中国光学（中英文）
Chinese Optics
Ei 核心期刊

大口径宽温反射镜中心支撑结构设计

袁健 裴思宇 霍占伟 张冠宸 张雷

Design of the central support structure of a large aperture mirror with a wide working temperature

YUAN Jian, PEI Si-yu, HUO Zhan-wei, ZHANG Guan-chen, ZHANG Lei

引用本文:
袁健, 裴思宇, 霍占伟, 张冠宸, 张雷. 大口径宽温反射镜中心支撑结构设计[J]. 中国光学, 2025, 18(1): 150−159. doi: 10.37188/CO.2024−0060
YUAN Jian, PEI Si-yu, HUO Zhan-wei, ZHANG Guan-chen, ZHANG Lei. Design of the central support structure of a large aperture mirror with a wide working temperature[J]. *Chinese Optics*, 2025, 18(1): 150-159. doi: 10.37188/CO.2024-0060

在线阅读 View online: https://doi.org/10.37188/CO.2024−0060

文章编号　2097-1842(2025)01-0150-10

大口径宽温反射镜中心支撑结构设计

袁　健，裴思宇，霍占伟，张冠宸，张　雷*
（长光卫星技术股份有限公司，吉林 长春 130033）

摘要：为提升低轨卫星与地面站间激光链路的通信质量，商业地面站内望远镜配备的大口径主镜需适应户外环境中恶劣的温度条件。针对某通光口径Φ500 mm 的高精度主镜组件，提出一种使用室温硫化硅橡胶的中心支撑方案。镜体采用微晶材料，衬套和支撑筒均为钛合金材质。1 mm 厚的胶层在卸载镜体自身重力的同时，可有效减小组件内部热应力。胶层的厚度和高度可通过仿真优化确定，特制的粘接工装可准确控制胶层形状和厚度，衬套上的通气孔促进了胶层的充分固化。仿真分析表明：主镜在 40 °C 温度均匀变化工况下的面形精度 RMS 值为 4.199 nm；光轴竖直重力工况下的 RMS 值为 13.748 nm；光轴水平重力工况下的 RMS 值为 4.187 nm，镜体最大倾角和位移分别为 4.722″和 3.597 μm，组件基频达到 53.45 Hz；实测主镜的面形精度为 RMS 0.017λ (λ=632.8 nm)，经大范围高低温循环试验及真空镀膜后，主镜均可保持高精度面形。文中支撑结构可以显著提升高精度反射镜的温度适应能力，在地面大型光电设备中具有广阔的应用前景。

关　键　词：宽温反射镜；室温硫化硅橡胶；热稳定性；地基望远镜；激光通信
中图分类号：V447.1　　**文献标志码：**A　　**doi：**10.37188/CO.2024-0060　　**CSTR：**32171.14.CO.2024-0060

Design of the central support structure of a large aperture mirror with a wide working temperature

YUAN Jian, PEI Si-yu, HUO Zhan-wei, ZHANG Guan-chen, ZHANG Lei*
(*Chang Guang Satellite Technology Co., Ltd., Changchun* 130033, *China*)
* *Corresponding author, E-mail: zhanglei@jl1.cn*

Abstract: In order to improve the communication quality of LEO-OGS laser links, commercial ground station telescopes equipped with large aperture primary mirrors must be able to withstand extreme outdoor temperature. A central support scheme using room-temperature vulcanizing silicone rubber was proposed for a high-precision primary mirror with an optical aperture of 500 mm. The mirror is made of microcrystal material, and both of the bushing and the supporting cylinder are made of titanium alloy. A 1-mm-thick adhesive layer is used, which can effectively reduce the thermal stress inside the assembly during temperature changes while unloading the gravity of the mirror blank. The thickness and height of the adhesive layer are determined by optimization. A specially designed fixture can accurately control the shape and thickness of the adhesive layer. The ventilation holes on the bushing promote its full solidification. Simulation analysis indicates that the surface shape accuracy of the primary mirror is 4.199 nm in RMS under 40 °C temperature vari-

收稿日期：2024-03-25；**修订日期：**2024-04-09
基金项目：吉林省科技发展计划资助项目（No. 20210509052RQ）
Supported by Science and Technology Development Plan Project of Jilin Province (No. 20210509052RQ)

ation, with 13.748 nm under vertical gravity and 4.187 nm under horizontal gravity, accompanied by the maximum mirror inclination and displacement of 4.722" and 3.597 μm, and the fundamental frequency of the assembly reaches 53.45 Hz. The measured surface shape accuracy of the primary mirror is RMS 0.017λ (λ=632.8 nm). The surface can maintain high precision after extensive heat cycling tests and vacuum coating. The central support structure can significantly improve the temperature adaptability of precise mirrors and has broad application prospects in large-scale ground optoelectronic equipment.

Key words: wide working temperature mirror; room temperature vulcanized silicone rubber; thermal stability; ground-based telescope; laser communication

1　引　言

随着商业遥感行业的快速发展,星地间数据传输总量激增,传输速率不足已成为制约遥感星座服务能力提升的瓶颈问题[1-2]。低轨卫星与地面站间的激光通信不仅具有速率高、保密性好等优点,还避免了对有限的射频谱段的争夺,被视作未来星地间信息传输中最具商业潜力的通信模式之一[3-4]。作为商业化激光通信地面站(后文简称“商业地面站”)的重要组成部分,望远镜起到收集激光能量、放大通信功率的作用,其工作性能直接影响激光链路的通信质量。

为避免湍流造成的功率衰减,商业地面站中望远镜缺乏类似航天遥感载荷中的热控措施,作为望远镜中的核心部件,主镜将面对不同季节户外大范围温度变化的挑战,因此,提高主镜的温度适应范围、维持优良的面形质量是此类装置设计者要考虑的核心问题之一。此外,望远镜在跟踪卫星时仰角不断变化,设计者还要考虑变方位重力作用对主镜的影响,并兼顾设备的轻小型化和高性价比等商业化要求,进一步提升了望远镜主镜支撑结构的设计难度。

学者们针对地基光电设备大口径反射镜支撑结构展开深入研究。谢军[5] 等人通过参数化建模和拓扑优化,对某Φ1 000 mm 口径微晶主镜的 whiffle-tree 形式轴向浮动支撑进行改良,分析得到该主镜面形精度误差 RMS 值在光轴竖直时为 8.38 nm、环境温度为−20 °C 时约为 35 nm。赵天娇[6] 等人研究了某Φ600 mm 口径、使用浮动支撑和重锤平衡杠杆相结合镜室支撑系统的微晶主镜在重力作用下的变形情况,通过将实测数据与有限元分析相结合,评估出光轴从水平变化至竖直过程中的主镜面形误差。张岩[7] 等人在某Φ700 mm 口径高分辨率光学成像望远镜中,使用轴向浮动和侧向芯轴相结合的支撑方式完成了主镜组件设计,主镜面形精度分析值优于 $\lambda/40$ (λ=632.8 nm)。李鑫[8] 等人研究了复杂外场环境中商业地面站望远镜内温度场的分布情况,评估了外场环境对望远镜工作性能的影响,并提出保障通信质量的合理建议。针对重力作用导致的望远镜光轴指向变化问题,王洪浩等人提出了光轴变化检测与修正方法,将 4 m 口径望远镜的光轴最大相对转角变化降至 2.8″[9] 等。

传统的地基光电设备主镜镜室内部零件数量多、装配过程复杂,导致相关产品体积庞大、使用约束多,不能适应商业地面站频繁运输转移、工作环境存在剧烈变动的使用要求。本文以某商业地面站中通光口径为Φ500 mm 的主镜为研究对象,为提升其在户外环境中的工作性能,提出一种基于室温硫化硅橡胶(room temperature vulcanized silicone rubber, 简称 RTV),采用中心支撑形式的宽温反射镜支撑结构。论述了该支撑结构的方案组成和关键参数的优化过程,给出了典型工况下的仿真分析数据,介绍了胶粘工艺的实施过程,并通过一系列环境试验和外场测试,对研制的主镜实物加以考核。

2　宽温中心支撑结构设计

2.1　热变形原理

环境温度对高精度光学元件面形质量的影响非常显著。采用中心支撑方案的主镜组件内部结构及热变形原理如图 1 所示。其中: ε_r、ε_θ、ε_z 分别为胶层的径向、切向、轴向应变; σ_r、σ_θ、σ_z 分别为胶层的径向、切向、轴向应力; r_b、r_m 分别为衬

套外径、镜体内径；t 为胶层厚度。当环境温度改变时，胶层发生形变，镜体承受的热应力实际来自于粘接面处胶层的径向应力 σ_r。

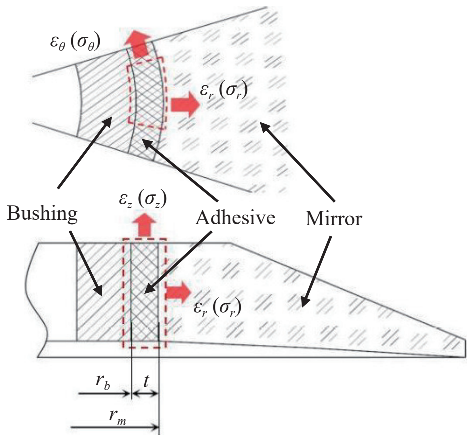


图 1 反射镜热变形示意图

Fig. 1 Schematic diagram of thermal deformation of mirror

胶层可视为各向同性材料且变形很小，根据材料力学中的广义胡克定律，胶层的径向应力 σ_r、切向应力 σ_θ 和轴向应力 σ_z 分别记为：

$$\sigma_r = E\varepsilon_r + \mu(\sigma_\theta + \sigma_z) \quad , \tag{1}$$

$$\sigma_\theta = E\varepsilon_\theta + \mu(\sigma_r + \sigma_z) \quad , \tag{2}$$

$$\sigma_z = E\varepsilon_z + \mu(\sigma_r + \sigma_\theta) \quad , \tag{3}$$

其中，E 为胶层的弹性模量，μ 为泊松比。由以上 3 式可得胶层径向应力 σ_r 的表达式为：

$$\sigma_r = \frac{E}{(1-2\mu)(1+\mu)}[(1-\mu)\varepsilon_r + \mu(\varepsilon_\theta + \varepsilon_z)] . \tag{4}$$

可见，胶层径向应力 σ_r 由其在 3 个方向上的应变决定。胶层在径向上的应变与胶层厚度、衬套尺寸有关，根据组件径向上的几何关系，胶层径向应变 ε_r 可以记为：

$$\varepsilon_r = [(\alpha_A - \alpha_M) + (\alpha_B - \alpha_M)\cdot r_b/t]\cdot\Delta T \quad , \tag{5}$$

式中 α_A、α_B、α_M 分别为胶层、衬套、镜体的线胀系数，ΔT 为温度变化量。考虑到圆环形胶层在受热膨胀时会受到镜体和衬套的共同限制，参考 Van Bezooijen 方程，将镜体与衬套二者热膨胀的平均值视作胶层在热变形条件下的约束尺寸，此时，胶层切向应变 ε_θ 和轴向应变 ε_z 可记为[10-11]：

$$\varepsilon_\theta = \varepsilon_z = \left(\alpha_A - \frac{\alpha_B + \alpha_M}{2}\right)\cdot\Delta T \quad . \tag{6}$$

将式(5)、式(6)带入式(4)可得胶层径向应力 σ_r 的最终表达式为：

$$\sigma_r = \frac{E\cdot\Delta T}{(1-2\mu)(1+\mu)}\cdot\left\{(1+\mu)\alpha_A + \left[(1-\mu)\cdot\frac{r_b}{t} - \mu\right]\alpha_B - \left[(1-\mu)\cdot\frac{r_b}{t} + 1\right]\alpha_M\right\} . \tag{7}$$

从式(7)可知，当镜体和衬套的材料及尺寸确定后，影响胶层径向应力 σ_r 的主要因素是胶层的弹性模量 E 和线胀系数 α_A，此外，适当地增加胶层厚度也可以降低胶层径向应力。

本文在中心支撑方案内部的“光-机”界面处布置了厚度为 1 mm 的 RTV 胶层，固化后的 RTV 质地柔软，其物理属性类似于橡胶材料，线胀系数约为常见金属材料的十倍左右，而弹性模量仅约为常见环氧类结构胶的数百分之一[12-13]。综合来看，RTV 的弹性模量对胶层径向应力的大小起决定性作用。结合式(7)中的数值关系，由于 RTV 的弹性模量很小，即使环境温度存在较大温差时，胶层径向应力也能得到有效控制，从而可以起到减小主镜热应力、提高反射镜温度适应性的目的。

2.2 主要设计指标

光学天线的信号收集能力与通光口径的平方成正比，为保证通信链路中功率裕量充足，兼顾制造成本，望远镜主镜的通光口径确定为 Φ500 mm。商业地面站在跟踪低轨卫星的过程中，望远镜的俯仰角度时刻发生变化，同时，户外的工作环境严苛，不同季节、不同时间段的环境温度存在显著差异。为确保维持高速率激光通信链路的稳定传输，望远镜主镜的支撑结构需保证其在变方位的重力作用下以及环境温度出现大范围变化时，都能够维持优良的面形精度，且镜体位移、转角均要处于较小量级。商业地面站使用 IM-DD 通信体制，作为能量收集系统，对望远镜中大口径主镜面形精度的要求可以适当放宽，但考虑到主镜在低温工作时可能出现面形精度退化的问题，故应为主镜留出适量的面形精度退化空间。将主镜的面形精度指标定为 RMS 值优于 1/30λ (λ=632.8nm)。作为地面装备，主镜组件的轻量化率要求可适当放宽，组件基频则需满足常规的防风和抗震需求。综上所述，给出主镜组件的主要设计指标如表 1 所示。

表 1　商业地面站中主镜组件的主要设计指标

Tab. 1　Main design metrics for primary mirror components in commercial ground station

No.	Item	Requirement
1	Clear aperture	Φ500 mm
2	Elevation during pointing	From horizontal to vertical
3	Deformation under gravity	Tilt: $\theta_X \leqslant 10''$, $\theta_Y \leqslant 10''$ Displacement: $\delta_X \leqslant 20$ μm, $\delta_Y \leqslant 20$ μm
4	Working temperature range	−20 °C~40 °C
5	Surface accuracy	RMS≤1/30λ (λ=632.8 nm)
6	Mass	≤30 kg
7	Frequency	≥30 Hz

2.3　反射镜支撑方案

地基光电设备中Φ500 mm 口径量级反射镜的支撑结构一般采用侧边与背部相结合的复合支撑方案[5-7], 但此类结构零件数量众多、装配过程复杂, 且设备沉重、体积庞大。

本文主镜采用中心支撑方案, 组件主要由镜体、胶层、衬套、支撑筒等 4 部分组成, 如图 2 所示。组件设计重量为 20.4 kg, 其中镜体重 18.7 kg。考虑到户外工作时的环境温度变化较为剧烈, 为减小镜体因热胀冷缩导致的曲率半径变化, 镜体材料选择微晶玻璃、其线胀系数接近于零[14]。镜体背部呈伞形、中心具有通孔, 胶层位于镜体与衬套之间, 由室温硫化硅橡胶固化后形成。衬套为薄壁结构, 其外圆柱面是与镜体之间的粘接面, 顶部通过法兰与支撑筒固连, 支撑筒的后端则为整个主镜组件提供安装接口。衬套侧壁上布置了通气孔以促进胶层固化, 衬套上沿设计了螺纹、方便与粘接工装连接, 实现对胶层厚度和形状的严格控制。

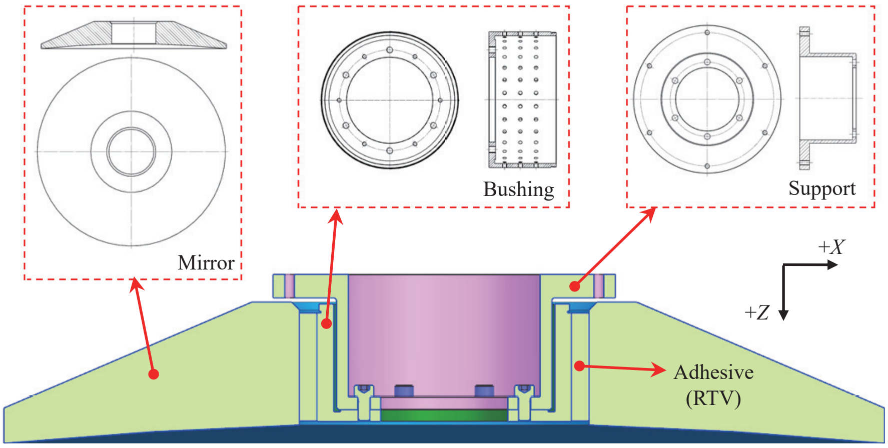


图 2　主镜组件中心支撑方案

Fig. 2　Central supporting scheme for primary mirror assembly

高性能光学遥感器中反射镜的支撑结构材料较多采用线胀系数较小的铟钢, 然而, 铟钢零件重量大(其密度为 8.1 g/cm^3), 且在户外潮湿环境中易腐蚀, 不适用于商业地面站特殊的应用场景。文中衬套、支撑筒均由钛合金(TC4)制造。钛合金的线胀系数在金属材料中相对较低, 并具有比刚度高、化学性质稳定等优点, 既可减轻组件重量, 还能避免支撑结构长期暴露在户外环境中导致的腐蚀。主镜组件采用 RTV 作为胶粘剂, 当衬套发生较显著热变形时, 弹性模量仅为 1.1 MPa 的 RTV 胶层所产生的热应力很小, 从而有效控制了衬套热变形对主镜面形精度的影响。

上述基于 RTV 的中心支撑方案不仅精简了主镜组件结构、体积紧凑, 且反射镜装配关系简单、受力状态单一, 可以提高大口径反射镜在户外环境中的工作可靠性, 是商业化地面站中高精度、高环境适应性主镜较为理想的支撑方案。

3　优化与分析

3.1　主镜组件建模

建立的中心支撑方案主镜组件有限元模型如图 3(彩图见期刊电子版)所示, 其中, 用一层六面体单元模拟胶层并赋予其各向同性材料属性, 胶层与镜体和衬套的粘接面通过节点拟合进行连接, 螺钉连接处采用孔周边一圈节点拟合的方式

处理，以模拟螺钉紧固。组件内各部分的材料及主要物理属性如表 2所示。

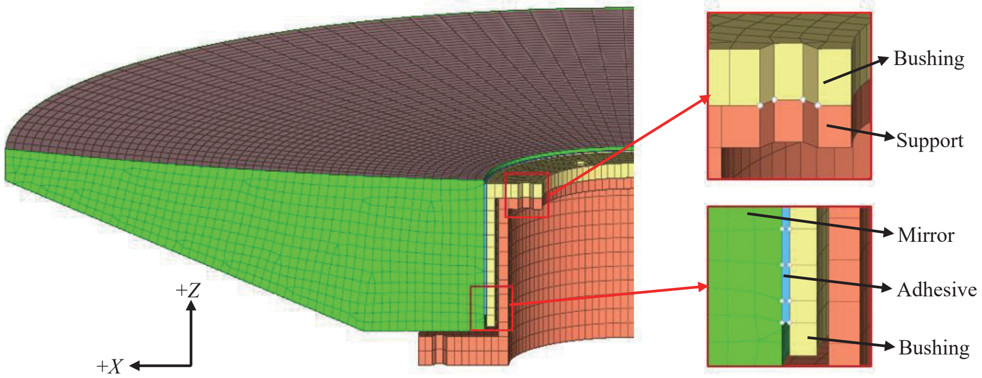


图 3 主镜组件有限元分析模型

Fig. 3 FEA model of primary mirror assembly

表 2 主镜组件材料物理属性

Tab. 2 Physical properties of primary mirror assembly components

Property	Mirror	Adhesive	Bushing	Support
Material & type	Zerodur	RTV	TC4	TC4
Density ρ (g·cm^{-3})	2.53	1.1	4.4	4.4
Elastic modulus E (MPa)	91 000	2.7	109 000	109 000
Poisson ratio μ	0.24	0.47	0.34	0.34
Thermal expansion coefficient α (10^{-6}·K^{-1})	0.1	185	9.1	9.1

3.2 关键参数优化

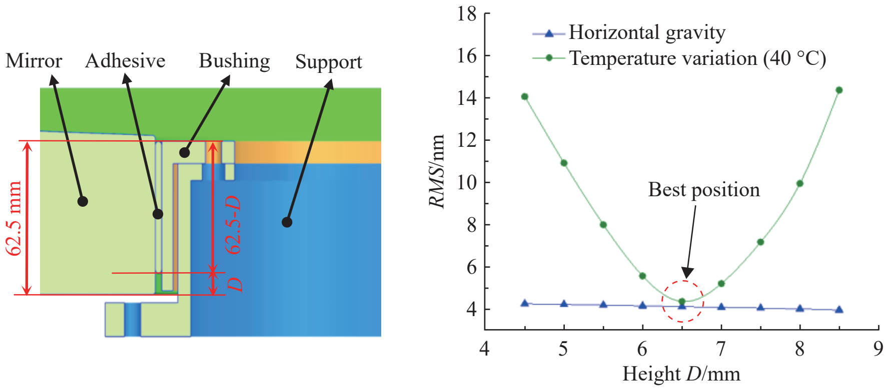
RTV 胶层的径向厚度、粘接位置(即胶层高度)等结构参数会直接影响中心支撑主镜的工作性能。望远镜在户外工作时面临的最大考验就是极端的环境温度。望远镜在装调时厂房内的温度约为 20 °C，而以长春地区为例，当地冬季一月份的日均最低气温为−20 °C，故需分析主镜组件在 40 °C 均匀温度变化下的热变形情况。在开展反射镜面形精度检测及望远镜系统装调时，主镜均保持光轴水平状态，需分析此时重力作用对主镜组件的影响。为确定胶层结构参数的最佳值，采用仿真分析的方法，调整有限元模型中胶层单元的形状，重点分析主镜在上述两种工况下的工作性能。

当胶层厚度为 1 mm 时，不同的胶层高度对主镜面形精度的影响如图 4(彩图见期刊电子版)所示，横轴表示胶层下沿距离镜体底面的距离 D，镜体在中心通孔处沿光轴向的高度为 62.5 mm，对应胶层高度为 62.5 mm−D，纵轴表示主镜的面形精度 RMS 值。可见，在胶层厚度一定时，胶层高度对于光轴水平重力工况下的主镜面形影响不大。而在 40 °C 均匀温度变化工况下，随着胶层高度的减小，主镜面形精度 RMS 值呈先减后增的趋势。其原因在于随着粘接位置的不断上移，胶层与镜体间相互作用力的加载位置逐步提高并靠近镜面，当该作用力合力的作用面通过镜体质心时，镜体仅承受沿圆周均匀分布的径向力的作用，此时镜体的变形量最小，对应着温度工况下面形精度 RMS 值变化曲线的转折点、也是最优点，而一旦该作用力合力的作用面偏离镜体质心，镜体要同时承受上述径向力以及由径向力带来的附加转矩的双重作用，此时镜面变形量会显著增大，据此确定最佳的胶层高度为 56 mm，对应 D=6.5 mm。

当胶层高度为 56 mm 时，不同的胶层厚度对主镜面形精度的影响如图 5(a)所示。横轴表示胶层厚度 t，纵轴表示主镜的面形精度 RMS 值。可见，当胶层高度确定时，随着胶层厚度的增加，主镜面形 RMS 值在光轴水平重力工况下仅有微小上升，而在 40 °C 均匀温度变化工况下则迅速下降并收敛。上述现象表明，当厚度较小时，胶层能够通过自身弹性形变显著地减小组件内部的热应力，此时胶层越厚，温度变化对镜面面形精度的影响越小，当胶层达到临界厚度(此处 t=1.0 mm)后，上述效果不再明显。

主镜镜体为实心结构、质量较大，而 RTV 胶层弹性模量小且厚度大，当组件处于光轴水平测试状态时，胶层在镜体重力的作用下产生变形，进而导致镜体出现一定的刚体位移和整体倾斜，如

图 5(b)中的位移 δ_X 和转角 θ_Y 所示。除面形精度外,胶层厚度对上述测试工况下镜体的位移 δ_X 和转角 θ_Y 也有影响,具体数值可以在有限元软件的后处理界面中读取,结果如图 5(c)所示。图中横轴表示胶层厚度 t,左、右纵轴分别表示镜体的位移 δ_X 和转角 θ_Y。可见,随着胶层厚度增加,镜体因重力作用产生的位移与转角均近似呈线性增长。与此同时,粘接操作难度增加,胶层固化速度减慢、胶层稳定性变差。综合考虑主镜的面形精度和热稳定性、重力引起的位移和转角、胶层的粘接工艺等因素,最终确定胶层厚度为 1.0 mm。

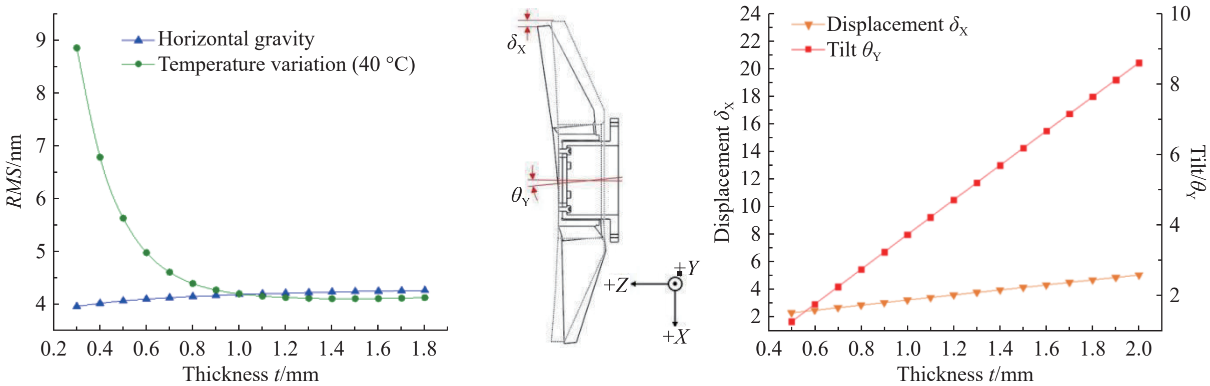


(a) 胶层高度 D 示意图
(a) Schematic diagram of adhesive height D

(b) 典型工况下的数据
(b) Statistics under typical conditions

图 4　胶层高度对主镜面形精度的影响

Fig. 4　Influence of adhesive layer height on primary mirror surface accuracy



(a) 面形精度
(a) Surface accuracy

(b) 测试状态自重变形
(b) Gravitational deformation under test

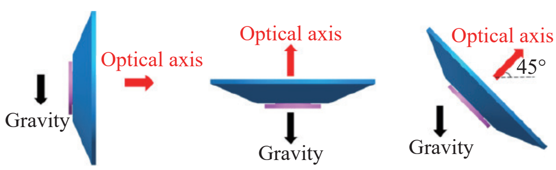
(c) 镜体位移与转角
(c) Displacement and tilt of mirror

图 5　胶层厚度与主镜工作性能间的关系

Fig. 5　Relationship between adhesive thickness and working performance of primary mirror

3.3　典型工况仿真分析

为评价主镜工作性能,从商业地面站使用场景出发,除了前文提出的 40 °C 均匀温度变化工况外,还应分析变方位重力作用对主镜的影响,选取了光轴水平、光轴竖直以及光轴呈 45°仰角的复合状态 3 种典型的重力加载工况,如图 6 所示。上述工况下主镜的面形精度变化量及镜体位移、转角数据如表 3 所示,各方向定义与图 2 坐标系相同。



(a) 光轴水平
(a) Horizontal

(b) 光轴竖直
(b) Vertical

(c) 复合 45°
(c) Compound 45°

图 6　变方位重力工况示意图

Fig. 6　Schematic diagram of variable-orientation gravity conditions

表 3 主要工况下主镜仿真结果

Tab. 3 Primary mirror's simulation results under main load cases (λ=632.8 nm)

Load case	Deformation/nm	Displacement/ μm			Tilt/″	
	RMS	δ_X	δ_Y	δ_Z	θ_X	θ_Y
Temperature variation(40°C)	4.199	0	0	58.325	0.008	0.008
Horizontal gravity	4.187	3.597	0	0.001	0.235	4.722
Vertical gravity	13.748	0	0	13.415	0.004	0.004
Compound gravity(45°)	10.161	2.542	0	9.572	0.167	3.339
Design Criterion	≤1/30λ	≤20	≤20	/	≤10	≤10

40 °C 均匀温度变化工况中，主镜面形精度 RMS 值为 4.199 nm，远小于设计指标要求。若采用高性能光学遥感器中常见的反射镜粘接方案，即胶粘剂使用环氧类结构胶、衬套使用铟钢材料，仿真分析表明，文中主镜由于没有柔性机械件，在 40 °C 均匀温度变化工况中的面形精度 RMS 值将达到 118.3 nm，约为使用 RTV 方案时的 28 倍。可见，RTV 胶层在镜体与机械零件之间起到了很好的缓冲作用，主镜在极端使用环境中仍能维持相对较高的面形精度。主镜沿光轴向（Z 向）的位移为 58.325 μm，望远镜在实际使用过程中可通过调焦对此项加以补偿。

光轴水平时，主镜在重力作用下的面形精度 RMS 值为 4.187 nm，最大位移和倾角分别为 3.597 μm、4.722″，光轴竖直时面形精度 RMS 值和最大位移分别为 13.748 nm 和 13.415 μm，45°仰角时面形精度 RMS 值和最大位移则为 10.161 nm 和 9.572 μm。上述分析数据均未超过设计指标要求。得益于胶层面积大、弹性模量低，且镜体轻量化率低、自身刚度高，基于 RTV 的主镜中心支撑方案对不同方向加载的重力都实现了较好的卸载效果。

与其它橡胶材料类似，随着时间的推移以及工作环境的温度变化，RTV 胶层的弹性模量具有一定的变化范围。考虑到 RTV 固化后的弹性模量数值仅为数 MPa，与镜体材料、支撑结构材料间的差异显著。将胶层潜在的变化量带入到上述主镜组件仿真模型中，分析结果仍能够满足设计指标要求。在商业地面站的推荐使用寿命内，胶层自身物理属性的变化对望远镜工作性能的影响较小。

分析主镜组件模态时，约束支撑筒与望远镜主背板间的连接位置，得到组件前 3 阶自然频率和振型，如表 4 所示。RTV 胶层的弹性模量小且厚度达到 1 mm，是“镜体-胶层-衬套-支撑筒”结构方案中刚度最低的环节，对主镜组件动力学特性具有重要影响：一方面，与使用传统粘接方案的主镜组件相比，RTV 胶层的运用导致了主镜组件整体刚度下降、一阶频率为 53.45 Hz；另一方面，圆环形胶层均匀分布在镜体中心通孔内壁，使得主镜组件的一阶模态表现为镜体绕光轴（Z 轴）的旋转。对于地面大型光电设备，风载、地震、人为因素等常见震源的能量主要集中在低频区且频率一般小于 15 Hz，而主镜组件的一阶频率为 53.45 Hz，不会在户外的低频载荷激励下产生谐振，其动力学特性能满足商业地面站的使用要求。

表 4 主镜组件模态分析结果

Tab. 4 Modal analysis results of primary mirror assembly

Order	Frequency/Hz	Vibration mode
1st	53.45	Rotation of mirror around Z axis
2nd	66.09	Rotation of mirror around X axis
3rd	66.10	Rotation of mirror around Y axis

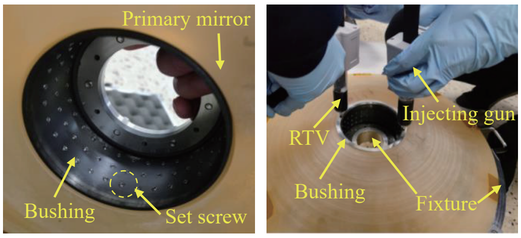
4 测试与验证

4.1 粘接工艺控制

胶层厚度均匀且固化充分是基于 RTV 的中心支撑结构提升主镜热稳定性的必要条件，故需制定合理的粘接工艺以保证胶层厚度的一致性及其固化效果。

RTV 固化本质上是液态硅橡胶中的高分子

链与空气中的水汽发生反应、逐步交联聚合成致密结构的过程, 影响 RTV 固化效果的关键要素是胶层能否与空气充分接触。通过对 RTV 固化特性的观察发现, 当胶层厚度为 1 mm 时, 胶层在 24 小时后的固化半径为 3~5 mm、48 小时后则拓展至 6~8 mm。为促进 RTV 固化, 在衬套侧壁上均匀布置 4 圈、共 80 处螺纹通孔, 注胶前在螺纹孔中旋入紧定螺钉, 以保证液态硅橡胶充满整个胶层空间而不溢出, 如图 7(a)所示。借助特制的粘接工装, 维持镜体与衬套间相对位置的同时, 将胶层空间封闭起来并确保胶层的径向厚度基本一致。使用注胶工具通过均布的注胶孔向夹层内缓慢注胶, 透过半透明的镜体可以观察硅橡胶的流动扩散过程, 如图 7(b)所示。完成注胶后将整套装置静置一天, 待口沿处 RTV 固化定形后旋出紧定螺钉, 以增加胶层与空气的接触面积、促进整个胶层的固化进程。



(a) 衬套细节　　(b) 注胶操作

(a) Bushing details　　(b) Adhesive injection

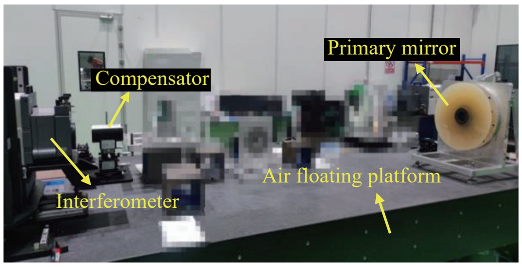
图 7　主镜组件 RTV 粘接工艺

Fig. 7　RTV bonding process in primary mirror assembly

4.2　面形精度检测

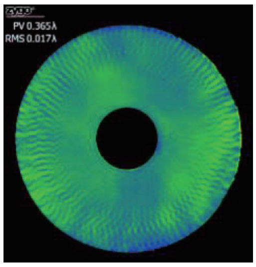
待主镜完成抛光后, 使用 ZYGO 干涉仪(型号为 Verifire 4″)和特制的补偿器, 对研制的主镜组件实物开展了面形精度检测, 如图 8 所示。主镜组件通过支撑筒后端的法兰直接固定在铝制工装板上, 保持光轴水平状态, 实测得到主镜面形精度 RMS 值为 0.017λ (λ=632.8 nm), 远优于设计指标要求。

借鉴遥感器研制中常见的环境试验方法[15-16], 为验证 RTV 胶层的稳定性以及主镜长期的面形精度, 使用快速温变箱对主镜组件开展了高低温循环试验, 如图 9 所示。试验共 10.5 个循环, 温度区间为−20 °C~40 °C, 恒温段保持时间 4 h、变温段温度变化速率为 3~5 °C/min。试验后复检主镜面形精度 RMS 值为 0.018λ (λ=632.8 nm), 与实验前基本一致, 如表 5 所示, 且矢高图中反射面的高低点分布规律未发生明显变化。这验证了文中基于 RTV 的反射镜中心支撑方案的可靠性, 也说明文中主镜在承受大范围温度变化和极端温度的冲击后仍可以维持良好的面形精度。镀膜过程中反射镜要同时经历高真空环境和加热过程, 镀膜后实测主镜的面形精度 RMS 值为 0.018λ (λ=632.8 nm), 镀膜前后主镜的面形精度未发生变化, 进一步证明了主镜组件的稳定性。



(a) 检测状态

(a) Status under test



(b) 干涉图

(b) Interferogram

图 8　主镜面形精度检测

Fig. 8　Primary mirror’s surface accuracy test

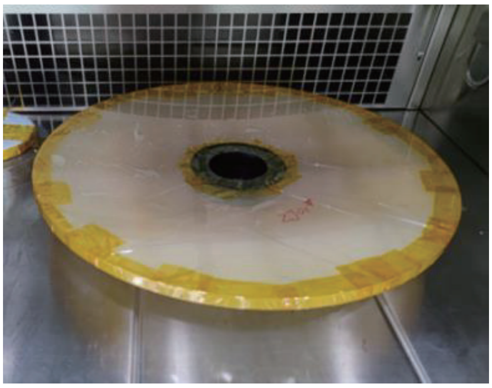


图 9　主镜组件稳定性试验

Fig. 9　Stability test of primary mirror assembly

表 5　主镜面形精度检测结果

Tab. 5　Primary mirror’s surface accuracy test results

Surface accuracy	Polishing	Heat recycle	Coating
RMS / λ (λ=632.8nm)	0.017	0.018	0.018

4.3 外场测试

配备文中主镜的望远镜已集成至长光卫星技术股份有限公司的车载商业地面站中并投入使用，如图 10 所示。2023 年 10 月 9 日，该站与“吉林一号”遥感星座中某卫星开展了星地激光高速图像传输试验并取得成功。积累的测试数据表明，望远镜能够在冬季夜间户外的低温环境中正常工作，弱湍流条件下地面站接收到的激光功率充裕且稳定，表明文中研制的宽温主镜具有良好的热稳定性。

(a) 望远镜 (a) Telescope　(b) 地面站 (b) Ground station

图 10 主镜在商业地面站中的应用

Fig. 10 Primary mirror’s application in commercial ground station

5 结 论

本文提出一种基于 RTV 的宽温反射镜中心支撑结构，并为某商业化激光通信地面站中的望远镜研制了通光口径为Φ500 mm、具备高精度高稳定性特征的主镜组件。组件由微晶镜体、RTV 胶层以及钛合金衬套和支撑筒等部分组成，1 mm 厚的胶层可有效减小组件内部热应力、卸载镜体自身重力作用，当户外环境中存在大范围温度变化时，以及在望远镜跟踪低轨卫星的过程中，主镜都能够维持优良的面形质量。胶层结构参数经优化后，主镜在 40 °C 均匀温度变化工况下的面形精度 RMS 值仅为 4.199 nm，变方位重力工况下 RMS 值最大不超过 13.748 nm，且组件一阶自然频率为 53.45 Hz，主镜组件的动、静力学特性均满足设计指标要求。

使用特制工装对 RTV 胶层厚度和形状进行了有效控制，衬套上设置的通气孔起到了加速胶层固化的作用，最终实现了大面积胶层的充分固化，确保了镜体受力状态稳定。经实测，研制的主镜面形精度达到 RMS 0.017λ (λ=632.8 nm)，在经历大温度范围高低温循环试验以及真空加热镀膜后，主镜均能够维持高精度的面形质量。

本文提出的宽温反射镜支撑方案结构简单、温度适应能力强、性价比高，可以提升高精度大口径反射镜在户外环境中的工作性能，本文工作对大型地面光电设备中反射镜支撑结构的设计具有参考和借鉴意义。

参考文献:

[1] 徐月，刘超，兰斌，等. 自适应光学在星地激光通信中的研究进展[J]. 激光与光电子学进展，2023，60(5)：0500004.
XU Y, LIU CH, LAN B, *et al*.. Research progress of adaptive optics in satellite-to-ground laser communication[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2023, 60(5): 0500004. (in Chinese).

[2] KAMMERER W, GRENFELL P, HYEST L, *et al*.. CLICK mission flight terminal optomechanical integration and testing[J]. *Proceedings of SPIE*, 2022, 12777: 1277730.

[3] 高世杰，吴佳彬，刘永凯，等. 微小卫星激光通信系统发展现状与趋势[J]. 中国光学，2020，13(6)：1171-1181.
GAO SH J, WU J B, LIU Y K, *et al*.. Development status and trend of micro-satellite laser communication systems[J]. *Chinese Optics*, 2020, 13(6): 1171-1181. (in Chinese).

[4] SCHIELER C M, RIESING K M, BILYEU B C, *et al*.. On-orbit demonstration of 200-Gbps laser communication downlink from the TBIRD CubeSat[J]. *Proceedings of SPIE*, 2023, 12413: 1241302.

[5] 谢军，何锋赟，王晶，等. 经纬仪主镜轴向支撑结构仿真与优化[J]. 红外与激光工程，2016，45(S1)：S118001.
XIE J, HE F Y, WANG J, *et al*.. Simulation and optimization of axial supporting structures for theodolite primary mirror[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2016, 45(S1): S118001. (in Chinese).

[6] 赵天骄，乔彦峰，孙宁，等. 经纬仪主镜在支撑系统下的面形变化[J]. 中国光学，2017，10(4)：477-483.
ZHAO T J, QIAO Y F, SUN N, *et al*.. Surface deformation of theodolite primary mirror under the support system[J]. *Chinese Optics*, 2017, 10(4): 477-483. (in Chinese).

[7] 张岩，陈宝刚，李洪文，等. 700mm 光学望远镜结构设计与分析[J]. 光学技术，2020，46(4)：385-390.

ZHANG Y, CHEN B G, LI H W, *et al*.. Structure design and analysis of 700 mm aperture optical telescope[J]. *Optical Technique*, 2020, 46(4): 385-390. (in Chinese).

[8] 李鑫, 袁健, 龚小雪, 等. 外场热环境作用下地基望远镜温度分布预测[J]. 激光与红外, 2023, 53(4): 589-596.
LI X, YUAN J, GONG X X, *et al*.. Prediction of temperature distribution of ground-based telescopes under the influence of external thermal environment[J]. *Laser & Infrared*, 2023, 53(4): 589-596. (in Chinese).

[9] 王洪浩, 王建立, 陈涛, 等. 地基大口径望远镜重力弯曲引起的指向变化检测与修正[J]. 光学 精密工程, 2022, 30(23): 3021-3030.
WANG H H, WANG J L, CHEN T, *et al*.. Measurement and calibration of optical axis changes caused by gravity for ground-based large-aperture telescope[J]. *Optics Precision Engineering*, 2022, 30(23): 3021-3030. (in Chinese).

[10] 郭骏立, 安源, 李宗轩, 等. 空间相机反射镜组件的胶结技术[J]. 红外与激光工程, 2016, 45(3): 0313002.
GUO J L, AN Y, LI Z X, *et al*.. Bonding technique of mirror components in space camera[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2016, 45(3): 0313002. (in Chinese).

[11] 范志刚, 常虹, 陈守谦. 透镜无热装配中粘结层的设计[J]. 光学精密工程, 2011, 19(11): 2573-2581.
FAN ZH G, CHANG H, CHEN SH Q. Design of bonding layer in lens athermal mount[J]. *Optics Precision Engineering*, 2011, 19(11): 2573-2581. (in Chinese).

[12] 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. (in Chinese).

[13] 张家齐, 郭艺博, 张友建, 等. 机载宽温条件下反射镜组件与粘接层设计[J]. 中国光学 (中英文), 2023, 16(3): 578-586.
ZHANG J Q, GUO Y B, ZHANG Y J, *et al*.. Design of reflector assembly and adhesive layer under airborne wide temperature conditions[J]. *Chinese Optics*, 2023, 16(3): 578-586. (in Chinese).

[14] 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): 41-51.
YUAN J, ZHANG L, JIANG Q F, *et al*.. Structure design of 1.2 m high lightweight primary mirror blank[J]. *Opto-Electronic Engineering*, 2023, 50(4): 41-51. (in Chinese).

[15] 袁健, 张雷. 大型离轴三反相机主镜组件结构设计与验证[J]. 红外与激光工程, 2023, 52(1): 20220363.
YUAN J, ZHANG L. Structure design and verification of primary mirror assembly for large off-axis TMA camera[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2023, 52(1): 20220363. (in Chinese).

[16] 谭淞年, 王福超, 许永森, 等. 航空光电平台两轴快速反射镜结构设计[J]. 光学 精密工程, 2022, 30(11): 1344-1352.
TAN S N, WANG F CH, XU Y S, *et al*.. Structure design of two-axis fast steering mirror for aviation optoelectronic platform[J]. *Optics Precision Engineering*, 2022, 30(11): 1344-1352. (in Chinese).

作者简介:

袁　健(1990—), 男, 吉林通化人, 博士, 副研究员, 2020 年于中国科学院长春光学精密机械与物理研究所获得博士学位, 主要从事精密仪器光机结构设计方面的研究。E-mail: yuanjian@jl1.cn

张　雷(1982—), 男, 山东菏泽人, 博士, 研究员, 2008 年于中国科学院长春光学精密机械与物理研究所获得博士学位, 主要从事光学遥感卫星总体技术方面的研究。E-mail: zhanglei@jl1.cn