

导弹天线罩 IPD 测量仪研究

曾照勇，赵立，彭思平，赵宇宏

(中国航天科技集团公司八院第802研究所，上海 200090)

摘要：天线罩是导弹的一个关键部件，其电气性能直接影响到导弹的制导精度，而插入相位延迟(IPD)是影响天线罩电性能的重要参数之一。针对国内在导弹天线罩IPD测量方面的技术难题，基于微波测量技术，研制了一台导弹天线罩IPD测量仪，阐述了导弹天线罩IPD测量仪的测量原理和软硬件构成。实验结果表明，该测量仪可以快速、准确地实现导弹天线罩IPD的无损检测，重复测量误差不大于 $\pm 0.2^\circ$ ，有效地保证了导弹天线罩的测量精度。该IPD测量仪的研制成功，为导弹天线罩的电性能检测提供了先进的手段。

关键词：导弹天线罩；插入相位延迟；微波

中图分类号：V448.15¹ 文献标识码：A

文章编号：1000-1328(2009)04-1582-05

DOI：10.3873/j.issn.1000-1328.2009.00.045

0 引言

天线罩是导弹中的一个特殊舱段，它既是导弹的头部，又起着保护导引头天线的作用，它是导弹控制回路的一个环节，天线罩的功率传输系数、瞄准线误差及误差斜率，将直接影响导弹的作用距离、脱靶量和稳定性。因此，天线罩是导弹中一个集气动、结构和电气性能于一体的特殊产品，对导弹的性能有着举足轻重的地位^[1]。

天线罩的电气设计，在于选择天线罩壁的最佳截面厚度，从电性能角度来说即插入相位延迟(Insert Phase Delay, IPD)，为了保证导弹的瞄准精度，必须保证罩壁的插入相位延迟的均匀性^[2-3]。电磁波透过天线罩时，由于罩壁引入的IPD变化会导致天线增益损失、波束宽度变化、波束偏移及副瓣电平抬高，从而影响天线罩的工作性能。

采用现有工艺制造的天线罩，虽然精加工后能够满足其几何形状和外形尺寸要求，但由于材料不均匀性和工艺水平的限制，其IPD可能不满足设计要求，影响了天线罩的电性能。因此必须对天线罩的IPD进行测量，根据测量结果对超差部位进行修补校正，以满足天线罩的电性能指标要求。

导弹天线罩IPD测量在国外起步较早^[4]，技术上较为成熟，但国内技术上与国外差距较大，在导弹天线罩IPD专用测量设备方面尚属空白。大连理工

大学研制了一台天线罩几何参数测量仪，用于检测天线罩机械厚度^[5-6]，由于机械厚度只是影响天线罩IPD的一方面，介电常数的不均匀性和材料疏密不均对IPD的影响不可忽视^[1-2]。本文介绍了新研制的导弹天线罩IPD专用测量仪，该测量仪基于微波测量原理，集成机械、电气、控制、软件、微波等多种技术于一体，可以准确、快速地实现天线罩IPD的无损检测，大大提高了我国导弹天线罩的电性能检测水平。

1 导弹天线罩IPD测量仪的原理

1.1 天线罩IPD测量的意义

电磁波通过一定厚度的不同介质时，将引起一定的相位滞后。对于平面波，仅一次通过两种不同的无损耗、一定厚度的介质层的相移量之差，称为介质层的插入相位延迟。对于天线罩而言，其插入相位延迟可表示为^[1-2]：

$$\phi = \frac{2\pi h}{\lambda} (\sqrt{\epsilon_r - \sin^2 \theta_i} - \cos \theta_i) \quad (1)$$

式中：
h——天线罩壁的物理厚度(mm)；

λ ——电磁波的波长(mm)；

θ_i ——电磁波的入射角($^\circ$)；

ϵ_r ——天线罩壁材料的相对介电常数。

对于一个特定的天线罩，在规定的工作波长和入射角条件下，由式(1)可知，影响IPD的因素是天

线罩的物理厚度和介电常数,因此天线罩 IPD 的测量能综合反映罩壁的物理厚度公差和介电常数均匀性,并可以作为检验天线罩电性能的一个重要手段。依据天线罩 IPD 的测量结果,可以通过修磨或喷涂等方式对天线罩壁厚进行补偿,进而保证天线罩各处 IPD 均匀,因此 IPD 测量是制造高精度天线罩的必要保证。

1.2 天线罩 IPD 的微波测量原理

天线罩 IPD 测量的基本原理是利用矢量网络分析仪产生与天线罩工作频率相同的微波,按一定入射距离和一定入射角透射天线罩,分析微波在穿过天线罩时产生的相位延迟。天线罩 IPD 的微波测量有透射和反射两种方式,采用透射方式时测量微波一次通过天线罩时的相位延迟,采用反射方式时测量微波通过天线罩后经反射面反射并再次通过天线罩的相位延迟。透射方式采用双喇叭天线,反射方式采用单喇叭天线。这两种方式的优缺点如下:

(1) 测量精度。透射方式与天线罩的实际工作方式相似,微波仅经过一次透射,中间环节少,因此精度较高。采用反射方式,微波需经过两次透射和一次反射,引起误差的因素增多,测量信号的衰减较大,受杂波的影响也越大。

(2) 结构复杂程度。采用透射方式,一般只能采用喇叭天线静止,而天线罩同时实现四轴联动的方式,技术难度大,成本高。采用反射方式,喇叭天线均在天线罩外,可采取天线罩绕主轴旋转、喇叭实现平移和水平面旋转的方式,机床结构相对简单。

(3) 测量范围。采用透射方式,由于一个喇叭天线在天线罩内工作,必须避免天线罩与喇叭之间的干涉,因此受天线罩形状的影响较大,特别对于小型天线罩,在天线罩顶部和尾部会有较大的测量死区,而采用反射方式时喇叭天线在天线罩外,因此测量死区比较小。

受导弹天线罩形状和机床结构等条件的限制,小孔径天线罩采用单喇叭反射方式是比较适合的一种测量方式。单喇叭反射方式的微波测量原理如图 1 所示,在被测天线罩内部有一个按天线罩外形等厚减小的金属反射面内胎。由矢量网络分析仪发出测试微波,通过喇叭天线发射,经过反射面反射后再由喇叭接收,分别测量在加天线罩和不加天线罩两种情况下反射微波和入射微波的相位差 ϕ_1 和 ϕ_2 ,则理论上 $(\phi_1 - \phi_2)/2$ 即为天线罩的 IPD。

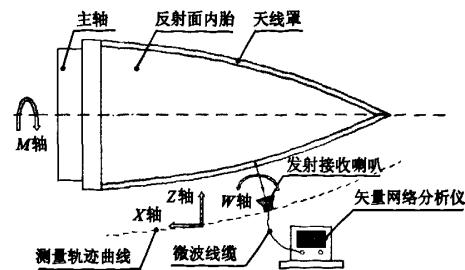


图 1 单喇叭反射测量系统原理图

Fig. 1 Principle of reflecting measuring system with single horn

1.3 天线罩 IPD 测量步距的选择和网格划分

在测量前,首先要对天线罩按指定测量步距进行网格划分,以确定测量区域和测量点数。测量步距一方面取决于测量分辨率,步距越小,则测量点数越多,分辨率也越高,但测量时间也会越长;另一方面也取决于天线的辐射方向图和喇叭天线的入射距离。天线在空间中的辐射场强不是均匀的,可以通过测量场强的方式得到天线的方向图^[7],如图 2 所示。通常把主瓣两侧为最大辐射功率密度一半的夹角称为半功率波瓣宽度,用 $2\theta_{0.5}$ 表示,天线的辐射能量主要集中在半功率波瓣宽度内,在天线罩测量时测量区域要与半功率波瓣宽度相适应。

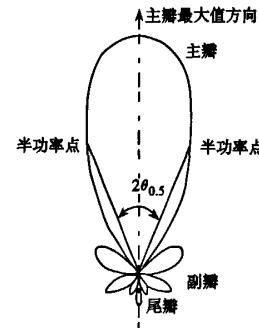


图 2 天线辐射方向图

Fig. 2 Antenna radiant pattern

确定了测量步距后,选定天线罩表面的一条母线为“零母线”,先沿母线方向从顶部至底部进行划分为多个测量圈,然后再对每个测量圈沿圆周方向进行划分,若测量长度不是测量步距的整数倍,可将测量步距适当进行调整。

1.4 天线罩 IPD 测量轨迹的计算

如图 3 所示,设天线罩的方程为 $y = f(x)$, 入射距离为 d , 测量步距为 Δ , 以天线罩顶点为原点, 喇

喇叭与 Y 轴平行位置时角度为零, 对于母线上的第 n 个测量圈, 天线罩表面上的对应点的坐标为: $x_{n0} = \Delta \times n, y_{n0} = f(x_{n0})$, 斜率为: $k_{n0} = f'(x_{n0})$, 则 X 轴、Y 轴、W 轴的对应运动坐标为:

$$\begin{cases} x_n = x_{n0} - d \times \sin(\arctan(k_{n0})) \\ y_n = y_{n0} + d \times \cos(\arctan(k_{n0})) \\ w_n = \arctan(k_{n0}) \end{cases} \quad (2)$$

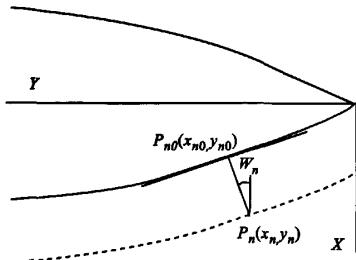


图 3 导弹天线罩 IPD 测量运动分析

Fig. 3 Motion analysis of IPD measuring instrument

对于该测量圈上的第 t 个测量点, M 轴(主轴)转角 m_{nt} 为:

$$m_{nt} = 360 \times (n - 1) + \frac{360}{\left[\frac{2\pi y_{n0}}{\Delta} \right]} \times t \quad (3)$$

通过(2)、(3)式可确定天线罩 IPD 测量仪在每个测量点处各轴的运动坐标。

2 导弹天线罩 IPD 测量仪的构成

2.1 硬件系统

导弹天线罩 IPD 测量仪如图 4 所示, 该设备由测量定位系统、控制系统、微波测量系统等组成。

测量定位系统保证天线罩准确定位到各预定测量位置上, 采用四轴联动数控机床, 应用电机驱动滚珠丝杠副带动大拖板实现微波喇叭水平轴向位移(X 轴); 应用电机驱动滚珠丝杠副带动小拖板实现微波喇叭水平径向运动位移(Y 轴); 应用电机驱动蜗轮蜗杆副实现微波喇叭在水平面的转动(W 轴); 应用电机驱动齿轮副实现工件绕轴线旋转(M 轴)。

天线罩微波测量系统由矢量网络分析仪、波导转换器和喇叭天线等组成, 如图 5 所示。由矢量网络分析仪提供微波信号, 通过喇叭天线发射、接收微波, 并由矢量网络分析仪对微波进行信号处理。

控制系统由工控计算机、四轴运动控制卡、信号转换板、检测和测量装置等组成, 如图 6 所示。以工控计算机为核心, 通过以太网对机床定位系统和微

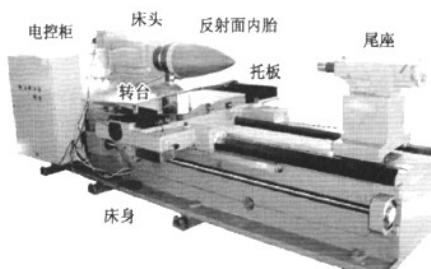


图 4 导弹天线罩 IPD 测量仪

Fig. 4 IPD measuring instrument for missile radome

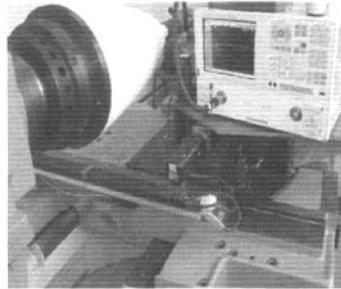


图 5 微波测量系统

Fig. 5 Microwave measuring system

波测量系统进行远程控制。

2.2 软件系统

软件系统主要由四个部分组成: 运动控制软件、测量控制软件、数据处理软件和安全防护软件, 为方便四个部分的集成, 软件系统统一采用 VB 语言编写。在输入相应测量参数后, 通过工控计算机对机床和测量系统进行远程控制, 自动实现运动定位和 IPD 测量, 并对测量结果进行数据处理、实时显示和自动保存。

运动控制软件利用 Galil 运动控制卡的 DMC-COM 通讯模块和 DMC32.dll 链接库, 在程序运行时动态加载测量控制代码实现对各轴的运动控制, 可实现四轴联动控制, 同时在工控计算机上采用动画实时显示各轴的运动轨迹曲线, 便于操作人员实时查看机床状态。

测量控制软件用于实现对矢量网络分析仪的控制, 测量控制界面如图 7 所示。为了实现对矢量网络分析仪进行远程自动测量控制, 本测量仪采用安捷伦公司先进的 PNA 系列网络分析仪, 其所提供的以太网控制接口解决了传统网络分析仪采用 GPIB 接口引起的传输距离短、传输速度低等问题, 为实现远程自动测量控制奠定了基础。利用安捷伦公司提

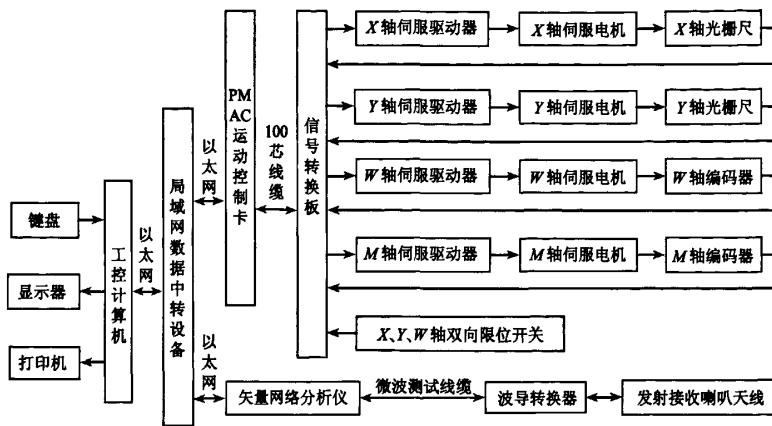


图6 控制系统硬件简图

Fig. 6 Hardware chart of control system

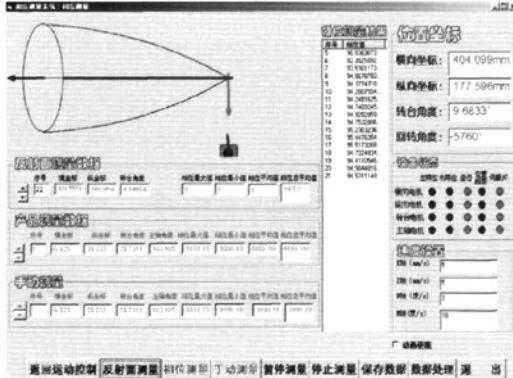


图7 导弹天线罩IPD测量仪测量控制界面

Fig. 7 Control interface of IPD measuring instrument

供的针对 PNA 系列的 COM 编程技术, 开发了相应的 IPD 专用测量软件, 利用该软件可实现加载测量校准文件、控制测量运行、自动获取测量数据、自动保存测量数据等功能。

为实现运动控制和测量控制的协调, 需制定相应的控制策略, 具体思路为: 先控制机床运动到测量点, 同时检测其位置, 运动到位后发出相应信号, 由于矢量网络分析仪的运动会引起微波环境变动, 因此需静止一段时间待微波环境稳定后再启动测量, 在每个测量点按设定参数进行采样, 测量结束后, 停止矢量网络分析仪扫描, 并控制机床运动到下一个测量点。

数据处理软件用于对测量结果进行处理, 滤去杂波信号, 显示测量数据曲线, 并最终将 IPD 测量数据转换为罩壁机械厚度。

安全防护软件实现对测量仪的软件防撞保护,

在运动过程中实现检测机床的运动位置, 保证当前位置和下一步的运动轨迹与天线罩的距离不小于安全距离, 以避免喇叭天线与天线罩相撞。

2.3 导弹天线罩IPD测量仪精度控制措施

天线罩 IPD 测量仪属于高精度测量仪器, 为了保证其测量精度, 采取了以下措施:

(1) 严格控制机床精度。X、Y、W 轴采用全闭环控制,X、Y 轴定位精度控制在 $\pm 0.01\text{ mm}$ 以内, 转台定位精度控制在 $\pm 15''$ 以内, M 轴精度要求不高, 采用半闭环控制, 精度 $\pm 1'$;

(2) 采用高精度矢量网络分析仪。本测量仪使用安捷伦公司高精度的 PNA 系列的矢量网络分析仪, 有效保证了测量精度;

(3) 严格控制测试环境。环境温度控制在 $23^\circ\text{C} \pm 3^\circ\text{C}$ 以内, 相对湿度 $\leq 70\%$, 测试环境采用电磁屏蔽措施, 避免外界杂波的影响;

(4) 采用远程控制。对机床运动和微波测量均采用以太网远程控制, 控制台与机床主体分离, 避免人员对测量的影响。

3 导弹天线罩IPD测量仪测量实验分析

为保证导弹天线罩 IPD 测量的准确性, IPD 测量仪要有较高的精度。由于微波的特性, 在测试过程中, 微波发生源的噪声、空气杂波、温度变化、湿度变化、机床定位误差等因素都会对测量产生影响, 造成测量结果不稳定, 因此需要对 IPD 测量仪重复测量误差进行检测, 并作为检验 IPD 测量仪精度的重要依据。

利用该 IPD 测量仪沿反射面母线方向进行测

量,入射距离为50mm(含喇叭长度和波导同轴转换器长度),采用垂直入射,在相同的实验参数和环境条件下连续测量三次,测量结果如图8所示。对测量数据进行分析,发现最大重复测量误差为0.189°。

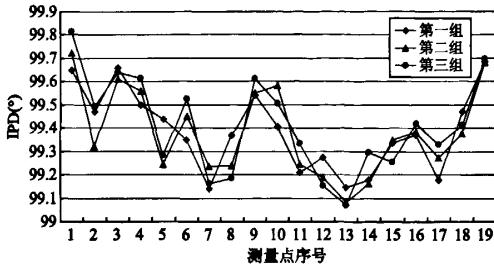


图8 导弹天线罩IPD测量仪重复测量误差检测

Fig. 8 Repeating error of IPD measuring instrument

对该测量仪按不同的测量参数进行多次测量精度检测,检测结果充分表明了在测量环境稳定的条件下,该IPD测量仪的重复测量误差不大于 $\pm 0.2^\circ$,满足了导弹天线罩IPD的测量精度要求。该测量仪采用自动测量控制技术,每小时可完成300~500个测量点的测量,一般情况下1个导弹天线罩的测量只需1~3小时,满足了实际测量需要。目前该测量仪在导弹天线罩电性能测试方面已经取得了很好的效果,并开始应用于正式产品的测量。

4 结论

高性能导弹天线罩有着十分严格的罩壁IPD公差要求,导弹天线罩IPD测量仪的研制成功,填补了国内在导弹天线罩IPD测量方面的空白,为加工高

精度导弹天线罩提供了重要的检测手段。

参考文献:

- [1] 彭望泽.防空导弹天线罩[M].北京:宇航出版社,1993.
[PENG Wang-ze. Anti-aircraft Missile Radome [M]. Beijing: Astronautics Press, 1993.]
- [2] Bryte. High performance radome & antenna materials[J]. High Performance Composites, 1999, 15.
- [3] Hollis MS. Parameterized design of a supersonic radome[J]. Army Research Lab., Aberdeen Proving Ground MD. Weapons and Materials Research Directorate, 2001: 37, Report Number ARL-TR 2418; ADA389166.
- [4] Apparatus for machining radome walls to controlled electrical thickness[J]. United States Patent Office 2, 1968: 824~913.
- [5] 郭东明,王晓明,贾振元,徐志祥.天线罩几何参数测量仪研究[J].机械工程学报,2000(3): 41~45. [GUO Dong-ming, WANG Xiao-ming, JIA Zhen-yuan, XU Zhi-xiang. Research on the geometric parameter measuring instrument for radome [J]. Journal of Mechanical Engineering, 2000, (3): 41~45.]
- [6] Jia Z Y, Ji V, Guo D M, Bina G H. A precision grinding technique of radome inner surfaces[J]. Key Engineering Materials, 2004: 257~258, 177~152.
- [7] 王朴中,石长生.天线原理[M].北京:清华大学出版社,1993.
[WANG Pu-zhong, SHI Chang-sheng. Antenna Principle [M]. Beijing: Tsinghua University Press, 1993.]

作者简介:曾照勇(1981-),男,硕士,工程师,研究方向为天线罩设计、制造与检测,机械加工,机电控制等。

通信地址:上海市杨浦区黎平路203号技术处(200090)

电话:(021)65666006~228

E-mail:zengzhao Yong@gmail.com

Research on IPD Measuring Instrument for Missile Radome

ZENG Zhao-yong, ZHAO Li, PENG Si-ping, ZHAO Yu-hong

(The 802nd Research Institute of the 8th Academy of China Aerospace Science and Technology Corporation, Shanghai 200090, China)

Abstract: Radome is a key part of missiles, and its electric performance directly affects the homing accuracy of missiles. Insert Phase Delay is one of the important parameters for electric performance of missile radome. A new-type IPD measuring instrument for missile radome, based on the technology of microwave measuring, is developed to solve the IPD measurement of missile radome. The measuring principle and structure of the IPD measuring instrument are presented. The result of measuring experiment shows that this measuring instrument can be used for nondestructive testing of missile radome accurately and rapidly, and its repeating error is less than $\pm 0.2^\circ$, which ensures the measuring precision of missile radome. Therefore, this IPD measuring instrument provides an advanced method for electric performance testing of missile radome.

Key words: Missile Radome; Insert Phase Delay; Microwave

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>