

文章编号: 1001-4322(2007)05-0868-05

辐照和电流注入下电缆耦合响应的计算*

李进玺, 程引会, 吴伟, 周辉

(西北核技术研究所, 西安 710024)

摘要: 采用传输线模型, 利用时域有限差分方法计算了辐照和电流注入两种试验环境中电缆屏蔽层电流对芯线的耦合响应, 并对响应规律进行了研究。计算结果表明: 电流注入时近端负载电压峰值最小, 辐照时次之, 电流注入时远端最大; 负载电压峰值、负载能量与屏蔽层电流源幅度等比例变化; 相比较前沿的变化而言, 改变屏蔽层电流源前沿对负载电压峰值和负载能量的影响不大; 屏蔽层电流源半高宽较小时, 负载电压峰值、负载能量与半高宽是非线性关系, 屏蔽层电流源半高宽较大时, 负载电压峰值、负载能量与半高宽成线性关系; 电缆较短时, 改变电缆长度对负载电压峰值有影响, 而电缆较长时, 只会影响电缆负载能量。

关键词: 辐照; 脉冲电流注入; 耦合; 负载响应

中图分类号: O441.4 **文献标识码:** A

脉冲电流注入(PCI)试验方法主要用来模拟各种强电磁辐射环境对电子系统的易损性评估和分析。研究脉冲电流注入和辐照两种试验方法中的电缆芯线负载响应, 为电流注入标准的提出及其误差估计提供了依据。

对于电缆屏蔽层的电磁脉冲响应, 许多学者已经作了大量的研究工作^[1-3]。对于电缆芯线的耦合响应, 文献[4]在复频域建立了短电缆条件下的模型、电报方程及其数学表达式, 由计算得到的复频域结果, 通过傅里叶逆变换得到了电缆芯线的时域响应。

本文采用 Higgins 等人^[5-6]提出的时域传输线方法, 对辐照和电流注入两种环境下电缆芯线负载的高空电磁脉冲响应进行了计算, 并着重分析了屏蔽层电流的幅度、半高宽、前沿以及电缆长度对芯线负载响应的影响。该方法采用时域传输线方法计算, 减小了对计算机内存和电缆长短的依赖。

1 计算模型

计算中所用的电缆型号为 SYV-50-9, 其参数为: 外导体外直径 $D_1=1.01$ cm, 内导体直径 $D_2=2.85$ mm, 编织线直径 $d=0.2$ mm, 编织角 39.3° , 屏蔽因子 $F=0.836$, 光学覆盖因子 $K=0.973$, 载流子数 24, 特性阻抗 $Z_{01}=50.02 \Omega$, 屏蔽层距离地面高度 $h=0.004$ m。

电缆芯线和屏蔽层之间组成一对特性阻抗为 Z_{01} 的内传输线, 电缆屏蔽层与大地之间组成一对特性阻抗为 Z_{02} 的外传输线, 外传输线上的信号通过转移阻抗和转移导纳耦合进入内传输线。图 1 给出了电缆双传输线模型, 其中 V_{in}, I_{in} 和 $V_{exterior}, I_{exterior}$ 分别表示内外传输线的电压源和电流源; $V_{center}, I_{center}, V_{shield}, I_{shield}$ 分别表示电缆芯线和屏蔽层的电压和电流(屏蔽层电压为屏蔽层对地电压)。在直角坐标系中, 对有源传输线方程进行时间、空间差分离散。图 2 为有源传输线网格划分模型, 其中, U_0 和 I_0 分别表示一个网格内的电压源和电流源, Δz 为空间网格长度。由差分格式可知^[5], 如果已知内外传输线方程中的电压源和电流源, 即可求得电缆屏蔽

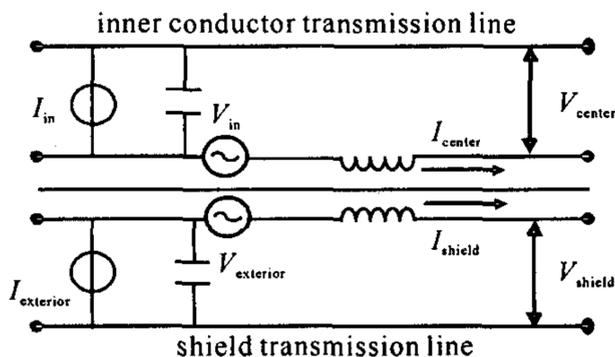


Fig. 1 Double transmission line model of shielding cable

图 1 电缆双传输线模型

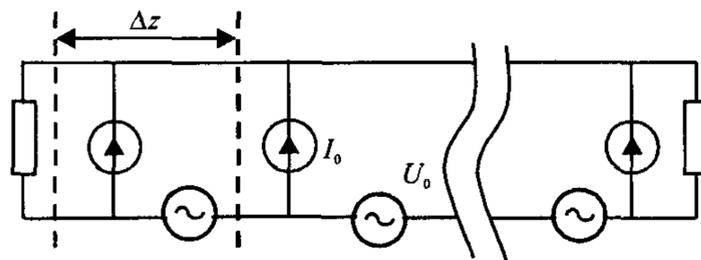


Fig. 2 Grid model of transmission line

图 2 传输线网格划分模型

* 收稿日期: 2006-10-18; 修订日期: 2007-02-05
基金项目: 国防科技基础研究基金资助课题
作者简介: 李进玺(1978—), 男, 主要从事电磁脉冲数值计算工作; jy_120@163.com。

层和芯线的电压电流分布。

外传输线方程中的电流电压源可以通过其它方法得到^[1-3]，而内传输线方程中的电流电压源，可以通过屏蔽层对地电压和屏蔽层电流对电缆的耦合得到。为了描述耦合特性，引进了转移阻抗 Z_T 和转移导纳 Y_T 两个参数来定量的分析它，根据文献[7]有

$$Z_T = Z_d + j\omega M_{12} \tag{1}$$

$$Y_T = j\omega C_{12} \tag{2}$$

式中： Z_d 为穿越屏蔽体的电磁场引起的阻抗； M_{12} 为屏蔽体回路和内导体回路之间的互感； C_{12} 为内导体与外部结构之间的互电容。 Z_T 和 Y_T 的计算公式见文献[7]，对于 SYV-50-9 型电缆，频率较低时，转移阻抗主要表现为 R_s ，频率较高时， M_{12} 起主要作用。因此，根据转移阻抗和转移导纳的定义^[7]，有

$$U_{in} = I_{shield} R_s + M_{12} dI_{shield}/dt \tag{3}$$

$$I_{in} = C_{12} dV_{shield}/dt \tag{4}$$

式中： R_s 为 Z_d 的直流项； U_{in} ， I_{in} 分别为电缆芯线和屏蔽层构成的传输线的电压源和电流源； U_{shield} ， I_{shield} 分别为电缆屏蔽层对地电压和屏蔽层电流。由(3)，(4)式可知：已知屏蔽层对地电压和电流及其时间变化率，就可以求得内传输线的电压源和电流源。

2 计算结果及分析

对于电流注入模型，屏蔽层上的电流处处相等，只是电流到达各点的时间先后不同；对于辐照模型，假定电缆屏蔽层各点的电流大小相同，相位也相同。由文献[2]可知，辐照情况下电缆屏蔽层上的电流沿电缆长度方向变化不大，因此，可以认为电缆屏蔽层各点的电流相同。图 3 和图 4 分别给出了脉冲电流注入模型与辐照模型，两种模型中，电缆芯线两端接 Z_{01} ；屏蔽层两端接 Z_{02} 。为了区分，定义电流注入端为近端，另一端为远端。本文计算中，辐照和电流注入环境中的屏蔽层电流均采用双指数脉冲。

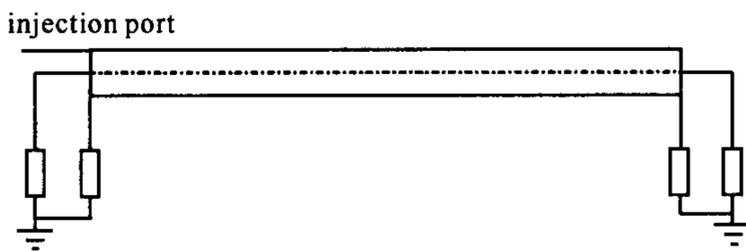


Fig. 3 Pulsed current injection model

图 3 脉冲电流注入模型

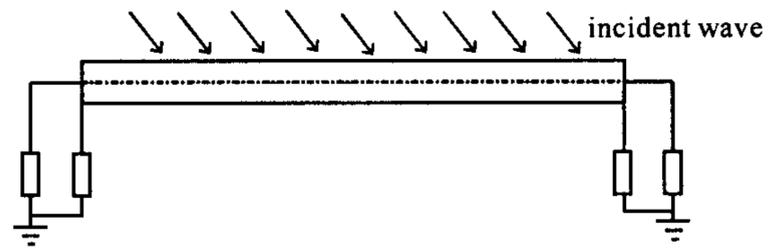


Fig. 4 Radiation model

图 4 辐照模型

2.1 屏蔽层电流幅度对芯线负载响应的影响

计算参数：屏蔽层电流前沿 $t_r = 7.8 \text{ ns}$ ，半高宽 $\tau_{FWHM} = 192.4 \text{ ns}$ ，电缆长度 12 m。图 5 给出了屏蔽层电流幅度为 1 kA 时辐照和电流注入两种情况下的电缆负载电压波形。

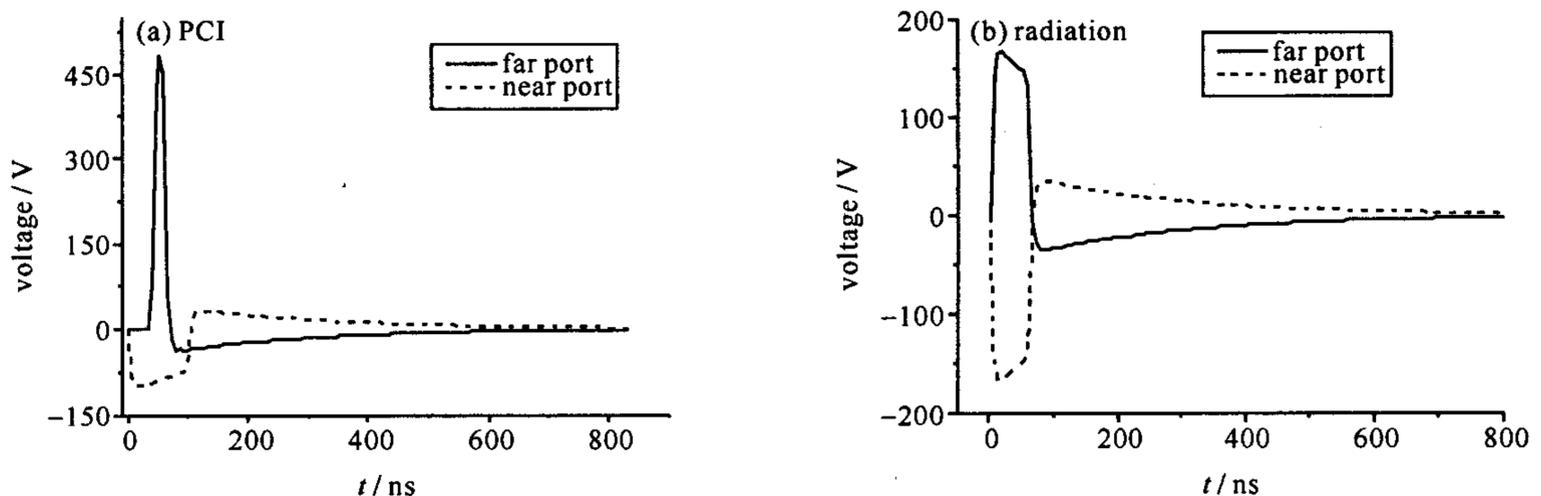


Fig. 5 Response voltage at the load

图 5 电缆负载电压响应波形

图 6 给出了负载电压峰值及负载电压绝对值积分(E)与电流幅度的关系曲线。由图 5,6 可以看出，辐照环境下电缆两端负载上电压大小相等，方向相反；对于负载电压峰值和负载电压绝对值积分来说，注入时近端最小，辐照时次之，注入时远端最大；近端负载电压绝对值积分大小与辐照时相差 6.67%，远端负载电压绝对值积分大小与辐照时相差 7.78%；负载电压峰值、电压绝对值积分与电流幅度成正比关系，两者等比例变化。

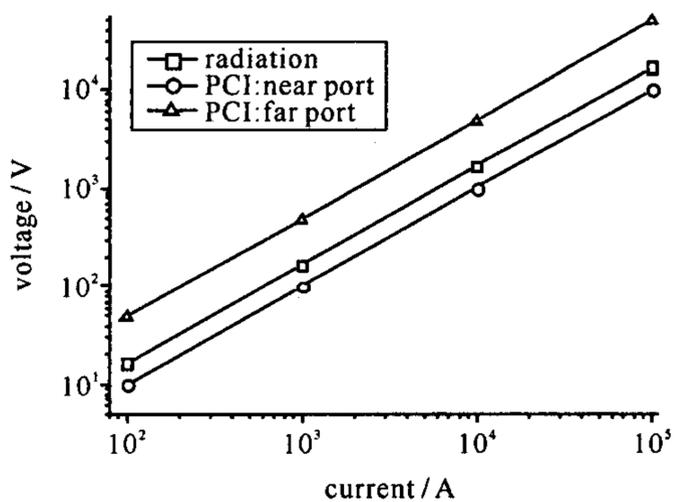
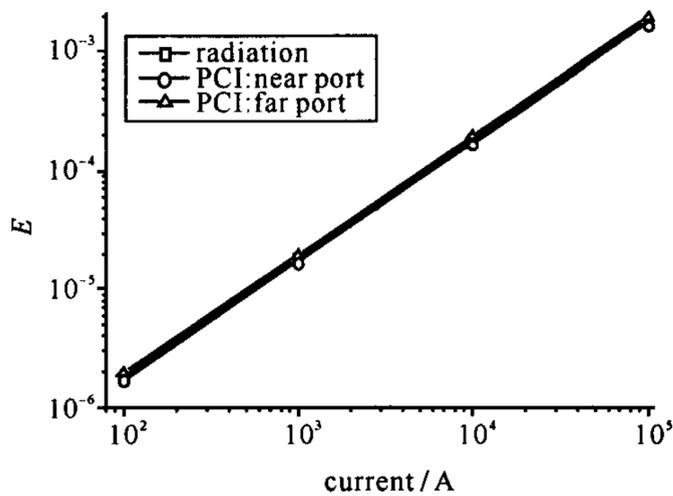


Fig. 6 Peak value of voltage and integrate value vs current amplitude

图 6 电流幅度对电缆负载电压峰值和电压绝对值积分的影响



2.2 屏蔽层电流脉宽对芯线负载响应的影响

计算参数: 电流幅度 1 kA, 前沿 $t_r = 7.8$ ns, 电缆长度 12 m。图 7 和图 8 分别给出了负载电压峰值、负载电压绝对值积分与屏蔽层电流半高宽的关系曲线。

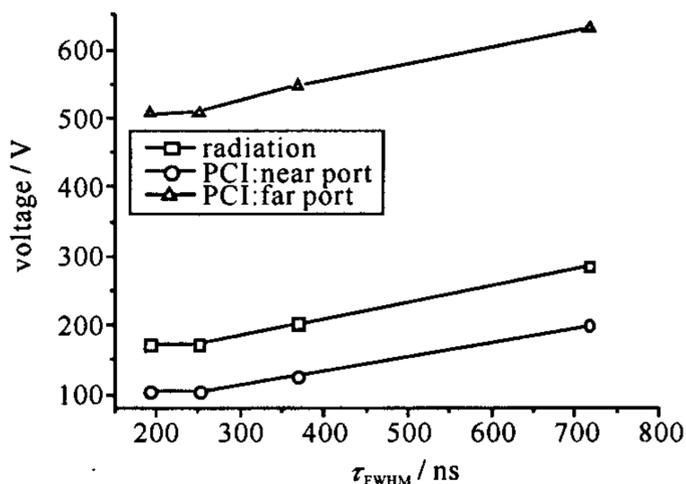


Fig. 7 Peak value of voltage vs τ_{FWHM}

图 7 电压峰值随电流半高宽的变化

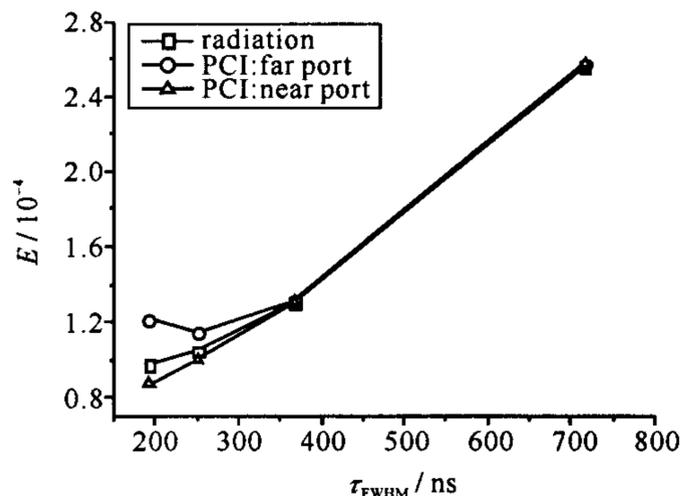


Fig. 8 Integrate value vs τ_{FWHM}

图 8 电压绝对值积分随电流半高宽的变化

可以看出, 半高宽较小时, 负载电压绝对值积分以及负载电压峰值与电流半高宽是非线性关系; 半高宽较大时, 负载电压绝对值积分以及负载电压峰值与电流半高宽成正比关系, 负载电压绝对值积分和半高宽等比例增加, 但是, 负载电压峰值不是等比例增加的。负载电压绝对值积分与产生屏蔽层电流的环境关系不大, 如 $\tau_{FWHM} = 716$ ns 时, 辐照环境下负载电压绝对值积分为 2.56×10^{-4} , 注入时远端为 2.57×10^{-4} , 注入时近端为 2.57×10^{-4} 。

2.3 屏蔽层电流前沿对芯线负载响应的影响

计算条件: 电流幅度 1 kA, 半高宽 $\tau_{FWHM} = 112$ ns, 电缆长度 120 m。图 9 给出了屏蔽层只有一个网格有电流时芯线负载电压峰值与电流前沿的关系, 一个网格有源是一种理想情况, 等效于短电缆。图 10 给出了屏蔽层电流前沿 $t_r = 5.78$ ns 时负载电压波形, 图 11、图 12 分别给出了负载电压峰值、负载电压绝对值积分与屏蔽层电流前沿的关系曲线。

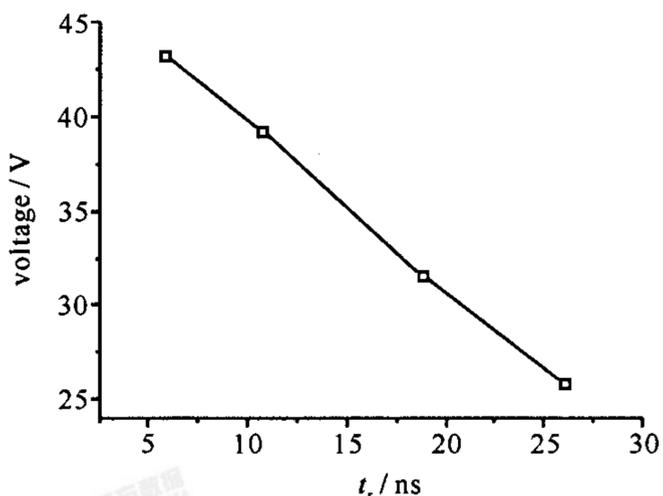


Fig. 9 Peak value of voltage vs the rise time when source at a single grid

图 9 一个网格有电流时负载电压峰值随前沿的变化

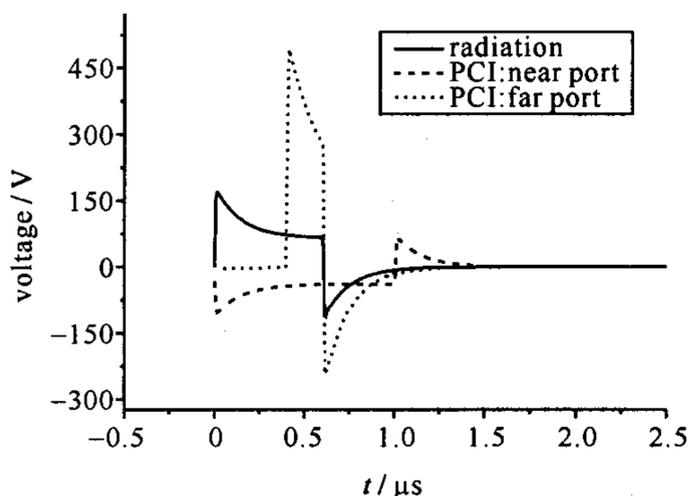


Fig. 10 Voltage vs time for 5.78 ns rise time

图 10 前沿 5.78 ns 时负载电压随时间的变化

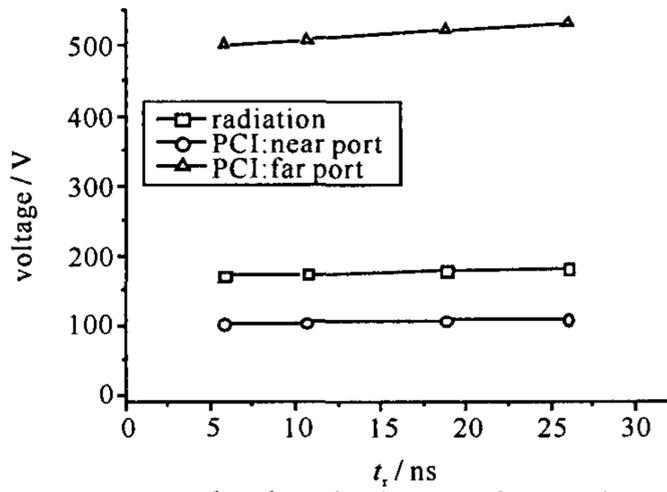


Fig. 11 Peak value of voltage vs the rise time

图 11 负载电压峰值随前沿的变化

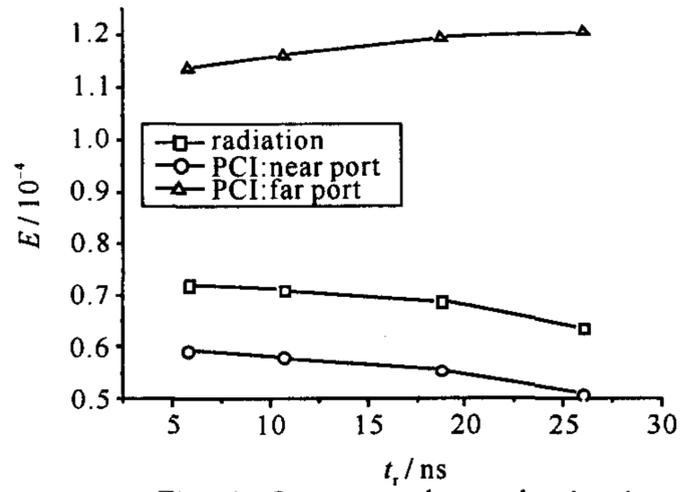


Fig. 12 Integrate value vs the rise time

图 12 电压绝对值积分随前沿的变化

由图 9 可以看出,短电缆时,负载电压峰值与屏蔽层电流前沿快慢成正比关系;电缆受辐照长度增大时,屏蔽层电流前沿不同对应的负载电压峰值增大的比例不同,前沿越慢,负载电压峰值增加越大,如图 11 所示,导致了负载电压峰值与屏蔽层电流前沿快慢成反比关系,但是,相比较电流前沿的变化幅度而言,负载电压峰值的变化很小,对于本文计算情况来说,前沿变慢至原来的 1/5 时,负载电压峰值增大 1 倍多。

辐照方式下和注入方式下近端负载电压绝对值积分与电流前沿的快慢成正比,注入方式下远端负载电压绝对值积分与电流前沿的快慢成反比,这是因为注入方式下的近端负载电压和辐照方式下的负载电压的平顶的持续时间比较长,并且前沿越慢,平顶越小,所以注入方式下的近端负载电压绝对值积分和辐照方式下的负载电压绝对值积分随前沿的变慢而减小,而注入方式下的远端负载电压绝对值积分随前沿的变慢而增大,如图 10 所示。但是,相比较电流前沿的变化幅度而言,负载电压绝对值积分的变化很小,对于本文计算情况来说,前沿变慢为原来的 1/5 时,注入方式下近端和辐照方式下负载电压绝对值积分减小 1/2 以上,而注入方式下远端负载电压绝对值积分与电流前沿增大 1 倍多。

2.4 电缆长度对芯线负载响应的影响

计算条件:电流幅度 1 kA,前沿 $t_r=106.3$ ns,半高宽 $\tau_{FWHM}=456.4$ ns。图 13、图 14 分别给出了电缆负载电压峰值以及电压绝对值积分与电缆长度的关系曲线。

可以看出,当电缆较短时,负载电压峰值与电缆长度成正比,电压峰值增大的倍数小于电缆长度增加的倍数,当电缆较长时,负载电压峰值不再变化;负载电压绝对值的积分与电缆长度成正比,两者等比例变化。辐照情况下,屏蔽层电流同步,因为电缆介质层的存在,影响了芯线和屏蔽层波的传播速度不同,因此,当电缆长度较大时,变化电缆长度只对负载电压脉宽有贡献,而对幅度没贡献;同理,因为注入情况下的屏蔽层电流是从近端向远端传播的,对应的,芯线电压也是从近端向远端传播的,当电缆长度较大时,变化电缆长度只对注入端负载电压脉宽有贡献,而对幅度没贡献。

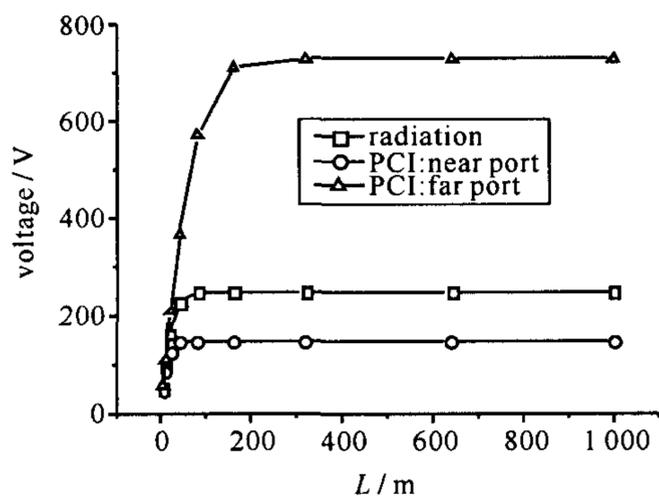


Fig. 13 Peak value of voltage vs the length of cable

图 13 电压峰值随电缆长度的变化

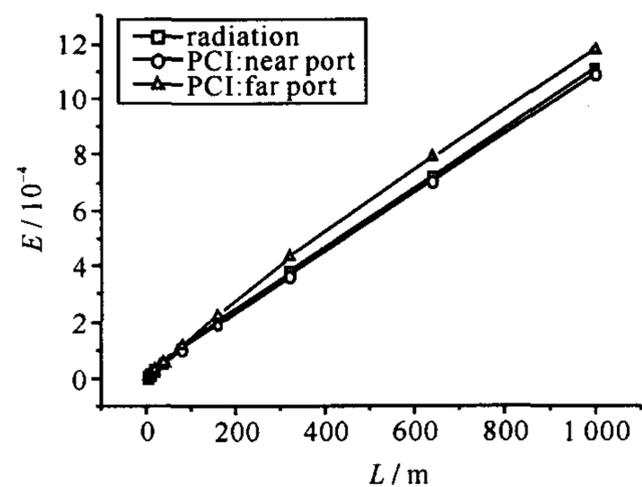


Fig. 14 Integrate value vs the length of cable

图 14 电压绝对值积分随电缆长度的变化

3 结 论

本文采用传输线模型,利用时域有限差分方法计算了辐照和电流注入两种试验环境中电缆屏蔽层电流对芯线的耦合响应,给出了屏蔽层电流的幅度、前沿、半高宽以及电缆长度对负载电压峰值、电压绝对值积分(能量)的影响。从计算结果可以得出:屏蔽层电流源相同时,注入时近端负载电压峰值、负载能量最小,辐照时次

之,注入时远端最大;负载响应与屏蔽层电流幅度成正比,改变屏蔽层电流幅度不影响对结果的分析,可以利用已知条件和结果对其他条件下的结果进行线性外推;屏蔽层电流半高宽较大时,注入和辐照两种环境下,负载能量近似相等;相比较屏蔽层电流前沿的变化幅度而言,改变前沿时负载电压峰值和负载能量的变化不大;电缆较短时,改变电缆长度对负载电压幅峰值有影响,而电缆较长时,只会影响电缆负载能量。

参考文献:

- [1] 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)
- [2] 马良. 地面铺设、埋地和部分埋地电缆的 HEMP 响应研究[D]. 西安:西北核技术研究所,2006. (Ma L. Research on HEMP responses of grounding-laying, buried and partially buried cables. Xi'an: Northwest Institute of Nuclear Technology, 2006)
- [3] 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)
- [4] 周辉,李宝忠,程引会,等. 编织屏蔽电缆 EMP 耦合和 X 光响应的理论计算[C]//计算物理学会陕西分会第一届学术会议文集. 1998. (Zhou H, Li B Z, Cheng Y H, et al. The calculation of braided shielding cable NEMP and X-ray responses//Proc of the First Science Symposium on Computational Physics. 1998)
- [5] Higgins D F, Barbara S. Time-domain calculation of the leakage of SGEMP transients through braided cable shields[J]. *IEEE Trans on Nuclear Science*, 1989, 36(6):2042-2049.
- [6] Higgins D F, Barbara S. SGEMP leakage through satellite cable shields; the importance of transfer admittance coupling and its implications on testing[J]. *IEEE Trans on Nucl*, 1980, 27(6):1589-1595.
- [7] Vance E F. Coupling to shielded cables[M]. Beijing: People's Posts and Telecom Press,1988.

Calculation of braided shielding cable responses in radiation and pulsed current injection environments

LI Jin-xi, CHENG Yin-hui, WU Wei, ZHOU Hui

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

Abstract: Using the transmission line model, the response in radiation and pulsed current injection(PCI) environments of braided cable shields coupling to inner conductor is calculated by finite-difference time-domain method. The numerical results indicate that the peak value of voltage of radiation environment is larger than the near port of PCI environments, and the far port is the biggest. The peak value of voltage and the integrate value of absolute value of voltage are in direct ratio with the current amplitude of shields. And the value is independent of the rise time. The value is non-linear with the full wave at half maximum(FWHM) for small FWHM, but it is just the opposite for big FWHM. The peak value and the length of cable are changed in the same ratio for short cable, as the length changes, the peak value becomes a constant. The integrate value is in direct ratio with the length.

Key words: Radiation; Pulsed current injection; Couple; Load response