

# 基于改进的 BP 神经网络算法的控制 系统在线辨识方法

陈君,郭玉兵,曹惠芳,王勇

国家知识产权局专利审查协作北京中心,北京 100081

**摘要** 讨论了以计算机虚拟仪器为核心器件,搭建了动态测试与系统辨识硬件平台,使用 Delphi 语言编写辨识模块,实现对控制系统的在线辨识。在非线性系统辨识方面,针对 BP 神经网络算法中存在的收敛速度比较慢和辨识精度不高的问题,提出一种基于降低网络灵敏度的 MBP 神经网络辨识算法和一种基于小波分析的神经网络辨识算法,实现了对控制系统的状态进行预测估计。并以“防空武器半实物仿真系统”中的三轴稳定平台为对象,试验验证了算法的正确性。

**关键词** 系统辨识;控制系统;BP 神经网络;MBP;小波分析;在线辨识

**中图分类号** TP273

**文献标识码** A

**doi** 10.3981/j.issn.1000-7857.2012.06.010

## An On-line Identification Method for Control System Based on Improved BP Neural Network Algorithm

CHEN Jun, GUO Yubing, CAO Huifang, WANG Yong

Patent Examination Cooperation Center of the Patent Office, SIPO, Beijing 100081, China

**Abstract** The identification methods based on dynamic performance testing are discussed focusing on the features of control systems. In order to realize the online identification for the control system in a computer virtual instrument, a dynamic testing and identification system is designed, using Delphi language for several identification modules. The hardware platform of dynamic testing and system identification with the virtual instrument being used as its core component is built. In the nonlinear aspect, this paper studies the identification algorithm based on Back Propagation (BP) Neural Network algorithm, and proposes an identification algorithm named MBP Neural Network and a Wavelet Neural Network algorithm to reduce the sensitivity of the network. Finally, the real-time wavelet algorithm is simulated to verify the above conclusion. The MBP Neural Network algorithm and the Wavelet Neural Network algorithm are simulated on the three-axis platform of the partial simulating system for an anti-aircraft weapon.

**Keywords** system identification; control system; BP neural network; MBP; wavelet; on-line identification

### 0 引言

控制系统作为工业自动化的重要组成部分,在工业自动化领域具有举足轻重的作用。如果能够知道被控对象的数学模型,就可以实现最优控制。因此,怎样确定控制系统的数学模型及其参数,就是系统辨识问题<sup>[1]</sup>。误差反向传播(BP)神经网络算法对参数估计值不断修正,以取得更为准确的参数估计值,能够实时辨识模型参数,在控制系统在线辨识中得到了广泛应用。但该算法收敛速度较慢,辨识精度不高。针对该

缺陷,本文提出两种改进的 BP 神经网络辨识算法,即基于降低网络灵敏度的 MBP 神经网络辨识算法,以及将小波变换与神经网络有机结合的基于小波分析的神经网络算法。用 Delphi 可视化语言实现以上算法,在计算机虚拟仪器上进行实际运行,以实现控制系统的动态测试与在线辨识功能。

本文基于北京理工大学“十五”“211 工程”重点学科建设项目——“国防复杂系统的智能控制与决策”的子课题“防空武器半实物仿真”,以“防空武器半实物仿真”系统的三轴稳

收稿日期:2012-02-01;修回日期:2012-02-15

基金项目:“985 工程”国家重点建设项目

作者简介:陈君,助理研究员,研究方向为机械电子工程,电子信箱:chenjun\_2@sipo.gov.cn

定平台为研究对象,实现对该三轴稳定平台的自动测试与模型辨识,进而可以对其进行最优控制或故障诊断等操作。

### 1 系统概述

控制系统硬件平台为实验室自主研发的多功能测试仪,软件部分采用 Delphi 编写的两个改进的 BP 神经网络辨识模块,移植到硬件平台上,实现对控制系统的在线辨识。本系统最大的特点在于可以通过获取系统的输入输出点集,实时对系统进行在线辨识,预测系统的模型参数,从而对系统的未来状态进行预测。另外,本系统还具备操作方便,界面形象直观等特点。经过试验验证,可以较快捷精确地实现各种控制系统的状态预测。

多功能测试仪的设计采用了虚拟仪器技术、自动测试技术、嵌入式系统应用技术、数字处理技术等多项前沿技术,集成了示波器、信号发生器、X-Y 记录仪、频谱分析仪等通用仪器的功能,同时具有强大的数据分析处理能力,具有集成度高、测试精度高、轻便灵活等特点。

多功能测试仪由嵌入式 CPU 系统、任意波形发生器卡、高速采集卡、信号调理电路、触摸式液晶屏、机壳以及电源组成,集成度高,体积小。仪器原理框图如图 1 所示。

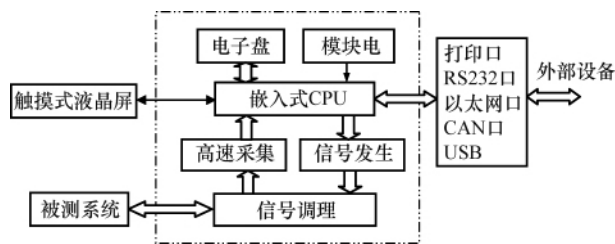


图 1 多功能测试仪原理框图  
Fig. 1 Block diagram of the multifunction tester

多功能测试仪器的主要技术指标如下。

- (1) 输入通道。最大输入通道 8 路,单端方式,信号范围为-10—10V(出厂配置)或-5—5V,采集精度 16 位,但通道最高采样频率为 200kHz。
- (2) 输出通道。1 路输出通道,输出信号范围为-10—10V(出厂配置)或-5—5V,信号精度 16 位,信号频率范围为 0.0001—100kHz。
- (3) 数据处理精度。X-Y 记录仪处理精度为 0.1%,阶跃响应处理精度为 0.5%,频率特性处理精度为 0.2%。
- (4) 数据存储量为 300MB。
- (5) 接口。以太网传输速度为 10MB/s,RS-232 口传输速度为 38400bits/s,USB 接口、LPT 接口。

### 2 BP 神经网络辨识

#### 2.1 BP 神经网络辨识简介

BP 神经网络法是一种被广泛使用的经典非线性系统辨

识方法,也是最常用、最流行、最成熟的人工神经网络之一。在网络中,各神经元接受上一级输入,输出到下一级,在理论上可以逼近任意连续非线性函数。BP 网是一种 2 层或 2 层以上的阶层型神经网络,即输入层、隐含层(也称中间层)和输出层。以 1 个输出层只含有 1 个神经元的 3 层 BP 神经网络为例,其原理和过程如图 2 所示<sup>[2-3]</sup>。

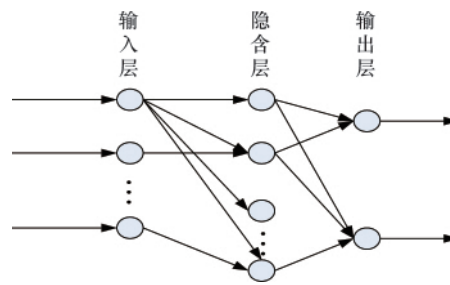


图 2 3 层 BP 神经网络结构  
Fig. 2 Structure of 3-layer BP neural network

#### 2.2 两种改进的 BP 神经网络辨识算法

##### 2.2.1 基于降低网络灵敏度改进的 MBP 神经网络辨识算法

这种改进的 BP 神经网络辨识算法是基于降低网络灵敏度的基础上,在网络的误差反向传播信号线上增加 1 个协调器,动态地将全局反向传播式网络变成局部反传式网络,可以使网络学习速率大大提高。其中,网络灵敏度的概念如下。

设  $\Delta y_m^i$  是由信号的各种变化及扰动引起的网络输出变化,  $|\Delta \varepsilon|$  为网络输入、权值变化及被辨识系统变化引起的综合误差,对第  $i$  样本,神经网络辨识器的灵敏度定义为

$$S_m^i(\cdot) = \frac{MSE(\Delta y_m^i)}{|\Delta \varepsilon|} \quad (1)$$

其中, MSE 为方差。

在网络输入扰动、网络参数变化或被辨识系统参数变化时,根据系统在被辨识过程中的误差,动态地控制神经网络各层权值,特别是最末一级隐层到输出层的权值矩阵(即输出层的权值矩阵)修正,可以使网络输出的均方差  $MSE(\Delta y_m^i)$  快速减小,从而使网络灵敏度  $S_m^i(\cdot)$  降低。

本文所采用的基于降低网络灵敏度的 BP 网络改进算法描述如下。

- (1) 在常规 BP 学习算法基础上,在网络的误差反向传播信号线上增加 1 个协调器,该协调器控制各层权值的修正。
- (2) 当网络的综合误差  $|\Delta \varepsilon|$  较大时,协调器控制网络输出层的权值矩阵增大,使网络输出迅速变化。
- (3) 当训练误差为  $10\% < |e| < 20\%$  时,协调器控制网络输出层的权值阵减小,同时停止其他层权值的修正,使网络灵敏度  $S_m^i(\cdot)$  降低,以免网络输出过冲,造成反向误差。
- (4) 当训练误差  $|e| < 10\%$  时,协调器控制只允许靠近网络输入层的第 1 或第 2 级隐层权值修正,同时停止网络输出层的权值阵和其他级隐层权。

上述基于降低网络灵敏度的 BP 网络改进算法, 动态地将全局反向传播式网络变成局部反传式网络, 可以使网络学习速率大大提高。

### 2.2.2 基于小波变换的 BP 神经网络辨识算法

小波自 20 世纪 80 年代提出以来, 理论和应用都得到了巨大的发展。小波分析的出现被认为是傅立叶分析的突破性进展。小波变换具有时频局部特性和变焦特性, 而神经网络具有自学习、自适应、鲁棒性、容错性和推广能力, 如何把两者的优势结合起来, 一直是人们关注的问题<sup>[4-5]</sup>。

本文采用串并联模式对网络进行训练, 把小波变换与神经网络有机结合, 充分继承两者的优点。图 3 为引入输出反馈环节的小波神经网络。图中结构只有 1 个输出结点, 辨识的是单输入单输出的非线性动态系统。只要在输入层和输出层增加结点就可以辨识多输入多输出的非线性动态系统。

图 3 的  $z^{-1}$  是反向移位算子。输入层的节点数为  $m+n$ ,  $m$  和  $n$  分别为网络输入序列的时延和网络输出的反馈阶次。隐层中含有  $N$  个结点,  $a_{ij}$  和  $b_{ij}$  分别为隐层小波基函数的伸缩参数和平移参数, 隐层结点的作用函数为  $\psi$ 。

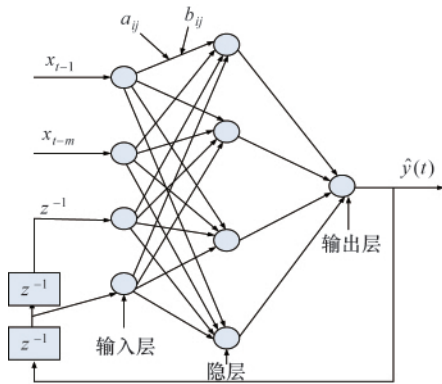


图 3 带反馈环节的小波神经网络结构图  
Fig. 3 Structure of the wavelet neural network with a feedback link

### 3 试验与分析

为了辨识设计的定位控制系统模型, 以三轴转台为被控对象进行试验。三轴转台的相关参数如下。

(1) 运动范围: 方位轴为  $\pm 120^\circ$ , 横滚轴为  $\pm 30^\circ$ , 俯仰轴为  $-20^\circ \sim 90^\circ$ 。

(2) 综合了防摇和跟踪的运动参数, 各轴的速度、加速度最大值如下。俯仰轴最大速度为  $85.9^\circ/\text{s}$ , 最大加速度为  $401.1^\circ/\text{s}^2$ ; 方位轴最大速度为  $258.5^\circ/\text{s}$ , 最大加速度为  $299.7^\circ/\text{s}^2$ ; 横滚轴最大速度为  $114.5^\circ/\text{s}$ , 最大加速度为  $299.7^\circ/\text{s}^2$ 。

以俯仰轴为例, 采用正向建模 (并联辨识) 结构, 神经网络选用 3-9-9-1 型, 即输出层  $k$  的节点个数分别为 3、9、9、1。采用函数 trainlm 对网络进行训练, 该函数的学习算法为 Levenberg-Marquadt 反传算法, 该训练函数的优点在于收敛

速度很快。辨识结果见图 4。

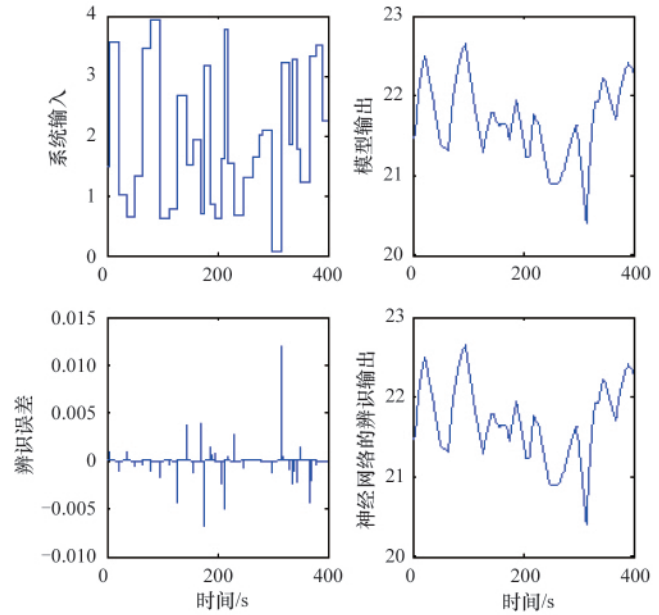


图 4 BP 网络辨识结果  
Fig. 4 Identification results of BP neural network

采用基于降低网络灵敏度的 MBP 神经网络辨识算法, 即在上述的 BP 网络中增加协调器, 激活函数采用 sigmoid 函数, 其辨识效果见图 5。

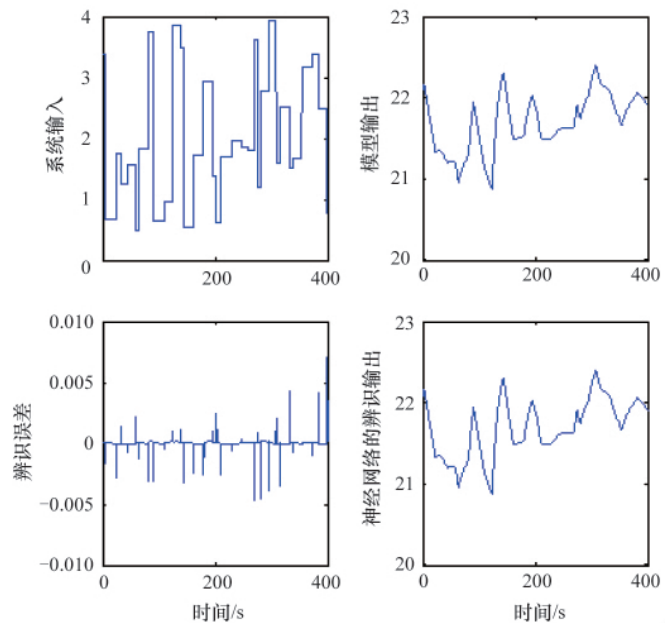


图 5 MBP 网络辨识结果  
Fig. 5 Identification results of MBP neural network

采用基于小波分析的 BP 神经网络辨识算法, 小波系采用 Daubechies 构造框架的方法, 令尺度因子和位移因子分别为  $a=2, b=1$ 。小波神经网络的初始权值由随机函数 rand() 给

出,网络权值采用 BP 算法进行计算,神经网络结构采用正向建模(串一并辨识)。其辨识效果见图 6。

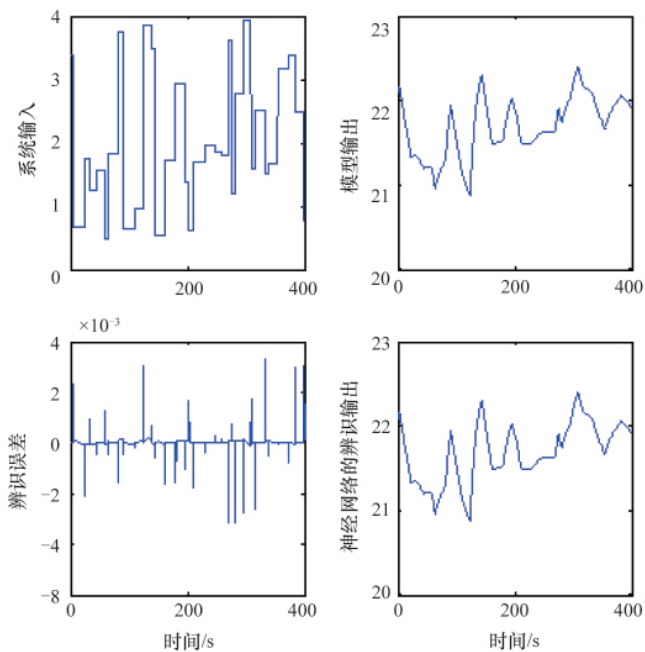


图 6 基于小波分析的 BP 神经网络辨识

Fig. 6 Identification results of wavelet neural network

BP 网络训练结果为

TRAINIDX, Epoch 0/200, MSE 4.21573e-007/0, Gradient 0.00467341/1e-010

TRAINIDX, Epoch 1/200, MSE 4.21573e-007/0, Gradient 0.00467341/1e-010

⋮

TRAINIDX, Epoch 17/200, MSE 4.30011e-007/0, Gradient 0.0249552/1e-010

TRAINIDX, Validation stop.

带协调器的 MBP 神经网络训练结果为

TRAINGDM, Epoch 0/200, MSE 4.21573e-007/0, Gradient 0.00467341/1e-010

⋮

TRAINGDM, Epoch 7/200, MSE 53.1852/0, Gradient 38.162/1e-010

TRAINGDM, Validation stop.

基于小波分析的神经网络训练结果为

TRAINLM, Epoch 0/200, MSE 4.21573e-007/0, Gradient 13.9969/1e-010

⋮

TRAINLM, Epoch 6/200, MSE 3.42397e-007/0, Gradient 0.130452/1e-010

TRAINLM, Validation stop.

将图 4、图 5 和图 6 进行对比可以看出,MBP 神经网络辨识精度与 BP 神经网络差不多,但基于小波分析的神经网络辨识方法的辨识精度要高许多。此外,从三者的训练结果可知,BP 网络递推 17 步后得到满意的辨识模型,MBP 神经网络仅仅递推 7 步就得到了要求的模型,辨识速度高于前者,基于小波分析的神经网络辨识算法也仅仅递推 6 步就满足辨识要求,辨识速度也要远高于 BP 神经网络辨识算法。

综上所述,采用 MBP 神经网络辨识算法辨识系统,辨识时收敛速度得到了改进,而辨识精度未有明显提高;而基于小波分析的神经网络辨识算法,不仅收敛速度明显高于 BP 神经网络辨识算法,而且在拟合精度上也有所改善,为 3 种算法中最适合“防空半实物仿真系统”中三轴稳定平台的模型的辨识算法。

#### 4 结论

本文以“防空武器半实物仿真系统”中的三轴稳定平台为研究背景,对控制系统的动态性能测试技术、测试系统的搭建和系统模型辨识等关键技术进行了研究。搭建了控制系统动态性能测试与系统辨识硬件平台,介绍了该硬件平台的组成结构以及各部分的特点和功能。其中,计算器虚拟仪器为该测试系统的核心部分,详细介绍了它的结构和参数。对于非线性辨识部分,提出一种基于降低网络灵敏度的改进 BP 神经网络辨识算法和基于小波分析的 BP 神经网络辨识算法。并以“三轴稳定平台”为模型,进行了仿真试验。结果表明,改进后的 BP 神经网络辨识算法减少了辨识步数,提高了收敛速度。基于小波分析的 BP 神经网络辨识算法不仅减少了辨识步数,也减小辨识误差,即从辨识精度和辨识速度上都得到了改进。

**致谢** 感谢“防空武器半实物仿真”课题组的王军政教授、马立玲副教授、汪首坤副教授在研究完成过程中给予的指导和帮助。

#### 参考文献 (References)

- [1] Brami V, Bielza L C. On time-dependent wavelet denoising [J]. *IEEE Transactions on Signal Processing*, 1999, 46(9): 2549-2551.
- [2] Cardell-Oliver R. Conformance tests for real-time systems with timed automata specifications [J]. *Formal Aspects of Computing*, 2000, 12(5): 350-371.
- [3] Wang S, Wang J. Research on digital dynamic testing technique for electrohydraulic servovalve [J]. *Journal of Beijing Institute of Technology*, 2003, 12(4): 357-362.
- [4] Li Z, Krstic M. Optimal design of adaptive tracking controllers for non-linear systems [J]. *Automatica*, 1997, 33(8): 1459-1473.
- [5] Mark L, Mehdi I S, Johnny F S. Integrated electro-hydraulic system modeling and analysis [J]. *IEEE Aerospace and Electronic Systems Magazine*, 2002, 17(7): 4-8.

(责任编辑 安莹,吴晓丽)