

以表面精度和基频为目标的 可展开天线索网结构的优化设计

尤国强 段宝岩 郑 飞
西安电子科技大学,西安,710071

摘要:对太空可展开天线索网结构中表面精度和基频的优化问题进行了研究,建立了索网的有限元分析模型,并用非线性有限元法对其进行了求解。以索网的上下弦索及中间调整索的直径为设计变量,上弦索的表面精度和结构的基频为目标函数,建立了天线单片辐射索网的多目标优化数学模型。采用序列二次规划法对模型进行了优化求解,得到了不同权重值时的多目标优化解集。由优化结果可知:以上弦索网的表面精度为目标函数之一,可使得优化后的索单元截面积有上下非对称的特点,不同位置索单元的截面积也有着特定的分布。

关键词:可展开天线;索网结构;几何非线性;表面精度;序列二次规划法;多目标优化
中图分类号:TH862 **文章编号:**1004—132X(2008)19—2306—04

**Optimization for a Deployable Spaceborne Antenna Cablenet Structure
with Goals of Surface Accuracy and Natural Frequency**
You Guoqiang Duan Baoyan Zheng Fei
Xidian University, Xi'an, 710071

Abstract: The sequential quadratic programming method was used for the cablenet structure of a deployable spaceborne antenna optimization. Nonlinear finite element method was used to solve the FEM analysis model of the cablenet, and the optimization model was built with the diameter of cables as design variables, surface accuracy of the upper—chord cables and natural frequency of the cablenet as objective functions. Sequential quadratic programming method was used, and optimal Pareto set with different weight values were obtained. Because one of the objective function is the surface accuracy of the upper—chord cables, the cross sectional areas of the cables have a non symmetrical distribution, and it is in accord with a characteristic law.

Key words: deployable antenna; cablenet structure; geometric nonlinearity; surface accuracy; sequential quadratic programming; multi—objective optimization

0 引言

索网结构由于其具有质量轻、强度高、收缩比大、成形多样等显著优点而开始被应用于太空可展开天线领域^[1,2]。与地面建筑中的索网结构不同,可展开天线中的索网结构主要用于形成天线的大跨度反射面,对于这一类型的索网结构,要解决的主要问题已不再是强度,而是要减小索单元节点位移引起的天线实际网面与理想抛物面之间的精度误差。另外,天线在太空展开和工作时都会遇到振动,为使天线远离激励(卫星姿态调整或变轨)频率,避免谐振对天线的破坏,保证天线结构的动力性能,还必需尽量提高结构的基频。因此,通过优化计算来确定索网结构参数,尽量减小天线反射面误差,提高天线动力性能是设计中的关键问题。

索网结构是具有几何非线性的柔性结构,需

要在索单元内施加一定的张力使结构具有确定的几何形状和刚度,然后才能对其进行动静力分析。索网结构的主要分析方法有非线性有限元法、力密度法和动力松弛法。非线性有限元法在给定了边界条件和预应力的情况下,通过建立索网结构的非线性有限元平衡方程,求解得到索网平衡态时确定的节点位置、结构刚度阵和模态信息。与其他方法相比,非线性有限元法是基于材料的结构特性并采用有限单元法进行分析计算的,计算结果较为精确,符合可展开天线高精度计算的要求,而且使用此法便于实现截面积优化,还能对结构进行相应的动力学分析。基于以上考虑,本文以非线性有限元法作为结构分析手段,建立了含有索网精度和频率性能的多目标优化模型,并以序列二次规划法求解该非线性优化问题。

1 天线索网结构的非线性有限元分析

图 1 所示的索网式可展开天线的结构是大跨

度的张拉组合结构,天线由反射面索网系统、周边桁架和中央圆筒三部分组成。索网系统是天线中最为关键的部分,当天线处于展开状态时,它具有一定的刚度并形成所需的反射面;当天线处于收拢状态时,索网系统又可以收缩缠绕在中央圆筒上,大大减小了天线占用的空间。单片辐射索由上弦拉索、中间调整索和下弦拉索组成,上弦拉索和下弦拉索是两组曲率相反的抛物线形拉索,它们的两端分别连接在中央圆筒和周边桁架上,中间调整索将上下弦拉索连接在一起,使得辐射索中的所有索单元在预应力的作用下都处于拉应力状态,从而形成整体张拉结构。图 2 为单片辐射索的结构图。

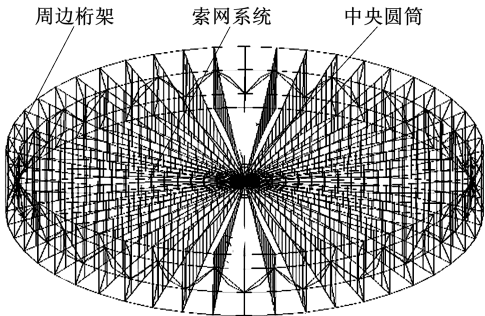


图 1 天线总体结构简图

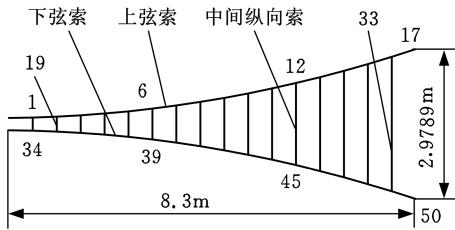


图 2 单片辐射索结构图

索网系统在载荷作用下处于小应变、大位移状态,因此在对结构进行分析计算时需要考虑结构的几何非线性问题^[3]。非线性有限元法就是针对索网的几何非线性,利用位移—应力的非线性关系来建立索网结构的有限元方程并对其求解。

对索网结构首先作如下假设:①索单元使用两节点直线杆单元;②忽略索网结构的材料非线性;③索单元只能承受拉应力,不能承受压应力,并符合虎克定律;④载荷均作用在节点上,并且各节点之间没有相对转动。

几何非线性问题的非线性最终体现在几何方程中,采用能量变分原理建立非线性有限元方程,由增量法可以得到

$$\mathbf{P}^{(n+1)} - \mathbf{Q}^{(n)} = (\mathbf{K}_0 + \mathbf{K}_L + \mathbf{K}_\sigma) \Delta \mathbf{d} \quad (1)$$

其中, $\mathbf{P}^{(n+1)}$ 为进行第 $n+1$ 次迭代计算时的整体节点载荷; $\mathbf{Q}^{(n)}$ 为整体初应力载荷; \mathbf{K}_0 为线性刚度矩阵,与单元位移无关; \mathbf{K}_L 为大位移刚度矩阵,与

单元节点位移有关; \mathbf{K}_σ 为几何刚度矩阵,与已知应力有关; $\Delta \mathbf{d}$ 为位移。

它们的代数方程形式分别如下所示:

$$\mathbf{K}_0 = \frac{EA}{l} \begin{bmatrix} 1 & 0 & -1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ -1 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (2)$$

$$\mathbf{K}_L = \frac{EA}{l} \begin{bmatrix} 0 & \tan\theta & 0 & -\tan\theta \\ \tan\theta & \tan^2\theta & -\tan\theta & -\tan^2\theta \\ 0 & -\tan\theta & 0 & \tan\theta \\ -\tan\theta & -\tan^2\theta & \tan\theta & \tan^2\theta \end{bmatrix} \quad (3)$$

$$\mathbf{K}_\sigma = \frac{\sigma A}{l} \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & -1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -1 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (4)$$

式中, E 为杆单元弹性模量; σ 为杆单元应力; A 和 l 分别为索杆单元的截面积和长度; θ 为杆件变形后的转角;上标 e 表示杆单元。

为了保证能够稳定有效的求解,本文采用载荷增量法与 Newton—Raphson 法相结合来进行迭代分析计算。

2 优化模型的建立

2.1 设计变量

建筑工程中的索网结构优化通常以索单元的预张力作为设计变量,由于本文中的展开天线索网结构形状很不规则,导致其索单元内的拉力分布不均匀,另外,天线在太空环境下工作,这使得对索单元应力状态的调节不能像地面上一样随意进行,故通过调节预应力来改善索网结构工作性能的方法难以实现,因此预先给出合理的索单元截面积,使天线在固有预应力的条件下得到满足性能要求的应力分布状态,是较为合理的设计方法。

综上所述,本文将各索单元的直径作为优化设计变量,并根据其内部拉力分布状况,将索网结构中的上下弦拉索和中间调整索中拉力值相近的弦单元直径归并为 9 类设计变量(图 2):上弦拉索中单元号为 1~6、7~11、12~17 的 3 组单元划为 3 类,3 类索单元的直径分别为 x_1 、 x_2 、 x_3 ;中间调整索中单元号为 18、19~32、33 的 3 组单元划为 3 类,3 类索单元的直径分别为 x_4 、 x_5 、 x_6 ;下弦拉索中单元号为 34~39、40~44、45~50 的 3 组单元划为 3 类,3 类索单元的直径分别为 x_7 、 x_8 、 x_9 。

2.2 目标函数

索网结构中,上弦拉索网拟合成的抛物面构成了天线的反射面,对于反射面天线而言,其工作

性能的高低取决于反射面的表面精度^[4],故本文以上弦拉索网的表面均方根误差(它能够较好地反映网面实际形状与理想抛物面的偏差情况)最小做为优化的目标函数之一。

天线在太空展开和工作时都会遇到振动,尽量提高结构的基频,使其远离激励(卫星姿态调整或变轨)频率,从而避免谐振现象对天线的破坏,保证天线结构的动力性能;故本文以天线的基频作为优化的另外一个目标函数。

2.3 约束条件

由于在太空中给天线提供的驱动力不可能很大,索网结构成形时所承受的载荷也不大,索的强度已不是主要考虑的问题,故本文只以索单元直径的上下限作为优化的约束条件。

2.4 优化模型

综合考虑以上因素,天线索网结构的优化数学模型可以描述为

Find $\mathbf{X} = [x_1 \ x_2 \ \cdots \ x_9]^T$ (6)

min $f_1 = \sqrt{\sum_{i=1}^m \delta_i^2 / m}$ (7)

$f_2 = \frac{1}{\omega(\mathbf{X})}$ (8)

s. t. $x_{i,L} \leq x_i \leq x_{i,U} \quad i = 1, 2, \dots, 9$ (9)

其中, f_1 为上弦拉索网的表面均方根误差值; δ_i 为变形前后上弦拉索网采样节点的坐标偏差值; m 为采样节点总数, $\omega(\mathbf{X})$ 为索网结构的基频; $x_{i,U}$ 和 $x_{i,L}$ 分别为设计变量 x_i 的上下限。

2.5 目标函数的处理

由于表面精度 f_1 和结构基频 f_2 是两个量纲与量级都不相同的目标函数,这可能会大大降低优化计算的效率,因此本文对这两个目标函数进行规一化处理,即令

$$\begin{cases} \bar{f}_1 = f_1 / (f_1 + c_1) \\ \bar{f}_2 = f_2 / (f_2 + c_2) \end{cases}$$
 (10)

其中, $c_1 = 0.00005, c_2 = 1$,它们是由计算得来的经验值,这样的处理使得 \bar{f}_1 与 \bar{f}_2 在设计变量取值范围内能够得到较为接近的值,有利于优化计算。

对于本文的多目标优化问题,这里采用加权系数法^[5]将每个目标函数值乘以相应的权重,而后累加合为一个目标,再使用单目标优化方法对其进行求解,其计算公式为

$$\begin{aligned} f &= w_1 \bar{f}_1 + w_2 \bar{f}_2 \\ w_1 + w_2 &= 1 \quad w_1, w_2 \geq 0 \end{aligned}$$
 (11)

3 算例分析

本文以展开天线中的单片辐射索为研究对象

进行优化分析,图 2 所示,为其有限元模型,其中上下拉弦索分别有 18 个节点、17 个索单元,中间调整调整索有 18 个索单元。索网横向总长度为 8.3m,中间均分为 17 段,纵向总长度为 2.9789m,节点坐标由抛物线方程 $z = 0.019\ 230\ 5x^2 + 0.100\ 05$ 确定,两端的 4 个节点没有 x, y, z 三个方向的位移。索网由芳纶纤维制成,横截面为圆形,弹性模量 $E = 130\text{GPa}$,材料密度 $\rho = 1.44 \times 10^3\text{kg/m}^3$ 。由于太空条件下初级电源不足,不能为索网提供较大的预应力支持,故计算时索单元内的预应力均取 50N。这里以 9 个索单元的直径为优化设计变量,为控制天线体积,设计变量上下限分别取 0.4mm 和 4mm,优化计算时初值均取 2mm。

为了探求不同权重系数对两个优化目标的影响趋势,本文选取 w_1 分别为 0.27、0.25、0.23、0.21、0.19 和 0.17 这 6 个值进行优化计算。采用序列二次规划法求解得到的优化解集曲线如图 3 所示。我们可以根据天线实际工作性能需求选取不同的优化结果作为设计参考值。具体优化迭代过程以 $w_1 = 0.19, w_2 = 0.81$ 时为例进行说明(图 4),计算得到表面精度值为 $58.20\mu\text{m}$,比初始值 $86.18\mu\text{m}$,减少了 32.74%,基频值为 5.50Hz

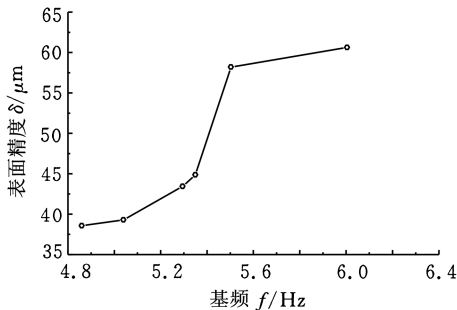


图 3 Pareto 解集

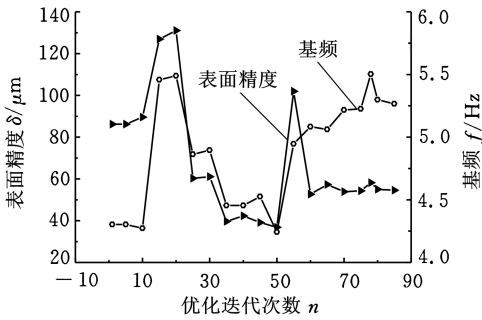


图 4 $w_1 = 0.19$ 时的优化结果图

比初始值 4.30Hz 增大了 27.88%。取得最优解时设计变量的取值情况如表 1 所示,其中索单元的直径分布并不均匀。另外,靠近两端的索段的直径要大一些,越接近索网中间,索的直径就越小。这是由于远离固定端的索段为了具有足够大的基频,必须增大其内部的应力值,所以结构中部的索单元直径要小于两端的索段。在优化迭代过程中

还可以发现:要增大结构的基频,就要相应减小索单元的直径,而这与降低索网表面均方根误差需要增大索单元的直径是相矛盾的。

表 1 $w_1 = 0.19$ 时设计变量优化结果值 mm

x_1	x_2	x_3	x_4	x_5	x_6	x_7	x_8	x_9
1.7	1.3	1.5	1.5	1.8	2.8	1.3	0.7	0.7

4 结论

(1)建立了展开天线索网结构的多目标优化模型,并应用序列二次规划法对其求解。在对目标函数进行规一化处理并将多目标问题用加权系数法化为单目标问题后,通过算例计算,得到了不同权重值时的不同优化结果,反映了不同目标函数倾向程度的差异对优化计算结果的影响。

(2)在一定的预应力前提下通过优化索网中各个索单元的截面积以确保天线在展开时的表面精度和频率特性是较好的办法。

(3)索网结构的不规则导致优化得到的索单元直径并不是均匀分布的,以上弦拉索的表面精度为优化目标之一进行优化计算,得出索网结构具有上下非对称的截面积分布的结果。这样的结果恰恰可以令天线结构内的应力分部更为合理,有助于索网形面的保持。

(4)由优化迭代过程可知,提高表面精度与增大结构基频对于设计变量而言是相矛盾的,所以,可以根据需要从多目标优化的 Pareto 解集中寻求合适的满意解以应用于实际情况。

参考文献:

[1] 刘明治,高桂芳. 空间可展开天线研究进展[J]. 宇航学报,2003,24(1):82-87.

[2] Koryo Miura, Yasuyuki Miyazaki. Concept of the Tension Truss Antenna[J]. AIAA Journal,1990,28(6):1098-1104.

[3] Karoumi R. Some Modeling Aspects in Nonlinear Finite Element Analysis of Cable Supported Bridges [J]. Computers & Structures,2000,71(4):41-50.

[4] 罗鹰,段宝岩,杨东武,等. 大型星载展开天线动力优化设计[J]. 空间科学学报,2004,24(3):203-210.

[5] 白广忱,王荣桥. 机械零件可靠性多目标优化设计的满意解[J]. 中国机械工程,2001,12(8):851-854.

(编辑 张 洋)

(上接第 2286 页)

本文以超声电机驱动的三关节机器人为研究对象,采用了非线性 H_∞ 控制方式,以 L_2 增益作为设计指标,设计了 H_∞ 控制器。实践证明,所设计的非线性 H_∞ 控制器不仅可以保证机器人稳定运行,而且各关节的位置精度分别提高了 55%、78% 和 74%。最后,还对控制器的鲁棒性进行了实验验证,结果表明该控制器有很好的抗干扰能力。

参考文献:

[1] 陈超. 旋转型行波超声电机理论模型的研究[D]. 南京:南京航空航天大学,2005.

[2] Flueckiger M, Bullo M, Perriard Y. Sensorless Speed Control of Traveling Wave Ultrasonic Motor [C]// IEEE Industry Applications Conference. Tampa, Florida:IEEE,2006: 2488-2495.

[3] Senjyu T, Nakamura M, Urasaki N, et al. Mathematical Model of Ultrasonic Motors for Speed Control[C]//Applied Power Electronics Conference and Exposition. New York:IEEE,2006: 290-295.

[4] Juang P A, Gu D W. Speed Control of a New Disc-type Ultrasonic Motor by Using Current Controller[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2006, 21(1):219-224.

[5] Park J H, Yim J. Nonlinear H_∞ Control of Robotic Manipulator[C]//Proceedings of IEEE Conference on Systems, Man and Cybernetics, San Diego, California:IEEE,1999:866-871.

[6] Park J H, Chung W Y. Design of a Robust H_∞ Control for Industrial Manipulators[J]. Journal of Dynamic Systems, Measurement and Control,2000, 122(4):803-812.

[7] Huang C Q, Shi S J. PID Feedback for Mixed H_2/H_∞ Tracking Control of Robotic Manipulators[J]. Journal of Systems Engineering and Electronics, 2004,15(4):579-585.

[8] Yim J G, Yeon J S, Lee J, et al. Robust Control of Flexible Robot Manipulators [C]//SICE - ICASE International Joint Conference, Busan Korea: SICE, 2006:3963-3968.

[9] 申铁龙. H_∞ 控制理论及应用[M]. 北京:清华大学出版社,1996.

[10] 熊有伦. 机器人技术基础[M]. 武汉:华中科技大学出版社,1996.

(编辑 马尧发)

作者简介:尤国强,男,1980 年生。西安电子科技大学机电工程学院博士研究生。研究方向为结构优化设计。发表论文 2 篇。

段宝岩,男,1955 年生。西安电子科技大学机电工程学院教授、博士研究生导师。

郑 飞,男,1967 年生。西安电子科技大学机电工程学院教授。

作者简介:孙志峻,男,1970 年生。南京航空航天大学机电学院副教授、博士。主要研究方向为机电一体化及其控制。

邢仁涛,男,1982 年生。南京航空航天大学机电学院硕士研究生。

黄卫清,男,1964 年生。南京航空航天大学精密驱动研究所教授、博士研究生导师。