

一类非线性离散系统的直接自适应模糊控制

姜海波^{1,2}, 张天平¹

(1. 扬州大学 信息工程学院, 江苏 扬州 225009; 2. 盐城师范学院 数学科学学院, 江苏 盐城 224002)

摘要: 针对一类含延迟非线性离散系统, 提出了一种直接自适应模糊控制器设计的新方案. 将系统用T-S模糊模型来表示, 并基于并行分布补偿(PDC)基本思想设计了一种具有未知参数的模糊控制器, 同时采用梯度下降算法对该控制器的参数进行在线辨识. 通过输入到状态稳定(ISS)方法, 证明了系统输出和参考输出的误差有界且满足一定的平均性能. 仿真表明本方法的有效性.

关键词: 非线性离散系统; 模糊控制; 自适应控制; 梯度下降算法; 输入状态稳定

中图分类号: TP273 **文献标识码:** A

Direct adaptive fuzzy control for a class of nonlinear discrete-time systems

JIANG Hai-bo^{1, 2}, ZHANG Tian-ping¹

(1. College of Information Engineering, Yangzhou University, Yangzhou Jiangsu 225009, China;

2. School of Mathematical Sciences, Yancheng Teachers College, Yancheng Jiangsu 224002, China)

Abstract: A new design scheme of direct adaptive fuzzy control for a class of nonlinear discrete-time systems with delay is proposed in this paper. Firstly, the Takagi-Sugeno (T-S) fuzzy model is used to represent the systems. Secondly, the basic idea of the so-called Parallel Distributed Compensation (PDC) is employed to design the fuzzy controller with unknown parameters. Thirdly, the parameters of the controller are identified by gradient descent algorithm on-line. Furthermore, by Input-to-State Stability (ISS) approach, the error between the system output and the reference output is proved to be bounded and to satisfy some average performance. Finally, simulation results show the effectiveness of the proposed scheme.

Key words: nonlinear discrete-time systems; fuzzy control; adaptive control; gradient descent algorithm; input-to-state stability

1 引言(Introduction)

由近几年来, 关于非线性连续系统的研究受到了广泛关注^[1,2], 基于模糊逻辑系统、神经网络的逼近性能, 提出了各种控制策略. 然而, 对非线性离散系统的研究却较少, 主要由于稳定性分析困难, 而且由于Lyapunov函数形式的差异, 连续系统的结果又很难推广到离散系统, 另外实际系统从本质上来说都是离散系统, 因此研究离散系统显得特别重要^[3~9].

对于一类非仿射型的离散系统, 文献[6]将系统等价转化为时变线性系统, 利用小波网络逼近控制器中的时变参数, 提出了一种直接自适应预测控制器的设计方案. 文献[7]首先利用隐函数定理证明理想控制器的存在性, 然后利用神经网络对理想控制

器进行逼近, 提出了一种神经网络直接自适应控制器的设计方案.

Takagi和Sugeno提出了具有线性后件的T-S模糊模型以来^[1], 由于模型既能充分利用专家经验, 又能结合成熟的经典控制理论, 因而受到了广泛关注. 文献[3]中, Cao和Ress提出用T-S模糊模型表示非线性离散系统, 且给出了一套建模与稳定性分析的系统化方法. 文献[8]针对一类非线性离散混沌系统, 给出了一种间接自适应模糊控制器的设计方法, 但其方法不能推广到一般离散系统.

除了传统Lyapunov方法, ISS方法也是一种稳定性分析很好的工具^[9,10]. 文献[9]给出了离散系统ISS的定义及一系列性质. 文献[10]利用ISS方法研

收稿日期: 2005-04-19; 收修稿日期: 2005-12-05.

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(60074013, 10371106); 江苏省教育厅指导性计划资助项目(KK0310067); 扬州大学信息科学学科群资助项目(ISG030606).

究了一类非线性离散系统模糊神经网络辨识问题.

本文针对一类含延迟的非线性离散系统, 提出了一种直接自适应模糊控制器设计的新方案. 基于PDC基本思想设计了一种具有未知参数的模糊控制器, 同时采用梯度下降算法对该控制器的参数进行辨识. 通过ISS方法, 证明了系统输出和参考输出信号的误差有界且满足一定的平均性能. 本方法不需要运用死区算法^[5], 不需要线性增长条件^[6]或持续激励条件, 又避免了LMI方法中难以找到公共矩阵的问题^[2].

2 系统模型与问题描述(System modeling and problem description)

假设被控对象由如下输入输出模型描述:

$$\begin{aligned} y(k+\tau) = & \\ & f(y(k), \dots, y(k-n), \\ & u(k-1), \dots, u(k-m)) + \xi(k). \end{aligned} \quad (1)$$

其中: τ 为系统延迟, m 为输入阶次, n 为输出阶次, $f(\cdot)$ 连续且可导, 且 $f(0, \dots, 0) = 0$, $\frac{\partial f}{\partial u(k-1)} > 0$, $\xi(k)$ 为系统未知有界干扰或建模误差.

控制目标要求系统输出 $y(k+\tau)$ 尽可能地跟踪一个指定的期望参考输出 $y_r(k+\tau)$.

经过局部模型线性化, 设系统(1)表示为如下T-S模糊模型:

规则 i :

IF $z_1(k)$ is M_1^i and, $\dots$, and $z_g(k)$ is M_g^i

THEN $y(k+\tau) =$

$$\begin{aligned} & l_{i0}y(k) + \dots + l_{in}y(k-n) + \\ & p_{i1}u(k-1) + \dots + p_{im}u(k-m) + \xi(k), \\ & i = 1, 2, \dots, r. \end{aligned} \quad (2)$$

其中: M_j^i 是模糊集合, $z(k) = [z_1(k), z_2(k), \dots, z_g(k)]^T$ 是可测量的变量, 即前件变量; $l_{i0}, \dots, l_{in}, p_{i1}, \dots, p_{im}$, ($i = 1, 2, \dots, r$)是第 i 个子系统的常数, r 是模糊规则的个数.

应用单点模糊化、乘积推理和中心加权反模糊化推理方法^[2], 可得如下全局模糊系统

$$\begin{aligned} y(k+\tau) = & \\ & \sum_{i=1}^r h_i(z(k)) [l_{i0}y(k) + \dots + l_{in}y(k-n) + \\ & p_{i1}u(k-1) + \dots + p_{im}u(k-m) + \xi(k)]. \end{aligned} \quad (3)$$

其中:

$$h_i(z(k)) = \frac{w_i(z(k))}{\sum_{i=1}^r w_i(z(k))},$$

$$w_i(z(k)) = \prod_{j=1}^g M_j^i(z_j(k)).$$

显然

$$\begin{aligned} w_i(z(k)) & \geq 0, \sum_{i=1}^r w_i(z(k)) > 0, i = 1, 2, \dots, r, \\ h_i(z(k)) & \geq 0, \sum_{i=1}^r h_i(z(k)) = 1, i = 1, 2, \dots, r. \end{aligned}$$

3 控制器的设计与参数辨识(Design of controller and parameter identification)

基于PDC基本思想, 设计如下由模糊模型表示的模糊控制器:

规则 i :

IF $z_1(k)$ is M_1^i and, $\dots$, and $z_g(k)$ is M_g^i

THEN $u(k-1) =$

$$\begin{aligned} & a_{i0}y(k) + \dots + a_{in}y(k-n) + \\ & b_{i2}u(k-2) + \dots + \\ & b_{im}u(k-m) + c_i y_r(k+\tau). \end{aligned} \quad (4)$$

其中 $a_{i0}, \dots, a_{in}, b_{i2}, \dots, b_{im}, c_i$ ($i = 1, 2, \dots, r$)为待定的未知参数.

应用单点模糊化、乘积推理和中心加权反模糊化推理方法^[2], 可得如下模糊控制器

$$\begin{aligned} u(k-1) = & \\ & \sum_{i=1}^r h_i(z(k)) [a_{i0}y(k) + \dots + \\ & a_{in}y(k-n) + b_{i2}u(k-2) + \dots + \\ & b_{im}u(k-m) + c_i y_r(k+\tau)]. \end{aligned} \quad (5)$$

令

$$\begin{aligned} \theta_i &= [a_{i0}, \dots, a_{in}, b_{i2}, \dots, b_{im}, c_i]^T, \\ \phi_i(k) &= \\ & [h_i(z(k))y(k), \dots, h_i(z(k))y(k-n), \\ & h_i(z(k))u(k-2), \dots, h_i(z(k))u(k-m), \\ & h_i(z(k))y_r(k+\tau)]^T, \\ \theta &= [\theta_1^T, \dots, \theta_r^T]^T, \phi(k) = [\phi_1^T, \dots, \phi_r^T]^T. \end{aligned}$$

则控制器式(5)表示为

$$u(k-1) = \phi^T(k)\theta. \quad (6)$$

假设 1 对于系统(1), 当 $\xi(k) = 0$ 时, 存在理想控制器 $u^*(k-1) = \phi^T(k)\theta^*$, 使得

$$f(y(k), \dots, y(k-n), u^*(k-1), \dots, u(k-m)) = y_r(k+\tau) - d(k).$$

其中 $d(k)$ 称为理想控制误差, 为较小的有界量.

注 由于系统的非线性性, 故不可能使得 $f(y(k), \dots,$

$y(k-n), u^*(k-1), \dots, u(k-m)) = y_r(k+\tau)$, 若模糊规则数足够多, 可使理想控制误差 $d(k)$ 尽可能的小.

由假设1、式(3)及中值定理得

$$e(k+\tau) = y(k+\tau) - y_r(k+\tau) = \eta_k \phi^T(k) \tilde{\theta}(k) + \omega(k). \quad (7)$$

其中: $\eta_k = \frac{\partial f}{\partial u(k-1)}|_{\xi}$, ξ 介于 $u(k-1), u^*(k-1)$ 之间, $0 < \eta_k \leq \eta_{\max}$, $\tilde{\theta}(k) = \hat{\theta}(k) - \theta^*$, $\hat{\theta}(k)$ 为对 θ^* 的估计, $\omega(k) = \xi(k) - d(k)$.

采用如下具有时变学习率的梯度下降算法^[10]对 θ 参数进行在线辨识:

$$\hat{\theta}(k+\tau) = \hat{\theta}(k) - \alpha(k) \phi(k) e(k+\tau), \quad (8)$$

$$\alpha(k) = \frac{\lambda}{1 + \|\phi(k)\|^2}. \quad (9)$$

其中 $0 < \lambda \leq \min(1/\eta_{\max}, 1)$ 为适当选取的常数.

4 稳定性分析(Stability analysis)

为了便于稳定性分析, 下面给出ISS理论的相关内容.

定义 1^[9] 若函数 $\alpha: (0, \infty) \rightarrow (0, \infty)$ 是连续的, 严格递增且 $\alpha(0) = 0$, 则称函数 α 为 K 型函数. 特别地, 若函数 α 无界, 则称函数 α 为 K_∞ 型函数.

定义 2^[9] 若函数 $\beta: (0, \infty) \times (0, \infty) \rightarrow (0, \infty)$, 对于 $t \geq 0$, 函数 $\beta(\cdot, t)$ 是 K 型函数. 又对于 $r > 0$, 函数 $\beta(r, \cdot)$ 严格递增且 $\lim_{t \rightarrow \infty} \beta(r, t) = 0$, 则称函数 β 为 KL 型函数.

考虑如下非线性系统

$$x(k+1) = f(x(k), u(k)). \quad (10)$$

其中: $x(k)$ 是系统状态, $u(k)$ 为系统输入.

下面给出系统输入到状态稳定的定义.

定义 3^[9] 对于系统(10), 若存在 K 型函数 γ , KL 型函数 β , 满足

$$\|x(k)\| \leq \beta(\|x(0), k\|) + \gamma(\|u_k\|_\infty), \quad \forall k \geq 0, \quad (11)$$

则称系统满足ISS. 其中 γ 为非线性 L_∞ 增益.

定理 1^[9] 若系统(10)是ISS的, 则系统零输入时渐近稳定, 且如果输入 $u(k)$ 有界, 则系统状态 $x(k)$ 也有界(bounded-input-bounded-state).

定义 4^[9] 若函数 $V \in C^1$ 满足如下条件:

1) 存在 K_∞ 型函数 α_1, α_2 满足

$$\alpha_1(\|x(k)\|) \leq V(x(k)) \leq \alpha_2(\|x(k)\|), \quad \forall x \in \mathbb{R}^n.$$

2) 存在 K_∞ 型函数 α_3, α_4 满足

$$\Delta V(x(k)) \leq -\alpha_3(\|x(k)\|) + \alpha_4(u(k)).$$

则函数 $V \in C^1$ 是ISS-Lyapunov函数.

下面利用ISS方法给出如下定理.

定理 2 若非线性系统(1)满足假设1, 采用控制

器式(4), 且用梯度下降算法式(8)(9)对控制器的参数进行在线辨识, 则系统输出与参考输出信号的误差有界, 且满足平均性能

$$\lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{T} \sum_{k=1}^T e_N^2(k) \leq \bar{\omega}.$$

其中:

$$\begin{aligned} e_N(k) &= \sqrt{\pi(k)} e(k+\tau), \\ \pi(k) &= \lambda(\eta_{\max}(1 + \sup_k \|\phi(k)\|^2))^{-1}, \\ \bar{\omega} &= \sup_k \omega^2(k), \\ \lim &\text{表示上极限, } \sup \text{表示上确界.} \end{aligned}$$

证 由式(8)得

$$\tilde{\theta}(k+\tau) = \tilde{\theta}(k) - \alpha(k) \phi(k) e(k+\tau). \quad (12)$$

取ISS-Lyapunov函数 $V(k) = \sum_{j=0}^{\tau-1} \|\tilde{\theta}(k+j)\|^2$, 则

$$\begin{aligned} \Delta V(k) &= \\ V(k+1) - V(k) &= \\ \|\tilde{\theta}(k+\tau)\|^2 - \|\tilde{\theta}(k)\|^2 &= \\ \|\tilde{\theta}(k) - \alpha(k) \phi(k) e(k+\tau)\|^2 - \|\tilde{\theta}(k)\|^2 &= \\ (\alpha(k) e(k+\tau))^2 \|\phi(k)\|^2 - & \\ 2\alpha(k) e(k+\tau) \phi^T(k) \tilde{\theta}(k) &= \\ (\alpha(k) e(k+\tau))^2 \|\phi(k)\|^2 - & \\ 2\alpha(k) e(k+\tau) ((1/\eta_k) e(k+\tau) - \omega(k)) &= \end{aligned}$$

由 $0 < \eta_k \leq \eta_{\max}$, $0 < \lambda \leq \min(1/\eta_{\max}, 1)$, 得

$$2/\eta_k - \lambda \geq 2/\eta_{\max} - \lambda \geq 1/\eta_{\max}.$$

又 $2ab \leq a^2 + b^2$, 则

$$\begin{aligned} \Delta V(k) &\leq \\ (\alpha(k) e(k+\tau))^2 \|\phi(k)\|^2 - & \\ 2\alpha(k) (e(k+\tau))^2 / \eta_k + 2\alpha(k) e(k+\tau) \omega(k) &\leq \\ (\alpha(k) e(k+\tau))^2 \|\phi(k)\|^2 - 2\alpha(k) e^2(k+\tau) / \eta_k + & \\ (\alpha(k) e(k+\tau))^2 + \omega^2(k) &\leq \\ -(\alpha(k) e^2(k+\tau) (2/\eta_k - & \\ \alpha(k) \|\phi(k)\|^2 - \alpha(k)) + \omega^2(k) &= \\ -\alpha(k) e^2(k+\tau) (2/\eta_k - \lambda) + \omega^2(k) &\leq \\ -\alpha(k) e^2(k+\tau) / \eta_{\max} + \omega^2(k). & \end{aligned}$$

令 $\pi(k) = \lambda(\eta_{\max}(1 + \sup_k \|\phi(k)\|^2))^{-1}$, 则

$$\Delta V(k) \leq -\pi(k) e^2(k+\tau) + \omega^2(k). \quad (13)$$

由定义3知, $c_3(s) = s^2$, $c_4(s) = s^2$. 由于 $V(k)$ 与 $\sqrt{\pi(k)} e(k+\tau)$ 有关, 如果把 $\omega(k)$ 作为“输入”, $e(k+\tau)$ 作为“输出”, 则由式(13)知, 系统是ISS的. 由定理1知系统满足BIBO. 则由 $\omega(k)$ 有界知, 输出 $\sqrt{\pi(k)} e(k+\tau)$ 有界. 而 $0 < \sqrt{\pi(k)} \leq 1/\eta_{\max}$, 则 $e(k+\tau)$ 有界.

由式(13)得

$$V(T) - V(1) \leq -\sum_{k=1}^T \pi(k) e^2(k+1) + T\omega^2(k),$$

即

$$\sum_{k=1}^T \pi(k) e^2(k+\tau) \leq V(1) + T\omega^2(k). \quad (14)$$

令 $e_N(k) = \sqrt{\pi(k)} e(k+\tau)$, $\bar{\omega} = \sup_k \omega(k)$, 则

$$\lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{T} \sum_{k=1}^T e_N^2(k) \leq \bar{\omega}. \quad (15)$$

证毕.

5 仿真结果(Simulation results)

考虑如下离散Henon混沌系统

$$y(k) = -y(k-1)^2 + 0.3y(k-2) + 1.4 + y(k-1) + \xi(k). \quad (16)$$

控制目标是使系统输出跟踪周期为20, 振幅为2的方波.

选取如下隶属函数 $M^1(y(k-1)) = 0.5(1 - \frac{y(k-1)}{d})$, $M^2(y(k-1)) = 0.5(1 + \frac{y(k-1)}{d})$, 其中 $d > 0$ 覆盖整个输出的范围. 则Henon系统可表示为如下T-S模糊模型^[8]:

$$\begin{cases} \text{IF } y(k-1) \text{ is } M^1 \\ \text{THEN} \\ y(k) = l_{11}y(k-1) + l_{12}y(k-2) + p_1\bar{u}(k-1) + \xi(k); \\ \text{IF } y(k-1) \text{ is } M^2 \\ \text{THEN} \\ y(k) = l_{21}y(k-1) + l_{22}y(k-2) + p_2\bar{u}(k-1) + \xi(k). \end{cases} \quad (17)$$

其中: $\bar{u} = u + 1.4$, $l_{11} = -l_{21} = d$, $l_{12} = l_{22} = 0.3$, $p_1 = p_2 = 1$, $\xi(k) = 0.5 * \sin k$.

采用如下模糊控制器

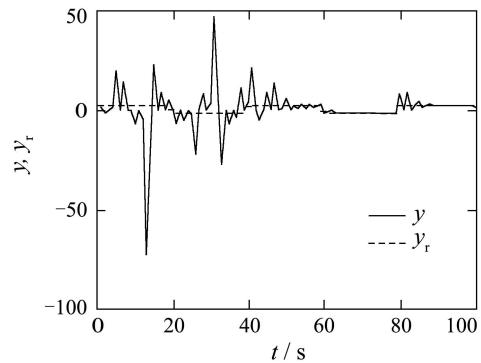
$$\begin{cases} \text{IF } y(k-1) \text{ is } M^1 \\ \text{THEN} \\ \bar{u}(k-1) = a_{11}y(k-1) + a_{12}y(k-2) + b_{11}y_r(k); \\ \text{IF } y(k-1) \text{ is } M^2 \\ \text{THEN} \\ \bar{u}(k-1) = a_{21}y(k-1) + a_{22}y(k-2) + b_{21}y_r(k). \end{cases} \quad (18)$$

其中控制器(18)中的参数由梯度下降算法(8)(9)进行在线辨识.

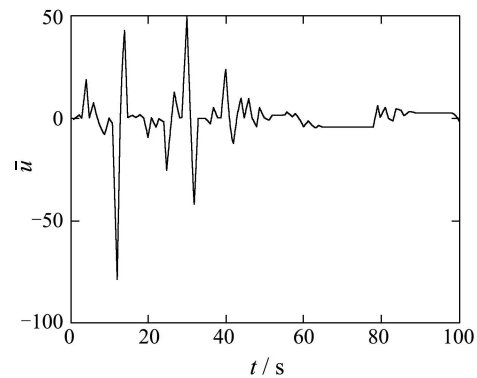
仿真中参数取为

$$\begin{aligned} \bar{u}(1) &= 2, \bar{u}(2) = -2, y(1) = 1, y(2) = -1, \lambda = 1, \\ \hat{\theta}(0) &= [a_{11}(0), a_{12}(0), b_{11}(0), a_{21}(0), a_{22}(0), b_{21}(0)]^T = \\ &= [10, 10, 10, 10, 10, 10, 10, 10]^T. \end{aligned}$$

仿真时间为100步, 仿真结果如图1所示. 图1(a)中实线表示 y_r , 虚线表示 y .



(a) 系统输出 y 和参考输出 y_r



(b) 控制输入 $\bar{u}$

图1 系统的跟踪响应和控制输入

Fig. 1 Tracking responses and control input of system

6 结论(Conclusion)

本文针对一类含延迟非线性离散系统, 提出了一种直接自适应模糊控制器设计的新方案. 本方法将T-S模糊模型和传统梯度下降算法结合起来, 有效地解决了一类非线性离散系统的直接自适应模糊控制问题.

参考文献(References):

- [1] TAKAGI T, SUGENO M. Fuzzy identification of systems and its application to modeling and control[J]. *IEEE Trans on Systems, Man and Cybernetics*, 1985, 15(1): 116 - 132.
- [2] TANAKA K, IKEDA T, KIM E, et al. Fuzzy regulators and fuzzy observers: relaxed stability conditions and LMI-based designs[J]. *IEEE Trans on Fuzzy Systems*, 1998, 6(2): 250 - 265.
- [3] CAO S G, REES N W, FENG G. Analysis and design for a class of complex control systems[J]. *Automatica*, 1997, 33(6): 1017 - 1028.
- [4] 张天平, 冯纯伯. 多变量系统的鲁棒自适应控制[J]. *东南大学学报*, 1994, 24(6): 66 - 71.
(ZHANG Tianping, FENG Chunbo. A design scheme of robust adaptive control for multivariable systems[J]. *J of Southeast University*, 1994, 24(6): 66 - 71.)
- [5] 解学军, 王远. 基于神经网络和带死区的最小二乘算法的一类非线性离散时间系统的自适应控制[J]. *控制理论与应用*, 1999, 16(3): 355 - 360, 379.

(下转第956页)

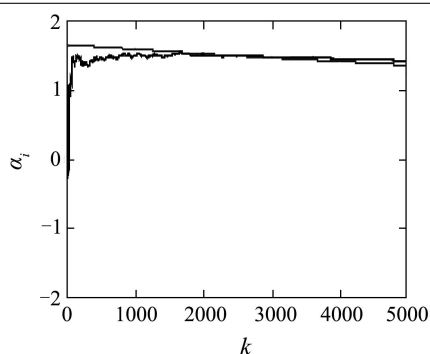


图3 方差缓慢漂移情况的权值跟踪曲线
Fig. 3 Weight tracking curve when
variance varies slowly

由图3可以看出,当检测系统所处环境噪声方差缓慢线性变化时,估计权值亦能较好地跟踪理论权值.

7 结论(Conclusion)

本文针对分布式检测系统中各传感器的虚警概率与漏报概率不相等的一般情况,提出了一种递推反馈自适应学习算法,用于在线调节Bayes融合规则的权值,使各权值最后收敛于其最佳值,而且对于环

境噪声的缓慢变化,该学习算法具有较好的适应性.理论分析和仿真算例均表明了该方法的有效性.

参考文献(References):

- [1] CHAIR Z, VARSHNEY P K. Optimal data fusion in multiple sensor detection systems[J]. *IEEE Trans on Aerospace and Electronic Systems*, 1986, 22(1): 98 – 101.
- [2] WONG K, LUO Z Q. Data compression, data fusion and Kalman filtering in wavelet packet sub-bands of a multisensor tracking system[J]. *IEE Proceeding of Radar, Sonar Navigation*, 1998, 45(2): 100 – 108.
- [3] MAZOR E, AVERBUCH A, DAYAN J. Interacting multiple model methods in target tracking[J]. *IEEE Trans on Aerospace and Electronic Systems*, 1998, 34(1): 103 – 123.

作者简介:

李俊 (1971—), 男, 教授, 博士, 主要研究方向为先进控制理论与应用、水下航行器导航与控制技术、信息融合理论及应用, E-mail: lijun601@nwpu.edu.cn;

徐德民 (1937—), 男, 教授, 博士生导师, 主要研究方向为控制理论及应用、水下航行器技术;

宋保维 (1963—), 男, 教授, 博士生导师, 主要研究方向为水下航行器技术.

(上接第952页)

(XIE Xuejun, WANG Yuan. Adaptive control of nonlinear discrete-time systems using neural networks and least squares algorithm with dead-zone [J]. *Control Theory & Applications*, 1999, 16(3): 355 – 360, 379.)

- [6] 郭健, 陈庆伟, 吴晓蓓, 等. 一类非线性系统的稳定自适应控制[J]. *控制理论与应用*, 2003, 20(4): 603 – 606.

(GUO Jian, CHEN Qingwei, WU Xiaopei, et al. Stable adaptive control for a class of nonlinear system [J]. *Control Theory & Applications*, 2003, 20(4): 603 – 606.)

- [7] GE S S, ZHANG J, LEE T H. Adaptive MNN control for a class of non-affine NARMAX systems with disturbances [J]. *Systems & Control Letters*, 2004, 53(1): 1 – 12.
- [8] FENG G, CHEN G R. Adaptive control of discrete-time chaotic systems: a fuzzy control approach [J]. *Chaos, Solitons and Fractals*, 2005, 23(2): 459 – 467.

- [9] JIANG Z P, WANG Y. Input-to-State stability for discrete-time nonlinear systems [J]. *Automatica*, 2001, 37(6): 857 – 869.

- [10] YU W, LI X O. Fuzzy identification using fuzzy neural networks with stable learning algorithms [J]. *IEEE Trans on Fuzzy Systems*, 2004, 12(3): 411 – 420.

作者简介:

姜海波 (1979—), 男, 扬州大学研究生, 主要研究方向为模糊控制、智能控制、脉冲控制等, E-mail: yctcjh@126.com;

张天平 (1964—), 男, 教授, 1996年获得东南大学自动化所自动控制理论及应用专业博士学位, 目前主要从事自适应控制、模糊控制理论、智能控制及非线性控制等研究工作, E-mail: tpzhang@yzu.edu.cn.