

# 光学窗口厚度设计及形变对相机性能影响

方 煜<sup>1,2</sup> 相里斌<sup>3</sup> 吕群波<sup>3</sup> 景娟娟<sup>1</sup>

<sup>1</sup> 中国科学院西安光学精密机械研究所, 陕西 西安 710119  
<sup>2</sup> 中国科学院大学, 北京 100049  
<sup>3</sup> 中国科学院光电研究院, 北京 100094

**摘要** 从断裂力学的角度进行分析,在考察断裂强度的基础上,对机载多光谱相机光学窗口的厚度进行了详细的设计。相关分析解决了光学窗口厚度的工程设计问题,使光学窗口的设计更加合理可靠。同时,结合窗口工作环境,利用有限元方法计算其稳态温度场分布,再结合分析结果中的温度载荷和相关的广义力载荷,计算光学窗口在力-热耦合情况下玻璃表面的变形。利用 Zernike 多项式对最终变形值进行拟合,得到变形后的光学窗口面形,输入到 Zemax 软件中,以波像差和调制传递函数(MTF)作为光学系统成像质量评价指标,分析了在这种工作环境下光学窗口变形对多光谱相机光学性能的影响。结果表明,在已知的环境条件下,窗口变形对系统成像质量的影响可以忽略。

**关键词** 光学设计;光学窗口;断裂力学;玻璃厚度;力-热耦合分析;Zernike 多项式

**中图分类号** TP702 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/AOS201333.0422007

## Design of Optical Window Thickness and Influence of Its Deformation on Multi-Spectral Camera's Optical Performance

Fang Yu<sup>1,2</sup> Xiangli Bin<sup>3</sup> Lü Qunbo<sup>3</sup> Jing Juanjuan<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Xi'an Institute of Optics and Precision Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Xi'an, Shaanxi 710119, China  
<sup>2</sup> University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China  
<sup>3</sup> Academy of Opto-Electronics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100094, China

**Abstract** Based on the fracture mechanics analysis, the glass thickness of the optical window of an airborne multi-spectral camera is designed in detail. Correlation analyses solve the engineering design problems of the optical window thickness and ensure the design more reasonable and reliable. Considering the complex environment, steady-state temperature field is calculated by means of finite element method. Linking temperature load to generalized force load, the deformation of optical window under the structure-thermal coupling condition is calculated. Optical window surface after deformation are derived by fitting the final deformation value using Zernike polynomial fitting. Fitting coefficients as the input of Zemax, the impact of the deformation of the optical window on the optical performance of multi-spectral camera is analyzed by means of wavefront error and modulation transfer function (MTF) as a measurement of imaging quality. The result shows that based on the known operational environment, the impact on imaging quality of optical system is negligible.

**Key words** optical design; optical window; fracture mechanics; glass thickness; stress-thermal coupled analysis; Zernike polynomial

**OCIS codes** 220.4298; 280.6780; 110.3000; 350.4600

## 1 引言

多光谱成像技术是新一代光电探测技术,兴起

于 20 世纪 80 年代,90 年代后形成研发热潮,至今仍

仍在迅速发展之中。多光谱成像集成探测与光谱

收稿日期: 2012-12-06; 收到修改稿日期: 2013-01-04

基金项目: 国家 973 计划(2009CB724005)和国家 863 计划(2011AA7012022)资助课题。

作者简介: 方 煜(1987—),男,博士研究生,主要从事光学系统设计方面的研究。E-mail: fangyuopt@126.com

导师简介: 相里斌(1967—),男,博士,研究员,主要从事光谱成像技术研究和航空航天光学遥感等方面的研究。

E-mail: xiangli@aoe.ac.cn

探测于一体,在地球观测和遥感探测中,获取地表景物目标的几何图像的同时,可以得到景物目标的波谱信息,为景物目标分类、识别提供了强有力的手段,已广泛应用于多个军事和民用领域<sup>[1~4]</sup>。随着技术的进一步发展,对多光谱相机的成像质量也提出了更高的要求。光学窗口作为多光谱相机的一部分,是相机与外界环境的接口,起到保护相机成像光学系统、隔离外界恶劣环境的作用,是一个压力气密隔离窗口,同时又是一个温度隔离窗口。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多光谱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,还要求考虑到其工作时对遥感多光谱相机的成像质量的影响。

本文提出了一种机载多光谱相机光学窗口设计方案。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。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。同时考虑到玻璃这种脆性材料的强度可靠性,从断裂力学的角度分析,窗口的强度由玻璃表面的最严重的瑕疵(划痕、裂纹等)决定,而临界瑕疵尺寸与窗口玻璃材料的临界应力强度系数有关。而且瑕疵产生的过程中还会带来局部残余应力,相应的产生一个局部应力强度系数。综合两种应力强度系数,并考虑光学窗口的支撑条件,结合光学窗口的受力情况,通过计算得到一个窗口最小厚度值,再结合实际工艺性,选择一个合理可靠的光学窗口厚度作为最终结果。相关分析解决了光学窗口厚度分析这类工程设计问题的盲目性,使光学窗口的设计更加合理可靠。

本文利用有限元分析软件详细分析了光学窗口在力-热耦合情况下的形变,用 Zernike 多项式将分析结果与 Zemax 软件连接,在 Zemax 软件仿真工作环境下光学窗口对多光谱相机成像质量的影响,为光学系统优化设计和热控提供参考。

## 2 光学窗口强度分析

光学窗口位于系统最前端,工作时暴露在外界低温低压的环境中,内外压差会导致窗口变形,使通过窗口的光波产生误差,而且在应力作用下还会使表面产生微裂纹,严重时会发生断裂。由于这种压力产生的应力会对整个多光谱相机工作的安全性产

生影响,因此需要对窗口玻璃进行强度分析,以确定满足要求的最小窗口玻璃的厚度。

从断裂力学的角度分析,玻璃窗口的强度由玻璃表面最严重的瑕疵(划痕、裂纹等)决定。而临界瑕疵尺寸  $c$  与玻璃的断裂强度  $S_F$  的关系为<sup>[5,6]</sup>

$$S_F = \frac{K_{IC}}{Y\sqrt{c}}, \quad (1)$$

式中  $K_{IC}$  为材料的临界应力强度系数也可称为断裂韧度,它代表该玻璃材料对裂纹生长的抵抗能力。 $Y$  是一个无量纲参数,用来表征裂纹的几何形态。而且瑕疵产生的过程中还会带来局部残余应力,相应地产生一个局部应力,其强度系数为  $K_r$ 。它与临界应力强度系数之间的关系为

$$K_r = K_{IC} (c/c_i)^{-r/2}, \quad (2)$$

式中  $c_i$  为初始的瑕疵尺寸, $r$  是一个描述残余应力场的参数。例如,对于点形状的瑕疵, $r=3$ ;对于线形状的瑕疵, $r=1$ 。这个局部应力强度系数对该瑕疵的扩展有很重要的影响。因而综合考虑两者,玻璃的断裂强度  $S_F$  为<sup>[7]</sup>

$$S_F = \left[ \frac{r}{(r+1)^{(r+1)/r}} \right] \frac{K_{IC}}{Y\sqrt{c}}, \quad (3)$$

从(3)式中可以知道,提高玻璃窗口强度的最重要的方法就是控制瑕疵的尺寸。而瑕疵主要是在加工过程中以及加工完成后操作和使用过程中产生的。通过控制磨削加工的磨粒尺寸以及抛光工艺,可以达到减小瑕疵尺寸的目的。一般,最大的瑕疵尺寸近似为平均磨粒尺寸的三倍。同时为了消弱窗口边缘侧面应力集中处瑕疵的影响,利用质量分数为 40% 氢氟酸清洗窗口侧面、边缘 15 min。考虑到加工实际使用的磨粒平均尺寸为  $30 \mu\text{m}$ ,取  $c=90 \mu\text{m}$ 。对于光学材料为石英玻璃的光学窗口,其断裂韧度约为  $K_{IC}=0.74 \text{ MPa}\sqrt{\text{m}}$ ,参数  $Y=1.24$ ,计算可得断裂强度为

$$S_F = 15.73 \text{ MPa}. \quad (4)$$

而在承受压差的情况下玻璃窗口的厚度  $t_w$  与断裂强度的关系为

$$t_w = 0.5A_w \sqrt{\frac{K_w f_s \Delta P_w}{S_F}}, \quad (5)$$

式中  $A_w$  为玻璃窗口直径, $\Delta P_w$  是内外压差,计算时取  $101.325 \text{ kPa}$ , $K_w$  为支撑条件系数,受到夹持的窗口可取  $K_w=0.75$ , $f_s$  为安全系数,一般取  $f_s=4$ 。

玻璃窗口的大小要求能够在平台摆动范围为  $-5^\circ \sim +5^\circ$  内不会挡光,并且能够和密封舱体紧密结合且不产生晃动,经计算,该玻璃窗口的直径设计

为 200 mm。代入相关数据可得到一个最小厚度，其值为

$$t_w \approx 13.81 \text{ mm}. \quad (6)$$

结合制造工艺的合理性，本系统中采用的光学窗口厚度  $t_w$  都选择为 20 mm，能够满足断裂强度要求。

### 3 环境变化对光学窗口的影响分析

光学窗口在工作过程中，隔绝舱内和外部的恶劣环境，因此窗口不仅要承受内外环境的压力差，还与周围环境进行着热交换。导致在其内部产生温度梯度，使得通过窗口的光波发生波前畸变，对多光谱相机的分辨率和成像质量造成不利影响。光程差的变化是产生波前像差的主要原因，它是由以下两个因素造成的：

- 1) 光学窗口的温度梯度使折射率发生变化，致使入射光波的光程发生改变；
- 2) 在窗口的温度和压差的共同作用下，造成玻璃的面形发生改变，导致光程改变。

#### 3.1 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，这种变形将会通过窗口的波前光程差发生变化<sup>[8]</sup>。设窗口支撑简单，在整个通光口径内压差为  $\Delta P$ ，则圆形窗口形变带来的光程差为<sup>[9]</sup>

$$L_{\text{OPD}} = 0.00899(n-1)\Delta P^2 d^6 / E^2 h^5, \quad (7)$$

式中  $n$  为窗口玻璃的折射率， $d$  为窗口直径， $E$  为玻璃材料的杨氏模量， $h$  为窗口厚度。

#### 3.2 温度梯度对光学窗口的影响

温度变化对于光学元件面形、曲率半径以及折射率等都有影响，从而对于光学系统像质也有很大的影响。通常按温度梯度分布的不均匀性又可分为轴向温度梯度和径向温度梯度。

1) 轴向温度梯度是指温度场在光学窗口中沿着厚度方向线性分布。这种温度梯度，导致窗口表面面形变为球面。如果光学窗口简单支撑，则温度梯度引起的球面曲率半径为<sup>[10]</sup>

$$R = \frac{k}{\alpha q}, \quad (8)$$

式中  $\alpha$  为窗口玻璃材料热膨胀系数， $q$  为窗口玻璃单位面积上的热通量， $q = k\Delta T/t_w$ ， $\Delta T_n$  为窗口轴向温差。 $k$  为玻璃材料的热导率。一个平行平板受到轴向温度梯度影响，变成一个弯月透镜，该透镜的光焦度为

$$\frac{1}{f_w} = \frac{(n-1)^2}{n} t_w \left( \frac{\alpha q}{k} \right)^2. \quad (9)$$

2) 径向温度梯度是指在光学窗口中，温度场从中心到边缘的线性分布。径向温度梯度分为两种情况<sup>[11,12]</sup>：中心温度高于边缘温度，所引起的变形称为“塌边”；中心温度低于边缘温度，所引起的变形称为“翘边”，如图 1 所示。这种温度效应也称为边缘效应，其中实线为变形前实际表面轮廓，厚度为  $d$ ，虚线为变形后表面轮廓，最大处以  $d'$  表示。

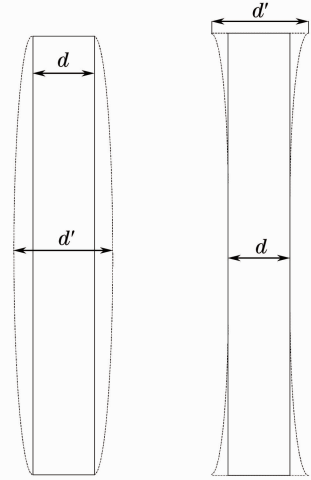


图 1 径向温度梯度对光学窗口的影响

Fig. 1 Effect of radial temperature gradient on optical window

假定玻璃折射率随温度的变化(即热光系数)对于小温度梯度是个常数，则边缘效应带来的光程差可表示为

$$L_{\text{OPD}} = \left[ (n-1)(1+\mu)\alpha + \frac{dn}{dT} \right] t_w \Delta T_r, \quad (10)$$

式中  $\mu$  是窗口材料的泊松比， $\frac{dn}{dT}$  为热光系数， $\Delta T_r$  为窗口中心到边缘的温度梯度。

### 4 光学窗口的力-热耦合分析

多光谱相机工作过程中，外界环境温度约为  $-56^\circ\text{C}$ ，气压极低值为 7000 Pa。而内部为了保证相机透镜的参数稳定，必须保持在一个大气压和  $20^\circ\text{C}$  环境中。因此，光学窗口作为隔绝内外环境的保护型光学元件，在其内部会产生较大的轴向温差和压力差。考虑到多光谱相机最终的成像质量，需要了解光学窗口在两者的作用下对相机的影响。

基于 ANSYS 软件，对光学窗口进行力-热耦合分析。采用顺序耦合的方法，进行稳态热分析，建立热单元模型，施加热载荷并求解。做静力结构分析

把单元类型转换成结构单元,定义包括热膨胀系数在内的结构材料属性,施加包括从热分析得到的温

度在内的结构载荷,求解得到两个表面的变形。光学窗口采用石英玻璃,材料属性如表 1 所示。

表 1 石英玻璃材料参数

Table 1 Material parameters of quartz glass

Thermal conductivity / $[W/(m \cdot ^\circ C)]$	Elastic modulus /Pa	Poisson's ratio	Coefficient of thermal expansion / $^\circ C$	Density / $(kg/m^3)$
1.37	$7.78 \times 10^{11}$	0.167	$5.5 \times 10^{-7}$	2200

光学窗口实际安装时,是采用对称性的压板、螺钉加橡胶垫片固定,并且加注了粘合剂。窗口在轴向的温度梯度和力作用下,支撑结构的影响其实主要在于引起窗口的轴向移动,亦即改变的是窗口整体和透镜之间的距离。对于工作在平行光路中的窗口近似于零光焦度元件(变形后),这类影响可以忽略不计。在进行有限元分析时,为了减小问题的复杂性,将安装情况直接作为约束条件作用在窗口上。在此基础上,建立光学窗口有限元模型,并进行网格划分,结果如图 2 所示,网格尺寸为  $5 \times 10^{-3} m^2$ 。图 3 为进行热分析后的窗口节点温度等值线图,在窗口中厚度相同处的节点温度相同。图 4 为进行力-热耦合分析后的窗口形变等值线图,可以看出在窗口中心处的形变量最大,形变数值都在  $10^{-4} \sim 10^{-3}$  量级。图 5(a)、(b)分别为光学窗口内外表面面形变形曲线,以过面形中心的径向路径为横坐标,纵坐标为变形量。显然,两侧的压差和温度梯度的综合影响使得窗口趋于凸向舱外。

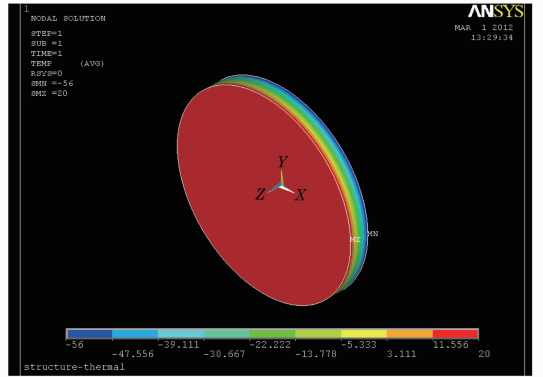


图 3 温度等值线图

Fig. 3 Temperature contour map

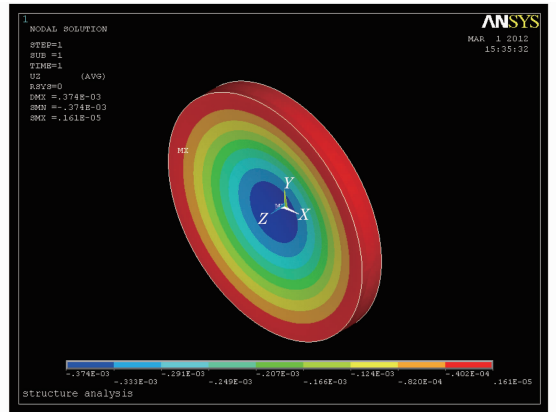


图 4 形变等值线图

Fig. 4 Deformation contour map

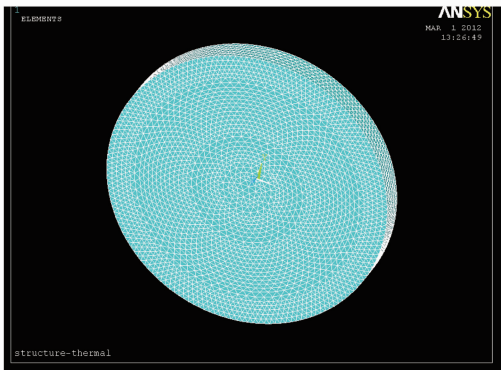


图 2 光学窗口网格划分

Fig. 2 Meshing of the optical window

## 5 形变对窗口成像质量的影响

在获得窗口的变形数据后,为了实现其对多光谱相机系统的影响分析,需要对光学窗口内外变形表面进行 Zernike 多项式拟合<sup>[13~15]</sup>。Zernike 多项式对于拟合光学窗口面形具有如下优点<sup>[16]</sup>:

1) 在单位圆上正交。函数系的正交使不同多项式的系数相互独立,对消除偶然因素的干扰很

有利;

2) Zernike 多项式容易与 Seidel 像差项对应,为有选择地单独处理各像差系数、优化系统性能提供了有效方法;

3) Zernike 多项式各项物理意义明了,是结构分析与光学分析程序之间的接口工具。在常用的光学设计软件 Zemax 软件中包含有 Zernike 面形,可以直接输入拟合后的相应各项 Zernike 系数,附加于原本窗口表面。然后就可以利用软件分析附加形变后的系统成像质量的变化。

在力-热耦合情况下,利用 Zernike 多项式拟合光学窗口表面变形,其内外表面面形前 10 项 Zernike 系数如表 2 所示。

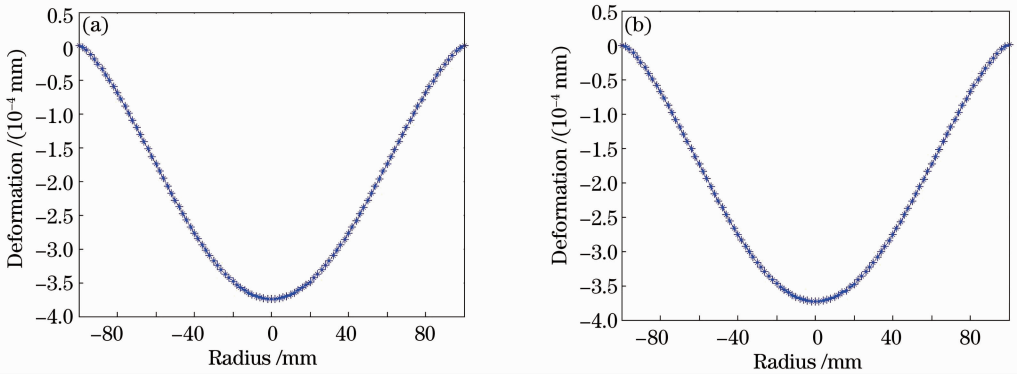


图 5 光学窗口内外表面面形形变曲线。(a)内表面；(b)外表面

Fig. 5 Deformation curves of inner and outer surface shapes of optical window. (a) Inner surface shape; (b) outer surface shape

表 2 内外表面面形前 10 项 Zernike 系数

Table 2 First ten Zernike polynomial coefficients of inner and outer surface shapes

Coefficient	Value of inner surface	Value of outer surface
1	$-1.92053 \times 10^{-4}$	$-1.99069 \times 10^{-4}$
2	0	0
3	$1.60542 \times 10^{-4}$	$1.85975 \times 10^{-4}$
4	$1.03411 \times 10^{-4}$	$0.89859 \times 10^{-4}$
5	$1.44679 \times 10^{-4}$	$1.67605 \times 10^{-4}$
6	0	0
7	0	0
8	$1.22862 \times 10^{-4}$	$1.42383 \times 10^{-4}$
9	$0.83548 \times 10^{-4}$	$0.89648 \times 10^{-4}$
10	0	0

Zemax 软件中默认的 Zernike 多项式各项都是以圆柱坐标表示,拟合时要注意匹配。将拟合后的 Zernike 系数代入原多光谱相机系统中,其中图 6(a), (b)分别为附加窗口变形前后系统的轴上视场调制传递函数(MTF)曲线。表 3 详细列出了 3 个视场子午和弧矢方向在奈奎斯特频率 56 lp/mm 处的 MTF 值

以及引入窗口变形后的 MTF 值。表 4 为主波长在 3 个视场处引入窗口变形前后波像差的均方根(RMS)变化。通过对两个指标的比较,可以看出,在近似一个大气压的内外压差以及 76 °C 的内外温度差下,MTF 和 RMS 波像差的变化很小,这是因为窗口在压力差作用的影响下,窗口表面凸向舱外,但是在轴向温度梯度的作用下,它又产生凸向舱内的变形,亦即轴向温度梯度在很大程度上其实是减小了窗口的形变,所以两者综合作用的影响下,窗口变形后是一个凸向舱外光焦度非常小的近似的正透镜。在变形后的窗口中加入这个微小光焦度后,原镜头系统的某些视场与某些方向的像差得以补偿,同时也造成其他视场某些方向像差的提高,所以才会显示 MTF、波像差指标在各个视场的变化上有所不同,有提高又有下降,这从表 3、4 数据的变化可以看出。由于这种变化很小,所以窗口变形对多光谱相机成像质量的影响可以忽略。

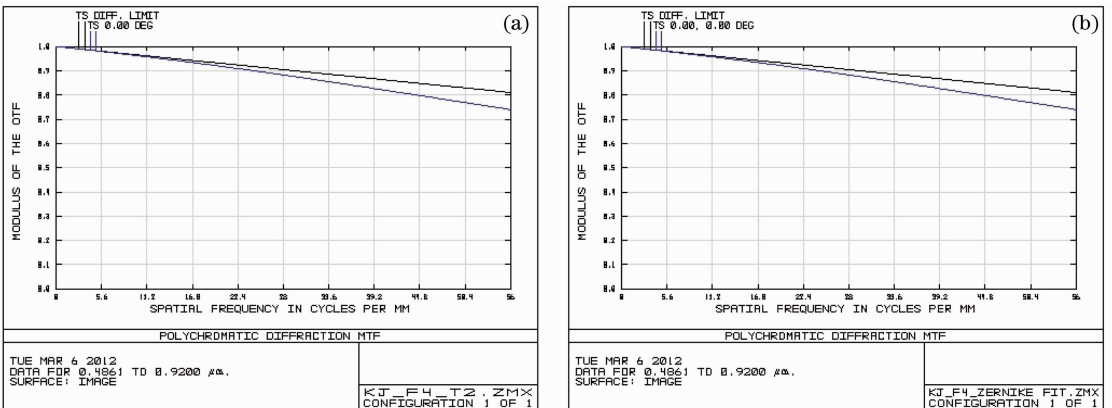


图 6 系统 MTF 曲线。(a)未形变系统轴上视场；(b)附加变形后系统轴上视场

Fig. 6 MTF curves of optical system. (a) Axial field without deformation; (b) axial field based on deformation effect

表 3 3 个视场奈奎斯特频率处系统 MTF 的变化

Table 3 Variation of the system MTF of three fields at Nyquist frequency

	Axial field of view		0.7 field of view		Full field of view	
	Meridian	Sagittal	Meridian	Sagittal	Meridian	Sagittal
MTF	0.741532	0.741532	0.744529	0.730418	0.709843	0.738829
MTF after deformation	0.741526	0.741538	0.743315	0.730632	0.714007	0.738771

表 4 变形影响下主波长波像差的变化

Table 4 Variation of wavefront error of primary wavelength based on deformation effect

	Axial field of view	0.7 field of view	Full field of view
RMS of wavefront error / $\lambda$	0.0299	0.1186	0.0975
RMS of wavefront error after deformation / $\lambda$	0.0299	0.1188	0.0949

## 6 结 论

结合断裂力学的相关知识,对某机载多光谱相机的光学窗口厚度进行了详细设计。同时,结合有限元中的力-热耦合分析结果,利用 Zernike 多项式进行拟合,以 MTF 和波像差作为成像质量评价指标,分析了在压差和轴向温度梯度环境工况下,光学窗口变形对整个多光谱相机系统性能的影响。结果表明,在已知的环境工况下,窗口变形对系统成像质量的影响可以忽略。相关分析过程可以用来指导类似光学窗口的设计工作,解决了光学窗口厚度分析这类工程设计问题的盲目性,使光学窗口的设计更加合理可靠。

## 参 考 文 献

- 1 F. Vagni. Survey of Hyperspectral and Multispectral Imaging Technologies [R]. The Research and Technology Organization, 2007
- 2 Fu Qiang, Huang Min, Jing Juanjuan *et al.*. Relay lens design for an LCTF multi-spectral imager [J]. *Acta Optica Sinica*, 2011, **31**(10): 1022002  
付强,黄旻,景娟娟等.用于液晶可调谐滤光片型多光谱成像仪的中继成像系统设计[J].*光学学报*,2011,**31**(10): 1022002
- 3 Xiangli Bin, Zhao Baochang, Xue Mingqiu. Spatially modulated imaging interferometry [J]. *Acta Optica Sinica*, 1998, **18**(1): 18~22  
相里斌,赵葆常,薛鸣球.空间调制干涉成像光谱技术[J].*光学学报*,1998,**18**(1): 18~22
- 4 Yang Xiukun, Zhong Mingliang, Jing Xiaojun *et al.*. FTIR microscopic image analysis based on principal component analysis-2nd derivative spectral imaging [J]. *Acta Optica Sinica*, 2012, **32**(7): 0711001  
杨秀坤,钟明亮,景晓军等.基于主成分分析-二阶导数光谱成像的红外显微图像分析[J].*光学学报*,2012,**32**(7): 0711001
- 5 E. R. Fuller Jr., S. W. Freiman, J. B. Quinn *et al.*. Fracture mechanics approach to the design of glass aircraft windows; a case

- study [C]. *SPIE*, 1994, **2286**: 419~430
- 6 John W. Pepi. Fail-safe design of an all BK-7 glass aircraft window [C]. *SPIE*, 1994, **2286**: 431~443
- 7 Keith B. Doyle, Mark A. Kahan. Design strength of optical glass [C]. *SPIE*, 2003, **5176**: 14~25
- 8 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
- 9 Paul R. Yoder, Jr.. Opto-Mechanical Systems Design [M]. Zhou Haixian, Cheng Yunfang Transl., Beijing: China Machine Press, 2008. 302~306  
保罗·约德.光机系统设计[M].周海宪,程云芳译.北京:机械工业出版社,2008.302~306
- 10 William P. Barnes, Jr.. Some effects of aerospace thermal environments on high-acuity optical systems [J]. *Appl. Opt.*, 1966, **5**(5): 701~711
- 11 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
- 12 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  
石进峰,吴清文,张建萍等.高空高速航空相机光学窗口的热光学分析[J].*光学学报*,2012,**32**(4): 0422004
- 13 E. Pearson, L. Stepp. Response of large optical mirror to thermal distributions [C]. *SPIE*, 1987, **748**: 215~228
- 14 Noreen Harned, Robert Harped, Ramsey Melugin. Alignment and evaluation of the cryogenic corrected infrared astronomical satellite (IRAS) telescope [C]. *Opt. Engng.*, 1981, **20**(2): 202195
- 15 J. W. Pepi, W. P. Barnes. Thermal distortion of a thin low expansion fused silica mirror [C]. *SPIE*, 1983, **450**: 40~49
- 16 Yang Jiawen, Huang Qiaolin, Han Youming. 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,韩友明. 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