

●研究简报●

两种含天线复合材料结构的性能对比*

CONTRAST ON PERFORMANCES OF TWO COMPOSITES WITH ANTENNAE

吉国明**¹ 付珍娟¹ 寇飞行² 刘莉³

(1. 西北工业大学 航空学院, 西安 710072)

(2. 中国航空工业集团公司 第一飞机设计研究院, 西安 710089)

(3. 西安航空制动科技有限公司, 西安 710065)

JI GuoMing¹ FU ZhenJuan¹ KOU FeiXing² LIU Li³

(1. School of Aeronautics, Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710072, China)

(2. The First Aircraft Institute of Aviation Industries Corporation of China, Xi'an 710089, China)

(3. Xi'an Science and Technology Limited Company of Aviation Braking, Xi'an 710065, China)

摘要 复合材料层压板结构和蜂窝夹芯结构是飞机上常用的两种复合材料结构,文中用有限元仿真分析和静力试验,对比天线埋入这两种不同的复合材料结构中在相同外载条件下的力学性能,并测试相同外载条件下这两种结构中天线的电性能。对比结果显示,无论在力学性能上还是介电性能上,蜂窝夹芯结构均比层压板结构具有一定的优势,说明在飞机上将天线埋入蜂窝夹芯结构中具有一定的优势。

关键词 层压板 蜂窝夹芯 复合材料 有限元分析 静力试验 天线性能

中图分类号 V214.8 TB332

Abstract Composite laminated plate and honeycomb sandwich are two common composite material structures on airplane. Finite element simulation analysis and static test are applied to contrast the mechanical properties of antennae in the two different composite materials loaded by the same addition loads, also test the electrical function of antennae in the two structures loaded by the same addition loads. The contrast result shows that honeycomb sandwich is better than laminated plate either on mechanical or dielectric properties to some extent, which shows that embedding antenna into honeycomb sandwich is better on airplane to some extent.

Key words Laminated plate; Honeycomb sandwich; Composite materials; Finite element analysis(FEA); Static test; Properties of antenna

Corresponding author: FU ZhenJuan, E-mail: xiaotu224@163.com, Fax: +86-29-88492422

Manuscript received 20100819, in revised form 20101025.

引言

由于先进的复合材料具有显著的减重效益,并能改善结构性能^[1],不少国家的飞机公司和航空研究机构都投入了大量的人力、物力进行理论和试验研究及其在飞机结构上应用的研究。自本世纪初来,各种复合材料以及复合材料结构相继问世,并在航空领域得到广泛应用^{[2]~[7]}。其中复合材料层压板结构和复合材料蜂窝夹芯结构是飞机上常用的两种复合材料结构。本文用有限元分析和静力试验对比这两种不同的复合材料天线结构在相同外载条件下的力学性能,并测试两种天线结构的电性能。

近年来纤维复合材料在汽车、机械、航空航天等领域得到广泛应用^[3]。纤维复合材料单层板在纤维方向

有很高的强度和刚度,而在垂直纤维方向上的强度和刚度非常低,实际应用中这类材料都是以层压板的形式出现^[4]。层压板即是由许多单层单向复合材料叠合在一起构成一个板结构,其层数和铺层方向根据要求不同排列。在进行层压板的强度分析时,由于每一层的排列方式和所承受的载荷可能不一样,导致各层的破坏顺序不一致,有的层先破坏,有的层后破坏,形成逐渐破坏过程^[5]。

蜂窝夹芯复合材料一般由上、下面板中间夹一比较厚的软夹芯构成。蜂窝芯的网格形式有正六边形、正方形、菱形等;材料可以是纸、玻璃布、铝合金、芳纶纸(nomex aramid paper)等;面板可采用胶合板、纤维板、铝合金板、玻璃钢板等等。因蜂窝夹芯结构有类似工字梁的力学性能,其最大特点是比强度、比刚度高,

* 20100819 收到初稿, 20101025 收到修改稿。

** 吉国明, 男, 1970 年 7 月生, 四川省威远县人, 汉族。西北工业大学副教授, 研究方向为飞行器结构设计、飞行器可靠性分析与设计。

隔音、隔热性能突出;与其他夹芯材料相比,强度相同时其重量要轻得多^[2,7]。因较厚的轻质蜂窝芯将面板隔开,使该结构具有较大的横断面惯性矩及较高的比强度和比刚度。从受力角度分析,承力体主要是面板,而支承及传递剪力的则是蜂窝芯。除了具有良好的力学特性外,它还具有低介电常数^[6]。

1 结构件

结构件选取飞机上蒙皮,按蒙皮材料形式分为两组,两组结构件尺寸相同,一组为层压板结构,另外一组为蜂窝夹芯结构。每组结构件中均含有两排电子天线,每排电子天线各有三个。具体如图1、图2所示。

结构件尺寸为500 mm×600 mm。各个天线尺寸相同,均为40 mm×40 mm。天线的弹性模量为150 GPa,泊松比为0.17。蒙皮单层厚度为0.25 mm,材料采用某复合材料,其材料参数见表1。

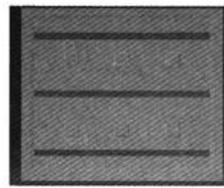


图1 层压板结构件

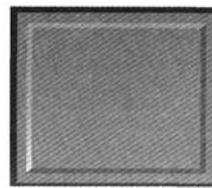


图2 蜂窝夹芯结构件

Fig.1 Laminated plate member Fig.2 Honeycomb sandwich member

表1 复合材料的材料参数

Tab.1 Material parameters of composite materials

纵向弹性模量	横向弹性模量	面内剪切模量	泊松比	密度
Longitudinal elastic modulus	Transverse elastic modulus	In-plane shear modulus	Poisson's ratio μ	Density ρ /(kg/m ³)
E_1 /GPa	E_2 /GPa	G_{12} /GPa		
22.9	22.2	3.1	0.2	1 820

1.1 层压板结构

本文中的层压板是由纤维复合材料单层板构成的,纤维复合材料单层板在纤维方向有很高的强度和刚度,而在垂直纤维方向上的强度和刚度非常低。为克服一般层压板的这种不足,可在层压板结构中加入桁条,称之为层压板加筋结构。本文中的层压板结构即属于这种结构(桁条有3根)。

本文选用的层压板加筋结构,无天线区域蒙皮铺层为8层,铺排方式为 $[(\pm 45^\circ)_3/-45^\circ/45^\circ]$,各铺层厚度均为0.25 mm;天线区域蒙皮铺层为9层,其中间一层为天线,天线厚度为1.5 mm,其余各层厚度均为0.25 mm,蒙皮铺排方式为 $[(\pm 45^\circ)_2/0^\circ/45^\circ/-45^\circ/-45^\circ/45^\circ]$;桁条在平行于蒙皮面方向的铺层为20层,铺排方式为 $[45^\circ/-45^\circ/-45^\circ/45^\circ/45^\circ/-45^\circ/-45^\circ/45^\circ/45^\circ/-45^\circ]$,各铺层厚度均为0.25 mm;桁条在垂直于

蒙皮面方向的铺层为12层,铺排方式为 $[45^\circ/-45^\circ/-45^\circ/45^\circ/45^\circ/-45^\circ]$,各铺层厚度均为0.25 mm。该结构蒙皮的部分区域铺层如图3所示,其中P表示铺层。

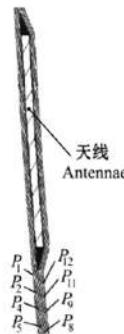


图3 层压板结构件蒙皮铺层图

Fig.3 Overlay of laminated plate skin

1.2 蜂窝夹芯结构件

本文选用的蜂窝夹芯结构,非天线区域蒙皮铺层为9层,该区域蒙皮铺排方式为 $[(\pm 45^\circ)_2/0^\circ/45^\circ/-45^\circ/-45^\circ/45^\circ]$,蜂窝芯处于最中间层(即第5层),该层厚度为8 mm,其余各铺层厚度均为0.25 mm;天线区域蒙皮铺层为11层,其中第5层和第7层为蜂窝芯,该两层厚度分别为3.5 mm和3 mm,第6层为天线,该层厚度为1.5 mm,天线区域蒙皮的铺排方式为 $[(\pm 45^\circ)_2/0^\circ/0^\circ/0^\circ/45^\circ/-45^\circ/-45^\circ/45^\circ]$ 。该结构蒙皮的部分区域铺层如图4所示。

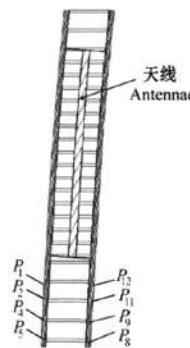


图4 蜂窝夹芯结构件蒙皮铺层图

Fig.4 Overlay of honeycomb sandwich skin

1.3 结构件受载情况介绍

结构件四周固定,在蒙皮表面选取9个大小相同的区域(100 mm×90 mm),在每个区域施加大小均为822.5 N的法向均布拉伸载荷,该力垂直作用于蒙皮表面,方向相对于蒙皮表面向外。9个受载区域的具体位置如图5所示。

2 力学性能分析

对两种试验件的力学性能进行分析,首先采用有

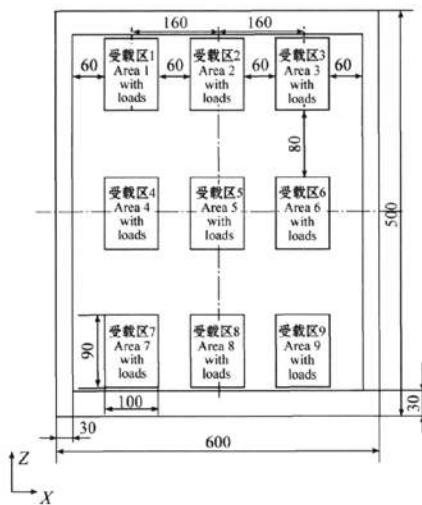


图 5 结构件受载区域分布图

Fig. 5 Areas with loads of members

限元分析,然后再作静力试验校核。

2.1 有限元仿真分析^[7,9]

运用有限元前后处理分析软件 Patran 和计算软件 Nastran 进行有限元建模及静力计算分析。两结构建模相似,均采用正交各向异性层压板建模。首先建立单层板几何模型,然后进行网格划分。对层压板结构,整个模型共有 13 481 个节点、13 248 个单元。其中蒙皮部分 12 221 个节点、12 000 个单元,桁条部分 1 575 个节点、1 248 个单元,蒙皮和桁条有 315 个共用节点。对蜂窝夹芯结构,整个模型共有 12 221 个节点、12 000 个单元。其中,单元属性定义为壳单元 shell 单元,按本文上节中所述结构件的铺排方式进行铺层。

两模型的边界条件均为四周固支。施加载荷时采用节点均布加力,每个节点力大小为 2.061 N,方向垂直于蒙皮表面向外。均布载荷区域如图 5 所示。

2.1.1 应力云图比较

层压板结构件应力云图如图 6 所示,最大 von Mises 应力为 56.7 MPa。蜂窝夹芯结构件应力云图如图 7 所示,最大 von Mises 应力为 29.8 MPa。两结构件均满足强度的要求。

对比图 6 和图 7 不难发现,在满足强度要求的前提下,对层压板结构件和蜂窝夹芯结构件分别施加相同载荷,可得以下结论:

(1) 蜂窝夹芯结构蒙皮的最大应力小于层压板结构蒙皮的最大应力;除桁条和天线区域外,层压板结构蒙皮的应力大于蜂窝夹芯结构蒙皮在相同区域的应力。这说明蜂窝夹芯结构的强度大于层压板结构的强度。

(2) 蜂窝夹芯结构蒙皮在天线区域的应力小于层压板结构蒙皮在相同区域的应力,说明蜂窝夹芯结构



图 6 层压板结构蒙皮应力云图

Fig. 6 Stress tensor of laminated plate skin

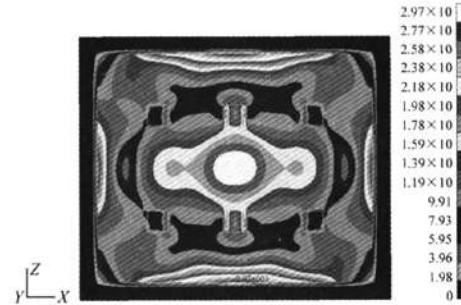


图 7 蜂窝夹芯结构蒙皮应力云图

Fig. 7 Stress tensor of honeycomb sandwich skin

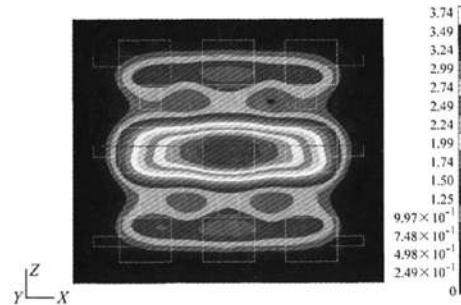


图 8 层压板结构蒙皮位移云图

Fig. 8 Displacements of laminated plate skin

对天线的影响小于层压板结构对天线的影响。

(3) 蜂窝夹芯结构蒙皮在天线边缘区域的应力小于层压板结构蒙皮在相同区域的应力,说明天线对蜂窝夹芯结构的影响小于天线对层压板结构的影响。

2.1.2 位移云图比较

层压板结构件位移云图如图 8 所示,最大位移发生于结构件中央,为 3.74 mm;最小位移发生于结构件靠近边缘区域。蜂窝夹芯结构件位移云图如图 9 所示,最大位移发生于结构件中央,为 1.52 mm;最小位移发生于结构件靠近边缘区域。两结构件均满足刚度的要求。

对比图 8 和图 9 不难发现,在满足刚度要求的前提下,对层压板结构件和蜂窝夹芯结构件分别施加相同载荷,可得以下结论:

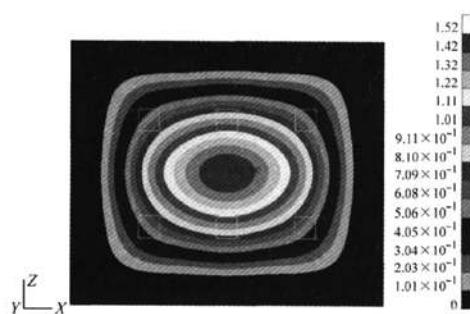


图9 蜂窝夹芯结构蒙皮位移云图

Fig.9 Displacements of honeycomb sandwich skin

(1)蜂窝夹芯结构蒙皮的最大位移小于层压板结构蒙皮的最大位移;除桁条和天线区域外,层压板结构蒙皮的位移大于蜂窝夹芯结构蒙皮在相同区域的位移,说明蜂窝夹芯结构的刚度大于层压板结构的刚度。

(2)蜂窝夹芯结构蒙皮在天线区域的位移小于层压板结构蒙皮在相同区域的位移,说明蜂窝夹芯结构对天线的影响小于层压板结构对天线的影响。

(3)蜂窝夹芯结构蒙皮在天线边缘区域的位移小于层压板结构蒙皮在相同区域的位移,说明天线对蜂窝夹芯结构的影响小于天线对层压板结构的影响。

2.2 静力试验

试验中采用千分表(即位移传感器)进行位移测量。如图10所示,2号千分表和1号千分表分别位于x轴两侧,且几何位置关于x轴对称。加载过程中,用位移传感器测得层压板结构试验件和蜂窝夹芯结构试验件测量点沿载荷方向的位移分别见表2和表3。位移变化的相对误差最大值均小于10%。

层压板结构测量点位移基本呈线性变化,最大位移分别是0.96 mm和0.88 mm,测量点几何位置关于x轴对称,位移变化的相对误差最大为

$$\left| \frac{0.96 - 0.88}{0.96} \right| \times 100\% \approx 8.3\% \leq 10\%$$

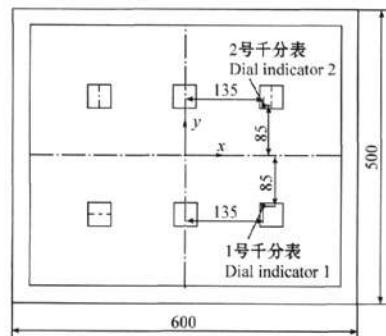


图10 位移传感器布置图

Fig.10 Distributing of displacement sensor

表2 层压板结构试验件测量点位移

Tab.2 Displacements of laminated plate test member's location measured

位移传感器 Displacement sensor	级数 Series				
	0(0%)	1(30%)	2(50%)	3(67%)	4(90%)
1号 No.1/mm	1.000	1.285	1.495	1.610	1.850
2号 No.2/mm	1.000	1.280	1.465	1.543	1.770

表3 蜂窝夹芯结构试验件测量点的位移

Tab.3 Displacements of honeycomb sandwich test member's location measured

位移传感器 Displacement sensor	级数 Series				
	0(0%)	1(30%)	2(50%)	3(67%)	4(90%)
1号 No.1/mm	1.000	1.195	1.345	1.485	1.630
2号 No.2/mm	1.000	1.192	1.312	1.443	1.585

蜂窝夹芯结构测量点位移基本呈线性变化,最大位移分别是0.72 mm和0.69 mm,测量点几何位置关于x轴对称,位移变化的相对误差最大值为

$$\left| \frac{0.72 - 0.69}{0.72} \right| \times 100\% \approx 4.1\% \leq 10\%$$

层压板结构和蜂窝夹芯结构测量数据均可靠有效。误差产生的主要原因,一是由于位移传感器的理论位置与实际位置存在误差,二是系统本身存在的误差。

2.3 有限元仿真结果与试验结果的比较

由有限元分析结果得,层压板结构在两测量点沿载荷方向最大位移分别为1.028 mm和0.933 mm。由此得层压板结构在两测量点有限元仿真误差分别为

$$\left| \frac{1.028 - 0.96}{0.96} \right| \times 100\% \approx 7.1\% \leq 10\%$$

$$\left| \frac{0.933 - 0.88}{0.88} \right| \times 100\% \approx 6.0\% \leq 10\%$$

由有限元分析结果得出,蜂窝夹芯结构在两测量点沿载荷方向最大位移均为0.722 mm。由此得蜂窝夹芯结构在两测量点有限元仿真误差分别为

$$\left| \frac{0.722 - 0.72}{0.72} \right| \times 100\% \approx 0.27\% \leq 10\%$$

$$\left| \frac{0.722 - 0.69}{0.69} \right| \times 100\% \approx 4.6\% \leq 10\%$$

层压板结构和蜂窝夹芯结构的有限元仿真相对于试验的误差均小于10%,说明有限元仿真结果与试验有良好的一致性。

此外,用敲击检测法、反射法超声C扫描、穿透法超声C扫描对层压板试验件和蜂窝夹芯试验件分别进行试验前和试验后无损检测。无损检测发现,试验前无损检测结果符合技术要求,结构完整,没有发现缺陷;试验后试验件外观完整,无损检测未发现破坏。这

说明层压板结构和蜂窝夹芯结构在所加载荷条件下安全,与有限元仿真结果吻合。

3 天线结构的电性能测试^[10]

采用专业试验仪器,试验加载到 30%、50%、67%、90%、100% 试验载荷时,测量 6 片天线中心的频点和带宽。通过驻波比检测各结构对天线性能的影响,并选择最优结构。测试结果如表 4 和表 5。

表 4 不同加载力下层压板结构天线组在工作频点的驻波比测试结果

Tab.4 Test results of stationary wave ratio of antennae in laminated plate at work channel with different loads

加压 Pressure	工作在 1.268 GHz 的 3 个 天线 Three antennae at 1.268 GHz			工作在 1.575 GHz 的 3 个 天线 Three antennae at 1.575 GHz		
	级数 Series					
	1	2	3	4	5	6
0	2.74	2.90	2.91	1.73	2.72	2.84
1	2.72	2.90	2.88	1.80	2.71	2.84
2	2.73	2.91	2.89	1.81	2.72	2.86
3	2.73	2.90	2.91	1.80	2.74	2.84
4	2.74	2.91	2.89	1.80	2.80	2.84
5	2.72	2.90	2.88	1.81	2.76	2.85
6(0)	2.72	2.90	2.88	1.81	2.77	2.82

表 5 不同加载力下蜂窝夹芯结构天线组在工作频点的驻波比测试结果

Tab.5 Test results of stationary wave ratio of antennae in honeycomb sandwich at work channel with different loads

加压 Pressure	工作在 1.268 GHz 的 3 个 天线 Three antennae at 1.268 GHz			工作在 1.575 GHz 的 3 个 天线 Three antennae at 1.575 GHz		
	级数 Series					
	1	2	3	4	5	6
0	2.03	1.24	1.81	1.32	1.33	2.16
1	2.05	1.25	2.67	1.32	1.35	2.17
2	2.05	1.24	3.12	1.33	1.35	2.16
3	2.05	1.23	3.12	1.32	1.34	2.17
4	2.04	1.23	3.11	1.34	1.33	2.16
5	2.05	1.23	3.12	1.33	1.34	2.17
6(0)	2.05	1.24	3.12	1.32	1.33	2.17

对比表 4、表 5 中的数据可以看出,蜂窝夹芯结构天线的驻波比整体小于层压板结构,从天线性能的角度比较,蜂窝夹芯结构对天线的影响比层压板结构小。结构不同所产生的性能差异可进一步研究。

4 结论

根据以上对比分析可以看出,结构承载变形对天线的电性能影响不大,可以接受;无论在力学性能上还

是介电性能上,蜂窝夹芯结构比层压板结构更具优势。此外,对试验件进行称重发现,蜂窝夹芯结构更轻。这些都说明在飞机上将天线埋入蜂窝夹芯结构中具有一定优势。

参考文献 (References)

- 陶梅贞. 现代飞机结构综合设计 [M]. 西安: 西北工业大学出版社, 2001: 291.
- TAO MeiZhen. Integrative design of current aircraft structures [M]. Xi'an: Northwestern Polytechnic University Press, 2001: 291 (In Chinese).
- 范秋习. 蜂窝夹层复合材料 [J]. 北京轻工业学院学报, 1998, 16(2): 77-81.
- FAN QiuXi. Honeycomb sandwich composite materials [J]. Journal of Beijing Institute of Light Industry, 1998, 16(2): 77-81 (In Chinese).
- 陈建桥, 许玉荣, 魏俊红. 复合材料层合板的极限强度分析与可靠性优化设计 [J]. 机械强度, 2007, 29(2): 241-246.
- CHEN JianQiao, XU YuRong, WEI JunHong. Probabilistic optimum design of laminated composites based on the last ply failure criterion [J]. Journal of Mechanical Strength, 2007, 29(2): 241-246 (In Chinese).
- 陈建桥, 彭文杰, 水田正道, 竹园茂男. 层合结构对复合材料层合板最终强度的影响 [J]. 华中科技大学学报, 2006, 34(8): 91-93.
- CHEN JianQiao, PENG WenJie, Nagata Masamichi, Takezono Shigeo. On the ultimate strength of laminated composites with different stacking structures [J]. Journal of Huazhong University of Science and Technology, 2006, 34(8): 91-93 (In Chinese).
- 黄争鸣. 复合材料的细观力学引论 [M]. 北京: 科学出版社, 2003: 49.
- HUANG ZhengMing. Mesomechanics introduction of composites [M]. Beijing: Science Press, 2003: 49 (In Chinese).
- 马连华. 蜂窝夹芯材料力学与介电性能研究 [D]. 北京: 北京工业大学, 2007: 2.
- MA LianHua. Study on mechanical and dielectric properties of honeycomb core materials [D]. Beijing: Beijing University of Technology, 2007: 2 (In Chinese).
- 富明慧. 蜂窝芯层的等效弹性参数 [J]. 力学学报, 1999, 31(1): 113-118.
- FU MingHui. Equivalent elastic parameters of the honeycomb core [J]. Journal of Mechanics, 1999, 31(1): 113-118 (In Chinese).
- Aid El-Sayed. Theoretical approach to the deformation of honeycomb based composite materials [J]. Composites, 1979, 10(4): 209-214.
- 张永刚, 王淑沅, 方灶旺, 陶文斌. 复合材料夹层结构翼型件的有限元分析 [J]. 纤维复合材料, 2009, 6(2): 18-20.
- ZHANG YongGang, WANG ShuYuan, FANG ZhaoWang, TAO WenBin. Finite element analysis for sandwich composite airfoil part [J]. Fiber Composites, 2009, 6(2): 18-20 (In Chinese).
- 王昭. 基于复合材料的天线结构设计 [J]. 电子机械工程, 2009, 25(4): 29-31.
- WANG Zhao. Based on compound materials antenna structure design [J]. Electro-Mechanical Engineering, 2009, 25(4): 29-31 (In Chinese).

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>