

文章编号: 1001-4322(2005)04-0575-06

# 地面附近架高线缆 HEMP 响应计算的 Agrawal 和 Taylor 模型比较\*

谢彦召<sup>1,2</sup>, 王赞基<sup>1</sup>, 王群书<sup>2</sup>

(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:** 研究在高空核爆电磁脉冲(HEMP)的作用下,地面附近架高线缆感应瞬态电压、电流的传输线模型计算方法并进行比较。考虑到有耗地面的电气参数,列举了 Agrawal 和 Taylor 两种传输线理论模型的不同,应用格林函数求积分和叠加定理,分别采用两种模型,计算并比较了不同入射波和线缆布放状态下的电压、电流响应,以及各场分量(水平电场、垂直电场和水平磁场)单独存在时对电流、电压响应的贡献。结果显示, Agrawal 和 Taylor 模型得到的电压、电流响应是一致的,可以考虑在有界波电磁脉冲模拟器中进行短线缆的效应实验;由于相同的场分量在不同的模型中对电压、电流响应的贡献并不相同,因此在阐述某一场分量对线缆响应贡献大小时,应该首先说明所采用的传输线模型。

**关键词:** 高空核爆电磁脉冲; 传输线方程; Agrawal 模型; Taylor 模型; 数值模拟  
**中图分类号:** TM15 **文献标识码:** A

高空核爆电磁脉冲(HEMP)的 E1 成分,具有辐射范围广、强度大、频谱宽等诸多特点,可以通过天线、线缆等的耦合作用,对各种电子化设备和系统造成暂时和永久损伤,具有强大的破坏效应。研究有效的线缆 HEMP 响应计算和实验方法,摸清响应规律,进而采取适宜的防护措施是 HEMP 效应和防护加固研究中的一项重要工作。

一般地讲,可以采用电磁散射方法直接求解线缆感应的电压、电流,但是较为麻烦。由于 HEMP 的波形参数、特征<sup>[1]</sup>及地面附近架高线缆的特点,并考虑到后续线缆网络求解的复杂性,这类场线耦合响应的计算多采用传输线模型,其计算精度能够符合大多数工程应用的需要<sup>[2,3]</sup>。目前,已有 Agrawal<sup>[4]</sup>、Taylor<sup>[5]</sup>、Rachidi<sup>[6]</sup>、Chowdhuri-Gross 等人分别提出了多种传输线模型表述外部电磁场对线缆的耦合。应用传输线方法计算线缆皮电流响应时,也有研究者采用基于 Agrawal 模型得到的简易解析公式来求解<sup>[7-9]</sup>。有文献比较了良导体地面情况下 Agrawal 模型和 Chowdhuri-Gross 模型的区别<sup>[10]</sup>。本文选取较为常用的 Agrawal 模型和 Taylor 模型,并考虑到地面介质电气参数因素,分别计算两种模型下线缆的 HEMP 响应,并比较其异同。

## 1 Agrawal 模型和 Taylor 模型及异同性

图 1 为坐标系统及线缆布放示意图。求解线缆响应首先需确定线缆所在位置处的电磁场环境,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,最后通过傅立叶反变换再得到时域解。

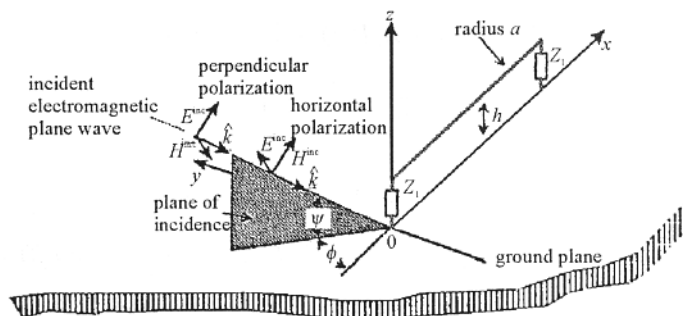


Fig. 1 Geometry of incident HEMP plane wave and the transmission line over the lossy ground

图 1 坐标系统及线缆布放示意图

\* 收稿日期:2004-06-14; 修订日期:2004-10-25

基金项目:国防科技基础研究基金资助课题

作者简介:谢彦召(1973—),男,博士研究生,主要从事电磁脉冲测量和效应研究工作;E-mail: xieyanzhao@tsinghua.org.cn.

1.1 地面附近的电磁脉冲环境及线缆、土壤参数<sup>[11]</sup>

在高空核爆电磁脉冲平面波入射下,地面附近的电磁场各个分量是入射场和反射场的矢量叠加。如图 1 所示,幅度为  $E_0$  的任意极化入射平面波可以分解为垂直极化分量和水平极化分量。如果入射的电场矢量与入射平面构成夹角  $\alpha$ ,则入射垂直极化电场分量  $E_1^{inc} = E_0 \cos\alpha$ ,入射水平极化电场分量  $E_2^{inc} = E_0 \sin\alpha$ 。在满足 Snell 定理条件下,下面推导出模型所用到的几个场分量。在地上  $(x, 0, h)$  处,  $x$  轴向的水平电场分量为

$$E_x^{ex}(x, 0, h) = E_x^{inc} + E_x^{ref} = E_0 [\cos\alpha \sin\psi \cos\phi (e^{jkh \sin\psi} - R_v e^{-jkh \sin\psi}) + \sin\alpha \sin\phi (e^{jkh \sin\psi} + R_h e^{-jkh \sin\psi})] e^{-jkr \cos\psi \cos\phi} \quad (1)$$

式中:  $E_x^{ref}$  为入射电场对应的反射电场分量。

地上  $(x, 0, 0)$  处,  $x$  轴向的水平电场分量为

$$E_x^{ex}(x, 0, 0) = E_0 [\cos\alpha \sin\psi \cos\phi (1 - R_v) + \sin\alpha \sin\phi (1 + R_h)] e^{-jkr \cos\psi \cos\phi} \quad (2)$$

在地上  $(x, 0, z)$  处的垂直电场为

$$E_z^{ex}(x, 0, z) = E_0 \cos\alpha \cos\psi (e^{jkz \sin\psi} + R_v e^{-jkz \sin\psi}) e^{-jkr \cos\psi \cos\phi} \quad (3)$$

在地上  $(x, 0, z)$  处的水平磁场为

$$H_y^{ex}(x, 0, z) = \frac{-E_0}{377} [\sin\alpha \sin\psi \sin\phi (1 + R_h) e^{-j2kz \sin\psi} + \cos\alpha \cos\psi (1 + R_v) e^{-j2kz \sin\psi}] e^{-jkr \cos\psi \cos\phi} e^{jkz \sin\psi} \quad (4)$$

上述各式中:  $R_v$  和  $R_h$  分别是垂直反射系数和水平反射系数。图 1 中: 线缆长度为  $L$ , 架高  $h$ , 线径  $a$ , 端接负载阻抗分别为  $Z_1$  和  $Z_2$ 。地表土壤电导率  $\sigma_g$ , 相对介电常数  $\epsilon_r$ , 线缆电导率为  $\sigma_w$ 。

1.2 Agrawal 模型

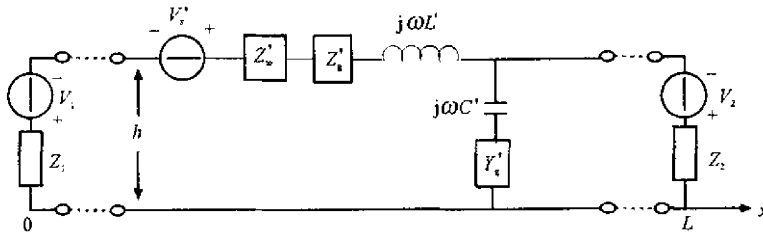


Fig. 2 Differential equivalent coupling circuit of a line over a lossy ground according to Agrawal model

图 2 有耗地面架高线缆的 Agrawal 集总参数传输线等效模型

Agrawal 等人<sup>[4]</sup>采用沿线散射电压  $V_s(x)$  和线电流  $I(x)$  作为变量, 给出传输线方程组为

$$\begin{cases} \frac{\partial V_s(x)}{\partial x} + Z'(\omega)I(x) = V_s' \\ \frac{\partial I(x)}{\partial x} + Y'(\omega)V_s(x) = 0 \end{cases} \quad (5)$$

其中, 激励函数  $V_s' = E_x^{ex}(x, 0, h)$ , 为无线缆时, 距地高  $h$  处  $x$  方向的水平极化电场;  $Z'(\omega)$ 、 $Y'(\omega)$  分别为单位长度的阻抗参数和导纳参数。边界条件为

$$\begin{cases} V_s(0) = -Z_1 I(0) + \int_0^h E_z^{ex}(0, 0, z) dz \\ V_s(L) = Z_2 I(L) + \int_0^h E_z^{ex}(L, 0, z) dz \end{cases} \quad (6)$$

散射电压  $V_s(x)$  与线上总电压  $V(x)$  的关系为

$$V(x) = V_i(x) + V_s(x) \quad (7)$$

其中:  $V_i(x) = -\int_0^h E_z^{ex}(x, 0, z) dz$ 。求解线上某一位置处的总电压, 需将  $V_s(x)$  加上入射场引起的电压  $V_i(x)$ 。

1.3 Taylor 模型

Taylor, Satterwhite 等人<sup>[5]</sup>提出了另一种传输线模型(图 3), 它以线上总电压  $V(x)$  和电流  $I(x)$  为微分变量, 其传输线方程组为

$$\begin{cases} \frac{\partial V(x)}{\partial x} + Z'(\omega)I(x) = V_s' \\ \frac{\partial I(x)}{\partial x} + Y'(\omega)V(x) = I_s' \end{cases} \quad (8)$$

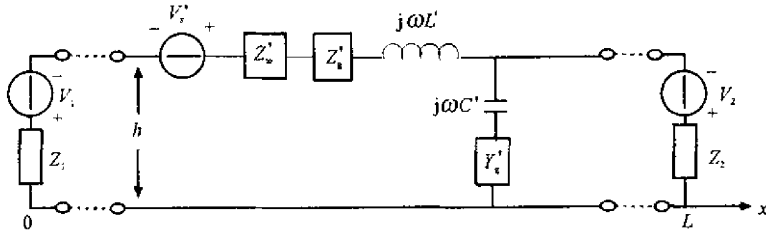


Fig. 3 Differential equivalent coupling circuit of a line over a lossy ground according to Taylor model

图 3 有耗地面架空线缆的 Taylor 集总参数传输线等效模型

两个激励函数为

$$\begin{cases} V_s' = -j\omega\mu_0 \int_0^h H_y^{ex}(x, 0, z) dz + E_x^{ex}(x, 0, 0) \\ I_s' = -Y'(\omega) \int_0^h E_z^{ex}(x, 0, z) dz \end{cases} \quad (9)$$

边界条件满足方程

$$\begin{cases} V(0) = -Z_1 I(0) \\ V(L) = Z_2 I(L) \end{cases} \quad (10)$$

激励函数  $V_s'$  包括水平磁场和地面的线缆方向水平电场。若是良导体地面,则只有水平磁场分量这一部分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。

### 1.4 模型异同性分析

从方程(5)、(6)及图 2 可以看出,在 Agrawal 模型中,微分变量为线缆散射电压  $V_s(x)$  和线上电流  $I(x)$ ,激励函数是线缆所在位置处的水平电场(分布电压源)。同时,在线缆负载处还有两个集总电压源(垂直电场形成)引起的贡献。

方程(8)、(9)及图 3 显示,在 Taylor 模型中,微分变量为线缆电压  $V(x)$  和电流  $I(x)$ ,有两个激励函数,分别为垂直场形成的分布电流源和水平磁场(有耗地面时,还有地面处的水平电场分量)形成的分布电压源。显然,模型中并没有线缆所在位置处的水平电场分量。

国内基于传输线模型进行电缆皮电流响应计算时,在早期或工程估算时多采用 Vance 基于 Agrawal 模型给出的简易解析表达式<sup>[12]</sup>,同时电缆试验时也是在水平极化模拟环境下进行的<sup>[13, 14]</sup>,这容易形成一个认识即认为线缆位置处水平电场分量的存在是 HEMP 在线缆上感应电压、电流的主要原因,进而片面认为没有这一场分量则线缆上就不会感应电压、电流,便自然无法进行线缆试验。但是,我们从传输线方程形式上已经看出,在 Taylor 模型中,这一个场分量不是必需的。下面通过数值计算结果具体分析二者的异同。

## 2 数值计算结果及讨论

传输线模型中所用的各个参数对计算结果有直接影响,单位长度阻抗参数  $Z'(\omega)$  和单位长度导纳参数  $Y'(\omega)$  表述为

$$Z'(\omega) = j\omega L' + Z_g' + Z_w' \quad (11)$$

$$Y'(\omega) = \left( \frac{1}{j\omega C'} + \frac{1}{Y_g'} \right)^{-1} \quad (12)$$

定义土壤中传播常数  $\gamma_g = \sqrt{j\omega\mu_0(\sigma_g + j\omega\epsilon_r\epsilon_0)}$ 。方程(11)和(12)中:地面阻抗  $Z_g' \approx \frac{j\omega\mu_0}{2\pi} \ln\left(\frac{1 + \gamma_g h}{\gamma_g h}\right)$ ;线阻  $Z_w' \approx 1/\pi a^2 \sigma_w$ ;地面导纳  $Y_g' \approx \gamma_g^2/Z_g'$ ;  $L'$  和  $C'$  分别为线缆置于良导体地面时的分布电感和电容。

本文应用格林函数法<sup>[15]</sup>求解传输线方程组(5)和(8),首先根据源匹配和端接负载阻抗匹配条件,求出分布点源(电流、电压源)在线缆任意位置处产生的电压和电流,然后把这四个函数作为格林函数,对点源的分布范围积分,就可以得到在外场激励下线缆上任意位置处感应的电压、电流。

选取两种入射波和线缆布放状态,分别采用 Agrawal 和 Taylor 模型,计算线缆感应电压、电流,并比较各电磁场分量单独存在时,对感应电压、电流的贡献。地表土壤介质参数相同,  $\sigma_g = 0.01 \text{ S/m}$ ,  $\epsilon_r = 10$ ,  $\mu_r = 1$ 。状态 1 中线缆长度 5 m,架高 0.8 m,线缆半径 1.5 mm,两端接阻抗均为 20  $\Omega$ , Bell 波形入射,  $\alpha = 0^\circ$ ,  $\psi = 10^\circ$ ,  $\phi =$

$0^\circ$ , 峰值场强 50 kV/m, 计算负载端的电流、电压响应。状态 2 线缆长度 30 m, 架高 1 m, 线缆半径 1.52 mm, 两端接阻抗均为  $100 \Omega$ , Bell 波形入射,  $\alpha=0^\circ$ ,  $\psi=30^\circ$ ,  $\phi=0^\circ$ , 峰值场强 50 kV/m, 计算线缆中点处的电流、电压响应。

图 4 比较了 Agrawal 和 Taylor 模型对线缆相同位置处的电压、电流响应。两种状态的计算结果表明, 负载端及沿线的感应电压、电流均相同, 这说明两种模型是等效的。值得指出的是, 状态 1 是负载端的电压、电流响应, 电压和电流的时域波形曲线显示, 二者仅相差一个比例因子即负载阻抗; 而状态 2 是线缆中点处的电压、电流响应, 二者的变化趋势完全不同, 从图中可以看出电压、电流相对变化关系。

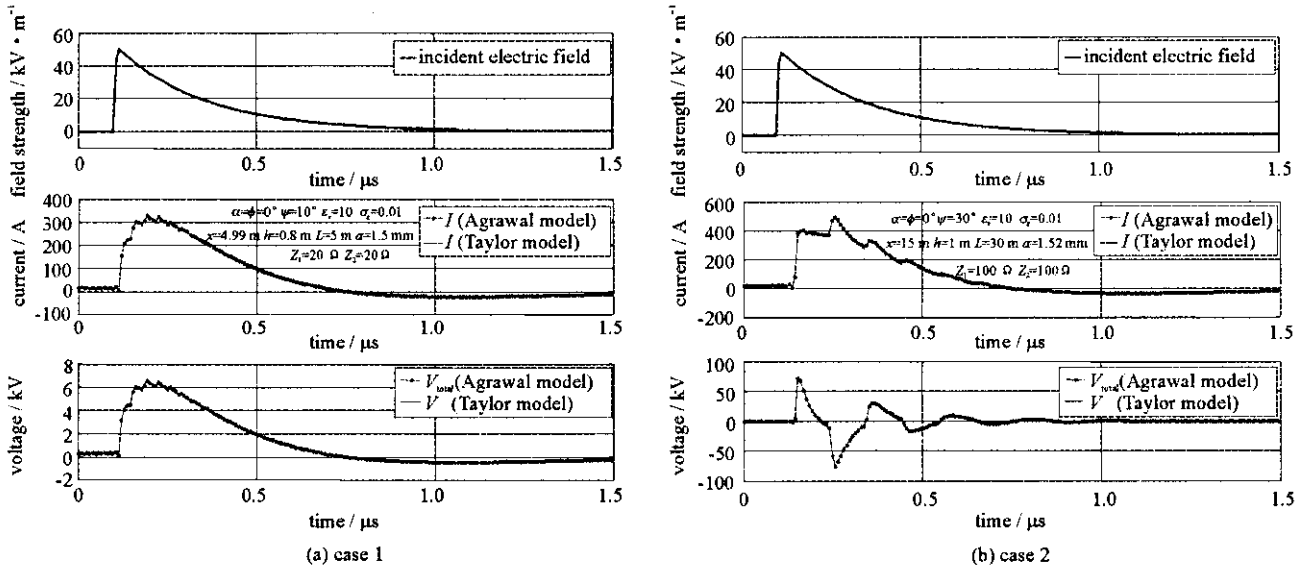
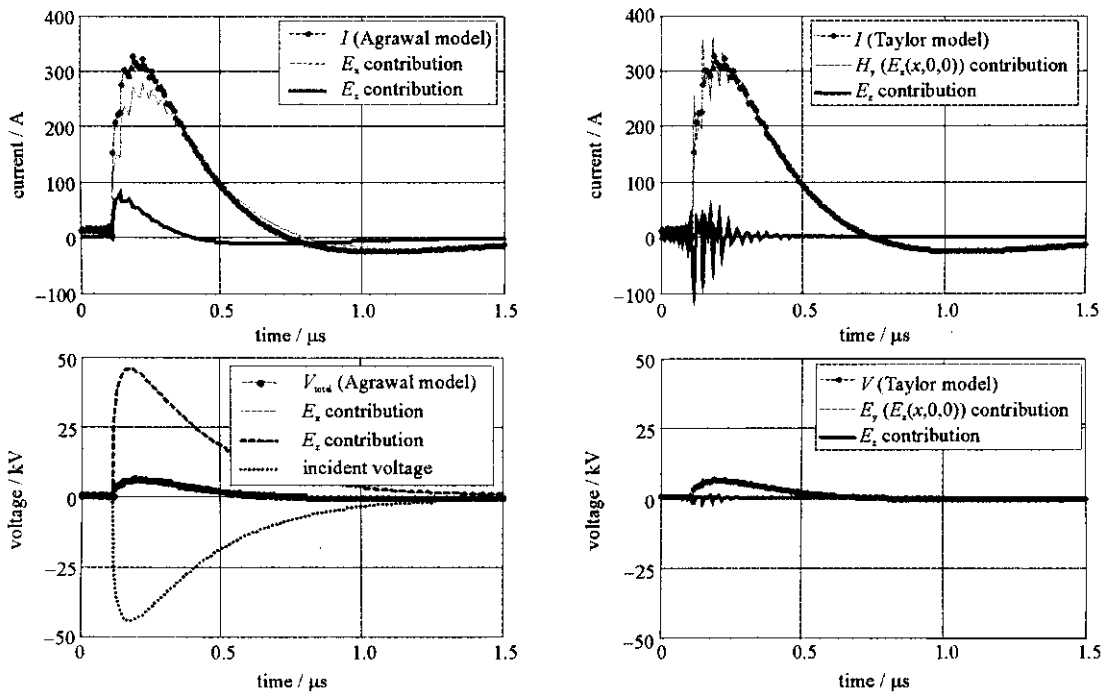


Fig. 4 Comparison of the induced current and voltage computed by the two TL models

图 4 两种模型计算得到的电流、电压比较

图 5 则给出了两种状态下, 分别采用两种模型计算时, 各个场分量单独存在时对线缆感应电压、电流的贡献。比如, 从图中比较垂直电场  $E_z$  对感应电流和电压的贡献, 可以显然看出, 相同的场分量在不同模型中对响应电流、电压的贡献并不相同。



(a) case 1

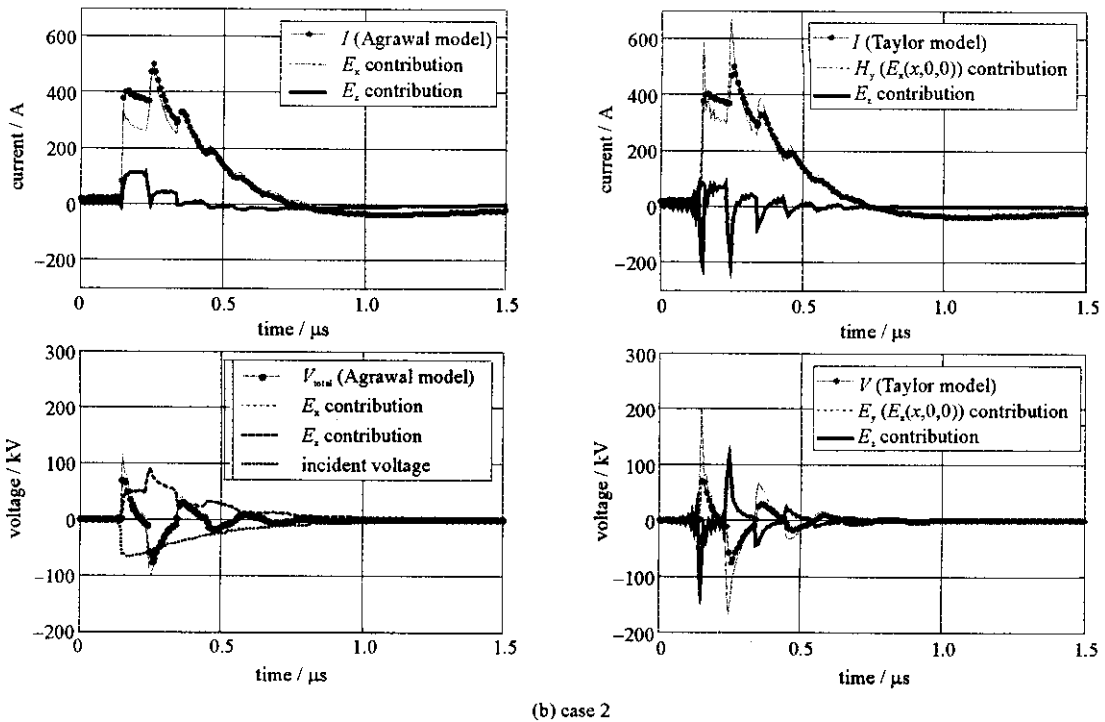


Fig. 5 Contributions to the total current and voltage due to the different field component computed by the two TL models

图 5 两种模型中各场分量对电流、电压的贡献比较

### 3 结 论

以 HEMP 对地面附近架空线缆的耦合为例,研究了 Agrawal 和 Taylor 这两种场-线耦合模型的异同性。它们采用不同的方程表达形式及激励函数,但计算得到的线缆感应电流、电压相同,因此,在有耗地面介电电气参数条件下,这两种模型也是等效的;其次,相同的电磁场分量在不同模型中对感应电压、电流的贡献是不同的,因此,在阐述电磁场分量对线缆响应的贡献大小时,应首先指明所采用的传输线模型这一前提条件;另外,由于 Taylor 模型并不需要平行于线缆方向的水平电场,这给我们提供了一个新的思路,即可以考虑在具备垂直极化电场和水平磁场的有界波 EMP 模拟器中进行短线缆效应实验。

### 参考文献:

- [1] 谢彦召,王赞基,王群书,等. 高空核爆电磁脉冲波形标准及特征分析[J]. 强激光与粒子束, 2003, 15(8): 781—787. (Xie Y Z, Wang Z J, Wang Q S, et al. High altitude nuclear electromagnetic pulse waveform standards: A review. *High Power Laser and Particle Beams*, 2003, 15(8): 781—787)
- [2] 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.
- [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] Agrawal A K, Price H J, Gurbaxani S H. Transient response of multiconductor transmission lines excited by a nonuniform electromagnetic field[J]. *IEEE Trans Electromagn Compat*, 1980, 22: 119—129.
- [5] 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 Trans Antennas Propagat*, 1965, 13: 987—989.
- [6] 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.
- [7] 余同彬,周肇华. 近地长电缆对高空电磁脉冲晚期部分的响应[J]. 强激光与粒子束, 2003, 15(12): 1237—1240. (Yu T B, Zhou B H. Response of long lines to late-time HEMP. *High Power Laser and Particle Beams*, 2003, 15(12): 1237—1240)
- [8] 黄聪顺,周启明. 高空电磁脉冲作用下地面电缆屏蔽层感应电流的数值模拟[J]. 强激光与粒子束, 2003, 15(9): 905—908. (Huang C S, Zhou Q M. Numerical simulation of the HEMP induced current in cable shielding near ground. *High Power Laser and Particle Beams*, 2003, 15(9): 905—908)
- [9] 孙蓓云,周辉,谢彦召. 两种高空核爆电磁脉冲电缆耦合效应的比较[J]. 强激光与粒子束, 2002, 14(6): 901—904. (Sun B Y, Zhou H, Xie Y Z. Comparison of the cable coupling effects under two kinds of HEMP environment. *High Power Laser and Particle Beams*, 2002, 14

(6): 901—904)

- [10] Nucci C A, Rachidi F, Ianoz M, et al. Comparison of two coupling models for lightning-induced overvoltage calculations[J]. *IEEE Transactions on Power Delivery*, 1995, **10**(1): 330—339.
- [11] 谢彦召, 孙蓓云, 周辉, 等. 地面附近的高空核爆电磁脉冲环境[J]. *强激光与粒子束*, 2003, **15**(7): 680—684. (Xie Y Z, Sun B Y, Zhou H, et al. High-altitude electromagnetic pulse environment over the lossy ground. *High Power Laser and Particle Beams*, 2003, **15**(7): 680—684)
- [12] Vance E F. Coupling to Shielded Cables[M]. New York: Wiley, 1978.
- [13] 祝敏, 刘顺坤, 周辉, 等. 电磁脉冲对电缆的耦合效应实验研究[J]. *强激光与粒子束*, 2001, **13**(6): 761—765. (Zhu M, Liu S K, Zhou H, et al. Experimental study of EMP coupling to long shielded cable. *High Power Laser and Particle Beams*, 2001, **13**(6): 761—765)
- [14] 周启明, 罗学金, 许献国, 等. 近地九芯电缆高空电磁脉冲耦合模拟试验[J]. *强激光与粒子束*, 2004, **16**(1): 63—67. (Zhou Q M, Luo X J, Xu X G, et al. HEMP coupling simulating test of nine cores cable near ground. *High Power Laser and Particle Beams*, 2004, **16**(1): 63—67)
- [15] Tesche F M, Ianoz M V, Karlsson T. EMC analysis methods and computational models[M]. New York: John Wiley & Sons, 1996.

## Comparison of Agrawal and Taylor models for response calculations of aboveground cable excited by HEMP

XIE Yan-zhao<sup>1,2</sup>, WANG Zan-ji<sup>1</sup>, WANG Qun-shu<sup>2</sup>

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

2. Northwest Institute of Nuclear Technology, Xi'an 710024, China)

**Abstract:** There exist two transmission line coupling models, Agrawal model and Taylor model, which can be used for the calculation of the aboveground cable effects excited by incident HEMP plane wave. In views of the lossy ground, we summarized and then discussed the differences between these two models in the representation of coupling formulations, exciting source terms and boundary condition. The contributions to the induced current and voltage by various electromagnetic field components, such as the vertical electrical field, the horizontal electrical field and the horizontal magnetic field, are compared in this paper in terms of integral of Green function and superposition theorem. The results validate the conclusion that the contribution of the same electromagnetic field component is not the same using different transmission line models.

**Key words:** HEMP; Transmission line formulation; Agrawal model; Taylor model; Numerical simulation