

## 高空高速环境热光学分析及光学窗口设计

范 达<sup>1,2</sup>, 明 星<sup>1</sup>, 刘昕悦<sup>1</sup>, 王国名<sup>1</sup>, 郭文记<sup>1</sup>, 黄 旻<sup>1</sup>, 董登峰<sup>1</sup>

(1. 中国科学院光电研究院, 北京 100094; 2. 中国科学院大学, 北京 100049)

**摘 要:** 为提高高空高速环境下机载光谱相机光学系统的成像性能, 分析了飞行高度对光学窗口面型变形的影响, 合理设计光学窗口厚度。基于有限元流固耦合、流热耦合模型, 仿真高空高速环境下气动压力、气动热载荷对光学窗口的作用, 分析了飞行高度对不同厚度光学窗口面型变形的影响; 初步选择光学窗口厚度, 利用 Zernike 多项式对该光窗面型变形进行拟合并输入光学软件, 以 MTF 及波相差为评价指标, 分析了光学窗口变形对光学系统成像性能的影响, 最终确定合理的光学窗口厚度。结果表明: 飞行器在 5~30 km 高空以 3 Ma 速度、5° 攻角飞行时, 口径 200 mm 的光学窗口合理设计厚度为 15 mm。为不同飞行高度范围光学窗口厚度的选择及优化提供了一定依据。

**关键词:** 热光学分析; 气动效应; 光学窗口; 有限元分析; 成像性能分析

**中图分类号:** V416.5 **文献标志码:** A **DOI:** 10.3788/IRLA201645.0818001

## Thermal optical analysis and design of optical window in high-altitude and high-speed environment

Fan Da<sup>1,2</sup>, Ming Xing<sup>1</sup>, Liu Xinyue<sup>1</sup>, Wang Guoming<sup>1</sup>, Guo Wenji<sup>1</sup>, Huang Min<sup>1</sup>, Dong Dengfeng<sup>1</sup>

(1. Academy of Opto-Electronics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100094, China;

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

**Abstract:** In order to improve the imaging performance of aviation camera optical system in high-altitude and high-speed environment, an analysis of the influence on the optical window surface deformation caused by the aerodynamic pressure and aerodynamic heat loading in different flying altitudes environment was conducted, and the thickness of optical window was well designed. Based on fluid-solid interaction model and fluid-heat interaction model with finite element, how aerodynamic pressure and aerodynamic heat loadings affected optical window was simulated and how different flying environment altitude impacted on the surface deformation of different thickness of optical window was analyzed. A proper optical window thickness was chosen in the consideration of not only strength requirement but also various flying altitude circumstances to meet unique flying environment demands; and then, to judge the influence on the imaging performance of optical system caused by the surface deformation of optical window with that thickness can be accepted or not, Zernike polynomial was used to fit the surface deformation of optical window in that working condition. Putting the Zernike polynomial coefficients into optical software, taking MTF and wavefront error as assessment indexes, the influence of deformation of

收稿日期: 2015-12-11; 修订日期: 2016-01-12

基金项目: 中国科学院科研装备研制项目(yz201309)

作者简介: 范达(1991-), 女, 硕士生, 主要从事空间环境模拟方面的研究。Email: fanda@aoe.ac.cn

导师简介: 明星(1976-), 男, 高级工程师, 博士, 主要从事光谱成像系统设计及性能检测方面的研究。Email: mingxing@aoe.ac.cn

optical window on the imaging performance of optical system was analyzed. Finally, the appropriate thickness of optical window was gotten. The result shows when an aviate flies at a speed of  $3Ma$ , in the 5–30 km altitude ranges and with the  $5^\circ$  angle, designing its optical window thickness to be 15 mm is fitted with the 200 mm diameter. A foundation is also built in the aspect of selecting and optimizing for the thickness of optical window in different flying altitude scopes.

**Key words:** thermal optical analysis; aerodynamic effect; optical window; finite element analysis; imaging performance analysis

## 0 引言

近年来,随着飞行器技术的快速发展,飞行高度达到几十千米,速度达到几个马赫,这种高空高速的飞行状态使其周围产生复杂的空气流场,进而对其所搭载的光谱相机的成像质量提出了新的要求。作为连接相机与外部环境的通道,光学窗口是机载光谱相机对地观测的关键部分,不仅用于隔离大气环境,保护飞行器系统内部结构,而且作为一个零光焦度的光学元件,光学窗口还是光谱相机光学系统的一部分。在高空高速环境下,光学窗口表面发生气动压力、气动热效应,其力学性能和光学性能都会受到影响<sup>[1-3]</sup>。因此,为了保证光谱相机的成像质量,有必要充分考虑环境因素对光学窗口的影响,合理设计光学窗口厚度,保证其面型精度,保证光学系统成像性能。

目前,已报道文献中的主要工作多是基于强度分析和热光学分析进行光学窗口的性能分析及厚度设计,却鲜有文献针对飞行器飞行环境变化对光学窗口表面气动压力、气动热效应产生的影响进行分析,进而以此为依据分析其导致的光窗面型变形对光学系统成像性能的影响,优化设计光学窗口厚度。

文中针对光谱相机高空高速的工作环境,通过前期工作分析发现光窗表面气动热的变化主要受飞行速度的影响,气动压力的变化主要受飞行高度、飞行攻角的影响,而飞行高度对其影响又远远大于攻角的影响。故文中以  $3Ma$  这一研究环境下的最高速度、 $5^\circ$  特征攻角为基本研究背景,重点分析 5~30 km 高度范围内气动压力、气动热效应作用于光窗表面的情况。首先根据现有工作已获得的高空高速环境下受气动压力、热效应影响作用在光学窗口表面的压力、温度载荷数据,通过基于有限元流固耦合、流

热耦合模式分析气动压力、气动热单独作用及力-热耦合作用对不同厚度光学窗口变形的影响;进一步,进行不同高度下不同厚度光学窗口的变形分析,得到满足强度要求且面型变化受高度变化影响较小的窗口厚度;最后利用该窗口厚度分析所获的形变数据,通过 Matlab 进行 Zernike 多项式对于光窗面型变形的拟合,并输入到光学软件中,使用光线追迹法,综合考虑优化光学窗口的厚度,使 MTF 及波像差影响在光学系统的容差范围内得到满足力学性能和光学性能的光学窗口厚度。

## 1 光窗的强度分析

作为隔离内部元件与外部环境的薄板结构元件,光学窗口要允许特定的辐射光通过,隔绝污物、湿气和其他污染,同时对成像质量和光强度有最小的影响,通常其材料是光学玻璃、熔融石英、塑料或晶体材料<sup>[4]</sup>。考虑到高空高速的飞行环境会使光窗始终承受高温及压差作用,对比硫化锌、硒化锌、熔融石英等材料性质,选择热膨胀系数较小的熔融石英作为光窗材料,其材料属性如表 1 所示。

表 1 光学窗口材料属性

Tab.1 Material properties of optical window

Material	Elastic modulus /Pa	Poisson's ratio	Density / $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$	Coefficient of thermal expansion / $^\circ\text{C}$	Thermal conductivity / $\text{W} \cdot (\text{m} \cdot ^\circ\text{C})^{-1}$
ZnS	$7.45 \times 10^{10}$	0.29	4 080	$7.6 \times 10^{-6}$	16.7
ZnSe	$7.03 \times 10^{10}$	0.28	5 270	$7.1 \times 10^{-6}$	18
Fused quartz	$7.3 \times 10^{10}$	0.17	2 200	$5.5 \times 10^{-7}$	1.4

由于光学窗口始终承受内外表面压差作用,其厚度需要满足力学性能要求,故对光学窗口进行最

小厚度计算。当圆形光学窗口在一个压力差为  $\Delta P_w$  的环境中,压力均匀地施加在直径为  $A_w$  的自由孔径上,材料的断裂应力为  $S_F$ ,其设计安全系数为  $f_s$ ,应用公式(1)可以求出该光窗具有的最小厚度  $t_w^{[4]}$ :

$$t_w = 0.5A_w [K_w f_s \Delta P_w / S_F]^{1/2} \quad (1)$$

式中: $K_w$ 为支撑条件常数,如果光窗没有受到夹持,常数值为 1.25;受到夹持则为 0.75。 $f_s$ 的习惯取值为 4。

该例中光窗的材料为熔融石英,断裂应力的典型最小值  $S_F=60$  MPa,  $K_w=0.75$ , 内外压差  $\Delta P_w=101\ 325$  Pa,则满足强度要求的窗口最小厚度为:

$$t_w = 0.5 \times 200\text{ mm} \times [0.75 \times 4 \times 0.101\ 325 / 60]^{1/2} = 7.14\text{ mm}$$

即该例中采用的熔融石英材料光学窗口厚度需大于 7.14 mm。

## 2 一定高度环境光学窗口的热光学分析

初始设计光学窗口口径  $\Phi 200$  mm,厚度为 20 mm。对光学窗口建立基于有限元的流固耦合、流热耦合模型,输入其材料特性参数,进行网格划分。光学窗口周向采用浇灌密封的方式安装,光学窗口作为零光焦度元件,忽略其径向膨胀。将飞行条件为 20 km 高空、3 Ma 速度、5°攻角时产生的气动压力、气动热载荷作用到光学窗口表面,进行基于有限元的流固耦合、流热耦合分析。

### 2.1 压力载荷对光学窗口的影响

压力载荷作用于光学窗口产生的影响主要表现在,内外表面的压差引起窗口的面形变形,使得通过窗口的光程差发生变化。如图 1 所示,针对 20 km 高

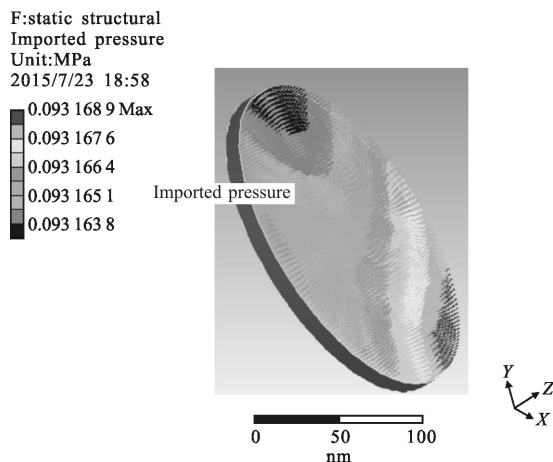


图 1 光学窗口外表面压力分布图

Fig.1 Pressure distribution map on outer surface of optical window

空、3 Ma 速度、5°攻角的飞行条件,将基于 CFD 仿真计算所得的光学窗口外表面的压力数据进行加载,外表面呈现出复杂流场作用下的低压载荷分布。由于光窗内表面为标准大气压,内外压差作用下,光学窗口受到向外的压力,变形凸向窗外。

### 2.2 温度载荷对光学窗口的影响

温度载荷作用于光学窗口产生的影响主要表现在两方面:一是温度梯度产生的热应力引起光窗面形变形,带来光程差;二是温度梯度引起光学玻璃折射率梯度变化,改变了入射光波的光程<sup>[5]</sup>。温度梯度引起的光学窗口面形变形分为径向变形和轴向变形。径向变形是由从窗口中心到边缘温度场径向梯度分布引起的,当边缘温度大于中心温度,出现“翘边”现象;当边缘温度小于中心温度,出现“塌边”现象<sup>[6]</sup>。轴向变形是由于光学窗口内外表面温差造成的轴向温度梯度分布引起的,当外表面温度大于内表面温度时,光学窗口凸向舱外,当外表面温度小于内表面温度时,光学窗口凹向舱内<sup>[7]</sup>。

光谱相机在工作过程中,由于外部环境在光学窗口外表面产生高温,而内部环境温度需保持在 20 °C 左右的室温,这就使得作为温度隔离窗口的光学窗口内、外表面产生温度差。如图 2 所示为针对

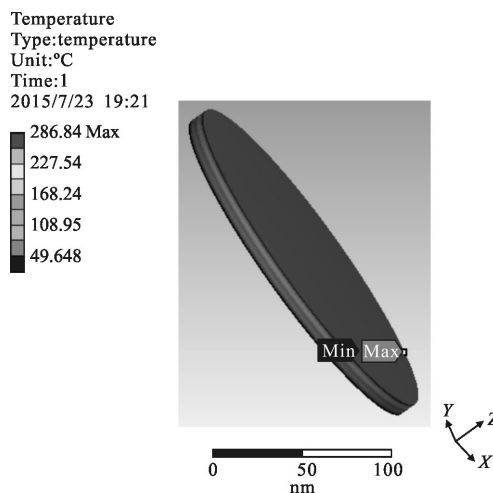


图 2 光学窗口温度轴向分布图

Fig.2 Temperature distribution map of optical window at axis direction

20 km 高空、3 Ma 速度、5°攻角的飞行条件,将基于 CFD 仿真计算所得的光学窗口外表面的温度载荷进行加载时,光学窗口温度场轴向等值线分布图。可以看出,窗口温度轴向呈梯度分布,厚度相同处温度基

本相等,轴向温差明显大于径向温差。光学窗口外表面温度大于内表面温度,在轴向温度场作用下,窗口变形凸向舱外。

### 2.3 力-热耦合作用的影响

采用顺序耦合的方式将基于 CFD 仿真计算所得的流场作用下产生的气动热、气动压力载荷加载到光学窗口外表面进行分析。压力、温度场共同作用下的光学窗口变形图如图 3 所示。光学窗口变形趋于向外凸的状态,变形大小呈径向梯度变化,变形最大位置发生在窗口中心处,最大值为 $2.46 \times 10^{-2}$  mm,变形量级为 $10^{-3} \sim 10^{-2}$  mm。

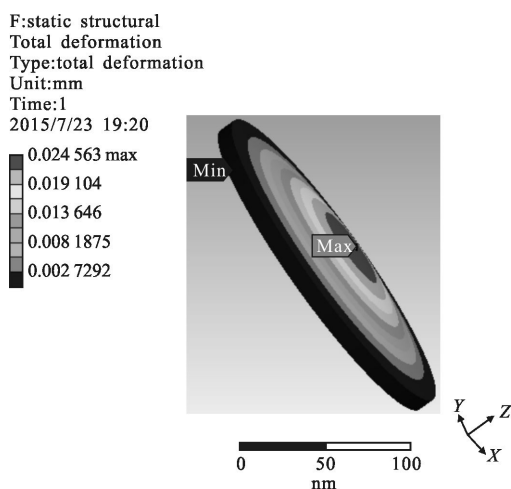


图 3 压力、温度场共同作用下的光学窗口变形图

Fig.3 Optical window deformation map caused by aerodynamic pressure, temperature effect

### 2.4 一定高度下不同厚度光学窗口变形分析

作为气密隔离窗口和温度隔离窗口,一方面,光学窗口承受飞行器内外环境压差,其厚度需足够大以满足强度和可靠性要求;而另一方面,光学窗口厚度值过大时,由温度场引起的热变形也更加明显,光学窗口的光学性能会受到较大影响,这将影响工作状态下光谱相机的分辨力和成像质量<sup>[3]</sup>。因此,对不同厚度的光学窗口进行气动压力、气动热效应作用下的变形分析。

针对飞行速度 $3Ma$ 、攻角 $5^\circ$ 、高度 $20\text{ km}$ 的高空高速环境,对不同厚度的光学窗口进行变形分析。先取步长为 $5\text{ mm}$ 对光学窗口厚度为 $10 \sim 30\text{ mm}$ 范围的光学窗口进行基于有限元的流固耦合、流热耦合,分析其在压力载荷单独作用、温度载荷单独作用、以及

压力和温度载荷共同作用下的变形情况。如图 4 所示,分析发现对于厚度为 $10 \sim 15\text{ mm}$ 的光学窗口,其变形受厚度变化影响较为显著,故取 $1\text{ mm}$ 步长进行进一步探索。

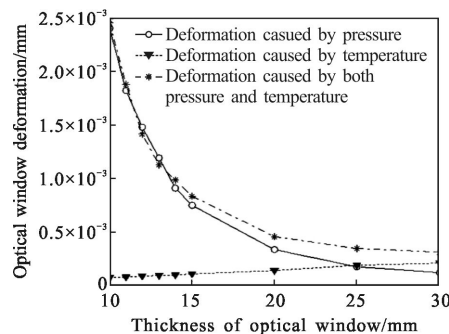


图 4 不同厚度的光窗在压力载荷、温度载荷作用下的变形折线图

Fig.4 Deformation line chart of different thickness optical window caused by pressure and temperature loadings

由图 4,在 $20\text{ km}$ 高空下,对于厚度较小( $10 \sim 15\text{ mm}$ 厚)的光学窗口,由压力载荷引起的面形变形比温度载荷引起的面型变形显著,这是由于此时光学窗口外表面气压很低,内外表面压力差非常大造成的;随着光学窗口的厚度增加,压力场作用引起的光学窗口轴向变形逐渐减小,且呈现开始减小速度快,后逐渐趋于平稳的趋势;而温度载荷引起的热膨胀变形随光学窗口厚度的增大愈加明显,在厚度值为 $25\text{ mm}$ 左右时,受温度载荷作用引起的变形将大于受压力载荷作用引起的变形;在压力场、温度载荷共同作用下,光学窗口的变形随厚度增加而减小。

## 3 不同高度环境、不同厚度光学窗口的热光学分析

针对 $5 \sim 30\text{ km}$ 高空范围内,飞行器在不同高度下飞行时,受气动压力、气动热作用不同厚度的光学窗口产生的面型变形进行分析。如图 5 所示,取步长为 $5\text{ km}$ 的 6 个特征高度,可得以下结论。

(1) 对于相同厚度的光学窗口,随飞行高度升高,其面型变形呈现增大趋势;

(2) 对于不同厚度的光学窗口,厚度值越小光学窗口面型变形受飞行高度影响越显著:厚度在 $10 \sim 15\text{ mm}$ 范围内的光学窗口,其表面变形量随飞行高度增加显著增大;厚度在 $15 \sim 25\text{ mm}$ 范围内的光学窗

口,其表面变形量随飞行高度增加有增大趋势,但变化幅度较小;厚度在 25~30 mm 范围内的光学窗口,其表面变形量随飞行高度增加只有略微的增加。这主要是由于随着光学窗口厚度的增加,受内外表面压差影响造成的变形会越来越小。

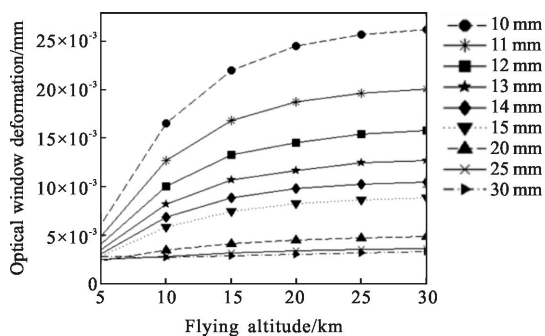


图 5 不同高度下不同厚度的光学窗口最大变形量折线图  
Fig.5 Line chart for the maximum deformation of different thickness optical window under different altitude environment

(3) 对于厚度在 10~25 mm 范围内的光学窗口,在同一飞行高度,基本呈现表面变形量随光学窗口厚度增加而减小的趋势;但对于厚度在 25~30 mm 范围的光学窗口,在同一飞行高度,随其厚度增加,光窗表面变形量反而增大。这主要是由于当厚度增大到一定值时,由热膨胀影响造成的表面变形越来越显著。

综合上述分析,认为 15 mm 厚度的光学窗口满足强度性能要求,且在 5~30 km 高度范围内飞行时,面型变形情况受高度影响变化幅度较小,可以选作合理的初始设计厚度。

#### 4 光窗型变对成像质量的影响

光学窗口的表面变形会影响光学系统的波前差,进而导致成像质量受到影响。通过上述分析,选择厚度为 15 mm 的光学窗口进行进一步分析,计算光学窗口形变状态与初始状态的光程差,计算 Zernike 多项式系数,使用光线追迹法,以调制传递函数和波像差作为成像质量评价指标,分析在气动压力、气动热效应影响下光学窗口面型变化对光学系统成像质量的影响。

##### 4.1 面型计算

Zernike 多项式是以半径和方位角定义的极坐

标形式表示的多项式,可以将离散的变形数据拟合成光滑连续的曲面,是描述波前像差的常用方法<sup>[8]</sup>。Zernike 多项式之所以适合用来表示波前,是因为它在定义的单位圆上相互正交,因此要将所得到的面形变形数据转换到单位圆内,然后再进行处理<sup>[9]</sup>。在直角坐标系下  $N$  项 Zernike 多项式为:

$$\Delta Z_i = \sum_{a=1}^N a_i z_i(x, y) = a_1 z_1(x, y) + a_2 z_2(x, y) + \dots + a_n z_n(x, y) \quad (1)$$

式中:  $a_i$  为 Zernike 多项式中第  $i$  项系数;  $z_i$  为 Zernike 多项式的第  $i$  项;  $N$  为 Zernike 多项式的项数;  $x, y$  为数据点的坐标值。

将有限元力热耦合得到的面形变形数据输出,通过 Matlab 编程对节点坐标及轴向位移进行 Zernike 多项式拟合,得到气动压力、气动热共同作用引起的内外表面面形的 37 项 Zernike 系数。表 2 列出了内外表面的前 10 项 Zernike 系数。

表 2 气动压力、气动热共同作用下前 10 项 Zernike 系数

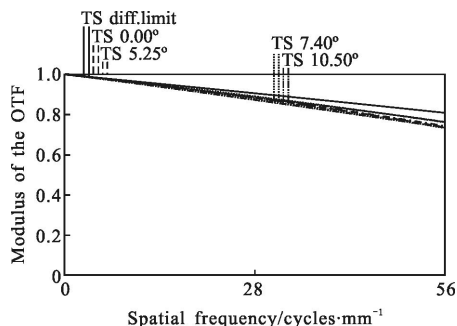
Tab.2 Former ten Zernike coefficients under the effect of both aerodynamic pressure and aerodynamic heat

Coefficient	Value of out surface	Value of inner surface
1	0.003 764	0.002 15
2	1.44E-06	5.69E-07
3	1.81E-06	8.74E-07
4	-0.004 01	-0.003 78
5	2.8E-06	1.32E-06
6	5.09E-06	2.18E-06
7	-3.1E-07	-4.5E-07
8	-5.6E-07	-8.2E-07
9	0.001 017	0.001 341
10	-4.3E-07	-8.3E-08

##### 4.2 面型变化对成像质量的影响

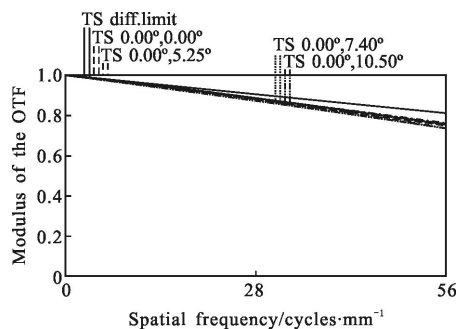
将拟合后的 Zernike 系数代入优化好的光学系统中,系统引入变形窗口玻璃前后系统的调制传递函数曲线如图 6 所示。表 3 为系统引入变形窗口玻璃前后 4 个视场在 56 lp/mm 频率处的 MTF 值及引入变形窗口玻璃后 MTF 值的改变量。通过比较可以看出,在引入变形窗口玻璃前后,4 个视场 MTF 的

值分别略有升高或降低，但变化幅度非常小，MTF 最大下降值小于 0.01，MTF 设计标准为下降值小于 0.06<sup>[6]</sup>，故引入变形窗口玻璃前后光学系统调制传递函数变化情况满足设计要求。



(a) 引入变形窗口玻璃前

(a) Before bringing in the deformation optical window glass



(b) 引入变形窗口玻璃后

(b) After bringing in the deformation optical window glass

图 6 引入变形窗口玻璃前后系统调制传递函数曲线图

Fig.6 MTF graph of the optical system before and after bringing in the deformation optical window glass

表 3 系统附加变形窗口前后 4 个视场在 56 lp/mm 频率处的 MTF 值及差值

Tab.3 MTF value and its D-value at 56 lp/mm frequency at the four fields of optical system with deformation optical window glass

MTF at 56 lp/mm	Field: 0°		Field: 5.25°		Field: 7.40°		Field: 10.50°	
	Tangential	Sagittal	Tangential	Sagittal	Tangential	Sagittal	Tangential	Sagittal
Original	0.734 758	0.734 758	0.744 631	0.764 336	0.761 604	0.734 592	0.764 605	0.737 382
Add wavefront	0.747 107	0.747 127	0.735 197	0.761 535	0.751 668	0.733 416	0.757 140	0.738 766
Change value	0.012 349	0.012 369	-0.009 434	-0.002 801	-0.009 936	-0.001 176	-0.007 465	0.001 384

系统引入变形窗口玻璃主波长在 4 个视场的波像差大小如表 4 所示。通过比较可以看出，在引入变形窗口玻璃前后，4 个视场的波像差有略微的升高或降低，变化幅度也很小，可忽略其影响。故引入变形窗口玻璃前后光学系统波像差变化情况满足设计要求。

表 4 系统附加变形窗口前后主波长在 4 个视场的波像差及其变化值

Tab.4 Wavefront error and its change value at the four fields of optical system with deformation optical window glass

Wavefront error	Field: 0°	Field: 5.25°	Field: 7.40°	Field: 10.50°
Original/ $\lambda$	0.069 7	0.081 5	0.091v9	0.055 6
Add wavefront/ $\lambda$	0.056 2	0.084 8	0.099 2	0.055 2
Change value/ $\lambda$	-0.013 5	0.003 3	0.007 3	-0.000 4

基于以上分析，由于光学窗口变形很小，可以近似看作是一个凸向舱外光焦度非常小的正透镜，在将其引入光学系统后，造成某些视场某些方向像差的升高，但同时也可能补偿了其他视场某些方向的像差，使得引入变形窗口后 MTF、RMS 指标呈现出在不同视场有提高也有下降的微小变化趋势，但由于变化值极小认为其对光学系统成像性能的影响可以忽略<sup>[10]</sup>。综合考虑光学窗口厚度对强度及可靠性的影响，在 5~30 km 高空范围随高度增加窗口变形情况，以及光学窗口面型变形对光学系统成像性能的影响，将该飞行条件下光学窗口的合理厚度设计为 15 mm。

## 5 结论

以高空高速光谱相机 5~30 km 高度范围、3 Ma 速度、5°攻角的飞行环境为背景，分析了一定高度下气动压力、气动热效应对光学窗口面形变形的影响，

结果表明在压力场、温度载荷共同作用下,光学窗口的变形随厚度增加而减小。进一步分析了不同高度环境下不同厚度光学窗口面型变形的变化情况,认为光学窗口厚度的选择有必要充分考虑其飞行环境高度。最后结合强度分析及热光学分析,设计该飞行条件的合理光学窗口厚度为 15 mm。文中为不同飞行高度范围光学窗口厚度的选择提供了一定依据。

#### 参考文献:

- [1] Zhang Hongwen, Cao Guohua, Li Yanwei, et al. Thermal-optical evaluation to optical window of near space aerial remote sensor surrounding hypersonic[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2014, 43(12): 3958–3962. (in Chinese)  
张洪文, 曹国华, 李延伟, 等. 临近空间超声速航空遥感器光学窗口热光学评价[J]. 红外与激光工程, 2014, 43(12): 3958–3962.
- [2] Zhang Hongwen, Cao Guohua, Li Yanwei, et al. Influence of three section type optical window on imaging quality of aerial camera [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2013, 42(6): 1623–1627. (in Chinese)  
张洪文, 曹国华, 李延伟, 等. 三折式光学窗口对航空相机成像的影响[J]. 红外与激光工程, 2013, 42(6): 1623–1627.
- [3] Li Yanwei, Yang Hongwei, Cheng Zhifeng. Thermal/structural/optical integrated design for optical window in aerial remote sensor [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2012, 41(8): 2012–2016. (in Chinese)  
李延伟, 杨洪波, 程志峰. 航空遥感器光学窗口光机热一体化设计[J]. 红外与激光工程, 2012, 41(8): 2012–2016.
- [4] Yoder P R. Opto-Mechanical Systems Design [M]. Zhou Haixian, Cheng Yunfang, translated. Beijing: China Machine Press, 2008: 281–282, 302–303. (in Chinese)  
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: 281–282, 302–303.
- [5] 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.
- [6] Shi Jinfeng, Wu Qingwen, Zhang Jianping. Thermal optical analysis for optical window of high-altitude and high-speed aerial camera[J]. *Acta Optica Sinica*, 2012, 32(4): 0422004. (in Chinese)  
石进峰, 吴清文, 张建萍. 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.
- [7] Wang Naixiang, Xu Yulei, Hui Shouwen. Optical/structural/thermal analysis of optical window of high-maher airborne remote sensor [J]. *Journal of Changchun University of Science and Technology (Natural Science Edition)*, 2014, 37(3): 6. (in Chinese)  
王乃祥, 徐钰蕾, 惠守文. 高马赫航空遥感器光学窗口的光机热分析[J]. 长春理工大学学报(自然科学版), 2014, 37(3): 6.
- [8] Pearson E, Stepp L. Response of large optical mirror to thermal distributions [C]// SPIE, 1987, 748: 215–228.
- [9] 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. (in Chinese)  
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.
- [10] Fang Yu, Xiangli Bin, Lv Qunbo, et al. Design of optical window thickness and influence of its deformation on multi-spectral camera's optical performance[J]. *Acta Optica Sinica*, 2013, 33(4): 0422007. (in Chinese)  
方煜, 相里斌, 吕群波, 等. 光学窗口厚度设计及形变对相机性能影响[J]. 光学学报, 2013, 33(4): 0422007.