



激光与光电子学进展
Laser & Optoelectronics Progress
ISSN 1006-4125, CN 31-1690/TN

《激光与光电子学进展》网络首发论文

题目: 大口径矩形碳化硅扫描反射镜组件研制技术
作者: 李延伟, 张景国, 谢新旺, 陈太喜, 董雷岗
收稿日期: 2021-10-25
网络首发日期: 2021-12-17
引用格式: 李延伟, 张景国, 谢新旺, 陈太喜, 董雷岗. 大口径矩形碳化硅扫描反射镜组件研制技术[J/OL]. 激光与光电子学进展.
<https://kns.cnki.net/kcms/detail/31.1690.TN.20211215.1113.004.html>



网络首发: 在编辑部工作流程中, 稿件从录用到出版要经历录用定稿、排版定稿、整期汇编定稿等阶段。录用定稿指内容已经确定, 且通过同行评议、主编终审同意刊用的稿件。排版定稿指录用定稿按照期刊特定版式(包括网络呈现版式)排版后的稿件, 可暂不确定出版年、卷、期和页码。整期汇编定稿指出版年、卷、期、页码均已确定的印刷或数字出版的整期汇编稿件。录用定稿网络首发稿件内容必须符合《出版管理条例》和《期刊出版管理规定》的有关规定; 学术研究成果具有创新性、科学性和先进性, 符合编辑部对刊文的录用要求, 不存在学术不端行为及其他侵权行为; 稿件内容应基本符合国家有关书刊编辑、出版的技术标准, 正确使用和统一规范语言文字、符号、数字、外文字母、法定计量单位及地图标注等。为确保录用定稿网络首发的严肃性, 录用定稿一经发布, 不得修改论文题目、作者、机构名称和学术内容, 只可基于编辑规范进行少量文字的修改。

出版确认: 纸质期刊编辑部通过与《中国学术期刊(光盘版)》电子杂志社有限公司签约, 在《中国学术期刊(网络版)》出版传播平台上创办与纸质期刊内容一致的网络版, 以单篇或整期出版形式, 在印刷出版之前刊发论文的录用定稿、排版定稿、整期汇编定稿。因为《中国学术期刊(网络版)》是国家新闻出版广电总局批准的网络连续型出版物(ISSN 2096-4188, CN 11-6037/Z), 所以签约期刊的网络版上网络首发论文视为正式出版。

大口径矩形碳化硅扫描反射镜组件研制技术

李延伟¹, 张景国^{2*}, 谢新旺^{1**}, 陈太喜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 为减轻大尺寸矩形扫描反射镜(740mm×480mm)重量并保证反射镜面形精度, 采用二维等效刚度模型与三维等效刚度模型结合的方法, 设计了背部开口、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扫描反射镜组件。有限元分析结果表明, 在Y向重力及40℃均匀温差耦合工况下, 球头万向节、柔性铰链支撑方式的反射镜面形误差RMS值分别为12.3nm和12.9nm; 一阶固有频率分别为68.1Hz和85.5Hz; 两种支撑方式的面形误差均能满足 $\leq 1/40\lambda$ 的光学要求; 但柔性铰链结构形式具有更好结构刚度。采用自准直法对扫描反射镜组件的面形误差进行了测量。测量结果表明, 面形误差RMS值为0.025 λ , 满足研制需求, 可为大口径矩形扫描反射镜组件的研制提供参考依据。

关键词 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

Design and Fabrication Technology of

Large Aperture Rectangular SiC Scanning Mirror Assembly

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

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

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

Abstract In order to reduce the weight of the large-size rectangular scanning mirror (740mm×480mm) and ensure the shape accuracy of the mirror, a lightweight structure with back openings, triangular lightweight holes and a lightweight rate of 81.4% was designed by combining the two-dimensional equivalent stiffness model with the three-dimensional equivalent stiffness model. Based on the principle of spherical joint and flexible hinge, two kinds of scanning mirror components with different three-point back support modes were designed. The finite element analysis results showed that under the coupling condition of Y gravity and uniform temperature difference at 40℃, the mirror shape errors RMS of spherical joint and flexible hinge support structure were 12.3nm and 12.9nm. The first-order natural frequencies were 68.1Hz and 85.5Hz. The surface error of the two support modes could meet the optical requirement of less than $1/40\lambda$.

基金项目: 国家重点研发计划(2016YFB0500301)

*E-mail: hitzjg@126.com; **E-mail: xxw432536@sina.com;

But the flexure hinge structure had better structural stiffness. The surface error of the flexure hinge scanning mirror was measured by using the auto collimation method. The measurement results showed that the surface error RMS value was 0.025λ . It provided a reference for the development of large aperture rectangular scanning mirror assembly.

Key words Scanning mirror; Ball joint; Flexure hinge; Surface error

OCIS codes 110.1758; 120.0280; 120.6810; 220.4880

1 引言

光学系统中,为实现光路折转、优化整机结构布局,常在光路中^[1-3],尤其是在光路前端增加扫描反射镜^[4,5],具备一维或二维旋转运动功能。利用扫描反射镜绕光轴旋转的特点可以实现成像视场扩大或视场搜索功能;利用扫描反射镜绕自身转轴旋转的特点,实现自准直检焦功能,并运用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来保持出射光线不变,理论上可以完全补偿前向像移。另外,扫描反射镜镜面面形精度会影响系统波像差,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,叠加影响成像质量。因此,扫描反射镜组件属于整机系统中的关键部件。目前,扫描反射镜组件在空间相机、航空相机、机载红外搜索与跟踪系统^[6]中得到广泛应用。

近年来随着航空相机光学系统焦距和口径的不断增大,扫描反射镜的尺寸也随之增大,这不仅会增大加工高面形精度的难度,而且会增加旋转组件的转动惯量,影响系统响应速度,增大其研制难度。因此,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,是获得重量轻且具有良好结构刚度与优异热稳定性的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 740mm×480mm 的碳化硅扫描反射镜,开展了反射镜轻量化和支撑结构的研究。采用二维等效刚度模型与三维等效刚度模型相结合的方法,设计了背部开口、三角形孔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,利用有限元方法进行了支撑刚度及面形精度的仿真分析与对比。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 扫描反射镜轻量化

工作时,扫描反射镜与光轴成 45° ,利用二维精密轴系实现扫描反射镜绕自身转轴及光

轴的运动，其原理示意图如图 1 所示。为减小转动惯量、提升系统响应速度，必须对扫描反射镜进行轻量化设计。

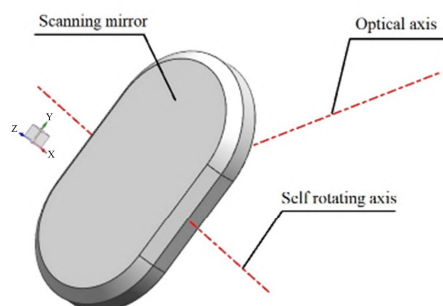


图1 扫描反射镜工作原理图

Fig.1 The working principle of the scanning mirror

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，尽可能的减轻镜体重量，主要包括参数优化方法与拓扑优化方法^[7]等。其中拓扑优化方法成为近年来反射镜轻量化领域的研究热点，已有相关科研人员利用拓扑优化方法完成了218mm×166mm小口径矩形反射镜轻量化设计^[8]，并完成了实物研制工作，但对于大口径反射镜，主要完成了轻量化设计工作^[9,10]。轻量化设计中常以轻量化率作为考核指标，定义为由轻量化设计去除的重量与未轻量化前结构重量的比值。参数优化方法主要考虑支撑方式、轻量化孔的形状、镜体厚度、筋板厚度等因素，优化相应参数，适用于各种类型的反射镜轻量化设计。综合考虑后，选择参数优化方法，采用经验设计与有限元校核的手段完成大口径矩形反射镜的轻量化设计工作。

反射镜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，可适用于外形尺寸大的矩形反射镜；背部支撑采用多点柔性支撑结构，可消除因装配、振动、环境温度变化所产生的应力，适用于外形尺寸大且长宽比小于2的矩形反射镜。该碳化硅扫描反射镜尺寸为740mm×480mm，长宽比为1.54。为保证反射镜面形精度，保证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，选择背部三点支撑方式作为此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，反射镜两端可进行倒圆处理（如图2所示），尽可能减轻重量。

为进一步减轻反射镜重量并保证面形精度与结构刚度，需要对轻量化孔进行优化布局。轻量化孔中三角形的结构刚度最好，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、三角形为主的轻量化设计，如图2所示。

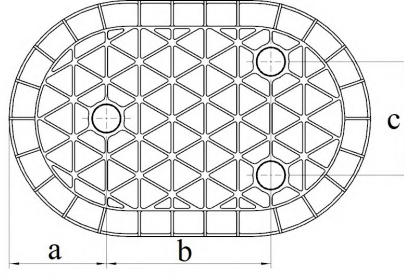


图2 扫描反射镜背部轻量化布局

Fig.2 The lightweight layout of scanning mirror

反射镜轻量化结构详细设计时，可优化的参数较多，如镜体厚度 t 、镜面厚度 t_f 、三角形内切圆直径 B 、背部筋板厚度 t_c 、支撑孔位置 a 、 b 、 c 等，这些设计参数并不是独立的，而是相互影响，因此要综合考虑。首先根据设计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面形 RMS 值^[12]，初步判断各参数是否合理。

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

式中 δ_{RMS} 为面形 RMS 值； η 为 PV 与 RMS 的换算系数； λ 为和形状相关的系数，三角形孔时为 0.00151； p 为加工时施加的压力； B 为三角形孔内切圆直径。

其次，建立三维等效刚度模型，在 X 向重力、Y 向重力、Z 向重力（如图 1 方向所示）、40℃均匀温升的工况下，以面形精度为目标，以重量、结构刚度为约束条件，对各参数进行迭代分析计算，最后确定了各项参数，如表 2 所示，设计后轻量化率达到了 81.4%，裸镜仿真分析的 RMS 值最大值为 7.4nm。

表1 反射镜各项参数

Tab.1 The parameters of the mirror

Number	Name	Value/mm
1	Mirror thickness: t	80
2	The thickness of reflecting surface: t_f	5
3	Rib plate thickness: t_c	4
4	Diameter of inscribed circle: B	41
5	Position parameters of support: a	198
6	Position parameters of support: b	335
7	Position parameters of support: c	232

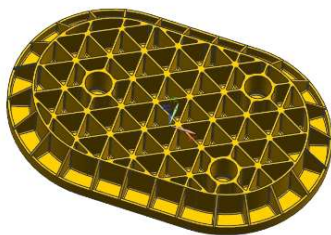


图3 扫描反射镜轻量化模型
Fig.3 The lightweight model of scanning mirror

3 扫描反射镜组件

扫描反射镜组件主要由扫描反射镜、镜体锥套、柔性环节及支撑背板等组成，如图 4 所示。

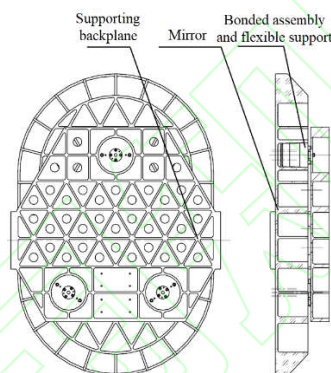


图4 扫描反射镜组件示意图
Fig.4 The scanning mirror assembly

扫描反射镜的材料选用具有高比刚度与良好热稳定性的碳化硅（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碳化硅反射镜支撑孔内，用于连接柔性环节，其材料为与碳化硅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能，进而减小镜面的面形误差，但柔性环节不能过于薄弱，否则结构刚度会过低，柔性铰链材料选用性能稳定的钛合金(TC4)；为保证反射镜的面形精度，支撑背板要具有良好的刚度和结构稳定性，材料选用性能稳定、易于成型的铸钛合金(ZTC4)；支撑背板采用了背部开口方案，采用了以矩形为主，三角形和圆形为辅的轻量化设计，最大程度减少背板的厚度，并保证其支撑刚度。

表2 材料参数

Tab.2 The material parameters

Material	Density/ 10^3 kg/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

3.1 球头万向节结构形式

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，其原图如图 5 所示。

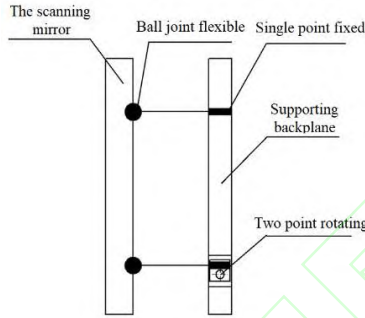


图5 球铰支撑方式原理图

Fig.5 The principle of ball hinge support mode

扫描反射镜背部设计有三个支撑点，每个支撑点处胶粘镜体锥套与扫描反射镜固定，通过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，使其转动自由度得到释放。当温度发生改变时，整个系统可以补偿扫描反射镜与支撑背板变形不一致，消除在温度变化时扫描反射镜和支撑背板变形量不一致产生的应力，始终保证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、球铰及支撑背板等组成，如图 6 所示。

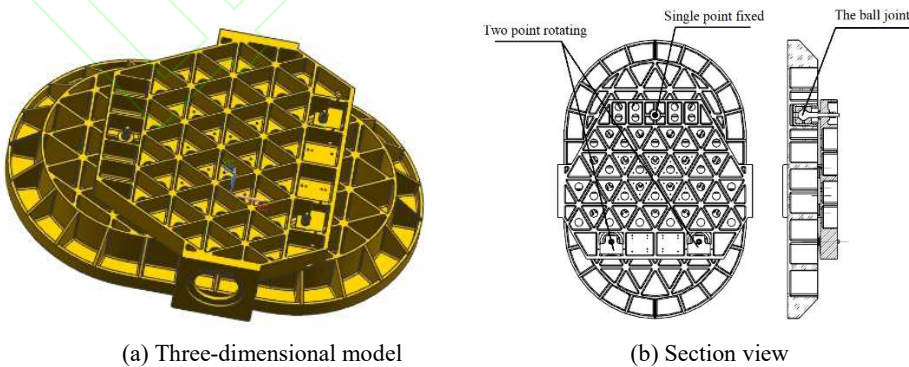


图6 球铰支撑方式

Fig.6 The ball joint support mode

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 向重力、Y 向重力、Z 向重力（如图 1 方向所示）、40℃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，确定球铰直径 SR 为 30mm，如图 7 所示。

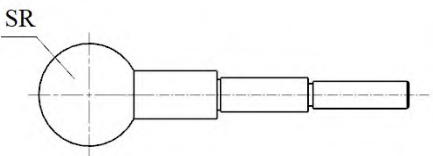


图7 球铰结构
Fig.7 The ball joint structure

3.2 柔性铰链结构形式

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，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所带来的内部应力，保证高精度面形。

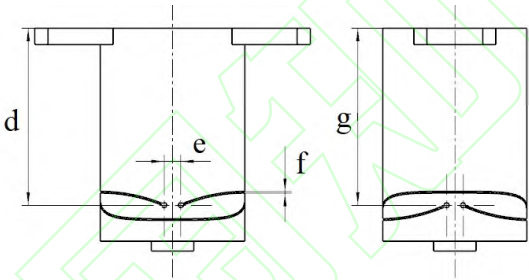


图8 柔性支撑
Fig.8 The flexible support

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：结构柔度过大会降低结构动态刚度，但同时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，但同时也会提高结构动态刚度。因此，要合理设计柔性支撑，优化柔性铰链的关键参数（如图 7 所示），才能满足系统刚度要求的同时，改善热环境下的面形精度。在 X 向重力、Y 向重力、Z 向重力（如图 1 方向所示）、40℃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，如表 3 所示。

表3 柔性支撑关键参数

Tab.3 The key parameters of flexible support		
Number	name	Value/mm
1	d	54
2	e	5
3	f	0.5
4	g	56

柔性铰链支撑方式主要由扫描反射镜、镜体锥套、柔性支撑及支撑背板等组成，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，一端固定在支撑背板上，修研后配打销钉固定。与球铰柔性支撑相比，柔性铰链支撑主要是通过结构的柔性来减小内部应力，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。

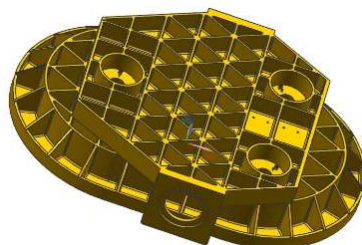


图9 柔性铰链支撑方式
Fig.9 The flexible hinge support mode

4 有限元分析

为对比分析两种支撑方案的动态刚度及热力耦合工况下的面形精度，采用手动划分网格，并对支撑背板做适当简化，建立了有限元模型，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 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。

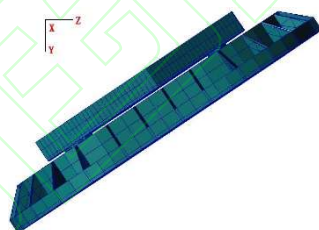


图10 扫描反射镜组件有限元模型
Fig.10 The finite element model

4.1 面形误差分析

扫描反射镜组件在系统中放置位置与光轴成 45 度方向，如图 10 所示，此时 Y 向重力即为实际受力情况。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°C 均匀温升。因此，分别对扫描反射镜组件在 Y 向重力、Y 向重力与 40°C 均匀温升耦合作用的工况下进行静力学分析，变形云图如图 11、图 12 所示；然后进行反射镜面形变化分析，对比结果如表 4 所示。

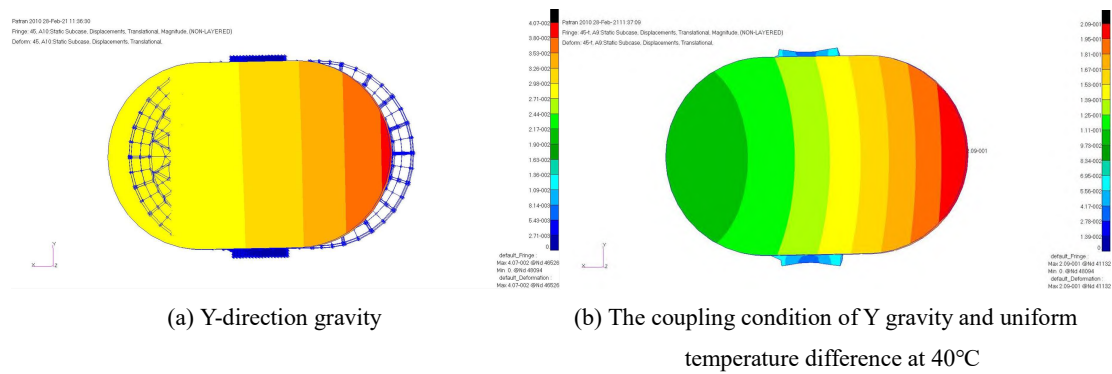


图11 球铰柔性方案变形云图

Fig.11 The deformation figure of ball hinge support mode

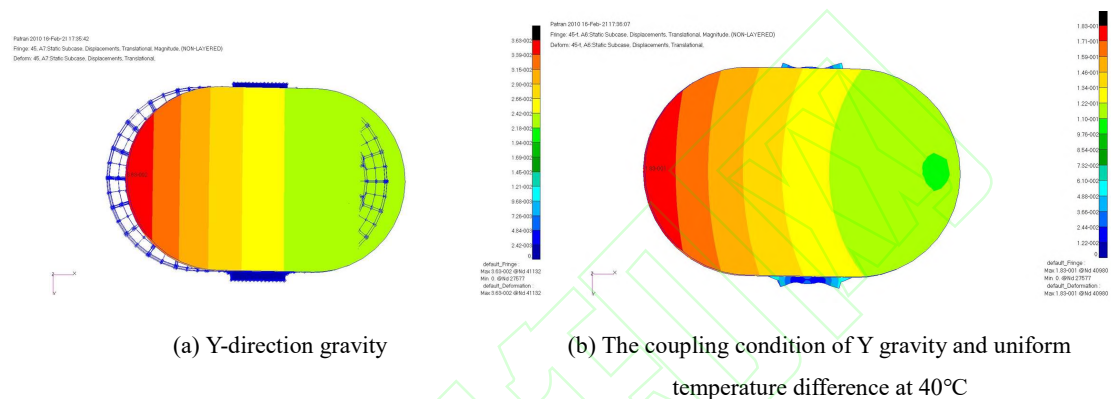


图12 柔性铰链方案变形云图

Fig.12 The deformation figure of flexible hinge support mode

由图 11、图 12 可知，在 Y 向重力、Y 向重力与 40°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 0.041mm、0.209mm；柔性铰链方案扫描反射镜组件的最大变形量分别为 0.036mm、0.183mm；柔性铰链方案整体变形较小，但两种方案均存在刚体位移。

表4 面形分析结果

Tab.4 The results of surface analysis

Condition	The ball hinge support mode		The flexible hinge support mode	
	PV/nm	RMS/nm	PV/nm	RMS/nm
Y-direction gravity	51.5	10.6	55.5	12.4
The coupling condition of Y gravity and uniform temperature difference at 40°C	53.4	12.3	62.8	12.9

由表 4 可知，球铰柔性方案与柔性铰链方案在两种工况下反射镜面 RMS 值均能满足 $\leq 1/40\lambda$ ($\lambda=632.8\text{nm}$) 的光学要求，但球铰柔性方案中面形误差 RMS 值要低 14.5%。

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，即主要由结构固有频率与

振型来衡量。结构固有频率^[13]可以表述为：

$$f_n=\frac{1}{2\pi}\sqrt{\frac{K}{M}}, \tag{2}$$

式中 f_n 为固有频率； K 为结构刚度矩阵； M 为质量矩阵。

由式（2）可知，固有频率的高低既能体现动态刚度的优劣，又能反映了静态刚度的大小，尤其是前三阶固有频率越大，表明结构的动态刚度越高，整体结构的比刚度亦越高。经过模态分析，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。

表5 固有频率

	The ball hinge support mode	The flexible hinge support mode
First natural frequency/Hz	68.1	85.5
Second natural frequency/Hz	80.8	101.8
Third natural frequency/Hz	93.6	128.4

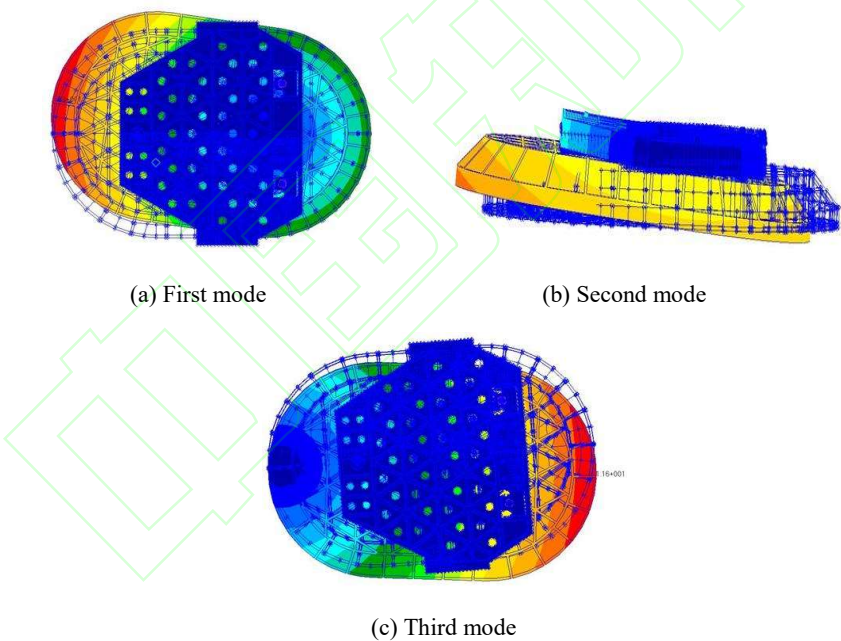
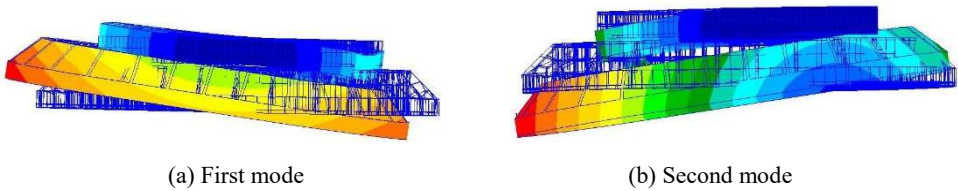
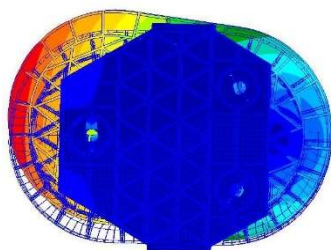


图13 球铰柔性方案前三阶振型图

Fig.13 The modes of ball hinge support mode





(c) Third mode

图14 柔性铰链方案前三阶振型图

Fig.14 The modes of flexible hinge support mode

由表 5、图 13、图 14 可知，两种支撑方案的一阶固有频率分别为 68.1Hz 和 85.5Hz，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，会使一阶固有频率降低，但与真实工作情况一致，方法合理、有效。

由以上分析结果可知，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要优于球铰柔性方案的一阶固有频率；另外考虑到球铰尺寸较大，加工、装调工艺更复杂，最终确定柔性铰链方案作为大口径矩形碳化硅扫描反射镜的支撑实施方案。

5 面形测试

由于扫描反射镜尺寸较大，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，其他区域不加工，有利于保证结构刚度。经过扫描反射镜的粗加工、表面改性与镀膜等工序后，最后实现了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]利用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。

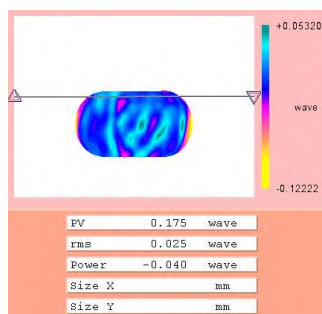


图15 面形检测结果

Fig.15 The result of surface error test

由检测结果可知，反射镜镜面面形 RMS 值为 0.025λ ，此时反射镜组件测试状态为与工

作状态一致, 只受 Y 向重力。对比相同工况下的分析结果 $RMS=0.020\lambda$ (12.4nm) 可知, 误差值为 3.4nm, 差异较小, 且满足 $\leq 1/40\lambda$ 的光学设计要求, 符合研制需求。

6 结论

针对尺寸为 740mm×480mm 的矩形碳化硅扫描反射镜, 深入开展了反射镜轻量化及支撑结构的研究, 主要成果如下:

1) 运用仿真分析迭代计算的方法, 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; 为后续大尺寸矩形碳化硅反射镜轻量化设计中参数化设计提供技术支撑;

2) 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, 并通过有限元仿真迭代计算, 确定了两种支撑方式中的重要参数: 球铰直径 SR 为 30mm、槽宽度 f 为 0.5mm、槽间距 e 为 5mm 等; 为球铰支撑与柔性支撑参数优化设计提供技术支撑;

3) 运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 向重力及 40℃ 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 值分别为 12.3nm 和 12.9nm; 一阶固有频率分别为 68.1Hz 和 85.5Hz。分析结果表明, 两种支撑方式均能满足 $\leq 1/40\lambda$ ($\lambda=632.8\text{nm}$) 的光学要求, 且柔性铰链结构形式具有更好结构刚度, 方案占优。

4) 测量结果表明, 所研制的扫描反射镜组件面形误差 RMS 值为 0.025λ , 满足 $\leq 1/40\lambda$ 的光学要求, 可以满足系统使用。

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, *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 H 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 Jian. Research on calibration method of TDI direction focal plane assembly in aerial

panoramic camera [D]. Beijing: University of 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]. 北京: 中国科学院大学, 2018: 1-10.

- [6] Wang CH, Han J ZH, 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 CH L, Ding Y L, Liu L. Level set topology optimization design of large-aperture mirror[J]. *Infrared and laser Engineering*, 2018,47 (9):1-7.
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): 1-7.
- [8] Hu Y, Li J, Jia X ZH. Optical design of lightweight off-axis mirror and flexible support[J]. *Acta Optic 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 CH ZH, 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 Zhongsu, Zhai Yan, Mei Gui, 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(Second Edition)[M]. Lian H D, Wang X Y, Xu P. Transl. Beijing: National Defence Industry Press, 2015: 90-103.
凯斯·道尔, 维克托·基恩伯格, 格雷戈里·迈克尔斯. 光机集成分析(第二版)[M]. 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, Ding Y L, et al. Study on Dynamic Characteristics of Truss Support Structure in a TMA Space Remote Sensor[J]. *Computer Simulation*, 2010, 27(9): 28-31.
李延伟, 远国勤, 丁亚林, 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): 28-31.
- [14] Liu X H, Li SH CH, Li M X. Supporting structure design for primary and tertiary mirror of off-axis TMA system[J]. *Infrared and laser Engineering*, 2021, 50(8): 251-259.
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): 251-259.

网络首发:

标题: 大口径矩形碳化硅扫描反射镜组件研制技术

作者: 李延伟, 张景国, 谢新旺, 陈太喜, 董雷岗

收稿日期: 2021-10-25

录用日期: 2021-12-01

DOI: 10.3788/lop59.0722001

引用格式:

李延伟, 张景国, 谢新旺, 陈太喜, 董雷岗. 大口径矩形碳化硅扫描反射镜组件研制技术[J]. 激光与光电子学进展, 2022, 59(07): 0722001.

网络首发文章内容与正式出版的有细微差别, 请以正式出版文件为准!

您感兴趣的其他相关论文:

镜面面形误差统计方法研究

周平伟 马宏财

中国科学院长春光学精密机械与物理研究所, 吉林 长春 130033

激光与光电子学进展, 2016, 53(4): 041201

高分辨宽能段软X射线光束线热负载影响与修正

石应波 王勇 邵仁忠 丁洪

中国科学院物理研究所, 北京 100190

激光与光电子学进展, 2014, 51(7): 073401

数控抛光非球面面形误差补偿技术研究

徐海华

重庆三峡学院机械工程学院, 重庆 404000

激光与光电子学进展, 2014, 51(10): 102204

望远镜主镜面形误差的结构函数分析方法

张振铎

中国科学院长春光学精密机械与物理研究所, 吉林 长春 130033

激光与光电子学进展, 2011, 48(11): 112201

镜面面形误差统计方法研究

周平伟 马宏财

中国科学院长春光学精密机械与物理研究所, 吉林 长春 130033

激光与光电子学进展, 2016, 53(4): 041201