

航空光电大口径平面光学窗口厚度尺寸设计分析

程刚 王惠林 张博 王涛 卢恒 曹尹琦 周帆

Design and analysis of thickness dimension for large aperture plane optical window of aerial electro-optics

CHENG Gang, WANG Huilin, ZHANG Bo, WANG Tao, LU Heng, CAO Yinqi, ZHOU Fan

引用本文:

程刚, 王惠林, 张博, 等. 航空光电大口径平面光学窗口厚度尺寸设计分析[J]. 应用光学, 2025, 46(3): 580–588. DOI: 10.5768/JAO202546.0301005

CHENG Gang, WANG Huilin, ZHANG Bo, et al. Design and analysis of thickness dimension for large aperture plane optical window of aerial electro-optics[J]. Journal of Applied Optics, 2025, 46(3): 580–588. DOI: 10.5768/JAO202546.0301005

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.5768/JAO202546.0301005>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

组合式力热动态载荷光学窗口的光学特性研究

Optical properties of combined dynamic thermal dynamic loading optical window

应用光学. 2021, 42(6): 1122–1126, 1132 <https://doi.org/10.5768/JAO202142.0605003>

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>

高低温试验装置中多光谱光学窗口组件设计

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

应用光学. 2023, 44(3): 661–667, 683 <https://doi.org/10.5768/JAO202344.0305001>

像质检测用光学窗口的温度适应性设计与实验

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

应用光学. 2022, 43(1): 30–35 <https://doi.org/10.5768/JAO202243.0101005>

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>

探测器像元尺寸对航空光电系统成像性能影响分析

Influence of detector pixel size on imaging performance of airborne optoelectronic system

应用光学. 2022, 43(4): 583–591 <https://doi.org/10.5768/JAO202243.0401001>



关注微信公众号，获得更多资讯信息

文章编号: 1002-2082 (2025) 03-0580-09

引用格式: 程刚, 王惠林, 张博, 等. 航空光电大口径平面光学窗口厚度尺寸设计分析 [J]. 应用光学, 2025, 46(3): 580-588.

CHENG Gang, WANG Huilin, ZHANG Bo, et al. Design and analysis of thickness dimension for large aperture plane optical window of aerial electro-optics[J]. Journal of Applied Optics, 2025, 46(3): 580-588.



在线阅读

航空光电大口径平面光学窗口厚度尺寸设计分析

程刚, 王惠林, 张博, 王涛, 卢恒, 曹尹琦, 周帆

(西安应用光学研究所, 陕西 西安 710065)

摘要: 航空光电装备平面光学窗口在确定构型尺寸和组合形式后, 窗口厚度对装备成像性能影响至为关键。从设计变量、组合形式、作用载荷3个方面对窗口设计问题进行分析, 确定了基于结构刚性和 RMS (root mean square) 波前误差的平面窗口厚度设计目标; 从光学窗口一阶结构谐振频率及其在温度和压力载荷作用下的 RMS 波前误差量化求解出窗口厚度尺寸范围 11.9 mm ~ 18.4 mm; 提出针对光学窗口组合工况性能计算的集成分析流程, 计算得到光学窗口一阶谐振频率为 151 Hz, 在飞行工作时各向组合工况——流场/重力/振动作用下光学窗口 RMS 波前误差不大于 1/10 参考波长。实验测试结果表明: 光学窗口 RMS 波前误差小于 0.07 参考波长, 实物样机振动和飞行条件下成像清晰、稳定, 证明窗口厚度尺寸设计分析方法正确有效。

关键词: 平面光学窗口; 厚度尺寸; 设计分析; 组合工况

中图分类号: TN201

文献标志码: A

DOI: 10.5768/JAO202546.0301005

Design and analysis of thickness dimension for large aperture plane optical window of aerial electro-optics

CHENG Gang, WANG Huilin, ZHANG Bo, WANG Tao, LU Heng, CAO Yinqi, ZHOU Fan

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

Abstract: After configuration size and combing type of aerial electro-optical equipment have been confirmed, thickness dimension is critical to its imaging performance. The window designing subject was described and analyzed from three aspects: design variables, combing types and applied loads, and the design goal of plane window thickness based on structural rigidity and root mean square (RMS) wavefront error was determined. Based on the first order structural resonance frequency and the RMS wavefront errors under temperature and pressure loads effects, the window thickness dimension range of 11.9 mm to 18.4 mm was quantified and solved. Integrated analyzing process was proposed aiming at window assembly performance in synthetic conditions. The first order structural resonance frequency of optical window assembly is 151 Hz, the RMS wavefront error is less than 1/10 reference wavelength with effects on composite load, such as flow field, gravity and vibration in operation. The test results show that the RMS wavefront error of optical window is less than 0.07 reference wavelength, and the images of vibration and flying test are stable and clear, which verifies that the design and analysis method of window thickness dimension is right and effective.

Key words: plane optical window; thickness dimension; design and analysis; composite load

收稿日期: 2024-06-13; 修回日期: 2024-09-10

基金项目: 173 计划基础研究基金 (2021-XX-0722)

作者简介: 程刚 (1977—), 男, 硕士, 研究员, 主要从事光电系统光机、平台结构设计、分析和优化等研究。

E-mail: 627820446@qq.com

引言

机载光电装备应用于低、中、高空环境中, 光学窗口为任务传感器、电子元器件等提供环境保护和光谱传输通道, 工作过程中承受空中环境、气动流场以及载机平台等载荷作用, 包括温度、压力、振动等, 因此, 光学窗口需要达到系统正常工作所要求的强度、刚性以及形变等性能要求。对于中高空、宽光谱机载光电装备, 光学窗口通常有平板整体式、平板拼装式、整流罩、共型等构成形式。RUDOLF H 分析了这几种不同形式光学窗口的优势和可能的缺陷, 并指出“避免(OPD 变化、MTF 下降、激光远场条纹恶化等)一系列问题的最好办法是不采用拼装式或分体式窗口”^[1]。整流罩和共型窗口受到构型尺寸和工艺复杂性限制, 所以某机载光电装备依据系统总体要求和光学参数配置, 确定采用平面式光学窗口构型。

在已公开文献中, 赵丽娟等分析比较了几种光学窗口的材料性能, 提出光学窗口设计研制需要综合考虑加工制造和工作使用环境要求^[2]; 廖志波等研究了不同方向温差对空间相机光学窗口光学性能的影响^[3]; 刘圃辰等研究了综合考虑强度和热环境作用下的窗口厚度设计方法^[4]; 范达等基于有限元仿真分析研究了高空高速环境下的热光学性能和光学窗口设计^[5]。光学窗口设计需要统筹兼顾加工阶段的测试验证, 又要保证工作应用过程中的光学性能和强度安全, 需要兼顾所用的载荷要素, 包括不同姿态下的重力影响、环境和气动下压力、温度、平台振动等。文中结合某机载光电装备平面光学窗口设计应用要求, 从设计变量、边界约束、作用载荷、设计目标等方面进行描述; 在边界约束条件、作用载荷确定的前提下, 通过解析计算, 初步确定平面窗口构型及厚度尺寸; 结合光学窗口制造工艺, 对平面光学窗口进行综合工况条件分析评估; 最后给出设计窗口的实物测试和飞行验证结果。

1 窗口设计问题描述

光学窗口在设计研制阶段, 需要综合考虑可设计变量、窗口玻璃光机组合边界约束条件、以及使用工作过程中承受的作用载荷, 在所有需要考虑的要素确定的前提下, 确保光学窗口满足要求。

1) 设计变量

平面光学窗口设计变量包括窗口材料种类与

窗口形状、厚度等参数。窗口玻璃材料选取首先由系统光学工作谱段决定, 此外还要考虑可选材料的光学、物理、力学特性以及可加工性、成本等因素, 经过对比分析, 本文研究的光学窗口材料选用多光谱硫化锌(m-ZnS), 材料特性参数如表 1 所示^[6]。光学窗口形状与系统光学入瞳位置和口径、视场角以及窗口相对稳定环架的回转角度范围等相关, 同时也受到内部光学单元与窗口布局关系、系统外廓包络等约束限制。在平板整体式光学窗口设计变量中, 厚度参数的选择确定与窗口材料特性、构型相关, 同时还要确保系统要求的光学、环境适应性与强度安全等性能。因此, 本文将基于确定的窗口材料和形状, 统一考虑光学窗口在使用工作过程中的作用载荷, 以系统要求的性能为设计目标, 确定光学窗口最优厚度参数和光机组合约束状态条件。

表 1 m-ZnS 材料特性参数

Table 1 m-ZnS material property parameters

属性	参数名称	参数值
物理参数	热膨胀系数/ $10^{-6} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$	6.5(-65 $^\circ\text{C}$ ~ 200 $^\circ\text{C}$)
	密度/ $10^3 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$	4.09
	热导率/ $\text{W}\cdot(\text{m}\cdot^\circ\text{C})^{-1}$	27(25 $^\circ\text{C}$)
力学参数	断裂强度/MPa	69
	弹性模量/GPa	74.5
	泊松比	0.318±0.001

2) 组合形式

光学窗口组合形式是指窗口玻璃与窗口框架之间的结构组合形式。基于大尺寸平面光学窗口对整体刚性、强度要求, 窗口框架通常选用高刚度比金属材料, 如铝、镁金属等, 大尺寸窗口框架铸造成型, 然后通过精密加工形成与窗口玻璃的结合结构, 通过窗口玻璃与框架之间的组合约束, 实现光学窗口整体密封以及在承受各种作用载荷情况下的光学性能与安全可靠性。平面光学窗口光机组合约束形式如图 1 所示。平板窗口玻璃与圆

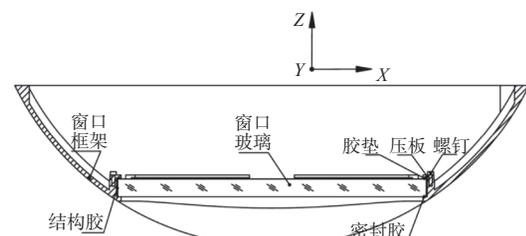


图 1 平面光学窗口组合形式

Fig. 1 Plane optical window combination form

筒形窗口框架采用边缘周向胶结组合方式,可实现窗口玻璃与窗口框架在玻璃平面内的柔性约束,在理论解析中可以将其看作是周边简支平板结构。在窗口玻璃外侧与窗口框架的法兰面之间填充密封胶,以确保光学窗口整体的密封性能。在窗口玻璃内侧通过压板在玻璃平面边沿预设胶垫,消除窗口玻璃在厚度方向上的刚性约束,同

时防止光学窗口在受到大幅值冲击作用时玻璃与框架之间刚性碰撞造成玻璃破损。

3) 作用载荷

光学窗口在工作过程中承受的作用载荷包括:自身重力、机动过载、环境与气动响应压力和温度、以及载机平台振动等,窗口作用载荷及影响如表2所示。

表2 窗口作用载荷及影响

Table 2 Window applied loads and influences

序号	载荷	载荷特点	作用来源	作用影响
1	重力(含机动过载)	与机动过载相同,属于静态载荷,对窗口作用会随窗口工作姿态位置变化	重力1 g,机动过载源于载机机动	系统工作过程中玻璃法向作用载荷,造成窗口内外表面变形,形成新的曲率半径,造成光学系统离焦和光程差;玻璃平面方向作用载荷对入射光线造成波前误差
2	压力	作用在窗口表面法向,窗口内外表面压力存在差异	源于飞行过程中环境压力以及大气与窗口相对运动;任务舱内环境气压	作用类似于窗口表面法向力,形成新的曲率半径,造成光学系统离焦和光程差
3	温度	在厚度方向和径向呈梯度分布	源于飞行过程中环境温度以及大气与窗口相对运动;任务舱内环境温度	厚度方向温度梯度造成窗口内外表面变形,形成新的曲率半径,造成光学系统离焦和光程差;径向温度梯度会造成“塌边”或者“翘边”,对入射光线造成波前误差
4	振动	沿载机航向、垂向、侧向3个方向作用	源于载机平台在飞行机动过程中的动态激励	造成窗口结构变形,入射光线在窗口内外表面上产生波前误差

4) 设计目标

依据光电装备光学设计以及环境条件要求,结合光学像差与波前误差关系和工程研制经验^[7-9],确定光学窗口设计目标为在载荷作用下的光学波前误差 RMS 不大于 1/10 参考波长 (632.8 nm),窗口结构谐振频率不小于 135 Hz。

力学载荷作用下的性能,光学窗口必须满足一定的结构刚性,即结构谐振频率 ≥ 150 Hz。参照光学窗口结合约束条件,可将其简化为四边简支矩形板壳结构。光学窗口的一阶谐振频率解析解可表示为^[10]

$$f = h_f \left(\frac{1}{a^2} + \frac{1}{b^2} \right) \sqrt{\frac{E_g}{12\rho(1-\mu^2)}} \quad (1)$$

式中: f 为一阶谐振频率,单位 Hz; a, b 为矩形板长边、短边长度,单位 mm; E_g 为矩形板材料的弹性模量,单位 MPa; h_f 为矩形板的厚度,单位 mm; ρ 为矩形板材料的密度,单位 10^3 kg/m^3 ; μ 为矩形板材料的泊松比。

根据式(1)计算得出,需要满足光学窗口一阶结构谐振频率 ≥ 135 Hz, m-ZnS 窗口厚度不小于 4.6 mm。

2.2.2 基于压力作用下的光程差

光学窗口在使用工作过程中,由于环境压力和气动效应造成光学窗口外表面承受气动压力作用,同时光学窗口内表面在光电装备任务舱压力控制作用下,会导致光学窗口承受相应的内外压差,为保证成像组件可安全工作,要求光学窗口必须能承受内外表面压差作用。光学窗口厚度与光程差解析计算公式^[11, 12]为

$$OPD_p = 0.00899(n-1)\Delta P^2 / (E_g^2 h_{\Delta P}^2) \quad (2)$$

2 窗口厚度设计初步确定

2.1 窗口构型确定

依据光电装备光学口径、视场以及关注场范围等参数,确定的平面光学窗口玻璃构型尺寸如图2所示(图中单位: mm)。

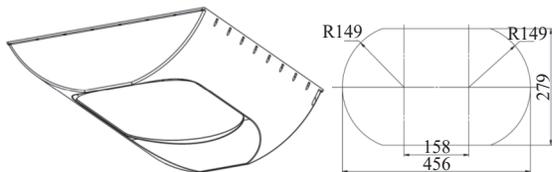


图2 平面光学窗口构型尺寸

Fig. 2 Configuration and dimension of plane optical window

2.2 窗口厚度范围解析计算

2.2.1 基于结构刚性

光学窗口在工作过程中承受来自载机平台的宽频段振动激励作用,为了保证光学窗口在动态

式中: OPD_p 为压力造成的光程差, 取 PV 值 1/4 参考波长 (632.8 nm), 单位 mm; $h_{\Delta P}$ 为满足压力波像差要求的窗口厚度, 单位 mm; n 为光学窗口材料折射率; ΔP 为光学窗口载荷压力差, 单位 MPa; E_g 为杨氏模量, 单位 MPa。

根据式(2)计算得出: 满足 PV 值不大于 1/4 参考波长光程差时, m-ZnS 光学窗口厚度不小于 11.9 mm。1/4 参考波长光程差 PV 值相对于系统 1/10 参考波长光程差 RMS 存在一定余量。

2.2.3 基于温度作用下的光程差

光学窗口在工作过程中由于环境温度和气动效应造成窗口外表面承受气动加热作用, 光学窗口外表面产生一定的温度梯度, 即径向温度梯度。同时光学窗口内表面在光电装备任务舱温度控制作用下, 导致窗口内外表面存在温度梯度, 即轴向温度梯度。窗口轴向温度梯度会使窗口变为球形, 给成像光学系统引入一个光焦度变量, 从而造成光学系统整体光焦度变化, 通过光学调焦可以对其进行补偿。径向温度梯度会引起通过窗口的光线光程变化, 轴向、径向温度梯度造成的光程差分别为^[13-14]:

$$OPD_{ia} = (\Delta n)(h_{\Delta ia}/\lambda) \quad (3)$$

$$OPD_{ir} = [(n-1)(1+\mu)\alpha + \frac{dn}{dt}]h_{\Delta ir}\Delta T \quad (4)$$

式中: OPD_{ia} 、 OPD_{ir} 为轴向/径向温度梯度造成的光程差, 取 PV 值 1/4 参考波长, 单位 mm; $h_{\Delta ia}$ 、 $h_{\Delta ir}$ 为满足轴向/径向温度梯度波像差要求的厚度, 单位 mm; Δn 为光学窗口材料折射率变化梯度; λ 为光电装备光学波长, 单位 mm; dn/dt 为光学窗口材料热光学系数/ $^{\circ}\text{C}$; μ 为光学窗口材料泊松比; α 为光学窗口材料热膨胀系数, 单位 $10^{-6}/^{\circ}\text{C}$; ΔT 为光学窗口径向温度差, 单位 $^{\circ}\text{C}$ 。

根据式(3)和式(4)计算出, 满足 PV 值不大于 1/4 参考波长波像差时, m-ZnS 光学窗口厚度不大于 18.4 mm。

基于光学窗口结构刚性、压力和温度的单要素光程差要求, 初步确定平面光学窗口玻璃厚度取值范围为 11.9 mm~18.4 mm。根据光学窗口强度对厚度尺寸的要求, 考虑到窗口玻璃在正常使用工作过程中完全处于线弹性受力状态, 并非塑性受力状态, 因此, 窗口玻璃在满足上述要求的前提下, 必然满足窗口材料的强度要求。

3 面向窗口厚度尺寸的集成分析

通过前述分析计算, 初步确定了平面光学窗口玻璃厚度取值范围, 结合前期机载光电装备光学窗口设计实践, 确定光学窗口厚度尺寸为 16 mm。基于光学窗口实际工况条件, 结合光学窗口构型、尺寸、组合工艺进行光学窗口使用性能集成分析。

3.1 集成分析流程

平面光学窗口集成分析涉及光学窗口工况条件组合响应计算、光学窗口表面面型接口数据转换、光学窗口性能分析评估等环节。机载光电装备光学窗口集成分析以确定的光学窗口设计模型和工况条件为输入, 基于流场、热、力学、光学多学科专业数值分析应用软件开展, 综合分析评估光学窗口结构刚性以及使用工况条件下的 RMS 光程差响应。光学窗口集成分析流程如图 3 所示。应用的分析系统包括: ANSYS Fluent、ANSYS WB Thermal/Mechanic、Matlab、CodeV。

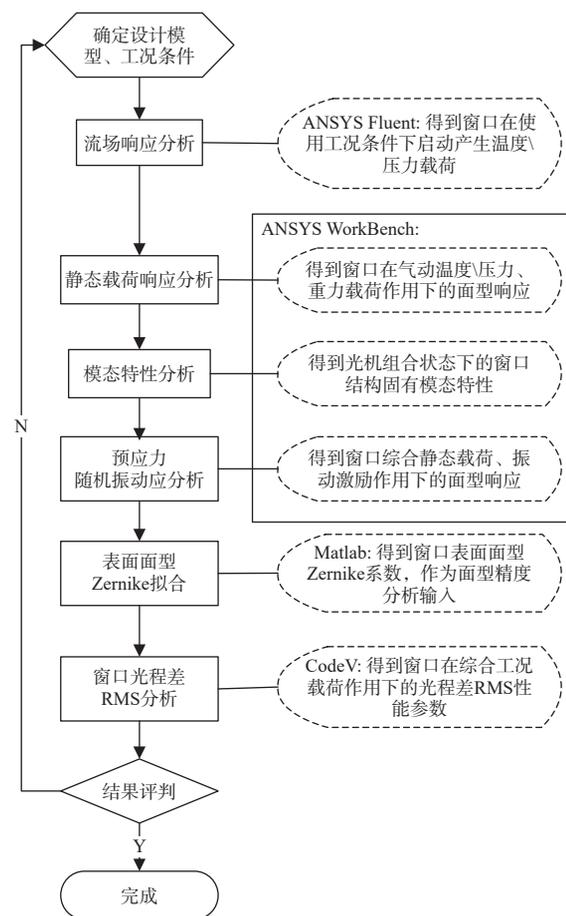


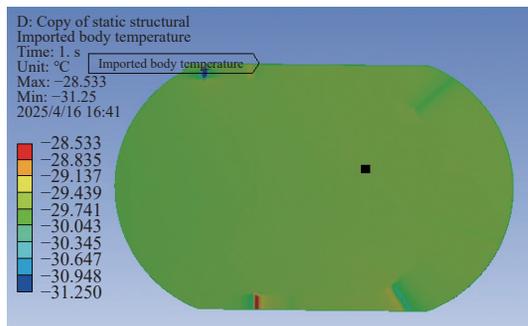
图 3 光学窗口集成分析流程

Fig. 3 Integrated analysis process of optical window

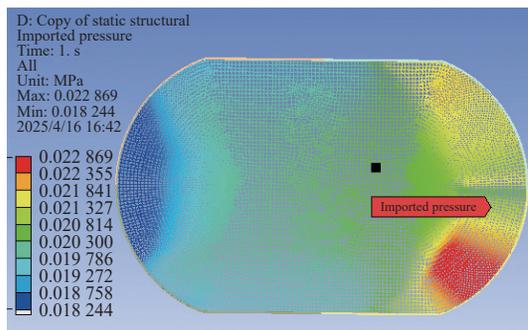
3.2 集成分析实现

3.2.1 流场计算

依据光电装备使用工况条件,即飞行高度 18 km、飞行速度 1050 km/h,在 CFD 应用系统 ANSYS Fluent 中构建光学窗口流场气动模型,求解得到光学窗口在工况条件下的气动热、气动压力响应,如图 4 所示。从图 4 可以看出,窗口玻璃气动热造成的温度梯度 $<0.5^{\circ}\text{C}$,气动热造成的压力梯度约为 2.5 kPa。根据综合光电装备任务舱内的压力和温度,在 ANSYS WB Thermal/Mechanic 中求解得到光学窗口在压力、温度组合作用下的结构应力,如图 5 所示,作为后续动力学响应求解的边界输入。



(a) 气动热响应分布



(b) 气动压力响应分布

图 4 光学窗口气动热/压力响应

Fig. 4 Aerodynamic thermal and pressure response of optical window

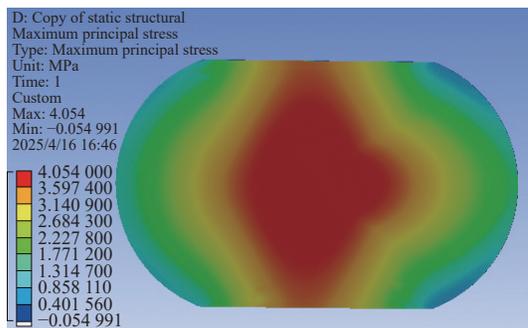


图 5 光学窗口压力/温度组合作用应力响应

Fig. 5 Composite action stress response for pressure and temperature of optical window

3.2.2 流场/静载/振动集成计算

在 ANSYS WB 中进行光学窗口流场/静载/振动集成响应计算,完成计算模型、边界约束、载荷条件、求解设置等定义,依次进行静力、预应力模态、随机振动计算,静力计算载荷条件包括流场热/压力和静载(包含重力和机动过载)。在光学窗口流场计算中,光学窗口与载机姿态坐标系定义如图 6 所示。图 6 中光学窗口与载机采用统一坐标系,载机航向为 Y 向,垂向为 Z 向,侧向为 X 向。在计算工况条件下,气动流场方向与载机航向一致,同时与光学窗口表面平行。

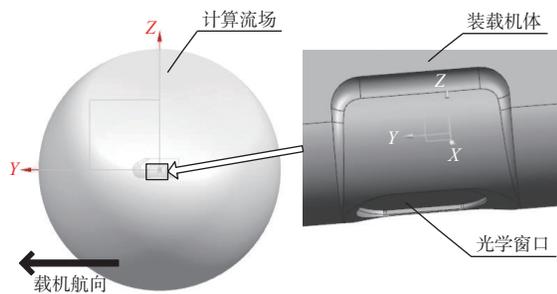


图 6 光学窗口与载机姿态坐标系定义

Fig. 6 Coordinate system definition of optical window and carrier attitude

将计算得到的光学窗口在静态载荷下的应力变形状态作为光学窗口结构模态计算的初始预应力状态,得到的光学窗口结构模态特性如表 3 所示。相应的模态振型云图如图 7 所示。从图 7 可以看出,提取的完全涵盖 6 个自由度激励响应的振型阶次,光学窗口结构刚性满足设计要求。

表 3 光学窗口结构模态特性

Table 3 Structural modal property of optical window

阶次	谐振频率/Hz	振型	主响应激励
1	151.17	Z向弯曲	Z向线性
2	209.78	X向转动	
3	220.82	Y向转动	
4	276.59	Z向转动	Z向旋转
5	299.72	Y向移动	Y向线性, X向旋转
6	306.68	Y向转动, X向移动	X向线性, Y向旋转

光学窗口预应力模态计算完成后,进行 3 个方向的组合工况集成计算,得到光学窗口在各方向组合工况作用下的各向位移极值与应力响应(3 σ),如表 4 所示。窗口表面位移、应力响应云图如图 8 和图 9 所示。位移响应作为光学窗口 RMS 波前误

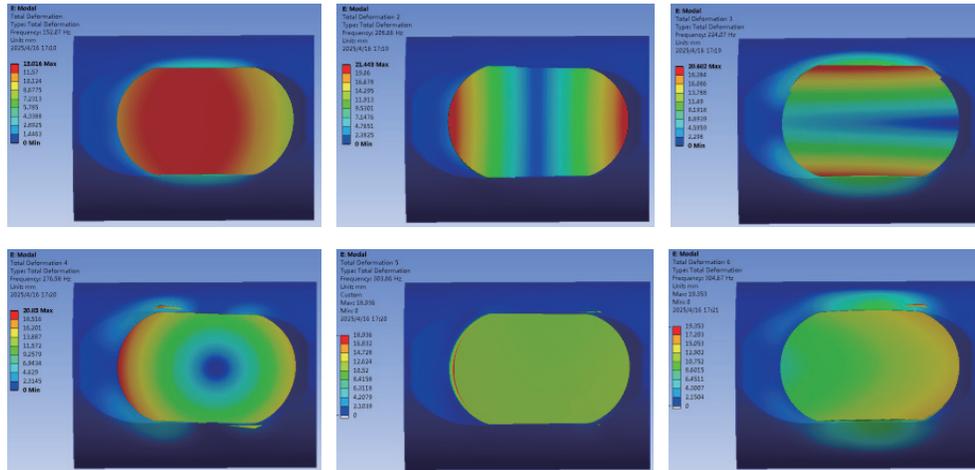


图 7 光学窗口 1~6 阶振型云图

Fig. 7 1st~6th order mode contour of optical window

差性能评估的输入, 基于光学窗口组合工况下的应力响应和窗口玻璃材料断裂强度参数(69 MPa), 可计算出光学窗口强度安全系数为 11.2, 满足航空产品强度安全系数不小于 1.5 的要求。

表 4 组合工况窗口表面位移/应力极值响应

Table 4 Displacement and stress extreme response for composite load of window surface

参数	坐标	X向组合工况	Y向组合工况	Z向组合工况
最大位移/mm	X	0.185 886	0.001 800	0.003 925
	Y	0.038 729	0.166 598	0.018 454
	Z	0.229 895	0.076 745	0.631 165
最大应力/MPa		1.02	0.77	6.15

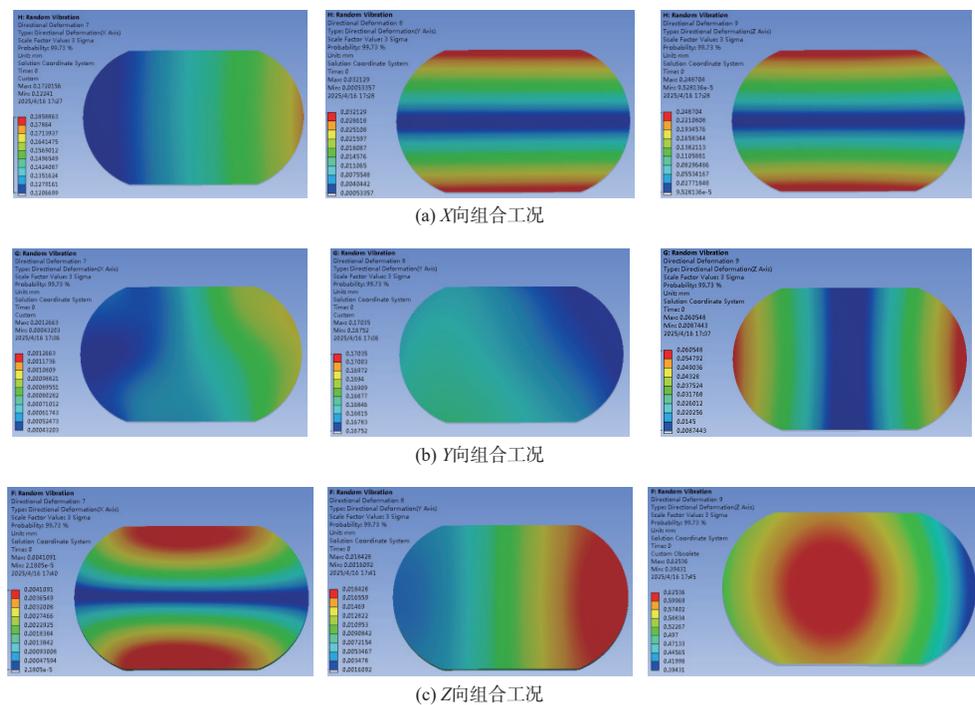


图 8 窗口玻璃组合工况位移响应

Fig. 8 Directional displacement extreme response for composite load of window surface

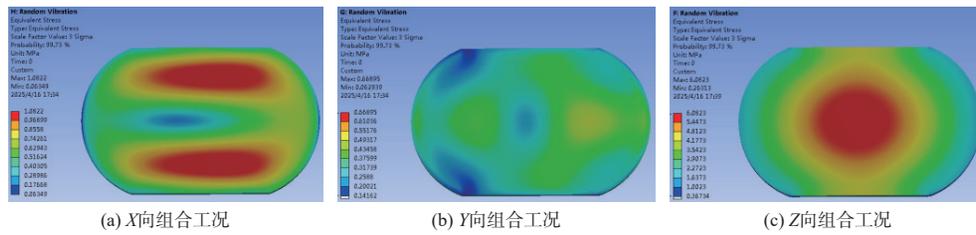


图9 光学窗口组合工况应力响应

Fig. 9 Stress response for composite load of window surface

3.3 分析结果评估

计算得到光学窗口各向组合工况条件下的玻璃表面位移响应后,基于 Zernike 多项式理论对工况作用下的玻璃面型进行拟合,在 Matlab 中求解得到窗口表面的归一化半径和前 9 阶 Zernike 系数。在 CodeV 中定义窗口成像模型,窗口内外表面、材料属性按照设计定义,使用理想镜头确定像面,依据系统

工作模式确定关注角度(-15°~15°),将拟合得到的窗口表面 Zernike 参数输入到窗口成像模型中,分析得到组合工况作用使光学窗口产生的 RMS 波前误差,如表 5 所示,得到的窗口 RMS 波前误差量化分布结果如图 10 所示。由此可见,窗口设计在 X、Y、Z 3 个方向组合工况作用下,可以满足光电装备组合工况下波前误差小于 1/10 参考波长的使用要求。

表 5 各向组合工况面型拟合参数与 RMS 波前误差结果

Table 5 Window surface fitting parameters and RMS wavefront error results for directional composite load

Zernike面型参数	X向		Y向		Z向		
	内表面	外表面	内表面	外表面	内表面	外表面	
面型拟合结果	归一化半径/mm	276.998 906 3	276.998 913 1	276.834 930 0	276.835 880 0	276.985 190 0	276.996 606 1
1阶系数: 平移	0.262 254 715	0.262 245 068	0.027 328 299	0.027 333 184	0.526 604 345	0.526 594 259 3	
2阶系数: X轴倾斜	0.000 828 909	0.000 830 881	-0.000 116 196	-0.000 116 363	0.000 404 496	0.000 404 351 5	
3阶系数: Y轴倾斜	-0.002 961 901	-0.002 964 867	0.001 715 877	0.001 717 946	-0.074 438 728	-0.074 439 059	
4阶系数: 离焦	0.224 762 549	0.224 754 626	-0.006 876 250	-0.006 878 576	-0.084 764 406	-0.084 778 920	
5阶系数: 0°像散	0.446 830 467	0.446 811 085	-0.063 721 412	-0.063 746 553	0.053 903 969	0.053 858 942 9	
6阶系数: 45°像散	0.000 858 146	0.000 834 739	-0.000 723 699	-0.000 723 958	-0.000 212 343	-0.000 212 356	
7阶系数: X轴彗差	0.000 486 215	0.000 488 836	-0.000 200 022	-0.000 200 175	0.000 018 786	0.000 018 704 5	
8阶系数: Y轴彗差	-0.001 401 989	-0.001 402 429	-0.001 475 794	-0.001 472 842	0.001 730 019	0.001 722 969 6	
9阶系数: 球差	0.002 379 907	0.002 379 864	-0.022 546 090	-0.022 551 892	0.014 896 605 3	0.014 887 764 0	
RMS波前误差	(-15° 0°)	0.020 910	0.093 245	0.061 374			
(波长632.8 nm)	(-12° 0°)	0.022 347	0.073 680	0.049 426			
	(-9° 0°)	0.024 178	0.055 118	0.038 603			
	(-6° 0°)	0.025 939	0.036 968	0.029 094			
	(-3° 0°)	0.027 515	0.020 215	0.022 680			
	(0° 0°)	0.029 283	0.009 413	0.021 299			
	(3° 0°)	0.031 347	0.020 643	0.026 096			
	(6° 0°)	0.033 608	0.037 371	0.034 372			
	(9° 0°)	0.035 707	0.055 512	0.044 736			
	(12° 0°)	0.037 636	0.074 048	0.055 959			
	(15° 0°)	0.040 064	0.093 565	0.068 238			

4 测试验证

光学窗口样机研制完成后,进行实验室测试以及振动、飞行实验,光学窗口环境安全性、波前误

差、成像等实验效果验证了大口径平面光学窗口厚度尺寸优化设计方法的有效性。采用干涉仪在实验室进行光学窗口(组件)波前误差测试,测试

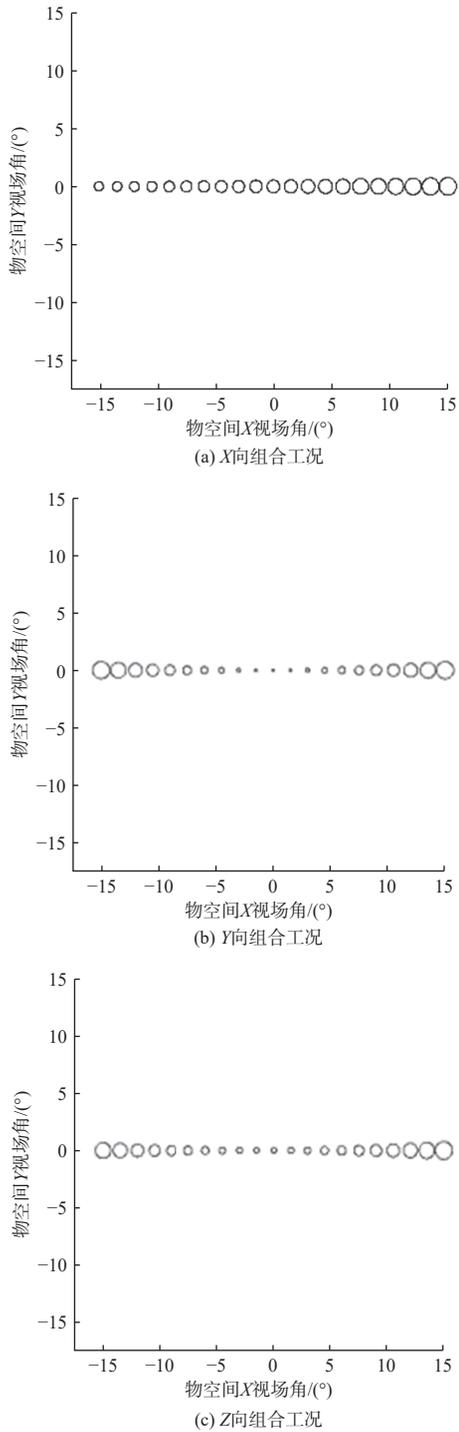
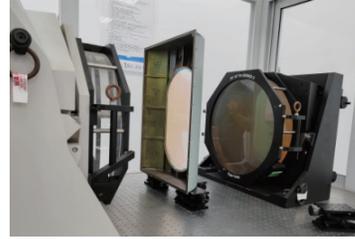


图 10 各向组合工况下窗口 RMS 波前误差

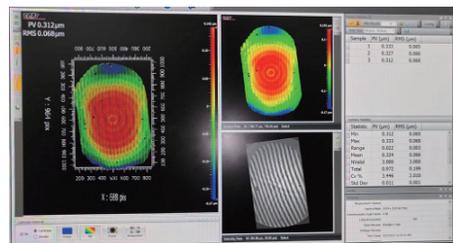
Fig. 10 Window surface RMS wavefront error results for directional composite load

装置和测试结果如图 11 所示。从图 11 可知, 得到的窗口波前误差 PV 值 < 0.35 参考波长, $RMS < 0.07$ 参考波长。在振动激励作用下结合光电装备稳定控制, 光源目标图像稳定, 振动试验场景与目标图像如图 12 所示。从实验结果可以判定窗口玻璃厚度设计满足光电装备振动工况条件要求。光学窗

口随光电装备安装在载机平台上进行飞行试验, 在飞行工况条件下目标场景的电视、红外成像效果清晰, 如图 13 所示。因此, 判定窗口玻璃厚度设计满足载机工况条件要求。



(a) 实验室测试



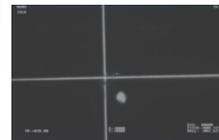
(b) 测试波前误差

图 11 光学窗口实验室测试及波前云图

Fig. 11 Laboratory test and wavefront errors contour of optical window



(a) 振动测试



(b) 振动像斑

图 12 光学窗口振动实验测试与光斑图像

Fig. 12 Vibration test and spot image of optical window



(a) 电视成像



(b) 红外成像

图 13 载机飞行成像效果

Fig. 13 Imaging effect during carrier flight

5 结论

机载光电装备平面光学窗口玻璃厚度设计需要综合考虑其构型尺寸、组合形式以及使用工况, 依据系统工作使用要求和工艺实践确定光学窗口

构型尺寸和组合形式后,窗口厚度尺寸设计必须考虑使用工作过程中承受的流场气动/重力/振动组合工况要素作用。结合光学窗口设计性能约束,基于单工况要素确定窗口厚度尺寸范围,再通过多应用系统组合工况集成分析评估窗口厚度尺寸设计对窗口设计性能的符合性,并提供了光学窗口样机随光电装备的温度、振动和飞行试验验证结果。

通过分析、计算和测试验证,窗口玻璃厚度设计正确,表明本文对平面窗口玻璃厚度尺寸设计分析方法合理可行、正确有效。后续将继续开展针对光学窗口在组合工况作用下的优化设计,以达到窗口玻璃厚度尺寸最优。

参考文献:

- [1] RUDOLF H. Airborne FLIR optical windows examples[J]. *SPIE Window and Dome Technologies and Materials III*, 1992, 1760: 86-96.
- [2] 赵丽娟,吉书鹏. 机载光电设备红外 8 μm~12 μm 光学窗口技术研究[J]. *光子学报*, 2007, 36(增刊): 235-238. ZHAO Lijuan, JI Shupeng. Study of 8 μm~12 μm infrared region optical window for airborne photoelectric equipment[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2007, 36(S): 235-238.
- [3] 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(3): 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(3): 407-410.
- [4] 刘囿辰,马国鹭,赵涌,等. 组合式力热动态载荷光学窗口的光学特性研究[J]. *应用光学*, 2021, 42(6): 1122-1126. LIU Youchen, MA Guolu, ZHAO Yong, et al. Optical properties of combined dynamic thermal dynamic loading optical window[J]. *Journal of Applied Optics*, 2021, 42(6): 1122-1126.
- [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 Xing, 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] 余怀之. 红外光学材料[M]. 1版. 北京:国防工业出版社, 2007: 75-140. YU Huaizhi. *Infrared optical material*[M]. 1st ed. Beijing: National Defense Industry Press, 2007: 75-140.
- [7] GHOLST G C. *Electro-optical imaging system performance*[M]. 5th ed. Washington DC: JCD Publishing, 2008: 84-86.
- [8] 王惠林,刘吉龙,吴雄雄,等. 航空光电侦察图像质量影响因素分析[J]. *应用光学*, 2021, 42(5): 817-829. WANG Huilin, LIU Jilong, WU Xiongxiong, et al. Image quality influencing factors for aerial electro-optical detection[J]. *Journal of Applied Optics*, 2021, 42(5): 817-829.
- [9] 石进峰,吴清文,张建萍,等. 高空高速航空相机光学窗口的热特性分析[J]. *光学学报*, 2012, 32(4): 0422004-1-9. SHI Jinfeng, WU Qingwen, ZHANG Jianping, et al. Thermal-optical analysis for optical window of high-altitude and high-speed aerial camera[J]. *Acta Optica Sinica*, 2012, 32(4): 0422004-1-9.
- [10] 李泽成,吴健,王斌,等. 平板振动的实体壳单元特性分析[C]//第十八届船舶水下噪声学术讨论会. 云南:船舶力学, 2021. LI Zecheng, WU Jian, WANG Bin, et al. Analysis of the characteristics of solid shell units with plate vibration [C]// The 18th Symposium on Underwater Noise of Ships. Yunnan: Ship Mechanics, 2021.
- [11] YODER P R. 光机系统设计[M]. 周海宪,程云芳,译. 3版. 北京:机械工业出版社, 2010: 302-306. YODER P R. *Opto-mechanical systems design*[M]. ZHOU Haixian, CHENG Yunfang, translated. 3rd ed. Beijing: China Machine Press, 2010: 302-306.
- [12] BARNES W P. Some effects of aerospace thermal environments on high-acuity optical systems[J]. *Applied Optics*, 1966, 5(5): 671-675.
- [13] DOYLE K B, GENBERG V L, MICHELS G Y. *Integrated optomechanical analysis*[M]. 2nd ed. Washington: USA Bellingham, 2012: 50-60.
- [14] 张兴德,刘琳,李荣刚. 机载光电设备红外窗口技术[J]. *红外与激光工程*, 2010, 39(4): 601-606. ZHANG Xingde, LIU Lin, LI Ronggang. Infrared optical window for airborne photoelectric equipment[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2010, 39(4): 601-606.