

# 微动复杂目标雷达散射截面计算方法\*

王胜,范红旗,石志广

(国防科技大学电子科学与工程学院, 长沙 410073)

**【摘要】** 在对雷达目标的动态特征提取和识别的研究中,需要能够逼真地反映目标的结构特性和运动特性的模拟信号。文中应用物理光学法和物理绕射理论,针对复杂动目标和多目标对目标面元和尖劈进行多普勒频率分级的方法实现了动目标的雷达散射截面计算;提出了微面元快速消隐算法和微动目标的模型剖分准则。应用该方法可以模拟转动、颤动以及非刚体运动目标的电磁散射特性。

**【关键词】** 动态目标;雷达散射截面;三角面元;电磁计算

中图分类号:TN951 文献标识码:A

## Calculation of the Radar Cross Section of Moving Targets Based on Object Model

WANG Sheng, FAN Hong-qi, SHI Zhi-guang

(School of Electronic Science and Engineering, NUDT, Changsha 410073, China)

**【Abstract】** In the study of the extraction and recognition of the radar target dynamic feature, a signal which can truthfully indicate the structure feature and dynamic feature of the target is needed. The calculation of the radar cross section of moving targets is realized by method of gradation of the doppler of the facets and spikes, with the application of the physical optics and physical theory of diffraction. A fast plate hidden algorithm and the profiling criterion of the model is proposed to calculate the Radar Cross Section of complex-object and multi-objects. This method can be used to simulate the scattering feature of rotating, vibrating and nonrigid moving object.

**【Key words】** moving targets; radar cross section(RCS); triangular-facet; electromagnetic calculation

## 0 引言

在宽带高分辨雷达体制下,目前对雷达回波信号的模拟大都采用目标散射中心方法近似模拟实际目标散射特性<sup>[1]</sup>。

针对微动目标的散射计算,本文应用PO和PTD方法直接对微动目标的三维模型进行RCS计算。对目标模型的剖分一般有2种方法:非均匀有理样条(NURBS)曲面剖分和平板面元剖分法。NURBS方法的优点在于可以用较少的曲面单元实现比较精确的电磁计算。而平板面元方法的优点在于单元散射截面的计算量较小,与NURBS需要双重积分不同,只需要一重积分即可求解。由于在雷达系统的频率分辨率较高或目标转动较快时,需要对目标模型进行比较细致的划分。因此,采用平板面元剖分法对目标进行电磁散射计算。

对于动目标而言,一方面由于目标的姿态随时间改变使得目标各部件间的遮挡关系发生改变;另一方

面由于部件间的相对运动使得目标各部件和部位的回波的多普勒频率存在差异。因此、动态目标的RCS是时变的并且呈现多普勒频率的色散现象。本文提出了对动目标的瞬态散射截面的表征方法和快速算法。

## 1 动态目标散射截面计算的基本方法和步骤

对动态目标的RCS计算首先是对动态目标的三维模型按雷达系统的距离分辨率和频率分辨率尺度进行预处理,确定对目标剖分的最大面元边长;然后,对姿态实时变换的动态目标三维模型的顶点根据目标的运动方式进行计算,同时判别面元间的遮挡关系,再根据目标的运动方式计算每个微元相对于观测点的径向速度;最后,在雷达系统的频率分辨率的尺度下对微元进行多普勒频率分级,根据其径向速度的不同确定各可见面元回波的多普勒频率等级,从而确定微动目标对应不同的多普勒频率下的瞬态散射截面积。目标的RCS除了随目标姿态角起伏外,还由其在不同多普勒频率下的分布表征。

\* 收稿日期:2008-01-27 修订日期:2008-05-22

## 2 平板面元模型及 RCS 基本算法

### 2.1 平板面元的散射

基于物理光学法的平板面元 RCS 计算是以 Stratton-Chu 积分方程<sup>[2]</sup>为基础的。对于理想导体,平板面元的雷达散射截面

$$\begin{aligned} \sqrt{\sigma_m} = & -\frac{n \cdot e_s \times h_i}{\sqrt{\pi T}} e^{jkr_0} \cdot w \sum_{l=1}^N (p \cdot a_l) \\ & e^{jk \cdot w} \frac{\sin\left(\frac{kw \cdot a_l}{2}\right)}{kw \cdot a_l} \end{aligned} \quad (1)$$

式中: $E_0$  是入射电场强度; $e_s$  为雷达接收机的电极化单位矢量; $h_i$  为入射磁场极化单位矢量; $r$  为局部源到表面单元  $ds$  的位置矢量; $w = i - s$ ,  $i, s$  分别为入射和散射方向的单位矢量; $r_0$  是平板面元局部坐标系原点在全局坐标系中的位置矢量; $a_l$  为平板面元第  $l$  个边缘的长度和方向矢量,这些边缘从头到尾沿周界分布; $r_l$  为第  $l$  个边缘中点的位置矢量; $T$  为  $w$  在平板上的投影长度; $p = n \times w / |n \times w|$  是平板面元上垂直于  $w$  的单位矢量; $N$  是平板边缘的数目。

### 2.2 金属劈的绕射

运用三角面元模拟复杂目标时,除去面元外还会有棱边。物理绕射理论是为了解决边缘绕射场提出的高频近似理论。物理绕射理论可推得劈的散射场为

$$\begin{aligned} e_s \cdot e_s = & \frac{L}{2\pi R} E_0 \frac{(e_i \cdot t)(e_s \cdot t)f + (h_i \cdot t)(h_s \cdot t)g}{\sin^2 \beta} \\ & \frac{\sin(kL\cos\beta)}{kL\cos\beta} e^{jki \cdot r_c} \end{aligned} \quad (2)$$

式中: $e, h$  分别为电场和磁场的极化单位矢量; $i$  和  $s$  为入射场和散射场; $r_c$  为全局坐标系原点到尖劈边缘中心的位置矢量; $t$  为沿尖劈边缘的单位矢量; $L$  为尖劈边缘的长度; $\beta = \arccos(i \cdot t)$ ; $f$  和  $g$  是 Ufimtsev 物理绕射系数,当计算后向散射场时  $f$  和  $g$  分别为<sup>[3]</sup>

$$f = \begin{cases} (X - Y) - (X_1 - Y_1) & 0 \leq \Psi_i \leq \alpha - \pi \\ (X - Y) - (X_1 - Y_1) - (X_2 - Y_2) & \alpha - \pi \leq \Psi_i \leq \pi \\ (X - Y) - (X_1 - Y_1) & \pi \leq \Psi_i \leq \alpha \end{cases} \quad (3)$$

$$g = \begin{cases} X + Y - (X_1 + Y_1) & 0 \leq \Psi_i \leq \alpha - \pi \\ X + Y - (X_1 + Y_1) - (X_2 - Y_2) & \alpha - \pi \leq \Psi_i \leq \pi \\ X + Y - (X_2 - Y_2) & \pi \leq \Psi_i \leq \alpha \end{cases} \quad (4)$$

其中

$$\begin{cases} X = \frac{\sin(\pi/m)}{n} \frac{1}{\cos(\pi/m) - \cos\frac{\Psi_s - \Psi_i}{n}} \\ Y = \frac{\sin(\pi/m)}{m} \frac{1}{\cos(\pi/m) - \cos\frac{\Psi_s + \Psi_i}{2}} \end{cases} \quad (5)$$

$$\begin{cases} X_1 = -\frac{1}{2} \tan\frac{\Psi_s - \Psi_i}{2} \\ Y_1 = -\frac{1}{2} \tan\frac{(\Psi_s + \Psi_i)}{2} \end{cases} \quad (6)$$

$$\begin{cases} X_2 = \frac{1}{2} \tan\frac{\alpha - (\Psi_s - \Psi_i)}{2} \\ Y_2 = \frac{1}{2} \tan\frac{\alpha - (\Psi_s + \Psi_i)}{2} \end{cases} \quad (7)$$

式中: $m$  为尖劈外角  $\alpha$  对  $\pi$  归一化的外劈角,即  $m = \frac{\alpha}{\pi}$ ; $\Psi_i$  为入射波单位矢量  $i$  的横向分量与上表面之间的夹角。

则尖劈的 RCS 平方根的公式<sup>[4]</sup>

$$\begin{aligned} \sqrt{\alpha_w} = & \frac{L}{\pi} \frac{(e_i \cdot t)(e_s \cdot t)f + (h_i \cdot t)(h_s \cdot t)g}{\sin^2 \beta} \\ & \frac{\sin(kL\cos\beta)}{kL\cos\beta} e^{jki \cdot r_c} \end{aligned} \quad (8)$$

### 3 目标模型的剖分准则和方法

在对三维动目标模型进行电磁散射截面计算时,采用三角面元对目标进行剖分,面元的剖分一般遵循 3 个准则:(1) 模型失真度准则,对于曲面在采用三角面元剖分时三角形的最大边长一般应小于曲面曲率半径的  $1/20$ ,面元边长应小于入射波长的 10 倍;(2) 最小计算量原则,对于平板模型尽量采用大的三角面元进行剖分以减少计算量;(3) 雷达系统分辨率原则,平板面元的边长应小于雷达系统距离分辨率的  $1/2$ ,然后,对动目标进行计算时,还应根据雷达系统的频率分辨率确定剖分面元的最大边长。在目标发生转动时,设目标上距转动轴最近的两个面元中心相对距离为  $dl$ ,距离轴心的距离为  $d$ ,角速度为  $\omega$  当转动平面与观测视线平行且目标与观测视线垂直时,2 个面元的速度差为  $dl \times \omega$ ,根据多普勒公式  $f_d = \frac{2dl \times \omega}{c}$ ,当雷达系统的分辨率为  $\Delta f$  时,则有:  $dl < \frac{\Delta f}{2f_0 \omega} c$ ,也就是说,为避免一个三角面元跨越 2 个频率分辨单元,对于旋转

目标三角面元的边长必须小于  $\frac{\Delta f}{2f_0\omega}c$ 。

采用 3D Studio Max 对目标进行三角面元剖分。首先,将复杂目标划分为几个主要的部件;然后对每一个部件通过 3D Studio Max 进行三角面元的逼近,从而得到一个有足够精度的目标模型。

一个复杂的雷达目标实际变成了一个复杂的多面体目标。对这个多面体目标的几何拓扑关系分析化简后,可以用 3 个列表来存储在计算其 RCS 过程中所需要的信息。

顶点表:以顶点的编号为序存放各顶点的坐标值。

面表:以表面编号为序存放多面体各面的顶点序号,并按逆时针方向排列(该方向与表面的外法向矢量成右手关系)。

劈表:以劈号为序存放各劈的参数,包括劈的起始和终止端点的顶点号,劈的左、右表面号<sup>[5]</sup>。

#### 4 面元和尖劈的消隐

对于简单的凸面体面元的消隐判断采用背面剔除法,即面元外法线方向与投影方向(观察方向)的夹角小于 90°的后向面(背面)的消除。剔除依据:物体表面是封闭的,背面总是被前向面所遮挡,始终是不可见的。而对于凹面体和多个物体则需处理遮挡问题。

对凹面体和多个物体的遮挡问题,首先把剖分过的目标在散射视平面上进行投影,然后把视平面划分为多个离散的投影区域,对投影到每一个投影区域内的面元进行消隐判决,判决的方法采用区域顶点竞争法,先找到投影到视平面的一个区域内的面元中距离观测者最近的一个面元,然后判断其他面元相对该面元的位置关系。如果其他面元与顶面元相连,则为可见面元,如果相距较远则为遮挡面元,再用前面可见多边形切割后面面元,最终使得每个多边形或是完全可见,或是完全不可见。该算法不仅能处理凸多面体,还可以处理凹多面体以及内部有空洞的多面体。为了提高算法的效率,辅之以背面剔除法。

#### 5 基于微动目标的面元和尖劈的多普勒频率分级的 RCS 计算

微动目标除了整体的平动外,在目标发生转动或目标部件发生转动以及目标出现振动时,由于目标上的面元和尖劈的运动矢量不同则相对于观测者的相对径向速度也不同。因此,对应不同的多普勒频率,在一定的频率分辨率下,对于目标上的面元和尖劈采用等多普勒分级,即把与观测者的径向速度相同的面元归

为一组,进行相干叠加计算该频率下的 RCS。设多普勒频率为  $f_{da}$  的等多普勒面元和尖劈的分级中面元的个数为  $m_i$ ,尖劈的个数为  $n_i$ ,则复杂目标中该频率的总的 RCS 可由下式表述

$$\sigma_{f_{da}} = \left| \sum_{i=1}^{m_i} (\sqrt{\sigma_m})_i + \sum_{j=1}^{n_j} (\sqrt{\sigma_w})_j \right|^2 \quad (9)$$

观测动目标时,由于面元和尖劈相对参考点的速度差异使得目标回波的频谱出现展宽,利用式(9)在由相对运动所引起的所有频点上分别求取目标 RCS,就构成了目标动态瞬时 RCS 在频率域上的分布。

对于包含有运动部件的微动目标,首先,把运动部件与相对静止的物体分开,根据运动部件的运动形式计算运动部件模型顶点在不同时刻的坐标,然后再把运动部件与相对静止的部件合并到同一场景中,进行面元遮挡判决,最后根据可见面元的径向速度对面元进行分级,计算各频率级下的 RCS 分布。

#### 5.1 目标自转或目标部件旋转时的目标面元和尖劈的多普勒频率计算

设目标或目标上的某一部件绕过  $P_1(x_1, y_1, z_1)$  和  $P_2(x_2, y_2, z_2)$  的直线

$$\frac{y - y_1}{y_2 - y_1} = \frac{x - x_1}{x_2 - x_1} = \frac{z - z_1}{z_2 - z_1} \quad (10)$$

或

$$\frac{y - y_1}{l_1} = \frac{x - x_1}{m_1} = \frac{z - z_1}{n_1} \quad (11)$$

其中  $(l_1, m_1, n_1) = \frac{P_1 P_2}{|P_1 P_2|} = u$ , 以角速度  $\omega$  逆时针旋转,则目标上中心在  $P(x_\sigma, y_\sigma, z_\sigma)$  点的面元或尖劈到轴线的距离为  $d = \sqrt{|P_1 P|^2 - |u \cdot P_1 P_2|^2}$ ,  $P$  点到轴线的垂点  $P_0$  的坐标为

$$\left( \frac{P_1 P \cdot P_1 P_2}{|P_1 P_2|^2} (x_2 - x_1) + x_1, \frac{P_1 P \cdot P_1 P_2}{|P_1 P_2|^2} (y_2 - y_1) + y_1, \frac{P_1 P \cdot P_1 P_2}{|P_1 P_2|^2} (z_2 - z_1) + z_1 \right)$$

即面元或尖劈的速度矢量为

$$V = d \cdot \omega \frac{P_1 P_0 \times P_1 P_2}{|P_1 P_0 \times P_1 P_2|} + V_0 \quad (12)$$

式中:  $V_0$  为轴心平移速度矢量。那么,在散射方向上的速度投影为

$$V_r = \frac{V \cdot s}{|s|} \quad (13)$$

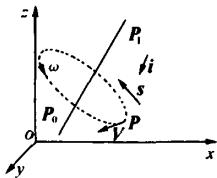


图1 目标旋转时的面元运动矢量关系

面元和尖劈在散射方向上的速度与多普勒频率的对应关系为

$$f_{dr} = \frac{2V}{c} f_0 \quad (14)$$

式中:  $c$  为光速;  $f_0$  为发射信号频率;  $f_{dr}$  为面元和尖劈的多普勒频率。这样面元和尖劈的速度分级就对应了 RCS 的频率分布。

## 5.2 目标局部振动时的 RCS 计算

设目标某一部位面元存在简谐振动, 振动的方向为目标表面的法线方向  $h$ , 谐振频率为  $f$ , 最大振荡幅度为  $A$ , 则面元的位移  $l = A\sin(2\pi f t)h$ , 也就是面元及其相连的尖劈的运动速度为  $V_t = 2A\pi f \cos(2\pi f t)h$ , 那么振动面元在散射方向上的速度投影为

$$V_w = \frac{2A\pi f \cos(2\pi f t)h \cdot s}{|s|} \quad (15)$$

再根据面元和尖劈在散射方向上的径向速度所对应的多普勒频率以雷达系统的最小频率分辨单元进行分级。

## 6 计算结果与分析

图2所示为金属哑铃, 2个金属球的直径均为1 m, 连接杆长为1.5 m。图3为金属锥体, 底边直径为2 m, 高为2 m。图4为金属哑铃采用面元法计算的极角90°, 方位角为0~360°, 在1.5 GHz的电磁波照射下的静态雷达散射截面积。图5为在相同条件下, 采用Radbare电磁计算软件所计算的静态雷达散射截面积。对图4和图5进行比较可以看出由于在快速面元的遮挡计算时采用了近似算法, 因此, 采用快速散射界面的计算方法除了在个别的角度下存在小的误差外, 基本上反映了复杂目标和多目标的散射界面面积的

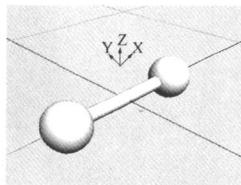


图2 金属哑铃

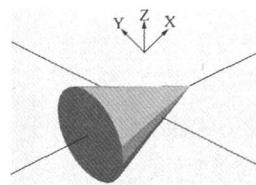


图3 金属锥体

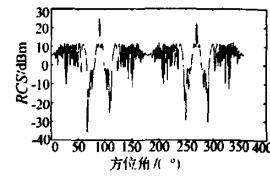


图4 采用面元法计算的金属哑铃的静态 RCS

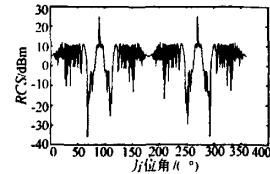


图5 采用Radbare计算的哑铃的静态 RCS

变化规律。在同样的硬件条件下, 计算时间只是Radbare电磁计算软件的1/10。

采用面元法的意义在于对复杂动态目标回波的实时模拟。动态目标的电磁散射特征是通过目标的RCS时频分布图来表征的, 对于动态目标, 首先根据其运动形式计算目标在不同时刻下目标的顶点位置迁移以及目标各面元的运动速度矢量在观测视线上的投影, 再换算成面元的多普勒频率并根据多普勒速度对面元进行分级, 对等多普勒的面元的散射面积进行相干累加, 进而实现在不同时刻下目标的RCS时频分布图。图6~图8分别为在单站、观测极角为45°时, 哑铃绕Z轴、X轴以及直线( $X=1.5, Y=0$ )旋转时散射截面的时频分布图。图9为目标绕Z轴旋转, 入射与散射方向与Z轴平行时的RCS时频分布图。

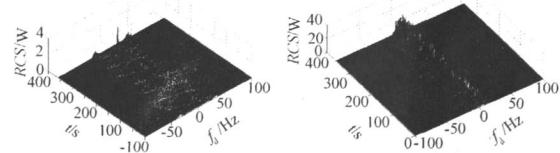
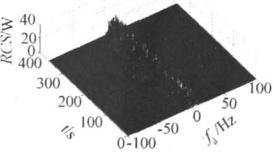
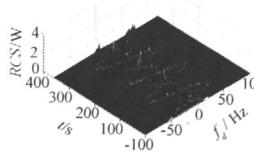
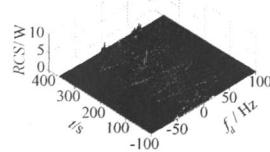
图6 哑铃绕Z轴旋转俯视角  
为45°RCS时频分布图图7 哑铃绕X轴旋转俯视角  
为45°RCS时频分布图图8 哑铃绕直线(X=1.5, Y=0)  
旋转, 俯视角为45°RCS  
时频分布图图9 哑铃绕Z轴旋转,  
俯视角为90°RCS  
时频分布图  
(下转第39页)

图4a为校正前测距误差与时间的关系曲线,图4b则给出了校正后测距误差与时间的关系曲线。

#### 4 结束语

针对正交解调接收机通道不平衡的校正问题,本文利用双频连续波雷达基于FFT比相测距的特点,从降低设备量与计算量出发,提出了一种正交解调误差的频域校正方法。在给出基于频域分析计算校正系数的基础上,实现了正交解调误差的校正。仿真结果验证了校正方法的有效性,校正系数的估计方差与克拉美-罗下界渐进一致。通过校正后,由通道不平衡引起的测距系统误差被有效地解决,从而改善了双频连续波雷达的测距性能。

#### 参 考 文 献

- [1] 许邦建,皇甫堪. FFT 比相测距的理论及仿真[J]. 兵工学报, 2000(6):53-54.
- [2] 袁俊泉,龚享铭,皇甫堪. 基于二次差频的多频连续波测距方法研究[J]. 电子学报, 2004,32(12): 2056-2058.
- [3] 许邦建,李纲,皇甫堪. 测距雷达解距离模糊的两种快速算法[J]. 电子与信息学报,2001,23(9):905-911.

(上接第35页)

由图6中可以看出,当哑铃绕Z轴旋转,观测角为45°时,主要散射截面在两端的球体上,在时频分布图上表现为RCS以 $f_d=0$ 为中心轴,呈对称分布。而在图9中,锥体同样绕Z轴旋转,由于锥体两端的散射截面的非对称性在RCS的时频分布图上也为非对称的,而且RCS在多普勒频率轴上的分布呈现周期性的交错现象。由图7中可以看出目标是绕其中心轴旋转的,其散射中心分布以 $f_d=0$ 为中心对称分布,而且RCS的密集分布区在轴线上。图8所示为旋转轴不在几何中心时,目标的散射截面的时频分布特性,由图中可以看出目标是绕一定轴旋转,而定轴不在目标的几何中心。

由以上各图可以看出采用多普勒分级的平板面元电磁散射计算方法得到的目标散射截面时频分布图不仅能够反映目标几何特征,更重要的是能够反映目标的运动特征。比如目标的旋转周期、旋转半径和转轴方向以及目标散射面积沿旋转直径方向的分布特性等目标散射特性。

#### 7 结束语

应用物理光学法和物理绕射理论以及本文所提出

- [4] Churchill F E, Ogar G W, Jhompson B J. The correction of I and Q errors in a coherent processor[J]. IEEE Trans. On AES, 1981,17(1):131-137.
- [5] Macleod M D. Fast calibration of IQ digitizer systems[J]. Elect. Eng., 1990,62(1): 41-45.
- [6] Green R A, Pierre J W. Quadrature receiver mismatch calibration[J]. IEEE Trans. On SP, 1999,47(11):3130-3133.
- [7] Yang X X, Hou Z F. Adaptive calibration of I and Q mismatch in quadrature receiver [J]. Journal of Electronics, 2002,19(2):187-191.
- [8] Rife D C, Boorstyn R R. Single-tone parameter estimation from discrete-time observations[J]. IEEE Transactions on Information Theory. 1974,20(5):591-598.

袁俊泉 男,1976年生,研究方向为雷达信号处理、现代数字信号处理、DSP开发及应用。

程柏林 男,1972年生,讲师。研究方向为无源定位、信号分选。

皇甫堪 男,1939年生,教授,博士生导师。研究方向为信号处理。

的针对动态目标的目标三维模型的面元剖分方法和面元消隐算法可较为逼真地模拟复杂目标和多目标的RCS特性,采用该方法适合电大尺寸的动态目标雷达回波特性模拟仿真,可以应用在雷达回波信号模拟和雷达目标识别算法中。

#### 参 考 文 献

- [1] 黄卡码,赵翔. 电磁场中的逆问题及应用[M]. 北京:科学出版社, 2005.
- [2] Stratton J A. Electromagnetic theory [M]. New York: McGraw-Hill, 1941.
- [3] Knott E F著. 雷达散射截面 - 预估、测量和缩减[M], 阮颖铮,陈海,译. 北京:电子工业出版社,1988.
- [4] Youssef Z N. Radar cross section of complex targets[J]. Proc. IEEE 1989,77(5):722-734.
- [5] 韩明华. 光学区复杂目标 RCS 特征信号计算及实验研究[D]. 长沙:国防科技大学,1999.

王胜 男,1965年生,博士研究生。研究方向为自动目标识别与模糊工程、制导雷达信号处理、雷达信号合成。

## 雷达散射截面（RCS）分析培训课程

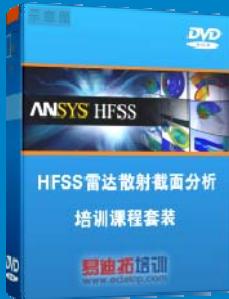
易迪拓培训([www.edatop.com](http://www.edatop.com))由数名来自于研发第一线的资深工程师发起成立，致力和专注于微波、射频、天线设计研发人才的培养，是国内最大的微波射频和天线设计人才培养基地。客户遍布中兴通讯、研通高频、国人通信等多家国内知名公司，以及台湾工业技术研究院、永业科技、全一电子等多家台湾地区企业。

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/>