

文章编号： 1001-4322(2002)06-0901-04

两种高空核爆电磁脉冲电缆耦合效应的比较*

孙蓓云, 周 辉, 谢彦召

(西北核技术研究所, 陕西 西安 710024)

摘 要: 有关高空核爆电磁脉冲(HEMP)的标准,我国推荐的 1976 HEMP 和 IEC 推荐的 1996 HEMP 的早期波形是不同的。针对两种 HEMP 标准,采用传输线方程计算了不同长度电缆受 HEMP 影响的情况,结果表明电缆的 1976 HEMP 早期耦合效应较 1996 HEMP 早期耦合效应要严重的多。

关键词: 高空核爆电磁脉冲(HEMP); 电缆; 耦合效应

中图分类号: O441.1 文献标识码: A

由高空核爆炸产生的电磁脉冲(HEMP)可分为三个部分:早期($0 < t < 1\mu\text{s}$),中期($1\mu\text{s} < t < 1\text{s}$)和晚期($t > 1\text{s}$)^[1]。HEMP 对电子系统有破坏作用,对其效应及抗辐射加固设计研究历来受到关注,并开展了电缆的电磁脉冲模拟试验^[2,3]。有关核电磁脉冲环境的公开标准近年来不断改变,其趋势是 HEMP 的早期波形前沿变快,脉宽变窄,也就是说脉冲波形的高频成分加强的同时,低频成分却大大地削弱了。因此不同的核电磁脉冲波形对同种研究对象,如车辆、电缆等会有不同的电磁耦合效果。研究地面系统的电缆在不同标准下的核电磁脉冲响应,对于电子系统的抗 HEMP 加固设计具有一定的参考价值。

1 两种不同的 HEMP 辐射环境

1.1 入射的平面波

HEMP 的早期波形采用双指数波,其时域和频域表达式分别为(1)式和(2)式。

$$E_{inc}(t) = kE_0(e^{-at} - e^{-bt}) \tag{1}$$

$$E_{inc}(f) = kE_0(b - a) / [(a + j)(b + j)] \tag{2}$$

在 1976 年出版的“EMP Radiation and Protective Techniques”中取 $a = 1.5 \times 10^6/\text{s}$, $b = 2.6 \times 10^8/\text{s}$, $k = 1.04$, $E_0 = 50\text{kV/m}$, 对应这种描述,波形的前沿(10%~90%) $t_r = 7.8\text{ns}$, 脉冲半宽度 $t_{1/2} = 483\text{ns}$, 这是我国推荐的 HEMP 早期波形。1996 年 IEC 制定的核电磁脉冲标准中规定 $a = 4 \times 10^7/\text{s}$, $b = 6 \times 10^8/\text{s}$, $k = 1.3$, $E_0 = 50\text{kV/m}$, 波形的前沿 $t_r = 2.5\text{ns}$, 脉冲半宽度 $t_{1/2} = 23\text{ns}$ ^[4]。图 1 给出归一化的 1976 HEMP 和 1996 HEMP 的早期波形及频谱。

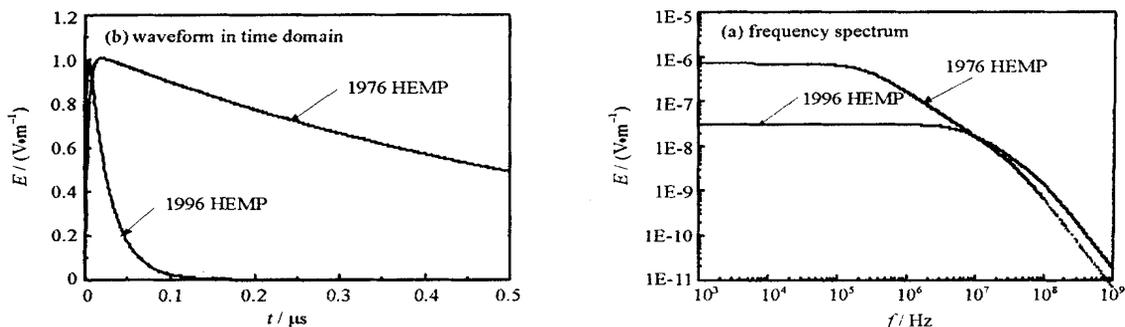


Fig. 1 Waveform and frequency spectrum of two kinds of HEMP

图 1 两种 HEMP 早期时域波形及频谱

1.2 地面附近的电场

有关的高空核爆电磁脉冲标准中,给出的脉冲波形及幅值均是针对自由空间的情况,而在进行实际的电磁脉冲效应研究时,效应物多处在地-空分界面附近,由于地面作用,其所处的电磁脉冲环境远异于自由空间中的

* 收稿日期:2002-05-10; 修订日期:2002-08-05

基金项目:国防科技基础研究基金资助课题

作者简介:孙蓓云(1966-),女,硕士,从事电磁脉冲方面的研究工作;西安市 69-13 信箱。

情况。

如图 2 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为 α ,则垂直极化分量为 $E_{v,inc} = E_0 \cos \alpha$,水平极化分量为 $E_{h,inc} = E_0 \sin \alpha$ 。

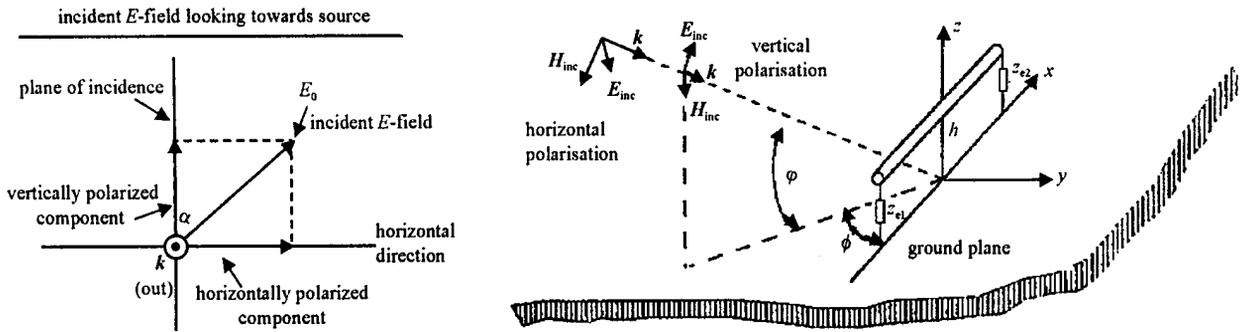


Fig. 2 Illustration of a cable excited by the incident EMP field

图 2 平面波激励架空线示意图

在高度 $z = h, y = 0$ 处, x 轴向的水平场分量为^[5]

$$E_{x,ex}(x, 0, h) = E_{x,inc} + E_{x,ref} = E_0 [\cos \alpha \sin \phi \cos \phi (e^{jkhsin \alpha} - R_v e^{-jkhsin \alpha}) + \sin \alpha \sin \phi (e^{jkhsin \alpha} + R_h e^{-jkhsin \alpha})] e^{-jkx \cos \alpha \cos \phi} \quad (3)$$

式中 R_v 和 R_h 分别为对应垂直极化和水平极化的菲涅尔反射系数。

$$R_v = \frac{\epsilon_r(1 + \frac{g}{j\epsilon_r\epsilon_0}) \sin \alpha - [\epsilon_r(1 + \frac{g}{j\epsilon_r\epsilon_0}) - \cos^2 \alpha]^{1/2}}{\epsilon_r(1 + \frac{g}{j\epsilon_r\epsilon_0}) \sin \alpha + [\epsilon_r(1 + \frac{g}{j\epsilon_r\epsilon_0}) - \cos^2 \alpha]^{1/2}} \quad (4)$$

$$R_h = \frac{\sin \alpha - [\epsilon_r(1 + \frac{g}{j\epsilon_r\epsilon_0}) - \cos^2 \alpha]^{1/2}}{\sin \alpha + [\epsilon_r(1 + \frac{g}{j\epsilon_r\epsilon_0}) - \cos^2 \alpha]^{1/2}} \quad (5)$$

式中: ϵ_r 为大地的相对介电常数; g 为大地的电导率。上述方程式为频域表达式,对于瞬态电磁脉冲,一般首先求出每个频率点上的合成总场,最后通过反傅立叶变换就可以得到需要的时域波形。

图 3 和图 4 分别为距地 3m 和 0.03m 处两种 HEMP 早期作用下,地面场的时域波形及频谱,波的入射角 $= 90^\circ$,极化角 $= 0^\circ$,方位角 $\phi = 0^\circ$,地面相对介电常数为 10,电导率为 0.01S/m。从计算结果可以看出,1996 HEMP 作用下地面场时域波形较我国 1976 HEMP 的时域波形脉宽要窄,其低频分量比 1976 HEMP 的要小得多。

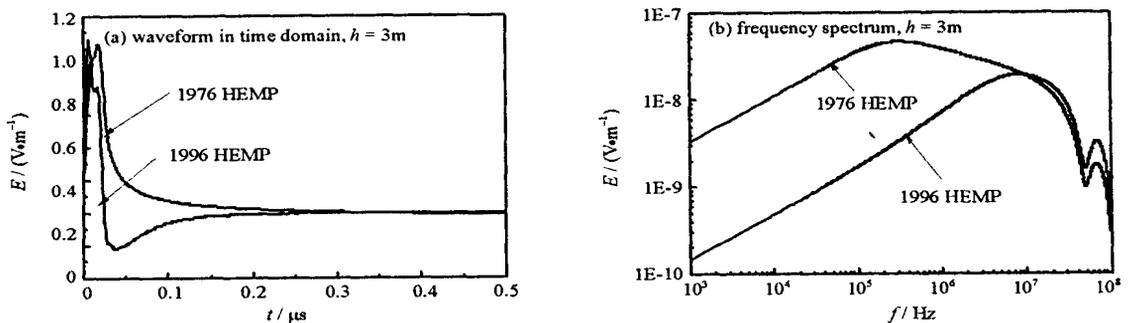


Fig. 3 Waveform and frequency spectrum of the HEMP field at $h = 3m$

图 3 高度为 3m 的地面场时域波形及频谱

2 两种核电磁脉冲波形的电缆耦合效应

2.1 求解电缆屏蔽层感应电流的基本原理

电缆感应皮电流可用时域 FDTD 方法进行求解^[6]。当长电缆架于有耗地面上时,应用传输线方程求解电缆的响应是一种有效方法^[7,8]。图 5 给出了电缆考虑了大地影响后的等效电路图。

如果导线两端接电阻分别为 $Z_{e1}(x = 0)$ 和 $Z_{e2}(x = l)$,当其受入射角 α ,方位角 ϕ 和极化角 θ 的平面波激励时,如图 2 所示,电缆外屏蔽层上的感应电压和感应电流满足电报方程

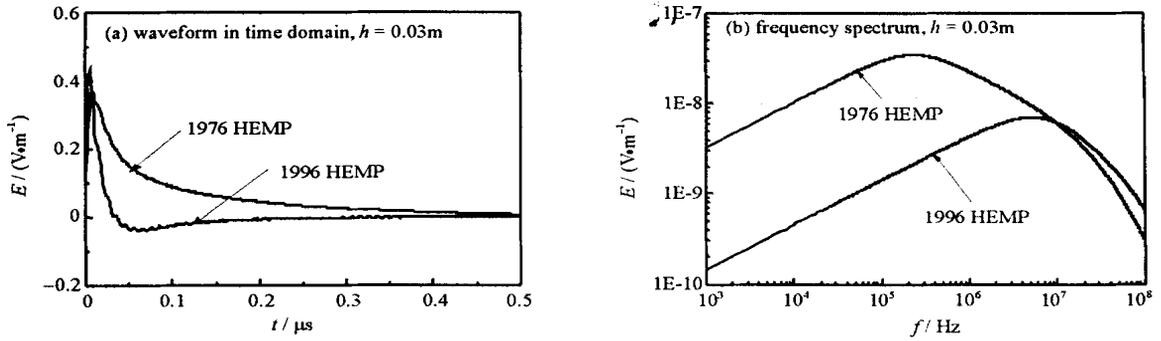


Fig. 4 Waveform and frequency spectrum of the HEMP field at $h = 0.03\text{m}$

图 4 高度为 0.03m 的地面场的时域波形及频谱

$$\begin{cases} \frac{dV_{\text{sca}}(x)}{dx} + ZI(x) = V_s(x) \\ \frac{dI(x)}{dx} + YV_{\text{sca}}(x) = 0 \end{cases} \quad (6)$$

式中 I, V_{sca}, Z, Y 分别为传输线上的电流、散射电压、阻抗和导纳, V_s 是外界电磁场引起的激励源, 即入射的水平方向电场分量。传输线阻抗和导纳的表达式为

$$Z = j\omega L + Z_g, \quad Y = (1/j\omega C + 1/Y_g) \quad (7)$$

有关传输线沿线电流的求解过程和电缆的电感 L 、电缆对大地的电容 C 、电缆对大地的阻抗 Z_g 及导纳 Y_g 可参见文献[5]。

2.2 电缆 HEMP 早期响应计算结果

如果核爆炸在磁赤道附近, 观测点在核爆地面的投影点附近, 垂直入射且电场方向与电缆平行的波会产生最为严重的感应电流。入射波与电缆的作用方式如图 6 所示。

我们先研究传输线两端短路的情况下的感应电流。屏蔽半径为 4mm 电缆的铺设状态有两种, 一是铺于地面 ($h = 0.03\text{m}$), 一是架高 3m。理想短路情况下 $Z_{e1} = Z_{e2} = 0$, 电缆端点处的感应电流与电缆的传播常数及入射波有关, 而与电缆的长度无关。图 7 给出两种 HEMP 早期作用下, 电缆的端点处感应皮电流波形。计算中电场的幅值为 50kV/m。

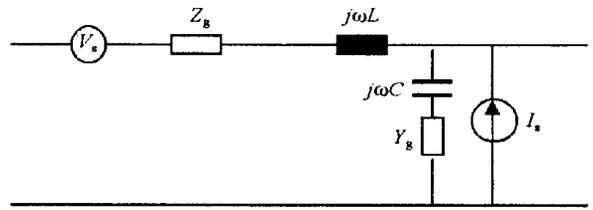


Fig. 5 Equivalent circuit

图 5 传输线等效电路

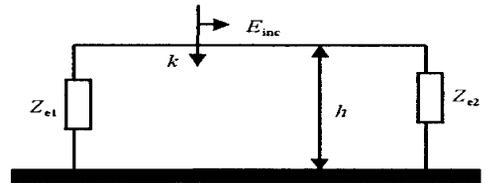


Fig. 6 Illustration of the incident HEMP field

图 6 HEMP 与电缆作用示意图

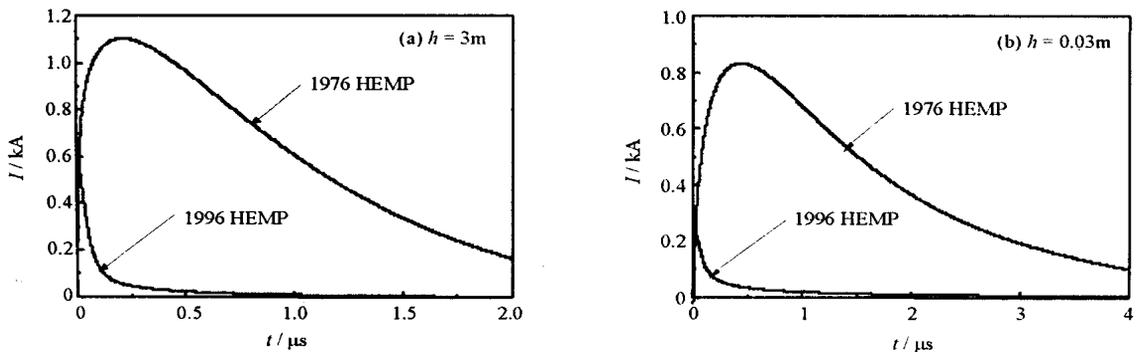


Fig. 7 Waveform of the induced current of the cable at $x = l$ with two ends shorted at $h = 3\text{m}$ and $h = 0.03\text{m}$

图 7 不同高度电缆架两端短路时 $x = l$ 处的感应电流

从图 7 可知, 在 1976 HEMP 作用下, 电缆架高 3m 时感应电流峰值为 1.103kA, 电缆铺地时感应电流峰值为 857A; 在 1996 HEMP 作用下, 电缆架高 3m 时电流峰值为 537A, 电缆铺地时峰值为 220A。另外, 电缆 1996 HEMP 感应电流的持续时间较 1976 HEMP 要短得多。

我们再研究电缆铺于地面两端开路的情况。图 8 给出两种 HEMP 作用下, 40m 长电缆在中点处的感应电流。表 1 给出了不同长度电缆中点处感应电流的峰值。可以看出, 电缆长度大于 10m 时, 1976 HEMP 的长电缆

耦合效应较 1996 HEMP 要严重得多。

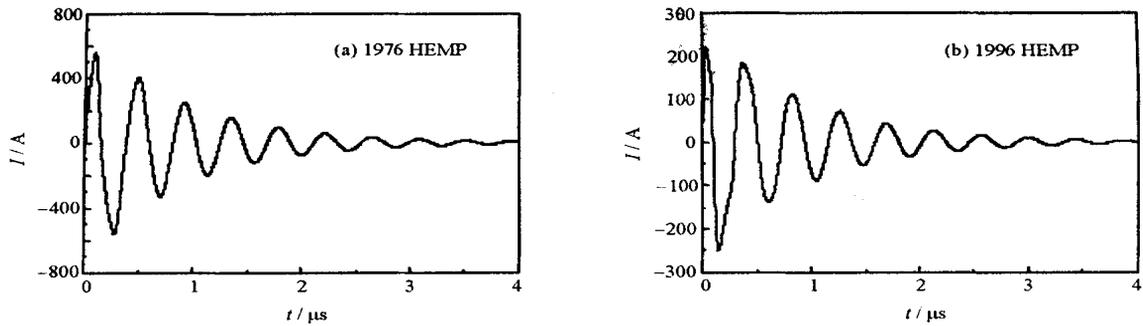


Fig. 8 Waveform of the induced current of the 40m long cable at $x=1/2$ with two ends opened ($h=0.03\text{m}$)

图8 40m长电缆铺于地面两端开路中点处的感应电流

表1 不同长度电缆两端开路中点处的电流峰值表

Table 1 Peak current of different length cable at $x=1/2$ with two ends opened

cable length / m	10	20	40	100	200	500	1 000
$I_{p,IEC}/\text{A}$	+206, - 222	+220, - 241	+221, - 249	+221, - 221	+221, - 181	+221, - 127	+218, - 93
$I_{p,1976}/\text{A}$	+250, - 226	+396, - 374	+566, - 562	+793, - 842	+892, - 962	+904, - 1 087	+837, - 1 141

3 计算结果分析

1976年我国推荐的 HEMP 早期的长电缆耦合效应较 1996 年 IEC 推荐的 HEMP 要严重,原因如下:前者的低频分量较后者的低频分量要高。经地面反射后,前者作用于电缆的低频分量也比后者的低频分量要高。电缆在短路状态下,其 HEMP 的早期响应主要由低频分量决定。因此,与 1996 HEMP 相比,1976 HEMP 电缆的感应电流要大,持续时间长。电缆在两端开路状态下,其 HEMP 的响应为一衰减振荡,振荡频率与电缆的长度有关,电缆越长,其振荡频率越低。对于几十 m、几百 m 长的电缆而言,电缆对外界电磁波的频率响应主要在 10MHz 以下。1996 HEMP 的低频分量幅值较小,对于接有电缆的设备而言,其端口保护指标较 1976 HEMP 要低得多。研究表明,对于民用电子设备 1996 HEMP 的标准比较合理^[1]。

参考文献:

- [1] Ianoz M, Nicoara B I C. Modeling of an EMP conducted environment[J]. *IEEE Trans on EMC*, 1996, **38**(3):400—413.
- [2] 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**(1):761—768. (ZHU M, LIU S K, ZHOU H, et al. Experiment study of EMP coupling to long shielded cable. *High Power Laser and Partical Beams*, 2001, **13**(6):761—768)
- [3] Hansen D, Schaer H, et al. Response of an overhead wire near a NEMP simulator[J]. *IEEE Trans on EMC*, 1990, **32**(1):18—27.
- [4] Description of HEMP environment-radiated disturbance[S]. International Electrotechnical Commission, 1996. IEC 1000-2-9.
- [5] Tesche Frederick M, Lanoz Michel V. EMC analysis methods and computational models[M]. New York: John Wiley & Sons, Inc., 1996.
- [6] 程引会,周辉,李宝忠,等.不同电磁脉冲对细导线的耦合[J]. *强激光与粒子束*, 2000, **12**(1):91—94. (CHENG Y H, ZHOU H, LI B Z, et al. Different EMP coupling to the thin wire structure. *High Power Laser and Partical Beams*, 2000, **12**(1):91—94)
- [7] Greesai V N. Response of long lines to nuclear high-altitude electromagnetic pulse[J]. *IEEE Trans on EMC*, 1998, **40**(4):348—353.
- [8] Taylor C D, Harrison C W. On the coupling of microwave radiation to wire structures[J]. *IEEE Trans on EMC*, 1992, **34**(3):183—188.

Comparison of the cable coupling effects under two kinds of HEMP environment

SUN Bei-yun, ZHOU hui, XIE Yair-zhao

(Northwest Institute of Nuclear Technology, P. O. Box 69-13, Xi'an 710024, China)

Abstract: There are various kinds of HEMP environment definitions. The coupling effects of electronic system are more different under different HEMP environment. In this paper, the responds of cable of different length are investigated under 1976 HEMP and 1996 HEMP environment. The results indicate that the cable coupling effects under 1976 HEMP environment are more serious than those under 1996 HEMP environment.

Key words: HEMP; cables; coupling effects