004 *Chin. Phys.* **13** 1391  
 [11] Hua C C, Guan X P, Li X L, Shi P 2004 *Chaos Solitons Fract.* **22** 103  
 [12] Guan X P, He Y H, Fan Z P 2003 *Acta Phys. Sin.* **52** 276 (in Chinese) [关新平、何宴辉、范正平 2003 物理学报 **52** 276]  
 [13] Chen J, Zhang T P 2006 *Acta Phys. Sin.* **55** 3928 (in Chinese)  
 [陈 晶、张天平 2006 物理学报 **55** 3928]  
 [14] Bowong S, Kakmeni F. M. M, Fotsin H 2006 *Phys. Lett. A* **355** 193  
 [15] Zhu F L 2008 *Phys. Lett. A* **372** 223  
 [16] Zhu F L 2009 *Chaos Solitons Fract.* **40** 2384  
 [17] Wang J Z, Chen Z Q, Yuan Z Z 2006 *Chin. Phys.* **15** 1216

## Observer synchronization method for a class of perturbed chaotic systems with unknown parameters\*

Li Xiu-Chun<sup>†</sup> Gu Jian-Hua Wang Yun-Lan Zhao Tian-Hai

(Centre for High Performance Computing, Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710072, China)

(Received 2 April 2010; revised manuscript received 29 June 2010)

### Abstract

Combining the observer and adaptive method, chaos synchronization is realized for a class of the perturbed chaotic systems with unknown parameters. Lyapunov stability theory and Barbalat lemma are adopted to design observer for achieving chaos synchronization. This method has fewer constraints and can be applied to many chaotic systems. Numerical simulations of representative chaotic systems further verify the validity of the proposed method.

**Keywords:** chaotic system, external perturbation, synchronization, observer method

**PACS:** 05.45.Gg, 05.45.Pq

\* Project supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant No. 11002114) and the National High Technology Research and Development Program of China (Grant No. 2009AA01Z142).

<sup>†</sup> E-mail: lixiuchun@nwpu.edu.cn