

# 面天线检测数据处理方法的探讨

李宗春<sup>1</sup> 李广云<sup>1</sup> 金超<sup>2</sup>

(1. 信息工程大学测绘学院, 河南 郑州 450052; 2. 信息产业部 54 所, 河北 石家庄 050081)

**文 摘** 对面天线检测数据处理方法作了一些有益的探讨。从获取被测物的三维坐标后到获取真正有用的信息这一过程需要经过坐标转换和表面误差计算两个步骤, 其中坐标转换是关键。在坐标转换方面, 文中提出了曲面自由拟合、公共点转换和 CAD 面型转换三种方法, 阐述了这些方法的数学模型, 并且用实测数据进行了验证计算。理论分析和实际计算两方面显示: CAD 面型转换法既不需要天线的曲面方程, 也不需要已有公共点, 结果准确、可靠, 是一种理想的方法。如果没有天线的 CAD 面型, 但却存在公共点时, 公共点转换法也是较理想的方法, 其结果与给定的公共点误差有关。如果既没有天线的 CAD 面型又无公共点或公共点误差很大时, 只能采用曲面自由拟合法, 该法准确度最高, 但容易使天线面型产生错位现象。

**主题词** 检测 坐标转换 曲面自由拟合 公共点 CAD 面型

## On the Data Processing Methods of Surface Antenna's Calibration

LI Zongchun<sup>1</sup> LI Guangyun<sup>1</sup> JIN Chao<sup>2</sup>

(1. Institute of Surveying and Mapping of Information Engineering University, Henan Zhengzhou 450052;  
2. 54th Institute of Ministry of Information Industry, Hebei Shijiazhuang 050081)

**Abstract** The data processing methods of surface antenna's calibration are deeply discussed in this paper. There are two steps from 3D measuring coordinates to useful information (for example, surface accuracy): coordinate transformation and surface accuracy calculation. The first step is more important. Three methods (surface free transformation, common point coordinate transformation and CAD surface transformation) are discussed in this paper. The mathematic models and formulas of these methods are deduced and some results are given finally. According to the theoretical analysis and actual calculation we can see that the CAD surface model fitting is the best method because it needs neither the surface equation nor common point

but the CAD surface and its result is reliable. If there is no CAD surface model but a number of common points , then the common point coordinate transformation is a better method , but its result would be influenced by the accuracy of common points . If there exists neither CAD surface model nor common point or the accuracy of common points is low , the surface free fitting is also a good method , which has a high surface precision but the calculated surface might be shifted.

**Subject terms** Calibration    Coordinate transformation    Surface free fitting    Common point    CAD Surface model

1 引 言

以电子经纬仪测量系统和激光干涉跟踪测量系统为代表的大尺寸工业测量系统(也称非正交坐标测量系统<sup>[1]</sup>)在现代面天线检测中得到了广泛的应用,给面天线检测带来了一场革命。在这场革命中,有两个问题需要特别关注:其一是怎样获取被测物(天线)的高准确度三维坐标,其二是如何对三维坐标数据进行科学正确的处理,以获取用户真正感兴趣的信息。本文以某旋转抛物面天线面型检测为例,着重对后一问题进行讨论。

由图 1<sup>[1]</sup>可以看出影响被测参数测量不确定度的因素众多,其中拟合算法是比较重要的一个环节,而拟合算法存在的原因则是由于坐标测量机硬件误差、工件形状误差及采样策略等因素的影响。本文重点介绍在算法的选择及程序实现(图 1 中的虚线框部分)。

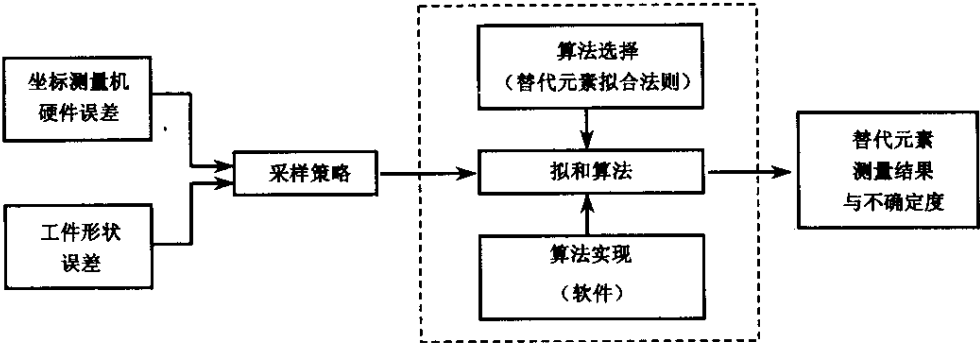


图 1 影响被测参数测量不确定度的因素

2 坐标系的观念

测量总是在一定的时空中进行,因而离不开坐标系的定义。面天线测量中经常用到如下两种坐标系:测量坐标系,工件坐标系。而拟合算法的关键就是以某种法则确定这两个坐标系之间的关系。

测量坐标系是由工业测量系统硬件定义的坐标系,如激光干涉跟踪测量系统的测量坐标系是由激光跟踪仪本身确定的球坐标系。经纬仪测量系统的坐标系定义较复杂,如图 2 所示,一般选取第一台仪器的三轴中心 1 为坐标原点,两台仪器中心连线 1、2 在水平面上的投影为 X

轴,过第一台仪器的铅垂线为  $z$  轴,建立右手直角坐标系,天线的所有测量坐标都是在测量坐标系下获得的。

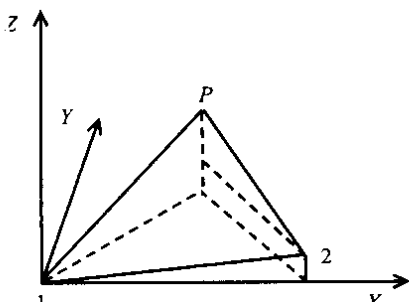


图2 测量坐标系

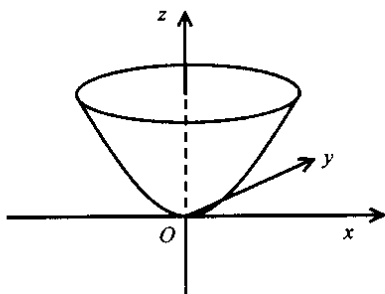


图3 工件坐标系

工件坐标系(以旋转抛物面为例)如图3所示,以抛物线的旋转轴为  $z$  轴,抛物线的顶点  $O$  为坐标原点,任意指定与  $z$  轴垂直的方向为  $x$  轴方向,建立右手直角坐标系。在该坐标系下, $z$  轴为抛物线的旋转轴,物理意义明显,而且抛物面的方程非常简单。设抛物线的方程为  $z = f(x)$ ,则旋转抛物面的方程为  $z = f(\sqrt{x^2 + y^2})$ 。

### 3 数据处理方法

由上述坐标系定义可知,在工件坐标系下面天线的数学模型简单,参数意义明显,但在测量坐标系下就比较复杂而且意义不明,因此数据处理分两步:首先将三维坐标从测量坐标系转换到工件坐标系中,然后在工件坐标系中进行表面误差计算。

#### 3.1 坐标转换方法

坐标转换计算有三种方法:其一是曲面自由拟合法,其二是公共点转换法,还有一种是测量数据和设计面型(CAD面型)直接进行转换和比较法。

##### 3.1.1 曲面自由拟合法

测量坐标系与工件坐标系之间存在三个平移参数和三个旋转参数,记为  $(X_0, Y_0, Z_0, \varphi, \theta, \psi)$ 。用曲面自由拟合法时,由于旋转抛物面的特殊性(工件坐标系  $x$  轴可任意指定),可以固定  $\psi$  为常数(如  $\psi = 0$ )。因此只剩三个平移参数和两个旋转参数,即  $(X_0, Y_0, Z_0, \varphi, \theta)$ 。设天线在工件坐标系下的坐标为  $(x, y, z)$ ,在测量坐标系下的坐标为  $(X, Y, Z)$ ,那么工件坐标系下的天线方程可写为

$$F = z - f(\sqrt{x^2 + y^2}) = 0 \quad (1)$$

工件坐标系与测量坐标系之间的转换关系为<sup>[2]</sup>

$$\begin{pmatrix} x \\ y \\ z \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \cos\varphi & \sin\varphi & 0 \\ -\sin\varphi\cos\theta & \cos\varphi\cos\theta & \sin\theta \\ \sin\varphi\sin\theta & -\cos\varphi\sin\theta & \cos\theta \end{pmatrix} \begin{pmatrix} X - X_0 \\ Y - Y_0 \\ Z - Z_0 \end{pmatrix} \quad (2)$$

由于  $(x, y, z)$  是  $(X_0, Y_0, Z_0, \varphi, \theta)$  的函数,因此  $F$  也是  $(X_0, Y_0, Z_0, \varphi, \theta)$  的函数。根据  $n$  个测

量点 $(X_i, Y_i, Z_i)$ 利用迭代最小二乘法计算可求出参数 $(X_0, Y_0, Z_0, \varphi, \theta)^{[3]}$ 。

最小二乘拟合原则是以误差的平方和为最小,因此这种方法所得出的表面误差最小。但是实际的天线设计往往只取旋转抛物面中的某一小部分,由于曲面自由拟合法没有给定实际天线的边界条件,因此这种方法计算出的结果可能会使天线出现错位的情况。

### 3.1.2 公共点转换法

使用公共点转换法的前提是天线上存在公共点(有设计坐标),此时两坐标系之间有三个平移参数和三个旋转参数,记为 $(X_0, Y_0, Z_0, \varepsilon_x, \varepsilon_y, \varepsilon_z)$ 。设公共点在测量坐标系下的坐标为 $(X, Y, Z)$ ,在工件坐标系下的坐标为 $(x, y, z)$ ,工件坐标系与测量坐标系之间的转换关系为 $^{[2]}$

$$\begin{pmatrix} x \\ y \\ z \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} a_1 & b_1 & c_1 \\ a_2 & b_2 & c_2 \\ a_3 & b_3 & c_3 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} X - X_0 \\ Y - Y_0 \\ Z - Z_0 \end{pmatrix} \quad (3)$$

给定近似值 $(X_0^0, Y_0^0, Z_0^0, \varepsilon_x^0, \varepsilon_y^0, \varepsilon_z^0)$ ,利用迭代最小二乘法计算,最后可求出转换参数 $(X_0, Y_0, Z_0, \varepsilon_x, \varepsilon_y, \varepsilon_z)^{[4]}$ 。

理论上如果存在3个以上的公共点,就可求出坐标转换参数,实际应用时应注意公共点的空间分布,最好均匀地分布在整个曲面上,以使其有较好的代表性(也是采样策略的问题)。当设计值与实测值存在尺度误差时(如热胀冷缩引起的长度变化),公共点转换法还可以求出尺度因子,这时实际上是7参数转换法。公共点转换法要求有已知的设计坐标,其准确度在制造过程中一般不易保证,因此转换误差较大。

### 3.1.3 CAD面型转换法

CAD面型转换法 $^{[5]}$ 是用曲面实测的离散数据点和设计的CAD曲面直接进行转换和比较。由于曲面自由拟合法没有约束边界条件,公共点转换法因公共点的设计坐标准确度较低(加工误差及变形)影响坐标转换的准确度,使得两种方法都不很理想,而CAD面型转换法克服了二者的不足,既克服了曲面自由拟合的无边界条件约束,又克服了公共点转换法中公共点准确度较低的缺点。其计算过程如图4所示,将CAD面型输入到程序中,和测量数据显示于一个窗口(图4a),然后人工调整CAD面型和实测数据,使其大概重合,此过程为确定近似坐标转换参数的过程,一旦确定近似坐标转换参数后,程序就可以进行拟合计算,直至所有离散点距离曲面距离平方和最小时(图4b)停止计算,图4c为实际面型相对于CAD面型的针形误差(法向偏差量)图,从该例可以非常直观地看出实际形状较理论曲面中间凸起,两端下沉。

实际计算时注意应尽可能精确地确定近似参数,如此可减少迭代计算时间。CAD面型转换法计算出的表面误差比较客观真实,同时有较强的图形显示和分析功能,是一种非常好的方法。

## 3.2 表面误差计算

如图5所示,对于标准抛物线 $x^2 = 4fz$ , $Oz$ 为抛物线的旋转轴, $F$ 为焦点, $P'$ 为实测点, $P$ 为 $P'$ 所对应的理论点, $PP''$ 是过 $P$ 点的法线。由抛物线的性质可知 $^{[3]}$ ,法线方向 $PP''$ 与轴向 $z$ 方向的夹角为

$$\operatorname{tg} \theta = \frac{x}{2f} \quad (4)$$

可求出 $P'$ 点沿轴向的偏移量 $PP'$ 为轴向误差

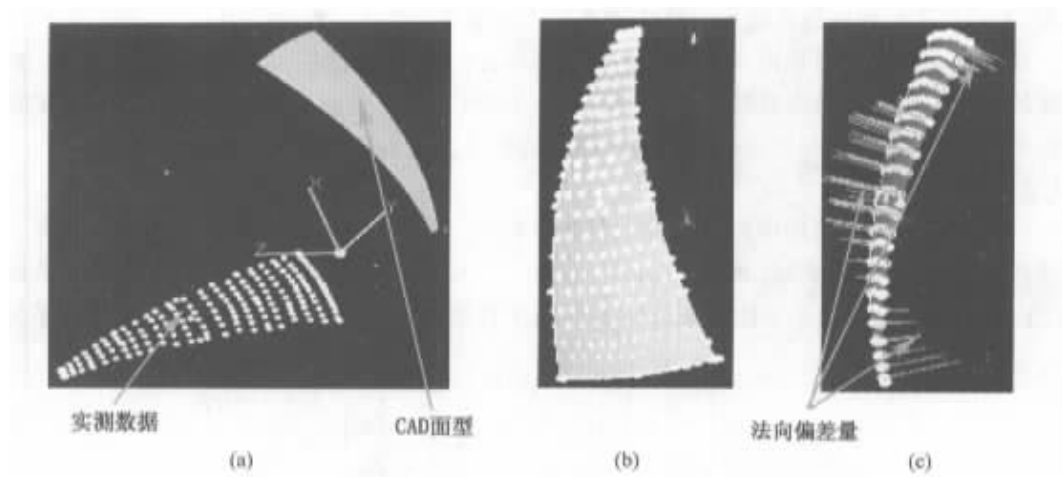


图4 CAD面型转换法计算过程

$$\Delta_z = z - \frac{x^2}{4f} \quad (5)$$

因此法向误差  $PP''$  为

$$\Delta = \Delta_z \cos \theta \quad (6)$$

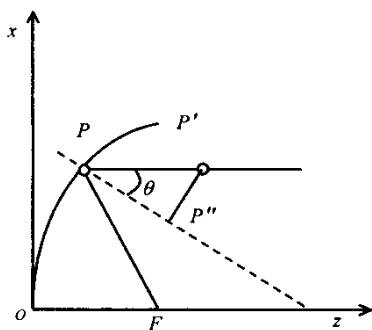


图5 表面误差计算图

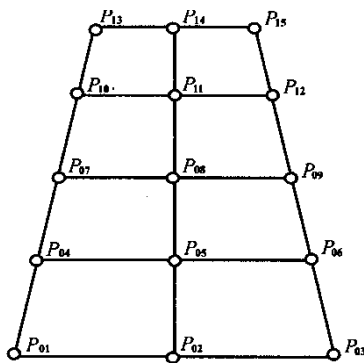


图6 模胎公共点分布图

## 4 实测数据分析

测量实例为在天线模胎上测量了 170 个点, 这些点基本上涵盖了整个天线面, 见图 4a。选取其中的 15 个点  $P_{01} \sim P_{15}$  点为公共点(有设计坐标), 公共点点位分布见图 6。从理论上讲, 如果没有测量误差、加工误差、面板变形及采样策略等因素的影响, 三种处理方法得到的结果应该是完全相同的。但由于上述因素的影响是不可避免的, 因而三种方法得到的结果肯定不同, 结果分别见表 1、表 2 和表 3。

表 1 曲面自由拟合法公共点结果及表面误差					
公共点	曲面自由拟合后坐标值		设计坐标值		法向偏差 ( mm )
	$x( mm )$	$y( mm )$	$x( mm )$	$y( mm )$	
$P_{01}$	3 092.486	- 84.905	3 100.000	- 78.7	0.072
$P_{02}$	3 090.884	- 86.185	3 100.000	- 78.7	0.117
$P_{03}$	3 090.992	- 85.457	3 100.000	- 78.7	0.606
$P_{04}$	2 480.723	- 542.984	2 489.200	- 537.076	- 0.090
$P_{05}$	2 479.982	- 543.389	2 489.200	- 537.076	- 0.020
$P_{06}$	2 479.490	- 543.548	2 489.200	- 537.076	0.118
$P_{07}$	1 828.608	- 911.185	1 839.200	- 906.100	0.155
$P_{08}$	1 827.669	- 911.718	1 839.200	- 906.100	0.070
$P_{09}$	1 827.073	- 911.870	1 839.200	- 9 06.100	0.185
$P_{10}$	1 077.066	- 1 177.164	1 088.800	- 1 174.700	0.344
$P_{11}$	1 076.149	- 1 177.693	1 088.800	- 1 174.700	0.042
$P_{12}$	1 075.541	- 1 178.101	1 088.800	- 1 174.700	- 0.213
$P_{13}$	297.902	- 1 268.608	310.000	- 1 268.750	0.119
$P_{14}$	296.238	- 1 268.725	310.000	- 1 268.750	- 0.005
$P_{15}$	295.190	- 1 268.445	310.000	- 1 268.750	0.270
整体坐标转换误差 0.106 mm 模胎表面误差( 170 个点平均法向偏差 ) 0.106 mm					

表 2 公共点转换法公共点结果及表面误差					
公共点	公共点坐标转换后坐标值		设计坐标值		法向偏差 ( mm )
	$x( mm )$	$y( mm )$	$x( mm )$	$y( mm )$	
$P_{01}$	3 101.299	- 77.322	3 100.000	- 78.7	0.228
$P_{02}$	3 100.088	- 78.062	3 100.000	- 78.7	0.438
$P_{03}$	3 100.226	- 77.130	3 100.000	- 78.7	1.060
$P_{04}$	2 490.758	- 537.029	2 489.200	- 537.076	- 0.664
$P_{05}$	2 490.486	- 536.999	2 489.200	- 537.076	- 0.489
$P_{06}$	2 490.057	- 536.995	2 489.200	- 537.076	- 0.243
$P_{07}$	1 839.622	- 906.967	1 839.200	- 906.100	- 0.713
$P_{08}$	1 839.220	- 907.179	1 839.200	- 906.100	0.733
$P_{09}$	1 838.713	- 907.210	1 839.200	- 906.100	- 0.545
$P_{10}$	1 088.789	- 1 174.947	1 088.800	- 1 174.700	- 0.240
$P_{11}$	1 088.458	- 1 175.286	1 088.800	- 1 174.700	- 0.492
$P_{12}$	1 087.957	- 1 175.623	1 088.800	- 1 174.700	- 0.702
$P_{13}$	309.846	- 1 268.466	310.000	- 1 268.750	0.284
$P_{14}$	308.809	- 1 268.531	310.000	- 1 268.750	0.218
$P_{15}$	307.869	- 1 268.234	310.000	- 1 268.750	0.514
公共点坐标转换误差( 15 个点 ) : 1.384 mm 模胎表面误差( 170 个点平均法向偏差 ) 0.512 mm					

表 3 CAD 面型转换法公共点结果及表面误差

公共点	CAD 转换后坐标值		设计坐标值		法向偏差 ( mm )
	$x( mm )$	$z( mm )$	$x( mm )$	$z( mm )$	
$P_{01}$	3 101.145	- 77.090	3 100.000	- 78.7	0.503
$P_{02}$	3 099.979	- 77.985	3 100.000	- 78.7	0.567
$P_{03}$	3 100.166	- 77.189	3 100.000	- 78.7	1.057
$P_{04}$	2 490.552	- 536.728	2 489.200	- 537.076	- 0.300
$P_{05}$	2 490.303	- 536.822	2 489.200	- 537.076	- 0.240
$P_{06}$	2 489.903	- 536.928	2 489.200	- 537.076	- 0.108
$P_{07}$	1 839.375	- 906.593	1 839.200	- 906.100	- 0.269
$P_{08}$	1 838.976	- 906.896	1 839.200	- 906.100	- 0.373
$P_{09}$	1 838.483	- 907.008	1 839.200	- 906.100	- 0.264
$P_{10}$	1 088.511	- 1 174.488	1 088.800	- 1 174.700	0.271
$P_{11}$	1 088.171	- 1 174.882	1 088.800	- 1 174.700	- 0.032
$P_{12}$	1 087.670	- 1 175.267	1 088.800	- 1 174.700	- 0.288
$P_{13}$	309.558	- 1 267.920	310.000	- 1 268.750	0.829
$P_{14}$	308.506	- 1 268.000	310.000	- 1 268.750	0.749
$P_{15}$	307.564	- 1 267.717	310.000	- 1 268.750	1.031

整体坐标转换误差 0.419 mm      模胎表面误差( 170 个点平均法向偏差 ) 0.366 mm

从表 1、表 2 和表 3 中可以看出 , 曲面自由拟合法所得误差最小 , 公共点转换法误差最大 , CAD 面型转换法介于二者之间。但如果再比较公共点的测量坐标与设计坐标的接近程度 , 公共点转换法和 CAD 面型转换法所得结果更接近设计坐标 , 曲面自由拟合法离得比较远。在天线数据处理中 , 面型的定位是比较重要的 , 虽然曲面自由拟合法得出的表面误差最小 , 但拟合曲面是数学上的最优面 , 已偏离理论设计面 , 因此高准确度是虚假的。CAD 面型转换法和公共点转换法可以较好地控制天线不发生错位 , 但公共点转换法所得结果受公共点坐标准确度的影响比较大 , 而 CAD 面型转换法既能够得到较高的转换准确度又可以控制天线的定位 , 因此是三者中最理想的方法。

5 结束语

通过以上讨论 , 对于本文所提出的三种坐标转换方法可以得出如下一些结论和认识 :

- 1) CAD 面型转换法既不需要天线的曲面方程 , 也不需要已知公共点 , 结果可靠、准确 , 是一种理想的方法 ;
- 2) 如果没有天线的 CAD 面型 , 但却存在公共点时 , 公共点转换法也是较理想的方法 , 其结果与给定的公共点误差有关 ;
- 3) 如果既没有天线的 CAD 面型又无公共点或公共点误差很差时 , 只能用曲面自由拟合法 , 该法准确度最高 , 但容易使天线面型产生错位现象。

## 参 考 文 献

- [1] 张国雄等.三坐标测量机[M].天津:天津大学出版社,1999.
- [2] 李广云,倪涵,徐忠阳.工业测量系统[M].北京:解放军出版社,1994.
- [3] 李广云.工业测量系统进展[M].北京:解放军出版社,2000.
- [4] 李宗春,李广云,卢志辉.余割波束天线检测方法的研究[J].电波科学学报,2001,16(3):363-366.
- [5] LI Zong-chun, LI Guang-yun and JIN Chao, "On the Data Processing Methods of Surface Antenna's Inspection", FIG web site, 2002.

## 热学技术服务

航天第一计量测试研究所热学室,是国防科工委热学计量一级站。建立有低温、中温和高温标准,对热电偶、热电阻和各种温度传感器的温度覆盖范围为:4~1873K。建有辐射温度标准,温度范围为50℃~2200℃;对红外辐射温度计检定,开口式黑体炉温度范围为50℃~1500℃。建有辐射热流标准,范围1W/cm<sup>2</sup>~150W/cm<sup>2</sup>;在建一等湿度标准,湿度范围为:露点温度-58℃~85℃,相对湿度0.01%~100%。

我们热学标准是为国防工业提供技术保障,充分发挥军工优势,为社会各企业提供优质服务。检定的种类有:热电偶、热电阻、各种温度传感器、辐射温度计、红外温度计、热流计和热流传感器、温度计和湿度仪表、热工二次仪表等。同时开展温度箱、湿度箱、各种工业炉、材料导热系数和发射率等测试服务。

除计量检定和测试外,我们根据多年的经验,研制了便携式标准黑体炉、热电偶现场校验炉、标准黑体面源、温度传感器自动校准系统等计量检定设备;有标准和工业热电偶、温度传感变送器、便携数字温度计等产品;为特殊用户设计过蒸汽发生器、高低温箱等非标准设备;多次承接热力测试工程;为企业提供技术咨询。

联系地址 北京 9200 信箱 24 分箱

邮 编 :100076

联 系 人 :王文革

电 话 :010-68383694



## 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](http://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](http://www.edatop.com))由数名来自于研发第一线的资深工程师发起成立，一直致力和专注于微波、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](http://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>