

索网式天线结构预拉力优化的新方法

杨东武，仇原鹰，段宝岩

(西安电子科技大学 机电工程学院, 陕西 西安 710071)

摘要：建立了某天线索网结构的计算模型, 提出了其预拉力优化配置的一种新方法。该方法结合索网结构的对称特性以及在水平投影面内网面内部网格均为正三角形的结构特点, 从前索网面在水平面内的力平衡方程出发, 以网面内部索段的最大拉力比最小为设计目标, 将索网结构预拉力优化配置问题转化为受不等式约束的两变量优化问题, 求得了前索网面中各索段在投影面内的预拉力分量; 以此为基础, 得到了索网结构中各索段的预拉力值。以预拉力优化结果为输入条件, 进行了索网结构的有限元仿真分析, 结果表明, 索网结构的网面设计精度达到了纳米量级, 网面内部索段的最大拉力比为 1.40, 验证了该方法的正确性及有效性。

关键词：天线；索网结构；预拉力；设计精度

中图分类号: V443.4 文献标识码: A 文章编号: 1001-2400(2008)02-0319-05

Optimal design of cable pre-tensions of the tension truss antenna

YANG Dong-wu, QIU Yuan-ying, DUAN Bao-yan

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

Abstract: With the help of a mathematical model of some tension truss antenna, an approach to the design of a prestressed tension truss antenna, not in consideration of the elasticity of the ring truss, is presented. The approach combines two steps in getting a set of optimum pre-tensions. Based on force equations of the front net projected in a plane perpendicular to the axis of the parabolic reflector, and the characteristic of the cable net structure, an optimization model, having only two design variables and with the maximum pre-tension ratio (MTR) of cables internal in the front cable net as its objective function, is deduced. And then, based on the optimization result, a set of pre-tensions of the cable net structure is calculated. Finally, a finite element model of the cable net structure, with the designed pre-tensions as initial conditions, is analyzed. The result shows that the designed model is nearly the same as the ideal model expected and that the MTR of cables internal in the front cable net is considerably small. This approach has proved to be correct and effective.

Key Words: antenna; cable net structure; pre-tension; design precision

环形桁架展开天线是近年来备受各国宇航界关注的一种空间展开天线形式, 其组成部分如图 1 所示, 其原理为^[1~3]: 当环形桁架在驱动装置的作用下展开到位后, 前索网、后索网以及纵向拉索(拉力索)在结构内力的作用下达到平衡位置, 形成所需的天线抛物面型面。金属反射网附着于前索网背部完成电波反射任务。这种天线形式的优点在于随着天线口径的增大, 天线重量不会成比例地增加, 因而是目前大型卫星天线的一种理想形式。

由环形桁架展开天线的基本原理可知, 该天线索网结构(由前索网、后索网及纵向拉索组成)的网面精度误差主要是指前索网面最终形成的天线反射面与理想反射面之间的误差。在设计阶段, 网面精度误差主要包

收稿日期: 2007-04-23

基金项目: 国家部委预研资助(51321040102)

作者简介: 杨东武(1978-), 男, 西安电子科技大学博士研究生, E-mail: ydw_1978@126.com.

括两部分内容:其一为以索网网格构成的反射面逼近理想抛物面反射面时所引入的原理误差.该误差取决于索网的布置形式(辐射状网格、三向网格或准测地线网格等)及网格的大小;其二为索网结构设计中所得到的前索网面各节点的位置与理想位置之间的误差,称为网面设计误差.由于索网结构设计是由“形”找“力”的过程,因此该误差由索网结构的初始预拉力不平衡引起.

有关天线反射面索网的布置形式以及网格大小优化的研究可参见文献[4],笔者不予讨论.此处仅讨论在索网结构的布置形式和网格大小确定的情况下,各索段预拉力的优化配置问题.因此,下文中所提及的网面精度皆指前索网面的设计精度,而对索网面的原理精度不再论及.至此,对索网结构的设计分析可以理解为寻求索网结构的一组预拉力,使得整个索网在边界条件约束(周边桁架约束)下处于平衡状态,并且该平衡状态应使前索网面形成设计所要求的抛物面型面.同时,前、后索网面中索段的预拉力应尽量均匀,即索段的最大拉力与最小拉力之比应尽可能小,以下简称为网面索段的最大拉力比最小.

对于该问题的求解,国内外宇航界学者一般采用非线性有限元与其他优化算法相结合的方法进行迭代求解^[5,6],求解速度较慢且精度不高(文献[6]中,经过300次优化迭代得到的网面精度为3.1 mm).文献[7]从索网结构的平衡矩阵出发,采用奇异值分解,并结合线性优化理论给出了一种新的优化途径,得到了相对较高的网面精度(10^{-9} m),但是其计算过程较为复杂,编程难度较大.而笔者所提出的方法思路简单,易于编程实现,能够得到具有较高网面设计精度的一组预拉力配置方案,且该组预拉力中网面内部索段的最大拉力比比较小.

1 理论推导

为叙述方便,以某环形桁架展开天线的三向网格索网结构为例进行说明.该天线口径 $D=10.0$ m,抛物面焦距 $F=6$ m,前、后索网对称,索网结构的计算模型如图2所示.其中外围节点均被周边环形桁架约束,且不考虑环形桁架结构在索力作用下的变形.在水平投影面(定义为抛物面轴线的垂面)内,前、后索网的内部网格均为正三角形,外围约束节点沿圆周均匀分布,且相邻约束节点之间的周边非约束节点位于某抛物线上.

该索网结构的预拉力优化配置问题可描述为:对于设计在理想抛物面上的索网结构模型(所有索网节点均位于设计要求的抛物面上),寻求一组预拉力,使得索网结构在原位置上达到平衡(即索网节点的最大位移量在预定的网面设计精度范围内),并尽可能使网面索段最大拉力比最小.

下面讨论该索网结构预拉力的优化配置过程.

第1步,取前网面为研究对象,优化配置网面中各索段在水平投影面内的预拉力分量.

由于只考虑索网拉力在投影面内的分量,纵向拉索的预拉力在该平面内的分量为零,无须计及,问题自然转化为二维平面内的索网预拉力优化配置问题.

考虑在投影面内前索网面的对称特性(参见图3),取该索网结构中的一个基本部分,并对其各索段进行编号,如图4所示.为叙述方便起见,将各索段在该投影面内预拉力分量的大小简称为索力,记为 F_j (j 为索段编号).依据索网结构的对称性,不难给出索网结构中其他索段的索力.此处将具有相同索力的索段以相同的索段编号表示,得到如图3所示的索网结构预拉力分布图.

依据力平衡特性,并结合索网结构的对称性,为求得该索网结构的一组平衡力,只需对图3中标出的关键节点(以黑点标出)分别列写沿x轴及y轴方向的力平衡方程,并求解由这些方程组成的方程组.满足该方程组的解,必然可以作为该投影面内的索网结构的一组平衡预拉力.

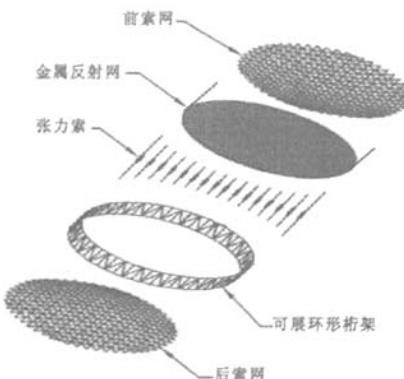


图1 环形桁架展开天线示意图

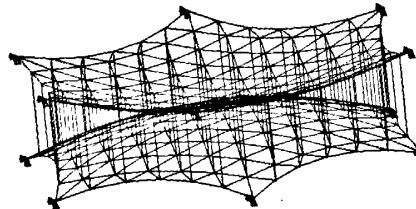


图2 索网结构计算模型

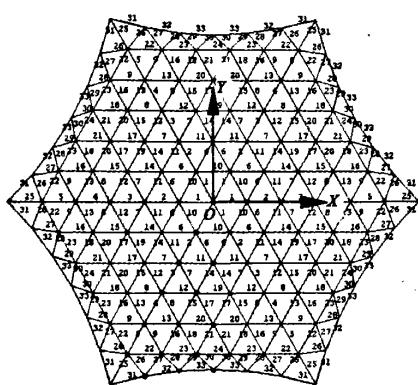


图3 前索网面索力分布图

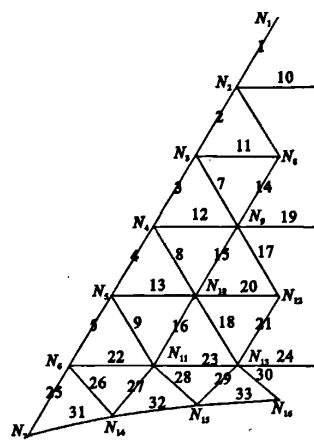


图4 前索网面的基本部分投影图

关键节点的力平衡方程(组)如下:

$$x \text{ 轴方向} \quad \sum_{k=1}^m F_k \cos \theta_k = 0, \quad i = 2, 3, \dots, 6, 8, 9, \dots, 16 \quad , \quad (1)$$

$$y \text{ 轴方向} \quad \sum_{k=1}^m F_{ik} \sin \theta_{ik} = 0, \quad i = 2, 3, \dots, 6, 8, 9, \dots, 16 \quad , \quad (2)$$

其中 m 表示与节点 i 相连的索段总数; F_{ik}, θ_{ik} 分别表示与节点 i 相连的第 k 索段的索力以及该索段(索段方向矢量的起点定义为节点 i)与 x 轴正向的夹角($0 \leq \theta_{ik} < 2\pi$).

索网结构预拉力优化配置要求网面中索段的最大拉力比最小。通过计算得知,对于该类抛物面天线结构,当水平投影面内网面索力最大拉力比最小时,网面中索段的最大拉力比也趋于最小。同时,注意到在水平投影面内该索网结构内部网格均为正三角形,当网面内部各索段(即不包含外围三角形的各边所对应的索段)索力相等时,对应的力平衡方程均能够成立。设水平投影面内网面内部各索段索力相等且等于常量 F_H ,即

$$F_i = F_H = a_0 F_H \quad , \quad i = 1, 2, \dots, 21 \quad , \quad (3)$$

而将其他各索段的索力也表示为 $F_{G1+i} = a_i F_H$, $i = 1, 2, \dots, 12$, (4)

其中 $a_0 = 1.0$. 将式(3)和(4)代入由式(1)和(2)所组成的方程组中, 消去方程组中的相关方程, 得到一个由 12 个未知变量 a_i ($i = 1, 2, \dots, 12$)、10 个独立方程所组成的方程组. 由于未知变量的个数大于独立方程个数, 因此该方程组有无穷多组解. 为求得其中的一组最优解, 不妨以 a_1, a_2 为独立变量, 通过求解该方程组, 将其他未知量均表示为 a_1 和 a_2 的函数, 即

$$a_i = f_i(a_1, a_2) \quad , \quad i = 3, 4, \dots, 12 \quad , \quad (5)$$

则水平投影面内网面索力的优化配置问题转化为以下优化模型：

$$\begin{array}{ll} \text{Find.} & a_1, a_2 \\ \text{Min.} & R = \max(a_i)/\min(a_j) \quad , \quad i = 0, 1, 2, \dots, 9, j = 0, 1, 2, \dots, 9 \quad , \\ \text{s. t.} & b > a_i > 1/b \quad , \quad b > 0, i = 1, 2 \quad , \\ & a_i = f_i(a_1, a_2) > 0 \quad , \quad i = 3, 4, \dots, 9 \quad , \end{array} \quad (6)$$

其中目标函数 R 为前索网面中内部索段(即不包含索段 31, 32 和 33)的最大拉力比; b 为满足条件 $a_i > 0$ ($i = 1, 2, \dots, 12$) (各索段均只承受拉力而不承受压力) 的任意一组 (a_1, a_2) 所对应的目标函数 R 的值。由 a_i 的物理意义可知, 当 $a_i > 0$ ($i = 1, 2, \dots, 9$) 时, $a_j > 0$ ($j = 10, 11, 12$)。

此例中,取 $a_1 = a_2 = 1.0$ 时,满足条件 $a_i > 0 (i = 1, 2, \dots, 12)$,求得 $b = R = 1.422$. 该优化模型较为简单,可用直接搜索法求得其数值解. 相应地,得到了投影面内前索网面的一组平衡力.

第2步,以投影面内的平衡力为基础,通过计算给出各索段的总拉力值。

索网结构前索网面中各索段的总拉力值计算公式为

$$T_j = F_j / \cos \beta_j, \quad j = 1, 2, \dots, e, \quad (7)$$

其中 T_j 表示网面中索段 j 的总拉力, β_j 表示索段 j 与水平投影面所夹的锐角 ($0 \leq \beta_j < \pi/2$), e 表示前面讨论的索网的基本部分中的索段总数, 此例中 $e = 33$.

由于前、后索网面的结构对称, 令后索网面中各索段的预拉力等于前索网面中对应索段的预拉力, 则后索网面中的索段预拉力必然在水平投影面内平衡.

为保证索网结构在纵向达到力平衡, 各纵向拉索的预拉力值的计算公式为

$$T_i = \sum_{k=1}^m F_k \tan \beta_{ik}, \quad (8)$$

其中 m 为前索网面中与节点 i 相连的索段总数; T_i 表示纵向拉索中与非约束节点 i 相连的索段的总拉力; F_k, β_{ik} 分别表示前索网面中与节点 i 相连的第 k 索段在水平投影面内的索力以及该索段与水平投影面的夹角 ($-\pi/2 < \beta_{ik} < \pi/2$. 当索段与投影面法线的夹角小于 $\pi/2$ 时, β_{ik} 取正值; 当索段与投影面法线的夹角大于 $\pi/2$ 时, β_{ik} 取负值).

2 算例分析

用 Mathematica 及 C 语言编制了相应的公式推导(方程组求解)及预拉力优化程序, 对前面讨论的索网结构进行了预拉力优化设计. 该索网结构中, 前、后索网面顶点之间的距离为 0.3 m, 图 3 中网面的周边节点 ($N_7, N_{14}, N_{15}, N_{16}$) 所在的抛物线方程为

$$y = -(3^{1/2} x^2 / 30) - 55 \times 3^{1/2} / 24. \quad (9)$$

三向网格索网结构预拉力优化配置结果如表 1~表 3 所示.

表 1 优化模型(6)的数值结果

变量	数值解	变量	数值解	变量	数值解
a_1	1.001701	a_5	0.956295	a_9	1.263525
a_2	0.971052	a_6	1.232010	a_{10}	18.004430
a_3	0.956295	a_7	1.110128	a_{11}	17.512500
a_4	1.305057	a_8	1.305036	a_{12}	17.212320

表 2 纵向拉索的预拉力分布

对应节点	T/F_H	对应节点	T/F_H
$N_1 \sim N_6$	0.2083	N_{13}	0.1968
$N_7 \sim N_{10}$	0.2083	N_{14}	1.3182
N_{11}	0.2028	N_{15}	1.2709
N_{12}	0.1989	N_{16}	1.2547

表 3 网面索段的预拉力分布

索段编号	T/F_H								
1	1.0006	7	1.0054	13	1.0054	19	1.0000	25	1.3970
2	1.0054	8	1.0096	14	1.0096	20	1.0006	26	0.9676
3	1.0150	9	1.0150	15	1.0215	21	1.0291	27	1.2965
4	1.0291	10	1.0000	16	1.0379	22	1.0113	28	1.1238
5	1.0477	11	1.0006	17	1.0150	23	0.9734	29	1.3476
6	1.0024	12	1.0024	18	1.0215	24	0.9563	30	1.2870

表 2 中的节点编号如图 4 所示; 优化模型(6)最终得到的目标函数值 $R = 1.36$; 前索网面中索段(不包括外围索段, 如索段 31, 32, 33)的最大拉力比为 1.40, 纵向拉索(不包括外围索段, 如与节点 N_{14}, N_{15}, N_{16} 相连接的索段)中的最大拉力比为 1.06. 网面索段的最大拉力比较小, 满足设计要求.

为验证以上预拉力优化结果的正确性, 分别取 $F_H = (20, 40, 100, 500)$, F_H 的单位为牛顿, 求得相应的一组索网预拉力(暂不考虑索网结构的强度约束), 并将所得的预拉力作为初始力(在有限元分析软件 Ansys 中需要转化为初始应变值 ϵ) 导入环形桁架展开天线索网结构的有限元模型中(周边节点全约束, 不考虑环形桁架的弹性变形), 进行非线性有限元分析. 通过 Ansys 分析, 得到的前索网面中节点的最大位移量如表 4 所示.

由表 4 可以看出, 随着 F_H 的增大, 节点的最大位移量也在增大, 但节点的最大位移量总保持在较小的数量级上. 可以认为有限元模型中索网节点由于各索段预拉力不平衡而引起的节点位移, 来自于计算各索段预拉力过程中的数值误差以及有限元建模过程中各输入参数的截取误差. 也就是说, 通过该方法得到的预拉

力是一组平衡预拉力,它能够保证索网结构设计具有足够高的网面设计精度。

表4 节点最大位移量与 F_H 的关系

F_H/N	20	40	100	500
节点最大位移量/m	0.93648×10^{-14}	0.19721×10^{-13}	0.44949×10^{-13}	0.21384×10^{-12}

值得说明的是,在该例中,如果用文献[6]中的方法进行优化求解,优化变量的个数至少为 $33+16=49$ 个,若用文献[5]中的方法时优化变量的个数至少为16个,而用笔者提出的方法只需要2个变量作为优化变量,问题的规模大大减小。另外,由于优化变量个数较少,此算例中的优化过程所需的CPU时间不到2 s(处理器为奔腾1.73 GHz),说明该方法具有较高的效率。

3 结束语

结合索网式天线结构的特点,将其索网结构的预拉力优化配置问题分为两步进行了求解。算例分析结果表明,笔者所提出的方法能够有效地提供一组由参数 F_H 所确定的、具有较高设计精度的平衡预拉力。

需要声明的是,在该方法的讨论过程中没有计及周边环形桁架的弹性变形所导致的索网结构边界条件(即约束节点的位置)的变化。在以后的研究中,可以通过一定的优化策略,给出相应的环形桁架设计方案,使得环形桁架的外接节点(与索网结构相连接的节点)在给定预拉力作用下,能够精确地变形到设计要求的位置,从而实现周边桁架设计与索网结构设计的无缝连接。

参考文献:

- [1] Tibert G. Deployable Tensegrity Structures for Space Applications [D]. Stockholm: Royal Institute of Technology Department of Mechanics, 2002.
- [2] Koryo M, Yasuyuki M. Concept of the Tension Truss Antenna [J]. AIAA Journal, 1990, 28(6): 1098-1104.
- [3] 陈建军, 张建国, 段宝岩, 等. 大型星载天线展开机构中同步齿轮系防卡滞研究 [J]. 西安电子科技大学学报, 2005, 32(3): 329-334.
Cheng Jianjun, Zhang Jianguo, Duan Baoyan, et al. Analysis of the Seizure-preventing Reliability of Synchronous Gears in the Deployment Mechanism of a Large Satellite Antenna[J]. Journal of Xidian University, 2005, 32(3): 329-334.
- [4] 罗鹰. 大型星载可展开天线的动力优化设计与工程结构的系统优化设计 [D]. 西安: 西安电子科技大学, 2004.
Luo Ying. Study on Dynamic Optimization of Large Deployed Antenna and Structural Systematic Optimization[D]. Xi'an: Xidian University, 2004.
- [5] Wang P H, Tabarrok T C B, Qin I. Nonlinear Analysis of Tension Structures [J]. Computers and Structures, 1992, 45(5): 973-984.
- [6] 狄杰建, 段宝岩, 罗鹰, 等. 大型网状可展开天线预张力的优化 [J]. 华南理工大学学报, 2004, 32(6): 23-26.
Di Jiejian, Duan Baoyan, Luo Ying, et al. Preloading Optimization of Large Net-shape Deployable Antennas[J]. Journal of South China University of Technology, 2004, 32(6): 23-26.
- [7] 李刚, 关富玲. 环形桁架展开天线索网的预拉力优化技术及工程应用 [J]. 固体力学学报, 2006, 27(S1): 174-179.
Li Gang, Guan Fuling. Optimization of Pretension in Net of Astromesh Deployable Reflector and Engineering Application [J]. ACTA Mechanica Solid Sinica, 2006, 27(S1): 174-179.

(编辑:郭华)

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)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)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)，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>