

基于遗传算法的混沌系统模糊控制

吴忠强 奥顿 刘坤

(燕山大学电气工程学院自动化系 秦皇岛 066004)

(2003 年 4 月 11 日收到, 2003 年 5 月 13 日收到修改稿)

基于遗传算法,研究了混沌系统的模糊控制问题.采用遗传算法对模糊系统的隶属函数进行优化,综合了遗传算法强大的空间搜索能力,高精度和模糊控制器快速性的优点,使模糊控制达到较好的控制效果.仿真结果证明了所给方法的有效性.

关键词:混沌系统,遗传算法,模糊控制

PACC: 0545

1. 引 言

随着 Ott 等人的 OGY 控制方法与 Pecora 和 Carroll 的驱动-响应同步方法的提出^[1,4],混沌控制与混沌同步及其在保密通信中的应用引起了人们的广泛兴趣^[2,3].混沌控制是目前非线性科学中的一个十分活跃的研究领域.在许多实际系统中,混沌现象作为一种不期望的现象,可能导致振荡或无规则运行,进而使系统彻底崩溃.因此,人们希望能找到一些方法来控制系统中的混沌行为.目前的控制方法有:神经网络控制^[5-7],自适应控制^[8-11],模糊控制^[12,13]等.模糊控制^[14,15]能方便地利用以语言表达的人的经验来对未知模型的系统进行控制,具有鲁棒性强和逼近能力好等优点.尤其是近年来 TS 模糊控制方法^[16,17]发展迅速.研究者们开始注意将模糊控制方法用到混沌控制中^[12].然而传统模糊控制系统的隶属函数参数是固定的,限制了它的控制能力,很难达到较好的控制效果.遗传算法^[18]由于其不依赖于问题的数学模型,也不需要具有可导性等约束条件,非常适用于复杂性高且搜索空间大的问题.

本文利用遗传算法优化模糊系统的隶属函数,并应用到带有不确定性的 Henon 混沌系统的控制中.研究结果表明,本文的方法有效的提高了模糊控制能力,取得了较好的控制效果.

2. 问题的描述

考虑如下混沌系统

$$x(k+1) = Ax(k) + f(x(k)) + u(k) \quad (1)$$
$$k = 1, 2, \dots, m,$$

其中 $x(k)$ 为系统的状态, $A \in R^{n \times n}$ 为定常矩阵, $f(x(k))$ 为光滑的非线性矢量, $u(k)$ 为控制量.在实际系统中,系统总会不可避免的存在不确定性,则(1)式可写为

$$x(k+1) = (A + \Delta A)x(k) + f(x(k)) + \Delta f(x(k)) + u(k) + d(k) \quad (2)$$
$$k = 1, 2, \dots, m,$$

其中 $\Delta Ax(k)$, $\Delta f(x(k))$ 为线性和非线性扰动项, $d(k)$ 为外部干扰.令 \bar{x} = 常数为其不动点.则要使得 $x(k)$ 趋向于不动点 \bar{x} , 定义误差为

$$e(k) = \bar{x} - x(k), \quad (3)$$

通过选择合适的 $u(k)$, 使得误差 $e(k)$ 趋向于零.

3. 控制器设计

一般化 TS 模糊控制器的两个输入变量是系统的偏差 $e(k)$ 和偏差变化 $ec(k)$, 均被模糊化为 N_1 个输入模糊集.所采用的隶属函数 $\mu_i(e)$ 和 $\mu_i(ec)$ 均为高斯函数, 即

$$\mu_i(y) = \exp(-(y - c_i)^2 / \sigma_i^2) \quad (4)$$
$$i = 1, \dots, N_1,$$

其中 $y = e(k)$ 或 $ec(k)$, $y \in [-\infty, +\infty]$.

TS 模糊控制器采用以下带有线性后项形式的模糊规则^[17]:

R_l : 如果 $e(k)$ 为 M_l^i 和 $ec(k)$ 为 M_l^j , 则

$$\Delta u(k) = a_{i,j} e(k) + b_{i,j} ec(k)$$

$$i, j = 1, 2, \dots, N_1, l = 1, \dots, i \times j,$$

其中 $\Delta u(k)$ 是该规则对 TS 模糊控制器输出变化的贡献, $a_{i,j}$ 和 $b_{i,j}$ 是规则后项设计参数. 规则后项对应的输出隶属度值为

$$\mu_{i,j}(\Delta u) = \mu_i(e) \otimes \mu_j(ec) \quad (5)$$

$$i, j = 1, 2, \dots, N_1,$$

式中符号“ \otimes ”表示任意的模糊逻辑 AND 操作.

广义模糊器用于计算 TS 模糊控制器的输出

$$\Delta u(k) = \frac{\sum_{i=1}^{N_1} \sum_{j=1}^{N_1} (\mu_{i,j}(\Delta u))^{\alpha} (a_{i,j}e(k) + b_{i,j}ec(k))}{\sum_{i=1}^{N_1} \sum_{j=1}^{N_1} (\mu_{i,j}(\Delta u))^{\alpha}} \quad (6)$$

$$i, j = 1, 2, \dots, N_1.$$

采用不同的 $\alpha (0 \leq \alpha < \infty)$, 可得到不同的反模糊器, 当 $\alpha = 1$ 时, 可得到重心反模糊器

$$u(k+1) = u(k) + \Delta u(k+1). \quad (7)$$

TS 模糊控制器(6)式被证明是带有可变化比例增益和可变积分增益的非线性 PI 控制器, 故处理非线性对象时比线性控制器有效. 但由于隶属函数和规则后项中的设计参数较多, 难以解析的设计, 因此本文采用遗传算法来对 TS 模糊控制器进行设计.

本文采用浮点数遗传算法, 具体实现步骤如下:

1. 首先对要优化的参数进行编码. 由于本文要优化隶属函数的参数及规则后项参数, 则要对隶属函数的参数 c_i 和 σ_i 及规则后项参数 $a_{i,j}$ 和 $b_{i,j}$ 进行编码, 再根据对混沌系统的初步认识来确定参数的取值范围.

2. 根据要求确定适应度函数. 选择误差平方与误差变化平方和的倒数为适应度函数

$$J = 1 / \sum_{i=0}^k (e(k)^2 + ec(k)^2), \quad (8)$$

当此适应度函数值最大, 即误差与误差变化最小时的参数值为所求.

3. 按(8)式计算各个体的适应度.

4. 从当前种群选出个最高适应度的个体直接进入下一代.

5. 利用遗传算法的 3 个基本操作(复制、交叉和变异)产生新个体. 其中根据系统本身的需要来选交叉率和变异率.

6. 重复以上操作直到 J 趋于最优值(或在某个允许范围内)为止, 找出最优个体, 得到隶属度函数的参数, 即可对混沌系统进行控制.

4. 仿真研究

带控制项的 Henon 混沌系统方程为

$$x_1(k+1) = 1 - a(x_1(k))^2 + bx_2(k) + u(k),$$

$$x_2(k+1) = x_1(k),$$

其中 $a = 1.4, b = 0.3$. 其不稳定不动点为(0.6314, 0.6314). 图 1 为 Henon 系统的变化曲线.

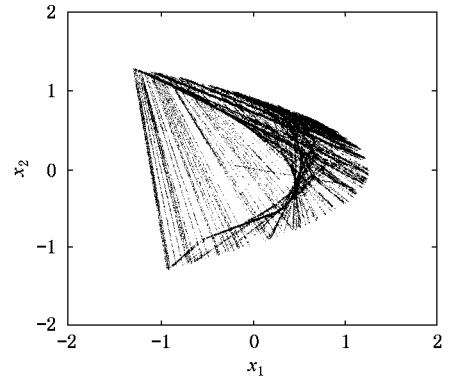


图 1 Henon 混沌系统

当存在不确定性时, Henon 混沌系统方程为

$$x_1(k+1) = 1 - (a + \sigma a)(x_1(k))^2 + (b + \sigma b)x_2(k) + \sigma d_1 + u(k),$$

$$x_2(k+1) = x_1(k) + \sigma d_2,$$

其中不确定性为 $\sigma a = 0.02, \sigma b = 0.03$, 外干扰为 $\sigma d_1 = 0.1 \sin(k), \sigma d_2 = 0.01 \sin(k)$.

TS 模糊控制器设计如下, 由图 1 仿真曲线可知 $e(k)$ 的变化范围为 $[-2, 0.8]$, 则 $e(k)$ 和 $ec(k)$ 均被模糊化为 5 个输入模糊集, 并且取 $\sigma_1 = \sigma_2 = \sigma$

$$\mu_1(y) = \begin{cases} 1 & x < -2, \\ \exp(-(y+2)^2/\sigma^2) & -2 < x < -0.6, \end{cases}$$

$$\mu_2(y) = \exp(-(y-c_1)^2/\sigma^2) \quad -2 < x < -0.6,$$

$$\mu_3(y) = \exp(-(y+0.6)^2/\sigma^2) \quad -2 < x < 0.8,$$

$$\mu_4(y) = \exp(-(y-c_2)^2/\sigma^2) \quad -0.6 < x < 0.8,$$

$$\mu_5(y) = \begin{cases} \exp(-(y-0.8)^2/\sigma^2) & -0.6 < x < 0.8, \\ 1 & x > 0.8. \end{cases}$$

采用 Zadeh 模糊逻辑‘and’和重心反模糊化. TS 模糊控制器共有 25 条规则, 需要设计的参数有: 输入模糊集参数 3 个, 规则后项参数 50 个, 共 53 个参数. 故需采用每代个体为 53, 交叉率选为 0.85, 变异率选为 0.006, 适应度函数选用

$$J = 1 / \sum_{i=0}^k (e(k)^2 + ec(k)^2).$$

根据图 1 的 Henon 混沌系统的响应曲线, TS 模糊控制器后项参数的变化范围可大致确定, 取 $a_{i,j}^{\min} = a_{i,j}^{\max} = [-3, 3], b_{i,j}^{\min} = b_{i,j}^{\max} = [-3, 3]$. 高斯型隶属

函数的参数 c_1, c_2 范围为 $[-2, 0.8]$, σ 为 $[0, 0.9]$.

仿真结果表明, 经过若干代优化, 得到用于控制模型(6)式的 TS 模糊控制器的一组最优设计参数. 所求参数如表 1 和表 2 所示. 图 2 为优化后适应度最优值与平均值变化曲线. 可看到在大约 170 代得到了最优值, 并达到了相对稳定的状态. 图 3, 图 4 为带有不确定性的 Henon 混沌系统在 2s 加入控制

量的状态的变化曲线和误差变化曲线. 可看出系统在很短时间内达到不动点.

表 1 隶属函数的参数值

c_1	c_2	σ
-1.9744	0.2008	0.0175

表 2 TS 模糊模型的后件参数 a_{ij} 和 b_{ij} 的值

a	-0.9544	0.3390	2.9892	1.0437	-0.8738	-0.9966	2.5090	-0.4212	-0.5676
b	0.5930	0.3168	1.2093	1.1390	2.6055	-0.1800	2.3199	0.1829	0.2733
a	1.6270	2.9462	-0.5263	1.2044	-0.1173	-0.0943	1.2498	0.6306	1.8108
b	2.5587	1.6422	-0.5481	1.7119	1.4799	1.1717	-0.4773	-0.9962	2.4744
a	1.0108	0.3582	-0.4125	-0.7504	2.7352	1.0771	0.5463		
b	2.0089	1.0815	2.8187	-0.1503	-0.9364	-0.3591	0.9376		

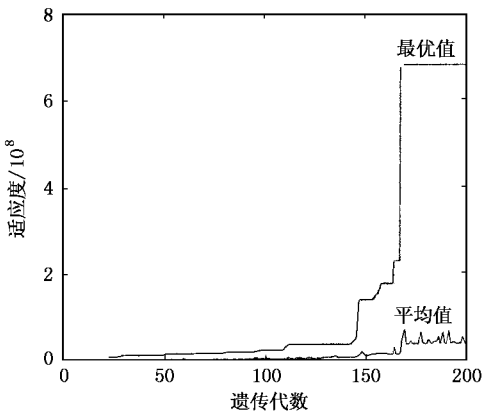


图 2 适应度函数的最优值与平均值

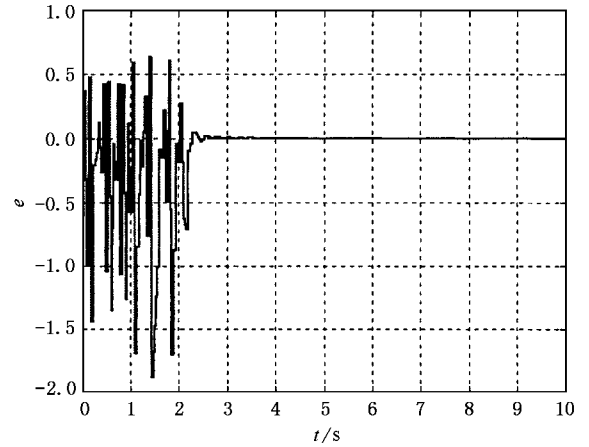


图 4 误差变化曲线

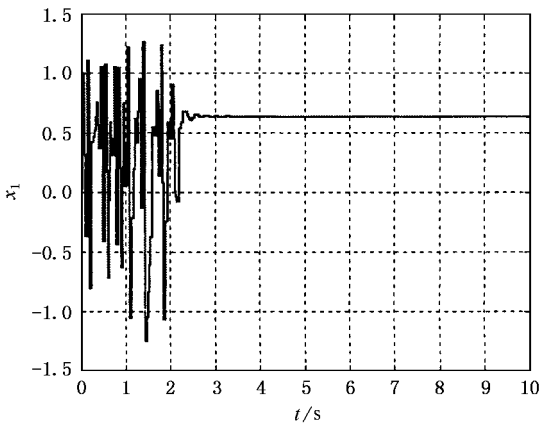


图 3 状态变化曲线

5. 结 论

本文采用遗传算法优化模糊控制器的隶属函数参数及后项参数, 并应用到带有不确定性的 Henon 混沌系统的控制中. 综合了遗传算法强大的空间搜索能力, 高精度和模糊控制器快速性的优点, 有效地提高了模糊控制能力. 研究结果表明, 当 Henon 混沌系统存在参数不确定性及外界干扰时, 仍能较快地达到不动点, 取得了较好的控制效果. 仿真实验表明此方法的有效性.

- [1] Ott E , Grebogi C and Yorke J A 1990 *Phys. Rev. Lett.* **64** 1196
- [2] Zheng Y A , Nian Y B and Liu Z R 2002 *Chin. Phys. Lett.* **19** 1251
- [3] Ren H P and Liu D 2002 *Chin. Phys. Lett.* **19** 1054
- [4] Pecora L M and Carroll T S 1990 *Phys. Rev. Lett.* **64** 821
- [5] Guan X P , Tang Y G , Fan Z P and Wang Y Q 2001 *Acta. Phys. Sin.* **50** 2112(in Chinese) [关新平、唐英干、范正平、王益群 2001 物理学报 **50** 2112]
- [6] Wang H X and Yu J B 2001 *Acta. Phys. Sin.* **50** 2303(in Chinese) [王宏霞、虞厥邦 2001 物理学报 **50** 2303]
- [7] He G G and Cao Z T 2001 *Acta. Phys. Sin.* **50** 2103(in Chinese) [何国光、曹志彤 2001 物理学报 **50** 2103]
- [8] Chen S H , Liu J , Feng J W and Lv J H 2002 *Phys. Rev. Lett.* **19** 1257
- [9] Li Z and Han C Z 2001 *Acta. Phys. Sin.* **50** 847(in Chinese) [李智、韩崇昭 2001 物理学报 **50** 847]
- [10] Dai D and Ma X K 2001 *Acta. Phys. Sin.* **50** 1237(in Chinese) [戴 栋、马西奎 2001 物理学报 **50** 1237]
- [11] Guan X P , Fan Z P , Peng H P and Wang Y Q 2001 *Acta. Phys. Sin.* **50** 2108(in Chinese) [关新平、范正平、彭海朋、王益群 2001 物理学报 **50** 2108]
- [12] Guan X P and Hua C C 2002 *Chin. Phys. Lett.* **19** 1031
- [13] Xue Y J and Feng R P 2001 *Acta. Phys. Sin.* **50** 440(in Chinese) [薛月菊、冯汝鹏 2001 物理学报 **50** 440]
- [14] Takagi T , Sugeno M 1985 *IEEE Trans. Syst. Man Cybern* **15** 116
- [15] Tanaka K and Sugeno M 1992 *Fuzzy Sets and Systems* **45** 135
- [16] Cao K , Zhang N Y and Xu L W 2001 *Control Theory and Applications* **18** 293(in Chinese) [曹 珂、张乃尧、徐立文 2001 控制理论与应用 **18** 293]
- [17] Ren L H *et al* 2001 *Control and Decision* **16** 16(in Chinese) [任立红等 2001 控制与决策 **16** 16]
- [18] Wang Q J 1997 *Environmental Modeling & software* **12** 27

Fuzzy control of a chaotic system based on genetic algorithm

Wu Zhong-Qiang Ao Dun Liu Kun

(Institute of Electrical Engineering , Yanshan University , Qinhuangdao 066004 , China)

(Received 11 April 2003 ; revised manuscript received 13 May 2003)

Abstract

We consider the fuzzy control problem of a chaotic system , based on genetic algorithm. We apply the genetic algorithm to optimize the parameters of membership function of fuzzy controller , which integrates the global searching and high precision of genetic algorithm and the celerity of the fuzzy controller. The results of simulation show the effectiveness of this method.

Keywords : chaotic system , genetic algorithm , fuzzy control

PACC : 0545