

文章编号: 1001-0920(2004)04-0455-04

不确定混沌系统的动态神经网络跟踪控制

谭文^{1,2}, 王耀南², 黄丹¹, 曾照福¹, 周少武¹

(1 湖南科技大学 信息系, 湖南 湘潭 411201; 2 湖南大学 电气与信息工程学院, 湖南 长沙 410082)

摘要: 针对不确定非线性混沌系统, 提出了一种基于动态神经网络辨识器的自适应跟踪控制新方法. 通过滑模控制技术在线调整动态神经网络辨识器权值, 并在获取动态神经网络模型的基础上设计出优化控制器, 实现混沌系统的轨道跟踪. 对辨识误差和轨道跟踪误差进行分析并证明了它们的有界性. Lorenz 混沌系统的仿真实验结果表明了控制策略的有效性.

关键词: 混沌; 动态神经网络; 滑模控制; 非线性系统; 稳定性

中图分类号: TP273

文献标识码: A

Tracking control for uncertain chaotic systems using dynamic neural networks

TAN Wen^{1,2}, WANG Yao-nan², HUANG Dan¹, ZENG Zhao-fu¹, ZHOU Shao-wu¹

(1 Department of Information, Hunan University of Science and Technology, Xiangtan 411201, China; 2 College of Electrical and Information Engineering, Hunan University, Changsha 410082, China Correspondent: TAN Wen, Email: wentan168@yahoo.com.cn)

Abstract: An adaptive tracking controller based on dynamic neural network identifier for uncertain nonlinear chaotic systems is presented. The weights of the dynamic neural networks used as neuro-identifier can be on-line adjusted through the usage of the sliding mode technique. An optimal controller via dynamic neural network model is presented to perform reference trajectory following control for chaotic system. The identification error and the trajectory tracking error are analyzed and guaranteed to be bounded. The experiment results of the chaotic system given by Lorenz equation show the effectiveness of the method.

Key words: chaos; dynamic neural networks(DNN); sliding mode control; nonlinear system; stability

1 引言

自OGY方法^[1]成功实现对混沌系统控制以来,许多学者提出了基于精确模型的混沌系统控制策略^[2~4].然而当混沌系统模型不确定或者部分甚至所有参数未知时,这些方法就失效了.最近人们开始尝试用神经网络对不确定混沌系统进行辨识和控制.文献[5]通过受控系统的输入输出数据控制了Duffing混沌系统;[6]利用局部优化方法有效镇定

了时间连续混沌系统;[7]采用自适应控制算法对一类混沌系统进行了调整.但是他们大多忽视了因辨识模型与实际系统不完全匹配引起的误差给控制带来的影响.

本文运用动态神经网络作为不确定混沌系统的辨识模型,利用滑模控制方式在线调整网络权值,以适应混沌系统快速变化而达到实时辨识要求.考虑到辨识模型与实际系统存在的差异,本文结合线性

收稿日期: 2003-03-31; 修回日期: 2003-07-21

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(60075008; 60102010); 湖南省自然科学基金资助项目(02JJY2095; 03JJY3107).

作者简介: 谭文(1968—),男,湖南益阳人,副教授,博士生,从事混沌控制、智能控制理论与应用等研究; 王耀南(1957—),男,云南昆明人,教授,博士生导师,博士,从事机器人控制、智能控制等研究.

正交算法设计优化补偿控制器 同时对辨识误差和轨道跟踪误差进行了分析, Lorenz 方程仿真实验结果表明了所研究理论的正确性和方法的有效性

2 动态神经网络辨识器及其学习算法

连续混沌系统可用微分方程表示为

$$\dot{y}_t = g(y_t, u_t, t). \quad (1)$$

其中: $t \geq 0$, y_t 是 t 时刻状态向量, g 为不确定函数, u_t 是控制作用且满足以下假设:

假设 1 $\|y_s - y_t\| \leq H\tau + M\tau|s - t|$, 其中 H, M, τ 是非负常数, $|s - t| \leq \tau$

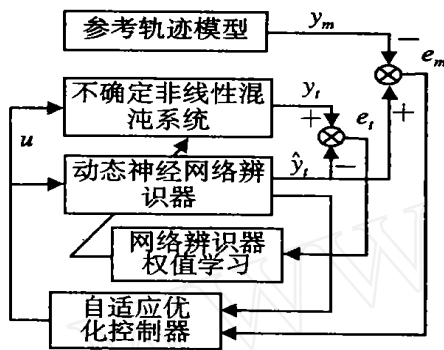


图1 控制系统原理框图

图1是控制系统原理结构框图 取动态神经网络模型^[8,9]

$$\dot{\hat{y}}_t = A\hat{y}_t + W_{1,t}\alpha(\hat{y}_t) + W_{2,t}\beta(\hat{y}_t)\mathcal{Y}(u_t). \quad (2)$$

其中: $\hat{y}_t$ 是神经网络状态, A 为 Hurwitz 矩阵, $W_{1,t}$ 和 $W_{2,t}$ 是输出层权值矩阵, α 和 β 是网络状态反馈函数, 在输入 $\mathcal{Y}(u_t)$ 作用下, 令辨识误差 $e_t = y_t - \hat{y}_t$, 由 (1) 和 (2) 得

$$\dot{e}_t = g(y_t, u_t, t) - A\hat{y}_t - W_{1,t}\alpha(\hat{y}_t) - W_{2,t}\beta(\hat{y}_t)\mathcal{Y}(u_t). \quad (3)$$

令 $g(y_t, u_t, t) = \frac{y_t - y_{t-\tau}}{\tau} + \Delta_t$,

其中 Δ_t 范数估计值为

$$\|\Delta_t\| = \|\tau^{-1}(y_t - y_{t-\tau}) - g(y_t, u_t, t)\| \leq \tau^{-1} \int_{\tau} \|g(y_s, u_s, s) - g(y_t, u_t, t)\| ds$$

根据假设 1 有

$$\|\Delta_t\| \leq H\tau + \frac{\tau}{2}M\tau, \quad (4)$$

于是
$$\dot{e}_t = \frac{y_t - y_{t-\tau}}{\tau} - A\hat{y}_t - [W_{1,t}\alpha(\hat{y}_t) + W_{2,t}\beta(\hat{y}_t)\mathcal{Y}(u_t)] + \Delta_t \quad (5)$$

为适应快速实时辨识要求, 采用滑模控制方式^[8,10], 其行为满足

$$-P \operatorname{sign}(e_t) = \frac{y_t - y_{t-\tau}}{\tau} - A\hat{y}_t - [W_{1,t}\alpha(\hat{y}_t) + W_{2,t}\beta(\hat{y}_t)\mathcal{Y}(u_t)]. \quad (6)$$

P 是正的对角矩阵, 由式 (6) 得权值矩阵

$$[W_{1,t}, W_{2,t}] = [\tau^{-1}(y_t - y_{t-\tau}) - A\hat{y}_t + P \operatorname{sign}(e_t)] \begin{bmatrix} \alpha(\hat{y}_t) \\ \beta(\hat{y}_t)\mathcal{Y}(u_t) \end{bmatrix}^+. \quad (7)$$

$[\cdot]^+$ 表示伪逆矩阵, 则式 (7) 变为

$$[W_{1,t}, W_{2,t}] = \frac{[\tau^{-1}(y_t - y_{t-\tau}) - A\hat{y}_t + P \operatorname{sign}(e_t)]}{\|\alpha(\hat{y}_t)\|^2 + \|\beta(\hat{y}_t)\mathcal{Y}(u_t)\|^2} \begin{bmatrix} \alpha(\hat{y}_t) \\ \beta(\hat{y}_t)\mathcal{Y}(u_t) \end{bmatrix}^T. \quad (8)$$

取 Lyapunov 函数为 $V_t = \frac{1}{2} \|e_t\|^2$, 容易证明当

$\min_i P_i > H\tau + \frac{\tau}{2}M\tau$ 时 $\dot{V}_t < 0$, 可保证 $\lim_{t \rightarrow \infty} e_t = 0$

3 基于辨识器的控制器设计

设参考模型为

$$\dot{y}_m = g_m(y_m, t), \quad (9)$$

状态轨迹跟踪问题可表述为

$$E_{\min} = \min_{u(t)} (\|y_t - y_m\|_{Q_c}^2 + \|u_t\|_{R_c}^2). \quad (10)$$

$\|\cdot\|_Q$ 表示半范数, $\tilde{R}_c = (1 + \lambda^{-1})R_c$. 令轨迹跟踪误差 $e_m = y_t - y_m$, 代价函数

$$J_t(u) = \mathcal{Y}^T(u)W_{2,t}P_L e_m + u^T R_c u, \quad (11)$$

其中 P_L 为 Riccati 方程解 为导出 $u(t)$, 令 $dJ_t(u)/du = 0$, 并采用回归梯度算法^[11], 即

$$u_k(t) = u_{k-1}(t) - \rho_k \frac{dJ_t(u_{k-1}(t))}{du}, u_0(t) = 0 \quad (12)$$

其中

$$\frac{dJ_t(u)}{du} = 2 \frac{d\mathcal{Y}^T(u)}{du} W_{2,t}P_L(t)e_m(t) + 2R_c u,$$

$$\rho_k = 1/(1+k)^\rho, \rho \in (0, 1]$$

定理 1 序列信号 $\{u_k(t)\}$ 的极限为控制作用 $u(t)$, 即 $u_k(t) \rightarrow u(t), k \rightarrow \infty$

证明参见文献[11]

推论 1 如果动态神经网络输入函数取决于 $u(t)$, 取 $d\mathcal{Y}^T(u)/du = \Psi$, 则控制律修正式为

$$u(t) = u_{\text{comp}}(t) + u^*(t). \quad (13)$$

式 (13) 可补偿辨识模型与实际系统不完全匹配造成的误差, $u_{\text{comp}}(t)$ 满足

$$W_{2,t}^T u_{\text{comp}}(t) + \zeta(t) = 0, \quad \zeta(t) = A y_m - g_m(y_m, t). \quad (14)$$

u^* 由线性正交优化控制律确定^[12], 即

$$u^*(t) = -R_c^{-1} \Psi^T W_{2,t}^T P_L e_m(t). \quad (15)$$

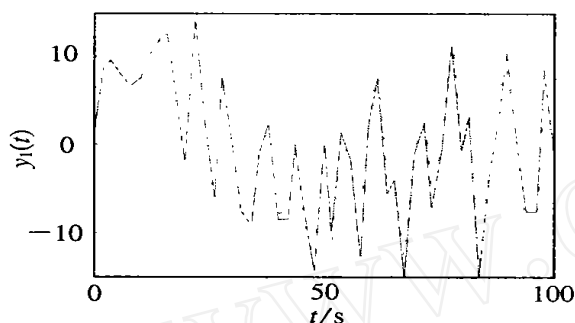
定理2 以动态神经网络(2)为辨识模型, 在控制律(13)作用下, 混沌系统(1)跟踪参考模型(9)的轨迹误差满足

$$\begin{aligned} & \|e_m\|_Q^2 + \|u^*\|_Q^2 \leq \\ & 2\|y_m\|_{\lambda}^2 + \limsup_{\lambda \rightarrow \infty} \frac{1}{\lambda} \int_0^T (u^*(t))^2 dt \end{aligned} \quad (16)$$

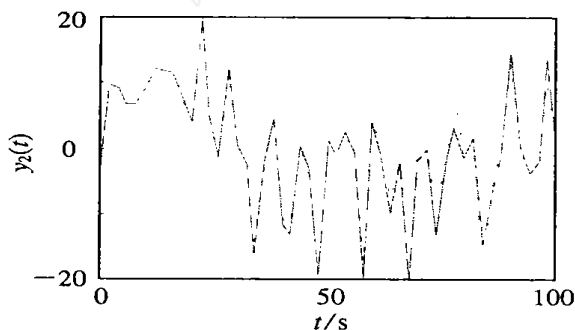
证明参见文献[7]附录

4 数值仿真

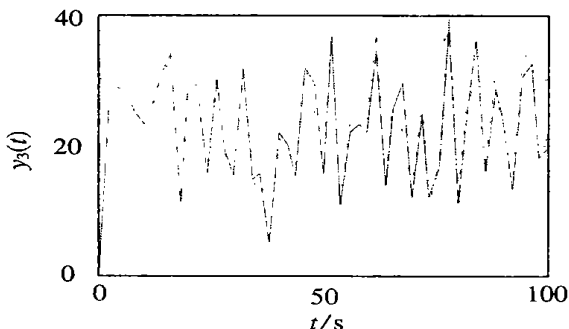
本文以Lorenz系统为仿真实例, 其表达式为



(a) Lorenz 系统状态 y_1 轨迹



(b) Lorenz 系统状态 y_2 轨迹



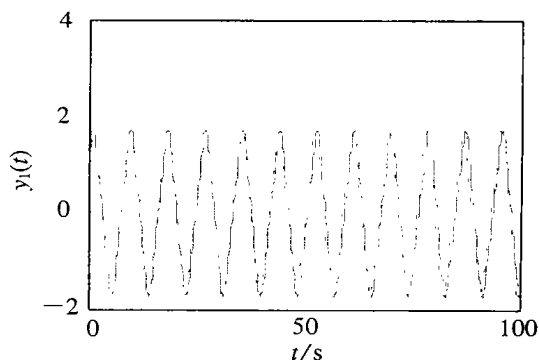
(c) Lorenz 系统状态 y_3 轨迹

图2 动态神经网络辨识曲线

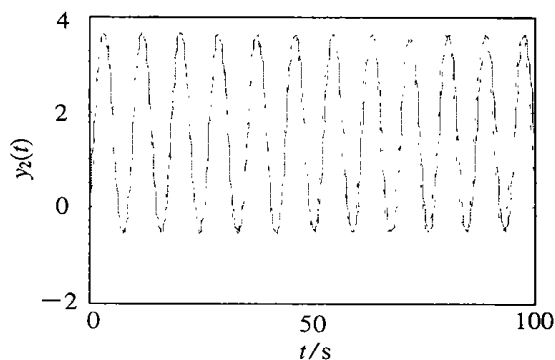
$$\begin{cases} \dot{y}_1 = a(y_2 - y_1), \\ \dot{y}_2 = by_1 - y_2 - y_1y_3, \\ \dot{y}_3 = -cy_3 + y_1y_2 \end{cases} \quad (17)$$

其中: y_1, y_2, y_3 分别表示流速、水平温差和垂直温

差; a 代表流体的 Prandtl 数, b 代表 Rayleigh 数, c 为空间几何系数, a, b, c 均大于零。取 $a = 10, c = 8/3, b = 28$, 系统处于混沌状态。仿真过程中 $A = \text{diag}(-10, -10, -10)$, 初始状态 $y_0 = [1, -5, 0]^T$, 权值矩阵 $W_{1,t}, W_{2,t}$ 为 3×3 矩阵, $\gamma(u) = u, \alpha(z) = 1/(1 + e^{-z}) - 0.1, \beta(z) = 0.1/(1 + e^{-0.1z}) - 0.01, P = \text{diag}(20, 20, 20), \tau = 0.01, d\gamma(u)/du = \Psi = I$ 。辨识结果如图2所示, 其中实线表示未受控制时的状态, 虚线表示神经网络辨识结果。然后按式(13)进行控制, 取 $Q_c = I, R_c = \text{diag}(0.05, 0.05, 0.05), Q = \text{diag}(0.3, 0.3, 0.3)$ 。参考模型为一个圆, 即 $y_{m1} = \cos(y_{m2}), y_{m2} = y_{m1}$ 。初始条件 $y_{m1}(0) = 1.0, y_{m2}(0) = 0$ 。轨迹跟踪结果如图3所示, 其中实线为参考模型轨迹, 虚线为控制跟踪轨迹。本文在设计控制器时考虑了辨识模型与实际系统不完全匹配造成的误差影响, 因而采用了优化补偿控制, 实验效果较理想。



(a) 受控后系统状态 y_1 轨迹



(b) 受控后系统状态 y_2 轨迹

图3 轨迹跟踪控制曲线

5 结语

本文提出了基于动态神经网络辨识器的不确定混沌系统自适应跟踪控制策略。将动态神经网络作为不确定混沌系统辨识模型, 用滑模控制方式在线调整网络权值, 较好地满足了混沌辨识的实时性。结

合线性正交算法设计优化补偿控制器,大大提高了跟踪控制精度 Lorenz 混沌系统的实验结果证明了本文方法的有效性

参考文献(References):

- [1] Ott E, Grebogi C, York J A. Controlling chaos[J] *Physics Review Letter*, 1990, 64(11): 1196-1199
- [2] Chen G, Dong X. Identification and control of chaotic systems: An artificial neural network approach [A] *Proc of the IEEE International Symposium on Circuits Systems*[C] Seattle, 1995 1177-1182
- [3] Nijmeijer H, Berghuis H. On Lyapunov control of the Duffing equation[J] *IEEE Trans on Circuits Systems*, 1995, 42(8): 473-477.
- [4] Loria A, Panteley E, Nijmeijer H. Control of the chaotic Duffing equation with uncertainty in all parameters[J] *IEEE Trans on Circuits Systems*, 1998, 45(12): 1252-1255
- [5] Ren X M, Rad A B, Chan P T. Identification and control of nonlinear systems using dynamic neural networks [A] *Proc of the 4th World Congress on Intelligent Control and Automation* [C] Shanghai, 2002 2002-2006
- [6] Poznyak A S, Wen Yu, Sanchez E N. Identification and control unknown chaotic systems via dynamic neural networks [J] *IEEE Trans on Circuits and Systems*, 1999, 46(12): 1491-1495
- [7] Poznyak A S, Wen Yu, Sanchez E N. Nonlinear adaptive trajectory tracking using dynamic neural networks[J] *IEEE Trans on Neural Networks*, 1999, 10(6): 1402-1411.
- [8] Poznyak A S, Yu W, Ramirez H S, et al Robust identification by dynamic neural networks using sliding mode learning [J] *Applied Mathematics Computer Science*, 1998, 8: 101-110
- [9] Rovithakis G A, Christodoulou M A. Adaptive control of unknown plants using dynamic neural networks[J] *IEEE Trans on Systems Man Cybernetics*, 1994, 24(3): 400-412
- [10] Utkin V I. *Sliding Modes in Optimization and Control* [M] Berlin: Springer-Verlag, 1992
- [11] Polyak B T. *Introduction to Optimization* [M] New York: Optimization Software, 1987.
- [12] Kailath T. *Linear Systems* [M] Englewood Cliffs: Prentice Hall, 1980

(上接第 454 页)

- [3] Kato N, Inaba T. Hovering performance of fish robot with apparatus of pectoral fin motion[A] *Proc 10th Int Symp on Unmanned, Untethered Submersible Technology* [C] New Hampshire, 1997. 177-188
- [4] Kato N, Furushina M. Pectoral fin model for maneuver of underwater vehicles[A] *Proc 1996 IEEE AUV Symp* [C] New York: IEEE Press, 1996 49-56
- [5] Anderson J M, Kerrebrock P A. The vorticity control unmanned undersea vehicle (VCUUV) - An autonomous vehicle employing fish swimming propulsion and maneuvering[A] *Proc of 10th Int Symp on Unmanned Untethered Submersible Technology* [C] Durham, 1997. 189-195
- [6] Hirata K. Development of experimental fish robot[A] *The 6th Int Symp on Marine Engineering* [C] ToKyo, 2000 711-714
- [7] Garcia R, Cufi X, Batle J, et al Positioning an underwater vehicle through image mosaicking [A] *Proc of the 2001 IEEE Int Conf on Robotics & Automation* [C] New York: IEEE Press, 2001. 2779-2784
- [8] 阮秋琦. 数字图像处理学[M] 北京: 电子工业出版社, 2001. 180-203
- [9] 朱述龙, 张占睦. 遥感图象获取与分析[M] 北京: 科学出版社, 2000 136-137.
- [10] Garcia-Campos R, Batlle J, Bischoff R. Architecture of an object-based tracking system using colour segmentation [EB/OL] <http://www.unibw-muenchen.de/campus/LRT6/PDF/AColSeg.pdf>, 2003-11-28
- [11] 钱晓捷. 汇编语言程序设计[M] 北京: 电子工业出版社, 2000 272-298
- [12] 黎明刚, 郭军. 基于伪MMX 技术的并行识别算法及应用[J] *中文信息学报*, 2000, 14(1): 27-31.
(Li M G, Guo J. A parallel recognition algorithm based on fake MMX and its application [J] *J of Chinese Information Processing*, 2000, 14(1): 27-31.)
- [13] Borenstein J, Koren Y. Real-time obstacle avoidance for fast mobile robots[J] *IEEE Trans on Systems Man and Cybernetics*, 1989, 19(5): 1179-1187.
- [14] 陈尔奎, 喻俊志, 王硕. 仿生机器鱼运动方向的模糊控制研究[J] *高技术通讯*, 2004, 14(2): 63-70
(Chen E K, Yu J Z, Wang S. The study on fuzzy control of motion orientation of biomimetic robot fish [J] *High Technology Letters*, 2004, 14(2): 63-70.)