第 59 卷 第 3 期 2010 年 3 月
1000-3290/2010/59(03)/1562-06
物 理 学 报
ACTA PHYSICA SINICA
Vol. 59, No. 3, March, 2010

基于 LMI 的参数未知时变时滞混沌系统模糊自适应 H_∞ 同步*

杨东升[1)2)†] 张化光[1)] 赵 琰[3)] 宋崇辉[1)] 王迎春[1)]

1)(东北大学信息科学与工程学院,沈阳 110004)

2)(东北大学教育部暨辽宁省流程工业综合自动化重点实验室,沈阳 110004)

3)(沈阳工程学院自动控制工程系,沈阳 110136)

(2009 年 6 月 26 日收到;2009 年 7 月 22 日收到修改稿)

考虑一类结构相同但驱动系统参数未知的两个时变时滞混沌系统同步问题,提出了基于 T-S 模糊模型的模糊自适应 H_∞ 同步方法. 基于 Lyapunov 稳定性理论和线性矩阵不等式技术,给出了驱动系统参数未知时变时滞混沌系统同步的充分条件. 仿真结果表明了所提方法的有效性.

关键词: 时变时滞混沌系统, 混沌同步, 模糊自适应, 线性矩阵不等式

PACC: 0545

1. 引 言

混沌同步的最初定义是在 1990 年由 Pecora 和 Carroll 提出的,并在电子学线路的实验中实现了混沌系统的同步[1]. 作为保密通信的关键技术,混沌同步理论研究已经取得了一定的进展,并由于混沌现象本身的复杂性而成为当今非线性系统研究的热点[2—7]. 众所周知,时变时滞混沌系统是无穷维的,与非时滞混沌系统或超混沌系统相比,它将表现出更加复杂和丰富的动力学行为. 基于时变时滞混沌系统同步技术的保密通信系统因而具有更强的抗破译能力,因此,探究时变时滞混沌系统的同步问题具有重要的理论意义和应用价值.

现有的混沌同步方法大都只适用于非时滞的混沌系统或超混沌系统,并且是在同步的混沌系统结构和参数都是精确已知的基础上实现的. 而在实际应用中,特别是当混沌同步应用于保密通信时,处在接收端的响应系统的结构和参数常常是已知或可测的,然而,处在远方发送端的驱动系统的参数却可能是未知或不可获得的,或者可能受各种干扰的影响后发生改变.

另一方面,众多的研究和应用表明,模糊控制对于复杂的不确定非线性系统来说是一种简单有效的控制方法. 应用最为广泛的T-S模糊模型是一种本质非线性模型,易于表达复杂系统的动态特性. 此外,基于T-S模糊模型的控制方法具有对参量摄动不敏感、抗扰动性强的优点,同时可以结合自适应控制等方法实时地调整模糊控制器的参量,成功地实现了不确定非时滞混沌系统或超混沌系统的控制与同步[8—12]. 近来,时滞混沌系统的同步问题引起了研究者们的广泛重视,并取得了一定的进展[13—20].

基于以上分析,本文在一类时变时滞混沌系统的精确T-S模糊模型的基础上,针对驱动系统参数未知的时变时滞混沌系统的同步问题,提出一种新的模糊自适应 H_∞ 同步方法. 通过选取适当的 Lyapunov-Krasovskii泛函,基于 Lyapunov 稳定性理论并利用线性矩阵不等式技术,给出了驱动系统参数未知时变时滞混沌系统 H_∞ 同步的充分条件.

2. 问题描述

考虑由如下时变时滞T-S模糊模型描述的混沌

* 国家自然科学基金(批准号: 60904046, 60904017, 60774093, 60974141, 60904101), 教育部长江学者和创新团队发展计划(批准号: IRT0421), 辽宁省教育厅科技项目(批准号: 2009A544)资助的课题.

† E-mail: yangdongsheng@mail.neu.edu.cn

系统作为响应系统，它的第 i 条规则表示为

R^i：IF $p_1(t)$ is F_{i1} and $\cdots$ and $p_q(t)$ is F_{iq}, THEN

$$\dot{x}(t)=A_i x(t)+B_i x(t-\tau(t))+b(t)+u(t),$$

其中，$x(t)\in R^n$ 为响应系统的状态向量，$p(t)=(p_1(t),p_2(t),\cdots,p_q(t))^{\mathrm{T}}$ 为可测的前件变量，F_{il} 为模糊集合，$i=1,2,\cdots,r$，$l=1,2,\cdots,q$，A_i 和 B_i 为适当维数的已知矩阵，$b(t)$ 表示响应系统中的周期振荡子或常向量，$u(t)$ 为待设计的同步控制器. $\tau(t)$ 为混沌系统中的时变时滞项，且满足 $0<\tau(t)\leqslant\tau_0$，$0<\dot{\tau}(t)\leqslant h<1$. 那么，采用单点模糊化，乘积推理机和加权平均解模糊化，可得到如下形式的 T - S 模糊时变时滞混沌响应系统：

$$\begin{aligned}\dot{x}(t)=&\sum_{i=1}^{r}\mu_i(p(t))(A_i x(t)+B_i x(t-\tau(t))\\&+b(t)+u(t)),\end{aligned}\tag{1}$$

其中

$$\mu_i(p(t))=\frac{\omega_i(p(t))}{\sum_{i=1}^{r}\omega_i(p(t))},$$

$$\mu_i(p(t))\geqslant 0,$$

$$\sum_{i=1}^{r}\mu_i(p(t))=1,$$

且

$$\omega_i(p(t))=\prod_{l=1}^{q}F_{il}(p_l(t)),$$

$$\sum_{i=1}^{r}\omega_i(p(t))>0,$$

$$\omega_i(p(t))\geqslant 0.$$

本文假设驱动系统和响应系统的结构是相同的，但驱动系统的参数是未知的. 驱动系统可采用如下形式模糊规则的T-S模糊模型进行描述，其第 i 条模糊规则表示为

R^i：IF $\hat{p}_1(t)$ is F_{i1} and $\cdots$ and $\hat{p}_q(t)$ is F_{iq}, THEN

$$\dot{\hat{x}}(t)=\hat{A}_i\hat{x}(t)+\hat{B}_i\hat{x}(t-\tau(t))+b(t),$$

其中，$\hat{x}(t)\in R^n$ 为驱动系统的状态向量，$\hat{p}(t)=(\hat{p}_1(t),\hat{p}_2(t),\cdots,\hat{p}_q(t))^{\mathrm{T}}$ 为可测的前件变量，$\hat{A}_i$ 和 $\hat{B}_i$ 为适当维数的未知矩阵，$i=1,2,\cdots,r$，其他变量的定义与响应系统相同. 那么，采用单点模糊化，乘积推理机和加权平均解模糊化，可得到如下形式的T-S模糊时变时滞混沌驱动系统：

$$\begin{aligned}\dot{\hat{x}}(t)=&\sum_{i=1}^{r}\mu_i(\hat{p}(t))(\hat{A}_i\hat{x}(t)\\&+\hat{B}_i\hat{x}(t-\tau(t)))+b(t).\end{aligned}\tag{2}$$

注释 1　当混沌同步应用在保密通信系统中时，由于驱动系统处在信号传输通道的发送端，而同步的控制器和响应系统处在信号传输通道的接收端，因此，在设计的控制器的过程中，响应系统的结构和参数通常都是已知的. 但是，由于种种条件的限制，处在远端的驱动系统的参数可能是未知的，所以，本文对驱动系统和响应系统参数的假设是合理的.

本文的主要目标是设计一个适当的控制器 $u(t)$，使得响应系统(1)和驱动系统(2)达到同步. 为了实现这个目标，定义响应系统和驱动系统的同步误差 $e(t)=x(t)-\hat{x}(t)$，由(1)式和(2)式可得如下同步误差闭环系统：

$$\begin{aligned}\dot{e}=&\dot{x}(t)-\dot{\hat{x}}(t)\\=&\sum_{i=1}^{r}\mu_i(p(t))(A_i e(t)+B_i e(t-\tau(t)))\\&+\Big(\sum_{i=1}^{r}\mu_i(p(t))-\sum_{i=1}^{r}\mu_i(\hat{p}(t))\Big)\\&\times(\hat{A}_i\hat{x}(t)+\hat{B}_i\hat{x}(t-\tau(t)))\\&+\sum_{i=1}^{r}\mu_i(p(t))((A_i-\hat{A}_i)\hat{x}(t)\\&+(B_i-\hat{B}_i)\hat{x}(t-\tau(t)))+u(t)\\=&\sum_{i=1}^{r}\mu_i(p(t))(A_i e(t)+B_i e(t-\tau(t)))\\&+\sum_{i=1}^{r}\mu_i(p(t))((A_i-\hat{A}_i)\hat{x}(t)\\&+(B_i-\hat{B}_i)\hat{x}(t-\tau(t)))+v(t)+u(t),\end{aligned}\tag{3}$$

其中

$$\begin{aligned}v(t)=&\Big(\sum_{i=1}^{r}\mu_i(\hat{p}(t))-\sum_{i=1}^{r}\mu_i(\hat{p}(t))\Big)\\&\times(\hat{A}_i\hat{x}(t)+\hat{B}_i\hat{x}(t-\tau(t))).\end{aligned}$$

这样，参数未知时变时滞混沌系统(1)和(2)的同步问题转化为同步误差系统零平衡点的镇定问题.

3. 主要结果

为了镇定同步误差系统(3)，进而使驱动系统(2)和响应系统(1)达到同步，利用并行分布补偿(PDC)技术，设计如下形式的模糊控制器：

R^i：IF $p_1(t)$ is F_{i1} and $\cdots$ and $p_q(t)$ is F_{iq}, THEN

$$u(t)=-K_i e(t)+(-A_i+C_i(t))\hat{x}(t)$$

$$+ (-B_i + D_i(t))\hat{x}(t-\tau(t))),$$

其中,$i=1,2,\cdots,r$, K_i 为待设计的控制器增益,$C_i(t)$ 和 $D_i(t)$ 为可调的控制器增益.那么,采用标准的模糊推理方法,可以得到模糊控制器的整体形式如下:

$$u(t) = \sum_{i=1}^{r}\mu_i(p(t))(-K_i e(t) + (-A_i + C_i(t)) \times \hat{x}(t) + (-B_i + D_i(t))\hat{x}(t-\tau(t))). \quad (4)$$

将控制器(4)代入到同步误差系统(3)中,可得

$$\begin{aligned}\dot{e}(t) &= \dot{x}(t) - \dot{\hat{x}}(t) \\ &= \sum_{i=1}^{r}\mu_i(p(t))((A_i - K_i)e(t) \\ &\quad + B_i e(t-\tau(t))) + \sum_{i=1}^{r}\mu_i(p(t))((C_i(t) \\ &\quad - \hat{A}_i)\hat{x}(t) + (D_i(t) - \hat{B}_i)\hat{x}(t-\tau(t))) \\ &\quad + v(t). \end{aligned} \quad (5)$$

针对闭环同步误差系统(5),定义如下 H_∞ 性能指标:

$$\int_0^{t_f} e^{\mathrm{T}}(t)e(t)\,\mathrm{d}t \leqslant e^{\mathrm{T}}(0)e(0) + \gamma^2\int_0^{t_f} v^{\mathrm{T}}(t)v(t)\,\mathrm{d}t, \quad (6)$$

其中,γ 为干扰抑制水平,t_f 为终止时间.

关于同步误差动态系统(5)的 H_∞ 镇定结果,可以表述为如下定理.

定理 1 考虑同步误差系统(5),对于给定的常数 γ,如果存在对称正定矩阵 P 和 Q,反馈增益矩阵 K_i,以及如下形式的参数自适应律:

$$\begin{aligned}\dot{c}_{1jk}(t) &= -\mu_1(p(t))\alpha_1 m_j\hat{x}_k(t), \\ &\vdots \\ \dot{c}_{rjk}(t) &= -\mu_r(p(t))\alpha_r m_j\hat{x}_k(t);\end{aligned} \quad (7)$$

$$\begin{aligned}\dot{d}_{1jk}(t) &= -\mu_1(p(t))\beta_1 m_j\hat{x}_k(t-\tau(t)), \\ &\vdots \\ \dot{d}_{rjk}(t) &= -\mu_r(p(t))\beta_r m_j\hat{x}_k(t-\tau(t)).\end{aligned} \quad (8)$$

其中,α_i 和 β_i 为正的常数,m_j 为 $2e^{\mathrm{T}}(t)P$ 的第 j 个分量,$i=1,2,\cdots,r,j,k=1,2,\cdots,n$,使得下面的不等式成立:

$$\begin{pmatrix} \Pi & PB_i & P & I \\ B_i^T P & -(1-h)Q & 0 & 0 \\ P & 0 & -\gamma^2 I & 0 \\ I & 0 & 0 & -I \end{pmatrix} < 0, \quad (9)$$

其中,$\Pi = (A_i - K_i)^{\mathrm{T}}P + P(A_i - K_i) + Q$,那么,受控的同步误差系统(5)满足 H_∞ 性能指标(6).

证明 选取如下形式的 Lyapunov - Krasovskii 泛函:

$$V(t) = V_1(t) + V_2(t),$$

其中

$$V_1(t) = e^{\mathrm{T}}(t)Pe(t) + \int_{t-\tau(t)}^{t} e^{\mathrm{T}}(s)Qe(s)\,\mathrm{d}s,$$

$$V_2(t) = \sum_{i=1}^{r}\sum_{j=1}^{n}\sum_{k=1}^{n}\Big[\frac{1}{2\alpha_i}(c_{ijk}(t) - \hat{a}_{ijk})^2 + \frac{1}{2\beta_i}(d_{ijk}(t) - \hat{b}_{ijk})^2\Big],$$

其中,$\hat{a}_{ijk}$ 和 $\hat{b}_{ijk}$ 分别为驱动系统的未知参数矩阵 $\hat{A}_i$ 和 $\hat{B}_i$ 中的元素.

沿同步误差动态系统(5)的轨迹对 $V_1(t)$ 和 $V_2(t)$ 求导,并考虑自适应律(7)和(8),可得

$$\begin{aligned}\dot{V}_1(t) &= \dot{e}^{\mathrm{T}}(t)Pe(t) + e^{\mathrm{T}}(t)P\dot{e}(t) + e^{\mathrm{T}}(t)Qe(t) \\ &\quad - e^{\mathrm{T}}(t-\tau(t))Qe(t-\tau(t))(1-\dot{\tau}(t)) \\ &\leqslant \sum_{i=1}^{r}\mu_i(p(t))\{e^{\mathrm{T}}(t)[(A_i - K_i)^{\mathrm{T}}P \\ &\quad + P(A_i - K_i) + Q]e(t) + e^{\mathrm{T}}(t-\tau(t))B_i^{\mathrm{T}}Pe(t) \\ &\quad + e^{\mathrm{T}}(t)PB_i e(t-\tau(t))\} - (1-h)e^{\mathrm{T}}(t-\tau(t)) \\ &\quad \times Qe(t-\tau(t)) + v^{\mathrm{T}}(t)Pe(t) + e^{\mathrm{T}}(t)Pv(t) \\ &\quad + \sum_{i=1}^{r}\mu_i(p(t))\{2e^{\mathrm{T}}(t)P(C_i(t) - \hat{A}_i)\hat{x}(t) \\ &\quad + 2e^{\mathrm{T}}(t)P(D_i(t) - \hat{B}_i)\hat{x}(t-\tau(t))\}, \end{aligned} \quad (10)$$

$$\begin{aligned}\dot{V}_2(t) &= \sum_{i=1}^{r}\sum_{j=1}^{n}\sum_{k=1}^{n}\Big[\frac{1}{\alpha_i}(c_{ijk}(t) - \hat{a}_{ijk})\dot{c}_{ijk}(t) \\ &\quad + \frac{1}{\beta_i}(d_{ijk}(t) - \hat{b}_{ijk})\dot{d}_{ijk}(t)\Big] \\ &= -\sum_{i=1}^{r}\sum_{j=1}^{n}\sum_{k=1}^{n}\mu_i(p(t))[(c_{ijk}(t) \\ &\quad - \hat{a}_{ijk})m_j\hat{x}_k(t) + (d_{ijk}(t) - \hat{b}_{ijk})m_j\hat{x}_k(t) \\ &= -2e^{\mathrm{T}}(t)P\sum_{i=1}^{r}\mu_i(p(t))[(C_i(t) - \hat{A}_i) \\ &\quad \times \hat{x}(t) + (D_i(t) - \hat{B}_i)\hat{x}(t-\tau(t))], \end{aligned} \quad (11)$$

综合(10)和(11)式,可得

$$\begin{aligned}\dot{V}(t) &= \dot{V}_1(t) + \dot{V}_2(t) \\ &\leqslant \sum_{i=1}^{r}\mu_i(p(t))\{e^{\mathrm{T}}(t)[(A_i - K_i)^{\mathrm{T}}P \\ &\quad + P(A_i - K_i) + Q]e(t) + e^{\mathrm{T}}(t-\tau(t))\end{aligned}$$

$$\times B_i^{\mathrm{T}}Pe(t)+e^{\mathrm{T}}(t)PB_ie(t-\tau(t))\}$$
$$-(1-h)e^{\mathrm{T}}(t-\tau(t))Qe(t-\tau(t))$$
$$+v^{\mathrm{T}}(t)Pe(t)+e^{\mathrm{T}}(t)Pv(t). \qquad (12)$$

基于(6)式，定义

$$J=\int_0^{t_f}[e^{\mathrm{T}}(t)e(t)-\gamma^2v^{\mathrm{T}}(t)v(t)]\mathrm{d}t,$$

进而可得

$$J=\int_0^{t_f}[e^{\mathrm{T}}(t)e(t)-\gamma^2v^{\mathrm{T}}(t)v(t)+\dot{V}(t)]\mathrm{d}t$$
$$-\int_0^{t_f}\dot{V}(t)\mathrm{d}t$$
$$=\int_0^{t_f}[e^{\mathrm{T}}(t)e(t)-\gamma^2v^{\mathrm{T}}(t)v(t)+\dot{V}(t)]\mathrm{d}t$$
$$-V-(t_f)+V(0)$$
$$\leqslant\int_0^{t_f}\sum_{i=1}^{r}\mu_i(p(t))\begin{pmatrix}e(t)\\ e(t-\tau(t))\\ v(t)\end{pmatrix}^{\mathrm{T}}$$
$$\times\Phi\begin{pmatrix}e(t)\\ e(t-\tau(t))\\ v(t)\end{pmatrix}\mathrm{d}t+V(0),$$

其中

$$\Phi=\begin{pmatrix}\Pi+I & PB_i & P\\ B_i^{\mathrm{T}}P & -(1-h)Q & 0\\ P & 0 & -\gamma^2I\end{pmatrix},$$
$$\Pi=(A_i-K_i)^{\mathrm{T}}P+P(A_i-K_i)+Q.$$

从以上分析可以看出，如果下面的不等式成立：

$$\begin{pmatrix}\Pi+I & PB_i & P\\ B_i^{\mathrm{T}}P & -(1-h)Q & 0\\ P & 0 & -\gamma^2I\end{pmatrix}<0, \qquad (13)$$

其中，$\Pi=(A_i-K_i)^{\mathrm{T}}P+P(A_i-K_i)+Q$，那么有

$$J=\int_0^{t_f}[e^{\mathrm{T}}(t)e(t)-\gamma^2v^{\mathrm{T}}(t)v(t)]\mathrm{d}t<V(0),$$

即 H_∞ 性能指标(6)得到满足. 根据 Schur 补引理，(13)式能够等价的转化为(9)式，证明完毕.

注释 2 在(9)式中，令 $PK_i=M_i$，则(9)式可以转化为如下线性矩阵不等式问题：

$$\begin{pmatrix}\Theta & PB_i & P & I\\ B_i^{\mathrm{T}}P & -(1-h)Q & 0 & 0\\ P & 0 & -\gamma^2I & 0\\ I & 0 & 0 & -I\end{pmatrix}<0, \qquad (14)$$

其中，$\Theta=A_i^{\mathrm{T}}P+PA_i-M_i-M_i^{\mathrm{T}}+Q$.

4. 数值仿真

为了验证本文提出的驱动系统参数未知时变时滞混沌系统模糊自适应 H_∞ 同步方法的有效性，下面进行仿真研究. 考虑如下T-S模糊模型描述的时变时滞混沌系统作为驱动系统[13]：

R^1：IF $\hat{x}_1(t)$ is F_{11}, THEN

$$\dot{\hat{x}}(t)=\hat{A}_1\hat{x}(t)+\hat{B}_1\hat{x}(t-\tau(t))+b(t),$$

R^2：IF $\hat{x}_1(t)$ is F_{21}, THEN

$$\dot{\hat{x}}(t)=\hat{A}_2\hat{x}(t)+\hat{B}_2\hat{x}(t-\tau(t))+b(t),$$

其中，$\hat{x}(t)=(\hat{x}_1(t),\hat{x}_2(t))^{\mathrm{T}}$，“未知”参数 $\hat{A}_1$ 和 $\hat{A}_2$ 的真实值为

$$\hat{A}_1=\begin{pmatrix}0 & 1\\ -47.6 & -0.18\end{pmatrix},$$
$$\hat{A}_2=\begin{pmatrix}0 & 1\\ 1.2 & -0.18\end{pmatrix}.$$

为简化问题，不失一般性，这里假设 $\hat{B}_1$ 和 $\hat{B}_2$ 是已知的，$\hat{B}_1$ 和 $\hat{B}_2$ 和 $b(t)$ 的值分别为

$$\hat{B}_1=\hat{B}_2=\begin{pmatrix}0 & 0\\ 0.01 & 0.01\end{pmatrix},$$
$$b(t)=\begin{pmatrix}0\\ 25\cos(1.29t)\end{pmatrix},$$

时变时滞项 $\tau(t)$ 取为 $\tau(t)=0.125\sin(2t)$，模糊集合的隶属度函数为

$$F_{11}(\hat{x}_1(t))=\frac{\hat{x}_1^2(t)}{100},F_{21}(\hat{x}_1(t))=1-\frac{\hat{x}_1^2(t)}{100}.$$

考虑如下T-S模糊模型描述的时变时滞混沌系统作为响应系统：

R^1：IF $x_1(t)$ is F_{11}, THEN

$$\dot{x}(t)=A_1x(t)+B_1x(t-\tau(t))+b(t)+u(t),$$

R^2：IF $x_1(t)$ is F_{21}, THEN

$$\dot{x}(t)=A_2x(t)+B_2x(t-\tau(t))+b(t)+u(t),$$

其中，$x(t)=(x_1(t),x_2(t))^{\mathrm{T}}$，

$$A_1=\begin{pmatrix}0 & 1\\ -39.6 & -0.1\end{pmatrix},$$
$$A_2=\begin{pmatrix}0 & 1\\ 0.4 & -0.1\end{pmatrix},$$
$$B_1=B_2=\begin{pmatrix}0 & 0\\ 0.01 & 0.01\end{pmatrix},$$

$b(t)$和 $\tau(t)$的取值和驱动系统相同，模糊集合的隶

属度函数为

$$F_{11}(x_1(t)) = \frac{x_1^2(t)}{100}, F_{21}(x_1(t)) = 1 - \frac{x_1^2(t)}{100}.$$

下面,基于T-S模糊模型描述的时变时滞混沌系统,根据本文提出的同步方法,设计模糊自适应控制器来实现上述混沌系统的 H_∞ 同步. 驱动系统和响应系统的初始条件选为 $\hat{x}(0) = (1, -1)^{\mathrm{T}}$, $x(0) = (2,3)^{\mathrm{T}}$,干扰抑制水平选为 $\gamma = 0.5$. 自适应律中的参数分别选为 $\alpha_1 = 50, \alpha_2 = 10, \beta_1 = 2, \beta_2 = 1$, $C_1(t)$ 和 $C_2(t)$ 的初始值选为

$$C_1(0) = \begin{pmatrix} 0 & 0 \\ c_1^{21}(0) & c_1^{22}(0) \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0 & 0 \\ -0.4 & -2 \end{pmatrix},$$

$$C_2(0) = \begin{pmatrix} 0 & 0 \\ c_2^{21}(0) & c_2^{22}(0) \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0 & 0 \\ -2 & -8 \end{pmatrix}.$$

根据定理 1 和注释 2,利用仿真软件 Matlab7.0 中的 LMI 工具箱,求得正定对称矩阵 P 和 Q 以及控制增益矩阵 K_1 和 K_2 的值为

$$P = \begin{pmatrix} 0.2299 & 0.0000 \\ 0.0000 & 0.2298 \end{pmatrix},$$

$$Q = \begin{pmatrix} 1.5325 & 0.0000 \\ 0.0000 & 1.5325 \end{pmatrix},$$

$$K_1 = \begin{pmatrix} 8.0084 & -19.2968 \\ -19.2968 & 7.9097 \end{pmatrix},$$

$$K_2 = \begin{pmatrix} 8.0084 & 0.7000 \\ 0.7001 & 7.9097 \end{pmatrix}.$$

驱动系统和受控响应系统的相轨迹分别如图 1 和图 2 所示,同步误差曲线和参数变化曲线分别如图 3 和图 4 所示. 从仿真结果中可以看出,很好地实现了参数未知时变时滞混沌系统的 H_∞ 同步.

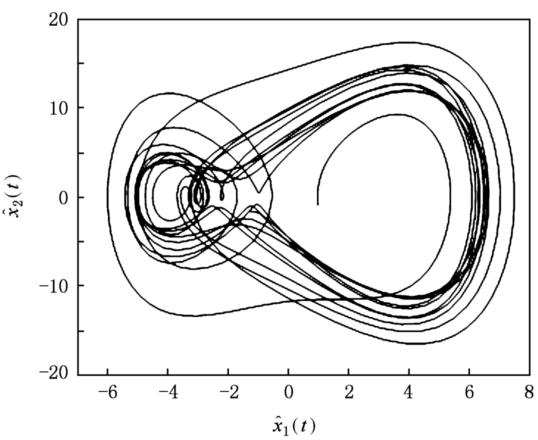

图 1 驱动系统的相轨迹

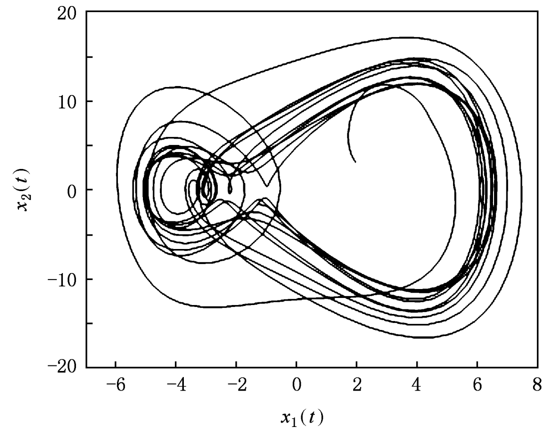

图 2 受控响应系统的相轨迹

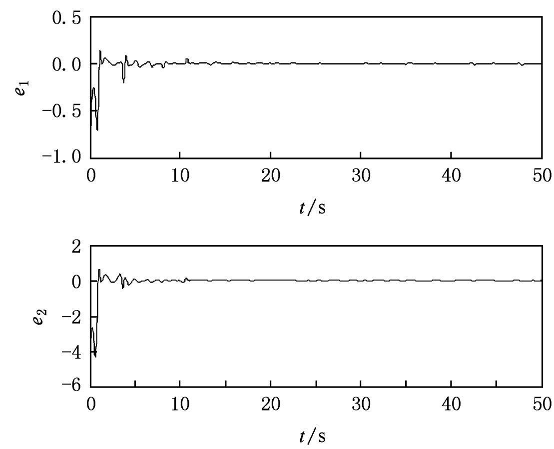

图 3 同步误差曲线:$e_1(t)$ 和 $e_2(t)$

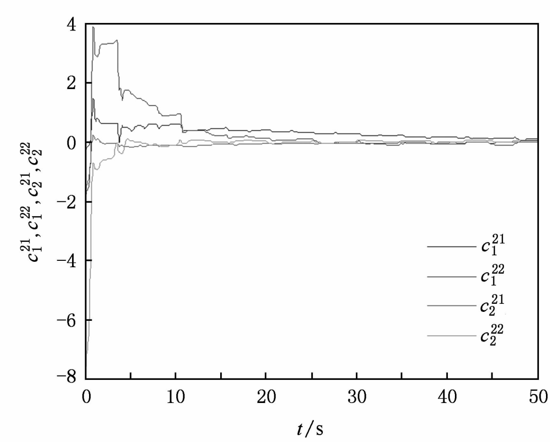

图 4 参数 $c_1^{21}, c_1^{22}, c_2^{21}, c_2^{22}$ 的变化曲线

5. 结 论

本文针对一类系统参数未知的时变时滞混沌系统的同步问题,实现了时变时滞混沌系统的 H_∞

同步，给出了同步的充分条件，解决了当驱动系统参数未知的情况下如何实现两个时滞混沌系统之间的主从同步问题，进而扩展了时滞混沌同步技术在保密通信等领域中的应用范围.

[1] Pecora L M, Carroll T L 1990 *Phys. Rev. Lett.* **64** 821

[2] Yan S L 2005 *Acta Phys. Sin.* **54** 1098 (in Chinese)[颜森林 2005 物理学报 **54** 1098]

[3] Hu M F, Xu Z Y 2007 *Chin. Phys.* **16** 3231

[4] Li N, Li J F 2008 *Acta Phys. Sin.* **57** 6093(in Chinese)[李农、李建芬 2008 物理学报 **57** 6093]

[5] Zhao Y, Zhang H G, Zheng C D 2008 *Chin. Phys.* B **17** 529

[6] Wang X Y, Wang M J 2007 *Acta Phys. Sin.* **56** 5136 (in Chinese)[王兴元、王明军 2007 物理学报 **56** 5136]

[7] Wang X Y, He Y J 2008 *Acta Phys. Sin.* **57** 1485 (in Chinese)[王兴元、贺毅杰 2007 物理学报 **57** 1485]

[8] Yang D S, Zhang H G, Li A P, Meng Z Y 2007 *Acta Phys. Sin.* **56** 3121 (in Chinese)[杨东升、张化光、李爱平、孟子怡 2007 物理学报 **56** 3121]

[9] Liu Y F, Yang X G, Miao D, Yuan R P 2007 *Acta Phys. Sin.* **56** 6250 (in Chinese)[刘云峰、杨小冈、缪 栋、袁润平 2007 物理学报 **56** 6250]

[10] Zhang H G, Zhao Y, Yu W, Yang D S 2008 *Chin. Phys.* B **17** 4056

[11] Meng J, Wang X Y 2009 *Acta Phys. Sin.* **58** 819 (in Chinese)[孟 娟、王兴元 2009 物理学报 **58** 819]

[12] Wang X Y, Meng J 2009 *Acta Phys. Sin.* **58** 3780 (in Chinese)[王兴元、孟 娟 2009 物理学报 **58** 3780]

[13] Kim J H, Shin H, Kim E, Park M 2005 *Int. J. Bifur. & Chaos* **15** 2593

[14] Zhou J, Chen T P, Xiang L 2006 *Chaos, Solit. & Fract.* **27** 905

[15] Qi W, Wang Y H 2009 *Chin. Phys.* B **18** 1404

[16] Wu R C 2009 *Acta Phys. Sin.* **58** 139 (in Chinese)[吴然超 2009 物理学报 **58** 139]

[17] Li T, Fei S M, Zhang K J 2008 *Physica* A **387** 982

[18] Li D, Zheng Z G 2008 *Chin. Phys.* B **17** 4009

[19] Ma T D, Zhang H G 2008 *Chin. Phys.* B **17** 4407

[20] Wang M J, Wang X Y 2009 *Acta Phys. Sin.* **58** 11467 (in Chinese)[王明军、王兴元 2009 物理学报 **58** 1467]

Fuzzy adaptive H_∞ synchronization of time-varying delayed chaotic systems with unknown parameters based on LMI technique*

Yang Dong-Sheng[1)2)†] Zhang Hua-Guang[1)] Zhao Yan[3)] Song Chong-Hui[1)] Wang Ying-Chun[1)]

1)(*School of Information Science and Engineering, Northeastern University, Shenyang* 110004, *China*)

2)(*Key Laboratory of Process Industry Automation of Ministry of Education, Northeastern University, Shenyang* 110004, *China*)

3)(*Department of Automatic Control Engineering, Shenyang Institute of Engineering, Shenyang* 110136, *China*)

(Received 26 June 2009; revised manuscript received 22 July 2009)

Abstract

The synchronization problem of two time-varying delayed chaotic systems with unknown parameters is studied. A novel fuzzy adaptive H_∞ control method is proposed to realize the synchronization of two time-varying delayed chaotic systems based on Lyapunov functional theory and linear matrix inequality techniques. The sufficient criterion for the stability of the synchronization error system is presented. Finally, an illustrative example is provided to demonstrate the effectiveness of the proposed method.

Keywords: time-varying delayed chaotic system, chaos synchronization, fuzzy adaptive control, linear matrix inequality (LMI)

PACC: 0545

* Project supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant Nos. 60904046, 60904017, 60774093, 60974141, 60904101), the Program for Changjiang Scholars and Innovative Research Team in University (Grant No. IRT0421), the Research Foundation of Education Bureau of Liaoning Province, China (Grant No. 2009A544).

† E-mail: yangdongsheng@mail.neu.edu.cn