

DOI: 10.3969/j.issn.1007-5461. 2020.03.006

捕获与跟踪望远镜光机结构设计

张 岩¹, 李 桐², 陈宝刚¹, 范文强¹, 王 亮¹

(1 中国科学院长春光学精密机械与物理研究所光电探测部, 吉林 长春 130033;

2 中国成套工程有限公司, 北京 100044)

摘 要: 针对某 400 mm 口径捕获与跟踪望远镜, 提出了一种结构设计方案。在该方案中, 对主镜支撑采用三点柔性底支撑加球头芯轴侧支撑的结构, 避免支撑应力干涉, 保证主镜具有高面形精度; 在主、次镜连接环节中使用钢钢连杆结构, 确保大温差下主、次镜间距的变化在公差范围内, 保证望远镜在极限条件下具有良好像质。进而建立望远镜整体结构的有限元模型, 分析了主镜面形精度及镜筒结构强度, 得出主镜面形均方根 (RMS) 值优于 $\lambda/40$, 主、次镜相对偏心及倾斜分别为 $3\ \mu\text{m}$ 、 $2.5''$, 满足指标要求。使用激光干涉仪及平行光管对望远镜光学指标进行了定量检测, 发现光学系统 RMS 值优于 $\lambda/14$, 星点半峰全宽 (FWHM) 值为 1.432, 接近衍射极限水平。所设计方案对同类望远镜的结构设计具有一定参考价值。

关键词: 应用光学; 光机结构; 主镜支撑; 衍射极限; 面形精度

中图分类号: TH743

文献标识码: A

文章编号: 1007-5461(2020)03-0294-08

Optical and mechanical structure design of capture and tracking telescope

ZHANG Yan¹, LI Tong², CHEN Baogang¹, FAN Wenqiang¹, WANG Liang¹

(1 Department of Photoelectric Detection, Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics,

Chinese Academy of Sciences, Changchun 130033, China;

2 China National Complete Engineering Corporation, Beijing 100044, China)

Abstract: A structural design scheme is proposed for a 400 mm aperture capture and tracking telescope. In this scheme, the main mirror is supported by three-point flexible bottom support and ball head spindle side support to avoid the interference of support stress and ensure that the main mirror has high profile accuracy. And an indium steel connecting rod structure is used in the connection of primary mirror and secondary mirror to ensure that the distance between primary and secondary mirrors changes within the tolerance range under large temperature difference, so that the telescope has good image quality under the limit conditions. Furthermore, the finite element model of the whole structure of the telescope is established, and the shape accuracy of the main mirror and the structural strength of the barrel are analyzed. The root mean square (RMS) value of the main mirror shape is better than $\lambda/40$, and the relative eccentricity and inclination of primary mirror and secondary mirror are $3\ \mu\text{m}$ and $2.5''$ respectively, which meets the index requirements. Finally, the optical parameters of the telescope are measured quantitatively by using laser

基金项目: Supported by Excellent Young Talents Fund of Science and Technology Development Plan of Jilin Province (吉林省科技发展规划优秀青年人才基金, 20180520076JH)

作者简介: 张 岩 (1988 -), 吉林长春人, 硕士, 助理研究员, 主要从事地基望远镜光机结构方面的研究。

E-mail: zhangfirstyan@126.com

收稿日期: 2019-10-17; **修改日期:** 2019-11-18

interferometer and collimator, and it is found that the RMS value of optical system is better than $\lambda/14$, the full width at half maxima (FWHM) value of star point is 1.432, which is close to the diffraction limit level. The designed scheme has certain reference value for the structure design of similar telescopes.

Key words: applied optics; optical mechanical structure; main mirror support; diffraction limit; surface accuracy

1 引 言

随着近几年我国科学技术突飞猛进地发展，望远镜的光机结构设计水平得到显著提高^[1~3]。在望远镜的光学元件支撑方面，Gao 等^[4]提出了一种新型主动调节侧支撑机构，可以大幅提高主镜面形精度；Zhao 等^[5]提出了望远镜次镜支撑结构的动力学建模及模态分析方法，对次镜四翼梁结构进行了优化研究；He 等^[6]提出了望远镜主镜重力卸载点布局优化方法，基于位置闭环的重力卸载策略，使望远镜光学组件的最佳位姿得到大幅改善及提高。在望远镜光学设计方面，大视场大口径斜轴离轴三反结构等各种新型光学成像系统设计及优化技术有突破性研究进展^[7~9]。此外，很多学者对望远镜的热适应性能进行了分析研究，对改善望远镜精度指标、成像质量等都有很大的参考价值^[10~12]。

以上研究工作的开展都是针对望远镜的某个关键模块，本文则针对某 400 mm 口径捕获与跟踪望远镜，提出了望远镜系统级的光机结构集成设计、分析及检测方法。根据光学参数指标，进行了详细的结构方案阐述，并对主镜支撑结构、望远镜镜筒等关键部件进行了有限元建模及仿真分析，最后对望远镜的光学成像质量进行了实验测试，以验证系统结构的可靠性。本文设计方案为同类望远镜的光机结构设计提供了一定参考。

2 光学参数

400 mm 可见光粗跟踪望远镜采用改进的卡塞格林系统，即 RC 形式光学系统。主、次镜均采用双曲面，以提高轴上点成像质量。其光学系统组成如图 1 所示，光学元件参数如表 1 所示。

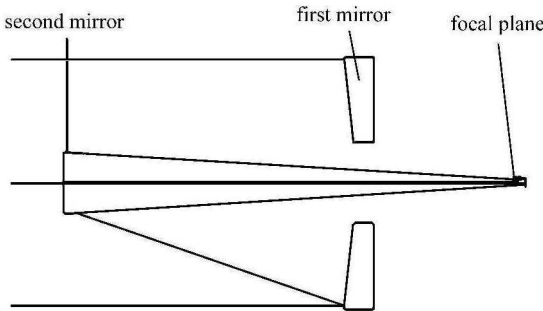


Fig.1 Optical system scheme of 400 mm telescope

Table 1 Parameter list of optical elements

Component number	M1	M2
Material	Glass ceramics	Glass ceramics
Aperture/mm	400	140
Reflector type	Double curved surface	Double curved surface
Radius of curvature/mm	970	434.68

望远镜光学系统设计结果如下: 1) 入瞳口径为 400 mm; 2) 系统焦比为 $F/6.25$; 3) 系统焦距为 2500 mm; 4) 系统全视场为 $0.3^\circ \times 0.3^\circ$; 5) 80% 能量集中度小于 $18.1 \mu\text{m}$ 。

3 结构设计

基于系统光学参数, 设计望远镜结构方案如图 2 所示。主要包括主镜组件、次镜组件、镜筒组件及成像系统等结构。

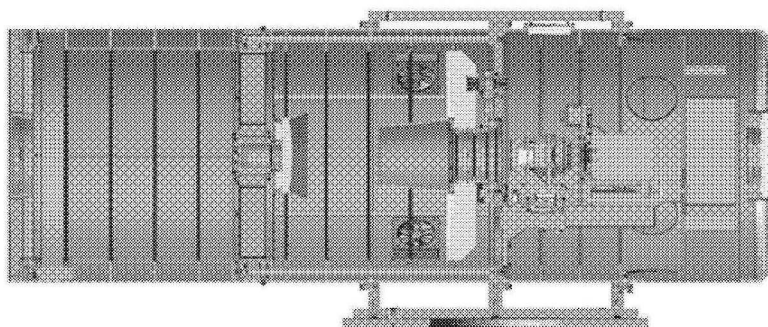


Fig.2 Overall structure of the designed telescope

3.1 主镜组件

主镜支撑结构采用三点柔性底支撑加球头芯轴侧支撑的方案, 如图 3、图 4 所示。主镜芯轴外球面与望远镜主镜中孔柱面高精度配合, 保证间隙小于 0.01 mm , 限制主镜水平方向两维平移; 三组底支撑组件采用柔性结构, 限制主镜竖直方向的平移及水平方向的两维倾斜。支撑结构中的柔性环节可避免无应力干涉, 保证主镜具有高面形精度。

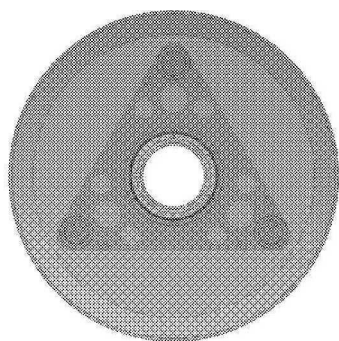


Fig.3 Schematic diagram of main mirror support assembly

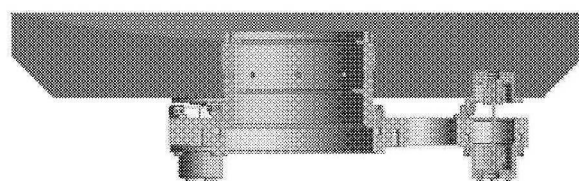


Fig.4 Sectional view of main mirror support assembly

主镜支撑结构中, 主镜芯轴与主镜底支撑粘接平板材料均选用铟钢。铟钢为铁镍合金, 具有较低的热膨胀系数, 根据镍的含量不同, 热膨胀系数略有不同, 平均热膨胀系数约在 1.5×10^{-6} 。具体热膨胀系数曲线如图 5 所示。从图中可以看出, 当铟钢中镍含量在 25% ~ 45% 时, 热膨胀系数可低于 1×10^{-6} , 基本可与主镜热膨胀系数匹配。

3.2 次镜组件

次镜安装夹持在次镜基座中, 采用三点压边方式将其固定, 同时在次镜背面中心孔内, 预留粘接定位环, 定位环与次镜基座互不干涉。调焦内环与调焦外环间隙配合, 以便于装调时次镜轴向滑动调焦。次镜调焦通过三点推拉式微调并锁紧。整个次镜支撑及调整部分均通过调焦外环固定在三翼环梁中心孔处, 在三翼环梁上设有微调机构, 以修正次镜的装调偏心以及倾斜。次镜支撑调整组件布局及剖视图如图 6 所示。

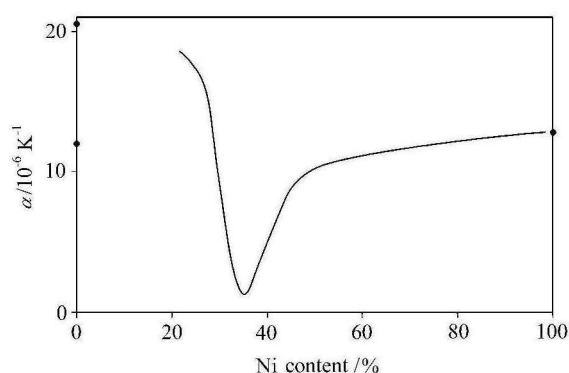


Fig.5 Thermal expansion coefficient curve of indium steel

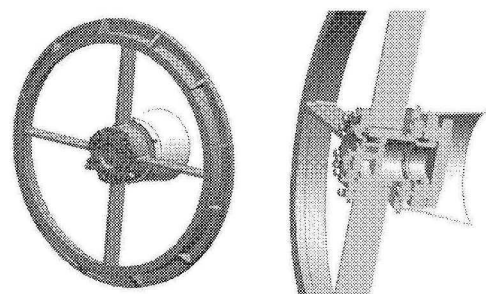


Fig.6 Structural diagram of secondary mirror support assembly

由于次镜口径较小, 径厚比相对较大, 次镜由支撑引起的重力变形可以忽略不计, 并且支撑部分组件采用与次镜材料膨胀系数相匹配的钢材材质, 压边区域与镜体台面相接触部分采用弹性的薄橡胶层, 因此可以将支撑应力对次镜面形精度的影响减少到最低。

3.3 镜筒结构

为保证望远镜整体较轻, 同时又具有大温差下高像质的要求, 望远镜镜筒采用镁铝合金结构, 而主、次镜组件通过钢材杆轴向定位连接。

由光学设计分析可知, 主、次镜之间的距离变化对光学系统的成像质量影响非常大。由于温度效应的影响, 使系统出现较大的离焦, 产生严重的像差。

主、次镜间距由于热膨胀引起的变化为

$$\Delta L = \alpha \cdot \Delta T \cdot L,$$

式中 α 为材料热膨胀系数, L 为支撑结构的作用长度, ΔT 为温度变化值。在一定温差下, 需减小主、次镜之间连接材料的膨胀系数。在系统的总体设计上, 为了控制重量并保证一定的刚度, 主体框架采用了较轻的铝材质, 而铝材质的膨胀系数 ($22 \times 10^{-6} \text{ K}^{-1}$) 远高于光学误差指标要求。为此, 主、次镜组件的连接采用如图 7 所示的方式, 通过钢材杆直接将次镜三翼环梁与主镜支撑基座相连接, 三翼环梁与框架筒壁适当间隙配合。同时在靠近三翼环梁的镜筒环面的托孔处相应布置三个线性轴承与钢材杆配合, 一方面增加次镜支撑、调整组件的稳定性, 另一方面能够保证温度变化时镜筒的变化与钢材杆间相对的线性位移顺畅, 不出现卡死现象。

通过计算, 在 60°C 温差下, 使用钢材杆连接结构而带来的主、次镜的间距变化为 $22.8 \mu\text{m}$, 满足光学公差要求。

4 仿真分析

4.1 主镜分析

为了使主镜的支撑面形精度最佳, 首先采用有限元分析软件 ANSYS 对裸镜的底支撑点位置进行优化, 以底支撑半径为设计变量, 面形精度 RMS 值为目标函数, 最终确定底支撑半径为 145 mm 。确定主镜底支撑点最佳位置后, 对主镜支撑组件整体建模, 其中主镜材料为微晶, 芯轴、底支撑件材料为钢材。主镜组件有限元模型如图 8 所示。

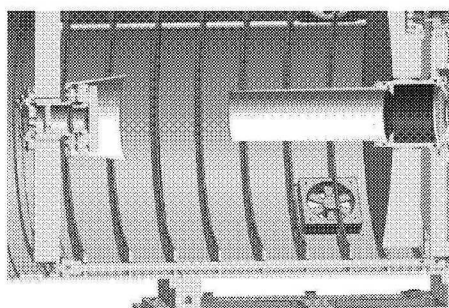


Fig.7 Schematic diagram of indium steel rod connection structure of telescope

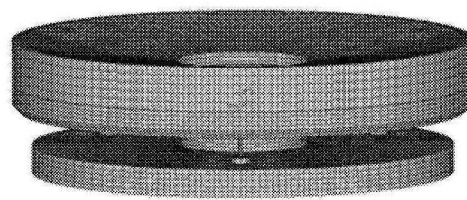


Fig.8 Finite element model of main mirror assembly

在主镜水平放置状态下,得到主镜变形云图如图 9 所示,主镜面形 RMS 值为 14.7 nm ($\lambda/45$, $\lambda = 630$ nm),满足指标要求。

4.2 镜筒刚度分析

通过有线有限元 ANSYS 软件,对系统进行整体建模,系统有限元模型如图 10 所示。分析其总体刚度及谐振频率,约束安装板底面,得到系统谐振状态如图 11 所示,分析结果表明系统谐振频率为 200 Hz,刚度性能指标良好。

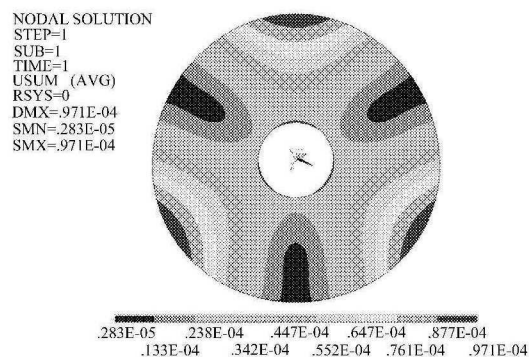


Fig.9 Main mirror cloud

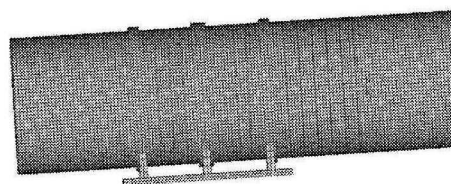


Fig.10 System finite element model

为进一步确定主次镜变形量,分析在重力(重力方向与约束面平行,与系统主光轴垂直)作用下系统的刚性变形量及主、次镜相对偏心量,得到的变形云图如图 12 所示。主、次镜组件变形云图如图 13 所示,由分析结果可以得出,系统在重力作用下最大刚性变形量为 0.009 mm,主、次镜相对偏心量为 0.003 mm,并计算得出由刚体位移带来的主、次镜相对倾斜 $2.5''$,满足系统技术指标要求。

5 实验测试

将主、次镜安装,通过机械结构定位精度进行粗装调,而后在主镜前放置平面反射镜,通过在焦点位置放置干涉仪进行自准直波像差检验,如图 14 所示。

经干涉仪检测,400 mm 主、次系统面形精度 RMS 值为 0.0672,优于 $\lambda/14$,达到理想设计结果,接近光学系统衍射极限水平。主、次系统面形检测图如图 15 所示。

使用 30 m 焦距平行光管检测望远镜星点成像质量,通过像元尺寸 $13 \mu\text{m}$ 探测器监视成像质量,如图 16 所示。对星点成像的分析表明轴上星点半峰全宽 (FWHM) 约为 1.432,如图 17 所示。换算成 80% 能量集中度约为 $18.6 \mu\text{m}$,接近衍射极限水平,光学成像质量良好。

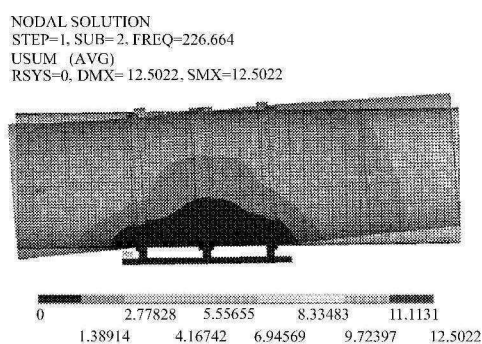


Fig.11 Cloud chart of system resonance frequency

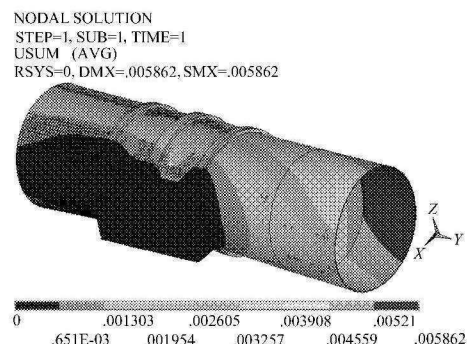


Fig.12 Cloud chart of gravity deformation of the system

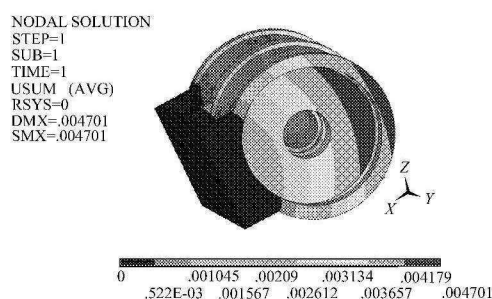
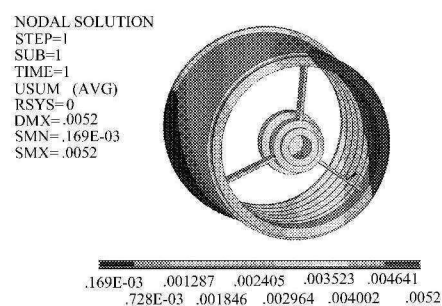


Fig.13 Deformation cloud chart of primary and secondary mirror components.



(a) Main tube deformation cloud; (b) Secondary mirror tube deformation

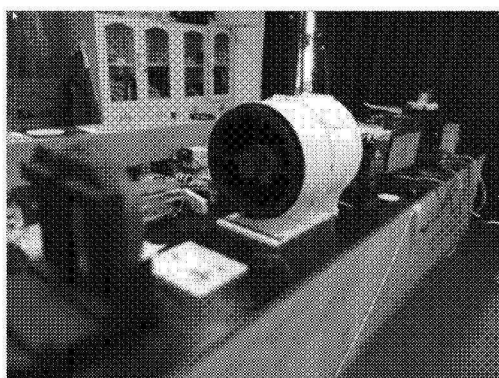


Fig.14 Optical accuracy test of the telescope

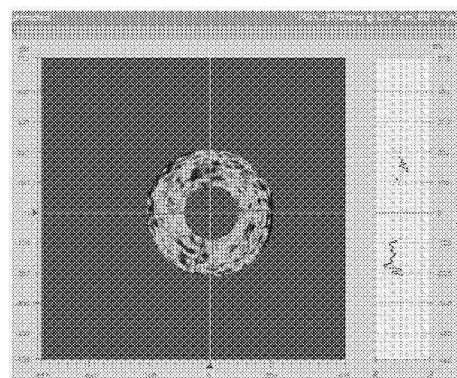


Fig.15 Profile inspection diagram of 400 mm primary and secondary mirror system

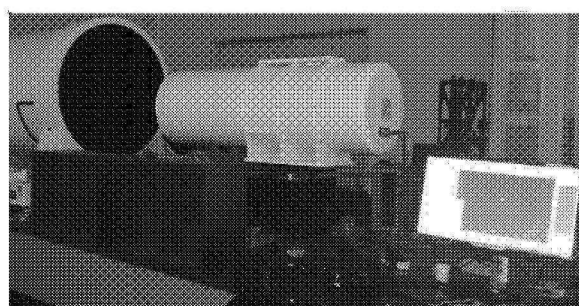


Fig.16 Inspection diagram of collimator

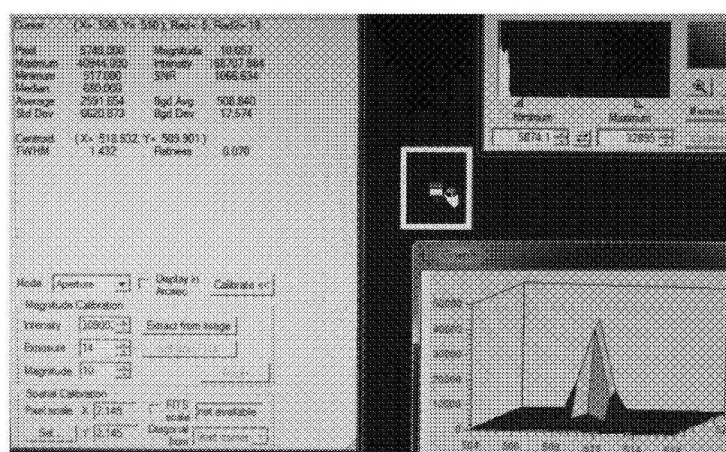


Fig.17 Star point detection diagram of telescope

6 结 论

针对 400 mm 口径望远镜提出了系统级的光机结构集成设计、分析及检测方法。主镜所采用的三点柔性底支撑加球头芯轴侧支撑的结构方案,可保证主镜面形 RMS 值优于 $\lambda/40$ 。在主、次镜连接环节中使用铰钢连杆结构,确保大温差下主次镜间距变化在公差范围内,保证望远镜在极限条件下具有良好像质。建立望远镜镜筒有限元模型,分析了望远镜结构刚度。最后开展检测实验,光学系统 RMS 值优于 $\lambda/14$,星点 FWHM 值为 1.432,接近衍射极限水平。所提出设计方案对同类望远镜的结构设计具有一定参考价值。

参考文献 :

- [1] Zhao Yongzhi, Shao Liang, Ming Ming, *et al.* Assembly for large aperture telescope primary mirror support system [J]. *Infrared and Laser Engineering* (红外与激光工程), 2017, 46(9): 0918003 (in Chinese).
- [2] An Qichang, Zhang Jingxu, Yang Fei, *et al.* On middle frequency error distribution of large telescope based on structure function [J]. *Optics and Precision Engineering* (光学 精密工程), 2017, 25(2): 433-440 (in Chinese).
- [3] Dong Liyuan, Zhang Silong, He Feng, *et al.* Thermal structure analysis of tracking telescope frame [J]. *Chinese Journal of Quantum Electronics* (量子电子学报), 2019, 36(4): 408-415 (in Chinese).
- [4] Gao Zechao, Hao Liang, Wang Fuguo, *et al.* Design and optimization of active adjusting lateral support mechanism for 2 m telescope [J]. *Infrared and Laser Engineering* (红外与激光工程), 2019, 48(8): 0814001 (in Chinese).
- [5] Zhao Hongchao, Zhang Jingxu, Yang Fei, *et al.* Secondary mirror supporting structure for 1.2 m telescope [J]. *Optics and Precision Engineering* (光学 精密工程), 2017, 25(10): 2614-2619 (in Chinese).
- [6] He Xu, Yang Xue, Li Yi, *et al.* Gravity compensation optimization algorithm for large aperture spatial optical telescope [J]. *Optics and Precision Engineering* (光学 精密工程), 2018, 26(11): 2764-2775 (in Chinese).
- [7] Liu Qiang, Wang Xin, Huang Genghua, *et al.* Optical design of wide field view and large relative aperture off-axis three-mirror reflective system with tilted optical axis [J]. *Acta Photonica Sinica* (光子学报), 2019, 48(3): 0322002 (in Chinese).
- [8] Li Fei, Wang Keyi. Design of optical imaging system for RGB three-channel diffraction telescope [J]. *Journal of Applied Optics* (应用光学), 2019, 40(3): 369-372 (in Chinese).

-
- [9] Qiang Pengfei, Sheng Lizhi, Li Linsen, *et al.* Optical design of X-ray focusing telescope [J]. *Acta Photonica Sinica* (物理学报), 2019, 68(16): 160702 (in Chinese).
- [10] Tan Yufeng, Wang Jihong, Ren Ge, *et al.* Effect of thermal control of thermal boundary layer on image quality with large-aperture primary mirror [J]. *Infrared and Laser Engineering* (红外与激光工程), 2018, 47(12): 1213005 (in Chinese).
- [11] Yu Yi, Wang Guomin. Thermal-structural coupling analysis and optimization design of multi-tube telescope center section [J]. *Machine Design and Research* (机械设计与研究), 2019, 35(2): 106-109 (in Chinese).
- [12] Deng Yongting, Li Hongwen, Wang Jianli, *et al.* Application of structural filter to principal axis system of telescope [J]. *Optics and Precision Engineering* (光学 精密工程), 2017, 25(4): 368-377 (in Chinese).