

Zhao Xin, Guan Fuling, Wang Hongjian, Xu Yan. Construction and measurement method research of an inflatable antenna.  
*Chin. J. Space Sci.*, 2011, 31(2): 384-389

## 充气天线制作及测试方法研究<sup>\*</sup>

赵 忻<sup>1</sup> 关富玲<sup>1</sup> 王宏建<sup>2</sup> 徐 彦<sup>1</sup>

1(浙江大学空间结构研究中心 杭州 310058)

2(中国科学院空间科学与应用研究中心 北京 100190)

**摘 要** 分析设计了一个充气可展开天线,得到初始曲面和裁剪片样式。制作了高精度的裁剪、拼接模板,并用于研制 3.2 m 口径天线样机。通过加工的天线调节装置,将反射器与支撑结构组装在一起。对索张力的两种调节方法进行了比较分析,最终采用张力弹簧调节装置。利用照相测量系统对反射面进行反复调节,使天线达到了较高的形面精度。

**关键词** 充气可展开天线, 天线调节, 形面精度

**中图分类号** V 414

## Construction and Measurement Method Research of an Inflatable Antenna

ZHAO Xin<sup>1</sup> GUAN Fuling<sup>1</sup> WANG Hongjian<sup>2</sup> XU Yan<sup>1</sup>

1(Space Structure Research Center, Zhejiang University, Hangzhou 310058)

2(Center for Space Science and Applied Research, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190)

**Abstract** An inflatable antenna is analyzed and designed, initial shape surface and cutting-pattern of inflatable reflector are obtained. High precision cutting module and seaming module are manufactured, which are used to develop the 3.2 m diameter antenna prototype. By a series of manufactured adjustment devices, inflatable antenna is installed to rigid support structure. Two kinds of adjust methods for cable tensional force are compared and analyzed, and finally spring adjust device is adopted. Non-contact photogrammetry measurement system is used to measure the inflatable reflector with repeated adjustment. A measurement method featured by departing target with 5 parts for the large diameter inflatable antenna is found after repeated contrast. Finally a high shape precision of antenna reflector is achieved. The measurement results are analyzed to identify the deviation and an improved method is proposed. These efforts can be referred for design and experiment on high-precision inflatable antenna.

**Key words** Inflatable antenna, Antenna adjustment, Shape precision

---

<sup>\*</sup> 国家 973 计划项目资助 (51329010302)

2009-01-23 收到原稿, 2010-04-28 收到修定稿

E-mail: followbird@126.com

## 1 引言

充气式天线相对于机械展开天线, 具有质量轻, 折叠体积小, 低成本, 可靠性高等优点, 成为近年来研究的热点. 美欧正大力发展各种充气天线, L'Garde 公司已经研制了口径为 3 m, 7 m, 9 m, 14 m 等系列的充气天线, 并于 1996 年成功实现了 14 m 口径充气天线的在轨实验; 美国 Johns Hopkins 应用物理实验室和 I LC Dover 公司研制出一种混合型充气式反射器; 欧空局联合 Contraves 公司研制了利用太阳能进行自固化的充气天线. 文献 [1-6] 提出的充气天线区别于传统的固化天线, 需要充气到设计气压, 仔细调整才可能达到设计精度, 满足使用要求. IAE 试验的充气天线在反射器中心 8 m 范围内的 RMS 值是 1.5 mm, 文献 [7] 提出的 2 m 口径充气天线在平姿态下反射面的最终精度为 1.83 mm, 验证了高精度充气薄膜反射面的可实现性. 本文对充气天线的调整方法及精度测量方法进行了研究, 使充气天线达到了较高的精度.

## 2 充气天线的设计方法

薄膜反射面在气压作用下发生变形, 变形后的形面为抛物面. 由于变形后的形面已知, 对于给定的气压和薄膜材料, 可以方便地求解变形前的形面, 变形前的形面为无应力状态. 当反射面为正置抛物面时求解的是轴对称问题, 抛物面由抛物线绕旋转轴  $z$  轴旋转得到, 建立柱坐标系  $r\theta z$ , 径向为  $r$  轴. 裁剪设计在此无应力状态下进行, 不需应力释放.

图 1 所示为变形后的抛物线和变形前的曲线, 在气压作用下点  $(r_1^0, z_1^0)$  变形到点  $(r_1, z_1)$ . 分别在变形前曲线和变形后抛物线上建曲线坐标  $\xi^0\eta^0\zeta^0$  和  $\xi\eta\zeta$ , 抛物线顶点  $\xi = 0$ . 定义抛物面母线方向为经向, 旋转方向为纬向. 抛物线方程为

$$z = r^2/4F. \quad (1)$$

其中,  $F$  为抛物线焦距. 从顶点到点  $(r_1, z_1)$  的曲线弧长为

$$\xi = \frac{r_1}{4} \sqrt{4 + \frac{r_1^2}{F^2}} + F^2 \ln \left( r_1 + F \sqrt{4 + \frac{r_1^2}{F^2}} \right) - F \ln(2F). \quad (2)$$

由此得到  $r_1$  和  $\xi$  的对应关系, 代入抛物线方程

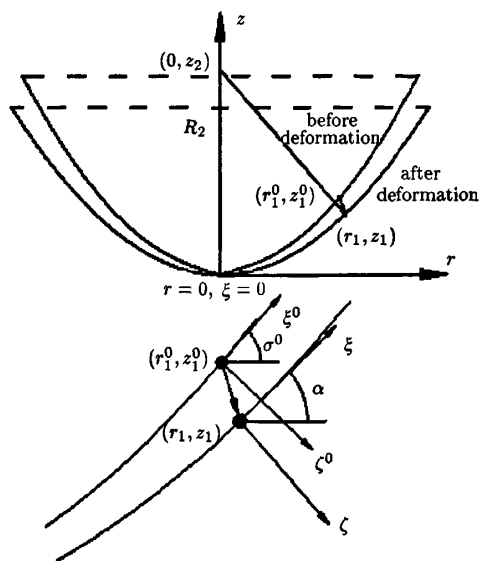


图 1 反射面变形前后形状示意

Fig. 1 Shape of reflector before and after deformation

(1) 得到  $z_1$  和  $\xi$  的对应关系. 薄膜经向和纬向应变分别为

$$\varepsilon_\xi = \frac{d\xi - d\xi^0}{d\xi^0}, \quad \varepsilon_\eta = \frac{d\eta - d\eta^0}{d\eta^0}. \quad (3)$$

由式 (3) 可知, 变形前后的经向和纬向线应力为

$$N_\xi^0 = N_\xi(1 + \varepsilon_\eta), \quad (4)$$

$$N_\eta^0 = N_\eta(1 + \varepsilon_\xi), \quad (5)$$

式中,  $N_\xi^0, N_\eta^0$  分别为单位弧长  $d\eta^0$  和单位弧长  $d\xi^0$  上的薄膜面内张力,  $N_\xi, N_\eta$  分别为单位弧长  $d\eta$  和单位弧长  $d\xi$  上的薄膜面内张力, 即抛物面内的经向和纬向内力. 薄膜内力与面应力之间的关系有,  $N_\xi = t\sigma_\xi$ ,  $N_\eta = t\sigma_\eta$ ,  $t$  为薄膜厚度. 在充气气压作用下形面展开为抛物面, 由于有  $\sin \alpha = r_1/R_2$ , 故点  $(r_1, z_1)$  所受的经向和纬向内力为

$$N_\xi = \frac{pR_2}{2}, \quad N_\eta = \frac{pR_2}{2} \left( 2 - \frac{R_2}{R_1} \right). \quad (6)$$

对于各向同性的薄膜材料, 应力应变关系为

$$\begin{bmatrix} N_\xi^0 \\ N_\eta^0 \\ 0 \end{bmatrix} = t \begin{bmatrix} d_{11} & d_{12} & 0 \\ d_{21} & d_{22} & 0 \\ 0 & 0 & d_{33} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \varepsilon_\xi \\ \varepsilon_\eta \\ 0 \end{bmatrix}, \quad (7)$$

解得

$$\begin{aligned}\varepsilon_{\xi} &= \frac{N_{\xi}d_{22}t - N_{\eta}(d_{12}t - N_{\xi})}{d_{11}d_{22}t - (d_{12}t - N_{\xi})(d_{12}t - N_{\eta})}, \\ \varepsilon_{\eta} &= \frac{N_{\eta}d_{11}t - N_{\xi}(d_{12}t - N_{\eta})}{d_{11}d_{22}t - (d_{12}t - N_{\xi})(d_{12}t - N_{\eta})}.\end{aligned}\quad (8)$$

截面  $z = z_1$  的纬向应变  $\varepsilon_{\eta} = \frac{d\eta - d\eta^0}{d\eta^0} = \frac{r_1}{r_1^0} - 1$ , 可以得到

$$r_1^0 = \frac{r_1}{1 + \varepsilon_{\eta}}. \quad (9)$$

经向应变  $\varepsilon_r = \frac{d\xi}{d\xi^0} - 1$ , 故通过积分可以得到变形前的曲线弧长, 有

$$\xi^0 = \int_0^{\xi} \frac{1}{1 + \varepsilon_{\xi}} d\xi. \quad (10)$$

在极小弧度内, 有

$$dz_1^0 = \sqrt{1 - \left[(1 + \varepsilon_{\xi}) \frac{dr_1^0}{d\xi}\right]^2} \frac{d\xi}{1 + \varepsilon_{\xi}}. \quad (11)$$

对其沿弧长方向积分, 得到

$$z_1^0 = \int_0^{\xi} \sqrt{1 - \left[(1 + \varepsilon_{\xi}) \frac{dr_1^0}{d\xi}\right]^2} \frac{d\xi}{1 + \varepsilon_{\xi}}. \quad (12)$$

求得  $r_1^0, z_1^0$ , 即可得薄膜反射面变形前的形面, 该形面为无应力状态.

裁剪设计在此无应力状态下进行, 不需应力释放. 由于目标曲面为空间曲面, 受加工工艺限制, 只能采用平面的薄膜卷材进行拼接, 故需要将目标曲面用裁剪线分割成若干曲面区域, 然后进行曲面展开. 膜面的裁剪线通常采用有限元网格线、膜面与平面的交线和测地线等方法. 这里采用测地线裁剪方法, 将目标曲面分成 20 片 (见图 2).

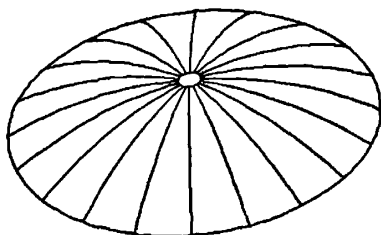


图 2 裁剪线布置

Fig. 2 Cutting line layout

薄膜曲面展开采用弹簧-质点系统, 薄膜三角形单元的三个顶点为质点, 三条边长用弹簧代替. 曲面状态中弹簧是松弛的, 由于假设的初始展开平面中弹簧的长度和对应的三维曲面网格边长存在差异, 故弹簧中存在内力, 质点在弹簧力的作用下运动到平衡状态, 即得到裁剪片 (见图 3).

### 3 模型样机的制作工艺方法

天线样机的整体结构如图 4 所示. 用等边角钢制作可拆卸组装的连接边框, 边框设计位置设竖向调节机构, 天线反射面通过弹簧和轴向调节机构用细绳连接, 构成样机. 天线由反射面和天蓬构成. 反射面  $f/D = 0.5$ , 口径为 3.2 m, 内压为 20 Pa. 反射面方程有  $z = 0.42667 - (x^2 + y^2)/6$ .

天线反射面由镀铝的 Kapton 膜制作, 可以有效反射电磁波, 天蓬由透波的 Kapton 膜制作, 弹性模量  $E = 2.5 \text{ GPa}$ , 泊松比  $\nu = 0.34$ , 选择厚度为 0.025 mm, 抗拉强度为  $2.31 \times 10^8 \text{ Pa}$ .

为使裁剪线平滑, 制作了反射面和天蓬裁剪片的模板, 将边折线拟合成多段线 (见图 5). 模板用铝合

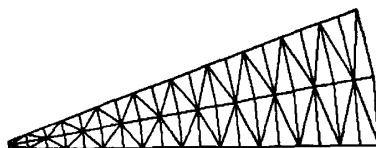


图 3 膜裁剪片

Fig. 3 Cutting membrane plate

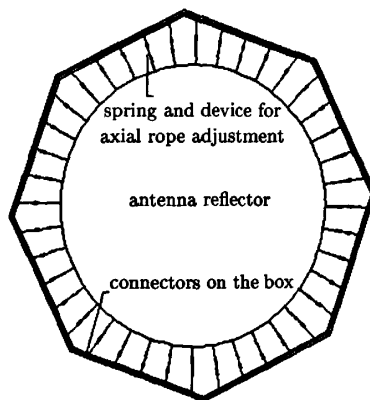


图 4 天线整体结构

Fig. 4 Overall structure of the antenna

金制作, 精度为 0.01 mm; 膜片之间是在如图 6 所示的 1/10 个初始无应力曲面粘贴模具上仔细对准粘贴的, 该模具精度为 0.31 mm, 采用桦木制作. 为使反射面的力均匀传到索上, 设计了花边. 将天线反射面和

天蓬粘贴在花边上组成一个气囊, 在花边上打出 40 个穿绳孔, 并在天蓬上装上充气口. 制作完成的天线实物如图 7 所示.

4 调节装置设计

4.1 调节装置原理

边框连接件如图 8 所示. 图 8 中横向的小螺母

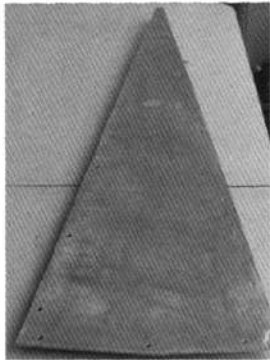


图 5 膜片裁剪模板  
Fig. 5 Membrane cutting template

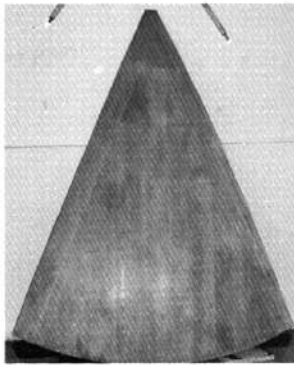


图 6 膜片粘贴模板  
Fig. 6 Membrane assembly template

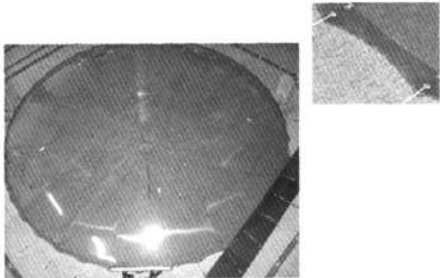


图 7 粘贴完成的天线及花边  
Fig. 7 Antenna and the lace



图 8 边框连接件  
Fig. 8 Border connector

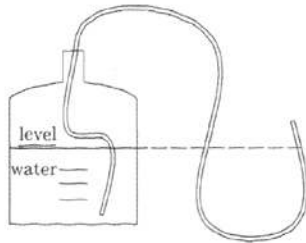


图 9 连通管原理及实物  
Fig. 9 Principle and the pipe

可用于左右调节拉索的角度, 拉索系于其中的小滑轮上; 纵向的大螺母将连接件固定于边框上, 并可上下调节高度. 根据连通管原理, 图 9 中水管端部的水平面与桶内是等高的, 边框连接件根据同一个水平面调节竖向高度. 索的轴向调节装置如图 10 所示, 其由两根可穿绳的螺母和一个内有正反螺纹的螺孔组成, 只要正反方向拧中间的螺孔, 就可以使得连接件伸长或缩短.



图 10 索轴向调节装置

Fig. 10 Cable axial adjustment device

## 4.2 调索方法研究

下面通过对两种调索方法的介绍, 比较特性, 确定最终的调索方法.

### (1) 重物悬吊法

重物悬吊法是将边框连接件装于框上, 挂上重量等同设计索力的重物, 通过连通管把连接件的上表面基本调整到一个水平面上. 把连接件对边拉上细绳, 调整小螺母, 使 20 条线交于一点, 夹角  $18^\circ$ , 交线即抛物面圆心. 把抛物面中心对准圆心, 索连接至连接件, 挂上重物. 充至设计气压, 再微调, 使抛物面周边在一个面内, 达到相应半径, 使抛物面最高点达到设计位置.

### (2) 连接弹簧法

连接弹簧法的水平调整及角度调整同上. 用标准砝码校准弹簧, 确定每个弹簧达到设计拉力时的总长度. 用细绳连接反射面、弹簧、轴向调索装置及边框连接件上的滑轮, 长度要适当, 以确保弹簧的长度在可调整的范围. 用 Photomodel 软件照相测量, 反复调整轴向调节装置, 将反射面周边点调整到设计位置即可.

### (3) 两种方法的比较

重物悬吊法的优点是能保证所有索力都方便地达到设计值, 缺点是重物与反射面之间要传递重力, 所以不能固定, 而当反射面没有气压时, 加载物会向外拉天线产生面外位移, 充气后由反射面受气压作用缓慢回复到设计值, 反复充气不能保证天线每次的变形都一样. 虽然设计时各个索力是一样的, 但是制

作及其他缺陷使索力会有小的偏差, 此法不能调整索力, 但是通常索力只是为了保证将反射面周边的点拉到设计位置, 因此该方法不能根据每次检测的结果调整索力.

连接弹簧法的优点是可以根据每次检测结果做出索力调整, 直至调整到设计位置为止. 由于该方法边框的连接件是与索直接连接在一起的, 不会发生位置的改变, 因此调整到设计位置后, 即使反复充气, 精度也不会改变. 其缺点是弹簧并不是一个孤立的装置, 一个弹簧力的改变会对其他弹簧力产生影响, 一个弹簧力度的确定是一个非常复杂的相互影响的过程, 因此弹簧的调整要经过很多次反复的调整才会使反射面达到设计位置.

通过实验对比, 最终选择连接弹簧法调索.

## 5 模型精度的测量方法

采用 Photomodel 软件照相测量该模型的测点坐标. 由于测量的是抛物面, 所以照片中远端的测点因角度太大会有较大误差. 采用如下测量方法可以解决这一问题. 如图 11 所示, 一台相机从 6 个角度拍照, 每个角度取两张照片, 以机位 1 为例, 该照片上必须包括 E 和 A 两片反射面和中间公共区域的测点, 其他 2~5 机位同 1, 机位 6 的照片需包括标尺

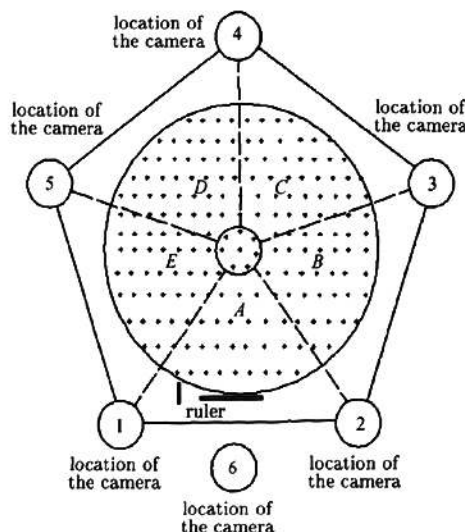


图 11 测量方法

Fig. 11 Measurement method

和中间公共点,使标尺所在的 A 片有三台相机能够较准确地拍到, B ~ E 片包含于两个机位的 4 张照片。这样就以 12 张照片中的中间公共点定位,输出整体反射面上的所有测点。

对输出的数据点(见图 12)按照标尺放大到实际尺寸后,将测量云中周边控制点与设计半径进行比较,反复调节周边装置,提高拟合抛物面精度,最终结果列于表 1。表 1 显示,第一次测量为仅气压达到设计值时,第二次测量将周边索力调整到设计值,第三次测量根据第二次测量结果调整了周边点的轴向位置,第四次测量根据第三次测量结果微调使周边点位于一个水平面上。

6 结论

充气可展开天线是天线领域近年来研究的热点

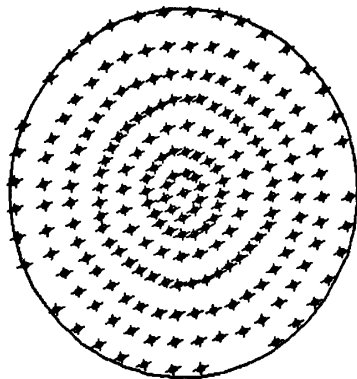


图 12 测量云

Fig. 12 Measurement figure

表 1 测量精度

Table 1 Measurement precision

| 测量次数    | 形面精度/mm |
|---------|---------|
| 第一次测量   | 3.06    |
| 第二次调整测量 | 2.20    |
| 第三次调整测量 | 1.74    |
| 第四次调整测量 | 1.36    |

之一,本文设计并制作了一个 3.2 m 口径的充气可展天线样机,设计了反射面调节方法,设计并制作了调节装置,并通过周边构件与天线之间的关系反复参照调节,使充气天线达到了较高的精度,超过了充气天线相应波段的使用精度要求,扩大了其使用范围。由于天线在制作时手工还存在一定误差,测量时天线反射面受重力作用,试验场不可避免的振动及照相测量处理数据时手动选点的误差等原因,使天线最终精度受到一定影响,进一步的研究工作还需要对模型的制作方法进行更细致的研究,并把其他各种误差源的影响降低到最小。此工作可为高精度、高性能充气可展天线的设计制作及试验提供参考。

参考文献

[1] Willey C E, Schulze R C. A hybrid inflatable dish antenna system for spacecraft[R]//42th AIAA/ASME/ASCE/AHS/ASC SDM Conference, AIAA-2001-1258, 2001. 1-9

[2] Freeland R E, Bilyeu G. IN-STEP inflatable antenna experiment[J]. *Acta Astron.*, 1993, 30:29-40

[3] Naboulsi S. Investigation of geometric imperfection in inflatable aerospace structures[J]. *J. Aeros. Eng.*, 2004, 17(3):98-105

[4] Tang-Tet Ng P E. Edge effects in pressurized membranes[J]. *J. Eng. Mech.*, 2002, 128(10):1100-1104

[5] Steiner M D, Cars on D E. Large, light weight deployable antenna[R]. Earth Science Enterprise Technology Planning Workshop. NASA, 2001

[6] Huang J, et al. The development of inflatable array antennas[R]. California: Jet Propulsion Laboratory California Institute of Technology Pasadena, AIAA, 2003. 2003-6320

[7] Xu Yan. Precision and Deployment Analysis Researches for Membrane Inflatable Antenna[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2009. In Chinese (徐彦. 充气可展开天线精度及展开分析研究. 杭州: 浙江大学, 2009)

[8] Xu Yan, Guan Fuling, Guan Yu. Precision analysis and shape adjustment of inflatable antenna[J]. *Chin. J. Space Sci.*, 2006, 26(4):292-297. In Chinese (徐彦, 关富玲, 管瑜. 充气可展天线精度分析和形面调整[J]. 空间科学学报, 2006, 26(4):292-297)



## 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>