

开缝矩形腔屏蔽特性的研究

范颖鹏 杜正伟 龚克

(清华大学微波与数字通信技术国家重点实验室 北京 100084)

摘要: 该文计算了在矩形腔上开有单缝时, 缝长变化对所激励的屏蔽腔中最低模式的幅度和频率特性的影响。同时, 采用时域-频域联合分析的方法, 对屏蔽腔内观察点时域波形进行了分析, 得到了不同频率分量在时域上的变化特性, 以及缝长变化对它们的影响。

关键词: 屏蔽腔, 开缝, 屏蔽效应, 时域-频域联合分析

中图分类号: TN154 文献标识码: A 文章编号: 1009-5896(2005)12-2005-03

Analysis on Shielding Effectiveness of Rectangular Cavity Perforated with a Single Slot

Fan Ying-peng Du Zheng-wei Gong ke

(State Key Laboratory on Microwave & Digital Communications, Tsinghua University, Beijing 100084, China)

Abstract The shielding effectiveness of a rectangular enclosure perforated with a slot is analyzed and the influences of the slot length on the magnitude and frequency of the lowest mode stimulated by the slot are given. Joint time-frequency analysis is also applied to explore the time domain waveform of every frequency component at observation point. The influence of the slot length to the time domain characteristics of different resonant mode is also obtained.

Key words Shielding enclosure, Slot, Shielding effectiveness, Joint time-frequency analysis

1 引言

电磁干扰在现代社会正引起越来越多的重视。严重的电磁干扰可能会影响电子设备的正常工作。屏蔽腔是用来保护电子设备的一种有效方法。但是, 在屏蔽腔上有一些不可避免的孔缝, 如电源线的连接孔, 通风孔, 或其它用途的开孔, 却为电磁干扰进入到屏蔽腔内打开了“后门”。外来的电磁干扰会通过这些孔缝耦合进屏蔽腔内, 进而影响电子设备的正常工作。因此, 研究开有孔缝的屏蔽腔的耦合特性, 预测可能存在的电磁干扰, 是非常有意义的。

对屏蔽腔的屏蔽效应的研究已经有了很多的工作^[1,2], 使用的方法也多种多样。如使用时域有限差分法(FDTD)来计算不同入射角度和极化角度下的屏蔽效应^[3,4], 以及干扰源在屏蔽腔内时对外的辐射问题^[5]。矩量法(MOM)^[6,7]也被用来分析屏蔽腔的特性。此外, 等效电路法被用于计算屏蔽腔内只存在单模时的情况^[8], 它的计算速度快, 便于研究屏蔽效应随各种参数的变化特性。但是为了保证屏蔽腔内只存在最低模, 它所应用的频率范围较低。

本文采用时域数值仿真, 侧重分析了屏蔽腔上开有单缝

的情况。研究了当缝长发生变化时, 在时域和频域上的耦合特性的相应变化。同时, 使用了时域-频域联合分析(JTFA)^[9]的方法, 得到了屏蔽腔内不同频率分量随时间的变化情况。和单独的时域和频域分析方法相比, 时域-频域联合分析在分析屏蔽腔的耦合特性时更加直观和有效。

2 屏蔽腔计算模型

考虑如图 1 所示的屏蔽腔, 坐标原点(0,0,0)位于腔的中心, 在 x, y, z 方向上分别用 a, b, c 来代表腔的长度。在计算中, 取 $a=300\text{mm}, b=200\text{mm}, c=300\text{mm}$ 。在腔的前壁上开有矩形缝。在这里, 固定缝的宽度为 $w=10\text{mm}$ 。入射波正入射在腔的前壁, 其电场方向如图 1 所示。

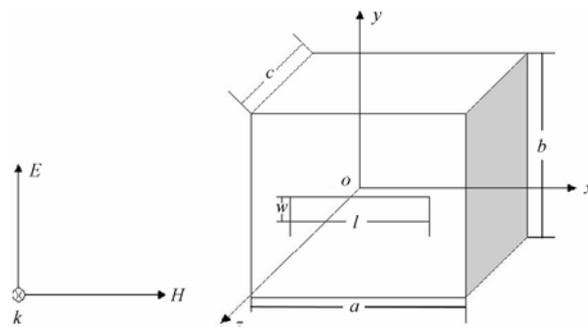


图 1 屏蔽腔结构及入射场方向示意图

在计算中采用平面波入射,其时域波形为高斯脉冲,频率范围为0.1~2.5GHz。此波源的时域及频域波形如图2所示。

在本文中计算结果为随频率变化的穿透系数,其定义如下:

$$p = E / E_i \quad (1)$$

其中 E 为屏蔽腔内观察点处的场强, E_i 为屏蔽腔不存在时该点的场强。在此,采用穿透系数作为表征屏蔽腔耦合特性的物理量,是因为它的计算结果可以更方便地观察腔内模式被激励的情况。

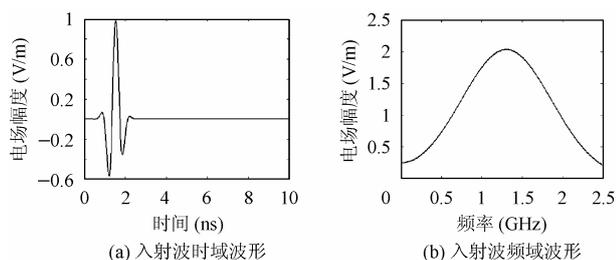


图2 入射波时域和频域波形

3 计算结果及分析

图3是当窄缝长度 $l=40\text{mm}$ 时,在屏蔽腔中心(0,0,0)处电场的时域和频域波形。图4是当窄缝长度 $l=140\text{mm}$ 时,在屏蔽腔中心处电场的时域和频域波形。图3(a)可以看出,入射的电磁脉冲在屏蔽腔内来回反射,基本无损耗,这说明当缝长 l 较小时,电磁场通过孔缝的辐射小,其时域波形基本无衰减;而频域波形表明,存在几个较强的谐振峰,第一个谐振峰对应的频率为0.707GHz。屏蔽腔未开孔缝时,其最低模式 TE_{101} 对应的本征频率也正好为0.707GHz,这说明这些谐振峰都对应屏蔽腔的本征频率,相应的本征模幅度也较大;而在非本征频率处,激励起来的电场幅度很小。这说明对于宽带的电磁干扰,在屏蔽腔的本征频率处危害较大。当缝长变大至 $l=140\text{mm}$ 时,图4(a)表明时域波形有明显的衰减,说明电磁场通过长缝的辐射变大,能量泄漏较大。频域结果表明,谐振峰的宽度变宽,这说明此时屏蔽腔已不是理想谐振腔,频率选择性变差,本征频率附近的模式也能激励起来。而且缝越长,进入到屏蔽腔内的场也越大。图4所示 $l=140\text{mm}$ 时,可以看出时域的电场幅度是 $l=40\text{mm}$ 的10倍左右。

比较图3和图4所示的频域波形,还可以发现,当孔较小时,激励起来的高阶模式的幅度比低价模式要大,而当缝长变大时,最低模的幅度比其它高阶模式都大,这说明缝长较短时,屏蔽腔接近理想谐振腔的条件,高阶模式也容易激励起来。而缝长较大时,理想谐振腔的条件被破坏,高阶模式不易被激励,相比之下,最低模更容易被激励起来。而且随着缝长的增加,最低模的频率也会降低。 $l=40\text{mm}$ 时,最

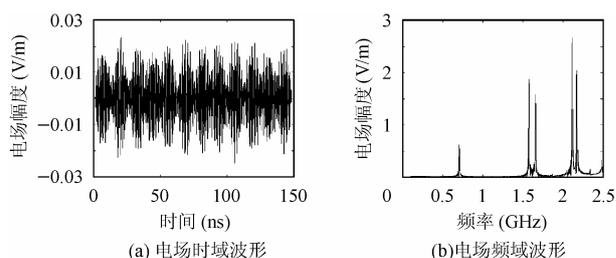


图3 $l=40\text{mm}$, (0,0,0)处电场时域和频域波形

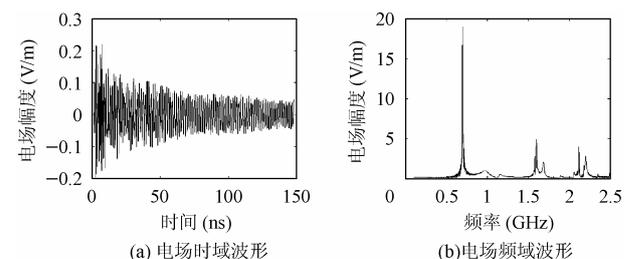


图4 $l=140\text{mm}$, (0,0,0)处电场时域和频域波形

低模的频率为0.707GHz,而 $l=140\text{mm}$ 时,最低模的频率变为0.697GHz。

为了研究最低模的幅度及频率随缝长的变化规律,令缝长从 $l=20\text{mm}$ 变化到 $l=200\text{mm}$,间隔为10mm。分别计算出最低模的幅度和频率,如图5所示。横坐标为缝长对屏蔽腔前壁长的归一化长度,即 l/a 。图5(a)结果表明,当窄缝长度 l 为腔壁长 a 的一半时,激励起来的最低模幅度最大,亦即存在一个缝长 l 对腔壁长 a 的谐振峰。图5(b)所示频率变化的结果表明,当 $l < 0.4a$ 时,频率变化较慢,而当 $0.4a < l < 0.7a$ 时,频率随缝长的变化非常大。

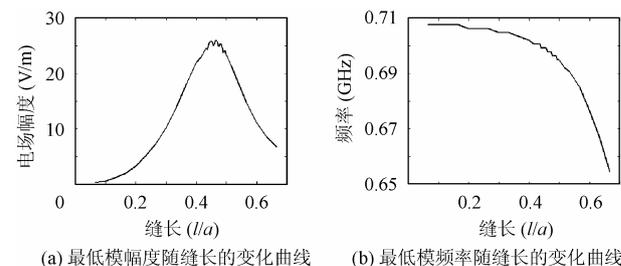


图5 最低模幅度和频率随缝长的变化曲线

为了验证这一结果,改变屏蔽腔的尺寸为 $a=200\text{mm}$, $b=120\text{mm}$, $c=250\text{mm}$,保持缝的宽度不变,仍为 $w=10\text{mm}$,令缝长从 $l=20\text{mm}$ 变化到 $l=140\text{mm}$,间隔仍为10mm。所得结果如图6所示。结果表明,仍然是当窄缝长度 l 为腔壁长 a 的一半时,激励起来的最低模幅度最大,而且频率的变化规律也基本不变。这个结果对于屏蔽腔的设计是非常有用的。这说明在设计屏蔽腔时,应尽量避免开缝的长度为腔壁长的一半。同时,要合理设计屏蔽腔和开缝的尺寸,使它最低模的频率尽量远离电路板的工作频率。

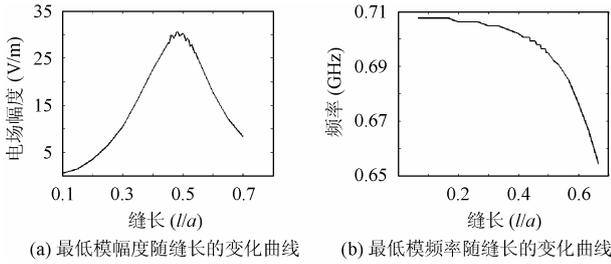


图 6 改变屏蔽腔尺寸后最低模幅度和频率随缝长的变化曲线

4 时域-频域联合分析

在处理数值仿真所得到的时域波形数据时,时域-频域联合分析是一种非常有效的方法。它可以得到每个频率分量随时间的变化关系,同时得到时域和频域的变化特性。

对图 3 所示时域波形应用时域-频域联合分析,所得结果如图 7 所示。从结果可以看到每个频率分量随时间的变化情况。由于开孔小,辐射出去的电磁场很少,最低模随时间基本不衰减。对应频率为 1.576GHz 谐振峰,它的幅度随时间变化有起伏,这是因为由于高阶模式频率相差很小,对应此谐振峰实际上有两个模式,由于这两个模式的频率差别非常小,所以在图 3(b)的频域波形中,只能看到一个谐振峰。而在时域-频域联合分析的结果中,它们的表现就像一个被调制的波形。对于频率为 2.115GHz 的谐振峰也是这个原因。而当缝长增加时,频率偏差加大,这两个谐振峰也变得可以在频谱图上分辨出来,这一点可以在图 4(b)的长缝结果中看出。由于缝长的增加使得激励起来的模式的频率发生偏移,可以看到在 1.58GHz 处,短缝时的一个谐振峰已经变成了长缝时的两个谐振峰。这个结果证明了时域-频域联合分析的有效性。

对图 4 所示时域波形应用时域-频域联合分析的结果如图 8 所示。可以看到,由于缝长的增加,电磁场通过窄缝的辐射增加,最低模随着时间在缓慢衰减,而高阶模式也表现出了不同程度的衰减。可见,时域-频域联合分析可以同时得到不同模式在时域和频域上的不同特性,它是一种非常直观和有效的分析方法。

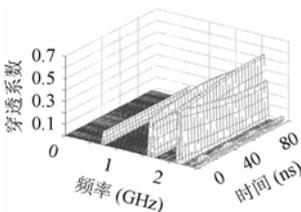


图 7 $l=40\text{mm}$, (0,0,0)处电场的时域-频域联合分析结果

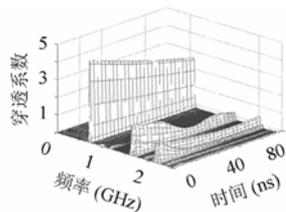


图 8 $l=140\text{mm}$, (0,0,0)处电场的时域-频域联合分析结果

5 结束语

对开有窄缝的屏蔽腔穿透系数的计算表明,在屏蔽腔的本征模式处会激励起较强的谐振峰。对于长缝的情况,耦合进腔内的电磁场大于短缝的情况。随着缝长的增加,屏蔽腔

内的最低模在缝长为腔壁长度一半时有最大的幅度。因此,在设计屏蔽腔时应尽量避免这种缝长谐振的情况出现。计算结果还表明,最低模式的频率会随缝长的增加而降低,特别是 $l>0.4a$ 时,频率降低的速率非常快。

在本文中还使用了时域-频域联合分析对仿真得到的时域数据进行了分析。与单独的时域或频域分析相比,时域-频域联合分析可以展示更丰富的时域和频域变化特性。当缝长变化时,不同的频率分量在时域上的不同变化规律可以直接显示出来。缝长较短时,激励起来的模式的幅度基本无衰减。而当缝长变长时,则可以明显看出在时域上的衰减。而且当两个模式的频率非常接近时,也可以由时域-频域联合分析的结果看出。因此,时域-频域联合分析在处理数值仿真所得结果时,是一种非常直观有效的方法。

参考文献

- [1] Li M, Drewniak J L, Radu S, et al.. An EMI estimate for shielding-enclosure evaluation. *IEEE Trans. on Electromagn. Compat.*, 2001, 43(3): 295 – 303.
- [2] 王建国, 屈华民, 范如玉, 等. 孔洞厚度对高功率微波脉冲耦合的影响. *强激光与粒子束*, 1994, 6(2): 282 – 286.
- [3] Belokour I, LoVetri J, Kashyap S. Shielding effectiveness estimation of enclosures with apertures. *IEEE Int. Symp. Electromagn. Compat.*, Washington, DC, USA: 2000, Piscataway, 2000: 855 – 860.
- [4] 付继伟, 候朝楨, 窦丽华. 电磁脉冲斜入射时对孔缝耦合效应的数值分析. *强激光与粒子束*, 2003, 15(3): 249 – 252.
- [5] Li M, Nuebel J, Drewniak J L, et al.. EMI from cavity modes of shielding enclosures- FDTD modeling and measurements. *IEEE Trans. on Electromagn. Compat.*, 2000, 42(1): 29 – 38.
- [6] Audone B, Balma M. Shielding effectiveness of apertures in rectangular cavities. *IEEE Trans. on Electromagn. Compat.*, 1989, 31(1): 102 – 106.
- [7] Harrington R F, Mautz J R. Characteristic modes for aperture problems. *IEEE Trans. on Microwave Theory Tech.*, 1985, 33(6): 500 – 505.
- [8] Robinson M P, Benson T M, Christopoulos C, et al.. Analytical formulation for the shielding effectiveness of enclosures with apertures. *IEEE Trans. Electromagn. Compat.*, 1998, 44(3): 240 – 247.
- [9] Johnk R T, Novotny D R, Archambeault B. Using joint time-frequency analysis to enhance time-domain numerical EMC simulations. *Interference Technology*, 2003: 113 – 124.

范颖鹏: 男, 1976 年生, 博士生, 从事电磁场数值计算的研究。
杜正伟: 男, 1971 年生, 副教授, 从事天线、传输线和电波传播的研究。
龚克: 男, 1955 年生, 教授, 从事无线通信技术的研究。