

文章编号: 1005-8451 (2011) 05-0012-03

## 带孔缝机箱对电磁脉冲的屏蔽效能研究

杨永亮, 王化深

(北京交通大学 电子信息工程学院, 北京 100044)

**摘要:** 在铁路系统中, 为保证设备不受外界的电磁干扰, 经常对设备采用金属机箱屏蔽的措施, 而金属机箱上又不可避免地开有各种孔缝。本文研究电磁脉冲斜入射情况下带孔缝的金属机箱的屏蔽效能, 和正入射情况下的屏蔽效能作比较。文中指出了屏蔽效能的计算方法, 对不同形状和不同数目的孔缝情况下机箱的屏蔽效能进行比较分析。在孔缝面积相同的情况下, 开圆形孔和方形孔的机箱屏蔽效能要比开矩形孔的机箱高, 多孔机箱屏蔽效能要高于单孔情况下机箱的屏蔽效能。

**关键词:** 电磁脉冲; 孔缝; 屏蔽效能

中图分类号: U228

文献标识码: A

### Study on shielding effectiveness of electromagnetic pulse to metal enclosure with slot YANG Yong-liang, WANG Hua-shen

(School of Electronic and Information Engineering, Beijing Jiaotong University, Beijing 100044, China)

**Abstract:** In railway systems, the equipments were often shielded with metal enclosure to protect them from external electromagnetic interference. But it couldn't be avoided that there were different kinds of slots on the enclosure. This paper researched on the shielding effectiveness of the metal enclosure when electromagnetic pulse(EMP) propagated into slots with an angle, and compared it with the result that the direction of EMP's propagation was vertical to the slot. The paper showed the calculation method of the shielding effectiveness, and analyzed the shielding effectiveness of the metal enclosure with different shapes and numbers of slots. When the area of the slot is the same, the shielding effectiveness of metal enclosure with circular and square slot was higher than that with rectangular slot. The shielding effectiveness of metal enclosure with multi-aperture was higher than that with single aperture.

**Key words:** electromagnetic pulse(EMP); slot; shielding effectiveness

在现代铁路系统中, 电子、电气设备的使用越来越广泛。这些设备产生的电磁信号构成了极其复杂的电磁环境, 并可能对彼此产生干扰。为了保证设备的正常工作, 最常用的屏蔽方法就是在设备外部加以金属机箱来进行屏蔽, 可实现机箱内部和外部场的隔离。但是由于通风、散热、电源和通信导线的接口、设备的显示仪表安装等原因, 在屏蔽机箱之上必定存在有孔缝。外部的电磁干扰信号会通过这些孔缝耦合至机箱内部, 从而使机箱的屏蔽效能降低。

### 1 屏蔽原理

#### 1.1 屏蔽效能的定义

对于屏蔽作用的评价可以用屏蔽效能来表示:

$$SE_E(dB)=20\lg(E_2/E_1)$$

收稿日期: 2010-07-28

作者简介: 杨永亮, 在读硕士研究生; 王化深, 教授。

$$SE_H(dB)=20\lg(H_2/H_1)$$

式中,  $E_1$ ,  $H_1$  为加上屏蔽后待测点的电场强度和磁场强度;  $E_2$ ,  $H_2$  为未加屏蔽前待测点的电场强度和磁场强度  $SE_E$ ,  $SE_H$  为电场屏蔽效能和磁场屏蔽效能。

对于远场而言, 由于电磁场是同一的整体, 所以  $SE_E=SE_H=SE$ 。即电场屏蔽效能和磁场屏蔽效能是一致的, 统称电磁屏蔽效能。本文将从电场屏蔽方面来进行机箱屏蔽效能的研究。

#### 1.2 吸收损耗和反射损耗

当电磁波进入金属屏蔽体后将产生感应电流, 该电流又产生欧姆损耗, 并变为热能而耗散, 电磁波在金属体中以指数方式很快地衰减, 传输距离很短。电磁波在金属体中的传输衰减规律可表示:

$$E_b = E_0 e^{-b/\delta}$$

式中,  $E_0$  为电磁波入射到金属体表面时的电场强度;  $E_b$  为电磁波在金属体内部的电场强度;  $b$  为电磁波深入到金属体内的距离;  $\delta$  为集肤深度。

集肤深度和频率与材料性能有关，可表示：

$$\delta = \sqrt{\frac{1}{\pi f \mu \sigma}} \text{ (m)}$$

式中， $f$ 为频率； $\mu$ 为金属体磁导率； $\mu = \mu_0 \mu_r$ ， $\mu_0$ 为自由空间磁导率； $\mu_r$ 为金属体相对磁导率。 $\sigma$ 为金属的电导率， $\sigma = \sigma_0 \sigma_r$ ， $\sigma_r$ 为金属相对铜的电导率。

因此，金属体的吸收损耗可表示为：

$$A(\text{dB}) = 20 \lg \frac{E_0}{E_b} = 1.31 b \sqrt{f \mu_r \sigma_r}$$

从式中可以看出，金属体越厚吸收损耗越大，吸收损耗随着频率的升高而增加。

反射损耗是由于电磁波在空气介质和金属体中的波阻抗不相等而造成的，当电磁波到达两种介质分界面时，因阻抗不匹配而发生反射。电场的反射损耗可用下式来表示：

$$R_E(\text{dB}) = 321.7 + 10 \lg \left( \frac{\sigma_r}{\mu_r f^3 d^2} \right)$$

式中  $d$  为干扰源到金属体的距离。可以看出，反射损耗与频率和干扰源的距离成反比关系。

## 2 建模仿真与分析

### 2.1 模型建立

以一金属机箱为研究对象，机箱材料设为理想导体，大小为  $30 \text{ cm} \times 30 \text{ cm} \times 12 \text{ cm}$ ，厚度为  $2 \text{ mm}$ 。孔缝开在  $30 \text{ cm} \times 12 \text{ cm}$  的面上，孔缝的形状有矩形孔、圆孔、方孔以及  $2 \times 2$  的圆孔阵和方孔阵，用以研究不同孔缝对机箱屏蔽效能的影响。

激励源选择双指数脉冲，函数表达式为：

$E(t) = E_0 (e^{-\beta t} - e^{-\alpha t})$ ,  $E_0 = 50 \text{ kV/m}$ ,  $\alpha = 8.98 \times 10^8 \text{ s}^{-1}$ ,  $\beta = 4.7 \times 10^7 \text{ s}^{-1}$ 。如图 1。求解频率范围为  $0 \text{ Hz} \sim 1 \text{ GHz}$ ，电磁脉冲入射方向平行于  $yoz$  平面，与  $y$  轴成  $45^\circ$  角。

### 2.2 单孔屏蔽效能

在机箱上开一  $16 \text{ cm} \times 2 \text{ cm}$  的矩形缝，研究矩形缝下机箱的屏蔽效能。图 2 和图 3 分别是距矩形孔缝处  $3 \text{ cm}$  和机箱中心处的电场强度时域波形。从图中可以看出，在所构造的屏蔽机箱和孔缝尺寸条件下，电磁脉冲的波头很容易耦合进机箱内部，而波尾耦合进机箱则比较困难。也就是说，

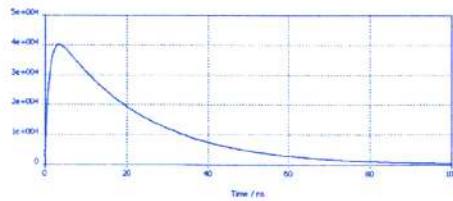


图 1 双指数脉冲激励源

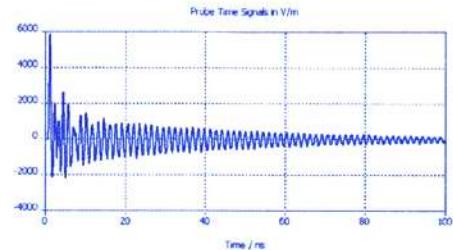


图 2 距矩形孔缝  $3 \text{ cm}$  处电场强度时域波形

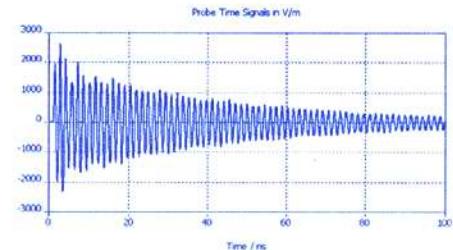


图 3 矩形孔缝机箱中心处电场强度时域波形

电磁脉冲的高频分量很容易耦合进机箱内部，而低频分量则被截止。

保持孔缝面积不变，在机箱上开出半径为  $32 \text{ mm}$  的圆形孔和边长为  $56 \text{ mm}$  的方形孔，研究其屏蔽效能。距孔缝处  $3 \text{ cm}$  和机箱中心处的电场强度时域波形如图 4~图 7。从图中可以看出，同样是电磁脉冲的波头很容易耦合进机箱内部，而波尾耦合进机箱则比较困难。电磁脉冲在屏蔽机箱内部衰减很快，脉冲场主要集中在孔缝附近，在机箱中心处脉冲幅值也有很大的衰减。因此，应该将敏感设备或器件放在距离孔缝较远的位置。比较图 2~图 7 可知，在面积相同时，经方孔和圆孔耦合进机箱的电场强度要比矩形孔小很多。

计算出机箱中心处在矩形孔和圆形孔以及方形孔的屏蔽效能，圆形孔和方孔的屏蔽效能很接近，且都比矩形孔的屏蔽效能高出大约十几分贝以上。所以，在机箱需要开孔缝时，应尽量避免开

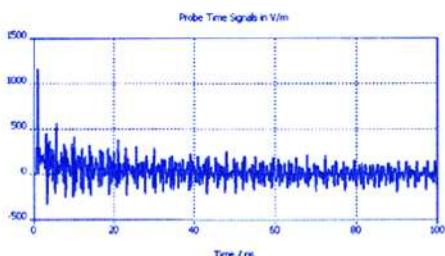


图4 距圆形孔3cm处电场强度时域波形

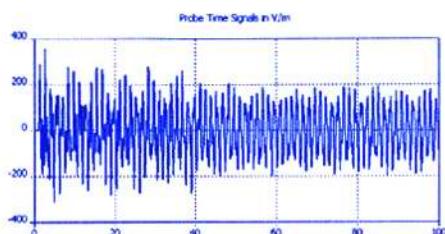


图5 圆形孔机箱中心处电场强度时域波形

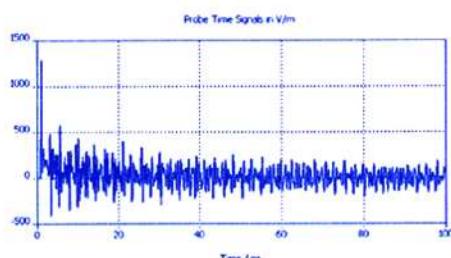


图6 距方形孔3cm处电场强度时域波形

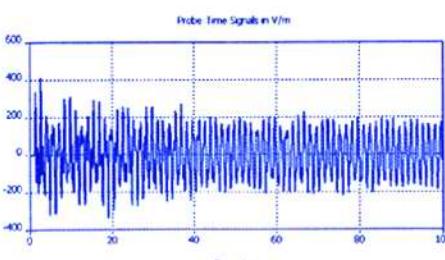


图7 方形孔机箱中心处电场强度时域波形

矩形孔缝，而选择圆形或方形孔。注意到在700 MHz附近屏蔽效能有很大的下降，屏蔽效能约-20 dB，这是由于机箱腔体的谐振造成的。

### 2.3 多孔屏蔽效能

保持孔缝总面积不变，在机箱上开出 $2 \times 2$ 的圆孔阵和方孔阵。每个小圆孔的半径为16 mm，圆心间距40 mm。每个小方孔的边长为28 mm，方

孔中心间距同样为40 mm。计算两种情况下机箱中心处的屏蔽效能，并和单孔做对比，在保持孔缝总面积不变的情况下，增加孔缝的数量可以相应提高机箱的屏蔽效能。同样会因为机箱腔体的谐振效应造成谐振频率附近屏蔽效能的下降。

### 2.4 电磁脉冲正对孔缝入射情况下的屏蔽效能

保持其它条件不变，将电磁脉冲的入射方向改为和孔缝垂直，研究此时的屏蔽效能。对于圆孔来说，正入射和斜入射情况下各频率点的屏蔽效能基本一致，只是在高频阶段，部分频点处斜入射时的屏蔽效能高于正入射时屏蔽效能。对于方孔来说，在低频阶段，部分频点处斜入射时的屏蔽效能高于正入射时屏蔽效能。

## 3 结语

通过以上分析，可以看出，屏蔽机箱靠近孔缝处的耦合电场强度较大，敏感器件的布置应该避开这个位置。由于机箱谐振的因素会导致谐振频率附近屏蔽效能的很大下降，甚至降至0 dB以下。在孔缝面积相同的情况下，开圆形孔和方形孔的机箱比开矩形孔的机箱屏蔽效能高。同样，在孔缝总面积相同的情况下，通过增加孔缝的数量同样可以提高机箱的屏蔽效能。电磁脉冲在正入射和斜入射情况下的屏蔽效能基本一致，只是在部分频点处存在一定的差异。

### 参考文献：

- [1] Ludger Klinkenbusch. On the Shielding Effectiveness of Enclosures[C]. IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility, 2005, 47(3):589-601
- [2] 范颖鹏, 杜正伟, 龚克. 开缝矩形腔屏蔽特性的研究[J]. 电子与信息学报, 2005, 27 (12).
- [3] Xufeng Zhang, Weidong Zhang, Xiang Cui. Research on shielding effectiveness of enclosure with apertures[J]. Asia-Pacific International Symposium on Electromagnetic Compatibility, 2010. 928-931.
- [4] 田东, 陈少昌. 孔缝矩形腔屏蔽效能仿真分析[J]. 舰船电子工程, 2009, (11): 188-190.
- [5] 沙斐. 机电一体化系统的电磁兼容技术[M]. 北京: 中国电力出版社, 北京, 1999.