

文章编号: 1000-582X(2011)10-027-05

## 有孔箱体屏蔽效能的多模传输线法分析

李永明<sup>1</sup>, 郑春旭<sup>1</sup>, 郝战铎<sup>2</sup>, 刘光明<sup>3</sup>

- (1. 重庆大学 输配电装备及系统安全与新技术国家重点实验室, 重庆 400044;
2. 许继电源有限公司, 河南 许昌 461000;
3. 辽宁蒲石河抽水蓄能有限公司, 辽宁 丹东 118216)

**摘要:**通过对有孔箱体屏蔽效能的传输线解析算法进行扩展, 得到可计及箱体内高次模传输的多模传输线模型, 运用三维电磁场仿真软件 HFSS (high frequency structure simulator) 进行了有效性验证。应用得到的多模传输线模型, 分析了箱体内不同位置处高次模对屏蔽效能的影响。计算结果表明: 宽频域上, 高次模对屏蔽效能的影响不可忽略; 在 1 GHz 以下, 越靠近箱体的开孔, 高次模影响越大; 在近孔处, 高次模会引起某些频段上屏蔽效能的提升。因此, 只有综合考虑多种传输模式才能准确反应宽频域上和近孔处的屏蔽效能。

**关键词:** 传输线; 多模; 孔缝; 屏蔽效能; 箱体

**中图分类号:** TN011

**文献标志码:** A

## Analysis of a multimode transmission line model of the shielding effectiveness of enclosures with apertures

LI Yong-ming<sup>1</sup>, ZHENG Chun-xu<sup>1</sup>, HAO Zhan-duo<sup>2</sup>, LIU Guang-ming<sup>3</sup>

- (1. State Key Laboratory of Power Transmission Equipment & System Security and New Technology, Chongqing University, Chongqing 400044, P. R. China;
2. Xuji Power Co. Ltd., Xuchang 461000, Henan, P. R. China;
3. Liaoning Pushihe Pumped Storage Co. Ltd., Dandong 118216, Liaoning, P. R. China)

**Abstract:** The equivalent transmission line method is extended to multi-transverse electric modes of cavity which are introduced by aperture coupling, and it is used to analyze the shielding effectiveness of rectangular enclosures with apertures. The multimode transmission line method is verified by HFSS (High Frequency Structure Simulator). The results show that higher-order mode is essential to obtain an accurate shielding effectiveness of rectangular enclosure on wide frequency domain. Below the frequency of 1 GHz, nearer to the slot, the impact of higher-order mode on the shielding effectiveness is greater in the place near the slot. Higher-order mode leads to a better shielding effectiveness.

**Key words:** transmission line; multimode; apertures; shielding effectiveness; enclosures

为了满足散热、连接线出入的需要, 电子设备的金属屏蔽外壳上一般要有开孔, 这些开孔破坏了屏蔽箱体的完整性, 降低了箱体的屏蔽作用。因此, 如

何有效地评估有孔箱体的屏蔽效能具有重要理论和现实意义。对于箱体的孔缝耦合问题, 目前主要有以下研究方法: 数值方法, 如时域有限差分法<sup>[1-4]</sup>、矩

收稿日期: 2011-04-20

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(50877081); 重庆市自然科学基金资助项目(CSTC2008BB2311)

作者简介: 李永明(1964-), 男, 重庆大学副教授, 博士, 主要从事电磁场数值仿真计算的研究, (E-mail) cqliym@cqu.edu.cn.

量法<sup>[5-7]</sup>、传输线矩阵法<sup>[8]</sup>和矩量-有限元混合法等<sup>[9,10]</sup>,数值方法计算思路清晰,能计算多种形状的物体,但运算量较大且不能清晰反应各种参数对结果的影响。解析方法,如传输线解析法<sup>[11]</sup>,传输线解析法概念清楚,将场的问题转换为电路问题,受限的是只能计算箱体中心线上的屏蔽效能。但降低了计算的复杂度,能清楚地显示出各种设计参数对结果的影响。已有的传输线解析方法多是将箱体等效为只有主模(即  $TE_{10}$  模)传播的矩形波导,而忽略高次模的影响。这种假设将该方法的应用限定在频率为 1 GHz 以下的低频孔缝耦合问题,在宽频域问题中将不适用。

用扩展为可分析高次模传输的多模传输线法对有孔箱体的屏蔽效能进行研究,用等效传输线来模拟波导内多个模式的传输,进而分析高次模影响下箱体内不同位置处的屏蔽效能。该方法将屏蔽效能的传输线解析公式的应用扩展到宽频范围,并分析了 1 GHz 以下不同位置处高次模的影响。

## 1 传输线法的基本原理

一般情况下,大部分能量是由孔缝耦合进入箱体的,而穿透箱体壁进入箱体内部的能量几乎很少<sup>[12]</sup>,因此可以假设箱体壁是理想导体而只考虑通过孔缝耦合进入箱体的能量。根据 Azaro 等人建立的等效传输线模型<sup>[13-14]</sup>,外部平面波垂直照射到有矩形孔的屏蔽箱体上,如图 1(a)所示,其中  $a$ 、 $b$ 、 $d$  分别为矩形箱体的长、高、宽,  $t$  为箱体壁的厚度,  $l$  和  $w$  为孔的长和宽。

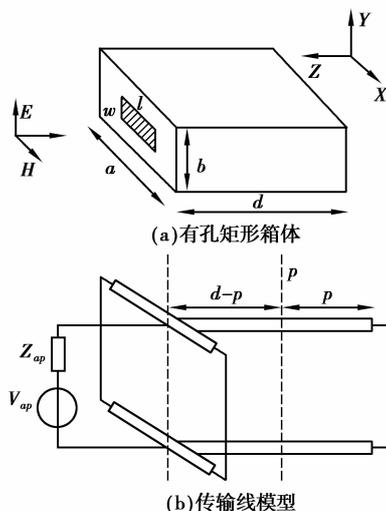


图 1 平面波照射有孔矩形箱体及其传输线模型

图 1(b)表示的是与图 1(a)对应的传输线模型。根据文献<sup>[13]</sup>,孔缝被等效为终端短路的共面传输线。共面传输线的特性阻抗为  $Z_{os}$ 。孔缝阻抗为

$$Z_{ap} = \frac{1}{2} j Z_{os} \tan\left(\frac{k_0 l}{2}\right), \quad (1)$$

式中  $k_0 = 2\pi/\lambda$ 。

电压源  $V_{ap}$  是平面电磁波照射在等效共面传输线上,在传输线上(即孔缝上)激励起来的感应电压。通过在传输线公式中引入激励函数并应用边界条件得到孔上的电压表达式

$$V(x) = A e^{-j\omega\sqrt{LC}x} + B e^{j\omega\sqrt{LC}x} + K e^{-j\beta_x x}. \quad (2)$$

其中  $\beta = (\beta_x e_x + \beta_y e_y + \beta_z e_z)$  是传播矢量,  $L$ 、 $C$  分别是单位长度的电感和电容,参数  $A$ 、 $B$ 、 $K$  详见文献<sup>[13]</sup>。应用得到的  $V(x)$  表达式计算孔中间处的感应电压  $V_{ap} = V(l/2)$ 。

屏蔽箱体被等效为矩形波导,且只考虑主模,即  $TE_{10}$  模式的传播。由于波导终端为金属导体,进一步将波导等效为终端短路的传输线,它有着和  $TE_{10}$  模式相同的特性阻抗  $Z_{g10}$  和传输常数  $k_{g10}$ 。由于箱体材料为理想导体,负载阻抗  $Z_l = 0$ ,观测点处的输入阻抗为

$$Z_{P10} = j Z_{g10} \tan[k_{g10} p]. \quad (3)$$

根据图 1(b)中的传输线模型,可以得到等效传输线的输入端电压为

$$V_{IN10} = V_{ap} \frac{Z_{P10}}{Z_{P10} + Z_{ap}}. \quad (4)$$

根据传输线理论<sup>[15]</sup>,沿传输线的电压传播可由下式确定

$$V_{g10}(z) = V^+ e^{-jk_{g10}z} + V^- e^{+jk_{g10}z}. \quad (5)$$

$V^+$ 、 $V^-$  可由边界条件

$$\begin{cases} V_{g10} = 0 = V^+ - V^-, \\ V_{g10}(d) = V_{IN10} = V^+ e^{-jk_{g10}d} + V^- e^{+jk_{g10}d}. \end{cases}$$

确定。得到观测点的电压  $V_{g10}(z_p)$ ,并考虑孔与箱体的整体性导致孔上电场的连续,所以观测点的电场幅值为

$$E_p = \sqrt{\frac{ab}{wl}} \cdot V_{g10} \sqrt{\frac{2}{ab}} = V_{g10} \sqrt{\frac{2}{wl}}. \quad (6)$$

则观测点处的屏蔽效能即为

$$S_E = -20 \lg \left| \frac{E_p}{E'_p} \right|. \quad (7)$$

$E'_p$  表示没有屏蔽箱体时  $p$  点的电场大小。

## 2 理论的扩展

以上模型只考虑了  $TE_{10}$  模在波导内的传播,忽略了高次模,使得模型不能应用在高频率的问题上。但是当频带较宽的电磁脉冲照射箱体时,会在孔缝

附近激励起大量的高次模,这些高次模会对主模的传输产生影响。笔者试图将上述单一模式的传输线模型扩展为多个模式的传输线模型来描述波导内高次模的传输。由于孔在箱体表面对称,在此只考虑横电场  $TE_{mn}$  中的  $TE_{m0}$  各个模式。如图 2 所示,以 3 个模式  $TE_{10}$ ,  $TE_{20}$ ,  $TE_{30}$  为例,分别运用上述单一模式的传输线模型得到任一模式下观测点的电压,然后通过叠加得到总的电压。

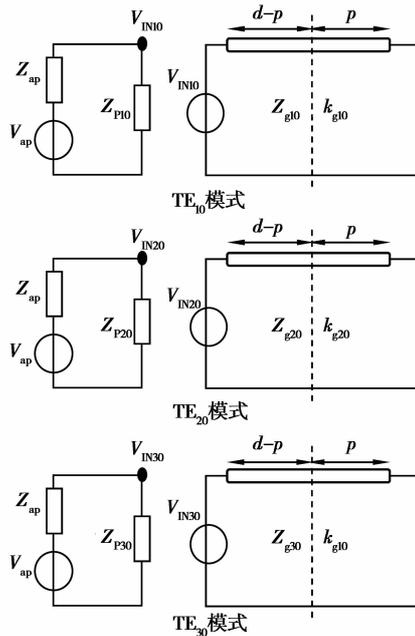


图 2 多个模式的传输线模型

根据图 2 中各个单一模式的传输线模型,运用式(1)–(5)得到各个独立模式下观测点处的电压  $V_{g10}(z_p)$ ,  $V_{g20}(z_p)$ ,  $V_{g30}(z_p)$ 。根据波导内模式的叠加性,再把各个结果叠加起来即得到观测点处的总电压

$$V_{gTot}(z_p) = \sum_{m=1}^N V_{gm0}(z_p) \quad (8)$$

这里取  $N=3$ ,则总电压

$$V_{gTot}(z_p) = V_{g10}(z_p) + V_{g20}(z_p) + V_{g30}(z_p)。$$

求出总的电压  $V_{gTot}(z_p)$ ,电场幅值的大小可通过式(6)  $E_p = \sqrt{\frac{ab}{wl}} \cdot V_{gTot} \cdot \sqrt{\frac{2}{ab}} = V_{gTot} \cdot \sqrt{\frac{2}{wl}}$  得到。

至此,可以得到用来分析箱体多种传输模式的屏蔽效能表达式,  $N$  表示波导中传输模式的数量。

$$S_E = -20 \lg \left| \frac{\sum_{m=1}^N V_{gm0}(z_p) \sqrt{\frac{2}{wl}}}{E'_p} \right| \quad (9)$$

### 3 计算结果分析

#### 3.1 多模传输线法的验证

分析的矩形箱体的尺寸  $a \times b \times d = 300 \text{ mm} \times 120 \text{ mm} \times 300 \text{ mm}$ ,材料厚度  $t = 1.5 \text{ mm}$ ,孔缝尺寸为  $l \times w = 50 \text{ mm} \times 10 \text{ mm}$ 。因为孔在箱体表面呈轴对称,所以只分析横电场  $TE_{m0}$  中  $TE_{10} \sim TE_{80}$  的 8 个模式即可满足需要。利用上文导出的多模传输线模型计算得到的箱体中心位置的屏蔽效能曲线,如图 3 所示。

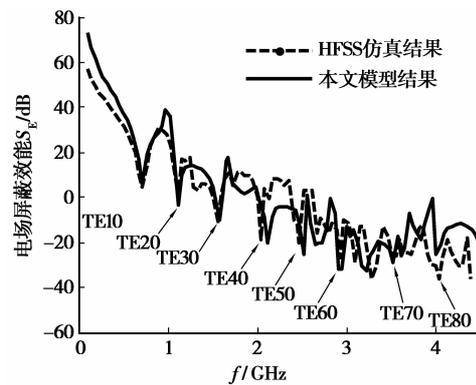


图 3 多模传输线法 SE 曲线与 HFSS 仿真结果对比

实线表示的是利用多模传输线方法得到的屏蔽效能曲线,虚线是用电磁场仿真软件 HFSS 仿真同一箱体模型得到的屏蔽效能曲线。

从图 3 可以看出,屏蔽效能曲线与 HFSS 的仿真结果基本一致,只是在 4 GHz 以上幅值有些偏差,由于 HFSS 采用的有限元法是一种数值方法,而本文模型是一种解析方法,所以两者的曲线在较高频率上会有一定误差。但谐振频率点和变化趋势都吻合较好,说明多模传输线法的屏蔽效能解析式是有效的。表 1 中给出了  $TE_{m0}$  模式的谐振频率理论值。

表 1  $TE_{m0}$  模式的谐振频率  $f$  MHz

模式/m	理论值	模型	HFSS 结果
1	706.6	716	722.2
2	1 117.3	1 112	1 111
3	1 580.1	1 552	1 556
4	2 060.1	2 124	2 044
5	2 547.8	2 520	2 469
6	3 039.3	2 960	2 933
7	3 533.1	3 532	3 556
8	4 028.4	4 016	4 044

对比表 1 和图 3 可以看出图 3 中每 1 个屏蔽效能的极小值分别对应箱体内部 1 个传输模式的谐振频率, 研究方法与各模式理论上的谐振频率都比较接近, 并且具有以下规律: 当频率低于各模式的谐振频率, 屏蔽效能随频率升高而下降, 当频率高于谐振频率时, 屏蔽效能随频率升高而上升, 在谐振频率点屏蔽效能最差。在 0.1~4.5 GHz 整个频域范围内屏蔽效能随着频率的升高总体呈下降趋势。

### 3.2 不同位置处高次模的影响

利用上文导出的可分析高次模传输的多模传输线来分析箱体内部 3 个不同观测点屏蔽效能的变化。观测点分别在  $P(z=d/4)$ 、 $P_1(z=d/2)$  和  $P_2(z=d \times 3/4)$ 。图 4 分别为不同点处主模传输与多模传输屏蔽效能的变化。

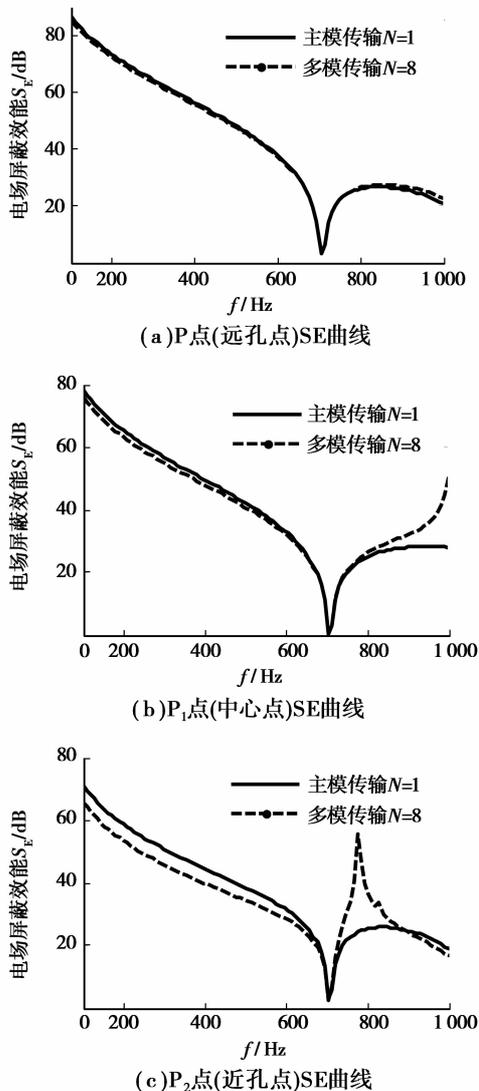


图 4 箱体中心线上不同位置处主模传输与多模传输的 SE 曲线 ( $N$  表示模式数量)

图 4(a) 表示的是  $P$  点(远孔点)的屏蔽效能曲线。可以看到, 只考虑主模传输的曲线与考虑高次模传输的曲线几乎完全吻合。说明在  $P$  点, 高次模的影响很小。此时, 箱体内部的屏蔽效能完全可以只考虑主模的传输, 而且可以达到很高的精确度。

图 4(b) 表示当观察点在中心  $P_1$  点时, 只考虑主模传输和考虑高次模传输时的屏蔽效能曲线的变化。不难看出, 在 800 MHz 以下, 2 条曲线吻合的都很好, 只是在 800 MHz 以上, 高次模的影响导致屏蔽效能的上升。由此可知, 当分析 1 GHz 范围内, 主模的传输占主要地位, 高次模的影响不大。

图 4(c) 表示的是  $P_2$  点(近孔点)的屏蔽效能曲线, 此时的曲线发生很大的变化。在谐振频率点以下, 考虑高次模传输时的屏蔽效能要比只考虑主模时低 5 dB 左右, 而在谐振频率以上, 考虑高次模的曲线在 800 MHz 附近出现一个峰值, 达到一个很好的屏蔽效能, 甚至接近 60 dB。根据文献[15], 波导中高次模对主模产生的作用很复杂, 有时有利于主模传输, 有时不利于主模传输。此处出现的屏蔽效能峰值是由于在近孔处, 入射场激励起大量的高次模且尚未衰减, 在此频率附近, 高次模阻碍了主模的传输。这些高次模产生的场与主模产生的场在孔附近相互抵消导致了屏蔽效能峰值的出现。

在箱体中心线上的不同观测点, 多模传输时的屏蔽效能如图 5 所示。可以看出, 在谐振频率以下, 距离孔越远, 屏蔽效能越好, 距离孔越近, 屏蔽效能越差。这种趋势与主模传输时的变化趋势是相同的; 在谐振频率以上, 近孔点处, 在 800 MHz 附近屏蔽效能出现峰值, 而在中心点和远孔点都没有出现峰值。由此可见高次模的影响随着离孔距离的增加而减小; 也即在近孔点处只考虑主模传输已无法准确反应箱体的屏蔽效能, 要求必须考虑高次模的影响。

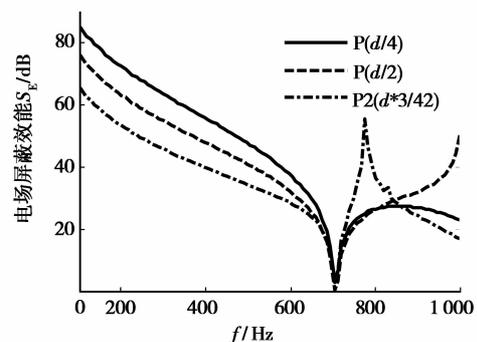


图 5 多模传输时不同点处的 SE 曲线

## 4 结 语

用扩展为可分析箱体内高次模传输的多模传输线法对有孔矩形箱体的屏蔽效能进行了分析,该方法使箱体屏蔽效能的传输线法分析不再局限于较低的频率范围内。结果表明:在宽频域范围内,高次模对屏蔽效能的影响不可忽略;高次模在近孔处影响最大,离孔越远影响越小;近孔处高次模将在谐振频率点以上某频段引起屏蔽效能的峰值,谐振频率点以下降低屏蔽效能。

### 参考文献:

- [1] JIAO C Q, LI L, CUI X, et al. Subcell FDTD analysis of shielding effectiveness of a thin-walled enclosure with an aperture [J]. IEEE Transactions on Magnetics, 2006, 42(4):1075-1078.
- [2] FEDELI D, GRADONI G, MOGLIE F, et al. Evaluation of equipment-level enclosure shielding properties in a reverberation chamber: numerical and experimental analysis [C] // 2008 IEEE International Symposium on Electromagnetic Compatibility, Aug 18-22, 2008, Detroit, MI. [s. l.]: Electromagnetic Compatibility, 2008:1-6.
- [3] JONG H K, HYUNG D C, HYUN H P, et al. Numerical modeling and measurements on the shielding effectiveness of enclosure with apertures [C] // 2008 Asia-Pacific Symposium on Electromagnetic Compatibility & 19<sup>th</sup> International Zurich Symposium on Electromagnetic Compatibility, May 19-22, 2008, Singapore. [S. l.]: APEMC, 2008:887-890.
- [4] 夏能弘, 易学勤, 宋文武, 等. EMP 激励下带孔缝金属机箱的耦合特性研究[J]. 装备环境工程, 2009, 6(3):21-24. XIA NENG-HONG, YI XUE-QIN, SONG WEN-WU, et al. Study of the coupling characteristic of metallic enclosures with apertures excited by EMP [J]. Equipment Environmental Engineering, 2009, 6(3): 21-24.
- [5] RAJAMANI V, BUNTING C F. Validation of Modal/MoM in shielding effectiveness studies of rectangular enclosures with apertures [J]. IEEE Transaction on Electromagnetic Compability, 2006, 48(2):348-353.
- [6] MOHAMMAD A K, PARISA D, ROUZBEH M, et al. Fast shielding effectiveness calculation of metallic enclosures with apertures using a multiresolution method of moments technique[J]. IEEE Transaction on Electromagnetic Compatibility, 2010, 52(1):230-235.
- [7] 谭旭, 宋祖勋, 朱光耀, 等. 基于矩量法的孔缝电磁耦合分析及其实验研究[J]. 计算机测量与控制, 2009, 17(8): 1592-1604.
- TAN XU, SONG ZU-XUN, ZHU GUANG-YAO, et al. Analysis and experimental studies on aperture coupling based on MOM [J]. Computer Measurements & Control, 2009, 17(8):1592-1604.
- [8] 毛湘宇, 杜平安, 聂宝林. 基于 TLM 的机箱孔缝电磁屏蔽效能数值分析[J]. 系统仿真学报, 2009, 21(23): 7493-7497. MAO XIANG-YU, DU PING-AN, NIE BAO-LIN. Numerical analysis for shielding effectiveness of computer enclosure with apertures based on TLM [J]. Journal of System Simulation, 2009, 21(23): 7493-7497.
- [9] PARK Y M, LEE Y, SO J H, et al. Electromagnetic topology combined with mode matching for the electromagnetic field penetration analysis of an aperture backed cavity [C] // 2009 IEEE International Symposium on Electromagnetic Compatibility, 2009. [s. l.]: Electromagnetic Compatibility, 2009: 121-126.
- [10] YENIKAYA S. Validation of MOM/FEM in modeling studies of loaded enclosures with apertures [C] // 2008 IEEE International Symposium on Electromagnetic Compatibility, 18-22 August, 2008, Detroit, MI, USA. [S. l.]: Electromagnetic Compatibility, 2008:1-5
- [11] PARISA D, AHAD T, ROUZBEH M. An efficient and reliable shielding effectiveness evaluation of a rectangular enclosure with numerous apertures [J]. IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility, 2008, 50(1):208-211.
- [12] ARANEO R, LOVAT G, PAULOTTO S. Effects of aperture thickness on the shielding effectiveness of metallic enclosures [C] // 2007 IEEE International Symposium on Electromagnetic Compatibility, 9-13 July, 2007, Honolulu, HI, USA. [S. l.]: Electromagnetic Compatibility, 2007:1-3.
- [13] AZARO R, CAORSI S, DONELLI M, et al. Evaluation of the effects of an external incident electromagnetic wave on metallic enclosures with rectangular apertures [J]. Microwave and Optical Technology Letters, 2001, 28(5):289-293.
- [14] AZARO R, CAORSI S, DONELLI M. A circuital approach to evaluating the electromagnetic field on rectangular apertures backed by rectangular cavities [J]. IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques, 2002, 50(10):2259-2265.
- [15] 梁昌洪, 谢拥军, 官伯然. 简明微波 [M]. 北京: 高等教育出版社, 2006.