

求解圆柱双站 RCS 方法的比较分析

姜永金¹, 傅文斌², 胡林华²

(1. 空军雷达学院研究生队, 湖北 武汉 430019; 2. 空军雷达学院微波工程系, 湖北 武汉 430019)

摘要: 运用矩量法和物理光学方法对 TM 波照射下圆柱的双站 RCS 进行了计算, 并与严格级数解和高频条件下物理光学方法 (PO) 求的解进行了比较和分析, 为更好地利用 MOM 和 PO 方法求解提供了依据。

关键词: 矩量法 (MOM); 圆柱 RCS; 物理光学方法 (PO)

中图分类号: TM15

The Comparison of Bistatic RCS Calculations of Cylinders

Jiang Yongjin¹, Fu Wenbin², Hu Linhua²

(1. Group of Graduate, AFRA, Wuhan 430019, China;

2. Department of Microwave Engineering, AFRA, Wuhan 430019, China)

Abstract: The article calculates the cylinders bistatic RCS in incidence of TM plane wave by using the MOM and the PO, compares and analyzes with the strict progressional solution and the solution obtained by the PO under the condition of high frequency. In order to use the MOM and PO better, it provides a reason.

Key words: method of moment (MOM); RCS of column; physical optics (PO)

雷达截面分析实际上就是要计算出目标对给定入射波所产生的散射场, 所用方法主要包括严格的经典解法、矩量法以及各种高频近似方法^[1, 2]。经典解法是从电磁场波动方程出发, 根据散射体的边界条件求得场的严格级数解, 这种方法只能适用于一些外形简单的目标^[3, 4]。矩量法是将积分方程化为矩阵方程, 通过矩阵求逆解出物体表面的感应点磁流, 从而计算出散射场, 与经典解法相比, 这种方法可适用于任意电磁激励的任意几何形状, 但在高频条件下对计算机存储量和速度提出了较高的要求^[5, 6]。高频方法, 如物理光学方法 (PO) 对高频条件下求解 RCS 具有较高的计算效率, 但算法的可靠性需要借助于简单目标验证^[7]。本文以 TM 波照射下圆柱的双站 RCS 求解为例, 对三种方法作了比较分析。

1 基本理论

无限长圆柱导体对 TM 波散射的几何关系如图 1 所示, 其中横截面的直角坐标表示为 (x, y) , 极坐标表示为 (ρ, ϕ) , 入射电场 \vec{E} 垂直于纸面向外 (TM 波), 可表示为

$$\vec{E}' = \hat{a}_z E_0 e^{-jkx} = \hat{a}_z E_0 - e^{jk\rho \cos \phi} \quad (1)$$

按经典解法得远区散射电场和 RCS 分别为

$$E_z^s = -E_0 \frac{e^{-jk\rho}}{\rho^{\frac{1}{2}}} \left(j \frac{2}{\pi k} \right)^{\frac{1}{2}} \sum_{n=0}^{+\infty} (2 - \delta_{0n}) \left[\frac{J_n(ka)}{H_n^{(2)}(ka)} \right] \cos(n\phi) \quad (2)$$

$$\sigma = 2\pi\rho \left| \frac{E_z^s}{E_z^i} \right|^2 = \frac{4}{k} \left| \sum_{n=0}^{+\infty} (2 - \delta_{0n}) \left[\frac{J_n(ka)}{H_n^{(2)}(ka)} \right] \cos(n\phi) \right|^2 \quad (3)$$

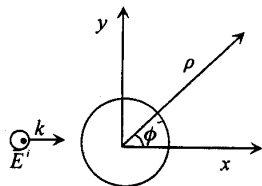


图 1 无限长圆柱导体对 TM 波散射的几何关系

收稿日期: 2000-11-08

作者简介: 姜永金 (1977 -), 男, 硕士生。

式中 k 为波数; a 为圆柱体的半径; $J_n(ka)$ 为 n 阶第一类贝塞尔函数; $H_n^{(2)}(ka)$ 为 n 阶第二类汉克函数。 δ_{0n} 是关于 n 定义的 Kronecker 函数, 即 $\delta_{0n} = \begin{cases} 1 & n=0 \\ 0 & n \neq 0 \end{cases}$ 。

1.1 矩量法解

TM 波照射无限长圆柱时的 RCS 计算可分为两步: (1) 计算感应电流 J_z ; (2) 计算 RCS。将圆柱体轮廓分成 N 个节 ΔC_n , J_z 按基函数 f_n 展开为 $J_z = \sum a_n f_n$, 选用脉冲函数为基函数和点选配后可用如下矩阵方程计算

$$\begin{aligned} [l_{mn}][\alpha_n] &= [g_m] \\ l_{mn} &= \begin{cases} \frac{k\eta}{4} \Delta C_n H_0^{(2)}(k\sqrt{(x-x_m)^2 + (y-y_m)^2}) & (m \neq n) \\ \frac{k\eta}{4} \Delta C_n [1 - j\frac{2}{\pi} \log(\frac{\gamma k \Delta C_n}{4e})] & m = n \end{cases} \\ g_m &= E_z^i(x_m, y_m) \end{aligned} \quad (4)$$

式中 $\gamma = 1.781$, 称为欧拉常数; $\alpha_n (1, 2, \dots, n)$ 为待求量。

远区 RCS 的矩量法解为

$$\sigma(\phi) = -\frac{k\eta^2}{4} \left| [V_n^s]^T [Z_{mn}]^{-1} [V_m^i] \right|^2 \quad (5)$$

其中

$$\begin{aligned} [V_n^s] &= [\Delta C_n e^{jk(x_n \cos \phi_s + y_n \sin \phi_s)}] \\ [Z_{mn}] &= [\Delta C_n l_{mn}] \\ [V_m^i] &= [\Delta C_m e^{jk(x_m \cos \phi_i + y_m \sin \phi_i)}] \end{aligned}$$

式中 ϕ_i 是入射角, ϕ_s 是散射角。

1.2 物理光学法 (PO) 解

从 Stratton-Chu 公式出发导出电场积分方程 (EFIE) 后, 可以得到 RCS 近似表达式

$$\sqrt{\sigma} = -j \frac{ka}{\sqrt{\pi}} I_z I_\phi \exp[jk\hat{r}_0 \cdot (\hat{i} - \hat{s})] \quad (6)$$

其中

$$\begin{aligned} I_z &= \int_{-l/2}^{l/2} \exp[jkz\hat{z} \cdot (\hat{i} - \hat{s})] dz \\ I_\phi &= \int_{-\pi/2}^{\pi/2} \hat{n} \cdot (\hat{e}_r \times \hat{h}_i) \exp[jka\hat{n} \cdot (\hat{i} - \hat{s})] d\phi \end{aligned}$$

式中 I_z 为轴向积分, I_ϕ 为圆周积分, a 为圆柱半径, \hat{z} 为圆柱轴向单位矢量, \hat{n} 为圆柱表面外法线, \hat{r}_0 为源点到坐标原点的位置矢量, \hat{i} 为入射波单位矢量, \hat{s} 为散射波单位矢量, \hat{e}_r 为接收器的电极化方向单位矢量, \hat{h}_i 为入射波的磁极化方向单位矢量, 取 $\hat{n} = \hat{x} \cos \phi - \hat{y} \sin \phi$, $\hat{i} = -\hat{x} \cos \phi_i + \hat{y} \sin \phi_i$ 时有

$$\begin{aligned} \sqrt{\sigma} &= -jI \left[\frac{2ka}{-j(1 + \cos \phi_i \cos \phi_s + \sin \phi_i \sin \phi_s)} \right]^{1/2} \times \\ &\quad \left[\hat{n}_0 \cdot (\hat{e}_r \times \hat{h}_i) \exp[jk\hat{r}_0 \cdot (\hat{i} - \hat{s})] \exp[jka\hat{n}_0 \cdot (\hat{i} - \hat{s})] \exp\left(-j\frac{\pi}{4}\right) \right] \end{aligned} \quad (7)$$

当时 $\phi_i = \pi$, 无限长圆柱的双站 RCS 为

$$\sigma = \frac{2ka}{(1 - \cos \phi_s)} \quad (8)$$

2 数值仿真

计算经典级数解时取 $n=200$ 。当 $ka=5$ 时与矩量法解 ($N=70$) 的比较见图 2 (a); 当 $ka=10$ 时与矩量法解 ($N=150$) 的比较见图 2 (b); 当 $ka=50$ 时与矩量法解 ($N=400$) 的比较见图 2 (c) (图中实线为经典级数解, * 为矩量法解)。矩量法解 ($ka=50, N=400$) 与 PO 法解的比较见图 3 (图中粗实线为 PO 方法解, 细线为矩量法解)。

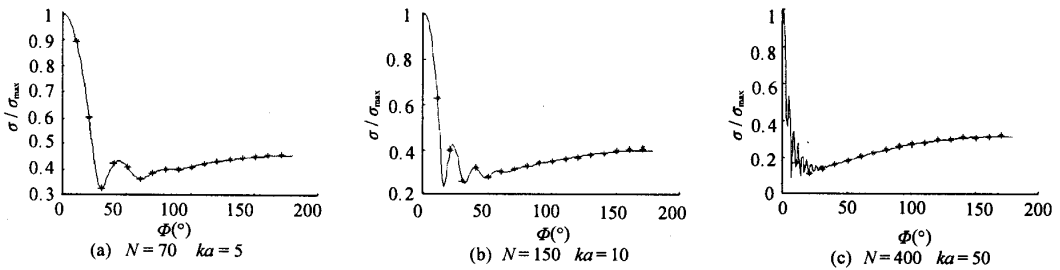


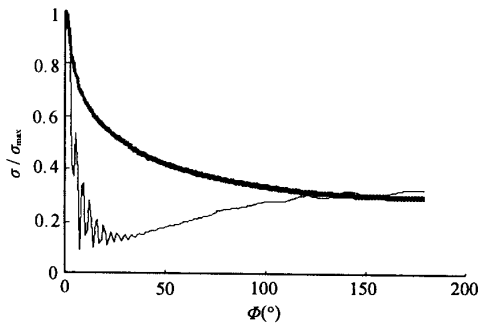
图2 矩量法解与经典级数解的比较

3 比较分析

由上面数值计算可见:

1. 矩量法求解时, 对电小尺寸横截面, $ka=5$ 时取 $N=70$ 即可, 计算用时为 $8 \sim 10$ s, 当 $ka=50$ 时, 计算用时约为 32 min, 是 $ka=5$ 情形下的 190 ~ 240 倍, 对实际的电大尺目标, 用矩量法计算是很不现实的, 只能借助高频近似方法。

2. PO 方法具有很高的效率, 但其只是在对镜面方向的偏离角不太大时, 所计算的解才与经典级数解

图3 矩量法解与PO解的比较($N=400$ $ka=50$)

和矩量法解相一致, 当偏离角较大时具有较大的误差, 这主要是 PO 方法假定圆柱体暗区的感应电流为零的缘故。事实上, 在无限长圆柱散射情形, 表面爬行波成为一种重要散射机制, 对它的考虑需要引进其它的方法。

参考文献:

- [1] G. T. Ruck. Radar Cross Section Handbook: Vol. 1&2. New York: Pelenum Press, 1970.
- [2] J. W. Crispin Jr., K. M. Spiegel. Mehods of Radar Cross Section Analysis. New York: Academic Press, 1968.
- [3] 鲁述, 徐朋根. 电磁场边值问题的解析方法. 北京: 宇航出版社, 1992.
- [4] 龚中麟, 徐承和. 近代电磁场理论. 北京: 北京大学出版社, 1989.
- [5] J. Moore, R. Pizer. Moment Methods in Electromagnetics. U. K: Research Studies Press Ltd. Lechworth, 1984.
- [6] R. F. 哈林登. 计算电磁场的矩量法. 北京: 国防工业出版社, 1981.
- [7] [美] E. F. 克拉特等. 雷达散射截面. 北京: 电子工业出版社, 1988.

雷达散射截面 (RCS) 分析培训课程

易迪拓培训(www.edatop.com)由数名来自于研发第一线的资深工程师发起成立, 致力和专注于微波、射频、天线设计研发人才的培养, 是国内最大的微波射频和天线设计人才培养基地。客户遍布中兴通讯、研通高频、国人通信等多家国内知名公司, 以及台湾工业技术研究院、永业科技、全一电子等多家台湾地区企业。

雷达散射截面 (Radar Cross Section, 简称 RCS) 是雷达隐身技术中最关键的概念, 也是电磁理论研究的重要课题, 使用 HFSS 软件可以很方便的分析计算各种目标物体的 RCS。

由易迪拓培训推出的《HFSS 雷达散射截面分析培训课程套装》是从零讲起, 系统地向您讲授如何使用 HFSS 软件进行雷达散射截面分析的全过程。该套视频课程由专家讲授, 边操作边讲解, 直观易学。

HFSS 雷达散射截面分析培训课程套装



套装包含两门视频培训课程, 其中: 《两周学会 HFSS》培训课程是作为 HFSS 的入门培训课程, 帮助您在最短的时间内迅速熟悉、掌握 HFSS 的实际操作和工程应用; 《HFSS 雷达散射截面(RCS)分析》培训课程是专门讲授如何使用 HFSS 来分析计算雷达散射截面, 包括雷达散射截面、单站 RCS、双站 RCS 等的定义, 实例讲解使用 HFSS 分析单站 RCS、双站 RCS 和宽频 RCS 的相关设置和实际操作等。视频课程, 专家讲授, 从零讲起, 直观易学...

课程网址: <http://www.edatop.com/peixun/hfss/130.html>

更多培训课程:

- **HFSS 培训课程**

网址: <http://www.edatop.com/peixun/hfss/>

- **CST 培训课程**

网址: <http://www.edatop.com/peixun/cst/>

- **天线设计培训课程**

网址: <http://www.edatop.com/peixun/antenna/>