

航空遥感器光学窗口光机热一体化设计

李延伟^{1,2}, 杨洪波³, 程志峰¹, 丁亚林¹, 张洪文¹, 张景国¹

(1. 中国科学院航空光学成像与测量重点实验室 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. 中国科学院研究生院, 北京 100049; 3. 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: 为减小光学窗口对航空光学遥感器成像质量的影响, 对光学窗口的窗口玻璃厚度进行了优化设计。根据强度理论确定了窗口玻璃最小厚度。依据纵掠平壁理论计算出光学窗口外表面的平均对流换热系数; 以热光学为基础, 仿真了航摄时光学窗口的瞬态温度场分布; 计算了光学窗口在热-力耦合作用下不同窗口玻璃厚度时的波像差(PV 和 RMS), 最终确定了矩形光学窗口(290 mm×140 mm)的玻璃厚度为 17 mm。试验结果表明: 特征频率为 60 lp/mm 时光学系统传递函数为 0.304, 并获得了稳定、清晰的航摄图像。成功实现了光学窗口的光机热一体化设计, 可为其他航空光学窗口设计提供参考。

关键词: 光学窗口; 对流换热; 热力耦合; 光机热一体化

中图分类号: TP73 **文献标志码:** A **文章编号:** 1007-2276(2012)08-2102-05

Thermal/structural/optical integrated design for optical window in aerial remote sensor

Li Yanwei^{1,2}, Yang Hongbo³, Cheng Zhifeng¹, Ding Yalin¹, Zhang Hongwen¹, Zhang Jingguo¹

(1. Key Laboratory of Airborne Optical Imaging and Measurement, Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun 130033, China; 2. Graduate University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China; 3. Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun 130033, China)

Abstract: In order to reduce the influence of optical window on imaging quality in aerial remote sensor, the optical window was optimized in glass thickness. The minimum thickness of optical window glass was calculated with strength theory. The convection heat transfer coefficient on outer surface of optical window glass was calculated with the theory of longitudinally sweeping plan mural. Based on the thermal optical analysis, transient state temperature field was emulated, and the optical path in peak to valley value (PV) and root mean square (RMS) error were calculated under the thermal-force coupling condition. Thickness of the optical window (290 mm×140 mm) was determined as 17 mm. The result of practical application shows that the MTF is 0.304 when the characteristics frequency is 60 lp/mm and the stable and distinct image is obtained. The study result shows that thermal/structural/optical integrated design for

收稿日期: 2011-12-20; 修订日期: 2012-01-19

基金项目: 国防预研项目(ZJ99130B)

作者简介: 李延伟(1983-), 男, 博士生, 主要从事航空遥感器结构设计方面的研究。Email: yanwei201314@163.com

导师简介: 杨洪波(1963-), 男, 研究员, 主要从事光机电集成计算机辅助工程技术的研究。Email: yanghb@vip.163.com

optical window is achieved successfully, and it provides a reference for the optical window design.

Key words: optical window; convection heat transfer; thermal-force coupling; thermal/structural/optical integrated

0 引言

光学窗口作为航空遥感器对地观测的重要组成部分,为航空遥感器拍照提供了光学接口,并应满足相应视场要求。在航摄拍照时,成像光线通过光学窗口进入光学系统成像在 CCD 焦平面上。由于光学窗口直接暴露在复杂环境中,窗口玻璃承受着来自加速度、压力、热等因素的影响,产生变形及温度梯度。当平面光波通过有温度梯度的光学窗口时会产生波面畸变,将直接影响航空遥感器的成像质量,降低分辨率。从光学窗口的强度分析,要求窗口玻璃具有足够的厚度;而从热光学方面分析,窗口玻璃厚度太大会加重由温度场引起的折射率梯度变化和热变形,降低光学窗口的光学性能。因此,对光学窗口进行光机热设计显得尤为重要。

在已报道的文献中,赵立新等针对空间相机光学的窗口^[1],分析了由温度引起的光学波像差;丁延卫等分析了空间光学窗口的热光学灵敏度^[2],并着重分析了径向和轴向温度的影响;James.I.Gimlet 系统地分析了空间窗口的热光学性能,还用波相差评价了系统的成像质量^[3]。对光学窗口光机热一体化设计^[4]的研究相对较少。

文中结合某光学窗口,根据强度理论得到窗口玻璃的最小厚度值。计算了航摄时光学窗口外表面的平均对流换热系数,利用 I-DEAS TMG 软件仿真了瞬态温度场分布,计算出最大温差时,热力学耦合作用下不同窗口玻璃厚度时的波像差(PV 和 RMS),分析了光学窗口变形对光学系统传递函数的影响,并最终确定了窗口玻璃的合理厚度。

1 光学窗口结构方案

光学窗口作为零光焦度的光学元件,对形变要求严格,因为形变会引入光学像差,影响光学系统的传递函数。根据航空遥感器外形尺寸的要求,窗口采用 3 块窗口玻璃拼接方式,如图 1 所示。

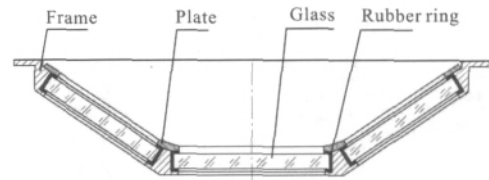


图 1 光学窗口结构方案图

Fig.1 Structure of optical window

2 窗口玻璃的最小厚度

窗口玻璃受到压力作用时会使通过窗口的光波产生误差。当光学窗口玻璃没有足够的塑性变形时,表面会出现裂纹或断裂,损坏窗口。因此,需要对窗口进行强度分析,以确定可靠的窗口玻璃厚度。简单支撑的矩形窗口所需的最小厚度^[5]为:

$$h=b\left\{\frac{\Delta p}{\sigma_F}\frac{3}{4[1+2(b/l)^3]}\right\}^{1/2}$$

式中: Δp 为窗口内外表面的压力差,为确保窗口玻璃的可靠性,取 Δp 为一个大气压; σ_F 为窗口材料的折断应力,窗口玻璃材料为 K9, $\sigma_F=28.5$ MPa; b 为窗口宽度, $b=140$ mm; l 为窗口长度, $l=290$ mm。通过计算可得:在仅考虑压力的情况下,窗口玻璃的最小厚度约为 8 mm。

3 光学窗口的热力耦合分析

首先确定光学窗口所处的外界热环境,依据纵掠平壁理论,计算出光学窗口外表面的平均对流换热系数,运用 I-DEAS TMG 软件仿真出光学窗口的瞬态温度场分布;然后将温度场加载到力学环境(压力及加速度 3 g)中进行热弹性分析,得到不同厚度下光学窗口的变形值;最后采用 Zernike 多项式作为基底函数进行曲面拟和的方法进行接口转化,输入光学设计软件 Code V 中进行光学评价^[6-7]。

3.1 热环境分析

航空遥感器光学窗口的热环境主要由外部环境(飞行高度和速度决定)和遥感器内部环境构成。航摄高度为 20 km,空气温度 $T=-56.5$ °C;内部环境为恒温($T=20$ °C)。光学窗口热环境示意图。窗口玻璃与外

部环境进行辐射和对流形式的换热;同时,窗口玻璃通过橡胶层与窗口框架存在热传导。

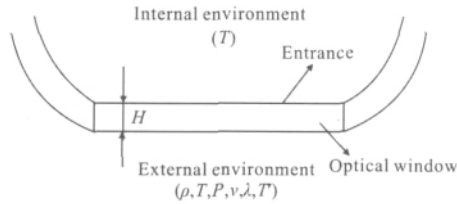


图 2 光学窗口热环境示意图

Fig.2 Schematic diagram of the optical window thermal environment

空气纵掠窗口时的对流传热属于流体外掠物体时的强迫对流传热,可按纵掠平壁理论计算窗口玻璃的平均对流传热系数^[8-9]。根据边界层理论,层流处及紊流处的对流换热系数可分别由努赛尔准则确定:

层流状态

$$Nu = \frac{h_x x}{\lambda} = 0.332 Re^{1/2} Pr^{1/3} \quad (Re < 5 \times 10^5, 0.6 < Pr < 50)$$

紊流状态

$$Nu = \frac{h_x x}{\lambda} = 0.0296 Re^{4/5} Pr^{1/3} \quad (Re > 5 \times 10^5, 0.6 < Pr < 50)$$

雷诺数计算公式为:

$$Re = \frac{vl}{\nu}$$

式中: h_x 为对流传热系数; Pr 为普朗特数,取 $Pr=0.76$; λ 为空气导热系数,取 $\lambda=0.02 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$; ν 为空气运动速度,设飞行相对空气速度为 280 m/s ; ν 为空气运动黏度,对流层 20 km 处, $\nu=1.610 \times 10^{-14} \text{ m}^2/\text{s}$ 。将数值代入,可知雷诺数:

$$Re = \frac{vl}{\nu} = 6.8 \times 10^5$$

在流体外掠平板情况下,一般取临界雷诺数 $Re > 5 \times 10^5$ 作为发生紊流的判据;可知窗口前部为层流,后部为湍流。依据边界层理论,复合边界层平均对流传热系数为:

$$h = \frac{1}{l} \left[\int_0^{x_c} h_x dx + \int_{x_c}^l h_x dx \right] = 0.037 \frac{\lambda}{l} (Re^{0.8} - 23500) Pr^{1/3}$$

代入数值可知,窗口外表面的平均对流传热系数:

$$h = 39.6 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$$

3.2 温度场分布

通过 I-DEAS TMG 软件建立光学窗口的热模

型,将相关参数输入,计算了窗口玻璃厚度 $8 \sim 32 \text{ mm}$ 、步长 3 mm 、共 9 组光学窗口 2 h 内的瞬态温度分布。表 1 为不同厚度下窗口玻璃的最大温差值。

表 1 不同厚度下窗口玻璃的最大温差值

Tab.1 Max temperature difference in different glass thickness

Glass thickness/mm	Max difference in temperature/ $^{\circ}\text{C}$
8	15.1
11	16.5
14	18.2
17	19.5
20	20.4
23	21.5
26	23.2
29	25.4
32	27.5

由表 1 可知,光学窗口的最大温差随着厚度的增加而增大,最小温差发生在厚度为 8 mm 时, $\Delta T_{\max} = 15.1^{\circ}\text{C}$ 。图 3 为厚度为 8 mm 、 15 min 时的温度分布。

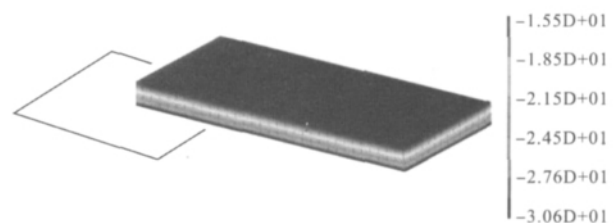


图 3 厚度为 8 mm 、 15 min 时的温度分布

Fig.3 Temperature field in fifteen minute when the thickness of glass is 8 mm

由图 3 可知, 15 min 时光学窗口的轴向温度梯度(厚度方向的线性温度梯度)为 $-15.5^{\circ}\text{C} - (-30.6^{\circ}\text{C}) = 15.1^{\circ}\text{C}$,这会使窗口变为球形,影响光学窗口面型^[10]。

3.3 热力耦合分析

将最大温差时的温度场分布结果作为结构分析的载荷,与力学载荷一起加载,进行结构响应求解,可以得到光学窗口的位移场分布,最后得到变形结果,进行 Zernike 多项式拟合,去除刚体位移,计算出光学窗口的面型值,如表 2 所示。

表 2 不同厚度下热力耦合作用下光学窗口面型值

Tab.2 Value of PV and RMS in different glass thickness

Glass thickness/mm	PV/nm	RMS/nm
8	69.9	17.3
11	63.4	13.6
14	51.7	11.6
17	45.6	10.5
20	47.5	10.9
23	49.5	11.3
26	53.7	12.8
29	56.7	13.2
32	62.8	13.5

由表 2 可知,厚度为 17 mm,光学窗口具有最小面型值:PV=45.6 nm,RMS=10.5 nm;厚度为 8 mm,光学窗口具有最大面型值:PV=69.9 nm,RMS=17.3 nm。用变形结果对光学系统 Code V 模型进行修正,得到变形后的光学系统,进行光学性能分析,得到变形后窗口玻璃厚度为 17 mm 时光学系统传递函数如图 4 所示。

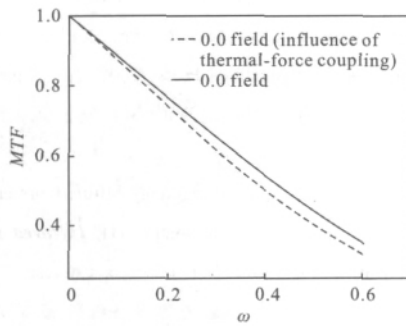


图 4 不同厚度下对光学传递函数的影响
Fig.4 MTF in the different glass thickness

由图 4 可知,在特征频率为 60 lp/mm($\omega=0.6$),由光学窗口变形导致光学系统传递函数下降的最大值为:0.356-0.320=0.036。依据热力耦合分析结果,根据误差分配原则,由热控引起的波形差应控制在 λ 以内($\lambda=632.8\text{nm}$),结合质量及加工工艺要求,最终选择窗口玻璃的厚度为 17 mm。

4 试验

为检验该设计方法的可行性,验证分析结果的

正确性,根据分析计算结果,加工制造出厚度为 17 mm 的窗口玻璃,如图 5 所示。将加工制造的窗口玻璃装配于航空遥感器,并放置于高低温箱中,模拟航空遥感器航摄时所处的压力和热环境,得到热力耦合作用下的光学传递函数,结合实际飞行试验结果验证分析结果的正确性。

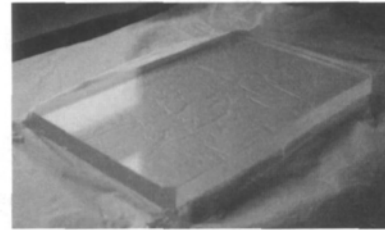


图 5 光学窗口玻璃
Fig.5 Glass of optical window

4.1 热试验

航空遥感器热试验装置如图 6 所示。将航空遥感器放置于高低温箱内,航空遥感器内部保持 20℃ 恒温环境,并模拟出航摄时所处的压力和热环境,对遥感器光学系统进行传递函数测试。当特征频率为 60 lp/mm 时,光学系统传递函数为 0.304,与仿真结果(0.320)基本一致,且满足 $MTF>0.3$ 的光学设计要求。

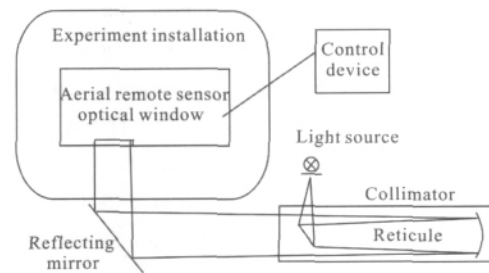


图 6 热试验装置图
Fig.6 Device of thermal test

4.2 飞行试验

将加工好的窗口玻璃安装在航空遥感器光学窗口框架中,经过试飞,光学窗口稳定,无任何故障,并获得了稳定清晰的航摄图像,如图 7 所示。

由图 7 可知,航摄图像均匀性良好、清晰度高,说明光学窗口满足光学系统成像质量要求,热力耦合分析结果正确,光学窗口厚度合理。



图 7 航拍图像

Fig.7 Image gained by aerial remote sensor

5 结 论

针对某航空遥感器中的光学窗口,以强度分析和热光学为基础,优化设计了窗口玻璃厚度,计算出既满足强度要求,又满足光学设计要求的玻璃厚度,实现了光学窗口光机热一体化设计。试验结果表明:该设计方法正确,获得了稳定、清晰的航摄图像,解决了此类设计问题的盲目性,可以作为光学窗口理论研究与实践的参考。

参考文献:

- [1] Zhao Linxin. Thermal-optical evaluation to optical windows of space camera [J]. *Acta Optica Sinica*, 1998, 18(10): 1440-1444. (in Chinese)
赵立新. 空间相机光学窗口的热光学评价[J]. *光学学报*, 1998, 18(10): 1440-1444.
- [2] Ding Yanwei, Han Shuangli, Li Jihui. Analysis for thermo-optical sensitivity of space optical window [J]. *Opt-Electronic Engineering*, 2002, 29(3): 15-18. (in Chinese)
丁延卫, 韩双丽, 李积慧. 空间光学窗口的热光学灵敏度分析[J]. *光电工程*, 2002, 29(3): 15-18.
- [3] Perry J M. Proc Phys[M]. London: Soc, 1943: 257-285.
- [4] Dong Bing, Yu Xin, Zhang Xiaofang, et al. Thermal - structural - optical integrated analysis of segmented space telescope [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2009, 38(2): 326-329. (in Chinese)
董冰, 俞信, 张晓芳, 等. 分块式空间望远镜的光机热集成分析[J]. *红外与激光工程*, 2009, 38(2): 326-329.
- [5] Barens W P, Jr. Some effects of aerospace thermal environments on high-acuity optical systems [J]. *Applied Optics*, 1966, 5(5): 671-675.
- [6] Zhang Liang, Liu Hongxia. Optical system design of long wave infrared zoom lens [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2011, 40(7): 1279-1281. (in Chinese)
张良, 刘红霞. 长波红外连续变焦光学系统的设计 [J]. *红外与激光工程*, 2011, 40(7): 1279-1281.
- [7] Yang Lihua, Fan Xuewu, Zou Gangyi, et al. Optical design of visible/infrared integrative camera [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2011, 40(10): 1992-1996. (in Chinese)
杨利华, 樊学武, 邹刚毅, 等. 可见光、红外一体化两用相机的光学设计 [J]. *红外与激光工程*, 2011, 40(10): 1992-1996.
- [8] Wu Xuefeng, Ding Yalin, Wu Qingwen. Thermal design for near space optical remote sensor [J]. *Opt Precision Eng*, 2010, 18(5): 1159-1165. (in Chinese)
吴雪峰, 丁亚林, 吴清文. 临近空间光学遥感器热设计 [J]. *光学精密工程*, 2010, 18(5): 1159-1165.
- [9] Qian Yiji. Aerodynamics [M]. Beijing: Beijing University of Aeronautics and Astronautics Press, 2009. (in Chinese)
钱翼稷. 空气动力学[M]. 北京:北京航空航天大学出版社, 2009.
- [10] Zhang Xinde, Liu Lin, Li Ronggang. Infrared optical window for airborne photoelectric equipments [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2010, 39(4): 601-606. (in Chinese)
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.