

激光与光电子学进展

新型中小口径反射镜消热刚性支撑结构设计

袁健, 张雷*

长光卫星技术股份有限公司, 吉林 长春 130033

摘要 为解决传统柔性支撑中小口径空间反射镜组件热稳定性与结构刚度间的矛盾,提出了一种新型刚性支撑结构,并为某高分辨率空间相机研制了通光口径 $\phi 214$ mm的高精度次镜组件。采用“镜体-锥套-支撑筒-刚性基板”组合,通过延长、优化热应力在组件内部的传递路径实现了消热目的。刚性支撑次镜组件重 2.6 kg、4 °C 均匀温升工况下面形变化均方根(RMS)仿真值为 2.573 nm,装调重力工况下镜体倾角和位移分别为 2.028"、0.566 μm ,与传统柔性支撑方案相比具有突出的优势。实测次镜的面形精度 RMS 为 0.0181 λ ($\lambda=632.8$ nm),在 16 °C 及 24 °C 时次镜面形变化量不超过 0.0025 λ ;组件基频达到 502.1 Hz,在快速高低温循环及大量级振动后次镜面形基本维持不变;装配容差测试中,次镜在 0.02 mm 不平度的作用下仅发生微弱变形。刚性支撑结构可以显著提升中小口径反射镜工作性能,在遥感器光机结构研制领域内具有广阔的应用前景。

关键词 空间光学; 反射镜; 刚性支撑; 消热; 面形精度稳定性

中图分类号 V447.1

文献标志码 A

DOI: 10.3788/LOP222590

Novel Design of Athermal and Rigid Support Structure for Small- and Medium-Aperture Mirrors

Yuan Jian, Zhang Lei*

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

Abstract A novel rigid support structure is proposed in this paper to solve the contradiction between thermal stability and structural stiffness in small- and medium-aperture space mirrors assembled using traditional flexible supports. Additionally, a high-precision secondary mirror assembly with a clear aperture of $\phi 214$ mm is developed for a high-resolution space camera. The combination of a mirror body, cone, support cylinder, and rigid base plate is adopted to realize heat dissipation by extending and optimizing the transmission path of the thermal stress within the assembly. The secondary mirror assembly with a rigid support structure weighs 2.6 kg, and the surface accuracy change has a root-mean-square (RMS) value of 2.573 nm in the simulation under the condition of a 4 °C uniform temperature rise. The inclination and displacement of the mirror body subjected to the gravity test are 2.028" and 0.566 μm , respectively, revealing the outstanding advantages of the proposed scheme over traditional flexible support systems. The measured surface accuracy RMS value of the secondary mirror is 0.0181 λ ($\lambda=632.8$ nm), and the changes in the surface accuracy at 16 and 24 °C do not exceed 0.0025 λ . The fundamental frequency of the assembly reaches 502.1 Hz, and the surface accuracy of the secondary mirror remains relatively unchanged after rapid heat cycles and large-scale vibrations. In the assembling tolerance test, the secondary mirror is only slightly deformed under 0.02 mm unevenness. The proposed rigid support structure can significantly improve the working performance of small- and medium-aperture mirrors and has broad application prospects in the optomechanical structural design of remote sensors.

Key words space optics; mirror; rigid support; athermal; surface accuracy stability

1 引言

随着各国空间遥感图像数据应用水平飞速发展,用户对遥感器探测能力的要求不断提升,光机部组件

研制难度逐步增加^[1-3]。作为光学系统中的重要环节,中小口径反射镜在不同类型、口径、工作波段的空间相机中都得到了广泛应用,其支撑结构要能够抑制温度波动和装配应力对高精度面形的影响,还要具有足够

收稿日期: 2022-09-20; 修回日期: 2022-10-10; 录用日期: 2022-11-17; 网络首发日期: 2022-11-27

通信作者: *18686344285@163.com

的结构刚度,以维持光学元件间相对位置、保证组件具有较高的基频,如何进一步提升中小口径反射镜的工作性能备受关注^[4-5]。

近年来,学者们持续改良优化高性能中小口径空间反射镜的支撑方案。Wang 等^[6]为口径 99 mm×85 mm 的实心矩形镜设计了框架式支撑结构,采用两组柔性凹槽并优化其布局,有效地减轻了各种误差源引起的镜面面形精度误差;邵梦旗等^[7]将背部三点支撑应用到 $\phi 216$ mm 超轻反射镜组件中,设计了一种折臂梁式柔性支撑并开展多目标集成优化,制备的反射镜具备良好的稳定性;胡洋等^[8]采用中心支撑方案完成了口径为 218 mm×166 mm 的离轴微晶反射镜组件设计,使用钢钢柔性芯轴以消除温度变化和胶层固化收缩带来的应力;张丽敏等^[9]采用 Bipod 形式柔性支腿完成了 $\phi 100$ mm 微晶反射镜侧边支撑结构设计,提高了实际工作条件下小型反射镜的面形精度;武永见等^[10]研究了 Bipod 柔性支撑结构反射镜组件中的胶接应力,通过热浸泡和振动消应力解决了反射镜在热真空试验后面形下降的问题,其研制的 $\phi 280$ mm 超低膨胀率玻璃 (ULE) 反射镜最终面形精度达到 0.014 λ ($\lambda=632.8$ nm)。

中心单点支撑形式具有结构紧凑、装配简单等优点,是中小口径空间反射镜实现高轻量化率及高环境适应性的理想方案。其中使用最广泛的是柔性支撑结构,即向反射镜的支撑零件中增加柔性环节(如切槽或薄板)^[11-12],当环境温度改变时,柔性结构变形吸收结构内部的应变能;然而,柔性结构导致组件整体刚度降低,增加了地面装调状态下光学元件因重力产生的偏心 and 倾角,入轨后该变形量回弹,影响光学系统成像质量。因此,有必要深入研究中小口径空间反射镜的消热原理,开发同时具备高环境适应性及高刚度特征的新型支撑结构。

本文以某高分辨率长焦距离轴三反相机中通光口径 $\phi 214$ mm 的次镜组件为研究对象,提出一种新颖的具备良好热稳定性的刚性支撑方案,详述了组件结构特征;与传统柔性结构进行对比,阐述了刚性支撑结构的消热原理和优异性能;对研制的次镜组件实物开展详细测试与试验,充分考核新型刚性支撑结构的工作性能。

2 设计要求

空间相机采用无中间像面的离轴三反射式光路,如图 1 所示。可见光波段地面像元分辨率达到亚米级、幅宽大于 130 km^[13]。该相机具有突出的高分辨率、长焦距特征,为保证成像质量,对系统内各主要光学元件的反射面面形精度及彼此间的相对位置精度都提出了严格的要求^[14]。次镜通光口径 $\phi 214$ mm,作为光学系统内的孔径光阑,其面形精度对各视场的波像差均有影响,次镜面形精度的均方根(RMS)应优于 1/50 λ 。通常将光轴水平状态作为反射镜组件检测及系

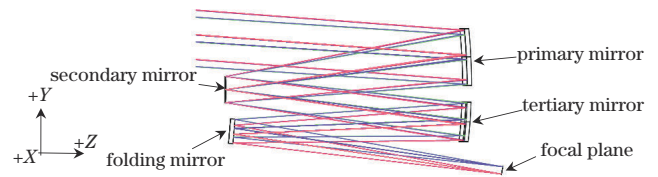


图 1 离轴三反相机光路

Fig.1 Optical path of the off-axis three mirror anastigmat camera

统装调状态,若缺乏足够的静态刚度,次镜组件受重力影响会产生较大的镜面变形以及镜体位移和倾斜,入轨后该变形量释放、向系统内引入误差,导致成像质量严重退化;地面及在轨工作期间都存在一定温度波动,为了保证装调顺利开展、相机工作状态稳定一致,要求次镜组件在宽温范围内都能保持良好的面形精度。此外,为适应运载发射的动力学条件及整机的重量限制,次镜组件还应满足相应的基频和重量要求。综上,设计次镜组件时的技术指标,如表 1 所示。

表 1 次镜组件设计要求

Table 1 Design requirements for secondary mirror assembly

Item	Requirement
Clear aperture	$\phi 214$ mm
Mass	≤ 3 kg
Surface accuracy	$RMS \leq 1/50\lambda$ ($\lambda=632.8$ nm)
Tilt	$\theta_x \leq 3''$, $\theta_y \leq 3''$
Displacement	$\delta_x \leq 5 \mu\text{m}$, $\delta_y \leq 5 \mu\text{m}$
Temperature	$(20 \pm 4)^\circ\text{C}$
Frequency	≥ 200 Hz

3 刚性支撑结构设计

3.1 传统柔性支撑及其局限

采用传统柔性支撑的次镜组件通常由“镜体-芯轴-柔性基板”三部分组成,如图 2 所示。镜体结构与刚性支撑方案一致,后续将详细论述;芯轴由殷钢制造,内部中空,一端有法兰、可与基板连接,外壁为锥面、与镜体间粘接;基板为钛合金材质,使用线切割工艺在其上加工出同心分布的、3 层共 9 处柔性槽。在传统柔性支撑结构中,基板通常具备较大的柔性,其刚度显著低于镜体和芯轴;当基板固定而组件受热膨胀时,基板内的热应力经柔性槽的综合、弱化后,再经芯轴后直接作用到镜体,基板中的柔性环节最易发生局部变形,从而吸收组件内部的大部分应变能,减弱热应力向镜面的传导。

通过分析可知,传统柔性支撑结构通过增加机械件局部柔性的方法,降低镜面处的热变形,从而提高组件整体热稳定性,但该方法也牺牲了组件刚度,势必带来较大的自重变形和更低的基频。可见,采用传统柔性支撑的中小口径反射镜,其面形精度的温度适应性和组件刚度二者之间存在固有矛盾,制约了光学系统性能的进一步提升。

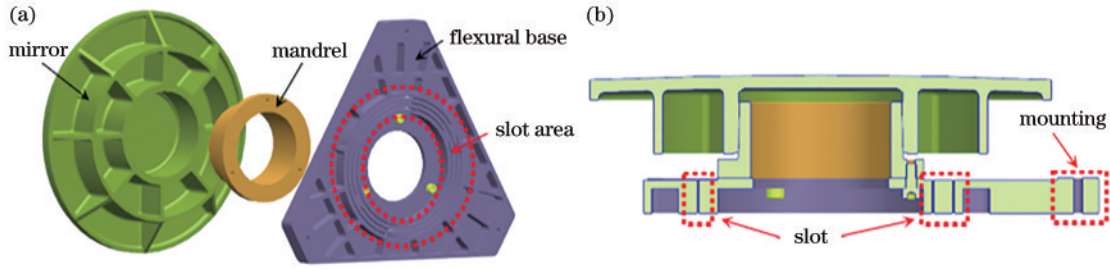


图2 采用传统柔性支撑结构的次镜。(a)内部组件;(b)装配关系

Fig. 2 Secondary mirror with conventional flexural support. (a) Internal components; (b) assembling relationship

3.2 新型刚性支撑结构

提出的新型刚性支撑结构主要由“镜体-锥套-支撑筒-刚性基板”4部分组成,其与传统柔性支撑间的最大区别在于基板上取消了柔性槽的设置,组件内各零件均为刚性结构,同时,用锥套与支撑筒的组合取代了芯轴,零件数量有所增加。

采用刚性支撑的次镜组件内部结构,如图3所示。设计重量2.6 kg,各零件材料及物理属性,如表2所示。其中:次镜镜体采用反应烧结碳化硅(RB-SiC)制备,外径 $\phi 224$ mm, RB-SiC 刚度高、热稳定性好,可以提升镜体轻量化率、减小热畸变^[15-16],是高性能对地观测遥感

器中反射镜的首选材料;镜体为背部开放式结构,轻量化腔体为扇形,边缘具有削边以减轻重量,镜体中心设置锥孔,用来安装支撑结构;经优化后镜体设计重量为1.16 kg,镜面厚度为5 mm,加强筋最薄处为3 mm。碗形锥套通过锥面与镜体锥孔粘接,为减小线胀系数差异及镜体热变形,锥套采用钢制造,并将其线胀系数调制为与RB-SiC基本一致。杯状支撑筒为薄壁、旋转对称结构,采用钛合金制造,顶部通过螺钉与锥套固连,底部设有一圈法兰与基板连接。基板采用铝基碳化硅复合材料(SiC/Al)加工并进行轻量化处理,次镜组件通过基板边缘的3处安装区与相机框架相连。

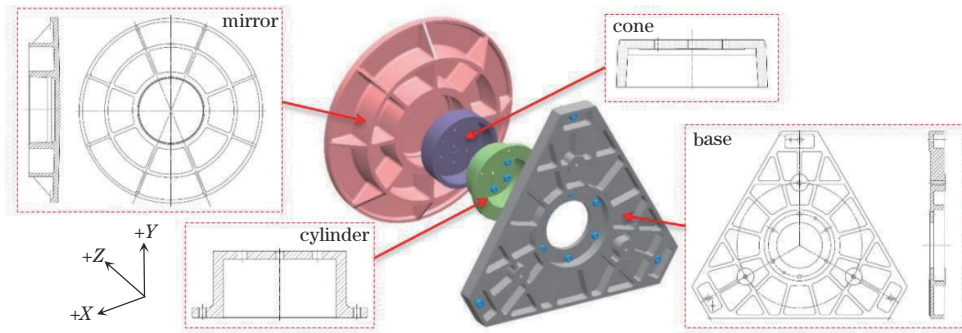


图3 刚性支撑详细结构

Fig. 3 Details of rigid support structure

表2 次镜组件材料属性

Table 2 Material properties of secondary mirror assembly

Property	Mirror	Cone	Cylinder	Base
Material & Type	RB-SiC	Invar (4J36)	Titanium (TC4)	SiC/Al
Density $\rho / (\text{kg} \cdot \text{m}^{-3})$	3.05	8.1	4.4	3.0
Elastic modulus E / GPa	340	141	114	180
Poisson ratio μ	0.20	0.25	0.34	0.18
Thermal expansion coefficient $\alpha / (10^{-6} \cdot \text{K}^{-1})$	2.5	2.5	9.1	8.0
Thermal conductivity $\lambda / (\text{W} \cdot \text{K}^{-1} \cdot \text{m}^{-1})$	180	10.4	7.4	225

不同于柔性支撑利用局部变形吸收热应力,刚性支撑的消热原理为:当环境温度变化时,组件发生热胀,基板安装区产生的约束反力首先从基板内部依次经过支撑筒的法兰、筒壁等部位向支撑筒顶面会聚,进而再从锥套中心区域向四周发散并均匀传递至锥套外壁,最终经锥孔传导至镜体,上述传力路径,如图4所

示。可见,刚性支撑结构通过引入锥套和支撑筒,延长了热应力在组件内部的传递路径,并优化了热应力的作用区域,使其均匀地作用在镜体上,充分利用了镜体自身刚度,从而实现了刚性结构吸收热应力、降低热变形的目的。

此外,刚性支撑的锥套、支撑筒均为旋转对称结构

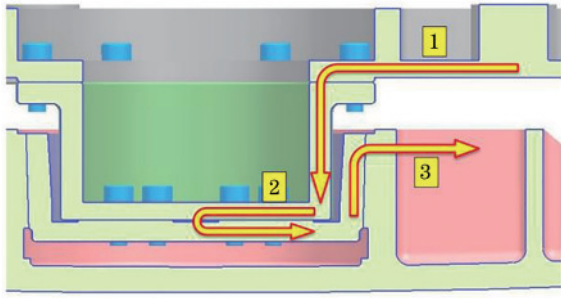


图 4 刚性支撑消热原理

Fig. 4 Athermal principle of rigid support

且基板不含柔性切槽,因而可以在消热的同时赋予组件很高的刚度,从而解决了反射镜柔性支撑中热稳定性与组件刚度间的矛盾。

3.3 仿真分析

空间反射镜在轨工作时面对的最大考验来自微重力环境和变化的温度场,装配中安装面的不平整也会导致镜面变形,对反射镜的工作性能造成影响。为评价次镜组件的环境适应性,建立次镜组件的有限元模型,如图 5 所示。各零件材料及其物理属性如表 2 所示,其中胶粘区域采用节点拟合的方式模拟胶层作用,螺钉连接位置采用孔周围一圈节点拟合的方式模拟零件间紧固。分析了装调重力(重力沿图 3 中 -Y 向加载)、4 °C 温升以及基板处 0.02 mm 不平度 3 种典型工

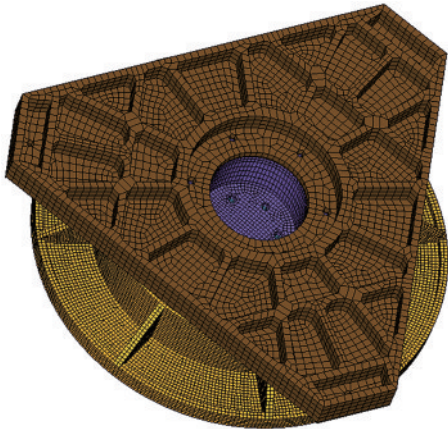


图 5 次镜组件有限元分析模型

Fig. 5 FEA model of secondary mirror assembly

表 5 2 种支撑结构工作性能比较

Table 5 Comparison of working characteristics between two support structures

Structure	Thermal deformation	Gravitational deformation during assembling			Dynamics
	RMS /nm	RMS /nm	$\delta_y / \mu\text{m}$	$\theta_x / (")$	Frequency /Hz
Rigid support	2.573	0.273	0.566	2.028	524.3
Flexural support	18.834	0.935	2.588	7.392	275.2

4 °C 均匀温升工况下 2 种支撑方案的热稳定性差异非常显著。温度工况下的变形云图,如图 6 所示,刚性支撑方案中次镜镜体的变形趋势非常均匀、等高线近似为同心圆环,而柔性支撑方案中镜体的变形则呈

况下次镜组件的变形情况,各工况下次镜镜面面形精度及相对位移、倾角数据,如表 3 所示。各项分析数据均能满足光学系统设计允差,其中,4 °C 温升工况下次镜镜面形变化 RMS 仅为 2.573 nm,重力工况下次镜位移为 0.566 μm 、倾角为 2.028",说明刚性支撑结构在有效控制镜面热变形的同时,镜体倾角和位移均很小。

表 3 主要工况下的仿真结果

Table 3 Simulation results under main loadcases

Load case	Deformation /nm		Displacement / μm			Tilt / (")	
	PV	RMS	δ_x	δ_y	δ_z	θ_x	θ_y
Y gravity	2.056	0.273	0	0.566	0	2.028	0
+4 °C	12.364	2.573	0	0	10.269	0.001	0.001
Unflatness	7.060	1.486					

约束基板上与相机框架间的接口位置,对次镜组件开展模态分析,得到组件的前 3 阶基频及相应振型,如表 4 所示。次镜组件一阶频率达到 524.3 Hz,其动力学特性能够满足空间遥感器的设计要求。

表 4 次镜组件模态分析结果

Table 4 Modal analysis results of secondary mirror assembly

Order	Frequency /Hz	Vibration mode
1st	524.3	Rotation of secondary mirror around Y axis
2nd	525.2	Rotation of secondary mirror around X axis
3rd	531.0	Vibration of secondary mirror along Z direction

4 刚性支撑与柔性支撑间的比较

将传统柔性支撑下次镜组件的主要工作性能与刚性支撑进行比较,结果如表 5 所示。在装调重力工况下,柔性支撑中镜体最大倾角和位移分别为 7.392"、2.588 μm ,而刚性支撑中镜体最大倾角和位移分别为 2.028"、0.566 μm ,相应数值仅为柔性支撑方案的 27.4%、21.9%;柔性支撑结构次镜组件的一阶基频为 275.2 Hz,刚性支撑结构的基频为 524.3 Hz,为柔性支撑的 1.9 倍。以上数据说明刚性支撑结构在静力学及动力学特性上都具备明显优势。

现出三角形,该趋势与基板上三处约束区域相对应;数值上,刚性支撑的面形变化 RMS 仅为 2.573 nm,而柔性支撑 RMS 则为 18.834 nm,为刚性支撑的 7.3 倍。可见,柔性支撑方案中柔性基板虽然吸收了温升工况下的

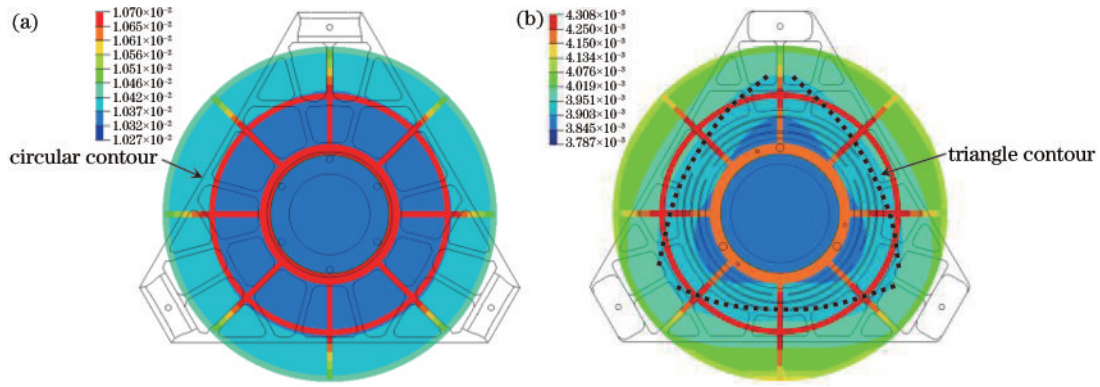


图6 温升工况下次镜变形云图。(a)新型刚性支撑;(b)传统柔性支撑

Fig. 6 Deformation nephogram under temperature rise loadcase. (a) Novel rigid support; (b) flexural support

大部分应变能,但由于热应力的作用路径短、过渡少,一部分约束反力仍较为直接地传递至镜面,形成了三叶式像散且变形量较大;刚性支撑中由于支撑筒和锥套的引入,热应力作用路径被大幅延长,且热应力先汇聚在支撑筒和锥套上、再均匀地作用到镜体锥孔上,所以镜体的变形云图呈现同心圆分布且变形量较小。综上,由于采用了不同的消热原理,刚性支撑结构取得了更加显著的消热效果。

虽然本节中的传统柔性支撑方案未经充分优化,但其原理上无法克服温度适应性与组件自重变形及基频之间的矛盾,使其优化后的工作性能仍落后于新型刚性支撑。此外,提出的刚性支撑结构还具有制造工艺简单、可靠性高、成本低等优点。

5 试验验证

5.1 面形精度检测

根据提出的刚性支撑方案研制了新型次镜组件,对光学加工后的次镜开展了面形精度检测。次镜反射面为一凸双曲面,且顶点曲率半径较大,使用弯月镜作为补偿器,弯月镜口径 $\phi 250$ mm,材料为熔石英,使用4D干涉仪(型号为PhaseCam 6000)配合大F数球面波镜头,光路如图7(a)所示。干涉仪发出的球面波束透过弯月镜后在次镜上发生第一次反射,反射波束照在弯月镜的后表面上并原路返回,波束在次镜上发生第2次反射后回波再次透过弯月镜并返回干涉仪,由于激光波束在次镜处共发生2次反射,干涉仪的干涉比例因子(ISF)设置为0.25,该检测方法具有检具制备简单、操作方便、检测精度高等优点。整个光路放置在气浮平台上,控制检测室环境温度在 (20 ± 0.5) °C范围内,降低气流和人员活动对面形测试带来的影响,如图7(b)所示。

次镜组件在检测时保持光轴水平状态。组件整体呈现 120° 中心对称形式,因此将组件分别绕光轴旋转 0° 、 120° 、 240° ,分别检测3个姿态下次镜的面形精度RMS,依次为 0.0181λ 、 0.0187λ 、 0.0193λ ($\lambda = 632.8$ nm),如图7(c)所示,镜面高低点分布相对均

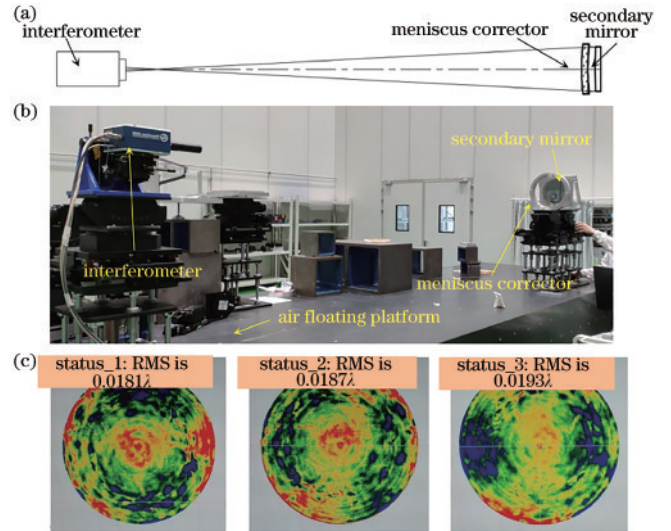


图7 次镜面形精度检测。(a)测试光路;(b)试验场地布置;(c)干涉图

Fig. 7 Surface accuracy test of secondary mirror. (a) Testing optical path; (b) layout of test site; (c) interferogram

匀且残留像散跟随一同转动。以上测试数据表明:本文次镜面形精度RMS优于 $\lambda/50$,能够满足光学系统设计的要求;3个姿态次镜RMS间的差距不超过 0.002λ ,表明重力对次镜面形精度的影响很小,镜面误差主要为抛光残留误差,也侧面说明在轨时次镜镜面的回弹量很小,可以保证遥感器良好的工作状态。

5.2 温度试验

为测试刚性支撑次镜组件的温度适应性,开展了温度拉偏面形测试。借助空调控制检测室环境温度分别为 16°C 、 24°C ,待静置充分、温度平衡后测试次镜面形精度。次镜在不同温度下的面形检测结果,如表6所示,低温工况和高温工况的RMS分别为 0.0197λ 、 0.0206λ ,较 20°C 的RMS变化不超过 0.0025λ ,与前文仿真结果基本一致。可见次镜在 $16\sim 24^\circ\text{C}$ 范围内均能够维持高精度面形,刚性消热结构可以抵御温度变化带来的不利影响。

表 6 不同阶段次镜面形精度检测结果

Table 6 Test results of surface accuracy at different stages

Surface accuracy	Temperature test			After heat recycle	After vibration	Unflatness test	
	16 °C	20 °C	24 °C			0.02 mm	0.04 mm
RMS /λ	0.0197	0.0181	0.0206	0.0185	0.0183	0.0189	0.0201

对次镜组件开展了高低温循环试验,该试验可以暴露组件内潜在的不稳定因素,验证反射镜长期面形稳定性。试验使用快速温变箱,温度变化速率为 3~5 °C/min、温度范围为 0~40 °C、恒温保持时间为 2 h。试验后在室温下复检次镜面形精度,如表 6 所示,RMS 未发生明显变化,说明采用刚性支撑的高精度次镜组件具备良好的长期面形稳定性。

5.3 振动试验

对次镜组件进行了扫频试验,如图 8 所示,测得

3 个方向的基频分别为 X 向 502.1 Hz、Y 向 503.4 Hz、Z 向 548.3 Hz,与模态分析数据最大偏差为 4.4%;又开展了 3 个方向 10~2000 Hz 范围、持续时间 120 s 的大量级随机振动,次镜镜体加速度响应最大值超过 10g RMS,试验后组件基频漂移量不超过 1%;复检次镜面形精度,其 RMS 基本维持稳定,如表 6 所示。可见采用刚性支撑的次镜组件具有基频高、可靠性好、面形稳定等突出优点。

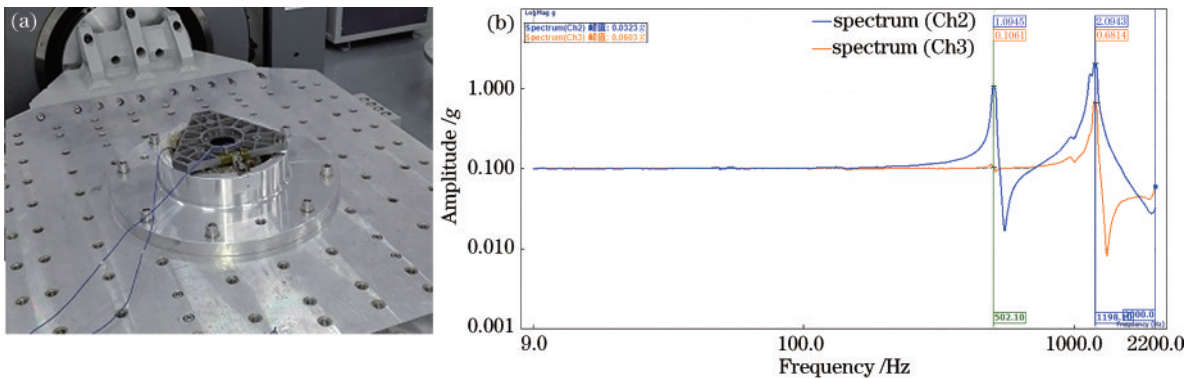


图 8 次镜组件振动试验。(a)试验场地;(b)X 方向扫描测试数据

Fig. 8 Vibration test for secondary mirror assembly. (a) Test site; (b) data of sweep test along X direction

5.4 装配容差测试

零件接触区的不平度以及装配应力会造成高精度反射镜面形精度衰减,为抵御外界干扰,反射镜组件需要具有大容差特性^[16]。选择一处接口位置,将数张厚度为 0.01 mm 的电容纸叠加后放入基板与工装间,重新安装后测试次镜的面形精度,以此模拟不同程度不平度对次镜面形精度的影响,如图 9 所示,典型厚度下测得的 RMS,如表 6 所示。当不平度为 0.02 mm 时,次镜面形 RMS 出现轻微变化;当不平度达到 0.04 mm

时,干涉图上出现扭曲、较大像散,此时将电容器纸抽出并正常安装,次镜面形随即恢复至初始高精度状态。测试结果说明:采用刚性支撑的次镜对接口位置的不平度影响不敏感,组件对外界干扰的适应性较强。

6 结 论

提出了一种适用于中小口径空间反射镜的新型刚性支撑结构,并研制了某离轴三反相机中通光口径为 φ214 mm 的高精度次镜组件。该结构由“镜体-锥套-支撑筒-刚性基板”4 部分组成,通过延长传力路径优化热应力在镜体内的分布形式,显著降低了镜面变形,在 4 °C 均匀温升工况下次镜面形变化 RMS 仿真值仅为 2.573 nm;此外,由于刚性支撑的结构刚度高,因而次镜组件在重力变形和动力学特性方面也较传统柔性支撑有大幅度提升。

经实测,次镜的面形精度 RMS 优于 1/50λ,且组件刚度高、装调重力对镜面的影响十分微小;环境温度在 ±4 °C 范围内变化时次镜仍能够维持高精度面形,新结构取得了良好的消热效果;次镜组件基频高,动力学特性满足空间遥感器设计要求;在大范围快速高温循环试验以及大量级随机振动试验前后次镜的面形

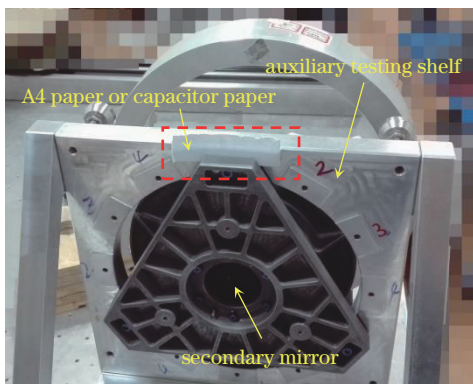


图 9 次镜模拟装配容差测试

Fig. 9 Simulated assembling tolerance test of secondary mirror

精度基本一致,证明组件装配合理、内部结构稳定,该方案具有良好的长期面形稳定性;当安装不平度达到 0.02 mm 时次镜仅发生微弱变形,组件具有一定容差特性,可以降低外界因素对其工作性能的干扰。

刚性支撑结构通过创新消热原理,解决了组件热稳定性与结构刚度之间的矛盾。提出的刚性支撑结构可以显著提升高精度遥感器内中小口径反射镜的工作性能,同时,该结构对热稳定性要求严苛的其他种类光学仪器设计也具有重要的借鉴和参考意义。

参 考 文 献

- [1] 齐一鸣,陈闽,王沫,等.我国商业遥感卫星的探索实践与发展建议[J].航天器工程,2021,30(6):188-194.
Qi Y M, Chen M, Wang M, et al. Exploration practice and development suggestions for commercial remote sensing satellites of China[J]. Spacecraft Engineering, 2021, 30(6): 188-194.
- [2] 张博文,王小勇,赵野,等.天基大口径反射镜支撑技术的发展[J].红外与激光工程,2018,47(11):1113001.
Zhang B W, Wang X Y, Zhao Y, et al. Progress of support technique of space-based large aperture mirror[J]. Infrared and Laser Engineering, 2018, 47(11): 1113001.
- [3] 张雷,邵梦旗,薛志鹏,等.微纳卫星高分辨视频相机光机结构与试验(特邀)[J].红外与激光工程,2021,50(10):20210477.
Zhang L, Shao M Q, Xue Z P, et al. Optomechanical structure design and experiment of high-resolution video camera for micro-nano satellite(Invited)[J]. Infrared and Laser Engineering, 2021, 50(10): 20210477.
- [4] 王升,丛杉珊,薛志鹏,等.一体式碳纤维次镜支撑结构设计[J].光学学报,2022,42(5):0522001.
Wang S, Cong S S, Xue Z P, et al. Design of integrated carbon fiber secondary mirror supporting structure[J]. Acta Optica Sinica, 2022, 42(5): 0522001.
- [5] 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.
Zhang L, Ke S L, Li L, et al. Optimum design of ultra-light mirror series flexible support structure[J]. Acta Photonica Sinica, 2018, 47(1): 0122001.
- [6] Wang K J, Dong J H, Wang X Y, et al. Design of frame-type support structure for space-based rectangular convex mirror tested on the back[J]. Optik, 2020, 212: 164673.
- [7] 邵梦旗,张雷,李林,等.超轻反射镜柔性支撑结构与试验[J].光子学报,2019,48(12):1222001.
Shao M Q, Zhang L, Li L, et al. Design and test of flexible supporting structure for ultra-light mirror[J]. Acta Photonica Sinica, 2019, 48(12): 1222001.
- [8] 胡洋,李季,贾学志.超轻离轴反射镜及柔性支撑优化设计[J].光学学报,2020,40(19):1923002.
Hu Y, Li J, Jia X Z. Optimal design of lightweight off-axis mirror and flexible support[J]. Acta Optica Sinica, 2020, 40(19): 1923002.
- [9] 张丽敏,王富国,安其昌,等. Bipod 柔性结构在小型反射镜支撑中的应用[J]. 光学精密工程, 2015, 23(2): 438-443.
Zhang L M, Wang F G, An Q C, et al. Application of Bipod to supporting structure of minitype reflector[J]. Optics and Precision Engineering, 2015, 23(2): 438-443.
- [10] 武永见,刘涌,孙欣.柔性支撑式空间反射镜胶接应力分析与消除[J].红外与激光工程,2022,51(4):20210496.
Wu Y J, Liu Y, Sun X. Analysis and elimination of adhesive bonding force of flexible supported space mirror[J]. Infrared and Laser Engineering, 2022, 51(4): 20210496.
- [11] Paul R. Yoder. 光机系统设计[M].周海宪,程云芳,译.3版.北京:机械工业出版社,2008:400-404.
Yoder P R. Opto-mechanical systems design[M]. Zhou H X, Cheng Y F, Transl. 3rd ed. Beijing: China Machine Press, 2008: 400-404.
- [12] 李宗轩,邢利娜,解鹏.视频空间相机 $\Phi 330$ mm口径主镜组件设计[J].光子学报,2016,45(7):0722003.
Li Z X, Xing L N, Xie P. Design of the $\Phi 330$ mm primary mirror assembly of spaceborne video camera[J]. Acta Photonica Sinica, 2016, 45(7): 0722003.
- [13] 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.
Wu H Y, Bai Y, Wang L L, et al. On-orbit geometric calibration and accuracy verification of Jilin1-KF01A WF camera[J]. Optics and Precision Engineering, 2021, 29(8): 1769-1781.
- [14] 钟兴,马驰,李艳杰,等.大视场离轴三反光学系统场曲特性与装调方法[J].光学学报,2021,41(9):0922001.
Zhong X, Ma C, Li Y J, et al. Field curvature characteristics and alignment method for the off-axis three-mirror optical system with wide field-of-view[J]. Acta Optica Sinica, 2021, 41(9): 0922001.
- [15] 王从敬,王东,黄鑫,等.大口径SiC轻量化主镜的优化与有限元分析[J].光学学报,2021,41(11):1122002.
Wang C J, Wang D, Huang X, et al. Optimization and finite element analysis of large-aperture SiC lightweight primary mirror[J]. Acta Optica Sinica, 2021, 41(11): 1122002.
- [16] 郭疆,朱磊,赵继,等.大口径空间反射镜大容差支撑结构与优化[J].光学精密工程,2019,27(5):1138-1147.
Guo J, Zhu L, Zhao J, et al. Design and optimize of high tolerance support structure for large aperture space mirror[J]. Optics and Precision Engineering, 2019, 27(5): 1138-1147.