

复合材料薄壁加筋抛物面天线仿真与优化

李伟 张明 朱大雷 刘洪新

(北京卫星制造厂,北京 100094)

文 摘 采用 Patran/Nastran 有限元软件对复合材料薄壁加筋抛物面天线进行了建模和仿真分析。重点分析了反射面铺层方式、加筋结构形式以及加强筋铺层对抛物面天线基频的影响。分析结果表明:采用 $[0/45/-45/90]$ 铺层形式的反射面基频最高;增加径向和环向筋可大幅提高天线基频,其中加筋结构采用 $[0/30/90/-30]$ 铺层可进一步提高天线基频。通过有限元分析确定了基频最佳的复合材料抛物面天线结构,为制备薄壁加筋抛物面天线提供了指导。

关键词 抛物面天线,有限元分析,碳纤维/树脂基复合材料,加筋结构,模态分析

中图分类号:TB3

DOI:10.3969/j.issn.1007-2330.2015.06.006

Simulation and Optimization of Composite Parabolic Antenna With Stiffening Ribs

LI Wei ZHANG Ming ZHU Dalei LIU Hongxin

(Beijing Spacecrafts, Beijing 100094)

Abstract By using the finite element analysis (FEA) software Patran/Nastran, the model of composite parabolic antenna was built and the structure properties were also simulated. The effects of reflector laying-up, and stiffening rib structure and laying-up on the antenna fundamental frequency were further analyzed. The analysis results show that the fundamental frequency of the antenna reflector using the $[0/45/-45/90]$ laying-up is the highest. Fixing the circumferential and radial ribs on the reflector can obviously improve the fundamental frequency. By using the $[0/30/90/-30]$ laying-up in the stiffening ribs, the antenna fundamental frequency is further increased. The optimal structure of composite parabolic antenna with stiffening ribs is determined by FEA, which can provide the guidance for the preparation of this composite parabolic antenna.

Key words Parabolic antenna, FEA, Carbon fiber reinforced resin composites, Structure with stiffening ribs, Modal analysis

0 引言

抛物面天线在航天器上有着广泛的应用,轻量化、高精度、高可靠性是天线系统的发展趋势^[1]。目前航天器抛物面天线较多采用碳纤维复合材料蜂窝夹层结构,其优点是质量轻、结构简单。但由于碳纤维复合材料和铝蜂窝存在线胀系数不匹配,在空间高低温交变环境条件下蜂窝夹层结构易发生精度下降、脱粘等问题,降低了天线的可靠性。而另一种全复合材料天线结构可实现一体化成型,减少零部件数量,简化工艺流程,提高结构的在轨稳定性,是航天器天线发展的重要方向之一。全复合材料天线一般采用

薄壁加筋结构形式,该结构形式在航空领域应用较多,而在航天器天线领域研究还较少。

有限元分析是天线结构设计优化的重要工具,可实现复合材料结构固有频率、热变形、冲击变形、动力响应以及工艺仿真等分析^[2-3],方便快捷,能够加快复合材料结构设计和研制进度,为复合材料制造提供指导^[4]。针对航天用复合材料天线反射面,其有限元仿真主要集中在刚度仿真^[5],反射面铺层优化和反射面固有频率预测等方面。

本文针对航天器典型全复合材料薄壁加筋抛物面天线,采用 Patran/Nastran 有限元软件对薄壁加筋

收稿日期:2015-09-23

作者简介:李伟,1991年出生,硕士,主要从事树脂基复合材料工艺研究。E-mail:1107770478@qq.com
宇航材料工艺 <http://www.yhclgy.com> 2015年 第6期

结构进行结构仿真和优化,重点分析反射面铺层方式、加筋结构形式以及加强筋铺层对抛物面天线基频的影响,最终获得了结构优化的薄壁加筋抛物面天线,为制备薄壁加筋抛物面天线提供指导。

1 薄壁加筋抛物面天线模型

1.1 结构模型

航天器用全复合材料抛物面天线主要由反射面和加筋筋条组成,筋条包括环向加强筋和径向加强筋,其结构如图 1 所示。

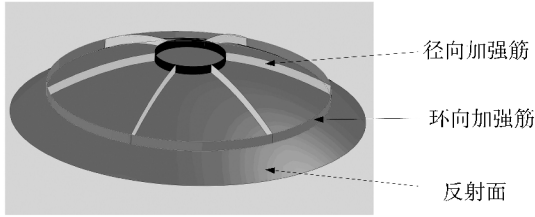


图 1 薄壁加筋反射面结构示意图

Fig. 1 Sketch of the thin-shell antenna reflector structure with stiffening ribs

筋条类型包括 L 形、T 形、工形和帽形。其中 T 形筋条比刚度较高,与反射面贴合紧密,易于一体化成型,因此薄型加筋选用 T 形筋条。

所考察的薄壁加筋抛物面天线反射面方程是 $x^2 + y^2 = 4fz$, 其焦距 $f = 140 \text{ mm}$, 反射面为正馈抛物面, 直径 $D = 400 \text{ mm}$, 厚度为 1 mm , 底座直径 $d = 80 \text{ mm}$, 如图 2 所示。

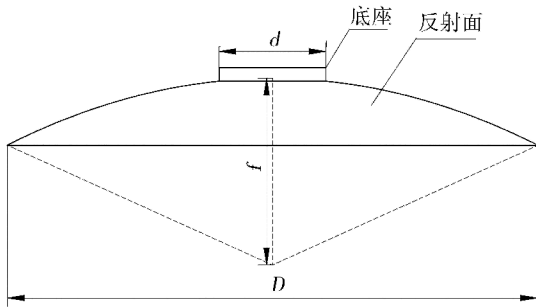


图 2 天线反射面尺寸

Fig. 2 Dimension of the parabolic antenna

1.2 有限元模型

根据天线的使用环境,天线结构的力学分析主要有静力学分析和动力学分析。静力学分析考察天线结构在发射阶段加速度惯性力作用下结构的变形和应力分布,考察结构强度是否满足要求。动力学分析考察结构的刚性,得到结构的自振频率和振型。在结

构强度满足要求的前提下,以结构基频作为评判天线力学性能的标准,分析反射面铺层,结构形式对天线性能的影响,通过比较确定最优的结构形式,并对筋条铺层、筋条高度等参数进行优化设计。

天线结构的力学分析可归纳为固体力学问题,其静力学分析通过以下通用方程求解:

$$[K]\{\delta\} = \{P\} \quad (1)$$

式中, $[K]$ 是刚度矩阵, $\{\delta\}$ 是节点位移列阵, $\{P\}$ 是节点载荷列阵。

动力学分析主要分析结构的自振频率及振型。结构无阻尼自由振动方程为:

$$[M]\{\ddot{\delta}\} + [K]\{\delta\} = 0 \quad (2)$$

式中, $[M]$ 为质量矩阵, $\{\ddot{\delta}\}$ 为节点加速度列阵。

方程的解为 $\{\delta\} = \{\delta_0\} \cos(\omega t + \varphi)$, 代入上式,可转化为特征值方程:

$$|[K] - \omega^2[M]| = 0 \quad (3)$$

式中, $\{\delta_0\}$ 是节点的振幅向量, ω 是频率, φ 是相位角。方程有 n 个(自由度) ω 值, 对应结构的 n 个自振频率。

采用 Patran/Nastran 有限元软件对加筋反射面天线进行分析。反射面及筋条的厚度相比面内尺寸要小的多,因此在有限元分析时将其简化为壳结构。天线固定方式为底座上六个点固支。静力学分析施加加速度载荷,自由振动分析无载荷。有限元网格模型见图 3。

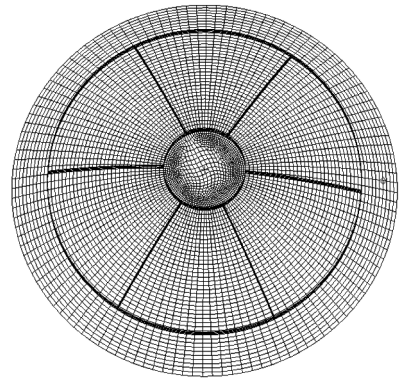


图 3 抛物面天线有限元网格模型

Fig. 3 Finite element mesh model of the parabolic antenna

薄壁加筋抛物面天线采用高模量碳纤维复合材料。有限元分析中所需的高模碳纤维复合材料单层板和铝蜂窝^[6]材料参数见表 1。

表 1 模型所需材料参数

Tab. 1 Mechanical parameters of composite laminate and aluminum honeycomb in the model

| 材料 | E_{11}/GPa | E_{22}/GPa | G_{12}/GPa | G_{13}/GPa | G_{23}/GPa | 泊松比 ν_{12} | 密度 $\rho/\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$ |
|---------|-----------------------|-----------------------|----------------------|---------------------|---------------------|----------------|---------------------------------------|
| 复合材料单层板 | 242 | 7.42 | 5.28 | 5.28 | 3 | 0.24 | 1700 |
| 铝蜂窝 | 3.47×10^{-5} | 3.47×10^{-5} | 4.9×10^{-6} | 0.09 | 0.135 | 0.33 | 27 |

2 结果与讨论

2.1 反射面铺层优化

考察不同铺层方式对抛物面天线反射面基频的影响,选取的铺层方式包括 $[0/45/-45/90]_s$ 、 $[0/30/-30/90]_s$ 和 $[0/90]_{2s}$,通过有限元分析得到不同铺层方式下天线反射面的固有频率结果,如表2所示。

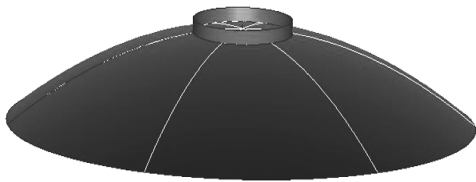
表2 不同铺层方式下天线反射面的固有频率

Tab.2 Natural frequency of the antenna reflector

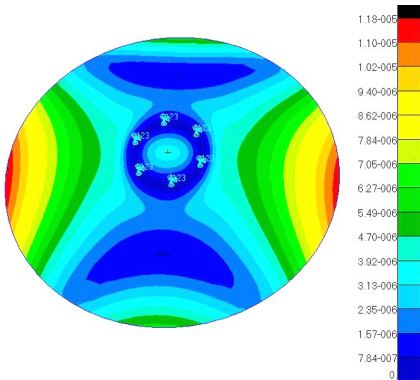
| 反射面铺层方式 | in the different laying-up | | | | | | Hz |
|-------------------|----------------------------|------|-------|-------|-------|-------|----|
| | 一阶 | 二阶 | 三阶 | 四阶 | 五阶 | 六阶 | |
| $[0/45/-45/90]_s$ | 77.8 | 80.8 | 106.9 | 108.1 | 188.2 | 188.4 | |
| $[0/30/-30/90]_s$ | 72.6 | 81.4 | 104.8 | 107.3 | 184.8 | 185.1 | |
| $[0/90]_{2s}$ | 50.6 | 82.9 | 102.4 | 109.8 | 179.8 | 185.8 | |

由表2可以看出, $[0/90]_{2s}$ 铺层的基频为50.6 Hz,是最低的,最高的是 $[0/45/-45/90]_s$,基频达到77.8 Hz。这说明准各向同性铺层反射面具有较好的刚性,这与工程中较常采用的铺层形式相符。

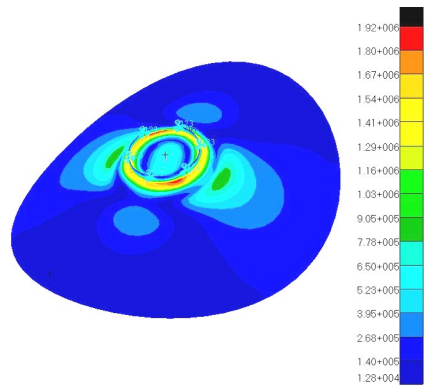
进一步对 $[0/45/-45/90]_s$ 铺层的薄壁反射面进行分析,获得了加载垂直向下 100 m/s^2 加速度载荷时的变形云图、应力分布云图以及结构的一阶振型,如图4所示。从图4的变形云图可以看出,反射面的外围变形较大,在载荷作用下容易发生变形。从应力分布图中可以看出,应力主要集中在蒙皮与底座的连接处,应力远小于材料的许用应力。



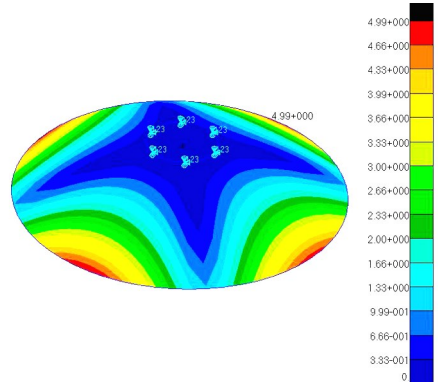
(a) 几何模型



(b) 变形云图



(c) 应力分布云图



(d) 一阶振型

图4 薄壁反射面有限元分析结果

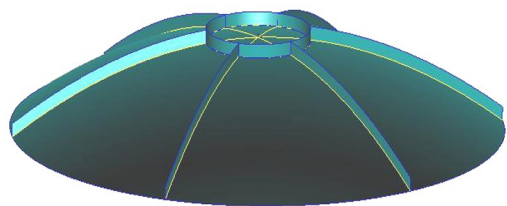
Fig.4 FEA results of the thin shell reflector

通过增加天线结构的厚度可提高结构刚性,通过有限元计算,若将反射面厚度提高到原来的2倍,基频可达到123.9 Hz,若提高到4倍,基频可提高到211.4 Hz。但增加厚度伴随结构质量增加,这是航天器结构很难接受的。航天器用天线一般采用蜂窝夹层结构来提高结构刚性,典型的蜂窝夹层结构天线采用前后0.5 mm碳蒙皮,铝蜂窝高度为9 mm的蜂窝夹层反射面,通过有限元计算其基频为296.7 Hz。针对复合材料薄壁反射面基频较低,在不大幅增加结构质量的基础上,通过增加加强筋对反射面进行构型优化,以提高其结构刚性。

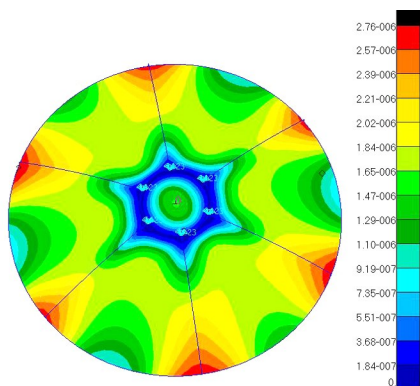
2.2 反射面构型优化

为了提高反射面天线整体刚性,考虑复合材料加强筋增强形式,沿天线半径方向上增加6条T形加强筋。选择的加强筋高度为10 mm,铺层方式为 $[0/45/-45/90]_s$ (0° 方向为加强筋的长度方向)。通过有限元计算获得了变形、应力和一阶振形图,见图5。从图5(b)可以看出,在相同的加速度载荷下,增加径向加强筋后抛物面天线结构变形明显变小;从图5(c)的应力分布图可以看出应力主要集中于加强筋和底座连接处,且应力值较低,径向加强筋是主要的承力路径。计算得到的天线结构的基频为109.5 Hz,较蒙皮结构的基频有所增加,说明增加T形加强筋后提高了抛物面天线结构的刚性,但与蜂窝夹层结构的

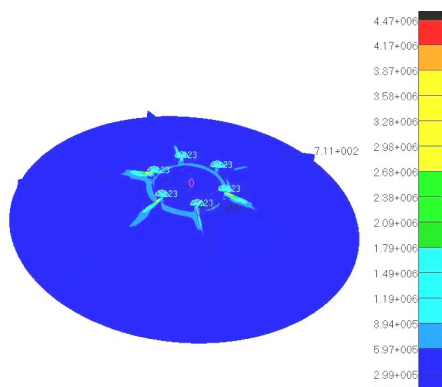
基频仍有差距。分析图 5(d) 的一阶振型可知,其薄弱点在 6 条径向加强筋之间的蒙皮外缘,因此需要对薄弱点进一步加强。



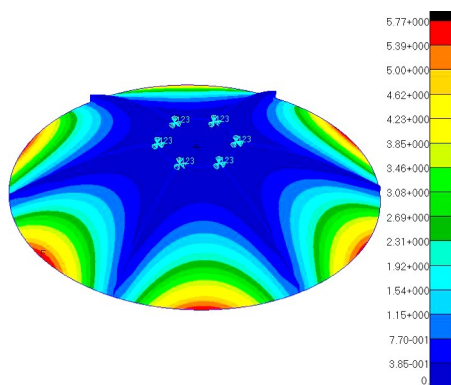
(a) 几何模型



(b) 变形云图



(c) 应力分布云图



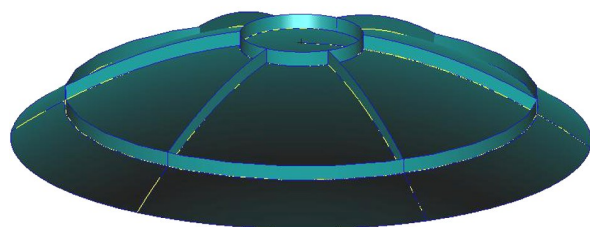
(d) 一阶振型

图 5 增加径向筋条后的有限元分析结果

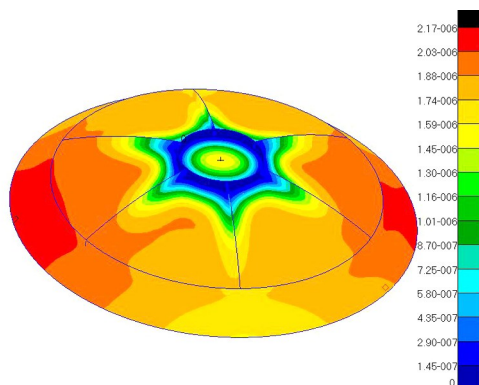
Fig. 5 FEA results of the reflector with the radial ribs

在其他条件不变的情况下,增加沿圆周方向的环向加强筋,加强筋铺层方向为 $[0/45/-45/90]_s$, 加强

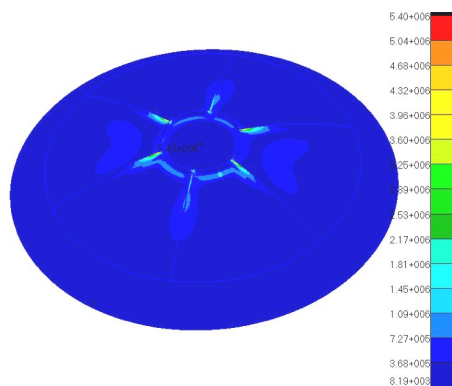
筋高度为 10 mm,加强筋位置为天线口径的 0.8 倍处,有限元计算得到的结果见图 6。



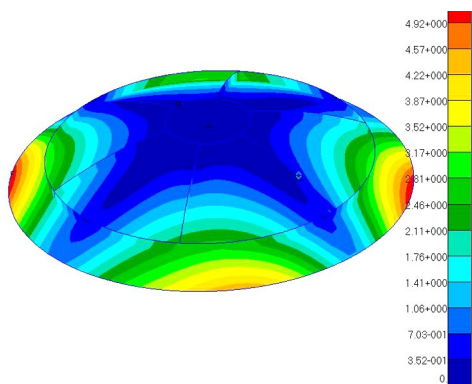
(a) 几何模型



(b) 变形云图



(c) 应力分布云图



(d) 一阶振型

图 6 加径向和环向加强筋的有限元分析结果

Fig. 6 FEA results of the reflector with the radial and circumferential ribs

由图 6 可知,增加环向加强筋后,抛物面天线结构的变形进一步减小,应力分布也主要集中于加强筋和宇航材料工艺 <http://www.yhclgy.com> 2015 年 第 6 期

底座连接处,应力水平进一步降低,结构基频大幅提高到 205.3 Hz,说明通过增加径向和环向加强筋这两种构型优化方式对提高天线结构刚度均有很大贡献,且增加环向加强筋对提高结构刚度的效果更明显。

2.3 加强筋铺层优化

分析加强筋的铺层方式对天线基频的影响。考察的筋条铺层方式包括 $[0/45/-45/90]_s$ 、 $[0/30/-30/90]_s$ 、 $[0/90]_{2s}$ 和 $[0/30/90/-30]_s$,通过有限元计算得到的基频结果见表 3。

表 3 采用不同铺层顺序加强筋的抛物面天线基频

Tab.3 Fundamental frequency of the parabolic antenna with the ribs in the different laying-ups

| 加强筋铺层方式 | 天线基频/Hz |
|-------------------|---------|
| $[0/45/-45/90]_s$ | 205.3 |
| $[0/90]_{2s}$ | 188.8 |
| $[0/30/-30/90]_s$ | 214.7 |
| $[0/30/90/-30]_s$ | 219.3 |

由 3 表可知,筋条采用 $[0/90]_{2s}$ 铺层方式的天线基频最低,但筋条采用 $[0/45/-45/90]_s$ 铺层方式的天线基频并不是最高的,仅有 205.3 Hz。筋条采用 $[0/30/90/-30]_s$ 铺层方式的天线基频最高,达到了 219.3 Hz,这和一般采用准各向同性铺层性能最优的结果不同。

2.4 加强筋参数优化

薄壁加筋反射面可以在不明显增加结构质量的前

提下根据性能要求对加强筋参数(加强筋数量,厚度,高度等)进行设计。针对现有径向和环向加强筋结构,加强筋高度由 10 mm 提高到 20 mm,结构基频可由 219.3 Hz 提高到 298 Hz,基本达到了蜂窝夹层结构天线的基频,说明设计的薄壁加筋反射面天线是可行的。

3 结论

(1)反射面铺层采用 $[0/45/-45/90]_s$,而加强筋铺层采用 $[0/30/90/-30]_s$ 更有利于天线结构基频的提高。

(2)薄壁加筋反射面构型增加径向和环向筋形式后刚性大幅提高,且增加环向筋后提高幅度更明显。

(3)增加加强筋高度可有效提高天线结构基频。

参考文献

[1] 王琦,王毅凡. Ka 波段通信卫星发展应用现状[J]. 卫星与网络,2010(8):20-27
 [2] 孙旋,童明波,王涛. 复合材料加筋板低速冲击有限元模拟分析[J]. 南京航空航天大学学报,2013(4):510-514
 [3] 李彩林,文友谊,窦作勇. 复合材料成型工艺仿真技术[J]. 宇航材料工艺,2011,41(3):27-30
 [4] 高秀华,张小江,王欢,等. 有限单元法原理及应用简明教程[M]. 北京:化学工业出版社,2008
 [5] 鞠金山,王亚锋. 碳纤维天线的刚度仿真[J]. 合肥工业大学学报(自然科学版),2010,8(8):1257-1259
 [6] 徐胜今,孔宪仁,王本利,等. 正交异性蜂窝夹层板动、静力学问题的等效分析方法[J]. 复合材料学报,2000(3):92-95

(编辑 吴坚)

欢迎订阅 2016 年《宇航材料工艺》

《宇航材料工艺》(双月刊)创刊于 1971 年,是经国家科委和国家新闻出版署批准出版的国家级技术类期刊,中国科技论文统计用刊,中国中文核心期刊,已被国际宇航文摘《IAA》、美国化学文摘《CA》、金属文摘《METADDEX》、《中国期刊网》、万方数据资源系统(ChinaInfo)数字化期刊群、《中国学术期刊(光盘版)》、《中国学术期刊综合评价数据库》、《中国科学引文数据库》等多种文摘和数据库收录。2002 年在第二届国家期刊奖评比活动中,《宇航材料工艺》获百种重点期刊奖。

《宇航材料工艺》主要报道我国材料及工艺的科技进展、科研成果和工程实践,内容丰富,信息量大。除大量刊登学术类技术论文、研究报告、综述和专论外,还刊登新材料、新工艺、新产品及技术改造、技术革新、生产经验、国外科技、科技见闻、成果简介及会议信息等。

刊号: $\frac{\text{ISSN1007-2330}}{\text{CN11-1824/V}}$

双月刊,每期 20 元,全年 6 期,共 120 元/年 国外订价:120 美元/年

帐户名称:航天材料及工艺研究所 请注明:订阅《宇航材料工艺》

开户银行:北京市工商银行东高地支行

帐号:0200006509008800374

邮汇:北京 9200 信箱 73 分箱《宇航材料工艺》编辑部 邮编:100076

联系电话:(010)68383269 E-mail:rtao703@163.com

未收到订单的读者可信汇或直接邮汇至编辑部,并将订户信息发至邮箱。订户信息需注明:单位名称(开发票)、经办人及电话、订阅份数及汇款金额、汇款方式及日期、邮寄地址及邮编。