

周边桁架式展开天线几何布局优化^{*}

罗 鹰 段宝岩

(西安电子科技大学机电工程学院 西安 710071)

摘 要

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^[4], 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1.3m, 长3.8m, 完全展开后形成鼓形结构, 直径可达到12.25m. 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

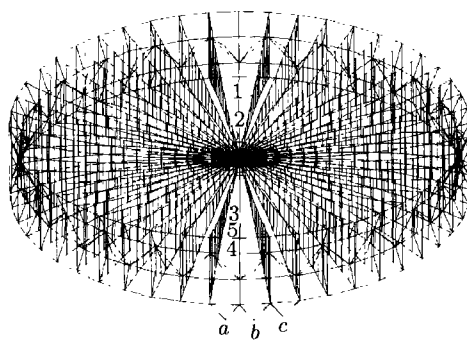


图1 某周边桁架式可展开天线结构图

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^{[1]-[3]}, 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, 在优化设计时可对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.

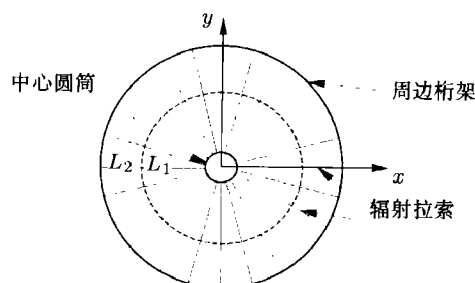


图 2 天线拉索系统俯视图

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.

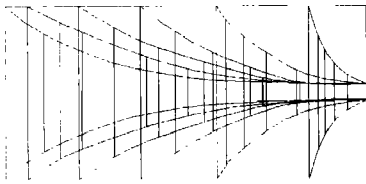


图3 天线拉索系统布局示意图

Fig.3 Layout of cable net

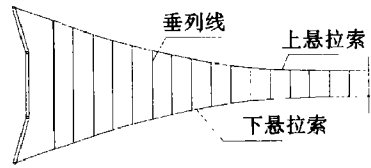


图4 一组天线曲面拉索

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, Δl 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 、 ρ 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 、 ρ' 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 e	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	58.301 724
1.0	44	23	0	2.48	2.48	2.48	56.593 453
0.9	47	19	4	1.994	3.989	2.294	59.649 287
0.8	46	14	5	1.939	3.996	2.422	57.638 365
0.7	44	14	8	1.608	3.944	2.487	56.789 153
0.6	42	15	10	1.250	3.996	2.479	55.424 148
0.5	42	11	9	1.086	3.992	2.493	54.035 879
0.4	40	13	12	0.70	3.926	2.485	53.080 822
0.3	38	16	15	0.434	3.956	2.500	51.972 663

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.

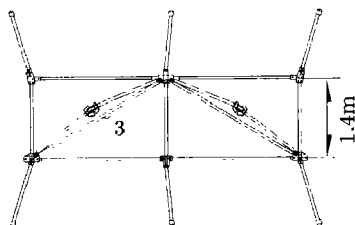


图 5 天线周边桁架结构图

Fig.5 The peripheral framework of antenna

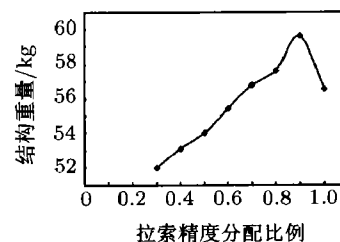


图 6 布局优化结果趋势图

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