

DOI:10.13296/j.1001-1609.hva.2020.02.004

电快速瞬变脉冲群发生器的特征根建模方法研究

翟小社¹, 刘畅², 李仁峰², 姚晓飞¹

(1. 西安交通大学电力设备电气绝缘国家重点实验室, 西安 710049; 2. 天津平高智能电气有限公司, 天津 300304)

摘要: 在电磁兼容设计中, 为了对电子单元的电快速瞬变脉冲群抗扰度性能进行预测, 须分别建立干扰源发生器及耦合装置的仿真模型。文中的研究目标是研究和验证基于特征根理论的电快速瞬变脉冲群发生器建模方法。对于干扰源发生器的建模, 文中根据电网络理论, 采用特征根法建立发生器脉冲形成网络的传输函数, 其中, 以两个负实根表征脉冲形成电路的非振荡物理过程, 两共轭复根表征其衰减振荡过程, 特征参数均由生产厂家提供的发生器开路校准波形确定。基于传输函数, 采用CAUER法进行电网络综合, 并根据匹配校准波形进行归一化运算, 最终建立发生器的等效电路。对于标准耦合夹的建模, 以矢量网络分析仪对耦合装置的端口散射参数(S参数)进行测量, 在相应频段内以矢量匹配法对S参数的测量结果进行有理函数逼近, 建立耦合网络的宏模型, 并进而转换为SPICE等效电路。基于以上建模方法对两平行信号线的共模及差模干扰进行了仿真与实验对比, 对比结果验证了文中方法的有效性。

关键词: 电快速瞬变脉冲群; 特征根法; 传输函数; 等效电路

Modeling of the Electrical Fast Transient/Burst Generator by Latent-roots Method

ZHAI Xiaoshe¹, LIU Chang², LI Renfeng², YAO Xiaofei¹

(1. State Key Laboratory of Electrical Insulation and Power Equipment, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China; 2. Pinggao Intelligent Electric Co., Ltd., Tianjin 300304, China)

Abstract: It is essential to construct an accurate model consisting of both an equivalent circuit of electrical fast transients/burst (EFT/B) generator and a coupling device, so as to predict interference immunity performance of an electronic equipment under EFT/B test. In this paper, a modeling method of EFT/B generator is proposed based on the theory of latent roots. For the modeling of the interference source generator, a transfer function of EFT pulse-forming network is constructed by the latent-roots method based on the network theory, in which two negative real roots are adopted to characterize the non-oscillatory physical process of the network, and both conjugated complex roots are used to characterize the damping-oscillation process. The parameters referring to the transfer function are determined according to the standardized waveforms of the generator in open-circuit condition. These standardized waveforms were provided by the manufacture of the generator. Subsequently, an equivalent circuit of EFT/B generator is constructed via synthesis of electrical network based on CAUER method and re-normalization calculation based on the matched standardized waveforms. For the modeling of the standard coupling clamp, a SPICE equivalent circuit is obtained from a macro model of the coupling network. The coupling network is constructed by the rational function approximation of the test results of the scattering parameters (S-parameters) based on the vector fitting method in a corresponding frequency band. The S-parameters at the ports of a coupling device are measured by a vector network analyzer. The proposed modeling method is verified by comparing the simulation results of differential-mode interference and common-mode interference of two parallel signal lines with the experimental data.

Key words: electrical fast transient/burst; latent root; transfer function; equivalent circuit

收稿日期: 2019-10-21; 修回日期: 2019-12-17

基金项目: 国家自然科学基金重点项目(51937009)。

Project Supported by the Key Project of National Natural Science Foundation of China(51937009).

0 引言

电快速瞬变脉冲群抗扰度实验(EFT/B)是检验电子设备对高频传导干扰电磁敏感性(EMS)的主要方式^[1-6]。根据实验标准的规定,需要对受试设备电源端口及信号端口分别加载脉冲干扰进行测试。为了以计算机仿真的方式对设备的干扰情况进行预测,应建立脉冲群发生器的等效电路模型。另外,当需要对设备的信号 I/O 端口进行仿真预测时,还应建立恰当的标准耦合夹模型,在此基础上仿真再现设备端口的干扰情况,结合仿真结果对抗干扰设计进行定量评估。

IEC 61000-4-4 标准中对有关实验装置进行了详细的规定,但给出的发生器等效电路仅用于对其工作原理的理解,以及对输出电路的规范,不能直接用于 EFT/B 实验的仿真研究^[7]。文[8-9]以计算方式确定发生器的主要参数,例如储能电容值,但其依据的有关单脉冲能量的规定,在修订版的 IEC 61000-4-4 标准中已经废止^[10]。更重要的是,在修订版的标准中,为保证 EFT 抗扰度试验的可重复性,以确保不同实验室仪器设备的测试结果具有可比性,规定了来自不同厂商的 EFT 发生器需在两种特定负载条件下进行校准(50 Ω , 1 k Ω 端接负载)。很显然,原有的建模方法缺乏系统考虑,难以适应新标准框架下的建模需要。

为满足新标准要求,文中在文[11-12]中提出并研究了一种 EFT/B 发生器的建模方法:通过构造脉冲形成网络的传输函数,并基于电网络综合方法构建发生器的等效电路。为了进一步完善该建模方法,建立更加符合 EFT/B 发生器实际物理过程的电路模型,文中提出以特征根法建立发生器脉冲形成网络的传输函数,其中,以两个实根表征其非振荡物理过程,以一对共轭复根表征其衰减振荡过程,从而确定了 EFT/B 脉冲形成网络的特征多项式和传输函数。基于传输函数的构建和经典电网络综合方法,最终确定发生器内部的各原件参数。

对于现有的标准耦合夹建模方法,现有研究主要采用了多传输线法(MTL)^[13],随着耦合线数量的增加以及模型带宽的扩展,该方法建模过程的复杂性将随之增加,因此不适应系统级复杂网络的建模与仿真研究。为此,文中首先对耦合装置的端口散射参数(S参数)进行测量,在相应频段内以矢量匹配法对 S 参数的测量结果进行有理函数逼近,建立耦合网络的宏模型,并基于电路理论转换为 Spice 等效电

路。基于以上方法,文中以两平行信号线的共模及差模干扰为例进行了仿真与实验对比,结果表明,该方法能够较好地再现端口干扰加载情况,且无需考虑耦合网络内部的电磁结构,适合系统级复杂电磁兼容问题的仿真要求。

1 EFT 脉冲发生器的建模

1.1 脉冲发生器的输出波形

标准给定的发生器简化等效电路见图 1,图 1 中:隔直电容 C_d 及匹配电阻 R_m 的取值已确定; U 为直流源; R_c 为电源电阻; C_c 为储能电容; R_s 为内部的放电电阻; R_o 为外部的负载电阻。

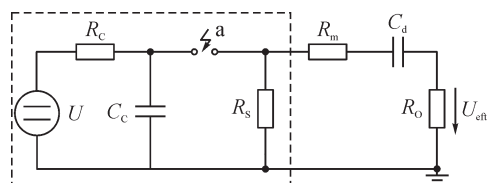


图1 标准给定的发生器简化电路

Fig. 1 The simplified circuit recommended by the standard

为了确定发生器的内部细节,首先考虑开路校准波形(1 000 Ω)。在此情况下,可忽略发生器电路的输出部分,集中讨论发生器的内部电路。开路下的校准波形见图 2^[14],各输出电压波形均由给定的实验电压进行归一化处理,考虑到波形的分散性,文中取平均波形见图 2。

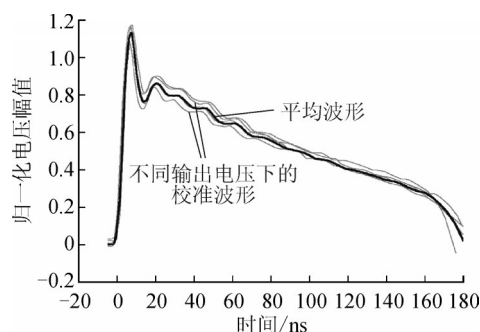


图2 发生器开路校准波形

Fig. 2 The verification waveforms under open-circuit condition of the generator

1.1.1 脉冲形成过程分析

1)非振荡过程。发生器的基本过程,即非振荡过程由式(1)表示^[15]

$$U_{\text{eff}} = \lambda U_p (e^{t/p_1} - e^{t/p_2}) \quad (1)$$

式(1)中: U_{eff} 为输出电压; U_p 为开路输出电压; λ 为波形系数,由基本电路理论, p_1, p_2 可作为该非振荡过程的特征参数。根据电路理论,对应于(1)的电路过程可由图 3 虚线框中的二阶电路阶跃响应

表示^[11]。

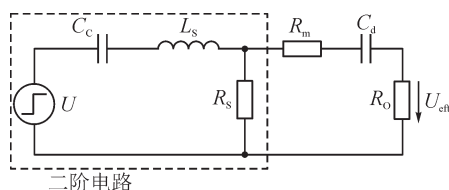


图3 与式(1)对应的二阶阶越响应电路

Fig. 3 The second-order step response circuit, corresponding to equation (1)

2) 衰减振荡过程。由于EFT脉冲的上升速度快, 因此无可避免地存在着衰减振荡过程, 该过程对于发生器的峰值电压和前沿时间都有较大影响。由电路理论可知, 该过程可由一对共轭复数进行表征^[16]。

$$P_{3,4} = \delta \pm j\omega \quad (2)$$

式(2)中: δ 是衰减因数; ω 是角频率。

1.1.2 网络传输函数的构造

由上述物理过程以及特征参数的讨论, 传输函数的特征多项式, $D(s)$ 可以被构造出来, 位于传输函数的分母位置。

$$D(s) = (s - p_1)(s - p_2)(s - p_3)(s - p_4) = s^4 + s^3 a_3 + s^2 a_2 + s a_1 + a_0 \quad (3)$$

传输函数的分子, 包括传输零点以及增益系数的确定可根据网络内部形成传输零点的支路进行确定

$$\begin{cases} H(s) = \frac{g \cdot N(s)}{D(s)} \\ g = a_1 \\ N(s) = s \end{cases} \quad (4)$$

式(4)中, g 为传输函数的增益系数, 当忽略网络内部的电阻时, 其值为 a_1 。 $N(s)$ 是传输函数的分子项, 根据对串臂电容和并臂电感的分析, 该传输函数在坐标原点处存在一阶传输零点, 基于 MATLAB 可建立图 4 所示传输函数阶跃响应仿真模型, 模型采用阶越函数激励源, 激励源幅值根据输出电路的分压关系应设定为 0.95。

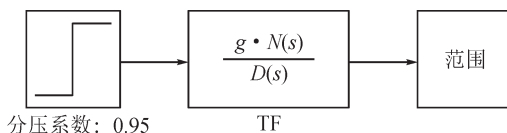


图4 传输函数阶跃响应仿真模型

Fig. 4 The simulation model of the step response with transfer function

计算该传输函数的阶越响应, 并与图 2 给定的平均校准波形进行对比, 取最小二乘解, 确定 p_1 到 p_4 的参数, 见式(5)。传输函数及对应参数值的阶越响

应见图 5, 与给定的平均校准波形能够较好的符合。

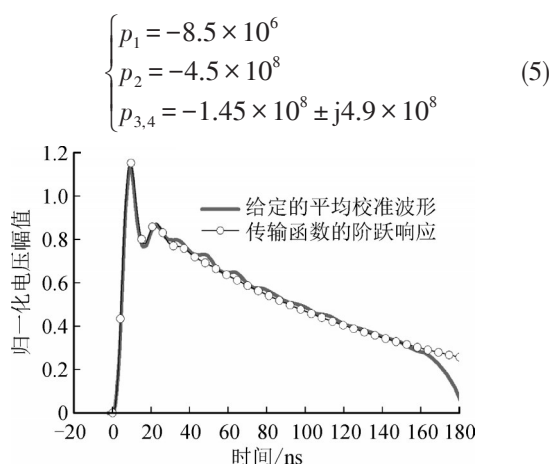


图5 传输函数的阶越响应

Fig. 5 Step response of the TF

1.2 CAUER 综合

由于特征参数的实部均为负数, 传输函数的分母多项式为 Hurwitz 多项式, 因此该传输函数所对应的电路可由无源器件实现^[17], 文中采用 Cauer 法对图 6 所示 EFT/B 网络进行电网络综合^[18]。

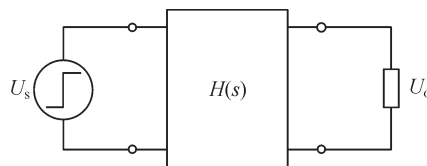


图6 EFT/B 网络

Fig. 6 Network of the EFT/B generator

根据电网络综合理论, 对于式(6)所示传输函数, 其相应的 y_{12} 和 y_{22} 见式(7)

$$H(s) = \frac{a_1 \cdot s}{s^4 + a_3 s^3 + a_2 s^2 + a_1 s + a_0} \quad (6)$$

$$\begin{cases} -y_{12} = \frac{N_1}{M_2} = \frac{a_1 \cdot s}{s^4 + a_2 s^2 + a_0} \\ y_{22} = \frac{N_2}{M_2} = \frac{a_3 \cdot s^3 + a_1 \cdot s}{s^4 + a_2 s^2 + a_0} \end{cases} \quad (7)$$

式(7)中: N_1 是相应的奇数多项式; M_2 和 N_2 是相应的 Hurwitz 多项式的偶部和奇部。

如式(8)所示, 对 y_{22} 进行分解以分别实现各传输零点, 其中首先实现坐标原点的传输零点, 最终实现图 7 所示 EFT/B 发生器电路, 其中, 由标准所给定的电路输出部分直接与电网络综合部分相串联。电路参数可由式(9)全部确定。

$$\begin{aligned} z_{22} = \frac{1}{y_{22}} &= \frac{s^4 + a_2 s^2 + a_0}{a_3 s^3 + a_1 s} = \\ &= \frac{1}{s C_C} + s L_0 + \frac{1}{s C_P + \frac{1}{s L_S}} \end{aligned} \quad (8)$$

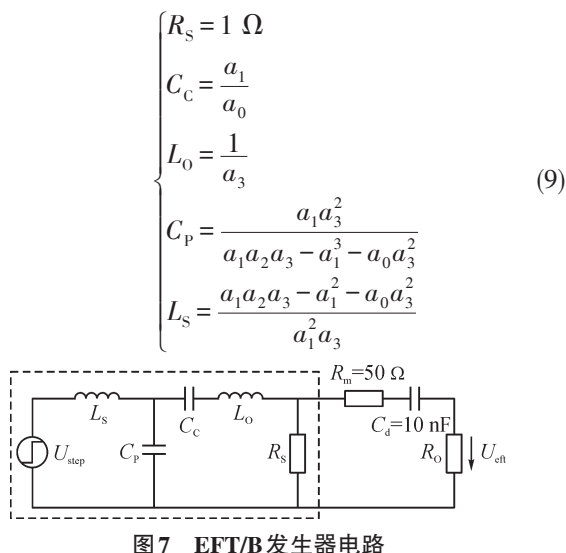
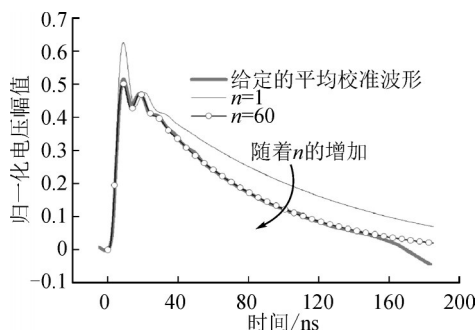


图7 EFT/B发生器电路

Fig. 7 Circuit of the EFT/B generator

1.3 等效电路的归一化

图7中 R_m 端接的等效电阻归一化仿真结果见图8。由图8可见,仿真结果与给定的平均校准曲线存在明显差异。其主要原因是,此时发生器的放电过程主要由内部图7中 $R_s(1 \Omega$ 电阻)决定。为了反映实际的负载影响,图7电路须选用恰当的归一化系数进行归一化处理。选用PSPICE对该电路进行 50Ω 端接下的仿真,当归一化系数 n 增加时,其放电速度逐渐增加,且脉冲上升过程的振荡逐步受到抑制,如图8所示,当归一化系数等于60时,仿真结果与给定曲线能够较好吻合。

图8 R_m 端接等效电路的归一化仿真结果Fig. 8 Renormalization simulation results of the equivalent circuit at terminals of R_m

2 EFT/B耦合夹的建模方法

文中耦合夹的建模基于耦合网络端口 S 参数的测量。在相应频段内以矢量匹配法对测量结果进行有理函数逼近,建立耦合网络的宏模型,进而基于Jordan-canon-ical方法以及SPICE电路转换规则,建立耦合夹等效电路模型^[19]。

2.1 多端口 S 参数的测量方法

I/O口EFT/B的标准实验装置示意图见图9。其

中,脉冲发生器产生的干扰信号通过标准耦合夹耦合到受试设备的信号线。受试设备及辅助设备分别位于耦合夹的两侧。为适应建模研究的需要,文中建立图10所示的 S 参数测量装置原理图。其中,两块金属板垂直安装于耦合夹两侧,作为SMA同轴插座的支撑,I/O信号线与SMA的芯线端子连接形成标准测量端口。另外,依照标准规定,将以上实验装置安装于金属参考面之上。

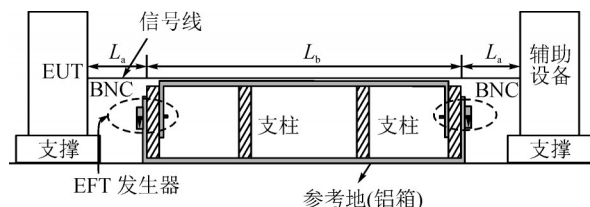
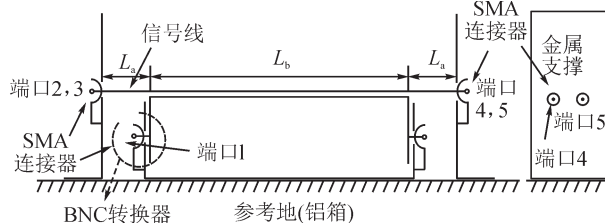
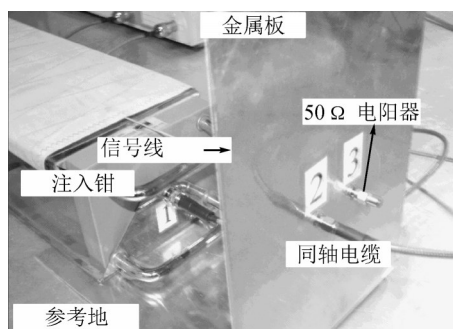


图9 I/O口EFT/B实验标准装置示意图

Fig. 9 Sketch of the standard EFT/B test device of the I/O ports

图10 S 参数测量装置原理图Fig. 10 Schematic of S parameter measurement device

所建立的 S 参数实验装置实物图见图11。文中对 S 参数的测量采用了二端口矢量网络分析仪(Aglient E5061B),测量的频率范围设定为 9 kHz 到 200 MHz ,该频率范围可涵盖EFT干扰信号频段^[20]。

图11 S 参数测量装置实物图Fig. 11 Onsite test equipment of the S -parameter measurement

多端口 S 参数的测量须在网络的每一对端口之间进行,根据测量原理,其余未用到的端口均应端接 50Ω 电阻,使之严格处于匹配状态,如图11所示。 n 端口电网络的 S 参数见式(10),其中, $\omega_i = 2\pi f_i$ ($i=1, 2, 3, \dots, n$)。根据文中模型特点,基于测量结果建立了5端口 S 参数矩阵。

$$S = \begin{bmatrix} S_{11}(\omega_i) & \dots & S_{1n}(\omega_i) \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ S_{n1}(\omega_i) & \dots & S_{nn}(\omega_i) \end{bmatrix} \quad (10)$$

2.2 有理函数逼近及电网络综合

基于耦合网络的 S 参数测量, 文中的矢量匹配及有理函数逼近采用了 12 对共轭复数极点及 2 个实数极点建立 5 端口网络宏模型。5 端口网络宏模型的 S 参数幅值和相位的仿真结果与实际的测量结果一致, 见图 12、13。

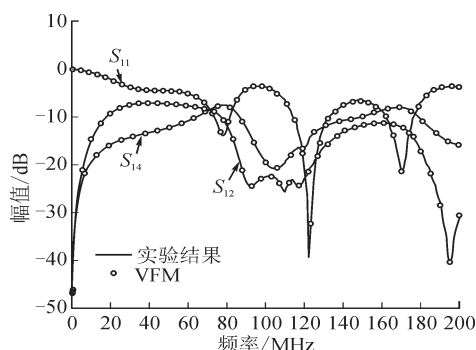


图 12 5 端口网络宏模型 S 参数幅值: 仿真结果和实验结果的对比

Fig. 12 Amplitude of the S parameters of macro-model network with 5 ports: Comparison of the simulation result with the experimental result

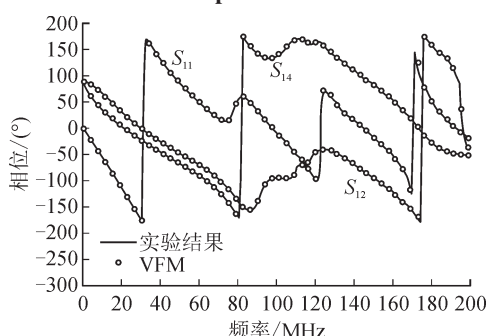


图 13 5 端口网络宏模型 S 参数相位: 仿真结果和实验结果的对比

Fig. 13 Phase of the S parameters of macro-model network with 5 ports: Comparison of the simulation result with the experimental result

根据文[19]的研究方法, 文中基于 Jordan-canonical 法以及 SPICE 电路转换规则建立了耦合夹等效电路模型, 并与前文所述的 EFT/B 发生器等效电路相连接, 最终建立如图 14 的耦合夹 5 端口网络仿真模型。

3 实验测量及仿真

时域测量采用 DPO3032(300 MHz) 示波器以及 TekP6139A (500 MHz/8 pF/10 M Ω) 电压探头。

基于图 14 仿真模型, 可以进行不同端接情况下

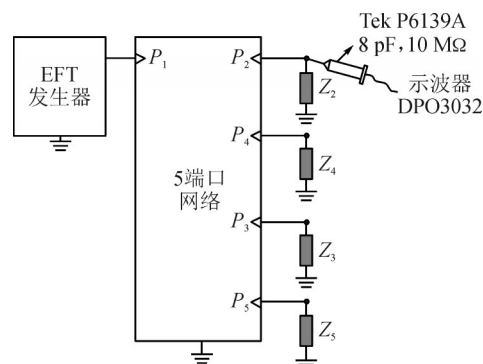


图 14 耦合夹 5 端口网络仿真模型

Fig. 14 Equivalent circuit of the 5-port network

的暂态仿真与实验对比。文中考虑开路以及接地两种简单情况。

首先, 将端口 2、4 置于开路状态, 3、5 端口接地。干扰源在 250 V 实验电压下, 2、4 端口的暂态电压仿真结果与实验测量结果的对比分别见图 15、16。从图 15、16 可见, 仿真与实验结果较好吻合。所有端口均开路状态下, 端口 4、5 之间的差模电压干扰仿真结果与测量结果的对比见图 17, 由结果可见, 差模信号较之共模干扰大为降低。

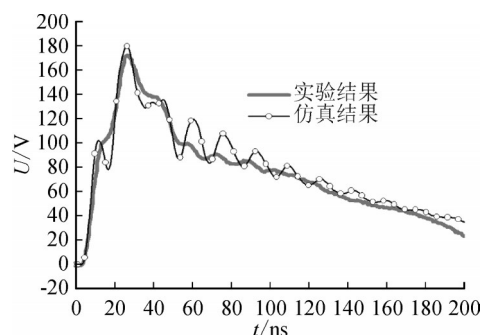


图 15 端口 2、4 开路, 端口 3、5 接地情况下, 端口 2 暂态电压响应: 仿真结果与实验测量结果的对比

Fig. 15 Transient voltage response of port 2 under a case of ports 2 and 4 opened, ports 3 and 5 earthed: Comparison of the simulation result with the experimental result

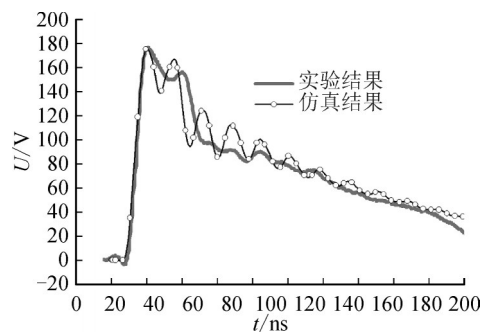


图 16 端口 2、4 开路, 端口 3、5 接地情况下, 端口 4 暂态电压响应: 仿真结果与实验测量结果的对比

Fig. 16 Transient voltage response of port 4 under a case of ports 2 and 4 opened, ports 3 and 5 earthed: Comparison of the simulation result with the experimental result

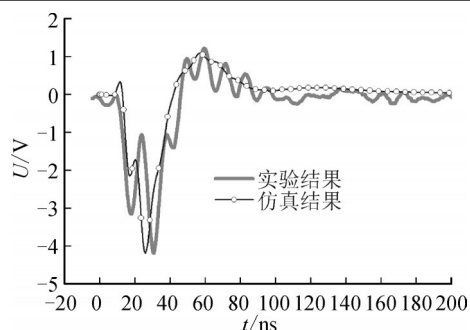


图17 所有端口开路情况下,端口4、5差模暂态电压响应仿真结果与实验测量结果的对比

Fig. 17 Differential mode transient voltage response of ports 4 and 5 under a case of that each port is earthed: Comparson of the simulation result with the experimental result

4 结语

在对EFT/B抗扰度实验的仿真研究中,文中提出了一种准确建立发生器等效电路的方法。该方法基于对脉冲形成过程的物理分析,提出并采用了特征根法建立脉冲形成网络的传输函数。由于传输函数特征根实部均为负数,因此能够以无源电路元件得到实现。另外,由于传输函数的建立基于基本电路理论,并与脉冲电路的物理过程相对应,因此,文中的发生器建模方法同样适合于相关仪器的设计。耦合夹的建模基于耦合网络的端口参数测量结果,采用了矢量匹配法进行有理函数逼近,并进而建立耦合夹等效电路,与电磁场数值方法相比,耦合夹建模方法采用了频域测量与电路仿真的方式,避免了电磁场数值方法模型的简化误差,并易于扩展到大型复杂系统的电磁兼容预测研究。通过仿真与实验对比检验了整个建模方法的合理性。

参考文献:

- [1] CORMIER B, BOXLEITNER W. Electrical fast transient (EFT) testing-an overview[C]//IEEE 1991 International Symposium on Electromagnetic Compatibility. Cherry Hill, America: IEEE, 2002: 291-296.
- [2] 牛博, 宋政湘, 王建华, 等. 智能电器监控单元的电快速瞬变脉冲群抗扰度研究[J]. 高压电器, 2007, 43(1): 14-17.
NIU Bo, SONG Zhengxiang, WANG Jianhua, et al. Study on electrical fast transient burst immunity of digital relay[J]. High Voltage Apparatus, 2007, 43(1): 14-17.
- [3] 王玉峰, 邹积岩, 廖敏夫. 微机保护装置抗电快速瞬变脉冲群的研究[J]. 高压电器, 2010, 46(10): 10-15.
WANG Yufeng, ZOU Jiyan, LIAO Minfu. Research on EFT/B countermeasure of microprocessor protection device[J]. High Voltage Apparatus, 2010, 46(10): 10-15.
- [4] 王玉峰, 邹积岩, 廖敏夫. 微机保护装置电源抗电快速瞬变脉冲群的试验研究[J]. 高压电器, 2010, 46(3): 10-14.
WANG Yufeng, ZOU Jiyan, LIAO Minfu. Suppressing electrical fast transient burst for power supply of microprocessor protection device[J]. High Voltage Apparatus, 2010, 46(3): 10-14.
- [5] 王玉峰. 变电站瞬态电磁环境及微机保护系统EMC研究[D]. 大连: 大连理工大学, 2007: 1-20.
WANG Yufeng. Investigation on transient electromagnetic environment in substation and EMC of microprocessor protection device[D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2007: 1-20.
- [6] 章雪生. 电子式电能表电快速瞬变脉冲群抗扰度自动测试系统研制[D]. 杭州: 中国计量学院, 2015: 1-30.
ZHANG Xuesheng. Design of automatic system of electrical fast transient burst immunity test of electric energy meter [D]. Hangzhou: China Jiliang University, 2015: 1-30.
- [7] 电磁兼容 试验和测量技术 电快速瞬变脉冲群抗扰度试验: GB/T 17626.4—1998[S]. 1998.
Electromagnetic compatibility-testing and measurement techniques - electrical fast transient/burst immunity test: GB/T 17626.4—1998[S]. 1998.
- [8] STEPHANE L, JEAN-LOUIS B. Contribution to electrical fast transient/burst modelling[C]//IEEE International Symposium on Electromagnetic Compatibility. Seattle, America: IEEE, 1999: 554-558.
- [9] CERRI G, LEO R D, PRIMIANI V M. Electrical fast-transient test: Conducted and radiated disturbance determination by a complete source modeling[J]. IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility, 2001, 43(1): 37-44.
- [10] KUNKEL H, KLEZAR S. Electric fast transients (EFT): The revision of IEC 61000-4-4[C]//IEEE International Conference on Electromagnetic Interference and Compatibility. Madras, India: IEEE, 2003: 403-408.
- [11] 翟小社, 耿英三, 王建华, 等. 电快速瞬变脉冲群抗扰度试验发生器的建模[J]. 中国电机工程学报, 2010, 30(6): 123-128.
ZHAI Xiaoshe, GENG Yingsan, WANG Jianhua, et al. Modeling of pulse generator in electrical fast transient/burst test[J]. Proceedings of the CSEE, 2010, 30(6): 123-128.
- [12] ZHAI Xiaoshe, GENG Yingsan, WANG Jianhua, et al. New method to model the equivalent circuit of the pulse generator in electrical fast transient/burst test[J]. IEEE Transactions on Electronics, 2009, 92(8): 1052-1057.
- [13] MUSOLINO F, FIORI F. Modeling the IEC 61000-4-4 EFT injection clamp[J]. IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility, 2008, 50(4): 869-875.

(下转第33页)

- the composition of quenching media in HV circuit breakers after current zero[J]. Journal of Physics D-Applied Physics, 1997, 30(11):1646-1652.
- [18] 王海兴, 孙素蓉, 陈士强. 双温度氦等离子体输运性质计算[J]. 物理学报, 2012, 61(19):317-323.
WANG Haixing, SUN Surong, CHEN Shiqiang. Calculation of transport coefficients of two-temperature Helium plasmas [J]. Acta Physica Sinica, 2012, 61(19):317-323.
- [19] 王飞鸣. 高压SF₆断路器非平衡态电弧机理及开断特性研究[D]. 沈阳: 沈阳工业大学, 2016.
WANG Feiming. Research on mechanism of non-equilibrium plasma arc and breaking characteristics in high-voltage SF₆ circuit breakers[D]. Shenyang: Shenyang University of Technology, 2016.
- [20] GLEIZES A, CHERVY, GONZALE J J. Calculation of a two-temperature plasma composition: Bases and application to SF₆[J]. Journal of Physics D - Applied Physics, 1999, 32(16):2060-2067.
- [21] WANG W Z, RONG M Z, YAN J D. The reactive thermal conductivity of thermal equilibrium and nonequilibrium plasmas application to nitrogen[J]. IEEE Transactions on Plasma Science, 2012, 40(4):980-990.
- [22] WANG Weizong, RONG Mingzhe, YAN J D, et al. Thermophysical properties of nitrogen plasmas under thermal equilibrium and non-equilibrium conditions[J]. Physics of Plasmas, 2011, 18(11):2-19.
- [23] GHORUI S, HEBERLEIN J, PFENDER E. Thermodynamic and transport properties of two-temperature nitrogen-oxygen plasma[J]. Plasma Chemistry and Plasma Processing, 2008, 28(4):553-582.
- [24] RAMSHAW J D. Simple approximation for thermal diffusion in gas mixtures[J]. Journal of Non-Equilibrium Thermodynamics, 1996, 21(3):233-238.
- [25] TANAKA Y, YOKOMIZU Y, ISHIKAWA M, et al. Particle composition of high-pressure SF₆ plasma with electron temperature greater than gas temperature[J]. IEEE Transactions on Plasma Science, 1997, 25(5):991-995.
- [26] 庚振新, 石岩, 钟建英, 等. SF₆放电等离子体分解特性的研究[J]. 高压电器, 2017, 53(4):18-24.
GENG Zhenxin, SHI Yan, ZHONG Jianying, et al. Research of the decomposition characteristics of SF₆ discharge plasma [J]. High Voltage Apparatus, 2017, 53(4):18-24.

石岩(1992—), 男, 硕士, 研究方向为高压电器气流场数值计算。

崔博源(1981—), 男, 高级工程师, 研究方向为高压开关设备研制及试验技术。

(上接第26页)

- [14] EMC Partner. User manual & calibration protocol[M]. Switzerland: EMC Partner AG, 2004.
- [15] V. Prasad Kodali. 工程电磁兼容[M]. 陈淑凤, 高攸纲, 苏东林, 等译. 北京: 人民邮电出版社, 2006:181-187.
PRASAD KODALI V. Engineering electromagnetic compatibility[M]. CHEN Shufeng, GAO Yougang, SU Donglin, translate. Beijing: People's Post and Telecommunications Press, 2006:181-187.
- [16] 邱关源. 电路[M]. 第四版. 北京: 高等教育出版社, 1999:158-170.
QIU Guanyuan. Circuit[M]. 4th ed. Beijing: Higher Education Press, 1999:158-170.
- [17] 邱关源. 电网络理论[M]. 北京: 科学出版社, 1988:91-95.
QIU Guanyuan. Theory of electric network[M]. Beijing: Science Press, 1988:91-95.
- [18] 俎云霄, 吕玉琴. 网络分析与综合[M]. 北京: 机械工业出版社, 2007:172-185.
ZU Yunxiao, LYU Yuqin. Network analysis and synthesis [M]. Beijing: China Machine Press, 2007:172-185.
- [19] 翟小社, 王建华, 宋政湘, 等. 信号完整性分析中时域宏模型结合电路仿真的方法研究[J]. 西安交通大学学报, 2007, 41(6):631-635.
ZHAI Xiaoshe, WANG Jianhua, SONG Zhengxiang, et al. Time domain macromodeling combining with circuit simulation for signal integrity[J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 2007, 41(6):631-635.
- [20] 程利军. 微机继电保护装置电磁兼容研究[D]. 北京: 华北电力大学, 2003:1-40.
CHENG Lijun. Research on electromagnetic compatibility for the microprocessor based protective relay[D]. Beijing: North China Electric Power University, 2003:1-40.
- 翟小社(1972—), 男, 高级工程师, 主要从事智能电器设计及电磁兼容研究工作。
- 刘畅(1981—), 男, 博士, 工程师, 主要从事真空灭弧室设计。
- 李仁峰(1990—), 男, 硕士, 主要从事真空灭弧室老炼技术研究。
- 姚晓飞(1985—), 男, 博士, 助理研究员, 主要从事相控快速真空开断技术及真空电弧理论研究。