

文章编号 1005-0388(2012)01-0045-06

屏蔽室接地位置不同对其屏蔽效能的影响研究

王建宝 周璧华 杨 波

(解放军理工大学工程兵工程学院, 江苏 南京 210007)

摘 要 为分析屏蔽室不同接地位置对其屏蔽效能的影响,应用并行时域有限差分算法,对雷电电磁脉冲和高空核电磁脉冲与开孔屏蔽室的耦合问题进行了数值模拟。计算了屏蔽室在两种接地位置下(前点接地、后点接地)内部的耦合电场,并进行了局部实验验证。研究结果表明:接地点与屏蔽室开孔位置间的距离远,屏蔽效能高;距离近则屏蔽效能低。

关键词 并行时域有限差分算法;屏蔽效能;接地位置;高功率电磁环境

中图分类号 O441

文献标志码 A

Influence of grounding locations on shielding effectiveness of shielded room

WANG Jian-bao ZHOU Bi-hua YANG Bo

(Engineering Institute of Engineering Corps,

PLA University of science and Technology, Nanjing Jiangsu 210007, China)

Abstract In order to analyze the influence of grounding locations on the shielding effectiveness (SE) of shielded room, numerical simulation is done by applying parallel time-domain finite-difference (FDTD) method on the coupling problems between shielded room and two high power electromagnetic environments, that are lightning electromagnetic pulse (LEMP) and altitude electromagnetic pulse (HEMP), respectively. Inner coupled electromagnetic (EM) fields are calculated when the shielded room is with different grounding locations. The results indicate that the farther the distance between the grounding location and the aperture, the better the SE of shielded room.

Key words parallel time-domain finite-difference method; shielding effectiveness; grounding locations; high power electromagnetic environment

引 言

众所周知,雷电电磁脉冲(LEMP)和高空核电磁脉冲(HEMP)等高功率电磁环境对电子、电气设备及系统的安全运行构成严重威胁,屏蔽和接地则是有效的电磁防护手段。外部电磁场通过屏蔽体上

的门、窗和孔缝在屏蔽室内部产生耦合场,进而影响内部敏感设备的正常工作^[1-3]。前人曾对屏蔽室孔缝耦合问题做过不少研究^[4-7],但涉及屏蔽室不同接地位置对其屏蔽效能影响的文献并不多见。

接地的目的是为了在正常和事故情况下,利用大地作为接地回路的一个元件,将接地处的电位固

收稿日期: 2011-02-02

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(60971063)

联系人: 王建宝 E-mail: yyuan5138@gmail.com

定在某一允许值上^[1],亦可将接地系统理解为在电气、电子设备与大地或低阻抗公共参考面间提供低阻通道^[3]。按接地位置的不同,将屏蔽室接地分为前点接地和后点接地,前者代表接地体引上线与屏蔽室连接位置选在门、窗等孔口所在面的屏蔽体下方,后者则为连接位置选在远离孔口的屏蔽体下方。

为分析屏蔽室不同接地位置对其屏蔽效能的影响,采用并行时域有限差分算法,分别计算了屏蔽室在前点接地和后点接地两种情况下与 LEMP 和 HEMP 的耦合问题。LEMP 耦合计算中所涉及的雷电流放电通道尺寸为千米级,如将地闪回击通道和开孔屏蔽室置于同一三维区域进行计算,将占用极大的计算空间。为减小对计算机内存和计算时间的需求,将地闪回击通道和开孔屏蔽室分置于两个计算区域^[7],回击电流辐射场的计算在柱坐标中完成,而对开孔屏蔽室的耦合计算,则在直角坐标系中进行。为进一步提高效率,并行算法得以采用,将原始计算区域根据处理器的数量进行一维区域分解,每个处理器只需计算问题区域的一部分^[8-9],这将大大缩短计算时间。

1. 计算模型和方法

1.1 屏蔽室接地模型

屏蔽室模型如图 1 所示,为边长 $a=3\text{ m}$ 的正方体,在与来波方向垂直的屏蔽体前壁面中心位置,开有尺寸为 $0.3\text{ m}\times 0.3\text{ m}$ 的方孔,屏蔽室与大地之间的绝缘垫厚 0.1 m ,接地体长 2.5 m ,其上端距地面 0.8 m ,通过引上线与屏蔽体相连接。点 A、B 为计算过程中的取值点,两点与孔口的距离分别取为 0.05 m 、 0.6 m 。

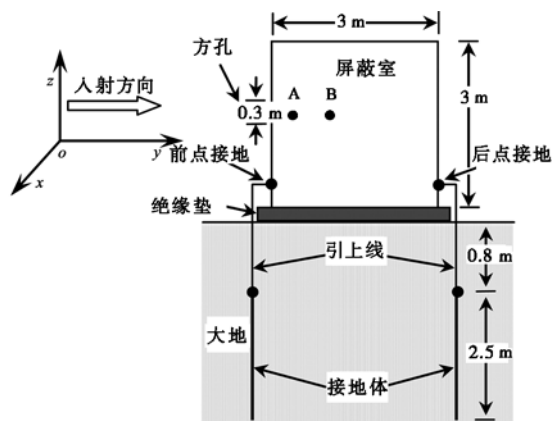


图 1 屏蔽室尺寸及接地示意图

1.2 激励源

国际电工委员会标准 IEC 61000-2-13^[10] 将电场强度超过 100 V/m 的电磁环境称为高功率电磁环境。为比较不同带宽入射波条件下接地位置对屏蔽室内部耦合场的影响,计算中涉及到两种高功率电磁环境:LEMP 和 HEMP,其数学表达式和参数选择如下

$$\text{LEMP: } E = E_0(e^{-\alpha t} - e^{-\beta t}), \alpha = 9.2 \times 10^5 \text{ s}^{-1}, \beta = 0.5 \times 10^7 \text{ s}^{-1};$$

$$\text{HEMP: } E = kE_0(e^{-\alpha t} - e^{-\beta t}), \alpha = 6 \times 10^7 \text{ s}^{-1}, \beta = 4 \times 10^8 \text{ s}^{-1}, k = 1.3.$$

1.3 计算方法

高功率电磁环境对于开孔屏蔽室的耦合属电磁散射问题,用 FDTD 法计算散射问题时通常将计算区域划分为总场区和散射场区。根据等效原理,在总场区和散射场区的连接边界上设置入射波电磁场的切向分量可保证入射波只引入总场区。对于空气-大地分层介质中的散射问题,见图 2,由于受地面的影响,不能简单地将自由空间中的初始入射波加在连接边界上。应利用电磁波反射、透射原理,连接边界地上部分引入的入射波是初始入射波和地面反射波的叠加;地下部分则为初始入射波在地下的透射波^[11]。

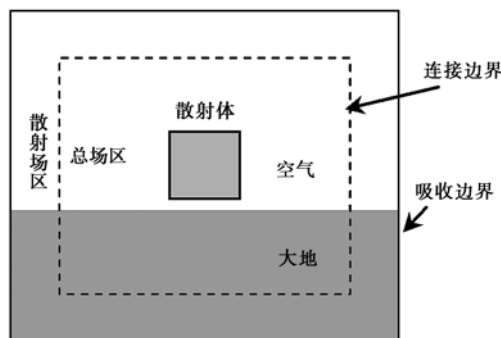


图 2 空气-大地分层介质总场/散射场

对于 HEMP,在地面附近一般可看作平面波^[2],连接边界加入源时按上述方法分地上地下两部分处理。对于产生 LEMP 的地闪,将地闪回击通道和开孔屏蔽室分置于两个计算区域。在二维柱坐标系下计算回击电流近场^[5],如图 3 所示。利用旋转对称性,并通过坐标变换转换为三维直角坐标系下的数据,而后加至三维直角坐标计算区域的连接边界上,从而算出屏蔽室内部的耦合场。为进一步提高效率,在二维柱坐标计算区域中采取渐变网格技术,即:在与屏蔽室三维计算区域对应的二维柱坐

标系中,网格尺寸设置为小网格以提高计算精度,在非对应区域采用渐变网格技术用大网格以提高计算效率。

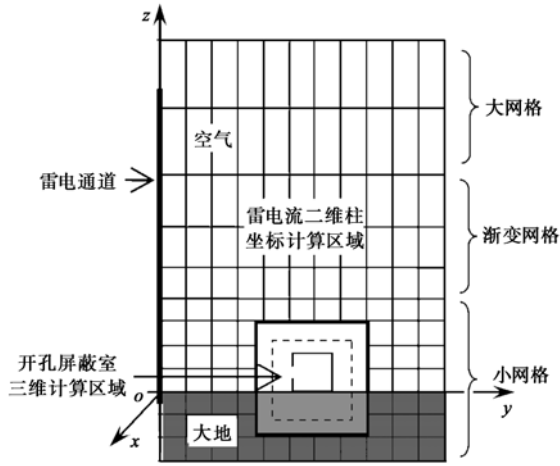


图 3 开孔屏蔽室与 LEMP 耦合计算模型

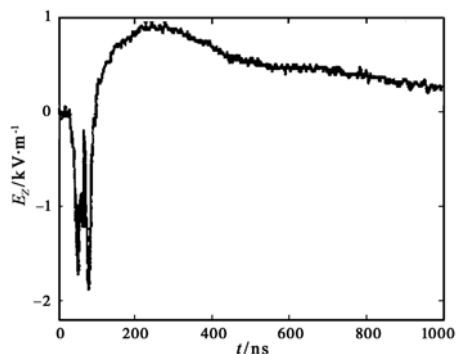
2. 计算结果及分析

大地介电常数和电导率分别取 $\epsilon_r = 10$ 和 $\sigma = 10^{-3} \text{ S/m}$ 。为满足稳定性条件、色散及计算精度要求,空间步长和时间步长分别取为,LEMP: $\delta = 0.02 \text{ m}$, $\Delta t = 1/3 \times 10^{-10} \text{ s}$;HEMP: $\delta = 0.01 \text{ m}$, $\Delta t = 1/6 \times 10^{-10} \text{ s}$ 。

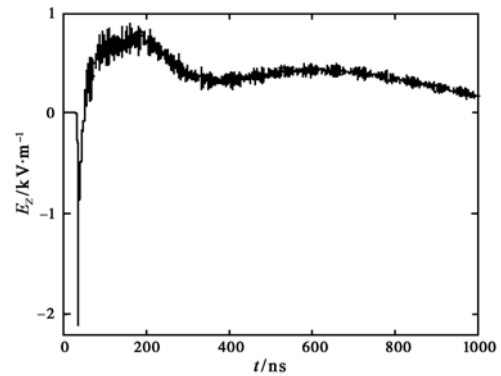
2.1 算法验证

为验证算法有效性,将试验测得波形与计算所得波形进行对比。将 $2 \text{ m} \times 2 \text{ m} \times 2 \text{ m}$ 全焊接钢板屏蔽室置于有界波电磁脉冲模拟器中,开孔尺寸为 $0.25 \text{ m} \times 0.25 \text{ m}$,激励源采用 600 kV 双指数高压脉冲源,在屏蔽室内与孔心距离为 0.2 m 处测得的垂直电场波形如图 4(a)所示;采用 FDTD 法模拟相同情况得相同位置电场波形示于图 4(b)。

比较图 4(a)和(b)可以发现,计算波形与实测波形一致性较好,反映了本算法的有效性。为进一



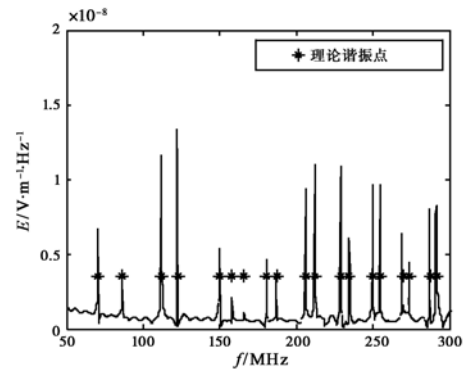
(a) 实验测得



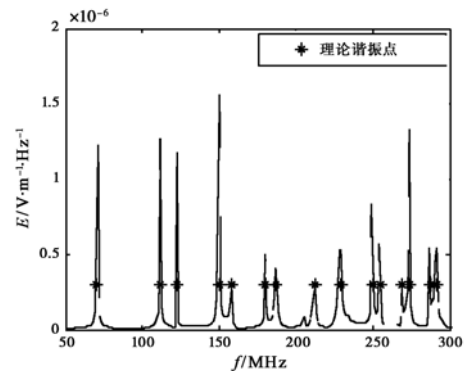
(b) 计算得出

图 4 屏蔽室内距孔心 0.2 m 处垂直电场波形

步验证,对内部耦合场做频域分析,见图 5。可以看出计算所得谐振点与理论谐振点相同,这从另一侧面同样反映了本算法合理有效。



(a) 与 LEMP 耦合时



(b) 与 HEMP 耦合时

图 5 屏蔽室内耦合场频域波形
与理论谐振点对比

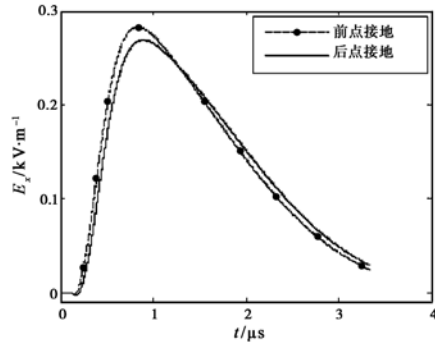
2.2 不同接地位置对屏蔽效能的影响

为比较不同接地位置对屏蔽室屏蔽效能的影响,分别计算了 LEMP 和 HEMP 入射下屏蔽室前点接地和后点接地时其内部耦合场。因屏蔽室内部大多水平布线,这里取点 A、B 处的水平电场分量

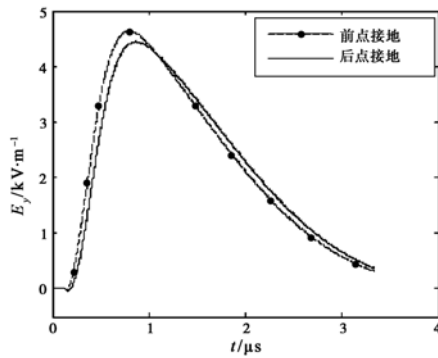
E_x 、 E_y 波形进行分析。

由图 6~9 可以看出:屏蔽室不同接地位置条件下其内部耦合场会发生变化且具有规律性。屏蔽室在前点接地时,内部耦合场大于其后点接地情况,即:接地位置距开孔近则内部耦合强,屏蔽效能差;远则弱,屏蔽效能改善。

2.2.1 入射波为 LEMP 时屏蔽室在不同接地位置条件下内部耦合场对比

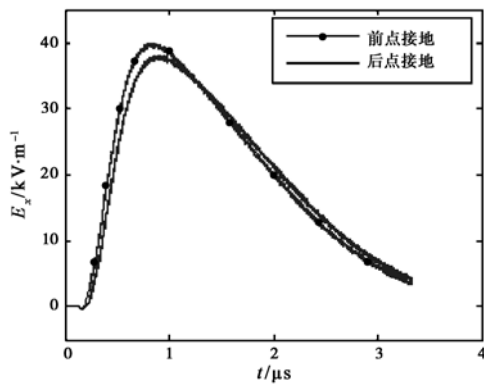


(a) E_x

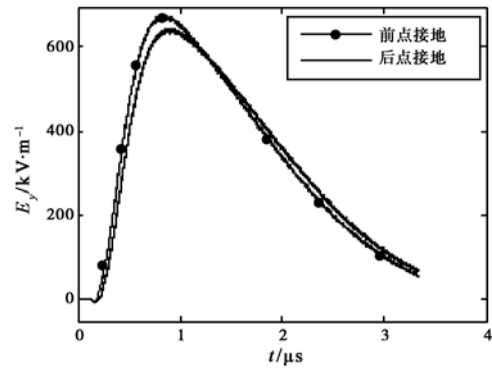


(b) E_y

图 6 屏蔽室内 A 点电场强度对比



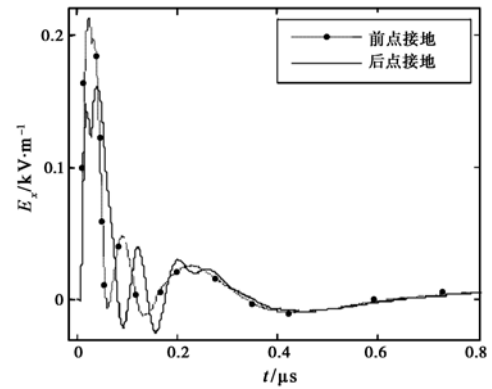
(a) E_x



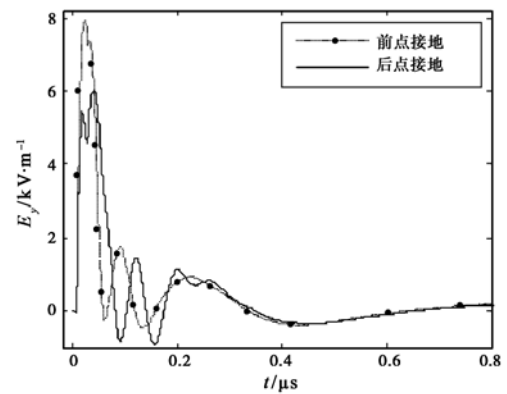
(b) E_y

图 7 屏蔽室内 B 点电场强度对比

2.2.2 入射波为 HEMP 时屏蔽室在不同接地位置条件下内部耦合场对比



(a) E_x



(b) E_y

图 8 屏蔽室内 A 点电场强度对比

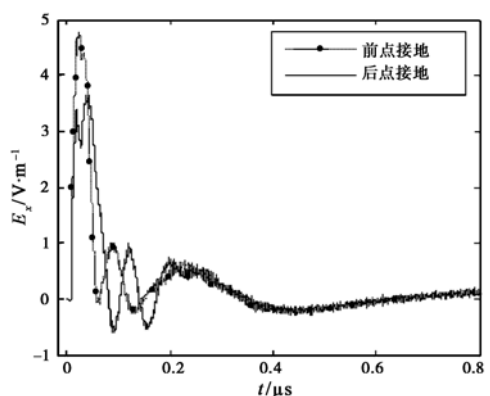
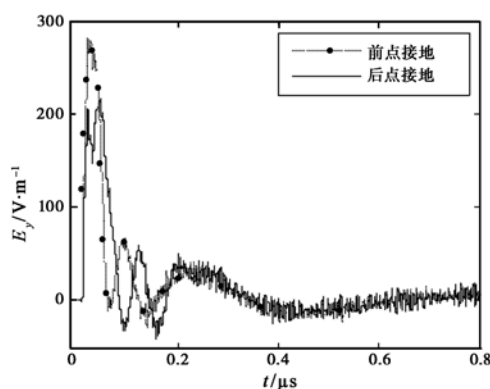
(a) E_x (b) E_y

图 9 屏蔽室内部 B 点电场强度对比

3. 结 论

采用 Parallel FDTD 技术,计算了在两种覆盖频段不同的高功率电磁环境中屏蔽室接地位置对其屏蔽效能的影响。所得结果表明:屏蔽室对于高功率电磁环境的屏蔽效能与其接地位置有一定关系,屏蔽室接地位置与开孔距离近,屏蔽效能差,接地位置远离开孔在一定程度上能改善屏蔽室的屏蔽效能。以上结论对指导屏蔽室接地体的安装具有一定的工程应用价值。

参考文献

- [1] KODALI V P. Engineering Electromagnetic Compatibility: Principles, Measurements, Technologies, and Computer Models[M]. New York: Wiley Publishing, 1996.
- [2] 周璧华, 陈 彬, 石立华. 电磁脉冲及其工程防护[M]. 北京: 国防工业出版社, 2003.
- ZHOU Bihua, CHEN Bin, SHI Lihua. EMP and EMP Protection[M]. Beijing: National Defence Indus-

try Press, 2003. (in Chinese)

- [3] PAUL C R. Introduction to Electromagnetic Compatibility[M]. New Jersey: John Wiley & Sons, 2006.
- [4] MA K P, LI M, DREWNIAK J L, et al. Comparison of FDTD algorithms for subcellular modeling of slots in shielding enclosures[J]. IEEE Trans. Electromagn. Compat., 1997, 39(2): 147-155.
- [5] YANG C S, ZHOU B H. Calculation methods of electromagnetic fields very close to lightning[J]. IEEE Trans. Electromagn. Compat., 2004, 46(1): 133-141.
- [6] FENG C, SHEN Z X. A hybrid FD-MoM technique for predicting shielding effectiveness of metallic enclosures with apertures[J]. IEEE Trans. Electromagn. Compat., 2005, 47(3): 456-462.
- [7] LI X J, ZHOU B H, YU T B. Coupled Field Inside Shielding Enclosure With an Aperture Due to Nearby Lightning[J]. IEEE Trans. Electromagn. Compat., 2007, 49(1): 133-142.
- [8] 余文华, 苏 涛, MITTRA R, 等. 并行时域有限差分[M]. 北京: 中国传媒大学出版社, 2005.
- YU Wenhua, SU Tao, MITTRA R, et al. Parallel FDTD[M]. Beijing: Communication University of China Press, 2005. (in Chinese)
- [9] WANG H L, XUE Z H, YANG S M, et al. Near field scattering analysis with parallel FDTD algorithm [C]// IEEE International Symposium on Microwave, Antenna, Propagation, and EMC Technologies for Wireless Communication Proceedings. 2005.
- [10] Electromagnetic compatibility (EMC) -Part 2-13 Environment-High-power electromagnetic (HPEM) environments-Radiated and conducted. IEC 61000-2-13 [S]. 1st ed. 2005.
- [11] YI Y, CHEN B, FANG D G. A new 2-D FDTD method applied to scattering by infinite objects with oblique incidence[J]. IEEE Trans. Electromagn. Compat., 2005, 47(4): 756-762.
- [12] 石 丹, 沈远茂, 高攸刚. 有孔屏蔽腔屏蔽效能的高次模分析[J]. 电波科学学报, 2009, 24(3): 510-513.
- SHI Dan, SHEN Yuanmao, GAO Yougang. High-order modes analysis on shielding effectiveness of enclosure with off-center aperture[J]. Chinese Journal of Radio Science, 2009, 24(3): 510-513. (in Chinese)

(下转第 65 页)

NM, April, 1990:2951-2954.

- [10] 王永良, 陈辉, 彭应宁, 等. 空间谱估计理论和算法 [M]. 北京: 清华大学出版社, 2004.

作者简介



杨 鹏 (1978—), 男, 云南人, 电子科技大学博士生, 研究方向为天线理论和自适应阵列处理。



杨 峰 (1962—), 男, 重庆人, 电子科技大学教授、博士生导师, 主要研究方向为超宽带通信、天线技术和电磁散射与逆散射。



聂在平 (1946—), 男, 陕西人, 电子科技大学教授、博士生导师, 主要研究方向为计算电磁学、天线理论与技术。

(上接第 49 页)

- [13] 汪柳平, 高攸纲. 有孔矩形腔的屏蔽效能及其对谐振抑制研究[J]. 电波科学学报, 2008, 23(3): 560-564.

WANG Liuping, GAO Yougang. Analysis of shielding effectiveness for rectangular cavity with apertures and resonance suppression[J]. Chinese Journal of Radio Science, 2008, 23(3): 560-564. (in Chinese)

- [14] 周璧华, 陈 彬, 高 成, 等. 钢筋网及钢筋混凝土电磁脉冲屏蔽效能研究[J]. 电波科学学报, 2000, 15(3): 251-259.

ZHOU Bihua, CHEN Bin, GAO Cheng, et al. Study on EMP shielding effectiveness of wire-mesh reinforcement and reinforced-concrete[J]. Chinese Journal of Radio Science, 2000, 15(3): 251-259. (in Chinese)

作者简介



王建宝 (1983—), 男, 山东人, 解放军理工大学在读博士生, 主要研究方向为计算电磁学和雷电电磁环境保护。



周璧华 (1940—), 女, 江苏人, 解放军理工大学教授, 博士生导师, 主要研究方向为高功率电磁环境保护。



杨 波 (1982—), 男, 四川人, 解放军理工大学在读博士生, 主要研究方向为计算电磁学和雷电电磁环境保护。