

低雷达散射目标的 RCS 分析与求解

宁焕生 钮保强 王宝发

(北京航空航天大学电子工程系 205 教研室,北京,100083)

RCS COMPUTATION AND ANALYSIS OF LOW-SCATTERING RADAR TARGETS

Ning Huansheng, Niu Baoqiang, Wang Baofa

(Faculty 205, Beijing University of Aeronautics and Astronautics, Beijing, 100083)

摘 要 利用 C-R 样条对目标进行建模和求解爬行波短程线,通过 GRECO 与爬行波混合法求解低散射目标后向 RCS。获得令人满意的结果。

关键词 电波散射 雷达散射截面 爬行波

中图分类号 V243

Abstract Graphical Electromagnetic Computing (GRECO) is recognized as the most valuable method of the RCS computation for the high-frequency region in real time. To the low RCS target, the effect of creeping wave is remarkable and larger than that of facets and wedges in some cases. Based on the C-R spline fitting theory, the problem of computing geodesic has been solved and a practical computing example of Low-RCS target fully proved the validity of the method in this paper by using the hybrid method of GRECO and Creeping Wave Theory. Some canonical and practical examples are given. Excellent agreement with the measured data indicates that the method has practical engineering value.

Key words electromagnetic wave scattering, radar cross section, creeping wave

GRECO 方法被证明是一种用高频近似分析电大尺寸复杂目标 RCS 的最有效方法之一,它不仅能准确模拟目标,而且具有存储量小,运算速度快,实时性好的优点。

对大多数目标而言,其 RCS 的主要贡献者来自面元和棱边, GRECO 法非常有效。但对于低散射目标而言,其面元与棱边效应已通过减缩技术处理而大大降低了其 RCS 贡献,此时仅用 GRECO 法对其求解面元与棱边的 RCS 贡献是不够的。必须针对具体情况,应用爬行波理论结合 GRECO 法来求解低散射目标的后向 RCS。采用近年来作为几何连续样条函数的 C-R 样条作为几何建模的工具,提高了计算精度,计算与实验结果吻合良好。拓宽了 GRECO 方法在求解低散射目标 RCS 中的应用。

1 ($G^1, K=1$)C-R 样条建模^[1]

本文采用的 Catmull-Rom 样条(简称 C-R 样条)的一般形式为: $F(u) = \sum_i P_i(u)W_i(u)$ 。其中:插值函数 $P_i(u)$ 是由插值($k+1$)个点矢 V_1, \dots, V_{k+1} 来构造的; $W_i(u)$ 为调配函数;将 $F(u)$ 表示为插值点矢 V 的函数,则 $F(u)$ 的第 q 段 $f_q(u)$ 可表示为

$$f_q(u) = \sum_{i=2}^1 P_{q+i}(u)W_{q+i}(u), \quad u \in [q, q+1] \quad (1)$$

式(1)即为 n 阶几何连续的 C-R 样条函数,称 $S_{q,i}(k; B_1, \dots, B_n; u)$ 为几何连续的 C-R 样条基函数; B 为样条在每个插值节点处的形状参数。C-R 样条具有直观、稳定、灵活、不需反

求控制顶点等优点, 特别适用于具有复杂外形的飞行器进行几何描述。

2 GRECO 法求解低散射目标的面元与棱边散射场^[2]

(1) 面元散射场求解 由 Stratton-Chu 积分公式, 当散射体内无电磁源时, 远区面元散射场可表示为

$$E_p^s = - \frac{jk \exp(jkR) E^i}{2PR} \sum_p \cos H \exp(2kz) S_{sp} \quad (2)$$

式中: k 为波数; z 为散射方向; H 为每一方形象素 S_{sp} 法矢方向与观察方向之间夹角; p 为目标图象的像素集合。

(2) 棱边散射场求解 由高频电磁理论棱边远区散射场可用等效线电流法求解。其单站散射场可表示为

$$E_c^d = E_0 \frac{\exp(-jkr)}{2Pr} \int_w [D_{\parallel} \sin C e^{\parallel} - D_x \cos C e^{\parallel} - D_{\perp} \cos C e^{\perp}] \exp(2jkz) dl' \quad (3)$$

其中: 线积分沿入射波所照明棱边 w 上进行; e^{\parallel} 和 e^{\perp} 是平行和垂直于入射面的单位矢量, 该入射面由入射线 z 和棱边 t 的方向确定; C 为入射电场和 e^{\perp} 的夹角; D_{\parallel} , D_x , D_{\perp} 为单站增量长度绕射系数, 运用 RCS 的定义即可得各种线极化的棱边 RCS 表示式^[2]。

3 爬行波理论求解低散射目标后向 RCS^[3]

当目标终端为凸光滑曲面时, 爬行波贡献显著, 这里以图 1 所示一终端为光滑凸曲面的低散射支架在入射平面波照射下为例来分析爬行波对高频区目标 RCS 的贡献。 Q_1 点处的等效源所激励的波将沿射线路程传输到阴影区中, 这些射线行程满足费马原理, 因此由 Q_1 点在曲面上的爬行波传播的路径为一条短程线, 这些射线在传播时将沿其切线方向发出射线, 因而线量将连续地从表面漏失, 故爬行波射线将沿传播方向衰减。图中 Q_1 点激励起的爬行波传到 Q_2 点又返回来波方向, 而

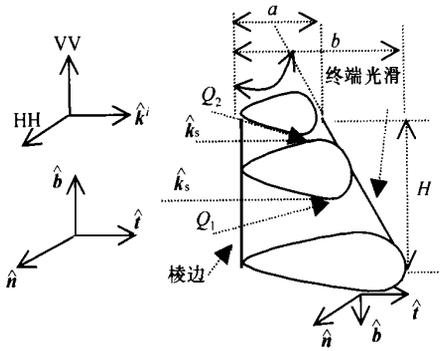


图 1 某低散射支架爬行波求解参数示意图

Q_2 点也同样被激励, 爬行波返回 Q_1 点。选取射线基坐标 (n, b, t) , 设入射场为

$$E(H) = E_{nn}^i + E_{bb}^i \quad (4)$$

总场为各模式场分量 $A_p(t)$ 之合成场, 即

$$E_c^s = \sum_{p=1}^m [D_p^s(Q_1)]^2 \exp(-A_p^s t) \frac{e^{-jk(s+t)}}{s} \quad (VV) \quad (5)$$

$$H_c^s = \sum_{p=1}^m [D_p^h(Q_1)]^2 \exp(-A_p^h t) \frac{e^{-jk(s+t)}}{s} \quad (HH) \quad (6)$$

其中: $D_p^{s,h}(Q_1)$ 为 Q_1 点的软和硬边界的表面绕射系数; s 为短程线距离。

4 爬行波短程线求解

在爬行波贡献中爬行波的行进路线是重要的物理量, 在利用 C-R 样条拟合目标表面的同时, 利用图 2 所示之参数可求得目标表面短程线步骤为: 对任意曲面上的一个初始点 P_0 , 给定某一个初始方向 S_0 , 由 P_0 点出发, 沿 S_0 方向给出, 则可得到 P_0 的邻近点 P_1 , 进

而确定出 P_1 点的法线方向 n_1 和 P_1 点的切平面;» 将 S_0 移到 P_1 点, 过 S_0 和 n_1 作平面, 求其与 P_1 点处切平面之交线, 则该交线所在方向即为 P_1 点处短程线走向 S_1 。由此循环进行可求出目标曲面上爬行波行进路线- 短程线。

5 总散射场及 RCS 定义

$$E^s = E_p^s + E_e^d + E_c^s \tag{7}$$

$$R = 4P \lim_{s \rightarrow \infty} R^2 |E^s / E^i|^2 \tag{8}$$

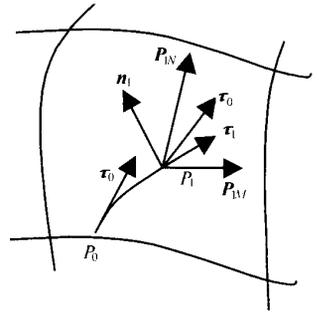


图 2 短程线求解示意图

6 计算实例

如图 1 所示之低散射支架, $A = 30^\circ$, $H = 0.8m$, $a = 0.1m$, $b = 0.4m$, 劈终端的横截面为球冠圆, 顶端和底端半径分别为 $0.02m$ 和 $0.08m$, 支架终端为光滑凸曲面, 爬行波效应显著。对于此结构形状目标水平极化时爬行波影响远大于垂直极化时影响。

图 3 为此支架在频率 $f = 37.5GHz$, HH 极化时正面的 $-10^\circ \sim 0^\circ$ 的 RCS 计算结果, 从中可看出其爬行波效应远大于面元与棱边的 RCS 贡献。图 4 为考虑爬行波后总的 RCS 计算结果, 主要是行波贡献, 与实验结果对比符合较好。

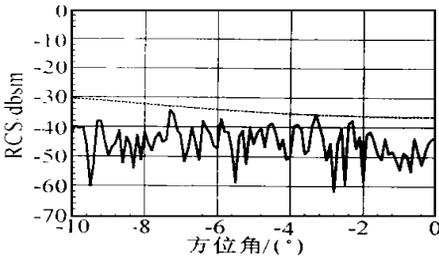


图 3 爬行波效应比较计算结果
——面元与棱边 RCS; - - - 爬行波 RCS

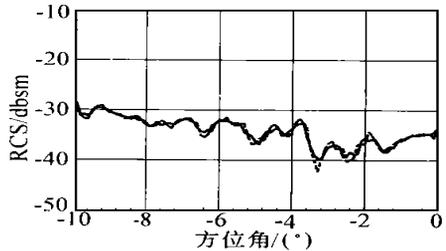


图 4 计算与测量结果比较
——考虑爬行波贡献; - - - 实验结果

参 考 文 献

- 1 Derose T D, Barsky B A. Geometric continuity, shape parameters, and geometric constructions for Catmull-Rom splines. ACM Transactions on Graphics, 1988, 7(1): 1~41
- 2 Rius J M, Jofre C. High-frequency RCS of complex radar targets in real time. IEEE Trans Antennas Propagation 1993, 41(9): 1308~1319
- 3 汪茂光. 几何绕射理论. 第二版. 西安:西安电子科技大学出版社, 1994. 120~155
- 4 廖朵朵, 张华军编著. OpenGL 三维图形程序设计. 北京: 星球地图出版社. 1996. 3~13