

高低温试验装置中多光谱光学窗口组件设计

惠刚阳 张博 左晓舟 王中强 刘欣 赵红军

Design of multispectral optical window assembly for high and low temperature test device

XI Gangyang, ZHANG Bo, ZUO Xiaozhou, WANG Zhongqiang, LIU Xin, ZHAO Hongjun

引用本文:

惠刚阳, 张博, 左晓舟, 等. 高低温试验装置中多光谱光学窗口组件设计[J]. 应用光学, 2023, 44(3): 661–667. DOI: 10.5768/JAO202344.0305001

XI Gangyang, ZHANG Bo, ZUO Xiaozhou, et al. Design of multispectral optical window assembly for high and low temperature test device[J]. Journal of Applied Optics, 2023, 44(3): 661–667. DOI: 10.5768/JAO202344.0305001

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.5768/JAO202344.0305001>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

光学窗口电磁屏蔽性能分析与验证

Analysis and test of electromagnetic shielding effectiveness of optical window

应用光学. 2020, 41(1): 55–59 <https://doi.org/10.5768/JAO202041.0101008>

外腔半导体激光器在高低温下的机械形变与功率变化

Mechanical deformation and power change of external cavity semiconductor laser under temperature change

应用光学. 2021, 42(4): 586–591 <https://doi.org/10.5768/JAO202142.0401003>

拼接式光学窗口装配关键技术研究

Research on assembly key technologies for stitched optical window

应用光学. 2018, 39(6): 896–901 <https://doi.org/10.5768/JAO201839.0605004>

某光电吊舱内方位电机组件低温摩擦特性分析研究

Analysis of friction characteristics at low temperature of interior orientation motor assembly in an electro-optical pod

应用光学. 2017, 38(5): 700–705 <https://doi.org/10.5768/JAO201738.0501004>

鱼眼镜头光学系统的非球面优化设计

Aspheric optimization design of fisheye lens optical system

应用光学. 2019, 40(5): 863–870 <https://doi.org/10.5768/JAO201940.0505001>

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>



关注微信公众号，获得更多资讯信息

文章编号: 1002-2082 (2023) 03-0661-07

高低温试验装置中多光谱光学窗口组件设计

惠刚阳, 张 博, 左晓舟, 王中强, 刘 欣, 赵红军

(西安应用光学研究所, 陕西 西安 710065)

摘 要: 箱外光电系统综合检测仪是光电成像系统高低温性能检测装置的重要组成部分, 多光谱光学窗口是高低温箱和外置目标模拟器的接口。论文根据应用需求及材料分析结果, 选取多光谱 ZnS 作为光学窗口材料, 通过热传导理论对光学窗口组件低温使用状态进行分析, 重点分析窗口组件在低温条件下加热对窗口组件面型的影响, 并提出了实现微应力装配的结构形式及解决窗口组件在低温条件下结霜结雾的设计方案; 通过 sigfit 对有限元计算结果进行提取、处理以及数据拟合, 并通过 CODE V 分析口径为 $\Phi 310$ mm 窗口组件在使用温度范围内的波像差 RMS, 分析结果显示优于 $\lambda/15$, 满足窗口组件的光学性能要求, 最后通过实物样机进行了验证。实验结果表明: 该多光谱光学窗口组件的结构设计方案既满足多波段使用要求, 又满足低温除霜除雾要求, 同时保证了高低温条件下的光学性能要求。

关键词: 光学窗口; 除霜除雾; 高低温试验装置; 波像差

中图分类号: TN202

文献标志码: A

DOI: 10.5768/JAO202344.0305001

Design of multispectral optical window assembly for high and low temperature test device

XI Gangyang, ZHANG Bo, ZUO Xiaozhou, WANG Zhongqiang, LIU Xin, ZHAO Hongjun

(Xi'an Institute of Applied Optics, Xi'an 710065, China)

Abstract: The comprehensive detector of the photoelectric system outside the box is an important accessory of the high and low temperature performance test device of the photoelectric imaging system, and the multispectral optical window is an interface between the high and low temperature box and the external target simulator. According to the application requirements and material analysis results, the multispectral ZnS was selected as the optical window material. Through the heat conduction theory, the low-temperature service state of the optical window assembly was analyzed, focusing on the influence of the window assembly heating under the low-temperature condition on the surface shape of the window assembly, and the structural form to realize the micro-stress assembly and the design scheme to solve the frost and fog of the window assembly under the low-temperature condition were put forward. According to the extraction, processing and data fitting of finite element calculation results by sigfit and the analysis of caliber by CODE V, the root-mean-square (RMS) value of wave aberration of $\Phi 310$ mm window assembly in the temperature range is better than $\lambda/15$. The above contents all meet the optical performance requirements of window assembly. And finally, it was verified through the physical prototype. The experimental results show that the structural design scheme of multispectral optical window assembly not only meets the requirements of multi band usage, but also meets the requirements of low-temperature defrosting and defogging, and ensures the optical performance requirements

收稿日期: 2022-05-18; 修回日期: 2022-07-20

基金项目: 军工双百工艺攻关 (多波段共光路光学系统精密装调技术, JCKY2018208B029)

作者简介: 惠刚阳 (1978—), 男, 研究员, 主要从事光电仪器装调工艺研究。E-mail: hgy891@163.com

under high and low temperature conditions.

Key words: optical window; defrosting and defogging; high and low temperature test device; wavefront aberration

引 言

随着光电成像探测系统环境适应性要求的提高,不仅需要考核光电系统在不同环境条件下的工作能力,同时还要考核其性能指标,比如在不同环境温度条件下光电系统的分辨率、成像传递函数等,避免由于苛刻的环境因素导致光电系统成像质量严重下降^[1-4]。因此,需要建立一套光电成像系统高低温试验装置来模拟光电系统在高低温环境中设计的合理性及其环境适应性,并完成相关性能指标的测试验证。光电成像系统高低温试验装置主要由具有多光谱光学窗口的高低温箱和外置的目标模拟器组成,其中多光谱光学窗口组件为高低温箱及被试产品与外部目标模拟器的接口,为该装置的核心组件。它不仅作为隔离组件实现产品与外部目标的隔离,同时作为通光窗口,是测试光束的必经通道,其光学性能直接影响检测结果的准确性^[5-7]。光学窗口组件在设计过程中不仅需要考虑光学窗口组件适应的光谱范围、强度、刚度,还需要考虑高低温环境条件下光学窗口组件的结霜结雾等问题,以及光学窗口组件透射性能对产品检测结果的影响。

空间相机领域常用到光学窗口组件,一般采用双层玻璃真空环境,内外有一定的压力差,两层光学玻璃之间在抽真空后充入一定大气压的干燥氮气^[8-9]。该方案可以实现逐级减压,减小每层光学玻璃承受的压差,有效提高整个光学窗口组件的安全可靠性。基于此方案,为了保证密封及内外压力差等,本文对于通光口径 $\Phi 310$ mm 的光学玻璃(尺寸 $\Phi 310$ mm $\times$ 30 mm)进行周向注胶并承受内外压力差。但是,选用的窗口玻璃——多光谱 ZnS 基底材料对尺寸有一定的限制,对于 $\Phi 310$ mm 光学材料厚度只能选 20 mm,这样的径厚比材料在一定真空条件(0.5 个大气压)下产生的应力会使光学窗口的面型发生较大变化,难以满足透射波像差 RMS 值优于 $\lambda/15$ ($\lambda=632.8$ nm)的要求,因此,必须采用一种新的结构设计方案解决周向注胶和内外压力差等问题。

光电系统高低温试验装置中光学窗口组件根据测试对象选取的有效口径为 $\Phi 300$ mm,光学窗

口可覆盖 $0.4\ \mu\text{m}\sim 0.96\ \mu\text{m}$ 、 $1.2\ \mu\text{m}\sim 2.0\ \mu\text{m}$ 、 $3.5\ \mu\text{m}\sim 12\ \mu\text{m}$ 波长范围,同时在光学窗口正面和窗口反面镀制增透膜,保证覆盖的各个光谱段具有较高的透过率。基于上述要求,本文选择多光谱 ZnS 作为光学窗口基底材料,并对光学窗口组件进行了结构方案设计。设计要求光学仓内大气压力与外界大气压相同,从而解决压力变形问题。为了保证窗口组件的环境温度适应性,提高光学窗口组件的工作可靠性,采用双层窗口玻璃结构,该结构可以减小窗口玻璃的温度梯度,减小温度对窗口面型的影响程度。

文中叙述了光学窗口组件的结构设计形式,充分考虑了装配应力及窗口面型精度,采用有限元分析软件 Ansys 计算了压力对光学玻璃表面变形的影响,利用 CODE V 软件分析计算了通光口径为 $\Phi 310$ mm 的光窗组件中光学玻璃表面变形对波像差 RMS 值的影响,计算分析了光窗组件中光学玻璃表面变形对光程差的影响。计算分析结果表明,文中给出的光学窗口组件结构方案既满足强度和可靠性要求,又满足光学性能要求,整个光学窗口组件安全可靠。

1 主要技术指标及要求

光学窗口组件是光电系统高低温试验装置(如图 1 所示)的核心部件,承担着光学性能指标测试的主要任务,其工作状态及面型精度直接影响光电系统性能指标测试的置信度,因此该组件不仅需要满足透射光学性能指标,而且需要满足高低温条件下不结霜结雾,面形不发生较大变化。光学窗口组件的主要技术指标如下:

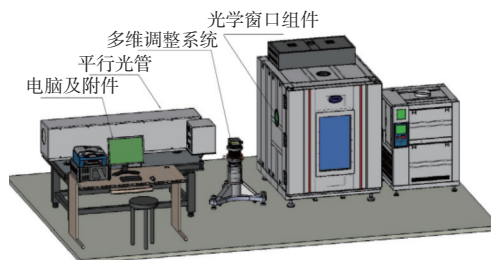


图 1 光电系统高低温试验装置示意图

Fig. 1 Schematic diagram of high and low temperature test device for photoelectric system

- 1) 光学窗口组件有效通光孔径为 $\Phi 300$ mm(光学玻璃直径 $\Phi 310$ mm), 材料为多光谱 ZnS;
- 2) 光学窗口组件在试验装置温度为 -55 $^{\circ}\text{C}$ ~ $+70$ $^{\circ}\text{C}$ 恒温期间不结霜结雾;
- 3) 光学窗口组件在试验温度范围内透射波像差 RMS 值优于 $\lambda/15(\lambda=632.8\text{ nm})$;
- 4) 具备充氮气接口。

2 光学窗口组件结构设计

综合考虑光学窗口组件工作状态下不结霜结雾要求、透射波像差要求、安全可靠性及光电系统性能测试要求, 文中针对光学窗口组件进行了结构方案设计。

2.1 光学窗口组件结构方案设计

为保证光学窗口组件的微应力装配、工作状态下透射波像差及高低温工作时不结霜结雾等要求, 光学窗口组件采用双层光学玻璃结构方案, 主要由窗口玻璃、外镜框、内镜框、尼龙隔圈、压圈、尼龙外压圈、中间镜筒、加热片组成, 如图 2 所示。窗口玻璃装配在内外镜框上, 通过尼龙隔圈和压圈固定。该设计方案以透射波像差精度和除霜除雾功能为主要出发点, 通过选取特种材料及膜层解决多光谱成像问题; 通过各个零件材料的选取及特征尺寸设计, 解决窗口组件光学元件与结构件之间的微应力装配问题, 并通过隔热结构及特殊材料的设计减小窗口热梯度, 解决了窗口玻璃的隔热和导热问题; 通过在中间镜筒增加加热片, 为镜筒内提供一个热场, 解决光学窗口表面加热问题; 通过特殊通道式结构设计实现光学窗口表面微风吹扫功能, 解决光学窗口装置在高低温过程中结霜结雾问题, 最终完成了满足透射波前要求以及具有除霜除雾功能的多光谱光学窗口组件设计。

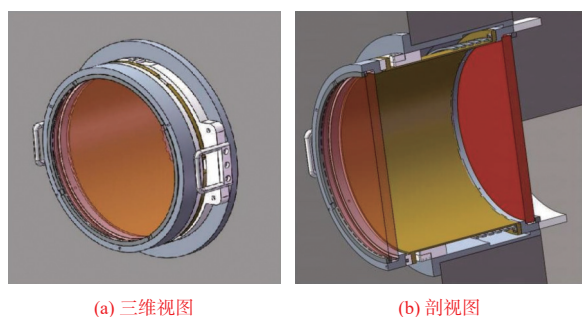


图 2 光学窗口组件结构简图

Fig. 2 Structure diagram of optical window assembly

2.2 光学窗口组件装配后对窗口面型影响的设计

为了解决光学窗口组件密封光学仓内外压力差带来的窗口应力变形问题, 本文设计中采用了非粘接装配方案, 利用特殊材料接触光学件表面实现接触自密封, 并设计了冲氮气通道实现窗口组件内外压力差为零, 这样就避免了粘接应力。窗口充氮气工作状态可使内外压力差控制在 0.02 个大气压左右, 同时采用了外筒热辐射的加热方案, 解决了窗口低温结霜结雾问题。

3 光学窗口组件不同温度场条件下光学性能分析

光学窗口组件设计除了需要考虑粘接应力和压力差外, 其工作温度状态也是必须考虑的。当光学窗口组件工作在 -50 $^{\circ}\text{C}$ ~ $+70$ $^{\circ}\text{C}$ 时, 光机结构形式及玻璃自身的温度梯度会使光学玻璃表面发生变形, 进而直接影响其光学性能, 光学性能的改变直接影响被测产品的测试结果。因此, 有必要验证光学窗口组件在不同温度条件下达到热平衡状态时是否满足光学性能要求。该组件主要用于评价光电系统成像性能指标, 所以选择透射波像差进行评价。

3.1 光学窗口组件有限元分析

采用有限元软件 Ansys 计算不同温度载荷情况下窗口的应力与应变情况。在进行光机热集成仿真分析之前, 对结构模型进行一系列的简化处理, 主要包括: 删除螺栓、螺钉、弹/平垫片; 修补较小的孔洞、小面; 修改部分结构件尺寸, 避免与镜筒干涉。模型简化完成后采用统一网格尺寸进行网格划分, 网格尺寸为 0.5 mm, 所有网格共节点。仿真过程中边界约束根据安装位置进行定义, 限制其 X、Y、Z 3 个方向的平移自由度, 重力载荷定义为 $-Y$ 方向 1 g, 温度载荷定义为 -50 $^{\circ}\text{C}$ 、 -30 $^{\circ}\text{C}$ 、 -10 $^{\circ}\text{C}$ 、 10 $^{\circ}\text{C}$ 、 30 $^{\circ}\text{C}$ 、 50 $^{\circ}\text{C}$ 、 70 $^{\circ}\text{C}$ 均匀温度场进行计算, 参考温度 20 $^{\circ}\text{C}$ 。根据传感器仿真的结构材料种类及光学设计模型中所用到的光学材料种类, 选取的零件材料具体参数见表 1 所示。不同温度下光学窗口组件应变结果如图 3 所示。

3.2 光学窗口组件光机拟合分析

采用光机拟合转换软件 Sigfit 对有限元计算结果进行提取、处理以及数据拟合, 以便后续光学软件仿真分析使用。选择 2 块窗口玻璃共计 4 个表

表 1 光学窗口组件材料参数

Table 1 Material parameters of optical window assembly

序号	材料	弹性模量/GPa	泊松比	密度/g/cm ³	热膨胀系数10 ⁻⁶ /K
1	铝	68.2	0.332	2.68	23.6
2	钛	114.0	0.34	4.43	8.8
3	硫化锌	74.5	0.29	4.08	4.6
4	聚四氟乙烯	14.0	0.40	2.20	120.0

面的位移结果进行面型拟合,从而实现其光学性能变化评估。拟合过程中采用 Zernike 多项式进行面型拟合^[10-15],面型表达式为

$$z = \frac{cr^2}{1 + \sqrt{1 - (1 + k)c^2r^2}} + Ar^4 + Br^6 + Cr^8 + Dr^{10} + Er^{12} + \dots$$

4 个表面的刚体位移结果和面形变化数据如表 2 和表 3 所示。表 2 中, SID 为光学设计软件中

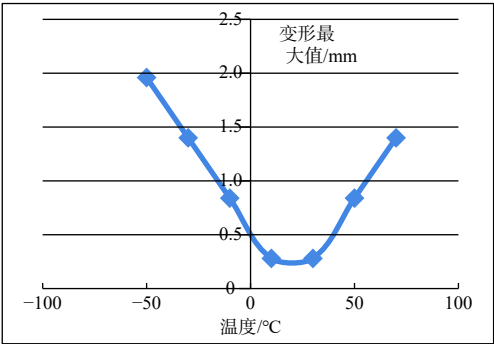


图 3 有限元计算结果

Fig. 3 Calculation results of finite element

表面编号, LID 为不同温度载荷对应编号, 数值由小到大代表温度由低到高, T1、T2、T3 分别为 X、Y、Z 方向的平动量, R1、R2、R3 分别为绕 X、Y、Z 轴的转动量。表 3 中, dRoC 为半径变化, RMS/PV 为去除刚体位移及半径变化后的面型矢高统计, Max、Min 分别为变形结果最大值与最小值。

表 2 刚体位移数据表

Table 2 Rigid body displacement data

SID	LID	T1/mm	T2/mm	T3/mm	R1/rad	R2/rad	R3/rad
1	1	-1.92E-02	-7.26E-03	1.57E-01	6.20E-05	-1.47E-04	-2.64E-07
1	2	-1.37E-02	-5.18E-03	1.12E-01	4.42E-05	-1.05E-04	-1.87E-07
1	3	-8.21E-03	-3.09E-03	6.72E-02	2.65E-05	-6.30E-05	-1.09E-07
1	4	-2.74E-03	-1.01E-03	2.24E-02	8.75E-06	-2.10E-05	-3.17E-08
1	5	2.74E-03	1.08E-03	-2.24E-02	-8.99E-06	2.10E-05	4.56E-08
1	6	8.21E-03	3.16E-03	-6.72E-02	-2.67E-05	6.30E-05	1.23E-07
1	7	1.37E-02	5.25E-03	-1.12E-01	-4.45E-05	1.05E-04	2.00E-07
2	1	-2.11E-02	-8.09E-03	1.52E-01	6.43E-05	-1.53E-04	-2.49E-07
2	2	-1.51E-02	-5.77E-03	1.08E-01	4.59E-05	-1.09E-04	-1.76E-07
2	3	-9.05E-03	-3.45E-03	6.50E-02	2.75E-05	-6.55E-05	-1.03E-07
2	4	-3.02E-03	-1.13E-03	2.17E-02	9.08E-06	-2.18E-05	-2.96E-08
2	5	3.02E-03	1.20E-03	-2.17E-02	-9.33E-06	2.18E-05	4.35E-08
2	6	9.05E-03	3.52E-03	-6.50E-02	-2.77E-05	6.55E-05	1.17E-07
2	7	1.51E-02	5.84E-03	-1.08E-01	-4.61E-05	1.09E-04	1.90E-07
3	1	2.18E-02	-2.79E-02	-2.72E-01	-3.49E-04	-3.81E-04	-5.35E-06
3	2	1.56E-02	-1.99E-02	-1.94E-01	-2.50E-04	-2.72E-04	-3.82E-06
3	3	9.36E-03	-1.19E-02	-1.17E-01	-1.50E-04	-1.63E-04	-2.29E-06
3	4	3.12E-03	-3.95E-03	-3.89E-02	-4.99E-05	-5.44E-05	-7.56E-07
3	5	-3.12E-03	4.03E-03	3.89E-02	4.99E-05	5.44E-05	7.73E-07
3	6	-9.36E-03	1.20E-02	1.17E-01	1.50E-04	1.63E-04	2.30E-06
3	7	-1.56E-02	2.00E-02	1.94E-01	2.49E-04	2.72E-04	3.83E-06
4	1	1.77E-02	-2.42E-02	-2.71E-01	-3.40E-04	-3.72E-04	-5.46E-06
4	2	1.26E-02	-1.73E-02	-1.93E-01	-2.43E-04	-2.65E-04	-3.90E-06
4	3	7.58E-03	-1.04E-02	-1.16E-01	-1.46E-04	-1.59E-04	-2.34E-06
4	4	2.53E-03	-3.43E-03	-3.87E-02	-4.86E-05	-5.31E-05	-7.73E-07
4	5	-2.53E-03	3.51E-03	3.87E-02	4.86E-05	5.31E-05	7.90E-07
4	6	-7.58E-03	1.04E-02	1.16E-01	1.46E-04	1.59E-04	2.35E-06
4	7	-1.26E-02	1.74E-02	1.93E-01	2.43E-04	2.65E-04	3.92E-06

表 3 面型变化数据表

Table 3 Optical surface deformation data

mm

SID	LID	dRoC	RMS	P-V	Max	Min
1	1	1.69E+05	2.09E-02	8.66E-02	5.03E-02	-3.64E-02
1	2	2.37E+05	1.49E-02	6.19E-02	3.59E-02	-2.60E-02
1	3	3.95E+05	8.96E-03	3.71E-02	2.15E-02	-1.56E-02
1	4	1.19E+06	2.99E-03	1.24E-02	7.17E-03	-5.19E-03
1	5	-1.19E+06	2.99E-03	1.24E-02	5.20E-03	-7.19E-03
1	6	-3.95E+05	8.96E-03	3.71E-02	1.56E-02	-2.15E-02
1	7	-2.37E+05	1.49E-02	6.19E-02	2.60E-02	-3.59E-02
2	1	1.68E+05	2.11E-02	8.84E-02	5.20E-02	-3.64E-02
2	2	2.35E+05	1.51E-02	6.31E-02	3.71E-02	-2.60E-02
2	3	3.92E+05	9.04E-03	3.79E-02	2.23E-02	-1.56E-02
2	4	1.18E+06	3.01E-03	1.26E-02	7.42E-03	-5.20E-03
2	5	-1.18E+06	3.01E-03	1.26E-02	5.20E-03	-7.43E-03
2	6	-3.92E+05	9.04E-03	3.79E-02	1.56E-02	-2.23E-02
2	7	-2.35E+05	1.51E-02	6.32E-02	2.60E-02	-3.72E-02
3	1	-1.44E+06	2.20E-02	1.12E-01	6.41E-02	-4.81E-02
3	2	-2.01E+06	1.57E-02	8.01E-02	4.58E-02	-3.44E-02
3	3	-3.35E+06	9.43E-03	4.81E-02	2.75E-02	-2.06E-02
3	4	-1.01E+07	3.14E-03	1.60E-02	9.15E-03	-6.87E-03
3	5	1.00E+07	3.14E-03	1.60E-02	6.87E-03	-9.15E-03
3	6	3.35E+06	9.43E-03	4.81E-02	2.06E-02	-2.75E-02
3	7	2.01E+06	1.57E-02	8.01E-02	3.44E-02	-4.58E-02
4	1	-1.47E+06	2.22E-02	1.15E-01	6.92E-02	-4.60E-02
4	2	-2.06E+06	1.58E-02	8.23E-02	4.94E-02	-3.29E-02
4	3	-3.43E+06	9.50E-03	4.94E-02	2.96E-02	-1.97E-02
4	4	-1.03E+07	3.17E-03	1.65E-02	9.88E-03	-6.58E-03
4	5	1.03E+07	3.17E-03	1.65E-02	6.58E-03	-9.88E-03
4	6	3.43E+06	9.50E-03	4.94E-02	1.97E-02	-2.96E-02
4	7	2.06E+06	1.58E-02	8.23E-02	3.29E-02	-4.94E-02

3.3 光学窗口组件光学仿真

本文只考虑热传导过程, 根据传热学理论可以推导出窗口轴向温度梯度分布与厚度成线性关系。在一定温度范围内, 材料折射率温度系数为固定值, 即折射率随温度呈线性变化, 从而可以得到窗口不同轴向位置处折射率参数。结合面型变化数据, 利用光学设计仿真软件 CODE V 对不同温度载荷下的光学系统模型进行光学性能分析与评估。选择视场图-RMS 波前误差作为整体像质评价标准, 评价结果如图 4 和表 4 所示。从图 4 和表 4 可以看出, 在-50 ℃~+70 ℃ 范围内, RMS 波前误差均优于 $\lambda/15$ 。

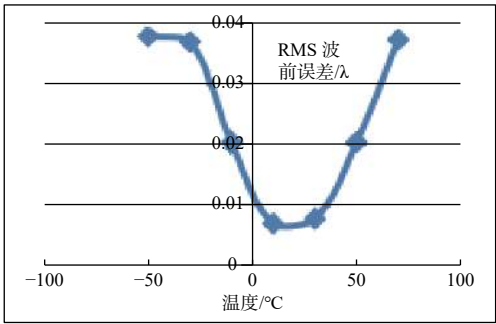


图 4 视场图-RMS 波前误差

Fig. 4 Diagram of field of view - RMS wavefront error

表 4 RMS 波前误差 ($\lambda=632.8\text{ nm}$)
Table 4 RMS wavefront error ($\lambda=632.8\text{ nm}$)

温度/ $^{\circ}\text{C}$	RMS波前 最小值/ λ	RMS波前 最大值/ λ	RMS波前 平均值/ λ
-50	0.037 890	0.037 890	0.037 8 90
-30	0.036 957	0.036 958	0.036 957
-10	0.020 315	0.020 315	0.020 315
10	0.006 990	0.006 990	0.006 990
30	0.007 769	0.007 769	0.007 769
50	0.020 433	0.020 433	0.020 433
70	0.037 285	0.037 285	0.037 285

4 光学窗口组件试验验证

该光学窗口组件的设计重点考虑窗口组件工作状态对成像性能的影响。为了验证该组件的实际工作指标,确定以该组件的透射波像差为评价依据,部件状态利用大口径平面干涉仪对其透射波像差进行测量,同时增加了热辐射工况。在部件测量基础上将该部件装配在光电系统高低温试验装置上,进行实际工况测试。

4.1 光学窗口组件透射波像差测试

利用大口径平面干涉仪对光学窗口组件的透射波像差进行测试,并在测试过程中确定了窗口玻璃压圈的预紧力矩值,测试图如图 5 所示,测试结果见表 5 所示。通过对外筒加热功率进行试验

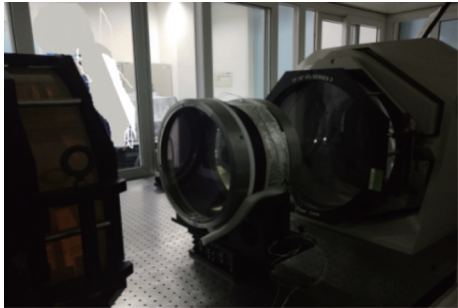


图 5 大口径平面干涉仪测试光学窗口组件透射波像差
Fig. 5 Physical drawing of transmitted wave aberration of optical window assembly tested by large-aperture plane interferometer

表 5 光学窗口组件透射波像差测试结果

Table 5 Test results of transmitted wave aberration of optical window assembly

参数	1	2	3
PV/ λ	0.210	0.169	0.187
RMS/ λ	0.042	0.033	0.035

摸底,确定了加热功率可接受范围,为后续装配力矩确定了工艺参数。从表 5 可以看出,该组件装配后能够满足系统的透射波像差要求。

4.2 光学窗口组件实际工作状态测试

如图 6 所示,将光学窗口组件装配至光电系统高低温试验装置侧面,在高低温箱内部隔振转台上架设一个微晶材料的高精度平面反射镜,利用平面干涉仪对光学窗口组件的透射波像差进行测试,并在测试过程中变化高低温箱的环境温度,同时开启光学窗口组件的外筒热辐射。通过监控窗口玻璃各表面的温度变化,1 h 可达到热平衡状态,达到热平衡后开始测量,透射波像差测试结果见表 6 所示。由于温度变化过程中窗口组件会出现一个明显的离焦(power 值),power 值影响光学系统测试的焦面变化,可调焦补偿,不影响系统像质评价。由表 6 测试结果可知,该组件在系统工作状态能够满足系统的透射波像差要求,高低温箱在工作温度范围内光学窗口组件无结霜结雾现象。

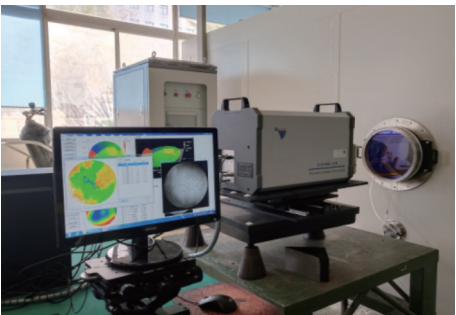


图 6 光学窗口组件透射波像差测试图
Fig. 6 Measurement diagram of transmitted wave aberration of optical window assembly

表 6 光学窗口组件实际工作状态透射波像差测试结果
Table 6 Test results of transmitted wave aberration of optical window assembly in actual working state

参数	1	2	3
PV/ λ	0.220	0.212	0.233
RMS/ λ	0.056	0.062	0.065

5 结论

本文对某光电系统高低温试验装置的多光谱光学窗口组件进行了结构方案设计,重点解决窗口的粘接应力和窗口内外压力差问题,采用非粘接装配方案,减小了外力对光学窗口玻璃面型精

度的影响。采用有限元分析软件 Ansys 计算了不同温度载荷下光学窗口的应力与应变, 借助光机拟合转换软件 Sigfit 完成有限元应变结果的提取、处理与拟合, 形成光学软件可以识别读取的数据。使用光学设计仿真软件 Code V 实现了光学窗口组件高低温不同条件下透射波像差的评估。理论计算分析及实验结果表明, 光学窗口组件结构设计合理, 满足该组件在不同温度条件下的光学性能要求, 解决了窗口组件在低温过程中结霜结雾问题。通过理论分析与工艺实验验证, 得到以下结论:

1) 结构设计中采用持续充氮气方案及热辐射方案, 解决了窗口组件光学玻璃工作过程中变形问题, 为满足系统的透射波像差指标创造了条件;

2) 光学窗口组件结构的仿真分析及实验结果表明, 该光学窗口组件透射波像差 RMS 值优于 $\lambda/15$ ($\lambda=632.8\text{ nm}$);

3) 在高低温条件下测试光学元件的面型指标可能高于窗口本身的波前指标, 需要对窗口的波前指标进行算法去除。经过实际分析可知, 通过插值法可进行对点去除, 将窗口玻璃对测试系统造成的系统误差进行修正, 该技术需要后续进一步验证。

参考文献:

- [1] 皮桂英, 石庆国. 国内外空间环境模拟试验条件分析[J]. 环境技术, 2013(4): 41-42.
PI Guiying, SHI Qingguo. Analysis on domestic and international space environment simulation test conditions[J]. Environmental Technology, 2013(4): 41-42.
- [2] 王珊珊. 一种用于航空平台的多光谱光学窗口: CN 108240861 A[S]. 2018-07-03.
WANG Shanshan. A multispectral optical window for aviation platform: CN 108240861 A[S]. 2018-07-03.
- [3] 惠刚阳, 杨海成, 姜峰, 等. 潜望式瞄准镜中消像旋棱镜的装调工艺技术[J]. 应用光学, 2013, 34(4): 700-705.
XI Gangyang, YANG Haicheng, JIANG Feng, et al. Alignment technology of offsetting image rotation prism in periscopic sight[J]. Journal of Applied Optics, 2013, 34(4): 700-705.
- [4] 黎明, 吴清文, 余飞. 基于热光学分析的光学窗口玻璃厚度的优化[J]. 光学学报, 2010, 30(1): 210-213.
LI Ming, WU Qingwen, YU Fei. Optimization of optical window glass thickness based on the thermal optical analysis[J]. Acta Optica Sinica, 2010, 30(1): 210-213.
- [5] 李延伟, 张洪文, 詹磊, 等. 高空环境对航空遥感器光学窗口的影响[J]. 激光与红外, 2012, 42(9): 1035-1039.
LI Yanwei, ZHANG Hongwen, ZHAN Lei, et al. Influence of high altitude environment on optical window in aerial remote sensor[J]. Laser & Infrared, 2012, 42(9): 1035-1039.
- [6] 赵立新. 空间相机光学窗口的热光学评价[J]. 光学学报, 1988, 18(10): 1440-1444.
ZHAO Lixin. Thermal-optical evaluation to optical windows of space camera[J]. Acta Optica Sinica, 1988, 18(10): 1440-1444.
- [7] 陈华, 史振广, 隋永新, 等. 干涉检测中环境温度引起的镜面变形分析[J]. 光学学报, 2011, 31(1): 135-139.
CHEN Hua, SHI Zhenguang, SUI Yongxin, et al. Thermal deformation analysis of optical surface caused by environmental temperature during intrferometric testing[J]. Acta Optica Sinica, 2011, 31(1): 135-139.
- [8] 廖志波, 焦文春, 伏瑞敏. 空间相机光学窗口热光学性能的仿真分析[J]. 应用光学, 2011, 32(5): 407-410.
LIAO Zhibo, JIAO Wenchun, FU Ruimin. Thermal optics property simulation of optical window for remote sensing[J]. Journal of Applied Optics, 2011, 32(5): 407-410.
- [9] 刘国辰, 马国鹭, 赵涌, 等. 组合式热动态载荷光学窗口的光学特性研究[J]. 应用光学, 2021, 42(6): 1122-1132.
LIU Youchen, MA Guolu, ZHAO Yong. Optical properties of combined dynamic thermal dynamic loading optical window[J]. Journal of Applied Optics, 2021, 42(6): 1122-1132.
- [10] 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): 220-225.
FANG Yu, XIANG Libin, LYU Qunbo. Design of optical window thickness and influence of its deformation on multi-spectral camera's optical performance[J]. Acta Optica Sinica, 2013, 33(4): 220-225.
- [11] PEARSON E, STEPP L. Response of large optical mirror to thermal distributions[J]. SPIE, 1987, 748: 215-228.
- [12] HARNED N, HARPED R, MELUGIN R. Alignment and evaluation of the cryogenic corrected infrared astronomical satellite (IRAS) telescope[J]. Opt. Eng., 1981, 20(2): 202195.
- [13] PEPI J W, BARNES W P. Thermal distortion of a thin low ex-pansion fused silica mirror[J]. SPIE, 1983, 450: 40-49.

(下转第 683 页)

- 点自动判别[J]. 强激光与粒子束, 2014, 26(1): 109-114.
- LI Lu, YANG Yongying, CAO Pin, et al. Automatic identification of dust and pitting on the surface of large aperture optical element[J]. High Power Laser and Particle Beams, 2014, 26(1): 109-114.
- [12] DUAN Y, LIU S, HU C, et al. Automated defect classification in infrared thermography based on a neural network[J]. NDT & E International, 2019, 107: 102147.
- [13] 赵博, 史迎馨. 卷积神经网络的高精密光学元件表面缺陷检测[J]. 激光杂志, 2021, 42(11): 5.
- ZHAO Bo, SHI Yingxin. Surface defect detection for high precision optical components based on convolutional neural network[J]. Laser Journal, 2021, 42(11): 5.
- [14] HE Y, HU C, LI H, et al. A flexible image processing technique for measuring bubble parameters based on a neural network[J]. Chemical Engineering Journal, 2022, 429: 132-138.
- [15] Makantasis K, Karantzas K, Doulamis A, et al. Deep supervised learning for hyperspectral data classification through convolutional neural networks[C]// Geoscience & Remote Sensing Symposium. USA: IEEE, 2015: 4959-4962.
- [16] BANDHU A, ROY S S. Classifying multi-category images using deep learning: a convolutional neural network model[C]// IEEE International Conference on Recent Trends in Electronics, Information & Communication Technology. Bangalore: IEEE, 2017: 915-919.
- [17] 马建, 韩卫光. 基于卷积神经网络的工作表面缺陷检测方法[J]. 组合机床与自动化加工技术, 2021(1): 106-109.
- MA Jian, HAN Weiguang. Workpiece surface defect detection method based on convolutional neural network[J]. Modular Machine Tool & Automatic Manufacturing Technology, 2021(1): 106-109.
- [18] DING X, GUO Y, DING G, et al. ACNet: strengthening the kernel skeletons for powerful CNN via asymmetric convolution blocks[C]// International Conference on Computer Vision, USA: IEEE, 2019: 1911-1920.
-
- (上接第 667 页)
- [14] 杨佳文, 黄巧林, 韩友民. Zernike 多项式在拟合光学表面面形中的应用及仿真[J]. 航天返回与遥感, 2010, 31(5): 49-55.
- YANG Jiawen, HUANG Qiaolin, HAN Youmin. Application and simulation in fitting optical surface with Zernike polynomial[J]. Spacecraft Recovery Remote Sensing, 2010, 31(5): 49-55.
- [15] 单宝忠, 王淑岩, 牛憨笨, 等. Zernike 多项式拟合方法及应用[J]. 光学精密工程, 2012, 10(3): 318-323.
- SHAN Baozhong, WANG Shuyan, NIU Hanben, et al. Zernike polynomial fitting method and its application[J]. Optics and Precision Engineering, 2012, 10(3): 318-323.