

DOI: 10.19650/j.cnki.cjsi.J2412785

空间折返式光学系统反射镜组件胶层粘接 设计与精密测量*

赵 岳, 郭惠楠

(中国科学院西安光学精密机械研究所 西安 710119)

摘 要: 为了满足折返式光学系统在空间环境中的应用, 本文以某空间燃烧光学实验设备中的纹影光学系统为例, 针对传统反射镜粘接工艺易受温度变化而影响光学系统成像质量的问题, 提出了一种反射镜组件胶层粘接设计与量化分析方法, 并对其空间姿态的精密测量进行了研究。采用环氧树脂胶作为反射镜组件的主要粘接剂, 并以无热化作为约束条件, 对粘接胶层理论计算方程进行改进优化; 通过多目标仿真分析及数据拟合, 选取合适的胶层厚度, 并利用中心偏差测量仪及工装测量法实现反射镜与镜框共轴装配。在此基础上, 采用坐标转换法建立基于经纬仪测量的反射镜组件装调坐标系, 推导出平面反射镜组件俯仰及方位偏差与经纬仪测量值的对应关系, 并通过经纬仪及五棱镜构建测量基准面实现反射镜组件空间姿态的精密测量。最终环境试验结果表明, 应用该方法可实现燃烧光学实验纹影光学系统在空间复杂环境条件下的工作, 其平面反射镜粘接后面型精度 RMS 为 0.023λ , 平面反射镜组件与光学系统光轴夹角均优于 $10''$, 光学设备在温度范围为 $-5^{\circ}\text{C} \sim +45^{\circ}\text{C}$ 时成像清晰。该方法目前也应用于其他在研项中。

关键词: 反射镜粘接; 无热化; 有限元仿真; 精密测量

中图分类号: TH741 TP391.9 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 460.4035

Design and precision measurement of adhesive layer bonding of mirror assembly in space reentry optical system

Zhao Yue, Guo Huinan

(Xi'an Institute of Optics and Precision Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Xi'an 710119, China)

Abstract: To satisfy the application of the retractable optical system in the space environment, this article takes the Schlieren optical system in a space combustion optical experiment equipment as an example. The traditional mirror bonding process is susceptible to temperature change and the image quality of the optical system is affected. To address this problem, a method of adhesive layer bonding design and quantitative analysis of the mirror assembly is proposed, and the precision measurement of its space attitude is studied. Epoxy resin adhesive is used as the main adhesive of the mirror assembly, and the theoretical calculation equation of the adhesive layer is improved and optimized under the constraint condition of non-thermal. Through multi-objective simulation analysis and data fitting, the appropriate thickness of adhesive layer is selected. The coaxial assembly of mirror and frame is realized by using center deviation measuring instrument and tool measuring method. On this basis, a coordinate system based on theodolite measurement is established by using the coordinate transformation method, and the corresponding relationship between the pitch and azimuth deviation of the plane mirror assembly and the measured values of the theodolite is derived. The final environmental test results show that this method can be used to realize the work of Schlieren optical system in the space complex environment. The accuracy of the plane mirror adhesion is 0.023λ , the angle between the plane mirror assembly and the optical axis of the optical system is better than $10''$, and the imaging of the optical device is clear when the temperature range is $-5^{\circ}\text{C} \sim +45^{\circ}\text{C}$. This method has also been applied to other research projects.

Keywords: mirror bonding; athermal; finite element simulation; precision measurement

0 引 言

反射镜组件是光学系统的重要组成部分。本文所述的空间折返式光学系统为满足空间燃烧诊断光学实验的需求,采用反射镜实现成像光路的折转,在不改变光学系统成像质量的基础上,有效抑制了光学设备的体积。由于光学系统需在复杂环境下工作,其反射镜组件则应满足不同温度、力学条件下的面型精度。传统方法采用胶粘方式实现反射镜与金属结构件的固定^[1],然后经过精密装调实现反射镜组件空间姿态校正达到满足成像质量的要求。由于空间光学设备的反射镜组件粘接通常使用环氧树脂胶,在组件粘接固化后,其光学材料、镜框材料及环氧树脂胶材料三者间因膨胀系数存在差异而造成反射镜内部产生热应变,降低反射镜面型精度,从而增加反射镜组件空间姿态调整难度,最终影响光学系统的成像质量。如何实现反射镜组件高精度调整,是提高光学系统成像质量的关键因素。范志刚等^[2]针对透镜的无热化粘接进行了研究,得到理论方程,但未应用在实际工程;李大伟^[3]通过平行光管内置十字丝分划板完成像面与系统光轴调整,但未描述具体方法;张继超等^[4]采用像面标定法实现反射镜光路的装调,但未给出具体过程。张建等^[5]给出的反射镜装调方法,但只包含了反射镜组件空间位置调整,未对反射镜组件粘接技术进行研究。

本文以燃烧光学实验设备中的纹影光学系统反射镜胶层粘接设计与量化分析作为研究对象,通过引入无热化粘接作为约束条件,在环氧树脂胶特性分析的基础上,优化胶层粘接方程;通过多目标仿真及数据拟合,得到适应复杂工作环境下反射镜粘接的最佳胶粘参数。在此基础上,利用经纬仪侧角原理,采用坐标转换法实现反射镜组件空间姿态的高精度测量^[6-8]。

1 反射镜组件结构设计

1.1 纹影光学系统成像原理

为了满足空间光学设备在燃烧光学实验中的成像需求,采用纹影成像技术,通过非接触式测量,使通常无法直接观察到的流体动力学现象加以呈现。传统的纹影成像方法,是以光源发射出的平行光通过一个光学系统后,经密度变化的流体,使光线会因为流体的密度差异和折射率改变而偏离原来的路径。当这些光线再次经过一个刀口时,则会将已偏离原路径的光线遮挡,最终被遮挡的光线将会形成一个光强的暗区,反之则形成一个光强的明区,从而构成纹影成像。由于空间使用环境对光学设备载体的限制,在光学系统设计初便引入平面反射镜完成光路折转,抑制光学系统体积大小。本文所述的纹影

光学系统,主要由光源系统与高速相机系统构成。其中光源系统包含 LED 光源、准直光学镜头、反射镜组件及狭缝组件;高速相机系统由高速光学镜头、反射镜组件、刀口及成像组件构成。纹影光学系统成像采用“凹”字型布局如图 1 所示。在成像过程中,狭缝组件与刀口组件分别位于准直光学镜头与高速光学镜头的焦平面上;LED 光源经准直光学镜头汇聚在狭缝上,并由狭缝控制光源光斑大小;经反射镜组件两次折转得到平行光,并使其在通过空气流场目标后,最终被高速光学镜头捕获,汇聚至刀口组件上;空气流场目标则经反射镜及高速光学镜头成像至相机成像组件,最终实现纹影成像。

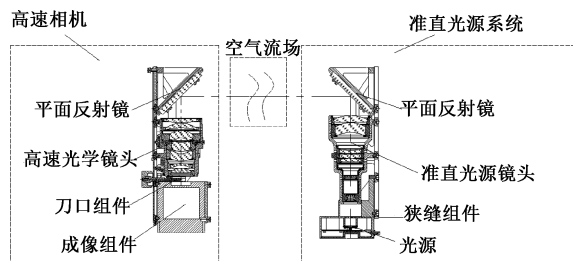


图 1 纹影系统成像

Fig. 1 Schlieren system imaging

1.2 反射镜组件空间姿态精密测量分析原理

根据纹影光学系统的光学结构组成及成像原理分析,将光学系统的测量主要分为光学镜头装调、反射镜组件装调及光学系统联调,分别对应光学系统成像、反射镜面型粘接精度及反射镜组件与光学镜头光轴间的相对空间姿态精密测量。其中对反射镜组件在光学系统中空间姿态的测量精度是该光学设备成像质量优劣的主要影响因素。图 2 为反射镜组件在光学系统中的空间姿态。

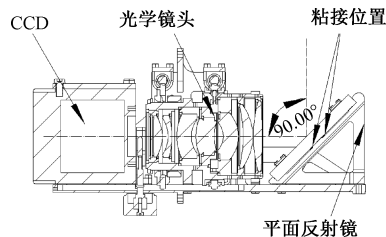


图 2 反射镜组件位置

Fig. 2 Reflector position

本文中所述的反射镜组件,其镜框结构采用轻量化的设计方式^[9-10],选取 3B2216B/A 环氧树脂胶作为平面反射镜与金属件的主要胶粘剂,通过反射镜胶层粘接的设计与可行性分析,使其在满足平面反射镜粘接面型精度的基础上,确保其牢固度。在此基础上,以光学镜头光轴为装调基准,进一步研究了反射镜组件空间姿态的装调方法,即如何实现反射镜与光学镜头光轴 $45^\circ \pm 10''$ 的夹

角。如图3所示,根据反射镜组件空间姿态,建立反射镜组件装调坐标系 O -XYZ,其中 O -Z 指向纸外方向。当入射光线位置不发生改变时,反射镜组件沿 O -X 或 O -Z 旋转,均会对反射镜与光学镜头光轴的夹角产生误差,即使反射镜组件安装位置的方位角与俯仰角发生改变;而沿 O -Y 旋转,将不会对上述光轴的偏差造成影响。由于反射镜组件在加工中不可避免会产生各类误差,在光学系统装调中,所造成的反射镜组件俯仰偏差将远大于方位偏差。综上所述,选择合适的装调测量方法,将有效提高反射镜组件的装调精度及周期,具体流程如图4所示。

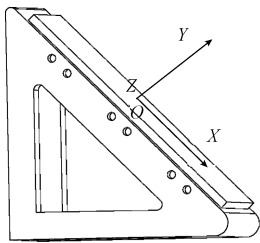


图3 反射镜组件安装示意图

Fig. 3 Diagram of mirror assembly installation

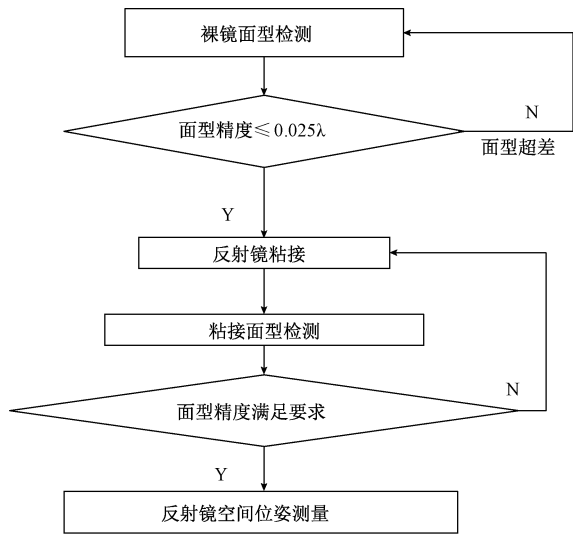


图4 反射镜组件测量流程图

Fig. 4 Flow chart of mirror assembly measurement

2 反射镜粘接胶层解算

2.1 粘接胶的选择

小尺寸反射镜的粘接通常采用支撑方式,即在镜框端面加工若干个圆形或方形凸台,通过环氧胶粘,使反射镜与镜框粘接固定。环氧树脂胶粘接光学元件的胶层厚度一般为 0.03~0.25 mm^[11],通常称胶层厚度为 0.1 mm 以下即为薄粘接胶层,主要用于反射镜膨胀系数与镜框

金属件膨胀系数接近时粘接;当反射镜膨胀系数与镜框金属件膨胀系数存在较大差别时,采用胶层厚度大于 0.1 mm 的厚胶层粘接。

本文所述的反射镜与反射镜镜框粘接,需充分考虑反射镜组件的大小、结构形式、材料属性等;同时,还需根据环氧胶粘接的稳定性、粘接胶层的厚度、粘接区域面积的大小等因素,进一步确保反射镜粘接后的面型精度及粘接的牢固度。而本文中所采用 3M2216B/A-Gray 胶,是由 3M 公司生产的一款的树脂环氧胶,已广泛应用于空间物体粘接中。该环氧树脂胶具有高粘接强度,低收缩率(TML0.77%)、高粘接稳定性、温度适应范围广、固化周期短等特点。

2.2 粘接胶层厚度设计

反射镜组件中反射镜、镜框以及粘接胶的性能参数如表1所示。反射镜与镜框端面凸台通过环氧树脂胶粘连接。由于反射镜、镜框及环氧胶的膨胀系数不同,当温度发生变化时,胶层也会相对的产生应力,从而造成反射镜组件粘接后面型发生形变。选择合适的胶层厚度,是确保反射镜面型精度及粘接牢固度的关键。

表1 材料性能参数

Table 1 Performance parameters of materials

材料	弹性模量/MPa	泊松比	热膨胀系数/10 ⁻⁶ ℃
JGS1	7 300	0.17	0.6
7075	1 040	0.332	13
3M2216B/A-Gray	342	0.43	102

环氧树脂胶的粘接强度随着胶层厚度的减薄而增强,但是较薄的胶层厚度在实际反射镜粘接中存在缺胶、胶层连续性差等隐患,从而造成胶粘力强度低;而较厚的胶层,在满足足够粘接力的基础上,又会产生较大应力形变。本文中选取的环氧树脂胶为 3M2216B/A-Gray,使用时胶层厚度的经验值为 0.102±0.025 mm。为了解决上述问题,选取合适胶层厚度是确保反射镜粘接前后面型精度及粘接牢固度的关键因素。胶层厚度理想状态的计算方法如式(1)所示。

$$t_h = \frac{R_g(\alpha_m - \alpha_g)}{\alpha_b - \alpha_m + \frac{v}{1-v}\left(\alpha_b - \frac{\alpha_g + \alpha_m}{2}\right)}$$

(1)

式中: v 为泊松比; α_b 为胶的膨胀系数; α_g 为反射镜的膨胀系数; α_m 为镜框的膨胀系数; R_g 为反射镜凸起部分的半径。由式(1)可知,反射镜采用 3M2216B/A-Gray 环氧树脂胶与镜框粘接的胶层理论厚度为 0.077 mm。

为了使上述方程的计算结果更接近于实际工程应用,将无热化粘接作为约束条件引入方程。对胶层的变

化增加约束条件,并简化繁琐的计算过程,设胶层的自由状态为拉伸或收缩,而与反射镜及镜框接触后的状态为拉伸。当温度出现上升时,该约束条件可表述为反射镜与胶层间的拉伸变化,胶层与镜框间的拉伸变化,以及上述两种变化的平均值,即此时胶层厚度的约束条件为:

$$\frac{D \cdot \alpha_g \cdot \Delta T + D \cdot \alpha_b \cdot \Delta T}{4} + \frac{D \cdot \alpha_m \cdot \Delta T + D \cdot \alpha_b \cdot \Delta T}{4} \quad (2)$$

其中, D 为反射镜组件粘接时胶层的宽度。由于反射镜组件在粘接时的主要约束来自轴向,则此时的应变为:

$$\varepsilon_z = \Delta T \left(\frac{\alpha_b}{2} - \frac{\alpha_g + \alpha_m}{4} \right) \quad (3)$$

而本文中的反射镜组件采用背部粘接,所受约束主要来自反射镜与镜框,且胶层厚度较薄,则式(3)变化为:

$$\varepsilon_z = \Delta T \left(\alpha_b - \frac{t_h}{2D} \alpha_b - \frac{\alpha_b - \alpha_m}{4} \right) \quad (4)$$

则式(1)优化为:

$$t_h = \frac{R_g(\alpha_m - \alpha_g)}{\alpha_b - \alpha_m + \frac{v}{1-v} \left[\left(2 - \frac{t_h}{2D} \right) \alpha_b - \frac{3}{4}(\alpha_g + \alpha_c) \right]} \quad (5)$$

式(5)主要考虑反射镜组件的无热化粘接,而实际粘接时,还需引入反射镜与镜框加工时的形位公差对方程做进一步修正,即:

$$t_h = \frac{R_g(\alpha_m - \alpha_g)}{\alpha_b - \alpha_m + \frac{v}{1-v} \left[\left(2 - \frac{t_h}{2D} \right) \alpha_b - \frac{3}{4}(\alpha_g + \alpha_c) \right]} + \Delta T_h \quad (6)$$

$$\Delta T_h = \frac{t_g + t_m}{2} + \frac{P_g + P_m}{2} \quad (7)$$

其中, t_g 为反射镜的垂直度, t_m 为镜框的垂直度, P_g 为反射镜粘接面的平面度, P_m 为镜框粘接面的平面度。

2.3 胶粘区域面积设计

反射镜胶粘时所选取的合适胶粘面积,应可同时兼顾反射镜面型精度及粘接的牢固度。最小粘接面积的计算公式如下:

$$Q_{\min} = W a_g f_s / J \quad (8)$$

但由于实际装配过程并非完全理想,考虑加工精度以及零部件表面洁净度等因素,安全系数取值为4。

反射镜的重量大约为160 g, 3M2216B/A Gray 胶的剪切力为22.06 MPa, 为了确保反射镜组件能够承受15倍的重力加速度,由式(8)求得粘接最小总面积为435 mm²。由于反射镜与镜框粘接部分的端面是由5个12 mm×12 mm 方形凸台构成,若每一个凸台上胶斑呈现规则圆形,则胶斑直径可由式(9)得出,约为10 mm。

$$D = 2 \sqrt{\frac{Q_{\min}}{5\pi}} \quad (9)$$

2.4 反射镜粘接可靠性分析

传统光学设备中各系统内部组件的加工、精密装调一般是在恒温环境中完成,而实际设备的工作环境则处于空间中,具有较宽温度条件,这便需要在装调过程中考虑温度变化对反射镜中心与金属结构件边缘产生的径向温差问题的影响。通常径向温差易造成光学元件内部产生热应力,使光学元件表面发生不规则形变,从而影响反射镜粘接后的面型精度。为了使反射镜粘接后仿真结果尽可能的满足实际装调,针对反射镜组件的有限元建模应与设计结构相符,主要包括反射镜、镜框、环氧树脂胶粘接胶层及反射镜安装位置,如图5所示。

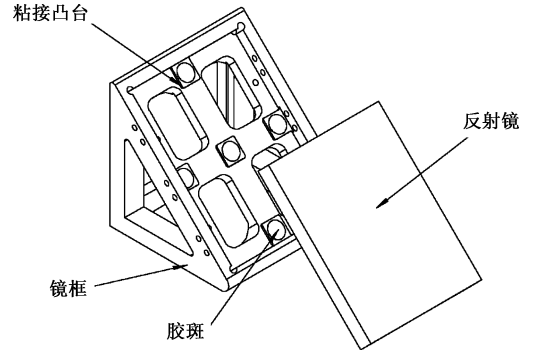
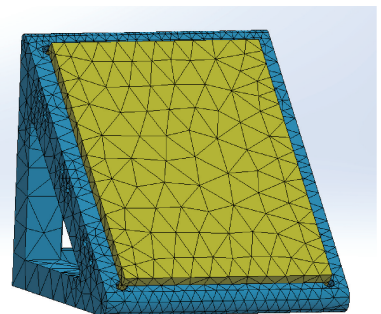


图5 反射镜粘接示意图

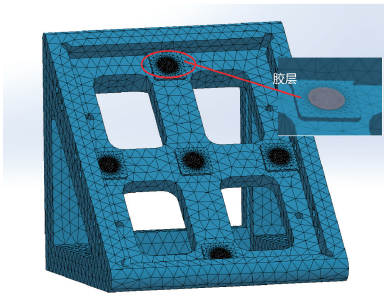
Fig.5 Diagram of mirror bonding

通常胶层厚度较薄时,反射镜粘接的面型精度较高,但其粘接的牢固度存在隐患;而粘接胶层过厚,则会产生较大的应变,存在损坏反射镜的风险。本文选取的环氧树脂胶为非线性材料,在对粘接胶层进行网格划分时,将胶粘位置设置为安装面,并选取较密单元格。反射镜组件的有限元仿真模型如图6所示,共选取单元数7 060个,节点数27 634个。为了验证上文中有关粘接胶层厚度的准确性,使用Ansys进一步分析反射镜表面的热应变。结合上文中有关反射镜粘接胶层设计的计算,选取粘接胶层厚度为0.07~0.10 mm,在温度变化范围为-5℃~+45℃时,分析反射镜组件的热应变情况,并将仿真结果通过Matlab进行最小二乘拟合,如图7所示。



(a) 反射镜组件有限元模型

(a) Finite element model of reflective mirror set



(b) 胶层有限元模型
(b) Finite element model of adhesive layer

图6 仿真模型网格划分

Fig. 6 Meshing simulation model

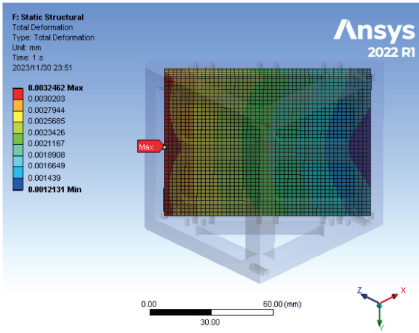


图7 反射镜热应变仿真

Fig. 7 Thermal strain simulation

从有限元模型的仿真结果可知,胶层厚度在不同温度变化时,对反射镜面型造成的应变并不是线性变化。将热应变仿真结果通过 Matlab 最小二乘拟合后可知,当温度变化范围为 $-5^{\circ}\text{C} \sim +45^{\circ}\text{C}$ 、胶层厚度为 0.08 mm 时,反射镜粘接后面型的热应变最小,结果如图8所示。

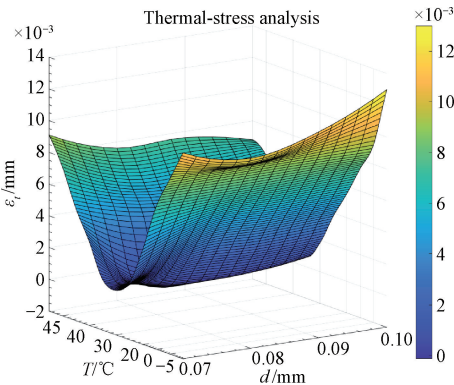


图8 热应变拟合

Fig. 8 Thermal strain fitting

将胶层厚度确定为 0.08 mm ,通过多次修正胶斑粘接位置并进行反射镜粘接应力仿真,如图9所示,反射镜粘接后所承受环氧树脂胶带来的应力主要来自粘接后的

镜框边缘。在实际操作时,应使反射镜胶斑胶粘位置远离反射镜镜框边缘。

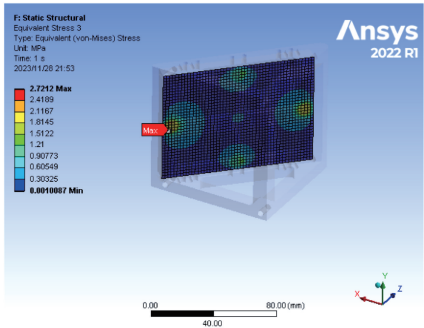


图9 应力仿真

Fig. 9 Stress simulation

3 反射镜组件精密测量

3.1 反射镜组件微应力粘接

为了实现反射镜组件粘接精确性,按照上文分析结果,首先采用工装测量法,如图10所示,通过反射镜镜框背部加工4个工艺孔及4个螺纹支轴,确保反射镜粘接胶层厚度满足仿真分析所需的 0.08 mm ;然后使用中心偏差测量仪,确定反射镜与镜框的共轴中心,进一步实现反射镜组件的微应力粘接,如图11所示。

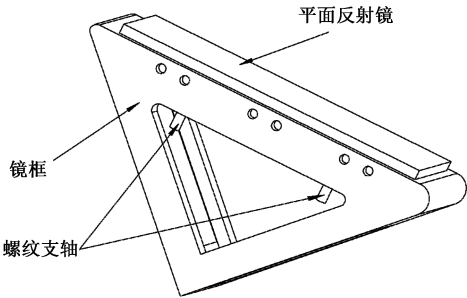


图10 工装测量法示意图

Fig. 10 Diagram of tooling measurement

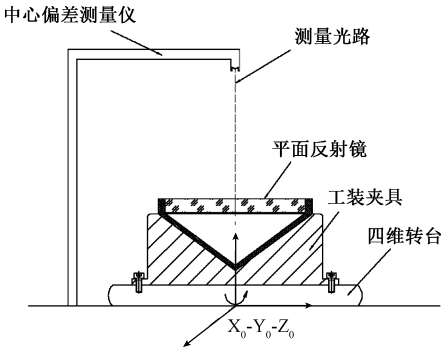


图11 反射镜粘接

Fig. 11 Reflector bonding

按照上述方法完成反射镜组件粘接,待 3M2216B/A Gray 胶 24 h 固化后,使用干涉仪对粘接的反射镜面型进行检测,结果如图 12 所示。检测结果表明,粘接后的面型精度 RMS 为 0.023λ ,优于反射镜粘接所要求的最大面型精度 $\text{RMS} \leq 0.025\lambda$,验证了本文中所述方法在工程应用中的可行性。

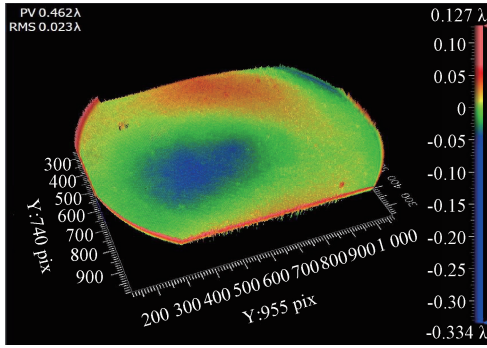


图 12 面型检测结果

Fig. 12 Surface type test results

3.2 反射镜组件空间姿态精密测量

由于空间光学成像设备的特殊性,要求反射镜组件与光轴夹角应为 $45^\circ \pm 10''$ 。为了提高反射镜组件的装调精度,采用十字丝分划板引出光学镜头的系统光轴,并通过经纬仪自准以及五棱镜完成光轴转换,进而实现反射镜组件装调坐标系的建立。按照上文分析所述,首选完成反射镜组件粘接及粘胶固化后面型检测,若固化后反射镜面型符合装调需求,便可按照图 13 所示,建立反射镜组件装调坐标系,完成反射镜组件的与镜头光轴空间位置的精密装调。

建立经纬仪坐标系为 $O_{th} - X_{th}Y_{th}Z_{th}$,五棱镜坐标系为 $O_p - X_pY_pZ_p$ (Z_p 指向纸外),反射镜组件坐标系为 $O_g - X_gY_gZ_g$ (Z_g, Z 均指向纸外)。当坐标系 $O_g - X_gY_gZ_g$ 以 $O_g - Z_g$ 为旋转轴转动角度 α 得到 $O_g - XYZ$ (Z 指向纸外),则反射镜法向量坐标为 $[0 \ 0 \ 1]^T$ 。由于零部件存在加工及装调误差,使得反射镜的法向量与实际位置存在一定的偏差,则位置可变化为 $O_g - X'Y'Z$,此时反射

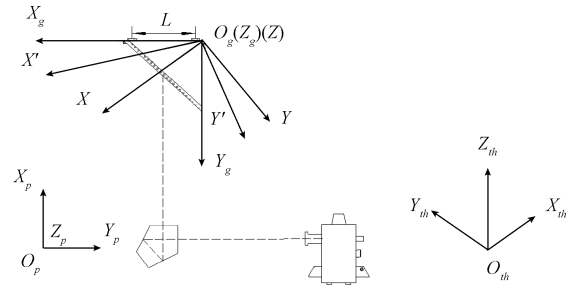


图 13 装调坐标系建立

Fig. 13 Setup coordinate system

镜组件的法向量在 $O_g - X_gY_gZ_g$ 中的坐标系表示为^[12-15]

$$n = \begin{bmatrix} n_x \\ n_y \\ n_z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \alpha & 0 & -\sin \alpha \\ 0 & 1 & 0 \\ \sin \alpha & 0 & \cos \alpha \end{bmatrix}$$

$$\begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \beta & -\sin \beta \\ 0 & \sin \beta & \cos \beta \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \cos \theta & 0 & \sin \theta \\ 0 & 1 & 0 \\ -\sin \theta & 0 & \cos \theta \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix} \quad (10)$$

其中, α 取值为 45° , β 与 θ 分别为反射镜法线沿 $O_g - X_g$ 轴、 $O_g - Y_g$ 轴旋转后的角度。由于五棱镜的装调位置可通过旋转 $O_p - Z_p$ 轴实现,设旋转角度为 ϕ ,则该五棱镜法向量在 $O_p - X_pY_pZ_p$ 的坐标可表示为

$$n_p = \begin{bmatrix} X_p \\ Y_p \\ Z_p \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \phi & -\sin \phi & 0 \\ \sin \phi & \cos \phi & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} -\sin \alpha \\ 0 \\ \cos \alpha \end{bmatrix} \quad (11)$$

针对上文所述,若在实际装调过程中将五棱镜转动角度为 ϕ 时,可使反射镜组件的反射像与经纬仪自准像在俯仰方向重合、方位方向存在偏差,则反射镜法向量 n 与 n_p 为同一平面,由上述式(10)、(11)可知:

$$\cos \beta \cos \theta \sin \phi \sin^2 \alpha - \sin \theta \sin \phi \sin \alpha \cos \alpha - \sin \beta \cos \theta \cos \phi \sin \alpha = 0 \quad (12)$$

$$\tan \phi = \frac{\sin \beta \cos \theta}{\cos \beta \cos \theta \sin \alpha - \sin \theta \cos \alpha} \approx \sqrt{2} \tan \beta \quad (13)$$

则此时经纬仪测量反射镜组件安装位置的俯仰角偏差 Δ 为

$$\sin^2 \Delta = \frac{(1 + \cos^2 \beta - 3 \cos^2 \theta + 2 \cos \beta \cos \theta \sin \theta) \cos \beta \cos \theta - (1 + \sin^2 \beta \cos^2 \theta) \sin \theta}{2 \sqrt{\sin^2 \beta \cos^2 \theta - 2 \cos \beta \cos \theta \sin \theta + 1}} \quad (14)$$

$$= 1 - \frac{2 \cos^3 \theta \cos \beta - 2 \cos^2 \beta \cos^2 \theta \sin \theta}{2(\cos \theta - \sin \theta)} \approx \sin^2 \theta$$

即经纬仪测量的角度偏差可近似看做为反射镜组件在俯仰方向的偏差。

根据上述分析,结合实际装调过程,当经纬仪自准像通过五棱镜与反射镜组件成像,可在经纬仪中同时观察到两个十字丝像;旋转五棱镜使两个十字丝像在方位方向重合,设此时经纬仪俯仰方向读数为 θ ,五棱镜与反射

镜组件自准后经纬仪俯仰方向读数为 θ' ,通过微调经纬仪,则反射镜组件与光轴夹角在俯仰方向的偏差为:

$$\omega = \theta - \theta' \quad (15)$$

当 ω 为负时,则反射镜组件法线与光轴夹角小于 45° ;当为正时,反射镜组件法线与光轴夹角大于 45° 。根据本文中所采用的的反射镜装调结构可知,通过修研反

射镜组件垫片厚度即可实现 ω 角度的校正,即:

$$\Delta\omega = L\tan\omega \tag{16}$$

其中, L 为反射镜组件调整垫片之间的距离。

在反射镜组件的实际装调过程中,应优先确保俯仰方向的装调精度,并在此基础上,通过绕某一固定轴旋转实现方位角度的校正。

实际装调过程中,按照上述技术方法,应首先完成反射镜组件的微应力粘接;然后采用如图 14 所示方法,将完成定心加工的分划板装入光学镜头中实现系统光轴的引出,并导入经纬仪 1 完成自准直共轴调整,此时记录经纬仪 1 俯仰方向角度偏差 α_1 ;若反射镜组件具有理想空间姿态,则经纬仪 2 中十字丝与分划板中心重合;若反射镜组件在俯仰方向存在角度偏差 θ ,则需要通过调整五棱镜、经纬仪 2 相对位置进一步实现中心重合校正,此时经纬仪 2 俯仰方向角度偏差为 α_2 ,则 $\Delta\omega = \alpha_1 - \alpha_2$,带入式(16)进而得到反射镜组件俯仰方向的失调量,实现反射镜组件空间姿态安装位置精密测量。

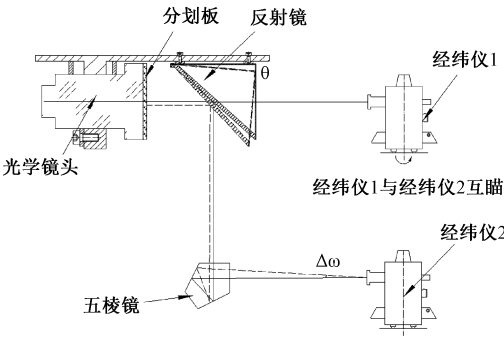


图 14 装调过程示意图
Fig. 14 Diagram of the alignment

表 2 为反射镜组件装调完成后的空间位置姿态多次测量结果,分析得到其俯仰方向及方位方向的相对标准偏差均优于 10%,表明采用上文所述方法可有效提高反射镜组件空间位置姿态的装调精度。

表 2 反射镜组件装调结

Table 2 Result of mirror assembly adjustment		
序号	俯仰偏差	方位偏差
1	6.2"	3.1"
2	6.5"	3.8"
3	6.7"	3.3"
4	6.8"	3.3"
5	6.1"	3.8"
6	6.3"	3.5"
7	6.9"	3.9"
8	6.2"	3.5"
9	6.5"	3.8"
10	6.8"	3.5"
平均值	6.5"	3.5"
相对标准偏差	4.47%	7.98%

3.3 实验验证与分析

空间光学设备搭载运载火箭进入空间站工作,不可避免的在运输过程中受到随机振动所产生非线性力学影响。为确保光学设备始终具备良好的光学性能,如图 15 所示,需通过环境实验模拟验证该光学设备在 X 、 Y 、 Z 3 个方向随机振动时各部组件的力学性能,实验条件如表 3 所示。

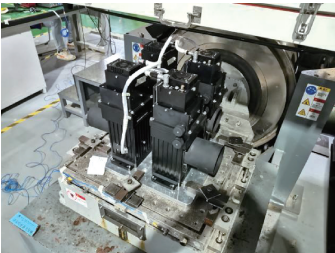


图 15 光学设备环试
Fig. 15 Environment test of optical equipment

表 3 随机振动实验条件

名称	参数值/频率范围/Hz		
	10~50	50~300	300~2 000
功率谱密度	3 dB/oct	0.025 g ² /Hz	-12 dB/oct
总均方根加速度值	3.055 grms		
每向试验持续时间	60 s		
加载方向	3 个轴向		

实验前后,分别对光学设备进行了波像差检测,前后两次检测结果未发生明显变化;光学设备外形完好,无异响,表面反射镜粘接牢固度满足要求。

以温变率为 5℃/min,实验温度范围-5℃~+45℃,对光学设备进行热循环实验,图 16 为热循环实验实际执行曲线。实验完成后对光学设备通电测试,结果如图 17 所示,图像输出正常,满足成像需求,说明采用上述反射

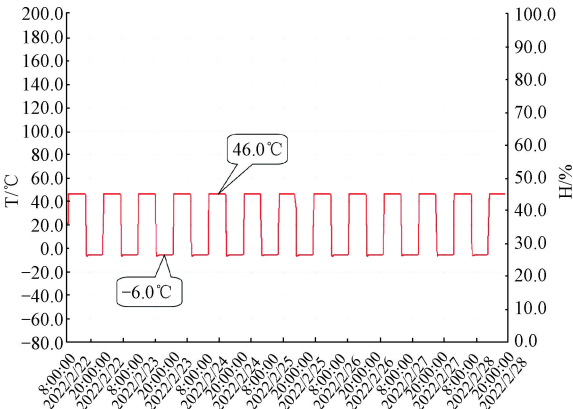


图 16 热循环曲线
Fig. 16 Thermal cycle curve

镜胶层粘接设计方法可满足宽泛温度下的成像需求,进一步验证了反射镜无热化粘接的工程应用性。

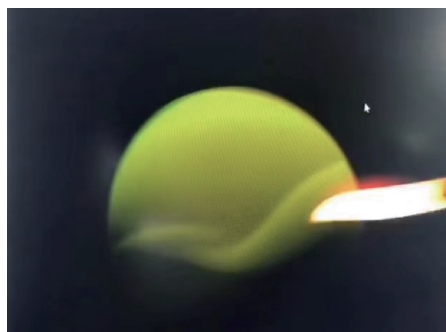


图 17 成像结果

Fig. 17 Imaging result

4 结 论

本文通过对空间折返式光学系统中纹影光学系统的反射镜相关组件性能参数的研究,提出了一种反射镜胶层设计与量化分析方法,用于降低温度变化对光学系统成像质量的影响,同时对反射镜组件空间姿态的精密测量方法也做了深入研究。针对复杂力学条件及宽泛温度变化下的工作需求,引入无热化作为约束条件,对理论胶层厚度计算方程进行优化,采用多目标仿真与 Matlab 数据拟合,确定胶层粘接厚度为 0.08 mm,胶斑直径为 10 mm 时反射镜粘接后面型精度为 0.023λ ,并最终通过环境实验验证反射镜粘接的牢固度及面型精度。通过建立基于经纬仪测量的反射镜组件装调坐标系,得到反射镜组件空间姿态测量的数学模型,从而推导出经纬仪测量值与反射镜及系统光轴夹角间的对应关系,进而实现对此类型反射镜组件在光学系统中空间姿态的快速、精密测量。结果表明反射镜组件在俯仰方向及方位方向的相对标准偏差均优于 10%。本文中有关空间光学设备反射镜粘接胶层的设计与精密测量工艺方案满足了光学设计的指标性能要求,为类似结构形式在工程实践应用中提供理论依据及相应的解决方案。

参考文献

- [1] PAUL R Y. 光机系统设计[M]. 北京:机械工业出版社,2008.
PAUL R Y. Opto-mechanical systems design [M]. Beijing: China Machine Press, 2008.
- [2] 范志刚,常虹,陈守谦. 透镜无热装配中粘结层的设计[J]. 光学精密工程,2011,19(11):2573-2581.
FAN ZH G, CHANG H, CHEN SH Q. Design of bonding layer in lens athermal mount [J]. Optics and Precision Engineering, 2011, 19(11): 2573-2581.
- [3] 李大伟. 长焦距航空遥感器的光学装调[J]. 长春理工大学学报(自然科学版),2012,35(2):29-32.
LI D W. Optical alignment of long focus aerial camera [J]. Journal of Changchun University of Science and Technology (Natural Science Edition), 2012, 35(2): 29-32.
- [4] 张继超,李大伟. 长焦距光学系统中反射光路的设计与装调[J]. 红外与激光工程,2015,44(5):1496-1499.
ZHANG J CH, LI D W. Design and adjustment of the reflection optical path in a long optical system [J]. Infrared and Laser Engineering, 2015, 44(5): 1496-1499.
- [5] 张健,王健飞,方新,等. 航空遥感器平面反射镜装调方法[J]. 中国光学,2022,15(3),534-544.
ZHANG J, WANG J F, FANG X, et al. Alignment method of plane reflecting mirror system for aerial remote sensor [J]. Chinese Optics, 2022, 15(3), 534-544.
- [6] 梅贵,翟岩,曲贺盟,等. 离轴三反系统的无应力装调[J]. 光学精密工程,2015,12(23),3414-3421.
MEI G, ZHAI Y, QU H M, et al. Stress-free alignment of off-axis three-mirror system [J]. Optics and Precision Engineering, 2015, 12(23), 3414-3421.
- [7] 颜昌翔,王家骥. 航相机像移补偿计算的坐标变换方法[J]. 光学精密工程,2000,8(3):203-207.
YAN CH X, WANG J Q. Method of coordinate transformation for IM & IMC calculation in aerospace camera system [J]. Optics and Precision Engineering, 2000, 8(3): 203-207.
- [8] 李斌,陈佳夷,王海超,等. 卡塞格林系统装调过程中高精度测角方法[J]. 应用光学,2017,38(6):958-962.
LI B, CHEN J Y, WANG H CH, et al. Accuracy angular measurement method in alignment process for Cassegrain telescope [J]. Journal of Applied Optics, 2017, 38(6): 958-962.
- [9] 张超杰,习兴华,王永宪,等. 空间遥感相机大口径反射镜结构优化设计[J]. 红外与激光工程,2020,49(2):262-267.
ZHANG CH J, XI X H, WANG Y X, et al. Structural optimization design of large-aperture mirror for space remote sensing camera [J]. Infrared and Laser Engineering, 2020, 49(2): 262-267.
- [10] 曲慧东,魏加立,董得义,等. 长条形空间反射镜组件轻量化结构设计[J]. 红外与激光工程,2021,50(6):187-197.
QU H D, WEI J L, DONG D Y, et al. Lightweight structural design of rectangular space mirror assem-

- bly[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2021, 50(6): 187-197.
- [11] 贾树强, 黄玮, 庞武斌. 胶层厚度对三点支撑反射镜面形的影响[J]. *光学精密工程*, 2015, 23(7): 2005-2012.
- JIA SH Q, HUANG W, PANG W B. Influence of adhesive thickness on surface deformation of mirror supported by three-point mount[J]. *Optics and Precision Engineering*, 2015, 23(7): 2005-2012.
- [12] 张健. 全景式航空遥感器焦平面组件 TDI 方向标定方法研究[D]. 长春: 中国科学院大学(中国科学院长春光学精密机械与物理研究所), 2018.
- ZHANG J. Research on calibration method of TDI direction for focal plane assembly in aerial panoramic camera[D]. Changchun: University of Chinese Academy of Sciences (Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences), 2018.
- [13] 张赢, 丁红昌, 赵长福, 等. 基于多激光传感器装配的自由曲面法线找正方法研究[J]. *中国光学*, 2021, 14(2): 344-352.
- ZHANG Y, DING H CH, ZHAO CH F, et al. The normal alignment method for freeform surfaces based on multiple laser sensor assembly[J]. *Chinese Optics*, 2021, 14(2): 344-352.
- [14] 陈太喜, 伍雁雄. 航空机载紧凑型长焦距光学系统设计及装调[J]. *光子学报*, 2021, 50(11): 212-222.
- CHEN T X, WU Y X. Design and alignment of airborne compact long focal length optical system[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2021, 50(11): 212-222.
- [15] 王克军, 董吉洪, 朱时雨, 等. 天问一号高分相机主光机在线装调技术研究[J]. *光学精密工程*, 2022, 30(2): 199-209.

WANG K J, DONG J H, ZHU SH Y, et al. Research on on-line alignment technology with main optical-mechanical structure of Tianwen-1 high-resolution camera[J]. *Optics and Precision Engineering*, 2022, 30(2): 199-209.

作者简介



赵岳, 2015 年于西北工业大学获得学士学位, 2018 年于西安电子科技大学获得硕士学位, 现为中国科学院西安光学精密机械研究所工程师, 主要研究方向为复杂光学系统精密装调工艺技术。

E-mail: zhaoyue900403@163.com.

Zhao Yue received his B.Sc. degree from Northwestern Polytechnical University in 2015 and M.Sc. degree from Xidian University in 2018. He is currently an engineer at Xi'an Institute of Optics and Precision Mechanics, Chinese Academy of Sciences. His main research interest is precision assembly technology for complex optical systems.



郭惠楠 (通信作者), 2008 年于西安理工大学获得学士学位, 2014 年于中国科学院大学获得博士学位, 现为中国科学院西安光学精密机械研究所高级工程师、硕士生导师, 主要研究方向为航天器智能感知与视觉测量技术。

E-mail: guohuinan@opt.ac.com.

Guo Huinan (Corresponding author) received his B.Sc. degree from Xi'an University of Technology in 2008 and Ph.D. degree from University of Chinese Academy of Sciences in 2014. He is currently a senior engineer and a master advisor at Xi'an Institute of Optics and Precision Mechanics, Chinese Academy of Sciences. His main research interests include spacecraft intelligent sensing and visual measurement technology.