

doi:10.3969/j.issn.1001-893x.2013.12.018

1 kW 微波源机箱电磁耦合的并行 FDTD 模拟^{*}

叶志红^{**}, 廖 成, 冯 强

(西南交通大学 电磁场与微波技术研究所, 成都 610031)

摘 要:微波源机箱的不同面板上开有不同数量和大小的矩形孔缝和散热通风孔,电磁脉冲可以通过机箱上的孔缝耦合进入微波源内部,对内部电路和设备造成干扰。通过自动网格剖分技术实现了 1 kW 微波源的快速建模,采用并行时域有限差分(FDTD)算法模拟了不同极化方向下高斯脉冲正入射 1 kW 微波源机箱的耦合问题,分析了微波源机箱的电磁脉冲耦合规律。研究结果表明,数值计算结果与电磁软件仿真结果吻合得比较好,电磁脉冲的极化方向对耦合进入微波源箱体内的电场强度影响不大,微波源机箱中心点的谐振特性明显。

关键词:微波源机箱;电磁脉冲耦合;自动网格剖分;并行时域有限差分;高斯脉冲
中图分类号:TN702 **文献标志码:**A **文章编号:**1001-893X(2013)12-1633-05

Electromagnetic Pulse Coupling Rule Research of 1 kW Microwave Source Case Based on Parallel FDTD Method

YE Zhi-hong, LIAO Cheng, FENG Qiang

(Institute of Electromagnetics, Southwest Jiaotong University, Chengdu 610031, China)

Abstract: Different panels of microwave source case have different numbers and sizes of rectangular holes and cooling vents. Electromagnetic pulse can couple into microwave source case by penetrating through the holes and vents, and then cause interference to the inner circuits and equipment. The adaptive mesh refine technology is used to achieve the rapid modeling of the 1 kW microwave source case. The parallel Finite-Difference Time-Domain (FDTD) algorithm is used to simulate the coupling problems between Gaussian pulse with different polarization direction under normal incidence and the microwave source. The results show that, the numerical calculation results agree well with that simulated by electromagnetic software, and the polarization direction of electromagnetic pulse doesn't influence the electric field strength coupling into the microwave source, and the resonant characteristics of the center of microwave source is obvious.

Key words: microwave source case; electromagnetic pulse coupling; adaptive mesh refine; parallel finite-difference time-domain; Gaussian pulse

1 引 言

随着微电子技术的发展,电子系统的集成度和灵敏度越来越高,抗电磁干扰的能力有所下降。而且随着电磁环境的日益复杂,电磁脉冲可以通过电

子系统机箱上的孔缝等耦合进入系统内部,对内部电路和器件造成干扰和损害。因此,分析电子系统带孔缝机箱的电磁脉冲耦合规律显得尤为重要。

国内外关于电磁脉冲对带孔缝机箱的电磁耦合

^{*} 收稿日期:2013-08-19;修回日期:2013-11-19 Received date:2013-08-19;Revised date:2013-11-19
基金项目:国家自然科学基金资助项目(11076022)
Foundation Item: The National Natural Science Foundation of China(No. 11076022)
^{**} 通讯作者:zhihongye_love@163.com **Corresponding author:** zhihongye_love@163.com

问题的研究比较多,主要集中在数值算法和耦合规律分析方面。文献[1]中采用矩量法,解决了 TE 波与有厚度的开缝无限大导电平面的电磁耦合问题。文献[2]中采用传输线矩阵(TLM)方法,分析了带矩形孔缝腔体的屏蔽效能。文献[3]中利用 FDTD 方法,得到了电磁脉冲作用下计算机主板耦合的电磁场分布。文献[4]中通过建立实际计算机机箱的物理模型,使用 FDTD 方法得到了电磁脉冲对计算机机箱的耦合规律。文献[5]中利用 FDTD 方法,研究了不同形状和不同数量的孔缝对机箱耦合效应的影响。文献[6]中利用 FDTD 方法,分析了不同极化方向的电磁脉冲对计算机机箱的耦合规律。文献[7]中利用 FDTD 方法,研究了带孔缝金属机箱在电磁脉冲激励下的电场屏蔽效能。文献[8]中分析了相同孔缝面积的情况下,不同开孔形状对机箱屏蔽效能的影响。文献[9]中采用有限积分法对弹体内置矩形腔体的屏蔽效能进行了数值模拟。

FDTD 方法是一种很有效的时域算法,通过一次计算即可获得信号宽频带的响应特性。近几年来,文献中多数是采用 FDTD 方法,对计算机机箱的电磁耦合问题进行计算和分析,微波源耦合问题的研究以及并行 FDTD 算法的应用比较少。基于此,本文采用并行 FDTD 算法,对 1 kW 微波源机箱进行建模并实现快速网格剖分,模拟并分析不同极化方向下高斯脉冲对微波源机箱的电磁耦合规律。

2 并行 FDTD 算法实现

采用并行 FDTD 算法分析微波源机箱的电磁脉冲耦合规律的实现过程如图 1 所示,这也是分析任意电子系统机箱电磁耦合问题的通用方法。主要包括 3 个部分:首先,根据粗略的理论分析,对微波源机箱结构进行合理的简化,再采用 CAD 软件建立微波源机箱的物理模型,导出其 STL 格式文件^[10];其次,将 FDTD 算法与基于 MPI 库的并行技术结合起来,形成并行 FDTD 程序模块,程序能够读入微波源的 STL 文件,并通过自动网格剖分技术,实现微波源机箱模型的快速建模;最后,采用并行 FDTD 程序,模拟不同极化方向的高斯脉冲源对微波源机箱的耦合,在微波源的关键位置设置观察点,提取观察点的时域波形,分析电磁波在微波源机箱内部的传播和谐振特性。

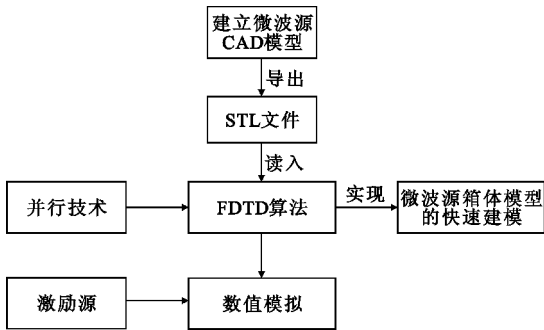


图 1 并行 FDTD 算法实现
Fig. 1 The implementation of parallel FDTD

3 微波源机箱建模

以型号为 MPG-2010C 的 1 kW 微波源为原型,通过相应的理论分析对结构进行合理简化和近似处理,再利用 CAD 软件进行建模。图 2 是 CAD 软件中建立好的微波源箱体模型,机箱的长、宽、高尺寸分别为 $X = 430\text{ mm}$, $Y = 705\text{ mm}$, $Z = 565\text{ mm}$ 。其前面板位于 XOY 平面,面板上开有一定数量的矩形孔和通风孔,后面板上同样开有通风孔,左右两侧的面板上开有多个矩形槽。

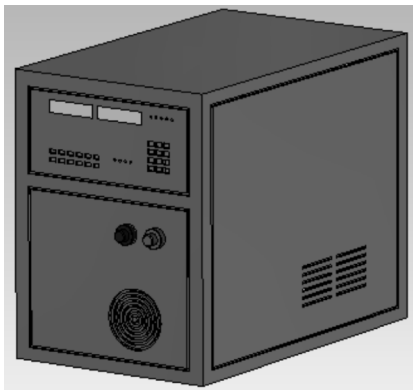


图 2 微波源 CAD 模型
Fig. 2 The CAD model of microwave source

电磁脉冲对微波源机箱的耦合过程满足无源麦克斯韦方程组:

$$\nabla \times \boldsymbol{H} = \varepsilon \frac{\partial \boldsymbol{E}}{\partial t} \tag{1}$$

$$\nabla \times \boldsymbol{E} = -\mu_0 \frac{\partial \boldsymbol{H}}{\partial t} \tag{2}$$

激励源选用高斯脉冲,其表达式为

$$E(t) = \exp\left(-\frac{4\pi(t-t_0)^2}{\tau^2}\right) \tag{3}$$

脉冲宽度 τ 为 0.2 ns, 幅值为 1 000 V/m。

计算区域的空间网格步长取为 5 mm, 时间步长根据 Courant 条件确定, 总的计算时间为 40 ns。计算空间分为总场和散射场, 入射波通过连接边界引入到总场区, 吸收边界采用 CPML 吸收边界条件。

4 数值仿真

在曙光刀片机上, 采用 4 个核进行并行计算, 模拟垂直极化与水平极化两种极化方向下的高斯脉冲正入射微波源机箱的电磁耦合问题, 将程序计算结果与商业电磁软件仿真结果进行比较, 验证算法的正确性。提取相应点的时域波形, 观察电磁波在机箱内部的振荡特性, 分析电磁脉冲对微波源机箱的耦合规律。微波源观察点的位置如图 3 所示, A 点为前面板通风孔附近点, B 点为后面板通风孔附近点, C 点为箱体的中心点。

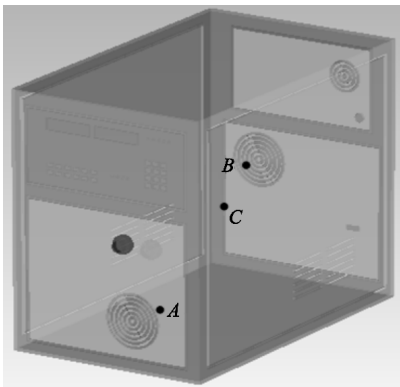


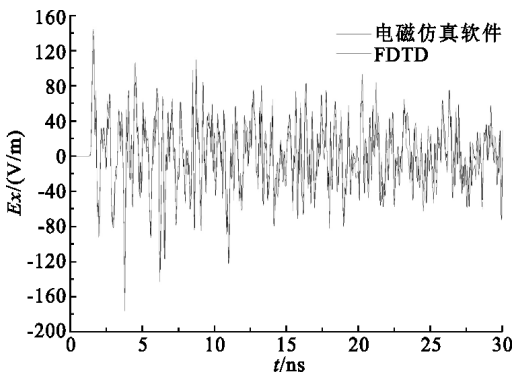
图 3 微波源观察点设置
Fig. 3 The location of observation points

4.1 垂直极化高斯脉冲正入射情形

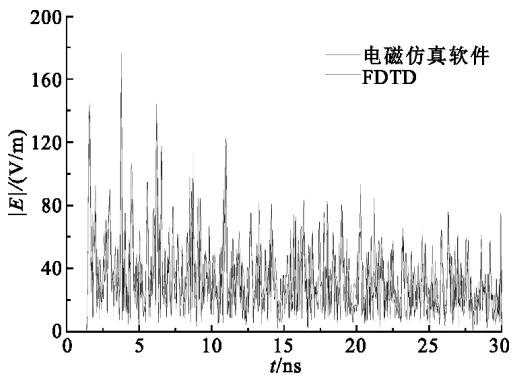
考虑垂直极化的高斯脉冲, 传播方向为 z 轴正方向, 极化方向为 x 轴正方向。

图 4 给出了微波源机箱中心点主极化方向的电场分量 E_x 以及总电场幅值的时域波形。由图可知, 程序计算结果与商业电磁软件的仿真结果吻合得比较好, 验证了算法的正确性。

图 5 给出了微波源中观察点的总电场幅值波形。由图可知, 电磁脉冲通过前面板上的通风孔耦合进入箱体的能量较大, 微波源箱体为金属结构, 可以近似看成谐振腔, 耦合进入微波源箱体内部的电磁脉冲会产生谐振, 而且中心点的谐振特性最明显, 谐振点增多。



(a) 中心点主极化方向 E_x 的时域波形



(b) 中心点总的电场幅值

图 4 垂直极化下机箱中心点的时域波形
Fig. 4 The time domain wave of the center under vertical polarization

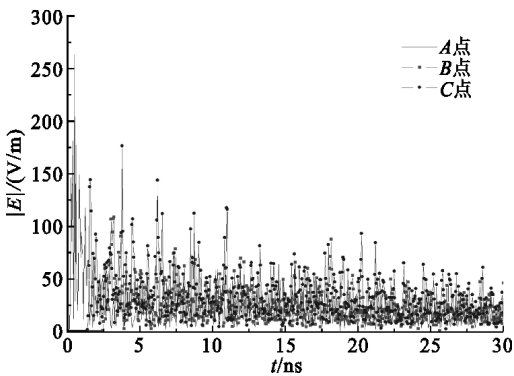


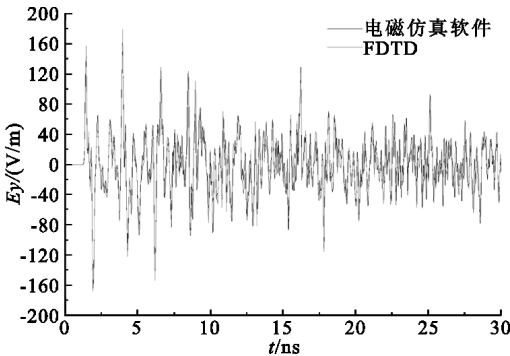
图 5 垂直极化下观察点的时域波形
Fig. 5 The time domain waves of observation points under vertical polarization

4.2 水平极化电磁脉冲正入射情形

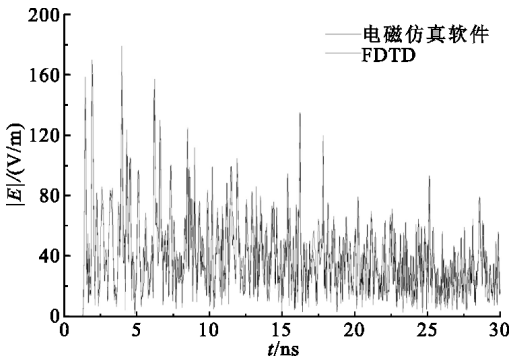
水平极化的高斯脉冲, 传播方向为 z 轴正方向, 极化方向为 y 轴正方向。

类似地, 图 6 中给出了微波源机箱中心点的主极化方向的电场分量 E_y 以及总电场幅值的时域波形。由图 6 可知, 程序计算结果与商业电磁软件的

仿真结果吻合得比较好,验证了算法的正确性。



(a) 中心点主极化方向 E_y 的时域波形



(b) 中心点总的电场幅值

图6 水平极化下中心点的时域波形
Fig.6 The time domain wave of the center under horizontal polarization

同样,图7给出了微波源中观察点的总电场幅值波形。由图7可知,电磁脉冲通过前面板上的通风孔耦合进入箱体的能量较大,且箱体中心点的谐振特性最明显。同时,由图5和图7可以看出,两种极化方向下的电磁脉冲耦合进入微波源箱体内部的电场强度基本相同。

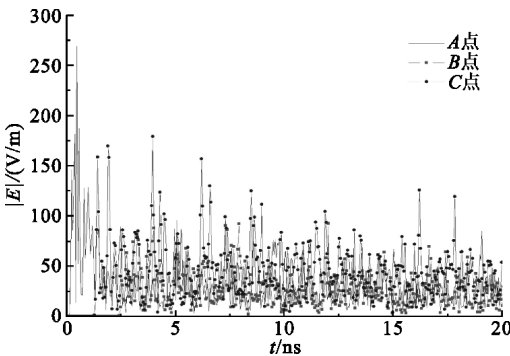


图7 水平极化下观察点的时域波形
Fig.7 The time domain waves of observation points under horizontal polarization

5 结束语

通过以上分析可以看出,1 kW微波源机箱电磁耦合的并行 FDTD 模拟结果与商业电磁软件仿真结果吻合得比较好,验证了算法的正确性。通过观察点的时域波形可以看出,电磁脉冲通过前面板通风孔耦合进入的能量较大,电磁脉冲在微波源箱体内部不断振荡,中心点的谐振特性最明显。同时,电磁脉冲的极化方向对耦合进入微波源内部的电场强度影响不大。分析微波源机箱的电磁脉冲耦合规律以及机箱内部电磁波的谐振特性,为进一步分析1 kW微波源以及更高功率微波源的电磁兼容问题以及微波源内部器件布局和设计提供了理论支撑,具有实际的工程价值。

参考文献:

[1] Auckland D T, Harrington R F. Electromagnetic transmission through a filled slit in a conducting plane of finite thickness TE case [J]. IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques, 1978,26(7): 499-505.

[2] Christopoulos C. Application of the TLM method to equipment shielding problems [C]//Proceedings of 1998 IEEE Symposium on Electromagnetic Compatibility. Denver,CO:IEEE,1998:188-193.

[3] 刘长军,黄卡玛,闫丽萍,等. 电磁辐射作用于计算机主板的模拟及效应评估[J]. 强激光与粒子束,2006,18(5): 847-852.

LIU Chang-jun, HUANG Ka-ma, YAN Li-ping, et al. Simulation and effect evaluation of electromagnetic radiation on computer mother board[J]. High Power Laser And Partiel Ebeams,2006,18(5):847-852. (in Chinese)

[4] 陈伟华,张厚,王剑,等. 电磁脉冲对计算机机箱的耦合效应[J]. 工程设计学报,2007,14(5):409-413.

CHEN Wei-hua, ZHANG Hou, WANG Jian, et al. Research on coupling effect of electromagnetic pulse and computer box [J]. Journal of Engineering Design,2007,14(5):409-413. (in Chinese)

[5] 方志坚,沈宣江,郭胜祥. 电磁脉冲对金属机箱的孔缝耦合特性研究[J]. 电子质量,2007(5):66-68.

FANG Zhi-jian, SHEN Xuan-jiang, GUO Sheng-xiang. Coupling Characteristic of EM Pulse into the Metal Box Enclose with Aperture [J]. Electronics Quality, 2007(5):66-68. (in Chinese)

[6] 廖成,杨丹,方剑. 不同极化方向电磁脉冲作用于计算机机箱的效应分析[J]. 微波学报,2007,23(4):28-32.

LIAO Cheng, YANG Dan, FANG Jian. Numerical Analysis for EMP Having Different Polarization Direction Coupling to a Computer Case [J]. Journal of Microwaves, 2007, 23(4):28-32. (in Chinese)

- [7] 夏能弘,宋文武,方重华,等. EMP 激励下带孔缝金属机箱的屏蔽效能研究[J]. 舰船科学技术,2009, 31(9):78-82.
XIA Neng-hong, SONG Wen-wu, FANG Chong-hua, et al. Shielding effectiveness of metallic enclosures with apertures excited by EMP [J]. Ship Science and Technology, 2009, 31(9):78-82. (in Chinese)
- [8] 杨永亮,王化深. 带孔缝机箱对电磁脉冲的屏蔽效能研究[J]. 铁路计算机应用,2011,20(5):12-14.
YANG Yong-liang, WANG Hua-shen. Study on shielding effectiveness of electromagnetic pulse to metal enclosure with slot[J]. Railway Computer Application, 2011, 20(5):12-14. (in Chinese)
- [9] 李春荣,王新政,冯延彬. 弹体内置矩形腔屏蔽效能分析[J]. 电讯技术,2012,52(2):250-254.
LI Chun-rong, WANG Xin-zheng, FENG Yan-bin. Analysis of Shielding Effectiveness of Rectangular Cavity in Missile Enclosure [J]. Telecommunication Engineering, 2012, 52(2): 250-254. (in Chinese)
- [10] Chen Linglu, Zhou Haijing, Li Hanyu, et al. Cartesian Mesh Generator for Parallel Finite-Difference Time-Domain Method[J]. Journal of Southwest Jiaotong University, 2013, 48(4):776-782.

作者简介:



叶志红(1988—),男,江苏泰兴人,2006年于西南交通大学获学士学位,现为西南交通大学博士研究生,主要研究方向为电磁兼容;

YE Zhi-hong was born in Taixing, Jiangsu Province, in 1988. He received the B. S. degree from Southwest Jiaotong University in 2006.

He is currently working toward the Ph. D. degree. His research concerns electromagnetic compatibility.

Email: zhihongye_love@163.com

廖成(1964—),男,重庆人,教授、博士生导师,主要研究方向为计算电磁学、电磁兼容和天线原理与设计;

LIAO Cheng was born in Chongqing, in 1964. He is now a professor and also the Ph. D. supervisor. His research concerns computational electromagnetics, electromagnetic compatibility, and antenna theory and design.

Email: c. liao@swjtu.edu.cn

冯强(1990—),男,江西丰城人,硕士研究生,主要研究方向为电磁兼容。

FENG Qiang was born in Fengcheng, Jiangxi Province, in 1990. He is now a graduate student. His research concerns electromagnetic compatibility.