

一种新型伞状天线反射面研究

刘婷婷, 华岳, 张成林, 解宁

(中国空间技术研究院西安分院, 西安 710000)

摘要:为设计和研制高精度伞状天线碳纤维三向编织反射面,选取碳纤维三向编织反射面为研究对象,通过试验获取了碳纤维织物的材料属性,设计了不同结构形态、不同加强筋方案的天线反射面,建立反射面有限元模型进行重力变形仿真,探索重力场下天线型面精度与反射面形态的关系,获取了最优的反射面设计方案。优化结果表明,多边形口径反射面相比圆形口径反射面型面精度提高了99.95%,在多边形口径反射面上设计环向加强筋可使型面精度进一步提高3.4%,为反射面的结构设计提供参考和依据。

关键词:伞状天线;碳纤维三向编织反射面;结构形态;加强筋方案;优化设计

中图分类号:V443

文献标志码:A

文章编号:1674-7135(2022)03-0094-05

Optimization of carbon fiber triaxial woven reflector of umbrella antenna

LIU Tingting, HUA Yue, ZHANG Chenglin, XIE Ning

(China Academy of Space Technology(Xi'an), Xi'an 710000, China)

Abstract: In order to design and develop a high precision carbon fiber triaxial woven reflector of umbrella antenna, the carbon fiber triaxial woven reflector is selected as the research object. The material properties of carbon fiber fabric were obtained by experiment. The antenna reflector with different structure shape and different reinforcement scheme is designed. The finite element model of reflector under gravity filed is established for simulation. The relationship between the precision of the antenna surface and the shape of the reflector under the gravity filed is explored, and the optimal design scheme of the reflector is obtained. The optimization results show that the profile accuracy of polygonal aperture reflector is 99.95% higher than that of circular aperture reflector. The profile accuracy can be further improved by 3.4% by designing the circumferential reinforcement on the polygonal aperture reflector. The research results provide reference and basis for the structure design of reflector.

Key words: umbrella-shaped deployable antenna; carbon fiber triaxial woven reflector; structure shape; reinforcement scheme; optimization

0 引言

碳纤维三向编织反射面伞状天线是一种新型的天线结构形式,该天线具有结构简单、重量轻、型面精度高以及成本低等特点,近年来成为卫星天线研究的热点,受到了各国航天科研单位的重视和持续的研究^[1],加拿大太空署^[2]对采用碳纤维单层三向织物制备超薄可折叠复合材料进行了研究,1995

年发射的MSAT-2空间飞行器中将该材料作为可收缩天线反射器的增强材料。Aoki等^[3-4]对由碳纤维和环氧树脂制成的TWF复合材料的基本机械和热性能进行了研究。Kueh等^[5-6]利用均匀化的Kirchhoff板对单层三轴织物复合材料的线弹性响应建模。Aoki等^[7]对三向织物复合材料进行静态和循环拉伸试验,研究其疲劳性能和损伤累积机理。

收稿日期:2022-02-18; 修回日期:2022-03-08

基金项目:国家自然科学基金(编号:11402196)

引用格式:刘婷婷,华岳,张成林,等.一种新型伞状天线反射面研究[J].空间电子技术,2022,19(3):94-98. LIU T T, HUA Y, ZHANG C L, et al. Optimization of carbon fiber triaxial woven reflector of umbrella antenna[J]. Space Electronic Technology, 2022,19(3):94-98.

Datashvili 等^[8]研究了 3 种复合材料:1)SK802 型采用 T300 纤维;2)SK809 型采用 M46J 纤维;3)SK907 型采用 YSH 50A 纤维。

反射面是伞状天线一个重要的结构件,不同形态、不同加强筋设计,会得到不同型面精度的反射面,因此需要进行碳纤维三向编织反射面优化设计,以保证研制出高精度反射面伞状天线。为此,设计了不同形态、不同加强筋方案的天线反射面,建立伞状天线反射面形态分析模型,对反射面进行结构优化设计,以获取型面精度最高的反射面结构设计方案,为高精度伞状天线结构设计提供依据。

1 碳纤维三向编织反射面介绍

平面三轴向织物是由平面内 3 个不同方向的碳纤维丝束(1K T300)以一定角度(0°和 ±60°)按照特定交织规律彼此间相互交织而成的^[9-10],定义 0°方向为织物横向,90°方向为织物纵向,如图 1 所示。碳纤维具有优异的力学性能、低热膨胀系数和优异的空间适用性等特点,是一种综合性能较好基体材料。

碳纤维三向编织反射面成型技术:将硅胶均匀地涂刷到平面三轴向织物表面,然后将织物铺贴到反射面成型工装表面,使网格布紧贴于模具表面,上面放吸胶毡,制真空袋使织物与模具压实,室温硫化不小于 92 h。成型的碳纤维三向编织反射面如图 2 所示。碳纤维三向编织反射面具有超轻、高精度、低膨胀、柔性耐折等优点,满足高精度天线要求。

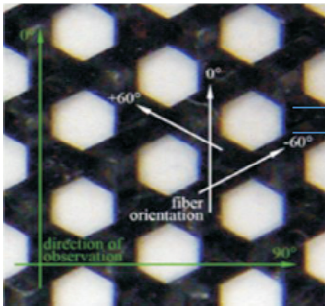


图 1 平面三轴织物
Fig. 1 Planar triaxial fabric



图 2 碳纤维三向编织反射面局部图
Fig. 2 Part of carbon fiber triaxial woven reflector

2 材料性能测试

为了对碳纤维三向编织反射面进行仿真分析,需获取材料的密度、弹性模量等参数。

碳纤维三向编织材料厚 2 mm,裁剪一片 200 mm × 200 mm 的试片,测量其重量为 60 g,根据公式 $\rho = m/v$,可获得碳纤维三向编织材料的密度为 750 kg/m³。

弹性模量测试装置如图 3 所示,试样分为横向和纵向两种,试样大小分别为 200 mm(横向) × 220 mm(纵向)和 200 mm(纵向) × 220 mm(横向),两种试样采用相同的测试方法进行测试,试样的长边 220 mm 有 20 mm 固定于测试工装上,测量试片重力变形后的尺寸,试样重力变形测量结果显示两种测试工况下试样的重力变形完全一致,测量值如图 4 所示,图 5 为试样的重力变形仿真分析,调节材料参数使得有限元模型的重力变形与试验结果一致,获取的材料参数如表 1 所列。



图 3 试样重力变形测试图(横向和纵向)
Fig. 3 Gravity deformation of test piece (horizontal and longitudinal)

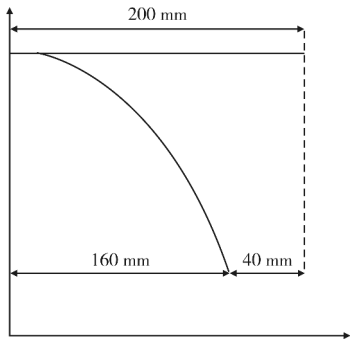


图 4 试样重力变形测量结果(横向和纵向)
Fig. 4 Measurement results of gravity deformation of test piece (horizontal and longitudinal)

表 1 试样材料参数

Tab. 1 Material parameters of test piece

项目	密度/(Kg/m ³)	弹性模量/GPa	泊松比
数值	750	2.6	0.3

型面精度计算时提取口径指标尺寸内节点位移,计算结果如表 2 所列,从表 2 中可以看出,方案 2 反射面比方案 1 反射面的型面精度高 99.95%,在反射面结构设计时应优先考虑多边形结构形式(方案 2)。

表 2 反射面在重力场下的型面精度

Tab. 2 The profile accuracy of relector in gravity field

项目	方案 1	方案 2
型面精度(RMS)	3.54×10^{-1} mm	1.75×10^{-4} mm

4 反射面加强筋方案设计与仿真分析

反射面加强筋方案设计如图 9 所示,为了保证反射面可折叠功能,碳布厚度较薄,碳布尺寸厚为 0.2 mm,宽为 25 mm。方案 1 为沿径向用碳布加强,方案 2 为沿环向用碳布加强,方案 3 为径向、环向同时用碳布加强。

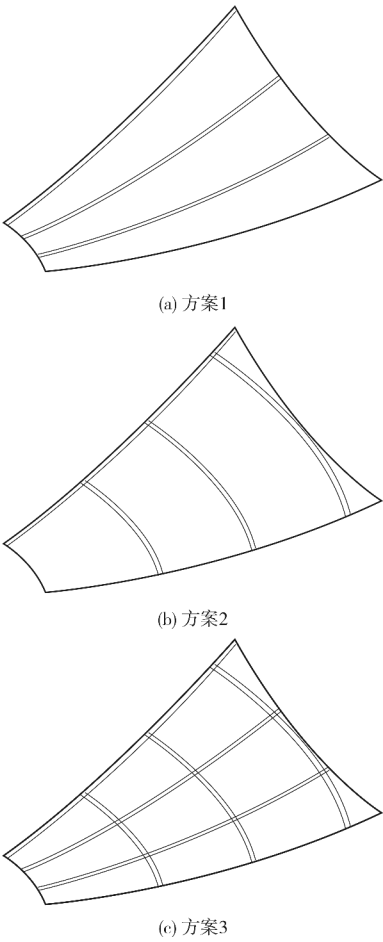


图 9 加强筋设计(方案 1、方案 2、方案 3)

Fig. 9 Design of reinforcement (scheme 1, scheme 2 and scheme 3)

反射面设计加强筋后在重力场下的变形云图如图 10 所示。

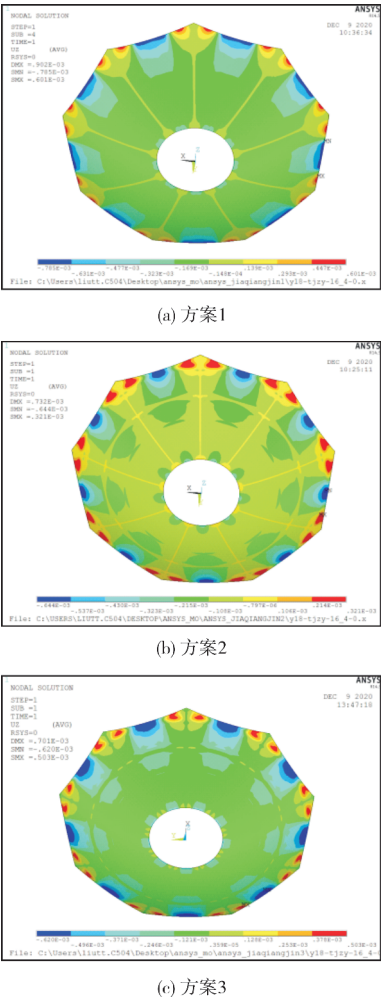


图 10 重力变形云图(方案 1、方案 2、方案 3)

Fig. 10 Cloud image of gravity deformation (scheme 1, scheme 2 and scheme 3)

表 3 为反射面在重力场下的型面精度,从表 3 可以看出,反射面设计加强筋后,反射面型面精度与无加强筋的型面精度相差不大,反射面径向设计加强筋会使其型面精度变差,其中方案 2 的型面精度最好,与无加强筋方案相比,型面精度提高了 3.4%。在工程实际中,反射面结构设计在满足重量指标的条件下可考虑环向加强筋的设计(方案 2)。

表 3 反射面在重力场下的型面精度

Tab. 3 The profile accuracy of relector in gravity field

项目	无加强筋	方案 1	方案 2	方案 3
型面精度(RMS)	1.75×10^{-4}	2.10×10^{-4}	1.69×10^{-4}	1.73×10^{-4}

5 结论

以伞状天线碳纤维三向编织反射面为研究对象,通过试验获取了碳纤维织物的材料属性,设计

了不同形态、不同加强筋方案的天线反射面,建立了伞状天线反射面形态分析模型,通过反射面重力变形仿真分析,得到了优化设计结果。结果表明:采用多边形口径反射面相比圆形口径反射面型面精度提高了 99.95%,在多边形口径反射面上设计环向加强筋可使型面精度进一步提高 3.4%,为反射面的结构设计提供参考和依据。

参考文献:

- [1] 万小平,杨粉莉,杨军刚. 空间大型可展开高精度天线的应用现状及发展趋势[J]. 空间电子技术,2020,17(6):1-7.
- [2] TAN L T, PELLEGRINO S. Thin-shell deployable reflectors with collapsible stiffeners part 1: Approach[J]. AIAA Journal, 2006, 44(11): 2515-2523.
- [3] AOKI T, YOSHIDA K. Mechanical and thermal behaviors of triaxially-woven carbon/epoxy fabric composite [C]//47th AIAA/ASME/ASCE/AHS/ASC Structures, Structural Dynamics, and Materials Conference, 2006: 1688.
- [4] AOKI T, YOSHIDA K, WATANABE A. Feasibility study of triaxially-woven fabric composite for deployable structures [C]//48th AIAA/ASME/ASCE/AHS/ASC Structures, Structural Dynamics, and Materials Conference, 2007: 1811.
- [5] KUEH A, PELLEGRINO S. ABD matrix of single-ply triaxial weave fabric composites [C]//48th AIAA/ASME/ASCE/AHS/ASC Structures, Structural Dynamics, and Materials Conference, 2007: 2161.
- [6] KUEH A, PELLEGRINO S. Thermo-elastic behaviour of single ply triaxial woven fabric composites [C]//47th AIAA/ASME/ASCE/AHS/ASC Structures, Structural Dynamics, and Materials Conference, 2006: 1899.
- [7] AOKI T, KOSUGI Y, WATANABE A. Fatigue characteristic and damage accumulation mechanism of triaxially-woven fabric composite [C]//52nd AIAA/ASME/ASCE/AHS/ASC Structures, Structural Dynamics and Materials Conference, 2011: 1993.
- [8] DATASHVILI L, BAIER H, DA ROCHA-SCHMIDT L. Multi-scale analysis of structures made of triaxially woven fabric composites with stiff and flexible matrix materials [C]//52nd AIAA/ASME/ASCE/AHS/ASC Structures, Structural Dynamics and Materials Conference, 2011: 2088.
- [9] 孙洁,施楣梧,钱坤. 平面三向织物的结构与性能[J]. 纺织学报, 2014, 35(6): 154-162.
- [10] 李怡晨,宋燕平,胡飞. 柔性基体 TWF 复合材料弹性性能研究[J]. 空间电子技术, 2019, 16(5): 38-44.

作者简介:刘婷婷(1990-),工程师,硕士,主要研究方向为空间大型网状可展开天线结构设计、空间可展开机构设计。

E-mail: 1316518575@qq.com