

超轻空间相机主支撑背板的优化设计

邵梦旗^{1,2*}, 张雷^{1,3**}, 李林^{1,2}, 魏磊³

¹中国科学院长春光学精密机械与物理研究所, 吉林 长春 130033;

²中国科学院大学, 北京 100049;

³长光卫星技术有限公司, 吉林 长春 130031

摘要 针对某空间相机超轻和高热稳定性的要求,设计一体化的背板结构,使得支撑背板既是整机主承力板,又是主反射镜支撑背板;采用具有高比刚度、高热稳定性的 SiC 作为背板材料,通过施加最小尺寸约束的变密度拓扑优化,确定支撑板背部筋的布置;建立以第二代非支配排序遗传算法为优化算法的多目标优化模型,集成反射镜面形误差和背板质量,完成背板的尺寸优化设计,背板质量仅为 0.591 kg,筋厚的最小值为 2.1 mm;最后利用有限元分析对优化结果进行动、静力学性能分析。结果表明:在 5 °C 温升载荷下,反射镜组件镜面面形方均根为 0.158 nm,具有良好的热稳定性;在 X 向重力载荷作用下(与光轴垂直方向/面形检测方向),镜面面形的方均根为 1.169 nm,峰谷值为 5.403 nm;反射镜组件的一阶固有频率为 397 Hz,镜面边缘随机振动响应(RMS)小于 16g,满足空间应用。

关键词 优化设计; 有限元分析; 支撑背板; 空间相机; 主反射镜; 轻量化

中图分类号 V423.4

文献标识码 A

doi: 10.3788/AOS201939.0322001

Optimization Design of Supporting Backplate for Ultra-Light Space Camera

Shao Mengqi^{1,2*}, Zhang Lei^{1,3**}, Li Lin^{1,2}, Wei Lei³

¹Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences,
Changchun, Jilin 130033, China;

²University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China;

³Chang Guang Satellite Technology Co. Ltd., Changchun, Jilin 130031, China

Abstract According to the requirements of ultra-light and high thermal stability of a space camera, an integrated backplate structure is designed so that the supporting backplate is not only the backplate of the main mirror, but also the main bearing plate of the space camera. The SiC with high specific stiffness and high thermal stability is used as the backplate material. The layout of back ribs is determined by the variable density topology optimization with the addition of a minimum size constraint. The size optimization design is completed by a multi-objective optimization model with Non-dominated Sorting Genetic Algorithm II (NSGA-II), integrating the mirror surface shape and the mass of the backplate. The mass of the backplate is only 0.591 kg and the minimum rib thickness is 2.1 mm. The dynamic and static performances of the optimization results are finally analyzed by the finite element analysis. The results show that the root-mean-square value of the mirror shape in the mirror assembly is 0.158 nm under a temperature rising load of 5 °C, which means good thermal stability. The root-mean-square value of the mirror shape is 1.169 nm and the peak to valley value is 5.403 nm under the X-direction gravity load (the direction perpendicular to the optical axis/the direction of detecting surface shape). The first-order intrinsic frequency of the mirror assembly is 397 Hz and the random vibration response value of the sampling point of the mirror edge is less than 16g. These mean the requirements for space application are satisfied.

Key words optimization design; finite element analysis; supporting backplate; space camera; primary mirror; lightweight

OCIS codes 220.4880; 230.4040; 350.4600; 350.6090

收稿日期: 2018-06-12; **修回日期:** 2018-10-15; **录用日期:** 2018-10-30

基金项目: 国家重点研发计划(2016YFB0500904)

* **E-mail:** 18300608158@163.com; ** **E-mail:** 18686344285@163.com

1 引 言

随着空间光学遥感技术的发展,高分辨率、宽视场、高性价比已成为空间相机的发展方向。高性能的要求通常意味着相机的口径更大,焦距更长,这导致相机的质量增加,发射成本提高。因此,需要对空间相机的结构进行优化设计,使其在保证性能要求的同时实现高度轻量化。反射镜支撑板是反射镜的承载结构,为反射镜提供承载接口,保证反射镜的空间位置精度^[1]。空间相机的主支撑背板承载着相机的光机结构,是主要的承力结构之一,因此,反射镜支撑板和相机主支撑板的轻量化设计对降低系统成本、保证系统性能十分重要^[2-3]。

随着优化算法在结构设计中的应用,国内外学者对结构的优化设计进行了相关研究。Kihm 等^[4]采用多目标遗传算法(GA)对 $\Phi 1000$ mm 口径的反射镜及其柔节进行优化设计,快速、有效地获得了满足设计要求的设计域。Genberg 等^[5]利用光机集成分析软件 SigFit 等工具建立了自动线性光学模型,将空间相机的系统级波前误差(WFE)作为光机结构优化设计的约束或目标,为改善系统级的动力学响应提供了指导。Riva 等^[6]在已有光机集成优化框架的基础上,通过耦合灵敏度矩阵分析提出了一种新的光机优化方法,并将其应用于 $\Phi 600$ mm 口径望远镜,在保证成像质量足够高的前提下优化了望远镜整体的质量。齐光等^[7]采用基于密度函数模型的拓扑优化方法设计了长条形平面反射镜支撑背板,在满足反射镜面形精度、位置刚度的要求下,提高了反射镜支撑板的轻量化率。李宗轩等^[8]基于背部单拱形镜体轻量化方案,采用有限元工程分析和基于响应面模型的优化设计,对 $\Phi 330$ mm 口径反射镜的支撑结构进行优化设计,确定了支撑结构

的最优尺寸。胡佳宁等^[9]提出了一种基于折衷规划理论的优化方法,采用该方法实现了反射镜柔性支撑的参数化优化设计,满足了装配误差、温度变化两种工况下对柔性支撑的运动需求。李海星等^[10]针对大尺寸矩形反射镜分析了环境温度影响反射镜面形的本质原因,基于材料热膨胀系数匹配和支撑结构刚度提出了一种反射镜结构支撑系统设计思路。目前,结构的优化设计多集中于提高结构刚度,并实现一定的轻量化等方面,较少考虑到结构的热稳定性能,即减小结构在温升载荷下的相对变形。

本文针对某空间相机不安装调焦机构且总质量不大于 5 kg 的要求,依据光机系统采用 SiC 材料设计了一体化的背板结构,以减小冗余质量。建立了以刚度为目标的拓扑优化模型和以反射镜面形为直接目标的尺寸优化模型,以得到轻量化和力学性能均优的背板结构。利用有限元方法对优化结果进行性能分析,根据设计要求考察所设计的背板的力学性能指标。

2 背板材料的选取

某空间相机在超轻量化和热稳定性方面的要求使得空间结构材料需要具有比刚度高、线膨胀系数小的特点。目前,常用的空间结构材料有铝、钛、镁铝合金、因瓦合金、高体分 SiC/Al、SiC 等,它们的性能参数如表 1 所示,包括密度 ρ 、弹性模量 E 、线膨胀系数 α 、热导率 λ 、比刚度 E/ρ 、热稳定性 λ/α ,这些参数关系到结构在静力学和动力学条件下的固有特性。比刚度 E/ρ 和热稳定性 λ/α 是反映材料力学性能和热物理性能的最直接的评判指标。引入综合品质因数 $(E/\rho) \cdot (\lambda/\alpha)$ 来综合评价材料的力学性能和热稳定性能^[11]。

表 1 常用空间结构材料的性能参数和综合品质因数

Table 1 Performance parameters and comprehensive quality factors of commonly used spatial structural materials

Material	Density /(g · cm ⁻³)	Elasticity modulus /GPa	Thermal conductivity /(W · m ⁻¹ · K ⁻¹)	Coefficient of linear expansion /(10 ⁶ m · °C ⁻¹)	Specific stiffness /(N · tex ⁻¹)	Thermostability /(10 ⁶ W · m ⁻²)	Quality factor
Al	2.70	68	167.00	22.50	25.19	7.42	186.97
Ti	4.40	114	7.40	9.10	25.91	0.81	21.07
MgAl	1.80	40	201.00	25.00	22.22	8.04	178.65
4J32 invar alloy	8.90	141	13.70	0.65	15.84	21.08	333.86
35%SiC/Al	3.00	100	155.00	16.00	33.33	9.69	322.88
55%SiC/Al	2.94	213	235.00	8.00	72.40	29.38	2126.75
SiC	3.20	400	155.00	2.40	125.00	64.58	8072.92

背板的高比刚度要求材料具有高弹性模量和低密度,弹性模量越高,承受外界振动和冲击的能力越高。热稳定性要求材料具有高的热导率和线膨胀系数。热膨胀系数越小,在相同的温度变化下,背板的变形量就越小;热导率越大,热量在背板中的传递就越快,越有利于消除背板中的温度梯度,保证背板的热尺寸稳定性。

由表 1 可知:与其他材料相比,SiC 的力学性能和热稳定性具有显著优势;SiC 的密度与 Al、高体分 SiC/Al 相差不大,但弹性模量却是高体分 SiC/Al 的 1.8 倍,Al 的 5.8 倍;SiC 的比刚度是高体分 SiC/Al 材料的 1.7 倍;SiC 的热导率与 Al 的相似,线膨胀系数仅低于因瓦合金。综合分析力学性能和热稳定性能可知,SiC 的综合品质因数是表 1 中所列结构材料中最大的。

制备工艺的限制以及 SiC 具有的硬、脆特性使其在实际空间相机类似支撑板结构设计中的应用较少。近几年,SiC 制备工艺的不断改进^[12]使得采用 SiC 制备背板结构成为可能。此外,在背板中预埋与 SiC 线膨胀系数相匹配的 4J32 因瓦合金镶嵌件可用于打孔和攻丝。欧洲航天局的盖亚望远镜(GAIA)和赫歇尔(HERSHEL)望远镜、罗塞塔探测器的 Osiris 窄视场相机(NAC),以及韩国航空宇宙研究院的地球静止海洋水色成像仪(GOCI)的多个部件均采用 SiC 材料制备^[13]。综合考虑该空间相机的高比刚度、高热稳定性的要求,本课题组选取 SiC 作为相机主支撑板的材料。

3 背板的结构设计

3.1 空间相机光机结构的设计要求

主承力板和反射镜组件的结构形式主要由光学系统、焦平面组件形式以及卫星结构接口决定。整机光学系统设计主镜的口径为 216 mm,通光孔径为 62 mm;主镜采用三点支撑结构,反射镜及其柔性支撑如图 1、2 所示。为了留有充足的装调空间,设计主承力板的外径 D_{outer} 为 254 mm,内径 D_{inner} 为 62 mm,如图 3 所示。此外,相机光机结构需要满足一定的设计要求:1)具有优良的刚度和热稳定性,以保证在重力和温度载荷影响下,光学元件的面形精度在光学设计规定的范围内;2)具有合理的模态分布,以避免其在外界工况下发生共振及响应过大的情况。

3.2 背板拓扑优化设计

3.2.1 拓扑优化模型

采用基于变密度的拓扑优化方法对反射镜支撑

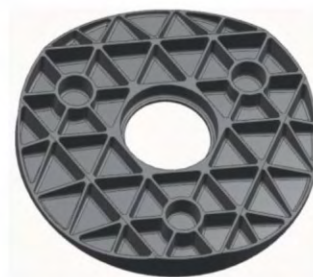


图 1 主镜模型

Fig. 1 Model of primary mirror

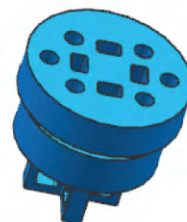


图 2 柔性支撑

Fig. 2 Flexible supporting part

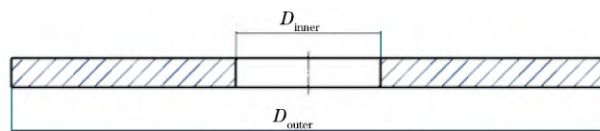


图 3 背板的外形尺寸参数

Fig. 3 Boundary dimension parameters of backplate

背板进行优化设计,以寻求材料的最佳分布形式^[14-15]。以每个单元的相对密度作为设计变量,同时引入密度与材料弹性模量的假设函数关系,即 SIMP 材料插值数学模型。常用的结构刚度度量是结构柔顺度,其表达式为 $C = F^T U$,其中 F 为外荷载向量, U 为外荷载作用方向上的力向量。将结构柔顺度代入结构平衡方程式后,结构柔顺度可写为 $C = U^T K U$,其中 K 为结构的总刚度矩阵。最小化结构柔顺度,即刚度最大化^[16]。以结构柔顺度最小(应变能最小或刚度最大)为目标,以体积比为约束,则优化模型为

$$\begin{aligned} \min C &= \min F^T U = \min U^T K U, \\ \text{s.t. } V(\rho) / V_0 &\leq f, K U = F, 0.001 \leq \rho_i \leq 1, \end{aligned} \quad (1)$$

式中: V_0 和 V 分别为初始结构和优化结构的体积; f 为体积比; ρ_i 为单元的相对密度,为了避免有限元分析的奇异性,取 ρ_i 的下限值为 10^{-3} 。

SIMP 材料插值数学模型为

$$K = \rho^p K_0, \quad (2)$$

式中: p 为惩罚因子, $p > 1$; K_0 为初始结构的刚度矩阵。

3.2.2 灵敏度分析

在背板结构的拓扑优化中,会出现材料和孔洞交错分布(棋盘格)的现象。消除棋盘格现象的研究有很多,本研究采用最小尺寸约束方法来抑制棋盘格现象,最小尺寸为平均单元尺寸的 1.0~3.0 倍。

最小尺寸约束定义为

$$G = \frac{\sum_{k=1}^M s^k x_e^k}{l^P} \geq G^*, \quad (3)$$

式中: G 为离散边界单元孔洞的等效特征尺寸; s^k 为边界单元 k 的外表面积; x_e^k 为边界单元 k 的相对密度, $0 < x_e^k < 1$; l^P 为边界孔洞相对于投影平面 P 的平均深度,投影面 P 定义为需要控制加工尺寸约束所在的平面; M 为边界离散单元数; G^* 为加工尺寸的下边界。

以结构柔顺度最小为目标的拓扑优化求解中,需要用到结构柔顺度相对于单元相对密度变量的灵敏值,对结构柔顺度灵敏值进行如下分析。由静力平衡得:

$$KU = F. \quad (4)$$

引入伴随向量 $\hat{U}$,则柔顺度 C 可写为

$$C = F^T U - \hat{U}^T (KU - F). \quad (5)$$

将(5)式两边对相对密度变量 ρ_i 求偏导,可得

$$\frac{\partial C}{\partial \rho_i} = (F^T - \hat{U}^T K) \frac{\partial U}{\partial \rho_i} - U^T \frac{\partial K}{\partial \rho_i} U. \quad (6)$$

根据 K 的对称性,建立伴随方程 $K \hat{U} = F$,即 $\hat{U} = U$,则有

$$\frac{\partial C}{\partial \rho_i} = -U^T \frac{\partial K}{\partial \rho_i} U. \quad (7)$$

将 SIMP 材料插值数学模型代入(7)式,得

$$\frac{\partial C}{\partial \rho_i} = -p(\rho_i)^{p-1} U_e^T K_i^0 U_e, \quad (8)$$

式中: K_i^0 为第 i 个单元的初始刚度矩阵; U_e 为所有单元的位移向量。(8)式给出了结构柔顺度和单元相对密度的关系,即柔顺度灵敏值关于单元相对密度的关系,即柔顺度灵敏值关于单元相对密度恒为负,其对应的物理意义为删除任意单元均会不同程度地增大结构的柔顺度值(减小结构的刚度)。因此,需要根据整机设计的质量和刚度约束,在保证背板刚度的情况下合理地背板进行轻量化。

3.2.3 优化模型的提取

相机主背板与其他结构的连接关系如图 4 所示。根据背板的功能需求,要求背板具有刚度高、质

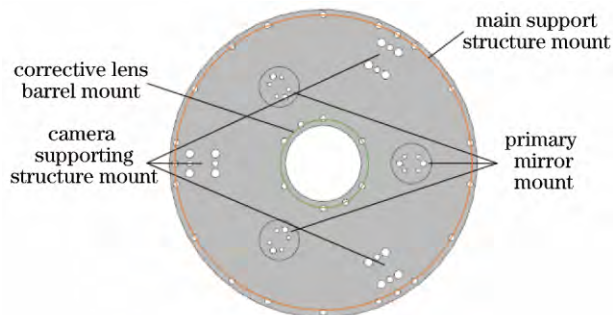


图 4 背板与其他结构的连接关系

Fig. 4 Connection between backplate and other structures

量小、热稳定性好的特点,能够在一定程度上削减主承力结构的变形,隔绝外部对反射镜组件的扰动^[17]。

根据反射镜组件与主承力结构的特点,设计背板的初始结构,并分析其装配关系,即建立合理边界条件,从而建立背板结构的有限元模型,如图 5 所示。背板上表面安装有主承力结构及主镜组件,下表面有相机支架固定约束。背板与其相连的结构件之间建立多点约束(MPC),约束背板底部与相机支架相连的 12 个螺纹孔,以柔顺度最小为目标,约束结构体积分数小于 0.4,对背板结构模型材料分布进行拓扑优化。

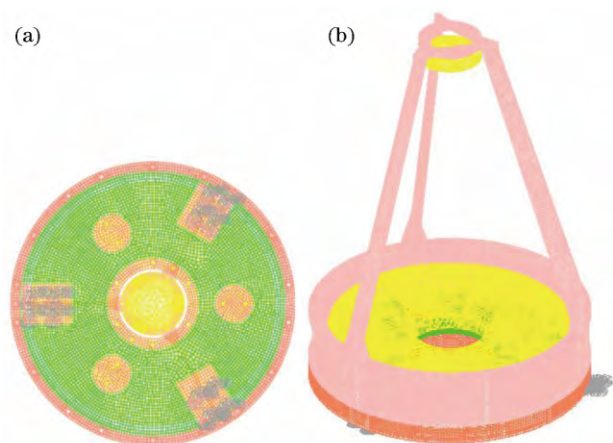


图 5 背板初始结构的有限元模型。(a)初步设计的有限元模型;(b)初始结构有限元模型

Fig. 5 Finite element models of initial structure of backplate. (a) Initially designed finite element model; (b) initial structure finite element model of constraint

经过 8 步迭代优化,迭代收敛曲线如图 6 所示,背板材料分布模型如图 7(a)所示。由图 7 可知,各部分材料单元的密度不同,相对密度趋于 0 的予以舍弃,相对密度趋于 1 的予以保留。优化区域的深色部分材料予以去除,表明柔顺度关于该区域单元相对密度的灵敏度较小,去除后结构的刚度下

降相对较小。浅色部分材料予以保留,柔顺度关于这些区域单元相对密度的灵敏度较大,如果去除,则刚度下降比较大,因此应保留。为了兼顾加工工艺和装配工艺,将结构设定为均匀对称的形式。去除拓扑优化结果的深色部分材料,只保留一定厚度的面板。为了保证相机在随机振动下的响应,将筋合理地均布在面板上,其中相对密度为中间值的材料在实际工程中很难实现,因此需要对拓扑优化结果进行处理,以适应实际工程的需要,处理后的模型如图 7(b)所示。

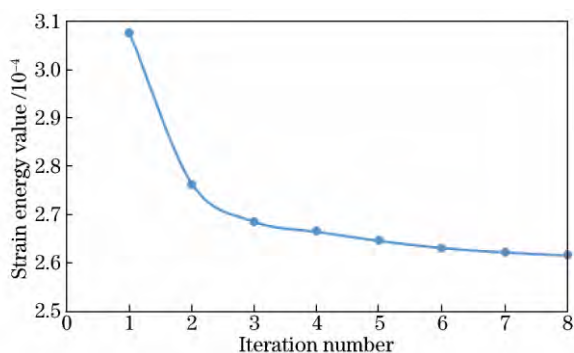


图 6 迭代收敛曲线

Fig. 6 Iterative convergence curve

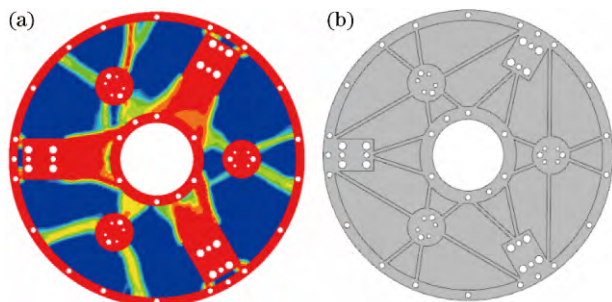


图 7 (a)背板初始结构的拓扑优化结果;(b)处理后的背板模型

Fig. 7 (a) Topological optimization result of initial structure of backplate; (b) processed backplate model

3.3 背板尺寸参数的优化

以 3.2.1 节中拓扑优化完成的背板模型为基础,建立反射镜组件支撑背板的参数化有限元模型,进行背板尺寸参数的优化设计。将背板结构对反射镜镜面面形值产生主要影响的结构尺寸参数化,建立反射镜组件的有限元模型,进行尺寸参数的优化设计,使反射镜的面形精度和背板的质量最优。

采用几何模型、有限元分析和面形计算相结合的方法进行优化设计。反射镜支撑背板轻量化筋、板厚、高度参数如图 8 所示,用以约束支撑背板与相机支架连接的 12 个螺纹孔,对反射镜组件施加 X 向和 Z 向的重力载荷。将参数 B_h 、 H 、 T_c 、 T_{ic} 、

T_{L1} 、 T_{L2} 定义为优化自变量,约束 Z 向重力载荷作用下的面形不大于 4 nm;以背板质量和镜面在 X 向重力载荷作用下的面形变化方均根(RMS)值作为目标函数,利用多目标优化算法第二代非支配排序遗传算法(NSGA-II)寻找最优解。

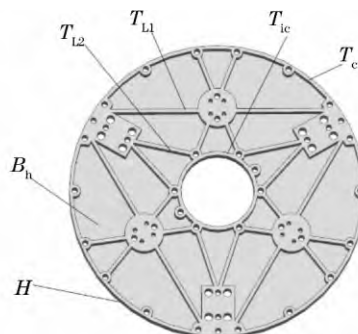


图 8 背板结构的参数变量

Fig. 8 Parameter variables of supporting backplate structure

优化模型的数学描述为

$X = (B_h, H, T_c, T_{ic}, T_{L1}, T_{L2}), \min(X_RMS, mass),$

$$\text{s.t.} \begin{cases} 2 < B_h < 4 \\ 9 < H < 12 \\ 2 < T_c < 4 \\ 2 < T_{ic} < 4^\circ \\ 2 < T_{L1} < 4 \\ 2 < T_{L2} < 4 \end{cases} \quad (9)$$

根据有限元分析的方法,获得背板的质量以及耦合载荷作用下反射镜的镜面变形数据。利用 Zernike 多项式拟合反射镜的面形,得到目标函数值,迭代曲线如图 9 所示,其中 RMS_X 为 X 向重力载荷下的 RMS 值。在优化模型中,最终得到一系列可行解组成的解集,该解集称为 Pareto 解集^[18]。选出一组最优的参数组合,如表 2 所示。根据该组参数得到面形指标和质量均优的背板结构模型。

尺寸参数优化后,得到面板厚度仅为 2 mm 并

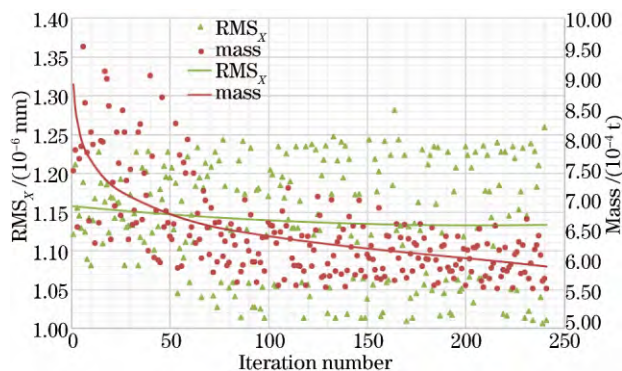


图 9 优化迭代过程

Fig. 9 Procedure of optimization iteration

表 2 设计变量与优化结果

Table 2 Designed variables and optimized results

Variable	Range /mm	Initial value /mm	Optimization result /mm
B_h	[2,4]	3.0	2.0
H	[9,13]	13.5	9.6
T_c	[2,4]	5.0	2.2
T_{ic}	[2,4]	3.0	2.2
T_{L1}	[2,4]	5.0	2.1
T_{L2}	[2,4]	5.0	2.5

且筋厚的最小值为 2.1 mm 的背板结构,其质量仅为 0.591 kg, X 向的面形 RMS 值为 1.169 nm,满足相机对背板质量和反射镜面形的约束。为了适应加工工艺,在各面的重合部分设计半径为 3 mm 的工艺圆角,优化模型如图 10 所示。

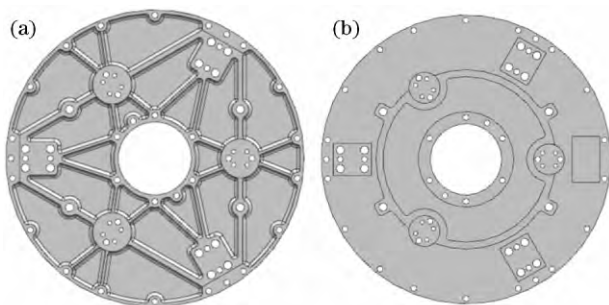


图 10 优化后的背板模型。(a)正面;(b)背面

Fig. 10 Supporting backplate model after optimization.

(a) Obverse side; (b) reverse side

4 有限元分析

背板是反射镜的支撑板以及相机的主背板,需要具有足够好的力学性能,以保证相机能够承受地面运输、火箭发射和在轨运行过程中的扰动。为了研究背板的动、静力学性能,需要对其进行性能分析。约束背板与相机支腿连接处单元节点的平动和转动如图 5 所示。分析组件在重力和温升载荷作用下反射镜的面形变化、模态信息,以及在随机振动环境下的加速度响应。

4.1 反射镜组件的静力学分析

静力学分析是组件在重力和均匀温升载荷作用下的变形分析。进行静力学分析得到了反射镜镜面位移云图(单位为 mm),如图 11 所示,同时得到了反射镜的镜面面形误差^[19-20],可用来判断载荷作用对成像质量的影响。对反射镜组件施加 25 °C(参考温度为 20 °C)的均匀温升载荷,以及 X 向和 Z 向的重力载荷($F_x=1g$, $F_z=1g$),在背板与相机支架连接的 12 个螺纹孔处施加固定约束,分析不同工况下

反射镜的变形位移数据。采用 Zernike 多项式进行面形拟合,得到了面形精度指标,如表 3 所示。

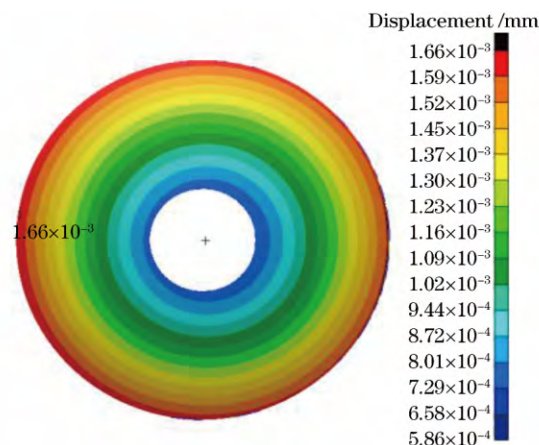


图 11 反射镜镜面变形云图

Fig. 11 Displacement cloud image of mirror surface

表 3 面形分析与精度对比

Table 3 Surface analysis and accuracy comparison

Load	Face shape precision	
	RMS /nm	Peak to valley /nm
25 °C	0.158	0.781
F_x	1.169	5.403
F_z	4.069	17.620
$F_x + 25$ °C	1.221	6.181
$F_z + 25$ °C	3.953	18.190

由表 3 可知,在 5 °C 的均匀温升条件(地面装调检测工况)下,反射镜的面形误差峰谷值小于 1 nm,镜面面形质量良好。原因是反射镜组件(SiC 反射镜、4J32 因瓦合金柔性环节、SiC 支撑背板)材料的热膨胀系数相匹配,在温升载荷作用下,结构件之间的变形一致,面形精度受温度载荷的影响小,具有良好的热稳定性。

此外,反射镜镜面面形 RMS 的最大值为 4.069 nm,满足设计要求的 $\lambda/50$ (λ 取 632.8 nm);由于 X 向重力作用下的面形是镜面面形的检测方向,因此对此方向的面形要求应尽可能高。 X 向重力作用下的面形为 1.169 nm,远小于 $\lambda/50$,有效地保证了反射镜组件的静刚度性能,满足设计要求。

4.2 反射镜组件的动力学分析

4.2.1 模态分析

通过模态分析获得结构的振动特性,可以确定自然频率和振型,预示结构在动力载荷作用下的振动响应,验证是否满足设计要求,避免发生共振现象而破坏结构^[21]。主要考核结构的低阶模态,表 4 所示为组件的各方向基频。由表 4 可知,反射镜组件的一阶模态为 397 Hz,高于系统要求的反射镜组件

表 4 反射镜组件的前三阶模态信息

Table 4 First three order modal information of mirror assembly

Swing around Z axis /Hz	Vibration along X axis /Hz	Vibration along Y axis /Hz	Mass of supporting backplate /kg
397	409	410	0.591

的基频(不低于 150 Hz),其相应的振型为反射镜绕光轴的转动,如图 12 所示,说明反射镜组件的动态刚度足够高,在低频正弦激励作用下不会与载体发生共振。

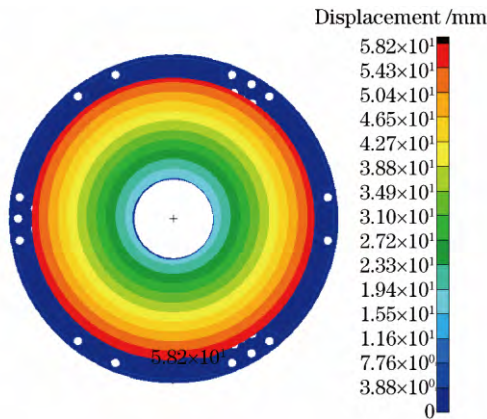


图 12 反射镜组件的第一阶固有振型

Fig. 12 First order intrinsic mode shape of mirror assembly

4.2.2 随机振动分析

为了更好地验证所设计的背板的动态力学性能,需要分析反射镜组件在随机振动环境中的响应,随机振动的实验条件如表 5 所示。从反射镜镜面边缘选取采样点,分析获得反射镜组件采样点在 X、Y、Z 这 3 个方向上的加速度激励响应,结果如表 6 所示。随机振动响应分析表明,采样点响应的最大值对应的方向为 Z 方向(沿光轴方向),采用 SiC 背板的反射镜组件采样点在随机振动作用下的响应放大倍数为 4.3,满足力学性能要求。

表 5 随机振动实验条件

Table 5 Conditions of random vibration test

Parameter	Direction along X	Direction along Y	Direction along Z
Frequency range /Hz	10-80	80-800	800-2000
Power spectral density /($g^2 \cdot Hz^{-1}$)	+3 dB/oct	0.01	-6 dB/oct
Root-mean-square(RMS)	3.56g		

表 6 随机响应分析结果

Table 6 Analysis result of random response

Direction	X	Y	Z
Result of random vibration analysis(RMS)	10.98g	10.91g	15.45g

5 结 论

针对某空间相机超轻、高稳定性的要求,本课题组设计了一体化的背板结构,提出了以镜面面形为直接优化目标的尺寸优化方法。采用高比刚度且热稳定性能优良的 SiC 材料作为背板,建立了以刚度为目标的拓扑优化模型,对模型的柔顺度进行了灵敏度分析。对背板进行综合质量和面形误差的多目标尺寸优化,得到了轻量化和稳定性均优的背板结构。利用有限元方法对优化结果进行性能分析,结果表明:反射镜组件在 5 °C 温升载荷下的镜面面形 RMS 值为 0.158 nm, X 向重力载荷下的 RMS 值为 1.169 nm;反射镜组件的第一阶固有频率可达到 397 Hz,背板质量仅为 0.591 kg,相比优化前减少了 63%,可满足设计要求。所设计的背板结构满足高比刚度和热膨胀系数相匹配的要求,保证了组件的动、静力学性能,可以为空间相机或其他类似结构的设计提供一定的借鉴。

参 考 文 献

- [1] Qu L X. Environmental adaptability design of space mirror subassembly[J]. Opto-Electronic Engineering, 2016, 43(5): 41-46.
曲利新. 空间反射镜组件的环境适应性设计[J]. 光电工程, 2016, 43(5): 41-46.
- [2] Fu S X, Zhou C, Cao Y Y, et al. Structural design of 4 m telescope mount base based on topology optimization method[J]. Infrared and Laser Engineering, 2015, 44(8): 2441-2447.
付世欣, 周超, 曹玉岩, 等. 基于拓扑优化的 4 m 望远镜底座结构设计[J]. 红外与激光工程, 2015, 44(8): 2441-2447.
- [3] Zhang L, Ke S L, Li L, et al. Multi-objective integrated optimization design of $\Phi 210$ mm ultra-light SiC mirror[J]. Acta Photonica Sinica, 2017, 46(12): 1222001.
张雷, 柯善良, 李林, 等. $\Phi 210$ mm 超薄超轻 SiC 反射镜多目标集成优化设计[J]. 光子学报, 2017, 46(12): 1222001.
- [4] Kihm H, Moon I K, Yang H S, et al. 1-m lightweight mirror design using genetic algorithm[J]. Proceedings of SPIE, 2012, 8415: 841514.
- [5] Genberg V L, Michels G J. Using integrated models

- to minimize environmentally induced wavefront error in optomechanical design and analysis[J]. Proceedings of SPIE, 2017, 10371: 103710I.
- [6] Riva M, Moschetti M. Integrated optomechanical structural optimization through coupling of sensitivity matrixes [J]. Proceedings of SPIE, 2016, 10012: 100120D.
- [7] Qi G, Xu Y J, Liu B Q. Lightweight structure design for SiC/Al supporting plate of space mirror[J]. Infrared and Laser Engineering, 2014, 43(7): 2214-2218.
齐光, 许艳军, 刘炳强. 空间相机反射镜 SiC/Al 支撑板轻量化结构优化设计 [J]. 红外与激光工程, 2014, 43(7): 2214-2218.
- [8] Li Z X, Xing L N, Xie P. Design of the $\Phi 330$ mm primary mirror assembly of spaceborne video camera [J]. Acta Photonica Sinica, 2016, 45(7): 0722003.
李宗轩, 邢利娜, 解鹏. 视频空间相机 $\Phi 330$ mm 口径主镜组件设计 [J]. 光子学报, 2016, 45(7): 0722003.
- [9] Hu J N, Dong J H, Zhou P W. Parametric design of flexure supporting for optical space remote sensor primary mirror [J]. Acta Optica Sinica, 2016, 36(11): 1128001.
胡佳宁, 董吉洪, 周平伟. 空间光学遥感器主镜柔性支撑的参数化设计 [J]. 光学学报, 2016, 36(11): 1128001.
- [10] Li H X, Ding Y L, Zhang H W. Support system study of rectangular mirror [J]. Acta Optica Sinica, 2015, 35(5): 0523002.
李海星, 丁亚林, 张洪文. 矩形反射镜结构支撑技术研究 [J]. 光学学报, 2015, 35(5): 0523002.
- [11] Logut D, Breysse J, Toulemont Y, *et al.* Light weight monolithic silicon carbide telescope for space application [J]. Proceedings of SPIE, 2005, 5962: 59621Q.
- [12] Zhao R C, Bao J X, Cao Q, *et al.* Partition gelation casting in RB-SiC mirror billet [J]. Optics and Precision Engineering, 2017, 25(12): 111-116.
赵汝成, 包建勋, 曹琪, 等. 碳化硅反射镜镜坯分区浇注成型技术 [J]. 光学精密工程, 2017, 25(12): 111-116.
- [13] Bougoin M. SiC challenging parts for GAIA [J]. Proceedings of SPIE, 2017, 10565: 105652C.
- [14] Zuo K T. Research of theory and application about topology optimization of continuum structure [D]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology, 2004: 98-104.
左孔天. 连续体结构拓扑优化理论与应用研究 [D]. 武汉: 华中科技大学, 2004: 98-104.
- [15] Luo Z, Chen L P, Huang Y Y, *et al.* Topological optimization design for continuum structures [J]. Advances in Mechanics, 2004, 34(4): 463-476.
罗震, 陈立平, 黄玉盈, 等. 连续体结构的拓扑优化设计 [J]. 力学进展, 2004, 34(4): 463-476.
- [16] Peng X R. A comparative study on models of structural stiffness optimization problems [J]. Journal of Hunan City University (Natural Science Edition), 2016, 25(1): 1-4.
彭细荣. 结构刚度优化问题模型比较研究 [J]. 湖南城市学院学报 (自然科学版), 2016, 25(1): 1-4.
- [17] Krödel M, Zauner C. Extreme stable and complex structures for optomechanical applications [J]. Proceedings of SPIE, 2015, 9574: 95740G.
- [18] Xiao X W, Xiao D, Lin J G, *et al.* Overview on multi-objective optimization problem research [J]. Application Research of Computers, 2011, 28(3): 805-808, 827.
肖晓伟, 肖迪, 林锦国, 等. 多目标优化问题的研究概述 [J]. 计算机应用研究, 2011, 28(3): 805-808, 827.
- [19] Huang Q T, Gao Q, Yu J C. FEM analysis of ultra thin mirror supporting structure effect on surface deformation in gravity field [J]. Proceedings of SPIE, 2006, 6148: 61480W.
- [19] Huang Q, Gao Q, Yu J. FEM analysis of ultra thin mirror supporting structure effect on surface deformation in gravity field [C]. 2nd International Symposium on Advanced Optical Manufacturing and Testing Technologies: Large Mirrors and Telescopes, 2006: 61480W.
- [20] Li F, Ruan P, Zhao B C. Study on the surface deformation of flat reflector under gravity load [J]. Acta Photonica Sinica, 2005, 34(2): 272-275.
李福, 阮萍, 赵葆常. 重力作用下平面反射镜变形研究 [J]. 光子学报, 2005, 34(2): 272-275.
- [21] Chen Z, Zhang R, Chen Z, *et al.* Experiment and modal analysis on the primary mirror structure of Space Solar Telescope [J]. Proceedings of SPIE, 2006, 6265: 62654B.