

相控阵用铁氧体天线单元综合性能研讨

胡雪梅

工作单位:航天总公司二院23所八室

通讯地址:北京142信箱203分箱8号 邮编:100054

摘要:本文针对相控阵天线用铁氧体天线单元在天馈系统中的作用及其本身的研究特点,提出这类器件的性能应进行综合分析和设计,并提出了一种对测试数据的统计处理方法,指出应从系统及雷达总体性能的角度出发去进行这类器件的研制。

关键词:相控阵 天线单元 铁氧体 移相器

1 概述

相控阵雷达由于其优越的快速电扫功能,受到了国内外普遍地重视。近十几年来在各类武器系统、民用系统中进行了广泛的研究并有许多雷达已投入装备或实用。相控阵雷达的关键技术是其相控阵天线的相位电扫技术,而组成相控阵天线的主要器件是天线单元。一部相控阵雷达中使用的天线单元少则数个、上百,多则数千、上万。因此,天线单元的性能及研制成本便极大地影响到雷达总体的性能及成本。为此,美国、俄罗斯、法国等国家均投入了很大力量对这一技术进行研究,如美国爱国者武器系统使用的数千支X波段非互易铁氧体天线单元、俄罗斯C-300武器系统使用的上万支X波段圆极化铁氧体天线单元、俄罗斯某机载雷达使用的数千支X波段双模互易铁氧体天线单元等等。近十年来,我国在相控阵雷达研究中投入了大量的力量,许多单位相继开展了这一技术的研究,但由于相控阵雷达的工程化研究在我国还未能形成规范、合理的系统、分系统、元器件各级的设计程序及思想,在进行如此庞大的技术设计及工程制造时,有时指标分配、技术要求不完全合理,研制出的产品虽然造价很高,但却不能全面地满足系统的实际需要。作者根据工作中的一些实际体会以及对外交流中了解到的一些情况,针对目前国内外相控阵雷达电扫系统中用得最普遍的由铁氧体移相器组成的天线单元的设计制造及使用,提出一些初浅的观点,与广大同行、天线及雷达设计人员及使用者商讨。

2 国内外相控阵用铁氧体天线单元的基本类型

在本文中,我们定义天线单元的构成如表1所示:

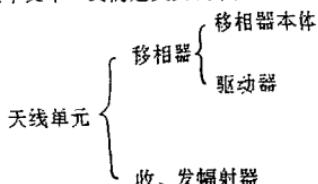


表1 天线单元的构成

目前，国内外研究和使用的最普遍的铁氧体移相器基本分为两大类，一类为单模线极化移相器，一类为双模圆极化移相器。而单模移相器又可分为连续式移相器、锁式移相器等，而双模移相器又可分为双模圆极化移相器、双模变极化移相器以及极化不灵敏移相器等，如表1所示。在大型相控阵面阵中，使用最多的是法拉弟旋转型移相器、非互易锁式移相器以及变极化移相器等，在此我们主要针对法拉弟旋转型移相器的情况进行讨论。

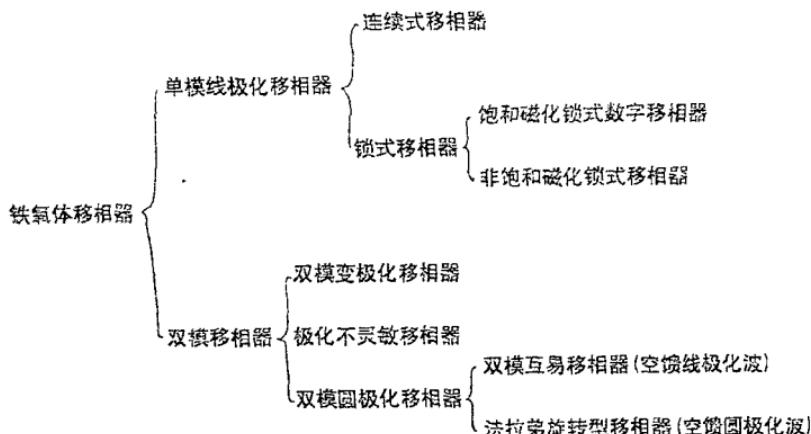
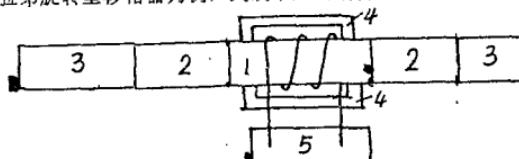


表2. 铁氧体移相器的主要类型

3 天线单元的主要技术要求及设计原则

以法拉弟旋转型移相器为例，天线单元的结构示意图如图1所示：



1、移相段；2、匹配器；3、辐射器；4、锁式磁轭；5、驱动器。

图1 以法拉弟旋转型移相器为主体的天线单元结构示意图

图1中，辐射器3一方面应完成整个阵面级的对空匹配，另一方面与匹配器2共同完成天

线单元内场匹配。驱动器5作为阵上波控的一部分，与阵下波控一道完成对天线单元的相位状态控制和调整。

对这类器件的主要技术要求及设计原则如下：

3.1 插入损耗 IL (dB)

天线单元的插入损耗由磁损耗、介质损耗以及导电壁损耗组成。其损耗的大小取决于铁氧体的磁参数Br、△H、μ、介电常数ε，匹配器和辐射器的介电常数ε以及天线单元各部分的横向尺寸和纵向尺寸。关于插入损耗的设计及计算许多文献中均有讨论，在此不赘述。

3.2 电压驻波比 SWR

天线单元的电压驻波比SWR由天线单元的内场匹配驻波SWR_内与天线单元的对空匹配驻波SWR_外两部分级连而成。

$$SWR = SWR_{\text{内}} \cdot SWR_{\text{外}} \quad \dots \dots (1)$$

但这两部分的匹配在设计和测试时均是相关的。天线单元的内场匹配可通过对各级介质的分析计算完成，主要方法有以路为基础的阻抗匹配法和以场为基础的微扰法及有限元法。但设计完成后，由于测试是在波导系统内完成的，测试的数据有时会受到波导系统与天线单元转换器的匹配状态的制约而使其不能真实地反映天线单元的内场匹配情况。天线单元的对空匹配是要实现阵面的对空匹配，在设计时一般是通过理论分析计算确定辐射器基本参数，然后进行小阵模拟器试验，测定其阵面穿透性，从而调试并确定辐射器的设计，为优化天线单元的整体设计，应采用一定数量的含移相器的实际天线单元进行模拟器试验，从而同步完成天线单元内、外场匹配的优化设计。

3.3 圆极化轴比 F (dB)

天线单元的圆极化轴比定义为其圆极化波长、短轴能量之差。轴比的大小取决于天线单元的磁路设计、加工精度和铁氧体材料的内部不均匀性等。

由于天线单元的圆极化轴比及长轴的方向对于不同的天线单元和同一单元不同的相位状态具有很强的随机性，因此，当阵面单元数量较大时单元轴比的大小与天线系统的圆极化轴比并没有直接的对应关系，而主要是由于交叉极化分量的出现（左圆极化工作时，右圆极化分量的出现）而引起微波损耗，从而使天线增益下降，圆极化轴比与能量损耗的关系根据定义可进行如下推导。

$$F(dB) = 10 \lg \frac{P}{P_1} - 10 \lg \frac{P}{P_2} \quad \dots \dots (2)$$

式中：P 为 天线单元输入端微波能量

P₁ 为天线单元输出端短轴方向能量

P₂ 为天线单元输出端长轴方向能量

若定义A为圆极化分量的幅度，则有

$$F = 20 \lg \left(\frac{1+A_r}{1-A_r} \right) \quad \dots \dots (3)$$

式中 $A_r = A_x/A_y$ ，为左、右圆极化分量的幅度比。

定义由于交叉极化引起的能量损耗为：

$$L_F(dB) = 10 \lg (1 - E_K) \quad \dots \dots (4)$$

式中 $E_K = E_x/E_y$ 。

则有

$$L_F = 10 \lg \left[\frac{\frac{F}{10^{20}} + 4}{\left(\frac{F}{10^{20}} + 1 \right)^2} \right] \quad \dots \dots (5)$$

由(5)式可知，当单元轴比为3dB时，能量损耗为3.3dB。

由于铁氧体材料在同一磁化状态下对左圆极化分量和右圆极化分量的相移不等，因此，交叉极化分量通过天线阵面后不能聚焦，散焦后形成一定的背景噪音。

3.4 插入相位 Φ 。

天线单元的插入相位(即移相器处于归零状态时，单元的相位值)主要影响阵面起始波束状态，在系统设计时一般采用逐个或分组将各天线单元的插入相位值中。写入波控机中以进行补偿或天线单元分组后由驱动器与波控机配合完成插入相位补偿的方法。因此，对天线单元的设计来说，一方面要减小 Φ_i 的分布，但更重要的是要解决由于频率变化($f \pm \Delta f$)和温度变化所引起的 Φ_i 变化后的相对关系发散。

3.5 差相移误差 $\Delta \psi$

这是天线单元最关键的技术指标，其性能直接影响天线阵面的增益、零深等指标。对于P位移相器，就有 2^P 个相位状态，各位态的差相移误差为：

$$\Delta \phi_i = \phi_i - \pi \cdot \frac{2\pi}{2^P} \quad \dots \dots (6)$$

式中： $i=0, 1, 2 \dots 2^P-1$

$i=1, 2, \dots 2^P$

P：移相器的位数

由于移相器的量化误差为 $2\pi/2^P$ ，因此，对于一般移相器来说，要求其 $\Delta \psi < \pm 2\pi/2^P$ 。但对于相控阵天线的天线单元来说，由于其单元数的增加对 $\Delta \psi$ 的要求应有所变化。

假设阵面共有M个天线单元，而每个单元差相移误差的均方根值 σ_{ψ} 为：

$$\sigma_s = \sqrt{\frac{1}{2^p} \sum_{n=0}^{2^p-1} \left(\phi_s - n \cdot \frac{2\pi}{2^p} \right)^2} \quad \dots \dots (7)$$

式中: $m=1, 2, \dots, M$

整个阵面的差相移平均均方根值 σ_{Σ} 为:

$$\sigma_{\Sigma} = \sqrt{\frac{1}{M} \sum_{s=1}^M \sigma_s^2} \quad \dots \dots (8)$$

则由差相移误差引起的天线增益的下降可近似表示为:

$$\Delta G = 1 - \frac{1}{M} \sum_{s=1}^M \sigma_s^2 = 1 - \sigma_{\Sigma}^2 \quad \dots \dots (9)$$

$$\text{或 } \Delta G(dB) = 20 \lg(1 - \sigma_{\Sigma}^2)$$

由差相移误差引起的天线的零深电平可近似表示为:

$$\Delta L = \sigma_{\Sigma}^2 / M$$

$$\text{或 } \Delta L(dB) = 20 \lg(\sigma_{\Sigma}^2 / M) \quad \dots \dots (10)$$

上述各式中 σ 的单位为弧度。

由此可见, 对天线阵面来说, 应注重整个阵面的差相移均方根误差的平均值, 而且随着阵面单元数的增加, 应相应降低对差相移精度的要求。

但同时, 差相移误差还应考虑到如下两个因素:

(1) 差相移的相位频率特性

由于移相器一般只在中心频率上进行配相, 在工作频率上 $\pm 1/4$ 带内, 可能会出现相位差随频率线性变化。但由于这种移相器为非饱和磁化移相器, 因此其线性度随磁化状态的不同而不同, 在设计时, 应尽量保证各位态的相位频率特性。若由于其它指标所限, 相位频率特性不好时, 可由波控机对各位态分别进行频率补偿; 但这时由于铁氧体材料的分散性, 便会产生频率差相移误差 σ_{ϕ} 。

(2) 差相移的温度特性

由于铁氧体材料的铁磁参数随温度变化是其本征特性, 因此常退下完成的天线单元配相, 在环境温度下会有所变化; 但考虑到这种变化对所有单元具有相同的规律性和阵面通风设计后具有相对的温度均衡性, 而阵面上所有单元各相位态的同步变化对阵面电扫性能没有本质影响, 因此, 在评价单元差相移的温度特性时, 可扣除相对同步变化的相位 $\Delta\phi$ 。

$$\Delta\phi_0 = \frac{1}{M} \cdot \frac{1}{2^p} \sum_{s=1}^M \sum_{n=0}^{2^p-1} \left(\phi_{s+n} - n \cdot \frac{2\pi}{2^p} \right) \quad \dots \dots (11)$$

$$\sigma_{\Sigma T} = \sqrt{\frac{1}{M} \cdot \frac{1}{2^P} \sum_{m=1}^M \sum_{n=0}^{2^P-1} (\varphi_{m,n,T} - \Delta\varphi_0)^2} \quad \dots \dots (12)$$

式中: $\varphi_{m,n,T}$ 为环境温度 T 下的差相移值

$\sigma_{\Sigma T}$ 为温度变化 ΔT 引入的阵面平均均方根相位误差

3.6 翻转能量 ΔE

天线单元的翻转能量是指在一个波束配相周期内, 消耗在移相器及驱动电路中的能量。

$$\Delta E = \int_0^T U \cdot I(t) \cdot dt + E_e \quad \dots \dots (13)$$

其中移相器所消耗的能量取决于铁氧体材料的矫顽力 H_c 、波导壁中的横向感应电流的大小、磁路的设计与制造等。驱动电路的能量消耗(或功耗)取决于末级电路的功耗及电路的设计, 对于一般功率的天线单元, ΔE 根据不同设计以及驱动器对单元的控制方式等约为 $300 \mu J - 1000 \mu J$ (相对最大配相位态)。该指标对一般用途移相器并不十分重要, 但对相控阵天线来说, 由于直接关系到阵面电源的设计规模和阵面通风散热情况, 因此在设计和制造时应给予足够的重视。

3.7 波束转换时间 (τ)

波束转换时间即完成一次单元相位调整所需要的时间, 对于法拉弟旋转型移相器来说, 移相器虽为非互易的, 但由于目标对圆极化波的反射特性, 使天线单元工作在互易状态。因此, 转移时间 τ 主要影响雷达的远程盲区。根据系统的不同要求, 在进行单元设计时, 应配合驱动器的驱动方案设计, 优化移相器的磁化线圈、磁路、饱和差相移设计, 以满足系统要求。

3.8 微波功率容量

对于大型相控阵天线而言, 由于天线单元数较大, 每个单元中所通过的微波能量(考虑到中心单元的加权)一般不大, 平均功率约为几瓦到十几瓦。因此, 在进行单元设计时, 在满足系统要求的情况下, 应优化铁氧体材料参数, 避免因功率余量过大而引起的铁氧体材料损耗和温度性能的变坏。

此外, 天线单元的单元横向最大尺寸、单元长度、单元重量等指标也是与天线元间距、天线厚度以天线总重量密切相关的技术指标, 因而也应成为相控阵天线单元设计的重要依据和出发点。

天线单元的驱动器作为阵上波控的一部分, 除完成一般移相器驱动电路的功能外, 应与阵上波控、阵上布线、阵下波控及电源系统统一设计和协调, 从而确保在阵面复杂的电磁环境下, 准确、可靠地完成阵面各单元的配相及状态检查等工作。

考虑到阵上复杂的电磁环境和结构环境、驱动器数量的庞大和对天线乃至雷达是否能正

常工作的影响程度，上述配相精度对天线性能的真正影响的分析等原因，天线单元驱动器的设计应以简化、稳定可靠为第一原则。

4 几个主要技术指标测试数据的数学处理方法

通过上述分析，我们可以看到天线单元性能对系统的影响，是以整体性能的优劣反映出来的，当阵面工作时，各天线单元的相位状态几乎是平均分布的，从这一观点出发，我们可以对几个主要技术指标的测试数据作如下处理：

4.1 天线单元微波损耗

如3.1、3.2、3.3中所述，由于天线单元的损耗测试是在波导系统内完成的，而且为提高测试精度，在测试系统两端均有带吸收片的波段，消除交叉分量的往复反射，因此，实测出的微波损耗应为：

$$L(\text{dB}) = IL - L_{\text{in}} - L, \quad \dots \dots (14)$$

式中： L_{in} 为由单元内场驻波引起的损耗

L 为由单元圆极化轴比引起的损耗

可见，实测出的 L 值包含了由导内驻波和轴比引起的单元损耗。

因此，除非系统有极高的指标要求，我们认为，可在设计阶段进行单元各相位态 S_{NR} 、 F 的测试及平均轴比 \bar{F} 的统计，

$$\bar{F} = \frac{1}{2^P} \cdot \sum_{n=1}^{2^P} F_n \quad \dots \dots (15)$$

$$\bar{F}_{\Sigma} = \frac{1}{M} \cdot \frac{1}{2^P} \cdot \sum_{m=1}^M \sum_{n=1}^{2^P} F_n \quad \dots \dots (16)$$

典型的 \bar{F} 分布图如图2所示。

而在天线单元的批生产阶段，则可分批抽测 S_{NR} 与 \bar{F} 的值并与设计阶段的值相比较和控制，而不需逐个测试。将天线单元的各相位态的微波损耗进行测试后，应进行单元平均损耗数据处理，除淘汰极少数单元外，对各批或整个阵面的平均损耗分布进行处理，求出阵面的平均损耗 \bar{L} 。

$$\bar{L} = \frac{1}{2^P} \cdot \sum_{n=1}^{2^P} L_n \quad \dots \dots (17)$$

$$\bar{L}_{\Sigma} = \frac{1}{M} \cdot \frac{1}{2^P} \cdot \sum_{m=1}^M \sum_{n=1}^{2^P} L_n \quad \dots \dots (18)$$

若 L 在频带内有较大起伏，则可分别求出在不同的频率下的 $L(f)$ 及 L_{in} 值。典型的 L

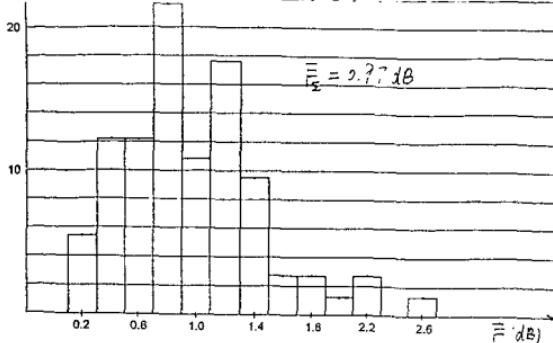


图2 典型的圆极化轴比 \bar{F} 分布图
天线单元数量为60

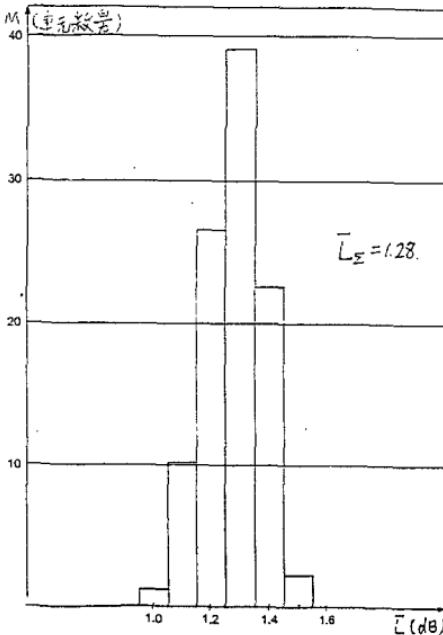


图3 典型的微波损耗 \bar{L} 分布图
天线单元数量为250

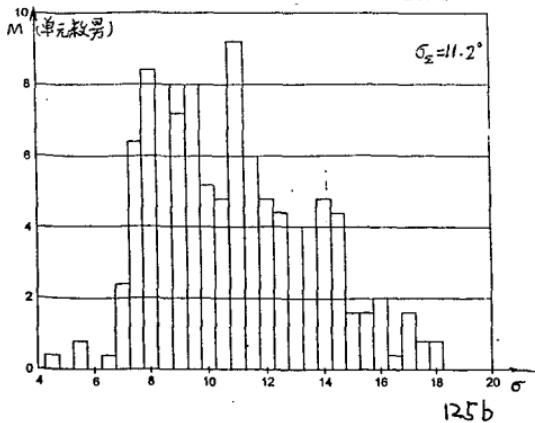


图4 典型的差相移误差均方根值 σ 分布图
天线单元数量为250

分布图如图3所示。

L_r 的数值可在很大程度上反映出天线单元对阵面损耗(或增益)的影响。

4.2 天线单元的插入相位

在3.1中, 我们认为天线单元的插入相位对阵面的主要影响在于在整个频带内和环境温度下, ϕ 变化后各单元 ϕ 的发散。

根据定义有:

$$\Delta\phi(r) = \frac{1}{M} \cdot \sum_{s=1}^M (\phi_s(r) - \phi_{av}) \quad \dots \dots (19)$$

$$\sigma_{\phi(r)} = \sqrt{\frac{1}{M} \sum_{s=1}^M (\phi_s(r) - \Delta\phi(r))^2} \quad \dots \dots (20)$$

$$\Delta\phi(T) = \frac{1}{M} \sum_{s=1}^M (\phi_s(T) - \phi_{av}) \quad \dots \dots (21)$$

$$\sigma_{\phi(T)} = \sqrt{\frac{1}{M} \sum_{s=1}^M (\phi_s(T) - \Delta\phi(T))^2} \quad \dots \dots (22)$$

式中: $\phi(f)$ 、 $\phi(r)$ 分别为在一定的频率下或温度下插入相位的值。

$\Delta\phi(f)$ 、 $\Delta\phi(r)$ 为相应的平均插入相位变化。

σ_{av} 、 σ_{ϕ} 为相应的插入相位散布的均方差

4.3 天线单元的差相移

在3.5中, 我们讨论了天线单元差相移误差对天线主要性能的影响并给出了天线单元在常温下和环境温度下, 不同的均方根误差和平均均方根误差值, 见式(7)、(8)、(11)、(12)。典型的天线单元 σ 分布图见图4所示。

当天线单元的差相移的频率特性不能满足要求, 需波控机进行补偿时, 由于天线单元材料的分散性而带来的在不同频率下的差相移误差, 可针对不同的补偿方案, 同理进行其单元和阵面均方差值的计算。在此不再一一写出。

5 结束语

5.1 通过上述讨论, 我们可以看到, 相控阵用铁氧体天线单元的研制不同于一般其它用途移相器的研制, 具有较强的系统和工程特点。因此, 其设计原则、数据处理及性能控制均应

有其自身特征，即应从对天线系统整体性能的影响出发，用数学统计的方法，去评价批次单元的整体性能，从而在保证系统实际要求的情况下，较大地提高天线单元的生产成品率，降低其相控阵雷达的研制成本。

5.2 由于数量关系，在一部相控阵雷达的研制中，铁氧体天线单元实际已为批量生产。因此，天线单元的实用性、工程性设计成为非常重要的设计工作之一。如其可靠性设计、电磁兼容性设计、可维性设计、三防性能设计、各电气、结构参数的~~大~~^差设计、与制造相关的工艺流程和途径研究、工艺稳定性与一致性研究以及工序检验与控制等设计和研制工作的情况，均对天线单元的综合性能有着深刻的影响，是评价天线单元综合性能的重要依据，由于篇幅所限，本文不在此展开讨论。

5.3 本文中的一些观点有些还不成熟，有些方面可能有失全面和准确，希望与大家探讨并得到指正。

6 参考文献

- [1] "Basic Information on Dual-Mode phase Shifters" Microwave Application Group.
- [2] "双模铁氧体新器件的发展和应用" 魏克珠、李士根

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>