

文章编号:1001-893X(2011)10-0117-05

基于系统辨识的电路脉冲响应建模^{*}

樊高辉,魏 明,刘卫超

(机械工程学院 静电与电磁防护研究所,石家庄 050003)

摘 要:为探索基于系统辨识的电磁脉冲效应仿真新方法,设计了以阶跃信号和方波脉冲信号为激励源、稳压电源系统为对象的脉冲注入实验,分别采用 OE 模型和 NARX 神经网络模型对该系统的脉冲能量耦合传递函数进行建模。结果表明,所建模型均能较好地预测出响应波形,且 NARX 模型预测能力强于 OE 模型,两者对阶跃、方波脉冲的预测精度分别达到 93.0%、67.4% 和 76.0%、61.4% 以上。两模型的仿真结果证实了系统辨识对电路电磁脉冲响应预测的正确性,为电磁防护设计提供了一种简单有效的仿真新方法。

关键词:电磁脉冲效应;电磁防护;系统辨识;最小二乘法;OE 模型;NARX 神经网络模型

中图分类号:TN03;O441.1 **文献标识码:**A **doi:**10.3969/j.issn.1001-893x.2011.10.024

Modeling of Circuit Pulse Response Based on System Identification

FAN Gao-hui, WEI Ming, LIU Wei-chao

(Institute of Electrostatic and Electromagnetic Protection, Ordnance Engineering College, Shijiazhuang 050003, China)

Abstract: In order to study the new methods of electromagnetic pulse effects simulation based on system identification, the pulse injection experiment of regulated power supply is designed with step signals and square wave pulse as drive sources. The pulse energy coupling transfer function of circuit system is modeled by OE (Output Error) model and NARX (Nonlinear Autoregressive Network with Exogenous Inputs) Neural Network. As a result, both of the models can predict the response wave shapes well, and the predictive ability of the NARX model is better than that of OE model. The goodness-of-fit on the step signal and square wave pulse response wave shapes, predicted by NARX model, is as high as 93.0% and 67.4%, and that predicted by OE model is 76.0% and 61.4%. The simulation results prove the effective application of system identification in electromagnetic pulse response prediction of the circuit. It offers a simple and effective simulating method for electromagnetic protection and design.

Key words: electromagnetic pulse (EMP) effect; electromagnetic protection; system identification; least square algorithm; OE model; NARX neural network model

1 引 言

长期以来,关于电磁效应的研究多集中于孔缝^[1-2]、器件^[3-5]、传输线的研究^[6],都是基于机理

分析,而对电路、电子设备乃至系统的电磁脉冲 (Electromagnetic Pulse, EMP) 响应预测建模方法研究工作还很少^[7-9]。但是,在武器装备电磁脉冲效应评估中,多数被测试对象属于黑箱系统,即内部结

^{*} 收稿日期:2011-04-29;修回日期:2011-08-26

基金资助项目:国家自然科学基金资助项目(50877079);国防科技重点实验室基金资助项目(9140C87030211JB34)

Foundation Item: The National Natural Science Foundation of China (No. 50877079); The National Key Laboratory of Defense Science and Technology Foundation (9140C87030211JB34)

构、电路是未知的,无法对实际系统进行合理的简化假定,这使得传统的机理分析变得异常困难。如何能找到一种依靠测试数据简单有效的统计建模和响应预测方法是实现电磁脉冲效应仿真预测和防护设计的前提。

系统辨识应用于电子设备 EMP 效应仿真,是一种实验测试与理论建模相结合的研究方法。它是在对输入和输出观测的基础上,在指定的一类系统中,确定一个与被识别的系统等价的系统^[10]。该方法的基本原理是把 EMP 源与被测试设备 (Equipment Under Test, EUT) 之间的能量耦合通道看作“黑箱”,这个黑箱系统的特性必然包含在与之对应的输入输出数据中,利用系统辨识可以求得该系统的传递函数,通过得到的传递函数就可以对 EMP 响应进行预测^[11]。

文献[11,12]采用静电放电电磁脉冲与阶跃信号两种单一激励源,算法均基于最小二乘法。不同于前者,本文实验激励源同时采用了阶跃信号与方波脉冲信号,丰富了激励源种类,且在算法上同时采用了传统的最小二乘法与神经网络智能算法,依据实验数据,分别对稳压电源系统进行建模。

2 实验设计

整个实验系统由标准信号发生器、稳压电源、示波器和同轴传输线组成, EUT 是电子设备中常用的稳压电源电路。不同于仿真所用的理想阶跃信号,这里采用更接近工程使用的阶跃信号,更加具有可信度。通过信号发生器(可产生前沿小于 10 ns 的方波脉冲),采用单次触发,分别注入阶跃信号和方波脉冲信号,调节幅值,使输出在 1~5 V 变化,充分激励出 EUT 的动态特性。输入输出数据是用 Tektronix 公司生产的 TDS7404B 高速示波器采样记录,最高测试频率为 4 GHz,最大采样率为 20 G/s,本实验采样率设置为 2 G/s。图 1 是实验示意图。

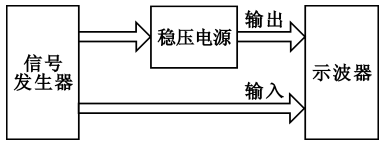


图 1 实验示意图
Fig.1 Sketch of measurement

图 2 是信号发生器输出的幅值为 2 V 的阶跃输入,图 3 是由示波器测得的稳压电源阶跃响应。

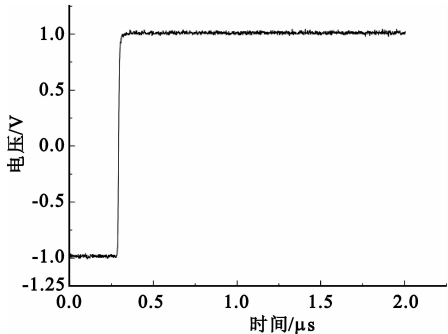


图 2 2 V 阶跃输入
Fig.2 Step input of 2 V amplitude

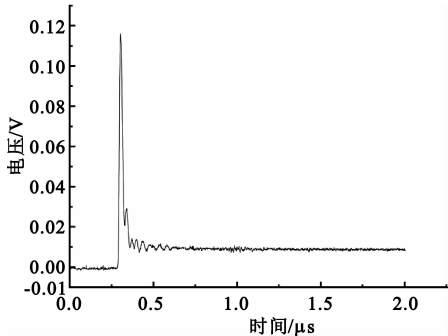


图 3 2 V 阶跃输出
Fig.3 Step output of 2 V amplitude

3 系统辨识建模

3.1 最小二乘法建模

3.1.1 模型选择

选用离散域上辨识低阶系统精度较好的 OE 模型作为辨识模型,其形式为

$$y(k) = z^{-nk} \frac{B(z^{-1})}{A(z^{-1})} u(k) + \epsilon(k) \quad (1)$$

$$A(z^{-1}) = 1 + a_1 z^{-1} + a_2 z^{-2} + \cdots + a_n z^{-n} \quad (2)$$

$$B(z^{-1}) = b_0 + b_1 z^{-1} + b_2 z^{-2} + \cdots + b_m z^{-m} \quad (3)$$

式中, $y(k)$ 为输出, $u(k)$ 为输入, nk 为纯时延, $\epsilon(k)$ 为残差, z^{-1} 为移位算子, n, m 为对应模型的阶次。

将式(1)改写成

$$y(k) = \boldsymbol{\varphi}^T(k) \boldsymbol{\theta} + \epsilon(k) \quad (4)$$

$$\boldsymbol{\varphi}(k) = [-y(k-1), \cdots, -y(k-n), u(k), u(k-1), \cdots, u(k-m)]^T \quad (5)$$

$$\boldsymbol{\theta} = [a_1, a_2, \cdots, a_n, b_0, b_1, \cdots, b_m]^T \quad (6)$$

在 N 次观测之后,可得式(4)向量形式的方程组为

$$Y = \boldsymbol{\Phi} \boldsymbol{\theta} + e \quad (7)$$

式(7)中 $\boldsymbol{\theta}$ 的最小二乘估计值 $\hat{\boldsymbol{\theta}}$ 为

$$\hat{\boldsymbol{\theta}} = (\boldsymbol{\Phi}^T \boldsymbol{\Phi})^{-1} \boldsymbol{\Phi}^T Y \quad (8)$$

3.1.2 参数辨识过程

考虑到辨识要求数据的统计特性与统计时间起点无关,且均值为零,因此,要对数据进行平稳化处理,去除趋势项。在满足奈奎斯特抽样定律的前提下,还要对数据进行重采样,以便在保证建模精度的前提下,减小建模数据量,提高运算速度。模型阶次经 AIC 准则判断,得系统阶次为 $n = m = 3, nk = 1$ 。将所得模型估计参数代入式(2)和式(3),在忽略噪声项影响的情况下,得系统的传递函数为

$$G(z) = \frac{B(z^{-1})}{A(z^{-1})} = \frac{0.03691z^{-1} - 0.07288z^{-2} + 0.03598z^{-3}}{1 - 2.547z^{-1} + 2.157z^{-2} - 0.61z^{-3}} \quad (10)$$

将幅值为 2 V、3 V、4 V 的阶跃输入与 1 V 的方波脉冲输入代入模型,分别预测出其响应;再通过与系统的实际响应作对比,来检验模型的预测能力。结果表明,模型预测响应波形与实际系统响应波形的拟合度分别为 90.1%、78.7%、76.0% 和 61.4%,均方误差值分别为 $1.168\,5 \times 10^{-6}$ 、 $1.174\,2 \times 10^{-5}$ 、 $2.670\,7 \times 10^{-5}$ 和 $2.869\,9 \times 10^{-5}$ 。图 4 和图 5 分别为 2 V 阶跃、1 V 方波脉冲信号的预测响应与实际响应的波形对比。

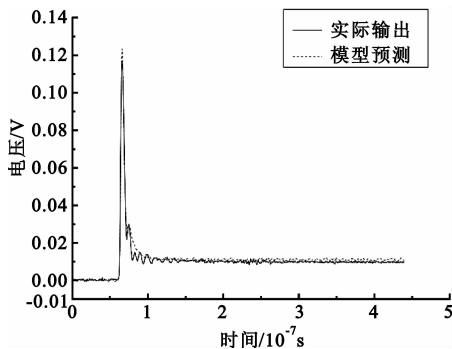


图 4 2 V 阶跃输入实际输出与模型预测
Fig.4 Experiment output and model predict of step input with 2 V amplitude

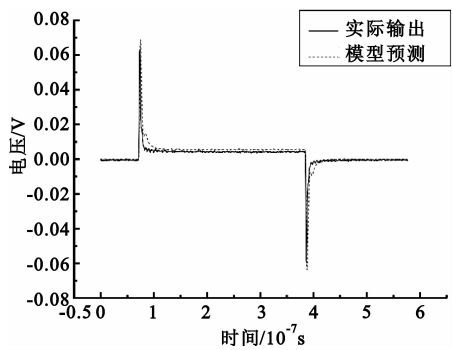


图 5 1 V 方波脉冲输入实际输出与模型预测
Fig.5 Experiment output and model predict of square wave input with 1 V amplitude

3.2 神经网络建模

3.2.1 模型选择

模型采用 NARX 神经网络,结构为串-并联型,使用标准 BP 算法训练,其动态行为由式(11)描述:

$$y(n+1) = F(y(n), \dots, y(n-q+1), u(n), \dots, u(n-q+1)) \quad (11)$$

式中, $u(n)$ 是输入, $y(n)$ 则是输出。该模型的输入由两部分组成^[13]: $u(n), u(n-1), \dots, u(n-q+1)$ 表示来自网络内部的输入;输出的延迟值,即 $y(n), y(n-1), \dots, y(n-q+1)$ 为其外部输入。在此基础上模型输出 $y(n+1)$ 进行回归。其中 F 是自变量的一个函数,辨识过程中用一个反馈网络来逼近函数 F 。该网络对线性与非线性系统均可进行辨识。

3.2.2 数据预处理

建模前亦要对采集到的数据去除趋势项、重采样。此外,由于神经网络输入层函数的特性,所用数据还必须要进行归一化处理。使各样本元素在 $[-1, 1]$ 之间变化,按照式(12)进行归一化计算:

$$T = \left[\frac{T_{\max} - T_{\min}}{S_{\max} - S_{\min}} \right] (S - S_{\max}) + T_{\max} \quad (12)$$

最后,网络训练结果还需还原到实际值,要进行反归一化运算,计算式如下:

$$S = \left[\frac{S_{\max} - S_{\min}}{T_{\max} - T_{\min}} \right] (T - T_{\max}) + S_{\max} \quad (13)$$

式中, S 代表实际数据, T 代表理论数据,下标 max、min 分别代表最大值和最小值。具体运算由 MATLAB 完成。

3.2.3 建模过程

对于本次实验,使用 MATLAB 提供的函数建立两层串-并联 NARX 网络,输入层传输函数为 tan-sig,输出层传输函数为 purelin,训练函数使用 train-br,训练步长为 100,训练目标为 0.001,准则函数为归一化均方误差性能函数 msereg。分别取输入层结点数为 5、10、15、20、30、40,取输入输出的延迟为 2、3、4、5。以幅值为 2 V 的阶跃输入输出实验数据进行训练,然后用训练好的网络来预测阶跃信号、方波脉冲信号的响应。经多次训练后发现,结点数为 15、输入输出的延迟为 4 时,预测输出与实际输出波形吻合最好,拟合度最高,误差最小。图 6 和图 7 分别给出了 NARX 神经网络对 2 V 阶跃输入、1 V 方波脉冲输入的预测响应与实际响应的波形图。

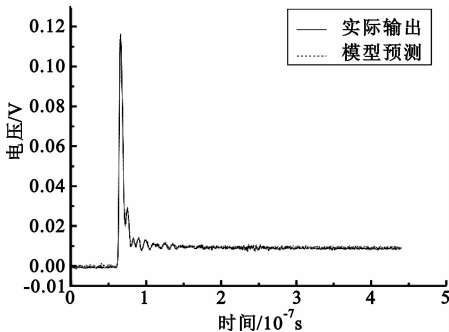


图6 2 V阶跃输入实际输出与模型预测
Fig.6 Experiment output and model predict of step input with 2 V amplitude

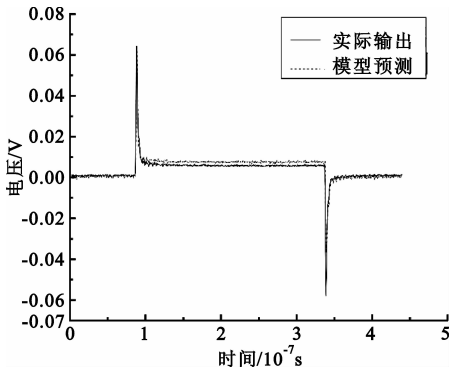


图7 1 V方波输入实际输出与模型预测
Fig.7 Experiment output and model predict of square wave input with 1 V amplitude

4 建模结果分析

本文采用拟合度和均方误差两个评价指标来检验所建模型的精度,结果如表1和表2所示。

表1 拟合度对比
Table 1 Goodnees - of - fit comparison

模型	拟合度			
	阶跃 2 V	阶跃 3 V	阶跃 4 V	方波 1 V
OE	90.1%	78.7%	76.0%	61.4%
NARX	96.1%	93.0%	94.0%	67.4%

表2 均方误差对比
Table 2 Mean square error comparison

模型	均方误差			
	阶跃 2 V	阶跃 3 V	阶跃 4 V	方波 1 V
OE	1.168 5 × 10 ⁻⁶	1.174 2 × 10 ⁻⁵	2.670 7 × 10 ⁻⁵	2.869 9 × 10 ⁻⁵
NARX	5.250 9 × 10 ⁻⁵	1.707 1 × 10 ⁻⁵	1.220 1 × 10 ⁻⁵	1.800 0 × 10 ⁻⁵

由表1和表2可得出以下结论:

(1)不同幅值阶跃信号的预测输出与实际输出波形吻合情况较好,即两者拟合度较高;方波信号拟合度相对较低,但是在整个趋势上的波形吻合情况仍然正确。总之,两种方法所建模型均能准确预测出响应的波形。

(2)在同一输入信号下,NARX神经网络模型预测能力(主要指拟合度)高于OE模型,尤其是在波形改变处,神经网络能够准确预测,OE模型有一定的偏差。这是因为神经网络采用的串并联结构具有反馈环节,能够通过实时训练校正模型结构,相对于一次最小二乘算法的OE模型而言,精度要高得多。但是总体上而言,两者对1 V方波信号拟合度偏低,这跟模型的泛化能力有关,可以通过调整网络结构或改变算法来提高预测的精度。

(3)从均方误差这一指标来看,两种模型误差均较小。相比之下,OE模型好于NARX网络,这跟神经网络的多次训练误差累积有关,这种情况在波形发生改变的时候显得尤为突出。

5 结 论

依据系统辨识理论,分别用基于最小二乘法的OE模型和NARX神经网络模型对稳压电源与脉冲之间的能量耦合通道进行了建模,所得模型均能够准确预测两种不同激励源的响应波形,证实了系统辨识对脉冲响应预测建模的准确性。同时发现在模型阶次相差不大时,NAXR神经网络模型对同种激励源响应的预测精度高于OE模型。

不同于传统机理建模法,系统辨识探索了依靠数据对系统进行建模的方法,证实了系统辨识在电磁领域内建模的正确性,其简单、易行,为电磁防护仿真设计提供了一种新手段。后续工作可以通过增加脉冲激励源类型和改进辨识算法,来提高模型预测响应的精度,增强其泛化能力。

参考文献:

[1] 周金山,刘国治,彭鹏,等.不同形状孔缝微波耦合的实验研究[J].强激光与粒子束,2004,16(1):88-90.
ZHOU Jin-shan, LIU Guo-zhi, PENG Peng, et al. Experimental studies on microwave coupling coefficient for different-shaped apertures [J]. High Power Laser & Particle Beams, 2004, 16(1): 88-90. (in Chinese)

[2] 闫哲,王卫兵,杨欣,等.电磁脉冲孔耦合瞬态响应SEM极点提取[J].电机与控制学报,2007,11(1):37-44.
YAN Zhe, WANG Wei-bing, YANG Xin, et al. The SEM

- poles extracting from the transient response of electromagnetic pulse coupling through aperture[J]. Electric Machines and Control, 2007, 11(1): 37 – 44. (in Chinese)
- [3] 陈曦, 杜正伟, 龚克. 基极注入强电磁脉冲对双极型晶体管的作用[J]. 强激光与粒子束, 2007, 19(3): 49 – 52. CHEN Xi, DU Zheng – wei, GONG Ke. Effects of high power electromagnetic pulse injected from base on bipolar junction transistor[J]. High Power Laser and Particle Beams, 2007, 19(3): 49 – 52. (in Chinese)
- [4] 杨洁, 刘尚合, 原青云, 等. 微波低噪声硅晶体管的方波电磁脉冲损伤研究[J]. 高电压技术, 2007, 33(7): 111 – 114. YANG Jie, LIU Shang – he, YUAN Qing – yun, et al. Square – wave EMP Damage of Microwave Low-noise Silicon Transistors[J]. High Voltage Engineering, 2007, 33(7): 111 – 114. (in Chinese)
- [5] 黄莹. 基于神经网络的非线性电子器件的建模方法研究[D]. 长春: 东北师范大学, 2007. HUANG Ying. A Research on the Method of Modeling of the Nonlinear Electric Devices Based on Neural Network [D]. Changchun: Northeast Normal School, 2007. (in Chinese)
- [6] 李宝忠, 何金良, 周辉, 等. 核电磁脉冲环境中传输线的电磁干扰[J]. 高电压技术, 2009, 35(11): 2753 – 2758. LI Bao – zhong, HE Jin – liang, ZHOU Hui, et al. Electromagnetic Interference of Transmission Line in HEMP Environment[J]. High Voltage Engineering, 2009, 35(11): 2753 – 2758. (in Chinese)
- [7] Frank Sabath, Anthony Wright, Alfred Brenner, et al. Methodology for the HEMP Clearance of a Modern Air Fighter [C]//Proceedings of 2007 IEEE International Symposium on Electromagnetic Compatibility. Honolulu, Hawaii: IEEE, 2007: 8 – 13.
- [8] Ai – Min Zhang, De – Gui Chen, Hang Zhang, et al. A Modeling Method for simulation analysis of Electromagnetic Susceptibility Problem[C]// Proceedings of the 17th International Zurich Symposium on Electromagnetic Compatibility. Zurich: IEEE, 2006: 428 – 43.
- [9] 潘洋, 严萍, 袁伟群. 纳秒脉冲电容分压器测量系统分析及波形重建[J]. 高电压技术, 2005, 31(2): 53 – 55. PAN Yang, YAN Ping, YUAN Wei – qun. Analysis and waveform reconstruction of nanosecond pulse voltage divider measurement system[J]. High Voltage Engineering, 2005, 31(2): 53 – 55. (in Chinese)
- [10] 李言俊, 张科. 系统辨识理论及应用[M]. 北京: 国防工业出版社, 2003. LI Yan – jun, ZHANG Ke. Theory and Application of System Identification[M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2003. (in Chinese)
- [11] 魏明, 杨楠, 王向东, 等. 静电放电电磁脉冲能量耦合的系统辨识建模[J]. 高电压技术, 2011, 36(8): 2017 – 2022. WEI Ming, YANG Nan, WANG Xiang – dong, et al. System Identification Modeling of ESD EMP Energy Coupling [J]. High Voltage Engineering, 2011, 36(8): 2017 – 2022. (in Chinese)
- [12] 刘卫东, 刘尚合, 魏明. 高压脉冲激励的系统连续模型辨识与系统性能分析[J]. 高电压技术, 2010, 36(10): 2494 – 2499. LIU Wei – dong, LIU Shang – he, WEI Ming. Continuous – time Model Identification and Analysis Using Measurement Data with High Voltage Pulse Excitation[J]. High Voltage Engineering, 2010, 36(10): 2494 – 2499. (in Chinese)

作者简介:

樊高辉(1986—), 男, 河南信阳人, 2009 年于郑州大学获工学学士学位, 现为硕士研究生, 主要从事电磁脉冲效应仿真研究;

FAN Gao – hui was born in Xinyang, Henan Province, in 1986. He received the B. S. degree from Zhengzhou University in 2009. He is now a graduate student. His research concerns the simulation of electromagnetic pulse effect.

Email: fangaohuioec@163.com

魏明(1968—), 男, 河北石家庄人, 教授、硕士生导师, 主要从事电磁环境模拟与防护技术研究。

WEI Ming was born in Shijiazhuang, Hebei Province, in 1968. He is now a professor and also the instructor of graduate students. His research concerns theory and techniques of electromagnetic environment simulation and protection.