

具有死区和饱和输入的自适应混沌控制*

沈启坤¹⁾ 张天平^{1)†} 孙 妍²⁾

(扬州大学信息工程学院, 扬州 225009)

‡ 扬州大学物理科学与技术学院, 扬州 225002)

(2007 年 1 月 17 日收到, 2007 年 2 月 11 日收到修改稿)

研究了一类具有死区饱和输入的不确定时滞混沌系统的跟踪问题. 基于滑模控制原理, 提出了一种自适应控制的新方案. 该方法不仅克服了已有结果的设计缺陷, 还取消了死区斜率已知和死区对称的假设, 并从理论上分析证明了跟踪误差渐近收敛到零. 最后, Duffing-Holme 系统的仿真结果表明了该方案的有效性.

关键词: 死区, 饱和, 混沌控制, 自适应控制

PACC: 0545

1. 引 言

混沌现象广泛出现于许多实际系统, 如化学反应堆、电力系统、生物系统等, 这可能会导致被控系统的性能衰减甚至不稳定. 自从 Ott, Grebogi 和 Yorke 提出参数微扰法(OGY 方法)^[1]以来, 针对混沌控制, 产生许多有效的控制方法或方案, 并取得一些成果^[2], 但是上述文献都基于执行机构不具有非线性特性的假设. 然而, 在实际系统中执行机构常具有非线性特性, 如死区、非线性输入、回滞以及饱和等. 在控制这些系统时, 必须考虑这些非线性特性对系统性能的影响. 针对各类具有死区的系统, 文献 3—7] 给出了多种控制方案. 文献 8—10] 利用滑模控制的思想分别探讨了具有非线性输入结构的一类时滞系统、混沌系统的稳定控制问题. 文献 11] 研究了一类带有死区模型并具有未知函数控制增益的 SISO 非线性系统的稳定控制问题. 文献 12] 用滑模控制方法实现了具有扇区非线性输入的主从混沌系统同步. Hsu^[13] 利用滑模控制的思想探讨了具有扇区非线性和死区输入结构的一类多输入系统的稳定控制问题. Yan^[14] 针对一类具有扇区非线性和死区输入的混沌系统的控制问题, 提出了一种自适应变结构控制器.

时滞现象, 与输入非线性环节一样, 也会影响被控系统性能和稳定性. 自从 Mackey 和 Glass 于 1977 年在混沌系统中发现时滞现象以来, 特别是近年来, 学者们对时滞混沌系统进行了广泛的研究^[15—19]. 但是上述文献^[15—19] 都假设时滞是已知常数, 而这在实际系统或过程中难以得到满足.

1990 年以来, 对饱和受限控制系统的研究又取得不少成果^[20—25]. 文献 [20] 利用 Lyapunov-Razumikhin 函数分析了不确定饱和时滞系统的稳定性. 文献 21] 研究了不确定线性系统控制饱和的镇定和 L_2 增益分析. 文献 22] 针对一类具有饱和控制输入的时滞系统考虑了其稳定问题, 并提出了一种动态补偿器. 文献 23—25] 对具有执行器饱和的非线性系统提出了自适应控制方案, 利用神经网络对超出饱和的受限部分 $\delta(t)$ 进行补偿, 而 $\delta(t)$ 含有待设计控制信号 u , 故该控制方案在实际设计时是不可实现的. 文献 26] 针对控制输入同时具有死区和饱和(本文称之为死区饱和)的非线性系统, 利用神经网络和模糊逻辑提出了死区饱和的补偿器, 但仍具有上述的问题. 文献 27] 研究了一类具有非线性死区且控制增益符号未知的多输入多输出非线性时滞系统的稳定控制问题.

本文在上述文献的基础上, 针对一类具有死区饱和输入的不确定时滞混沌系统, 提出了一种自适

* 国家自然科学基金(批准号: 60774017)和扬州大学自然科学基金(批准号: GK0413154)资助的课题.

† E-mail: tpzhang@yzu.edu.cn

应控制方案. 该方法不仅克服了文献 [23—26] 的设计缺陷, 而且在考虑到未知状态时滞以及各种不确定的情况下, 保证了良好的跟踪性能. 另外, 该方法还取消了死区斜率已知的假设. 最后通过李亚普诺夫综合方法, 证明了该控制方案的有效性.

2. 问题描述及基本假设

考虑如下具有死区饱和输入的不确定时滞混沌系统:

$$\begin{aligned} \dot{x}_1 &= x_{i+1}, \quad i = 1, 2, \dots, n-1, \\ \dot{x}_n &= f(x) + \Delta f(x, x(t-\tau(t)), p; it) \\ &\quad + \text{sat}(\varphi(u(t))), \end{aligned} \quad (1)$$

其中 $x(t) = [x_1(t), x_2(t), \dots, x_n(t)]^T = [x(t), \dot{x}(t), \dots, x^{(n-1)}(t)]^T \in R^n$ 是状态向量, $f(x, t) \in R$ 是系统给定的非线性函数, p 是摄动参数, $\tau(t) \in R$ 为时变时滞且 $0 \leq \tau(t) \leq d$, d 是已知正常数, $\Delta f(x, x(t-\tau(t)), p; it)$ 代表系统的不确定项, 包括未知时变参数变化不确定、模型不确定、外来干扰以及系统本身的不确定, $u(t) \in R$ 是控制输入, $\varphi(u(t)): R \rightarrow R$, $\text{sat}(\cdot): R \rightarrow R$ 分别表示死区和饱和非线性函数, 见图 1—2.

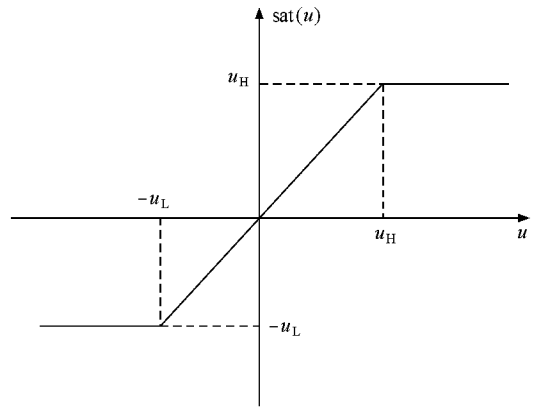


图 2 饱和 $\text{sat}(u(t))$

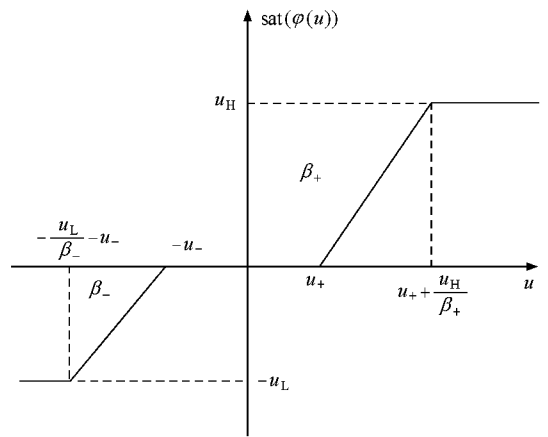


图 3 死区饱和 $\text{sat}(\varphi(u))$

其中 $\beta_+, u_+, \beta_-, u_-$ 均为正常数.

饱和具体定义如下:

$$\begin{aligned} \text{sat}(u) &= \begin{cases} u_H, & u > u_H, \\ u, & -u_L \leq u \leq u_H, \\ -u_L, & u < -u_L, \end{cases} \\ &= u(u)u, \end{aligned} \quad (3)$$

其中 $u_H, u_L \in R^+$ 为正常数, $u(u)$ 定义如下:

$$u(u) = \begin{cases} u_H/u, & u > u_H, \\ 1, & -u_L \leq u \leq u_H, \\ -u_L/u, & u < -u_L, \end{cases} \quad (4)$$

很显然 $u(u) \in R^+$ 并且 $0 < u(u) \leq 1$. 由混沌系统的状态和输入的有界性以及实数的密度性质可知, 存在一个实常数 η , 使得下式成立:

$$0 < \eta < u(u) \leq 1, \quad (5)$$

这里不妨假设 $u_H > \beta_+ u_+, u_L > \beta_- u_-$, 这样, 具有死区和饱和的输入函数 $\text{sat}(\varphi(u))$ 就可表示为

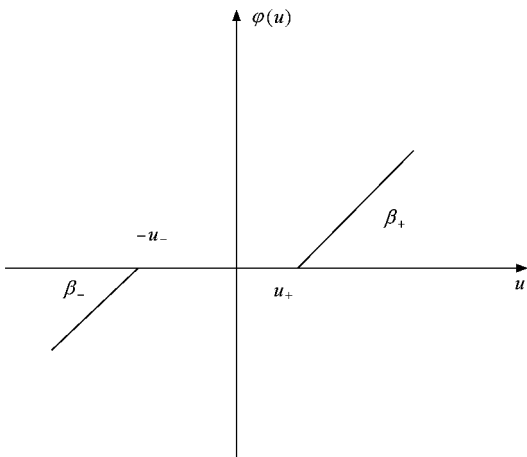


图 1 死区 $\varphi(u(t))$

死区具体描述如下:

$$\varphi(u(t)) = \begin{cases} \beta_+(u - u_+), & u > u_+, \\ 0, & -u_- \leq u \leq u_+, \\ \beta_-(u + u_-), & u < -u_-, \end{cases} \quad (2)$$

$$\text{sa}(\cdot) = \begin{cases} \frac{u_H}{\varphi(u)}\varphi(u) = u(\varphi(u))\beta_+(u - u_+), & u > \frac{u_H}{\beta_+} + u_+ \\ \beta_+(u - u_+), & \frac{u_H}{\beta_+} + u_+ \geq u > u_+, \\ 0, & -u_- \leq u \leq u_+, \\ \beta_-(u + u_-), & -\frac{u_L}{\beta_-} - u_- \leq u < -u_-, \\ \frac{u_L}{\varphi(u)}\varphi(u) = u(\varphi(u))\beta_-(u + u_-), & u < -\frac{u_L}{\beta_-} - u_-, \end{cases} \quad (6)$$

其曲线图见图 3.

在本文中,控制问题是使系统(1)的状态去跟踪一个 n 维的状态向量 $x_d(t)$, 这里,

$$\begin{aligned} x_d(t) &= [x_{d1}(t), x_{d2}(t), \dots, x_{dn}(t)]^T \\ &= [x_d(t), \dot{x}_d(t), \dots, x_d^{(n-1)}(t)]^T. \end{aligned}$$

定义跟踪误差

$$\begin{aligned} e(t) &= x(t) - x_d(t) \\ &= [x(t) - x_d(t), \dots, x^{(n-1)}(t) - x_d^{(n-1)}(t)]^T \\ &= [e(t), \dot{e}(t), \dots, e^{(n-1)}(t)]^T \\ &= [e_1(t), \dots, e_n(t)]^T. \end{aligned} \quad (7)$$

控制目标是确定控制信号 $u(t)$, 使跟踪误差(7)满足下述性质:

$$\lim_{t \rightarrow \infty} \|e(t)\| = 0. \quad (8)$$

定义滤波误差 s 如下:

$$s = \left(\frac{d}{dt} + \lambda\right)^{n-1} e_1(t) = \sum_{i=1}^{n-1} c_i e_i(t) + e_n(t), \quad (9)$$

其中 $c_i = C_{n-1}^{-1} \lambda^{n-i}$, $i = 1, \dots, n$, $\lambda > 0$ 为设计参数.

为了设计稳定的自适应滑模控制器,对系统(1)作如下假设:

假设 1 存在已知非负常数 α, χ, κ , 使得

$$\|\Delta f\| \leq \alpha \|x\| + \chi \|x(t - \tau(t))\| + \kappa, \quad (10)$$

这里 Δf 表示 $\Delta f(x, x(t - \tau(t)), p, it)$.

3. 自适应滑模控制器的设计及稳定性分析

由(1)(9)式知

$$\dot{s} = f(x) + \Delta f + \text{sa}(\varphi(u)) + \gamma, \quad (11)$$

$$\text{其中 } \gamma = \sum_{i=1}^{n-1} c_i e_{i+1} - x_d^{(n)}.$$

定义光滑函数 $V_1(t) = \frac{1}{2} s(t)^2$. 将 V_1 关于时间 t 求导, 有

$$\dot{V}_1 = s(f(x) + \gamma) + s\Delta f + s \cdot \text{sa}(\varphi(u)). \quad (12)$$

定义控制律

$$u = \begin{cases} u'(1 + \hat{\eta}_\beta) + u_+, & s < 0, \\ 0, & s = 0, \\ -u'(1 + \hat{\eta}_\beta) - u_-, & s > 0, \end{cases} \quad (13)$$

其中 $u' \geq 0$, 具体定义将在下面给出, $\hat{\eta}_\beta > 0$ 是在 t 时刻对 $\eta_\beta = \eta^\beta$ 的估计值, $\beta = \min(\beta_-, \beta_+)$.

由(6)和(13)式以及假设 1 并由 $0 < \eta < 1$, 可知

1) 当 $s < 0$ 时, 有 $u = u'(1 + \hat{\eta}_\beta) + u_+ > u_+ > 0$, $\varphi(u) = \beta_+(u - u_+)$, 则

① 当 $\varphi(u) = \beta_+(u - u_+) < u_H$, 即 $u < \frac{u_H}{\beta_+} + u_+$ 时, $\text{sa}(\varphi(u)) = \varphi(u) = \beta_+(u - u_+)$ 故

$$\begin{aligned} \dot{V}_1 &= ss' = s(f(x) + \gamma + \Delta f) + s \cdot \text{sa}(\varphi(u)) \\ &= s(f(x) + \gamma + \Delta f) + s\beta_+(u - u_+) \\ &= s(f(x) + \gamma + \Delta f - \beta_+ u_+) + s\beta_+ u \\ &= s(f(x) + \gamma + \Delta f - \beta_+ u_+) \\ &\quad + s\beta_+(u'(1 + \hat{\eta}_\beta) + u_+) \\ &= s(f(x) + \gamma + \Delta f) + s\beta_+ u'(1 + \hat{\eta}_\beta) \\ &= s(f(x) + \gamma + \Delta f) + s\beta_+ u' + s\beta_+ u' \hat{\eta}_\beta \\ &\leq |s| (|f(x)| + |\gamma| + \alpha \|x\| \\ &\quad + \chi \|x(t - \tau(t))\| + \kappa) \\ &\quad - |s| \beta_+ u' - |s| \beta_+ u' \hat{\eta}_\beta \\ &\leq |s| (|f(x)| + |\gamma| + \alpha \|x\| \\ &\quad + \chi \|x(t - \tau(t))\| + \kappa) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
& -|s|\beta_+ u' \hat{\eta}_\beta \\
\leq & |s|(|f(x)| + |\gamma| + \alpha \|x\| \\
& + \chi \|x(t - \tau(t))\| + \kappa) \\
& -|s|\beta_+ u' \eta \hat{\eta}_\beta.
\end{aligned}$$

②当 $\varphi(u) = \beta_+(u - u_+) \geq u_H$, 即 $u \geq \frac{u_H}{\beta_+} +$

u_+ 时 $\text{sat}(\varphi(u)) = u_H = \frac{u_H}{\varphi(u)} \varphi(u) = u(\varphi(u))\beta_+$

$(u - u_+)$ 故

$$\begin{aligned}
\dot{V}_1 &= s(f(x) + \gamma + \Delta f) + su(\varphi(u))\beta_+(u - u_+) \\
&= s(f(x) + \gamma + \Delta f \\
&\quad - u(\varphi(u))\beta_+ u_+) \\
&\quad + su(\varphi(u))\beta_+ u \\
&= s(f(x) + \gamma + \Delta f) \\
&\quad + su(\varphi(u))\beta_+ u'(1 + \hat{\eta}_\beta) \\
&= s(f(x) + \gamma + \Delta f) + su(\varphi(u))\beta_+ u' \\
&\quad + su(\varphi(u))\beta_+ u' \hat{\eta}_\beta \\
&\leq |s|(|f(x)| + |\gamma| + \alpha \|x\| \\
&\quad + \chi \|x(t - \tau(t))\| + \kappa) \\
&\quad - |s|u(\varphi(u))\beta_+ u' - |s|u(u)\beta_+ u' \hat{\eta}_\beta \\
&\leq |s|(|f(x)| + |\gamma| + \alpha \|x\| \\
&\quad + \chi \|x(t - \tau(t))\| + \kappa) \\
&\quad - |s|\eta\beta_+ u' - |s|\eta\beta_+ u' \hat{\eta}_\beta \\
&\leq |s|(|f(x)| + |\gamma| + \alpha \|x\| \\
&\quad + \chi \|x(t - \tau(t))\| + \kappa) \\
&\quad - |s|\beta_+ u' \eta \hat{\eta}_\beta.
\end{aligned}$$

2)当 $s > 0$ 时, 有 $u = -u'(1 + \hat{\eta}_\beta) - u_- < -u_-$

< 0 , $\varphi(u) = \beta_-(u + u_-)$ 则

③当 $\varphi(u) = \beta_-(u + u_-) > -u_L$, 即 $u >$

$-\left(\frac{u_L}{\beta_-} + u_-\right)$ 时 $\text{sat}(\varphi(u)) = \varphi(u) = \beta_-(u + u_-)$,

故

$$\begin{aligned}
\dot{V}_1 &= s(f(x) + \gamma + \Delta f) + s\beta_-(u + u_-) \\
&= s(f(x) + \gamma + \Delta f + \beta_- u_-) + s\beta_- u \\
&= s(f(x) + \gamma + \Delta f + \beta_- u_-) \\
&\quad - s\beta_-(u'(1 + \hat{\eta}_\beta) + u_-) \\
&= s(f(x) + \gamma + \Delta f) \\
&\quad - s\beta_- u' - s\beta_- u' \hat{\eta}_\beta \\
&\leq |s|(|f(x)| + |\gamma| + \alpha \|x\| \\
&\quad + \chi \|x(t - \tau(t))\| + \kappa)
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
& -|s|\beta_- u' - |s|\beta_- u' \hat{\eta}_\beta \\
\leq & |s|(|f(x)| + |\gamma| + \alpha \|x\| \\
& + \chi \|x(t - \tau(t))\| + \kappa) \\
& -|s|\beta_- u' \hat{\eta}_\beta \\
\leq & |s|(|f(x)| + |\gamma| + \alpha \|x\| \\
& + \chi \|x(t - \tau(t))\| + \kappa) \\
& -|s|\beta_- u' \eta \hat{\eta}_\beta.
\end{aligned}$$

④当 $\varphi(u) = \beta_-(u + u_-) \leq -u_L$, 即 $u <$

$-\left(\frac{u_L}{\beta_-} + u_-\right)$ 时 $\text{sat}(\varphi(u)) = u_L = \frac{u_L}{\varphi(u)} \varphi(u) =$

$u(u)\beta_-(u + u_-)$ 故

$$\begin{aligned}
\dot{V}_1 &= s(f(x) + \gamma + \Delta f) + su(\varphi(u))\beta_-(u + u_-) \\
&= s(f(x) + \gamma + \Delta f \\
&\quad + u(\varphi(u))\beta_- u_-) \\
&\quad + su(\varphi(u))\beta_- u \\
&= s(f(x) + \gamma + \Delta f + u(\varphi(u))\beta_- u_-) \\
&\quad - su(\varphi(u))\beta_-(u'(1 + \hat{\eta}_\beta) + u_-) \\
&= s(f(x) + \gamma + \Delta f) - su(\varphi(u))\beta_- u' \\
&\quad - su(\varphi(u))\beta_- u' \hat{\eta}_\beta \\
&\leq |s|(|f(x)| + |\gamma| + \alpha \|x\| \\
&\quad + \chi \|x(t - \tau(t))\| + \kappa) \\
&\quad - |s|u(\varphi(u))\beta_- u' - |s|u(\varphi(u))\beta_- u' \hat{\eta}_\beta \\
&\leq |s|(|f(x)| + |\gamma| + \alpha \|x\| \\
&\quad + \chi \|x(t - \tau(t))\| + \kappa) \\
&\quad - |s|\eta\beta_- u' - |s|\eta\beta_- u' \hat{\eta}_\beta \\
&\leq |s|(|f(x)| + |\gamma| + \alpha \|x\| \\
&\quad + \chi \|x(t - \tau(t))\| + \kappa) \\
&\quad - |s|\beta_- u' \eta \hat{\eta}_\beta.
\end{aligned}$$

由上面①②③④分析可知,

$$\begin{aligned}
\dot{V}_1 &\leq |s|(|f(x)| + |\gamma| \\
&\quad + \alpha \|x\| + \chi \|x(t - \tau(t))\| \\
&\quad + \kappa) - |s|u' \eta \hat{\eta}_\beta, \tag{14}
\end{aligned}$$

采用控制律(13) 其中

$$u' = (|f(x)| + |\gamma| + |s| + \alpha \|x\| + \chi x_m + \kappa), \tag{15}$$

这里 $x_m = \max_{t-d \leq \tau \leq t} (\|x(\tau)\|) \geq \|x(t)\|$.

采用如下的自适应律:

$$\dot{\eta}_\beta = \xi \hat{\eta}_\beta^3 u' |s|, \tag{16}$$

其中 $\xi > 0$ 是自适应率, $\hat{\eta}_\beta(0) > 0$.

针对系统 (1),采用上述的控制律和自适应律,提出如下定理:

定理 1 考虑过程 (1),死区饱和输入由 (6)式确定,其控制律由 (13) (15)式确定,自适应律由 (16)式确定,并满足假设 1,则闭环控制系统能够实现渐近跟踪性能指标 $\lim_{t \rightarrow \infty} \|e(t)\| = 0 \Leftrightarrow \lim_{t \rightarrow \infty} |e_k(t)| = 0, k = 1, \dots, n$.

证明 令

$$V = V_1 + \frac{\tilde{\eta}_\beta^2}{2\xi},$$

其中 $\tilde{\eta}_\beta = \frac{1}{\hat{\eta}_\beta} - \eta_\beta = \hat{\eta}_\beta^{-1} - \eta_\beta$.

将 $V(t)$ 关于 t 求导,并利用 (15)式,有

$$\dot{V} \leq |s|(|f(x)| + |\gamma| + |s| + \alpha \|x\| + \chi x_m + \kappa) - |s|u'\eta_\beta\hat{\eta}_\beta + \tilde{\eta}_\beta\dot{\hat{\eta}}_\beta/\xi, \quad (17)$$

而 $\dot{\hat{\eta}}_\beta = d(\hat{\eta}_\beta^{-1})/dt - \dot{\eta}_\beta = -\hat{\eta}_\beta^{-2}\dot{\eta}_\beta$,代入 (17)式得

$$\begin{aligned} \dot{V} &\leq |s|(|f(x)| + |\gamma| + |s| + \alpha \|s\| + \chi x_m + \kappa) \\ &\quad - |s|u'\eta_\beta\hat{\eta}_\beta - \tilde{\eta}_\beta\hat{\eta}_\beta^{-2}\dot{\hat{\eta}}_\beta/\xi \\ &= |s|(|f(x)| + |\gamma| + |s| + \alpha \|x\| + \chi x_m + \kappa) \\ &\quad + |s|(\hat{\eta}_\beta^{-1} - \eta_\beta)\hat{\eta}_\beta u' \\ &\quad - |s|(\hat{\eta}_\beta^{-1}\hat{\eta}_\beta u' - \tilde{\eta}_\beta\hat{\eta}_\beta^{-2}\dot{\hat{\eta}}_\beta/\xi) \\ &= |s|(|f(x)| + |\gamma| + |s| + \alpha \|s\| + \chi x_m + \kappa) \\ &\quad + \tilde{\eta}_\beta\hat{\eta}_\beta u' |s| - \hat{\eta}_\beta^{-1}u' |s| - \tilde{\eta}_\beta\hat{\eta}_\beta^{-2}\dot{\hat{\eta}}_\beta/\xi. \end{aligned}$$

将控制律以及自适应律代入上式,可得

$$\begin{aligned} \dot{V} &\leq -s^2 + \tilde{\eta}_\beta(\hat{\eta}_\beta u' |s| - \hat{\eta}_\beta^{-2}\dot{\hat{\eta}}_\beta/\xi) \\ &= -s^2 \leq 0. \end{aligned}$$

由上式可知, $V(t)$ 是单调不增下有界函数,所以 $V(+\infty)$ 存在,进而有 $\int_0^{+\infty} s^2(t)dt \leq V(0) - V(+\infty) < +\infty$,即得 $s \in L_2$. 又因为 $s, \dot{s} \in L_\infty$ 则由 Babalat 引理可知 $\lim_{t \rightarrow \infty} s(t) = 0$,进一步分析可得 $\lim_{t \rightarrow \infty} |e_k(t)| = 0, k = 1, \dots, n$. 证毕.

4. 仿真结果

考虑如下 Duffing-Holme 系统^[10]:

$$\begin{aligned} \dot{x}_1 &= s_2, \\ \dot{x}_2 &= -p_1 x_1(t) - p_2 x_2(t) - x_1^3(t) + q \cos(w_1 t) \\ &\quad + \Delta f(x(t), x(t - \tau(t)), t) \\ &\quad + \text{sat}(\varphi(u(t))), \end{aligned} \quad (18)$$

其中 $p_1 = -1, p_2 = 0.25, q = 0.3, w_1 = 1.0$. 如果没有摄动和控制,即 $\text{sat}(\varphi(u)) = 0, \Delta f(x, x(t - \tau(t)), t) = 0$,上述 Duffing-Holme 系统显示出混沌特性^[2]. 本文显示,在有不确定项和死区饱和的情况下,通过控制器 (13),能够控制上述混沌系统跟踪任一混沌范围内的期望轨迹. 为了证明控制器 (13) 的有效性,具体参数选取如下: $\alpha = 0.8, \chi = 0.5, \kappa = 0.3, d = 0.1$;死区饱和输入 $\text{sat}(\varphi(u(t)))$ 定义如 (6)式, $u_H = u_L = 5, u_+ = u_- = 0.5, \beta_- = 0.3, \beta_+ = 0.5$ 期望的轨迹 $y_d = (\pi/30)\sin(t)$; $\xi = 2.5$. 系统的初始状态取为 $x_1(0) = 0.25, x_2(0) = 0, \hat{\eta}_\beta(0)$ 为 0.01,仿真结果如图 4,5 所示. 由图 4 可以看出,本文设计的控制器具有良好的收敛性能. 图 5 反映了控制信号的有界性.

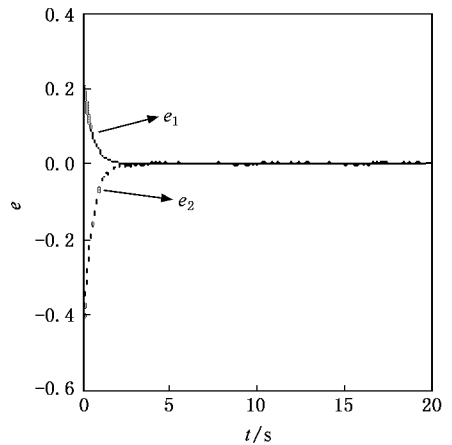


图 4 跟踪误差 e

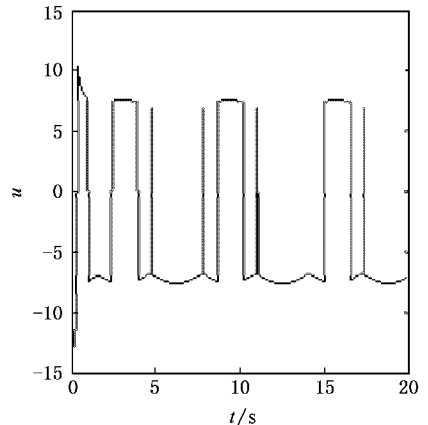


图 5 控制信号 u

5. 结 论

本文针对一类具有死区和饱和输入的不确定时滞混沌系统,基于 SMC,提出了一种自适应控制方

法.该方法不仅在考虑了未知状态时滞以及各种不确定,而且克服了有关文献的设计缺陷,保证了良好的跟踪性能.另外,该方法还取消了死区斜率已知的假设.最后通过李亚普诺夫综合方法,证明了该控制器的有效性.

-
- [1] Ott E , Grebogi C , Yorke J A 1990 *Phys. Rev. Lett.* **64** 1196
- [2] Yau H T , Chen C K , Chen C L 2000 *Int J Bifurc Chaos* . **10** 1139
- [3] Tao G , Kokotovic P V 1994 *IEEE Trans on Automatic Control* **39** 59
- [4] Tao G , Kokotovic P V 1995 *Int. J. Control* **61** 1
- [5] Cho H Y , Bai E W 1998 *Int. J. Adaptive Control And Signal Processing* **12** 451
- [6] Wang X S , Hong H , Su C Y 2003 *IEE Proc-Control Theory Appl* **150** 261
- [7] Wang X S , Su C Y , Hong H 2004 *Automatica* **40** 407
- [8] Yu F M , Chung H Y , Chen S Y 2003 *Fuzzy Sets and Systems* **140** 359
- [9] Yan J J 2004 *Chaos Solitons and Fractals* . **19** 541
- [10] Yau H T , Yan J J 2004 *Chaos Solitons and Fractals* . **19** 891
- [11] Zhang T P , Yi Y , Mei J D 2006 *Control and Decision* **21** 36(in Chinese) [张天平、裔 扬、梅建东 2006 控制与决策 **21** 36]
- [12] Wang X Y , Liu M 2005 *Acta Phys. Sin.* **54** 2584(in Chinese) [王 兴元、刘 明 2005 物理学报 **54** 2584]
- [13] Hsu K C , Wang W Y , Lin P Z 2004 *IEEE Trans on Systems , Man , and Cybernetics-Part B : Cybernetics* **34** 374
- [14] Yan J J , Shyu K K , Lin J S 2005 *Chaos Solitons and Fractals* . **25** 347
- [15] Jiang G P , Zheng W X , Chen G R 2004 *Chaos Solitons and Fractals* **20** 267
- [16] Sun J T , Zhang Y P 2004 *Chaos Solitons and Fractals* **19** 93
- [17] Sun J T 2004 *Chaos Solitons and Fractals* **19** 789
- [18] Sun J T 2004 *Chaos Solitons and Fractals* **21** 143
- [19] Sun J T 2004 *Chaos Solitons and Fractals* **21** 967
- [20] Wei A R , Zhao K Y , Yu H S 2006 *Proceedings of the 6th World Congress on Intelligent Control and Automation , Dalian , China* 883 (in Chinese) [魏爱荣、赵克友、于海生 2006 第六届全球智能控制与自动化大会,大连,中国,883]
- [21] Zhao K Y , Wei A R , Wang J H S 2006 *Proceedings of the 6th World Congress on Intelligent Control and Automation , Dalian , China* 1052 [赵克友、魏爱荣、王锦华 2006 第六届全球智能控制与自动化大会,大连,中国,1052]
- [22] Yan J J , Lin J S , Liao T L 2007 *Chaos Solitons and Fractals* . **31** 1223
- [23] Gao W , Selmic R R 2006 *IEEE Trans on Neural Networks* **17** 147
- [24] Gao W , Selmic R R 2004 *Proceeding of the 2004 American Control Conference Boston , Massachusetts* 2569
- [25] Fang H , Wang Z H , Yang B , Fang M 2006 *Proceedings of the 6th World Congress on Intelligent Control and Automation , Dalian , China* 949(in Chinese) [方 会、王中华、杨 波、方 敏 2006 第六届全球智能控制与自动化大会,大连,中国,949]
- [26] Jang J O , Chung H T , Jeon G J 2005 *American Control Conference , Portland , USA* 1715
- [27] Zhang T P , Ge S S 2007 *Automatica* **43** 1021

Adaptive chaos control with dead-zone and saturating input^{*}

Shen Qi-Kun¹⁾ Zhang Tian-Ping^{1)†} Sun Yan²⁾

¹ *College of Information Engineering, Yangzhou University, Yangzhou 225009, China*

² *College of Physics Science & Technology, Yangzhou University, Yangzhou 225002, China*

(Received 17 January 2007 ; revised manuscript received 11 February 2007)

Abstract

The chaos tracking control problem is studied for a class of uncertain time-delay chaotic systems. Based on the principle of sliding mode control (SMC), a novel adaptive design scheme is proposed. The approach not only overcomes the drawback reported in the literature, but also removes the assumptions that the dead-zone is symmetric and the slopes are known. By theoretical analysis, it is shown that tracking error asymptotically converges to zero. Finally, simulation results of Duffing-Holmes chaotic system demonstrate the effectiveness of the proposed approach.

Keywords : dead-zone, saturation, chaos control, adaptive control

PACC : 0545

^{*} Project supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant No. 60774017) and the Natural Science Foundation of Yangzhou University (Grant No. GK0413154).

[†] E-mail : tpzhang@yzu.edu.cn