

钢质天线结构风振疲劳寿命估算方法比较研究

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: 根据一屋顶钢质天线结构气弹模型风洞试验结果, 计算了疲劳分析关键点处的应力响应功率谱; 基于疲劳累积损伤理论在频域上用等效窄带法对钢天线进行寿命估算; 同时, 根据关键点处的应力响应功率谱, 用 Monte Carlo 方法模拟了应力时程响应, 并用雨流法对应力时程响应进行计数, 用 Goodman 法则考虑平均应力的影响后得到应力范围出现的概率, 然后拟合了应力范围的概率密度函数, 对天线进行寿命估计。结果表明, 采用两种方法估算的结构风致疲劳寿命相近; 平均风对结构的疲劳寿命影响很小。

关键词: 钢质天线; 风洞实验; 气动弹性模型; 风振疲劳; 雨流法

中图分类号: TU312.1 **文献标识码:** A

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, 容易产生较大幅度的振动, 风振疲劳破坏是其主要的破坏形式。

风振疲劳累积损伤有两种计算方法: 一种是完全基于概率的频域方法, 另一种是基于传统应力循环计数的时域分析方法。Davenport 等^[1]首先在频域上对结构进行风振疲劳分析; 随后 Petrov^[2]、Mikitarenko^[3]和 Repetto 等^[4-6]对柔性小阻尼钢结构进行风振疲劳分析, 在以上文献中关键点的应力响应为窄带过程, 应力范围的分布可以通过关键点的应力响应谱得出。Gu 等^[7]用 Monte Carlo 方法模拟了关键点处的应力时程响应, 用雨流法对应力循环进行计数, 并根据计数结果拟合应力范围的概率密度函数, 对南浦大桥钢梁进行风振疲劳分析。邓洪洲^[8]、王世村^[9]用频域和时域的方法分别对桅杆结构和高耸结构进行风振疲劳分析。

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 m、27 m、26 m, 其直径分别为 2.4 m、1.75 m、1 m, 壁厚各为 3 cm、2.5 cm、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)。天线结构的前五阶自振频率分别为: 0.475(x 方向) Hz、0.675(y 方向) Hz、1.48(x 方向) Hz、2.30(y 方向) Hz 和 3.34(x 方向) Hz。

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, 根据天线结构的气动弹性

模型进行风洞试验得结果, 获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, 基于疲劳累积损伤理论在频域上用等效窄带法对钢天线进行寿命估算; 同时, 根据关键点处的应力响应功率谱, 用 Monte Carlo 方法模拟了应力时程响应, 并用雨流法对应力时程响应进行计数, 用 Goodman 法则考虑平均应力的影响后得到应力范围出现的概率, 然后拟合了应力范围的概率密度函数, 对天线进行寿命估计。并比较了两种方法估算的结构寿命。

1 风速风向联合概率分布模型以及风洞试验

为了进行天线结构风振疲劳分析, 必须先确定天线结构位置处的风速风向联合分布模型。定义每一个风向角范围 $[\theta_i, \theta_{i+1}]$ 下风速范围 $[v_j, v_{j+1}]$ 是第 $[i, j]$ 个工况, 以正北方为 $\theta_0 = 0^\circ$, 风向角间隔 $\Delta\theta_i = \theta_{i+1} - \theta_i$ 为 22.5° , 划分了 16 个风向区间; 风速范围间隔 $\Delta v_j = v_{j+1} - v_j$ 为 2 m/s , $v_0 = 0$, 每个工况出现的概率为 P_{ij} , 在疲劳分析过程中以 $\bar{v}_j = (v_{j+1} + v_j)/2$, $\bar{\theta}_i$ (风洞试验相对应的风向角) 来计算每个工况下的疲劳参数。

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, 其计算程序的流程图见图 2。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。



图 1 天线立面

基金项目: 国家自然科学基金创新群体科学基金(50321803)资助

收稿日期: 2007-03-26

第一作者 王钦华 男, 博士, 1979 年生

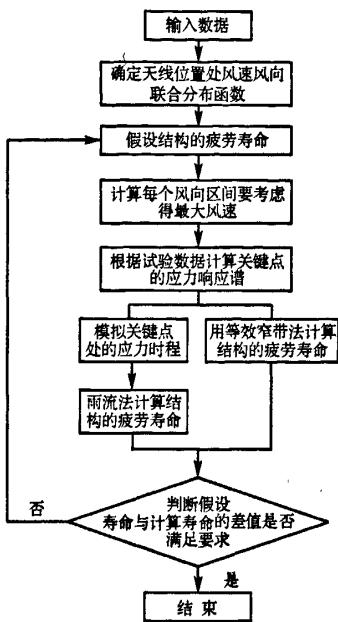


图2 疲劳寿命计算流程图

天线结构的风致响应是进行结构风致疲劳分析的基础。为此,在同济大学 TJ-1 风洞中进行天线的气动弹性模型试验,文献[10]对试验进行了详细的说明。根据气弹模型风洞试验采集到的加速度响应及公式(1)可以得到疲劳分析关键点处的应力谱:

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

式中, $S_i(\omega)$ 为关键点的应力谱; $S_{h_i}(\omega)$ 、 $S_{h_j}(\omega)$ 分别为第 i 、 j 振型对应的广义位移谱; r 为关键点处圆环的外径; $\phi_i(z)$ 为第 i 振型; ω_i 分别为第 i 振型对应的频率; $m(z)$ 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。

本文计算了所有工况下天线结构关键点应力谱,由于工况太多不能全部列出。图 3~4 分别列出风向区间为 $[45^\circ, 67.5^\circ]$, 15 m/s 风速下天线结构的位移谱和关键点的应力功率谱。

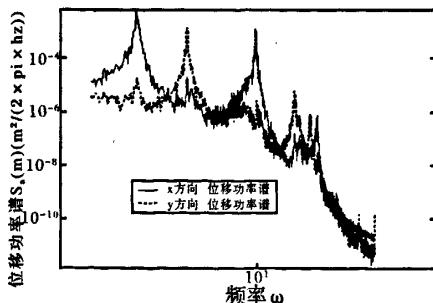


图3 x 和 y 方向的位移功率谱

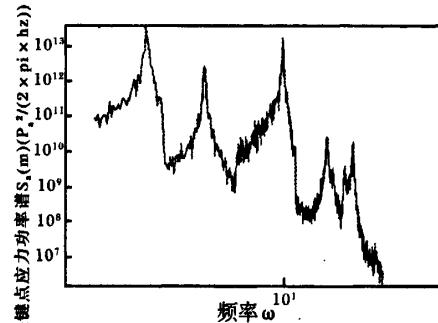


图4 关键点的应力功率谱

2 天线结构疲劳寿命分析方法

2.1 等效窄带法^[11]

得到关键点的应力功率谱后,就可以在频域上用等效窄带法对钢天线进行风振疲劳分析。当应力过程为平稳窄带高斯过程时,其应力范围概率密度函数为 Rayleigh 分布模型。即:

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

上式中, $\sigma_{s_{ij}}$ 为 $[i, j]$ 工况下应力的方差,可以通过对应力功率谱积分后得到。

当第 $[i, j]$ 工况下应力过程为平稳窄带高斯过程时,应力范围的平均频率 $f_{L_{ij}}$ 就等于单位时间内以正斜率与零线交差次数的数学期望 $v_{0_{ij}}^+$, 即:

$$f_{L_{ij}} = v_{0_{ij}}^+ = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{\lambda_{2_{ij}}}{\lambda_{0_{ij}}}} \quad (3)$$

式中, $\lambda_{2_{ij}}$ 为疲劳关键点处应力功率谱的二次矩, $\lambda_{2_{ij}} = \int_0^{+\infty} \omega^2 S_{s_{ij}}(\omega) d\omega$, $S_{s_{ij}}(\omega)$ 为第 $[i, j]$ 工况下关键点应力的功率谱; $\lambda_{0_{ij}}$ 为关键点处应力功率谱的零次矩。

天线结构关键点在任意时间 T 内的累积损伤为:

$$D = TD_0 = \frac{T}{A} \sum_{i=1}^k \sum_{j=1}^n P_{ij} f_{L_{ij}} \int_0^{\infty} f_{s_{L_{ij}}}(s) s^m ds \quad (4)$$

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 $[i, j]$ 工况出现的概率; $f_{L_{ij}}$ 为第 $[i, j]$ 工况下的应力范围的平均频率; $f_{s_{L_{ij}}}(s)$ 为第 $[i, j]$ 工况下应力范围概率密度函数。

应力参数定义为:

$$\Omega = \sum_{i=1}^k \sum_{j=1}^n P_{ij} f_{L_{ij}} E(s^m)_{ij} \quad (5)$$

上式中, $E(s^m)_{ij} = \int_0^{\infty} s^m f_{s_{L_{ij}}}(s) ds$ (6)

将公式(2)、(3)代入公式(5), 得应力参数:

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

$$(2\sqrt{2})^m \Gamma\left(\frac{m+2}{2}\right) \sum_{i=1}^k \sum_{j=1}^n P_{ij} v_{0j}^+ (\sigma_{xj})^m \quad (7)$$

式中, $\Gamma()$ 为伽玛函数

将公式(7)代入到公式(4)中, 得:

$$D = T\Omega/A \quad (8)$$

只有当应力过程为平稳窄带高斯过程时, 应力范围才是 Rayleigh 分布的。计算表明关键点的应力过程为宽带过程, 所以应该对用 Rayleigh 分布模型计算的累积损伤进行雨流修正, 修正关键为^[12]:

$$D_{ij} = \lambda_{ij} D_{Ra,ij} \quad (9)$$

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

雨流修正后的应力参数为:

$$\Omega = (2\sqrt{2})^m \Gamma\left(\frac{m+2}{2}\right) \sum_{i=1}^k \sum_{j=1}^n \lambda_{ij} P_{ij} v_{0j}^+ (\sigma_{xj})^m \quad (10)$$

雨流修正后构件的疲劳寿命为:

$$T_f = DA/\Omega \quad (11)$$

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》(GB50017-2003) 构件连接类别取 8 类, 参数 $m=3$, $A=4.1 \times 10^{11}$ 。将结构参数和风振响应结果代入以上方法, 考虑天线结构的前五阶振型后, 应力参数 Ω 为 $1.1083 \times 10^2 \text{ MPa}^3 \text{s}^{-1}$, 天线结构的疲劳寿命(单位为年)为:

$$T_f = \frac{1 \times 4.1 \times 10^{11}}{1.1083 \times 10^2 \times 365 \times 24 \times 60 \times 60} = 117.3$$

2.2 雨流法计数法以及疲劳寿命估计

有两种方法可以求得关键点处的应力时程, 一种是直接对结构在时域上进行风振动力分析; 另一种是根据关键点的应力响应谱, 用 Monte Carlo 方法模拟关键点处的应力时程响应。由于前一方法计算量大, 所以本文采用后一种方法得到关键点处的应力时程响应。关键点的应力时程响应由以下公式求得^[13]:

$$s(t) = \sum_{k=1}^n a_k \cos(\omega_k t + \phi_k) \quad (12)$$

式中, ϕ_k 是 $0 \sim 2\pi$ 范围的同一随机变数, 并且是相互独立的; a_k 利用已给出的关键点应力的功率谱密度函数 $S_s(\omega)$ 求出, $a_k^2 = 4S_s(\omega_k)\Delta\omega$; 频率范围 $\Delta\omega = (\omega_u - \omega_l)/n$; 第 k 个圆频率为 $\omega_k = \omega_l + (k-1/2)\Delta\omega$; ω_u 为有效频率的频率上限, ω_l 为有效频率的下限; n 为频率点的总数量; t 为模拟时间, 本文中模拟了 500s 的应力时程; 本文中采用的频率间隔为 $\Delta\omega = 0.032 \text{ Hz}$, 频率上限 $\omega_u = 22.25 \text{ Hz}$, 频率下限 $\omega_l = 0 \text{ Hz}$ 。

模拟了关键点的应力时程响应以后, 采用雨流计数法对应力时程进行计数, 计数的结果包括应力范围、应力均值和应力范围出现的次数。此外还计算了每个工况下平均风荷载引起关键点处的应力均值。由于应

万方数据

力均值对疲劳累积损伤也会产生影响, 必须按等效损伤的原则将非零应力均值的应力范围转化为零应力均值的应力范围, 本文采用 Goodman 经验公式进行转换:

$$s_g = s_{rg} \frac{s_i}{s_{rg} - s_{ng}} \quad (13)$$

式中, s_g 为第 g 个等效零均值应力范围; s_{rg} 为用雨流法统计的第 g 个应力范围; s_{ng} 为用雨流法统计的第 g 个应力均值与此工况下平均风荷载引起的应力均值之和; s_i 为结构材料的抗拉强度极限。

对应力范围进行修正以后, 就可以根据计数结果拟合应力范围的概率密度函数 $f_{s_{tg}}$ 以及统计应力范围作用的平均频率 $f_{L_{tg}}$, 与公式(4)中应力范围的概率密度函数 f_{s_L} 和应力范围作用的平均频率 f_L 不同的是: $f_{s_{tg}}, f_{L_{tg}}$ 是假设关键点的响应为平稳窄带高斯过程并且应力范围总数与应力范围是相互独立的随机变量通过交差分析而求得^[14]。而 $f_{s_{tg}}, f_{L_{tg}}$ 是采用雨流法对应力时程进行计数并采用 Goodman 法则修正应力范围后, 分别采用概率拟合和概率方法求得。

应力范围作用的平均频率为:

$$f_{L_{tg}} = n_{tg}/t_{tg} \quad (14)$$

式中, n_{tg} 为用雨流法计数第 $[i,j]$ 个工况下的应力时程得到的应力范围的总次数; t_{tg} 为第 $[i,j]$ 个工况下应力时程的时间。

$N(\bar{s}_k)$ 为应力范围 \bar{s}_k 的常幅疲劳荷载作用下结构疲劳破坏的循环次数, 由以下公式求得:

$$N(\bar{s}_k) = A/(\bar{s}_k)^m \quad (15)$$

式中, 参数 $A = 4.1 \times 10^{11}$, $m=3$; $\bar{s}_k = (s_{k-1} + s_k)/2$, s_k 为第 k 个应力范围, $s_0 = 0 \text{ MPa}$, 在本文中每一个工况下以应力范围的最小值为下限, 以最大值为上限, 把应力范围分成 20 份, 即公式(16)中 $l=20$, 这意味着应力范围的间隔 $\Delta s = s_k - s_{k-1}$ 随着工况而不同, 这样做是因为不同的工况下应力范围的最大值差别较大。

用 Palmgren-Miner 累积损伤公式计算的结构疲劳参数为:

$$D_r = T_r \sum_{i=1}^k \sum_{j=1}^n \sum_{k=1}^l P_{ij} f_{L_{tg}} \frac{f_{s_{tg}}(\bar{s}_k)(s_k - s_{k-1})}{N(\bar{s}_k)} \quad (16)$$

式中, D_r 为用雨流法计算的疲劳参数, 当 $D_r = 1$ 时结构发生疲劳破坏; T_r 为用雨流计数法计算的结构寿命。

本文分析了 208 工况。由于参数过多不能全部列出, 图 5-7 列出了在 $45^\circ \sim 67.5^\circ, 15 \text{ m/s}$ 风速下的计算结果。用雨流法对 $45^\circ \sim 67.5^\circ, 15 \text{ m/s}$ 风速下关键点的应力时程进行计数, 并采用 Goodman 法则修正应力范围后, 根据计数的结果拟合了应力范围的概率密度函数, 结果见图 6。图 7 表示了此工况下不同应力范围对结构疲劳损伤的贡献。拟合的应力范围的概率密

度函数为:

$$f_{S_{L_q}}(s) = 0.4314 \times e^{-0.2517s} - 0.3133 \times e^{-0.463s} \quad (17)$$

用雨流法计数并采用 Goodman 法则修正应力范围以后, 计算的结构疲劳寿命(单位为年)为:

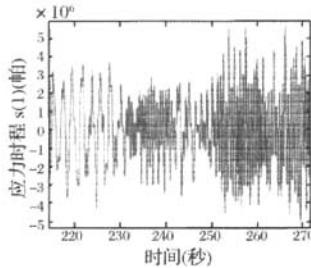


图 5 模拟的应力时程

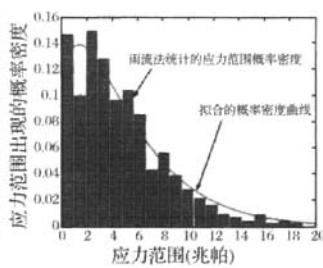


图 6 拟合的概率密度曲线

$$T_r = \frac{1}{\sum_{i=1}^k \sum_{j=1}^n \sum_{k=1}^l P_{ij} f_{S_{L_q}}(\bar{s}_k) (s_k - s_{k-1}) / N(\bar{s}_k)} = \\ \frac{1}{2.9038 \times 10^{-10} \times 365 \times 24 \times 60 \times 60} = 109.2$$

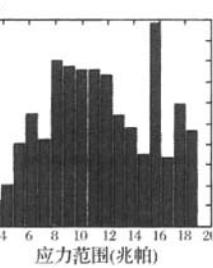


图 7 累积损伤

此外,本文还计算了不考虑平均风荷载影响的结构疲劳寿命,其疲劳寿命为 112.4 年。

3 结论

本文根据天线结构气动弹性模型风洞试验结果,并考虑风速风向分布以及平均风荷载的影响,分别用等效窄带法和雨流法计算了结构的疲劳寿命。计算结果表明不考虑平均风荷载影响时用雨流法计算的结构疲劳寿命比用等效窄带法计算的疲劳寿命要低 4.3%。这是因为雨流法考虑了材料的应力-应变行为。此外,考虑平均风荷载影响的结构寿命为 109.2 年,不考虑平均风荷载影响的寿命为 112.4 年,表明平均风荷载对本结构的疲劳寿命造成很小的影响。虽然低应力范围出现的概率很大,但其疲劳累积损伤的贡献却很小,这是因为低应力范围内结构疲劳破坏的循环次数很大造成的。

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—54.
- [2] Petrov A. Dynamic response and life prediction of steel structures under wind loading [J]. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 1998, 74—76: 1057—1065.
- [3] Mikitarenko M A, Perelmuter A V. Safe fatigue life of steel towers under the action of wind vibration [J]. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 1998, 74: 1091—1100.
- [4] Repetto M P, Solary G. Dynamic alongwind fatigue of slender vertical structure [J]. Engineering Structure, 2001, 23: 1622—1633.
- [5] Repetto M P, Solary G. Dynamic crosswind fatigue of slender vertical structures [J]. Wind and Structures, 2002, 5(6): 527—542.
- [6] Repetto M P, Solary G. Directional Wind-induced Fatigue of Slender Vertical Structure [J]. Journal of Structural Engineering, 2004, 130(7): 1032—1040.
- [7] Gu M, Xu Y L, Chen L Z, Xiang H F. 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—400.
- [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—23.
- [9] 王世村.高耸结构风振响应和风振疲劳分析[D]:[学位论文].杭州:浙江大学,2005.
- [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—20.
- [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.
- [12] Wirsching H, Light M C. Fatigue under Wide Band Random Stress [J]. Journal of Structural Division, 1980, 106(7): 1593—1607.
- [13] 星谷胜.随机振动分析[M].北京:地震出版社,1997.
- [14] 李桂青,曹宏.结构动力可靠性理论及其应用[M].北京:地震出版社,1993.

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>