

# 大型网状可展开天线预张力的优化\*

狄杰建 段宝岩 罗 鹰 仇原鹰 杨东武

(西安电子科技大学 机电工程学院, 陕西 西安 710071)

**摘要:** 以纵向拉索预张力的大小为设计变量, 网状反射面的均方根误差为目标函数, 以应力和频率为约束条件, 建立了大型网状可展开天线预张力优化的数学模型, 并用遗传算法对其进行优化。结果表明, 该方法能有效地提供一组预张力, 使得网状天线的初始形状具有较高的表面精度, 对工程设计人员具有一定的参考价值。

**关键词:** 可展开天线; 均方根误差; 遗传算法; 预张力

**中图分类号:** TH862<sup>+</sup>.72

**文献标识码:** A

近 20 年来, 索网结构以质轻、柔软易折叠、收缩比大、在拉伸状态下能承受一定的载荷等优点而倍受人们的青睐, 被广泛地应用于桥梁、房屋等建筑结构, 甚至太空领域<sup>[1]</sup>。其中, 周边式桁架可展开天线(如图 1 所示)便是利用了绳索收缩比大、重量轻等优点, 从而成为各国竞相研究的热点。但是绳索结构的分析与一般刚性结构的分析不同, 刚性结构的一般分析是在已知结构形状的基础上进行, 而对于索网结构来说, 分析前提是施加一定的预应力使其具有一定的刚度。因此, 在结构分析之前必须确定出在一定的边界条件和预应力情况下对应的结构形状, 形状的确定即预应力的施加是分析的前提。大多数的研究集中在各种桥梁的预应力设计上<sup>[2,3]</sup>, 很少有关太空天线方面的报道, 也极少考虑它的频率特性。而太空天线对表面形状有较高的精度要求(通常要求表面误差小于 2%<sup>[4,5]</sup>), 如何确定出一组预张拉力, 使得天线反射面非常接近理想抛物线, 减少后续的天线网面调整工作, 并且让基频远离激励频率, 防止共振现象, 这是设计人员所关心的问题。对于这种高非线性<sup>[6,7]</sup>的问题, 传统的基于梯度的优

化方法难以胜任。而遗传算法<sup>[8]</sup>(GA)是一种随机搜索方法, 它对搜索空间没有特殊的要求, 目标函数无论可微或不可微、显式或隐式均可进行计算。它同时搜索的是解空间中的一群点, 并构成不断进化的群体序列, 具有较大可能获得全局最优解、隐含并行性、搜索效率高等特点。文中采用 GA 算法, 结合 ANSYS 有限元分析软件 New-Raphson 法, 有效地解决了这一问题。

## 1 天线结构特点

图 1 所示周边桁架式可展开天线属于张拉整体组合结构, 由周边桁架、反射面悬索系统以及中心体组成。每个索网辐射单元均由上弦拉索、下弦拉索、16 条纵向拉索组成。上弦拉索的一端固定在中央圆筒上部, 另一端固定在周边构架单元的上斜杆顶端。下弦拉索的一端固定在中央圆筒略下一点位置, 另一端固定在周边构架单元的下斜杆顶端。依靠纵向调整索可以将上弦拉索调整到所需曲率。因此, 调整每一组索网辐射单元的纵向调整索, 可以使上弦索系达到所需的位置, 从而可以保证整个上弦索系形成所需的反射面。由于天线反射面为悬索结构, 是一种典型的几何非线性结构, 其单元应变和位移之间不存在一般的线性关系<sup>[6]</sup>, 正是这种非线性变位特性使得结构分析变得较为复杂, 一般包括两个阶段: 找形阶段和力学分析阶段。

收稿日期: 2003-09-27

\* 基金项目: 中国人民解放军总装备部资助项目  
(41321070301)

作者简介: 狄杰建(1974-), 男, 博士生, 主要从事结构优化、参数化造型的研究。E-mail: dijiejian@tom.com

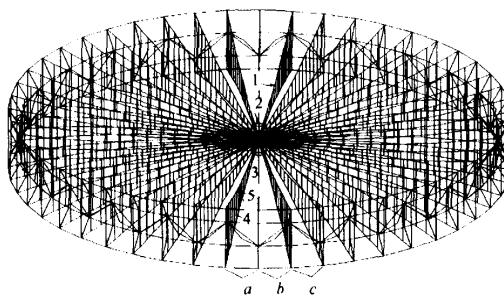
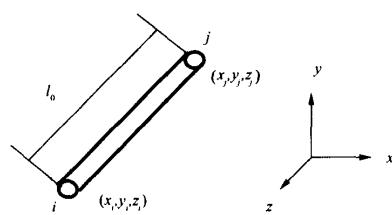


图1 周边式桁架可展开天线总体结构图(去除了反射网)  
Fig. 1 Circular-truss deployable antenna without reflector mesh  
1—悬索系统; 2—中心圆筒; 3—上弦拉索;  
4—下弦拉索; 5—纵向拉索(调节索)

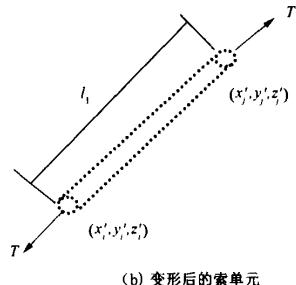
## 2 力学分析

首先作如下假设(见图2):

- (1) 材料是线性的,忽略材料的非线性.
- (2) 绳索单元承受拉力,不承受压力.
- (3) 绳索的横截面积是均匀的.
- (4) 各节点之间没有相对转动.



(a) 变形前的索单元



(b) 变形后的索单元

图2 索单元受力情况  
Fig. 2 Cable element subjected to tension

由于索网结构在荷载作用下一般处于小应变大位移状态,所以该类结构有限元计算需要考虑结构的几何非线性问题,在成型分析的时候通过引入几

何刚度矩阵来体现.由于用到Newton-Raphson法,因而它的切线刚度矩阵包括弹性刚度矩阵和几何刚度矩阵两部分:

$$\mathbf{K}_e^T \mathbf{U}_e = (\mathbf{K}_e^e \mathbf{U}_e + \mathbf{K}_e^g \mathbf{U}_e) = \mathbf{P}_e - \mathbf{R}_e \quad (1)$$

式中: $\mathbf{K}_e^T$  表示索单元的切线刚度矩阵; $\mathbf{K}_e^e$  表示索单元的弹性刚度矩阵; $\mathbf{K}_e^g$  表示索单元几何刚度矩阵; $\mathbf{U}_e$  表示单元节点位移; $\mathbf{P}_e$  表示单元等效节点外力; $\mathbf{R}_e$  表示结构单元的内力.

$$\mathbf{K}_e^e = \frac{EA}{l_0^3} \begin{bmatrix} \mathbf{t}_s & -\mathbf{t}_s \\ -\mathbf{t}_s & \mathbf{t}_s \end{bmatrix},$$

$$\mathbf{K}_e^g = -\frac{T}{l_0^3} \begin{bmatrix} \mathbf{t}_s & -\mathbf{t}_s \\ -\mathbf{t}_s & \mathbf{t}_s \end{bmatrix},$$

$$\mathbf{t}_s = \begin{bmatrix} c_x^2 & c_x c_y & c_x c_z \\ c_y c_x & c_y^2 & c_y c_z \\ c_z c_x & c_z c_y & c_z^2 \end{bmatrix} \quad (2)$$

$$\begin{aligned} c_x &= x_j - x_i \\ c_y &= y_j - y_i \\ c_z &= z_j - z_i \end{aligned} \quad (3)$$

$$\mathbf{t}_s = \begin{bmatrix} c_x^2 - l_1^2 & c_x c_y & c_x c_z \\ c_y c_x & c_y^2 - l_1^2 & c_y c_z \\ c_z c_x & c_z c_y & c_z^2 - l_1^2 \end{bmatrix}.$$

式中: $E$  为杨氏弹性模量; $A$  为截面积; $T$  为单元  $ij$  的内力; $l_0, l_1$  分别为单元变形前和变形后的长度.

## 3 优化数学模型的建立

建立优化设计的数学模型通常从设计变量的选取、目标函数的列出和约束条件的给定三方面的问题来考虑.

### 3.1 设计变量

文中的优化对象是较为复杂的周边式桁架可展开天线,它的反射面由索网结构形成,为了获得期望的抛物线形状,需要不断改变绳索预张力的大小,故纵向拉索的预张力选为设计变量.

### 3.2 目标函数

天线的表面精度决定它的工作性能,表面均方根误差( $R_{MS}$ )较好地反映与理想抛物面的偏差情况<sup>[9]</sup>.因此,把各数据点与理想抛物面的偏差的均方根作为目标函数,力求天线的表面误差最小.

### 3.3 约束条件

由于各绳索在天线结构中不能松弛,只承受拉力,同时最大不能超过允许应力;另外,结构的频率

特性是星载展开天线重要指标,在调整中使基频远离激励频率,避免共振现象发生,减少振动,提高结构的动力性能。

综合以上考虑,可列出如下数学模型:

$$\mathbf{X} = (x_1, x_2, \dots, x_n) = (T_1, T_2, \dots, T_n),$$

$$\min f(\mathbf{X}) = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^m \delta v_i^2 + \sum_{i=1}^m \delta u_i^2 + \sum_{i=1}^m \delta w_i^2}{m}} \quad (4)$$

$$\text{s. t. } 0 < T_j \leq A\sigma_a \quad (j=1, 2, \dots, k) \quad (5)$$

$$\bar{\omega}_{\min}^d - \bar{\omega}_{\text{allow}} > 0 \quad (6)$$

式中:  $T_1, T_2, \dots, T_n$  代表各纵向拉索的张拉力;  $n$  表示纵向拉索数;  $\delta u_i, \delta v_i, \delta w_i$  分别代表第  $i$  个采样节点与理想抛物线对应节点的偏差;  $m$  为采样节点数;  $\sigma_a$  为绳索的允许应力;  $T_j$  为  $j$  索单元的张力;  $A$  为绳索的横截面积;  $k$  为总索单元数;  $\bar{\omega}_{\min}^d$  为天线展开状态下的基频,  $\bar{\omega}_{\text{allow}}$  为天线设计规定的基频值。

#### 4 算例分析

文中以大型可展开天线的单片辐射单元为例进行说明。图 3 为其实有限元模型,共有 36 个节点,16 个纵向拉索。如何匹配调整纵向拉索的预张力,使得上弦拉索能非常接近理想抛物线,  $R_{\text{MS}} \leq 3.50 \text{ mm}$ ,且基频满足  $\bar{\omega}_{\min}^d > 0.7 \text{ Hz}$ 。绳索材料全部是芳纶材料,索半径  $r = 1 \times 10^{-3} \text{ m}$ ,弹性模量  $E = 1.3 \times 10^{11} \text{ N/m}^2$ ,质量密度  $\rho = 1.44 \times 10^3 \text{ kg/m}^3$ 。两端的 4 个节点无  $x, y, z$  方向的位移。

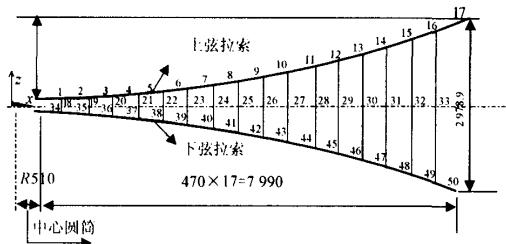


图 3 单片悬索辐射单元

Fig. 3 One radial member of catenary

文中采用遗传算法结合 ANSY 有限元分析软件进行了求解运算,GA 的一般控制参数分别为:群体大小为 10, 交叉概率:  $P_c = 0.9$ , 变异概率  $P_m = 0.09$ , 终止进化迭代次数为 300。

结果如图 4 所示,纵轴表示天线的表面均方根误差,横轴表示优化迭代次数。从图中可以看出,随着优化迭代次数的增加,天线表面误差不断减小。80 次优化迭代后(图中的 A 点),表面均方根下降为 3.490 mm,300 次迭代后已降为 3.074 mm。调整过

程的非线性在此图中也得以体现。按本算例的要求,在第 80 次已经达到。考虑到后续的制造、安装过程会不可避免地使误差偏大,因而在天线的初始设计阶段尽量提高它的表面精度。为此决策者可在 AB 段选取优化值来进行指导预张力的施加,也可以增大 GA 算法的终止次数来获取尽可能好的优化值。

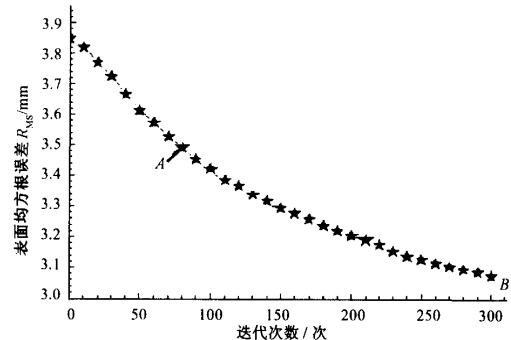


图 4 表面精度随迭代次数的变化情况

Fig. 4 Surface accuracy vs. iterations

最后,表 1 给出了前 4 阶的频率值;表 2 给出了优化后的一组纵向拉索预张力值。

表 1 悬索单元的模态分析结果

Table 1 Modal results of catenary member

阶数	固有频率/Hz	阶数	固有频率/Hz
1	1.5478	3	3.0078
2	2.4449	4	4.2231

表 2 各调节索的预张力

Table 2 Pretension for each adjustable cable

索单元号	预张力/N	索单元号	预张力/N
18	4.797	26	4.494
19	4.868	27	3.848
20	3.924	28	4.187
21	4.356	29	5.494
22	4.143	30	3.864
23	4.350	31	4.135
24	4.673	32	4.481
25	4.152	33	5.064

#### 5 结束语

本文中利用 GA 优化算法和 New-Raphson 法,有效地提供了一组预张力,使得确定出的天线反射面初始形状很接近理想抛物线,为工程设计人员提供了参考依据。由于在后续的制造、安装过程中还不

可避免地会使误差偏大,为减少后续的网面调整工作,在设计初期尽量减小天线的表面误差。为满足天线的表面精度要求,保证天线的正常工作状态,还必须对天线进行网面的精调工作。

## 参考文献

- [1] 沈世钊,徐崇宝,赵臣.悬索结构设计[M].北京:中国建筑工业出版社,1997.
- [2] Tseng, Tang C G. Initial shape of cable-stayed bridges [J]. Computers and Structures, 1993, 46 (6): 1 055 - 1 106.
- [3] Takagi R, Nakamura T, Nakagnna K. A new design technique for prestressed loads of a cable-stayed bridges [J]. Computers and Structures, 1996, 58 (3): 607 - 612.
- [4] Jin Mitsugi, Tetsuo Yasaka, Koryo Miura. Shape control of the tension truss antenna [J]. AIAA Journal, 1990, 28 (2): 316 - 322.
- [5] Koryo Miura, Yasuyuki Miyazaki. Concept of the tension truss antenna [J]. AIAA Journal, 1990, 28 (6): 1 098 - 1 104.
- [6] Wang P H, Tabarrok T C B, Qin I. Nonlinear analysis of tension structures [J]. Computers and Structures, 1992, 45 (5): 973 - 984.
- [7] 王勘成,邵敏.有限单元法基本原理和数值算法[M].北京:清华大学出版社,2002.
- [8] 周明,孙树栋.遗传算法原理及其应用[M].北京:国防工业出版社,2002.
- [9] Fichter W B. Reduction of root mean square errors in faceted space antennas [J]. AIAA Journal, 1984, 22 (11): 1679 - 1684.

## Preloading Optimization of Large Net-shape Deployable Antennas

Di Jie-jian Duan Bao-yan Luo Ying Qiu Yuan-ying Yang Dong-wu

(School of Mechano-Electronic Engineering, Xidian Univ., Xi'an 710071, Shanxi, China)

**Abstract:** A mathematical model to optimize the preloading of large net-shape deployable antennas was established, with the magnitude of the preloading on vertical cables as the design variable, the root mean square on the net-shape reflective surface as the objective function, and the stress and the frequency as constraints. Optimization using Genetic Algorithm was then performed. As a result, the proposed method can effectively provide a group of preloading, thus obtaining high surface accuracy of the initial shape of the net-shape antenna. The experimental results may serve as a good reference for engineering designers.

**Key words:** deployable antenna; root mean square; Genetic Algorithm; preloading

## “石材磨具材料配方和工艺的技术开发”通过成果鉴定

华南理工大学化工学院杨卓如、程江教授等承担的项目“石材磨具材料配方和工艺的技术开发”于2004年2月23日通过了由广东省科技厅组织、广东省教育厅主持的科技成果鉴定。鉴定委员会审阅了所提交的鉴定资料,听取了项目完成单位的研制工作总结报告等。经认真讨论,一致认为:

1. 该项目提供的鉴定资料齐全,符合鉴定要求。
2. 该项目所研制的花岗石抛光磨具,采用压制成型新工艺,利用毛发与酚醛树脂的复合和多种软硬磨共同的表面瞬时塑性变形使用,提高了磨具的强度、使用寿命和花岗石板材的光泽度。经过用户使用证明,磨具质量稳定,抛光效果好,花岗石板材光泽度达到85°以上。
3. 该产品经广州市产品质量监督检验所和中山市磨具研究所检测结果表明,质量符合Q/CT003—1998的指标要求。产品制备工艺简单可行,可进行工业化生产,生产过程中微量粉尘可经集中分离处理回用,符合环保要求。

该项目具创新性和实用性,技术水平达到国内领先。鉴定委员会一致同意该项目通过成果鉴定。

## 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](http://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](http://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](http://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>