

文章编号:1007-9432(2011)04-0341-05

## 改进的粒子群算法在分形天线中的应用

刘建霞<sup>1</sup>, 朱秀敏<sup>1</sup>, 张世超<sup>2</sup>

(1. 太原理工大学 信息工程学院, 太原 030024;

2. 中国电子科技集团公司第54研究所微波散射通信专业部, 河北 石家庄 050081)

**摘 要:**针对基本粒子群算法初始种群的盲目性、搜索过程中粒子多样性丧失的问题,提出了一种自适应混沌差分粒子群算法,该算法提高了种群粒子的多样性,具有更快的搜索速度和更高的求解精度。利用自适应混沌差分粒子群算法优化设计了一款小型化多频微带分形天线,这对于实际工程应用具有一定的指导作用。

**关键词:**自适应混沌差分粒子群算法;微带分形天线;小型化;多频带

**中图分类号:**TN624

**文献标识码:**A

随着无线通信中语音业务、窄带和宽带数据业务、卫星广播、卫星定位的兴起,天线的小型化以及多频化就成为天线研究领域的一个重要课题。随着分形技术的发展,利用分形结构实现天线的小型化、多频化甚至是宽频化就成为研究者的研究热点之一。分形(Fractal)来源于拉丁文,1975年法国数学家 Benoit Mandelbrot<sup>[1,2]</sup>将其引入论文表示高度不规则的集合。同传统天线相比,分形天线在尺寸和频带方面具有很大优势,分形天线结构不规则,且具有自相似性,使得天线具有很强的尺寸压缩和多频特性<sup>[3]</sup>。此外,分形天线具有“自加载”特征,无需额外加载元件就可以在宽带工作条件下实现阻抗匹配,便于简化电路、提高系统性能。目前,分形天线在无线通信、卫星和移动通信方面都有着巨大的发展潜力和非常广阔的市场前景。

粒子群优化算法(Particle Swarm Optimization, PSO)是美国心理学家 Kennedy 和电气工程师 Eberhartholl<sup>[4]</sup>在受到鸟群搜索食物的行为启发后,于1995年提出的一种标准智能群体算法,其结构简单,便于实现,近年来得到了快速发展,在神经网络训练、电路优化领域和动态问题中有着广泛的应用。利用智能进化算法进行天线优化设计是现代天线研究的一个重要趋势,文献[5]中利用粒子群算法成功优化设计了一款双频E形微带天线,显示了利用智能算法优化微带天线的高效性。

基本粒子群算法初始种群的随机性以及搜索过程中粒子多样性丧失的问题,使得算法在搜索中易陷入早熟或局部最优,笔者针对这些不足,融合了自适应粒子群算法、混沌优化以及差分进化算法的优点,提出了一种自适应混沌差分粒子群优化算法。该算法采用改进的 Tent 序列初始种群,利用自适应方法调整惯性权重因子,在搜索过程中使用 Logistic 序列和差分进化算法补充更新部分粒子,克服了基本粒子群算法的不足,提高了粒子群的搜索速度和求解精度。

### 1 自适应混沌差分粒子群算法

#### 1.1 基本粒子群算法概述

粒子群算法通过模仿鸟类觅食行为,将鸟群的飞行空间类比于问题的搜索空间,而问题中所要寻找的最优解则等同于鸟类所要寻找的食物,一只只觅食的鸟抽象成一个个无质量无体积的微粒,用来表示问题的一个候选解。粒子群算法通过为每个微粒制定类似于鸟类的简单行为规则,使粒群寻优像鸟类觅食那样运转开来,进而解决复杂的优化寻优问题。其中粒子的位置和速度更新公式为:

$$v_{i,j}(t+1) = wv_{i,j}(t) + c_1r_1[p_{i,j} - x_{i,j}(t)] + c_2r_2[p_{g,j} - x_{i,j}(t)] \quad (1)$$

$$x_{i,j}(t+1) = x_{i,j}(t) + v_{i,j}(t+1), \\ j = 1, \dots, d. \quad (2)$$

收稿日期:2011-03-22

基金项目:山西省教育厅科技开发资助项目(200999);山西省研究生优秀创新项目(20103033);山西省自然科学基金资助项目(2008011027-4)

作者简介:刘建霞(1970-),女,山西晋中人,博士,教授,主要从事电磁场与微波技术的研究,(Tel)15536882255

式中,  $w$  为惯性权因子,  $c_1$  和  $c_2$  为学习因子,  $r_1$  和  $r_2$  为 0 到 1 之间的均匀分布的随机数。

## 1.2 自适应混沌粒子群算法(ACDPSO)

粒子群算法结构简单, 搜索速度较快, 因而收到广大学者的青睐, 但基本粒子群算法也存在不足之处, 其种群初始化的随机性以及搜索过程中粒子多样性的丧失, 使得基本粒子群算法易陷入局部最优或早熟。针对这些不足, 结合自适应调整因子、混沌算法以及差分优化算法对基本粒子群算法进行改进, 提出自适应混沌差分粒子群算法。

### 1.2.1 自适应惯性权因子

粒子群算法中惯性权因子的大小直接影响着算法的搜索性能, 当惯性权因子  $w$  较大时算法的全局搜索性能较好, 但同时局部搜索能力降低, 因此选择合适的惯性权因子大小可以平衡粒子的全局搜索和局部搜索能力。笔者根据不同粒子的适应值不同自适应地选择惯性权因子, 在粒子的速度和位置更新公式中, 惯性权因子采用下式计算:

$$w = \begin{cases} w_{\min} - \frac{(w_{\max} - w_{\min}) \times (f - f_{\min})}{(f_{\text{avg}} - f_{\min})}, & f \leq f_{\text{avg}}; \\ w_{\max}, & f > f_{\text{avg}}. \end{cases} \quad (3)$$

式中:  $w_{\max}$  和  $w_{\min}$  分别为惯性权因子的最大值和最小值,  $f$  表示粒子当前的适应值,  $f_{\text{avg}}$  和  $f_{\min}$  分别表示当前微粒的平均适应值和最小适应值。

### 1.2.2 混沌序列

混沌是一种普遍存在的非线性现象, 混沌搜索具有内随机性、初值敏感性、遍历性等特点, 利用混沌优化思想可以很好地弥补粒子群算法存在的不足, 笔者借鉴文献[6]的思想, 分别采用 Logistic 序列和 Tent 序列, 其表达式分别如下式(4)、(5)所示:

$$\begin{aligned} x_{n+1} &= 4x_n(1-x_n), \\ n &= 0, 1, 2, \dots, N, 0 < x_0 < 1; \end{aligned} \quad (4)$$

$$x(n+1) = \begin{cases} x(n)/0.4 & x(n) \leq 0.4, \\ (1-x(n))/0.6 & x(n) > 0.4. \end{cases} \quad (5)$$

### 1.2.3 差分进化公式

差分进化算法(Differential Evolution, DE)特有的记忆能力, 使得算法具有较强的鲁棒性和全局搜索能力, 利用差分进化算法对种群中的部分优秀个体进行补充更新, 以达到提高粒子的搜索速度和搜索精度的目的, 本文使用的差分公式如下式所示:

$$V_{i,G+1} = d(X_{r_1,G} - X_{r_2,G}) + X_{r_3,G} \quad (6)$$

式中:  $X_{i,G}$  是当代种群中的个体;  $G$  是进化代数;  $V_{i,G+1}$  是新产生的下一代种群的个体;  $r_1, r_2$  和  $r_3$  是在种群个数范围内随机挑选的不同的三个整数; 差分变量  $X_{r_1,G} - X_{r_2,G}$  对下代新个体的影响程度由变异因子  $d \in [0, 2]$  控制, 算法要得到较好的结果时一般要求  $d \in [0.4, 1]$ , 本文取  $d=0.5$ 。

### 1.2.4 自适应混沌差分粒子群优化算法的基本流程

步骤 1: 设置相关参数。

步骤 2: 利用 Tent 混沌序列初始化微粒的位置和速度。

步骤 3: 评价每个微粒的适应度, 将当前各微粒的位置和适应值存于各微粒的  $p_{\text{best}}$  中, 将所有  $p_{\text{best}}$  中适应值最优个体的位置和适应值存储于  $g_{\text{best}}$  中。

步骤 4: 按照式(1)和式(2)更新粒子的速度和位移。

步骤 5: 计算每个微粒的适应值, 然后选择群体中性能最好的 50% 的微粒, 进行差分搜索, 并更新其  $p_{\text{best}}$  以及群体的  $g_{\text{best}}$ 。

步骤 6: 收缩粒子的搜索区域, 收缩公式为:

$$x_{\min,j} = \max\{x_{\min,j}, x_{g,j} - r \times (x_{\max,j} - x_{\min,j})\}, 0 < r < 1. \quad (7)$$

$$x_{\max,j} = \min\{x_{\max,j}, x_{g,j} + r \times (x_{\max,j} - x_{\min,j})\}, 0 < r < 1. \quad (8)$$

式中  $x_{g,j}$  表示当前  $p_{\text{best}}$  的第  $j$  维变量的值。

步骤 7: 在收缩后的区域内利用 Logistic 混沌序列产生群体中剩余的 50% 的微粒, 并进行混沌搜索, 更新其  $p_{\text{best}}$  以及群体的  $g_{\text{best}}$ 。

步骤 8: 比较更新所有粒子的  $p_{\text{best}}$  以及群体的  $g_{\text{best}}$ , 若满足停止条件, 搜索停止, 输出结果, 否则转步骤 3。

## 1.3 算法测试

为了验证自适应混沌差分粒子群算法的性能, 选取经常被国内外学者用于对优化问题测试的三个经典数值优化测试函数, 通过对比 ACDPSO 与遗传算法 GA、基本粒子群优化算法 PSO 的优化结果来验证 ACDPSO 算法的良好性能。这三个函数分别是 De Jong's Function 1 函数、Rotated hyper-ellipsoid 函数以及 Camel 函数, 分别用  $f_1, f_2$  和  $f_3$  表示。其中,  $f_1$  函数用来测试算法的有效性及其收敛速度,  $f_2$  函数难以最小化, 用于检测优化算法是否具有良好搜索能力,  $f_3$  函数主要用来比较算法的搜索速度和搜索精度。

$$f_1(x_i) = \sum_{i=1}^2 x_i^2, x_i \in [-5.12, 5.12]; \quad (9)$$

$$f_2(x) = \sum_{i=1}^5 (\sum_{j=1}^i x_j)^2; \\ -65.536 \leq x_i \leq 65.536; \quad (10)$$

$$f_3(x) = (4 - 2.1x_1^2 + \frac{x_1^4}{3})x_1^2 + \\ x_1x_2 + (-4 + 4x_2^2)x_2^2, \\ x_i \in [-100, 100]. \quad (11)$$

实验参数选择为:ACDPSO 和 PSO 种群大小为 40,最大迭代步数为 100。遗传算法 GA 的群体大小为 40,染色体长度为 10,最大迭代次数为 100,交叉概率为 0.8,变异概率为 0.02。考虑到算法的随机性,对每个函数都进行 20 次试验。表 1 给出了

实验结果,图 1,图 2 和图 3 分别为函数  $f_1$ ,  $f_2$  和  $f_3$  寻优过程中最佳函数值优化曲线。从优化过程和结果来看,ACDPSO 算法改善了基本 PSO 算法的搜索速度和精度,相比较 GA 和 PSO 算法具有更高的搜索速度和求解精度,特别是在多变量或搜索范围较大时 ACDPSO 算法的优越性越明显。

表 1 三种算法对函数的优化结果

算法	$f_1$	$f_2$	$f_3$
GA	$5.010\ 8 \times 10^{-7}$	$7.166\ 5 \times 10^{-2}$	-1.030 689 9
PSO	$3.566\ 5 \times 10^{-8}$	$7.778\ 8 \times 10^{-5}$	-1.031 628 0
ACDPSO	$1.801\ 3 \times 10^{-9}$	$2.628\ 6 \times 10^{-9}$	-1.031 627 9

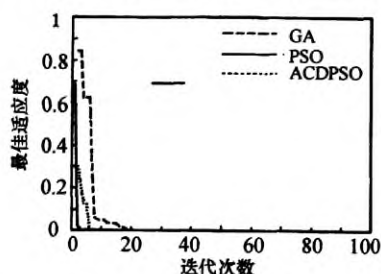


图 1 对  $f_1$  的优化比较

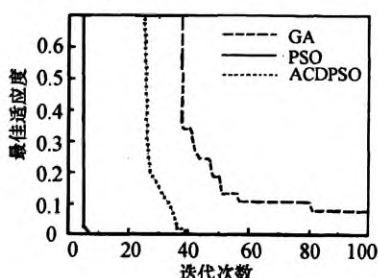


图 2 对  $f_2$  的优化比较

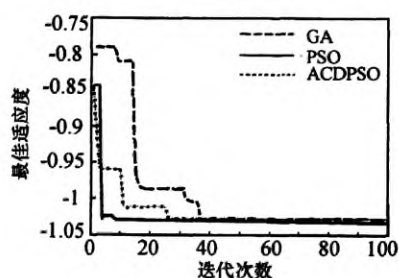


图 3 对  $f_3$  的优化比较

## 2 Sierpinski 方形贴片天线结构

大多数分形天线都是采用不规则的几何形状,本文基于 Sierpinski<sup>[7-8]</sup>分形几何的原理思想,对正方形贴片天线进行了分形处理,天线的结构如图 4 所示。

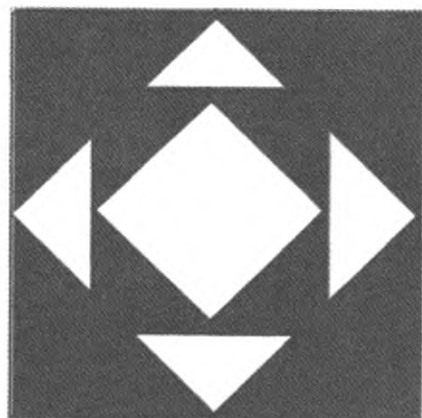


图 4 天线结构

图 4 中,黑色部分是实体,白色部分是被挖去的部分,结构中的各个正方形的边长分别为  $L_1, L_2, L_3, L_4$ 。

## 3 适应值函数及参数设定

本文利用智能算法优化设计天线的基本思想是:将天线的最优参数设计作为自适应混沌粒子群

算法的最优解问题,将天线的参数作为种群的微粒,将天线的设计要求(通常通过 S 曲线体现)作为种群的适应值函数,在一定空间范围内进行寻优,通过算法的大量迭代,最终得到具有最优性能的天线结构,本文选用的适应值函数为频带内的 5 个频点的回波损耗均值,其表达式为:

$$R_L = [|S_{11}(f_1)| + |S_{11}(f_2)| + |S_{11}(f_3)| + \\ |S_{11}(f_4)| + |S_{11}(f_5)|] / 5. \quad (12)$$

天线的基板采用相对介电常数为 4,厚为 5 mm 的聚酰胺晶体,基板尺寸大小为  $L \times W = 50\text{ mm} \times 50\text{ mm}$ 。馈电传输线的宽度为 2 mm。

## 4 仿真结果

经过优化仿真之后,最终确定天线结构为:正方形贴片的尺寸为:  $L_1 = 48\text{ mm}$ ,  $L_2 = 33.82\text{ mm}$ ,  $L_3 = 12\text{ mm}$ ,  $L_4 = 8.48\text{ mm}$ 。HFSS 中天线的模型如图 5 所示。

矩形贴片天线与 Sierpinski 方形贴片天线的回波损耗分别如图 6、图 7 所示。

图 8 为 Sierpinski 方形微带天线在 2.4 GHz 的辐射方向图,图 9 显示出了在 2.9 GHz 的辐射方向图。

通过观察比较图 6 和图 7 看出,引入分形结构后的微带天线在 2.4 GHz、2.9 GHz 以及 3.9 GHz 附近出现谐振,天线由原来的单频增加到多频,并且

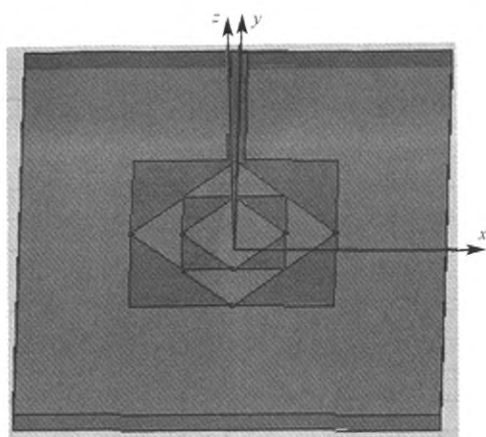
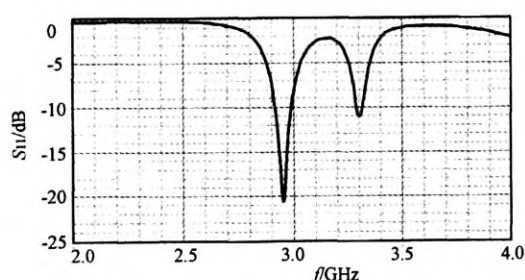
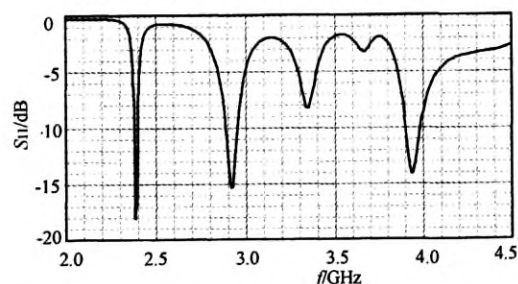


图 5 HFSS 中的天线模型

图 6 矩形贴片天线的回波损耗  $S_{11}$  曲线图 7 Sierpinski 方形贴片天线的回波损耗  $S_{11}$  曲线

## 参考文献:

- [1] Tsachtsiris G, Soras C, Karaboikis M, et al. A Printed Folded Koch Monopole Antenna for Wireless Devices, Microwave and Optical Technology, March 2004: 374-378.
- [2] Konstantatos G, Soras C, Tsachtsiris G, et al. Finite Element Modeling of Minkowski Monopole Antennas Printed on Wireless Devices[J]. Electromagnetics Journal, EMG24 (1-2) 13571: 1-13.
- [3] 刘英, 龚书喜, 傅德民. 用于多频通信的微带分形贴片天线[J]. 微波学报, 2001, 17(4): 76-79.
- [4] Kennedy J, Eberhart R. Particle Swarm Optimization[C]//IEEE Int Conf on Neural Networks, Piscataway: IEEE Service Center, 1995: 1942-1948.
- [5] 邱朝生, 朱仁杰, 曲仁慧. 基于 PSO-PTS 算法的 E 形双频微带天线设计[J]. 吉林大学学报, 2009, 27(5): 493-499.
- [6] 刘建霞, 李楠, 谢克明. 改进的思维进化算法在阵列天线综合中的应用[J]. 测试技术学报, 2009, 23(4): 331-336.
- [7] Puente C, Romeu J, Pous R, et al. On the Behavior of the Sierpinski Multiband Fractal Antenna[J]. IEEE Trans on Antennas & Propagation, 1998, 46(4): 517-524.
- [8] 侯审茂, 何焰蓝, 罗建书. 分形天线多频性及应用研究[J]. 物理实验, 2010, 30(4): 43-46.

在低频和低频部分分别出现谐振, 相比较矩形贴片天线的谐振点 2.9 GHz, 天线尺寸缩减了 17%, 实现了天线的小型化且具有更好的尺寸填充性; 由辐射方向图 8 和图 9 我们可以看出该天线在 2.4 GHz 和 2.9 GHz 具有良好的方向性, 这表明该天线对于小型化多频天线应用具有一定的指导意义。

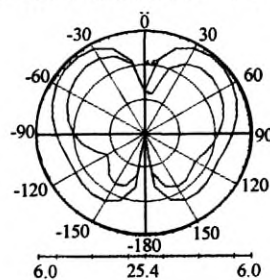


图 8 2.4 GHz 的辐射方向图

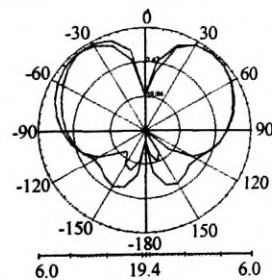


图 9 2.9 GHz 的辐射方向图

## 5 结束语

本文利用自适应因子、混沌算法和差分算法对粒子群算法进行改进, 提出了自适应混沌差分粒子群算法, 改善了基本粒子群算法易陷入局部最优的不足, 并通过数例仿真对比验证了该算法具有良好的搜索速度和搜索精度特性, 最后将自适应混沌差分粒子群算法应用到微带分形天线的多频优化设计中, 设计了一款 Sierpinski 方形微带天线, 从反射损耗曲线和辐射图可以看出该天线具有良好的小型化和多频特性, 在工程应用领域方面具有一定的实用价值。

## Application of Improved Particle Swarm Optimization Algorithm in Fractal Antenna Design

LIU Jian-xia<sup>1</sup>, ZHU Xiu-min<sup>1</sup>, ZHANG Shi-chao<sup>2</sup>

(1. College of Information Engineering, Taiyuan University of Technology, Taiyuan 030024, China;

2. Department of Microwave and Troposcatter, The 54th Reserch Institute of CETC, Shijiazhuang 050081, China)

**Abstract:** Particle Swarm Optimization (PSO) roots in research on colony movement of bird, and it is simple in structure, easy to be controlled and realized. For the basic PSO, the generation of initial population is blind, and the particle diversity is lost during the course of evolution. We proposed a kind of Adaptation Chaotic Differential Particle Swarm Optimization (ACDPSO) in this paper, which can increase the population diversity, speed the rate of convergence and improve the accuracy of solution. ACDPSO was used to design a kind of small and muti-frequency antenna, which is valuable to guid the Actual Enginerring.

**Key words:** ACDPSO; Microstrip fractal antenna; miniaturization; multi-frequency

(编辑:贾丽红)

(上接第 340 页)

## Fault Diagnosis Simulation Platform Based on SDG-GrC

ZHANG Zhi-jun, ZHAN Feng, ZHAO Jing-ge, XIE Ke-ming

(1. College of Information Engineering, TUT, Taiyuan, 030024, China;

2. College of Information management, Shanxi University of Finance and Economics, Taiyuan, 030006, China)

**Abstract:** As the real industrial system does not allow research of real-time fault diagnosis in the actual process device, GUI visual program in Matlab was used to design simulation platform for hot nitric acid cooling fault diagnosis. By using Signed Directed Graph(SDG) deep knowledge model and inverse direction inference technique and using consistent path, the basic rules of fault diagnosis were reasoned. Information Granularity and Information Granulation were introduced into construce fault diagnosis method based on GrC-SDG, which achieves Granular Matrix-based knowledge reduction algorithm. Finally, the effective ness of the fault diagnosis simulation platform were illustrated with experiments.

**Key words:** fault diagnosis; signed directed graph; granular computing; Graphical User Interfaces; Simulation Platform

(编辑:刘笑达)

## 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>