

中心支撑长条形反射镜轻型优化设计

包奇红^{1,2}, 沙巍¹, 陈长征¹, 任建岳¹

(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)

摘要: 针对轻小卫星相机质量更轻、性能更好的设计要求, 对空间某中等口径的长条形反射镜提出一种基于中心支撑形式的轻型优化设计方法。选用背部中心单点支撑形式, 不仅从整体上减小了反射镜及其组件的质量, 而且大大简化了支撑结构的设计。采用多目标集成优化的方法, 提高了反射镜在 Z 向重力工况下的面形精度。设计了适用于中心支撑的柔性支撑结构, 克服了中心支撑刚度低、动态可靠性差的缺点。仿真分析了反射镜及其组件的综合性能, 并与背部三点支撑形式进行了比较。结果表明, 中心支撑的反射镜质量更轻(3.36 kg), 与实体反射镜相比, 轻量化率达到了 87%, 组件质量也较三点支撑减小了 24%; 在 X、Y、Z 三轴方向 1 g 重力工况下的面形精度 RMS 值分别达到 2.2、2.1、7.5 nm, 优于三点支撑形式; 4 °C 均匀温升载荷工况下的面形精度 RMS 值为 2.8 nm, 远小于设计要求的 $RMS \leq 12$ nm; 反射镜组件的一阶固有频率为 135 Hz, 重力作用下镜面的最大刚体位移为 3.96 μ m。该设计在极大地减小了反射镜及其组件质量的同时, 保证了反射镜的面形精度和组件的动、静态刚度, 满足设计要求, 为同类型空间反射镜的轻型优化设计提供了一种新思路。

关键词: 长条形反射镜; 中心支撑; 多目标优化; 柔性支撑结构; 对比分析

中图分类号: TH703 **文献标志码:** A **DOI:** 10.3788/IRLA201746.0718003

Lightweight and optimization design of rectangular reflective mirror supported in centre

Bao Qihong^{1,2}, Sha Wei¹, Chen Changzheng¹, Ren Jianyue¹

(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)

Abstract: A lightweight and optimization design method for a medium aperture rectangular mirror supported in centre was proposed to meet the requirement of designing lighter and better satellite cameras. By choosing the method of rear support in centre by single point, the mass of both mirror and subassembly was decreased and the design of the support structure was simplified. By using multi-objective optimization design, the surface figure accuracy under the load case of gravity in Z-direction was improved. A flexible support structure dedicated to the mirror supported in centre was designed to overcome its shortcomings of low stiffness and low dynamic reliability. The integrated performance of the mirror was simulated and compared with that of the mirror mounted via rear three points. It shows that

收稿日期: 2016-11-05; 修订日期: 2016-12-03

基金项目: 国家高技术研究发展计划(863-2-5-1-13B)

作者简介: 包奇红(1992-), 男, 硕士生, 主要从事空间相机光机结构优化设计方面的研究。Email: qingtian@mail.ustc.edu.cn

导师简介: 任建岳(1952-), 男, 研究员, 博士生导师, 博士, 主要从事光学遥传感器的研制和性能评价方面的研究。Email: reny@sohu.com

the mirror supported in centre has a lighter mass of 3.36 kg and the lightweight ratio is 87% compared with the solid mirror, and that the mass of the mirror subassembly is decreased 24% of the one supported by three points. The surface figure accuracy RMS of the mirror reaches respectively 2.2, 2.1 and 7.5 nm when gravity load is applied in the directions of X, Y and Z axes, which is better than that of the one supported by three points. Furthermore, the RMS is 2.8 nm when the mirror subassembly is under the load condition of uniform temperature rise of 4 °C, which is far less than the requirement of $RMS \leq 12$ nm. Otherwise, the first order natural frequency of the mirror subassembly is 135 Hz, and the maximum rigid body displacement is 3.96 μ m. The proposed design method not only reduces the mass of the mirror with its support structure extremely, but also ensures the surface figure accuracy of the mirror and the dynamic and static rigid of the mirror subassembly requirement, provides a new approach to lightweight and optimization design for the same type space mirrors.

Key words: rectangular reflective mirror; support in centre; multi-objective optimization; flexible support structure; contrastive analysis

0 引言

离轴三反光学系统(TMA)因具有长焦距、大视场、宽波段、无遮拦等优点而被广泛应用于空间光学传感器中。长条形反射镜作为 TMA 系统的核心元件,是影响系统成像质量和整机性能的关键,其镜体及其支撑结构的设计历来是空间光机结构设计的难点^[1-2]。

反射镜及其支撑结构的设计需综合考虑地面加工、装调、发射运载和在轨运行等各种环境因素的影响^[3]。在设计过程中既要求反射镜系统具有良好的动静力学性能和热尺寸稳定性,又要求系统的质量最轻,这种指标要求间的矛盾无疑增加了反射镜的设计难度^[4]。轻型优化设计旨在最大程度地减小反射镜结构系统质量的同时,尽量提高反射镜的面形精度和保证系统的刚度。随着空间光学的发展,轻小型遥感卫星对空间相机提出了质量更轻、性能更好的要求^[5-6],这就使得空间反射镜的轻型优化设计更加困难。

文中对某空间离轴三反相机中等口径(506 mm×

224 mm)的长条形反射镜,提出一种基于中心支撑形式的轻型优化设计方法。通过选用背部中心支撑形式,既从整体上减小了反射镜及其组件的质量,又简化了支撑结构的设计。优化过程中采用多目标集成优化方法,在减小镜体质量的同时提高了反射镜在重力工况下的面形精度。设计了适用于中心支撑形式的柔性支撑结构,克服了中心支撑刚度低、动态特性差的缺点。对比分析了中心支撑与背部三点支撑的反射镜及其组件的各项综合指标,指出了对文中所述的长条形反射镜,采用中心支撑形式,通过合理的结构优化设计能获得良好的综合性能。

1 反射镜结构设计

1.1 镜体材料选择

反射镜材料的选择主要考虑比刚度和导温系数两个指标,它们分别表征了材料的力学性能和热学性能。空间相机中常用的光学材料及其性能如表 1 所示,其中 E/ρ 为材料的比刚度; λ/α 为导温系数,表

表 1 常用反射镜材料的性能和品质因数

Tab.1 Performance and quality factors of rational materials for reflective mirror

Material	SiC	Si	Be	Zerodur	Al	FS
Density $\rho/\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$	3 200	2 330	1 850	2 530	2 700	2 190
Young's modulus E/GPa	400	131	287	91	68	72
Thermal conductivity $\lambda/\text{W} \cdot \text{mK}^{-1}$	155	137	216	1.64	167	1.4
Thermal expansivity α/K^{-1}	2.4×10^{-6}	2.6×10^{-6}	11.4×10^{-6}	0.05×10^{-6}	22.5×10^{-6}	0.5×10^{-6}
$E/\rho/\text{m}$	125×10^{-6}	56.2×10^{-6}	155×10^{-6}	36×10^{-6}	25.2×10^{-6}	32.9×10^{-6}
$\lambda/\alpha/\text{m} \cdot \text{W}^{-1}$	64.6×10^{-6}	52.7×10^{-6}	18.9×10^{-6}	32.8×10^{-6}	7.42×10^{-6}	2.8×10^{-6}
$(\lambda/\alpha) \cdot (E/\rho)$	8 073	2 962	2 939	1 180	187	92

征材料的热稳定性,其值越大,表明材料的热稳定性越好; $(\lambda/\alpha) \cdot (E/\rho)$ 表征了材料的综合品质^[7]。可以看到 SiC 的综合品质远高于其他几种材料,另外 SiC 的物理、化学性质稳定,能够保证反射镜形状和尺寸的稳定性,且通过研磨、抛光可获得较高的表面质量,是目前制造反射镜的理想材料^[8]。因此文中反射镜选用 SiC 材料。

1.2 支撑方式选择

在空间领域,长条形反射镜多采用周边支撑和背部支撑两种形式。周边支撑通过压板将反射镜压在镜框内,在反射镜底面和周边还可以辅以胶粘结固定。这种支撑形式简单方便,一般适用于小口径反射镜,对于大口径反射镜,周边支撑一方面会增加结构尺寸,不利于整机的轻小化设计,另一方面也难以获得较高的面形精度。背部支撑通过适当的连接方式将反射镜背部与支撑结构连接到一起。相比于其他支撑形式,背部多点支撑容易获得较高的面形精度,因此对于中等口径和大口径的反射镜常采用背部三点或多点支撑的方式^[9]。然而背部三点或多点支撑一方面结构复杂,体积大,质量大,另一方面为了解决反射镜过定位安装、热环境适应性问题通常需要引入复杂的柔性铰链系统,既增加了支撑结构的设计难度,也带来了加工、装调困难等问题。因此,文中反射镜采用背部中心单点支撑形式,通过合理的结构优化设计,既能保证反射镜面形精度和支撑结构刚度满足设计要求,又能从整体上减小反射镜及其组件的质量和降低支撑结构的设计难度。

1.3 轻量化结构形式

反射镜的轻量化设计包括确定径厚比、反射面厚度和轻量化结构形式等。传统设计方法通常需要依据经验公式来确定各结构参数的取值,对于背部多点支撑的反射镜,要确定其轻量化结构形式,首先需要确定支撑点的个数和优化支撑点的位置^[10]。文中反射镜采用中心支撑形式则省去了这一步骤,同时由于集成优化可将镜体厚度、镜面厚度等结构参数直接作为优化变量,因此在确定反射镜初始结构时不必拘泥于经验公式的束缚,只需大致确定各参数的初始值即可。针对文中长条形反射镜的尺寸特点,确定支撑孔直径为 $\phi 100$ mm,并从结构刚度和轻量化率等综合指标考虑,选用直角三角形轻量化孔

形式,确定反射镜的初始结构如图 1 所示。中心支撑的长条形反射镜长度方向较宽度方向边缘会有较大的自重变形,因此在镜体长度方向边缘背部进行了倒角处理(第一倒角 θ_1),使得镜体质量向中心集中,既有利于保证反射镜在重力作用下的面形精度,又能减轻镜体质量,提高系统的动态特性^[11]。同时考虑到该反射镜离轴量较大,镜体在宽度方向质量分布不均匀,因此在镜体厚度较大的两角背部也进行了倒角处理(第二倒角 θ_2),使得镜体质量相对于支撑孔的分布更加均匀。

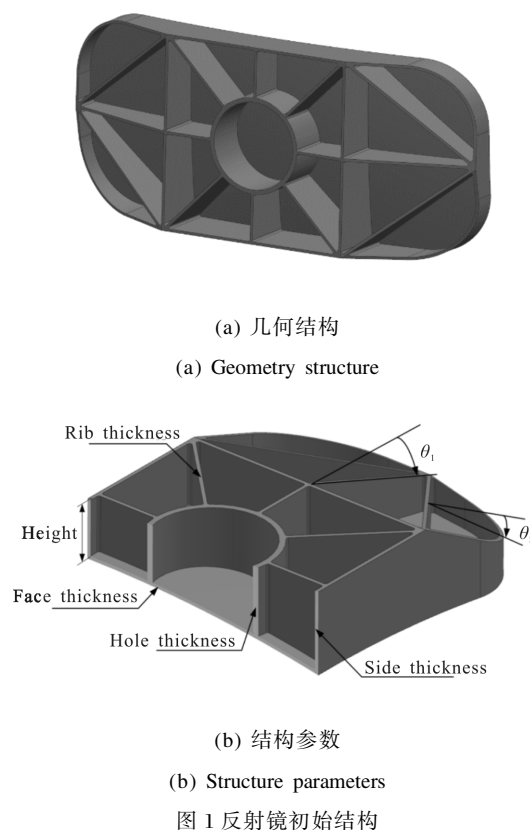
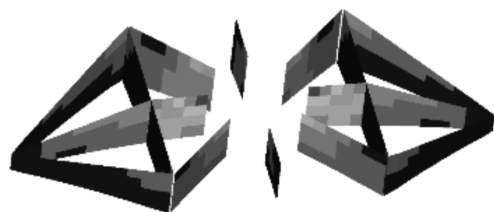


Fig.1 Original structure of reflective mirror

2 集成优化

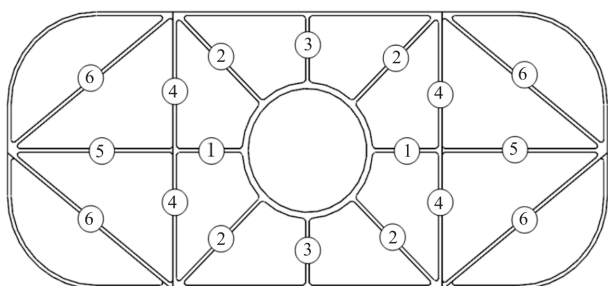
2.1 变量扩展

为了扩展设计变量、增加设计自由度,采用变筋厚设计形式,即将反射镜的加强筋依据在特定工况下的传力路径进行分组,使不同组的筋具有不同的厚度,从而达到改善镜体局部刚度,提高镜面面形精度的目的^[12]。中心支撑的长条形反射镜,Z向(光轴)重力工况下的变形最大,故依据 Z向重力工况下加强筋的应力分布云图确定筋的分组方案,如图 2 所示。



(a) 应力云图

(a) Stress nephogram



(b) 分组方案

(b) Distribution scheme

图 2 加强筋分组示意图

Fig.2 Schematic of distribution of ribs

2.2 变量转化

为了在集成优化过程中能方便地实现对倒角值 θ_1 和 θ_2 的优化,需将角度变量转化为坐标变量。方法是用三个不共线的点确定倒角平面,通过改变其中一点的坐标位置来改变倒角平面的倾斜程度,从而改变倒角值的大小。建立反射镜的壳单元模型,如图 3 所示,用节点 $N1$ 、 $N3$ 和 $N4$ 确定第一倒角平面,通过改变 $N1$ 的坐标 $z1$ 便可以改变 θ_1 的大小,用 $N1$ 、 $N2$ 和 $N3$ 确定第二倒角平面,通过改变 $N2$ 的坐标 $z2$ 来改变 θ_2 的大小。

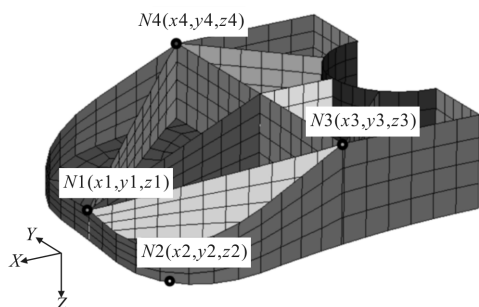


图 3 角度变量转化成坐标变量示意图

Fig.3 Schematic of changing angle variable to coordinate variable

2.3 多目标集成优化

在反射镜轻量化设计过程中,镜体质量和面形精度往往是一对相互矛盾的设计指标,镜体质量的减小常常会引起面形精度的降低,反之亦然。单目标优化仅以某一指标作为目标函数而将另一指标作为约束条件,这样往往得不到全局最优解,造成设计空间的极大浪费。如果能同时兼顾质量的最小化和面形的最优化,则能充分利用设计空间寻找全局最优解,得到综合指标最好的设计结果。文中反射镜由于 Z 向自重变形较 X 向和 Y 向大,面形精度也较难满足设计要求,因此将 Z 向重力工况下的面形精度 RMS 值和镜体质量同时作为优化目标,而将 X 向和 Y 向重力工况下的面形精度 RMS 值作为约束条件。

2.4 优化结果

经过变量扩展与变量转化后,该反射镜优化问题的设计变量包括镜体厚度 H (Height)、镜面厚 Ft (Face-thickness)、支撑孔壁厚 Ht (Hole-thickness)、外壁厚 St (Side-thickness)、加强筋厚 $R1 \sim R6$ (Rib-thickness 1~Rib-thickness 6),以及分别控制倒角 θ_1 和 θ_2 大小的坐标变量 $z1$ 和 $z2$,总共 12 个变量。优化后各变量的取值及优化结果见表 2,其中 θ_1 、 θ_2 为 $z1$ 、 $z2$ 换算后取整的结果。从表 2 数据可以看到 $R1 \sim R6$ 取值不尽相同,说明通过变筋厚设计扩展设计变量有利于反射镜的轻型优化。优化后的模型质量为 3.27 kg, X、Y 和 Z 向重力工况下的面形精度 RMS 值分别为 2.8、1.5、4.1 nm。

表 2 设计变量和优化结果

Tab.2 Design variables and optimization results

Variable	Value/mm	Variable	Value/mm
Ft	4	$R4$	2
Ht	5	$R5$	4
St	3	$R6$	2
$R1$	5	H	57
$R2$	2	$z1(\theta_1)$	20(29°)
$R3$	3	$z2(\theta_2)$	31(12°)
Mass	3.27 kg	RMS_Y	1.5 nm
RMS_X	2.8 nm	RMS_Z	4.1 nm

3 组件分析与比较

3.1 柔性支撑结构

由于反射镜采用中心支撑形式,一方面当环境

温度变化时,不会像多点支撑热变形产生相互干涉,从而可以降低支撑结构不均匀热应力对反射镜的影响,另一方面在安装调试阶段,中心支撑的反射镜受外界作用力的干扰也相对较小^[13]。因此可以大大简化柔性支撑结构的设计,避免引入复杂的柔性铰链结构,既提高了支撑结构的刚度,又能降低支撑结构的设计难度。设计的柔性支撑结构如图 4 所示,反射镜与锥套胶接,柔性元件螺接锥套与背板,背板最终与相机整体相连,从而实现反射镜的固定。其中锥套材料为殷钢(Invar),柔性元件材料为钛合金(TC4),背板材料为高体分(Al/SiC)。

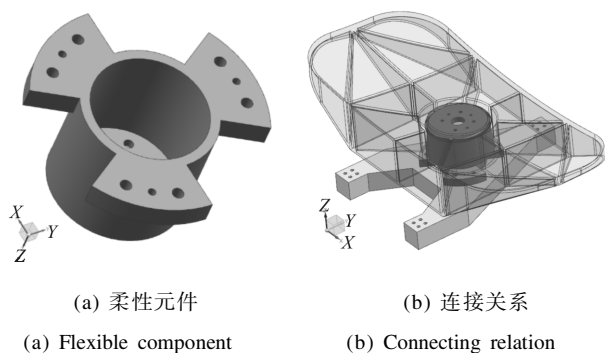


图 4 柔性支撑结构

Fig.4 Flexible support structure

3.2 组件对比分析

为了分析反射镜组件的综合性能,并与三点支撑形式进行比较,分别建立了两种支撑形式的反射镜组件的实体单元模型,如图 5 所示。其中背部三点支撑的反射镜同样进行了集成优化设计。由于三点支撑的反射镜,镜体质量相对于三个支撑点的分布更加均匀,三个方向重力工况的面形精度都较易满足设计要求,因此优化过程中仅以镜体质量为目标

函数,而将三个方向重力工况下的面形精度 RMS 值均作为约束条件。可以看到采用背部三点支撑的反射镜支撑结构复杂、体积庞大,与之相反,采用中心支撑则不仅简化了支撑结构,而且从整体上减小了反射镜及其组件的体积。仿真分析的结果见表 3,其中 X、Y 和 Z 分别表示三个方向的重力工况,T-4 表示 4 °C 均匀温升载荷工况。从表中数据可以看出,与三点支撑形式相比,中心支撑的反射镜质量更轻(3.36 kg),与实体镜相比,轻量化率达到了 87%,组件整体质量也较三点支撑形式减小了 24%。反射镜在 X、Y 和 Z 向重力工况下的面形精度 RMS 值分别达到了 2.2、2.1、7.5 nm,优于三点支撑形式,4 °C 均匀温升载荷工况下的面形精度 RMS 值为 2.8 nm,远小于设计要求的 $RMS \leq 12$ nm。重力工况下镜面在 X、Y 和 Z 方向的刚体位移分别为 3.96、2.05、2.41 μm ,静态刚度整体上高于三点支撑形式。虽然组件的一阶自然频率低于三点支撑形式,但仍达到了 135 Hz,即使在整机分析时会有几赫兹的下降,但依然高于外界激励频率,动态刚度满足设计要求。

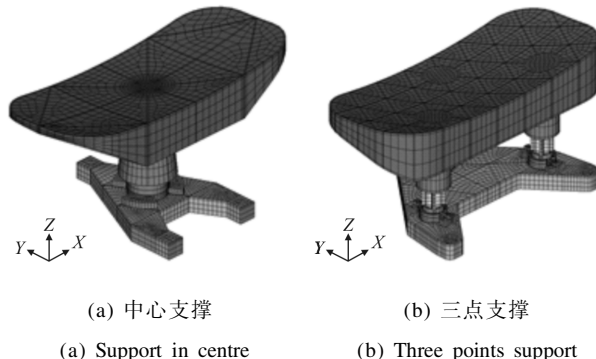


图 5 反射镜组件有限元模型

Fig.5 FEM model of reflective mirror subassembly

表 3 仿真分析结果对比

Tab.3 Comparison of the results of simulation

Design indexes	Mass of mirror/kg	Light-weight ratio	Mass of subassembly /kg	X		Y		Z		T-4	First order frequency /Hz
				$\Delta X/\mu\text{m}$	RMS/nm	$\Delta Y/\mu\text{m}$	RMS/nm	$\Delta Z/\mu\text{m}$	RMS/nm		
Centre	3.36	87%	5.91	3.96	2.2	2.05	2.1	2.41	7.5	2.8	135
Three-point	4.16	83%	7.75	6.76	8.5	4.65	2.7	2.32	9.7	0.9	170

3.3 可靠性分析

相机在发射过程中承受着较大的冲击、过载、振动等动力学载荷,为了避免反射镜组件造成永久的变形或破坏,要求组件具有良好的动态特性。中心支

撑结构形式最明显的弊端在于支撑刚度不足导致组件基频较低,动态特性较差。虽然设计柔性支撑结构时提高了柔性元件的刚度,但仍需对反射镜组件的动态特性进行分析验证。这里分析在加速度激励下

反射镜组件的频率响应, 加速度响应曲线在一定程度上能很好地反应结构的共振特性^[14]。以背板与机架连接的螺栓孔作为加速度激励的输入点, 沿 X、Y 和 Z 向分别输入频率为 10~200 Hz 的单位加速度激

励。最大响应点的响应曲线如图 6 所示, 可以看到三个方向加速度响应曲线的谐振峰均出现在 135 Hz 附近, 在小于 100 Hz 的频段内无谐振峰出现, 保证了在发射阶段反射镜组件不发生共振。

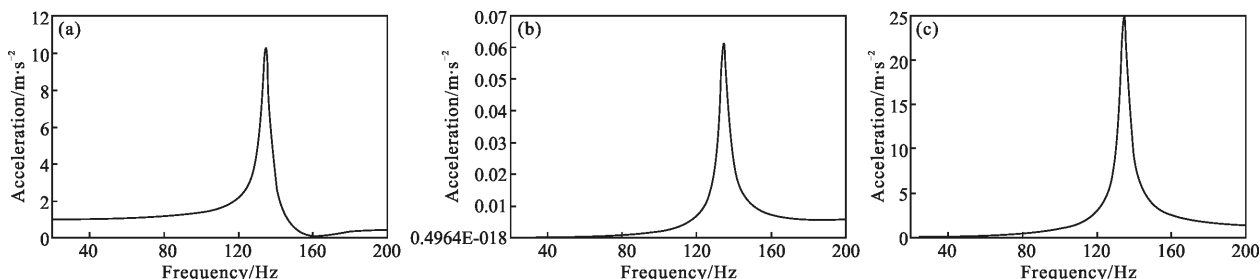


图 6 加速度频率响应曲线

Fig.6 Frequency response curves of acceleration

反射镜在安装调试阶段会受到外界作用力的干扰, 这种作用力主要为支撑结构产生的装配应力。虽然单点支撑形式可以减小外界作用力的干扰, 但在支撑结构设计过程中为了提高刚度而牺牲了柔性元件的部分柔性, 削弱了其卸载装配应力的作用, 因此需要分析装配应力载荷对镜面产生的影响, 以保证反射镜的面形精度满足设计要求。分析过程用柔性连接件与背板螺钉连接孔处轴向 10 μm 的强制节点位移模拟装配应力工况, 面形拟合云图如图 7 所示, 面形精度 PV=1.6 nm, RMS=0.3 nm, 说明镜面受装配应力的影响很小, 可忽略不计。

果显示, 中心支撑的反射镜, 镜体质量仅为 3.36 kg, 轻量化率达到了 87%, 组件整体质量也较三点支撑形式减小了 24%; X、Y 和 Z 向重力工况下的面形精度 RMS 值分别为 2.2、2.1、7.5 nm, 优于三点支撑形式; 4 °C 均匀温升载荷工况下的面形精度 RMS 值为 2.8 nm, 满足设计要求; 组件的一阶自然频率为 135 Hz, 重力工况下镜面的最大刚体位移为 3.96 μm, 具有足够高的动、静态刚度。该设计为同类型空间反射镜的轻型优化设计提供了新思路。

参考文献:

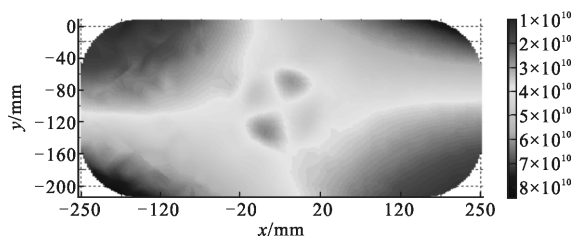


图 7 面形拟合结果

Fig.7 Result of surface fitting

4 结论

文中所设计的反射镜选用中心支撑形式, 与三点支撑形式相比, 不仅从整体上减小了反射镜及其组件的质量, 而且大大降低了支撑结构的设计难度。采用多目标集成优化方法在减小镜体质量的同时提高了镜面的面形精度。设计了适用于中心支撑的柔性支撑结构, 提高了支撑结构的刚度。仿真分析的结

[1] Zhang Liang, An Yuan, Jin Guang. Optical design of the uncoaxial three-mirror system with wide field of view and long focal length [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2007, 36(2): 278-280. (in Chinese)
张亮, 安源, 金光. 大视场、长焦距离轴三反射镜光学系统的设计[J]. 红外与激光工程, 2007, 36(2): 278-280.

[2] Zhu Junqing, Sha Wei, Chen Changzheng, et al. Position layout of rear three point mounting for space rectangular mirror [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2015, 23(9): 2562-2569. (in Chinese)
朱俊清, 沙巍, 陈长征, 等. 空间长条形反射镜背部三支撑点的设置[J]. 光学精密工程, 2015, 23(9): 2562-2569.

[3] Zhang Xuejun, Li Zhilai, Zhang Zhongyu. Space telescope aspherical mirror structure design based on SiC material [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2007, 36(5): 577-582. (in Chinese)
张学军, 李志来, 张忠玉. 基于 SiC 材料的空间相机非球面反射镜结构设计 [J]. 红外与激光工程, 2007, 36(5):

- 577-582.
- [4] Xin Hongwei, Guan Yingjun, Li Jinglin, et al. Design of support for large aperture rectangular mirror [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2011, 19(7): 1560-1568. (in Chinese)
辛宏伟, 关英俊, 李景林, 等. 大孔径长条形反射镜支撑结构设计[J]. 光学精密工程, 2011, 19(7): 1560-1568.
- [5] Zhan Yafeng, Ma Zhengxin, Cao Zhigang. Technology of modern micro satellite and its development direction [J]. *Acta Electronica Sinica*, 2000, 7: 102-106. (in Chinese)
詹亚锋, 马正新, 曹志刚. 现代微小卫星技术及发展趋势[J]. 电子学报, 2000, 7: 102-106.
- [6] Chen Yonghe, Chen Hongda, Fu Yutian. Optical design of small-sized camera in visible for micro-satellite [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2015, 44(7): 2087-2029. (in Chinese)
陈永和, 陈洪达, 傅雨田. 适用于微小卫星平台的小型可见光相机设计[J]. 红外与激光工程, 2015, 44(7): 2087-2029.
- [7] Ren Jianyue, Chen Changzheng, He Bin, et al. Application of SiC and SiC/Al to TMA optical remote sensor [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2008, 16(12): 2537-2543. (in Chinese)
任建岳, 陈长征, 何斌, 等. SiC 和 SiC/Al 在 TMA 空间遥感器中的应用[J]. 光学精密工程, 2008, 16(12): 2537-2543.
- [8] Xu Hong, Guan Yingjun. Structural design of large aperture SiC mirror subassembly [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2014, 43(S): 83-88. (in Chinese)
徐宏, 关英俊. 大口径 SiC 轻量化反射镜组件的结构设计[J]. 红外与激光工程, 2014, 43(S): 83-88.
- [9] Qi Guang, Li Jinglin, Wang Shuxin, et al. Lightweight structure design for rectangular SiC space mirror [J]. *Opto-Electronic Engineering*, 2012, 39(2): 43-47. (in Chinese)
齐光, 李景林, 王书新, 等. 长条形 SiC 空间反射镜轻量化结构优化设计[J]. 光电工程, 2012, 39(2): 43-47.
- [10] Liu Fuhe, Cheng Zhifeng, Shi Lei, et al. Design and analysis of supporting structure for rectangular mirror [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2015, 44(5): 1512-1517. (in Chinese)
刘福贺, 程志峰, 石磊, 等. 长条形反射镜支撑结构设计与分析[J]. 红外与激光工程, 2015, 44(5): 1512-1517.
- [11] Li Zhilai, Xu Hong. Design of rectangular space mirror and its support structure [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2011, 19(5): 1039-1047. (in Chinese)
李志来, 徐宏. 长条形空间反射镜及其支撑结构设计[J]. 光学精密工程, 2011, 19(5): 1039-1047.
- [12] Yuan Jian, Ren Jianyue. Improvement and optimization of lightweight structure for SiC reflective mirror [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2015, 44(8): 0812004. (in Chinese)
袁健, 任建岳. 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.
- [13] Xin Hongwei. Design and analysis on the flexible structure of the optical reflector [J]. *OME Information*, 2010, 27(7): 51-55. (in Chinese)
辛宏伟. 小型轻质长条反射镜挠性支撑方案研究[J]. 光机电信息, 2010, 27(7): 51-55.
- [14] Liu Pai, Huang Qiaolin, Yang Jukui. Research on support structure between primary and secondary mirror in large-aperture and long-focal-length space camera [J]. *Spacecraft Recovery & Remote Sensing*, 2014, 35(3): 60-67. (in Chinese)
刘湃, 黄巧林, 杨居奎. 大口径长焦距相机主次镜支撑结构方案初步研究[J]. 航天返回与遥感, 2014, 35(3): 60-67.