

# 含不确定性混沌系统的模糊自适应同步\*

岳 东<sup>1)</sup> Jun Yoneyama<sup>2)</sup>

<sup>1)</sup> 南京师范大学信息与控制工程技术研究中心, 南京 210042)

<sup>2)</sup> Department of Electronics and Electrical Engineering, Aoyama Gakuin University, Tokyo, Japan)

(2002 年 5 月 4 日收到, 2002 年 6 月 18 日收到修改稿)

研究了含不确定性混沌系统的同步问题. 基于 Takagi-Sugeno(T-S)模糊动态模型, 给出了一个新的自适应模糊同步控制设计方法. 该方法同时适用于相同结构混沌系统的同步以及异构混沌系统的同步. 为说明问题, 给出了 Lorenz 混沌系统和 Rossler 混沌系统的同步控制设计和仿真结果.

关键词: 混沌系统, 模糊控制, 同步

PACC: 0545, 0547

## 1. 引 言

近年来混沌控制及应用问题受到国内外学者的关注<sup>[1-4]</sup>. 作为混沌保密通信的关键技术, 同步问题的研究日益受到人们的重视, 提出了若干有效的设计方法, 如极点配置方法<sup>[3]</sup>、脉冲控制方法<sup>[4]</sup>、神经网络方法<sup>[2]</sup>等.

我们知道, 模糊控制器具有设计简单, 适用于非线性系统和鲁棒性强等特点, 在工程实践中获得广泛应用. 在假设所考虑系统不含不确定性因素情况下, 基于 Takagi-Sugeno(T-S)模型<sup>[5-7]</sup>, 文献[1]研究了混沌系统同步的模糊控制设计问题. 然而, 实际系统中, 参数摄动与外扰动等不确定因素是不可避免的<sup>[2]</sup>, 此时, 文献[1]中的方法的应用将受到一定限制.

本文考虑当系统中含有参数摄动与外扰动情况下的同步控制问题, 基于 T-S 模型提出一个新的含自适应参数调整的模糊控制设计方法. 本文方法同时适用于相同结构混沌系统的同步以及异构混沌系统的同步. 为说明本文方法的有效性, 我们考虑含扰动情况下 Lorenz 混沌系统和 Rossler 混沌系统的异构同步控制问题. 仿真结果表明, 本文的方法是有效的.

## 2. 准备工作

考虑一混沌系统, 其 T-S 模糊动态模型为  $R_i$ . 如果  $z_1(t)$  是  $M_{i1}$  and ... and  $z_n(t)$  是  $M_{in}$ , 则

$$\dot{x}(t) = (A_i + \Delta A_i)x(t) + d_i(t) + Bu(t) \quad (1)$$

$i = 1, 2, \dots, l,$

这里  $z_i(t)$  ( $i = 1, 2, \dots, l$ ) 是前件变量,  $x(t) \in R^n$  是状态变量,  $u(t) \in R^m$  是控制输入,  $M_{ij}$  ( $j = 1, 2, \dots, n$ ) 是模糊集合,  $l$  表示规则数目,  $A_i$  和  $B$  是第  $i$  个子系统相应维数的矩阵,  $\Delta A_i$  表示参数摄动,  $d_i(t)$  表示外扰动, 它们满足如下匹配条件:

$$\Delta A_i = BF_i, d_i(t) = Bp_i(t), \quad (2)$$

其中  $F_i$  是未知矩阵,  $p_i(t)$  为未知有界函数, 满足

$$\|F_i\| \leq \eta_i, \|p_i(t)\| \leq \gamma_i, \quad (3)$$

这里  $\eta_i$  和  $\gamma_i$  是未知常数.

假设 1 存在矩阵  $A_0$  使得  $A_i - A_0 = BG_i$  ( $i = 1, 2, \dots, l$ ), 这里  $G_i$  是已知矩阵.

若采用单点模糊化, 加权平均反模糊化方法, (1)式可以表示成如下全局系统方程

$$\dot{x}(t) = \sum_{i=1}^l \lambda_i(x(t))(A_i + \Delta A_i)x(t) + \sum_{i=1}^l \lambda_i(x(t))d_i(t) + Bu(t), \quad (4)$$

\* 国家自然科学基金(批准号 69874042), 教育部高等学校骨干教师资助计划项目和教育部留学回国人员基金资助的课题.

这里

$$z(t) = [z_1(t) \ z_2(t) \ \dots \ z_n(t)]^T,$$

$$\lambda_i(z(t)) = \frac{\omega_i(z(t))}{\sum_{i=1}^n \omega_i(z(t))},$$

$$\omega_i(z(t)) = \prod_{j=1}^n M_{ij}(z_j(t)),$$

$M_{ij}(z_j(t))$  是模糊集合  $M_{ij}$  的隶属度函数.

参考模型也是一混沌系统, 其 T-S 模糊动态模型为

$R_i$ : 如果  $z_{R1}(t)$  是  $N_{i1}$  and ... and  $z_{Rn}(t)$  是  $N_{in}$ , 则

$$\dot{x}_R(t) = (D_i + \Delta D_i)x_R(t) + d_{Ri}(t) \quad (5)$$

$$i = 1, 2, \dots, l,$$

这里  $z_{Rj}(t) \ (j = 1, 2, \dots, n)$  是前件变量,  $x_R(t) \in R^n$  是状态变量,  $N_{ij} \ (j = 1, 2, \dots, n)$  是模糊集合,  $l$  表示规则数目,  $D_i$  是具有相应维数的已知参数矩阵,  $\Delta D_i$  表示参数摄动,  $d_{Ri}$  表示外扰动, 它们满足

$$\Delta D_i = BH_i, \quad d_{Ri}(t) = Bp_{Ri}(t), \quad (6)$$

其中  $\|H_i\| \leq \xi_i$ ,  $\|p_{Ri}(t)\| \leq \gamma_{Ri}$ ,  $\xi_i$  和  $\gamma_{Ri}$  表示未知常数.

假设 2 存在矩阵  $D_0$  使得  $D_i - D_0 = BR_i \ (i = 1, 2, \dots, l)$ , 这里  $R_i$  是已知矩阵.

采用类似上面的方法可得到参考模型(5)的全局系统方程为

$$\dot{x}_R(t) = \sum_{i=1}^l v_i(z_R(t))(D_i + \Delta D_i)x_R(t) + \sum_{i=1}^l v_i(z_R(t))d_{Ri}(t), \quad (7)$$

其中

$$z_R(t) = [z_{R1}(t) \ z_{R2}(t) \ \dots \ z_{Rn}(t)]^T,$$

$$v_i(z_R(t)) = \frac{\omega_{Ri}(z_R(t))}{\sum_{i=1}^n \omega_{Ri}(z_R(t))},$$

$$\omega_{Ri}(z_R(t)) = \prod_{j=1}^n N_{ij}(z_{Rj}(t)),$$

$N_{ij}(z_{Rj}(t))$  是模糊集合  $N_{ij}$  的隶属度函数.

定义 1 如果在控制  $u(t)$  作用下, 混沌系统(1)和(5)满足

$$\lim_{t \rightarrow \infty} (x(t) - x_R(t)) = 0, \quad (8)$$

则称混沌系统(1)和(5)同步, 控制  $u(t)$  称为同步控制.

引理 1<sup>[8]</sup> 若  $f(t)$  是一致连续函数, 且满足

$$\int_0^{+\infty} |f(t)| dt < \infty, \text{ 则有 } \lim_{t \rightarrow \infty} f(t) = 0.$$

### 3. 模糊自适应同步控制设计

定义误差变量  $e(t) = x(t) - x_R(t)$ , 结合系统(4)和(7)得

$$\begin{aligned} \dot{e}(t) &= \sum_{i=1}^l \lambda_i(z(t))(A_i + \Delta A_i)x(t) \\ &\quad - \sum_{i=1}^l v_i(z_R(t))(D_i + \Delta D_i)x_R(t) \\ &\quad + \sum_{i=1}^l \lambda_i(z(t))d_i(t) \\ &\quad - \sum_{i=1}^l v_i(z_R(t))d_{Ri}(t) + Bu(t) \\ &= \sum_{i=1}^l \lambda_i(z(t))A_i x(t) \\ &\quad - \sum_{i=1}^l v_i(z_R(t))D_i x_R(t) \\ &\quad + B \sum_{i=1}^l \lambda_i(z(t))F_i x(t) \\ &\quad - B \sum_{i=1}^l v_i(z_R(t))H_i x_R(t) \\ &\quad + B \sum_{i=1}^l \lambda_i(z(t))p_i(t) \\ &\quad - B \sum_{i=1}^l v_i(z_R(t))p_{Ri}(t) + Bu(t). \quad (9) \end{aligned}$$

由假设 1 和假设 2 (9)式可以写成

$$\begin{aligned} \dot{e}(t) &= A_0 x(t) + \sum_{i=1}^l \lambda_i(z(t))(A_i - A_0)x(t) \\ &\quad - D_0 x_R(t) - \sum_{i=1}^l v_i(z_R(t))(D_i - D_0)x_R(t) \\ &\quad + B \sum_{i=1}^l \lambda_i(z(t))F_i x(t) \\ &\quad - B \sum_{i=1}^l v_i(z_R(t))H_i x_R(t) \\ &\quad + B \sum_{i=1}^l \lambda_i(z(t))p_i(t) \\ &\quad - B \sum_{i=1}^l v_i(z_R(t))p_{Ri}(t) + Bu(t) \\ &= A_0 x(t) + B \sum_{i=1}^l \lambda_i(z(t))G_i x(t) \\ &\quad - D_0 x_R(t) - B \sum_{i=1}^l v_i(z_R(t))R_i x_R(t) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 &+ B \sum_{i=1}^l \lambda_i(\mathbf{x}(t))F_i\mathbf{x}(t) \\
 &- B \sum_{i=1}^l v_i(z_R(t))H_i x_R(t) \\
 &+ B \sum_{i=1}^l \lambda_i(\mathbf{x}(t))p_i(t) \\
 &- B \sum_{i=1}^l v_i(z_R(t))p_{Ri}(t) + B\mathbf{u}(t). \quad (10)
 \end{aligned}$$

构造控制器  $\mathbf{u}(t)$  为

$$\mathbf{u}(t) = u_1(t) + u_2(t), \quad (11)$$

其中

$$\begin{aligned}
 u_1(t) &= K_1 \mathbf{x}(t) - K_2 x_R(t) - \sum_{i=1}^l \lambda_i(\mathbf{x}(t))G_i \mathbf{x}(t) \\
 &+ \sum_{i=1}^l v_i(z_R(t))R_i x_R(t), \quad (12)
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 u_2(t) &= -[\hat{\delta}(t) \|\mathbf{x}(t)\| + \hat{\rho}(t) \|x_R(t)\| \\
 &+ \hat{d}(t)] \text{sgn}(B^T P \mathbf{e}(t)), \quad (13)
 \end{aligned}$$

这里  $P \in R^{n \times n}$  是一个待求的正定矩阵,  $K_1 \in R^{m \times n}$ ,  $K_2 \in R^{m \times n}$ ,  $\text{sgn}$  表示符号函数,  $\hat{\delta}(t)$ ,  $\hat{\rho}(t)$  和  $\hat{d}(t)$  满足自适应调节律, 即

$$\dot{\hat{\delta}}(t) = 2 \|\mathbf{x}(t)\| \|B^T P \mathbf{e}(t)\|, \quad (14)$$

$$\dot{\hat{\rho}}(t) = 2 \|x_R(t)\| \|B^T P \mathbf{e}(t)\|, \quad (15)$$

$$\dot{\hat{d}}(t) = 2 \|B^T P \mathbf{e}(t)\|. \quad (16)$$

假设 3 存在矩阵  $K_1$  和  $K_2$  使得

$$\begin{aligned}
 &[(A_0 + BK_1) - (D_0 + BK_2)]^T \\
 &\times [(A_0 + BK_1) - (D_0 + BK_2)] = 0. \quad (17)
 \end{aligned}$$

定理 1 在假设 1, 2, 3 下, 若存在正定矩阵  $P$  和矩阵  $K_1$  使得

$$A_0^T P + PA_0 + K_1^T B^T P + PBK_1 < 0, \quad (18)$$

则在控制 (11) 作用下有  $\lim_{t \rightarrow \infty} \mathbf{e}(t) = 0$ .

证明 将 (11) 式代入 (10) 式得闭环系统

$$\begin{aligned}
 \dot{\mathbf{e}}(t) &= (A_0 + BK_1)\mathbf{x}(t) - (D_0 + BK_2)x_R(t) \\
 &+ B \sum_{i=1}^l \lambda_i(\mathbf{x}(t))F_i\mathbf{x}(t) \\
 &- B \sum_{i=1}^l v_i(z_R(t))H_i x_R(t) \\
 &+ B \sum_{i=1}^l \lambda_i(\mathbf{x}(t))p_i(t) \\
 &- B \sum_{i=1}^l v_i(z_R(t))p_{Ri}(t) \\
 &- [\hat{\delta}(t) \|\mathbf{x}(t)\| + \hat{\rho}(t) \|x_R(t)\|
 \end{aligned}$$

$$+ \hat{d}(t)] \text{Bsgn}(B^T P \mathbf{e}(t)). \quad (19)$$

在假设 3 下, 系统 (19) 还可以写成

$$\begin{aligned}
 \dot{\mathbf{e}}(t) &= (A_0 + BK_1)\mathbf{e}(t) \\
 &+ B \sum_{i=1}^l \lambda_i(\mathbf{x}(t))F_i\mathbf{x}(t) \\
 &- B \sum_{i=1}^l v_i(z_R(t))H_i x_R(t) \\
 &+ B \sum_{i=1}^l \lambda_i(\mathbf{x}(t))p_i(t) \\
 &- B \sum_{i=1}^l v_i(z_R(t))p_{Ri}(t) \\
 &- [\hat{\delta}(t) \|\mathbf{x}(t)\| + \hat{\rho}(t) \|x_R(t)\| \\
 &+ \hat{d}(t)] \text{Bsgn}(B^T P \mathbf{e}(t)). \quad (20)
 \end{aligned}$$

构造一个 Lyapunov 函数

$$\begin{aligned}
 V(t) &= e^T(t)P\mathbf{e}(t) + \frac{1}{2}(\delta - \hat{\delta})^2 \\
 &+ \frac{1}{2}(\rho - \hat{\rho})^2 + \frac{1}{2}(d - \hat{d})^2. \quad (21)
 \end{aligned}$$

这里  $\delta = \sum_{i=1}^l \eta_i$ ,  $\rho = \sum_{i=1}^l \xi_i$ ,  $d = \sum_{i=1}^l \gamma_i + \sum_{i=1}^l \gamma_{Ri}$ .

对  $V(t)$  关于时间  $t$  求导得

$$\begin{aligned}
 \dot{V}(t) &\leq e^T(t) [(A_0 + BK_1)^T P + P(A_0 + BK_1)] \mathbf{e}(t) \\
 &+ \mathbf{1} \delta \|\mathbf{x}(t)\| + \rho \|x_R(t)\| \\
 &+ d \|\text{Bsgn}(B^T P \mathbf{e}(t))\| \\
 &- \mathbf{1} \hat{\delta}(t) \|\mathbf{x}(t)\| + \hat{\rho}(t) \|x_R(t)\| \\
 &+ \hat{d}(t) \|\text{Bsgn}(B^T P \mathbf{e}(t))\| \\
 &- \dot{\hat{\delta}}(\delta - \hat{\delta}) - \dot{\hat{\rho}}(\rho - \hat{\rho}) \\
 &- \dot{\hat{d}}(d - \hat{d}). \quad (22)
 \end{aligned}$$

采用自适应律 (14), (15) 和 (16) 式 (22) 式进一步化为

$$\dot{V}(t) \leq e^T(t) [(A_0 + BK_1)^T P + P(A_0 + BK_1)] \mathbf{e}(t). \quad (23)$$

因为 (18) 式成立, 从 (23) 式得到

$$\dot{V}(t) \leq -\lambda e^T(t)\mathbf{e}(t), \quad (24)$$

这里  $\lambda = \lambda_{\min}((A_i + BK_{1i})^T P + P(A_i + BK_{1i}))$ .

从 0 到  $+\infty$  对 (24) 式两边进行积分得到

$$\begin{aligned}
 \int_0^{+\infty} e^T(t)\mathbf{e}(t) dt &\leq \frac{1}{\lambda}(V(0) \\
 - V(+\infty)) &\leq \frac{1}{\lambda}V(0) < +\infty. \quad (25)
 \end{aligned}$$

另外, 由 (24) 式可知  $\mathbf{e}(t)$ ,  $\hat{\delta}(t)$ ,  $\hat{\rho}(t)$  和  $\hat{d}(t)$  均有界, 因此  $\dot{\mathbf{e}}(t)$  有界. 由此进一步可知  $\mathbf{e}(t)$  一致连续, 结合 (24) 式和引理 1 可得到结论  $\lim_{t \rightarrow \infty} \mathbf{e}(t) = 0$ . 证毕.

类似文献 [1] 中方法 (17) 式可以转化为求解

$$X[(A_0 + BK_1) - (D_0 + BK_2)]^T \times [(A_0 + BK_1) - (D_0 + BK_2)]X < \beta S, \quad (26)$$

这里  $X$  和  $S$  是两个正定矩阵, 且  $S^T S < I$ .

令  $P = X^{-1}, Y_1 = K_1 X, Y_2 = K_2 X$ , 则定理 1 中控制  $u(t)$  的设计问题转化为如下求解问题<sup>[9]</sup>:

$$\begin{aligned} & \underset{X, S, Y_1, Y_2}{\text{minimize}} \beta, \\ & XA_0^T + A_0 X + Y_1^T B^T + BY_1 < 0, \\ & \begin{bmatrix} -\beta S & XA_0^T + Y_1^T B^T - XD_0 - Y_2^T B^T \\ A_0 X + BY_1 - D_0 X - BY_2 & -I \end{bmatrix} < 0, \\ & \begin{bmatrix} -I & S \\ S & -I \end{bmatrix} < 0, \end{aligned} \quad (27)$$

这里  $X$  和  $S$  是两个正定矩阵.

**推论 1** 假设混沌系统(1)和(5)具有相同结构, 即  $A_i = D_i$ . 若存在正定矩阵  $X$  和矩阵  $Y$  使得

$$XA_0^T + A_0 X + Y^T B^T + BY < 0, \quad (28)$$

则在

$$u(t) = u_1(t) + u_2(t) \quad (29)$$

控制作用下有  $\lim_{t \rightarrow \infty} e(t) = 0$ , 其中

$$\begin{aligned} u_1(t) &= Kx(t) - Kx_R(t) - \sum_{i=1}^l \lambda_i(z(t))G_i x(t) \\ &+ \sum_{i=1}^l \nu_i(z_R(t))G_i x_R(t), \end{aligned} \quad (30)$$

$$\begin{aligned} u_2(t) &= -[\hat{\delta}(t)\|x(t)\| + \hat{\rho}(t)\|x_R(t)\| \\ &+ \hat{d}(t)]\text{sgn}(B^T P e(t)), \end{aligned} \quad (31)$$

这里  $P$  是一个待求的正定矩阵,  $\hat{\delta}(t), \hat{\rho}(t)$  和  $\hat{d}$  满足如下自适应调节律:

$$\dot{\hat{\delta}}(t) = 2\|x(t)\| \|B^T P e(t)\|, \quad (32)$$

$$\dot{\hat{\rho}}(t) = 2\|x_R(t)\| \|B^T P e(t)\|, \quad (33)$$

$$\dot{\hat{d}}(t) = 2\|B^T P e(t)\|. \quad (34)$$

### 4. 仿真实例

考虑 Lorenz 混沌系统, 假设  $x_1(t) \in [-q, q]$ , 则可以得到其模糊动态模型

规则 1: 如果  $x_1(t)$  是  $M_1$ ,

$$\dot{x}(t) = A_1 x(t) + B d_1(t) + B u(t),$$

规则 2: 如果  $x_1(t)$  是  $M_2$ ,

$$\dot{x}(t) = A_2 x(t) + B d_2(t) + B u(t).$$

这里

$$x(t) = [x_1(t) \quad x_2(t) \quad x_3(t)]^T,$$

$$\begin{aligned} A_1 &= \begin{bmatrix} -a & a & 0 \\ c & -1 & -q \\ 0 & q & -b \end{bmatrix}, \\ A_2 &= \begin{bmatrix} -a & a & 0 \\ c & -1 & q \\ 0 & -q & -b \end{bmatrix}, B = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}, \end{aligned}$$

$$M_1(x_1(t)) = \frac{1}{2} \left( 1 + \frac{x_1(t)}{q} \right),$$

$$M_2(x_1(t)) = \frac{1}{2} \left( 1 - \frac{x_1(t)}{q} \right).$$

其中  $a = 10, b = 8/3, c = 28, q = 30, d_1(t) = 0.5\sin(t), d_2(t) = 0.9\sin(t)$ .

参考模型为 Rossler 混沌系统, 假设

$$x_1(t) \in [c - q, c + q],$$

则可以得到其模糊动态模型为

规则 1: 如果  $x_{1R}(t)$  是  $N_1$ ,

$$\dot{x}_R(t) = D_1 x_R(t) + B d_{R1}(t),$$

规则 2: 如果  $x_{1R}(t)$  是  $N_2$ ,

$$\dot{x}_R(t) = D_2 x_R(t) + B d_{R2}(t).$$

这里

$$x_R(t) = [x_{R1}(t) \quad x_{R2}(t) \quad x_{R3}(t)]^T,$$

$$D_1 = \begin{bmatrix} 0 & -1 & -1 \\ 1 & -a & 0 \\ b & 0 & -q \end{bmatrix}, D_2 = \begin{bmatrix} 0 & -1 & -1 \\ 1 & -a & 0 \\ b & 0 & q \end{bmatrix},$$

$$N_1(x_{R1}(t)) = \frac{1}{2} \left( 1 + \frac{c - x_{R1}(t)}{q} \right),$$

$$N_2(x_{R1}(t)) = \frac{1}{2} \left( 1 - \frac{c - x_{R1}(t)}{q} \right).$$

这里  $a = 0.34, b = 0.4, c = 4.5, q = 10, d_{R1}(t) = 0.3\cos(t), d_{R2}(t) = 0.5\cos(t)$ .

选取  $A_0 = A_1$  和  $D_0 = D_1$ , 求解 (27) 式, 得到

$$X = \begin{bmatrix} 5.1234 & 0 & 0 \\ 0 & 5.1234 & 0 \\ 0 & 0 & 5.1234 \end{bmatrix},$$

$$Y_1 = \begin{bmatrix} 48.6726 & -33.8107 & -137.6772 \\ -160.8799 & 2.5617 & -64.0954 \\ 137.6772 & 64.0954 & 11.1008 \end{bmatrix},$$

$$Y_2 = \begin{bmatrix} -2.5617 & 22.5472 & -132.5537 \\ -22.5472 & -0.8197 & -217.7985 \\ 135.6278 & 217.7985 & 48.6726 \end{bmatrix}.$$

利用  $K_1 = Y_1 X^{-1}$  和  $K_2 = Y_2 X^{-1}$  得

$$K_1 = \begin{bmatrix} 9.5000 & -6.5992 & -26.8720 \\ -31.4008 & 0.5000 & -12.5102 \\ 26.8720 & 12.5102 & 2.1667 \end{bmatrix},$$

$$K_2 = \begin{bmatrix} -0.5000 & 4.4008 & -25.8720 \\ -4.4008 & -0.1600 & -42.5102 \\ 26.4720 & 42.5102 & 9.5000 \end{bmatrix}.$$

构造控制器(11),图1和图2表示在此控制作用下两混沌系统的同步情况.

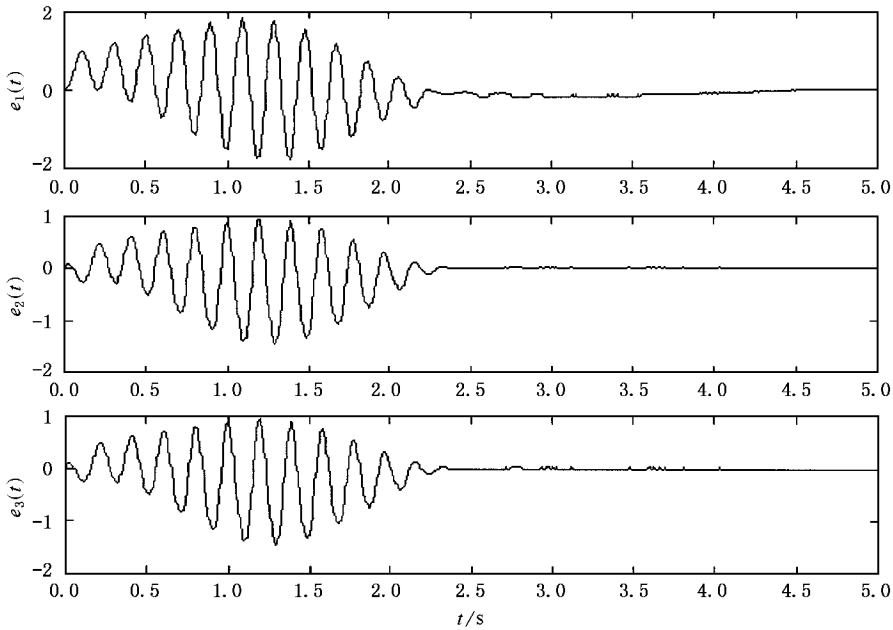


图1 同步误差的动态曲线

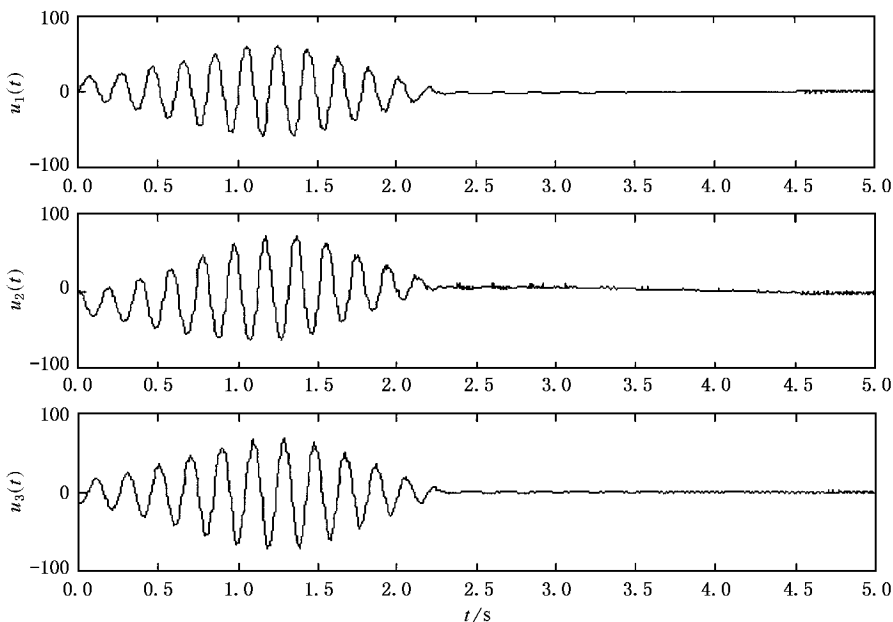


图2 控制  $u(t)$

## 5. 结 论

本文研究了含扰动和参数摄动情况下混沌系统

的同步问题,给出了一个自适应模糊同步控制设计方法.本文方法适用于相同结构混沌系统的同步以及异构混沌系统的同步问题.仿真结果表明,本文方法是有效的.

- [ 1 ] Tanaka Kazuo ,Takayuki Ikeda and Wang H O 1998 *IEEE Trans on Circuits and Systems I :Fundamental Theory and Applications* **10** 1021
- [ 2 ] Guan X P , Tang Y G , Fan Z P and Wang Y Q 2001 *Acta Phys . Sin .* **50** 2112 [ in Chinese ] 关新平、唐英干、范正平、王益群 2001 *物理学报* **50** 2112 ]
- [ 3 ] Giuseppe G and Saverio M 1999 *Int . J . Bifure . Chaos* **9** 705
- [ 4 ] Yang L B and Yang T 2000 *Acta Phys . Sin .* **49** 33 [ in Chinese ] 杨林保、扬 涛 2000 *物理学报* **49** 33 ]
- [ 5 ] Jun Y ,Masahiro N ,Hitoshi K and Akira I 2001 *Int . J . Sys . Sci .* **32** 915
- [ 6 ] Yue D , Wu Z Q and Xu S F 2002 *J . of Sys . Simulation* **14** 634 [ in Chinese ] 岳 东、吴忠强、许世范 2002 *系统仿真学报* **14** 634 ]
- [ 7 ] Takagi T and Sugeno M 1985 *IEEE Transactions on Systems ,Man and Cybernetics* **15** 116
- [ 8 ] Sastry S and Bodson M 1989 *Engle Wood Cliffs* ( Prentice Hall ,NJ )
- [ 9 ] Boyd S , Ghaoui L EI , Feron E and Balakrishnan V 1994 *Studies in Applied Mathematics* ( SIAM ,Philadelphia )
- [ 10 ] Wu Z Q , Yue D and Xu S F 2002 *Acta Phys . Sin .* **51** 1193 [ in Chinese ] 吴忠强、岳 东、许世范 2002 *物理学报* **51** 1193 ]

# Adaptive fuzzy synchronization of chaotic systems with uncertainties \*

Yue Dong<sup>1)</sup> Jun Yoneyama<sup>2)</sup>

<sup>1)</sup> ( Nanjing Normal University ,Nanjing 210042 ,China )

<sup>2)</sup> ( Department of Electronics and Electrical Engineering , Aoyama Gakuin University ,Tokyo ,Japan )

( Received 4 May 2002 ; revised manuscript received 18 June 2002 )

## Abstract

This paper is concerned with the synchronization problem of a class of chaotic systems with uncertainties. A novel design method for the adaptive fuzzy synchronization is proposed based on a Takagi-Sugeno ( T-S ) fuzzy dynamical model. The proposed methods can be applied not only to the chaotic systems with the same structures ,but also to the chaotic systems with different structures. To demonstrate the effectiveness of our method ,simulation results of synchronization are finally given for the Lorenz system and Rossler system.

**Keywords :** chaotic system , fuzzy control , synchronization

**PACC :** 0545 , 0547

\* Project supported by the National Natural Science Foundation of China ( Grant No. 69874042 ) ,by the Foundation for University Key Teachers by the Ministry of Education ,China and the Foundation for Return Student Abroad by the Ministry of Education ,China.