

以 PCB 为干扰源的带孔机箱电磁辐射特性仿真研究

刘恩博¹,杜平安¹,周 元²,任 丹¹

(1.电子科技大学机械电子工程学院,四川成都 611731;2.中电 24 所,重庆 400060)

摘 要: 对电子设备进行电磁辐射特性的研究,不仅要考虑机箱表面孔缝的电磁泄露,更要考虑机箱内部干扰源的电磁辐射特性.本文提出一种将 PCB 的电磁辐射能量导入机箱内部作为干扰源的方法,用于计算电子设备的整机电磁辐射特性,并与耦合微带线作为内部干扰源的方法进行对比.基于本文提出的将 PCB 作为干扰源的方法,研究了开孔尺寸、开孔类型、开孔位置对电子设备电磁辐射特性的影响,所总结的规律可为电子设备的工程设计提供一定参考标准.

关键词: 干扰源;印制板;带孔机箱;电磁辐射特性

中图分类号: TM153 **文献标识码:** A **文章编号:** 0372-2112 (2015)03-0611-04

电子学报 URL: <http://www.ejournal.org.cn>

DOI: 10.3969/j.issn.0372-2112.2015.03.030

Numerical Simulation on the Electromagnetic Radiation Performance of Enclosure with Apertures Excited by PCB

LIU En-bo¹, DU Ping-an¹, ZHOU Yuan², REN Dan¹

(1. School of Mechatronics Engineering, University of Electronic Science and Technology of China, Chengdu, Sichuan 611731, China;

2. No.24 Research Institute of CETC, Chongqing 400060, China)

Abstract: In order to study the electromagnetic radiation performance of enclosure with apertures, not only the electromagnetic leakage caused by apertures, but also the electromagnetic radiation performance of PCB should be considered. In this paper, a new method of importing electromagnetic energy of PCB into enclosures as the interference source was developed and compared with the coupling microstrip method. Based on the method considering PCB as the interference source, the relationship between the aperture size, type and location with the electromagnetic radiation performance were intensively studied. Some conclusions were obtained and they can be helpful guidelines for electronic equipment design.

Key words: interference source; PCB; enclosures with apertures; electromagnetic radiation performance

1 引言

电子设备的电磁兼容性能与机箱表面的孔缝结构所产生电磁泄露相关,也与其内部的电磁辐射元器件相关^[1].对带孔机箱进行电磁特性分析根据干扰源类型的不同可分为两种情况:当干扰源为外部源时,等效为分析电子设备抵抗外来电磁辐射的能力;干扰源为内部源时,等效于分析电子设备阻止内部电磁能量向外辐射的能力.国内外众多学者分析了外部干扰源条件下带孔机箱的电磁特性,并得到了机箱和孔缝结构参数对带孔机箱电磁辐射特性的影响^[2,3].

但在实际生产中,电子设备阻止内部电磁能量向外

辐射的能力往往更受关注,但如何模拟内部干扰源则成为研究带孔机箱电磁辐射特性的难题.有学者提出用耦合微带线近似模拟 PCB 作为内部干扰源的方法,并用数值仿真计算得到了某电脑主机的电磁兼容特性^[4],具有一定的实际工程意义.

本文提出将实际 PCB 的电磁辐射能量直接导入机箱内部作为内部干扰源,再通过全波仿真分析准确获取以 PCB 为内部干扰源的带孔机箱的电磁辐射特性.然后将这种 PCB 作为内部干扰源的方法与耦合微带线法^[4]进行了对比.最后继续利用实际 PCB 作为内部干扰源的方法,分析了单孔的三种基本结构参数对电子设备电磁辐射特性的影响,所得到的结论可用于指导实际生产设计.

2 获取 PCB 的辐射特性

2.1 仿真环境介绍

本文所采用的仿真软件为 CST STUDIO SUITE 的 CST 印制板工作室 (CST PCB Studio)、CST 设计工作室 (CST Design Studio)、CST 电磁兼容工作室 (CST Microstrips)。其中 CST PCB Studio 主要采用了部分元等效电路法 (PEEC)^[5,6]。CST Microstrips 采用的理论基础是传输线矩阵法 (Transmission-Line Matrix method, TLM)^[7]。

2.2 仿真求解 PCB 辐射特性

本文所采用的 PCB 模型是基于某研究所的二次电源内部的实际 PCB 结构,其尺寸为 $80\text{mm} \times 1\text{mm} \times 60\text{mm}$ 。在 CST PCB Studio 中导入具有多层板结构的该 PCB 模型文件,对其进行划分网格操作,并用 PEEC 建模方法建立 PCB 等效模型。分网和建模完成后,可以在 CST Design Studio 中得到 PCB 的针脚分布。参照该 PCB 实际工作时的针脚接线情况,在 CST Design Studio 中为 PCB 的各针脚连上相对应的电子器件,如图 1 所示。

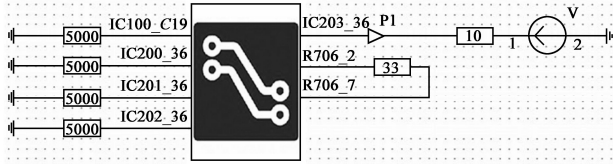


图1 PCB的针脚接线情况

由图 1 可知, IC100_C19、IC200_36、IC201_36、IC202_36 四个针脚分别接电阻值 $R = 5000\Omega$ 的电阻后再接地; 针脚 IC706_2、IC706_7 通过一电阻值 $R = 33\Omega$ 的电阻互连; 针脚 IC203_36 为输入端, 与电阻值 $R = 10\Omega$ 的电阻以及电压源 V 串联。在图 1 中, 器件 P1 为探针, 用于监测电压源输入到 PCB 的电压和电流。

参考 PCB 实际工作时所施加的交流电压, 在 CST Design Studio 中为电压源器件 V 上添加一个交流电压 AC-task, 并设置最大频率为 2GHz , 频率样本数为 500。设定电场监测模块, 该模块的尺寸为 $90\text{mm} \times 11\text{mm} \times 70\text{mm}$, 并且保证该模块的边界与 PCB 所对应的每个边界之间的距离都为 5mm 。通过仿真求解, 该模块可以获得 PCB 在实际工作时 PCB 所辐射的电磁能量。

3 干扰源为 PCB 的带孔机箱电磁特性求解

本小节将把 PCB 辐射的电磁能量导入到 CST Microstrips 中做为带孔机箱模型内部的干扰源, 并通过仿真计算得到干扰源为 PCB 的带孔机箱电磁辐射特性。

本文所采取的带孔机箱腔体尺寸规格为 $a \times b \times d = 200\text{mm} \times 120\text{mm} \times 160\text{mm}$, 机箱壁厚 $t = 1\text{mm}$, 材料为铝 (电导率为 $3.54 \times 10^7\text{S/m}$); 开孔尺寸为 $l \times w = 20\text{mm}$

$\times 20\text{mm}$, 开孔位置为机箱壁中心位置。将第 2 小节中所截取的 PCB 电磁辐射能量导入机箱内部作为干扰源, 并将此干扰源模块设置在机箱内部的中心位置。采用吸收边界作为仿真环境的边界条件, 并且设置吸收边界与机箱壁之间的距离为所对应的机箱尺寸的 30% 。网格划分则采用 CST Microstrips 自动分网技术。PCB 模块在机箱内部的位置以及整个仿真模型的网格划分信息如图 2 所示 (其中一个机箱壁被设置为隐藏, 以便更好观测 PCB 模块与带孔机箱的相对位置)。

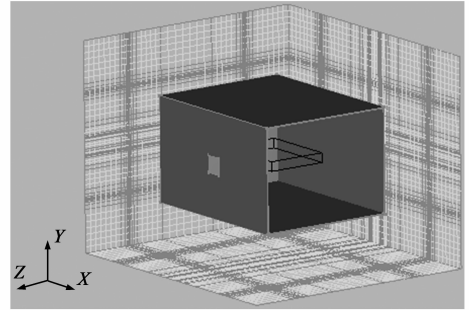


图2 仿真环境示意图

实际电子产品在进行 EMC 检测时所采用的方法为 3m 法, 即监测天线与电子设备的距离为 3m 。因此在本文中, 监测点设定在正对开孔中心距离开孔位置的 3m 处。通过仿真求解, 得到频段 $f = 0 \sim 3\text{GHz}$ 下监测点处的电场强度并将其取对数, 如图 3 所示。

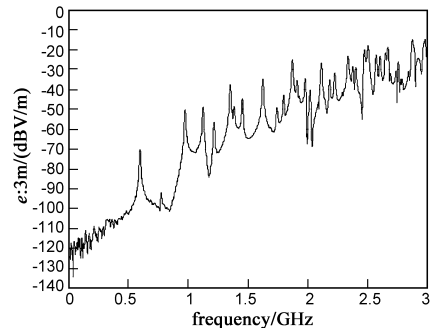


图3 监测点位于3m处的电场值

由图 3 可知, 随着频率的升高, 电子设备所辐射的电磁能量逐渐增大。

4 不同干扰源对比

本小节将把耦合微带线法^[4]与本文提出的 PCB 电磁辐射能量作为内部干扰源的方法进行对比。

保持带孔机箱的结构参数不变, 图 4 给出了两种方法所得到的三条 $E-f$ 曲线。其中, 实线是采取了第 2、第 3 小节的计算条件, 虚线则是在此基础上更改针脚 IC706_2、IC706_7 之间的电阻为 $R = 100\Omega$ 后的结果, 点线为耦合微带线法所得的结果。

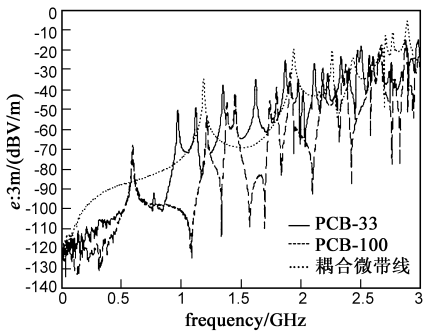


图4 不同干扰源所得电场值对比

由图 4 可知:(1)耦合微带线法所得结果与两种 PCB 作为内部干扰源所得结果大体趋势相同均随频率的升高而增大;(2)耦合微带线法所得电场曲线较之 PCB 作为内部干扰源法,会丢失部分谐振点,且在高频段处的准确度较低;(3)针脚 IC706_2、IC706_7 之间的电阻 R 分别为 33, 100 Ω 时,观测点处的电场值同样出现差异,说明不同的 PCB 类型同样会导致电子设备不同的电磁辐射特性。

综上所述,本文所提出的将 PCB 作为干扰源的方法较之耦合微带线法更为准确,并且适合不同 PCB 做为内部干扰源的情况。

5 开孔参数研究

常见开孔参数有开孔尺寸、开孔形状和开孔位置。本小节基于 PCB 作为内部干扰源的方法,分析了上述三种开孔参数对电子设备电磁辐射特性的影响。

5.1 开孔尺寸

保持第 2、第 3 小节中的计算参数不变,设定正方形孔的边长变化范围为 $l \in (1, 40)$ mm。图 5 给出了在频率 $f = 500$ MHz 条件下,监测点处的电场值 E 随 l 的变化规律。

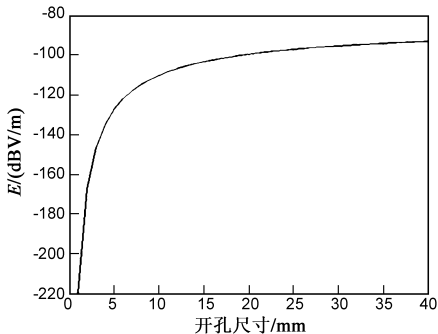


图5 开孔尺寸与电磁辐射特性之间的关系曲线

由图 5 可知,随着正方形孔的尺寸递增,带孔机箱辐射的电磁能量逐渐增大,监测点处的电场值随之升高,其升高趋势则随开孔尺寸的增大而逐渐变缓。

5.2 开孔形状

实际生产中常用的开孔形状大致有三种:正方形

孔、圆形孔、六角形孔。设定第一种开孔为正方形孔,开孔尺寸为 $l \times w = 20$ mm \times 20 mm;第二种开孔形式为圆形孔,并使其开孔尺寸逐渐增大,分别为与正方形孔内切,等面积以及外接。表 1 给出了计算频率 $f = 1$ GHz 条件下几种不同开孔情况下观测点处的电场值。

表 1 正方形孔与圆形孔的对比

	正方形孔	内切圆形孔	等面积圆形孔	外接圆形孔
电场值 (dB V/m)	-68.2	-73.3	-68.4	-62.1

保持正方形孔尺寸不变,设置三种不同开孔尺寸的六角形孔,其分别与正方形孔内接、等面积以及外接。表 2 给出了四种开孔情况下观测点处的电场值。

表 2 正方形孔与六角形孔的对比

	正方形孔	内接六角形孔	等面积六角形孔	外接六角形孔
电场值 (dB V/m)	-68.2	-74.8	-68.1	-61.9

由表 1、表 2 可知,随着开孔尺寸的增大,观测点处的电场值逐渐升高;当正方形孔、圆形孔、六角形孔的面积相等时,观测点处的电场值大致相等。

5.3 开孔位置

设置计算频率 $f = 2.5$ GHz,保持正方形孔尺寸 $l \times w = 20$ mm \times 20 mm 不变,图 6 给出了不同开孔位置下观测点处的电场值(图中每个节点的坐标值代表开孔中心为该坐标值的一个正方形孔)。

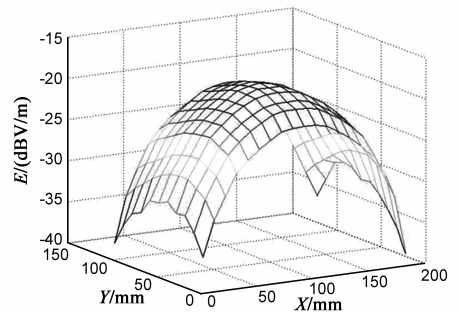


图6 开孔位置与电场值之间关系图

由图 6 可知,机箱壁中心处开孔时观测点的电场值最大;观测点处电场值与开孔位置的关系图围绕机箱壁中心点呈对称分布;开孔位置越靠近机箱壁的边角位置,观测点处的电场值越小。

6 总结

对于带孔机箱电磁辐射特性的仿真研究,本文提出了一种将 PCB 电磁辐射能量导入机箱内部作为干扰源的方法。这种方法一定程度上填补了国内外基于内部源法对电子设备电磁辐射特性进行研究的缺陷,并

且将为研究 PCB 做为内部干扰源的电子设备电磁辐射特性研究提供一定的方法指导。

通过对比本文提出的 PCB 电磁能量导入法和耦合微带线法可知:尽管对于不同的内部干扰源,所得到的电场值大体变化趋势是一致的,但其具体的电场值变化趋势以及谐振点分布却不尽相同,本文所提出的 PCB 做为内部源的方法更为精确,更适合实际电子设备的电磁辐射特性研究。

基于将 PCB 导入机箱内部作为干扰源的方法,本文研究了开孔尺寸、开孔形状、开孔位置对观测点处电场值的影响,并总结出以下可用于指导生产设计的规律性结论:

(1) 随着开孔尺寸逐渐增大,带孔机箱的电磁辐射逐渐增大,但其增大的趋势则逐渐变缓.实际生产中,可以先通过仿真得到 $E-I$ 关系曲线,再从 $E-I$ 关系曲线上选取最为合适的开孔尺寸。

(2) 不同开孔形状的单孔,只要面积相等,电子设备所辐射的电磁能量几乎相同.实际生产中,在保证开孔面积一致的情况下,可以更多的考虑开孔形状以满足散热和装配等需求。

(3) 在机箱壁中心处开孔,监测点处的电场值最大;在机箱壁四个边角开孔,带孔机箱的电磁辐射能量则较小.实际生产中,也应更多的考虑在机箱壁边缘处开孔。

参考文献

- [1] 石峥,杜平安,聂宝林.基于矢量有限元法的热沉结构电磁辐射研究[J].电子学报,2009,37(11):2439-2443.
Shi Zheng, Du Ping-an, Nie Baolin. Study on heatsink electromagnetic radiation based on vector FEM[J]. Acta Elctronica Sinica, 2009, 37(11): 2439-2443. (in Chinese)
- [2] M P Robinson, T M Benson, C Christopoulos. Analytical formulation for the shielding effectiveness of enclosures with apertures[J]. IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility, 1998, 40(3): 240-248.
- [3] Min Li, Joe Nuebel, James L Drenniak. EMI from cavity modes of shielding enclosures — FDTD modeling and measurements[J]. IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility, 2000, 42(1): 171-179.
- [4] 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 Xiangyu, Du Ping-an, Nie Baolin. Analysis for the shielding effectiveness of computer enclosure with single aperture based on TLM[J]. Journal of System Simulation, 2009, 21(23): 7493-7497. (in Chinese)

- [5] Ruehl. Equivalent circuit models for three dimensional multi-conductor systems[J]. IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques, 1974, 22(3): 216-221.
- [6] 李富华,赵吉祥,李征帆.基于 PEEC 方法的片内螺旋电感建模[J].半导体学报,2005,26(4):770-774.
Li Fuhua, Zhao Jixiang, Li Zhengfan. Inductance simulation based on PEEC[J]. Journal of Semiconductors, 2005, 26(4): 770-774. (in Chinese)
- [7] Hoefler. The transmission-line matrix method — Theory and applications[J]. IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques, 1985, 33(10): 882-893.

作者简介



刘恩博 男,1987 年出生于四川乐山,电子科技大学机械电子工程学院,博士研究生,主要研究方向为电磁兼容。
E-mail: 523199743@qq.com



杜平安(通信作者) 男,1962 年出生于重庆市,电子科技大学机械电子工程学院教授,博士生导师,主要研究方向为数字化设计与仿真。
E-mail: dupingan@uestc.edu.cn

周元 男,1981 年出生于重庆市,中电 24 所研究员,主要研究方向为 PCB 仿真与设计。
E-mail: 39692024@qq.com

任丹 男,1986 年出生于安徽淮南,电子科技大学机械电子工程学院博士研究生,主要研究方向为电磁场理论。
E-mail: 583602878@qq.com