

某星载双反射抛物面天线轻量化设计*

黄福清, 朱庆流, 张登材, 陈以金

(中国电子科技集团公司第二十九研究所, 四川 成都 610036)

摘要: 为了解决某星载双反射抛物面天线超重的问题, 文中采用力学仿真和试验的方法对其进行了研究。首先, 采用铝合金材料对天线进行结构设计, 并计算整个天线的重量, 结果显示不满足项目重量指标要求; 然后, 基于碳纤维复合材料的特性, 对模型进行结构优化设计, 使重量指标满足项目要求, 同时进行力学仿真分析, 校核天线的结构强度; 最后, 通过振动试验验证了这种轻量化设计的可行性。文中的研究思路和方法为星载双反射抛物面天线的轻量化设计提供了参考。

关键词: 双反射面天线; 碳纤维复合材料; 轻量化设计; 仿真

中图分类号: TN82 **文献标识码:** A **文章编号:** 1008-5300(2020)04-0005-03

Weight Reducing Design of a Spaceborne Double Reflection Paraboloid Antenna

HUANG Fuqing, ZHU Qingliu, ZHANG Dengcai, CHEN Yijin

(The 29th Research Institute of CETC, Chengdu 610036, China)

Abstract: The mechanic simulation and test are carried out to solve the overweight problem of a spaceborne double reflection paraboloid antenna in this paper. First, a three-dimension model of the antenna is designed with aluminum alloy material and weight of the whole antenna is calculated, but the weight does not meet the requirements of index. Then, optimization design of the model is carried out based on characteristics of the carbon fiber composites. Meanwhile, the structure strength of antenna is verified by mechanic simulation analysis. Finally, feasibility of the optimization design is verified by vibration test. The research ideas and methods in this paper provide a reference for the weight reducing design of spaceborne antennas.

Key words: double reflection antenna; carbon fiber composites; weight reducing design; simulation

引言

随着科学技术的发展, 航天电子设备的组成越来越复杂, 重量越来越大, 但航天产品对重量的要求却非常严格, 这就带来了设备轻量化的问题。特别是大型双反射抛物面天线结构尺寸大, 结构复杂, 减重余量大, 有必要对其进行轻量化设计。如果只是单纯采取去除材料的方法来减重, 则其刚度和强度必然会减弱, 特别是双反射抛物面天线这种悬臂安装和开口截面结构, 存在结构破坏的风险。所以应优选材料, 并借助仿真优化结构形式, 确保天线的各项指标满足要求。

碳纤维复合材料因其优异的机械性能, 在航天领域得到了广泛应用^[1-3]。这种材料是以树脂为基体、碳纤维为增强体的复合材料, 具有质量轻、模量高、

热膨胀系数低等特点。同时, 这种材料本身具有导电性, 所以用碳纤维复合材料制作的天线不仅能保证天线的电气性能, 而且质量轻, 抗冲击振动能力强, 还能承受高低温、热真空等恶劣环境。

为了便于运输和快速拆装, 文献[4]设计了一种轻型复合材料抛物面天线, 并着重介绍了碳纤维复合材料轻型反射体的具体结构设计; 文献[5]介绍了一种球载雷达轻质碳纤维天线, 并对天线骨架结构进行了分析; 文献[6]制作了一种高型面精度反射器, 并重点阐述了其工艺制造流程和技术难点。目前, 针对抛物面天线的相关报道主要集中在单个反射面的设计、仿真及工艺制造方面, 对双反射面整体天线的研究鲜见报道。本文基于传统的双反射抛物面天线, 通过优化其材料和结构形式进行了轻量化设计, 并通过仿真和试验对轻量化设计的可行性进行了验证。

* 收稿日期: 2020-07-17

1 双反射抛物面天线原始结构

某星载双反射抛物面天线主要包括主反射面、副反射面、馈源、副反射面支撑杆和馈源支撑杆，其模型如图 1 所示。其中，副反射面的口径大约为 500 mm，采用铝合金直接机加工成型。主反射面的尺寸比较大，口径大约为 1.5 m，采用 2 mm 铝板模压成型，背面采用加强筋支撑。各支撑杆采用不锈钢材料。按照以上思路完成三维模型后，经计算，其总质量约为 40 kg（其中馈源 2.5 kg），总质量超标，不满足质量指标要求，需要进行轻量化设计。

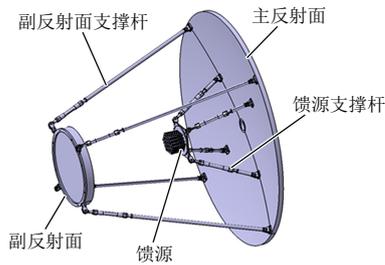


图 1 天线原始结构模型

2 结构优化设计

2.1 结构模型优化设计

天线的主、副反射面为大面积曲面，需要保证足够的刚度，因此采用刚度性能优异的蜂窝夹层结构。蜂窝夹层结构主要由内蒙皮、铝蜂窝和外蒙皮组成，背面设置加强筋。内、外蒙皮均为碳纤维复合材料，各厚 0.3 mm，铝蜂窝高 19.4 mm，结构总厚度为 20 mm。综合考虑导电性能、强度、模量、成本等因素，内蒙皮选择 3 层准各向同性 M55J-6k 碳布铺层，外蒙皮选择 3 层准各向同性 T800H 碳布铺层，背面加强筋选择 T800H 碳布。树脂基体材料选用应用广泛的环氧树脂（AG-80）。蒙皮各层碳纤维布的角度铺设采用准各向同性铺设，以利于保持产品型面精度和各个方向电场基本一致。综合考虑产品重量、力学性能及其工艺铺覆性，选用 5 mm × 0.04 mm 规格的铝蜂窝。

馈源阵支架没有电性能要求，优选 T800H 作为增强材料，AG-80 环氧树脂作基体材料，整体成型，结构形式为锥形筒，通过合理布置减重孔减轻其重量。

支撑杆在主、副反射面之间起连接作用，用于支撑副反射面。支撑杆比较长（约 1 m），为了控制重量，采用直径为 30 mm 的中空管状结构，也采用 T800H 作为增强材料，AG-80 环氧树脂作基体材料。

支撑杆与上下连接件整体共固化。每个支撑杆通过螺套调整主、副反射面的相对位置。上下连接件和螺套采用硬铝合金 2A12-T4 材料，紧固件采用钛合金 Ti-6Al-4V。

优化后的天线结构模型如图 2 所示，天线总质量约为 16.5 kg（馈源为 2.5 kg），减小了 23.5 kg，减小比例为 59%，总质量满足指标要求。还需要通过力学仿真计算来校核天线的设计强度。

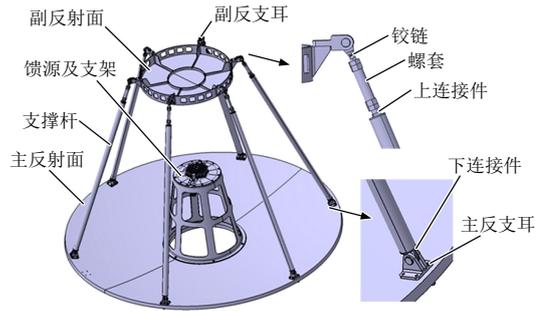


图 2 优化后的天线结构模型

2.2 有限元模型

综合考虑等效单元属性和计算效率等因素，对天线的三维模型进行一定的简化，并建立有限元模型。其中，两个反射面和馈源支架利用等效壳单元网格模拟，支撑杆利用梁单元模拟，螺套、铰链及各个连接件利用实体单元进行网格模拟，各连接点采用铰接处理。边界条件为约束主反射面背面的对外法兰盘安装孔。完整的天线有限元模型如图 3 所示。有限元模型中各部分材料的属性见表 1。

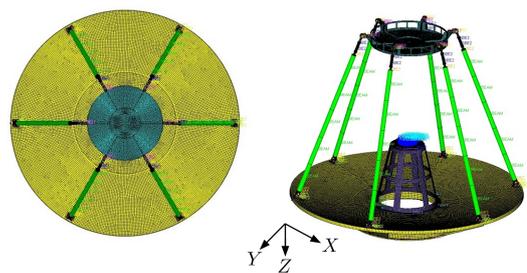


图 3 天线有限元模型

表 1 结构材料力学性能参数

材料名称	弹性模量 /GPa	泊松比	抗拉强度 /MPa	密度 /((kg·m ⁻³))
2A12-T4	71	0.32	520	2 800
Ti-6Al-4V	109	0.34	950	4 440
T800/AG-80	65.6	0.26	450	1 700

2.3 模态分析

对天线有限元模型进行模态分析，提取前 16 阶模态，其中天线的一阶模态如图 4 所示，振型为副反

射面沿 Y 向往复摆动, 振动频率为 12 Hz, 避开了天线安装卫星平台的共振频率, 满足要求。

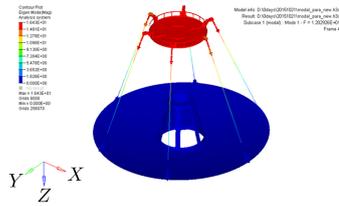


图 4 天线的一阶模态振型

2.4 正弦振动分析

天线正弦振动试验条件见表 2。采用模态叠加法, 分别对天线进行 X、Y、Z 三个方向的正弦振动分析。提取前 16 阶模态, 满足在主要运动方向上的总有效质量超过模型中可运动质量 90% 的要求^[7]。直接模态阻尼设置为 0.05。

表 2 正弦振动试验条件

频率范围 /Hz	X、Y、Z 向 振动量值	扫描速率 / (oct·min ⁻¹)
5~12	10.35 mm	4
12~20	6g	
20~25	过渡至 10g	
25~35	10g	
35~45	过渡至 6g	
45~100	6g	

天线在结构形式上以 Z 轴为旋转轴, 呈旋转对称, 所以在 X 和 Y 向激励时应力相近。如图 5 所示, Y 向激励时应力值最大, 最大应力出现在上连接件与螺套连接处, 在 12 Hz 附近天线的应力值最大, 为 623.7 MPa, 超过了硬铝的抗拉强度 520 MPa, 不满足要求, 需要进一步迭代。

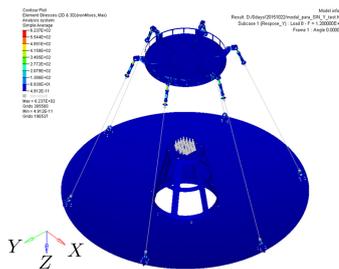


图 5 天线应力分布云图

2.5 方案迭代

根据模拟样机调试情况, 可以将支撑杆的加工精度控制在电气性能接受的范围内, 简化支撑杆与副反射面的调节连接方式, 去掉铰链和螺套。天线迭代后的结构模型如图 6 所示, 支撑杆通过上下连接件与主副反射面连接。由于上述正弦振动分析中上下连接件应力比较大, 因此将材料改成强度高的钛合金 Ti-6Al-4V, 改进后天线的总质量为 16 kg。重新进行

模态分析, 天线的一阶固有频率为 16 Hz, 其振型与图 4 接近。

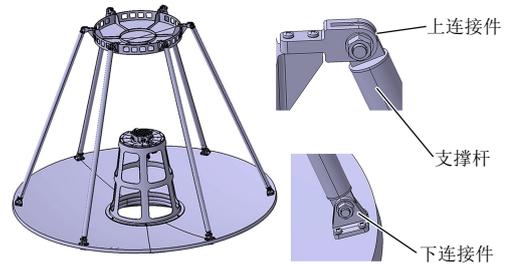


图 6 迭代后的天线结构模型

按相同的方法分别对天线进行 X、Y、Z 三向正弦振动分析。其中 Y 向激励时, 应力值最大, 最大应力位于支撑杆和上连接件处。支撑杆的最大应力为 102 MPa, 小于碳纤维的抗拉强度。上连接件所受的应力为 522 MPa, 远小于钛合金的抗拉强度 950 MPa。

考虑加工制造和载荷的不确定性, 按下式计算安全系数:

$$k = \frac{\sigma_b}{\sigma} = \frac{950}{522} = 1.8$$

式中: k 为安全系数; σ_b 为极限应力; σ 为许用应力。计算出安全系数为 1.8, 大于 1.5, 满足项目要求。

3 试验验证

为了进一步验证天线方案是否满足环境振动试验要求, 按照表 2 中的振动条件, 分别对天线实物进行 X、Y、Z 三个方向的振动试验, 如图 7 所示。每个方向分别进行振动前扫频试验、正弦振动试验和振动后扫频试验。扫频测试结果见表 3, 试验结果与仿真值比较一致。

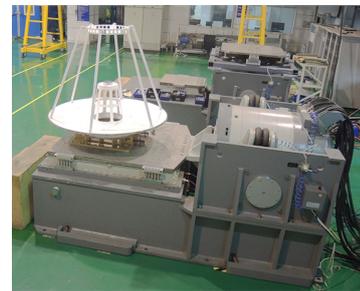


图 7 天线的振动试验

表 3 一阶频率的仿真值与试验值对比

方向	仿真值/Hz	试验值/Hz
X 向	16	15.6
Y 向	16	15.0
Z 向	84	94.2

(下转第 41 页)

- [5] GAUTAM G D, PANDEY A K. Pulsed Nd: YAG laser beam drilling: a review [J]. Optics & Laser Technology, 2018, 100: 183–215.
- [6] WANG H, LIN H, WANG C, et al. Laser drilling of structural ceramics: a review [J]. Journal of the European Ceramic Society, 2017, 37(4): 1157–1173.
- [7] 孙立华. 陶瓷激光打孔技术研究 [D]. 长春: 长春理工大学, 2007.
- [8] 梅雪松, 杨子轩, 赵万芹. 电子陶瓷基板表面激光孔加工综述 [J]. 中国激光, 2020, 47(5): 1–16.
- [9] KACAR E, MUTLU M, AKMAN E, et al. Characterization of the drilling alumina ceramic using Nd: YAG pulsed laser [J]. Journal of Materials Processing Technology, 2009, 209(4): 2008–2014.
- [10] 夏博, 姜澜, 王素梅, 等. 飞秒激光微孔加工 [J]. 中国激光, 2013, 40(2): 1–12.
- [11] 章斌. 基于光纤激光的氧化铝陶瓷材料微孔加工工艺研究 [D]. 温州: 温州大学, 2019.
- [12] 盖晓晨. 飞秒激光微加工的系统建立及工艺研究 [D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2013.
- [13] 姜涛, 赵清亮, 樊荣伟, 等. 飞秒激光在宽带隙陶瓷表面的烧蚀特性 [J]. 红外与激光工程, 2012(2): 387–392.
- [14] 刘宏斌. 轴对称微结构表面的飞秒激光加工工艺研究 [D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2014.
- [15] ZHANG J, LONG Y, LIAO S, et al. Effect of laser scanning speed on geometrical features of Nd: YAG laser machined holes in thin silicon nitride substrate [J]. Ceramics International, 2016, 43(3): 2938–2942.
- [16] WANG L Z, ZHAO W Q, MEI X S, et al. Improving quality and machining efficiency of hole during AlN trepanning with nanosecond pulse laser [J/OL]. Ceramics International, [2020-07-29]. <https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2020.06.179>.
- [17] CHEN M, HSIAO W, WANG M, et al. A theoretical analysis and experimental verification of a laser drilling process for a ceramic substrate [J]. International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2015, 81(9-12): 1723–1732.

姜海涛 男, 1979年生, 硕士, 高级工程师, 主要从事雷达工艺总体设计和先进制造技术研究工作。

(上接第7页)

试验完毕检查天线外观, 无肉眼可见的损伤, 且每个方向试验前后两次的扫频结果一致, 表明产品完好, 能够满足环境试验要求。

由于天线是典型的机电一体化产品, 需测试其电性能指标, 验证是否完好。经过试验前后对照测试, 发现其各项电性能指标都满足要求。

4 结束语

以往文献多偏向于单个反射面天线的设计与研究, 而本文则注重更复杂的双反射面天线的整体结构研究。通过碳纤维复合材料和结构优化的路径, 采用仿真与设计迭代的方法, 解决了某星载双反射抛物面天线超重的问题, 使天线实物最终通过试验验证。将碳纤维蜂窝夹层结构应用于抛物面天线结构轻量化设计有效地减轻了重量。有限元仿真中蜂窝夹层结构运用了等效壳单元的方法, 计算出的结果与试验结果比较接近。该天线产品现在已成功应用于某星载平台, 说明这些研究方法可行, 可供其他大型天线结构轻量化设计参考。

参考文献

- [1] 李威, 郭权峰. 碳纤维复合材料在航天领域的应用 [J]. 中

- 国光学, 2011, 4(3): 52–55.
- [2] 张登材, 张义萍, 黄福清, 等. 碳纤维复合材料在星载天线结构中的应用 [J]. 电子机械工程, 2018, 34(3): 52–55.
- [3] 习稳庆, 汤小蓉, 韩伟强, 等. 星载大口径固面反射器结构优化设计 [J]. 电子机械工程, 2018, 34(3): 201–212.
- [4] 杨文宁. 车载轻型抛物面天线结构设计 [J]. 河北省科学院学报, 2016, 33(4): 13–17.
- [5] 朱迅, 许越宁. 某雷达轻质碳纤维天线结构设计 [J]. 纤维复合材料, 2010(3): 20–22.
- [6] 方芳, 杜涛. 高精度碳纤维反射器制造技术 [J]. 电子机械工程, 2012, 28(5): 53–56.
- [7] 石亦平, 周玉蓉. ABAQUS 有限元分析实例详解 [M]. 北京: 机械工业出版社, 2009.

黄福清 男, 1968年生, 高级工程师, 主要从事天馈系统结构设计工作。

朱庆流 男, 1984年生, 工程师, 主要从事结构强度仿真工作。

张登材 男, 1973年生, 高级工程师, 主要从事天馈系统结构设计工作。

陈以金 男, 1985年生, 工程师, 主要从事结构强度仿真工作。