

文章编号:1005-6122(2005)02-0033-05

不同吸波涂层对三维复杂目标的 RCS 影响的分析*

王 涯¹ 周乐柱¹ 谭云华² 董 硕¹

(1. 北京大学信息科学技术学院电子学系, 北京 100871; 2. 香港城市大学电子工程系, 香港)

摘要: 利用有限元-快速多极子算法(FEM-FMM)分析了三维复杂目标涂有不同吸波涂层的雷达散射截面(RCS)。以圆锥体为例, 详细计算分析了涂敷有耗各向同性、正单轴各向异性、负单轴各向异性和纳米吸波材料4种典型吸波材料对目标电磁散射特性的影响, 并首次讨论了每种吸波材料随不同涂层厚度对 RCS 的影响, 得到了最佳隐身效果的吸波材料和涂层厚度的组合。结果表明, 涂敷最佳吸波材料目标的后向 RCS 比目标没有吸波涂层时可以降低 16.6dB。

关键词: 雷达散射截面, 有限元-快速多极子算法, 雷达吸波材料, 隐身技术

Analysis of Impacts of Various RAM on RCS of 3-D Complex Targets

WANG Pai, ZHOU Le-zhu, TAN Yun-hua, DONG Shuo

(1. Department of Electronics, Peking University, Beijing 100871, China;

2. Department of Electronic Engineering, City University of Hong Kong, Hong Kong, China)

Abstract: The hybrid vector finite element method and fast multipole method(FEM-FMM) was used to calculate RCS of 3-D complex targets coated with various radar absorbing materials(RAM). For a cone as an example, this paper analyzed the impact of four kinds of canonical RAM including lossy isotropic, positive uniaxial anisotropic, negative uniaxial anisotropic and nanometer absorbing materials on electromagnetic scattering characteristics of the objects. For the first time, the effect of RCS caused by different coating RAM thickness was discussed and optimal RAM with its corresponding coating thickness were obtained to attain best stealth purpose. Numerical results showed that the back RCS can be reduced about 16.6dB compared with the uncoated objects by using optical coating RAM.

Key words: RCS, FEM-FMM, Radar absorbing materials(RAM), Stealth technology

引 言

隐身技术作为提高武器系统生存能力和突防能力的有效手段, 已被世界各国视为重点开发的军事高新技术。在隐身技术中, 主要包括整形技术和目标涂敷吸波材料两种方法来降低目标的雷达散射截面(RCS)。整形技术同时受到飞行目标空气动力学要求性能的制约, 其潜力挖掘非常有限, 而随着各种吸波材料研究的不断深入, 新型高性能的雷达吸波材料(RAM)为隐身技术提供了更广阔的发展空间, 因此, 准确快速地分析带有吸波涂层的三维复杂目标的电磁散射特性具有重要的理论意义和军事应用

背景。

在分析有涂层导体目标的电磁散射问题上主要包括高频近似法^[1,2]、边界积分方程-阻抗边界条件法(BIE-IBC)^[3]、体-表面积分方程法(V-SIEM)^[4]和矢量有限元-快速多极子法(FEM-FMM)^[5]。其中, 高频近似法和 BIE-IBC 不能分析任意厚度涂敷目标的电磁散射, 只适用于分析导体涂层非常薄的情况, 因此是一种近似的方法。V-SIEM 和 FEM-FMM 则可以严格分析任意材料涂敷、任意涂层厚度的目标电磁散射, 但采用 V-SIEM 方法的文献几乎都针对涂层是各向同性吸波材料的。文献[1]讨论了各向异性吸波材料对散射的影响, 但局限于带涂层的无

* 收稿日期:2004-03-22;定稿日期:2004-07-21

基金项目:国家自然科学基金(6007016)、教育部博士点基金(20010001037)项目资助

穷大平板;文献[2]讨论了复杂目标的散射,但局限于各向同性材料,而且采用射线法。目前还没有文献深入讨论比较各种吸波材料涂层及涂层厚度对三维复杂目标 RCS 减缩的影响。针对这一情况,本文采用矢量有限元-快速多极子方法对三维复杂目标涂有有耗各向同性、正单轴各向异性、负单轴各向异性和平板材料 4 种典型吸波材料的 RCS 进行了计算和分析比较。尽管从材料电磁参数的特性分类上说,纳米吸波材料可以归属于有耗各向同性材料,但由于其吸收电磁波的机理完全不同于普通的吸波材料以及纳米吸波材料,是目前很有发展前途的雷达吸波材料,所以单独列出。文中以锥体为例讨论了每种吸波材料的 RCS 随不同涂层厚度的影响,得到了最佳隐身效果的吸波材料和涂层厚度的组合。结果表明,目标涂敷最佳吸波材料及适当厚度时的 RCS 比没有涂层时可以降低 16.6dB。

1 FEM-FMM 的原理和公式

有限元-快速多极子算法(FEM-FMM)是研究任意形状、任意材料特性分布的复杂目标电磁散射的最有效方法之一。该方法在介质区域使用有限元而在表面使用边界积分方法,既利用了有限元法在处理复杂结构方面的通用性和灵活性,得到高度稀疏的系数矩阵,又利用了边界积分法自动满足辐射边界条件,因而可以最大限度地压缩有限元的计算区域,从而缩小计算量的优点。同时,快速多极子法(FMM)不但大大加速了矩阵与向量的相乘计算,而且也大大降低了存储量,可用于电大尺寸目标的分析。

对于如图 1 所示的任意介质分布(各向同性或各向异性)、任意几何形状的三维复杂目标,介质的电磁参数一般用相对介电常数张量 ϵ_r 和相对磁导率 μ_r 表示:

$$\begin{bmatrix} \mathbf{K}_{ll} & \mathbf{K}_{ls} \\ \mathbf{K}_{sl} & \mathbf{K}_{ss} \\ 0 & \mathbf{P}_n + \mathbf{U}_{Mx} \mathbf{T} \mathbf{V}_x + \mathbf{U}_{My} \mathbf{T} \mathbf{V}_y + \mathbf{U}_{Mz} \mathbf{T} \mathbf{V}_z \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \mathbf{a}_l \\ \mathbf{a}_s \\ \mathbf{Q}_n + \mathbf{U}_{Ex} \mathbf{T} \mathbf{V}_x + \mathbf{U}_{Ey} \mathbf{T} \mathbf{V}_y + \mathbf{U}_{Ez} \mathbf{T} \mathbf{V}_z \end{bmatrix}$$

其中, \mathbf{P}_n 、 \mathbf{Q}_n 为近区组作用矩阵, \mathbf{U} 、 \mathbf{T} 、 \mathbf{V} 分别是 FMM 产生的解聚、转移、聚合矩阵, 即远区组中元素之间的相互作用。有关矩阵元的详细表达式及计算方法可见于文献[5]。

2 数值结果与讨论

基于 FEM-FMM 原理公式, 我们编制了相应软件。

率张量 μ_r 表示:

$$\begin{aligned} \boldsymbol{\epsilon}_r &= \begin{bmatrix} \epsilon_{xx} & \epsilon_{xy} & \epsilon_{xz} \\ \epsilon_{yx} & \epsilon_{yy} & \epsilon_{yz} \\ \epsilon_{zx} & \epsilon_{zy} & \epsilon_{zz} \end{bmatrix} \\ \boldsymbol{\mu}_r &= \begin{bmatrix} \mu_{xx} & \mu_{xy} & \mu_{xz} \\ \mu_{yx} & \mu_{yy} & \mu_{yz} \\ \mu_{zx} & \mu_{zy} & \mu_{zz} \end{bmatrix} \end{aligned} \quad (1)$$

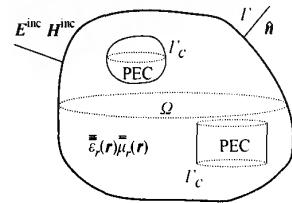


图 1 三维复杂目标示意图

以包括非均匀介质区域的最小虚拟外表面 Γ (最好选择使用介质表面) 为分界面把整个空间分为内外两个区域, 分别对应有限元和快速多极子算法求解区域。利用有限元-边界积分方程法(FEBI)^[5,6], 得到矩阵方程为:

$$\begin{bmatrix} \mathbf{K}_{ll} & \mathbf{K}_{ls} & 0 \\ \mathbf{K}_{sl} & \mathbf{K}_{ss} & \mathbf{B} \\ 0 & \mathbf{P} & \mathbf{Q} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \mathbf{a}_l \\ \mathbf{a}_s \\ \mathbf{b}_s \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ \mathbf{b}_{inc} \end{bmatrix} \quad (2)$$

其中, $\{\mathbf{a}_l\}$ 是有限元区域 Γ 内所有离散四面体边对应的电流未知系数, $\{\mathbf{a}_s\}$ 和 $\{\mathbf{b}_s\}$ 分别是有限元区域外表面上对应的电场未知系数和电流未知系数, $\{\mathbf{b}_{inc}\}$ 表示入射波项; \mathbf{K}_{ll} 、 \mathbf{K}_{ls} 、 \mathbf{K}_{sl} 、 \mathbf{K}_{ss} 和 \mathbf{B} 是有限元产生的稀疏矩阵, \mathbf{P} 、 \mathbf{Q} 是矩阵法得到的稠密矩阵。为加速矩阵与向量的相乘运算, 快速多极子算法可将 \mathbf{P} 、 \mathbf{Q} 分解成稀疏矩阵形式, 最终得到 FEM-FMM 矩阵方程:

$$\begin{bmatrix} 0 \\ \mathbf{B} \\ \mathbf{B} + \mathbf{U}_{Ex} \mathbf{T} \mathbf{V}_x + \mathbf{U}_{Ey} \mathbf{T} \mathbf{V}_y + \mathbf{U}_{Ez} \mathbf{T} \mathbf{V}_z \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \mathbf{a}_l \\ \mathbf{a}_s \\ \mathbf{b}_s \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ \mathbf{b}_{inc} \end{bmatrix} \quad (3)$$

件包, 可以计算分析含任意介质分布的三维复杂目标的电磁散射特性, 为验证程序首先计算了涂敷有耗各向同性介质导体球及各向异性介质球的 RCS, 结果如图 2、图 3 所示, 可以看出与文献[7]、[8]结果吻合, 证明了 FEM-FMM 算法的有效性和程序的正确性。

我们以圆锥体为例, 讨论不同吸波材料对其

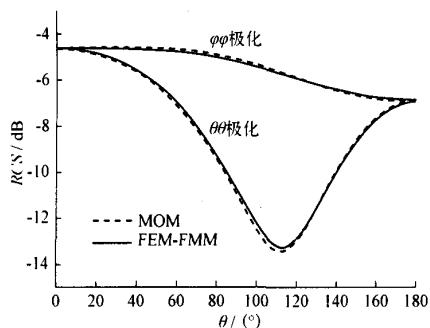


图 2 有耗各向同性介质涂敷的导体球的 RCS,
导体球半径 0.18λ , 涂层厚 0.02λ , $\epsilon_r = 1.75 - 0.3j$

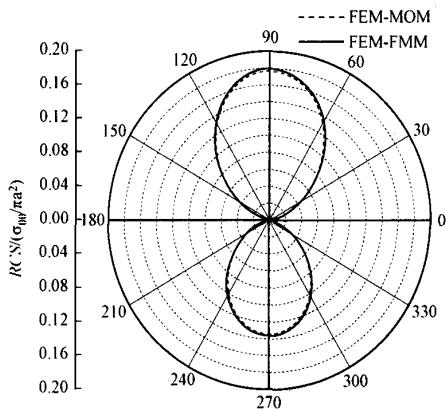


图 3 各向异性介质球的 RCS, $k_0 a = 0.5$,

$$\mu_r = 1, \epsilon_r = \begin{bmatrix} 7 & 0 & 0 \\ 0 & 5 & -j \\ 0 & -j & 5 \end{bmatrix}$$

RCS 的影响。图 4 是离散化后的圆锥体示意图, 其高为一个波长, 底面周长为 2.513 个波长, 锥轴为 z 轴, 入射波沿 $-z$ 轴方向入射。下面从不同的角度对此涂层圆锥体的 RCS 减缩进行了讨论。

2.1 涂敷有耗各向同性、正单轴各向异性和负单轴各向异性吸波材料的 RCS 比较

有耗各向同性吸波材料、正单轴各向异性吸波材料和负单轴各向异性吸波材料所采用的电磁参数如下^[1]:

有耗各向同性吸波材料:

$$\epsilon_r = 25.59 - j3.89, \mu_r = 2.16 - j1.68$$

正单轴各向异性吸波材料:

$$\epsilon_r = \begin{bmatrix} 8.19 - 1.3j & 0 & 0 \\ 0 & 8.19 - 1.3j & 0 \\ 0 & 0 & 15.59 - 8.19j \end{bmatrix}$$



图 4 离散圆锥体示意图

$$\mu_r = \begin{bmatrix} 1.39 - 0.56j & 0 & 0 \\ 0 & 1.39 - 0.56j & 0 \\ 0 & 0 & 2.16 - 1.38j \end{bmatrix}$$

负单轴各向异性吸波材料:

$$\epsilon_r = \begin{bmatrix} 25.59 - 3.89j & 0 & 0 \\ 0 & 25.59 - 3.89j & 0 \\ 0 & 0 & 8.19 - 1.3j \end{bmatrix}$$

$$\mu_r = \begin{bmatrix} 2.16 - 1.68j & 0 & 0 \\ 0 & 2.16 - 1.68j & 0 \\ 0 & 0 & 1.39 - 0.56j \end{bmatrix}$$

由于不同的涂层厚度对目标 RCS 的影响非常敏感, 因此首先讨论涂层厚度对 RCS 的影响。搜索雷达和跟踪雷达的工作波段通常在 2 ~ 12GHz, 对应波长为 25 ~ 150mm, 因此工程实际应用时吸波涂层的范围一般在 $0.01\lambda \sim 0.12\lambda$, 若涂层再厚会造成目标重量增加, 使飞行性能严重下降, 而且涂层太厚本身也是不切实际的, 我们讨论的厚度也限于这一范围。图 5 是后向 RCS 随不同涂层材料及涂层厚度的变化曲线, 涂层厚度为零也就是目标为导体的情况。从图中可以得到每种吸波材料有最小后向 RCS 对应的涂层厚度, 总结到表 1 里; 并且发现负单轴各向异性吸波材料在几乎任何相同涂层厚度下都明显好于各向同性和正单轴各向异性两种材料, 这与文献[1]以平板为例得到负单轴各向异性吸波材料优于正单轴各向异性吸波材料的结论是完全一致的。图 6 是 3 种材料在各自最佳涂层厚度下的 RCS 曲线, 可以看出, 尽管负单轴各向异性吸波材料后向 RCS 比没有涂层时的 RCS 降低 16.6dB, 但前向 RCS 却增大了 4.7dB。

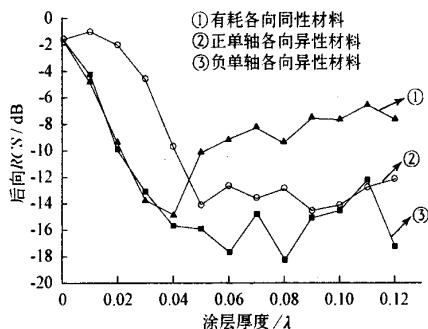


图5 后向 RCS 随不同材料及涂层厚度的变化曲线

表1 与不同吸波材料最小后向 RCS 对应的涂层厚度

吸波材料	最佳涂层厚度(波长)	反向 RCS (dB)	比未涂层 RCS 低 dB 数
有耗各向同性	0.04	-14.86	13.25
正单轴各向异性	0.09	-14.52	12.91
负单轴各向异性	0.08	-18.23	16.6

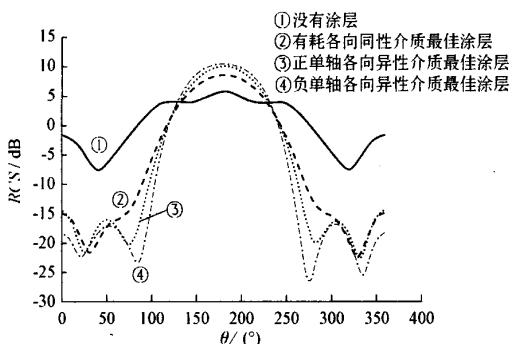


图6 3种材料在各自最佳涂层厚度下的 RCS 曲线

2.2 变化负单轴各向异性吸波材料主轴方向对 RCS 的影响

上面提到的负单轴各向异性材料主轴在 z 轴, 平行于圆锥锥尖方向; 现改变材料主轴方向为垂直于锥尖方向进行计算。此时, 电磁参数为:

$$\boldsymbol{\epsilon}_r = \begin{bmatrix} 8.19 - 1.3j & 0 & 0 \\ 0 & 25.59 - 3.89j & 0 \\ 0 & 0 & 25.59 - 3.89j \end{bmatrix}$$

$$\boldsymbol{\mu}_r = \begin{bmatrix} 1.39 - 0.56j & 0 & 0 \\ 0 & 2.16 - 1.68j & 0 \\ 0 & 0 & 2.16 - 1.68j \end{bmatrix}$$

图7是在材料不同主轴方向下后向 RCS 随涂层厚度的变化, 可以看出, 主轴方向垂直于圆锥锥尖方向的负单轴各向异性吸波材料在厚度为 0.04λ 下就得到最大的 RCS 减缩(-18.33dB), 而且与主方数据

轴方向平行锥尖方向的负单轴各向异性吸波材料的 RCS 减缩效果基本相当, 而后者最佳隐身效果需要 0.08λ。因此, 在吸波材料要求“薄、轻、宽、强”的标准下, 将材料的主轴方向垂直于锥尖方向或许是更佳的选择。

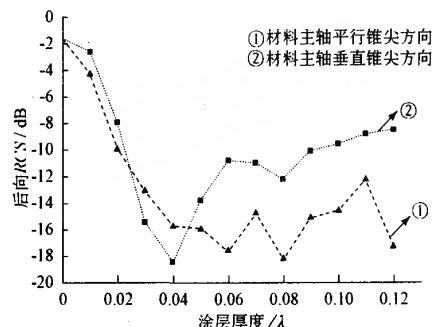


图7 材料不同主轴方向下后向 RCS 随涂层厚度的变化

2.3 纳米吸波材料与负单轴各向异性吸波材料的对比

纳米材料是指材料组成成分的特征尺寸在纳米量级(1~100nm)的材料。由于纳米吸波材料具有频带宽、质量轻、厚度薄等优点, 因此是近几年来吸波材料研制领域中的热点, 目前, 美、俄、法、日等国家都把纳米吸波材料作为新一代雷达吸波材料进行探索和研究。我们也对它进行了讨论, 所选电磁参数为^[9]:

$$\text{纳米吸波材料: } \epsilon_r = 8.0 - j3.5 \quad \mu_r = 1$$

表2总结了纳米吸波材料的最佳涂层厚度和比没有涂层时的 RCS 降低的 dB 数, 并与负单轴各向异性吸波材料进行了对比, 可以看出, 纳米吸波材料与负单轴各向异性吸波材料的 RCS 减缩基本相当。

表2 纳米吸波材料与负单轴各向异性吸波材料的比较

吸波材料	最佳涂层厚度(波长)	反向 RCS (dB)	比未涂层 RCS 低 dB 数
纳米吸波材料	0.08	-17.96	16.35
负单轴各向异性	0.08	-18.23	16.6

图8是负单轴各向异性吸波材料和纳米吸波材料在各自最佳涂层厚度下的 RCS 曲线, 发现尽管两种材料的后向 RCS 都大大减小了, 但前向 RCS 却增大了, 纳米吸波材料的前向 RCS 比没有涂层的增大了 5.78dB。

3 结论

本文分析了不同的吸波材料涂敷和不同的涂层

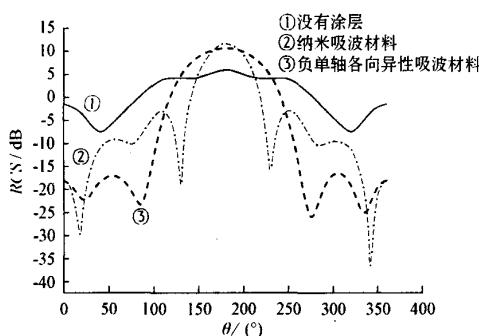


图 8 纳米吸波材料和负单轴各向异性吸波
在各自最佳涂层厚度下的 RCS 曲线

厚度对目标 RCS 产生的影响。通过选择最佳吸波材料和相应的最佳涂层厚度,能够显著降低目标的后向 RCS,实现了很好的隐身效果。本文的数值计算分析虽然是针对特定三维目标和特定的材料特性作出的,但研究方法和讨论结果对实际三维复杂目标的隐身研究有一定的指导意义和参考价值。

参 考 文 献

- [1] Yang Helin, Liu Wu, Lu Shu. EM scattering by rectangular conducting flat plates with thin uniaxial anisotropic materials. *CEEM2000 Proceedings Environmental Electromagnetics*, 2000, 213~216
 - [2] Ruan Y Z, Du H P. RCS evaluation of complex objects coated with radar absorbing materials using the complex ray method. *Proc IEEE*, 1992, 424~427
 - [3] Hu Jun, Nie Zaiping, et al. Computation of the RCS of 3-D coating conductor with arbitrary shape by using FMM and IBC. *2000 proceedings of Antennas Propagation and EM Theory*, 2000, 289~292
 - [4] Lu Cai Cheng. Multilevel fast multipole algorithm for electromagnetic scattering from conducting objects with material coating. *Antennas and Propagation Society International Symposium*, 2001, 770~773
 - [5] Tan Yunhua, Zhou Lezhu, Zhang Yaojiang. Analysis of electromagnetic scattering from 3-D conductors coated with anisotropic inhomogeneous materials using the FEM-FMA. *2002 3rd International Conference on Microwave and Millimeter Wave Technology Proceedings*, 2002
 - [6] Sheng Xin Qing, Jin J M, Song J M, et al. On the formulation of hybrid finite-element and boundary-integral method for 3D scattering. *IEEE Trans Antennas Propagat*, 1998, 46(3): 303~311
 - [7] Medgyesi-Mitschang L N, Paunam J M, Gedera M B. Generalized method of moments for 3-D penetrable scatterers. *Opt Soc Am A*, 1994, 11(4): 1383~1398
 - [8] Roberto D Graglia, Piergiorgio L E Uslenghi, Rodolfo S Zich. Moment method with isoparametric elements for 3-D anisotropic scatterers. *Proc IEEE*, 1989, 77(5): 750~760
 - [9] 焦桓, 罗发, 周万城. Si/C/N 纳米粉体的吸波特性研究. *无机材料学报*. 2002, (5): 595~599
- 王 涣** 男,1979 年出生于山东青岛,于 2002 年在电子科技大学电子工程学院获得工学学士学位,同年保送至北京大学电子学系直接攻读博士学位,主要研究方向是计算电磁学中频域、时域的高效快速算法及其应用。
- 周乐柱** 男,1944 年出生于贵州贵阳,北京大学教授、博士生导师,CIE 会士,IEEE 高级会员。1968 年北京大学物理系物理专业本科毕业,1981 年北京大学电子学系电子物理专业研究生毕业,获理学硕士学位,毕业后留校任教至今。1991 年 8 月~1993 年 2 月在英国伦敦大学学院作高级访问学者。1994 年 10 月~1997 年 1 月在英国曼彻斯特科技大学作研究教授。长期从事电磁场理论及微波技术方面的科研和教学工作,已发表论文、出版专著和教材等几十篇。当前主要研究方向为计算电磁学及其应用(散射、天线、微波器件),通信中的电磁场问题。
- E-mail: lz zhou @ sunrise. pku. edu. cn
- 谭云华** 男,1973 年出生于湖北长阳,分别于 1995 年和 1998 年在武汉大学获得无线电物理专业的学士和硕士学位,2003 年在北京大学物理电子学专业获得博士学位,目前在香港城市大学电子工程系从事科研工作。主要研究方向包括计算电磁学,通信中的电磁场问题等。
- 董 硕** 男,1981 年出生于北京,2003 年在北京大学电子学系获得学士学位,同年保送为北京大学电子学系硕士研究生,研究方向为计算电磁学及天线、散射应用。

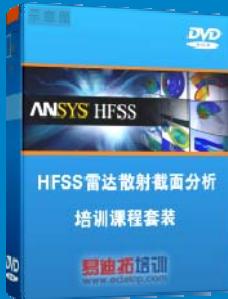
雷达散射截面 (RCS) 分析培训课程

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/>

专注于微波、射频、天线设计人才的培养

易迪拓培训

官方网址: <http://www.edatop.com>

淘宝网店: <http://shop36920890.taobao.com>