

超轻离轴反射镜及柔性支撑优化设计

胡洋^{1*}, 李季^{1,2}, 贾学志^{1,2}

¹ 长光卫星技术有限公司, 吉林 长春 130102;

² 中国科学院长春光学精密机械与物理研究所, 吉林 长春 130033

摘要 针对多光谱相机的整机设计秉承集成化、小型化和超轻质的设计理念, 提出一种结合最小尺寸约束的变密度拓扑优化与多目标集成优化的设计方法, 并借助此途径完成空间离轴微晶反射镜及背部支撑结构(消热芯轴、柔节和背板)的优化设计。对于尺寸为 218 mm×166 mm 的反射镜, 质量为 0.917 kg, 轻量化率为 71.3%, 并对加工装配好的反射镜组件开展工程环境试验和面形干涉检测。试验结果表明, 环境试验前后的反射镜镜面面形的方均根值均优于 $1/50\lambda$, 检测波长 $\lambda=632.8$ nm, 基频为 397.8 Hz, 满足光学系统的设计要求以及卫星平台对光学载荷的要求, 验证所提方法的可行性和正确性。

关键词 光学器件; 空间遥感器; 离轴反射镜; 集成优化; 面形检测; 力学试验

中图分类号 V423.4

文献标志码 A

doi: 10.3788/AOS202040.1923002

Optimal Design of Lightweight Off-Axis Mirror and Flexible Support

Hu Yang^{1*}, Li Ji^{1,2}, Jia Xuezhi^{1,2}

¹ Chang Guang Satellite Technology Co., LTD., Changchun, Jilin 130102, China;

² Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun, Jilin 130033, China

Abstract This study proposes a design method combining variable density topology optimization and multi-objective integration optimization with minimum size constraints for the overall design of multispectral cameras, adhering to the design concept of integration, miniaturization, and ultra-lightweight. This approach is used for spatial separation, and the optimized design of an axis microcrystalline mirror and a back support structure (heat dissipation mandrel, flexible joint, and backplate). The mirror has an aperture of 218 mm×166 mm, mass of 0.917 kg, and weight reduction rate of 71.3%. In addition, the processed and assembled reflector components are subjected to engineering environmental tests and surface interference detection. Test results show that the root mean square value of the mirror surface before and after the environmental test is greater than $1/50\lambda$, detection wavelength $\lambda=632.8$ nm, and fundamental frequency is 397.8 Hz, meeting the design requirements of an optical system and optical satellite platform. Load requirements validate the feasibility and accuracy of the proposed method.

Key words optical devices; space remote sensor; off-axis mirror; integrated optimization; face detection; mechanical test

OCIS codes 230.4040; 350.4600

1 引 言

近年来,随着空间光学遥感载荷技术的迭代与创新,在农林生产、环境监测、智慧城市、地理测绘和土地规划等领域的遥感需求日益增加^[1-2],为此人们对空间光学遥感器要求越来越高,未来光学遥感器主要朝着高分辨、多光谱和大幅宽的方向发展^[3]。实现星下点分辨率高和幅宽大的有效方法就是增大

反射镜的口径,但性能提升的代价是反射镜的质量变大,与之相关的地面加工和装调难度均变大。因此,在充分考虑反射镜的动静态力学稳定性和热稳定性的前提下,对反射镜进行轻量化设计是空间光学遥感器中相机光机结构设计的关键步骤之一^[4]。

Kihm 等^[5]采用了多目标遗传算法(GA)对口径为 1000 mm 的反射镜及其柔节进行优化设计,可以快速求解满足设计要求的可行解。Genberg 等^[6]

收稿日期: 2020-03-01; 修回日期: 2020-03-27; 录用日期: 2020-06-19

基金项目: 国家重点研发计划(2016YFB0500904)

* E-mail: 13649243140@163.com

1923002-1

利用了光机集成分析软件建立自动线性光学模型,该模型可以将空间相机系统的波前误差(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指导。张雷等^[7]采用了多目标集成优化方法,以反射镜质量和 x 方向重力工况下的面形作为目标,以 z 方向重力工况下的面形作为约束,最终完成反射镜的优化设计。胡佳宁等^[8]基于折衷规划理论的优化方法,实现了反射镜柔性支撑的参数化设计。兰斌等^[9]建立了反射镜及其支撑系统的参数化模型,并基于该模型对镜体厚度、支撑点位置和柔性支撑结构的设计参数进行多目标优化设计。邢明慧等^[10]采用了拓扑优化法对小口径的离轴反射镜进行轻量化设计,在减重的同时可以提高面形精度。王克军等^[11]提出了经验设计、拓扑优化与尺寸优化相结合的设计方法,并成功地应用在某空间遥感器反射镜组件结构的设计过程中。魏磊等^[12]采用了反射镜结构的拓扑优化方法,以随机振动响应加速度峰值作为优化目标,实现了反射镜结构的轻量化。沙巍等^[13]采用了拓扑优化方法实现口径为 500 mm 反射镜的轻量化设计,拓扑优化的轻量化方式在面形和轻量化方面均优于传统形式。

传统的反射镜设计所依赖的经验公式大都适用于圆形反射镜,无法适用于矩形反射镜,而矩形反射镜依然采用经验设计与有限元校核的手段。本文针对应用于空间光学遥感领域的超轻离轴反射镜的超轻质和高精度指标需求,设计一种空间离轴反射镜及消热柔性支撑结构。通过最小尺寸约束的变密度拓扑优化法并结合集成优化手段,实现反射镜组件的多目标和多工况优化设计,试验结果表明反射镜组件的力学性能指标满足设计要求。

2 超轻主镜组件构型的确定与材料的选择

2.1 多光谱相机简介

“吉林一号”遥感星座某星多光谱相机可在

528 km的轨道高度上实现全色图像的地面像元分辨率优于 5 m、幅宽大于 110 km(双相机拼接)的成像指标,满足农林生产、环境监测、智慧城市、地理测绘和土地规划等领域的遥感应用需求。该相机采用 Cook 型离轴三反结构,具有视场大、无中心遮拦和传函高等优点。光学系统示意图如图 1 所示。

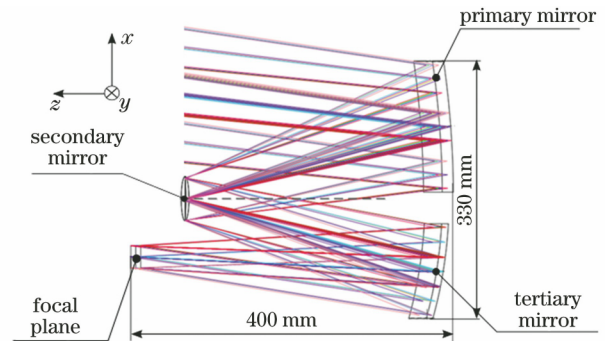


图 1 光学系统示意图

Fig. 1 Schematic of optical system

2.2 材料的选择和初始结构的设计

2.2.1 材料的选择

空间相机中反射镜及支撑结构材料的选择通常考虑材料的比刚度、线胀系数、热稳定性和加工工艺等因素。目前,常用的光学反射镜材料有微晶玻璃(Zerodur)、碳化硅(SiC)和超低膨胀玻璃(ULE)等。综合考虑光学元件的机械性能、质量、加工工艺与周期和批量生产与研制成本等因素后,反射镜材料选择 Zerodur,镶嵌件为牌号 4J32 的调制殷钢(Invar),其线胀系数与微晶玻璃一致;柔节和背板多采用钛合金(TC4)和铝基高体份复合材料(SiC/Al),材料性能指标如表 1 所示。

2.2.2 初始结构的设计

对于矩形反射镜来说,目前并无成熟的径厚比和支撑点个数求解公式可借鉴,大都采用有限元试算的手段^[14]。反射镜的有效通光尺寸定为 218 mm×166 mm,在超轻质反射镜的设计指标要求下,与传统的经验设计方法^[15]相结合,则反射镜的支撑方式选为背部中心支撑,反射镜组件由镜体、消热芯轴、

表 1 常见空间相机材料的性能指标

Table 1 Performance indicators of common space camera materials

Material	Density / ($\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$)	Young's modulus / GPa	Specific stiffness	Thermal expansion coefficient /($10^{-6} \text{ } ^\circ\text{C}$)	Poisson's ratio
Zerodur	2.53	91	36.0	0.05	0.24
SiC	3.05	310	101.6	2.50	0.14
Invar	8.10	141	17.4	0.05–7.00	0.25
TC4	4.44	109	24.5	9.10	0.34
SiC/Al	3.00	180	60.0	8.10	0.18

柔节和背板组成,原始反射镜的组件结构如图 2 所示。反射镜的消热芯轴是反射镜与机械件之间的连接结构,除了连接作用外,其主要作用是消除由温度变化和胶接单元膨胀收缩引起的热应力^[16]。柔节

是消热芯轴和背板之间的连接结构,其主要作用是消除由支撑结构与镜体线胀系数不匹配带来的热应力,以及减小组件装配过程中由尺寸偏差带来的装配应力。

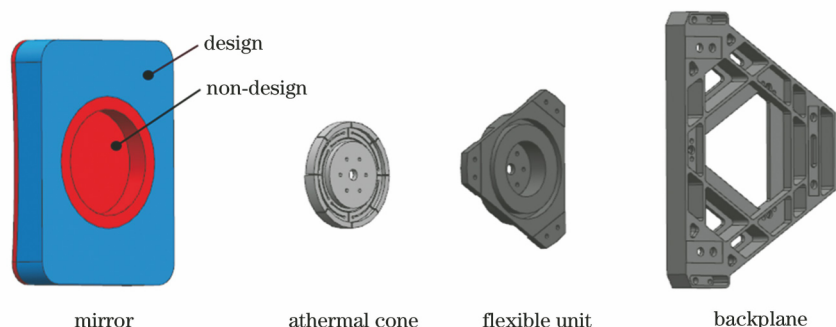


图 2 原始反射镜的组件结构

Fig. 2 Component structures of original mirror

3 优化设计

3.1 镜体的拓扑优化设计

反射镜的轻量化设计是指保证镜体轴向刚度要求的前提下,通过合理地改进镜体结构达到减重的设计目的^[17]。镜体刚度高可以降低重力变形,以及温度和装配应力所引起面形的退化。常用的结构刚度度量是结构柔顺度,表达式为

$$C = F^T U, \quad (1)$$

式中: F 为外载荷向量; U 为在外载荷作用方向上的位移向量。将(1)式代入结构平衡方程

$$F = KU, \quad (2)$$

则(1)式可表示为

$$C = U^T KU, \quad (3)$$

式中: K 为结构的总刚度矩阵,刚度最大即结构柔顺度最小。以反射镜组件的结构柔顺度最小为优化目标,对其进行拓扑优化设计,以确定最佳的材料分布和传力路径;以体积分数和 x 方向重力下反射镜镜面面形均方根(RMS)作为约束条件,建立的拓扑优化数学模型为

$$\begin{aligned} \min C &= \min(F^T U) = \min(U^T KU), \\ \text{s.t. } V(\rho)/V_0 &\leq f, KU = F, 0.001 \leq \rho \leq 1, \\ R_{\text{RMS}}(i) &< 5 \text{ nm}, i = 1, 2, \dots, n, \end{aligned} \quad (4)$$

式中: V_0 和 V 分别为初始结构和优化后结构的体积; f 为体积比; ρ 为单元的相对密度,为避免有限元计算时出现奇异性,取 ρ 的下限值为 0.001; n 为最大迭代次数。对于反射镜组件的拓扑优化来说,以镜面面形作为约束条件直接参与整个反射镜组件的拓扑优化过程,优化结果更合理,光机热分析软件

可提供面形 RMS 和峰谷值(PV)来求解多点约束(MPC)多项式。求解 Zernike 多项式及基于 DRESP2 生成镜面面形响应主要有以下几个步骤。

1) 利用偏置反射镜光学表面的原始节点生成新节点。

2) 利用 MPC 等式来计算 Zernike 多项式和刚体位移数据,将计算结果存储于新节点中。

3) 在每个新节点处生成一个 DRESP1 响应,并导入有限元模型中,利用 DRESP2 来求解变形后镜面 RMS 和 PV。

基于某光机热分析软件并采用 DRESP2 来建立镜面面形 RMS 和 PV 以求解响应,求解过程如图 3 所示。

SIMP (Solid Isotropic Material with Penalization)材料的插值数学模型为

$$K = pK_0, \quad (5)$$

式中: p 为惩罚因子, $p > 1$; K_0 为初始结构的总刚度矩阵。

3.1.1 灵敏度分析

在空间光学遥感载荷各机械结构件的拓扑优化过程中,普遍存在棋盘格和网格依赖性的现象。消除棋盘格的方法有很多,实验通过控制最小成员尺寸约束的方法来抑制棋盘格,最小尺寸为平均单元尺寸的 1~3 倍。最小成员尺寸约束定义为

$$G = \sum_{k=1}^M s^k x_e^k / l^p \geq G^*, \quad (6)$$

式中: G 为离散边界单元孔洞的等效特征尺寸; G^* 为加工尺寸的下边界; M 为边界离散单元数; 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

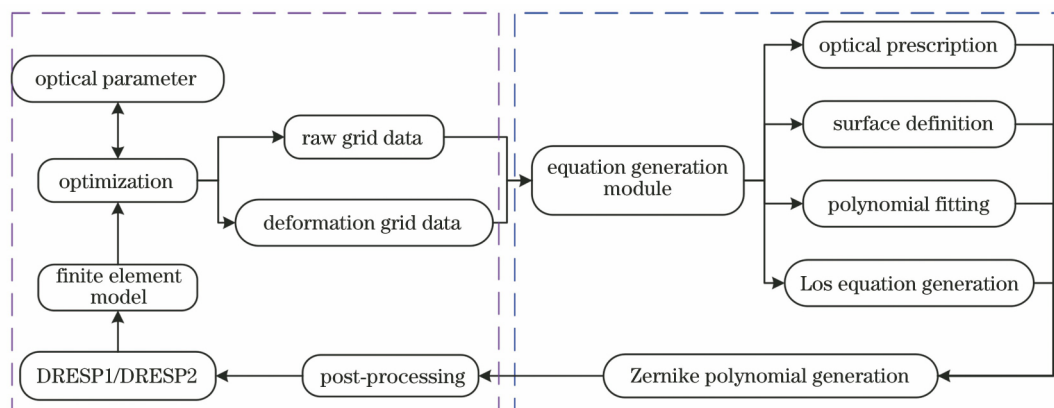


图 3 基于 DRESP2 的面形求解过程

Fig. 3 Surface shape solving process based on DRESP2

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, P 为需要控制加工尺寸约束所在的平面。采用伴随分析法来求解目标函数的灵敏度, 根据(2)式为(1)式添加零函数, 并引入伴随向量 $\hat{U}$, 则柔顺度 C 可改写为

$$C = F^T U - \hat{U}^T (KU - F). \quad (7)$$

对(7)式两边的相对密度 ρ_u 求偏导, 其中 u 为单元号, 可得

$$\frac{\partial C}{\partial \rho_u} = F^T \frac{\partial U}{\partial \rho_u} - \hat{U}^T \left(\frac{\partial K}{\partial \rho_u} U + K \frac{\partial U}{\partial \rho_u} \right) = (F^T - \hat{U}^T K) \frac{\partial U}{\partial \rho_u} - \hat{U}^T \frac{\partial K}{\partial \rho_u} U. \quad (8)$$

根据 K 的对称性, 当 $\hat{U}$ 满足伴随方程

$$\hat{U}^T K = F^T \quad (9)$$

时, 即 $\hat{U} = U$, 则(8)式可改写为

$$\frac{\partial C}{\partial \rho_u} = -U^T \frac{\partial K}{\partial \rho_u} U. \quad (10)$$

将 SIMP 材料的插值数学模型代入(10)式, 得到

$$\frac{\partial C}{\partial \rho_u} = -p(\rho_u)^{p-1} U_e^T K_u^0 U_e, \quad (11)$$

式中: K_u^0 为 u 的初始刚度矩阵; U_e 为单元的位移向量。由(11)式可知, 灵敏度关于单元相对密度是恒为负值, 即删除任意单元均会不同程度地增大结构柔顺度值, 减小结构的刚度, 因此在满足光学设计指标要求的前提下, 需合理地对反射镜进行轻量化。

3.1.2 优化过程

经过 18 次迭代, 优化目标函数逐渐收敛, 迭代收敛曲线如图 4(a) 所示。由于各部分材料的单元密度不同, 舍去相对密度为 0 的区域, 保留相对密度趋于 1 的部分, 反射镜背部材料的分布如图 4(b) 所

示。当对离轴非球面进行铣磨和抛光时, 开放式加强筋的边缘处刚度低, 则会存在塌边的可能, 故在镜体边缘增加加强环, 尽量避免边缘塌边。

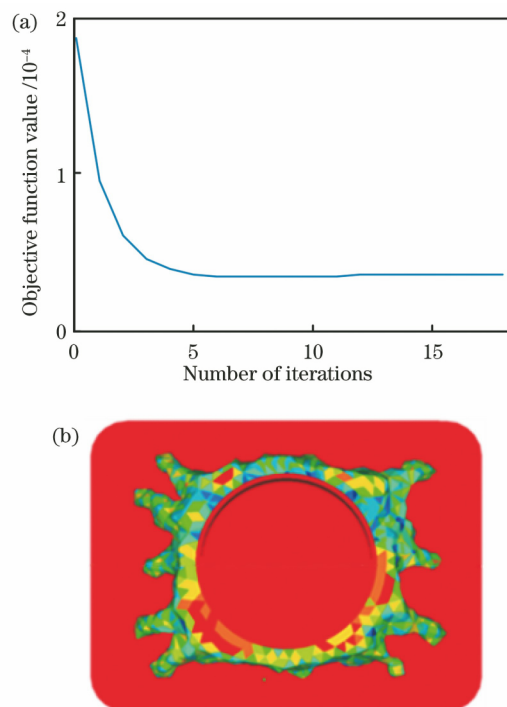


图 4 迭代收敛曲线及优化结果。(a) 迭代收敛曲线; (b) SIMP 拓扑优化结果

Fig. 4 Iterative convergence curve and optimization result. (a) Iterative convergence curve; (b) SIMP topology optimization result

背部开放式加强筋的布局如图 5 所示。其中 D_{cone} 为消热芯轴或反射镜连接柱面的直径, $D_1 \sim D_3$ 分别为镜体加强筋环的直径, D_4 、 D_5 分别为消热槽中分度圆的直径, θ_1 为加强筋的角度, θ_2 为轻量化削边的角度, θ_3 、 θ_4 为消热槽间的夹角, $T_{\text{rib}(j)}$ ($j=1 \sim 4$) 为加强筋的厚度, T_e 为消热槽的宽

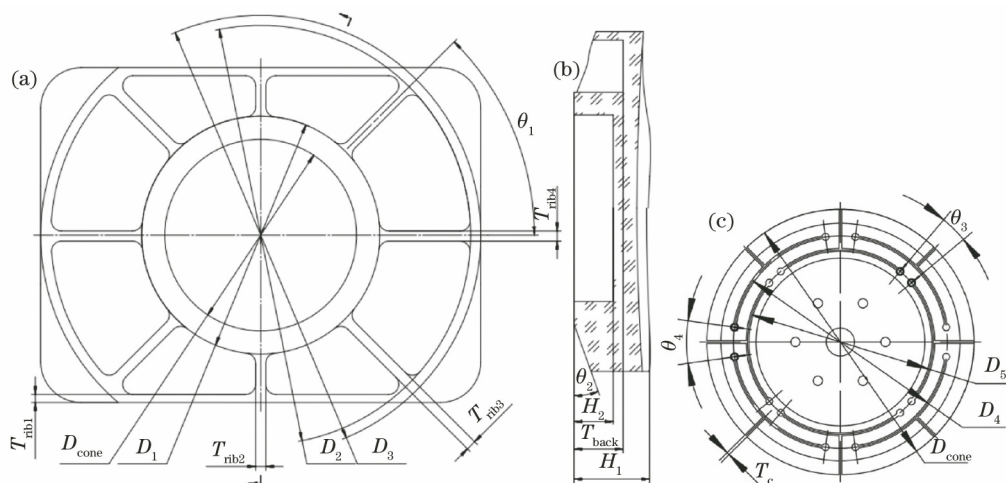


图 5 反射镜组件的结构参数。(a)反射镜俯视图;(b)反射镜剖视图;(c)消热芯轴俯视图

Fig. 5 Structural parameters of mirror assembly. (a) Vertical view of mirror; (b) section view of mirror; (c) vertical view of athermal cone

度, T_{back} 为背部轻量化腔体的深度, H_1 为反射镜的总厚度, H_2 为消热芯轴下沉的深度。

3.2 集成优化设计

离轴微晶反射镜组件要求重量轻、面形好、组件基频高以及重力下倾斜、刚体位移小, 此为多目标优化的问题。该优化模型的数学表达式为

$$\begin{aligned} \text{find } X = & (T_{\text{back}}, T_{\text{rib1}}, T_{\text{rib2}}, T_{\text{rib3}}, T_{\text{rib4}}, T_c, D_{\text{cone}}, \\ & D_1, D_2, D_3, D_4, D_5, \theta_1, \theta_2, \theta_3, \theta_4, H_1, H_2) \\ \text{min}[m, R_{\text{RMS}}(xg), R_{\text{RMS}}(\text{temp}), a^{xg}, b^{xg}, c^{xg}, \theta_x^{xg}, \theta_y^{xg}], \end{aligned} \quad (12)$$

$$\text{s.t.} \begin{cases} f_1 > 200 \text{ Hz} \\ 22 \text{ mm} < T_{\text{back}} < 28 \text{ mm} \\ 115 \text{ mm} < D_1 < 125 \text{ mm} \\ 205 \text{ mm} < D_2 < 210 \text{ mm} \\ 208 \text{ mm} < D_3 < 215 \text{ mm} \\ 55 \text{ mm} < D_4 < 80 \text{ mm} \\ 45 \text{ mm} < D_5 < 75 \text{ mm} \\ 90 \text{ mm} < D_{\text{cone}} < 100 \text{ mm} \\ 3 \text{ mm} < T_{\text{rib1}} < 5 \text{ mm} \\ 3 \text{ mm} < T_{\text{rib}(j)} < 6 \text{ mm} \quad (j = 2, 3, 4) \\ 0.5 \text{ mm} < T_c < 3.0 \text{ mm} \\ 30^\circ < \theta_1 < 60^\circ \\ 0^\circ < \theta_2 < 45^\circ \\ 5^\circ < \theta_k < 20^\circ \quad (k = 3, 4) \\ 25 \text{ mm} < H_1 < 35 \text{ mm} \\ 20 \text{ mm} < H_2 < 30 \text{ mm} \end{cases}$$

式中: $R_{\text{RMS}}(xg)$ 和 $R_{\text{RMS}}(\text{temp})$ 分别为重力工况和温度工况下的镜面面形 RMS 值; m 为反射镜组件

的总质量, $a^{xg}, b^{xg}, c^{xg}, \theta_x^{xg}, \theta_y^{xg}$ 分别为 x 方向重力工况下(装调方向), x, y, z 三个方向的刚体位移和倾斜角度。优化变量的取值范围是根据结构尺寸的制备工艺进行约束的。

集成优化主要是将各工程软件对接、尺寸参数修正和目标函数评价等流程整合到框架中, 通过集成和调用来实现自动计算、目标函数评估和参数修正等过程。面形目标函数的求解是通过 Zernike 面形拟合法来实现的, 相比于最小二乘球面拟合法, 实验所使用的 Zernike 面形拟合法不仅可以自由选择去除项, 还可以求解镜面偏心和倾斜, 并且可为光学设计软件提供数据接口。图 6 中每个 Simcode 程序均为 Windows 批处理命令, 用来提高文件的执行效率。

采用集成优化法共获得 180 次迭代反射镜组件的质量、面形 RMS、偏心和倾斜等目标函数值, 迭代曲线如图 7 所示。结合实际经验从中选择一组最优的参数组合, 结果如表 2 所示。

根据尺寸优化的结果重构模型, 反射镜的质量为 0.917 kg, 轻量化率为 71.3%, 仅占反射镜组件的 37.9%。在 x 方向重力及 4 °C 温升工况下的面形分析结果如图 8 所示, 基频、总重量及偏心、倾斜结果如表 3 所示。从图 8 和表 3 可以看到, 面形的 RMS 值均优于 3 nm, 重力下反射镜偏心和倾斜分别优于 1.5 μm (对于 x 向位移来说) 和 1"(z 向位移与镜面直径比值的反正切值)。

4 工程试验验证

环境试验是结构设计过程中的重要组成部分,

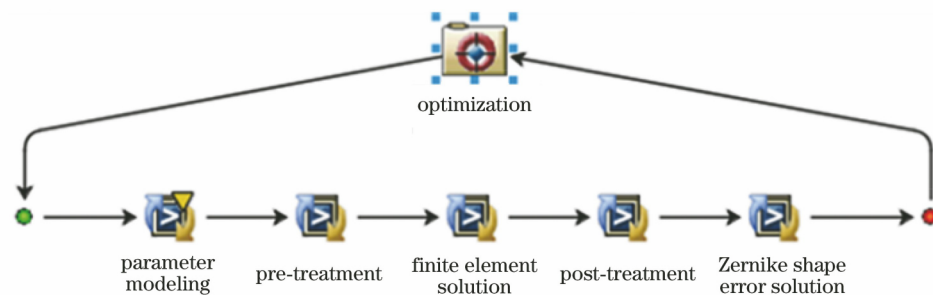


图 6 集成优化平台的处理流程示意图

Fig. 6 Flow chart of integrated optimization platform processing

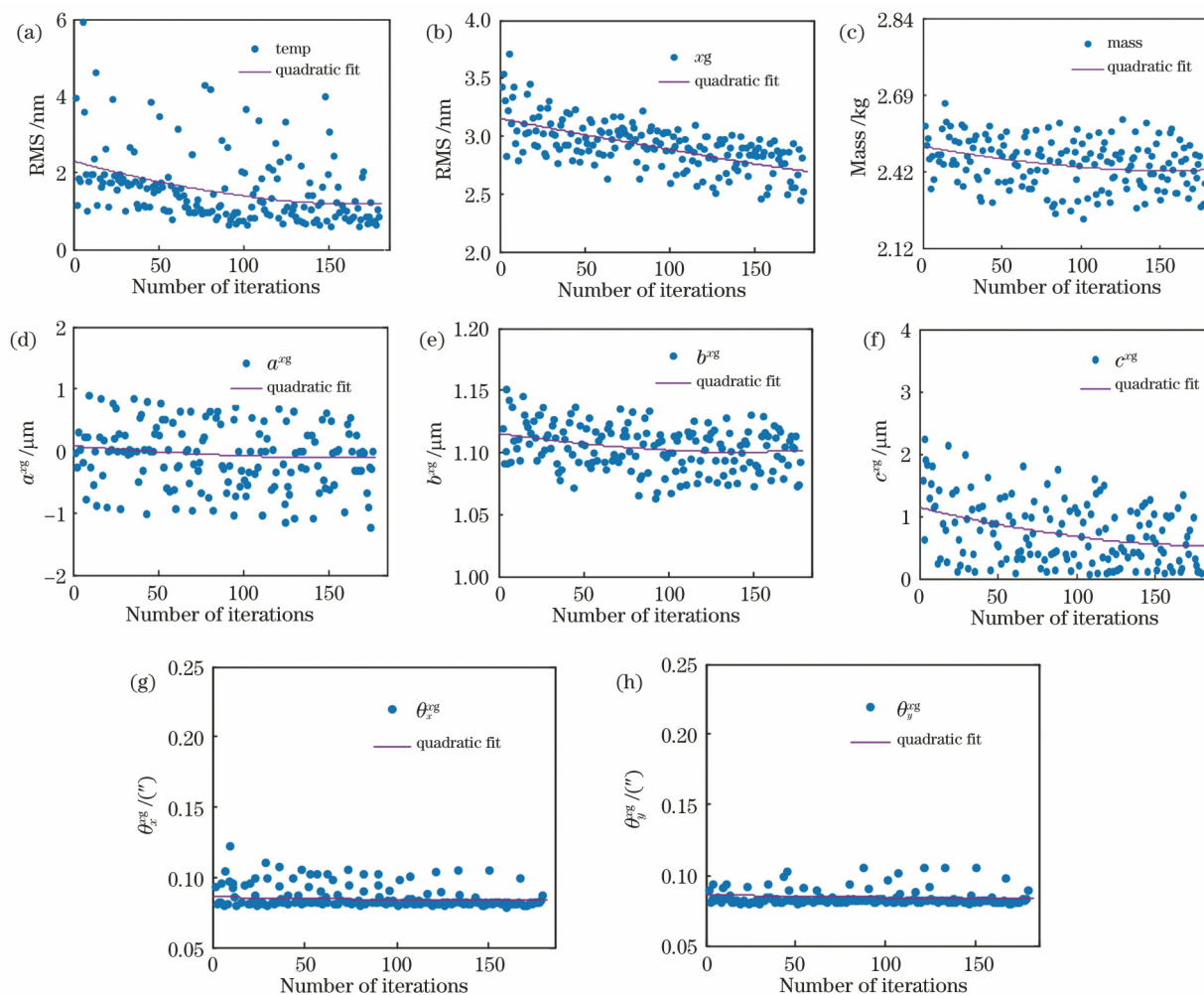


图 7 不同情况下优化后的迭代曲线。(a) $+4\text{ }^{\circ}\text{C}$ 温度面形 RMS 值;(b) x 方向重力面形 RMS 值;(c)反射镜组件质量;(d)重力工况 x 方向偏心;(e)重力工况 y 方向偏心;(f)重力工况 z 方向偏心;(g)重力工况 x 方向倾斜;(h)重力工况 y 方向倾斜

Fig. 7 Iterative curves after optimization in different situations. (a) RMS values of surface shape at $+4\text{ }^{\circ}\text{C}$; (b) RMS values of gravity surface in x direction; (c) mass of reflector component; (d) eccentricity of x -gravity condition; (e) eccentricity of y -gravity condition; (f) eccentricity of z -gravity condition; (g) x -tilt of gravity condition; (h) y -tilt of gravity condition

可以验证结构设计的合理性和仿真分析的准确性。反射镜组件对于整个光机系统而言,应具有足够的力学性能以保证相机能够承受在地面运输、火箭发

射和在轨运行的动载荷。为了研究反射镜组件的静、动力学性能,以主反射镜组件为对象进行激励大小为 0.2 m/s^2 的扫频试验和随机振动试验,并对试

表 2 最优的参数组合结果

Table 2 Optimal parameter combination results

Variable	Value range	Initial value	Optimization
$T_{\text{back}}/\text{mm}$	[22.0, 28.0]	24.0	25.2
$T_{\text{rib1}}/\text{mm}$	[3.0, 5.0]	4.0	4.6
$T_{\text{rib2}}/\text{mm}$	[3.0, 6.0]	5.0	4.1
$T_{\text{rib3}}/\text{mm}$	[3.0, 6.0]	5.0	5.4
$T_{\text{rib4}}/\text{mm}$	[3.0, 6.0]	5.0	4.5
T_{c}/mm	[0.5, 2.0]	1.0	1.6
D_1/mm	[115.0, 125.0]	120.0	118.3
D_2/mm	[205.0, 210.0]	205.0	3.0
D_3/mm	[208.0, 215.0]	210.0	3.0
D_4/mm	[55.0, 80.0]	76.0	64.2
D_5/mm	[45.0, 75.0]	66.0	52.8
$D_{\text{cone}}/\text{mm}$	[70.0, 100.0]	90.0	75.5
$\theta_1/(\circ)$	[30, 60]	40.0	46.5
$\theta_2/(\circ)$	[0, 30]	10.0	8.5
$\theta_3/(\circ)$	[5, 20]	5.0	9.5
$\theta_4/(\circ)$	[5, 20]	10.0	15.9
H_1/mm	[25.0, 35.0]	30.0	28.2
H_2/mm	[20.0, 30.0]	25.0	25.2

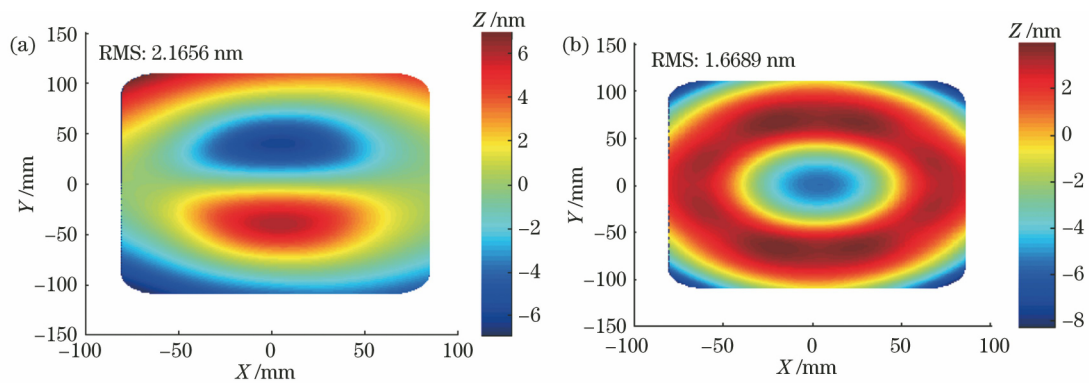
图 8 不同情况下的面形分析结果。(a) x 方向重力; (b) $4\text{ }^{\circ}\text{C}$ 温升Fig. 8 Surface shape analysis results under different conditions. (a) x -gravity condition; (b) $4\text{ }^{\circ}\text{C}$ temperature rise

表 3 优化分析结果

Table 3 Optimize analysis results

Parameter	Direction	Gravity in x direction	$4\text{ }^{\circ}\text{C}$ temperature rise
Rigid body displacement $/\mu\text{m}$	x	1.5×10^{-6}	-3.2×10^{-5}
	y	9.3×10^{-1}	8.0×10^{-4}
	z	-7.0×10^{-4}	1.3×10^{-2}
Tilt $/(\circ)$	x	1.4×10^{-2}	8.1×10^{-2}
	y	6.0×10^{-3}	8.2×10^{-2}
Intrinsic frequency $/\text{Hz}$		402.3	
m/kg		2.42	

验前、后镜面的状态进行干涉检测和记录。

4.1 正弦扫频试验

图 9 为相机力学试验现场,对装配完成的反射镜组件进行正弦扫频和随机振动试验。由于反射镜的安装面不垂直于光轴,为正确表征振动情况下反射镜镜面的最大响应,将反射镜组件安装在主承力框架上,这样得到的振动结果最准确。受到安装方式的限制,三轴加速度传感器粘贴在反射镜背部的轻量化腔体上,用以表征镜面的振动响应。对试验对象在水平两个方向和轴向一个方向进行随机振动试验,随机振动前后增加扫频试验,正弦扫频试验数据如图 10 所示,其中纵轴含义为监测点的振动加速

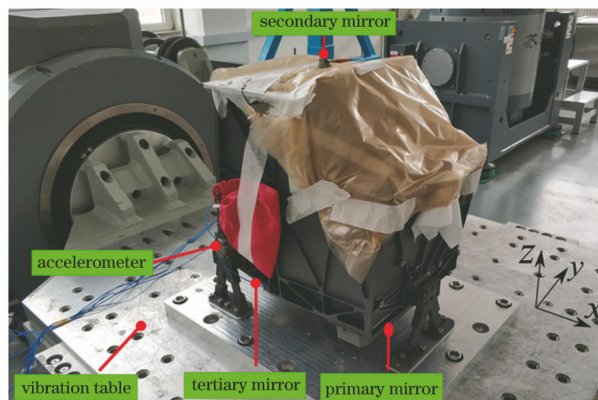


图 9 相机力学振动试验平台

Fig. 9 Camera mechanical vibration test platform

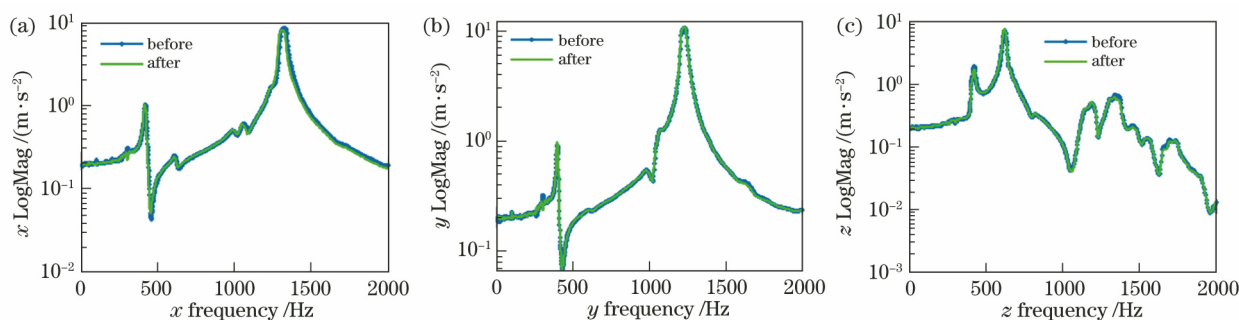


图 10 正弦扫频试验数据。(a) x 向正弦扫频;(b) y 向正弦扫频;(c) z 向正弦扫频

Fig. 10 Sine frequency sweep test data. (a) x -direction sine sweep; (b) y -direction sine sweep; (c) z -direction sine sweep

度,正弦扫频试验与工程分析得到的固有频率的对比如表 4 所示。

从图 10 和表 4 可以看到, x 、 y 和 z 方向扫频前后的固有频率基本不变,频率变化均小于 3%,满足频漂不超过 5% 的要求,且扫频试验结果与工程分

析结果相差最大不超过 2%,而反射镜的基频为 397.8 Hz,远高于系统要求的 200 Hz 频率,满足火箭发射段的振动要求。所得结果验证反射镜拓扑优化结合集成优化方法的可行性和正确性,为后续反射镜的设计提供参考。

表 4 不同情况下固有频率的对比

Table 4 Frequency comparison in different situations

Loading direction	Intrinsic frequency from experiment /Hz	Intrinsic frequency from analysis /Hz	Relative error /%	Vibration mode
x	419.9	423.5	0.8	Swing around y axis
y	397.8	402.3	1.1	Swing around x axis
z	624.1	635.6	1.8	Vibration along z axis

4.2 面形精度测试

为了更好地验证试验前后反射镜的状态是否是稳定的,分别对试验前后的反射镜进行面形干涉检测,检测温度均控制在 $(20 \pm 0.5)^\circ\text{C}$ 范围内,并去除环境影响因子。图 11 为反射镜光学干涉检测现场,图 12 为试验前后反射镜的检测结果。

从图 12 可以看到,力学试验前、后面形的 RMS 值基本无变化,面形图上高低点分布基本一致,面形 RMS 值均优于 $1/50\lambda$,检测波长 $\lambda = 632.8\text{ nm}$,说明所

提方法行之有效,可以应用在同类结构的设计中。

5 结 论

针对某相机具有超轻质、低成本、批量化和短周期的总体要求,优化设计一种超轻质和高稳定性的反射镜组件,建立以结构柔顺度为目标的拓扑优化数学模型,得到相机主镜在该模型下的最优传力路径。确定传力形式后,以反射镜镜面面形的 RMS 值为目标建立反射镜与消热芯轴的尺寸优化数学模

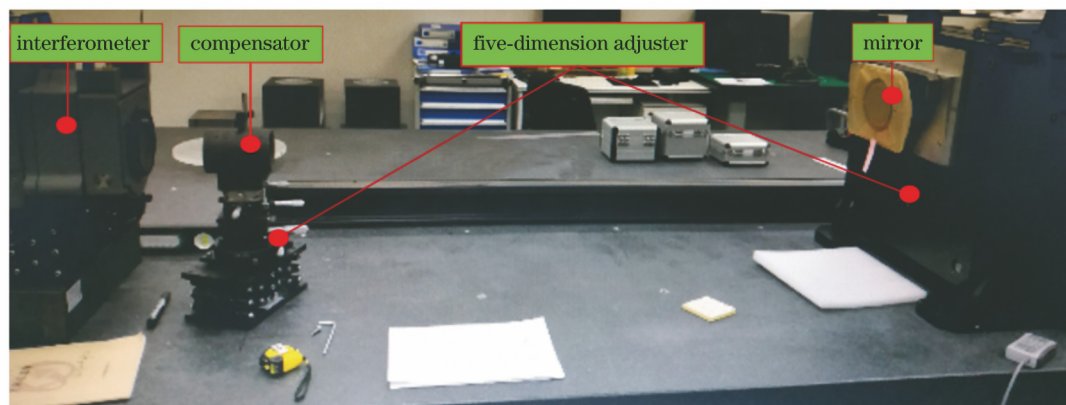


图 11 面形干涉检测现场

Fig. 11 Surface interference detection site

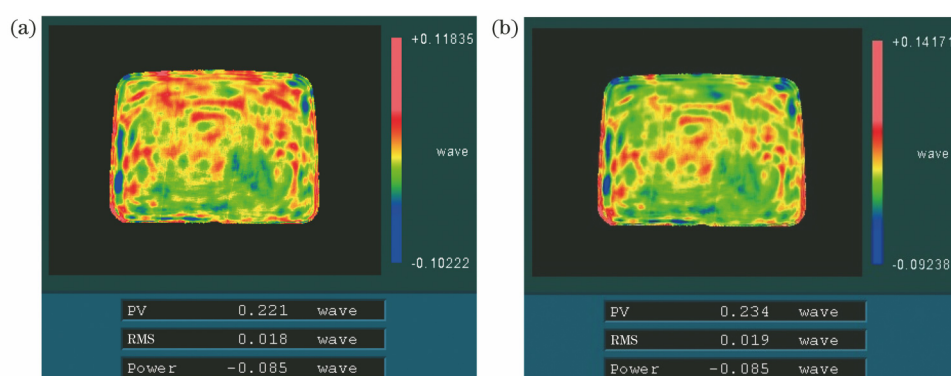


图 12 试验前后反射镜的检测结果。(a) 试验前;(b) 试验后

Fig. 12 Test results of mirror before and after test. (a) Before test; (b) after test

型,得到超轻质和高稳定性的空间反射镜组件,该反射镜的质量为 0.917 kg,仅占反射镜组件的37.9%。有限元分析表明,在重力和 4℃温升载荷的工况下,面形的 RMS 值均优于 3 nm,重力下反射镜偏心和倾斜角度分别优于 1.5 μm 和 1"。工程试验结果表明,反射镜的基频为 397.8 Hz,试验前后反射镜面形检测的 RMS 值不变。这表明基于面形 RMS 值的变密度拓扑优化方法和集成优化方法的正确性,为后续超轻质、结构紧凑和性能优良的离轴空间反射镜组件的设计提供参考。

参 考 文 献

- [1] Gleyzes M A, Perret L, Kubik P. Pleiades system architecture and main performances [J]. ISPRS-International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, 2012, XXXIX-B1: 537-542.
- [2] Zhang X J, Fan Y C, Bao H, et al. Applications and development of ultra large aperture space optical remote sensors[J]. Optics and Precision Engineering, 2016, 24(11): 2613-2626.
- [3] Li Z L, Xu H. Design of rectangular space mirror and its support structure [J]. Optics and Precision Engineering, 2011, 19(5): 1039-1047.
- [4] Qu L X. Environmental adaptability design of space mirror subassembly [J]. Opto-Electronic Engineering, 2016, 43(5): 41-46.
- [5] 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.
- [6] 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, 1037: 103710I.
- [7] 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): 2613-2626.

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.
- [8] 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. 空间光学传感器主镜柔性支撑的参数化设计[J]. 光学学报, 2016, 36(11): 1128001.
- [9] Lan B, Yang H B, Wu X X, et al. Optimal design of $\Phi 620$ mm ground mirror assembly[J]. Infrared and Laser Engineering, 2017, 46(1): 0118001.
兰斌, 杨洪波, 吴小霞, 等. $\Phi 620$ mm 口径地基反射镜组件优化设计[J]. 红外与激光工程, 2017, 46(1): 0118001.
- [10] Xing M H, Li J J, Zhai W C, et al. Design of support structure for small caliber off-axis parabolic reflector based on finite element analysis [J]. Journal of Applied Optics, 2019, 40(6): 1160-1166.
邢明慧, 李健军, 翟文超, 等. 基于有限元分析的小口径离轴抛物面反射镜支撑结构设计[J]. 应用光学, 2019, 40(6): 1160-1166.
- [11] Wang K J, Xuan M, Dong J H, et al. Design method of reflector component structure of space remote sensor[J]. Infrared and Laser Engineering, 2016, 45(11): 1113001.
王克军, 宣明, 董吉洪, 等. 空间传感器反射镜组件结构设计方法[J]. 红外与激光工程, 2016, 45(11): 1113001.
- [12] Wei L, Zhang L, Li Z X, et al. Optimization design and test for large aspect ratio rectangular SiC space mirror[J]. Acta Photonica Sinica, 2017, 46(3): 0322003.
魏磊, 张雷, 李宗轩, 等. 大长宽比长条形 SiC 反射镜的优化设计与试验[J]. 光子学报, 2017, 46(3): 0322003.
- [13] Sha W, Chen C Z, Zhang X X, et al. Topological lightweight design of space mirror [J]. Opto-Electronic Engineering, 2009, 36(4): 35-39.
沙巍, 陈长征, 张星祥, 等. 空间反射镜轻量化结构的拓扑优化设计[J]. 光电工程, 2009, 36(4): 35-39.
- [14] Yoder P R. Opto-mechanical systems design[M]. 3rd ed. Beijing: China Machine Press, 2005: 397-398.
- [15] San B, Li J L, Sun B. Light-weight technology and its application of large-aperture mirror in space camera[J]. Infrared and Laser Engineering, 2015, 44(10): 3043-3048.
伞兵, 李景林, 孙斌. 空间相机大口径反射镜轻量化技术及应用[J]. 红外与激光工程, 2015, 44(10): 3043-3048.
- [16] Dong D Y, Li Z L, Li R G, et al. Simulation and experiment of influence of adhesive curing on reflective mirror surface [J]. Optics and Precision Engineering, 2014, 22(10): 2698-2707.
董得义, 李志来, 李锐钢, 等. 胶层固化对反射镜面形影响的仿真与试验[J]. 光学 精密工程, 2014, 22(10): 2698-2707.
- [17] Wang K, Xin H W, Xu H, et al. Lightweight design of fast steering mirror for space cameras[J]. Infrared and Laser Engineering, 2019, 48(4): 0418001.
汪奎, 辛宏伟, 徐宏, 等. 空间相机快速反射镜的结构轻量化设计[J]. 红外与激光工程, 2019, 48(4): 0418001.