

文章编号: 1002-2082 (2020) 05-0885-06

地平式望远镜跟踪机架结构设计与分析

张 岩, 陈宝刚, 李洪文, 曹玉岩

(中国科学院 长春光学精密机械与物理研究所, 吉林 长春 130000)

摘 要: 针对某 700 mm 口径地平式望远镜系统, 提出了一种 U 型跟踪架的结构设计方案。跟踪架结构中方位轴系采用双排密珠球轴承, 轴承设计为双排轴向止推钢珠及双排径向钢珠结构, 滚珠的密集及均化作用可保证轴系具有高回转精度。俯仰轴系设计采用一端固定、一端游动的结构方式, 以补偿机械误差及热变形对回转精度的影响。对望远镜跟踪架进行有限元建模, 分析得出其一阶谐振频率可达到 47.6 Hz, 说明它具有良好的模态特性。使用电子水平仪及自准直仪分别对方位轴及俯仰轴进行定量检测, 方位轴轴系晃动优于 1.3", 俯仰轴轴系晃动优于 1.8"。通过仿真分析及实验测试, 证明设计的望远镜跟踪架结构具有高刚度及高回转精度, 为同类跟踪架的结构设计提供了一定的参考价值。

关键词: 光机结构; 跟踪架; 轴系晃动; 模态特性

中图分类号: TN202; TH751

文献标志码: A

DOI: 10.5768/JAO202041.0501002

Structure design and analysis of tracking frame for horizontal telescope

ZHANG Yan, CHEN Baogang, LI Hongwen, CAO Yuyan

(Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences,
Changchun 130000, China)

Abstract: The structure design scheme of U-type tracking frame was put forward for a 700 mm aperture horizontal telescope. The double row dense ball bearings were used for azimuth shafting, and the bearing was designed as double row of axial thrust steel balls and double row of radial steel balls. The dense of the ball could ensure the high rotation accuracy of the shafting. First, the pitching shafting was designed as a structure with one end fixed and one end floating to compensate the effect of mechanical error and thermal deformation on the rotation accuracy. Then, the finite element model of tracking frame was established, and the first order resonance frequency could reach to 47.6 Hz, which showed that it had good modal characteristics. Finally, the electronic level and digital autocollimator were used to measure the pitch axis and azimuth axis respectively. The shaking of azimuth axis shafting was better than 1.3", and the shaking of pitching axis shafting was better than 1.8". The test results show that the designed telescope tracking frame structure has high stiffness and high rotation accuracy, which provides some reference value for the structure design of similar tracking frames.

Key words: optical-mechanical structure; tracking frame; shafting shaking; modal characteristics

引言

随着望远镜探测技术的不断发展, 对望远镜设计水平及其跟踪与指向精度的要求也越来越高^[1-6]。跟踪架作为望远镜的承载机构, 其结构刚度、轴系精度等指标就显得非常关键。为此, 国内外学者对望远镜跟踪架及其相关技术展开了较为深入的

研究^[7-12]。杨立保等人针对米级望远镜跟踪架, 设计了桁架式转台的结构, 并结合有限元分析, 优化得出最优的设计方案^[13]。赵勇志等人根据望远镜力的传递路径, 设计了双排角接触球轴承形式转台, 通过模态测试获得系统的性能, 并借助于流场分析研究了风载对望远镜性能的影响^[14]。邓永停

收稿日期: 2019-11-29; 修回日期: 2020-03-17

基金项目: 国家自然科学基金青年基金项目 (11803035)

作者简介: 张岩 (1988-), 男, 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

等人针对望远镜跟踪架的跟踪精度问题,对跟踪架动态性能进行了测试和分析,并对跟踪架控制系统的频率特性进行了模型辨识,通过设计算法大大降低了跟踪架的随动误差,提高了系统性能指标^[15]。

本文针对某 700 mm 口径地平式望远镜,提出了一种 U 型架结构设计方案。为提高跟踪架转动精度,方位轴系设计采用双排密珠球轴承结构。俯仰轴系设置为一端固定一端游动的方式,以补偿机械误差及热变形对系统回转精度的影响。对望远镜跟踪架进行有限元建模,分析其谐振特性,最后使用电子水平仪及自准直仪分别对跟踪架两轴精度进行定量检测。检测结果表明,本文设计方案可为同类跟踪架的结构设计提供一定参考。

1 跟踪架结构

望远镜跟踪架采用 U 型结构,如图 1 所示。主要包括俯仰轴系组件、方位轴系组件、基座及调平组件等。跟踪架的轴系精度及模态特性是其性能优良与否的主要考核指标,根据相关文献的调研,中大口径级望远镜跟踪架跟踪精度优于 5",一阶谐振频率优于 20 Hz,即为指标性能优良^[13-15],这也是本文设计的指标值。

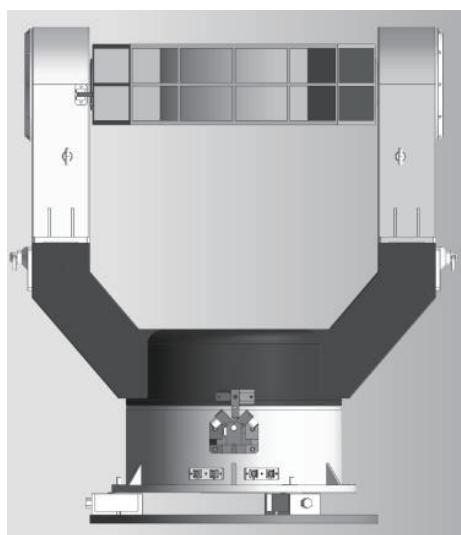


图 1 望远镜跟踪架结构示意图

Fig. 1 Structure of telescope tracking frame

1.1 方位轴结构

方位轴由精密转台轴承、力矩电机、转轴、编码器、方位基座及限位机构等组成,如图 2 所示。为保证跟踪架结构强度,方位基座采用合金钢材料。

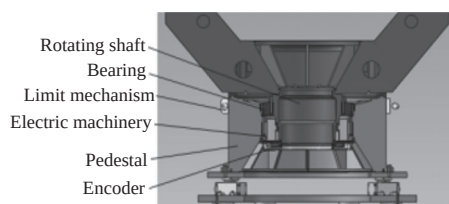


图 2 方位轴结构示意图

Fig. 2 Structure of azimuth axis

方位轴系采用双排密珠球轴承,如图 3 所示。密珠轴系具有回转精度高、摩擦力矩小、对温度变化不敏感、结构简单及制造安装方便等优点,从结构上设计灵活,可实现结构紧凑设计且精度可控。密珠轴系基本结构由主轴、轴承环及密集于两者之间并过盈配合的滚珠组成,滚珠的密集有助于减小其误差对主轴轴心位置的影响,起着平均效应的作用,可提高主轴的回转精度。滚珠通过合理布局,可使每个滚珠公转时运动轨迹不重合,减小了滚道的磨损,可长期保持轴系精度。

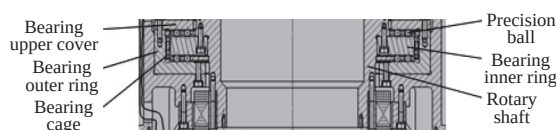


图 3 双排密珠球轴系结构

Fig. 3 Structure of double row dense ball shafting

轴承环材料采用 GCr15, 淬火硬度可达 60 HRC~62 HRC, 轴系采用双排轴向止推钢珠及双排径向钢珠, 轴向及径向钢珠每圈 72 个均匀布局, 相邻钢球间距 5°, 滚珠的密集有助于减小其误差对主轴轴心位置的影响, 起着平均效应的作用, 可提高主轴的回转精度。组装垂直轴系应保证径向轴承配合过盈量在 0.008 mm~0.012 mm。

方位轴系的角晃动主要取决于滚道环面平面度, 滚道环面平面度 K 要求小于 0.005 mm。轴系晃动精度按照下式计算:

$$\alpha = \arctan(K/D) \quad (1)$$

式中: K 为滚道环面平面度; D 为轴系回转直径。由上式可计算出轴系晃动量优于 2"。由于密珠的均化作用, 轴系实际晃动量要小于此值。另外需要说明, 按照以上公式得出的轴系晃动精度为双排密珠球轴承自身的理论晃动精度值。此外, 回转轴的配合面与中心轴的垂直度及同轴度、回转轴自身的圆柱度等指标因素, 对整体的轴系精度

都有一定的影响。因此,在机械加工及装配过程中需要严格把控以上指标,以保证轴系精度。

1.2 俯仰轴结构

俯仰轴结构采用U型架结构形式,由左右立柱、轴承、力矩电机、编码器及限位机构等组成。为补偿机械误差及热变形对回转精度的影响,轴系配置为一端固定一端游动,固定端立柱安装角度编码器,游动端立柱安装力矩电机。俯仰轴组件结构如图4所示。

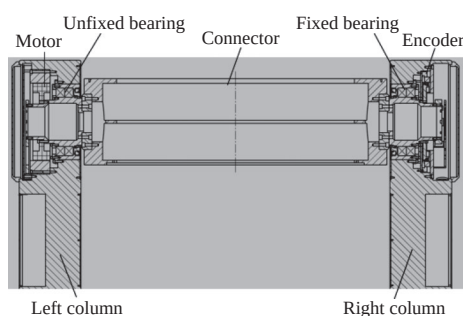


图4 俯仰轴组件结构图

Fig. 4 Structure of pitch shaft assembly

轴承是俯仰轴系的关键组件,它的精度、承载能力和摩擦力矩变化等性能直接影响整个系统跟踪的精度和稳定性。根据俯仰轴系运动过程中各项受载的复杂工况,采用两对轴承背对背的装配形式,且设计左立柱和右立柱,轴承装配结构采用一端固定一端游动的结构,左立柱轴承外环有 ± 1 mm的轴向间隙,利于减小机械误差对轴系的影响及温度变化造成的轴向伸缩。

方位轴及俯仰轴均采用直流力矩电机直接驱动,电机回转刚度高、零空回,控制精度高,考虑到轴系摩擦力矩理论值与实际值的差距以及存在负载加工误差,力矩电机驱动力矩要有一定的储备。此外,俯仰轴及方位轴均设计了硬限位结构,以保证跟踪架工作工程的安全性。

2 建模分析

跟踪架系统作为望远镜镜筒的承载组件,同时又负责系统的跟踪及指向,其整体结构动态性能对望远镜的功能实现起关键作用。因此望远镜跟踪架的机械精度和结构刚度都需要具有较高的指标要求。为此,对望远镜跟踪机架及镜筒进行了有限元建模及分析,以确保结构设计的合理性。

首先分析跟踪机架的载重变形情况,建立跟踪机架的有限元模型,如图5所示。望远镜实际质量约为350 kg,为保证充分的设计余量,在分析过程中增加了额定载荷质量,因此在四通施加500 kg模拟望远镜载荷,图6为跟踪机架带模拟负载后的变形云图。从变形图可以看出,跟踪架轴头处最大变形0.015 mm,轴头最大应力9.6 Mpa。分析结果表明,望远镜跟踪机架的结构刚度性能良好。

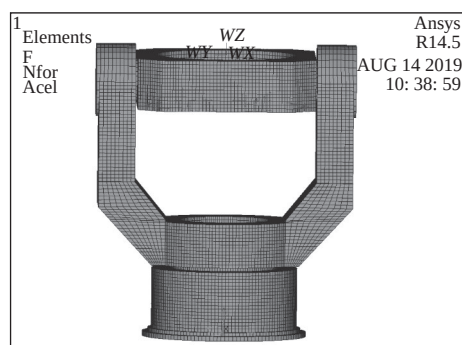
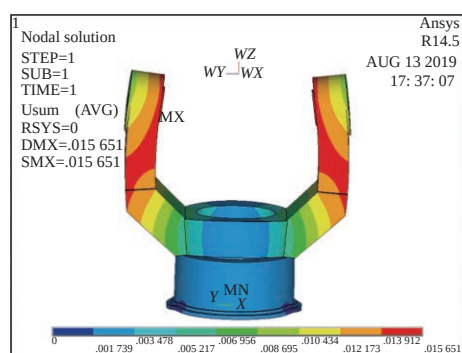
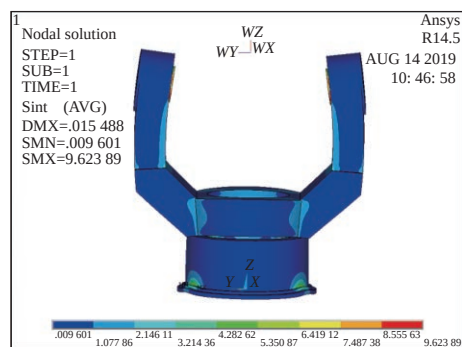


图5 望远镜跟踪机架有限元模型

Fig. 5 Finite element model of telescope tracking frame



(a) 负载变形



(b) 应力云图

图6 望远镜跟踪架负载变形及应力云图

Fig. 6 Load deformation and stress nephogram of telescope tracking frame

望远镜跟踪机架的谐振特性对系统的动态指标特性影响较大,因此需要对系统结构的模态特性进行分析。对望远镜跟踪机架整体进行有限元建模,如图 7 所示。

分析跟踪架的模态特性,并提取了跟踪架前两阶模态的振型数据,各阶振动型态及振动频率如表 1 所示,振型云图如图 8 所示。

从以上分析可以看出,系统前两阶谐振为跟踪架整体左右及前后摆动,一阶谐振频率可达到 47.6 Hz,二阶谐振频率为 52.7 Hz。由仿真图例可以证明望远镜跟踪架的模态特性指标良好。由于跟踪架轴系的滚珠与轴承内外环采用过盈方式配合,相当于对轴系施加了预紧载荷,通过微量的弹性变形起到消除间隙、减小几何形状误差的作用,提高了轴系的刚度,因此可保证望远镜跟踪架的高模态特性。

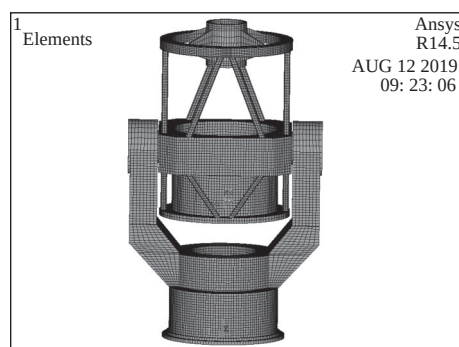


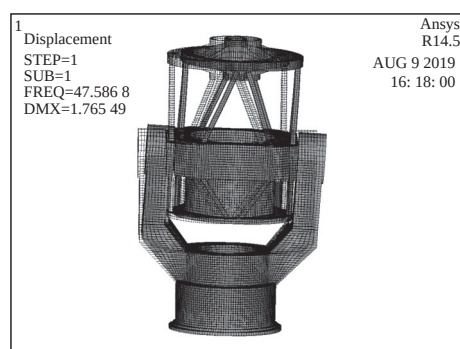
图 7 望远镜系统有限元模型

Fig. 7 Finite element model of telescope system

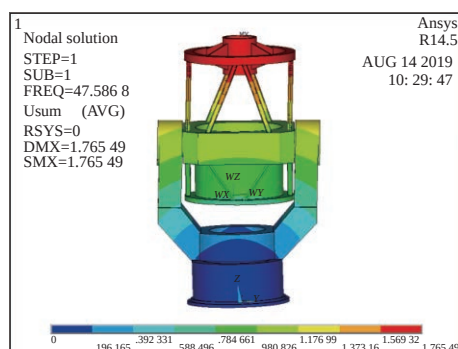
表 1 系统前四阶模态分析结果

Table 1 Analysis results of first four modals of system

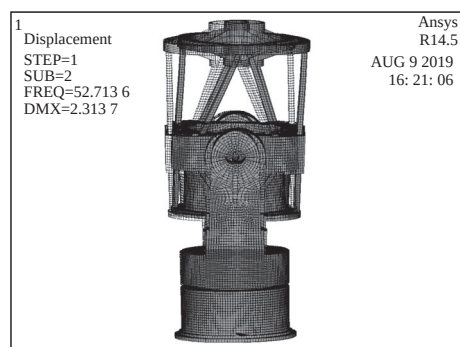
振动阶数	振动型态	振动频率/Hz
1	跟踪架整体左右摆动	47.6
2	跟踪架整体前后摆动	52.7



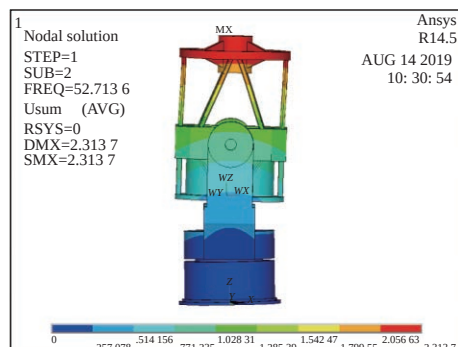
(a) 一阶模态形状



(b) 一阶模态云图



(c) 二阶模态形状



(d) 二阶模态云图

图 8 系统前两阶振型及模态云图

Fig. 8 First two modes and modal nephogram of system

3 指标检测

跟踪架轴系晃动精度对望远镜的跟踪及指向性能起关键作用。为验证跟踪架轴系所采用双排密珠球轴承的晃动精度,下面进行检测实验。使

用 0.2" 电子水平仪对跟踪架方位轴系晃动进行检测,通过检测 12 个圆周均布位置的水平度,通过数据处理得到轴系晃动误差,如图 9 所示,实验测试数据如图 10 所示。从测试结果可以看出,方位轴



图9 方位轴系晃动测试

Fig. 9 Azimuth shafting shaking test

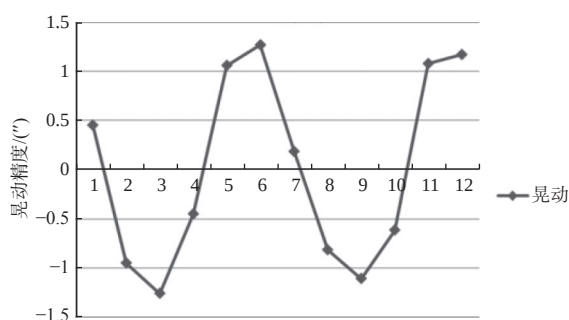


图10 跟踪架水平轴系晃动数据

Fig. 10 Shaking data of horizontal shafting for tracking frame

系晃动精度优于1.3″。

同样原理,使用0.1″数字自准直仪对跟踪架俯仰轴系晃动进行检测,如图11所示,对测试数据整理结果如图12所示。从测试结果可以看出,俯仰轴系晃动精度优于1.8″。通过对跟踪架两轴晃动进行测试,结果表明望远镜跟踪架的轴系精度非常高。



图11 跟踪架俯仰轴系晃动测试

Fig. 11 Shaking test of pitching shafting for tracking frame

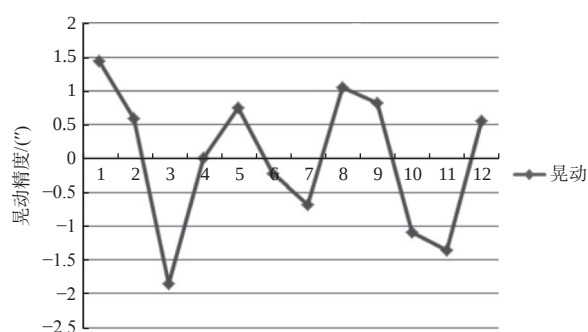


图12 跟踪架俯仰轴系晃动数据

Fig. 12 Shaking data of pitching shafting for tracking frame

4 结论

本文提出了一种望远镜地平式跟踪架结构设计方案。跟踪架轴系采用双排密珠球轴承,保证了轴系回转精度高的特性,俯仰轴系采用一端固定、一端游动的结构方式,以补偿机械误差及热变形对回转精度的影响。为验证跟踪架的结构强度,对望远镜跟踪架进行有限元建模,分析得出其一阶谐振频率可达到47.6 Hz,具有良好的模态特性。最后,使用电子水平仪及数字自准直仪分别对方位轴及俯仰轴进行定量检测,方位轴轴系晃动优于1.3″,俯仰轴轴系晃动优于1.8″。仿真分析及实验测试结果表明,望远镜跟踪架轴系具有高强度及高精度特性,本文设计方案为同类跟踪架的结构设计提供了一定的参考价值。

参考文献:

- [1] 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, 2019, 48(3): 0322002-1-11.
刘强,王欣,黄庚华,等.大视场大相对孔径斜轴离轴三反望远镜的光学设计[J].光子学报,2019,48(3): 0322002-1-11.
- [2] LI Fei, WANG Keyi. Design of optical imaging system for RGB three-channel diffraction telescope[J]. Journal of Applied Optics, 2019, 40(3): 369-372.
李飞,王克逸. RGB三通道衍射望远镜光学成像系统设计[J].应用光学,2019,40(3): 369-372.
- [3] AN Qichang, ZHANG Jingxu, YANG Fei, et al. On middle frequency error distribution of large telescope based on structure function[J]. Optics and Precision En-

- gineering, 2017, 25(2): 433-440.
- 安其昌, 张景旭, 杨飞, 等. 基于结构函数的大口径望远镜中频误差分配研究[J]. 光学精密工程, 2017, 25(2): 433-440.
- [4] HE Xu, YANG Xue, LI Yi, et al. Gravity compensation optimization algorithm for large aperture spatial optical telescope[J]. Optics and Precision Engineering, 2018, 26(11): 2764-2775.
- 何煦, 杨雪, 李颐, 等. 大口径空间光学望远镜重力卸载点布局优化方法[J]. 光学精密工程, 2018, 26(11): 2764-2775.
- [5] TAN Yufeng, WANG Jihong, REN Ge. Effect of thermal control of thermal boundary layer on image quality with large-aperture primary mirror[J]. Infrared and Laser Engineering, 2018, 47(12): 1213005-1-7.
- 谭玉凤, 王继红, 任戈, 等. 大口径主镜热边界层热控对成像质量影响分析[J]. 红外与激光工程, 2018, 47(12): 1213005-1-7.
- [6] 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, 2019, 48(8): 0814001-1-6.
- 高则超, 郝亮, 王富国, 等. 2 m 级望远镜主动调节侧向支撑机构设计与优化[J]. 红外与激光工程, 2019, 48(8): 0814001-1-6.
- [7] DONG Liyuan, ZHANG Silong, HE Feng, et al. Thermal structure analysis of tracking telescope frame[J]. Chinese Journal of Quantum Electronics, 2019, 36(4): 408-415.
- 董丽媛, 张巳龙, 何枫, 等. 跟踪望远镜机架的热结构分析[J]. 量子电子学报, 2019, 36(4): 408-415.
- [8] DENG Yongting, LI Hongwen, WANG Jianli, et al. Application of structural filter to principal axis system of telescope[J]. Optics and Precision Engineering, 2017, 25(4): 368-377.
- 邓永停, 李洪文, 王建立, 等. 结构滤波器在望远镜主轴控制系统中的应用[J]. 光学精密工程, 2017, 25(4): 368-377.
- [9] ZHAO Yongzhi, SHAO Liang, MING Ming, et al. Assembly for large aperture telescope primary mirror support system[J]. Infrared and Laser Engineering, 2017, 46(9): 0918003-1-8.
- 赵勇志, 邵亮, 明名, 等. 大口径望远镜主镜支撑系统装调[J]. 红外与激光工程, 2017, 46(9): 0918003-1-8.
- [10] ZHAO Hongchao, ZHANG Jingxu, YANG Fei, et al. Secondary mirror supporting structure for 1.2 m telescope[J]. Optics and Precision Engineering, 2017, 25(10): 2614-2619.
- 赵宏超, 张景旭, 杨飞, 等. 1.2 m 望远镜次镜支撑结构设计[J]. 光学精密工程, 2017, 25(10): 2614-2619.
- [11] SUN Jingwei, WU Xiaoxia, LYU Tianyu, et al. Design and analysis of the 400 mm tracing telescope structure[J]. Infrared and Laser Engineering, 2014, 43(8): 2568-2575.
- 孙敬伟, 吴小霞, 吕天宇, 等. 400 mm 跟踪望远镜结构设计与分析[J]. 红外与激光工程, 2014, 43(8): 2568-2575.
- [12] YU Yi, WANG Guomin. Thermal-structural coupling analysis and optimization design of multi-tube telescope center section[J]. Machine Design and Research, 2019, 35(2): 106-109.
- 余易, 王国民. 多镜筒望远镜中间块热—结构耦合分析与优化设计[J]. 机械设计与研究, 2019, 35(2): 106-109.
- [13] YANG Libao, WANG Jing, SHI Guoquan. Design and model analysis on tracking frame of meter class aperture[J]. Opto-Electronic Engineering, 2015, 42(6): 45-49.
- 杨立保, 王晶, 史国权. 米级口径跟踪架的设计与模态分析[J]. 光电工程, 2015, 42(6): 45-49.
- [14] ZHAO Yongzhi, WANG Wenpan, DUAN Wen. Structural design and analysis of the 1.2 m telescope tracking mount[J]. Journal of Changchun University of Science and Technology, 2019, 42(1): 64-67.
- 赵勇志, 王文攀, 段文. 1.2 m 望远镜跟踪架结构设计与分析[J]. 长春理工大学学报, 2019, 42(1): 64-67.
- [15] DENG Yongting, LI Hongwen, CHEN Tao, et al. Dynamic analysis of two meters telescope mount control system[J]. Optics and Precision Engineering, 2018, 26(3): 654-661.
- 邓永停, 李洪文, 陈涛, 等. 2 m 级望远镜跟踪架控制系统动态性能分析[J]. 光学精密工程, 2018, 26(3): 654-661.