第36卷 第7期

设计研究与应用

# 基于改进 BP 的神经网络模型参考自适应控制

张敏 1. 徐启华 1,2

(1.中国矿业大学 信息与电子工程学院, 江苏 徐州 221000; 2.淮海工学院 电子工程学院, 江苏 连云港 222005)

摘 要:由于传统 BP 算法存在收敛速度慢,容易陷入局部极小值等弊端,目前的 BP 优化算法又使得控制过程变得复杂,继而基于 BP 神经网络的模型参考自适应控制过程也存在实时性差,收敛性慢,精度不高等不足。现针对改进的 BP 算法和非线性系统的可逆性,分析设计了一种基于激励函数自寻优的 BP 网络模型参考自适应控制,并通过 Matlab 仿真结果表明,在满足控制精度的情况下控制系统中的辨识器和控制器效果都很理想。因此,对工程应用有很大的实际参考利用价值。

关键词: BP 算法;神经网络;模型参考自适应控制;激励函数; Matlab 仿真

中图分类号: TP183 文献标识码: A **DOI**: 10.3969/j.issn,1003-6970.2015.07.024

本文著录格式: 张敏,徐启华. 基于改进 BP的神经网络模型参考自适应控制[J]. 软件,2015,36 (7):118-123

## The Improved BP Neural Network Model Reference Adaptive Control

ZHANG Min<sup>1</sup>, XU Qi-hua<sup>1,2</sup>

(1. College of Information and Electronic Engineering, China University of Mining and Technology, Xuzhou 221000, China; 2. School of Electronic Engineering, Huaihai Institute of Technology, Lianyungang 222005, China)

[Abstract]: Due to the traditional BP algorithm's some defects like slow convergence speed, easily falling into local minimum, the process is made more complex by the improved BP algorithm. Thus model reference adaptive control based on BP neural network also has slow convergence, poor real-time and low accuracy. In this paper, combined with the improved BP algorithm and the reversibility of nonlinear system, the author puts forward a kind of model reference adaptive control based on BP network that transfer function can optimized by itself. And the Matlab simulation result shows that, in the case of meeting the control precision, the control effect of the identifier and the controller are very ideal. Therefore, this method is valuable for practical application of engineering.

**[Key words]**: BP algorithm; Neural network; Model reference adaptive control; Transfer function; Matlab simulation

## 0 引言

在现代实际工业生产中,被控对象存在各种不确定性和时变性,因而使得工业控制过程变得繁琐复杂。针对线性时变系统或非线性系统的控制,人们不断的研究其解决方法,Narendra 等人提出了神经网络控制和模型参考自适应控制相结合的神经网络模型参考自适应控制(Neural Network Model Reference Adaptive Control ---NNMRAC)<sup>[1-2]</sup>方法。近来神经网络的研究已成为智能控制研究的热点,因其自身具有自学习的特点,可以有效地解决不确定和复杂的非线性控制系统控制问题。因此将神经网络与模型参考自适应控制相结合,组成基于神经网络的模型参考自适应控制系统,进而使其在复杂非线性过程控制中具有不可替代的优势<sup>[3]</sup>。目前神经网络模型参考自适应控制系统中应用最广泛的神经网络是 BP 神经网络。

BP 神经网络(Back Propagation Network)是一种多层前向型神经网络也被称为反向传播网络,在 BP 网络中信号是前向传播的,而误差是反向传播的<sup>[4-5]</sup>。一般三层 BP 网络结构就可以使其对有限个不连续点的函数进行逼近,也可以逼近任意非线性映射关系。然而,传统 BP 神经网络算法存在很多缺点,各种优化

**作者简介:** 张敏, 硕士研究生, 主研领域: 人工神经网络, 智能故障诊断; 徐启华, 博士, 教授, 研究生导师, 主研领域: 智能故障诊断与容错控制

改进的 BP 算法也层出不穷。就目前的 BP 优化算法,常常忽略算法本身存在的自适应、自学习等特点,改进算法如蚁群算法和粒子群算法大都是直接对 BP 神经网络中的参数进行训练。文中采用基于激励函数自寻优的方法改进 BP 神经网络模型参考自适应系统的控制方法,改进后的 BP 神经网络模型参考自适应控制方法收敛速度快、精度高,系统控制过程中被控对象的输出能够很好地跟随参考模型的输出,具有很好的控制效果,在实际工程中也可以得到很好的验证和应用。

## 1 BP 神经网络结构及其算法改进

BP 神经网络已经被证明具有很强的学习能力,能够逼近任意连续有界的非线性函数<sup>[6-8]</sup>。一般的 BP 神经网络包括输入层、隐含层、输出层,其中隐含层可以有多个。其中隐含层和输出层的激励函数通常直接采用 Sigmoid 函数,其函数表达式为:

$$f(x) = \frac{1}{1 + e^{-\beta x}}, (\beta > 0) \tag{1}$$

上式中  $\beta$  称为 Sigmoid 函数的斜率参数,不同的  $\beta$  取值,引起曲线的弯曲程度不同, $\beta$  越大,f(x)图形 越陡峭。当斜率参数  $\beta$  接近无穷大时,Sigmoid 函数将转化成简单的阶跃函数。但与阶跃函数不同,Sigmoid 函数对应于  $0 \sim 1$  之间的一个连续取值区域,但阶跃函数只 输入层 隐含层 输出层

一般的三层前馈神经网络拓扑结构如图 1 所示。

输入向量为  $X_i = (x_1, x_2..., x_n)^T$  , i=1,2,...,n , n 表示输入神经元的个数,隐含层的输出向量为  $Y_j = (y_1, y_2,..., y_m)$  , j=1,2,...,m, 输出层的输出向量为  $O_k = (o_1,o_2,...,o_l)$  , k=1,2,...,l 。每层之间的权值用 W 表示, $W_{ij}$  为隐含层和输入层之间的权值, $W_{ik}$  为输出层和隐含层之间的权值。

对于输出层,有

对应 0 和 1 两个取值。

$$o_k = f(net_k), \quad k = 1, 2, ..., l$$
 (2)

$$net_k = \sum_{j=0}^{m} w_{jk} y_j$$
,  $j = 1, 2, ..., m$ ,

$$k = 1, 2, ..., l$$

对于隐含层,有

$$y_{j} = f(net_{j}), \quad j = 1, 2, ..., m$$
 (4)

$$net_{j} = \sum_{i=0}^{n} w_{ij} x_{i}$$
,  $i = 1, 2, ..., n$ ,

$$j = 1, 2, \dots, m \tag{5}$$

这里对上述 BP 算法的改进,也就是通过改进激励函数 f(x),进而优化神经网络,最终使得基于神经网络的模型参考自适应控制在不增加复杂性及确保精度的情况下,系统性能进一步得到提高改善。由于 BP 神经网络产生局部极小值的一个重要原因就是误差函数是一个以 Sigmoid 函数为自变量的非线性函数,而 Sigmoid 函数存在饱和区,所以改进和优化激励函数对于 BP 算法的应用是至关重要的。通过实验发现,在函数表达式中增加一个控制参数  $\eta$ ,可以控制激励函数的压缩程度。改进的激励函数形式如下:

$$f(x) = \frac{1}{1 + \eta e^{-\beta x}}, (\eta > 0, \beta > 0)$$
(6)

上式描述的 f(x)的定义域为( $-\infty$ ,  $+\infty$ ),值域为(0,1),函数也是单调的,满足激励函数的条件。以往出现的改进 BP 算法学习过程中, $\eta$  和  $\beta$  的赋值都是经验值,本文使得  $\eta$  是一个可以自适应的参数,就是通过判断网络不断学习过后的权值能否减小网络误差来自动的调整  $\eta$  的值<sup>[9]</sup>,其调整方法为:

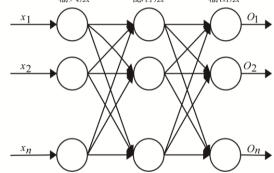


图 1 三层前馈神经网络拓扑结构图

Fig.1 Topological structure diagram of three layer feedforward neural network

(3)

$$\eta(t+1) = \begin{cases} a\eta(t) & E(t) > E(t-1) \\ b\eta(t) & E(t) \le E(t-1) \end{cases}$$
(7)

其中,a<1,b>1,E 为网络误差,t 指迭代次数。在误差信号反向传播时,自适应参数  $\eta$  是随着误差信号不断进行修正的。

此算法可以提高 BP 网络的收敛速度,同时也避免了陷入局部极小值。文中使其结合模型模型参考自适应控制明显提高了系统的整体控制效果,进一步验证了算法改进的实用性,与传统 BP 算法相比,改进后的算法在实际运用中更具有意义。

## 2 神经网络模型参考自适应控制系统结构

典型的神经网络模型参考自适应控制系统结构如图 2 所示。

图 2 中 NNC(Neural Network Controller)为神经网络控制器,NNI(Neural Network Identifier)为神经网络辨识器,r 为参考输入,u 为 NNC 的输出, $y_m$  和 y 分别为参考模型和被控对象的输出, $e_c$  是参考模型输出和被控对象输出之差, $e_i$  是被控对象输出和辨识器输出之差,NNC 的权值修正目标是使  $e_c$  达到系统设定值(理想值为零),NNI 的目标也是使  $e_i$  尽可能最小(理想值为零),且为 NNC 传递梯度信息 [10]。

神 经 网 络 辨 识 器 NNI 的 训 练 误 差 表 示 为  $e_i = \hat{y}(k+1) - y(k-1)$ ,其中,y(k)当前 k 时刻被控对象的输出

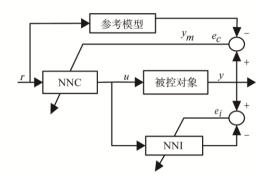


图 2 神经网络模型参考自适应控制系统结构图 Fig.2 Structure diagram of the neural network model reference adaptive control system

数据,  $\hat{y}(k+1)$ 为下一时刻的预测输出数据。则辨识器的调整规则就是使误差  $E_i$  尽可能小, $E_i$  表示为:  $E_i = \sum_{i=1}^n \left| e_i(k+1) \right|^2$ 。

神经网络模型参考自适应控制系统的控制目标在于使被控对象的输出 y 与参考模型的输出  $y_m$  渐近的匹配,即

$$\lim_{t \to \infty} \| y_m - y \| \le \varepsilon, \varepsilon > 0 \tag{8}$$

其中,  $\varepsilon$  为一个给定的小正数。

神经网络控制器 NNC 的训练则由误差  $e_c = y_m - y$  来训练,训练准则如上式(8),控制系统中神经网络辨识器和控制器的学习算法就采用改进后的 BP 算法。

在神经网络模型参考自适应控制系统的控制策略设计中,改进的 BP 算法能够在满足系统控制规律符合要求的情况下,使得神经网络模型参考自适应控制效果更好。虽然改进的 BP 算法是激励函数自寻优的自适应方法,不能够使神经网络辨识器 NNI 进行离线训练,但是快速的 BP 算法仍然可以使网络具有很好的实时性。首先在线训练辨识器,待参数训练好以后,再进行控制器 NNC 的训练,最终可以保证被控对象的输出 y 很好的跟踪参考模型的输出 y<sub>m</sub>。

## 3 仿真实例研究

#### 3.1 改进的 BP 算法验证

本文采用 BP 神经网络进行预测控制来验证改进算法的有效性。利用简单的一组样本训练集和样本目标集进行神经网络的训练,再给定一组输入样本数据,观测输出层输出数据和误差。分析样本数据设计 BP 神经网络结构为 3个输入、2个输出、隐含层的神经元数目为 8。网络学习次数为 100 次,目标误差设置为 0.001。

使用 MATLAB 软件进行网络训练,传统 BP 算法的网络训练过程收敛情况如图 3 所示,经过 56 步循环达到了网络误差要求的精度。改进的 BP 算法网络收敛情况如图 4 所示,仅需要 10 步就达到了误差精度要

求,其中 a 和 b 取值分别为 0.9 和 1.5。输出误差和网络实际输出数据在表 1 中展示,直观的看出,改进后的 BP 网络可以得到更有效的输出。

输入样本: 
$$X = \begin{bmatrix} 1 & 1 \\ -1 & -1 \\ 1 & 1 \end{bmatrix}$$
,  $T = \begin{bmatrix} 1 & 1 \\ 1 & 1 \end{bmatrix}$ , 训练样本:  $X1 = \begin{bmatrix} 1 & 1 \\ -1 & -1 \end{bmatrix}$ 

仿真结果如图3和图4所示。

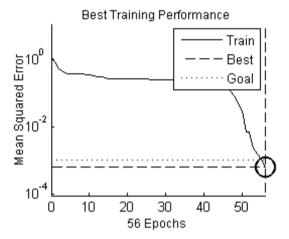
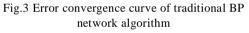


图 3 传统 BP 网络算法误差收敛曲线图



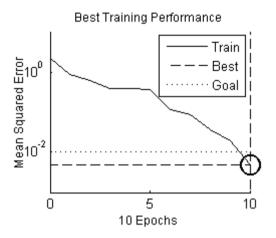


图 4 改进后 BP 网络算法误差收敛曲线图 Fig.4 Error convergence curve of improved BP network algorithm

根据得到的误差收敛曲线比较看出,改进后的 BP 算法所用训练步数少即需要的训练时间少,说明收敛速度明显加快。

测试输出结果如表 1 所示。

从表中可以直观清晰看出改进后的 BP 算法实际输出误差明显减小,提高了算法精度。

### 3.2 改进的神经网络模型参考自适应控制仿真实例

结合参考文献[11][12]中提到的污水处理的例子进行改进算法的验证。污水处理系统结构图如图 5 所示,

表 1 改进前后 BP 网络输出误差和实际输出数据比较

Table 1 Comparison of output error and real output data of BP network before and after improvemen

_	目标输出	改进前实际	改进前实	改进后实	改进后实际误	
		输出	际误差	际输出	差	
	1	0.9638	0.6569	0.9950	0.1405	
	1	0.9638	0.6569	0.9950	0.1405	
	1	0.9994	0.6569	0.9910	0.1405	
	1	0.9994	0.6569	0.9910	0.1405	

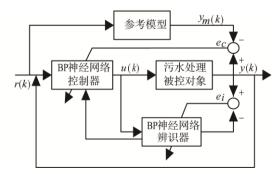


图 5 污水处理控制系统结构图

Fig.5 Structure diagram of sewage treatment control system

在污水处理系统控制结果是否达标,主要是通过需氧量(OD)、溶解氧(DO)等几个重要参数来衡量。 本例中为了提高污水处理效果,系统控制目标设置为使误差  $e_c$  控制在±0.05mg/L 以内,污水处理控制系统 中采

用离散的参考模型:

 $y_m(k) = 0.375 y_m(k-1) + 0.623 r(k)$ 

其中,控制输入r(k)=2为系统给定的阶跃信号。

污水处理系统的实验仿真中,BP 网络辨识器设定 4 个输入变量和 1 个输出变量,隐含层包含 10 个隐节点,对于 BP 网络控制器取 3 个输入层节点,隐含层的节点数为 6。根据 BP 神经网络控制器和辨识器的改进算法,采用 MATLAB 进行仿真,取采样周期  $t_s$ =0.001s, 这里 a 取 0.8, b 取 1.5, 仿真结果如图 6 所示。

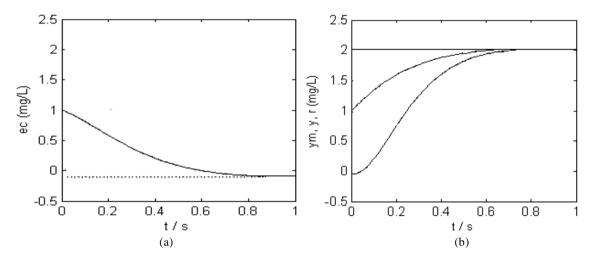


图 6 仿真结果图

Fig.6 Result chart of simulation

在图 6(a) 中第一条线为控制输入 r, 中间的第二条曲线代表参考模型的输出  $y_m$ , 最下边的曲线代表污水被控对象的输出  $y_m$ , 图 6(b) 中的曲线代表误差  $e_c$ (系统实际输出与参考模型输出之差)的变化。从图中可以分析看出,改进后模型参考自适应控制方法在该控制系统中的控制效果很好,氧的溶解浓度(DO)保持在 2mg/L 左右,参考输出和实际输出最终相吻合,误差  $e_c$  控制在  $\pm 0.05mg/L$  以内,因此仿真结果满足控制系统的控制要求。

#### 4 结语

本文采用改进后的 BP 神经网络作为模型参考自适应控制中的辨识器和控制器,由仿真结果表明,BP 算法在简单有效的改进后,提高了 BP 网络的收敛速度,进而在模型参考自适应控制系统中达到良好的实时性,同时满足了控制系统在线训练的要求。虽然本文提到的 BP 改进算法对太复杂的智能控制系统影响不是太大,但在实际工程应用中,只要充分结合运用不同的改进 BP 算法的方法就可以达到比以往更理想的效果。

#### 参考文献

- [1] 张秀玲. 神经网络非线性系统模型参考自适应控制器统一设计法[J]. 控制与决策, 2002, 17(2): 151-154, 158. ZHANG X L.Nonlinear system neural network model reference adaptive controller design method[J]. Control and Decision, 2002, 17(2): 151-154
- [2] 刘玉海. 神经网络的C 编程及矿井安全预测仿真[J]. 软件, 2013, 34(5): 88-90. LIU Y H.C programming of neural network and forecast simulation of mine safety[J]. Software, 2013, 34(5): 88-90.
- [3] 李雪松,李颖晖,李霞,等. 一种基于神经网络的任意模型参考自适应控制[J]. 系统工程与电子技术,2011,33(1):162-165. LI X S,LI Y H,LI X,et al.One arbitrary model reference adaptive control based on Neural Network[J]. System engineering and electronic technology, 2011, 33(1): 162–165.
- [4] Patino H D, Liu D. Neural network-based model reference adaptive control system[J]. IEEE Transaction on Systems, Man, And

- Cybernetics, Part B: Cybernetics, 2008, 30(1): 198-204.
- [5] 朱凯, 王正林. 精通MATLAB神经网络[M]. 北京: 电子工业出版社, 2010: 193-195.

  ZHU K, WANG Z L.Proficient in MATLAB neural network[D]. Electronic Industry Press, 2010:193-195.
- [6] 徐步云,倪禾.自组织神经网络和K-means 聚类算法的比较分析[J]. 新型工业化, 2014, 4(7): 63–69. XU B Y,NI H.Comparative analysis of self organizing neural network and K-means clustering algorithm[J]. New type industrialization, 2014, 4(7): 63–69.
- [7] 何险峰, 何柳.二次型神经网络模型及其应用[J]. 计算机应用与软件, 2010, 27(10): 244-246.

  HE X F, HE L.The model and application of the two time neural network[J]. Computer applications and software, 2010, 27(10): 244-246
- [8] 王沥, 邝育军. 一种基于蚁群算法的BP 神经网络优化方法研究[J]. 新型工业化, 2012, 2(4): 8-15. WANG L,KUANG Y J.Study on the optimization method of BP neural network based on ant colony algorithm[J]. New type industrialization, 2012, 2(4): 8-15.
- [9] 俞克强, 宫宁生, 丁磊. 一种神经网络控制模型的研究与应用[J]. 计算机应用与软件, 2013, 30(6): 60–62+108. YU K Q, GONG N S, DING L.Research and application of neural network control model[J]. Computer applications and software, 2013, 30(6): 60–62+108.
- [10] 曲朝阳, 计超, 郭晓利, 等. 基于传递函数自我优化的BP网络算法改进[J]. 电测与仪表, 2014, 51(11): 56-59, 64. QU Z Y, JI C, et al.Improved BP algorithm based on transfer function of self optimization[J]. Electrical Measurement and Instrumentation. 2014, 51(11): 56-59.
- [11] 胡艳玲, 黄兴格, 等. 神经网络模型参考自适应控制在污水处理中的仿真研究[J]. 工业仪表与自动化装置, 2011, (1): 3–5, 18. HU Y L, HUANG X G, et al. Simulink research of neural network model reference adaptive control in sewage treatment[J]. Industrial Instruments and Automatic equipment, 2011, 1: 3–5.
- [12] 张德丰. 小波神经网络在智能优化控制系统中的应用[J]. 计算机工程与设计. 2009, 30(10): 2457-2460. ZHANG D F.Application of wavelet neural network in intelligent optimization control system[J]. Computer Enginerring and Design, 2009, 30(10): 2457-2460.