

文章编号: 2095-4980(2017)01-0075-06

电磁脉冲窄缝耦合共振特性

倪 勤, 魏志勇*, 韩梦涛, 方美华, 王 静, 朱庆伟

(南京航空航天大学 航天学院, 江苏 南京 210016)

摘 要: 利用有限积分法对电磁脉冲与带缝腔体孔缝耦合特性进行研究。选取窄缝为 mm 量级微小孔缝作为研究对象, 借助耦合函数, 分析了核电磁脉冲与单层腔体、嵌套腔体内、外窄缝平行分布与垂直分布 2 种情况下的耦合函数。结果表明: 当入射波电场矢量方向与窄缝短边平行, 即入射角 $\theta=0^\circ$ 时, 内、外窄缝平行分布耦合进入腔体的电磁能量在内窄缝处发生第 2 次场增强效应; 而内、外窄缝采用垂直分布的相对位置, 在内窄缝处的电场值仅为几伏每米, 此分布能有效降低电磁脉冲对电子器件的干扰。

关键词: 电磁脉冲; 有限积分; 耦合系数; 窄缝

中图分类号: TN011

文献标志码: A

doi: 10.11805/TKYDA201701.0075

Investigation on resonant electromagnetic pulse coupling into the cavity with a narrow slot

NI Qin, WEI Zhiyong*, HAN Mengtao, FANG Meihua, WANG Jing, ZHU Qingwei

(School of Astronautics, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing Jiangsu 210016, China)

Abstract: Coupling processes of electromagnetic pulse into cavities with slot are investigated by Finite Integral(FIT) method. Slots with dimension of several millimeters are selected as research objects. The coupling functions about parallel distribution and vertical distribution of the slots are analyzed with the incident angle $\theta=0^\circ$. It is found that electromagnetic energy coupling into the cavity in the parallelly distributed slots would behave the second resonance effect at the point of the internal slot. At the same time, the peak electric field is only a few volts per meter at the point of the internal slot of the vertically distributed slots. Therefore, this distribution can effectively reduce the interference of electromagnetic pulses on electronic devices.

Keywords: electromagnetic pulse; Finite Integral; coupling coefficient; narrow slot

随着近地航天活动的日益频繁, 航天器在轨运行时间大大延长。随着一些新材料的广泛应用, 飞行器可靠性提升和寿命的延长显得越发重要, 空间辐射环境对飞行器的影响及相应的抗辐射加固技术一直以来受到广泛重视。高空核爆炸, 在爆点附近执行任务的飞行器, 将受到核爆后产生的 X 射线的直接照射, 大量的电磁脉冲、中子及 γ 射线会对飞行器产生严重的辐射, 导致电子设备被烧毁。在电子集成度越来越高的时代, 电子系统抗电磁辐射的要求提上日程。核电磁脉冲强度大, 覆盖区域广, 促使一些国家和地区开展了大量电磁脉冲耦合^[1-4]性能的研究, 同时开展了电磁脉冲的防护措施研究。

前人已经开展了大量的电磁脉冲与腔体孔缝耦合特性研究^[5-8]。LIU Qiang 等^[9]利用时域有限差分法对微波脉冲与带孔缝的腔体进行了研究; 刘强等^[10]在前人研究的基础上, 采用矩形和圆柱 2 种嵌套腔体, 研究微波脉冲的孔缝耦合特性。朱占平等^[11]利用天线互补原理从理论上推导了真空、介质窄缝共振频率公式。YANG Dan 等^[12]利用时域有限差分法(FIT)分析了超宽带与腔体不同形状孔缝的耦合。ZHU Zhanping 等^[13]利用天线互补原理, 在真空、介质窄缝共振频率公式的基础上, 得出了微波脉冲耦合进入腔体时, 带缝腔体中心共振加强与腔体的内部

收稿日期: 2015-07-02; 修回日期: 2016-01-10

基金项目: 国家自然科学基金青年基金资助项目(11405085); 江苏省自然科学基金青年基金资助项目(BK20130789)

*通信作者: 魏志勇 email: wzy_msc@nuaa.edu.cn

结构无关,但内部结构却影响腔体内耦合电场分布的结论。

以上研究工作在窄缝单峰共振特性、耦合函数等方面研究广泛,选取的研究对象大多是 cm 量级孔缝,腔体体积基本在 1 m^3 以下,对于像飞行器这种接近圆柱体的大型腔体,开展的研究工作较少。本文研究的飞行器尺寸大,装配要求高,因装配产生的缝隙尺寸小,因此选取 mm 级孔缝,采用与实体尺寸 1:1 的计算模型建模,用 FIT 对核爆电磁脉冲与飞行器孔缝耦合过程进行数值模拟研究。

1 计算模型和理论基础

1.1 数值计算模型

将飞行器简化为圆柱形,建立用理想导体构成的圆柱形腔体模型,飞行器半径 $R=1.5\text{ m}$,高 h 为 4 m ,窄缝长为 a ,宽为 b 。假设在圆柱腔体的侧面或者端面存在孔缝,分别讨论单层腔体和嵌套腔体在核电磁脉冲激励下的电磁波耦合特性,嵌套腔体窄缝相对位置对耦合进入腔体内的电场能量的影响。飞行器腔体模型如图1所示。

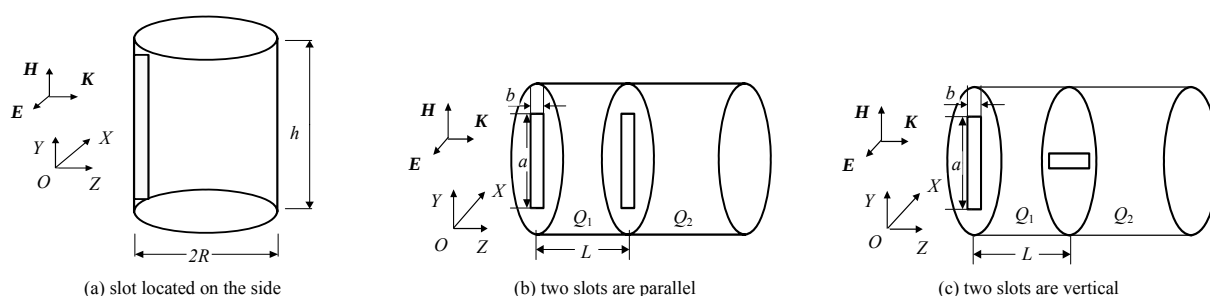


Fig.1 Numerical calculation model

图1 数值计算模型

本文研究高空核爆条件下,电磁脉冲与带缝腔体的耦合特性,选取具有代表性的核电磁脉冲作为激励源。核电磁脉冲(Nuclear Electromagnetic Pulse, NEMP)的时域表达式为:

$$E(t) = kE_0(e^{-\alpha t} - e^{-\beta t}) \quad (1)$$

式中: $E(t)$ 为入射核电磁脉冲场强; 常数 $k=1$; $E_0=6.5 \times 10^4\text{ V/m}$; $\alpha=4 \times 10^7\text{ S}^{-1}$; $\beta=6 \times 10^8\text{ S}^{-1}$ 。NEMP 幅值大,作用时间短,通常在 $0.01 \sim 0.03\text{ }\mu\text{s}$ 的时间内即可上升到最大值;频率范围宽,作用范围广。输入波形如图2所示。

1.2 理论基础

当电磁脉冲入射到带孔缝腔体的表面时,会在表面发生电磁散射,在孔缝处产生穿透现象。电磁散射和穿过程均满足麦克斯韦方程组:

$$\begin{cases} \nabla \times \mathbf{H} = \frac{\partial \mathbf{D}}{\partial t} + \mathbf{J} \\ \nabla \times \mathbf{E} = -\frac{\partial \mathbf{B}}{\partial t} + \mathbf{J}_m \end{cases} \quad (2)$$

电磁脉冲与带缝腔体耦合的电磁计算属于求解无源麦克斯韦方程组的问题。FIT 法的基本思想是将麦克斯韦积分方程离散化,转化成为麦克斯韦网格方程进行数值求解。通常采用 Yee^[14] 网格。Yee 网格是解决此类问题具有代表性的一种网格,空间中电场和磁场各分量的取值点交叉放置,每个电场分量周围环绕 4 个磁场分量,与此同时每个磁场分量周围也环绕 4 个电场分量。这样在满足电磁场解析特性的前提下对麦克斯韦方程进行求解,得出需要计算的电磁场量。

1.3 耦合系数

假设有一电磁脉冲入射到带有窄缝的圆柱腔体上,电磁波在空间传输至腔体壁及窄缝附近时,将产生电磁散

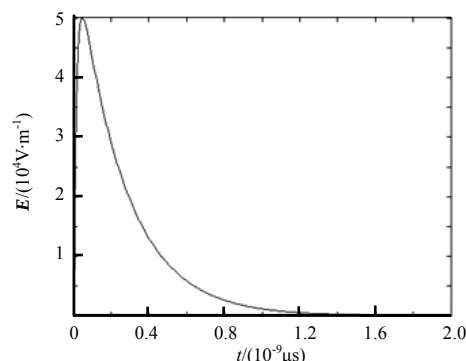


Fig.2 Nuclear electromagnetic pulse waveform

图2 核电磁脉冲波形

射和透射现象。对于复杂腔体和孔缝形状,用解析方法求解三维问题几乎不可能,只能借助数值模拟方法获得近似解。因此,为反应带窄缝圆柱腔体对电磁耦合的特性,定义系统的耦合函数为:

$$\eta(\theta, f, r) = 20 \lg \frac{|E_c(\theta, f, r)|}{|E_i(f)|} \quad (3)$$

式中: θ 表示入射波的电场方向与孔缝短边的夹角; f 是入射电磁脉冲的频率; r 是电磁脉冲耦合进入腔体内, 电场能量观测点位置; $E_c(\theta, f, r)$ 是耦合进系统内的电场值大小; $E_i(f)$ 表示入射波的电场峰值。

2 数值结果与分析

2.1 单层腔体不同入射角度耦合系数

采用图 1(a)中的孔缝位于侧面单层腔体的飞行器模型, 孔缝尺寸长 $a=1.5$ m, 宽 $b=2$ mm。当核电磁脉冲电场 E 的方向与窄缝短边平行, 此时入射角 $\theta=0^\circ$ 。如图 3 中 P_1 点为窄缝所在位置, A 为 $R=1.4$ m 时圆周上的点, 点 A 为沿着圆周在 $0^\circ \sim 360^\circ$ 范围的一动点, 为方便表示 $R=1.4$ m 时圆周上每点的耦合系数, 定义点 A 和圆心的连线与 X 轴正方向的夹角为 φ , 数值计算电场不同入射角度, 不同点 A 处的耦合系数。采用 NEMP 作为激励源, 计算频率范围 $0 \sim 1.2$ GHz 的耦合系数大小。由于电场值以 X 轴呈对称分布, 本文只画出 φ 在 $0^\circ \sim 180^\circ$ 范围电场耦合系数。

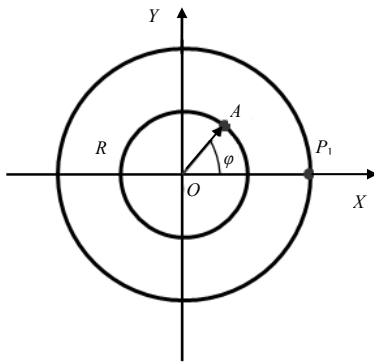


Fig.3 Coupling coefficient of point A
图 3 点 A 耦合系数

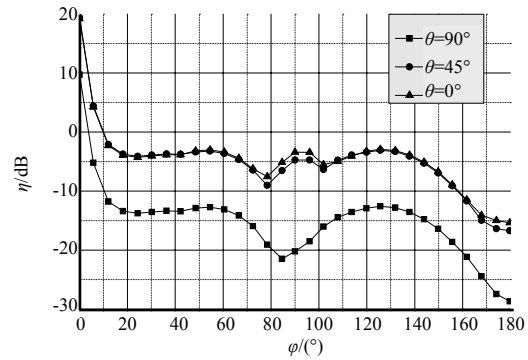
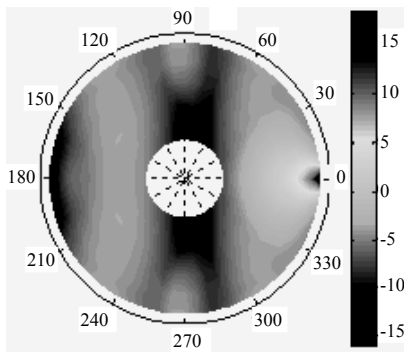
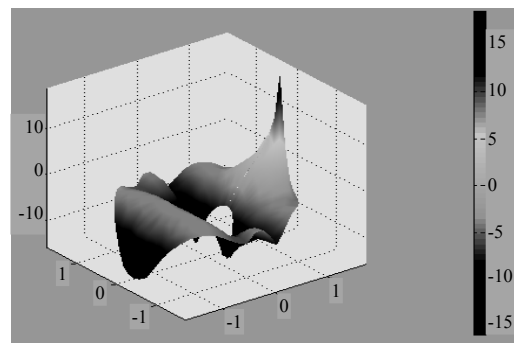


Fig.4 Coupling coefficient of different incident angles
图 4 不同入射角度耦合系数

由图 4 可知, $R=1.4$ m 靠近窄缝处, 当 $\theta=0^\circ$ 时, 即核电磁脉冲电场方向与窄缝短边平行, 激发的电场强度最大, 对飞行器装载的电子元器件的损伤最大。因此, 本文主要研究 $\theta=0^\circ$, R 从 0.4 m 到 1.4 m 的电磁脉冲入射平面内的耦合系数, 见图 5。



(a) 0.12 GHz coupling coefficients



(b) rectangular coordinates for 0-1.2 GHz coupling coefficients

Fig.5 Coupling coefficient
图 5 耦合系数图

2.2 嵌套腔体平行分布窄缝共振特性研究

核电电磁脉冲与带矩形孔缝的嵌套圆柱形腔体耦合模型的空间结构如图 1(b)~(c)所示,嵌套腔体(b)两窄缝的相对位置平行,嵌套腔体(c)两窄缝的相对位置垂直。金属腔体的相对介电常数 ε_r 为常数 1。计算区域采用完全吸收边界,圆柱腔体半径 $R=1.5$ m,高 $h=4$ m。孔缝尺寸长 $a=1.5$ m,宽 $b=2$ mm。两嵌套腔体 Q_1 和 Q_2 之间的距离为 L 。核爆电磁脉冲垂直于嵌套腔体入射,电场方向与窄缝的短边 b 平行。将每个入射波长划分为 10 个网格,并在窄缝处进行网格加密处理,仿真计算频率范围为 0~800 MHz 的圆柱腔体的多峰共振频率点。

讨论核电电磁脉冲与圆柱腔体的耦合过程,分别计算外窄缝、内窄缝中心点耦合电场变化,并将所得的电场值与没有设置嵌套腔体的单层腔体的电场值进行对比。此处,内外腔体的距离 $L=50$ cm。图 6(a)~图 6(b)中,外、内孔缝中心耦合电场强度分别为 1.58 MV/m,0.426 MV/m,假设外、内孔缝的场增强因子为 C_w 和 C_n ,此次计算得到的 C_w 和 C_n 为 31.6 和 8.5。因此核电电磁脉冲通过窄缝耦合在外、内窄缝中心附近均有场增强现象。图 6(d)是距外窄缝不同距离的耦合电场峰值,在 $L=50$ cm,即在内窄缝位置处出现了明显的场增强效应。内窄缝中心的耦合电场峰值不是经过外孔缝耦合主脉冲与其直接耦合产生的结果,而是耦合的主脉冲在腔体 Q_1 内振荡数个来回后再与内窄缝耦合的结果。图 6(a)~图 6(c)中,嵌套腔体在外、内窄缝处激励的耦合电场大于单层腔体。其主要原因是入射波经外窄缝耦合,主脉冲进入腔体 Q_1 并在内部来回振荡,受到腔体的调制,再经内窄缝耦合进入腔体 Q_2 ,腔体 Q_2 中的电磁能量通过内窄缝向外辐射,增加了内窄缝附近的电场强度。另外,设置相同的入射波及初始条件,计算单层圆柱形腔体耦合电场,得到单层腔体内窄缝位置处耦合电场峰值为 2 115 V/m,仅为嵌套腔体窄缝处的 0.5%。

由图 6(e)可以看出,电磁脉冲经过外窄缝处时发生了多峰共振。朱占平、钱宝良利用天线互补原理从理论上推导了真空、介质窄缝共振频率公式,对于垂直入射的电磁波,可得多峰共振频率点为:

$$f_n = \frac{c}{\lambda} = \frac{c}{2\pi/k} = \frac{(2n+1)\pi c}{2\pi a} = (2n+1) \frac{c}{2a} \quad n=0,1,2,\dots \quad (4)$$

式中: a 为垂直电场入射方向孔缝长边的长度; c 为自由空间的光速。同时定义 f_0 为耦合共振基频。表 1 列出了由式(4)计算的解析值和仿真值之差,其相对差小于 2%,FIT 算法可达到较高的计算精确度。

表 1 $a=1.5$ m, $b=2$ mm 的共振频率点
Table 1 Resonance frequency ($a=1.5$ m, $b=2$ mm)

resonance frequency	f_0/GHz	f_1/GHz	f_2/GHz	f_3/GHz
analytic value	0.100 0	0.300 0	0.500	0.700 0
simulation value	0.100 5	0.301 5	0.501	0.7095
difference value	0.5%	0.5%	0.2%	1.4%

2.3 嵌套腔体平行分布窄缝共振特性研究

本节参数设置同 2.2,采用内外窄缝垂直分布的嵌套腔体,讨论核电电磁脉冲与系统的耦合效应。

图 7(a)核电电磁脉冲通过窄缝耦合在外窄缝中心附近出现场增强现象。入射波经外窄缝耦合,主脉冲进入腔体 Q_1 并在内部来回振荡,受到腔体的调制,再经内窄缝耦合进入腔体 Q_2 ,内窄缝处电场峰值为 7.17 V/m。由于内窄缝与电场方向垂直,即 $\theta=90^\circ$ 时耦合的电磁能量最小,对飞行器装载的电子器件的影响可以忽略。图 7(c)耦合进腔体的电磁波在传输的过程中电磁能量损耗,在 $L=50$ cm,即在内窄缝处电磁能量大大降低,接近 0 V/m。图 7(d)中,内窄缝处的耦合函数 η 低于 -40 dB,没有发现共振现象。

3 结论

本文对核电电磁脉冲激励下,入射到腔体开有矩形孔缝的耦合效应进行仿真分析,主要分析了 $\theta=0^\circ$ 时,单层腔体在核电电磁脉冲垂直入射平面内耦合系数的大小及嵌套腔体内、外窄缝相对位置对耦合特性的影响。研究表明:核电电磁脉冲在窄缝处产生强烈共振,得到了孔腔共振效应和孔缝增强效应;嵌套腔体两窄缝平行分布时,在内窄缝处将发生第二次场增强效应;而嵌套腔体两窄缝垂直分布时,内窄缝处电磁能量大大降低,对飞行器装载的电子元器件的损伤几乎可以忽略不计。

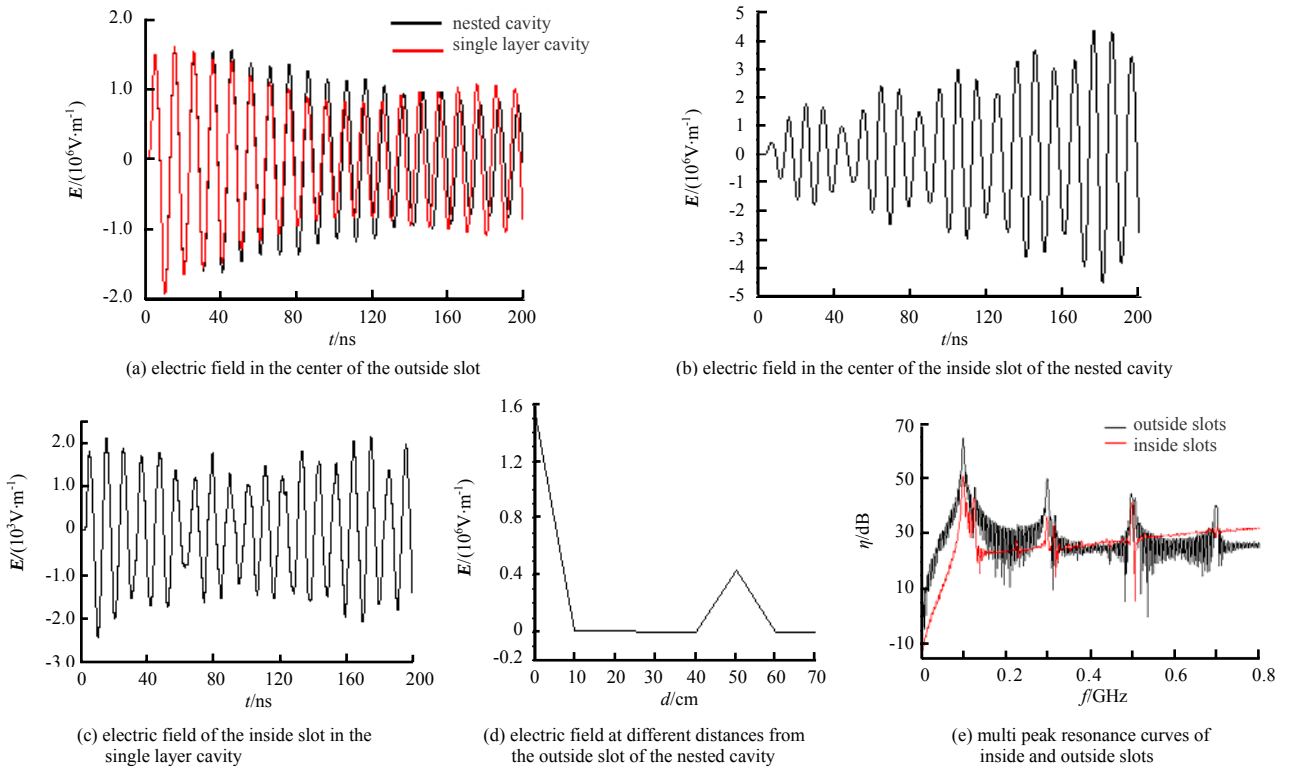


Fig.6 Electric field value and coupling coefficient of nested cavity

图 6 嵌套腔体电场值及耦合系数

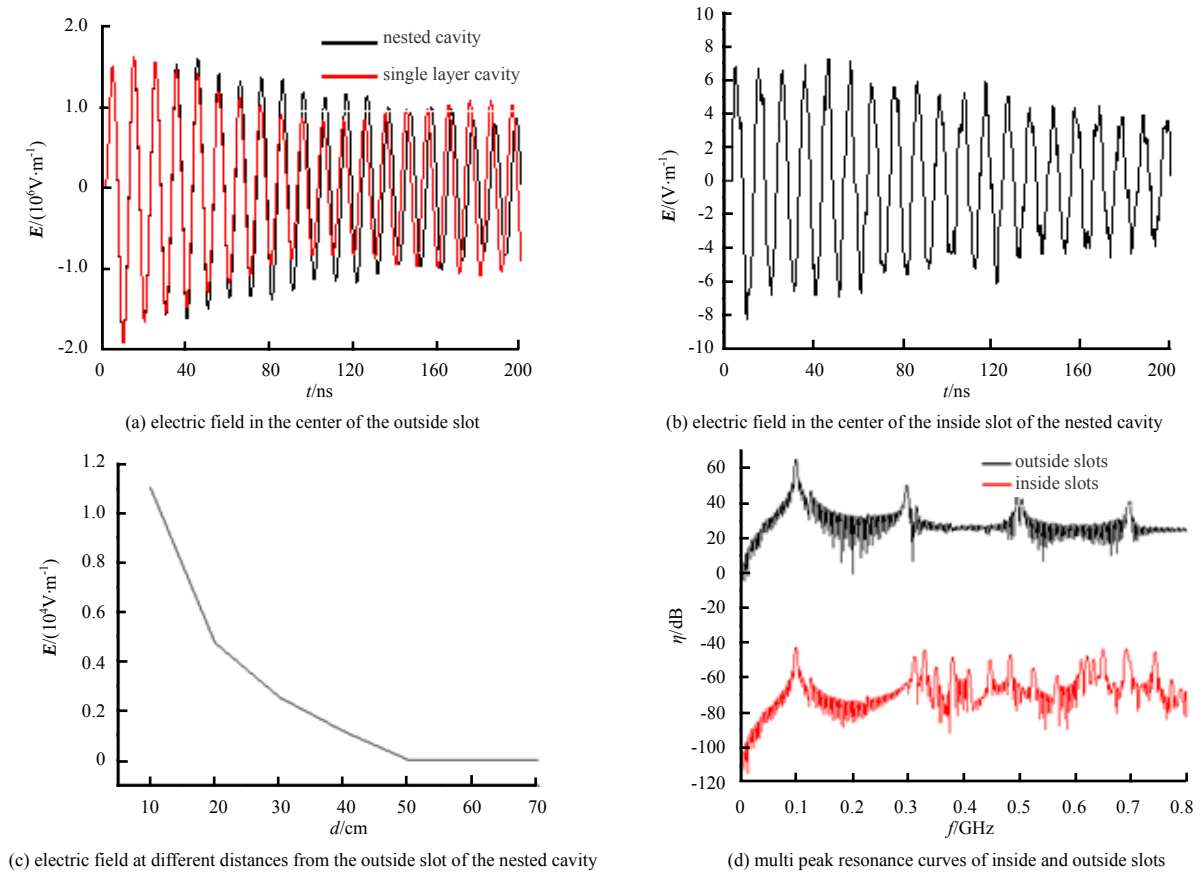


Fig.7 Electric field values and coupling coefficients of nested cavity

图 7 嵌套腔体电场值及耦合系数

参考文献:

- [1] SWEGLE J A, BENFORD J. High-power microwave at 25 years: the current state of development[C]// Proceedings of the 12th International Conference on High-Power Particle Beams. Haifa, Israel: [s.n.], 1998: 149–152.
- [2] SIEGER G E, LEE J H, MAYHAL D J. Computer simulation of nonlinear coupling of high-power microwaves with slots[J]. IEEE Transactions on Plasma Science, 1989, 17(4): 616–621.
- [3] ROBINSON M P, BENSON T M, CHRISTOPOULOS C, et al. Analytical formulation for the shielding effectiveness of enclosures with apertures[J]. IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility, 1998, 40(3): 240–248.
- [4] WANG Jianguo, YU Hanqing, LIU Guozhi, et al. Numerical studies on resonant and enhancement effects for coupling of microwave pulses into narrow slots[J]. Journal of Electronics(China), 1998, 15(2): 174–181.
- [5] 江文灿. 强电磁脉冲对带分布阵列孔缝机箱的毁伤效应研究[D]. 南京: 南京理工大学, 2010. (JIANG Wencan. Study on the damage effect of strong electromagnetic pulse on the case with distributed array slots[D]. Nanjing, China: Nanjing University of Science and Technology, 2010.)
- [6] 周飞. 电磁脉冲通过屏蔽体孔缝的耦合特性研究[D]. 郑州: 郑州大学, 2011. (ZHOU Fei. Coupling characteristics research of the EMP through the shield's aperture[D]. Zhengzhou, China: Zhengzhou University, 2011.)
- [7] 卢新科. 电磁脉冲的耦合及防护[D]. 西安: 西安电子科技大学, 2009. (LU Xinke. Coupling and protection of electromagnetic pulse[D]. Xi'an, China: Xidian University, 2009.)
- [8] 马飞. 微波脉冲与带缝非金属腔体、金属腔体耦合的研究[D]. 长沙: 国防科学技术大学, 2008. (MA Fei. Study on the coupling microwave pulses into the nonmetal and metal cavities with slots[D]. Changsha, China: National University of Defense Technology, 2008.)
- [9] LIU Qiang, QIAN Baoliang, ZHU Zhanping. Numerical study on coupling of microwave pulses into different shaped cavities through slots[J]. High Power Laser and Particle Beams, 2009, 21(12): 1859–1865.
- [10] 刘强, 朱占平, 钱宝良. 微波脉冲与带缝嵌套腔体耦合的研究[J]. 高电压技术, 2007, 33(10): 122–125. (LIU Qiang, ZHU Zhanping, QIAN Baoliang. Study on the coupling of microwave pulses into nested cavities through slots[J]. High Voltage Technology, 2007, 33(10): 122–125.)
- [11] 朱占平, 钱宝良. 利用互补天线原理求解孔缝的共振性能[J]. 强激光与粒子束, 2009, 21(4): 536–540. (ZHU Zhanping, QIAN Baoliang. Resonant performance of microwave slot coupling derived using complementary antenna theory[J]. Intense Laser and Particle Beams, 2009, 21(4): 536–540.)
- [12] YANG Dan, LIAO C, CHEN W. Numerical solution on coupling of UWB pulse into a rectangular cavity through slots[J]. International Symposium on Antennas, 2003, 19(12): 815–818.
- [13] ZHU Zhanping, WANG Honggang, QIAN Baoliang. Numerical simulation of microwave-slot coupling into a rectangular cavity with an interior structure[C]// Microwave Conference Proceedings(CJMW). [S.l.]: IEEE, 2011: 1–4.
- [14] YEE K S. Numerical solution of initial boundary value problems involving Maxwell equations in isotropic media[J]. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 1966, 14(3): 302–307.

作者简介:



倪 勤(1988–), 女, 江苏省南通市人, 硕士, 从事强电磁脉冲效应研究. email: 719326096@qq.com.

魏志勇(1962–), 男, 兰州市人, 教授, 从事空间辐射、空间辐射探测器技术、辐射剂量学、辐射防护研究.

韩梦涛(1991–), 男, 河南省平顶山市人, 在读硕士研究生, 从事辐射剂量学研究.

王 静(1991–), 女, 江苏省扬州市人, 在读硕士研究生, 从事强电磁脉冲效应研究.

朱庆伟(1990–), 男, 江苏省盐城市人, 在读硕士研究生, 从事辐射剂量学研究.

方美华(1982–), 女, 浙江省湖州市人, 讲师, 从事空间辐射及效应、空间辐射探测研究.