

◎工程与应用◎

多形状孔缝耦合分析及其实验研究

谭旭¹, 宋祖勋^{1,2}, 朱光耀¹TAN Xu¹, SONG Zu-xun^{1,2}, ZHU Guang-yao¹

1.西北工业大学 电子信息学院, 西安 710072

2.西北工业大学 365 所, 西安 710072

1.Electronic Information Department, Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710072, China

2.No.365 Institute, Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710072, China

E-mail: mayliyuchuan@yahoo.com.cn

TAN Xu, SONG Zu-xun, ZHU Guang-yao. Analysis and experimental studies on multiform aperture coupling. Computer Engineering and Applications, 2009, 45(21): 206-208.

Abstract: The electromagnetic coupling of a plane wave through a small aperture in conducting surface is used as the typical researching object, and then circle, square and rectangle are selected to build a model of aperture coupling of electromagnetic wave. Firstly, in terms of the Moment Method (MoM), the electromagnetic coupling through a small aperture on conducting surfaces is analyzed. The EM energy transmission coefficient through the aperture on conducting surfaces is calculated. Several coupling models are built to validate its effectiveness; the experimental results are shown in good agreement with each other.

Key words: Moment Method (MoM); the coupling of aperture; Electromagnetic (EM) energy transmission coefficient

摘要: 以平板孔缝耦合为典型对象, 选取圆形、正方形、长方形孔形, 建立了无限大平板的小孔耦合模型, 然后利用矩量法对孔缝耦合模型进行求解分析, 得到了表征电磁耦合强弱的能量传输系数。为验证方法的有效性, 搭建了实验系统对不同的孔缝类型进行了测试。结果表明, 电磁波通过不同形状孔缝耦合过去的能量和孔缝的面积以及电磁波的入射角度有密切的关系。

关键词: 矩量法; 孔缝耦合; 电磁能量传输系数

DOI: 10.3778/j.issn.1002-8331.2009.21.059 文章编号: 1002-8331(2009)21-0206-03 文献标识码: A 中图分类号: TN752.1

1 引言

对于许多电子系统而言, 孔缝耦合是电磁波进入系统的主要途径之一, 即所谓的“后门”耦合。所以在军事领域, 孔缝耦合问题的研究也是武器系统抗干扰加固技术的关键环节^[1]。目前, 电磁波通过孔或缝隙的研究方法多基于模型简化的近似解^[2-3]。其中有对于无限薄导体平板上的电小尺寸孔缝, 其散射特性可由等效电、磁偶极子进行描述^[4]。而后对于有限厚度的孔缝出现了模式匹配法^[5], 文献[6]采用实验的方法研究了矩形孔缝耦合, 但并未从理论方面进行分析。该文利用矩量法及等效原理^[7], 结合自由空间并矢格林函数分析并计算了平面波通过小孔的能量耦合系数, 并采用试验结果进行验证, 综合分析了不同形状孔缝的耦合, 此结果可用于系统电磁兼容问题^[8-9]的研究。

2 平板孔缝耦合模型

如图 1 无限大平板导体有一方孔, 假设平面波照射。无限大电平板将空间分为 a 、 b 两个区域, 激励平面波在 a 区。其中 U_i 是极化矢量, 而 k 是波矢量, S_a 代表 a 区小孔面积。将孔用理

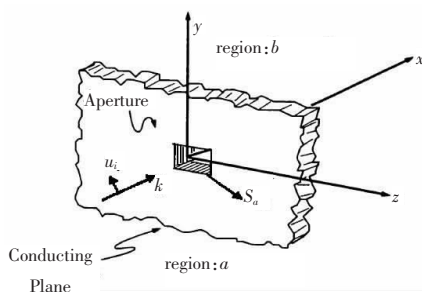


图 1 平板的孔缝耦合

想导体封闭, 采用等效磁流法将其归结为两个独立区域, 在孔处放置一磁流 M 。对 a 区有

$$M = \hat{z} \times E \quad (1)$$

式中, \hat{z} 是法向单位矢量, E 是孔缝处的电场。在 b 区的孔处放置 $-M$ 。由等效定理可得:

$$H_i^a(M) + H_i^b = H_i^b(-M) \quad (2)$$

将其改写为

基金项目: 国家部委预研基金资助项目 (the Pre-Research Foundation of China Ministries and Commissions)。

作者简介: 谭旭 (1983-), 男, 研究生, 研究方向: 电磁场与微波应用技术。

收稿日期: 2009-01-05 修回日期: 2009-03-12

$$H_i^a(\mathbf{M}) + H_i^b(\mathbf{M}) = -H_i^i \quad (3)$$

式中, H_i^i 表示入射场磁场, $H_i^a(\mathbf{M})$ 表示在区域 a 的孔处由磁流 \mathbf{M} 所产生的磁场; $H_i^b(-\mathbf{M})$ 表示在区域 b 的孔处由磁流 $-\mathbf{M}$ 所产生的磁场。这三个量都是在孔导体封闭下定义的。将孔进行网格剖分, 利用矩量法求解(3)式中的磁流 \mathbf{M} 。

首先将磁流 \mathbf{M} 在 S_a 孔上用矢量基函数展开:

$$\mathbf{M} = \sum_{n=1}^N V_n \mathbf{M}_n \quad (4)$$

式中, \mathbf{M}_n 表示磁流展开函数, V_n 为磁流展开函数的系数, N 为剖分网格数。采用 Galerkin 法, 定义内积为:

$$\langle u, v \rangle = \iint_{S_s} u \cdot v \, ds \quad (5)$$

令 $\mathbf{I} = 2 \iint_{S_s} \mathbf{M} \cdot \mathbf{H}_i^i \, ds$, 把方程(3)写成欧姆定律的形式:

$$(Y^a + Y^b)V = \mathbf{I} \quad (6)$$

设 $Y = Y^a + Y^b$, 其中 Y^a 和 Y^b 分别表示 a 区和 b 区的广义导纳。 V 是磁流展开系数, \mathbf{I} 是口径面封闭时入射磁场的切向分量。

3 等效磁流求解

定义权函数 $w = \begin{cases} x+y, r' \in S_i \\ 0, r' \in S_j \end{cases}$, S_i 代表划分网格面积。式(3)做

内积得:

$$\begin{cases} \langle V_x, H_x^a \rangle + \langle V_x, H_x^b \rangle = \langle V_x, -H_x^i \rangle \\ \langle V_y, H_y^a \rangle + \langle V_y, H_y^b \rangle = \langle V_y, -H_y^i \rangle \end{cases} \quad (7)$$

写成矩阵形式, 即

$$\begin{bmatrix} H_x^a & H_y^a \\ H_x^b & H_y^b \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_x \\ V_y \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} H_x^b & H_y^b \\ H_x^a & H_y^a \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_x \\ V_y \end{bmatrix} = -\begin{bmatrix} H_x^i & \\ & H_y^i \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_x \\ V_y \end{bmatrix} \quad (8)$$

由并矢格林函数得

$$H_x^a = \frac{-2jk}{z_0} \iint_{S_s} G_{\alpha} \cdot V_x \, ds \quad (9a)$$

$$H_y^a = \frac{-2jk}{z_0} \iint_{S_s} G_{\alpha} \cdot V_y \, ds \quad (9b)$$

其中角标 α 为 a 时代表 a 区, 为 b 时代表 b 区。

将式(9a)、(9b)代入式(7), 利用点匹配法可得二阶矩阵方程:

$$\begin{bmatrix} Y_{11} & Y_{12} \\ Y_{21} & Y_{22} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_x \\ V_y \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} I_x \\ I_y \end{bmatrix} \quad (10)$$

其中 $G = \frac{e^{-jk|r-r'|}}{4\pi|r-r'|}$;

若 $f \neq s$

$$[Y]_{fs} = \begin{bmatrix} -\frac{j2k}{z_0} \iint_s \left[G + \frac{1}{k^2} \frac{\partial^2 G}{\partial x^2} \right] ds & -\frac{j2k}{z_0} \iint_s \left[\frac{1}{k^2} \frac{\partial^2 G}{\partial x \partial y} \right] ds \\ -\frac{j2k}{z_0} \iint_s \left[\frac{1}{k^2} \frac{\partial^2 G}{\partial y \partial x} \right] ds & -\frac{j2k}{z_0} \iint_s \left[G + \frac{1}{k^2} \frac{\partial^2 G}{\partial y^2} \right] ds \end{bmatrix} \quad (11)$$

若 $f = s$

$$Y_{ff} = \begin{bmatrix} Y_{ff}^{11} & Y_{ff}^{12} \\ Y_{ff}^{21} & Y_{ff}^{22} \end{bmatrix} \quad (12)$$

下标 f 和 s 分别表示观察点和源点, 由于积分出现奇异性, 进行特殊处理^[10-11]后得:

$$Y_{ff}^{11} = \frac{-2j}{kz} \iint_{S_0} \frac{\partial^2 G}{\partial x^2} dS_0 - \frac{2jk}{Z_0} \iint_{S_0} G dS_0 = -\frac{2jk}{Z_0} \iint_{S_0} G dS_0 + I_{1\text{ex}} \quad (13)$$

$$\text{其中 } I_{1\text{ex}} = \frac{2}{\pi} \int_0^{\pi/4} \frac{-1}{jk} e^{-\frac{jk\Delta}{\cos\theta}} d\theta - \frac{j}{k} \circ$$

因此小孔感应磁流为:

$$\begin{bmatrix} M_x \\ M_y \end{bmatrix} = [Y]_{fs}^{-1} \begin{bmatrix} I_x \\ I_y \end{bmatrix} \quad (14)$$

$$\text{其中: } \begin{bmatrix} I_x \\ I_y \end{bmatrix} = 2 \begin{bmatrix} H_x^i \\ H_y^i \end{bmatrix} \circ$$

4 能量传输系数

通过小孔耦合电磁波能量传输系数定义为从外部通过小孔耦合到内部区域电磁能量的平均功率与入射波平均功率之比。通过小孔耦合功率:

$$p_{\text{trans}} = 2\text{Re} \iint_{S_s} (E_y^b H_z^{b*} - E_z^b H_y^{b*}) ds \quad (15)$$

将上式写成矩阵形式:

$$p_{\text{trans}} = S_a \cdot \text{Re} \{ [V] [Y]^{-1} [V]^* \} \quad (16)$$

假设理想平面波入射, 口径面两切向单位矢量分别为 \mathbf{x} 、 \mathbf{y} , 则第 i 个面片中心的入射磁场 H_x^i 、 H_y^i 为:

$$H_x^i = Y_0 (\sin\beta \cos\theta \cos\phi + \cos\beta \sin\phi) \cdot e^{jk_0 \sin\theta(x \cos\phi + y \sin\phi)} \quad (17)$$

$$H_y^i = Y_0 (\sin\beta \cos\theta \cos\phi + \cos\beta \sin\phi) \cdot e^{jk_0 \sin\theta(x \cos\phi + y \sin\phi)} \quad (18)$$

上式中 β 为入射波 E_i 与方位角 θ 的夹角。当 $\beta=0$ 时, $H_z^i=0$, 同样, 当 $\beta=\pi/2$ 时, $E_z^i=0$ 。

当入射波为平面波时, 入射的平均功率为:

$$p_{\text{in}} = Z_0 |H^i|^2 S_a \cos\theta_i \quad (19)$$

能量传输系数 $t = p_{\text{trans}} / p_{\text{in}}$ 。

5 平板孔缝耦合的实验验证

5.1 测试系统

为了验证该算法对不同孔型的耦合能力, 实验采用将信号源的频率设置在 1 000 Hz 到 3 000 Hz 之间, 一块尺寸为 1.5 m × 1.5 m 的正方形铝板模拟无限大导电平面, 平板的厚度为 3 mm, 测量在中心开 200 mm × 200 mm 方孔、直径 20 mm 圆孔和 200 × 50 mm 长方形孔的三种孔缝; 测试系统的配置如图 2(a) 所示, 信号源产生微波信号, 通过宽带天线发射水平极化波, 在导电板的另一侧, 用标准探头接收场强。发射天线和测量探头正对, 并相距 3 m, 功率设置在可检测的强度, 在同一轴线上, 采用场强计记录信号强度; 校准时, 将导电平板移开, 发射天线和测量探头的位置不变, 采用同样的方法记录空间传输数据。测试系统照片见图 2(b)。

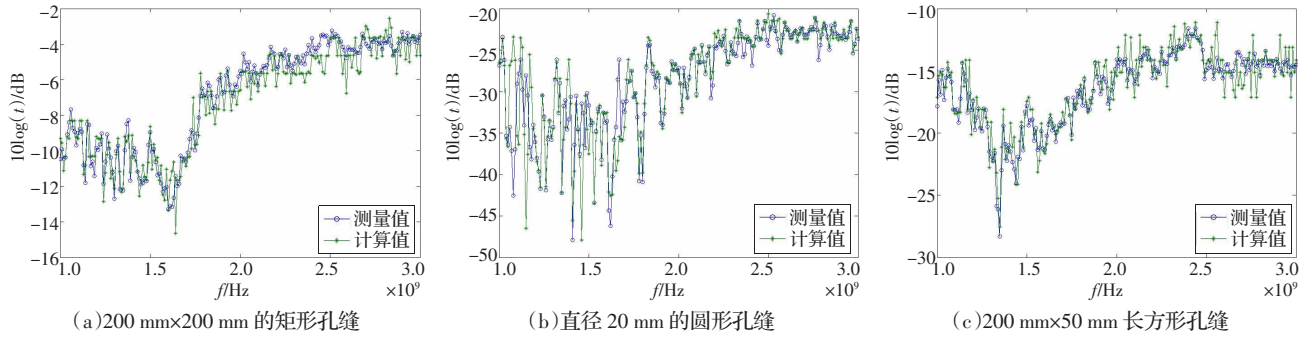


图3 三种孔形的传输系数随频率变化关系

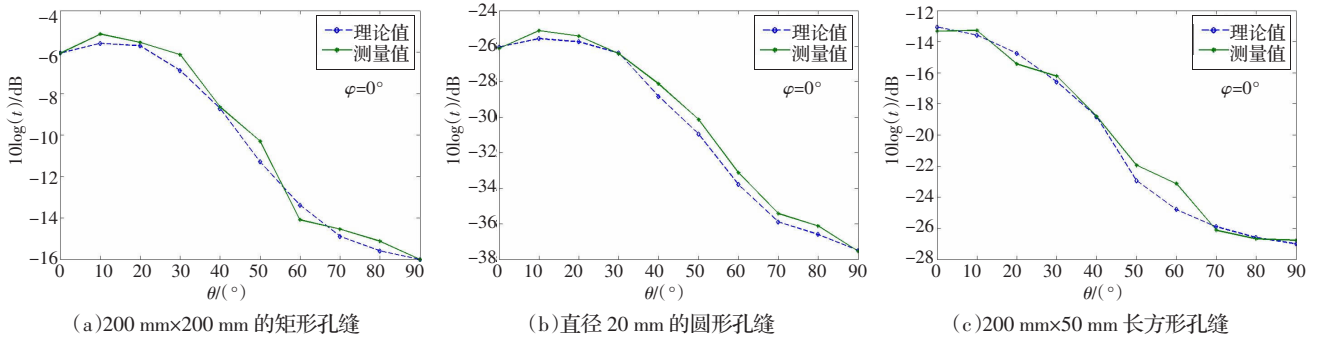


图4 三种孔形的传输系数随角度变化关系

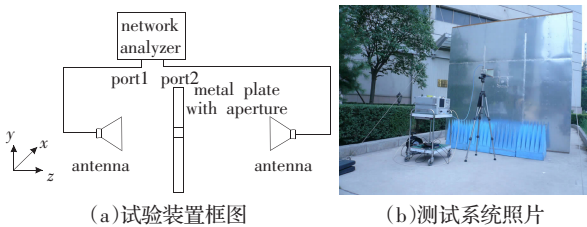


图2 平板孔缝耦合测试原理图及实测系统照片

5.2 实测数据分析

从图3中可以看出,三种孔型的计算和测量结果基本一致,表明了采用矩量法对孔缝耦合分析的有效性。对于测量结果中存在明显的起伏,主要是由测量噪声引起;在低频段由于试验用铝板并非无限大,而发射天线波束较宽,这样会有较多的能量从铝板的边缘绕射过去。另外因为方孔的面积比圆孔的面积大的多,通过孔缝耦合过去的能量也高出将近20个dB,结果和两个孔面积的比值相近,明显看出孔缝耦合传输系数和孔的面积成正比。

图4给出了入射波频率为2 GHz垂直入射情况下三种形状孔缝在一定俯仰角下的能量传输系数,从图中可以看出,对于三种孔型在相同极化波入射的情况下,其能量传输系数走势基本一致。从图中所表示传输系数和角度 φ 、 θ 的关系,可以反映电磁波通过孔缝的耦合能量随着入射波的角度变化而变化,能量传输系数是入射波和孔在同一轴线上时能达到最大值,所以该方法适合于任意形状孔缝耦合能量分析。

6 结论

分析全金属机身的飞行器,机身表面存在的口盖、板块对接等产生的细小孔缝,以及设备装配、操作机构可能带来的孔缝,它是电磁波进入系统的主要耦合途径,是电子设备主要干扰源之一,因而也是电磁兼容研究的重要内容,该文以平面波

为例,基于矩量法计算了正方形、长方形和圆形孔缝耦合,分析了通过导体表面上小孔电磁能量传输系数,并与实际测量的结果进行了比较,计算与测量结果均表明,在电磁波垂直入射的情况下,三种形状孔缝的能量传输系数走势基本一致,在入射波和孔在同一轴线上时能达到最大值,并且从三种孔型能量传输系数的能量级的差异可以看出它的大小受到孔缝面积大小的影响,这在航空航天飞行器EMC工程研究中有重要应用价值。

参考文献:

- [1] 王建国.高功率微波脉冲孔缝耦合的理论和数值模拟研究[D].西安:西安电子科技大学,1997.
- [2] 李旭,俞集辉.地面附近开口箱体孔缝耦合效应的数值仿真[J].系统仿真学报,2007,19(6):1217-1219.
- [3] 张慧文,史小卫.孔缝耦合问题求解方法分析[J].电子科技,2004(10):26-37.
- [4] Kiang J F.Wave penetration through slits on stacked thin plates[J].IEEE Trans on MTT,1998,46(7):889-893.
- [5] Auckland D T,Harrington R F.Electromagnetic transmission through a filled slit in a conducting plane of finite thickness[J].IEEE Trans on MTT,1978,26(7):499-505.
- [6] 周金山,刘国治,王建国.矩形孔缝耦合特性实验研究[J].强激光与粒子束,2003,15(12):1228-1232.
- [7] Harrington R F.A generalized network formulation for aperture problem[J].IEEE Trans on AP,1976,24(6):870-873.
- [8] 何伟,李德,华薛雷.三维图像处理设备的电磁兼容性设计[J].计算机工程与应用,2005,41(8):201-227.
- [9] 孙艳.军用便携式加固计算机的电磁屏蔽设计[J].计算机工程与应用,2008,44(1):238-239.
- [10] Douglas B M.The singularity integral problem in surface[J].IEEE Trans on AP,1983,31(3):507-509.
- [11] 聂小春.电磁散射混合方法及相关问题研究[D].西安:西安电子科技大学,2001.