

引用格式: DU Yimin, GAO Yan, XU Boqian, et al. Integrated Design of Splicing Primary Mirror Segment Assembly Based on Combinatorial Optimization Algorithm[J]. Acta Photonica Sinica, 2022, 51(4):0412008

杜一民,高雁,许博谦,等. 基于组合优化算法的拼接子镜组件一体设计[J]. 光子学报, 2022, 51(4):0412008

基于组合优化算法的拼接子镜组件一体设计

杜一民,高雁,许博谦,张春悦,匡也

(中国科学院长春光学精密机械与物理研究所 中国科学院空间光学系统在轨制造与集成重点实验室,
长春 130033)

摘 要:为降低子镜促动器负载,保证拼接式主镜的面形精度和稳定性,针对子镜组件进行了一体优化设计。根据子镜组件设计要求初步确定了子镜的结构形式,基于反射镜背部三点支撑方案提出了一种开槽横梁多轴柔性支撑结构。为解决组件一体优化设计中引入变量过多,不易收敛的问题,设计了一种基于多岛遗传与梯度优化的组合优化算法。建立了以结构重量、面形精度为目标的优化模型,对子镜组件进行了一体设计、工程分析及试验验证。工程分析结果表明:子镜组件结构重量为 1.74 kg, X、Y、Z 三个方向上的基频均在 400 Hz 以上,面形精度均控制在 5 nm 以内。最后对子镜面形进行了检测,结果显示:子镜面形精度的 RMS 值为 0.019λ ($\lambda=632.8$ nm),满足优于 $\lambda/50$ 的设计要求,验证了设计和分析的准确性,表明针对子镜组件的一体优化设计方法是合理的,为空间相机反射镜支撑结构组件级一体化设计提供了新思路。

关键词:拼接式主镜;面形精度;子镜组件;组合优化算法;一体设计;工程分析;面形检测

中图分类号: V423.4

文献标识码: A

doi: 10.3788/gzxb20225104.0412008

0 引言

随着空间观测需求的发展,对空间光学遥感器的要求越来越高^[1-5]。反射镜组件是空间光学遥感器中最重要的部件之一,反射镜的面形精度与稳定性直接关系到光学系统的成像质量。为了降低反射镜支撑、加工、装调、检测难度,保证面形精度,需对其进行轻量化设计以减轻结构重量^[6-8]。

欧洲航天局研制的 Herschel 远红外望远镜 $\Phi 3.5$ m 主镜的镜面厚度为 2.5 mm,镜体重量为 210 kg,面密度为 21.8 kg/m²,采用双足支架柔性支撑结构,面形精度 RMS 值优于 2 μ m^[9];Xinetics 公司研发的 $\Phi 510$ mm 反射镜的镜面厚度为 2~4 mm,加强筋厚度为 1.5 mm,反射镜的面密度仅为 22 kg/m²,面形精度 RMS 值为 296 nm^[10]。张雷、柯善良^[11-12]等针对某空间相机的 $\Phi 210$ mm SiC 反射镜应用拓扑优化、多目标集成优化方法进行超轻量化设计,并应用集成优化方法优化设计了一种串联双轴片式柔性支撑结构,反射镜面形精度 RMS 值优于 3.5 nm,组件重量仅为 637 g,面密度达到 16.9 kg/m²;邵梦琪等^[13]针对微型遥感载荷采用第二代非支配排序遗传算法建立多约束多目标的参数优化模型,设计了一种折臂梁式柔性支撑结构,镜面的表面误差 RMS 优于 0.020λ 。

传统轻量化方法一般以单一工件为优化对象^[14-15],不能使整个组件真正达到重量最轻、面形精度最高的设计目标。由于子镜组件(Pimary Mirror Segment Assembly, PMSA)促动器承载能力及镜体材料的严格限制,传统轻量化方法无法满足设计指标。因此,子镜组件的一体优化设计方法是符合重量要求的关键。组件级一体化设计势必引入过多的参数变量,导致系统运算量大,迭代时间长、不易收敛。为解决上述问题,设计了一种基于多岛遗传与梯度优化的组合优化算法,将其应用于拼接子镜的优化设计中。

基金项目:国家重点研究发展计划(No.2016YFE0205000)

第一作者:杜一民(1991—),男,研究实习员,硕士,主要研究方向为空间光学遥感器结构与机构设计。Email: duyimin0601@126.com

通讯作者:高雁(1980—),男,副研究员,博士,主要研究方向为空间光学遥感器总体技术。Email: ynogga@163.com

收稿日期: 2021-09-07; **录用日期:** 2021-11-09

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

本文旨在应用一体优化方法设计一种用于拼接式主镜、镜体材料为 Zerodur 的子镜组件,通过拓扑优化方法确定子镜结构形式,基于反射镜背部三点支撑方案提出一种开槽横梁多轴柔性支撑结构。建立组件一体化多目标优化模型,对镜体、柔性支撑与背板的尺寸参数进行一体优化,通过工程分析方法及试验验证了子镜组件的性能,很好解决了反射镜组件设计中的全局寻优问题。

1 子镜组件结构设计

本文研究的拼接式反射镜由三块正六边形 Zerodur 子镜构成,每个子镜外接圆 $\Phi 242$ mm。由于子镜位姿促动器承载能力的限制,要求结构重量不大于 2 kg。自身重力与 5℃ 温变的分别作用下,子镜面形精度 RMS 值优于 $\lambda/50$ ($\lambda=632.8$ nm),组件基频不小于 200 Hz,主镜拼接后面形精度优于 $\lambda/40$ 。为了保证子镜面形,考虑组件的动静态刚度与热稳定性^[16],子镜采用背部三点支撑方案。

1.1 子镜拓扑优化

子镜的轻量化是在给定的设计空间内寻找合理的材料分布,在满足各种性能的前提下实现重量最轻设计。本文通过 OptiStruct 中基于密度法的拓扑优化技术确定子镜背部的最佳结构形式。在工程实际中通常将反射镜的面形精度要求转化为镜面节点的约束。拓扑优化模型以子镜体积最小为优化目标,镜面节点位移为约束,材料分布密度为变量,其数学描述为

$$\begin{aligned} \text{find: } & \rho = \{\rho_1, \rho_2, \dots, \rho_N\}^T \\ \text{Minimize: } & V(\rho_1, \rho_2, \dots, \rho_N) = \mathbf{v}^T \rho = \sum_{i=1}^N \rho_i v_i \\ \text{subject to } & \begin{cases} U(\rho_i) \leq U, \\ \mathbf{F} = \mathbf{K} \mathbf{u} \\ 0 < \rho_{\min} \leq \rho_i \leq \rho_{\max} \leq 1 \\ i = 1, 2, \dots, N \end{cases} \end{aligned} \quad (1)$$

式中, ρ_i 为单元的相对密度,是优化变量; N 为设计取离散结构单元总数目; v_i 为单元体积; V 为优化后设计区结构体积; F 为边界载荷; K 为结构总刚度矩阵; u 为节点位移向量; U 为镜面节点位移; U^* 为镜面节点位移约束; $\rho_{\max}$ 、 $\rho_{\min}$ 分别为单元密度的极大值与极小值。

根据子镜支撑方案及设计要求,对子镜的材料分布进行拓扑优化,建立如图 1(a) 所示的有限元模型,约束支撑孔三个方向上的位移自由度,镜面与支撑孔侧壁为非设计区域,其余部分为设计区域。拓扑优化结果如图 1(b),镜体材料分布呈杂乱状态,且在工程中材料密度不存在中间值,应对优化结果进行分析以适应工程实际:支撑孔附近单元基本得以保留,布置加强筋与支撑孔侧壁连接;子镜边角与支撑点间路径上均有单元保留,应设置加强筋连接;镜体边缘大部分区域被去除,应适度切除。子镜初始结构如图 2,边角与支撑孔间通过 12 条加强筋相连,边缘部分进行了修剪处理,减轻结构重量。

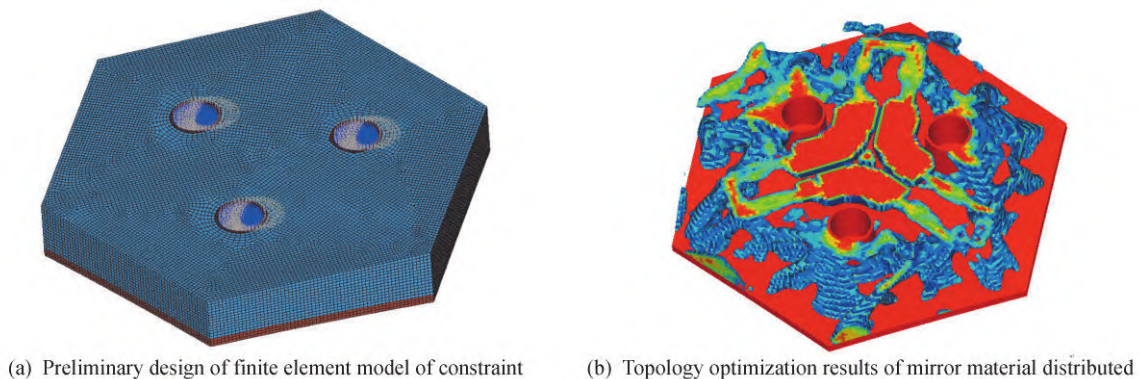


图 1 子镜拓扑优化

Fig. 1 Topology optimization of mirror



图2 子镜初始结构
Fig. 2 Initial structure of mirror

1.2 柔性支撑结构

柔性支撑起到支撑镜体的作用,同时减小反射镜组件因材料热膨胀系数的不同引起的面形精度下降,柔性支撑结构应具备良好的动静态刚度保证反射镜的面形精度及稳定性,还要提供足够的柔性充分释放组件内部产生的热应力,减小温度变化对反射镜面形的影响,一般通过局部开槽或去除材料降低特定方向上的刚度。设计的柔性支撑结构选用比刚度较大的钛合金(TC4)材料以减轻结构重量,初始结构如图3,包括:衬套安装座、开槽横梁、多轴铰链、底座,由支撑横梁上的应力释放沟槽和多轴柔性铰链共同构成柔性环节。

1.3 子镜组件初步设计

子镜组件由子镜、衬套、柔性支撑结构、背板构成,装配关系如图4。衬套采用与 Zerodur 子镜热膨胀系数相同的殷钢(4J32)材料,通过环氧胶与反射镜支撑孔粘接,背板采用钛合金(TC4)材料,整个组件固定在子镜位姿促动器上。

2 子镜组件一体优化设计

子镜组件安装在促动器上以调整子镜位姿,为了降低位姿促动器的负载,同时保证拼接式反射镜的成像质量,以子镜面形精度和结构质量作为衡量组件性能的依据,对组件结构参数进行一体优化设计。

2.1 组合优化算法

遗传算法借助于生物进化过程中“适者生存”的规律,模仿生物遗传繁殖机制,对优化问题解空间的个体进行编码及遗传操作,经过迭代从新的种群中寻找最优解。多岛遗传算法是对并行分布遗传算法的改进,具有优良的全局求解能力,适用于全局、非光滑、不连续的优化问题,但收敛速度较慢;梯度优化算法寻优过程可以表述为以一定的方向、一定的步长逐步接近优化点的过程。选定初始点 $X^{(0)}$,按梯度方向 $S^{(0)}$,以初选步长 $a^{(0)}$ 寻找一个新点 $X^{(1)}$,使目标函数值 f 下降,并重复这一过程,直到获得最优解 X^* ,即 $X^{(k+1)} = X^{(k)} + a^{(k)} S^{(k)}$ 。梯度优化算法可以有效探索初始设计点周围局部区域,收敛速度较快,但非常依赖于初始设计点,

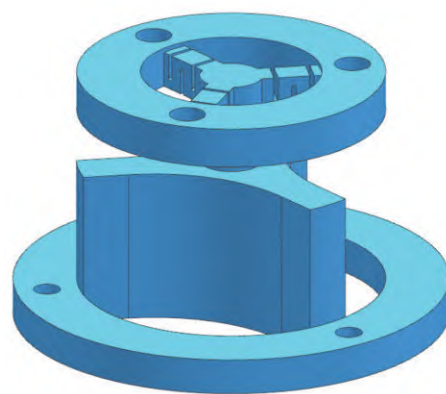


图3 开槽横梁多轴柔性支撑初始结构
Fig. 3 Initial structure of multi-axis flexible support with slotted beams

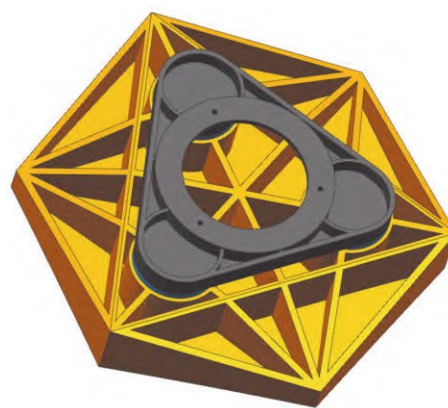


图4 子镜组件初始结构
Fig. 4 Initial structure of primary mirror segment assembly

容易陷入局部解。

为了减少系统运算量,加快收敛速度,规避局部最优解,提高优化效率和系统稳定性,设计了基于多岛遗传与梯度优化的组合优化算法,其策略为:通过多岛遗传算法对设计空间的敏感区域进行粗略定位,应用梯度优化算法对该区域进行精确寻优。该策略充分发挥了全局优化算法在整体设计空间遍历和梯度优化算法在局部区域收敛速度快的优势。基于多岛遗传与梯度优化的组合优化算法可以有效解决因参数过多导致的迭代步数多、目标函数不易收敛的问题。

2.2 结构尺寸参数

根据1.3节中子镜组件的初步设计,进一步优化直接影响子镜组件面形和质量特性的结构参数,具体参数如图5,其中子镜的尺寸参数包括:镜体高度 H 、镜面厚度 T_m 、外壁厚度 T_{or} 、加强筋厚度 T_{rib} 、支撑锥孔孔口直径 D_{hole} 、支撑孔壁厚 T_{hole} 、支撑孔中心到子镜中心距离 Z_{hole} 、镜体边缘切除高度 H_{rim} ;柔性支撑结构的参数包括:横梁的开槽深度 S_{beam} 、开槽间距 G_{beam} 、开槽位置 L_{beam} 以及多轴柔性铰链的直径 D_h 、长度 L_h ;背板的结构参数包括:柔性支撑结构安装面厚度 T_f 、平台安装面厚度 T_h 、加强筋厚度 T_r 。

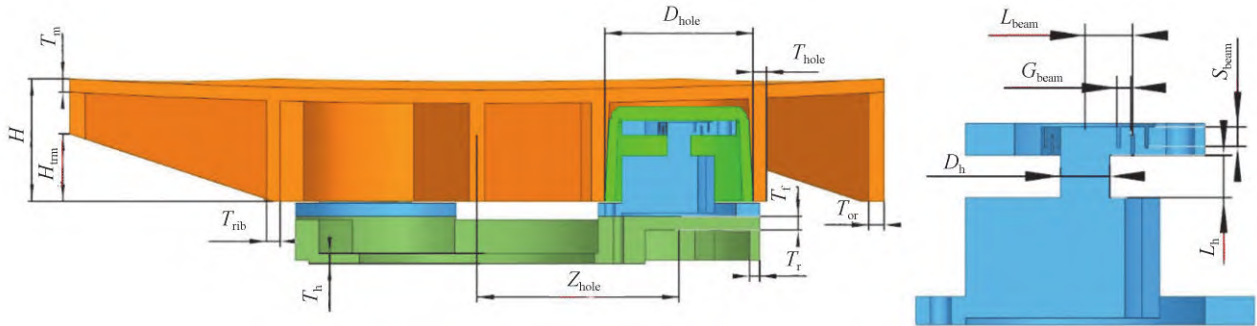


图5 结构参数示意

Fig. 5 Diagram of structure parameters

2.3 子镜组件一体优化模型

建立以子镜组件重量 $MASS$ 和 Y 向自重、 5°C 温变载荷分别作用下面形 RMS 值最小为设计目标的尺寸优化模型。优化变量为2.2节中结构参数。子镜位姿促动器承载最大负载 2.5 kg ,以组件重量 $MASS$ 不大于 2 kg 作为优化的约束条件,设定子镜组件基频不小于 200 Hz ,结合工程实际及结构工艺性,确定参数尺寸的取值范围。子镜组件一体优化的数学描述为

$$\begin{aligned}
 & \text{find } X = \{H, T_m, T_{or}, T_{rib}, D_{hole}, \dots, T_r\}^T \\
 & \min(M, R_{Gy}, R_T) \\
 & \text{subject to } \begin{cases} M \leq 2.0 \text{ kg} \\ f \geq 200 \text{ Hz} \\ 25 \text{ mm} \leq H \leq 40 \text{ mm} \\ 4 \text{ mm} \leq T_m \leq 10 \text{ mm} \\ 4 \text{ mm} \leq T_{or} \leq 10 \text{ mm} \\ 4 \text{ mm} \leq T_{rib} \leq 10 \text{ mm} \\ 60 \text{ mm} \leq D_{hole} \leq 80 \text{ mm} \\ \vdots \\ 2 \text{ mm} \leq T_r \leq 5 \text{ mm} \end{cases} \quad (2)
 \end{aligned}$$

式中, M 为子镜组件重量, X 为优化变量, R_{Gy} 为 Y 方向自重下面形变化的均方根值, R_T 为 5°C 温度变化面形精度的均方根值, f 为子镜组件一阶频率。

优化流程如图6,子镜组件一体优化系统集成了自动优化、参数化建模、有限元分析、面形计算等功能。通过结构尺寸参数建立三维模型,应用有限元方法检测子镜组件的质量特性,分析其节点位移。根据分析

结果提取镜面节点位移并拟合面形数据,计算子镜面形精度。

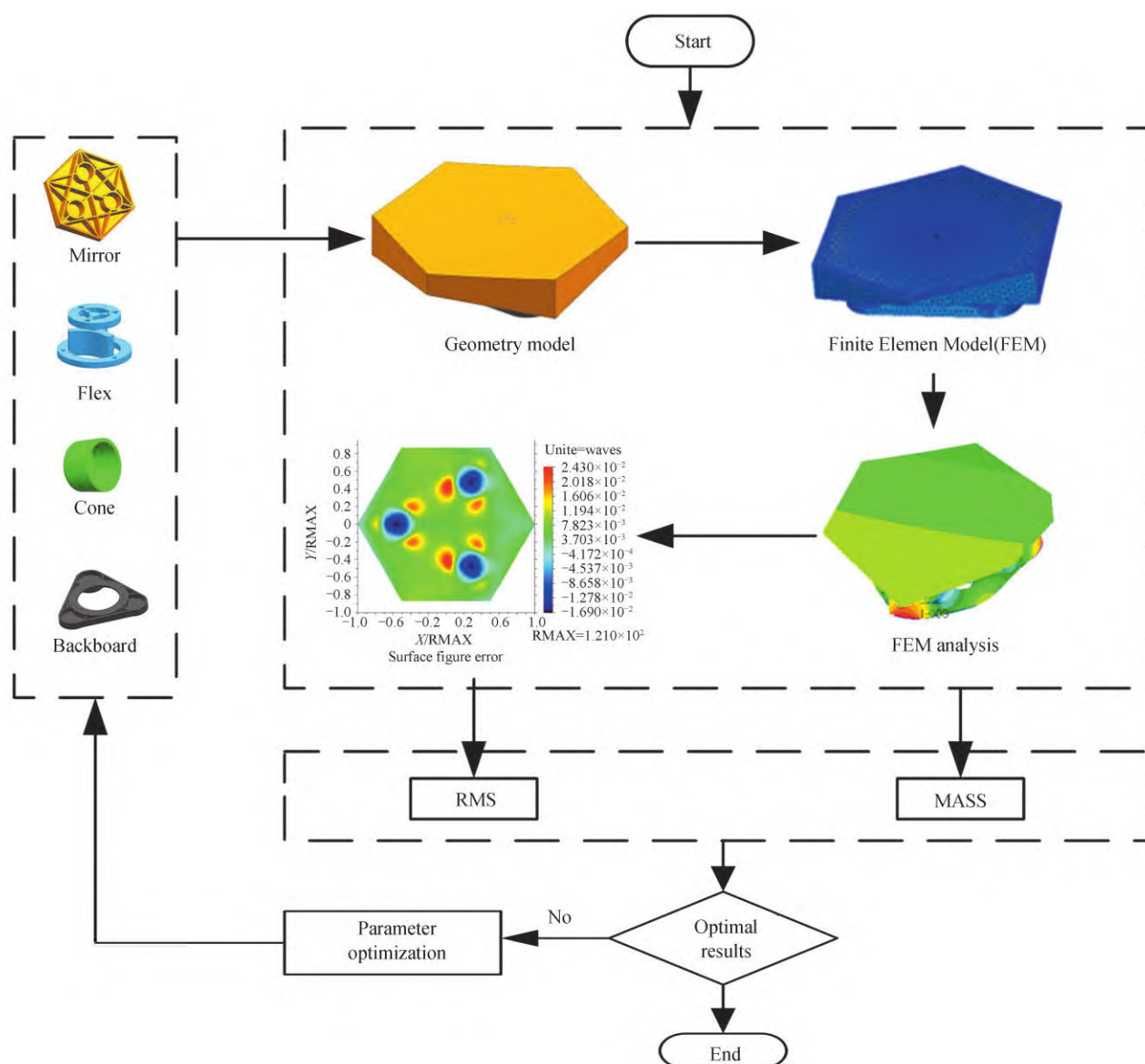


图6 子镜组件优化流程

Fig. 6 Optimization flow of primary mirror segment assembly

2.4 优化结果

在多目标优化问题中各个目标间存在一定的冲突,最优解不是单一的,而是一个最优解集,定义最优解判据:若 $x \in X$,不存在另一可行点 $x' \in X$,对于任意 m ,使得 $f_m(x) \leq f_m(x')$ 成立,且其中至少有一个严格不等式成立,则称 x 为多目标优化问题的一个最优解,所有最优解构成的集合为最优解子集。判据中: X 为多目标优化的可行域, x 为其可行解, m 为子目标, $f_m(x)$ 为子目标函数。

优化结果如图7,图中每一各点代表一个优化结果,根据最优解判据,筛选出最优解子集(图7中圆点所示),从中选取重量级面形精度均较为理想的解。各参数及目标的优化结果如表1,优化后的子镜组件如图8(a),柔性支撑结构开槽间距为1 mm,可以提供足够的柔性。考虑结构工艺性,圆整各尺寸参数,增加圆角、倒角、凸台,局部区域部分去除排布较为密集的加强筋,重新构建子镜组件模型如图8(b)所示。

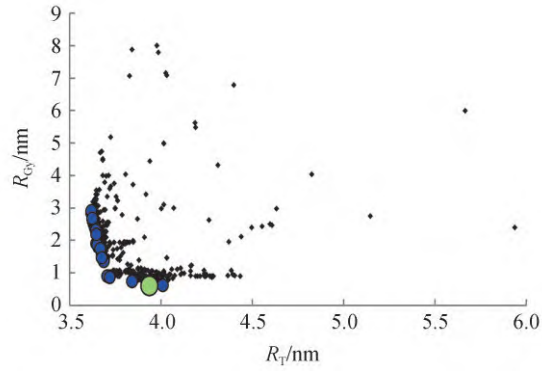


图7 子镜组件优化结果

Fig. 7 Optimization results of primary mirror segment assembly

表1 子镜组件设计变量与优化结果

Table 1 Design variables and optimization results of primary mirror segment assembly

Variable	Ranges/mm	Optimization results/mm	Round value/mm
H	[25.0,40.0]	36.361	36
T_m	[4.0,10.0]	4	4
T_{or}	[4.0,10.0]	4	4
T_{rib}	[4.0,10.0]	4	4
T_{hole}	[4.0,10.0]	4	4
D_{hole}	[24.0,50.0]	44.001	44
Z_{hole}	[60.0,85.0]	67.235	67
H_{trim}	[10.0,($H-4$)]	31.965	32
S_{beam}	[0.0,3.5]	1.030 8	1
G_{beam}	[1.0, k]	1.108 3	1
L_{beam}	[$D/2,s$]	7.645 8	7.5
D_h	[3.0,15.0]	9.776 9	10
L_h	[1,20]	5.549 3	5.6
T_f	[2,5]	3.106 9	3
T_h	[2,5]	2.949 8	3
T_r	[2,5]	3.237 8	3

Notes: $k = \frac{D_{hole} - D_h}{4} - 6$, $s = \frac{D_{hole}}{2} - 12$

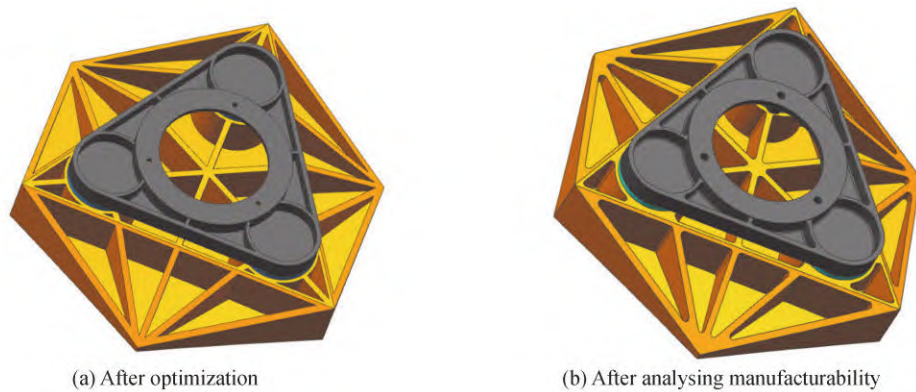


图8 优化后的子镜组件

Fig. 8 Primary mirror segment assembly after optimization

2.5 组合优化算法分析

为评估组合算法的优化效率,应用多岛遗传算法对子镜组件进行优化设计,以此与组合优化算法进行分析对比,图9(a)为多岛遗传算法迭代过程,图9(b)为组合优化算法迭代过程。其中,组合优化算法共迭代394次,多岛遗传算法迭代601次。原因是优化设计模型引入较多的设计变量,导致收敛速度较慢,而组合优化算法在局部敏感区域可有效加快收敛速度。综上所述,相比其他算法,基于多岛遗传与梯度优化的组合优化算法求解能力更强,可以有效提高子镜组件一体优化设计的寻优效率。

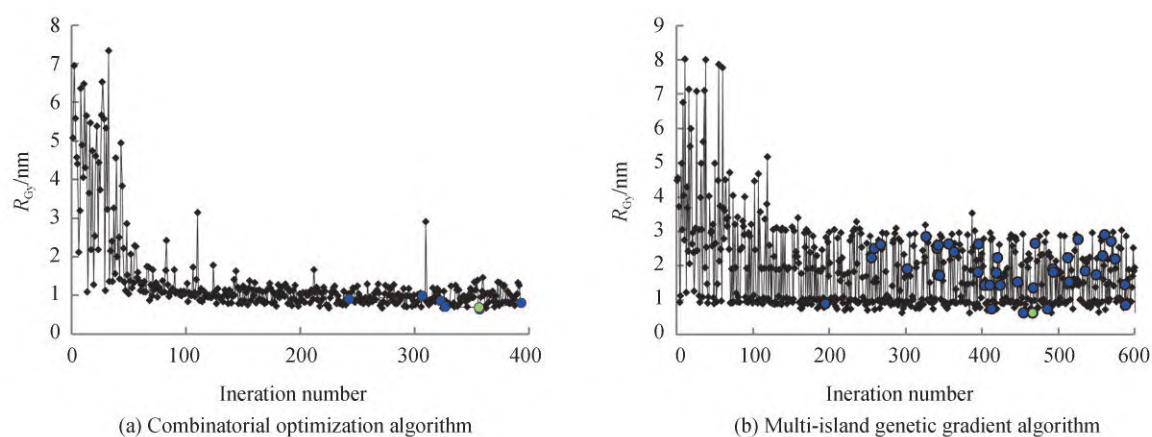


图9 优化迭代过程

Fig. 9 Process of optimization iteration

3 子镜组件分析及试验验证

3.1 子镜组件工程分析

针对一体优化后的子镜组件开展工程分析,组件重量为1.74 kg,满足不大于2 kg的轻量化要求,其中Zerodur子镜结构重量1.04 kg,面密度达到27.32 kg/m²,轻量化率在68%以上。子镜组件的各项指标如表2所示,在X、Y、Z三个方向上自身重力载荷和5℃温变载荷分别作用下的面形精度均控制在5 nm以内,Y方向作为相机的检测、装调时的重力作用方向,镜面变形的RMS值仅为0.89 nm,远远小于 $\lambda/50$ 的设计要求。子镜组件X、Y、Z三个方向上的基频均在400 Hz以上,满足不小于200 Hz的要求。

表2 子镜组件工程分析结果

Table 2 Engineering analysis results of primary mirror segment assembly

Load case	X-direction	Y-direction	Z-direction
Self-gravity	1.02 nm	0.89 nm	4.60 nm
5℃ temperature change		3.65 nm	
Primary frequency	442 Hz	443 Hz	565 Hz

3.2 面形检测试验

子镜组件如图10,为了验证子镜组件的结构性能,按照试验要求,在室温条件下对子镜组件进行面形精度检测,面形检测干涉图如图11。面形精度的RMS值为0.019 λ ,PV值为0.154 λ ,面形精度优于 $\lambda/50$,满足光学系统正常成像的需求,验证了子镜组件所采用设计方法的合理性和可靠性。



图 10 子镜组件

Fig. 10 Primary mirror segment

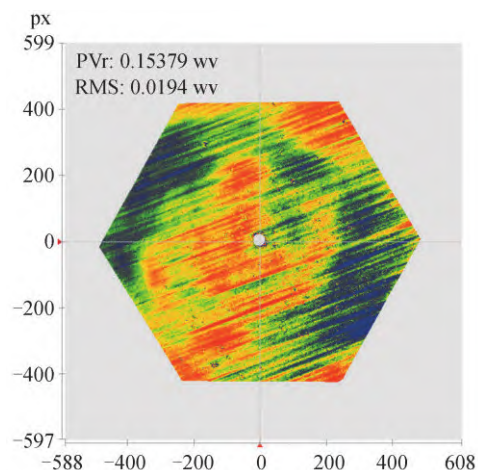


图 11 子镜面形检测结果

Fig. 11 Surface figure error testing of primary mirror segment

4 结论

本文根据拼接式反射镜的性能要求,通过拓扑优化方法分析了子镜的材料分布,确定了子镜结构初始结构,基于反射镜背部三点支撑方案提出了一种开槽横梁多轴柔性支撑结构。为解决组件一体优化设计中引入变量过多,不易收敛的问题,设计了一种基于多岛遗传与梯度优化的组合优化算法。建立了以子镜组件结构重量和面形精度为目标的一体优化设计模型,优化后的子镜组件重量为 1.74 kg,面形精度控制在 5 nm 以内。最后对子镜的面形进行了检测,结果显示:子镜面形精度的 RMS 值为 0.019 λ ,满足优于 $\lambda/50$ 的设计要求,验证了子镜组件设计和分析的准确性,有效解决了反射镜的组件级一体优化设计问题。

参考文献

- [1] REN Guorui, LI Chuang, WAND Wei, et al. Structural design of carbon fiber-reinforced plastics barrel for space remote sensing camera[J]. Acta Photonica Sinica, 2019, 48(8):0822001.
任国瑞,李创,王伟,等.空间相机碳纤维复合材料主镜连接筒设计[J].光子学报,2019,48(8):0822001.
- [2] YUAN Jian, SHA Wei, REN Jianyue. 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.
- [3] LI Zhilai, XU Hong, GUAN Yingjun. 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.
- [4] JIANG Hao. Research on ultra-light SiC mirrors and support techniques [D]. Changchun: Changchun Institute of Optics, Fine Machines and Physics, Chinese Academy of Science, 2016.
江浩.超轻量化SiC反射镜及支撑技术研究[D].长春:中国科学院长春光学精密机械与物理研究所,2016.
- [5] BAO Qihong, SHA Wei, CHEN Changzheng, et al. Ultra-lightweight design of $\Phi 610$ 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 $\Phi 610$ mm圆形主镜的超轻量化设计[J].光子学报,2016,45(9): 0912007.
- [6] SHI Yincheng, YAN Huaide, GONG Peng, et al. Topology optimization design method for supporting structures of optical reflective mirrors based on zernike coefficient optimization model[J]. Acta Photonica Sinica, 2020, 49(6):0622001.
施胤成,闫怀德,宫鹏,等.基于Zernike系数优化模型的光学反射镜支撑结构拓扑优化设计方法[J].光子学报,2020,49(6):0622001.
- [7] DONG Binchao, 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.
- [8] WANG Kejun, DONG Jihong, XUAN Ming, 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,宣明,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.
- [9] TOULEMONT Y, PASSVOGEL T, PILBRATT G L, et al. The 3.5-m all-SiC telescope for HERSCHEL[C]. SPIE, 2004.

- [10] HADAWAY J B, ENG R, STAHL H P, et al. Cryogenic performance of lightweight SiC and C/SiC mirrors[C]. SPIE, 2004.
- [11] ZHANG Lei, KE Shanliang, LI Lin, et al. Multi-objective integrated optimization design of 210 mm ultra-light SiC mirror[J]. Acta Photonica Sinica, 2017, 46(12):1222001.
张雷,柯善良,李林,等. $\Phi 210\text{mm}$ 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.
- [12] ZHANG Lei, KE Shanliang, LI Lin, et al. Optimum design of ultra-light mirror series flexible support structure[J]. Acta Photonica Sinica, 2018, 47(1): 0122001.
张雷,柯善良,李林,等. 超轻反射镜串联柔性支撑结构优化设计[J]. 光子学报, 2018, 47(1):0122001.
- [13] SHAO Mengqi, ZHANG Lei, LI Lin, et al. Design and test of flexible supporting structure for ultra-light mirror[J]. Acta Photonica Sinica, 2019, 48(12):1222001.
邵梦旗,张雷,李林,等. 超轻反射镜柔性支撑结构设计与试验[J]. 光子学报, 2019, 48(12):1222001.
- [14] SUN Yi, LI Fu, YANU Jianfeng, et al. Optimum design and experiment verification of space coaxial reflective secondary mirror support structure[J]. Acta Photonica Sinica, 2018, 47(7):0722003.
孙奕,李福,杨建峰,等. 空间同轴反射式次镜支撑结构优化设计与实验验证[J]. 光子学报, 2018, 47(7):0722003.
- [15] XIAO Yang, XU Wendong, ZHAO Chengqiang. Integrated simulation of opto-mechanical system [J]. Acta Optica Sinica, 2016, 36(7):0722002.
肖阳,徐文东,赵成强. 光机系统的一体化仿真分析[J]. 光学学报, 2016, 36(7): 0722002.
- [16] LI Weiyang, LV Qunbo, LIU Yangyang, et al. Thermal characteristics analysis and verification of primary supporting structure for spaceborne camera based on low volume SiC/Al primary mirror frame [J]. Acta Photonica Sinica, 2021, 50(4):0412001.
李伟艳,吕群波,刘扬扬,等. 基于低体分 SiC/Al 主镜框的空间相机主支撑结构热特性分析与验证[J]. 光子学报, 2021, 50(4):0412001.

Integrated Design of Splicing Primary Mirror Segment Assembly Based on Combinatorial Optimization Algorithm

DU Yimin, GAO Yan, XU Boqian, ZHANG Chunyue, KUANG Ye

(CAS Key Laboratory of On-orbit Manufacturing and Integration for Space Optics System, Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun 130033, China)

Abstract: The optimization target of traditional light-weight methods is a single part generally, which can not make the whole component achieve the design goal of lightest weight and highest surface figure precision. It can not meet performance indexes due to the strict limitation of the carrying capacity of actuator and mirror's material. A Primary Mirror Segment Assembly (PMSA) is designed integrated to reduce the load of the segment actuator and ensure the surface figure and stability of the splicing primary mirror. The points support on the mirror back is selected as the support method 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 the mirror is determined based on back with triangular hole for light-weighting. A multi-axis flexible support structure with slotted beams based on the support method is put forward. Component integration design introduces too many parameter variables, resulting in a large amount of calculation, long iteration time and difficulty in convergence. A combinatorial optimization algorithm based on multi-island genetic and gradient algorithm to solve the problem of too many variables and difficulty in convergence is designed, and it is applied to optimization design of the segment. The combinatorial optimization algorithm's tactics is that the sensitive area of the design space is roughly located by the multi-island genetic algorithm, and the exact positions are optimized by using the gradient optimization algorithm in the area. The tactics makes full use of the advantages of global optimization algorithm in overall design space traversal and gradient optimization algorithm in local area convergence speed faster. It is established that multiple-object optimization model which combines structure mass, the surface figure error under the influence of gravity along Y-axis (detection direction) and the surface figure error under the effect of 5°C temperature change as objectives. The optimization model is carried out on the initial structure of the primary mirror segment assembly, and the statics of the optimized structure under the influence of gravity

along Y-axis (detection direction) and 5°C temperature change are analyzed. The Root Mean Square (RMS) of the mirror's surface figure error is controlled within 5 nm, which is tested at last and is far better than design requirement. The segment weights 1.74 kg, and primary frequency of X , Y , Z is more than 400 Hz. Its surface density is as low as 27.32 kg/m³. The surface figure error is test and the primary mirror segment assembly with RMS is as low as 0.019 λ ($\lambda=632.8$ nm), which meets the design requirement better than $\lambda/50$. The design method of integrated optimization is reasonable, and it provides a guiding for design of mirror assembly of space camera. In order to evaluate the optimization efficiency of the combinatorial algorithm, it is compared with multi-island genetic algorithm. The multi-island genetic algorithm is used to optimize the primary mirror segment assembly. The combinatorial optimization algorithm iterates 394 times, and the multi-island genetic algorithm iterates 601 times. The result shows that combinatorial optimization algorithm based on multi-island genetic and gradient optimization has better solving ability and can effectively improve the optimization efficiency of integral optimization design of the primary mirror segment assembly.

Key words: Splicing primary mirror; Surface figure error; Primary mirror segment assembly; Combinatorial optimization algorithm; Integrated design; Engineering analysis; Surface test

OCIS Codes: 220.4830; 220.4840; 350.4600; 350.6090