

受扰统一混沌系统的主动自适应模糊积分滑模控制

路永坤[†]

(天津科技大学电子信息与自动化学院, 天津 300222)

(2012年5月22日收到; 2012年6月1日收到修改稿)

针对受扰统一混沌系统, 提出一种主动自适应模糊积分滑模控制方法. 在保持原非线性积分滑模控制暂态性能的同时, 设计了一种改进非线性积分滑模控制方法, 保证了系统的稳定性. 所提出控制方法减小了统一混沌系统的不可控状态和自适应模糊补偿项的逼近精度对系统状态误差的影响. 基于 Lyapunov 稳定性理论分析了系统的稳定性. 数值仿真结果表明, 在存在参数摄动和外部扰动时, 能将统一混沌系统控制到目标点上. 数值仿真验证了所提出控制方法的有效性.

关键词: 统一混沌系统, 主动控制, 滑模控制, 自适应模糊补偿项

PACS: 05.45.Gg

1 引言

混沌控制^[1-12]是目前一个非常活跃的研究领域. 在保密通信、电力电子系统和医学等领域, 混沌控制有很多的应用和发展前景^[1-3]. 吕金虎、陈关荣等把 Lorenz 吸引子和 Chen 吸引子连接起来, 提出了统一混沌系统^[4]. 人们已经把很多控制方法应用到统一混沌系统的控制^[5-10].

滑模控制^[10-16]具有良好的鲁棒性, 并易于实现. 但是, 滑模控制过程中容易产生抖振现象. 积分滑模控制^[13-15]不仅可以通过边界层消除抖振, 而且可以抑制稳态误差, 提高控制精度. 不过, 积分项容易出现饱和, 引起 Windup 效应^[15,16]. 如文献[15]提出一种积分滑模面. 通过调整因子, 该方法可以对边界层外的滑模面的积分项进行削弱. 但是, 文献[15]的控制律设计没有考虑到所提出非线性积分滑模面对系统稳定性的影响. 引入自适应机理, 可以改善滑模控制效果^[10]. 文献[12]在混沌系统存在参数变化和外部扰动的情况下, 同步两个混沌系统, 不需要知道参数变化和外部扰动的界, 利用自适应方法来估计不确定项的上界. 文献[14]在参数未知的情形下, 利用自适应滑模控制方法来实

现混沌系统的同步, 也无需知系统外部干扰的上界, 它由自适应律来实现. 然而文献[12, 14]中估计滑模控制的切换增益的自适应律是非负的, 必然导致滑模控制的切换增益随时间单调递增. 虽然可以采用文献[17]的参数自适应律形式, 来避免滑模控制切换增益随时间单调递增. 但是如果不能选择好文献[17]中参数自适应律的设计参数, 易给该方法带来较大的输出误差. 事实上, 我们可以通过离线的方式获得混沌控制研究对象的参数变化和外部扰动的界的大致情况, 所以对有关参数变化和外部扰动的界的情况并不可能完全未知. 文献[10]利用主动思想, 建立了受外扰的统一混沌系统的受控子系统在目标点的可控标准型, 采用基于滑模趋近律在线参数整定的 RBF 神经网络逼近滑动变量与控制输入之间的关系, 不过 RBF 网络的逼近精度对系统输出误差有很大影响.

本文针对文献[10]的统一混沌系统的可控标准型, 当存在参数变化和外部扰动的情况下, 利用自适应模糊积分滑模控制方法控制系统状态到目标点. 在保持文献[15]的非线性积分滑模控制暂态性能的同时, 对原积分滑模控制方法进一步改进. 并在控制律中考虑不可控状态偏差, 减小不可控状态对控制器的影响. 所设计的自适应模糊积分滑模

[†] E-mail: automationcn@126.com

控制方法中,用自适应模糊^[18,19]补偿项来补偿由参数变化而引起的不确定函数.滑模切换增益由自适应模糊补偿项、非线性积分项的补偿项、外部扰动的界和不可控状态偏差等构成,非线性积分项的补偿项用来补偿所采用非线性积分滑模面对系统稳定性的影响.最后,通过数值仿真验证了该方法的有效性.

2 统一混沌系统的数学模型和可控标准型

考虑外部扰动的统一混沌系统的数学模型表示为^[7,10]

$$\begin{aligned} \dot{x}_1 &= (25\alpha + 10)(x_2 - x_1), \\ \dot{x}_2 &= (28 - 35\alpha)x_1 - x_1x_3 \\ &\quad + (29\alpha - 1)x_2 + d + u, \\ \dot{x}_3 &= x_1x_2 - (\alpha + 8)x_3/3, \end{aligned} \quad (1)$$

其中, x_1, x_2, x_3 是系统的状态变量, $\mathbf{x} = [x_1, x_2, x_3]^T$ 是系统状态向量, \mathbf{T} 表示转置, 系统参数 $\alpha \in [0, 1]$, 控制输入 $u \in \mathbf{R}$, d 是外部有界扰动, $d \leq D$, D 是已知常数. 当不受控, 并且 $d = 0$ 时, 系统 (1) 是吕金虎等提出的典型统一混沌系统的数学模型. 不受控时, 典型统一混沌系统都为混沌态, 并当 $\alpha \in [0, 0.8)$ 时系统为广义的 Lorenz 系统; 当 $\alpha = 0.8$ 时, 系统为广义的 Lü 混沌系统; 当 $\alpha \in (0.8, 1]$ 时, 系统为广义的 Chen 系统. 可以证明, 对于典型统一混沌系统, 若常量 x_{r1} 表示状态变量 x_1 最终要到达的期望平衡点, 在受控时系统状态向量最终稳定在 $\mathbf{y}_r = [x_{r1}, x_{r2}, x_{r3}]^T$, $x_{r2} = x_{r1}$, $x_{r3} = 3x_{r1}^2/(\alpha + 8)$.

如果令 $\mathbf{P} = \begin{bmatrix} 1/\beta & 0 \\ -1 & 1 \end{bmatrix}$, $\mathbf{z} = [z_1, z_2]^T = \mathbf{P}[x_1, x_2]^T$, $u = \xi + x_1x_3$, $\beta = (25\alpha + 10)$, $\varphi = (28 - 35\alpha)$, $\delta = (29\alpha - 1)$, $\rho = (\alpha + 8)/3$, $z_{r1} = x_{r1}/\beta$, $z_{r2} = 0$, $e_1 = z_1 - z_{r1}$, $e_2 = z_2$, $e_3 = x_3 - x_{r3}$, 根据文献 [10], 系统状态误差的方程为

$$\begin{aligned} \dot{e}_1 &= e_2, \\ \dot{e}_2 &= \beta(\varphi + \delta)e_1 + (\beta - \delta)e_2 \\ &\quad + \beta(\varphi + \delta)z_{r1} + \rho + \xi. \end{aligned} \quad (2)$$

根据主动控制思想, 令 $\xi = v - \beta(\varphi + \delta)z_{r1} - \rho$, 则

$$\dot{\mathbf{e}} = \mathbf{A}\mathbf{e} + \mathbf{b}v, \quad (3)$$

$$\begin{aligned} \dot{e}_3 &= -\beta^2(z_{r1} + e_1)^2 - \beta z_{r1} \\ &\quad - \beta e_1 e_2 + \rho z_{r3} + \rho e_3, \end{aligned} \quad (4)$$

其中, $\mathbf{A} = \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ \beta(\varphi + \delta) & (\beta - \delta) \end{bmatrix}$, $\mathbf{e} = [e_1, e_2]^T$, $\mathbf{b} = [0, 1]^T$, (3) 式的动态误差方程是可控标准型, (4) 式的动态误差方程是不可控的.

3 自适应模糊积分滑模控制器设计

定义如下饱和函数^[15]:

$$\text{sat}(S/\phi) = \begin{cases} S/\phi, & |S| \leq \phi, \\ \text{sgn}(S), & |S| > \phi, \end{cases} \quad (5)$$

其中, ϕ 是边界层厚度, $\phi \in (0, 1]$, $\text{sgn}(\cdot)$ 是符号函数.

定义如下非线性积分变化函数:

$$L(S, \bar{\mathbf{e}}) = \begin{cases} e_1, & |S| \leq \phi, \quad |e| \leq \phi, \\ \frac{-\lambda_1^2 e_0 + \phi(1 + \sigma)\text{sat}(S/\phi) - \sigma S - e_2}{2\lambda_1}, & |S| > \phi, \end{cases} \quad (6)$$

其中, $\bar{\mathbf{e}} = [e_0, e_1, e_2]^T$, $e = e_1$, $\dot{e}_0 = L(S, \bar{\mathbf{e}})$, σ 和 λ_1 为设计参数, $\sigma > -1$, $\lambda_1 > 0$.

定义如下非线性积分滑模面:

$$\begin{aligned} S &= \mathbf{c}^T \bar{\mathbf{e}} = c_2 e_2 + c_1 e_1 + c_0 e_0, \\ \dot{e}_0 &= L(S, \bar{\mathbf{e}}), \end{aligned} \quad (7)$$

其中, $\mathbf{c} = [c_0, c_1, c_2]^T = [\lambda_1^2, 2\lambda_1, 1]^T$.

定义 $f(\mathbf{e}) = \beta(\varphi + \delta)e_1 + (\beta - \delta)e_2$, $\mathbf{k} = [\lambda_1^2, 2\lambda_1]^T$.

若取等效控制律为

$$v_{\text{eq}} = -f(\mathbf{e}) - \mathbf{k}^T \mathbf{e} - \beta(\varphi + \delta)z_{r1} - \rho + x_1x_3, \quad (8)$$

则系统为渐近稳定系统.

选取控制律为

$$u = v_{\text{eq}} - v_{\text{af}} - \lambda_2 \tilde{e}_3 - M \text{sat}(S/\phi), \quad (9)$$

其中, v_{af} 是用来补偿由参数变化而引起的不确定函数 $\Delta f(x)$ 的自适应模糊补偿项, 切换增

益 $M = |v_{af}| + |\lambda_2 \tilde{e}_3| + v_{ints} + D + \eta$, $\lambda_2 > 0$. 非线性积分项的补偿项 v_{ints} 定义为

$$v_{ints} = \begin{cases} 0, & |S| \leq \phi, \\ \frac{(|S| - \phi)(1 + \sigma)\lambda_1}{2}, & |S| > \phi. \end{cases} \quad (10)$$

v_{ints} 用来补偿所采用非线性积分项对系统稳定性的影响. \tilde{e}_3 是 e_3 的饱和限幅变量. 由 (4) 式可知的 e_3 动态方程是不可控制的, 为了减小偏差 e_3 对 e 控制的影响, 所以在控制律中引入 e_3 的信息. \tilde{e}_3 定义为

$$\tilde{e}_3 = \begin{cases} e_3, & |e_3| < \phi, \\ \phi \text{sgn}(e_3), & |e_3| \geq \phi. \end{cases} \quad (11)$$

除了 D 和 η 为以外, 切换增益 M 的各个组成项都是可以动态变化的, 并不存在随时间单调递增变化的现象.

自适应模糊补偿项 v_{af} 的模糊输入变量取 S 和 e_3 , 前件隶属度函数采用函数形式为 $\mu(x) = \exp\left(-\frac{1}{2}\left(\frac{x - \omega}{\tau}\right)^2\right)$ 的高斯隶属度函数, ω 为中心值, τ 为宽度, 并且模糊系统采用中心 - 平均解模糊、乘积推理和单点模糊化, 则自适应模糊补偿项 v_{af} 可以定义为

$$v_{af} = \mathbf{p}^T \mathbf{q} = \sum_{j=1}^m \frac{\prod_{i=1}^n \mu_{F_{ij}} \cdot \tilde{u}_j}{\sum_{j=1}^m \prod_{i=1}^n \mu_{F_{ij}}}, \quad (12)$$

其中, 参数向量 $\mathbf{p} = [\tilde{u}_1, \tilde{u}_2, \dots, \tilde{u}_m]^T$, 模糊输入变量数量 $n = 2$, $\mu_{F_{ij}}$ 是前件隶属度函数, \tilde{u}_j 是后件模糊划分的峰点, m 是后件隶属度函数的数量, \mathbf{q} 是模糊基函数向量.

选取参数向量自适应律为

$$\dot{\mathbf{p}} = \begin{cases} rS\mathbf{q}, & (\|\mathbf{p}\| < N_1) \\ (\text{or } (\|\mathbf{p}\| = N_1 \text{ and } S\mathbf{p}^T \mathbf{q} \leq 0)), & \\ 0, & \text{其他,} \end{cases} \quad (13)$$

其中, N_1 为设计参数, $N_1 > 0$.

4 系统稳定性分析

定义最优逼近参数向量

$$\mathbf{p}^* = \arg \min_{\mathbf{p} \in \Omega_1} \left[\sup_{\|x\| \leq N_2} |\Delta f(x) - v_{af}| \right],$$

最小逼近误差为 ε , $\mathbf{w} = \mathbf{p} - \mathbf{p}^*$,

定义 Lyapunov 函数为

$$V = \frac{1}{2}S^2 + \frac{1}{2r}\mathbf{w}^T \mathbf{w}, \quad (14)$$

则 V 对时间 t 的导数为

$$\begin{aligned} \dot{V} &= S\dot{S} + \frac{1}{r}\mathbf{w}^T \dot{\mathbf{p}} \\ &= S(\dot{e}_2 + 2\lambda_1 e_2 + \lambda_1^2 L(S, \bar{e})) + \frac{1}{r}\mathbf{w}^T \dot{\mathbf{p}} \\ &= S(f(\mathbf{e}) + \Delta f(\mathbf{x}) + d + v + 2\lambda_1 e_2 \\ &\quad + \lambda_1^2 L(S, \bar{e})) + \frac{1}{r}\mathbf{w}^T \dot{\mathbf{p}} \\ &= S(\Delta f(\mathbf{x}) + d - \mathbf{k}^T \mathbf{e} - v_{af} - \lambda_2 \tilde{e}_3 \\ &\quad - Msat(S/\phi) + 2\lambda_1 e_2 + \lambda_1^2 L(S, \bar{e})) + \frac{1}{r}\mathbf{w}^T \dot{\mathbf{p}} \\ &= S(\Delta f(\mathbf{x}) + d - \lambda_1^2 e_1 - v_{af} - \lambda_2 \tilde{e}_3 \\ &\quad - Msat(S/\phi) + \lambda_1^2 L(S, \bar{e})) + \frac{1}{r}\mathbf{w}^T \dot{\mathbf{p}} \\ &= S(-\mathbf{w}^T \mathbf{q} + \varepsilon + d - \lambda_1^2 e_1 - \lambda_2 \tilde{e}_3 \\ &\quad - Msat(S/\phi) + \lambda_1^2 L(S, \bar{e})) + \frac{1}{r}\mathbf{w}^T \dot{\mathbf{p}} \\ &= S(\varepsilon + d - \lambda_1^2 e_1 - \lambda_2 \tilde{e}_3 + \lambda_1^2 L(S, \bar{e}) \\ &\quad - Msat(S/\phi)). \end{aligned} \quad (15)$$

当 S 位于边界层外时, (15) 式可以写为

$$\begin{aligned} \dot{V} &\leq S(\varepsilon - (|v_{af}| + \eta)\text{sgn}(S)) \\ &\leq |S|(|\varepsilon| - |v_{af}| - \eta). \end{aligned} \quad (16)$$

当 S 位于边界层内时, (15) 式可以写为

$$\begin{aligned} \dot{V} &\leq S(\varepsilon - (|v_{af}| + \eta)(S/\phi)) \\ &\leq |S|(|\varepsilon| - |v_{af}||S| - \eta|S|). \end{aligned} \quad (17)$$

综合 (16) 式和 (17) 式, 若 $\max((|\varepsilon| - |v_{af}| - \eta), (|\varepsilon| - |v_{af}||S| - \eta|S|)) \leq 0$, 则 $\dot{V} \leq 0$. 又因为 $V > 0$, 所以闭环系统是稳定的. 系统的状态 \mathbf{x} 和控制信号 \mathbf{u} 都有界. 显然, 自适应模糊补偿项 v_{af} 的逼近精度对系统输出误差有很大影响. 在切换增益中引入 v_{af} , 则可以减小补偿项的逼近精度对系统输出误差的影响.

5 仿真分析

(1) 式所示的系统有三个平衡点, 鞍点 $S_0(0, 0, 0)$, 不稳定焦点

$$S_+(\sqrt{(8 + \alpha)(9 - 2\alpha)}, \sqrt{(8 + \alpha)(9 - 2\alpha)}, 27 - 6\alpha),$$

不稳定焦点

$$S_- \left(-\sqrt{(8+\alpha)(9-2\alpha)}, -\sqrt{(8+\alpha)(9-2\alpha)}, 27-6\alpha \right).$$

为了便于比较 [5,10], 初始状态设为 $\mathbf{x}(0) = [1, 1, 1]^T$. 不加入控制器时, 式 (1) 的系统处于自由混沌运动状态. 用所提出的控制方法, 将系统控制到任意平衡点或任意非平衡点.

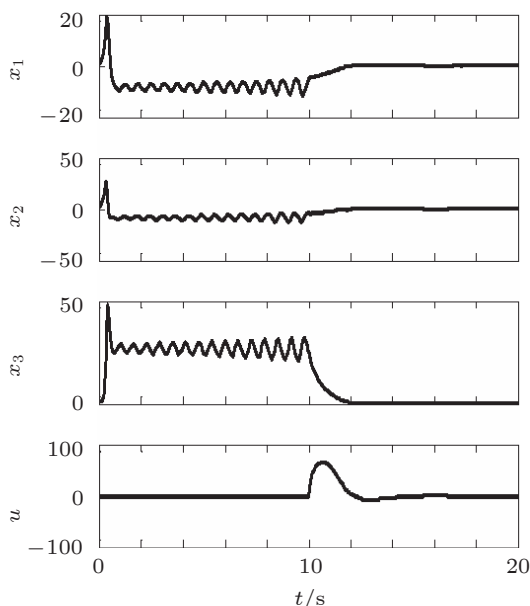


图1 $d=0$ 且 $\alpha=0$ 控制到 S_0

5.1 控制系统到零不动点

目标是从 $t = 10$ s 开始将系统控制到零不动点 $S_0(0, 0, 0)$. $d = 0$. 控制参数为 $\phi = 0.3, \sigma = 2, \lambda_1 = 2, \lambda_2 = 1, D = 0, \eta = 5.1, r = 60$. 自适应模糊补偿项的模糊输入变量 S 的模糊论域为 $[-0.3, 0.3]$, 前件隶属度函数为

$$\begin{aligned} \mu_{F_{11}} &= \exp\left(-\frac{1}{2}\left(\frac{S}{0.4}\right)^2\right), \\ \mu_{F_{12}} &= \exp\left(-\frac{1}{2}\left(\frac{S-0.1}{0.4}\right)^2\right), \\ \mu_{F_{13}} &= \exp\left(-\frac{1}{2}\left(\frac{S-0.2}{0.4}\right)^2\right), \\ \mu_{F_{14}} &= \exp\left(-\frac{1}{2}\left(\frac{S-0.3}{0.4}\right)^2\right), \\ \mu_{F_{15}} &= \exp\left(-\frac{1}{2}\left(\frac{S+0.1}{0.4}\right)^2\right), \\ \mu_{F_{16}} &= \exp\left(-\frac{1}{2}\left(\frac{S+0.2}{0.4}\right)^2\right), \\ \mu_{F_{17}} &= \exp\left(-\frac{1}{2}\left(\frac{S+0.3}{0.4}\right)^2\right). \end{aligned}$$

模糊输入变量 e_3 的模糊论域的划分和隶属度函数, 与模糊输入变量 S 形式相同. 仿真曲线如图 1 所示, 分别给出了状态 x_1, x_2 和 x_3 的响应以及控制器输出 u .

5.2 控制系统到非零不动点

目标是从 $t = 10$ s 开始将系统控制到非零不动点 $S_+(8.25, 8.25, 24)$. $d = 0$. 控制参数与 5.1 中相同. 仿真曲线如图 2 所示. 图 3 是在相同控制参数下, 控制到非零不动点 $S_-(-7.48, -7.48, 18.9)$.

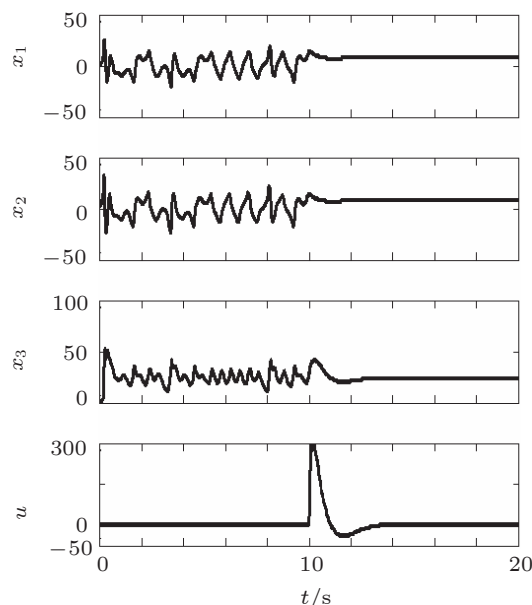


图2 $d=0$ 且 $\alpha=0.5$ 控制到 S_+

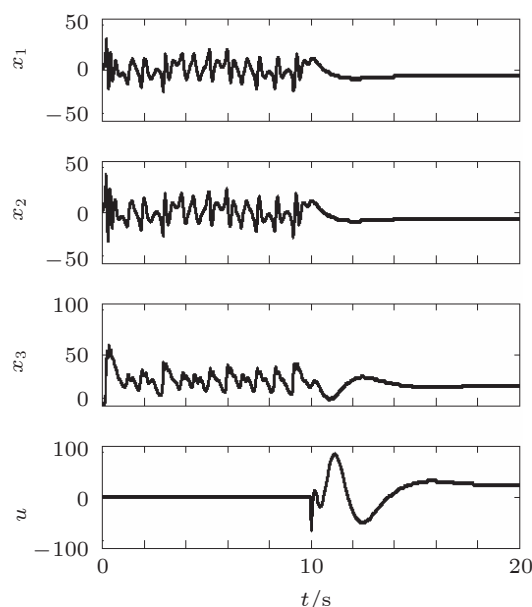


图3 $d=0$ 且 $\alpha=0.9$ 控制到 S_-

5.3 存在外部扰动时控制系统到非平衡点

目标是从 $t = 5$ s 开始将系统控制到非平衡点 $S_1(-5, -5, 8.5)$. 外部扰动 $d = 0.5 \cos(5\pi t)$. 除了 $D = 1$ 外, 其他控制参数与 5.1 中相同. 仿真曲线如图 4 所示.

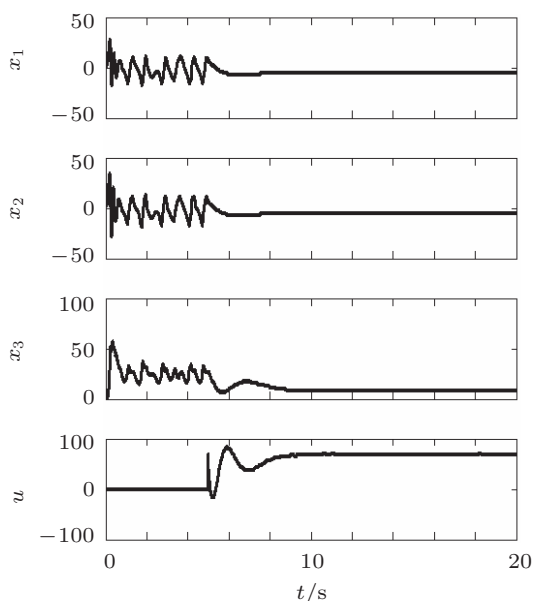


图 4 $d = 0.5 \cos(5\pi t)$ 且 $\alpha = 0.8$ 控制到 S_1

5.4 当参数突变时控制系统到非平衡点

目标是从 $t = 5$ s 开始将系统控制到非平衡点 $S_2(8.5, 8.5, 25.5)$. $d = 0$. 控制参数与 5.1 中相同. 仿真曲线如图 5 所示.

5.5 当参数波动时控制系统到零不动点

目标是从 $t = 10$ s 开始将系统控制到零不动点 $S_0(0, 0, 0)$. $d = 0$. 参数 α 发生波动^[9] $\alpha = |\cos(\pi t)|$. 控制参数与 5.1 中相同. 仿真曲线如图 6 所示.

从图 1 到图 6 的仿真结果看到, 所提出的控制方法能将统一混沌系统准确镇定. 并且在系统参数发生摄动和存在外部扰动时, 所提出的控制方法仍然能将系统稳定在目标点上.

6 结论

本文研究了受扰统一混沌系统的滑模控制问题, 提出了一种主动自适应模糊积分滑模控制方法. 数值仿真结果表明, 在存在参数摄动和外部扰动时, 所提出控制器仍然具有有效性和实用性.

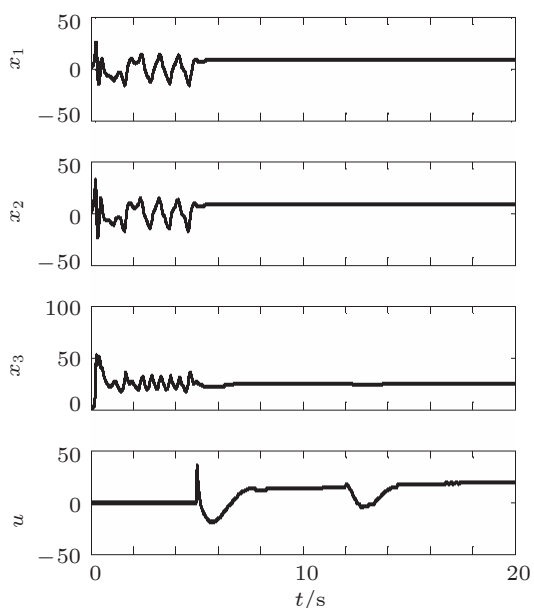


图 5 $d = 0$ 且在 12 s 时从 $\alpha = 0.5$ 到 $\alpha = 0.6$ 控制到 S_2

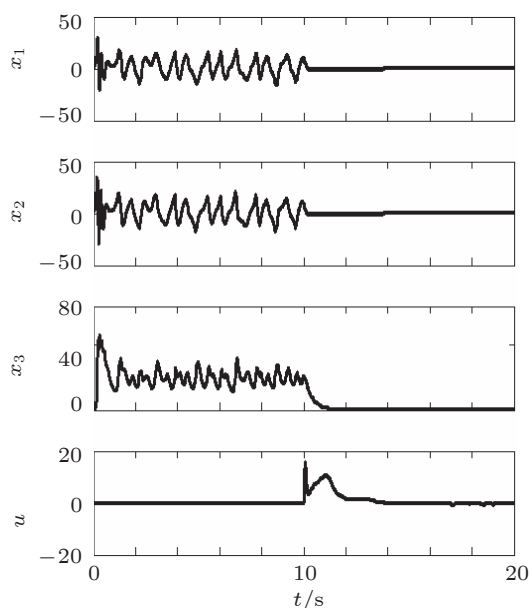


图 6 $d = 0$ 且 $\alpha = |\cos(\pi t)|$ 时控制到 S_0

- [1] Li N, Li J F 2008 *Acta Phys. Sin.* **57** 6098 (in Chinese) [李农, 李建芬 2008 物理学报 **57** 6098]
- [2] Yu Y, Mi Z Q, Liu X J 2011 *Acta Phys. Sin.* **60** 070509 (in Chinese) [余洋, 米增强, 刘兴杰 2011 物理学报 **60** 070509]
- [3] Kuang Y L, Tang G N 2012 *Acta Phys. Sin.* **61** 100504 (in Chinese) [邝玉兰, 唐国宁 2012 物理学报 **61** 100504]
- [4] Tao C H, Lu J A 2003 *Acta Phys. Sin.* **52** 281 (in Chinese) [陶朝海, 陆君安 2003 物理学报 **52** 281]
- [5] Wang D F 2005 *Acta Phys. Sin.* **54** 1495 (in Chinese) [王东风 2005 物理学报 **54** 1495]
- [6] Gao X, Liu X W 2007 *Acta Phys. Sin.* **56** 84 (in Chinese) [高心, 刘兴文 2007 物理学报 **56** 84]
- [7] Li W L, Chen X Q, Shen Z P 2008 *Chin. Phys. B* **17** 87
- [8] Yu D C, Wu A G, Wang D Q 2006 *Chin. Phys. B* **15** 306
- [9] Wei W, Li D H, Wang J 2011 *Chin. Phys. B* **20** 040510
- [10] Guo H J, Liu D, Zhao G Y 2011 *Acta Phys. Sin.* **60** 010510 (in Chinese) [郭会军, 刘丁, 赵光宙 2011 物理学报 **60** 010510]
- [11] Li M, Liu C X 2010 *Chin. Phys. B* **19** 100504
- [12] Li W L, Chang K M 2009 *Chaos, Solitons and Fractals* **39** 2086
- [13] Lou X Y, Cui B T 2008 *Chin. Phys. B* **17** 4434
- [14] Li X C, Xu W, Xiao Y Z 2008 *Acta Phys. Sin.* **57** 4721 (in Chinese) [李秀春, 徐伟, 肖玉柱 2008 物理学报 **57** 4721]
- [15] Li P, Ma J J, Li W Q, Zheng Z Q 2009 *Control and Decision* **24** 1463 (in Chinese) [李鹏, 马建军, 李文强, 郑志强 2009 控制与决策 **24** 1463]
- [16] Peng Y, Vrancic D, Hanus R 1996 *IEEE Contr. Syst. Mag.* **16** 48
- [17] Tong S C, Li Y M, Shi Peng 2009 *Infor. Sci.* **179** 1319
- [18] Tan W, Wang Y N 2004 *Acta Phys. Sin.* **53** 4087 (in Chinese) [谭文, 王耀南 2004 物理学报 **53** 4087]
- [19] Guan X P, Chen C L, Fan Z P 2002 *Acta Phys. Sin.* **51** 07531 (in Chinese) [关新平, 陈彩莲, 范正平 2002 物理学报 **51** 07531]

Active adaptive fuzzy integral sliding mode control for unified chaotic system with uncertainties and disturbance

Lu Yong-Kun[†]

(School of Electronic Information and Automation, Tianjin University of Science and Technology, Tianjin 300222, China)

(Received 22 May 2012; revised manuscript received 1 June 2012)

Abstract

An active adaptive fuzzy integral sliding mode controller is proposed for a unified chaotic system with parametric uncertainties under external perturbation. An improved control method is designed to guarantee the stability, while maintaining the transient performances of the original nonlinear integral sliding mode control. The proposed method reduces the effects of both the uncontrollable state of unified chaotic system and approximation error of adaptive fuzzy compensator on system state error. The stability of the controller is analyzed by Lyapunov stability theorem. The simulation results show that the system states can be controlled to target points with parametric uncertainties under external perturbation. The effectiveness of this method is illustrated by the numerical simulation.

Keywords: unified chaotic system, active control, sliding mode control, adaptive fuzzy compensator

PACS: 05.45.Gg

[†] E-mail: automationcn@126.com