

# 用 FDTD 方法模拟稳态电磁 散射时开关函数的应用\*

葛德彪 郭利强 李明之

(西安电子科技大学物理系, 西安 710071)

**摘要** 在用时域有限差分 (FDTD) 方法模拟稳态电磁散射时, 为了减小稳态建立过程中的冲激效应, 缩短建立稳态所需时间, 本文引入了开关函数, 并给出几种开关函数下 FDTD 的稳态建立过程。

**关键词** 电磁散射; 时域有限差分 (FDTD) 方法; 开关函数

## 1. 引言

时域有限差分 (FDTD) 方法<sup>[1]</sup>是将 Maxwell 方程直接作差分离散, 随着时间的推进交替计算电场和磁场。实际上, 它是一种时域逐步推进方法。通常, 将计算区域分为总场区和散射场区, 如图 1 所示。在用 FDTD 方法模拟正弦电磁波下的散射过程时, 总要经历一段建立过程才可以达到稳态。为了缩短稳态建立所需时间和减小冲激效应, 我们引入了开关函数, 并给出几种开关函数下平面波的稳态建立过程。最后, 给出相应的 FDTD 计算二维电磁散射的例子。

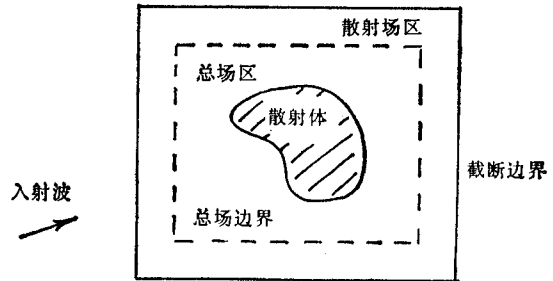


图 1 FDTD 区

## 2. 入射场的引入和开关函数

根据惠更斯原理, 只要给出图 1 中总场边界上入射波电场和磁场的切向值, 在用 FDTD 计算时就可以将入射场引入到总场区<sup>[2]</sup>。通常, 在  $t = 0$  时刻以前, 假设 FDTD 区内电磁场均为零。因此, 分析稳态散射时, 入射波实际上取为

$$\mathbf{E}_i(\mathbf{r}, t) = \mathbf{E}_0 \cos(\omega t - \mathbf{k}_i \cdot \mathbf{r}) \cup \left( t - \frac{\mathbf{k}_i \cdot (\mathbf{r} - \mathbf{r}_0)}{\omega} \right) \quad (1)$$

1992.06.30 收到, 1993.01.04 定稿。

\* 国防科技预研基金资助项目。

葛德彪 男, 1938 年生, 教授, 中国电子学会会员, 美国电磁科学院成员, 研究方向为电磁散射与逆散射。

郭利强 男, 1967 年生, 硕士研究生, 研究方向为电磁逆散射成像。

李明之 男, 1969 年生, 硕士研究生, 研究方向为电磁逆散射。

其中  $k_i$  为入射波矢量,  $r_0$  为位于 FDTD 区外的参考点位置矢。  $U(t)$  是以  $t = 0$  为起始的开关函数, 适当选择这一函数可以缩短稳态建立时间和减小冲激。 当然, 整个 FDTD 区中稳态的到达还与散射体特性有关。 对于不含腔的单个导体目标, 可以从爬行波绕目标表面一周来估算稳态建立至少所需的时间。

### 3. 例子

(1) 不同开关函数下平面波的稳态建立过程 对于(1)式中的开关函数  $U(t)$ , 我们分别考虑以下 4 种形式:

(a) 阶梯函数, 即

$$U(t) = \begin{cases} 0, & t < 0 \\ 1, & t \geq 0 \end{cases} \quad (2)$$

(b) 倒指数函数, 即

$$U(t) = \begin{cases} 0, & t < 0 \\ 1 - \exp(-7t/t_0), & 0 \leq t < t_0 \\ 1, & t \geq t_0 \end{cases} \quad (3)$$

(c) 斜坡函数, 即

$$U(t) = \begin{cases} 0, & t < 0 \\ (t_0 - t)/t_0, & 0 \leq t < t_0 \\ 1, & t \geq t_0 \end{cases} \quad (4)$$

d. 升余弦函数, 即

$$U(t) = \begin{cases} 0, & t < 0 \\ 0.5[1 - \cos(\pi t/t_0)], & 0 \leq t < t_0 \\ 1, & t \geq t_0 \end{cases} \quad (5)$$

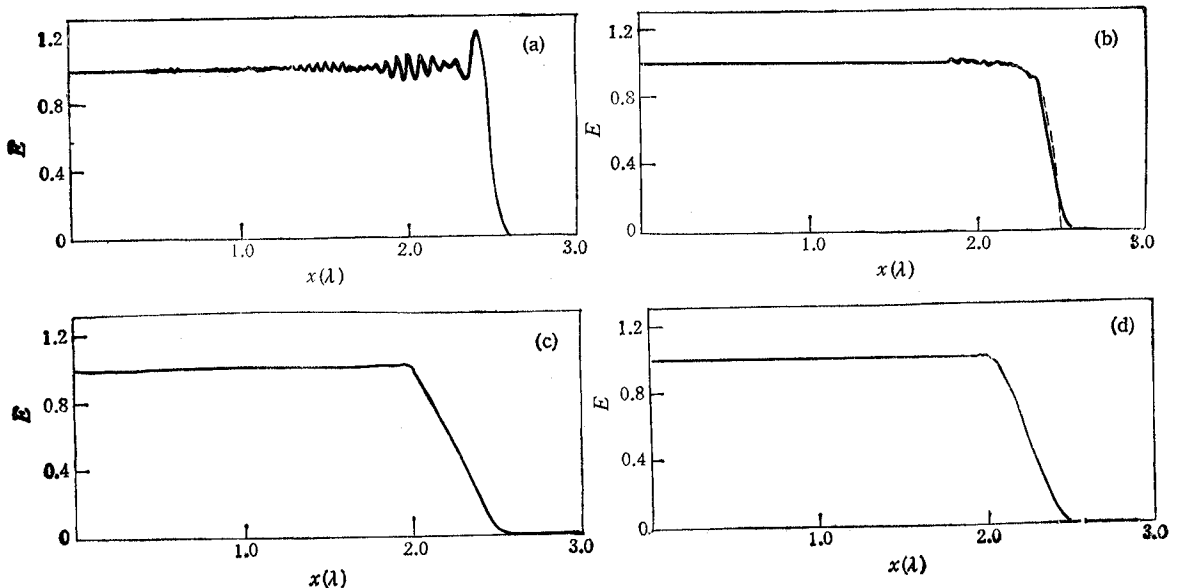


图 2 几种开关函数下 FDTD 的稳态建立过程  
(a) 阶梯函数, (b) 倒指数函数, (c) 斜坡函数, (d) 升余弦函数。

以上各式中  $\epsilon_0$  为常数. 考虑到 FDTD 的数值色散, FDTD 区中平面波的引入实际上是先用一维 FDTD 模拟一列平面波再把它投影到总场边界上<sup>[1]</sup>. 图 2 给出上述 4 种开关函数下由 FDTD 所得平面波在自由空间的传播情形, 设平面波沿  $x$  轴传播. 计算中考虑两列波. 一列如(1)式所示, 另一列则以正弦函数代替(1)式中的余弦函数. 二者平方和的开方为图 2 曲线的纵坐标. 图中横坐标为  $x$  方向距离, 以波长  $\lambda$  为单位. 图 2 (a)—2(d)分别对应于(2)—(5)式所给开关函数下 FDTD 的输出. 计算中取  $\epsilon_0 = T/2$ , 空间和时间步长分别取为  $\delta = \lambda/64$  和  $c \Delta t/\delta = 0.5$ . 由图可见, 阶梯函数所引起的冲激最大, 持续时间最长. 甚至经过 3 个周期以后(图中未绘出)仍有小的扰动. 升余弦函数所引起的冲激最小. 这是由于它的平滑性最好. 在用 FDTD 分析稳态散射时, 我们采用升余弦函数作为开关函数.

(2) 介质圆管的散射, TE 情形 设介电系数  $\epsilon_r = 4.0$  的介质圆管内, 外半径分别为  $a_1 = 0.25\lambda$  和  $a_0 = 0.30\lambda$ . 管内外均为真空. 入射平面波磁场  $H$  平行于柱轴. FDTD 网格取为  $\delta = 0.01\lambda$ . 图 3(a) 给出  $H_x$  的振幅分布. 图中小方框内为总场区, 显示出波在圆管右半部的“聚焦”. 图 3(b) 中实线为用 FDTD 数据外推得到的双站雷达散射截面(RCS), 虚线为用级数解<sup>[4]</sup>得到的结果. 图中横坐标  $\phi$  为  $0^\circ$  或  $360^\circ$  时对应于前向散射. 图中纵坐标是用波长  $\lambda$  归一化后的雷达散射截面.

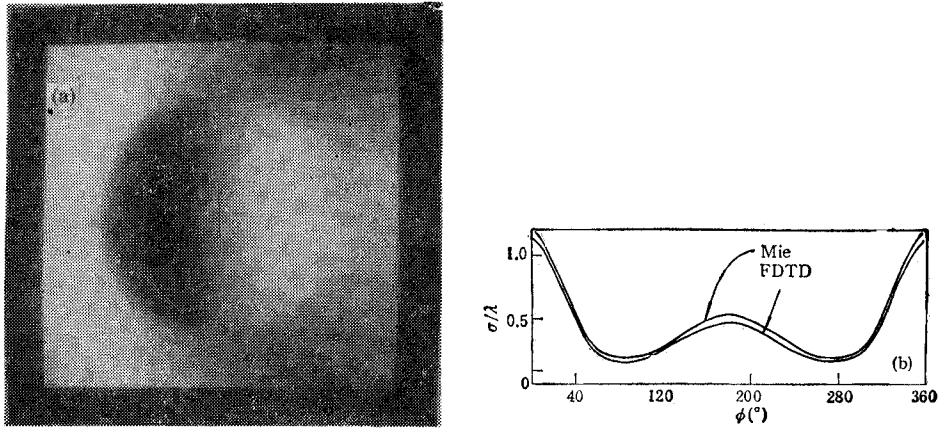


图 3 介质圆管的散射, TE 情形

(a)  $H_x$  的振幅分布, (b) 双站 RCS.

## 参 考 文 献

- [1] A. Taflove, K.R. Umashankar, *Proc. IEEE*, 77 (1987)5, 682—699.
- [2] G. Mur, *IEEE Trans. on EMC*, EMC-23 (1981)4, 377—382.
- [3] 郭利强, 李明之, 葛德彪, 厉明博, *计算物理*, 9(1992) 4, 655—660.
- [4] G.T. Ruck, D.E. Barrick, W.D. Stuart, C.K. Krichbaum, *Radar Cross-Section Handbook*, New York, Plenum Press, (1970), Chap. 4.

## APPLICATION OF SWITCH-ON FUNCTIONS IN THE 2-D FDTD MODELING TIME-HARMONIC ELECTROMAGNETIC SCATTERING

Ge Debiao Guo Liqiang Li Mingzhi

(*Xidian University, Xi'an 710071*)

**Abstract** When the time-harmonic electromagnetic scattering is modeled via the finite-difference time-domain (FDTD) technique, an additional switch-on function is introduced in order to reduce the ringing phenomenon for initial transient process in FDTD calculation. Some examples are given to demonstrate the feasibility.

**Key words** Electromagnetic scattering; Finite-difference time-domain method; Switch-on function.