

可展天线的柔性索网结构找形分析方法

李团结, 周懋花, 段宝岩

(西安电子科技大学机电工程学院, 西安 710071)

摘要: 给出了可展天线柔性索网结构形态分析的一种优化方法。在满足索网形面精度的条件下, 用小三角形网格单元拟合反射面抛物曲面, 生成索网结构的网格。以索网结构的网面精度为目标函数, 以索网单元预张力值为设计变量, 以索网松弛面积、强度和应力分布均匀性为约束条件, 提出了基于遗传算法和有限元分析相结合的找形分析优化方法, 将索网找形转变成一个带约束的最小化问题。对可展天线中常用的三种三向索网结构进行了找形分析, 结果表明此优化找形方法是可行的, 可应用于工程中其他索网结构的形态分析。

关键词: 柔性索网; 找形; 有限元分析; 可展天线

中图分类号: TU351; V414

文献标识码: A

文章编号: 1000-1328(2008)03-0794-05

0 引言

索网结构以受拉的高强度索作为主要承载构件, 形成柔性网格结构。结构内基本上不存在构件的稳定问题, 可最大限度地利用索材的高强性能。因此, 张拉索结构在建筑^[1]、空间结构^[2]、张力天线^[3,4]等工程领域得到了广泛的应用。

索网结构与其他刚性结构的不同首先表现为所使用的主要材料本身不具有刚度和形状, 即在自然状态下不具有保持固有形状和承载的能力, 只有对索施加预应力后才能获得结构承载所必需的刚度和形状。当然, 预应力大小与分布决定了结构的刚度和形状, 因此, 索网结构设计过程中首先是形态分析, 即寻求满足造型和功能要求并与某种自平衡预应力分布状态相对应的结构几何形状。索网结构具有较强几何非线性, 几何外形的微小变化都会引起结构性能的较大变化。索网结构在外荷载、预应力以及几何形状等互相牵制下达到平衡。因此, 在给定边界条件的前提下, 寻找满足平衡条件及相应的预应力分布状态的结构形状(即找形)是索网结构设计中的关键问题。找形分析方法先后提出过动力松弛法^[5]、力密度法^[6]等。这些方法计算简单, 通过手算可得到简单结构的近似解。随着计算机的普及应用, 当前普遍采用有限元分析的节点平衡法^[7]。但是还没有一个适用于一般索网结构的通用找形分析方法。

可展索网天线指反射面由轻质金属网编织而成的空间可展天线。反射面可为切割抛物面、球面、柱面等^[4]。网状反射面柔性、易折叠、折叠体积小(收纳率高)、轻质, 易于实现大型化, 便于组合各种可展结构。但是网状反射面为柔性受力系统, 张力点、张力水平对形面刚度、保形能力、形面精度有重要影响。网状反射面天线是目前构造大型天线的一种优异方案, 要求天线在展开工作状态时, 反射面的索网张力尽可能均匀, 以保证反射面的形面精度在要求的范围之内。大型网状反射面的设计是一个复杂的过程: 首先用小块平面网格拟合反射面曲面, 即在满足形面精度的条件下生成索网网格; 然后寻找满足一定形面精度的索网结构的平衡态, 即找形分析; 最后考虑边界条件及其他因素对网面精度的影响, 进行网面优化调整, 通过调整预应力分布来达到调整索网结构形状的目的, 即再次找形的过程。

可展天线的索网类型主要有辐射状、三向索网和准测地线索网3种^[3], 其中三向索网的受力性能是三者中最优的。三向索网根据其与周边支撑结构的连接方式还可以分为如图1所示的3种类型。本文以周边桁架可展天线的抛物面柔性三向索网结构为对象, 给出了一种基于遗传算法(Genetic algorithm, GA)和有限元分析相结合的找形优化方法, 该方法也可应用于工程中的其他索网结构形态分析。

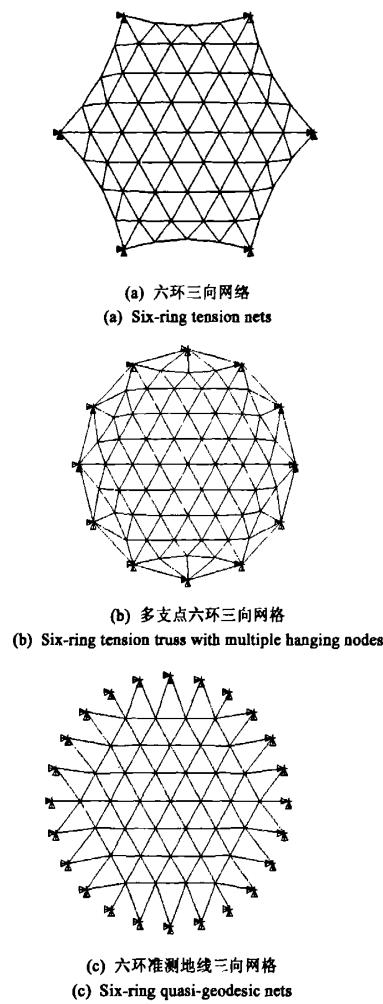


图1 三向索网的类型

Fig.1 Types of triangular tension nets

1 索网网格生成

1.1 网格边长确定

天线索网网格密度的确定,一般采用最小均方根值(δ_{rms})确定法^[8]。首先,变曲率的抛物面用半径 R 的球面近似,二者在顶点及周边点处重合,如图2所示。

球面半径 R 与抛物面焦距 F 和口径 D 的关系为:

$$R = 2F + \frac{D^2}{32F} \quad (1)$$

然后用一系列等边三角形来模拟该球面,则指定的理论形面精度均方根误差 δ'_{rms} 和网格最大边长 L_{max} 及半径 R 的关系为:

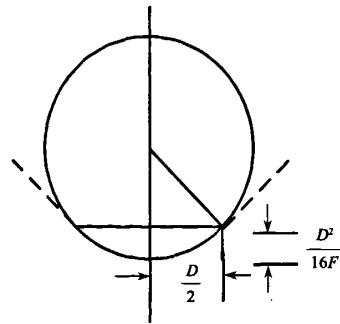


图2 抛物面的球面近似

Fig.2 The approximated paraboloid with a spherical surface

$$\delta'_{\text{rms}} = \frac{L_{\text{max}}^2}{8\sqrt{15}R} \quad (2)$$

由上式,控制网格密度的三角形最大边长应满足:

$$L_{\text{max}} \leq \sqrt{8\sqrt{15}\delta'_{\text{rms}}R} \quad (3)$$

1.2 确定节点坐标

1.2.1 建立坐标系

三向索网结构上的索可分成径向的主索、环向的副索、连接内外层副索的次索(如图3所示),以及连接反射面和背架索网的竖向拉索。取周边桁架可展天线背架索网中心点的坐标为(0,0,0),对于反射面上的节点 I ,其坐标间的关系为:

$$Z_I = (X_I^2 + Y_I^2)/(4F) + H \quad (4)$$

其中 (X_I, Y_I, Z_I) 为节点坐标, F 为焦距, H 为背架索网与反射面索网中心点间的高度。

对于背架索网上与 I 节点对应的 J 节点有:

$$\begin{aligned} X_J &= X_I, \quad Y_J = Y_I, \\ Z_J &= -(X_J^2 + Y_J^2)/(4F) - H \end{aligned} \quad (5)$$

其中 (X_J, Y_J, Z_J) 为节点 J 的坐标。

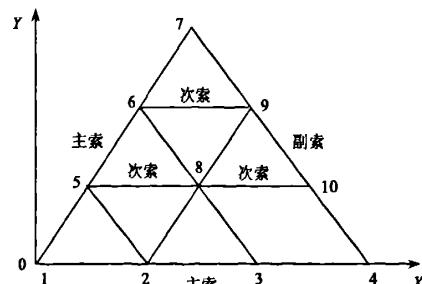


图3 三向网格

Fig.3 Triangular facets

1.2.2 确定主索等分数

以 $Y=0$ 向的抛物线为例来说明三向网格主索

等分数的确定方法。先求 $Z = X^2/(4F) + H$ 的 X 从 0 到 $D/2$ 的抛物线长 l :

$$l = \int_0^{\frac{D}{2}} \sqrt{d^2 X + \left(\frac{dZ}{dX}\right)^2} \, dX \quad (6)$$

即

$$l = \int_0^{\frac{D}{2}} \sqrt{1 + \left(\frac{X}{2F}\right)^2} \, dX \quad (7)$$

则径向主索需分成 N 段, 即

$$N = \text{CEIL}\left(\frac{l}{L_{\max}}\right) \quad (8)$$

式中 CEIL 函数表示向无穷大方向取整。

所以主索网格的边长为 $L = l/N$ 。

1.2.3 内环索节点坐标的确定

以 $Y = 0$ 向, $Z = X^2/(4F) + H$, X 从 0 到 $D/2$ 的抛物线为例, 如图 3 所示, 由已知抛物面上两点的长度 L 来拟合出对应节点的 X, Z 坐标, 则有

$$X_1 = 0, Z_1 = H \quad (9)$$

$$(Z_i - Z_{i-1})^2 + (X_i - X_{i-1})^2 = L^2 \quad (10)$$

$$\left(\frac{X_i^2}{4F} - \frac{X_{i-1}^2}{4F}\right)^2 + (X_i - X_{i-1})^2 = L^2 \quad (11)$$

已知 X_{i-1} , 解此方程求得 X_i , 由此求得对应的 X_i 和 Z_i 。

对 $\theta = 60^\circ, 120^\circ, 180^\circ, 240^\circ, 300^\circ$, 由坐标旋转可得出主索的节点坐标:

$$X_\theta = X_i \cos \theta, Y_\theta = X_i \sin \theta, Z_\theta = Z_i \quad (12)$$

则其余节点的坐标为:

$$X_8 = (X_3 - X_6)/2 + X_6,$$

$$Y_8 = (Y_6 - Y_3)/2 + Y_3,$$

$$Z_8 = (X_8^2 + Y_8^2)/(4F) + H \quad (13)$$

$$X_9 = 2(X_4 - X_7)/3 + X_7,$$

$$Y_9 = (Y_7 - Y_4)/3 + Y_4,$$

$$Z_9 = (X_9^2 + Y_9^2)/(4F) + H \quad (14)$$

$$X_{10} = (X_4 - X_7)/3 + X_7,$$

$$Y_{10} = 2(Y_7 - Y_4)/3 + Y_4,$$

$$Z_{10} = (X_{10}^2 + Y_{10}^2)/(4F) + H \quad (15)$$

其他内环索节点的坐标可按照上述方法依次类推而获得。

1.2.4 考虑边界条件的外环索节点坐标的确定

在图 1(a)、(b) 所示的索网结构中, 由于周边桁架对反射面索网的支撑是有限的, 因此边界处的索网必须要有一定的变化或者加入一些索单元, 通过减少反射面积和降低对边界索单元的预应力要求来

适应桁架提供的边界条件。引入垂跨比的概念^[9], 如图 4 所示, 垂跨比的计算公式为:

$$\rho = \frac{\delta}{2R_0 \tan(\theta/2)} \quad (16)$$

其中 δ 为垂度, $\theta = 2\pi/m$, 在本文中 $m = 6$, R_0 是网格的有效半径。

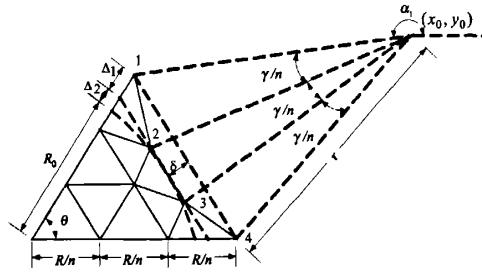


图 4 垂跨比

Fig. 4 The sag-to-span ratio

从 R 中减去 Δ_1, Δ_2 即可以得到 R_0, Δ_1 和 Δ_2 的计算公式为:

$$\Delta_1 = R \frac{1 - \cos(\theta/2)}{\cos(\theta/2)} \quad (17)$$

$$\Delta_2 = \frac{\delta}{\cos(\theta/2)} \quad (18)$$

由式(17)和(18)可导出 R 与 R_0 之间的关系为:

$$\frac{R}{R_0} = \frac{1 + 2\rho \tan(\theta/2)}{\cos(\theta/2)} \quad (19)$$

在外环索中, 边界节点是均匀地分布在半径为 r 和张角为 γ 的圆弧上。它们之间的关系为:

$$r = \frac{\delta^2 + R^2 \sin^2(\theta/2)}{2\delta} \quad (20)$$

$$\gamma = 2\arccos \frac{r - \delta}{r} \quad (21)$$

根据上述关系可确定外环索的节点坐标。如图 4 所示, 可以得出以 r 为半径的圆心坐标为:

$$x_0 = (R \sin(\pi/3) - \delta + r) \times \cos(\pi/6) \quad (22)$$

$$y_0 = (R \sin(\pi/3) - \delta + r) \times \sin(\pi/6) \quad (23)$$

然后算出节点 1 相对于此圆心的方位角为:

$$\alpha_1 = 2\pi - a \cos \frac{(x_1 - x_0)}{r} \quad (24)$$

再经由坐标变换可以得出节点 2 的坐标如下:

$$x_2 = r \cos(2\pi - \alpha_1 + \gamma/n) + x_0 \quad (25)$$

$$y_2 = r \sin(2\pi - \alpha_1 + \gamma/n) + y_0 \quad (26)$$

同理可得点 3 的坐标:

$$x_3 = r \cos(2\pi - \alpha_1 + 2\gamma/n) + x_0 \quad (27)$$

$$y_3 = r \sin(2\pi - \alpha_1 + 2\gamma/n) + y_0 \quad (28)$$

其他边界节点的坐标依此类推。

2 找形分析

对于可展天线,索网结构设计应满足以下原则:

(1) 索网出现松弛的面积尽可能小;(2) 索网内的最大预张力与最小预张力的比值尽可能小;(3) 索网对周边支撑结构的作用尽量小;(4) 索网结构的自振频率不要与支撑平台耦合。为此,本文将GA算法和有限元分析相结合,给出了一个通用的找形分析优化方法,其基本流程如图5所示。

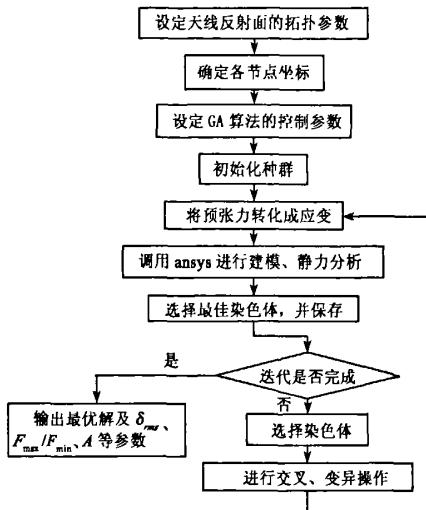


图5 找形分析流程框图

Fig.5 The flowchart for the form-finding analysis

由于图1所示的索网结构是对称的,因此只取1/6的反射面索网和相应的1/6的竖向索单元中的预张力值作为优化设计变量,找形分析问题可表示为:

$$\text{Find } F = (F_1, F_2, \dots, F_M)^T \quad (29)$$

$$\text{Min } \delta_{rmu} \quad (30)$$

$$\text{s.t. } 0 < F_i \leq [F] \quad (31)$$

$$[F] \leq a[\delta_a] (i = 1, 2, \dots, M) \quad (32)$$

$$A \leq A_1 \quad (33)$$

$$\frac{F_{\max}}{F_{\min}} \leq K \quad (34)$$

式中, F_i 为索单元的预张力值, M 为索单元的数目; δ_{rmu} 为索网实际形面精度; $[F]$ 为索单元预张力最大值; a 为索单元的横截面积; $[\delta_a]$ 为索单元的许用拉应力; A 为索网的松弛面积; A_1 为索网松弛面积的允许值; F_{\max} 为索网中的最大预张力值, F_{\min} 为索网中的最小预张力值, K 为索网内最大预张力

与最小预张力比值的允许值。

3 找形算例及结果分析

应用上述找形分析方法对图1所示的三种索网结构进行了找形分析。天线的拓扑参数为:口径 $D = 17\text{m}$, 焦距 $F = 13\text{m}$, 理论网面精度 $\delta'_{rmu} = 0.0035\text{m}$, 高度 $H = 0.1051\text{m}$, 垂跨比 $\rho = 10\%$ 。索网全部采用芳纶材料, 索的半径 $r = 0.001\text{m}$, 弹性模量 $E = 1.3 \times 10^{11}\text{ N/m}^2$, $[\delta_a] = 2760\text{ MPa}$ 。

GA 算法的控制参数为: 种群个数为 100, 终止优化迭代次数为 40, 交叉概率为 0.6, 变异概率为 0.06。

找形分析结果如表1所示, 三种索网结构找形分析的最优解导入到 ANSYS 的分析结果如图6 所示。

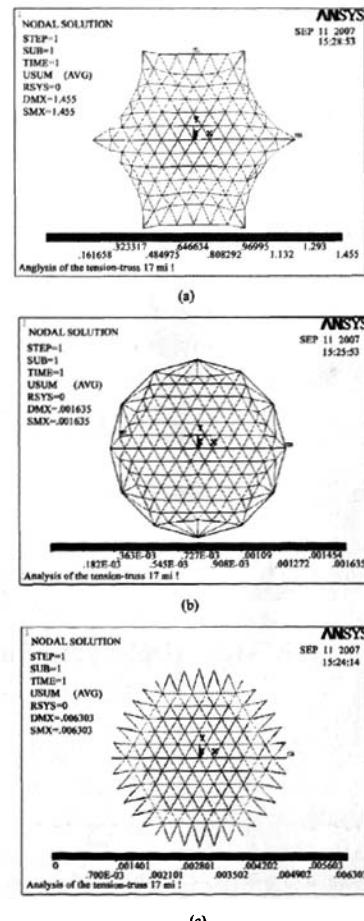


图6 索网结构找形结果位移分布图

Fig.6 Displacement distributing pictures of form-finding results of cable nets

表1 找形分析结果

Table 1 Results of form-finding analysis

索网结构	δ_{max} (m)	$\frac{F_{\text{max}}}{F_{\text{min}}}$	A	最大约束反力 (N)
图1(a)	0.566	47.5	10%	3422.7
图1(b)	0.001	6.70	0	1371.5
图1(c)	0.001	6.45	0	1652.6

从上述找形结果可以看出:六环三向网格结构简单,但由于周边桁架对其的支撑很少,形面精度较差,不能满足形面要求,应力分布不均匀性较高,对周边桁架的约束反力较大,松弛面积较大,最大位移较大,不易平衡。而其他两种索网结构形面精度好,能满足形面要求,应力分布均匀,对周边桁架的约束反力较小,索网无松弛,最大位移较小,易平衡,但结构较复杂,与周边桁架的支撑点较多。

4 结论

本文给出了抛物面可展天线柔性索网结构形态分析的一种优化方法。完成了网格划分,并建立了基于GA算法和有限元分析相结合的找形分析的优化模型,并进行了算例验证。结果表明,此找形方法是可行的,可应用于工程中其他形式索网结构的形态分析。在本文工作的基础上,考虑边界条件及其他因素对网面精度的影响,可研究可展天线网面优化调整问题,即再次找形的过程。

参考文献:

- [1] 张毅刚,薛素锋,杨庆山,等.大跨空间结构[M].北京:机械工业出版社,2005.[ZHANG Yi-gang, XUE Su-duo, YANG Qing-shan, et al. Big Span Space Structure[M]. Beijing: China Machine Press, 2005.]
- [2] 陈务军,张淑杰.空间可展结构体系与分析导论[M].北京:中国宇航出版社,2006.[CHEN Wu-jun, ZHANG Shu-jie. Deployable Space Structures and Analysis Theory[M]. Beijing: China Astronautics Press, 2006.]
- [3] Tibert G. Deployable tensegrity structures for space applications[D]. Stockholm: Royal Institute of Technology, 2002.
- [4] 段宝岩.柔性天线结构分析、优化与精密控制[M].北京:科学出版社,2005.[DUAN Bao-yan. Flexible Antenna Structure Analysis, Optimization and Control[M]. Beijing: Science Press, 2005.]
- [5] Lewis W J, Leis T S. Application of formian and dynamic relaxation to the form finding of minimal surfaces[J]. IASS Journal, 1996, 37(3): 165-186.
- [6] Schek H J. The force density method for form finding and computation of general networks[J]. Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering, 1974(3): 115-134.
- [7] 杨庆山,姜亿南.张拉索一膜结构分析与设计[M].北京:科学出版社,2004.[YANG Qing-shan, JIANG Yi-nan. Analysis and Design of Tensioned Cable-membrane Structures[M]. Beijing: Science Press, 2004.]
- [8] Agrawal P, Anderson M, Card M. Preliminary design of large reflectors with flat facets[J]. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 1981, 29(4): 688-694.
- [9] Tibert G, Pellegrino S. Furlable reflector concept for small satellites [C]// In Proc. 42nd AIAA/ASME/ASCE/AHS/ASC Structures, Structural Dynamics, and Materials Conference and Exhibit, Seattle WA, April 2001, 1-12(AIAA 2001-1261).



作者简介:李团结(1972-),男,教授,博导,研究方向为空间可展结构及机器人系统。
通信地址:西安电子科技大学机电工程学院 188信箱(710071)
电话:(029)88202470
E-mail:tjli888@126.com

A Method of Form-finding Analysis for Flexible Cable Net Structures of Deployable Antennas

LI Tuan-jie, ZHOU Mao-hua, DUAN Bao-yan

(School of Electromechanical Engineering, Xidian University, Xi'an 710071, China)

Abstract: An optimization method for the shape-state analysis of cable net structures in deployable antennas is presented. The cable net structure, which used a triangulated cable network to approximate the reflecting surface under conditions of higher surface accuracy, was generated. The surface accuracy of the cable nets was chosen as objective function, the pre-tension forces in cables as design variables, and the relaxing area, strength and the adequate prestress distributions as constraint conditions, an optimization method to the form-finding was proposed based on the genetic algorithm and finite element analysis, which turned the form-finding of the cable nets into a constrained minimization problem. The method was applied to the form-finding of three types of triangular nets commonly used in deployable antennas. Results shows the feasibility of the form-finding method, which can be applied to the form-finding analysis of the other cable nets.

Key words: Flexible cable nets; Form-finding; Finite element analysis; Deployable antenna

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>