



引用格式:郭王策,王欢,张涛,等. 基于有限元的索网天线结构误差分析[J]. 轻工学报, 2018,33(4):66-72.

中图分类号:V443+.4 文献标识码:A

DOI:10.3969/j.issn.2096-1553.2018.04.009

文章编号:2096-1553(2018)04-0066-07

基于有限元的索网天线结构误差分析

Analysis of structure error for cable net antenna based on the finite element

郭王策^{1,2},王欢^{1,2},张涛²,杜雪林²

GUO Wangce^{1,2},WANG Huan^{1,2},ZHANG Tao²,DU Xuelin²

关键词:

索网天线;结构误差;
制造误差;型面精度;
有限元

Key words:

cable net antenna;
structure error;
manufacturing error;
surface accuracy;
finite element

1. 中航光电科技股份有限公司,河南 洛阳 471003;

2. 西安电子科技大学 机电工程学院,陕西 西安 710071

1. AVIC Jonhon Optron Technology Co., Ltd., Luoyang 471003, China;

2. School of Mechanical and Electrical Engineering, Xidian University, Xi'an 710071, China

摘要:通过力密度迭代方法得到了索网天线的结构模型,等效地利用高斯分布模拟了制造误差和热变形误差,构建了索网天线结构误差分析的有限元模型. 以制造公差和工作温度为变量,通过具体算例分析了结构误差对索网天线型面偏差的影响,并与使用蒙特卡洛法单独分析索网天线制造误差产生的型面偏差进行比较,结果表明,该方法对结构误差的分析具有准确性和可行性,可以用来评估结构误差对天线型面精度的影响.

收稿日期:2017-07-04 修回日期:2017-12-01

基金项目:国家自然科学基金项目(51775404)

作者简介:郭王策(1992—),男,陕西省铜川市人,中航光电科技股份有限公司技术员,西安电子科技大学硕士研究生,主要研究方向为星载天线结构与结构误差分析.

通信作者:杜雪林(1984—),男,河北省石家庄市人,西安电子科技大学博士研究生,主要研究方向为多体系统动力学.

Abstract: The structural model of the cable antenna was obtained by the force density iterative method. The Gaussian distribution was used to simulate the manufacturing error and thermal deformation error. The finite element model of the cable network structure error analysis was constructed. Taking the manufacturing tolerance and working temperature as variables, the influence of structural error on the antenna surface deviation of the cable was analyzed by a specific example. And comparison was made with the profile deviation analyze caused by the analysis of the cable antenna manufacturing error with the Monte Carlo method. The results showed that the method had the accuracy and feasibility of structural error analysis, which could be used to evaluate the impact of the structural error to the antenna profile accuracy.

0 引言

近年来,由于经济和军事需要,太空活动越来越频繁,受制于运载能力的限制,大口径可展开索网天线受到更多的青睐^[1-10]. 索网天线主要包括五部分:环形桁架、前索网面、后索网面、竖向拉索和金属反射网,它是一种前、后索网面对称的天线结构,如图1所示. 在动力装置驱动下,索网天线可以平稳地展开,达到设计的天线构型.

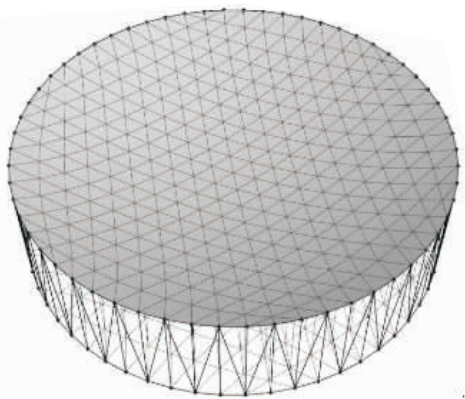


图1 索网天线

Fig. 1 Cable net antenna

索网天线前索网面背后附着的金属反射网主要用来实现信号的接收与发送,因此,前索网面的型面精度是影响天线电性能的主要因素之一. 对于大口径索网天线来说,较大的结构误差(如制造误差、热变形误差等)会严重影响天线的性能^[7-11]. 在误差研究的初期,通过固有频率倒数之和来计算天线型面偏差,但此方法准

确性比较低,因此很少使用^[8]. 2003年, M. Mehem^[9]通过蒙特卡洛法单独地分析了天线制造误差对天线精度的影响,但未考虑热变形误差因素的影响. H. Tanaka^[11]提出了根据天线增益来判断索网天线的型面偏差的方法,主要用于成型后索网天线的误差检测,不能用于设计的起始阶段,存在较大的局限性. 范叶森等^[12]基于整体坐标迭代法分析了索段长度误差对索网天线精度的影响,但该算法比较繁琐且也未考虑热变形误差的影响. 目前,蒙特卡洛分析法^[9]是分析制造误差的较好选择,但考虑到太空环境下天线的工作温度变化极大,索网天线易产生热变形,蒙特卡洛分析法未分析热变形对索网天线型面精度的影响,有一定的局限性.

鉴于此,本文拟运用有限元法整体分析制造误差和热变形误差对索网天线型面精度的影响,以全面评估结构误差对天线性能的影响.

1 索网天线的结构模型

对索网天线结构作误差分析,首先是给定索网面索段预拉力 T_0 ,通过力密度迭代方法进行索网天线设计^[13],得到索网天线的结构模型. 选取索网天线前索网面局部进行分析,见图2.

索网面节点 i 与 j 通过预拉力为 T_j 的索段相连接,索网面内部节点受力平衡

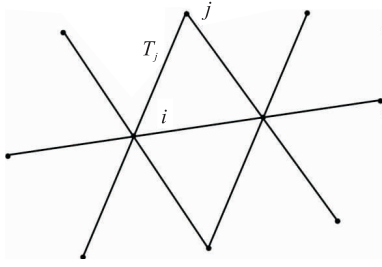


图2 索网面局部节点

Fig. 2 Part node of cable net

$$\sum_{j=1}^{c_i} T_j (X_j - X_i) / l_{ij} = f_{ix} \quad (1)$$

式①为节点*i*在*X*方向的力平衡方程,类似地,在*Y, Z*方向同样适用。

将索段力密度系数 q_j 带入到力平衡方程中,即索网面方程①转化为

$$\sum_{j=1}^{c_i} q_j (X_j - X_i) = f_{ix}$$

索网面内部节点处于力平衡中,也就是节点合力 $f_{xi} = 0$ 。本文要求所有索段具有相同的预拉力 $T_u = const$,则力平衡方程拥有唯一解,由此确定索网天线的结构模型。

2 结构误差的计算方法

2.1 制造误差的计算方法

对于索网天线来讲,结构误差主要包括制造误差和热变形误差两部分。根据相关经验,制造误差是一种随机分布,一般服从高斯分布。根据 $3 - \sigma$ 准则,通过合理分配可以模拟制造误差。

$$L_M = L_{00} + \frac{R_j}{6} \quad (2)$$

式中, $L_M = [L_1^1, L_1^2, L_1^3, \dots, L_1^j]^T$ 为索网面索段实际长度, j 为索段编号; L_{00} 为各个索段的理论放样长度; R_j 为通过标准高斯分布得到的随机数。

式②将制造误差等效地分配到索网天线每一个索段上。改变索段的放样长度,也就改变了索段张力,这样就有效地模拟了索段制造误

差对索网天线的影响。

2.2 热变形误差的计算方法

索网天线在轨工作时,由于太阳辐射、地球反射、地球阴影等因素的影响,天线工作温度变化大,不可避免地造成索网天线的热变形。这直接影响索网天线的形面精度,进而影响索网天线的电性能。因此,研究工作温度对索网天线精度的影响非常重要。首先,需要计算出索网天线工作温度的区间^[14]:

$$T_{\max} = \left(\frac{q_{\text{IR}} \varepsilon_{\text{IR}} \sin^2 \rho + G_s \alpha_s (1 + \chi K_\alpha \sin^2 \rho)}{2 \varepsilon_{\text{IR}} \sigma} \right)^{\frac{1}{4}}$$

$$T_{\min} = \left(\frac{q_{\text{IR}} \sin^2 \rho}{2 \sigma} \right)^{\frac{1}{4}}$$

式中, q_{IR} 为地球每平方米的红外发射量, ε_{IR} 为天线表面的红外发射率, ρ 为地球的角半径, G_s 为太阳能辐射通量, α_s 为太阳表面吸收率, χ 为太阳直接辐射通量的反射率, K_α 为由于地球为球形所造成反射能损耗的修正系数, σ 为 Stefan-Boltzmann 常数。

索网天线工作温度发生变化时,索网天线结构易产生变形。索网天线索网面由绳索组成,根据热弹性应变理论^[15],在一定的范围内索段长度的变化与温差之间是线性关系:

$$\varepsilon_T = \frac{L_T - L_{01}}{L_{01}} \quad (3)$$

$$\varepsilon_T = \alpha (T - t_{01}) \quad (4)$$

式中, ε_T 为工作温度等于 T 时的线应变, L_T 为工作温度等于 T 时索段长度, L_{01} 为常温下的放样长度, α 为材料的热膨胀系数, t_{01} 为标准大气压下初始参考温度。

通常, α 的值与材料有着密切的关系,但由于受制造等多方面因素的影响,确定索段材料热膨胀系数准确值非常困难。文献[16]给出了芳纶热膨胀系数的一个区间 $[a, b]$, 为合理地确定材料的热膨胀系数,本文认为 α 在一定的区间内服从高斯分布:

$$\alpha = \alpha_t + \frac{R}{3} \quad (5)$$

式中, α_t 表示参考温度为 t 时材料的热膨胀系数, R 为基于高斯分布产生的随机数.

工作温度的变化会引起索网天线材料的热膨胀变形, 为了更有效地分析温差对索网天线的影 响, 公式 ③④⑤ 可以较为方便地计算索网天线网面索段的变形.

3 结构误差模拟与分析

3.1 结构误差的模拟

根据上述计算, 结构误差可以等效为索网天线索段长度的变化. 因此, 制造误差和热变形误差可以整体地等效为索段长度的变化, 这有利于全面分析结构误差对索网反射面型面精度的具体影响.

$$\Delta L = \Delta L_M + \Delta L_T$$

$$\Delta L_M = L_M - \Delta L_{00}$$

$$\Delta L_T = L_T - \Delta L_{01}$$

式中, ΔL 和 ΔL_M 分别为结构误差和制造误差引起的索网天线单元变化值, ΔL_T 为温度变化引起的索网天线索段长度的变化值.

3.2 索网天线预拉力与型面精度

结构误差的存在会使索网天线失去原有的理想平衡状态, 索网天线索段单元的预拉力也会随之发生相应变化. 索网天线中每个索段单元与两个节点相连, i, j 为索网面中的节点, 如图 3 所示. 将结构误差等效地转化为索段长度的变化, 重新计算索网天线各个索段的预拉力.

$$L_{i,j} = \sqrt{(X_j - X_i)^2 + (Y_j - Y_i)^2 + (Z_j - Z_i)^2}$$

$$T_{i,j} = EA_{ij}\varepsilon_{ij} \quad \varepsilon_{ij} = \frac{L_{ij} - L_0}{L_0}$$

式中, $L_{i,j}$ 为之间的索段长度; X, Y, Z 为相应的索段节点的坐标值; T_{ij} 为索段 i, j 之间的预拉力; A_{ij} 为索段 i, j 的横截面积; E 为索段之间材料的弹性模量; ε_{ij} 为索段 i, j 的线应变; L_0 为索段放样长度.

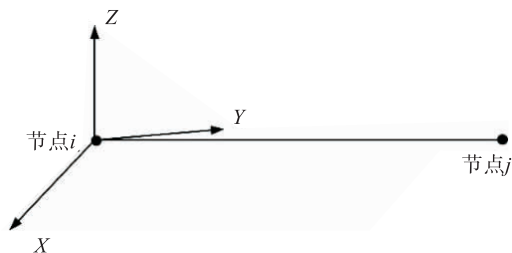


图 3 索网天线节点

Fig. 3 Cable net antenna node

考虑索网天线索段由芳纶绳索组成, 而索段单元只能承受拉力, 因此索段的线应变 ε_{ij} 应取非负值, 避免出现索段松弛等严重问题.

通常采用型面偏差来描述索网反射面的型面精度, 通过实际节点坐标与理想节点坐标偏移的均方根误差来计算:

$$\delta_{ms} = \sqrt{\sum_{i=1}^m (\Delta X_i^2 + \Delta Y_i^2 + \Delta Z_i^2) / m}$$

式中, m 为自由节点的总数; $\Delta X, \Delta Y$ 和 ΔZ 为索网面实际节点与理想节点的坐标之差.

δ_{ms} 用来描述索网面的型面偏差, δ_{ms} 值越小, 索网天线的精度越高.

4 索网天线结构误差的分析步骤

索网天线是目前比较成熟的一种星载天线形式. 随着频率波段的提高, 对天线反射面要求也越来越苛刻. 本文对索网天线的结构误差进行模拟分析, 主要步骤如下:

1) 以得到的索网天线结构为模型, 根据结构误差的模拟方法, 合理地模拟天线的制造误差及热变形误差, 准确地计算出索网天线各个索段单元的实际长度.

2) 构造包含结构误差的索网天线有限元模型, 进行索网天线变形分析, 得到了新的索网天线平衡结构.

3) 以制造公差和工作温度为变量, 分析结构误差对索网天线结构的影响, 明确结构误差与型面精度、变形位移之间的关系.

5 算例验证

本文以索网天线为研究对象,天线采用前、后索网面对称的旋转抛物面天线形式,其结构参数如下:天线口径 $D = 12\text{ m}$, 焦距比为 0.6 , 初始预拉力 $F = 100\text{ N}$, 以索段最大拉力比 $forceration = F_{\max}/F_{\min} = 0.001$ 为收敛准则. 为了进行结构误差的模拟与分析, 补充一些必要的数据: 索段单元直径 $d = 1\text{ mm}$, 材料的弹性模量 $E = 20\text{ GPa}$, 参考温度 $t = 20\text{ }^{\circ}\text{C}$. 在此基础上, 在 Mathematica 10.2 平台下, 对结构误差进行模拟、分配, 计算出结构误差分析所需要的数据. 同时, 在 ANSYS 15.0 平台下, 构建天线有限元误差模型, 计算结构变形位移. 图 4 给出了工作温度 $T = -70\text{ }^{\circ}\text{C}$, 制造公差为 $M = 0.1\text{ mm}$ 时, 天线的变形位移云图/mm.

由图 4 可知, 当工作温度为 $-70\text{ }^{\circ}\text{C}$, 制造公差为 0.1 mm 时, 索网天线的结构已经改变, 此时天线的最大位移由 0 增加到 0.277 mm , 索网天线的型面偏差变为 0.132 mm . 可以得出, 在结构误差的影响下, 天线结构发生了微小变形, 导致型面精度下降.

为进一步了解结构误差对索网天线型面精度的影响, 就要具体分析结构误差引起的天线型面偏差. 结构误差主要分为制造误差和热变形误差两类. 制造误差的分布主要是由天线实际制造时的制造公差决定的, 而热变形误差主要是由天线工作温度变化造成的. 下面分别以制造公差和工作温度为变量, 分析天线结构误差产生的型面偏差. 为避免样本过少对实验结果的较大影响, 根据式③④, 选取三个小组样本, 其工作温度分别为 $-70\text{ }^{\circ}\text{C}$, $20\text{ }^{\circ}\text{C}$, $110\text{ }^{\circ}\text{C}$. 对每个小组样本, 取不同的制造公差(分别为 0.1 mm , 0.3 mm , 0.5 mm) 进行结构误差分析, 结果见表 1.

由表 1 可以看出不同结构误差下的索网天线型面偏差分布情况. 随着天线制造公差的增大, 表 1 中的天线型面偏差都在不断地增大, 只是增加幅度有所不同: 当工作温度相同时, 随着制造公差的增大, 型面偏差变大, 天线的型面精度下降; 当制造公差相同, 且工作温度为 $20\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时, 天线的型面偏差较小, 即此时的结构误差对天线影响较小, 这是因为 $20\text{ }^{\circ}\text{C}$ 的工作温度接近天线制造时的参考温度, 即是说此时天线热变

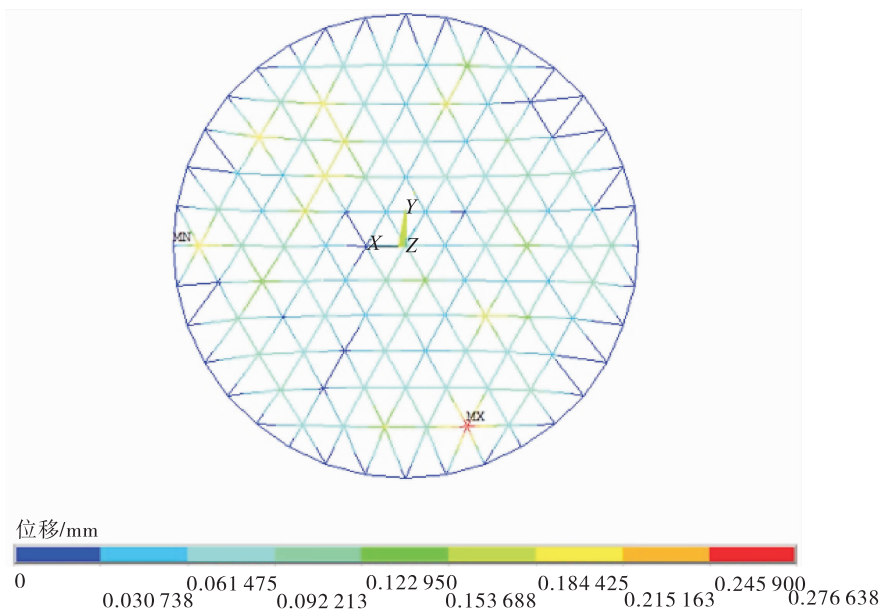


图 4 索网天线变形位移云图

Fig. 4 Deformation and displacement cloud map of cable net antenna

表1 结构误差分析

Table 1 Structure error analysis mm

工作温度/℃	制造公差	最大变形位移	型面偏差
-70	0.1	0.277	0.132
	0.3	0.552	0.232
	0.5	1.133	0.523
20	0.1	0.201	0.069
	0.3	0.533	0.201
	0.5	0.959	0.431
110	0.1	0.401	0.135
	0.3	0.562	0.241
	0.5	1.001	0.514

形误差较小.因此,结构误差整体引起的型面偏差较小.

对于设计得很好的索网天线结构模型,当没有考虑结构误差(制造误差与热变形误差)时,索网天线为平衡结构,最大变形位移为0;当考虑结构误差时,索网天线的结构被改变,天线结构发生变形,表1中的最大变形位移均大于0.同时,从中可以看出,天线的最大变形位移越大,天线的型面偏差越大.

此外,笔者又使用蒙特卡洛法利用有限元对索网天线制造误差单独进行了分析,而没有考虑热变形误差,以进一步验证本文结构误差干扰分析方法的可行性和有效性.蒙特卡洛分析法对天线制造公差的分析结果见表2.

通过将表2与表1对比发现,表1中的索网天线型面偏差基本都大于表2中的形面偏差值,这是因为本文的结构误差分析包含了热变形误差和制造误差,而蒙特卡洛法(表2)只分析了制造误差.由表1和表2可以看出,索网天

表2 蒙特卡洛法误差分析

Table 2 Error analysis of

Monte Carlo method mm

制造公差	变形最大位移	型面偏差
0.1	0.202	0.070
0.3	0.512	0.201
0.5	0.905	0.421

线的工作温度接近于参考温度时,结构误差引起的型面偏差接近蒙特卡洛型面偏差值,这说明本文结构误差分析方法是有效的、可行的.

6 结论

本文通过高斯分布合理地模拟了索网天线的结构误差分布,包括制造误差和热变形误差,运用有限元模型对索网天线的结构误差进行分析,计算结构误差对索网天线型面精度的影响.最后,通过算例分析了结构误差对索网面型面精度的影响,通过与蒙特卡洛法单独分析制造误差产生的型面偏差的对比,验证了本文结构误差分析方法的有效性和可行性.

综合考虑,天线的型面偏差主要是由结构误差,即制造误差和热变形误差造成的.制造误差的分布取决于天线的制造公差,天线制造公差的选取,一方面要保证天线满足型面精度要求,另一方面取决于制造工艺水平和经济性.因此本文给出的不同结构误差下天线型面偏差分布的情况,具有一定的工程参考价值.

参考文献:

- [1] THOMAS M W. Historical perspectives on the development of deployable reflectors [C]//The 50th AIAA/ASME/ASCE/AHS Structures, Structure Dynamics and Materials Conference. Reston VA: AIAA, 2009: 2605.
- [2] 李团结, 张琰, 段宝岩. 周边桁架可展开天线展开过程运动分析及控制[J]. 西安电子科技大学学报(自然科学版), 2007, 34(6): 916.
- [3] 杨东武, 仇原鹰, 段宝岩. 索网式天线结构预拉力优化的新方法[J]. 西安电子科技大学学报(自然科学版), 2008, 35(2): 319.
- [4] ORIKASA T, MIURA A, HIROYUKI T, et al. A study of large reflector antenna mounted on communication satellite for satellite terrestrial mobile communication system [C]//31st AIAA

- International Communications Satellite Systems Conference. Reston VA: AIAA, 2013: 5649.
- [5] SHI H, YANG B, FANG H. Offset-feed surface mesh generation for design of space deployable mesh reflectors [C] // 14th AIAA Gossamer Spacecraft Forum. Reston VA: AIAA, 2013: 1526.
- [6] 李团结, 周懋花, 段宝岩. 可展天线的柔性索网结构找形分析方法[J]. 宇航学报, 2008, 29(3): 794.
- [7] LOPATIN A V, RUTKOVSKAYA M A, GANTOVNIK V B. Accuracy analysis of the reflective surface of the umbrella-type antenna [J]. Journal of Spacecraft and Rockets, 2008, 45(1): 149.
- [8] HEDGEPEETH J M. Influence of fabrication on the surface accuracy of large antenna structures [J]. AIAA Journal, 1982, 20(5): 680.
- [9] MEHEM M. Methods of analyzing surface accuracy of large antenna structures due to manufacturing tolerance [C] // Proceeding of 44th AIAA/ASMW/ASCE/AHS/ASC Structures, Structure Dynamics and Materials Conference. Norfolk: AIAA, 2003.
- [10] MEGURO A, HARADA S, WATANABE M. Key technologies for high-accuracy large mesh antenna reflectors [J]. Acta Astronautica, 2003, 53: 899.
- [11] TANAKA H. Surface error estimation and correction of a space antenna based on antenna gain analyses [J]. Acta Astronautica, 2011, 68: 1062.
- [12] 范叶森, 马小飞, 李正军, 等. 绳索长度误差对索网天线网面精度影响的分析方法[J]. 华南理工大学学报(自然科学版), 2014, 42(8): 64.
- [13] MORTEROLLE S, MAURIN B, QUIRANT J, et al. Numerical form-finding of geotensoid tension truss for mesh reflector [J]. Acta Astronautica, 2012, 76: 154.
- [14] TIBERT G. Deployable tensegrity structures for space applications [R]. Stockholm: Royal Institute of Technology, 2002: 147 - 150.
- [15] 王洪纲. 热弹性力学概论 [M]. 北京: 清华大学出版社, 1989.
- [16] 李同起, 王成扬. 影响芳纶纤维及其复合材料性能的因素和改善方法 [J]. 高分子材料科学与工程, 2003, 19(5): 5.