

# 加装印刷电路板的圆孔阵矩形机壳屏蔽效能\*

路宏敏<sup>1</sup>, 刘国强<sup>1</sup>, 余志勇<sup>2</sup>, 那彦<sup>1</sup>

(1. 西安电子科技大学 电子工程学院, 西安 710071; 2. 解放军第二炮兵工程学院, 西安 710025)

**摘 要:** 为评估矩形金属机壳抗外部电磁干扰的能力, 建立加装印刷电路板(PCB)有圆孔孔阵矩形机壳的波导等效电路模型, 导出其电场屏蔽效能的简洁表达式, 提出一种简单高效的新方法, 对于没有加装印刷电路板的机壳, 该方法的简化结果与现有文献结果完全一致; 对于加装 PCB 的机壳屏蔽效能, 该方法计算结果与 CST 仿真结果良好吻合。结果表明: 电场极化方向与孔阵长度方向平行, 同其与孔阵长度方向垂直比较, 前者屏蔽效能显著优于后者; 所考虑的频率范围内, 加装 PCB 可以显著提高机壳的屏蔽效能; 正交排列孔阵的屏蔽效能优于交错排列孔阵的屏蔽效能; 保持孔阵中孔数目不变, 孔间距越大, 屏蔽效能越高。

**关键词:** 电磁兼容性; 印刷电路板; 屏蔽效能; 设备机壳; 圆孔阵

**中图分类号:** TN03 **文献标志码:** A

电子、电气设备机壳用于抵抗机壳内部的电磁场以及机壳外部的电磁骚扰源产生的电磁泄露, 必须满足电磁兼容性(EMC)要求。然而, 设备机壳的完整性常常受到提供可见性、通风以及检修等用途的缝隙和孔的破坏。开口能够使外部电磁场透入到设备机壳的内部空间, 耦合到印刷电路板(PCB)上, 从而在内部导体上感应电压和电流, 降低电子电路、元器件的工作性能, 甚至毁坏。因此, 研究含孔缝的设备机壳电磁屏蔽效能的分析方法, 具有重要的理论意义和应用价值。

屏蔽效能(Shielding Effectiveness, SE)是评价设备电磁兼容性的重要技术指标, 其定义为没有屏蔽体时观测点的场强幅度与存在屏蔽体时同一观测点的场强幅度之比, 以分贝表示为  $S_e = 20\lg(E_o/E_s)$ 。金属机壳的屏蔽效能受到机壳材料的电气特性、尺寸、厚度<sup>[1]</sup>, 机壳上孔缝的形状、尺寸、数量<sup>[2-12]</sup>, 机壳内部的印刷电路板<sup>[4,7,9,13]</sup>, 以及骚扰电磁波的照射方式、极化形式和工作频率等的显著影响。研究用电设备机壳屏蔽效能的常用方法有电磁边值问题严格求解<sup>[3,11]</sup>, 时域有限差分法<sup>[8]</sup>、传输线法、矩量法、以及各种混合方法等电磁场数值方法<sup>[9]</sup>, 实验方法<sup>[2,7-9]</sup>, 以及等效传输线法<sup>[2,9-10]</sup>。

等效传输线法提供了一种设计者能够分析设计参数对屏蔽效能的影响、以及快速计算屏蔽效能的方法<sup>[2,7,9-10]</sup>。P. Dehkhoda<sup>[2]</sup>等提出了分析含孔阵矩形金属空机壳屏蔽效能的波导等效电路模型; W. P. David<sup>[7]</sup>和 M. P. Robinson<sup>[9]</sup>等提出了分析含单孔矩形金属机壳屏蔽效能及其内置物加载效应的等效电路方法。借鉴他们的研究思路, 本文将矩形金属机壳等效为一段终端短路的波导传输线<sup>[10]</sup>, 将含单孔矩形金属机壳前面板等效为两端短路的共面传输线<sup>[7]</sup>, 将含孔阵矩形金属机壳前面板等效为导纳<sup>[2]</sup>, 建立加装 PCB、含孔阵矩形金属机壳的波导等效电路模型, 提出简单、高效计算其屏蔽效能的新方法, 进而分析印刷电路板的加装效应。

## 1 理论分析

### 1.1 小孔阵导纳

图 1 表示无限大金属平板上周期性 2 维孔阵的两种几何结构。对于垂直入射平面波, 无限大薄金属平板上的小孔阵相当于与 TEM 模传输线并联的一个感性电纳。假设孔阵没有电阻性损耗, 且  $d < d_h$ ,  $d < d_v$ ;  $d_h \ll \lambda$ ,  $d_v \ll \lambda$ , 图 1 所示的两种结构的归一化并联导纳为<sup>[2-3]</sup>

$$\frac{Y_{ah}}{Y_0} = -j \frac{3d_h d_v \lambda_0}{\pi d^3} \quad (1)$$

### 1.2 等效电路模型

阻抗  $Z_{ah} = 1/Y_{ah}$  作为连接自由空间和波导的模型<sup>[10]</sup>。图 2 描绘孔阵居中并部分穿透机壳壁的情况, 其有

\* 收稿日期: 2008-07-21; 修订日期: 2008-10-20

基金项目: 国家自然科学基金项目(60571059)

作者简介: 路宏敏(1961—), 男, 教授, 从事系统电磁兼容性、电磁场与微波技术研究; hmlu@mail.xidian.edu.cn。

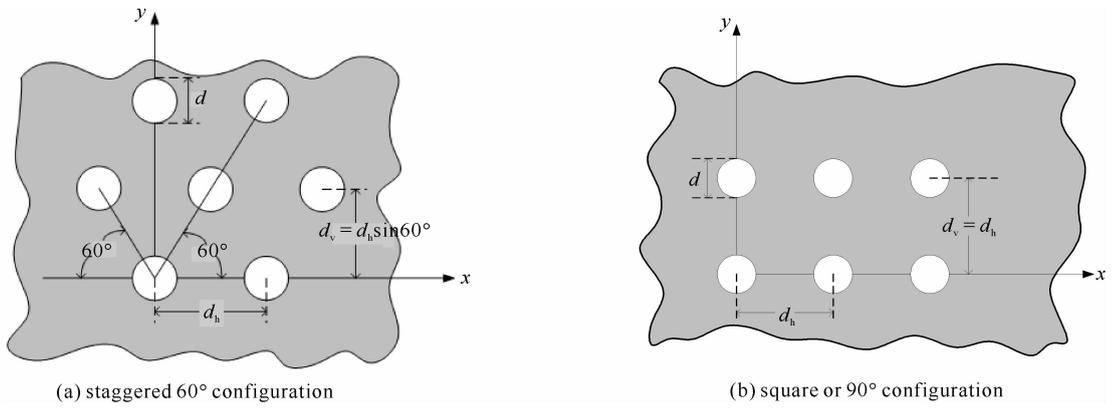


Fig. 1 Geometries of the 2-D array of holes in a metallic infinite flat plate

图 1 无限大金属平板上的 2 维孔阵结构

效的机壳壁孔阵阻抗  $Z'_{ah}$  是  $Z_{ah}$  的一部分。由阻抗比的概念<sup>[2]</sup>可知： $Z'_{ah} = Z_{ah}\omega l / ab$ ，其中  $l$  和  $\omega$  分别是孔阵的长度和宽度，且  $l = d_h/2 + (m-1)d_h + d_h/2$ ， $\omega = d_v/2 + (n-1)d_v + d_v/2$ ，这里  $m$  和  $n$  分别是沿孔阵长度方向和宽度方向上孔的个数。

实际的 PCB 包含导电面、有耗电介质、金属印制线和各种元器件，当这些相关细节不能够获得时，就不可能在设计阶段建立这一复杂系统的精确模型。然而可以应用实际 PCB 的宏观模型（等效介质板），代替横向完全填充机壳内部的 PCB，且期望 PCB 显著抑制电磁波。PCB 引起的电磁波抑制效应能够用一块厚度近似等于 PCB 厚度  $t$  且完全填充波导横截面的电介质近似表示<sup>[6]</sup>。如果介质块的有效相对介电常数为  $\epsilon'_r$ ，有效电导率为  $\sigma$ ，那么对于矩形机壳内部介质块加装区域中传播的  $TE_{10}$  模，其传播特性为  $Z'_g = (Z_0/\sqrt{\epsilon_r})/\sqrt{1-(\lambda'/2a)^2}$ ， $k'_g = k'_0 \times \sqrt{1-(\lambda'/2a)^2}$ ，其中  $k'_0 = 2\pi\sqrt{\epsilon_r}/\lambda$ ， $\lambda' = \lambda_0/\sqrt{\epsilon_r}$ ， $\epsilon_r = \epsilon'_r - j\sigma/2\pi f\epsilon_0$ ，且  $f, \lambda_0, Z_0, \epsilon_0$  分别是频率、自由空间中的波长、特性阻抗和介电常数。

### 1.3 屏蔽效能表达式

假设金属机壳由理想导体构成，那么垂直入射到含孔阵理想导体机壳上的电磁波仅能够从孔阵透入机壳内部。从而组合等效上述各部分的模型，就可以建立平面电磁波垂直照射加装 PCB 的含孔阵矩形机壳的波导等效电路，如图 3 所示。

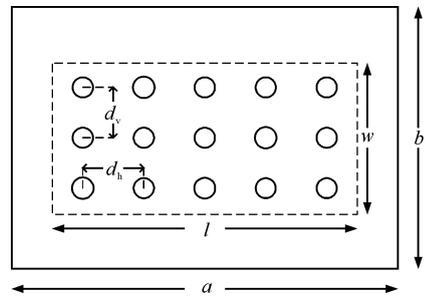
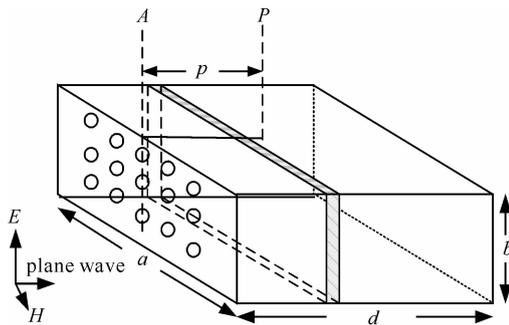
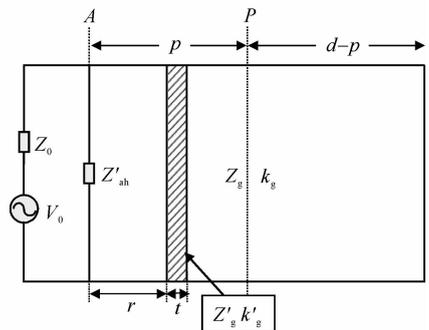


Fig. 2 Wall of an enclosure partially perforated by a centered array of holes

图 2 孔阵居中且部分穿透机壳壁



(a) rectangular enclosure with aperture arrays



(b) equivalent circuit model

Fig. 3 PCB-loaded rectangular enclosure with aperture arrays vertically illuminated by plane wave and corresponding circuit model

图 3 平面电磁波垂直照射加装 PCB 的含孔阵矩形机壳及其等效电路

依据上述波导等效电路和戴维南定律，孔阵处的等效电压源及其阻抗为

$$Z_1 = Z_0 Z'_{ah} / (Z_0 + Z'_{ah}), \quad V_1 = V_0 Z'_{ah} / (Z_0 + Z'_{ah}) \quad (2)$$

由传输线理论知，介质板左端处的电压  $V_r$  及阻抗  $Z_r$  可表示为

$$Z_r = \frac{Z_1 + jZ_g \tan(k_g r)}{1 + j(Z_1/Z_g) \tan(k_g r)}, \quad V_r = \frac{V_1}{\cos(k_g r) + j(Z_1/Z_g) \sin(k_g r)} \quad (3)$$

同理,介质板右端处的电压  $V_{r+t}$  及阻抗  $Z_{r+t}$  可表示为

$$V_{r+t} = \frac{V_r}{\cos(k'_g t) + j(Z_r/Z'_g)\sin(k'_g t)}, \quad Z_{r+t} = \frac{Z_r + jZ'_g \tan(k'_g t)}{1 + j(Z_r/Z'_g)\tan(k'_g t)} \quad (4)$$

PCB 右侧观测点  $P$  处等效电压源的阻抗和电压为

$$Z_2 = \frac{Z_{r+t} + jZ_g \tan[k_g(p-r-t)]}{1 + j(Z_{r+t}/Z_g)\tan[k_g(p-r-t)]}, \quad V_2 = \frac{V_{r+t}}{\cos[k_g(p-r-t)] + j(Z_{r+t}/Z_g)\sin[k_g(p-r-t)]} \quad (5)$$

由观测点  $P$  处向右看去,短路波导段的等效阻抗和  $P$  处的电压为

$$Z_3 = jZ_g \tan[k_g(d-p)], \quad V_P = V_2 Z_3 / (Z_2 + Z_3) \quad (6)$$

如果没有矩形屏蔽机壳,那么平面电磁波在自由空间传播,从而观测点  $P$  处的负载阻抗为  $Z_0$ ,电压  $V'_P = V_0/2$ ,因此电场屏蔽效能为

$$S_e = 20 \lg |V'_P/V_P| = 20 \lg |V_0/2V_P| \quad (7)$$

显然,矩形屏蔽机壳没有加装 PCB 时(空机壳),文中提出的等效电路及其屏蔽效能表达式与文献[2]的结果相同。

## 2 结果与分析

选取含孔阵矩形金属机壳的尺寸为  $a \times b \times d = 300 \text{ mm} \times 120 \text{ mm} \times 300 \text{ mm}$ ,壁厚为  $2 \text{ mm}$ 。PCB 与孔阵所在平面平行,尺寸为  $296 \text{ mm} \times 116 \text{ mm} \times 1 \text{ mm}$ ,置于距孔阵面  $100 \text{ mm}$  处的机壳内部。分析中实际 PCB 以一块有耗介质等效<sup>[6]</sup>,电导率  $\sigma = 0.22 \text{ S/m}$ ,介电常数  $\epsilon_r = 2.65$ 。观测点  $P$  距孔阵面  $150 \text{ mm}$ ,且正对孔阵面中心。圆孔孔阵面积  $l \times w = 100 \text{ mm} \times 60 \text{ mm}$ ,位于孔阵面中心。孔阵中的每个小圆孔直径  $d = 10 \text{ mm}$ ,孔阵长度  $l$  方向的孔间距  $d_h$  等于孔阵宽度  $w$  方向的孔间距  $d_v$ ,即  $d_h = d_v = 20 \text{ mm}$ ;孔阵中孔的个数为  $5 \times 3$ 。频率范围  $200 \sim 1000 \text{ MHz}$  的平面电磁波垂直孔阵面入射到机壳上。

基于上述加装 PCB 的含孔阵矩形金属机壳相关参数设定,采用本文提出的波导等效电路模型及电场屏蔽效能表达式(7),应用 MATLAB 语言编程计算屏蔽效能;同时针对同一金属机壳相关参数,采用通用专业软件 CST(CST STUDIO SUITE 2006B)进行仿真,两种方法计算的电场屏蔽效能如图 4 所示。

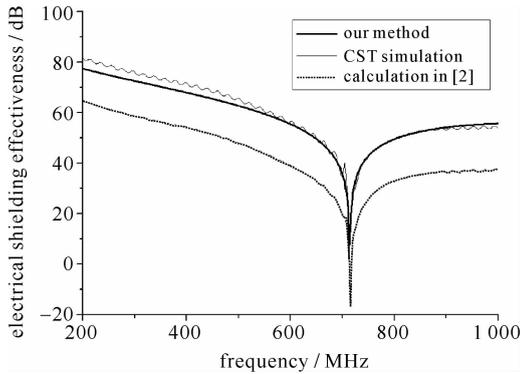


Fig. 4 Electrical SE comparison of different methods

图 4 不同方法电屏蔽效能的比较

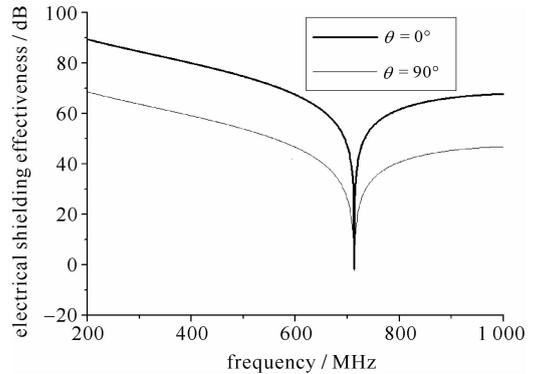


Fig. 5 Electrical SE vs orientation of polarization

图 5 极化方向与电屏蔽效能的关系曲线

图 4 表示观测点处,本文方法、CST 仿真和文献[2](没有加装 PCB,即空机壳)的电场屏蔽效能计算结果。从图 4 可以看出,本文方法与 CST 仿真结果良好吻合。当机壳没有加装 PCB 时,波导等效电路模型及电场屏蔽效能表达式完全可以简化为文献[2]的结果。因此,波导等效电路模型及电场屏蔽效能表达式是有效的。图中给出了机壳前 3 个谐振频率  $707.1, 1180, 1436 \text{ MHz}$  中的一个谐振频率,没有加装 PCB 的机壳,在第一个谐振频率处的电场屏蔽效能为负值;而加装 PCB 的相同机壳在谐振频率处的屏蔽效能大于零。由此可见,所考虑的频率范围内,加装 PCB(有耗介质块)可以显著提高机壳的屏蔽效能。

图 5 表示入射波电场极化方向与屏蔽效能的关系。电场极化方向与孔阵长度  $l$  方向平行( $\theta = 0^\circ$ )时的机壳屏蔽效能,同电场极化方向与孔阵长度  $l$  方向垂直( $\theta = 90^\circ$ )时的机壳屏蔽效能比较,前者显著优于后者。

图 6 描绘孔正交排列与交错排列(见图 1)时,含圆孔阵矩形金属机壳的屏蔽效能比较。从图 6 中可以看出,孔交错夹角越小,屏蔽效果越差。在其它条件相同的情况下,正交排列孔阵的屏蔽效果优于交错排列孔阵的屏蔽效果。

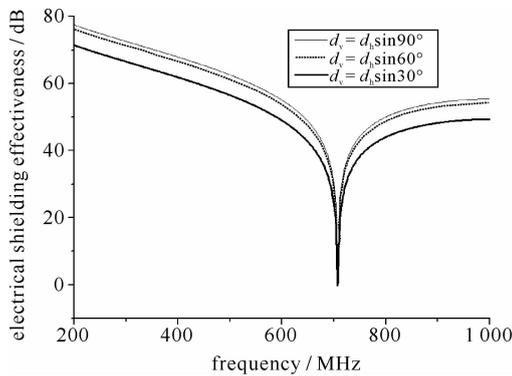


Fig. 6 Comparison of electrical SE between staggered configuration and square configuration

图 6 孔交错排列与正交排列的比较

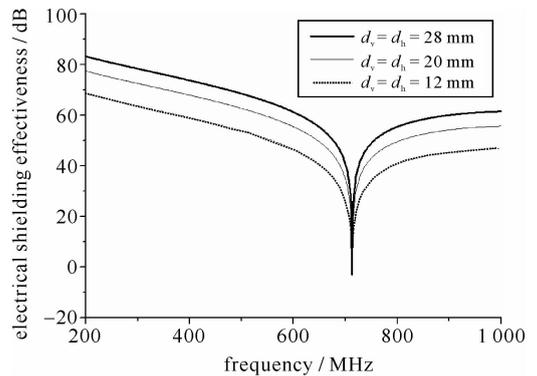


Fig. 7 Electrical SE for different aperture spacing

图 7 不同孔间距的屏蔽效能比较

图 7 描绘孔阵正交排列, 水平方向孔间距  $d_h$  和垂直方向孔间距  $d_v$  相同, 即  $d_h = d_v$ , 保持每个小圆孔直径不变, 孔阵中孔的个数也不变。仅仅改变孔间距(孔间距分别为 28, 20 和 12 mm), 从而导致孔阵面积  $lw$  变化时的屏蔽效能。结果显示: 圆孔阵的孔间距越大, 屏蔽效能越高, 屏蔽效果越好。

### 3 结论

基于含圆孔阵矩形金属机壳的屏蔽效能主要受最低波导模  $TE_{10}$  的影响, 以及机壳材料为理想导体的假设, 提出了加装印刷电路板、含圆孔孔阵矩形机壳屏蔽效能评估的波导等效电路及其电场屏蔽效能表达式。机壳没有加装 PCB 时, 文中提出的波导等效电路及其电场屏蔽效能表达式, 能够简化为已有文献的结果。对于具体的加装印刷电路板的含圆孔孔阵矩形机壳的屏蔽效能, 本文方法计算结果与 CST 仿真结果良好吻合。计算结果表明, 电场极化方向与孔阵长度方向平行, 同其与孔阵长度方向垂直比较, 前者屏蔽效能显著优于后者; 所考虑的频率范围内, 加装 PCB(有耗介质块) 可以显著提高机壳的屏蔽效能; 正交排列孔阵的屏蔽效果优于交错排列孔阵的屏蔽效果; 保持孔阵中孔数目不变, 孔间距越大, 屏蔽效能越高。

### 参考文献:

- [1] Araneo R, Lovat G. An efficient MoM formulation for the evaluation of the shielding effectiveness of rectangular enclosures with thin and thick apertures[J]. *IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility*, 2008, **50**(2):294-304.
- [2] Dehkhoda P, Tavakoli A, Moini R. An efficient and reliable shielding effectiveness evaluation of a rectangular enclosure with numerous apertures[J]. *IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility*, 2008, **50**(1):208-212.
- [3] Otoshi T Y. A study of microwave leakage through perforated flat plates[J]. *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, 1972, **20**(3):235-236.
- [4] Scogna A C, Schauer M. EMC simulation of complex PCB inside a metallic enclosure and shielding effectiveness analysis[C]//18<sup>th</sup> International Zurich Symposium on Electromagnetic Compatibility. 2007:91-94.
- [5] Rajamani V, Bunting C F, Deshpande M D, et al. Validation of model/MoM in shielding effectiveness studies of rectangular enclosures with apertures[J]. *IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility*, 2006, **48**(2):348-353.
- [6] Wallyn W, Zutter D D, Laermans E. Fast shielding effectiveness prediction for realistic rectangular enclosures[J]. *IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility*, 2003, **45**(4):639-643.
- [7] David W P, Thomas A C, Denton T K, et al. Model of the electromagnetic fields inside a cuboidal enclosure populated with conducting planes or printed circuit boards[J]. *IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility*, 2001, **43**(2):161-169.
- [8] Joe M L, Nuebel J L, Drewniak R E, et al. EMI from cavity modes of shielding enclosures-FDTD modeling and measurements[J]. *IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility*, 2000, **42**(1):29-38.
- [9] Robinson M P, Benson T M, Christopoulos C, et al. Analytical formulation for the shielding effectiveness of enclosures with apertures[J]. *IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility*, 1998, **40**(3):240-248.
- [10] Robinson M P, Turner J D, David W P, et al. Shielding effectiveness of a rectangular enclosure with a rectangular aperture[J]. *Electronics Letters*, 1996, **32**(17):1559-1560.
- [11] Mendez H A. Shielding theory of enclosures with apertures[J]. *IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility*, 1978, **20**(2):296-305.
- [12] 路宏敏. 工程电磁兼容[M]. 西安:西安电子科技大学, 2003. (Lu Hongmin. Engineering electromagnetic compatibility. Xi'an, Xidian Uni-

versity Press, 2003)

- [13] 汪柳平,高攸纲. 装有电路板孔阵矩形腔对快上升前沿电磁脉冲的屏蔽效能[J]. 强激光与粒子束, 2008, **20**(1):162-166. (Wang Liuping, Gao Yougang. Shielding effectiveness of PCB loaded rectangular cavity with aperture arrays to front rising electromagnetic pulse. *High Power Laser and Particle Beams*, 2008, **20**(1):162-166)

## Shielding effectiveness of PCB loaded rectangular enclosure with circular-aperture array

Lu Hongmin<sup>1</sup>, Liu Guoqiang<sup>1</sup>, Yu Zhiyong<sup>2</sup>, Na Yan<sup>1</sup>

(1. *School of Electronic Engineering, Xidian University, Xi'an 710071, China;*

2. *The Second Artillery Engineering University of PLA, Xi'an 710025, China*)

**Abstract:** With the purpose of evaluating the ability for a metallic rectangular enclosure with an array of circular apertures and a printed circuit board(PCB) against the external electromagnetic interference, a waveguide equivalent circuit model was established, the analytical formulation of shielding effectiveness(SE) was derived from the equivalent circuit, and a simple and high-effective approach was proposed. In the case of the enclosure without PCB, the approach is identified with that in the reference. With respect to the SE of the PCB loaded enclosure, the calculated results using the present approach are in well agreement with those obtained by commercially available numerical tool CST. The results show that the comparison between electric field orientations parallel and perpendicular to the length direction of the aperture array was made, and the former has an advantage over the latter in SE; the SE is evidently improved by means of loading the enclosure with a PCB; the SE of a 90°aperture array configuration is much better than that of the staggered configuration; the larger the aperture spacing is, the better the SE is, when the number and configuration of apertures are constant.

**Key words:** electromagnetic compatibility; printed circuit board; shielding effectiveness; equipment enclosures; array of circular apertures