

# 一类大系统的分散自适应模糊滑模控制<sup>1)</sup>

张天平

(扬州大学师范学院数学系 扬州 225002)

**摘 要** 研究了一类具有未知函数控制增益的非线性大系统的分散模糊控制问题. 基于滑模控制原理和模糊集理论, 提出了一种分散自适应模糊控制器的设计方法. 通过理论分析, 证明了分散自适应模糊控制系统是全局稳定的, 跟踪误差可收敛到零的一个领域内.

**关键词** 大系统, 模糊控制, 滑模控制, 自适应控制, 分散控制, 全局稳定性.

## 1 引 言

目前, 对耦合大系统自适应控制的研究已有许多结果<sup>[1-3]</sup>. 但文献[1, 2]仅仅讨论了各子系统建模部分均为线性的情况, 所提出的分散自适应控制器设计只能保证跟踪误差收敛到一残差集. 基于滑模控制的一种性能指标, 文献[3]对非线性大系统提出了一种分散模糊逻辑控制器设计; 另外, 为了降低颤动对量化因子提出了一种自适应调节算法, 但闭环系统的稳定性缺少理论分析. 文献[4]证明了模糊系统是通用估计器. 基于文献[4]中的结果, 文献[5-7]综合出一种稳定的自适应模糊控制器. 但文献[6]中跟踪误差的收敛性依赖于逼近误差平方可积这一假设, 而文献[7]仅仅讨论了一类控制增益为 1 的非线性系统的自适应模糊控制的设计问题. 在文献[4, 7, 8]的基础上, 文献[9]针对控制增益为未知常数的一类非线性大系统, 提出了一种分散自适应模糊控制器设计的方法.

本文讨论一类具有函数控制增益的耦合大系统的分散模糊控制问题, 提出了能够利用专家语言信息和数字信息的分散自适应模糊控制器的设计方案. 另外, 为了有效地抑制通常变结构控制中所固有的颤动现象, 利用模糊逻辑切换来柔化控制信号, 从而使得控制律是连续的. 根据李亚普诺夫方法, 确定了分散模糊系统中结论模糊集的峰值、未知逼近误差及各子系统间耦合作用项的上界多项式函数中未知系数的自适应律. 通过理论分析, 证明了闭环分散模糊控制系统的稳定性, 跟踪误差可收敛到零的一个领域.

## 2 问题的描述及基本假设

考虑由下面  $N$  个相互关联的子系统  $P_i$  所构成的非线性系统  $P$

$$P_i : \begin{cases} \dot{x}_{i1} = x_{i2}, \\ \vdots \\ \dot{x}_{im_i} = -f_i(x_i) + b_i(x_{iT})u_i(t) + d_i(x, t), \end{cases} \quad i = 1, \dots, N, \quad (1)$$

1) 国家自然科学基金资助课题.

收稿日期 1996-04-30

其中  $\mathbf{x}_i = (x_{i1}, \dots, x_{im_i})^T \in R^{m_i}$  是子系统  $P_i$  的状态向量,  $u_i$  是子系统  $P_i$  的控制输入,  $f_i$  是未知连续函数,  $b_i(\mathbf{x}_{iT})$  是未知控制增益, 而  $\mathbf{x}_{iT} = (x_{i1}, \dots, x_{im_i-1})^T \in R^{m_i-1}$ ,  $d_i(\mathbf{x}, t)$  代表外来干扰及子系统间交互作用的和,  $\mathbf{x} = (\mathbf{x}_1^T, \dots, \mathbf{x}_N^T)^T \in R^m$  是系统  $P$  的状态向量, 而  $m = \sum_{i=1}^N m_i$ .

控制目标是对每一个子系统  $P_i$  要求子系统的状态向量  $\mathbf{x}_i = (x_{i1}, \dots, x_{im_i})^T$  尽可能好地去跟踪一个指定的期望轨迹  $\mathbf{x}_{id} = (y_{id}, \dot{y}_{id}, \dots, y_{id}^{(m_i-1)})^T, i=1, \dots, N$ . 定义子系统  $P_i$  的跟踪误差向量  $\mathbf{e}_i = \mathbf{x}_i - \mathbf{x}_{id} = (e_{i1}, \dots, e_{im_i})^T$ . 因此, 问题是设计一个分散控制律  $u_i(t)$ , 使得  $\mathbf{e}_i$  收敛到零的一个小邻域内.

为了设计稳定的自适应模糊滑模控制, 参照文[1, 7—9]中的讨论, 对未知连续函数  $f_i(\mathbf{x}_i), b_i(\mathbf{x}_{iT})$  作出如下假设:

- 1)  $|h_i(\mathbf{x}_i)| \leq K_{i0}(\mathbf{x}_i), \mathbf{x}_i \in A_{id}, h_i(\mathbf{x}_i) = b_i^{-1}(\mathbf{x}_{iT}) f_i(\mathbf{x}_i);$
- 2)  $0 < b_i^{-1}(\mathbf{x}_{iT}) \leq K_{i1}(\mathbf{x}_{iT}), \forall t \geq 0;$
- 3)  $|\dot{b}_i^{-1}(\mathbf{x}_{iT})| = |\nabla b_i^{-1}(\mathbf{x}_{iT}) \dot{\mathbf{x}}_{iT}| \leq K_{i2}(\mathbf{x}_i) \|\mathbf{x}_i\|, \forall t \geq 0;$
- 4)  $|b_{A_i}^{-1}(\mathbf{x}_i) - b_i^{-1}(\mathbf{x}_{iT})| \leq \epsilon_{b_i}, \mathbf{x}_i \in A_i;$
- 5)  $|h_{A_i}(\mathbf{x}_i) - h_i(\mathbf{x}_i)| \leq \epsilon_{h_i}, \mathbf{x}_i \in A_i;$
- 6) 存在未知非负实数  $a_{ijk}$ , 使得

$$|d_i(\mathbf{x}, t)| \leq \sum_{k=0}^p \sum_{j=1}^N a_{ijk} \|\mathbf{x}_j\|^k. \quad (2)$$

其中  $K_{i0}(\mathbf{x}_i), K_{i1}(\mathbf{x}_{iT}), K_{i2}(\mathbf{x}_i)$  是已知正的连续函数;  $\epsilon_{b_i}, \epsilon_{h_i}$  只要是常数即可, 不必是充分小;  $p$  为正整数; 集合  $A_{id}, A_i$  由下式给出

$$A_{id} = \{\mathbf{x}_i \mid \|\mathbf{x}_i - \mathbf{x}_{i0}\|_{p_i, w_i} \leq 1\}, \quad (3)$$

$$A_i = \{\mathbf{x}_i \mid \|\mathbf{x}_i - \mathbf{x}_{i0}\|_{p_i, w_i} \leq 1 + \phi_i\}. \quad (4)$$

而  $w_i = \{w_{ij}\}_{j=1}^{m_i}$  是一组严格正的权,  $\mathbf{x}_{i0}$  是  $R^{m_i}$  中一定点,  $\phi_i > 0$  表示过渡区域的宽度,  $\|\mathbf{x}_i\|_{p_i, w_i}$  是一种加权  $p_i$ -范数, 其定义如下

$$\|\mathbf{x}_i\|_{p_i, w_i} = \left[ \sum_{j=1}^{m_i} \left( \frac{|x_{ij}|}{w_{ij}} \right)^{p_i} \right]^{\frac{1}{p_i}}, \mathbf{x}_i = (x_{i1}, x_{i2}, \dots, x_{im_i})^T;$$

当  $p_i = \infty$  时,

$$\|\mathbf{x}_i\|_{\infty, w_i} = \max \left\{ \frac{|x_{i1}|}{w_{i1}}, \dots, \frac{|x_{im_i}|}{w_{im_i}} \right\};$$

当  $p_i = 2, w_{ij} = 1, j = 1, \dots, m_i$  时,  $\|\mathbf{x}_i\|_{p_i, w_i}$  变为欧氏范数  $\|\mathbf{x}_i\|$ .  $h_{A_i}(\mathbf{x}_i), b_{A_i}^{-1}(\mathbf{x}_i)$  分别是由类似文献[4]中模糊基函数  $p_{h_j}(\mathbf{x}_j), p_{b_j^{-1}}(\mathbf{x}_j)$  在  $A_i$  上对  $h_i(\mathbf{x}_i), b_i^{-1}(\mathbf{x}_{iT})$  的一个逼近, 即

$$h_{A_i}(\mathbf{x}_i) = \sum_{j=1}^{N_{i1}} \beta_{ij} p_{h_j}(\mathbf{x}_i), \quad (5)$$

$$b_{A_i}^{-1}(\mathbf{x}_i) = \sum_{j=1}^{N_{i2}} \gamma_{ij} p_{b_j^{-1}}(\mathbf{x}_i). \quad (6)$$

而  $N_{i1}, N_{i2}$  是模糊系统的规则数目,  $\beta_{ij}, \gamma_{il}$  是模糊系统中第  $j$  条规则及另一个模糊系统中第  $l$  条规则结论部分的正规模糊集的峰值,  $j = 1, \dots, N_{i1}, l = 1, \dots, N_{i2}, i = 1, \dots, N$ .

### 3 分散自适应模糊滑模控制器的设计

对子系统  $P_i$  定义切换函数

$$s_i(t) = c_{i1}e_{i1} + c_{i2}e_{i2} + \dots + c_{i(m_i-1)}e_{i(m_i-1)} + e_{im_i}, \quad (7)$$

其中  $e_{i1} = x_{i1} - y_{id}$ ,  $e_{i2} = \dot{x}_{i1} - \dot{y}_{id}$ ,  $\dots$ ,  $e_{im_i} = x_{i1}^{(m_i-1)} - y_{id}^{(m_i-1)}$ , 而常数  $c_{i1}, c_{i2}, \dots, c_{i(m_i-1)}$  确定的多项式  $\lambda^{m_i-1} + c_{i(m_i-1)}\lambda^{m_i-2} + \dots + c_{i1}$  是霍尔维茨多项式. 将  $s_i(t)$  对时间  $t$  求导得

$$\dot{s}_i(t) = \sum_{j=1}^{m_i-1} c_{ij}e_{i(j+1)} + b_i(\mathbf{x}_{iT})u_i(t) + d_i(\mathbf{x}, t) - f_i(\mathbf{x}_i) - y_{id}^{(m_i)}(t). \quad (8)$$

采用如下控制律

$$u_i(t) = -k_{id}s_{i\Delta}(t) - \frac{1}{2}K_{i2}(\mathbf{x}_i)\|\mathbf{x}_i\|s_{i\Delta}(t) + [m_i(t)(K_{i0}(\mathbf{x}_i) + K_{i1}(\mathbf{x}_{iT})|u_i^*(t)|) + K_{i1}(\mathbf{x}_{iT})\sum_{k=0}^p\sum_{j=1}^N\hat{a}_{ijk}(t)\|\mathbf{x}_j\|^k]u_{if}(t) + (1 - m_i(t))u_{ia}(t), \quad (9)$$

其中  $k_{id} > 0$ ,  $\hat{a}_{ijk}(t)$  是  $a_{ijk}$  在  $t$  时刻的估计值,  $u_{if}(t)$  由文献[9]中式(21)确定 ( $z_i = s_i/\phi_i$ ). 取

$$u_i^*(t) = \sum_{j=1}^{m_i-1} c_{ij}e_{i(j+1)} - y_{id}^{(m_i)}(t), \quad (10)$$

$$u_{ia}(t) = \sum_{j=1}^{N_{i1}}\hat{\beta}_{ij}(t)p_{h_{ij}}(\mathbf{x}_i) + \hat{\epsilon}_{h_i}(t)u_{if}(t) - u_i^*(t)\sum_{j=1}^{N_{i2}}\hat{\gamma}_{ij}(t)p_{b_i^{-1}j}(\mathbf{x}_i) + \hat{\epsilon}_{b_i}(t)u_{if}(t)|u_i^*(t)|, \quad (11)$$

而  $\hat{\beta}_{ij}(t), \hat{\gamma}_{ij}(t), \hat{\epsilon}_{h_i}(t), \hat{\epsilon}_{b_i}(t)$  分别是  $\beta_{ij}, \gamma_{ij}, \epsilon_{h_i}, \epsilon_{b_i}$  在  $t$  时刻的估计值.

$$m_i(t) = \max\left\{0, \text{sat}\left(\frac{\|\mathbf{x}_i - \mathbf{x}_{i0}\|_{p_i, w_i} - 1}{\phi_i}\right)\right\}, \quad (12)$$

$$s_{i\Delta}(t) = s_i(t) - \phi_i \text{sat}(s_i(t)/\phi_i), \quad (13)$$

这里  $m_i(t)$  是一个调制函数,  $0 \leq m_i(t) \leq 1$ ,  $\forall t \geq 0$ . 而  $\hat{\beta}_{ij}(t), \hat{\epsilon}_{h_i}(t), \hat{\gamma}_{ij}(t), \hat{\epsilon}_{b_i}(t)$  分别是  $\beta_{ij}, \epsilon_{h_i}, \gamma_{ij}, \epsilon_{b_i}$  在  $t$  时刻的估计值; 饱和函数  $\text{sat}(y) = y$ , 当  $|y| \leq 1$ ;  $\text{sat}(y) = \text{sgn}(y)$ , 当  $|y| > 1$ ;  $\phi_i > 0$  为边界层宽度.

采用如下自适应律

$$\dot{\hat{\beta}}_{ij} = -\eta_{i1}(1 - m_i(t))s_{i\Delta}(t)p_{h_{ij}}(\mathbf{x}_i), \quad j = 1, \dots, N_{i1}, \quad i = 1, \dots, N, \quad (14)$$

$$\dot{\hat{\epsilon}}_{h_i} = \eta_{i2}(1 - m_i(t))|s_{i\Delta}(t)|, \quad (15)$$

$$\dot{\hat{\gamma}}_{ij} = \eta_{i3}(1 - m_i(t))p_{b_i^{-1}j}(\mathbf{x}_i)s_{i\Delta}(t)u_i^*(t), \quad j = 1, \dots, N_{i2}, \quad i = 1, \dots, N, \quad (16)$$

$$\dot{\hat{\epsilon}}_{b_i} = \eta_{i4}(1 - m_i(t))|s_{i\Delta}(t)u_i^*(t)|, \quad (17)$$

$$\dot{\hat{a}}_{ijk} = \eta_i\|\mathbf{x}_j\|^k K_{i1}(\mathbf{x}_{iT})|s_{i\Delta}(t)|, \hat{a}_{ijk}(0) \geq 0, \quad i, j = 1, \dots, N, \quad k = 0, 1, \dots, p, \quad (18)$$

其中  $\eta_{i1} > 0, \eta_{i2} > 0, \eta_{i3} > 0, \eta_{i4} > 0, \eta_i > 0$  均为自适应率.

## 4 稳定性分析

由式(1)和(8)得

$$b_i^{-1}(\mathbf{x}_{iT})\dot{s}_i(t) = b_i^{-1}(\mathbf{x}_{iT})u_i^*(t) + u_i(t) + b_i^{-1}(\mathbf{x}_{iT})d_i(\mathbf{x}, t) - h_i(\mathbf{x}_i), \quad (19)$$

将式(9)一(18)代入式(19),并利用假设1)一6),整理得

$$\begin{aligned} b_i^{-1}(\mathbf{x}_{iT})\dot{s}_i(t) = & -k_{id}s_{i\Delta}(t) - \frac{1}{2}K_{i2}(\mathbf{x}_i)\|\mathbf{x}_i\|s_{i\Delta}(t) + [m_i(t)(K_{i0}(\mathbf{x}_i) + \\ & K_{i1}(\mathbf{x}_{iT})|u_i^*(t)|) + K_{i1}(\mathbf{x}_{iT})\sum_{k=0}^p\sum_{j=1}^N\hat{a}_{ijk}(t)\|\mathbf{x}_j\|^k]u_{if}(t) + \\ & (1 - m_i(t))\left[\sum_{j=1}^{N_{i1}}(\hat{\beta}_{ij}(t) - \beta_{ij})p_{h_{ij}}(\mathbf{x}_i) + \hat{\epsilon}_{h_i}(t)u_{if}(t)\right] + \\ & (1 - m_i(t))\left[\sum_{j=1}^{N_{i2}}(\gamma_{ij} - \hat{\gamma}_{ij}(t))p_{b_i^{-1},j}(\mathbf{x}_i)u_i^*(t) + \hat{\epsilon}_{b_i}(t)u_{if}(t)|u_i^*(t)|\right] + \\ & (1 - m_i(t))[h_{A_i}(\mathbf{x}_i) - h_i(\mathbf{x}_i) + u_i^*(t)(b_i^{-1}(\mathbf{x}_{iT}) - b_{A_i}^{-1}(\mathbf{x}_i))] + \\ & m_i(t)(b_i^{-1}(\mathbf{x}_{iT})u_i^*(t) - h_i(\mathbf{x}_i)) + b_i^{-1}(\mathbf{x}_{iT})d_i(\mathbf{x}, t). \end{aligned} \quad (20)$$

对于由式(9)一(13)构成的控制律,提出如下稳定性定理.

**定理.** 考虑过程(1),其控制律由式(9)一(13)确定,自适应律由式(14)一(18)确定,并满足假设1)一6),则闭环模糊控制系统中所有信号有界,跟踪误差收敛到零的一个邻域内.

证明. 取

$$\begin{aligned} V(t) = & \sum_{i=1}^N \left[ \frac{1}{2}b_i^{-1}(\mathbf{x}_{iT})s_{i\Delta}^2(t) + \frac{1}{2} \left( \sum_{j=1}^{N_{i1}} (\hat{\beta}_{ij}(t) - \beta_{ij})^2/\eta_{i1} + (\hat{\epsilon}_{h_i}(t) - \epsilon_{h_i})^2/\eta_{i2} + \right. \right. \\ & \left. \left. \sum_{j=1}^{N_{i2}} (\hat{\gamma}_{ij}(t) - \gamma_{ij})^2/\eta_{i3} + (\hat{\epsilon}_{b_i}(t) - \epsilon_{b_i})^2/\eta_{i4} \right) + \frac{1}{2} \sum_{k=0}^p \sum_{j=1}^N (\hat{a}_{ijk}(t) - a_{ijk})^2/\eta_i \right]. \end{aligned} \quad (21)$$

由于 $|s_i(t)| < \phi_i$ 时, $\dot{s}_{i\Delta}(t) = 0$ , $|s_i(t)| > \phi_i$ 时, $\dot{s}_{i\Delta}(t) = \dot{s}_i(t)$ , $u_{if}(t) = -\text{sgn}(s_i(t))$ . 将 $V(t)$ 对时间 $t$ 求导,得

$$\begin{aligned} \dot{V}(t) = & \sum_{i=1}^N \left[ \frac{1}{2}\dot{b}_i^{-1}(\mathbf{x}_{iT})s_{i\Delta}^2(t) + b_i^{-1}(\mathbf{x}_{iT})s_{i\Delta}(t)\dot{s}_{i\Delta}(t) + \sum_{j=1}^{N_{i2}} (\hat{\beta}_{ij}(t) - \beta_{ij})\dot{\hat{\beta}}_{ij}(t)/\eta_{i1} + \right. \\ & (\hat{\epsilon}_{h_i}(t) - \epsilon_{h_i})\dot{\hat{\epsilon}}_{h_i}(t)/\eta_{i2} + \sum_{j=1}^{N_{i1}} (\hat{\gamma}_{ij}(t) - \gamma_{ij})\dot{\hat{\gamma}}_{ij}(t)/\eta_{i3} + \\ & \left. (\hat{\epsilon}_{b_i}(t) - \epsilon_{b_i})\dot{\hat{\epsilon}}_{b_i}(t)/\eta_{i4} + \sum_{k=0}^p \sum_{j=1}^N (\hat{a}_{ijk}(t) - a_{ijk})\dot{\hat{a}}_{ijk}(t)/\eta_i \right]. \end{aligned} \quad (22)$$

当 $|s_i(t)| \leq \phi_i$ 时, $\dot{V}(t) = 0$ ;当 $|s_i(t)| > \phi_i$ 时,将式(14)一(18),(20)代入式(22),并利用假设1)一6)整理得

$$\begin{aligned} \dot{V}(t) \leq & \sum_{i=1}^N \left[ -k_{id}s_{i\Delta}^2(t) + (-K_{i1}(\mathbf{x}_{iT})\sum_{k=0}^p\sum_{j=1}^N\hat{a}_{ijk}(t)\|\mathbf{x}_j\|^k + |b_i^{-1}(\mathbf{x}_{iT})d_i(\mathbf{x}, t)|)|s_{i\Delta}(t)| - \right. \\ & m_i(t)(K_{i0}(\mathbf{x}_i) + K_{i1}(\mathbf{x}_{iT})|u_i^*(t)| - |b_i^{-1}(\mathbf{x}_{iT})u_i^*(t)| - |h_i(\mathbf{x}_i)|)|s_{i\Delta}(t)| + \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 & (1 - m_i(t))(\epsilon_{h_i} - \hat{\epsilon}_{h_i}(t))|s_{i\Delta}(t)| + (1 - m_i(t))(-\hat{\epsilon}_{b_i}(t) + \epsilon_{b_i})|u_i^*(t)s_{i\Delta}(t)| + \\
 & (\hat{\epsilon}_{h_i}(t) - \epsilon_{h_i})\dot{\hat{\epsilon}}_{h_i}(t)/\eta_{i2} + (\hat{\epsilon}_{h_i}(t) - \epsilon_{h_i})\dot{\hat{\epsilon}}_{b_i}(t)/\eta_{i4} + \\
 & \sum_{k=0}^p \sum_{j=1}^N (\hat{a}_{ijk}(t) - a_{ijk})\dot{\hat{a}}_{ijk}(t)/\eta_i \leq \sum_{i=1}^N [-k_{id}s_{i\Delta}^2(t)] < 0.
 \end{aligned} \tag{23}$$

从以上两种情况分析可以得出

$$\dot{V}(t) \leq \sum_{i=1}^N [-k_{id}s_{i\Delta}^2(t)] \leq 0, \quad \forall t \geq 0. \tag{24}$$

采用文献[9]中类似的证明方法, 不难证明定理成立.

### 5 仿真结果

例. 考虑如下具有函数控制增益的非线性大系统

$$P_1: \begin{cases} \dot{x}_{11} = x_{12}, \\ \dot{x}_{12} = -x_{11}^3 - x_{12} + (1 + 0.5\sin x_{11})u_1 + d_1(\mathbf{x}, t), \end{cases} \tag{25}$$

$$P_2: \begin{cases} \dot{x}_{21} = x_{22}, \\ \dot{x}_{22} = x_{21} - x_{22}^2 + (1 + e^{-x_{21}})u_2 + d_2(\mathbf{x}, t). \end{cases} \tag{26}$$

其中  $d_1(\mathbf{x}, t) = 12\cos t + 2x_{21}\sin(3t) + x_{22}\cos(10t) + 0.5x_{12}\sin(0.5t)$ ,  $d_2(\mathbf{x}, t) = \sin(5t) + 2x_{11}\sin(x_{21}) + x_{22}\cos(0.2t)$ . 由此得  $|d_1(\mathbf{x}, t)| \leq 12 + 0.5\|\mathbf{x}_1\| + 2\sqrt{2}\|\mathbf{x}_2\|$ ,  $|d_2(\mathbf{x}, t)| \leq 1 + 2\|\mathbf{x}_1\| + \|\mathbf{x}_2\|$ .

控制目标是使状态  $\mathbf{x}_i = (x_{i1}, x_{i2})^T$  跟踪指定的轨迹  $x_{id} = \left( \sin\left(\frac{\pi t}{20}\right), \frac{\pi}{20}\cos\left(\frac{\pi t}{20}\right) \right)^T, i = 1, 2$ . 定义  $\mathbf{e}_i = \mathbf{x}_i - \mathbf{x}_{id} = (e_{i1}, e_{i2})^T$ . 仿真中,  $p = 1$ , 采样周期为  $0.004\text{s}$ ,  $\mathbf{x}_{i0} = (0, 0)^T$ , 逼近

$h_1(\mathbf{x}_1) = \frac{x_{11}^3 + x_{12}}{1 + 0.5\sin x_{11}}$ ,  $h_2(\mathbf{x}_2) = \frac{x_{22}^2 - x_{21}}{1 + e^{-x_{21}}}$  的模糊系统用下面一组规则描述

$R_{h_i}^j$ : 若  $x_{i1}$  是  $\tilde{A}_{j1i}$ ,  $x_{i2}$  是  $\tilde{A}_{j2i}$ , 则  $h_{A_i}$  是  $\tilde{B}_{jh_i} (j = 1, \dots, 5, i = 1, 2)$ ,

其中  $\tilde{A}_{j1i}(x_{i1}) = e^{-\frac{x_{i1}^2}{2}}$ ,  $\tilde{A}_{j2i}(x_{i2}) = e^{-\frac{(x_{i2}-j+3)^2}{2}}$ ,  $j = 1, \dots, 5, i = 1, 2$ . 用  $\beta_{ij}$  表示正规模糊集  $\tilde{B}_{jh_i}$  的峰值,  $j = 1, \dots, 5, i = 1, 2$ . 于是采用文献[4]中同样的推理方法可得模糊系统的输出

$$h_{A_i}(x_{i1}, x_{i2}) = \sum_{j=1}^5 \beta_{ij} p_{h_j}(x_{i1}, x_{i2}), \quad i = 1, 2, \tag{27}$$

其中模糊基函数

$$p_{h_j}(x_{i1}, x_{i2}) = \frac{\tilde{A}_{j1i}(x_{i1})\tilde{A}_{j2i}(x_{i2})}{\sum_{j=1}^5 \tilde{A}_{j1i}(x_{i1})\tilde{A}_{j2i}(x_{i2})} \quad (j = 1, \dots, 5; i = 1, 2) \tag{28}$$

逼近  $b_1^{-1}(x_{11}) = \frac{1}{1 + 0.5\sin x_{11}}$ ,  $b_2^{-1}(x_{21}) = \frac{1}{1 + e^{-x_{11}}}$  的模糊系统用下面一组规则描述

$R_{b_i^{-1}}^j$ : 若  $x_{i1}$  是  $\tilde{A}_{j1i}$ , 则  $b_{A_i}^{-1}$  是  $\tilde{B}_{jb_i^{-1}} (j = 1, \dots, 5, i = 1, 2)$ .

上式中  $\tilde{A}_{111}(x_{11}) = e^{-\frac{(x_{11} + \frac{\pi}{2})^2}{2}}$ ,  $\tilde{A}_{211}(x_{11}) = e^{-\frac{(x_{11} + \frac{\pi}{6})^2}{2}}$ ,  $\tilde{A}_{311}(x_{11}) = e^{-\frac{x_{11}^2}{2}}$ ,  $\tilde{A}_{411}(x_{11}) = e^{-\frac{(x_{11} - \frac{\pi}{6})^2}{2}}$ ,

$\tilde{A}_{511}(x_{11}) = e^{-\frac{(x_{11} - \frac{\pi}{2})^2}{2}}$ ,  $\tilde{A}_{j12}(x_{21}) = e^{-\frac{(x_{21}-j+3)^2}{2}}$ , 用  $\gamma_{ij}$  表示正规模糊集  $\tilde{B}_{jb_i^{-1}}$  的峰值,  $j = 1, \dots,$

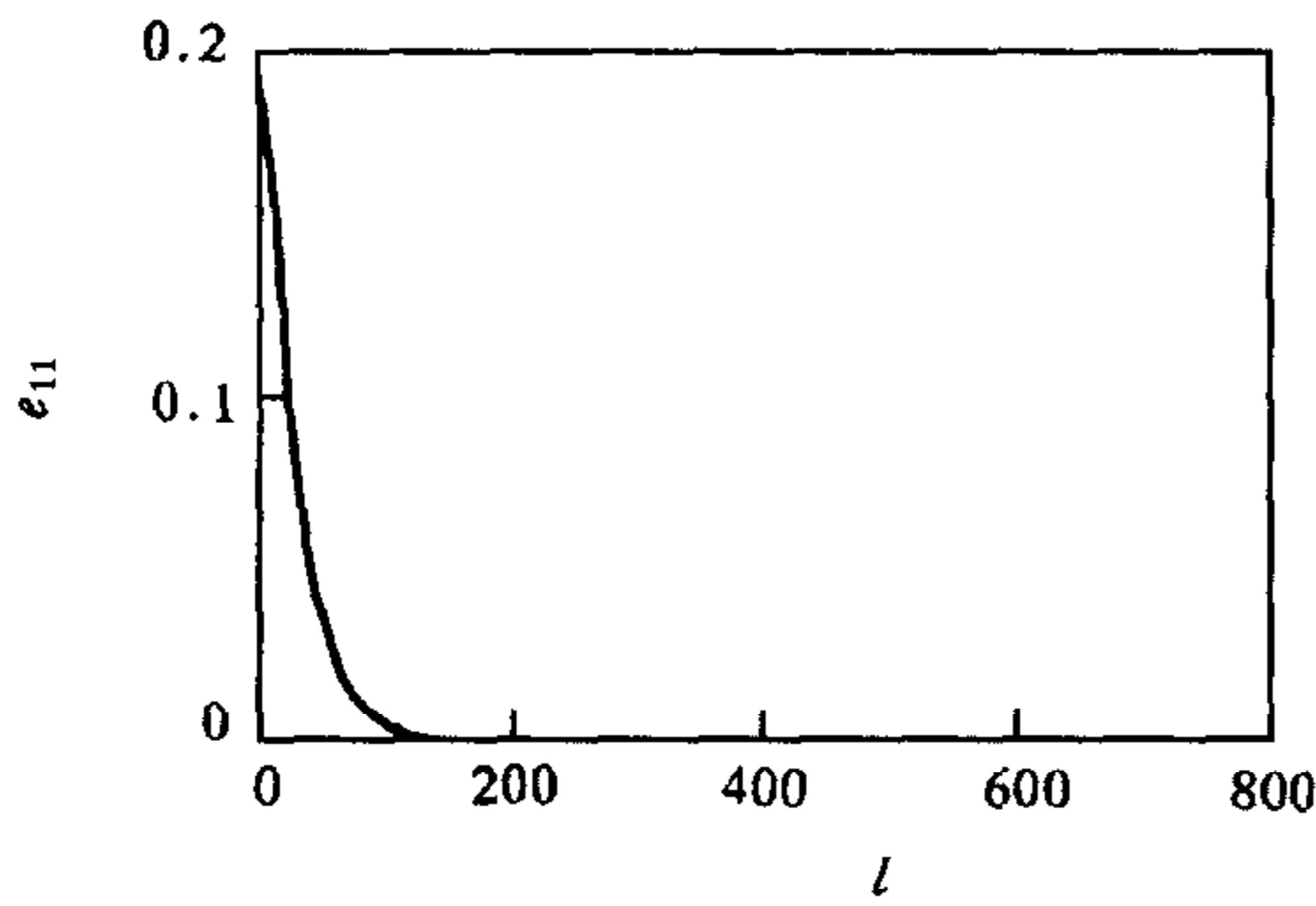
5,  $i=1,2$ ,于是采用文献[4]中同样的推理方法可得模糊系统的输出

$$b_{A_i}^{-1}(x_{i1}) = \sum_{j=1}^5 \gamma_{ij} p_{b_i^{-1}j}(x_{i1}), \quad i = 1, 2, \tag{29}$$

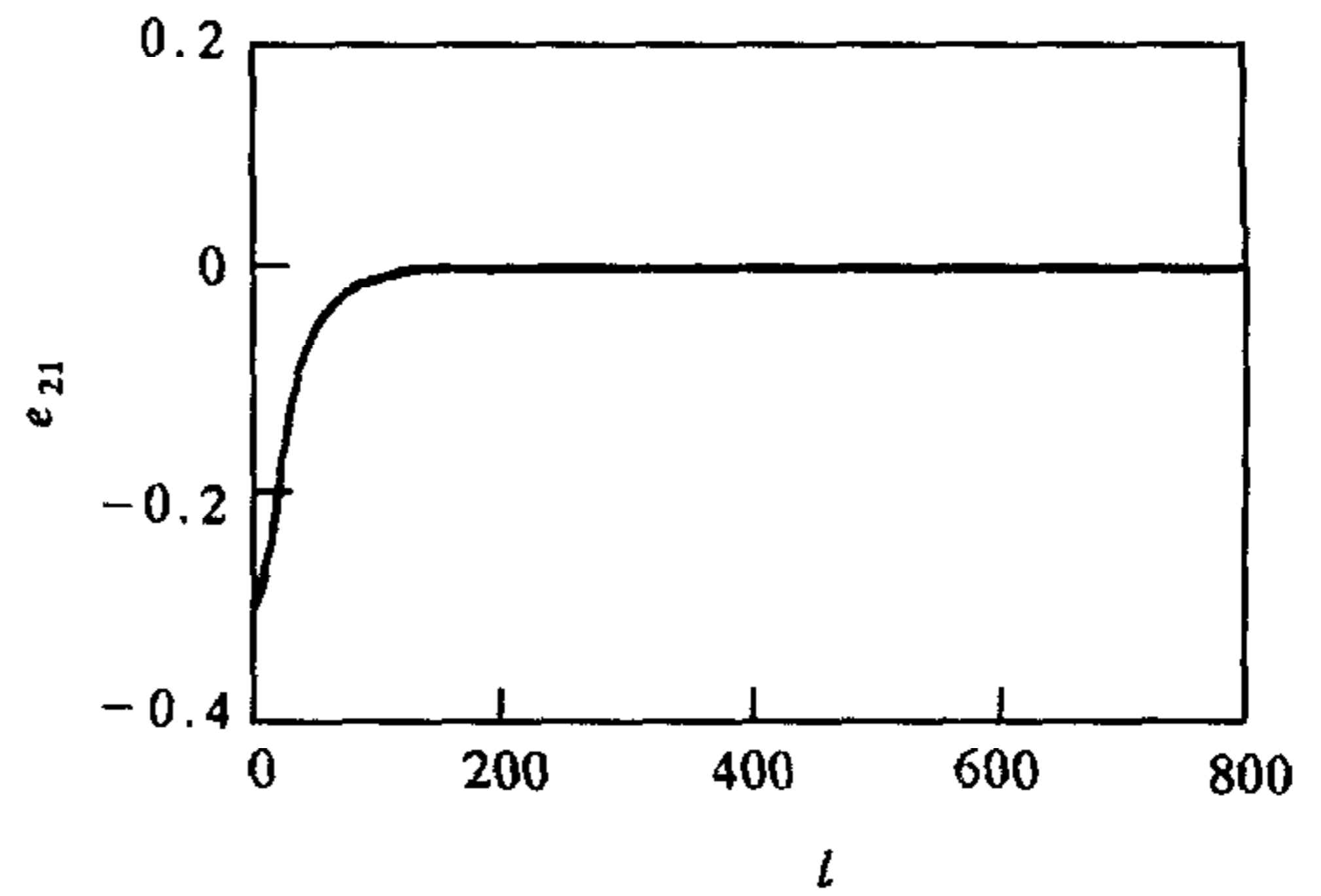
其中模糊基函数

$$p_{b_i^{-1}j}(x_{i1}) = \frac{\tilde{A}_{jli}(x_{i1})}{\sum_{j=1}^5 \tilde{A}_{jli}(x_{i1})}, \quad j = 1, \dots, 5, i = 1, 2. \tag{30}$$

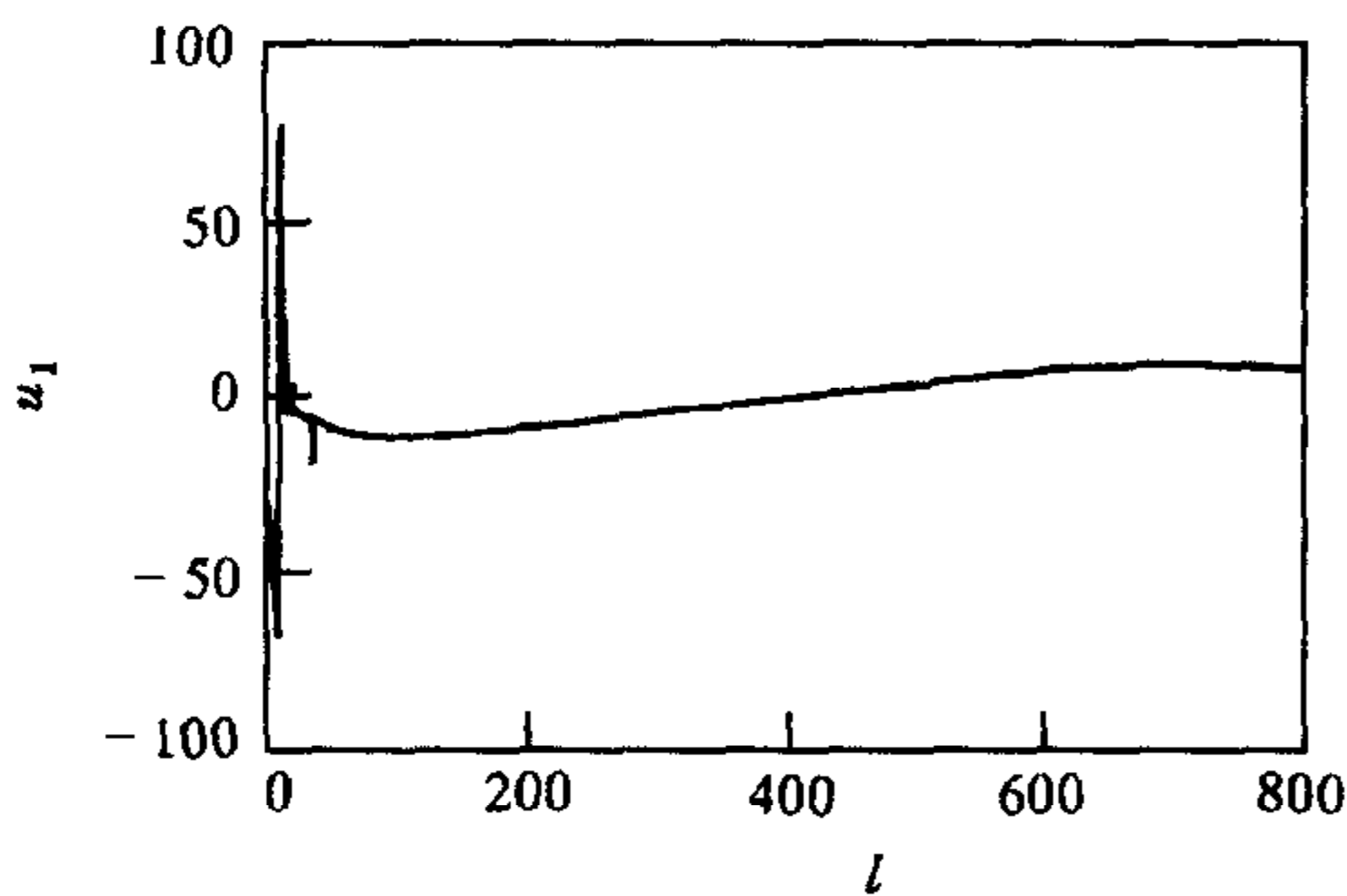
$x_{11}(0) = 0.2, x_{12}(0) = 0, x_{21}(0) = -0.3, x_{22}(0) = 0, \hat{\epsilon}_{h_i}(0) = \hat{\epsilon}_{b_i}(0) = 0.5, \hat{a}_{110}(0) = 10, \hat{a}_{111}(0) = 0.45, \hat{a}_{121}(0) = 3, \hat{a}_{210}(0) = 1.1, \hat{a}_{211}(0) = 1.8, \hat{a}_{221}(0) = 1.1, \hat{\beta}_{11}(0) = -1.9, \hat{\beta}_{22}(0) = -0.9, \hat{\beta}_{13}(0) = 0.01, \hat{\beta}_{14}(0) = 0.9, \hat{\beta}_{15}(0) = 1.9, \hat{\beta}_{21}(0) = 1.9, \hat{\beta}_{22}(0) = 0.5, \hat{\beta}_{23}(0) = 0.1, \hat{\beta}_{24}(0) = 0.5, \hat{\beta}_{25}(0) = 0.9, \hat{\gamma}_{11}(0) = 2, \hat{\gamma}_{12}(0) = 1.3, \hat{\gamma}_{13}(0) = 1, \hat{\gamma}_{14}(0) = 0.5, \hat{\gamma}_{15}(0) = 0.8, \hat{\gamma}_{21}(0) = 0.1, \hat{\gamma}_{22}(0) = 0.25, \hat{\gamma}_{23}(0) = 0.5, \hat{\gamma}_{24}(0) = 0.8, \hat{\gamma}_{25}(0) = 0.9, c_{11} = 10, c_{21} = 10, w_{11} = w_{12} = w_{21} = w_{22} = 2.5, \psi_1 = \psi_2 = 0.05, \phi_1 = \phi_2 = 0.01, \eta_{ij} = \eta_i = 0.2, j = 1, 2, 3, 4, i = 1, 2$ . 仿真结果如图1所示( $l$  为采样次数).



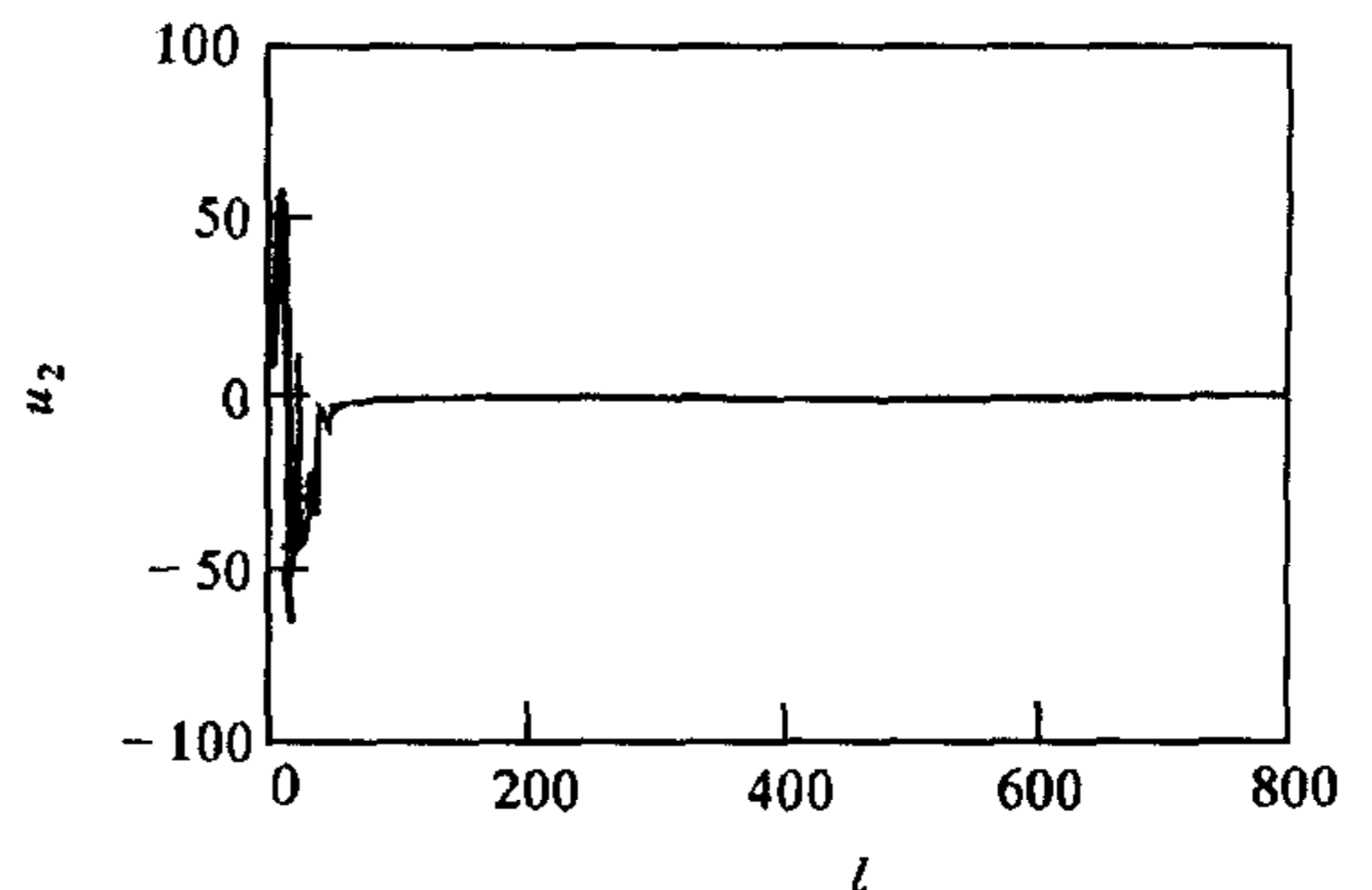
(a)跟踪误差  $e_{11}$



(b)跟踪误差  $e_{21}$



(c)控制信号  $u_1$



(d)控制信号  $u_2$

图1 跟踪误差及控制信号

## 6 结 论

本文提出一种分散自适应模糊滑模控制器的设计方案. 通过在线调节分散模糊系统

中结论模糊集的峰值、未知逼近误差及各子系统间耦合作用项的上界多项式函数中未知系数,从而实现了对动态不确定性进行自适应补偿.利用李亚普诺夫方法,证明了分散自适应模糊滑模控制算法的全局稳定性.由于分散控制律中含有相应的逼近误差的自适应补偿项,因此不管逼近未知函数的模糊系统是否准确,都能保证闭环模糊控制系统的全局稳定性.仿真结果表明,本文提出的分散自适应模糊控制算法具有较强的鲁棒性和良好的跟踪性能,同时不存在颤动现象.

### 参 考 文 献

- 1 Shi L, Singh S K. Decentralized adaptive controller design for large-scale systems with higher order interconnections. *IEEE Trans. Autom. Control*, 1992, **37**(8):1106—1118
- 2 Gavel D T, Siljak D D. Decentralized adaptive control: Structural conditions for stability. *IEEE Trans. Autom. Control*, 1989, **34**(4):413—426
- 3 Yeh Z M. A performance approach to fuzzy control design for nonlinear systems. *Fuzzy Sets and Systems*, 1994, **64**:339—352
- 4 Wang L X, Mendel J M. Fuzzy basis functions, universal approximation and orthogonal leastsquares learning. *IEEE Trans. Neural Networks*, 1992, **3**(5):807—814
- 5 张天平,冯纯伯.一类非线性系统的自适应模糊滑模控制.自动化学报,1997, **23**(3):361—369
- 6 Wang L X. Stable adaptive fuzzy control of nonlinear systems. *IEEE Trans. Fuzzy Systems*, 1993, **1**(2):146—155
- 7 Su C Y, Stepanenko Y. Adaptive control of a class of nonlinear systems with fuzzy logic. *IEEE Trans. Fuzzy Systems*, 1994, **2**(4):285—294
- 8 Sanner R M, Slotine J J E. Gaussian networks for direct adaptive control. *IEEE Trans. Neural Networks*, 1992, **3**(6):837—863
- 9 张天平,冯纯伯.非线性大系统的分散自适应模糊控制.控制理论与应用,1996, **13**(5):559—566

## DECENTRALIZED ADAPTIVE FUZZY SLIDING MODE CONTROL FOR A CLASS OF LARGE-SCALE SYSTEMS

ZHANG TIANPING

(Department of Mathematics, Teachers College, Yangzhou University, Yangzhou 225002)

**Abstract** The problem of decentralized fuzzy control for a class of large-scale systems with unknown function control gains is studied in this paper. Based on the principle of sliding mode control and fuzzy set theory, a design scheme for decentralized adaptive fuzzy controller is proposed. By theoretical analysis, the decentralized adaptive fuzzy control system is proven to be globally stable, with tracking errors converging to a neighborhood of zero.

**Key words** Large-scale systems, fuzzy control, sliding mode control, adaptive control, decentralized control, global stability.

**张天平** 1964年生.1986年毕业于扬州师院数学系,1992年获华东师范大学数学系运筹学与控制论专业硕士学位.1996年4月获东南大学自动化所自动控制理论及应用专业博士学位.现为扬州大学数学系副教授.目前主要从事自适应控制、模糊控制理论及应用、非线性控制等研究工作.