

温度载荷下安防镜头的离焦与补偿分析

司占山 石广丰 唐亚 海鸿松 张庆

Defocusing and compensation analysis of security lens under temperature load

SI Zhanshan, SHI Guangfeng, TANG Ya, HAI Hongsong, ZHANG Qing

引用本文:

司占山, 石广丰, 唐亚, 等. 温度载荷下安防镜头的离焦与补偿分析[J]. 应用光学, 2025, 46(5): 981–987. DOI: 10.5768/JAO202546.0501004

SI Zhanshan, SHI Guangfeng, TANG Ya, et al. Defocusing and compensation analysis of security lens under temperature load[J]. Journal of Applied Optics, 2025, 46(5): 981–987. DOI: 10.5768/JAO202546.0501004

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.5768/JAO202546.0501004>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

玻塑混合定焦镜头热离焦与补偿分析

Thermal defocus and compensation analysis of glass-plastic hybrid fixed-focus lens

应用光学. 2023, 44(5): 959–966 <https://doi.org/10.5768/JAO202344.0501003>

激光能量密度对CMOS探测器的感光面热应力的影响研究

Influence of laser energy density on thermal stress at photosensitive layer of CMOS detector

应用光学. 2024, 45(3): 568–574 <https://doi.org/10.5768/JAO202445.0310011>

基于波像差判据的同步相移显微干涉检焦方法

Synchronous phase-shifting microscopic interference focal detection method based on wave aberration criteria

应用光学. 2021, 42(4): 703–708 <https://doi.org/10.5768/JAO202142.0403002>

热压载荷作用下气体检测光学窗口对激光传输影响

Influence of optical window for gas detection on laser transmission under thermal pressing loads

应用光学. 2023, 44(1): 195–201 <https://doi.org/10.5768/JAO202344.0107001>

基于误差提取算法辅助装调的离焦误差校正方法

Defocusing error correction method based on error extraction algorithm assisted installation and adjustment

应用光学. 2024, 45(6): 1245–1251 <https://doi.org/10.5768/JAO202445.0603005>

机载相机非球面光学系统热光学特性分析

Analysis of thermal optical properties of airborne camera aspheric optical system

应用光学. 2020, 41(2): 270–275 <https://doi.org/10.5768/JAO202041.0201006>



关注微信公众号，获得更多资讯信息

文章编号: 1002-2082 (2025) 05-0981-07

引用格式: 司占山, 石广丰, 唐亚, 等. 温度载荷下安防镜头的离焦与补偿分析 [J]. 应用光学, 2025, 46(5): 981-987.

SI Zhanshan, SHI Guangfeng, TANG Ya, et al. Defocusing and compensation analysis of security lens under temperature load[J]. Journal of Applied Optics, 2025, 46(5): 981-987.



在线阅读

温度载荷下安防镜头的离焦与补偿分析

司占山¹, 石广丰¹, 唐亚², 海鸿松¹, 张庆¹

(1. 长春理工大学 机电工程学院, 吉林 长春 130022; 2. 东莞市宇瞳光学科技股份有限公司, 广东 东莞 523000)

摘要: 为了降低研发成本, 缩短研发周期, 在设计阶段对安防镜头进行无热化设计是必要的。基于 OpticStudio STAR 模块作为有限元分析与光学分析之间的接口工具, 对一款光圈数为 1.6~1.3 的安防镜头进行光机热集成分析。在 UG 中建立有限元模型并导入 Ansys 中, 以镜头正常使用温度区间内的最高和最低温度作为载荷进行热应力分析, 得到镜片表面面型数据和相关热应力数据; 将面型数据运用 STAR 模块进行拟合并导入 Zemax 中进行光学离焦量模拟; 通过结构-光学-结构迭代设计, 设计出在 -40℃~80℃ 温度范围内像质符合要求的成品镜头。最后通过镜头高低温离焦量测试, 验证了镜头在极限温度环境中成像的稳定性, 以及光机热集成分析的准确性。

关键词: 光机热集成分析; 温度载荷; 面型拟合; 离焦量; 热应力

中图分类号: TN201

文献标志码: A

DOI: 10.5768/JAO202546.0501004

Defocusing and compensation analysis of security lens under temperature load

SI Zhanshan¹, SHI Guangfeng¹, TANG Ya², HAI Hongsong¹, ZHANG Qing¹

(1. School of Mechanical and Electrical Engineering, Changchun University of Science and Technology, Changchun 130022, China; 2. Dongguan Yutong Optical Technology Co., Ltd., Dongguan 523000, China)

Abstract: In order to reduce costs and shorten the cycle, it is necessary to carry out heat-free design of security lenses in the design stage. Based on the OpticStudio STAR module as an interface tool between finite element analysis and optical analysis, the optical-mechanical thermal integration analysis of a security lens with an aperture of 1.6~1.3 was performed. The finite element model was established in UG and imported into Ansys. The thermal stress analysis was carried out with the highest and lowest temperatures within the normal operating temperature range of the lens as the load, and the surface profile data and related thermal stress data of the lens were obtained. The profile data were merged into Zemax using STAR module for optical defocus simulation. Through the structure-optical-structure iterative design, the finished lens which could meet the requirements at -40℃~80℃ image quality was designed. Finally, the imaging stability of the lens in the extreme temperature environment and the accuracy of the optical, mechanical and thermal integrated analysis were verified by the lens defocus measurement at high and low temperatures.

Key words: integrated optical, mechanical and thermal analysis; temperature load; profile fitting; defocusing amount; thermal stress

引言

安防镜头行业近年来在技术进步和市场需求的双重驱动下, 呈现出快速发展的趋势, 同时对安

防镜头在极端温度环境下的成像要求也逐步提高, 要求镜头能够在 -40℃~80℃ 环境中保证成像效果。玻塑混合设计方案具有成本低、成像效果

收稿日期: 2024-09-06; 修回日期: 2024-09-26

基金项目: 吉林省科技厅重点技术攻关项目 (20190302123GX)

第一作者: 司占山, E-mail: 2938381770@qq.com

通信作者: 石广丰, E-mail: shiguangfeng@cust.edu.cn

好的优点,设计中温度载荷对光学系统的影响包含了光学、结构、温度之间的相互作用。热胀冷缩效应会使结构件发生变形,导致光学元件发生位置变化,进而使光学元件面型发生变化,这些变化均会导致最佳像面偏离原来位置而产生离焦。Zemax 的热离焦与补偿设计不能模拟结构件的热胀冷缩带来的影响,所以,需要对镜头进行光机热集成仿真分析。

2011 年, YANG H S 等人^[1]通过三层镜筒的形式实现了红外光学系统机械被动无热化设计,实现高温状态下后组透镜与焦平面负位移补偿。长春理工大学刘才等人^[2]采用光学被动无热化设计方法,设计了大口径、多波段、多参数检测系统,解决了大口径、多波段的色差校正难题。西北工业大学唐玉凤等人^[3]利用光学被动无热化设计与机械主动消热差设计方法相结合的方式,设计了一款非制冷长波红外连续变焦光学系统。中国科学院长春光学精密机械与物理研究所刘韬^[4]运用机械主动消热差设计与光学优化相结合的方法,使高能激光光学系统能够在激光辐照状态下有较好的远场聚焦特性。以上研究虽然对热载荷下镜头的像质变差提出了诸多改善方法,但是,在热载荷下以 OpticStudio STAR 模块作为有限元分析与光学分析之间的接口工具,采用光学被动式消热设计与机械被动式消热设计相结合的设计方案却很少。

本文运用光学被动式补偿设计与机械被动式补偿设计相结合的设计方法,对一款变焦安防镜头的广角端进行热离焦与补偿分析^[5-7]。首先,将镜头 3D 模型及材料参数导入到有限元仿真分析软件中,计算求得各枚镜片由于温度载荷而产生的面型变化及应力分布情况;其次,将求得的面型数据通过 Ansys Star 模块进行数据处理;最后,将处理后包含刚体位移的数据导入到 Zemax 中进行光学离焦量模拟,找出对镜头离焦敏感度较高的镜片进行进一步优化分析。通过设计-仿真-设计反复迭代,最终设计出像质符合标准的镜头。

1 热离焦与补偿基本原理

温度载荷使镜片在径向和轴向引起径向压力 S_R 和轴向压力 P_A , 以采用压圈固定方式的单透镜装配结构为例, 其中 D_g 表示镜片口径, D_m 表示镜片外壳口径, t_c 表示镜框厚度, t_E 表示边缘接触点宽度^[8-9]。

光学镜片和结构材料的杨氏模量分别为 E_g 和

E_m , 通常来说, 光学镜片的热胀系数 α_g 与结构材料的热胀系数 α_m 之间存在差值, 所以温度的变化会造成镜片与镜框由于伸缩量的不同产生挤压力, 如公式(1)、(2)、(3)所示:

$$S_R = -K_4 \times K_5 \times \Delta t \quad (1)$$

$$K_4 = \frac{\alpha_m - \alpha_g}{\frac{1}{E_g} - \frac{D_g}{E_m \times t_c}} \quad (2)$$

$$K_5 = 1 + \frac{D_m - D_g}{D_g \times \Delta t \times (\alpha_m - \alpha_g)} \quad (3)$$

由以上公式可知, 镜框与镜片之间的径向压力 S_R 只与镜框厚度 t_c 、镜片与镜框间隙 D_m 和 D_g 、以及两种材料的杨氏模量和泊松比有关, 与镜框的长度无关。其中, K_4 为应变特性参数, K_5 为间隙参数。

在轴向方向上, 温度的变化会造成轴向压力发生变化, 如公式(4)、(5)所示:

$$P_A = K_3 \times \Delta t \quad (4)$$

$$K_3 = \frac{-(\alpha_m - \alpha_g) \times t_E}{\frac{2t_E}{E_g \times A_g} + \frac{t_E}{E_m \times A_m}} \quad (5)$$

式中, A_m 和 A_g 表示透镜和镜框内壁受压区域的横截面面积; K_3 为应变特性参数。由公式(4)和(5)可知: 镜框与镜片之间的轴向压力同样与镜框和压圈长度无关, 只与边缘接触点宽度 t_E 、受压区域横截面面积 A_m 、 A_g , 以及材料的物理属性杨氏模量和泊松比相关^[10]。

2 镜头光学系统设计

根据设计要求, 此款变焦镜头总长度为 52.14 mm, 光学后焦距为 5.43 mm ~ 12.82 mm, 波长为 (536 ~ 850) μm , 法兰距为 13.5 mm, 高低温信赖性测试条件为 $-40^\circ\text{C} \sim 80^\circ\text{C}$, 分辨率为 2592×1.44 像素 (5 Mp)。光学系统示意图如图 1 所示。此款镜头采用 2 枚玻璃镜片搭配 6 枚塑胶镜片的形式, 第 1 枚和第 4 枚为玻璃镜片, 其余镜片均为塑胶材质。

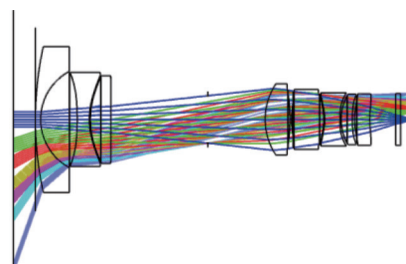


图 1 光学系统示意图

Fig. 1 Schematic of optical system

光学系统在进行初始设计时, 根据传统的光学系统无热化设计方法考虑折射率变化对焦距的影

响^[11-13],将结构的热膨胀系数代入其中,未能考虑温度载荷下镜框等结构件与光学镜片的膨胀量不同造成相互挤压对焦距的影响。

3 镜头光机热集成仿真分析

3.1 温度载荷下镜头有限元仿真分析

此款镜头由2枚玻璃镜片、6枚塑胶镜片、主筒、隔圈、垫片、镜框组成。其中第1枚镜片与第4枚镜片为玻璃材质,其余镜片均为塑胶材质。该镜头为回转体结构,可由二维图旋转生成,镜头结构如图2所示。为了保证装配精度及整机稳定性,镜片底面的支撑均是平面,所以镜片的装配方式采用平面承靠的装配方式,装配平行度高,稳定性好^[14]。经过查阅资料,镜片与镜框的配合间隙初步设置为 2×10^{-3} mm。

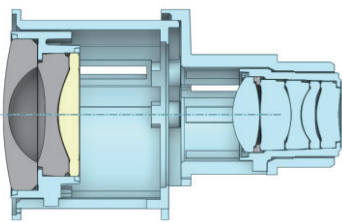


图2 镜头结构示意图

Fig. 2 Schematic of lens structure

在实际有限元仿真分析中,绝大部分分析模型与设计模型是不相同的。当我们对一个新的设计进行分析时,首先要进行模型的简化,去除微小特征,便于网格的划分以及最后的求解分析。利用Ansys Workbench自带的mesh功能对镜头进行四面体网格划分^[15],共画出550 438个高质量网格。有限元仿真模型网格划分如图3所示。

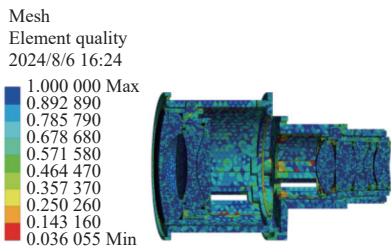


图3 镜头网格模型

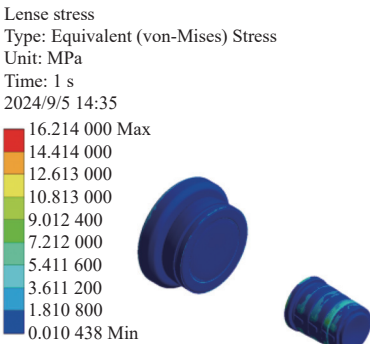
Fig. 3 Mesh model of lens

按照该安防镜头极端环境温度要求,在Ansys Workbench中分别施加高温80℃、低温-40℃的温度载荷,常温设置为22℃。边界条件由实际工况得知,在后主筒端面设置固定。镜头各部件材料参数如表1所示。镜头热-结构仿真结果云图如图4所示。

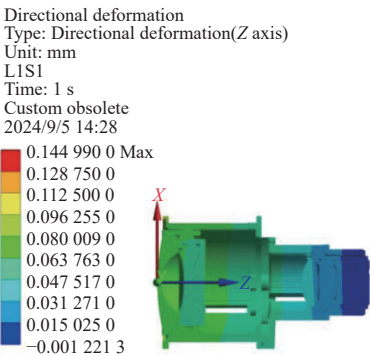
表1 镜头各部件材料参数

Table 1 Material parameters of each part of lens

材料	密度/ g·cm ³	弹性模 量/MP _a	泊松比	热膨胀系 数/($\times 10^{-5}$ ℃)	
				垂向	法向
PC+10%GF	1.27	3 500	0.3	7	4
PC+30%GF	1.43	8 900	0.35	6.3	1.8
H-LAK53B	4.18	122 200	0.3	0.6	
EP5000	1.25	2 790	0.36	6.8	
H-FK95N	3.52	71 950	0.3	1.44	
K26R	1.01	2 600	0.35	6.24	
U-1055	1.09	2 300	0.32	6.5	
EP8000	1.23	3 310	0.37	7.3	
C3604	2.75	68 900	0.33	2.36	
U-1055J	1.3	160	0.37	7.5	
BR25MD	8.4	1 100	0.35	2.06	



(a) 镜片高温应力分布云图



(b) 镜头低温沿光轴方向变形云图

图4 镜片温度中的变形

Fig. 4 Deformation in temperature of lens

80℃工况下,由有限元仿真结果可知,镜片7所受压应力的值远大于其他镜片。因此,对高温工况下镜头的离焦可以考虑采用径向热膨胀系数较大的镜框材料或采用热膨胀系数较小的镜片材料,减小镜片7与镜框之间的压应力进行补偿分析。-40℃工况下,在径向方向上,塑胶镜片的热膨胀量大于镜框的热膨胀量,所以在低温工况下,镜片与镜框之间几乎不存在挤压应力,镜头在低温工况下像面偏移主要归于镜框在光轴方向上的

补偿量。从以上有限元仿真结果可知镜头在温度载荷下的受力及变形情况,至于热应力对镜头成像性能的影响则需要对镜头进行光机热联合仿真分析^[16],进一步验证该镜头设计方案的合理性。

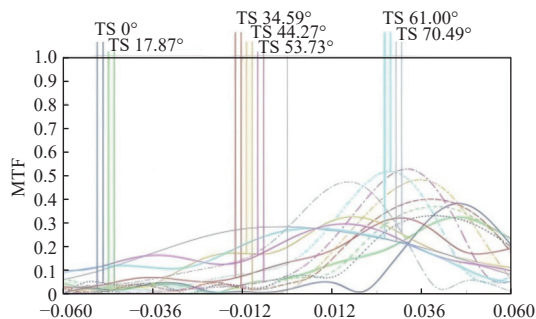
3.2 基于 OpticStudio STAR 模块的 FEA 数据处理

光学镜片表面是光滑连续的,而从有限元软件中提取的变形数据是离散的,将离散的变形数据拟合成光滑连续的曲面称为镜面拟合。本文采取 Zernike 多项式对有限元求得的数据进行面型拟合^[17]。直角坐标系下, N 项 Zernike 多项式数学描述如下:

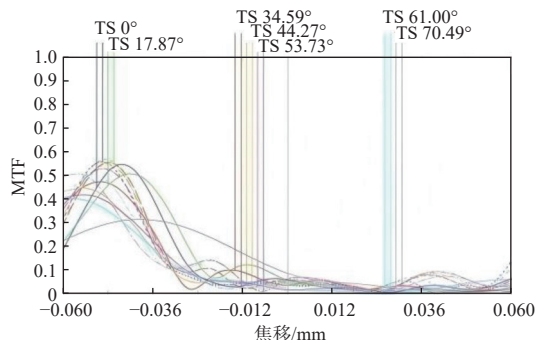
$$\Delta Z_i = \sum_{i=1}^N a_i Z_i(x, y) = a_1 Z_1(x, y) + a_2 Z_2(x, y) + \dots + a_n Z_n(x, y) \quad (6)$$

式中: a_i 为多项式第 i 项系数; Z_i 为多项式第 i 项; N 为多项式系数; x, y 为数据点的坐标值。在有限元仿真软件 Ansys 中对整机镜头进行静力分析,可得到镜片表面变形文件。

通过使用 Zemax 的自定义扩展对镜片表面变形文件进行拟合并导出 Ansys Mechanical 的 FEA 结果。该扩展便于追踪 FEA 数据集,可以确定在光学设计中将它们分配到哪个面,还可以与结构和热数据集一起使用^[18]。温度载荷下镜头的离焦调制传递函数(MTF)曲线如图5所示。



(a) 80 °C时镜头离焦MTF曲线



(b) -40 °C时镜头离焦MTF曲线

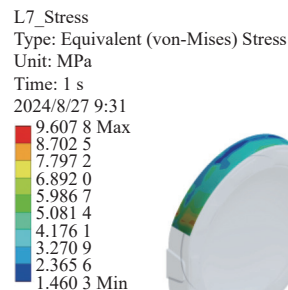
图5 温度载荷下镜头离焦 MTF 曲线

Fig.5 MTF curves of lens defocusing under temperature load

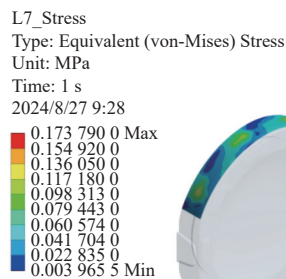
从以上光机热集成分析结果可知,由于塑胶镜片与镜框的热膨胀系数存在较大差值,导致镜头在高温载荷下发生了 0.045 mm 的正离焦,低温载荷下发生了 0.046 mm 的负离焦,此变化结果符合光学设计要求。镜头在 80 °C 下离焦量过大的主要原因是,在径向方向上第 7 枚镜片的热膨胀系数远大于后镜框的热膨胀系数,致使镜框与镜片相互挤压发生像面偏移。镜头在 -40 °C 下离焦量过大的主要原因是,后镜框在轴向方向上热膨胀系数过小导致。基于以上分析结果,由公式(1)可知,应选取径向和轴向热膨胀系数较大的后镜框材料对镜头像面偏移进行优化分析。

3.3 优化镜框材质镜头的有限元仿真分析

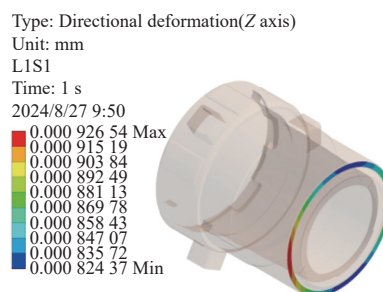
为了同时改善镜头在高温与低温工况下的离焦情况,将后镜框的材料由原来的 PC+30%GF 更换为 PC+10%GF,对镜头进行优化仿真分析,结果如图6所示。



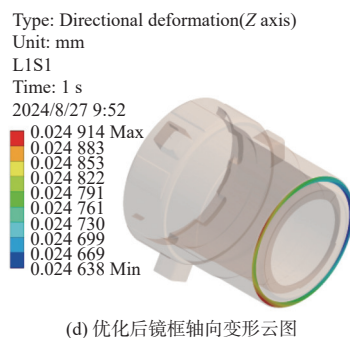
(a) 优化前L7径向应力分布云图



(b) 优化后L7径向应力分布云图



(c) 优化前镜框轴向变形云图

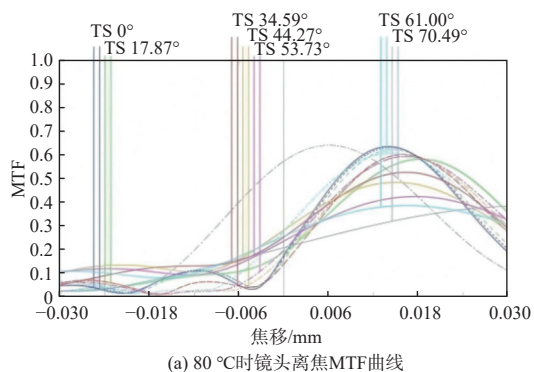


(d) 优化后镜框轴向变形云图

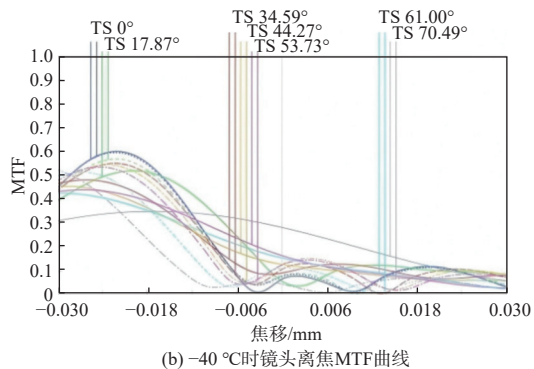
图 6 优化前后结果对比云图

Fig. 6 Comparison of cloud images before and after optimization

通过优化分析结果可知,第7透镜的径向应力分布较优化前减少了98%,镜框轴向补偿量较优化前增加了0.024 mm。将优化后的镜片表面面型数据通过STAR模块进行面型拟合后,代入光学设计软件Zemax中进行光学模拟分析,结果如图7所示。



(a) 80 °C时镜头离焦MTF曲线



(b) -40 °C时镜头离焦MTF曲线

图 7 镜头优化后温度载荷下离焦 MTF 曲线

Fig. 7 Defocused MTF curve under thermal load following lens optimization

由上述光学模拟结果可知,优化后的镜头在高温工况下发生了0.015 mm正离焦,同优化前0.045 mm离焦量相比减少了66.6%。在低温工况下发生了-0.022 mm负离焦,同优化前-0.046 mm离焦量

相比减少了52.2%。通过光机热集成分析可知,加大后镜框径向与轴向热膨胀系数可以明显减小镜头在温度载荷下的成像性能,且优化后的镜头成像质量满足镜头设计要求。

4 验证试验

为了光机热集成分析的准确性,我们利用ImageMaster®HR紧凑型高精度光学测量仪进行温度载荷下镜头焦距测量实验。德国全欧光学(TRIOPTICS)设计的ImageMaster HR TempControl VIS是ImageMaster光学传递函数测量仪系列中的产品,采用立式结构设计,特别适合于小口径透镜或镜头小批量、高精度的研发和量产测试应用。测量平台示意图如图8所示。

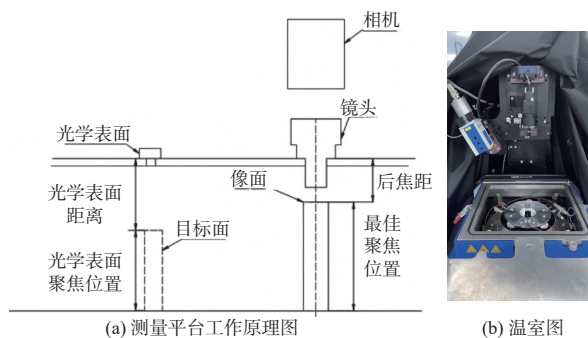


图 8 镜头法兰焦距测量实验

Fig. 8 Flange focal length measurement experiment of lens

在测量过程中,将镜头放置在热室中,通过真空与环境隔离,并升温-40 °C至120 °C的各种测试温度范围。真空可防止低温下冷凝,并且热室的设计方式可确保设备本身的热胀冷缩对实验结果无影响。测量结果如表2所示。从表2中的法兰焦距可知,镜头低温离焦量为-18 μm,高温离焦量为15 μm,与光机热集成仿真的结果基本一致,验证了仿真方法的有效性。

表 2 镜头高低温法兰焦距测量结果

Table 2 Measurement results of Flange focal length at high and low temperatures for Lens

温度/°C	聚焦位置/mm	光学表面聚焦位置/mm	光学表面位置/mm	法兰焦距/mm
20.001	7.304 39	1	19.706 425	13.402 03
-39.995	7.320 4	1	19.705 22	13.384 30
19.998	7.328 1	1	19.731 748	13.403 65
79.996	7.278 63	1	19.697 684	13.419 05
20.001	7.327 15	1	19.728 322	13.401 17

5 结论

通过对镜头进行光机热集成分析,根据分析中的有限元理论得出了镜头热离焦的主要原因,并提出了有效的补偿措施。

镜头在 80℃ 工作环境中,由有限元仿真结果可知,第 7 枚透镜的平均径向应力由优化前 3.86 MPa 减小到 0.046 MPa。在 -40℃ 工作环境中,后镜框的补偿量由原来的 0.0008 mm 增加到了 0.028 mm。

将两种热载荷下镜片表面面型数据通过 STAR 模块进行拟合,拟合后的结果文件导入到 Zemax 中进行分析,得到镜头在 80℃ 工作环境中,镜头离焦量由原来的 0.045 mm 减小到 0.015 mm,较优化前减小了 66%。镜头在 -40℃ 工作环境中,离焦量由原来的 0.046 mm 减小到 0.022 mm,较优化前减小了 52%,这与有限元仿真得到的后镜框的补偿量 0.027 mm 一致,进一步验证了有限元仿真结果的正确性。

最后通过温度载荷下镜头离焦测量实验,验证了镜头成像性能稳定,结构设计合理、有效,光机热集成化分析结果与实验结果基本一致,为镜头研发提供了一种高效、可靠的验证手段。

参考文献:

- [1] YANG H S, KIHM H, MOON I K, et al. Three-shell-based lens barrel for the effective athermalization of an IR optical system[J]. *Applied Optics*, 2011, 50(33): 6206-6213.
- [2] 刘才, 于信, 潘国涛, 等. 大口径多波段光束质量检测系统设计[J]. *中国光学*, 2024, 17(4): 932-942.
LIU Cai, YU Xin, PAN Guotao, et al. Design of large-aperture multi-band beam quality detection system[J]. *Chinese Optics*, 2024, 17(4): 932-942.
- [3] 唐玉凤, 毛珊, 宋逸辰, 等. 非制冷长波红外连续变焦光学系统的一种无热化设计[J]. *光学学报*, 2024, 44(7): 158-166.
TANG Yufeng, MAO Shan, SONG Yichen, et al. Athermalization design of uncooled long waveband infrared continuous zoom optical system[J]. *Acta Optica Sinica*, 2024, 44(7): 158-166.
- [4] 刘韬. 考虑热致面型变化的消热差光学设计方法研究[D]. 长春: 中国科学院大学(中国科学院长春光学精密机械与物理研究所), 2022.
LIU Tao. Research on athermal optical design method considering thermal-induced surface deformation[D]. Changchun: University of Chinese Academy of Science (Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences), 2022.
- [5] 宋长孝, 于信, 白素平, 等. 光轴稳定探测系统无热化光机结构设计[J]. *中国光学*, 2024, 17(4): 909-920.
SONG Changxiao, YU Xin, BAI Suping, et al. Design of athermalization optical machine structure for optical axis stability detection system[J]. *Chinese Optics*, 2024, 17(4): 909-920.
- [6] 唐晗, 周春芬, 冯建伟, 等. 变光阑长波红外连续变焦光学系统设计[J]. *红外技术*, 2024, 46(5): 491-500.
TANG Han, ZHOU Chunfen, FENG Jianwei, et al. Design of LWIR continuous zoom optical system with variable diaphragm[J]. *Infrared Technology*, 2024, 46(5): 491-500.
- [7] 张丽芝, 陆秋萍, 段帆琳, 等. 长焦镜头光学系统设计及无热化研究[J]. *光学学报*, 2024, 44(8): 227-236.
ZHANG Lizhi, LU Qiuping, Duan Fanlin, et al. Optical system design and athermalization of telephoto lens[J]. *Acta Optica Sinica*, 2024, 44(8): 227-236.
- [8] YODER P R. Axial stresses with toroidal lens-to-mount interfaces[J]. *SPIE*, 1991, 1533: 2-11.
- [9] YODER P R. Parametric investigations of mounting-induced axial contact stresses in individual lens elements[J]. *SPIE*, 1993, 1998: 8-20.
- [10] YODER P R, HATHEWAY A E. Further considerations of axial preload variations with temperature and the resultant effects on contact stresses in simple lens mountings[J]. *SPIE*, 2005, 5877: 38-52.
- [11] 宫晓峰, 刘健, 陈建发, 等. 光机热集成仿真在光学系统无热化设计中的应用研究[J]. *光电与控制*, 2023, 30(2): 106-110.
GONG Xiaofeng, LIU Jian, CHEN Jianfa, et al. Application of structural-thermal-optical integration simulation in optical system athermalization design[J]. *Electronics Optics & Control*, 2023, 30(2): 106-110.
- [12] 闫阿奇, 崔雯, 董森. 大变倍比光学被动半无热化变焦系统设计[J]. *光学学报*, 2022, 42(4): 149-156.
YAN Aqi, CUI Wen, DONG Sen. Optical design of optical passive half-athermalization zoom lens with high zoom ratio[J]. *Acta Optica Sinica*, 2022, 42(4): 149-156.
- [13] 石佳, 余飞鸿. 光学软件热分析方法和消热差镜头

- 设计[J]. 激光与红外, 2021, 51(9): 1217-1226.
- SHI Jia, YU Feihong. Thermal analysis methods of optical software and athermalization of optical system[J]. Laser & Infrared, 2021, 51(9): 1217-1226.
- [14] 杨加强, 刘宏旭, 刘秋佐, 等. 铝基离轴三反系统光机一体化设计[J]. 激光与红外, 2023, 53(6): 900-905.
- YANG Jiaqiang, LIU Hongxu, LIU Qiuzuo, et al. Optical-mechanical intergrated design of aluminium-based off-axis three-mirror anastigmat system[J]. Laser & Infrared, 2023, 53(6): 900-905.
- [15] 谢康, 张宇, 陈龙, 等. 低温红外镜头柔性支撑结构的设计与分析[J]. 激光与红外, 2023, 53(8): 1259-1265.
- XIE Kang, ZHANG Yu, CHEN Long, et al. Design and analysis of flexible support structure for low temperature infrared lens[J]. Laser & Infrared, 2023, 53(8): 1259-1265.
- [16] 赵亮, 张志刚, 孙瑶. 高精度光学系统光机热耦合分析方法与实现[J]. 系统仿真学报, 2023, 35(6): 1381-1394.
- ZHAO Liang, ZHANG Zhigang, SUN Yao. Opto-mechanical-thermal coupling analysis method and implementation of high-precision optical system[J]. Journal of System Simulation, 2023, 35(6): 1381-1394.
- [17] 吴天祺, 徐熙平, 潘越, 等. 红外长波投影镜头的光机结构设计及热光分析[J]. 长春理工大学学报(自然科学版), 2018, 41(4): 64-67.
- WU Tianqi, XU Xiping, PAN Yue, et al. Opto-mechanical structure design and thermal optical analysis on LWIR projection lenses[J]. Journal of Changchun University of Science and Technology(Natural Science Edition), 2018, 41(4): 64-67.
- [18] ESTEBAN C, MATTHIAS S. OpticStudio STAR 模块: Ansys 数据导出扩展[EB/OL]. (2021-09-07)[2024-09-03]. <https://support.zemax.com>.
- ESTEBAN C, MATTHIAS S. OpticStudio STAR module: Ansys data export extension[EB/OL].(2021-09-07)[2024-09-03]. <https://support.zemax.com>.