

基于递归神经网络的 TVS 电磁脉冲响应建模

纪志强¹, 魏 明¹, 吴启蒙², 于毅成³

(1. 军械工程学院静电与电磁防护研究所, 河北石家庄 050003; 2. 总装备部工程兵军事代表局驻武汉军事代表室, 湖北武汉 430073; 3. 总装备部沈阳军事代表局驻哈尔滨地区代表室, 黑龙江哈尔滨 150000)

摘要:针对传输线脉冲(TLP)测试方法实施过程工作量较大、测试结果与实际情况相符程度较差的问题,提出一种基于递归神经网络建模的电磁脉冲响应预测方法。该方法基于 TLP 测试系统,增加机器模型静电放电和人体金属模型静电放电两类注入电磁脉冲,分别建立 Elman, Jordan 神经网络以及它们的组合 Elman-Jordan 神经网络对 NUP2105L 型瞬态抑制二极管(TVS)进行建模,预测不同脉冲条件下 TVS 的响应。仿真结果表明,递归神经网络建模效果好、运算效率高。

关键词:自动化技术应用;电磁脉冲;瞬态抑制二极管;系统辨识;递归神经网络

中图分类号:O441.4 **文献标志码:**A

EMP response modeling of TVS based on the recurrent neural network

JI Zhiqiang¹, WEI Ming¹, WU Qimeng², YU Yicheng³

(1. Research Institute of Static Electricity & Electromagnetic Protection, Ordnance Engineering College, Shijiazhuang, Hebei 050003, China; 2. Wuhan Military Representative Office, The General Armament Engineering Department, Wuhan, Hubei 430073, China; 3. Harbin Military Representative Office, The General Armament Department, Harbin, Heilongjiang 150000, China)

Abstract: Due to the larger workload in the implementation process and the poor consistence between the test results and actual situation problems when using the transmission line pulse (TLP) testing methods, a modeling method based on the recurrent neural network is proposed for EMP response forecast. Based on the TLP testing system, two categories of EMP are increased, which are the machine model ESD EMP and human metal model ESD EMP. Elman neural network, Jordan neural network and their combination namely Elman-Jordan neural network are established for response modeling of NUP2105L transient voltage suppressor (TVS) forecasting the response under different EMP. The simulation results show that the recurrent neural network has satisfying modeling effects and high computation efficiency.

Keywords: application of automation technology; electromagnetic pulse (EMP); transient voltage suppressor (TVS); system identification; recurrent neural network

收稿日期:2014-08-12;修回日期:2014-12-23;责任编辑:李 穆

基金项目:国家自然科学基金(51277181)

作者简介:纪志强(1989—),男,福建泉州人,硕士研究生,主要从事电磁仿真与效应评估技术研究。

通讯作者:魏 明教授。E-mail:406789675@qq.com

纪志强,魏 明,吴启蒙,等.基于递归神经网络的 TVS 电磁脉冲响应建模[J].河北科技大学学报,2015,36(2):157-162.

JI Zhiqiang, WEI Ming, WU Qimeng, et al. EMP response modeling of TVS based on the recurrent neural network[J]. Journal of Hebei University of Science and Technology, 2015, 36(2): 157-162.

电磁脉冲(electromagnetic pulse, EMP)是一类常见的干扰源,具有场强峰值高、瞬时功率大、频带范围广等特点,能够对精密元器件造成永久性损坏,严重影响电子设备的正常运行^[1-3]。

为了防止电磁脉冲进入电子设备,通常加设浪涌保护器件,主要包括气体放电管、固体放电管、金属氧化物压敏电阻、瞬态抑制二极管(transient voltage suppressor, TVS)等,其中 TVS 是一类专门用于过电压保护的器件,也叫齐纳二极管,响应快、箝压准、功率大,广泛用于电子设备中精密元器件的保护,其电磁脉冲响应状况直接关系后续电路性能的发挥^[4-5]。

目前,对于 TVS 性能研究主要采用传输线脉冲 TLP 测试方法,利用矩形短脉冲模拟实际脉冲注入 TVS,根据伏安特性判断 TVS 性能^[6]。该方法操作简单,但是方波脉冲脉宽及幅值选择性大,依次实验,工作繁重、效率较低;而且采用矩形脉冲无法完全代替实际脉冲,实验结果和实际情况不能很好地对应上。为了弥补效应实验的不足,工程实践中通常建立 TVS 模型对脉冲响应进行预测,定量评估 TVS 电磁脉冲效应,然而 TVS 脉冲响应模型具有强烈的非线性,建模难度较大^[7]。针对上述问题,本文基于 TLP 测试方法,增加激励脉冲类型以丰富建模信息,尝试利用递归神经网络对实验数据进行建模,预测不同脉冲条件下 TVS 的响应。

1 递归神经网络

递归神经网络也叫反馈神经网络,是一种从输出到输入具有反馈连接的神经网络,具有强烈的动态特性,其反馈形式灵活多样,包括输出反馈(输出层到输入层)、状态反馈(隐含层到输入层)及同层反馈(同层神经元间,应用很少),并且可以设置不同输入延迟和反馈延迟阶数^[8-9]。

典型的递归网络有 Elman 神经网络(状态反馈递归网络)和 Jordan 神经网络(输出反馈递归网络),它们都只有一阶延迟反馈连接,无输入延迟,结构清晰、运算效率高,是递归网络研究的基础。

1.1 Elman 神经网络

Elman 神经网络结构如图 1 所示,它是在 BP 网络结构的基础上增加一个承接层作为一步延时算子,将上一时刻隐含层状态值应用于当前时刻计算^[10],即

$$X_c(k) = X(k-1) = f_1(W^z(k-1)X_c(k-1) + W^u(k-1)u(k-2)), \tag{1}$$

式中: f_1 为隐含层传递函数; f_2 为输出层传递函数; X_c 为承接层输出; X 为隐含层输出; W^z 为承接层到隐含层的连接权值; W^u 为输入层到隐含层的连接权值; u 为网络的输入; y 为网络的输出。

1.2 Jordan 神经网络

Jordan 神经网络结构如图 2 所示,它类似于 Elman 神经网络,通过承接层将网络上一时刻输出层的输出结果反馈到输入层,应用于当前时刻计算^[11],即

$$Y_c(k) = Y(k-1) = f_2[W^y(k-1)f_1(W^u(k-1)u(k-2))], \tag{2}$$

式中: Y_c 为承接层输出; $Y = [y_1, y_2, \dots, y_n]$; W^y 为隐含层到输出层的连接权值。

对于一个建模问题来说,通常只知道输入、输出数据,不知道状态数据,采用状态反馈递归网络建模容易造成误差累积,因此,前期研究大多集中于输出反馈递归网络。文献[12]证明:状态反馈包含输出反馈,输出反馈是状态反馈的特殊形式。状态反馈将系统动态直接包含于网络结构中,辨识过程无需知道系统结构参数,因而近几年来状态反馈网络受到广泛的研究。

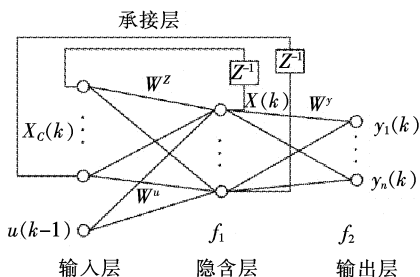


图 1 Elman 神经网络
Fig. 1 Elman neural network

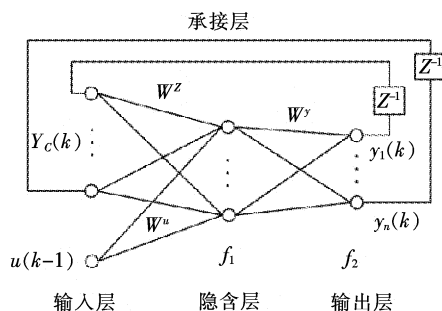


图 2 Jordan 神经网络图
Fig. 2 Jordan neural network

1.3 Elman-Jordan 神经网络

利用 Matlab 提供的自定义神经网络工具,将 Elman 神经网络和 Jordan 神经网络进行组合,结构如图 3 所示,将其命名为 Elman-Jordan 神经网络,将上一时刻状态值和输出结果用于当前时刻计算,关系式同式(2)。

自定义神经网络^[13]是 Matlab 在标准网络函数之外,为满足用户需求提供的网络工具,能够任意指定网络类型,可用于神经网络的设计、改进等操作,其最终目标是设计完全符合实际系统的网络结构,然而系统辨识主要针对“黑箱”系统,待辨识系统结构参数无法预先知道,因此,目前自定义网络主要用于现有标准网络的改进。对于 Elman 神经网络和 Jordan 神经网络的改进,一是在输入层加设自反馈因子^[14-15];二是增加输入延迟和反馈延迟阶数,如 NARX 网络。

目前,对于递归网络尚无一般性的结论,总的来说,伴随网络输入延迟和反馈延迟阶数的增加,网络非线性逼近能力增强,但是网络训练困难,收敛性无法保证。

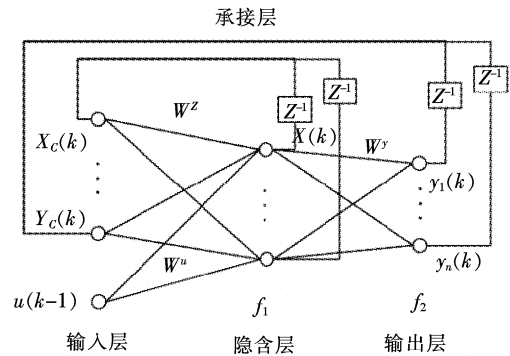


图 3 Elman-Jordan 神经网络
Fig. 3 Elman-Jordan neural network

2 实验设计

采用时域传输 TDT TLP 测试方法,所用设备为 NoiseKen;INS-4040 型方波源;SANKI;NS61000-2A 型静电放电枪;NoiseKen;ESS-606 型静电放电枪;ATektronoix;TDS7154B 型示波器;MS2-4000 型 30dB 脉冲衰减器;N-50KF 型射频同轴接头;NUP2105L 型 TVS;相应器件夹具等,测试系统布置如图 4 所示。

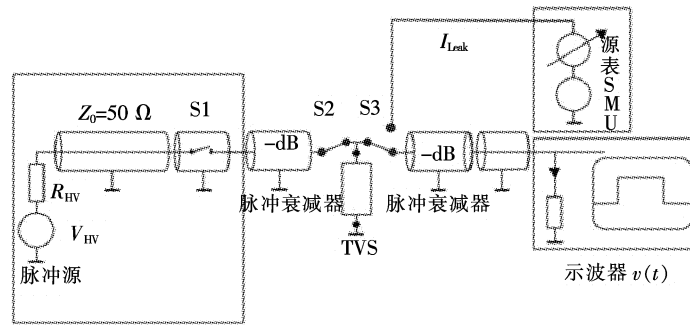


图 4 TLP 测试平台结构图
Fig. 4 Schematic of TLP testing system

实验时分别对 TVS 注入矩形脉冲(square pulse,SP)、机器模型静电放电电磁脉冲(machine model ESD EMP,MM ESD EMP)以及人体金属模型静电放电电磁脉冲(human body model ESD EMP,HMM ESD EMP),利用示波器采集脉冲信号及 TVS 响应信号。

3 神经网络建模

3.1 建模过程

设置 SP 脉宽为 50,400 ns;幅值为 40,450,900,1 400 V;MM ESD EMP 幅值为 40,450,900,1 400 V,以这两类脉冲信号实验数据为建模数据,以脉宽 250 ns、幅值 630 V 的 SP,幅值 1 035 V 的 MM ESD EMP,幅值 485 V 的 HMM ESD EMP 这 3 种脉冲信号实验数据为验证数据。

3 种网络模型参数设置的隐含层神经元数为 10;隐含层传递函数为 tansig,输出层传递函数为 purelin,

训练函数使用 trainbfg, 训练步数为 1 000, 采用均方差^[16] (mse) 作为准则函数, 拟合度^[17] (fit) 作为评价标准, 表达式分别为

$$\text{均方差(mse)} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (y_i - y_h)_i^2; \tag{3}$$

$$\text{拟合度(fit)} = \frac{1 - \text{norm}(yh - y)}{\text{norm}(y - \text{mean}(y))} \times 100\%. \tag{4}$$

式中: N 为实验数据长度; y_h 为预测输出; y 为实测输出; $\text{mean}(y)$ 表示对实测输出求均值; norm 表示求解范数。预测效果如图 5—图 7 所示, 拟合度及均方差如表 1 所示。

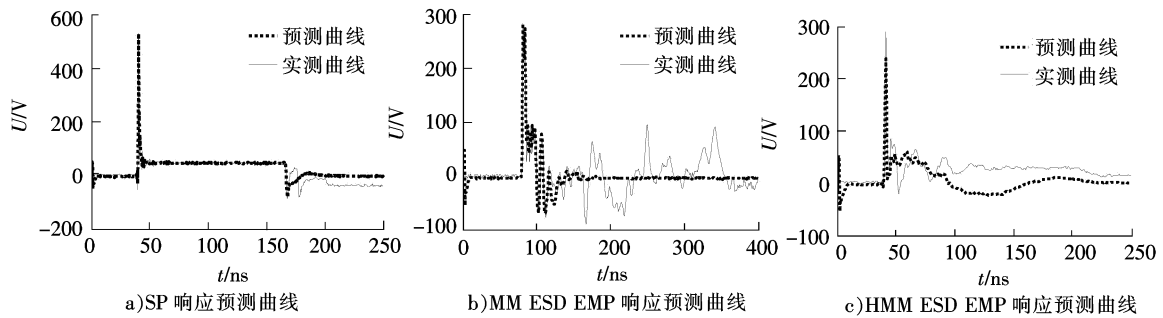


图 5 Elman 神经网络脉冲响应预测曲线
Fig. 5 EMP response prediction curve of Elman-NN

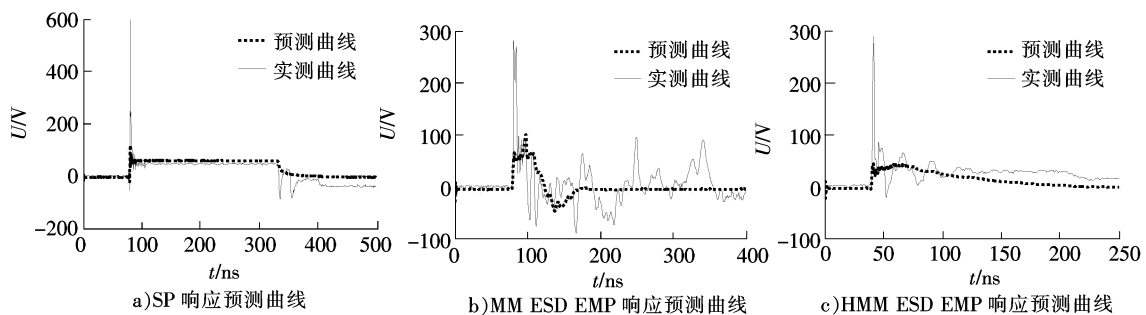


图 6 Jordan 神经网络脉冲响应预测曲线
Fig. 6 EMP response prediction curve of Jordan-NN

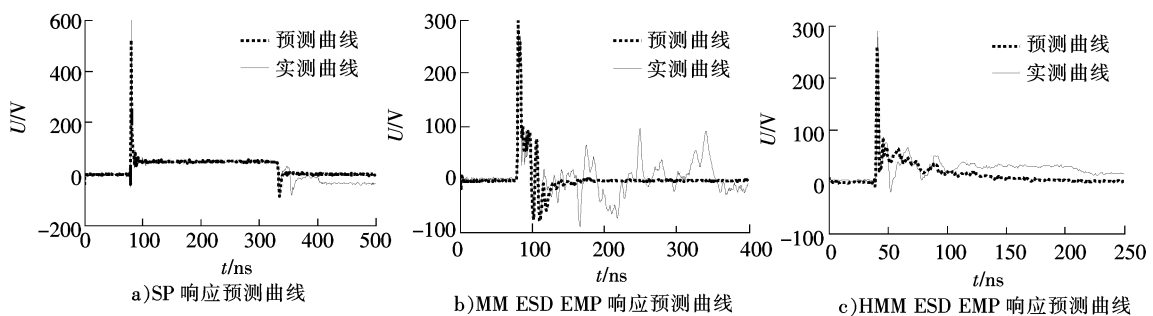


图 7 Elman-Jordan 神经网络脉冲响应预测曲线
Fig. 7 EMP response prediction curve of Elman-Jordan-NN

表 1 拟合度及均方差对比
Tab.1 Comparison of degree of fit and MSE

脉冲类型	Elman-NN		Jordan-NN		Elman-Jordan-NN	
	fit/%	mse	fit/%	mse	fit/%	mse
SP	53.95	5.00×10^{-4}	30.02	0.001 2	52.86	5.23×10^{-4}
MM ESD	28.36	0.001 1	5.76	0.001 8	32.29	9.49×10^{-4}
HMM ESD	4.73	6.43×10^{-4}	-5.64	7.91×10^{-4}	15.81	5.02×10^{-4}

3.2 结果分析

本文尝试将 Elman 神经网络和 Jordan 神经网络进行组合,使得网络内部同时含有输出反馈和状态反馈,以此增强动态性能,这种网络结构仅适合无延迟或延迟阶数较低的简单神经网络,否则容易导致网络运算效率降低,实际运用中需要尝试或根据实际网络情况添加反馈连接。

将神经网络应用于“黑箱”系统的建模,系统结构参数未知,很难构建出与系统完全贴合的自定义神经网络,通常只能采用标准网络或改进网络。训练过程中,神经网络的初始权值、阈值一般是随机给定的,输出结果带有一定的随机性,必须经过多次训练,选择输出稳定、效果较好的模型进行预测。

从结果上看,Elman-Jordan 神经网络建模效果最好,Elman 神经网络其次,两者预测曲线基本能够与实际贴合上, Jordan 神经网络无法预测脉冲峰值,建模效果最差。组合网络泛化能力提高明显,并且能够有效减小脉冲前端“抖动”现象,充分说明组合网络具备更强的动态性能。

从指标选择上看,拟合度表征曲线的重合程度,均方差表征结果数值间的差距,两者的关注点不同、对数据衡量各有优势。本文旨在建立模型指导工程实践,数据精度满足应用需要,在脉冲前沿、下降沿、持续时间、峰值等关键处预测良好即可,无需过分追求指标数值的极大或极小,这样不仅能够节约成本和时间,还保证模型简洁、计算方便,上述结果中 Elman-Jordan 及 Elman 两种神经网络已经基本达到应用需求。

4 结 语

本文在 TLP 测试系统基础上增设两类电磁脉冲,分别建立 Elman, Jordan 及 Elman-Jordan 3 种类型递归神经网络对实验数据进行建模,有效预测 TVS 在不同脉冲条件下的响应。递归神经网络形式多样、建模精度高,为定量评估 TVS 性能提供了有效途径。

参考文献/Reference:

- [1] ANSI C63.14-2009, American National Standard Dictionary of Electromagnetic Compatibility(EMC) Including Electromagnetic Environmental Effects(E3) [S].
- [2] 张涛,陈亚洲. 平面波激励传输线模型响应分析[J]. 河北工业科技, 2013, 30(3): 152-155.
ZHANG Tao, CHEN Yazhou. Response analysis of transmission line model excited by plane wave [J]. Hebei Journal of Industry Science and Technology, 2013, 30(3): 152-155.
- [3] 郭亚红. EMC 中的两种接地技术[J]. 河北工业科技, 2011, 28(4): 270-271.
GUO Yahong. Case analysis of EMC grounding technology [J]. Hebei Journal of Industry Science and Technology, 2011, 28(4): 270-271.
- [4] 张希军,杨洁,张庆海. 瞬态电压抑制器在快沿电磁脉冲作用下的瞬态响应[J]. 高电压技术, 2012, 38(9): 2242-2247.
ZHANG Xijun, YANG Jie, ZHANG Qinghai. Transient response of transient voltage suppressor device under EMP with fast rise time [J]. High Voltage Engineering, 2012, 38(9): 2242-2247.
- [5] 杨博,刘庆飞,闫冬,等. 瞬态抑制二极管在车辆仪表中的应用[J]. 长春工业大学学报(自然科学版), 2013, 34(2): 149-150.
YANG Bo, LIU Qingfei, YAN Dong, et al. TVS application in vehicle instrument [J]. Journal of Changchun University of Technology (Natural Science Edition), 2013, 34(2): 149-150.
- [6] 陆坚,朱卫良. 一种新型 IC 保护单元 ESD 评价方式——TLP 测试[J]. 电子与封装, 2008, 8(12): 13-16.
LU Jian, ZHU Weiliang. The new method for IC ESD protect constructsures; TLP [J]. Electronics & Packaging, 2008, 8(12): 13-16.
- [7] 吴启蒙,魏明,张希军,等. 瞬态抑制二极管电磁脉冲响应建模[J]. 强激光与粒子束, 2013, 25(3): 799-804.
WU Qimeng, WEI Ming, ZHANG Xijun, et al. Electromagnetic pulse response modeling of transient voltage suppressor [J]. High Power Laser and Particle Beams, 2013, 25(3): 799-804.

- [8] 丛爽, 陆婷婷, 戴谊. 递归神经网络的设计与应用[J]. 计算机工程与应用, 2009, 45(4): 79-81.
CONG Shuang, LU Tingting, DAI Yi. Design and application of recurrent neural networks [J]. Computer Engineering and Applications, 2009, 45(4): 79-81.
- [9] 杜云, 田强, 杜艳, 等. 简单动态递归神经网络在非线性系统辨识中的应用[J]. 河北科技大学学报, 2009, 30(2): 130-134.
DU Yun, TIAN Qiang, DU Yan, et al. Application of simple dynamic recurrent neural network in non-linear system identification [J]. Journal of Hebei University of Science and Technology, 2009, 30(2): 130-134.
- [10] 王俊松. 基于 Elman 神经网络的网络流量建模及预测[J]. 计算机工程, 2009, 35(9): 190-191.
WANG Junsong. Modeling and prediction for network traffic based on Elman neural network [J]. Computer Engineering, 2009, 35(9): 190-191.
- [11] 赵奇, 刘开第, 庞彦军. JORDAN 神经网络在系统辨识中应用研究[J]. 制造业自动化, 2005, 27(3): 16-18.
ZHAO Qi, LIU Kaidi, PANG Yanjun. The application research on system identification of JORDAN networks[J]. Manufacturing Automation, 2005, 27(3): 16-18.
- [12] 王科俊, 王克成. 神经网络建模、预报与控制[M]. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学出版社, 1996: 105-108.
WANG Kejun, WANG Kecheng. Neural Networks' Modeling, Prediction and Control [M]. Harbin: Harbin Engineering University Press, 1996: 105-108.
- [13] 陈国迎, 陈翀. 基于自定义神经网络的 EPS 助力特性研究[J]. 拖拉机与农用运输车, 2009, 36(5): 17-18.
CHEN Guoying, CHEN Chong. Study of assist characteristic of EPS based on self-defined neural network [J]. Tractor & Farm Transporter, 2009, 36(5): 17-18.
- [14] 党小超, 郝占军. 基于改进 Elman 神经网络的网络流量预测[J]. 计算机应用, 2010, 30(10): 2648-2652.
DANG Xiaochao, HAO Zhanjun. Prediction for network traffic based on modified Elman neural network [J]. Journal of Computer Applications, 2010, 30(10): 2648-2652.
- [15] 张宁, 陈笑蓉. Jordan 神经网络的改进研究[J]. 贵州大学学报(自然科学版), 2009, 26(1): 36-39.
ZHANG Ning, CHEN Xiaorong. The improvement studies on Jordan neural networks [J]. Journal of Guizhou University (Natural Science), 2009, 26(1): 36-39.
- [16] HAGAN T, DEMUTH H, BEALE M. Neural Network Design[M]. Boston: PWS Publishing, 1996.
- [17] 王向东. 基于系统辨识的电子设备电磁脉冲效应建模[D]. 石家庄: 军械工程学院, 2008.
WANG Xiangdong. Modeling of the Electric Equipment EMP Effect Based on System Identification[D]. Shijiazhuang: Ordnance Engineering College, 2008.