

文章编号: 1001-0920(2002)03-0320-04

一种模糊神经网络控制器参数的混沌优化设计

李祥飞, 邹恩, 张泰山

(中南大学 信息科学与工程学院, 湖南 长沙 410083)

摘要: 通过模糊控制与神经网络相串联的方式构成模糊神经网络系统, 然后提出一种基于模拟退火策略的混沌优化算法, 将该算法引入模糊神经网络参数域中进行优化, 实现混沌粗搜索与细搜索相结合优化目的, 体现出具有更强的模糊神经网络参数全局最优解的搜索能力。采用该控制器对一个非线性对象进行控制, 仿真实验表明, 该方法能有效地实现模糊神经网络控制器参数优化, 控制具有无振荡、超调小、调节时间短等优点, 算法结构简单, 容易实现。

关键词: 模糊神经网络; 混沌优化; 模拟退火策略; 最优控制

中图分类号: TP 273

文献标识码: A

Optimization design of fuzzy neural networks controller parameter based on chaos

L I X iang-fei, Z O U E n, Z H A N G T ai-shan

(Information Science & Engineering Institute, Central South University, Changsha 410083, China)

Abstract: A fuzzy neural networks controller, which is constructed by cascade of fuzzy logical and feedforward neural networks, is introduced. Based on chaotic variable and annealing strategy, an optimization method is proposed to search for global optimal fuzzy neural networks controller. Controller parameters are optimized by means of combination of global and partial chaos searching. Because chaos has no repetition and randomness, it has higher ability of searching for optimal fuzzy neural networks. The method is applied to control a nonlinear system. Simulation results show that the optimization method is efficient to search for controller parameters, and the control has advantages of small overshoot, short setting-time. The algorithm has simple structure and is easy to realize.

Key words: fuzzy neural networks; chaos optimization; annealing strategy; optimal control

1 引言

模糊控制与神经网络协作控制系统是近年来人们颇为关注的研究领域。将模糊技术引入神经网络^[1-5], 可大大拓宽神经网络处理信息的能力, 使其既能处理精确信息, 也能处理模糊信息, 进一步提高控制系统的智能化程度。模糊控制和神经网络的组

合方式多种多样, 选择何种组合方式才能充分发挥系统处理信息能力, 改善系统的控制效果是研究的关键问题之一。同时, 模糊神经网络的参数确定也是影响系统控制效果的重要因素, 因此, 其参数的学习过程是一个函数参数优化问题。

混沌是存在于非线性系统中一种较为普遍的现象。混沌运动具有遍历性和随机性等特点, 它能在

收稿日期: 2001-03-23; 修回日期: 2001-06-13

作者简介: 李祥飞(1969—), 男, 湖南汨罗人, 博士生, 从事神经网络、混沌优化、最优控制等研究; 张泰山(1938—), 男, 福建南安人, 教授, 博士生导师, 从事模糊控制、专家系统、神经网络等研究。

定范围内按其自身规律不重复地遍历所有状态。采用混沌变量对模糊神经网络系统的参数整定进行优化搜索, 将比其它智能优化算法更具有优越性。本文提出的优化控制方案, 将混沌变量引入到模糊神经网络参数寻优方式中, 根据系统的性能指标, 采用混沌变量进行粗搜索寻优模糊神经网络参数, 然后在此基础上引入基于模拟退火策略的混沌细搜索, 最后搜索出的模糊神经网络参数便是全局最优的。

2 模糊神经网络系统的结构设计

模糊控制器作为非线性控制器, 用于模糊信息处理及逻辑推理, 而神经网络作为非线性函数逼近器, 用于计算最优控制。模糊控制器的参数 x_1 和 x_2 , 神经网络的权值 w_{ij} 和 v_j , 以及比例变换系数 p_u , 均采用基于模拟退火策略的混沌优化方法。这样就构成了最优 FZ-NN 控制器。模糊神经网络系统的结构如图 1 所示。

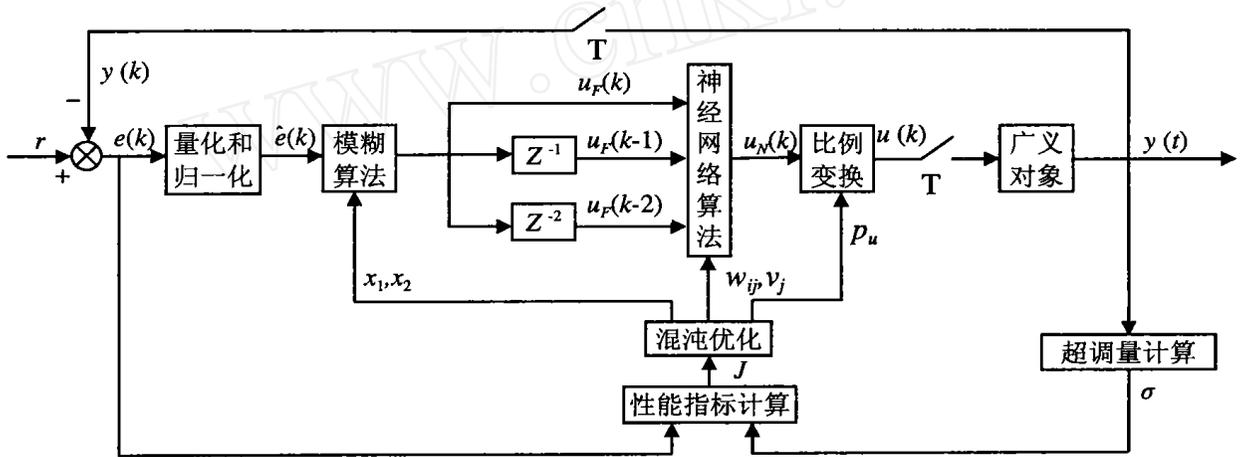


图 1 基于混沌优化的模糊神经网络系统结构

系统的误差变量信息经过量化和归一化处理, 通过模糊逻辑处理, 再送给神经网络。由于神经网络的激活函数采用 sigmoid 函数, 而模糊处理后的信号幅值位于 (0, 1) 区间内, 这样便避免了神经网络由于输入信号过大而导致输出趋于饱和的现象, 使其对输入变化不再敏感。最后把神经网络的输出通过比例放大送给被控对象。模糊神经网络的隶属函数和其神经网络的权值都取于 [0, 1] 区间, 采用基于模拟退火策略的混沌优化算法来确定, 从而保证系统控制效果处于最优状态。

$$p_e = |1/[r(0) - y(0)]| = |1/e(0)| \quad (2)$$

模糊逻辑中采用文献[6]的模糊推理, 其 3 个模糊规则为

R1: if (\hat{e} is NB) then (u_F is NB)

R2: if (\hat{e} is PB) then (u_F is PB)

R3: if (\hat{e} is AZ) then (u_F is AZ)

其中, NB 表示负最大, PB 表示正最大, AZ 表示接近零, \hat{e} 和 u_F 的隶属函数为三角形函数, 如图 2 所示。显然, 该模糊规则简单, 待确定参数少, 只有 x_1 和 x_2 两个变量, u_F 的隶属函数是关于 x_1, x_2 的函数。

3 模糊神经网络控制器的实现

3.1 模糊控制

首先对系统的误差变量 $e(k)$ 进行量化和归一化处理。误差变量 $e(k) = r(k) - y(k)$, 其中 $r(k)$ 为控制系统的设定值, $y(k)$ 为被控对象的输出响应。对 $e(k)$ 做如下处理, 使其分布在 [-1, 1] 区间^[6],

$$\hat{e}(k) = \begin{cases} 1, & p_e e(k) > 1 \\ p_e e(k), & |p_e e(k)| \leq 1 \\ -1, & p_e e(k) < -1 \end{cases} \quad (1)$$

其中参数 p_e 定义为

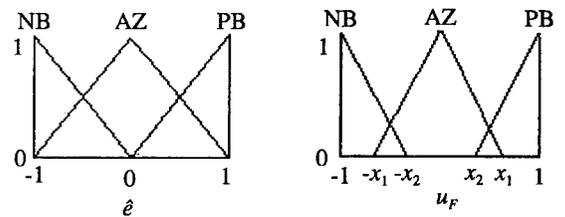


图 2 隶属函数曲线

模糊控制计算采用如下算法:

1) 当 $0 < \hat{x}_1 - \hat{x}_2 < 1$ 时, 则

$$u_F = \frac{z_5 e [3x_2 (2 - |e|) + z_5 (3 - e^2)]}{3[2x_1 (1 - e^2) + z_5 (2|e| - e^2)]} \quad (3)$$

2) 当 $0 < x_2 < x_1 < 1$ 时, 分3种情形来讨论:

$$0 < \hat{e} < z_0$$

$$u_F = \frac{e[3(1-x_1^2) + 3x_1^2 \hat{e} - x_1^2 e^2]}{3[2x_1 + 2(1-x_1) \hat{e} - x_1 e^2]} \quad (4)$$

$$z_0 < \hat{e} < 1 - z_0$$

$$u_F = \frac{\hat{e}[z_5 \hat{e} + [3x_2(2 - \hat{e}) + z_5(3 - \hat{e}^2)] - z_{470}[(3 - z_0)x_1 - z_4]]}{3 \hat{e} [2x_1(1 - \hat{e}^2) + z_5(2 \hat{e} - \hat{e}^2) - z_{470}]} \quad (5)$$

$$1 - z_0 < \hat{e} < 1$$

$$u_F = \frac{e\{z_4[3 - x_1^2(1 + \hat{e} + \hat{e}^2)] - z_{573}[z_1(2 + x_1 z_2) - z_5 z_3]\}}{3 \hat{e} [z_1(2 + x_1 z_2) - z_5 z_3]} - \frac{z_5 z_3 [3 - z_5(1 - \hat{e} + \hat{e}^2)]}{3 \hat{e} [z_1(2 + x_1 z_2) - z_5 z_3]} \quad (6)$$

其中 $z_0 \sim z_5$ 分别定义为

$$z_0 = (x_1 - x_2)/(1 + x_1 - x_2)$$

$$z_1 = 1 - \hat{e}, \quad z_2 = 1 + \hat{e}$$

$$z_3 = 1 - 2\hat{e}, \quad z_4 = x_1 - x_2$$

$$z_5 = 1 - 2\hat{e} \quad (7)$$

3.2 前向神经网络

设神经网络采用3层(3-6-1)多输入单输出前向神经网络, 其 I/O 关系为

$$u_N(k) = f[u_F(k), u_F(k-1), u_F(k-2)] \quad (8)$$

其中, $f(x)$ 为非线性函数, 隐层和输出层的激活函数都取 $h(x) = 1/(1 + e^{-x})$, 且隐层权值 $w_{i,j}$ 和输出层权值 v_j 满足下式

$$0 < w_{i,j}, v_j < 1 \quad (9)$$

3.3 输出比例变换

模糊神经网络控制器的输出 $u(k)$ 做如下比例变换

$$u(k) = p_u u_N(k) \quad (10)$$

且系数 p_u 满足

$$0 < p_u \leq \max(|u_{\min}|, |u_{\max}|)$$

其中 u_{\min} 和 u_{\max} 分别为被控对象允许输入数据的最小值和最大值^[6]。

3.4 控制系统的性能指标

在模糊神经网络控制器参数的优化中, 所选择的性能指标应当既能反映控制系统的动态特性, 又包含其稳态特性, 因此, 本文采用如下性能指标^[6]

$$\begin{cases} J = \min \left[a \sum_{k=0}^l |e(k)| / \max(e(k)) + b \sigma \right] \\ \text{s t} \quad 0 < x_1, x_2, w_{i,j}, v_j < 1 \\ \quad \quad 0 < p_u \leq \max(|u_{\min}|, |u_{\max}|) \end{cases} \quad (11)$$

其中 σ 表示百分制的超调, 对于这种目标函数, 当系统在阶跃输入时, 具有响应快、超调量小、选择性好等优点。

4 基于模拟退火策略的混沌优化算法

为找到模糊神经网络控制器参数的全局最优解, 将模拟退火策略引入混沌动力学中。本文采用 Logistic 映射

$$X_{n+1} = \mu X_n(1 - X_n)$$

$$0 < X_0 < 1, \quad n = 0, 1, \dots, N$$

若取 $\mu = 4$, 则完全处于混沌状态, X_n 在 $(0, 1)$ 范围内遍历。由于混沌状态具有对初始值极其敏感的特点, 因此选取不同的初始值便可得到不同轨迹的混沌变量。

考虑下列等式

$$X_{m,n}^* = X_m^* + z(t)X_n$$

$$m = 1, 2, \dots, k-1, \quad n = 0, 1, \dots, N \quad (12)$$

$$X_{q,n}^* = X_q^* + pz(t)X_n$$

$$p = \max(|u_{\min}|, |u_{\max}|), \quad n = 0, 1, \dots, N \quad (13)$$

$$z(t+1) = (1 - \beta)z(t) \quad (14)$$

其中, X^* 为经过混沌粗搜索获得的参数次优解, X_n 为由 Logistic 映射得到的混沌变量且其吸引子域映射关于原点对称, $\beta(0 < \beta < 1)$ 为时变参数 $z(t)$ 的衰减因子。

这种寻优算法实质上是利用混沌变量在某区间内具有遍历性和随机性的特点, 引入模拟退火策略, 从而实现了粗搜索与细搜索相结合的功能。即: 首先根据控制系统的性能指标, 通过混沌粗搜索找出模糊神经网络参数系的次优解, 然后采用基于模拟退火策略的时变参量 $z(t)$ 自动缩小混沌变量遍历的区域范围, 实现混沌细搜索的目的, 这样便可快速找到参数全局最优解, 大大加快了搜索速度。

基于模拟退火策略的混沌优化算法步骤如下:

Step1: 模糊神经网络待确定参数数目为 27 个, 在 $(0, 1)$ 区间随机选取 27 个不同的初始值, 分别代入 Logistic 映射, 则可得到 27 个混沌轨迹变量, 将其中一个混沌变量 $X_{q,n}$ 映射到 $(0, \max(|u_{\min}|, |u_{\max}|))$ 区间^[7];

Step2: 将 27 个混沌变量分别代入模糊神经网络参数系 $x_1, x_2, w_{i,j}, v_j$ 和 p_u 中, 根据式(11) 计算相应的系统性能指标 J , 从 N 个系统性能指标中找到

表 1 混沌优化后的神经网络隐层权值 w_{ij}

输入层节点 (i)	隐层节点 (j)					
	1	2	3	4	5	6
1	0.037 1	0.244 0	0.024 4	0.972 4	0.333 2	0.004 2
2	0.306 8	0.993 1	0.007 8	0.262 2	0.888 4	0.032 7
3	0.757 1	0.532 7	0.161 2	0.981 9	0.155 7	0.526 2

表 2 混沌优化后的神经网络输出层权值、隶属函数参数及比例变换系数

v_1	v_2	v_3	v_4	v_5	v_6	x_1	x_2	P_u
0.818 3	0.044 9	0.771 0	0.629 1	0.512 3	0.544 7	0.671 7	0.343 5	0.890 5

最小值, 其对应的模糊神经网络参数值即为次优解;

Step 3: 将 27 个参数次优解分别代入式 (12) 和 (13), 产生 27 个新变量, 分别代入模糊神经网络参数系 x_1, x_2, w_{ij}, v_j 和 p_u 中, 并计算相应的系统性能指标 J ;

Step 4: $t = t + 1$;

Step 5: 根据式 (14) 计算 $z(t)$, 若 $z(t) < Q$ (搜索终止条件) 则转 Step 6; 否则, 返回 Step 3;

Step 6: 找到系统性能指标的最小值, 其对应的模糊神经网络参数值即为全局最优解。

5 仿真研究

考虑非线性对象

$$y(k) = \frac{y(k-1)y(k-2)[y(k-1)-0.5]}{1+y^2(k-1)y^2(k-2)} + u(k)$$

被控对象允许输入的最小值和最大值分别取 $u_{\min} = 0, u_{\max} = 5$ 。模糊神经网络控制器中神经网络结构为 3-6-1, 则控制器待确定的参数共有 27 个, 所有参数初始值均取 (0, 1) 区间内的随机数, 式 (12) 和 (13) 中的混沌变量 X 映射到 (-0.5, 0.5) 区间, 式 (14) 中取 $\beta = 0.001, z(0) = 0.5$, 其终止条件取 $z(t) < 10^{-3}$, 式 (11) 中取 $a = b = 0.5, l = 100$, 即每 100 步混沌寻优一次。根据本文提出的控制算法, 采用

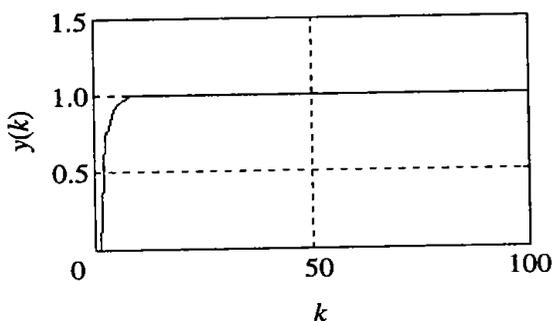


图 3 基于模糊神经网络的非线性系统控制结果

MA TLAB 语言进行仿真研究。混沌优化后的控制器参数如表 1、表 2 所示, 仿真结果如图 3 所示。

6 结 论

本文采用模糊控制与神经网络相串联的组合控制方式, 结合基于模拟退火策略的混沌优化算法, 构造了满足一种性能指标的最优模糊神经网络控制器。仿真实验表明, 该控制方案有效地实现了对非线性对象的最优控制, 控制具有无振荡、超调小等特点, 算法结构简单, 为工业过程非线性复杂系统的控制提供了一种有效的控制方案。

参考文献 (References):

- [1] 孙炜, 王耀南, 毛建旭 基于模糊 B 样条基函数神经网络控制的交流伺服系统[J]. 控制与决策 (Control and Decision), 2000, 5(3): 290-292
- [2] Beatrice Lazerini, Leonardo M, Marcello Chiaberge A neuro-fuzzy approach to hybrid intelligent control[J]. IEEE Trans on Industry Applications, 1999, 35 (2): 413-425
- [3] Magne Setnes, Hans Roubos GA-fuzzy modeling and classification: Complexity and performance [J]. IEEE Trans on Fuzzy System s, 2000, 8(5): 509-522
- [4] Yupu Yang, Xiaoming Xu, Wenyuan Zhang Design neural networks based fuzzy logic[J]. Fuzzy Sets and System s, 2000, 114(2): 325-328
- [5] 周志坚, 毛宗源 一种最优模糊神经网络控制[J]. 控制与决策 (Control and Decision), 2000, 15(3): 358-364
- [6] Baogang Hu, George K IM ann, Raymond G Gosine New methodology for analytical and optimal design of fuzzy PD controller [J]. IEEE Trans on Fuzzy System s, 1999, 7(5): 521-538
- [7] 李兵, 蒋慰孙 混沌优化方法及其应用[J]. 控制理论与应用 (Control Theory & Applications), 1997, 14 (4): 613-615