

钢天线风致疲劳研究

王钦华,顾明

(同济大学 土木工程防灾国家重点实验室,上海 200092)

摘要:基于一钢质天线气动弹性模型风洞试验结果,研究了其风致疲劳。首先,根据当地气象站资料统计的风速风向联合概率分布函数求得天线结构所在位置处的风速风向联合概率分布函数,并以结构假定的疲劳寿命为最大风速重现期来计算每个风向区间要考虑的最大风速。其次,对天线结构的气动弹性模型进行风洞试验,测得天线结构在不同风向角、不同风速下的加速度响应,根据试验获得的结构响应,求得疲劳分析关键点处的应力响应功率谱。最后,基于疲劳累积损伤理论在频域上用等效窄带方法计算天线结构的疲劳寿命,结果表明,这一实际结构的风振疲劳寿命接近主楼结构的设计寿命。

关键词:钢质天线;风振疲劳;风洞实验;气动弹性模型

中图分类号: TU 312.1

文献标识码: A

文章编号: 0253-374X(2008)08-1040-05

Directional Wind-Induced Fatigue of a Real Steel Antenna

WANG Qinhu, GU Ming

(State Key Laboratory for Disaster Reduction in Civil Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China)

Abstract: The paper presents a study of the fatigue damage caused by wind actions of a real steel antenna. Based on the wind data obtained from the local meteorological observatory, the joint probability distribution model of wind speed and corresponding direction is first derived. The maximum wind speed for a given wind direction is determined according to the assumed fatigue life of the structure as the return period. The aeroelastic full antenna model is then tested in a wind tunnel, and the wind induced vibration responses are accordingly recorded at different wind speeds and wind directions. The power spectra of the stress responses at critical points are obtained on the basis of the responses. Finally, the accumulated fatigue life is calculated in frequency domain by using equivalent narrow band method. The results indicate the fatigue life of the antenna is close to the designed life of the building.

Key words: steel antenna; wind-induced fatigue; wind tunnel test; aerodynamic model

屋顶天线结构广泛用于通讯领域,是一种由细长钢结构杆身组成的柔性结构,在随机风荷载作用下,容易产生较大幅度振动,疲劳破坏是其主要的破坏形式。本文分析的天线结构位于上海市中心(D类地貌)一栋245 m超高层建筑的屋顶上,天线主杆高度为87 m,天线顶端离地高度为333 m。天线由下往

上分段等截面,每段高度依次为34,27,26 m;其直径分别为2.4,1.75,1 m;壁厚各为3,2.5,2 cm。在距离主杆底部1.2 m处有四个小的斜支撑,其直径为1 m,壁厚为2 cm。在距离底部34 m处有一个斜支撑,其直径为1 m,壁厚为2 cm,见图1。

收稿日期: 2007-01-19

基金项目: 国家自然科学基金创新群体科学基金资助项目(50321803)

作者简介: 王钦华(1979—),男,博士生,主要研究方向为风工程。E-mail: concrete60mp@163.com

顾明(1957—),男,教授,博士生导师,工学博士,主要研究方向为风工程。E-mail: minggu@mail.tongji.edu.cn

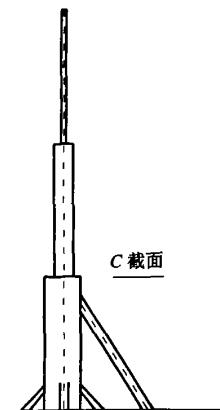


图 1 天线模型图
Fig. 1 Antenna model

关于风振疲劳分析的文献并不多见。Dionne 等建立了顺风向阵风因子和疲劳累积损伤的简单关系^[1]。Holmes 在半经验理论的基础上导出了顺风向疲劳闭合形式的解^[2]。Roberson 等用实际测量的方法验证了 Holmes 提出的闭合形式的解^[3]。Repetto 等研究了细长钢结构杆的顺风向风振疲劳^[4]、横风向风振疲劳^[5]，以及考虑风速风向联合分布的顺风向、横风向风振疲劳^[6]。Gu 等考虑了风速风向联合分布的影响，研究了杨浦大桥钢梁的风振疲劳寿命^[7]。邓洪洲等假设风速风向为 Weibull 分布，对桅杆结构进行风振疲劳分析^[8]。以上文献均用 Palmgren-Miner 线性疲劳累积损伤准则进行风振疲劳研究。

本文根据气象站资料统计获得天线结构处的风速风向联合概率分布函数。其次，对天线结构的气动弹性模型进行风洞试验，测得天线结构在不同风向角、不同风速下两个正交方向的加速度响应，进一步求得疲劳分析关键点处的应力响应功率谱。最后，基于疲劳累积损伤理论在频域上用等效窄带方法计算天线结构的疲劳寿命。

1 风速风向联合概率分布函数以及最大平均风速的确定

文献[9]采用上海龙华气象站(B类地貌)30多年的风速样本，统计了该气象站10 m高度处风速风向联合分布概率模型为

$$P_o(U > u_o, \theta) = f(\theta) \left\{ 1 - \exp \left[- \exp \left(- \frac{u_o - b(\theta)}{a(\theta)} \right) \right] \right\} \quad (1)$$

式中： $f(\theta)$ 为每个风向区间出现的概率，以正北方向

为 0° ，间隔 22.5° ，从 θ_1 到 θ_{16} 顺时针把风向分为 16 个区间； $a(\theta), b(\theta)$ 均为概率模型分布参数，随着不同的风向区间而变化，分布参数可以由文献[9]获得； u_o 为风速。

由龙华气象站 10 m 高度处的风速风向联合分布概率模型转化为天线结构顶端 333 m 高度处的风速风向联合分布概率

$$P(U > u_b, \theta) = f(\theta) \left\{ 1 - \exp \left[- \exp \left(- \frac{(1/\eta) u_b - b(\theta)}{a(\theta)} \right) \right] \right\} \quad (2)$$

式中： $\eta = \left(\frac{H_o}{h_o} \right)^{\alpha_o} \left(\frac{h_b}{H_b} \right)^{\alpha_b}$ ； H_o 和 H_b 分别为气象站和天线所在位置处的梯度风高度，取值为 350 m 和 450 m； h_o 和 h_b 分别为气象站和天线顶端位置处的风速高度，取值为 10 m 和 333 m； α_o 和 α_b 分别为气象站和天线所在位置处的地面粗糙度指数，取值为 0.16 和 0.30。

每一个风向角范围 $[\theta_i, \theta_{i+1}]$ 下风速范围 $[v_i, v_{i+1}]$ 是第 $[i, j]$ 个工况，风向角间隔 $\Delta\theta_i = \theta_{i+1} - \theta_i$ 为 22.5° ，与式(1)中规定的风向区间相同；风速范围间隔 $\Delta v_i = v_{i+1} - v_i$ 为 $2 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ ， $v_0 = 0$ 。根据式(2)就可以求得每个工况出现的概率 P_{ij} ，如图 2 所示。在分析过程中，以 $\bar{v}_i = (v_{i+1} + v_i)/2$ ， $\bar{\theta}_i$ (风洞试验相对应的风向角) 来计算每个工况下的应力参数。

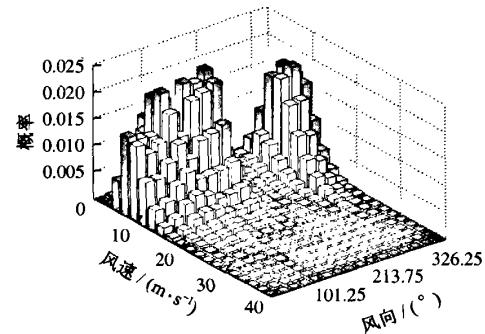


图 2 天线顶端风速风向区间出现的概率

Fig. 2 Probability of wind velocity and angle at top of antenna

由于在进行疲劳寿命分析之前，不能确切知道结构的疲劳寿命，必须先根据假设的疲劳寿命来确定计算每个风向区间的最大风速，然后计算结构的疲劳寿命。再把计算出的结构寿命作为假设的疲劳寿命进行循环计算，其计算程序的流程见图 3。同

时,在进行风振疲劳寿命评估时,最大风速必须根据疲劳寿命作为重现期来确定,而不应根据结构的设计寿命来确定。每个风向区间内,进行疲劳分析的最大风速为

$$U_{\max} = \eta \left\{ b(\theta) - a(\theta) \ln \left[\ln \frac{N_0 T_f f(\theta)}{N_0 T_0 f'(\theta) - 1} \right] \right\} \quad (3)$$

式中: T_f 为疲劳寿命; N_0 为每年内极值的抽样次数。

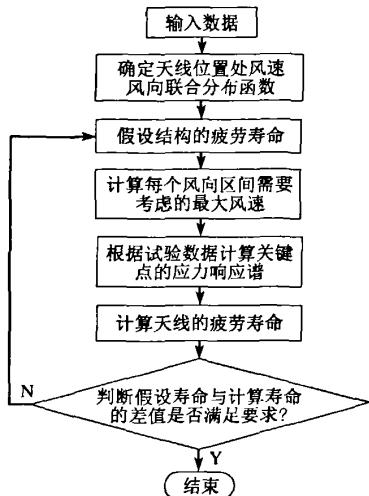


图3 疲劳寿命计算流程图

Fig. 3 Flow chart of fatigue life estimation

2 气弹模型风洞实验以及关键点应力响应

天线气动弹性模型试验在同济大学 TJ-1 风洞中进行,天线风向角以及位置见图 4。在风洞中使用格栅模拟了风场。本试验风场紊乱度为 11%。按相似律严格设计了天线的气动弹性模型。

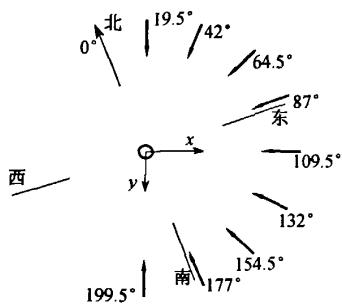


图4 天线的位置图以及风洞试验风向角

Fig. 4 Figure of antenna location and angle in wind test

试验风向角分别为 199.5°, 177°, 154.5°, 132°, 109.5°, 87°, 64.5°, 42° 和 19.5°。测量了天线顶端 x 和

y 方向的加速度响应。以上前 7 个风向角下试验风速均为 6.0, 8.0, 10.0, 12.0, 14.0 和 16.0 m·s⁻¹, 后 2 个风向角下的试验风速分别为 10 和 16 m·s⁻¹。

由于每个风向角只测得了 6 个风速下天线顶端的响应。在进行天线结构疲劳分析时,需要全部风速区间不同风速下天线的响应,因此要根据试验风速下测得的结构响应推广到其他任何风速下结构的响应。在试验风速 v_t 下求得的天线顶端的广义位移谱,由下式求得其他任意风速 v_r 下的广义位移谱:

$$S_{v_r}(\omega) = v_r^4 S_{v_t}(\omega) / v_t^4 \quad (4)$$

式中: $S_{v_t}(\omega)$ 为试验风速下结构的广义位移谱; $S_{v_r}(\omega)$ 为任意风速下结构的广义位移谱。可以根据气动弹性模型风洞试验测得的加速度响应求得^[10]。

图 1 中 C 截面处在上、下变截面柱以及斜撑的交界处,考虑风向出现最大概率区间等因素,经过在 C 截面上选取几点疲劳寿命比较,疲劳分析关键点选择在 C 截面圆杆外边缘,和 C 截面上圆心的连线与 x 轴正方向夹角 20°。由第 i 个振型上的弹性恢复力引起关键点处的弯曲应力响应为

$$s_i(t) = r \sin \theta_i \int_{z_1}^H m(z) \omega_i^2 \phi_i(z) \cdot (z - z_1) h_i(t) dz / I \quad (5)$$

式中: r 为关键点处圆环的外径; θ_i 为关键点和圆心的连线与第 i 振型相垂直方向的夹角; $\phi_i(z)$ 为第 i 振型; ω_i 分别为第 i 振型对应的频率; $h_i(t)$ 为第 i 振型对应的广义位移; $m(z)$ 为结构单位长度的质量; H 为天线的高度; z_1 为关键点的高度; I 为关键点处截面惯性矩。

由于各振型之间的耦合项对响应贡献很小,忽略各振型耦合的影响,关键点处弯曲应力谱可根据以下公式确定:

$$S_s(\omega) = \sum_{i=1,3,5} \left[\frac{r \sin 70^\circ \omega_i^2 \int_{z_1}^H m(z) \phi_i(z) (z - z_1) dz}{I} \right]^2 S_{h_i}(\omega) + \sum_{j=2,4} \left[\frac{r \sin 20^\circ \omega_j^2 \int_{z_1}^H m(z) \phi_j(z) (z - z_1) dz}{I} \right]^2 S_{h_j}(\omega) \quad (6)$$

式中: $S_s(\omega)$ 为关键点的弯曲应力谱; $S_{h_i}(\omega)$, $S_{h_j}(\omega)$ 分别为第 i, j 振型对应的广义位移谱。由于天线为不对称结构,其振型为空间振型,1, 3, 5 振型为 x 方向上的振型;2, 4 为 y 方向上的振型。

本文分析了所有工况对天线结构关键点应力参数的贡献,由于工况太多不能全部列出,图 5—8 列

出风向区间为[45°, 67.5°], 15 m·s⁻¹风速下天线结构的响应.

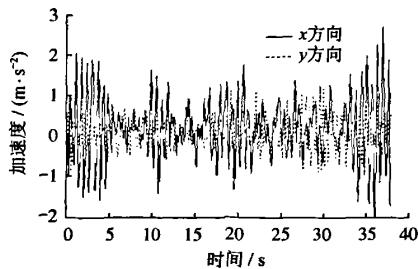


图5 x和y方向的加速度响应

Fig.5 Acceleration responses at x and y direction

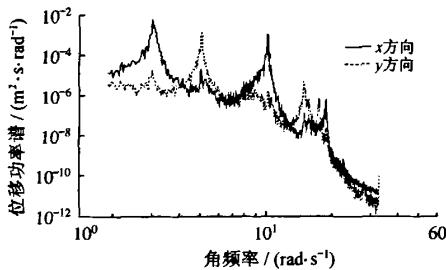


图6 x和y方向的位移功率谱

Fig.6 Power spectrum of displacement at x and y direction

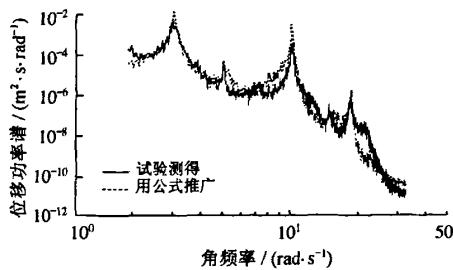


图7 位移功率谱的比较

Fig.7 Comparision of displacement power spectrum

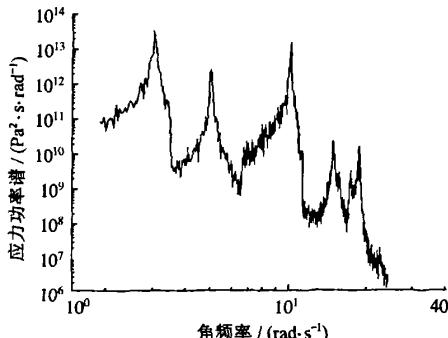


图8 关键点的应力功率谱

Fig.8 Stress power spectrum of critical point

3 天线结构疲劳寿命分析

天线结构关键点在任意时间 T 内的累积损伤为^[11]

$$D = TD_0 = \frac{T}{A} \sum_{i=1}^k \sum_{j=1}^n P_{ij} f_{L_{ij}} \int_0^\infty f_{s_{L_{ij}}}(s) s^m ds \quad (7)$$

式中: D_0 为单位时间内的平均损伤; m, A 是与材料性质有关的常数; P_{ij} 为第 $[i, j]$ 工况出现的概率; $f_{L_{ij}}$ 为第 $[i, j]$ 工况下应力范围作用的平均频率; $f_{s_{L_{ij}}}(s)$ 为第 $[i, j]$ 工况下应力范围概率密度函数. 当 $D=1$ 时结构发生疲劳破坏.

应力参数定义为

$$\Omega = \sum_{i=1}^k \sum_{j=1}^n P_{ij} f_{L_{ij}} E(s^m)_{ij} \quad (8)$$

式中

$$E(s^m)_{ij} = \int_0^\infty s^m f_{s_{L_{ij}}}(s) ds \quad (9)$$

式(8)带入式(7), 得

$$D = T\Omega/A \quad (10)$$

当应力过程为窄带过程时, 其应力范围概率密度函数为

$$f_{s_{ij}}(s) = \frac{s}{4\sigma_{x_{ij}}^2} \exp\left(-\frac{s^2}{8\sigma_{x_{ij}}^2}\right) \quad (11)$$

式中, $\sigma_{x_{ij}}$ 为第 $[i, j]$ 工况下应力的方差, 可以通过对应力功率谱积分后开方得到.

若再以单位时间内正斜率与零线交差次数的数

学期望 $\nu_{0_{ij}}^+$ 来代替单位时间应力幅值总数的数学期望值, 则可以求得应力参数

$$\Omega = \sum_{i=1}^k \sum_{j=1}^n P_{ij} \nu_{0_{ij}}^+ (2\sqrt{2}\sigma_{x_{ij}})^m \Gamma\left(\frac{m+2}{2}\right) = (2\sqrt{2})^m \Gamma\left(\frac{m+2}{2}\right) \sum_{i=1}^k \sum_{j=1}^n P_{ij} \nu_{0_{ij}}^+ (\sigma_{x_{ij}})^m \quad (12)$$

式中, $\Gamma(\cdot)$ 为伽玛函数.

只有当应力过程为窄带过程时, 应力范围才是 Rayleigh 分布的. 若对宽带的应力过程采用 Rayleigh 分布模型, 就应该进行雨流修正, 修正关系为

$$D_{ij} = \lambda_{ij} D_{Ra,ij} \quad (13)$$

式中: D_{ij} 为雨流修正后的累积损伤; $D_{Ra,ij}$ 为采用 Rayleigh 分布模型计算的累积损伤; λ_{ij} 为雨流修正系数.

Wirsching 和 Light 用数字模拟的方法得到一系

列宽带应力过程,基于雨流计数法计算疲劳累计损伤,然后将所得的结果与采用 Rayleigh 分布模型的结果比较^[12]. 经统计分析,雨流修正系数的经验公式为

$$\lambda_{ij} = a + (1 - a)(1 - \epsilon_{ij})^b \quad (14)$$

式中: $a = 0.926 - 0.033m$; $b = 1.587m - 2.323$; $[i,j]$ 工况下的应力过程的带宽系数 $\epsilon_{ij} = (1 - m_2^2 / m_0 m_4)^{1/2}$, m_i 为应力过程功率谱密度的第 i 次矩.

雨流修正后的应力参数为

$$\Omega = (2\sqrt{2})^m \Gamma\left(\frac{m+2}{2}\right) \sum_{i=1}^k \sum_{j=1}^n \lambda_{ij} P_{ij} v_{0_j}^+ (\sigma_{x_{ij}})^m \quad (15)$$

构件的疲劳寿命为

$$T_f = DA/\Omega \quad (16)$$

关键点附近由于有斜撑杆以及上端变截面杆的影响,根据《钢结构设计规范》(GB 50017—2003)构件连接类别取 8 类,参数 $m = 3$, $A = 4.1 \times 10^{11}$. 本文计算了所有风向区间不同风速下的参数. 由于工况太多,不能全部列出,表 1 只列出了 $14 \sim 16 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 风速 7 个风向角下的参数. 考虑天线结构的前 5 阶振型后,应力参数 Ω 为 $1.1083 \times 10^2 \text{ MPa}^3 \cdot \text{s}^{-1}$, 天线结构的疲劳寿命为 $T_f = 117.3$ 年.

表 1 风速为 $14 \sim 16 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 时 7 个风向角下的概率和应力过程的参数

Tab.1 Parameters of stress process and probability at $14 \sim 16 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ wind speed and seven wind directions

风向角	P_{ij}	$\sigma_{x_{ij}}/\text{MPa}$	$v_{0_j}^+/\text{Hz}$	ϵ_{ij}	λ_{ij}
$45^\circ \sim 67.5^\circ$	0.004 699	2.575 8	1.082 60	0.703 28	0.835 95
$67.5^\circ \sim 90^\circ$	0.005 761	1.635 9	0.770 39	0.840 37	0.828 97
$90^\circ \sim 112.5^\circ$	0.004 944	2.208 0	0.520 05	0.797 56	0.830 52
$112.5^\circ \sim 135^\circ$	0.003 830	2.114 8	0.970 37	0.775 89	0.831 51
$135^\circ \sim 157.5^\circ$	0.003 760	1.831 1	0.939 14	0.786 33	0.831 02
$157.5^\circ \sim 180^\circ$	0.004 249	1.820 7	0.906 59	0.800 38	0.830 40
$180^\circ \sim 202.5^\circ$	0.001 687	1.808 2	1.225 20	0.658 80	0.839 58

4 结论

(1) 本文首先建立了天线所在位置处风速风向联合概率分布函数. 分析表明,天线顶端风速在 $3 \sim 15 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 范围内出现的概率最大,天线结构的疲劳损伤主要由此范围内的风速引起,高风速下引起的疲劳损伤较小.

(2) 对天线结构的气动弹性模型进行风洞试验,测得天线结构在不同风向角、不同风速下的加速度响应,根据试验获得的结构响应,求得疲劳分析关

键点处的应力响应功率谱,其谱宽参数介于 0.7~0.8 之间,说明应力过程介于 Rayleigh 过程和 Gauss 过程之间.

(3) 基于疲劳累积损伤理论在频域上用等效窄带方法计算天线结构的疲劳寿命,结果表明这一实际结构的风振疲劳寿命接近主体结构的设计寿命.

参考文献:

- [1] Dionne M, Davenport A G. A simple relationship between the gust response factor and fatigue damage[J]. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 1988, 30: 45.
- [2] Holmes J D. Fatigue life under along-wind loading — closed-form solution[J]. Engineering Structure, 2002, 24: 109.
- [3] Robertson A P, Holmes J D, Smith B W. Verification of closed-form solution of fatigue life under along-wind loading[J]. Engineering Structure, 2004, 26: 1381.
- [4] Repetto M P, Solary G. Dynamic along-wind fatigue of slender vertical structure[J]. Engineering Structure, 2001, 23: 1622.
- [5] Repetto M P, Solary G. Dynamic crosswind fatigue of slender vertical structures[J]. Wind and Structures, 2002, 5(6): 527.
- [6] Repetto M P, Solary G. Directional wind-induced fatigue of slender vertical structure[J]. Journal of Structural Engineering, 2004, 130(7): 1032.
- [7] Gu M, Xu Y L, Chen L Z, et al. Fatigue life estimation of steel girder of Yangpu Cable-Stayed Bridge due to buffeting[J]. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 1999, 80: 383.
- [8] 邓洪洲,屠海明,王肇民.桅杆结构随机风振疲劳研究[J].土木工程学报,2003,36(4):19.
DENG Hongzhou, TU Haoming, WANG Zhaomin. Study on stochastic fatigue of guyed masts under wind load[J]. China Civil Engineering Journal, 2003, 36(4): 19.
- [9] 杨咏昕,葛耀君,项海帆.风速风向联合分布的平均风统计分析[J].结构工程师,2002(3):29.
YANG Yongxin, GE Yaojun, XIANG Haifan. Statistic analysis of wind speed based on the joint distribution of wind speed and wind direction[J]. Structural Engineers, 2002(3): 29.
- [10] 顾明,洪小健.两种天线方案抖振位移响应的比较[J].振动与冲击,2004,23(1):17.
GU Ming, HONG Xiaojian. Comparison of buffeting displacement between two kinds of antenna[J]. Journal of Vibration and Shock, 2004, 23(1): 17.
- [11] 胡毓仁,陈伯真.船舶及海洋工程结构疲劳可靠性分析[M].北京:人民交通出版社,1996.
HU Yuren, CHEN Bozhen. Fatigue analysis of ship and offshore structures[M]. Beijing: China Communications Press, 1996.
- [12] Wirsching H, Light M C. Fatigue under wide band random stress [J]. Journal of Structural Division, 1980, 106(7): 1593.

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>