

文章编号:1671-5942(2008)04-0111-05

雷达天线型面测量拟合算法^{*}

陈兴权¹⁾ 王解先^{1,2)}

(1)同济大学测量与国土信息工程系,上海 200092
(2)现代工程测量国家测绘局重点实验室,上海 200092)

摘要 雷达天线长期处于架设状态容易产生变形,为了确保整个雷达系统处于良好运行状态,需定期对天线面进行检测。目前已有的曲面拟合方法往往无法得出曲面的标准方程参数或者得到的参数拟合精度不高。利用一般二次曲面和特征值条件对雷达天线椭圆抛物面方程进行拟合,并阐述了测量坐标与标准坐标之间的转换关系、特征向量与旋转角的关系,将天线椭圆抛物面方程的一般形式转化为标准方程格式。工程实例证明该方法是行之有效的。

关键词 曲面拟合;雷达天线;坐标转换;特征向量;特征值

中图分类号:TD173 **文献标识码:**A

SURFACE FITTING ALGORITHM OF RADAR ANTENNA PROFILE MEASUREMENT

Chen Xingquan¹⁾ and Wang Jiexian^{1, 2)}

(1) Department of Surveying and Geo-Informatics, Tongji University, Shanghai 200092
(2) Key Laboratory of Modern Engineering Surveying of SBSM, Shanghai 200092)

Abstract Radar antennas on long - period erection state can easily lead to deformation. Therefore, periodical test is required. However, the standard equation parameters of the curved surface can not be computed out with existing surface fitting methods. A general quadric equation and eigenvalue condition are used to fit the elliptic paraboloid equation, and the conversion relationship between the measurement coordinates and the standard coordinates expounded. Besides, the relationship between eigenvectors and rotation angles is shown. The general format of elliptic paraboloid equation is converted into standard format. An engineering example verifies that this method is applicable.

Key words: surface fitting; radar antenna; coordinates transformation; eigenvector; eigenvalue

1 引言

天线是整个雷达装置中的关键部件,它对雷达装置的整体性能有重要影响。天线反射面表面精度直接影响辐射脉冲与接收回波的质量,若反射面存

在较大的型面误差,将会使天线增益下降,从而影响雷达的作用距离和分辨能力。因此,为确保整个雷达性能保持良好状态,必须定期对雷达天线型面进行高精度检测。

目前已有的曲面拟合方法主要有基于插值和逼

* 收稿日期:2008-01-13

作者简介:陈兴权,男,1982年生,硕士,主要从事GPS数据处理及形变监测研究. E-mail: chenxqagua@163.com

近的样条拟合^[1,2]、基于神经网络的曲面拟合^[3]、格网法拟合^[4]等方法在曲面拟合中具有一定的应用价值,但无法拟合出曲面方程的参数。Bezier^[5]法需要通过调整控制点来修改、调配形状,这种方法虽简单直观,但修改不方便。比较基础的多项式曲面拟合由于精度较低不适用于高精度型面检测和逆向工程领域。

本文的研究目的是结合架设状态下某雷达天线椭圆抛物型面的拟合,提出相应的数据处理方法,从而了解该天线面的变形情况。

2 拟合模型

若在椭圆抛物面表面上测定的一系列点坐标 $(x_i \ y_i \ h_i)^T$ ($i = 1, 2, \dots, n$) 满足一般二次曲面的方程:

$$a_0 + a_1 x + a_2 y + a_3 h + a_4 xy + a_5 yh + a_6 hx + a_7 x^2 + a_8 y^2 + a_9 h^2 = 0 \quad (1)$$

简写为:

$$a_0 + (a_1 \ a_2 \ a_3) X + X^T D X = 0 \quad (2)$$

式中, a_0, a_1, \dots, a_9 为待定系数, $X = (x \ y \ h)^T$,

$$D = \begin{bmatrix} a_7 & a_4/2 & a_6/2 \\ a_4/2 & a_8 & a_5/2 \\ a_6/2 & a_5/2 & a_9 \end{bmatrix}.$$

为了避免引起法方程系数病态, 对测定坐标中心化:

$$\begin{bmatrix} x'_i \\ y'_i \\ h'_i \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} (x_i - \bar{x})/\Delta x \\ (y_i - \bar{y})/\Delta y \\ (h_i - \bar{h})/\Delta h \end{bmatrix} \quad (3)$$

简写为:

$$X' = S(X - \bar{X}) = \begin{bmatrix} 1/\Delta x & & \\ & 1/\Delta y & \\ & & 1/\Delta h \end{bmatrix} (X - \bar{X}) \quad (4)$$

式中 $\bar{X} = (\bar{x} \ \bar{y} \ \bar{h})^T$ 为坐标分量均值, $(\Delta x \ \Delta y \ \Delta h)$ 为各坐标分量最大值与最小值之差的一半。中心化后坐标 $X' = (x'_i \ y'_i \ h'_i)^T$ ($i = 1, 2, \dots, n$) 满足:

$$b_0 + (b_1 \ b_2 \ b_3) \begin{bmatrix} x' \\ y' \\ h' \end{bmatrix} + (x' \ y' \ h') \begin{bmatrix} b_7 & b_4/2 & b_6/2 \\ b_4/2 & b_8 & b_5/2 \\ b_6/2 & b_5/2 & b_9 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x' \\ y' \\ h' \end{bmatrix} = 0 \quad (5)$$

简写为

$$b_0 + (b_1 \ b_2 \ b_3) X' + X'^T D X' = 0 \quad (6)$$

式中 b_0 为常数, 迭代时其值可取为 3 个坐标分量范围的乘积, b_1, b_2, \dots, b_9 为待定参数, 迭代初值取为 0。误差方程为:

$$v_i = x'_i \delta b_1 + y'_i \delta b_2 + h'_i \delta b_3 + x'_i y'_i \delta b_4 + y'_i h'_i \delta b_5 + h'_i x'_i \delta b_6 + x'^2_i \delta b_7 + y'^2_i \delta b_8 + h'^2_i \delta b_9 - l_i \quad (7)$$

为了满足拟合后的标准方程 $\frac{x'^2}{a^2} + \frac{y'^2}{b^2} = h''$, 式

(6) 中 D 的 3 个特征根中必有一个为 0, 即行列式:

$$\begin{vmatrix} b_7 & b_4/2 & b_6/2 \\ b_4/2 & b_8 & b_5/2 \\ b_6/2 & b_5/2 & b_9 \end{vmatrix} = 0$$

展开得:

$$b_7 b_8 b_9 + \frac{2}{4} b_4 b_5 b_6 - \frac{1}{4} b_4^2 b_9 - \frac{1}{4} b_6^2 b_8 - \frac{1}{4} b_5^2 b_7 = 0 \quad (8)$$

则拟合椭圆抛物面的限制条件式为:

$$(2b_5 b_6 - 2b_4 b_9) \delta b_4 + (2b_4 b_6 - 2b_5 b_7) \delta b_5 + (2b_4 b_5 - 2b_6 b_8) \delta b_6 + (4b_8 b_9 - b_5^2) \delta b_7 + (4b_7 b_9 - b_6^2) \delta b_8 + (4b_7 b_8 - b_4^2) \delta b_9 + 4b_7 b_8 b_9 + 2b_4 b_5 b_6 - b_4^2 b_9 - b_6^2 b_8 - b_5^2 b_7 = 0 \quad (9)$$

由式(7)和(9)利用附有限制条件的间接平差拟合得到式(6)的系数, 将式(6)与式(2)比较得:

$$a_0 = b_0 - (b_1 \ b_2 \ b_3) S \bar{X} + \bar{X}^T S B S \bar{X} \quad (10)$$

$$(a_1 \ a_2 \ a_3) = (b_1 \ b_2 \ b_3) S - 2 \bar{X} S B S \quad (11)$$

$$\begin{bmatrix} a_7 & \frac{a_4}{2} & \frac{a_6}{2} \\ \frac{a_4}{2} & a_8 & \frac{a_5}{2} \\ \frac{a_6}{2} & \frac{a_5}{2} & a_9 \end{bmatrix} = S \begin{bmatrix} b_7 & \frac{b_4}{2} & \frac{b_6}{2} \\ \frac{b_4}{2} & b_8 & \frac{b_5}{2} \\ \frac{b_6}{2} & \frac{b_5}{2} & b_9 \end{bmatrix} S = \begin{bmatrix} \frac{b_7}{\Delta x^2} & \frac{b_4}{2\Delta x \Delta y} & \frac{b_6}{2\Delta x \Delta h} \\ \frac{b_4}{2\Delta y \Delta x} & \frac{b_8}{\Delta y^2} & \frac{b_5}{2\Delta y \Delta h} \\ \frac{b_6}{2\Delta h \Delta x} & \frac{b_5}{2\Delta h \Delta y} & \frac{b_9}{\Delta h^2} \end{bmatrix} \quad (12)$$

通过以上计算拟合得出式(1)的系数。

3 椭圆抛物面标准化

根据雅可比数值方法, 将拟合得到的式(2)中二次项系数矩阵 D 分解, 求其特征值和特征向量, 即:

$$D = R \begin{bmatrix} \lambda_1 & & \\ & \lambda_2 & \\ & & 0 \end{bmatrix} R^T$$

式中, R 为特征向量, $\lambda_1, \lambda_2, 0$ 为 D 特征值。

定义新坐标 $Y' = (p \ q \ r) = R^T X$, 则式(2)写

成:

$$a_0 + (c_1 \ c_2 \ c_3) Y' + Y'^T A Y' = 0 \quad (13)$$

式中 $(c_1 \ c_2 \ c_3) = (a_1 \ a_2 \ a_3) R$, 展开式(13)

得:

$$a_0 + c_1 p + c_2 q + c_3 r + \lambda_1 p^2 + \lambda_2 q^2 = 0 \quad (14)$$

对式(14)系数给予限制条件,可以拟合任意标准二次曲面。由于本文拟合对象为雷达天线的椭圆抛物型面,所以 c_3 必不为 0,将式(14)化为:

$$\begin{aligned} & \lambda_1 \left(p + \frac{c_1}{2\lambda_1} \right)^2 + \lambda_2 \left(q + \frac{c_2}{2\lambda_2} \right)^2 + \\ & c_3 \left(r + \frac{a_0 - \lambda_1 \left(\frac{c_1}{2\lambda_1} \right)^2 - \lambda_2 \left(\frac{c_2}{2\lambda_2} \right)^2}{b_3} \right) = 0 \end{aligned} \quad (15)$$

定义:

$$\begin{aligned} Y = \begin{pmatrix} x'' \\ y'' \\ h'' \end{pmatrix} &= \begin{pmatrix} p \\ q \\ r \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} x_0 \\ y_0 \\ h_0 \end{pmatrix} = \\ & \begin{pmatrix} p \\ q \\ r \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} \frac{b_1}{2\lambda_1} \\ \frac{b_2}{2\lambda_2} \\ \frac{a_0 - \lambda_1 \left(\frac{b_1}{2\lambda_1} \right)^2 - \lambda_2 \left(\frac{b_2}{2\lambda_2} \right)^2}{b_3} \end{pmatrix} \end{aligned}$$

其中 $(x_0 \ y_0 \ h_0)$ 为坐标平移量,得:

$$\frac{x''^2}{-c_3/\lambda_1} + \frac{y''^2}{-c_3/\lambda_2} = h'' \quad (16)$$

比较上式与标准方程得:

$$\begin{cases} a^2 = |-c_3/\lambda_1| \\ b^2 = |-c_3/\lambda_2| \end{cases}$$

当 $-c_3/\lambda_1$ 与 $-c_3/\lambda_2$ 同号时为椭圆抛物面,异号时为双曲抛物面。

由前面推导得测量坐标系坐标与新坐标系坐标的关系如下:

$$\begin{pmatrix} x \\ y \\ h \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} x_0 \\ y_0 \\ h_0 \end{pmatrix} + R \begin{pmatrix} x'' \\ y'' \\ h'' \end{pmatrix} \quad (17)$$

4 R 的几何意义

特征向量相当于旋转矩阵:

$$R = R_1(\alpha) R_2(\beta) R_3(\gamma) \quad (18)$$

其中:

$$R_1(\alpha) = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos\alpha & -\sin\alpha \\ 0 & \sin\alpha & \cos\alpha \end{bmatrix}$$

$$R_2(\beta) = \begin{bmatrix} \cos\beta & 0 & \sin\beta \\ 0 & 1 & 0 \\ -\sin\beta & 0 & \cos\beta \end{bmatrix}$$

$$R_3(\gamma) = \begin{bmatrix} \cos\gamma & -\sin\gamma & 0 \\ \sin\gamma & \cos\gamma & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

$R_1(\alpha)$ 表示将测量坐标系统 x 轴旋转 α 角度, $R_2(\beta)$ 表示将坐标系统 y 轴旋转 β 角度, $R_3(\gamma)$ 表示将坐标系统 h 轴旋转 γ 角度。坐标系旋转时注意各轴的旋转次序,不同旋转次序计算所得的旋转角不同。旋转角计算公式如下:

$$\left. \begin{aligned} \alpha &= \arctan \left(-\frac{R(2,3)}{R(3,3)} \right) + \left\{ \begin{array}{l} 0 \\ \pi \end{array} \right. \\ \beta &= \left\{ \begin{array}{l} \arcsin(R(1,3)) \\ \pi - \arcsin(R(1,3)) \end{array} \right. \\ \gamma &= \arctan \left(-\frac{R(1,2)}{R(1,1)} \right) + \left\{ \begin{array}{l} 0 \\ \pi \end{array} \right. \end{aligned} \right\} \quad (19)$$

在以上 α, β, γ 组解中,找出使得由式(18)求出的矩阵与特征向量矩阵一致的一组作为 α, β, γ 的解。

5 雷达天线型面的曲面拟合

在一雷达天线型面检测的工程实例中,共采样 72 个点,且比较均匀地分布于椭球抛物面上,点位分布如图 1,数据如表 1。

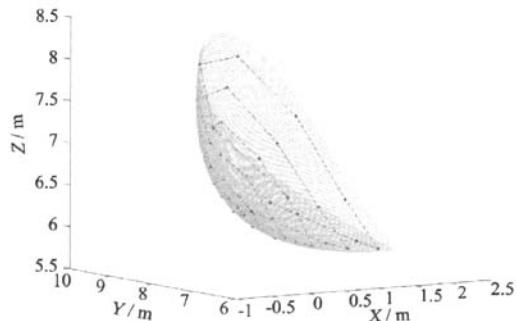


图 1 雷达天线型面拟合图
Fig. 1 Fitting pattern for radar antenna's profile

通过编程实现上述算法并拟合计算得雷达天线型面标准方程为:

$$\frac{x''^2}{2.3535319} + \frac{y''^2}{3.244661} = h''$$

坐标平移量 $(x_0 \ y_0 \ h_0) = (10.380 \ 3 \ -1.469 \ 6 \ -0.352 \ 0)$, 单位为米, 坐标旋转角 $\alpha = 35^\circ 29' 3.274''$, $\beta = 33^\circ 19' 27.365''$, $\gamma = 276^\circ 35' 41.874''$ 。测量中误差 $\delta = 0.0009 \text{ m}$ 。

表 1 坐标测量数据
Tab. 1 Surveyed coordinates

点号	坐标			点号	坐标		
	x(m)	y(m)	h(m)		x(m)	y(m)	h(m)
1	-0.002 8	8.655 8	5.784 8	37	0.226 8	8.031 0	5.552 4
2	0.038 3	8.638 7	5.747 8	38	0.463 5	8.254 1	5.476 5
3	0.040 8	8.706 5	5.786 8	39	0.642 4	8.581 4	5.522 4
4	0.091 7	8.793 5	5.813 2	40	0.623 8	8.904 7	5.707 3
5	0.083 5	8.802 4	5.825 3	41	0.577 5	9.140 1	5.976 9
6	0.021 4	8.768 8	5.846 6	42	0.344 8	9.213 8	6.248 1
7	-0.000 3	8.813 3	5.901 0	43	-0.013 4	9.090 5	6.453 2
8	-0.064 7	8.768 3	5.923 7	44	-0.280 1	8.878 7	6.556 5
9	-0.049 4	8.732 3	5.873 2	45	-0.416 1	8.659 2	6.433 3
10	-0.115 1	8.651 6	5.878 9	46	-0.494 5	8.332 6	6.265 7
11	-0.103 6	8.639 7	5.859 6	47	-0.350 7	8.050 6	5.970 1
12	-0.017 2	8.628 7	5.776 1	48	-0.131 7	7.971 1	5.764 4
13	0.056 6	8.498 1	5.674 6	49	0.274 0	7.886 7	5.549 0
14	0.163 1	8.568 5	5.644 0	50	0.616 0	8.130 5	5.446 5
15	0.270 0	8.674 5	5.644 1	51	0.921 3	8.544 9	5.503 2
16	0.310 3	8.821 7	5.721 1	52	0.944 8	8.924 3	5.712 4
17	0.195 8	8.889 1	5.829 7	53	0.701 1	9.186 8	6.018 9
18	0.087 1	8.940 3	5.967 2	54	0.532 8	9.307 8	6.373 6
19	0.040 8	8.941 9	6.011 5	55	0.124 7	9.206 2	6.692 2
20	-0.148 5	8.841 0	6.107 0	56	-0.235 8	8.945 6	6.767 3
21	-0.269 0	8.661 8	6.084 8	57	-0.494 7	8.581 8	6.612 3
22	-0.228 4	8.571 9	5.954 2	58	-0.566 5	8.176 6	6.371 6
23	-0.214 3	8.465 4	5.880 7	59	-0.397 2	7.891 5	6.049 6
24	-0.080 5	8.391 8	5.739 1	60	-0.104 7	7.726 4	5.791 4
25	0.106 3	8.223 3	5.600 0	61	0.395 6	7.590 0	5.563 5
26	0.293 1	8.442 8	5.552 8	62	0.858 3	7.965 8	5.420 0
27	0.448 7	8.693 4	5.598 7	63	1.122 6	8.443 0	5.487 2
28	0.474 0	8.919 7	5.746 5	64	1.132 3	8.955 0	5.763 3
29	0.364 2	9.033 5	5.906 0	65	1.017 4	9.299 2	6.210 8
30	0.189 7	9.100 3	6.131 1	66	0.617 3	9.380 6	6.630 1
31	0.066 2	9.077 1	6.238 6	67	0.263 7	9.278 8	7.006 1
32	-0.193 0	8.873 5	6.248 6	68	-0.232 9	8.937 5	7.036 5
33	-0.361 7	8.668 6	6.281 4	69	-0.562 1	8.488 7	6.849 8
34	-0.357 8	8.465 4	6.072 6	70	-0.637 2	8.050 1	6.546 5
35	-0.288 3	8.313 7	5.919 5	71	-0.472 5	7.652 3	6.219 5
36	-0.126 6	8.257 9	5.748 3	72	-0.067 2	7.487 8	5.842 1

6 结语

本文利用一般二次曲面和特征根条件拟合雷达天线面的一般方程, 避免了有些方法不能计算参数的弊端, 也避免了 Bezier 法需要通过调整控制点来修改、调配形状的不便。同时本文阐述了二次曲面二次项系数矩阵分解的特征向量的几何意义, 并用工程实例证明该拟合算法是可行的。将拟合得到的雷达天线面标准方程与设计方程进行比较, 可以检

测出天线面的形变情况。

参 考 文 献

- Wang W, Pottmann H and Liu Y. Fitting B-spline curves to point clouds by curvature-based squared distance minimization[J]. ACM Transactions on Graphics, 2006, 25 (2): 214 - 238.
- Wang L Z and Zhu X X. Local interpolation blended B-spline surfaces and its conversion to NURBS surface [J]. Computer Aided Drafting, Design and Manufacturing, 1994, 4(2) : 5 - 17.

(下转第 120 页)

因素。对于 CHAMP 这样高度的低轨卫星,切比雪夫多项式的外推拟合区间可设置为 500 s,阶数为 6 ~ 8,外推时间不宜超过 50 s。多项式外推低轨卫星轨道仅适合短时间的外推,如当星载 GPS 信号暂时失锁,利用简单方便的切比雪夫多项式方法对低轨卫星轨道进行短暂的预报,这对星载 GPS 实时定轨有实用意义。多项式外推轨道的局限性是外推时间不宜太长,如果需要更长时间的外推效果,应综合考虑动力学法、几何法、轨道根数法。

参 考 文 献

- 1 魏二虎,柴华. GPS 精密星历插值方法的比较研究 [J]. 全球定位系统,2006(5):13~15.
- 1 Wei Erhu and Chai Hua. The comparison research on GPS precise ephemeris interpolation methods [J]. Gnss World of China, 2006(5):13~15. (in Chinese)
- 2 柳响林. 基于 B-spline 和正则化算法的低轨卫星轨道平滑 [J]. 地球物理学报,2006,49(1): 99~105.
- 2 Liu Xianglin. Smoothing a satellite orbit on the basis of B-spline and regularization [J]. Chinese Journal of Geophysics, 2006,49(1): 99~105. (in Chinese)
- 3 陈刘成,贾晓林,莫中秋. 用切比雪夫曲线拟合导航卫星广播星历 [J]. 天文学进展,2006,24(2):167~172.
- 3 Chen Liucheng, Jia Xiaolin and Mo Zhongqiu. Fitting the broadcast ephemeris of navigation satellites by Chebyshev approximation [J]. Progress in Astronomy, 2006,24(2): 167~172. (in Chinese)
- 4 赵齐乐,等. CHAMP 卫星 cm 级精密定轨 [J]. 武汉大学学报(信息科学版), 2006,31(10): 879~882.
- 4 Zhao Qile, et al. Precision orbit determination of CHAMP satellite with cm-level accuracy [J]. Geomatics and Information Science of Wuhan University, 2006,31(10): 879~882. (in Chinese)
- 5 刘根友. 高精度 GPS 定位及地壳形变分析若干问题的研究 [D]. 中国科学院测量与地球物理研究所,2004.
- 5 Liu Genyou. Some key issues relating to high precision GPS positioning and crustal deformation analysis [D]. Institute of Geodesy and Geophysics Chinese Academy of Sciences, 2004. (in Chinese)
- 6 马开锋,彭碧波,洪樱. 基于卫星轨道特征的低轨卫星星历参数拟合法 [J]. 大地测量与地球动力学,2007,27(1):85~90.
- 6 Ma Kaifeng, Peng Bibo and Hong Ying. LEO satellite ephemeris parameters fitting method based on orbit character of satellite [J]. Journal of Geodesy and Geodynamics, 2007,27(1):85~90. (in Chinese)
- 7 刘林,王彦荣. 卫星轨道预报的一种分析方法 [J]. 天文学报,2005,46(3):307~313.
- 7 Liu Lin and Wang Yanrong. An analytical method for satellite orbit forecasting [J]. Acta Astronomica Sinica, 2005,46(3):307~313. (in Chinese)
- 8 常志巧,郝金明,张成军. GPS 精密星历的外推精度分析 [J]. 测绘工程,2006,15(2):27~29.
- 8 Chang Zhiqiao, Hao Jinming and Zhang Chengjun. Precision analysis of orbit prediction of GPS satellites [J]. Engineering of Surveying and Mapping, 2006,15(2):27~29. (in Chinese)
- 6 王解先. 工业测量中一种二次曲面的拟合方法 [J]. 武汉大学学报(信息科学版), 2007,32(1):47~50.
- 6 Wang Jiexian. A method for fitting of conicoid in industrial measurement [J]. Geomatics and Information Science of Wuhan University, 2007,32(1):47~50. (in Chinese)
- 7 Chernov N, Lesort C and Simanyi N. On the complexity of curve fitting algorithms [J]. Journal of Complexity, 2004(20):484~492.
- 8 Bethany A, et al. A curve fitting procedure to derive inter-annual phonologies from time series of noisy satellite NDVI data [J]. Remote Sensing of Environment, 2007(106):137~145.
- 9 Alhanaty M and Bercovier M. Curve and surface fitting and design by optimal control methods [J]. Computer-Aided Design, 2001(33):167~182.

(上接第 114 页)

- 3 刘成龙,杨天宇. 基于 BP 神经网络的 GPS 高程拟合方法的探讨 [J]. 西南交通大学学报, 2007, 42(02): 148~151.
- 3 Liu Chenglong and Yang Tianyu. Study on method of GPS height fitting based on BP artificial neural network [J]. Journal of Southwest Jiaotong University, 2007, 42(02): 148~151. (in Chinese)
- 4 Wu Jianhuang, et al. A fitting algorithm of subdivision surface from noising and dense triangular meshes [J]. Journal of Software, 2007, 18(2):442~452.
- 5 全哲,满家巨. Bezier 曲面的 Hermite 方法 [J]. 计算机工程与应用,2007,43(3):96~98.
- 5 Quan Zhe and Man Jiaju. Hermite method for Bezier surface [J]. Computer Engineering and Applications, 2007,43(3): 96~98. (in Chinese)

- 6 王解先. 工业测量中一种二次曲面的拟合方法 [J]. 武汉大学学报(信息科学版), 2007,32(1):47~50.
- 6 Wang Jiexian. A method for fitting of conicoid in industrial measurement [J]. Geomatics and Information Science of Wuhan University, 2007,32(1):47~50. (in Chinese)
- 7 Chernov N, Lesort C and Simanyi N. On the complexity of curve fitting algorithms [J]. Journal of Complexity, 2004(20):484~492.
- 8 Bethany A, et al. A curve fitting procedure to derive inter-annual phonologies from time series of noisy satellite NDVI data [J]. Remote Sensing of Environment, 2007(106):137~145.
- 9 Alhanaty M and Bercovier M. Curve and surface fitting and design by optimal control methods [J]. Computer-Aided Design, 2001(33):167~182.

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>