

文章编号: 100124322(2004) 1021304203

水平极化电磁脉冲模拟器空间场的数值模拟^X

谢秦川, 陈明, 李进玺, 吴伟

(西北核技术研究所, 陕西 西安 710024)

摘 要: 采用时域有限差分方法, 对水平极化电磁脉冲模拟器所产生的电磁场进行数值模拟, 在时域中计算了电磁场的时间-空间分布。讨论了电磁脉冲模拟器产生的电磁脉冲波形和场的空间变化、均匀性等重要因素。结果表明, 模拟器产生的电磁脉冲前沿为 10ns, 接近脉冲电压前沿, 波形与脉冲电压波形(双指数波)相差较大; 峰值场强在对称轴上并非与距离成反比, 而是随距离增大而迅速减弱; 该模拟器的双锥-笼形天线能在大范围内(大于等于 50m, 水平方向)产生均匀分布、高峰值场强、快前沿的电磁脉冲。

关键词: 电磁脉冲; 模拟器; 双指数脉冲; 时域有限差分方法

中图分类号: O441 **文献标识码:** A

水平极化电磁脉冲模拟器(图 1)能够在较大空间范围内, 为大型系统的抗核电磁脉冲测试提供模拟的电磁环境^[1, 2, 6]。该模拟器的高压脉冲源产生双指数脉冲, 经由双锥-笼形天线系统向空间辐射电磁波, 笼形天线的末端由负载接地。测试区中的电场水平极化, 待测系统置于测试区中保持一定的水平高度, 并与天线平行。

对模拟器辐射场分布的理论模拟不仅能为模拟器的设计和实验研究提供重要参考数据^[4, 5], 而且可用于评估场对周围环境和人员的影响。对于这种大型模拟器的场值计算, 一般采用简化的等效偶极子模型^[2], 计算精度较差。时域有限差分^[3]方法(FDTD)可以在一个计算空间中, 同时对脉冲源、天线系统及有耗大地等物理目标精确建模, 通过数值迭代, 完整地获得电磁场在时间-空间中的分布特征。

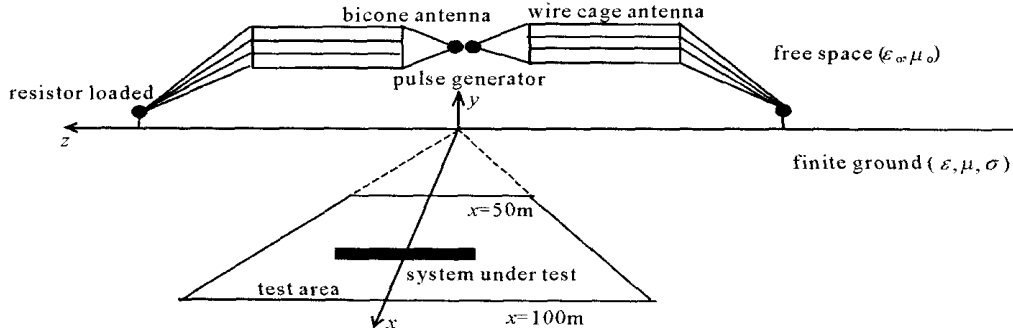


Fig. 1 Illustration of horizontally polarized electromagnetic pulse simulators

图 1 水平极化电磁脉冲模拟器示意图

1 数值方法

时域有限差分方法将时域 Maxwell 矢量方程转化为时域标量方程, 例如, 时域 Maxwell 方程中, 电场 x 分量的表达式为

$$\frac{\partial E_x}{\partial t} = \frac{1}{\epsilon} \left(\frac{\partial H_y}{\partial z} - \frac{\partial H_z}{\partial y} - E_x \right) \quad (1)$$

在直角坐标系中, 对电场、磁场的各分量进行时间、空间差分离散, 时间、空间的取样点分别偏置半个网格, 以二阶精度的中心差分近似一阶偏导, 从而获得具有二阶精度的蛙跳(Leap Frog)差分格式。通过时间递进, 可以求解整个计算空间中电磁场的时间-空间分布。对于开放空间中的电磁环境, 一般采用数值吸收边界截断计算空间, 本文采用具有二阶精度的 Mur 吸收边界。

X 收稿日期: 2003212218; 修订日期: 2004203229

基金项目: 国防科技基础研究基金资助课题

作者简介: 谢秦川(1973—), 男, 助研, 从事电磁场与微波技术研究; 西安市 69210 信箱。

2 计算结果及分析

模拟器计算模型的各项物理参数如下。

双锥2笼形天线:双锥半张角 $\theta = 32^\circ$;中心点架高为 15m;笼形天线的水平部分长为 200m;倾斜部分长为 100m;天线总长为 300m;笼半径 $R = 4.0\text{m}$;金属线数 $n = 40$;线半径 $r = 1.6\text{mm}$ 。

大地特性参数: $\epsilon_r = 6$; $\mu_r = 1$; $\sigma = 1 \times 10^{-3}\text{S/m}$ 。

脉冲源产生典型的双指数脉冲电压 $V(t) = A[\exp(-at) - \exp(-bt)]$; $A = 3.15\text{MV}$; $a = 4.76 \times 10^8\text{s}^{-1}$; $b = 2.6 \times 10^6\text{s}^{-1}$ 。

2.1 脉冲的波形特征

图 2 示出距天线中心 $x = 55\text{m}$,位于对称轴上($z = 0$),测试高度 $y = 1.8\text{m}$ 处电场主极化分量(E_z)的时域波形。峰值场强约 12kV/m ;脉冲上升沿 10ns ,与脉冲电压的前沿接近;3dB 脉宽约 10ns ,波形与双指数波形相差较大,这与实测结果吻合^[2]。

根据场的叠加原理,测试区中的场是天线的直接入射场和地面反射场的矢量和。而在水平方向上,反射电场与入射电场极性相反,如果直接入射波和反射波的波程差很小,反射波的影响较大,则水平电场的峰值、脉宽都会减小。相反,随着测试高度的增加,入射波和反射波的波程差增大,反射波的影响减弱,则脉冲峰值增大,脉宽可增加至约 20ns ,更接近于双指数波形(图 3,4)。同理,天线本身也应该架设在一定高度以上(大于等于 10m)。

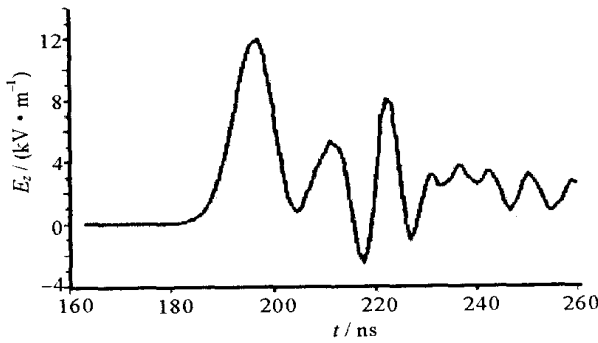


Fig. 2 $E_z(t)$ at (55,1.8,0)

图 2 在 (55,1.8,0)处 $E_z(t)$ 的波形

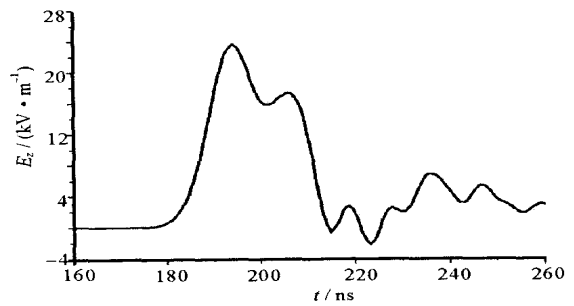


Fig. 3 $E_z(t)$ at (55,14,0)

图 3 在 (55,14,0)处 $E_z(t)$ 的波形

2.2 场随测试距离的分布

根据天线理论,远区中的场强与距离成反比,即 $E \propto 1/R$, $\propto 1$ 。但是,测试区位于天线附近, $1/R^2$ 等高阶项和地面的反射都会对场产生影响。从图 5 可以看出,在地面附近,对称轴上($z = 0$)的场强与距离 $[r = (x^2 + z^2)^{1/2}]$ 并非反比关系, $\propto 1$ 。随着距离的增大,场强迅速减弱。

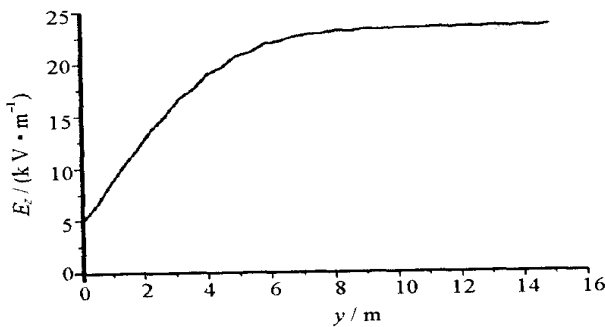


Fig. 4 Distribution of peak value of E_z along height (y) ($x = 55\text{m}, z = 0$)

图 4 E_z 峰值随高度(y)的分布($x = 55\text{m}, z = 0$)

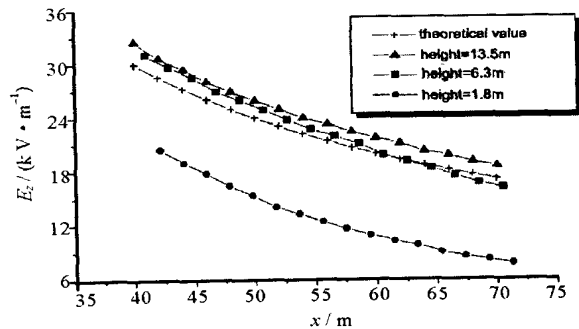


Fig. 5 Distribution of peak value of E_z along distance (x) ($z = 0$)

图 5 ($z = 0$)处 x 轴方向上 E_z 峰值随距离 x 的分布

2.3 水平测试范围(场的均匀性)

大型待测系统的抗核电磁脉冲试验要求系统周围的场分布尽可能均匀,变化小于 10% 。图 6 示出电场主

极化分量沿 z 方向的分布。在距离 $x = 55\text{m}$, 高度 $y = 1.8\text{m}$ 的水平线上, 测得 E_z 变化率为 10% 的点位于 $z = 24\text{m}$ 处, 水平测试范围约 50m, 测试区张角 $2\arctan(z/x) = 47^\circ$ 。测试区近似为梯形, 随着距离的增加, 测试范围相应扩大, 但场强会相应减小。

图 4~6 依次给出了模拟器的场在测试区中沿 y 、 x 、 z 三个方向的分布规律。

3 结 论

水平极化电磁脉冲模拟器能够在大范围内(大于等于 50m, 水平方向)产生均匀分布、高场强、快前沿的电磁脉冲, 可为大型系统的抗核电磁脉冲测试提供模拟的电磁环境。如果将测试物高度增加, 从而减小地面反射的负影响, 相对于在地面测试, 可以改善入射电磁脉冲的峰值、波形。虽然能够产生快前沿脉冲, 但是由于地面反射以及天线低频辐射能力的限制, 单纯增加脉冲电压的脉宽并不能明显增加测试区中脉冲的宽度。如果效应研究工作要求具有较大脉宽的电磁脉冲, 则需要将测试物体向天线方向移近, 但是这样会缩小测试范围。另外, 这种天线在 $z = 0$ 平面内全向辐射, 方向性较差, 整体辐射效率较低。

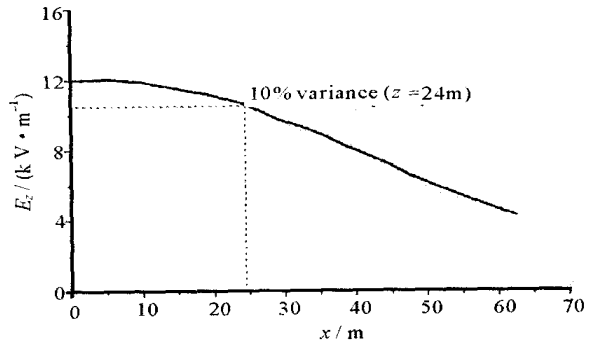


Fig. 6 Horizontal distribution of peak value of E_z at
($x = 55\text{m}$, $y = 1.8\text{m}$)

图 6 ($x = 55\text{m}$, $y = 1.8\text{m}$) 处 E_z 峰值的水平分布

参考文献:

- [1] Baum C E. EMP simulators for various types of nuclear EMP environments: an interim categorization[J]. *IEEE Transaction on Electromagnetic Compatibility*, 1978, 20(1): 35—53.
- [2] Williams J W, Dennis E H, Vivian J V, et al. Dipole models for the farfield representation of EMP simulators with application to estimates of human RF exposure[J]. *IEEE Transaction on Nuclear Science*, 1992, 39(6): 1921—1934.
- [3] Taflov A. Computational electrodynamics: The finite difference time domain method[M]. Artech House, 1995.
- [4] 刘顺坤, 郑振兴, 焦杰, 等. 电磁脉冲模拟器空间场分布的数值模拟[J]. *强激光与粒子束*, 1998, 10(3): 399—402. (Liu S K, Zheng Z X, Jiao J, et al. A numerical simulation of the spatial electromagnetic field in EMP simulator. *High Power Laser and Particle Beams*, 1998, 10(3): 399—402)
- [5] 祝敏, 孙培云, 郑振兴, 等. 用平行板天线测量有界波电磁脉冲模拟器地面场[J]. *强激光与粒子束*, 1999, 11(6): 751—754. (Zhu M, Sun P Y, Zheng Z X, et al. Measuring the ground electric field of EMP simulator with parallel plate antenna. *High Power Laser and Particle Beams*, 1999, 11(6): 751—754)
- [6] 孙培云, 周晏, 郑振兴, 等. 有界波 EMP 模拟器脉冲高压源[J]. *强激光与粒子束*, 2000, 12(4): 505—508. (Sun P Y, Zhou Y, Zheng Z X, et al. The development of high voltage pulse generator for bounded wave EMP simulator. *High Power Laser and Particle Beams*, 2000, 12(4): 505—508)

Numerical simulation of space-time distribution of field of horizontally polarized electromagnetic pulse simulators

XIE Qinchuan, CHEN Ming, LI Jinxi, WU Wei

(Northwest Institute of Nuclear Technology, P. O. Box 69210, Xi'an 710024, China)

Abstract: The finite difference time domain method is used to numerically simulate electromagnetic field distribution of horizontally polarized electromagnetic pulse simulators. Some important factors representative of simulator performance such as waveform, spatial variation and uniformity are studied. The rise time of EMP generated by the simulator is 10ns, approximately the same as the rise time of voltage source. Waveform of EMP is greatly different from that of the voltage pulse. Electric field attenuates rapidly along the horizontal axis. This kind of antenna can generate uniformly distributed EMP with high electric field strength and short rise time in a large area (50m, horizontal directions).

Key words: Electromagnetic pulse; Simulator; Double exponential pulse; Finite difference time domain method