

DOI:10.16356/j.1005-2615.2021.S.011

## 小卫星一体化星敏支架拓扑优化

王瑞显, 冯振伟, 马灵犀, 单悌磊, 张 杨, 刘质加

(航天东方红卫星有限公司, 北京 100094)

**摘要:** 针对小卫星薄壁式铸钛一体化星敏支架减重需求, 采用拓扑优化方法设计了一种面向 3D 打印制造的一体化星敏支架, 拓扑优化计算时以刚度不低于 200 Hz 和重量最小化为目标得到了材料分布模型, 采用形状优化和形貌优化等手段对材料分布模型进行光滑处理得到了拓扑优化设计后一体化星敏支架。经有限元分析, 星敏支架刚度和强度满足要求。选择 Ti6Al4V (TC4) 激光选区熔化成型工艺加工了样机, 验证了拓扑优化的星敏支架的可制造性。拓扑优化的一体化星敏支架重量相比薄壁式结构铸钛一体化星敏支架减重达 80%。

**关键词:** 一体化星敏支架; 拓扑优化; 3D 打印

**中图分类号:** V414      **文献标志码:** A      **文章编号:** 1005-2615(2021)S-0067-04

### Topology Optimization of Sensor Brackets for Small Satellites

WANG Ruixian, FENG Zhenwei, MA Lingxi, SHAN Tilei, ZHANG Yang, LIU Zhijia

(DFH Satellite Co., Ltd., Beijing 100094, China)

**Abstract:** To satisfy the lightweight design requirements of the thin-walled titanium sensor brackets of small satellites, the topology optimization method is to manufacture sensor brackets by 3D printing. The topology optimization constraint conditions are the stiffness no less than 200 Hz and the minimum bracket weight. The material distribution model is generated after topology optimization. The shape optimization and morphology optimization method are used to smooth the material distribution, and the sensor brackets with optimized topology are produced. A finite element analysis demonstrates that the mechanical stiffness and strength of the designed sensor bracket meets the requirement. The sample piece is manufactured by Ti6Al4V (TC4) laser selective melting (SLM) and the manufacturability is verified. The weight of the designed bracket is 80% lighter than the thin-walled titanium casting bracket.

**Key words:** combined star sensor bracket; topology optimization; 3D printing

星敏是卫星重要的姿态测量部件, 对于光学遥感小卫星常配置 3 个星敏完成卫星成像期间的姿态测量, 姿态测量的精度直接关系到卫星成像的定位精度<sup>[1]</sup>。卫星在轨期间整星结构热变形引起的星敏间夹角变化是影响星敏测量精度的一个重要因素, 为此定位精度高、图像分辨率高的光学遥感卫星常常将所有星敏通过一个体化支架组合安装在一起以减少热变形带来的星敏夹角变化, 同时星敏支架采用热膨胀系数小的材料也是减小热变形

的重要手段<sup>[2]</sup>。目前广泛使用的一体化星敏支架为薄壁式结构, 整体包络尺寸较大, 由热膨胀系数小的钛合金铸造而成, 质量在 7 kg 左右, 一个星敏支架重量往往占到了小卫星次结构总重量的三分之一左右。对于重量指标严苛的小卫星, 星敏支架减重需求迫切而且减重空间较大。次结构减重设计主要从材料选择和优化结构形式两方面展开, 如采用碳纤维、镁铝合金等轻质材料和采用结构拓扑优化设计方法等。对于研制成本低、周期短的小卫

**收稿日期:** 2021-05-10; **修订日期:** 2021-06-25

**通信作者:** 刘质加, 男, 高级工程师, E-mail: 120248549@qq.com。

**引用格式:** 王瑞显, 冯振伟, 马灵犀, 等. 小卫星一体化星敏支架拓扑优化[J]. 南京航空航天大学学报, 2021, 53(S): 67-70. WANG Ruixian, FENG Zhenwei, MA Lingxi, et al. Topology optimization of sensor brackets for small satellites[J]. Journal of Nanjing University of Aeronautics & Astronautics, 2021, 53(S): 67-70.

星来说,次结构的减重设计需要综合考虑时间和成本经济性。

在满足一定约束条件下,拓扑优化方法能够获得优化的材料分布,从而获得最优的结构特定性能指标。结构拓扑优化设计在满足结构设计性能要求的条件下,常需要结合尺寸优化、形状优化和形貌优化等优化方法,改善结构的综合性能,获得更符合工程应用的结构模型。目前常用的连续体结构的拓扑优化方法有:变厚度法、变密度法及均匀化方法<sup>[3-9]</sup>。经过30多年的发展,拓扑优化方法理论及软件日趋成熟,成为了结构优化设计的重要手段。然而拓扑优化结果往往比较复杂,不适宜采用传统的铸造、机械加工等制造方法,拓扑优化的结构无法制造一度实现成为拓扑优化方法广泛应用的瓶颈。

增材制造是采用层层堆积材料的方法制造零件结构的技术,该加工技术可不受模具的可制造性及零件空间可达性的制约,可实现复杂形状零件的制造,适合于多品种、小批量、结构复杂、原材料价值高的结构制造,被誉为颠覆性的制造技术<sup>[10-12]</sup>。

将拓扑优化设计方法和增材制造技术结合起来,即将先进的设计方法和制造技术有效结合,可大大地提高产品创新能力。近年来随着增材制造理论、设备、材料及工艺的成熟,拓扑优化结构得到了广泛应用。本文拟采用拓扑优化方法和3D打印技术对一体化星敏支架进行减重优化设计。

### 1 拓扑优化设计流程

拓扑优化设计的流程如图1所示,设计师首先须建立结构设计基础模型,之后按照拓扑优化需求

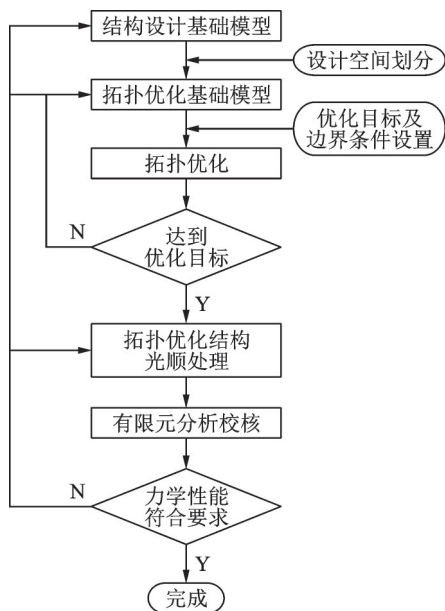


图1 星敏传感器支架拓扑优化设计流程

Fig.1 Topology optimization workflow of star sensor bracket

划分出设计空间和非设计空间从而得到拓扑优化的基础模型,在拓扑优化软件工具设置优化模型的材料参数、位移约束、载荷、优化目标等参数,设置完成后进行拓扑优化运算得到拓扑优化模型,判断拓扑优化模型是否达到了优化目标,如果没有达到优化目标则需修改拓扑优化基础模型或者调整优化目标重新进行拓扑优化计算直到得到满意的结果。拓扑优化计算得到结果只是粗糙的材料分布模型,需结合形状优化和形貌优化等手段对拓扑优化计算得到的模型进行光顺处理从而得到可制造的设计模型。拓扑优化的结构还需应用有限元分析手段对结构的刚度、强度等力学性能进行校核,如不满足要求则需调整模型重新进行拓扑优化。

### 2 星敏支架的拓扑优化

目前已经有成熟的软件工具用于结构的拓扑优化设计。本文采用SolidThinking Inspire作为拓扑化工具进行星敏支架的拓扑优化设计计算和光顺处理,得到了可3D打印的星敏支架设计模型。

本文以图2所示的一体化星敏支架作为基础模型进行拓扑优化设计,该星敏支架上装有3个星敏,且3个星敏间光轴角度固定,星敏和星敏支架中间有冷板。支架基础模型导入SolidThinking Inspire中,星敏和冷板使用质量点代替,支架基础模型中的薄壁结构部分和安装耳片部分设置为非设计空间,其余为设计空间。星敏支架拓扑优化基础模型如图3所示。星敏支架材料选择钛合金,8处安装点设置为固定约束。优化目标设置为基频不低于200 Hz和质量最小化。在SolidThinking Inspire工具中进行拓扑优化计算,得到拓扑优化结果如图4所示。

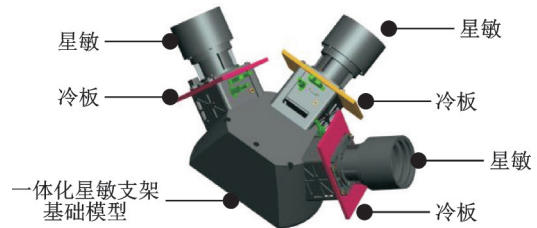


图2 一体化星敏支架基础模型

Fig.2 Basic model of combined star sensor bracket

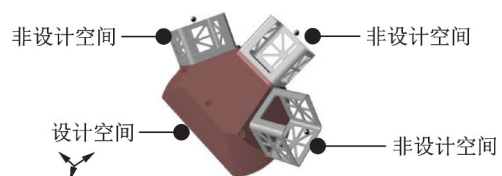


图3 星敏支架拓扑优化基础模型

Fig.3 Topology optimization basic model of combined star sensor bracket

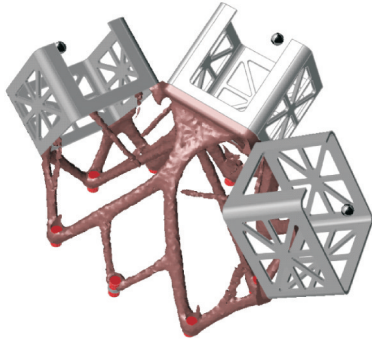


图4 星敏支架拓扑优化结果

Fig.4 Topology optimization model of star sensor bracket

本文采用SolidThinking Inspire的拓扑优化模型处理模块按照拓扑优化得到材料分布路径进行了模型光滑处理,之后使用Creo Parametric工具对星敏支架安装耳片和星敏冷板安装处进行细化设计,得到了如图5所示的设计模型。

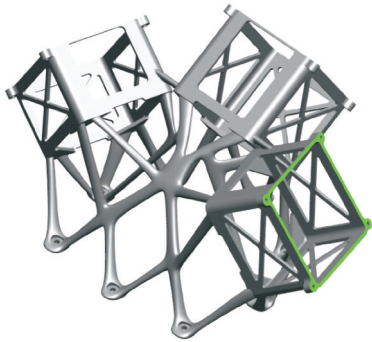


图5 一体化星敏支架拓扑优化设计模型

Fig.5 Topology optimization design model of combined star sensor bracket

### 3 星敏支架力学分析

经拓扑优化设计的一体化星敏支架采用Msc/Patran软件进行有限元建模和结果处理,并使用通用结构分析软件Msc/Nastran进行计算分析。有限元建模时对星敏支架进行了如下处理:

(1) 采用线弹性理论,将支架视为线性弹性结构系统,采用体单元模拟;

(2) 星敏模型采用质量点模拟;

(3) 在星敏与支架安装面处的所有连接螺栓处均采用MPC约束,以使星敏与支架刚性连接;

(4) 有限元模型的边界条件为星敏支架与结构板安装面的所有固定螺栓处采用固支约束。

星敏支架的有限元模型见图6,共划分节点57 591个、单元27 631个。

星敏支架模态分析结果如表1所示。星敏支架基频为294.72 Hz,满足大于100 Hz的刚度要求。

星敏支架受到的载荷主要是卫星发射过程中

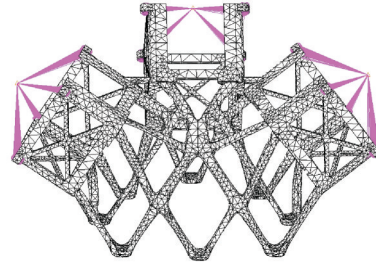


图6 星敏支架有限元模型

Fig.6 Finite element model of star sensor bracket

表1 星敏支架模态分析结果

Table 1 Results of star sensor bracket modal analysis

阶次	频率/Hz
一	294.72
二	332.21
三	341.46
四	375.23
五	409.92
六	468.20

运载火箭作用的过载、正弦振动和随机振动等载荷,为验证星敏支架的静强度,本文采取 $3\sigma$ 法则将随机振动条件等效成惯性载荷来分析计算。小卫星组件的随机振动试验条件见表2,鉴定级随机振动的总均方值为13.6g,则

$$13.6g \times 3 = 40.8g = 40.8 \times 9.8 = 400 (\text{m/s}^2)$$

表2 小卫星组件的随机振动试验条件

Table 2 Random vibration test condition of small satellite subassembly

频率/Hz	振动幅值	
	验收级	鉴定级
10~95	+6 dB/oct	+6 dB/oct
95~130	$0.45g^2/\text{Hz}$	$1g^2/\text{Hz}$
130~200	-14.7 dB/oct	-13 dB/oct
200~600	$0.055g^2/\text{Hz}$	$0.16g^2/\text{Hz}$
600~2 000	-15 dB/oct	-15 dB/oct
总均方根值	8.5 Grms	13.6 Grms
振动方向	X、Y、Z	

对星敏支架X、Y、Z三向同时施加 $400 \text{ m/s}^2$ 的载荷,星敏支架的Von Mises应力云图如图7所示,

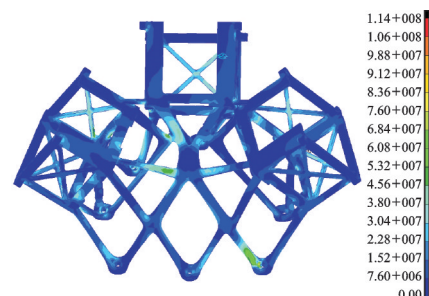


图7 Von Mises应力云图

Fig.7 Von Mises stress nephogram

可见最大应力为114 MPa。星敏支架采用的材料为Ti6Al4V(TC4),3D打印件材料屈服强度为800 MPa,安全裕度为 $800/114-1=6.02$ 。对应金属材料屈服强度,安全裕度均大于0,满足强度要求。

#### 4 星敏支架3D打印

3D打印技术是基于离散-堆积原理,实现零件三维实体快速自由成形制造的技术。主要技术包括激光选区熔化技术,激光直接沉积制造技术,光固化立体成型技术等。本文选择Ti6Al4V(TC4)激光选区熔化成型工艺(SLM)进行加工,3D打印的一体化星敏支架如图8所示,星敏支架实测质量为1.36 kg。

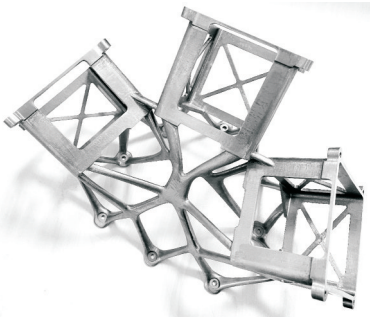


图8 一体化星敏支架3D打印样件

Fig.8 3D print sample piece of combined star sensor bracket

#### 5 结 论

本文探讨了拓扑优化与3D打印技术相结合在复杂几何形状的一体化星敏支架设计中的应用。采用拓扑优化技术在SolidThinking Inspire工具中对装有3个星敏的一体化星敏支架进行了优化设计,对拓扑优化后的一体化星敏支架进行了有限元仿真分析计算,星敏支架刚度和强度均满足要求。选择Ti6Al4V(TC4)激光选区熔化成型工艺加工了样件,实测星敏支架实测质量为1.36 kg,相比传统的薄壁式结构铸造星敏支架减重达80%,减重效果明显,拓扑优化设计的一体化星敏支架有广阔的应用前景。

#### 参考文献:

- [1] 白照广,陆春玲,李长俊,等.高分一号卫星方案与技术特点[J].航天器工程,2014(23):1-6.  
BAI Zhaoguang, LU Chunling, LI Changjun, et al. GF-1 satellite design and technology characteristics [J]. Spacecraft Engineering, 2014(23): 1-6.
- [2] 徐云飞,邸国栋,白照广,等.高分一号卫星总体构形布局与优化[J].航天器工程,2014(23):32-35.  
XU Yunfei, DI Guodong, BAI Zhaoguang, et al. Design of configuration and layout for GF-1 satellite [J]. Spacecraft Engineering, 2014(23): 32-35.
- [3] STANFORD B K, DUNNING P D. Optimal topology of aircraft rib and spar structures under aeroelastic loads[J]. J Aircraft, 2015, 52(4): 1298-1311.
- [4] BENDSØE M P, KIKUCHI N. Generating optimal topology in structural design using a homogenization method[J]. Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering, 1988, 71: 197-224.
- [5] MLEJNEK H P, SCHIRRMACHER R. An engineer's approach to optimal material distribution and shape finding[J]. Comp Meth Appl Mech Engrg, 1993, 106: 1-26.
- [6] XIE Y M, STEVEN G P. A simple evolutionary procedure for structural optimization[J]. Computer and Structures, 1993, 49: 885-896.
- [7] 周景陵.基于多边形网格的结构拓扑优化方法研究[D].西安:西安电子科技大学,2017.  
ZHOU Jingling. Structural topology optimization methods based on polygonal meshes[D]. Xi'an: Xidian University, 2017.
- [8] 刘军欢.面向增材制造的拓扑优化结果精细化设计[D].大连:大连理工大学,2016.  
LIU Junhuan. Refined design of topology optimization results for additive manufacturing[D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2016.
- [9] 马灵犀,葛逸民,王瑞显,等.面向增材制造的小卫星动量轮支架优化设计[C]//2018年集团公司航天器数字化制造工艺技术中心技术交流会.西安:[s.n.],2018.  
MA Lingxi, GE Yimin, WANG Ruixian, et al. Optimal design of small satellite momentum wheel bracket for additive manufacturing[C]//Proceedings of 2018 CASC Spacecraft Digital Manufacturing Center Academic Conference. Xi'an:[s.n.],2018.
- [10] 高永新,马灵犀,王瑞显,等.面向3D打印的小卫星星敏器支架优化设计[C]//2018年中国航天科技集团公司科技委总体技术专业组学术研讨会.北京:[s.n.],2018.  
GAO Yongxin, MA Lingxi, WANG Ruixian, et al. Optimal design of small satellite star sensor bracket for 3D printing[C]//Proceedings of 2018 CASC Technology Committee System Design Major Academic Conference. Beijing:[s.n.],2018.
- [11] 李海亮,贾德昌,杨治华,等.选区激光熔化3D打印钛合金及其复合材料研究进展[J].材料科学与工艺,2019,27(2):1-15.  
LI Hailiang, JIA Dechang, YANG Zhihua, et al. Research progress on selective laser melting 3D printing of titanium alloys and titanium matrix composites[J]. Materials Science and Technology, 2019, 27(2): 1-15.
- [12] 唐超兰,温竟青,张伟祥,等.钛合金3D打印成形技术及缺陷[J].航空材料学报,2019,39(1):38-47.  
TANG Chaolan, WEN Jingqing, ZHANG Weixiang, et al. 3D printing technology for titanium alloy and its defect[J]. Journal of Aeronautical Materials, 2019,39(1): 38-47.