

文章编号: 1001-4322(2003)12-1237-04

# 近地长电缆对高空电磁脉冲晚期部分的响应\*

余同彬, 周璧华

(解放军理工大学 工程兵工程学院, 江苏 南京 210007)

**摘 要:** 根据传输线理论, 计算了高空电磁脉冲晚期部分作用下近地长电缆外导体的感应电流, 给出了电缆取不同长度、端接不同阻值负载时的电流波形。计算结果表明, 当电缆长度为几十 km, 外导体两端接地, 其感应电流峰值可达数十 A, 且随电缆长度的增加而增加, 但电流增幅随电缆长度的增加逐渐变慢。当接地电路中串接较大电阻时, 感应电流峰值明显降低。

**关键词:** 高空电磁脉冲; 传输线; 耦合

**中图分类号:** TN011 **文献标识码:** A

高空爆炸电磁脉冲(HEMP)对电子、电气设备及系统的干扰与损伤效应已引起人们的足够重视。在地面附近, HEMP 包括前期、中期和晚期三个部分<sup>[1~3]</sup>。然而人们在研究 HEMP 的影响时, 往往只考虑其前期部分的作用, 并习惯地就将这一部分称之为 HEMP。由于前期部分的电场强度峰值可达数十 kV/m, 脉冲的上升时间和半峰值宽度分别为几个 ns 和几十 ns, 高频成份相当丰富, 对工作频率越来越高的微电子设备及系统的干扰与损伤效应日趋严重。中期部分电场波形的峰值约为 100V/m, 脉冲宽度为 693μs。但中期部分入射电场与地面反射电场的合成场仅有很小的水平分量, 因而对平行于地面电缆的耦合作用往往可以忽略。晚期部分的持续时间近 10<sup>3</sup>s, 电场峰值不超过 40mV/m, 覆盖的频段主要分布在 1Hz 以下。值得注意的是, 晚期部分的电场平行于地面的分量持续时间较长, 主要频率分量为极低的频率, 可对近地长电缆产生较强的耦合作用<sup>[1,4~6]</sup>。要研究 HEMP 对电缆的耦合, 首先要分析 HEMP 在电缆外导体上产生的感应电流。

对于 HEMP 前期部分与近地电缆外导体的耦合问题, 一般根据传输线理论作近似分析<sup>[7~10]</sup>或采用时域有限差分(FDTD)法之类的数值方法作时域全波分析<sup>[11]</sup>。而对 HEMP 晚期部分与近地电缆外导体的耦合问题, 由于受机时和存储空间的限制, 目前还难以采用 FDTD 法进行研究。对于 HEMP 晚期部分作用下的近地长电缆, 在外导体两端接地条件下产生的感应电流, 国外多采用准直流模型作近似计算<sup>[3~5]</sup>。由于这种方法未考虑直流回路中大地的损耗以及电缆与大地之间的感抗, 计算得出的感应电流必将产生一定误差。V. N. Greetsai 等人于 1998 年曾用传输线理论对 HEMP 晚期部分在通信电缆外导体上产生的感应电流进行过估算<sup>[7]</sup>, 但进一步的研究结果未见报道。本文根据传输线理论对 HEMP 晚期部分与近地长电缆外导体的耦合问题进行了研究, 计算了近地长电缆在取不同长度和外导体端接不同阻值负载时外导体感应电流的波形, 并就有关结果进行了讨论。

## 1 计算模型及方法

图 1 为 HEMP 来波与近地电缆方位示意图。计算 HEMP 作用下电缆感应电压和电流时, 可采用如图 2 所示的分布源传输线模型<sup>[8]</sup>。模型中传输线常用波阻抗  $Z_0$  及传输常数  $\gamma$  来描述。

图 2 中  $E_z(z)$  为作用于电缆上的合成电场频域符号。在离地面  $h$  高度处,  $E_z(z)$  是由入射场  $E_i(z)$  和来自地面的反射场  $E_r(z)$  迭加形成的, 其值除与高度  $h$  和大地电参数有关外, 还取决于来波的极化方式与入射角度, 可参考文献[8]中的有关算式确定。当  $E_z(z)$  作用于图 2 中的传输线时, 沿线电压和电流的频域表达式为<sup>[8]</sup>

$$U_z(z) = Z_0 \{ [K_1 + P(z)] e^{-\gamma z} - [K_2 + Q(z)] e^{\gamma z} \} \quad (1)$$

$$I_z(z) = [K_1 + P(z)] e^{-\gamma z} + [K_2 + Q(z)] e^{\gamma z} \quad (2)$$

\* 收稿日期: 2003-04-24; 修订日期: 2003-07-07

基金项目: 国家自然科学基金资助课题(50237040)

作者简介: 余同彬(1970-), 男, 安徽人, 1991 年毕业于解放军通信工程学院, 1996 年在该院获电磁场与微波技术专业硕士学位, 2003 年在解放军理工大学工程兵工程学院获博士学位, 讲师。主要从事计算电磁学和电磁防护研究; E-mail: ytbyang@yahoo.com.cn。

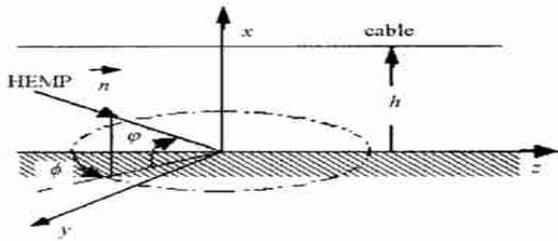


Fig. 1 Coordinate for the cable and ground  
图 1 HEMP 与架空电缆方位图

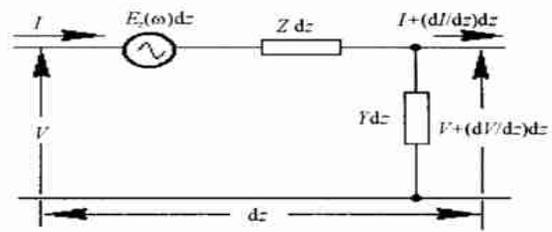


Fig. 2 Transmission line model  
图 2 分布源传输线模型

式中

$$P(z) = \frac{1}{2Z_0} \int_{z_1}^z e^{-\gamma v} E_z dv \tag{3}$$

$$Q(z) = \frac{1}{2Z_0} \int_z^{z_2} e^{-\gamma v} E_z dv \tag{4}$$

$$K_1 = \frac{1}{2} e^{-\gamma z_1} \frac{2P(z_2)e^{-\gamma z_2} - Q(z_1)e^{-\gamma z_2}}{e^{-\gamma(z_2-z_1)} - 1} \tag{5}$$

$$K_2 = \frac{1}{2} e^{-\gamma z_2} \frac{Q(z_1)e^{-\gamma z_1} - P(z_2)e^{-\gamma z_1}}{e^{-\gamma(z_2-z_1)} - 1} \tag{6}$$

式中:  $\gamma_1 = (Z_1 - Z_0)/(Z_1 + Z_0)$ ,  $\gamma_2 = (Z_2 - Z_0)/(Z_2 + Z_0)$ , 其中  $Z_1, Z_2$  为电缆两端阻抗;  $z_1, z_2$  为电缆两端坐标。

计算时先由入射 HEMP 电场的时域表达式求得其频域表达式,按大地电参数、极化方向、入射角度和电缆架高得出距地面某一高度处的电场频域表达式,根据式(1)和式(2)求得  $U_z(\omega)$  和  $I_z(\omega)$ ,再经傅里叶变换就可得到  $U_z(t)$  和  $I_z(t)$ 。考虑到直接进行傅氏积分难度较大,而离散傅里叶变换能很好地近似连续变量的傅里叶变换,故本文在进行上述时域和频域间的变换时,是通过快速傅里叶变换(FFT)完成的。

## 2 计算结果及讨论

在计算长电缆外导体上的感应电流时,大地参数取为  $\sigma = 10^{-4} \text{ S/m}$ ,  $\epsilon_r = 10$ ,  $\mu_r = 1$ 。按文献[8]中的数据,电缆外导体直径及厚度分别取为 2cm 和 0.5mm,电导率取  $5.8 \times 10^7 \text{ S/m}$ 。按文献[4],HEMP 晚期部分在大地中接近地面处产生的切向感应电场可表示为

$$E(t) = \begin{cases} 0, & t < 0 \\ E_{01} k_1 (e^{-a_1 t} - e^{-b_1 t}) - E_{02} k_2 (e^{-a_2 t} - e^{-b_2 t}), & t > 0 \end{cases} \tag{7}$$

式中:  $t = t - 1$ ,  $E_{01} = 0.04 \text{ V/m}$ ,  $a_1 = 0.02 \text{ s}^{-1}$ ,  $b_1 = 2 \text{ s}^{-1}$ ,  $k_1 = 1.058$ ,  $E_{02} = 13.26 \text{ mV/m}$ ,  $a_2 = 0.015 \text{ s}^{-1}$ ,  $b_2 = 0.02 \text{ s}^{-1}$ ,  $k_2 = 9.481$ 。(7)式描述的波形如图 3 所示,其中(a)图的横坐标取常用形式,(b)图的横坐标取对数形式。由图 3 可见,电场的峰值为 38.6mV/m,上升时间(10%~90%)约 0.9s,正负脉冲的半峰值宽度分别约为 20, 130s。由于大地与空气分界面上电场的切向分量连续,(7)式也可用来近似表示地面以上近地切向电场,且在贴近地面处,这种近似具有较高的精度。

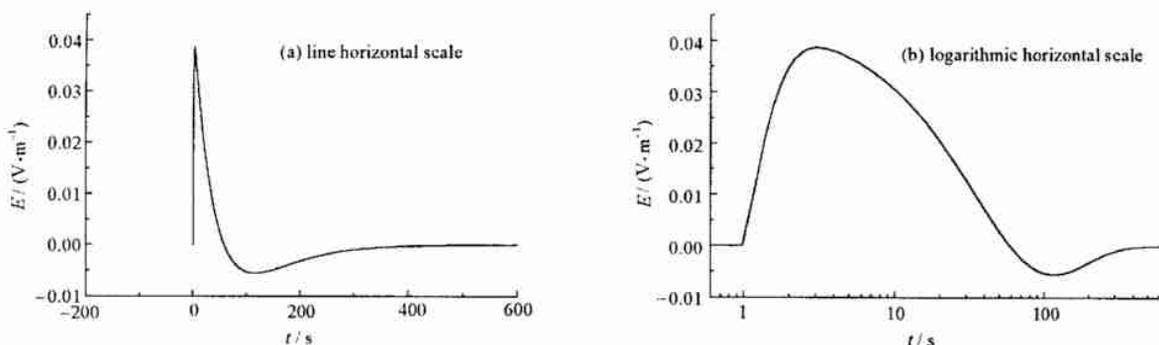


Fig. 3 Standard late-time HEMP waveform  
图 3 HEMP 后期部分电场的标准波形

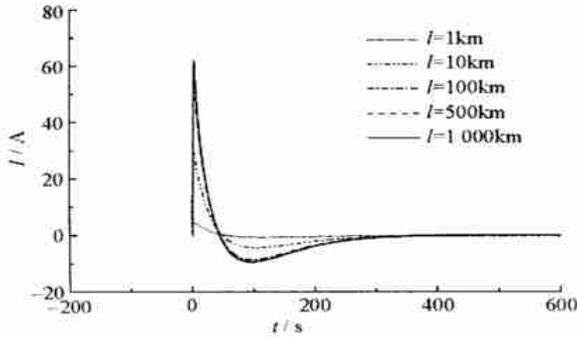


Fig. 4 Sheath current waveform of the cable with two grounded ends  
图 4 电缆外导体两端接地时感应电流波形

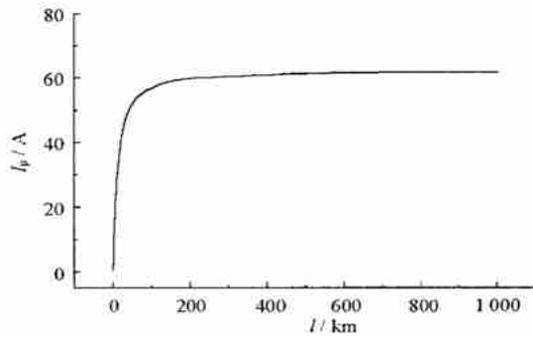


Fig. 5 Peak value of the Sheath current as a function of cable length  
图 5 电缆外导体感应电流峰值随电缆长度的变化曲线

对两端接地的电缆当其取不同长度时,按传输线理论计算得到外导体上感应电流的波形如图 4 所示。计算中电缆轴线距地面高度取为 1.1cm,电缆两端的接地电阻均取为  $4\ \Omega$ ,传输线特性阻抗和传输常数所涉及的传输线单位长度纵向阻抗  $Z$  由以下三部分组成:电缆和地面之间磁场所决定的感抗、大地内阻抗和电缆内阻抗。在计算  $Z$  时如果仅考虑电缆内阻抗,由传输线理论得到的结果和根据准直流模型计算的结果完全一致。然而,对近地长电缆而言,由电缆和地面之间的磁场所决定的感抗及大地内阻抗的作用是不能忽略的,计算  $Z$  时应予以充分考虑。由于感抗及大地内阻抗与频率有关,因而感应电流的波形与电场波形会有一定差异。图 5 给出了电缆外导体两端接地时的感应电流峰值随电缆长度的变化情况,从图中可以看出,感应电流峰值随着电缆长度的增加而增加,但其增幅随长度的增加逐渐变小。

图 6 为电缆一端接地、另外一端串接不同电阻而接地时外导体感应电流的波形。当串接电阻为  $0\ \Omega$  时,感应电流峰值可达几十 A;当串接电阻为  $100\ \Omega$  和  $500\ \Omega$  时,感应电流峰值明显降低;而当串接电阻为无穷大时,感应电流几乎为零。可见,为避免受 HEMP 晚期部分的影响,长电缆外导体应采取一端接地。

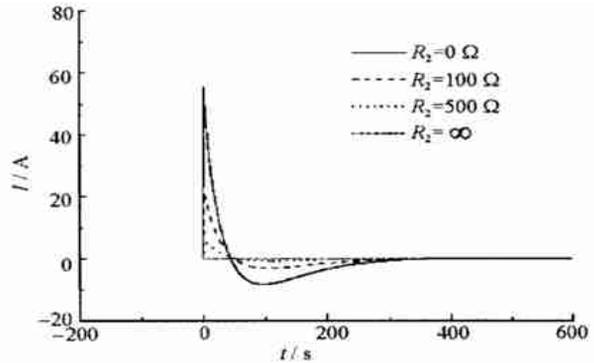


Fig. 6 Sheath current waveform of the cable with end 2 having different serial resistance in the grounded wire (end 1 is grounded)

图 6 一端接地、另外一端串接不同电阻而接地时  
电缆外导体感应电流的波形

### 3 结 论

对于外导体两端接地的近地长电缆,HEMP 晚期部分在其外导体上产生的感应电流峰值可达数十 A,且感应电流峰值随电缆长度的增加而增加。但随着电缆长度的增加,感应电流峰值的增加越来越缓慢。当接地电阻增大时,感应电流峰值明显降低。

### 参考文献:

- [1] IEC 61000-2-9. Description of HEMP environment-radiated disturbance[S]. 1996.
- [2] 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. *High Power Laser and Particle Beams*, 2003, 15(9): 905—908)
- [3] 孙蓓云,周辉,谢彦召. 两种高空核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)
- [4] IEC 61000-2-10. Description of HEMP environment-conducted disturbance[S]. 1998.
- [5] Tesche F M, Barnes P R, Sakis Meliopoulos A P. Magnetohydrodynamic Electromagnetic Pulse(MHD-EMP) Interaction with Power Transmission and Distribution Systems[R]. ORNL/ Sub/ 90-828/ 1, Martin Marietts Energy Systems, Inc, Oak Ridge Natl, 1992.
- [6] Barnes P R. MHD-EMP analysis and protection[R]. Defense Nuclear Agency Report No. DNA-TR-92-101, 1993.
- [7] Greetsai V N. Response of long lines to nuclear. High-altitude EM pulse[J]. *IEEE Trans on EMC*, 1998, 40(3): 348—354.
- [8] Vance E F. Coupling to Shielded Cables[M]. New York: John Wiley & Sons Inc, 1978.

- [9] Tesche F M. Comparison of the transmission line and scattering models for computing the NEMP response of overhead cables[J]. *IEEE Trans on EMC*, 1992, **34**(2) : 93—99.
- [10] 余同彬,周璧华. HEMP作用下近地有限长电缆外皮感应电流研究[J]. 解放军理工大学学报,2002,**3**(1) :8—12. (Yu T B, Zhou B H. Study of the HEMP induced current in cables of finite length near the ground. *Journal of PLA University of Science & Technology*, 2002,**3**(1) : 8—12)
- [11] 陈彬,王廷永,高成,等. 电磁脉冲作用下近地电缆外皮感应电流的全波分析[J]. 微波学报, 2000,**16**(5) :549—553. (Chen B, Wang T Y, Cao C, et al. Full-wave analysis of the EMP induced current in cables near the ground. *Journal of Microwaves*, 2000,**16**(5) :549—553)

## Response of long lines to late-time HEMP

YU Tong-bin, ZHOU Bi-hua

(*Engineering Institute of Engineering Corps, People's Liberation Army University of Science & Technology, Nanjing 210007, China*)

**Abstract :** The transmission-line theory is used to calculate the late-time HEMP induced sheath current of long lines with different length and termination, which is located near or above the ground. The results show that the induced sheath current on the line with two grounded ends can reach to tens of As. As the line's length grows, the peak value of the sheath current increases, and the increase with the length slows down. When one end of a line have high serial resistance in the grounded wire(the other end is grounded), the peak value of the sheath current decreases obviously.

**Key words :** Nuclear electromagnetic pulse; Transmission line; Coupling