

基于热光学分析的真空相机光学镜设计

许明明, 侯永辉, 陈文亮, 姜海娇, 季杭馨, 徐腾, 胡中文, 王磊, 陈忆

¹中国科学院国家天文台南京天文光学技术研究所, 江苏 南京 210042;

²中国科学院天文光学技术重点实验室, 江苏 南京 210042

摘要 以热光学分析为基础,对复杂环境下改正镜作为光学窗口的玻璃厚度进行了优化设计。对改正镜的强度及其所处的热环境进行了分析,将温度场映射到结构模型中,利用有限元计算改正镜在热-力耦合情况下的改正镜的变形量和面形数据,对正镜面形数据进行拟合和处理,最后将处理后的改正镜面形数据导入光学设计方案中,分析改正镜厚度对光谱仪性能影响。结果表明改正镜厚度应该不小于 10 mm;当改正镜厚度为 15 mm 时,改正镜受热力学影响可以忽略。因此改正镜作为光学窗口既能满足强度和可靠性要求,又能满足光谱仪性能指标,为窗口的设计提供了依据。

关键词 测量;改正镜;热光学分析;真空相机;热力耦合

中图分类号 P111.42 **文献标识码** A

doi: 10.3788/LOP54.121204

Design of Corrector Mirror of Vacuum Camera Based on Thermal-Optical Analysis

Xu Mingming, Hou Yonghui, Chen Wenliang, Jiang Haijiao, Ji Hangxin, Xu Teng, Hu Zhongwen, Wang Lei, Chen Yi

¹*Nanjing Institute of Astronomical Optics & Technology, National Astronomical Observatories, Chinese Academy of Sciences, Nanjing, Jiangsu 210042, China;*

²*Key Laboratory of Astronomical Optics & Technology, Chinese Academy of Sciences, Nanjing, Jiangsu 210042, China*

Abstract Based on the thermal-optical analysis, the glass thickness of the corrector mirror used as an optical window is optimized under the complex environment. The intensity and the thermal environment of the corrector mirror is analyzed. By mapping the temperature field to structural model, the deformation and surface data of the corrector mirror under the thermal-force coupling condition are calculated by the finite element method. The surface data of corrector mirror is fitted and calculated. Finally, the processed surface data of corrector mirror is brought into the optical design scheme, and the effect of the thickness of corrector mirror on the performance of spectrometer is analyzed. The results show that the thickness of the corrector mirror should be no less than 10 mm. If the thickness of the corrector mirror is 15 mm, the effect of thermodynamics on corrector mirror can be ignored. It is concluded that the corrector mirror acting as optical window can not only meet the strength and reliability requirements, but also meet the optic index of the spectrometer. These results provide the guidance for the optical window design.

Key words measurement; corrector mirror; thermal-optical analysis; vacuum camera; thermal-force coupling

OCIS codes 120.4570; 120.6780

1 引言

随着科学技术的发展,大尺寸真空相机系统已广泛应用于航空、航天、遥感、天文和高精密检测等多个重

收稿日期: 2017-05-19; **收到修改稿日期:** 2017-05-27

基金项目: 国家自然科学基金(11273038,11603054,11503059,11473049)

作者简介: 许明明(1981—),男,博士,工程师,主要从事光机精密设计和热力耦合分析技术方面的研究。

E-mail: mingxu@niaot.ac.cn

要领域^[1-4]。在航空领域,真空相机应用于无人机侦察和高空侦察等方面^[5];在航天领域,真空相机用于资源探索和空间遥感等方面^[1];在天文领域,真空相机逐步应用于大型望远镜终端设备光谱仪中,真空相机的性能将直接影响光谱仪获取天体图片信息的能力,因此对光谱仪相机结构提出了新的设计要求^[6]。目前国际主流的 8~10 m 级望远镜以及在建的三十米望远镜(TMT)的光谱仪相机采用的都是真空相机,故真空相机封窗的设计成为真空相机设计的关键点之一。在光机精密设备设计中,由于工作环境的复杂,必须考虑多方面的因素,热力方面就是影响光机精密设计的主要因素。因此,热力学耦合分析方法是光机精密设备研发中必不可少的手段之一^[7-8]。

大天区面积多目标光纤光谱天文望远镜(LAMOST)采用施密特系统,芯片需要在真空低温环境下工作,如对电荷耦合器件(CCD)芯片进行真空制冷,其支撑结构较大,在光路中将造成 25% 的挡光。为此,基于尽可能减少 CCD 支撑结构挡光的原则,开展了 LAMOST 真空相机结构关键技术研究,即将整个相机系统放置于真空环境中。改正镜作为真空相机系统改正光学性能的光学元件,既为照相通光窗口,又是压力隔离气密窗口(将罐内的真空与外部的大气环境隔离),同时也是温度隔离窗口(将罐内的热沉与外部室温环境隔离)。由于改正镜的热传导系数较小,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,导致改正镜因不均匀热膨胀而使窗口面形发生变化,改正镜的光学性能直接关系到空间相机的成像质量。另一方面,改正镜要将罐内的真空与外部大气环境隔离,因此需要承受 1 个标准大气压的压力。从窗口的强度及可靠性考虑,需要保证窗口玻璃的厚度足够大,而当窗口玻璃厚度太大时,由温度场变化引起的折射率梯度变化和热变形等会更加明显,严重时会导致窗口不满足其光学指标要求。

本文综合考虑各种因素和要得到的结果,优化设计改正镜作为光学窗口时的合理尺寸。设计出既能满足机械强度可靠性要求,又能满足光谱仪光学性能要求的改正镜尺寸,使光谱仪真空相机系统更加科学合理。

2 原 理

对于天文高分辨光谱仪而言,其光学性能分析主要集中在以下几个方面^[8-10]:

- 1) 压力差和温度变化等原因引起的玻璃的面形变化;
- 2) 光学镜面面形变化等引起的视场离散斑的大小;
- 3) 光学镜面面形变化等引起的 CCD 像面漂移。

改正镜一面是高斯非球面,另一面是平面。对于高斯非球面,利用高次非球面方程结合最小二乘法拟合镜面面形变化后新的高次非球面方程;对于改正镜另一平面,利用齐次变换法求解平面的刚体移动量。最后将高次非球面方程结合平面刚体移动量一起带入 Zemax 光学方案中,分析对光谱仪整体性能的影响。

2.1 高次非球面方程系数拟合过程

在压力差作用下,改正镜高斯非球面也会产生相应的面形形变,使得原有的高次非球面方程发生变化,为查看变形后的改正镜高斯非球面对成像质量的影响,通过最小二乘法求出变形后改正镜高斯非球面的高次非球面方程。参照原有 LAMOST 改正镜高斯非球面的高次非球面方程给出的拟合方程形式为

$$z = a \times r^2 + b \times r^4 + c \times r^6 + d \times r^8 + e \times r^{10} \quad (1)$$

以厚度为 18 mm 改正镜为例,通过 Origin 软件求解得出(1)式的系数,如表 1 所示。根据表 1 所示,改正镜厚度为 18 mm 时,拟合后的高次非球面系数和理论设计值非常接近。

表 1 高次非球面方程系数和理论设计系数

Table 1 High order aspherical equation coefficient and theoretical design coefficient

	<i>a</i>	<i>b</i>	<i>c</i>	<i>d</i>	<i>e</i>
Fitting coefficient	-8.30262×10^{-5}	2.85911×10^{-9}	2.14692×10^{-14}	-6.48294×10^{-18}	2.73807×10^{-23}
Design coefficient	-8.30107×10^{-5}	2.84118×10^{-9}	2.77092×10^{-14}	-1.48518×10^{-18}	6.53659×10^{-23}

2.2 改正镜平面的刚体平移量求解原理

改正镜平面的刚体位移可以用齐次坐标变换法求解,齐次坐标变换法求解镜面平移原理如下所述^[10]。在光机结构有限元分析数据中,设镜面一节点理想坐标 (x_i, y_i, z_i) 沿 x 、 y 、 z 轴平移量分别为 e 、 f 、 g ,

绕 x 、 y 、 z 轴旋转量分别为 $(\theta_x, \theta_y, \theta_z)$ ，由于旋转量非常小，忽略高阶项，总坐标变换矩阵 \mathbf{T} 可如下表示：

$$\begin{bmatrix} x'_i \\ y'_i \\ z'_i \\ 1 \end{bmatrix} = \mathbf{T} \cdot \begin{bmatrix} x_i \\ y_i \\ z_i \\ 1 \end{bmatrix}, \mathbf{T} = \begin{bmatrix} 1 & -\theta_z & \theta_y & e \\ \theta_z & 1 & -\theta_x & f \\ -\theta_y & \theta_x & 1 & g \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}, \quad (2)$$

式中， (x_i, y_i, z_i) 为变形前镜面节点坐标， (x'_i, y'_i, z'_i) 为变形后节点坐标。令

$$Q = \sum_{i=1}^M [(x'_i - x_i - \theta_z y_i - \theta_x z_i - e)^2 + (y'_i - y_i - \theta_z x_i + \theta_x z_i - f)^2 + (z'_i - z_i - \theta_x y_i + \theta_y x_i - g)^2]. \quad (3)$$

若想结果拟合误差最小，只要 Q 最小，由最小二乘法得到，则：

$$\frac{\partial Q}{\partial e} = \frac{\partial Q}{\partial f} = \frac{\partial Q}{\partial g} = \frac{\partial Q}{\partial \theta_x} = \frac{\partial Q}{\partial \theta_y} = \frac{\partial Q}{\partial \theta_z} = 0. \quad (4)$$

根据(4)式中的 6 个方程组可以求出刚体平移量为 $[e \ f \ g \ \theta_x \ \theta_y \ \theta_z]$ 。

因此，可以求得总坐标变化矩阵 \mathbf{T} ，就可以分离刚体位移， i 节点变形前坐标整体移动到仅包含刚体位移的位置：

$$\begin{bmatrix} x''_i \\ y''_i \\ z''_i \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & -\theta_z & \theta_y & e \\ \theta_z & 1 & -\theta_x & f \\ -\theta_y & \theta_x & 1 & g \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} x_i \\ y_i \\ z_i \\ 1 \end{bmatrix}. \quad (5)$$

用有限元计算得到的节点面型数据，减去仅包含刚体位移的数据，就可以得到仅包含表面畸变的面型数据，即：

$$\begin{bmatrix} \Delta x'_i \\ \Delta y'_i \\ \Delta z'_i \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x'_i \\ y'_i \\ z'_i \\ 1 \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} x''_i \\ y''_i \\ z''_i \\ 1 \end{bmatrix}. \quad (6)$$

以 18 mm 改正镜为例，求解改正镜平面的刚体平移量如表 2 所示。表 2 中刚体平移单位为 m，转动单位为 $(^\circ)$ 。根据表 2 结果可知，刚体移动量较小。实际计算过程中，将高次非球面方程结合平面刚体平移量一起带入 Zemax 光学方案中，分析对光谱仪整体性能的影响。

表 2 改正镜平面刚体平移量

Table 2 Translation of rigid body of the corrector mirror plane

$\Delta x / \text{m}$	$\Delta y / \text{m}$	$\Delta z / \text{m}$	$\theta_x / (^\circ)$	$\theta_y / (^\circ)$	$\theta_z / (^\circ)$
-9.726×10^{-9}	-1.100×10^{-9}	5.339×10^{-7}	5.5578×10^{-9}	-4.2917×10^{-7}	1.5757×10^{-10}

3 分析与讨论

3.1 改正镜封窗热力耦合计算

改正镜采用的是 K9 玻璃，K9 玻璃材料为脆性材料，在压力作用下会使改正镜产生形变，从而产生光学误差，此外也会因受力过大对改正镜产生强度破坏，即表面会出现裂纹或断裂，因此需要对改正镜进行强度分析，以确定满足强度要求的改正镜的最小厚度。K9 玻璃材料物理性能如表 3 所示。

表 3 改正镜(K9)材料参数

Table 3 Material parameters of corrector mirror (K9)

Young's modulus /GPa	Density / $(\text{kg} \cdot \text{m}^{-3})$	Specific heat / $\text{J}/(\text{kg} \cdot ^\circ\text{C}^{-1})$	Coefficient of thermal expansion / $^\circ\text{C}$	Allowable stress /MPa	Thermal conductivity / $(\text{W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot ^\circ\text{C}^{-1})$
80	2520	858	3.5×10^{-6}	48	1.2

改正镜作为封窗在温度和压力耦合作用下，会产生面形变化。实测真空相机外部环境一昼夜温度

变化为 $0.3\text{ }^{\circ}\text{C}$ ，且真空相机内部和外部压差为一个大气压。改正镜尺寸为 DN244，厚度为 10 mm ，用 Workbench 15.0 计算模型联合计算热力耦合结果。真空相机通光方向为 Z 方向，边界条件为改正镜圆盘边界约束 X、Y、Z 方向自由度。改正镜作为封窗窗口在温度场和力学场作用下变形图如图 1 所示。

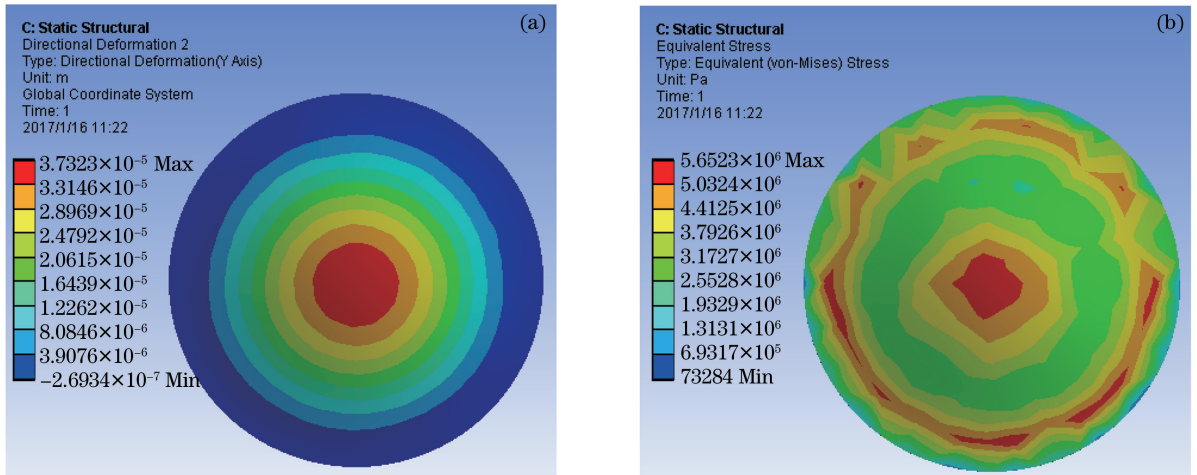


图 1 改正镜(a)变形图和(b)应力图

Fig. 1 (a) Deformation pattern and (b) stress contours of the corrector mirror

改正镜在热和气压双重作用下，会引起改正镜面形变化和光程差变化。根据实际设计改正镜光学尺寸，通过有限元软件建立改正镜厚度从 5 mm 到 15 mm 的优化设计模型。选取 7 组玻璃厚度不同时窗口的热力耦合变形情况，最大变形结果如图 2 所示，改正镜的最大应力和剪切应力如图 3 所示。

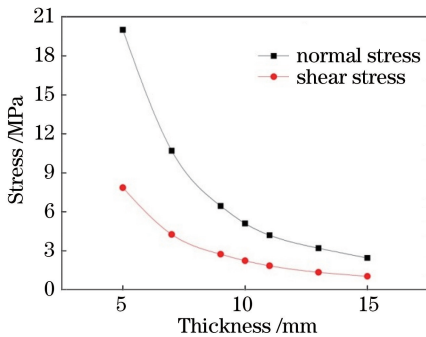


图 2 最大变形量

Fig. 2 Maximum deformation

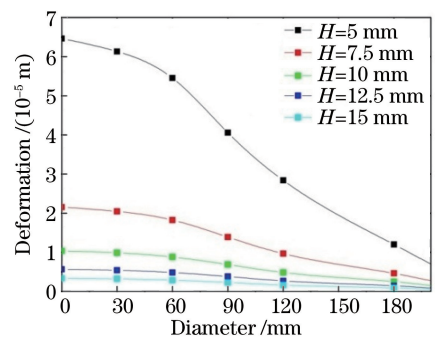


图 3 改正镜最大应力和剪切应力值

Fig. 3 Maximum stress and shear stress of the corrector mirror

3.2 光学性能分析

图 4 为 LAMOST 光谱仪光路示意图，LAMOST 低分辨率光谱仪相机采用施密特系统，在现有机械结构设计中，CCD 场镜及其支撑结构位于施密特照相镜的焦面上，在光路中会导致 25% 的挡光。为尽可能提

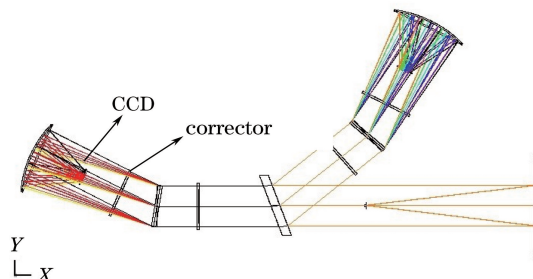


图 4 LAMOST 低分辨率光谱仪光路示意图

Fig. 4 Schematic diagram of LAMOST low resolution spectrometer light path

高光谱仪的通光效率,采用真空相机系统方案,将整个相机系统放置在真空系统中。这种真空相机方案设计会将光谱仪本体光学效率提高 10% 以上。

在热力耦合作用下改正镜产生形变和刚体平移,通过有限元软件将已求得温度场代入到力学模型中,计算窗口玻璃在温度和压力情况下的变形,将计算的结果通过接口程序计算出改正镜在热和压力耦合情况下的面形,将面形数据通过 Zemax 光学软件接口输入到光学方案中,计算不同尺寸改正镜在热力耦合作用下对光谱仪性能的影响。为了能全面得到 CCD 像面上离散斑大小和漂移随厚度变化情况,下面给出了三个不同波长(对应两个不同视场)的离散斑和像值漂移情况,CCD 像面上离散斑大小和漂移随厚度变化情况如图 5、图 6 和图 7 所示。

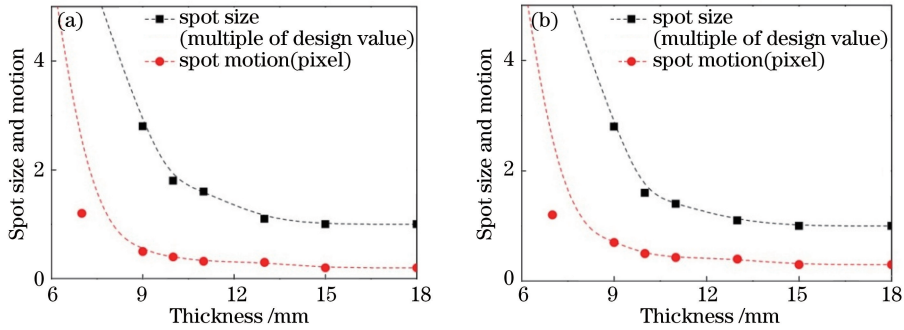


图 5 波长 570 nm CCD 像面离散斑和像面漂移。(a) 视场 1; (b) 视场 2

Fig. 5 Discrete spot and motion of CCD image plane with wavelength of 570 nm. (a) Field of view 1; (b) field of view 2

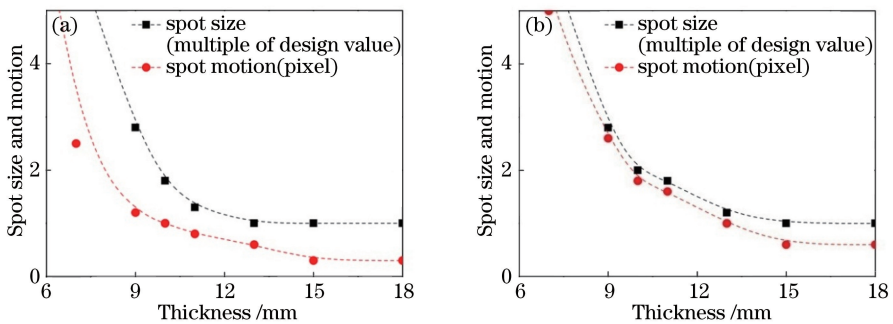


图 6 波长 700 nm CCD 像面离散斑和像面漂移。(a) 视场 1; (b) 视场 2

Fig. 6 Discrete spot and motion of CCD image plane with wavelength of 700 nm. (a) Field of view 1; (b) field of view 2

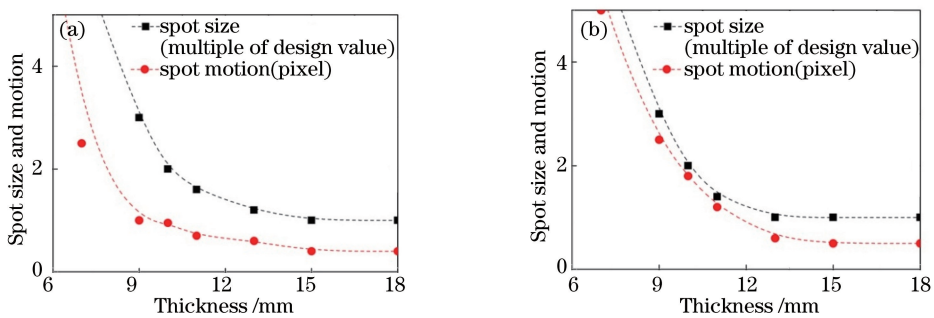


图 7 波长 740 nm CCD 像面离散斑和像面漂移。(a) 视场 1; (b) 视场 2

Fig. 7 Discrete spot and motion of CCD image plane with wavelength of 740 nm. (a) Field of view 1; (b) field of view 2

如图 5~图 7 所示,在 5~18 mm 厚度范围内,厚度越厚改正镜受热力耦合作用影响越小。在分析过程中,对 CCD 像面进行调焦,使离散斑最小。当改正镜厚度为 15 mm 时,经过系统调焦后的离散斑大小近似等于理论设计值。同样分析图像漂移结果为:改正镜厚度在 5~18 mm 范围内,厚度越厚,离散斑漂移量越小。当改正镜厚度为 10 mm 时,图像漂移约为 0.95 pixel(1 pixel 为 12 μm);当改正镜厚度为 15 mm 时,图

像漂移约为 0.45 pixel。

理论分析可知,改正镜压力差是恒定的,因此,内外压力差引起的离散斑点漂移可以通过调节 CCD 靶面位置和姿态进行矫正。但温度变化引起的离散斑点漂移无法通过调节靶面位置和姿态来矫正,温度引起离散斑点漂移随改正镜厚度变化如图 8 所示。

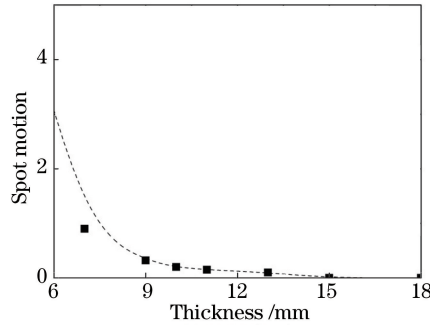


图 8 CCD 像面漂移随改正镜厚度变化

Fig. 8 Motion of CCD image plane varies with corrector mirror's thickness

根据计算和分析,不同厚度的改正镜力学性能和光学性能如表 4 所示。从安全系数考虑,如果安全系数大于 8 时,改正镜厚度应不小于 10 mm;从离散斑大小考虑,如果改正镜厚度为 15 mm 时,通过调节等手段可以让离散斑大小达到理论值;从离散斑点漂移情况考虑,改正镜厚度不小于 10 mm 时,可以忽略温度引起的漂移。综合对比可知,改正镜厚度为 15 mm 时性能最佳;如果对光谱仪分辨率要求不高,可以选择 10 mm 厚的改正镜,在狭缝大小不变的情况下,1.8 倍的离散斑会降低光谱仪分辨率。

表 4 不同改正镜厚度性能对比

Table 4 Performance comparison of corrector mirrors with different thicknesses

Thickness of corrector /mm	5	7	9	10	11	13	15	18
Safe factor	2.5	5.1	7.75	10	11.9	15.6	20.7	24.1
Size for design	>20	>6	3	1.8	1.3	1.1	1	1
Image motion /pixel	>10	3.5	1.5	0.95	0.85	0.6	0.45	0.4
Image motion with temperature /pixel	5.1	0.9	0.32	<0.2	<0.2	<0.2	<0.2	<0.2

根据概率分布的分析方法对窗口玻璃的力学性能进行可靠性分析,分析结果为^[11]:

$$\eta = \exp\left[-\left(\frac{\sigma}{\sigma_0}\right)^x\right], \quad (7)$$

式中, η 为窗口玻璃可靠度, σ 为窗口玻璃的工作应力, σ_0 为窗口玻璃的许用应力, x 为窗口玻璃的韦伯参数($x=4$)。

K9 玻璃的许用应力 $\sigma_0=48$ MPa,当改正镜厚度为 10 mm 时,可靠性为:

$$\eta = \exp\left[-\left(\frac{\sigma}{\sigma_0}\right)^x\right] = \exp\left[-\left(\frac{5.1}{48}\right)^4\right] = 0.9999. \quad (8)$$

当改正镜厚度为 15 mm 时,可靠性为:

$$\eta = \exp\left[-\left(\frac{\sigma}{\sigma_0}\right)^x\right] = \exp\left[-\left(\frac{2.45}{48}\right)^4\right] = 0.9999999999 \dots \approx 1. \quad (9)$$

改正镜厚度不小于 10 mm 时,机械结构的可靠性均满足设计要求。

4 结 论

本文介绍了在热光学分析的基础上,以 LAMOST 光谱仪真空相机为研究平台,优化设计改正镜作为光学窗口时的厚度尺寸。通过热力耦合分析、温度分析和压力分析等工况环境,计算出既能满足机械强度可靠性要求,又能满足光谱仪光学性能要求的改正镜尺寸,解决了这类工程设计的盲目性,使真空相机整体结构更加合理可靠。得出结论如下:

1) 改正镜厚度 15 mm 时性能最佳;改正镜在热力耦合作用下,其离散斑大小达到理论设计值,机械结构可靠性大于 99.99%,温度变化造成光谱仪离散斑漂移不影响光谱仪性能。

2) 从机械结构安全系数和温度变化对光谱仪离散斑漂移方面分析,改正镜的厚度要不小于 10 mm。当改正镜厚度为 10 mm 时,离散斑的设计值约为理论值的 1.8 倍,在狭缝宽度不变的情况下,光谱仪分辨率会降低。

参 考 文 献

- [1] Li Ming, Wu Qingwen, Yu Fei. Optimization of optical window glass thickness based on the thermal optical analysis [J]. *Acta Optica Sinica*, 2010, 01: 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.
- [2] Fang Yu, Xiang Libin, Lü 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.
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.
- [3] 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.
- [4] Dong Lili, Cao Qilei, Zhao Ming, *et al.* Dynamic clamping design of space remote sensing cameras[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2017, 46(1): 0111002.
董丽丽, 曹旗磊, 赵明, 等. 航天遥感相机动态钳位设计[J]. *光子学报*, 2017, 46(1): 0111002.
- [5] Cao Qilei, Zhao Ming, Dong Lili, *et al.* The optimization method of remote sensing camera and its parameters[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2017, 54(3): 032802.
曹旗磊, 赵明, 董丽丽, 等. 航天遥感相机及参数优化方法[J]. *激光与光电子学进展*, 2017, 54(3): 032802.
- [6] Smith G A, Saunders W, Bridges T, *et al.* AAOmega: a multipurpose fiber-fed spectrograph for the AAT[C]. *SPIE*, 2004, 5492: 551013.
- [7] James J. *Spectrograph design fundamentals*[M]. Cambridge: Cambridge University Press, 2007.
- [8] Chen Rongli, Ma Zhen, Yang Wengang, *et al.* Thermal optical analysis and tests for high resolution space camera[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2010, 39(11): 2068-2072.
陈荣利, 马臻, 杨文刚, 等. 空间相机热光学分析与试验验证[J]. *光子学报*, 2010, 39(11): 2068-2072.
- [9] 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.
- [10] Li Xianhui. Study on the integrated optomechanical analysis optical surface post-process system [D]. Changchun: Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academia of Sciences, 2004.
李贤辉. 光机集成有限元分析光学面形后处理研究与实现[D]. 长春: 中国科学院长春光学精密机械与物理研究所, 2004.
- [11] Doremus R H. Fracture statistics: A comparison of the normal, Weibull, and Type I extreme value distributions[J]. *Journal of Applied Physics* 1983, 54(1): 193-198.