

文章编号: 1001-0920(2006)03-0281-04

基于模块化模糊子系统的分层模糊神经网络

刘芳, 刘民, 吴澄

(清华大学 a 自动化系, b C M S 工程研究中心, 北京 100084)

摘要: 提出一种基于模块化模糊子系统的分层模糊神经网络。该分层模糊神经网络基于高斯隶属函数, 且功能上等价于一个 TSK 模糊系统。这种分层神经网络在保留了传统模糊神经网络很多优点的同时有效地抑制了“维数灾”问题, 而且在模糊子系统中模糊规则的激活强度有所提高。仿真试验结果表明, 该方法能获得更为简洁有效的模糊规则集。

关键词: 聚类方法; 分层模糊神经网络; 进化规划

中图分类号: TP18 **文献标识码:** A

Hierarchical Fuzzy Neural Network Based on Module Fuzzy Subsystem s

L I U Fang, L I U M in, W U Cheng

(a Automation Department, b Computer Integrated Manufacturing System Engineering Research Center, Tsinghua University, Beijing 100084, China. Correspondent: L I U Fang, E-mail: liufang@cms.tsinghua.edu.cn)

Abstract: A hierarchical fuzzy neural network based on module fuzzy subsystems (HM-FNNs) is proposed, which is built based on ellipsoidal basis function and is equivalent to a Takagi-Sugeno-Kang fuzzy system functionally. The HM-FNNs not only remains the full benefits of a traditional FNNs but also suppress the effects of the unwanted phenomenon, “the curse of dimensionality.” It also offers one great advantage that all rule fire strengths are strong on average when passing through subsystem layers. The simulation results show that the proposed method can produce the compact and high performance fuzzy rule-base.

Key words: Clustering algorithm; Hierarchical fuzzy neural network; Evolutionary programming

1 引言

近 10 年来, 模糊神经网络的应用得到了飞速发展, 这是因为模糊神经网络既具有模糊控制简单有效的非线性控制作用, 又具有神经网络的学习和自适应能力^[1]。然而, 在模糊神经网络的应用过程中, 尤其对于多变量系统, 存在以下问题:

- 1) 模糊神经网络结构的优化, 亦即模糊规则数目的优化, 当系统输入变量较多时, 模糊规则的选取空间急剧增大, 相应神经网络的结构愈来愈复杂;
- 2) 模糊神经网络参数的优化, 亦即模糊规则前、后件系数的优化, 在模糊规则数目确定的情况下, 模糊控制系统的性能是由模糊规则的前、后件系数决定的, 这是一个多参数的寻优问题, 使用传统的方法

难以获得全局最优解

对于模糊神经网络的学习而言, 结构越复杂, 参数越多, 模糊神经网络的全局优化越困难。在大规模模糊神经网络的实际应用中, 由于各模糊分量之间可能存在耦合和相关, 使得系统辨识更加困难, 模糊系统工作效率较低。近年来, 许多学者从事了这方面的研究工作, 提出了一些分层、递阶模糊神经网络系统^[2,3], 以解决“模糊规则爆炸”问题, 但他们没有给出变量分层组合的原则。

为解决上述问题, 本文提出一种分层模糊神经网络, 并将其用于大规模模糊神经网络的训练, 旨在解决大规模模糊神经网络的规则爆炸问题, 以及学习速度较慢的问题。仿真试验证明该方法是有有效的。

收稿日期: 2005-01-24; 修回日期: 2005-05-06

作者简介: 刘芳(1971—), 女, 陕西长安人, 博士后, 从事神经网络、进化计算和数据挖掘等研究; 吴澄(1940—), 男, 浙江桐乡人, 中国工程院院士, 教授, 博士生导师, 从事系统集成方法与技术等研究。

2 基于聚类方法的输入变量分类方法

2.1 聚类方法

事实上,自然界以及人类现实生活中,对于大规模复杂问题,已经形成了许多行之有效的解决方法。例如,脑的视觉神经系统的不同组成部分完成视觉的不同方面(颜色、深度、运动、细节、形状等),是一种天然的分而治之、协同处理方法。而人类在进行决策时,也是首先归纳出事物在颜色、形状等方面的不同特征;然后在典型特征的基础上作出最终的决策。受这种思维模式的启示,作者提出在模糊系统中,首先利用聚类方法将输入变量进行分类,同类变量作为一个模糊子系统的输入,该模糊子系统的输出作为下一级模糊子系统的输入。依次类推,可以得到一个递阶的模糊系统。这种递阶模糊系统能够大大减少模糊规则的数目,同时能够提高模糊系统的效率。在本模糊系统中,要求对输入进行归一化处理。

设计聚类方法如下:

1) 设待聚类的输入变量为

$$x = [x_1, x_2, \dots, x_n]^T, \quad (1)$$

输入变量的采样值依次为 $x(1), x(2), \dots, x(k)$ 。其中: n 表示输入的维数, k 表示样本数。

2) 计算

$$d_{jl} = \sqrt{\sum_{i=1}^k |x_j(i) - x_l(i)|^2}, \quad j = 1, 2, \dots, n, l = 1, 2, \dots, n, l > j. \quad (2)$$

3) 从所有 d_{jl} 中选出最小的一个,并记下相应的 j 和 l 的值: j^* 和 l^* 。

4) 可知待聚类的输入变量中 x_{j^*} 和 x_{l^*} 最为相似,划为一类。

从模糊数学的角度分析上述思路:

If x_A 与 x_B 为同类且不妨设

$$\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \mu(x_A(i)) \cong \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \mu(x_B(i)), \quad (3)$$

则

$$\phi = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \mu(x_A(i)) \quad \mu(x_B(i)) \cong \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \mu(x_A(i)); \quad (4)$$

If x_A 与 x_c 为不同类且不妨设

$$\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \mu(x_A(i)) \gg \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \mu(x_c(i)), \quad (5)$$

则

$$\phi = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \mu(x_A(i)) \quad \mu(x_c(i)) \cong \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \mu(x_c(i)). \quad (6)$$

故 $\phi \gg \psi$

从而可知,如果将 x_A 与 x_B 作为模糊规则的前件,显然当 A 与 B 相似时,模糊规则的激励程度或模糊规则的完成程度相对较大。这正是进行模糊系统设计所期望的,也就是说此时模糊系统的工作效率得到提高。

2.2 分级模糊系统

本文的模糊系统模型,由如下一组模糊规则组成:

$$R^i: \text{ If } x_1 \text{ is } A_{i1} \text{ and } x_2 \text{ is } A_{i2} \text{ and } \dots \text{ and } x_r \text{ is } A_{ir}, \\ \text{ Then } y_i = p_i x_1 + q_i x_2 + \dots + r_i, \\ i = 1, 2, \dots, m. \quad (7)$$

其中: R^i 表示第 i 条模糊规则; x_k 为模糊模型的第 k 维个输入变量; A_{ij} 为隶属函数; y_i 为第 i 条规则的输出; p_i, q_i, \dots, r_i 为实系数, m 为正整数。

本文提出的模糊分级系统的结构如图 1 所示^[3],其中每个模糊子系统的结构如图 2 所示,该模糊子系统模型的收敛性已有文献证明^[4]。

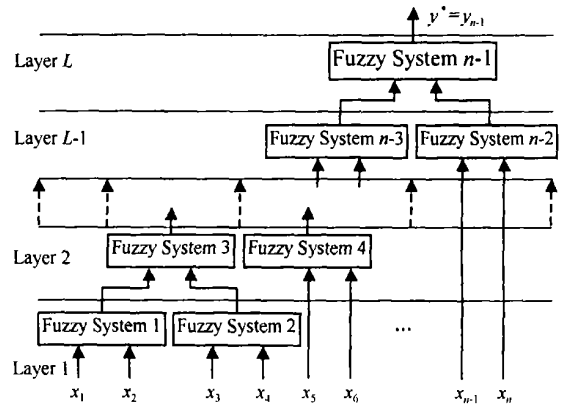


图 1 基于模块处理的分层模糊神经网络结构

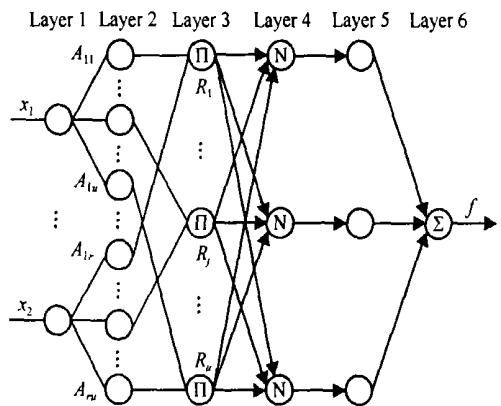


图 2 模糊子系统的结构

图 1 所示的基于模块处理的分层模糊神经网络之所以能够解决“模糊规则爆炸”问题,是因为每个模糊子系统的输入维数都很低。

3 模糊神经网络的学习算法

模糊神经网络的学习算法包括结构学习和参数学习两部分。本文利用进化规划算法训练模糊神经网络, 可以实现结构和参数的快速、全局寻优, 避免了 BP 算法易陷入局部最优的缺点。

3.1 一种改进的进化规划算法用于网络参数学习

进化规划是进化算法的一种, 与遗传算法类似, 同样经历产生初始群体-突变-计算个体适应度-选择-组成新群体; 然后反复迭代, 一步一步地进化, 直至找到最优解。标准进化规划仅给出了进化规划算法求解优化问题的一般过程, 而变异规则的设计通常是进化规划算法设计的关键^[5]。在进化过程中, 一方面, 结合搜索过程中所积累的知识, 使得突变具有一定的方向性, 有助于改善解的性能, 为此本文采用模拟最优化搜索中前进后退法的搜索方式进行搜索; 另一方面, 适当控制种群的分布密集程度(利用种群中每个个体与最优个体之间的距离来度量), 有助于防止早熟收敛。基于这一思想, 在标准进化规划的基础上, 提出进化规划算法的一种新的变异规则:

$$\text{If } f(X^n(k)) > f(X^{n-1}(k)),$$

$$d(X_{\text{best}}^n, X^n(k)) > a;$$

Then

$$X_j^{n+1}(k) =$$

$$X_j^n(k) + (X_{\text{best},j}^n - X_j^n(k))N_j(0, 1),$$

$$X_j^{n+1}(k) =$$

$$X_j^n(k) - (X_{\text{best},j}^n - X_j^n(k))N_j(0, 1);$$

Else If $d(X_{\text{best}}^n, X^n(k)) < a;$

Then

$$X_j^{n+1}(k) =$$

$$X_j^n(k) - (X_{\text{best},j}^n - X_j^n(k))N_j(0, 1),$$

$$\text{age}(n+1, k) = \text{age}(n, k) + 1;$$

Else

$$X_j^{n+1}(k) =$$

$$X_j^n(k) + \text{age}(n, k)bf(X_j^n(k))N_j(0, 1),$$

$$\text{age}(n+1, k) = \text{age}(n, k) + 1;$$

$$\forall k \in \{1, 2, \dots, N\}, \forall j \in \{1, 2, \dots, m\}.$$

(8)

其中: $d(\bullet)$ 表示计算欧氏距离; X_{best}^n 表示第 n 代的最优个体, $X_{\text{best},j}^n$ 表示 X_{best}^n 的第 j 个分量; $X^n(k)$ 表示第 n 代种群中的第 k 个个体, $X_j^n(k)$ 表示 $X^n(k)$ 的第 j 个分量; a, b 为常数, 其值可取 1, 适当调整 a, b 能改善算法搜索效果; N_p 为种群规模; m 表示 $X^n(k)$ 的

维数; $N_j(0, 1)$ 表示对遇到的每个个体中的每一维分量均更新的高斯随机变量; $f(\bullet)$ 为适应度函数; $\text{age}(\bullet)$ 为一修正因子。

上述变异规则的直观含义是, 种群中的每个个体都向当前最优解学习, 当整个种群过于集中时, 则产生一个随机扰动, 以跳出局部最优。另外, 这种改进的进化规划算法的实施过程与标准进化规划的实施过程相同^[5]。

3.2 网络结构学习

从本质上讲, 模糊模型就是一种插值拟合, 因此若能确定研究对象输出曲面的变化趋势, 则不仅能比较正确地建立系统的模糊模型, 而且可用较少的插值点来拟合, 从而所产生的规则数较少。基于这种思想, 文献[6~8]中提出一种利用局部极值点来确定模糊划分的方法, 其中文献[6,7]都未给出确定极值点的有效实用的方法, 因为在某些情况下(如遇到某个区域内的点都是相同的极值点时)生成的规则集将非常庞大以致不可用。文献[8]提出了一种确定极值点的方法, 但要经过数据预处理以及无用极值点剔除等操作才能有效。本文采用极值聚类^[9]的方法确定输入变量的初试模糊划分。

结构学习过程中, 规则的产生和删除方法参见文献[5]。

4 仿真试验

本文以如下非线性系统辨识问题为例^[10]:

$$y(t+1) =$$

$$\frac{y(t)y(t-1)[y(t)+2.5]}{1+y^2(t)+y^2(t-1)} + u(t),$$

被辨识系统模型形式为

$$\hat{y}(t+1) = f(y(t), y(t-1), u(t)).$$

其中: $u(t) = \sin(2\pi t/25)$, 系统平衡点状态为 $(0, 0)$ 和 $(2, 2)$ 。

试验条件如下: 种群规模为 50, 选择策略参数 $q = 0.9$, 网络结构增删办法为每次可增加或删减单元个数为 1, 试验终止条件为结构迭代次数超过 1 000 次。

用本文方法辨识上述系统为两个子模块的模糊系统, 共得到 6 条规则, 系统累计误差不大于 0.8, 而文献 10 中的学习结果为 22 条模糊规则。该模糊系统结构与图 1 类似, 此略。

5 结 论

本文提出了一种基于模块化处理的分层模糊神经网络的模糊建模方法, 用于处理输入变量维数较高的模糊问题。仿真结果表明, 该方法能够解决“模糊规则爆炸”问题, 并能产生简洁有效的模糊规则集。针对大规模问题, 如何进一步建立具有实时更新

性能的自适应模糊神经网络, 如何避免模糊规则不完全而带来的网络振荡等问题是下一步要做的研究工作

参考文献(References)

- [1] Rong-Jong Wai, Faa-Jeng Lin, Rou-Yong Duan. Robust Fuzzy Neural Network Control for Linear Ceramic Motor Drive via Backstopping Design Technique [J]. *IEEE Trans Fuzzy System*, 2002, 10(1): 102-112
- [2] Waratt Rattasiri, Saman K Halgamuge. Computationally Advantageous and Stable Hierarchical Fuzzy Systems for Active Suspension [J]. *IEEE Trans Industrial Electronics*, 2003, 50(1): 48-61
- [3] 孙瞿, 孙衢. 复杂非线性系统的模糊控制及其优化研究 [D]. 西安: 西安交通大学系统工程研究所, 2000
(Sun Q, Sun Q. *Research on Fuzzy Control and Optimization to Complex Non-linear System* [D]. Xi'an: Systems Engineering Institute in Xi'an Jiaotong University, 2000)
- [4] Lin Y H, Cunningham G A. A New Approach to Fuzzy-neural System Modeling [J]. *IEEE Trans Fuzzy System*, 1995, 3(2): 190-197
- [5] Lee C-Y, Yao X. Evolutionary Programming Using Mutations Based on the Lévy Probability Distribution [J]. *IEEE Trans on Evolutionary Computation*, 2004, 8: 1-13
- [6] 吴勇, 沈理. 模糊控制规则的自动生成 [J]. 兰州大学学报(自然科学版), 1996, 32(专刊): 552-525
(Wu Y, Shen L. Automatically Generating Fuzzy Control Rules [J]. *J of Lanzhou University (Natural Sciences)*, 1996, 32(S): 522-525)
- [7] 黄京炜, 王众托. 一种综合模糊知识表示与反馈学习的模糊神经网络模型 [A]. *智能控制与自动化* [C]. 北京: 科学出版社, 1993: 493-499
(Huang J W, Wang Z T. A Fuzzy Neural Network Model Integrating Expression of Fuzzy Knowledge with Feedback Learning [A]. *Intelligence Control and Automation* [C]. Beijing: Science Publish, 1993: 493-499)
- [8] 王剑, 沈理, 巢菊芬. 一种高效的模糊规则自动生成方法 [J]. *计算机研究与发展*, 1999, 36(2): 139-143
(Wang J, Shen L, Chao J F. An Efficient Method of Fuzzy Rules Generation [J]. *J of Computer Research and Development*, 1999, 36(2): 139-143)
- [9] 李人厚. *智能控制理论和方法* [M]. 西安: 西安电子科技大学出版社, 1999: 142-143
(Li R H. *The Theory and Method of Intelligent Control* [M]. Xi'an: Xidian University Publisher, 1999: 142-143)
- [10] Chao C T, Chen Y J. Simplification of Fuzzy-neural Systems Using Similarity Analysis [J]. *IEEE Trans on Systems, Man and Cybernetics, Part B*, 1996, 26(2): 344-354

下 期 要 目

无人驾驶直升机飞行控制技术综述	曾丽兰, 等
不确定性多属性决策中的 ER 方法改进	贺金凤, 等
实时无等待 HFS 调度的一种拉格朗日松弛算法	轩 华, 等
带有未知死区模型的鲁棒自适应模糊控制	张天平, 等
传感器网络中能量最优化的聚类轮换算法	王永才, 等
基于内容分类的乘性水印最优检测	王金伟, 等
离散非线性规划问题的改进遗传算法	何大阔, 等
基于方形邻域的离群点查找新方法	黄添强, 等
生产商竞争的供应链系统退货决策分析	徐经意, 等
基于遗传算法的应用层多播路由方案	程 鹏, 等