

周边桁架式索网天线型面的快速调整方法

杨东武 杜敬利 李团结

西安电子科技大学, 西安, 710071

摘要: 提出了一种周边桁架式索网天线型面的快速调整方法。以最大误差节点及结构基频为判定条件, 首先给出最佳待调整索段的确定方法, 在此基础上, 以最佳待调整索段的调整量为设计变量, 型面误差为目标函数, 索网应力为约束条件, 建立了索网天线型面优化调整的数学模型。数值算例结果表明, 所提出方法具有很好的收敛速度, 调整工作量较小。

关键词: 索网天线; 反射面; 表面误差; 精度; 优化设计

中图分类号: V443.4

文章编号: 1004-132X(2010)01-0035-03

Optimization Method for Shape Adjustment of Perimeter-truss Mesh Antenna Reflectors

Yang Dongwu Du Jingli Li Tuanjie

Xidian University, Xi'an, 710071

Abstract: An optimization method for shape adjustment of perimeter-truss mesh antenna reflectors was put forward. With the assumption that only one cable element to be adjusted in once time, and based on the fundamental frequency of mesh structure and the errors of each adjustable nodes, a scheme for choosing the best element to be adjusted in current procedure was firstly proposed. Then, optimization model for only once shape adjustment procedure was developed, with variation of the element length as design variables, root mean square(RMS) error of the adjustable nodes as objective function and element stresses as constraints. The numerical example shows that the proposed method possesses a rapid convergence rate and needs low adjusting workload.

Key words: mesh antenna; reflector; surface error; accuracy; optimum design

0 引言

由于发射装置的限制, 大型空间天线要求轻质、可展开, 同时为满足电性能要求, 还需要有较高的表面精度。可展开天线一般分为板式、索网式与充气式三类^[1], 其中索网式天线由于具有收缩比大、质量轻等优点而成为各国竞相研究的热点。索网天线结构通常由可展桁架结构、索网结构以及金属反射网组成。索网结构^[2-3]又可分为前索网、后索网以及纵向调节索。

尽管天线在设计阶段满足了表面精度要求, 但后继的制造和安装过程不可避免地会带来误差。为减小或消除这些误差的影响, 尽可能提高天线表面精度, 必须对天线网面进行调整。

在索网结构的型面调整中, 索网节点位置相互影响, 表现为高度的非线性和强耦合关系^[4]。线性调整方法^[5]忽略了绳索的弹性伸长, 只适合于微量调整情况; 非线性有限元分析与遗传算法相结合的调整方法^[6]虽然能够有效地指导索网调整过程, 但优化迭代过程中的计算量比较大, 需要调节的索数较多, 求解时间较长。为提高调整效率, 并尽可能减少调整次数, 假设每次只调整一根索段, 则待调整索段的调整应使索网型面的误差

具有最快的下降速度。本文以理想抛物面为基准, 以最大误差节点及结构基频为判定条件, 给出了最佳待调整索段的确定方法, 并以最佳待调整索段的调整量为设计变量, 型面误差为目标函数, 索网应力为约束函数, 建立了索网型面调整的优化数学模型, 对周边桁架式索网型面进行了优化调整, 取得了良好效果。

1 型面调整方法

1.1 最佳调整索段的确定

索网型面调整的目标通常是通过调节纵向调节索以使上弦拉索节点尽量都落在理想抛物面上, 从而使天线反射面的均方根误差最小, 在满足结构基频大于最低固有频率要求的同时, 应保证索网张力在一定的许可范围之内。

将第 i 根纵向调节索对应的上弦拉索节点称为第 i 个调整节点, 则天线型面节点的均方根误差^[4]为

$$\delta_{\text{rms}} = \sqrt{\frac{1}{m} \sum_{i=1}^m p_i^2} \quad (1)$$

式中, m 为纵向调节索数; p_i 为第 i 个调整节点与理想抛物线之间的轴向偏差。

值得注意的是, 式(1)给出的天线型面节点均方根误差并不是真正意义上的天线反射面误差, 因为索网天线型面由金属丝网张成的若干小

平面拼合而成,即使所有索网节点均位于理想抛物面上,索网天线型面与理想抛物面之间还是存在一定的逼近误差,通常称之为索网天线型面的原理误差。在索网网格大小及布局形式确定的情况下,索网天线反射面的原理误差是确定的^[7-8],无法通过索网调整予以消除或减小,因此,通常将索网型面节点的均方根误差作为索网调整过程中天线反射面误差的评价公式。

为获得最快的调整速度,假设每次只调整一根索段,则应当选取对反射面误差影响最大的节点作为调整节点,将与理想抛物面偏差(绝对值)最大的索网节点对应的纵向调整索作为待调整索段。但是,若最大偏差节点位于理想抛物面上方,为将其调整到理想抛物面上,必然要缩短待调节索的长度,从而使整个索网的张力增大,如果索网张力过大就有可能导致天线桁架结构不易展开;若最大偏差节点位于理想抛物面下方,必然要增长纵向调节索的长度,索网张力减小的过程中,结构基频减小,甚至于发生索网松弛现象,会影响天线结构的工作性能。

综合索网结构张力及结构固有频率的要求,确定如下最佳待调整索段的选取方案:当结构基频低于固有频率要求时,选择位于理想抛物面上方的最大误差节点作为待调整节点,对应的纵向调节索作为最佳待调整索段;否则,选择位于理想抛物面下方的最大误差节点对应的纵向调节索作为最佳待调整索段。

特别地,当结构基频过高,但所有调整节点(几乎)均位于理想抛物面上方,或者,当结构基频过低,但所有调整节点(几乎)均位于理想抛物面下方时,单纯地调节纵向调节索往往不能较好地满足设计要求,需要通过缩放上弦拉索的长度来调整当前结构。结合周边桁架索网结构的实际情况,本文选择上弦拉索中与周边桁架结构相连接的索段作为上弦拉索中的可调节索段。当最佳待调整节点的误差绝对值较小但型面节点的均方根误差仍不能满足设计要求(即所有索网节点几乎均位于理想抛物面的上方或下方)时,将上弦拉索作为最佳待调整索段。

1.2 索段调整量的确定

当最佳待调整索段确定后,索网型面的优化调整问题变为如何确定待调整索段的调整量问题。考虑到最佳待调整索段的选择在一定程度上考虑了索网基频及索网张力的要求,此处仅以索网应力作为约束条件,待调节索的原长改变量作为设计变量,建立优化模型如下:

$$\left. \begin{aligned} & \text{find } x_j \\ & \min \delta_{\text{rms}} = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^m [p_i(x_j)]^2} \\ & \text{s. t. } 0 < \sigma_e(x_j) < [\sigma]_a \quad e = 1, 2, \dots, n \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

式中, x_j 为索段原长的改变量(调整量),下标 j 表示最佳待调整索的索段编号; $p_i(x_j)$ 为第 i 个调整节点与理想抛物线沿轴向的偏差; $\sigma_e(x_j)$ 、 $[\sigma]_a$ 分别为第 e 个索单元的实际应力和许用应力。

$\sigma_e(x_j) > 0$ 表示索单元 e 不能松弛; $\sigma_e(x_j) < [\sigma]_a$ 表示索单元 e 的应力不能超过绳索材料的应力极限且索单元 e 的张力不能超过其许用张力。

借助于有限元分析软件,对于给定设计变量值,索网型面节点位置的确定相当于索网结构的一次找形过程,索段的应力约束条件可作为罚函数处理,因此,优化模型(式(2))的求解可作为一个无约束最优化问题处理。为提高模型求解效率,通常可以将线性调整法^[5]给出的调整量作为优化迭代过程的初始点。

1.3 调整过程的终止条件

通过分析以上索网最佳调整索段及其调整量的确定过程不难发现,索网型面的调整过程中,始终以索网型面节点的均方根误差作为目标函数,每次调整都将使型面节点的均方根误差值减小,但并不保证在每次的调整过程中,索网结构的固有频率能够满足结构设计要求。

若第 i 次调整后天线结构的固有频率 ω 偏离设计要求,则此后的调整过程将在尽可能减小索网型面误差的同时,使结构固有频率逼近于设计要求。随着索网型面误差的减小,索网型面节点的最大误差值减小,索网调整过程中天线结构固有频率的变化幅度也在减小,但仍将表现为在设计频率附近的振荡。因此,可将以下条件作为索网型面调整过程的终止条件:

$$\omega \geq \omega_a \text{ 且 } \delta_{\text{rms}} < \delta_a \quad (3)$$

式中, ω_a 为索网结构的最低固有频率要求; δ_a 为索网型面节点均方根误差的最大容许值。

2 算例分析

以文献[4]中周边桁架式索网天线的单片辐射单元为例进行分析。天线口径为17m,中心圆筒直径为1.02m,反射面焦距为13m。要求通过调整纵向调节索张力,使得上弦索节点尽可能落在理想抛物面(线)上,以使天线反射面的均方根误差最小,最低固有频率大于0.7Hz。绳索为芳纶材料,索半径 $r=1\text{mm}$,弹性模量 $E=130\text{GPa}$,材料的密度 $\rho=1.44 \times 10^3\text{kg/m}^3$ 。

图1所示为单片辐射单元的有限元模型。节

点总数为 36 个,左端两个节点为中央圆筒上的节点,右端两个节点为周边桁架结构上的节点,各端点均处于理想位置且作为约束节点。节点 2~17 为上弦拉索上的调节节点,依次与纵向调节索单元 35~50 对应;假设上弦拉索中单元 17(对应节点为 17 和 18)的长度可调。

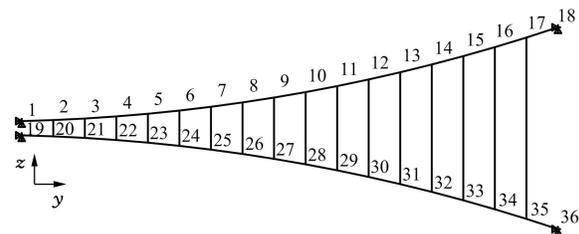


图 1 单片辐射单元有限元模型

初始模型中,单片辐射单元处于平衡状态。相对于理想抛物面(线),索网型面节点的均方根误差为 2.41mm,各索段均处于拉伸状态,结构基频为 0.70Hz。以本文提出的调整方法对以上模型进行型面调整,以型面节点均方根误差不大于 0.60mm 且结构基频不小于 0.70Hz 为型面优化的终止条件,得到的索网平衡态模型中,索网型面节点的均方根误差为 0.57mm,各索段均处于拉伸状态,结构基频为 0.81Hz。图 2 与图 3 所示分别为索网型面调整过程中型面节点均方根误差及结构基频的变化情况。

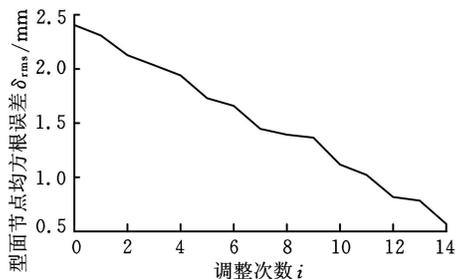


图 2 型面误差随调整次数的变化情况

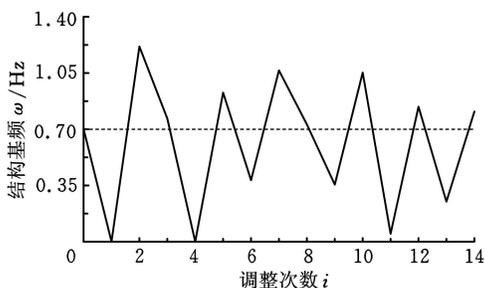


图 3 结构基频随调整次数的变化情况

图 2 中,索网的型面误差随着调整次数的增加迅速减小,通过仅仅 14 次(根索)的调整,型面节点的均方根误差值下降了 1.84mm,达到了设计要求。

图 3 中,索网结构的基频随着调整次数的变化时而高、时而低(甚至接近于零值),但总的趋势仍然是向设计要求(0.70Hz)逐渐逼近。这一现

象与我们的预期结果一致。

另外,相对于文献[4]中的有限元与遗传算法相结合的索网调整方法,由于单次索网型面调整的优化模型中设计变量个数从 16 个变为 1 个,使优化计算过程中调用有限元分析的次数(计算工作量)大大减少,所需要的调节次数(以索次计,称为调整工作量)也大大减少,最终获得的索网型面精度反而要好,因此本文方法更适用于工程应用。

3 结论

(1) 选择最大误差节点对应的纵向调节索作为最佳待调整索段的调整方法是可行的,且具有较好的调整效率。

(2) 在单次的型面调整过程中,暂不考虑索网结构的基频要求,仅通过全局最佳待调整索段的合理选择能够保证索网结构的基频及张力最终满足设计要求。

(3) 文中所提方法收敛速度快,计算量及调整工作量小,适合于工程应用。

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] Thomson M W. The AstroMesh Deployable Reflector [C]//Antennas and Propagation Society, IEEE International Symposium, Orlando, 1999: 1516-1519.
- [3] Tibert G. Deployment Tensegrity Structure for Space Applications[D]. Stockholm: Royal Institute of Technology Department of Mechanics, 2002.
- [4] 狄杰建,段宝岩,仇原鹰,等.周边式桁架可展开天线的形面调整[J].宇航学报,2004,25(5):583-586.
- [5] Koryo Miura, Yasuyuki Miyazaki. Concept of the Tension Antenna[J]. AIAA Journal, 1990, 28(6): 1098-1104.
- [6] 狄杰建,仇原鹰,段宝岩,等.周边式桁架可展开天线基于地面的网面调整[J].应用力学学报,2006,23(2):289-292.
- [7] Agrawal P K, Anderson M S, Card M F. Preliminary Design of Large Reflectors with Flat Facets[J]. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 1981, 29(4): 56-63.
- [8] 罗鹰,段宝岩.周边桁架式展开天线几何布局优化[J].空间科学学报,2004,24(2):132-137.

(编辑 郭伟)

作者简介:杨东武,男,1978年生。西安电子科技大学机电工程学院讲师、博士研究生。主要研究方向为索网天线结构设计、多柔体系统动力学。发表论文 10 余篇。杜敬利,男,1977年生。西安电子科技大学机电工程学院副教授。李团结,男,1972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。