

基于 FIT 的外壳开孔屏蔽性能仿真计算

安靖婕¹, 陈 旻², 张露妍¹, 赵 阳², 夏 欢²

(1. 江苏省计量科学研究院, 江苏 南京 210007)
(2. 南京师范大学江苏省电气装备电磁兼容工程实验室, 江苏 南京 210042)

[摘要] 针对电气产品中的屏蔽问题,使用时域有限积分算法,对电气电子产品的机箱外壳开孔问题作了电磁场仿真,适用于辐射电磁干扰典型的频段 30 MHz ~ 1 GHz,计算并比较其屏蔽效能. 仿真计算的结果表明,在相同面积、不同形状的开孔情况下,电场屏蔽效能和磁场屏蔽效能的特性,为设计电磁兼容屏蔽提供了帮助.
[关键词] 电磁兼容,屏蔽性能,开孔,时域有限积分算法
[中图分类号] TM15 [文献标志码] A [文章编号] 1672-1292(2014)01-0007-05

Shielding Efficiency Simulation of Aperture in an Enclosure Based on FIT

An Jingjie¹, Chen Yang², Zhang Luyan¹, Zhao Yang², Xia Huan²

(1. Jiangsu Institute of Metrology, Nanjing 210007, China)
(2. Jiangsu Electronic Equipment EMC Engineering Lab, Nanjing Normal University, Nanjing 210042, China)

Abstract: Apertures in a enclosure of electronic equipment are main channels of radio disturbance radiated. Based on FIT, this paper simulates electromagnetic field for Shielding Efficiency, applied on typical radiated emission frequency (30 MHz ~ 1 GHz), their shilding efficiencies are computed and compared. The simulation results show that SE for E-field and H-Field are different under the same area and different shapes. It is helpful for engineers who are designing EMC shields.
Key words: EMC, shielding efficiency (SE), apertures, FIT

随着电子技术的迅猛发展,电气电子设备的工作频率速度不断提高,其产生的电磁辐射骚扰导致周围电磁环境越来越恶化,严重影响自身和周围电气电子设备的正常运行.

目前,有关外壳上各种开孔电磁辐射的近似计算得到了国内外学者广泛的关注. 1998 年,Robinson M 等首先提出了一种屏蔽罩开孔近似模型^[1],文献[2]提出了一种可以处理多面上多孔、多模、平面波斜入射时矩形屏蔽罩的屏蔽效应的电路模型. 文献[3]则借助仿真软件 FASTEM 计算得到了几个关键频点在不同开孔位置的场强值.

上述研究为外壳开孔的屏蔽性能研究提供了快速、简便的理论设计参考. 然而,在产品设计的初期,需要结合外壳开孔的面积、形状、位置、成本因素等综合考虑,并非面积越小、材料越厚所取得的屏蔽性能最好. 应该在和产品成本之间选择符合电磁兼容标准的外壳开孔方案.

针对这些问题,本文借助 CST STUDIO SUITE 仿真软件的时域有限积分算法,对相同开孔面积,不同开孔形状的铁质外壳的屏蔽性能做了仿真,给出了辐射电磁干扰测试频段 30 MHz ~ 1 GHz 内的数值结果. 从而为辐射电磁骚扰抑制提供理论依据.

1 屏蔽性能评价与计算方法

屏蔽是利用导电或导磁材料制成的壳、板、套等各种形状的屏蔽体,并能将电磁能量限定在一定的空间范围内,以抑制辐射电磁干扰的一种有效措施. 按照屏蔽所起的作用分类,可分为电场屏蔽、磁场屏蔽和

收稿日期:2013-10-31.
基金项目:江苏省自然科学基金(BK2011789)、毫米波国家重点实验室开放基金(K201309)、江苏省科技厅产学研联合创新资金——前瞻性联合研究基金(BY2012004)、2013 年度南京师范大学校级“大学生创新训练项目”(PCB 辐射电磁干扰噪声诊断与抑制方法研究).
通讯联系人:赵阳,教授,博士生导师,研究方向:电磁兼容技术与应用. E-mail:zhaoyang2@njnu.edu.cn

电磁场屏蔽. 图 1 展示了当外壳为金属材质且接地时 3 种屏蔽的原理^[4].

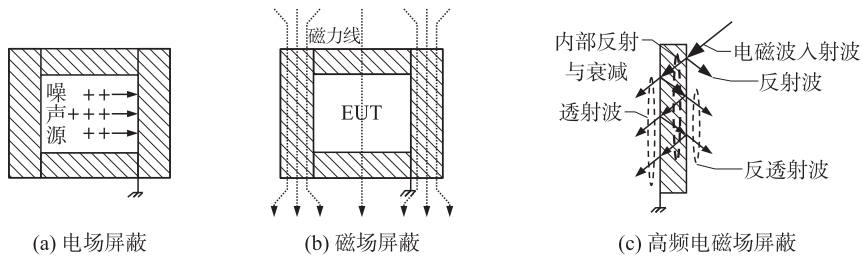


图 1 屏蔽的原理
Fig. 1 Different theory of shielding

评估金属的屏蔽性能,主要用屏蔽效能(SE)这一指标. 计算公式为:

$$SE_{dB}=A_{dB}+R_{dB}+B_{dB}, \tag{1}$$

其中,变量的计算方法如式(2)~式(4)所示.

吸收损耗(A_{dB})指的是电磁波穿过屏蔽罩时候损耗掉的能量数量,单位为 dB:

$$A_{dB}=0.131t\sqrt{f\mu_r\sigma_r}. \tag{2}$$

近场反射损耗(R_{dB})的大小体现了电磁波产生源头的性质以及与波源的距离. 其大小随着波阻与屏蔽阻抗的比率变化,因此它并不单独取决于波的类型,而且也由屏蔽罩与波源之间的距离所决定,单位为 dB:

$$\begin{aligned} R(\text{电})_{dB} &= 321.8 - 20\lg r - 30\lg f - 10\lg(\mu_r/\sigma_r), \\ R(\text{磁})_{dB} &= 14.6 + 20\lg r + 10\lg f + 10\lg(\mu_r/\sigma_r). \end{aligned} \tag{3}$$

校正因子(B_{dB})表明了屏蔽罩厚度和金属的相对电导率对于屏蔽性能的补偿关系,单位为 dB:

$$B_{dB}=20\lg[-e^{-2t/\sigma_r}], \tag{4}$$

其中, f 为频率/MHz; μ_r 为金属的相对磁导率; σ_r 为金属的相对电导率, t 为屏蔽罩厚度/mm.

对于外壳有孔缝的结构,在低频段可以做近似的处理,认为屏蔽效能与开孔的总面积有关系. 但是在高频段,当屏蔽厚度的尺寸与波长可以比拟的时候,开孔对辐射电磁干扰的影响呈现很复杂的局面,电磁场透入的大小和形状都与开孔的形状、面积甚至孔缝负载有关系. 故不能简单的运用公式计算,而需要电磁场三维的仿真,来计算屏蔽效能.

2 基于时域有限积分算法的建模与数值计算

2.1 时域有限积分法

时域有限积分法(FIT)通过将 Maxwell 积分方程离散化来进行数值求解. 对 Maxwell 方程的空间离散由如图 2 所示的两套正交的网格完成(基网格 G 和伴随网络 \tilde{G}).

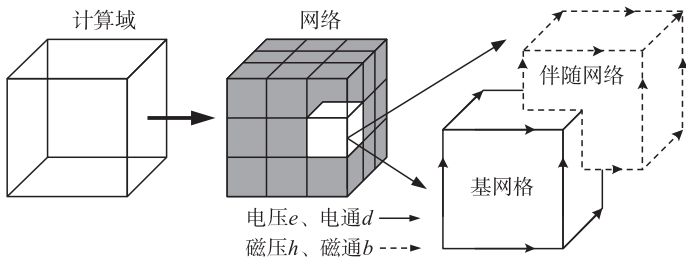


图 2 时域有限积分法中的离散网格
Fig. 2 Discrete grid in FIT

Maxwell 积分方程组在此基础上,可以得到时域有限积分法下的新形式,如:

$$Ce=-\dot{b}, \tilde{C}h=\dot{d}+j, Sb=0, \tilde{S}d=q. \tag{5}$$

相比于解析形式的麦克斯韦方程组,时域有限积分法的离散化的过程中,并未引入任何近似条件. 与其他的电磁学计算算法相比,时域有限积分法的计算准确度就得到了很大提高,得益于解析形式下的梯度、旋度和散度算子之间的特性,即旋度散度恒等于零,梯度的旋度恒等于零,在网格空间中完全保持不变,如下式所示.

$$SC=\widetilde{S}\widetilde{C}=\mathbf{0},C\widetilde{S}^T=\widetilde{C}S^T=\mathbf{0}.$$
 (6)

时域有限积分法以离散麦克斯韦网格方程组为基础. 用中心差分代替时间导数,生成显式方程,下式为无耗情况下的时间积分方程.

$$e^{n+1/2}=e^{n-1/2}+\Delta tM_e^{-1}[\widetilde{C}M_u^{-1}b^n+j_s^n],b^{n+1}=b^n-\Delta tCe^{n+1/2}.$$
 (7)

显式表示的时间积分过程的稳定性必须满足 CFL 稳定性条件,即:

$$\Delta t\leqslant\frac{\sqrt{\varepsilon\mu}}{\sqrt{\left(\frac{1}{\Delta x}\right)^2+\left(\frac{1}{\Delta y}\right)^2+\left(\frac{1}{\Delta z}\right)^2}},$$
 (8)

式中,Δt 为时间步长,Δx、Δy、Δz 为网格步长.

每个时域有限积分法空间离散生成的网格单元的计算都应该满足该稳定性条件,才能结束算法.

相比较于矩量法(MoM)和有限元法(FEM),FEM 和 MoM 是隐式算法,需要矩阵求逆方可解出所需的电磁场值. 对矩量法的满秩阵,矩阵求逆所需的内存和时间与网格数的三次方成正比;对有限元的大型稀疏矩阵,矩阵求逆所需的内存和时间与网格数的平方成正比;而时域有限积分法是显式算法,不需要进行矩阵求逆,所需的内存和时间基本上与网格数的平方成正比. 采用时域有限积分法将大大减少数值计算的时间.

2.2 CST STUDTO SUITE 仿真平台的建模

本文选用典型的电偶极子辐射干扰源作为噪声源,在 CST STUDTO SUITE 中针对不同机壳开孔的情况,进行了电磁场仿真,计算比较 3 种开孔情况下的屏蔽效能,为产品的机壳设计作参照.

CST STUDTO SUITE 是德国 CST 公司开发的电磁场仿真软件. 其善于计算时域、复杂结构和宽带问题,适合于电大、电小尺寸模型的建立和仿真. 外壳的屏蔽性能仿真所建立的物理模型均属于电大尺寸的范围,本文采用时域有限积分法与理想边界拟合技术相结合的电磁场仿真计算,原因在于时域有限积分法适用于 0~100λ 尺度的物理模型的电磁场仿真计算,结合边界拟合技术后保持了结构化直角坐标系网格的所有优点,并且可以对其进行曲线结构的精确建模^[5-6]. 其数值计算的流程如图 3 所示.

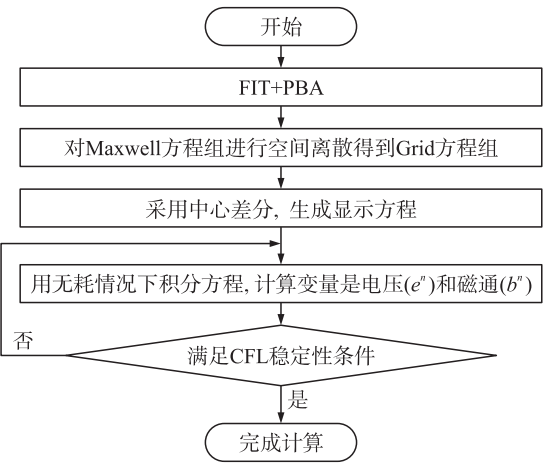


图 3 流程图
Fig.3 Flow chart

仿真模型如图 4 所示,(a)是无屏蔽盖,(b)、(c)、(d)分别是屏蔽盖开孔为长方形、正方形、圆形,其仿真模型和开孔面积如表 1 所示. 所有仿真模型的机壳均采用铁质(Iron)材料,厚度 t=1 m,频段从 30 MHz~1 GHz,保证 3 种形状的开孔总面积相等.

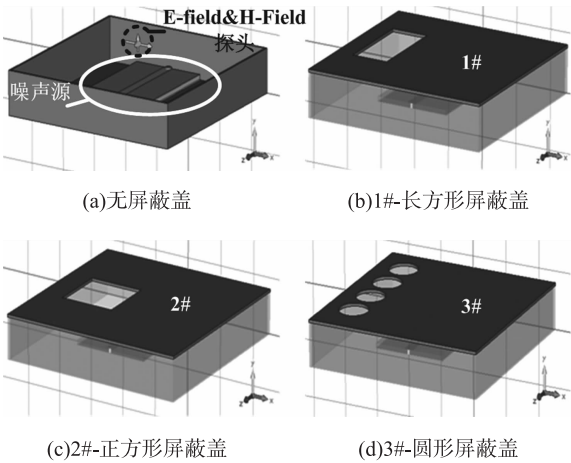


图 4 仿真模型
Fig.4 Simulation model

表 1 仿真模型开孔情况

Table 1 Simulation model about apertures			
图号	编号	开孔形状	开孔面积/m ²
图(a)	0#	无屏蔽盖	
图(b)	1#	长方形	1×20×45=900
图(c)	2#	正方形	1×30×30=900
图(d)	3#	圆形	4×π×8.47 ² =901

3 仿真计算结果与分析

本文的电磁场仿真计算使用的 CPU 是 Pentium(R)Dual-Core E5200,内存 1GHz. 完成 4 个模型的仿真参

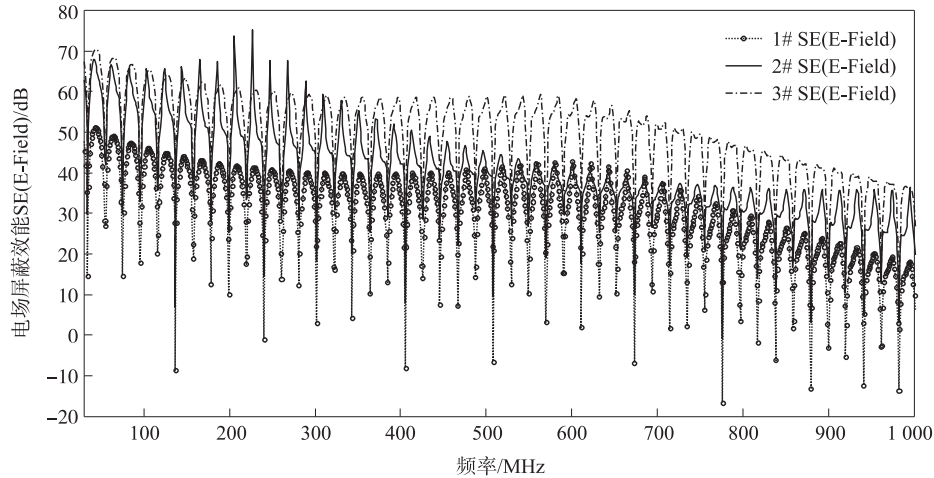
数如表 2 所示. 可以看出,4 个模型仿真总时间不超过 5.5 min,消耗的计算机虚拟内存低于 20M. 足以证明本文采用 CST STUDIO SUITE 作为屏蔽性能仿真的优势. 大大节省了设计时的时间和硬件成本.

表 2 仿真计算机参数
Table 2 Computer parameter in simulation

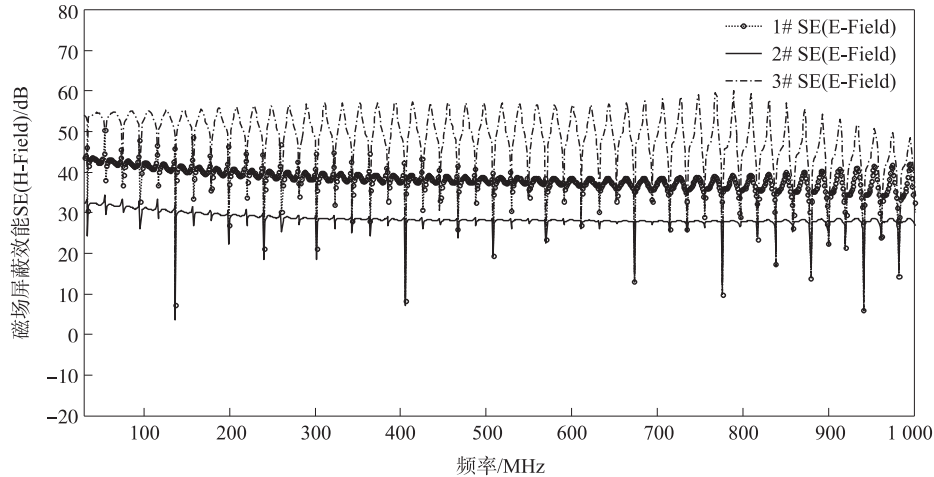
参数	编号			
	0#	1#	2#	3#
网格数/个	15 184	6 240	6 944	8 928
计算消耗内存/kB	162 116	162 116	206 988	240 188
仿真器消耗内存/kB	197 436	197 436	197 372	197 436
耗时/s	89	63	74	96

借助如图 2(a)所示的电场探头和磁场探头(E-Field & H-Field Probe),可以获得 4 种模型的电磁场数值,进而得出电场屏蔽效能和磁场屏蔽效能这两组对比结果,如图 5 所示.

由图 5 可以看出:在电场屏蔽效能中,120 MHz ~ 300 MHz 的频段中 2#正方形开孔数值最高,说明该种形状的开孔在该频段电场屏蔽效果最好. 其他的频段中,3#圆形开孔的屏蔽效果最好,2#正方形开孔次之,1#长方形开孔的数值最低. 在磁场屏蔽效能中 3#圆形开孔的屏蔽效能始终最大,意味着屏蔽效果最好,1#长方形开孔次之,2#正方形开孔数值最低. 无论电磁屏蔽还是磁场屏蔽在辐射频段内不同的效能是由于屏蔽的空间具有固有谐振频率的谐振腔,在孔缝入射场的作用下会发生谐振,谐振时电磁场强度就会陡增,使得屏蔽效能下降许多. 最不理想的情况是固有谐振频率附件引起的电磁场强度大小比没有屏蔽外壳时更强. 故实际设计使用屏蔽外壳时考虑的因素还有很多.



(a)电场屏蔽效能对比结果



(b)磁场屏蔽效能对比结果

图 5 屏蔽效能对比结果

Fig. 5 Result comparison of SE

4 结论

本文以 CST STUDIO SUITE 仿真软件的时域有限积分法为平台,对电磁兼容研究中的机箱外壳开孔问题作了电磁场仿真,计算出了以电偶极子为噪声源情况下,相同面积的 3 种开孔形状的屏蔽效能,适用于辐射电磁干扰典型的频段 30 MHz ~ 1 GHz. 从表 2 和图 5 可以看出,在时域有限积分法的帮助下,花费很少的时间和计算机内存,就可以得出全频段的电场屏蔽效能数值和磁场屏蔽效能数值. 总体上,相等面积时,3#圆形开孔的屏蔽效果最好,1#长方形开孔与 2#正方形开孔分别在磁场屏蔽和电磁屏蔽方面有各自的优势. 为设计机壳开孔提供了参照,有利于利用屏蔽的方法,解决电气电子产品的电磁兼容问题.

[参考文献] (References)

[1] Robinson M P, Benson T M, Christopoulos C, et al. Analytical formulation for the shielding effectiveness of enclosures with apertures[J]. IEEE Trans Electromagn Compat, 1998, 40(3): 240-248.

[2] Shim Jongjoo, Kam Dong Gun, Kwon Jong Haw, et al. Circuital modeling and measurement of shielding effectiveness against oblique incident plane wave on apertures in multiple sides of rectangular enclosure[J]. IEEE Trans Electromagn Compat, 2010, 52(3): 566-577.

[3] 周雷, 邓凌翔, 陈道升, 等. 机箱开孔位置对无线电辐射骚扰的影响[J]. 微波学报, 2011, 27(4): 77-80.
Zhou Lei, Deng Lingxiang, Chen Daosheng, et al. Influence of position of aperture in a rectangular enclosure on the radio disturbance[J]. Journal of Microwaves, 2011, 27(4): 77-80. (in Chinese)

[4] 朱文立. 电磁兼容设计与整改对策及案例分析[M]. 北京: 电子工业出版社, 2012: 127-147.
Zhu Wenli. EMC Design and Rectify Measures and Case Analysis[M]. Beijing: Electronic Industry Press, 2012: 127-147. (in Chinese)

[5] Schuhmann R, Weiland T. Conservation of discrete energy and related laws in the finite integration technique[J]. Progress In Electromagnetics Research, 2001, 32: 301-316.

[6] Krietenstein B, Schuhmann R, Thoma P, et al. The perfect boundary approximation technique facing the challenge of high precision field computation[C]//Proceedings of the XIX International Linear Accelerator Conference. Chicago: IEEE, 1998: 860-862.

[责任编辑: 刘 健]