

理想导体半圆柱 TE 波散射的混合法解

崔索民 汪茂光

(西安电子科技大学 西安 710071)

摘要 本文应用混合技术分析了在 TE 平面波激励下,理想导体半圆柱的双站散射.该混合技术是把半圆柱劈附近的电流表示为未知数,圆柱曲面上的一阶电流应用 Fock 理论求解,高阶绕射电流表示为含有未知系数的 Fock 型函数.圆柱平面上的一阶电流用物理光学近似和曲劈的一致性几何绕射理论得到.劈的二阶绕射电流表示为含有未知系数的 GTD 形式.然后通过磁场积分方程,运用简单矩量法求得劈附近的电流和未知的绕射系数.最后计算了理想导体半圆柱的双站散射截面,结果与矩量法的结果吻合得相当好.

关键词 电磁散射,混合法,半圆柱

1 引言

目前分析电磁散射和辐射问题的高频渐近矩量混合法有场基混合法^[1]和电流基混合法^[2-4].场基混合法亦称为几何绕射理论矩量法(GTD-MM)混合技术,它的目的主要是通过矩量法(MM)推广 GTD 的应用范围.在该方法中绕射系数可以是未知数,利用 GTD 区域的已知电流形式,可以计算未知的绕射系数,从而为寻找分析形式未知的绕射系数提供了有效方法.电流基混合法是在高频解存在的区域用物理光学(PO)近似、物理绕射理论(PTD)和 Fock 理论求解电流,而在高频解不存在的区域用 MM 求解未知电流.在求解该未知电流时,高频电流是有效的等效源.该混合法主要目的是利用高频技术推广 MM 的应用范围.D. S. Wang^[2-4]等用该方法分析了金属、介质和涂层旋转体(球、圆锥和锥球)对平面波的散射,在某些情况下得到的结果与 MM 的结果一致.由于高频电流在积分方程的积分算子中出现,在计算矩阵元时要计算大量的高维积分,使计算时间显著增加.

本文把上述两种混合法有机地结合起来,利用 PO 近似、Fock 理论、一致性几何绕射理论(UTD)和 GTD 等高频渐近理论以及简单的 MM,分析了二维理想导体半圆柱在 TE 平面波照射下的双站散射问题.该混合法的结果与 MM 的结果一致,计算时间比 MM 少.

2 导体半圆柱表面上的高频电流

首先利用高频渐近技术分析如图 1 所示的半圆柱面上的高频电流, a 是柱的半径,柱

1993-11-04 收到,1994-03-26 定稿

崔索民 男,1967 年生,博士生,主要从事电磁散射研究.

汪茂光 男,1930 年生,教授,主要从事电磁散射和辐射研究.

的轴沿 z 轴方向, 对于 TE 波, 其入射磁场表示如下:

$$H_i^i(\rho) = \exp(-jk\mathbf{k}_i \cdot \rho), \quad (1)$$

k 是自由空间的波数, \mathbf{k}_i 和 \mathbf{k}_s 分别为入射波和散射波单位波矢量。

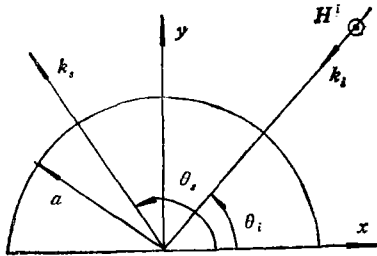


图 1 导体半圆柱散射几何示意图

2.1 弯曲表面上的电流

弯曲表面上的电流由两部分构成: 入射波直接在弯曲表面上激励的电流以及两个劈 Q_R 和 Q_L 在弯曲表面上产生的绕射电流。

2.1.1 入射磁场在柱的弯曲表面上产生的感应电流 这部分电流 J_{S1} 可由 Fock 理论得

到^[5,6]。

在照明区域(图 2(a) 所示)

$$J_{\phi}^{S1}(\rho_Q) = -H_i^i(\rho_Q)g(\xi)\exp(-j\xi^3/3), \quad (2)$$

其中 $\xi = -M(\mathbf{n} \cdot \mathbf{k}_i)$, \mathbf{n} 为圆柱曲面的单位外法向矢量, $M = \sqrt[3]{ka/2}$, $g(\xi)$ 为硬边界 Fock 函数, H_i^i 为 Q 处的入射磁场。

阴影区域(图 2(b) 所示)的电流为

$$J_{\phi}^{S1}(\rho_{Q'}) = -H_i^i(\rho_{Q'})g(\xi)\exp(-jkt), \quad (3)$$

式中 $\xi = Mt/a$, Q' 是 \mathbf{k}_i 与柱表面的切点, t 是 Q 到 Q' 间的弧长。

当 $\theta_i = 270^\circ$ 时(图 2(c))

$$J_{\phi}^{S1}(\rho_Q) = -[H_i^i(\rho_R)g(\xi_R)\exp(-jkt_R) + H_i^i(\rho_L)g(\xi_L)\exp(-jkt_L)], \quad (4)$$

其中 t_R 和 t_L 是 Q_R 和 Q_L 到 Q 点的弧长, $\xi_{R,L} = Mt_{R,L}/a$ 。

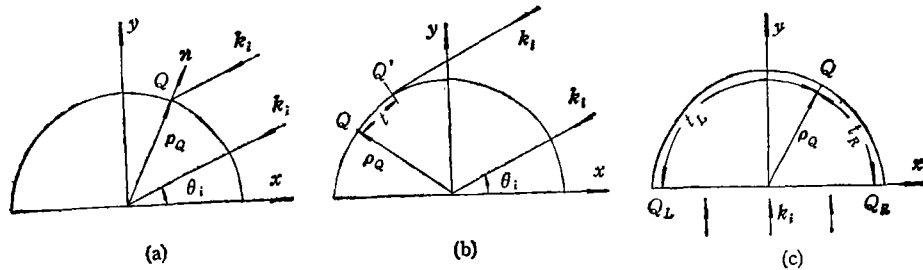


图 2 计算柱曲面上绕射电流示意图

2.1.2 劈 Q_R 和 Q_L 在曲面上激励的电流 这部分电流包括三部分: (1) 劈被照射产生的绕射场在曲面上激励的电流, (2) 曲面上的爬行波到达劈产生的绕射场在曲面上激励的电流, (3) 二劈之间相互作用而产生的绕射场在曲面上激励的电流。设它们可表示为:

$$J_{\phi}^{S2}(\rho_Q) = Ag(\xi_R)\exp(-jkt_R) + Bg(\xi_L)\exp(-jkt_L), \quad (5)$$

其中 A 和 B 为待定系数, $\xi_{R,L} = Mt_{R,L}/a$ 。

2.2 平面上的电流

2.2.1 物理光学电流

$$J_z^{\rho_0} = \begin{cases} -2H_z^i(\rho_0), & (\text{照明区}); \\ 0, & (\text{阴影区}). \end{cases} \quad (6)$$

2.2.2 劈 Q_R 和 Q_L 一次绕射在平面上产生的电流 劈 Q_R 和 Q_L 一次绕射对平面上电流的贡献可根据基于 UTD^[7] 的等效磁流源方法得到。在此仅分析劈 Q_R 在平面产生的电流,对于劈 Q_L 可作类似处理。

劈 Q_R 的等效磁流源为

$$I_m^R = \eta_0(8\pi/kj)^{1/2}H(Q_R)D_h(\varphi_1, \varphi_1', n = 3/2). \quad (7)$$

它在平面上产生的绕射磁场为

$$H_{dz}^R(\rho_0) = C'(\pi k/2j)^{1/2}H_0^{(2)}(k\rho_R)H(Q_R)D_h(\varphi_1, \varphi_1', n = 3/2), \quad (8)$$

式中 $H(Q_R)$ 为 Q_R 处的人射磁场, $D_h(\varphi_1, \varphi_1', n = 3/2)$ 是 90° 理想导体劈的硬极化一致性绕射系数^[7], C' 是一与入射波的入射方向有关的系数。

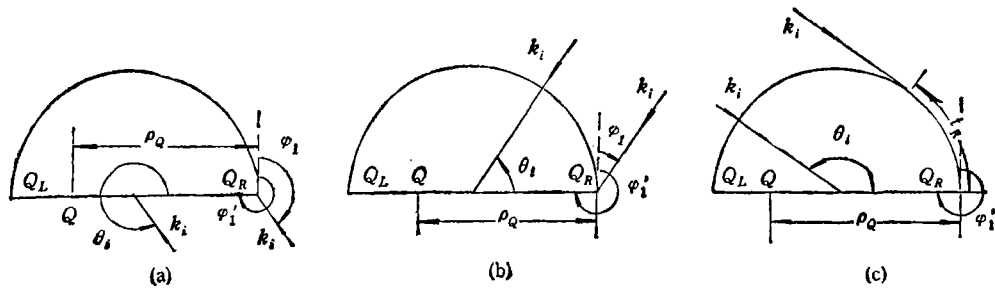


图 3 计算柱平面上绕射电流示意图

(1) 当平面部分被照明(图 3(a)),此时 $C' = 1, H(Q_R) = H_z^i(\rho_0)$.

(2) 当平面处于阴影区而 Q_R 处于照明区时(图 3(b)), Q_R 的人射磁场由 Fock 理论得

$$H(Q_R) = -H_z^i(\rho_0)g(\xi)\exp(-j\xi^3/3), \quad (9)$$

其中 $\xi = -M(\mathbf{n} \cdot \mathbf{k}_i)$, \mathbf{n} 是 Q_R 处的外法线。在这种情况下,对于劈 Q_R 为掠入射,磁极化的绕射系数应乘 $1/2$,即 $C' = 1/2$ ^[8]。

(3) 当 Q_R 处于阴影区(图 3(c)),此时 Q_R 的人射磁场仍由 Fock 理论得到

$$H(Q_R) = -H_z^i(\rho_0)g(\xi)\exp(-jk\xi), \quad (10)$$

式中 $\xi = M\tau_R/a$, 由于是掠入射 $C' = 1/2$ 。

于是劈的一次绕射场在平面上产生的电流为

$$J_z^d(\rho_0) = -[H_{Rz}^d(\rho_0) + H_{Lz}^d(\rho_0)], \quad (11)$$

2.2.3 劈的二次绕射在平面上产生的电流 设这部分电流可表示为 GTD 形式

$$J_z^s = C\exp(-jk\rho_R)/(\rho_R)^\alpha + D\exp(-jk\rho_L)/(\rho_L)^\alpha, \quad (12)$$

式中 C 和 D 为未知系数, ρ_R 和 ρ_L 为平面上的一点 Q 到 Q_R 和 Q_L 的距离。对于掠入射 $\alpha = 0$, 对于其它入射方向 $\alpha = 1/2$ 。

半圆柱平面的电流为上述三种电流之和。

3 混合法公式

上述高频渐近电流在劈附近不正确,而且(4)和(12)式中含有四个未知系数,因而我们将散射体表面划分成如图4所示的区域。

劈附近的区域称为矩量区,曲面上除矩量区域以外的称为区域 C_1 ,平面上除矩量区域以外的称为区域 C_2 。各区域的电流表示如下:

$$J = \begin{cases} J^{mn} t, & \text{在矩量区;} \\ (J_{\varphi}^{S1} + J_{\varphi}^{S2}) \varphi, & \text{在区域 } C_1; \\ (J_x^{P0} + J_x^d + J_x^i) x, & \text{在区域 } C_2; \end{cases} \quad (13)$$

其中 t 在曲面上为 φ , 在平面上为 x 。

与文献[2]的方法类似,我们把劈附近的电流展开成 N 脉冲函数

$$J^{mn} = \sum_{n=1}^N \alpha_n P_n t, \quad (14)$$

其中 P_n 是脉冲函数, α_n 为待求系数。

将(13)和(14)式代入磁场积分方程(见文献[1](4)式)并在 N 个脉冲的中点对积分方程进行点匹配即得到 N 个线性方程组。

为了求解(4)和(12)式中的未知系数,分别在区域 C_1 和 C_2 取两个点,并对磁场积分方程进行匹配又可得四个线性方程组。求解 $N+4$ 个线性方程组得到矩量区域的电流和另外四个未知系数,于是就得到半圆柱表面的全部电流。

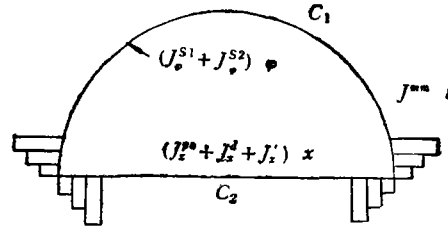


图4 柱面划分为不同区域及其电流

4 数值计算结果和讨论

图5(a)—5(d)是根据上述混合法公式计算的半径为两个波长的半圆柱的双站散射截面随观察方向变化的曲线。对于这些入射方向,特别是在柱的平面的掠射方向,高频近似方法与MM的结果差别较大,而混合法结果却与MM结果吻合的相当好。

在图5的计算中,MM用了110个脉冲函数展开整个表面上的电流,需要求解 110×110 维矩阵的逆,约需时间90s。混合法仅用10个脉冲函数展开劈附近的电流,仅需要求解 14×14 维矩阵的逆,约需时间50s。在MM中,绝大部分时间用在矩阵求逆,而在混合法中,绝大部分时间用在计算矩阵元(因为部分矩阵元含有一重数值积分)。半圆柱的半径越大,混合法越具有优势。

我们可把上述混合法看作是一种混合基矩量法:目标表面连续部分的电流用全域基展开,而不连续部分的电流用子域基展开。与一般全域基不同的是,本文的全域基是用高频渐近理论得到的,具有明显的物理意义,因此使计算速度明显增加。

5 结束语

混合法在电磁散射中有独特的优越性,它把数值方法和解析法有机地结合起来,克服

了它们的不足之处。只要能正确求解高频区域的电流, 它的计算精度则与矩量法相近, 计算时间比 MM 法要少。在混合法中, 如何快速有效地计算矩阵元中的积分有待于进一步的研究。

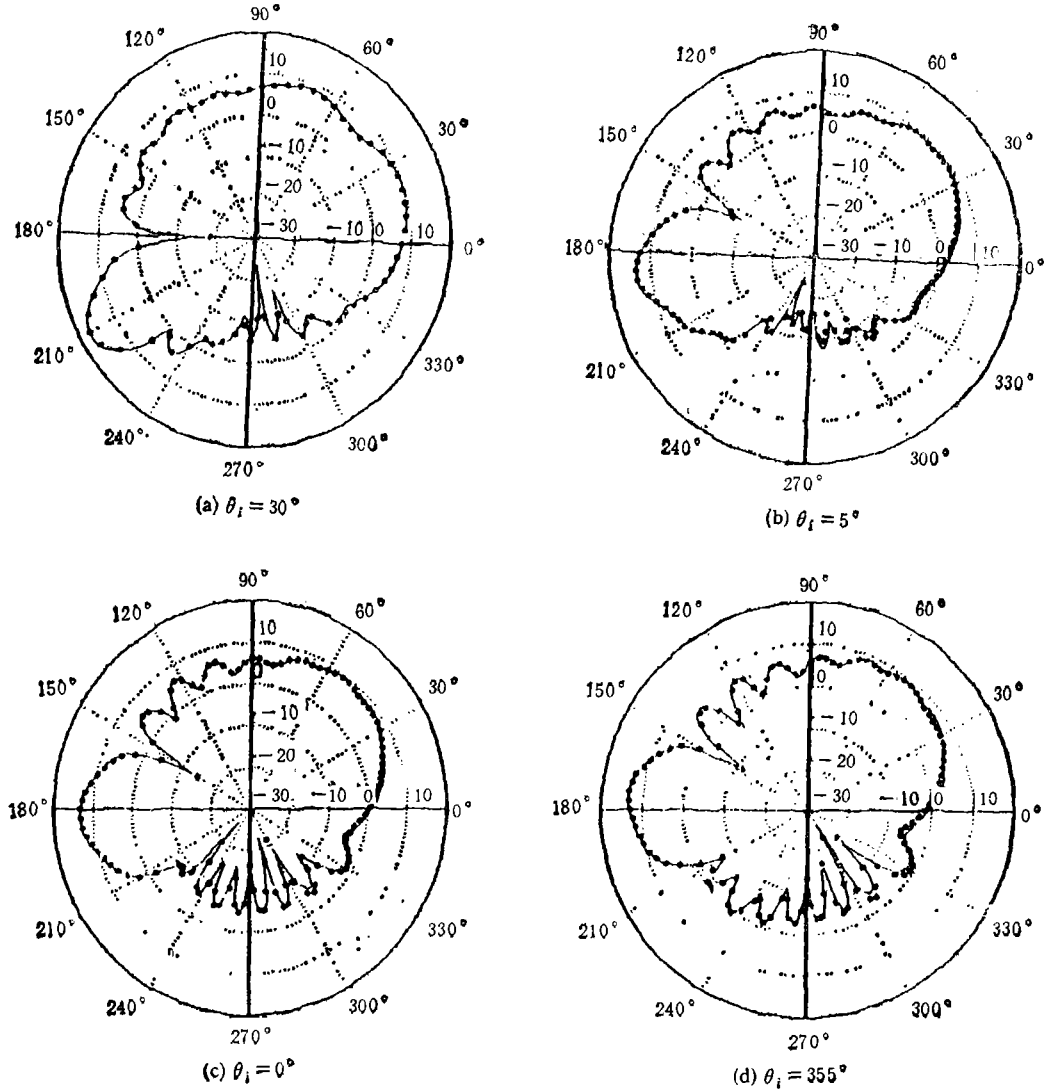


图 5 理想导体半圆柱的双站散射截面 ($\sigma/\lambda \sim \theta_s$)

———矩量解 *****混合法

参 考 文 献

- [1] Burnside W D, Yu C L, Marhefha R J. IEEE Trans. on AP, 1975, AP-23(7): 551—558.
- [2] Medgyesi mitschang L N, Wang D S. IEEE Trans. on AP, 1983, AP-31(4): 570—581.
- [3] Medgyesi-mitschang L N, Wang D S. IEEE Trans. on AP, 1984, AP-32(7): 717—723.
- [4] Medgyesi-mitschang L N, Wang D S. IEEE Trans. on AP, 1986, AP-34(11): 1319—1329.
- [5] Fock V A. Electromagnetic Diffraction and Propagation Problems. New York: Pergamon, 1961, Chapter 2.

- [6] Puck G T.ed. Radar Cross Section Handbook. New York: Plenum, 1970, Chapter 2.
[7] Kouyoumjian R G, Pathak P H. Proc. IEEE, 1974, 62(11): 1448—1461.
[8] 汪茂光. 几何绕射理论. 西安: 西北电讯工程学院出版社, 1978, 66—82.

A HYBRID METHOD FOR TE SCATTERING BY A PERFECTLY CONDUCTING SEMICYLINDER

Cui Suomin Wang Maoguang
(*Xidian University, Xi'an 710071*)

Abstract Bistatic scattering of a perfectly conducting semicylinder is analysed by using a hybrid method. In the hybrid method, the currents in the close vicinity of edges are represented as unknown coefficients; the first-order currents on the curved face are obtained by Fock theory; the high-order currents are described as the Fock type functions involving two unknown coefficients. The first-order currents on planar surface are physical optical currents and diffraction currents obtained by the uniform geometrical theory of diffraction; the second-order currents are expressed in the geometrical theory of diffraction form involving two unknown coefficients. The magnetic field equation is solved to obtain four coefficients and the currents in the close vicinity of the edges. The results obtained by the hybrid method are in good agreement with the results of moment method.

Key words EM scattering, Hybrid method, Semicircular cylinder