

# 高空高速航空相机光学窗口的热光学分析

石进峰<sup>1,2</sup> 吴清文<sup>1</sup> 张建萍<sup>3</sup> 黄 勇<sup>1</sup> 杨献伟<sup>1</sup> 丁亚林<sup>4</sup>

<sup>1</sup> 中国科学院长春光学精密机械与物理研究所 空间光学研究一部, 吉林 长春 130033

<sup>2</sup> 中国科学院研究生院, 北京 100049

<sup>3</sup> 中国科学院长春光学精密机械与物理研究所光学系统先进制造技术中国科学院重点实验室, 吉林 长春 130033

<sup>4</sup> 中国科学院长春光学精密机械与物理研究所航空成像与测量技术研究部, 吉林 长春 130033

**摘要** 分析航空相机光学窗口的热光学特性, 选定熔石英作为窗口玻璃的材料, 将热流密度加权分配到窗口外表面各个区域, 并考虑整个窗口玻璃的辐射来计算其在一个工作循环内的温度分布。高空高速飞行时, 气动热使窗口外表面的温度急剧上升, 由于熔石英的导热率很小, 窗口产生很大的轴向温差, 分别取轴向温差 55 °C, 70 °C 和 90 °C 时的工况计算窗口热变形; 光学窗口内、外表面的变形规律为近似球面, 计算了其近似曲率半径, 计算由面形变化和折射率变化引起的光程差并转化为 Zernike 多项式; 将 Zernike 多项式系数带入 Code V 中考核窗口玻璃的光学性能, 得到波像差变化量, 其像面离焦量为 -0.114 mm, 调制传递函数的下降最大值小于 0.01。结果表明, 光学窗口满足光学性能的要求。

**关键词** 光学设计; 光学窗口; 热变形; Zernike 多项式; 波像差

**中图分类号** V416.5 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/AOS201232.0422004

## Thermal-Optical Analysis for Optical Window of High-Altitude and High-Speed Aerial Camera

Shi Jinfeng<sup>1,2</sup> Wu Qingwen<sup>1</sup> Zhang Jianping<sup>3</sup> Huang Yong<sup>1</sup> Yang Xianwei<sup>1</sup> Ding Yalin<sup>4</sup>

<sup>1</sup> *The First Research Department of Space Optics, Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun, Jilin 130033, China*

<sup>2</sup> *Graduate University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China*

<sup>3</sup> *Key Laboratory of Optical System Advanced Manufacturing Technology, Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun, Jilin 130033, China*

<sup>4</sup> *Research Department of Airborne Imaging and Measurement Techniques, Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun, Jilin 130033, China*

**Abstract** Thermal-optical properties of optical window in complex environment are analyzed. From the perspective of considering thermal deformation of optical window, fused silica is selected for material of the window. In order to calculate temperature distribution of optical window within a work cycle, heat flux is assigned on a scale of weight to outer surface of the window and radiation of the window is taken into account. Carrier of the window is an unmanned aerial vehicle with high-altitude and high-speed. Temperature of the window's external surface increases sharply due to the aerodynamic heating that generated during the high-speed flight. Since thermal conductivity of fused silica is very small, a great axial temperature difference produces at the window. Heat deformation of the optical window is calculated when axial temperature difference is 55 °C, 70 °C and 90 °C, respectively. Radiuses of curvature of internal and external surface of optical window are obtained approximately by rules of its deformation. Optical path difference caused by the deformation of the surface shape and refractive index changes is analyzed. Zernike polynomial coefficients are fitted. Finally, the Zernike polynomials are put into the Code V to assess the optical

**收稿日期**: 2011-09-15; **收到修改稿日期**: 2011-11-25

**基金项目**: 国家重大工程资助课题。

**作者简介**: 石进峰(1986—), 男, 博士研究生, 主要从事空间光学遥感器热设计及力学分析等方面的研究。

E-mail: jfshi2009@163.com

**导师简介**: 吴清文(1968—), 男, 博士, 研究员, 主要从事光学精密仪器 CAD/CAE 和空间光学遥感器热控技术等方面的研究。E-mail: wuqw@ciomp.ac.cn

properties of window glass. With the introduction of wave-front aberration, change of defocus is  $-0.114$  mm and maximum decline value of modulation transfer function (MTF) is less than 0.01. The results show that the optical window meets optical performance requirements.

**Key words** optical design; optical window; heat deformation; Zernike polynomial; wave-front aberration

**OCIS codes** 110.6820; 220.4830; 350.6090

## 1 引 言

光学窗口作为零光焦度的光学元件,是空间遥感器光学系统中最简单的元件,工作期间其外表面将受到复杂的空间外热流的影响。光学窗口起着减小外部空间热环境对相机的影响以及透光、防污染等作用,由于窗口玻璃的热传导系数较小,热交换的不均匀性使光学窗口产生较大的非轴对称温度梯度,它导致玻璃材料的折射率发生变化,还会因不均匀热膨胀而使窗口面形发生变化,光学窗口的光学性能直接关系到空间相机的成像质量<sup>[1~3]</sup>。文献[1]分析了不同厚度的光学窗口的径向温度分布以及窗口在压差作用下的变形,使光学窗口的设计更加的合理可靠。文献[4]通过计算说明了光学窗口温度计算时必须考虑其内部的辐射,分析了轴向折射率梯度的变化对光强分布和像偏移的影响,对窗口气动光学效应的控制和校正提出了合理的建议。文献[5]介绍了单独的轴向温差、径向温差对光学窗口的影响。文献[6]计算了系统波像差对光学窗口周向温差、轴向温差和径向温差的灵敏性,为光学窗口的热设计提供依据。

本文中航空相机载体无人机的飞行高度为 30 km,处在平流层,空气密度仅为  $0.018$  kg/m<sup>3</sup>,对流换热较小。无人机的飞行速度约为 3 Ma,其高速飞行产生气动热,使光学窗口外表面受到较大的外热流影响,且高速飞行加强了对流换热,光学窗口外表面温度急剧上升且有明显的径向温差,内、外表面也产生很大的轴向温差,其影响有:1)较高的轴向温度梯度直接影响光线的透射率;2)光学窗口温度升高导致热应力产生,应力的存在将导致窗口玻璃的折射率发生变化,即产生弹光效应<sup>[7]</sup>;3)外表面径向温差使窗口玻璃产生轴向变形。

光学元件特别是透镜对温度梯度很敏感<sup>[8]</sup>,文中光学窗口的轴向和径向均有较大的温差,且温差无规律,其最大轴向温差为  $90$  °C。前文文献中提到的窗口的轴向温差均小于  $10$  °C,且轴向变形值以及峰谷值(PV)和均方根(RMS)都很接近设计要求,而本文光学窗口的轴向变形值数量级为几十微米、计算所得峰谷值和均方根与设计要求的相差很远,这样利用文献中的方法进行光学性能的分析时有局限

性。针对这种情况,在计算 Zernike 多项式时用光程差代替窗口的轴向变形值,在进行光学性能分析时引入折射率对波前的影响。结果显示,光学窗口在经受热荷载过程中需要进行系统调焦。

## 2 光学窗口结构组成

光学窗口玻璃的周边用胶圈密封,上部用压盖压紧,其结构组成如图 1 所示。

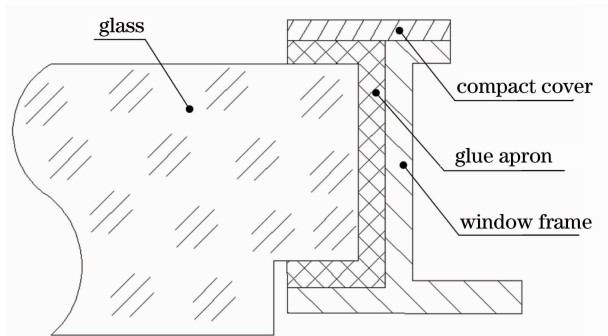


图 1 光学窗口结构图

Fig. 1 Structure of optical window

温度场按分布的不均匀性分为轴向温度场和径向温度场,由轴向温差引起的窗口变形如图 2 所示。径向温度梯度分布会改变光学元件的面型和曲率半径,当中心温度低于边缘温度,则产生“翘边”,如图 3(a)所示;当中心温度高于边缘温度,则产生“塌边”,如图 3(b)所示,这一温度效应称为边缘效应。

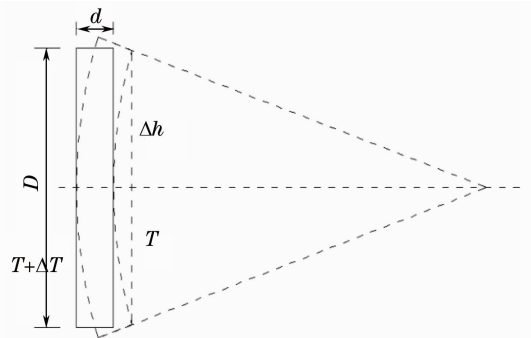


图 2 轴向温差引起的平板形变

Fig. 2 Flat deformation caused by axial temperature difference

光学窗口玻璃的材料选择对其经受外部环境而

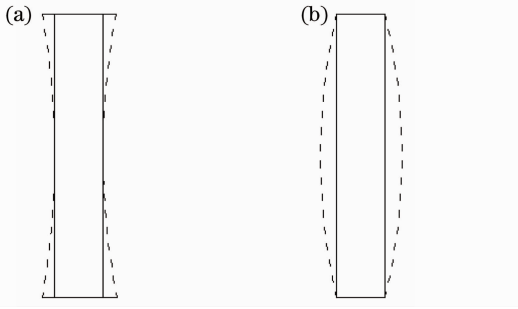


图3 径向温差引起的平板形变

Fig. 3 Flat deformation caused by radial temperature difference

变形有很大的影响。对于既有轴向温差又有径向温差的窗口,其材料的选择原则为:1)定义线胀系数与热导率之比称为材料的热畸变参数。轴向温度梯度引起畸变时,热畸变参数应尽可能小<sup>[9]</sup>。2)当有边缘效应存在时,马克苏托夫给出了一个经验公式:

表1 窗口玻璃材料参数

Table 1 Material properties of window glass

Material	Elastic modulus	Density / (kg/m <sup>3</sup> )	Specific heat capacity / (J/kg·°C)	Linear expansion coefficient / (10 <sup>-6</sup> /°C)	Thermal conductivity / [W/(m·K)]	Thermal distortion coefficient / (m/W)
K9	80	2530	858	3.5	1.2	2.92
Fused silica	75	2200	787	0.55	1.4	0.39

### 3 光学窗口的温度场分析

文中的光学窗口的载体为无人机,其一个工作循环分为爬升段、摄像段和返回段。根据其飞行测试所得的热流密度,计算窗口的温度场分布,结果作为温度荷载加载到光学窗口计算其热变形。光学窗口温度场的计算作如下3点处理:1)将窗口玻璃外表面分成一定的区域,将飞行获得的热流密度加权

$$\Phi = Eq/\alpha, \quad (1)$$

式中 $\Phi$ 为表征材料在减小边缘效应的参数, $\Phi$ 值越大,相应的材料在减小边缘效应方面对镜面越有利; $E$ 为材料的弹性模量; $\alpha$ 为线胀系数; $q$ 为导温率,表达式为 $q = \lambda/(c\rho)$ ,表征材料从一些点上把温度传递到另一些点上的能力, $\lambda$ 、 $c$ 、 $\rho$ 分别为材料的热导率、比热容和密度。为了减少镜面的边缘效应,应选择导温率较高的材料,因为当其他条件相同时,镜面上两点间的温差将最小<sup>[10]</sup>。

本文的光学窗口的轴向温度梯度很大,所以在窗口玻璃材料的选取时应考虑热畸变参数;由下文温度场计算得知光学窗口存在径向温差,即会产生边缘效应,所以选材料时也应考虑材料在减小边缘效应的参数 $\Phi$ 。常用的透镜材料K9和熔石英的材料参数如表1所示。综合对比最后选定窗口玻璃的材料为熔石英。

分配到各个区域,用I-DEAS软件计算窗口在一个工作循环内的瞬态温度场;2)计算光学窗口温度时,将光学窗口作为体辐射源进行热辐射的计算<sup>[4]</sup>,对相机整体的热分析表明,窗口玻璃周向与窗框外侧的温度相差不大,故计算时只考虑窗口内、外表面的热辐射而不考虑周向的热辐射;3)为便于使用Patran/Nastran同时计算其温度场和热变形,采用

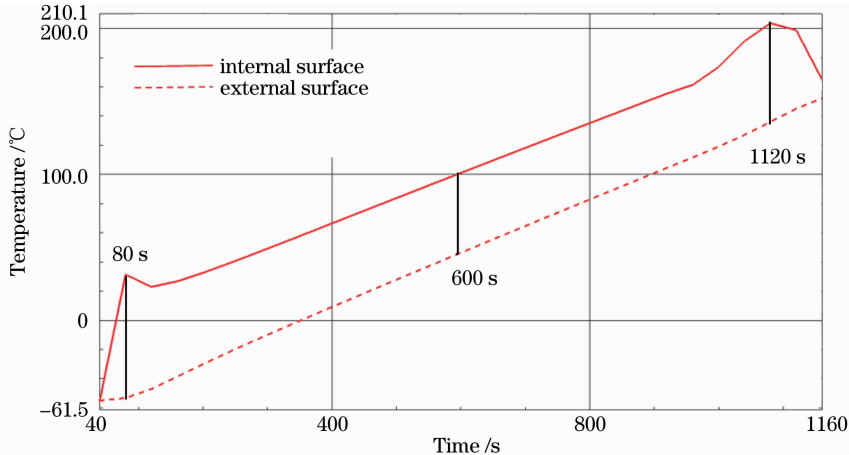


图4 光学窗口内、外表面温度变化

Fig. 4 Temperature of internal and external surface of optical window

Patran/Nastran 划分的有限元网格, 结构模型和热模型的节点和单元均一一对应。计算得窗口玻璃的内、外表面在一个工作循环内温度变化如图 4 所示。

由图 4 可知, 窗口内表面温度从  $-55\text{ }^{\circ}\text{C}$  上升到  $150\text{ }^{\circ}\text{C}$ , 外表面温度从  $-55\text{ }^{\circ}\text{C}$  上升到  $205\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。轴向温差在爬升段逐渐增大, 并在  $80\text{ s}$  时达到最大值约为  $90\text{ }^{\circ}\text{C}$ ; 然后保持恒定值  $55\text{ }^{\circ}\text{C}$ ; 返回时温差又增大为  $70\text{ }^{\circ}\text{C}$  左右。

轴向温差是影响窗口变形的主要因素, 分别计算窗口玻璃在图 4 所示  $80, 600, 1120\text{ s}$  这 3 个时刻的温度场作用下的热变形: 即爬升段、摄像段和返回段, 轴向温差分别为  $90\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,  $55\text{ }^{\circ}\text{C}$  和  $70\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。计算

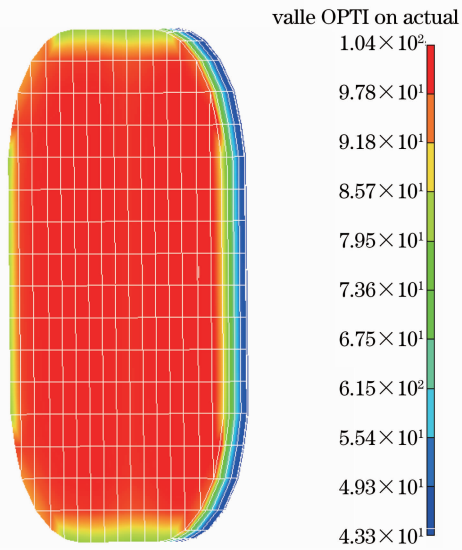


图 5 光学窗口温度场

Fig. 5 Temperature field distribution of optical window

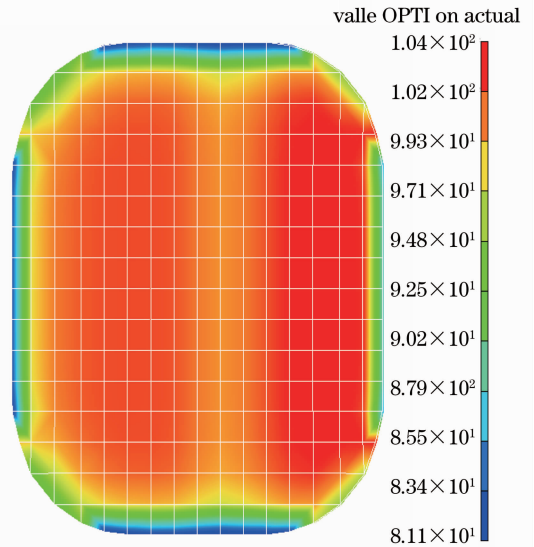


图 6 窗口外表面温度场

Fig. 6 Temperature field of external surface of window  
光学窗口在一个工作循环内的温度场, 在摄像段, 窗口玻璃的温度场如图 5 所示, 窗口玻璃外表面的温度场如图 6 所示。从图 5 表明窗口内、外表面有很大的轴向温差; 图 6 表明窗口表面有明显的径向温差。其余两个工况的温度场分布与图 5、图 6 相似, 均有明显的轴向温差和径向温差。

## 4 光学窗口的热变形分析

### 4.1 热变形计算

窗口玻璃的尺寸为  $403\text{ mm} \times 341\text{ mm} \times 22\text{ mm}$ , 用 Patran/Nastran 建立有限元模型, 轴向划分 4 层单元, 模型节点数为 1325, 单元数为 976。无人机的飞行方向为图 7 所示的 X 向 (平行于窗口较短的边)。

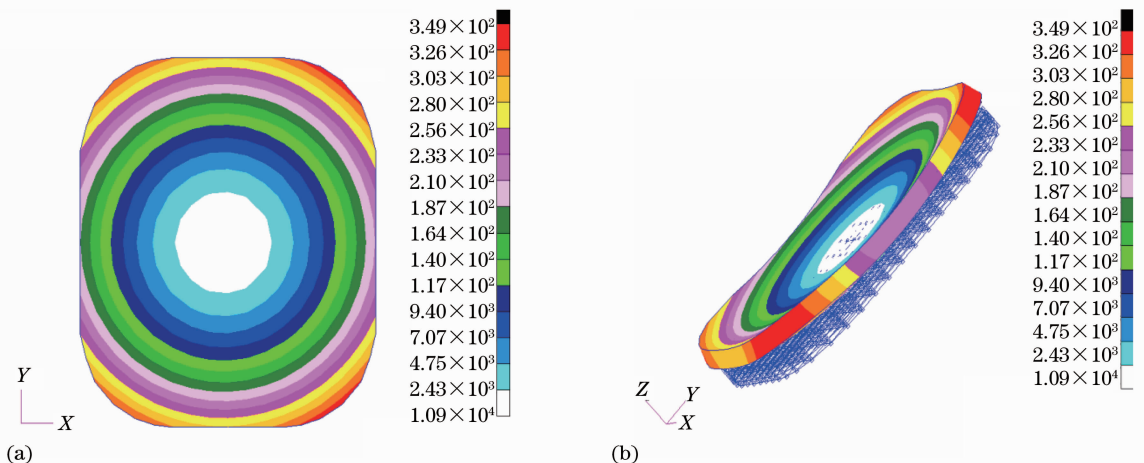


图 7 光学窗口热变形云图

Fig. 7 Cloud pictures of heat deformation of optical window

边界条件为  $X$  向对称轴处节点约束  $UY$  方向自由度, 中心节点(内、外表面中心点的中点)约束  $UX$ 、 $UY$ 、 $UZ$  方向自由度, 其中  $UX$ 、 $UY$ 、 $UZ$  为各方向平动自由度。计算窗口玻璃在 3 种温度场作用下的热变形, 其在摄像段的热变形云图如图 7 所示, 热变形的单位为毫米。其它两个工况的热变形图与图 7 相似。

#### 4.2 数据分析

分别取窗口玻璃内、外表面的  $Y$  向对称轴、 $X$

向对称轴和对角线上的点, 定义内、外表面  $Z$  向(轴向)的变形值为  $\Delta_1$  和  $\Delta_2$ , 取其相对变形值  $\Delta = \Delta_1 - \Delta_2$ 。  $\Delta_1$  和  $\Delta_2$  的变形图在 3 种工况下的趋势是相同的, 故只列出在摄像段的变化图, 如图 8 和图 9 所示。相对变形值  $\Delta$  的变化如图 10 所示, 图中  $X$  轴为各点与中心点的距离(为便于绘图, 正、负值表示中心点的两侧)。

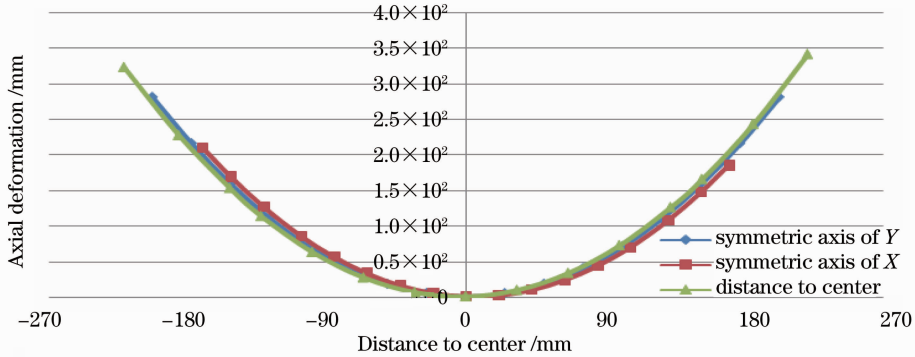


图 8 内表面轴向变形图

Fig. 8 Axial deformation of internal surface

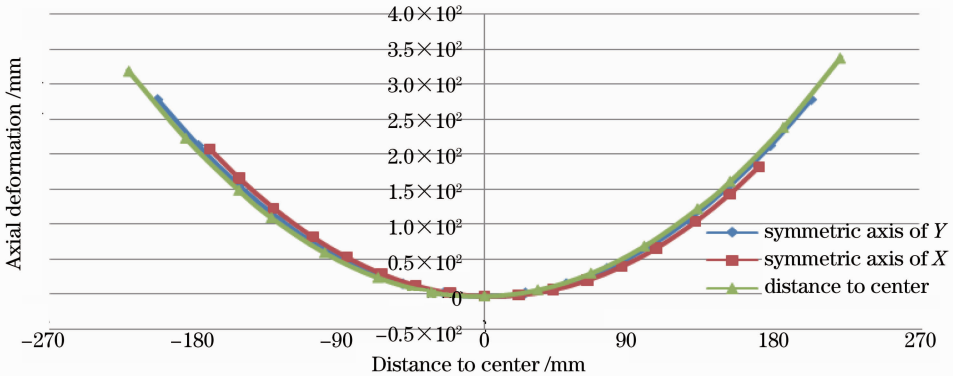


图 9 外表面轴向变形图

Fig. 9 Axial deformation of external surface

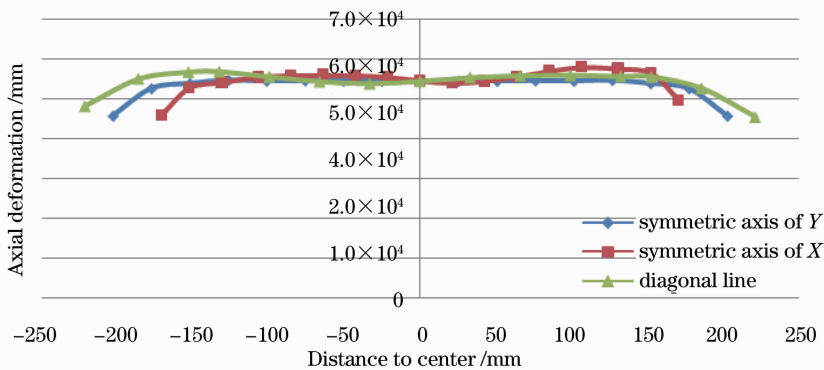


图 10 光学窗口相对轴向变形图

Fig. 10 Relative axial deformation of optical window



图 10 显示窗口玻璃在图 5 所示的温度场下的变形与图 2 和图 3 所示的理论相吻合(彩图见网络电子版)。由图 8 和图 9 可以看出,窗口内、外表面 Y 向对称轴、X 向对称轴和对角线方向的轴向变形从中心点到两边的变化趋势相同,且 3 条曲线的变化斜率也近似相同。窗口内、外表面各方向的轴向变形趋势均相同,结合图 7,初步认为窗口玻璃在温度场作用下由平面变为球面。对计算结果分析得:爬升段时窗口玻璃轴向相对变形  $\Delta$  以中心点对称变化;摄像段时窗口玻璃轴向相对变形  $\Delta$  不对称,其对成像的影响在后文计算;返回段时窗口玻璃轴向相对变形  $\Delta$  相差很大,但此时为返回段,相机已停止工作。

根据图 8 和图 9,计算内、外表面 Y 向对称轴、X 向对称轴和对角线方向变形后曲线的曲率半径可

表 2 内、外表面曲率半径

Table 2 Curvature radius of internal and external surface

		Symmetric axis of Y /m	Symmetric axis of X /m	Diagonal line /m
Climbing	Internal surface	1019.77	1099.06	996.62
	External surface	1002.02	1070.45	982.24
Camera shooting	Internal surface	1460.79	1558.81	1429.87
	External surface	1484.85	1601.40	1449.11
Returning	Internal surface	1399.52	1456.13	1380.06
	External surface	1482.12	1592.45	1446.63

由表 2 的计算结果知窗口玻璃在温度场的作用下内、外表面在相同方向上的曲率相差较小,但不同方向的曲率是不同的,且差异较大。下文将利用 Zernike 多项式拟合其变形后的曲面并分析计算温度场引起的变形对光学窗口光学性能的影响。

## 5 光学窗口的光学性能评价<sup>[11~14]</sup>

### 5.1 Zernike 多项式系数计算

现行技术采用液态灌胶、室温固化的无应力装配工艺,可以把光学窗口光程差的影响降到很小,因此光学窗口的光程差主要由两部分构成:1)由于压力差和温度梯度等原因而引起的窗口玻璃的面形变形,这种面形变化将使光学系统的光程发生变化而产生光程差,2)由于存在温度梯度而导致的折射率梯度引起的光程差<sup>[1]</sup>。文中计算的光学窗口内外无压强差,但由温度梯度引起面形变形而产生的光程差和折射率梯度引起的光程差都较大,所以分析窗口光学性能时要综合考虑二者的共同影响。

因为光学窗口为薄板结构,窗口玻璃材料为热膨胀系数较小的熔石英,周边约束为无应力密封,而且窗口为零光焦度元件,计算结果显示光学窗口的径向变形与轴向变形相比是很小的,因此主要处理

以用图 11 所示的方法。由上文知窗口玻璃变形后形成一个球面,其计算公式可近似为  $R = L^2/\Delta_x$ ,分别计算 3 种工况下内、外表面 Y 向对称轴、X 向对称轴和对角线方向的半径,结果如表 2 所示。

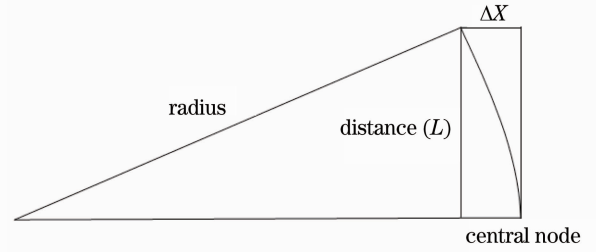


图 11 曲率半径计算图

Fig. 11 Calculation diagram of radius of curvature

轴向热变形的影响。窗口玻璃的厚度为 22 mm,有限元模型沿光轴方向为 4 层单元(5 个节点),在拟合其 Zernike 多项式时做如下处理:1)利用 Matlab 编程将所有节点归类,使沿光轴方向相对应的每 5 个节点为一组,分别计算每个节点对应的折射率。折射率计算公式为

$$n = n_0[1 + \alpha(t - 20)], \quad (1)$$

其中  $n_0$  为窗口玻璃在 20 °C 时的相对折射率, $\alpha$  为窗口玻璃的折射率温度变化率;2)在光学上,波像差定义为实际波面相对于理想波面的光程差,即波像差是用来计算光程的。光程是光在一种介质里所走过的几何路程与该介质的折射率的乘积。由于光学系统的像差使出射后的等光程波面偏离了理想波面,此偏离量可以用波像差来表示。只要分别求入射波面发出的各条光线到出射参考波面交点之间的光程,便可求出各光线之出入间的光程差,即波面经窗口后的改变程度,计算光轴方向因折射率梯度引起的光程差,计算公式为

$$\delta = \sum \Delta_i - \Delta = \sum n_i d_i - n_0 d, \quad (2)$$

式中  $d_i$  为热变形后光轴方向两节点间的距离; $n_i$  为光轴方向两节点折射率的平均值; $d$  为窗口厚度。分

别计算每组节点对应位置的光程差;3) 窗口玻璃在径向的变形为每组 5 个节点变形值的平均值;4) 取外表面为初始表面,其对应的径向(X向、Y向)变形值为第3)步计算得到的平均值,轴向(Z向)变形值为第2)步计算得到的光程差;基于以上处理计算其

Zernike 多项式系数,取其误差最小时的项数,结果如表 3 所示。表 3 中 Zernike 多项式与像差的对应关系为平移、倾斜和离焦,其整体引起的光学系统像质变化将通过进一步的分析来确定。

表 3 Zernike 多项式系数

Table 3 Coefficients of Zernike polynomial

Item	1	$\rho \cos \theta$	$\rho \sin \theta$
Coefficient	$0.131649 \times 10^{-1}$	$-0.454113 \times 10^{-3}$	$0.493667 \times 10^{-8}$
Item	$-1 + 2\rho^2$	$\rho^2 \cos 2\theta$	$\rho^2 \sin 2\theta$
Coefficient	$-0.553085 \times 10^{-3}$	$0.339343 \times 10^{-4}$	$-0.201345 \times 10^{-8}$
Item	$\rho(-2 + 3\rho^2) \cos \theta$	$\rho(-2 + 3\rho^2) \sin \theta$	$1 - 6\rho^2 + 6\rho^4$
Coefficient	$-0.103123 \times 10^{-3}$	$-0.364657 \times 10^{-8}$	$-0.514216 \times 10^{-3}$

5.2 窗口的光学性能分析

将表 3 数据带入到如图 12 所示的理想透镜光学系统中进行计算,理想透镜光学系统的光学参数与实际系统的设计参数一致。经 Code V 计算得到波前变化引起的 RMS 变化为  $0.995\lambda$  (其中  $\lambda = 546.1 \text{ nm}$ ),有限元分析  $W_{\text{rms}} = 1.035\lambda$ 。

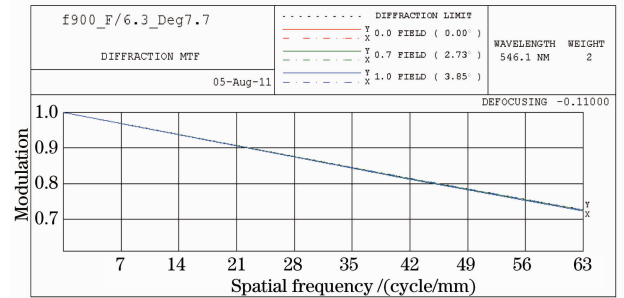


图 14 带入波像差影响后的 MTF 曲线

Fig. 14 MTF curve with the introduction of wave-front aberration

表 4 理想光学系统 MTF 数值比较

Table 4 MTF values comparison of the perfect optical system

	MTF@63 lp/mm (the best image plane)		
	Without introducing the change of wave surface	After introduction of changes in wave surface	
0.00 $\omega$	T	0.726	T 0.725
	S	0.726	S 0.725
0.71 $\omega$	T	0.726	T 0.725
	S	0.726	S 0.725
1.00 $\omega$	T	0.726	T 0.725
	S	0.723	S 0.723

实际设计的光学系统结构形式如图 15 所示,其未引入波像差影响前的 MTF 曲线如图 16 所示,像质变化情况如图 17 及表 5 所示,在光学系统中引入

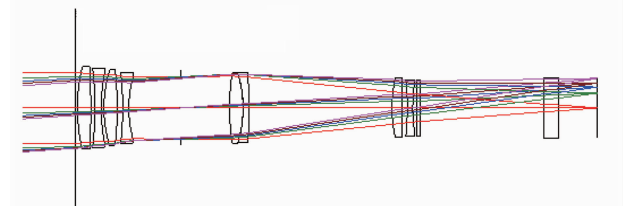


图 15 光学系统结构

Fig. 15 Structure of the optical system

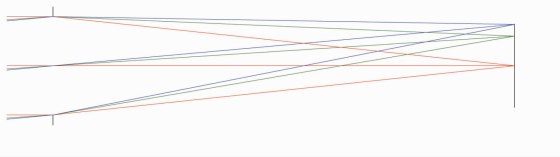


图 12  $f=900$  的理想光学透镜系统

Fig. 12 Perfect optical lens system of  $f=1900$

理想透镜光学系统带入波像差影响前的理想调制传递函数(MTF)如图 13 所示,像质变化情况如图 14 及表 4 所示,在理想光学系统中引入波面的变化将导致像面的离焦和 MTF 的略微下降。图 14 的计算结果显示其像面离焦量为  $-0.11 \text{ mm}$ ,表 4 中引入波前前后的 MTF 数值对比表明(T 和 S 分别代表子午和弧矢量),MTF 下降的最大值小于 0.01。

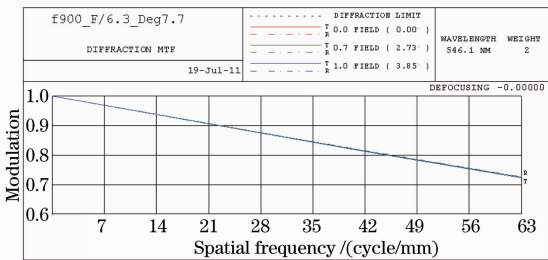


图 13 带入波像差影响前的理想调制传递函数(MTF)曲线

Fig. 13 Perfect modulation transfer function (MTF) curve without the introduction of wave-front aberration

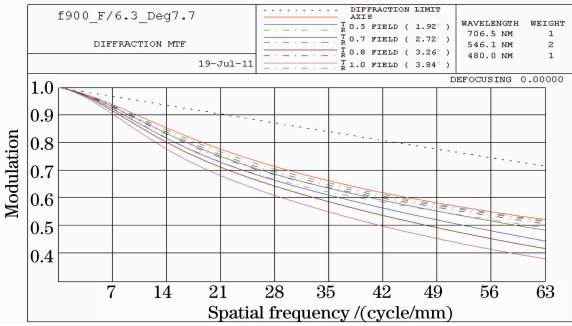


图 16 带入波像差前原系统的 MTF 曲线

Fig. 16 MTF curves without introduction of wave-front aberration

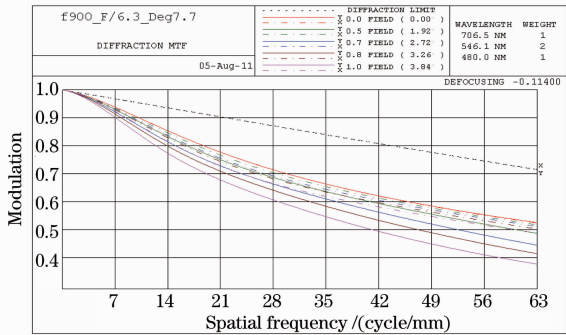


图 17 带入波像差影响后的 MTF 曲线

Fig. 17 MTF curves with introduction of wave-front aberration

波面的变化将导致像面的离焦和 MTF 的略微下降,其中像面离焦量为 $-0.114\text{ mm}$ ,MTF 下降的最大值小于 $0.01$ 。

表 5 实际光学系统调制传递函数数值比较

Table 5 MTF values comparison of real optical system

	MTF@63 lp/mm (the best image plane)			
	Without introducing the change of wave surface		After introduction of changes in wave surface	
0.00 $\omega$	T	0.521	T	0.524
	S	0.521	S	0.525
0.71 $\omega$	T	0.513	T	0.512
	S	0.443	S	0.444
1.00 $\omega$	T	0.491	T	0.487
	S	0.379	S	0.377

对光学窗口光学性能的分析结果显示,像面离焦量为 $-0.114\text{ mm}$ ,与理想光学系统的离焦量 $-0.11\text{ mm}$ 近似相同,需要进行系统调焦;MTF 函数数值的下降小于 $0.01$ ,MTF 设计标准为下降值小于 $0.06$ ,光学系统的 MTF 变化满足设计要求。即光学窗口在经受热冲击的过程中需要进行系统调焦。

## 6 结 论

本文对高空高速航空相机的光学窗口进行了热光学分析。光学窗口的载体无人机的高空高速飞行产生气动热,窗口外表面的温度急剧上升,而窗口玻璃材料熔石英的热导率又很小,从而使窗口玻璃内、外表面产生非常大的轴向温差和径向温差,在爬升段轴向温差最大为 $90\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。本文主要分析其摄像段轴向温差为 $55\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时的热变形及对光学性能的影响。拟合 Zernike 多项式时考虑了由折射率变化和面形变形引起的光程差,考察窗口玻璃的光学性能时引入了波像差,分析结果显示系统经离焦后像质无明显变化,像面离焦量为 $-0.114\text{ mm}$ ,即光学窗口在经受热荷载的过程中需要进行系统调焦。其数据翔实、结果可信,研究方法可以推广到其他光学零部件的设计中。

## 参 考 文 献

- 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
- 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
- Zhao Lixin. Thermal-optical evaluation to optical windows of space camera [J]. *Acta Optica Sinica*, 1998, **18**(10): 1440~1444
- 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
- Chen Hua, Shi Zhenguang, Sui Yongxin *et al.*. Thermal deformation analysis of optical surfaces caused by environmental temperature during interferometric testing [J]. *Acta Optica Sinica*, 2011, **31**(1): 0112007
- 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): 0112007
- Han Wei, Zhao Yuejin, Hu Xinqi *et al.*. Study on aero-optical effects of hypersonic vehicle's optical window [J]. *Optical Technique*, 2008, **36**(4): 622~626
- 韩伟,赵跃进,胡新奇等.超高速飞行器光学窗口气动光学效应分析[J]. *光学技术*, 2008, **36**(4): 622~626
- Lü Baobin, Yang Lihua, Ma Zhen *et al.*. Influence of optic window deformation on collimator image quality [J]. *Electro-Optic Technology Application*, 2009, **24**(2): 13~17
- 吕保斌,杨利华,马臻等.光学窗口形变对平行光管像质影响[J]. *光电技术应用*, 2009, **24**(2): 13~17
- Ding Yanwei, Han Shuangli, Li Jihui. Analysis for thermo optical sensitivity of space optical window [J]. *Opto-Electronic Engineering*, 2002, **29**(5): 15~18
- 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**(5): 15~18
- Fan Zhigang, Zhang Yaping, Pei Yangwei. Numerical simulation of optical transmission through high speed aircraft optical window in aero-dynamic thermal environment [J]. *J. Infrared & Millim. Waves.*, 2007, **26**(5): 396~400
- 范志刚,张亚萍,裴扬威.气动热环境下高速飞行器光学窗口光传输数值仿真研究[J]. *红外与毫米波学报*, 2007, **26**(5): 396~400
- Ding Yanwei, Wang Lei, You Zheng *et al.*. Thermo-optical sensitivity and thermal control system for manned spaceship



- optical windows [J]. *J. Tsinghua Univ. (Sci. & Tech.)*, 2005, **45**(11): 1489~1492
- 丁延卫, 王雷, 尤政等. 载人飞船光学窗口的热光学灵敏度和热控制策略[J]. 清华大学学报, 2005, **45**(11): 1489~1492
- 9 Zhang Yingyi, Su wen. Design of optical window based on the changeable environment [J]. *Electro-Optic Technology Application*, 2007, **22**(4): 24~26
- 张英屹, 苏文. 基于多变环境条件下的光学窗口设计[J]. 光电技术应用, 2007, **22**(4): 24~26
- 10 Yang Linhua. Discussion on affection of mirror surface caused by temperature variation [J]. *Spacecraft Environment Engineering*, 2003, **20**(1): 14~18
- 杨林华. 浅谈温度变化对光学镜面的影响[J]. 航天器环境工程, 2003, **20**(1): 14~18
- 11 Li Fu, Ruan Ping, Ma Xiaolong. Methods of opto-mechanical analysis with Zernike polynomials [J]. *J. Appl. Opt.*, 2008, **28**(1): 38~42
- 李福, 阮萍, 马小龙. 用 Zernike 多项式实现光机分析的技术方法[J]. 应用光学, 2008, **28**(1): 38~42
- 12 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
- 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
- 13 Yan Aqi, Yang Jianfeng, Cao Jianzhong. Optical design of aerial digital camera based on large planar array CCD [J]. *Acta Optica Sinica*, 2011, **31**(6): 0622003
- 闫阿奇, 杨建峰, 曹剑中. 大面阵 CCD 航空数码相机光学系统设计[J]. 光学学报, 2011, **31**(6): 0622003
- 14 Zhou Jiufei, Zhai Linpei, Zhou Gang *et al.*. Autofocus method of aerial imaging device [J]. *Acta Optica Sinica*, 2010, **30**(1): 105~108
- 周九飞, 翟林培, 周刚等. 航空成像设备自动调焦方法[J]. 光学学报, 2010, **30**(1): 105~108

栏目编辑：谢婧