

## 受扰统一混沌系统基于 RBF 网络的主动滑模控制\*

郭会军<sup>1)†</sup> 刘 丁<sup>1)</sup> 赵光宙<sup>2)</sup>

1)(西安理工大学自动化学院,西安 710048)

2)(浙江大学系统科学与工程学系,杭州 310027)

(2010年3月6日收到;2010年5月4日收到修改稿)

针对受外扰影响的统一混沌系统,提出一种基于径向基函数(RBF)神经网络的主动滑模自适应控制方法.将被控系统分解为受控子系统和自由子系统,利用主动控制思想,建立受控子系统在目标点处的状态误差的可控标准型,设计出一个结构简单的基于滑模趋近率在线参数整定的 RBF 函数神经网络控制器,并且基于 Lyapunov 稳定性理论分析了系统的稳定性.仿真结果表明该控制器对系统参数突变和外部干扰具有鲁棒性,同时抑制了抖振.

**关键词:** 统一混沌系统, 主动控制, 滑模控制, RBF 网络

**PACS:** 05.45.Gg

## 1. 引言

自 OGY 方法出现以来,混沌控制就成为非线性科学研究中的活跃领域,并逐渐在工程等领域得到大量应用<sup>[1-17]</sup>.近年来,随着非线性科学研究的深入化和问题的复杂化,基于遗传算法、模糊逻辑、神经网络、支持向量机、粒子群等的智能化控制方法成为研究热点<sup>[18-29]</sup>.如文献[18]将基于对偶约束的最小二乘支持向量机用于混沌海杂波背景中的微弱信号检测.文献[19]提出了基于粒子群算法和 OGY 方法的混沌系统混合控制.文献[20]利用混沌蚂蚁群算法设计 T-S 模糊系统,并用于非线性动态系统辨识和自适应模糊控制.文献[21]基于支持向量机对非平稳时间序列的预测进行了研究.文献[22]提出一种基于新型聚类算法的 RBF 神经网络并用于混沌时间序列预测.文献[23]提出了采用改进的遗传算法优化 PID 神经网络解耦控制器的连接权值,从而实现 PID 控制器参数的优化及非线性多变量系统的解耦控制,并将其应用于统一混沌系统的控制.文献[24]将统一混沌系统表达为 T-S 模型,利用泛函微分方程的 Lyapunov-Krasovskii 稳定性理论和线性矩阵不等式方法,设计出新的带时延的状态反馈模糊控制器.

在混沌系统分析与控制领域,吕金虎、陈关荣

等在 2002 年提出的统一混沌系统巧妙地连接了 Lorenz 吸引子和 Chen 吸引子,其运动特性极其复杂,已经成为新的基准性的研究对象之一<sup>[23,25,26,30,31]</sup>.控制受到参数摄动和外加扰动以及未建模因素影响的统一混沌系统具有很大的挑战性,智能控制将是较好的解决办法<sup>[3]</sup>.在非线控制领域,鉴于滑模控制对满足匹配条件的模型参数扰动和外扰具有极强的鲁棒性,算法简单且易于在线实现,很适用于具有不确定性参数的多变量非线性受控对象.如文献[27]就采用滑模变结构方法对直驱永磁同步风力发电机中的混沌运动进行了控制研究.文献[28]研究了一类受扰混沌系统的自适应滑模控制.文献[29]研究了基于主动滑模控制的一类混沌系统的异结构反同步.但是常规滑模控制过程所伴随的抖振现象会使被控状态变量产生相当大的稳态误差,限制了其在混沌控制中的深入应用.为了抑制或缓解抖振现象,虽然可以精心设计和采用包含积分形式或者双重积分形式的滑模切换面函数,但更好的方法是在滑模控制中引入自适应机理在线调节相关控制参数,并且使控制连续化<sup>[32]</sup>.本文从分析受到外加扰动影响的统一混沌系统的模型出发,提出了基于主动滑模 RBF 神经网络的自适应混沌控制方法.受益于控制量的连续性,抖振现象得到了很好地抑制,并且在系统受到外加干扰和参数扰动的情况下仍然可以有效控制.

\* 陕西省自然科学基金(批准号: SJ08F31), 陕西省教育厅科研项目(批准号: 09JK616)资助的课题.

† E-mail: realghj@yahoo.com.cn

## 2. 统一混沌系统的可控标准型

统一混沌系统的数学模型为

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

其中参数  $\alpha \in [0, 1]$ ,  $u \in R^1$  为标量控制输入,  $d_x$  为系统受到的外扰, 其范围为  $|d_x| \leq \delta$ ,  $\delta$  是限制干扰大小的常数. 当系统不受控时, 参数  $\alpha \in [0, 1]$  时系统均为混沌态, 当  $0 \leq \alpha < 0.8$  时为广义 Lorenz 系统, 当  $\alpha = 0.8$  时为广义 Lü 系统, 当  $0.8 < \alpha \leq 1$  时为广义 Chen 系统<sup>[31]</sup>. 同时可以证明, 在统一混沌系统不受干扰的情况下即  $d_x = 0$ , 设常量  $x_{1r}$  表示状态变量  $x_1$  要达到的期望平衡点, 在  $u$  的作用下系统状态轨迹最终将稳定在点  $X_r = (x_{1r}, x_{2r}, x_{3r})^T$ ,  $x_{2r} = x_{1r}, x_{3r} = 3x_{1r}^2/(\alpha + 8)$ ,  $T$  表示转置.

确定控制输入  $u$  需要将系统的状态方程转化为广义的可控规范形. 根据主动控制思想<sup>[33]</sup>, 令  $u = h - f(x)$ ,  $f(x) = -x_1(t) \cdot x_3(t)$ ,  $(25\alpha + 10) = a$ ,  $(28 - 35\alpha) = b$ ,  $(29\alpha - 1) = c$  和  $(\alpha + 8)/3 = d$ . 则根据(1)式整理得到

$$\begin{bmatrix} \dot{x}_1 \\ \dot{x}_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -a & a \\ b & c \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ d_x \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ 1 \end{bmatrix} h, \quad (2)$$

$$\dot{x}_3 = x_1x_2 - dx_3. \quad (3)$$

显然(2)式为能控的线性子系统, 引入线性非奇异变换

$$\begin{bmatrix} \bar{x}_1 \\ \bar{x}_2 \end{bmatrix} = P \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \end{bmatrix}, \quad P^{-1} = \begin{bmatrix} a & 0 \\ a & 1 \end{bmatrix}, \quad (4)$$

则其可控标准型为

$$\begin{aligned} \begin{bmatrix} \dot{\bar{x}}_1 \\ \dot{\bar{x}}_2 \end{bmatrix} &= \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ a(b+c) & -(a-c) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \bar{x}_1 \\ \bar{x}_2 \end{bmatrix} \\ &\quad + \begin{bmatrix} 0 \\ d_x \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ 1 \end{bmatrix} h. \end{aligned} \quad (5)$$

已知  $X_r = (x_{1r}, x_{2r}, x_{3r})^T$  表示变换前期望的目标点,

由(4)式可知  $\bar{x}_{1r} = \frac{x_{1r}}{a}$ ,  $\bar{x}_{2r} = -x_{1r} + x_{2r} = 0$ . 令  $e_1 = \bar{x}_{1r} - \bar{x}_1$ ,  $e_2 = \bar{x}_{2r} - \bar{x}_2 = -\bar{x}_2$  和  $\bar{e} = x_{3r} - x_3(t)$ , 则系统状态在目标点处误差的状态方程为

$$\dot{e}_1 = \dot{\bar{x}}_{1r} - \dot{\bar{x}}_1 = -\dot{\bar{x}}_2 = e_2,$$

$$\begin{aligned} \dot{e}_2 &= -\dot{\bar{x}}_2 = a(b+c)e_1 - (c-a)e_2 \\ &\quad - a(b+c)\bar{x}_{1r} - d - h. \end{aligned} \quad (6)$$

根据主动控制思想, 令  $h = -H_x - a(b+c)\bar{x}_{1r} - d$ , 则

$$\dot{e} = Ae + BH_x, \quad (7)$$

$$\begin{aligned} \dot{\bar{e}} &= a^2(x_{1r} - e_1)^2 + a\bar{x}_{1r} + ae_1e_2 - dx_{3r} + d\bar{e} \\ &= d\bar{e} - f(e_1, e_2), \end{aligned} \quad (8)$$

其中  $f(e_1, e_2) = -a\bar{x}_{1r} - ae_1e_2 + d\bar{x}_{3r} - a^2(\bar{x}_{1r} - e_1)^2$ ,  $A = \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ a(b+c) & a-c \end{bmatrix}$ ,  $e = [e_1, e_2]^T$ ,  $H_x = w(t)$ ,  $B = [0 \ 1]^T$ , 其中(7)式表示关于状态误差的可控规范形, (8)式表示系统内部动力学特性.

## 3. RBF 主动滑模控制器的设计

RBF 神经网络是一种两层局部收敛的网络, 比多层前向神经网络收敛更快<sup>[34,35]</sup>. 第一层为非线性输入层, 输出为

$$\phi_i(x) = \exp\left(-\frac{\|x - c_i\|^2}{2\sigma_i^2}\right), \quad i = 1, 2, \dots, n, \quad (9)$$

第二层为线性输出层, 即

$$\begin{aligned} y_j = f(x) &= \sum_{i=1}^n m_{ji} \phi_i(x) = M_j^T \phi, \\ j &= 1, 2, \dots, m, \end{aligned} \quad (10)$$

其中  $x \in R^n$  和  $y \in R^m$  分别是网络的输入输出向量,  $\phi = [\phi_1, \dots, \phi_n]^T$  是隐层的输出向量,  $n$  为隐层单元的数量,  $M_j = [m_{j1}, \dots, m_{jn}]^T$  为网络的权值, 参数  $c_i$  和  $\sigma_i$  分别为第  $i$  个隐元的中心和宽度. 对 RBF 网络而言, 可供调节的参数有  $M$ ,  $c_i$  和  $\sigma_i$ , 其中  $M$  常采用最小二乘类方法加以估计, 而对于隐元参数  $c_i$  和  $\sigma_i$  则多采用梯度下降法加以学习优化. 在本文中, 滑动变量  $s$  被定为 RBF 控制器的输入, 即根据滑模变量  $s$  求取相应的控制输入  $w(t)$ .

对于(7)式所示系统, 根据滑模变结构控制理论, 定义如下的滑模切换面:

$$s(e) = Ce = [c_1, c_2]e. \quad (11)$$

则

$$\begin{aligned} \dot{s} &= C\dot{e} \\ &= CAe + CBH_x(t) \\ &= CAe + CBw(t). \end{aligned} \quad (12)$$

则 RBF 网络的输出如下:

$$w_N(t) = \sum_{i=1}^n M_i \exp\left(-\frac{\|s - c_i\|^2}{2\sigma_i^2}\right) = M^T \phi. \quad (13)$$

### 3.1. 网络权值在线学习规则

根据 Lyapunov 稳定性定理, 只有当满足滑模可达条件  $s\dot{s} < 0$  时, 在  $w(t)$  的作用下被控系统状态才将收敛到原点<sup>[36]</sup>. 本文采用 RBF 网络在线逼近滑动变量  $s$  与  $w(t)$  之间的关系, 自然必须在确保满足滑模可达前提下对网络的参数进行在线修正, 当给定隐元参数  $c_i$  和  $\sigma_i$  值时, 需要调节的参数仅有网络的权值. 学习方法采用梯度下降方式

$$\begin{aligned} \dot{M}_i &= -\gamma \frac{\partial s\dot{s}}{\partial M_i} = -\gamma \frac{\partial s\dot{s}}{\partial w_N} \cdot \frac{\partial w_N}{\partial M_i} \\ &= -\gamma s CB \phi_i, \end{aligned} \quad (14)$$

其中参数  $\gamma > 0$  表示学习速率.

### 3.2. 滑模控制器的设计

根据滑模理论, 当系统进入或处于滑动状态时, 必须满足如下两个条件:

$$s(e) = 0 \quad (15)$$

和

$$\dot{s}(e) = 0. \quad (16)$$

根据(12)式, (15)式和(16)式, 可确定等效控制

$$w_{eq}(t) = -(CB)^{-1} CAe, \quad (17)$$

可见  $(CB)^{-1}$  存在是必要条件.

进而采用如下的等速趋近率

$$\dot{s} = -\lambda s. \quad (18)$$

参数  $\lambda > 0$  表示系统运动点趋近切换面  $s = 0$  的速率, 其值小, 趋近速度慢, 相反则趋近速度快, 由(18)式可知  $s$  将逐渐收敛到零. 根据(11)式关于滑动曲面变量  $s$  的定义, 系统状态误差  $(e_1, e_2)$  也将收敛到零,  $\bar{e}$  也将随之收敛, 系统状态最终稳定在  $X_r$ . 由(12)式和(18)式可得

$$\dot{s} = CAe + CBw(t) = -\lambda s. \quad (19)$$

则由上式可确定如下的控制量

$$w_R(t) = -(CB)^{-1} \lambda s - (CB)^{-1} CAe. \quad (20)$$

### 3.3. 稳定性分析

本文采用 RBF 神经网络在线计算控制输入  $w_N$ , 理想状况下可得到  $w_N - w_R = 0$ , 但是实际中  $w_N$  不可能以无误差的方式逼近  $w_R$ . 引理指出当这一误差在一定范围内时, 闭环系统的稳定性和收敛不受

影响.

引理<sup>[34]</sup> 给定任意常数  $\xi$  和一个连续函数  $f: X \rightarrow R^n$ , 必存在一个权值矩阵  $M = M^*$ , 使得具有  $n$  个隐元的 RBF 网络的输出满足

$$\max_{x \in X} \|\hat{f}(x, M^*) - f(x)\| \leq \xi,$$

其中  $\hat{f}(\cdot)$  为 RBF 神经网络模型.

由引理可知必定存在这样一组最优权值  $\bar{M}$ , 使得  $w_N$  和  $w_R$  之间的误差小于  $\xi$ , 即

$$\max |w_N(t) - w_R(t)| = \max |M_N^T \phi - \bar{M}^T \phi| \leq \xi, \quad (21)$$

其中  $w_N = M_N^T \phi$ ,  $w_R = \bar{M}^T \phi$  和  $\tilde{M} = M_N^T - \bar{M}^T$ , 则

$$w_N - w_R = M_N^T \phi - \bar{M}^T \phi = \tilde{M} \phi = \tilde{w}. \quad (22)$$

定义 Lyapunov 函数

$$V = \frac{1}{2} s^2 + \frac{1}{2\gamma} \tilde{M}^T \tilde{M}. \quad (23)$$

$V$  关于时间的一阶导数为

$$\begin{aligned} \dot{V} &= s\dot{s} + \frac{1}{\gamma} \tilde{M}^T \dot{\tilde{M}} \\ &= -\lambda s^2 + \frac{1}{\gamma} \tilde{M}^T (-\gamma s CB \phi) \\ &= -\lambda s^2 - s CB (M_N - \bar{M})^T \phi. \end{aligned} \quad (24)$$

由(21)式可得

$$|M_N - \bar{M}|^T \phi \leq \xi. \quad (25)$$

因此

$$\begin{aligned} \dot{V} &= -\lambda s^2 + s CB (-M_N + \bar{M})^T \phi \\ &\leq -\lambda s^2 + s CB \xi. \end{aligned} \quad (26)$$

进而推导得出

$$\dot{V} \leq |s| (-\lambda |s| + CB \xi). \quad (27)$$

显然如果  $|s| \geq CB \xi / \lambda$ , 则  $\dot{V} \leq 0$ . 从而证明了状态空间中的任意点具有必定向切换线  $s = 0$  靠近或无限趋近的趋势, 同时满足了广义滑模的存在及可达条件. 滑模变量  $s$  将收敛到曲线  $s = 0$  附近  $\pm CB \xi / \lambda$  的范围内, 并且当 RBF 网络逼近精度进一步提高时, 系统输出误差也将随着下降. 进一步, 在  $s = 0$  的邻域内,  $V$  正定,  $\dot{V}$  负半定, 根据 Lyapunov 稳定性定理, 可知闭环系统是稳定的. 此时状态误差  $e_1$  和  $e_2$  均为有界收敛, 就必然可找到函数  $h(t)$ , 使得  $|f(e_1, e_2)| \leq h(t)$  进而  $\bar{e}$  必有界.

## 4. 仿真分析与讨论

仿真时, 统一混沌系统参数  $\alpha$  分别取  $\{0, 0.5,$

0.6, 0.8, 0.9}. 为便于比较, 初始状态统一取为  $(x_1(0), x_2(0), x_3(0)) = (1, 1, 1)$ , 不稳定的平衡点  $(S_0, S_+, S_-)$  和非平衡点共同构成目标点. RBF 网络的隐层神经元个数经试凑确定为 7, 中心值  $c_i$  分别为  $\{-3, -2, -1, 0, +1, +2, +3\}$ , 宽度值  $\sigma_i$  固定为 0.7, 参数  $\lambda = 10$ .

$$\begin{aligned} S_0 &= (0, 0, 0), \\ S_+ &= (\sqrt{(8+\alpha)(9-2\alpha)}, \\ &\quad \sqrt{(8+\alpha)(9-2\alpha)}, 27-6\alpha), \quad (28) \\ S_- &= (-\sqrt{(8+\alpha)(9-2\alpha)}, \\ &\quad -\sqrt{(8+\alpha)(9-2\alpha)}, 27-6\alpha). \end{aligned}$$

#### 4.1. 控制到零不动点

控制目标是使系统状态稳定在  $S_0$ , 相关控制参数为  $C = [20, 1]$ ,  $\gamma = 10$ ,  $t = 10$  s 时加入控制器. 仿真曲线如图 1 所示. 可见混沌状态迅速消失, 随着  $x_1, x_2$  稳定到  $x_{1r}$ , 系统内部状态变量  $x_3$  也迅速收敛到  $x_{3r}$ . 对于其他  $\alpha$  值和不同初始条件下的系统, 适当修改控制参数  $C$ , 同样能够获得很好的控制效果.

#### 4.2. 控制到非零不动点

控制目标是使系统状态稳定在  $S_+$ ,  $\alpha = 0.5$ . 相关控制参数为  $C = [20, 1]$ ,  $\gamma = 20$ ,  $t = 10$  s 时激活控制器. 仿真曲线如图 2 所示. 图 3 则给出了  $\alpha =$

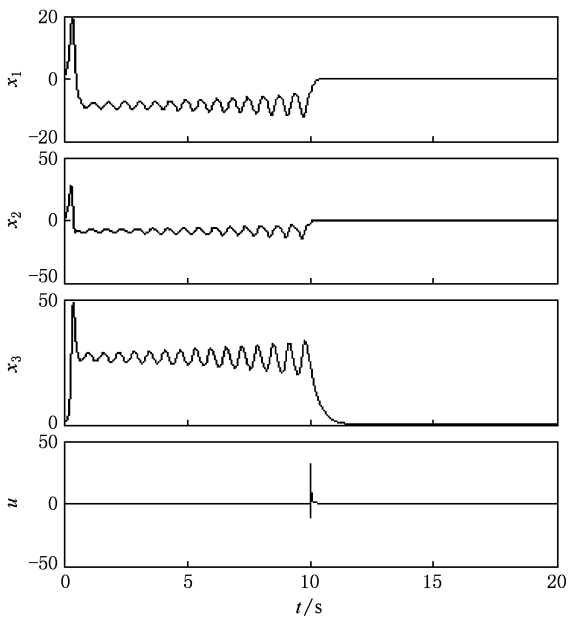


图 1  $\alpha = 0$  控制到  $S_0$

0.9 时,  $C = [20, 1]$ ,  $\gamma = 10$ , 控制目标为  $S_-$  的仿真结果. 从图中亦可以看出状态  $x_3$  的稳定明显滞后于状态  $x_1$  和  $x_2$ . 同时困扰滑模技术应用的抖振现象得到抑制, 这得益于控制输入的连续性. 对于  $\alpha$  取  $\{0, 0.5, 0.6, 0.8, 0.9\}$  之外的参数值或不同的初始条件, 大量的仿真结果同样表明本文的控制算法具有良好的性能, 限于篇幅从略.

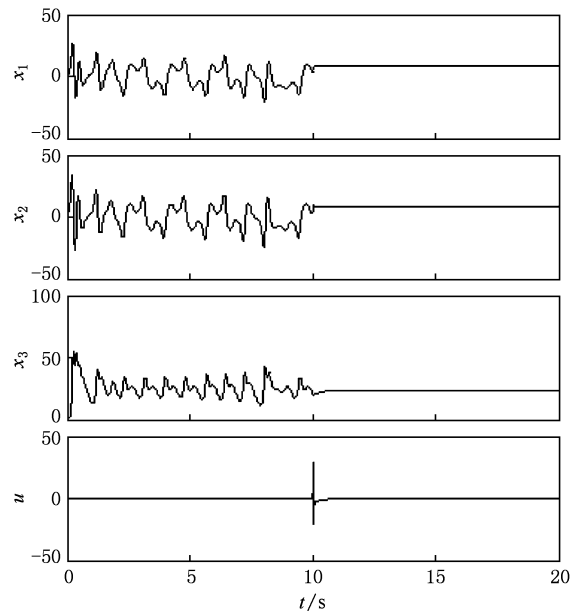


图 2  $\alpha = 0.5$  控制到  $S_+$

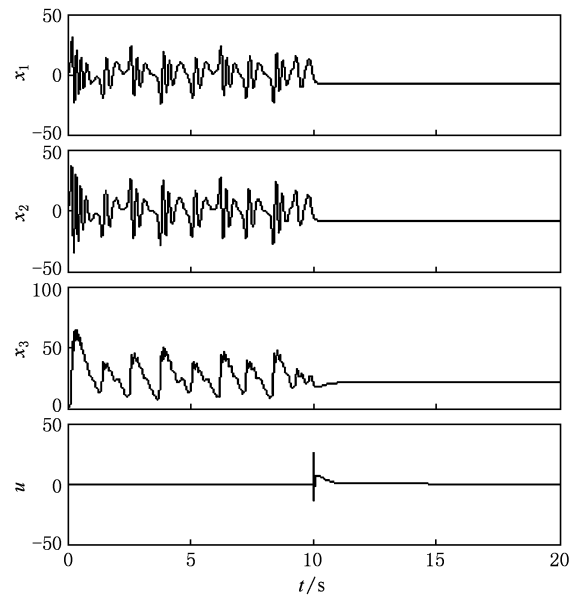


图 3  $\alpha = 0.9$  控制到  $S_-$

#### 4.3. 在外扰下控制到非平衡点

随机选取目标点  $S_1 = (-5, -5, 8.5)$ , 并考虑

系统受到外加干扰  $d = 0.5\cos(5\pi t)$  作用在  $x_2$  状态方程上, 相关控制参数为  $C = [20, 1]$ ,  $\gamma = 20$ ,  $t = 5$  s 时激活控制器. 图 4 就给出了当  $\alpha = 0.8$  的仿真结果, 这表明本文的控制器在有外加干扰的情况下仍能统一混沌系统控制到非平衡点.

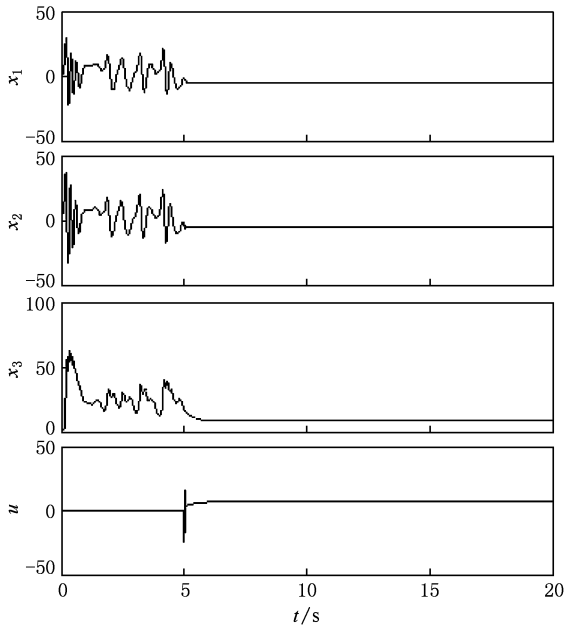


图 4  $\alpha = 0.8$  控制到  $S_1$

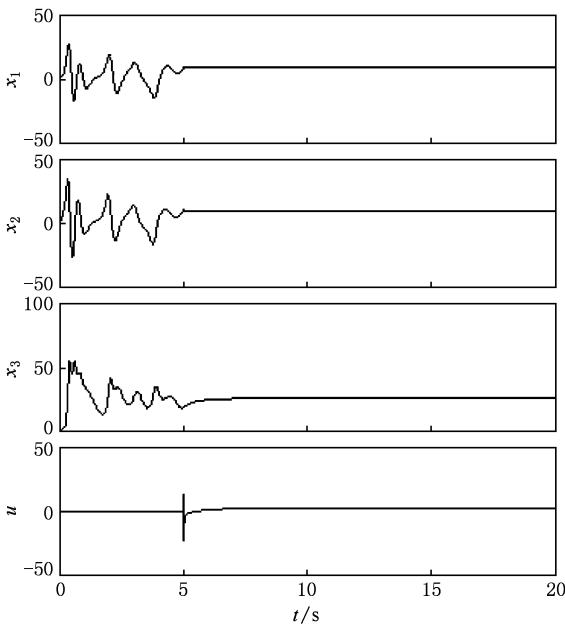


图 5  $\alpha$  在 12 s 时从 0.5 切换为 0.6 控制到  $S_2$

#### 4.4. 参数突变情况下控制到非平衡点

选取目标点  $S_2 = (8.5, 8.5, 25.5)$ ,  $\alpha = 0.5$ ,  $t = 5$  s 时激活控制器, 当  $t = 12$  s 时突然改为  $\alpha = 0.6$ , 对应参数变化率达 20%. 控制器相关参数为  $C = [20, 1]$ ,  $\gamma = 10$ . 仿真结果如图 5 所示. 可见尽管系统经历了较大的参数变化, 但是在滑模控制的作用下, 系统状态依然稳定在目标点上. 同时可以看出在整个控制过程中, 由于控制作用的连续性, 没有发生抖振现象.

#### 4.5. 分析与讨论

仿真结果表明控制器能将混沌系统准确镇定, 并具有较强的抗干扰能力. 图 5 的结果还表明在系统参数发生摄动时, 本文方法仍然能够将系统稳定在目标点上. 融合了主动控制思想的滑模 RBF 网络控制的突出特点是自身构造简单, 隐层仅含 7 个径向基单元, 在神经元的中心值和宽度值都事先给定的情况下, 整个网络需要调节的权值也仅为 7 个. 尤其要指出的是控制器的参数 (即权值) 依据滑模趋近率采用在线训练的方式加以确定, 根本不需要事先通过离线方式学习, 因此应用上, 具有极大的优势. 镇定系统所需的控制量与滑模切换面密切相关, 所以实际应用时应根据具体场合定义合适的滑模切换面函数, 以确保控制器输出不超出系统允许范围. 尽管本文在确定隐层神经元数目时采用了试凑的方法, 实际上完全可以采用适当的优化算法加以确定.

### 5. 结 论

研究了受扰统一混沌系统基于 RBF 网络的主动滑模控制问题, 通过整合自适应控制、主动控制、神经网络和滑模控制技术, 设计出基于 RBF 神经网络的自适应滑模控制器, 控制器的权值则按照滑模控制可达性条件在线学习和修正. 仿真结果证明控制器在有参数扰动和外界干扰的情况下, 仍能准确镇定统一混沌系统. 所设计的滑模切换面保证了从一开始控制器就对扰动具有鲁棒性, 并且使得控制器输出保持连续, 克服了常规滑模切换控制所存在的抖振现象. 值得指出的是该方法也可推广到其他连续混沌系统中去.

- [1] Ott E, Grebogi C, Yorke J A 1990 *Phys. Rev. Lett.* **64** 1196
- [2] Chen G, Dong X 1993 *Int. J. Bifur. Chaos.* **3** 1363
- [3] Boccaletti S, Kurths J, Osipov G, Valladares D L, Zhou C S 2002 *Phys. Rep.* **366** 1
- [4] Li D, Wang S L, Yang D, Zhang X H 2009 *Acta Phys. Sin.* **58** 1432 (in Chinese) [李东、王时龙、杨丹、张小洪 2009 物理学报 **58** 1432]
- [5] Yang J, Qi D L 2010 *Chin. Phys. B* **19** 020508-1
- [6] Hao J H, Wu S H, Xu H B 2010 *Chin. Phys. B.* **19** 020509-1
- [7] Cai G L, Miao S T, Li X, Wang H X 2010 *Chin. Phys. B* **19** 030509-1
- [8] Liu C X, Xu Z, Yang T 2010 *Acta Phys. Sin.* **59** 1524 (in Chinese) [刘崇新、许喆、杨韬 2010 物理学报 **59** 1524]
- [9] Lai X Q, Li Z H, Wang H, Ye Q, Yuan B, Zhao Y R 2010 *Acta Phys. Sin.* **59** 2256 (in Chinese) [来新泉、李祖贺、王慧、叶强、袁冰、赵永瑞 2010 物理学报 **59** 2256]
- [10] Tang G N, Yang C Y 2009 *Acta Phys. Sin.* **58** 143 (in Chinese) [唐国宁、杨朝羽 2009 物理学报 **58** 143]
- [11] Zhang H G, Fu J, Ma T D, Tong S C 2009 *Chin. Phys. B* **18** 969
- [12] Ma W Q, Niu Y D, Wang R 2009 *Acta Phys. Sin.* **58** 2934 (in Chinese) [马文强、牛永迪、王荣 2009 物理学报 **58** 2934]
- [13] Tong W J, Yu H J 2009 *Acta Phys. Sin.* **58** 2977 (in Chinese) [童伟君、于洪洁、2009 物理学报 **58** 2977]
- [14] Gao J H, Peng J H, Xie L L 2009 *Acta Phys. Sin.* **58** 5218 (in Chinese) [高继华、彭建华、谢玲玲 2009 物理学报 **58** 5218]
- [15] Luo X S, Qiu D Y, Wei D Q, Zhang B 2009 *Acta Phys. Sin.* **58** 6026 (in Chinese) [罗晓曙、丘东元、韦笃取、张波 2009 物理学报 **58** 6026]
- [16] Chen Q H, Li H Q, Luo X H 2009 *Acta Phys. Sin.* **58** 7532 (in Chinese) [陈秋华、李华青、罗小华 2009 物理学报 **58** 7532]
- [17] Zhou J H, Deng M Y, Tang G N, Kong L J, Liu M R 2009 *Acta Phys. Sin.* **58** 6828 (in Chinese) [周建槐、邓敏艺、唐国宁、孔令江、刘慕仁 2009 物理学报 **58** 6828]
- [18] Xing H Y, Jin T L 2010 *Acta Phys. Sin.* **59** 140 (in Chinese) [行鸿彦、金天力 2010 物理学报 **59** 140]
- [19] Wang X F, Xue H J, Shi S K, Yao Y T 2009 *Acta Phys. Sin.* **58** 3729 (in Chinese) [王校锋、薛红军、司守奎、姚跃亭 2009 物理学报 **58** 3279]
- [20] Li L X, Peng H P, Yang Y X 2008 *Acta Phys. Sin.* **57** 703 (in Chinese) [李丽香、彭海朋、杨义先 2008 物理学报 **57** 703]
- [21] Wang G L, Yang P C, Mao Y Q 2008 *Acta Phys. Sin.* **57** 714 (in Chinese) [王革丽、杨培才、毛宇清 2008 物理学报 **57** 714]
- [22] Zhang J F, Hu S S 2007 *Acta Phys. Sin.* **56** 713 (in Chinese) [张军峰、胡寿松 2007 物理学报 **56** 713]
- [23] Niu P F, Zhang J, Guan X P 2007 *Acta Phys. Sin.* **56** 2493 (in Chinese) [牛培峰、张君、关新平 2007 物理学报 **56** 2493]
- [24] 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]
- [25] Ye M Y 2005 *Acta Phys. Sin.* **54** 30 (in Chinese) [叶美盈 2005 物理学报 **54** 30]
- [26] Wang D F 2005 *Acta Phys. Sin.* **54** 1495 (in Chinese) [王东风 2005 物理学报 **54** 1495]
- [27] Yang G L, Li H G 2009 *Acta Phys. Sin.* **58** 7552 (in Chinese) [杨国良、李惠光 2009 物理学报 **58** 7552]
- [28] 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]
- [29] Liu F C, Song J Q 2008 *Acta Phys. Sin.* **57** 4729 (in Chinese) [刘福才、宋佳秋 2008 物理学报 **57** 4729]
- [30] 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]
- [31] Lü J, Chen G R, Zhang D Z, Celikovskiy S 2002 *Int. J. Bifurcat. Chaos* **12** 2917
- [32] Yang S K, Chen S L, Yau H T 2002 *Chaos, Solitons and Fractals* **13** 767
- [33] Yassen M T 2005 *Chaos, Solitons and Fractals* **23** 1245
- [34] Broomhead D S, Low D 1998 *Complex Systems* **2** 321
- [35] Powell M J D 1992 *Advances in Numerical Analysis* (Oxford: Oxford Univ. Press) p 46
- [36] Edwards Ch, Spurgeon S K 1998 *Sliding mode control-theory and applications* (London, Bristol: Taylor & Francis) p121

## Active radial basis function sliding mode controller for unified chaotic system with disturbance and uncertainties \*

Guo Hui-Jun<sup>1)†</sup> Liu Ding<sup>1)</sup> Zhao Guang-Zhou<sup>2)</sup>

1) (*Department of Automation and Information Engineering, Xi'an University of Technology, Xi'an 710048, China*)

2) (*Department of System Science and Engineering, Zhejiang University, Hangzhou 310027, China*)

(Received 6 March 2010; revised manuscript received 4 May 2010)

### Abstract

An adaptive active radial basis function (RBF) sliding mode controller is designed to control a unified chaotic system with parametric uncertainties under external disturbance. The controlled system is divided into a controllable subsystem and a free subsystem. Based on the controllable canonical form of controllable sub-system's state errors at the target points, a sliding surface is defined as the only input to the RBF controller. The weight of the controller is tuned on-line based on the sliding mode reaching law. The simulation results show that this method is applicable and effective, and the robustness to parametric uncertainties and external disturbance is provided. And the chattering of conventional sliding controls doesn't occur.

**Keywords:** unified chaotic system, active control, sliding mode control, RBF networks

**PACS:** 05.45.Gg

---

\* Project supported by the Natural Scientific Foundation of Shaanxi Province (Grant No. 08F31) and the Scientific Research Foundation of the Education Department of Shaanxi Province (Grant No. 09JK616).

† E-mail: realghj@yahoo.com.cn