

# 空间相机光学窗口的热光学评价\*

赵立新

(中国科学院空间科学与应用总体部, 北京 100080)

**摘 要** 光学窗口是空间相机光学系统中直接暴露在轨道热真空环境中的光学元件, 所处的热环境非常复杂, 要产生温度梯度, 从而对空间相机的成像质量和分辨率产生影响。文中结合工程实际, 以光学波像差的基本理论为基础对空间相机光学窗口的非轴对称温度场进行了热光学评价, 编程计算了空间相机光学窗口在一个轨道周期内各典型位置处的均方根波像差, 并把计算结果与美国“天空实验室”光学窗口的相应数据进行比较, 以验证本文热光学分析的合理性、正确性。

**关键词** 光学窗口, 空间相机, 热光学分析, 波像差。

## 1 引 言

空间光学窗口安装在飞船轨道舱的内壁上, 地面目标的成像光线必须通过总厚度达 90 mm 的双层玻璃窗口, 再经过空间相机的光学系统成像在胶片上。光学窗口直接暴露在复杂多变的太空环境中, 在很大程度上影响着空间相机的分辨率和成像质量。

光学窗口与太空热环境进行各种形式的热交换, 由于窗口玻璃的热传导系数较小, 热交换不均匀会使光学窗口产生较大的非轴对称温度梯度。它不仅使玻璃材料的折射率发生变化, 还会因不均匀热膨胀而导致窗口面形发生变化。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, 影响空间相机成像质量, 降低分辨率。因此, 必须将光学窗口的温度梯度控制在允许的范围内, 这就需要对光学窗口的非稳态温度场进行光学计算——热光学评价。

随着我国航天事业的发展, 空间相机的分辨率越来越高, 对光学窗口的要求也越来越严格。长期以来, 由于国内缺少必要的理论研究, 故对这类工程问题的解决带有较大的盲目性。本文对上述问题作了定量的计算和探讨, 总结了一套理论和计算方法。

## 2 光学波像差的基本理论

根据空间相机光学系统提出的技术要求, 双层光学窗口的均方根波像差值  $RMS \leq \lambda/14$ 。它包括光学窗口的温度梯度、热变形、压力变形等误差因素, 涉及到光学波像差的基本理论。

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, 即波像差是用计算光程的

\* 国家自然科学基金资助项目, 59486003

收稿日期: 1996-08-10; 收到修改稿日期: 1997-08-26

方法来计算的。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。根据马吕斯定律, 入射波面上各点到经任意次折射或反射后的出射波面上相应点之间的光程都是相等的(即出射波面和入射波面之间是等光程的), 只是因为光学系统的像差使出射后的等光程波面偏离了理想波面而已, 此偏离量用波像差来表示。只要分别求出从入射波面出发的各条光线到出射参考波面交点之间的光程  $\Sigma nl$ , 便可求出各光线之间的光程差<sup>[1]</sup>。

空间相机光学窗口对成像质量的影响如图 1 所示。从像差和波像差的角度来看, 光学窗口和成像系统中的光学透镜或反射镜是等同的。

地面目标发出的光波可以看做是与光学窗口表面平行的平面光波, 透过光学窗口后, 波面发生畸变。光学窗口为双层平板玻璃, 其参考波面与入射波面平行, 但从最小二乘法的角度, 波面畸变的均方根波像差是相对于最佳拟合平面的。光学窗口的温度场大体上是轴对称的, 所以其最佳拟合平面仍与入射波面平行, 即参考波面与最佳拟合平面是平行的, 参见图 1。

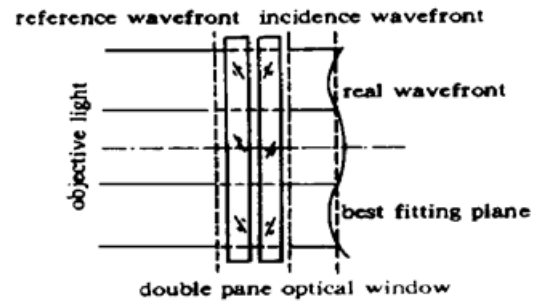


Fig. 1 The influence of optical window to wavefront

### 3 光学窗口的热光学评价

光学窗口的外表面暴露在外层空间(真空)中, 真空的折射率为 1, 而在 20℃ 和 101 kPa 的情况下, 空气的折射率为 1.000272。在对光学窗口进行光学评价时, 所有的折射率都要取为绝对折射率(相对于真空的折射率)。

光学玻璃在某一温度  $t$  下的绝对折射率  $n_t$  用下式表示:

$$n_t = n_0 \times 1.000272 + \alpha(t - 20) \quad (1)$$

式中  $n_0$  为光学玻璃在 20℃ 时的相对折射率;  $\alpha$  为光学玻璃的折射率温度变化率; 光学玻璃在某一温度  $T$  下的长度  $l_T$  为:

$$l_T = l_0 \times [1 + \beta(t - 20)] \quad (2)$$

式中  $l_0$  为光学玻璃在 20℃ 时的长度;  $\beta$  为光学玻璃的热膨胀系数。

把厚度分别为 45 mm 的双层光学窗口沿轴向分成 20 个层单元, 每个玻璃单元的轴向名义厚度是相同的, 均为 4.5 mm, 而实际厚度则取决于轴向热膨胀。因为光学窗口为薄板结构, 周边约束为无应力密封, 而且温度变化很小, 可以忽略径向和周向热膨胀对轴向热膨胀的影响。根据已算得的光学窗口的非稳态非轴对称温度场<sup>[2]</sup>, 采用上述公式, 可以求出光学窗口的每个单元的轴向热膨胀和绝对折射率, 即成像光线在任一单元内的光程  $n_r l_r$ 。

把光学窗口的透光面沿径向和周向划分为  $10 \times 20$  个表面单元。对应于每个表面单元, 取一根成像光线从表面单元的中心处开始追迹。由于成像光线均垂直于光学窗口表面, 在光程计算中光线在每个单元中是直线传播的, 因此每根成像光线都垂直透过了 20 个窗口玻璃单元。将此 20 个单元内的光程累加, 可得到此成像光线在双层窗口玻璃内的光程。

光程计算时, 必须计算由于窗口玻璃的热膨胀而造成的空间或真空间隔的减少, 假定光学窗口的轴向热膨胀沿轴的两个方向上相等, 又因为光学窗口的工作标称温度为 21℃, 介质折射率以 21℃ 为基准, 则每根成像光线的光程  $L$  可通过(1)式求得。

$$L = \sum_1^{20} [n_r l_r - n l - 0.5(l_T - l)(n_1 + n_2)] \quad (3)$$

式中  $n_T$  为窗口玻璃单元在温度为  $T$  时的折射率;  $l_T$  为窗口玻璃单元在温度为  $T$  时的轴向厚度;  $n$  为窗口玻璃在温度为  $21^\circ\text{C}$  时的折射率;  $l$  为窗口玻璃在温度为  $21^\circ\text{C}$  时的轴向厚度;  $n_1$ 、 $n_2$  为窗口玻璃前后的气体或真空在  $21^\circ\text{C}$  时的折射率;

根据(3)式, 求出通过每个表面单元中心处的成像光线的光程, 再以表面单元的表面积为权重, 求出总共  $10 \times 20$  根成像光线的平均光程, 并经此平均光程为基准, 求出每根光线的光程差  $\Delta L$ ,

$$\Delta L = L - \frac{10 \times 20}{i} [L \times S(i, j)] / S \quad (4)$$

式中,  $S(i, j)$  为与该光线相对应的表面单元的表面积;  $S$  为光学窗口通光面积, 等于各表面单元的面积  $S(i, j)$  之和;

在已知每根成像光线的光程差  $\Delta L$  的情况下, 再次以表面单元的面积作为权重, 求出整个通光口径上的均方根波像差值,

$$RMS = \sqrt{\sum [\Delta L^2 \times S(i, j)] / S} \quad (5)$$

根据上式, 也可分别求出内、外层光学窗口各自的均方根波像差  $RMS$  值, 但需说明的是, 内、外层光学窗口各自的均方根波像差的代数和要大于双层窗口的总均方根波像差值, 这是符合误差合成原理的, 因为内、外层光学窗口的温度场不同, 波像差部分抵消。

根据上述参数和公式, 以及已算出的光学窗口在不同轨道位置处的非稳态温度场数据, 可编程分别计算出光学窗口各单元在不同轨道位置处的  $n_T$  和  $l_T$ , 进而求出光学窗口在不同轨道位置处的均方根波像差  $RMS$  值, 计算结果见表 1。

Table 1.  $RMS$  wavefront error of optical window in an orbit cycle ( $RMS$  value, unit: nm)

| orbit angle | outer window | inner window | double window | orbit angle | outer window | inner window | double window |
|-------------|--------------|--------------|---------------|-------------|--------------|--------------|---------------|
| $0^\circ$   | 7.546        | 0.898        | 7.483         | $180^\circ$ | 8.163        | 1.814        | 9.228         |
| $15^\circ$  | 7.428        | 0.867        | 7.358         | $195^\circ$ | 8.238        | 1.960        | 9.331         |
| $30^\circ$  | 7.366        | 0.960        | 7.381         | $210^\circ$ | 8.308        | 2.084        | 9.418         |
| $45^\circ$  | 7.356        | 1.028        | 7.501         | $225^\circ$ | 8.371        | 2.189        | 9.491         |
| $60^\circ$  | 7.394        | 0.994        | 7.673         | $240^\circ$ | 8.428        | 2.278        | 9.551         |
| $75^\circ$  | 7.477        | 0.850        | 7.876         | $255^\circ$ | 8.473        | 2.354        | 9.597         |
| $90^\circ$  | 7.603        | 0.669        | 8.130         | $270^\circ$ | 8.493        | 2.417        | 9.617         |
| $105^\circ$ | 7.733        | 0.706        | 8.404         | $285^\circ$ | 8.459        | 2.414        | 9.532         |
| $120^\circ$ | 7.829        | 0.938        | 8.622         | $300^\circ$ | 8.331        | 2.237        | 9.212         |
| $135^\circ$ | 7.912        | 1.199        | 8.804         | $315^\circ$ | 8.138        | 1.919        | 8.740         |
| $150^\circ$ | 7.998        | 1.435        | 8.965         | $330^\circ$ | 7.921        | 1.523        | 8.226         |
| $165^\circ$ | 8.082        | 1.640        | 9.107         | $345^\circ$ | 7.715        | 1.144        | 7.782         |

根据表 1, 计算出光学窗口在一个轨道周期内的平均均方根波像差值为  $8.6262 \text{ nm}$ , 变化范围为  $(7.358 \sim 9.617) \text{ nm}$ 。

#### 4 光学窗口的热光学误差与热控方式的关系

为了减小光学窗口的温度梯度, 对光学窗口采取的主要热控方式如下: 1) 在窗口玻璃外表面镀阶梯形 ITO 透明导电膜, 通电加热以补偿从窗口外表面辐射流失的热量; 2) 在窗口组件铝外框上设置 8 片聚酰亚胺薄膜电加热片, 以补偿从舱壁法兰传导流失的热量。本文设

定了四种特殊工况, 以说明光学窗口热光学误差与热控方式的关系。

1) 只用 ITO 透明导电膜对窗口玻璃外表面加电热控, 聚酰亚胺薄膜电加热器不对窗口外框加热, 光学窗口初始温度为 21℃;

2) 只用聚酰亚胺薄膜电加热器对窗口外框加电热控, ITO 透明导电膜不对窗口玻璃外表面加热, 光学窗口初始温度为 21℃;

3) ITO 透明导电膜和聚酰亚胺薄膜电加热器都不加热, 光学窗口从初始温度 21℃ 自然冷却;

4) ITO 透明导电膜和聚酰亚胺薄膜电加热器都正常加电热控, 但光学窗口初始温度为 20℃。

在上述四种特殊工况下, 分别对光学窗口的非稳态温度场进行热光学评价, 其均方根波像差(用飞船过会日点时的光学窗口均方根波像差来表示)随轨道周期变化的规律如图 2 所示。为了比较, 图中还列出了光学窗口正常热控工况(初始温度 21℃)下的均方根波像差变化规律, 以及光学窗口由于各种误差因素而造成的均方根波像差最大允许值 40 nm。

从图 2 中可以看出, 在正常热控(初始温度 21℃)工况下, 光学窗口的温度梯度很小, 热光学误差为 7.48 nm(过会日点处), 小于光学窗口综合误差最大允值 40 nm。而在其它工况下, 光学窗口的热光学误差都大于 40 nm, 这充分说明了光学窗口热控制的必要性。

在初始温度 20℃、正常热控工况下, 光学窗口在发射后(3~4)个周期内, 热光学误差较大, 最大可达 60 nm, 随后逐渐变小, 与正常热控(初始温度 21℃)工况的均方根波像差曲线重合, 这说明了光学窗口临发射前预热的必要性。

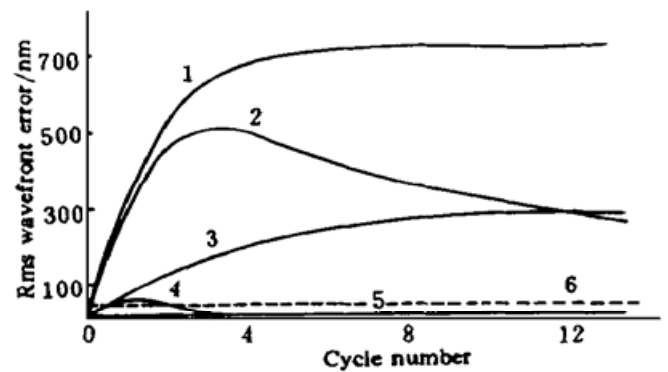


Fig. 2 RMS wavefront error varies with orbit cycle in different modes. 1: only ITO film heater on (window temperature 21℃); 2: no heating, temperature naturally drop (window temperature 21℃); 3: only frame heater on (window temperature 21℃); 4: normal thermal control (window temperature 20℃); 5: normal thermal control (window temperature 21℃); 6: maximum error (various errors)

## 5 光学窗口的热光学误差和国外同类窗口的比较

对比国内外各种典型窗口的技术要求和设计特点, 美国“天空实验室”的光学窗口和空间相机光学窗口最为接近<sup>[3]</sup>, 因此, 把计算结果与美国“天空实验室”光学窗口的相应数据比较如下:

Table 2. Optical windows comparison between

| parameter                         | the space carema                  | American 'Skylab'                              |
|-----------------------------------|-----------------------------------|--|
| windows pane dimension            | $\phi 566 \times 45$ double panes | 591.8 $\times$ 449.1 $\times$ 40.6 single pane |
| total area                        | 0.2516 m <sup>2</sup>             | 0.2658 m <sup>2</sup>                          |
| luminous area                     | 0.2124 m <sup>2</sup>             | 0.1721 m <sup>2</sup>                          |
| RMS wavefront error range         | (7.358~9.617) nm                  | (7.1~12.6) nm                                  |
| RMS wavefront error average value | 8.626 nm                          | 10.3 nm  |

空间相机光学窗口与美国“天空实验室”光学窗口采用的热控方案基本上相同,都是在窗口玻璃外表面镀透明导电膜,在窗口外框上设置电加热器,因而两种窗口的热光学误差具有一定的可比性。从表2可以看出,空间相机光学窗口的热光学误差与美国“天空实验室”光学窗口的数据接近,其均方根波像差的平均值略优于美国“天空实验室”光学窗口的数据。原因如下:1)美国“天空实验室”光学窗口的热光学分析只计算了“热状态”和“冷状态”两种极限状态,即热参数的取值使得对窗口的空间热流分别为最大或最小,同时把极限热边界条件耦合在一起;而本文是按照空间热辐射的客观变化规律进行的外热流计算。2)美国“天空实验室”光学窗口的舱壁法兰上,安装了低温的红外光谱仪,使得舱壁法兰面上有9℃左右的横向温差,正是这个横向温差造成了“天空实验室”光学窗口上的最大的横向温度梯度;而本文计算的光学窗口的舱壁法兰用液体管路进行了热控,温度波动较小。通过表2的数据比较,在一定程度上说明了本论文热光学分析结果的合理性和正确性。

**小 论** 本文介绍了光学波像差的基本理论,并以此为基础,结合工程实际,对空间相机光学窗口进行了热光学评价,编程计算了空间相机光学窗口在一个轨道周期内各典型位置处的均方根波像差。有关光学窗口的理论研究和工程实践,具有广阔的发展前景。进一步开展这个领域的研究,不仅具有重要的学术意义,而且也是我国航天事业进一步发展的需要。

### 参 考 文 献

- [1] 张以谟, 应用光学, 北京: 机械工业出版社, 1982. 277~ 289
- [2] 赵立新, 空间光学窗口和外遮光罩的热光学分析及其在工程中的应用. 中国科学院长春光学精密机械研究所博士学位论文, 1996. 8
- [3] James I. Gimlett, Donald H. Garbaccio, Multiple docking adapter window for S-190 experiment. *Appl. Opt.*, 1974, 13(11) : 2629~ 2637

## Thermal-Optical Evaluation to Optical Windows of Space Camera

Zhao Lixin

(Center for Space Science and Applied Research, The Chinese Academy of Sciences, Beijing 100080)

(Received 10 August 1996; revised 26 August 1997)

**Abstract** In the optical system of space camera, the optical window is the only optical component exposed to the very complicated thermal-vacuum circumstance in orbit space. The temperature gradient occurs imperatively and then influences to the image quality and resolution of the space camera. Based on the theory of optical wavefront error and combining the engineering practice, the thermal-optical evaluation has been done to the optical window with non-symmetric temperature field. The RMS wavefront errors of the optical window have been calculated on each typical position in orbit cycle. The results of the thermal-optical evaluation in this paper are verified by the optical windows of American “Skylab” spaceship as a reference and a proof.

**Key words** optical window, space camera, thermal-optical evaluation, wavefront error.