

文章编号: 1001-0920(2002)04-0447-03

# 基于动态神经网络的一类非线性不确定系统的自适应观测器

杨晋勇, 贾英民

(北京航空航天大学 第七研究室, 北京 100083)

**摘要:** 基于动态神经网络, 对一类非线性不确定系统提出了相应的观测器设计方法。在观测器设计中, 充分考虑了不确定性和神经网络逼近误差对观测器性能的影响, 增加了鲁棒控制项并设计了相应的参数自适应律, 以保证良好的观测性能。神经网络的权值在线进行调整, 而无需离线学习。

**关键词:** 动态神经网络; 非线性系统; 观测器; 不确定性

**中图分类号:** TP 13      **文献标识码:** A

## Adaptive observer for a class of nonlinear uncertain systems based on dynamical neural networks

YANG Jin-yong, JIA Ying-min

(The Seventh Research Division, Beijing University of Aeronautics and Astronautics, Beijing 100083, China)

**Abstract:** Based on dynamical neural networks, a design method of adaptive observer for a class of nonlinear uncertain systems is developed. The effects of uncertain term and neural network approximation error are well considered. A robust control term and weights updating laws are designed to guarantee the performance of adaptive observer. The weights of neural networks are updating on-line, and the off-line training phase is not required.

**Key words:** dynamical neural networks; nonlinear systems; observer; uncertainty

### 1 引言

非线性系统观测器的设计一直是重要的研究课题之一<sup>[1,2]</sup>。系统的设计方法要求系统的动态完全已知, 而在实际中系统的动态往往是未知的, 或是部分未知的, 这便使得观测器的设计成为不可能。神经网络以其独特的性质在非线性系统控制中得到了广泛的应用, 基于神经网络的状态观测器的设计引起了人们的兴趣<sup>[3]</sup>。

文献[4]基于动态神经网络设计了一类非线性系统的鲁棒自适应观测器, 去掉了未知非线性动态的 Lipschitz 和匹配条件等限制, 但是当系统中存在未知不确定性时, 如何设计相应的观测器却没有考虑。本文基于动态神经网络研究一类非线性不确定系统的观测器设计问题。在观测器设计中, 充分考虑了不确定性和网络逼近误差对观测器性能的影响, 对保证观测器鲁棒观测的控制项进行恰当设计, 从而保证了良好的观测性能。

收稿日期: 2001-05-28; 修回日期: 2001-08-22

基金项目: 国家攀登计划项目(69625506); 教育部高校博士点基金项目(1999000602)

作者简介: 杨晋勇(1969—), 男, 江苏六合人, 博士生, 从事神经网络、模糊控制等研究; 贾英民(1958—), 男, 山东金乡人, 教

© 1994-2012, China Academic Electronic Publishing House. All rights reserved. <http://www.cnki.net>

本文中一些符号的定义如下:

设  $x = (x_1, x_2, \dots, x_n)^T \in R^n$ ,  $|x|$  表示向量的 Euclidean 范数; 如果  $x$  是一个标量, 则  $|x|$  表示其绝对值。

设  $\|x\|_1 = \sum_{i=1}^n |x_i|$ , 如果  $A$  是一个矩阵, 则用  $\|\cdot\|$  表示矩阵范数,  $\text{tr}\{\cdot\}$  表示矩阵的迹。

定义  $\|A\|^2 = \sum_{i,j} |a_{i,j}|^2 = \text{tr}\{A^T A\}$ 。

## 2 问题阐述

考虑如下仿射非线性不确定动态系统

$$\begin{cases} \dot{x} = f(x) + g(x)(u + \eta(x, t)) \\ y = Cx \end{cases} \quad (1)$$

其中,  $x \in R^n$  是状态变量,  $u \in R^m$  是控制输入,  $y \in R^q$  是系统输出,  $C$  为  $q \times n$  矩阵,  $\eta(x, t)$  为有界的未知非线性不确定项,  $f(x)$  和  $g(x)$  是未知函数, 只有输出  $y$  可以测量。

问题可转化为: 针对非线性不确定系统(1), 基于动态神经网络设计相应的观测器, 并保证观测器具有良好的性能。

## 3 基于动态神经网络的观测器设计

系统(1)可由动态神经网络表示为<sup>[5,6]</sup>

$$\begin{cases} \dot{x} = Ax + BW^* S(x) + BW_1^* S_1(x)u + \\ \quad BW_1^* S_1(x)\eta(x, t) + B\epsilon(x, u, t) \\ y = Cx \end{cases} \quad (2)$$

其中,  $A$  为  $n \times n$  矩阵,  $B$  为  $n \times r$  矩阵,  $W^*$  和  $W_1^*$  分别为  $r \times L$  和  $r \times L_1$  权矩阵;  $S(x)$  为  $L$  维向量,  $S_1(x)$  为  $L_1 \times m$  矩阵,  $S(x)$  和  $S_1(x)$  的元素分别为  $s(x_i)$  和  $s_1(x_i)$ , 它们是光滑单调函数, 通常选用 Sigmoid 函数;  $\epsilon(x, u, t)$  为模型误差项, 假设在紧集  $\Omega \subset R^n$  中, 有  $\|\epsilon(x, u, t)\|_1 \leq \theta$ ,  $\theta$  为未知常数。

对于系统(2), 相应的观测器为

$$\begin{cases} \dot{\hat{x}} = A\hat{x} + \hat{B}\hat{W}S(\hat{x}) + \hat{B}\hat{W}_1 S_1(\hat{x})u + \\ \quad L(\hat{y} - y) + Bv \\ \hat{y} = C\hat{x} \end{cases} \quad (3)$$

其中,  $\hat{x}$  为观测器的状态,  $L$  为观测器增益矩阵;  $\hat{W}$  和  $\hat{W}_1$  分别为  $W^*$  和  $W_1^*$  的估计值, 定义参数估计误差  $\tilde{W} = \hat{W} - W^*$ ,  $\tilde{W}_1 = \hat{W}_1 - W_1^*$ ;  $v$  是为保证观测器鲁棒观测而引入的新控制。

假设 1 对于式(2)中的不确定项, 有  $\|W_1^* S_1(x)\eta(x, t)\|_1 \leq \rho(x, t)$ , 其中  $\rho(x, t)$  是未知

正的标量函数。

根据神经网络逼近理论<sup>[7,8]</sup>, 有  $\rho(x, t) = W_2^{*T} \sigma(x) + \epsilon_2(t)$ 。其中,  $W_2^*$  为理想权值, 假设  $\hat{W}_2$  为  $W_2^*$  的估计值, 则估计误差  $\tilde{W}_2 = \hat{W}_2 - W_2^*$ ;  $\sigma(x)$  为基函数,  $\epsilon_2(t)$  为网络所固有的逼近误差。对于  $\epsilon_2(t)$ , 有  $\|\epsilon_2(t)\|_1 < \theta_2$ ,  $\theta_2$  为未知常数<sup>[9]</sup>。

假设 2 对于  $\epsilon_1(x, u, t)$  和  $\epsilon_2(t)$ , 有  $\|\epsilon_1(x, u, t) + \epsilon_2(t)\|_1 < \|\epsilon_1\|_1 + \|\epsilon_2\|_1 < \theta_1 + \theta_2 < \theta$ ,  $\theta$  为未知常数<sup>[9]</sup>。

设  $\hat{\theta}$  为  $\theta$  的估计值, 则估计误差  $\tilde{\theta} = \hat{\theta} - \theta$ 。

假设 3 对于控制输入  $u$ , 有  $\|u\| < U_M$ , 其中  $U_M$  为一常数。

定义观测误差  $e = \hat{x} - x$ , 由式(3)和(2), 经过一定的运算, 可得

$$\begin{cases} \dot{e} = A_c e + B\tilde{W}S(x) + B\tilde{W}_1 S_1(x)u + B\tilde{W}^* \tilde{S} + \\ \quad B\tilde{W}_1^* \tilde{S}_1 u + Bv - B\tilde{W}_1^* S_1(x)\eta(x, t) - \\ \quad B\epsilon_1(x, u, t) \\ \tilde{y} = Ce \end{cases} \quad (4)$$

其中

$$\begin{aligned} \tilde{S} &= \hat{S}(x) - S(x), \quad \tilde{S}_1 = \hat{S}_1(x) - S_1(x) \\ \tilde{y} &= \hat{y} - y, \quad A_c = A + LC \end{aligned}$$

假设 4  $\|\tilde{S}\| < M$ ,  $\|\tilde{S}_1\| < M_1$ , 其中  $M$  和  $M_1$  为未知常数。

定理 1 对于系统(2), 相应的观测器为式(3),  $\hat{W}$ ,  $\hat{W}_1$ ,  $\hat{W}_2$ ,  $\hat{\theta}$  的自适应律分别为

$$\dot{\hat{W}} = -\gamma \hat{W} - F^T \tilde{y} S^T(\hat{x}) \quad (5)$$

$$\dot{\hat{W}}_1 = -\gamma_1 \hat{W}_1 - F^T \tilde{y} u^T S_1^T(\hat{x}) \quad (6)$$

$$\dot{\hat{W}}_2 = -\gamma_2 \hat{W}_2 + |\tilde{y}^T F|_1 \sigma(\hat{x}) \quad (7)$$

$$\dot{\hat{\theta}} = -\gamma_3 \hat{\theta} + |\tilde{y}^T F|_1 \quad (8)$$

观测器的鲁棒控制项  $v = v_1 + v_2$ 。其中,  $v_1 = -\hat{W}_2^T \sigma(x) \text{sign}(\tilde{y}^T F)$ ,  $v_2 = -\hat{\theta} \text{sign}(\tilde{y}^T F)$ ,  $\text{sign}(\tilde{y}^T F) = [\text{sign}(\tilde{y}^T F)_1, \dots, \text{sign}(\tilde{y}^T F)_r]^T \in R^r$ ;  $\gamma, \gamma_1, \gamma_2, \gamma_3$  均为大于零的常数。则  $e, \tilde{W}, \tilde{W}_1, \tilde{W}_2, \tilde{\theta}$  最终一致有界(UUB)。这里  $F \in R^{n \times r}$ , 定义见文献[10]。

证明 构造如下李雅普诺夫函数

$$V = \frac{1}{2} e^T P e + \frac{1}{2} \text{tr}\{\tilde{W}^T \tilde{W}\} + \frac{1}{2} \text{tr}\{\tilde{W}_1^T \tilde{W}_1\} + \frac{1}{2} \tilde{W}_2^T \tilde{W}_2 + \frac{1}{2} \tilde{\theta}^2 \quad (9)$$

对  $V$  求导, 并代入式(4), 经过一定的运算, 可得

$$\begin{aligned} & \dot{V} \\ & - \frac{1}{4} \lambda_{\min}(Q) |e|^2 + \\ & e^T P B \tilde{W} S(x) + e^T P B \tilde{W}_1 S_1(x) u + \\ & 2[\lambda_{\min}(Q)]^{-1} (P B W^* \tilde{S})^T (P B W^* \tilde{S}) + \\ & 2[\lambda_{\min}(Q)]^{-1} (P B W_1^* \tilde{S}_1 u)^T (P B W_1^* \tilde{S}_1 u) - \\ & \tilde{W}_2^T \sigma(x) |\tilde{y}^T F|_1 - \theta |\tilde{y}^T F|_1 + \\ & \text{tr}\{\dot{\tilde{W}}^T \tilde{W}\} + \text{tr}\{\dot{\tilde{W}}_1^T \tilde{W}_1\} + \dot{\tilde{W}}_2^T \tilde{W}_2 + \dot{\theta} \theta \end{aligned} \quad (10)$$

其中  $\lambda_{\min}$  为矩阵  $Q$  的最小特征值。将式(5) ~ (8) 代入式(10), 因为

$$\begin{aligned} \text{tr}\{\dot{\tilde{W}}^T \tilde{W}\} &= \\ \frac{1}{2} \dot{\tilde{W}}^2 + \frac{1}{2} \dot{\tilde{W}}^2 - \frac{1}{2} \dot{W}^{*2} \\ \text{tr}\{\dot{\tilde{W}}_1^T \tilde{W}_1\} &= \\ \frac{1}{2} \dot{\tilde{W}}_1^2 + \frac{1}{2} \dot{\tilde{W}}_1^2 - \frac{1}{2} \dot{W}_1^{*2} \\ \dot{\tilde{W}}_2^T \tilde{W}_2 &= \frac{1}{2} |\dot{\tilde{W}}|^2 + \frac{1}{2} |\dot{\tilde{W}}|^2 - \frac{1}{2} |W^*|^2 \\ \dot{\theta} \theta &= \frac{1}{2} \dot{\theta}^2 + \frac{1}{2} \theta^2 - \frac{1}{2} \theta^2 \end{aligned}$$

经过适当整理, 由式(10) 可得  $\dot{V} = -cV + k$ 。其中

$$\begin{aligned} c &= \min\left\{\frac{1}{2} \frac{\lambda_{\min}(Q)}{\lambda_{\max}(P)}, \gamma, \gamma_1, \gamma_2, \gamma_3\right\} \\ k &= \frac{\gamma}{2} |W^*|^2 + \frac{\gamma_1}{2} |W_1^*|^2 + \frac{\gamma_2}{2} |W_2^*|^2 + \\ & \frac{\gamma_3}{2} \theta^2 + 2[\lambda_{\min}(Q)]^{-1} P B W^{*2} M^2 + \\ & 2[\lambda_{\min}(Q)]^{-1} P B W_1^{*2} M_1^2 U_M^2 \end{aligned}$$

如果  $V \geq k/c$ , 则可得到  $\dot{V} \leq 0$ , 所以  $e, \tilde{W}, \tilde{W}_1, \tilde{W}_2, \theta$  最终一致有界(UUB)。

### 4 仿 真

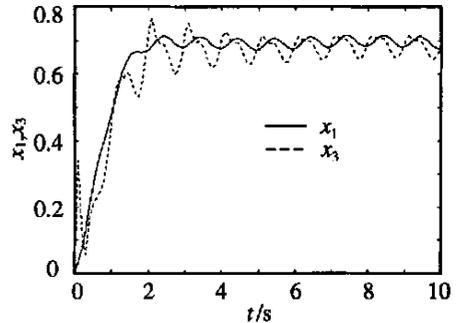
考虑如下非线性不确定系统(取自非线性电机模型)

$$\begin{aligned} \begin{bmatrix} \dot{x}_1 \\ \dot{x}_2 \end{bmatrix} &= \begin{bmatrix} -x_1^2 - x_1 x_2 \\ 4x_1 x_2 - x_2^2 \end{bmatrix} + \\ & \begin{bmatrix} 1/4 & 0 \\ 0 & 2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u_1 \\ u_2 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \eta_1(x, t) \\ \eta_2(x, t) \end{bmatrix} \\ y &= [1 \quad 0] \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \end{bmatrix} \end{aligned}$$

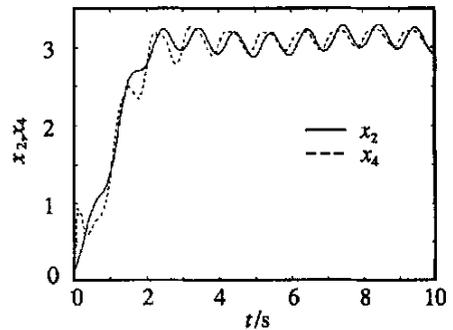
其中, 不确定项  $\eta_1(x, t) = -\sin x_1 - 0.1 \sin t \cos x_1 + 2x_1 + 3x_2$ ,  $\eta_2(x, t) = 0.1 \sin t \cos x_1$ 。在动态神经网络中, 取

$$A = \begin{bmatrix} -18 & -0.1 \\ 0 & -4 \end{bmatrix}, \quad B = \begin{bmatrix} 1 \\ 1 \end{bmatrix}$$

$x(0) = [0 \quad 0.1]^T, \hat{x}(0) = [0 \quad 0.1]^T$   
 参数的初始值选为  $W(0) = 0.1, W_1(0) = 0.1, W_2(0) = 0.5, \hat{\theta}(0) = 0.5$ ; 控制  $u_1 = u_2 = 0.5 \sin(2\pi t) + 0.5 \cos(2\pi t/250)$ ; 基函数取 Sigmoid 函数, 数目为 10; 自适应增益分别为 0.1, 0.1, 10, 1; 观测器增益矩阵选为  $L = [-10 \quad -2]^T, F = 1$ 。仿真结果如图 1 所示。



(a)  $x_1$  和  $x_3$  曲线



(b)  $x_2$  和  $x_4$  曲线

图 1 系统仿真结果

### 参考文献 (References):

- [1] Xia Xiao-Hua, Gao Wei-Bing. Nonlinear observer design by observer error linearization[J]. *SIAM J Contr & Optim*, 1989, 27: 199-216.
- [2] Zietz M. The extended Luenberger for nonlinear systems[J]. *Syst & Contr Lett*, 1987, 9: 156-194.
- [3] Young H Kim, Frank L Lewis, Chaouki T Abdallah. Dynamic recurrent neural-network-based adaptive observer for a class of nonlinear systems[J]. *Automatica*, 1997, 33(8): 1539-1543.
- [4] 朱瑞军, 柴天佑. 基于动态神经网络的非线性系统鲁棒观测器设计[J]. *信息与控制*, 1998, 27(6): 421-425.

(下转第 453 页)

表3 用电节点数据

用电节点	4	5	6	7
需电量 $d_i$	20.80	14.50	11.40	8.60

$10^4$  MWh, 电价单位为元/MWh。

采用多智能体系统进行求解。当优先序为[6-7-4-5]时, 在线路4和8上作了负荷交换, 得到最优解。目标值即总的购电和输电费用为14 555.015万元, 其中输电费用为416.015万元。解得的购电量 $x_i$ 和输电量 $y_{ij}$ 分别示于表1和表2的后两列。以上解满足所有节点的平衡条件。

## 5 结 语

针对电力市场下电力购买与配送计划优化问题, 本文提出一种基于多智能体的用禁忌搜索协调的优化方法。将该方法用于实际电网的购电-配电优化问题, 取得了满意的应用效果。所提出方法为电力系统改革中“厂网分开”条件下的电价计算提供了一套可行的算法。

## 参考文献(References):

- [1] 刘金琨, 尔联洁. 多智能体技术应用综述[J]. 控制与决策, 2001, 16(2): 133-140.  
(LIU Jin-kun, ER Lian-jie. Overview of application of multiagent technology[J]. *Control & Decision*, 2001, 16(2): 133-140.)
- [2] 曾伟, 费奇. 基于Agent方法体系的ODSS研究[J]. 控制与决策, 2000, 15(6): 753-755.  
(Zeng Wei, Fei Qi. Research on agent-based organizational decision support system[J]. *Control & Decision*, 2001, 15(6): 753-755.)
- [3] F Glover. Tabu search: Part I[J]. *ORSA J on Computing*, 1989, 1(3): 190-206.
- [4] 于尔铿, 韩放, 谢开, 等. 电力市场[M]. 北京: 中国电力出版社, 1998.
- [5] R S Fang, A K David. Transmission congestion management in an electricity market [J]. *IEEE Trans on Power Syst*, 1999, 14(3): 877-883.
- [6] C S K Yeung, A S Y Poon, F F Wu. Game theoretical multi-agent modeling of coalition formation for multilateral trades [J]. *IEEE Trans on Power Syst*, 1999, 14(3): 929-934.

(上接第449页)

(Ruijun Zhu, Tianyou Chai. Robust nonlinear adaptive observer design using dynamical neural networks[J]. *Infor & Contr*, 1998, 27(6): 421-425.)

- [5] G A Rovithakis. Tracking control of multi-input affine nonlinear dynamical systems with unknown nonlinearities using dynamical neural networks[J]. *IEEE Trans on Syst, Man & Cybern*, 1999, 29(2): 179-189.
- [6] G A Rovithakis, Manolis A Christodoulou. Adaptive control of unknown plants using dynamical neural networks [J]. *IEEE Trans on Syst, Man & Cybern*, 1994, 24(3): 400-411.
- [7] Man Zhihong, H R Wu, M Palaniswami. An adaptive tracking controller using neural networks for a class of nonlinear systems [J]. *IEEE Trans on Neural Networks*, 1998, 9(5): 947-954.

- [8] 朱瑞军, 柴天佑, 伏静丹. 基于神经网络的不确定非线性系统的鲁棒控制[J]. 控制与决策, 1999, 14(1): 73-76.  
(Ruijun Zhu, Tianyou Chai, Jingdan Fu. Robust control of a class of uncertain nonlinear systems using neural networks[J]. *Control & Decision*, 1999, 14(1): 73-76.)
- [9] Chaio-shiung Chen, Wen-liang Chen. Robust adaptive sliding mode control using fuzzy modeling for an inverted-pendulum systems [J]. *IEEE Trans on Ind Electr*, 1998, 45(2): 297-305.
- [10] Bruce Walcott, Stanislaw H Zak. Combined observer-controller synthesis for uncertain dynamical systems with applications [J]. *IEEE Trans on Syst, Man & Cybern*, 1988, 18(1): 88-103.