

雷电脉冲辐照下有孔矩形腔体电磁屏蔽效能研究

岳利, 官伯然

(杭州电子科技大学 电子信息学院, 浙江 杭州 310018)

摘要:应用混合 FDTD 方法研究雷电脉冲照射下有孔矩形腔体的屏蔽机理, 精确预测腔体的屏蔽效能, 对高性能屏蔽腔体的设计具有重要意义。通过研究不同雷电脉冲参数、腔体表面开有不同孔阵、不同腔体尺寸以及不同入射脉冲极化角的金属腔体的屏蔽效能, 说明金属腔体在用作电磁防护时应采取的具体措施。

关键词:雷电电磁脉冲; 金属腔体; 屏蔽效能; 时域有限差分方法

中图分类号: TN03

文献标志码: A

文章编号: 1672-3767(2011)01-0068-03

Research on Electromagnetic Shielding effectiveness of Rectangular Cavity with Holes Irradiated by Lightning Pulse

YUE Li, GUAN Boran

(College of Electronic Information, Hangzhou University of Electronic Science and Technology, Hangzhou, Zhejiang 310018, China)

Abstract: It is of great significance to research the shielding mechanism of the metallic cavity with holes irradiated by lightning pulse and to accurately predict the cavity shielding effectiveness for the design of high performance shielded cavity by applying the FDTD methods. The research of the cavity shielding effectiveness in different pulse parameters, different hole arrays at the cavity surface, different cavity sizes and different polarization angles of incident pulses showed that specific measures should be taken for the metallic cavity to be used as electromagnetic protection.

Key words: lightning electromagnetic pulse; metallic cavity; shielding effectiveness; finite difference method of time domain

随着科学技术的快速发展,电磁干扰问题日趋严重。雷电电磁脉冲作为一种强电磁干扰源,经常会对工作在野外的电子设备和电力系统(如雷电探测设备^[1])造成强烈干扰以至严重损坏。这些设备一般是由金属矩形腔体封闭,用以切断干扰路径、屏蔽外界复杂的干扰信号,但是,在金属腔体表面一般不可避免地开有孔缝或孔阵,用于同外界元件的连接、通风或散热,这些开孔必然会引入电磁耦合,降低腔体的屏蔽作用。因此,研究雷电电磁脉冲作用下有孔矩形腔体的电磁耦合规律,对腔体上的孔缝或孔阵做出精确预测,能够提高屏蔽体的效能,从而提高电子设备的抗干扰能力。

有孔金属腔体屏蔽效能的分析方法有解析法和数值法。解析法包括等效传输线法和等效原理法,它们求解时只能模拟结构简单、规则的问题。数值法包括有限元法(finite element method, FEM)、矩量法(method of moment, MoM)、时域有限差分(finite difference time domain, FDTD)方法以及一些混合方法,有限元法和矩量法在计算中需要求解逆矩阵,计算过程比较繁琐,并且一般只能处理“电小尺寸”的问题,在解决结构相对复杂的“电大尺寸”的问题时, FDTD 方法具有突出的优越性^[2-4]。

本文使用 FDTD 方法直接时域求解的特点,基于 Liu 改进的子网格模型技术^[5],研究雷电脉冲照射下

收稿日期: 2010-11-19

基金项目: 国家自然科学基金项目(60971057); 国家高技术研究发展计划(“863”计划)重点项目(2009AA110303)。

作者简介: 岳利(1982—),男,山东曲阜人,硕士研究生,主要从事计算电磁学、电磁兼容方向的研究。

官伯然(1955—),男,山东青岛人,教授,博士生导师,博士后,主要从事微波通信技术和超导电子技术方面的研究。

E-mail: brguan@hdu.edu.cn.

金属矩形腔体的屏蔽效率。

1 Liu 的细缝子网格模型

FDTD 方法计算有孔屏蔽腔体时,发展了细缝子网格模型算法,各种方法的主要区别是细缝所在网格的等效介电常数 $\epsilon_r(k)$ 和磁导率 $\mu_r(k)$ 处理不同。基于 Liu 修正的算法^[5],给出细缝的子网格模型及 FDTD 差分公式。

$$E_y^{n+1}(i, j + \frac{1}{2}, k) = E_y^n(i, j + \frac{1}{2}, k) + \frac{\Delta t}{\epsilon_r \epsilon_0 \Delta z} (H_x^{n+\frac{1}{2}}(i, j + \frac{1}{2}, k + \frac{1}{2}) - H_x^{n+\frac{1}{2}}(i, j + \frac{1}{2}, k - \frac{1}{2})) - \frac{\Delta t}{\epsilon_r \epsilon_0 \Delta x} (H_z^{n+\frac{1}{2}}(i + \frac{1}{2}, j + \frac{1}{2}, k) - H_z^{n+\frac{1}{2}}(i - \frac{1}{2}, j - \frac{1}{2}, k)) \quad (1)$$

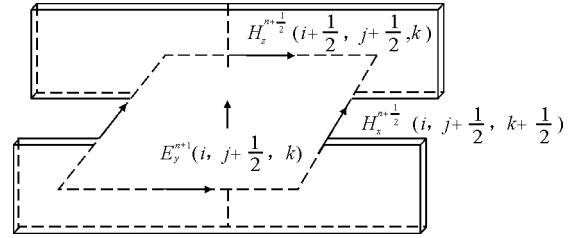


图 1 FDTD 细缝子网格模型图

Fig. 1 The FDTD sub-grid model of the thin slot

$$H_x^{n+\frac{1}{2}}(i, j + \frac{1}{2}, k + \frac{1}{2}) = H_x^{n-\frac{1}{2}}(i, j + \frac{1}{2}, k + \frac{1}{2}) + \frac{\Delta t}{\mu_r \mu_0 \Delta z} (E_y^n(i + \frac{1}{2}, j, k + 1) - E_y^n(i + \frac{1}{2}, j, k)) \quad (2)$$

2 数值算例及结果分析

研究雷电脉冲照射下金属矩形腔体的屏蔽效能,以下计算中,如未做特殊说明,矩形腔体尺寸均选取为 30 cm×30 cm×12 cm,表面中心处开有细缝的尺寸为 10 cm×0.5 cm, FDTD 离散的立方体网格尺寸选取为 $\Delta x = \Delta y = \Delta z = 1$ cm,时间步长为 $\Delta t = \Delta x / (2c_0)$,在截断边界处设置 PML(perfectly matched layer, 完全匹配层)吸收边界,采样点选取腔体中心点。在计算中引入汉宁窗,以节省时域数据到频域数据的转换。

2.1 不同雷电电磁脉冲对屏蔽效能的影响

雷电电磁脉冲(lightning electromagnetic pulse, LEMP)一般可以总结为简单的双指数解析函数表达式^[6]:

$$E(t) = kE_0(e^{-\beta t} - e^{-\alpha t}) \quad (3)$$

式中: E_0 为峰值场强, k 为修正系数, α, β 为表征脉冲前、后沿的参数。分析不同参数的雷电电磁脉冲(表 1)对腔体屏蔽效能产生的影响,得到的屏蔽效能如图 2 所示,其中 t_r 为上升时间。

由图 2 可知,对于雷电电磁脉冲,频率越低,腔体内振荡越严重。腔体屏蔽效能跟雷电电磁脉冲的衰减系数有关,衰减系数越大,腔体屏蔽效能越低,同时腔体内产生的振荡也越严重。

2.2 腔体表面开有不同阵列对屏蔽效能的影响

研究在相同的腔体表面上分别开有面积相同的矩形孔阵和圆形孔阵时,腔体屏蔽效能的变化情况:矩形孔阵为 6 个

表 1 雷电电磁脉冲参数表

Tab. 1 The parameters of different LEMP

脉冲参数	t_r/ns	α/s^{-1}	β/s^{-1}
快-EMP	1.5	2.0×10^9	7.0×10^6
中-EMP	5.0	4.8×10^8	2.6×10^6
慢-EMP	>10.0	2.0×10^8	1.0×10^6

10 cm×0.5 cm 的水平细缝均匀设置成 3×2 的阵列;圆形孔阵为 6 个 $R=1.26$ cm 的圆孔均匀设置成 3×2 的阵列。腔体表面的圆孔缝使用对角分裂模型^[3]来处理。图 3 所示腔体屏蔽效能曲线说明:相比矩形孔阵,圆形孔阵的屏蔽效能大约提高 20 dB。可见,在腔体表面开有面积相等的孔缝的情况下,圆孔缝要比矩形孔缝屏蔽效能好。

2.3 腔体尺寸对屏蔽效能的影响

考虑腔体尺寸分别为 30 cm×30 cm×12 cm, 35 cm×35 cm×15 cm 和 40 cm×40 cm×18 cm 时,腔体内的屏蔽效率情况。图 4 显示的屏蔽效能曲线表明:机箱或机柜的屏蔽效能低频部分可以保持一定屏蔽性能,但是在高频部分,外来电场在机箱或机柜内部激发了各种不同的谐振模式,使得机箱或机柜的屏蔽性能急剧降低,并且随着屏蔽腔体的增大,腔体内发生谐振现象越严重,出现多模振荡现象也越严重。

2.4 入射波极化角对屏蔽效能的影响

电磁波以极化角 γ 水平入射开有孔缝的屏蔽腔体,极化角分别取 $45^\circ, 90^\circ$ 和 135° ,从图 5 可以看出:当 $0 < \gamma < 90^\circ$ 时,SE 随极化角度的增加而减小;当 $90^\circ < \gamma < 180^\circ$ 时,SE 随极化角度的增加而增大。这是合理的情况,因为当 $\gamma=90^\circ$ 时,入射波电场沿着细缝方向,这将导致腔体内部通过细缝产生 z 方向分量最大值。

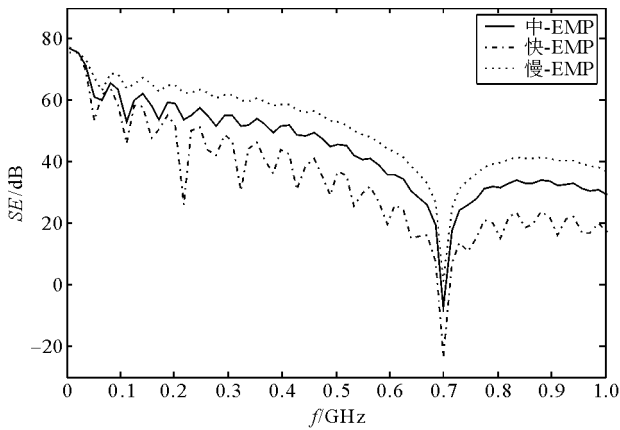


图2 不同雷电脉冲参数下的腔体屏蔽效能图

Fig. 2 The cavity shielding effectiveness with the different lightning pulses

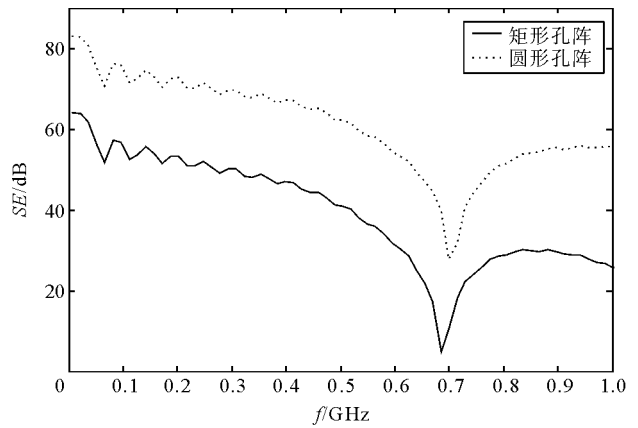


图3 表面开有不同孔阵下的腔体屏蔽效能图

Fig. 3 The cavity shielding effectiveness with different hole arrays

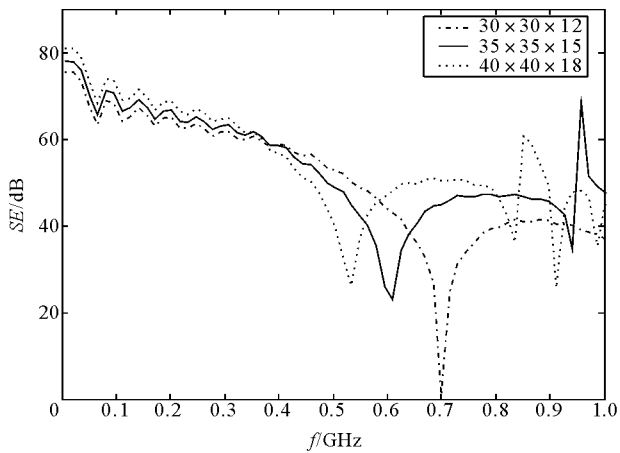


图4 不同腔体尺寸下的屏蔽效能图

Fig. 4 The shielding effectiveness with different cavity sizes

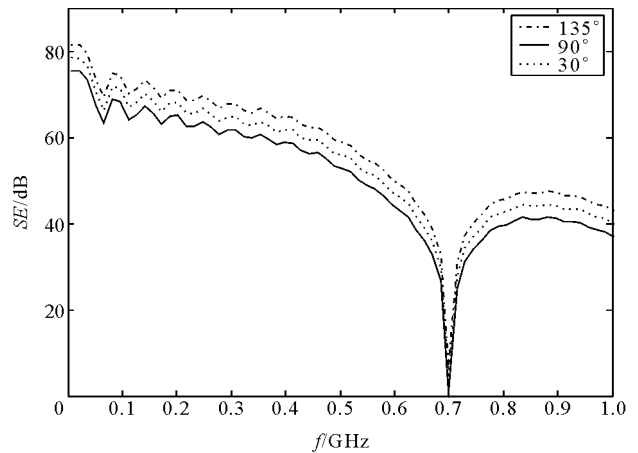


图5 不同入射脉冲极化角下的屏蔽效能图

Fig. 5 The cavity shielding effectiveness with different polarization angles

3 结论

应用混合 FDTD 方法的细缝子网格模型技术,研究了雷电电磁脉冲照射下有孔金属腔体屏蔽效能的变化情况。计算结果表明:在雷电电磁脉冲照射下,屏蔽腔体内部会产生严重振荡,低频处振荡较高频处振荡会加重;在腔体内主要是以 TM_{110} 模为主的谐振场。因此,在考虑相应的电磁防护设计时,应尽可能让腔体内的电子系统及电子器件远离孔缝;通风孔的设计应采用圆孔阵形式;尽可能采用较小的屏蔽体,以减小腔体内部的多模振荡。

参考文献:

- [1]张红旗,赵让元,李凯,等.用神经网络方法提高雷电单站定位精度[J].电波科学学报,1997(4):423-427.
ZHANG Hongqi,ZHAO Rangyuan,LI Kai,et al.Improvement of the location precision of lightning single station by the method of neural net[J].Chinese Journal of Radio Science,1997(4):423-427.
- [2]葛德彪,闫玉波.电磁波时域有限差分方法[M].2版.西安:西安电子科技大学出版社,2005.
- [3]TAFLOVE A,HANGESS S C.Computational electrodynamics:The finite-difference time-domain method[M].3rd ed.Norwood,MA:Artech House,2005.
- [4]GEORGAKOPOULOS S V,BIRTCHER C R,BALANIS C A.HIRF penetration through apertures:FDTD versus measurements[J].IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility,2001,43(3):282-294.
- [5]LIU Q F,YIN W Y,MAO J F,et al.Accurate characterization of shielding effectiveness of metallic enclosures with thin wires and thin slots[J].IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility,2009,51(2):293-300.
- [6]CAMP M,GERTH H,GARBE H,et al.Predicting the breakdown behavior of microcontrollers under EMP/UWB impact using a statistical analysis[J].IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility,2004,46(3):368-379.