

文章编号:1000-4939(2008)04-0617-05

预应力索网天线结构优化设计*

杨东武 仇原鹰 段宝岩

(西安电子科技大学 710071 西安)

摘要: 索网预拉力设计是索网天线结构设计的一个重要内容。针对三向网格旋转抛物面索网天线结构,首先在不计桁架结构受力变形的条件下,从索网节点的力平衡方程出发,以索网结构的结构特征为依据,以网面索段最大拉力比最小为设计目标,给出了索网结构预拉力优化设计的有效方法;其次,考虑到在索网结构的拉力作用下,桁架结构的微小变形将导致网面索段的拉力均匀性变差,通过调节索网挂接节点的位置,对桁架结构的受力变形进行了有效补偿,改进了预应力索网天线结构的整体设计方案。算例分析结果表明,天线结构网面索段的实际设计最大拉力比为 1.30,验证了方法的正确性及有效性。

关键词: 环形桁架展开天线; 索网; 预拉力

中图分类号: V443.4 **文献标识码:** A

1 引言

环形桁架展开天线是近年来备受各国宇航界关注的一种空间展开天线形式,其组成部分如图 1 所示,其原理为:当环形桁架在驱动装置的作用下展开到位后,前、后索网以及纵向拉索在结构内力的作用下达到平衡位置,形成天线所需的抛物面型面^[1-2]。金属反射网附着于前索网背部完成电波反射任务。这种天线形式的优点在于其较高的收缩比及结构性能,因而是目前大型卫星天线的一种理想形式。

由环形桁架展开天线的基本原理可知,该天线索网结构(由前、后索网及纵向拉索组成)的网面精度误差主要是指前索网面最终形成的天线反射面与理想反射面之间的误差。在设计阶段,网面精度误差主要包括两部分内容,其一为以索网网格构成的反射面逼近理想抛物面反射面时所引入的原理误差。该误差取决于索网的布置形式(辐射状网格、三

向网格或准测地线网格等)及网格的大小;其二为索网结构设计中所得到的前索网面各节点的位置与理想位置之间的误差,称为网面设计误差。由于索网结构设计是由“形”找“力”的过程,因此该误差由索网结构的初始预拉力不平衡引起。

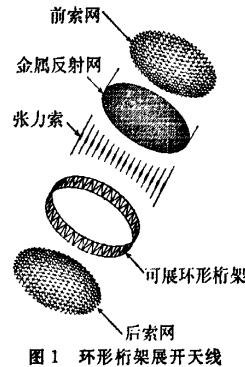


图 1 环形桁架展开天线

有关天线反射面索网的布置形式以及网格大小优化的研究可参见文献[3],本文中不予讨论。此处仅讨论在索网结构的布置形式和网格大小确定的情况下,各索段预拉力的优化设计问题,因此,下文中所提及的网面精度皆指前索网面的设计精度,而对索网面的原理精度不再论及。

至此,对索网结构的预拉力设计可以理解为寻求索网结构的一组预拉力,使得整个索网在边界条

* 来稿日期:2007-04-28 修回日期:2008-05-22

第一作者简介:杨东武,男,1978 年生,西安电子科技大学机电工程学院,博士生,研究方向——索网天线结构设计,多柔体系统动力学。
E-mail:ydw_1978@126.com

件约束(周边桁架约束)下处于平衡状态,并且该平衡状态应使前索网面形成设计所要求的抛物面型面。同时,前、后索网面中索段的预拉力应尽量均匀,即索段的最大拉力与最小拉力之比应尽可能小,以下简称为网面索段的最大拉力比最小。

对于该问题的求解,国内外宇航界学者一般采用非线性有限元与其他优化算法相结合的方法进行迭代求解^[4-5],求解速度较慢且精度不高(文献[5]中,经过300次优化迭代得到的网面精度为3.1mm)。文献[6]从索网结构的平衡矩阵出发,采用奇异值分解,并结合线性优化理论给出了一种新的优化途径,但是其计算过程较为复杂,编程难度较大,而且没有考虑环形桁架结构的受力变形。本文中所提出的方法思路简单,易于编程实现,不仅考虑了桁架结构的受力变形,且优化设计结果比文献[6]中的结果要好。

2 理论推导

以三向网格索网天线结构为例进行说明。天线口径 $D = 10\text{m}$,抛物面焦距 $f = 6\text{m}$,前、后索网对称,索网结构与周边环形桁架之间通过挂接铰链连接。桁架结构的一侧有四个节点完全约束。绳索材料为芳纶纤维,桁架为碳纤维管材。

天线结构的计算模型如图2所示,其中桁架结构的计算模型如图3所示。桁架结构及挂接铰链均简化为梁单元进行处理,铰链质量以集中质量进行校正。

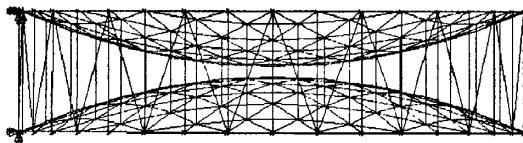


图2 索网天线结构模型

2.1 索网结构预拉力设计方法

在水平投影面(定义为抛物面轴线的垂面)内,三向网格索网结构前、后索网的内部网格均为正三角形,索网挂接节点沿圆周均匀分布^[6]。

在不计环形桁架结构受力变形的情况下,索网结构中的所有挂接节点(边界节点)均可看作是固定节点。

索网结构的预拉力优化问题可描述为:对于设计在理想抛物面上的索网结构模型(所有索网节点均位于设计要求的抛物面上),寻求一组预拉力,使

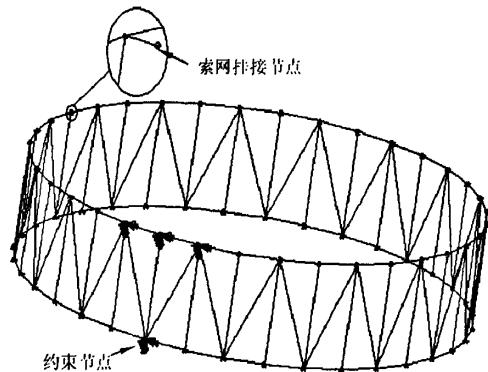


图3 环形桁架结构模型

得索网结构在原位置上达到平衡(即索网节点的最大位移量在预定的精度范围内),并尽可能使网面索段的最大拉力比最小。

为便于设计分析,将索网预拉力优化求解过程分为两步:第一步,优化设计水平投影面内前索网面索段的预拉力分量;第二步,计算求解索网结构中各索段的总拉力。

在第一步中,由于只考虑索网预拉力在投影面内的分量,而且纵向拉索的预拉力在该平面内的分量为零,无须计及,问题自然转化为二维平面内索网预拉力的优化设计问题。

考虑在投影面内前索网面的对称特性,取该索网结构中的一个基本部分,并对其各索段进行编号,如图4所示。为叙述方便起见,将各索段在该投影面内拉力分量的大小简称为索力,记为 F_{ik} (i 为索段编号, F_i 为标量)。

依据该索网结构的对称性,不难给出索网结构中其他索段的索力。此处将具有相同索力的索段以相同的索段编号表示,得到如下图5所示的索网结构预拉力分布图。

依据力平衡特性,并结合索网结构的对称性,为求得该索网结构的一组平衡力,需对图5中标出的各关键节点(以黑点标出)分别列写沿 x 轴及 y 轴方向的力平衡方程,并求解由这些方程组成的方程组。满足该方程组的解,必然可以作为该投影面内的前索网面的一组平衡预拉力。

关键节点 i ($i = 2, 3, 4, 5, 7, 8, 9, 10, 11, 12$) 的力平衡方程如下

$$x \text{ 轴方向: } \sum_k^6 F_{ik} \cos \theta_{ik} = 0 \quad (1)$$

$$y \text{ 轴方向: } \sum_k^6 F_{ik} \sin \theta_{ik} = 0 \quad (2)$$

式中:下标 ik 表示与节点 i 相连的第 k 索段; F_{ik}, θ_{ik}

分别表示与节点*i*相连的第*k*索段的索力以及该索段(索段方向矢量的起点定义为节点*i*)与x轴正向的夹角($0 \leq \theta_k < 2\pi$)。

通过整理以上各关键节点的力平衡方程,得到独立的力平衡方程个数为14个,而未知变量个数为28个,变量个数远大于方程个数,该方程组有无穷多组解。

图4 前索网面的基本部分投影图

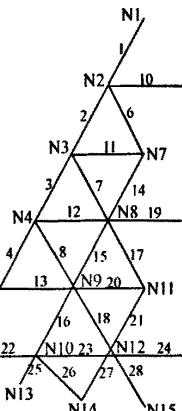


图4 前索网面的基本部分投影图

考虑索网结构的预拉

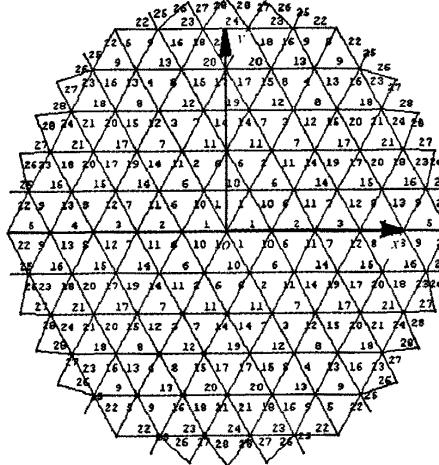


图5 前索网面索力分布图

力优化设计中要求网面索段的最大拉力比最小。通过计算得知,索网面中各索段的总拉力与水平分量之比的最大值*r*为

$$r = \sqrt{1 + \left(\frac{D}{4f}\right)^2} \quad (3)$$

式中:*D*为天线口径;*f*为抛物面焦距。对于一般索网天线而言,*r*通常都接近于1.0,此例中*r*=1.083。因此,当索网面中各索段拉力在水平投影面内分量(即索力)的最大拉力比最小时,索网面中索段的最大拉力比也趋于最小,而且索段的最大拉力比与索力的最大拉力比之间的比值接近于*r*。

不妨将网面索段最大拉力比最小的要求以网面索段索力最大拉力比最小近似替代。

假设水平投影面内网面内部各索段的索力相等,且等于常量*F_H*,即

$$F_i = F_H, (i = 1, 2, \dots, 21) \quad (4)$$

则网面内部索段索力的最大拉力比已经最小,而且

除N10和N12两节点而外,其他关键节点在投影面内均已处于平衡状态。

下面只须对索力*F_i*(*i*=22,23,...,28)共7个变量进行设计,相关方程为N10和N12两个节点所对应的力平衡方程

$$F_9 - F_{16} + 2F_{22} - 2F_{23} +$$

$$2F_{25} \cos\theta_{25} - 2F_{26} \cos\theta_{26} = 0 \quad (5)$$

$$\sqrt{3}F_9 + \sqrt{3}F_{16} - 2F_{25} \sin\theta_{25} - 2F_{26} \sin\theta_{26} = 0 \quad (6)$$

$$F_{18} - F_{21} + 2F_{23} - 2F_{24} + 2F_{27} \cos\theta_{27} -$$

$$2F_{28} \cos\theta_{28} = 0 \quad (7)$$

$$\sqrt{3}F_{18} + \sqrt{3}F_{21} - 2F_{27} \sin\theta_{27} - 2F_{28} \sin\theta_{28} = 0 \quad (8)$$

式中 θ_j (*j*=25,26,27,28)表示索段*j*在投影面内与x轴所夹的锐角($0 < \theta_j < \pi/2$)。以上4个方程相互独立,因此只有三个变量为独立变量。

不妨进一步令

$$F_{21+i} = a_i F_H, (i = 1, 2, \dots, 7) \quad (9)$$

并将式(4)及式(9)代入方程式(5)~式(8),整理后得到

$$a_4 = \csc(\theta_{25} + \theta_{26})(\sqrt{3}\cos\theta_{26} + (-a_1 + a_2)\sin\theta_{26}) \quad (10)$$

$$a_5 = \csc(\theta_{25} + \theta_{26})(\sqrt{3}\cos\theta_{25} + (-a_1 - a_2)\sin\theta_{25}) \quad (11)$$

$$a_6 = \csc(\theta_{27} + \theta_{28})(\sqrt{3}\cos\theta_{28} + (-a_2 + a_3)\sin\theta_{28}) \quad (12)$$

$$a_7 = \csc(\theta_{27} + \theta_{28})(\sqrt{3}\cos\theta_{27} + (-a_2 + a_3)\sin\theta_{27}) \quad (13)$$

令*a₈*=1.0,则水平投影面内网面索力的优化问题可用以下优化模型描述

Find: *a₁*, *a₂*, *a₃*

$$\text{Min. } R = \text{Max}(a_i)/\text{Min}(a_i), \quad (i = 1, 2, \dots, 8; j = 1, 2, \dots, 8) \quad (14)$$

$$\text{s. t. } b > a_i > 1/b, (b > 0; i = 1, 2, 3) \quad (15)$$

$$a_i > 0, \quad (i = 4, 5, \dots, 8) \quad (16)$$

称该优化模型为索力分量优化模型。考虑到*a_i*的物理意义为水平投影面内网面索力与常量*F_H*的比值,因此,式(14)表示网面索段索力的最大拉力比,式(16)表示索力分量均应为正值,即所有索段均为受拉状态。*b*为满足条件*a_i>0*(*i*=1,2,...,7)的任意一组(*a₁*, *a₂*, *a₃*)所对应的目标函数*R*的值,即当前索力的最大拉力比。此例中,取*a₁=a₂=a₃=1.0*时,满足条件*a_i>0*(*i*=1,2,...,7),求得此时的索力分量最大拉力比*b=R=1.47*。式(15)保证了当前搜索范围中索力*F₂₂*、*F₂₃*、*F₂₄*与常量*F_H*的比

值不超过当前的最大拉力比 b , 给出了优化变量的有效可行域。

由于该优化模型较为简单, 可用变步长直接搜索法求得其数值解。相应地, 得到了水平投影面前索网面的一组平衡索力。

第二步, 以投影面内的平衡索力为依据, 通过计算给出各索段的总拉力值。

索网结构前索网面中各索段的总拉力值计算公式

$$T_j = F_j / \cos \beta_j, \quad (j = 1, 2, \dots, e) \quad (17)$$

其中: T_j 表示网面中索段 j 的总拉力; β_j 表示索段 j 与水平投影面所夹的锐角 ($0 \leq \beta_j < \pi/2$); e 表示前面讨论的索网基本部分中的索段总数, 此例中 $e = 28$ 。

依据前、后索网面的对称关系, 后索网面中的预拉力可依据前索网面中的预拉力相应给出。

索网结构中各纵向拉索的总拉力值计算公式

$$T_i = \sum_{k=1}^6 F_{ik} \operatorname{tg} \beta_{ik} \quad (18)$$

其中: T_i 表示与非约束节点 i 相连接的纵向拉索索段的总拉力; F_{ik}, β_{ik} 分别表示前索网面中与节点 i 相连的第 k 索段在水平投影面内的索力以及该索段与水平投影面的夹角 ($-\pi/2 < \beta_{ik} < \pi/2$, 当索段与投影面法线的夹角小于 $\pi/2$ 时, β_{ik} 取正值; 当索段与投影面法线的夹角大于 $\pi/2$ 时, β_{ik} 取负值)。

2.2 桁架结构的变形补偿方法

以上索网结构预拉力设计过程中没有考虑桁架结构的变形影响, 而天线结构的找形过程中, 索网结构的预拉力必然会导致桁架结构产生一定的变形。相应分析结果表明, 桁架结构的微小变形将导致索网结构中网面索段的最大拉力比发生较大变化, 网面索段的拉力均匀性变差。为此, 下面给出环形桁架结构的变形补偿方法。

考虑到网面索段最大拉力比发生变化的根本原因为桁架结构的变形导致索网结构边界节点位置发生了变化, 因此, 环形桁架结构变形补偿方法的基本思想为, 结合桁架结构的变形特征, 在维持索网结构设计结果(即各索段原长)不变的基础上, 通过调节桁架结构中挂接铰链的挂接节点位置, 使变形后的桁架结构中的索网挂接节点位置与索网结构预拉力设计过程中的边界节点位置尽可能一致, 从而尽可能维持索网结构预拉力设计结果中的最大索段拉力比。

变形补偿的核心在于索网挂接节点初始位置调整量的确定。假设桁架结构变形后, 索网挂接节点 H_i 与其理想位置(索网结构的理想边界位置)的位置差为向量, 由结构力学知识可知, 对于在弹性范围

内的小变形桁架结构, 可以将作为桁架结构中索网挂接节点 H_i 初始位置的调整量。

另外, 在每次对索网挂接节点的初始位置进行调整后, 为保证天线结构有限元模型中桁架结构上的索网挂接节点与索网结构中的边界节点位移协调, 需将索网结构的边界节点位置调整至索网挂接节点的最新位置, 并重新计算索网结构中的索段预

拉力。这一过程相当于对已设计好的索网结构先反向拉伸。在天线结构的找

形过程中, 当索网挂接节点到达理想位置时, 索网结构中的索段拉力则必然恢复至原来的设计值。

于是, 考虑桁架结构变形补偿时的预应力索网天线结构的设计流程如图 6 所示。

3 算例分析

采用 mathematica 语言编制了相应的程序, 对以上讨论的索网天线结构进行了相应的设计, 包括在不考虑桁架结构受力变形时的索网结构预拉力设计以及环形桁架结构的变形补偿设计。

下面分别给出相应的设计结果。

3.1 索网结构的预拉力设计结果

表 1 网面索力优化模型数值结果

变量	数值解	变量	数值解
a_1	1.195025	a_5	1.195024
a_2	1.013250	a_6	1.048874
a_3	1.082553	a_7	1.013249
a_4	1.013249	a_8	1.0

由表 2 可知, 网面索力的最大拉力比为 $R = 1.195025/1.0 \approx 1.195$, 网面各索段总拉力的最大拉力比为 $1.2840/1.0 = 1.284$, 纵向拉索各索段的最大拉力比为 $0.25/0.2346 \approx 1.066$ 。网面索段的最大拉力比低于文献[6]中的结果(1.38), 说明该方法得到的结果较好。

为验证以上预拉力优化结果的正确性, 取 $F_H = 20\text{N}$, 求得相应的一组索网预拉力, 并将所得的预

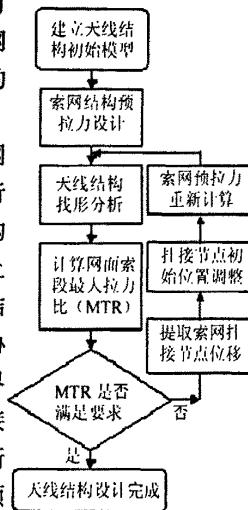


图 6 索网天线结构的设计流程图

拉力作为初始力(在有限元分析软件 Ansys 中需要转化为初始应变值 ϵ)导入索网结构的有限元模型中(索网边界节点全约束),进行非线性有限元分析。在 Ansys 环境下得到的节点最大位移量为 0.223×10^{-14} ,说明通过该方法得到的预拉力设计方案是正确的。

表 2 网面索段预拉力的设计结果

索段 编号	T/F_H	索段 编号	T/F_H	索段 编号	T/F_H
1	1.0009	11	1.0009	21	1.0417
2	1.0078	12	1.0035	22	1.2115
3	1.0215	13	1.0078	23	1.0525
4	1.0417	14	1.0138	24	1.0132
5	1.0680	15	1.0308	25	1.2840
6	1.0035	16	1.0541	26	1.0318
7	1.0078	17	1.0215	27	1.1497
8	1.0138	18	1.0308	28	1.0576
9	1.0215	19	1.0000		
10	1.0000	20	1.0009		

注:纵向拉索中,相应于节点 N10 与 N12 的索段拉力值分别为 $0.2346F_H$ 和 $0.2361F_H$,其他索段的拉力值均为 $0.2500F_H$ 。

3.2 预应力天线结构的最终设计结果

首先分析桁架结构变形对网面索段最大拉力比的影响。仍以 $F_H = 20 N$ 时的索网预拉力设计结果为例,设置天线结构有限元模型中索网结构的预拉力,天线桁架结构处于无应力状态。在天线结构找形分析过程中,桁架结构变形,索网结构预拉力重新分布。当天线结构到达平衡位置时,天线结构中的节点最大位移量为 0.363mm ,反射面精度(RMS)为 0.094mm ,网面索段的最大拉力比为 2.512 。说明天线桁架结构的变形较小,且对天线反射面精度的影响较小,但对网面索段拉力的均匀性影响较大(网面索段最大拉力比由原设计值 1.284 变为 2.51)。

采用文中的桁架结构变形补偿方法,经过 62 次循环迭代,最终获得的天线结构平衡态结果中,节点最大位移量为 7.467mm ,反射面精度(RMS)为 0.006mm ,网面索段的最大拉力比为 1.302 。其中,索网挂接节点沿天线结构径向的最大调整量为

2.480mm ,沿天线结构轴向的最大调整量为 7.067mm 。索网挂接节点的位置调整量较小,容易实现;而且通过补偿设计,网面索段拉力的均匀性得到了较大的改善。说明了天线桁架结构变形补偿方法的正确性和有效性。

4 结 论

- 1) 在不考虑天线桁架结构受力变形的前提下,以三向网格旋转抛物面索网结构的结构特征为依据,从索网节点的力平衡方程出发,给出了索网结构预拉力优化设计的有效方法。
- 2) 考虑到天线桁架结构的受力变形对天线索网结构中网面索段最大拉力比的影响较大,结合天线桁架结构的变形特征,通过调整索网挂接节点的初始位置,给出了预应力天线桁架结构设计的变形补偿方法,进一步完善了天线索网结构的预拉力优化设计。
- 3) 结合某索网天线结构的设计算例,说明了索网结构预拉力优化设计方法以及天线环形桁架结构变形补偿设计方法的正确性及有效性。

参 考 文 献

- [1] Tibert G. Deployment Tensegrity Structure for Space Applications[D]. Stockholm, Sweden : Royal Institute of Technology Department of Mechanics, 2002: 67-78.
- [2] Koryo M, Yasuyuki M. Concept of the tension truss antenna [J]. AIAA Journal, 1990, 28(6): 1098-1104.
- [3] 罗鹰. 大型星载可展开天线的动力优化设计与工程结构的系统优化设计[D]. 西安: 西安电子科技大学, 2004.
- [4] Wang P H, Tabarrok T C B, Qin I. Nonlinear analysis of tension Structures[J]. Computers and Structures, 1992, 45(5): 973-984.
- [5] 狄杰建,段宝岩,罗鹰,等.大型网状可展开天线预张力的优化[J].华南理工大学学报:自然科学版,2004, 32(6):23-26.
- [6] 李刚,关富玲.环形桁架展开天线索网的预拉力优化技术及工程应用[J].固体力学学报,2006,27(S1):174-179.

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>