

基于广义 T-S 模糊辨识模型的混沌系统模糊控制

张 静

(襄樊学院物理系 襄樊 441000)

摘 要: 该文针对混沌系统辨识引入广义 T-S 模糊模型, 并对 T-S 模糊模型自适应参数进行遗传退火算法优化, 使系统具有最佳结构和参数。在此基础上给出了广义 T-S 模糊模型使系统渐近稳定模糊控制算法, 并证明了广义 T-S 模型有足够的精度, 控制的精度就能得到满足, 系统可以跟踪目标。控制的目标可以为周期轨道, 也可以为连续变化的目标函数。以一维的 Logistic 系统和二维的 Henon 系统为例进行仿真分析, 结果表明该方法的有效性和可行性。

关键词: 混沌系统; 辨识; 广义 T-S 模糊模型; 模糊控制

中图分类号: TP273

文献标识码: A

文章编号: 1009-5896(2007)07-1753-04

Identifying Chaotic System Based on Adaptable T-S Fuzzy Model and Algorithms of GA-Annealing Strategy

Zhang Jing

(Department of Physics, Xiangfan University, Xiangfan 441000, China)

Abstract: A adaptable T-S fuzzy model which membership functions, structure and parameters optimized by the algorithms of GA-Annealing strategy is proposed to identify chaotic system. Based on this, the asymptotic stability algorithm of fuzzy control having simple and effective control laws is employed. That the system can efficiently track the objective functions which can be either period orbits or continuous variable functions is also proved, if the precision of the adaptable T-S fuzzy model is good. The simulations to control chaotic system models of Logistic system and Henon system show the effectiveness and feasibility of the proposed method.

Key words: Chaotic system; Identification; Adaptable T-S fuzzy model; Fuzzy control

1 引言

混沌是一种普遍的非线性现象, 其行为复杂且类似随机, 但存在内在规律性^[1,2]。混沌的发现, 对科学的发展有深远的意义。近年来, 混沌系统的控制、反控制、同步受到广泛的关注, 但是在实际中, 实际混沌系统只能得到外在的含有噪声输出时间序列, 并不能得到十分精确的数学模型, 因此有必要对混沌进行辨识, 以便于采用相关的控制策略, 设计相关控制器。文献[3]引入广义 T-S 模糊模型, 使系统中隶属函数具有自适应性; 并对 T-S 模糊模型前件模糊规则数、各加权值、隶属函数自适应参数进行遗传算法优化, 使系统具有最佳结构参数, 得到收敛速度及精度良好的混沌系统的广义 T-S 模糊模型。在此基础上, 本文将讨论基于广义 T-S 模糊模型的混沌系统控制。采用上述模糊建模方法, 其特点是无需被控对象的解析模型, 便可以对其进行有效控制, 控制的目标可以是周期轨道, 也可以是连续变化的目标函数, 控制律简单有效。

本文第 2 节介绍基于遗传算法的广义 T-S 模糊模型的混

沌系统辨识原理; 第 3 节介绍基于 T-S 模糊模型的控制方法; 第 4 节是仿真应用; 最后是结束语。

2 广义 T-S 模糊模型的混沌系统辨识

令

$$\mu_F(x) = \exp\left[-\left|\frac{x-b}{a}\right|^c\right], a > 0, b \in R, c \geq 0 \quad (1)$$

显然选择合适的 a, b, c 值对隶属函数进行平移、压缩、扩张, 隶属函数将逼近三角形、梯形、高斯形等。因此 $\mu_F(x)$ 具有自适应性^[4], 若 T-S 模糊模型:

R_i : if x_1 is A_1^i and $\dots x_n$ is A_n^i then

$$y_i = p_1^i x_1 + \dots + p_n^i x_n + p_{n+1}^i \quad i = 1, \dots, m \quad (2)$$

中取隶属函数为 $\mu_F(x)$, 则称此模型为广义 T-S 模糊模型, 且其输出为

$$y = \sum_{i=1}^m y_m G^i / \sum_{i=1}^m G^i, \quad G^i = \prod_{j=1}^n A_j^i(x_{j0}) = \prod_{j=1}^n \exp\left[-\left|\frac{x_{j0} - b_j^i}{a_j^i}\right|^{c_j^i}\right] (x_{j0}) \quad (3)$$

混沌系统的广义 T-S 模糊模型的辨识基础是观测得到的时间序列, 令 $X^T = [x_1, \dots, x_n]$, $Y^T = [y_1, \dots, y_n]$ 为输入和输出数据, $Z^T = [X \ Y]$, 利用式(1) $\mu_F(x)$, 模糊 c 均值聚类分

2006-01-11 收到, 2007-04-19 改回

湖北省教育厅科研项目(2001D69001)和湖北省物理实验教学示范中心建设项目资助课题

析方法和局部最小二乘估计方法确定混沌系统初始的广义 T-S 模糊模型,再引入遗传模拟退火算法^[4,5]优化结构和参数,使系统具有最佳结构参数,得到收敛速度及精度良好的混沌系统的广义 T-S 模糊模型。

3 基于 T-S 模糊模型的控制方法

考虑如下混沌系统:

$$x(k+1) = f(x(k), \theta) + u(k) \quad (4)$$

式中, $x \in R_n$ 为系统的状态; θ 为系统参数; u 为控制项。

令式(4)中的 $u(k) = 0$, 得

$$x(k+1) = f(x(k), \theta) \quad (5)$$

实际混沌系统只能得到外在的含有噪声输出时间序列,利用基于遗传模拟退火的广义 T-S 模糊模型的混沌系统辨识建模方法确定式(5)输入输出关系,可以得到其模糊模型为

$$\hat{x}(k+1) = \hat{f}(x(k), \theta) \quad (6)$$

根据离散系统稳定性原理设计控制器:

$$u(k) = x_r(k+1) - \hat{f}(x(k), \theta) + l(\hat{x}(k) - x_r(k)) \quad (7)$$

式中, $x_r(k)$ 为期望的控制目标。

定义误差

$$e(k) = \hat{x}(k) - x_r(k) \quad (8)$$

则 $e(k+1) = \hat{x}(k+1) - x_r(k+1)$ 。

定义广义 T-S 模糊模型误差

$$\hat{e}(k) = x(k) - \hat{x}(k) \quad (9)$$

将式(7)、式(8)和式(9)代入到式(4)中,可得

$$\begin{aligned} e(k+1) &= f(x(k), \theta) - \hat{f}(x(k), \theta) + l(\hat{x}(k) - x_r(k)) \\ &= \hat{e}(k) + le(k) \end{aligned} \quad (10)$$

如果模糊模型能够很好地逼近原系统,那么误差系统为

$$e(k+1) = l(\hat{x}(k) - x_r(k)) = le(k) \quad (11)$$

按稳定系统极点配置原则设计 l 使式(11)所示离散系统渐近稳定,则系统控制可以跟踪给定 x_r 。根据离散系统稳定原理,选取 $|l| < 1$, 式(10)系统为渐近稳定的。可以证明系统式(4)在施加控制时,可以跟踪控制目标。

下面具体讨论混沌系统动力特性的广义 T-S 模糊模型误差对控制性能的影响。

定义 $e_1 = \sup_k |e(k)|$ 为最大跟踪误差; $e_2 = \sup_k |\hat{e}(k)|$ 为最大模型误差。

定理 1 对于式(4)的系统,采用控制如式(7)所示进行控制,则有 $e_1 \rightarrow e_2$ 。

证明 由于式(9)所示的系统是输入输出有界的。对式(9)两边取绝对值并求上确界得: $\sup_k |e(k+1)| = \sup_k |\hat{e}(k) + le(k)|$, $e_1 = e_2 + |l|e_1$ ($|l| < 1$), 因此 $e_1 \rightarrow e_2$ 证毕

上述定理说明,控制的最大跟踪误差趋于模型的误差,只要使模型有足够的精度,控制的精度就能得到满足。

文献[6]指出模糊系统是万能逼近器。其证明方法是根据 Stone-Weierstrass 定理^[6]进行证明的,从证明中可见,模糊

系统的逼近精度和规则数目有关,同时规则数目和所设计的模糊系统的复杂程度有关。这一结论直观地说明了:规则越多,所产生的模糊系统越有效。但是同时这样的模糊系统也越复杂。要解决的问题就是:在保证逼近精度的条件下如何设计出较简单的模糊系统。文献[3]利用式(1) $\mu_F(x)$ 、模糊 c 均值聚类分析方法和局部最小二乘估计方法确定混沌系统初始的广义 T-S 模糊模型,再引入遗传模拟退火算法优化结构和参数,使系统具有最佳结构参数即最简的规则,得到收敛速度及精度良好的混沌系统的广义 T-S 模糊模型:一维的 Logistic 系统仅有 3 条模糊规则,模型均方误差=1.3372·e-009; 二维的 Henon 系统仅有 4 条模糊规则,模型均方误差=1.8455e-009。

4 仿真应用

以一维的 Logistic 系统和二维的 Henon 系统为例进行仿真分析,结果如下。

4.1 Logistic 系统仿真

Logistic 系统为

$$X(k+1) = r(1 - X(n))X(n) \quad (12)$$

$r = 4$ 时系统混沌。施加控制后,系统变为

$$X(k+1) = r(1 - X(n))X(n) + u \quad (13)$$

($X(0) = 0.05$), 相应的模糊模型则为^[3]:

(1) If(input1 is in1mf1) then $x(k+1) = 3.9x(k) - 0.264$

(2) If(input1 is in1mf2) then $x(k+1) = 0.04012x(k) + 0.634$

(3) If(input1 is in1mf3) then $x(k+1) = -3.856x(k) + 3.582$

设计模糊控制器为

$$u(k) = x_r(k+1) - \hat{f}(x(k)) + l(\hat{x}(k) - x_r(k)) \quad (14)$$

由式(11)可知,对于 Logistic 模型,应用极点配置法,只要 $|l| < 1$, 施加了控制后,期望系统是渐进稳定的。这里取 $l = 0.01$, 控制目标 x_r 分别为系统的一个不动点 1 和周期信号: $x_{r1} = 1, x_{r2} = 0.5 + 0.25 \sin(k * 3.14 / 100)$ 在第 200 步时,施加控制 $u(k)$ 。控制结果分别为如图 1(a)和图 1(b)所示,控制目标 x_{r2} 及 $x_r = x_{r2}$ 时系统跟踪误差如图 1(c)和图 1(d)所

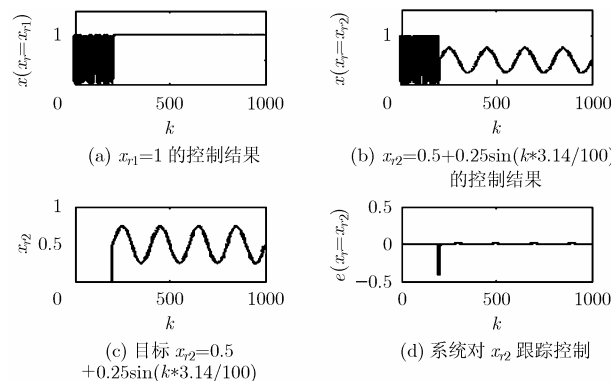


图 1 Logistic 系统控制结果

示。基于广义 T-S 模糊模型的模糊控制方法可以将系统控制稳定不动点和周期信号, 从而证明了该方法的有效性。从如图 1(c)和图 1(d)可知: 控制速度很快, 系统跟踪误差在 3 步内接近 0, 具有良好的实时控制性。

4.2 Henon 系统

Henon 系统为:

$$X(k+1) = 1 + bY(k) - a^2X(k), \quad Y(k+1) = X(k) \quad (15)$$

$a = 1.4, b = 0.3$ 时系统混沌。施加控制后, 系统变为

$$\begin{aligned} X(k+1) &= 1 + bY(k) - a^2X(k) + u_1(k), \\ Y(k+1) &= X(k) + u_2(k) \end{aligned} \quad (16)$$

相应的模糊模型($X(0) = 0.631, Y(0) = 0.631$)则为^[3]:

(1) If (input1 is in1mf1) and (input2 is in2mf1) then $X(k+1) = 1.205X(k) + 0.3132Y(k) - 5.543$

(2) If (input1 is in1mf1) and (input2 is in2mf2) then $X(k+1) = 5.938X(k) + 0.3161Y(k) - 6.9$

(3) If (input1 is in1mf2) and (input2 is in2mf1) then $X(k+1) = -6.375X(k) + 0.2915Y(k) + 7.898$

(4) If (input1 is in1mf2) and (input2 is in2mf2) then $X(k+1) = -1.643X(k) + 0.2929Y(k) - 5.226$

设计模糊控制器为

$$\left. \begin{aligned} u_1(k) &= x_r(k+1) - \hat{f}_1(x(k), y(k)) + l(\hat{x}(k) - x_r(k)) \\ u_2(k) &= x_r(k+1) - \hat{f}_2(x(k), y(k)) + l(\hat{y}(k) - y_r(k)) \end{aligned} \right\} \quad (17)$$

取 $l=0.01$, 控制目标分别为 $x_r = 1, y_r = 0.5 + 0.25 \sin(k * 3.14 / 100)$ 在第 200 步时, 施加控制 $u(k)$ 。控制结果分别为如图 2(a)和 2(b)所示, 控制目标 y_r 时系统跟踪误差如图 2(c)所示。从如图 2(c)可知: 控制速度很快, 系统跟踪误差在 3 步内接近 0, 具有良好的实时控制性。

4.3 自适应性和抗噪声干扰分析

混沌系统的广义 T-S 模糊模型建模时利用 $\mu_F(x)$ 、模糊 c 均值聚类分析方法和局部最小二乘估计方法确定混沌系统初始的广义 T-S 模糊模型, 再引入遗传模拟退火算法优化结构和参数, 使系统具有最佳结构参数即最简单的规则, 这保证了模糊模型具有很好的自适应性和更强的抗噪声干扰的

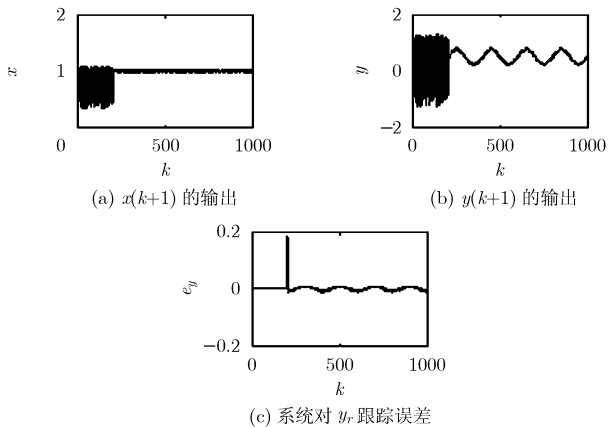


图2 Henon 系统控制结果

能力。

以 Logistic 系统为例, 利用文献[3]模型, 将原始序列再加噪声方差 $\delta^2 = 0.00 : 0.02 : 0.1$ 的噪声进行仿真($x(1005) - x(1304)$ 仿真), 结果如下: 图 3 Logistic 系统含噪声的混沌吸引子、本方法相应仿真及噪声方差=0.1 时本方法控制结果 (控制器和控制目标、条件同 4.1 节); 图 4 是仿真均方根误差与噪声方差曲线。

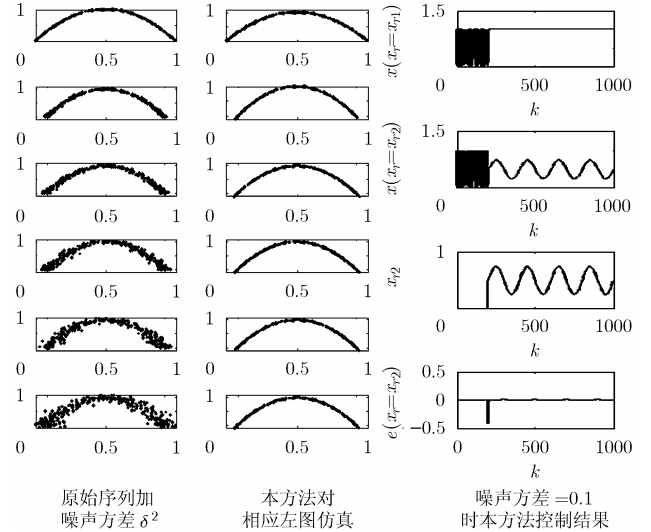


图3 Logistic 系统含噪声的混沌吸引子、本方法相应仿真及噪声方差=0.1 时本方法控制结果

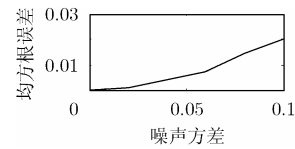


图4 仿真均方根误差与噪声方差曲线

从图 3、图 4 对比图 1 可以看出基于广义 T-S 模糊模型的模糊控制在噪声方差为零、较小、较大情况下仿真精度和控制效果仍然良好, 本方法具有良好的自适应性和很强的抗噪声干扰的能力, 鲁棒性好。

5 结束语

本文讨论基于广义 T-S 模糊模型的混沌系统控制, 给出了广义 T-S 模糊模型使系统渐近稳定模糊控制算法, 并证明了广义 T-S 模型有足够的精度, 控制的精度就能得到满足, 系统可以准确跟踪目标。可得到如下结论: (1) 广义 T-S 模糊模型的精度可以通过足够的规则数来保证。在精度一定的前提下, 尽量减少规则数以实现模型最简。模型有足够的精度, 控制的精度就能得到满足, 系统可以准确跟踪目标。(2) 控制的目标可以为周期轨道, 也可以为连续变化的目标函数。以一维的 Logistic 系统和二维的 Henon 系统为例进行仿真分析, 结果表明该方法可以将确定的混沌系统控制在稳定不动点和周期信号。而且具有良好的实时性。(3) 该方法可以将含有噪声信号混沌系统控制在稳定不动点和周期信号, 说明该方法具有良好的自适应性和很强的抗噪声干扰的能力, 鲁棒性

好。(4)采用上述模糊建模方法,其特点是无需被控对象的解析模型,便可以对其进行有效控制。(5)本方法具有的工程意义:例如永磁同步电动机的动力学特征,它是一个强非线性系统^[7],能呈现出非常丰富的动态行为,诸如极限环和混沌。可以建立其TS 模糊模型,再利用基于模糊模型的模糊控制方法来控制混沌现象。而且可将永磁同步电动机系统从混沌状态控制在任意制定的周期轨道上或稳定不动点(即期望的工作状态),而且不改变系统的结构,具有良好的轨道跟踪能力和稳定性。

参 考 文 献

- [1] Lorenz E N. Deterministic nonperiodic flow[J]. *J. Atmos. Sci.*, 1963, 20: 130-141.
 - [2] Hao B L. (ed). *Chaos*[M]. Singapore: World Scientific, 1984: 3-230.
 - [3] 张静. 基于遗传模拟退火的广义 T-S 模糊模型的混沌系统辨识[J]. *计算机应用*, 2005, 25(11): 2671-2675.
 - [4] 张化光, 何希勤. 模糊自适应控制理论及其应用[M]. 北京: 北京航空航天大学出版社, 2002: 100-250.
 - [5] 周明, 孙树栋. 遗传算法原理及应用[M]. 北京: 国防工业出版社, 1999: 100-150.
 - [6] 王立新. 模糊系统与模糊控制教程[M]. 北京: 清华大学出版社, 2003, 12: 110.
 - [7] Li Z, Zhang B, and Mao Z Y. Strange attractors in permanent-magnet synchronous motors[A]. *IEEE Proceedings of 1999 International Conference on Power Electronics and Drive Systems*[C], Hong Kong, 1999: 150-155.
- 张 静: 女, 1967 年生, 副教授, 从事建模预测研究.