

# 舰艇形隐身及其雷达散射截面的预估初探

袁俊杰 金咸定

(上海交通大学船舶及海洋工程学院)

**摘要:**分析了舰艇隐身的原理、性质和方法，并针对舰艇的雷达隐身，讨论了各种基本形状和简单的舰艇外形对雷达截面的影响。针对常见的两面角等几何形状阐述了计算方法，建立了雷达散射截面预估的基本思想，对舰艇隐身具有启迪意义和应用前景。

**关键词:**舰艇隐身，雷达散射截面预估

## Ship Configuration Stealth on Radar and Preliminary Exploration on RCS Estimation

YUAN Junjie JIN Xianding

(School of Naval Architecture and Ocean Engineering of Shanghai Jiao Tong University, Shanghai 200030)

**Abstract:** The theory, character and method of ship stealth are analysed in this paper. And the influence of kinds of elementary surfaces and basic ship configuration on RCS is discussed. Some computation methods and the elementary idea to establish ship's RCS estimation program are given which is meanful to ship stealth and to be used widely in the future.

**Keyword:** Ship stealth, Radar cross-section(RCS), RCS estimation method

### 1 前 言

舰艇的隐身性即不被对方探测到的性能。目前探测舰艇的手段主要有雷达探测、声纳探测、磁探测和红外探测四种方式。而隐身的目的就是设法抑制自身的这四个方面的物理场，增加对方的探测难度或减小其探测距离，以达到隐身的目的。舰艇的隐身性能研究日益受到了各主要海军国家的重视。美国海军在1993年公开了全新概念的隐身舰“海影”号(Sea Shadow)，在近期代表21世纪水面战舰最新成就的DD21型驱逐舰亦将加入到海军的战斗序列；俄国海军的“基洛夫”号巡洋舰也大量应用了隐身技术；同时，法国、瑞典、以色列等国家也各自提出了各有特色的隐身舰艇。可以说，隐身性是21世纪海军战斗舰艇的一种必然的发展方向、一种不可缺少的舰艇特质。

在舰艇隐身性的各项因素中，雷达隐身是其中一个很重要的方面。雷达探测是由其发射天线给定方向发射电磁波，电磁波遇到目标就产生散射，雷达的接收天线捕捉到该散射电磁波而发现目标。当目标被电磁波照射时，能量将朝各个方向散射，能量的空间分布依赖于目标的形状、大小和结构，以及入射波的频率和特性。通常，目标所反射或散射的能量可以表示为一个有效面积与入射功率密度的乘积，这个有效面积称为目标的雷达散射截面RCS。其大小反映了目标的隐身性的高低。RCS与目标的形状、大小和结构有关，与入射波的频率和特性也有关。同时，由于散射场与目标相对于入射波的姿态有关，RCS不是一个常数，而是与目标姿态角度密切相关的一种目标特性。因此，提高舰艇的雷达隐身性能，就是减少雷达能接收到的散射电磁波强度，就是减小舰艇RCS。

## 2 舰艇雷达隐身的方法

舰艇的雷达截面减缩是一种折衷性的研究,是在优点和缺点的平衡中选择。RCS 减缩的基本方法有以下几种:整形、雷达吸收材料、无源对消和有源对消。

整形是通过修整目标的表面和边缘,使目标折射或反射能量的方向偏离雷达,从而减小了目标的 RCS。当然也要注意:在各个方向上都要做到小的截面是不太可能的,在某一方向上的小散射截面可能在另一方向上会有较大的 RCS。所以,整形常常是使目标可能受威胁的那些角度区域的 RCS 减小。

雷达吸收材料是通过吸收电磁波能量来减小反射回雷达的能量。覆盖在目标表面的吸收材料在受到电磁波照射时,可以将电磁波的能量转换成热能而耗散掉,从而使目标的 RCS 值变小。但是,受吸收材料频带宽度、重量、对舰艇性能的影响等诸多因素的限制,吸收材料的应用也还是有限的。

无源对消就是在目标的回波源处引入另一个回波源去抵消它。可是对于舰艇这样复杂的目标,有上百个回波源,要对每个回波源设计一个无源对消装置是不可能的。随着频率和观察角度的微小变化,抵消作用也许反而变成加强。因此,这种方法现在还是难以实现。

有源对消的基本思想是,由目标主动产生一种辐射,其幅度与相位刚好与目标反射的能量相抵消。要实现这一过程,首先要检测出入射波的入射角、强度、频率和波形,然后确定自己对这个入射波和到达角的反射特性,最后产生合适的波形与频率,辐射出适当幅度和相位的脉冲。显然,当前的技术还实现不了。

所以,当前舰艇的隐身主要采用整形和吸收材料,使它们结合起来,在仅用整形难以达到满意效果的散射贡献点,辅助以吸收材料;反之,在不便用吸收材料的地方如强振动和耐高温的地方,用整形处理。

## 3 舰艇外形与雷达散射截面(RCS)

舰艇的外形十分复杂,它是一个很多回波源的集合体,总是含有数十个有显著贡献的“散射中心”和无数个贡献较小的散射源。它们随角度变化,各部分回波不断产生同相和反相,产生相互干涉,影响舰艇的雷达散射截面。分析舰艇的雷达散射,可以从分析舰艇外形各部分对散射的贡献入手,然后综合预估其总体的 RCS 值。不管舰艇的外形多么复杂,总可以把它分解成一些基本的形状,称它们为散射形状。何况,舰艇的发展趋势是外形越来越简洁,所以用散射形状的思路是可行的。下面我们讨论几种典型的散射形状的雷达截面特性。

### • 直二面角反射器

直两面角反射器是舰艇上最常见的结构,也是舰艇雷达散射的主要贡献方式。在传统的舰艇上,大面积的垂直舱壁与甲板、海平面形成典型的两面角反射。舰艇上任何一个竖直表面与海面都形成一个个的两面角反射器,成为散射的贡献者。

直二面角反射器(图 1)由两个垂直的截面构成。入射波在其间两次反射后返回入射方向,回波较强,其 RCS 最大值为:  $\sigma = 8\pi a^2 b^2 / \lambda^2$ , 式中  $a, b$  分别为平面的长度和宽度。参考图 1,在垂直于两面角的平面内,路程长度  $L_{ABCD} = L_{EFGH}$ , 有效反射面为  $WXYZ$ 。

当入射线沿视线时(即入射线在垂直于两面角轴线的平面内,与两面皆成 45 度角),入射线垂直于有效反射面  $WXYZ$ , 此时等效面积、RCS 为最大:

$$Ae_{max} = \sqrt{2} ab$$

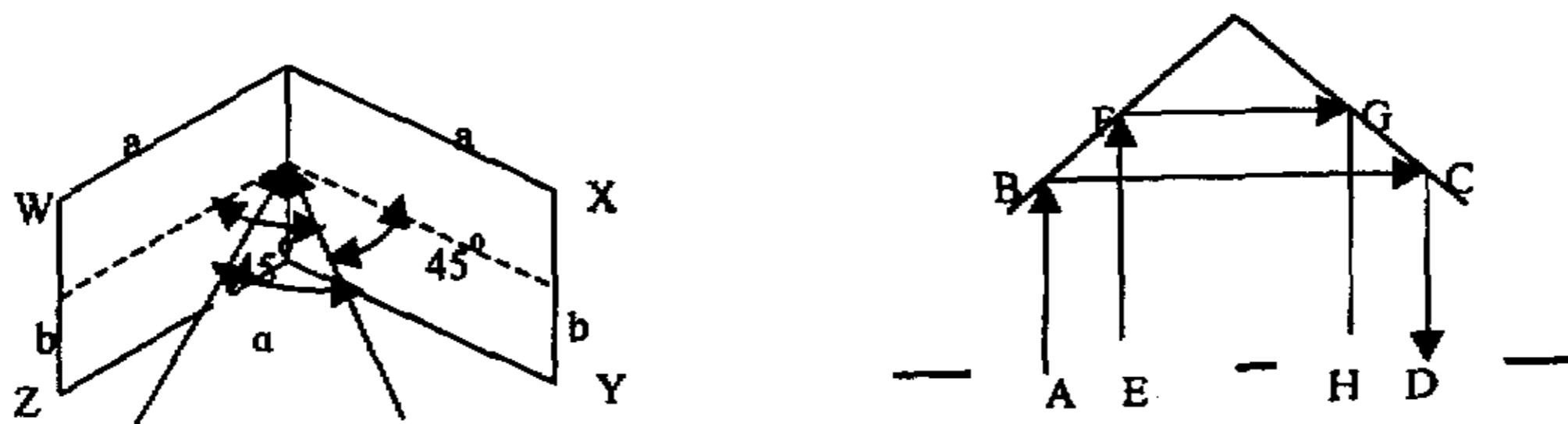
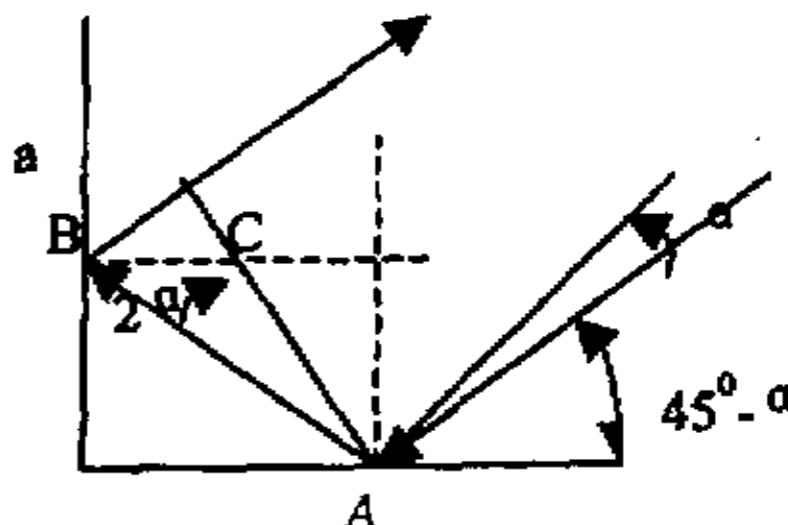


图1 直面双面角反射器几何形状示意图

$$\sigma_{\text{max}} = 4\pi Ae^2/\lambda^2 = 8\pi a^2 b^2/\lambda^2$$

当入射线在垂直两面的轴线内偏离  $P_1$  方向角时, 入射线不再垂直于有效反射面, 此时的等效面积及其算法见图 2, 公式如下所示:

$$L_{AC} = L_{AB}\cos(2\alpha)$$



#### · 方三角后向反射器

方三角后向反射器是一种回波最强的散射形状,由三个互相垂直的平面构成,其 RCS 最大值为:  $\sigma_{\max} = 12\pi a^4/\lambda^2$ , 式中  $\sigma$ —雷达散射截面;  $a$ —反射器尺寸;  $\lambda$ —入射波波长。

对于此种形状，入射波在很宽的观察角范围内，经过 3 次反射后回到入射方向，形成极强的散射回波。舰艇上特别是在上层结构中存在这种强反射形状。这些结构，即使是尺寸很小的三面垂直结构，往往也会成为舰艇 RCS 贡献的闪烁点。

## · 平板

平板是舰艇上大量存在的形状,当入射波垂直入射到平板上时,回波最强,其 RCS 值为:  
 $\sigma_{\max} = 4\pi a^2 b^2 / \lambda^2$ , 式中  $a, b$  分别为平板的长度和宽度。回波表现为直接反射,当入射波偏离垂直方向时,回波急剧减小。在舰艇上,单纯的平板并不成为雷达散射的主要贡献者,因为对平板的垂直入射总是随机的、短促的,其散射易被环境干扰所掩盖。但是,平板极易与其他表面构成三面、二面角反射器,成为散射体的重要成员。

#### · 圆柱

圆柱表面在舰艇上大量存在。当它受到垂直照射时,其散射截面取得最大值:  $\sigma = 2\pi ab^2/\lambda$ , 式中  $a, b$  分别为圆柱的半径和长度。圆柱的回波比平板小,但对于竖直于甲板平面的圆柱形状,其水平面内各角度的回波都相同,从而产生稳定的回波,容易被雷达捕捉。此外,圆柱面还可以与平面形成二面角反射器,成为有意义的回波源。因此,圆柱及其周围形状也是考察舰艇散射截面时要注意的部位。

### · 三面体

三面体是舰艇中常有的一种结构，尤其是在设计舰艇越来越考虑到隐身性的因素时更为如此。比如，现代舰艇中的上层天线，出于减小舰艇 RCS 的目的，常常将之设计成矮小的多面

体的形式,使杂乱无章的天线所辐射的电磁波减少,也减小了其 RCS。但是,就这个多面体而言,它自己在受到垂直照射时,最大的散射截面为:

$$\sigma = \frac{4}{3} \pi a^4 / \lambda^2 \quad (\text{三角形三面体})$$

$$\sigma = 15.7 a^4 / \lambda^2 \quad (\text{圆形三面体})$$

#### · 球

平板、圆柱和球分别是平坦的、单曲的和双曲的形状。对于镜面波来说,回波源于物体上的表面外法线指向雷达的点。平板的整个面都是镜面点,圆柱上有一条素线是镜面点,而球面只有一个点是镜面点。在垂直入射时,球散射截面取得最大值:  $\sigma = \pi a^2$ , 式中  $a$  为球面半径。球的散射截面较平板和圆柱都要小。

#### · 直边、曲边和尖顶

在镜面反射中,它们的镜面条件是:边缘的取向必须使其上一点的外法线指向雷达。直边缘的整条边、曲边缘的一个点是镜面点,而尖顶相当于半径为 0 的球的情形。

#### · 总结

通过对以上各种散射形状的散射特性的分析,可知若要减小象舰艇这样复杂物体的回波,最理想的形式是,仅使其有边缘、顶点而无表面,或是将舰船建造的好象一个倒置的冰淇淋一样。无疑,海军决不会启用它,但是它可认为是在海上环境中值得注意的一个有效特性,就是它的倾斜表面。即调整外形表面的取向,使之的边缘和表面法线偏离雷达的方向。

美国的“海影”号是一艘用来展示先进技术在未来海军中应用前景的演示艇,它的外表是由多个梯形和矩形平面封闭而成,上体外部完全由平面构成,侧面倾斜角 45°。这项技术极有可能已用于 DD21 驱逐舰的设计和建造中。法国的“拉斐特”则是将舰舷的倾角定为 10°。

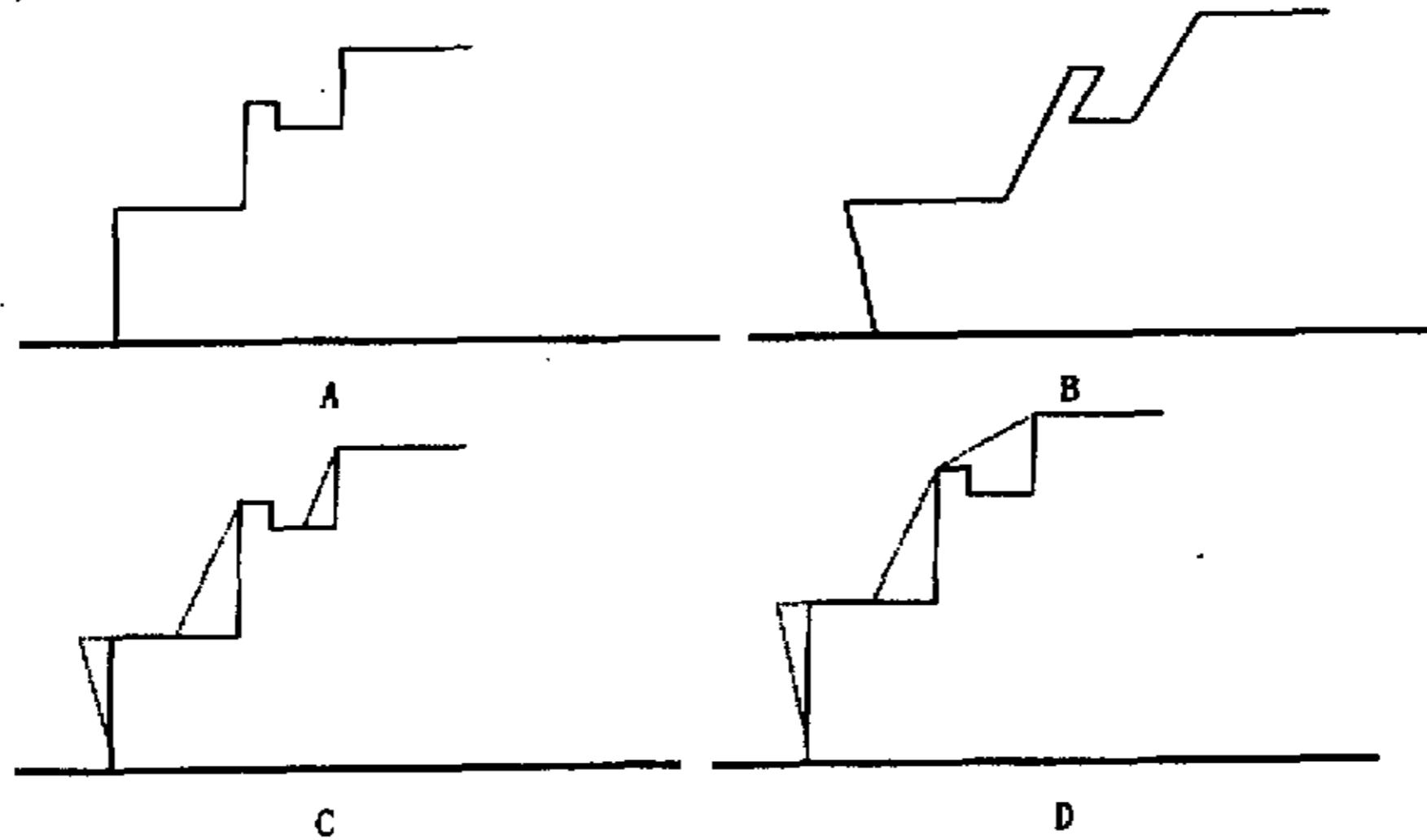


图 3 RCS 减缩的几种方案:A 原始;B 竖直表面倾斜;C 采用屏蔽网;D 屏蔽网的改进使用)

为了利用倾斜表面的优点,船的轮廓应向图 3 所示的那样设计和建造。使用屏蔽网也提供了基本相同的效果,但是可用甲板的面积变小了。而最后一种方案则是一种比较好的方式。

一艘舰艇的威胁雷达来自另一艘舰艇或空中平台,它们都接近水面。最可能的视线角集中在水平面上方的一个小角度范围内(最多 1°或 2°)。因此在垂直平面内有一个有利的角度范围。然而,所有的角度在方位角平面是等可能的,因此,在水平面内整形的目的是减小大的边射

面、弓形面和船尾回波。由于可能的视线角集中在水平面以内几度的范围内，舰艇的最佳形状是尖顶指向天空的直圆锥形。当然，从实际的观点来说，这是不合理的，但是从电磁观点，则表明了整形的目标。

#### 4 舰艇的 RCS 预估思想

舰艇的主要散射体依赖于雷达和船之间的距离。对于边射以外的其他入射，即使船体不埋没于水平线以下，也不是主要的散射体。上部结构和桅杆才是主要的散射体。每条船都有大量固定物和仪器装在顶端，比如：排气口、系缆柱、升降机等等。舰艇是一个很复杂的目标，即使它的桅杆已在水平线中消失了，其雷达天线可能有很大的雷达截面——也是最后消失的 RCS 主要贡献者。当然我们在这里可以仅从舰艇的外部大结构考虑，对于天线的辐射不加以考虑。

舰艇的雷达散射，由于其尺寸，基本上都是高频散射。也就是目标的每一部分基本上是独立的散射能量与其他部分无关。这样，就可以将整艘舰艇用各个形状的集合来表示，根据各部分的形状特征和尺寸，分别估算各部分的散射场，组合成舰艇的雷达截面散射特征。

舰艇的 RCS 预估思想为：

- 构造舰艇的计算机三维外形图。这里应以三维面的方式构造舰艇外形。对平面和规则曲面无需特别处理，而对不规则曲面，可以用平面和规则曲面片逼近。
- 舰艇形状分解。目的是分离出散射形状，寻找散射中心。因为雷达截面是与角度密切相关的目标特性，散射形状随入射角的变化也不同，因此舰艇形状分解的结果在各威胁角度是不同的。这就需要在各角度区域生成不同的舰艇外形图。
- 对分解出的各基本散射体依次进行 RCS 预估。
- 组合形成舰艇的总的 RCS 特征。一般说来，高频散射中孤立的散射源之间的相互作用可以忽略不计。

#### 5 舰艇 RCS 预估的意义

在建造一艘新的、有隐身性要求的舰艇时，设计方案能否达到隐身的要求，不可能通过实际测量来确定，而必须借助预计雷达反射的模型。国外已经或正在做了一些工作，如美国海军研究试验室正在研制 RCS 预估程序，并且包括海面影响产生的多路径效应。

根据舰艇各部分的雷达散射特性，寻找舰艇雷达散射的“闪烁点”及其在各角度区域中的变化。这样，可以对舰艇的散射状况有一个全面的了解，以便于有针对性的减小舰艇的 RCS 值。

由舰艇各角度下的 RCS 预估值，可以预知我方舰艇遇敌时的对敌雷达散射状态。另一方面，若事先了解敌舰各角度下的 RCS 预估值，遇敌时与雷达探测结果相结合，则可对敌舰的类型、距离、姿态等进行更准确的判断。

#### 参考文献

- 1 [美]克拉特 EF 等. 雷达散射截面预估、测量和减缩. 阮颖铮等译. 北京:电子工业出版社,1988
- 2 陈保辉 等. 雷达目标反射特性. 北京:国防工业出版社,1993
- 3 阮颖铮 等. 雷达截面与隐身技术. 北京:国防工业出版社,1998

## 雷达散射截面（RCS）分析培训课程

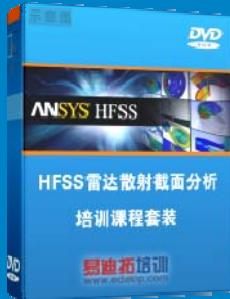
易迪拓培训([www.edatop.com](http://www.edatop.com))由数名来自于研发第一线的资深工程师发起成立，致力和专注于微波、射频、天线设计研发人才的培养，是国内最大的微波射频和天线设计人才培养基地。客户遍布中兴通讯、研通高频、国人通信等多家国内知名公司，以及台湾工业技术研究院、永业科技、全一电子等多家台湾地区企业。

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/>