

文章编号: 1001—4322(1999)04—0495—04

快上升前沿电磁脉冲与 目标腔体的孔腔共振效应研究*

刘顺坤^{1,2}, 傅君眉², 陈雨生¹, 周辉¹, 邱爱慈¹

(1. 西北核技术研究所, 西安市 69 信箱 16 分箱, 710024)

(2. 西安交通大学, 西安, 710049)

摘 要: 利用时域有限差分方法(FD-TD Method)研究了快上升前沿电磁脉冲(FREMP)对目标腔体的孔腔共振效应。研究表明:由于 FREMP 的高频分量丰富,使得 FREMP 更容易通过目标腔体上的孔缝,与目标腔体发生孔腔共振。由于孔缝的对外辐射,振荡幅度将逐渐减弱。

关键词: 时域有限差分方法; 快沿电磁脉冲; 耦合; 孔腔共振

中图分类号: O 441 **文献标识码:** A

快上升前沿电磁脉冲(FREMP)效应是非核电磁脉冲效应研究的重要内容。FREMP 是指上升前沿在亚纳秒级、脉宽约为几十纳秒的电磁脉冲信号。相对于核电磁脉冲(NEMP)、雷电电磁脉冲(LEMP)等, FREMP 具有更宽的频带和更丰富的高频成分。因而它更容易通过屏蔽腔体上的孔缝耦合进入屏蔽体内,并与目标腔体发生孔腔共振,进而影响和破坏屏蔽体内电子设备的正常工作。

我们利用时域有限差分方法研究了 FREMP 对开有小孔的目标腔体的空腔共振效应,并分析了孔腔共振现象的规律和特点^[1]。

1 计算空间及计算方法的建立

1.1 计算空间的建立

目标空间的结构如图 1 所示,矩形目标腔体按完纯导体考虑,其几何尺寸为 0.6m × 0.6m × 0.6m,腔体壁厚 0.01m。在腔体的中央开有 0.09m × 0.09m 的矩形小孔,孔面对着来波方向。腔体的周围是吸收边界,用于截断计算空间,它对于反射波是透明的。

入射 FREMP 为双指数脉冲,电场方向垂直极化。其脉冲幅度为 10³V/m、上升前沿时间为 0.3ns,脉冲宽度约为 50ns,入射方向为 $\phi = 0^\circ; \theta = 90^\circ$ 。

1.2 计算方法的建立

根据研究问题的特点,将计算区域划分成总场区和散射场区,总场区包含目标腔体,两区域通过连接边界连接^[2,3]。总场区域的场满足方程

$$\nabla \times E_{\text{total}} = -\mu \frac{\partial H_{\text{total}}}{\partial t} - \sigma^* H_{\text{total}} \quad (1)$$

$$\nabla \times H_{\text{total}} = \epsilon \frac{\partial E_{\text{total}}}{\partial t} - \sigma^* E_{\text{total}} \quad (2)$$

散射场区域的场满足的方程

* 国防科技基础研究基金资助课题
1998 年 10 月 19 日收到原稿,1999 年 6 月 21 日收到修改稿。
刘顺坤,男,1966 年 12 月出生,助研,博士生

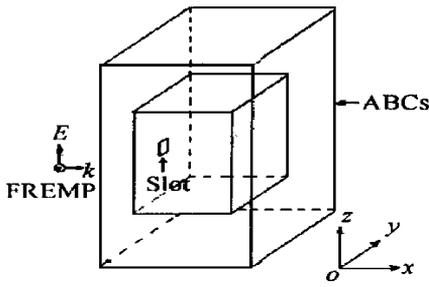


Fig 1 The model of computational space
图 1 计算空间模型

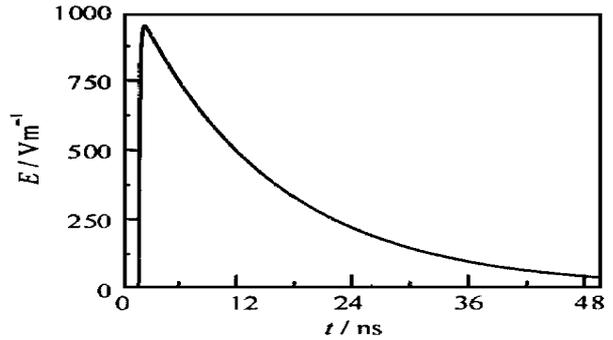


Fig 2 The waveform of incident FREMP electric field in time domain
图 2 FREMP 入射场时域波形

$$\nabla \times E_{\text{scat}} = -\mu_0 \partial H_{\text{scat}} / \partial t \tag{3}$$

$$\nabla \times H_{\text{scat}} = \epsilon_0 \partial E_{\text{scat}} / \partial t \tag{4}$$

入射场在连接边界处接入。

计算空间所用的吸收边界满足三维波动方程单向波传播条件

$$(\partial/\partial x^2 + \partial/\partial y^2 + \partial/\partial z^2 - \frac{1}{v^2} \partial/\partial t^2)E = 0 \tag{5}$$

近似吸收边界的棱线上取(5)式的一阶Mur形式,其它处取(5)式的二阶Mur形式。

2 计算结果及分析

2.1 FREMP 对目标腔体的孔缝耦合与孔腔共振

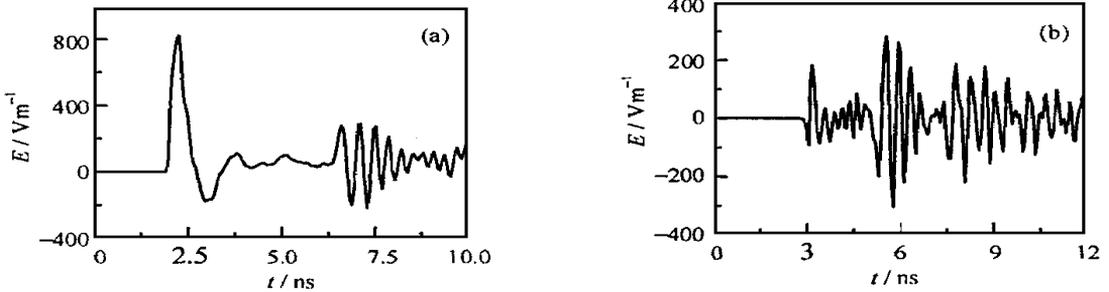


Fig 3 The coupled field distance from slot 3cm (a) and 30cm (b) in time domain
图 3 孔轴线上距孔 3cm (a) 和 30cm (b) 处的耦合场的时域波形

图 3 为 FREMP 通过小孔耦合进入屏蔽腔体内的信号波形,它们分别距小孔 3cm 和 30cm。从图中可以看到, FREMP 的波头很容易耦合进入腔体,脉冲波在腔体内衰减得很快,脉冲场主要集中在孔缝附近。在主脉冲结束后,出现了高频振荡信号。且其幅度并不随距小孔距离变化。从时间上分析,该信号是从小孔对面腔体壁上反射回来的。为了验证这个推测,改变后壁距孔的距离,发现高频振荡距主脉冲的时间距离也随之改变。最后,取消腔体后壁,高频振荡消失。证明推测是正确的。由此,可以认定, FREMP 通过小孔耦合进入腔体,并与腔体发生了孔腔共振。

将目标腔体后壁向前移 0.15m,从图 4 可以看出,高频振荡距主脉冲的距离也变短了。这

是预料中的,是由于反射面距观测点的距离变短的缘故。

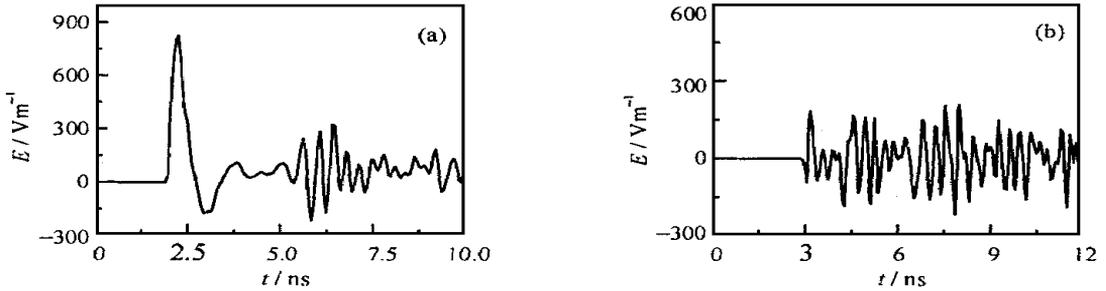


Fig. 4 The coupled field distance from slot 3cm (a) and 30cm (b) in time domain with after wall moved forward

图 4 后壁前移后孔轴线上距孔 3cm (a) 和 30cm (b) 处的耦合场的时域波形

图 5 反映的是,取消腔体的后壁,在 FREMP 作用下距小孔 3cm 和 30cm 处的耦合场波形。正如所预料的那样,跟在主脉冲后面的高频振荡消失。主脉冲向前传输,最后被吸收边界所吸收。从图中还可以看到一个有趣的现象,即腔体边界条件的改变对图 5(a) 主脉冲的影响很小而对图 5(b) 的波形影响较大。这是由于主脉冲主要集中在孔缝附近,并且持续时间短,而边界条件改变所形成的扰动场并非该波导的本征模式,在腔体内衰减很快,衰减的扰动场传输到孔缝周围时,幅度已经很小,而且主脉冲已基本结束,故对主脉冲的影响很小,只是形成幅度很小的衰减振荡。图 5(b) 所反映的观测点距后边界点较近,主脉冲产生的时间较晚且幅度小,故受边界变化的扰动较大。从这里可以看出瞬态场与时谐场的结果有较大的区别。时谐场依赖边界条件,而瞬态场依赖与时间发生联系的边界条件。电磁脉冲与腔体发生作用后,脉冲波形已经发生很大变化。如果采用基尔霍夫假定处理,那么对计算结果将产生很大的影响^[4]。

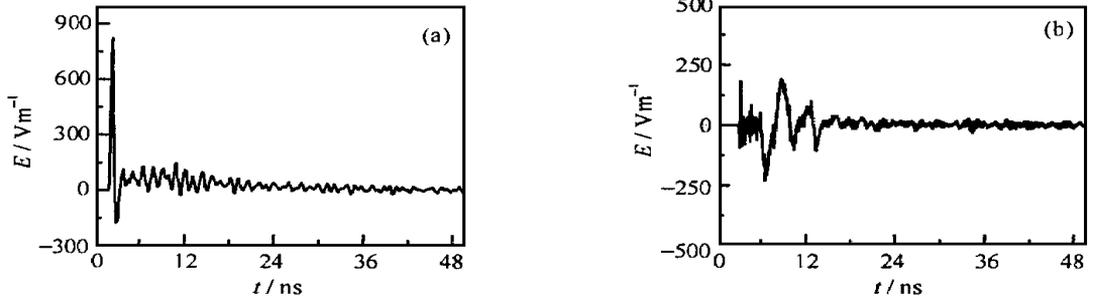


Fig. 5 The coupled field distance from slot 3cm (a) and 30cm (b) in time domain with after wall moved away

图 5 取消后壁后孔轴线上距孔 3cm (a) 和 30cm (b) 处的耦合场的时域波形

2.2 FREMP 与目标腔体孔腔共振的分析

图 6 是距小孔 30cm 处,即腔体中心点的耦合信号时域波形及其频谱分析波形。可以看到,主脉冲已经衰减得很小了,而高频振荡的幅值基本上没有变化。从图 6(b) 可以看出,共振信号基本上是腔体本征频率的高次模,在腔体内不允许低于腔体截至频率的模式存在。

3 结 论

由模拟结果可以得出 FREMP 与屏蔽腔体相互作用并产生孔腔共振有如下特点:

- (1) FREMP 的波头可以较容易地通过孔缝耦合进入腔体内,并与腔体发生孔腔共振。FREMP 耦合进入腔体的主脉冲在腔体内衰减得很快,基本上只存在于孔缝周围。而共振信号



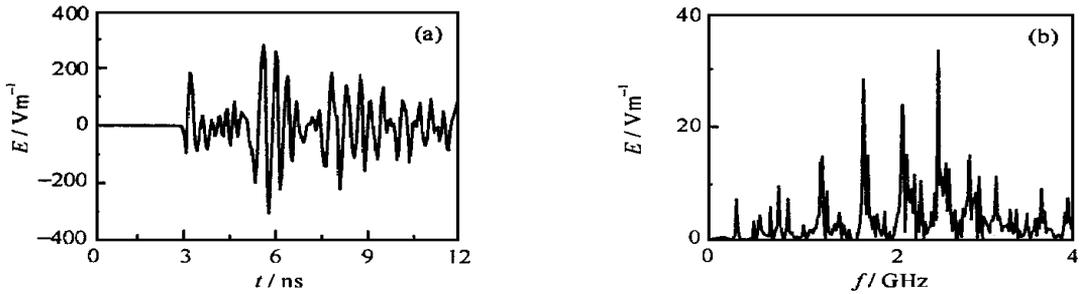


Fig 6 The coupled field in the middle of cavity in time domain (a) and in frequency domain (b)

图 6 腔体中心处耦合场的时域波形(a)和频域波形(b)

在腔体内几乎不随观测点的位置变化,在腔体内基本没有衰减,只是由于孔缝的辐射作用,幅度随时间有所下降。

(2) FREMP 与目标体发生孔隙共振,共振信号基本上是腔体本征频率的高次模式,而低于本征频率的模式不能在腔体内存在。

(3) 改变腔体的部分边界条件对共振现象有较大的影响,而对耦合进入腔体的主脉冲影响不大。

参考文献

- 1 Jianguo Wang Numerical studies on nonlinear coupling of high power microwave pulses into a cylindrical cavity. *IEEE Trans on Plasma Science*, **12**(1)
- 2 Kunz K S and Luebbers R J. *The Finite Difference Time Domain Method for Electromagnetics* Florida: CRC Press, 1993
- 3 Allen Taflov. *Computational Electrodynamics* Boston: Artech House Inc Press, 1995
- 4 虞国寅等 强电磁脉冲的小孔耦合 电波科学学报, 1996, **11**(2)

NUMERICAL STUDIES ON RESONANT EFFECTS OF FREMP INTO A CAVITY THROUGH A SLOT

LIU Shun-kun^{1,2}, FU Jun-mei², CHENG Yu-sheng¹, ZHOU Hui¹, QIU Aici¹

1 Northwest Institute of Nuclear Technology, Xi'an, Shanxi, 710024, China

2 Xi'an Jiaotong University, Xi'an, Shanxi, 710049, China

ABSTRACT: The purpose of this paper is to use the Finite-Difference Time-Domain (FD-TD) method to study numerically the resonant effects of FREMP into a cavity through a slot. Computational data indicate that FREMP is easier to resonate with a cavity through a slot for the plentiful high frequencies of FREMP. Because of the radiation outward, the amplitudes of resonant signals attenuate slowly.

KEY WORDS: FD-TD method; FREMP; coupling; resonance