

小型预警机主雷达天线的机体散射¹

马凤国 高飞 刘其中 焦书喜

(西安电子科技大学天线与电磁散射研究所 西安 710071)

摘要 该文以一致性几何绕射理论(UTD)为基础,利用新提出的叠加模型对小型预警机主雷达相控阵天线的机体散射(包括螺旋桨散射)进行了分析,定量得出了这些散射的特点和变化规律,为天线装机后辐射性能预测与布局优化提供了理论依据。

关键词 小型预警机,螺旋桨,相控阵天线,一致性几何绕射理论,机体散射,叠加模型

中图号 TN95, TN820

A

1 引言

小型预警机造价便宜、技术难度小、投资风险小、研制周期短、作战配属灵活,在一定的战区区域内,可以有效地发挥战役要求的通信、控制、指挥和情报(C³I)中心的作用。小型预警机机体小,主雷达采用先进的相控阵天线。这种由裂缝波导或印刷振子构成的面天线阵,位置靠近机身,天线辐射将受到机体的散射效应影响,如机体或机翼对天线射线的绕射和遮挡,在一些扫描角度上,扫描波束的主波瓣可能形成的对某些散射结构的直接照射,使装机后的天线空间辐射方向图有较大的畸变,从而影响雷达性能。由于天线装机后难以改变,一旦装机位置不合理会造成极大的经济和战略损失,因此在装机前对天线受到的机体散射效应影响做出定量的估计,并据此提出天线安装位置的优化设计方案,是非常必要的!

预警雷达一般工作在厘米波段,相对于飞机尺寸来讲,这时的散射属于高频散射的范畴。解决这类问题最有效的方法是高频近似法,如 GO/GTD 方法。利用 UTD 研究飞行器等一类复杂散射体的高频散射,可采取 Michigan 大学的组合方法(Combination Method)。然而,小型预警机主雷达散射有其特殊性,首先小型预警机一般都是螺旋桨飞机,旋转的螺旋桨给机体散射带来了更多的复杂性,本文采用与机翼成一定角度的长矩形条带模拟螺旋桨。其次相对于机体尺寸,主雷达天线具有大口径特性,并且在应用中具有扫描特性。如何对大尺寸的天线口面应用 UTD,是多年来高频散射的一个重要问题。传统的方法是将天线直接等效为位于天线相位中心的点源,该点源具有与原天线同样的方向图,显然,对于辐射单元相位幅度均不相同的大口径天线来说,计算精度是较低的,本文则是将组成天线阵的每一个单元单独作为一个点源来考虑,考虑天线在扫描或不扫描时馈电的相位和幅度分布,分别计算这些点源在各自实际位置的散射场量,最后进行矢量叠加获得散射效应的结果。

利用以上方法,计算了某小型预警机在飞机机翼位于上中下位置和天线位于不同高度以及主波束在不同扫描角时,主雷达垂直和水平方向的辐射方向图,其结果与文献或实验数据吻合较好。根据计算数据,分析了小型预警机大口径相控阵天线的机体散射效应,优化了天线架设位置设计。

2 计算模型和算法

利用 UTD 求解飞机散射效应,首先要建立飞机和天线等效模型。小型预警机的主要结构可分解为 6 部分:机身、机翼(包括垂直尾翼与水平尾翼)、发动机、螺旋桨、起落架吊舱及机载雷达天线系统。为了比较精确地预测相控阵雷达的机体散射效应,又要使计算机的计算量

¹ 2000-04-21 收到, 2000-12-19 定稿

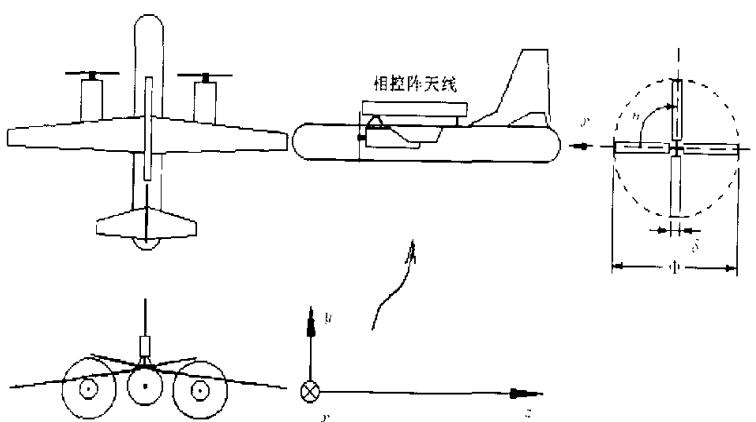


图1 飞机及螺旋桨的等效模型和统一坐标系

和存储量不至于太大，将系统的这几个主要结构进行以下等效：(1) 机身等效为理想导电圆柱加头尾半球；(2) 机翼等效为平面屏；(3) 发动机和起落架吊舱等效为空心理想导电圆柱，(4) 螺旋桨等效为一个旋转角度可变的长矩形理想导体条。等效飞机模型和统一坐标系如图1，螺旋桨参数中， δ 为桨叶叶片宽度， Φ 为旋转半径， θ 为叶片与 X 轴的夹角。

小型预警系统的主雷达天线是背负的 $M \times N$ 单元平面波导裂缝或印刷振子天线阵，在水平扫描方向形成的 Taylor 方向图，在垂直方向形成扇形方向图。由于 UTD 中求解典型问题的辐射源为点源或一维线源，不能直接应用于大口面相控阵天线，故传统上天线部分等效为位于天线口面几何中心（同时也是相位中心）的具有实际天线自由空间理想方向图的点源（点源模型：Point Source Model）。由于天线尺寸，尤其是沿飞机纵向的尺寸很大，相对于小型预警机的机体来说，这种等效必然会带来一定的误差，因此，我们修正了这种普遍采用的点源模型，而将构成天线的每一个单元等效为一个点源来考虑，那么整个天线阵的散射场就是每个单元的散射场的矢量叠加（叠加模型：Additive Model）。而每一个单元的理想方向图和馈电的相位和幅度分布，则可以通过预处理来得到，当天线处于扫描的状态时，只需要通过改变预处理中的相位分布部分，就可以很方便地得到扫描时飞机对天线阵的散射效应。

任意一个辐射单元在某一远场点的散射场为出射射线经飞机结构的反射、绕射或直射所形成的分场量的矢量叠加，

$$E = u^i E^i + u^{pr} E^{pr} + u^{pd} E^{pd} + u^{sr} E^{sr} + u^{sd} E^{sd} + u^{lr}(\theta) E^{lr}(\theta) + u^{ld}(\theta) E^{ld}(\theta) \quad (1)$$

式中 E^i 为直达场， E^{pr} 为机翼平板反射场， E^{pd} 为边缘绕射场（包括机翼直边缘绕射场、发动机曲边缘绕射场和一些必须的二次绕射场）， E^{sr} 和 E^{sd} 为机身及发动机的曲面反射场和绕射场， E^{lr} 和 E^{ld} 为螺旋桨的反射场和绕射场， u 为各分场量的相应射线寻迹和遮挡判断因子，当指向远场点的相应射线存在并且不被飞机机体部件遮挡时，其值为 1，否则为 0，其中与螺旋桨有关的量随螺旋桨的角度发生变化。考虑到各个分量场计算采用各自方便的局部坐标系，要进行空间矢量叠加，必须先将这些分量场在一个统一坐标系中进行分解，然后再进行统一的矢量叠加。我们选定飞机模型坐标系 (x, y, z) 为统一坐标系（图 1），那么 (1) 式写成矩阵

形式即为

$$\begin{bmatrix} E_x \\ E_y \\ E_z \end{bmatrix} = u^i \begin{bmatrix} E_x^i \\ E_y^i \\ E_z^i \end{bmatrix} + u^{pr} \begin{bmatrix} E_x^{pr} \\ E_y^{pr} \\ E_z^{pr} \end{bmatrix} + u^{pd} \begin{bmatrix} E_x^{pd} \\ E_y^{pd} \\ E_z^{pd} \end{bmatrix} + u^{sr} \begin{bmatrix} E_x^{sr} \\ E_y^{sr} \\ E_z^{sr} \end{bmatrix} \\ + u^{sd} \begin{bmatrix} E_x^{sd} \\ E_y^{sd} \\ E_z^{sd} \end{bmatrix} + u^{lr} \begin{bmatrix} E_x^{lr} \\ E_y^{lr} \\ E_z^{lr} \end{bmatrix} + u^{ld} \begin{bmatrix} E_x^{ld} \\ E_y^{ld} \\ E_z^{ld} \end{bmatrix} \quad (2)$$

对于叠加模型, 这样的一个计算只是一个单元的散射场, 实际天线总的散射效应是各个单元散射效应的再次矢量叠加, 即:

$$E^t = \sum_{m=1}^M \sum_{n=1}^N E(m, n) \cdot F(m, n) \quad (3)$$

式中 E^t 为场点接收的总场, $E(m, n)$ 是天线阵第 m 行第 n 列单元的散射总场, 而 $F(m, n)$ 是第 m 行第 n 列单元的馈电相位和幅度。图 2 为预测主雷达相控阵天线的机体散射效应计算软件的流程图。

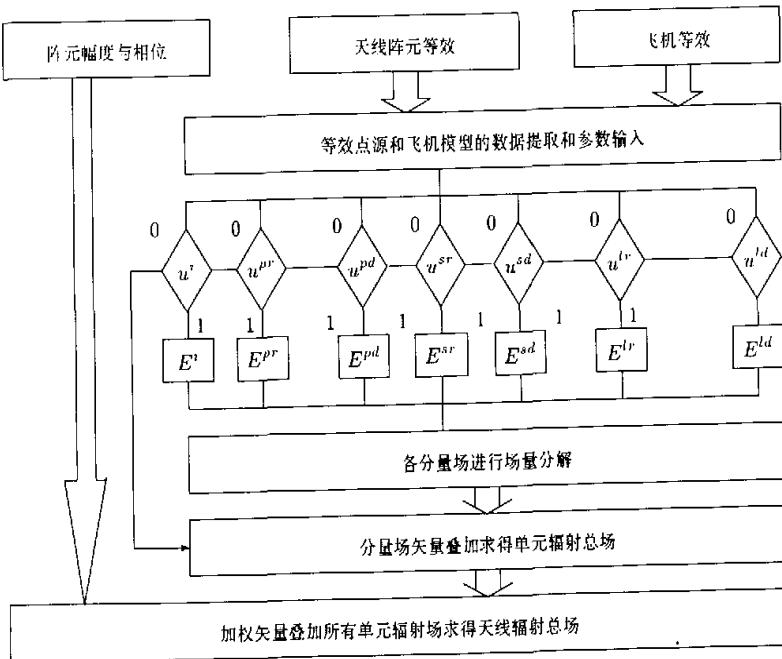


图 2 机体散射效应计算流程图

3 计算结果和分析

利用上述算法, 分别计算了小型预警机不同剖面和不同扫描角的散射方向图, 其中相控阵天线型式为 10(竖直)×192(水平) 单元平面波导裂缝阵主瓣, 尺寸为 $105\lambda \times 9\lambda \times 7\lambda$, 几何中心位于机身中轴线距机头 117λ 的位置, 载机为 X 型国产中型螺旋桨运输机, 机身全长 285λ ,

翼展 345λ ，螺旋桨参数为： $\delta = 5.8\lambda$, $\Phi = 35\lambda$ 。图 3 为具有单极子方向图的点源在 X 型电子干扰飞机上的方向图，其中 1# 天线位于机身 15 框区中轴线下部，6# 天线位于机身 70 框区下部偏 x 轴 45° ，并与利用微波暗室缩比模型实测的结果进行了对比，在 $0-360^\circ$ 的范围内，计算预测的结果与暗室的实测结果相差平均不到 $3-5\text{dB}$ ，表明了阵元辐射场的精度，而图 4 与文献 [3] 结果的对比，说明了上述算法预测大口面相控阵天线散射的正确性。

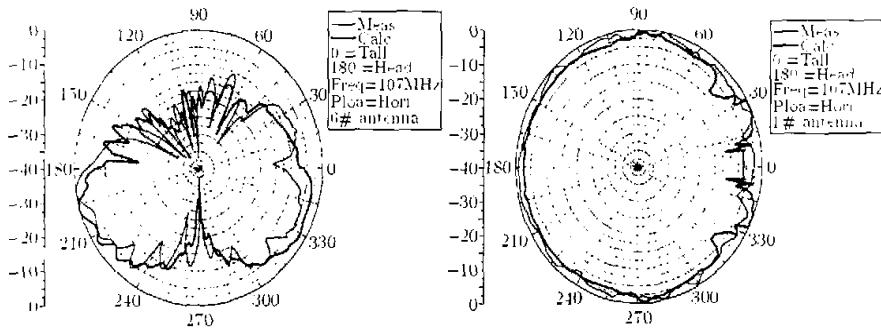


图 3 X 型电子战飞机 6# 天线俯仰面和 1# 天线水平面方向图预测和实测对比

从获得的方向图计算结果可以看出：

(1) 机体对天线水平扫描面方向图的影响随着天线架设高度的降低而增强(图 4, 图 5, 图 6)。具体来说，螺旋桨及机翼、机体头尾的散射使天线方向图副瓣提高明显，其中高度最低时的 12λ 近区副瓣提高 5dB ，而远区副瓣最高可提高 $5-10\text{dB}$ ，甚至有超过近区副瓣电平的远区副瓣产生。随着架设高度的增加，当天线高度大于螺旋桨桨叶最高高度时，散射效应明显减小，在我们所考察的几个高度中，架高 24λ 以上对于近区副瓣的影响已很小，主要只是在远区副瓣区域有 $5-10\text{dB}$ 的电平提高，已构不成对天线探测和跟踪性能的根本影响。

(2) 机体散射对天线垂直面影响很大，垂直面主要的散射机制为机翼散射，螺旋桨影响较小(图 4, 图 7, 图 8)。具体来说，机翼对高空副瓣形成波动干扰，最大高空副瓣电平峰值增加可达 10dB ，平均 5dB 左右，且随着高度增加影响减弱，而低空副瓣由于机翼阻挡电平大幅度降低。天线架高 $12-18\lambda$ 时主瓣打在机翼上，主瓣电平叠加使得主瓣产生畸变，而架高 18λ 以上仅有副瓣照射到机翼上，此时主瓣基本不受散射影响。

(3) 从图 5- 图 8 可以看出，螺旋桨位于静态某一位置对天线辐射的影响不大，主要是在水平方向远区副瓣产生一些散射波动，而对主瓣和近区副瓣以及垂直面方向图的影响不大。当天线底边高度低于螺旋桨(如天线架高为 12λ 和 18λ 的两种布局方案)的最高高度($h = 35\lambda$)时，某些扫描角度可能会导致扫描波束主瓣被螺旋桨遮挡，这表示了主瓣扫描在螺旋桨上的最坏情形，是要坚决避免的。旋转的螺旋桨将增大对天线的散射，并出现对散射的调制效应。

(4) 图 9 和图 10 可以看出机翼位置对天线辐射的影响，显然上单翼飞机机翼距离最近，对天线辐射影响最大，而中单翼和下单翼飞机则要好一些，副瓣电平相差最大达 $3-5\text{dB}$ ，因此在可能的情况下，小型预警机应尽量采用下单翼飞机做载机。

综合以上几点，我们认为：小型预警机主雷达的辐射受机翼影响较大，螺旋桨影响较小，因此基于天线辐射性能的考虑，天线布局方案应在尽可能的范围内，尽量选用下单翼飞机，加高天线的架设高度，使其远离机翼和螺旋桨，对于我们所计算的飞机和天线模型，垂直面主波束不扫描时最低要求是天线底边不得低于螺旋桨桨叶的最高高度，此时天线下边缘最低架高 22λ ，垂直面主波束 $\pm 2.5^\circ$ 扫描时，要相应提高天线高度，此时天线下边缘最低架高 29λ 左右。

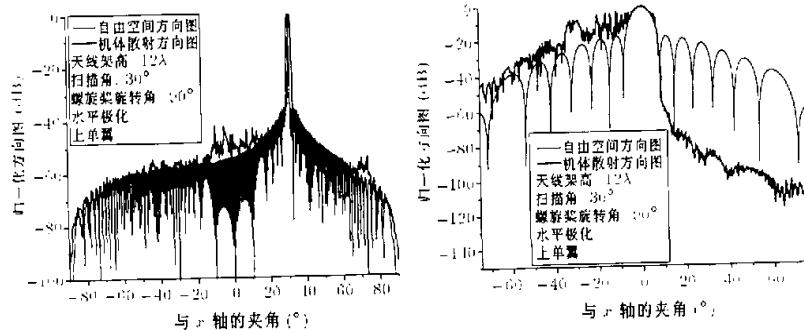


图 4 X型小型预警机水平面和垂直面散射方向图与理想方向图对比

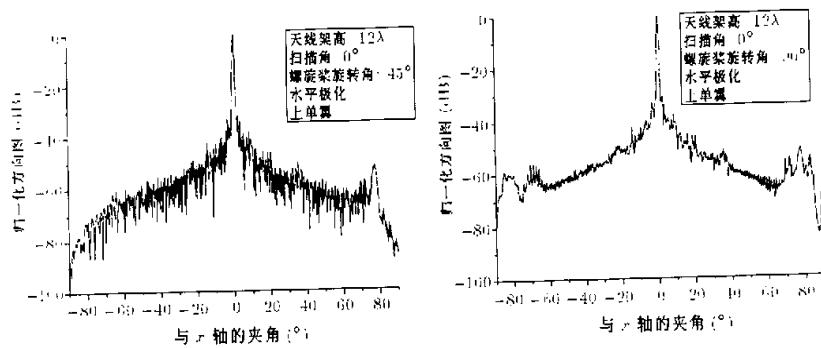


图 5 X型小型预警机天线架高 12λ 时的水平面散射方向图

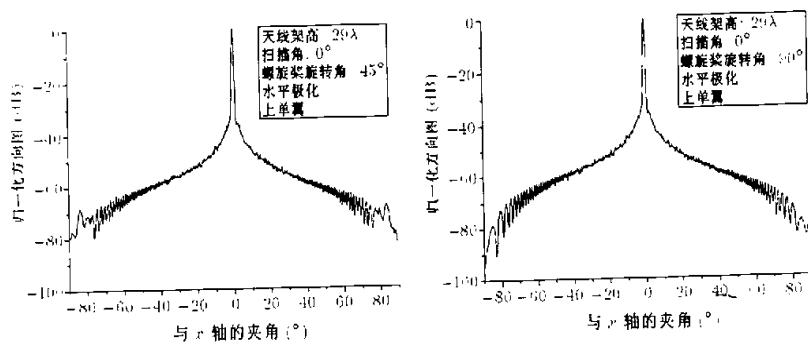


图 6 X型小型预警机天线架高 29λ 时的水平面散射方向图

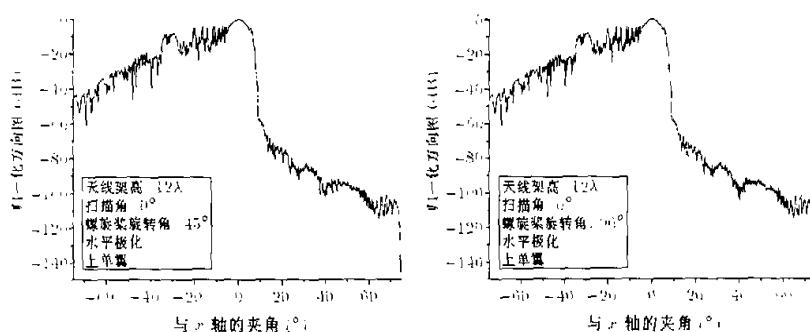


图 7 X型小型预警机天线架高 12λ 时的垂直面散射方向图

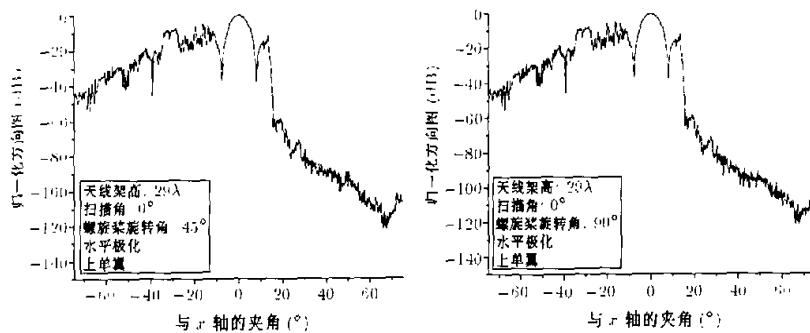


图 8 X型小型预警机天线架高 29λ 时的垂直面散射方向图

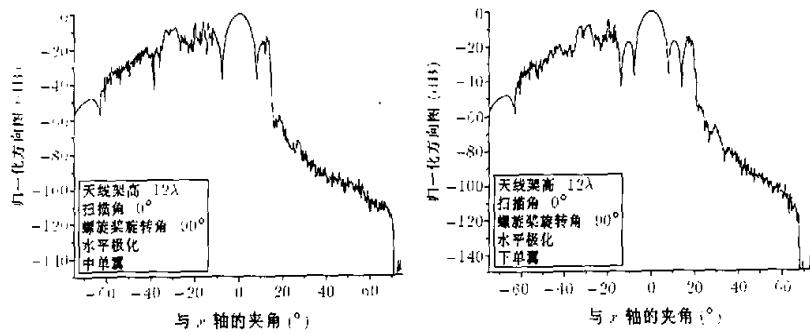


图 9 中单翼和下单翼布局天线架高 12λ 时的垂直面散射方向图

4 结 论

基于UTD理论的小型预警机主雷达机体散射研究有着不同于一般天线机体散射研究的特点，首先要考虑这种天线系统的大口面扫描特性，利用叠加模型，其次要采用比较精确的飞机模型，计算机翼、发动机甚至螺旋桨等的影响，并计入尽量多的散射射线，才能提高计算的有效性和精确度。

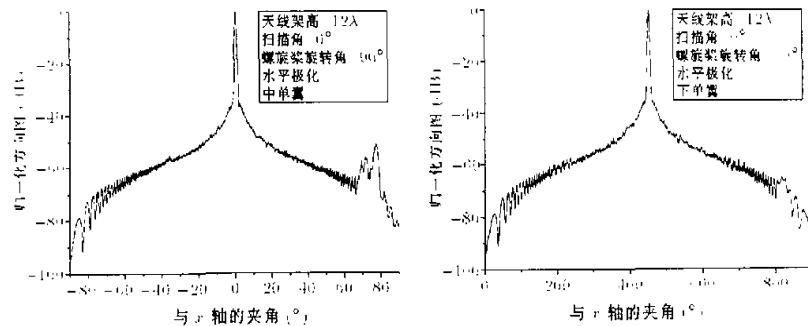


图 10 中单翼和下单翼布局天线架高 12λ 时的水平面散射方向图

参 考 文 献

- [1] J. B. Keller, Geometrical theory of diffraction, *J. Opt. Soc. Am.*, 1962, 52(2), 116-130.
- [2] R. G. Kouyoumjian, P. H. Pathak, A uniform theory of diffraction for an edge in a perfectly conducting surface, *Proc. IEEE*, 1974, 62(11), 1448-1461.
- [3] B. N. Suresh Babu, T. P. Guella, Effect of antenna aircraft interaction on phased-array radar performance, *IEEE National radar conference*, Bedford, 1993, 102-106.
- [4] 汪茂光, 几何绕射理论, 西安, 西安电子科技大学出版社(第二版), 1994 年 12 月, 第 2, 4, 5 章.
- [5] 马凤国, 刘其中, 等, 大口面天线机体散射效应分析, *微波学报*, 1999, 15(3), 238-243.

SCATTERING OF THE MAIN RADAR ANTENNA FIXED
ON MINI-AWACS

Ma Fengguo Gao Fei Liu Qizhong Gong Shuxi

(Research Inst. of Antenna and EM Scattering, Xidian University, Xi'an 710071, China)

Abstract Based on the Uniform Geometric Theory of Diffraction (UTD), the scattering of aircraft including propellers for the phased-array of the main radar is analysed by using of a new additive model of antenna. The variety and characteristic of the scattering is presented quantitatively. It can be used as a theoretical basis to dope out the radiation performance and optimize the arrangement of antennas.

Key words Mini-AWACS, Propeller, Phased-Array, UTD, Scattering of Aircraft, Additive Model

马凤国: 男, 1971 年生, 博士生, 主要研究方向为电磁场理论的工程应用及电磁兼容技术.

高飞: 男, 1973 年生, 博士生, 主要研究方向为电磁场理论的工程应用及天线技术.

刘其中: 男, 1938 年生, 教授, 博士生导师, 主要研究领域包括电磁理论及应用、天线宽带和小型化技术、天线的计算机辅助设计技术等等, 并发表有多本专著.

龚书喜: 男, 1958 年生, 教授, 主要研究领域为电磁场理论及应用.

如何学习天线设计

天线设计理论晦涩高深，让许多工程师望而却步，然而实际工程或实际工作中在设计天线时却很少用到这些高深晦涩的理论。实际上，我们只需要懂得最基本的天线和射频基础知识，借助于 HFSS、CST 软件或者测试仪器就可以设计出工作性能良好的各类天线。

易迪拓培训(www.edatop.com)专注于微波射频和天线设计人才的培养，推出了一系列天线设计培训视频课程。我们的视频培训课程，化繁为简，直观易学，可以帮助您快速学习掌握天线设计的真谛，让天线设计不再难…



HFSS 天线设计培训课程套装

套装包含 6 门视频课程和 1 本图书，课程从基础讲起，内容由浅入深，理论介绍和实际操作讲解相结合，全面系统的讲解了 HFSS 天线设计的全过程。是国内最全面、最专业的 HFSS 天线设计课程，可以帮助你快速学习掌握如何使用 HFSS 软件进行天线设计，让天线设计不再难…

课程网址: <http://www.edatop.com/peixun/hfss/122.html>

CST 天线设计视频培训课程套装

套装包含 5 门视频培训课程，由经验丰富的专家授课，旨在帮助您从零开始，全面系统地学习掌握 CST 微波工作室的功能应用和使用 CST 微波工作室进行天线设计实际过程和具体操作。视频课程，边操作边讲解，直观易学；购买套装同时赠送 3 个月在线答疑，帮您解答学习中遇到的问题，让您学习无忧。

详情浏览: <http://www.edatop.com/peixun/cst/127.html>



13.56MHz NFC/RFID 线圈天线设计培训课程套装

套装包含 4 门视频培训课程，培训将 13.56MHz 线圈天线设计原理和仿真设计实践相结合，全面系统地讲解了 13.56MHz 线圈天线的工作原理、设计方法、设计考量以及使用 HFSS 和 CST 仿真分析线圈天线的具体操作，同时还介绍了 13.56MHz 线圈天线匹配电路的设计和调试。通过该套课程的学习，可以帮助您快速学习掌握 13.56MHz 线圈天线及其匹配电路的原理、设计和调试…

详情浏览: <http://www.edatop.com/peixun/antenna/116.html>



关于易迪拓培训:

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，一直致力于专注于微波、射频、天线设计研发人才的培养；后于 2006 年整合合并微波 EDA 网(www.mweda.com)，现已发展成为国内最大的微波射频和天线设计人才培养基地，成功推出多套微波射频以及天线设计经典培训课程和 **ADS**、**HFSS** 等专业软件使用培训课程，广受客户好评；并先后与人民邮电出版社、电子工业出版社合作出版了多本专业图书，帮助数万名工程师提升了专业技术能力。客户遍布中兴通讯、研通高频、埃威航电、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。

我们的课程优势:

- ※ 成立于 2004 年，10 多年丰富的行业经验
- ※ 一直专注于微波射频和天线设计工程师的培养，更了解该行业对人才的要求
- ※ 视频课程、既能达到了现场培训的效果，又能免除您舟车劳顿的辛苦，学习工作两不误
- ※ 经验丰富的一线资深工程师主讲，结合实际工程案例，直观、实用、易学

联系我们:

- ※ 易迪拓培训官网: <http://www.edatop.com>
- ※ 微波 EDA 网: <http://www.mweda.com>
- ※ 官方淘宝店: <http://shop36920890.taobao.com>