

引用格式:邢艳秋.空间微型光学载荷主结构优化设计[J].电光与控制,2018,25(10):104-107. XING Y Q. Optimization design of the main structure of a mini-optical device for spatial use[J]. Electronics Optics & Control, 2018, 25(10):104-107.

## 空间微型光学载荷主结构优化设计

邢艳秋

(吉林工业职业技术学院机电与智能技术学院,吉林 吉林 132013)

**摘要:**针对某空间微型光学载荷主结构质量过重、地面重力变形过大以及基频太低的问题,提出以质量最小、随机加速度响应 RMS 值为目标,基频、变形为约束条件,推导出多目标拓扑优化的表达式,建立优化数学模型,并对光学载荷主结构进行拓扑优化设计。对优化后的主结构进行工程分析,结果表明,优化后的主结构质量较小,基频较高,变形和随机振动响应较小。最后对主结构和其上端安装的光学载荷进行了力学试验,并对试验后的设备进行了性能检测,结果满足总体指标,证明了所设计的主结构具有良好的性能,同时该主结构优化方法有效可行。

**关键词:**微型光学载荷;主结构;拓扑优化;有限元分析

**中图分类号:** V414.19 **文献标志码:** A **doi:**10.3969/j.issn.1671-637X.2018.10.021

## Optimization Design of the Main Structure of a Mini-optical Device for Spatial Use

XING Yan-qiu

(Electromechanical and Intelligent Technology Institute, Jilin Vocational College of Industry and Technology, Jilin 132013, China)

**Abstract:** Aiming at the problems that the main structure of a mini-optical device for spatial use is too heavy, its ground gravity deformation is severe and the base frequency is too low, an optimization mathematical model was established with the minimum mass and the RMS of random acceleration response as the objectives, and the fundamental frequency and the deformation as the constraint conditions. The topology optimization design of the main structure was carried out. An engineering analysis was made to the optimized main structure. The results showed that the optimized main structure of the mini-optical device has lighter mass, higher fundamental frequency, less deformation and random vibration response. Mechanics experiments were carried out to examine the performance of the main structure. The detection results accord with the overall index, which proved that the optimization method is effective and feasible.

**Key words:** mini-optical device; main structure; topology optimization; finite element analysis

### 0 引言

随着航天器遥感技术的快速发展,微型化航天器已成为世界各国的研究热点。对光学航天器而言,要求其所安装的光学设备尽可能小,从而可有效减轻航天器质量。航天器在火箭发射升空过程中需要承受火箭产生的苛刻环境条件,环境激励通过航天器传递到光学载荷结构上,将影响光学载荷设备的性能和可靠性<sup>[1-3]</sup>。通常要求航天器结构具有一定的刚度,不至于在升空过程中结构被破坏,而且光学载荷结构还要求质量轻,这就需要对其结构进行优化设计。自1988

年 BENDSØE 等<sup>[4]</sup>开展连续体拓扑优化研究以来,拓扑优化理论得到长足发展;文献[5]研究了静力变形与频率约束下的拓扑优化问题;文献[6]为降低航天器结构中的随机响应,提出了以随机 RMS 值最小为目标的优化设计方法,并很好地应用于工程实际。本文根据某空间微型光学载荷<sup>[7]</sup>总体设计指标,提出对其主结构进行多目标优化设计。根据优化结果建立主结构模型,并对其进行工程分析,结果表明,优化后的结构满足总体设计指标。

### 1 微型光学载荷主结构设计

#### 1.1 方案设计

根据总体指标,初步设计的微型光学载荷主支撑结构如图1所示,其上端光学载荷质量为20 kg。主结构采

收稿日期:2017-10-24

修回日期:2017-11-20

作者简介:邢艳秋(1981—),女,吉林四平人,硕士,研究方向为机械优化设计、算法、光学结构。

用型号为 TC4 的钛合金材料,其外形尺寸为 400 mm × 280 mm × 85 mm,主结构设计指标为基频不小于 200 Hz,重量不大于 15 kg,地面重力条件下光学载荷安装位置重力变形不大于 2 μm,光学敏感设备安装位置随机加速度响应 RMS 值放大倍率不大于 1.5。

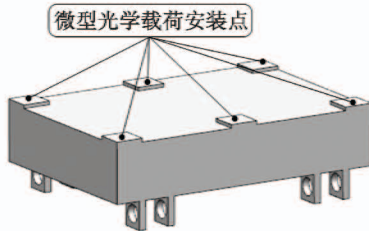


图 1 光学载荷主支撑结构

Fig. 1 Main support structure of the optical device

### 1.2 主结构分析

在 Hypermesh 中建立主结构有限元模型,并对其赋 TC4 材料属性,设定垂直光学载荷安装面方向为 Z 向。对主结构进行模态分析和静力学分析,分析结果如表 1 所示。

表 1 主结构初始方案分析结果

Table 1 Analysis results of initial scheme of main structure

质量/kg	模态/Hz				Z 向变形/mm
	一阶	二阶	三阶	四阶	
39.96	11.18	11.25	36.53	73.65	0.186 2

据表 1 可知,初步设计的光学载荷主结构质量、基频和地面静力变形均不满足总体指标,因此,对主结构进行优化设计。

## 2 主结构优化设计

### 2.1 运动方程

航天器在火箭发射过程中,其主结构承受随机加速度动态载荷,结构将产生变形,随机加速度动态载荷在优化过程中采用等效静态载荷计算。建立以主结构基频和敏感设备安装位置静力变形为约束、质量最小转化为体积最小、随机响应 RMS 为优化目标的拓扑优化模型。根据结构运动时间,可将其运动方程表示为

$$M(x)\ddot{y}(t) + K(x)y(t) = R(t) \quad (1)$$

$$K(x)y(t) = f_{eqt} \quad (2)$$

式中:  $M$  和  $K$  分别为质量矩阵和刚度矩阵;  $y$  为结构动态位移矢量;  $R$  为所承受的动态载荷;  $f_{eqt}$  是时间为  $t$  时的等效静态载荷。

式(1)变形为

$$K(x)y(t) = R(t) - M(x)\ddot{y}(t)。 \quad (3)$$

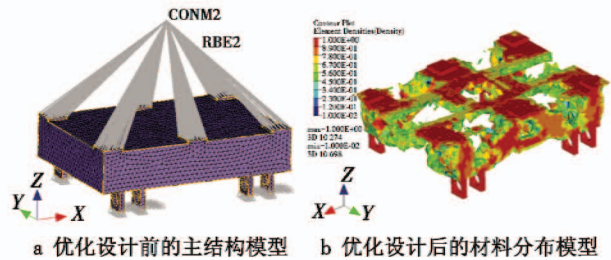
由式(3)可看出,等效静态载荷包含结构的惯性力和所受的外力,离散化处理后通过计算每个离散点即可求解其对应的值,在此基础上来求解主结构的响

应优化。

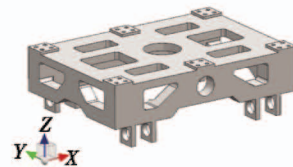
### 2.2 优化过程

本文采用虚拟激励法<sup>[8]</sup>把随机激励近似转化为简谐激励进行求解<sup>[9]</sup>,利用 SIMP<sup>[10-12]</sup>材料插值模型,通过引入中间密度单元,将离散型优化问题转换为连续型优化问题,把拓扑优化问题转化为材料的最优分布问题。采用折衷规划法<sup>[13]</sup>,通过引入数学规划对多个目标进行权衡,建立合理的目标函数,将多目标优化模型转化为单目标优化模型。

主结构选用 TC4 钛合金材料,密度 4400 kg/m<sup>3</sup>,弹性模量 110 000 MPa,泊松比 0.34。其优化前模型如图 2a 所示,包含 9908 个节点,42 904 个四面体单元。经过 46 步迭代优化之后,主结构材料分布模型如图 2b 所示。兼顾加工工艺因素,设计微型光学载荷主结构模型如图 2c 所示,最薄位置尺寸为 15 mm,圆角为 R6。迭代过程如图 3 所示,收敛结果如表 2 所示。



a 优化设计前的主结构模型 b 优化设计后的材料分布模型



c 优化设计后的主结构模型

图 2 优化设计前后模型

Fig. 2 The model before and after optimal design

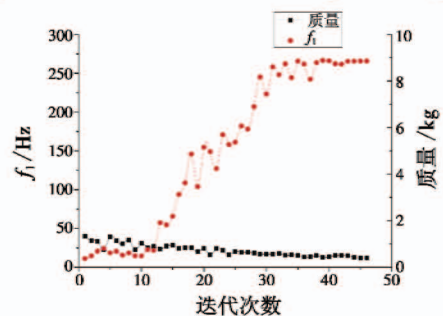


图 3 迭代优化曲线

Fig. 3 Iterative optimization curves

表 2 迭代优化结果

Table 2 Iterative optimization results

质量/kg	模态/Hz				Z 向变形/mm
	一阶	二阶	三阶	四阶	
12.12	265.7	292.7	936.4	964.6	0.000 28



### 3 工程分析

#### 3.1 模态分析

在Hypermesh中建立所优化设计的主结构有限元模型,并分别对其进行模态分析和静力分析。主结构前四阶阵型云图如图4所示,重力条件下光学载荷安装位置Z向静力变形云图如图5所示。工程分析结果见表3,表中数据表明优化设计结果均优于任务指标。

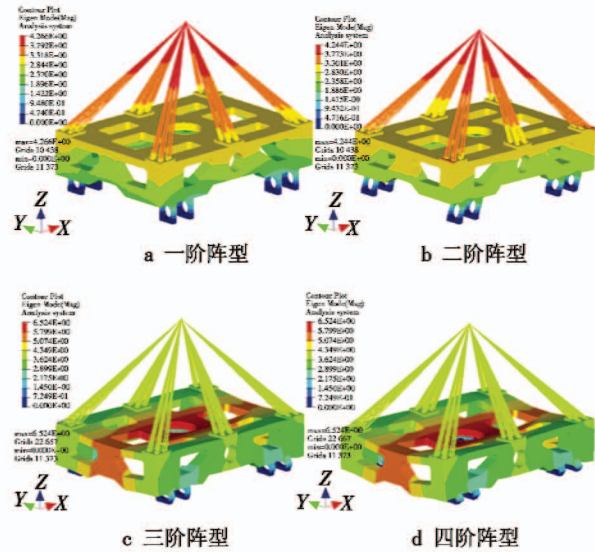


图4 主结构前四阶阵型云图

Fig.4 First four order cloud chart of the main structure

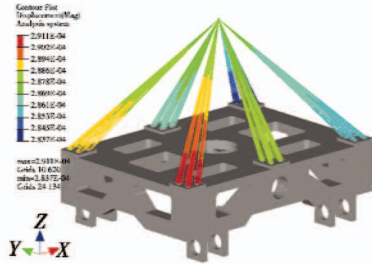


图5 光学载荷安装Z向重力变形云图

Fig.5 Gravity deformation cloud chart of Z axis of the sensitive equipment installation

表3 优化后主结构工程分析结果

Table 3 Analysis results of main structure after optimization

质量/kg	模态/Hz				Z向变形/mm
	一阶	二阶	三阶	四阶	
12.50	268.7	291.5	926.9	965.3	0.000 28

#### 3.2 误差分析

空间微型光学载荷主结构优化结果与工程分析结果见表4。据表4可知,优化结果与工程分析结果均满足总体设计指标,且优化设计后主结构质量降低了68.71%,基频为268.7 Hz,高于总体指标,重力条件下,Z向静力变形远小于总体指标2 μm。

表4 结果对比与误差

Table 4 Result comparison and the error

项目	优化前	优化结果	工程分析结果	总体指标	相对误差
质量/kg	39.96	12.12	12.50	≤15	3.13%
一阶频率/Hz	11.18	265.7	268.7	≥200	1.12
Z向变形/mm	0.1862	0.000 28	0.000 28	≤0.002	—

同时发现主结构优化结果与工程分析结果存在差异,这是由于优化设计时兼顾加工工艺,对结构进行了柔顺化处理,在局部用圆角代替尖角,且最大相对误差为3.13%,在工程误差范围之内。

### 4 试验

#### 4.1 随机振动试验

根据运载提供的单机组件级随机振动强迫加速度功率谱密度RMS值为14.53g,试验条件如表5所示。用20 t力学振动试验台分别对主结构及其顶部安装的光学设备进行X向、Y向、Z向随机振动试验,用以考核主结构的结构强度和稳定性,主支撑结构上光学载荷随机振动响应曲线如图6所示。

表5 激励加速度功率谱

Table 5 The acceleration power spectrum

频率/Hz	功率谱密度	频率/Hz	功率谱密度
>20 ~ 80	+8 dB/oct	>700 ~ 1700	0.05g <sup>2</sup> Hz <sup>-1</sup>
>80 ~ 180	0.45g <sup>2</sup> Hz <sup>-1</sup>	>1700 ~ 2000	-6 dB/oct
>180 ~ 700	0.18g <sup>2</sup> Hz <sup>-1</sup>		

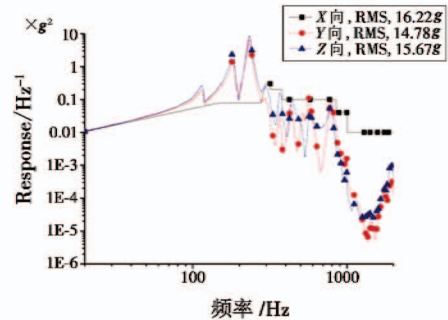


图6 随机振动响应曲线

Fig.6 Curves of RMS response

由图6可知,主结构上光学设备随机振动响应RMS值均在20g内,相对输入为14.53g,随机响应放大率均在1.5以内,满足总体设计指标。

#### 4.2 检测试验

为了测试经力学试验后的光学载荷主支撑结构的性能,对主结构上的光学设备性能进行了光学试验。根据试验数据,光学设备太阳角重复性测量误差小于60';在全视场旋转测量中,太阳角测量值和实际值的最大误差在40'之内。光学设备实现了120°×120°太阳角的测量,整个视场范围内定姿精度优于6",表明试验后光学设备性能正常,验证了主结构设计的合理性。

## 5 结论

本文针对某空间微型光学载荷主结构质量过大、基频过低和重力条件下敏感载荷安装位置静力变形过大的问题,对主结构进行优化设计,并对优化设计后的主结构和光学设备进行了力学试验,对试验后的结构进行了检测,结论如下:1) 根据总体设计指标,初步设计了主结构方案,工程分析表明,初步设计的主结构方案质量为39.96 kg,基频为11.18 Hz,敏感载荷安装位置变形为0.186 2 mm,指标均远优于总体指标;2) 建立微型光学载荷主结构多目标优化数学模型,并对结构进行了优化设计,优化结果显示,所有指标均满足设计要求,且质量降低了68.71%;3) 工程分析表明,主结构质量、基频和力条件下光学载荷安装位置静力变形结果良好,所用优化设计方法有效可行,可为后续其他结构设计提供一定的借鉴;4) 试验表明,所设计的光学载荷主支撑结构具有优良的力学强度和尺寸稳定性,能够有效保证其上端光学载荷在空间环境中的优良性能。

### 参考文献

- [1] 杨新峰,赵志明,邓卫华,等. 小卫星随机振动特性分析与试验验证方法探讨[J]. 航天器环境工程,2014(4):357-362.
- [2] 谭陆洋,王栋,孔林,等. 基于蜂窝加肋板结构参数匹配抑制光学卫星随机响应[J]. 光学精密工程,2016(2):372-380.
- [3] 李林,王栋,谭陆洋,等. 微小卫星天线与飞轮共支撑结构优化设计与试验[J]. 红外与激光工程,2016(10):199-205.
- [4] BENDSØE M P, KIKUCHI N. Generating optimal topologies in structural design using a homogenization method[J]. Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering, 1988, 71(2):197-224.
- [5] DIAZ A R, BENDSØE M P. Shape optimization of structures for multiple loading conditions using a homogenization method[J]. Structural Optimization, 1992, 4(1):17-22.
- [6] 李林,王栋,杨洪波,等. 空间相机柔性减振支撑结构的优化设计[J]. 光学精密工程,2016(7):1677-1684.
- [7] 张新洁,颜昌详,谢涛. 星载光学遥感器调焦机构的设计[J]. 光学精密工程,2009(11):2757-2761.
- [8] 程曦,姚林泉,沙峰. 基于虚拟激励法的车-轨-桥耦合系统的随机振动响应分析[J]. 力学季刊,2015,36(2):261-269.
- [9] 胡杰. 基础激励下基于模态叠加法的谐响应分析[J]. 计算机辅助工程,2014,23(6):94-96.
- [10] 冯伟. 基于变密度法的箱型梁结构拓扑优化研究[D]. 太原:中北大学,2014.
- [11] 夏天翔,姚卫星. 连续体结构拓扑优化方法评述[J]. 航空工程进展,2011(1):1-11,55.
- [12] 邓扬晨,张卫红,刘晓欧,等. 拓扑优化设计中刚度与密度关系的一种力学模型[J]. 航空计算技术,2004,(1):1-4.
- [13] 刘林华,辛勇,汪伟. 基于折衷规划的车架结构多目标拓扑优化设计[J]. 机械科学与技术,2011,30(3):382-385.

(上接第103页)

### 参考文献

- [1] 王立吉. 计量质量保证方案[M]. 北京:中国计量出版社,1992:62-69.
- [2] ABDALJBBAR B A, RIAZ D M, ABBASI S A. On model selection for autocorrelated processes in statistical process control[J]. Quality and Reliability Engineering International, 2017, 33(4):867-882.
- [3] 孙静. 自相关过程的残差控制图[J]. 清华大学学报:自然科学版,2002,42(6):735-738.
- [4] ALWAN L C. The problem of misplaced control limits[J]. Journal of the Royal Statistical Society, 1995, 44(3):269-278.
- [5] MONTGOMERY D C, MASTRANGELO C M. Some statistical process control methods for autocorrelated data[J]. Quality Control & Applied Statistics, 1991, 36(3):569-570.
- [6] RUNGER G, WILLEMAIN T. Batch-means control charts for autocorrelated data[J]. IIE Transactions, 1996, 28(6):483-487.
- [7] LI S Y, WANG W J. A study on the performance of lambda control chart for autocorrelated processes[C]//International Conference on Control Science and Systems Engineering (EI), 2016:124-127.
- [8] 王莉,赵渊,杨显明,等. 基于时间序列模型与残差控制图的兰州市空气质量研究[J]. 高原气象,2015,34(1):230-236.
- [9] ALWAN L, ROBERTS H. Time-series modeling for statistical process control[J]. Journal of Business & Economic Statistics, 1988, 6(1):87-95.
- [10] ZHANG N F. Detection capability of residual control chart for stationary process data[J]. Journal of Applied Statistics, 1997, 24(4):475-492.
- [11] WARDELL D G, MOSKOWITZ H, PLANTE R D. Control charts in the presence of data correlation[J]. Management Science, 1992, 38(8):1084-1102.
- [12] LIN W S W, ADAMS B M. Combined control charts for forecast-based monitoring schemes[J]. Journal of Quality Technology, 1996, 28(3):289-301.