

一种电大尺寸涂覆目标 RCS 的算法

顾俊 戴飞

(1. 环境电磁特征国家重点实验室, 上海 200090; 2. 上海航天技术研究院 802 所, 上海 200090)

摘要: 从 Stratton-Chu 积分方程入手, 推导出一种光滑凸体金属表面涂覆雷达吸波材料 (RAM) 的物理光学后向 RCS 计算公式, 同时考虑边缘绕射的贡献, 介质劈与金属劈的电磁散射特性是不同的, 须通过等效电磁流法 (EEC) 来求解介质边缘散射加以修正。通过对涂覆平板、涂覆柱锥组合体及某导弹目标 RCS 的计算, 再与实测值和矩量法结果对比, 它们均相吻合, 从而验证了算法的有效性和准确性。本算法特别适合大尺寸目标 RCS 计算。

关键词: 雷达吸波材料; 雷达散射截面; 电磁散射; 物理光学; 仿真

RCS Calculation Method of Large Electric Size Targets Coated with Radar Absorbing Material

GU Jun, DAI Fei

(1. State Key-Lab of Electromagnetic Environment Research, Shanghai 200090, China;

2. No.802 Institute of SAST, Shanghai 200090, China)

Abstract: On the basis of Stratton-Chu equation, the method gives simple physical optics equation that calculate the RCS of the convex coated metal surface, and considering wedges scattering field, electromagnetic scattering characteristic of wedge with dielectric coating and conducting wedge are different, the wedge with dielectric coating scattering field is resolved by using Edge Equivalent Current(EEC), the radar cross-section (RCS) of typical target such as metal plate coated with RAM, combined cone-cylinder coated with RAM and a missile coated with RAM are calculated, the calculated results are consistent with the result from measurement and MOM, which verify effectivity and accuracy of the method. This method is specially effective to compute RCS of large electric size targets.

Key words: Radar absorption material; Radar cross-section; Electromagnetic wave scattering; Physical optics; Simulating

引言

由于在未来战争中, 雷达仍将是探测目标的最可靠手段, 因此对隐身类目标低 RCS 的散射特性研究已成为武器系统研制的当务之急。对复杂金属目标 RCS 研究已日趋完善, 而金属表面涂覆吸波材料计算其方法则有待发展。物体的高频电磁散射与其材料特性和几何外形有关, 与金属体相比, 涂覆体的散射问题要复杂得多^[1-3]。在物体几何外形的表述方法中, 常采用的一种方法是用小平面元拟合物体表面, 涂覆体在其外形用小平面元模拟后, 其散射问题就转化为涂覆多边形平板的散射问题。

在隐身武器设计中, 除对目标进行几何造型处理以减小其 RCS 外, 还需要在目标的局部或全部涂覆雷达吸波材料 (RAM), 以减小某些较强的散射面或棱边在一定的空域内有较强的散射贡献。因此, 局部或全部的涂覆 RAM 的复杂目标进行 RCS 分析对武器系统的设计、隐身与反隐身研究尤为重要。本文从 Stratton-Chu 积分方程入手, 推导出电大尺寸光滑凸体金属表面涂覆 RAM 的物理光学后向 RCS 计算公式, 并且根据等效电流法求解介质边缘

散射加以修正。通过对涂覆平板、涂覆柱锥组合体以及某巡航导弹目标 RCS 的仿真计算, 再与实测值和矩量法结果对比, 二者相吻合。

1 理论计算方法

用物理光学法 (PO) 计算空间中物件的散射场时, 我们可以把麦克斯韦方程和矢量格林定理结合起来应用, 以获得关于散射场的场方程组。由 Stratton-Chu 积分方程^[4]

$$\mathbf{E}_s = \frac{jk_o \exp(jkR)}{4\pi R} \int_S [(Z_o \mathbf{n} \times \mathbf{H}) - i(Z_o \mathbf{n} \times \mathbf{H}) \mathbf{i} - \mathbf{i} \times (\mathbf{n} \times \mathbf{E})] \exp(jkr \cdot \mathbf{i}) dS \quad (1)$$

式中, S 是照明面面积; \mathbf{n} 是涂层表面单位法矢;

\mathbf{i} 是入射方向的单位矢量; k_o 为自由空间波数;

Z_o 为自由空间波阻抗。求解散射电场的关键是要

给出积分表面上电磁场的分布。若用 \mathbf{e}_i 表示入射电场方向，则入射电磁场可表示为：

$$\mathbf{E}_i = \mathbf{e}_i E_o \exp[jk_o \mathbf{r} \cdot \mathbf{i}] = \mathbf{e}_i E_i \quad (2)$$

$$\mathbf{H}_i = \mathbf{i} \times \mathbf{e}_i E_i / Z_o \quad (3)$$

图 1 为局部坐标系。

$$\left\{ \begin{array}{l} \mathbf{e}_{\perp} = \mathbf{i} \times \mathbf{n} / |\mathbf{i} \times \mathbf{n}| \\ \mathbf{e}_{\parallel} = \mathbf{i} \times \mathbf{e}_{\perp} \\ \mathbf{i} = \mathbf{e}_{\perp} \times \mathbf{e}_{\parallel} \end{array} \right. \quad (4)$$

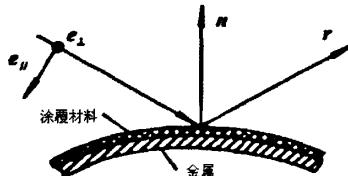


图 1 局部坐标

对于金属表面涂覆厚度为 d 、相对介电常数为 ϵ_r 、相对磁导率为 μ_r 的吸波材料， R_{\perp} 和 R_{\parallel} 由式(5)和(6)确定

$$R_{\perp} = \frac{\eta_{\perp} \cos \theta_i - 1}{\eta_{\perp} \cos \theta_i + 1} \quad (5)$$

$$R_{\parallel} = \frac{\eta_{\parallel} - \cos \theta_i}{\eta_{\parallel} + \cos \theta_i} \quad (6)$$

其中：

$$\eta_{\perp} = j \frac{\mu_r k_o \tan(\beta' d)}{\beta} \quad (7)$$

$$\eta_{\parallel} = j \frac{\mu_r k_o \tan(\beta' d)}{\beta} \quad (8)$$

$$\beta' = k_o \sqrt{\epsilon_r \mu_r - \sin^2 \theta_i} \quad (9)$$

θ_i 为入射角。对于后向散射，有 $\mathbf{s} = -\mathbf{i}$ ，按如下定义求后向 RCS 平方根：

$$\sqrt{\sigma} = \lim_{R \rightarrow \infty} 2\sqrt{\pi} R \frac{\mathbf{E}^s \cdot \mathbf{e}_r}{\mathbf{E}^i} \exp(-jkR) \quad (10)$$

经推导，得到光滑金属表面涂覆吸波材料时的后向

RCS 平方根为：

$$\sqrt{\sigma} = -\frac{jk_o}{\sqrt{\pi}} \int [(\mathbf{e}_i \cdot \mathbf{e}_{\perp})^2 R_{\perp} + (\mathbf{e}_i \cdot \mathbf{e}_{\parallel})^2 R_{\parallel}] \quad (11)$$

$$(\mathbf{n} \cdot \mathbf{i}) \exp(-2jk_o \mathbf{r} \cdot \mathbf{i}) d\mathbf{s}$$

如果对于金属平板表面涂覆吸波材料则有：

$$\begin{aligned} \sqrt{\sigma} = & -\frac{\exp(2jk_o \mathbf{i} \cdot \mathbf{r}_o)}{2\sqrt{\pi} \tan \theta_i} \\ & [(\mathbf{e}_i \cdot \mathbf{e}_{\perp})^2 R_{\perp} + (\mathbf{e}_i \cdot \mathbf{e}_{\parallel})^2 R_{\parallel}] \\ & \sum_{m=1}^M (\mathbf{e}_{\perp} \cdot \mathbf{a}_m) \exp(-2jk_o \mathbf{i} \cdot \mathbf{r}_m) \frac{\sin[k_o \mathbf{i} \cdot \mathbf{a}_m]}{k_o \mathbf{i} \cdot \mathbf{a}_m} \end{aligned} \quad (12)$$

式中， \mathbf{r}_o 是局部坐标原点相对于全局坐标原点的位置矢量； \mathbf{a}_m 是平板多边形第 M 条边的矢量； \mathbf{r}_m 表示平板多边形第 M 条边中点的位置矢量； θ 是小平面外法线 \mathbf{n} 与入射波 \mathbf{i} 之间的夹角； M 是平板多边形的边数。

对于涂覆吸波材料棱边散射，棱边经涂层后将出现两种情况，其一是单面涂层劈，其二是双面涂层劈。前者可作为后者的特例进行求解。为简单起见，这里只讨论双面涂层劈，双面涂层劈可以用介质劈进行处理。当电磁波斜入射到介质劈上时，如图 2 所示。

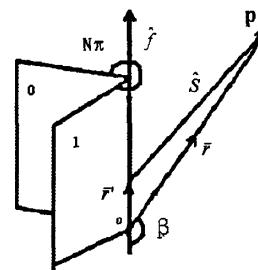


图 2 介质劈散射示意图
其绕射场可表示为^[5-7]

$$\mathbf{E}_i^d = (D_{11} \mathbf{E}_i^i + D_{12} Z_o \mathbf{H}_i^i) \cdot \frac{\exp(jk t \cos \beta + jk p \sin \beta)}{\sqrt{\rho \sin \beta}} \quad (13)$$

$$\frac{Z_0 \mathbf{H}_t^d = (D_{11} \mathbf{E}_t^i + D_{22} Z_0 \mathbf{H}_t^i) \cdot \exp(jkt \cos \beta + jk \rho \sin \beta)}{\sqrt{\rho \sin \beta}} \quad (14)$$

式中, Z_0 为自由空间波阻抗; $D_{11}, D_{12}, D_{21}, D_{22}$ 分别为介质劈的绕射系数矩阵 D_t 的元素, 对斜入射而言有 $D_{12} \neq 0, D_{21} \neq 0$ 。因为绕射场包含有 t 方向的行波因子, 那么相同的因子应该在介质劈的等效流(EEC)的辐射场中出现, 因此 EEC 应该写成如下形式:

$$I_e = A \exp(jkt \cos \beta) \quad (15)$$

$$I_m = B \exp(jkt \cos \beta) \quad (16)$$

此式与自由空间的开勒锥上场对应。

$$\mathbf{E}_t = -\frac{\exp(jkt \cos \beta + jk \rho \sin \beta - j\pi/4) k Z_0 A}{2 \sqrt{2\pi k \rho \sin \beta}} \quad (17)$$

$$Z_0 \mathbf{H}_t = -\frac{\exp(jkt \cos \beta + jk \rho \sin \beta - j\pi/4) k Z_0 B}{2 \sqrt{2\pi k \rho \sin \beta}} \quad (18)$$

通过(13),(14)与(17),(18)式的等效可得

$$Z_0 A = -\frac{2\sqrt{\pi k} \exp(j\pi/4)}{k \cdot \sin \beta} (D_{11} \mathbf{E}_z^i + D_{12} \mathbf{H}_2^i) \quad (19)$$

$$B = -\frac{2\sqrt{\pi k} \exp(j\pi/4)}{k \cdot \sin \beta} (D_{21} \mathbf{E}_z^i + D_{22} \mathbf{H}_2^i) \quad (20)$$

显然, 介质劈与金属劈不同, 必须通过等效的电磁流求解。EEC 产生的场可由积分得到:

$$\begin{aligned} \mathbf{E}_e^d &= jk \int [Z_0 I_e(\mathbf{r}') \mathbf{s} \times (\mathbf{s} \times \mathbf{t}) + \\ &\quad I_m(\mathbf{r}') (\mathbf{s} \times \mathbf{t})] \cdot G(\mathbf{r}, \mathbf{r}') d\mathbf{t} \end{aligned} \quad (21)$$

其中 $G(\mathbf{r}, \mathbf{r}')$ 为格林函数, 如图 2 所示积分路径是沿着介质劈边缘进行, L 为劈的长度。因此 EEC 的后向区辐射场为:

$$\begin{aligned} \mathbf{E}_e^d &= jk G_0 [Z_0 A \mathbf{s} \times (\mathbf{s} \times \mathbf{t}) + \\ &\quad B (\mathbf{s} \times \mathbf{t})] \cdot \frac{\sin(kl \cos \beta)}{k \cos \beta} \end{aligned} \quad (22)$$

β 为后向散射方向与棱边 t 向之夹角。

综合涂覆面元与涂覆棱边的散射场。然后按照 RCS 的定义, 就可以计算出涂覆目标的 RCS。

2 计算实例

采用以上介绍的电磁计算方法对表面有涂层的平板、柱锥组合体和某导弹目标进行了计算, 下面是给出的几个典型例子。

2.1 涂覆平板目标 RCS

第一个例子: 方形涂覆平板的尺寸为 $20\text{cm} \times 20\text{cm}$, 涂层参数 $\epsilon = 16.3+j1.62$, 磁导率 $\mu = 1.49+j1.67$, 涂层厚度为 0.3mm , 平板垂直放置, 电磁波正对平板入射为 0° , 垂直极化, 仿真频率 10GHz , 计算目标随方位角变化的后向 RCS, 见图 3 所示, 显然可以看出两者相吻合。

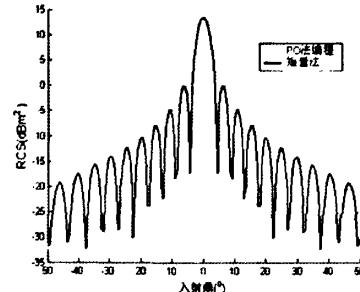


图 3 涂覆平板目标 RCS 物理光学与矩量法比对曲线

第二个例子: 平板尺寸为 $30\text{cm} \times 30\text{cm}$, 涂层参数 $\epsilon = 16.3+j1.62$, 磁导率 $\mu = 1.49+j1.67$, 涂层厚度为 1mm , 平板垂直放置, 电磁波正对平板入射为 0° , 垂直极化, 仿真频率 10GHz , 计算目标随方位角变化的后向 RCS, 如图 4 所示, 其中红实线为测试曲线^[8](实测涂覆平板, 只测到 -20dBm^2 以上), 加点蓝线为 PO 法编程计算曲线, 虚线为矩量法结果, 从图中可以看出计算与测试相吻合。

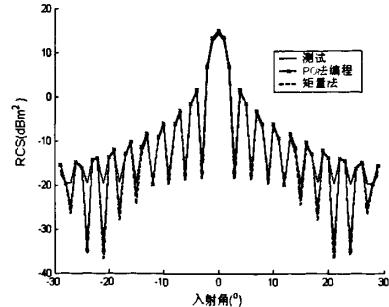


图 4 不同方法获得的涂覆平板目标 RCS 比对曲线

2.2 涂覆柱锥组合体目标 RCS

涂覆柱锥组合体其各外形尺寸为：圆锥底面半径 9.69cm，高 9.71cm；圆柱底半径 9.69cm，高 20.31cm。两锥柱底面相外切。垂直极化，仿真频率 10GHz。其中涂层参数 $\epsilon = 16.3+j1.62$ ，磁导率 $\mu = 1.49+j1.67$ ，涂层厚度为 0.8mm，计算组合体目标随方位角(组合体轴线与水平面 X 轴重合)变化一周的 RCS，如图 5 所示。显然可以看出两者相吻合。

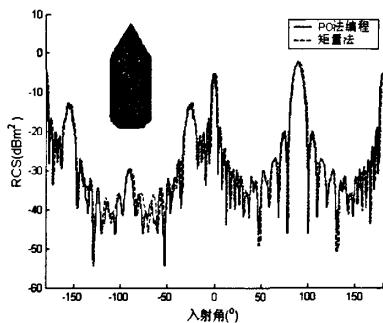


图 5 涂覆柱锥组合体 RCS 物理光学与矩量法比对曲线

2.3 涂覆复杂目标 RCS

为进一步演示本文算法的有效性，选取图 6 中上部的某巡航导弹目标，弹长约 4m，弹体半径 0.2m，在 X 波段，垂直极化，分别计算纯导体表面及涂覆表面时目标的 RCS 值。涂层参数 $\epsilon = 11.4+j1.52$ ，磁导率 $\mu = 1.27+j2.2$ ，涂层厚度为 1mm，导弹目标的后向 RCS 计算结果如图 6 所示，可见存在涂覆能够使导弹目标的 RCS 平均减小约 15~16dB。

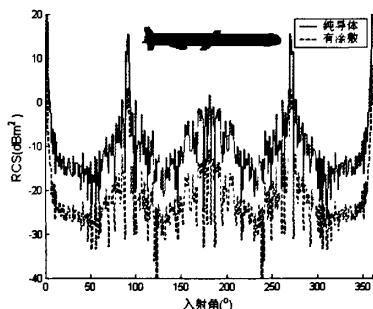


图 6 纯导体与涂覆导弹目标计算比对曲线

3 结束语

本文研究了一种表面涂覆目标的 RCS 计算方法，通过对涂覆材料多种目标 RCS 的仿真计算，并且与实测值和矩量法精确结果对比相吻合，证明采用的理论方法是正确和有效的。论文介绍的计算方法为电大尺寸涂覆复杂目标的 RCS 计算提供了一种有效的途径，对隐身及反隐身技术研究有一定的工程应用价值。

参 考 文 献

- [1] J. A. Stratton, Electromagnetic Theory, McGraw-Hill Book Co., N. Y. 1941.
- [2] G. Sinclair, Theory of Model of Electromagnetic Systems, PIRE, Nov. 1948, pp. 1364-1370.
- [3] Brekhovskikh L. M. Waves in Layered Media[M]. New York: Academic Press. 1980.
- [4] 阮颖铮, 等译. 雷达散射截面预估、测量和减缩[M]. 北京: 电子工业出版社, 1989.
- [5] J. M. Rius, M. Ferrando, and L. Jofre•High frequency RCS of complex radar targets in real time[J]. IEEE Trans. AP, 1993, 41(9):1308-1319.
- [6] D. Jankovic, M. Labelle, D. C. Chang, et al. A Hybrid Method for the Solution of Scattering from Inhomogeneous Dielectric Cylinders of Arbitrary Shape[J]. IEEE Trans. Antennas Propagat, 1994, 42(9):1215-1221
- [7] Wu L. Ch., Zhang W. X., Wang M. G.. Computation of RCS from a Flat Coved with Radar Absorbing Material[J]. IEEE Trans. AP, 1995, 1935-1938.
- [8] 张云飞, 武哲. 系统工程与电子技术, 2000, 5:30-32.

顾俊，男，1963 年生，研究员。主要研究方向：电磁散射算法、目标与环境特性模拟仿真技术。

E-mail:Gu.jaa@163.com

戴飞，男，1983 年生，硕士。主要研究方向：电磁散射仿真计算、目标特性模拟技术。

E-mail:daifei83@hotmail.com

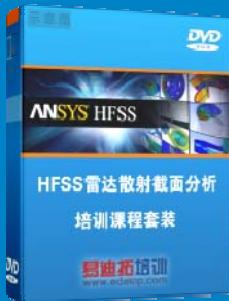
雷达散射截面（RCS）分析培训课程

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/>