

考虑近区多重散射的目标 RCS 图形电磁算法

张君¹, 邹军², 王光明¹

(1. 空军工程大学导弹学院, 陕西三原 713800; 2. 清华大学电机工程系, 北京 100084)

摘要: 计算目标雷达散射截面时, 对于存在近区多次散射的目标, 对存在近区耦合场的单元的识别非常复杂。从磁场积分方程出发, 结合图形电磁计算平台 GRECO, 经过适当的坐标转换, 可快速识别对单元产生耦合场的区域; 同时, 采用迭代物理光学方法, 计算了典型目标的近场与远场 RCS。数值算例证明了本方法的有效性, 本方法考虑了目标的多重散射特性, 使得图形电磁计算方法从物理光学方法扩展应用到迭代物理光学方法。

关键词: 迭代物理光学法; 图形电磁计算; 雷达散射截面; 多次散射; 近场

中国分类号: TN 957.52

文献标志码: A

DOI: 10.3969/j.issn.1001-506X.2010.05.016

RCS predication of a complex object by considering the near-field multi-scattering effect with GRECO

ZHANG Jun¹, ZOU Jun², WANG Guang-ming¹

(1. Missile Inst., Air Force Engineering Univ., Sanyuan 713800, China;

2. Dept. of Electrical Engineering, Tsinghua Univ., Beijing 100084, China)

Abstract: The RCS of targets with near-field multi-scattering effect is studied by integrating with graphical electromagnetic computing. It is a complex work to detect the triangle elements which will affect the other triangle elements by producing radiation field for targets with near-field multi-scattering effect. In order to simplify this process, graphical electromagnetic computing (GRECO) is introduced. After the targets are transformed by rotation and translation, the triangle elements which affect the other elements can be detected conveniently by using GRECO. Then, the near-field and far-field RCS of canonical objects are computed respectively, and the result is in accordance with the document result and measurement result. The effect of multi-scattering is considered by using GRECO, and the applying area of GRECO is extended from physical optics (PO) to iterative physical optics (IPO).

Keywords: iterative physical optics (IPO); graphical electromagnetic computing (GRECO); radar cross section (RCS); multi-scattering; near field

0 引言

雷达散射截面(radar cross section, RCS)是飞行器设计中一个重要的指标。根据电磁波传播特点, 在雷达工作频段, 电场或磁场强度随空间距离迅速衰减, 目标不同场点处的耦合作用并不显著, 采用高频方法忽略各单元间的相互影响所得计算结果一般能满足工程需要。目前, 物理光学方法(physical optics, PO)是计算电大尺寸目标 RCS 时常用的高频方法之一, 其根据入射磁场强度直接计算目标上的感应电流, 这对于场点处曲率半径远大于波长的情况, 计算结果满足工程计算要求^[1]。对于存在多重散射的目标 RCS 计算, PO 方法需要进行修正。迭代物理光学方法(Iterative physical optics, IPO)从磁场积分方程(magnetic

field integral equation, MFIE)^[2-5]出发, 对目标表面电流, 仍采用 PO 方法予以确定, 通过逐次迭代考虑单元的相互耦合作用, 从而得到正确结果。

图形电磁计算技术(graphical electromagnetic computing, GRECO)将电磁计算和计算机图形技术相结合, 可实现 RCS 的快速计算。但是, 目前 GRECO 不考虑单元之间的耦合^[6-10], 对于存在多重散射目标 RCS 的计算, 需 GRECO 进行改进。

本文从 MFIE 出发, 分析了电磁耦合关系, 确定各耦合关系计算方法。为提高计算效率, 基于图形电磁计算方法, 引入了邻近单元耦合的透视变换算法, 建立了基于 GRECO 的可考虑电磁耦合的多重电磁散射目标 RCS 计算方案。

收稿日期: 2009-01-05; 修回日期: 2009-04-02。

基金项目: 国家自然科学基金(50777038)资助课题

作者简介: 张君(1983-), 男, 博士研究生, 主要研究方向为计算电磁学和电磁辐射。E-mail: zhangjunpengliying@126.com

1 考虑近场耦合基于图形电磁计算的 RCS 计算方法

1.1 考虑近场作用目标感应电流的计算

对于闭合的由完纯导体构成的目标, 其表面感应电流 J 可由 MFIE 描述

$$J = 2\hat{n}' \times H' + 2\hat{n}' \times \oint_s (J \times \nabla' \psi_0) ds' \quad (1)$$

式中

$$\psi_0 = \frac{e^{-jk_0 R}}{4\pi R} \quad (2)$$

$$\nabla' \psi_0 = \hat{R} \left(-jk_0 - \frac{1}{R} \right) \psi_0 \quad (3)$$

J 是导体面上剖分单元的电流密度; \hat{n}' 为导体面剖分单元处的外法向单位矢量; H' 为外加源在表面产生的场; \oint 为主值积分; ψ_0 为自由空间格林函数; $R = |\mathbf{r}' - \mathbf{r}|$, $\hat{R} = (\mathbf{r}' - \mathbf{r}) / |\mathbf{r}' - \mathbf{r}|$, \mathbf{r}' 为导体表面点的位置矢量, \mathbf{r} 为观察点的位置矢量。

将式(1)展开, 有

$$J = J_0 + J_1 = 2\hat{n} \times H' + 2\hat{n} \times \oint_s \left[J \times \hat{R} \left(-jk_0 \psi_0 - \frac{\psi_0}{R} \right) \right] ds' \quad (4)$$

由式(4)可知, 如果忽略单元之间的耦合, 则 $J = 2\hat{n}' \times H'$ 。式(4)中 J_0 是由入射场产生的感应电流, 即 PO 方法的结果。 J_1 为考虑单元耦合产生的感应电流项。从物理上讲, 对于弱耦合系统, 对于 RCS 计算而言, J_1 随场点与源点之间距离迅速衰减, 一般可忽略。但是对于存在多重散射的情况, 应考虑该项的贡献。

若对式(4)采用迭代方法求解, 其计算迭代格式为

$$J^{(k+1)} = 2\hat{n} \times H' + 2\hat{n} \times \oint_s \left[J^{(k)} \times \hat{R} \left(-jk_0 \psi_0 - \frac{\psi_0}{R} \right) \right] ds' \quad (5)$$

1.2 基于 GRECO 近区耦合场的计算格式

目前, 图形电磁计算的应用局限于式(5)中的第 1 项, 即 PO 方法的结果, 忽略了第 2 项, 即未考虑单元之间的耦合。对于存在多次散射的目标, 在基于 GRECO 考虑单元之间耦合场时, 做两个合理的假设: 当面元被来自无穷远处的波照到时, 此面元才有可能对其他面元产生影响; 当两个面元能互相可见时, 才能产生耦合场。基于这两个假设, 式(5)中由于存在单元耦合产生的场 $H_1^{(k)}$ 可以变为离散形式

$$H_{1,t}^{(k)} = \oint_s \left[J^{(k)} \times \hat{R} \left(-jk_0 \psi_0 - \frac{\psi_0}{R} \right) \right] ds' = \sum_{p=p_1}^{p=p_t} J_p^{(k)} \times \hat{R} \left(-jk_0 \psi_0 - \frac{\psi_0}{R} \right) \Delta s'_p \quad (6)$$

式中, 下标 t 代表被来自无穷远处的波照到的面的索引值; p 代表能对 t 面产生影响的面的索引值, 即此面既能被无穷远处的波照到, 又能看到 t 面; $J_p^{(k)}$ 代表第 k 次迭代第 p 个单元处的电流密度; $\Delta s'_p$ 代表第 p 个单元的面积。

2 图形电磁计算方法的实现

2.1 外加源产生的场

根据 PO 的假设: 只有当单元能被波照射到时, 此单元才产生感应电流。对于外加源产生的场, 其步骤如下:

步骤 1 利用专业造型软件进行建模, 并剖分成若干三角面元;

步骤 2 把模型数据读入本文软件, 计算相应的信息, 如面元的中心坐标及面的法向量的值等, 并存储在内存单元中;

步骤 3 成像在屏幕上, 通过读取与三角面元顶点相对应的像素点处的深度值判断三角面元是否可见, 存储所有能被无穷远处的光照到的面及相关信息;

步骤 4 计算对应三角面元处的入射场的值。

图 1 显示了利用图形电磁计算方法求得的某模型能被无穷远处的光照到的三角面元。

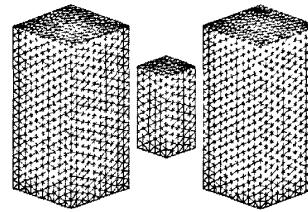


图 1 基于图形电磁计算方法识别出的能被无穷远处的波照到的模型上的三角面元

2.2 基于 GRECO 近区耦合场

假设两个单元之间存在相互耦合场, 则必须同时满足两个条件, 两个单元都能被外加光源照射到; 两个单元能相互看见。

以 2.1 节的算例为基础介绍式(6)中 $H_1^{(k)}$ 的计算, 并以求其他三角面元对第 k 个三角面元产生的场为例介绍求解过程。

步骤 1 根据第 k 个单元与其他面单元之间的法向量的关系, 粗略确定可能对第 k 个单元产生影响的面元。具体求解方法如下:

如果两个面的位置关系如图 2 和图 3 所示, 即两个面的交线与组成三角面元的三条线段有交点, 则认为两个面不会产生耦合场; 如果两个面的位置关系如图 4 和图 5 所示, 即两个面的交线与组成三角面元的三条线段没有交点, 如果 $A_1 P \cdot \hat{n}_1 = 1$, 则两个面之间产生耦合场; 如果 $A_1 P \cdot \hat{n}_1 = -1$, 则认为两个面之间不存在耦合场。在 2.1 节的算例中, 经过上述粗略判断, 可能会对第 k 个单元产生影响的区域如图 6 所示。

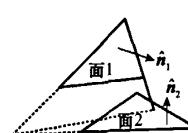


图 2 位置关系 1

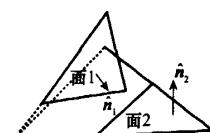


图 3 位置关系 2

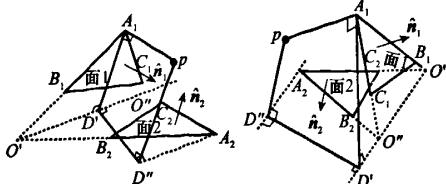


图 4 位置关系 3

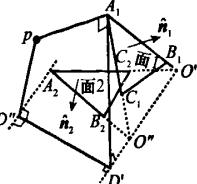


图 5 位置关系 4

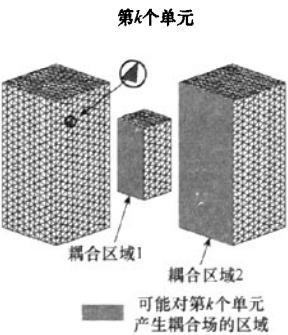


图 6 可能对单元产生耦合场的区域

步骤 2 确定由耦合区域 1 和耦合区域 2 中的三角面元确定的几何中心 $Center_{total} = (x_{center}, y_{center}, z_{center})$ 。

步骤 3 确定由单元 k 的中心 $Center_k = (x_k, y_k, z_k)$ 与 $Center_{total} = (x_{center}, y_{center}, z_{center})$ 确定的矢量 $Vector_{Rot} = [(x_{center} - x_k)a_x + (y_{center} - y_k)a_y + (z_{center} - z_k)a_z]$ 。

步骤 4 对第 k 个单元的中心坐标进行平移变换,使得其变为 $(0, 0, 0)$,从而确定平移变换量 $(x_{translate}, y_{translate}, z_{translate})$ 。

步骤 5 对矢量 $Vector_{Rot}$ 做旋转变换,使其沿着 y 轴旋转 φ ,之后再沿着 x 轴旋转 θ ,使得矢量 $Vector_{Rot}$ 指向 $-a_z$ 方向。

步骤 6 依据步骤 4 求得的平移变换量 $(x_{translate}, y_{translate}, z_{translate})$,对耦合区域 1 和 2 中的三角面元对应的顶点及中心坐标进行平移变换;基于平移变换求得的结果,依据步骤 5 求得的旋转量 φ 和 θ ,对耦合区域 1 和 2 中的三角面元对应的顶点、中心坐标及单位法向量进行旋转变换。

步骤 7 遍历耦合区域 1 和 2 中经过平移旋转变换的三角面元,确定透视区域的尺寸,使得耦合区域 1 和 2 中的三角面元最大地呈现在透视区域中,并基于 GRECO 确定最终能对第 k 个单元产生影响的面元,如图 7 所示。

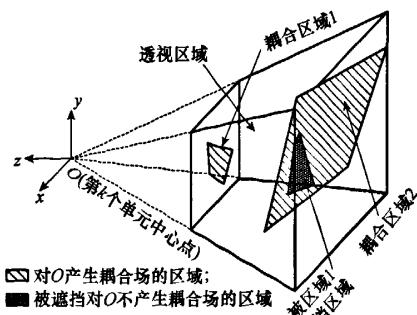


图 7 利用 GRECO 识别出对单元产生耦合场的区域

步骤 8 基于 MFIE 求解这些面元对第 k 个单元产生的场。

表 1 列出了基于本文方法与利用传统方法计算存在耦合场的目标用时比较。目标越复杂,则本文方法用时与传统方法相比就越少。

表 1 本文方法用时与传统方法用时比较

剖分的三角面的数量	本文方法用时/s	传统方法用时/s
972	44	57
1 244	67	123
2 122	217	660

3 数值算例

3.1 近场方法计算远场 RCS

算例 1 正方体边长为 0.3 m,入射频率为 9.375 GHz,发射源距离目标中心为 90 m,如图 8 和图 9 所示。

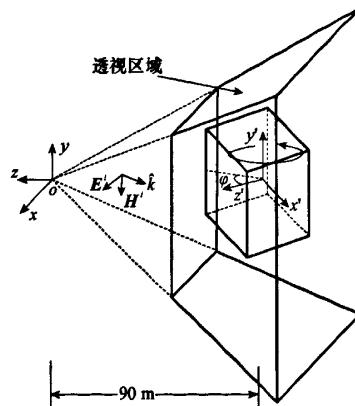


图 8 正方体近场方法计算远场 RCS 示意图

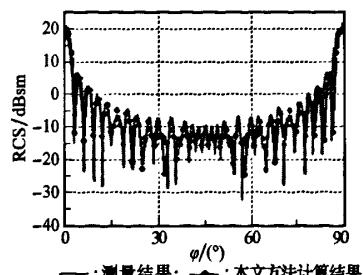


图 9 本文近场方法计算的远场 RCS 与文献[11]测量结果比较

当观察点与目标的距离满足 $r > 2D^2/\lambda$ 时,则可以认为观察点处的场为远区场,其中 D 为最大的尺寸, λ 为入射波波长。在此算例中 $D = 0.3\sqrt{3}$, $\lambda = 0.032$ m,所以只要 $r > 16.875$ 即满足远场条件。如果近场方法计算远场的结果是正确的,则在一定程度上可证明近场方法的正确性。在此算例中,发射源距离目标中心 90 m,所以相对散射体来说,可看作平面波入射,计算结果为远场 RCS。计算结果表明,本文近场计算方法可以很好地求解远场。

3.2 近场 RCS 计算

圆柱直径为 0.127 m, 长度为 0.631 8 m, 入射频率为 12 GHz, 水平极化, 雷达距目标 6.096 m, 0° 垂直于圆柱轴线。

如图 10 所示, 利用本文近场方法计算的结果与文献[12]测量的结果基本吻合, 所以利用本文方法计算近区散射场是正确的。这说明: 对于距离目标观察点很近的目标, 在观察点处设置一点波源, 通过目标的散射而在观察点处接收的散射场是符合实验测量结果的。这对于考虑单元之间的多次散射场具有重要的作用。

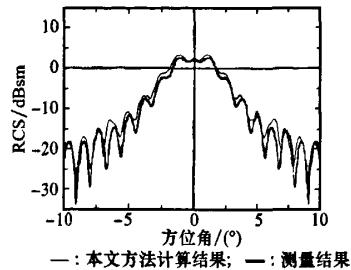


图 10 本文近场方法计算结果与文献[12]测量结果比较

3.3 基于 GRECO 考虑单元近场耦合计算结构复杂体的远场 RCS

下面计算了结构较复杂的带翼立方体的远场 RCS, 入射频率为 15 GHz。计算结果显示利用本文方法计算的结果与文献结果是一致的, 如图 11 和图 12 所示。通过引入 GRECO, 大大节省了计算时间。

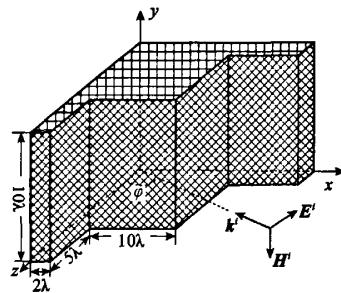


图 11 IPO 方法计算带翼正方体 RCS 示意图

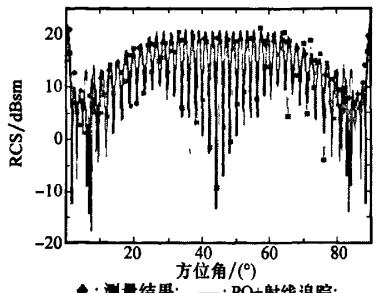


图 12 本文方法计算带翼正方体远场 RCS 与文献[13]测量结果比较

4 结束语

本文从 MFIE 出发, 基于 IPO 方法, 计算了存在多次散射的目标 RCS。通过引入 GRECO, 简化了对单元存在耦合场的区域的识别, 把 GRECO 的应用范围从 PO 法扩展到 IPO 法中。计算结果与文献结果及测量结果一致; 本文方法中, 对于某个单元的透视区域的确定是一个繁重的工作, 这是下一步应该解决的问题。

参考文献:

- [1] 阮颖铮. 雷达截面与隐身技术 [M]. 北京: 国防工业出版社, 1998.
- [2] Obelleiro-Basteiro F, Rodriguez J L, Burkholder R J. An iterative physical optics approach for analyzing the electromagnetic scattering by large open-ended cavities [J]. *IEEE Trans. on Antennas and Propagation*, 1995, 43(4): 356–361.
- [3] Burkholder R J, Lundin T. Forward-backward iterative physical optics algorithm for computing the RCS of open-ended cavities [J]. *IEEE Trans. on Antennas and Propagation*, 2005, 53(2): 793–799.
- [4] Burkholder R J, Tokgoz C, Reddy C J, et al. Iterative physical optics: its not just for cavities anymore [C] // *Antennas and Propagation Society International Symposium*, 2005, 1A (3–8): 18–21.
- [5] 张鹏飞, 龚书喜, 徐云学, 等. 电大尺寸开口腔体 RCS 计算和控制 [J]. 西安电子科技大学学报: 自然科学版, 2005, 36(1): 111–115.
- [6] Rius J M, Ferrando M, Jofre L. High frequency RCS of complex radar targets in real time [J]. *IEEE Trans. on Antennas Propagate*, 1993, 41(9): 1308–1319.
- [7] 金灿民, 许家栋, 韦高. 复杂目标近场电磁散射的可视化计算方法 [J]. 电波科学学报, 1998, 13(3): 241–244.
- [8] 张君, 鞠智芹. 一种直接计算目标双站 RCS 的图形电磁计算方法 [J]. 空军工程大学学报: 自然科学版, 2007, 8(1): 69–72.
- [9] 李建周, 毛继志, 许家栋. 一体化双站散射图形算法 [J]. 微波学报, 2004, 20(1): 19–22.
- [10] 张君, 鞠智芹, 金凤杰, 等. 双站 RCS 计算 GRECO 算法的新改进 [J]. 系统工程与电子技术, 2005, 30(5): 789–791. (Zhang Jun, Ju Zhiqin, Jin Fengjie, et al. Improvement of graphical electromagnetic computing method to compute bistatic radar cross section [J]. *Systems Engineering and Electronics*, 2005, 30(5): 789–791.)
- [11] 李建周. 复杂目标一体化电磁散射计算与优化研究 [D]. 西安: 西北工业大学, 2005.
- [12] Falconer D G. Extrapolation of near-field RCS measurements to the far zone [J]. *IEEE Trans. on Antennas and Propagation*, 1988, 36(6): 822–829.
- [13] 李运周, 史庆藩, 王琪. 高频电磁波多次散射的数值求解 [J]. 物理学报, 2006, 55(3): 1119–1124.

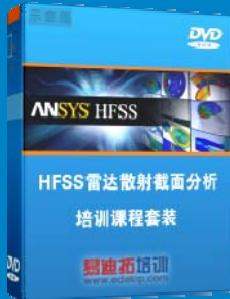
雷达散射截面（RCS）分析培训课程

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/>