

文章编号: 1672-2892(2011)06-0728-05

电路端口电磁脉冲响应仿真分析

刘卫超, 魏 明, 樊高辉

(军械工程学院 强电磁环境模拟与防护技术国防科技重点实验室, 河北 石家庄 050003)

摘 要: 为了将系统辨识理论用于典型电路电磁脉冲效应敏感度预测领域, 利用电路仿真软件 PSPICE, 选用基础单元电路, 并在可变的脉冲干扰下获得其端口仿真条件下的响应输出。根据系统辨识理论, 运用 1 组输入输出数据建立电路能量耦合模型。模型的预测输出与实际输出的拟合度能够达到 98.5%, 说明模型的精度达到了要求。通过改变干扰电压的各项参数, 对比实际输出与模型输出的拟合度, 检验任意干扰下模型的适用性。结果表明, 模型输出的峰值、趋势都能逼近实际输出; 参数改变幅度越大, 拟合度越低。这一方法能够在一定程度上反映电路对脉冲干扰的敏感性能, 为电磁脉冲效应敏感度预测新方法的探索打下基础。

关键词: 电磁脉冲; 响应预测; PSPICE 软件; 系统辨识; 仿真分析

中图分类号: TN911.7

文献标识码: A

Analysis of simulation about circuit response caused by electromagnetic pulse

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

(Key Laboratory of Defense Science and Technology on EM Environment Simulation & Protection, Ordnance Engineering College, Shijiazhuang Hebei 050003, China)

Abstract: A base unit circuit is selected to study the effects of a typical circuit under Electromagnetic Pulse(EMP) interference and research the methods of susceptibility forecasting with system identification theory based on simulation software PSPICE. According to system identification theory, a set of energy coupling circuit models is established by input and output data. The Goodness of Fit(GOF) between the predictive output and actual output achieves 98.5%, indicating that the model is suitable. The GOF is compared and its applicability is tested by changing the parameters of interference voltage. The results show that the peak and the trend of the output waveform of the model can approximate the actual output; the larger magnitude of the parameters changes, the lower the fit. To a certain extent, the approach can reflect the sensitivity of the circuit to the pulse interference, thus it can lay a foundation for exploring new method of predicting sensitivity of the circuit electromagnetic pulse effect.

Key words: Electromagnetic Pulse; predication of response; PSPICE; system identification; simulation analysis

电磁脉冲(EMP)影响越来越广泛, 电子设备采用的电路模块集成化越来越高, 门限电压越来越低, 且存在天线耦合、孔缝耦合、电源线路耦合等多种耦合途径, 必然对电子设备能否在干扰下正常工作甚至生存产生影响^[1-2]。掌握了各种典型电路端口干扰响应的规律, 才能对电子设备进行有效的针对性防护^[3]。探索 EMP 响应预测方法, 是开展这个工作的必要前提。关于电子设备 EMP 效应评估方法的研究, 国外开展较早, 早期主要以概率统计法为基础, 评估结果以 EMP 敏感度阈值或生存概率分布曲线的形式给出。但要保证模型的可靠性和准确性, 必须采集大量的实验数据, 工程应用较为繁琐。目前, 国外较为成熟的 EMP 效应预测方法是基于最小相位算法的频谱估计法。但其仍存在问题: a) 适用对象仅限于最小相位系统; b) 实验方法采用低场强照射, 忽略了过电压保护器件的非线性效应, 使问题简化, 因而对强 EMP 场效应的预测结果与实际情况差异较大^[4]。而基于系统辨识理论的 EMP 响应建模仿真与预测, 是结合实验测试与理论建模的一种方法, 其将系统视为“黑箱”, 利用采集的实验数据确定能量耦合模型的各项参数, 找到一个比较理想的模型逼近实际系统^[5]。基于系统辨识理论的电磁脉冲

收稿日期: 2011-05-06; 修回日期: 2011-07-08

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

效应仿真在相关文章中已做探索,并得到较好的仿真结果^[6]。而基于神经网络的系统辨识理论因其自身良好特性应用更加广泛。神经网络具有良好的非线性映射能力、自适应学习能力和并行信息处理能力,可对未知非线性系统进行辨识仿真^[7-8]。基于神经网络的系统辨识,就是选择适当的网络模型作为被辨识系统来逼近实际系统。其辨识过程就是直接学习系统的输入/输出数据,不断调整网络的权值和阈值系数,以使实际系统输出与网络输出误差达到最小,从而归纳出隐含在系统的输入/输出数据的映射关系。针对不同的实验系统,不同结构的神经网络建模效果也会有所不同,文献[9]研究了非线性自回归(Nonlinear Autoregressive exogenous, NARX)网络、径向基(Radial-Based Function, RBF)网络和BP(Back Propagation)网络对不同电磁脉冲实验系统的能量耦合建模分析,结果表明,此方法适用于电子设备电磁脉冲效应仿真建模,比基于机理分析的方法计算量小,便于工程应用。将神经网络应用于电磁脉冲效应仿真预测方面的研究,国内外刚刚起步,可查找的文献还较少,但从已研究成果来看,有较好应用前景。本文选取基础单元电路,利用仿真软件进行脉冲干扰仿真实验,获取输入输出数据;利用基于神经网络的系统辨识理论,建立 EMP 能量耦合模型;根据模型预测输出,探索激励与响应之间的关联规律。

1 仿真实验

当电路置于电磁脉冲场中时,场能量耦合到电路端口上,形成的脉冲电压、电流对电路产生影响。任一电子设备的功能模块都是由大大小小的各种单元电路组成,并且其功能的实现也是建立在各单元电路正常工作的基础之上^[10]。本仿真实验选用功能单一的或非门进行实验,便于对实验结果进行分析比较与方法总结。图1为被试电路原理图,仅当2个输入端输入都为低电平时,输出为高电平,只要有端口输入高电平,输出都为低电平。本实验假设供电线路耦合了脉冲信号,对电路产生影响。当脉冲干扰致使输出端信号发生改变,比如由低电平跃变为高电平,则本单元电路失去了其在功能模块中存在的意义,甚至导致整个功能模块不能输出正确的信号。

运用电路仿真软件 PSPICE 对被试电路进行仿真,利用 V_2 模拟电磁脉冲耦合到供电电源 V_1 之上的电压干扰信号。高空核爆电磁脉冲前期波形、雷电电磁脉冲波形及电快速脉冲群波形都采用双指数形式,具有一定的代表性,其定义包括电场强度峰值、上升时间、半峰宽、峰时、衰落时间等参数。因此利用 V_2 模拟输出双指数波形。使用 PSPICE 中的 Stimulus Editor 对脉冲信号进行描点法编辑,改变脉冲信号的上升时间 T_r 、半峰宽 T_{fwhm} 、峰值 $peak$ 等参数,观察输出端对干扰的响应。将采样率设置为 10 GS/s,采集输入输出数据。图2给出了峰值为 21 V,上升时间为 10 ns,半峰宽为 45 ns 的干扰脉冲耦合到 5 V 供电电路上时,测得的输出波形。当改变以上3个参数时,得到的响应波形也会随之改变。通过以上过程,对比不同参数的干扰脉冲下的电路输出端口响应情况。

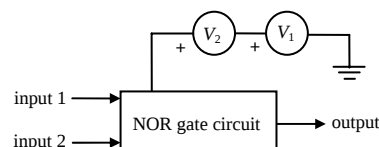


Fig.1 Diagram of NOR gate
图1 或非门原理图

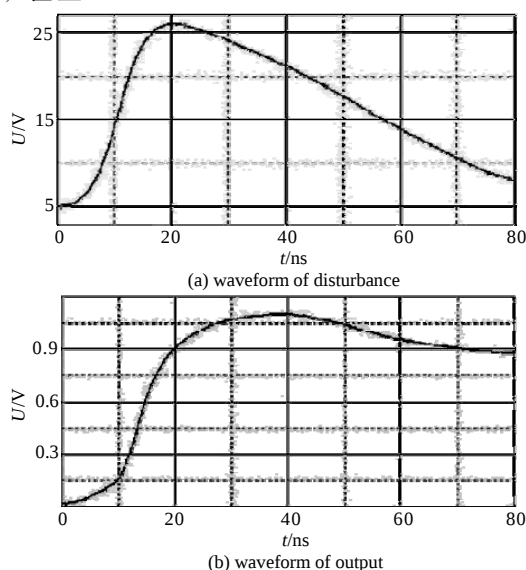


Fig.2 Results of simulation experiment
图2 仿真实验输入输出结果

2 模型的建立与性能分析

2.1 数据预处理

对每组输入数据截取 8 000 个样本,并对各组数据叠加 3 dBm 的高斯白噪声来模拟真实的耦合情况。由于数据量过大,文件长度过长,需要对实验数据进行采样速率一致的重采样。为去除噪声干扰,并保证数据中包含充足的系统真实特性,采用效果较好的小波降噪法对数据进行降噪处理^[11-13],以提高模型辨识精度。再将小波降噪处理后的数据设置为输入、输出变量,进行模型训练和预测。

2.2 模型辨识

本文选用 NARX 模型对实验数据进行建模,见图3, NARX 模型

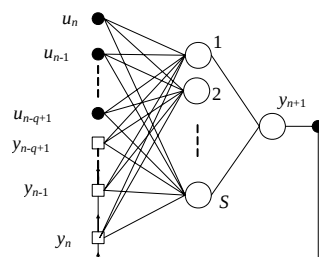


Fig.3 Architecture of the NARX neural network
图3 NARX 网络结构

是1个周期性循环的动态网络,它带有1个后向反馈,使网络闭合为1个循环线路。

设 u_n 是模型的输入, y_{n+1} 是模型的输出。该模型的输入由2部分组成:现在和过去的输入值,即 $u_n, u_{n-1}, \dots, u_{n-q+1}$, 表示来自网络外部的输入;输出的延迟值,即 $y_n, y_{n-1}, \dots, y_{n-q+1}$, 在此基础上模型输出 y_{n+1} 进行回归^[14-15]。NARX 输出信号是依赖于之前若干个时刻的输入信号及当前和之前若干个时刻独立的外部输入信号,其表达式为:

$$y_{n+1} = f(u_n, u_{n-1}, \dots, u_{n-q+1}, y_n, y_{n-1}, \dots, y_{n-q+1})$$

利用 MATLAB 编程建立一个2层的 NARX 神经网络模型,设定模型的输入/输出延时阶次为2,隐含层传递函数为 tansig, 输出层函数为 purelin, 训练函数使用 trainbr, 训练目标为 0.01。分别取隐含层神经元数为 20, 30, 40 和 50 进行实验, 计算表明当隐含层神经元数超过 30 后, 网络性能并未有大的提高, 甚至误差增大, 网络变得很不稳定。最后确定隐含层神经元数为 30。迭代次数分别选择 30, 50, 70 和 100 进行训练, 发现超过 50 后, 误差性能并没有改善, 为了降低训练时间, 迭代次数定为 50。利用上升时间为 10 ns, 脉宽为 30 ns, 峰值为 30 V 干扰脉冲输入输出数据(记为第1组数据)进行建模。

2.3 泛化能力比较分析

模型建立后, 利用第1组数据对其进行自验证。图4为所建模型的预测响应与实际响应的拟合图。可以看出, 拟合度达到了 98.5%, 说明了模型的有效性、正确性。

为了检验当第1组数据输入波形的参数发生改变时, 模型预测的电路响应将如何改变, 且其与实际输出有什么差别, 选择了表1中15组数据进行对比(其中第1组为建模数据)。

对比发现, 当单一改变某一波形参数时, 拟合度略有下降; 当2个或3个参数发生改变时, 拟合度下降的幅度变大, 且参数改变幅度变大时, 拟合度下降的幅度也变大。总体来看, 拟合度都在 80% 以上, 分析有几个原因: a) 输入干扰波形比较理想, 没有较大波动, 描述参数少且幅度变化有限; b) 所建模型符合本系统特性, 能够有效逼近实际输出值; c) 限于或非门电路的特性, 其仿真实验不同脉冲响应输出波形趋势变化不大。

为了探索任一干扰下, 所建模型的有效性, 采用方波作为输入。图5为 PSPICE 仿真输入的方波波形, 其上升时间为 9 ns, 幅值 20 V, 脉宽 49 ns, 下降时间 12 ns, 并且叠加了随机干扰。

从图6可看出, 模型输出与实际仿真输出拟合度达到 80.6%, 波形趋势一致, 但在细节处仍有差别。分析原因: a) 双指数波形未能充分激励出能量耦合通道的系统特性, 没有完全包含系统的特征信息, 利用这种条件下采集的数据建立的模型对系统细节有所忽略; b) 模型的泛化能力受到所要学习的输入输出数据之间隐含的函数的光滑性的影响, 即输入有较小的扰动, 大多数情况下, 输出也有较小的变化。然而利用方波得到的响应作为验证, 其附加的干扰变化比较剧烈, 带来较大波动。

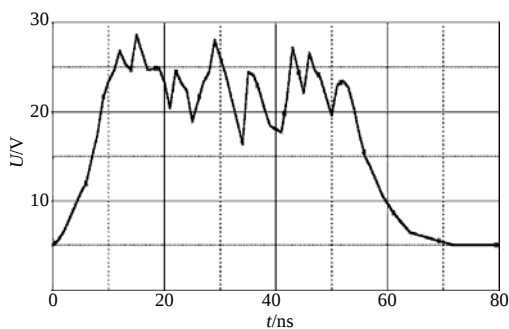


Fig.5 Input of simulation experiment
图5 仿真实验输入

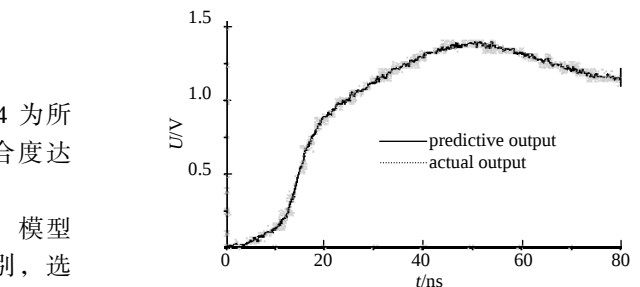


Fig.4 Fitting graph of model output and experiment output
图4 模型预测输出与实际输出对比图

表1 不同预测输出的拟合度对比

Table1 Fitting comparison of different predictive output

order	parameters of waveform			goodness of fit
	t_r/ns	$T_{\text{width}}/\text{ns}$	peak/V	
1	10	30	30	98.5%
2	20	30	30	92.2%
3	30	30	30	87.3%
4	10	10	30	93.7%
5	10	20	30	96.9%
6	20	10	30	92.6%
7	20	20	30	94.2%
8	30	10	30	86.2%
9	30	20	30	91.3%
10	10	30	40	95.9%
11	20	30	50	86.9%
12	10	20	40	91.5%
13	10	20	50	91.4%
14	30	10	40	82.9%
15	30	20	50	81.1%

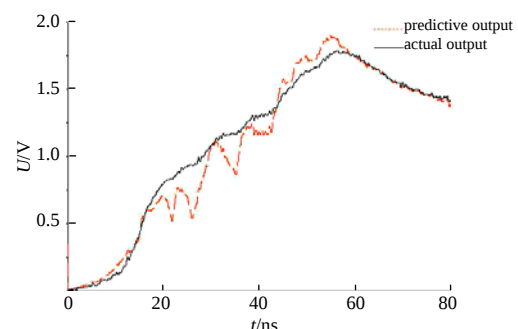


Fig.6 Fitting graph of predictive output and actual output
图6 预测输出与实际输出拟合图

2.4 应用性分析

从仿真实验实际输出可以看出,对于或非门电路,在干扰到来的情况下,输出在短时间内由低电平跃变为高电平。若其在某功能模块中产生类似响应,必然会对下一级电路输出错误信号。而经过神经网络建模所输出的响应预测,与仿真实验所得输出结果相差无几,可以确定出电平跃变的时间拐点等信息,因此可以通过预测大致确定电路输出电平是否跃变及发生跃变的时刻,对电路响应进行定性分析。另外,由于相同的实验条件下,能量耦合传递函数是确定的,因此,对于不同的 EMP 激励源,只要通过解析、数值计算或实验方法得到其时域表达序列,就可利用系统辨识得到的传递函数计算出被试设备及其内部电路单元的端口响应,进而预测出被试设备在该 EMP 环境中的敏感度。

3 结论

对基础单元电路或非门进行仿真实验,改变干扰电压波形,获取不同的输出端口响应。利用所得的实验数据进行系统辨识建模,然后通过模型对不同实验结果进行响应预测,预测结果与实验结果拟合较为理想,说明了所建立的神经网络模型反映了系统本身的能量耦合特性,对预测不同脉冲干扰带来的响应具有通用性:

a) 利用电路仿真软件 PSPICE 对电路在干扰情况下的响应进行了仿真, Stimulus Editor 能够对输入波形进行编辑,改变耦合电压波形的各项参数更加方便。

b) 通过建立的神经网络能量耦合模型,对多组不同干扰响应进行拟合度对比。可以看出,波形参数变化越多,幅度越大,拟合度将有所下降。

c) 在泛化能力可信的基础上,根据电路本身性能分析,可以确定一类干扰输入会使电路发生怎样的改变。此方法为基于系统辨识的电路端口效应预测打下基础。

由于现实中电磁环境复杂多样,EMP 辐射源难以模拟任意波形的干扰,实验存在一定的困难,该仿真建模方法为电路的电磁脉冲干扰防护技术及效应评估提供一种新的参考方法。

参考文献:

- [1] Achar R, Nakhla M. Simulation of high-speed interconnects[J]. Proceedings of the IEEE, 2001, 89(5): 693-727.
- [2] Jaekel BW. Electromagnetic compatibility of distribution switchgear installations[C]// IEEE Conference Publication No. 459, Trends in Distribution Switchgear. London: [s.n.], 1998: 52-57.
- [3] Daniel Nitsch, Michael Camp, Frank Sabath, et al. Susceptibility of Some Electronic Equipment to HPEM threats[J]. IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility, 2004, 46(3): 380-389.
- [4] 魏明. 设备级电磁脉冲效应仿真算法研究综述[J]. 军械工程学院院报, 2009, 21(6): 50-53. (WEI Ming. A Survey on Simulating Arithmetic for Electromagnetic Pulse Effects at Equipment level[J]. Journal of Ordnance Engineering College, 2009, 21(6): 50-53.)
- [5] 张爱民, 张航, 陈德桂, 等. 基于系统辨识的电子设备建模及其应用[J]. 电工技术学报, 2009, 24(8): 1-5. (ZHANG Aimin, ZHANG Hang, CHEN Degui, et al. Modeling with System Identification for Electronic Devices and Its Application[J]. Transactions of China Electro Technical Society, 2009, 24(8): 1-5.)
- [6] 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, 2010, 36(8): 2017-2022. (WEI Ming, YANG Nan, WANG Xiangdong, et al. System Identification Modeling of ESD EMP Energy Coupling[J]. High voltage engineering, 2010, 36(8): 2017-2022.)
- [7] 徐小平, 钱富才, 王峰. 非线性系统辨识方法研究[J]. 计算机工程与应用, 2010, 46(6): 19-24. (XU Xiaoping, QIAN Fucui, WANG Feng. Research on identification method of nonlinear system[J]. Computer Engineering and Application, 2010, 46(6): 19-24.)
- [8] YANG Jenpin, SHEN Chiyen, CHEN Yuju, et al. The Identifications of Ammonia Concentration by Different Neural Models[C]// 2010 International Conference on Measuring Technology and Mechantronics Automation. Changsha: [s.n.], 2010: 881-884.
- [9] 陈祥. 电子设备电磁脉冲效应的神经网络建模[D]. 军械工程学院, 2009. (CHEN Xiang. Neural Network Modeling of the Electric Equipment EMP Effect[D]. Ordnance Engineering College, 2009.)
- [10] 周星, 张成怀, 魏光辉. 电磁脉冲与连续波对数字电路的辐照效应比较[J]. 高电压技术, 2010, 36(7): 1761-1766. (ZHOU Xing, ZHANG Chenghuai, WEI Guanghui. Comparison of Radiation Effects of CW and EMP on Digital Circuit[J]. High Voltage Engineering, 2010, 36(7): 1761-1766.)
- [11] 秦亚辉, 冯景辉, 陈立定. 基于小波变换的信号去噪方法研究[J]. 信息技术, 2010(1): 53-57. (QIN Yahui, FENG Jinghui,

- CHEN Liding. Study of signal denoising methods based on wavelet transform[J]. Information Technology, 2010(1):53-57.)
- [12] 吴伟,蔡培生. 基于 MATLAB 的小波去噪仿真[J]. 信息与电子工程, 2008,6(3):220-222. (WU Wei,CAI Peisheng. Simulation of Wavelet Denoising Based on MATLAB[J]. Information and electronic engineering, 2008,6(3):220-222.)
- [13] LI Xiaoping, LV Xiaoxing, LI Yinxian, et al. Research on denoising of license plate image based on wavelet technology[C]// 4th International Conference on New Trends in Information Science and Service Science. Gyeongju:[s.n.], 2010:349-354.
- [14] 张国梁,张志杰,杜红棉,等. 基于 NARX 神经网络的冲击加速度计建模研究[J]. 弹箭与制导学报, 2008,28(3):284-286. (ZHANG Guoliang, ZHANG Zhijie, DU Hongmian, et al. Research on Modeling of Shock Accelerator Based on NARX Neural Network[J]. Journal of Projectiles, Rockets, Missiles and Guidance, 2008,28(3):284-286.)
- [15] XIE Hang, TANG Hao, LIAO Yuhe. Time series prediction based on NARX neural networks: An advanced approach[C]// 2009 International Conference on Machine Learning and Cybernetics. Baoding:[s.n.], 2009:1275-1279.

作者简介:



刘卫超(1984-), 男, 山东省肥城市人, 在读硕士研究生, 研究方向为电磁仿真与效应评估技术. email:liuweichao1006@yahoo.cn.

魏 明(1968-), 男, 博士, 教授, 中国兵工学会电磁技术专业委员会委员, 主要从事电磁脉冲效应与仿真技术研究.

樊高辉(1986-), 男, 河南省信阳市人, 在读硕士研究生, 主要从事电磁仿真技术研究.

(上接第727页)

- [7] Mayes J R, Carey W J, Nunnally W C, et al. The Marx Generator as an Ultra Wideband Source[C]// The 13th IEEE International Pulsed Power Conference. Las Vegas, Nevada:[s.n.], 2001.
- [8] Mayes J R, Lara M B, Mayes M G, et al. An Enhanced MV Marx Generator for RF and Flash X-ray Systems[C]// 15th IEEE International Pulsed Power Conference. Monterey, CA:[s.n.], 2005.

作者简介:



宋法伦(1977-), 男, 山东郯城人, 博士, 主要从事脉冲功率技术研究. email:emplasma@ustc.edu.

张 勇(1978-), 男, 吉林敦化人, 助理研究员, 主要从事微波器件硬管化技术研究.

卓婷婷(1986-), 女, 陕西宝鸡人, 研究实习员, 主要从事高功率微波技术研究.

谢 平(1980-), 男, 四川绵阳人, 助理研究员, 主要从事天线技术研究.

龚海涛(1973-), 男, 四川德阳人, 工程师, 主要从事脉冲功率实验技术研究.

金 晓(1969-), 男, 兰州人, 研究员, 主要从事高功率微波技术研究.

冯弟超(1974-), 男, 重庆人, 副研究员, 主要从事电源与控制技术研究.

甘延青(1970-), 男, 四川绵阳人, 助理研究员, 主要从事脉冲功率技术研究.