

## 雷达目标动态 RCS 仿真研究

张居凤, 冯德军, 王雪松, 陈志杰

(国防科技大学电子科学与工程学院, 湖南长沙 410073)



**摘 要:** 根据中段弹道目标的运动学特性, 结合室内缩比模型 RCS 静态测量数据, 提出了一种雷达目标动态 RCS 仿真的方法。该方法首先仿真空间目标飞行弹道, 然后计算目标在飞行过程中的方位角, 由此获得目标在设定场景下的 RCS 动态特性。仿真结果与理论分析相比较, 证明了所提出方法的可行性。

**关键词:** 目标识别; 弹道; 雷达散射截面; 仿真

**文章编号:** 1004-731X (2005) 04-0834-04

**中图分类号:** TP391.9; TN95

**文献标识码:** A

## Simulation of Dynamic RCS Data of Radar Targets

ZHANG Ju-feng, FENG De-jun, WANG Xue-song, CHEN Zhi-jie

(School of Electronic Science and Engineering, National University of Defense Technology, Changsha 410073, China)

**Abstract:** According to the kinetic characteristic of targets in midcourse and the RCS data of static measurement of the model, a simulation method for dynamic RCS data of radar targets is proposed. After the ballistic trajectory of midcourse simulated and the azimuth angle of target in flight calculated, the dynamic characteristics of RCS of the target under the given scene are obtained. Compared with the theory analysis, simulation results show the effectiveness of the method.

**Keywords:** target recognition; trajectory; RCS; simulation

## 引 言

弹道导弹防御是现代战争研究的热点问题, 真假弹道目标识别是其中的关键技术之一。弹道导弹的飞行过程包括助推段、中段和再入段三个阶段, 由于中段为反导系统提供识别目标的时间较之再入段长很多, 若该段识别成功将大大提高整个反导系统的拦截概率, 因此, 中段目标识别成为整个弹道目标识别的重点。就雷达而言, 目标识别的技术途径有很多种, 利用目标 RCS 信息进行识别是弹道目标识别的常用方法之一<sup>[1-3]</sup>。

RCS 数据的获得途径主要有: 理论计算、全尺寸外场测量、动态目标测量和室内缩比模型测量等。理论计算的方法较复杂, 并且只适用于少数典型目标的求解; 全尺寸目标散射测试场能够提供逼真的战场环境, 但其造价和测试费用大; 动态测量的误差因素较多, 因而其测量精度不高; 现代室内测量场不但能够提供高精度的 RCS 数据, 而且可以实现 360° 全方位测量, 因此, 基于目标缩比模型的室内静态测量数据为大多识别算法所采用。但静态测量的缺点是不能反映目标的运动特性, 难以逼真再现实际场景中的目标 RCS 动态信息。本文根据中段弹道目标的运动学特性, 结合目标缩比模型 RCS 静态测量数据, 提出了一种雷达目标动态 RCS 仿真的方法, 可以获得设定战情下弹道目标的 RCS 动态信息。

## 1 中段弹道目标运动特性

弹头是弹道中段存在的主要目标, 也是导弹防御方需要识别的重点对象。为了保持弹头在大气层外飞行的稳定性、提高命中精度, 导弹设计中大都采用了弹头姿态控制和速度控制技术, 以确保弹头在真空中的飞行是稳定的、无翻滚的。一般认为轴对称的弹头具有一个绕纵轴旋转的章动, 如图 1 所示。章动是弹头中段飞行过程中的一个主要特征。假定弹头沿  $ov$  方向飞行, 在不考虑弹头绕其极轴  $OA$  自转的情况下, 可用弹头的章动角  $g$ 、 $OA$  轴绕速度方向的旋转角速度  $w$  两个参量来描述弹头的章动。

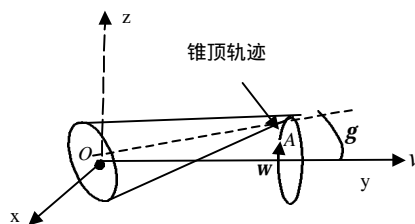


图 1 弹头章动示意图

以  $v$  方向为  $y$  轴, 发射面上与其垂直的直线为  $x$  轴, 按右手准则与它们正交的方向为  $z$  轴, 建立坐标系。若起始时刻弹头顶端  $A$  在发射面上的投影与弹头速度方向交于  $y$  轴,  $t$  时刻转过角度  $\Delta f = w \cdot t$ , 根据几何关系容易求得  $t$  时刻  $OA$  轴与弹道平面的夹角即导弹偏航角  $\gamma = \text{tg}^{-1} \left[ \frac{\sin g \cos \Delta f}{\sqrt{(\sin g \sin \Delta f)^2 + (\cos g)^2}} \right]$ ,

$OA$  轴在发射面上的投影与弹头速度  $v$  方向的夹角为  $\text{tg}^{-1} [\text{tg} g \sin \Delta f]$ , 再结合  $t$  时刻弹头的运动参数, 可求出该时刻导弹俯仰角  $j$ 。对于轴对称目标来讲, 可以认为滚动角  $g = 0$ 。 $j$ 、 $\gamma$  及  $g$  这三个量可充分描述导弹相对地球飞行的姿态。

收稿日期: 2004-06-09

修回日期: 2004-12-27

基金项目: “十五”国防预研计划项目 (41303517); 全国优秀博士论文专项资金 (08100101)。

作者简介: 张居凤 (1978-), 女, 陕西人, 硕士生, 研究方向为电子战仿真, 雷达目标识别; 冯德军 (1972-), 男, 湖南人, 博士生, 研究方向为信号处理与目标识别, 雷达成像。

弹头章动也可用其章动频率来描述。从提高弹头命中精度的角度讲, 应选择较大的章动速率, 但如果该速率过大, 又会导致弹头横向过载偏大甚至弹头解体。因此, 弹头的章动速率要选择适当, 一般为 2Hz 左右<sup>[4]</sup>。

## 2 雷达目标动态 RCS 仿真方法

弹道和雷达的相对位置对目标的 RCS 动态特性影响很大。采用本文方法时, 首先将弹道和雷达的位置设于想定场景, 然后通过计算获得所需要战情下的目标动态 RCS 信息。其具体实现过程是: 首先设定雷达位置和导弹关机点参数, 然后根据战情仿真目标飞行弹道, 再结合目标在运动过程中的运动参数及运动特性求解出目标在仿真弹道飞行过程中相对雷达方位角的变化, 最后, 根据室内静态测量所获得的目标全方位角下的 RCS 信息, 在保证精度的前提下通过插值得到目标在飞行过程中随方位角变化的动态 RCS 信息。本方法的核心包括两个方面: 中段飞行弹道仿真和目标飞行过程中雷达视线角的计算。

### 2.1 中段飞行弹道仿真

在椭圆弹道基本假设下, 由理论知, 导弹的中段飞行为一位于速度矢量与地球引力矢量所决定的弹道平面内的运动。其弹道方程为<sup>[5]</sup>:

$$r = \frac{P}{1 + e \cos f} \quad (1)$$

显然, 上式为极坐标表示的圆锥截线方程。式中  $e$  为偏心率, 它决定圆锥截线的形状;  $P$  为半通经, 它与  $e$  共同决定圆锥截线的大小;  $r$  是圆锥截线上任一点到地心的距离;  $f$  为极角。要导弹不逃离地球引力作用而飞向宇宙空间, 必须满足  $e < 1$ , 即圆锥截线形状为椭圆。

在导弹关机点  $K$  处的关机参数  $r_k$  (关机点距地面高度)、 $q_k$  (弹道倾角)、 $V_k$  (导弹关机速度)、 $t_k$  (关机时刻) 已知的情况下, 有

$$P = \frac{r_k V_k^2 \cos^2 q_k}{\frac{m}{r_k}} = r_k V_k \cos^2 q_k \quad (2)$$

$$e = \sqrt{1 + v_k (v_k - 2) \cos^2 q_k} \quad (3)$$

其中,  $v_k = \frac{V_k^2}{\frac{m}{r_k}}$  是个中间变量,  $m = 3.986 \times 10^{14} \text{ m}^3/\text{s}^2$  为地心引力常数。

为方便计算, 以椭圆中心  $o$  为圆心, 长半轴为半径做辅助圆。辅助圆具有两个性质: 辅助圆与椭圆上的点有一一对应关系; 导弹在椭圆上飞行一周的时间与辅助圆上飞行一周的时间相等。如此, 可以把导弹在椭圆上的飞行时间转化为在辅助圆上的飞行时间来计算。椭圆上点  $q$  对应的辅助圆上  $q'$  点之圆心角称为偏近点角  $E$ , 导弹从近地点开始在  $t-t_p$  时间内以平均角速度  $n$  飞过的角度, 即偏近点角  $M$  满足:

$$M = n(t - t_p) = E - e \sin E \quad (4)$$

上式即开普勒方程, 式中  $n = \frac{2\pi}{T} = \sqrt{\frac{m}{a^3}}$ 。

若已知导弹飞行在任一时刻  $t$  的偏近点角  $E$ , 那么该时刻导弹的运动参数为:

$$V = \sqrt{\frac{m}{a} \frac{1 - e^2 \cos^2 E}{1 - e \cos E}} \quad (5)$$

$$q = \arcsin \frac{e \sin E}{\sqrt{1 - e^2}} \quad (6)$$

$$r = a(1 - e \cos E) \quad (7)$$

其中  $V$  是该时刻的速度大小,  $q$  是速度倾角。

由  $r_k$ 、 $a$ 、 $e$  通过式 (7), 可得关机点  $k$  处的偏近点角

$$E_k = \cos^{-1} \left( \frac{a - r_k}{ae} \right) \quad (8)$$

将  $E_k$ 、 $t_k$  代入开普勒方程, 可得导弹飞经近地点的时间

$$t_p = t_k - \frac{M_k}{n} = t_k - \frac{E_k - e \sin E_k}{n} \quad (9)$$

其中  $t_k$  是导弹关机点时间, 可以设为起始时刻, 即  $t_k = 0$ 。

有了  $t_p$ , 反解开普勒方程  $E - e \sin E = n(t - t_p)$ , 可以得到任意时刻  $t$  的偏近点角  $E$ , 再代入式 (5)~(7) 即可求出导弹  $t$  时刻的运动参数  $V(t)$ 、 $q(t)$ 、 $r(t)$ 。

特别地, 当  $V_k$  和  $r_k$  一定时, 可以找到一个速度倾角  $q_{kopt}$  使导弹射程最大, 此时的椭圆弹道为最小能量弹道,  $q_{kopt}$  称为最佳速度倾角,

$$\tan^2 q_{kopt} = \frac{V_k [2R - (r_k + R)V_k]}{2[RV_k - 2(R - r_k)]} \quad (10)$$

一般在进行弹道设计时, 都会力求使  $q_k$  控制在最佳速度倾角  $q_{kopt}$  附近。

根据弹道方程和导弹飞行中段任意时刻的运动参数可以求出关机点所对应的真近点角  $f_k$  和任意  $t$  时刻的真近点角  $f$ , 由此得到导弹飞行的射程  $L = R(f - f_k)$ 。有了弹道上任一点到地心的距离和目标飞经该点的射程, 从而可以仿真出导弹飞行的弹道轨迹。

### 2.2 仿真场景下目标雷达视线角的计算

导弹飞行于中段时, 一般都距离地面几百甚至几千公里的高空, 其运动完全可以视为是在真空中进行的。在不考虑其运动姿态的情况下, 可以把它看作为一个质量集中在质心的质点来研究。对轴对称目标而言, 方位角可以认为是雷达与目标质心的连线和目标轴线的夹角, 它的计算方法是将雷达在大地坐标系中的位置先后经过地心坐标、发射坐标系转换到弹体坐标系中, 这样就把目标方位角的求解问题简化成了同一坐标系下的两直线间夹角问题。各坐标系定义分别如下 (如图 2 所示):

发射坐标系 ( $oxy_z$ ): 以地面发射点为坐标原点  $o$ ; 取发射点的铅垂线为  $y$  轴, 向上为正, 在忽略地球扁率率和不计地球旋转时,  $oy$  轴的延长线交地球赤道平面于地心  $o_d$ ;  $x$  轴在发射点水平面上, 指向瞄准方向;  $oz$  与  $ox$ 、 $oy$  构成右手直角坐标系。

弹体坐标系 ( $o_c x_1 y_1 z_1$ ): 它是固连于弹体且随弹体一起运动的直角坐标系, 是为描述飞行导弹相对地球的姿态而引入

的。坐标原点取在弹体质心  $o_z$  上;  $o_z x_1$  轴与弹体纵对称轴一致, 指向弹头方向;  $o_z y_1$  轴垂直于  $o_z x_1$  轴, 且位于弹体纵对称面内, 指向弹体上方;  $o_z z_1$  轴与  $o_z x_1$ 、 $o_z y_1$  构成右手直角坐标系。

地心坐标系( $o_d x_d y_d z_d$ ): 原点取在地球质心  $o_d$ ;  $z_d$  轴指向 BIH1984.0 定义的协议地球极 (CTP) 方向;  $x_d$  轴指向 BIH1984.0 定义的零度子午面和 CTP 赤道的交点;  $y_d$  轴和  $z_d$  轴、 $x_d$  轴构成右手直角坐标系。

大地坐标系( $L, B, H$ ): 空间任一点 P 的大地坐标用大地经度 L、大地纬度 B 和大地高度 H 表示。P 点的大地子午面与起始子午面所构成的二面角为 L, P 点对应地球的法线与赤道面的夹角为 B, P 点沿法线到地球球面的距离为 H。

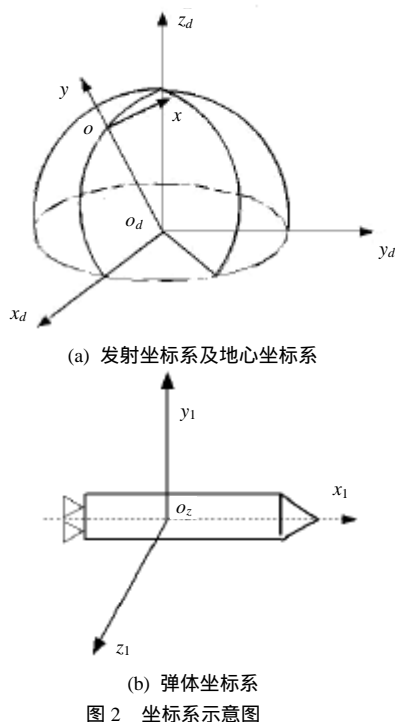


图2 坐标系示意图

把某一坐标系中的矢量转换到另一坐标系中, 只需将该矢量乘以这两坐标系之间的转换矩阵即可得到。忽略地球扁平率的情况下, 已知雷达位置的大地坐标时, 首先可按如下转换关系获得它在地心坐标系中的位置坐标 ( $x_o, y_o, z_o$ )

$$\begin{aligned} x_o &= (R+H) \cdot \cos B \cdot \cos L \\ y_o &= (R+H) \cdot \cos B \cdot \sin L \\ z_o &= (R+H) \sin B \end{aligned} \quad (11)$$

对其它任意两个坐标原点和坐标轴均不重合的右手直角坐标系, 可以经过一次平移和三次旋转后完全重合, 其转换矩阵模型如下:

若坐标系 A 绕  $oy$  轴逆时针 (逆着  $oy$  正方向看去, 以下同) 旋转  $j$  角 ( $0 \leq j < 2\pi$ ), 得到新坐标系 B, 则其转换矩阵为:

$$R_y[j] = \begin{bmatrix} \cos j & 0 & -\sin j \\ 0 & 1 & 0 \\ \sin j & 0 & \cos j \end{bmatrix} \quad (12)$$

若坐标系 A 绕  $oz$  轴逆时针旋转  $J$  角 ( $0 \leq J < 2\pi$ ), 得到新坐标系 B, 则其转换矩阵为:

$$R_z[J] = \begin{bmatrix} \cos J & \sin J & 0 \\ -\sin J & \cos J & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (13)$$

若坐标系 A 绕  $ox$  轴逆时针旋转  $f$  角 ( $0 \leq f < 2\pi$ ), 得到新坐标系 B, 则其转换矩阵为:

$$R_x[f] = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos f & \sin f \\ 0 & -\sin f & \cos f \end{bmatrix} \quad (14)$$

若原点重合的坐标系 A 先后绕  $oy$ 、 $oz$ 、 $ox$  轴旋转三次, 得到坐标系 B, 则 A 到 B 的转换矩阵为

$$R_{A \rightarrow B} = R_y[j] \cdot R_z[J] \cdot R_x[f] \quad (15)$$

弹体坐标系的原点是随目标运动而运动的, 因而发射坐标系到弹体坐标系的转换矩阵也是动态变化的, 它主要与导弹的俯仰角、偏航角和滚动角有关。对于弹头目标, 它们的解算在 1 节中已给出。

### 3 仿真结果

下面以锥球体所代表的弹头目标为例, 应用其 RCS 静态测量数据以及 2 节中的弹道目标动态 RCS 仿真方法, 仿真出目标飞行在中段过程中的 RCS 动态信息。

仿真中用到的数据是在微波暗室中对目标缩比模型测量得到的。目标具体参数如下: 总长 600mm, 直径 140mm, 锥角  $13.4^\circ$ 。雷达采用步进扫频测量方式, 工作频率范围为 8.75—10.75GHz, 步长 20MHz; 目标横滚角和俯仰角均为  $0^\circ$ ; 方位角范围  $0^\circ$ — $180^\circ$ ; 方位角步长  $0.2^\circ$ ; 极化状态为水平极化和垂直极化。目标在点频  $F=8.75$  GHz、单一极化 HH 下的 RCS 幅度变化如图 3 所示。

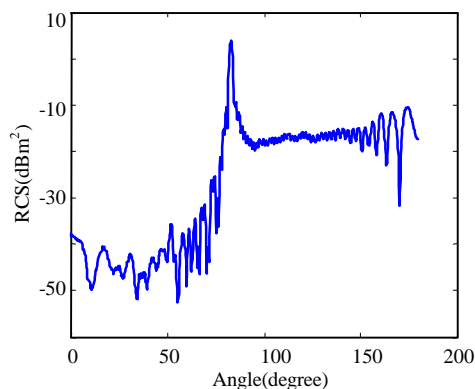
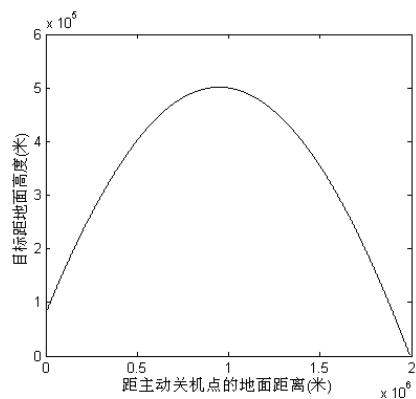


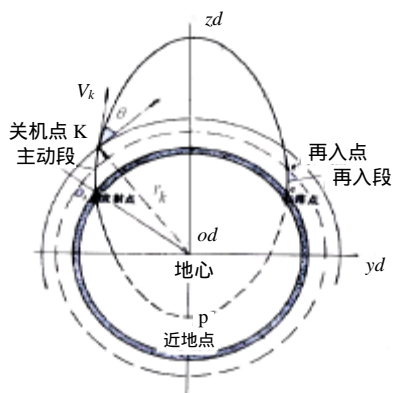
图3 目标缩比模型 RCS 静态测量数据

假定导弹关机点距地面高度 80km, 关机速度 4km/s, 目标飞行弹道为最小能量弹道, 弹头在飞行过程中是自旋稳定的, 飞行过程中绕速度方向做章动角为  $3^\circ$  的圆锥运动, 章动频率为 2.3Hz, 雷达跟踪数据率 20Hz。忽略地球扁平率并且不考虑地球自转的影响, 此时的发射面与弹道平面重合。设导弹发射点位于地心坐标系中的  $y_d o_d z_d$  平面与弹道平面的交点  $o$  (西经  $90^\circ$ , 北纬  $84.7^\circ$ ), 雷达位于东经  $90^\circ$ , 北纬  $84.7^\circ$

处。在上述设定场景下根据导弹的关机点参数仿真出的弹道轨迹及目标飞行场景如图 4 所示。



(a) 仿真弹道



(b) 飞行场景

图 4 仿真弹道及目标飞行场景

从目标中段飞行过程中抽取 10s 作为观测时间, 此时目标位于弹道最高点左右的平飞阶段, 距离地面约 501km。根据场景中设定参数求解出目标飞行过程中的方位角, 对图 3 中的目标  $0^\circ$ - $180^\circ$  下 RCS 进行高精度插值, 并寻找出相应方位角的 RCS, 即目标动态 RCS 信息。仿真得到的观测时间内目标 RCS 幅度变化及其起伏频谱分别如图 5、图 6 所示。

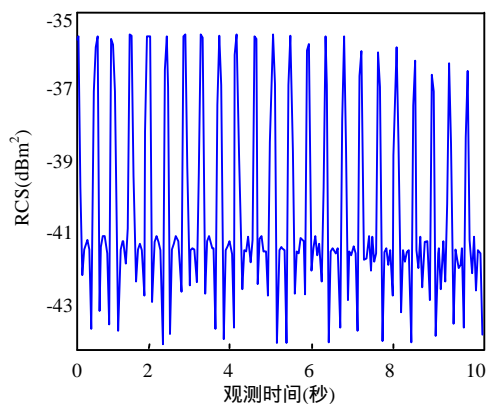


图 5 弹头目标动态 RCS 幅度变化

从图 5 可以看出, 目标在中段飞行过程中的 RCS 呈现出明显的周期性, 这是由于目标章动引起的。图 6 中 RCS

频谱第二“高峰”出现在第 24 个数据点, 相应于弹头章动频率 2.4Hz, 它与参数设定中的弹头章动频率 2.3Hz 是十分接近的, 这充分说明了该方法的有效性。另外, 将观测时间改变为关机后不久的上升弧段和飞过最高点后下降弧段进行仿真, 同样取得了与参数设置相一致结果, 但缩短观测时间会增大仿真误差。因此, 在弹道导弹目标识别中无论雷达何时跟踪上目标, 只要对目标观测时间足够长, 就可以从 RCS 幅度序列中提取出稳定的特征量。

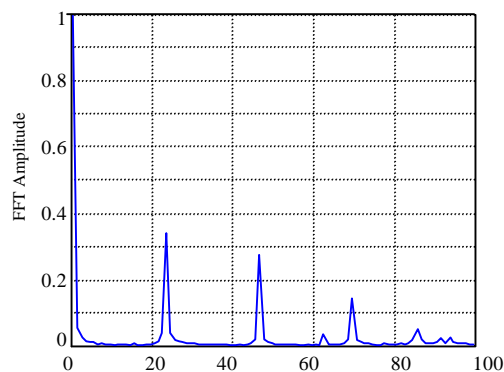


图 6 弹头目标动态 RCS 频谱

## 4 结论

采用 RCS 信息识别真假弹道目标是防御系统雷达目标识别的重要手段之一, 由于受到实测数据缺乏的限制, 该方法常常难以得到有效的检验。本文提出了一种雷达目标动态 RCS 仿真的方法, 通过仿真飞行弹道并结合暗室测量数据, 得到了设定场景下的目标的 RCS 动态信息, 仿真结果与理论分析相一致, 这证明了该方法的正确性。

对于中段其它目标, 由于其运动轨迹与弹头基本一致, 上述方法仍然适用, 但它们的姿态和运动方式可能存在差异, 因此, 在雷达视线角的计算过程中要充分考虑到这一点。本文提出的方法可以用于构造逼真的空间目标识别场景, 这为空间目标的特性和识别研究提供了一种新途径。

## 参考文献:

- [1] 戴征坚, 郁文贤. 空间目标的雷达识别技术[J]. 系统工程与电子技术. 2000, 22(3): 19-22.
- [2] 许小剑, 黄培康. 利用 RCS 幅度信息进行雷达目标识别[J]. 系统工程与电子技术, 1992, 6: 1-9.
- [3] James L.Rasmussen, Randy L.Haupt, Michael J.Walker. RCS feature extraction from simple targets using time-frequency analysis [J]. SPIE 1996, 2845: 66-74.
- [4] 罗宏. 动态雷达目标的建模与识别研究[D]. 博士学位论文. 北京: 航天工业总公司第二研究院, 2000.
- [5] 张毅. 弹道导弹动力学[M]. 长沙: 国防科技大学出版社, 1999.
- [6] 黄培康. 雷达目标特征信号[M]. 北京: 宇航出版社, 1993.
- [7] Mr.Thomas Foster. Application of Pattern Recognition Techniques for Early Warning Radar (EWR) Discrimination [R]. ADA298895, 1995.

## 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/>