

文章编号: 1001-0920(2004)11-1301-04

基于广义模糊双曲正切模型的自适应控制器

张明君^{1,2}, 张化光¹

(1. 东北大学 信息科学与工程学院, 辽宁 沈阳 110004; 2. 北华大学 电气工程系, 吉林省 吉林市 132021)

摘要: 针对一类非线性函数未知的非线性离散系统, 提出一种新的基于广义模糊双曲正切模型的参考模型自适应控制器设计方法, 并利用 Lyapunov 稳定性理论证明了该控制器是全局渐近稳定的。仿真例子证明了该方法的有效性。

关键词: 广义模糊双曲正切模型; 自适应控制; 渐近稳定

中图分类号: TP273 **文献标识码:** A

Adaptive controller based generalized fuzzy hyperbolic model

ZHANG Ming-jun^{1,2}, ZHANG Hua-guang¹

(1. Institute of Information Science and Engineering, Northeastern University, Shenyang 110006, China;

2 Department of Electrical Engineering, Beihua University, Jilin 132021, China Correspondent: ZHANG Ming-jun,

E-mail: zmj_neu@163.com)

Abstract: Generalized fuzzy hyperbolic model (GFHM) is a universal approximator and can be as the identifier of a class unknown nonlinear function. An adaptive controller based Generalized Fuzzy Hyperbolic Model is proposed for a class of nonlinear discrete time systems with unknown nonlinear function. Based on the stability theory of Lyapunov, this controller can be guaranteed the asymptotic stability of the closed-loop system. The simulation results show the effectiveness of proposed adaptive controller.

Key words: generalized fuzzy hyperbolic model (GFHM); adaptive control; asymptotic stability

1 引言

模糊模型具有非线性特性, 因此可用于非线性系统的建模和控制。目前, 对于 T-S 模型的自适应控制器已有较多的研究^[1], 但由于一般 T-S 模型辨识复杂, 当模型的辨识精度要求较高时, 难以解决规则爆炸问题, 其控制效果受到局限。文献[2]提出的模糊双曲正切模型(FHM)是一种本质非线性模糊模型, 适合于根据成熟的线性系统理论设计强鲁棒性的稳定控制器; [3, 4]在 FHM 基础上, 提出一种广义模糊双曲正切模型(GFHM), 该模型具有全局逼近性质, 为万能逼近器, 可作为未知非线性函数的

辨识器

本文针对一类非线性系统, 提出一种新的基于 GFHM 的参考模型自适应控制器。该方法克服了对模型的辨识精度要求较高时, 规则爆炸带来的无法在线辨识的问题, 它可利用神经网络在线优化参数。

2 广义模糊双曲正切模型^[3,4]

已知 MISO 系统的 n 个输入变量为 $x_1(t), \dots, x_n(t)$, 输出为 y 。定义广义输入变量 $x_i = x_z - d_{zj}$, 其中: $z = 1, \dots, n, i = 1, \dots, m \left(m = \sum_{i=1}^n w_i \right), w_z (z =$

收稿日期: 2003-11-03; 修回日期: 2004-03-24

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(60274017); 教育部博士点基金资助项目(20011045023); 沈阳市自然科学基金资助项目(1022033-1-07)。

作者简介: 张明君(1966—), 女, 河北栾县人, 副教授, 博士生, 从事模糊控制理论与应用等研究; 张化光(1959—), 男, 吉林省吉林市人, 教授, 博士生导师, 从事复杂系统的模糊自适应控制、非线性控制等研究。

1, ..., n) 为 x_z 线性变换的个数, d_{zj} ($j = 1, \dots, w_z$) 为常参数 取广义输入变量对应的模糊集合 P 和 N 的隶属函数为

$$\mu_P(x_i) = e^{-\frac{1}{2}(x_i - k_i)^2}, \mu_N(x_i) = e^{-\frac{1}{2}(x_i + k_i)^2}, \quad (1)$$

式中 k_i 为常数 GFHM 的第 l 条模糊规则形式为

R^l : If $(x_1 - d_{11})$ is $F_{x_{11}}$... and $(x_1 - d_{1w_1})$ is $F_{x_{1w_1}}$ and $(x_2 - d_{21})$ is $F_{x_{21}}$... and $(x_2 - d_{2w_2})$ is $F_{x_{2w_2}}$... and $(x_n - d_{n1})$ is $F_{x_{n1}}$... and $(x_n - d_{nw_n})$ is $F_{x_{nw_n}}$.

$$\text{Then } y^l = c_{F_{11}} + c_{F_{12}} + \dots + c_{F_{1w_1}} + c_{F_{21}} + \dots + c_{F_{2w_2}} + \dots + c_{F_{n1}} + c_{F_{n2}} + \dots + c_{F_{nw_n}},$$

$$l = 1, \dots, 2^m. \quad (2)$$

其中: $F_{x_{zj}}$ 为与 $x_z - d_{zj}$ 对应的模糊子集, 包括形如式(1)的正(P)和负(N)两个语言值; $c_{F_{zj}}$ 为与 $F_{x_{zj}}$ 对应的常参数 此模糊规则共有 $s = 2^m$ 条模糊规则 由各规则的局部输出 y^l 可得整体输出 y 如下:

$$y(k+1) = p + q \tanh[k_x(x_z - d_{zj})] = p + q \tanh(K_x x). \quad (3)$$

其中

$$p_i = (c_{P_i} + c_{N_i})/2, q_i = (c_{P_i} - c_{N_i})/2,$$

$$p = \sum_{i=1}^m p_i, q = [q_1, \dots, q_m],$$

$$K_x = \text{diag}[k_1, \dots, k_m],$$

$$x = \begin{bmatrix} x_1 \\ \vdots \\ x_m \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x_1 - d_{11} \\ \vdots \\ x_n - d_{mw} \end{bmatrix},$$

$$\tanh(K_x x) = \begin{bmatrix} \tanh(k_1 x_1) \\ \vdots \\ \tanh(k_m x_m) \end{bmatrix}.$$

3 基于 GFHM 的自适应控制器

3.1 控制器结构

考虑如下形式的 SISO 离散非线性系统:

$$y(k+1) = f(y(k), y(k-1), \dots, y(k-n+1)) + CU(k). \quad (4)$$

式中: $f(y(k), y(k-1), \dots, y(k-n+1)) = f(X(k))$ 为未知的非线性连续函数, $X(k) = [y(k), \dots, y(k-n+1)]^T$; $C = [c_0, c_1, \dots, c_{m-1}]$, c_0

$0, c_i \in R, i = 0, 1, \dots, m-1$; $U(k) = [u(k), \dots, u(k-n+1)]^T, u(k) \in R$ 和 $y(k) \in R$ 分别为系统第 k 采样时刻的输入和输出

控制任务是迫使被控系统的输出 $y(k+1)$ 渐近跟踪一个给定的有界参考信号 $y_m(k+1)$, 即需要保证 $e(k+1) = y_m(k+1) - y(k+1)$ 在 k 趋于无穷大时收敛到零. 本文采用如图 1 所示的自适应控制器, 其中: $r(k)$ 为输入, $y_m(k+1)$ 为参考模型输出, $u(k)$ 为控制器输出, $y(k+1)$ 为被控对象输出, $e(k+1) = y_m(k+1) - y(k+1)$, TDL 为时延环节, 辨识器为广义 GFHM 辨识器

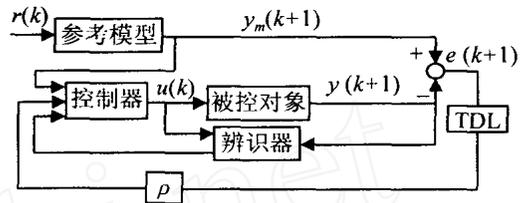


图1 基于 GFHM 的自适应控制器结构

3.2 自适应律

参考模型为

$$y_m(k+1) = AX_m(k) + br(k). \quad (5)$$

其中

$$A = [a_0, \dots, a_{n-1}], a_i \in R,$$

$$i = 0, 1, \dots, n-1,$$

$$X_m(k) = [y_m(k), \dots, y_m(k-n+1)]^T,$$

$$b \in R, r(k) \in R.$$

$r(k)$ 为参考模型输入

自适应控制器的辨识器的误差为

$$\Delta f(k) = \hat{f}(X(k)) - f(X(k)),$$

式中 $\hat{f}(X(k))$ 为形如式(3)的 GFHM 模糊逻辑系统控制系统的跟踪误差

$$e(k) = y_m(k) - y(k).$$

定理 1 对于形如式(4)的离散非线性系统, 若系统的 $|\Delta f(k)| \leq M_f, |e(k)| \leq M_e, M_f$ 和 M_e 分别为偏差的上界, 是大于零的正实数, 可选取 M_f 或 M_e 满足 $M_{\max} = M_f/M_e < 1$. 则采用如下自适应律的控制器全局渐近稳定:

$$u(k) = \frac{1}{c_0} [-\hat{f}(X(k)) + AX_m(k) + br(k) - \tilde{C}\tilde{U}(k) + \rho e(k)] \quad (6)$$

式中: $\tilde{C} = [c_1, \dots, c_{m-1}]$, $\tilde{U}(k) = [u(k-1), \dots, u(k-m+1)]^T, \rho$ 为反馈增益, $M_{\max} - 1 < \rho < -M_{\max} + 1$.

证明 由式(4)和(6)得

$$y(k+1) = f(X(k)) - f(X(k)) + AX_m(k) + br(k) + \rho e(k). \quad (7)$$

由式(5)和(7)可得

$$\begin{aligned} \hat{e}(k+1) &= \\ f(X(k)) - f(X(k)) - \rho e(k) &= \\ \Delta f(k) - \rho e(k). \end{aligned} \quad (8)$$

根据离散系统的Lyapunov 稳定性定理^[5], 取 $V(k) = e^2(k)/2$ 为Lyapunov 函数, 为使系统输出误差渐近收敛, 要求

$$\Delta V(k) = V(k+1) - V(k) < 0,$$

由式(8)得

$$\begin{aligned} \Delta V(k) &= \\ \frac{1}{2} [\Delta f(k) - \rho e(k)]^2 - \frac{1}{2} e^2(k) &= \\ \frac{1}{2} e^2(k) \left[\rho^2 - 1 - 2\rho \frac{\Delta f(k)}{e(k)} + \frac{\Delta f^2(k)}{e^2(k)} \right]. \end{aligned} \quad (9)$$

取 $M = \Delta f(k)/e(k)$, 则

$$\Delta V(k) = e^2(k) [\rho - (M - 1)][\rho - (M + 1)]/2 \quad (10)$$

令 $\rho^2 - 2M + M^2 - 1 < 0$, 得

$$M - 1 < \rho < M + 1$$

因 $|\Delta f(k)| \leq M_f, |e(k)| \leq M_e$, 有

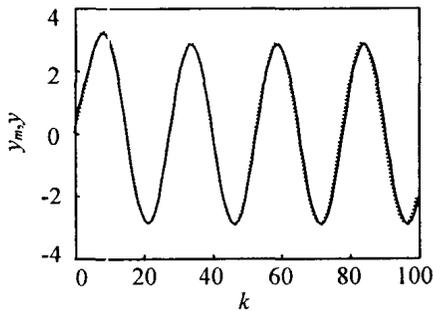
$$M_{\max} = \max(M) = M_f/M_e,$$

$$M_{\min} = \min(M) = -M_{\max}$$

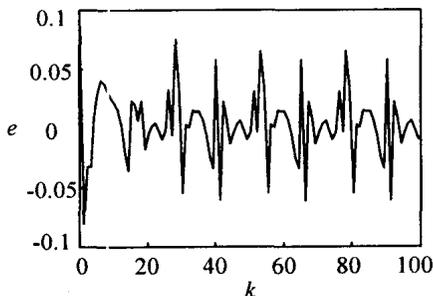
当 $M_{\max} < 1$ 时, 有 $M_{\max} - 1 < \rho < -M_{\max} + 1$, 使 $\Delta V(k) < 0$ 成立

3.3 动态辨识器

GFHM 是一种神经网络模型, 可利用神经网络



(a) 控制器输出 y 和参考模型输出 y_m



(b) 跟踪误差 e

图 2 本文输出曲线和跟踪误差曲线

的学习方法优化模型参数 本文采用一阶梯度下降法动态学习和修正模型参数

GFHM 辨识器的特点是辨识参数较少. 在 n 个输入变量和 m_i 个模糊子空间个数的条件下, GFHM 的辨识参数数量为 $\sum_{i=1}^n 2m_i + \sum_{i=1}^n m_i(n+1)$, 而相同条件下一般 T-S 模型的辨识参数数量为 $1 + \left(\frac{3}{2}\right)^n m_i$. 可见, 随着输入变量或模糊子空间个数的增加, GFHM 辨识器的辨识参数数量为线性增长, 而一般 T-S 模型的辨识参数数量为几何增长. 因此, GFHM 辨识器的辨识复杂性和计算量远低于一般 T-S 模型辨识器的对应情况

4 仿真示例

为说明本文控制器的有效性, 分别采用基于 GFHM 的参考模型自适应控制器和文献[6]的最优模糊系统进行仿真实验

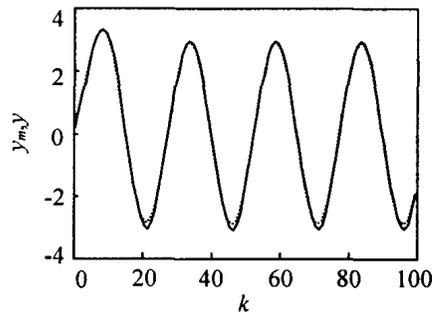
考虑非线性系统^[6]

$$\begin{aligned} y(k+1) &= \\ f[y(k), y(k-1)] + CU(k). \end{aligned} \quad (11)$$

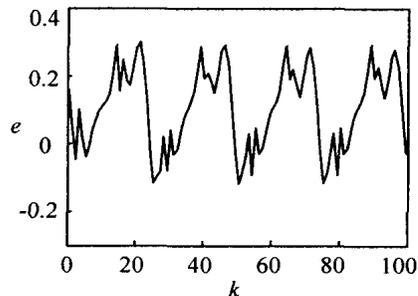
式中: $C = [1], U(k) = [u(k)]$, 未知非线性函数为

$$f[y(k), y(k-1)] = \frac{y(k)y(k-1)[y(k) + 2.5]}{1 + y^2(k) + y^2(k-1)}$$

跟踪参考模型为



(a) 控制器输出 y 和参考模型输出 y_m



(b) 跟踪误差 e

图 3 文献[6] 输出曲线和跟踪误差曲线

$$y_m(k+1) = 0.6y_m(k) + 0.2y_m(k-1) + r(k) = AX_m(k) + br(k).$$

式中: $r(k) = \sin(2\pi k/25)$, $A = [0.6, 0.2]$, $X_m(k) = [y_m(k) \ y_m(k-1)]^T$, $b = 1$.

根据定理1设计形如式(6)的自适应控制器, 反馈增益 $\rho = 0.35$. 例中GFHM形如式(3), 辨识器初值为

$$\begin{aligned} p &= 1.7966, \\ q &= [q_1, q_2, q_3] = [-0.8234, 2.8879, 0.9175], \\ x &= [x_1 \ x_2 \ x_3]^T = [y(k) + 0.0135 \ y(k) - 1.3630 \\ &\quad y(k-1) + 0.6249]^T, \\ K_x &= \text{diag}[k_1, k_2, k_3] = \text{diag}[-0.5893, 0.2256, -1.9538] \end{aligned}$$

仿真结果如图2和图3所示, 其中图2(a)和图3(a)中的实线 y 分别为本文和文献[6]中的控制器输出曲线, 虚线 y_m 均为参考模型输出曲线. 通过对比图2和图3可见, 本文的控制器跟踪效果明显好于文献[6].

5 结 语

本文提出一种基于GFHM的自适应控制器, 并利用Lyapunov稳定性理论证明了此控制器是全局渐近稳定的, 跟踪误差趋于零. 该方法具有以下特

点: 1) 辨识参数少, 辨识复杂性较小; 2) 克服了在模型辨识精度要求较高时, 规则爆炸所带来的无法在线辨识的问题, 可以用神经网络在线优化参数; 3) 控制器的跟踪效果优于文献[6], 控制精度较高.

参考文献(References):

- [1] Tseng C S, Chen B S, Uang H J. Fuzzy tracking control design for nonlinear dynamic systems via T-S fuzzy model[J]. *IEEE Trans on Fuzzy System*, 2001, 9(3): 381-392.
- [2] Zhang H G, Quan Y B. Modeling, identification and control of a class of nonlinear system[J]. *IEEE Trans on Fuzzy System*, 2001, 9(2): 349-354.
- [3] 全永兵, 张化光. 广义模糊双曲正切模型及其逼近性研究[J]. *东北大学学报*, 2003, 24(1): 1-3.
(Quan Y B, Zhang H G. Generalized fuzzy hyperbolic model: A universal approximator[J]. *J of Northeastern University*, 2003, 24(1): 1-3.)
- [4] 张化光, 王智良, 黎明, 等. 广义模糊双曲正切模型: 一个万能逼近器[J]. *自动化学报*, 2004, 30(3): 416-422.
(Zhang H G, Wang ZL, Li M, et al. Generalized fuzzy hyperbolic model: A universal approximator[J]. *Acta Automatica Sinica*, 2004, 30(3): 416-422.)
- [5] 陈新海, 李严俊, 周军. 自适应控制系统及应用[M]. 西安: 西北工业大学出版社, 1998.
- [6] Wang L X. *Adaptive Fuzzy Systems and Control: Design and Stability Analysis* [M]. NJ: Prentice Hall, 1994.

(上接第1300页)

参考文献(References):

- [1] Kennedy J, Eberhart R C. Particle swarm optimization [A]. *IEEE Int Conf on Neural Networks* [C]. Perth, 1995. 1942-1948.
- [2] 谢晓锋, 张文俊, 杨之廉. 微粒群算法综述[J]. *控制与决策*, 2003, 18(2): 129-133.
(Xie X F, Zhang W J, Zhang Z L. Overview of particle swarm optimization[J]. *Control and Decision*, 2003, 18(2): 129-133.)
- [3] Angeline P J. Evolutionary optimization versus particle swarm optimization: Philosophy and performance difference [A]. *Proc of 7th Annual Conf on Evolutionary Programming* [C]. Germany, 1998. 601-610.
- [4] Clerc M, Kennedy J. The particle swarm: Explosion, stability and convergence in a multi-dimensional complex space[J]. *IEEE J of Evolutionary Computation*, 2001, 6(1): 58-72.
- [5] Trelea I C. The particle swarm optimization algorithm: Convergence analysis and parameter selection [J]. *Information Processing Letters*, 2003, 85: 317-325.
- [6] Kennedy J. The particle swarm: Social adaptation of knowledge [A]. *IEEE Int Conf on Evolutionary Computation* [C]. Indianapolis, 1997. 303-308.
- [7] Eberhart R C, Shi Y. Comparing inertia weights and constriction factors in particle swarm optimization [A]. *Proc of the IEEE Congress on Evolutionary Computation* [C]. San Diego, 2000. 84-88.
- [8] Shi Y, Eberhart R C. Parameter selection in particle swarm optimization [A]. *Proc of the Seventh Annual Conf on Evolutionary Programming* [C]. New York, 1998. 591-600.