文章编号:1000-4939(2008)04-0617-05

预应力索网天线结构优化设计

杨东武 仇原鹰 段宝岩

(西安电子科技大学 710071 西安)

摘要: 索网预拉力设计是索网天线结构设计的 一 个重要内容。针对三向网格旋转抛物面索网 天线 结构, 首先在不计桁架结构受力变形的条件下, 从索网 节点的力平衡方程出发, 以索网 结构的结构 特征为依据, 以网面索段最大拉力比最小为设计目标, 给出了索网 结构预拉力优化设计的有效方 法; 其次, 考虑到在索网结构的拉力作用下, 桁架结构的微小变形将导致网面索 段的拉力均匀性变 差, 通过调节索网挂接节点的位置, 对桁架结构的受力变形进行了有效补偿, 改进了预应力索网 天 线结构的整体设计方案。算例分析结果表明, 天线结构网面索 段的实际设计最大拉力比为 1. 30, 验证了方法的正确性及有效性。

关键词: 环形桁架展开天线; 索网; 预拉力 中图分类号: V443.4 文献标识码: A

1 引 言

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:当环形桁架在驱动装置的作用下展开 到位后,前、后索网以及纵向拉索在结构内力的作用 下达到平衡位置,形成天线所需的抛物面型面^[+2]。 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其较高的收缩比及结构性 能,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、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[3],本文中不予讨论。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设计问题,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,对索网结构的预拉力设计可以理解为寻 求索网结构的一组预拉力,使得整个索网在边界条

^{*} 来稿日期: 2007-04-28 修回日期: 2008-05-22

第一作者简介:杨东武,男,1978年生,西安电子科技大学机电工程学院,博士生,研究方向——索网天线结构设计,多柔体系统动力学。

[©] E-mail: ydw 1978@ 126. com 1994-2012 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

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^[45],求解速度较慢且精度不高(文献[5] 中,经过 300 次优化迭代得到的网面精度为 3 1mm)。文献[6]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,但是其计算过程较为复杂,编程难度较 大,而且没有考虑环形桁架结构的受力变形。本文 中所提出的方法思路简单,易于编程实现,不仅考虑 了桁架结构的受力变形,且优化设计结果比文献[6] 中的结果要好。

2 理论推导

以三向网格索网天线结构为例进行说明。天线 口径 *D* = 10m, 抛物面焦距 *f* = 6m, 前、后索网对 称。索网结构与周边环形桁架之间通过挂接铰链连 接。桁架结构的一侧有四个节点完全约束。绳索材料 为芳纶纤维, 桁架为碳纤维管材。

天线结构的计算模型如图 2 所示,其中桁架结 构的计算模型如图 3 所示。桁架结构及挂接铰链均 简化为梁单元进行处理,铰链质量以集中质量进行 校正。





2.1 索网结构预拉力设计方法

在水平投影面(定义为抛物面轴线的垂面)内, 三向网格索网结构前、后索网的内部网格均为正三 角形,索网挂接节点沿圆周均匀分布⁽⁶⁾。

在不计环形桁架结构受力变形的情况下,索网 结构中的所有挂接节点(边界节点)均可看作是固 定节点。

索网结构的预拉力优化问题可描述为: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 大位移量在预定的精度范围内),并尽可能使网面索 段的最大拉力比最小。

为便于设计分析,将索网预拉力优化求解过程 分为两步:第一步,优化设计水平投影面内前索网面 索段的预拉力分量;第二步,计算求解索网结构中各 索段的总拉力。

在第一步中,由于只考虑索网预拉力在投影面 内的分量,而且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索网 预拉力的优化设计问题。

考虑在投影面内前索网面的对称特性, 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 内拉力分量的大小简称为索力, 记为 *F_i*(*j* 为索段编 号, *F_i* 为标量)。

依据该索网结构的对称性,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,得到如下图 5 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,需对图 5 中标出的 各关键节点(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前 索网面的一组平衡预拉力。

关键节点 i (i = 2, 3, 4, 5, 7, 8, 9, 10, 11, 12) 的 力平衡方程如下

x 轴方向:
$$\sum_{k}^{\circ} F_{ik} \cos \theta_{ik} = 0$$
 (1)

轴方向:
$$\sum_{k}^{6} F_{ik} \sin \theta_{ik} = 0$$
 (2)

的方法,我们的推动面上)。寻求一组预拉力,使ublishing 式中。下标本表示与节点,相连的第些索段:Fit,他

y



通过整理以上各关 键节点的力平衡方程。得 到独立的力平衡方程个 数为14个,而未知变量个 数为28个. 变量个数远大,,, 干方程个数.该方程组有 无穷多组解。



考虑索网结构的预 前索网面的基本部分投影图 拉力优化设计中要求网



图 5 前索网面索力分布图 面索段的最大拉力比最小。通过计算得知、索网面中 各索段的总拉力与水平分量之比的最大值 r 为

$$r = \sqrt{1 + \left(\frac{D}{4f}\right)^2}$$
(3)

式中:D为天线口径;f 为抛物面焦距。对于一般索 网天线而言, r 通常都接近于 1.0, 此例中 r = 1.083。因此,当索网面中各索段拉力在水平投影面 内分量(即索力)的最大拉力比最小时,索网面中索 段的最大拉力比也趋于最小,而且索段的最大拉力 比与索力的最大拉力比之间的比值接近于 r。

不妨将网面索段最大拉力比最小的要求以网面 索段索力最大拉力比最小近似替代。

假设水平投影面内网面内部各索段的索力相 等,且等于常量 F_H ,即

$$F_i = F_H, (i = 1, 2, ..., 21)$$
 (4)
网部索段索力的最大拉力比已经最小 而且

除 N 10 和 N 12 两节点而外,其他关键节点在投影面 内均已处于平衡状态。

下面只须对索力 $F_i(i = 22, 23, ..., 28)$ 共 7 个 变量进行设计,相关方程为N10和N12两个节点所 对应的力平衡方程

$$F_{9} - F_{16} + 2F_{22} - 2F_{23} + 2F_{25}\cos\theta_{25} - 2F_{26}\cos\theta_{26} = 0 \quad (5)$$

$$\sqrt{3}F_9 + \sqrt{3}F_{16} - 2F_{25}\sin\theta_{25} - 2F_{26}\sin\theta_{26} = 0 \quad (6)$$

$$F_{18} - F_{21} + 2F_{23} - 2F_{24} + 2F_{27}\cos\theta_{27} -$$

$$2F_{28}\cos\theta_{28} = 0 \quad (7)$$

 $\sqrt{3}F_{18} + \sqrt{3}F_{21} - 2F_{27}\sin\theta_{27} - 2F_{28}\sin\theta_{28} = 0$ (8) 式中 θ_i (*i* = 25, 26, 27, 28)表示索段*i* 在投影面内与 x 轴所夹的锐角 $(0 < \theta < \pi/2)$ 。以上4个方程相互 独立,因此只有三个变量为独立变量。

不妨讲一步令

$$F_{2 + i} = a_i F_H, \quad (i = 1, 2, ..., 7)$$
 (9)

并将式(4) 及式(9) 代入方程式(5) ~ 式(8), 整理 后得到

$$u_{4} = \csc(\theta_{25} + \theta_{26})(\sqrt{3}\cos\theta_{26} + (-a_{1} + a_{2})\sin\theta_{26})$$
(10)

$$a_5 = \csc(\theta_{25} + \theta_{26})(\sqrt{3}\cos\theta_{25} + (-a_1 - a_2)\sin\theta_{25})$$
(11)

$$a_6 = \csc(\theta_{27} + \theta_{28})(\sqrt{3}\cos\theta_{28} +$$

$$(-a_2 + a_3)\sin(b_3)$$
 (12)

$$a_{7} = \csc(\theta_{27} + \theta_{28})(\sqrt{3}\cos\theta_{27} + (-a_{2}^{2} + a_{3}^{2})\sin\theta_{27})$$
(13)

 $\Rightarrow a_8 = 1.0.$ 则水平投影面内网面索力的优化 问题可用以下优化模型描述

Find:
$$a_1, a_2, a_3$$

M in. $R = M \operatorname{ax}(a_i) / M \operatorname{in}(a_j),$
 $(i = 1, 2, \dots, 8; j = 1, 2, \dots, 8)$ (14)
s.t. $b > a_i > 1/b, (b > 0; i = 1, 2, 3)$ (15)

$$a^i > 0, \qquad (i = 4, 5, \dots, 8)$$
 (16)

(14)

称该优化模型为索力分量优化模型。考虑到 ai 的物 理意义为水平投影面内网面索力与常量 F_{H} 的比 值,因此,式(14)表示网面索段索力的最大拉力比, 式(16) 表示索力分量均应为正值, 即所有索段均为 受拉状态。b为满足条件 $a_i > 0$ (i = 1, 2, ..., 7)的任 意一组 (a_1, a_2, a_3) 所对应的目标函数 R 的值, 即当 前索力的最大拉力比。此例中, $\mathbf{u} a_1 = a_2 = a_3 =$ 1.0时,满足条件 $a_i > 0(i = 1, 2, ..., 7)$,求得此时 的索力分量最大拉力比 b = R = 1.47。式(15) 保证 则网面内部索段索力的最大拉力比已经最小,而且 H_{1} 的比 值不超过当前的最大拉力比 b,给出了优化变量的 有效可行域。

由于该优化模型较为简单,可用变步长直接搜 索法求得其数值解。相应地,得到了水平投影面内前 索网面的一组平衡索力。

第二步, 以投影面内的平衡索力为依据, 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

 $T_j = F_j/\cos\beta, \quad (j = 1, 2, ..., e)$ (17) 其中: T_j 表示网面中索段 *j* 的总拉力; β 表示索段 *j* 与 水平投影面所夹的锐角($0 \leq \beta < \pi/2$); *e* 表示前面讨 论的索网基本部分中的索段总数, 此例中 *e* = 28。

依据前、后索网面的对称关系,后索网面中的预 拉力可依据前索网面中的预拉力相应给出。

索网结构中各纵向拉索的总拉力值计算公式

$$T_i = \sum_{k=1}^{6} F_{ik} \operatorname{tg}_{\beta_{ik}}$$
(18)

其中: T_i 表示与非约束节点 i 相连接的纵向拉 索索段的总拉力; F_{k} , β_{k} 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($-\pi/2 < \beta_{k} < \pi/2$, 当索 段与投影面法线的夹角小于 $\pi/2$ 时, β_{k} 取正值; 当索 段与投影面法线的夹角大于 $\pi/2$ 时, β_{k} 取负值)。 2 2 桁架结构的变形补偿方法

以上索网结构预拉力设计过程中没有考虑桁架 结构的变形影响,而天线结构的找形过程中,索网结 构的预拉力必然会导致桁架结构产生一定的变形。 相应分析结果表明,桁架结构的微小变形将导致索 网结构中网面索段的最大拉力比发生较大变化,网 面索段的拉力均匀性变差。为此,下面给出环形桁架 结构的变形补偿方法。

考虑到网面索段最大拉力比发生变化的根本原 因为桁架结构的变形导致索网结构边界节点位置发 生了变化,因此,环形桁架结构变形补偿方法的基本 思想为,结合桁架结构的变形特征,在维持索网结构 设计结果(即各索段原长)不变的基础上,通过调节桁 架结构中挂接铰链的挂接节点位置,使变形后的桁架 结构中的索网挂接节点位置与索网结构预拉力设计 过程中的边界节点位置尽可能一致,从而尽可能维持 索网结构预拉力设计结果中的最大索段拉力比。

变形补偿的核心在于索网挂接节点初始位置调整量的确定。假设桁架结构变形后,索网挂接节点 *Hi*与其理想位置(索网结构的理想边界位置)的位置差为向量,由结构力学知识可知,对于在弹性范围 内的小变形桁架结构,可 以将作为桁架结构中索网 挂接节点 *Hi* 初始位置的 调整量。

另外,在每次对索网挂 接节点的初始位置进行调 整后,为保证天线结构有限 元模型中桁架结构上的索 网挂接节点与索网结构中 的边界节点位移协调,须将 索网结构的边界节点位置 调整至索网挂接节点的最 新位置,并重新计算索网结

构中的索段预拉力。这一过 程相当于对已设计好的索 网结构先反向拉伸。在天线 结构的找形过程中,当索网 挂接节点到达理想位置时,



图 6 索网天线结构的 设计流程图

索网结构中的索段拉力则必然恢复至原来的设计值。

于是,考虑桁架结构变形补偿时的预应力索网 天线结构的设计流程如图6所示。

3 算例分析

采用 mathematica 语言编制了相应的程序,对 以上讨论的索网天线结构进行了相应的设计,包括 在不考虑桁架结构受力变形时的索网结构预拉力设 计以及环形桁架结构的变形补偿设计。

下面分别给出相应的设计结果。

3.1 索网结构的预拉力设计结果

表 1 网面索力优化模型数值结果

变量	数值解	变量	数值解
a_1	1. 195025	a_5	1 195024
a_2	1. 013250	a_6	1 048874
a_3	1. 082553	a_7	1 013249
a_4	1. 013249	a_8	1. 0

由表 2 可知, 网面索力的最大拉力比为 R =1. 195025/1. 0 ≈ 1. 195, 网面各索段总拉力的最大 拉力比为 1. 2840/1. 0 = 1. 284, 纵向拉索各索段的 最大拉力比为 0 25/0 2346 ≈ 1. 066。网面索段的最 大拉力比低于文献[6] 中的结果(1. 38), 说明该方 法得到的结果较好。

为验证以上预拉力优化结果的正确性, 取 F_# =: 20N, 求得相应的一组索网预拉力, 并将所得的预

621

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 ɛ) 导入索网结构的有限元模型 中(索网边界节点全约束),进行非线性有限元分析。 在 Ansys 环境下得到的节点最大位移量为 0. 223 × 10⁻¹⁴,说明通过该方法得到的预拉力设计方案是正 确的。

索段	T/F_H	索段	T/F_H	索段	T/F_H
编号		编号		编号	
1	1.0009	11	1. 0009	21	1.0417
2	1.0078	12	1. 0035	22	1.2115
3	1. 0215	13	1. 0078	23	1.0525
4	1.0417	14	1. 0138	24	1.0132
5	1.0680	15	1. 0308	25	1.2840
6	1. 0035	16	1. 0541	26	1.0318
7	1.0078	17	1. 0215	27	1.1497
8	1. 0138	18	1. 0308	28	1.0576
9	1. 0215	19	1. 0000		
10	1. 0000	20	1. 0009		

表 2 网面索段预拉力的设计结果

注: 纵向拉索中,相应于节点 N 10 与 N 12 的索段拉力值分别为 0. 2346F_H和0 2361F_H,其他索段的拉力值均为0 2500F_H。

3.2 预应力天线结构的最终设计结果

首先分析桁架结构变形对网面索段最大拉力比 的影响。仍以*F*_H = 20 *N* 时的索网预拉力设计结果 为例,设置天线结构有限元模型中索网结构的预拉 力,天线桁架结构处于无应力状态。在天线结构找形 分析过程中,桁架结构变形,索网结构预拉力重新分 布。当天线结构到达平衡位置时,天线结构中的节点 最大位移量为0363mm,反射面精度(RMS)为 0094mm,网面索段的最大拉力比为2512。说明天 线桁架结构的变形较小,且对天线反射面精度的影 响较小,但对网面索段拉力的均匀性影响较大(网面 索段最大拉力比由原设计值1284 变为251)。

采用文中的桁架结构变形补偿方法,经过 62 次 循环迭代,最终获得的天线结构平衡态结果中,节点 最大位移量为 7.467mm,反射面精度(RMS) 为 0.006mm,网面索段的最大拉力比为 1.302。其中, 索网挂接节点沿天线结构径向的最大调整量为 2 480mm, 沿天线结构轴向的最大调整量为 7.067mm。索网挂接节点的位置调整量较小,容易 实现;而且通过补偿设计,网面索段拉力的均匀性得 到了较大的改善。说明了天线桁架结构变形补偿方 法的正确性和有效性。

4 结 论

 在不考虑天线桁架结构受力变形的前提下,以 三向网格旋转抛物面索网结构的结构特征为依据, 从索网节点的力平衡方程出发,给出了索网结构预 拉力优化设计的有效方法。

2) 考虑到天线桁架结构的受力变形对天线索网 结构中网面索段最大拉力比的影响较大,结合天线 桁架结构的变形特征,通过调整索网挂接节点的初 始位置,给出了预应力天线桁架结构设计的变形补 偿方法,进一步完善了天线索网结构的预拉力优化 设计。

3) 结合某索网天线结构的设计算例,说明了索网 结构预拉力优化设计方法以及天线环形桁架结构变 形补偿设计方法的正确性及有效性。

参考文献

- Tibert G. Deployment Tensegrity Structure for Space Applications[D]. Stockholm, Sweden: Royal Institute of Technology Department of Mechanics, 2002: 67-78.
- [2] Koryo M, Yasuyuki M. Concept of the tension truss antenna[J]. AIAA Journal, 1990, 28(6): 1098-1104.
- [3] 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.
- [4] Wang P H, Tabarrok T C B, Qin I. Nonlinear analysis of tension Structures [J]. Computers and Structures, 1992, 45(5): 973-984.
- [5] 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: 自然科学版, 2004, 32(6): 23-26.
- [6] 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.

Dynamic Response Analysis for Uncertainty Truss Structures with Interval Factor Method

Lin Liguang Chen Jianjun Ma Juan Liu Guoliang Zhang Yaoqiang (School of Electronic Mechanical Engineering, Xidian University, 710071, Xian, China)

Abstract: The dynamic response analysis of uncertainty truss structures is presented. Simultaneously considering the uncertainty of physical parameters of structural materials, geometric dimensions of truss structures and considering uncertainty of applied load, an interval factor method to deal with uncertainty variable is proposed, where an interval variable can be described as its interval main value multiplied by its interval factor. From Duhamel integral, the expressions of structures interval dynamic response are deduced by combining mode superposition method. To testify the correctness and rationality of the model and solution, Monte Carlo method is used to simulate the uncertainty structure in the example. To demonstrate the influence of the uncertainty structural parameters and uncertainty applied load on structural uncertainty dynamic response.

Keywords: uncertainty struss structures, interval arithmetic, interval factor, Dynamic response.

New Method for Prestressed Astromesh Deployable Antenna Design

Yang Dongwu Qiu Yuanying Duan Baoyan (School of ElectroMechanical Engineering, Xidian University, 710071, Xian, China)

Abstract: Pretension design of cable-net structure is an import part of the design of the structure of Astromesh antenna. Based on the characteristics of the cable-net structure and the force balance equations of the cable nodes, an approach, no considering of the elasticity of the ring truss, for design of the pretensions of the cable-net structure of axi-symmetric parabolic antenna with triangular net form is presented in the first place, where an optimization model, with only three design variables and with the maximum pretension ratio (MTR) of cables in the front cable net as its objective function, is deduced. Finite element models of the cable-net structure and the whole structure of a designed antenna following the strategy are analyzed. The result shows the effectiveness of the proposed approach.

Keywords: Astromesh antenna, cable net, pre-tension.

Liquid-Solid Coupling Sloshing of Reinforced Concrete Rectangular Liquid-Storage Tanks—Elastic Soleplate

Cheng Xuansheng Du Yong feng Li Hui

(School of Civil Engineering, Lanzhou University of Technology, 730050, Lanzhou, China)

Abstract: Aiming at the ideal liquid of Micro-breadth sloshing, the velocity potential function is derived in © 1994-2012 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net