

文章编号: 1001-4322(2005)11-1717-04

有界波电磁脉冲模拟器下短线缆效应的理论和实验研究*

谢彦召^{1,2}, 孙蓓云², 聂鑫², 相辉², 周辉², 王群书², 王赞基¹

(1. 清华大学 电机工程与应用电子技术系, 北京 100084; 2. 西北核技术研究所, 陕西 西安 710024)

摘要: 研究了有界波电磁脉冲模拟器下短线缆效应的理论建模和实验方法。基于传输线模型计算了线缆在有界波电磁脉冲模拟器辐照下的电流响应。建立了有界波电磁脉冲模拟试验环境,其前沿时间小于 5 ns,脉冲半高宽约 200 ns。开展了短线缆的效应实验验证研究,短线缆负载端响应电流的测量和计算结果吻合得很好,表明应用改型有界波电磁脉冲模拟器开展短线缆效应实验在理论和实验上都是可行的。这种线缆实验方法具有效应实验空间电磁场分布规范均匀、参数指标可控、监测技术成熟等优点。

关键词: 有界波电磁脉冲模拟器; 短线缆效应; 传输线模型; Taylor 模型; 电流测量

中图分类号: TM15 **文献标识码:** A

在电子设备或系统的电磁脉冲效应研究中,线缆是重要的电磁脉冲耦合途径之一。目前这类场-线耦合问题的理论研究,按研究对象的频段范围不同,主要有电磁散射、传输线模型和准静态电路近似等 3 类方法。基于电磁散射的 FDTD 数值方法,可以同时求出线缆上任意一点的电流分布,但难以处理参数随频率变化的负载计算问题,且由于受存储空间和运算时间的制约,目前仅用于单根线缆且长度不太长的情况。电磁脉冲的主要能谱范围在百 MHz 以下,随着 FFT 算法的改进以及对地分布参数求取模型的发展,传输线模型方法计算精度接近于电磁散射方法^[1,2],具有计算方便、方法成熟、可推广到多根线缆及线缆网络等优点^[3],广泛应用于地面附近架高线缆在 HEMP 作用下的电流、电压响应研究^[4~6]。电磁脉冲场-线耦合的实验研究^[7],最直接的方法是在电磁脉冲场辐照下,实测电缆屏蔽层以及内部芯线负载上的感应电流、电压。例如,对于架空线缆响应,一般也是先在电磁脉冲模拟器的辐射场下取得规律性认识,然后再通过电流线圈注入等方式间接模拟^[8,9]。

水平极化电磁脉冲模拟试验条件一般较为复杂,而实验室的有界波电磁脉冲模拟器具有效应实验方便、参数指标可控、监测技术成熟等优点,如果可以开展短线缆及线缆网络的规律验证性实验,将会非常便利。为此,本文研究利用有界波电磁脉冲模拟器开展线缆效应研究,基于传输线模型计算线缆响应,进而建立了有界波电磁脉冲模拟器下的实验环境,进行实验验证。

1 有界波电磁脉冲模拟器下开展短线缆效应研究的理论基础

目前已有多种场-线耦合的传输线模型,其中正确有效的有 Agrawal^[10]、Taylor^[11]和 Rachidi^[12]等 3 种。垂直极化有界波电磁脉冲模拟器中存在垂直电场和水平磁场,据此安排线缆布局,如图 1 所示。

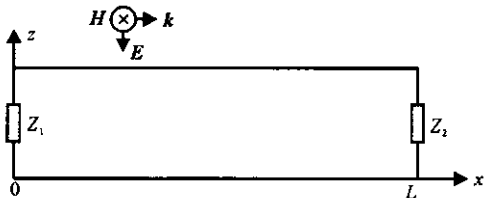


Fig. 1 Geometry of single-wire line excited by EMP

图 1 单根线缆受到电磁场激励

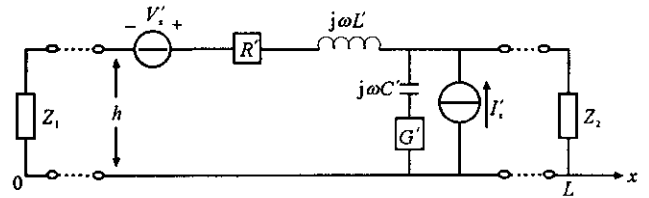


Fig. 2 Distribution parameter equivalent circuit based on Taylor approach

图 2 基于 Taylor 模型的分参数等效电路

求解线缆响应首先需确定线缆所受辐照的电磁场环境,然后变换到频域解传输线方程组,得到线缆某一位置的电流、电压频域解,最后通过傅里叶反变换再得到时域解。本文选用 Taylor 模型,其分布参数等效电路,

* 收稿日期:2005-03-17; 修订日期:2005-08-08

作者简介:谢彦召(1973—),男,博研,副研究员,从事电磁脉冲效应和测量技术研究;E-mail:xieryanzhao@tsinghua.org.cn。

如图 2 所示。以线上电压 $V(x)$ 和电流 $I(x)$ 为微分变量, 写出相应的频域传输线方程组为

$$\begin{cases} \frac{\partial V(x)}{\partial x} + (R' + j\omega L')I(x) = V_s' \\ \frac{\partial I(x)}{\partial x} + (G' + j\omega C')V(x) = I_s' \end{cases} \quad (1)$$

式中: R', L', G', C' 分别为线缆单位长的电阻、电感、电导和电容。对于在金属极板上架设的短线缆, R', G' 一般可略去。

两个激励函数为

$$\begin{cases} V_s' = -j\omega\mu_0 \int_0^h H_y(x, 0, z) dz \\ I_s' = -j\omega C' \int_0^h E_z(x, 0, z) dz \end{cases} \quad (2)$$

式中: h 为模拟器中线缆的架设高度; E_z 和 H_y 分别是模拟器中垂直电场和水平磁场, 二者幅值相差空气中的波阻抗这一比例因子。边界条件满足方程

$$\begin{cases} V(0) = -Z_1 I(0) \\ V(L) = Z_2 I(L) \end{cases} \quad (3)$$

由于是金属导体面, 激励函数 V_s' 仅有水平磁场引起的贡献, 构成模型中的分布电压源, 而激励函数 I_s' 则是垂直电场形成的分布电流源。

对 (1) 式及 (3) 式的求解, 有多种不同的方法^[13,14]。本文的方法是首先由 (2) 式求出电磁场在局部微分线段上感应产生的分布点源(电流源 I_s' 、电压源 V_s'), 然后根据源匹配和端接负载阻抗匹配条件, 分别求出在线缆任意位置处引起的电流, 形成两个点源格林函数

$$G_1^{(I)}(x, x_s) = \frac{\delta e^{-\beta L}}{2Z_c(1 - \rho_1\rho_2 e^{-2\beta L})} [e^{-\beta(x_{\max}-L)} - \delta\rho_2 e^{\beta(x_{\max}-L)}] (e^{\beta x_{\min}} + \delta\rho_1 e^{-\beta x_{\min}}) \quad (4)$$

$$G_1^{(V)}(x, x_s) = \frac{e^{-\beta L}}{2Z_c(1 - \rho_1\rho_2 e^{-2\beta L})} [e^{-\beta(x_{\max}-L)} - \rho_2 e^{\beta(x_{\max}-L)}] (e^{\beta x_{\min}} - \rho_1 e^{-\beta x_{\min}}) \quad (5)$$

式中: ρ_1 和 ρ_2 分别为线缆两端的电压反射系数; x_{\max} 表示线缆上位置 x 和分布点源 x_s 之间的较大者; x_{\min} 表示线缆上位置 x 和分布点源 x_s 之间的较小者。当 $x > x_s$ 时, $\delta = 1$; $x < x_s$ 时, $\delta = -1$ 。

这样, 线缆任意位置处感应产生的电流, 就可以根据叠加定理, 通过对点源(电流源和电压源)在分布范围内沿线积分求得

$$I(x) = \int_0^L G_1^{(V)}(x; x_s) V_s' dx_s + \int_0^L G_1^{(I)}(x; x_s) I_s' dx_s \quad (6)$$

根据上述步骤, 本文编程实现了线缆上任意位置处感应的电流计算程序。类似地, 本文还编程实现了电压响应计算程序。

2 有界波电磁脉冲模拟环境的建立及线缆实验布局

我们改造了中型有界波电磁脉冲模拟器, 延长了效应实验空间, 建立了实验环境。效应工作区高 1 m, 特性阻抗 150 Ω 。电磁脉冲波形的前沿时间 $t_r < 5$ ns, 半高宽 $t_{FWHM} \approx 200$ ns, 场强范围 10~50 kV/m。实验测试表明, 模拟器性能稳定、重复性好。图 3 为线缆在模拟器中的实验布局示意图。线缆平行于模拟器上下极板, 两端分别接负载电阻到下极板。电场测量探头为偶极天线配置的光纤测量系统。电流测量探头为罗果夫斯基

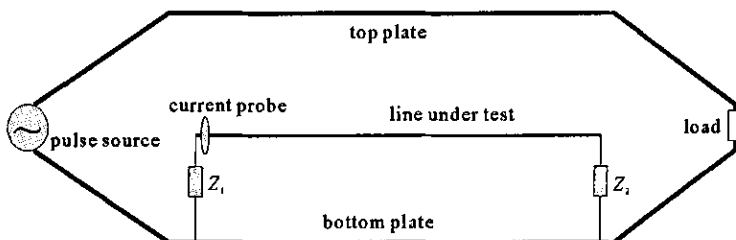


Fig. 3 Schematic layout of a short single-wire line experiment setup using EMP simulator

图 3 有界波电磁脉冲模拟器下的线缆实验

线圈,使用光纤系统传输信号,以降低干扰。

3 线缆电流响应的理论和测试结果比较

在该模拟器下进行了不同端接负载的线缆响应实验。图 4 给出了其中一种条件下的电流响应实验和理论计算结果。线缆直径 5 mm,长度 2.5 m,两侧端接阻抗分别为 15Ω 和 300Ω 。图 4(a)为线缆所处位置在无线缆存在时的实测电场波形,其幅值约 30 kV/m,图 4(b)为靠近模拟器脉冲高压源一侧线缆端点处的实测电流响应,感应产生了幅值接近 40 A 的电流,图 4(c)为将实测电场波形作为程序的输入而计算得到电流响应。可以看出,电流响应的实验测量和理论计算的波形、幅值吻合得相当好。这说明应用有界波电磁脉冲模拟器开展短线缆的响应实验是可行的,同时也表明 Taylor 模型可以用于电磁脉冲对线缆耦合的响应计算。

4 结 论

本文的工作为短线缆电磁脉冲效应的规律性研究提供了一种实验室条件下的实验技术途径。基于传输线模型的计算结果和在模拟器下的实验验证结果吻合相当好。这表明,应用改型有界波电磁脉冲模拟器开展短线缆效应实验在理论和实验上都是可行的。所建立的改型模拟器实验环境具有效应实验空间电磁场分布规范均匀、参数指标可控、监测技术成熟等优点,为进一步开展多根线缆及线缆网络效应的规律性验证实验奠定了基础。

参考文献:

- [1] Tesche F M. Comparison of the transmission line and scattering models for computing the HEMP response of overhead cables[J]. *IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility*, 1992, **34**(2):93—99.
- [2] Arreghini F, Ianoz M, Rachidi F. Frequency and time-domain approaches in EMP coupling. A comparison between different methods of calculation[A]. Proceedings of the Second International Conference on Electromagnetics in Aerospace Applications[C]. Torino, Italy, 1991.
- [3] Ianoz M, Nucci C A, Tesche F M. Transmission line theory for field-to-transmission line coupling calculations[J]. *Electromagnetics*, 1988, **8**(2-4):171—211.
- [4] Tesche F M, Barnes P R. The HEMP response of an overhead power distribution line[J]. *IEEE Transactions on Power Delivery*, 1989, **4**(3):1937—1944.
- [5] Rachidi F, Nucci C A, Ianoz M. Transient analysis of multiconductor lines above a lossy ground[J]. *IEEE Transactions on Power Delivery*, 1999, **14**(1):294—302.
- [6] Nucci C A, Rachidi F, Ianoz M V, et al. Lightning-induced voltages on overhead lines[J]. *IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility*, 1993, **35**(1):75—86.
- [7] Ianoz M, Orzan D, Rachidi F. Validation of field-to-transmission line coupling models[A]. Proceedings of International Symposium on Electromagnetic Compatibility[C]. Beijing, China, 1997.
- [8] 周启明, 杨蓉, 黄聪顺. 九芯电缆 EMP 耦合的电流注入法实验[J]. 信息与电子工程, 2004, **2**(1):49—53. (Zhou Q M, Yang R, Huang C S. Testing of EMP coupling with current injection for nine-core cable. *Information and Electronic Engineering*, 2004, **2**(1):49—53)
- [9] Trout D H. Investigation of the bulk current injection technique by comparison to induced currents from radiated electromagnetic fields[A]. International Symposium on Electromagnetic Compatibility[C]. 1996. 412—417.
- [10] Agrawal A K, Price H J, Gurbaxani S H. Transient response of multiconductor transmission lines excited by a nonuniform electromagnetic field[J]. *IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility*, 1980, **22**:119—129.
- [11] Taylor C D, Satterwhite R S, Harrison C W. The response of a terminated two-wire transmission line excited by a nonuniform electromagnetic field[J]. *IEEE Transactions on Antennas Propagation*, 1965, AP-13, 987—989.
- [12] Rachidi F. Formulation of the field-to-transmission line coupling equations in terms of magnetic excitation field[J]. *IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility*, 1993, **35**(3):404—407.

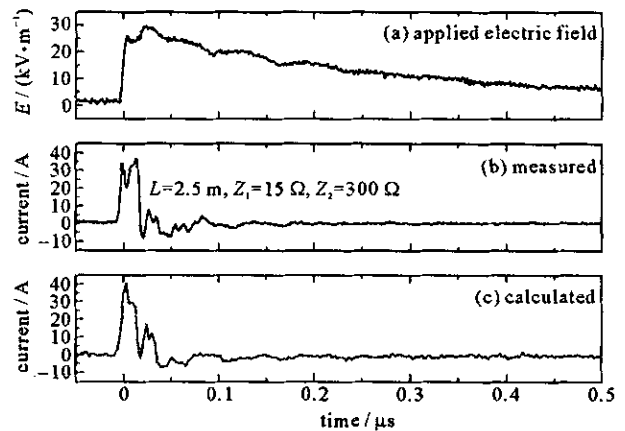


Fig. 4 Comparison of the calculated and measured current responses

图 4 有界波电磁脉冲模拟器下线缆效应的理论计算和实验测量结果比较

[13] Tesche F M, Ianoz M V, Karlsson T. EMC analysis methods and computational models[M]. New York: John Wiley & Sons, 1996.

[14] Paul C R. Analysis of multiconductor transmission lines[M]. New York: John Wiley and Sons, 1994.

Response of a short single-wire line illuminated by an EMP simulator

XIE Yan-zhao^{1,2}, SUN Bei-yun², NIE Xin², XIANG Hui², ZHOU Hui², WANG Qun-shu², WANG Zan-ji¹

(1. *Department of Electrical Engineering, Tsinghua University, Beijing 100084, China;*

2. *Northwest Institute of Nuclear Technology, P. O. Box 69-10, Xi'an 710024, China*)

Abstract: The response of a short single-wire line excited by EMP was theoretically investigated and experimentally validated by means of an EMP simulator. A modified bounded-wave EMP simulator was developed with a rise time less than 5 ns and pulse width about 200 ns for the short line validation test. Comparison of current responses at the line termination between calculation using the transmission line theory and experimental measurement were presented. The good agreement shows that this bounded-wave EMP simulator can be used for short single-wire line experiment. This method of effects experiment has the characteristics of reasonably uniform electromagnetic field distribution in the working volume, easy adjustment of EMP experiment parameters and convenience to measure electric field and current response, etc.

Key words: Bounded-wave EMP simulator; Response of short single-wire line; Transmission line model; Current response; Taylor model