

文章编号: 1005-8451 (2011) 05-0008-04

双侧开孔矩形金属腔体的屏蔽效能仿真分析

卢 怡, 闻映红

(北京交通大学 电磁兼容实验室, 北京 100044)

摘 要: 介绍了屏蔽原理及开孔金属腔体屏蔽效能的计算方法, 建立单侧单孔、单侧双孔、双侧单孔、双侧双孔4种矩形金属腔体模型, 使用FEKO (电磁仿真软件), 模拟各腔体在外部电磁干扰下的内部场分布, 分析其差异。

关键词: 金属腔体; 屏蔽效能; 电磁场仿真; 电磁仿真软件

中图分类号: U228

文献标识码: A

Simulative analysis on shielding effectiveness of rectangular metal enclosure with bilateral apertures

LU Yi, WEN Ying-hong

(EMC Laboratory of Beijing Jiaotong University, Beijing 100044, China)

Abstract: In this paper, the principle of shielding and the calculation method of shielding effectiveness for metal enclosure were introduced. Four kinds of models for rectangular metal enclosure with unilateral and single aperture, unilateral and double apertures, bilateral and single aperture, bilateral and double apertures were built. The software named FEKO was applied to simulate the distribution of interior electromagnetic field under the interference of outside electromagnetism, analyze the difference of each model.

Key words: metal enclosure; shielding effectiveness; electromagnetic simulation; FEKO

随着电气化铁路的发展, 电子电气设备已广泛应用于铁路各个系统, 其电磁干扰问题也日趋严重。电磁屏蔽技术能够减弱外界对敏感设备的伤害, 是保护敏感设备的有效手段。采用封闭屏蔽的方法, 选择适当的屏蔽材料和屏蔽层厚度, 理论上可获得任意大的屏蔽效能。在实际使用中, 由于通风散热、布线等要求, 往往需要在屏蔽体上钻孔开缝, 这就破坏屏蔽的完整性, 使得外部电磁骚扰能够通过孔缝进入到屏蔽体内部, 干扰设备正常工作。本文所利用的电磁仿真软件FEKO是一款用于3D结构电磁场分析的仿真工具。对单侧开孔、双侧开孔的金属腔体做对比仿真, 分析其屏蔽效能的差异。

1 基本原理

1.1 屏蔽的作用原理

收稿日期: 2010-07-08

基金项目: 中央高校基本科研业务费专项资金资助 (2009YJS012),

中央高校基本科研业务费专项支持 (2009JBM154)。

作者简介: 卢 怡, 在读硕士研究生; 闻映红, 教授。

屏蔽的作用原理如下: 在一次场 (源引起的场) 的作用下, 屏蔽体表面产生感应电荷, 其壁内产生电流和磁极化。这些电荷、电流和磁极化又产生出二次场, 二次场与一次场相叠加, 使得防护区域内的合成场弱于原来的一次场。

也可理解为: 场源所产生的电磁能流一部分被屏蔽体反射回去, 而另一部分则被引导着从屏蔽体的壁内通过, 从而无法进入空间防护区域。^[4]

1.2 屏蔽效能的定义^[2-5]

对于屏蔽作用的评价用屏蔽效能来表示

$$SE_E(dB)=20\lg(E_2/E_1) \quad (1)$$

$$SE_H(dB)=20\lg(H_2/H_1) \quad (2)$$

上式中: E_1, H_1 表示加上屏蔽后待测点的电场强度和磁场强度; E_2, H_2 表示未加屏蔽前待测点的电场强度和磁场强度; SE_E, SE_H 表示电场屏蔽效能和磁场屏蔽效能^[1]。

对于远场而言, 电磁场是统一的整体, 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。即

$$SE_E=SE_H=SE \quad (3)$$

1.3 有孔腔体屏蔽效能的计算^[3-6]

若腔体上有方形孔洞,外界电磁波就可通过这些孔洞进入腔体内部。首先考虑正方形孔洞,设孔洞面积为 S ,屏蔽体的面积为 A ,若 A 远大于 S ,且孔洞尺寸比电磁波的波长小得多时,电磁场通过孔洞的传输系数为:

$$T = \frac{H_p}{H_0} = 4 \left(\frac{S}{A} \right)^{3/2} \quad (4)$$

H_0 、 H_p 分别为屏蔽体孔洞前、后侧的磁场。

若屏蔽体上有 n 个孔洞,则传输系数为:

$$T_{nh} = 4n \left(\frac{S}{A} \right)^{3/2} \quad (5)$$

矩形孔洞要比圆形或正方形孔洞传输系数大。

有孔洞金属屏蔽体,其总传输系数 T_s 为金属导体本身的穿透传输系数 T_s 与孔洞的传输系数 T_{nh} 之和,则考虑孔洞影响后的屏蔽体的屏蔽效能为:

$$SE = 20 \lg \left| \frac{1}{T_s + T_{nh}} \right| \quad (6)$$

对于电场,由于金属板本身的传输系数几乎为零,因此屏蔽体总的传输系数决定于孔洞的穿透传输系数,屏蔽效能基本上不随频率 f 和距离 r 而变化;对于磁场,在低频时,屏蔽体总的传输系数取决于金属板本身的传输系数,在高频时,则决定于孔洞的穿透传输系数,因而对磁场的屏蔽效能随着频率的增加而增加,在同一频率下,随着距离 r 的增大而增大。

2 仿真分析

2.1 建立仿真模型

电磁仿真软件(FEKO)以矩量法(MOM)为基础。

本文建立单侧单孔、单侧双孔、双侧单孔、双侧双孔4种矩形金属腔体模型。腔体的几何尺寸为 $3 \text{ m} \times 1 \text{ m} \times 1 \text{ m}$ ($X \times Y \times Z$),材料特性为理想导体,边界完美匹配,屏蔽体壁厚 0.1 m ,远大于趋肤深度,此时屏蔽体内部的电磁波可认为完全是通过孔缝耦合进去的。单侧单孔模型在腔体近端 $3 \text{ m} \times 1 \text{ m}$ 平面(平行于 XZ 面的平面)中央开几何尺寸为 $0.5 \text{ m} \times 0.3 \text{ m}$ 的孔,双侧单孔模型则在对应平面加开同样的孔。双孔模型在同一侧开的两孔相对称,两孔中心位置相距 1 m 。骚扰源为组合平面波如图1,其频率范围从 $100 \text{ kHz} \sim$

30 MHz 连续,相邻两平面波入射方向夹角为 45° ,用以模拟混响室测试环境,利用统计平均计算金属腔体的屏蔽效能。

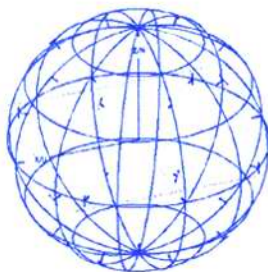


图1 组合平面波骚扰源

2.2 仿真结果与分析

2.2.1 电场磁场屏蔽效能比较

组合平面波作为骚扰源分别作用于4种矩形金属腔体,将4种腔体中心位置的电场屏蔽效能和磁场屏蔽效能分别作图比较,如图2和图3:

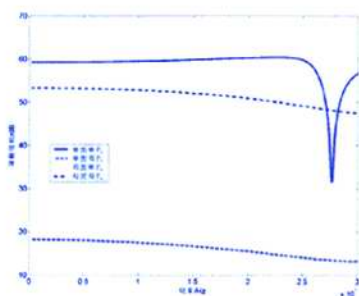


图2 电场屏蔽效能比较图

分析图2,图3可知,(1)单侧单孔金属腔体的电场屏蔽效能在 $100 \text{ kHz} \sim 2.5 \text{ MHz}$ 频率范围内始终保持在 60 dB 左右,走势平稳,明显优于其他3种腔体模型,在 $2.5 \text{ MHz} \sim 3 \text{ MHz}$ 频率范围内其电场屏蔽效能有大幅下降,下降幅度在 30 dB 左右,之后又恢复到了 0 dB 以上的水平。单侧双孔模型的电场屏蔽效能最差,始终保持在 20 dB 以下,与其他3种模型相差 30 dB 左右,且其电场屏蔽效能有随频率增加而减小的趋势。两种双侧模型的电场屏蔽效能在 $100 \text{ kHz} \sim 3 \text{ MHz}$ 频率范围内始终保持在 $50 \text{ dB} \sim 60 \text{ dB}$ 之间,且有随频率增加而减小的趋势。

双侧双孔模型的磁场屏蔽效能最好,始终保持在 95 dB 以上,且随着频率增加而增加,在 3 MHz

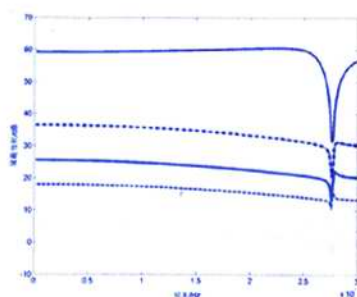


图3 磁场屏蔽效能比较图

频率下其磁场屏蔽效能达到 100 dB。除单侧单孔模型以外，其他3种模型的磁场屏蔽效能变化趋势一致，均随频率增加而增加，且都保持在 90 dB 以上。单侧单孔模型的磁场屏蔽效能从 1 MHz 频率开始明显下降，在 3 MHz 频率下达到 80 dB 左右，是 4 种模型中最低的。

2.2.2 同一腔体不同测试点屏蔽效能

在每个腔体内截取两个平行于 $3\text{ m} \times 1\text{ m}$ 表面 (X × Z) 的截面，截面 1 过腔体中心，截面 2 与截面 1 平行，且相距 0.2 m。在每个截面上取 3 个测试点，其位置分布如图 4。

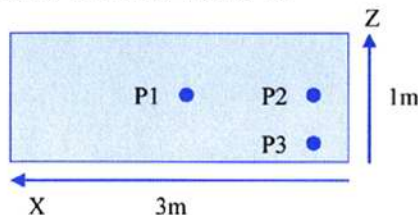


图4 截面测试点分布

这样，每个腔体内含 6 个测试点，同一腔体不同测试点的屏蔽效能比较如图 5。

分析图 5 可知，4 种模型中心点 P1 的电场/磁场屏蔽效能均优于模型内部其他点，而截面 2 上的 P2 点是 6 个测试点中电场/磁场屏蔽效能最差的。

单侧单孔模型中，各点电场屏蔽效能的变化幅度不大，趋势平稳，在 2.5 MHz~3 MHz 频率范围内各点的电场屏蔽效能都存在一个明显的下降至回复过程。两个截面上的 P1 点磁场屏蔽效能变化趋势一致，幅度上相差 10 dB 左右，其它 4 点的磁场屏蔽效能变化趋势一致，且 6 点的磁场屏蔽效能能在 2.5 MHz~3 MHz 频率之间也有一个明显的突变。

单侧双孔模型的各点电场屏蔽效能普遍随频率增加而减小，变化幅度在 5 dB 左右。截面 1 上

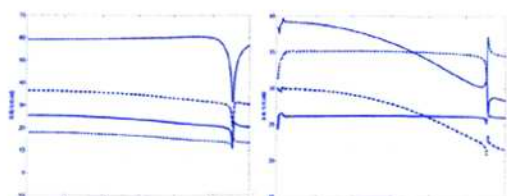


图 a. 单侧单孔模型电场屏蔽效能

图 b. 单侧单孔模型磁场屏蔽效能

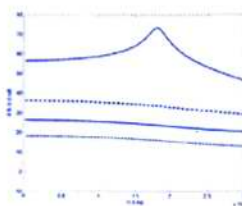


图 c. 单侧双孔模型电场屏蔽效能

图 d. 单侧双孔模型磁场屏蔽效能

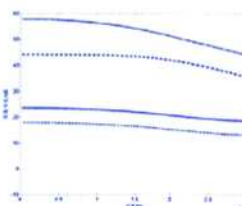


图 e. 双侧单孔模型电场屏蔽效能

图 f. 双侧单孔模型磁场屏蔽效能

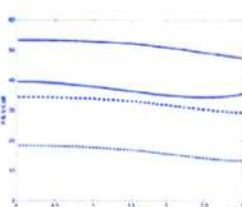


图 g. 双侧双孔模型电场屏蔽效能

图 h. 双侧双孔模型磁场屏蔽效能



图5 同一腔体不同测试点屏蔽效能比较

的 P1 点，其电场屏蔽效能在 1.5 MHz~2 MHz 频率范围内突增，由 60 dB 增至 75 dB 左右，之后又下降到 50 dB 左右。各点磁场屏蔽效能的变化趋势不一致，除截面 2 上的 P1 点外，均随频率增加而小幅增大或减小，变化幅度不超过 2 dB。截面 2 上的 P1 点随频率减小了 8 dB，变化最为明显。

双侧单孔模型的电场屏蔽效能也随着频率增加而减小，变化趋势较一致。截面 2 上 P1 点的磁场屏蔽效能随频率增加降低的幅度较快，跌幅达 15 dB。

各模型中测试点屏蔽效能的变化趋势基本一致，出入较大的只有截面 2 上的 P1 点，既截面 2 的中心点，其原因有待进一步研究分析。

总体来讲，双侧开孔较之单侧开孔，屏蔽体的电场屏蔽效能有所下降，但下降的幅度并不大。而双侧开孔模型的磁场屏蔽效能，在某些位置甚至优于单侧开孔模型。原有的双侧开孔模型屏蔽效能小于单侧开孔模型的猜想被推翻。

3 结束语

以往对金属腔体的仿真分析往往倾向于使用单面开孔模型，本文建立了 4 种腔体模型，两个单侧开孔，两个双侧开孔。仿真计算后，就同一模型内部不同测试点的仿真数据进行比较，还比较了单侧开孔模型与双侧开孔模型内部同一位置观测点的仿真数据，更全面的得到了开孔金属腔体内部电磁场的分布情况及屏蔽效能情况。

参考文献：

[1] Robinson, M.P., Benson, T.M., Christopoulos, C., Dawson, J. F., Ganley, M.D., Marvin, A.C., Porter, S.J. and Thomas, D. W.P., "Analytical formulation for the shielding effectiveness of enclosures with apertures," [J]IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility, Vol. 40, August 1998, 240-248.

[2] 喻建, 余志勇. 基于 FEKO 的金属腔体屏蔽效能研究[J]. 现代电子技术, 2010, 2: 137-139.

[3] 许允之, 张军国, 李国欣, 刘青. 孔缝对电力设备机箱电磁屏蔽效能的影响[J]. 工矿自动化, 2008, 1: 36-38.

[4] 沙皮罗. 电磁屏蔽的理论基础.[M]. 北京: 国防工业出版社, 1983.

[5] 徐亮. 缝隙对屏蔽效能的影响分析[J]. 信息与电子工程, 2008, 6 (3): 176-179.

[6] 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, 1999.

责任编辑 徐侃春

(上接 P7)

表 2 牵引变压器的生命周期维修成本率

| R | N=1 | N=2 | N=3 | N=4 | N=5 | N=6 | N=7 | N=8 | N=9 |
|------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
| 0.8 | 6.8778 | 5.1335 | 4.7133 | 4.6160 | 4.6430 | 4.7282 | 4.8435 | 4.9750 | 5.1156 |
| 0.85 | 6.9329 | 5.5181 | 5.1710 | 5.1124 | 5.1691 | 5.2804 | 5.4200 | 5.5747 | 5.7374 |
| 0.9 | 6.9848 | 6.0284 | 5.8090 | 5.8198 | 5.9275 | 6.0820 | 6.2605 | 6.4514 | 6.6481 |

防性维修间隔，优化预防性维修次数，使牵引变压器在其生命周期内维修成本率最小，试验结果及其分析验证了本文提出方法的有效性。

2.3 牵引变压器的生命周期维修成本率

为了确定牵引变压器的最优预防性维修次数，可根据 (2) 式计算得出生命周期成本率，本例中其参数取值为 $C_m=50$, $C_{pm}=100$, $C_p=30$, $C_r=200$, $\sigma=3$ ，计算结果如表 2，当可靠性阈值 $R=0.8$ 、 0.85 时，牵引变压器的最优预防性维修次数为 4，当可靠性阈值 $R=0.9$ 时，牵引变压器的最优维修次数为 3。可见为了保证牵引变压器的可靠性要求，随着可靠性阈值的增加，维修成本率也随之增加。

3 结束语

传统的预防性维修不能满足铁路新型动车设备的维修要求，因此，本文以牵引变压器为例研究了 RCM 的在动车设备中的应用。采用截尾试验法估计牵引变压器的威布尔故障分布参数，在满足设备可靠性的前提下根据故障率演化规则确定预

参考文献：

[1] 王敏, 王长林, 李晓霞. 动车组车载通信设备运用中的维修[J]. 铁路计算机应用, 2009, 18 (6): 21-23.

[2] 贾希胜. 以可靠性为中心的维修决策模型[M]. 北京: 国防工业出版社, 2007.

[3] Marin R. Reliability centered maintenance [J]. Reliability Engineering and System Safety, 1998, (2): 121-132.

[4] 李果, 高建民, 陈富民. 基于可靠性的设备维修优化方法研究[J]. 中国机械工程, 2007, 18 (4): 419-423.

[5] 苏春, 黄茁. 以可靠性为中心的维修成本优化模型及其应用[J]. 机械科学与技术, 2007, 26 (12): 1156-1159.

[6] 贺国芳, 许海宝. 可靠性数据的收集与分析[M]. 北京: 国防工业出版社, 1995.

[7] 周晓军, 莫立峰, 李杰. 一种基于可靠性的设备顺序预防性维护模型[J]. 上海交通大学学报, 2005, 39 (12): 2044-2047.

责任编辑 徐侃春