

多导体散射中广义谐振的模式分析

金谋平, 梁昌洪, 史小卫

(西安电子科技大学 微波电信工程系, 陕西西安 710071)

摘 要: 在电磁兼容分析中, 多导体开放系统中存在的广义谐振现象是一个值得注意的问题. 本文利用矩量法分析了多导体散射问题, 发现了广义谐振现象, 并提出广义谐振腔模型, 对广义谐振进行了模式分析, 很好地解释了这类散射结构的谐振特性.

关键词: 广义谐振; 电磁兼容; 广义谐振腔

中图分类号: TN03 **文献标识码:** A **文章编号:** 0372-2112 (2001) 12-1665-03

Model Analysis of Generalized Resonance in Scattering by Multiple Conductors

JIN Mou-ping, LIANG Chang-hong, SHI Xiao-wei

(Dept. of Microwave Telecommunications Engineering, Xidian Univ., Xi'an, Shanxi 710071, China)

Abstract: In electromagnetic compatibility (EMC) analysis, generalized resonance existing in multiple conductors open system is noticeable problem. The analysis of generalized resonance occurring in scattering by multiple conductors is presented utilizing moment method. The resonance is explained by generalized resonance cavity theory.

Key words: generalized resonance; EMC; generalized resonance cavity

1 引言

任意形状导体散射场的计算与分析, 对于舰船、车辆、飞行器上复杂电系统的电磁兼容性分析设计都有着重要意义. 一般文献研究的电磁散射问题大多是单个物体的散射, 这对于复杂多导体系统的电磁兼容设计是不够的.

本文在做舰船的电磁兼容 (EMC) 研究中, 利用矩量法分析了两个金属散射体的散射情况, 发现对于一定的散射环境, 散射场在某个频率上出现的场强突然增强现象, 我们称之为广义谐振^[1,2] (Generalized Resonance) 现象. 这一点对于电磁兼容分析特别重要. 文献[3]利用传输线理论分析了线导体上的电流分布, 讨论了多导线散射中的广义谐振现象的特性. 本文利用矩量法分析了多导体散射中的广义谐振特性, 并提出了广义谐振腔模型, 很好地解释了这类散射结构的谐振特性.

2 多导体散射的矩量法分析

本文研究散射结构如图 1 所示, 两个金属散射体尺寸为: $T_1 = T_2 = 1.8\text{m}$, $W_1 = W_2 = 1.96\text{m}$, $L_1 = L_2 = 6.3\text{m}$, 间距 $d = 1.2\text{m}$, 归一化入射平面波 $E_z = e^{-jkz}$, 入射方向为 $k = \hat{x}$, 散射近场观察点 $p(-0.6, 0.98, 3.45)$ 距离散射体 0.3m .

用 S 表示理想导电散射体的表面, 由 S 上边界条件可得电场积分方程 (EFIE):

$$[-jA(\mathbf{r}) - \nabla\phi(\mathbf{r})]_{\tan} = -E^{inc}(\mathbf{r})_{\tan} \quad \mathbf{r} \in S \quad (1)$$

其中 $E^{inc}(\mathbf{r})$ 是入射场, A, ϕ 是势函数.

$$A(\mathbf{r}) = \frac{\mu}{4} \int_S \mathbf{J}(\mathbf{r}') \frac{e^{-jkR}}{R} ds \quad (2)$$

$$\phi(\mathbf{r}) = \frac{-1}{4j} \int_S \nabla_s \cdot \mathbf{J}(\mathbf{r}') \frac{e^{-jkR}}{R} ds \quad (3)$$

$R = |\mathbf{r} - \mathbf{r}'|$ 是任意场点 \mathbf{r} 到 S 上源点 \mathbf{r}' 的距离.

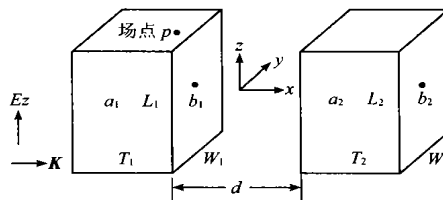


图 1 散射体结构示意图

采用矩量法, 利用 Rao^[4] 电流模型, 得到矩阵方程:

$$[Z][I] = [V] \quad (4)$$

上式方程求解的计算量主要在于矩阵求逆, 其计算量与 N^3 成正比. 在处理多导体散射时, 矩阵方程式 (4) 中的 $[Z]$ 矩阵维数很大, 直接求解计算量很大. 本文采用分块矩阵迭代法求解矩阵方程, 大大减小了计算量. 根据各散射体距离入射场的距离顺序 $d_i (d_1 < d_2 < \dots < d_{N_0})$, 用分块矩阵重写矩阵方程 (4)^[5]:

$$Z = \begin{bmatrix} Z_{11} & Z_{12} & \dots & Z_{1N_0} \\ Z_{21} & Z_{22} & \dots & Z_{2N_0} \\ \dots & \dots & \ddots & \dots \\ Z_{N_0 1} & Z_{N_0 2} & \dots & Z_{N_0 N_0} \end{bmatrix}$$

$$I = \begin{bmatrix} I_1 \\ I_2 \\ \dots \\ I_{N_0} \end{bmatrix} \quad V = \begin{bmatrix} V_1 \\ V_2 \\ \dots \\ V_{N_0} \end{bmatrix} \quad (5)$$

式中 Z_{ij} 为分块阻抗矩阵, 代表位于第 j 个散射体上的等效源在第 i 个散射体的表面 S_i 上的作用; I_j 为第 j 个散射体上感应电流系数, V_i 是第 i 个散射体上的电压. 迭代初始值取: $I_k^{(0)} = 0$, 迭代公式为:

$$I_k^{(i)} = Z_{kk}^{-1} \left[V_k - \sum_{m=1}^{k-1} Z_{km} I_m^{(i)} - \sum_{m=k+1}^{N_0} Z_{km} I_m^{(i-1)} \right] \quad (6)$$

式中, $I_k^{(i)}$ 是第 i 次迭代第 k 个散射体上的电流系数. 若各散射体结构尺寸相同, 且面元划分也一致, 则对角线上的分块矩阵均相同, 即 $Z_{11} = Z_{22} = \dots = Z_{N_0 N_0}$, 计算量可大为减少.

迭代法求出感应电流系数 I , 即求出面电流 J , 则散射场 E^s 可由下式计算:

$$E^s(r) = - \frac{j\mu}{4} \int_S J(r) \frac{e^{-jkR}}{R} ds - \frac{j\nabla}{4} \int_S \nabla_s \cdot J(r) \frac{e^{-jkR}}{R} ds \quad (7)$$

3 广义谐振现象

图 2 是 p 点电场的频率响应曲线. 从图中可以看出, 当散射体为两个导电物体时, 在某个频率上出现很明显的强场尖峰, 我们称之为广义谐振现象, 同时, 我们也看到只有一个散射体时则没有这种现象.

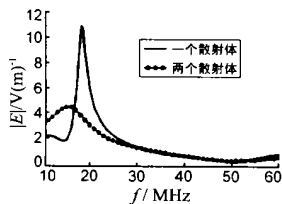


图 2 两种散射情况下, P 点的场强

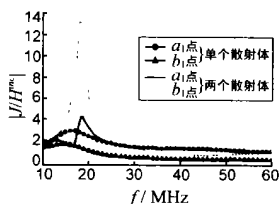


图 3 散射体上的表面中心点电流

图 3 是两种散射情况下, 散射体照射面和背面中心点 a_1 、 b_1 处的感应电流的频率响应曲线. 从图中可以看出, 当只有一个散射体时, 照射面 a_1 点的感应电流比背面 b_1 点的要大, 且两者随频率变化平缓; 当散射体为两个导电长方体时, 在谐振频率附近, 照射面 a_1 点的感应电流小于背面 b_1 点的, 而在谐振频率上 ($f = 18.2\text{MHz}$), b_1 点的电流显著增强, 也正是感应电流的增强使得散射场无论是近区场还是远区场都明显增强, 这也说明广义谐振现象是多个散射体之间的相互作用引起的.

图 4 是谐振频率下散射体周围 XZ 面和 YZ 面上的电场幅度分布, 从图中可以看出, 电场主要集中在散射体之间的空

域内, 且沿 z 方向两端强中间弱, 呈驻波分布. 图 4 中的矩形框是散射体所在位置.

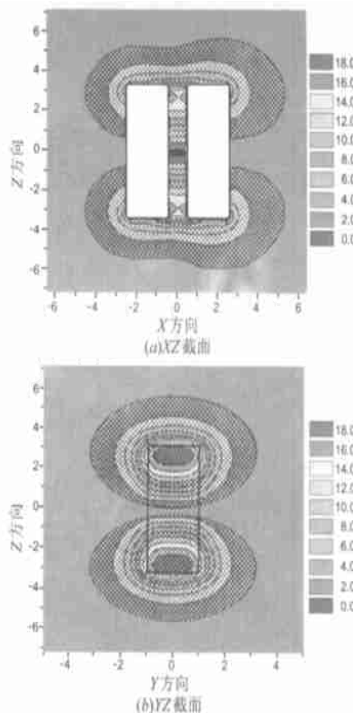


图 4 谐振频率下, XZ 和 YZ 截面上电场幅度分布

改变金属长方体的长 L 、宽 w 、厚度 T 及散射体的间距 d , 场点仍然取在距散射体 0.3 米处, 散射场的变化情况如图 5、6、7、8 所示, 很明显, 散射系统的结构尺寸变化对广义谐振特性影响很大. 散射体长度缩短, 谐振频率升高, 谐振强度减弱, 如图 5; 散射体宽度越宽, 厚度越厚, 谐振频率越低, 谐振强度减弱; 同时, 两个散射体间距增大, 谐振频率降低, 谐振强度减弱.

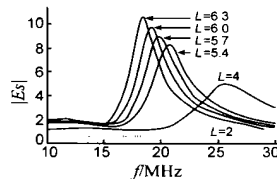


图 5 散射体的长度变化

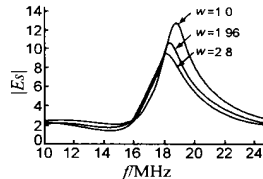


图 6 散射体的宽度变化

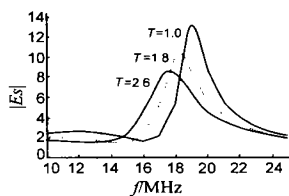


图 7 散射体的厚度变化

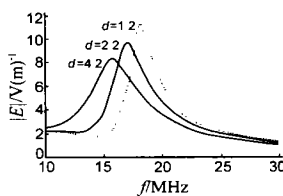


图 8 散射体的间距变化

4 广义谐振的模式分析

我们将这种散射结构看成一个由短路面及开路面组成的

广义谐振腔,如图 9 所示. 假定所讨论的谐振空间是在 y 方向上有两个短路面, x 和 z 方向上各有两个近似开路面所包围的区域,三个方向的尺寸分别为 b 和 a, l , 场沿三个方向分布的半驻波个数(模数)为 n, m 和 p .

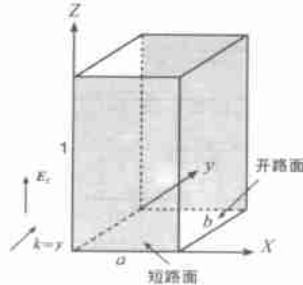


图 9 广义谐振示意图

x, z 方向上的近似开路面为非理想开路,末端分布电容增大,存在衍射,其效应等效为该方向尺寸的增加,设 $a = a + a', l = l + l'$. 假设 y 方向为纵向,横截面 xz 面上的截止波长由于衍射作用而增大,

$$c = \frac{1}{\sqrt{\left(\frac{m}{2a}\right)^2 + \left(\frac{p}{2l}\right)^2}} \quad (8)$$

则波沿纵向即 y 方向的传播的波导波长随之减小,

$$g = \frac{0}{\sqrt{\left(\frac{n}{b}\right)^2}} \quad (9)$$

衍射作用使沿轴向传播的波导长减小,模数相应增大,我们引入 m_d, n_d 和 p_d 分别表示 x, y 和 z 方向为纵向时,横截面上的衍射作用,综合考虑非理想开路效应,我们给出广义谐振的谐振波长表达式

$$\lambda_0 = \frac{2}{\sqrt{\left(\frac{m+m_d}{a+a'}\right)^2 + \left(\frac{n+n_d}{b}\right)^2 + \left(\frac{p+p_d}{l+l'}\right)^2}} \quad (10)$$

式中, m_d 反映的是 z 向衍射作用, n_d 反映的是 x 和 z 向衍射作用, p_d 反映的是 x 向衍射作用. 当 x 和 z 方向也为短路面时, $a' = l' = 0, m_d = n_d = p_d = 0$, 则回到微波谐振腔的谐振波长公式. 当短路面宽度远大于波长时,可忽略掉式(10)中的 a 和 l 项, 则又回到光学开放式谐振腔的谐振频率公式^[6].

利用式(10)也可以很好地说明多导体散射系统中的广义谐振特性,前面所分析的广义谐振的模式为 TM_{001} , 即沿 z 方向分布的半驻波数为 1, 在 x, y 方向均匀分布,其谐振频率可近似为

$$f_0 = \frac{c}{\lambda_0} = \frac{c}{2} \frac{p+p_d}{l+l'} \quad (11)$$

这里, p_d 反映的是 y 方向的衍射作用,谐振区域内电场主要为 E_x 分量,散射体横截面如图 10 所示. 当散射体宽度 w 和厚度 T 增大时,末端分布电容增大,则 z 向长度增加量 l 增大; 另外,横向尺寸增大使得衍射效应减弱, p_d 减小,这些都使得谐振频率下降,这和前面矩量法分析结果一致.

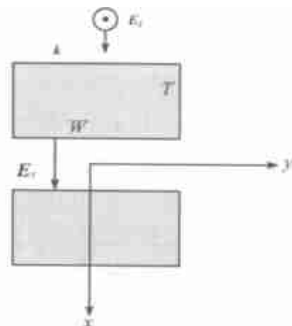


图 10 散射系统横截面示意图

5 结论

本文利用矩量法分析了多导体散射中的广义谐振特性,并提出了由短路面及开路面组成的广义谐振腔模型,对体散射中的广义谐振现象进行了模式分析,该模型公式囊括了一般微波谐振腔及光学开放式谐振腔情况,很好地解释了这类散射结构的谐振特性.

参考文献:

- [1] 梁昌洪. 舰面近场计算机仿真研究报告 [R]. 西安电子科技大学, 1998, 6.
- [2] 金谋平, 张新军, 袁伟良, 梁昌洪. 电磁兼容分析中的近场谐振现象 [J]. 电波科学学报, 1999, 4, 14(增刊).
- [3] 金谋平, 梁昌洪, 史小卫. 多导体开放系统广义谐振传输线分析 [J]. 电波科学学报, 2000, 15(1).
- [4] S M Rao, A W Gisson. Electromagnetic scattering by surfaces of arbitrary shape [J]. IEEE Trans. On AP, May 1982, 30(3): 409 - 418.
- [5] J L Rodriguez, F Obelleiro, A G Pino. A block-iterative algorithm for multi-object scattering problems [J]. IEEE trans. on Magnetics, Sept. 1998, 34(5): 2696 - 2699.
- [6] 方洪烈. 光学谐振腔理论 [M]. 北京: 科学出版社, 1981.

作者简介:



金谋平 男. 1968 年 3 月出生于安徽省安庆市. 1989 年 7 月本科毕业于西安电子科技大学, 2000 年 9 月获西安电子科技大学博士学位, 现为华东电子工程研究所高级工程师.



梁昌洪 男. 1943 年出生于上海市. 现为西安电子科技大学校长, 教授, 博士生导师, 并任中国电子学会微波学会副主任委员、中国电子学会会士、IEEE Senior member 等职. 研究方向包括计算场论、计算微波、微波网络理论、电磁散射与逆散射、电磁兼容等方面.