

基于区域分割技术的等距天线曲面重构

全志民^{1,2}, 唐文彦¹, 马 强¹, 李慧鹏¹

(1. 哈尔滨工业大学 电气工程及自动化学院, 黑龙江 哈尔滨 150001;
2. 黑龙江八一农垦大学 信息技术学院, 黑龙江 大庆 163319)

摘 要:针对逆向工程中空间坐标测量时仪器测头半径或靶标厚度的误差补偿问题,提出了对散乱点云数据进行自动区域分割的方法。快速搜索出子区域中测点的最近邻域,利用测点最近邻域构造一个有约束的最小二乘切平面,得到曲面在该测点处的法线矢量。基于 Prim 算法的优化算法对法线矢量方向进行调整,使各测点处的法线矢量都指向曲面同一侧,进而求取了实际曲面上的点。对于经过误差补偿后的点云数据,从空间任意二次曲面的一般方程出发,基于二次曲面的误差方程和法方程提出一种通用拟合算法,并借助二次型理论得到曲面的特征参数。实验结果证明:应用该区域分割算法能够提高最近邻域的搜索速度,且曲面拟合算法具有很好的鲁棒性和有效性。

关键词:逆向工程;散乱数据;区域分割;等距曲面;二次曲面

中图分类号:TP 391 **文章编号:**1005-9830(2008)05-0585-05

Reconstruction of Antenna Offset Surface Based on Segmentation Technique

TONG Zhi-min^{1,2}, TANG Wen-yan¹, MA Qiang¹, LI Hui-peng¹

(1. School of Electrical Engineering and Automation, Harbin Institute of Technology, Harbin 150001, China;
2. School of Information Technology, Heilongjiang August First Land Reclamation University, Daqing 163319, China)

Abstract: A new method of automatic segmentation of the scattered point-cloud data is presented in view of the error compensation of the radius of the instrument probe or the thickness of the targets in spatial coordinates measurement in reverse engineering. The nearest neighborhood of a measured point is searched quickly within the child areas and a constrained least square tangent plane of the surface at each point is constructed with the points in the neighborhood and the normal vectors at the point are obtained. The normal vectors of the tangent planes are adjusted to the same direction by using the Prim-based optimal arithmetic. The real points on the surface are obtained. In order to reconstruct the surface, using the compensated point-cloud data, a universal fitting arithmetic from the general equations of the quadric surface is proposed based on the error equations and vector equations of the quadric surface. The characteristic parameters of the surface are obtained by virtue of quadratic theory. Ex-

收稿日期:2007-05-17 修回日期:2008-07-13

作者简介:全志民(1977-),男,山东邹城人,博士生,主要研究方向:大尺寸工业测量方法及其应用,E-mail:tong-zhm@hit.edu.cn。

perimental results show that the searching speed of the nearest neighborhood is improved by using the segmentation method and the arithmetic of the surface fitting is proved robust and efficient.

Key words: reverse engineering; scattered data; region segmentation; offset surfaces; quadric surfaces

三坐标测量机或其他的三维坐标测量设备的测头与被测表面接触(见图1),当测头在被测表面移动时,测头球心和接触点的连线(公法线)始终垂直于接触点表面,且长度为测头半径 r ,所形成的测头中心轨迹为实际曲线(或曲面)的等距曲线(或曲面)。坐标测量机输出的坐标值实际上是测头中心的坐标值,而被测点应该为测头与被测表面的接触点,所以应该将测头中心点的轨迹转换为接触点的轨迹(实际曲面)。由于测头中心点的轨迹是实际曲面的等距曲面,而天线曲面与其等距面不具有相似性^[1,2],因而需通过数据的预处理将测量点转换为待测表面上的点坐标,再进行曲面重构。

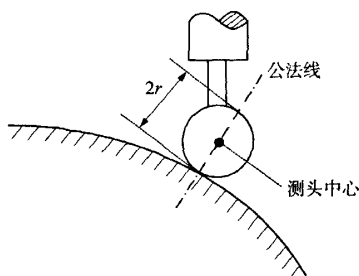


图1 坐标测量设备测头与被测表面相对位置

数据预处理的过程实际上就是对测量数据进行测头半径补偿的过程,其关键就是精确获取测量点处的曲面法线矢量。通常情况下将测得的物体表面的散乱点数据进行空间区域分割,搜索测量点在其相应区域内的 k 个最近邻域,在区域尽可能小的情况下,利用测量点的最近邻域计算曲面在该测量点处的切平面,切平面的法线矢量就是曲面在测量点处的法线矢量。然后在法线矢量方向对测量点进行测头半径补偿,得到实际表面上的待测点坐标。区域分割有两种方法:一种是手工提取点云数据的边界,然后利用这些边界将点云数据分割,对分割后的每一片点云,手动选定一定的曲面进行拟合,这种方法精度差,效率低;另一种方法是自动提取点云数据的边界,自动进行数据分割。点云数据的自动分割目前主要集中在规则点云数据的研究^[3,4],基于规则点云数据的自动分割的应用范围有明显的局限性。

本文重点研究基于散乱点数据的区域分割技

术及其最近邻域搜索方法,首先阐述散乱点区域分割及最近邻域搜索算法并计算曲面法线矢量,然后给出利用计算得到的实际曲面点进行天线曲面重构的算法,最后通过实验验证了算法的正确性。

1 点云数据预处理

在二维或三维散乱点集中,与某一个测点 P_i 的直线距离最短的 k 个测点称为 P_i 的 k -近邻,记为 $k\text{-Nbhd}(P_i)$,它广泛应用于散乱数据的曲面重建、插值、地理信息系统及微分几何等领域。通常,求取某点 P_i 的 $k\text{-Nbhd}(P_i)$ 的方法是计算点 P_i 与其余各点的欧氏距离,并按其距离大小升序排列其余各点,前 k 个点即为 P_i 的 $k\text{-Nbhd}(P_i)$ 。该方法由于实际测量数据量很大,因此计算数据点 P_i 的 $k\text{-Nbhd}(P_i)$ 工作量大。针对此问题一些学者进行了快速算法的研究,但都没有很好地解决计算量和搜索速度的最佳组合问题^[5-8]。本文在空间分块策略的基础上提出一种新的 $k\text{-Nbhd}(P_i)$ 的快速搜索算法。该算法根据数据集的取值范围和测量数据点的数量选择最近邻域点的数目 k ,同时确定接近于最佳搜索速度的分块大小,改进搜索终止准则以进一步提高 $k\text{-Nbhd}(P_i)$ 的搜索速度。

1.1 点云数据的空间分块

为了对点云数据进行空间分块,首先应确定包含所有 n 个点云数据的欧氏空间的范围 (x_{\min}, x_{\max}) 、 (y_{\min}, y_{\max}) 、 (z_{\min}, z_{\max}) ,将点云数据空间均分成 n_c 个边长为 L 的立方体子空间,则有:

$$n_c = \frac{x_{\max} - x_{\min}}{L} \cdot \frac{y_{\max} - y_{\min}}{L} \cdot \frac{z_{\max} - z_{\min}}{L} \quad (1)$$

假设分割得到的每个立方体子空间中平均数据点个数是 k 的线性函数,则有:

$$n/n_c = \alpha k \quad (2)$$

式中: α 为线性系数。将式(1)代入式(2),同时令 $\beta = \sqrt[3]{\alpha}$,整理后得到立方体子空间的边长 L 为:

$$L = \beta \cdot \sqrt[3]{\frac{k}{n} (x_{\max} - x_{\min}) (y_{\max} - y_{\min}) (z_{\max} - z_{\min})} \quad (3)$$

式中: β 用于调节立方体子空间边长的大小。利用式(3)对立体子空间边长 L 进行估计时,综合考虑了点云数据集的空间范围、数据总量 n 以及最近邻域点的个数 k 。 β 的取值由拟合误差控制下的区域生长的分割算法来确定,在候选点的最近邻域点的个数 k 一定且给定曲面切平面的拟合误差的阈值 δ 的情况下,满足切平面拟合误差小于 δ 的最小 β 值所确定的 L 就是区域分割立方体子空间的最小边长。实际执行过程中,先给予空间划分中的 β 值赋一个较小初值,根据曲面切平面的拟合误差的大小自动调整 β ,即如果拟合误差大于阈值 δ 则 β 增加一个步长 s ,也就是将立体子空间的大小外展一圈再进行拟合,直到满足拟合误差小于阈值 δ 。此时,子空间的边长 L 达到最优。通过实验分析可知,对于不同疏密程度和不同拓扑结构的三维空间点云数据,都可以给出统一的接近于最佳 k -Nbhd(P_i)搜索速度的 β 值,因此该空间分块算法具有较强的适应性和一般性^[9]。

1.2 k -Nbhd(P_i)的搜索

第 1.1 节将点云数据空间分割成 n_c 个立方体子空间结构 $Cube(i, j, k)$ ($i = 1, \dots, n_x; j = 1, \dots, n_y; k = 1, \dots, n_z$), 其中

$$\begin{aligned} n_x &= \lceil (x_{\max} - x_{\min}) / L \rceil \\ n_y &= \lceil (y_{\max} - y_{\min}) / L \rceil \\ n_z &= \lceil (z_{\max} - z_{\min}) / L \rceil \end{aligned} \quad (4)$$

式中 $\lceil \cdot \rceil$ 表示向上取整。对每个候选点 P_i 搜索 k -Nbhd(P_i)的步骤如下:(1)根据候选点 P_i 的三维坐标值,搜索所在立方体子空间 $Cube(i, j, k)$;(2)分别计算候选点 P_i 到当前立方体子空间六壁的最短距离 d_{\min} ;(3)在当前子空间内搜索与候选点 P_i 最近的 k 个点,按距离升序的方式记录 k 个邻近点与候选点间的距离及其序号,同时对访问过的立方体子空间进行标记;(4)在当前子空间内,如果候选点 P_i 的 k -Nbhd(P_i)已找到,并且候选点到第 k 个最近点的距离小于 d_{\min} ,则候选点的 k -Nbhd(P_i)搜索结束。记录它们的序号,并对已标记的立方体子空间进行复位,以便于下一个候选点的 k -Nbhd(P_i)搜索;否则,子空间向外扩张一圈,返回步骤(2)继续搜索。

2 曲面法线矢量求取及调整

2.1 切平面计算

待重建曲面在每个测点 P_i 处的切平面 $T_p(P_i)$

是在完成测点 P_i 的 k -Nbhd(P_i)计算的基础上求取的。通常切平面是利用 P_i 的 k -Nbhd(P_i)构造的一个最小二乘平面^[10],该平面通过 k -Nbhd(P_i)的形心,一般不通过测点 P_i ,因此这样形成的切平面往往会在测点处产生几何位置偏差,在曲率较大的尖锐棱边和曲面的边界处偏差会更大。本文在此基础上加以改进,即利用 P_i 的 k -Nbhd(P_i)构造一个有约束的最小二乘平面,将测点 P_i 直接设定成待求切平面的中心,此时只要求出能使 k 个最近邻域点到该切平面的距离平方和最小的切平面的法线矢量量 N_i 即可。假定 O 为 k -Nbhd(P_i)的形心,其坐标值为 (x_0, y_0, z_0) ; P_i 的坐标值为 (x_i, y_i, z_i) ,则 k 个最近邻域点的协变矩阵 M_{cov} 可以表示为:

$$M_{\text{cov}} = \sum_i [(P_i - O) \cdot (P_i - O)^T] \quad (5)$$

式中 $(P_i - O) = [x_i - x_0 \ y_i - y_0 \ z_i - z_0]^T$, 则 M_{cov} 为一个对称的半正定 3×3 矩阵。采用逆迭代法求取矩阵的最小特征值 λ_{\min} , 则其对应的单位特征向量 V_{\min} 就是所要求的切平面的法线矢量量 N_i 或其负向。

2.2 法线矢量调整

上述方法得到的法线矢量的方向存在不一致性,即有些数据点处的法线矢量指向曲面内侧,有些数据点处的法线矢量指向曲面外侧。由于在进行等距曲面复原时要求法线矢量的方向保持一致,所以对计算得到的法线矢量方向进行调整。法线矢量调整算法通常从点云数据中某一点 P_i 开始,利用一定的优先准则选择该点的一个邻接点 P_j ,如果 $N_i \cdot N_j < 0$,则将 j 点的法线矢量 N_j 的方向取反;否则, N_j 的方向不变。如此搜索下去,直到所有数据点处的法线矢量都调整完毕。在法线矢量调整的过程中,数据点的搜索顺序会影响调整后的结果。本文直接利用最小生成树的实现算法达到对所有数据点的法线矢量进行调整的目的,而不需要再遍历最小生成树。该算法是在 Prim 算法的基础上实现的,其基本思想是:从 Riemannian 图^[6]的某一顶点 P_i 出发,选择与它邻接的具有最小权值的边 $e(P_i, P_j)$,将顶点加入到生成树的顶点集合 U 中,比较这两点处的法线矢量,如果 $N_i \cdot N_j < 0$,则将 N_j 的方向取反。以后每一步从一个顶点在 U 中,而另一个顶点不在 U 中的各边中选择权值最小的边 $e(u, v)$,点 u 为集合 U 内的点,即已经搜索过的点, v 为集合外的点,即需要调整的点。比较这两点处的法线矢量 N_u, N_v 。如果 $N_u \cdot N_v < 0$,则

将 N_i 的方向取反,并把 v 点加入到集合 U 中、如此继续下去,直到网络中的所有顶点都加入到生成树的顶点集合 U 中。

3 天线曲面重构

实际的空间天线测量中,测得的数据点往往都是其等距曲面上的点,为拟合得到实际的天线曲面形状和位置等特征参数,首先应对测量点进行补偿。采用第 1 节和第 2 节介绍的区域分割法和法线矢量方向求解法得到 P_i 点处的法线矢量 n ,假定实际曲面上的对应点为 P_0 ,在测头半径 r 或靶标厚度 d 已知的情况下,则可以根据如下公式进行补偿:

$$P_0 = P_i + r \cdot n \quad \text{或} \quad P_0 = P_i + d \cdot n \tag{6}$$

然后利用二次曲面的一般形式来拟合曲面。空间任意二次曲面的一般方程为:

$$f(x,y,z) = a_{11}x^2 + a_{22}y^2 + a_{33}z^2 + 2a_{12}xy + 2a_{13}xz + 2a_{23}yz + a_{14}x + a_{24}y + a_{34}z + a_{44} = 0 \tag{7}$$

式中 $a_{ij}(i,j=1,2,3,4)$ 是实数。

由于存在观测误差和变形,观测坐标 $(x,y,z)^T$ 不满足式(7),将其不符合部分作为观测值,列出误差方程:

$$V = \hat{a}_{11}x^2 + \hat{a}_{22}y^2 + \hat{a}_{33}z^2 + 2\hat{a}_{12}xy + 2\hat{a}_{13}xz + 2\hat{a}_{23}yz + \hat{a}_{14}x + \hat{a}_{24}y + \hat{a}_{34}z + \hat{a}_{44} \tag{8}$$

其矩阵形式为 $V_i = A_i \Delta a - L_i$,组成法方程:

$$M \Delta a = C \tag{9}$$

式中: $M = A^T A$ 为法方程系数阵, A 为误差矩阵; $C = A^T L$, L 为常数向量; Δa 为拟合修正系数。

$$R^T N R = A \tag{10}$$

式中 $A = \begin{bmatrix} \lambda_1 & & \\ & \ddots & \\ & & \lambda_9 \end{bmatrix}$ 。

特征根和特征向量矩阵 R 可采用适合计算机的 Jacobi 正交变换方法求解。借助二次型理论把二次曲面的一般形式化为标准形式,即可得到旋转抛物面的各个特征参数。

4 实验结果分析

利用三坐标测量机(CMM)对空间天线面进行测量,所用测头半径为 3 mm。部分测量点数据如表 1 左侧所示,这些点即为空间天线曲面等距面上的点。

表 1 空间天线测量数据及补偿后的数据点

测量数据点			补偿后的数据点			拟合误差
x	y	z	X	Y	Z	σ
-77.046	-118.64	99.971	-74.825 4	-115.239 1	97.055 1	0.002
2.481	-142.146	100.842	2.632 4	-138.071 8	97.947 5	0.006
140.245	27.261	101.564	144.288 6	28.036 4	98.727 1	0.004
139.208	32.139	101.395	140.405 2	36.020 0	98.478 8	0.003
-19.884	-141.479	102.098	-19.300 8	-137.403 2	99.261 1	0.008
\vdots	\vdots	\vdots	\vdots	\vdots	\vdots	\vdots

通过区域分割求取每个测点的 $k-Nbhd(P_i)$,利用 k 个最近邻域点拟合平面得到切平面的法线矢量方向,并在此方向上对测量点进行测头半径补偿,得到实际曲面上的坐标点如表 1 右侧所示。

利用本文所述方法求取的曲面各点的法线矢量与其实际法线矢量如表 2 所示。由表 2 可以看出,二者差别甚小,故可以直接利用区域分割法所求取的法线矢量回归计算实际曲面上的点坐标。而数据拟合最大误差为 0.008 mm,可以看出该算法具有很高的拟合精度。

计算得到的几何参数与设计参数如表 3 所示。由表 3 可知,二者显然具有很高的拟合精度。图 2 给出了利用散乱数据点、通过测头半径补偿求取实际曲面的过程及曲面的拟合结果。

表 2 曲面的实际法线矢量与所求法线矢量

实际法线矢量			所求法线矢量		
M	N	P	m	n	p
0.445	0.685	-0.577	0.444 122	0.680 178	-0.583 19
0.029	0.817	-0.575	0.030 281	0.814 837	-0.578 90
0.804	0.156	-0.574	0.808 717	0.155 079	-0.567 39
0.239	0.781	-0.577	0.239 440	0.776 198	-0.583 25
0.114	0.811	-0.574	0.116 643	0.815 154	-0.567 38
\vdots	\vdots	\vdots	\vdots	\vdots	\vdots

通过实验可以看出,对边缘直径为 500 mm 的抛物面测量 800 个坐标点,并进行空间 8-Nbhd 搜索,如果不进行空间区域分割直接进行空间 8-Nbhd 搜索,需要 1.5 min,而用本文算法对数据进行空间区域分割后,再进行空间 8-Nbhd 搜索则只需要 2 s。

表 3 抛物面几何参数

	x_0/mm	y_0/mm	z_0/mm	曲率	M	N	P
拟合值	0.001 11	-4.34×10^{-5}	-8.32×10^{-7}	100.006 5	-5.53×10^{-6}	2.15×10^{-7}	0.999 99
设计值	0	0	0	100	0	0	1

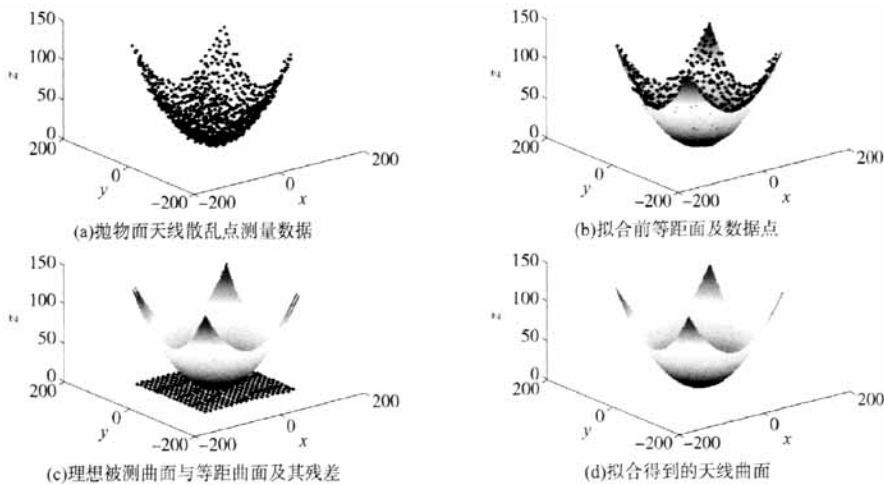


图 2 天线曲面的拟合过程及结果

5 结束语

本文基于空间自动分割策略,采用新的 $k - \text{Nbhd}(P_i)$ 的搜索算法,构造出空间曲面上某点处的有约束最小二乘切平面,并沿其法线矢量方向对测量数据进行测头半径或靶标厚度补偿,求取空间曲面上的实际测量点坐标。实验证明,该算法在空间区域自动分割的基础上进行最近邻域搜索,其搜索速度提高了数十倍,同时保证了曲面测量点的法线矢量的求取精度。而且,从二次曲面一般方程出发进行曲面重构,采用 Jacobi 正交变换和二次型理论找寻其与标准方程的关系,进而求取曲面的特征参数,开辟了二次曲面拟合的新思路,实验证明该算法具有很高的曲面拟合精度。

参考文献:

[1] Maekawa T. An overview of offset curves and surfaces [J]. Computer Aided Design, 1999, 31(3): 165 - 173.
[2] Lü Wei. Rational parameterization of quadrics and their

offsets[J]. Computing, 1996, 57(2): 135 - 147.
[3] Fitzgibbon A W, Eggert D W, Fisher R B. High-lever CAD model acquisition [J]. Computer Aided Design, 1997, 29(4):321 - 330.
[4] 胡鑫,习俊通,金烨. 基于图像法的点云数据边界自动提取[J]. 上海交通大学学报,2002,36(8): 1 118 - 1 120.
[5] Goodsell G. On finding p -th nearest neighbors of scattered points in two dimensions for small p [J]. Computer Aided Geometric Design,2000,17(4):387 - 392.
[6] 周儒荣,张丽艳,苏旭,等. 海量散乱点的曲面重建算法研究[J]. 软件学报,2001,12(2):249 - 255.
[7] Piegl L A, Tiller W. Algorithm for finding all k nearest neighbors[J]. Computer Aided Design,2002,34(2): 167 - 172.
[8] 慈瑞梅,李东波. 逆向工程中 Nurbs 曲面重构技术研究[J]. 南京理工大学学报,2004,28(4):390 - 394.
[9] 曲学军. 基于表面法线矢量的散乱数据分割与几何特征提取[J]. 机械工程学报,2007,43(9):228 - 235.
[10] Witkin A, Welch W. Fast animation and control of nonrigid structures[J]. Computer Graphics, 1990,24(4):243 - 252.

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),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>