

文章编号 1004-924X(2022)20-2436-10

航空相机气密光学窗口及其保护罩的设计

谭淦年^{1,2,3*}, 姚 园^{1,3}, 徐钰蕾^{1,3}, 许永森^{1,3}, 李 浩^{1,3}

(1. 中国科学院 长春光学精密机械与物理研究所, 吉林 长春 130033;

2. 中国科学院大学, 北京 100049;

3. 中国科学院 航空光学成像与测量重点实验室, 吉林 长春 130033)

摘要:为了保证航空相机的成像效果,设计了气密光学窗口及其保护罩。本文对光学窗口的设计流程进行了分析,讨论了光学窗口设计的考虑因素,例如光学材料、光学厚度、压力和气密安装方案等。为了实现在非工作状态下对光学窗口的保护,设计了双层舱门结构形式的光窗保护罩,实现了系统的小型化。通过仿真分析和试验,测试了气密光学窗口和光窗保护罩的稳定性,系统能够在2个大气压和高低温环境下正常工作,性能良好。光学窗口保护罩整个厚度仅为37 mm,能够实现快速开启与关闭,单程时间为7.7 s。相关分析方法解决了光学窗口设计问题的盲目性,使光学窗口的设计更加合理可靠。本文提出的方案为航空相机光学窗口的设计和保护提供了参考和技术支持。

关 键 词:航空相机;光学窗口;气密性;光窗保护罩;双层舱门

中图分类号:V447+.1 **文献标识码:**A **doi:**10.37188/OPE.20223020.2436

Design of airtight optical window and protector for aerial camera

TAN Songnian^{1,2,3*}, YAO Yuan^{1,3}, XU Yulei^{1,3}, XU Yongsen^{1,3}, LI Hao^{1,3}

(1. Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences,
Changchun 130033, China;

2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China;

3. Key Laboratory of Airborne Optical Imaging and Measurement, Chinese Academy of Sciences,
Changchun 130033, China)

* Corresponding author, E-mail: tansongnian@126.com

Abstract: To ensure the imaging effectiveness of an aerial camera, an airtight optical window and a protector are designed in this study. The design process for the optical window is analyzed. Considerations, such as optical materials, optical thickness, pressure, and air-tight installation options, for the design of optical windows are discussed. To ensure that the optical window remains protected in the non-working state, a light window protector with a double hatch structure is designed to miniaturize the system. The stability of the airtight optical window and light window protector is tested by conducting simulation analysis and experiments. The system can work appropriately and exhibit good performance under an atmospheric pressure of 2 and in high- and low-temperature environments. The overall thickness of the optical window protector is 37 mm. The one-way time is 7.7 s, indicating a small opening or closing interval.

收稿日期:2022-01-10;修订日期:2022-03-02.

基金项目:国家自然科学基金青年基金项目(No. 61905242);

The related analysis method ensures that the optical window design process is guided and makes the optical window design process more effective and reliable. The scheme proposed in this study provides a reference and technical support for the design and protection of aerial camera optical windows.

Key words: aerial camera; optical window; airtight; protector; double hatch

1 引言

在载机飞行过程中,载荷会处于极其严峻的工作环境(如载体造成的冲击、振动,相机载荷内外压力变化、温度变化等)^[1]。光学窗口作为航空光电平台的一部分,是内部载荷与外界环境的接口。由于工作环境恶劣,航空相机密封在保护光学窗口内,光学窗口起到将光学系统与外界环境隔离的作用,避免外界的烟雾、沙尘、水汽和其他污染进入光学系统内部,因此光学窗口玻璃需进行气密处理。此外,光学窗口直接承受外界环境的气动冲击、加热热流^[2-3]、内外压差和载机振动,其作为光学系统的一部分,为了保证光学系统成像清晰,光学窗口不能翘曲变形,这就要求窗口具有足够的机械强度,并且不会产生应力集中的问题。

光学窗口玻璃是脆性材料,在外界压力和温度变化等影响下可能会遭到破坏^[4]。光学窗口的设计决定了光电载荷的可靠性。此外,当航空光电平台载机在地面和起降过程中,扬起的沙尘会对光学窗口造成划痕和损伤,破坏光学窗口表面的膜系。在光学窗口外侧增加光窗保护罩结构是一种解决方案,可实现对光学窗口的保护^[5]。窗口保护舱门结构位于光学窗口外侧,当载机在地面和起降过程中,保护舱门处于关闭状态;当光电载荷设备工作时,舱门处于打开状态。由于载机对航空相机体积和重量的严格限制,需要一种结构尺寸紧凑、轻质,并能对光学窗口起到保护作用的保护罩。目前航空光电载荷一般采用地面拆装光学窗口保护盖的方式来实现对光学窗口的保护,该方式造成人力资源浪费的同时也存在起飞及降落过程中损伤光学窗口的风险。

本文提出了一种航空相机光学窗口及其保护罩的设计方案。确定了光学窗口的设计流程和方法,并设计了双层舱门结构形式的光窗保护罩,实现了系统的小型化。通过仿真分析和试

验,测试了光学窗口和光窗保护罩的稳定性,能够满足系统指标要求。

2 方法论

光学窗口作为航空相机的一部分,是相机与外界环境的接口,同时是一个压力气密隔离与温度隔离窗口,起到保护相机成像光学系统、隔离外界恶劣环境的作用。另外窗口本身又是一个零光焦度的光学元件,是入射光束的必经路径,作为相机光学系统的一部分,其光学性能直接关系到航空相机的分辨力和成像质量。因此在光学窗口设计工作中不仅必须考虑到玻璃材料及其强度可靠性,还要考虑到其工作时对遥感高光谱相机的成像质量的影响。光窗分系统包括光学窗口和光窗保护罩等。

2.1 光学窗口设计原则

(1)光学仪器的光窗作为内部元件和外部环境间的一种透明界面,需要允许所希望的辐射光通过,并对成像质量和光强度有最小的影响。

(2)光学窗口安装设计主要需考虑由于机械和热产生畸变的程度,密封措施以及在光学系统中的位置。

(3)平面光透射通过光窗后,成像质量会有所下降,根据所允许的最小下降来规定光窗的光学性能。透过波前误差包括由材料不均匀或加工造成的表面残留形状误差以及装配或环境影响造成机械变形等原因而导致的误差。

(4)航空相机安装在机身有环控的舱段内,需要使用光窗将该舱或吊舱密封起来,并保证光窗所包围区域具有空气动力学的连续性。

(5)气密窗口应能满足内部增压舱与周围大气之间的压差^[6]。

根据光学窗口的设计原则,可以明确光学窗口设计的关键设计要素^[7],即材料、尺寸、镀膜、气密设计和力学特性等。根据光学指标要求,对光

学窗口的设计要素进行计算,通过建模仿真来判断设计合理性。然后开展光学窗口保护罩的设计

计,确定尺寸和结构形式。光学窗口及光窗保护罩设计流程如图 1 所示。

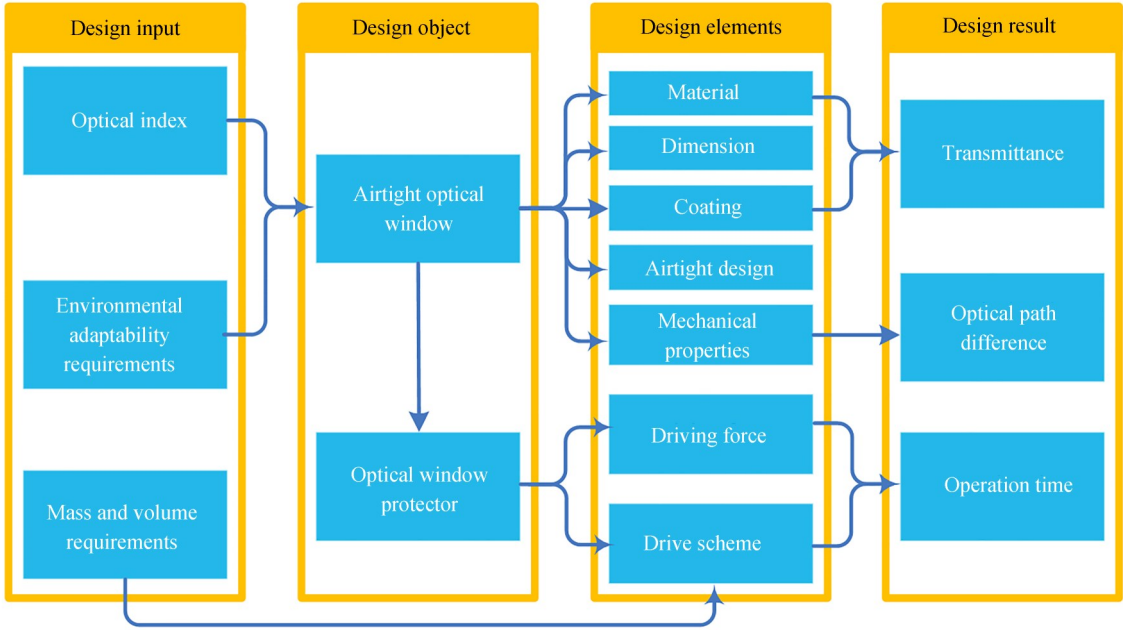


图 1 光学窗口及光窗保护罩设计流程

Fig. 1 Design process of optical window and optical window protector

2.2 光学窗口设计方法

2.2.1 光学窗口材料选择

针对光学系统不同的应用环境及探测波段,窗口材料的选取标准不同。光学窗口材料的选取主要考虑两方面的因素,物理性能和机

械性能^[8]。物理性能主要是指材料的光学性能,例如材料的体吸收率、光学波段透过率等。机械性能是指窗口材料的力学性能等。航空相机在可见波段常用的窗口材料参数如表 1 所示。

表 1 常用窗口材料参数

Tab. 1 Common window material parameters

Material	Elastic modulus /GPa	Poisson's ratio	Density /(kg·m ⁻³)	Linear expansion coefficient /(10 ⁻⁶ °C)	Thermal conductivity /(W·m ⁻¹ ·K ⁻¹)
Fused silica	75	0.17	2200	0.55	1.4
BK7	79	0.21	2530	3.5	1.2
ZnS	74.5	0.29	4080	7.6	16.7

2.2.2 光学窗口厚度确定

窗口采用简单支撑的侧边固定的方式,在承受压差的情况下玻璃窗口的最小厚度 L 为:

$$L = 0.5A_w \sqrt{\frac{K_w f_s \Delta P_w}{\sigma_F}}, \quad (1)$$

其中: A_w 为光学窗口直径,方形窗口取对角线长度; ΔP_w 为光学窗口表面法向压差; K_w 为支撑条

件系数,受到夹持的窗口取 $K_w=0.75$; f_s 为安全系数,一般取 $f_s=4$; σ_F 为光学玻璃材料的断裂应力。

2.2.3 压力对光学窗口的影响

光学窗口工作过程中,一侧是低压,另一侧是一个大气压,两侧的压差使得窗口趋于凸向舱外,这种变形将会使通过窗口的波前光程差发生

变化,在整个通光口径内压差为 ΔP_w ,则圆形窗口形变带来的光程差 L_{OPD} 为:

$$L_{OPD} = \frac{0.00899(n-1)\Delta P_w^2 A_w^6}{E^2 L^5}, \quad (2)$$

其中: n 为玻璃窗口的折射率, E 为窗口玻璃的弹性模量。

2.2.4 光学窗口镀膜设计

光学窗口外表面镀增透膜、硬质保护膜和憎水膜,光学窗口内表面镀增透膜和硬质保护膜。增透膜用来减少光的反射及增加穿透强度;硬质保护膜可以增加光学镜片表面的硬度,对窗口起到保护的作用;憎水膜即防水防尘膜,使水、尘等脏污与光学窗口的接触面积变小,使其不易粘附于光学窗口表面,提高了光学窗口防水、防雾、防尘、防指纹等防污染的能力。根据窗口材料和窗口厚度尺寸参数可以计算得到光学窗口的体透过率,公式如下:

$$\tau = e^{-\alpha L}, \quad (3)$$

其中: τ 为窗口体透过率, α 为窗口体吸收系数。

2.2.5 气密光窗结构设计及气密设计

气密光学窗口玻璃直接与稳定平台连接,是光学系统的第一个工作面,外界环境的温度、湿度、腐蚀性、压力、尘土、飞虫等都直接作用于它。因此,对气密光窗的要求比较高。光学窗口气密结构如图2所示。为了实现快速装配,光学窗口未选择粘接连接方式^[9],而是选用硫化硅橡胶进行密封。硫化硅橡胶具有良好的密封性,并具有

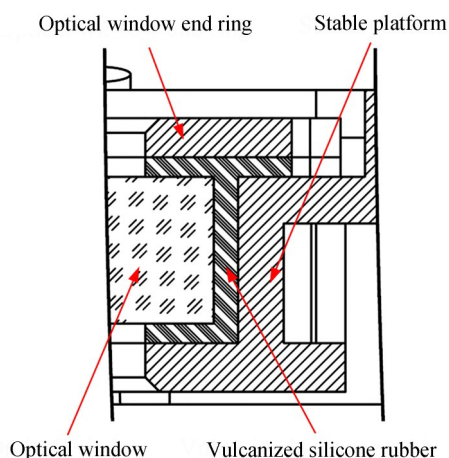


图2 气密光窗结构组成示意图

Fig.2 Schematic diagram of airtight optical window structure

优良的耐热性和耐寒性,满足航空环境使用要求。硫化硅橡胶是包覆住光学窗口的完整胶圈,截面成丁字型。硫化硅橡胶的上下两部分通过窗口压盖压紧可以实现光学窗口的气密,密封圈压边大于2 mm,固定窗口压盖的螺钉间距应小于60 mm,同时在螺钉处涂密封胶。

在金属框架与光学窗口间隙处的硫化硅橡胶是为了补偿温度的影响。硫化硅橡胶补偿温度变化的最小间隙厚度计算公式如下:

$$d_r = \frac{A_w(\alpha_M - \alpha_g)\Delta T}{2}, \quad (4)$$

其中: α_M 为壳体的线膨胀系数, α_g 为玻璃的线膨胀系数, ΔT 为最大温差。

2.3 光窗保护罩设计方法

为了保护光学窗口免受沙尘等杂质的污染,在光学窗口外侧设计光窗保护罩。光窗保护罩设计的关键点包括结构设计的小型化和舱门的动密封。

2.3.1 光窗保护罩驱动方案

受安装空间限制,传统的单层平移式舱门结构会出现干涉。为了实现小型化,设计了一种平移式双层舱门结构光学窗口保护罩。具体实现方式如图3所示。结构主要包括舱门机构、支撑板、导向机构、驱动机构、自锁机构和电控机构等。所有部件安装在支撑板上,支撑板上有通光孔,该通光孔尺寸满足航空光电平台内部载荷对外成像角,保证对外成像时不被遮挡。舱门机构为上下两块平板结构舱门,上下舱门与光轴垂直放置。在关闭状态下,上下舱门水平并列放置,对所述的支撑机构中的通光孔进行遮挡。在开启状态下,上下舱门层叠

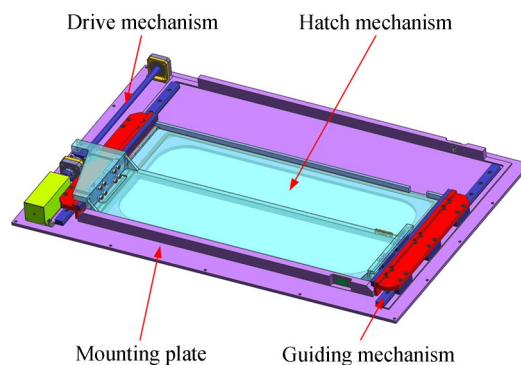


图3 光学窗口保护罩

Fig.3 Optical window protector

放置在支撑机构的一侧,开放所述的支撑机构中的通光孔,保证航空光电平台内部载荷对外成像,实现结构的小型化。

如图4所示为舱门结构驱动方案。光窗保护罩的驱动机构包括电机、联轴器和滚珠丝杠等,驱动舱门进行水平运动。选用微直流电机作为驱动部件,微直流电机能够以小巧的尺寸实现高功率,且具有坚固耐用、可控性高、重量轻、结构紧凑的优点。采用稀有金属环向器,可以实现最高的总体持续运行性能。驱动机构选用滚珠丝杠,电机带动滚珠丝杠,进而带动舱门实现水平移动。支撑机构采用直线导轨保证舱门机构的支撑与导向,使舱门机构水平移动。2个固定直线导轨水平安装在支撑板上,下舱门直接安装在固定直线导轨滑块上。2个随动直线导轨侧向安装在下舱门结构内侧,减小了厚度方向的尺寸,上舱门安装在随动直线导轨滑块上。直线导轨涂低温润滑脂,保证航空光电平台在飞行过程中正常工作。

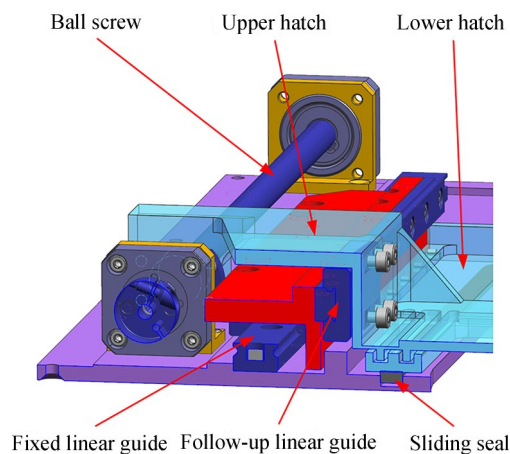


图4 舱门结构驱动方案

Fig. 4 Driving scheme of hatch structure

当系统给出舱门开启指令,驱动机构电机开始转动,通过联轴器带动滚珠丝杠转动,滚珠丝杠的转动转化为滚至丝杠滑块的直线运动,带动上舱门运动。上下舱门的两端有挡板,当上舱门挡板与下舱门挡板接触时,带动下舱门一起运动。在此运动期间,上下舱门相对静止,直到舱门接触关闭端限位时,舱门运动停止,实现舱门开启。当舱门处于开启状态,系统给出舱门关闭

指令时,驱动机构电机开始转动,通过联轴器带动滚珠丝杠转动,滚珠丝杠的转动转化为滚至丝杠滑块的直线运动,带动上舱门运动。当上舱门挡板与下舱门挡板接触时,带动下舱门一起运动,在此运动期间,上下舱门相对静止,直到舱门接触开启端机械限位时,舱门运动停止,实现舱门关闭。

舱门机构的动密封设计是满足环境适应性的关键。上下舱门之间通过迷宫密封结构来实现动密封,下舱门和安装板之间通过滑动密封圈来实现动密封。舱门结构除导轨安装面为平面外,通光孔径可以实现随形设计。

2.3.2 光窗保护罩驱动力

驱动电机需要克服由外部负荷引起的摩擦扭矩 T_1 并抵抗外部负载以进行加速驱动所需的加速扭矩 T_2 。外部负荷包括光窗保护罩和空气阻力,极限情况下,滚珠丝杠垂直,承受全部重力。另外需要克服空气阻力。旋转扭矩 T_i 如下式所示:

$$T_i = k(T_1 + T_2) = k \left(\frac{(Mg + \frac{1}{2} C_\rho S v^2) u}{2\pi\eta} + \frac{2\pi N}{60t} \left(\frac{\pi Y}{32} D^4 l + M \left(\frac{s}{2\pi} \right)^2 \right) \right), \quad (5)$$

其中: k 为安全系数,选取 $k=2$; M 为光窗保护罩的重量; u 为滚珠丝杠的螺距; l 为滚珠丝杠的长度; η 为滚珠丝杠的机械效率,选取 $\eta=0.9$; D 为滚珠丝杠的丝杠轴外径; N 为电机转速; t 为加速时间。

光窗保护罩开关时间决定了光学载荷是否可以快速使用,开关时间的计算公式如下式所示:

$$t_0 = \frac{l}{\left(\frac{N}{n \times 60} \times u \right)}. \quad (6)$$

3 光学窗口的设计与分析

3.1 光学窗口设计输入条件

航空相机包含高光谱载荷和可见光载荷,高光谱载荷的应用可以实现对海洋等领域更好的探测^[10]。相关的指标输入如表2所示。

表 2 光学输入指标
Tab. 2 Optical input indexes

Item	Index
Optical band	400 nm~800 nm
Surface accuracy requirements	Equal thickness difference > 105 nm
Transmittance	> 97%
Maximum flight altitude	8 000 m
Pressure condition	2 atmospheres
Temperature condition	- 55 ℃~+ 70 ℃

3.2 光学窗口设计

根据设计输入条件,设计的气密光学窗口组件结构如图 5 所示。主要由载荷框架、光学窗口和光学窗口保护罩等组成。

航空相机工作于可见光谱段,根据表 1 所示,综合考虑经济性和加工难度,选用 BK7 玻璃作为光学窗口的材料。为了保证不遮挡载荷成像,在成像范围之外留有一定余量,两个窗口尺寸最终确定为 170 mm×184 mm 和 110 mm×154 mm。

光学窗口厚度按照极限条件来设计。玻璃窗口直径取高光谱成像仪方形窗口的对角线为 250 mm,光窗玻璃需能在外界 2 个大气压条件下正常工作,取光学窗口表面法向承受压差为 0.202 6 MPa;BK7 光学玻璃材料的断裂应力为 48 MPa。相关数据代入公式(1)可得到光学窗口的最小厚度值为 14.06 mm。结合制造工艺的合理性和结构尺寸空间排布,选取高光谱相机光学窗口和可见相机光学窗口的厚度均为 15 mm。光学窗口材料及尺寸参数见表 3。

确定光学窗口厚度后,计算压力作用下的窗口形变。BK7 玻璃窗口的折射率为 1.515($\lambda=632.8\text{ nm}$),弹性模量为 79 GPa。根据最大飞行高度为 8 000 m,大气压力为 0.036 MPa,光学窗口内侧为加压状态,取舱内压力值为常压值

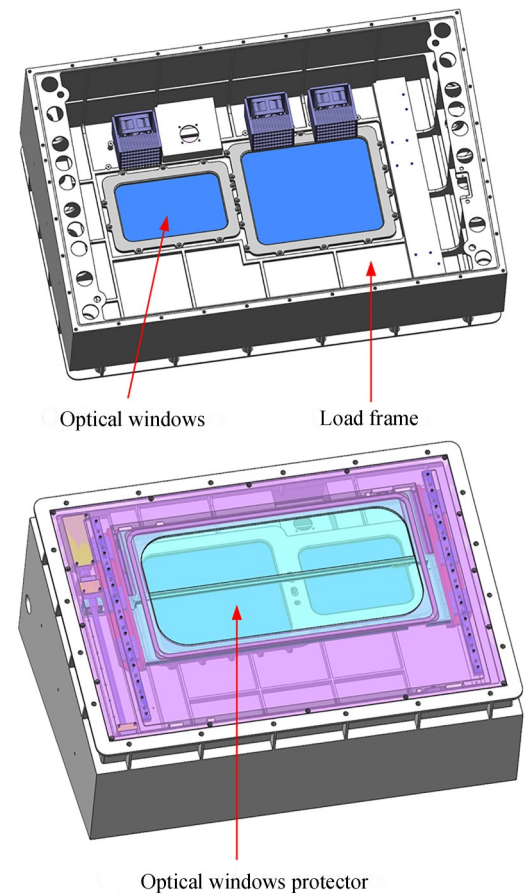


图 5 气密光学窗口组件结构示意图
Fig. 5 Schematic diagram of airtight optical window assembly structure

表 3 光学窗口材料及尺寸参数
Tab. 3 Optical window materials and size parameters

Item	Parameter	
Window name	Hyperspectral camera window	Visible light camera window
Window material	BK7	BK7
Optical aperture	145 mm×159 mm	92 mm×128 mm
Window size	170 mm×184 mm	118 mm×154 mm
Thickness	15 mm	15 mm

0.1 MPa, 光学窗口表面法向承受压差为 0.064 MPa。根据公式(2)计算得窗口形变带来的光程差为 0.972 nm, 优于 105 nm。

BK7 材料的体吸收系数为 $1.72 \times 10^{-3} \text{ cm}^{-1}$, 代入公式(3)计算得到窗口的体透过率为 99.7%, 结合镀膜的膜层透过率, 计算得窗口的平均透过率为 97.3% (400 nm~900 nm), 满足指标要求。

稳定平台框架结构为铝合金材料, 线膨胀系数为 $23.6 \times 10^{-6} \text{ K}^{-1}$ 。BK7 材料的线膨胀系数为 $7.5 \times 10^{-6} \text{ K}^{-1}$ 。代入式(4)计算得到硅橡胶的最小厚度 $d_r = 0.3 \text{ mm}$, 综合考虑硅橡胶圈的成形工艺和装配难度, 取硅橡胶的厚度为 2.5 mm。气密光学窗口组件安装后, 在所有螺钉位置注胶, 保证螺钉位置的气密性。

3.3 光学窗口工程分析

相机工作时光学窗口暴露在外界低温低压的环境中, 而舱内常温常压, 导致光学窗口承受较大的内外压差和温度梯度。组件中所用的光学窗口 BK7 玻璃材料属于脆性材料, 在压力作用下, 气密光窗由于尺寸较大, 高空飞行过程中内外压差会对气密光窗面形造成一定影响, 可能发生塑性变形, 光学玻璃表面变形会导致光学性能下降, 变形严重时甚至会损坏光学玻璃, 当光学

玻璃表面塑性变形小于压力引起的变形时, 其表面就会出现裂纹或者断裂。为了保证相机能安全工作, 要求光学窗口必须具有一定的刚度和强度, 能承受压差和温度梯度的影响。因此对光学窗口进行强度分析十分必要。

通过 Hypermesh 软件对光学窗口组件进行有限元网格划分, 光学窗口组件的有限元网格模型如图 6 所示。根据实际安装情况, 在分析时对上安装座的安装位置进行三自由度全约束。

光学窗口结构的材料性能如表 4 所示。

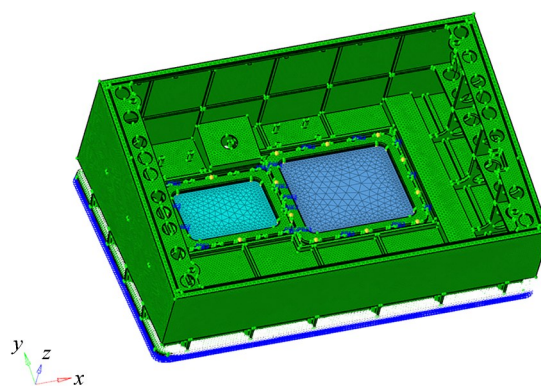


图 6 气密光窗组件有限元网格模型

Fig. 6 Finite element mesh model of airtight optical window assembly

表 4 光学窗口组件材料属性表

Tab. 4 Material attribute of optical window Assembly

Material	Elastic modulus /MPa	Poisson's ratio	Linear expansion coefficient /(10^{-6} K^{-1})	Position
BK7	79200	0.21	7.5	Window
Silicone Rubber	11.52	0.4	690	Rubber band
7A09	71000	0.33	23.6	Mounts and window glands

3.3.1 载荷工况

光窗气密承载不小于 2 个标准大气压, 则光学窗口表面法向承受压差为 0.2 MPa, 光学窗口重力方向为光学表面法向方向, 分析光窗组件在 1g 向下重力和 0.2 MPa 压差共同作用下的变形情况和应力分布。

当载荷处于工作状态时, 飞行高度为 8 000 m, 大气压力为 0.036 MPa, 光学窗口同时受到

压差、重力和温度变化的影响。分析光学窗口组件在 1g 向下重力、内外压差 0.064 Mpa 和低温温度 $-55 \text{ }^{\circ}\text{C}$ 共同作用下的变形情况和应力分布。

3.3.2 分析计算结果

利用 optistruct 进行求解计算。光学窗口组件窗口玻璃的最大变形数值结果和最大 Mises 应力数值结果均列于表 5 中。载荷工况 a 时, 可见

光相机窗口玻璃出现最大应力点,皆出现在窗口胶圈边缘处。仿真分析结果表明,光窗中光学窗口玻璃所受最大应力 10.97 MPa 小于 BK7 玻璃的弯曲强度 93.8 MPa,光学窗口可以安全工作^[11]。载荷工况 a 时,可见光相机窗口玻璃的变形云图和应力云图如图 7 所示。

表 5 不同工况下窗口玻璃和壳体的仿真分析结果

Tab. 5 Simulation analysis results of window glass and structure under different working conditions

Load case	Hyperspectral camera window		Visible light camera window	
	Maximum stress/MPa	Maximum deformation/mm	Maximum stress/MPa	Maximum deformation/mm
a	7.55	1.53	10.94	1.61
b	3.19	0.30	2.97	0.27

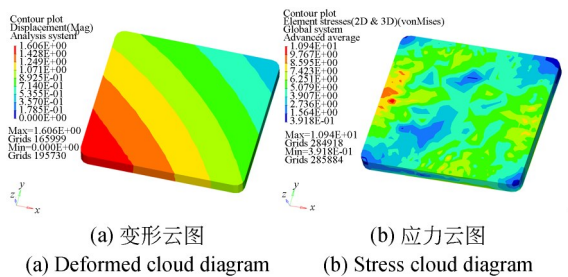


图 7 可见光相机窗口玻璃的分析结果
Fig. 7 Analysis results of visible light camera window glass

3.4 光学窗口压力试验

对光学窗口开展水压试验,验证组件的抗静压破坏强度。在气密光窗组件的载荷框架上加盖密封盖,密封盖与载荷框架通过密封条密封,密封盖上有入水/出水接口和压力测试仪器接口。光学窗口压力试验如图 8 所示,压力测试仪器采用 F-98 压力表,如图 8(a)所示。为了排除水重力对光学窗口的影响因素,测试时,光学窗口水平向上放置,密封盖向下,向载荷框架中加水直至载荷框架中充满水。此时水对窗口施加均布向上的压力,当压力达到 0.2 MPa 后,立即

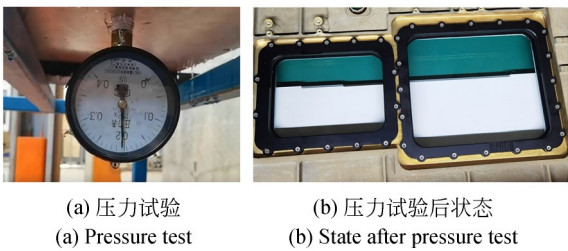


图 8 光学窗口压力试验
Fig. 8 Pressure test of optical window

释放,减压排水。试验后,观察光学窗口,窗口玻璃完好,表面无明显划痕、裂膜和腐蚀,表面清洁无异物。试验完成后的光学窗口内侧结构如图 8 (b)所示。试验证明光学窗口设计合理,能够满足指标要求。

3.5 光窗保护罩设计

光窗保护罩采用模块化设计,位于光学窗口外侧,用于对光学载荷和光学窗口的保护。根据方法论,确定了光窗保护罩的结构形式,整个厚度仅为 37 mm。光窗保护罩如图 9 所示。

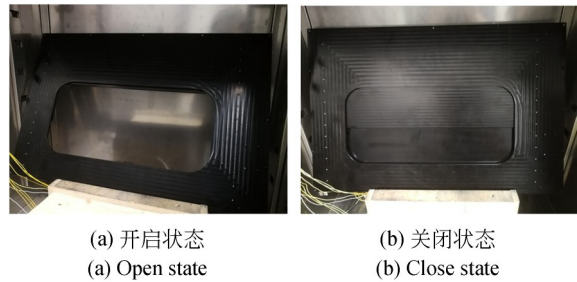


图 9 光学窗口保护罩
Fig. 9 Optical window protector

根据公式(5)确定电机的力矩,即电机输出端力矩需要大于 0.012 N·m。电机采购福尔哈贝直流电机,减速比为 18:1,经减速箱后输出力矩为 0.086 N·m。最大电机转速为 11 000 r/min,根据公式(6)计算得光窗保护罩打开关闭理论时间为 7.42 s,能够满足光窗保护罩开合单次时间小于 30 s 的指标要求。电机由机械件密封防尘安装,电机电源出线孔通过注胶密封,保证工作

环境密闭。

3.6 光窗保护罩测试

对光窗保护罩进行了单次开启或关闭时间实际测试,经过测试,光窗保护罩在20℃环境下,开启/关闭时间为7.7 s。导轨和滚珠丝杠涂低温润滑脂,保证航空光电平台在飞行过程中正常工作。对光窗保护罩组件进行了高低温启动测试。高温70℃条件下,光窗保护罩能够满足正常启动要求。低温-55℃环境下光窗保护罩开启/关闭时间为10.4 s,这是由于低温润滑脂在低温状态下引起摩擦力增大。对光窗保护罩进行了低温连续工作、常温连续工作和高温连续工作测试,工作稳定无故障。

4 结 论

光学窗口保证了航空相机对外成像的稳定性和成像精度。光学窗口的设计和保护对航空相机至关重要。本文对强压力下的气密光学窗口的结构设计进行了理论分析,避免了光学窗口设计的盲目性。经过压力测试,光学窗口能在2个大气压下正常工作。为了保护光学窗口,设计了光学窗口保护罩,实现了非工作状态下对光学窗口的保护。光学窗口保护罩采用双层舱门结构,实现了系统的小型化,整个厚度仅为37 mm,开启/关闭时间为7.7 s,整个系统能够满足在航空振动与高低温等恶劣环境中工作的要求。本文的研究为航空光学窗口的设计和保护提供了相关的设计流程和方法。

参考文献:

- [1] 田大鹏, 邵晓鹏. 航空光学成像与测量技术新进展[J]. 光学精密工程, 2020, 28(6): 1221-1225.
TIAN D P, SHAO X P. New emerging technologies in airborne optical imaging and measurement [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2020, 28(6): 1221-1225. (in Chinese)
- [2] ZHANG G P, YANG H T, MEI C, *et al.* Thermal/structural/optical integrated design for optical sensor mounted on unmanned aerial vehicle [C]. *Proc SPIE 9796, Selected Papers of the Photoelectronic Technology Committee Conferences Held November*, 2015, 9796: 712-720.
- [3] 潘虹宇, 李佳奇, 陈学, 等. 具有复杂围护结构光学窗口的传热特性分析[J]. 宇航学报, 2021, 42(10): 1327-1334.
PAN H Y, LI J Q, CHEN X, *et al.* Analysis of heat transfer characteristics of optical window with complex envelopment [J]. *Journal of Astronautics*, 2021, 42(10): 1327-1334. (in Chinese)
- [4] 张庆鹏, 谭毅, 任戈, 等. 大口径光学窗口结构及支撑技术[J]. 强激光与粒子束, 2018, 30(12): 19-25.
ZHANG Q P, TAN Y, REN G, *et al.* Technology for the structure and supporting form of large aperture optic window [J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2018, 30(12): 19-25. (in Chinese)
- [5] 李延伟, 张洪文, 远国勤, 等. 高空分段拼装式光学窗口防护装置的设计[J]. 光学精密工程, 2014, 22(3): 664-669.
LI Y W, ZHANG H W, YUAN G Q, *et al.* Design of protector for altitude sub-assembled optical window [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2014, 22(3): 664-669. (in Chinese)
- [6] 徐明林, 解鹏. 空间环境模拟系统光学窗口组件设计[J]. 红外与激光工程, 2014, 43(S1): 30-35.
XU M L, XIE P. Design for optical window in space environment simulation system [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2014, 43(S1): 30-35. (in Chinese)
- [7] TAHIR A M, PRIYANTO I, ARIFIN B, *et al.* Optical window design for MWIR camera [J]. *Journal of Physics: Conference Series*, 2018, 1130: 012021.
- [8] IHRACSKA B, CROOKES R J, MONTALVÃO D, *et al.* Opto-mechanical design for sight windows under high loads [J]. *Materials & Design*, 2017, 117: 430-444.
- [9] 孙冬明, 潘栋, 刘宏旭, 等. 胶层厚度对多点支撑光窗面形的影响[J]. 激光与红外, 2021, 51(4): 480-485.
SUN D M, PAN D, LIU H X, *et al.* Influence of adhesive layer thickness on surface shape of multi-point supported light window [J]. *Laser & Infrared*, 2021, 51(4): 480-485. (in Chinese)
- [10] 李颐, 刘伟, 张晓辉, 等. 机载光谱仪高模态主支

撑结构优化[J]. 光学精密工程, 2019, 27(8): 1783-1792.

LI Y, LIU W, ZHANG X H, *et al.* Optimized design of high-mode main support structure for airborne spectrometer [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2019, 27(8): 1783-1792. (in Chinese)

[11] 兰敬高, 杨觉明, 韩美康. 热处理与化学强化对

K9 光学玻璃强度的影响[J]. 西安工业大学学报, 2015, 35(2): 142-146, 151.

LAN J G, YANG J M, HAN M K. Effect of heat treatment and chemical tempering process on the strength of K9 optical glass [J]. *Journal of Xi'an Technological University*, 2015, 35(2): 142-146, 151. (in Chinese)

作者简介:



谭淞年(1989—),男,吉林通化人,硕士,助理研究员,2012年、2014年于哈尔滨工业大学分别获得学士、硕士学位,主要从事增材制造和航空成像与测量等方面的研究。E-mail: tansongnian@126.com



姚 园(1986—),男,安徽铜陵人,副研究员,2011年于哈尔滨工业大学获得硕士学位,主要从事航空光学成像仿真及光学系统设计等方面的研究。E-mail: yaoy@ciomp.ac.cn