

文章编号:1000-582X(2005)10-0082-04

# 基于自适应学习速率法的补偿模糊神经网络

汪纪锋, 蒋玉莲

(重庆邮电学院 自动化学院, 重庆 400065)

**摘要:**为克服常规网络收敛速度慢、无法结合专家知识等缺点,引入补偿模糊神经元,结合模糊系统强大的知识表达能力和神经网络优秀的自学习能力,并利用自适应学习速率法动态地改变学习率.提出了一种新型的基于自适应学习速率法的补偿模糊神经网络,并将其应用到实际例子中.结果证明,它不仅能在在线适当调整参数,还能动态地优化相应的模糊推理,加快训练速度.

**关键词:**神经网络;补偿模糊神经网络;自适应学习速率法;模糊逻辑

**中图分类号:**TP15;TP183

**文献标识码:**A

近年来,模糊逻辑与神经网络技术相结合的研究已受到人们的广泛关注.两者结合的产物——模糊神经网络集模糊系统强大的知识表达能力和神经网络灵活的分布式信息存储及优秀的学习能力于一体<sup>[1]</sup>.正是基于这样的思想,笔者提出了一种新型的模糊神经网络——基于自适应学习速率法的补偿模糊神经网络来在线调整参数,从而达到快速准确地辨识系统的目的.应用证明,该方法具有运算速度快,逼近误差小的优点.

## 1 补偿模糊神经网络

### 1.1 定义

补偿模糊神经网络(Compensatory Fuzzy Neural Network)是一个结合了补偿模糊逻辑和神经网络的混合系统,由面向控制和面向决策的模糊神经元(分别执行模糊化运算、模糊推理、补偿模糊运算和反模糊化运算)所构成<sup>[2-3]</sup>.与常规模糊神经网络相比,补偿模糊神经网络能从初始正确定义(或错误定义)的模糊规则进行训练,使网络容错性更高,系统更稳定;且模糊运算采用了动态的、全局优化运算,神经网络的学习算法中亦动态地优化了补偿模糊运算,因此网络更适应、更优化.

### 1.2 结构

补偿模糊神经网络有 5 层结构:输入层、模糊化

层、模糊推理层、补偿运算层、反模糊化层<sup>[3]</sup>.层与层之间依据模糊逻辑系统的语言变量、模糊 IF-THEN 规则、最坏-最好运算、模糊推理方法、反模糊函数所构建,其结构图如下:

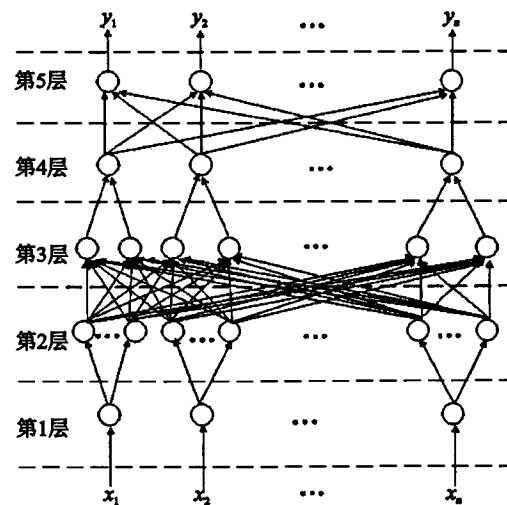


图 1 补偿模糊神经网络结构图

图 1 中,第 1 层的各个结点直接与输入向量相连接;第 2 层的每一个结点代表一个语言变量值,其作用是计算各输入向量属于各语言变量值模糊集合的隶属函数<sup>[4]</sup>;第 3 层的每一个结点代表一条模糊规则,其作用是匹配模糊规则,并计算出每条规则的适用度;第 4 层神经元进行补偿模糊运算;第 5 层神经元进行反模糊化运算,获得网络输出的精确值.

\* 收稿日期:2005-05-16

基金项目:重庆市科委科技攻关资助项目(2002-3303)

作者简介:汪纪锋(1944-),男,重庆人,重庆邮电学院教授,博士生导师,研究方向:控制理论及应用.

## 2 基于自适应学习速率法的补偿模糊神经网络

### 2.1 自适应学习速率法

标准的梯度下降法在训练过程中存在着收敛速度慢等问题<sup>[5]</sup>. 而基于此改进的自适应学习速率法(Adaptive Learning Rate Method)则通过恰当选择学习率来改善收敛速度. 其调节准则是:检查权值的修正值是否真正降低了误差函数<sup>[6]</sup>. 当新误差超过了旧误差一定的倍数时,学习速率将减少,否则其学习速率保持不变. 当新误差小于旧误差时,学习速率将被增加. 此方法可以保证网络总是以最大的可接受的学习速率进行训练.

### 2.2 基于自适应学习速率法的补偿模糊神经网络算法

借鉴利用自适应学习速率法对BP网络进行改进的思想<sup>[7-8]</sup>,笔者提出一种新型的模糊神经网络——基于自适应学习速率法的补偿模糊神经网络. 在这种网络中,学习速率取为动态常数,籍此提高收敛速度. 其学习训练过程中,一个迭代可分为正向的补偿模糊推理和逆向的误差传播两个过程. 学习算法流程图如图2所示.

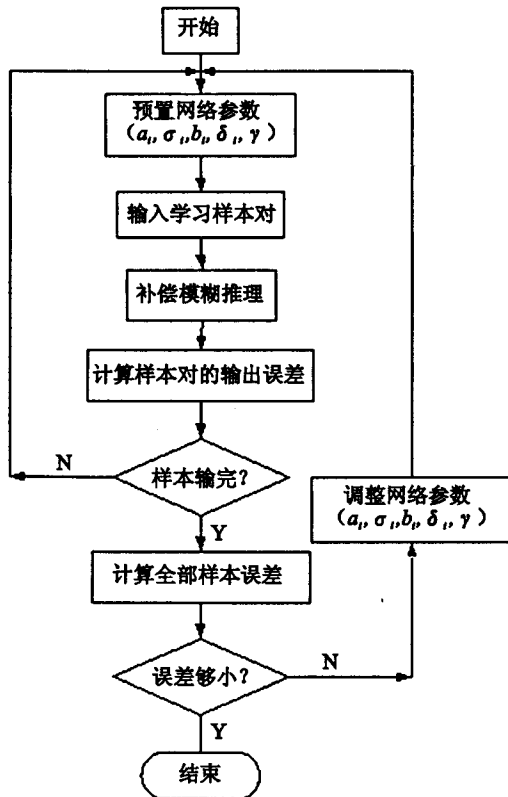


图2 基于自适应学习速率法的CFNN的学习算法流程图

系统是一个由单值模糊产生器、高斯型隶属函数、乘积推理规则、消极-积极补偿运算以及改进型重心反模糊化器构成的补偿模糊神经网络,其具有  $N$  输入 1 输出,定义  $n$  维输入数据为  $x^p (x^p = (x_1^p, \dots, x_n^p))$ , 一维输出数据为  $y^p, p = 1, 2, \dots, N$ .

#### 1) 正向的补偿模糊推理.

该系统的  $M$  条模糊 IF-THEN 规则,可表示为:

$FR^k$ : IF  $x_1$  is  $A_1^k$  and  $\dots$  and  $x_n$  is  $A_n^k$ , THEN  $y$  is  $B^k$  ( $A_i^k$  是论域  $U$  上的模糊集;  $B^k$  是论域  $V$  上的模糊集;  $x_i$  和  $y$  是语言变量;  $i = 1, 2, \dots, n$ ;  $k = 1, 2, \dots, m$ ).

在第2层取输入、输出变量的模糊隶属函数为高斯型:

$$\mu_{A_i^k}(x) = \exp\left[-\left(\frac{x_i - a_i^k}{\sigma_i^k}\right)^2\right],$$

$$\mu_{B^k}(x) = \exp\left[-\left(\frac{y - b^k}{\delta^k}\right)^2\right],$$

上式中,  $a$  与  $\sigma$  为输入隶属函数的中心和宽度;  $b$  与  $\delta$  为输出隶属函数的中心和宽度.

在第3层,论域  $U (U = U_1 \times U_2 \times \dots \times U_n)$  中的一个输入模糊子集  $A'$ , 根据第  $k$  个模糊规则,在输出论域  $V (V = V_1 \times V_2 \times \dots \times V_n)$  中产生一个输出模糊子集  $B'$ . 模糊推理采用最大-代数积 ( $\sup(\cdot)$ ) 合成运算,则由模糊推理规则所导出的  $V$  上的模糊集合  $B'$  为:

$$\mu_{B'^k}(y) = \sup_{x \in U} (\mu_{A_1^k \times \dots \times A_n^k \rightarrow B^k}(x, y) \cdot \mu_{A'}(x)).$$

在第4层,采用模糊蕴涵积运算、消极运算、积极运算以及补偿运算,可得:

$$\mu_{B'^k}(y) = \sup_{x \in U} \{ \mu_{B^k}(y) \mu_{A'}(x) [ \prod_{i=1}^n \mu_{A_i^k}(x_i) ]^{1-\gamma+\gamma/n} \},$$

其中:  $\gamma$  为补偿度,  $\gamma \in [0, 1]$ .

再采用单值模糊化  $\mu_{A'}(x) = 1, \mu_{B'}(b^k) = 1$ , 则

$$\mu_{B'^k}(b^k) = [ \prod_{i=1}^n \mu_{A_i^k}(x_i) ]^{1-\gamma+\gamma/n},$$

令其等于  $Z^k$ , 有

$$\mu_{B'^k}(b^k) = [ \prod_{i=1}^n \mu_{A_i^k}(x_i) ]^{1-\gamma+\gamma/n} = Z^k.$$

在第5层,进行反模糊化运算,得到反模糊化数为:

$$f(x) = \frac{\sum_{k=1}^m b^k \delta^k [ \prod_{i=1}^n \mu_{A_i^k}(x_i) ]^{1-\gamma+\gamma/n}}{\sum_{k=1}^m \delta^k [ \prod_{i=1}^n \mu_{A_i^k}(x_i) ]^{1-\gamma+\gamma/n}} = \frac{\sum_{k=1}^m b^k \delta^k Z^k}{\sum_{k=1}^m \delta^k Z^k}.$$

#### 2) 逆向的误差传播过程.

目标函数定义为:  $E^p = \frac{1}{2} [f(x^p) - y^p]^2$ . 设  $\eta$  是学习率,  $t=0, 1, \dots$ , 是训练步数. 这里采用的是自适应学习速率方法. 其调整公式为:

- 当  $E(k) < E(k-1)$ , 则  $\eta(k+1) = 1.05\eta(k)$ ;
- 当  $E(k) > 1.04E(k-1)$ , 则  $\eta(k+1) = 0.7\eta(k)$ ;
- 其它, 则  $\eta(k+1) = \eta(k)$ .

以下便是基于上式, 不断改变学习率  $\eta$ , 自适应地进行训练的过程:

训练输出隶属函数的中心:

$$b^k(t+1) = b^k(t) - \eta \left. \frac{\partial E^p}{\partial b^k} \right|_t = b^k(t) - \eta \frac{[f(x^p) - y^p] \delta^k Z^k}{\sum_{k=1}^m \delta^k Z^k} \Bigg|_t$$

训练输出隶属函数的宽度:

$$\delta^k(t+1) = \delta^k(t) - \eta \left. \frac{\partial E^p}{\partial \delta^k} \right|_t = \delta^k(t) - \eta \frac{[f(x^p) - y^p] [b^k - f(x^p)] Z^k}{\sum_{k=1}^m \delta^k Z^k} \Bigg|_t$$

训练输入隶属函数的中心:

$$a_i^k(t+1) = a_i^k(t) - \eta \left. \frac{\partial E^p}{\partial a_i^k} \right|_t$$

训练输入隶属函数的宽度:

$$\sigma_i^k(t+1) = \sigma_i^k(t) - \eta \left. \frac{\partial E^p}{\partial \sigma_i^k} \right|_t$$

训练补偿度:  $\gamma \in [0, 1]$ , 定义  $\gamma = \frac{c^2}{c^2 + d^2}$ ,

有 
$$\frac{\partial r}{\partial c} = \frac{2cd^2}{(c^2 + d^2)^2}$$

于是 
$$c(t+1) = c(t) - \eta \left. \frac{\partial E^p}{\partial c} \right|_t = c(t) - \eta \frac{\partial E^p}{\partial r} \cdot \frac{\partial r}{\partial c} \Bigg|_t = c(t) - \eta \left\{ \frac{2c(t)d^2(t)}{[c^2(t) + d^2(t)]^2} \right\} \frac{\partial E^p}{\partial \gamma} \Bigg|_t$$

同理 
$$d(t+1) = d(t) - \eta \left. \frac{\partial E^p}{\partial d} \right|_t = d(t) - \eta \frac{\partial E^p}{\partial r} \cdot \frac{\partial r}{\partial d} \Bigg|_t =$$

$$d(t) + \eta \left\{ \frac{2d(t)c^2(t)}{[c^2(t) + d^2(t)]^2} \right\} \frac{\partial E^p}{\partial \gamma} \Bigg|_t$$

$$\gamma(t+1) = \frac{c^2(t+1)}{c^2(t+1) + d^2(t+1)}$$

$$\left( \frac{\partial E^p}{\partial \gamma} = \frac{[f(x^p) - y^p] [b^k - f(x^p)] \left[ \frac{1}{n} - 1 \right] \delta^k Z^k \ln \left[ \prod_{i=1}^n u_{A_i^k}(x_i^p) \right]}{\sum_{k=1}^m \delta^k Z^k} \right)$$

### 3 应用及仿真

根据基于自适应学习速率法的补偿模糊神经网络的原理, 对于某个两输入一输出系统(其函数表达式近似表示为:  $y = \frac{2\cos(x_1)}{e^{x_2/5}} + \sin(x_1) + 0.98$ ), 补偿度  $\gamma$  为 0.5. 利用 MATLAB 语言编制程序来对系统进行逼近仿真, 结果如图 3、图 4 所示.

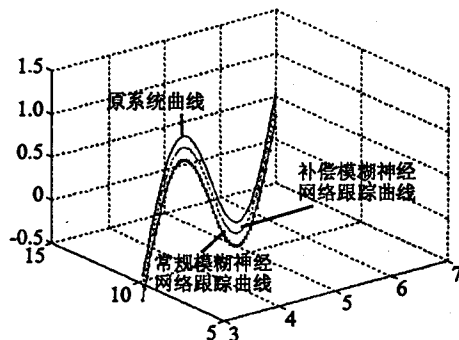


图 3 系统跟踪曲线图

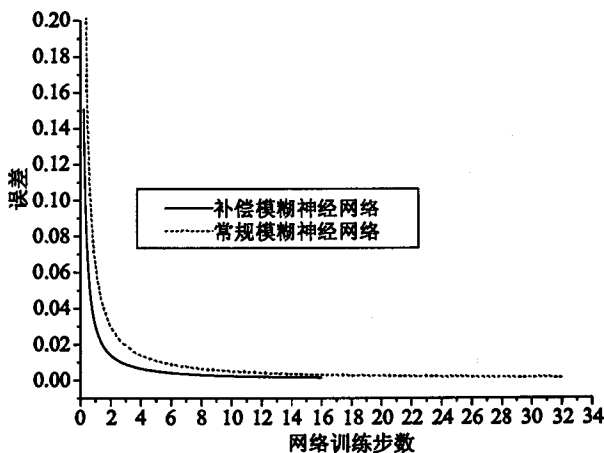


图 4 网络训练步数 X-误差 Y 曲线图

图 3 中, 实线为原系统的曲线, 虚线为基于自适应学习速率法的补偿模糊神经网络的跟踪曲线, “S” 线为常规模糊神经网络的跟踪曲线. 可看到: 基于自适应学习速率法的补偿模糊神经网络比常规模糊神经网络的误差更小, 跟踪性能更好.

图 4 中, 实线代表基于自适应学习速率法的补偿模糊神经网络训练步数 X-误差 Y, 虚线代表常规模糊神经网络训练步数 X-误差 Y 曲线. 从中, 可清晰地看到: 基于自适应学习速率法的补偿模糊神经网络比常规模糊神经网络的训练速度更快.

### 4 结论

相对于常规模糊神经网络而言, 基于自适应学习速率法的补偿模糊神经网络性能更优, 它不仅能在线

适当调整输入、输出模糊隶属函数,还能借助于补偿逻辑算法动态地优化适应的模糊推理,其网络参数物理含义明确,训练速度加快。

#### 参考文献:

- [1] 张乃尧,阎平凡. 神经网络与模糊控制[M]. 北京:清华大学出版社,1998.
- [2] SEKER, EVANS, AYDIN, et al. Compensatory Fuzzy Neural Networks-based Intelligent Detection of Abnormal Neonatal Cerebral Doppler Ultrasound Waveforms [J]. IEEE Transactions on Information Technology in Biomedicine, 2001,3(5):187-194.
- [3] ZHANG YAN-QING, KANDEL. Compensatory Neurofuzzy Systems with Fast Learning Algorithms [J]. IEEE Transactions on Neural Networks, 2002,1(9):83-105.
- [4] 闻新,周露,李翔,等. MATLAB神经网络仿真与应用[M]. 北京:科学出版社,2003.
- [5] 雷华,王明渝. 基于神经网络的速度估计方法[J]. 重庆大学学报(自然科学版), 2004,27(2):107-110.
- [6] 丛爽. 神经网络、模糊系统及其在运动控制中的应用[M]. 合肥:中国科学技术大学出版社,2001.
- [7] LIN FAA-JENG, WAI RONG-JONG. Adaptive Fuzzy-neural-network Control for Induction Spindle Motor Drive[J]. IEEE Transactions on Energy Conversion, 2002, 4(17):507-513.
- [8] ZHENG PEI, KEYUN QIN, YANG XU. Dynamic Fuzzy Neural-network Identification and Its Application Systems [J]. IEEE International Conference on Man and Cybernetics, 2003,10(5):4974-4979.
- [9] 丛爽. 面向MATLAB工具箱的神经网络理论与应用[M]. 合肥:中国科学技术大学出版社,2003.
- [10] 楼顺天. 基于MATLAB的系统分析与设计:神经网络[M]. 西安:西安电子科技大学出版社,1998.

## Design and Application of Compensatory Fuzzy Neural Network Based on Adaptive Learning Rate Method

WANG Ji-feng, JIANG Yu-lian

(Institute of Automation, Chongqing University of Post & Telecommunications, Chongqing 400065, China)

**Abstract:** To overcome the disadvantages of general networks such as slow convergence speed and being unable to combine with the expert knowledge etc, the authors introduces compensatory fuzzy neural cells, integrate the powerful knowledge expressiveness of fuzzy system and the excellent self-learning of neural network, and present a novel Compensatory Fuzzy Neural Network (CFNN) based on Adaptive Learning Rate Method which changes the learning rate using Adaptive Learning Rate Method in dynamic way. Finally this method is applied to the actual case. The result proves that it not only can adjust parameters properly on line, but also can optimize relevant fuzzy reasoning in dynamic way, fasten training rate.

**Key words:** neural network; compensatory fuzzy neural network(CFNN); adaptive learning rate method; fuzzy logic

(编辑 吕赛英)