

不同极化方式下复杂目标高频区的 RCS 计算

匡 磊, 吴先良

(安徽大学 电子工程与信息科学系, 安徽 合肥 230039)

摘要:通过图形电磁计算(GRECO)方法,利用在安装了高性能的图形加速卡的微机上实时计算复杂目标的高频雷达散射截面(RCS),目标用非均匀有理 B 样条(NURBS)进行样条模拟,由图形加速卡完成消隐和遮挡运算,利用 Phong 光照模型着色渲染目标可见表面,运用物理光学(PO),等效电磁流法(MEC),增量长度绕射系数法(ILDC)和物理绕射理论(PTD)计算目标高频区的雷达散射截面。根据极化之间的转换关系分析了线极化和圆极化下的雷达散射截面。计算结果与理论值进行比较,效果令人满意。

关键词:电磁散射; 雷达散射截面; 图形电磁计算; 圆极化

中图分类号: TN971.⁺¹ 文献标识码: A 文章编号: 1000-2162(2004)03-0043-07

复杂军事目标的电磁计算在国内外的航空技术领域中备受重视,也是现代化战争的关键技术之一。从目标雷达散射特性建模的发展史来看有三个阶段:手工阶段—部件分解法; CAD 阶段—面元法; 可视化阶段—图形计算电磁学。其中部件分解法是把一个复杂目标分解为若干个典型体的电磁散射部件(如球,柱,锥,板),用半经验的方法除去被遮挡住的部分,求出每个未被遮挡部分的电磁散射场,最后再将它们叠加在一起形成总场得到整个目标 RCS,显然这种方法求解出的雷达电磁散射特性有较大误差。面元法是用很多小面元及棱边组成的多面体逼近目标的外形,计算出每个面元和棱边的电磁散射场最后把它们的贡献叠加在一起,得到整个目标的 RCS。但是这种方法需要存储的目标几何外形过大对求解成千上万个面元及棱边的遮挡工作十分困难且费时,还会引入虚假的棱边效应(面噪声)。图形电磁计算方法充用参数表面模拟目标外形减少了对计算机存储量的要求,也消除了面元法由虚假棱边造成的噪声,能准确地模拟目标;充分利用了计算机硬件优势,由图形加速卡完成最困难,最费时的遮挡和消隐工作,CPU 只需完成电磁部分的计算,从而大大提高了运算速度。

本文运用非均匀有理 B 样条(NURBS)曲面对目标进行几何建模,同时利用 OpenGL 的光照模型对目标进行着色渲染,可在屏幕上生成目标的彩色图像,通过对每个象素点的颜色分量来求得该点的法矢,再从深度缓存区中读取每个象素的深度值,根据一定的坐标转换关系将计算机屏幕上的每个象素与实际目标面元一一对应起来。根据象素之间的关系区分出目标的面元与棱边,分别应用不同的电磁散射机制,最后迭加每块面元和棱边对散射场的

收稿日期: 2003-12-03

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(60371041), 安徽省教育厅重点科研基金资助项目(2002kj32)

作者简介: 匡 磊(1980-), 男, 安徽合肥人, 安徽大学硕士研究生;

吴先良(1955-), 男, 安徽亳州人, 安徽大学教授, 博士生导师。

贡献得到总的散射场。并且通过分析不用极化方式下的转换关系,分别求得了线极化和圆极化下的 RCS 值。

1 目标几何建模

本文采用的 NURBS 曲面,其有理基函数表如下

$$p(u, v) = \sum_{i=0}^m \sum_{j=0}^n d_{i,j} R_{i,k,j,l}(u, v); R_{i,k,j,l} = \frac{W_{i,j} N_{i,k}(u) N_{j,l}(v)}{\sum_{r=0}^m \sum_{s=0}^n W_{r,s} N_{r,k}(u) N_{s,l}(v)}$$

其中 $d_{i,j}$ 为 $n \times m$ 控制矩阵, $W_{i,j}$ 为权重矩阵, $N_{j,l}, N_{i,k}$ 分别为 l 的第 j 个基函数和阶数为 k 的第 i 个基函数。采用双三次 B 样条插值曲面,设给定的插值点 $P_{i,j}, i = 0, 1, \dots, m; j = 0, 1, \dots, n$; 未知控制点 $d_{i,j}, i = 0, 1, \dots, m+2; j = 0, 1, \dots, n+2$, 则 B 样条插值曲面方程可以写成:

$$p(u, v) = \sum_{i=0}^{m+k-1} \sum_{j=0}^{n+l-1} d_{i,j} N_{i,k}(u) N_{j,l}(v)$$

即 $p(u, v) = \sum_{i=0}^{m+k-1} C_i N_{i,k}(u)$, 其中控制顶点 $C_i(v) = \sum_{j=0}^{n+l-1} d_{i,j} N_{j,l}(v), i = 0, 1, \dots, m+k-1$

固定一参数 v , 求出控制曲线上 $m+k$ 个点 $C_i(v)$, 这些点又作为控制顶点, 定义多个曲面上以 u 为参数的等参线。由于对曲面的重建要求拟合后的曲面通过原始坐标型值点, 从而必须针对型值反算其控制顶点。下式中 $d'_{i,j}$ 为 u 的控制顶点 ($i = 0, 1, \dots, m+k-1; j = 0, 1, \dots, n$)。

$$S_j(u_{k+i}) = \sum_{i=0}^{n+k-1} d'_{r,j} N_{r,k}(u_{k+j}) = P_{i,j}, i = 0, 1, \dots, m; j = 0, 1, \dots, n$$

$$\text{于是有 } \sum_{r=0}^{n+k-1} d_{i,s} N_{s,l}(v_{l+j}) = d'_{i,j}, j = 0, 1, \dots, n; i = 0, 1, \dots, m+k-1$$

先求得 $d'_{i,j}$, 再解方程组求得 $d_{i,j}$ 从而求得曲面控制顶点, 通过以上过程, 可以从工程图纸中的剖面图恢复双三次 B 样条曲面, 建立三维物体几何模型。利用 NURBS 曲面可以对复杂目标进行几何模型。

2 目标图像的生成

用非均匀有理 B 样条(NURBS)构成的目标几何外形只是每个截面的坐标点数据, 还需要利用 OpenGL^[2]的图形函数, 将其生成真实的目标图像并显示在屏幕上。

OpenGL 是由多家在计算机领域处于领导地位的世界著名计算机公司制定的一个通用共享的开放式三维图形标准, 使用 OpenGL 可减轻三维图形应用的编程量, OpenGL 和专对 OpenGL 进行硬件加速的三维图形加速卡的结合使用, 可提高微机的图形处理能力, 使微机的图形处理能力达到 GRECO 方法的要求, 从而在微机上实现图形电磁计算。

图像的描述和图形的输入输出都是在一定坐标系下进行的, 雷达目标的初始外形就在由用户定义的用户坐标系中。视区是用户在屏幕上定义的一个矩形区域, 用于显示窗口中的图形。用户坐标系中的三维目标首先要根据观察者所在方位作一旋转变换, 变换到观

察坐标系中,然后根据窗口大小,对三维目标作剪裁处理,之后三维目标被平行投影到二维观察平面上,最后通过开窗变换将其转换到屏幕坐标系中显示。

由于对目标进行电磁计算用的是物理光学近似,只有被雷达照射的部分对雷达散射才有贡献,因此把雷达看不到的部分消去就是所谓的消隐问题。借助Z缓存隐面消除算法在屏幕坐标下进行。这样把同一屏幕坐标(x,y)点的最小Z值取出就得到消隐后由可视点组成的可视表面。显然,要判断每个面元是否被其他面元所遮住是一件计算量巨大的事情,这部分工作我们借助三维图形加速卡完成,大大提高了计算机的速度。

运用Phong光照模型^[1]着色渲染目标可见表面,对于给定视角,消隐后的目标图像上每一象素点的颜色是由红(R),绿(G),蓝(B)三种基本颜色混合调色而成。由于象素点的法矢可能有六种分量,经过消隐处理后要用三种颜色表示五种法矢分量,所以至少需要对同一观察角成两次像,才能利用R,G,B唯一地表示出整个图像上每一象素点的法矢。

最后,根据象素的法矢和深度值进行判断面元与棱边的位置,在随后的电磁计算中,要对目标的面元和棱边分别计算。

3 电磁散射建模

GRECO方法的主要步骤就是利用以求得的目标照明象素点的坐标信息(x,y,z)和法向信息(n_x, n_y, n_z)进行电磁计算,应用物理光学(PO),物理绕射理论(PTD),等效电流法(MEC)三种高频近似方法进行求解。以下将分别阐明这些方法的运用。

3.1 理想导体面元散射模型^{[3],[4],[5]}

利用物理光学求解理想导体散射场,由Stratton-Chu积分公式,当散射体内无电磁源时,散射场可表示为:

$$\vec{E}_{PO}^S = \frac{1}{4\pi} \int_S [j\omega(\hat{n} \times \vec{H}^T)\varphi + (\hat{n} \times \vec{E}^T) \times \nabla' \varphi + (\hat{n} \cdot \vec{E}^T) \nabla' \varphi] ds + \frac{1}{4\pi j\omega\epsilon_0} \oint_R \nabla' \varphi \vec{H}^T \cdot d\vec{l} \quad (1)$$

远区的物理光学散射场可以近似为: $|\vec{r}| \cong R - \hat{s} \cdot \hat{r}'$

$$\begin{aligned} \varphi &\cong \frac{\exp(-jkR)}{R} \cdot \exp(-jk\hat{s} \cdot \hat{r}') = \varphi_0 \exp(-jk\hat{s} \cdot \hat{r}'); \varphi_0 = \frac{\exp(-jkR)}{R} \\ \nabla' \varphi &\cong -jk\varphi_0 \hat{z} \exp(jk\hat{z} \cdot \hat{r}') \end{aligned}$$

远区的物理光学散射场可以近似为:

$$\vec{E}_{PO}^S = jkZ_0 \frac{\exp(-jkR)}{4\pi R} \int_S \hat{s} \times \hat{s} \times (2\hat{n} \times \vec{H}_i) \exp(jk\hat{r} \cdot \hat{s}) ds \quad (2)$$

其中(2)式中 \hat{n} 为面元的法向矢量, \hat{s} 为散射波方向,设电磁波入射方向为 $-\hat{z}$,于是在单站情况下(2)可以写为:

$$\vec{E}_{PO}^S = 2jk \vec{E}_0 \frac{\exp(-jkR)}{4\pi R} \int_S (\hat{n} \cdot \hat{z}) \exp(2jkz) ds \quad (3)$$

3.2 棱边散射模型

根据高频理论,棱边远区散射场可看成其上等效电流的辐射,此电流大小由入射方向和

观察点相对棱边的方位来决定,因此沿着棱边该值大小不为常数。等效电流通常表示为一些增量绕射系数的函数。由等效电流计算棱边远区单站散射场可表示为:

$$\vec{E}^d = \vec{E}_0 \frac{\exp(-jkr)}{2\pi r} \int_{EDGE} [-D_{//} \sin \gamma \hat{e}_{//}^i - D_x \cos \gamma \hat{e}_{//}^i - D_{\perp} \cos \gamma \hat{e}_{\perp}^i] \exp(2jkz) dl' \quad (4)$$

其中线积分沿入射波所照明棱边进行, $D_{//}$, D_{\perp} 和 D_x 分别是增量绕射系数, γ 代表入射电场 \hat{e}_{11}^i 和入射平面法线之间的夹角。 $\hat{e}_{//}^i$ 和 \hat{e}_{\perp}^i 分别是平行和垂直于入射面的单位矢量。分解(4)式可导出各种极化条件下的边缘绕射场,在单站情况下对于 VV 极化(发射和接受的电场均垂直方向):

$$\vec{E}_{VV}^d = E_0 \frac{\exp(-jkr)}{2\pi r} \int_{EDGE} [-D_{//} \frac{t_y^2}{t_x^2 + t_y^2} + \frac{t_x^2}{t_x^2 + t_y^2} D_{\perp}] \exp(j2kz) dl \quad (5)$$

同理可求得: E_{HH}^d , E_{HV}^d 和 E_{VH}^d 。

因此,面元和棱边的散射场叠加后可得到总的散射场: $\vec{E}^s = \vec{E}_{po}^s + \vec{E}^d$ 。

目标雷达散射截面 RCS 为: $\sigma = 4\pi R^2 \frac{|E_s|^2}{|E_i|^2}$

3.3 圆极化散射参量求解

上述讨论的是线极化散射效应。而在实际应用时也同样考虑圆极化散射效应,可以利用极化散射矩阵变换由线性极化散射效应求出圆极化散射效应。

对于任意圆极化波可分解为 $\vec{E} = \vec{E}_R + \vec{E}_L = E_R \hat{R} + E_L \hat{L}$, 其中 E_R 和 E_L 分别是复右, 左旋圆极化分量。圆极化分量与线极化分量的相互转换关系:

$$\begin{bmatrix} E_L \\ E_R \end{bmatrix} = \frac{1}{\sqrt{2}} \begin{bmatrix} 1 & -j \\ 1 & j \end{bmatrix} \begin{bmatrix} E_H \\ E_V \end{bmatrix} \quad (6)$$

对入射波和目标之间的相互作用可以用极化散射矩阵[S]来描述,它将散射场 E^s 各分量和入射场 E^i 各分量联系起来。对线极化散射场量可表示为:

$$\begin{bmatrix} E_H^s \\ E_V^s \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} S_{HH} & S_{HV} \\ S_{VH} & S_{VV} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} E_H^i \\ E_V^i \end{bmatrix} \quad (7)$$

对圆极化散射场量可表示为:

$$\begin{bmatrix} E_L^s \\ E_R^s \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} S_{LL} & S_{LR} \\ S_{RL} & S_{RR} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} E_L^i \\ E_R^i \end{bmatrix} \quad (8)$$

由矩阵乘法可得到圆极化和线极化的相互转换:

$$\begin{bmatrix} S_{LL} \\ S_{LR} \\ S_{RL} \\ S_{RR} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & j & -1 & 1 \\ 1 & -j & -j & -1 \\ 1 & j & j & -1 \\ 1 & -j & j & 1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} S_{HH} \\ S_{HV} \\ S_{VH} \\ S_{VV} \end{bmatrix} \quad (9)$$

并可看出散射矩阵元素与雷达散射截面之间的关系: $\sigma_{ij} = 4\pi r^2 |S_{ij}|^2$

4 计算实例

4.1 球,圆柱,分别与理论值比较

球的半径 $R=0.5\text{m}$, 频率 $f=10\text{GHz}$, 计算结果如图 1 所示。将计算结果与球 RCS 的

理论值进行相比较相互吻合很好。

$$\sigma = 10 \log(\pi R^2) = 10 \log(\pi \cdot 0.5^2) = -1.049 \text{ dBsm}$$

RCS[Bsm] 频率: 10.000 GHz; 极化: vv

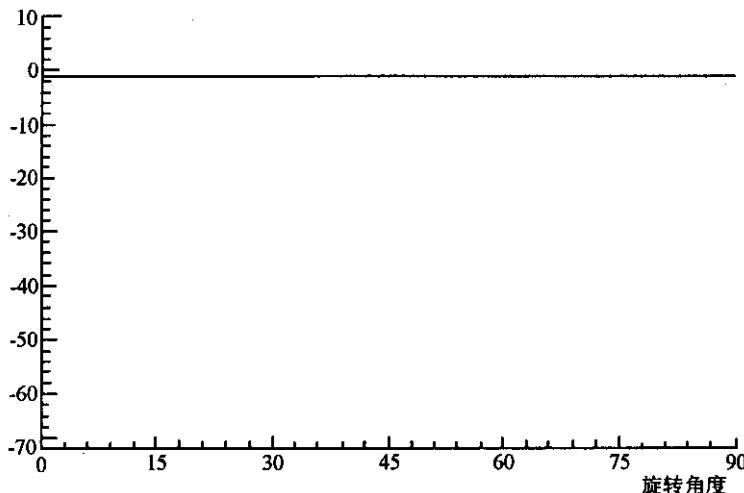


图 1 球的 RCS 计算结果

圆柱参数为: 半径 $R=0.4\text{m}$, 高 $h=1.0\text{m}$, 频率 $f=10\text{GHz}$, 计算结果如图 2 所示, 将计算结果与圆柱 RCS 理论值相比较, 相互吻合很好。

$$\sigma = 10 \log \frac{2\pi Rh^2}{\lambda} = 10 \log \frac{2\pi \times 0.4 \times 1.0^2}{0.03} = 19.23 \text{ dBsm}$$

RCS[dBsm] 频率: 10.000 GHz; 极化: vv

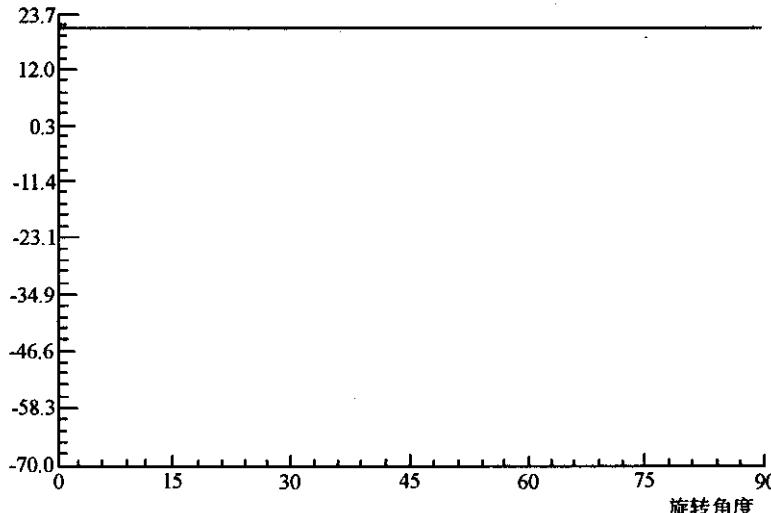


图 2 圆柱的 RCS 计算结果

4.2 任意建一个导弹模型

导弹的模型由一个圆锥, 三个圆台组成和四个对称的舵组成。参数设置如下: 圆锥高为 0.6m , 圆锥底面半径为 0.2m , 圆台 1 的高为 2 , 下底面半径为 0.3 , 圆台 2 的高为 0.7m , 下

底面半径为 0.36m, 圆台 3 的高为 0.3m, 下底面半径为 0.4m, 尾翼高 0.4m, 下底边长为 0.1m, 长为 0.66m, 轴线与尾翼底面的距离为 0.305m, 尾翼后侧与导弹后侧的距离为 0.03m。其网格图如图 3; 频率 $f=10\text{GHz}$, 导弹在不同极化下的 RCS 如图 4 所示。

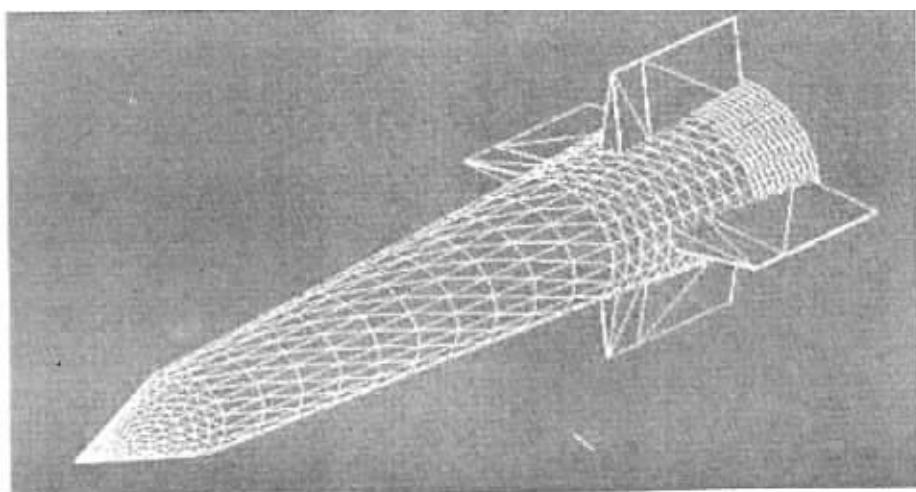


图 3 导弹的网格图

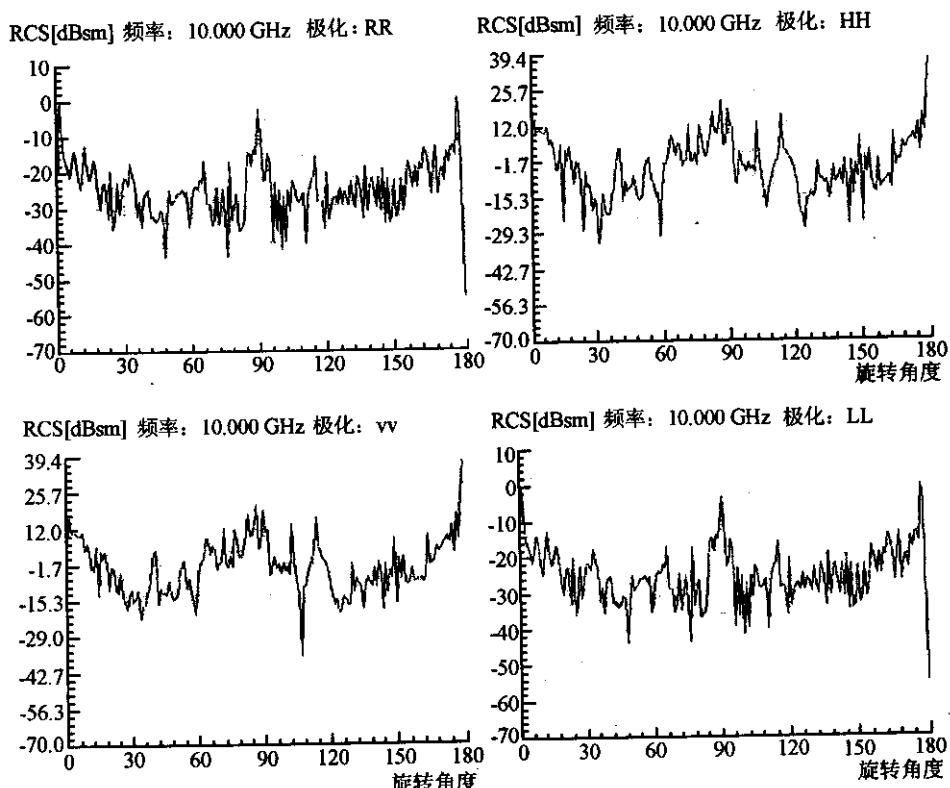


图 4 导弹在各种线极化和圆极化下的 RCS

5 结束语

利用 GRECO 方法充分发挥了计算机图形加速器的硬件功能,对复杂目标法矢的计算和面元的划分通过象素的提取完成,针对目标的棱边和表面分别应用不同的电磁散射机制,使得对复杂目标在高频区的 RCS 求解能够实时完成,并且分析了在不同极化方式下的 RCS,有着显著的工程意义。

相比较其他计算较大尺寸的复杂目标来说,图形电磁计算方法(GRECO)有着占用内存小,实时处理性强的优点。

参考文献:

- [1] Rius J M, Jofre C. High-frequency RCS of complex radar targets in real time[J]. IEEE Trans Antennas Propagant, 1993, 41(9): 1380-1319.
- [2] 廖朵朵, 张华军. OpenGL 三维图形程序设计[M]. 北京: 星球地图出版社, 1996.
- [3] Rius J M, et al. Recent techniques for RCS prediction of complex objects[J]. Journees Inter de Nice Sur les Antennas, Nice, 1994. 205-214.
- [4] Gralia R I. Recent development of numerical techniques for the evaluation of RCS of conducting bodies[J]. Joumomes Inter de Nice Sur les Antennas, Nice, 1994. 205-214.
- [5] 吴先良. 涂覆雷达吸波材料复杂目标 RCS 可视化计算[J]. 安徽大学学报(自然科学版), 2000, (2): 24-30.

Computing the RCS of complex targets in high-frequency region for different polarizable modes

KUANG Lei, WU Xian-liang

(Dept. of Electronics Engineering & Information Science, Anhui University, Hefei 230039, China)

Abstract: This paper presents a approach called “Graphical Electromagnetic Computing(GRECO)” to compute the radar cross section(RCS) of complex targets in high-frequency region and real time, by means of a 3D graphic hardware accelerator. The targets are modeled with NURBS and the image of the targets are rendered and displayed on the screen. The high-frequency RCS is obtained through Physical Optics(PO), Method of Equivalent Currents(MEC) and Physical Theory of Diffraction(PTD) respectively and is analyzed under the linear polarization and circular polarization modes. Good argument has been found between the results calculated with this present approach and the theoretical ones.

Key words: electromagnetic wave scattering; radar cross section; graphic electromagnetic computing; circular polarization

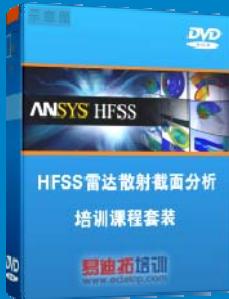
雷达散射截面（RCS）分析培训课程

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/>