

# 周边桁架式展开天线几何布局优化<sup>\*</sup>

罗 鹰 段宝岩

(西安电子科技大学机电工程学院 西安 710071)

## 摘要

V4 A

讨论了某新型周边桁架式展开天线拉索系统的布局优化设计问题。将天线拉索系统的上、下悬索数量，以及中间调节索数量作为设计变量，在优化过程中主要考虑结构拉索系统原理精度约束，建立以结构重量最轻为优化目标，基于天线几何精度的展开天线布局优化数学模型。通过数值算例证明，拉索系统的布局优化设计对提高天线设计质量是非常有效的。

关键词 展开天线；拉索系统；布局优化

## 1 引言

随着科学技术特别是航天技术的飞速发展，卫星天线技术也发生了很大的变化，周边桁架式展开天线的应用越来越广泛。这种天线结构是一种拉索预应力结构<sup>[4]</sup>，它通过拉索引入预应力，使天线能够有效地提高承载力，控制结构变形，降低天线结构重量。图1为某新型周边桁架式展开天线的结构示意图。1998年，阿斯特罗为休斯公司制造的图拉雅通信卫星上的网状展开天线采用的就是这种结构形式。发射前，天线可折叠成圆筒状，直径只有1.3 m，长3.8 m，完全展开后形成鼓形结构，直径可达到12.25 m。虽然这种天线具有结构简单、压缩比大、结构重量轻等优点，但由于其反射曲面完全由拉索系统分段拟合而成，因此这种天线不能像面天线那样通过将反射面加工成比较理想的抛物面来提高天线的精度。也就是说，这种天线与理论反射面之间在设计之初就存在原理误差。为了减少设计误差，提高原理精度，可以通过增加天线上(前)、下(后)网悬索数，以及中间调节

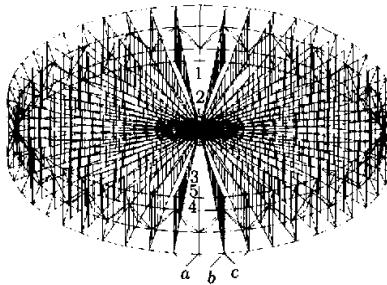


图1 某周边桁架式可展开天线结构图  
Fig.1 The new flexible deployable antenna

\* 总装备部“十五”重点预研项目资助

2003-01-26 收到原稿，2004-01-06 收到修定稿

索数量来解决。但是, 随着拉索数量的增加, 天线重量也会随之增加。而航天技术(人造卫星、火箭以及航天飞机等)对结构重量的要求又十分严格, 卫星的重量每减轻1 kg, 运载的火箭就可以减轻500 kg。既要保证天线设计精度, 又要减轻天线重量, 这就给天线拉索系统的设计提出了新的要求。目前, 关于天线结构设计问题的相关文献比较多<sup>[1]-[3]</sup>, 但针对拉索系统的布局优化研究还比较少。本文将优化设计思想应用之, 在满足天线设计精度的约束条件下, 对天线拉索系统布局进行最优化设计。

## 2 设计变量的确定

星载展开天线拉索系统的设计包括两个阶段, 即天线反射面原理精度的几何设计阶段和结构力学性能设计阶段。本文只考虑第一阶段, 即天线反射面原理精度的几何设计阶段, 主要基于天线网面的几何形状精度对天线上、下悬索及中间调节索的数量, 以及它们的布局进行优化设计, 使其在满足展开天线反射面精度要求的前提下最终得到使结构重量最轻的拉索最佳布局。

根据天线反射面到中心体的距离与反射面的工作效率成反比的特点, 对天线反射面的不同区域常常规定不同的精度要求。例如, 反射面的边缘部分的精度比较低, 中间部分的精度比较高。因此, 在优化设计时可将反射面沿径向分为两个部分, 也就是离中心体近的部分和远离中心体的部分。在设计中, 对离中心体近的部分反射面可适当提高其精度, 反之, 对远离中心体的部分可适当放宽其精度要求。这样, 一方面可以降低天线制造难度和成本, 减少工程造价, 另一方面可以提高天线效率, 使设计更为合理。

图2为周边桁架式展开天线拉索系统俯视图, 本文沿径向将反射面分为两部分, 分配比例可以根据具体设计要求而定。然后, 分别对两部分抛物面沿径向等分为 $m_1$ 和 $m_2$ 份, 此时沿抛物面径向产生2个设计变量, 分别为两部分反射面中每段的长度, 记为 $x$ 和 $y$ , 且有下列关系:

$$x = L_1/m_1, \quad y = L_2/m_2. \quad (1)$$

其中,  $L_1$ 和 $L_2$ 分别为两段抛物面的径向长度, 且满足关系式 $L_1 + L_2 = L$ ,  $L$ 为反射面沿径向的总长度,  $m_1$ 和 $m_2$ 分别为 $L_1$ 段抛物面与 $L_2$ 段抛物面的等分数目。同样, 可以将参数 $m_1$ 和 $m_2$ 作为设计变量。

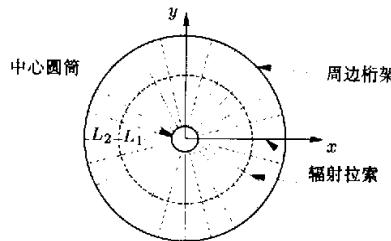


图2 天线拉索系统俯视示意图  
Fig.2 The planform of cable net

另外,反射面的精度还与沿反射面圆周调节索的分布密度有密切联系,因此可得到第3个设计变量 $Z$ ,它表示沿圆周各调节索的分配圆周角度,且满足下列条件:

$$k \cdot Z = 360^\circ. \quad (2)$$

其中, $k$ 为天线沿圆周方向的等分数目。同样,可以采用参数 $k$ 作为设计变量。

最后,根据上述3个设计变量,可以确定出在满足天线反射面精度要求的条件下,所需天线调节索的最佳数量及它们在天线结构中的最佳分配布局情况。

### 3 拉索系统原理精度的确定

图3为展开天线拉索系统的布局结构示意图。由图可见,天线的反射面是由从中央圆筒均匀向外辐射的拉索系统形成的。图4为一组曲面拉索,图中清楚地表明了天线曲面形成的原理。主要依靠垂列线(调节索)将上悬索调整到设计曲率所需的位置。调整每一组曲面拉索,即可形成所需的反射面。由此可知,垂列线越多则单组悬索线达到所需的曲率精度越高。从中央圆筒向外辐射的曲面拉索组越多,则形成的反射面精度也就越高。但随着曲面拉索组的增加,需要增加周边桁架等分段,会使天线的重量增加,收缩比减小。

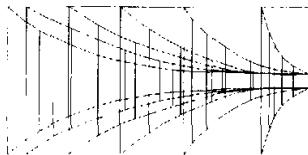


图3 天线拉索系统布局示意图  
Fig.3 Layout of cable net

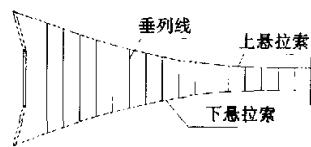


图4 一组天线曲面拉索  
Fig.4 A set of cable system

根据天线反射面设计尺寸(包括反射面直径 $d$ ,反射面高度 $H$ ,中心圆筒半径 $r$ ,反射面分配比例 $e$ 等),利用抛物线方程,可得旋转抛物面的焦距 $f$ 为

$$f = \frac{x^2}{4z} = \frac{d}{8H}, \quad (3)$$

从而得到天线反射面方程为

$$x^2 + y^2 = 4fz. \quad (4)$$

拉索系统中任一组曲面拉索上各节点的坐标为

$$\begin{cases} x_1[i] = i\left(\frac{L_1}{m_1}\right) + r, \\ y_1[i] = 0, \\ z_1[i] = \frac{x_1[i]^2}{4f}, \end{cases} \quad i = 0, 1, 2, \dots, m_1. \quad (5)$$

$$\begin{cases} x_1[j] = (j - m_1) \left( \frac{L_2}{m_2} \right) + L_1 + r, \\ y_1[j] = 0, \\ z_1[j] = \frac{x_1[j]^2}{4f}, \end{cases} \quad j = m_1 + 1, m_1 + 2, \dots, m_1 + m_2. \quad (6)$$

其中,  $L_1$  为反射面中心部分的径向长度,  $L_2$  为反射面外围部分的径向长度,  $m_1$  为反射面中心部分沿径向的等分数,  $m_2$  为反射面外围部分沿径向的等分数.

索网系统中与该拉索相邻拉索上各节点的坐标为

$$\begin{cases} x_2[i] = x_1[i] \cos \left( \frac{360}{n} \right), \\ y_2[i] = \sqrt{4fz_2[i] - x_2[i]^2}, \\ z_2[i] = z_1[i], \end{cases} \quad i = 0, 1, 2, \dots, m_1 + m_2. \quad (7)$$

其中,  $n$  为反射面沿圆周的均分数.

现在已经确定了抛物面上相邻两条拉索上各调节点的坐标, 而每 4 个相邻结点  $A_1(x_1[i], y_1[i], z_1[i])$ ,  $A_2(x_1[i+1], y_1[i+1], z_1[i+1])$ ,  $B_1(x_2[i], y_2[i], z_2[i])$  和  $B_2(x_2[i+1], y_2[i+1], z_2[i+1])$  可构成一个平面. 为了比较全面地反映拉索系统形成的反射面与理想反射面之间的误差, 本文在每个平面中取均匀分布的 9 个点作为计算节点, 以每个节点与理想反射面间轴向误差作为该节点的误差值. 最后, 通过求取各个计算节点与理想反射曲面的轴向误差的均方根值  $D$  (rms) 得到天线的设计精度为

$$D = \sqrt{\sum_{\alpha=1}^{N_c} \Delta l_{\alpha}^2 / N_c}, \quad (8)$$

其中,  $\Delta l$  为计算节点与理想反射曲面的轴向误差,  $N_c$  为索网式天线中的计算节点数.

## 4 优化设计模型的数学描述

通过上述讨论, 可得到优化设计模型如下:

$$\begin{aligned} \text{Find} \quad & n, m_1, m_2; \\ \text{Min} \quad & W = A\rho \sum_{i=1}^N L_i + A'\rho' \sum_{j=1}^M L'_j; \\ \text{S.T.} \quad & D - D_0 \leq 0. \end{aligned} \quad (9)$$

其中,  $n$  为天线沿圆周方向的均分数,  $m_1$  为天线沿径向靠近中心体部分的均分数,  $m_2$  为天线沿径向远离中心体部分的均分数,  $A$ 、 $L_i$ 、 $\rho$  和  $N$  分别为周边桁架中各个单元的截面积、长度值、周边桁架的材料密度及单元数量;  $A'$ 、 $L'_j$ 、 $\rho'$  和  $M$  分别为中间拉索系统中各单元的截面积、长度值、拉索的材料密度及拉索单元数目,  $D$  为天线实际原理精度,  $D_0$  为天线设计允许的原理精度.

## 5 数值试验与结果分析

空间展开天线结构如图 1 所示, 天线反射面通过利用拉索系统构成抛物面, 直径为 17 m, 反射面高为 1.3894 m, 周边构架尺寸如图 5 所示, 周边构架材料为碳纤维, 杆截面全部为圆管, 半径为 0.01 m, 壁厚为 0.001 m, 密度为  $1.8 \times 10^3 \text{ kg/m}^3$ ; 而中间拉索采用芳纶纤维, 截面为圆, 半径为 0.001 m, 密度为  $1.44 \times 10^3 \text{ kg/m}^3$ . 按照设计要求, 天线反射网面的设计精度要求为 0.0025 m, 靠近中心体部分的设计精度要求为 0.002 m, 远离中心体部分的设计精度要求为 0.004 m.

根据前述优化设计思想, 以结构重量作为优化设计目标, 以天线索网设计原理精度作为约束条件(包括整体精度、靠近中心体部分精度、远离中心体部分精度), 根据天线反射网面的各种不同分配比例, 对天线反射网面的布局进行优化计算, 最终优化结果见表 1.

表 1 优化结果数据  
Table 1 The result of layout optimization

比例 $\epsilon$	$n$	$m_1$	$m_2$	精度 / mm			重量 / kg
				精度 1	精度 2	总精度	
1.0(原设计)	48	17	0	2.41	2.41	2.41	58.301724
1.0	44	23	0	2.48	2.48	2.48	56.593453
0.9	47	19	4	1.994	3.989	2.294	59.649287
0.8	46	14	5	1.939	3.996	2.422	57.638365
0.7	44	14	8	1.608	3.944	2.487	56.789153
0.6	42	15	10	1.250	3.996	2.479	55.424148
0.5	42	11	9	1.086	3.992	2.493	54.035879
0.4	40	13	12	0.70	3.926	2.485	53.080822
0.3	38	16	15	0.434	3.956	2.500	51.972663

图 6 为针对不同分配比例所得的天线布局优化结果趋势图, 从图 6 与表 1 中的数据可见, 通过对拉索布局的优化设计, 一方面可以减轻天线的结构重量, 通过对原设计方案的优化, 结构重量从 58.3 kg 下降到 56.59 kg, 从而降低了天线的制造费用和发射成本, 可见对空间展开天线布局进行优化是完全有必要和有效的. 另一方面, 通过对优化结果的比较可以发现, 天线索网精度分配比例对天线结构的重量同样具有比较大的影响. 随着靠近中心体部分(精度高)的缩小, 结构重量会逐步降低.

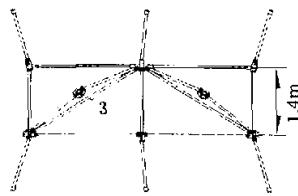


图 5 天线周边桁架结构图  
Fig.5 The peripheral framework of antenna

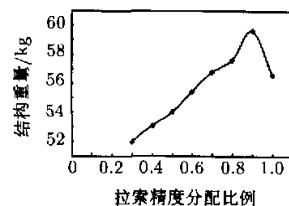


图 6 布局优化结果趋势图  
Fig.6 The graph of layout optimization

## 6 结束语

本文对星载周边桁架式可展开天线的拉索系统进行了布局优化设计, 以天线拉索系统沿圆周方向和径向的分配比例作为设计变量, 以天线结构重量作为目标, 考虑结构拉索系统的精度约束, 最后得到了在不同分配精度分配比例下的最优拉索系统的布局。数值算例证明, 这种优化对于提高天线的性能, 降低结构重量是有效的。

## 参 考 文 献

- [1] Stander N, Coster J E. Structural optimization of guyed trusses. *AIAA J.*, 1995, **33**(12):2393—2397
- [2] Sadek E A. Dynamic optimization of framed structures with variable layout. *Int. J. Num. Meth. Eng.*, 1986, **23**(15):1273—1294
- [3] Li Xiaoquan, Wang Li. Reflective antenna structure's discrete variables optimum design under multiple loading condition. *Chin. J. Astron.*, 2001, **22**(2):56—60. in Chinese (李孝全, 王莉. 反射面型天线结构多工况离散变量优化设计. 宇航学报, 2001, **22**(2):56—60)
- [4] Song Changyong, Shen Shizhao. Shape finding analysis of cable-net structure. *Chin. J. Space Stru.*, 1995, **1**(4):53—60. in Chinese (宋昌永, 沈世钊. 索网结构形状确定分析. 空间结构, 1995, **1**(4):53—60)
- [5] Liu Mingzhi, Na Bai. Shape accuracy adjustment of a flexible mesh antenna reflector. *Chin. J. Astron.*, 2001, **22**(6):72—77. in Chinese (刘明治, 那柏. 网状天线的反射面形状精度调整. 宇航学报, 2001, **22**(6):72—77)

## LAYOUT OPTIMIZATION OF LARGE FLEXIBLE DEPLOYED ANTENNA

LUO Ying DUAN Baoyan

(School of Electromechanical Engineering, Xidian University, Xian 710071)

### Abstract

Based on a new flexible cable net for a deployable antenna, the optimum design of cable system is discussed in the paper. An optimum design model is presented, searching for minimum weight design while the constraints such as reflector precision is concerned. The design parameters are selected as the number of upper cable, lower cable and adjustable cable. Through a numerical example, the model above is tested and verified to be correct and effective.

**Key words** Deployed antenna, Cable net, Layout optimization

## 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>