

快沿电磁脉冲模拟器内部垂直极化场分布仿真研究^{*}

国海广, 魏光辉, 范丽思, 潘晓东

(军械工程学院 静电与电磁防护研究所, 河北 石家庄 050003)

摘 要: 采用基于矩量法电磁仿真软件 FEKO, 对快沿电磁脉冲模拟器内部电场进行数值计算。分析仿真结果, 得出了模拟器内部垂直极化电场的分布规律。仿真结果表明: 从不同高度中心到边缘的场强变化趋势来看, 最接近上传输线的位置为振荡, 接近上下传输线的位置是先增大后减小, 其余区域为单调减小; 模拟器内部垂直极化场的 $\pm 10\%$ 均匀场区域为模拟器传输线空间处于高度的 $20\% \sim 85\%$, 宽度的 80% (自中心算起) 区域, 接近下传输线位置的高度的 20% 以下, 宽度的 30% 以内 (自中心算起)。

关键词: 快沿电磁脉冲; 矩量法; 传输线; 有界波; 模拟器

中图分类号: O441 **文献标志码:** A

有界波电磁脉冲模拟器是 20 世纪 60 年代出现的一种广泛应用于电磁兼容/电磁干扰 (EMC/EMI) 的实验装置^[1]。当把连续波或脉冲波信号源加在模拟器的一端, 另一端加负载时, 模拟器内部就建立起一定极化形式的电磁场, 可供各种效应实验之用。针对 IEC (国际电工委员会) 61000-4-25 标准中制定的高空核爆电磁脉冲波形新标准的发布^[2], 核电磁脉冲波形上升时间由原来的 10 ns 缩短到 1.8~2.8 ns, 相应的高空核电磁脉冲 (HEMP) 试验装置也有了新的技术要求^[3], 而目前的 HEMP 模拟装置一般难以完全满足这一要求, 因此研制脉冲前沿为 1.8~2.8 ns 的快沿电磁脉冲模拟器有着非常重要的作用。仿真研究是设计并建造模拟器的理论依据, 也是利用模拟器进行效应研究的基础, 只有搞清了模拟器空间场分布结构, 才能对设计模拟器提供理论依据, 才能在各种效应实验中正确地获取和分析实验数据^[4]。

矩量法 (MoM) 是一种基于严格积分方程的方法, 结合各种快速算法, 它无需对传播空间进行网格划分; 由于积分方程基于格林函数构建, 也无需设置吸收边界条件; 只要硬件条件许可, 矩量法可以求解任意复杂结构的电磁场问题^[5-7]。笔者采用电磁仿真计算软件 FEKO (一种基于矩量法及高频分析方法, 为各种高频电磁场应用而开发的全波电磁场分析软件), 对快沿电磁脉冲模拟器内部垂直极化场分布进行了分析。

1 电磁脉冲模拟器的仿真模型的建立

1.1 几何模型的建立

20 世纪 70 年代末以来, 锥形电磁脉冲模拟器传输线结构被广泛采用, 它使得脉冲的高频部分可以辐射到模拟器的终端而不形成驻波, 提高了模拟器的频率上限^[8], 所以本文模拟器传输线采用锥形结构, 模拟器示意图如图 1 所示。模拟器传输线宽高比为 1:1, 特性阻抗约为 180Ω , 模拟器的前锥角 $\alpha = 15^\circ$ ^[9], 最大高度 $H_{\max} = 2 \text{ m}$, 源端高度为 0.2 m, 由此可以计算出模拟器的长度 $L = 6.718 \text{ m}$, 上传输线采用直径为 3 mm, 11 根均匀分布的细导线, 下传输线采用厚度为 3 mm 的薄紫铜板, 终端负载采用 3 根垂直于下传输线的电阻并联, 3 根电阻阻值均为 540Ω , 并联后阻值为 180Ω , 以保证终端负载匹配。

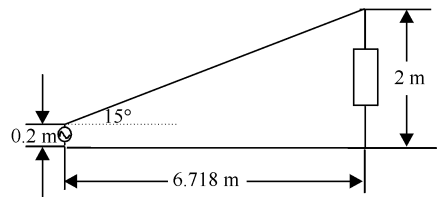


Fig. 1 Schematic of simulator

图 1 模拟器示意图

1.2 仿真模型的建立

仿真模型的建立在电磁仿真计算中是非常重要的一步, 它直接关系到计算所花费的时间和计算的精度。因此在建模时, 既要注重模型的简化以减小计算量, 又要考虑到关键点的细化以减小计算误差。模拟器的仿真模型如图 2 所示, 由于模拟器是关于 $y=0$ 平面对称的, 建模时可以只建 $y>0$ 部分的模型, 其它的部分通过对称来建模, 不仅可以减少建模的工作量, 更重要的是还可以减少计算时间和计算机内存的使用。

^{*} 收稿日期: 2008-07-22; 修订日期: 2008-12-01

基金项目: 国防科技重点实验室基金项目 (9140C87010108JB34)

作者简介: 国海广 (1980—), 男, 河北衡水人, 博士研究生, 主要从事电磁脉冲模拟技术研究; guohaiguangghg@163.com。

实体模型不能用于数值计算,必须将其划分为网格模型,划分时细线用线段单元划分网格,且要遵循以下原则:(1)线段长度应该小于 $\lambda_{\min}/10$ (λ_{\min} 为主要能量成分的最短波长);(2)三角形的边长应该小于 $\lambda_{\min}/5$ 。对于本文研究的快沿电磁脉冲,其脉冲前沿时间不小于1 ns, $f_{\max}=0.4/t_r=400$ MHz^[10], $\lambda_{\min}=c/f_{\max}=0.74$ m, c 为光速。根据网格划分原则,确定线段单元长度为 $\lambda_{\min}/10=0.075$ m,三角形单元的边长为 $\lambda_{\min}/6=0.125$ m。

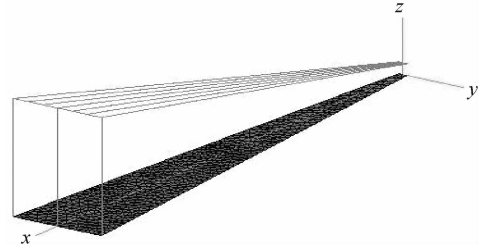


Fig. 2 Simulation model of simulator

图 2 模拟器仿真模型

2 仿真结果与分析

2.1 仿真结果

电磁脉冲模拟器的激励源采用双指数脉冲,其数学表达式为 $u(t) = U_0(e^{-\alpha t} - e^{-\beta t})$,本文中 $U_0 = 300$ kV, $\alpha = 4 \times 10^7$, $\beta = 1.6 \times 10^9$ 。由此可以确定 $t_r = 1$ ns, $t_{hw} = 23$ ns。取 $x = 4$ m横截面,根据模拟器模型可以计算出在此截面上模拟器的宽度和高度均为1.272 m,在此截面上下传输线间等距离地取19个高度,每个高度上等距离地取21个测量点,这样整个截面就等面积地被分割成400份。由于模拟器在 y 轴方向上的对称性,所以为了减少计算量只分析 y 轴正方向上的点。各点的垂直场强如表1所示, H_i ($H_1 \sim H_{19}$)为从低到高等距离的19个高度。

表 1 各点的垂直极化场强

Table 1 Vertical field intensity of every point

| H_i/m | $E/(kV \cdot m^{-1})$ | | | | | | | | | | |
|----------------|-----------------------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|
| | $y=0$ | $y=0.064$ | $y=0.127$ | $y=0.191$ | $y=0.254$ | $y=0.318$ | $y=0.382$ | $y=0.445$ | $y=0.509$ | $y=0.572$ | $y=0.636$ |
| $H_1=0.064$ | 229 | 230 | 231 | 233 | 237 | 243 | 252 | 266 | 290 | 324 | 269 |
| $H_2=0.127$ | 228 | 228 | 229 | 231 | 234 | 238 | 244 | 251 | 258 | 255 | 222 |
| $H_3=0.191$ | 226 | 226 | 227 | 228 | 229 | 231 | 233 | 235 | 233 | 222 | 200 |
| $H_4=0.254$ | 223 | 223 | 224 | 224 | 224 | 224 | 223 | 221 | 215 | 204 | 187 |
| $H_5=0.318$ | 220 | 220 | 220 | 220 | 219 | 217 | 215 | 211 | 203 | 193 | 179 |
| $H_6=0.382$ | 218 | 218 | 217 | 216 | 214 | 212 | 208 | 203 | 195 | 185 | 173 |
| $H_7=0.445$ | 215 | 215 | 214 | 213 | 211 | 207 | 203 | 197 | 190 | 180 | 169 |
| $H_8=0.509$ | 213 | 213 | 212 | 210 | 208 | 204 | 199 | 193 | 186 | 177 | 167 |
| $H_9=0.572$ | 212 | 211 | 210 | 208 | 206 | 202 | 197 | 191 | 183 | 175 | 165 |
| $H_{10}=0.636$ | 211 | 210 | 209 | 207 | 204 | 201 | 196 | 190 | 182 | 174 | 164 |
| $H_{11}=0.700$ | 210 | 210 | 209 | 207 | 204 | 201 | 196 | 190 | 182 | 174 | 164 |
| $H_{12}=0.763$ | 211 | 210 | 209 | 208 | 205 | 201 | 197 | 191 | 184 | 175 | 165 |
| $H_{13}=0.827$ | 211 | 210 | 209 | 208 | 205 | 201 | 197 | 191 | 184 | 175 | 165 |
| $H_{14}=0.890$ | 213 | 212 | 212 | 210 | 209 | 206 | 202 | 197 | 190 | 181 | 170 |
| $H_{15}=0.954$ | 214 | 214 | 214 | 213 | 211 | 210 | 207 | 203 | 197 | 187 | 175 |
| $H_{16}=1.018$ | 216 | 216 | 216 | 215 | 214 | 214 | 213 | 211 | 206 | 197 | 183 |
| $H_{17}=1.081$ | 218 | 218 | 218 | 217 | 217 | 218 | 220 | 221 | 220 | 212 | 196 |
| $H_{18}=1.145$ | 222 | 220 | 220 | 217 | 219 | 222 | 229 | 234 | 239 | 235 | 220 |
| $H_{19}=1.208$ | 240 | 208 | 239 | 204 | 230 | 210 | 255 | 231 | 280 | 249 | 297 |

2.2 仿真结果分析

本文研究的模拟器上传输线采用线栅结构,下传输线采用薄板结构,由这种上下传输线的不对称性导致了接近上下传输线位置的场强差异较大,所以在分析时,将19个高度分为4个区域,为了分析的连续性,区域划分如下: $H_1 \sim H_5$ 为1区, $H_5 \sim H_{10}$ 为2区, $H_{10} \sim H_{15}$ 为3区, $H_{15} \sim H_{19}$ 为4区。

4个区域的垂直场强分布如图3至6所示。

从图3至图6上可以看出:从不同高度中心到边缘的场强变化趋势来看,中间高度为单调减小;接近下传输线的位置是先增大后减小,这是由于存在边缘(尖端)效应,金属板的电流密度边缘大中间小,在金属板边缘附近形成强场区;最接近上传输线的位置最不均匀,再靠下的区域与接近下传输线的区域的变化类似为先增大

后减小,这也是边缘(尖端)效应的影响,与接近下传输线位置不同的是,虽然上传输线上电流整体趋势是边缘大、中间小,但电流分布在每一根线栅上,这样在每一根线栅的周围都形成一个局部小强场区,使得接近上传输线位置的场强极不均匀。

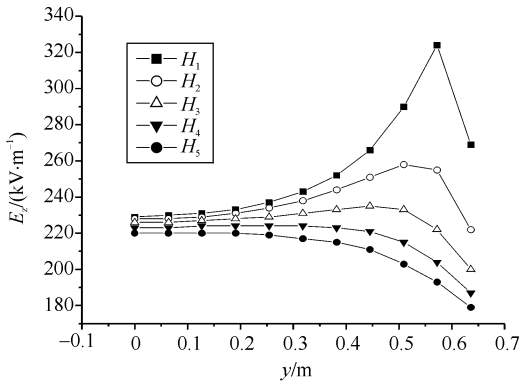


Fig. 3 Distribution of vertical field in the first area

图 3 1区垂直极化场分布

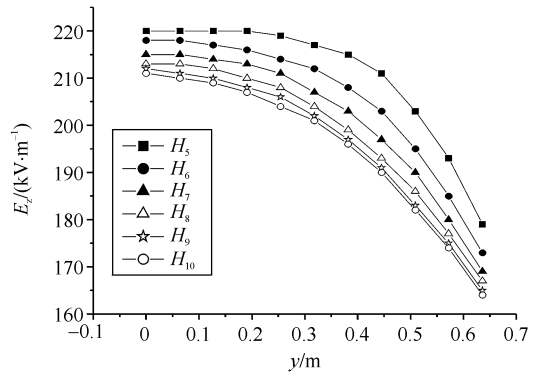


Fig. 4 Distribution of vertical field in the second area

图 4 2区垂直极化场分布

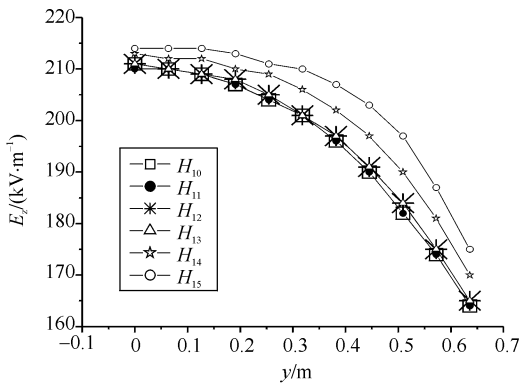


Fig. 5 Distribution of vertical field in the third area

图 5 3区垂直极化场分布

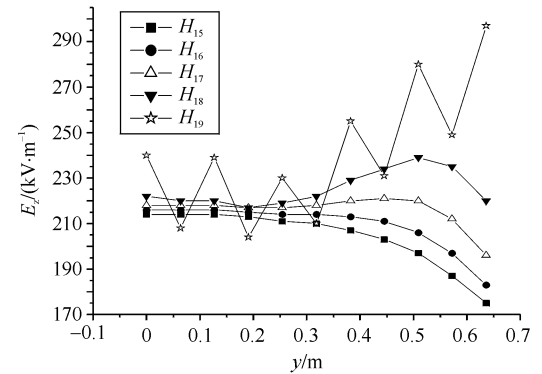


Fig. 6 Distribution of vertical field in the fourth area

图 6 4区垂直极化场分布

为了给测试提供依据,下面分析一下模拟的均匀场区域,图 7 绘出了以截面中心位置场强为基准,场强变化不超过±10%的均匀场区域。图中,实线所包围的区域为根据数据点绘出的±10%均匀场区域,虚线所包围的区域 A 和 B 为实际有意义的可供测试的均匀场区域。通过计算可知,A 区域的高度上下边界分别为模拟器高度的 85%和 20%,宽度为模拟器传输线宽度的 80%(自中心算起);B 区域为模拟器高度 20%以下,宽度为模拟器传输线宽度的 30%以内(自中心算起)。虽然只分析了一个截面上场的均匀度,但根据模拟器传输线结构特点,此结论在其它截面上也是适用的。

3 结 论

通过对上传输线采用线栅结构,下传输线采用薄板结构模拟器内部垂直极化场进行分析可以得出如下结论:(1)从不同高度中心到边缘的场强变化趋势来看,中间高度为单调减小;除最接近上传输线的位置外,接近上下传输线的位置是先增大后减小,这是由于边缘效应造成的;(2)在模拟器内部垂直极化场中间部分分布比较均匀,在一个截面上,模拟器传输线空间处于高度的 20%至 85%,宽度的 80%(自中心算起)区域,接近下传输线位置的高度的 20%以下,宽度的 30%以内(自中心算起)场强变化不超过±10%,为有意义的可供测试的均匀场区域;(3)接近上传输线的位置场最不均匀,测试时必须避免将测试设备置于接近上传输线的位置。

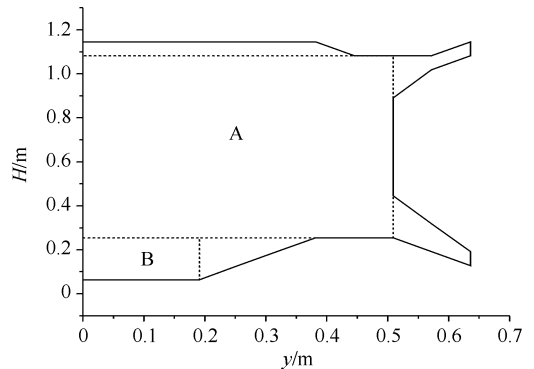


Fig. 7 Area of ±10% uniform field

图 7 ±10%均匀场区域图

参考文献:

- [1] 黄志洵. 平行板传输线式横电磁室及其应用[J]. 光纤与电缆及其应用技术, 1991, **10**(3): 6-11. (Huang Zixun. Parallel-plate transmission line TEM-cell and application. *Optical Cable and Its Application Technology*, 1991, **10**(3): 6-11)
- [2] MIL-STD-464, Electromagnetic Environmental Effects Requirements for Systems[S].
- [3] IEC 61000-4-25, Testing and Measurement Techniques HEMP Immunity Test Methods for Equipment and Systems[S].
- [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 Sunkun, Zheng Zengxin, Jiao Jie, 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] 李世智. 电磁辐射与散射问题的矩量法[M]. 北京: 电子工业出版社, 1985. (Li Shizhi. MoM of electromagnetic radiation and scatter problem. Beijing: Publishing House of Electronic Industry, 1985)
- [6] 丁雪, 姜育峰. 计算电磁学与电磁兼容仿真[J]. 电子质量, 2007, (3): 73-75. (Ding Xue, Jiang Yufeng. Computational electromagnetic and emulation of EMC. *Electronics Quality*, 2007(3): 73-75)
- [7] 庄丽华, 孙玉宝, 刘镇. 基于矩量法对线天线辐射特性的仿真研究[J]. 舰船电子工程, 2006, (2): 111-114. (Zhuang Lihua, Sun Yubao, Liu Zen. Analysis for radiation of antennas based on moment method by simulation. *Ship Electronic Engineering*, 2006(2): 111-114)
- [8] Giles J C. A Survey of nuclear electromagnetic pulse (EMP) simulators outside the United States[C]//The Twentieth International Conference on Lasers and Application. LA. USA. Dec. 1997: 960-967.
- [9] 潘晓东, 魏光辉. 电磁脉冲模拟器前后过渡锥角设计[J]. 强激光与粒子束, 2006, **8**(6): 977-981. (Pan Xiaodong, Wei Guanghui. Transitional section cone angle design of EMP simulator. *High Power Laser and Particle Beams*, 2006, **8**(6): 977-981)
- [10] 方波. 高压毫微秒脉冲的形成[M]. 北京: 原子能出版社, 1975: 11. (Fang Bo. Produce of high-voltage millimicrosecond pulse. Beijing: Publishing House of Atomic Energy, 1975:11)

Simulation study on vertical field distribution of EMP simulator with fast risetime

Guo Haiguang, Wei Guanghui, Fan Lisi, Pan Xiaodong

(Institute of Electrostatic and Electromagnetic Protection, Ordnance Engineering College, Shijiazhuang 050003, China)

Abstract: The inner electric field of EMP simulator with fast rise-time is studied using FEKO which is based on Method of moments(MOM). The simulation result is analyzed and the distribution law of vertical electric field is deduced. The result shows that: (1) the changing trend from center to edge of different level differs in three part, concussion very near the upper transmission line, increasing at first and then decreasing near upper and lower lines, and monotone decreasing other part; (2) the $\pm 10\%$ uniform field area of inner simulator is formed of two parts: one is the area with height of 20% to 85% and width of 80% from the center, the other is the area with height below 20% and width of 30% from the center.

Key words: fast risetime EMP; method of moments; transmission line; bounded-wave; simulator