

文章编号: 1005-6122(2011)02-0034-04

孔缝对内置电路板壳体屏蔽效能的影响*

安 静^{1,2} 武俊峰^{1,2} 吴一辉¹

(1. 中国科学院长春光学精密机械与物理研究所应用光学国家重点实验室, 长春 130033;

2. 中国科学院研究生院, 北京 100039)

摘 要: 电子设备屏蔽效能的好坏直接影响着电路系统的电磁兼容性能, 而其金属壳体上的孔缝造成的电磁泄漏是一个不容忽视的问题。以内置电路板的开缝屏蔽壳体为研究对象, 应用 FEM(有限元法) 分析了不同的孔缝尺寸、电路板尺寸、电路板位置对壳体屏蔽效能的影响。并进一步研究了电路板上金属微带线受电磁干扰信号影响而产生感应电流的变化规律: 走线越长, 离缝隙越近, 感应电流数值越大, 其峰值出现在腔体的谐振频率处。根据计算结果, 提出了优化设计屏蔽腔及其腔内电子设备的建议。本文研究对于更为有效地利用金属壳体防御电磁干扰, 提高系统电磁兼容性具有指导意义。

关键词: 孔缝, 屏蔽效能, 有限元法, 金属壳体, 电路板

Influence of Apertures on Shielding Effectiveness for Shell of Loaded PCB

AN Jing^{1,2}, WU Jun-feng^{1,2}, WU Yi-hui¹

(1. National Key Lab of Applied Optics, Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun 130033, China;

2. Graduate School of the Chinese Academy of Sciences, Beijing 100039, China)

Abstract: Shielding effectiveness of electronic equipment directly influences the EMC performance of the circuit system. And the electromagnetic leakage from apertures of metal shell is an issue which can not be ignored. In this paper, the PCB which is set in rectangular shielding shell is the research object. The influence of different apertures sizes, different board sizes and different board position on shielding effectiveness was analyzed by applying the FEM(finite element method). Variation regularity of induced current which is resulting from interaction between metal microstrip line of the PCB board and the electromagnetic interference signals was further studied. The longer the trace, the closer from the slot, the greater the induced current value. The peak appears in the cavity resonant frequency. Some suggestions from calculation results are presented for optimized design of shielding and electronic equipment in the body of shell. The study is instructive for more effective use of metal shell to defense EMI and will improve the system electromagnetic compatibility.

Key words: slot, shielding effectiveness, finite element method, metal shell, printed circuit board

引 言

随着电子技术的不断发展和应用, 电磁干扰的问题变得越来越严重。同样, 作为系统基本构成单元的电子设备所处的电磁环境也十分复杂。使用屏蔽腔来减小外界电磁干扰是一种有效方法, 但在屏蔽腔上一般都不可避免地开有孔缝, 或用于电源线

和信号线的连接, 或用于通风等实际需要。孔缝的存在会降低屏蔽腔的防护作用, 使得电磁波能够进入腔内, 而耦合到腔内的干扰信号会对电子线路中存在的非线性元器件(如晶体管)发生电磁感应, 随之产生的低频电流就会对电子线路进行干扰, 影响电子设备的正常工作。如果干扰源是高功率微波脉冲, 甚至可能烧毁电子器件。因此, 必须研究电磁能

* 收稿日期: 2010-09-09; 修回日期: 2010-12-17

基金项目: 中国科学院“十一五”支撑技术研究项目(No. 61501.02.03.04)

量通过孔缝的耦合特性,以减少电磁波对屏蔽腔内设备的干扰。

迄今为止,对开有孔缝腔体的屏蔽效能的研究,前人已做了很多工作,所用的方法也多种多样,如矩量法^[1]、时域有限差分法^[2-4]、有限元法^[5-6],等等。现有研究表明,开缝屏蔽腔的谐振频率对屏蔽效能的影响很大,在这些谐振频率上屏蔽效果很差。但以上的研究都是以空腔为主,对于腔体内装有电路板的情况以及孔缝尺寸、电路板尺寸及位置等结构参数的变化对屏蔽效能的影响分析工作却并不多见,而对于电路板上微带线受外界电磁激励而感应出电流的变化规律的分析工作还未见报道。

本文首先建立了内置印刷电路板(Printed Circuit Board,以下简称 PCB)的带孔缝腔体计算模型,然后利用有限元法分析了外部平面波照射下壳体的孔缝电磁耦合情况,并进一步研究了 PCB 板上金属微带线受电磁干扰信号影响而产生感应电流的变化规律。本文研究对于更为有效地利用金属壳体防御电磁干扰,提高系统电磁兼容性具有指导意义。

1 内置 PCB 板的屏蔽腔计算模型

本文采用如图 1 所示的腔体模型进行研究,坐标原点(0 0 0)位于腔体中心,在 X、Y、Z 方向上分别用 a、b、c 来代表腔体的三维尺寸。计算中取 a = 300mm、b = 120mm、c = 300mm。在腔的前壁开有矩形狭缝,PCB 电路板放置在腔体内部距前壁 290mm 处,PCB 沿 Z 轴正向可移动放置距离为 d_p ,幅度为 1V、极化方向垂直狭缝长边的远场平面波垂直入射在腔体前壁。经由孔缝耦合进入腔体中的能量要比穿透腔体壁进入其中的能量多得多,所以可合理假设腔体壁的电导率足够高而只考虑耦合能量^[7]。

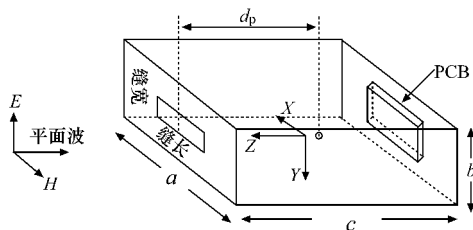


图 1 平面电磁波垂直入射内置 PCB 板的有孔矩形腔

当使用有限元法求解电磁场时,需要引入一个包围该物体的虚构面 S,将无限的区域截断为有限的求解区域,为了获得解的唯一性,在该虚构面上需要设置吸收边界条件,且这种边界条件应该使虚构面对外散射场尽可能透明,索末菲辐射条件^[8]为:

$$\hat{n} \times (\nabla \times E^{sca}) + jk_0 \hat{n} \times (\hat{n} \times E^{sca}) = 0 \quad (1)$$

上式可用于计算散射场,为了求解总场,需要将 $E^{sca} = E - E^{inc}$ 代入式(1),可得:

$$\hat{n} \times [\nabla \times (E - E^{inc})] + jk_0 \hat{n} \times [\hat{n} \times (E - E^{inc})] = 0 \quad (2)$$

进一步整理得:

$$\hat{n} \times (\nabla \times E) + jk_0 \hat{n} \times (\hat{n} \times E) = P^{inc} \quad (3)$$

式中:

$$P^{inc} = \hat{n} \times (\nabla \times E^{inc}) + jk_0 \hat{n} \times (\hat{n} \times E^{inc}) \quad (4)$$

把索末菲辐射条件用于描述虚构面 S 上的场,应用广义变分原理,可得变分表达式:

$$F(E) = \frac{1}{2} \iiint_V \left[\frac{1}{\mu_r} (\nabla \times E) \cdot (\nabla \times E) - k_0^2 \epsilon_r E \cdot E \right] dV + \iint_S \left[\frac{jk_0}{2} (\hat{n} \times E) \cdot (\hat{n} \times E) + E \cdot P^{inc} \right] dS \quad (5)$$

进一步,把四面体棱边元作为子域划分的基本离散单元,同时利用边界条件,选择适当的差值函数建立方程组,求解该方程组即可获得腔体内的场分布。

为便于观察腔体内部模式被激励的情况,使用屏蔽效能作为表征腔体耦合特性的物理量。通常,以电场形式定义的屏蔽效能更为常用^[9],其计算表达式如下:

$$SE = 20 \log(E_0/E_1) \quad (6)$$

其中 E_0 表示未加屏蔽时某观察点处的场强, E_1 表示同一观察点处加屏蔽之后的场强。

2 计算结果及分析

2.1 裸板屏蔽效能分析

根据文献[10]可以使用($\sigma = 0.22 \text{sm}^{-1}$, $\epsilon_r = 2.65$)简化的宏观介质板(裸板)代替实际复杂的 PCB。首先,保持 PCB 板尺寸为 100mm × 40mm,观察孔缝宽边长度的改变对腔体屏蔽效能的影响。结果如图 2 所示。

由图 2 可知,随着孔缝变大,腔体屏蔽效能大幅下降。缝长从 5mm 增大到 40mm,对应的屏蔽效能下降可达 15dB。在 707MHz 频点处,腔体内部发生共振现象,耦合进入腔体内的电场幅度最大,屏蔽效能很低甚至为负值。同样的结果也体现在随着孔缝长边长度变化时,对屏蔽效能的影响上。结果如图 3 所示。缝长从 100mm 增大到 180mm,对应的屏蔽效能下降多达 20dB。

通过图 2 和图 3 可知,孔缝的尺寸对屏蔽体的屏蔽性能有非常大的影响。因此,在工程设计时,在

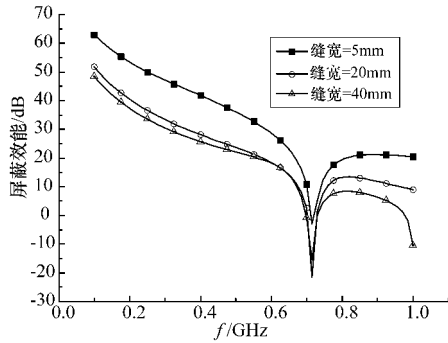


图2 孔缝宽度变化对屏蔽效能的影响

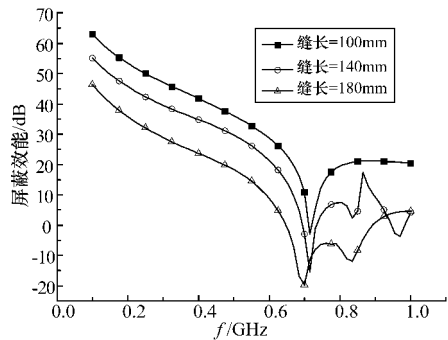


图3 孔缝长度变化对屏蔽效能的影响

满足散热通风等必需的条件下,应使屏蔽体的孔缝面积越小越好。为了增大屏蔽体的屏蔽效能,可以使用屏蔽性能优良的导电衬垫来减小缝隙造成的电磁泄漏。

以孔缝尺寸 $100\text{mm} \times 5\text{mm}$ 为例,保持 PCB 在屏蔽腔内的轴对称方向及位置不变,改变其原有大小,在腔体的中心处数值仿真得到的屏蔽效能曲线如图 4 所示。由图 4 可知,同空腔相比,由于 PCB 板(损耗介质)^[11]的载入,耦合进入腔体内的能量部分被 PCB 所消耗,导致屏蔽效能有很大改善。并且随着 PCB 尺寸的增大,耦合进入腔体内的能量损耗得越多,屏蔽效能越好。

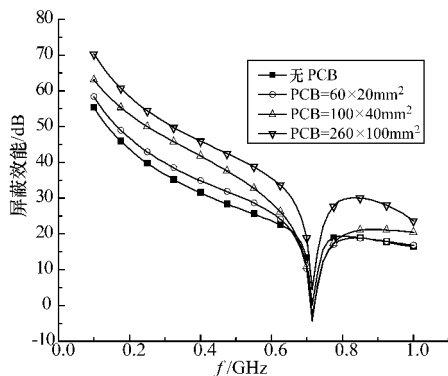


图4 PCB大小改变对屏蔽效能的影响

PCB 板在腔体内不同的位置,对屏蔽效能的影响也不同。以孔缝尺寸 $100\text{mm} \times 5\text{mm}$ 、PCB 板尺寸 $100\text{mm} \times 40\text{mm}$ 为例,改变 PCB 沿 Z 轴放置位置 d_p ,在腔体中心观测到的结果如图 5 所示,由图 5 可知,PCB 板放在孔缝附近($d_p = 10\text{mm}$)时,屏蔽效能很低,甚至比空腔情况还要平均低约 8dB。当低于主谐振频率时,PCB 放置在壳体底部($d_p = 290\text{mm}$)时,效果是最好的。因而在壳体内放置 PCB 板时,应将其放在离孔缝较远的地方特别是其上有敏感元件的部位。

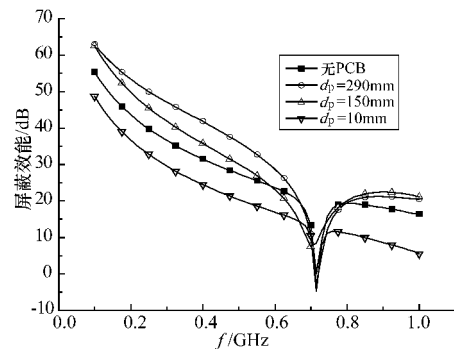


图5 不同 PCB 位置对应的屏蔽效能

2.2 微带线感应电流分析

实际 PCB 板上会存在用于信号传递的金属微带线,经由孔缝耦合进入腔体内的电磁干扰信号,会在微带线上产生感应电流。示意图如图 6 所示。保持缝隙尺寸为 $100\text{mm} \times 5\text{mm}$ 、PCB 尺寸为 $100\text{mm} \times 40\text{mm}$ 不变,通过改变 PCB 板上的微带线长度和 PCB 板与前壁之间的距离 d_p ,观察感应电流的变化规律。计算结果如图 7 所示。从图 7 可知,40mm 长微带线上的感应电流数值要比 20mm 线长时大得多,同是 40mm 线长,不同位置对应的电流数值也不同,相差最大可达 45dB,而且电流基本都是在 707MHz 达到最大值,这与前面屏蔽效能的计算结果相符。同时可知,壳体内部的电磁场分布是不均匀的,离缝隙 10mm 处的电磁场强度要比 290mm 处的大得多,导致微带线上感应电流数值也较大,这与图 5 的结论是一致的,即离缝隙越近,耦合进腔体内部的能量越多,对电子设备的潜在危害越大,所以应该合理设计实际屏蔽体内部的电路布局,尽量避免腔体内部场强峰值区域。

3 结束语

孔缝的存在已成为电子设备屏蔽效能下降的一个主要原因。本文分析结果表明:孔缝尺寸越大,屏

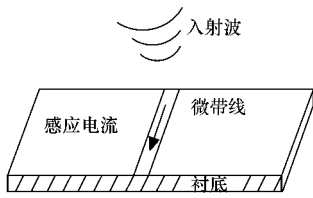


图 6 入射波对 PCB 上微带线的电磁感应

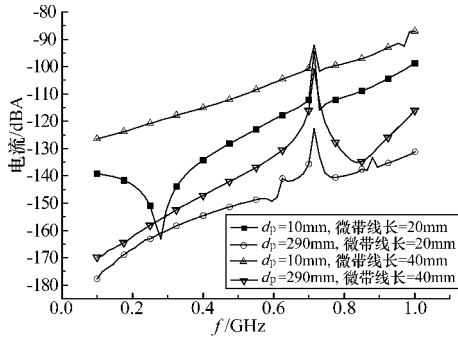


图 7 微带线上感应电流分析

蔽效能越差;随着内置 PCB 板尺寸的增加,屏蔽效能有明显改善,但要注意到在腔体的谐振频点处,屏蔽效能仍然很低,设计电路时应尽可能使电路的响应频率避开腔体的谐振频率。屏蔽体内电磁场分布也是不均匀的,孔缝附近,电磁场幅度很强,即使 PCB 板的存在也不能明显提高屏蔽效能,当低于主谐振频率时,PCB 板放置离孔缝越远,效果越好。腔体内的电磁场会在 PCB 板的微带线上产生感应电流,走线越长,离缝隙越近,感应电流数值越大,其峰值出现在腔体的谐振频率处。

在实际设计屏蔽腔时,应根据上述结论妥善处理腔体上的孔缝、PCB 板尺寸及位置,以达到最佳的屏蔽效果,使对腔体内部设备的干扰最小。

参 考 文 献

(1) Cerri G, De Leo R, Primiani V M. Theoretical and experimental evaluation of the electromagnetic radiation from apertures in shielded enclosures [J]. IEEE Trans on Electromagnetic Compatibility, 1992, 34(11): 423-432
 (2) 马飞,朱占平,钱宝良,等. 微波脉冲与带矩形窄缝腔体耦合多峰共振特性的研究[J]. 微波学报, 2008, 24(S1): 40-43

(3) 陈修桥,张建华,胡以华. 电磁脉冲与窄缝腔体耦合共振特性分析[J]. 强激光与粒子束, 2003, 15(5): 481-484
 (4) 付继伟,侯朝桢,冀丽华. 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
 (5) Florean D. Computer aided prediction and experimental validation of radiated emission from a shielding box with different size apertures [A]. IEEE International Symposium on Electromagnetic [C]. 2000. 195-198
 (6) Zheng Boyu, Shen Zhongxiang. Shielding Effectiveness of Cylindrical Enclosures with Rectangular Apertures [A]. 2008 Asia-Pacific Symposium on Electromagnetic Compatibility and 19th International Zurich Symposium on Electromagnetic Compatibility [C]. Singapore, 2008. 710-713
 (7) 邓小斌,侯朝桢. 有孔矩形腔屏蔽效能的传输线法分析[J]. 强激光与粒子束, 2004, 16(3): 341-343
 (8) 金建铭. 电磁场有限元方法[M]. 西安: 西安电子科技大学出版社, 1998. 191-192
 (9) Paul C R. Introduction to Electromagnetic Compatibility [M]. Wiley Series in Microwave and Optical Engineering. Wiley, By John & Sons. INC., 1992. 335-341
 (10) Thomas D W P, Konefal T, et al. Characterization of the shielding effectiveness of loaded equipment enclosures [A]. International Conference and Exhibition on Electromagnetic Compatibility [C]. New York, 1999. 89-94
 (11) Montrose M I. EMC and the Printed Circuit Board, Design, Theory, and Layout Made Simple [M]. New York: IEEE Press, 1999

安 静 男, 1980 年生, 博士生, 主要研究方向为卫星姿控飞轮电磁兼容技术。

E_mail: llqs123@126.com

武俊峰 男, 1981 年生, 博士生, 主要从事卫星姿控飞轮控制系统设计等方面的研究。

吴一辉 女, 1965 年生, 工学博士, 研究员, 博士生导师, 1986 年毕业于天津科技大学获得学士学位, 1991 年和 1996 年分别于长春光机所获得工学硕士和博士学位。主要致力于微光机电系统(MEMS)和精密机电系统方面的研究。