

doi:10.3788/gzxb20174612.1222001

$\Phi 210$ mm 超薄超轻 SiC 反射镜多目标集成优化设计

张雷^{1,3}, 柯善良^{1,2}, 李林^{1,2}, 贾学志^{1,3}, 杜一民^{1,2}

(1 中国科学院长春光学精密机械与物理研究所, 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, 长春 130031)

摘要: 为了提高轻小型碳化硅反射镜的面形精度并减轻其加工成本, 针对某空间相机的 $\Phi 210$ mm SiC 反射镜进行超轻量化设计。采用背部三点支撑并优化支撑点的位置, 通过拓扑优化, 得到反射镜背部需保留和可去除材料的分布情况, 结合背部开放式、三角形孔的轻量化方案, 确定反射镜轻量化结构的初始模型。应用多目标集成优化方法, 建立以反射镜重量和 X 向自重工况面形为目标, Z 向自重工况面形值为约束的优化模型, 对该反射镜进行了优化设计。优化后反射镜的 X 向自重工况下 RMS 值仅为 0.18 nm, Z 向自重工况下 RMS 值为 2.38 nm, 重量仅为 0.568 kg, 面密度达到 16.9 kg/m², X、Y、Z 三向基频都在 500 Hz 以上。本文设计的反射镜结构有良好的力学性能, 本文优化设计方法是合理有效性。

关键词: 超轻量化; 拓扑优化; 多目标; 集成优化; 随机振动

中图分类号: V423.4

文献标识码: A

文章编号: 1004-4213(2017)12-1222001-9

Multi-objective Integrated Optimization Design of $\Phi 210$ mm Ultra-light SiC Mirror

ZHANG Lei^{1,3}, KE Shan-liang^{1,2}, LI Lin^{1,2}, JIA Xue-zhi^{1,3}, DU Yi-min^{1,2}

(1 Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun 130033, China)

(2 University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

(3 Chang Guang Satellite Technology Co., LTD, Changchun 130031, China)

Abstract: This paper has proposed ultra-lightweight design and optimization for a primary mirror of a space camera with $\Phi 210$ mm aperture to improve surface quality and reduce its launching cost. Three-point support on mirror back is selected as the support method and the locations of the supports are carefully studied. Through the topology optimization, the mass distribution of the back of the mirror and the distribution of the removable part are obtained. The initial structure of mirror is light weighted on its back applying triangular hole light-weighting method. Multiple-object optimization which combines mass and surface figure error along X-axis (detection direction) as optimization object under constraint of surface figure error along Z-axis (machine direction) is carried out on the initial structure of mirror. Finally, a mirror with RMS (Root Mean Square) as low as 0.18 nm with X-axis straight down and 2.38 nm with Z-axis straight down is achieved. The mirror weights 0.568 kg, surface density of it is as low as 16.9 kg/m². And the primary frequency of X, Y, Z are more than 500 Hz. Through the FEM analysis and vibration test, verify the good mechanical properties of the mirror structure. The results show that the optimal design method of this paper is reasonable for the lightweight mirror.

Key words: Ultra-lightweight; Topology optimization; Multi-objective; Integrated optimization; Random

基金项目: 国家重点研发计划 (No. 2016YFB0500904) 资助

第一作者 (导师): 张雷 (1983—), 男, 副研究员, 博士, 主要研究方向为空间传感器总体技术. Email: 18686344285@163.com

通讯作者: 柯善良 (1993—), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为空间相机主支撑结构. Email: 13943029677@163.com

收稿日期: 2017-03-28; 录用日期: 2017-09-05

<http://www.photon.ac.cn>

vibration

OCIS Codes: 220.4830; 230.4040; 280.0280; 280.4788; 350.4600; 350.6090

0 引言

随着空间遥感信息的发展,各国在多个领域对于分布式高分辨率空间遥感影像的需求越来越大.目前,我国的遥感信息资源不丰富,特别是高空间分辨率和高时间分辨率的卫星遥感影像严重不足.但对于分辨率越高的卫星,传统设计中意味着反射镜口径的增大和焦距的增长^[1],不仅造价昂贵,而且发射成本高.微型化多源多尺度遥感载荷技术的突破为我国遥感卫星获取数据能力提升带来了新方向,可以最大程度地发挥卫星的应用效能,大大提升卫星遥感的性价比.微型遥感旨在大幅度降低载荷的重量,同时提高载荷的长期稳定性和环境适应性,载荷中光学系统质量的减轻,可以节省巨额的制造成本和发射费用,同时相机的结构会更加紧凑.因此,空间遥感载荷的结构轻量化是目前研制微型遥感相机的一项重要工作.

在现代空间光学传感器中通过对反射镜进行轻量化设计来减轻镜体的重量,降低发射成本和支撑结构的设计难度,同时要保证光学反射镜表面的面形精度^[2].通过合适的优化设计方法,结合实际光学系统和相关元件的制造工艺,对反射镜的结构进行超轻量化设计是现代微型遥感相机研究的重要方面.国外在反射镜的轻量化方面已有显著成果,德国 IABG 公司研制的 $\Phi 500$ mm 碳化硅反射镜的镜面厚度仅为 1.5 mm,加强筋厚度为 1.1 mm,反射镜的面密度仅为 8 kg/m^2 ,面形精度(Root Mean Square, RMS)值为 $32 \text{ nm}^{[3]}$; NASA 和德国宇航局合作研制的 Sofia 红外太空望远镜的 $\Phi 352$ mm 碳化硅次镜的镜体重量仅为 1.97 kg,面密度达到 20 kg/m^2 ,面形精度 RMS 值为 $79 \text{ nm}^{[4]}$;日本宇宙研究开发机构研制的 $\Phi 800$ mm 碳化硅超轻反射镜的主镜重量为 11.2 kg,面密度为 22 kg/m^2 ,面形精度 RMS 值为 $110 \text{ nm}^{[5]}$;日本研制的 $\Phi 710$ mm 红外空间望远镜 AKARI 的主镜重量为 10.7 kg,面密度达到 27 kg/m^2 ,面形精度 RMS 值为 $20 \text{ nm}^{[6]}$.目前,国内碳化硅反射镜的超轻量化研究已有了一定的进展,而随着有限元的开发与引进,国内对反射镜的超轻量化设计进入集成优化设计阶段.长春光机所的包齐红等,应用集成优化的方法对 $\Phi 610$ mm 的中心支撑主镜进行了变筋厚和变筋高的优化设计,其面密度达到 21.3 kg/m^2 ,面形精度 RMS 值为 $4.5 \text{ nm}^{[7]}$;袁建等通过集成优化的方法,对口径为 $\Phi 510$ mm 的 SiC 轻质主镜进行了变筋厚设计,面形精度 RMS 值达到 3.4 nm ,面密度为 $77 \text{ kg/m}^2^{[8]}$;兰斌,杨洪波等通过集成优化的方法,对 $\Phi 620$ mm 口径地基反射镜组件进行了优化设计,其面形精度 RMS 值达到 $27 \text{ nm}^{[9]}$.同时,国内小型碳化硅反射镜的加工工艺发展迅速,长春光机所的张舸等采用真空辅助凝胶注模法结合反应烧结工艺制备出了口径 200 mm,壁厚 2 mm 的超轻量化碳化硅反射镜,面密度达到 9.35 kg/m^2 ,其面形精度 RMS 值为 $27 \text{ nm}^{[10]}$.

本文应用拓扑优化方法对 $\Phi 210$ mm 碳化硅反射镜镜体结构进行了初步设计.以反射镜重量和 X 向(镜体沿轴向水平放置进行面形检测时的方向)自重面形为目标,Z 向(镜体竖直放置沿轴向进行机械加工的方向)自重工况下面形值为约束建立多目标集成优化模型,对该反射镜进行了优化设计.并对优化后的反射镜进行了力学仿真分析与试验验证,结果表明拓扑优化和多目标集成优化方法对反射镜的超轻量化十分有效,并能很好的解决超轻反射镜的全局优化设计问题.

1 反射镜材料的选取

本文 $\Phi 210$ mm 反射镜的超轻量化设计要达具有良好的面形精度($\text{RMS} < \lambda/50, \lambda = 632.8 \text{ nm}$)和足够轻的镜体结构(重量 $< 0.7 \text{ kg}$).影响光学系统面形的因素主要有材料性能、轻量化结构以及支撑结构^[11].对该超轻反射镜的轻量化设计主要从合适的材料选取与拓扑结构设计两方面内容着手.合适的反射镜材料不仅能提升反射镜的面形精度,还能大幅度减轻反射镜的重量,要使空间相机达到超轻的指标,需要选择比刚度大的制作材料.同时空间相机所处的空间环境十分恶劣,因此所选材料还需具备尺寸稳定性好、热变形系数小、力学性能和热性能各向同性的特点^[12].

目前,用于制作光学反射镜的材料主要有铍(Be)、铝(AL)、微晶玻璃(zerodur)、ULE、碳化硅(Si 及熔石英(Fused silica)等^[13].其比刚度与热稳定性比较如图 1.

光学反射镜材料的比刚度 E/ρ 决定了反射镜的自然频率和自重变形,是反射镜材料最重要的属性,由图 1 可知 SiC 与 Be 的比刚度显著高于其他材料,是优选材料;此外反射镜材料的热特性对其面形精度有很大影响,由图 1 可得 SiC 的热稳定性最优,其比刚度与热稳定性综合性能最佳.碳化硅材料具有比刚度高,密度低,热膨胀系数小、导热性能良好及各向同性等优异性能^[14],是一种非常理想的微型遥感相机超轻反射镜材料.

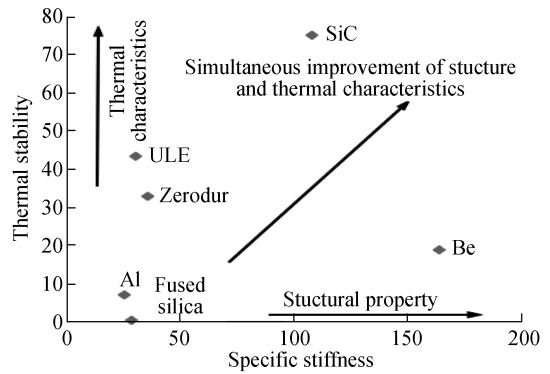


图 1 常用反射镜材料性能的比较

Fig.1 Comparison of common materials properties

2 SiC 主镜的优化设计

2.1 支撑孔位置优化

空间反射镜的支撑方案应满足结构紧凑,稳定可靠的要求.结合支撑结构的设计难度与复杂性,本文设计的 $\Phi 210$ mm 超轻 SiC 反射镜采用三点支撑方案.

支撑孔的位置对反射镜的面形和结构稳定性有显著影响.反射镜近似为圆平板状结构,抵抗轴向载荷的能力较差,反射镜面形精度主要考虑反射镜自重沿光轴以及水平方向作用的工况.优化过程中约束镜体的三处支撑孔内壁,由于背部支撑方案涉及支撑孔在反射镜径向方向的位置,因此定义支撑孔中心线到光轴的距离为 Z_{hole} ,如图 2.

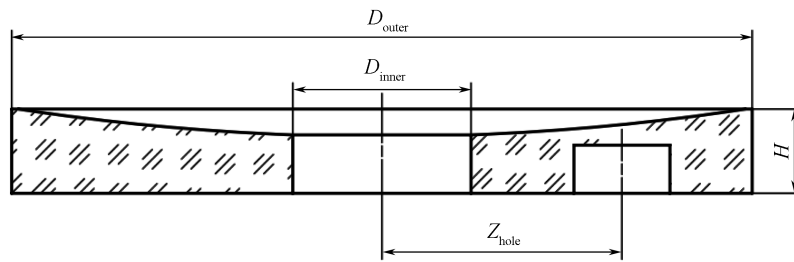


图 2 反射镜支撑点的位置

Fig.2 Position of mirror support

由光学系统已确定反射镜的外径 D_{outer} ,内部通光孔径 D_{inner} 和整体高 H ,以支撑孔到光轴的距离 Z_{hole} 作为优化参数,约束三个孔的内壁,以 X 与 Z 向自重面形为目标,进行支撑孔位置优化.由圆形有中心孔反射镜的支撑孔中心线到光轴距离最佳取值范围: $(D_{outer}/2) \times 0.6 < Z_{hole} < (D_{outer}/2) \times 0.7$ ^[15],结合反射镜尺寸和工艺性,取支撑孔位置范围为: $64 < Z_{hole} < 76$,优化结果如图 3.

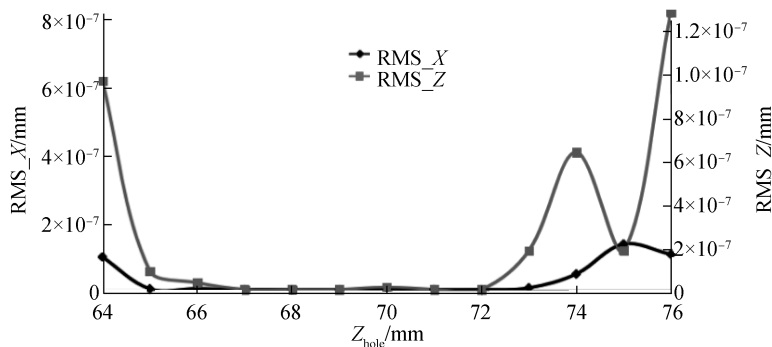


图 3 支撑孔位置优化结果

Fig.3 Optimization results of support location

由图 3 可知支撑孔中心线到反射镜光轴的距离在 $67 \sim 72$ mm 之间时沿 X 方向的自重面形精度较高,均在 10^{-3} nm 以内.反射镜光学加工时光轴竖直放置,对 Z 向自重面形精度有很大影响,因此支撑孔位置在兼顾 X 向面形前提下取 Z 向自重面形最小的点.最终选择反射镜三个支撑孔的中心线到反射镜光轴的距离

为 72 mm.

2.2 镜体拓扑优化设计

对反射镜进行轻量化设计的根本问题是:保留有益部分材料,去除多余部分材料^[16].被保留的是处于传力路径及对镜体刚度至关重要的部分,被去除的是作用不明显及有害的部分.反射镜设计尚处于概念设计阶段,首先采用拓扑优化的方法寻找结构的最佳拓扑形式.反射镜属于连续体,采用连续体结构拓扑优化方法^[17].

根据图 2 的结构参数和 2.2 中确定的支撑孔中心线到光轴的距离,建立有限元模型.以支撑孔侧壁与反射镜的前面板为非设计区域,其余部分为设计区域.以镜体重量最小为拓扑优化目标,约束反射镜面上的点沿光轴方向位移小于 12 nm,进行拓扑优化.优化后的有限元模型如图 4.

由拓扑优化结果可知,在通光孔和支撑孔附近的单元基本保留;在离支撑孔较远的三处镜体边缘,单元被去除.从轻量化的角度出发,背部开放式结构能够显著提高反射镜的轻量化水平,而三角形轻量化孔能够很好的均衡反射镜的刚度和轻量化程度,本文优化设计的超轻 SiC 反射镜采用背部开放、三角形孔的轻量化方式.结合 SiC 反射镜的热性能和工艺性,本文超轻 SiC 反射镜的初始模型如图 5.初始模型在反射镜的通光孔和外缘有通光孔壁和外壁,背部均布 15 条相互之间形成正三角形的加强筋,通光孔和三个支撑孔分别与 6 条加强筋相连,起加强反射镜整体刚度作用,在离支撑孔较远的三处镜体边缘部分分别沿着最外侧的筋进行了修剪,模型的刚度得到了加强,重量又得以减轻.

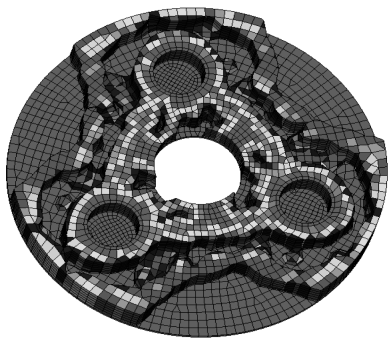


图 4 反射镜拓扑优化结果图

Fig.4 Topology optimization results of mirror

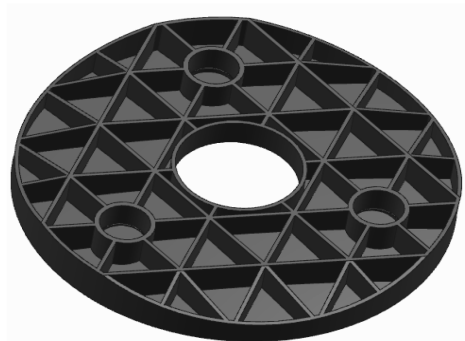


图 5 反射镜初始模型

Fig.5 Initial model of mirror

2.3 主镜集成优化

超轻反射镜结构的各参数对光学表面的面形质量影响很复杂,并不能简单叠加.传统的反射镜设计是利用经验公式对各参数进行取值,不断尝试直到满足要求.这种传统设计方法计算量大,效率极低,且容易陷入局部最优解^[18].为了提高设计效率,避免手动修改结构参数,本文通过 Isight 软件实现多目标集成优化,将几何建模、有限元分析与面形计算集成在一起,通过自适应遗传优化算法(Archive-Based Micro Genetic Algorithm, AMGA)在复杂的设计空间内找到全局最优解.

2.3.1 集成优化结构参数

通过拓扑优化可以对反射镜初步设计进行指导,对反射镜的面形精度及重量有直接影响的镜体和加强筋厚度、支撑孔大小及背部切除部分高度等参数需要进一步优化.该反射镜具体结构参数如图 6 所示.

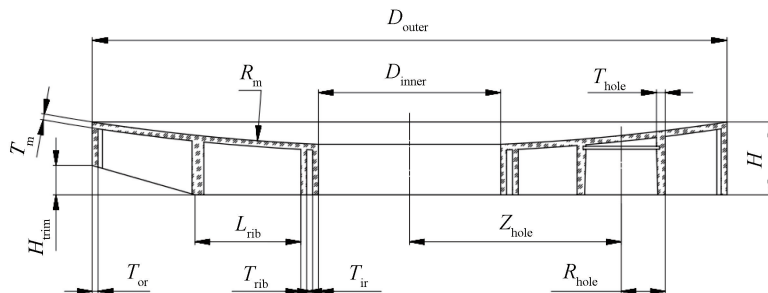


图 6 反射镜结构参数

Fig.6 Structure parameters of mirror

其中,镜面光学球面半径 R_m 、反射镜外径 D_{outer} 、通光孔径 D_{inner} 和镜体高度 H 等光学参数不可变,其余包括反射镜镜面厚度 T_m 、反外壁厚度 T_{or} 、内孔壁厚 T_{ir} 、加强筋厚度 T_{rib} 、支撑孔壁厚 T_{hole} 、支撑孔半径 R_{hole} 、加强筋间距 L_{rib} 和背部切除部分高度 H_{trim} 均为集成优化参数。

2.3.2 集成优化模型

该超轻 SiC 反射镜要求其重量轻、面形精度好,为多目标优化问题,优化目标函数包括镜体重量 $Mass$ 和面形精度 RMS 。面形精度主要是反射镜在加工和检测两种工况下自重对面形的影响,提高 Z 向面形可降低光学加工难度,而提高 X 向面形可直接提升反射镜检测面形,故以 X 向自重面形和镜体重量为目标函数。约束 Z 向自重工况下的面形不大于 3 nm ,并对镜体结构进行工艺性约束,包括镜面、加强筋厚度和支撑孔径等结构参数的取值范围。

该优化的数学描述:

$$\begin{cases} \text{find } X = (T_m, T_{or}, T_{ir}, T_{rib}, T_{hole}, R_{hole}, L_{rib}, H_{trim})^T \\ \text{min}(Mass, RMS_X) \\ \text{S.T. } 2 < T_m < 4 \\ 2 < T_{or} < 4 \\ 2 < T_{ir} < 4 \\ 2 < T_{rib} < 4 \\ 2 < T_{hole} < 4 \\ 8 < R_{hole} < 20 \\ 30 < L_{rib} < 45 \\ 0 < H_{trim} < 24 \end{cases}$$

优化时,通过 UG 实现参数化建模;以 Patran 结合 Nastran 进行有限元分析和镜体重量测量;用 SigFit 实现面形计算。通过 Isight 软件实现集合建模,有限元分析和面形计算的集成优化过程。优化流程如图 7。整个优化过程输入变量为 UG 模型中的结构尺寸,输出文件为 $Mass$ 和 RMS_X 值。

2.3.3 集成优化过程

优化过程中发现 T_m 、 T_{rib} 和 H_{trim} 对结果影响最显著。通过多项式拟合处理得图 8。

由图 8(a)可知随镜面厚度 T_m 增加,反射镜重量增大, X 向自重面形精度变差,优化结果收敛与 2 mm ,重力与面形拟合曲线相交为理想值;由图 8(b)可知随加强筋厚度 T_{rib} 增加,反射镜重量增大,但刚度得以提高, X 向自重面形精度提升,综合考虑重量与面形,加强筋厚度在 2 mm 处结果最优;由图 8(c)可知随边缘切除高度 H_{trim} 增大,反射镜重量下降,但刚度有所降低, X 向自重面形值增大,在 H_{trim} 达 19.8 mm 时两曲线相交,反射镜重量与面形综合最优。

反射镜重量与刚度是一对矛盾量,该优化是多目标优化问题,很难收敛到唯一的全局最优解,得到一系列可行解的解集,称之为 Pareto 最优解集^[19]。多目标集成优化结果如图 9 所示。图中每个点为一次优化结果,圆点为 Pareto 最优解。

2.4 优化结果

对 Pareto 最优解数据进行对比,选出重量和面形都理想的解。集成优化的设计变量取值范围、初始值与最终优化结果见表 1。

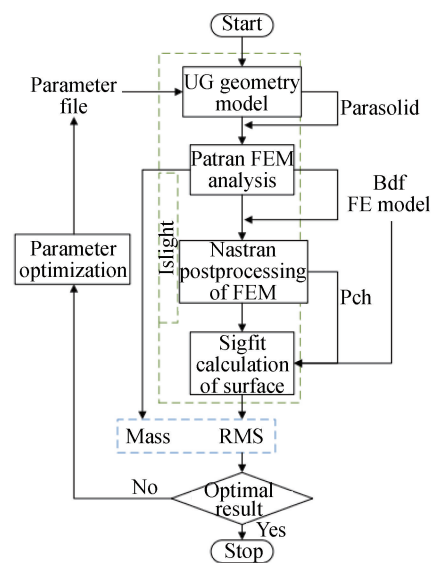


图 7 Isight 集成优化设计流程
Fig.7 Isight integrated optimization design

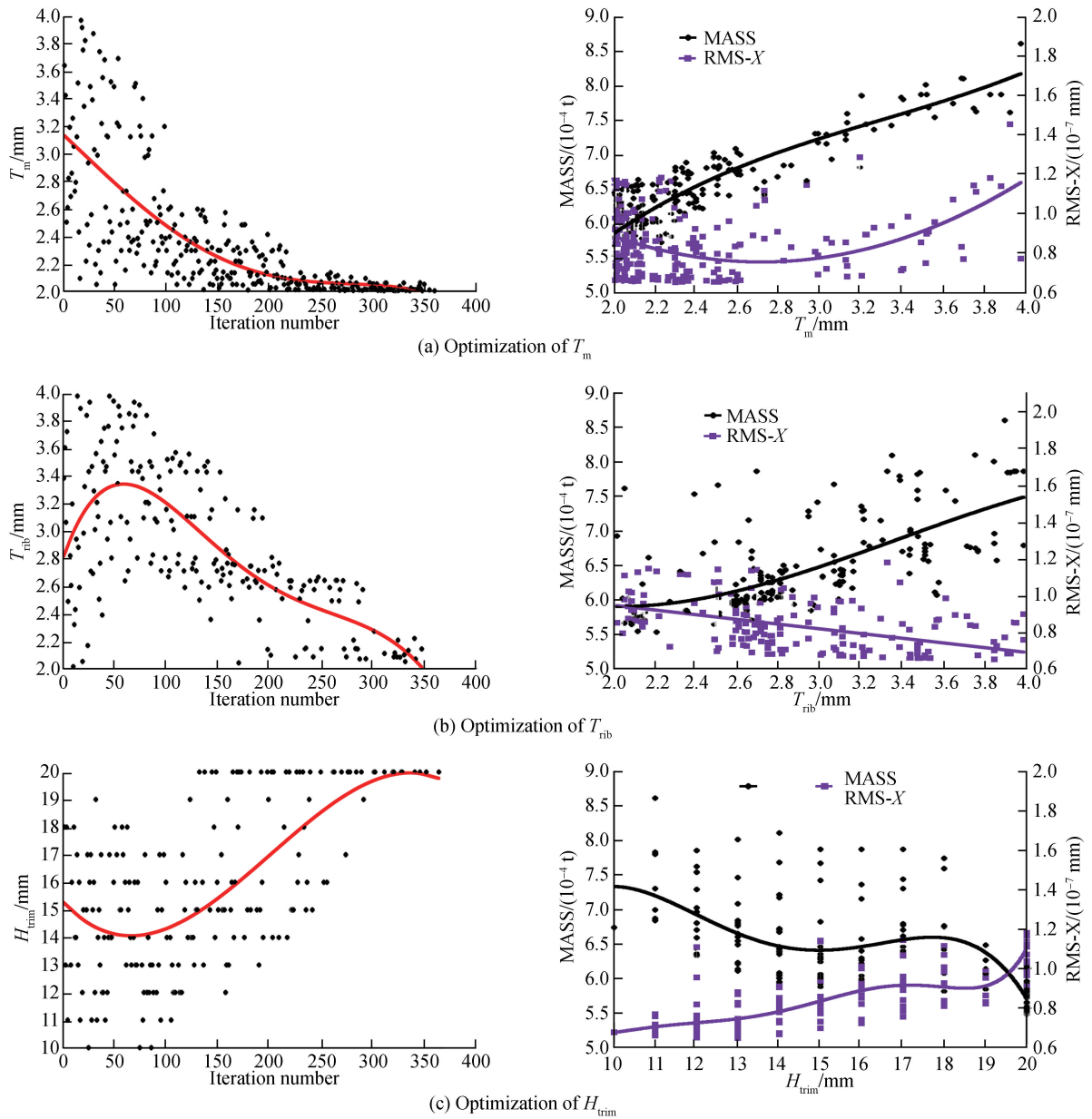


图 8 集成优化过程

Fig.8 Procedure of Integrated Optimization

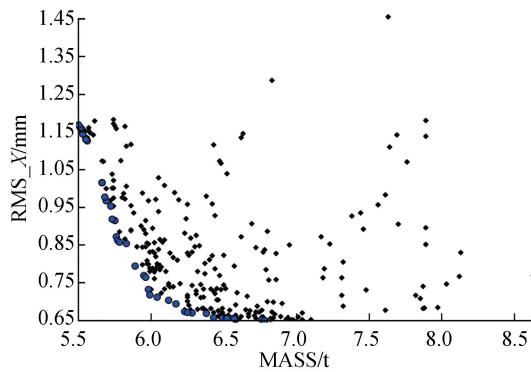


图 9 集成优化结果

Fig.9 Results of multi-objective integrated optimization

表 1 设计变量与优化结果

Table 1 Design variables and optimization results

Direction		X	Y	Z
Face shape precision	PV/nm	1.16	1.9	9.58
	RMS/nm	0.18	0.2	2.38
Primary frequency/Hz		4 993	4 985	6 690
GRMS of mirror/g		3.56	3.56	3.64

由表可知,优化后模型的镜面、加强筋和内外侧壁厚度仅为 2 mm,远小于传统反射镜厚度,将各优化值进行圆整,其模型如图 10 左图所示.从工艺角度分析,靠近内孔壁的 6 个轻量化孔尺寸太小,最小处仅 2 mm,加工工艺差,将这部分轻量化孔去除,并将内孔壁向外移动与最内侧加强筋相连,在各面的重合部分加上 2 mm 的工艺圆角,最终模型如图 10 右图,其重量仅为 0.568 kg,面密度达到 16.9 kg/m².



图 10 优化后反射镜模型

Fig.10 Mirror model after optimization

2.5 优化后单镜性能分析

约束最终反射镜模型背部的 3 个支撑孔,对单镜的面形精度和力学性能进行分析,结果如表 2.

表 2 单镜有限元分析结果

Table 2 The FEM analysis results of mirror

Variable	Ranges/mm	Initial value/mm	Optimization results/mm
T_m	[2.0,4.0]	2.5	2.001
T_{or}	[2.0,4.0]	2.5	2.041
T_{ir}	[2.0,4.0]	2.5	2.031
T_{rib}	[2.0,4.0]	2.5	2.039
T_{hole}	[2.0,4.0]	2.5	3.032
R_{hole}	[8.0,20.0]	10.0	14.88
L_{rib}	[30,45]	30	36
H_{trim}	[0.0,24.0]	10.0	19.8

由表 2 可知,通过多目标集成优化所得反射镜自重工况下面形精度均在 2.5 nm 以内,X 向面形仅有 0.18 nm,远远小于 $\lambda/50$ 的设计要求;在输入为 3.6 g 的随机加速度响应下反射镜的加速度响应均方根值变化很小.本文的优化方法不仅大幅度降低了反射镜的重量,降低了随机振动的加速度响应,且优化后反射镜面形精度更佳.

3 反射镜组件分析与试验验证

欲通过振动试验来验证本文优化设计的反射镜的力学性能,由于单个反射镜没有与振动工装直接相连的接口因而无法直接进行试验,因而采用反射镜模拟组件(包括铝制反射镜模拟件与柔性支撑结构)来进行力学振动试验.对模拟组件进行仿真分析,并与试验结果进行对比验证分析的正确性,进而证明本文的优化设计方法的合理性.

建立如图 11 所示的反射镜组件有限元模型,约束振动工装板与振动台连接的螺栓孔,对 SiC 反射镜组件和模拟组件分别进行模态分析和随机振动有限元分析.分析结果如表 3 所示,从比较结果可知,模拟组件与 SiC 反射镜组件的模态相对误差均在 6% 以内;随机振动响应除了 Z 向外,其余方向相对误差都在 2% 以

内,因此可以用铝制模拟组件来分析 SiC 反射镜组件的力学性能.

表 3 模拟组件与 SiC 组件力学性能对比

Table 3 Comparison of Al and SiC mirror component

Direction		X	Y	Z
Comparison the results of modal analysis	Al mirror component	573.3 Hz	575.9 Hz	1 669.1 Hz
	SiC mirror component	601.3 Hz	603.2 Hz	1 760.6 Hz
	Relative error	4.65 %	4.52 %	5.2 %
Comparison the results of random vibration analysis	Al mirror component	22.85 g	23.05 g	6.18 g
	SiC mirror component	22.8 g	22.7 g	7.14 g
	Relative error	0.22 %	1.54 %	13.4 %

对反射镜模拟组件进行振动试验,试验现场如图 12 所示.在镜面贴 3 个传感器检测镜面加速度响应,在振动工装上贴控制传感器作为输入参考.

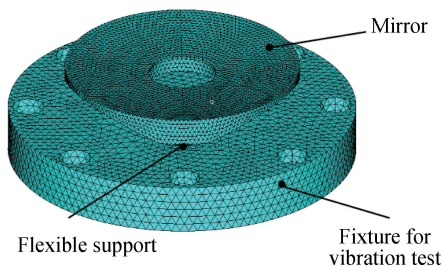


图 11 反射镜组件有限元模型

Fig.11 The FEM model of mirror component

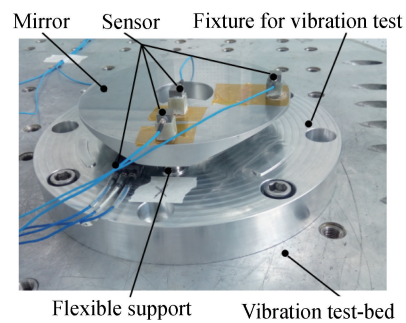


图 12 振动试验现场

Fig.12 Placement of random vibration test

将试验结果与分析结果对比如表 4 所示,本文反射镜模拟组件的约束模态和随机振动加速度响应有限元分析数据与试验数据相对误差均在 8% 以内,在误差允许范围之内,满足工程要求.因此本文的有限元模型较为准确,从而间接证明了本文所用的多目标集成优化设计方法的合理性.

表 4 试验与分析数据对比

Table 4 Comparison the date of tests and analysis

Direction		X	Y	Z
Comparison the results of frequency scanning test with modal analysis	Analysis	573.3 Hz	575.9 Hz	1 669.1 Hz
	Test	545.5 Hz	538.5 Hz	1 572.2 Hz
	Relative error	4.85 %	6.49 %	5.8 %
Comparison the results of random vibration test with analysis	Analysis	22.85 g	23.05 g	6.18 g
	Test	22.25 g	21.67 g	5.74 g
	Relative error	0.26 %	5.98 %	7.1 %

4 结论

本文利用拓扑优化和多目标集成优化方法对 $\Phi 210$ mm 超轻 SiC 反射镜进行了优化设计.首先对反射镜背部支撑点的位置进行了敏感度分析,确定了支撑点中心线到中心孔光轴的距离.再利用拓扑优化分析了反射镜背部材料的分布情况,确定了反射镜轻量化方案和反射镜的初始模型.最后通过光机集成分析方法,建立以镜体重量和 X 向自重工况面形为优化目标,以 Z 向自重工况面形为约束的优化模型,对反射镜各结构参数进行了自动化和多目标的集成优化.优化后单镜重量为 0.568 kg,面密度达到 16.9 kg/m^2 ,面形均在 2.5 nm 以内,反射镜的各项指标均满足设计要求,且显著优于传统轻量化结构的结果.通过有限元分析和振动试验表明反射镜的力学性能满足设计要求,验证了有限元分析的准确性,表明本文针对超轻反射镜提出的拓扑优化和多目标集成优化的合理性和有效性,很好的解决了超轻反射镜的全局优化设计问题.

参考文献

- [1] YUAN Jian, SHA Wei, REN Jian-yue. Design of support structure for deformable mirror used in space camera[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2016, **45**(7): 0718001.
袁健,沙巍,任建岳. 空间相机用变形镜的支撑结构设计[J]. 红外与激光工程, 2016, **45**(7):0718001.
- [2] LI Zhi-lai, XU Hong, GUAN Ying-jun. Structural design of 1.5 m mirror subassembly for space camera.[J] *Optics and Precision Engineering*, 2015, **23**(6): 1635-1641.
李志来,徐宏,关英俊. 1.5 m 口径空间相机主镜组件的结构设计[J]. 光学精密工程, 2015, **23**(6):1635-1641.
- [3] HADAWAY J B, ENG R, STAHLH P, *et al.* Cryogenic performance of lightweight SiC and C/SiC mirrors[C]. SPIE, International Society for Optics and Photonics, 2014: 1018-1029.
- [4] WADDELL P, BECKLIN E E, HAMILTON R T, *et al.* Telescope stray light: early experience with SOFIA[C]. SPIE, International Society for Optics and Photonics, 2016: 997300.
- [5] KRODEL M, ZAUNER C. Extreme stable and complex structures for optomechanical applications [C]. SPIE, International Society for Optics and Photonics, 2015: 95740G.
- [6] SERJEANT S. Strong gravitational lenses and multi- wavelength galaxy surveys with AKARI, Herschel, SPICA and Euclid[J]. *arXiv preprint arXiv*, 2016: 1604.00282.
- [7] BAO Qi-hong, SHA Wei, CHEN Chang-zheng, *et al.* Ultra-lightweight design of Φ610 mm circular primary mirror supported in center[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2016, **45**(9): 0912007.
包奇红,沙巍,陈长征,等. 中心支撑 Φ610 mm 圆形主镜的超轻量化设计[J]. 光子学报, 2016, **45**(9):0912007.
- [8] YUAN Jian, REN Jian-yue, *et al.* Improvement and optimization of lightweight structure for SiC reflective mirror[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2015, **44**(8): 0812004.
袁健,任建岳,等. 碳化硅反射镜轻量化结构的改进与优化[J]. 光子学报, 2015, **44**(8):0812004.
- [9] LAN Bin, YANG Hong-bo, WU Xiao-xia, *et al.* Optimal design of Φ620 mm ground mirror assembly[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2017, **46**(1):0118001.
兰斌,杨洪波,吴小霞,等. Φ620 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] DONG Bin-chao, ZHANG Ge. Fabrication and properties of ultra-lightweight SiC mirror[J]. *Optics and Precision Engineering*, 2015, **23**(8): 2185-2191.
董斌超,张舸. 超轻量化 SiC 反射镜的制备及性能[J]. 光学精密工程, 2015, **23**(8):2185-2191.
- [11] WANG Ke-jun, DONG Ji-hong, ZHAO Wei-guo, *et al.* Compound support structure for large aperture mirror of space remote sensor[J]. *Optics and Precision Engineering*, 2016, **24**(7): 1719-1730.
王克军,董吉洪,赵伟国,等. 空间遥感器大口径反射镜的复合支撑结构[J]. 光学精密工程, 2016, **24**(7):1719- 1730.
- [12] LI Zong-xuan, XING Li-na, XIE Peng. Design of the Φ330 mm primary mirror assembly of space-borne video camera [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2016, **45**(7): 0722003.
李宗轩,邢利娜,解鹏. 视频空间相机 Φ330 mm 口径主镜组件设计[J]. 光子学报, 2016, **45**(7):0722003.
- [13] WANG Yong-jie, XIE Yong-jie, MA Zhen, *et al.* Research progress of new space mirror materials[J]. *Materials Herald*, 2016, **7**: 143-147.
王永杰,解永杰,马臻,等. 空间反射镜新材料研究进展[J]. 材料导报, 2016, **7**:143-147.
- [14] LI Meng-qing, ZHANG Lei. Optimization design of athermal adhesive for rectangular space mirror[J]. *Chinese Optics*, 2016, **9**(6): 704-712.
李梦庆,张雷. 长条形空间反射镜无热化胶层的优化设计[J]. 中国光学, 2016, **9**(6):704- 712.
- [15] 凯斯.B.道尔, 维克托.L.基恩伯格, 格雷戈里.J.迈克尔斯等著, 连华东, 王小勇, 徐鹏等译. 光机集成分析(第2版)[J]. 北京:国防工业出版社, 2015:135-139.
- [16] JANG Hao. Research on ultra-light SiC mirrors and support techniques[D]. Changchun Institute of Optics, Fine Machines and Physics, Chinese Academy of Science, 2016: 26-27.
江浩. 超轻量化 SiC 反射镜及支撑技术研究[D]. 中国科学院长春光学精密机械与物理研究所, 2016:26-27.
- [17] 尹芳放,叶红玲,王伟伟,等. 基于独立连续变量位移约束的双材料平面连续体结构拓扑优化[A]. 见:北京力学学会第二十三届学术年会[C]. 中国北京, 2017, 242.
- [18] TANG Dun-bin, YANG Jun, DAI Min. Object-oriented multiple poles and multi-objective constrained optimization design method[J]. *Mechanical Manufacturing & Automation*, 2016, **45**(4): 1- 4.
唐敦兵,杨俊,戴敏. 面向对象的多杆机构多目标约束优化设计方法[J]. 机械制造与自动化, 2016, **45**(4):1- 4.
- [19] 赖宇阳,姜欣,方立桥. Isight 参数优化理论与实例详解[M]. 北京:北京航空航天大学出版社, 2012:189-193.