

文章编号:1007-4708(2008)03-0397-05

# 多模多馈天线的悬索结构分析与研究

崔建新<sup>\*1</sup>, 国因常<sup>2</sup>

(1. 中国电波传播研究所, 新乡 453003; 2. 新乡空间钢结构工程有限公司, 新乡 453800)

**摘要:**多模多馈天线传统的悬索结构分析与计算中将悬挂线视为直线, 难以保证天线施工后的成型良好。本文讨论一种工程实用的较为精确的悬索结构分析与计算方法。根据各悬挂点高度不变的特点, 应用悬垂线方程式计算各悬挂点半径, 应用力矩公式修正以上计算结果, 确定振子线各节段的长度。本方法适用于不等大小、不等间距集中荷载作用下的天线悬吊索, 可以保证天线施工后的成型良好。在工程实用上, 与传统的几何方法计算的结果相比, 本方法得出的解更为精确。

**关键词:**天线; 悬索结构; 悬挂结构; 结构分析

**中图分类号:** TN823<sup>+</sup>.31; TM752; TB115

**文献标识码:** A

## 1 引言

短波多模多馈天线是由四根振子线自下而上通过六根悬挂线依次盘绕而成的正六棱倒锥形轴向辐射型螺旋天线。该种天线具有多辐射模式、多输入路数、工作频段宽、可全向通信和抗极化衰落能力强等突出特点<sup>[1]</sup>。天线立面图及平面图分别如图1和图2所示。

对于天线面的悬索结构分析与计算, 以往的工程实践大都是将悬挂线简单地视为直线, 仅用几何计算方法进行的, 这种方法难以保证天线施工后的成型良好。实际上, 在振子线节段张力的作用下, 悬挂线将呈喇叭形状内凹, 如果不缩短并修正振子线各节段的长度, 振子线节段将严重下垂而影响天线的造型美观。本文讨论一种工程实用的较为精确的悬索结构分析与计算方法。根据工程实践经验, 并考虑到天线成型的力学和美观要求, 首先, 初定悬挂线的垂度, 根据各悬挂点高度不变的特点, 应用悬垂线方程式计算各悬挂点半径; 然后, 应用力矩公式修正以上计算结果, 确定振子线各节段的长度, 从而得到较为精确的解。

## 2 几何计算方法

如图1和图2所示, 四根振子线始端在螺旋体锥顶O处与多模多馈器相连, 末端正交后沿螺旋体中心轴(中心桅杆)顺下来接地。考虑到天线结构的对称性, 以两根振子线1、2及三根悬挂线A、B、C展开讨论。振子线1起始于悬挂线A、终止于悬挂线A, 振子线2起始于悬挂线C、终止于悬挂线B。为便于叙述及分析讨论, 将振子线2终止点按相同规律延伸至悬挂线C。

锥形螺旋线上某一点的半径为

$$r = r_0 e^{\alpha\varphi} \quad (1)$$

式中  $r_0$  为螺旋线起始点的半径, 即螺旋体小口半径,  $\alpha$  为螺旋常数,  $\varphi$  为螺旋线上该点相对于其起始点所转过的角度。

设螺旋线圈数为  $n$ , 则  $\varphi$  的范围为  $0 \sim 2n\pi$ 。本文振子线上悬挂点的编号  $i = 0 \sim 6n$ , 节段的编号

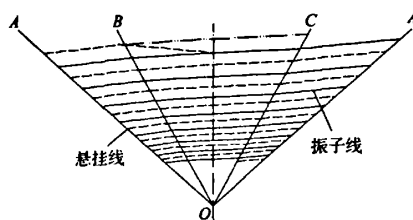


图1 天线立面图  
Fig.1 Elevation of antenna

收稿日期: 2006-04-06; 修改稿收到日期: 2006-12-10.

基金项目: 国家科技部科技型中小企业技术创新基金  
(04C26221101009) 资助项目.

作者简介: 崔建新<sup>\*</sup> (1967-), 男, 硕士, 高级工程师  
(E-mail: cuijianxin2000@yahoo.com.cn.)

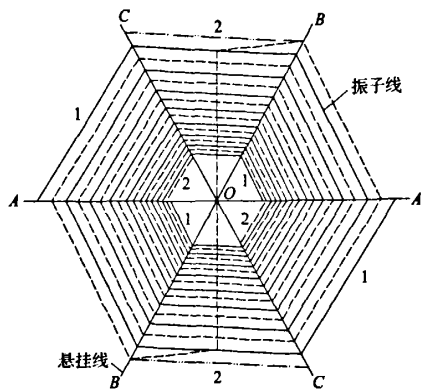


图 2 天线面平面图

Fig. 2 Plane figure of antenna

$i = 1 \sim 6n$ ; 振子线 1, 2 起始点正交, 其悬挂点  $i$  相对于各自起始点所转过的角度  $\varphi_i$  分别为  $\frac{\pi}{3}i$  和  $\frac{\pi}{3}i + \frac{\pi}{6}$ ; 螺旋体的半锥顶角为  $\theta$ 。悬挂点  $i$  的半径  $r_i = r_0 e^{e\varphi_i}$ , 高度  $h_i = \frac{r_0 e^{e\varphi_i}}{\tan \theta}$ , 悬挂点  $i$  至  $O$  点的距离  $L_i = \frac{r_0 e^{e\varphi_i}}{\sin \theta}$ , 节段  $i$  的长度  $S_i = \sqrt{(r_i^2 + r_{i-1}^2 - r_i r_{i-1}) + (h_i - h_{i-1})^2}$ 。可以证明, 同一根振子线上  $r_i, h_i, L_i, S_i$  分别成等比数列, 其公比均为  $e^{e\theta}$ 。对于硬支撑杆多模多馈天线, 到此即可完成天线面的结构分析与计算。而对悬索结构多模多馈天线, 尚需根据力学模型计算并修正各悬挂点半径, 确定振子线各节段的长度, 从而使解更为精确。

### 3 建立力学模型

工程实践表明, 实际结构经过适当简化后建立的力学模型, 其计算结果与实际测试结果相差不多, 可为工程界所接受<sup>[2]</sup>。在安装条件下, 本文悬挂线可视为竖向倾斜悬挂的、在其自重和多个集中荷

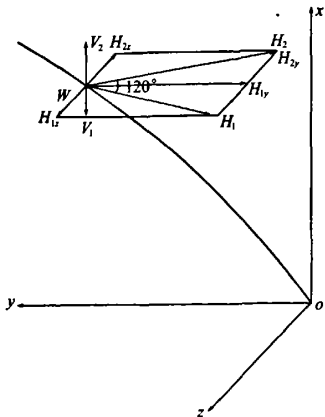


图 3 悬挂点力学模型

Fig. 3 Mechanical model of suspension point

载作用下的柔索, 必须确定其受力变形后的几何形状。在三维坐标系中考察悬挂线上某一悬挂点  $W$ , 建立力学模型如图 3 所示。

由于悬挂线自重相对于其两侧振子线张力数值较小, 通过调整悬挂线上下拉力, 基本可以消除其自重的影响。两侧振子线垂度与相应节段长度的比值相同, 螺旋角相同, 节段长度相差不多。分析表明, 两侧振子线节段作用于  $W$  点的垂直张力  $V_1$  和  $V_2$  大小相差不多、方向相反, 可以保持各悬挂点高度不变; 作用于  $W$  点的水平张力  $H_1$  和  $H_2$  大小相差不多、夹角呈  $120^\circ$  对称于悬挂线, 它们在垂直于悬挂线平面的分量  $H_{1z}$  和  $H_{2z}$  大小视为相等、方向相反, 可以保持悬挂线在天线面周向不扭曲;  $H_1$  和  $H_2$  在悬挂线平面内的分量  $H_{1y}$  和  $H_{2y}$  即为影响悬挂线几何形状的集中荷载, 其方向相同、合力为  $(H_1 + H_2)/2$ 。实际上, 锥形螺旋天线面是一种空间索网结构, 悬挂线上下拉力的作用也有助于  $V_1$  与  $V_2$  和  $H_{1z}$  与  $H_{2z}$  差额的缩减, 从而保证天线面的成型良好, 故应首先初定悬挂线的垂度, 调整悬挂线上下拉力。实践表明, 只关注  $H_{1y}$  和  $H_{2y}$ , 建立简化力学模型而在二维坐标系中进行悬索结构分析与计算, 在工程实用上不致引起较大误差。

### 4 初步计算悬挂点半径

受集中荷载作用的悬挂线如图 4 所示。

初步计算各悬挂点半径时, 可将悬挂线视为受均布荷载作用的柔索。根据柔索计算理论<sup>[3]</sup>, 当其垂度与相应跨度的比值小于 10% 时, 可以将其垂直于  $OP$  弦方向上的垂度  $f_1$  视为水平悬挂时的最大垂度, 均布荷载可视为沿弦长均匀分布, 其悬垂

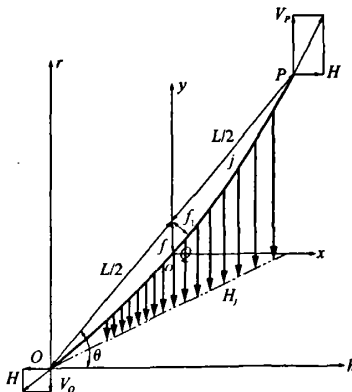


图 4 受集中荷载作用的悬挂线

Fig. 4 Suspended cable influenced by focus forces

线为二次抛物线<sup>[4-8]</sup>。如图4所示建立坐标系,则悬垂线方程式为

$$y = \frac{4f}{(L\cos\theta)^2}x^2 + x\tan\theta \quad (2)$$

悬垂线的曲线长度为

$$U \approx L + \frac{8f_1^2}{3L} \quad (3)$$

式中  $f$  为悬垂线的最大垂度,  $f \approx f_1/\cos\theta$ ;  $L$  为悬垂线的弦长,本文定为顶悬挂点至  $O$  点的距离。

由于悬挂线  $f_1/L$  很小,根据式(3)考察  $L$  为 20 m,  $f_1/L$  为 2.5% 的悬挂线,  $L$  与  $U$  的差额只有 33 mm,故可将  $U$  视为  $L$  而简化计算。

将坐标轴设为悬挂点的高度  $h$  和半径  $r$ ,并注意到  $L\cos\theta$  即为顶悬挂点的高度  $h_{\max}$ ,则原点平移至  $O$  点后式(2)变换为

$$r = \frac{4f}{h_{\max}^2}h(h-h_{\max}) + h\tan\theta \quad (4)$$

设悬挂线上悬挂点  $j$  相对于其起始点所转过的角度为  $\varphi_j$ ,则悬挂点  $j$  的高度  $h_j = \frac{r_0 e^{a\varphi_j}}{\tan\theta}$ ,悬挂点  $j$  至  $O$  点的距离  $L_j = \frac{r_0 e^{a\varphi_j}}{\sin\theta}$ 。可以证明,用几何方法计算的同一根悬挂线上  $r_j, h_j, L_j$  分别成等比数列,其公比均为  $e^{\frac{2}{3}a}$ 。

对于悬挂线 A:

振子线自下而上按 1、2 顺序交替布置,顶悬挂点在振子线 1 上。

$$j = 0 \sim 4n, \varphi_j = \frac{\pi}{2}j, h_{\max} = \frac{r_0 e^{2\pi na}}{\tan\theta}, \text{悬挂点 } j$$

与振子线 1、2 上悬挂点  $i$  的对应关系分别为  $i = \frac{3j}{2}$

和  $i = \frac{3j-1}{2}$ 。

对于悬挂线 B:

振子线自下而上按 1、2 顺序交替布置,顶悬挂点在振子线 2 上。

$$j = 1 \sim 4n, \varphi_j = \frac{\pi}{2}j + \frac{\pi}{6}, h_{\max} = \frac{r_0 e^{2\pi na}}{\tan\theta} e^{\frac{5}{6}a}, \text{悬挂点 } j \text{ 与振子线 1、2 上悬挂点 } i \text{ 的对应关系分别为 } i = \frac{3j-1}{2} \text{ 和 } i = \frac{3j-2}{2}。$$

对于悬挂线 C:

振子线自下而上按 2、1 顺序交替布置,顶悬挂点在振子线 2 上。

$$j = 0 \sim 4n, \varphi_j = \frac{\pi}{2}j + \frac{\pi}{6}, h_{\max} = \frac{r_0 e^{2\pi na}}{\tan\theta} e^{-\frac{5}{6}a},$$

悬挂点  $j$  与振子线 1、2 上悬挂点  $i$  的对应关系分别为  $i = \frac{3j+1}{2}$  和  $i = \frac{3j}{2}$ 。

由式(4)可得悬挂点  $j$  的半径  $r_j$ 。

## 5 计算支座反力

在修正各悬挂点半径之前,需根据静力条件,采用力矩公式计算支座反力。振子线节段  $i$  作用于其两侧悬挂点的水平张力为

$$H_i = \frac{qS_i^2}{8f_i} \cos^2\beta \quad (5)$$

式中  $q$  为振子线的单位长度重量,  $f_i$  为节段  $i$  在垂直于相应弦长方向上的最大垂度,  $\beta$  为振子线的螺旋角。

令  $\frac{(1 + e^{-\frac{2}{3}a} - e^{-\frac{5}{3}a}) \sin\theta}{\sqrt{1 + e^{-\frac{2}{3}a} - e^{-\frac{5}{3}a}(1 + \cos^2\theta)}}$  为系数  $\eta$ ,

$f_i/S_i$  为振子线的垂度系数  $\lambda$ ,则由式(5)推导并整理得悬挂点  $j$  受其下侧振子线节段作用的水平张力为  $\frac{q\eta}{8\lambda}r_0 e^{a\varphi_j}$ 。可以证明,同一根振子线上  $H_i$ 、同一根悬挂线上  $H_j$  均成等比数列,其公比分别为  $e^{\frac{5}{3}a}$ 、 $e^{\frac{2}{3}a}$ 。悬挂点  $j$  受其两侧振子线节段作用的水平张力为

$$H_j = \frac{q\eta}{16\lambda}(1 + e^{\frac{5}{3}a})r_0 e^{a\varphi_j} \quad (6)$$

在计算支座反力及修正各悬挂点半径时,不考虑振子线节段长度的缩短而引起水平张力的改变,在工程实用上不致引起较大误差。悬索结构是一种不同于杆、梁结构的柔性结构,它不能承受弯矩,只能承受轴向力,故柔索上任一点的总弯矩为零<sup>[2]</sup>。如图4所示,视整个悬挂线为平衡体,对  $P$  点取力矩并使总力矩为零,得

$$V_0 h_{\max} - H h_{\max} \tan\theta + M_P = 0 \quad (7)$$

视  $O-Q$  段悬挂线为平衡体,对  $Q$  点取力矩并使总力矩为零,得

$$\frac{1}{2}V_0 h_{\max} - H\left(\frac{1}{2}h_{\max} \tan\theta - f\right) + M_Q = 0 \quad (8)$$

式中  $H$  为悬挂线的水平张力,  $V_0$  为支座  $O$  点悬挂线的垂直张力,  $M_P$  为全部悬挂点受其两侧振子线节段作用的水平张力对  $P$  点的力矩总和,  $M_Q$  为  $Q$  点左侧悬挂点(设其最大编号为  $m$ )受其两侧振子线节段作用的水平张力对  $Q$  点的力矩总和。

对于悬挂线 A 和 C,得

$$M_P = \sum_{j=0}^{4n-1} H_j (h_{\max} - h_j) \quad (9)$$

$$M_Q = \sum_{j=0}^m H_j \left( \frac{1}{2} h_{\max} - h_j \right) \quad (10)$$

对于悬挂线 B, 得

$$M_P = \sum_{j=1}^{4n-1} H_j (h_{\max} - h_j) \quad (11)$$

$$M_Q = \sum_{j=1}^m H_j \left( \frac{1}{2} h_{\max} - h_j \right) \quad (12)$$

联立解式(7)和式(8), 得

$$H = \frac{M_P - 2M_Q}{2f} \quad (13)$$

$$V_O = H \tan \theta - \frac{M_P}{h_{\max}} \quad (14)$$

根据静力平衡条件, 求得支座 P 点悬挂线的垂直张力为

$$V_P = V_O + \sum H_j \quad (15)$$

式中  $\sum H_j$  为全部悬挂点受其两侧振子线节段作用的水平张力总和。

## 6 修正悬挂点半径

如前所述, 柔索上任一点的总弯矩为零。对于悬挂点  $j$ , 视  $O-j$  段悬挂线为平衡体, 对  $j$  点取力矩并使总力矩为零, 得

$$V_O h_j - H r_j + M_j = 0 \quad (16)$$

式中  $M_j$  为  $j$  点左侧悬挂点受其两侧振子线节段作用的水平张力对  $j$  点的力矩总和。

对于悬挂线 A 和 C, 得

$$M_j = \sum_{k=0}^{j-1} H_k (h_j - h_k) \quad (17)$$

对于悬挂线 B, 得

$$M_j = \sum_{k=1}^{j-1} H_k (h_j - h_k) \quad (18)$$

根据式(16)即可修正悬挂线 A、B、C 上悬挂点  $j$  的半径  $r_j$ , 再根据悬挂点  $j$  与振子线 1、2 上悬挂点  $i$  的对应关系即可修正悬挂点  $i$  的半径  $r_i$ 。

由于振子线  $\lambda$  值很小, 根据式(3)考察螺旋体大口半径为 15 m 和  $\lambda$  为 1% 的顶层振子线节段, 其弦长与曲线长度的差额只有 4 mm, 故在修正振子线各节段的长度时可将曲线长度视为弦长而简化计算。

## 7 工程算例分析

应用本文讨论的悬索结构分析与计算方法, 考察一个多模多馈天线工程算例: 螺旋体小口半径为 1 m, 半锥顶角为  $49^\circ$ , 螺旋常数为 0.05, 螺旋线圈

数为 8, 振子线的单位长度重量为 0.8 N/m, 振子线、悬挂线的垂度系数分别取 1%, 2.5%。利用计算机程序计算悬挂点  $H_j$ 、悬挂点  $r_j$  及振子线  $S_i$ , 并与传统的几何方法计算的结果相比, 其最大偏差见表 1。

表 1 计算结果比较

Tab. 1 Comparison of calculating results

| 比较项目          | 本方法  | 几何方法 | 偏差   | 误差    |
|---------------|------|------|------|-------|
| 悬挂点 $H_j$ , N | 46.1 | 51.9 | 5.8  | 12.6% |
| 悬挂点 $r_j$ , m | 5.61 | 6.25 | 0.64 | 11.4% |
| 振子线 $S_i$ , m | 5.32 | 5.95 | 0.63 | 11.8% |

计算表明, 本方法修正悬挂线上各悬挂点半径, 与将悬挂线视为受均布荷载作用的柔索而进行的初步计算结果相比, 最大偏差不超过 13 mm, 故在施工要求不甚严格时可按初步计算的方法进行。

## 8 结 论

本方法适用于不等大小、不等间距集中荷载作用下的线天线悬吊索, 应用于实际天线工程, 可以满足天线施工工艺要求, 保证天线施工后的成型良好。值得说明的是, 本方法虽然也是一种近似解析方法, 但在工程实用上是切实可行的。

## 参考文献 (References):

- [1] 蔡英仪, 王 坦, 杨经晓, 等. 短波天线工程建设与维护[M]. 北京: 解放军出版社, 2003. (CAI Ying-yi, WANG Tan, YANG Jing-xiao, et al. *Building and Maintenance of Shortwave Antenna Works*[M]. Beijing: PLA Press, 2003. (in Chinese))
- [2] 段宝岩. 天线结构分析、优化与测量[M]. 西安: 西安电子科技大学出版社, 1998. (DUAN Bao-yan. *Analysis, Optimization and Measurement of Antenna Structures*[M]. Xi'an: Xidian University Press, 1998. (in Chinese))
- [3] Качурин В К. 小垂度柔线计算理论[M]. 杨福新, 译. 上海: 科学技术出版社, 1958. (Качурин В К. *ГИБКИЕ НИТИ С МАЛЫМИ СТРЕЛКАМИ* [M]. YANG Fu-xin, Translator. Shanghai: Science and Technology Press, 1958. (in Chinese))
- [4] 北京工业建筑设计院金属结构室. 塔桅钢结构设计[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 1972. (Metal Structure Department of Beijing Industrial Building Design Institute. *Design of Tower Steel Structures* [M]. Beijing: China Architecture and Building Press, 1972. (in Chinese))
- [5] 陈国珉, 高福群, 薛 发, 等. 电信工程设计技术手册/

- 天线和馈电线[M]. 北京:人民邮电出版社,1985.  
(CHEN Guo-dai,GAO Fu-qun,XUE Fa,et al. *Technical Manual of Telecom Engineering Design/Antennas and Feeding Lines* [M]. Beijing: Posts and Telecom Press,1985. (in Chinese))
- [6] 张其林. 索和膜结构[M]. 上海:同济大学出版社,2002. (ZHANG Qi-lin. *Cable and Membrane Structures* [M]. Shanghai: Tongji University Press,2002. (in Chinese))
- [7] 杨庆山,姜忆南. 张拉索-膜结构分析与设计[M]. 北京:科学出版社,2004. (YANG Qing-shan, JIANG Yi-nan. *Analysis and Design of Tensioned Cable-membrane Structures* [M]. Beijing: Science Press,2004. (in Chinese))
- [8] 崔建新. 线天线大吊索悬挂点几何位置的一种近似解[J]. 河南科技大学学报(自然科学版),2006,27(1): 51-53. (CUI Jian-xin. A new method to determine approximate geometric positions of suspension points on rope sling of wire antenna[J]. *Journal of Henan University of Science and Technology (Natural Science)*,2006,27(1):51-53. (in Chinese))

## Structural analysis and discussion on suspension structure of multi-mode multi-feed antenna

CUI Jian-xin<sup>\*1</sup>, GUO Yin-chang<sup>2</sup>

(1. China Research Institute of Radiowave Propagation, Xinxiang 453003, China;

2. Xinxiang Space Steel Structural Engineering Co. Ltd, Xinxiang 453800, China)

**Abstract:** It seems difficult for the conventional structural analysis and calculation method to ensure excellent shape to the suspension structural multi-mode multi-feed antenna, which considers the suspended cables as straight lines. Now, a new method in practical engineering is proposed for suspension structural analysis and calculation. Firstly, according with the character that the heights of suspension points are steady, the radii of suspension points can be obtained by the suspended-cable equations, and their radii are corrected by the moment equations, then the lengths of antenna wire segments are determined. This method applies to the wire antenna's rope slings influenced by focus forces with different power and space, and it ensures fine shape to the antenna. Compared with the calculating result of conventional geometric method, the result here is more accurate in practical engineering.

**Key words:** antenna; suspension structure; suspended structure; structural analysis

## 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>