

文章编号:1006-2343(2010)03-108-04

# 大型天线舱风载作用下力学特性及稳定性分析

沈文军<sup>1</sup>, 沈琦<sup>2</sup>

(1. 中国电子科技集团公司 第十四研究所, 南京 210039, E-mail: swj9999@sina.com;  
2. 上海交通大学 机械系统与振动国家重点实验室, 上海 200240)

**摘要:** 通过有限元分析, 对某大型舰载设备天线舱在摇摆工作状态下进行了力学特性分析和优化。其中, 根据工字梁结构屈曲分析理论, 对其在不同动态载荷工况下底层结构的工字钢腹板稳定性进行研究, 并对舱底层结构在不同方向风载的结构应力分布进行了仿真分析, 提出了使用指导意见, 其研究成果可为天线舱进一步优化提供基础。

**关键词:** 风载荷; 强度; 稳定性; 天线舱; 屈曲

中图分类号: O346 文献标识码: A

## Analysis on the Mechanical Behavior and Stability of Antenna-cabin With Various Wind Loads

SHEN Wen-jun<sup>1</sup>, SHEN Qi<sup>2</sup>

(1. 014 Research Institute, China Electronic Science and Technology Corporation, Nanjing 210039, China;  
2. State Key Lab of Mechanical System and Vibration, Shanghai Jiao Tong University, Shanghai, 200240, China)

**Abstract:** In the present paper, the mechanical behavior of antenna-cabin on capital ship under rolling and pitching situations has been investigated by means of finite element analysis. The stability of underlying I-beams under different dynamic loads has been discussed based on the buckling theory of I-beams. Simulation analysis of underlying structural stress with wind loads in various directions has been done. The results can be used in the further optimization design and applications of antenna-cabin.

**Key words:** wind load; strength; stability; antenna-cabin; buckling

大型舰载电子设备的天线舱, 做为地面调试设备的载体安装在摇摆台上, 因此必须能满足舰船模拟环境的要求以及当地的环境条件如风、雨等气候条件要求。并且由于摇摆台承载能力有限, 该舱的重量控制也极为严格。因此对天线舱在不同方向的风载荷作用下结构的力学特性和稳定性进行研究十分重要。

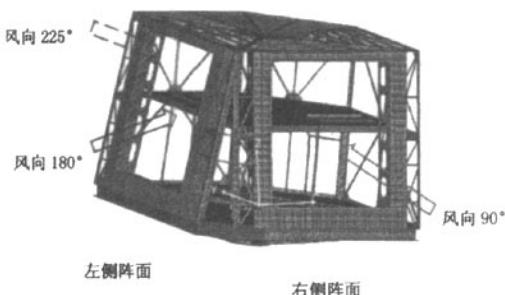
目前国内对天线舱的结构设计研究主要集中在刚度、强度分析及加工成形性方面; 肖波等人研究了海试方舱在不同摇摆工况下的桅杆刚度、强度特性<sup>[2]</sup>; 王良模等人分析了某种车辆方舱的固有频率和振动模式, 为实际使用中的外加激励频率提供了理论指导<sup>[3]</sup>; 赵静研究了某雷达骨架式方舱的结构焊接成形性能, 提出了结构优化方案, 并通过实验验证了其可行性<sup>[4]</sup>。这些研究在不同类别的天线舱的局部设计具有指导作用, 但是对于天线舱整体结构在全载荷下的力学特性及动载荷作用下的稳定性研究并不多见; 此外, 针对天线舱的力学特性研究中大多仅考虑了由其自身结构重量所引起的刚度、强度变化, 而忽略了风载荷对其实际使用中稳定性的影响。

基于建筑结构风载荷求解标准, 考虑不同风压和背压给出某型天线舱结构的风载与风速之间关系, 拟采用壳单元建立其结构有限元模型, 分析天线舱在摇摆工况下不同风载方向对结构的刚度和强度影响; 并在此基础上以底座工字钢腹板结构为对象, 分析在不同载荷工况下结构屈曲和稳定性, 为天线舱结构设计和使用提供指导。

### 1 有限元模型及载荷

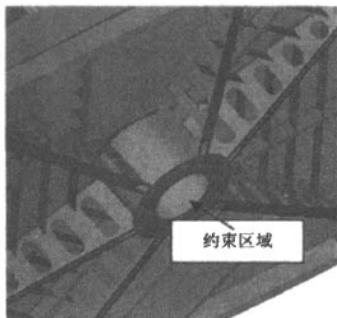
#### 1.1 有限元模型

由于天线舱在装配时采用焊接或铆接方式进行各部件之间的连接, 最后形成一个整体, 故有限元模型中各部件之间的连接采用共节点的方法模拟装配中的焊接工艺。为了便于分析天线舱结构连接处的应力状态及局部稳定性, 整个模型采用壳单元划分网格。模型中主要以四节点壳单元为主, 为了避免力传递路径畸变性, 局部区域采用少量的三节点壳单元进行过渡使载荷的传递与网格方向一致。模型坐标原点位于法兰盘中心在底层地板上表面的投影点, 如图 1 所示。X 轴平行于右侧天线阵面, Y 轴平行于左侧天线阵面。有限元建模及数值分析均在 ANSYS 中完成, 结构的单元数为 208 511 个, 节点数为 210 368 个。



▲图1 天线舱整体结构有限元模型

天线舱的主要框架结构采用Q345B和Q235B钢,材料的杨氏模量和泊松比为200 GPa和0.3。为了结构轻量化,底层和二层地板采用铝合金材料,材料的杨氏模量和泊松比为70 GPa和0.35。根据其安装特性在底板的中间位置进行约束,如图2所示。



▲图2 天线舱约束位置

由于天线舱上需要安装天线和内部设施,它们的总质量比天线舱质量大很多,因此分析其动态特性时需要考虑它们的惯性对结构刚强度和稳定性的影响。分析时采用质量点方式施加这部分载荷,质量点位于这些结构的重心位置。

## 1.2 风载荷等效模型

由于天线舱一般固定安装在平台上,整体结构类似于塔式结构,在风力的作用下,在结构的表面会产生一定的风压,风压的大小与风速、空气密度、所在的地区和季节有关。同时在结构的背面会受到背压的影响。目前对塔式结构的风压的等效模型的研究相对比较多,并形成了基本的计算公

式。根据研究<sup>[5-7]</sup>以及建筑结构荷载规范(GB50009-2001)<sup>[8]</sup>,风压力由下式计算:

$$p = f(K_i, K_{i1}, f_i, D_{ci}) q_0 \quad (1)$$

这里 $f$ 是与风压高度变化系数、体型系数、塔体设备的有效直径等参数相关的变量,根据天线舱的几何尺寸以及安装特点,考虑各个参数之后的求解得到 $f \approx 1.0$ 。 $q_0$ 为基本风压值,单位为Pa,由下式计算:

$$q_0 = \frac{1}{2} \rho v^2 \quad (2)$$

其中, $\rho$ 为当地空气密度,单位kg/m<sup>3</sup>;因此,不同风速下的风压力可以近似由下式得到:

$$p = q_0 = \frac{1}{2} \rho v^2 \quad (3)$$

当考虑风载对天线舱的影响时,便可将压强 $p$ 作为等效风载施加于风载作用面上。此外,天线舱结构在风载荷的作用下,除了正面的风压力之外,结构背面会有背压产生。对结构而言,背压主要加剧弯矩的生成,而背压大小主要与结构的体型系数有关。根据相关经验公式及建筑结构荷载规范,进行背压计算时,圆柱结构的体型系数为0.7,一般墙面的体型系数为-1.0,墙角为-1.8。基于此,对天线舱进行风载背压分析时,综合考虑安全系数,将背压区系数设定为-1.30。

根据实际需求,分析时在一个阵面施加载荷,计算在风速35 m/s、摇摆范围:±10°、最大角加速度:0.108 rad/s<sup>2</sup>、摇摆最大角速度:0.137 rad/s时,不同风向下的动态特性。

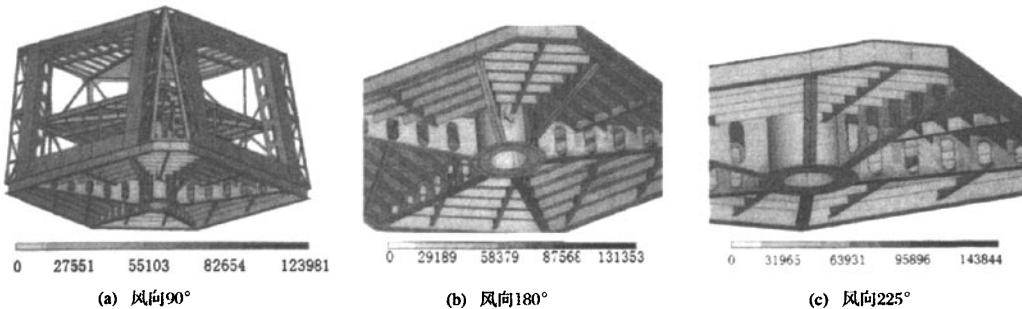
取当地空气密度 $\rho = 1.29 \text{ kg/m}^3$ ,故等效风载 $p$ 为:

$$p = \frac{1}{2} \times 1.29 \times 35^2 = 790.13 \text{ Pa} \quad (4)$$

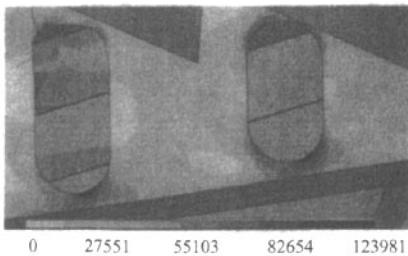
分别在三个方向施加风载荷(如图1),分析天线舱在动态载荷下的力学特性。其中,90°风载平行于Y轴,垂直于右侧阵面;180°风载平行于X轴,垂直于左侧阵面;225°风向可分解为两个分量,一部分平行左侧阵面,另一部分垂直于左侧阵面。

## 2 不同方向风载作用下力学特性

计算得到不同方向风载荷作用下天线舱的整体等效应力分布云图如图3所示。由于天线舱的底板工字钢支撑结构承受整个天线舱及设备的重量,故不同方向风载荷下等效应力较大的位置出现在底板工字钢靠近约束位置的根部。为了减轻整体结构的重量,在工字钢的腹板上开孔,由于承载面积的减少,造成结构的最大应力位置出现在开孔边缘附近,如图4所示。



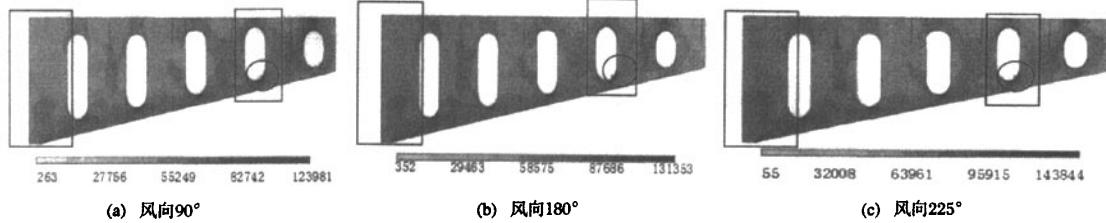
▲图3 天线舱整体应力分布云图(单位 kPa)



▲图4 底板应力量大位置局部放大图(单位 kPa)

比较不同风向下的结构应力分布云图和应力最大值可知:在风向225°工况下,结构的整体应力值最大,为144 MPa;在风向90°工况下,结构的整体应力值最小,为124 MPa。这是由于当风载方向与天线安装面垂直时,风载荷有效地降低了天线阵面对底板约束位置的弯矩,使得结构在该位置时应力分布更加均匀,从而使天线舱总体的应力值下降。因此,尽管在不同方向风载的工作工况下结构均满足设计要求,但是在这种工况下工作相对于更安全,该结果对于天线舱的实际应用具有理论指导意义。

在不同方向风载作用下,天线舱整体结构最大变形位置



(图中圆圈处为天线舱整体结构应力最大值所在位置,方框区域为局部稳定性分析区域)

▲图5 牛腿工字梁腹板应力分布云图(单位 kPa)

根据《钢结构设计规范》GB50017-2003<sup>[9]</sup>、引入腹板通用高厚比 $\lambda$ 的概念,从弯曲临界应力 $\sigma_c$ 、剪切临界应力 $\tau_c$ 、局部压力作用下应力 $\sigma_c$ 三方面综合计算工字梁腹板的临界应力,将实际工况中的受力分析结果带入局部稳定性公式进行失稳判断。计算过程如下:

(1) 弯曲临界应力 $\sigma_c$

用于抗弯计算腹板的通用高厚比为<sup>[12]</sup>:

$$\lambda_b = \sqrt{\frac{f_y}{\sigma_c}} \quad (5)$$

式中: $\sigma_c = \frac{x_b k_b \pi^2 E}{12(1-\nu^2)} \left( \frac{t_w}{h_0} \right)^2$ ;  $f_y$ :钢材屈服强度,根据材料属性,取345 MPa; $x_b$ 为梁弯曲时翼缘对腹板的约束系数; $k_b$ 为板的弯曲屈曲系数; $E$ 为钢材的弹性模量; $\nu$ 为钢材的泊松比; $t_w$ 为腹板的厚度; $h_0$ 为腹板的计算高度

根据实际工况,若取 $x_b = 1.66$ <sup>[12]</sup>,则:

$$\lambda_b = \frac{h_0/t_w}{177} \sqrt{\frac{f_y}{235}} \quad (6)$$

根据通用高厚比 $\lambda_b$ 的不同,弯曲临界应力计算公式如下<sup>[12]</sup>:

当 $\lambda_b \leq 0.85$ 时, $\sigma_c = f$

都出现在平行于 $X$ 轴的右侧天线安装面上。由于风载远小于天线舱的结构自重及设备载荷,而结构只在下端固定,因此天线舱的变形主要是结构本身的刚体位移和变形位移。当风向为225°时,天线舱整体结构位移值最大达到4.65 mm,高于风向90°(3.85 mm)及风向180°(3.91 mm)的情况。这是由于当风载垂直于天线安装面时,减缓了天线舱向天线安装面一侧的偏转趋势,因而从一定程度上减小了天线舱的整体结构位移。相反地,当风载平行于天线安装面时,则加剧了天线舱的偏转,从而增大了天线安装面的变形。

### 3 不同风载作用下局部结构的稳定性

#### 3.1 天线舱底板工字梁局部稳定性判断公式

从不同风向下天线舱的刚度和强度分析结果表明,天线舱底部工字钢是整个结构中主要承力部件。在三种方向的风载作用下,天线舱的结构整体应力最大值都出现在 $X$ 轴侧天线阵面下方的同一个工字梁腹板开孔边缘位置,同时工字钢腹板的应力值相对较大,特别是在风向为225°时,工字钢腹板的应力值相对比较集中。如图5所示。由于工字钢的腹板为非标准尺寸,在应力较大区域存在屈曲和压溃的可能;因此必须对其进行屈曲分析,以保证其在摇摆工况下局部稳定性。

当 $0.85 < \lambda_b \leq 1.25$ 时,

$$\sigma_c = [1 - 0.75(\lambda_b - 0.85)]f \quad (7)$$

当 $\lambda_b > 1.25$ 时, $\sigma_c = 1.1f/\lambda_b^2$

式中: $f$ 为钢材的强度设计值,根据低合金高强度结构钢GB/T1591<sup>[10]</sup>取 $f = 310$  MPa。

(2) 剪切临界应力 $\tau_c$

用于剪切计算腹板的通用高厚比为<sup>[11]</sup>:

$$\lambda_s = \sqrt{\frac{f_y}{\tau_c}} \quad (8)$$

式中: $\tau_c = \frac{x_s k_s \pi^2 E}{12(1-\nu^2)} \left( \frac{t_w}{h_0} \right)^2$

$f_y$ 为钢材的剪切屈服强度; $x_s$ 为梁受剪时翼缘对腹板的约束系数; $k_s$ 为板的剪切屈曲系数; $E$ 为钢材的弹性模量。

根据实际工况,取 $x_s = 1.25$ <sup>[11]</sup>,则

$$\lambda_s = \frac{h_0/t_w}{41\sqrt{k_s}} \sqrt{\frac{f_y}{235}} \quad (9)$$

其中,根据实际结构,取 $k_s$ 为<sup>[10]</sup>:

$$k_s = 4 + 5.34(h_0/a)^2 \quad (10)$$

这里, $a$ 为腹板横向加劲肋的间隙

根据通用高厚比 $\lambda_s$ 的不同,弯曲剪切应力计算公式

如下<sup>[12]</sup>:

当  $\lambda_c \leq 0.8$  时,  $\tau_{\sigma} = f_c$ ,

当  $0.8 < \lambda_c \leq 1.2$  时,

$$\tau_{\sigma} = [1 - 0.59(\lambda_c - 0.8)]f_c \quad (11)$$

当  $\lambda_c \leq 1.2$  时,  $\tau_{\sigma} = 1.1f_c/\lambda_c^2$

式中  $f_c$  为钢材的抗剪强度设计值, 根据低合金高强度结构钢 GB/T1591)<sup>[10]</sup>, 取  $f_c = 180$  MPa。

(3) 局部压力作用下临界应力  $\sigma_c$ 。

用于腹板抗局部压力作用时的通用高厚比为<sup>[11]</sup>:

$$\lambda_c = \sqrt{\frac{f_y}{\sigma_{c,\sigma}}} \quad (12)$$

式中,  $\sigma_{c,\sigma} = \frac{x_c k_c \pi^2 E}{12(1-\nu^2)} \left( \frac{t_w}{h_0} \right)^2 x_c$  为梁受局部压力时翼缘对腹板的约束系数;  $k_c$  为板的局部受压屈曲系数

经简化整理, 计算  $\lambda_c$  的公式为<sup>[11]</sup>:

当  $0.5 < a/h_0 \leq 1.5$  时,

$$\lambda_c = \frac{h_0/t_w}{28 \sqrt{10.9 + 13.4(1.83 - a/h_0)^3}} \sqrt{\frac{f_y}{235}} \quad (13)$$

当  $1.5 < a/h_0 \leq 2.0$  时,

$$\lambda_c = \frac{h_0/t_w}{28 \sqrt{18.9 - 5a/h_0}} \sqrt{\frac{f_y}{235}} \quad (14)$$

根据通用高厚比  $\lambda_c$  的不同, 局部压力作用下临界应力计算公式如下<sup>[11]</sup>:

当  $\lambda_c \leq 0.9$  时,

$$\sigma_{c,\sigma} = f \quad (15)$$

当  $0.9 < \lambda_c \leq 1.2$  时,

$$\sigma_{c,\sigma} = [1 - 0.79(\lambda_c - 0.9)]f \quad (16)$$

当  $\lambda_c > 1.2$  时,

$$\sigma_{c,\sigma} = 1.1f/\lambda_c^2 \quad (17)$$

(4) 局部稳定性判断公式

工字梁腹板局部稳定性计算公式为<sup>[11]</sup>:

$$\left( \frac{\sigma}{\sigma_c} \right)^2 + \left( \frac{\tau}{\tau_c} \right)^2 + \left( \frac{\sigma_c}{\sigma_{c,\sigma}} \right)^2 \leq 1.0 \quad (18)$$

根据天线舱牛腿工字梁结构参数及材料属性, 代入以上公式, 求得:

牛腿根部区域局部稳定性判断公式为:

$$\left( \frac{\sigma}{245} \right)^2 + \left( \frac{\tau}{154} \right)^2 + \left( \frac{\sigma_c}{251} \right)^2 \leq 1.0 \quad (18)$$

腹板开孔区域局部稳定性判断公式为:

$$\left( \frac{\sigma}{310} \right)^2 + \left( \frac{\tau}{168} \right)^2 + \left( \frac{\sigma_c}{302} \right)^2 \leq 1.0 \quad (19)$$

### 3.2 局部稳定性判断

根据应力分析结果, 求得牛腿根部及应力最大值所在区域实际弯曲应力、剪切应力、局部压应力, 代入稳定性判断公式得到失稳系数, 如表 1 所示。其中, 实际弯曲应力用 Mises 等效应力代替, 由于 Mises 等效应力总是大于弯曲应力, 因此计算结果偏安全。

从表 1 可知, 结构的局部失稳系数都小于 1, 工字梁腹板满足稳定性分析, 符合使用要求。三种方向风载下, 当风向为 90° 时, 风载垂直于天线安装阵面, 此时的工字梁失稳系数

表 1 稳定性分析区域实际应力值表(单位: MPa)

风载方向	分析区域	弯曲应力	剪切应力	局部压应力	失稳系数
90°	牛腿根部	84	26	89	0.50
	开孔处	124	53	123	0.67
180°	牛腿根部	100	45	100	0.65
	开孔处	131	56	130	0.72
225°	牛腿根部	110	71	143	0.99
	开孔处	144	62	143	0.83

略低于 180° 风向时的情况, 天线舱结构最安全。而当风向为 225° 时, 牛腿根部的失稳系数已逼近 1, 并且工字梁腹板开孔处的失稳系数也是三种风向中最高的 0.83。这是由于此时的风载可分解为平行于天线安装面和垂直于天线安装面两部分, 虽然平行于天线安装面的那部分载荷绝对值并不大, 但是这部分风压与天线舱的偏转方向一致, 因而加剧了天线安装面下方牛腿的局部压应力, 使整体工作环境偏危险。在实际工作中, 当天线舱倾斜摇摆时, 应尽量避免在该方向风载下长时间工作, 以避免由于失稳造成结构破坏。

## 4 结论

天线舱摇摆工况下, 不同方向的风载荷对天线舱主要承载部件应力分布产生影响, 风载荷与大线阵面夹角为 225° 时, 最大应力集中工字钢腹板孔边周围, 风向与天线阵面垂直时主要承力部件应力分布相对均匀, 应力值较风向为 225° 时小 13.8%。

在摇摆工况下, 风向为 225° 时结构的失稳系数较大, 在该工况下结构易出现失稳, 因此应尽量避免在风载平行于天线安装阵面的环境下长时间工作, 以免造成整体结构的失稳。

## 参考文献

- [1] 袁宝生. 方舱装备的现状与发展趋势[J]. 方舱与地面设备, 2004, 3(2): 1~7.
- [2] 肖波, 邬耀明, 王爽. 海试方舱桅杆结构有限元分析[J]. 中国水运(理论版), 2006, 4(5): 33~34.
- [3] 王良模, 吴长风, 王晨至. 特种车辆方舱结构的有限元模态分析[J]. 机械设计与制造, 2008, (11): 92~94.
- [4] 赵静. 某骨架式方舱的计算与测试分析[J]. 电子机械工程, 2008, 24(4): 14~17.
- [5] 张相庭. 工程抗风设计计算手册[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 1998.
- [6] 张相庭. 工程结构风荷载理论和抗风计算手册[M]. 上海: 同济大学出版社, 1990.
- [7] 张相庭. 结构风压和风振计算[M]. 上海: 同济大学出版社, 1985.
- [8] 中华人民共和国国家标准/GB50009-2001, 建筑结构荷载规范[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2002.
- [9] 中华人民共和国国家标准/GB50017-2003, 钢结构设计规范[S]. 北京: 中国计划出版社, 2003.
- [10] 中华人民共和国国家标准/GB/T1591-2008, 低合金高强度结构钢[S]. 北京: 中国标准出版社, 2009.
- [11] 丁阳, 刘锡良. 焊接工字梁腹板的局部稳定和考虑屈曲后强度的计算[J]. 建筑结构学报, 2002, 23(3): 52~59.

作者简介: 沈文军(1970-), 男, 研究院高工; 主要研究方向为雷达结构总体, 发表论文十余篇, 获国防科学技术进步一等奖一项及中国电子科技集团公司科学技术进步一等奖两项。

## 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](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>