

卫星模型散射 FDTD 计算的共形边界研究

姜彦南, 葛德彪, 杨利霞

(西安电子科技大学理学院, 陕西 西安 710071)

摘要: 根据卫星模型太阳能帆板平面相对卫星主体较大的特点, 提出了共形边界的概念, 即总场边界、外推边界和吸收边界的几何形状与目标外形轮廓相同, 并把它应用在卫星模型时域有限差分(FDTD)计算中, 以减少 FDTD 计算及存储量. 首先讨论了 FDTD 方法中 3 种边界的共形处理方法, 特别针对 270° 拐角处吸收边界的处理进行了详细分析. 通过电偶极子辐射验证共形吸收边界具有良好的吸收外行波的性能. 最后给出卫星模型远区后向散射时域波形, 与常规长方体边界 FDTD 计算结果相符, 验证了共形边界理论在 FDTD 计算应用中的正确性. 卫星模型采用共形边界后节省内存约 40.7%, 缩短了计算时间, 改善了计算性能.

关键词: 共形边界; 时域有限差分(FDTD)方法; 卫星模型

中图分类号: TN011 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-2400(2007)04-0587-03

Conformal boundary scheme in FDTD computation of satellite model scattering

JIANG Yan-nan, GE De-biao, YANG Li-xia

(School of Science, Xidian Univ., Xi'an 710071, China)

Abstract: Based on the large dimension of the solar panel compared with the main body in the satellite model, the conformal boundaries are implemented, i. e., the outlines of the total field boundary, near-to-far field extrapolation boundary and absorbing boundary are the same as that of the target. This scheme is applied to the FDTD analysis for satellite model scattering to reduce memory space and computation time. Firstly, the three conformal boundaries in FDTD are considered. The boundary condition at the 270° corner is particularly analyzed in detail. Then the electric dipole radiation is computed to test the applicability of conformal absorbing boundaries, which demonstrates the efficiency in absorbing the outward wave. Finally, the back scattering by the satellite model is computed by using conformal boundaries. The far-zone time domain waveform obtained is in good agreement with that calculated by FDTD of conventional rectangular boundaries, which validates the presented scheme. The FDTD calculation performance is improved using the conformal boundaries in the satellite model. It saves the memory about 40.7% and shortens the computation time.

Key Words: conformal boundary; FDTD method; satellite model

在时域有限差分(FDTD)方法中计算区域的截断和总场-散射场区域的划分通常采用长方体边界^[1~3]. 在如图 1 所示的卫星简化模型 FDTD 计算中, 太阳能帆板展开后总长度远大于帆板厚度和卫星主体尺寸. 若采用通常的长方体边界, 卫星主体两侧除了太阳能帆板外, 很大一部分是不必要计算的区域. 为此在 FDTD 分析中引入共形边界. 所谓共形边界, 指的是边界的几何形状与目标外形轮廓相同. 对于共形吸收边界技术的研究主要有不变性测度方程(MEI)方法^[4,5], 它利用在空间每个离散节点上的场均可表示成其周围格点上场的线性组合和该方程对激励具有不变性的假设, 原则上可以适用于任意形状的物体, 但是需要通过测试来确定线性方程的系数, 并且未涉及总场边界和外推边界的研究. 共形边界和共形网格技术^[6,7]是两个不同的概念. FDTD 方法中的共形网格技术是指空间离散的台阶化近似与目标表面不相符时对 FDTD 递推

收稿日期: 2006-10-20

基金项目: 国家自然科学基金资助(60371018)

作者简介: 姜彦南(1980-), 男, 西安电子科技大学博士研究生.

公式的特殊处理方法. 笔者提出的共形边界是针对卫星模型 FDTD 计算的一种边界处理方法, 不仅对吸收边界, 而且对总场边界和外推边界均采取了共形处理, 可以大量节省内存和缩减计算时间.

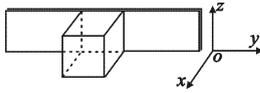


图 1 卫星简化模型

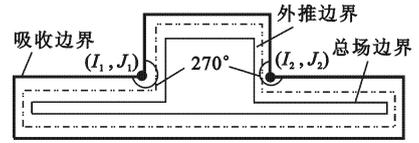


图 2 如图 1 卫星模型 xy 剖面示意图

1 共形边界分析

图 2 为图 1 的 xy 剖面图. 除了在太阳能帆板与卫星主体连接处存在如图 2 中所示的 270° 拐角外, 其余 90° 拐角处以及边界上场的处理与传统长方体边界相同. 下面着重就总场-散射场连接边界、外推边界和吸收边界在 270° 拐角处的处理方法分别进行分析.

1.1 总场边界

以三维总场区边界上的 $E_z^n(i_c, j_c, k_c + 1/2)$ 节点为例, xyz 坐标系中节点位置 (x_c, y_c, z_c) 投影到平面波入射方向 \hat{e}_r 上的距离为

$$r' = x_c \sin \theta_{\text{inc}} \cos \varphi_{\text{inc}} + y_c \sin \theta_{\text{inc}} \sin \varphi_{\text{inc}} + z_c \cos \theta_{\text{inc}} = i_c \Delta x \sin \theta_{\text{inc}} \cos \varphi_{\text{inc}} + j_c \Delta y \sin \theta_{\text{inc}} \sin \varphi_{\text{inc}} + \left(k_c + \frac{1}{2}\right) \Delta z \cos \theta_{\text{inc}} \quad (1)$$

上述 r' 值可能位于一维 FDTD 的两个节点之间, 例如 $r' = (p + \omega) \Delta x$, $0 < \omega < 1$, 即位于 p 和 $p + 1$ 节点之间. 于是, 采用线性插值公式可得三维总场区边界上 $(i_c, j_c, k_c + 1/2)$ 节点处的入射波为

$$E_{z,\text{inc}}^n(i_c, j_c, k_c + 1/2) = (1 - \omega) E_{z,\text{inc}}^n(p) + \omega E_{z,\text{inc}}^n(p + 1) \quad ,$$

其中 $E_{z,\text{inc}}^n$ 为入射波电场在 xyz 系中的 z 分量. 其他 E 和 H 节点的切向分量有类似处理. 以这种逐步推进方式设置入射波, 在总场区以外产生的泄漏较小. 这里的连接边界是沿着目标几何外形(如图 3)的共形边界, 在平行于 xy 面的连接边界上的投影仅仅局限在“凸”形的面上. 对于 270° 拐角处的电场 E_z , 只需要在交汇于此的互相垂直的两个平面中的任意一个平面上处理一次即可.

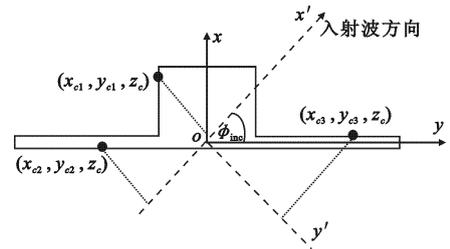


图 3 xy 剖面沿 x 方向一维入射平面波在总场边界上的投影

1.2 外推边界

对于共形外推边界共有 10 个平面, 通过共形外推边界面上的等效电磁流, 由惠更斯原理计算远区散射场. 垂直于 z 轴的 2 个“凸”形外推边界面上, 仅计算“凸”形面上的等效电磁流. 在平行于 xoz 面和 yoz 面的 8 个外推边界面上计算等效电磁流时, 对于 270° 拐角上的电场 E_z , 只需在平行于 xoz 面或者 yoz 面的外推边界上计算一次其等效电磁流.

1.3 吸收边界

共形截断边界面上的吸收边界采用的是 Mur 一阶和二阶近似的混合处理方法^[3]. 从吸收边界理论可以看出, 除了 270° 拐角处电场 E_z 分量外, 吸收边界上其余电场分量的处理与常规长方体边界相同.

对于电场 E_z 分量, 若采用二阶近似, 如图 2 中棱边 (I_1, J_1, k) 处场的处理需要用到迭代区域内部电场; 同时, 在计算诸如 $(I_1, J_1 + 1/2, k)$ 处的磁场 H_x 和 $(I_1 - 1/2, J_1, k)$ 处的 H_y 时, 均需要用到 270° 处棱边的电场 E_z , 因此, 对 270° 棱边 $A_1 B_1$ 处电场 E_z 的处理要采用一阶 Mur 近似, 而不是文献^[3]中处理 90° 棱边不考虑的方式. 针对 270° 处棱边的特殊性, 以 (I_1, J_1, k) 处为例, 考虑其所在平面的方向, 处理时采用以下公式:

$$E_z^{n+1}(I_1, J_1, k) = E_z^n(I_1 - 1, J_1 + 1, k) + \frac{c \Delta t - (\Delta x^2 + \Delta y^2)^{1/2}}{c \Delta t + (\Delta x^2 + \Delta y^2)^{1/2}} \cdot [E_z^{n+1}(I_1 - 1, J_1 + 1, k) - E_z^n(I_1, J_1, k)] \quad (2)$$

即棱边 (I_1, J_1, k) 处场量与其上时刻场量以及其对角线 $(I_1 - 1, J_1 + 1, k)$ 上场量有关. 同理, 棱边 (I_2, J_2, k) 处的处理亦是如此.

综上所述,对于共形吸收边界,90°和 270°棱边及其截断边界面上切向场分量节点的计算按以下 3 种情况区别对待:截断边界面上与 90°棱边相邻的一列节点采用一阶近似条件;截断边界面上与 270°棱边相邻的一列节点采用一阶近似条件;截断边界面上其他节点则仍用二阶近似条件。

需要特别注意的是:($I_1 - 1/2, J_1 + 1, k$)和($I_1 - 1/2, J_2 - 1, k$)处 E_x 场量的计算以及($I_1 - 1, J_1 + 1/2, k$)和($I_1 - 1, J_2 - 1/2, k$)处 E_y 场量计算,也是用二阶近似来完成。

2 共形吸收边界吸收效果检验:电偶极子辐射场

作为共形吸收边界效果的检验,考虑如图 1 模型形状的三维计算空间中电偶极子辐射情况.设垂直电偶极子位于计算区域中心 $E_x(1/2, 0, 0)$ 和 $E_z(0, 0, 1/2)$ 处.电偶极子辐射源的 FDTD 公式为^[3]

$$E_r^{n+1} = E_r^n + \Delta t [\nabla \times \mathbf{H}]_r^{n+1/2} / \epsilon_0 - (\Delta t / (\epsilon_0 \delta^3)) [dp/dt]^{n+1/2}, \quad r = x \text{ 或 } z.$$

上式是在无源 FDTD 计算式中加上了右边的第 3 项,适用于电偶极子所在节点位置.除偶极子所在节点外,其他节点仍应用无源空间 FDTD 公式.元胞尺寸设为 $6 \text{ cm} \times 6 \text{ cm} \times 6 \text{ cm}$,即 $\delta = 6 \text{ cm}$.按照 $\delta = 2c \Delta t$,时间间隔为 $\Delta t = 100 \text{ ps}$.考察距离辐射源 10δ 处观察点 Q 的电场 $E_x(10 + 1/2, 0, 0)$ 和 $E_z(10, 0, 1/2)$.计算中偶极子源采用高斯脉冲

$$p(t) = A \cdot \exp[-B \cdot ((t - t_0) / \tau)^2], \tag{3}$$

其中 $A = 10^{-10}, B = 1, \tau = 2 \text{ ns}, t_0 = 3\tau$,此处电流源单位为 A.在观察点 Q 处, $r = 10\delta, \theta = 90^\circ$.

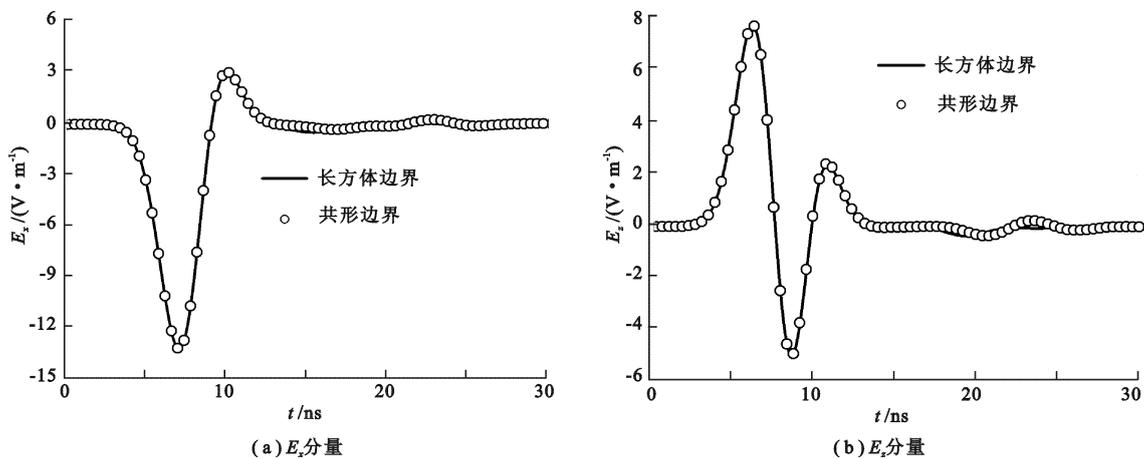


图 4 Q 点处电偶极子辐射场

为了比较,图 4 中同时给出文中共形边界和传统长方体吸收边界下瞬态偶极子的 FDTD 计算结果.由图可见,二者符合很好.从图 4(a)~(b)可以看出,偶极子辐射场在 15~25 ns 之间存在微小差异,这是由于在 270°拐角处采用一阶 Mur 近似吸收边界引起。

3 卫星模型共形边界远区散射计算

设图 1 所示卫星模型的太阳能帆板展开后总长约 10 m,板厚度 6 cm,计算中设太阳能帆板为理想导体材料;卫星主体长方体物件约为 $1.5 \text{ m} \times 1.5 \text{ m} \times 1.5 \text{ m}$,计算中取离散间隔为 $\delta = 6 \text{ cm}$.入射波采用如式(3)的高斯脉冲波,其中 $A = 1, B = 4\pi$,脉冲宽度 $\Delta t = \delta / (2c), \tau = 60 \Delta t$,脉冲峰值出现在 $t_0 = 0.8\tau$ 时刻, $p(t)$ 单位为 V/m.入射波沿 z 向入射,线性极化波,即电场沿卫星翼展方向极化,迭代计算步数为 300 步.采用共形边界计算得到后向散

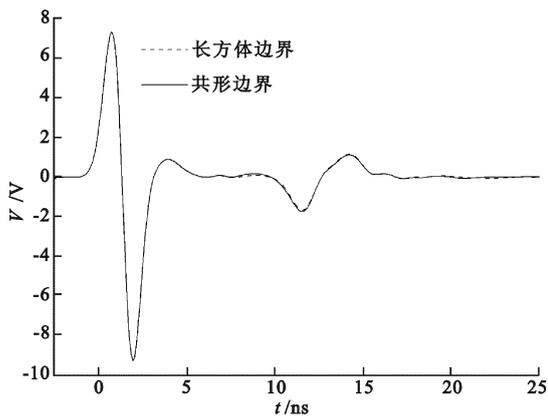


图 5 共形和长方体边界卫星模型后向远区散射时域波形