第15卷 第3期　　控 制 与 决 策　　2000年5月
Vol 15 No. 3　　CONTROL AND DECISION　　May 2000

基于参考误差调节的间接自适应模糊控制*

师五喜　霍　伟
(北京航空航天大学第七研究室　100083)

摘　要　针对一类不确定非线性系统提出一种新的模糊自适应控制方法。用模糊逻辑系统逼近未知函数,并根据前一步参考误差来修正模糊逻辑系统的输入,以此对逼近误差进行补偿。该方法不但能保证闭环系统稳定,而且可使跟踪误差收敛于原点或原点的一个小邻域内。仿真结果验证了此方法的有效性。

关键词　模糊自适应控制,参考误差,模糊逼近,输入修正
分类号　TP 273

Indirect Adaptive Fuzzy Control Based on Reference Error Adjustment

Shi Wuxi, Huo Wei
(Beijing University of Aeronautics and Astronautics)

Abstract　A new adaptive fuzzy control method for a class of uncertain nonlinear systems is presented. In this method, two fuzzy logic systems are used to approximate unknown functions, and the reference error vector defined is added to the input of one fuzzy logic system to compensate for the approximate errors of fuzzy logic systems. It is proved that the proposed method can not only guarantee the stability of the closed-loop system, but also make the tracking error converge to the origin or its small neighborhood. Simulation results demonstrate the effectiveness of this method.

Key words　adaptive fuzzy control, reference error, fuzzy approximation, input amendment

1　引　　言

文献[1]证明了模糊逻辑系统(FLS)可以任意精度一致逼近任何定义在致密集上的非线性函数。然而在实际应用中,逼近误差总是存在的,它不仅无法量测,而且直接影响模糊控制系统的精度。[1]用FLS成功地设计出一种稳定的自适应模糊控制器,但并未考虑如何减小逼近误差对控制精度的影响。[2]基于参考误差调节人工神经元网络权重,依据前一步参步误差来修正神经元网络的输入,以减小逼近误差对控制精度的影响。

本文借鉴[2]的思想,对一类不确定非线性系统提出了自适应模糊控制方法。此方法用模糊逻辑系统逼近两个未知函数,同时根据跟踪误差来定义参考误差,再根据前一步参考误差来修正其中一个模糊逻辑系统的输入,并用参考误差调节模糊逻辑系统参数。在未知逼近误差存在的情况下,对参考误差进行更强的抑制,从而达到减小跟踪误差的目的。文中证明了该方法不但能保证闭环系统稳定,而且可适当调整控制器中的设计参数,减小跟踪误差。

2　问题的描述及模糊逻辑系统

考虑如下不确定非线性系统

$$\begin{cases} x^{(n)} = f(x, \mathring{x}, \cdots, x^{(n-1)}) + \\ \qquad g(x, \mathring{x}, \cdots, x^{(n-1)})u \\ y = x \end{cases} \tag{1}$$

其中,$\overline{x} = [x, \mathring{x}, \cdots, x^{(n-1)}]^{\mathrm{T}} \in U_c \subset R^n$ 为系统的状态向量,且是可量测的;$u \in R$ 和 $y \in R$ 分别为系统的输入和输出;f 和 g 是未知的连续函数,且满足:

1) 存在已知函数 $f^U(\overline{x})$, $g^U(\overline{x})$ 和 $g^L(\overline{x})$,使得对处于 U_c 内的 $\overline{x}$, $|f(\overline{x})| \le f^U(\overline{x}) < \infty$, $0 < g^L(\overline{x}) \le$

* 1998-12-30 收稿,1999-05-12 修回

$g(\bar{x}) \le g^U(\bar{x}) < \infty$; 2) 对任一 $\bar{x} \in U_c$, 均有 $g(\bar{x}) > 0$ 成立。

控制任务是: 给定有界的光滑参考输出 y_m, 对系统(1)设计自适应模糊控制器 $u = u(\bar{x}|\bar{\theta})$ 以及 FLS 参数向量 $\bar{\theta}$ 的自适应律, 使得: 1) 在所有变量一致有界的意义下, 闭环系统全局稳定, 即存在常量 $M_{\bar{x}}, M_{\bar{\theta}}$ 和 M_u, 对所有的 $t \ge 0$, 都有 $|\bar{x}(t)| \le M_{\bar{x}} < \infty$, $|\bar{\theta}(t)| \le M_{\bar{\theta}} < \infty$, $|u(\bar{x}|\bar{\theta})| \le M_u < \infty$ 成立; 2) 跟踪误差 $e = y_m - y$ 收敛于原点或它的一个小邻域内。

本文采用的模糊逻辑系统的规则库具有如下形式

$$R^{(l)}: \text{If } \tilde{x}_1 \text{ is } F_1^l \text{ and } \cdots \text{ and } \tilde{x}_n \text{ is } F_n^l$$
$$\text{Then } \tilde{y} \text{ is } G^l, \quad l = 1, 2, \cdots, M$$

其中, M 为规则库中的模糊规则数, $\tilde{x} = (\tilde{x}_1, \cdots, \tilde{x}_n)^T$ 是将 $\bar{x}$ 模糊化后得到的模糊变量, $\tilde{y}$ 是输出模糊变量, $F_i^l (i = 1, 2, \cdots, n)$ 和 G^l 均为模糊集合。采用文献[1]中单值模糊产生器、乘积推理规则和中心平均模糊消除器, 则 FLS 的输出可表示为

$$f(\bar{x}) = \bar{\theta}^T \bar{\xi}(\bar{x}) \tag{2}$$

其中

$$\bar{\xi}(\bar{x}) = (\xi_1, \cdots, \xi_M)^T$$
$$\xi_l(\bar{x}) = \frac{\prod_{i=1}^{n} \mu_{F_i^l}(x_i)}{\sum_{l=1}^{M} \prod_{i=1}^{n} \mu_{F_i^l}(x_i)}$$
$$\bar{\theta} = (\theta_1, \cdots, \theta_M)^T, \quad \theta_l = \bar{y}^l$$

$\bar{y}^l$ 为 μ_{G^l} 取最大值时所对应的点。

3 自适应模糊控制器构造

记 $\bar{e} = [e, \dot{e}, \cdots, e^{(n-1)}]^T$, $\bar{k} = [k_0, \cdots, k_{n-2}, 1]^T$, $\bar{k}$ 中元素使得 $\hat{L}(s) = s^{n-1} + \cdots + k_1 s + k_0$ 是 Hurwitz 多项式。定义参考误差 $e_s = \bar{k}^T \bar{e}$, 记 $\bar{e}_s = \dot{e}_s - e^{(n)} = [k_0, \cdots, k_{n-2}][\dot{e}, \cdots, e^{(n-1)}]^T$。若 f 和 g 已知, 则取控制器 $u = \frac{1}{g(\bar{x})}[-f(\bar{x}) + y_m^{(n)} + \eta e_s + \bar{e}_s]$, $\eta > 0$。代入(1)式得 $\dot{e}_s = -\eta e_s$, 此式表明 e_s 渐近稳定, 从而知误差 $\bar{e}$ 趋于零。

现 f 和 g 未知, 以上控制器不可能实现。故分别用两个形如(2)式的 FLS 来逼近 f 和 g, 得到 $\hat{f}(\bar{x}|\bar{\theta}_f) = \bar{\theta}_f^T \bar{\xi}_1(\bar{x})$, $\hat{g}(\bar{x}|\bar{\theta}_g) = \bar{\theta}_g^T \bar{\xi}_2(\bar{x})$。取控制器

$$u = u_c + u_s \tag{3}$$

其中 u_s 是监督控制, 考虑到逼近误差的存在, 取

$$u_c = \frac{1}{\hat{g}(\bar{x}|\bar{\theta}_g)}[-\hat{f}(\bar{x} + k_f \Delta\bar{x}|\bar{\theta}_f) + y_m^{(n)} + \eta e_s + \bar{e}_s] \tag{4}$$

其中 η 为待设计的正数; k_f 为修正系数, 修正值 $\Delta\bar{x} = \left[\bar{\theta}_f^T \frac{\partial \bar{\xi}_1}{\partial \bar{x}}\right]^T e_s$。将(3)式代入(1)式得

$$\dot{e}_s = -\eta e_s + (\hat{f}(\bar{x} + k_f \Delta\bar{x}|\bar{\theta}_f) - f) + (\hat{g} - g)u_c - g u_s \tag{5}$$

取 Lyapunov 函数 $V_e = \frac{1}{2} e_s^2$, 对其沿(5)式求导得

$$\dot{V}_e \le -\eta e_s^2 + |e_s|[|\hat{f}(\bar{x} + k_f \Delta\bar{x}|\bar{\theta}_f)| + |f| + |\hat{g} u_c| + |g u_c|] - e_s g u_s \tag{6}$$

取监督控制

$$u_s = I \operatorname{sgn}(e_s) \frac{1}{g^L}[|\hat{f}(\bar{x} + k_f \Delta\bar{x}|\bar{\theta}_f)| + f^U(\bar{x}) + |\hat{g} u_c| + |g^U u_c|] \tag{7}$$

当 $V_e > \bar{V}$ ($\bar{V}$ 是设计者取定的常量, 用来控制状态向量模的大小) 时, $I = 1$; 当 $V_e \le \bar{V}$ 时, $I = 0$。当 $V_e > \bar{V}$ 时, 由(6)和(7)式知, $\dot{V}_e \le -\eta e_s^2 \le 0$, 因此只要取 u_s 为(7)式, 就可保证 $V_e \le \bar{V}$, 所以 e_s 有界。

定义

$$\bar{\theta}_f^* = \arg\min_{\bar{\theta}_f \in \Omega_f}[\sup_{\bar{x} \in U_c} |\hat{f}(\bar{x}|\bar{\theta}_f) - f(\bar{x})|]$$
$$\bar{\theta}_g^* = \arg\min_{\bar{\theta}_g \in \Omega_g}[\sup_{\bar{x} \in U_c} |\hat{g}(\bar{x}|\bar{\theta}_g) - g(\bar{x})|]$$

其中, $\Omega_f = \{\bar{\theta}_f: |\bar{\theta}_f| \le M_f\}$, $\Omega_g = \{\bar{\theta}_g: |\bar{\theta}_g| \le M_g, \bar{y}^l \ge \epsilon\}$, M_f, M_g 和 ϵ 是取定的正数, $\bar{y}^l \ge \epsilon$ 用来保证 $\hat{g}(\bar{x}|\bar{\theta}_g) > 0$, 以与 $g(\bar{x})$ 应满足 $g(\bar{x}) > 0 (\forall \bar{x} \in U_c)$ 相一致。定义 $\omega = (\hat{f}(\bar{x}|\bar{\theta}_f^*) - f(\bar{x})) + (\hat{g}(\bar{x}|\bar{\theta}_g^*) - g(\bar{x}))u_c$, 并记 $\Phi_f = \bar{\theta}_f - \bar{\theta}_f^*$, $\Phi_g = \bar{\theta}_g - \bar{\theta}_g^*$, 则(5)式可写成

$$\dot{e}_s = -\eta e_s + [\hat{f}(\bar{x} + k_f \Delta\bar{x}|\bar{\theta}_f) - \hat{f}(\bar{x}|\bar{\theta}_f^*)] + [\hat{g}(\bar{x}|\bar{\theta}_g) - \hat{g}(\bar{x}|\bar{\theta}_g^*)]u_c + \omega - g u_s \tag{8}$$

由 Taylor 展式知

$$\hat{f}(\bar{x} + k_f \Delta\bar{x}|\bar{\theta}_f) = \hat{f}(\bar{x}|\bar{\theta}_f) + k_f \Delta\bar{x}^T \left[\bar{\theta}_f^T \frac{\partial \bar{\xi}_1}{\partial \bar{x}}\right]^T + o(|\Delta\bar{x}|) \tag{9}$$

将(9)式代入(8)式得

$$\dot{e}_s = -\left\{\eta - k_f \left[\bar{\theta}_f^T \frac{\partial \bar{\xi}_1}{\partial \bar{x}}\right]\left[\bar{\theta}_f^T \frac{\partial \bar{\xi}_1}{\partial \bar{x}}\right]^T\right\} e_s + \Phi_f^T \bar{\xi}_1(\bar{x}) + \Phi_g^T \bar{\xi}_2(\bar{x}) u_c - g u_s + d \tag{10}$$

其中 $d = \omega + o(|\Delta\bar{x}|)$。记 $\eta_s = \eta - k_f \left[\bar{\theta}_f^T \frac{\partial \bar{\xi}_1}{\partial \bar{x}}\right] \times \left[\bar{\theta}_f^T \frac{\partial \bar{\xi}_1}{\partial \bar{x}}\right]^T$, 于是(10)式可写成

$$\overset{\circ}{e}_s = -\eta_s e_s + \Phi_f^T \bar{\xi}_1(\bar{x}) + \Phi_g^T \bar{\xi}_2(\bar{x}) u_c + d - g u_s \tag{11}$$

注1 若不考虑输入修正, 取 $u_c = \frac{1}{\hat{g}(\bar{x}|\theta_g)}[-\hat{f}(\bar{x}|\theta_f) + y_m^{(n)} + \eta_s e_s + \bar{e}_s]$, 则误差方程为 $\overset{\circ}{e}_s = -\eta e_s + \Phi_f^T \bar{\xi}_1(\bar{x}) + \Phi_g^T \bar{\xi}_2(\bar{x}) u_c + \omega - g u_s$。由(11)式知, 只要取 $k_f < 0$, 就有 $\eta_s > \eta$, 故形如(4)式的带有输入修正的控制器对参考误差有更强的抑制作用。

为保证闭环系统稳定性和误差的收敛性, 采用下列自适应律来调节参数向量 θ_f。

$$\dot{\theta}_f = \begin{cases} -\gamma_1 \bar{\xi}_1(\bar{x}) e_s, & |\theta_f| < M_f \text{ 或} \\ & |\theta_f| = M_f \text{ 且 } \theta_f^T \bar{\xi}_1(\bar{x}) e_s \geq 0 \\ P\{-\gamma_1 \bar{\xi}_1(\bar{x}) e_s\} & \\ & |\theta_f| = M_f \text{ 且 } \theta_f^T \bar{\xi}_1(\bar{x}) e_s < 0 \end{cases} \tag{12}$$

式中 $\gamma_1 > 0$。投影算子 $P\{\cdot\}$ 按文献[1]定义为

$$P\{-\gamma_1 \bar{\xi}_1(\bar{x}) e_s\} = -\gamma_1 \bar{\xi}_1(\bar{x}) e_s + \gamma_1 \frac{\theta_f \theta_f^T \bar{\xi}_1(\bar{x})}{|\theta_f|^2} e_s \tag{13}$$

采用下列自适应律来调节参数向量 θ_g: 当 θ_g 的某一分量 $\theta_{gi} = \epsilon$ 时, 采用

$$\dot{\theta}_{gi} = \begin{cases} -\gamma_2 \xi_{2i}(\bar{x}) e_s u_c, & \xi_{2i}(\bar{x}) e_s u_c < 0 \\ 0, & \xi_{2i}(\bar{x}) e_s u_c \geq 0 \end{cases} \tag{14}$$

式中 $\gamma_2 > 0$, $\xi_{2i}(\bar{x})$ 为 $\bar{\xi}_2(\bar{x})$ 的第 i 个分量。否则, 采用

$$\dot{\theta}_g = \begin{cases} -\gamma_2 \bar{\xi}_2(\bar{x}) e_s u_c, & |\theta_g| < M_g \text{ 或} \\ & |\theta_g| = M_g \text{ 且 } \theta_g^T \bar{\xi}_2(\bar{x}) e_s u_c \geq 0 \\ P\{-\gamma_2 \bar{\xi}_2(\bar{x}) e_s u_c\} & \\ & |\theta_g| = M_g \text{ 且 } \theta_g^T \bar{\xi}_2(\bar{x}) e_s u_c < 0 \end{cases} \tag{15}$$

式中

$$P\{-\gamma_2 \bar{\xi}_2(\bar{x}) e_s u_c\} = -\gamma_2 \bar{\xi}_2(\bar{x}) e_s u_c + \gamma_2 \frac{\theta_g \theta_g^T \bar{\xi}_2(\bar{x}) e_s u_c}{|\theta_g|^2} \tag{16}$$

定理1 对系统(1), 如果采用控制器(3)和参数调节律(12)～(16), 则有

1) 对所有 $t \geq 0$ 成立 $|\theta_f| \leq M_f$, $|\theta_g| \leq M_g$, θ_g 的所有分量 $\geq \epsilon$。

$$|\bar{x}(t)| \leq B_m + \left[\sum_{i=0}^{n-2} (\|\hat{G}_i(s)\|_1)^2 + \left(1 + \sum_{i=0}^{n-2} k_i \|\hat{G}_i(s)\|_1\right)^2\right]^{1/2} (2\bar{V})^{1/2} \tag{17}$$

$$|u(t)| \leq \frac{1}{\epsilon}[M_f + B_n + (\eta + 1)(2\bar{V})^{1/2}] + \frac{1}{g^L(\bar{x})}[M_f + |f^U(\bar{x})| + \frac{1}{\epsilon}(M_g + g^U) \times (M_f + B_n + (\eta + 1)(2\bar{V})^{1/2})] \tag{18}$$

其中, $\hat{G}_i(s) = s^i / \hat{L}(s)$, $i = 0, \cdots, n-1$; $\|\hat{G}_i(s)\|_1 = \int_{-\infty}^{\infty} |g_i(\tau)| \mathrm{d}\tau$, $g_i(t) = L^{-1}[\hat{G}_i(s)]$; B_m 是 $|\bar{Y}_m| = |[y_m, \overset{\circ}{y}_m, \cdots, y_m^{(n-1)}]^T|$ 的上界, B_n 是 $|y_m^{(n)}|$ 的上界。

2) 当 $k_f < 0$ 时, 跟踪误差 e 将收敛于原点的小邻域, 且增大 k_f 的绝对值或增大 γ_1, γ_2 的值, 可使 $|e|$ 的值减小。

3) 若 $d \in L_2$, $\eta > 1$, 则 $\lim_{t\to\infty} |e| = 0$。

证明 在此只证2), 其他证明与[1]中定理8.1的证明类似。

取Lyapunov函数

$$V = \frac{1}{2} e_s^2 + \frac{1}{2\gamma_1} \Phi_f^T \Phi_f + \frac{1}{2\gamma_2} \Phi_g^T \Phi_g$$

由(12)～(16)式知

$$\dot{V} = -\eta_s e_s^2 + e_s d + I_1 \frac{\Phi_f^T \theta_f \theta_f^T \bar{\xi}_1(\bar{x}) e_s}{|\theta_f|^2} + I_2 \frac{\Phi_{g+}^T \theta_{g+} \theta_{g+}^T \bar{\xi}_{2+}(\bar{x}) e_s u_c}{|\theta_{g+}|^2} + I_3 \Phi_{g\epsilon}^T \bar{\xi}_{2\epsilon}(\bar{x}) e_s u_c - e_s g u_s \tag{19}$$

当(12)式第一行(或第二行)成立时, $I_1 = 0$(或 $I_1 = 1$); 当(15)式第一行(或第二行)成立时, $I_2 = 0$(或 $I_2 = 1$); 当(14)式第一行(或第二行)成立时, $I_3 = 0$(或 $I_3 = 1$)。θ_{g+} 表示所有 $\theta_{gi} > \epsilon$ 的集合, $\theta_{g\epsilon}$ 表示所有 $\theta_{gi} = \epsilon$ 的集合, $\Phi_{g+} = \theta_{g+} - \theta_{g+}^*$, $\Phi_{g\epsilon} = \theta_{g\epsilon} - \theta_{g\epsilon}^*$, $\bar{\xi}_{2+}(\bar{x})$ 表示 $\bar{\xi}_2(\bar{x})$ 相对于 θ_{g+} 的集合。可以证明, (19)式中含 I_1, I_2, I_3 的项均非正, 而 $\left[\theta_f^T \frac{\partial \bar{\xi}_1}{\partial \bar{x}}\right]\left[\theta_f^T \frac{\partial \bar{\xi}_1}{\partial \bar{x}}\right]^T \geq k_M > 0$, 因此 $\eta_s \geq \eta - k_f k_M \triangleq \eta_M$。由于 θ_f, θ_g, $\bar{x}$ 和 u 均有界, 于是 d, Φ_f, Φ_g 均有界。令 $|d| \leq W$, $|\Phi_f| \leq W_f$, $|\Phi_g| \leq W_g$, 又 $e_s g u_s \geq 0$, 所以(19)式变为

$$\dot{V} \leq -\eta_M e_s^2 + e_s d \leq -|e_s|(\eta_M |e_s| - W) \tag{20}$$

当 $|e_s| > W / \eta_M$ 时, 有 $\dot{V} < 0$。记 $E = [e_s, \Phi_f^T, \Phi_g^T]^T$, 定义闭集 $B = \{E \,|\, |e_s| \leq W / \eta_M, |\Phi_f| \leq W_f, |\Phi_g| \leq W_g\}$, 则

$$S(p) = \{E \,|\, V \leq p\ (p \text{ 为常数}), |\Phi_f| \leq W_f, |\Phi_g| \leq W_g\} \tag{21}$$

取包含闭集 B 的形如(21)式的最小闭集 $S(\underline{p}) = \{E \,|\, V \leq \underline{p}, |\Phi_f| \leq W_f, |\Phi_g| \leq W_g\}$, 其中 $\underline{p} = \frac{W^2}{2\eta_M} + \frac{1}{2\gamma_1} W_f^2 + \frac{1}{2\gamma_2} W_{g0}^2$。任取 $\bar{p} > \underline{p}$, 令 $p_0 = V(t_0)$, $c_0 =$

$\min\{\eta_a e_s^2 - |e_s| W \mid E \in S(p_0) - S(\bar{p})\}$, 则由文献[3]知, $E(t)$ 对集合 $S(\bar{p})$ 一致最终有界。当

$$t \ge t_0 + T(E(t_0), S(\bar{p}))$$

$$T(E(t_0), S(\bar{p})) = \begin{cases} 0, & E(t_0) \in S(\bar{p}) \\ \dfrac{p_0 - \bar{p}}{c_0}, & E(t_0) \notin S(\bar{p}) \end{cases}$$

但

$$|\Phi_f(t_0)| \le W_f, \quad |\Phi_g(t_0)| \le W_g$$

时, $E(t) \in S(\bar{p})$。进而由 $\frac{1}{2} e_s^2 \le V \le \bar{p}$ 知, $|e_s| \le \sqrt{2\bar{p}}$, 因此 e_s 将收敛到原点的小邻域内, 且适当增大 k_f 的绝对值或增大 γ_1, γ_2 的值, 可使 $\bar{p}$ 的值减小, 从而使 $|e_s|$ 减小。又 $|e| \le |e_s| \|\hat{G}(s)\|_1$, 由此知 e 也将收敛到原点的小邻域, 且适当增大 k_f 的绝对值或 γ_1, γ_2 的值, 可使跟踪误差变小。(证毕)

4　仿　　真

研究倒摆控制问题, 其动态方程为

$$\begin{cases} \dot{x}_1 = x_2 \\ \dot{x}_2 = \dfrac{g \sin x_1 - \dfrac{m l x_2^2 \cos x_1 \sin x_1}{m_c + m}}{l\left(\dfrac{4}{3} - \dfrac{m \cos^2 x_1}{m_c + m}\right)} + \dfrac{\dfrac{\cos x_1}{m_c + m}}{l\left(\dfrac{4}{3} - \dfrac{m \cos^2 x_1}{m_c + m}\right)} u \end{cases}$$

式中, $g = 9.8\,\mathrm{m/s^2}$, $m_c = 1\,\mathrm{kg}$, $m = 0.1\,\mathrm{kg}$, $l = 0.5\,\mathrm{m}$。参考信号为 $y_m(t) = \frac{\pi}{30}\sin(t)$。由文献[1]知, $f^U = 15.78 + 0.0366 x_2^2$, $g^U = 1.46$, $g^L = 1.12$, 误差 $e = y_m - x_1$。若要求 $|\bar{x}| \le \pi/6$, $|u| \le 190$, 取 $\bar{k} = [2, 1]^T$, 选 $t_0 = 0$, 可得 $\|\hat{G}(s)\|_1 = 1/2$。由于 $|\bar{Y}_m| \le \pi/30$, 为使 $|\bar{x}|$ 满足约束条件, 由(17)式可选 $\bar{V} = 0.0206$。根据(18)式可选取 $M_f = 15$, $M_g = 6.5$, $\epsilon = 0.8$, $\eta = 5$, 使 u 满足约束条件。$f(\bar{x})$, $g(\bar{x})$ 分别用形如(2)式的 25 条规则构成的 FLS 逼近, 隶属函数的选取同[1]中例 8.1。选择 $\gamma_1 = 80$, $\gamma_2 = 1$, 初始条件 $\bar{x}(0) = (-\pi/30, 0)^T$, $\theta_f(0)$ 和 $\theta_g(0)$ 分别在[-2, 2]和[1, 1.3]内随机选取。

文献[1]的系统误差曲线如图 1 所示, 本文方法 $k_f = -1.5$ 时的误差曲线如图 2 所示。从图中明显看出, 本文提出的控制律能明显减小跟踪误差的大小。

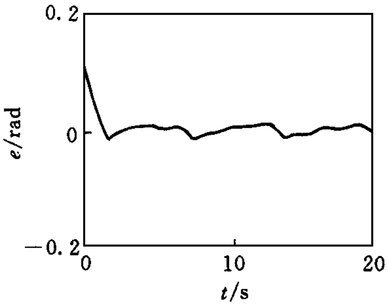

图 1　文献[1]的误差曲线

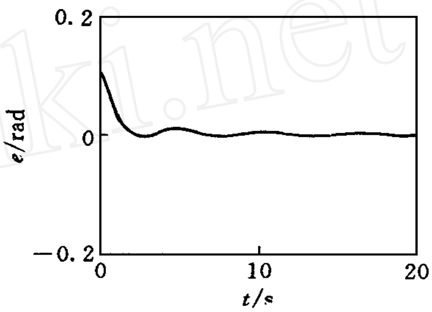

图 2　本文的误差曲线

参 考 文 献

1　王立新. 自适应模糊系统与控制——设计与稳定性分析. 北京: 国防工业出版社, 1995

2　任雪梅. 非线性系统的神经网络辨识与控制研究. 北京航空航天大学博士学位论文, 1995

3　M W Spong, J S Thorp, J M Kleinwaks. Robust microprocessor control of robot manipulators. Automatica, 1987, 23(3): 373_379

4　Jeffrey T Spooner, Kevin M Passino. Stable indirect adaptive control using fuzzy systems and neural networks. In: Proc of the 34th Conf on Design & Control. 1995

作 者 简 介

师五喜　男, 1964 年生。1996 年入北京航空航天大学第七研究室攻读硕士学位。目前主要从事非线性系统自适应模糊控制研究。

霍　伟　见本刊 1995 年第 10 卷第 6 期第 518 页。