

多用途激光通信天线设计

李响, 柳鸣, 李小明, 张家齐, 白杨杨, 孟立新, 张立中

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 为了满足空间多节点激光通信系统的研制与调试要求,提出了一种多用途激光通信光学天线。通过替换透镜或分光组件,实现激光通信光学天线与自准直平行光管功能的切换。对主镜室进行加强设计,提高了系统整体刚度并使其具有遮光罩的功能。主镜室前端面与盘式次镜架连接,方便光学系统的装校工作,内部通过6个粘接点与主镜相连,后端面连接主镜室背板,以提供透镜组件、分光组件及主镜辅助支撑组件的安装接口。有限元分析结果表明,本结构1阶模态为345 Hz,环境温度在 $20\text{ }^{\circ}\text{C}\pm 5\text{ }^{\circ}\text{C}$ 范围内,主镜面形误差均方根值优于 $\lambda/28$ 。使用4维(4D)干涉仪对系统波像差进行检测,结果表明,激光通信光学天线工作模式下系统波前均方根值优于 $\lambda/14$,能够满足激光通信系统的指标要求。

关键词 光通信; 光学天线; 平行光管; 多用途

中图分类号 TN929.13

文献标识码 A

doi: 10.3788/LOP55.020602

Design of Multipurpose Optical Antenna for Laser Communication

Li Xiang, Liu Ming, Li Xiaoming, Zhang Jiaqi, Bai Yangyang, Meng Lixin, Zhang Lizhong

*National and Local Joint Engineering Research Center of Space and Optoelectronics Technology,
Changchun University of Science and Technology, Changchun, Jilin 130022, China*

Abstract We design a multipurpose laser communication optical antenna to develop and debug the space multi-node laser communication system. The laser communication optical antenna and autocollimator can be switched when the lens or the optical beam splitter in the classic Cassegrain system is chosen. The primary mirror room is designed to improve the overall stiffness of the system and can be used as the lens hood of the system. The front end of the primary mirror room is connected with the disc-type secondary frame so as to assemble and debug the optical system conveniently. The primary mirror is fixed through six bonding points in the primary mirror room. The back end is connected with the backboard of the primary mirror room to provide the installation interfaces for lens assembly, optical beam-splitting assembly, and primary mirror auxiliary support. The finite element analysis results show that when the first order mode frequency of this structure is 345 Hz and the ambient temperature is $20\text{ }^{\circ}\text{C}\pm 5\text{ }^{\circ}\text{C}$, the root mean square (RMS) value of surface shape error of the primary mirror is less than $\lambda/28$. Tested by a 4D interferometer, the RMS value of wavefront aberration of the system is less than $\lambda/14$ under work mode of laser communication optical antenna, which can meet the requirements of laser communication system.

Key words optical communications; optical antenna; collimator; multipurpose

OCIS codes 060.2605; 120.4880; 120.6810; 130.1750

1 引言

随着空间光学遥感器指标的不断提升,对数据传输速率的要求也越来越高。由于空间激光通信具有传输速率高、保密性好等优点,该技术已经成为当前空间

信息通信领域研究的热点之一。但激光通信系统束散角较小,无法同时与多个目标进行通信。为了解决该问题,提出了空间多节点同时激光通信系统^[1]。

多节点激光通信链路包含1个主光端机及3个从属光端机,因此快速高效地装校与调试成为空间

收稿日期: 2017-07-17; **收到修改稿日期:** 2017-08-08

基金项目: 国家自然科学基金重大研究计划(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

多节点激光通信系统研制的关键技术之一。由于3个从属光端机需要安装在动态靶标上与系统进行联调,传统静态工况下使用的自准直平行光管无法满足系统调试中多次拆装以及多角度、多工况使用的技术要求。因此迫切需要一种可应用于多工况、多角度并且易拆装的自准直平行光管,为后续装校与调试工作提供技术基础。

针对以上问题,提出一种多用途激光通信光学天线。该天线作为多节点同时激光通信系统的从属光端机,可通过更换主镜室背板上的光学组件快速进行激光通信光学天线与自准直平行光管的功能切换,避免了单独研制平行光管增加的额外工作量与成本。该激光通信光学天线的应用,能够使多个从属光端机互为基准、互相标定,极大地提高了装校与调试效率。使用4D干涉仪对系统波像差进行检测,检测结果表明,激光通信光学天线系统波像差均方根(RMS)值优于 $\lambda/14$ (波长 $\lambda=632.8\text{ nm}$),能够满足激光通信系统的使用要求。

2 工作原理

根据激光通信系统的实际装校与调试的需求,

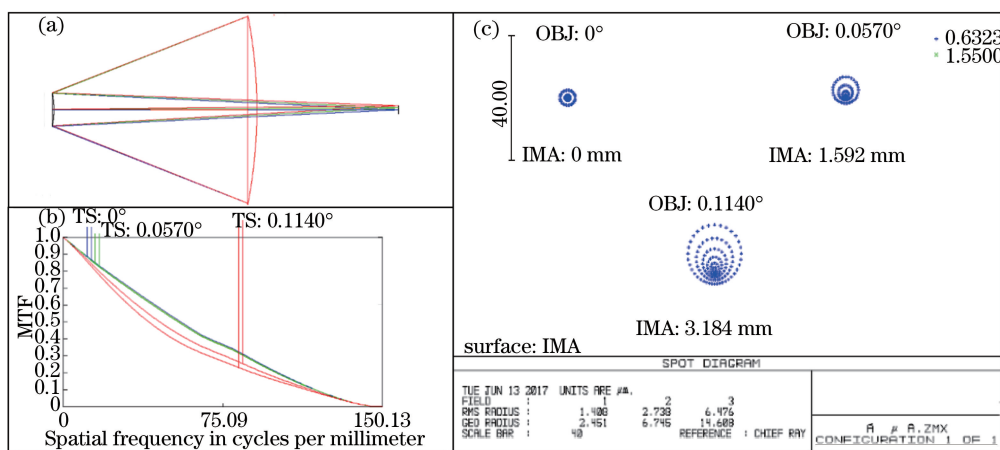


图1 平行光管工作模式光学设计图。(a)光路图;(b)MTF曲线;(c)点列图

Fig. 1 Optical design of working mode of autocollimator. (a) Optical path diagram; (b) MTF curve; (c) spot diagram

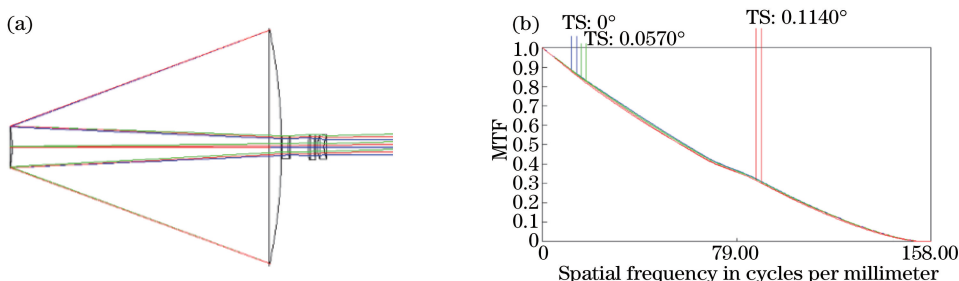


图2 激光通信天线工作模式光学设计图。(a)光路图;(b)MTF曲线

Fig. 2 Optical design of working mode of laser communication optical antenna. (a) Optical path diagram; (b) MTF curve

本文所设计的激光通信光学天线应具有自准直平行光管的功能和激光通信光学天线的功能。在平行光管工作模式下,如图1(a)所示,主镜设计为直径 $\Phi=150\text{ mm}$ 的抛物面,次镜设计为直径 $\Phi=26\text{ mm}$ 的双曲面,根据激光通信系统的要求,平行光管的视场角设计为 4 mrad ,焦距为 1500 mm 。

为了实现自准直平行光管的功能,在光学系统的次镜与焦点之间加入分光元件,令平行光管的发射光路与接收光路隔离,为了给分光组件留出足够的安装空间,光学系统的焦点设置在距离次镜反射面 280 mm 处,此时光学系统调制传递函数(MTF)曲线如图1(b)所示,平行光管焦平面点列图如图1(c)所示,图中TS代表视场角,OBJ代表光阑面,IMA代表像平面。

在激光通信天线工作模式下,如图2(a)所示,保证主、次镜位置不变的前提下,在次镜后设计了3片式透镜组替代分光组件,将焦距为 1500 mm 的准直系统转化为放大率为15倍的无焦望远系统,该系统能将接收到的 $\Phi 150\text{ mm}$ 的光束缩束到 $\Phi 10\text{ mm}$ 并输出到后续激光通信光学系统中进行处理,光学系统MTF曲线如图2(b)所示。

3 光机结构设计

由于多节点激光通信系统的从属光端机须要安装在动态靶标上与主光端机进行激光通信实验,验证系统的动态跟踪与通信能力,因此光机结构设计时应增强系统的动态刚度,保证运动状态下主、次镜的位置稳定,使光学天线在运动中仍能保持较好的像质水平。

针对激光通信天线的使用要求,本文对主镜室进行了加强设计,前端面延长至次镜附近,增加了与“盘式”次镜架连接的机械接口,提高了次镜组件的位置稳定性,增加了系统的整体刚度,其工作模式结构图如图3所示。在主镜室内部设计多个环形光阑,保证光学系统不受视场外杂光影响,使主镜室同时具备光学系统遮光罩的功能。主镜室与主镜通过止口保证光轴与机械轴同轴,并通过主镜外圆周面的6个粘接点与主镜室进行固定^[2-13],配合主镜背部的3点辅助支撑,能够保证光学天线在多种环境下使用的可靠性。主镜室后端面通过6个M5的螺钉与主镜室背板相连,两者通过止口配合保证主镜室与主镜室背板的机械轴同轴,主镜室背板上安装透镜组件,并通过研磨垫片调整透镜组件的轴向离焦量,调整完成后使用螺钉固定,定位销定位。

将主镜室背板上的透镜组替换为分光组件后,该系统能够转换为自准直平行光管的工作模式,结构图如图4所示。平行光管的发射光路采用光纤光源,可以通过研磨光纤适配器的垫片来调节平行光管轴向的离焦量。接收光路使用分辨率为1024 pixel×1024 pixel、单个像元尺寸为7.4 μm的CCD相机作为

探测器。发射光路与接收光路调节同轴后,可以实现自准直功能,能够达到5 μrad的角分辨率,可以满足激光通信从属光端机的调试需求。

为了提高激光通信系统的环境适应性、降低研制成本、缩短研制周期,主镜室及主镜室背板等主要承力零件使用比刚度(比刚度是指材料的弹性模量与其密度的比值)较高的钛合金材料,以便提高系统的整体刚度。由于主镜是直接粘接在主镜室中,当环境温度发生改变时主镜室的热变形将直接影响主镜的面形误差,因此主镜材料的线膨胀系数应该与钛合金相匹配,如表1所示,H-K9L玻璃的线膨胀系数与钛合金接近并且成本较低,较为合适。次镜由于口径较小,高精度加工难度较大,因此选用光学加工性能较好的微晶玻璃材料。为了保持次镜面形的热稳定性,采用钢制次镜座与其配合使用(次镜组件口径较小,成本不高)。其余材料对系统性能影响较小,采用铝合金,重量轻、经济实惠。

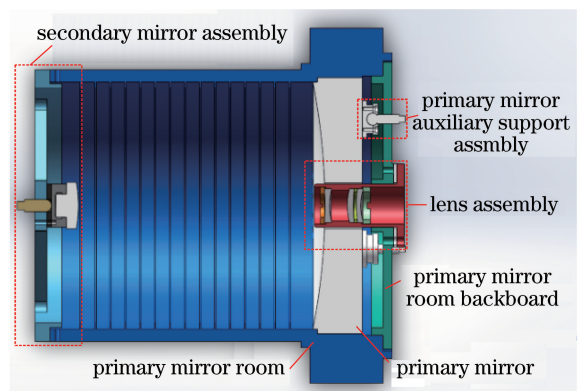


图3 激光通信天线工作模式结构图

Fig. 3 Structure diagram of working mode of laser communication optical antenna

表1 材料属性表

Table 1 Material properties table

Material	Elastic modulus E /GPa	Density ρ / ($\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$)	Thermal conductivity κ / [$\text{W}\cdot(\text{m}\cdot\text{K})^{-1}$]	Linear expansion coefficient α / ($10^{-6}\cdot^{\circ}\text{C}^{-1}$)
Zerodur	90.6	2.53	1.64	0.05
Invar (4J32)	141	8.1	13.9	0.04
Titanium alloy (TC4)	109	4.44	7.8	8.9
Aluminium alloy (2A12)	68.2	2.68	167	23.6
H-K9L glass	79.2	2.52	1.1	7.6

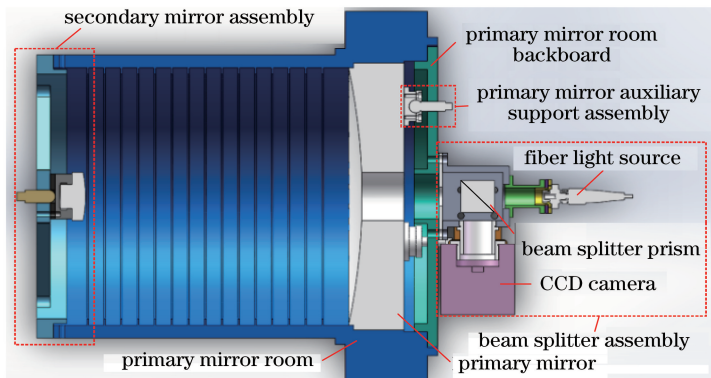


图 4 自准直平行光管工作模式结构图

Fig. 4 Structure diagram of working mode of autocollimator

4 仿真分析

为了验证设计方案的可行性,针对激光通信天线的结构建立了有限元模型,如图 5 所示,使用 ANSYS 有限元分析软件对该结构进行了模态分析,结果表明,本结构 1 阶模态频率为 345 Hz,具有较好的整机动态刚度,能够满足激光通信从属光端机多种工作状况下的使用要求。

由于本系统次镜组件中次镜与次镜座采用微晶玻璃与钢钢作为材料,两者线膨胀系数差异较小(仅为 $1 \times 10^{-8} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$,可以忽略),因此次镜面形误差对于

工作环境温度的变化并不敏感。相比次镜组件,主镜使用的 H-K9L 玻璃与主镜室使用的钛合金线膨胀系数差异较大,应重点进行分析。为此,在 $20 \text{ } ^\circ\text{C} \pm 5 \text{ } ^\circ\text{C}$ 的温度范围内分析环境温度对本结构中主镜面形误差的影响,如图 6(a)所示,使用球面拟合软件对主镜面形误差有限元分析结果进行处理,结果表明,在环境温度升至 $25 \text{ } ^\circ\text{C}$ 时,主镜面形误差峰谷(PV)值为 $\lambda/8$,RMS 值为 $\lambda/43$ 。如图 6(b)所示,在环境温度降至 $15 \text{ } ^\circ\text{C}$ 时,主镜面形误差 PV 值为 $\lambda/5$,RMS 值为 $\lambda/28$,能够满足激光通信系统对于主镜面形误差 RMS 值 $\lambda/25$ 的指标要求。

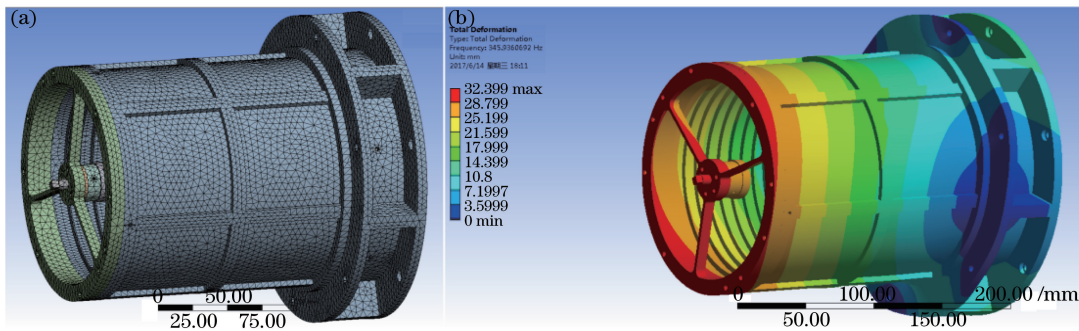


图 5 激光通信光学天线模态分析

Fig. 5 Modal analysis of the laser communication optical antenna

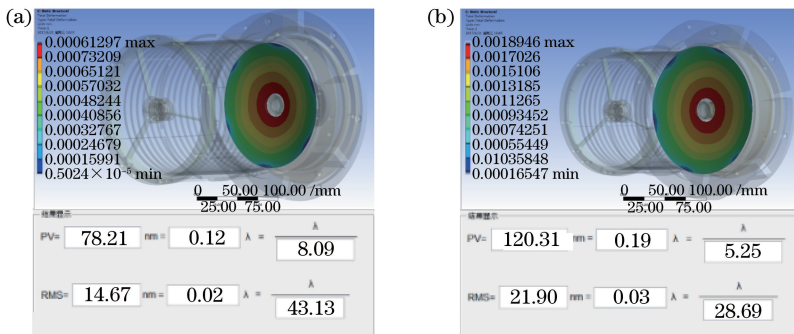


图 6 工作环境温度改变时主镜面形误差仿真结果。(a)温度为 $25 \text{ } ^\circ\text{C}$; (b)温度为 $15 \text{ } ^\circ\text{C}$

Fig. 6 Simulation results of the surface shape error of the primary mirror when the ambient temperature is changed.

(a) Temperature is $25 \text{ } ^\circ\text{C}$; (b) temperature is $15 \text{ } ^\circ\text{C}$

5 实 验

激光通信天线装校完成后,使用 4D 干涉仪与标准平面反射镜对其系统波像差进行了检测,如图 7(a)所示。4D 干涉仪发射标准平面波,通过激光通信天线将 4D 干涉仪的出射光扩束到 $\Phi 150$ mm,经过 $\Phi 300$ mm 的标准平面反射镜将检测光束反射回 4D 干涉仪,实现

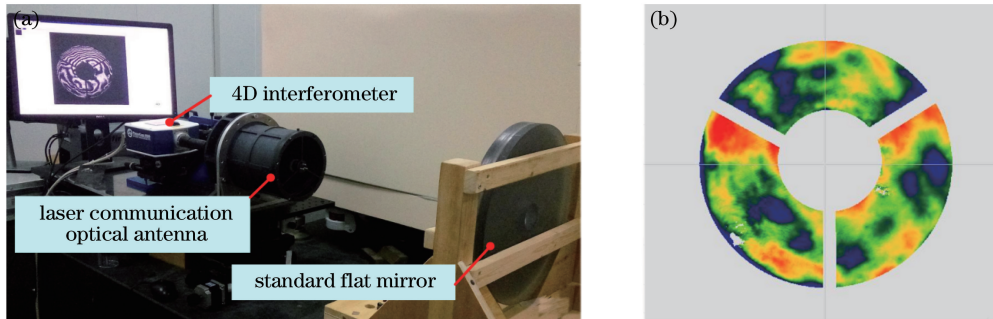


图 7 激光通信光学天线波像差检测。(a)检测现场;(b)检测结果

Fig. 7 Wavefront aberration detection of the laser communication optical antenna.

(a) Testing in the laboratory; (b) test results

6 结 论

为了提高空间多节点激光通信系统的研制与调试效率,提出了一种多用途激光通信光学天线,通过更换透镜组件及分光组件,可以实现激光通信光学天线与自准直平行光管功能的切换。基于对多种材料热学性能的分析对比,合理搭配使用各种材料,提高了在环境温度发生改变时光学系统像质的稳定性,降低了研制成本。采用盘式次镜架的设计、承力一体式主镜室、6 点周边粘接及背部辅助 3 点支撑的主镜支撑方式,令整个系统具有较高的动态结构刚度,能够满足多工况下的使用需求。使用有限元分析软件对该结构进行了整机模态以及主镜面形热学稳定性的分析,结果表明,本系统基频能够达到 345 Hz,具有较好的动态刚度。当环境温度在 $20\text{ }^{\circ}\text{C} \pm 5\text{ }^{\circ}\text{C}$ 范围内波动时,主镜面形误差 RMS 值优于 $\lambda/28$,可以满足激光通信系统对于主镜面形误差 RMS 值优于 $\lambda/25$ 的指标要求。系统完成装校后,使用 4D 干涉仪对系统波像差进行检测,检测结果表明激光通信光学天线系统波像差 RMS 值优于 $\lambda/14$,满足激光通信系统的使用要求,本系统能够为该课题后续研究工作提供技术依据。

参 考 文 献

[1] Jiang H L, Jiang L, Song Y S, *et al.* Research of optical and apt technology in one-point to multi-point

激光通信天线系统波像差的检测。检测过程中应保证 4D 干涉仪、激光通信天线以及标准平面反射镜的光轴同轴,防止引入额外像差影响检测结果的准确性。

如图 7(b)所示,检测结果表明激光通信天线系统波像差 PV 值为 0.539λ ($\lambda/1.86$), RMS 值为 0.0699λ ($\lambda/14.31$),能够满足激光通信系统对于光学天线波像差 RMS 值 $\lambda/14$ 的指标要求。

simultaneous space laser communication system [J]. Chinese Journal of 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.

[2] Li C, He X. Design of lightweight large aperture mirrors and supporting structures [J]. Laser Technology, 2015, 39(3): 337-340.

李畅, 何欣. 大口径反射镜轻量化及其支撑结构设计 [J]. 激光技术, 2015, 39(3): 337-340.

[3] Xu H, Guan Y J. Structural design of large aperture SiC mirror subassembly [J]. Infrared and Laser Engineering, 2014, 43(S1): 83-88.

徐宏, 关英俊. 大口径 SiC 轻量化反射镜组件的结构设计 [J]. 红外与激光工程, 2014, 43(S1): 83-88.

[4] Liu F H, Cheng Z F, Shi L, *et al.* Design and analysis of supporting structure for rectangular mirror [J]. Infrared and Laser Engineering, 2015, 44(5): 1512-1517.

刘福贺, 程志峰, 石磊, 等. 长条形反射镜支撑结构设计与分析 [J]. 红外与激光工程, 2015, 44(5): 1512-1517.

[5] Cheng Z F. Mechanical design of support structure of reflector in aerial camera [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2014, 35(6): 87-90.

程志峰. 航空相机反射镜支撑结构设计 [J]. 仪器仪表学报, 2014, 35(6): 87-90.

[6] Li H X, Ding Y L, Zhang H W. 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.
- [7] Yoder P R. *Opto-mechanical systems design* [M]. 3rd ed. Florida: CRC Press, 2005.
- [8] Miller J L, Friedman E. *Photonics rules of thumb* [M]. New York: McGraw Hill, 2003.
- [9] Arnold L. Optimized axial support topologies for thin telescope mirrors[J]. *Optical Engineering*, 1995, 34(2): 576-574.
- [10] Wang N X, Hui S W. The flexible support structure design of the glued primary-secondary mirror of the aviation dual-band camera [J]. *Chinese Journal of Scientific Instrument*, 2014, 35(6): 77-81.
- 王乃祥, 惠守文. 航空双波段相机胶粘主次镜柔性支撑结构设计[J]. *仪器仪表学报*, 2014, 35(6): 77-81.
- [11] Fan L, Wang Z, Cao Y Y. Analysis of mirror support based on active moment correction [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2015, 44(4): 1273-1277.
- 范磊, 王志, 曹玉岩. 基于力矩主动校正的反射镜支撑分析[J]. *红外与激光工程*, 2015, 44(4): 1273-1277.
- [12] Shao L, Wu X X, Chen B G, *et al.* Passive support system of light-weighted SiC primary mirror [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2015, 23(5): 1380-1386.
- 邵亮, 吴小霞, 陈宝刚, 等. SiC 轻量化主镜的被动支撑系统[J]. *光学精密工程*, 2015, 23(5): 1380-1386.
- [13] Xin H W, Liu J, Liu L, *et al.* Support structure of primary mirror for small optical remote sensor [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2015, 23(4): 1027-1033.
- 辛宏伟, 刘巨, 刘磊, 等. 小型光学遥感器主镜室的光机结构[J]. *光学精密工程*, 2015, 23(4): 1027-1033.