

文章编号: 1002-2082 (2022) 01-0030-06

像质检测用光学窗口的温度适应性设计与实验

张 磊¹, 张 松¹, 王海伟¹, 沙 巍², 宋子男¹

(1. 陆军装备部驻沈阳地区军代局 驻长春地区军代室, 吉林 长春 130000; 2. 中国科学院 长春光学精密机械与物理研究所, 吉林 长春 130033)

摘 要: 为了在温度变化条件下对光电成像系统进行像质检测与评价, 设计一种具有温度自适应功能的光学窗口。分析了温度变化对光学玻璃面形的影响, 进行光学窗口的温度适应性光机结构设计, 通过有限元分析与实测实验相结合的方法分析了温度变化对光学窗口面形的影响, 验证了温度适应性设计的有效性。实验结果表明: 常温 20 ℃ 条件下, 光学窗口波像差的 PV 值和 RMS 值分别为 82.90 nm 和 6.96 nm; 高温 50 ℃ 条件下, 波像差的 PV 值和 RMS 值分别为 136.68 nm 和 14.55 nm; 低温 -40 ℃ 条件下, 波像差的 PV 值和 RMS 值分别为 183.51 nm 和 28.48 nm; 高、低温环境下光学窗口的波像差与常温环境下结果对比的数值变化趋势与有限元分析结果具有较好的吻合性; 在 3 种温度条件下光学窗口波像差的 PV 值均小于或接近 $(1/4)\lambda$, 且由于温度变化引起的光学窗口面形变化很小, 设计的光学窗口具有较好的温度适应性。

关键词: 光学窗口; 温度适应性; 波像差; 设计; 实验

中图分类号: TN202; TP73

文献标志码: A

DOI: 10.5768/JAO202243.0101005

Temperature adaptability design and experiment of optical windows for image quality detection

ZHANG Lei¹, ZHANG Song¹, WANG Haiwei¹, SHA Wei², SONG Zi'nan¹

(1. Changchun Military Representative Office, Shenyang Military Representative Bureau of Army Equipment Department, Changchun 130000, China; 2. Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun 130033, China)

Abstract: In order to realize the image quality detection and evaluation of photoelectric imaging system under the condition of temperature change, an optical window with temperature adaptation function was designed. Firstly, the influence of temperature on the surface shape of optical glass was analyzed. Secondly, the temperature adaptability opto-mechanical structure of optical window was designed. Finally, the effect of temperature change on the surface shape of optical window was analyzed by means of finite element analysis and experiment, and the validity of temperature adaptability design was verified. The experimental results show that the peak-valley (PV) and root-mean-square (RMS) values of the wave aberration of optical window are 82.90 nm and 6.96 nm respectively at room temperature of 20 ℃, the PV and RMS values of the wave aberration are 136.68 nm and 14.55 nm respectively at high temperature of 50 ℃, and the PV and RMS values of the wave aberration are 183.51 nm and 28.48 nm respectively at low temperature of -40 ℃. Under high and low temperature conditions and compared with the room temperature condition, the numerical variation trend of wave aberration is in good agreement with the finite element analysis results. Under three temperature conditions, the PV values of the wave aberration of optical window are less than or close to $(1/4)\lambda$, and the

收稿日期: 2021-03-16; 修回日期: 2021-11-20

基金项目: 军内科研计划项目 (012016015800A22202)

作者简介: 张磊 (1986—), 男, 博士, 工程师, 主要从事光电产品质量监督和光学检测方面的研究。E-mail: fanhuayishu0630@163.com

change of the surface shape of optical window caused by the temperature change is very small. The designed optical window has better temperature adaptability.

Key words: optical window; temperature adaptability; wave aberration; design; experiment

引言

依据 GJB150A, 军用领域的光电成像系统需要在 $-40\text{ }^{\circ}\text{C} \sim 50\text{ }^{\circ}\text{C}$ 范围内正常工作, 对于民用领域的光电成像系统也有其特定的工作温度范围。已有研究表明, 温度变化对于光电成像系统的像质有显著影响^[1-4], 在光电成像系统设计和使用过程中必须分析并考虑温度的影响。将光学成像系统置于真实的温度环境下进行像质检测与评价, 探索温度变化对像质影响的程度和规律, 是光学检测领域亟需解决的问题之一。在实验室环境进行温度变化条件下的光电成像系统像质检测, 较为可行的方案之一是将被测光电成像系统置于高低温试验箱中, 在高低温试验箱上安装光学窗口, 透过光学窗口检测被测光电成像系统的像质。光学窗口作为检测光路的组成部分, 处于温度变化范围较大的环境中, 设计过程中需考虑温度适应性问题, 减小由于温度变化产生的变形, 提高像质检测精度。

光学窗口的温度适应性分析和设计是一个光机热一体化问题, 相对于波像差指标要求较高的设计条件, 对于改变折射率或引起应力双折射的热光效应和弹光效应可忽略不计, 温度变化对光学窗口的影响最终都会反映为改变光程而导致的波像差变化。近年来, 相关学者针对光学窗口的温度适应性设计和优化问题展开了研究, 具有代表性的研究成果主要有: 文献 [5]~[8] 分别以高空高速环境应用的光学窗口、真空相机光学镜、航空遥感器光学窗口和平行光管光学窗口为研究对象, 在进行光热耦合有限元分析的基础上, 对光学玻璃的厚度进行了优化设计; 文献 [9] 基于断裂力学理论进行了机载多光谱相机光学窗口厚度设计, 并通过有限元分析的方法验证了设计的可行性; 文献 [10] 利用光机热集成分析方法, 运用有限元分析软件对设计的三片式红外镜头进行了热结构耦合仿真分析, 为预测红外镜头提供了参考。目前, 针对光学窗口的温度适应性分析和研究工作主要集中在对某一个或几个结构尺寸进行性能优化, 对光机热一体化结构设计问题探讨较少, 而且采用的研究手段多为理论分析或仿真分析, 基于实验验证的方法较为有限。文献 [7] 虽然进行了实验研究与分析, 但也是通过飞行试验获得了

稳定清晰的航摄图像, 间接验证温度适应性设计的有效性, 缺少直接有效的数据分析。

为实现在温度变化条件下进行光电成像系统像质检测与评价, 本文以某型光电成像系统像质评价装置所用的光学窗口为设计对象, 在 $-40\text{ }^{\circ}\text{C} \sim 50\text{ }^{\circ}\text{C}$ 温度范围内, 光学窗口的波像差 PV 值优于 $(1/4)\lambda$ 为设计目标, 在忽略热光效应和弹光效应的基础上, 针对光学窗口温度适应性问题进行设计、分析与实验研究。在此基础上, 通过光机柔性结构设计和有限元分析, 在分析温度对光学窗口面形影响的基础上, 进行光机结构设计和有限元分析, 并通过常温、高温和低温 3 种环境下的实测实验验证了设计的有效性。

1 温度影响分析

分析温度变化对光学玻璃的变形影响, 是进行温度适应性光学窗口光机结构设计的基础。依据变化形式, 温度变化通常可分为稳态温度变化和瞬态温度变化; 按照温度场分布, 又可分为轴向温度场和径向温度场。根据光学窗口所处的热力学环境, 本文忽略对瞬态温度变化的情况, 假设窗口玻璃为平行平板, 分析稳态温度变化、轴向温度变化、径向温度变化对窗口玻璃面形的影响, 为光学窗口的光热耦合设计提供参考。

1.1 稳态温度变化影响分析

稳态温度变化是一种比较理想的温度变化形式, 对窗口玻璃光学性能的影响主要体现在 2 个方面: 一是由于光学玻璃与其他结构件的材料线膨胀系数存在差异, 导致窗口玻璃的几何参数发生变化; 二是温度变化导致窗口玻璃的折射率改变, 致使窗口玻璃的光学参数发生变化, 从而导致成像大小和质量发生变化。

对于平行平板状窗口玻璃, 稳态温度变化不改变其基本形状, 只是引起其厚度和直径发生变化。经稳态温度变化后, 窗口玻璃的厚度与直径的变化量分别与温度变化量和热膨胀系数成线性关系, 即温度变化量越大, 材料的热膨胀系数越大, 窗口玻璃的形变量越大。

1.2 轴向温差影响分析

在轴向温度场作用下, 光学玻璃的变形如图 1

所示。图 1 中, D 、 d 分别为平行平板的直径和厚度, T 为温度, ΔT 为平行平板两侧的温度差。在轴向温差作用下, 平行平板由温度高的表面向温度低的表面产生弯曲, 通过矢高增量 Δh 和左右表面的基本圆直径差 ΔD 来反映弯曲变形的大小:

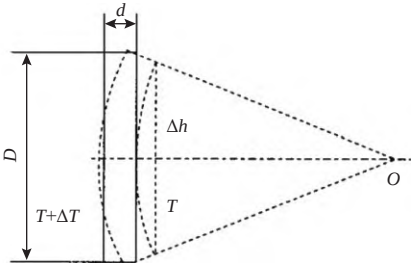


图 1 轴向温度场引起的形变

Fig. 1 Deformation caused by axial temperature field

$$\Delta D = D \cdot \alpha \cdot \Delta T \quad (1)$$

$$\Delta h = \frac{D^2 \cdot \alpha \cdot \Delta T}{8d} \quad (2)$$

式中: α 为热膨胀系数; ΔD 为左右表面的基本圆直径差; d 为平行平板的厚度; Δh 为矢高增量。

可见, 轴向温度场不仅会引起窗口玻璃曲率发生变化, 而且会由于内部产生非均匀变形, 导致窗口玻璃面形被破坏。由(1)式和(2)式可知, 窗口玻璃的直径和温差越大, 引起变形就越严重^[11]。

1.3 径向温差影响分析

径向温度梯度场中, 光学元件形变如图 2 所示。形变可分为“翘边”和“塌边”两种, 图 2(a)为中心温度低于边缘温度产生的形变, 图 2(b)为中心温度高于边缘温度产生的形变, 统称为边缘效应。

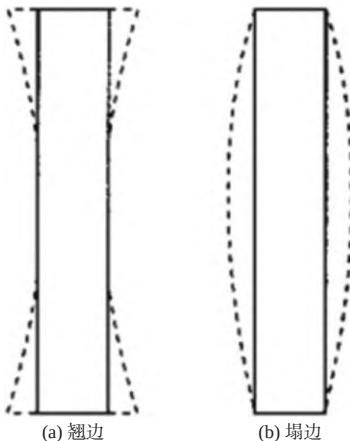


图 2 径向温度梯度分布对平行平板的影响

Fig. 2 Effect of radial temperature gradient distribution on parallel plate

径向温度梯度分布效应可改变元件的面形和曲率半径, 根据马克苏托夫经验公式, 以 ϕ 表征材料减小边缘效应参数^[12], 则:

$$\phi = Eq/\alpha \quad (3)$$

式中: E 为材料弹性模量; q 为导热率。 q 越大, 相应的材料在减少边缘效应方面对镜面越有利。

2 光机结构设计

根据测试要求, 作为温度模拟装置的高低温试验箱内温度在 $-40\text{ }^{\circ}\text{C} \sim 50\text{ }^{\circ}\text{C}$ 范围内交替变化, 箱内外不存在压差, 所以光学窗口的设计需要考虑的环境因素主要是较大温差条件下的热、光耦合问题。

2.1 窗口玻璃设计

采用单块圆形平行平板作为窗口玻璃。为减小稳态温度变化和轴向温差对窗口玻璃面形的影响, 应尽可能选择热膨胀系数较小的材料。由(3)式可知, 为抑制径向温度场引起的窗口玻璃面形变形, 窗口玻璃材料还需具有较大的弹性模量和热导率。表 1 给出了常用窗口玻璃材料的相关参数。由表 1 可知, 其弹性模量相差很小, 其中线性膨胀系数最大的 ZnS 和材料热导率最小的熔石英作为窗口玻璃材料较为合适。将这两种材料的相关参数代入(3)式计算后可知, 熔石英的 ϕ 值更大, 边缘效应更小, 因此选择熔石英作为窗口玻璃材料。

表 1 常用窗口玻璃材料的主要参数

Table 1 Main parameters of window glass materials

材料	弹性模量 E/Pa	泊松比 μ	线性膨胀系数 $\alpha/(1/^{\circ}\text{C})$	热导率 $q/\text{W}/(\text{m} \cdot ^{\circ}\text{C})$
K9	8.2×10^{10}	0.21	7.1×10^{-6}	1.1
ZnS	7.45×10^{10}	0.29	7.6×10^{-6}	16.7
ZnSe	7.03×10^{10}	0.28	7.1×10^{-6}	18
熔石英	7.3×10^{10}	0.17	5.5×10^{-7}	1.4

受测试需求和安装空间的限制, 窗口玻璃的直径为定值 140 mm。由(2)式可知, 适当增大窗口玻璃的厚度有利于抑制轴向温差产生的变形。设计时采用文献 [7] 所述的方法对窗口的厚度进行优化, 综合考虑加工因素, 确定其厚度为 18 mm。

2.2 光机结构设计

在确定了窗口玻璃材料和尺寸的基础上, 进行温度适应性光机结构设计。首先, 确定窗口玻璃的安装方式。文献 [13] 在分析刚度、强度等结构因素和温度因素的基础上, 对透镜安装过程常用的几种表面接触方式进行分析和计算, 结果表明,

常规采用压圈或隔圈的机构,在透镜和镜座之间注入粘接剂的安装方式在温度为 -40°C 的环境下,透镜会产生较大变形,因此不适合本文光学窗口的安装方式。文献[14]提出了透镜的柔性安装方式,通过调整柔性结构的柔度以适应较大的温度变化,且这种周围3点支撑方式较为适合圆形光学玻璃,其原理如图3所示。故本文采用柔性安装的方式固定窗口玻璃,通过柔性结构为窗口玻璃提供温度补偿,降低其在温度变化环境下的形变。

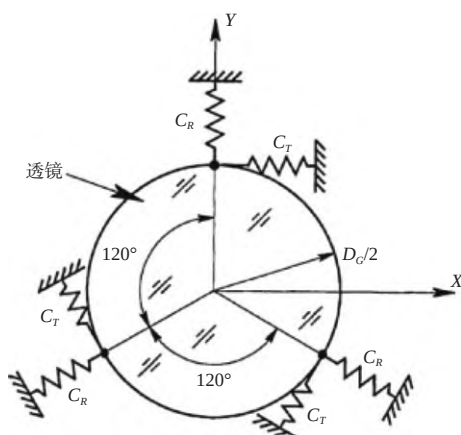


图3 透镜柔性安装原理

Fig. 3 Schematic diagram of flexible installation of lens

最终设计的光学窗口结构形式如图4所示,主要包括窗口玻璃、基础法兰、柔性机构和盖板。其中,3个柔性机构沿圆周固定在基础法兰上,窗口玻璃径向端面与3个柔性机构相切,轴向通过基础法兰和压板固定。为了保证高低温箱内的气密性,在盖板和窗口玻璃之间、法兰底座和高低温箱侧壁之间都开设密封沟槽,装配过程中通过硅橡胶圈保证整体的气密性。为控制光学玻璃和其他结构件材料的热膨胀系数不匹配而产生的应力,减小窗口玻璃的变形,除窗口玻璃和标准连接件外,基础法兰、柔性机构和盖板的材料均选择与融石英热膨胀系数相近的某型殷钢材料。

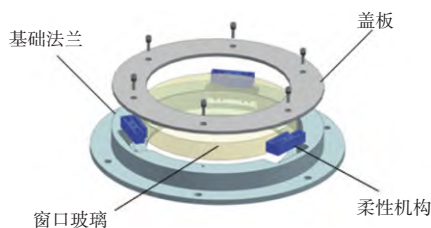


图4 光学窗口结构示意图

Fig. 4 Schematic diagram of optical window structure

3 有限元分析与实验验证

为验证光学窗口设计的有效性,分别采用有限元分析和实测实验的方法研究环境温度变化对光学窗口面形的影响。

3.1 有限元分析

基于Ansys软件对光学窗口柔性安装座进行有限元分析。根据温度模拟装置——高低温试验箱的相关参数,设置轴向和径向温差均为 1°C ,假设常温(20°C)窗口的波像差为0,对窗口进行高温 50°C 和低温 -40°C 两种工况有限元分析验证,得到两种工况下窗口玻璃面形变化情况,如图5所示。有限元分析结果表明:高温 50°C 时,窗口玻璃PV值变化为 44.0 nm ,RMS值变化为 7.3 nm ;低温 -40°C 时,窗口玻璃PV值变化为 88.1 nm ,RMS值变化为 14.5 nm ,说明设计的光学窗口在高、低温两种情况下面型变化较小,即只需在设计加工时保证光学窗口在常温下具有较好的面形精度,就能保证在高、低温条件下满足设计要求。

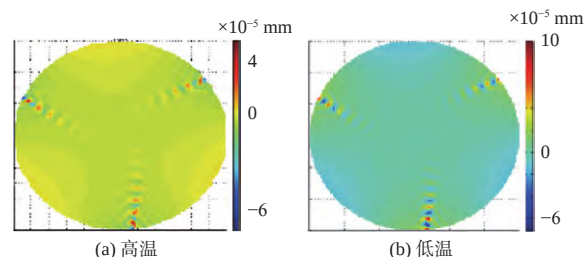


图5 有限元分析结果

Fig. 5 Results of finite element analysis

3.2 实测实验与结果分析

为验证光学窗口设计结果和有限元分析结果的有效性,采用某型斐索干涉仪对设计加工的光学窗口进行常温和高低温条件下的面形精度测试实验,实验装置如图6所示。



图6 测试实验图

Fig. 6 Test experiment diagram

首先,在常温 20 ℃ 环境下检测光学窗口波像差,如图 7(a)所示;其次,将被测光学窗口安装在像质检测设备的高低温箱上,将高低温箱温度升至 50 ℃ 并保持 4 h,检测此时光学窗口的波像差,如图 7(b)所示;最后,待光学窗口冷却至常温后,将高低温箱温度降至-40 ℃ 并保持 4 h,检测此时光学窗口的波像差,如图 7(c)所示。

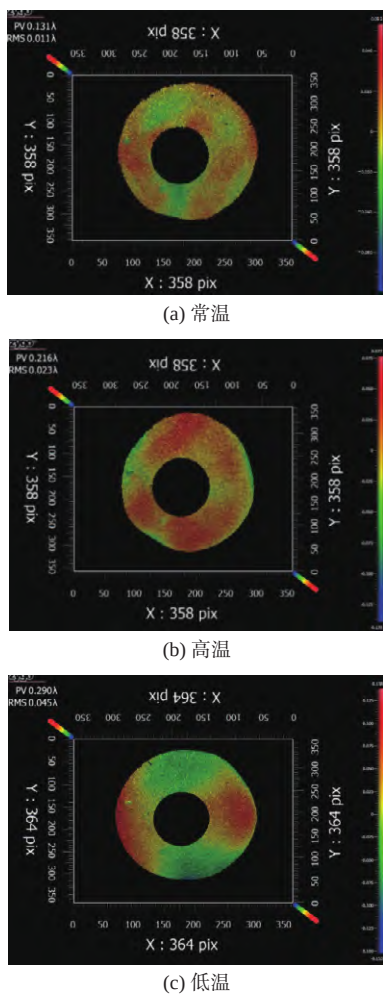


图 7 实验结果

Fig. 7 Experimental results

取 $\lambda=632.8$ nm, 常温和高低温下光学窗口的波像差测试结果如表 2 所示。

表 2 不同温度条件下光学窗口的实验结果

Table 2 Experimental results of optical window under different temperature conditions

测试温度/℃	测试结果/nm	
	PV值	RMS值
20	82.90	6.96
50	136.68	14.55
-40	183.51	28.48

对比实测数据与有限元分析结果可以看出:

1) 在温度引起的光学窗口面形变化趋势方面,实测结果与有限元分析结果具有较好的吻合性,有限元分析和实验结果均显示,低温-40 ℃ 工况较高温 50 ℃ 引起的光学窗口 PV 值和 RMS 值变化明显偏大。

2) 在高温和低温两种工况下,实测的光学窗口 PV 值和 RMS 值较常温的变化量均大于有限元分析结果,且低温工况实测值与有限元分析值的偏差大于高温工况。其原因是:一方面由于被测光学窗口在实测过程中置于常温环境,与测试环境进行热交换产生气流,引起测试结果较有限元分析值偏大;另一方面,对低温下保存的光学窗口进行实验时,窗口玻璃产生凝露现象,即使立即擦拭并进行测试,也会对窗口玻璃的透过率产生影响。

3) 设计的光学窗口具有较好的温度适应性,在高温 50 ℃ 和低温-40 ℃ 两种极限工况下,较常温环境面形变化较小,且在 3 种测试温度下的波像差 PV 值小于或接近 $(1/4)\lambda$,基本达到设计要求。

4 结论

本文以温度变化环境下像质检测用光学窗口为研究对象,在分析温度变化对窗口玻璃面形影响的基础上,设计了一种带有柔性结构、具有温度适应性功能的光学窗口,并进行了 20 ℃、高温 50 ℃ 和低温-40 ℃ 3 种工况的有限元分析和实验研究。实验结果表明:常温 20 ℃ 条件下,光学窗口波像差的 PV 值和 RMS 值分别为 82.90 nm 和 6.96 nm;高温 50 ℃ 条件下,波像差的 PV 值和 RMS 值分别为 136.68 nm 和 14.55 nm;低温-40 ℃ 条件下,波像差的 PV 值和 RMS 值分别为 183.51 nm 和 28.48 nm;实验数据与有限元分析结果在趋势上具有较好的吻合性;在 3 种典型实验温度环境条件下,光学窗口波像差的 PV 值均小于或接近 $(1/4)\lambda$,且由于温度变化引起的光学窗口面形变化很小。因此,光学窗口具有较好的温度适应性,能够满足环境温度变化范围较大时像质检测要求。

本文所述光学窗口的温度适应性设计过程,一方面可为开发温度变化条件下的光学成像系统像质检测设备以及研究温度对光电成像系统的像质影响提供依据,同时也可在温度变化范围较大环境下使用的其他侦察、检测用光学窗口的设计提供参考。

参考文献:

- [1] 张思晨, 李卓, 高彦泽, 等. 低冷环境红外场景投影光学系统的设计[J]. 光学学报, 2021, 41(14): 181-190.
ZHANG Siliang, LI Zhuo, GAO Yanze, et al. Design of optical system for infrared scene projection in cryogenic environment[J]. Acta Optica Sinica, 2021, 41(14): 181-190.
- [2] 高有道, 李福东, 沈正祥, 等. 低温红外镜头设计仿真方法及试验验证[J]. 红外与激光工程, 2021, 50(5): 22-27.
GAO Youdao, LI Fudong, SHEN Zhengxiang, et al. Simulation method and its test verification of cryogenic infrared lens design[J]. Infrared and Laser Engineering, 2021, 50(5): 22-27.
- [3] 李国璋, 姜文韬, 任国全, 等. 温度和气压对车载光学系统成像质量的影响研究[J]. 激光与红外, 2016, 46(9): 1113-1118.
LI Guozhang, JIANG Wentao, REN Guoquan, et al. Influence of temperature and air pressure on imaging quality of vehicle-mounted optical system[J]. Laser & Infrared, 2016, 46(9): 1113-1118.
- [4] 孔林, 杨林. 空间相机温度-离焦特性分析与试验[J]. 光学精密工程, 2017, 25(7): 1825-1831.
KONG Lin, YANG Lin. Study and test of thermal-defocusing property in space camera[J]. Optics and Precision Engineering, 2017, 25(7): 1825-1831.
- [5] 范达, 明星, 刘昕悦, 等. 高空高速环境热光学分析及光学窗口设计[J]. 红外与激光工程, 2016, 45(8): 0818001-1-7.
FAN Da, MING Xin, LIU Xinyue, et al. Thermal optical analysis and design of optical window in high-altitude and high-speed environment[J]. Infrared and Laser Engineering, 2016, 45(8): 0818001-1-7.
- [6] 许明明, 侯永辉, 陈文亮, 等. 基于热光学分析的真空相机光学镜设计[J]. 激光与光电子学进展, 2017, 54(12): 207-213.
XU Mingming, HOU Yonghui, CHEN Wenliang, et al. Design of corrector mirror of vacuum camera based on thermal-optical analysis[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2017, 54(12): 207-213.
- [7] 李延伟, 杨洪波, 程志峰, 等. 航空遥感器光学窗口光机热一体化设计[J]. 红外与激光工程, 2012, 41(8): 2012-2016.
LI Yanwei, YANG Hongbo, CHENG Zhifeng, et al. Thermal/structural/optical integrated design for optical window in aerial remote sensor[J]. Infrared and Laser Engineering, 2012, 41(8): 2012-2016.
- [8] 许亮, 李创, 樊学武, 等. 光学窗口形变对平行光管光学性能影响分析[J]. 应用光学, 2010, 31(6): 914-917.
XU Liang, LI Chuang, FAN Xuewu. Deformation of optical window and its influence on collimator's optical performance[J]. Journal of Applied Optics, 2010, 31(6): 914-917.
- [9] 方煜, 相里斌, 吕群波, 等. 光学窗口厚度设计及形变对相机性能影响[J]. 光学学报, 2013, 33(4): 212-217.
FANG Yu, XIANG Libin, LYU Qunbo, et al. Design of optical window thickness and influence of its deformation on multi-spectral camera's optical performance[J]. Acta Optica Sinica, 2013, 33(4): 212-217.
- [10] 史燕飞, 张宇, 黄攀, 等. 热环境下红外镜头面形变化对成像质量的影响[J]. 光学技术, 2018, 44(3): 365-370.
SHI Yanfei, ZHANG Yu, HUANG Pan, et al. The influence of infrared lens surface change on imaging quality in thermal environment[J]. Optical Technique, 2018, 44(3): 365-370.
- [11] 王红, 田铁印. 轴向温差对空间遥感器光学系统成像质量的影响[J]. 光学精密工程, 2007, 15(10): 1489-1494.
WANG Hong, TIAN Tieyin. Effect of axial temperature difference on imaging quality of space remote sensor optical system[J]. Optics and Precision Engineering, 2007, 15(10): 1489-1494.
- [12] 徐钰蕾, 王乃祥, 许永森. 高速航空遥感器的双层光学窗口设计研究[J]. 光学学报, 2015, 35(1): 370-378.
XU Yulei, WANG Naixiang, XU Yongsen. Design analysis of double optical window of high speed aerial remote sensor[J]. Acta Optica Sinica, 2015, 35(1): 370-378.
- [13] 张丽敏, 吕天宇. 多组元透镜的安装和定位研究[J]. 激光与光电子学进展, 2015, 52(4): 042202-1-6.
ZHANG Limin, LYU Tianyu. Research for fixing and orientation structure of lens[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2015, 52(4): 042202-1-6.
- [14] Jr YODER P R. Opto-mechanical system design[M]. Washington: SPIE Press, 2006.