

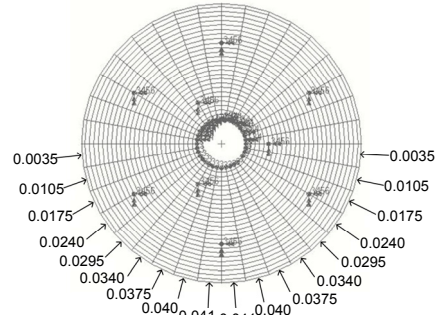
DOI: 10.12086/oe.2020.190485

## 激光通信地面站 600 mm 主镜 径向支撑设计

李小明<sup>1\*</sup>, 张天硕<sup>2</sup>, 张家齐<sup>1</sup>, 李响<sup>1</sup>, 张立中<sup>1</sup>

<sup>1</sup> 长春理工大学空间光电技术国家地方联合工程研究中心, 吉林 长春 130022;

<sup>2</sup> 长春理工大学机电工程学院, 吉林 长春 130012



**摘要:** 激光通信大口径地面光端机的主要作用是与卫星建立通信链路, 实现卫星与地面站之间的数据传输。某激光通信车载地面光端机 600 mm 主镜采用微晶材料, 重量较大且工作角度不断发生变化。为保证镜面变形精度, 该主镜在采用轴向背部 9 点支撑的基础之上, 需同时采用径向支撑结构平衡主镜在其工作角度下重力的径向分力。本文根据主镜工作角度变化, 针对传统多点径向支撑结构尺寸大并易造成应力集中等问题, 为平衡主镜径向重力分量, 减小径向支撑结构尺寸, 设计了中心轴与水银带相结合的径向支撑方案, 采用有限元分析方法得出水银带参数对主镜面形的影响, 优化了支撑参数并设计了支撑结构。主镜面形测试结果表明, 采用本文提出的径向支撑结构后, 主镜面形达到了预期效果, 面形 PV 值优于  $\lambda/5$ , RMS 值优于  $\lambda/37$ , 完全满足设计要求。

**关键词:** 激光通信; 水银带; 径向支撑; 中心支撑; 面形误差

中图分类号: TN929.13

文献标志码: A

引用格式: 李小明, 张天硕, 张家齐, 等. 激光通信地面站 600 mm 主镜径向支撑设计[J]. 光电工程, 2020, 47(9): 190485

## Lateral support structure for 600 mm primary mirror of laser communication

Li Xiaoming<sup>1\*</sup>, Zhang Tianshuo<sup>2</sup>, Zhang Jiaqi<sup>1</sup>, Li Xiang<sup>1</sup>, Zhang Lizhong<sup>1</sup>

<sup>1</sup>NUERC of Space and Optoelectronics Technology, Changchun University of Science and Technology, Changchun, Jilin 130022, China;

<sup>2</sup>College of Mechanical and Electric Engineering, Changchun University of Science and Technology, Changchun, Jilin 130012, China

**Abstract:** The main function of the laser communication large-caliber ground optical transceiver is to establish a communication link with the satellite to realize data transmission between the satellite and the ground station. The 600 mm microcrystalline primary mirror of one laser communication station is heavy, and its working angle changes constantly. In order to decrease the mirror surface error, the support system not only has a 9-pose axial support structure but also simultaneously balances the radial component of gravity of the primary mirror at its working angle by using a radial support structure. Flexible lateral support structures have large size and stress, so it is not suit for the mirror that works in a wide range of rotation. The paper researches the lateral support structure with a mercury band and central shaft, and analyses the impact of mercury band parameters on the surface error. The designed

收稿日期: 2019-08-15; 收到修改稿日期: 2019-11-08

基金项目: 国家重点研发计划资助(2018YFB1107600); 国防科工局条件保证项目资助(S2201011202)

作者简介: 李小明(1984-), 男, 博士, 助理研究员, 主要从事精密光机结构分析与优化方面的研究。E-mail: lxm Kidd@163.com

版权所有©2020 中国科学院光电技术研究所

lateral structure has small size and improves the surface quality of the mirror. The measured values of PV and RMS are smaller than  $\lambda/5$  and  $\lambda/37$ , respectively. These result shows that the designed lateral support structure reaches the design purpose and satisfies the requirements.

**Keywords:** laser communication; mercury band; lateral support; center support; surface error

**Citation:** Li X M, Zhang T S, Zhang J Q, et al. Lateral support structure for 600 mm primary mirror of laser communication[J]. *Opto-Electronic Engineering*, 2020, 47(9): 190485

## 1 引言

某激光通信车载地面光端机主镜采用微晶材料。考虑到成本等问题,由于光端机对质量等指标没有严格要求,因此主镜未做轻量化处理,质量较大,且随着光学天线的转动,主镜光轴方向与重力方向之间的角度将不断发生变化。为保证主镜面形质量,支撑结构需同时满足轴向和径向上的重力卸载要求<sup>[1-2]</sup>。重力在光轴方向上的分力通过多点背部支撑卸载,其设计方法较为成熟并已得到大量应用;重力在径向上的分力需采用径向支撑卸载,常用的径向支撑有多点支撑、水银支撑、带支撑、滚轮链式支撑等支撑方式<sup>[3]</sup>。多点支撑结构较为复杂,且当所需支撑点数较多时易造成支撑结构尺寸较大;带支撑和滚轮支撑不适用于有俯仰角度变化的反射镜;水银支撑要求工作环境不能有剧烈振动且具有污染环境的可能,但对于地面站主镜是较为理想的支撑方案。

在水银支撑研究方面,杜俊峰对 1.3 m 主镜的水银带径向支撑进行了分析和设计,取得了较好的支撑效果,但未见详细的测试<sup>[4]</sup>;高明辉等对水银带支撑的有限元分析方法进行了研究和探索,但未进行工程设计<sup>[5]</sup>;刘国庆采用分析和面形拟合的方法对水银带支撑进行了研究,但未见其工程应用<sup>[6]</sup>。

本文针对某 600 mm 口径的激光通信地面站主镜径向支撑结构进行了分析与优化设计,保证了主镜面形质量满足通信要求。

## 2 主镜参数及支撑要求

考虑到地面站对重量指标的要求并不严格,系统主镜采用平背形结构。系统主镜外径为 $\phi 620$  mm,有效通光口径为 $\phi 606$  mm,中心孔直径为 $\phi 109$  mm,厚度为 100 mm,曲率半径  $R=-1760.025$  mm,采用线胀系数较小的微晶材料,质量约 65.4 kg,重心平面与镜背距离为 41.75 mm。系统主镜加工后面形误差 PV 值优于  $\lambda/7$ ,RMS 值优于  $\lambda/50$ ,系统工作角度为  $0\sim 80^\circ$ 。加工后的主镜如图 1 所示。采取支撑方案后主镜面形

精度设计要求为 RMS 值优于  $\lambda/30$ ,PV 值优于  $\lambda/5$ 。

激光通信地面站与低轨卫星等移动目标进行通信时,光学天线会不断转动,重力对主镜的影响不断变化,因此必须采用轴向与径向复合支撑结构同时卸载重力。光学天线采用背部 9 点支撑卸载轴向重力,在 3 点支撑的基础上,在每一个静定的支撑点上通过一层刚性浮动支架把支承点数扩大为 9 点再作用于反射镜,对轴向重力形成多点卸载,镜面变形得到了明显改善。由于背部支撑采用托盘与主镜背部接触,不具备定位能力,径向支撑需在卸载径向重力的同时对主镜进行定位。主镜背部支撑主要卸载垂直镜面方向的重力,水银支撑卸载沿径向方向的重力,两者无法完全解耦。本文对径向支撑的研究是在背部 9 点支撑的基础上开展的,并开展了面型分析。

## 3 径向支撑方案

为保证径向支撑不会产生额外的附加弯矩而造成主镜面形精度下降,径向支撑设计时一般支撑合力通过主镜的重心平面,以平衡主镜在任何工作角度下重力的径向分力。主镜径向支撑形式主要有基于运动学原理的径向浮动支撑和多点边缘浮动支撑<sup>[7-9]</sup>。

基于运动学原理的径向支撑结构是根据三点定位原理,采用机械结构对主镜进行侧向支撑,支撑点数

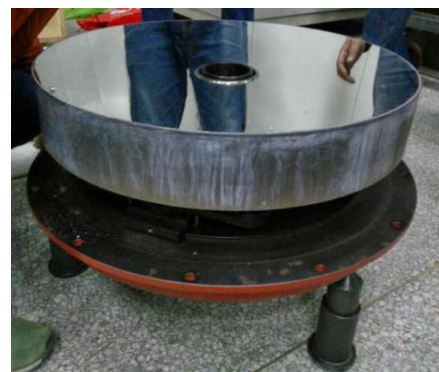


图 1 主镜实物图

Fig. 1 Photograph of the primary mirror

为 3 的倍数,能够保证结构稳定性,主要有 Whiffle-tree 结构和 Bipod 结构;多点边缘浮动支撑形式是利用杠杆平衡重锤或在支撑点处施加浮动支撑力,不限制主镜的自由度,因此这种径向支撑必须有中心定位,主要有水银带支撑形式、带式或滚轮链式支撑形式等。

Whiffle-tree 和 Bipod 结构在径向上需为支撑机械结构预留结构空间,同时随着主镜尺寸增大,为改善主镜应力所需的径向支撑点数也增加,因此造成其结构复杂、径向尺寸增大,不利于地面站的小型化等缺点。带式或链式支撑结构是通过柔性带或链在主镜外边缘的下部施加沿径向方向的支撑力。由于光端机工作时天线实时跟踪运动目标,主镜工作角度不断变化,带式支撑无法满足需求。水银带支撑是一种近似理想的支撑形式,属于浮动支撑但不具有定位功能,需要增加中心支撑,但其具有结构简单、质量较轻等优点。水银带支撑结构在主镜径向布置水银带,依靠水银产生的浮力卸载主镜的径向重力,因此会导致主镜产生不均匀且可随重力方向变化的支撑力,且当光轴水平时水银带支撑力最大。

综上所述,光学天线主镜设计为水银支撑与中心支撑相结合的复合支撑结构,可使水银卸载大部分主镜径向重力,且中心支撑卸载小部分径向重力的同时,能保证主镜空间定位。主镜复合支撑结构如图 2 所示。

#### 4 水银带支撑设计

水银带支撑形式属于浮动支撑,在反射镜侧面会产生沿径向正比于水银柱高度均匀变化的侧向力,侧向力等于所需卸载的重力。天线在俯仰方向转动时水银高度随之变化,可保证沿径向上的作用力与重力的径向分力一致<sup>[10]</sup>。主镜在俯仰方向上的工作角度为 0~80°,且主镜始终为单侧受力,因此选用水银半充满方案,即水银只充满整个水银带的 50%,对反射镜的作用范围为±90°。

当反射镜镜面法线与重力间角度为  $\theta$  时,水银带在主镜侧向点源处产生的侧向力  $dF$  为<sup>[11]</sup>

$$dF = \rho gh \sin \theta dA = \rho gh (\cos \alpha - \cos \alpha_{\max}) \sin \theta dA \quad (1)$$

其中: $\rho$ 为水银密度; $g$ 为重力加速度; $h$ 为水银高度; $R$ 为主镜半径; $\alpha$ 为点源角度; $\alpha_{\max}$ 为最大包络角度; $b$ 为水银带宽度; $dA$ 为点源面积,且有:

$$dA = bR d\alpha \quad (2)$$

水银带对主镜产生的“浮力”与水银柱高度成正比,随着水银柱的升高浮力逐渐增大。

点源上产生与重力方向相反的浮力为

$$dF \cos \alpha = R^2 \rho g b \sin \theta \cos \alpha (\cos \alpha - \cos \alpha_{\max}) d\alpha \quad (3)$$

水银产生的总浮力为

$$F = 2 \int_0^{\alpha_{\max}} R^2 \rho g b \sin \theta \cos \alpha (\cos \alpha - \cos \alpha_{\max}) d\alpha \\ = R^2 \rho g h \sin \theta (\alpha_{\max} - \sin \alpha_{\max} \cos \alpha_{\max}) \quad (4)$$

由上式可见,最大包络角度固定后,水银带宽度与卸载重力成正比,卸载重力增大,水银带宽度也随之增加,且水银带对主镜作用力面积增大。在进行有限元分析时需在主镜侧面有限元单元上施加相应的径向压强以仿真水银带对主镜的力学影响。水银对主镜的径向压强  $P$  为

$$P = \rho g h \sin \theta = \rho g R (\cos \alpha - \cos \alpha_{\max}) \sin \theta \quad (5)$$

当最大包角为 90°时,水银带在主镜侧面产生的压强如图 3 所示。

由于地面站激光通信系统主镜为球面镜且背部为平背形结构,主镜在不同径向上厚度不相等,即边缘厚度大中心厚度小,所以在轴向上越靠近背部反射镜镜体刚度越大,越靠近镜面方向镜体刚度越小,越易受到外力影响。水银带的轴向支撑位置会对主镜面形产生较大影响,支撑位置靠后,主镜受重力影响严重;支撑位置靠前,水银带压力影响主镜面形。图 4 为宽度 40 mm 水银带在不同支撑位置主镜受 1 g 重力作用时的面形变化。可见水银带支撑位置位于重心平面指

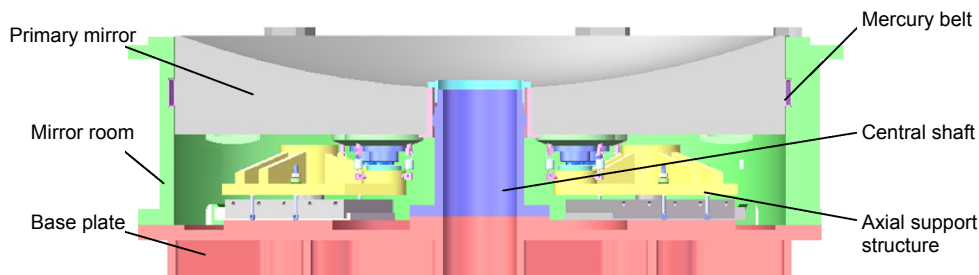


图 2 主镜复合支撑结构

Fig. 2 Flexible support of the primary mirror

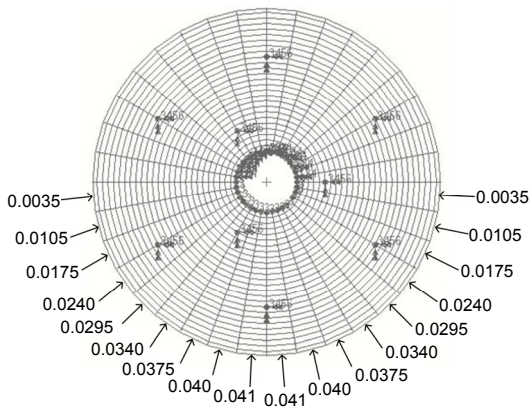


图 3 主镜径向压强分布(MPa)

Fig. 3 Radial pressure distribution (MPa)

向镜面方向约 5 mm 时支撑效果最好,同时水银带支撑位置靠前可避免主镜产生向前的倾覆力矩。

根据其他学者的研究,卸载力一般在主镜重量的 90%~70%之间<sup>[4,10]</sup>。在此范围内对不同卸载力下主镜面型精度进行了分析,结果如表 1 所示。可见,对于本系统,选取 80%卸载力效果较好。

径向支撑由中心支撑与水银带支撑共同卸载径向重力,当中心支撑卸载力过大时,会造成中心支撑结构对主镜的压力增大从而影响主镜面型。同时,为保证主镜位置精度,中心支撑机构设计难度加大。据研究表明,水银带卸载力一般在主镜重量的 70%~90%之间<sup>[4]</sup>。本文中水银带设计为卸载 80%重力,中心支撑卸载 20%重力。根据式(4),水银产生的总浮力为

$$F = 2 \int_0^{\alpha_{\max}} R^2 \rho g b \cos \alpha (\cos \alpha - \cos \alpha_{\max}) d\alpha = R^2 \rho g b (\alpha_{\max} - \sin \alpha_{\max} \cos \alpha_{\max}), \quad (6)$$

其中: $b$  为水银带宽度,根据水银带卸载的主镜重量,经计算得到水银带的宽度为 25.32 mm。

表 1 不同卸载比例下的主镜面形精度

Table 1 Precision of the main mirror shape under different unloading ratios

水银承担重力比例/%	主镜面形误差 RMS/nm
90	3.55
85	3.12
80	2.85
75	3.44
70	4.44

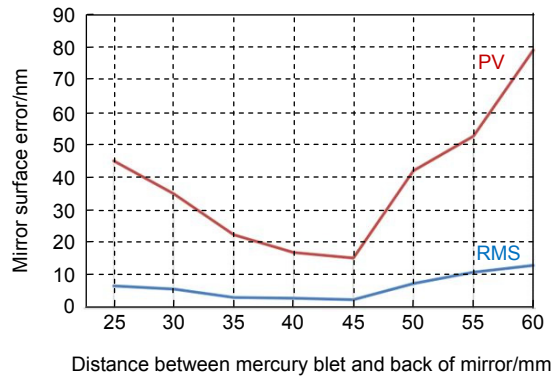


图 4 水银带不同轴向支撑位置时主镜面形变化

Fig. 4 Mirror-shaped error at different axial support positions

## 5 中心支撑设计

中心支撑组件的主要作用是对主镜进行中心定位且能卸载一部分重力,是径向水银带支撑的辅助支撑结构,要求强度较好、刚度较大、抗弯能力较强。中心支撑组件主要是由芯轴、镶套、圆螺母组成,芯轴和镶套材料选择与主镜材料线胀系数相匹配的铟钢。嵌套与主镜采用粘结的连接方式,芯轴上端凸出部分为圆弧形,并与镶套内壁形成线接触,且接触部分位于主镜的重心平面,保证了主镜中心定位的要求,同时又可以实现小角度灵活转动。加工后的芯轴如图 5 所示。

## 6 支撑结构有限元分析

采用 Patran/Nastran 对水银带与中心支撑共同作用下的主镜变形进行仿真分析,采用球面方程对数据进行拟合分析得到主镜的面形误差。当主镜垂直放置时主镜变形云图如图 6 所示,重力产生的面形误差为

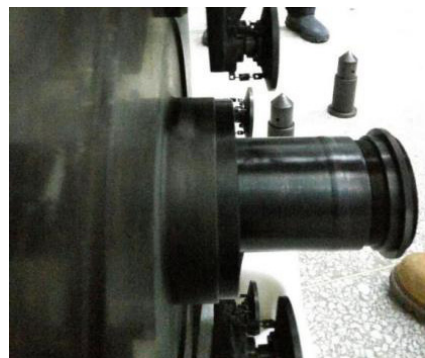


图 5 芯轴实物图

Fig. 5 Mandrel diagram

31.6 nm (PV), 5.7 nm (RMS)。由分析结果可见, 当主镜垂直时主镜的全部重量由中心轴和水银带支撑承受, 变形区域主要在主镜上部和下部, 其下部变形由水银带造成, 云图呈带状分布且均匀过渡; 上部变形主要是由重力作用和中心支撑作用产生。

小口径反射镜精抛时一般连同支撑机构进行整体抛光加工, 支撑机构产生的误差可在加工中消除, 加工完成后的主镜面形误差即为主镜在支撑结构作用下的面形。大口径主镜和支撑结构受尺寸和重量的限制, 必须单独加工后再进行装校, 支撑机构产生的面形误差必然影响主镜面形, 主镜的最终面形精度由主镜加工后面形与支撑机构产生的面形误差共同决定, 现未见对该方面的研究。为评价支撑后主镜面形, 整体面形误差 PV 值按主镜加工面形误差 PV 值与支撑结构产生面形误差 PV 值叠加计算, RMS 值按两者的均方根

值计算。采用该支撑结构后主镜的最终面形为

$$PV = (\lambda / 7 + 31.64) = 122.04 \text{ nm} = \lambda / 5.1 \text{ ,}$$

$$RMS = \sqrt{(\lambda / 50)^2 + 5.7^2} = 13.88 \text{ nm} = \lambda / 45.6 \text{ . (7)}$$

对水银带和背部 9 点复合支撑条件下主镜从竖直状态(0°)转动到水平状态(80°)面形变化进行分析, 结果如图 7 所示。分析可见主镜在垂直状态下(0°)时面形误差最大, 径向支撑机构可以保证主镜在不同工作角度下的面形精度。

## 7 主镜面形检测

装调完成后对光轴水平时主镜支撑的最终状态进行检测, 图 8 为检测装置, 为便于检测, 将主镜组件安装于伺服转台上, 通过支撑脚固定主镜角度使主镜光轴处于水平状态。检测结果如图 9 所示, RMS 值优于  $\lambda/37$ , PV 值优于  $\lambda/5$ 。

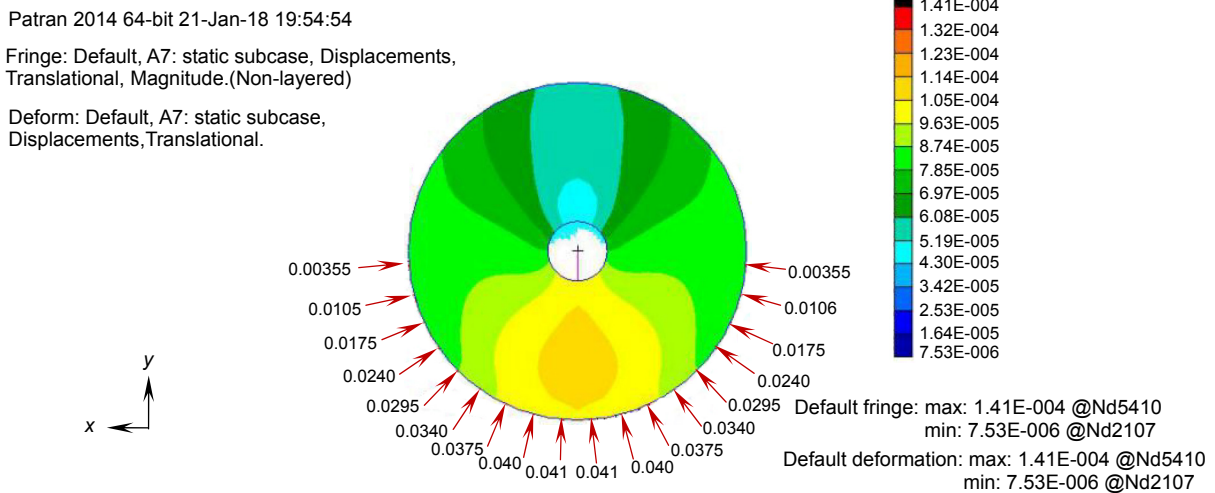


图 6 垂直状态下主镜变形云图  
Fig. 6 Vertical deformation of the primary mirror

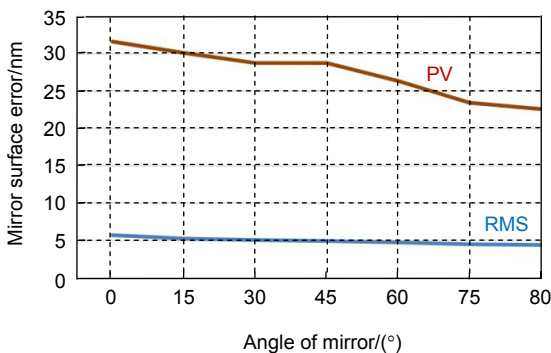


图 7 主镜不同工作角度下面形分析结果  
Fig. 7 Mirror-shape error at different angles



图 8 面形检测现场  
Fig. 8 Mirror-shape error detection

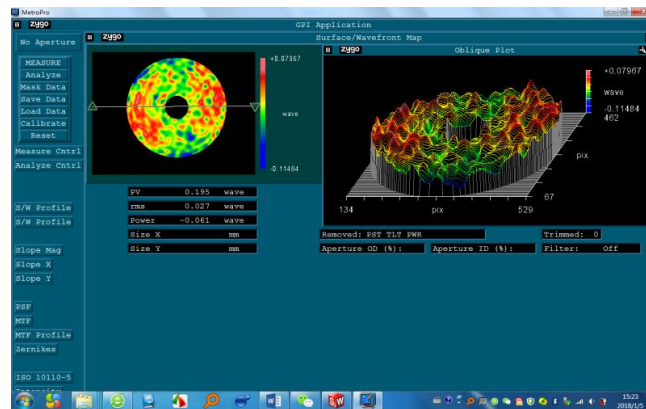


图9 面形检测结果

Fig. 9 Mirror-shape error detection results

## 8 结论

本文针对 600 mm 口径激光通信地面光端机主镜，在背部 9 点支撑的基础上采用水银带与中心支撑相结合的方法，设计了一种复合径向支撑结构，分析优化了水银带支撑位置和结构参数。实际应用到了激光通信地面站光学天线主镜支撑后，主镜组件实测结果表明采用设计的支撑结构主镜面形误差 PV 值优于  $\lambda/5$ ，RMS 值优于  $\lambda/37$ ，径向支撑完全达到设计目标，保证了激光通信主镜的面形误差要求。

## 参考文献

[1] Liu B, Zhang J X, Wang F G, et al. Design and optimization of kinematic lateral support on 2m SiC primary mirror[J]. *Opto-Electronic Engineering*, 2016, **43**(12): 46–51.  
刘博, 张景旭, 王富国, 等. 2m SiC 主镜 Kinematic 侧支撑方法设计与优化[J]. *光电工程*, 2016, **43**(12): 46–51.

[2] Bao Q H, Sha W, Chen C Z, et al. Characteristics of rear support in centre for space SiC mirror[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2017, **46**(2): 0222003.  
包奇红, 沙巍, 陈长征, 等. 空间 SiC 反射镜背部中心支撑特性[J]. *光子学报*, 2017, **46**(2): 0222003.

[3] 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.  
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.

[4] Du J F, Zhang L B, Ren G. Mounting system design for 1.3 m primary mirror[J]. *Optics and Precision Engineering*, 2007, **15**(10): 1483–1488.  
杜俊峰, 张林波, 任戈. 1.3m 主镜的支承设计[J]. *光学精密工程*,

2007, **15**(10): 1483–1488.

[5] Gao M H, Wang Z S, Yang J S, et al. Physical parameter analysis of mercury tube mounting structure for large-aperture mirror[J]. *Optics and Precision Engineering*, 2004, **12**(4): 18–20.  
高明辉, 王忠素, 杨劲松, 等. 大口径反射镜水银带支撑结构物理参数分析[J]. *光学精密工程*, 2004, **12**(4): 18–20.

[6] Liu G Q, Ma W L. The finite element analysis for large-aperture lightweight mirror mount[J]. *Opto-Electronic Engineering*, 2001, **28**(5): 14–17.  
刘国庆, 马文礼. 大口径轻质镜支撑的有限元分析[J]. *光电工程*, 2001, **28**(5): 14–17.

[7] Zhou Y X, Shen X. Structure design of backside bipod flexure mount for space reflector[J]. *Laser Technology*, 2017, **41**(1): 141–145.  
周宇翔, 沈霞. 空间反射镜背部双脚架柔性支撑结构设计[J]. *激光技术*, 2017, **41**(1): 141–145.

[8] Wang K J, Dong J H, Xuan M, 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] Li S H, Guan Y J, Xin H W, et al. Lightweight design and flexible support of large diameter mirror in space camera[J]. *Laser & Infrared*, 2017, **47**(11): 1422–1427.  
李慎华, 关英俊, 辛宏伟, 等. 大口径空间反射镜轻量化设计及其柔性支撑[J]. *激光与红外*, 2017, **47**(11): 1422–1427.

[10] Yoder R R Jr. *Opto-Mechanical Systems Design*[M]. 3rd ed. Zhou H X, Cheng Y F, trans. Beijing: China Machine Press, 2008.  
约德. 光机系统设计[M]. 3版. 周海宪, 程云芳, 译. 北京: 机械工业出版社, 2008.

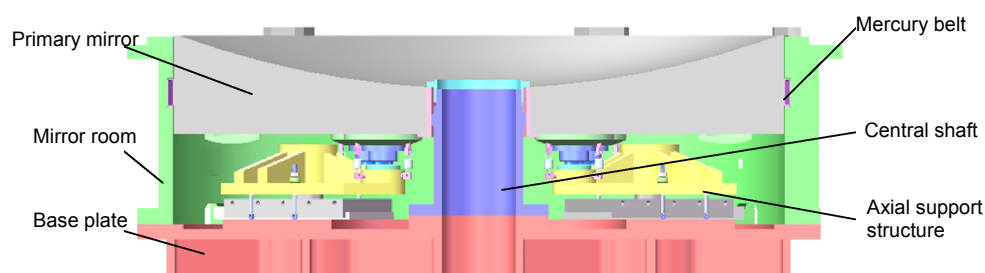
[11] Zhang L, Ye L, Zhang J P, et al. Gravity and support error separation of 1.2 m lightweight space mirror[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2018, **47**(7): 0722002.  
张琰, 叶璐, 张金平, 等. 1.2m 轻量化空间反射镜的重力支撑变形分离[J]. *光子学报*, 2018, **47**(7): 0722002.

# Lateral support structure for 600 mm primary mirror of laser communication

Li Xiaoming<sup>1\*</sup>, Zhang Tianshuo<sup>2</sup>, Zhang Jiaqi<sup>1</sup>, Li Xiang<sup>1</sup>, Zhang Lizhong<sup>1</sup>

<sup>1</sup>NUERC of Space and Optoelectronics Technology, Changchun University of Science and Technology, Changchun, Jilin 130022, China;

<sup>2</sup>College of Mechanical and Electric Engineering, Changchun University of Science and Technology, Changchun, Jilin 130012, China



Flexible support of primary mirror

**Overview:** Laser communication has the advantages of high communication rate, good confidentiality, and strong anti-interference ability, and it has become a rapidly developing new mode of communication. The satellite-ground laser communication link mainly realizes the high-speed transmission of satellite massive data. Large-caliber laser communication optical terminal is an important terminal to ensure the link performance in the satellite-ground link, and directly impacts on link communication performances. As the core component of the optical antenna of the ground station. The primary mirror surface shape accuracy directly determines the optical quality of the system. The main mirror lateral support plays a decisive role in the mirror surface shape accuracy.

The primary mirror of the laser communication vehicle ground optical terminal uses microcrystalline materials. Consideration of costs, the primary mirror lightweight design is not necessary, because the optical terminal has no strict requirements for quality. The primary mirror of laser communication stations is heavy, and its working angle changes constantly. In order to decrease the mirror surface figure, the support structure needs to meet both axial and radial gravity unloading requirements.

In order to ensure the accuracy of the surface shape, the support system not only has a 9-rose axial support structure but also simultaneously balances the radial component of gravity of the primary mirror. Flexible lateral support structures have large size and stress, so it is not suit for the mirror that works a in wide range of rotation. In this paper, in order to balance the radial gravity component of the primary mirror and reduce the size of the radial support structure, a combination of the central axis and the mercury belt is designed to balance the radial gravity component of the primary mirror. In the radial support scheme, the finite element analysis was used to analyze the influence of mercury belt parameters on the surface shape accuracy of the primary mirror. The support parameters were optimized, and the support structure was designed.

For the 600 mm microcrystalline primary mirror of the laser communication station, a composite radial support structure is designed, in which the method of combining the mercury band with the central support is adopted on the basis of the back 9-point support. The support position and structure parameters of mercury band were analyzed and optimized. After the actual application to the optical antenna primary mirror support of the laser communication ground station, the actual measurement results of the primary mirror assembly show that the designed support structure enables a surface shape error and RMS value of the primary mirror smaller than  $\lambda/5$  and  $\lambda/37$ , respectively. The radial support fully achieves the design goal, satisfying the surface error requirements of the laser communication primary mirror.

**Citation:** Li X M, Zhang T S, Zhang J Q, *et al.* Lateral support structure for 600 mm primary mirror of laser communication[J]. *Opto-Electronic Engineering*, 2020, 47(9): 190485

Supported by National Key Research and Development Program (2018YFB1107600), Condition Guarantee Project of the State Administration of Science and Technology (S2201011202)

\* E-mail: lxm Kidd@163.com