

DOI: 10.19650/j.cnki.cjsi.J2412963

# 大口径折射式空间望远镜接触非线性光机集成分析\*

黄志裕<sup>1</sup>, 刘勇<sup>1</sup>, 张铭起<sup>1</sup>, 岳春宇<sup>2</sup>, 关英俊<sup>1</sup>

(1. 长春工业大学机电工程学院 长春 130012; 2. 北京空间机电研究所 北京 100094)

**摘要:**针对大口径折射式空间望远镜在结构中存在的接触非线性问题,利用有限元方法进行了接触非线性分析及光机集成分析,保证大口径折射式空间望远镜在宽温域环境中正常成像。首先,采用定心车工艺对大口径折射式空间望远镜进行结构设计,利用切线接触方式降低透镜应力水平;然后,采用接触非线性分析方法对大口径折射式空间望远镜在自重和温度载荷作用下望远镜的变形进行了分析,考察了整机在重力和温升等静力学工况以及随机振动和冲击等动力学环境下的应力水平;其次,利用 Sigfit 软件进行 Zernike 多项式拟合并导入光学软件进行光机集成分析,评估系统在静力学环境变化下的光学指标劣化程度;分析结果表明:在静动力学工况中,光学元件的最大接触应力为  $1.83 \times 10^7$  Pa,安全裕度优于 0.82,载荷作用下的光学元件变形导致光学系统参数发生变化,调制传递函数(MTF)降低约 2.97%,满足光学允差要求;最后,对整机结构进行了加工装调和检测,测试结果表明,大口径折射式空间望远镜系统波像差为  $0.123\lambda$  ( $\lambda = 632.8$  nm),其外场成像试验图像清晰,能够满足空间对地观测的使用要求,为后续大口径折射式空间望远镜的优化设计、研制需求等方面提供参考借鉴。

**关键词:** 空间望远镜;接触非线性;有限元分析;光机集成

**中图分类号:** TH16 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 460.20

## Contact nonlinear opto-mechanical integration analysis of large-aperture refractive space telescope

Huang Zhiyu<sup>1</sup>, Liu Yong<sup>1</sup>, Zhang Mingqi<sup>1</sup>, Yue Chunyu<sup>2</sup>, Guan Yingjun<sup>1</sup>

(1. College of Electromechanical Engineering, Changchun University of Technology, Changchun 130012, China;  
2. Beijing Institute of Space Mechanics & Electricity, Beijing 100094, China)

**Abstract:** To address the contact nonlinearity issues in the structure of large-aperture refractive space telescope, finite element methods were employed to perform contact nonlinear analysis and opto-mechanical integrated analysis, ensuring the telescope's normal imaging performance in a wide temperature range. Firstly, a centering turning process was employed in the structural design of large-aperture refractive space telescope, using tangential contact methods to reduce lens stress levels. Subsequently, contact nonlinear analysis was conducted to evaluate the deformation of large-aperture refractive space telescope under self-weight and thermal loads. The analysis examined the stress levels of the system under static conditions, such as gravity and temperature rise, as well as dynamic conditions, including random vibration and impact. Next, Zernike polynomial fitting was performed using Sigfit software, with the results imported into optical software for opto-mechanical integrated analysis. This step assessed the degradation of optical performance under variations in static mechanical conditions. The analysis results indicated that under both static and dynamic conditions, the maximum contact stress of the optical component is  $1.83 \times 10^7$  Pa, with a safety margin better than 0.82. The deformation of optical components under load led to changes in optical system parameters, resulting in a reduction of approximately 2.97% in modulation transfer function (MTF), which remains within acceptable optical tolerances. Finally, the complete system underwent machining, assembly, and testing. The test results showed that the wavefront aberration of large-aperture refractive space telescope system is  $0.123\lambda$  ( $\lambda = 632.8$  nm), and field imaging test produced clear images, meeting the requirements for space-to-ground observation. This provides valuable references and guidance for the further optimization design and development of large-aperture refractive space telescope.

**Keywords:** space telescope; contact nonlinear; finite element analysis; opto-mechanical integration

收稿日期: 2024-06-19 Received Date: 2024-06-19

\* 基金项目: 吉林省科技厅重点研发项目(20210201108GX)资助

## 0 引言

随着空间对地光学探测技术的不断发展,航天光学遥感器作为探测仪器被广泛应用于陆地资源勘测、环境减灾、气象海洋等领域<sup>[1]</sup>。通常在地球低轨道布置大口径、高分辨率天基望远镜,对地面不同区域进行目标探测。尽管,目前长焦距反射式望远镜在轨应用较多,但大口径折射式空间望远镜在研制成本、周期等方面具有独特优势,仍在普遍应用<sup>[2]</sup>。

在波长一定的情况下,折射式空间望远镜的口径越大,光学系统的分辨率越高,将导致透镜及机械结构重量的增加;随之系统受随机振动等动力学载荷以及受失重、温度变化等静力学载荷的影响较之小口径望远镜更大,需要更加全面且详细的考虑结构强度、光学表面的面形变化以及光学系统偏心等指标<sup>[3-4]</sup>。另外,大口径折射式空间望远镜主要由透镜与镜筒、透镜压圈组成;其在结构设计中采用透镜与机械元件相切接触的形式,需要考虑零部件间的接触等因素影响<sup>[5]</sup>。

目前,对诸如螺钉联结、零部件接触等非线性环节,空间遥感器工程分析一般都采用线性分析方法,这种方法不能精确地模拟边界条件的改变,工程分析结果与试验结果存在较大的误差<sup>[6]</sup>。为了减小线性分析方法带来较大的求解误差,对于需要考虑接触因素的光机结构仿真,一些学者在不同的光学仪器中进行了研究。徐广州等<sup>[7]</sup>通过采用接触方法与集成仿真技术对摆镜进行了仿真,得出摆镜在外载作用下面形变化满足设计要求。谢军等<sup>[8]</sup>采用接触边界条件仿真方法较准确地获得主镜面形均方根值。李梦庆等<sup>[9]</sup>采用非线性接触算法对空间相机平面反射镜组件进行了分析,得到与实际相近的结果。

为了提高有限元分析的准确度,本研究建立了大口径折射式空间望远镜的非线性有限元模型。采用接触非线性方法对透镜与机械结构件相切接触的方式进行了分析,得到了大口径折射式空间望远镜的镜面节点位移,然后,通过使用 Zernike 多项式集成仿真接口程序处理各透镜的镜面位移,消除刚体位移并得到真实变化的面形参数,最后,导入光学分析软件进行了光机集成分析,通过相关试验验证了光机结构设计的有效性。

## 1 光机结构设计

### 1.1 光学系统设计指标

在光机集成分析前,需要进行光机结构的设计。根据提出的光学设计指标,保证大口径折射式空间望远镜的工作波段为 480~680 nm,视场为 3.6°;在全视场下,空

间频率为 110 lp/mm 的调制传递函数(modulation transfer function, MTF)需要  $\geq 0.3$ ;此外,确保镜头的畸变小于 0.1%。本文所研究的大口径折射式空间望远镜的光学系统设计指标如表 1 所示。

表 1 空间望远镜光学设计指标

Table 1 Optical design specifications of space telescope

参数	指标
镜头视场 $2\omega$	$\Phi 3.6^\circ$
焦距 $f$	380 mm
有效通光口径	125 mm
光谱范围	480~680 nm
畸变	$\leq 0.1\%$
MTF	$\geq 0.3$ (全视场下,空间频率 110 lp/mm)

根据表 1 提供的优化设计指标参数,对空间望远镜进行光学系统设计。

### 1.2 光学系统设计

根据实际应用需求,空间望远镜的光学系统类型将采用折射式,其优点包括:制造工艺成熟,成本低以及适宜流水线式大规模生产;缺点包括:系统色差较难消除,受限于玻璃材料尺寸,口径无法满足更大口径系统的应用需求(通常反射式系统口径可以达到 0.5 m 以上)。

此外,折射式空间望远镜的相对口径,其尺寸可以设计较小,即  $F\#$  小,有利于弱目标探测,适用于侦查和天文观测方面的工作<sup>[10]</sup>。运用光学设计软件对大口径折射式空间望远镜进行光学系统设计,并对选定的光学系统进行初始优化设计。在优化设计过程中,以消除大口径折射式空间望远镜出现的各类像差,并满足结构材料的消热设计要求。最终,通过光学系统设计与优化,选用了表 2 所示的玻璃材料用于光学透镜,并优化了由 13 片光学透镜组成的光学系统,系统结构如图 1 所示。

表 2 望远镜材料属性

Table 2 Material properties of the telescope

参数	密度 $\rho / (\text{kg} \cdot \text{m}^{-3})$	弹性模量 $E / (10^9 \text{ Pa})$	热胀系数 $\alpha / (10^{-6} / ^\circ\text{C})$	泊松比 $\nu$
H-K9L	2 520	79.20	7.6	0.21
H-ZBAF16	3 590	76.48	7.1	0.27
H-ZK50GT	3 540	75.98	6.8	0.26
H-LAK6A	3 590	107.70	5.6	0.28
H-QK3LGTI	2 430	62.30	9.2	0.22
QF3	2 600	75.51	9.0	0.22
H-ZBAF3	3 770	85.92	7.5	0.27
ZF6	3 240	90.87	8.7	0.25
H-ZF73GT	3 490	103.07	5.8	0.24

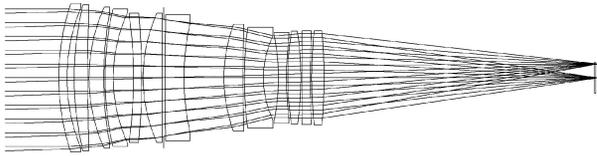
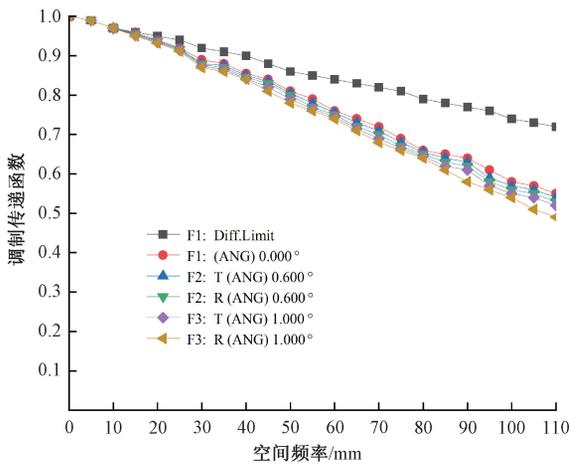


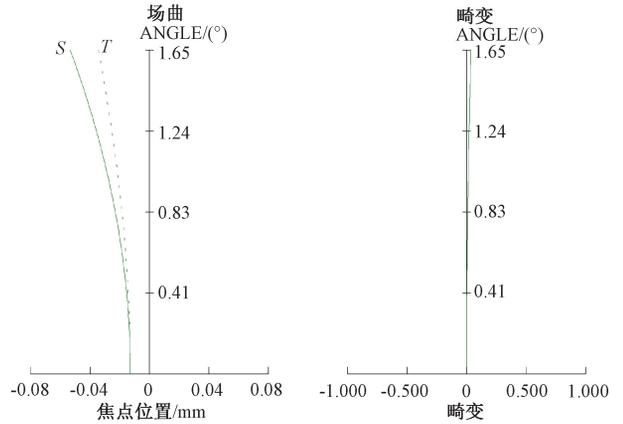
图 1 光学系统  
Fig. 1 Optical system

### 1.3 光学系统分析

针对选用 13 片透镜所组成的光学系统进行了光学系统分析,如图 2(a)~(c)所示分别为大口径折射式空间望远镜的 MTF、点列图和畸变。从图 2(a)中可看出,光学系统在空间频率为 110 lp/mm 的传递函数 > 0.4; 从图 2(b)和(c)中可看出,在不同的物面角度所看到的像面的像质不同,光学系统中的弥散斑直径较好,畸变较小,表明所设计的光学系统合理,接下来应进行光学系统的结构设计。



(a) 调制传递函数  
(a) Modulation transfer function



(c) 光学畸变曲线  
(c) Optical distortion curves

图 2 光学系统分析结果

Fig. 2 Analysis results of the optical system

### 1.4 结构设计

#### 1) 材料选取

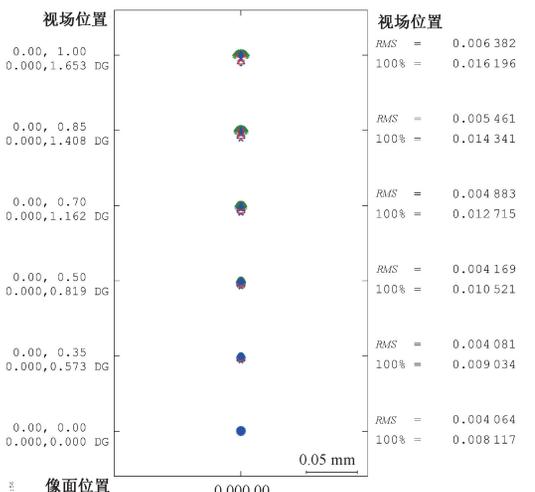
针对空间望远镜需要选择的光机结构材料,国内外主要采用铝合金、钢、钛合金、铝基复合材料以及碳纤维复合材料等。其各材料性能参数如表 3 所示。

大口径折射式空间望远镜的光学元件数量多、口径较大(包含 13 片光学透镜,透镜最大直径为 109 mm),其工作温度范围为  $20^{\circ}\text{C} \pm 5^{\circ}\text{C}$ 。望远镜的光学元件在自重和温度载荷作用下容易发生变形,要求结构材料的热膨胀系数与光学元件材料相兼容,且需要有较高的结构稳定性。此外,大口径折射式空间望远镜在冲击、振动等动力学环境下,为保证其光学元件的面形精度和位置精度,选用的结构材料需具备足够的强度、刚度等力学性能。从表 3 来看,钛合金的优势为密度相对适中、强度大,且与系统选用的光学元件材料的热膨胀系数较为接近,有利于减少热应力;抗冲击和辐射屏蔽性好,能够很好地保护透镜免受冲击振动和空间辐射的影响。综上考虑,选取钛合金作为大口径折射式空间望远镜的光机结构材料。

#### 2) 望远镜结构设计

大口径折射式空间望远镜主要由镜筒、镜组两部分组成。在满足强度及刚度的前提下,镜筒设计为多条径向和轴向加强筋的薄壁圆筒结构,使其具有较轻的重量和较高的结构刚度,确保各透镜相互间的偏心量和间隔能够满足光学允差要求<sup>[11]</sup>。镜筒通过精密铸造,再由车削完成,其轴向加强筋留有多个注胶孔,法兰端面的安装孔便于与其他部件进行安装。

大口径折射式空间望远镜的镜组由镜座、透镜以及压圈 3 部分组成。在初次安装镜组时需要将透镜进行偏心检查,使透镜偏心应不大于  $20''$ ,通过将透镜装入带有内螺纹的镜座中,透镜轴向间隙使用胶黏剂填充,压圈



(b) 点列图  
(b) Spot diagram

表3 主要材料结构参数  
Table 3 Structural parameters of the main materials

结构参数	密度 $\text{/(kg}\cdot\text{m}^{-3}\text{)}$	弹性模量 $\text{/(10}^9\text{ Pa)}$	热传导率 $\text{/(W}\cdot\text{(m}\cdot\text{°C)}^{-1}\text{)}$	比刚度 $\text{/(10}^7\text{ N}\cdot\text{m}\cdot\text{kg}^{-1}\text{)}$	线膨胀系数 $\text{/(10}^{-6}\text{/°C)}$	泊松比 $\nu$
铝合金 7A09	2 800	71	134	2.54	23.6	0.33
钢钢	8 100	141	13.9	1.74	0.3~1.0	0.27
钛合金	4 440	109	7.4	2.45	9.1	0.34
铝基复合材料	2 940	213	235	7.24	8.0	0.3
碳纤维复合材料	1 600	37		23.10	0~1	0.28

定位面与螺纹涂上胶黏剂,使用带有外螺纹的压圈将透镜固定在镜座中。在初始设计阶段,每一个独立的镜座都预留了参考修切线,旨在定心加工之前,镜座外部边缘部分与镜座端面尺寸留有足够的加工余量,以确保在定心加工过程中镜座的回转中心与透镜中心线同轴,使镜座的外圆柱面能与镜筒的配合面满足设计要求<sup>[12]</sup>。通过调整每个透镜组件外圆柱面的两侧面,保证每个透镜间隔误差及两修切面与光轴垂直度误差,使每个单透镜组件能够安装到镜筒中。望远镜光机结构剖切图如图3所示。

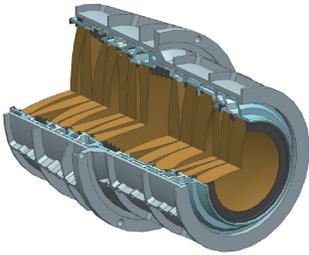


图3 望远镜光机结构剖切图

Fig. 3 Cutaway view of the opto-mechanical structure of the telescope

## 2 力学分析

### 2.1 接触有限元理论

在光机结构设计中,固定透镜时,透镜球面与机械件采用相切接触方式,接触方式如图4所示。

此外,大口径折射式空间望远镜在严苛的力学工况下,产生的变形与应力对其结构以及光学元件产生变化的影响较小,故大口径折射式空间望远镜主要存在由接触所带来的边界条件非线性问题。通常,边界条件非线性问题主要是通过接触面的间隙和接触正压力2个参数来表达,它们的关系为<sup>[13-14]</sup>:

$$g_N \cdot P_N = 0, \quad g_N \geq 0, \quad P_N \leq 0 \quad (1)$$

其中, $g_N$ 为接触界面之间的间隙, $P_N$ 为接触正压力。当两个接触面有间隙时,即:

$$g_N \neq 0, \quad P_N = 0 \quad (2)$$

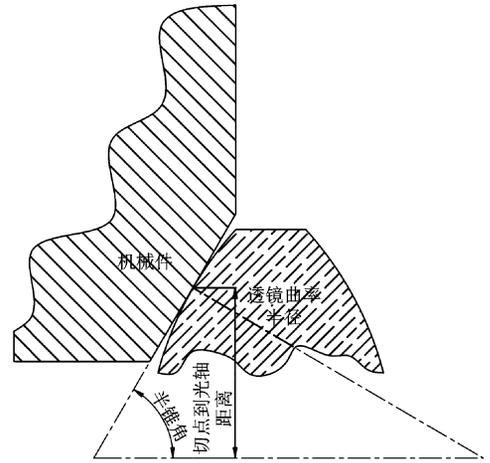


图4 透镜与机械件相切接触

Fig. 4 Tangential contact between lens and mechanical parts

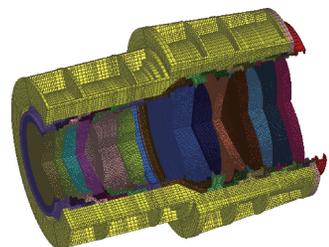
当两个接触面有接触时,即:

$$g_N = 0, \quad P_N \neq 0 \quad (3)$$

总之,接触问题是研究接触体系之间通过接触而实现力的传递的现象,并且存在于各种工程结构之中,这类问题往往需要对接触体进行应力与变形分析<sup>[14]</sup>。

### 2.2 有限元模型

为了进一步获得接近真实工作状态下的空间望远镜的应力与变形参数,将采用 HyperMesh 建立大口径折射式空间望远镜的非线性有限元模型,结构有限元模型如图5(a)所示。为了提高其模型精度和计算准确性,主要采用六面体网格进行划分,完成结构接触部位的网格细化,图5(b)所示为局部剖视图。



(a) 望远镜有限元网格  
(a) Finite element mesh of the telescope

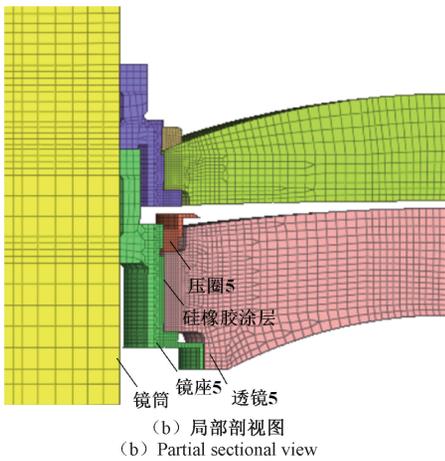


图 5 有限元模型  
Fig. 5 Finite element model

### 2.3 接触非线性设置

#### 1) 接触设置

目前,有限元分析软件提供的接触方式有点-面接触和面-面接触。在大口径折射式空间望远镜结构中,镜筒法兰端面上的端孔通过螺钉与整机主体支撑结构进行连接。每个镜组安装于镜筒中,镜座与压圈之间采用固定连接,对镜筒与镜座、镜座与压圈设置接触边界条件,透镜与镜座之间径向采用胶黏剂进行粘接,轴向限位为面接触,透镜与压圈轴向限位采用面接触或点面接触。

为保证计算收敛,在 2 个有可能接触的结构结点间建立了接触单元,接触类型,采用罚函数法并引入法向不可穿透约束,求解接触问题。接触分析步骤如图 6 所示。

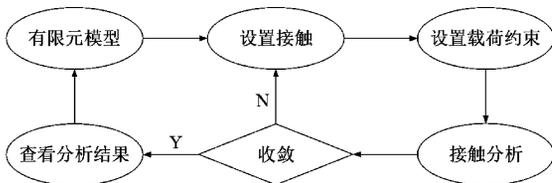


图 6 接触非线性分析流程  
Fig. 6 Workflow of contact nonlinear analysis

#### 2) 透镜粘接及弹性特征分析

对于大口径折射式空间望远镜来说,通过使用胶粘剂粘接透镜与镜座,胶粘剂起到了辅助支撑、防止固紧螺钉松动而用胶固死的作用,然而建立胶黏剂模型困难之处在于胶的不可压缩性以及极小板厚等<sup>[15-16]</sup>。陈永聪<sup>[16]</sup>采用有限元法对大口径平行光管主反射镜支撑进行研究时,通过采用室温硫化硅橡胶(room temperature vulcanized silicone rubber, RTV)和环氧胶胶接,并对 RTV 胶的测量以及对胶固紧进行了可靠性分析,同时计算出胶的厚度。

其中,采用胶厚度的计算公式为:

$$\alpha_1 t_1 + \alpha_2 t_2 = \alpha_3 (t_1 + t_2) \quad (4)$$

式中: $t_1$  是透镜厚度; $\alpha_1$  是透镜的热膨胀系数; $t_2$  是胶的厚度; $\alpha_2$  是胶的热膨胀系数; $\alpha_3$  是贴头材料的热膨胀系数。

根据胶厚度的计算公式以及目前望远镜结构和各透镜尺寸等因素,镜组采用 0.05 mm 厚的 RTV 硅橡胶进行胶接;然而,大口径折射式空间望远镜使用的胶黏剂材料特性为近似超弹性,其力学特性可以采用 Mooney-Rivlin 应变能密度函数理论来描述,公式<sup>[17]</sup>为:

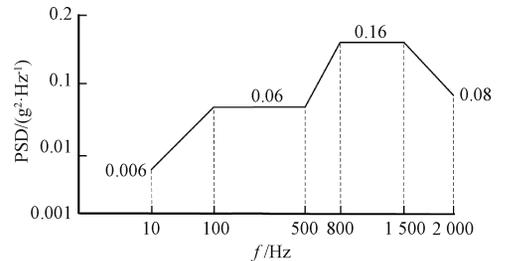
$$W = C_{10}(I_1 - 3) + C_{01}(I_2 - 3) + 1/D_1(J - 1)^2 \quad (5)$$

式中: $W$  为应变能密度; $I_i$  为第  $i$  方向的应变不变量; $C_{10}$  和  $C_{01}$  为实验得到的材料常数; $J$  为体积比; $D_1$  为常数,与材料的压缩性相关。

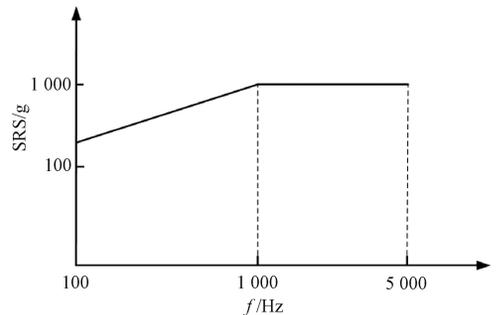
研究表明,Mooney-Rivlin 模型可以较好地模拟各向同性不可压缩材料在小变形时的特性,故对粘接透镜的硅橡胶涂层建立材料模型时,采用应变能密度方法。

### 2.4 有限元分析结果

空间望远镜在航天器结构中,需要承受运载、发射和在轨工作环境中的静力学、动力学和在轨热环境载荷。其中,静力学工况主要包括失重和温度环境变化,动力学工况主要包括火箭运载过程中的随机振动和分离过程中的冲击等动力学载荷,其中随机振动谱输入如图 7(a) 所示,冲击响应谱如图 7(b) 所示。



(a) 随机振动谱  
(a) Random vibration spectrum



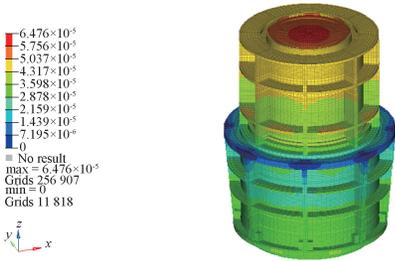
(b) 冲击响应谱  
(b) Shock response spectrum

图 7 空间望远镜结构动力学载荷曲线

Fig. 7 Structural dynamics load curve of space telescope

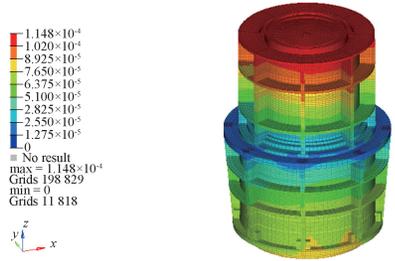
当前,对大口径折射式空间望远镜有限元模型在自

重及5℃(以20℃为基准温度)温差载荷作用下进行接触非线性分析,以及在随机振动和冲击等动力学载荷下对其各部分的应力进行分析,以安全裕度>0进行考察,证明该望远镜在力热环境下能够满足结构稳定性的要求。望远镜自重及温度整机变形与应力云图如图8所示,各部分的应力结果如表4所示。



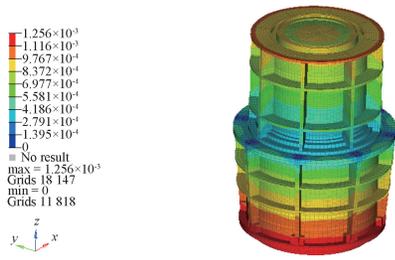
(a) 轴向重力载荷作用下的变形云图

(a) Deformation contour plot under axial gravitational load



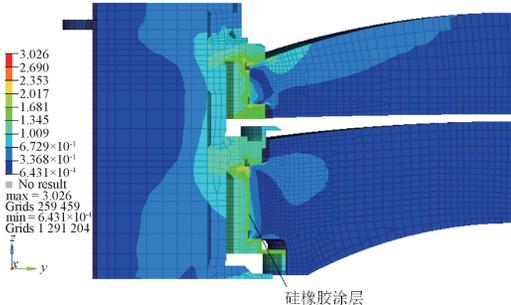
(b) 径向重力载荷作用下的变形云图

(b) Deformation contour plot under radial gravitational load



(c) 5℃温差载荷作用下的变形云图

(c) Deformation contour plot under 5°C thermal gradient load



(d) 5℃温差载荷作用下的应力云图

(d) Stress contour plot under 5°C thermal gradient load

图8 有限元分析结果

Fig. 8 Finite element analysis results

从图8(a)~(c)的变形云图中可以看出,轴向重力与径向重力对其产生的变形非常小;而温度载荷对其变形影响较大,最大变形数值为 $1.256 \times 10^{-3}$  mm,整体的变形不明显。从图8(d)的应力云图中可以看出,望远镜组件所产生的最大接触应力为 $3.026 \times 10^6$  Pa,接触应力较小。从表4中可以看出,在随机振动等动力学载荷作用下,光学元件在轴向冲击中的最大接触应力为 $1.83 \times 10^7$  Pa,安全裕度优于0.82;望远镜结构组件在径向随机振动中所产生的最大应力为 $8.21 \times 10^6$  Pa;在径向冲击中所产生的最大应力为 $1.83 \times 10^8$  Pa;其产生的最大应力远小于材料的许用应力,望远镜结构组件的安全裕度优于1.91。在失重和温度载荷作用下,整机的应力较小,对其影响较小。从整体的分析结果上看,大口径折射式空间望远镜的光机结构可以在随机振动等动力学载荷以及失重、温度载荷作用下具有良好的结构稳定性。

### 3 光机集成分析

目前,除了大口径折射式空间望远镜的光机结构满足力学要求外,还需要判断大口径折射式空间望远镜的光学系统在自重和温度载荷作用下是否满足性能要求,需采用光机集成方法对其进行分析。

光机集成分析方法能够对其光机结构的系统性能进行评价,同时,该方法也能为下一步的结构优化设计做出指导,从而能够更好的运用到工程技术中。光机集成分析的整体流程如图9所示。

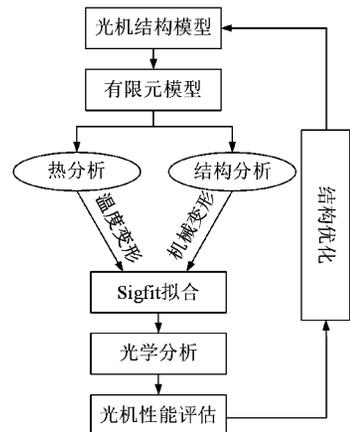


图9 光机集成分析流程

Fig. 9 Workflow of opto-mechanical integration analysis

#### 3.1 基于Sigfit的光机热集成分析

目前,Zernike多项式能够在光机集成分析中描述光学系统产生系统波前误差、视线误差、畸变等,同时能够为优化系统性能以及处理各像差系数提供有效的方法。另外,Zernike多项式也可以使用数学极坐标形式表示光

表 4 不同工况下的最大应力

Table 4 Maximum stress under different load cases

(Pa)

零件\载荷	温升 5℃	径向重力	轴向重力	轴向随机	径向随机	轴向冲击	径向冲击	安全裕度
透镜 1	7.40×10 <sup>5</sup>	1.05×10 <sup>4</sup>	2.14×10 <sup>4</sup>	1.22×10 <sup>5</sup>	3.26×10 <sup>5</sup>	1.01×10 <sup>7</sup>	5.24×10 <sup>6</sup>	2.30
透镜 2	1.50×10 <sup>6</sup>	8.36×10 <sup>3</sup>	2.29×10 <sup>4</sup>	1.53×10 <sup>5</sup>	2.42×10 <sup>5</sup>	1.34×10 <sup>7</sup>	3.55×10 <sup>6</sup>	1.48
透镜 3	7.06×10 <sup>5</sup>	9.54×10 <sup>3</sup>	2.09×10 <sup>4</sup>	1.41×10 <sup>5</sup>	3.07×10 <sup>5</sup>	9.83×10 <sup>6</sup>	4.62×10 <sup>6</sup>	2.39
透镜 4	7.96×10 <sup>5</sup>	1.91×10 <sup>4</sup>	3.96×10 <sup>4</sup>	1.09×10 <sup>5</sup>	4.96×10 <sup>5</sup>	8.85×10 <sup>6</sup>	8.48×10 <sup>6</sup>	2.76
透镜 5	1.55×10 <sup>6</sup>	2.13×10 <sup>4</sup>	4.42×10 <sup>4</sup>	1.27×10 <sup>5</sup>	3.21×10 <sup>5</sup>	1.05×10 <sup>7</sup>	5.66×10 <sup>6</sup>	2.17
透镜 6	1.89×10 <sup>6</sup>	1.17×10 <sup>4</sup>	2.22×10 <sup>4</sup>	1.20×10 <sup>5</sup>	2.50×10 <sup>5</sup>	1.03×10 <sup>7</sup>	4.84×10 <sup>6</sup>	2.23
透镜 7	5.80×10 <sup>5</sup>	1.97×10 <sup>4</sup>	3.69×10 <sup>4</sup>	1.27×10 <sup>5</sup>	5.22×10 <sup>5</sup>	1.07×10 <sup>7</sup>	1.18×10 <sup>7</sup>	1.82
透镜 8	8.36×10 <sup>5</sup>	1.43×10 <sup>4</sup>	3.52×10 <sup>4</sup>	2.84×10 <sup>5</sup>	4.19×10 <sup>5</sup>	1.74×10 <sup>7</sup>	9.38×10 <sup>6</sup>	0.91
透镜 9	4.01×10 <sup>5</sup>	1.31×10 <sup>4</sup>	1.19×10 <sup>4</sup>	1.98×10 <sup>5</sup>	3.00×10 <sup>5</sup>	1.83×10 <sup>7</sup>	5.30×10 <sup>6</sup>	0.82
透镜 10	5.77×10 <sup>5</sup>	2.99×10 <sup>4</sup>	3.90×10 <sup>4</sup>	1.33×10 <sup>5</sup>	4.35×10 <sup>5</sup>	9.61×10 <sup>6</sup>	7.45×10 <sup>6</sup>	2.46
透镜 11	1.24×10 <sup>6</sup>	2.18×10 <sup>4</sup>	2.81×10 <sup>4</sup>	1.51×10 <sup>5</sup>	8.27×10 <sup>5</sup>	1.05×10 <sup>7</sup>	1.34×10 <sup>7</sup>	1.48
透镜 12	7.72×10 <sup>5</sup>	1.88×10 <sup>4</sup>	2.43×10 <sup>4</sup>	2.01×10 <sup>5</sup>	8.87×10 <sup>5</sup>	1.71×10 <sup>7</sup>	1.40×10 <sup>7</sup>	0.94
透镜 13	8.66×10 <sup>5</sup>	1.45×10 <sup>4</sup>	1.42×10 <sup>4</sup>	1.18×10 <sup>5</sup>	6.41×10 <sup>5</sup>	8.40×10 <sup>6</sup>	1.17×10 <sup>7</sup>	1.84
TC4 结构	3.02×10 <sup>6</sup>	2.63×10 <sup>5</sup>	1.14×10 <sup>5</sup>	1.63×10 <sup>6</sup>	8.21×10 <sup>6</sup>	1.55×10 <sup>8</sup>	1.83×10 <sup>8</sup>	1.91

学镜面<sup>[18]</sup>:

$$Z(r, \theta) = A_{00} + \sum_2^{\infty} A_{n0} R_n^0(r) + \sum_{n=1}^{\infty} \sum_{m=1}^{\infty} R_n^m [A_{nm} \cos(n\theta) + B_{nm} \sin(m\theta)] \quad (6)$$

其中,Zernike 多项式径向关系式为:

$$R_n^m(r) = \sum_{s=0}^{\frac{n-m}{2}} (-1)^s \frac{(n-m)!}{s!(\frac{n+m}{2}-s)!(\frac{n-m}{2}-s)!} r^{(n-2s)} \quad (7)$$

式(6)中  $A_{nm}$  和  $B_{nm}$  是 Zernike 系数,式(6)、(7)中  $n$  和  $m$  均为整数, $n-m$  为偶数且  $n \geq m$ ;  $s$  为由  $0 \sim (n-m)/2$  区间的自由变量。

为了得到光学系统中各参数的变化,确保光学系统能够在静载荷作用下满足各项性能指标要求,将采用 Sigfit 软件进行 Zernike 多项式拟合。

上述的自重和热变形分析完成后,在 HyperMesh 软件中提取各个透镜表面结点面形的位移,通过生成相关文件类型导入 Sigfit 软件中进行 Zernike 多项式拟合,将拟合得到的消除刚体位移后的面形参数读入到 CodeV 或者 Zemax 软件中进行光学分析,进而评估光学系统在轴向重力与径向重力及温度载荷作用下的光学性能。光机集成拟合前后的各参数如表 5 所示。

由表 5 可看出,在没有调焦补偿的前提下,光学系统受轴向重力工况、径向重力工况以及温度载荷影响后,MTF 的数值有所降低,但参数下降不明显;另外,MTF 受温度载荷影响最大,光学系统传递函数下降为 0.392,

表 5 光机集成拟合前后对比

Table 5 Comparison before and after opto-mechanical integration fitting

指标	设计值	工况			对比
		轴向重力	径向重力	温度	
MTF	0.404	0.400	0.404	0.392	↓ 2.97%
弥散圆 $D$	6.488 $\mu\text{m}$	6.503 $\mu\text{m}$	6.486 $\mu\text{m}$	6.562 $\mu\text{m}$	↑ 1.14%
畸变	0.036 66%	0.036 66%	0.035 79%	0.036 64%	↓ 2.37%

下降幅度为 2.97%,但能够满足光学系统设计的指标要求。从弥散圆  $D$ (直径)参数上看光学系统像质变化,温度载荷对光学系统像质的影响较为明显,弥散圆直径最大值为 6.562  $\mu\text{m}$ ,上升幅度为 1.14%。从畸变上看各工况参数,径向重力工况对畸变参数影响最显著,畸变值为 0.035 79%,下降幅度为 2.37%。从整体参数上看,各指标参数变化较小,都能够满足光学系统设计的指标要求及成像质量要求,也进一步说明当前光机结构设计合理,无需温度补偿。

对大口径折射式空间望远镜进行光机集成分析的实践证明,光机集成分析可以全面地对系统成像质量进行评价,并得到更为接近实际工况的分析结果。

## 4 装调与测试

根据上述分析得到的望远镜各项参数,对望远镜的透镜及机械结构件进行加工与装配。通过使用 ZYGO 干涉仪检测 13 片光学透镜的内外表面的面形偏差,各光学透镜的检测结果均满足单透镜的光学设计指标要求。通

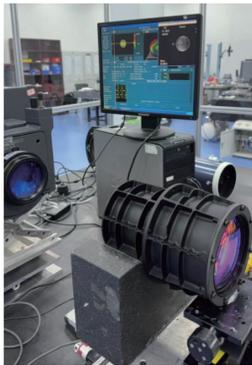
通过使用具有弹性模量小、性能稳定以及固化后体积收缩应力小等特点的 RTV 胶粘接每个单透镜,压圈定位面将每个单透镜固定于镜座中。采用定心工艺加工 13 组透镜组件,并对加工完成的每个透镜组进行检测,各透镜组件满足图纸的设计要求。最终将每个透镜组件进行装配,并对装配完成的大口径折射式空间望远镜进行光学检测。检测结果如图 10(a)、(b)所示,大口径折射式空间望远镜系统波像差为  $0.123\lambda$  ( $\lambda = 632.8 \text{ nm}$ ),检测结果均满足设计指标要求。在保证一定的温度 ( $20^\circ\text{C} \pm 5^\circ\text{C}$ )、湿度 ( $35\% \sim 70\%$ ) 以及洁净度(航天标准)的情况下,通过使用探测器对大口径折射式空间望远镜进行外



(d) 大口径折射式空间望远镜  
(d) Large-aperture refractive space telescope

图 10 装调与测试

Fig. 10 Assembly, alignment, and testing



(a) 干涉仪检测望远镜  
(a) Telescope inspection with interferometer

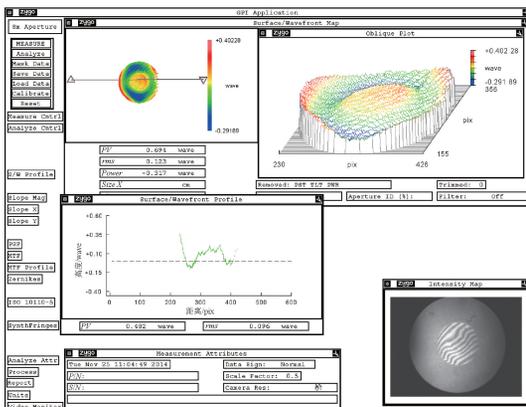
场成像试验,选取的目标对象直线距离超过 3 km,外场成像试验如图 10(c)所示,可以看出,大口径折射式空间望远镜成像结果清晰。最后,通过加工、装配与检测,大口径折射式空间望远镜实物如图 10(d)所示。

## 5 结 论

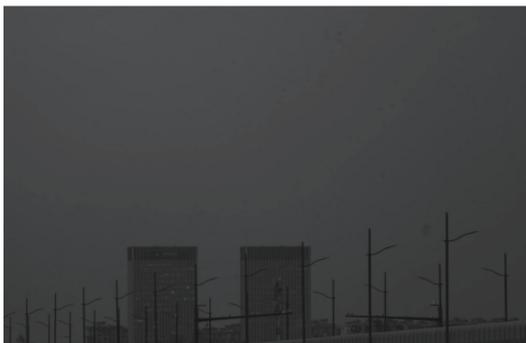
通过对大口径折射式空间望远镜进行了结构设计,由于结构中存在接触非线性,通过对大口径折射式空间望远镜在自重和温度载荷作用下进行了接触非线性分析;同时,也对大口径折射式空间望远镜进行了动力学分析。分析结果表明:在静动力学工况中,光学元件在轴向冲击中的最大接触应力为  $1.83 \times 10^7 \text{ Pa}$ ,安全裕度优于 0.82;望远镜结构组件在径向冲击中所产生的最大应力为  $1.83 \times 10^8 \text{ Pa}$ ,安全裕度优于 1.91。由此可知,在静动力学载荷作用下,空间望远镜的光机结构具有良好的结构稳定性。随后,对大口径折射式空间望远镜进行了 Zernike 多项式拟合,并对其进行了光机集成分析。光机集成分析结果表明:载荷作用下的光学元件变形导致光学系统的变化,系统 MTF 降低约 2.97%,满足光学允差要求。最后,对大口径折射式空间望远镜进行装调与检测,检测结果表明:大口径折射式空间望远镜系统波像差为  $0.123\lambda$ ,其外场成像试验图像清晰,能够满足空间对地观测领域的探测需求;为后续大口径折射式空间望远镜的优化设计、研制需求等方面提供参考借鉴。

## 参考文献

- [1] 苏云,葛婧菁,王业超,等. 航天高分辨率对地光学遥感载荷研究进展[J]. 中国光学(中英文),2023,16(2):258-282.  
SU Y, GE J J, WANG Y CH, et al. Research progress on high-resolution imaging system for optical remote sensing in aerospace[J]. Chinese Optics,2023,16(2):



(b) 望远镜检测结果  
(b) Telescope testing result



(c) 外场成像试验结果  
(c) Field imaging test result

- 258-282.
- [ 2 ] 曹明辉,辛宏伟,陈长征,等. 微小型空间相机碳纤维整体式主框架轻量化设计[J]. 仪器仪表学报,2022,43(2):54-61.  
CAO M H, XIN H W, CHEN CH ZH, et al. A lightweight design of carbon fiber integrated main frame for the micro space camera[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument,2022,43(2):54-61.
- [ 3 ] 郭崇岭,陈佳夷,陈传志,等. 大口径空间光学望远镜桁架结构关键技术研究进展[J]. 南京航空航天大学学报,2024,56(1):31-43.  
GUO CH L, CHEN J Y, CHEN CH ZH, et al. Review on critical technologies for truss structure of large-aperture space optical telescope[J]. Journal of Nanjing University of Aeronautics & Astronautics,2024,56(1):31-43.
- [ 4 ] 单博闻,辛宏伟,陈长征. 空间太阳望远镜调焦机构的设计与分析[J]. 仪器仪表学报,2021,42(6):1-8.  
SHAN B W, XIN H W, CHEN CH ZH. Design and analysis for focusing mechanism of space solar telescope[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument,2021,42(6):1-8.
- [ 5 ] 曹玉岩,王建立,初宏亮,等. 大口径光学透镜的双级柔性支撑结构设计[J]. 光学精密工程,2021,29(8):1867-1880.  
CAO Y Y, WANG J L, CHU H L, et al. Design and analysis of bi-flexible mounting structure for large optical lens [ J ]. Optics and Precision Engineering, 2021, 29(8):1867-1880.
- [ 6 ] 关英俊,辛宏伟,刘巨,等. 基于接触非线性分析方法的反射镜组件工程分析[J]. 光学技术,2006,32(6):859-862.  
GUAN Y J, XIN H W, LIU J, et al. Reflector subassembly engineering analysis based on contact nonlinear analysis method[J]. Optical Technique,2006,32(6):859-862.
- [ 7 ] 徐广州,阮萍,李婷,等. 基于接触方法与集成仿真技术的摆镜面形仿真[J]. 红外与激光工程,2012,41(5):1316-1322.  
XU G ZH, RUAN P, LI T, et al. Surface simulation of tilt mirror based on contact and integrated simulation method[J]. Infrared and Laser Engineering, 2012, 41(5):1316-1322.
- [ 8 ] 谢军,何锋赞,王晶,等. 经纬仪主镜轴向支撑结构仿真与优化[J]. 红外与激光工程,2016,45(S1):139-144.  
XIE J, HE F Y, WANG J, et al. Simulation and optimization of axial supporting structures for theodolite primary mirror [ J ]. Infrared and Laser Engineering, 2016,45(S1):139-144.
- [ 9 ] 李梦庆,张雷,李宗轩,等. 空间平面反射镜组件销钉预紧的非线性分析[J]. 光子学报,2016,45(2):140-145.  
LI M Q, ZHANG L, LI Z X, et al. Nonlinear analysis of preload of pins in the space planar mirror assembly[J]. Acta Photonica Sinica,2016,45(2):140-145.
- [ 10 ] 胡斌,李创,相萌,等. 可展开空间光学望远镜技术发展及展望[J]. 红外与激光工程,2021,50(11):347-362.  
HU B, LI CH, XIANG M, et al. Development and prospects of deployable space optical telescope technology[J]. Infrared and Laser Engineering,2021,50(11):347-362.
- [ 11 ] 刘旭,汪恒,刘晓丰,等. 空间相机碳纤维主承力筒结构设计与分析[J]. 红外与激光工程,2024,53(8):204-213.  
LIU X, WANG H, LIU X F, et al. Design and analysis of carbon fiber main load-bearing cylinder structure for space cameras [ J ]. Infrared and Laser Engineering, 2024,53(8):204-213.
- [ 12 ] 魏加立,曲慧东,王永宪,等. 空间TOF相机大视场光学镜头结构优化设计[J]. 仪器仪表学报,2020,41(10):121-128.  
WEI J L, QU H D, WANG Y X, et al. Structure optimization design of large field of view optical lens for the space TOF camera[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument,2020,41(10):121-128.
- [ 13 ] 谢军,曹立华,韩光宇,等. 考虑接触边界条件的经纬仪主镜面形误差分析[J]. 光子学报,2014,43(12):138-142.  
XIE J, CAO L H, HAN G Y, et al. The surface error analysis of theodolite primary mirror considering contact boundary condition [ J ]. Acta Photonica Sinica, 2014, 43(12):138-142.
- [ 14 ] 吴志刚,蒋建平,邬树楠,等. 航天结构空间组装机动力学与控制研究进展[J]. 力学进展,2024,54(2):344-390.  
WU ZH G, JIANG J P, WU SH N, et al. Review on dynamics and control of space structure in the process of on-orbit assembly [ J ]. Advances in Mechanics, 2024, 54(2):344-390.
- [ 15 ] 马宏川,范宏波,林宇,等. 热像仪光机热集成分析综述[J]. 红外技术,2019,41(2):134-141.  
MA H CH, FAN H B, LIN Y, et al. Review of thermal-structural-optical integration analysis of thermal imager[J]. Infrared Technology,2019,41(2):134-141.
- [ 16 ] 陈永聪. 基于有限元法的大口径平行光管主反射镜支

撑技术研究[D]. 西安:中国科学院研究生院(西安光学精密机械研究所),2007.

CHEN Y C. Research on the support technology of large diameter parallel optical tube main mirror based on finite element method[D]. Xi'an: Xi'an Institute of Optics and Precision Mechanics Chinese Academy of Science, 2007.

[17] 张家齐,郭艺博,张友建,等.机载宽温条件下反射镜组件与粘接层设计[J].中国光学(中英文),2023,16(3):578-586.

ZHANG J Q, GUO Y B, ZHANG Y J, et al. Design of reflector assembly and adhesive layer under airborne wide temperature conditions[J]. Chinese Optics, 2023, 16(3):578-586.

[18] 刘朋朋,靳利锋,赵慧,等.低轨道遥感相机光机热一体化分析及优化设计[J].红外技术,2022,44(6):614-621.

LIU P P, JIN L F, ZHAO H, et al. Integrated opto-mechanical-thermal analysis and optimization design of a low-orbit remote sensing camera[J]. Infrared Technology, 2022, 44(6):614-621.

## 作者简介



黄志裕,2022年于长春工业大学获得学士学位,现为长春工业大学硕士研究生,主要研究方向为空间光学仪器光机结构优化设计。

E-mail:2216419535@qq.com

**Huang Zhiyu** received his B.Sc. degree from Changchun University of Technology in 2022. He is currently a M.Sc. student at the same university, with his primary research focus on the optimization design of opto-mechanical structures for space optical instruments.



刘勇,2018年于长春工业大学获得学士学位,2022年于长春工业大学获得硕士学位,现为长春工业大学博士研究生,主要研究方向为空间光学仪器光机结构优化设计。

E-mail:liuyong657224357@outlook.com

**Liu Yong** received his B.Sc. degree from Changchun University of Technology in 2018 and his M.Sc. degree from the same university in 2022. He is currently a Ph.D. candidate at Changchun University of Technology, with

his main research focus on the optimization design of optical-mechanical structures for space optical instruments.



张铭起,2018年于长春工业大学获得学士学位,2022年于长春工业大学获得硕士学位,现为长春工业大学博士研究生,主要研究方向为空间光学仪器光机结构优化设计。

E-mail:zhangmq96@163.com

**Zhang Mingqi** received his B.Sc. degree from Changchun University of Technology in 2018 and his M.Sc. degree from the same university in 2022. He is currently a Ph.D. candidate at Changchun University of Technology, with his main research focus on the optimization design of optical-mechanical structures for space optical instruments.



岳春宇,2006年于武汉大学获得学士学位,2012年于武汉大学获得博士学位,现为北京空间机电研究所高级工程师,主要研究方向为航天摄影测量,遥感数据处理。

E-mail:ycy1893@163.com

**Yue Chunyu** received his B.Sc. degree and Ph.D. from Wuhan University in 2006 and 2012. He is currently a senior engineer in Beijing institute of space mechanics & electricity, with his primary research focus on space photogrammetry and remote sensing data processing.



关英俊(通信作者),分别在2001年和2004年于长春工业大学获得学士学位和硕士学位,2007年于中国科学院长春光学精密机械与物理研究所获得博士学位,现为长春工业大学教授,博士生导师,主要研究方向为空间光学仪器光机结构优化设计。

E-mail:guanyingjun@ccut.edu.cn

**Guan Yingjun** (Corresponding author) received his B.Sc. and M.Sc. degrees from Changchun University of Technology in 2001 and 2004, respectively. He received his Ph.D. from the Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics, and Physics, Chinese Academy of Sciences in 2007. He is currently a professor and doctoral advisor at Changchun University of Technology, with his primary research focus on the optimization design of opto-mechanical structures for space optical instruments.