

文章编号: 1001-0920(2006)04-0367-04

带有未知死区模型的鲁棒自适应模糊控制

张天平, 裔 扬, 梅建东

(扬州大学 信息工程学院, 江苏 扬州 225009)

摘 要: 针对一类带有死区模型并具有未知函数控制增益的 SISO 非线性系统, 根据滑模控制原理, 利用 Nussbaum 函数的性质, 提出一种自适应模糊控制器的设计方案。该方案取消了函数控制增益符号已知和死区模型参数上界、下界已知的条件, 通过引入最优逼近误差的自适应补偿项来消除建模误差和参数估计误差的影响。理论分析证明了闭环系统的稳定性和跟踪误差收敛到零。仿真结果表明了该方法的有效性。

关键词: 死区模型; 模糊控制; 自适应控制; 滑模控制; Nussbaum 函数

中图分类号: TP273 **文献标识码:** A

Robust Adaptive Fuzzy Control with Unknown Dead-zone Model

ZHANG Tian-ping, YI Yang, MEI Jian-dong

(College of Information Engineering, Yangzhou University, Yangzhou 225009, China Correspondent: ZHANG Tian-ping, E-mail: tpzhang@mail.yzu.edu.cn)

Abstract: A design scheme of adaptive fuzzy controller for a class of SISO nonlinear system with unknown function control gain and dead-zone model is proposed. The design is based on the principle of sliding mode control and the property of Nussbaum function. The approach does not require a priori knowledge of the sign of the control gain, the upper bound and lower bound of dead zone model parameter. The adaptive compensation term of the optimal approximation error is adopted to minimize the influence of modeling errors and parameter estimation errors. The closed-loop control system is shown to be stable in the sense that all signals involved are bounded, with tracking error converging to zero. Simulation results demonstrate the effectiveness of the approach.

Key words: Dead-zone model; Fuzzy control; Adaptive control; Sliding mode control; Nussbaum function

1 引 言

许多工业过程中存在着死区非线性环节, 在控制精度要求较高的情况下, 必须考虑这些因素对系统的影响。20 世纪 90 年代以来, 为减少这种未知死区非线性对控制系统的影响, 许多学者对其进行了研究, 并取得了一定的成果^[1~5]。文献[1, 2]针对一类线性系统, 分别引用连续和离散的自适应死区逆对死区进行补偿。文献[3~5]针对含有死区模型的非线性系统, 提出了新的控制方案。[4, 5]通过简化死区模型使控制律的设计更为简单, 然而[5]仅讨论了控制增益为常数的情况。近年来, 非线性动态系统

的建模与控制一直是控制理论研究的热点之一, 并取得了一些研究成果^[6~8]。[6]利用积分型李亚普诺夫函数取消了控制增益一阶导数上界已知的要求, 跟踪误差渐近收敛于一个小的残差集内。[7, 8]针对 SISO, MIMO 不确定非线性系统, 利用模糊逻辑系统的逼近能力和修改的李亚普诺夫函数, 提出了两种自适应模糊控制方案, 理论分析证明了跟踪误差收敛到零。[9]讨论了 Nussbaum 函数的性质。[10, 11]利用其性质对控制增益符号未知的非线性系统, 提出鲁棒自适应控制策略。

本文针对一类带有未知死区和未知控制增益符

收稿日期: 2005-03-21; 修回日期: 2005-05-17

基金项目: 国家自然科学基金项目(60074013, 10371106); 江苏省教育厅指导性基金项目(KK0310067); 扬州大学信息科学学科群基金项目(1SG030606)。

作者简介: 张天平(1964—), 男, 江苏泰兴人, 教授, 博士, 从事自适应控制、模糊控制理论等研究; 裔扬(1980—), 男, 江苏扬州人, 硕士生, 从事自适应控制、模糊控制理论等研究。

号的不确定 SISO 非线性系统,采用文献[5]的简化死区模型,引入Nussbaum 函数,提出一种自适应模糊滑模控制方法与文献[5]相比,该方法更具一般性,取消了死区模型参数的上下界必须已知的条件和控制增益符号已知的假设 通过利用积分型李亚普诺夫函数和最优逼近误差的自适应补偿项,证明了闭环系统状态有界,跟踪误差收敛到零 仿真结果表明,本文提出的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

2 问题的描述和基本假设

考虑下面一类 SISO 非线性系统:

$$\begin{cases} \dot{x}^{(n)} = f(x, \dot{x}, \dots, x^{(n-1)}) + \\ \quad g(x, \dot{x}, \dots, x^{(n-1)})w(t) + \\ \quad d(x, \dot{x}, \dots, x^{(n-1)}, t), \\ y = x. \end{cases} \quad (1)$$

其中: $x = (x_1, x_2, \dots, x_n)^T = (x, \dot{x}, \dots, x^{(n-1)})^T$ 是状态向量, w 是具有输入为 $v(t)$ 的死区模型输出, y 是系统输出, $f(x)$ 是未知连续函数, $g(x)$ 是未知控制增益, $d(x, t)$ 代表外来干扰或未建模动态

控制目标要求系统输出 y 尽可能好地跟踪一个指定的期望轨迹 y_d , 因此, 问题转化为设计一个控制律 $v(t)$, 使得 $y - y_d$ 收敛到零. 定义 x_d, e 和滤波误差 s 如下:

$$\begin{aligned} x_d &= (y_d, \dot{y}_d, \dots, y_d^{(n-1)})^T, \\ e &= x - x_d = (e_1, e_2, \dots, e_n)^T, \\ s &= \left[\frac{d}{dt} + \lambda \right]^{n-1} e_1 = \sum_{i=1}^{n-1} c_i e_i + e_n = H(s) e_n \end{aligned} \quad (2)$$

其中: $\lambda > 0, H(s) = s^{n-1} + c_{n-1}s^{n-2} + \dots + c_1$ 是 Hurwitz 多项式 由式(1)和(2)可知

$$\begin{aligned} \dot{s} &= \sum_{i=1}^{n-1} c_i e_{i+1} + \dot{x}_n - \dot{y}_d^{(n)} = \\ & \mathcal{Y} + f(x) + g(x)w + d(x, t), \\ \dot{\mathcal{Y}} &= \sum_{i=1}^{n-1} c_i e_{i+1} - \dot{y}_d^{(n)}. \end{aligned} \quad (3)$$

为了设计稳定的自适应模糊滑模控制,对未知函数 $f(x), g(x), d(x, t)$ 作如下假设:

- 1) $g_1 |g(x)| g_0 > 0, \forall x \in R^n,$
- 2) $|d(x, t)| \leq p^* \Phi(x), \forall t > 0,$
- 3) $(x_d^T, y_d^{(n)T})^T \in \Omega_d.$

其中: $\Phi(x)$ 是已知的非负光滑函数, g_0 和 g_1 是已知的正常数, p^* 是未知正常数, Ω_d 是已知的有界闭集

3 死区模型及其基本性质^[1,5]

输入为 $v(t)$, 输出为 $w(t)$ 的死区模型描述如图

1 所示

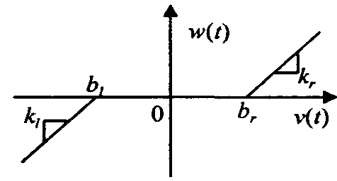


图1 死区模型

$$w(t) = D(v(t)) = \begin{cases} k_r(v(t) - b_r), & v(t) > b_r; \\ 0, & b_l < v(t) < b_r; \\ k_l(v(t) - b_l), & v(t) < b_l. \end{cases} \quad (4)$$

假设死区模型具有如下基本性质:

- 1) 死区输出 $w(t)$ 是不可测量的;
- 2) 死区的倾斜度 $k_r = k_l = k$;
- 3) 死区参数 b_r, b_l, k 是未知的有界常数, 但它们的符号已知, $b_r > 0, b_l < 0, k > 0$

根据上述死区的基本性质,重新定义死区模型如下:

$$w(t) = D(v(t)) = kv(t) + d(v(t)). \quad (5)$$

其中

$$d(v(t)) = \begin{cases} -kb_r, & v(t) < b_l; \\ -kv(t), & b_l < v(t) < b_r; \\ -kb_l, & v(t) > b_r. \end{cases} \quad (6)$$

$|d(v(t))| \leq \rho^*, \rho^*$ 是未知的正常数

4 Nussbaum 函数的定义及性质

为了进一步研究的需要,引入Nussbaum 函数 定义1 如果连续函数 $N(s): R \rightarrow R$ 满足条件

- 1) $\limsup_{s \rightarrow +\infty} \frac{1}{s} \int_0^s N(\zeta) d\zeta = +\infty,$
- 2) $\liminf_{s \rightarrow -\infty} \frac{1}{s} \int_0^s N(\zeta) d\zeta = -\infty,$

则称 $N(s)$ 是Nussbaum 函数

引理1^[10] 已知 $V(\cdot), \zeta(\cdot)$ 都是 $[0, t_f)$ 上的光滑函数, 且 $V(t) > 0, \forall t \in [0, t_f), N(\cdot)$ 是Nussbaum 函数, 如果下列不等式成立:

$$\begin{aligned} \dot{V}(t) &\leq -c_0 + \int_0^t (gN(\zeta) + 1)\zeta d\tau, \\ &\quad \forall t \in [0, t_f). \end{aligned} \quad (7)$$

其中: g 是非零常数, c_0 是合适的常数 那么 $V(t), \zeta(t)$ 和 $\int_0^t (gN(\zeta) + 1)\zeta d\tau$ 一定在 $[0, t_f)$ 上有界

5 自适应模糊控制器的设计及其稳定性分析

定义光滑函数如下:

$$V_s = \int_0^s \frac{\sigma}{|g(x, \sigma) + \mathcal{Y}|} d\sigma \quad (8)$$

其中: $\bar{x} = (x_1, x_2, \dots, x_{n-1})^T, \mathcal{Y}_1 = y_d^{(n-1)} - \sum_{i=1}^{n-1} c_i e_i$

由积分中值定理可知, $\exists \lambda \in (0, 1)$, 使得

$$V_s = s^2/2g(\bar{x}, \lambda s + \mathcal{Y}_1).$$

所以有 $V_s = \frac{s^2}{2g_1} > 0$, 即 V_s 是关于变量 s 的正定函数. 由复合函数的求导规则可知

$$V_s^\circ = \frac{s}{|g(x)|} s + \int_0^s \left[\frac{\partial |g^{-1}(\bar{x}, \sigma + \mathcal{Y}_1)|}{\partial \bar{x}} \right]_{x+} \frac{\partial |g^{-1}(\bar{x}, \sigma + \mathcal{Y}_1)|}{\partial \mathcal{Y}_1}] d\sigma \quad (9)$$

因为

$$\frac{\partial |g^{-1}(\bar{x}, \sigma + \mathcal{Y}_1)|}{\partial \mathcal{Y}_1} = \frac{\partial |g^{-1}(\bar{x}, \sigma + \mathcal{Y}_1)|}{\partial \sigma},$$

且 $\dot{\mathcal{Y}}_1 = -\mathcal{Y}$, 所以有

$$\begin{aligned} & \int_0^s \frac{\partial |g^{-1}(\bar{x}, \sigma + \mathcal{Y}_1)|}{\partial \mathcal{Y}_1} \mathcal{Y}_1 d\sigma = \\ & - \int_0^s \frac{\partial |g^{-1}(\bar{x}, \sigma + \mathcal{Y}_1)|}{\partial \sigma} d\sigma = \\ & - \frac{\mathcal{Y}_s}{|g(x)|} + \int_0^s \frac{1}{|g(\bar{x}, \sigma + \mathcal{Y}_1)|} d\sigma \end{aligned}$$

代入式(9)可得

$$\begin{aligned} V_s^\circ = & \frac{s}{|g(x)|} (\mathcal{Y} + f(x) + g(x)w + d(x, t)) + \\ & \int_0^s \frac{\partial |g^{-1}(\bar{x}, \sigma + \mathcal{Y}_1)|}{\partial \bar{x}} \Big|_{x+} d\sigma - \frac{s}{|g(x)|} \mathcal{Y} + \\ & \int_0^s \frac{1}{|g(\bar{x}, \sigma + \mathcal{Y}_1)|} d\sigma = \\ & s \frac{g(x)}{|g(x)|} w(t) + s \frac{d(x, t)}{|g(x)|} + sh(z). \quad (10) \end{aligned}$$

其中

$$\begin{aligned} h(z) = & \frac{f(x)}{|g(x)|} + \frac{1}{s} \left[\int_0^s \frac{\partial |g^{-1}(\bar{x}, \sigma + \mathcal{Y}_1)|}{\partial \bar{x}} \Big|_{x+} d\sigma + \right. \\ & \left. \int_0^s \frac{\mathcal{Y}}{|g(\bar{x}, \sigma + \mathcal{Y}_1)|} d\sigma \right], \\ z = & (x^T, s, \mathcal{Y}, \mathcal{Y}_1)^T. \end{aligned}$$

定义有界紧集

$\Omega_\epsilon = \{(x^T, s, \mathcal{Y}, \mathcal{Y}_1)^T \mid x \in \Omega_d, (x_d^T, y_d^T)^T \in \Omega_d\}$, Ω_d 的定义将在定理中给出. 设 $h(z, \theta)$ 是一个二型模糊逻辑系统在区域 Ω 上对 $h(z)$ 的一个逼近, 即

$$h(z, \theta) = \frac{\sum_{i=1}^M y_i^l \left[\exp \left(- \frac{(z_i - a_{ih}^l)^2}{(b_{ih}^l)^2 + b_{0h}} \right) \right]}{\sum_{i=1}^M \exp \left(- \frac{(z_i - a_{ih}^l)^2}{(b_{ih}^l)^2 + b_{0h}} \right)}. \quad (11)$$

其中: $\theta = (y_h^1, \dots, y_h^M, b_{1h}^1, \dots, b_{n+3,h}^1, \dots, b_{1h}^M, \dots, b_{n+3,h}^M, a_{1h}^1, \dots, a_{n+3,h}^1, \dots, a_{1h}^M, \dots, a_{n+3,h}^M)^T$ 是可调参数, M 是模糊系统中的规则数目, 正数 b_{0h} 是设计参数

令

$$\Omega_h = \{\theta_i \mid \theta_i \in M_h\},$$

$$\hat{\theta}_i = \arg \min_{\theta_i \in \Omega_h} \left[\sup_{z \in \Omega_z} |h(z, \theta_i) - h(z)| \right].$$

其中正常数 M_h 是设计参数. 设 $\hat{\theta}_i(t) \in \Omega_h$ 是 θ_i 在 t 时刻的估计值, 将 $h(z, \hat{\theta}_i)$ 在 $\hat{\theta}_i(t)$ 的邻域展开成泰勒式, 有

$$\begin{aligned} h(z, \theta_i^*) - h(z, \hat{\theta}_i) = & (\theta_i^* - \hat{\theta}_i)^T \frac{\partial h(z, \hat{\theta}_i)}{\partial \theta_i} + O(\|\theta_i^* - \hat{\theta}_i\|^2), \quad (12) \end{aligned}$$

其中 $\theta_i^* = \theta_i - \hat{\theta}_i$. 令

$$\epsilon_i = \max_{z \in \Omega_z, \theta_i \in \Omega_h} [O(\|\theta_i^*\|^2) + |h(z) - h(z, \theta_i^*)|], \quad (13)$$

则 ϵ_i 是未知有界正常数. 由式(5), (6) 和(10) 及式(10) 假设 2), 3) 可得

$$\begin{aligned} V_s^\circ = & s \frac{g(x)}{|g(x)|} kv(t) + s \frac{g(x)}{|g(x)|} d(v(t)) + \\ & sh(z) + s \frac{d(x, t)}{|g(x)|} \\ & s \frac{g(x)}{|g(x)|} kv(t) + |s| \rho^* + \\ & sh(z) + |s| \frac{p^* \phi(x)}{g_0} \\ & s \frac{g(x)}{|g(x)|} kv(t) + sh(z) + |s| b^* \phi(x). \quad (14) \end{aligned}$$

其中: $b^* = \max\left\{\rho^*, \frac{p^*}{g_0}\right\}$, $\phi(x) = 1 + \phi(x)$.

采用如下控制律:

$$\begin{aligned} v(t) = & N(\zeta) [k_0 s + h(z, \hat{\theta}_i) + \\ & \hat{\epsilon} \text{sgn}(s) + \hat{b} \text{sgn}(s) \phi(x)], \quad (15) \end{aligned}$$

$$\zeta = k_0 s^2 + h(z, \hat{\theta}_i) s + \hat{\epsilon} |s| + \hat{b} \phi(x) |s| \quad (16)$$

其中: $N(\zeta) = e^{\zeta} \cos((\pi/2)\zeta)$; k_0 为正常数; $\hat{\theta}_i$, $\hat{\epsilon}$ 和 \hat{b} 分别表示 θ_i , ϵ_i 和 b^* 在 t 时刻的估计值

采用如下自适应律:

$$\hat{\theta}_i = \begin{cases} \eta_{i,s} \frac{\partial h(z, \hat{\theta}_i)}{\partial \theta_i}, & \hat{\theta}_i < M_h; \\ \eta_{i,s} \frac{\partial h(z, \hat{\theta}_i)}{\partial \theta_i}, & \\ \hat{\theta}_i = M_h, s \hat{\theta}_i \frac{\partial h(z, \hat{\theta}_i)}{\partial \theta_i} > 0; \\ \eta_{i,s} \frac{\partial h(z, \hat{\theta}_i)}{\partial \theta_i} - \eta_{i,s} \frac{\hat{\theta}_i}{\theta_i} \frac{\partial h(z, \hat{\theta}_i)}{\partial \theta_i}, & \\ \hat{\theta}_i = M_h, s \hat{\theta}_i \frac{\partial h(z, \hat{\theta}_i)}{\partial \theta_i} < 0 \end{cases} \quad (17)$$

$$\hat{\epsilon} = \eta_{\epsilon} |s|, \quad (18)$$

$$\hat{b} = \eta_b \phi(x) |s| \quad (19)$$

其中: η, η_b, η_s 是自适应率, 且 $\eta > 0, \eta_b > 0, \eta_s > 0$
 由文献[7]可知, $\hat{\theta}_i \in \Omega_i, \forall t \geq 0$

定理 1 考虑过程(1), 其控制律由式(15), (16) 确定, 自适应律由式(17) ~ (19) 确定, 并满足假设 1) ~ 3), 则 $\lim_{t \rightarrow \infty} s = 0$, 即 $\lim_{t \rightarrow \infty} e_1 = 0$, 且

$$x \in \Omega_\mu = \{x \mid |s|^2 \leq 2g_1\mu, |\tilde{e}|^2 \leq 2\eta_b\mu, |\tilde{b}|^2 \leq 2\eta_b\mu\}$$

证明 令

$$V(t) = V_s + \frac{1}{2\eta} \tilde{\theta}_i^T \tilde{\theta}_i + \frac{1}{2\eta_b} \tilde{e}^2 + \frac{1}{2\eta_b} \tilde{b}^2,$$

其中: $\tilde{e} = e_1 - \hat{e}, \tilde{b} = b^* - \hat{b}$ 将 $V(t)$ 关于 t 求导, 利用式(14), 同时将控制律和自适应律代入其中, 整理得

$$\begin{aligned} \dot{V} &= \dot{V}_s + \frac{1}{\eta} \tilde{\theta}_i^T (-\dot{\tilde{\theta}}_i) + \frac{1}{\eta_b} \tilde{e} (-\dot{\tilde{e}}) + \frac{1}{\eta_b} \tilde{b} (-\dot{\tilde{b}}) \\ &= \frac{g(x)}{|g(x)|} kN (\zeta \zeta^T + \zeta - k_0 s^2 - h(z, \hat{\theta}_i) s - \hat{e} |s| - \hat{b} \phi(x) |s| + h(z) s + |s| b^* \phi(x) + \frac{1}{\eta} \tilde{\theta}_i^T (-\dot{\tilde{\theta}}_i) + \frac{1}{\eta_b} \tilde{e} (-\dot{\tilde{e}}) + \frac{1}{\eta_b} \tilde{b} (-\dot{\tilde{b}}) = \\ &= \frac{g(x)}{|g(x)|} kN (\zeta \zeta^T + \zeta - k_0 s^2 + [h(z, \hat{\theta}_i) - h(z, \theta_i^*) + h(z, \hat{\theta}_i) - h(z) - h(z, \theta_i^*)] s - \epsilon_i |s| + \frac{1}{\eta} \tilde{\theta}_i^T (-\dot{\tilde{\theta}}_i) \\ &= \frac{g(x)}{|g(x)|} kN (\zeta \zeta^T + \zeta - k_0 s^2 + I_1 s \tilde{\theta}_i^T \frac{\partial \tilde{\theta}_i}{\partial \theta_i} - \frac{\partial \tilde{\theta}_i}{\partial \theta_i} \frac{\partial \tilde{\theta}_i}{\partial \theta_i}) \end{aligned} \quad (20)$$

其中: 当式(17) 的第 1 个和第 2 个条件成立时, $I_1 = 0$; 当式(17) 的第 3 个条件成立时, $I_1 = 1$, 这时有 $s \tilde{\theta}_i^T \frac{\partial \tilde{\theta}_i}{\partial \theta_i} > 0$ 且 $\tilde{\theta}_i^T \frac{\partial \tilde{\theta}_i}{\partial \theta_i} = \frac{1}{2} [\|\tilde{\theta}_i\|^2 - \hat{\theta}_i^T \tilde{\theta}_i - \tilde{\theta}_i^T \hat{\theta}_i + \|\hat{\theta}_i\|^2] \geq 0$, 所以

$$\dot{V} \leq -k_0 s^2 + \frac{g(x)}{|g(x)|} kN (\zeta \zeta^T + \zeta) \quad (21)$$

两边取积分可得

$$\begin{aligned} V(t) &+ \int_0^t k_0 s^2 d\tau \\ &\leq V(0) + \int_0^t \left(\frac{g(x)}{|g(x)|} kN (\zeta \zeta^T + \zeta) d\tau \right) \end{aligned} \quad (22)$$

即有

$$V(t) \leq V(0) + \int_0^t \left(\frac{g(x)}{|g(x)|} kN (\zeta \zeta^T + \zeta) d\tau \right) \quad (23)$$

根据引理 1 可知, $V(t), \int_0^t (k \operatorname{sgn}(g(x)) N (\zeta \zeta^T + \zeta) d\tau$ 和 $\zeta(t)$ 在 $[0, t_f]$ 上是有界的 由文献[10, 11]

易知, 结论对 $t_f = +\infty$ 也成立 令 C_ζ 表示 $\int_0^t \left(\frac{g(x)}{|g(x)|} kN (\zeta \zeta^T + \zeta) d\tau \right)$ 在 $[0, t_f]$ 上的一个上界, $\mu = V(0) + C_\zeta$ 则 $\frac{s^2}{2g_1} \leq V_s \leq V(t) \leq V(0) + C_\zeta \leq s^2 \leq 2g_1\mu$, 进一步得 $|s| \leq L$. 由式(3) 和(22) 得 $\dot{s} \leq L$ 和 $s \geq -L$. 于是根据 Barbalat 引理可知 $\lim_{t \rightarrow \infty} s = 0$, 即 $\lim_{t \rightarrow \infty} e_1 = 0$ 定理 1 得证

6 仿真结果

考虑如下非线性系统:

$$\begin{cases} \dot{x}_1 = x_2, \\ \dot{x}_2 = x_2^2 \sin(x_2) + (1 + 0.5 \sin(x_1))w + d, \\ y = x_1. \end{cases} \quad (24)$$

其中: $d = 0.1 \sin t$, 期望的轨迹 $y_d = \sin t$ 仿真中取 $\lambda = 3.5, \eta = 0.8, \eta_b = 1.5, \eta_s = 1.2, k_0 = 1.5, k = 1, b_r = 0.1, b_l = -0.1$; 系统的初始状态可设为 $x_1(0) = 0.2, x_2(0) = 0.1$; $\hat{\theta}_i(0), \zeta(0)$ 在区间 $[0, 1]$ 上随机取值; 模糊逻辑系统的规则数目取为 5; $\hat{\theta}_i(0)$ 在区间 $[-1, 1]$ 上随机取值; $b_{0h} = 0.01, M_h = 10$ 仿真结果如图 2 和图 3 所示

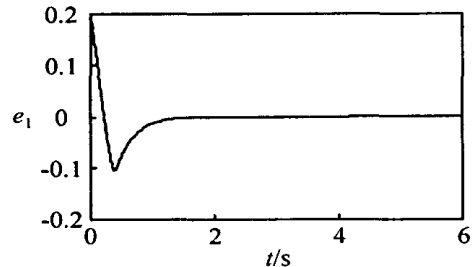


图 2 跟踪误差

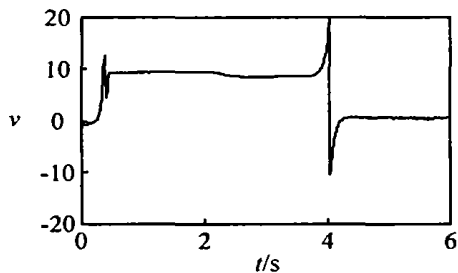


图 3 控制输入

7 结 论

本文针对一类带有死区模型并具有未知函数控制增益符号的非线性系统, 基于具有非线性可调参数的二型模糊系统的逼近能力, 利用 Nussbaum 函数性质, 提出了一种自适应模糊控制器的设计方案 通过 Lyapunov 方法, 证明了闭环系统是鲁棒稳定的, 跟踪误差收敛到零

(下转第 375 页)

- Spectrum Watermarking for Multimedia [J]. *IEEE Trans on Image Processing*, 1997, 6(12): 1673-1687.
- [3] Kunder D, Hatzinakos D. A Robust Digital Image Watermarking Method Using Wavelet-based Fusion [A]. *Proc IEEE Int Conf on Image Processing* [C]. California, 1997: 544-547.
- [4] Cheng Q, Huang T S. Robust Optimum Detection of Transform Domain Multiplicative Watermarks [J]. *IEEE Trans on Signal Processing*, 2003, 51 (4): 906-924
- [5] Cheng Q, Huang T S. Optimum Detection of Multiplicative Watermarks Using Locally Optimum Decision Rule [A]. *IEEE Int Conf on Multimedia and Expo* [C]. Tokyo, 2001: 309-312
- [6] Hernández J R, Amado M, Pérez-González F. DCT-domain Watermarking Techniques for Still Images: Detector Performance Analysis and a New Structure [J]. *IEEE Trans on Image Processing*, 2000, 9(1): 55-68
- [7] Buccigrossi R W, Simoncelli E P. Image Compression Via Joint Statistical Characterization in the Wavelet Domain [J]. *IEEE Trans on Image Proceeding*, 1999, 8(12): 1688-1701.
- [8] Cheng Q, Huang T S. Optimum Detection and Decoding of Multiplicative Watermarks in DFT Domain [A]. *IEEE Int Conf on Acoustics, Speech, and Signal Processing* [C]. Orlando, 2002: 3477-3480
- [9] Barni M, Bartolini F, De Rosa A, et al. A New Decoder for the Optimum Recovery of Nonadditive Watermarks [J]. *IEEE Trans on Image Processing*, 2001, 10 (5): 755-766
- [10] Cachin C. An Information-theoretic Model for Steganography [A]. *Proc of 2nd Workshop on Information Hiding* [C]. Oregon: Springer-Verlag, 1998: 306-318
- [11] Ming N T, Garg H K. Wavelet Domain Watermarking Using Maximum-likelihood Detection [A]. *Proc of SPIE-IS and T Electronic Imaging on Security, Steganography, and Watermarking of Multimedia Contents VI* [C]. California: San-Jose, 2004: 816-826
- [12] Kwon S G, Lee S H, Kwon K K, et al. Watermark Detection Algorithm Using Statistical Decision Theory [A]. *IEEE Int Conf on Multimedia and Expo* [C]. Lausanne, 2002: 561-564

(上接第 370 页)

参考文献(References)

- [1] Tao G, Kokotovic P V. Adaptive Sliding Control of Plants with Unknown Dead-zone [J]. *IEEE Trans on Automatic Control*, 1994, 39(1): 59-68
- [2] Tao G, Kokotovic P V. Discrete-time Adaptive Control of Systems with Unknown Dead-zone [J]. *Int J of Control*, 1995, 61(1): 1-17.
- [3] Cho H Y, Bai E W. Convergence Results for an Adaptive Dead Zone Inverse [J]. *Int J of Adaptive Control and Signal Processing*, 1998, 12(3): 451-466
- [4] Wang X S, Hong H, Su C Y. Model Reference Adaptive Control of Continuous Time Systems with an Unknown Dead-zone [J]. *IEE Proc - Control Theory Application*, 2003, 150(3): 261-266
- [5] Wang X S, Hong H, Su C Y. Robust Adaptive Control a Class of Nonlinear Systems with an Unknown Dead-zone [J]. *Automatica*, 2004, 40(3): 407-413
- [6] Zhang T, Ge S S, Hang C C. Stable Adaptive Control for a Class of Nonlinear Systems Using a Modified Lyapunov Function [J]. *IEEE Trans on Automatic Control*, 2000, 45(1): 129-132
- [7] 张天平. 基于一种修改的李亚普诺夫函数的自适应模糊滑模控制 [J]. *自动化学报*, 2002, 28(1): 137-142
(Zhang T P. Adaptive Sliding Mode Control Based on a Modified Lyapunov Function [J]. *Acta Automatica Sinica*, 2002, 28(1): 137-142)
- [8] Zhang T P. Stable Direct Adaptive Fuzzy Control for a Class of MIMO Non-linear Systems [J]. *Int J of Systems Science*, 2003, 34(6): 375-388
- [9] Nussbaum R D. Some Remarks on the Conjecture in Parameter Adaptive Control [J]. *System Control Letters*, 1983, 1(3): 243-246
- [10] Ye X D, Jiang J P. Adaptive Nonlinear Design without a Priori Knowledge of Control Directions [J]. *IEEE Trans on Automatic Control*, 1998, 43 (11): 1617-1621.
- [11] Ge S S, Hong F, Lee T H. Adaptive Neural Control of Nonlinear Time-delay Systems with Unknown Virtual Control Coefficients [J]. *IEEE Trans on Systems, Man and Cybernetics - Part B*, 2004, 34(1): 499-516