

文章编号 1005-0388(2009)06-1060-05

基于 Taguchi 算法的双层贴片宽带天线优化方法

徐 刚^{1,2} 唐传祥¹ 孟凡宝² 廖 勇² 杨周炳² 谢 平²

(1. 清华大学工程物理系, 北京 100084; 2. 中国工程物理研究院应用电子学研究所, 四川 绵阳 621900)

摘要 介绍了一种新出现的 Taguchi 全局优化算法, 并将其应用于双层贴片宽带天线的输入阻抗带宽优化设计中。Taguchi 算法基于正交矩阵对参数空间的均匀抽样, 以较少的计算量就能评估参数对结果的影响, 通过多次迭代并缩小搜索级差, 从而实现快速的多参数全局优化, 其具有实现简单、收敛快等优点。以天线的反射损耗 S_{11} 在期望带宽范围内的积分作为目标函数, 对含有 7 个变量参数的双层贴片天线结构进行了优化设计, 优化进程经过 40 次迭代后得到了求解精度内的最优解, 优化得到的双层贴片天线 $VSWR < 3$ 的带宽达到 40%, 对宽带电磁脉冲的辐射因子增益达到 1.4。

关键词 Taguchi 算法; 双层贴片; 全局优化; 宽带天线; 宽带电磁脉冲

中图分类号 TN820 **文献标志码** A

Optimization method for two-layer patches wideband antenna based on Taguchi's algorithm

XU Gang^{1,2} TANG Chuan-xiang¹ MENG Fan-bao² LIAO Yong²
YANG Zhou-bing² XIE Ping²

(1. Department of Engineering Physics, Tsinghua University,
Beijing 100084, China; 2. Institute of Applied Electronics, CAEP,
P. O. Box, 919-1015, Mianyang Sichuan 621900, China)

Abstract A novel global optimization method for two-layer patch wideband antenna based on Taguchi's algorithm is performed in this paper. Taguchi's algorithm is based on OA array concept, an optimal evenly distribute in multi-dimensional parameters space. By employing an OA(18, 7, 3, 2) and well designing fitness function, which is the integration of the antenna port reflect parameter S_{11} in expect frequency band, a two layer patch antenna contains seven variable dimension parameters was optimized around 500 MHz centre frequency using this method, 40% percent bandwidth was obtained($VSWR < 3$), the optimized antenna has well radiation direction that the rate of radiation fact to peak voltage of fed input mesoband EM pulse is 1.4.

Key words Taguchi algorithm; two-layer patch; global optimization; wideband antenna; mesoband EM pulse

引 言

宽带贴片天线是目前天线研究领域的一个热点^[1-4]。对于双层贴片的宽带微带天线, 其结构参

数较多, 而这些参数的合理设计又极大地影响着天线的输入阻抗带宽特性。利用传统的参数扫描或者随机搜索方法寻找能够使阻抗带宽最大的最优参数组合, 其计算量是非常庞大的, 而且容易陷入局部最

优,丢失全局最优解。例如一个具有 7 个变量参数的天线全局优化问题,如果要求参数的优化精度为各参数范围的 1/10,就将有高达 10^7 种参数组合。怎样通过较少的计算量获得全局最优的参数组合,是快速设计优良性能天线的重要途径。为此,介绍了一种基于正交矩阵抽样的 Taguchi 算法^[5],并研究了基于此算法的双层宽带贴片天线优化方法,通过对天线基底厚度、馈电位置和贴片尺寸等结构参数的优化,获得了满意的优化设计结果,使其满足了宽带微波辐射天线宽频带、高增益的要求,并验证了此优化方法的有效性。

1 Taguchi 算法

Taguchi 算法由 Taguchi G 提出,最初用于评估工厂中生产工艺参数对产品质量的影响^[6],之后便广泛应用于生物、化学等领域的实验设计中^[7,8]。近年来才由 Weng Weichung, Tsai J T 和 Kim E H 等人将其引入电磁设计领域^[9~12],用于射频电路、滤波器和相控天线阵列的优化设计,并获得了很好的优化结果。对于组合连续参数全局优化问题,由于 Taguchi 算法在优化进程中没有抽样的随机性以及对参数的离散编码等操作,与目前常用的遗传算法和模拟退火算法等优化算法^[13]相比,具有收敛快、优化精度高等特点,同时又不失全局最优性^[9]。

Taguchi 算法是基于正交矩阵对多维参数空间的抽样,表 1 为优化中用到的正交矩阵 OA(18, 7, 3, 2)^[14],它表示对于 7 维的参数空间,将各参数按

表 1 优化所用正交阵 OA(18, 7, 3, 2)^[14]

组合	参 数							Fitness	FitnessdB
	1	2	3	4	5	6	7		
1	0	0	0	0	0	0	0	F1	FdB1
2	1	1	1	1	1	1	0	F2	FdB2
3	2	2	2	2	2	2	0	F3	FdB3
4	0	0	1	2	1	2	0	F4	FdB4
5	1	1	2	0	2	0	0	F5	FdB5
6	2	2	0	1	0	1	0	F6	FdB6
7	0	1	0	2	2	1	1	F7	FdB7
8	1	2	1	0	0	2	1	F8	FdB8
9	2	0	2	1	1	0	1	F9	FdB9
10	0	2	2	0	1	1	1	F10	FdB10
11	1	0	0	1	2	2	1	F11	FdB11
12	2	1	1	2	0	0	1	F12	FdB12
13	0	1	2	1	0	2	2	F13	FdB13
14	1	2	0	2	1	0	2	F14	FdB14
15	2	0	1	0	2	1	2	F15	FdB15
16	0	2	1	1	2	0	2	F16	FdB16
17	1	0	2	2	0	1	2	F17	FdB17
18	2	1	0	0	1	2	2	F18	FdB18

其范围分为 3 个级阶,分别用序号 0、1、2 代表,参数之间的相关强度为 2,只需要 18 个组合即可在参数空间中进行最优化的采样,正交矩阵的特点在于任取其中任意 2 列参数,均存在两参数的 3^2 种组合,且每种组合的个数相同。这种抽样方式是对参数空间最少个数的均匀抽样,可通过较少次数的实验即反映出各参数对结果的影响。

以 Taguchi 算法为基础的优化方法流程图如图 1 所示,主要包括以下 8 个步骤:

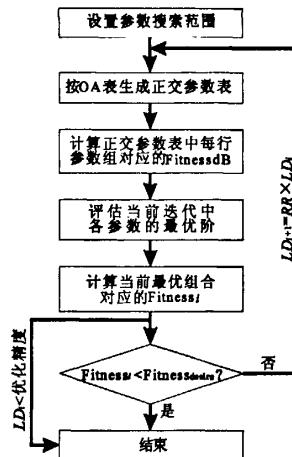


图 1 Taguchi 算法的流程图

第 1 步:根据参数范围生成初始 $Para_{opt_0}$ 和 LD_0 。其中 $Para_{opt_0} = (Para_{low} + Para_{up})/2$, 即各参数搜索范围的中心,而初始级差 $LD_0 = (Para_{up} - Para_{low})/4$ 为 $Para_{opt_0}$ 到上、下域距离的一半,使初始 3 级阶均匀分布于参数范围内;

第 2 步:根据 $Para_{opt_i}$ 和 LD_i 生成参数级阶表 $level(*, 2) = Para_{opt_i}$, $level(*, 1) = Para_{opt_i} - LD_i$, $level(*, 1) = Para_{opt_i} + LD_i$;

第 3 步:根据正交矩阵 OA(18, 7, 3, 2)和参数级阶表 $level(7, 3)$ 生成正交的参数组合矩阵 $ParaOA(27, 7)$,其中 $ParaOA$ 中各单元的数值为 OA 矩阵中相应各单元的级阶号对应的参数级阶值,表示为 $ParaOA(m, n) = level(n, OA(m, n))$;

第 4 步:计算 $ParaOA$ 中各行的参数组合对应的 Fitness 值和 FitnessdB 值;

第 5 步:计算参数的各级平均 FitnessdB,比如表 1 中参数 6 第 0 级的平均 FitnessdB = $(FdB1 + FdB5 + FdB9 + FdB12 + FdB14 + FdB16)/6$,各参数平均 FitnessdB 最低那级阶认为是此次迭代中该参

数的最佳值 $\text{Para}_{\text{opt}_i}$;

第6步:计算此次迭代中最佳参数值的组合对应的Fitness,作为该次迭代的最佳Fitness_i;

第7步:判断Fitness_i是否小于Fitness_{desire}或者级差LD_i是否小于所需要的优化精度,否则LD_{i+1}=RR×LD_i,并返回第2步,其中RR为级差的收敛系数,随着迭代次数增加,级差逐渐减小;

第8步:退出优化程序,保存最终优化结果。

其中的级差收敛系数RR选取较为灵活,一般取 $0.7 \leq RR < 1$,对于较多峰值的复杂问题,RR值越大越不容易丢失全局最优解,但这是以损失收敛速度为代价的。此外,针对不同的优化问题可通过设计可变的收敛系数RR_i改进优化速度^[15]。

2 双层贴片天线及带宽优化方法

图2所示为用于宽带微波辐射的同轴馈电双层贴片天线,基底由三层厚度分别为H₁、H₂、H₃的“介质-空气-介质”复合层组成,其中介质的介电常数为3.2,采用地板背面的同轴电缆馈电,两层介质上分别贴有长×宽分别为L₁×W₁和L₂×W₂的金属贴片,形成两个谐振频率相近的辐射模式,从而实现较宽的工作频带。在文献[16]中给出了这两个谐振频率与介质层厚度和贴片长度的近似关系,但贴片的宽度和馈电位置x对输入阻抗和带宽的影响非常大,所以需要对这些参数组合进行全局优化以实现在所需频段带宽内的良好匹配特性。

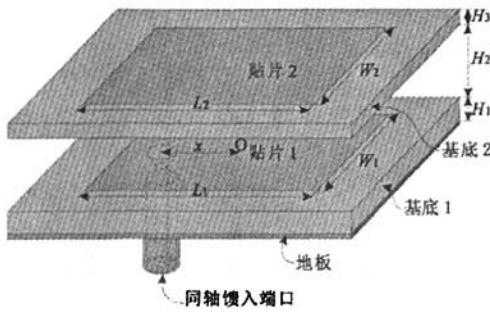


图2 双层微带贴片天线结构

表2 参数搜索域及40次迭代后得到的最优解

参数	下限	上限	初始值	优化值
x/cm	5	7	6	5.51
H ₁ /cm	1.5	3	2.25	3.0
H ₂ /cm	1	2.5	1.75	2.49
H ₃ /cm	1	2	1.5	1.79
W ₁ /cm	10	20	15	15.57
W ₂ /cm	15	24	14.5	24.0
L ₂ /cm	13.5	17.5	15.5	15.13
FitnessdB			-0.51	-19.19

由于中心频率f₀主要取决于贴片1的长度L₁,中心频率一旦确定,L₁也就固定了,主要由x、H₁、H₂、H₃、W₁、W₂和L₂这7个可变参量影响天线在所需频宽范围内的匹配性能,所以选用表1中的OA(18,7,3,2)作为优化程序中的正交采样矩阵,矩阵的各列就代表这7个可变参数,每次迭代共需进行18次计算。此外,适应度函数的合理设计也是优化算法能否获得满意结果的关键,针对不同的优化目标,可设计不同的适应度函数,如文献[9]中对阵列方向图的优化设计,采用了按各参数组合计算得到的方向图与期望方向图差异的积分作为适应度函数。此处优化目标为在中心频率附近一定带宽范围内的良好阻抗匹配特性,所以以馈电端口处的反射系数S_{11,dB}与目标反射系数S_{11,desire,dB}的差异在目标带宽频段内的积分作为适应性函数,即

$$\text{Fitness} = \int_{f_{\min}}^{f_{\max}} (S_{11,\text{dB}} - S_{11,\text{desire,dB}}) \times \left[\frac{1 + \text{sign}(S_{11,\text{dB}} - S_{11,\text{desire,dB}})}{2} \right] df \quad (1)$$

式中,sign为符号函数。因S_{11,dB}越小越好,所以低于S_{11,desire,dB}后就不计入积分之中。为了放大不同组合之间适应度的差异,使得统计参数各级对应的平均适应度时有更好的区分度,可把适应度函数转换为

$$\text{FitnessdB} = 20 \lg(\text{Fitness}) \quad (2)$$

优化过程中调用电磁场数值计算软件完成给定参数天线的计算,并返回目标频段内的端口反射系数S₁₁,按照图1中流程图完成整个优化过程,并输出每次迭代中的FitnessdB和最优解的参数。

3 优化计算结果

首先给定优化程序中天线尺寸参数的大致搜索范围,表2中列出了这7个参数的上下限,其中级差收敛系数RR=0.89,迭代40次后就可达到优化精度LD₄₀<1%×LD₀,表中还列出了初始参数和最终优化参数以及对应的适应度FitnessdB。图3为40次迭代进程中FitnessdB的收敛曲线,可以看到适应度值在前20次迭代中下降很快,之后变化很小,这表明已逐渐接近此种结构天线的极限宽带性能。

图4为经优化后双层贴片天线的阻抗圆图,阻抗轨迹围绕匹配点形成一个圈。图5为500 MHz相邻频段驻波系数的仿真和实测曲线,由于尼龙介电常数略低于设计值,实测曲线频率偏高,VSWR<

3 的带宽达到了 205 MHz, 相对于 500 MHz 的工作频率, 百分比带宽达到了 40%。

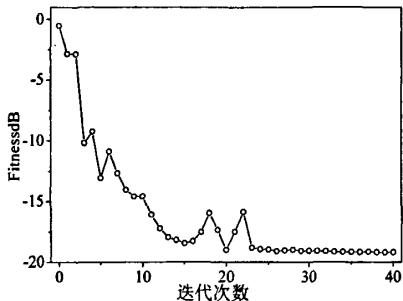


图 3 天线优化进程的收敛曲线

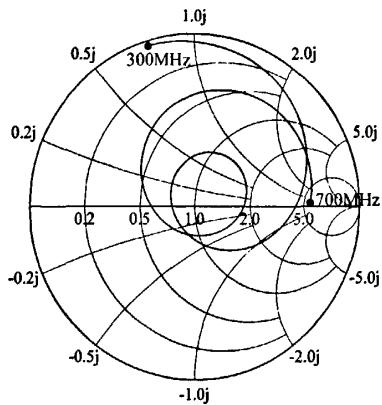


图 4 优化后天线的 Smith 圆图阻抗轨迹

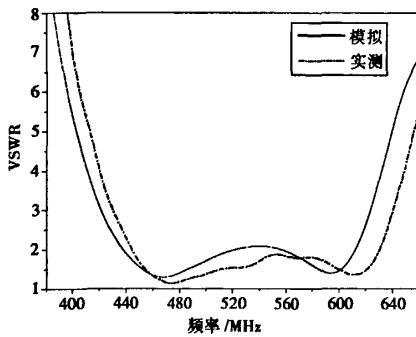


图 5 优化后天线的驻波比

作为用于定向辐射宽谱脉冲的天线, 辐射场幅值的方向性也是一项重要的指标。当馈入信号为带宽 15% 的指数衰减振荡脉冲时, 天线的 E 面和 H 面时域辐射场如图 6 所示(见 1177 页), 图中径向为时间轴, 0 度角为主辐射方向, 高度为辐射脉冲的归一化幅值。可见优化后的双层贴片天线在实现宽频带输入匹配的同时具有较好的方向性, 背向和侧向

辐射场峰值均远小于主辐射方向, 主辐射方向上的远场辐射因子 $r \cdot E$ 与馈入信号幅值之比达到了 1.4 倍。

4 结 论

介绍了以 Taguchi 算法为基础的全局优化方法, 并将其应用于双层贴片宽带天线的优化设计中。以双层贴片天线的输入阻抗带宽为优化目标设计了用于优化程序的适应度函数, 经过 40 次的迭代计算后获得了很好的结果, 经优化的天线 $VSWR < 3$ 的百分比带宽达到了 40%, 且对宽带脉冲的辐射具有较好的方向性。由于基于 Taguchi 算法的天线优化方法具有收敛快、优化精度高等特点, 而且还可以通过合理设计适应度函数和可变的级差收敛系数提高算法的性能, 对于以其他指标如增益或者效率为优化目标的天线优化设计也具有一定的参考价值。

参 考 文 献

- [1] GUHA D. Broadband design of microstrip antennas: recent trends and developments[J]. Mechanics, Automatic Control and Robotics, 2003, 3(15): 1083-1088.
- [2] 陈雅娟, 龙云亮. 宽带微带贴片天线的研究进展[J]. 电波科学学报, 1999, 14(3): 357-361.
CHEN Yajuan, LONG Yunliang. The development of the wideband microstrip antenna[J]. Chinese Journal of Radio Science, 1999, 14(3): 357-361. (in Chinese)
- [3] 姚凤薇, 钟顺时. 新型带扇形馈源的宽带缝隙天线[J]. 电波科学学报, 2005, 20(5): 675-677.
YAO Fengwei, ZHONG Shunshi. A new broadband slot antenna with a fan-shaped microstrip feed[J]. Chinese Journal of Radio Science, 2005, 20 (5): 675-677. (in Chinese)
- [4] 项 阳, 钱祖平, 赵受俊, 等. 一种宽带圆极化微带天线阵的设计与制作[J]. 电波科学学报, 2008, 23(3): 565-571.
XIANG Yang, QIAN Zuping, ZHAO Shoujun, et al. Design and realization of a broadband circularly polarization microstrip antenna array[J]. Chinese Journal of Radio Science, 2008, 23(3): 565-571.
- [5] ROY R. A primer on the Taguchi method[M]. New York: Van Nostrand Reinhold Press, 1999.
- [6] TAGUCHI G, CHOWDHURY S, WU Y. Taguchi's Quality Engineering Handbook[M]. New Jersey: John Wiley & Sons Press, 2004.
- [7] RAO R S, KUMAR C G, PRAKASHAM R S, et al. The Taguchi methodology as a statistical tool for biotechnological applications: a critical appraisal[J]. Biotechnology Journal, 2008, 3(4): 510-523.

- [8] KIM K D, HAN D N, KIM H T. Optimization of experimental conditions based on the Taguchi robust design for the formation of nano-sized silver particles by chemical reduction method [J]. *Chemical Engineering Journal*, 2004, 104(1-3): 55-61.
- [9] WENG Weichung, YANG Fan, DEMIR V, et al. Electromagnetic optimization using Taguchi method: a case study of linear antenna array design [C]// IEEE Ant and Prop Society Int Symp, 2006: 2063-2066.
- [10] KIM E H, HYUN K H, KWAK Y K, et al. Optimal design of radial basis function using Taguchi method [C]// Int Conf on Neural Networks and Brain, 2005, 1: 171-177.
- [11] TSAI J T, CHOU J H, LIU T K. Optimal design of digital IIR filters by using hybrid Taguchi genetic algorithm [J]. *IEEE Trans on Industrial Electronics*, 2006, 53(3): 867-879.
- [12] HWANG G Y, HWANG S M, LEE H J, et al. Application of Taguchi method to robust design of acoustic performance in IMT-2000 mobile phones [J]. *IEEE Trans on Magnetics*, 2005, 41(5): 1900-1903.
- [13] 汪定伟, 王俊伟, 王洪峰, 等. 智能优化算法 [M]. 北京: 高等教育出版社, 2007.
- WANG Dingwei, WANG Junwei, WANG Hongfeng, et al. Intelligent optimization methods [M]. Beijing: Higher Education Press, 2007.
- [14] HEDAYAT A S, SLOANE N J A, STUFKEN J. Orthogonal arrays: theory and applications [M]. New York: Springer Press, 1999.
- [15] WENG Weichung, YANG Fan, ELSHERBENI A. Electromagnetics and antenna optimization using Taguchi's method [M]. San Francisco: Morgan & Claypool, 2007.
- [16] LIU Zhangfa, KOOI P S, LI Lewei, et al. A method for designing broad-band microstrip antennas in multilayered planar structures [J]. *IEEE Trans on Ant and Prop*, 1999, 47(9): 1416-1420.



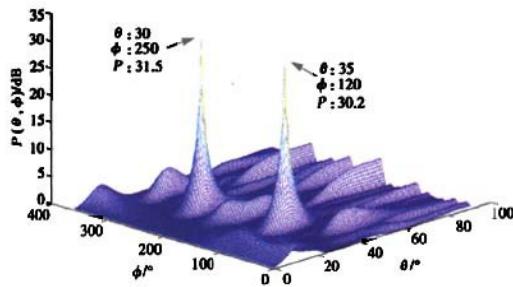
徐刚 (1984—), 男, 云南人, 2006 年于清华大学工程物理系获学士学位, 现为博士生。主要研究方向为高功率微波, 宽带天线和优化设计。



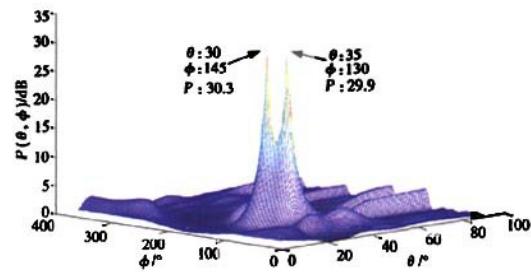
唐传祥 (1969—), 男, 山东人, 教授, 博士生导师。现任清华大学工程物理系系主任, 国家 863 项目专题组专家、中国粒子加速器学会常务理事及加速器物理专业组组长。研究方向为加速器物理及应用。获国家科技进步一等奖 1 项、中国专利发明金奖 1 项等其他省部级奖励多项, 并入选 2004 年度教育部“新世纪优秀人才支持计划”。



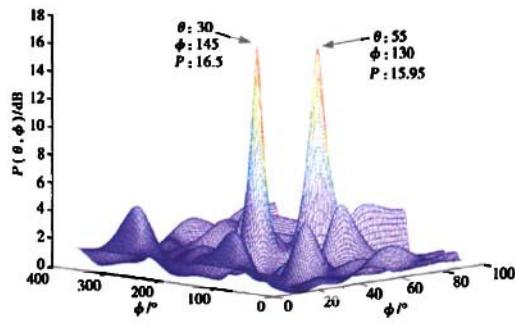
孟凡宝 (1961—), 男, 山东人, 研究员, 博士生导师。现任中国工程物理研究院应用电子学研究所总工程师。研究方向为亚 ns 脉冲辐射天线及高功率微波技术。入选国家“新世纪百千万人才工程”和国防科技工业“511 人才工程”, 享受政府特殊津贴, 国家“高科技发展”计划 15 周年“贡献奖”获得者。



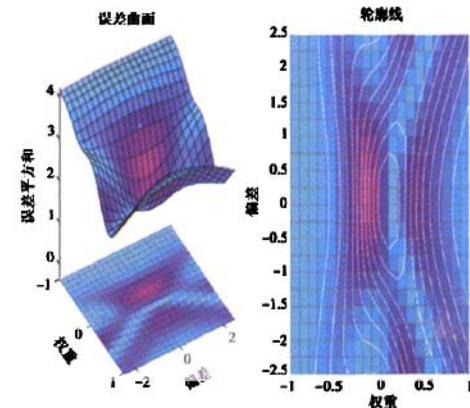
华光图 7 螺旋阵列二维空间谱估计



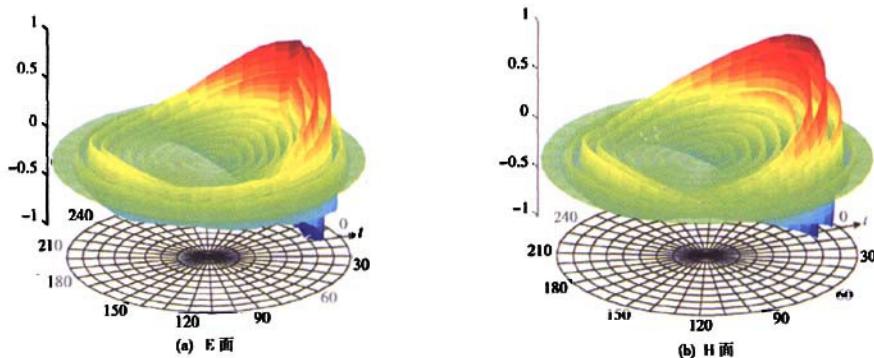
华光图 8 融合螺旋阵列相邻来波二维空间谱估计



华光图 9 融合螺旋阵列二维空间谱估计(SNR=0dB)



马伟图 2 系统神经元误差曲面和轮廓线



徐刚图 6 优化天线的时域辐射方向图

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>