

# 微波脉冲与孔阵矩形腔体耦合的数值模拟研究

李锐<sup>1)</sup> 杨一明 钱宝良

(国防科学技术大学, 光电科学与工程学院 长沙 410073)

**摘要** 利用时域有限差分(FDTD)方法对微波脉冲与孔阵矩形腔体的耦合过程进行了数值模拟研究. 当孔缝阵中的孔缝长边垂直于入射电场方向时, 详细分析了微波脉冲与孔缝阵矩形腔体的耦合过程中孔阵面上各个孔缝中心点的电场分布情况. 结果表明, 在平行于入射电场方向上排列的孔缝中, 处在中心的孔缝场增强效应最弱, 孔缝场增强效应由中心向两侧依次对称的增强; 在垂直于入射电场方向上排列的孔缝中, 处在中心的孔缝场增强效应最强, 孔缝场增强效应由中心向两边依次对称的减弱. 同时, 讨论了孔缝孔阵中孔缝个数、间隔等因素对各孔缝中心点的场增强效应和腔体内的耦合场分布的影响.

**关键词** 微波脉冲 孔阵矩形腔体 数值模拟

## 1 引言

孔缝耦合是微波进入系统的主要途径之一<sup>[1]</sup>, 高功率微波与目标耦合的研究是高功率微波技术领域不可缺少的部分, 是高功率微波应用和系统抗高功率微波加固方面的重要课题. 现有许多学者大多围绕着孔缝耦合特性开展研究工作, 对微波与孔缝耦合的物理过程已经有了较深入的认识<sup>[2-5]</sup>.

在实际的电子系统中, 也经常存在孔缝阵列的情况, 而在公开的文献中对于微波脉冲与孔阵腔体耦合的研究工作的有关报导很少. 本文利用时域有限差分(FDTD)<sup>[6]</sup>方法对微波脉冲与孔阵矩形腔体的耦合过程进行了数值模拟研究. 当孔缝阵中的孔缝长边垂直于入射电场方向时, 详细分析了微波脉冲与孔缝阵矩形腔体的耦合过程中孔阵面上各个孔缝中心点的电场分布情况. 结果表明, 在平行于入射电场方向上排列的孔缝中, 处在中心的孔缝场增强效应<sup>[4]</sup>最弱, 孔缝场增强效应由中心向两侧依次对称的增强; 在垂直于入射电场方向上排列的孔缝中, 处在中心的孔缝场增强效应最强, 孔缝场增强效应由中心向两边依次对称的减弱. 同时, 讨论了孔缝孔阵中孔缝个数、间隔等因素对各孔缝中心点的场增强效应和腔体内的耦合场分布的影响, 模拟结果表明随着孔缝个数的增加, 各孔缝中心点的场增强效应减弱, 但腔体内的耦合场和耦合进腔体内的功率峰值增强; 随着孔缝间距的增加, 各孔缝中心点的场增强效应、腔体内的耦合场和耦合

进腔体内的功率峰值都增强.

## 2 物理模型

微波脉冲与孔阵矩形腔体的耦合模型如图1所示.

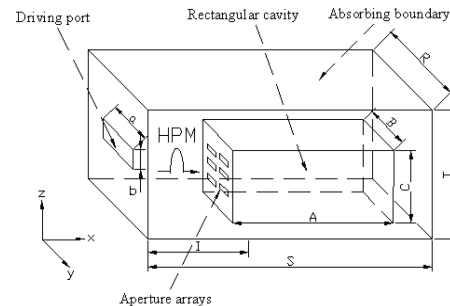


图1 微波脉冲与孔阵矩形腔体的耦合模型

计算区域采用吸收边界(ABC)<sup>[7]</sup>截断, 其长 $S=85\text{cm}$ , 宽 $R=38\text{cm}$ , 高 $T=38\text{cm}$ ; 带孔阵腔体的长 $A=48\text{cm}$ , 宽 $B=24\text{cm}$ , 高 $C=24\text{cm}$ , 腔体壁厚度 $D=1\text{cm}$ ; 假设腔体壁为理想导体壁, 在腔体壁上存在由多个矩形窄孔缝组成的孔阵, 每个孔缝的厚度 $H=1\text{cm}$ , 孔缝的长度 $L=6\text{cm}$ 、宽度 $K=0.1\text{cm}$ , 但孔阵中孔的位置、数目以及各孔之间的间隔会根据数值模拟的需要而改变; 假设微波脉冲采用一矩形波导口向外辐射, 波导口长 $a=12\text{cm}$ 、宽 $b=6\text{cm}$ , 波导口面位于平面 $x=0$ 内, 微波脉冲沿 $+x$ 方向朝孔阵矩形腔体辐射; 假设矩形

2008 - 01 - 07 收稿

1) E-mail: lirui4534@163.com

波导激励源、矩形腔体和孔阵的中心轴线均与坐标轴  $x$  轴重合, 孔阵矩形腔体与激励端口之间沿  $x$  轴方向的水平距离  $I$  满足一定的远场条件又不至于使计算区域过大, 取为  $I=30\text{cm}$ . 在以下的模拟过程中如果没有特殊说明, 各参数均保持不变.

相比计算区域, 介质孔缝尺寸很小, 需要采用亚网格技术<sup>[8]</sup>进行网格划分. 假设入射的微波脉冲是正弦调制的高斯脉冲波:

$$E_{\text{in}}(t) = E_0 \sin(2\pi ft) \exp\left[-\frac{4\pi(t-t_0)^2}{\tau^2}\right], \quad (1)$$

其中  $f=2.5\text{GHz}$  为入射微波脉冲的载频,  $E_0=1.0\times 10^5\text{V/m}$ ,  $t_0=2.0\times 10^{-9}\text{s}$ , 入射波脉冲宽度  $\tau=2.5\times 10^{-9}\text{s}$ ; 激励源采用一矩形波导向外辐射  $TE_{10}$  模式.

### 3 模拟结果及分析

当在计算区域仅设置激励源时进行计算, 得到入射波的场分量情况, 并将它作为耦合过程分析的参考入射波, 该参考入射波在计算区域中的坐标点  $(30.5\text{cm}, 0, 0)$  (即耦合模型中孔阵矩形腔体的孔阵所在腔体面的几何中心) 的场强峰值  $E_{\text{max}}=1.8709\times 10^5\text{V/m}$ .

#### 3.1 孔阵中孔缝个数对微波脉冲与孔阵腔体耦合过程的影响

孔阵中孔缝长边垂直于  $z$  轴(即入射电场方向), 沿  $y$  轴方向相邻孔缝之间的间隔为  $1\text{cm}$ , 沿  $z$  轴方向相邻孔缝之间的间隔为  $0.5\text{cm}$  不变, 沿  $z$  轴方向增加孔缝的个数, 由  $1\times 3$  个孔缝阵对称的变为  $11\times 3$  个孔缝阵, 把中间的 3 个孔缝沿  $y$  轴负向到正向的顺序依次称为孔 6, 孔 17, 孔 28, 然后按照从  $z$  轴正向到负向的顺序依次递增的方法来命名孔阵中的孔缝. 例如, 对于  $3\times 3$  个孔缝组成的孔阵中 9 个孔缝按从  $z$  轴正向到负向、从  $y$  轴负向到正向的顺序依次称为孔 5、孔 6、孔 7、孔 16、孔 17、孔 18、孔 27、孔 28、孔 29. 个数沿  $z$  轴变化的孔缝组成的孔阵所在腔体面的示意图和该孔阵中每个孔缝中心点的场强峰值如图 2 所示.

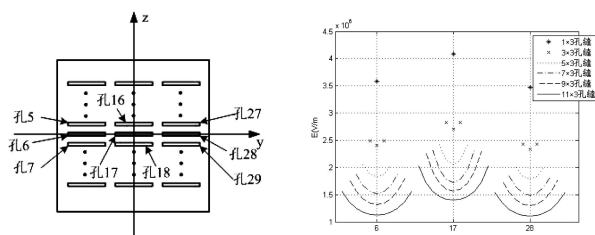


图 2 个数沿  $z$  轴变化的孔缝组成的孔阵所在腔体面示意图和每个孔缝中心点的场强峰值

从图 2 可以看出: 每个孔缝中心点的场强峰值随着孔缝个数的增加逐渐减小; 在相同孔缝个数的条件下, 每一列孔缝的中间孔缝向上下两侧(即  $z$  轴正负方向)孔缝中心点的场强峰值依次增大, 且对称的上下两侧两个孔缝中心点的场强峰值基本相同; 中间一列孔缝中心点的电场峰值比左右两侧的两列相应孔缝中心点的电场峰值高, 左右两侧的两列相应孔缝中心点的电场峰值基本相同.

腔体中心的场强峰值和在  $x=32\text{cm}$ ,  $54\text{cm}$ ,  $76\text{cm}$  处通过腔体横截面的功率峰值随孔缝  $z$  向个数变化的情况如图 3 所示, 从图 3 中可以看出, 随着孔阵中孔缝个数的增加, 腔体中心的场强峰值和在  $x=32\text{cm}$ ,  $54\text{cm}$ ,  $76\text{cm}$  处通过腔体横截面的功率峰值都是逐渐增加的.

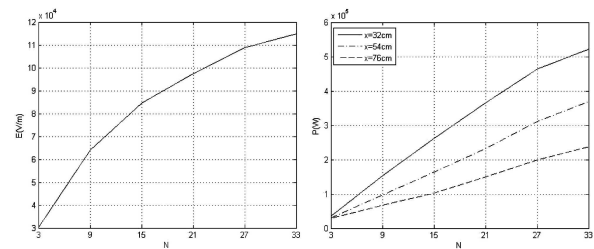


图 3 腔体中心的场强峰值随孔缝  $z$  向个数变化和  $x=32\text{cm}$ ,  $54\text{cm}$ ,  $76\text{cm}$  处通过腔体横截面的功率峰值随孔缝  $z$  向个数变化

#### 3.2 孔阵中孔缝间距对微波脉冲与孔阵腔体耦合过程的影响

考虑  $3\times 3$  孔缝阵的情况, 孔缝长边垂直于  $z$  轴(即入射电场方向), 沿  $y$  轴方向相邻孔缝之间的间隔为  $1\text{cm}$ , 沿  $z$  轴方向相邻孔缝之间的间隔为  $0.05\text{cm}$ , 以矩阵元素的表示方法来命名 9 个孔缝, 其孔阵所在腔体面的示意图如图 4 所示. 逐渐改变  $z$  轴方向孔缝之间的距离, 相邻孔缝之间的间隔由  $0.05\text{cm}$  开始以  $0.05\text{cm}$  为步长逐渐变化到  $0.5\text{cm}$ , 得到每个孔缝中心随间距变化的情况如图 5 所示

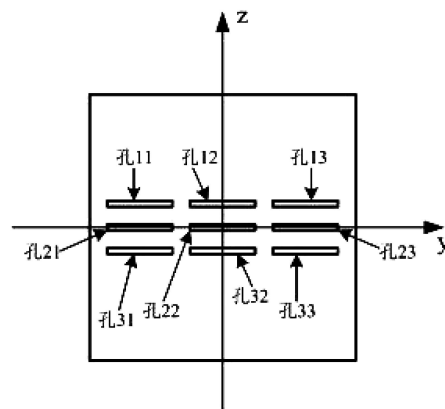


图 4 九孔缝组成的孔阵所在腔体面示意图

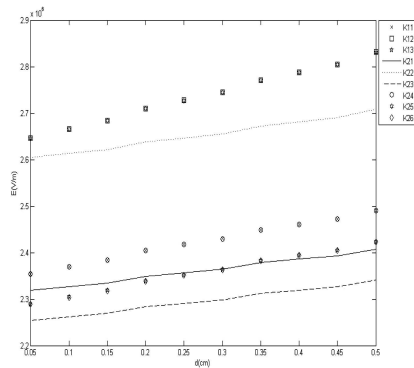


图 5 每个孔缝中心点的场强峰值随间距的变化

可以看出,随着孔缝间距的增大,每个孔缝中心点的电场峰值都逐渐增加,并且每一列孔缝中中间孔缝中心点的电场峰值比上下两侧略低,上下两侧孔缝中心点的电场峰值基本相同;中间一列孔缝中心点的电场峰值比左右两侧的两列相应孔缝中心点的电场峰值高,左右两侧的两列相应孔缝中心点的电场峰值基本相同,这与3.1节得出的结论是一致的。

腔体中心的场强峰值和在 $x=32\text{cm}$ ,  $54\text{cm}$ ,  $76\text{cm}$ 处通过腔体横截面的功率峰值随间距变化的情况如图6所示。可以看出,随着孔缝间距的增大,每个孔缝中心的场强峰值和腔体中心的场强峰值以及在 $x=32\text{cm}$ ,  $54\text{cm}$ ,  $76\text{cm}$ 处通过腔体横截面的功率峰值都逐渐增大。

由于参考入射波在各个孔缝中心点位置的场强(未加腔体条件下)均不超过 $2 \times 10^5 \text{V/m}$ ,从以上计算的结果可以看出,场增强因子 $C^{[4]}$ 至少大于7,加入孔缝阵腔体后,所有孔缝中心的场强比该位置未加腔体时的场强都要高。因此,在所有孔缝的中心均发生场增强效应,只不过场增强效应的强弱随着孔缝所在位

置的不同而不同而已。

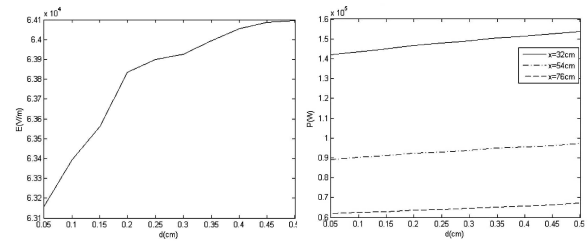


图 6 腔体中心点的场强峰值随间距的变化和 $x=32\text{cm}$ ,  $54\text{cm}$ ,  $76\text{cm}$ 处通过腔体横截面的功率峰值随间距的变化

## 4 结论

本文利用时域有限差分(FDTD)方法对微波脉冲与孔阵矩形腔体的耦合过程进行了数值模拟研究。

当孔缝阵中的孔缝长边垂直于入射电场方向时,详细分析了微波脉冲与孔缝阵矩形腔体的耦合过程中孔阵面上各个孔缝中心点的电场分布情况。结果表明,在平行于入射电场方向上排列的孔缝中,处在中心的孔缝场增强效应最弱,孔缝场增强效应由中心向两侧依次对称的增强;在垂直于入射电场方向上排列的孔缝中,处在中心的孔缝场增强效应最强,孔缝场增强效应由中心向两边依次对称的减弱。

同时,讨论了孔缝孔阵中孔缝个数、间隔等因素对各孔缝中心点的场增强效应和腔体内的耦合场分布的影响,模拟结果表明随着孔缝个数的增加,各孔缝中心点的场增强效应减弱,但腔体内的耦合场和耦合进腔体内的功率峰值增强;随着孔缝间距的增加,各孔缝中心点的场增强效应、腔体内的耦合场和耦合进腔体内的功率峰值都增强。

## 参考文献(References)

- James Benford, John Swgle. High Power Microwaves. Norwood: Artech House, Inc., 1992
- ZHU Z P. The Study on Microwave Coupling into Slot on a Cavity with a Block Inside. Changsha: National University of Defense Technology, 2005 (in Chinese)  
(朱占平. 微波与内置物质块带缝腔体耦合的研究. 长沙: 国防科学技术大学, 2005)
- LIU Q. Study on the Coupling of Microwave Pulses into Monolayer and Nested Cavities Through Slots. Changsha: National University of Defense Technology, 2006 (in Chinese)  
(刘强. 微波脉冲与带缝单层腔体、嵌套腔体耦合的研究. 长沙: 国防科学技术大学, 2006)
- WANG J G, LIU G Z, ZHOU J S. High Power Laser and Particle Beams, 2003, **15**(11): 1093—1099 (in Chinese)  
(王建国, 刘国治, 周金山. 强激光与粒子束, 2003, **15**(11): 1093—1099)
- WANG J G, LIU G Z, CHEN Y S et al. Journal of Microwaves, 1995, **11**(4): 244—251 (in Chinese)  
(王建国, 刘国治, 陈雨声等. 微波学报, 1995, **11**(4): 244—251)
- Yee K S. IEEE, 1966, **14**: 320
- Mur G. IEEE Trans, Electromagn. Compat., 1981, **23**(4): 377—382
- Kasher J C, Yee K S. Applied Computational Electromagnetic Society Journal and Newsletter, 1987, **2**(2): 75—102

# Numerical Simulation of Microwave Pulse Coupling into the Rectangular Cavity with Aperture Arrays

LI Rui<sup>1)</sup> YANG Yi-Ming QIAN Bao-Liang

(College of Optoelectronic Science and Engineering, National University of Defense Technology, Changsha 410073, China)

**Abstract** In this paper, the finite-difference time-domain (FDTD) algorithm is employed to simulate microwave pulse coupling into the rectangular cavity with aperture arrays. In the case in which the long-side of the slot in aperture arrays is perpendicular to the incident electrical field, and the electrical distribution of each center of slot in the aperture arrays in the process of microwave pulse coupling into the rectangular cavity with aperture arrays is analyzed in detail. We find that the effect of field enhancement of the slot in the middle of all the slots which distribute in the direction parallel to the incident electrical field is minimum and increases in turn from the middle to both sides symmetrically. We also find that the effect of field enhancement of the slot in the middle of all the slots which distribute in the direction perpendicular to the incident electrical field is maximum and decreases in turn from the middle to both sides symmetrically. In the same time, we investigate the factors that influence the effect of field enhancement of the center of each slot and the coupling electrical distribution in the cavity, including the number of slots and the spacing between slots.

**Key words** microwave pulse, rectangular cavity with aperture arrays, numerical simulation