

光电工程

Opto-Electronic Engineering

中文核心期刊 中国科技核心期刊
Scopus CSCD

空间相机大长宽比平面反射镜结构设计

袁健, 张雷, 裴思宇, 李小涛, 张冠宸

引用本文:

袁健, 张雷, 裴思宇, 等. 空间相机大长宽比平面反射镜结构设计[J]. 光电工程, 2025, 52(5): 250006.

Yuan J, Zhang L, Pei S Y, et al. Structure design of flat mirror with large aspect ratio for space camera[J]. *Opto-Electron Eng*, 2025, 52(5): 250006.

<https://doi.org/10.12086/oe.2025.250006>

收稿日期: 2025-01-08; 修改日期: 2025-03-19; 录用日期: 2025-03-24

相关论文

1.2 m高轻量化率主反射镜镜坯结构设计

袁健, 张雷, 姜启福, 裴思宇, 龚小雪

光电工程 2023, 50(4): 220225 doi: [10.12086/oe.2023.220225](https://doi.org/10.12086/oe.2023.220225)

大口径空间相机结构优化设计

邵明东, 郭疆, 崔永鹏, 杨利伟, 周龙加, 王浩

光电工程 2025, 52(2): 240259 doi: [10.12086/oe.2025.240259](https://doi.org/10.12086/oe.2025.240259)

轻质长条形反射镜结构优化设计

王朋朋, 辛宏伟, 朱俊青, 王永宪, 许艳军, 陈长征

光电工程 2020, 47(8): 200109 doi: [10.12086/oe.2020.200109](https://doi.org/10.12086/oe.2020.200109)

Φ1.05 m轻量化反射镜设计与制造

胡瑞, 陈志强, 张媛媛, 徐涛, 刘红, 张继友

光电工程 2020, 47(10): 200317 doi: [10.12086/oe.2020.200317](https://doi.org/10.12086/oe.2020.200317)

更多相关论文见光电期刊集群网站 



光电工程
Opto-Electronic Engineering

<http://cn.ojournal.org/oe>



OE_Journal

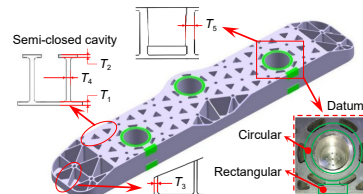


Website

空间相机大长宽比平面反射镜结构设计

袁 健, 张 雷*, 裴思宇, 李小涛, 张冠宸

长光卫星技术股份有限公司, 吉林 长春 130033



摘要: 具备大长宽比、高轻量化率特征的平面反射镜是大型离轴三反相机光机结构的研制难点, 针对某通光口径为 1220 mm×198 mm 的平面反射镜, 提出一种使用半封闭式碳化硅镜体并配合背部三点支撑形式的组件方案, 质量仅为 30.5 kg。通过优化支撑点位置, 改善镜体支撑效果。调整柔性支撑中铰链的尺寸和位置, 兼顾组件的自重变形、热稳定性及动力学特性。仿真分析结果表明, 平面反射镜在检测重力工况中的面形精度变化均方根 (RMS) 为 1.812 nm、倾角为 3.639"。实测组件基础频率为 132.5 Hz, 经抛光后, 测得平面反射镜左、中、右各子区域的面形精度 RMS 值分别为 0.0203 λ 、0.0197 λ 、0.0204 λ ($\lambda=632.8$ nm), 且在环境试验前后保持稳定, 可满足高性能空间相机的使用需求。

关键词: 空间光学; 平面反射镜; 光机结构设计; 离轴三反相机

中图分类号: V447.1

文献标志码: A

袁健, 张雷, 裴思宇, 等. 空间相机大长宽比平面反射镜结构设计 [J]. 光电工程, 2025, 52(5): 250006

Yuan J, Zhang L, Pei S Y, et al. Structure design of flat mirror with large aspect ratio for space camera[J]. *Opto-Electron Eng*, 2025, 52(5): 250006

Structure design of flat mirror with large aspect ratio for space camera

Yuan Jian, Zhang Lei*, Pei Siyu, Li Xiaotao, Zhang Guanchen

Chang Guang Satellite Technology Co., Ltd., Changchun, Jilin 130033, China

Abstract: The flat mirror with the characteristics of large aspect ratio and high lightweight rate is one difficulty in the opto-mechanical design of a large off-axis three-mirror anastigmat cameras. For a certain flat mirror with a clear aperture of 1220 mm×198 mm, the assembly structure combining a semi-closed mirror blank made of silicon carbide with the three-point back support scheme was proposed, resulting in a total design weight of 30.5 kg. The supporting effect of the mirror was improved through the optimization of support positions. Both the size and position of hinges in the flexure were adjusted, taking into account gravitational deformation, thermal stability, and dynamic characteristics of the assembly. Simulation reveals that, under the condition of gravity during the test, the root mean square (RMS) of the surface accuracy change of the flat mirror is 1.812 nm, together with the tilt of 3.639" for the mirror blank. The measured fundamental frequency of the assembly is 132.5 Hz. After polishing, the tested RMS values of surface accuracy are 0.0203 λ , 0.0197 λ , and 0.0204 λ ($\lambda=632.8$ nm), corresponding to the left, middle, and right sub-zones of the flat mirror respectively. The surface accuracy can remain basically unchanged after environmental tests, which meets the requirements of high-performance space cameras.

Keywords: space optics; flat reflector; opto-mechanical design; off-axis three mirror anastigmat camera

收稿日期: 2025-01-08; 修回日期: 2025-03-19; 录用日期: 2025-03-24

基金项目: 吉林省科技发展计划项目 (20210509052RQ)

*通信作者: 张雷, zhanglei@jl1.cn。

版权所有©2025 中国科学院光电技术研究所

1 引言

离轴三反光学系统具有焦距长、视场大、无遮拦、传函高等特点^[1-3], 因其具备的突出商业价值, 在现代商业航天遥感领域内得到广泛应用, 其中较为成功的是美国 DigitalGlobe 公司于 2001 年研制的 Quickbird-2 卫星和 2007 年研制的 Worldview-1 卫星, 其全色分辨率和幅宽分别达到 0.61 m 和 16.5 km, 以及 0.5 m 和 17.6 km。近年来, 我国也成功研制了多颗配备了离轴三反相机的大型商业遥感卫星, 如中国四维测绘技术有限公司于 2024 年发射的“四维高景三号”卫星, 其幅宽超过 130 km, 可向用户提供 0.5 m 分辨率的图像产品。此类空间相机普遍采用推扫成像模式^[4], 光学系统垂轨向视场远大于沿轨向视场, 使得除位于孔径光阑外的其他反射镜均呈现近似长方形轮廓; 随着用户对图像分辨率和观测效率的要求不断提高, 离轴三反相机的口径和幅宽随之增长^[5-7], 导致长方形反射镜的尺寸不断拓展, 其长边尺寸现已超过 1 m 量级, 反射镜的长宽比随之快速提高, 非对称的镜体大大增加了组件支撑结构的设计难度。具备大长宽比、高轻量化率特征的反射镜组件结构设计已成为离轴三反相机光机结构研制中的主要难点之一。

近年来, 学者们针对大尺寸长条形空间反射镜的研究不断深入。曲慧东等^[8]提出一种新型柔性支撑结构, 并完成了某 700 mm×249 mm 长方形空间反射镜组件的结构设计, 改善了反射镜组件的力、热环境适应能力; 袁健等^[3]介绍了某空间相机中通光口径为 1250 mm×460 mm 的长方形反射镜的设计过程, 其全口径面形精度实测值均方根 (RMS) 为 0.016λ (λ 为波长, $\lambda=632.8$ nm), 且在大量级的环境试验前后体现出良好的面形精度稳定性; 刘朋朋等^[9]针对某口径为 540 mm×180 mm、材料为超低膨胀石英玻璃的长方形反射镜建立了组件参数化模型, 使用多种优化方法确定了全封闭式镜体结构的轻量化参数以及柔性支撑的尺寸参数, 并运用基于点云三维重建的点阵结构仿真方法完成了背板的优化设计; 李宗轩等^[7,10]重点研究了某 1.8 m×0.5 m 口径的长方形反射镜的柔性支撑技术, 对柔性支撑的关键尺寸进行了优化设计, 提出了柔性支撑最佳安装位置, 即长条形反射镜中性面位置的确定方法, 反射镜在 0°/180°自重作用下的面形精度实测值 RMS 均优于 0.03λ ($\lambda=632.8$ nm)。

上述文献中报道的反射镜长宽比均较小, 以某大

型离轴三反相机中通光口径为 1220 mm×198 mm 的平面反射镜 (后文简称“平面镜”) 为研究对象, 其长宽比大于 6:1, 主要阐述具备大长宽比特征的高轻量化率空间反射镜的设计方法, 重点讨论了镜体的轻量化设计、背部三点支撑方案的实现、柔性支撑的参数优化、大尺寸平面的面形精度检测等技术要点, 并通过环境试验, 对所研制的平面镜的力学特性和面形精度稳定性进行充分验证。

2 组件光机结构特征

大型离轴三反相机 (TMA camera) 中, 入射光线依次经主镜、次镜、三镜反射后, 再经平面镜的折转, 最终会聚在焦面上, 虽然平面镜没有光焦度、对像差校正没有贡献, 但能够将焦平面从次镜一侧折转至主镜一侧, 起到有效压缩系统光轴向尺寸的作用^[11], 因此, 平面镜成为大型离轴三反相机的重要组件。

文中相机采用桁架式支撑结构^[12], 前、后框架间由碳纤维桁架连接, 主镜、三镜及焦平面布置在后框架上, 次镜和平面镜安装于前框架上, 如图 1 所示。相机内除次镜为圆形口径外, 其余反射镜的轮廓均近似为长方形, 而平面镜处于光路后端, 成像光束的截面经压缩后在此处变得更加扁平, 使平面镜的通光口径达到 1220 mm×198 mm, 长宽比则扩大至 6.16:1。反射镜的长宽比越大, 镜体整体刚度越差、镜面边缘越易变形, 轻量化镜体以及组件支撑结构的设计难度也随之提升。开展系统装调及测试时, 空间相机通过后框架上的安装支腿固定在检测工装上, 相机处于图 1 所示的光轴水平状态, 此时的相机可视作“简支梁”, 相机前端的挠度和转角将使光学元件间的相对位置精度发生变化, 造成相机入轨后工作性能的衰退, 因此, 为减轻系统重量, 平面镜组件的轻量化设计非常重要。

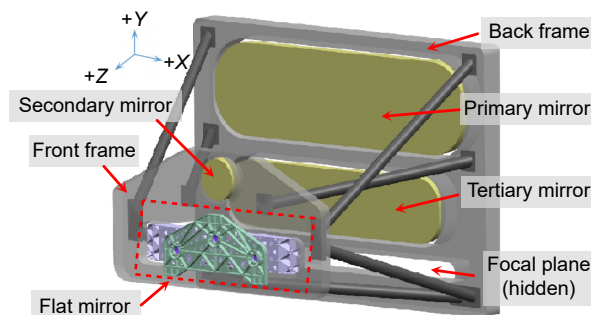


图 1 大型离轴三反相机中的平面镜组件

Fig. 1 Flat mirror assembly in large off-axis TMA camera

除显著的大长宽比和高轻量化率特征外, 为了能够适应高性能可见光波段遥感器的使用需求, 平面镜的动、静力学特性和热稳定性也应满足相应的技术指标。综上, 给出平面镜组件的主要设计指标, 如表 1 所示, 其中 θ_M 为镜体绕图 1 中 X 轴的转角, φ 为镜面直径。

3 平面镜组件结构设计

3.1 轻量化镜体

为减轻镜体质量, 增强光学元件的环境适应能力, 用来制备大口径空间反射镜的材料应具备高比刚度、高热稳定性等特点^[3,7], 在可见光波段高性能遥感器中常见的镜坯材料物理属性如表 2 所示。其中, 比刚度参数 (即弹性模量与密度之比) 对于提升大长宽比反射镜的力学性能、降低镜坯重力变形尤为重要, 镜坯材料的高热稳定性 (即导温系数与线胀系数之比) 有助于大尺寸长条形镜体各处保持温度一致, 因此文中平面镜镜坯选用三种材料中比刚度和热稳定性均最高的碳化硅 (SiC) 制造。

文中碳化硅镜坯采用反应烧结方法制备, 在制坯阶段使用消失模铸造工艺, 镜体内部的减重腔体呈半封闭式结构, 翻边宽度为 10 mm, 加强筋交叉构成等边三角形, 支撑孔处于加强筋交点上, 如图 2 所示,

该轻量化形式可显著提升镜体刚度。随着高精度数控铣磨、磁流变抛光等新型光学加工工艺的日益成熟, 有效地削弱了高轻量化率反射镜在抛光时产生的“印透效应”, 对各处板壳的厚度和加强筋密度等参数的限制也逐步放松^[13]; 同时, 采用的平面镜短边长度小, 镜体四周侧壁对镜面起到较好的支撑作用, 使得抛光时的镜面变形得到有效控制。基于以上考量, 在确定平面镜镜体轻量化参数时, 主要考虑制坯时的工艺因素, 如保证腔体壁厚均匀、减少疏松气孔、方便操作等, 最终将镜坯的面板厚度 T_1 定为 5 mm, 背板厚度 T_2 为 4 mm, 四周侧壁厚 T_3 为 4 mm, 加强筋厚度 T_4 为 3 mm, 三处锥孔壁厚 T_5 为 10 mm。

对于长条形反射镜而言, 单纯增加镜体厚度对提高反射镜刚度的效果有限, 镜体厚度通常为镜体长度的 1/10 左右^[14], 若反射镜的长宽比较大, 镜体厚度与长度间的比值可以适当放宽; 为控制镜体重量, 结合本文空间相机中前框架沿光轴向的尺寸限制, 确定平面镜镜体厚度为 87.5 mm。

制坯过程中, 在平面镜镜坯背面及底面等位置还增设了多处矩形或圆环形凸台, 如图 2 所示, 后续经铣磨后可用作基准面, 供光学加工、系统装调时定位用。此外, 还在远离支撑点的镜体两侧设置斜面、在镜体中部布置削边, 这些措施起到了进一步去除镜

表 1 平面镜组件主要设计指标

Table 1 Main design metrics for flat mirror assembly

No.	Item	Requirement
1	Clear aperture	1220 mm×198 mm
2	Testing attitude	Optical axis horizontal
3	Gravitational deformation	Tilt: $\theta_M \leq 10''$
4	Working temperature	(20±4) °C
5	Surface accuracy	RMS≤1/50λ over sub-aperture of φ140 mm (λ=632.8 nm)
6	Mass	≤40 kg
7	Frequency	≥100 Hz

表 2 主要可见光波段空间反射镜材料属性

Table 2 Properties of spatial reflector materials in main visible light band

Property	SiC	ULE	Zerodur
Density $\rho/(\text{kg} \cdot \text{m}^{-3})$	3050	2210	2530
Elastic modulus E/GPa	340	67	91
Specific stiffness E/ρ	111.5	30.3	36
Thermal conductivity $\lambda_r/(\text{W} \cdot \text{K}^{-1} \cdot \text{m}^{-1})$	155	1.31	1.64
Thermal expansion coefficient $\alpha/(10^{-6} \cdot \text{K}^{-1})$	2.50	0.03	0.05
Thermal stability λ_r/α	62	43.7	32.8

体冗余质量、提升镜体轻量化率的作用。综上, 最后得到平面镜镜体的设计质量为 17.4 kg、面密度约为 70 kg/m^2 , 与未做减重处理的结构相比, 镜体轻量化率约为 74%。

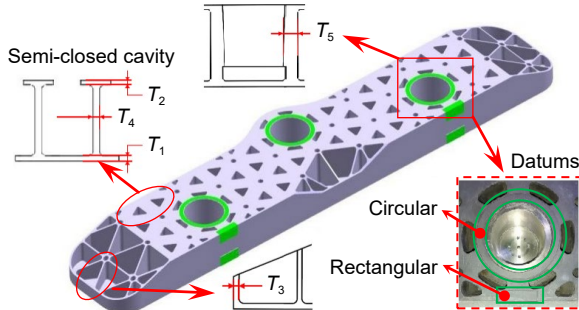


图 2 镜体轻量化结构
Fig. 2 Lightweight structure of mirror blank

3.2 背部三点支撑方案

平面镜采用背部三点支撑形式, 镜体背部三个支撑点间的相对位置对大长宽比平面镜组件的动、静力学特性有显著影响。为提高镜体刚度, 支撑点的布置应使镜体重量均匀地分散至各处、整个镜面得到有效支撑, 支撑点间的相对位置主要由支撑点间的水平距离 D_x 、垂直距离 D_y , 以及下方支撑点距离镜体侧面的距离 δ_y 三个参数确定, 如图 3 所示; 由于镜体长宽比达到 6:1 量级, 镜体短边方向的长度仅 208 mm, 为增加支撑点构成的三角形的覆盖面积, 将上方支撑点适当向上移动, 在镜体上方形成拱形突出部。

为确定合适的支撑点位置, 可以分析上述三个参数 D_x 、 D_y 、 δ_y 对镜体处于光轴铅垂状态时自重变形的影响^[14]; 对大长宽比镜体而言, 该变形量既表征了支撑点分布对镜体自身重力的均匀卸载情况, 也在一定程度上反映了振动、热胀冷缩等其他外部载荷通过支

撑点作用于镜体时的变形情况, 以该变形量为关注对象有助于在镜体设计阶段获得良好的综合支撑效果。仿真时约束镜体背面各支撑点对应位置, 计算上述重力状态下镜面面形的均方根值。

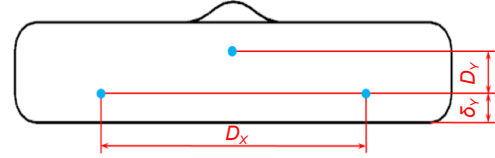


图 3 镜体支撑点间相对位置
Fig. 3 Relative position between supports of mirror

当 δ_y 数值较小 (50 mm) 时, D_y 对镜体变形量起决定作用, D_y 数值越大, 对镜体的支撑效果越佳, 但此时镜体自重变形 RMS 均偏大, 如图 4(a) 所示; 当 δ_y 数值较大 (110 mm) 时, 下方支撑点近似位于镜体短边方向的中间位置, 此时 D_y 对镜体变形量的影响趋同, 如图 4(c) 所示, 镜体自重变形体现为两侧边缘位置的凹陷, 其 RMS 主要由下方支撑点的水平距离 D_x 决定, 可见此时中心支撑点并未对镜体起到明显的支撑作用。当 δ_y 取值适中 (80 mm) 时, 如图 4(b) 所示, 各支撑点间存在最佳的相对位置使得镜体自重变形量最小, 且随着 D_y 的缩小, 最佳位置对应的 D_x 快速扩大, 镜体自重变形 RMS 逐步减小; 注意到当 D_y 取值偏小时, 三个支撑点趋于构成一条直线, 此时镜体沿短边方向缺乏支撑, 组件将出现绕镜体长边方向的旋转模态, 故 D_y 取值不能过小, 以避免削弱大长宽比反射镜组件的动态刚度。综上, 最终选取了 $\delta_y=80 \text{ mm}$ 、 $D_y=90 \text{ mm}$ 作为平面镜的支撑位置, 此时, 在典型的 D_x 取值下, 平面镜镜面的自重变形趋势如图 5 所示, 其中, 当 $D_x=650 \text{ mm}$ 时, 镜面的变形量最小; 为了使各支撑点与轻量化镜体内部加强筋的交汇点重合, 将 D_x 在上述最佳支撑位置附近适当调整, 最终确定 $D_x=624 \text{ mm}$ 。

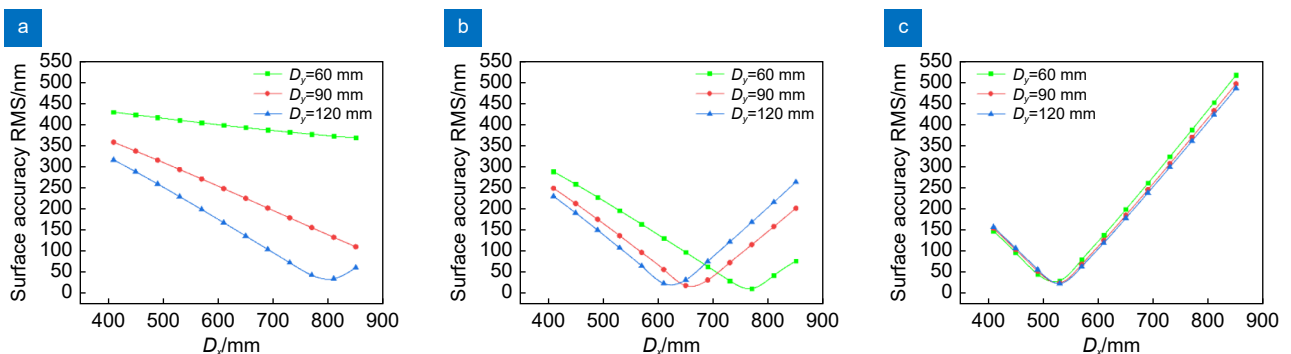


图 4 背部三点支撑位置对镜体自重变形的影响。(a) $\delta_y=50 \text{ mm}$; (b) $\delta_y=80 \text{ mm}$; (c) $\delta_y=110 \text{ mm}$

Fig. 4 Influence of three-point back support position on gravitational deformation of mirror. (a) $\delta_y=50 \text{ mm}$; (b) $\delta_y=80 \text{ mm}$; (c) $\delta_y=110 \text{ mm}$

平面镜组件主要由镜体、锥套、柔性支撑和基板四部分组成, 其结构如图 6 所示。其中, 锥套材料为钢钢、其线胀系数与 SiC 镜体接近, 锥套与镜体之间使用光学环氧胶粘接固定; 柔性支撑使用具备高屈服极限的钛合金 (TC4) 制造, 可保证组件可靠性、防止组件在恶劣的力学条件下破坏失效; 基板采用铝基碳化硅复合材料 (SiC/Al), 该材料比刚度高, 有助于进一步减轻组件质量。平面镜组件设计质量为 30.5 kg, 镜体质量在设计质量中的占比为 57%, 各主要零件使用的材料及物理属性如表 3 所示; 该组件结构方案不仅对外的机械接口简单, 且内部受力状态稳定, 有助于维持大长宽比反射镜面形精度的长期稳定。

3.3 柔性支撑

使用柔性支撑是提升空间反射镜热稳定性的有效

途径之一, 也是卸载大长宽比镜体自身重力作用、确保面形精度检测数据准确无误的关键环节。平面镜采用双轴正交铰链式柔性支撑, 零件整体呈中空的圆柱形, 顶部有盖、底部有法兰, 如图 7(a) 所示; 使用线切割工艺, 在零件靠近顶部的位置加工两层柔性环节, 每层柔性环节均包含一对相向布置的柔性铰链, 可认为其旋转轴位于两铰链根部中点的连线上, 两层柔性环节的结构参数一致、旋转轴互相垂直且位于同一平面内, 构成类似“万向节”的结构。

各柔性铰链均可简化为悬臂梁结构, 当平面镜发生热胀冷缩时, 组件内的柔性铰链将受力产生微小变形, 这一过程中可视作各铰链仅承受弯矩 M 作用, 根据材料力学相关知识, 此时铰链一端的转角 θ 可以记为

$$\theta = (M \cdot L) / (E \cdot I), \quad (1)$$

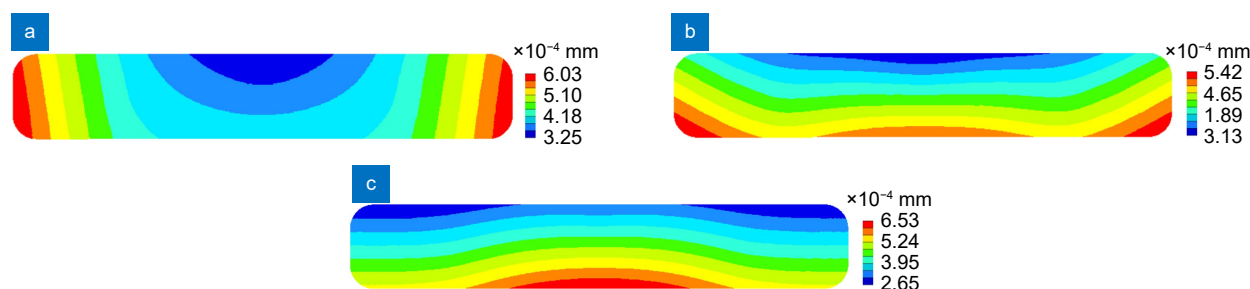


图 5 典型支撑位置下的平面镜自重变形。(a) $D_x=610$ mm; (b) $D_x=650$ mm; (c) $D_x=690$ mm

Fig. 5 Gravitational deformation of flat mirror under typical support positions. (a) $D_x=610$ mm; (b) $D_x=650$ mm; (c) $D_x=690$ mm

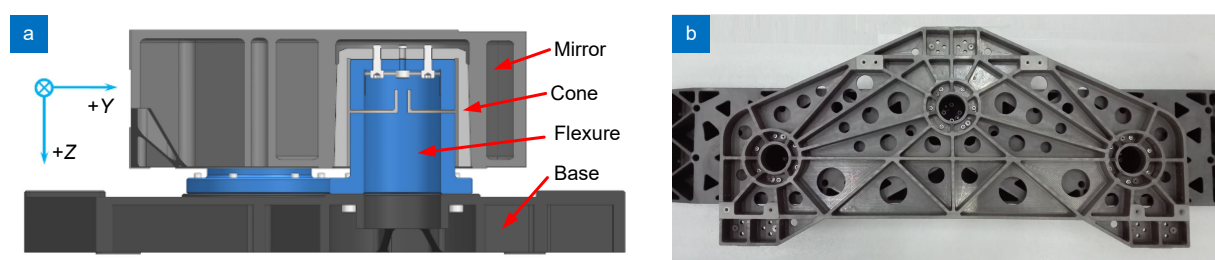


图 6 平面镜背部三点支撑结构。(a) 装配关系; (b) 组件实物

Fig. 6 Back three-point support structure for flat mirror. (a) Assembly relationship; (b) Component physical object

表 3 主要零件材料及其物理属性

Table 3 Main parts materials and their physical properties

Parameter	Main parts material			
	Mirror	Cone	Flexure	Base
Material	SiC	Invar	TC4	SiC/Al
Density $\rho/(\text{kg} \cdot \text{m}^{-3})$	3050	8100	4400	3000
Elastic modulus E/GPa	340	141	114	180
Poisson ratio μ	0.27	0.25	0.34	0.18
Thermal expansion coefficient $\alpha/(10^{-6} \cdot \text{K}^{-1})$	2.5	2.5	9.1	8.4

式中: E 为铰链材料的弹性模量; L 和 I 分别为铰链长度和截面惯性矩。铰链截面为矩形, 故 I 可记作

$$I = W \cdot T^3 / 12, \quad (2)$$

式中: W 、 T 分别为铰链的宽度 (即零件壁厚) 和厚度。记铰链的转动刚度为 K , 则由以上两式可得

$$K = (E \cdot I) / L = (E \cdot W \cdot T^3) / 12L. \quad (3)$$

由式 (3) 可知, 铰链的长度 L 越大、截面惯性矩 I 越小, 铰链的转动刚度 K 就越小, 且铰链厚度 T 对铰链转动刚度 K 的影响最大, 数值上为立方关系。虽然降低铰链转动刚度使得柔性支撑更易于发生变形, 有利于减小环境温度变化时组件内部的热应力, 进而控制平面镜的热畸变, 然而, 大幅降低铰链转动刚度会导致组件基频迅速下降, 增加空间相机在发射过程中出现破坏的风险。为兼顾组件的热稳定性和动力学特性, 可采用多目标优化的方法, 确定柔性支撑最终的结构参数。以 4°C 均匀温度变化工况下的平面镜面形精度 RMS 为热稳定性的评价指标, 以组件基频 f_1 为动力学特性的评价指标, 上述优化问题的数学描述可以记为

$$\text{Find } X = (W, T, L)$$

$$\text{Where Minimize(RMS), Maximize}(f_1)$$

$$\text{s.t. } 6 \leq W \leq 9, 5 \leq T \leq 8, 12 \leq L \leq 16$$

式中: X 代表由铰链的宽度 W 、厚度 T 及长度 L 构成的参数组合, 各参数的取值范围主要根据制造工艺限制确定, 单位均为 mm。为求解上述优化问题, 首先通过实验设计 (design of experiment, DOE) 的手段, 对该问题的响应面模型进行拟合, 在选择样本点时, 应保证其在设计空间内的随机性与均匀性; 进而使用全局响应面法对拟合得到的近似模型进行多目标寻优, 优化中最大评估数设置为 200, 得到的计算数据及帕

雷托前沿如图 7(b) 所示。帕累托前沿对应的组件基频 f_1 变化范围较小且数值均较高, 而温度变化工况下的面形精度 RMS 则变化剧烈, 故选择帕累托前沿的底部作为最优解, 综合考虑制造工艺并经过圆整后, 最终确定柔性支撑中铰链的结构参数为 $W=9\text{ mm}$ 、 $T=6\text{ mm}$ 、 $L=13\text{ mm}$ 。

开展平面镜面形检测时, 组件处于光轴水平状态, 此时平面镜将在图 1 中 $-Y$ 方向重力作用下产生变形, 镜体的大长宽比特征将使上述自重变形更加显著; 该变形量既影响面形检测的精度, 又可以表征空间相机入轨后处于微重力环境时镜面回弹量的大小, 必须对其加以控制。相关研究表明, 柔性支撑中铰链结构的轴向位置对大口径反射镜在光轴水平重力工况下的变形量有重要影响, 可以通过优化铰链结构的轴向位置获得最佳的重力卸载效果^[7-10]。在有限元模型中, 仅将铰链结构沿光轴向整体移动、其它结构参数保持不变, 分析得到铰链结构的高度 H 与检测状态下镜面面形变化 RMS 间的数值关系, 如图 7(c) 所示, 其中, 横轴表示高度 H , 即上层铰链切槽与顶面间的距离, 纵轴表示 $-Y$ 向重力工况下的镜面 RMS。可见, 平面镜在铰链结构逐步下移的过程中存在面形变化量最小点, 其原因可以用“中性面”理论解释: 在该位置, 铰链结构的旋转轴与镜体的中性面基本重合, 此时镜体仅受重力作用, 镜面面形精度变化量最小, 一旦偏离该位置, 镜体除受重力作用外, 还要承受附加转矩, 使镜面面形 RMS 值快速增大。综上, 确定柔性支撑中铰链结构的高度 H 为 9.5 mm 。

3.4 典型工况仿真分析

开展面形检测和系统装调时, 平面镜的长边保持水平状态, 此时组件会因重力作用发生变形, 导致镜

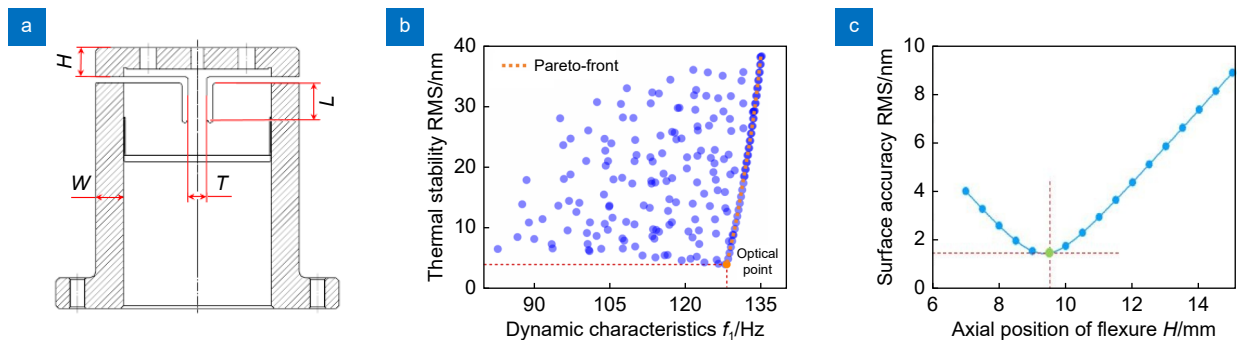


图 7 双轴正交铰链式柔性支撑。(a) 主要柔性参数; (b) 铰链结构参数优化; (c) 铰链位置与镜体变形的关系
Fig. 7 Flexure support with biaxial orthogonal hinge. (a) Main flexure parameters; (b) Optimization of hinge structure parameters; (c) Relation between hinge position and mirror deformation

面形精度退化以及镜体倾斜;地面测试及在轨工作过程中,平面镜所处的环境温度存在一定的变化范围((20±4)℃),此外,基板对外安装接口位置的表面不平整(不平度最大可达0.02 mm),以上因素也会造成平面镜变形。

建立组件有限元模型,零件材料及物理属性根据表2设置,其中,胶层由于厚度较薄(约0.02 mm),建模时加以省略,镜体与衬套间的粘接界面通过镜体锥孔内壁全部节点耦合加以模拟,柔性支撑与衬套和基板间的螺钉紧固关系则通过螺钉孔开口处节点耦合来模拟,固定三角基板的对外接口位置作为约束条件,将镜面节点的原始位置及分析得到的节点位移量导出,通过拟合得到镜面的面形精度数据。

为评估自重、温度、装配等因素对平面镜工作性能的影响,分别用-Y向1 G重力、4℃均匀温度变化、0.02 mm强迫位移三种工况对上述因素加以仿真,分析得到各因素分别作用及同时作用(即复合工况)时的组件变形数据,包括镜面的面形精度变化RMS以及镜体的倾角等如表4所示,相应的镜面节点拟合云图如图8所示。

从表4中数据可知,平面镜在检测重力工况下的面形精度变化量RMS为1.812 nm,虽然通过调整柔性支撑中的铰链高度,实现了对重力作用较好的卸载效果,但镜体仍存在微小的刚体转角 θ_x ,其数值

为3.639";复合工况代表了全使用周期内可能出现的最恶劣情况,对应的平面镜面形精度变化RMS为5.044 nm。可见,平面镜在各工况下的变形数据均满足设计指标要求,所提大长宽比平面镜结构方案具有良好的环境适应能力。

对平面镜组件进行模态分析,组件前6阶自然频率及对应振型如表5所示。平面镜组件基频仿真值达到129.1 Hz,与100.0 Hz的设计要求之间存在较大裕量,背部三点支撑形式可以满足米级大长宽比空间反射镜的组件基频要求;平面镜的一阶振型表现为镜体绕Z轴的旋转,如图9所示,这主要是由于大长宽比平面镜在镜体长边两侧的刚度相对较低所致,与柔性支撑相比,镜体的大长宽比因素是决定平面镜动力学特性的主要因素。此外,若以无约束状态下镜体自身的基频为关注对象,发现采用开放式结构的镜体的基础频率为532.0 Hz,而采用半封闭式结构时,镜体基础频率则为656.0 Hz,较前者提升了约23%,可见,半封闭式结构使得大长宽比镜体自身的刚度得到了显著改善。

4 检测与试验

4.1 面形精度检测

待平面镜组件完成装配和抛光后,对其面形精度

表4 典型工况下平面镜组件变形数据

Table 4 Deformation data of the flat mirror assembly under typical conditions

Typical condition		RMS/nm	$\theta_x/^{\circ}$
Condition 1	Gravity/(1 G, -Y)	1.812	3.639
Condition 2	Temperature change/4℃	3.302	/
Condition 3	Forced displacement/0.02 mm	0.948	/
Condition 1+2+3	Compound	5.044	/
Requirement		$\leq 1/50\lambda$ ($\lambda=632.8$ nm)	$\leq 10''$

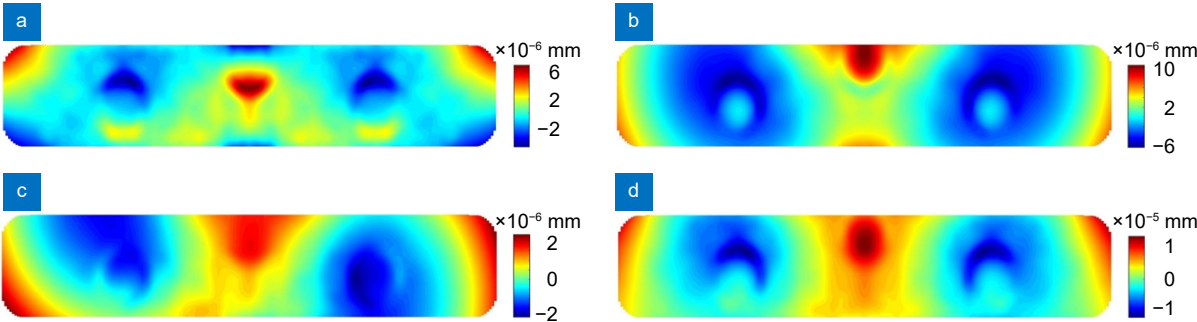


图8 典型工况下镜面变形拟合云图。(a) 1 G, -Y向重力; (b) 4℃温度变化; (c) 0.02 mm不平度; (d) 复合工况

Fig. 8 Fitting nephograms of mirror deformation under typical conditions. (a) 1 G, -Y gravity; (b) 4℃ temperature change; (c) 0.02 mm forced displacement; (d) Compound

表 5 平面镜组件模态分析结果
Table 5 Modal analysis results of flat mirror assembly

No.	Frequency/Hz	Vibration mode
1	129.1	Mirror rotation around Y-axis
2	134.6	Mirror rotation around X-axis
3	174.9	Mirror rotation around Z-axis
4	178.5	Mirror translation along Y-axis
5	193.3	Mirror translation along X-axis
6	201.5	Mirror translation along Z-axis

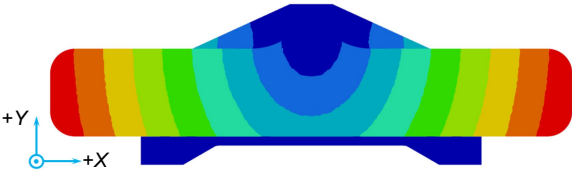


图 9 平面镜组件一阶振型
Fig. 9 First order vibration mode of flat mirror assembly

进行了检测。平面镜长边方向超过 1.2 m，由于缺乏与之匹配的更大口径标准球面镜检具，未搭建常规的“瑞奇-康芒”法检测光路，而是使用分区检测方法开展大长宽比平面镜的面形精度检测，具体做法是：将平面镜镜面划分为左、中、右三个直径约为 600 mm 的子区域，相邻区域间有约 150 mm 宽的重叠带，如图 10(a) 所示，使用大口径平面干涉仪分别检测并记录各子区域的面形精度 RMS 及面形云图；当全部子区域的 RMS 均满足设计指标时，可认为平面镜满足系统使用要求。分区检测方法不需要更大口径的光学

元件作为辅助检具，利用大口径干涉仪直接对待检平面进行检测^[15]，具有成本低、效率高等优点，在大长宽比平面镜的光学加工领域中被广泛采用。

使用的干涉仪为国产品牌成都泰科的 INF600-LP-WM 型激光平面干涉仪，其检测口径 $\varphi=600\text{ mm}$ 、检测重复性精度 RMS 优于 $1/2000\lambda$ ($\lambda=632.8\text{ nm}$)。搭建好的平面镜检测光路如图 10(b) 所示，干涉仪整体放置于隔振光学平台上，检测时平面镜组件安装在特制的检测工装内，以模拟平面镜与前框架之间的连接方式，平面镜与干涉仪窗口距离约为 400 mm；检测工装固定在气浮调整架上，切换区域时，平面镜与工装可以在光学平台上平稳移动；借助干涉仪的对准光束，可将各子区域与干涉仪窗口对中布置，并保证各子区域每次的检测范围基本一致。

测得平面镜各分区的面形云图如图 11 所示，各子区域 RMS 分别为左侧 0.0203λ 、中部 0.0197λ 、右

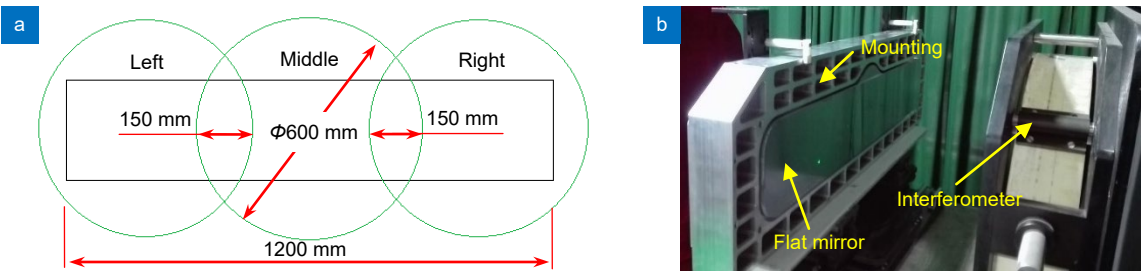


图 10 平面镜面形精度检测。(a) 反射面分区示意图；(b) 大口径干涉仪检测现场
Fig. 10 Surface accuracy test of flat mirror. (a) Schematic of surface zoning; (b) Test scene using large aperture interferometer

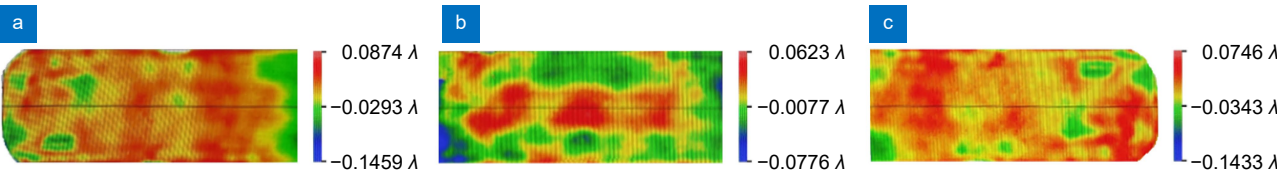


图 11 平面镜分区面形云图。(a) 左侧，RMS 为 0.0203λ ；(b) 中部，RMS 为 0.0197λ ；(c) 右侧，RMS 为 0.0204λ
Fig. 11 Zonal surface nephograms of flat mirror. (a) Left, RMS of 0.0203λ ; (b) Middle, RMS of 0.0197λ ; (c) Right, RMS of 0.0204λ

侧 0.0204λ , 各子区域残留像差以中高频成分为主、power 项系数均小于 0.05, 同时注意到, 中部区域面形云图中的两侧相对偏低, 与左侧、右侧区域中的重叠区域位置相对应; 使用干涉仪自带的测量软件, 在各子区域内任意框选直径 $\varphi=140\text{ mm}$ 的圆形区域并分析此处子口径的面形精度, 其 RMS 均优于 $1/50\lambda$, 满足设计指标要求。

环境温度对大长宽比平面镜的面形检测影响较大, 变化的温度场不仅会使待检组件自身产生热变形, 还会导致干涉仪内部腔体处于不稳定状态, 向测量结果中引入系统误差。为获得准确的测量结果, 平面镜的面形精度检测在独立且相对封闭的检测室内开展, 室内配备大功率空调, 使环境温度恒定在 $(20\pm 0.5)\text{ }^{\circ}\text{C}$ 范围内, 每次检测前, 组件放置在检测室内静置 4 h 以上; 测试时, 待面形云图中的高低点分布及面形数据稳定时记录数据, 对各区域进行多次测量并求平均值, 从而减少气流扰动、环境振动等不利因素对面形精度检测的影响。

4.2 翻转测试

为了验证背部三点支撑形式能否充分卸载大长宽比镜体自身的重力作用, 以及柔性支撑关键参数设计的正确性, 对平面镜开展了面形翻转测试^[3,7], 即将检测光路中的平面镜组件连同其检测工装绕光轴旋转 180° , 再复检此时平面镜各区域的面形精度。测试结果如表 6 所示, 翻转后平面镜各子区域的面形精度 RMS 值分别为左侧 0.0213λ 、中部 0.0204λ 、右侧 0.0207λ , 相同子区域在翻转前后的 RMS 变化量不超过 $1/1000\lambda$ 。以上数据表明, 所提平面镜组件具有良好的静态刚度, 可以有效地控制重力作用对检测状态中反射镜面形精度的不良影响。

表 6 翻转前后平面镜面形精度数据

Table 6 Surface accuracy data of flat mirror before and after overturn

Zone		RMS/ λ
Left	Before	0.0203
	After	0.0213
Middle	Before	0.0197
	After	0.0204
Right	Before	0.0204
	After	0.0207

4.3 环境试验

为了考核所提平面镜面形精度的稳定性以及组件结构方案的可靠性, 参考典型的空间遥感器环境试验方法, 对平面镜开展了振动试验和高低温循环试验。

振动试验分为扫频试验和随机振动试验两部分: 通过幅值为 0.2 g 、频率范围为 $0\sim 2000.0\text{ Hz}$ 的扫频试验, 实测得到平面镜组件的基频为 132.5 Hz , 与仿真值间的误差约为 2.5% , 可见所提平面镜具有良好的动态刚度、能够满足空间反射镜的设计要求, 也侧面表明所提仿真建模方法正确、分析数据的可信度较高; 随机振动试验中, 振动台的输入量级为 2 g RMS 且持续加载时间均超过 120 s , 实测镜体中部的最大加速度响应超过 8 g RMS 、镜体两侧达到 14 g RMS , 试验后复检平面镜面形精度, 各子区域 RMS 未发生明显变化, 说明平面镜组件动态刚度较高且装配可靠, 可以抵御恶劣的振动环境并保持高精度面形质量。

将平面镜组件置于快速温变箱内, 开展高低温循环试验。在试验过程中, 控制温度范围为 $0\sim 40\text{ }^{\circ}\text{C}$ 、温变速率为 $1\sim 2\text{ }^{\circ}\text{C/min}$, 总持续时间超过 48 h ; 试验结束后, 取出平面镜并复检面形精度, 各分区 RMS 基本维持不变, 表明平面镜组件结构稳定, 其面形精度具备良好的长期稳定性。

5 结 论

以某大型离轴三反相机内的平面镜为研究对象, 其通光口径为 $1220\text{ mm}\times 198\text{ mm}$, 详细讨论了大长宽比特征对高性能平面反射镜工作性能的影响, 并系统地阐述了其研制方法。碳化硅镜体采用半封闭式结构, 面板厚度为 5 mm 、加强筋壁厚 3 mm , 设置分散的凸台作为基准面, 镜体设计质量为 17.4 kg , 获得了较高的镜体轻量化率。采用背部三点支撑形式的大长宽比平面镜具有优良的工作性能, 经调整后的柔性支撑可以在提升平面镜热稳定性的同时卸载检测状态下大长宽比镜体自身的重力作用, 镜体倾斜值仅为 $3.639''$, 各典型仿真工况中平面镜的面形精度变化 RMS 最大值为 5.044 nm , 均充分满足设计指标要求。

使用大口径平面干涉仪和分区检测方法, 对研制的平面镜实物开展了面形精度检测, 左、中、右三处子区域的 RMS 分别为 0.0203λ 、 0.0197λ 、 0.0204λ , 且翻转测试中各子区域的面形精度基本维持不变; 平面镜组件的基频实测值为 132.5 Hz , 经历大量级的振

动试验和长期的高低温循环试验后, 平面镜均能维持高精度的面形质量。所提平面镜的工作性能可以满足高性能空间相机的使用需求, 该工作可以为大长宽比、高轻量化率平面镜的研制提供参考。

利益冲突: 所有作者声明无利益冲突

参考文献

- [1] Jiang C B, Chen Z L, Wang X T, et al. Design of compact off-axis triple mirror optical system[J]. *Opto-Electron Eng*, 2023, **50**(12): 230231.
蒋成斌, 陈智利, 王肖同, 等. 紧凑式离轴三反光学系统设计[J]. *光电工程*, 2023, **50**(12): 230231.
- [2] Wang P P, Xin H W, Zhu J Q, et al. Structural optimization design of lightweight rectangular reflective mirror[J]. *Opto-Electron Eng*, 2020, **47**(8): 200109.
王朋朋, 辛宏伟, 朱俊青, 等. 轻质长条形反射镜结构优化设计[J]. *光电工程*, 2020, **47**(8): 200109.
- [3] Yuan J, Zhang L. Structure design and verification of primary mirror assembly for large off-axis TMA camera[J]. *Infrared Laser Eng*, 2023, **52**(1): 20220363.
袁健, 张雷. 大型离轴三反相机主镜组件结构与验证[J]. *红外与激光工程*, 2023, **52**(1): 20220363.
- [4] Wu H Y, Bai Y, Wang L L, et al. On-orbit geometric calibration and accuracy verification of Jilin1-KF01A WF camera[J]. *Opt Precis Eng*, 2021, **29**(8): 1769–1781.
武红宇, 白杨, 王灵丽, 等. 吉林一号宽幅 01 星宽幅相机在轨几何定标及精度验证[J]. *光学精密工程*, 2021, **29**(8): 1769–1781.
- [5] Yuan J, Zhang L. Novel design of athermal and rigid support structure for small- and medium-aperture mirrors[J]. *Laser Optoelectron Prog*, 2024, **61**(5): 0522005.
袁健, 张雷. 新型中小口径反射镜消热刚性支撑结构设计[J]. *激光与光电子学进展*, 2024, **61**(5): 0522005.
- [6] Song W Y, Xie P, Wang X. Design of lightweight split support structure for large space off-axis three mirror camera[J]. *Opt Precis Eng*, 2021, **29**(3): 571–581.
宋伟阳, 解鹏, 王循. 大型空间离轴三反相机分体支撑结构设计[J]. *光学精密工程*, 2021, **29**(3): 571–581.
- [7] Li Z X, Zhang C H, Zhang D F, et al. Flexural mounting technology of a 1.8 m space-borne rectangular mirror[J]. *Chin Opt*, 2022, **15**(5): 1079–1091.
李宗轩, 张昌昊, 张德福, 等. 1.8 m 空间长条反射镜柔性支撑技术研究[J]. *中国光学*, 2022, **15**(5): 1079–1091.
- [8] Qu H D, Wei J L, Dong D Y, et al. Lightweight structural design of rectangular space mirror assembly[J]. *Infrared Laser Eng*, 2021, **50**(6): 20200404.
曲慧东, 魏加立, 董得义, 等. 长条形空间反射镜组件轻量化结构设计[J]. *红外与激光工程*, 2021, **50**(6): 20200404.
- [9] Liu P P, Wu J, Chang J L, et al. Design method of flexible support and lattice structure for long strip mirror[J]. *Acta Optica Sin*, 2024, **44**(2): 0222002.
刘朋朋, 吴俊, 常君磊, 等. 长条镜柔性支撑及点阵结构设计方法[J]. *光学学报*, 2024, **44**(2): 0222002.
- [10] Long Q, Li Z X, Zhang D F, et al. Support position design of 1.8 m rectangular light-weight SiC mirror[J]. *Acta Optica Sin*, 2024, **44**(13): 1322004.
龙荃, 李宗轩, 张德福, 等. 1.8 m 长条形轻质 SiC 反射镜支撑位置设计[J]. *光学学报*, 2024, **44**(13): 1322004.
- [11] Chen T X, Wu Y X, Song S M, et al. Design and alignment of folded off-axis three-mirror optical system[J]. *Laser Optoelectron Prog*, 2021, **58**(17): 1722001.
陈太喜, 伍雁雄, 宋绍漫, 等. 折叠式离轴三反光学系统设计与装调[J]. *激光与光电子学进展*, 2021, **58**(17): 1722001.
- [12] Wei L, Zhang L, Gong X X, et al. Design and optimization for main support structure of a large-area off-axis three-mirror space camera[J]. *Appl Opt*, 2017, **56**(4): 1094–1100.
- [13] Yuan J, Zhang L, Jiang Q F, et al. Structure design of 1.2 m high lightweight primary mirror blank[J]. *Opto-Electron Eng*, 2023, **50**(4): 220225.
袁健, 张雷, 姜启福, 等. 1.2 m 高轻量化率主反射镜镜坯结构设计[J]. *光电工程*, 2023, **50**(4): 220225.
- [14] Zhu J Q, Sha W, Chen C Z, et al. Position layout of rear three point mounting for space rectangular mirror[J]. *Opt Precis Eng*, 2015, **23**(9): 2562–2569.
朱俊青, 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.
- [15] Li Y W, Zhang J G, Xie X W, et al. Design of large-aperture rectangular SiC scanning mirror assembly[J]. *Laser Optoelectron Prog*, 2022, **59**(5): 0522001.
李延伟, 张景国, 谢新旺, 等. 大口径矩形 SiC 扫描反射镜组件的设计[J]. *激光与光电子学进展*, 2022, **59**(5): 0522001.

作者简介



袁健(1990-), 男, 吉林通化人, 博士, 副研究员, 主要从事精密仪器光机结构设计方面的研究。

E-mail: yuanjian@jll.cn



【通信作者】张雷(1982-), 男, 山东菏泽人, 博士, 研究员, 主要从事光学遥感卫星总体技术方面的研究。

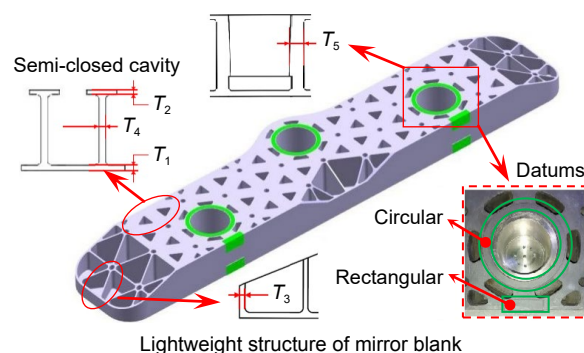
E-mail: zhanglei@jll.cn



扫描二维码, 获取PDF全文

Structure design of flat mirror with large aspect ratio for space camera

Yuan Jian, Zhang Lei*, Pei Siyu, Li Xiaotao, Zhang Guanchen



Lightweight structure of mirror blank

Overview: The flat mirror with the characteristics of a large aspect ratio and high lightweight rate is one difficulty in the opto-mechanical design of large off-axis three-mirror anastigmat cameras. For a certain flat mirror with a clear aperture of 1220 mm×198 mm, the assembly structure combining a mirror blank made of reaction-sintered silicon carbide with a three-point back support scheme was proposed. The assembly mainly consists of four parts, namely mirror, cone, flexure, and base, with a designed weight of 30.5 kg. Due to the special preparation process, the semi-closed mirror blank has a thin-walled structure with a facepanel of only 5 mm thick and the discretely arranged datums as a reference for positioning. Different supporting effects for mirrors with a large aspect ratio were discussed, and thus the optimal support position was determined. The working principle of the flexure with biaxial orthogonal hinges was explained, and the size parameters of the flexible hinges were determined to balance the thermal stability and dynamic characteristics of the assembly. Based on the neutral plane theory, the position of the hinges was also optimized to achieve the best gravity-unloading effect. Simulations reveal that the root mean square (RMS) value of surface accuracy change of the flat mirror caused by gravity during the test is 1.812 nm, with a tilt of 3.639" for the mirror blank. In the compound working condition where factors such as gravity, temperature change, and interface unflatness work together, the surface accuracy change is RMS only 5.044 nm. Using a large interferometer with an aperture of 600 mm, zonal detection was adopted in the surface accuracy test for the flat mirror after polishing, and the tested RMS values were 0.0203λ , 0.0197λ , and 0.0204λ ($\lambda=632.8$ nm), corresponding to the left, middle, and right zones respectively. The surface accuracy of each zone reaches an RMS of $\lambda/50$, and for any sub-aperture within $\varphi=140$ mm, it is significantly better than RMS $\lambda/50$, fully meeting the design metrics. In the overturn test, the assembly was rotated 180° around its optical axis, and the surface accuracy of each zone was retested, achieving the results of RMS 0.0213λ for the left, 0.0204λ for the middle, and 0.0207λ for the right. The RMS value change of the same zone does not exceed $\lambda/1000$, indicating that the developed structure can effectively control the gravitational deformation during the test. The measured fundamental frequency of the assembly is 132.5Hz, with a difference of about 2.5% from simulations. The surface accuracy of each sub-zone remains basically unchanged after the vibration test and thermal recycle test, indicating that the assembly structure is reliable and the high-precision surface of the flat mirror has good stability. The related work has important reference significance for the development of large-sized and high-precision space mirrors.

Yuan J, Zhang L, Pei S Y, et al. Structure design of flat mirror with large aspect ratio for space camera[J]. *Opto-Electron Eng*, 2025, 52(5): 250006; DOI: [10.12086/oe.2025.250006](https://doi.org/10.12086/oe.2025.250006)

Foundation item: Jilin Province Science and Technology Development Plan Project (20210509052RQ)

Chang Guang Satellite Technology Co., Ltd., Changchun, Jilin 130033, China

* E-mail: zhanglei@jl1.cn