

激光与光电子学进展

大口径矩形 SiC 扫描反射镜组件的设计

李延伟¹, 张景国^{2*}, 谢新旺^{1**}, 陈大喜¹, 董雷岗¹

¹季华实验室, 广东 佛山 528200;

²中国科学院长春光学精密机械与物理研究所, 吉林 长春 130033

摘要 为了减轻大尺寸(740 mm×480 mm)矩形扫描反射镜的质量并保证反射镜的面形精度,结合二维和三维等效刚度模型设计了背部开口、以三角形轻量化孔为主、轻量化率为 81.4% 的轻量化结构。基于球头万向节与柔性铰链原理,设计了两种背部三点支撑方式的 SiC 扫描反射镜组件。有限元分析结果表明,在 Y 方向重力及 40 °C 均匀温差耦合工况下,球头万向节与柔性铰链支撑方式的反射镜面形误差均方根(RMS)值满足小于等于 0.025λ (波长 λ=632.8 nm)的设计要求,分别为 12.3 nm 和 12.9 nm,一阶固有频率分别为 68.1 Hz 和 85.5 Hz,且柔性铰链结构的刚度更好。采用自准直法测量扫描反射镜组件的面形误差,结果表明,面形误差的 RMS 值为 0.025λ,满足实际要求,为大口径矩形扫描反射镜组件的设计提供了参考依据。

关键词 光学设计; 扫描反射镜; 球头万向节; 柔性铰链; 面形误差

中图分类号 TH122

文献标志码 A

doi: 10.3788/LOP202259.0522001

Design of Large-Aperture Rectangular SiC Scanning Mirror Assembly

Li Yanwei¹, Zhang Jingguo^{2*}, Xie Xinwang^{1**}, Chen Taixi¹, Dong Leigang¹

¹Ji Hua Laboratory, Foshan, Guangdong 528200, China;

²Changchun Institute of Optics and Fine Mechanics and Physics,
Chinese Academy of Sciences, Changchun, Jilin 130033, China

Abstract To reduce the weight of the large-aperture (740 mm × 480 mm) rectangular scanning mirror and ensure the surface accuracy of the mirror, this study proposes a lightweight structure design with back openings, mainly triangular lightweight holes, and a lightweight rate of 81.4% by combining the two- and three-dimensional equivalent stiffness models. Based on the principle of ball joint and flexible hinge, two types of scanning mirror components with different three-point back support modes are designed. The finite element analysis results show that under the coupling condition of Y-direction gravity and a uniform temperature difference of 40 °C, the root-mean-square (RMS) value of the mirror surface error of the ball joint and flexible hinge support structure are 12.3 nm and 12.9 nm, respectively, which satisfies the optical design requirement of less than or equal to 0.025λ (wavelength λ=632.8 nm). Furthermore, the first-order natural frequencies are 68.1 Hz and 85.5 Hz, and the flexure hinge structure had better stiffness. The surface error of the flexure hinge scanning mirror is measured using the autocollimation method. The measurement results show that the surface error RMS value is 0.025λ. This result provides a reference for developing a large-aperture rectangular scanning mirror assembly.

Key words optical design; scanning mirror; ball joint; flexure hinge; surface error

收稿日期: 2021-10-25; 修回日期: 2021-11-18; 录用日期: 2021-12-01

基金项目: 国家重点研发计划(2016YFB0500301)

通信作者: hitzjg@126.com; **xxw432536@sina.com

1 引言

为了实现光路折转、优化整机结构布局,常在光学系统的光路中^[1-3],尤其是光路前端增加具备一维或二维旋转运动功能的扫描反射镜^[4-5]。扫描反射镜绕光轴旋转的特点可以实现扩大成像视场和视场搜索范围的功能,扫描反射镜绕自身转轴旋转的特点可实现自准直检焦功能。通过光学补偿法在飞行过程中控制扫描反射镜产生一个附加旋转运动,以保持出射光线不变,理论上可以完全补偿前向像移。此外,扫描反射镜的镜面面形精度会影响系统的像差,进而影响成像质量。扫描反射镜组件的动态响应特性会影响像移补偿残差,进一步影响成像质量。因此,扫描反射镜组件是整机系统中的关键部件,在空间相机、航空相机、机载红外搜索与跟踪系统^[6]中得到了广泛应用。

近年来,扫描反射镜的尺寸随航空相机光学系统焦距和口径的不断增大而增大,这不仅增加了对反射镜面型精度的要求,也增加了旋转组件的转动惯量和研制难度,进而影响系统的响应速度。选用比刚度大与线膨胀系数匹配的反射镜及支撑结构材料、设计合理的轻量化反射镜与柔性支撑结构,是获得质量轻且具有良好结构刚度与热稳定性扫描反射镜组件的有效途径,也是保证系统稳定性和环境适应性的前提。

针对尺寸为 740 mm × 480 mm 的 SiC 扫描反射镜,本文开展了反射镜轻量化和支撑结构的研究,结合二维和三维等效刚度模型设计了背部开口、以三角形轻量化孔为主的轻量化扫描反射镜。基于球头万向节与柔性铰链原理,设计了两种不同背部支撑方式的轻型扫描反射镜组件,利用有限元方法分析和对比了不同结构的支撑刚度及面形精度,并完成了基于柔性铰链结构形式扫描反射镜组件的面形测试工作。

2 扫描反射镜的轻量化

工作时,扫描反射镜与光轴的夹角为 45°,利用二维精密轴系使扫描反射镜绕自身转轴及光轴进行运动,其原理如图 1 所示。为了减小转动惯量、提升系统响应速度,必须对扫描反射镜进行轻量化设计。

扫描反射镜的轻量化是指在保证面形精度、力学性能、热稳定性的条件下,尽可能地减轻镜体质量,主要包括参数优化方法与拓扑优化方法^[7]。其中,拓扑优化方法是近年来反射镜轻量化领域的研究热点,人

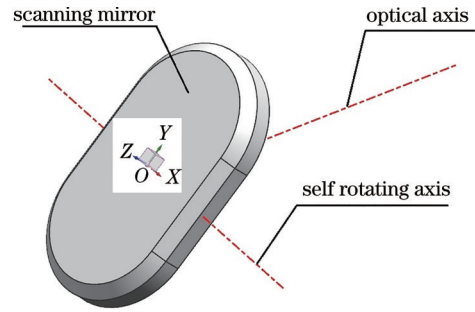


图 1 扫描反射镜的工作原理

Fig. 1 Working principle of the scanning mirror

们利用拓扑优化方法已经完成了尺寸为 218 mm × 166 mm 小口径矩形反射镜的轻量化设计^[8],并完成了实物研制工作,但对于大口径反射镜轻量化设计的研究较少^[9-10]。轻量化设计中常以轻量化率作为考核指标,定义为轻量化设计去除的质量与未轻量化前结构质量的比。优化方法主要包括支撑方式、轻量化孔的形状、镜体厚度、筋板厚度等参数的优化,综合考虑后,选择参数优化方法并采用经验设计与有限元仿真手段完成大口径矩形反射镜的轻量化设计工作。

反射镜的支撑方式主要有周边支撑、侧面支撑与背部支撑^[11]。周边支撑以反射镜底面和侧面作为定位基准面,适用于小尺寸反射镜且温度相对稳定的工作环境。侧面支撑以反射镜的两个侧面为定位基准,适用于外形尺寸较大的矩形反射镜。背部支撑采用多点柔性支撑结构,可消除装配、振动、环境温度变化产生的应力,适用于外形尺寸大且长宽比小于 2 的矩形反射镜。该 SiC 扫描反射镜的尺寸为 740 mm × 480 mm,长宽比为 1.54。为保证反射镜的面形精度及其在动态过程中的支撑稳定性,综合考虑反射镜尺寸、重力载荷及温度载荷等因素后,选择背部三点支撑方式作为该扫描反射镜的支撑结构形式。根据入射光线的实际分布情况,对反射镜两端进行倒圆处理,以尽可能地减轻系统的质量。为了进一步减轻反射镜的质量并保证面形精度与结构刚度,需要对轻量化孔的布局进行优化。三角形结构轻量化孔的刚度最好,且有利于保证面形精度。因此,该扫描反射镜选择了背部开口、以三角形轻量化孔为主的轻量化设计,如图 2 所示。

反射镜轻量化结构中可优化的参数较多,如镜体厚度 t 、镜面厚度 t_s 、三角形孔的内切圆直径 B 、背部筋板厚度 t_c 、单支撑点距上边缘的距离 a 、单支撑点与双支撑点的垂直距离 b 、双支撑点的间距 c ,且这些设计参数会相互影响,因此,要综合考虑后再

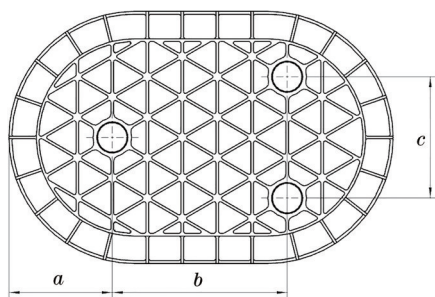


图2 扫描反射镜背部的轻量化布局

Fig. 2 Lightweight layout of the scanning mirror

进行优化。首先,根据经验对参数进行初步取值,利用二维等效刚度模型评估镜面的面形误差^[12],初步判断各参数是否合理。镜面面形误差的均方根(RMS)值可表示为

$$\delta_{\text{RMS}} = \eta \frac{12\mu p B^4 (1 - \mu^2)}{E t_f^3}, \quad (1)$$

式中,η为波谷(PV)与RMS的换算系数,μ为与形状相关的系数,三角形孔的μ为0.00151,p为加工时施加的压力,E为材料的杨氏模量。建立三维等效刚度模型,在X方向重力、Y方向重力、Z方向重力、40℃均匀温升的工况下,以面形精度为目标,以质量、结构刚度为约束条件,对各参数进行迭代分析计算,最终确定的各项参数如表1所示,扫描反射镜的轻量化模型如图3所示。设计后系统的轻量化

表1 扫描反射镜的参数

Table 1 Parameters of the scanning mirror unit: mm

Number	Parameter	Value
1	<i>t</i>	80
2	<i>t_f</i>	5
3	<i>t_c</i>	4
4	<i>B</i>	41
5	<i>a</i>	198
6	<i>b</i>	335
7	<i>c</i>	232

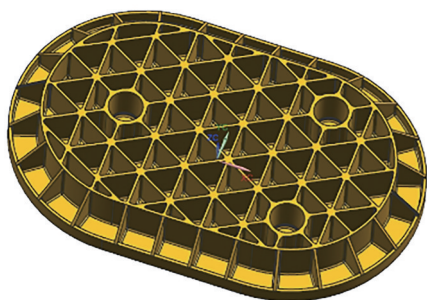


图3 扫描反射镜的轻量化模型

Fig. 3 Lightweight model of the scanning mirror

率达到了81.4%,裸镜仿真分析的最大RMS值为7.4 nm。

3 扫描反射镜的组件

扫描反射镜系统主要由扫描反射镜、镜体锥套、柔性环节及支撑背板等结构组成,如图4所示。

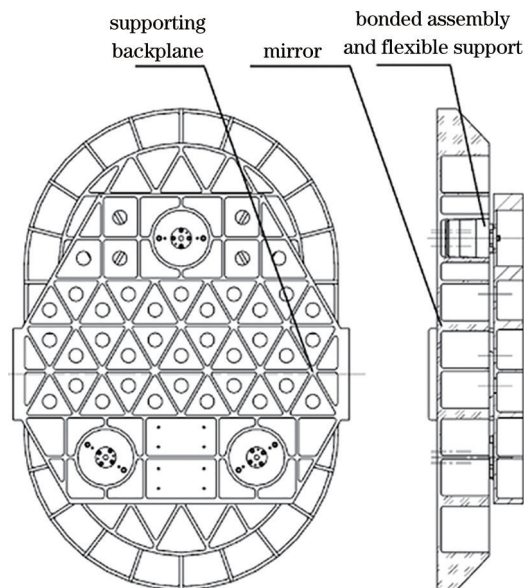


图4 扫描反射镜的组件示意图

Fig. 4 Schematic diagram of components of the scanning mirror

扫描反射镜的材料选用具有高比刚度与良好热稳定性的SiC,利用RB-SiC成型工艺烧结成型;镜体锥套利用胶粘工艺固定在SiC反射镜支撑孔内,用于连接柔性环节,其材料为与SiC热胀系数匹配的钢钢(4J36);柔性环节可以减小反射镜镜体中的应变,进而减小镜面的面形误差,但柔性环节不能过于薄弱,否则会降低结构的刚度,因此柔性铰链材料选用性能稳定的钛合金(TC4);为了保证反射镜的面形精度,支撑背板需具有良好的刚度和结构稳定性,因此选用的材料为性能稳定、易于成型的铸钛合金(ZTC4);支撑背板采用背部开口方案,选取以矩形为主,三角形和圆形为辅的轻量化设计,最大程度减少了背板的厚度,并保证其支撑刚度,对应材料的具体参数如表2所示。

3.1 球头万向节的结构

基于球头万向节原理,设计了一种适用于大尺寸矩形扫描反射镜的球铰柔性支撑方式,其原理如图5所示。扫描反射镜背部设计有三个支撑点,每个支撑点处均固定有镜体锥套与扫描反射镜,通过

表 2 扫描反射镜中的材料参数

Table 2 Material parameters in the scanning mirror

Material	Density / [$10^3 \text{ (kg}\cdot\text{m}^{-3})$]	Elastic modulus / GPa	Poisson's ratio	Linear expansion coefficient / (10^{-6} K)
SiC	3.05	400	0.18	2.5
TC4	4.44	109	0.34	9.1
4J36	8.1	141	0.25	2.5
ZTC4	4.40	112	0.29	8.9

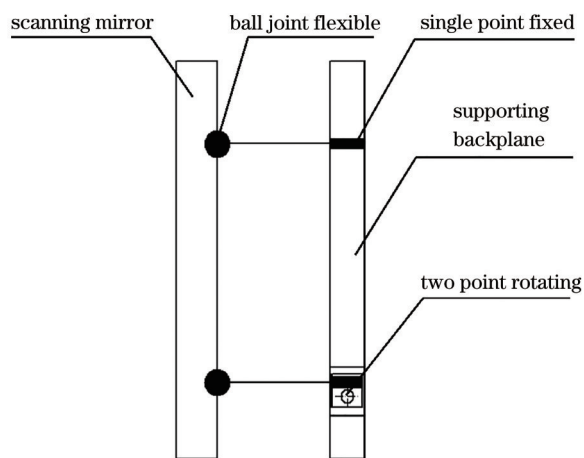


图 5 球铰支撑方式的原理

Fig. 5 Principle of the ball joint flexible support mode

球铰柔性环节与支撑背板连接,利用球头的万向性实现每个支撑点转动自由度的释放。支撑背板处,

单点支撑端为固定连接,两点支撑端通过销轴连接,以释放其转动自由度。当温度发生变化时,整个系统可以补偿扫描反射镜与支撑背板变形的不一致,消除扫描反射镜和支撑背板变形量不一致产生的应力,从而确保扫描反射镜的高精度面形。

球铰柔性支撑方式主要由扫描反射镜、镜体锥套、上压环、下压环、球铰及支撑背板等结构组成,如图 6 所示。其中,球铰与上压环、下压环采用配研工艺,保证球头转动舒适、自由;单点固定端由镜体锥套压圈将球头部分固定到扫描反射镜上;另一端由球铰结构锁紧压圈固定在支撑背板上。两点转动端设置有转动过渡件,一端用于连接球铰结构,另一端通过转动销轴与支撑背板连接。在 X 方向重力、Y 方向重力、Z 方向重力、40 °C 均匀温升的工况下,以面形精度为目标,考虑结构刚度,经过多次迭代仿真计算,确定球铰的直径 S_R 为 30 mm,结构如图 7 所示。

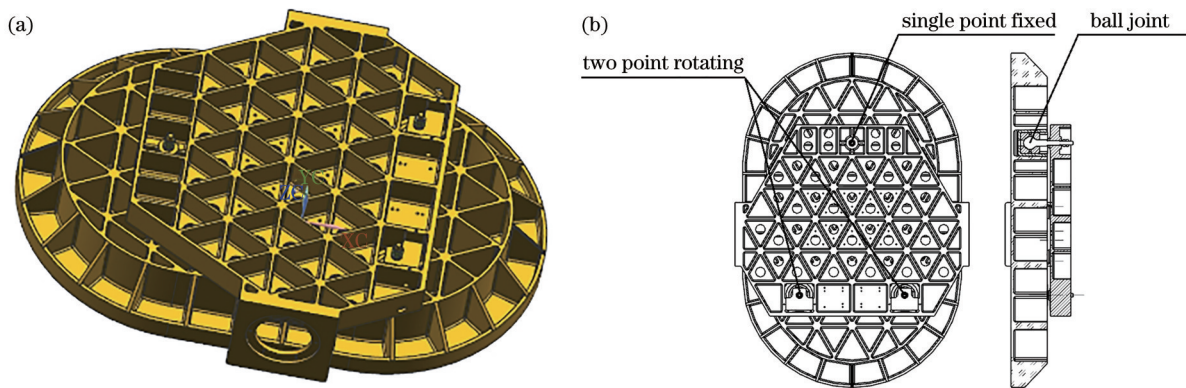


图 6 球铰支撑的模型。(a) 三维模型; (b) 剖视图

Fig. 6 Model of the ball joint support. (a) Three-dimensional model; (b) section view

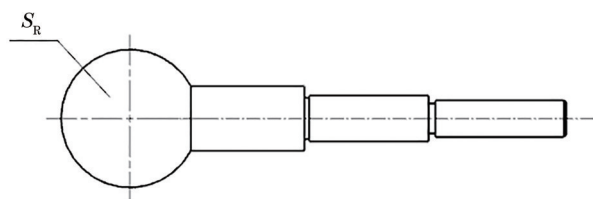


图 7 球铰结构

Fig. 7 Structure of the ball joint

3.2 柔性铰链结构

基于柔性铰链的弹性变形原理,设计了一种侧面双向开槽的柔性支撑结构,如图 8 所示。柔性支撑主要通过开槽的方式增加结构柔性,释放转动自由度,减小装配与温度变化带来的内部应力,保证高精度面形。

柔性支撑设计的关键在于平衡高结构动态刚度与高镜面面形精度之间的矛盾,即结构柔度过大

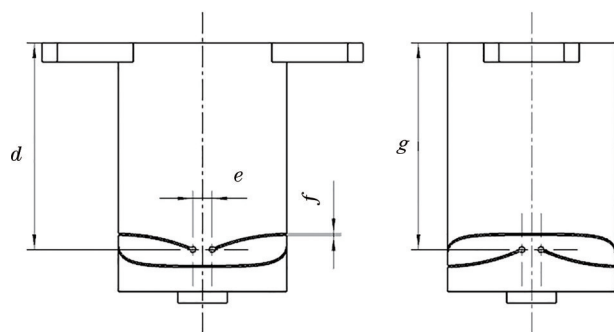


图 8 柔性铰链的结构

Fig. 8 Structure of the flexible hinge

会降低结构动态刚度,也会提高镜面面形精度;结构柔度过小会降低镜面面形精度,也会提高结构动态刚度。因此,需要优化柔性铰链的关键参数,如上端双槽与顶端的距离 d 、双槽的间距 e 、槽宽 f 以及下端双槽与顶端的距离 g ,以在满足系统刚度要求的同时,改善热环境下的面形精度。在 X 方向重力、 Y 方向重力、 Z 方向重力、 $40\text{ }^\circ\text{C}$ 均匀温升的工况下,以面形精度为目标,考虑结构刚度,进行了迭代计算,确定了各项关键参数,结果如表 3 所示。

表 3 柔性支撑的关键参数

Table 3 Key parameters of the flexible support unit: mm

Number	Parameter	Value
1	d	54
2	e	5
3	f	0.5
4	g	56

柔性铰链支撑结构主要由扫描反射镜、镜体锥套、柔性支撑及支撑背板等结构组成,如图 9 所示。其中,柔性支撑采用止口定位方式,一端固定在镜体锥套上,另一端固定在支撑背板上,修研后配打销钉固定。相比球铰柔性支撑,柔性铰链支撑主要

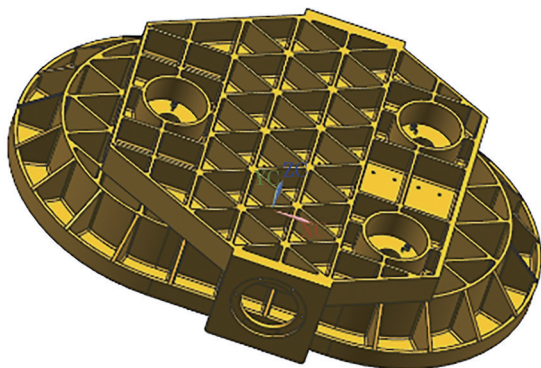


图 9 柔性铰链的模型

Fig. 9 Model of the flexible hinge

通过结构的柔性减小内部应力,加工、装调相对简单;而球铰支撑对装配要求很高,装配工艺复杂。

4 有限元仿真分析

为了对比分析两种支撑方案的动态刚度及热耦合工况下的面形精度,采用手动划分网格的方式,并适当简化了支撑背板,建立的有限元模型如图 10 所示。其中,球铰柔性支撑方式的扫描反射镜组件中,扫描反射镜与镜体锥套采用节点耦合方式连接;上、下压环与球铰之间采用多点耦合(MPC)连接。柔性铰链支撑方案中,各零件之间均采用节点耦合方式进行连接。

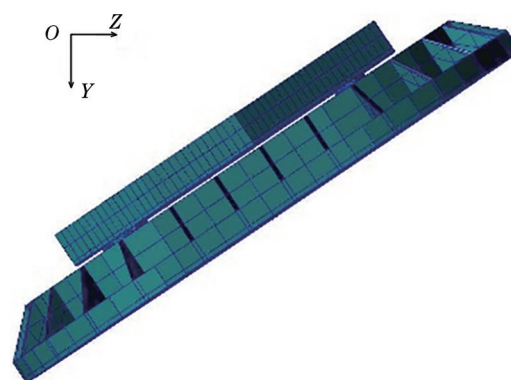


图 10 扫描反射镜的有限元模型

Fig. 10 Finite element model of the scanning mirror

4.1 面形误差分析

扫描反射镜组件在系统中与光轴的夹角为 45° ,此时, Y 方向重力为实际受力情况。考虑到系统外界热环境较差,为严格考核扫描反射镜组件的温度适应性,将热载荷条件设置为 $40\text{ }^\circ\text{C}$ 均匀温升。分别对扫描反射镜组件在 Y 方向重力、 Y 方向重力与 $40\text{ }^\circ\text{C}$ 均匀温升耦合作用工况下进行静力学分析,得到的变形云图如图 11、图 12 所示。不同反射镜的面形变化对比结果如表 4 所示。可以发现,在 Y 方向重力、 Y 方向重力与 $40\text{ }^\circ\text{C}$ 均匀温升耦合作用的工况下,球铰柔性方案扫描反射镜组件的最大变形量分别为 0.041 mm 、 0.209 mm ;柔性铰链方案扫描反射镜组件的最大变形量分别为 0.036 mm 、 0.183 mm 。柔性铰链方案整体变形较小,但两种方案均存在刚体位移。球铰柔性方案与柔性铰链方案在两种工况下反射镜面误差的 RMS 值均满足小于等于 0.025λ (波长 $\lambda=632.8\text{ nm}$) 的光学设计要求,但球铰柔性方案在 Y 方向重力工况下的面形误差 RMS 值比柔性铰链结构低 14.5% 。

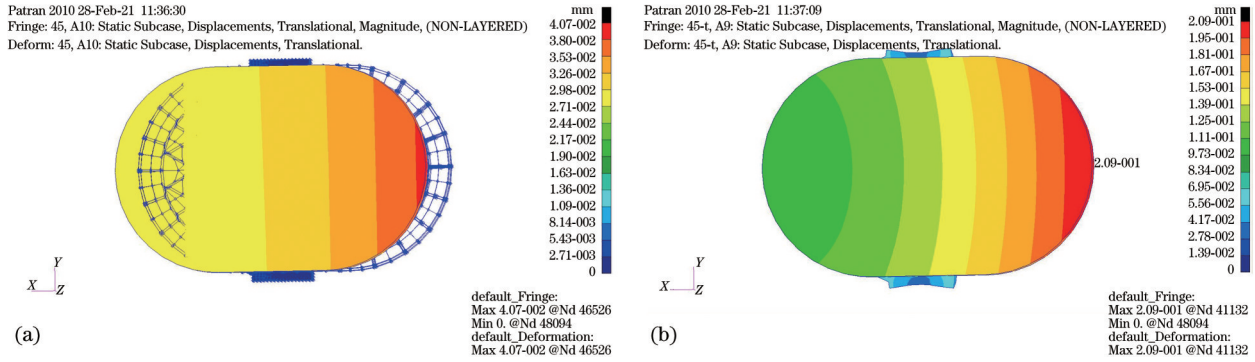


图 11 球铰柔性方案的变形云图。(a) Y 方向重力; (b) Y 方向重力与 40 °C 均匀温升耦合

Fig. 11 Deformation figure of the ball hinge mode. (a) Y-direction gravity; (b) coupling of Y-direction gravity and uniform temperature rise at 40 °C

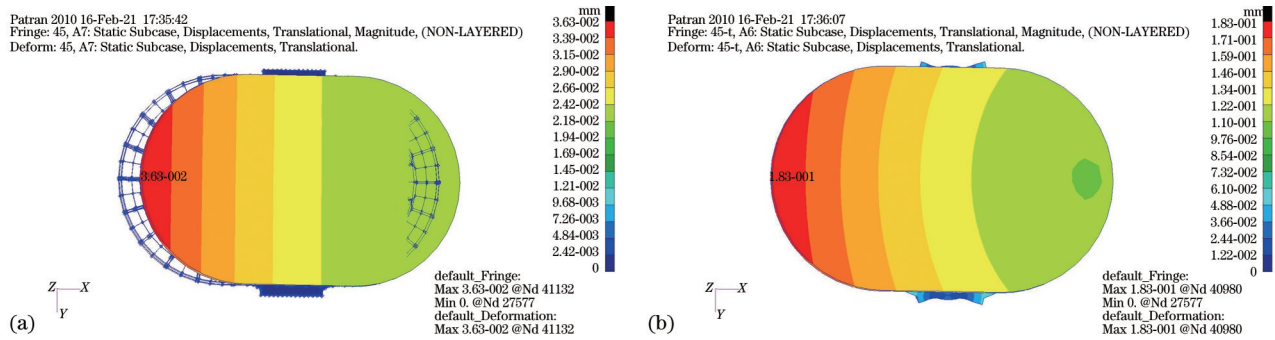


图 12 柔性铰链方案的变形云图。(a) Y 方向重力; (b) Y 方向重力与 40 °C 均匀温升耦合

Fig. 12 Dformation figure of the flexible hinge mode. (a) Y-direction gravity; (b) coupling of Y-direction gravity and uniform temperature rise at 40 °C

表 4 不同结构的面形分析结果

Table 4 Surface shape analysis results of different structures

Condition	Ball hinge support mode		Flexible hinge support mode	
	PV	RMS	PV	RMS
Y-direction gravity	51.5	10.6	55.5	12.4
Y-direction gravity and uniform temperature rise at 40 °C	53.4	12.3	62.8	12.9

4.2 模态分析

扫描反射镜组件动态刚度的好坏主要取决于结构的动态特性,即结构固有频率与振型。结构固有频率^[13]可表示为

$$f_n = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{K}{M}}, \quad (2)$$

式中, f_n 为固有频率, K 为结构刚度, M 为质量。可以发现,固有频率既能体现动态刚度的优劣,又能反映静态刚度的大小;且前三阶固有频率越大,表明结构的动态刚度越高,整体结构的比刚度也越高。经过模态分析,得到两种支撑方案的前三阶固有频率如表 5 所示,振型图如图 13、图 14 所示。可以发现,球铰柔性和柔性铰链两种支撑方案的一阶

表 5 不同结构的固有频率

Table 5 Natural frequencies of different structures

Structure	unit: Hz	
	Ball hinge support	Flexible hinge support
First natural frequency	68.1	85.5
Second natural frequency	80.8	101.8
Third natural frequency	93.6	128.4

固有频率分别为 68.1 Hz 和 85.5 Hz,柔性铰链支撑方案的一阶固有频率比球铰柔性方案的一阶固有频率高 20.4%,即柔性铰链支撑结构的刚度更优。仿真模型中,球铰处采用 MPC 连接处理,释放了五个自由度,在一定程度上降低了一阶固有频率,但

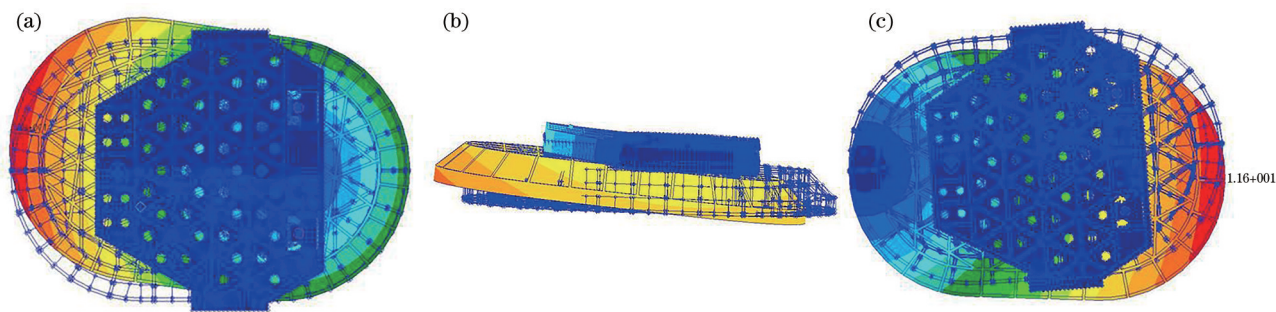


图 13 球铰柔性方案的振型图。(a)第一阶;(b)第二阶;(c)第三阶

Fig. 13 Vibration shape diagram of the ball hinge mode. (a) First mode; (b) second mode; (c) third mode

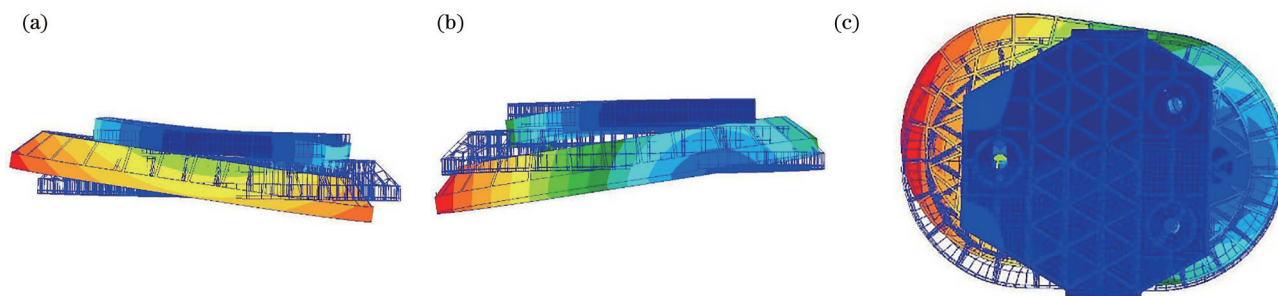


图 14 柔性铰链方案的振型图。(a)第一阶;(b)第二阶;(c)第三阶

Fig. 14 Vibration shape diagram of the flexible hinge mode. (a) First mode; (b) second mode; (c) third mode

与真实工作情况一致。

由上述分析可知,柔性铰链方案与球铰柔性方案的面形误差均能满足光学设计要求,但柔性铰链方案的一阶固有频率优于球铰柔性方案的一阶固有频率。此外,考虑到球铰尺寸较大,加工、装调工艺更复杂,最终确定用柔性铰链方案作为大口径矩形 SiC 扫描反射镜的支撑方案。

5 面形测试

由于扫描反射镜的尺寸较大,形状复杂,采用凝胶注模成型工艺烧结制作,后续只需加工支撑孔及反射镜镜面处,不对其他区域进行加工,以保证结构刚度。经过扫描反射镜的粗加工、表面改性与镀膜等工序后,最终实现扫描反射镜组件的装配。采用自准直方法,在实验室常温环境下,运用大口径 Zygo 干涉仪^[14]和标准镜对处于正常工作位置的扫描反射镜组件进行了面形检测,结果如图 15 所示。可以发现,反射镜镜面面形的 RMS 值为 0.025λ ,此时反射镜组件测试状态与工作状态一致,只受 Y 方向重力。对比相同工况下的分析结果(RMS 为 0.020λ)发现,测试结果与分析结果的误差值为 3.4 nm ,差异较小,且满足小于等于 0.025λ 的光学设计要求。

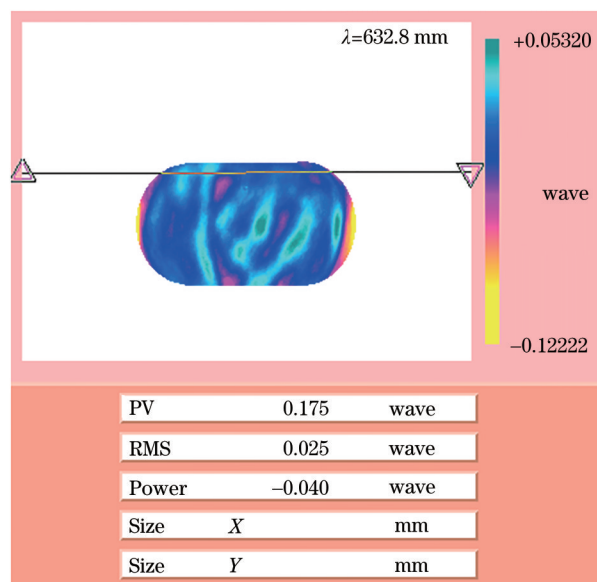


图 15 面形检测结果

Fig. 15 Result of the surface inspection

6 结 论

针对尺寸为 $740\text{ mm} \times 480\text{ mm}$ 的矩形 SiC 扫描反射镜,开展了反射镜轻量化及支撑结构的研究。通过仿真分析迭代计算确定了三点背部支撑孔的相对位置,完成了以三角形轻量化孔为主、轻量化

率为 81.4% 的扫描反射镜结构设计,为后续大尺寸矩形 SiC 反射镜的轻量化设计提供了技术支撑。基于球头万向节与柔性铰链原理,设计了两种不同支撑方式的扫描反射镜组件,通过有限元仿真迭代计算确定两种支撑方式中的重要参数,为球铰支撑与柔性支撑参数优化设计提供了参考。用有限元分析法对扫描反射镜组件的面形误差及结构刚度进行了仿真分析,在 Y 方向重力及 40 °C 均匀温差耦合工况下,球头万向节、柔性铰链支撑结构的反射镜面形误差 RMS 值均满足小于等于 0.025 λ 的光学设计要求,分别为 12.3 nm 和 12.9 nm,一阶固有频率分别为 68.1 Hz 和 85.5 Hz,且柔性铰链结构的刚度更好。

参 考 文 献

- [1] Si Z, Shen X, Zhu J X, et al. All-reflective self-referenced spectral interferometry for single-shot measurement of few-cycle femtosecond pulses in a broadband spectral range[J]. Chinese Optics Letters, 2020, 18(2): 021202.
- [2] Jin R, Yu Y L, Shen D, et al. Flexible, video-rate, and aberration-compensated axial dual-line scanning imaging with field-of-view jointing and stepped remote focusing[J]. Photonics Research, 2021, 9(8): 1477-1485.
- [3] Zheng C, Jin D, He Y P, et al. High spatial and temporal resolution synthetic aperture phase microscopy [J]. Advanced Photonics, 2020, 2(6): 065002.
- [4] Chen W, Ding Y L, Hui S W, et al. Design of kinematic mount for SiC scanning reflective mirror [J]. Chinese Optics, 2012, 5(2): 161-166.
陈伟, 丁亚林, 惠守文, 等. 碳化硅扫描反射镜支撑结构设计[J]. 中国光学, 2012, 5(2): 161-166.
- [5] Zhang J. Research on calibration method of TDI direction for focal plane assembly in aerial panoramic camera[D]. Changchun: Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, 2018: 1-10.
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: 中国科学院长春光学精密机械与物理研究所, 2018: 1-10.
- [6] Wang C, Han J Z, Li J Y. Design of a new type lightweight scanning mirror[J]. Laser & Infrared, 2012, 42(11): 1268-1272.
王诚, 韩建忠, 李江勇. 一种新型轻量化扫描反射镜设计[J]. 激光与红外, 2012, 42(11): 1268-1272.
- [7] Li C L, Ding Y L, Liu L. Level set topology optimization design of large-aperture mirror[J]. Infrared and Laser Engineering, 2018, 47(9): 0918001.
李诚良, 丁亚林, 刘磊. 大口径反射镜水平集拓扑优化设计[J]. 红外与激光工程, 2018, 47(9): 0918001.
- [8] Hu Y, Li J, Jia X Z. Optimal design of lightweight off-axis mirror and flexible support[J]. Acta Optica Sinica, 2020, 40(19): 1923002.
胡洋, 李季, 贾学志. 超轻离轴反射镜及柔性支撑优化设计[J]. 光学学报, 2020, 40(19): 1923002.
- [9] Sha W, Chen C Z, Zhang X X, et al. Topological lightweight design of space mirror[J]. Opto-Electronic Engineering, 2009, 36(4): 35-39.
沙巍, 陈长征, 张星祥, 等. 空间反射镜轻量化结构的拓扑优化设计[J]. 光电工程, 2009, 36(4): 35-39.
- [10] Li Y W, Yang H B, Geng Q X, et al. Large-aperture lightweight primary mirror design method using topology optimization[J]. Optical Technique, 2008, 34(2): 236-238.
李延伟, 杨洪波, 耿麒先, 等. 大口径主反射镜轻量化结构拓扑优化设计方法[J]. 光学技术, 2008, 34(2): 236-238.
- [11] Wang Z S, Zhai Y, Mei G, et al. Design of flexible support structure of reflector in space remote sensor [J]. Optics and Precision Engineering, 2010, 18(8): 1833-1841.
王忠素, 翟岩, 梅贵, 等. 空间光学遥感器反射镜柔性支撑的设计[J]. 光学精密工程, 2010, 18(8): 1833-1841.
- [12] Doyle K B, Genberg V L, Michel G J. Integrated optomechanical analysis[M]. 2nd ed. Lian H D, Wang X Y, Xu P, Transl. Beijing: National Defense Industry Press, 2015: 90-103.
Doyle K B, Genberg V L, Michel G J. 光机集成分析[M]. 2版. 连华东, 王小勇, 徐鹏, 译. 北京: 国防工业出版社, 2015: 90-103.
- [13] Li Y W, Yuan G Q, Geng Q X, et al. Study on dynamic characteristics of truss support structure in a TMA space remote sensor[J]. Computer Simulation, 2010, 27(9): 20-23.
李延伟, 远国勤, 耿麒先, 等. 某 TMA 遥感器桁架支撑结构动态特性研究[J]. 计算机仿真, 2010, 27(9): 20-23.
- [14] Liu X H, Li S C, Li M X, et al. Supporting structure design for primary and tertiary mirror of off-axis TMA system[J]. Infrared and Laser Engineering, 2021, 50(8): 20210025.
刘小涵, 李双成, 李美萱, 等. 离轴三反光学系统主三反射镜支撑结构设计[J]. 红外与激光工程, 2021, 50(8): 20210025.