

星载可展开网状天线的网面成形与防缠绕设计

关富玲, 杨玉龙, 赵孟良

(浙江大学 空间结构研究中心, 浙江 杭州 310027)

摘要:由网状反射面和可展开桁架结构构成的大型可展开网状天线是卫星通讯的有效工具。系统介绍了星载可展开网状天线的网面成形设计,并提出了几种有效的网状天线防缠绕设计方案。根据这些设计方法,利用FORTRAN语言编制了抛物面索网的网格优化程序,并成功设计制造了两种不同网格形式的缩比天线模型,进行了初步试验分析,验证了防缠绕设计的有效性,从而能够为类似的可展开网状天线设计提供重要的参考依据。

关键词:可展开天线; 形面设计; 防缠绕设计; 网状天线; 最佳拟合抛物面

中图分类号: V443.4

文献标识码: A

文章编号: 1006-754X(2006)04-0271-06

Mesh generation and preventing winding of large net-shape deployable antennas for satellite

GUAN Fu-ling, YANG Yu-long, ZHAO Meng-liang

(Space Structure Research Center, Zhejiang University, Hangzhou 310027, China)

Abstract: Large net-shape deployable antennas composed by mesh reflector membrane surface and deployable truss structure are an effective tool for satellite communication. Design methods for a large deployable reflector structure were introduced systematically and some measures to prevent winding were proposed. According to these methods, two prototype models with different net types were successfully designed and manufactured and prime experiments were carried out on them. These methods provided important references for design of similar deployable net-shape antennas.

Key words: deployable antenna; mesh generation; preventing winding; net-shape antenna; the best-fit paraboloid

随着航天技术的不断发展,对卫星天线提出了新的要求。在大功率通信卫星、电子侦察卫星以及深空探测领域,大口径天线越来越成为必不可少的设备^[1-2]。由柔性网面、索网和可展开支撑结构组成的网状可展开抛物面天线,以其重量轻、收缩体积小等特点在航天领域得到越来越广泛的应用^[3-4]。

本文设计制作了一种可展开网状抛物面天线结构,天线在构造上主要由三部分组成:正十二边环形可展桁架、反射网面、支撑索网(包括前索网、后索网、中层竖向拉索)。前、后索网周边固定在环形桁架上,通过中层竖向拉索相互联系,在索网中施加预拉力后,使前索网形成所需的抛物面,反射网面附着于前索网上完成电波反射任务。

首先,简要介绍可展开桁架结构的展开机理与设计要点;然后,重点研究可展开网状抛物面天线的网面成形设计,对天线索网的网格生成、形面精度、索网的预拉力优化、反射网设计等进行了详细介绍;最后,针对可展开网状天线设计中的一个重要问题——防缠绕问题,给出几种防缠绕设计方案,并通过设计的两种网状天线模型进行了防缠绕试验验证。

1 可展开桁架结构设计简介

图 1 给出了两个可展桁架单元的展开示意图,天线的展开原理^[5]为连续的展开索依次穿过桁架单元的可伸缩对角杆(套筒机构),通过电机带动展开索收缩来使环形桁架展开。在节点 B,D,F 处各有

一对同步啮合齿轮,保证整个桁架在展开过程中的同步,也即在展开过程中,各个矩形单元始终保持形状相同。当桁架运动至完全展开状态时,可伸缩对角杆 AE,CE 中的细管分别顶在顶点 A 和 C,阻止其进一步运动;同时,弦杆也运动至与竖杆成垂直的位置,节点盖板之间的填充限位件与弦杆连接件紧密接触,阻止其转动。

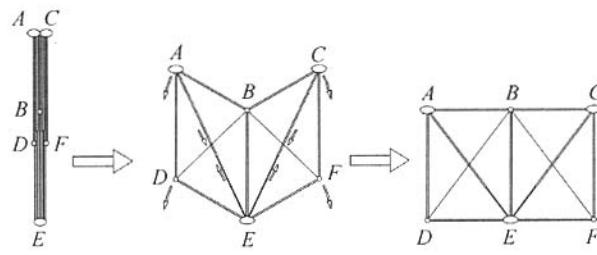


图 1 两个桁架单元的展开示意图

Fig. 1 Deployment of two truss units

可展开桁架结构的设计主要包括节点设计、杆件设计和可动构件设计等,其设计要求为高展开可靠性、轻质量和高收缩比。按此要求,本文设计了 12 个可展桁架单元,装配成一十二边可展开桁架结构用于支撑抛物面索网。

2 可展开网状抛物面天线的网面成形设计

2.1 支撑索网的设计

支撑索网是使柔性反射网面形成抛物面构形的重要结构,其设计优劣对整个天线的形面精度起决定作用,必须进行重点设计。

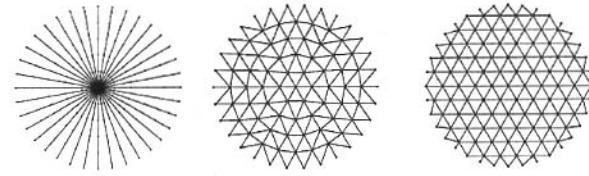
2.1.1 索网几何形状的优化设计

对于可展开柔性天线,不能像固面天线一样通过模具加工出相对理想的反射面,它的反射面是通过在支撑索网结构上铺覆金属丝网格薄膜拟合反射面,所以形面偏差又引入了一个设计偏差。而且,对于这类可展开反射器,设计偏差是主要的形面偏差。索段越多,节点越多,则在抛物面上的点就越多,结构的形面精度越高;但节点越多,设计、加工、安装的难度越大。因此,为了满足给定的形面精度指标,又使设计加工较容易,必须在设计时对抛物面的网格划分进行优化计算,求出满足给定精度前提下的最少张力索段的设计。

天线的反射面一般是一轴对称的抛物曲面,支撑索网是由前索网、后索网和竖向拉索组成。前索网和后索网通常设计成相同的形状,设计方便,节约设计成本。此外,对称的前后索网可以保证索网施加于外围可展桁架上的力是对称的,有利于外围可展桁

架保持其理想形状。

网状天线所采用的索网类型大致可分为三种(图 2):第一,辐射状网格;第二,准测地线网格;第三,三向网格。这些网格形式各有其优缺点:辐射状索网的制作加工相对简单,但其受力性能有一定缺陷,主要表现在网面的最大应力与最小应力的比值较大;准测地线索网的制作加工较复杂,但其受力性能优于辐射状索网;三向网格的制作加工相对复杂,但其受力性能在以上三种索网中却是最优的。



(a) 辐射状索网 (b) 准测地线索网 (c) 三向网格索网

图 2 网状天线的常用索网形式

Fig. 2 Common cable nets for the mesh antennas

辐射状索网的网格生成较简单,而三向网格的生成步骤如下:假设需要对一平面多边形(边数为 m ,通常 $m=6$)进行三角形网格划分,首先根据预测的边长确定平面多边形每边的等分数(n),并对平面多边形进行三角形网格划分,然后将划分完毕的平面三角形网格映射到所要求的抛物面上。

反射网面是由一系列离散的点形成的小平面来逼近抛物面,所以与理想抛物面会存在形面偏差,天线设计时大多数情况下都是通过求得最小均方根偏差所在的最佳拟合抛物面^[6]作为设计成形的抛物面。对一系列由离散的点构成的反射器表面,最佳拟合抛物面的方程为:

$$Z = \frac{X^2 + Y^2}{4F} + \Delta Z_P, \quad (1)$$

式(1)中: F 为最佳拟合焦距, ΔZ_P 为 XYZ 坐标系中理想抛物面顶点的位移。设 $(X_1, Y_1, Z_1), (X_2, Y_2, Z_2), \dots, (X_n, Y_n, Z_n)$ 为反射器表面上 p 个点的坐标,假如这 p 个点不是等分在口径平面上,则在计算最佳拟合抛物面时每个点的贡献是不同的。这种不同可以通过把各点相关面积作为权重引入计算而解决。因此,较密集的点比较稀疏的点有较小的权重。

将这 p 个点代入方程(1),并在方程两端乘以每个点所在面的水平投影面积,得到下面的线性超定方程组:

$$\begin{bmatrix} A_1(X_1^2 + Y_1^2) & A_1 \\ A_2(X_2^2 + Y_2^2) & A_2 \\ \vdots & \vdots \\ A_n(X_n^2 + Y_n^2) & A_n \end{bmatrix} \begin{pmatrix} 1/4F \\ \Delta Z_P \end{pmatrix} = \begin{bmatrix} A_1 Z_1 \\ A_2 Z_2 \\ \vdots \\ A_n Z_n \end{bmatrix}, \quad (2)$$

式(2)中: A_1, A_2, \dots, A_n 分别为 p 个点所在面的水平投影面积。方程(2)能够通过线性最小二乘方法求解。

在最佳拟合分析中,对每个三角形面的边进行 k 等分,即 $\Delta l = l/k$,得到 k^2 个小三角形,则轴对称抛物面的六分之一曲面所在的小三角形总数为:

$$m = n^2 \times k^2. \quad (3)$$

在计算最佳拟合抛物面时每个小三角形的重心作为一个点,并将小三角形的水平投影作为权重系数。因此,由于反射面上点离散引起的最小均方根值($\delta_{\text{rms},z}$)误差可由下式计算:

$$\delta_{\text{rms},z} = \left[\frac{1}{\sum_{i=1}^{nk} A_i} \sum_{i=1}^{nk} A_i (\bar{Z}_i - Z_i)^2 \right]^{\frac{1}{2}}, \quad (4)$$

式(4)中: A_i 为第 i 个点所在面的水平投影面积, Z_i 为第 i 个点实际 Z 坐标, \bar{Z}_i 为第 i 个点在最佳拟合抛物面上的 Z 坐标。

当求得的均方根误差过大,不能满足天线设计要求时,需要加密网格划分,即增大 n 值。这样反复迭代计算,求出满足精度要求的最优网格划分。表 1 为通过编制的网格优化程序,对一口径 $D=3.0$ m 的抛物面天线取不同的网格划分和不同的焦距比进行最佳拟合计算的结果(计算时取 $k=5$)。

表 1 三角形平面逼近曲面所引起的表面误差、焦距变化值和顶点变化值

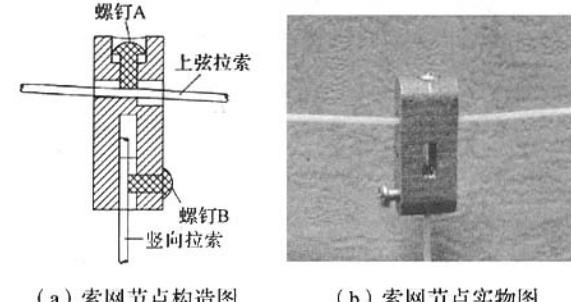
Table 1 Surface deviation and change of focus and vertex due to triangular faceting

n	F/D	$\Delta F/\text{mm}$	$\Delta Z/\text{mm}$	$\delta_{\text{rms},z}/\text{mm}$
4	0.4	0.722 4	5.978 2	4.860 3
	0.5	0.906 5	4.782 3	3.982 0
	0.6	1.087 9	3.985 0	3.364 3
5	0.4	0.301 5	3.799 7	3.109 8
	0.5	0.375 1	3.039 4	2.548 0
	0.6	0.452 3	2.533 3	2.152 9
6	0.4	0.145 9	2.628 1	2.159 4
	0.5	0.186 0	2.102 8	1.769 3
	0.6	0.218 9	1.752 2	1.495 0

2.1.2 索网节点的设计

图 3(a) 和 (b) 分别是索网节点示意图和实物图。每个节点都是由用来穿上下弦拉索的水平孔、穿竖向索的竖直孔以及定位螺钉所组成。在进行索网布置时,先确定每段上下弦拉索的长度,将索网节点穿入一整段上下弦拉索中,待上下弦拉索节点之间的索段长度调整好后,将图 3(a) 中所示的螺钉 A 拧紧,通过螺钉 A 卡牢索网来进行索网节点的水平定位;同理,待每段竖向拉索的长度调整好后,通过螺

钉 B 卡牢索网来进行索网节点的竖直定位。图 4 和图 5 分别是索网中心和外围背架上的连接可调节点。索网节点的设计保证了索段长度的精确确定,易于调节。但这种特别设计的可调节点在保证索网能够精确定位的同时,也使索网缠绕的风险大大增加,对这种网状可展开天线进行索网的防缠绕设计是必须的。



(a) 索网节点构造图 (b) 索网节点实物图

图 3 索网节点

Fig. 3 Node of the cable net

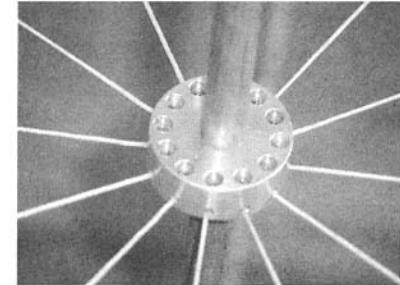


图 4 索网中心的可调连接构造

Fig. 4 Adjustable joint of the cable net center

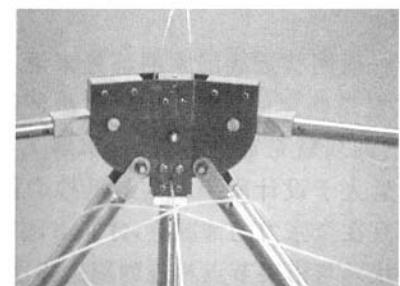


图 5 可展桁架上的索网连接构造

Fig. 5 Adjustable joint of the deployable truss

2.1.3 索网的预拉力优化

得到反射面的数学模型后,对其天线索网部分的分析可以理解为寻找索网中各索段的一组预拉力,该组预拉力能使整个索网在边界条件约束下处于平衡状态,并且该平衡状态应使前索网形成设计所要求的反射面型面。索网的预拉力优化常用的方法有:

法有非线性有限元法和奇异值分解法,本文采用奇异值分解法寻找支撑索网的一组最优预拉力.

索网部分可以认为是所有索段均承受拉力的桁架体系(又称张力桁架体系^[7]),对其中每一非约束节点均可写出其节点平衡方程,如节点*i*(图 6 所示,其中小写字母表示节点编号,带圈小写字母表示索段编号)的节点平衡方程如下:

$$\left. \begin{aligned} \frac{X_i - X_j}{L_a} T_a + \frac{X_i - X_k}{L_b} T_b + \frac{X_i - X_m}{L_c} T_c &= 0, \\ \frac{Y_i - Y_j}{L_a} T_a + \frac{Y_i - Y_k}{L_b} T_b + \frac{Y_i - Y_m}{L_c} T_c &= 0, \\ \frac{Z_i - Z_j}{L_a} T_a + \frac{Z_i - Z_k}{L_b} T_b + \frac{Z_i - Z_m}{L_c} T_c &= 0, \end{aligned} \right\} \quad (5)$$

式(5)中: X_i, Y_i, Z_i 表示节点坐标; L_a, L_b, L_c 表示索段长度; T_a, T_b, T_c 表示索段预拉力. 对体系中的每一非约束节点列写上述方程,并集成为矩阵形式,可得如下的体系平衡方程:

$$BT = 0, \quad (6)$$

式(6)中: B 为体系的平衡矩阵,是一 $3(n-c) \times m$ 矩阵; T 为索段的预拉力列向量,是一 m 维列向量. m 为体系索段总数, n 为体系节点总数, c 为体系约束节点总数.

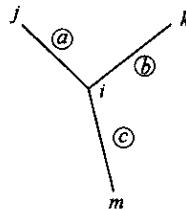


图 6 节点*i*的平衡示意图

Fig. 6 The sketch map of the balance of node *i*

对于一般网状天线的索网部分来说,索网中各节点的位置是确定的,即平衡矩阵 B 是确定的,因此,问题的实质就是通过方程(6)求解 T ,并且要求 T 的各分量大于设计所要求的最低拉力值(因为索网结构只有在全张力的情况下,才具有刚度,形成所需要的形状),与桁架节点相连的周边索段的拉力值小于设计所要求的最大拉力值(因为索拉力太大,使桁架变形过大,影响天线反射面的精度),并且使属于前、后索网面索段的各分量尽量均匀.这一问题的解决可分两个步骤来完成:第一,求解平衡矩阵 B 的零空间正交基,并将 T 表示为 B 的零空间正交基底向量的线性组合;第二,采用优化方法寻找最优的组合系数.

可以通过线性约束的优化方法^[8]寻找一组 T 值,使 T 的各分量达到最优配置. 索网优化的数学模型如下:优化变量为 T_1, T_2, \dots, T_m ,最小化目标函

数为:

$$f = t_{\max}/t_{\min}, \quad (7)$$

不等式约束条件为:

$$T_{\max} \geq T \geq T_{\min}, \quad (8)$$

式(7)和式(8)中, t_{\max}, t_{\min} 分别为预拉力列向量 T 中属于前、后索网索段的分量中的最大值和最小值; T_{\min} 为设计所要求的索网各索段最小拉力组成的列向量; T_{\max} 为与桁架节点相连索段所允许的最大拉力值. 对优化模型进行求解可得出最优的 T .

2.2 反射网面的材料选择与裁剪设计

反射网面可以是一种柔软的金属丝网和布状材料,也可以是一种金属化薄膜. 在较高的射频频率,选择的网材料是由非常细的镀金细丝构成的,并用细密的网眼连接起来. 这种细密的网眼类似尼龙长统袜,用肉眼几乎是看不见的. 在较低的射频频率,网眼自然要粗大得多,类似于鸡笼网.

选择好能够满足要求的网面材料后,一般的反射面都是由平面膜片缝合而成抛物面形式,所以需对网面进行裁剪设计,使得各块裁剪网布拼接后能够形成所要求的曲面形状. 裁减的片数越多,拟合的曲面形状越理想,但会给加工制作带来更大麻烦,所以必须经过误差计算求得最优的网面裁剪数量.

3 柔性天线的防缠绕设计

凡是带有索的展开机构一般来说都有防缠绕问题. 缠绕通常是在收纳后再次展开的时候发生的,原因在于收纳时很难保证索的空间位置,而且索上还带有节点等附带物,当再次展开的时候索的附带物和索及其他构件之间就可能缠绕. 图 7 所示为收拢状态时索网在中心圆管上缠绕图. 可见若不采取一定的防缠绕措施,在天线收拢时,索网将杂乱无序地缠绕在一起而难以分开,从而影响天线的顺利展开.



图 7 索网的局部缠绕模型

Fig. 7 Local twisting model of the cable net

柔性索网天线的防缠绕措施主要有:

(1) 索网材料的选择. 通常在索网材料的选择时, 表面索选择高刚度的材料, 而竖向支撑索选择低刚度的材料. 但应保证在索网材料的选择时选择不易缠绕的索, 一般弹性模量大的材料较之弹性模量小的更不易缠绕.

(2) 发射时的网面保持. 卫星搭载的机器在火箭发射时会受到非常激烈的振动和音响荷载的影响. 该振动使索网的节点与节点之间发生改变, 产生缠绕, 故采用折叠索、节点和反射面网格等各个方向由吸收振动的板材夹持以约束运动.

(3) 依次展开. 展开时索如果全部释放, 在无重力的轨道上大量的索开始漂浮, 很容易发生缠绕. 因此, 要使索的漂浮范围尽可能地小. 最好的办法就是在展开过程中依次展开. 这可以在伸展臂式展开天线上实现, 对于单元式展开天线, 由于其为同步展开, 实现这一功能比较困难. 此时索松弛而有缠绕危险, 需要通过特殊的设计将索收拢到某些防缠绕装置中去. 这是一种主动控制的方法, 但往往会加大设计的复杂程度.

(4) 索的面内约束. 在索与索之间用膜连接, 展开过程中索作为膜运动的一部分, 这样缠绕的可能性将更小. 当柔性可展开天线有金属网构成的电波反射面, 该金属网充当了连接膜的角色, 不用特意设置防缠绕膜.

(5) 节点和突起物的空间分离. 为了防止缠绕, 索上的附带物和背架上的节点等应该尽量不带棱角. 当索与背架上的突起物必不可少, 从而有可能发生缠绕时, 有必要在展开途中索可能达到的范围内全部突起物均设置外罩. 同时注意可动结构外罩不能损失机构的展机能.

4 设计实例

4.1 网面成形设计

设计一三向网格索网的抛物面天线, 特征参数为: 口径 $D=1982\text{ mm}$, 焦距比 $F/D=0.5$, 上下表面索网完全相同, 上下索网顶点间距 $H_1=125.5\text{ mm}$, 形面精度 $\delta_{\text{rms}}=2.65\text{ mm}$. 划分得抛物面网格如图 8 所示. 对生成的一系列三角形网格组成的抛物面进行最佳拟合抛物面分析, 得抛物面的焦距增量 $\Delta F=0.595\text{ mm}$, 顶点增量 $\Delta Z=3.159\text{ mm}$. 然后对生成的索网进行预拉力优化, 设最小索段预拉力为 5 N , 得网面上各索段的预拉力如表 2 所示. 表 2 中的索段编号如图 9 所示.

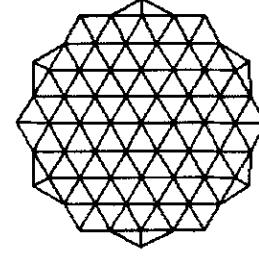


图 8 三向网格索网

Fig. 8 The cable net of triclinic mesh

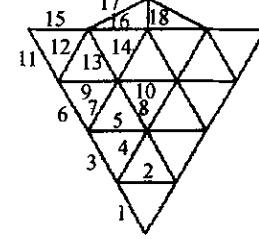


图 9 表 2 中的索段编号

Fig. 9 The number of cable in Table 2

表 2 三向网格索网的预拉力分布

Table 2 The distribution of pretension in triclinic mesh cable net

N

编号	1	2	3	4	5	6	7	8	9
预拉力	13.98	14.70	14.76	14.29	14.36	15.15	15.07	15.13	17.62
编号	10	11	12	13	14	15	16	17	18
预拉力	10.95	24.33	10.28	11.23	22.37	27.50	11.66	21.98	30.30

各竖向索的拉力为 $5\sim5.43\text{ N}$. 由表 2 可见, 中间索网的预拉力分布较均匀, 而周边较差, 抛物网面中最大索段拉力与最小索段拉力之比为 2.95.

反射网面的裁剪设计采用三角形平面膜片, 对于本文设计的由十二边形可展桁架支撑的网状天线, 共裁剪 12 块相同的网布拼接后即能得到较好的抛物面构形.

4.2 防缠绕设计

针对三向网格状索网天线, 首先采用了直接将索段系在一起的方式; 其次, 所有的索之间都形成了三角形的网格结构, 索段长度也相对较小, 避免了索的空间大范围漂浮运动, 从而降低了缠绕的可能性; 最后, 反射网对索的空间运动进行了限制, 也大大降

低了缠绕的可能性。针对辐射状索网天线,设计的防缠绕方案为在天线收拢或者展开过程中,将中心索网缠绕于中央圆筒上,实现了索网的顺次展开,在无重力的太空环境中,这种方法也是非常有效的;另外,索段之间的连接没有采用图 3 所示的可调节点,而是采用了直接将索段系在一起的方式,这样便消除了节点对于缠绕的影响。

根据设计好的两种天线模型(图 10 和图 11),进行了多次重复收拢展开试验,发现索网均未发生相互缠绕现象,说明采用的防缠绕方案是有效的。

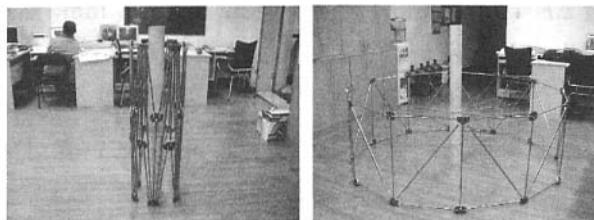


图 10 十二边辐射状索网可展开网状天线模型

Fig. 10 Model of net-shape deployable antenna composed of twelve-side radiation mesh cable-net

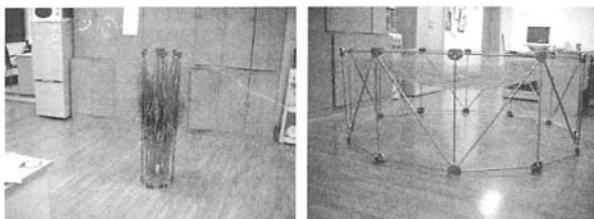


图 11 十二边三向网格状索网可展开网状天线模型

Fig. 11 Model of net-shape deployable antenna composed of twelve-side triclinic mesh cable-net

5 结 论

本文首先简要介绍了一种可展开桁架结构的设计,然后系统介绍了星载可展开网状抛物面天线网面成形的设计方法,给出了柔性天线的几种防缠绕设计方案。在此基础上编制了索网的网格优化程序,

并成功设计了两种可展开网状天线结构模型,证明了这种可展开天线具有大口径、超轻重量、大收缩比的优点,也验证了文中给出的防缠绕设计方案的有效性。

参 考 文 献:

- [1] 张京街,关富玲. 大型切割旋转抛物面展开结构的设计[J]. 工程设计学报, 2000, 7(1): 46-48.
ZHANG Jing-jie, GUAN Fu-ling. Design of large cutting-parabolic structure[J]. Journal of Engineering Design, 2000, 7(1): 46-48.
- [2] 陈向阳,关富玲. 六棱柱单元可展天线结构设计[J]. 空间科学学报, 2001, 21(1): 68-72.
CHEN Xiang-yang, GUAN Fu-ling. A large deployable hexapod paraboloid antenna[J]. Chinese Journal of Space Science. 2001, 21(1): 68-72.
- [3] MARK W Thomson. Astromesh deployable reflectors for Ku-and Ka-band commercial satellites[C]// Proc 20th AIAA International Communications Satellite Systems Conference. Montreal, Canada, 2002.
- [4] 罗 鹰,段宝岩. 周边桁架式展开天线的几何布局优化[J]. 空间科学学报, 2004, 24(2): 132-137.
LUO Ying, DUAN Bao-yan. Layout optimization of large flexible deployed antenna[J]. Chinese Journal of Space Science, 2004, 24(2): 132-137.
- [5] MARK W Thomson, GREFFREY W Marks, JOHN M Hedgepeth. Light-weight reflector for concentrating radiation: America, 5690145[P]. 1997-10-21.
- [6] GUNNAR Tibert. Deployable tensegrity structures for space applications[D]. Stockholm, Sweden: Royal Institute of Technology Department of Mechanics, 2002.
- [7] LAI C Y, YOU Z, PELLEGRINO S. Shape and stress analysis of symmetric CRTS reflectors[R]. Cambridge: European Space Agency Contractor Report, 2001.
- [8] 薛嘉庆. 最优化原理与方法[M]. 北京:冶金工业出版社, 2003: 253-275.
XUE Jia-qing. Optimization theory and method[M]. Beijing: Metallurgical Industry Press, 2003: 253-275.

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>