

多节点激光通信天线紧凑型摆镜组件设计

李 响, 张立中, 李小明, 柳 鸣, 孟立新

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

摘要 为了减小多节点激光通信天线的工作包络尺寸并提高二维摆镜的运动控制精度, 提出了一种紧凑型摆镜组件。采用高体分铝基碳化硅(SiC/Al)支撑板与 H-K9L 反射镜直接黏接的方案, 提高了摆镜面形的热稳定性, 摆镜回转中心至镜面的距离被缩短至 20 mm。黏接面采用三点薄圆环的设计, 在保证摆镜组件动态刚度的前提下有效降低了黏接应力对摆镜面形的影响。有限元分析结果表明, 摆镜组件的基频为 1319.96 Hz, 在 $(20 \pm 5)^\circ\text{C}$ 工作温度范围内, 面形峰谷(PV)值优于 $\lambda/4$ ($\lambda = 632.8 \text{ nm}$), 面形均方根(RMS)值优于 $\lambda/22$ 。使用 ZYGO 激光干涉仪对摆镜的面形进行检测, 结果表明, 在 $(20 \pm 5)^\circ\text{C}$ 温度范围内, 摆镜面形的 PV 值优于 $\lambda/4$, RMS 值优于 $\lambda/29$, 满足激光通信天线 RMS 为 $\lambda/15$ 的指标要求。

关键词 光通信; 光学天线; 二维摆镜; 平面镜支撑优化; 有限元分析

中图分类号 TN929.13 **文献标识码** A

doi: 10.3788/AOS201737.0906003

Design of Compact Tip-Tilt Mirror Assembly in Multi-Node Laser Communication Antennas

Li Xiang, Zhang Lizhong, Li Xiaoming, Liu Ming, Meng Lixin

National and Local Joint Engineering Research Center of Space Optoelectronics Technology,

Changchun University of Science and Technology, Changchun, Jilin 130022, China

Abstract In order to reduce the working envelope size of multi-node laser communication antennas and improve the motion control accuracy of two-dimensional tip-tilt mirror, a compact mirror assembly is proposed. A scheme of directly bonding between a high volume fraction Al-based SiC (SiC/Al) supporter and a H-K9L plane mirror is adopted. The thermal stability of the tip-tilt mirror surface shape is improved, and the distance between the tip-tilt mirror assembly rotation center and the mirror surface is shortened to 20 mm. The design of three-point thin ring is used on the bonding surface. The influence of the bonding stress on the mirror surface is effectively reduced on the basis of ensuring the dynamic stiffness of the tip-tilt mirror assembly. The results of finite element analysis show that the fundamental frequency of the tip-tilt mirror assembly is 1319.96 Hz. The tip-tilt mirror surface shape peak-valley (PV) value is better than $\lambda/4$ ($\lambda = 632.8 \text{ nm}$) and the root mean square (RMS) value is better than $\lambda/22$ in the working temperature range of $(20 \pm 5)^\circ\text{C}$. A ZYGO laser interferometer is used for testing the mirror surface shape, and the test results show that the PV value of the tip-tilt mirror surface shape is better than $\lambda/4$ and the root mean square (RMS) value is better than $\lambda/29$ in the temperature range of $(20 \pm 5)^\circ\text{C}$. These results are better than tip-tilt mirror surface shape RMS value of $\lambda/15$ and meet the laser communication antenna requirement.

Key words optical communications; optical antennas; two-dimensional tip-tilt mirror; optimization of plane mirror supporting; finite element analysis

OCIS codes 060.2605; 120.4880; 120.6810; 130.1750

1 引 言

近年来,通信系统对数据传输速率的要求不断提高。经过近 30 年的探索与研究,空间激光通信的速率

收稿日期: 2017-03-16; 收到修改稿日期: 2017-05-09

基金项目: 国家自然科学基金(91338116)

作者简介: 李 响(1986—),男,博士,助理研究员,主要从事光学有效载荷光学精密机械结构的设计与优化方面的研究。

E-mail: abelfeel@163.com

由初期演示验证的 1.024 Mbit/s 跃变到目前的 Gbit/s 量级^[1], 相比传统的射频通信, 空间激光通信逐渐显露其技术优势。

激光通信具有发散角窄、光学接收视场小的特性, 因此无法进行多个目标的同时收发, 这给多点通信带来很大难度。为解决这一问题, 研究人员在激光通信光学系统研究的基础上提出了空间多节点同步的激光通信系统^[2], 通过设计多节点激光通信光学天线, 将多路光束进行中继, 使系统能够在方位角为 360° 、俯仰角在 $\pm 20^\circ$ 以内与多个从属光端机同时进行通信。为了保证激光能量的接收效率, 多节点激光通信光学天线设计为以旋转抛物面为基底的多反射镜拼接结构, 且每片反射镜均可以实现二维的摆扫运动。

为了提高二维摆镜的运动控制精度、降低工作包络尺寸并保证多反射镜动态拼接过程中摆镜运动范围不大于主光端机有效通光口径 (274 mm), 摆镜镜面到回转中心的距离 (简称面心距) 要求较为苛刻。为此, 提出了一种紧凑型摆镜组件, 通过对材料的优化配置提高了摆镜面形的热稳定性, 采用背部三点薄圆环的黏接方案有效缩短了面心距, 显著提高了摆镜组件的动态刚度, 降低了黏接剂对摆镜面形的影响, 实现了面心距仅为 20 mm 且摆镜面形的均方根 (RMS) 值优于 $\lambda/15$ ($\lambda = 632.8 \text{ nm}$) 的指标要求。

2 支撑方案选取

反射镜一般采用背部支撑和侧面支撑两种形式, 支撑点的具体数目需依据反射镜的口径大小确定, 口径越大需要的支撑点数越多。这种传统的支撑方式虽然能够使反射镜的面形具有较好的力、热稳定性, 但是其结构较为复杂, 一般由镶嵌件、柔性连接件以及支撑背板三部分组成^[3-9]。因此, 镜面到支撑背板的距离一般较远, 无法满足激光通信天线的要求。

为了缩短二维摆镜的面心距, 这里简化摆镜组件的结构, 将反射镜直接通过支撑板连接到俯仰电机的转子上。支撑板设计为 L 型结构, 将向外的两个相互垂直的面作为工作面, 工作面 a 通过螺钉与摆镜俯仰电机转子相连, 工作面 b 通过黏接剂与平面反射镜背面黏接, 二维摆镜系统结构示意图如图 1 所示。为了有效减小安装应力, 电机转子安装面应与支撑板工作面 a 进行相对研磨以保证 0.005 mm 的平面度。对支撑板工作面 b 进行研磨, 以消除局部高点并达到 0.003 mm 的平面度, 从而避免影响反射镜面形。

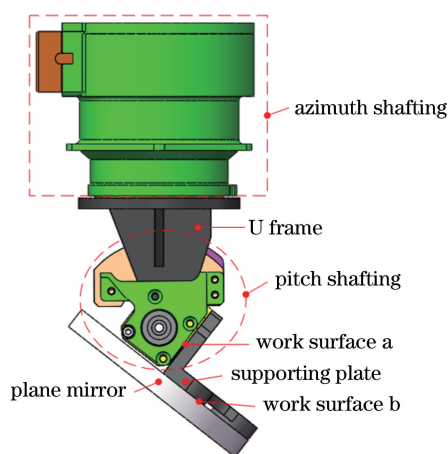


图 1 二维摆镜系统结构示意图

Fig. 1 Structural diagram of two-dimensional tip-tilt mirror system

考虑到工作环境的温度变化以及电机自身的散热情况, 摆镜需能够在 $(20 \pm 5)^\circ\text{C}$ 温度范围内工作, 并保证面形 RMS 值为 $\lambda/15$ 的面形精度。为了提高摆镜组件的热稳定性, 选择线膨胀系数相近的材料加工摆镜与支撑板, 目前常用光学材料与机械材料的属性如表 1 所示, 表中 H-K9L 玻璃与高体分铝基碳化硅 (SiC/Al)、微晶玻璃与殷钢两组材料能够满足条件。为了缩短摆镜组件的面心距, L 型支撑板不应过厚, 因此对支撑材料的比刚度 (弹性模量/密度) 要求较高。由表 1 可以看出, 高体分 SiC/Al 的比刚度为 77, 是钢钢的 4.5 倍, 因此选择高体分 SiC/Al 以及 H-K9L 玻璃作为摆镜组件的材料最为合适。

表 1 常用光学材料与机械材料的属性

Table 1 Properties of universal optical materials and mechanical materials

Material	Density $\rho / (\text{g} \cdot \text{cm}^{-3})$	Elastic modulus E / GPa	Linear expansion coefficient $\alpha / (10^{-6} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1})$
H-K9L glass	2.52	79.2	7.60
Zerodur	2.53	90.6	0.05
SiC	2.92	310.0	2.64
High volume fraction SiC / Al	3.03	235.0	7.80
Al	2.68	68.2	23.60
Titanium alloy (TC4)	4.44	109.0	8.90
Steel (45)	7.81	200.0	11.59
Invar (4J32)	8.10	141.0	0.30

3 黏接面结构设计

为了保证摆镜组件的结构刚度以及面形精度,将支撑板工作面 b 设计为三点薄圆环结构,摆镜组件结构示意图如图 2 所示,该结构通过三个黏接点对反射镜进行运动学约束,6 个自由度都被唯一限制,不存在过约束或欠约束的情况,黏接应力显著减小,结构更为紧凑。单个黏接点采用薄圆环的设计,能够扩大单点黏接半径,减小黏接面积和单点黏接应力。

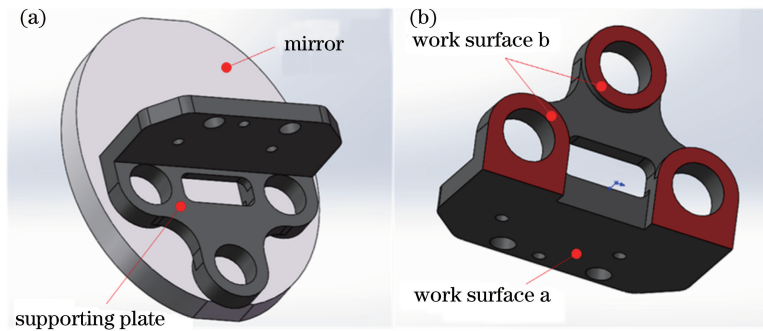


图 2 (a) 摆镜组件结构示意图; (b) 摆镜支撑板结构示意图

Fig. 2 (a) Structural diagram of tip-tilt mirror assembly; (b) structural diagram of tip-tilt mirror supporting plate

在黏接剂固化或环境温度变化期间,黏接剂的尺寸变化与黏接面积成正比,即黏接面积越大,黏接剂的形变就越大^[10-11]。为了减小面心距,将支撑板直接粘到反射镜背面,从而使黏接剂的形变与反射镜的面形产生直接联系,因此在保证黏接强度的同时需尽量减小黏接面积。黏接面如图 3 所示。通过三个黏接点间接地将总黏接圆半径扩大到 R_w ,以提高摆镜组件的动态刚度。为了减小单个黏接点上黏接剂对反射镜面形的影响,将黏接点设计为薄圆环型,使黏接圆环外径增大到 R (内径为 r),实际黏接面积减小到 $\pi(R^2 - r^2)$ 。

当激光通信天线在工作状态时,摆镜镜面与水平方向成 45° ,摆镜设计为长轴为 100 mm、短轴为 80 mm、厚度为 10 mm 的椭圆形反射镜。通过三维设计软件 SolidWorks 计算得到反射镜重量约为 158 g。为了减小黏接剂对反射镜面形的影响,采用单组份室温硫化硅橡胶对反射镜进行黏接,其抗剪切强度 J 为 2~4 MPa。理想情况下安全系数 f_s 一般取 2,考虑到实际工作中存在如黏接面不够洁净、不同黏接剂的性能差异较大以及胶层厚度控制不足等问题,这里将安全系数取为 6。极限加速度 a_G 设为 $100g$ ($g = 9.8 \text{ m/s}^2$),即该结构可以承受 $100g$ 的冲击(本项目要求激光通信天线可承受 $50g$ 的峰值冲击力,留余量后取为 $100g$)。计算得到摆镜的最小黏接面积 Q_{MIN} ^[12] 为

$$Q_{\text{MIN}} = \frac{W a_G f_s}{J}, \quad (1)$$

式中 W 为被黏接光学元件的重量, a_G 为极限加速度, f_s 为安全系数, J 为黏接部位的抗剪切强度。

经过计算,摆镜的黏接总面积应不小于 48.4 mm^2 ,为了有效提高摆镜组件的动态刚度并减小单个黏接

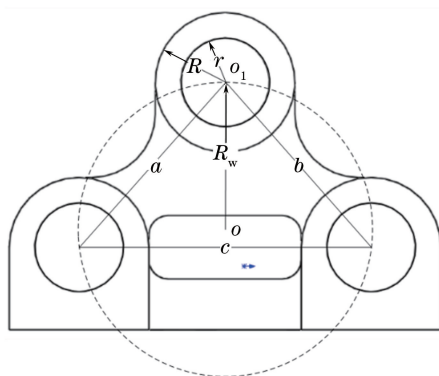


图 3 黏接面

Fig. 3 Adhesive surface

点对摆镜面形的影响,综合考虑二维摆镜系统整体布局,确定总黏接圆半径 $R_w = 23$ mm,单点黏接圆环外径 $R = 10$ mm,内径 $r = 8$ mm。

4 仿真分析

建立摆镜组件的有限元模型,对其进行模态分析,结果如图 4 所示。该组件的 1 阶模态为 1319.96 Hz,动态刚度较高,能够满足激光通信光学天线的要求(激光通信光学天线要求整机模态频率大于 120 Hz,元件模态频率大于 200 Hz)。

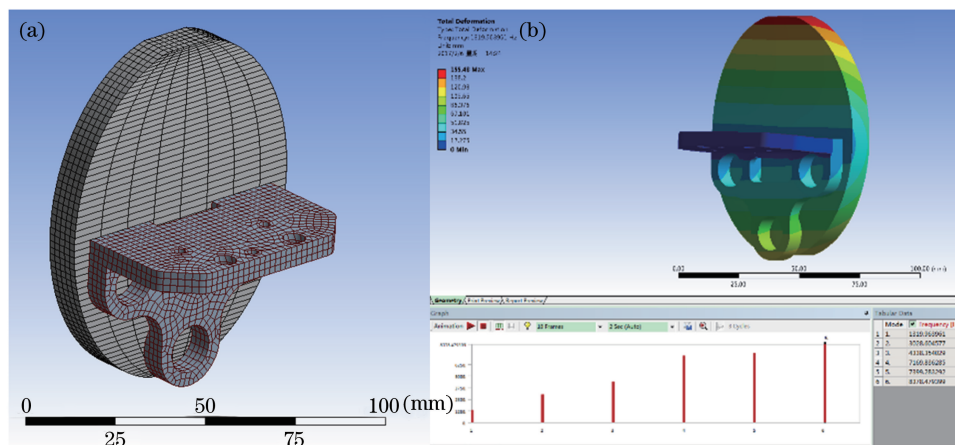


图 4 (a)摆镜组件有限元模型;(b)模态分析结果

Fig. 4 (a) Finite element model of tip-tilt mirror assembly; (b) result of modal analysis

对摆镜组件的力学分析结果如图 5 所示,摆镜镜面与重力方向成 45° 、角加速度为 10 ($^\circ$)/ s^{-2} ,此时摆镜面形的 RMS 值为 $\lambda/110$,峰谷(PV)值为 $\lambda/20$,说明摆镜的自身重力以及运动状态对其面形的影响不大。

在上述工作状态的基础上,进一步仿真分析 15 $^\circ\text{C}$ 和 25 $^\circ\text{C}$ 工作温度下摆镜面形的变化情况。不同温度下的力热耦合分析结果如图 6 所示,可以看出:在 15 $^\circ\text{C}$ 的工作温度下摆镜面形的 RMS 值为 $\lambda/22$,面形 PV 值为 $\lambda/4$;在 25 $^\circ\text{C}$ 的工作温度下摆镜面形的 RMS 值为 $\lambda/23$,面形 PV 值为 $\lambda/4$ 。仿真结果表明,在重力、扭矩以及温度的综合作用下,摆镜面形仍能够满足 $\lambda/15$ 的指标要求,且摆镜面形对温度变化更加敏感。

5 实验验证

通过仿真分析可知,摆镜面形对温度变化较敏感,因此使用 ZYGO 激光干涉仪分别在 15 、 20 、 25 $^\circ\text{C}$ 环境温度下对摆镜组件面形进行检测,检测系统如图 7 所示。

图 8(a)~(c)为不同温度下摆镜面形的检测结果。当环境温度为 15 $^\circ\text{C}$ 时,摆镜面形 PV 值为 0.212λ ($\lambda/4.71$),RMS 值为 0.034λ ($\lambda/29.41$),面形如图 8(a)所示;当环境温度为 20 $^\circ\text{C}$ 时,摆镜面形 PV 值为 0.144λ

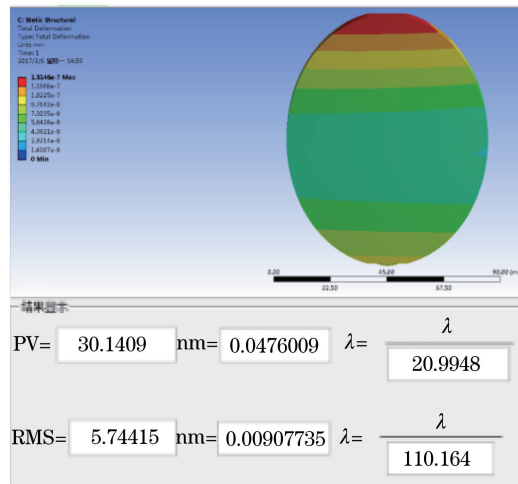


图 5 力学分析结果

Fig. 5 Result of mechanics analysis

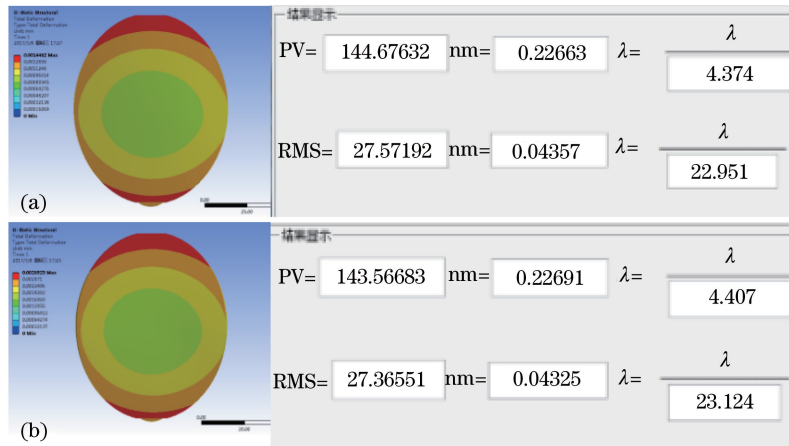


图 6 不同温度下力热耦合分析结果。(a) 15 °C ;(b) 25 °C

Fig. 6 Results of force-heat coupling analysis at different temperatures. (a) 15 °C ; (b) 25 °C

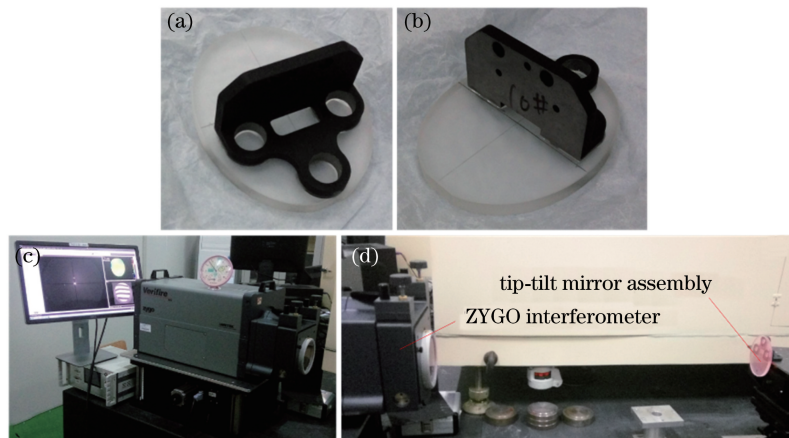


图 7 摆镜组件面形检测系统。(a)(b)摆镜组件;(c)(d)面形检测实验装置

Fig. 7 System for tip-tilt mirror assembly surface shape testing. (a)(b) Tip-tilt mirror assembly; (c)(d) experimental setup of surface shape testing

($\lambda/6.94$),RMS 值为 0.019λ ($\lambda/52.63$), 面形如图 8(b) 所示; 当环境温度为 25 °C 时, 摆镜面形 PV 值为 0.168λ ($\lambda/5.95$),RMS 值为 0.03λ ($\lambda/33.33$), 面形如图 8(c) 所示。实验结果表明, 在 (20 ± 5) °C 的温度范围

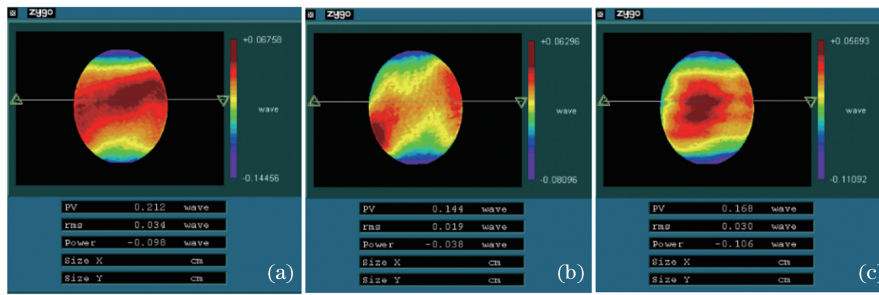


图 8 不同温度下摆镜面形的检测结果。(a) 15 °C;(b) 20 °C;(c) 25 °C

Fig. 8 Results of tip-tilt mirror surface shape testing at different temperatures. (a) 15 °C; (b) 20 °C; (c) 25 °C

内,摆镜面形优于 RMS 值为 $\lambda/15$ 的指标要求,满足激光通信光学天线的使用条件。

6 结 论

为了减小激光通信光学天线的工作包络尺寸并提高二维摆镜的运动控制精度,提出了一种紧凑型摆镜组件。使用高体分 SiC/Al 材料的 L 型支撑板与 H-K9L 玻璃材料的反射镜有效提高了摆镜面形的热稳定性,黏接面采用三点薄圆环的设计,显著减小了黏接应力对摆镜面形的影响,提高了摆镜组件的动态刚度,并且面心距仅为 20 mm。经过仿真分析,摆镜组件的基频为 1319.96 Hz,在 (20 ± 5) °C 的温度范围内,镜面与重力方向成 45°,以 10 (°)/s⁻² 的角加速度进行摆扫时,摆镜面形 RMS 值优于 $\lambda/22$,PV 值优于 $\lambda/4$,[优于 $\lambda/15$ (RMS)的指标要求]。

使用 ZYGO 激光干涉仪对不同温度下摆镜的面形进行了检测。实验结果表明摆镜面形优于 $\lambda/15$ (RMS)的设计值,能够满足系统指标要求。该研究结果为激光通信光学天线的下一步工作提供了基础。

参 考 文 献

- [1] Jiang Huilin, An Yan, Zhang Yalin, *et al.* Analysis of the status quo, development trend and key technologies of space laser communication[J]. Journal of Spacecraft TT&C Technology, 2015, 34(3): 207-217.
姜会林, 安 岩, 张雅琳, 等. 空间激光通信现状、发展趋势及关键技术分析[J]. 飞行器测控学报, 2015, 34(3): 207-217.
- [2] Jiang Huilin, Jiang Lun, Song Yansong, *et al.* Research of optical and APT technology in one-point to multi-point simultaneous space laser communication system[J]. Chinese J Lasers, 2015, 42(4): 0405008.
姜会林, 江 伦, 宋延嵩, 等. 一点对多点同时空间激光通信光学跟瞄技术研究[J]. 中国激光, 2015, 42(4): 0405008.
- [3] Wang Zhongsu, Zhai Yan, Mei Gui, *et al.* Design of flexible support structure of reflector in space remote sensor[J]. Optics and Precision Engineering, 2010, 18(8): 1833-1841.
王忠素, 翟 岩, 梅 贵, 等. 空间光学遥感器反射镜柔性支撑的设计[J]. 光学 精密工程, 2010, 18(8): 1833-1841.
- [4] Bao Qihong, Sha Wei, Chen Changzheng, *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研究[J]. 光子学报, 2017, 46(2): 0222003.
- [5] Li Haixing, Ding Yalin, Zhang Hongwen. Support system study of rectangular mirror[J]. Acta Optica Sinica, 2015, 35(5): 0523002.
李海星, 丁亚林, 张洪文. 矩形反射镜结构支撑技术研究[J]. 光学学报, 2015, 35(5): 0523002.
- [6] Xu Xinxing, Gao Yunguo, Yang Hongbo, *et al.* Large-diameter fast steering mirror on rigid support technology for dynamic platform[J]. Optics and Precision Engineering, 2014, 22(1): 117-124.
徐新行, 高云国, 杨洪波, 等. 车载大口径刚性支撑式快速反射镜[J]. 光学 精密工程, 2014, 22(1): 117-124.
- [7] Dong Deyi, Li Zhilai, Li Ruigang, *et al.* Simulation and experiment of influence of adhesive curing on reflective mirror surface[J]. Optics and Precision Engineering, 2014, 22(10): 2698-2707.
董得义, 李志来, 李锐钢, 等. 胶层固化对反射镜面形影响的仿真与试验[J]. 光学 精密工程, 2014, 22(10): 2698-2707.

- [8] Zhou Ziyun, Gao Yunguo, Shao Shuai, *et al.*. Design of fast steering mirror using flexible hinge[J]. Optics and Precision Engineering, 2014, 22(6): 1547-1554.
周子云, 高云国, 邵 帅, 等. 采用柔性铰链的快速反射镜设计[J]. 光学 精密工程, 2014, 22(6): 1547-1554.
- [9] Qi Guang, Wang Shuxin, Li Jinglin. Design of high volume fraction SiC/Al composite mirror in space remote sensor[J]. Chinese Optics, 2015, 8(1): 99-106.
齐 光, 王书新, 李景林. 空间遥感器高体份 SiC/Al 复合材料反射镜组件设计[J]. 中国光学, 2015, 8(1): 99-106.
- [10] Jia Shuqiang, Huang Wei, Pang Wubin. Influence of adhesive thickness on surface deformation of mirror supported by three-point mount[J]. Optics and Precision Engineering, 2015, 23(7): 2005-2012.
贾树强, 黄 玮, 庞武斌. 胶层厚度对三点支撑反射镜面形的影响[J]. 光学 精密工程, 2015, 23(7): 2005-2012.
- [11] Liu Qiang, He Xin, Zhang Feng, *et al.*. Calculation and control of adhesive layer in reflector athermal mount[J]. Optics and Precision Engineering, 2012, 20(10): 2229-2236.
刘 强, 何 欣, 张 峰, 等. 反射镜无热装配中胶层厚度的计算及控制[J]. 光学 精密工程, 2012, 20(10): 2229-2236.
- [12] Yoder Jr P R. Opto-mechanical systems design[M]. Florida: CRC Press, 2005: 396-398.