

文章编号 : 1001-4322(2004)03-0341-04

有孔矩形腔屏蔽效能的传输线法分析*

邓小斌 , 侯朝桢

(北京理工大学 自动控制系,北京 100081)

摘 要: 首先介绍了用传输线法(transmission line method, TLM)分析有孔矩形腔屏蔽效能的基本原理,然后将基本公式作进一步扩展,使其能计算圆孔、多孔洞以及在任意极化方向时的情形。仿真结果表明:当频率低于主谐振频率时,离孔缝越近,耦合进的电磁能量越大;当处于谐振频率时,屏蔽腔与孔形成共振,屏蔽效能很低甚至为负,而且腔体内任何空间都如此;屏蔽效能随极化角度的递增而递减,低频段的屏蔽比高频段要好;对于相同面积的孔洞,单孔洞的屏蔽效能比多孔洞的屏蔽效能要差,孔洞越多,屏蔽效果越好,而圆形孔(等同于方形孔)的屏蔽效果最好。

关键词: 传输线法(TLM); 孔洞; 屏蔽效能
中图分类号: O441.5 **文献标识码:** A

随着电子产品的发展趋向高频率、高集成度和普及化,电磁环境日趋复杂。对许多电子产品而言,如果没有屏蔽措施,很难满足其电磁兼容要求。然而,屏蔽体的完整性通常会因为通风、散热等原因而被破坏。因此,如何有效地评估这些在腔体壁上的孔、缝对屏蔽体屏蔽效能的影响就成为一个非常实际的问题。目前研究此问题,主要采用两种方法:时域有限差分法(FDTD)和传输线法(TLM),两种方法各有优势。FDTD^[1,2]法计算思路清晰明了,能计算不同形状的物体,应用范围很广;TLM法非常节省时间、内存,更重要的是,对于目标腔体屏蔽效能的分析,它能清楚表示出各种参数对结果的影响,这对电子产品的设计有较大的指导意义。本文先叙述了基本的传输线模型,并用时域有限差分法(FDTD)验证其有效性,接着对公式作进一步扩展,使其能适应任意极化角度平面波,然后讨论其在圆孔、多孔洞方面的应用。

1 传输线法基本原理

根据传输线理论,平面电磁波垂直照射的带矩形孔的矩形腔及其相应的电路模型^[3]分别如图 1 和图 2 所示。一般而言,由孔缝耦合进入腔体中的能量要比穿过腔体壁进入其中的能量多得多,因此可以合理假设腔体壁的电导率足够高而只考虑耦合能量。图 1 中,讨论平面波 1 时的情形,其中, l_s, w_s, d_s 分别为矩形腔的长、宽、高, l_a, w_a 为矩形孔的长和宽。图 2 中, V_0 代表辐射源, Z_0 为自由空间波阻抗,等效源阻抗 Z_s 等于孔缝阻抗 Z_a 与 Z_0 并联, V_s 为等效源电压, Z_g 和 k_g 表示波导腔的特性阻抗和传播常数,距离孔缝 d_p 远的观测点 P 的电场屏蔽效能 S_e 就可由有无屏蔽体时点 P 的电压比值计算出来,磁场屏蔽效能 S_m 相应于点 P 的电流比值。

在此模型中,孔缝阻抗 Z_a 为^[3]

$$Z_a = \frac{1}{2} \frac{l_a}{l_s} j Z_{0s} \tan\left(\frac{k_0 l_a}{2}\right) \quad (1)$$

式中:因子 l_a/l_s 表示了孔缝与腔体之间的耦合关系;波数 $k_0 = 2\pi/\lambda$; $Z_{0s} = 120 \sqrt{\frac{\epsilon_0}{\mu_0}}$ $\ln \left[2 \frac{1 + \sqrt{1 - (w_e/w_s)^2}}{1 - \sqrt{1 - (w_e/w_s)^2}} \right]^{-1}$, 其中, w_e 为有效宽度, $w_e = w_a - \frac{5h}{4} (1 + \ln \frac{4w_a}{h})$, 一般要求 $w_e/w_s < 1/\sqrt{2}$ (适用范围), h 为屏蔽体厚度(见图 1)。

这样,从入射面往波源看,等效源电压 $V_s = V_0 Z_a / (Z_0 + Z_a)$, 等效源阻抗 $Z_s = Z_0 Z_a / (Z_a + Z_0)$ 。因为此矩形腔有 TE_{10}, TE_{20}, \dots 若干种传播模式,而 TE_{10} 占了绝大部分,通常只考虑 TE_{10} 模,则矩形谐振腔特征阻抗和传播常数为

$$Z_g = Z_0 \sqrt{1 - (l_s/2\lambda)^2} \quad (2)$$

* 收稿日期:2003-07-13; 修订日期:2003-11-12

作者简介:邓小斌(1978—),男,湖南湘潭人,硕士研究生,现从事电磁屏蔽方面的工作;E-mail: dxb-bit@bit.edu.cn.

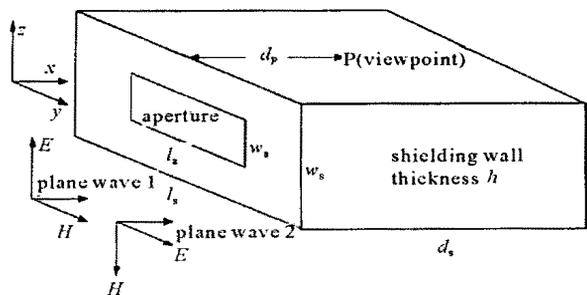


Fig. 1 Normal incident plane wave illuminates rectangular enclosure with aperture
图 1 平面电磁波垂直入射有孔矩形腔

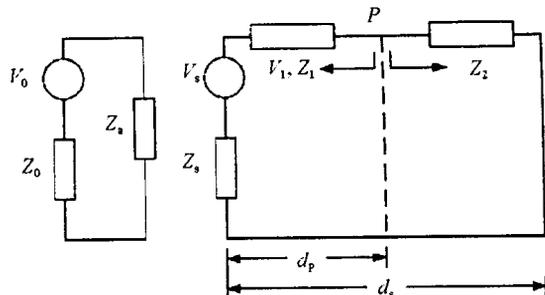


Fig. 2 Corresponding circuit model of transmission line of figure 1
图 2 与图 1 对应的传输线模型

$$k_g = k_0 \sqrt{1 - (l_s / 2l_s)^2} \tag{3}$$

对于图 2 中的 \$P\$ 点, 其源电压 \$V_1\$、源阻抗 \$Z_1\$ 及负载阻抗 \$Z_2\$ 有

$$V_1 = \frac{V_s}{\cos(k_g d_p) + j Z_s / Z_g \sin(k_g d_p)} \tag{4}$$

$$Z_1 = \frac{Z_s + j Z_g \tan(k_g d_p)}{1 + j Z_s / Z_g \tan(k_g d_p)} \tag{5}$$

$$Z_2 = j Z_g \tan[k_g (d_s - d_p)] \tag{6}$$

所以, \$P\$ 点的电压 \$V_P = V_1 Z_2 / (Z_1 + Z_2)\$, 电流 \$i_P = V_1 / (Z_1 + Z_2)\$。如果没有矩形屏蔽腔, 则 \$P\$ 点的电压 \$V_P = V_0 / 2\$, 电流 \$i_P = V_0 / (2 Z_0)\$, (上标表示对应没有屏蔽时的情况), 因此屏蔽效能为

$$S_e = -20 \lg |V_P / V_P| \tag{7}$$

$$S_m = -20 \lg |i_P / i_P| \tag{8}$$

现在用这种方法来计算 \$400\text{mm} \times 200\text{mm} \times 400\text{mm}\$ 的矩形腔, 孔的尺寸为 \$150\text{mm} \times 40\text{mm}\$, 腔壁厚 \$3\text{mm}\$, 仿真结果如图 3 所示。从图 3 可以看出, TLM 屏蔽效能曲线与 FDTD 计算得到的结果基本一致, 因此对于分析腔体屏蔽效能, TLM 是一种可以信赖的电磁分析方法。图 4 是不同观测点的屏蔽效能比较, 不难看出, 当频率低于主谐振频率, 离孔缝越近, 耦合进的电磁能量越大; 当处于谐振频率时, 屏蔽腔与孔形成共振, 屏蔽效能很低甚至为负, 而且腔体内任何空间都如此, 这是应该极力避免出现的情况。

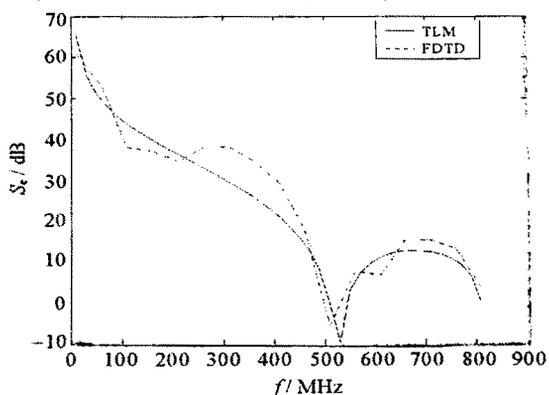


Fig. 3 Shielding effectiveness of TLM and FDTD
图 3 TLM 和 FDTD 的屏蔽效能比较

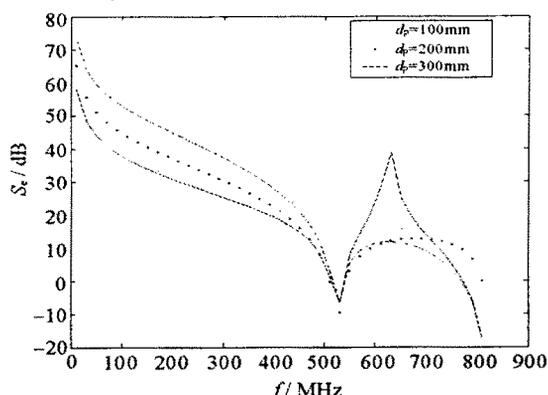


Fig. 4 Shielding effectiveness of different viewpoint
图 4 不同观测点的屏蔽效能比较

2 公式扩展及仿真试验

基本的传输线公式没有考虑极化角, 下面先讨论极化角不同时的屏蔽效能。当电场垂直于矩形孔长边入射时(即图 1 中平面波 1)可采用以上公式, 显然若电场垂直于孔短边入射(即图 1 中平面波 2), 只需将以上公式中的参数 \$l_a\$ 和 \$l_s\$ 分别与 \$w_a\$ 和 \$w_s\$ 互相对换就可以了。如果平面波为任意极化角度(电场与孔各边既不垂直也不平行), 可以将电场 \$E\$ 分解为 \$E_x\$ 和 \$E_y\$, 磁场 \$H\$ 分解为 \$H_x\$ 和 \$H_y\$。\$E_x\$ 和 \$H_y\$ 一组, 应用图 1 平面波 1 对应的公

式,注意此时 $Z_0 = E_z / H_y$,得到 P 点值 $V_{P1}, i_{P1}, V_{P1}, i_{P1}$;同理, E_y 和 H_z 一组,应用图 1 平面波 2 对应的公式, $Z_0 = E_y / H_z$,得到 P 点的值 $V_{P2}, i_{P2}, V_{P2}, i_{P2}$,那么, P 点的电压 $V_P = \sqrt{V_{P1}^2 + V_{P2}^2}$,而 i_P, V_P, i_P 的计算类似,然后就可套用公式 (7) 和 (8) 来计算屏蔽效能了。

如果用 θ 表示极化角,图 1 中的平面波 2 对应的 $\theta = 0$,平面波 1 对应的 $\theta = 90^\circ$,那么极化角 θ 对屏蔽效能 (以 S_e 为例) 的影响如图 5 所示。从图 5 中可以看出,屏蔽效能 S_e 随极化角 θ 的递增而递减,为 0° (垂直短边) 的屏蔽效能要比 90° 的屏蔽效能好得多,另外屏蔽体对低频段的屏蔽效果比高频段要好。以下讨论如未特别声明,均是针对 $\theta = 90^\circ$ (即图 1 的平面波 1) 的情形。

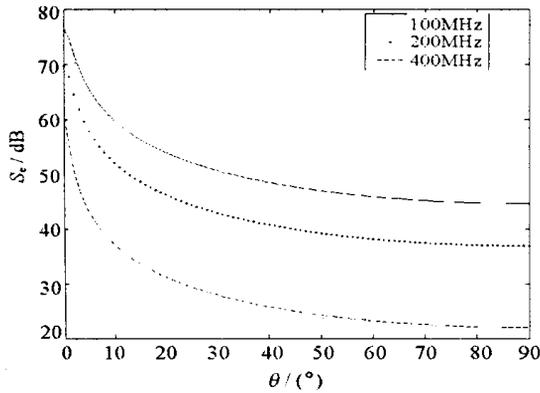


Fig. 5 Change of S_e by plane wave of arbitrary angle of polarization
图 5 任意平面极化波对 S_e 的影响

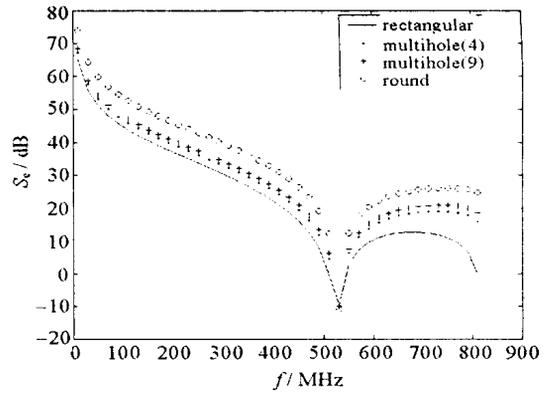


Fig. 6 Change of S_e by apertures with different shape but same areas
图 6 相同面积不同孔对 S_e 的影响

如果在屏蔽体的一个面上有多个相同形状的矩形孔,那么模型中表示孔的阻抗 Z_a 是各个孔阻抗之和^[4],即公式 (1) 变为

$$Z_a = n \frac{1}{2} \frac{l_a}{l_s} j Z_0 \tan\left(\frac{k_0 l_a}{2}\right) \tag{9}$$

式中 n 表示孔的个数。显然孔之间的距离不能太小,因为上式并没有考虑孔之间的耦合关系。

对于圆形孔,文献 [5] 指出,圆形孔的阻抗值相当于相同面积的正方形孔的阻抗值,也就是说, $l_a = w_a = \sqrt{S_a}$, S_a 为圆孔面积。

现在应用以上公式,对总面积为 6000mm^2 的各种孔耦合影响进行了仿真试验,结果如图 6 所示。从图中可以看出,不管孔的形状如何变化,屏蔽效能 S_e 都有一个最小值点,此点对应了屏蔽体的 TE_{10} 模,由屏蔽体的结构参数决定。图 6 表明,对于相同面积的孔洞,单孔洞的屏蔽效能比多孔洞的屏蔽效能要差,孔洞越多,屏蔽效果越好,而圆形孔 (等同于方形孔) 的屏蔽效果最好。因此,对于那些无法避免的腔壁开口,应尽可能分散化,并采用圆形孔或方形孔。

3 结束语

本文导出了传输线法分析屏蔽效能的基本公式,并对公式进行了进一步地扩展使其能处理更多的情形,如任意极化角度、圆孔、多孔洞,得出了一些规律,希望对电磁兼容产品设计有指导意义。尽管传输线法已经发展多年,在对有孔矩形腔的屏蔽效能分析上也取得不少研究成果,仍有不少问题不能处理,比如孔洞在腔壁上不是中心对称,任意入射角度等等,需要进一步研究。

参考文献:

- [1] 王长清,祝西里. 电磁场计算中的时域有限差分法[M]. 北京:北京大学出版社,1994. (Wang C Q,Zhu X L. The finite difference time-domain method of electromagnetic computation. Beijing:Beijing University Press, 1994)
- [2] 付继伟,侯朝桢,窦丽华. 电磁脉冲斜入射对孔缝耦合效应的数值分析[J]. 强激光与粒子束,2003,15(3):249—252. (Fu J W,Hou C Z,Dou L H. Numerical analysis on hole coupling effects of an oblique incidence of electromagnetic pulse. High Power Laser and Particle Beams, 2003,15(3):249—252)
- [3] Robinson M P, Benson T M, Christopoulos C, et al. Analytical formulation for the shielding effectiveness of enclosures with apertures[J]. IEEE Trans on Electromagnetic Compatibility, 1998,40(3):240—248.
- [4] Belokour I,LoVetri J,Kashyap S. Shielding effectiveness estimation of enclosures with apertures[A]. IEEE Electromagnetic Compatibility Symposium Proceed-

ing[C]. 2000. 855—860.

- [5] Turner J D, Benson T M, Christopoulos C, et al. Characterization of the shielding effectiveness of equipment cabinets containing apertures[A]. Int Symp EMC [C]. Rome, Italy, 1994. 75—79.

Analysis on shielding effectiveness of rectangular cavity with apertures by transmission line method

DENG Xiao-bin, HOU Chao-zhen

(*Department of Automatic Control, Beijing Institute of Technology, Beijing 100081, China*)

Abstract: This article firstly introduces the basic theory of transmission line method (TLM) which is used to analyze shielding effectiveness of rectangular enclosure with apertures, then expands the fundamental formulas to deal with cases of round hole, multi-holes, and arbitrary angle of polarization. Simulation results indicate: (1) when the frequency is under dominant resonant frequency, the closer to the enclosure, the more coupling energy; (2) under resonant frequency, resonance appears between the aperture and the enclosure, which results in low even negative shielding effectiveness in the cavity; (3) shielding effectiveness decreases when polarization angle increases, and shielding of low frequency is better than that of high frequency; (4) for the same areas, shielding effectiveness of single-hole is worse than that of multi-holes, and the more holes, the better performance, and the round (equal to square) hole is the best.

Key words: Transmission line method (TLM); Apertures; Shielding effectiveness