

文章编号: 1001-0920(2009)03-0468-04

基于神经网络干扰观测器的一类不确定 非线性 MIMO 系统 H 跟踪控制

胡 慧^{1,2}, 刘国荣²

(1. 湖南大学 电气与信息工程学院, 长沙 410082; 2. 湖南工程学院, 湖南 湘潭 411101)

摘 要: 针对一类具有未知外部干扰及内部不确定性的非线性 MIMO 系统, 提出了基于神经网络干扰观测器的鲁棒跟踪控制方法, 用于降低控制器对干扰的要求. 设计了基于神经网络的干扰观测器, 以逼近由外部干扰、内部不确定性和子系统的交叉耦合组成的复合干扰. 根据 Lyapunov 稳定性理论的参数更新律及所设计的控制器, 保证了系统中所有信号的最终一致有界性, 并获得了给定的跟踪性能指标. 仿真结果证明了该方法的有效性.

关键词: 非线性 MIMO 系统; 干扰观测器; 鲁棒控制; 神经网络

中图分类号: TP273 **文献标识码:** A

H tracking control of a class of uncertain nonlinear MIMO systems based on neural network disturbance observer

HU Hui^{1,2}, LIU Guorong²

(1. College of Electrical and Information Engineering, Hu 'nan University, Changsha 410082, China; 2. Hu 'nan Institute of Engineering, Xiangtan 411101, China. Correspondent: HU Hui, E-mail: onlymyhui@126.com)

Abstract: This paper presents a robust tracking control approach based on neural network disturbance observer for a class of uncertain nonlinear MIMO systems under the unknown external disturbance and internal uncertainty to reduce the restrain conditions on the disturbance. The disturbance observer is designed with the neural networks for monitoring the compound disturbance which consists of external disturbance, internal uncertainty and cross-coupling of subsystems. Parameters update laws based on Lyapunov theory and the controller are proposed, which guarantee that all the signals in the system are uniformly ultimately bounded and the given tracking performance index is obtained. Simulation results show the effectiveness of this method.

Key words: Nonlinear MIMO system; Disturbance observer; Robust control; Neural network

1 引 言

近年来,非线性不确定系统的控制问题已有不少成果^[1-5],但在这些研究中,要么未考虑外部干扰的影响,要么对干扰作了各种限制,而实际系统中干扰是不可避免的.如何降低对干扰的要求,已成为当前的研究热点之一.文献[6,7]针对一类单输入/单输出非线性系统,提出一种模糊干扰观测器方法,应用模糊逻辑系统的万能逼近性,观测由外部干扰及内部不确定性组成的复合干扰,并基于该观测器设计系统的控制律.文献[8]则对一类多输入/多输出系统提出一种神经网络干扰观测器方法.

为进一步简化系统的设计,本文对一类具有未

知外部干扰及内部不确定性的多输入/多输出非线性系统,提出了基于神经网络干扰观测器的鲁棒跟踪控制方法.该方法的一个突出特点是应用主导输入的概念^[9,10],将一个 $m \times m$ 维的多输入/多输出系统分解成 m 个单输入/单输出系统进行设计.对每个子系统设计神经网络干扰观测器,观测由子系统间的交叉耦合、内部不确定性和外部干扰组成的复合干扰,并基于观测器推导出新颖的控制律和参数更新律,以保证系统中所有信号的最终一致有界性.为了克服观测误差的影响,在控制器中引入了鲁棒控制项.本文从理论上和仿真实验上证明了所提出方法的有效性.

收稿日期: 2008-01-13; 修回日期: 2008-03-27.

基金项目: 湖南省自然科学基金项目(05JJ40093); 湖南省科技计划项目(2008FJ3029).

作者简介: 胡慧(1979—),女,湖南浏阳人,讲师,博士生,从事非线性系统、神经网络等研究; 刘国荣(1957—),男,湖南华容人,教授,博士生导师,从事智能控制、不确定非线性系统等研究.

2 问题描述

考虑如下形式的 MIMO 非线性系统:

$$\begin{cases} \begin{bmatrix} y_1^{(r_1)} \\ \dots \\ y_m^{(r_m)} \end{bmatrix} = F(x) + \bar{G}(x)u + d, \\ y_1 = x_{11}, \dots, y_m = x_{m1}. \end{cases} \quad (1)$$

其中: $r_1 + r_2 + \dots + r_m = n, x = [x_{11}, \dots, x_{1r_1}, \dots, x_{m1}, \dots, x_{mr_m}]^T \in R^n$ 为系统的可测状态向量, $y = [y_1, y_2, \dots, y_m]^T \in R^m$ 和 $u = [u_1, u_2, \dots, u_m]^T \in R^m$ 分别为系统的输出向量和输入控制向量, $F(x) = [f_1(x), \dots, f_m(x)]^T$ 和

$$G(x) = \begin{bmatrix} g_{11}(x) & \dots & g_{1m}(x) \\ \dots & \ddots & \dots \\ g_{m1}(x) & \dots & g_{mm}(x) \end{bmatrix}$$

为已知的函数向量和控制增益矩阵, $d = [d_1, d_2, \dots, d_m]^T$ 为具有未知上界的外部干扰, $F(x) = [f_1(x), \dots, f_m(x)]^T$ 和

$$G(x) = \begin{bmatrix} g_{11}(x) & \dots & g_{1m}(x) \\ \dots & \ddots & \dots \\ g_{m1}(x) & \dots & g_{mm}(x) \end{bmatrix}$$

为系统的内部不确定性。

式(1)给出的 $m \times m$ 维多输入/多输出系统,可看作由 m 个多输入/单输出子系统组成,其第 i 个子系统为

$$\begin{cases} y_i^{(r_i)} = f_i(x) + \sum_{j=1}^m g_{ij}(x)u_j + d_i, \\ i = 1, 2, \dots, m. \end{cases} \quad (2)$$

m 个输入都影响这个子系统的输出。在这 m 个输入中,选择一个起主导作用的输入,记为 u_i ,其余看作系统的外来干扰。则有

$$y_i^{(r_i)} = f_i(x) + g_{ii}(x)u_i + \tilde{d}_i(x, u), \quad (3)$$

其中

$$\tilde{d}_i(x, u) = f_i(x) + \sum_{j=1, j \neq i}^m g_{ij}(x)u_j + \sum_{j=1}^m g_{ij}(x)u_j + d_i.$$

这样便将一个 $m \times m$ 维多输入/多输出系统分解成 m 个单输入/单输出子系统。

对式(3)作如下假设:

假设 1 对于可控区域 $U_c \subset R^n$ 中的 x , 有 $g_{ii}(x) \neq 0$ 。

于是式(1)可表述为

$$\begin{cases} \begin{bmatrix} y_1^{(r_1)} \\ \dots \\ y_m^{(r_m)} \end{bmatrix} = F(x) + \bar{G}(x)u + d(x, u), \\ y_1 = x_{11}, \dots, y_m = x_{m1}. \end{cases} \quad (4)$$

其中: $\bar{G}(x) = \text{diag}(g_{11}(x), \dots, g_{mm}(x))$, $(x, u) = [x_1(x, u), \dots, x_m(x, u)]^T$ 为系统(1)中各子系统间的交叉耦合、内部不确定性和外部干扰组成的复合干扰。

本文利用 RBF 神经网络的万能逼近特性,将其作为干扰观测器观测系统总的复合干扰。在此基础上,设计一个鲁棒自适应控制器,使得系统(1)的各个输出 y_i 及至 $r_i - 1$ 阶导数 $y_i, \dots, y_i^{(r_i-1)}$ 跟踪有界的参考信号 y_{id} 及其相应阶的导数。

对于一个给定的干扰衰减水平常数 $\epsilon > 0$,可获得如下 H 跟踪性能指标:

$$\begin{aligned} & \frac{1}{2} \int_0^T e^T Q e dt \\ & + \frac{1}{2} e^T(0) P e(0) + \sum_{i=1}^m \frac{1}{2} \int_0^T \tilde{e}_i^T(0) \tilde{e}_i(0) + \\ & \int_0^T \left[\frac{1}{2} \tilde{e}_i^2(0) + \int_0^T \left(\frac{1}{2} \tilde{e}_i^2 + \frac{1}{2} \tilde{e}_i^2 \right) dt \right]. \end{aligned} \quad (5)$$

其中: $\gamma_i > 0$ 为学习率, $\beta_i > 0$ 为设计参数, $T \in [0, \infty)$, $e = [e_1^T, e_2^T, \dots, e_m^T]^T$ 为输出跟踪误差向量, \tilde{e}_i 为参数逼近误差向量, \tilde{e}_i 为干扰观测误差, \tilde{e}_i 为神经网络逼近误差上界, $P = \text{diag}(P_1, P_2, \dots, P_m)$, $Q = \text{diag}(Q_1, Q_2, \dots, Q_m)$ 。

3 RBF 神经网络干扰观测器与 H 控制器设计

考虑系统(3),令 $\tilde{e}_i = y_{id} - y_i, e_i = [\tilde{e}_i, \dot{\tilde{e}}_i, \dots, \tilde{e}_i^{(r_i-1)}]^T, k_i = [k_{ir_i}, k_{ir_i-1}, \dots, k_{ir_1}]^T \in R^{r_i}$, 并用 $\hat{\Lambda}_i$ 表示 RBF 神经网络干扰观测器的输出。如果 $\hat{\Lambda}_i$ 能很好地逼近系统的复合干扰 \tilde{d}_i , 则在考虑假设 1 的情况下,对系统(3)构造如下形式的控制器:

$$u_i = \frac{1}{g_{ii}(x)} (-f_i(x) + v_i - \hat{\Lambda}_i - u_{ia}). \quad (6)$$

其中: $v_i = y_{id}^{(r_i)} + k_i^T e_i$; u_{ia} 为鲁棒控制项,将在后面给出。将式(6)代入式(3),有

$$\dot{e}_i^{(r_i)} = -k_i^T e_i + \hat{\Lambda}_i - \tilde{d}_i + u_{ia}. \quad (7)$$

将式(7)用矩阵形式表示为

$$\dot{e}_i = A_i e_i + B_i (\hat{\Lambda}_i - \tilde{d}_i) + B_i u_{ia}. \quad (8)$$

其中

$$A_i = \begin{bmatrix} 0 & 1 & \dots & 0 \\ 0 & 0 & \dots & 0 \\ \dots & \dots & \ddots & \dots \\ -k_{ir_i} & -k_{ir_i-1} & \dots & -k_{ir_1} \end{bmatrix},$$

$$B_i = [0 \ 0 \ \dots \ 1]^T.$$

设计干扰观测器前,作如下假设:

假设2 对于任意 $x \in M_x$, 其中 M_x 为一紧集, 则神经网络的最优权值定义为

$$i^* = \arg \min_i [\sup_{x \in M_x} |i - \hat{i}_i|], \quad (9)$$

其中 i 表示具有希望边界的子集, 即 $i = \{i / i \in M_i\}$, M_i 为设计参数.

于是 RBF 神经网络干扰观测器的输出为 $\hat{i}_i = \sum_{j=1}^m \tilde{i}_{ij} \cdot \tilde{i}_j$. 其中: $i = (i_1, i_2, \dots, i_m)^T$ 为可调参数, $(x) = (x_1(x), \dots, x_m(x))^T$ 为基函数向量.

根据万能逼近定理, 存在最优权值 i^* 使得 $\hat{i}_i(x / i^*)$ 尽可能逼近复合干扰 i , 即有

$$i(x) = \hat{i}_i(x / i^*) + \tilde{i}_i = i^{*T} + \tilde{i}_i, \quad (10)$$

其中: \tilde{i}_i 为神经网络逼近误差; \bar{i}_i 为逼近误差上界, 可通过增加隐层节点数目任意减小. 通过使用式(10), 式(8)可表示为

$$\begin{aligned} \dot{e}_i = & A_i e_i + B_i (i^T(x) - i^{*T}(x) - \tilde{i}_i) + B_i u_{ia} = \\ & A_i e_i + B_i \tilde{i}_i^T(x) + B_i u_{ia} - B_i \tilde{i}_i, \end{aligned} \quad (11)$$

其中 $\tilde{i}_i = i - i^*$ 为参数逼近误差. 取误差的 H 控制器

$$u_{ia} = -\frac{1}{r} B_i^T P_i e_i, \quad (12)$$

其中 $P_i = P_i^T > 0$ 是如下方程的解:

$$\begin{aligned} P_i A_i + A_i^T P_i + Q_i - \frac{2}{r} P_i B_i B_i^T P_i + \\ \frac{1}{2} P_i B_i B_i^T P_i = 0, \quad Q_i > 0. \end{aligned} \quad (13)$$

为使方程(13)有一个对称半正定解, 必须适当选择加权因子 r , 使得 $2^2 > r$.

第 i 个干扰观测器系统设计为如下形式:

$$\dot{\mu}_i = -\lambda_i \mu_i + p_i(x, \hat{i}_i), \quad \mu_i \in R^p, \quad (14)$$

其中

$$p_i(x, \hat{i}_i) = \lambda_i y_i^{(r_i-1)} + f_i(x) + g_{ii}(x) u + \hat{i}_i.$$

定义干扰观测误差 $\tilde{i}_i = y_i^{(r_i-1)} - \mu_i$. 由式(3)和(14)可得干扰观测误差动态

$$\dot{\tilde{i}}_i = -\lambda_i \tilde{i}_i + i - \hat{i}_i. \quad (15)$$

当误差 $\tilde{i}_i \rightarrow 0$, 即 $\mu_i \rightarrow y_i^{(r_i-1)}$ 时, 便意味着神经网络输出 \hat{i}_i 很好地逼近了未知干扰 i .

定理1 假定采用神经网络干扰观测器(14)估计干扰, 控制器(6)作为系统(3)的控制器, 且神经网络权值的自适应律为

$$\dot{i}_i = -e_i^T P_i B_i(x) + \tilde{i}_i(x). \quad (16)$$

则观测误差最终一致有界, 且系统(3)的跟踪误差小于给定的性能指标

$$\begin{aligned} & \frac{1}{2} \int_0^T e_i^T Q_i e_i dt \\ & \frac{1}{2} e_i^T(0) P_i e_i(0) + \frac{1}{2} \int_0^T \tilde{i}_i^T(0) \tilde{i}_i(0) + \\ & \frac{1}{2} \int_0^T \tilde{i}_i^2(0) + \int_0^T \left(\frac{1}{2} \tilde{i}_i^2 + \frac{1}{2} \tilde{i}_i \right) dt. \end{aligned} \quad (17)$$

其中: $\gamma_i > 0$ 为学习率, $\beta_i > 0$ 为设计参数, $\tilde{i}_i = i - i^*$.

证明 取 Lyapunov 函数

$$V_i = \frac{1}{2} e_i^T P_i e_i + \frac{1}{2} \tilde{i}_i^T \tilde{i}_i + \frac{1}{2} \tilde{i}_i^2. \quad (18)$$

对上式两边求导, 并考虑式(12), 可得

$$\begin{aligned} \dot{V}_i = & \frac{1}{2} e_i^T (A_i^T P_i + P_i A_i) e_i + \\ & e_i^T P_i B_i \tilde{i}_i^T(x) + e_i^T P_i B_i u_{ia} - \\ & e_i^T P_i B_i \tilde{i}_i + \frac{1}{2} \tilde{i}_i^T \tilde{i}_i + \tilde{i}_i \dot{\tilde{i}}_i. \end{aligned} \quad (19)$$

将式(12), (13), (15), (16)代入上式, 得

$$\begin{aligned} \dot{V}_i = & -\frac{1}{2} e_i^T Q_i e_i - \frac{1}{2} e_i^T P_i B_i B_i^T P_i e_i - \\ & e_i^T P_i B_i \tilde{i}_i - \tilde{i}_i^2 + \tilde{i}_i \dot{\tilde{i}}_i. \end{aligned} \quad (20)$$

因为

$$-\tilde{i}_i^2 + \tilde{i}_i \dot{\tilde{i}}_i = -\frac{\tilde{i}_i^2}{2} + \frac{1}{2} \tilde{i}_i^2,$$

所以

$$\begin{aligned} \dot{V}_i = & -\frac{1}{2} e_i^T Q_i e_i - \frac{1}{2} e_i^T P_i B_i B_i^T P_i e_i - \\ & e_i^T P_i B_i \tilde{i}_i + \frac{1}{2} \tilde{i}_i^2 = \\ & -\frac{1}{2} e_i^T Q_i e_i - \frac{1}{2} \left[\left(\frac{1}{r} B_i^T P_i e_i + \tilde{i}_i \right)^T \times \right. \\ & \left. \left(\frac{1}{r} B_i^T P_i e_i + \tilde{i}_i \right) \right] + \frac{1}{2} \tilde{i}_i^2 + \frac{1}{2} \tilde{i}_i^2 \\ & - \frac{1}{2} \min(Q_i) e_i^2 + \frac{1}{2} \tilde{i}_i^2 + \frac{1}{2} \tilde{i}_i^2. \end{aligned} \quad (21)$$

当

$$e_i \in \left[\frac{1}{\sqrt{\min(Q_i)}} / \beta_i, \beta_i + \frac{1}{\sqrt{\min(Q_i)}} \right]$$

时, 则 $\dot{V}_i < 0$. 对整个系统构造 Lyapunov 函数 $V = V_1 + V_2 + \dots + V_m$, V 对 t 求导可得 $\dot{V} = \dot{V}_1 + \dot{V}_2 + \dots + \dot{V}_m$, 因此

$$\dot{V} = \dot{V}_1 + \dot{V}_2 + \dots + \dot{V}_m < 0. \quad (22)$$

所以在所设计的控制器的作用下, 闭环系统具有全局稳定性, 并且观测器误差最终一致有界.

对方程(21)积分, 得

$$\begin{aligned} V_i(T) - V_i(0) = & -\frac{1}{2} \int_0^T e_i^T Q_i e_i dt + \int_0^T \left(\frac{1}{2} \tilde{i}_i^2 + \frac{1}{2} \tilde{i}_i^2 \right) dt. \end{aligned}$$

由于 $V_i(T) = 0$, 上式等价于式(17).

对于整个系统而言, 系统可获得 H 跟踪性能 (5).

4 仿真算例

考虑一个双输入 / 双输出系统

$$\begin{bmatrix} \dot{y}_1 \\ \dot{y}_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x_1 + x_3^2 \\ x_1^2 \end{bmatrix} + F(x) + \begin{bmatrix} 1 + x_3^2 & 1 \\ 1 & 1 + x_1^2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u_1 \\ u_2 \end{bmatrix} + G(x)u + d.$$

其中 $F(x)$, $G(x)$ 和 d 分别为系统的不确定性和未知外部干扰, 在仿真中假设分别为

$$F(x) = \begin{bmatrix} 0.1x_1x_3 \\ 0.2x_1x_2 \end{bmatrix},$$

$$G(x) = \begin{bmatrix} 0 & 0.2 \\ 0 & -0.2(1+x_1^2) \end{bmatrix},$$

$$d = \begin{bmatrix} 0.2x_1\cos(3t) \\ 0.5x_2\sin(4t) \end{bmatrix}.$$

系统输出的参考信号选为

$$y_{1d} = \sin(t) + \cos(0.5t), \quad y_{2d} = \cos(t).$$

选择设计参数

$$Q_1 = 10, \quad Q_2 = \begin{bmatrix} 10 & \\ & 10 \end{bmatrix}, \quad \rho = 0.023,$$

$$r = 0.001, \quad k_1 = 10, \quad k_2 = [1 \quad 5].$$

求解 Riccati 方程(13), 可得

$$P_1 = 0.5, \quad P_2 = \begin{bmatrix} 27 & 5 \\ 5 & 2 \end{bmatrix}.$$

选择干扰观测器参数 $\alpha_1 = \alpha_2 = 10$, 学习率 η_1

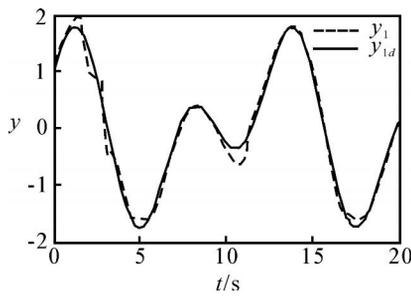


图 1 系统输出跟踪曲线 1

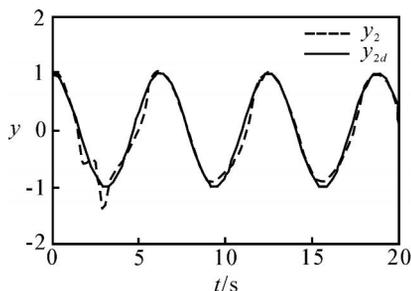


图 2 系统输出跟踪曲线 2

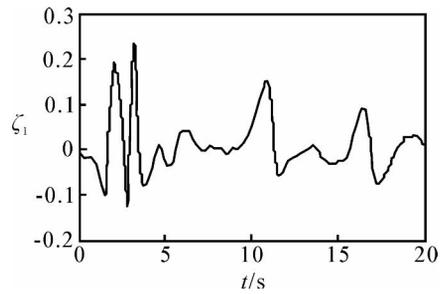


图 3 干扰观测器的误差曲线 1

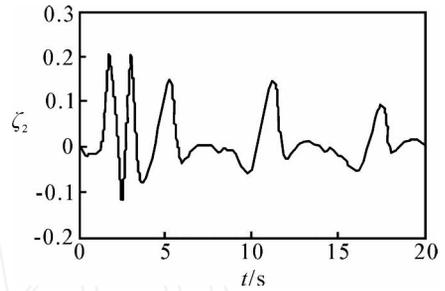


图 4 干扰观测器的误差曲线 2

$\alpha_2 = 20, \alpha_3 = 5$. 按式(14)设计干扰观测器, 按式(6)设计控制器, 采用 Matlab 进行仿真实验, 实验结果如图 1 ~ 图 4 所示.

图 1 和图 2 为系统输出及参考输出. 由仿真结果可以看出, 本文所提出的鲁棒控制器, 能使具有外部干扰和内部不确定性的系统输出很好地跟踪指定参考信号. 图 3 和图 4 为干扰观测器的误差曲线. 由图可见, 干扰观测器很好地观测了复合干扰的变化, 因此本文方法对具有复合干扰的多输入 / 多输出非线性系统的跟踪控制是有效的.

5 结 论

本文对一类具有未知外部干扰及内部不确定性的多输入 / 多输出非线性系统, 提出了基于神经网络干扰观测器的鲁棒跟踪控制方法. 设计了神经网络干扰观测器观测未知复合干扰, 并基于干扰观测器设计了系统的控制律和神经网络权值更新律. 从理论上和仿真实验上证明了所提出方法能保证所有信号的最终一致有界性以及一定的鲁棒特性.

参考文献(References)

[1] Chen Wenhua. Nonlinear disturbance observer enhanced dynamic inversion control missiles[J]. J of Guidance, Control and Dynamics, 2003, 26(1): 161-166.
 [2] Chen Wenhua, Ballance D J. A nonlinear disturbance observer for two-link robotic manipulators[J]. IEEE Trans on Industrial Electronics, 2000, 47(4): 932-938.

(下转第 476 页)

K 个满意代表点 $m_k(t)$ 的搜索方向,用质心修正类代表点的迭代算法是批处理算法,可消除序贯算法产生的随机性干扰。

2) 提取各指标对聚类所作贡献大小的量化值,并以此为启发性知识定义样本与代表点的加权距离,使之作为样本与类之间的相似性度量。该方法不同于其他的聚类算法,它体现了通过数据挖掘实现数据驱动的特点。

上述两条是本文算法与现有聚类算法的不同点,也是本文算法的创新点。两种典型数据的检验效果证明了本文算法的价值。

3) 无监督学习没有提供样本分类的空间信息,无论给定样本在空间如何分布,都只能把各维分量相对接近的样本归为一类作为学习规则。本文学习算法适用于在加权距离意义上各类大致呈球形分布的样本点聚类。

参考文献(References)

[1] Vladimir N Vapnik. The nature of statistical learning

theory[M]. New York: Springer-Verlag, 1995.

[2] Kohonen T. The self-organizing map[J]. Proc of IEEE, 1990, 78(9): 1464-1480.

[3] Bezdek J C, Tsao E C K, Pal N R. Fuzzy kohonen clustering network[C]. IEEE '92 1st Fuzzy — IEEE Proc. San Diego, 1992: 1035-1043.

[4] 边肇祺,张学工. 模式识别[M]. 北京: 清华大学出版社, 2000.

(Bian Z Q, Zhang X G. Pattern recognition [M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2000.)

[5] Everitt B S. Cluster analysis[M]. New York: Halsted Press, 1993.

[6] Francesco Camastra Alessandro Verriani. A novel kernel method for clustering[J]. IEEE Trans on Pattern and Machine Intelligence, 2005, 27(5): 801-805.

[7] Scott C. Adaptive fuzzy leader clustering complex data sets in pattern recognition[J]. IEEE Trans on Neural Networks, 1992, 3(5): 794-800.

(上接第 471 页)

[3] Zeng Lianliu, Jaroslav Svoboda. A new control scheme for nonlinear systems with disturbances[J]. IEEE Trans on Control Systems Technology, 2006, 14(1): 176-181.

[4] 房方,谭文,刘吉臻. 机炉协调系统的非线性输出跟踪控制[J]. 中国电机工程学报, 2005, 25(1): 147-151.
(Fang F, Tan W, Liu J Z. Nonlinear output tracking control for the coordinated system of boiler-turbining units [J]. Proc of the CSEE, 2005, 25(1): 147-151.)

[5] 孙郁松,孙元章,卢强,等. 水轮机调节系统非线性 H 控制规律的研究[J]. 中国电机工程学报, 2001, 21(2): 56-60.
(Sun Y S, Sun Y Z, Lu Q, et al. Research on nonlinear robust control strategy for hydroelectric generator's valve[J]. Proc of the CSEE, 2001, 21(2): 56-60.)

[6] Euntai Kim. A fuzzy disturbance observer and its application to control [J]. IEEE Trans on Fuzzy Systems, 2002, 10(1): 77-84.

[7] Euntai Kim, Changwoo Park. Fuzzy disturbance observer approach to robust tracking control of nonlinear sampled systems with the guaranteed suboptimal H performance [J]. IEEE Trans on Systems, Man and

Cybernetics, 2004, 34(3): 1574-1581.

[8] 陈谋,姜长生,吴庆宪. 基于干扰观测器的一类不确定非线性系统鲁棒 H 控制[J]. 控制理论与应用, 2006, 23(4): 611-614.

(Chen M Jiang C S, Wu Q X. Robust H control of a class of nonlinear uncertain systems with disturbance observer[J]. Control Theory & Applications, 2006, 23(4): 611-614.)

[9] 刘国荣,万百五. 一类非线性 MIMO 系统的直接自适应模糊鲁棒控制[J]. 控制理论与应用, 2002, 19(5): 693-698.

(Liu G R, Wan B W. Direct adaptive fuzzy robust control for a class of nonlinear MIMO systems [J]. Control Theory & Applications, 2002, 19(5): 693-698.)

[10] 刘国荣,万百五. 一类非线性 MIMO 系统的间接自适应模糊鲁棒控制[J]. 控制与决策, 2002, 17(增): 676-680.

(Liu G R, Wan B W. Indirect adaptive fuzzy robust control for a class of nonlinear MIMO systems [J]. Control and Decision, 2002, 17(S): 676-680.)