

# 不确定非线性系统的自适应反推终端滑模控制

刘东<sup>1</sup>, 武杰<sup>2,3</sup>, 杨朋松<sup>2</sup>

(1. 北京航空航天大学自动化科学与电气工程学院, 北京, 100191, 2. 空军工程大学航空航天工程学院, 陕西西安, 710038, 3. 94579 部队, 山东新泰, 271206)

**摘要** 针对一类具有未知非线性函数的严格反馈型不确定非线性系统, 提出了一种自适应反推终端滑模控制方法。反推控制的前  $n-1$  步结合动态面控制技术设计虚拟控制律, 第  $n$  步仅采用一个神经网络函数逼近器补偿系统所有未知非线性函数, 得到了基于全局快速终端滑模控制的自适应神经网络控制器; 通过引入一阶滤波器, 不仅避免了传统反推控制存在的复杂计算, 提高了系统的收敛速度, 而且通过引入逼近误差和不确定干扰上界的自适应补偿项来消除建模误差和参数估计误差的影响, 改善了稳态跟踪精度。理论分析证明闭环系统所有信号半全局一致终结有界, 仿真结果验证了该方法的有效性。

**关键词** 自适应神经网络控制; 反推; 终端滑模控制; 动态面

**DOI** 10.3969/j.issn.1009-3516.2012.05.004

**中图分类号** V448.2 **文献标识码** A **文章编号** 1009-3516(2012)05-0014-06

不确定非线性系统的控制问题历来是控制领域的热点之一, 其中滑模变结构控制是一种较为有效的方法, 但要求系统的不确定性满足匹配条件<sup>[1]</sup>。对于非匹配不确定非线性系统, 一般采用自适应反推 (Backstepping) 控制<sup>[2]</sup>, 该方法在逐步递推的设计过程中引入中间虚拟控制量, 并基于 Lyapunov 稳定性理论给出整个系统控制律。然而, 自适应反推控制要求系统不确定性可参数化表示, 并且存在计算复杂性和控制律高度非线性问题<sup>[3]</sup>, 使得控制器难以实现。

近年来, 一些学者将滑模变结构控制与自适应反推控制相结合, 取得了一定研究成果。文献[4]针对一类最小相位仿射非线性系统, 设计了自适应反推滑模变结构控制器; 文献[5]为了减弱抖振, 将二阶滑模控制方法应用于自适应反推控制最后 2 步构造的辅助系统中, 减少了算法计算量, 并允许系统最后 2 个方程存在非参数化不确定性; 文献[6]针对一类非线性函数已知的不确定严格反馈块控非线性系统, 提出了一种模糊自适应反推全局快速终端滑模控制方法, 对于  $n$  个未知不确定函数, 引入  $O(n)$  个模糊逼近器, 使得控制器的复杂程度大大增加。

本文针对一类具有未知非线性函数和不确定干扰的严格反馈非线性系统, 提出了一种自适应神经网络反推快速终端滑模控制方案。

## 1 问题描述和预备知识

考虑如下不确定严格反馈非线性系统:

$$\begin{cases} \dot{x}_i = x_{i+1} + f_i(\bar{x}_i), & i = 1, 2, \dots, n-1 \\ \dot{x}_n = f_n(\mathbf{x}) + bu + d(t, \mathbf{x}) \\ y = x_1 \end{cases} \quad (1)$$

收稿日期: 2012-07-11

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(60543006)

作者简介: 刘东(1984-), 男, 河南郑州人, 博士生, 主要从事故障诊断和容错控制的研究。

E-mail: liudong\_156@sina.com

式中:  $\bar{\mathbf{x}}_i = [x_1, x_2, \dots, x_i]^T \in \mathbb{R}^i$ ,  $\mathbf{x} = [x_1, x_2, \dots, x_n]^T \in \mathbb{R}^n$  为可测状态向量;  $u, y \in \mathbb{R}$  分别为系统控制输入和输出;  $f_i(\bar{\mathbf{x}}_i)$ ,  $i = 1, 2, \dots, n$  为未知不确定非线性函数;  $b \neq 0$  为已知常数;  $d(t, \mathbf{x})$  为未知外界扰动不确定项。

**假设 1** 对  $\forall (t, \mathbf{x}) \in \mathbb{R}_+ \times \mathbb{R}^n$ , 存在未知正常数  $\rho^*$ ,  $i = 1, 2, \dots, n-1$ , 使得  $|d(t, \mathbf{x})| \leq \rho^* \phi(x)$ ,  $\phi(x)$  为已知非负光滑函数。

本文采用 RBF 神经网络逼近系统未知非线性函数, 可表示为:

$$h_{nn}(\mathbf{Z}) = \mathbf{W}^T \xi(\mathbf{Z}) \quad (2)$$

式中: 输入向量  $\mathbf{Z} \in \Omega_Z \subset \mathbb{R}^n$ ,  $n$  为神经网络输入维数;  $\mathbf{W} = [W_1, W_2, \dots, W_l]^T \in \mathbb{R}^l$  为神经网络权值向量,  $l > 1$  为网络节点数;  $\xi(\mathbf{Z}) = [\xi_1(\mathbf{Z}), \xi_2(\mathbf{Z}), \dots, \xi_l(\mathbf{Z})]^T \in \mathbb{R}^l$  为基函数向量, 选取基函数  $\xi_i(\mathbf{Z})$  为如下的高斯函数:

$$\xi_i(\mathbf{Z}) = \exp\left[-\frac{(\mathbf{Z} - \boldsymbol{\mu}_i)^T(\mathbf{Z} - \boldsymbol{\mu}_i)}{v_i^2}\right], \quad i = 1, 2, \dots, l$$

式中  $\boldsymbol{\mu}_i = [\mu_{i1}, \mu_{i2}, \dots, \mu_{in}]^T$  为高斯函数的中心;  $v_i$  为高斯函数的宽度。

RBF 神经网络(2)能够在紧集  $\Omega_Z \subset \mathbb{R}^n$  上以任意精度逼近连续函数  $h(\mathbf{Z})$ :

$$h(\mathbf{Z}) = \mathbf{W}^{*T} \xi(\mathbf{Z}) + \varepsilon(\mathbf{Z}), \quad \forall \mathbf{Z} \in \Omega_Z \subset \mathbb{R}^n$$

式中:  $\varepsilon(\mathbf{Z})$  为神经网络逼近误差且有界;  $\mathbf{W}^*$  为最优权值向量,  $\mathbf{W}^*$  的选取原则为: 对于所有的  $\mathbf{Z} \in \Omega_Z$ , 使  $|\varepsilon(\mathbf{Z})|$  为最小的  $\mathbf{W}$  值, 即:

$$\mathbf{W}^* = \arg \min_{\mathbf{W} \in \mathbb{R}^l} \left\{ \sup_{\mathbf{Z} \in \Omega_Z} |h(\mathbf{Z}) - \mathbf{W}^T \xi(\mathbf{Z})| \right\} \quad (3)$$

**假设 2** 神经网络重构误差  $\varepsilon(\mathbf{Z})$  有界, 即  $|\varepsilon(\mathbf{Z})| \leq \varepsilon^*$ ,  $\forall \mathbf{Z} \in \Omega_Z \subset \mathbb{R}^n$ ,  $\varepsilon^* > 0$  为未知常数。

为了削弱滑模控制的抖振, 本文引入文献[7]提出的连续且可导的平滑函数  $[g(s)]_{cd}$  近似表示符号函数:

$$[g(s)]_{cd} = \frac{1 - \exp(-vs)}{1 + \exp(-vs)}, \quad \forall v > 0, \text{ 且 } 0 \leq |s| - s \leq \frac{1 - \exp(-vs)}{1 + \exp(-vs)} \leq \frac{1}{v}$$

## 2 控制器设计与稳定性分析

控制器设计如下:

**Step 1** 考虑闭环系统(1)的第一阶子系统:  $\dot{x}_1 = f_1(x_1) + x_2$ , 定义系统状态跟踪误差  $e_1 = x_1 - y_d$ , 则系统跟踪误差  $e = e_1$ , 对状态跟踪误差  $e_1$  求导得:

$$\dot{e}_1 = f_1(x_1) + x_2 - \dot{y}_d \quad (4)$$

若非线性函数  $f_1(x_1)$  已知, 则根据上式可设计如下虚拟控制律:

$$\beta_1^* = x_2 = -k_1 e_1 - f_1(x_1) + \dot{y}_d.$$

若非线性函数未知, 采用神经网络逼近, 本文将在设计的最后一步对所有未知非线性函数进行补偿。则第一阶子系统虚拟控制律为:

$$\beta_1 = -k_1 e_1 + \dot{y}_d \quad (5)$$

针对传统反推设计由于对虚拟控制律反复求导带来的计算复杂性问题, 采用动态面控制技术<sup>[8]</sup>, 引入一阶低通滤波器对虚拟控制律进行滤波, 滤波器动态方程为:

$$\tau_1 \dot{\alpha}_1 + \alpha_1 = \beta_1, \quad \alpha_1(0) = \beta_1(0) \quad (6)$$

式中  $\tau_1$  为滤波器时间常数。定义第一阶子系统的边界层误差为:

$$\omega_1 = \alpha_1 - \beta_1 \quad (7)$$

定义状态跟踪误差  $e_2 = x_2 - \alpha_1$ , 且由式(4)和式(5)可得:

$$\dot{e}_1 = f_1(x_1) - k_1 e_1 + e_2 + \omega_1 \quad (8)$$

**Step i** 考虑闭环系统(1)的第  $i$  阶子系统:  $\dot{x}_i = f_i(\bar{\mathbf{x}}_i) + x_{i+1}$ ,  $2 \leq i \leq n-1$ 。定义状态跟踪误差  $e_i = x_i - \alpha_{i-1}$ , 对其求导得:

$$\dot{e}_i = f_i(\bar{\mathbf{x}}_i) + x_{i+1} - \dot{\alpha}_{i-1} \quad (9)$$

根据上式设计如下虚拟控制律:

$$\beta_i = -e_{i-1} - k_i e_i + \alpha_{i-1} \quad (10)$$

对  $\beta$  进行滤波得到期望虚拟控制  $\alpha_i$ , 定义第  $i$  阶子系统边界层误差为:

$$\omega_i = \alpha_i - \beta_i \quad (11)$$

由状态跟踪误差  $e_{i+1} = x_{i+1} - \alpha_i$  及式(9)和(10)可得:

$$\dot{e}_i = f_i(\bar{x}_i) - e_{i-1} - k_i e_i + e_{i+1} + \varepsilon_i \quad (12)$$

Step  $n$  考虑闭环系统(1)的第  $n$  阶子系统:  $\dot{x}_n = f_n(x) + bu(t) + d(t, x)$ 。由状态跟踪误差  $e_n = x_n - \alpha_{n-1}$ , 对  $e_n$  求导得:

$$\dot{e}_n = f_n + bu(t) + d(t, x) - \dot{\alpha}_{n-1} \quad (13)$$

为了提高误差系统的收敛速度和稳态跟踪精度, 本文采用如下全局快速终端滑模面<sup>[6]</sup>:

$$\dot{s} = -\alpha s - \beta s^{\frac{q}{p}} \quad (14)$$

式中:  $s = \sum_{i=1}^{n-1} c_i e_i + e_n$ ,  $\alpha, \beta > 0$ ,  $p$  和  $q$  为正奇数, 且  $p > q$ 。对  $s$  求导并由式(14)可得:

$$\sum_{i=1}^{n-1} c_i \dot{e}_i + \dot{e}_n + \alpha s + \beta s^{\frac{q}{p}} = 0 \quad (15)$$

当切换函数  $s$  远离零点时,  $s$  的收敛速度主要由  $\alpha$  决定,  $\alpha$  越大, 收敛速度越快; 当切换函数  $s$  接近零点时,  $s$  的收敛速度主要由  $\beta$  决定,  $\beta$  越大, 收敛速度越快。

将式(8)、(12)和(13)代入式(15)得:

$$\sum_{i=1}^{n-1} c_i (f_i - k_i e_i + e_{i+1} + \varepsilon_i) - \sum_{i=2}^{n-1} c_i e_{i-1} + f_n + bu + d - \dot{\alpha}_{n-1} + \alpha s + \beta s^{\frac{q}{p}} = 0 \quad (16)$$

上式中的未知函数  $\sum_{i=1}^{n-1} c_i f_i + f_n$  采用 RBF 神经网络逼近, 可得:

$$\sum_{i=1}^{n-1} c_i (e_{i+1} - k_i e_i + \varepsilon_i) - \sum_{i=2}^{n-1} c_i e_{i-1} + W^* \xi + \varepsilon + bu + d - \dot{\alpha}_{n-1} + \alpha s + \beta s^{\frac{q}{p}} = 0 \quad (17)$$

式中  $W^*$  的变量为  $Z, Z = [x_1, x_2, \dots, x_n]^T \in \Omega_Z \subset R^n$ , 且神经网络逼近误差和不确定干扰满足如下不等式:

$$\varepsilon + d \leq \varepsilon^* + \rho^* \phi(x) \leq \delta^* \phi(x) \quad (18)$$

式中:  $\delta^* = \max\{\varepsilon^*, \rho^*\}$ ;  $\phi(x) = 1 + \bar{\phi}(x)$ 。

设计如下控制律:

$$\begin{cases} u = u_{eq} + u_{vss} \\ u_{eq} = -b^{-1} \left[ \sum_{i=1}^{n-1} c_i (e_{i+1} - k_i e_i + \varepsilon_i) + \hat{W}^T \xi - \dot{\alpha}_{n-1} + \alpha s + \beta s^{\frac{q}{p}} - \sum_{i=2}^{n-1} c_i e_{i-1} \right] \\ u_{vss} = -b^{-1} \delta \hat{\phi}(x) \frac{\{1 - \exp[-v \delta \hat{\phi}(x) s]\}}{\{1 + \exp[-v \delta \hat{\phi}(x) s]\}} \end{cases} \quad (19)$$

引入  $\sigma$ -修正方法<sup>[2]</sup>, 神经网络权值自适应律  $\hat{W}$  和参数自适应律  $\hat{\delta}$  设计如下:

$$\dot{\hat{W}} = \Gamma (s \xi - \sigma_{10} \hat{W}), \quad \dot{\hat{\delta}} = \gamma (\phi |s| - \sigma_{11} \hat{\delta}) \quad (20)$$

式中  $\Gamma = \Gamma^T > 0$  为自适应增益矩阵,  $\gamma > 0$  为自适应增益系数,  $\sigma_{10} > 0, \sigma_{11} > 0$  为设计参数。

**定理 1** 对于由系统(1)、控制律(19)、自适应律(20)组成的闭环系统, 且定义初始紧集  $\Omega_0$ :

$$\Omega_0 = \left\{ s^2 + \sum_{i=1}^{n-1} (e_i^2 + \varepsilon_i^2) + \tilde{W}^T \Gamma^{-1} \tilde{W} + \gamma^{-1} \rho^2 \leq 2\lambda \right\}.$$

$\lambda$  为任意给定正数, 在假设 1-2 条件下, 存在参数  $\alpha, \beta, p, q, \Gamma, \gamma, \sigma_{10}, \sigma_{11}, v$  和  $k_i, c_i, \tau_i, i = 1, 2, \dots, n-1$ , 使得闭环系统的半全局一致终结有界, 且系统跟踪误差收敛到原点附近的一个小邻域内。

**证** 定义闭环系统(1)的 Lyapunov 函数:

$$V = \frac{1}{2} s^2 + \frac{1}{2} \sum_{i=1}^{n-1} (e_i^2 + \varepsilon_i^2) + \frac{1}{2} \tilde{W}^T \Gamma^{-1} \tilde{W} + \frac{1}{2} \gamma^{-1} \delta^2 \quad (21)$$

对  $V$  按时间  $t$  求导得:

$$\dot{V} = s \dot{s} + \sum_{i=1}^{n-1} (e_i \dot{e}_i + \varepsilon_i \dot{\varepsilon}_i) + \tilde{W}^T \Gamma^{-1} \dot{\tilde{W}} + \gamma^{-1} \delta \dot{\delta} \quad (22)$$

由  $\varepsilon_i = \alpha_i - \beta_i$  得  $\dot{\varepsilon}_i = -\varepsilon_i / (\tau_i - \beta_i)$ , 由文献[9]<sup>145-146</sup>可知存在  $\kappa_\infty$  类函数  $\kappa_{i1}$  和  $\kappa_{i2}$  使,  $\kappa_{i1} \leq |\beta_i| \leq \kappa_{i2}$

$\kappa_{i2}$ , 对  $s$  求导, 代入式(8)、(12) 和(13) 及控制律(19) 得:

$$\dot{s} = -\alpha s - \beta s^{\frac{q}{p}} - \tilde{W}^T \xi + \varepsilon + d - \hat{\delta} \bar{\phi}(x) \frac{1 - \exp[-\nu \hat{\delta} \bar{\phi}(x) s]}{1 + \exp[-\nu \hat{\delta} \bar{\phi}(x) s]} \quad (23)$$

将式(23) 代入式(22), 并根据  $\kappa_{i1} \leq |\beta_i| \leq \kappa_{i2}$ , 再代入  $\hat{W}$  和  $\hat{\delta}$ , 可得:

$$V \leq \sum_{i=1}^{n-1} \left[ -c_i^* |e_i|^2 + \left( \frac{1}{4} - \frac{1}{\tau_i} - \frac{\kappa_{i2}}{2\eta_i} \right) |\varepsilon_i|^2 + \frac{\eta_i}{2} \right] + \alpha^* s^2 - \sigma_{10} \tilde{W}^T \hat{W} - \sigma_{11} \hat{\delta} \hat{\delta} + \frac{1}{\nu} \quad (24)$$

结合 Cauchy - Schwarz 不等式, 式(24) 可化为:

$$V \leq \sum_{i=1}^{n-1} \left[ -k_i^* |e_i|^2 + \left( \frac{1}{4} - \frac{1}{\tau_i} - \frac{\kappa_{i2}}{2\eta_i} \right) |\varepsilon_i|^2 \right] - \alpha^* s^2 - \frac{\sigma_{10}}{2} \|\tilde{W}\|^2 - \frac{\sigma_{11}}{2} \|\hat{\delta}\|^2 + \varphi \quad (25)$$

式中:  $\varphi = \sum_{i=1}^{n-1} \frac{\eta_i}{2} + \frac{\sigma_{10}}{2} \|\tilde{W}^*\|^2 + \frac{\sigma_{11}}{2} \|\hat{\delta}^*\|^2 + \frac{1}{\nu}$ ;  $\alpha^* = \alpha + 1$ 。

令  $\mu = 2 \min \left\{ k_i^*, \alpha^*, \frac{\sigma_{10}}{2\lambda_{\max}(\Gamma^{-1})}, \frac{\sigma_{11}\gamma}{2} \right\}$ ,  $\eta_i = \kappa_{i2} / [2(\mu - 1/\tau_i + 1/4)]$ ,  $1 \leq i \leq n - 1$ , 并代入式(25),

得  $V \leq -\mu V + \varphi$ 。当  $\mu > \varphi/\lambda$ , 在  $V = \lambda$  上有  $V \leq 0$ , 因而  $V \leq \lambda$  是一个不变集, 因此, 当系统满足初始条件  $V(0) \leq \lambda$  时, 对于所有的  $t > 0$ , 可得  $V(t) \leq \lambda$ , 则  $e_i, \varepsilon_i, s, \tilde{W}$  和  $\hat{\delta}$  半全局一致终结有界, 可知闭环系统(1) 状态跟踪误差  $e_i$  有界及系统跟踪误差  $e = e_1$  收敛到系统原点附近的一个小邻域内。

### 3 仿真算例

考虑如下不确定严格反馈非线性系统:

$$\begin{cases} \dot{x}_1 = f_1(x_1) + x_2 \\ \dot{x}_2 = f_2(x_1, x_2) + u + d(t, x) \\ y = x_1 \end{cases} \quad (26)$$

式中:  $f_1(x_1) = 0.1x_1^2$ ,  $f_2(x_1, x_2) = 0.2e^{-x_2} + x_1 \sin(x_2)$  未知; 不确定干扰  $d(t, x) = 0.5(x_1^2 + x_2^2) \sin^3(t)$  未知。自适应反推终端滑模控制器设计参数为:  $\alpha = 2, \beta = 1, p = 5, q = 3, \Gamma = \text{diag}[0.2], \gamma = 0.2, \sigma_{10} = \sigma_{11} = 0.5, k_1 = 3.5, c_1 = 2.5, \tau_1 = 0.04$ ; RBF 神经网络  $\tilde{W}^T \xi(Z)$  包含  $l = 25$  个节点, 接收域的中心  $\mu_i (i = 1, 2, \dots, l)$  均匀分布在空间  $[-4, 4] \times [-4, 4]$  上, 宽度  $\nu_i = 2, i = 1, 2, \dots, l$ ; 神经网络权值  $\hat{W}$  的初值  $\hat{W}(0) = 0$ , 参数估计初值  $\hat{\delta}(0) = 0$ ; 系统参考轨迹为  $y_d = \sin(t)$ , 初始状态:  $x(0) = [0.5, 0.5]^T$ 。

将基于指数趋近律的自适应神经网络反推滑模控制方案与本章提出的控制方案进行仿真对比。选择指数趋近律  $\dot{s} = -\alpha s - \rho \text{sign}s$ ,  $\rho = 4$  为滑模开关增益, 其余相应的设计参数和本文设计的控制方案设计参数保持一致, 仿真结果见图 1-6。

图 1 为状态变量  $x_1$  的仿真曲线, 图 2 和图 3 分别为神经网络权值范数  $\|\hat{W}\|$  和自适应参数  $\hat{\delta}$  的有界轨迹, 图 4 为 2 种控制方法的系统跟踪误差对比曲线, 图 5 和图 6 分别为 2 种方法的控制输入。可见, 本文提出的自适应反推终端滑模控制方法可以保证系统跟踪误差有较高的收敛精度, 且控制输入平滑无抖振。

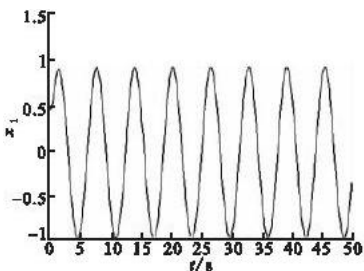


图 1 状态变量  $x_1$

Fig. 1 State variable  $x_1$

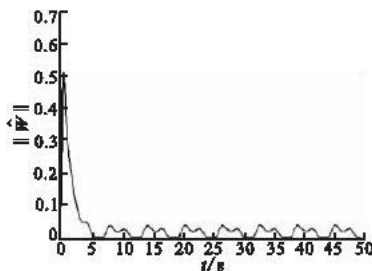


图 2 神经网络权值范数  $\|\hat{W}\|$

Fig. 2 Norm of neural network weight vector  $\|\hat{W}\|$

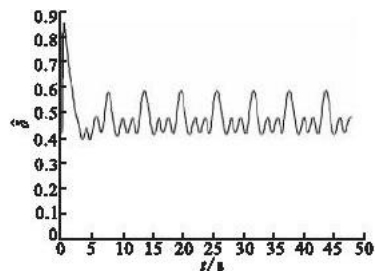
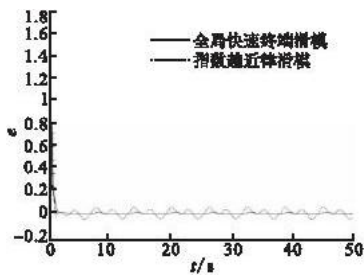
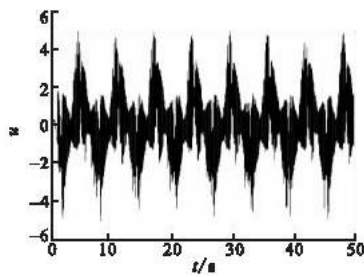
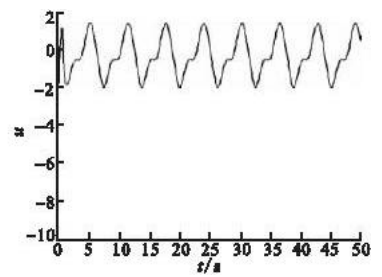


图 3 自适应参数  $\hat{\delta}$

Fig. 3 Adaptive parameter  $\hat{\delta}$

图4 不同控制方法下系统跟踪误差  $e$ Fig.4 Tracking error  $e$  by different methods图5 指数趋近律滑模控制输入  $u$ Fig.5 Control input  $u$  by exponential reaching law sliding mode图6 全局快速终端滑模控制输入  $u$ Fig.6 Control input  $u$  by global fast terminal sliding mode

## 4 结束语

本文针对一类具有未知非线性函数和不确定干扰的严格反馈非线性系统,提出了一种鲁棒自适应反推终端滑模控制方法。本文控制方法避免了传统反推控制存在的计算复杂性问题,采用终端滑模控制提高了系统的收敛速度和稳态跟踪精度。仿真结果表明,本文所提的控制方法对未知非线性函数和不确定干扰具有强鲁棒性,系统跟踪误差在有限时间内收敛到原点附近的一个小邻域内,控制信号平滑无抖振现象,便于实际应用。

### 参考文献(References):

- [1] 高为炳. 变结构控制的理论及设计方法[M]. 北京:科学出版社,1996.  
GAO Weibing. Variable structure control theory and design approach[M]. Beijing:Science press,1996. (in Chinese)
- [2] Kristic M, Kanellakopoulos I, Kokotovic P V. Nonlinear and adaptive control design[M]. New York:John wiley and sons, 1995.
- [3] Wu Z J, Xie X J, Zhang S Y. The reduced - order design of robust adaptive backstepping controller[J]. Acta automatic sinica, 2006, 31(4) :543 - 548.
- [4] 李俊,徐德民. 非匹配不确定非线性系统的自适应反推滑模控制[J]. 控制与决策, 1999, 14(1) :46 - 50.  
LI Jun, XU Deming. Adaptive sliding mode controller for nonlinear systems with mismatched uncertainties based on adaptive backstepping scheme[J]. Control and decision, 1999, 14(1) :46 - 50. (in Chinese)
- [5] Bartolini G, Ferrara A, Giacomini L, et al. Properties of a combined adaptive/second - order sliding mode control algorithm for some classes of uncertain nonlinear systems [J]. IEEE transactions on automatic control, 2000, 45(7) :1334 - 1341.
- [6] 周丽,姜长生,都延丽. 一种基于反步法的鲁棒自适应终端滑模控制[J]. 控制理论与应用, 2009, 26(6) :678 - 682.  
ZHOU Li, JIANG Changsheng, DU Yanli. A robust and adaptive terminal sliding mode control based on backstepping [J]. Control theory and applications, 2009, 26(6) :678 - 682. (in Chinese)
- [7] 胡剑波,庄开宇. 高级变结构控制理论及应用[M]. 西安:西北工业大学出版社,2008.  
HU Jianbo, ZHUANG Kaiyu. Advanced variable structure control theory and applications[M]. Xi'an:Northwestern polytechnical university press, 2008. (in Chinese)
- [8] Swaroop S, Hedrick J K, Yip P P, et al. Dynamic surface control for a class of nonlinear systems[J]. IEEE trans - actions on automatic control, 2000, 45(10) :1893 - 1899.
- [9] Khalil H K. Nonlinear systems[M]. New Jersey:Prentice - hall, 2002.

(编辑:徐敏)

### 本刊相关链接文献:

- [1] 王首斌,王新民,姚从潮,谢蓉. 基于小波网络的高超音速飞行器鲁棒自适应积分反步控制[J]. 空军工程大学学报:自然科学版, 2012, 13(3) :15 - 20.
- [2] 方洋旺,胡诗国,伍友利,等. 随机跳变系统状态估计与控制研究进展[J]. 空军工程大学学报:自然科学版, 2010, 11(4) :31 - 36.
- [3] 周凤岐,孔令云. 一类混沌系统的自适应滑模变结构控制[J]. 空军工程大学学报:自然科学版, 2007, 8(3) :19 - 22.
- [4] 郭书祥,张陵,李颖. 柔性状态反馈控制器设计线性系统的鲁棒  $H^\infty$  [J]. 空军工程大学学报:自然科学版, 2005, 6(1) :30 - 32.

## Adaptive Backstepping Terminal Sliding Mode Control for Uncertain Nonlinear Systems

LIU Dong<sup>1</sup>, WU Jie<sup>2,3</sup>, YANG Peng - song<sup>2</sup>

(1. School of Automation Science and Electrical Engineering, Beijing University of Aeronautics and Astronautics, Beijing 100191, China; 2. School of Aeronautics and Astronautics Engineering, Air Force Engineering University, Xi'an 710038, China; 3. Unit of 94579, Xintai 271206, Shandong, China)

**Abstract:** An adaptive backstepping terminal sliding mode control scheme is proposed for a class of uncertain nonlinear systems in strict - feedback form with unknown nonlinearities. The dynamic surface control is combined with the first steps of backstepping method to design the virtual controller. In the  $n$ -th step, only one neural network functions approximator is adopted to compensate all the unknown nonlinearities, and a adaptive neural network controller based on global fast terminal sliding mode design is obtained. The proposed controller design approach avoids the explosion of complexity in traditional backstepping design, and improves the convergence rate and steady - state tracking accuracy of the system by introducing approximation errors and adaptive compensation of uncertainty bounds to eliminate the errors of modeling and parameter estimation. By theoretical analysis, all the signals in the closed loop systems are guaranteed to be semi - globally uniformly ultimately bounded. Finally, the simulation results validate the effectiveness of the proposed method.

**Key words:** adaptive neural network control; Backstepping; terminal sliding mode control; dynamic surface control

(上接第 4 页)

## Numerical Research on Effect of An Improved Slot Configuration on the Flow Field Characteristics of Cascade

WANG Ru - gen<sup>1</sup>, LUO Kai<sup>1</sup>, WU Yun<sup>1</sup>, CHEN Bin - bin<sup>2</sup>

(1. School of Aeronautic and Astronautics Engineering, Air Force Engineering University, Xi'an 710038, China; 2. Unit 95275, Liuzhou 545004, Guangxi, China)

**Abstract:** Based on the thought that the jet flow from slot outlet can control separation of boundary layer on the suction surface, an improved slot configuration is designed to obtain better flow field characteristics of cascade. The CFD measures are used to analyze the effect of blade slot treatment on performance of cascade. Different slot outlet angles are studied. The results indicate that the improved slot configuration can help obtain better flow field characteristics, higher turning angle and static pressure rise, and lower total pressure loss. Slot outlet angle obviously affects the flow field characteristics of cascade.

**Key words:** cascade; blade slot treatment; jet flow; boundary layer; flow field characteristics