

非线性大系统的分散自适应模糊控制*

张天平

冯纯伯

(扬州大学师范学院数学与计算机科学系·扬州, 225002) (东南大学自动化所·南京, 210018)

摘要: 本文针对非线性大系统, 利用模糊系统的逼近能力, 提出了一种分散自适应模糊控制器设计的系统方法. 控制结构中采用分散模糊系统去自适应补偿过程不确定性, 同时用模糊控制器的输出代替常规变结构控制律中的符号函数. 利用李亚普诺夫理论, 证明了控制算法是全局稳定的, 跟踪误差可收敛到零的一个邻域内.

关键词: 大系统; 模糊控制; 变结构控制; 自适应控制; 分散控制; 全局稳定性

1 引言

现实世界中, 许多过程都是由多个相互作用的子系统组成, 控制这些过程常采用分散控制策略, 对这类大系统的研究已有许多结果^[1~3]. 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. 基于模糊逻辑规则的模糊控制器, 从本质上来说它是一种非线性映射. 通常模糊控制能够应用于那些定义不完善或难以精确建模的复杂过程^[4]. 然而, 模糊控制系统的主要缺点是缺少完善的分析和设计方法. 变结构控制是一种控制系统的综合方法, 主要优点是对于干扰和未建模动态具有较强的鲁棒性, 缺点是会产生高频颤动. 将变结构控制与模糊控制有机地结合起来是设计鲁棒控制的又一新途径. 文献[5~7]证明了模糊系统是通用估计器. 基于文献[5]中的结果, 文献[8]综合出一种稳定的自适应模糊控制器, 该模糊系统用于逼近一个最优控制器, 模糊系统中的参数可自适应地进行调节, 但文[8]中跟踪误差的收敛性依赖于逼近误差平方可积这一假设. 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.

本文讨论了一类非线性大系统的分散模糊控制问题, 为消除通常变结构控制中所固有的颤动现象, 借助于滑动模态设计了模糊控制器, 并将其精确输出用来代替变结构控制中的符号函数. 通过在线调节分散模糊系统中的结论模糊集的峰值达到自适应地补偿动态不确定性, 因此形成了一种自适应模糊控制系统, 其控制律是连续的. 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、未知控制增益以及各子系统间交互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邻域.

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 :

* 国家自然科学基金和江苏省自然科学基金资助课题.

本文于 1995 年 6 月 9 日收到, 1995 年 12 月 20 日收到修改稿.

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

其中 $X_i = (x_{i1}, \dots, x_{im_i})^T \in \mathbb{R}^{m_i}$ 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 是未知控制增益, $d_i(X, t)$ 代表外来干扰及子系统间交互作用的和, $X = (X_1^T, \dots, X_N^T)^T \in \mathbb{R}^m$ 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 $X_i = (x_{i1}, \dots, x_{im_i})^T$ 尽可能好地去跟踪一个指定的期望轨迹 $X_{id} = (x_{id}, \dot{x}_{id}, \dots, x_{id}^{(m_i-1)})^T, i = 1, \dots, N$. 定义子系统 P_i 的跟踪误差向量 $E_i = X_i - X_{id} = (e_{i1}, \dots, e_{im_i})^T$. 因此, 问题是设计一个分散控制律 $u_i(t)$, 使得 E_i 收敛到零的一个小邻域, $i = 1, \dots, N$.

参照文[1]、[5]及[9]中的讨论, 对 $f_i(X_i), d_i(X, t) (i=1, \dots, N)$ 作如下假设:

- I) $|f_i(X_i)| \leq M_{i0}(X_i), X_i \in A_{id}$;
- II) $|f_{iA_i}(X_i) - f_i(X_i)| \leq \epsilon_i, X_i \in A_i$;
- III) 存在未知非负实数 a_{ijk} , 使得

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

其中 $M_{i0}(X_i)$ 是一正函数, ϵ_i 只要是正常数即可, 不必是充分小, p 为正整数, 集合 A_{id}, A_i 由下式给出:

$$A_{id} = \{X_i \mid \|X_i - X_{i0}\|_{p_i, \omega_i} \leq 1\}, \quad (3)$$

$$A_i = \{X_i \mid \|X_i - X_{i0}\|_{p_i, \omega_i} \leq 1 + \psi_i\}. \quad (4)$$

而 $\omega_i = \{\omega_{ij}\}_{j=1}^{m_i}$ 是一组严格正的权, X_{i0} 是 \mathbb{R}^{m_i} 中一定点, $\psi_i > 0$ 表示过渡区域的宽度, $\|X\|_{p_i, \omega_i}$ 是一种加权 p_i -范数, 其定义如下:

$$\|X_i\|_{p_i, \omega_i} = \left[\sum_{j=1}^{m_i} \left(\frac{|x_{ij}|}{\omega_{ij}} \right)^{p_i} \right]^{\frac{1}{p_i}}, \quad X_i = (x_{i1}, x_{i2}, \dots, x_{im_i})^T;$$

当 $p_i = \infty$ 时, $\|X_i\|_{\infty, \omega_i} = \max\left(\frac{|x_{i1}|}{\omega_{i1}}, \dots, \frac{|x_{im_i}|}{\omega_{im_i}}\right)$;

当 $p_i = 2, \omega_{ij} = 1, j = 1, \dots, m_i$ 时, $\|X_i\|_{p_i, \omega_i}$ 变为欧氏范数 $\|X_i\|$. $f_{iA_i}(X_i)$ 是由文[5]中模糊基函数 $p_{ij}(X_i)$ 在 A_i 上对 $f_i(X_i)$ 的一个逼近, 即

$$f_{iA_i}(X_i) = \sum_{j=1}^{N_i} \theta_{ij} p_{ij}(X_i). \quad (5)$$

而 N_i 是第 i 个模糊系统中的规则数目, θ_{ij} 表示模糊系统中第 j 个规则结论部分正规模糊集的峰值, $j = 1, \dots, N_i, i = 1, \dots, N$.

3 分散自适应模糊控制器的设计

假设未知控制增益 b_i 是正常数. 对子系统 P_i 定义切换函数

$$s_i(t) = c_{i1}e_{i1} + c_{i2}e_{i2} + \dots + c_{i(m_i-1)}e_{i(m_i-1)} + e_{im_i}. \quad (6)$$

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

将 $s_i(t)$ 对时间求导得

$$\dot{s}_i(t) = \sum_{j=1}^{m_i-1} c_{ij} e_{i(j+1)} + b_i u_i(t) + d_i(X, t) - f_i(X_i) - x_{id}^{(m_i)}(t). \quad (7)$$

采用如下控制律

$$u_i(t) = -k_{id} s_{i\Delta}(t) - \hat{b}_i^{-1}(t) u_i^*(t) + \hat{b}_i^{-1}(t) (m_i(t) M_{i0}(X_i) + \sum_{k=0}^p \sum_{j=1}^N \hat{a}_{ijk}(t) \|X_j\|^k) u_{if}(t) + (1 - m_i(t)) u_{ia}(t). \quad (8)$$

其中 $k_{id} > 0$, $\hat{b}_i^{-1}(t)$ 是 b_i^{-1} 在 t 时刻的估计值, $u_{if}(t)$ 根据模糊规则确定, 取

$$u_i^*(t) = \sum_{j=1}^{m_i-1} c_{ij} e_{i(j+1)} - x_{id}^{(m_i)}(t), \quad (9)$$

$$u_{ia}(t) = \sum_{j=1}^{N_i} \hat{\alpha}_{ij}(t) p_{ij}(X_i) + \hat{\epsilon}_{id}(t) u_{if}(t), \quad (10)$$

$$m_i(t) = \begin{cases} 0, & \text{当 } X_i \in A_{id}, \\ \text{sat}\left(\frac{\|X_i - X_{i0}\|_{p_i, \omega_i} - 1}{\phi_i}\right), & \text{当 } X_i \in A_i \cap A_{id}^c, \\ 1, & \text{当 } X_i \in A_i^c, \end{cases} \quad (11)$$

$$s_{i\Delta}(t) = s_i(t) - \varphi \text{sat}(s_i(t)/\varphi). \quad (12)$$

这里 $m_i(t)$ 是一种调制函数, $0 \leq m_i(t) \leq 1, \forall t \geq 0$. 而 $\hat{\alpha}_{ij}(t)$ 是 θ_{ij}/b_i 在 t 时刻的估计值, $\hat{\epsilon}_{id}(t)$ 是 ϵ_i/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 $|y| > 1$. $\varphi > 0$ 为边界层宽度.

采用如下自适应律

$$\dot{\hat{\alpha}}_{ij} = -(1 - m_i(t)) \eta_{i1} s_{i\Delta}(t) p_{ij}(X_i), \quad j = 1, \dots, N_i, \quad i = 1, \dots, N, \quad (13)$$

$$\dot{\hat{\epsilon}}_{id} = (1 - m_i(t)) \eta_{i2} |s_{i\Delta}(t)|, \quad i = 1, \dots, N, \quad (14)$$

$$\dot{\hat{a}}_{ijk} = \eta \|X_j\|^k |s_{i\Delta}(t)|, \quad \hat{a}_{ijk}(0) \geq 0, \quad i, j = 1, \dots, N, \quad k = 0, \dots, p, \quad (15)$$

$$\dot{\hat{b}}_i^{-1} = (u_i^*(t) - (\sum_{k=0}^p \sum_{j=1}^N \hat{a}_{ijk}(t) \|X_j\|^k + m_i(t) M_{i0}(X_i)) u_{if}(t)) s_{i\Delta}(t), \quad i = 1, \dots, N. \quad (16)$$

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

确定 u_{if} 的模糊控制规则定义如下:

R_{ji} : 若 s_i 是 \tilde{A}_{ji} , 则 u_{if} 是 $\tilde{B}_{-ji} (j = -2, -1, 0, 1, 2)$

输入: s_i 是 \tilde{A}_i

输出: u_{if} 是 \tilde{B}_i .

其中 $i = 1, \dots, N, \tilde{A}_{ji}, \tilde{B}_{ji}$ 的隶属函数如图 1, 2 所示. 由第 j 条规则得到的模糊关系

$$\tilde{R}_{ji} = \tilde{A}_{ji} \times \tilde{B}_{-ji},$$

即
$$\tilde{R}_{ji}(s_i, u_{if}) = \tilde{A}_{ji}(s_i) \tilde{B}_{-ji}(u_{if}). \quad (17)$$

其中 \times 表示笛卡尔积, $\tilde{A}_{ji}(s_i), \tilde{B}_{-ji}(u_{if})$ 分别表示模糊集 \tilde{A}_{ji} 和 \tilde{B}_{-ji} 的隶属函数. 总的模糊规则所对应的模糊关系为

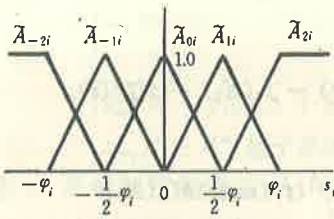


图1 输入模糊集的隶属函数

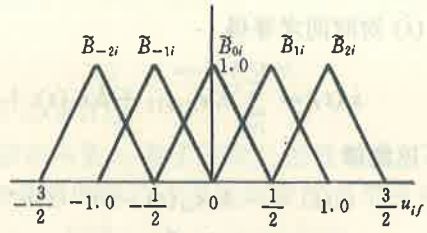


图2 输出模糊集的隶属函数

$$\tilde{R}_i = \bigcup_{j=-2}^2 \tilde{R}_{ji},$$

即

$$\tilde{R}_i(s_i, u_{if}) = \bigvee_{j=-2}^2 [\tilde{A}_{ji}(s_i) \tilde{B}_{-ji}(u_{if})]. \tag{18}$$

其中 \bigvee 表示 max 运算. 采用 max-product 推理合成规则和单元集模糊化方法, 易推得

$$\tilde{B}_i(u_{if}) = \bigvee_{j=-2}^2 [\tilde{A}_{ji}(s_i) \tilde{B}_{-ji}(u_{if})]. \tag{19}$$

采用重心非模糊化方法^[10], 可将模糊控制器输出 \tilde{B}_i 化为精确的控制量

$$u_{if} = \frac{\int_{-3/2}^{3/2} u_{if} \tilde{B}_i(u_{if}) du_{if}}{\int_{-3/2}^{3/2} \tilde{B}_i(u_{if}) du_{if}}. \tag{20}$$

由图 1, 2 及式 (19), (20) 不难推出

$$u_{if} = \begin{cases} 1, & z_i \leq -1, \\ \frac{2z_i^3 + 9z_i^2 + 7z_i + 3}{6z_i^2 + 9z_i + 6}, & -1 < z_i \leq -0.5, \\ \frac{2z_i^3 + 3z_i^2 - 2z_i}{6z_i^2 + 3z_i + 3}, & -0.5 < z_i \leq 0, \\ \frac{2z_i^3 - 3z_i^2 - 2z_i}{6z_i^2 - 3z_i + 3}, & 0 < z_i \leq 0.5, \\ \frac{2z_i^3 - 9z_i^2 + 7z_i - 3}{6z_i^2 - 9z_i + 6}, & 0.5 < z_i \leq 1, \\ -1, & z_i > 1. \end{cases} \tag{21}$$

其中 $i = 1, \dots, N, z_i = \frac{s_i}{\varphi_i}$. 由 (21) 可知, $|s_i| \geq \varphi_i$ 时, $u_{if}(t) = -\text{sgn}(s_i(t))$.

4 稳定性分析

将式 (8) 代入式 (7)

$$\begin{aligned} \dot{s}_i(t) = & -k_{id} b_i s_{i\Delta}(t) + (1 - b_i \hat{b}_i^{-1}(t)) u_i^*(t) + b_i \hat{b}_i^{-1}(t) \left(\sum_{k=0}^p \sum_{j=1}^N \hat{a}_{ijk}(t) \|X_j\|^k \right. \\ & \left. + m_i(t) M_{i0}(X_i) \right) u_{if}(t) - f_i(X_i) + b_i (1 - m_i(t)) u_{ia}(t) + d_i(X, t). \end{aligned} \tag{22}$$

将式 (10) 代入式 (22), 整理得

$$\dot{s}_i(t) = -k_{id} b_i s_{i\Delta}(t) + (1 - b_i \hat{b}_i^{-1}(t)) u_i^*(t) + b_i (1 - m_i(t)) \sum_{j=1}^{N_i} (\hat{a}_{ij}(t) - \frac{\theta_{ij}}{b_i}) p_{ij}(X_i)$$

$$\begin{aligned}
& + (1 - m_i(t))(b_i \hat{\varepsilon}_{id}(t) u_{if}(t) + f_{iA_i}(X_i) - f_i(X_i)) \\
& - m_i(t) f_i(X_i) + b_i \hat{b}_i^{-1}(t) \left(\sum_{k=0}^p \sum_{j=1}^N \hat{a}_{ijk}(t) \|X_j\|^k + m_i(t) M_{i0}(X_i) \right) u_{if}(t) + d_i(X, t) \\
= & -k_{id} b_i s_{i\Delta}(t) + (1 - b_i \hat{b}_i^{-1}(t)) u_i^*(t) + (1 - m_i(t)) \sum_{j=1}^{N_i} (b_i \hat{a}_{ij}(t) - \theta_{ij}) p_{ij}(X_i) \\
& + (1 - m_i(t))(b_i \hat{\varepsilon}_{id}(t) u_{if}(t) + f_{iA_i}(X_i) - f_i(X_i)) + m_i(t) [b_i \hat{b}_i^{-1}(t) M_{i0}(X_i) u_{if}(t) \\
& - f_i(X_i)] + b_i \hat{b}_i^{-1}(t) \sum_{k=0}^p \sum_{j=1}^N \hat{a}_{ijk}(t) \|X_j\|^k u_{if}(t) + d_i(X, t). \tag{23}
\end{aligned}$$

对于由式(8)~(16)以及式(21)构成的控制律,我们提出如下稳定性定理:

定理 考虑非线性大系统(1),其控制律由式(8)~(16)以及式(21)确定,并满足假设 D), D), M) 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.

证 取

$$\begin{aligned}
V(t) = & \sum_{i=1}^N \left[\frac{1}{2} s_{i\Delta}^2(t) + \frac{1}{2} b_i \left(\sum_{j=1}^N (\hat{a}_{ij}(t) - \frac{\theta_{ij}}{b_i})^2 / \eta_{i1} + (\hat{\varepsilon}_{id}(t) - \frac{\varepsilon_i}{b_i})^2 / \eta_{i2} \right. \right. \\
& \left. \left. + (\hat{b}_i^{-1}(t) - b_i^{-1})^2 \right) + \frac{1}{2} \sum_{k=0}^p \sum_{j=1}^N (\hat{a}_{ijk}(t) - a_{ijk})^2 / \eta \right]. \tag{24}
\end{aligned}$$

由于 $|s_i(t)| \leq \psi_i$ 时, $s_{i\Delta}(t) = 0$; $|s_i(t)| > \psi_i$ 时, $s_{i\Delta}(t) = s_i(t)$ 且 $|s_{i\Delta}(t)| = |s_i(t)| - \psi_i$. 将 $V(t)$ 对时间 t 求导得

$$\begin{aligned}
\dot{V}(t) = & \sum_{i=1}^N [s_{i\Delta}(t) \dot{s}_{i\Delta}(t) + \sum_{j=1}^N (b_i \hat{a}_{ij}(t) - \theta_{ij}) \dot{\hat{a}}_{ij}(t) / \eta_{i1} + (b_i \hat{\varepsilon}_{id}(t) - \varepsilon_i) \dot{\hat{\varepsilon}}_{id}(t) / \eta_{i2} \\
& + (b_i \hat{b}_i^{-1}(t) - 1) \dot{\hat{b}}_i^{-1}(t) + \sum_{k=0}^p \sum_{j=1}^N (\hat{a}_{ijk}(t) - a_{ijk}) \dot{\hat{a}}_{ijk}(t) / \eta]. \tag{25}
\end{aligned}$$

当 $|s_i(t)| \leq \psi_i$ 时, $\dot{V}(t) = 0$; 当 $|s_i(t)| > \psi_i$ 时, 将式(23)代入式(25)得

$$\begin{aligned}
\dot{V}(t) \leq & \sum_{i=1}^N [-k_{id} b_i s_{i\Delta}^2(t) + (b_i \hat{\varepsilon}_{id}(t) - \varepsilon_i) \dot{\hat{\varepsilon}}_{id}(t) / \eta_{i2} + (1 - m_i(t)) (-b_i \hat{\varepsilon}_{id}(t) + \varepsilon_i) |s_i \Delta(t)| \\
& + m_i(t) (M_{i0}(X_i) u_{if}(t) - f_i(X_i)) s_{i\Delta}(t) + (- \sum_{k=0}^p \sum_{j=1}^N \hat{a}_{ijk}(t) \|X_j\|^k \\
& + |d_i(X, t)|) |s_{i\Delta}(t)| + \sum_{k=0}^p \sum_{j=1}^N (\hat{a}_{ijk}(t) - a_{ijk}) \dot{\hat{a}}_{ijk}(t) / \eta]. \tag{26}
\end{aligned}$$

将式(11)~(16)代入式(26)并根据假设 I), II) 得

$$\dot{V}(t) \leq \sum_{i=1}^N [-k_{id} b_i s_{i\Delta}^2(t)] < 0.$$

从以上的两种情况分析可以得出

$$\dot{V}(t) \leq - \sum_{i=1}^N k_{id} b_i s_{i\Delta}^2(t) \leq 0, \quad \forall t \geq 0. \tag{27}$$

所以 $V(t)$ 是单调不增的非负函数,故 $\lim_{t \rightarrow \infty} V(t)$ 存在,即 $V(\infty)$ 存在. 进一步得 $\int_0^{\infty} V(t) dt$ 存在,所以 $\int_0^{\infty} \sum_{i=1}^N k_{id} b_i s_{i\Delta}^2(t) dt$ 存在. 又由于 $\{V(t)\}$ 收敛故从式(24)可知, $|s_{i\Delta}(t)|$ 有界, $\hat{a}_{ij}(t)$,

$\hat{e}_{id}(t), \hat{b}_i^{-1}(t), \hat{a}_{ijk}(t)$ 有界, 从而 $s_i(t)$ 有界. 根据式(6) 可知, $X_i = (x_{i1}, \dot{x}_i, \dots, x_i^{(m_i-1)})^T$ 有界.

由于连续函数在有界闭集上必有界, 由式(23) 知 $\dot{s}_i(t)$ 有界, 从而知 $\frac{d}{dt}s_{i\Delta}^2(t) = 2s_{i\Delta}(t)\dot{s}_i(t)$ 有界. 故 $s_{i\Delta}^2(t)$ 在 $[0, \infty)$ 上一致连续, 根据 Barbalat 引理可知, $\lim_{t \rightarrow \infty} |s_{i\Delta}(t)| = 0$, 即 $s_i(t)$ 渐近收敛到边界层 $\{X_i | |s_i(t)| \leq \phi_i\}$. 由此可知跟踪误差必收敛到零的一个邻域.

5 仿真结果

为了验证本文所提控制算法的有效性, 我们采用文献[1, 3]中两个关联倒立摆系统的例子进行了仿真.

例 考虑文献[1]中两个关联倒立摆系统, 其运动方程可用如下的非线性状态方程描述:

$$P_1: \begin{cases} \dot{x}_1 = x_2, \\ \dot{x}_2 = g_1x_1 + g_3u_1 + g_2x_3 - (\beta_1x_2^2 + g_4); \end{cases} \quad (28)$$

$$P_2: \begin{cases} \dot{x}_3 = x_4, \\ \dot{x}_4 = g_1x_3 + g_3u_2 + g_2x_1 - (\beta_2x_4^2 - g_4). \end{cases} \quad (29)$$

其中 $x_1 = \theta_1, x_2 = \dot{\theta}_1, x_3 = \theta_2, x_4 = \dot{\theta}_2, g_1 = g/(c * L) - g_2, g_3 = 1/(c * m * L^2), g_2 = k * a(t) * (a(t) - c * L) * g_3, g_4 = k * (a(t) - c * L) * (y_1 - y_2) * g_3, \beta_1 = m/M * \sin x_1, \beta_2 = m/M * \sin x_3$. 定义 $X_1 = (x_1, x_2)^T, X_2 = (x_3, x_4)^T, X = (X_1^T, X_2^T)^T$. 由此得各交互作用项分别为

$$d_1(X, t) = a(t)(a(t) - 0.5)(-x_1 + x_3) - 0.5m\beta_1x_2^2 - (a(t) - 0.5)(y_1 - y_2),$$
$$d_2(X, t) = a(t)(a(t) - 0.5)(x_1 - x_3) - 0.5m\beta_2x_4^2 - (a(t) - 0.5)(y_2 - y_1).$$

为了与文献[1, 3]中的仿真结果进行比较, 取相同参数值如下: $a(t) = \sin(5t), y_1 = \sin(2t), y_2 = L + \sin(3t), k = 1, M = m = 10, l = 1, L = 2, g = 1, c = 0.5$. 由此得

$$|d_i(X, t)| \leq 2 + \frac{1}{2} \|X_1\| + \frac{1}{2} \|X_2\| + \frac{m}{2} \|X_i\|^2, \quad i = 1, 2. \quad (30)$$

控制目标是使状态 $X_1 = (x_1, x_2)^T, X_2 = (x_3, x_4)^T$ 跟踪指定的轨迹 $X_{id} = (0, 0)^T, i = 1, 2$. 定义 $E_i = X_i - X_{id} = (e_{i1}, e_{i2})^T$. 仿真中, $p_i = 2$, 采样周期为 0.004 秒, $X_{i0} = (0, 0)^T$, 逼近 $f_i(X_1) = -x_1, f_2(X_2) = -x_3$ 的模糊系统用下面 5 条规则描述

$$R_{f_i}^j: \text{ 若 } x_{i1} \text{ 是 } \tilde{A}_{j1i}, x_{i2} \text{ 是 } \tilde{A}_{j2i}, \text{ 则 } f_{iA_j} \text{ 是 } \tilde{B}_{-jfi}, j = -2, -1, 0, 1, 2, i = 1, 2.$$

其中 $x_{11} = x_1, x_{12} = x_2, x_{21} = x_3, x_{22} = x_4, \tilde{A}_{j1i}(x_{i1}) = e^{-\frac{(x_{i1}-j)^2}{2}}, \tilde{A}_{j2i}(x_{i2}) = e^{-\frac{(x_{i2}-j)^2}{2}}$, 用 θ_{ij} 表示正规模糊集 \tilde{B}_{-jfi} 的峰值, $j = -2, -1, 0, 1, 2, i = 1, 2$. 于是采用[5]中同样的推理方法可得模糊系统的输出

$$f_{iA_j}(x_{i1}, x_{i2}) = \sum_{j=-2}^2 \theta_{ij} p_{ij}(x_{i1}, x_{i2}), \quad i = 1, 2. \quad (31)$$

其中模糊基函数

$$p_{ij}(x_{i1}, x_{i2}) = \frac{\tilde{A}_{j1i}(x_{i1})\tilde{A}_{j2i}(x_{i2})}{\sum_{j=-2}^2 \tilde{A}_{j1i}(x_{i1})\tilde{A}_{j2i}(x_{i2})}, \quad j = -2, -1, 0, 1, 2, \quad i = 1, 2. \quad (32)$$

$$x_1(0) = 0.5, x_2(0) = 0, x_3(0) = -0.5, x_4(0) = 0,$$

$$\begin{aligned} \hat{\epsilon}_{1d}(0) = \hat{\epsilon}_{2d} = 0.5, \hat{\alpha}_{1j}(0) = -0.1, j = -2, \dots, 2, \hat{\alpha}_{2j}(0) = 0.1, j = -2, \dots, 2, \\ \hat{\alpha}_{110}(0) = \hat{\alpha}_{120}(0) = \hat{\alpha}_{210}(0) = \hat{\alpha}_{220}(0) = 0.1, \hat{\alpha}_{ijk}(0) = 0.1, i, j, k = 1, 2, \\ \hat{b}_i^{-1}(0) = 1.5, i = 1, 2, c_{11} = 10, c_{21} = 5, \omega_{11} = \omega_{12} = \omega_{21} = \omega_{22} = 0.8, \\ \Psi_1 = \Psi_2 = 0.1, \varphi_1 = \varphi_2 = 0.01, \eta_{i1} = \eta_{i2} = \eta = 0.1, i = 1, 2. \end{aligned}$$

仿真结果如图 3 所示。

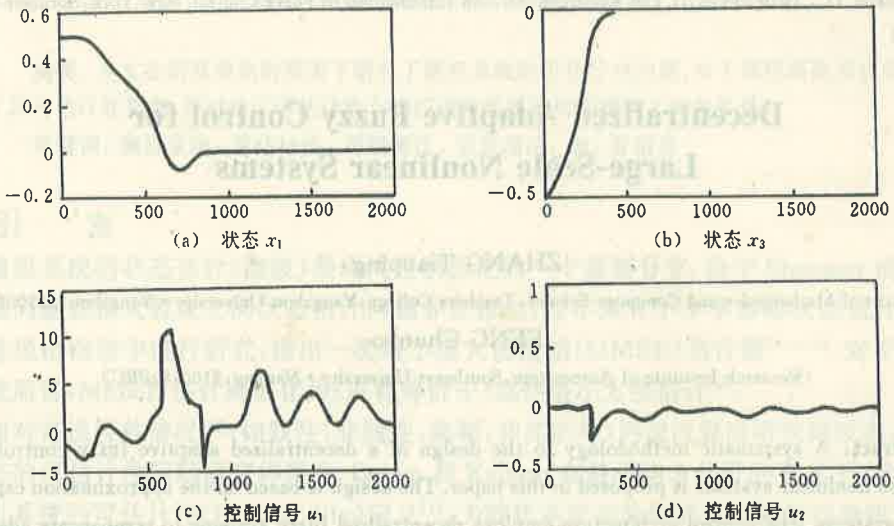


图 3 系统响应及控制信号

6 结 论

本文借助于滑动模式设计了模糊控制器,并以其输出代替符号函数,同时对模糊系统中结论模糊集的峰值进行自适应调节并对动态不确定性进行补偿.利用李亚普诺夫方法,证明了分散自适应模糊控制算法的全局稳定性.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. and Singh, S. K. . Decentralized Adaptive Controller Design for Large-Scale Systems with Higher Order Interconnections. IEEE Trans. Automat. Contr. ,1992, 37:1106-1118
- [2] Gavel, D. T. and Siljak, D. D. . Decentralized Adaptive Control; Structural Conditions for Stabiity. IEEE Trans Automat. Contr. ,1989, AC-34:413-426
- [3] Yeh, Z. M. . A Performance Approach to Fuzzy Control Design for Nonlinear Systems. Fuzzy Sets and Systems, 1994, 64:339-352
- [4] Lee, C. C. . Fuzzy Logic in Control Systems; Fuzzy Logic Controller. Part I, Part II, IEEE Trans. Syst. Man Cybern. , 1990, 2:404-435
- [5] Wang, L. X. and Mendel, J. M. . Fuzzy Basis Functions, Universal Approximation, and Orthogonal Least-Squares Learning. IEEE Trans, Neural Networks, 1992, 3:807-814
- [6] Ying, H. . Sufficient Conditions on General Fuzzy Systems as Function Approximators. Automatica, 1994, 30:521-

525

- [7] Castro, J. L. . Fuzzy Logic Controllers Are Universal Approximators. IEEE Trans , Syst. Man Cybern. , 1995, 25: 629—635
- [8] Wang, L. X. . Stable Adaptive Fuzzy Control of Nonlinear Systems. IEEE Trans. on Fuzzy Systems, 1993, 1: 146—155
- [9] Sanner, R. M. and Slotine, J. J. E. . Gaussian Networks for Direct Adaptive Control. IEEE Trans, Neural Networks, 1992, 3: 837—863
- [10] Driankov, D. , Hellendoom, H. and Reinfrank, M. . An Introduction to Fuzzy Control. New York, Springer-Verlag, 1993

Decentralized Adaptive Fuzzy Control for Large-Scale Nonlinear Systems

ZHANG Tianping

(Department of Mathematics and Computer Science, Teachers College, Yangzhou University • Yangzhou, 225002, PRC)

FENG Chunbo

(Research Institute of Automation, Southeast University • Nanjing, 210018, PRC)

Abstract: A systematic methodology to the design of a decentralized adaptive fuzzy controller for large-scale nonlinear systems is proposed in this paper. The design is based on the approximation capability of fuzzy systems. The control architecture employs decentralized fuzzy systems to compensate adaptively for plant uncertainties, and replacing sign function in the conventional variable structure control with the fuzzy controller output. By using the Lyapunov theory, the algorithm is proven to be globally stable, with tracking errors converging to a neighborhood of zero.

Key words: large-scale systems; fuzzy control; variable structure control; adaptive control; decentralized control; global stability

本文作者简介

张天平 1964年生. 1986年毕业于扬州师院数学系, 后留校任教, 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年获东南大学博士学位. 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.

冯纯伯 见本刊1996年第1期第17页.