

# UPML 吸收边界在电磁脉冲孔缝耦合计算中的应用

陈伟华<sup>1</sup>, 张厚<sup>1</sup>, 徐海洋<sup>1</sup>, 杨宇军<sup>2</sup>

(1. 空军工程大学 导弹学院, 陕西 三原 713800; 2. 航天科技集团 771 研究所, 陕西 西安 710075)

**摘要:**用时域有限差分(FDTD)法模拟电磁脉冲与腔体的孔缝耦合过程,利用各向异性理想匹配层(UPML)作为吸收边界截断计算空间。通过对腔体内特定观察点的时、频特性计算,得到了电磁脉冲对孔缝的耦合特性,计算结果表明了UPML吸收边界的有效性。

**关键词:**时域有限差分法;各向异性理想匹配层;吸收边界;屏蔽效果

**中图分类号:** TN011 **文献标识码:** A **文章编号:** 1009-3516(2007)05-0063-04

强电磁脉冲对电子设备有着严重的破坏作用<sup>[1]</sup>。屏蔽腔是减小脉冲效应的有效方法,但设备的通风、线缆的连接,不可避免地开有孔缝,孔缝的存在会严重影响腔体的屏蔽效果。

时域有限差分(FDTD)法是求解电磁场问题的一种有效数值方法<sup>[2]</sup>,在模拟开区域问题时,由于计算机内存有限,必须设置吸收边界以截断计算空间。目前吸收效果较好的是理想匹配层(PML)吸收边界,它首先由 Berenger 在 1994 年提出<sup>[3]</sup>。Gedney 提出了各向异性理想匹配层(UPML)吸收边界<sup>[4]</sup>,和传统 PML 吸收边界相比,UPML 吸收边界避免了介质中对电磁场的拆分,进一步降低了对计算机内存的要求,使得编程更容易实现。本文利用 UPML 吸收边界对电磁脉冲与腔体的孔缝耦合过程进行了计算<sup>[5-6]</sup>。

## 1 计算模型的建立

### 1.1 FDTD 算法描述

问题的物理模型如图 1 所示,其中坐标原点位于腔体中心。屏蔽腔为理想导体构成的 12 cm × 12 cm × 12 cm 矩形空腔,腔体壁厚 0.02 cm,中央开有 3 cm × 3 cm 的矩形孔。腔体的周围是吸收边界,用来截断计算空间。空间网格步长为  $\Delta x = \Delta y = \Delta z = 1$  mm,根据 Courant 稳定性条件,选取时间步长  $\Delta t = \Delta x / \sqrt{3} C = 1.926 \times 10^{-12}$  s。

由于 MAXWELL 方程是线性方程,电磁场可以分裂为入射和反射场之和的形式,即

$$\begin{cases} \mathbf{E}^{\text{total}} = \mathbf{E}^{\text{inc}} + \mathbf{E}^{\text{scat}} \\ \mathbf{H}^{\text{total}} = \mathbf{H}^{\text{inc}} + \mathbf{H}^{\text{scat}} \end{cases} \quad (1)$$

这样分裂的好处是:入射场可在整个计算空间中用解析法求解,只有散射场需要进行数值分析,只有散射场需要在研究的计算空间之外被边界条件吸收。

在散射体外散射场满足方程:

$$\begin{cases} \nabla \times \mathbf{E}^{\text{scat}} = -\mu_0 \partial \mathbf{H}^{\text{scat}} / \partial t \\ \nabla \times \mathbf{H}^{\text{scat}} = \varepsilon_0 \partial \mathbf{E}^{\text{scat}} / \partial t \end{cases} \quad (2)$$

在散射体上散射场满足方程:

$$\begin{cases} \nabla \times \mathbf{E}^{\text{scat}} = -\mu \partial \mathbf{H}^{\text{scat}} / \partial t - \sigma^* \mathbf{H}^{\text{scat}} - [(\mu - \mu_0) \partial \mathbf{H}^{\text{inc}} / \partial t + \sigma^* \mathbf{H}^{\text{inc}}] \\ \nabla \times \mathbf{H}^{\text{scat}} = \varepsilon \partial \mathbf{E}^{\text{scat}} / \partial t + \sigma \mathbf{E}^{\text{scat}} + [(\varepsilon - \varepsilon_0) \partial \mathbf{E}^{\text{inc}} / \partial t + \sigma \mathbf{E}^{\text{inc}}] \end{cases} \quad (3)$$

通过式(2)、(3)可以计算出散射场,进而利用式(1)求出总场。

选用高斯脉冲作为激励源,则入射电场可表示为

收稿日期:2007-01-23

作者简介:陈伟华(1981-),男,河南沈丘人,博士生,主要从事电磁兼容研究;

张厚(1962-),男,山西太原人,教授,博士生导师,主要从事天线与电磁兼容智能化研究。

$$E_z^i(I, J, K)^n = E_z \exp(-\alpha(\tau - \beta\Delta t)^2); \quad \tau = n\Delta t + \mathbf{r} \cdot \mathbf{r}/C + R/C$$

式中:  $\mathbf{r}' \cdot \mathbf{r} = ((I-1) + 0.5)\Delta x \cos\phi \sin\theta + (J-1)\Delta y \sin\phi \sin\theta + (K-1)\Delta z \cos\theta$ 。  $\theta$  为入射波与  $Z$  轴夹角,  $\phi$  为入射波与  $X$  轴夹角, 电磁波沿单位向量  $\mathbf{r}$  方向入射,  $C$  是光速,  $\mathbf{r}'$  是由原点到网格空间中场点的向量,  $R$  为参考距离,  $\beta$  为由截断点到高斯脉冲峰值的步数,  $\alpha$  为衰减因子。本文选定  $\beta = 64$ ,  $a = [4/\beta\Delta t]^2$ , 高斯脉冲幅度 1000 V/m, 其时域波形如图 2 所示。入射波沿着  $X$  轴负方向垂直入射, 电场方向为垂直极化。

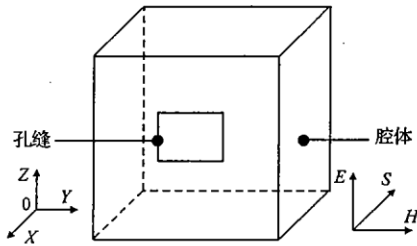


图1 物理模型

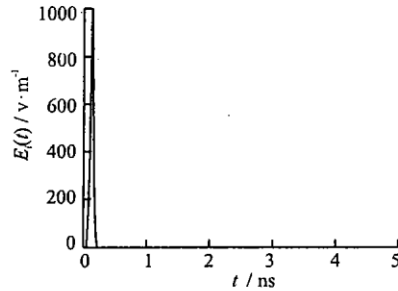


图2 高斯脉冲时域波形

## 1.2 UPML 的 FDTD 差分格式

UPML 中的电场分量递推表达式为

$$E_{x,y}^{n+1/2} = \left( \frac{2\varepsilon_0\varepsilon_{1r} - \sigma_1\Delta t}{2\varepsilon_0\varepsilon_{1r} + \sigma_1\Delta t} \right) E_{x,y}^{n-1/2} = \left( \frac{2\varepsilon_0}{2\varepsilon_0\varepsilon_{1r} + \sigma_1\Delta t} \right) (D_{x,y}'^{n+1/2} - D_{x,y}'^{n-1/2}) \quad (4)$$

$$E_z^{n+1/2} = E_z^{n-1/2} + \left(1 + \frac{\sigma_z\Delta t}{2\varepsilon_0}\right) D_z'^{n+1/2} - \left(1 - \frac{\sigma_z\Delta t}{2\varepsilon_0}\right) D_z'^{n-1/2} \quad (5)$$

式中  $D'_x = (\varepsilon_{1r} + \sigma_1/j\omega\varepsilon_0)E_x$ ,  $D'_y = (\varepsilon_{1r} + \sigma_1/j\omega\varepsilon_0)E_y$ ,  $D'_z = E_z/(1 + \sigma_z/j\omega\varepsilon_0)$ 。同理可以导出 UPML 中的磁场分量递推表达式。

通常以理想导体为 UPML 的最外层截断边界, 且取  $\sigma_i (i=x, y, z)$  为非均匀分层, 例如  $\sigma_z(z) = \sigma_{\max} |(z - z_0)/d|^m$ , 式中  $d$  为 UPML 的厚度,  $z_0$  为 UPML 靠近 FDTD 区的界面位置,  $m$  为整数。研究表明: 当  $m=4$ 、 $\sigma_{\max} = (m+1)/(\sqrt{\varepsilon_r}150\pi\Delta)$  时最佳, 其中  $\Delta$  为 FDTD 网格尺寸。本文选  $d=7\Delta, m=4$ 。

## 2 计算结果及讨论

### 2.1 腔体内的耦合电场

图 3 和图 4 分别是孔轴线上矩形孔中心和腔体中心处的电场信号波形。图 5 和图 6 分别是坐标 (50, 40, -40) 和 (-10.5, 40, -40) 处的电场信号波形。

从图 3、图 4 中可看出: 腔体内的电场主要集中于小孔周围, 脉冲信号在腔体内衰减很快, 在主脉冲结束后, 出现了谐振信号, 并趋于稳态。由于孔缝的对外辐射, 谐振信号的幅度随着时间的增加有所下降。在非小孔轴线上的网格点上仍然有谐振信号, 但幅度较小孔轴线上的信号微弱, 而且该信号几乎不随轴线距离的变化而变化。

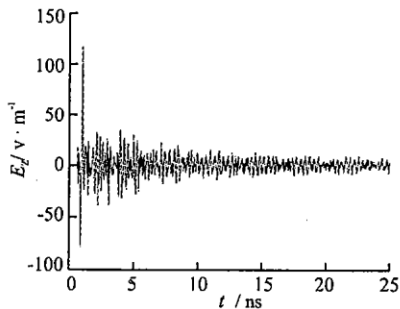


图3 矩形孔中心处电场

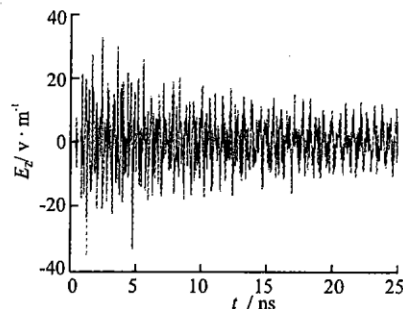


图4 腔体中心处电场

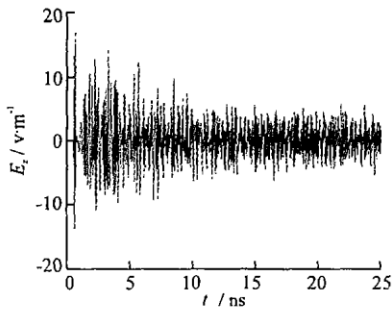


图5 坐标(50,40,-40)处电场

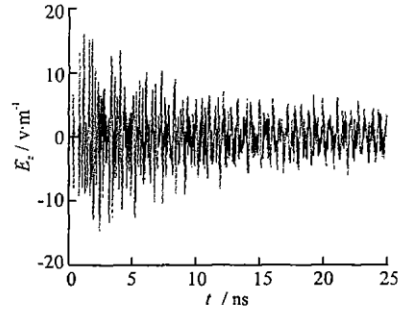


图6 坐标(-10.5,40,-40)处电场

### 2.2 腔体的屏蔽效能

对腔体内观察点的电场进行傅氏变换可得到其频域特性。随频率变化的电场屏蔽系数定义为  $SE = 20\log|(E(f)/E_i(f))|$ , 式中  $E_i(f)$  为观察点的场强,  $E(f)$  为屏蔽腔不存在时该点的场强。腔体中心的电场屏蔽系数计算结果如图7所示。

图中每一个峰值分别对应腔体内的一个模式,第1个谐振峰的频率为1.8 GHz,对应屏蔽腔的主模  $TE_{101}$  模。在屏蔽腔内,无论是低阶模还是高阶模都被激励起来,而且频率越高,模式越多;在谐振频率处腔体的屏蔽性能很差,防护能力最弱;在远离谐振频率的情况下,腔体的屏蔽效果随着频率的升高而降低。

### 2.3 腔体内的功率密度

功率密度计算表达式为:  $S = E \times H$ , 其中 X 方向的分量为:  $S_x = E_y \cdot H_z - E_z \cdot H_y$ 。图8是腔体中心的功率密度随时间的变化曲线。

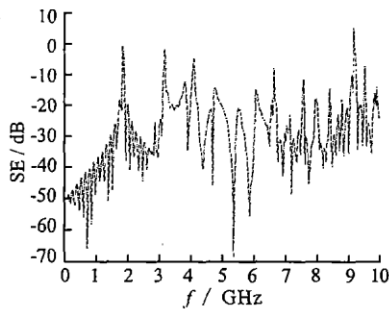


图7 腔体中心的电场屏蔽系数

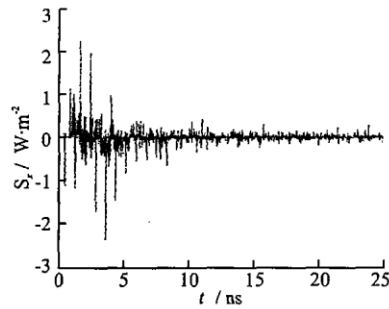


图8 腔体中心的功率密度

从图8中可看出:在电磁脉冲进入腔体的短暂过程中,功率密度的幅值不断增大,在达到最大后,由于孔缝的对外辐射,耦合进入腔体内的电磁脉冲的功率密度幅值不断减小。总的来看机箱内的耦合能量对腔体内元件的瞬间影响较大,是一个先增加后减小的过程。

## 3 结论

利用UPML吸收边界对电磁脉冲与腔体的耦合过程进行了研究,并得到一些有用的结论:电磁脉冲可通过孔缝耦合进入腔体内,并与腔体发生共振;耦合进入腔体的电磁脉冲衰减很快,在开孔附近的场强较大;整个腔体内都存在谐振信号,只是由于孔缝的对外辐射作用,谐振信号的幅度逐渐减小;机箱内的耦合能量对元件的瞬间影响很大,是一个先增加后减小的过程。实验结果与文献[5-8]的计算结果一致,表明了UPML吸收边界的有效性。

### 参考文献:

- [1] 赖祖武. 高功率微波及核电磁脉冲的防护问题[J]. 微波学报,1995,11(1):1-8.
- [2] 吕英华. 计算电磁学的数值方法[M]. 北京:清华大学出版社,2006.
- [3] Berenger J P. A perfectly matched layer for the absorption of electromagnetic waves[J]. Journal of Computational Physics,1994, 114:185-200.
- [4] Gedney S D. An anisotropic perfectly matched layer absorbing medium for the truncation of FDTD lattices[J]. IEEE Trans. on

Antennas and Propagation, 1996, 44(12):1630-1639.

- [5] 刘顺坤,傅君眉. 电磁脉冲对目标腔体的孔缝耦合效应数值研究[J]. 电波科学学报, 1999, 14(2):202-206.  
 [6] 陈莉,赵永久. 电磁脉冲对带孔缝腔体的耦合特性[J]. 火控雷达技术, 2005, 34(2):29-33.  
 [7] 孟萃,陈雨生,王建国. 瞬态电磁场对多孔目标耦合规律的数值研究[J]. 强激光粒子束, 2000, 12(6):732-736.  
 [8] 王建军,刘国治,陈雨生. 微波脉冲孔缝线性耦合的数值与实验研究[J]. 微波学报, 1995, 11(4):224-251.

(编辑:田新华,徐楠楠)

## Application of UPML Absorbing Boundary in Calculation of Electromagnetic Pulse Coupling into Slot

CHEN Wei-hua<sup>1</sup>, ZHANG Hou<sup>1</sup>, XU Hai-yang<sup>1</sup>, YANG Yu-jun<sup>2</sup>

(1. The Missile Institute, Air Force Engineering University, San Yuan 713800, Shaanxi, China; 2. Space Science and Technology Group 771 Academy, Xi'an 710075, China)

**Abstract:** This article simulates the coupling processes of electromagnetic pulse into a cavity with a slot, and utilizes the uniaxial anisotropic perfectly matched layer (UPML) as absorbing boundary condition to truncate the calculation region by a finite difference time domain method (FDTD). According to the calculation of electric field and its frequency domain characteristic of some special grids, the rules of electromagnetic pulse coupling into a cavity with a slot are obtained. The result shows that uniaxial anisotropic perfectly matched layer is effective in serving as absorbing boundary.

**Key words:** finite - difference time - domain method; uniaxial anisotropic perfectly matched layer; absorbing boundary; shielding effectiveness

(上接第 62 页)

- [5] Chiclana F, Herrera F, Herrera - Viedma E. Integrating three Representation Models in Fuzzy Multipurpose Decision Making Based on Fuzzy Preference Relations [J]. Fuzzy Sets and Systems, 1998, 97(1):33-48.  
 [6] 徐泽水. 不确定多属性决策方法及应用[M]. 北京:清华大学出版社, 2004.  
 [7] Yager R R. Applications and Extensions of OWA Aggregations [J]. International Journal of Man - Machine Studies, 1992, 37(2):103-132.  
 [8] 王欣荣,樊治平. 一种具有不同形式偏好信息的群决策方法[J]. 东北大学学报:自然科学版, 2003, 24(2):178-181.

(编辑:田新华,徐楠楠)

## A Group Decision - Making Method of the Threat Evaluation Based on OWA Operator

ZHANG Su<sup>1</sup>, SHEN Mao-xing<sup>1</sup>, WANG Jin-jiang<sup>2</sup>, ZHOU Hao<sup>1</sup>

(1. The Missile Institute, Air Force Engineering University, Sanyuan 713800, China; 2. The Engineering Institute, Air Force Engineering University, Xi'an 710038, China)

**Abstract:** In view of actual warfare facts a new method of the threat evaluation based on the OWA operator is put forward. Through the method of unifying preference information into the utility value form, and the subjective preference information of decision - making group is aggregated by the OWA operator. Then the threat evaluation model integrating the subjective and the objective preference information is established in the paper. The attributes weight can be calculated by a quadratic programming model. The degree of threat can be obtained through the decision - making models. The threat evaluation method is in accord with the actual war process. The validity of this method is demonstrated in an example.

**Key words:** threat evaluation; group decision - making; subjective preference information; OWA operator; unifying