

文章编号 1004-924X(2022)11-1344-09

航空光电平台两轴快速反射镜结构设计

谭淞年^{1,2,3*}, 王福超^{1,2}, 许永森^{1,2}, 王烨菲^{1,2,3}, 李全超^{1,2,3}

(1. 中国科学院 长春光学精密机械与物理研究所, 吉林 长春 130033;

2. 中国科学院大学, 北京 100049;

3. 中国科学院 航空光学成像与测量重点实验室, 吉林 长春 130033)

摘要:为了满足航空光电平台对可见/红外双波段两轴快速反射镜面形精度和动态性能的高要求,针对性地设计了轻量化平面反射镜和柔性结构。对快速反射镜结构的设计方法进行了归纳,明确了快速反射镜结构的设计要素,分析了装配误差的影响。设计了背部中心支撑轻量化反射镜,通过定位工装实现了电机高精度装配。基于十字型柔性轴承,实现了双轴柔性结构的设计。最后,对快速反射镜的面形精度和模态进行了仿真和实验测试。实验结果表明,平面反射镜的面形精度(RMS)优于 0.017λ ($\lambda=632.8\text{ nm}$),快速反射镜闭环带宽优于200 Hz,X向和Y向的定位误差皆低于 $1.2\ \mu\text{rad}$ 。在满足高面形精度和高动态性能的基础上,该快速反射镜实现了小型化和模块化,能够在复杂的航空环境下稳定可靠地工作。

关键词:快速反射镜;双轴柔性支撑;面形精度;模态分析

中图分类号:V443.5;TH703 文献标识码:A doi:10.37188/OPE.20213000.0757

Structure design of two-axis fast steering mirror for aviation optoelectronic platform

TAN Songnian^{1,2,3*}, WANG Fuchao^{1,2}, XU Yongsen^{1,2}, WANG Yefei^{1,2,3}, LI Quanchao^{1,2,3}

(1. *Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun 130033, China;*

2. *University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China;*

3. *Key Laboratory of Airborne Optical Imaging and Measurement, Chinese Academy of Sciences, Changchun 130033, China)*

* *Corresponding author, E-mail: tansongnian@126.com*

Abstract: To meet the demanding requirements of the aeronautical optoelectronic platform for surface accuracy and dynamic performance of the visible/infrared dual-band two-axis fast steering mirror, a lightweight flat mirror assembly and a flexible structure have been specifically designed. First, the design method of the fast steering mirror structure is summarized, their design elements are clarified, and the influence of assembly error is analyzed. A lightweight mirror supporting the center of the back is designed, and the high-precision assembly of the motor is realized through a positioning fixture. Then, based on the cross-shaped flexible bearing, the design of the biaxial flexible structure is realized. Finally, the surface accuracy

收稿日期:2021-12-15;修订日期:2022-01-27.

基金项目:国家自然科学基金面上基金资助项目(No. 62175234)

and mode of the fast steering mirror are simulated and tested. The test results show that the surface shape accuracy (RMS) of the flat mirror is greater than 0.017λ ($\lambda=632.8\text{ nm}$), the closed-loop bandwidth of the fast steering mirror is higher than 200 Hz, and the position errors in both the X- and Y-directions are less than $1.2\ \mu\text{rad}$. As a result of achieving high surface accuracy and dynamic performance, the miniaturization and modularization of a fast steering mirror are realized, allowing them to function stably and reliably in complex aviation environments.

Key words: fast steering mirror; biaxial flexible support; surface shape accuracy; modal analysis

1 引言

航空光电稳定平台在照相时刻曝光瞬间,由于载机前向飞行、飞行姿态调整等因素会产生像移,造成成像质量下降。为保证成像质量,需采取像移补偿措施来消除或减少像移的影响。

快速反射镜是近几年来发展起来的用于高精度光束控制的光学装置。在光路系统中,增加快速反射镜装置,通过控制平面反射镜的位置,进而精确控制光束传播方向,可以实现补偿前向像移、光学稳像等功能^[1]。快速反射镜具有响应速度快、指向精度和角度分辨力高等突出优点,广泛应用于航空光电载荷、激光武器和光通信等技术领域^[2]。其设计首先要考虑动态特性及稳定精度,而应用在航空中其环境适应性也是非常重要的因素。平面反射镜是快速反射镜光学系统的核心元件,为达到探测器的高分辨率要求,当面对温度冲击等恶劣环境时,它必须具有高质量的光学面形精度。

快速反射镜系统通常采用柔性支撑结构,可以实现无摩擦和快速响应^[3]。随着科技的进步,整个光学系统向着灵巧型、轻质和高分辨率的方向发展,因此,光学系统对快速反射镜装置的体积和质量等提出了更高的要求,并要求装配的快速性与模块化。

本文以航空光电载荷双轴快速发射镜为研究对象,对双轴快速反射镜的设计理论和方法展开研究,明确了快速反射镜的设计要素,并对反射镜的装配误差开展了分析。在设计过程中实现了模块化和轻小型化设计,保证了反射镜的面形精度和动态性能,具备较高的定位精度。

2 设计原理

2.1 快速反射镜设计要素

快速反射镜性能指标与其各个部件之间的关系如图 1 所示^[4]。快速反射镜的工作方式决定了平面反射镜的轻量化和小型化设计,一旦平面反射镜设计完成,快速反射镜的运动部分就大致确定了。面形精度决定了平面反射镜的光学性能^[5]。

根据快速反射镜的工作带宽要求,可以得到对其各向机械谐振频率的要求,结合平面反射镜的设计结果(平面反射镜的转动惯量)可以大致得到柔性支撑各个方向上的刚度要求,根据柔性支撑各向刚度的要求,进行柔性支撑结构和参数的设计。柔性支撑结构设计是实现动态特性的关键。电机的选型取决于工作带宽、转角范围^[6]以及平面反射镜的转动惯量。

传感器的选型主要取决于快速反射镜对分辨率的要求,同时也要考虑快速反射镜的转动行程。

综上,面形精度和动态特性是两轴快速反射镜的核心指标。

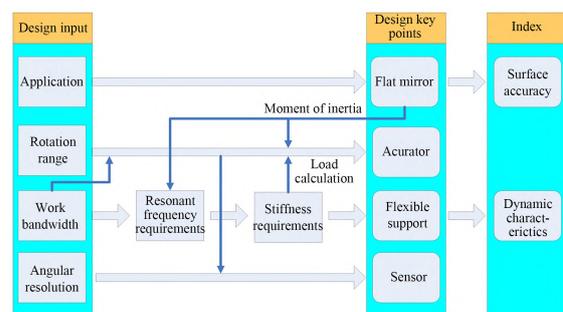


图 1 快速反射镜性能指标与其各个部件之间的关系
Fig. 1 Relationship between performance indicators of fast steering mirror and its components

2.2 两轴快速反射镜设计关键

2.2.1 平面反射镜的轻小型化

快速反射镜中的平面反射镜是光学系统的核心元件,为达到探测器的高分辨率要求,当面对温度冲击等恶劣环境时,必须保证它具有高面形精度。而平面反射镜的质量影响了快速反射镜的带宽。因此,需要在满足面形精度的情况下尽量减小平面反射镜的质量。

2.2.2 制动器布局

用于精密光路调整和稳定的微定位机构以音圈电机为主。快速反射镜选择4个圆周分布的音圈电机采用一推一拉的方式进行工作。驱动方案采用4个圆周分布的音圈电机,其优点是系统是单输入单输出(Single Input Single Output, SISO),降低了两轴之间的耦合,方便最终的控制。

快速反射镜的音圈电机结构如图2所示,4个驱动元件在XY平面以坐标原点O为中心呈“十”字均匀分布,通过驱动元件A,C一伸一缩,实现绕Y轴的偏转,通过B,D一伸一缩,实现绕X轴的偏转^[7]。此方案的主要优点在于:

(1)实现了平面内绕任意轴转动,同时可保持中心O不产生Z向移动;

(2)差动模式有效减小温漂对偏转的影响,同时可进行Z向误差补偿;

(3)通过两对音圈电机的推拉实现对 α, β 的直接控制,无需进行控制量的转换,且只需2个控制量,其转换关系为:

$$\begin{aligned} \Delta P_1 &= \alpha r \\ \Delta P_2 &= \beta r \end{aligned} \quad (1)$$

其中: $\Delta P_1, \Delta P_2$ 为两对电机的相对位移量,即两个控制量。

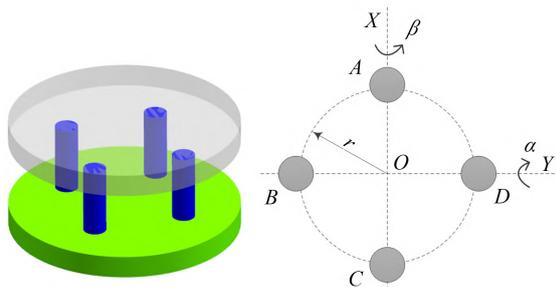


图2 四点驱动结构示意图

Fig. 2 Schematic diagram of four-point drive structure

2.2.3 快速反射镜柔性支撑

柔性支撑是快速反射镜的核心。与传统的轴承支撑结构等刚性机构相比,柔性支撑可实现高精度运动,具有结构刚度大,装配简单,及无间隙和摩擦等优点。

快速反射镜在工作方向的谐振频率应尽量小,而非工作方向的谐振频率尽量大。由于快速反射镜工作方向上的谐振可以通过控制器引入速度反馈来消除^[8],系统的机械谐振频率就主要取决于柔性结构在各个方向上的刚度特性。充分利用空间排布完成柔性支撑的设计,并满足刚度以及工作带宽的要求是柔性支撑设计的重点。

2.2.4 安装误差分析

完成柔性支撑及其他部件的加工和选型后,更重要的就是对系统进行正确的装配。安装误差会引起两轴之间耦合,影响反射镜的定位精度。快速反射镜装配过程中,定位误差来源主要有两个:

(1)音圈电机装配误差

音圈电机的装配位置误差直接影响两个轴的正交度以及系统的性能。因此,电机和传感器安装的相对位置应该准确。

(2)四个音圈电机的坐标轴线与传感器的坐标轴线不重合。轴线不重合又有两种情况,一种是轴心重合,但是轴线之间偏离一定角度;另一种是轴线之间保持平行,但轴心本身发生了偏移。这两种情形最终都会增大快速反射镜两轴之间的耦合度。

当电机与传感器的轴线存在一定夹角 $\Delta\theta$ 时,其中一组电机工作,反射镜在两个轴上都会产生转角。根据运动分解原理,当预期转角为只绕x轴旋转 θ_x 时,实际情况下,y轴也会旋转 $\theta_x \sin(\Delta\theta)$,而x轴自身的转角 $\theta_x \cos(\Delta\theta)$ 则稍有减少,这会增大快速反射镜两轴之间的耦合度。在角度标定过程中,通过对两个轴分别标定,可以对安装造成的平台旋转角度误差进行补偿。

当电机的轴线与传感器的轴线中心产生偏差 Δl 时,在一组音圈电机中两个电机的出力特性理想的情况下,两个电机以等值相反的力推拉工作。轴线中心偏差会导致快速反射镜的工作转角误差。 ΔZ 表示音圈电机相对于初始位置的位移,当平台预定转角为 α 时,由于电机的轴线与柔

性支撑的轴线的转动中心有偏差 Δl , 平台实际转角为 α' , 其关系如下:

$$\tan \alpha = \frac{\Delta Z}{l}, \quad (2)$$

$$\tan \alpha' = \frac{\Delta Z}{l + \Delta l}. \quad (3)$$

在小角度时, 平台旋转角度误差为 $\Delta \alpha = \alpha - \alpha' = \frac{\alpha l}{l(l + \Delta l)}$ 。虽然可以通过角度标定过程

来确定输出角度与电机输出力矩的关系, 但是在转动一定角度时, 电机处于动态稳定状态, 轴心偏移误差造成的力矩差异减小了电机控制裕度。因此, 安装过程中的轴心偏移误差对快速反射镜的角度精度影响更大。

3 两轴快速反射镜结构设计

快速反射镜应用于可见/红外双波段航空光电平台, 其设计指标如表 1 所示。

表 1 快速反射镜的设计指标

Tab. 1 Design index of fast steering mirror

Index	Parameters
Effective clear aperture/mm	$\varphi 54$
Incident light angle/(°)	45
Surface accuracy (RMS)/nm	≤ 15.82
Closed loop bandwidth/Hz	≥ 200
Position accuracy/ μrad	≤ 5

根据输入条件, 快速反射镜的结构示意图如图 3 所示。整个系统采用模块化设计, 包括反射镜组件、柔性支撑组件和反射镜基座组件。反射镜组件包括反射镜和音圈电机线圈, 小型化的柔性支撑模块可以实现柔性结构柔度的快速设计。

3.1 平面反射镜组件设计

由于航空光电稳定平台结构的总体尺寸有限, 快速反射镜系统必须具有轻巧的结构, 尽量减轻质量。因此, 平面反射镜为八边形结构, 尺寸为 $84 \text{ mm} \times 66 \text{ mm}$ 。材料选择 SiC, 采用背部轻量化结构。

为了保持平面反射镜的面形稳定性, 反射镜背板选择殷钢材料, 线膨胀系数与 SiC 相匹配, 可有效减小温度变化时产生的应力。平面反射

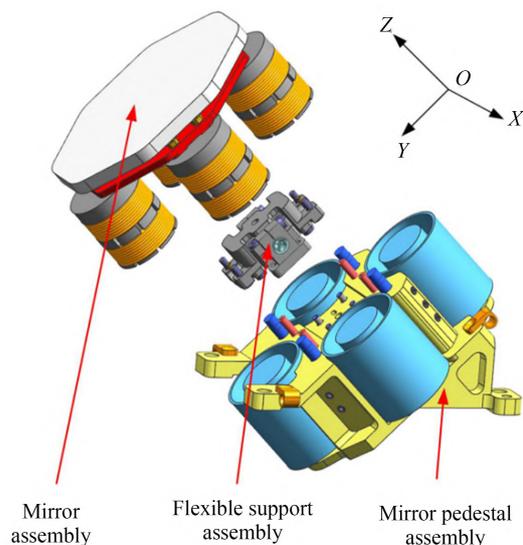


图 3 快速反射镜的结构组成

Fig. 3 Structure component of fast steering mirror

镜采用背部中心支撑方式^[9], 与反射镜背板之间通过黏接固连。由于平面反射镜尺寸较小, 黏接的高度有限, 因此采用传统的锥面配研难度较高, 且容易出现倾斜。为了保证反射镜的黏接精度, 选择圆柱面黏接, 严格控制平面反射镜和反射镜背板圆柱面的黏接间隙, 单侧间隙小于 $8 \mu\text{m}$, 同时保证两者圆柱度皆优于 $3 \mu\text{m}$ 。反射镜背板的背面有 4 处等高的感应面, 感应面的面积至少为角度传感器探测面面积的 1.5 倍。感应面位置处的厚度需满足角度传感器的最小感应厚度。

音圈电机的选择是一个迭代的过程, 优先选择电机线圈质量轻, 峰值力矩大的电机。初步选择电机之后, 根据电机峰值出力、转动惯量和柔节转动刚度的关系式(4), 确定电机力是否满足要求; 若不满足, 则重新选择大电机, 直至满足要求。

$$T_{\max} = 2Fs = k(J_x \ddot{\theta}_{\max}). \quad (4)$$

通过模态仿真, 固定反射镜背板的安装接口, 平面反射镜组件的一阶模态为 1354 Hz , 证明反射镜组件有着良好的刚度。

根据装配误差分析, 电机对轴心偏移误差更敏感。因此, 在反射镜组件的装配过程中, 定位工装和反射镜组件通过中心定位销和导向销组合来保证相对位置, 然后精密安装电机线圈, 避免出现轴心偏移误差。电机线圈的安装示意图

如图 4 所示。

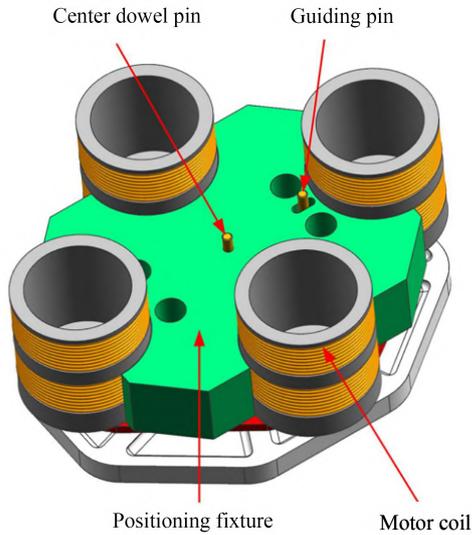


图 4 电机装配

Fig. 4 Motor assembly

3.2 柔性组件设计

快速反射镜的固有频率主要由柔性支撑结构决定。如图 5 所示,柔性支撑由 4 个十字型柔性轴承构成,4 个十字型柔性轴承两两一组同轴布局,交于一虚拟旋转中心点 O ,实现了绕 x 轴和 y 轴的两个转动自由度。移动框架与反射镜背板连接,实现二维转动,根据反射镜的转动角度预留出和固定框架的间隙,以实现小型化设计。移动框架的材料选择与反射镜背板相同的殷钢材料,以满足高低温的适应性需求。其余结构件可以选择不锈钢材料。

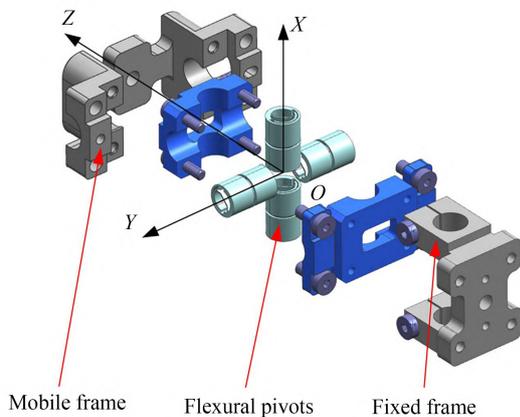


图 5 柔性支撑组件结构组成

Fig. 5 Structure component of flexible support

装配过程中同样应用中心定位销实现准确定位移动框架和固定框架的相对位置。十字型柔性轴承的正交旋转轴中心 O 应与反射镜组件的质心近似重合,减少反射镜组件因重力产生的弯矩对反射镜面形精度的影响。

当反射镜组件和柔性组件装配完成后,通过贯穿整个组件的中心定位销使 3 个组件实现同心,避免出现轴心偏移误差,然后安装在反射镜基座组件上。

3.3 反射镜基座组件

反射镜基座上安装有角度传感器、音圈电机磁座和机械限位。角度传感器选用电涡流传感器,如图 6 所示,4 个角度传感器与 4 个音圈电机磁座交错分布安装在反射镜基座组件上,减小了 X 、 Y 轴方向的尺寸,保证了快速反射镜的小型化。

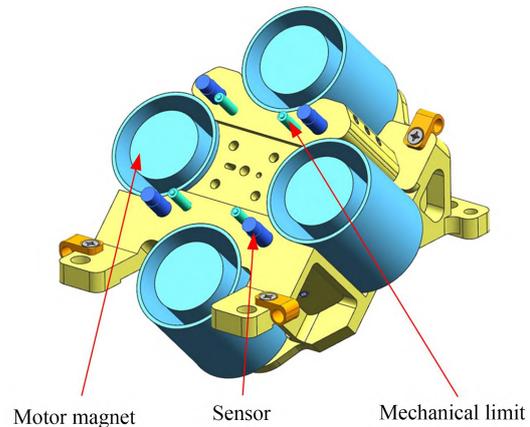


图 6 反射镜基座组件

Fig. 6 Mirror pedestal assembly

每个角度传感器的探测面与反射镜背板的感应面平面放置并预留一定的探测距离,能够测试反射镜全行程内的转动角度。

3.4 仿真分析

对快速反射镜系统进行有限元分析,将构建的三维模型导入 hypermesh 进行网格划分,去除不必要的细节特征,合理设置网格尺寸,提高计算效率,对柔节等关键件进行网格细分,保证分析的准确性。确定了 8 节点六面体单元的反射镜有限元模型,网格划分情况如图 7 所示。

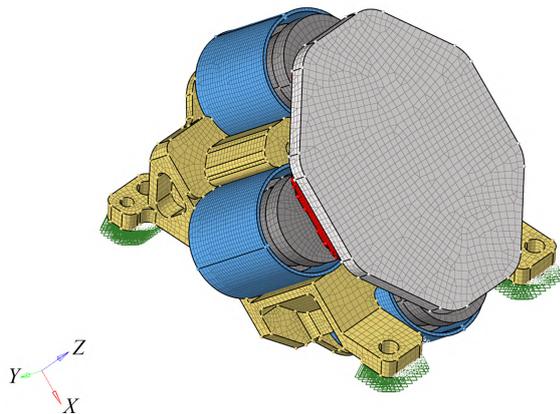


图 7 快速反射镜的有限元模型

Fig. 7 Finite element model of fast steering mirror

3.4.1 装配误差对面形精度的影响

平面反射镜装配过程中的安装误差会影响平面反射镜的面形精度。根据安装面的研磨精度,平面度优于 $2\ \mu\text{m}$,因此,对反射镜背板的一侧安装面设置 $4\ \mu\text{m}$ 的强制位移,分析反射镜的面形变化。

平面反射镜的表面节点数为 3 827,通过 hypermesh 提取变形前后的节点位移,对快速反射镜进行面形分析。如图 8 所示,反射镜面形 RMS 值变化为 $2.84\ \text{nm}$,PV 值变化为 $14.22\ \text{nm}$,满足光学指标要求。

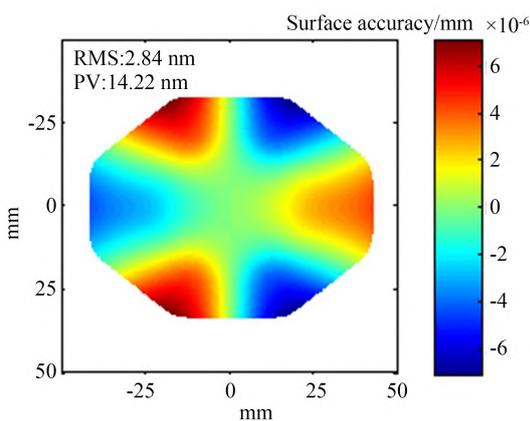


图 8 装配误差对面形精度的影响

Fig. 8 Influence of assembly stress on mirror surface accuracy

3.4.2 工作环境对面形精度的影响

当快速反射镜布置在工作环境时,影响其面形精度的主要因素包括振动环境的最大加速度

和最大温差,两者可能同时对快速反射镜作用。因此,为了保证最恶劣条件下快速反射镜的面形精度能够满足要求。以最大加速度 $4g$,最大温差 $5\ ^\circ\text{C}$ (温控作用下)为边界条件,分析计算平面反射镜的面形精度。

图 9 为快速反射镜面形分析结果,最大加速度分别设置 X 向和 Z 向,反射镜面形 RMS 均小于 $\lambda/50$ ($\lambda=632.8\ \text{nm}$),PV 均小于 $\lambda/10$ ($\lambda=632.8\ \text{nm}$),满足光学指标要求。由此表明,反射镜组件结构设计合理。

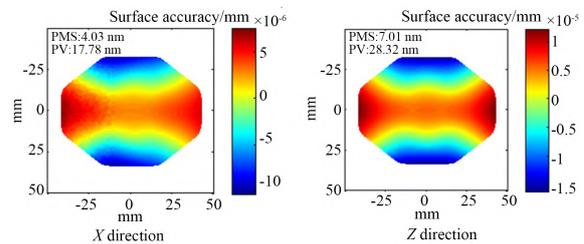


图 9 工作条件下面形精度的仿真

Fig. 9 Mirror surface accuracy in simulation

3.4.3 模态分析

固有频率和振型是评价结构动态刚度的重要指标,且固有频率是结构固有频率,与外界载荷无关。通过有限元分析,可初步确定快速反射镜的柔性支撑结构是否满足刚度设计要求。

图 10 是快速反射镜的一阶模态振型,表 2 为固有频率和前六阶振型。模态分析结果表明,快速反射镜系统在两个工作方向上的谐振频率分别为 $16.2\ \text{Hz}$ 和 $19.62\ \text{Hz}$,而其他非工作方向上

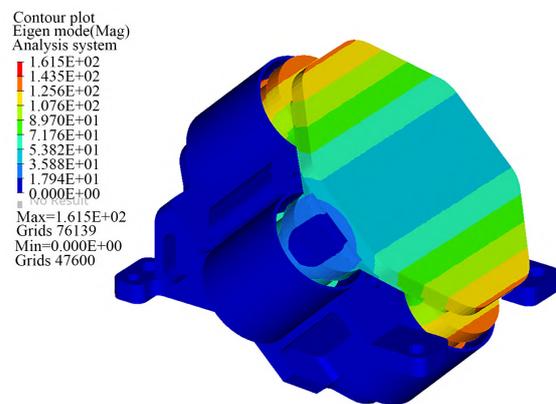


图 10 一阶模态振型

Fig. 10 The 1st mode vibration

的谐振频率均在 292.2 Hz 以上,证明了柔性铰链结构参数选择合理^[10]。平面反射镜组件的一阶模态为 1 354 Hz,远远大于柔节的两个转动谐振频率,因此反射镜组件相对于柔性结构等效于刚体,电机输出力对反射镜面形的影响可以忽略不计。

表 2 快速反射镜的固有频率和前六阶振型

Tab. 2 Natural frequency and the first six-order mode of fast steering mirror

Order	Frequency/Hz	Vibration mode
1	19.38	Swing around the X axis
2	23.43	Swing around the Y axis
3	292.16	Swing around the Z axis
4	716.35	Translation in the XZ plane
5	893.97	Translation in the XY plane
6	1 054.04	Translation in the XZ plane

3.5 快速反射镜装配

平面反射镜表面镀金膜,镀膜后在可见波段(650~850 nm)的反射率优于 95%,在红外波段(3.7~4.8 μm)的反射率优于 98%。平面反射镜采用无应力黏接方法,实现了反射镜的快速黏接和装配^[11]。

反射镜背板安装面和柔性组件中移动框架安装面的平面度会对平面反射镜的面形精度造成影响,因此需要进行精密研磨,平面度优于 2 μm 。装配完成的快速反射镜如图 11 所示。

对各个工序下平面反射镜的面形精度进行



图 11 快速反射镜

Fig. 11 Fast steering mirror

测试,结果如表 3 所示。反射镜装配完成后,存在装配应力。经过高低温循环(-55~70 $^{\circ}\text{C}$)和振动试验后,快速反射镜的装配应力充分释放,平面反射镜的面形精度(RMS)优于 0.017 λ ($\lambda=632.8\text{ nm}$)。快速反射镜通电状态下,平面反射镜的面形精度测试结果如图 12 所示。

表 3 平面反射镜各阶段的面形精度

Tab. 3 Surface accuracy of mirror at different stages

Procedure	PV	RMS	Power
After coating	0.123 λ	0.018 λ	0.018 λ
After bonding	0.110 λ	0.019 λ	0.005 λ
After assembling	0.282 λ	0.018 λ	-0.010 λ
After thermal and vibration test	0.165 λ	0.017 λ	0.014 λ

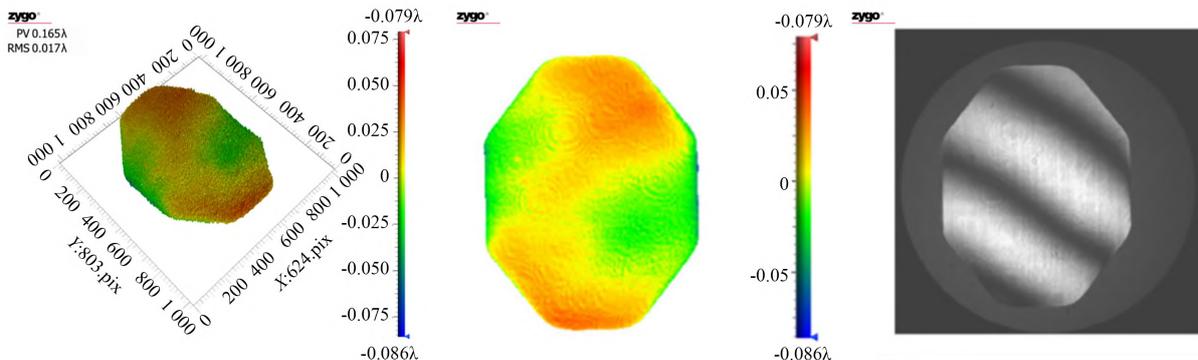


图 12 快速反射镜的面形精度

Fig. 12 Surface shape accuracy of fast steering mirror

3.6 实验检测

光电载荷成像稳定精度主要由快速反射镜来保证,跟踪性能和定位精度是快速反射镜的重要指标,因此对这两项指标进行测试。

采用完全跟踪控制方法对系统进行正弦信号跟踪性能测试^[12]。输入指令为幅值为 0.5 V,电压频率分别为 50,100 和 200 Hz 的正弦信号,检测输出信号的变化,以输出信号大于 0.707 倍的幅值信号作为闭环带宽标准。系统对 50,100 和 200 Hz 的正弦信号控制信号波形幅值都能满足指标。当系统的闭环控制带宽为 200 Hz 时,闭环控制信号波形曲线如图 13 所示。输出信号的幅值大于 $0.707 \times 0.5 \text{ V}$,因此控制带宽优于 200 Hz(-3 dB),能够满足指标要求。

在标准实验室光学平台上,通过自准直仪测试快速反射镜的定位精度,自准直仪设备为 Trioptics。快速反射镜镜面垂直放置于自准直仪光

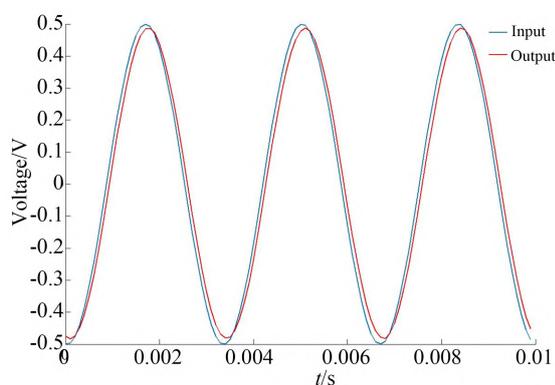


图 13 闭环控制信号波形

Fig. 13 Closed loop control signal waveform

参考文献:

- [1] 王正玺,张葆,李贤涛,等.快速反射镜在像移补偿中的应用[J].中国光学,2020,13(1):95-105.
WANG ZH X, ZHANG B, LI X T, *et al.* Application of fast steering mirror in image motion compensation[J]. *Chinese Optics*, 2020, 13(1): 95-105. (in Chinese)
- [2] RAN B, YANG P, WEN L H, *et al.* Design and analysis of a reactionless large-aperture fast steering mirror with piezoelectric actuators[J]. *Applied Optics*, 2020, 59(4): 1169.

束出射端,控制快速反射镜处于零位状态,分别读取自准直仪 X 向和 Y 向的角度偏转,绘制曲线如图 14 所示。快速反射镜的 X 向定位误差峰峰值低于 $1.20 \mu\text{rad}$, Y 向定位误差峰峰值低于 $1.18 \mu\text{rad}$,满足指标要求。

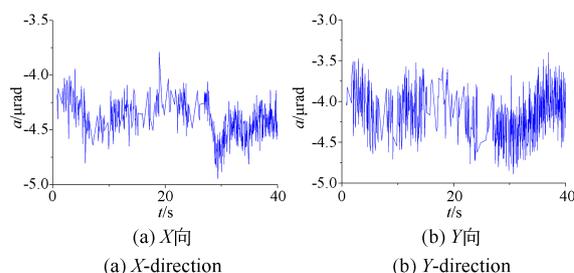


图 14 定位误差曲线

Fig. 14 Positioning error curves

4 结 论

本文根据航空光电载荷对快速反射镜的高指标要求,研究了快速反射镜的结构设计方法,确定了反射镜组件、柔性结构以及传感器装配,然后对每个子系统的结构和关键点进行模块化设计,并通过仿真对关键指标进行验证,最后通过检测跟踪性能和定位误差,验证了高面形精度和高跟踪精度的快速反射镜的设计和制备。实验结果表明:平面反射镜的面形精度为 0.017λ ($\lambda=632.8 \text{ nm}$),系统闭环带宽优于 200 Hz, X 向和 Y 向的定位误差皆低于 $1.2 \mu\text{rad}$,能够满足光电载荷系统的要求。

- [3] 周子云,高云国,邵帅,等.采用柔性铰链的快速反射镜设计[J].光学精密工程,2014,22(6):1547-1554.
ZHOU Z Y, GAO Y G, SHAO SH, *et al.* Design of fast steering mirror using flexible hinge[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2014, 22(6): 1547-1554. (in Chinese)
- [4] 王震,程雪岷.快速反射镜研究现状及未来发展[J].应用光学,2019,40(3):373-379.
WANG ZH, CHENG X M. Research progress and development trend of fast steering mirror[J]. *Journal of Applied Optics*, 2019, 40(3): 373-379. (in Chinese)

- Chinese)
- [5] DONG Z C, JIANG A M, DAI Y F, *et al.* Space-qualified fast steering mirror for an image stabilization system of space astronomical telescopes [J]. *Applied Optics*, 2018, 57(31): 9307-9315.
- [6] 陈国真, 徐斯强, 刘品宽, 等. 大行程快速反射镜的结构设计及带宽特性[J]. *光学精密工程*, 2020, 28(1): 90-101.
CHEN G ZH, XU S Q, LIU P K, *et al.* Structural design and bandwidth characteristic of a fast steering mirror with large travel range [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2020, 28(1): 90-101. (in Chinese)
- [7] 徐新行, 张贵明, 李冠楠, 等. 具有两个双轴柔性铰链的快速反射镜设计[J]. *仪器仪表学报*, 2019, 40(2): 174-181.
XU X H, ZHANG G M, LI G N, *et al.* Design of fast steering mirror with two double-axis flexure hinges[J]. *Chinese Journal of Scientific Instrument*, 2019, 40(2): 174-181. (in Chinese)
- [8] 汪奎, 辛宏伟, 曹乃亮, 等. 空间相机快速反射镜的两轴柔性支撑结构设计[J]. *红外与激光工程*, 2019, 48(12): 233-240.
WANG K, XIN H W, CAO N L, *et al.* Design of two-axis flexible support structure for fast steering mirror in space cameras[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2019, 48(12): 233-240. (in Chinese)
- [9] 汪奎, 辛宏伟, 徐宏, 等. 空间相机快速反射镜的结构轻量化设计[J]. *红外与激光工程*, 2019, 48(4): 177-183.
WANG K, XIN H W, XU H, *et al.* Lightweight design of fast steering mirror for space cameras[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2019, 48(4): 177-183. (in Chinese)
- [10] TAN S N, YU X, XU Y S, *et al.* Micro-stress bonding analysis of high precision and lightweight mirrors [J]. *Optics Express*, 2021, 29 (21) : 33665.
- [11] 艾志伟, 嵇建波, 王鹏举, 等. 两轴柔性支承快速反射镜结构控制一体化设计[J]. *红外与激光工程*, 2020, 49(7): 20190479-1-8.
AI ZH W, JI J B, WANG P J, *et al.* Integrative design of structure control for two-axis fast steering mirror with flexible support[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2020, 49(7): 20190479-1-8. (in Chinese)
- [12] 王福超, 王昱棠, 田大鹏. 音圈快速反射镜的完全跟踪控制[J]. *光学精密工程*, 2020, 28(9): 1997-2006.
WANG F CH, WANG Y T, TIAN D P. Perfect tracking control for fast-steering mirror driven by voice coil motor[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2020, 28(9): 1997-2006. (in Chinese)

作者简介:



谭淞年(1989—),男,吉林通化人,硕士,助理研究员,2012年、2014年于哈尔滨工业大学分别获得学士、硕士学位,主要从事增材制造和航空成像与测量等方面的研究。E-mail: tansongnian@126.com