

基于FDTD方法的脉冲磁场屏蔽效能研究*

张洪欣¹, 吕英华¹, 毛昌辉², 杨志民²

(1. 北京邮电大学 培训中心 214 信箱, 北京 100876; 2. 北京有色金属研究总院, 北京 100088)

摘要:为了解决实际工程中存在的线圈隔离问题,利用时域有限差分法对电感线圈的低频脉冲磁场屏蔽问题进行了建模和分析,研究了在不同的屏蔽材料下对脉冲磁场的屏蔽效果,为解决在实际工程中存在的线圈隔离问题提供了可靠的理论依据。

关键词:时域有限差分法;磁场屏蔽;屏蔽效能;线圈隔离

中图分类号:TM15 文献标识码:A

0 引言

时域有限差分(FDTD; finite-difference time-domain)法作为一种有效的电磁场数值计算方法,在电磁兼容、天线辐射、目标电磁散射、微波和光波分析、生物医学工程等领域有着日益广泛的应用。它直接把含时间变量的Maxwell旋度方程转化为差分方程,每个网格点上的电场(或磁场)分量仅与它相邻的磁场(或电场)及该点上的一时间步场值有关。通过选取合适的初值和计算空间的边界条件,在每一时间步上计算网格空间各点场分量,随着时间步的推进,也能直接模拟电磁波的传播及其与其他物体的相互作用过程。这使得它能直接给出非常丰富的电磁场问题的时域信息。如果需要频域信息,则只需对时域信息进行Fourier变换。FDTD法不需要任何导出方程,避免了使用更多的数学工具,使得它成为现有的计算电磁学方法中较为简单的一种。本文利用FDTD方法对实际工程中存在的电感线圈脉冲磁场隔离问题进行了建模和计算,研究了屏蔽材料的屏蔽效能。同时用FDTD方法分析了利用铜、坡莫合金等金属材料作为屏蔽材料在脉冲磁场激励时的屏蔽效能,为该装置延时电路的有效实施提供了理论依据。

1 Maxwell方程组FDTD格式的建立

1.1 自由空间中Maxwell方程组的FDTD格式

建立时域有限差分方程所采用的Yee氏网格如图1所示^[1-3]。在线性、各项同性的媒质中,无源区的

Maxwell方程组为

$$\nabla \times \mathbf{H} = \epsilon \frac{\partial \mathbf{E}}{\partial t}; \quad \nabla \times \mathbf{E} = -\mu \frac{\partial \mathbf{H}}{\partial t} \quad (1)$$

采用如图1所示的Yee氏网格,将式(1)中的空间和时间一阶微分做中心差分,可以得到Maxwell方程组在自由空间无源区的差分格式,其中电场的x方向分量如式(2)所示^[3,6]:

$$E_{x|i+1/2,j,k}^{n+1} = \frac{\epsilon/\Delta t - \sigma/2}{\epsilon/\Delta t + \sigma/2} E_{x|i+1/2,j,k}^n + \frac{1}{\epsilon/\Delta t + \sigma/2} \left[\frac{H_{z|i+1/2,j+1/2,k}^{n+1/2} - H_{z|i+1/2,j-1/2,k}^{n+1/2}}{\Delta y} - \frac{H_{y|i+1/2,j,k+1/2}^{n+1/2} - H_{y|i+1/2,j,k-1/2}^{n+1/2}}{\Delta z} \right] \quad (2)$$

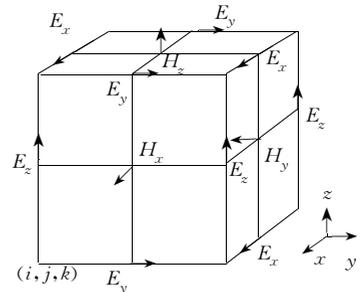


图1 Yee氏网格
Fig. 1 Yee's grid

式(2)中, E, H 分别为电场和磁场强度, $\Delta y, \Delta z$ 分别为 y, z 方向的空间步长, Δt 为时间步长, ϵ 为介电常数, σ 为导电率。

1.2 PML吸收媒质中Maxwell方程组的FDTD格式

为了能够利用有限的计算空间来模拟无限大空间中电磁波的传播,必须在边界上采用吸收边界条

* 收稿日期:2003-07-19

基金项目:国家自然科学基金资助项目(60271018)

作者简介:张洪欣(1969-),男,山东人,博士研究生,主要从事电磁兼容,信息安全等研究工作;吕英华(1944-),男,辽宁人,教授,博士生导师。

件,用以吸收到达边界的电磁波。1994 年 Berenger 提出了一种完全匹配层(PML:perfectly matched layer)吸收边界条件^[2],它建立在一组分裂式的麦克斯韦方程的基础上,反射系数可以达到 -80 dB 到 -100 dB 以下^[4-8]。1996 年,Gedney 提出了建立在直接形式麦克斯韦方程组基础上的 PML 方法^[4](UPML),这种方法提高了计算效率,并且易于推广到一般曲线坐标系。本文利用 UPML 实现了三维直角坐标系下 Maxwell 方程组的 FDTD 格式,其 PML 参数的三维设置示意图见图 2,整个 PML 空间

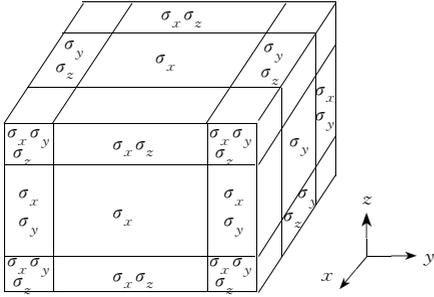


图2 PML中吸收媒质参数的设置

Fig.2 Parameters set in PML absorbing material

分成 26 块,这包括 6 个面、12 条棱和 8 个角。与其他文献^[4,5]不同的是,最外层不再用理想导体封闭,而以一阶 Mur 边界条件替代。PML 的特点是在面区域和棱区域中与坐标轴平行的电导率为零,只存在与坐标轴垂直的电导率,并且随着进入 PML 的深度增加而增大,在 PML 与计算空间的交界处为零,在最外层达到最大值;在角区域中存在着沿 3 个方向变化的电导率。Maxwell 方程组表示为

$$\nabla \times \mathbf{H} = j\omega\epsilon_0\epsilon_r\epsilon\mathbf{E}; \quad \nabla \times \mathbf{E} = -j\omega\mu_0\mu\mathbf{H} \quad (3)$$

$$\epsilon = \begin{bmatrix} \frac{s_y s_z}{s_x} & 0 & 0 \\ 0 & \frac{s_x s_z}{s_y} & 0 \\ 0 & 0 & \frac{s_x s_y}{s_z} \end{bmatrix} \quad (4)$$

式(4)中, $s_x = 1 + \frac{\sigma_x}{j\omega\epsilon_0}$, $s_y = 1 + \frac{\sigma_y}{j\omega\epsilon_0}$, $s_z = 1 + \frac{\sigma_z}{j\omega\epsilon_0}$,这样可以保证到达 PML 中的来波无反射地传播。引入电通量密度为

$$D_z = \epsilon_0\epsilon_r \frac{\sigma_x}{s_z} E_z \quad (5)$$

由式(3),(4),(5)可得 Maxwell 方程组在 PML 中的 FDTD 格式,其中的 D_x, E_x 的表达式如下:

$$D_{x|i+1/2,j,k}^{n+1/2} = \frac{2\epsilon_0 - \sigma_y \Delta t}{2\epsilon_0 + \sigma_y \Delta t} D_{x|i+1/2,j,k}^{n-1/2} + \frac{2\epsilon_0 \Delta t}{2\epsilon_0 + \sigma_y \Delta t} \left(\frac{H_{z|i+1/2,j+1/2,k}^n - H_{z|i+1/2,j-1/2,k}^n}{\Delta y} - \right.$$

$$\left. \frac{H_{y|i+1/2,j,k+1/2}^n - H_{y|i+1/2,j,k-1/2}^n}{\Delta z} \right) \quad (6)$$

$$E_{x|i+1/2,j,k}^{n+1/2} = \frac{2\epsilon_0 - \sigma_z \Delta t}{2\epsilon_0 + \sigma_z \Delta t} E_{x|i+1/2,j,k}^{n-1/2} + \frac{2\epsilon_0 + \sigma_x \Delta t}{(2\epsilon_0 + \sigma_z \Delta t)\epsilon_0\epsilon_r} (D_{x|i+1/2,j,k}^{n+1/2} - D_{x|i+1/2,j,k}^{n-1/2}) \quad (7)$$

同理可以得到电场在 x, y 方向上的差分格式和磁场在各个方向上的差分格式。由于在 PML 中不同的区域上电导率的取法不同,因此在不同区域应用这些差分方程时应当根据实际情况简化方程。

在 PML 媒质中,介电常数和磁导率数分别为真空中的介电常数 ϵ_0 和介磁常数 μ_0 。电导率的选取可以依据经验公式^[5]

$$\sigma(\rho) = \sigma_{\max} \left(\frac{\rho}{\delta} \right)^m \quad (8)$$

式(8)中, ρ 为进入到 PML 层的深度, δ 为 PML 吸收层的厚度, σ_{\max} 为固定参数, m 一般选在 3 到 4 之间。在 PML 层与计算空间的交界处为零,在 PML 层与 PEC 的交界处为最大值。其中, $\sigma_{\max} = \frac{(m+1)\ln[R(0)]}{2\delta\sqrt{\mu/\epsilon}}$,本文中取 $R(0) = 10^{-2}$, $m = 4$,PML 层为 9 层。

2 脉冲磁场屏蔽效果

本文研究的电感线圈和屏蔽层的设置见图 3,图 3 中只画出了 2 个并列放置的电感线圈中的一个,具体尺寸从略。根据问题的特点,把通电线圈等效为恒定的磁场激励源,该磁场强度可以由电流强度、电感值和线圈的横截面等来计算,如式(9)所示。

$$H = \frac{B}{\mu_0\mu_r} = \frac{\Psi}{\mu_0\mu_r S} = \frac{NLI}{\mu_0\mu_r S} \quad (9)$$

式(9)中, $\Psi = BS$ 为磁通量; $B = \mu H$ 为磁感应强度; S 为电感线圈横截面积, L 为电感值; I 为电流; N 为电感线圈总匝数,取 100 匝。屏蔽层采用金属铜和坡莫合金,距磁场源 3 mm,厚度取 0.3 mm,计算时取空间步长为 0.15 mm,此时屏蔽层占 2 个网格。经计算,电流最大值为 1.2 A。因为高斯脉冲磁场源峰值频率为 10 kHz,其波长与空间步长相差悬殊,故仅取电流的峰值进行计算。

2.1 无屏蔽层时线圈磁场的计算

在不加屏蔽层时,空间取值点的分布见图 3,所计算的空间场强分布见图 4。计算空间为 $30 \times 30 \times 30$

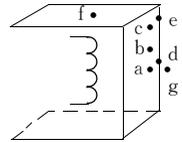


图3 电感线圈的磁场屏蔽示意图

Fig.3 Sketch of magnetic shielding of inductance loop

个网格,空间步长取1 mm。经过归一化,图4中每单位长度代表3 mm。

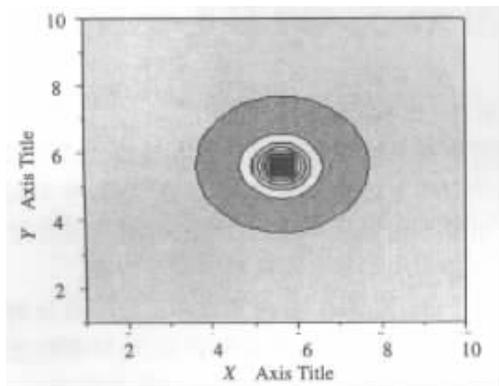


图4 磁场等位分布图

Fig. 4 Equal potential distributing of magnetic field

屏蔽层所处位置应在距线圈3 mm处。经过FDTD计算, a点的磁场强度为 $-7.583855e+006$ A/m; b点的磁场强度为 $-5.307859e+006$ A/m; c点的磁场强度为 $-1.466374e+006$ A/m; d点的磁场强度为 $-2.883367e+006$ A/m; e点的磁场强度为 $-1.431336e+006$ A/m; f点的磁场强度为 $1.727227e+007$ A/m; g点的磁场强度为 $-4.200330e+006$ A/m。可见,不加屏蔽层时由线圈到外部各点的磁场衰减不大。

2.2 铜屏蔽层时磁场的分布和屏蔽效能

铜作为屏蔽层材料时,电导率取为 5.8×10^7 S/m,相对磁导率为1.0,厚度取0.3 mm。计算时空间步长取0.15 mm,计算空间划分为 $200 \times 200 \times 200$ 个网格,所计算的空间场强分布见图5和图6。图5中每单位长度代表3 mm。

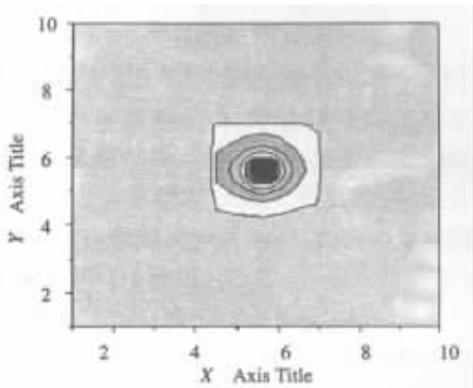


图5 铜屏蔽时磁场等位分布

Fig. 5 Equal potential distributing of magnetic field with copper shield

图5中,最外层同心圆曲线为屏蔽层中的磁场

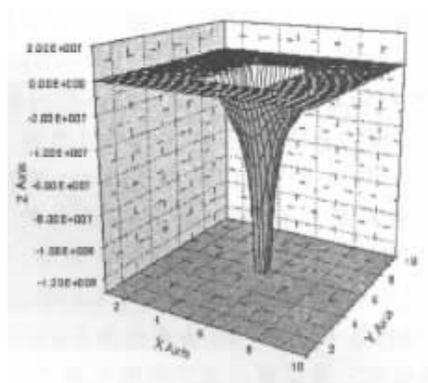


图6 铜屏蔽时磁场空间分布

Fig. 6 Magnetic field distributing in space with copper shield

分布曲线。取值点见图7,屏蔽层内侧(a点)磁场强度为 $-4.283087e+007$ A/m,屏蔽层中(b点)磁场强度为 $-4.811019e+004$ A/m,屏蔽层外侧(c点)磁场强度

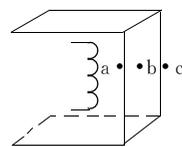


图7 电感线圈与屏蔽层 Fig. 7 Sketch of inductance loop and shielding material

为 $-1.245372e+004$ A/m,屏蔽效能为 $s = 201g(H_2/H_1) = -60.54$ dB,在60 dB以上。

2.3 坡莫合金屏蔽层时磁场的分布和屏蔽效能

坡莫合金作为屏蔽层材料时,电导率取为 6.0×10^6 S/m,相对磁导率为1000.0,厚度取0.3 mm。计算空间划分为 $200 \times 200 \times 200$ 个网格,计算时取空间步长为0.15 mm。此时屏蔽层占2个网格。所计算的空间场强分布见图8和图9。图8中每单位长度代表3 mm。

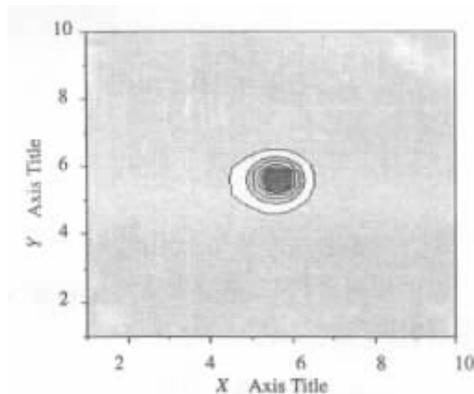


图8 坡莫合金屏蔽时磁场等位分布

Fig. 8 Equal potential distributing of magnetic field with permalloys shield

在图8和图9中,因为磁场强度太小,没有显示出屏蔽层中磁场的分布曲线。如图7给出了屏蔽层内外各点,经过FDTD计算后,屏蔽层内侧(a点)磁

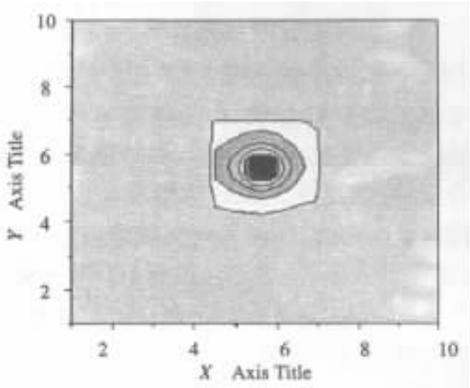


图9 坡莫合金屏蔽时磁场空间分布

Fig. 9 Magnetic field distributing in space with permalloys shield

场强度为 $-1.971843e+007$ A/m, 屏蔽层中(b点)磁场强度为 $7.942313e-001$ A/m, 屏蔽层外侧(c点)磁场强度为 $-1.370837e+003$ A/m, 屏蔽效能为 $s=201g(H_2/H_1)=-79.84$ dB, 屏蔽效能接近 80 dB。

3 结 论

本文研究了某一实际工程系统中铜和坡莫合金等金属材料对高斯脉冲激励源磁场的屏蔽效能。通过分析计算表明,在电感线圈加上屏蔽层时磁场强度得到了足够大的衰减。在低频的情况下可采用金属铜作为屏蔽材料时可使其屏蔽效能达到 60 dB 以上;当选用坡莫合金作为屏蔽材料时其屏蔽效能可达到 80 dB。通过进一步的试验测试表明,2 种情况下,均能达到线圈隔离的要求,消除了 2 个并列放置的电感线圈的相互干扰,达到了系统正常工作的性能指标。

参考文献:

- [1] YEE K. S. Numerical solution of initial boundary value problem involving maxwell's equations in isotropic media [J]. IEEE Trans. Antennas and Propagation, 1966, 14: 302-307.
- [2] BERENGER J P. A perfectly matched layer for the absorption of electro- magnetic waves [J]. Computational Physics, 1994, 114 (2): 185-200.
- [3] 高本庆. 时域有限差分法 [M], 北京: 国防工业出版社, 1995.
- [4] GEDNEY S . D. An anisotropic perfectly matched layer-absorbing medium for the truncation of FDTD lattices [J]. IEEE Trans. Antennas and Propagation, 1996, 44 (12): 1630-1639.
- [5] TAFLOVE A. Advances in computational electrodynamics [M]. Norwood, MA: Artech House, 1998.
- [6] 王长清, 祝西里. 电磁场计算中的时域有限差分法 [M], 北京: 北京大学出版社, 1994.
- [7] 张洪欣, 吕英华, 黄永明. 柱坐标系下 PML-FDTD 及总场-散射场区连接条件[J]. 重庆邮电学院学报(自然科学版), 2003, 15 (3): 4-8.
- [8] 张洪欣, 吕英华, 黄永明. 基于 FDTD 方法的同轴电缆孔缝辐射效应研究 [J]. 电波科学学报, 2003, 18 (2) : 161-165.

(编辑:龙能芬)

Investigation of shielding efficiency against pulse magnetic field based on FDTD method

ZHANG Hong-xin¹, LU Ying-hua¹, MAO Chang-hui², YANG Zhi-min²

(1. Beijing University of Posts and Telecommunications, Beijing 100876, P. R. China;

2. Beijing General Research Institute for Non-ferrous Metals, Beijing 100088, P. R. China)

Abstract: In this article, the pulse magnetic field shielding efficiency of the inductance loop in low frequency is modeled and analyzed using FDTD method in order to settle the inductance seclusion problem that exists in an actual project. Then, the pulse magnetic field shielding efficiency with different material is studied. This provide the credible theoretic evidences for settling the inductance seclusion problem that exists in the actual project.

Key words: finite-difference time-domain; magnetic field shielding; shielding efficiency; inductance loop seclusion