

EAST 低杂波天线相位本底校准技术研究

徐 辉, 单家方

(中国科学院等离子体物理研究所, 合肥 230031)

摘要: 介绍了 EAST 低杂波天线相位采集控制系统中两个主要部分的相位本底的校准技术。一是由相控多结波导阵天线与等离子体相切弧面引入的相位本底的静态校准, 二是天线移动时软波导伸缩引起的可变相位本底的动态校准。低杂波天线相位本底校准技术为相位反馈控制系统提供了准确的相位基点, 为实现预设相位与实调相位的一致性奠定了基础。

关键词: 天线; 相位; 测量; 校准

中图分类号: TL61⁷2.11

文献标识码: A

1 引言

低杂波可用于托卡马克等离子体电流驱动、加热及预电离。相位反馈控制系统是 EAST 低杂波系统中的一个重要的子系统, 低杂波的微波能量可以与等离子体耦合, 并通过 Landau 阻尼在某个方向对电子进行加速。相位反馈系统通过调节天线各主波导间的相位差来改善低杂波的耦合效率, 同时得到满足特定实验要求的功率谱。

本文主要对相控多波结波导阵天线与等离子体相切弧面引入的相位本底进行了计算和静态校准, 对天线移动时软波导伸缩引起的可变相位本底进行测量和动态校准, 从而为相位反馈控制系统提供了准确的相位基点, 为实现预设相位与实调相位的一致性奠定了基础。

2 EAST 低杂波天线结构

EAST 低杂波新的天线采用的是相控多结波导阵天线结构。20 路主波导到达天线后, 每一路主波导被分成 8 路子波导, 构成了一个 5×32 的波导阵。每路中相邻子波导之间的相位差固定为 90° 。天线的主波导之间的相位差是可以通过相位反馈系统进行控制的, 通过控制主波导之间的相位差, 可以控制天线辐射的功率谱, 从而改善微波与等离子体的

耦合效率。天线主视图如图 1 所示。

为了提高与等离子体的耦合效率, EAST 低杂波天线多结波导阵端面被加工成与等离子体相切的弧面。等离子体形状类似轮胎形, 相控多结波导阵端面与等离子体相切, 侧面和顶面都会出现弧面, 这就是本文所讨论的一个重要部分——相控多结波导阵天线与等离子体相切弧面引入相位本底的校准。天线与等离子体相切形式如图 2 所示。

3 低杂波天线相位测量

EAST 低杂波天线在靠近每只速调管输出口的波导传输线上及靠近天线处分别连接一只波导双定向耦合器。耦合器上外接检波器和鉴相器, 可以及时地给出相应波导内入射波、反射波的功率大小以及之间的相位信息。由于 20 个速调管的输入信号源来自同一个本振, 所以它们的输出波是完全相干的^[2]。20 路微波相位信息经计算机处理后反馈控制速调管输入级中的数控微波移相器, 从而可以实现快速调节天线主波导相位, 通过控制天线主波导间的相位关系, 改善波的功率谱, 以达到最好的驱动效果。

托卡马克放电期间, 电磁环境非常恶劣, 电磁干扰大。为了保证测量的可靠性和稳定性, 采用双

收稿日期: 2006-09-27; 修订日期: 2007-03-28

作者简介: 徐辉, 女, 河北沧州人, 中科院等离子体物理研究所微波加热研究室硕士, 研究方向: 微波设计与控制。

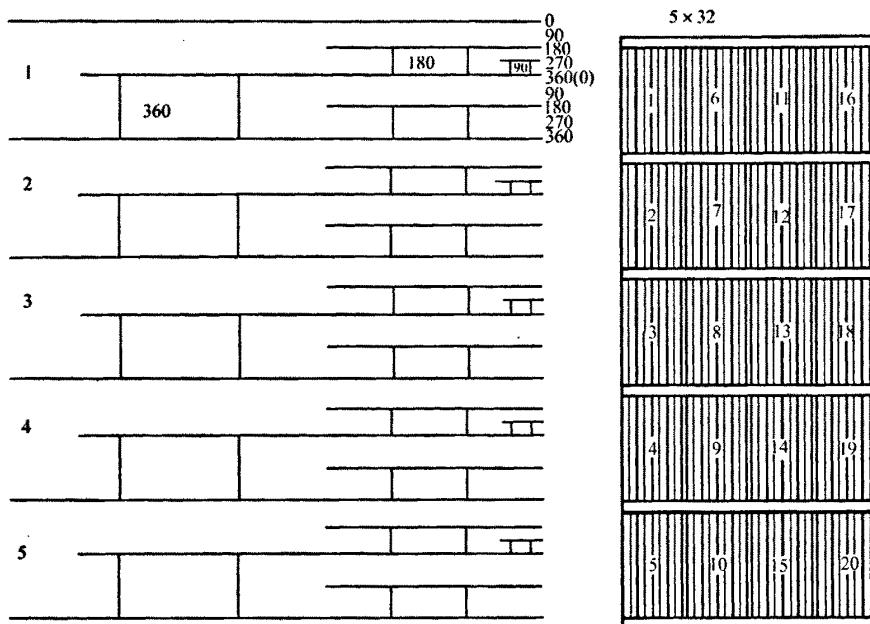


图1 天线主视图

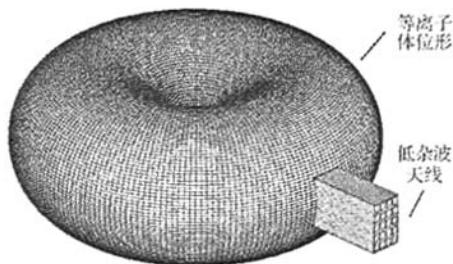


图2 低雜波天线与等离子体相切示意图

机冗余设计,在天线处和波导传输线处各放一台鉴相器测量天线相位。波导传输线处的鉴相器测量信号取自传输线上的双定向耦合器,天线处的鉴相器测量信号取自天线处的定向耦合器。

低雜波天线相位测量就是测定天线 20 路主波导相位与选定的参考相位的差值。为保证参考相位的稳定性,取本振信号作为参考。以参考相位为零点,则测定的主波导相位与参考相位的差值即为主波导相位。测量天线相位的鉴相器内部结构如图 3 所示。

测量天线相位时,将取自定向耦合器的微波信

号以及从本振取出的参考信号分别通过鉴相器中的隔直滤波器、 1×4 PIN 开关、功分器等微波器件输入以 AD8302 为核心的鉴相模块中,则鉴相模块输出的鉴相电压对应 AD8302 相位特性曲线的相位值就是天线主波导相位。

4 低雜波天线相位校准概述

为保证到达天线端口主波导中心点的相位一致,除考虑传输线引起的相位本底外,主要就是考虑多结波导阵与等离子体相切的弧面引起的固定相位本底。传输线长度一旦确定,由传输线长度不同而引起的相位本底可通过网络分析仪测量,并在程序中扣除。传输线长度引起的固定本底这里不讨论。这里着重讨论计算多结波导阵与等离子体相切的弧面引起的相位本底并在软件中进行校准的问题。一旦天线端口形状与尺寸确定,这部分相位本底就是确定不变的。因此,软件设计中只需测量一次进行校准即可,称为静态校准。

为改善低雜波天线与等离子的耦合效率,天线的位置是可以前后移动的。天线与固定波导之间通过软波导相连。软波导可以随天线的前后移动拉伸

和收缩,这就引出可变相位本底。软件控制中,考虑天线处测量的相位可能受电磁干扰而不准确,故以波导传输线处测量的相位为主。由于软波导的长

度变化,两个鉴相器之间的相位本底差可变。因此,每次天线移动位置后都要进行一次校准,称为动态校准。

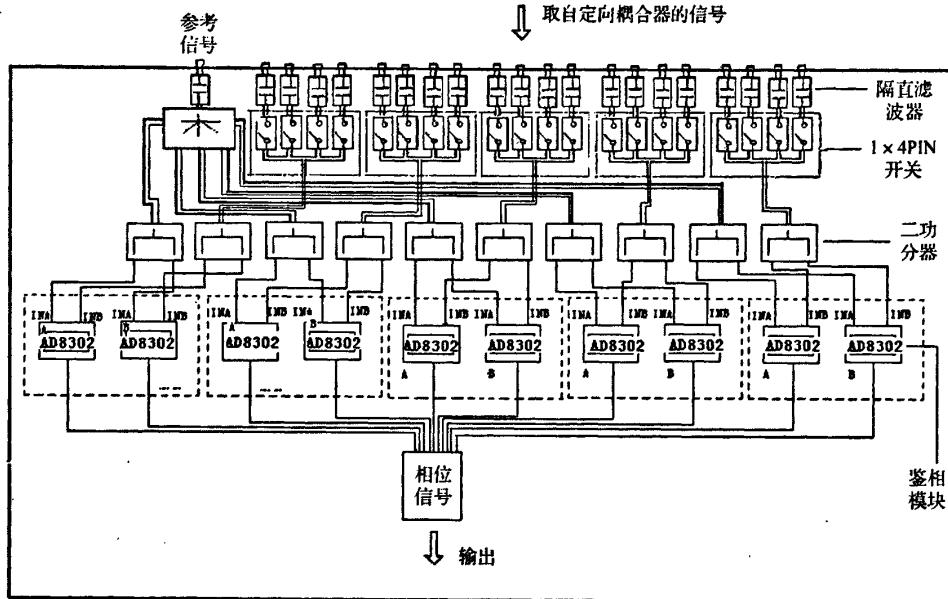


图 3 鉴相器内部结构图

5 多结波导阵与等离子体相切的弧面引起的相位本底的静态校准

5.1 弧面引起的相位本底计算

5.1.1 侧弧面引起的相位本底计算

由于侧弧面和顶弧面引起的相位本底相互独立,为了简化问题,将这两部分相位本底分开计算。

首先考虑侧弧面引起的相位差。以第 3 排的波导中心作为基点,上下两侧波导中心点关于这个中心点对称。所以只要计算第 1 排波导中心点和第 2 排波导中心点到基点的距离差引起的相位差即可。

图 4 是天线侧视图,定义弧面半径(等离子体外环大半径)为 R 。等离子体 5 排波导(等高)每层的高度定义为 h_1 ,间隔为 h_2 ,现在求解由弧面引起的距离差 Δ 而引起的相位本底,它们定义为 ϕ_1 、 ϕ_2 。

如图 4 所示,由直角三角形特性: $L = \sqrt{R^2 - H^2}$ 。对应图 4 中的变量定义,可得:

$$\begin{cases} L_1 = \sqrt{R^2 - 4(h_1 + h_2)^2} \\ L_2 = \sqrt{R^2 - (h_1 + h_2)^2} \end{cases} \quad (1)$$

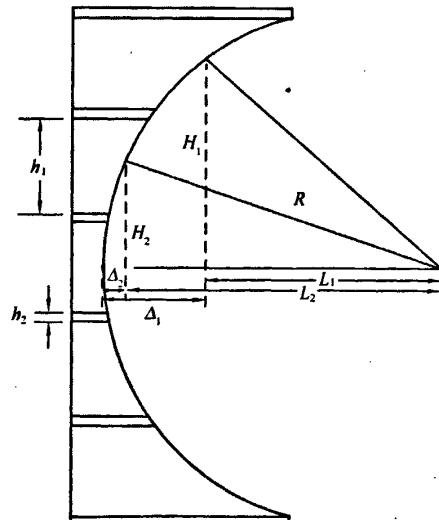


图 4 天线侧视图

距离差 $\Delta = R - L$, 对应有:

$$\begin{cases} \Delta_1 = R - L_1 \\ \Delta_2 = R - L_2 \end{cases} \quad (2)$$

设微波在真空中的波长为 λ , 在天线中波导波长为 λ_s , 则有:

$$\begin{cases} \lambda = \frac{c}{f} \\ \lambda_s = \frac{\lambda}{\sqrt{1 - \left(\frac{\lambda}{2a}\right)^2}} \end{cases} \quad (3)$$

式中, c 为光速; f 天线中传输的微波频率; a 为波导的宽边尺寸。距离差 Δ 引入的相位本底为(单位为弧度):

$$\Phi_i = \frac{\Delta_i}{\lambda_s} \quad (4)$$

式中, Φ_i 为相位本底。

5.1.2 顶端弧面引起的相位本底计算

在图 2 中可以看到, 低杂波天线与等离子体相切在顶端也有一个弧面。进行相位控制时, 由于顶端的弧面, 各列主波导之间存在距离差, 因而微波到达主波导中心位置的相位就存在差异, 这也是相位本底的一部分, 需要计算出来并在控制程序中进行校准。这里的相位本底计算方法与上面类似。

图 5 中, R_b 为定义弧面半径, i_1 为每列主波导宽度, i_2 为间隔。以弧面中点为基点, 左右两列波导关于中心对称。 Δ_{b1} , Δ_{b2} 为两侧波导中心相对于基点的距离差。 Φ_{b1} , Φ_{b2} 为引起的相位差定义。

类似的, 我们有: $L = \sqrt{R_b^2 - I^2}$, 则:

$$\begin{cases} L_{b1} = \sqrt{R_b^2 - [1.5(h_1 + h_2)]^2} \\ L_{b2} = \sqrt{R_b^2 - [0.5(h_1 + h_2)]^2} \end{cases} \quad (5)$$

由此可求得距离差:

$$\begin{cases} \Delta_{b1} = R_b - L_{b1} \\ \Delta_{b2} = R_b - L_{b2} \end{cases} \quad (6)$$

同样, 结合式(3)可求得距离 Δ_{b1} 、 Δ_{b2} 引入的相位本底 Φ_{b1} 、 Φ_{b2} 。

5.2 计算结果

5.2.1 侧弧面引入的相位本底计算结果

已知的条件列于表 1 中。根据式(1)~(4), 可以求得 $L_1=1059.87\text{mm}$, $L_2=1090.11\text{mm}$; $\Delta_1=40.13\text{m}$, $\Delta_2=9.89\text{mm}$; $\Phi_1=15.548^\circ$, $\Phi_2=3.833^\circ$ 。即第 1 排

波导中心点到基点的距离差引起的相位差为 15.548° , 第 2 排波导中心点到基点的距离差引起的相位差为 3.833° 。由于对称性, 第 4 排波导中心点到基点的距离差引起的相位差为 3.833° 。同理, 第 5 排波导中心点到基点的距离差引起的相位差为 15.548° 。这即为需要在软件中扣除的相位本底的一部分。

表 1 计算侧弧面相位本底的已知条件

天线侧	每排	两排	波导宽边	波导中
弧面半径 R/mm	波导高度 h_1/mm	波导间隔 h_2/mm	尺寸 a/mm	微波频率 f/GHz
1100	113.2	34	109.2	2.45

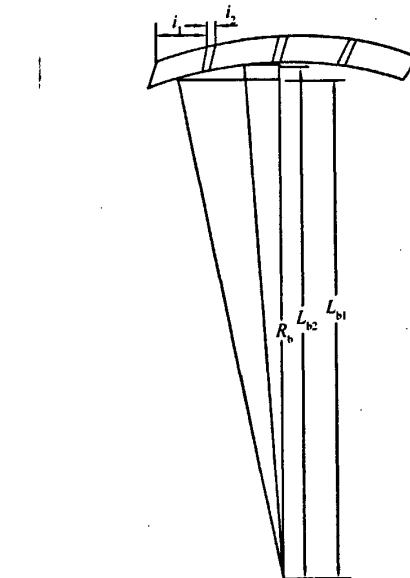


图 5 天线顶端弧面

5.2.2 顶弧面引入的相位本底计算结果

已知的条件列于表 2 中。同理, 可得计算结果为 $\Phi_{b1}=3.580^\circ$, $\Phi_{b2}=0.397^\circ$ 。

表 2 计算顶弧面相位本底的已知条件

天线定	每列	两列	波导	波导中
弧面半径 R_b/mm	波导宽度 i_1/mm	波导间隔 i_2/mm	宽边尺寸 a/mm	微波频率 f/GHz
1700	108	10	109.2	2.45

由于对称性, 第 1 列和第 4 列波导中心点到基

点的距离差引起的相位差为 3.580° , 第 2 列和第 3 列波导中心点到基点的距离差引起的相位差为 0.397° 。由于引入的相位差较小, 在允许的误差范围内, 因此顶部弧面引入的相位差可忽略其影响。即认为同一排主波导中心的相位一致。

5.3 弧面引起的相位本底校准

由上述计算可知, 侧弧面引入的相位本底较大, 在相位控制中会造成预设相位与实调相位的较大误差, 从而影响相位反馈控制的控制准确度, 因此必须在软件中进行校准, 由于此部分相位本底只与天线形状和尺寸有关, 是固定不变的, 因此只需要一次校准, 称为静态校准。校准算法如下。

假设预设 20 路主波导的相位为 θ_i ($i = 1, 2, 3, \dots, 20$), 从本振源取信号作为参考相位, 即每路主波导与参考相位之间的相位差为 θ_i 。由上所述, 忽略顶弧面引入的相位本底, 只考虑侧弧面引起相位本底 ϕ_1, ϕ_2 , 因计算时取第三排主波导中心点相位作为基准, 根据图 1 所示, $\theta_1, \theta_8, \theta_{13}, \theta_{19}$ 不需要校准, 而其它主波导必须要校准。第一排和第五排主波导均要对 ϕ_2 校准, 即 $\theta_1, \theta_6, \theta_{11}, \theta_{16}, \theta_5, \theta_{10}, \theta_{15}, \theta_{20}$ 需要分别减去 ϕ_2 作为相移器的输出相位。同理, $\theta_2, \theta_7, \theta_{12}, \theta_{17}, \theta_4, \theta_9, \theta_{14}, \theta_{19}$ 需要分别减去 ϕ_1 作为相移器的输出相位。这样就完成了侧弧面引入的相位差的校准。

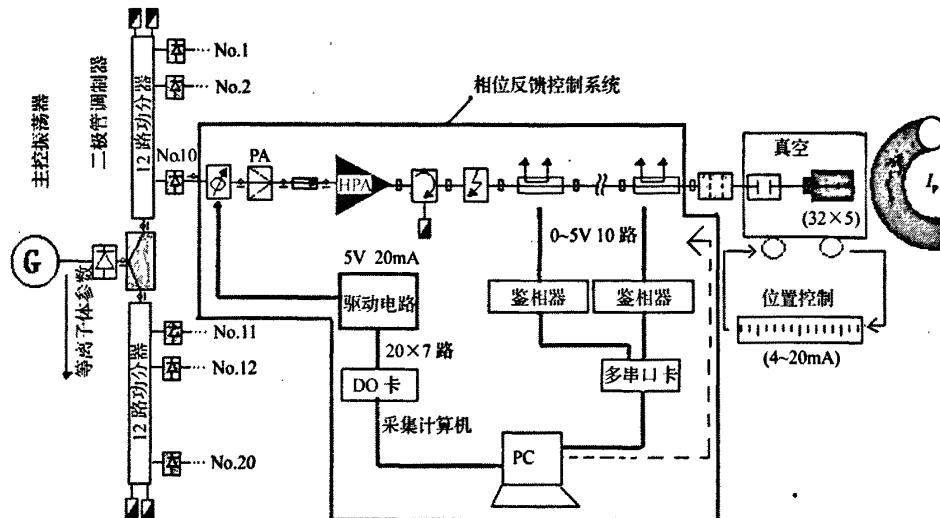


图 6 两台鉴相器同时测量相位示意图

6 天线移动时软波导伸缩引起的相位本底的动态校准

低杂波与等离子体相切的位置不同, 二者的耦合性能和效率也不同。为了研究波与等离子体的耦合性能, 这就要求低杂波天线的位置相对于 EAST 装置是可以变化的。天线的位置前后移动是依靠天线与固定波导传输线之间连接的软波导伸长或者收缩来实现的。天线与固定波导传输线之间的软波导的伸长或收缩使得定向耦合器到天线端口的传输线长度改变, 这必然引起相位本底的变化。

为了方便测量软波导长度变化后引起的相位差, 同时由于托开马克放电期间电磁干扰很强, 为了避免放在 EAST 托卡马克装置附近的鉴相器的测量信号可能受到电磁干扰的影响而使相位测量不准, 我们采用两台鉴相器同时从两个地方测量相位, 如图 6 所示。

EAST 托卡马克进行放电实验之前, 利用相位反馈控制软件系统读取两个鉴相器测量到的相位初值, 由于托卡马克没放电时电磁干扰不强, 两台鉴相器测量到的相位初值都相对稳定, 加上各自的定向耦合器到天线端口的固定相位本底即可以得

到天线端口的相位值。根据测量的相位初值求出两个鉴相器的相位差作为本底。由于这部分相位本底是会随着软波导长度的变化而改变的, 所以成为动态相位本底。

在 EAST 托卡马克放电实验期间, 托卡马克装置附近的鉴相器由于强电磁干扰的影响, 相位的测量值可能不准, 这时以相对远离托卡马克装置的波导传输线上的连接的鉴相器测量的相位为准, 加上根据上述求出的动态相位本底来作为天线端口的相位, 调节此相位便可实现天线端口的相位反馈控制。这个过程就完成了由于软波导伸缩引起的动态相位本底的校准。

7 结论

通过所介绍的多结波导阵与等离子体相切的

弧面引起的相位本底的静态校准和天线移动时软波导伸缩引起的相位本底的动态校准技术, 可以准确稳定地测量天线端口相位, 通过本底校准, 到达天线端口的每排四个主波导中心点相位一致, 即为相位反馈控制系统提供了准确的相位基点, 为实现预设相位与实调相位的一致性奠定了基础。

参考文献:

- [1] 王茂. 新 HT-7 低杂波天线微波特性的测量与低杂波单管实验的研究 [D]. 合肥: 中国科学院研究生院, 2002.
- [2] Brambilla M. Slow-wave launching at the lower hybrid frequency using a phased waveguide array [J]. Nucl. Fusion, 1976, 16(1): 47.
- [3] 王茂, 刘岳修, 单家芳, 等. HT-7 装置新低杂波相控波导阵天线及其微波特性测量 [J]. 核聚变与等离子体物理, 2003, 23(1): 55.

Calibrate technology of the EAST lower hybrid wave antenna background phases

XU Hui, SHAN Jia-fang

(Institute of Plasma Physics, Chinese Academy of Sciences, Hefei 230031)

Abstract: A calibrate technology of background phases in two main parts is introduced in the EAST lower hybrid wave antenna phases collection and control system. One part is referred to static calibration of the background phases caused by tangency of phased multi-junction grill antenna and plasma. The other part is referred to dynamic calibration of the alterable background phase caused by soft wave-guide flex when the antenna is being moved. The calibrate technology of lower hybrid wave antenna background phases provides an exact phase base point of phase feedback control system. It could be a foundation for the consistency of the pre-establish phases and actual phases.

Key words: Antenna; Phase; Measure; Calibration

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>