

文章编号:1000-582X(2006)06-0054-04

FDTD/MoM 用于耦合口径辐射的数值仿真*

毕兴忠,俞集辉

(重庆大学电气工程学院 高电压与电工新技术教育部重点实验室,重庆 400030)

摘要:对屏蔽体耦合口径的辐射问题进行数值仿真时,导体盒内部结构的复杂性,以及导体盒外部近场到远场的变换是其中的难点所在.时域有限差分法(FDTD)可以处理内部结构复杂、非均匀介质的情况,而矩量法(MoM)擅长处理电大尺寸的辐射问题,因此可以把2种方法相结合来处理此问题.在导体盒内部由于结构和介质上的复杂性,使用了FDTD,在计算导体盒外部远场情况时,使用基于电场积分方程(EFIE)的MoM来变换到远场,从而解决了导体盒耦合口径的辐射问题,节省了计算机内存和计算时间.

关键词:时域有限差分法;矩量法;混合方法;辐射

中图分类号:N32

文献标识码:A

对电子设备进行封装是一种防止电磁辐射的必要手段,也是产品外观设计的要求.在这些金属屏蔽盒上往往存在着耦合口径(如:散热孔,电缆连接孔等),在高频情况下,这些口径就会成为辐射源,对周围的电磁环境造成影响.如何使用数值方法来计算由此产生的电磁问题已经成为计算电磁学(CEM)的一个热点.

评估耦合口径的辐射问题有多种数值计算方法,时域有限差分法FDTD和矩量法MoM都是使用比较多而且比较成熟的数值计算方法.FDTD是求解麦克斯维微分方程的直接时域方法.FDTD在计算中将空间某一样本点的电场(或磁场)与周围格点的磁场(或电场)直接相关联,且介质参数已赋值给空间每一个元胞,因此这一方法可以用来处理非均匀介质的电磁辐射、散射等问题.但是FDTD在处理具有复杂边界的电大尺寸物体时,如近远场变换,因为需要剖分较大体积的区域,这就花费大量的计算时间,占用大量的计算机内存,而且还会出现由吸收边界产生的反射和数值发散.而MoM是基于电场积分方程(EFIE)对未知数进行离散化的求解方法,因此可以解决数值发散和计算机内存问题.但是MoM在处理复杂结构和非均匀介质上存在着较大的困难.而FDTD/MoM混合方法则正好取长补短,很好地解决了耦合口径的电磁辐射的计算问题.

FDTD/MoM混合的方法分成两种:一种是先由FDTD计算然后变换到MoM,另一种是由MoM变换到

FDTD.前一种最早出现在1996年,主要用来解决UHF/VHF电磁波在复杂地形中的传播等问题.后一种方法最早出现于1998年,主要使用在机箱屏蔽盒耦合口径的辐射问题中.在本课题中主要使用后者.

FDTD/MoM混合法的要点是将问题空间以耦合口径为界分为内部空间和外部空间,当电磁波由内部空间向外辐射时,运用谢昆诺夫(Schelkunoff)场的等效定律和MoM^[1],求出耦合口径上的等效磁流源,该磁流源将激励外部空间区域,可借助MoM来实现从近场到远场的变换^[2-4].因为FDTD是时域的方法,而MoM是频域的方法^[5-6],因此把2种不同域的方法结合起来是主要困难所在.使用这种FDTD/MoM混合法的优点是可以处理内部结构复杂、非均匀介质和结构尺寸比波长大而耦合口径可与波长比拟的问题^[1].

1 FDTD/MoM 混合法

如图1左图所示,金属屏蔽盒的外部表面积为 S ,耦合口径为 S_0 .是一矩形.导体盒内部由于结构的复杂性,使用FDTD计算,外部则使用MoM.

根据等效原理耦合口径设为有导电板封闭,封闭导电板上的等效磁流源 M_0 由内部源辐射产生,封闭导体盒外部的电磁场就由 M_0 产生.因此只要根据MoM求解出 M_0 ,就能得到导体盒外部任意区域的电磁场.

耦合口径附近的场点的电场可以用公式(1)来

* 收稿日期:2006-01-10

作者简介:毕兴忠(1979-),男,江苏扬州人,重庆大学硕士,主要从事电磁兼容与环境保护方面的研究.

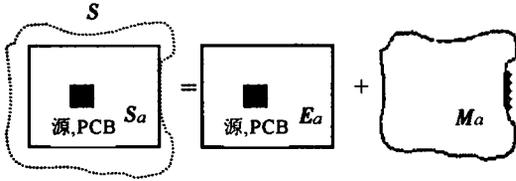


图 1 研究模型

表示:

$$E_{FDTD} = E(M_a) = -\nabla \times F = -\frac{\nabla}{4\pi\epsilon_0} \int_{S_a} M_a(r') g(r:r') ds', \quad (1)$$

$$\text{即: } E_{FDTD} = -\frac{1}{4\pi\epsilon_0} \int_{S_a} M_a(r') \nabla g(r:r') ds', \quad (2)$$

式中, M_a 是等效磁流源; F 是矢量电位(磁流矢量位); r 是场点位置; r' 是源点位置; $g(r:r')$ 是自由空间的格林函数,由公式(3)来表示.

$$g(r:r') = \frac{e^{-jk_0|r-r'|}}{|r-r'|} = \frac{e^{-jk_0R}}{|R|}, \quad (3)$$

$$\text{式中 } R = \sqrt{(x-x')^2 + (y-y')^2 + (z-z')^2}; \quad (4)$$

$k_0 = 2\pi/\lambda$, λ 代表波长; (x, y, z) 代表场点坐标; (x', y', z') 代表源点坐标. 公式(2)中

$$M_a(r') \times \nabla g(r:r') = \begin{bmatrix} \hat{x} & \hat{y} & \hat{z} \\ M_x & M_y & 0 \\ \frac{\partial g}{\partial x'} & \frac{\partial g}{\partial y'} & \frac{\partial g}{\partial z'} \end{bmatrix}, \quad (5)$$

M_x, M_y 是 M_a 在 x, y 方向上的分量.

因为场点和 FDTD 计算电场点和等效磁流源不在一个平面上,在电场积分方程中不含磁流源的其他导出形式,因此等效磁流源可以用简单的脉冲基函数形式来近似表示.

$$M_x(x', y') \approx \sum_{i=1}^{N_x} \sum_{j=1}^{N_y} \alpha_{ij} \Delta x \Delta y \delta(x' - x_i, y' - y_j), \quad (6)$$

$$M_y(x', y') \approx \sum_{i=1}^{N_x} \sum_{j=1}^{N_y} \beta_{ij} \Delta x \Delta y \delta(x' - x_i, y' - y_j), \quad (7)$$

其中 α_{ij}, β_{ij} 是 M_a 在 x, y 方向上的分量系数; $\Delta x, \Delta y$ 是等效磁流源在开口面上所占据的小矩形的边长.

E_{FDTD} 是距离口径一定距离,以一个确定的几何形式(圆环,平面,球面等)的近场值. 因为金属屏蔽盒内部结构的复杂性,可以通过 FDTD 计算求解出这一系列电场值,笔者利用 FDTD 的计算结果,如图 2 所示.

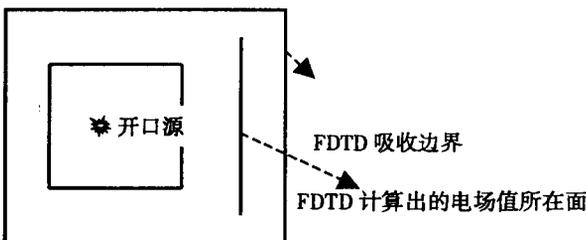


图 2 用 FDTD 计算开口前的电场强度

现在使用 MoM 的点匹配技术来求解 M_a , 在直角坐标下,由公式(1)和公式(5)得:

$$\begin{bmatrix} E_{FDTD, x} \\ E_{FDTD, y} \\ E_{FDTD, z} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} H_{11} & H_{12} \\ H_{21} & H_{22} \\ H_{31} & H_{32} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} M_x \\ M_y \end{bmatrix}, \quad (8)$$

其中 $E_{FDTD, x}, E_{FDTD, y}, E_{FDTD, z}$ 是 E_{FDTD} 的 3 个分量,把公式(8)简写为:

$$E_{FDTD} = H \cdot M_a, \quad (9)$$

其中 H 是等效磁流源源点和辐射点(也就是 FDTD 计算出的电场值)之间的关系矩阵. 因为 FDTD 是时域方法,而 MoM 是频域方法,所以需要通过傅里叶变换到频域. 在求出等效磁流源之后,可以用下式计算出导体盒外部任意位置的电场值,如图 3 所示.

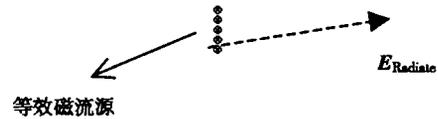


图 3 用 MoM 计算远场

$$E_{Radiate} = H_{Radiate} \cdot M_a, \quad (10)$$

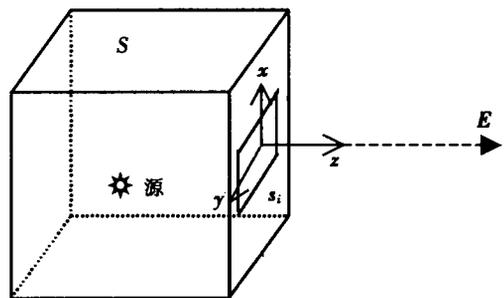
公式(10)中 $H_{Radiate}$ 是远场计算点和等效磁流源之间的关系矩阵; $E_{Radiate}$ 就是需要计算的导体盒外部的电场强度.

2 耦合口径辐射问题的模拟

把 FDTD/MoM 应用到具体的导体盒耦合口径辐射问题的模型中,在此简化了导体盒内部结构上的复杂性,假设在导体盒的内部加上电偶极子高斯脉冲源,见公式(11)

$$E_i(t) = 10^{-12} \cdot \exp\left(-\frac{(t-\tau)^2}{\tau^2}\right), \quad (11)$$

其中, $\tau = 0.683082 \times 10^{-9}$, 源在导体盒的中心,如图 4 所示.



导体盒尺寸: 20 cm × 40 cm × 50 cm;
开口尺寸: 4 cm × 2 cm;
观测点距离机箱开口中心 3 m

图 4 研究的模型

在导体盒的内部,因为 FDTD 的便利性,可以使用 FDTD 计算出距开口外 5 cm 处一平面上的一系列

电场值. 在计算这些值的时候, 因为导体盒在开口处的尺寸大小的缘故, 为保证计算精度需要仔细划分微结构部分, 也就是减小网格尺寸增加网格数目.

因为这些由 FDTD 计算出来的电场值是在时域下的值, 而 MoM 是频域的方法, 为了能用在 MoM 中, 需要变换到频域下, 在傅里叶变换时将会涉及到一个面上一系列点的变换. FDTD 计算程序的时间步长为 16.667×10^{-12} s, 使用傅里叶变换频率范围将达到 60 GHz, 本模型只取 0~3 GHz.

FDTD 的剖分网格为正方形网格, 边长为 1 cm, 但是在下一步使用 MoM 的过程中将会把等效磁流源的网格提高到 0.02 mm. 较大的 FDTD 的剖分网格可以显著提高求解速度, 而 MoM 中较细的磁流源密度又不至于降低计算精度. FDTD 吸收边界采用二阶吸收边界条件.

将等效磁流源和 FDTD 计算场点之间的位置矩阵和 FDTD 的计算场值代入公式(9), 可能由于 FDTD 计算场点的个数和等效磁流源的个数不相等, 一般要求计算场点的数目大于或等于等效磁流源的数目, 如果大于, 则公式(9)是一个超定方程组, 可以求解出等效磁流源 M_0 的最小二乘解.

在计算出等效磁流源 M_0 之后就可以根据公式(10)计算出任意远场的辐射电场. 笔者计算了离开口 3 m 处的辐射电场, 频率范围从 0~3 GHz.

如图 5 所示, 计算结果数据通过公式(12)进行处理.

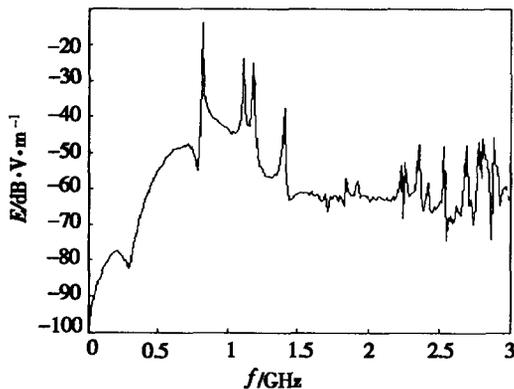


图5 面上只有1个开口时的电场强度频域曲线

$$|E| = 20 \times \log_{10}(E). \quad (12)$$

金属隔离盒内部的共振频率计算公式为:

$$f = 150 \sqrt{\left(\frac{k}{l}\right)^2 + \left(\frac{m}{h}\right)^2 + \left(\frac{n}{w}\right)^2} \text{ MHz}, \quad (13)$$

式中: l, w, h 为盒的长宽高, 单位为 m; k, m, n 为整数, 而且不能同时有 2 个 0. 从图 5 可以看出, 最大谐振点出现在 0.8 GHz 左右, 在 1.2 GHz 的附近出现了 2 个尖峰, 这与公式(13)的计算结果 0.808 GHz 和

1.1 GHz 是比较吻合的.

图 6 计算模型是在同一面上有 2 个开口的计算模型, 2 个开口相距 2 cm, 其他模型参数设置与上同, 从图中可以看出开口的增多会产生更多的波动.

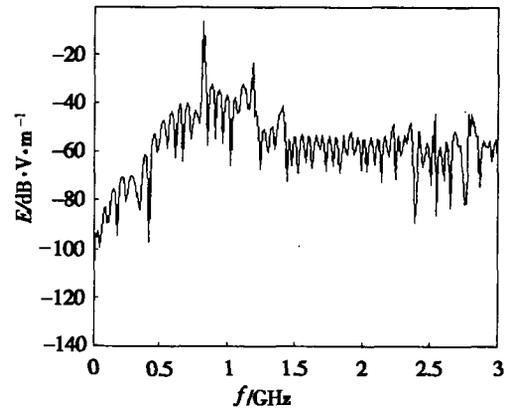


图6 同一面上有2个开口时的电场强度频域曲线

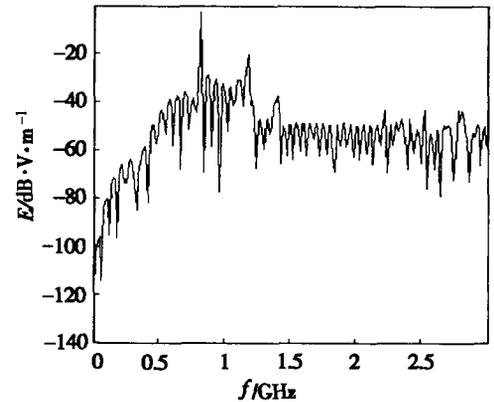


图7 同一面上有3个开口时的电场强度频域曲线

图 7 计算模型是在同一面上有 3 个开口的计算模型, 开口之间相距 2 cm, 其他模型参数设置与上同, 从与图 6 两个开口的模型比较中可以看出开口的增多在高频部分会产生更小的电场上的波动.

对于其他导体盒模型(如开口是圆型等其他形状, 或开口在导体盒的不同面上, 或在同一个面上有多个开口的情况), FDTD 部分难点主要是网格在开口处的剖分, 因为当开口很小(如细孔缝)时, 需采用亚网格^[6]等技术来建立模型, MoM 部分难点主要在等效磁流源和计算点之间的位置关系矩阵的建立.

3 结束语

为了解决导体盒耦合口径的辐射问题, 引进了一种基于 FDTD 和 MoM 的混合方法. 计算了几种开口模型 3 m 处的电场值, 绘出了曲线.

在使用 FDTD/MoM 混合方法模拟导体盒耦合口径的辐射问题时存在着 2 个难点: 1) 开口在很小的情况下, FDTD 的网格需要使用亚网格等技术进行剖分.

2)开口的位置和形状的不同要引起 MoM 中位置矩阵和等效磁流源的分布情况的变化,需要重新建立位置矩阵.

这种混合方法结合了 FDTD 可以方便地处理非均匀介质和复杂结构的模型和 MoM 可以处理大尺寸模型的优点,克服了导体盒耦合口径辐射问题中遇到的困难.

这种方法可以用来计算开口在不同导体盒面上和在同一导体盒面有多个开口的计算模型.而且尤其适合于计算某一规则平面、曲面、球面上的大量辐射场点的运算任务.

参考文献:

[1] 高本庆. 时域有限差分法[M]. 北京:国防工业出版社,1995.

[2] MARROCCO G, FARI S, BARDATI F. A Hybrid FDTD-MoM Procedure for the Modeling of Electromagnetic Radiation from Cavity-backed Apertures[J]. Antennas and Propagation Society International Symposium, IEEE, 2001, 4: 8-13.

[3] GILBERT J, HOLLAND R. Implementation of the Thin-Slot Formalism in the Finite-Difference EMP Code THREDII [J]. IEEE Trans Nucl Sci, 1981, NS-28 (6): 4 269 - 4 274.

[4] WALLYN W, ZUTTER D D, ROGIER H. Prediction of the Shielding and Resonant Behavior of Multisection Enclosure Based on Magnetic Current Modeling[J]. Electromagnetic Compatibility, IEEE Transactions on, 2002, 44 (1): 320-326.

[5] 李世智. 电磁辐射与散射问题的矩量法[M]. 北京:电子工业出版社,1985.

[6] 哈林登. 计算电磁场的矩量法[M]. 北京:国防工业出版社,1981.

Apply the Hybrid Method of FDTD/MoM to Calculate the Radiation from the Aperture

BI Xing-zhong, YU Ji-hui

(Key Laboratory of High Voltage Engineering and Electrical New Technology, Ministry of Education, Electrical Engineering College of Chongqing University, Chongqing 400030, China)

Abstract: This paper presents a hybrid method of the Finite-Difference Time-Domain (FDTD) and the method of moment (MoM) to compute the radiation from the aperture. The FDTD is a commonly used electromagnetic simulation way. It can solve the question with complex dielectric, but it is difficult (even cannot) for FDTD to calculate the far field because of large compute time and computer memory. So the authors can make use of the FDTD to get a large number of near electric field intensity, and then use the MoM, which based on electric field integral equation to compute the far field. Using this procedure, the authors solve the radiation of the box with apertures on one or more sides and reduced the compute time and the computer memory.

Key words: the Finite-Difference Time-Domain; the method of moment; electromagnetic compatibility; radiation

(编辑 李胜春)