

长条镜柔性支撑及点阵结构设计方法

刘朋朋*, 吴俊, 常君磊, 庞寿成, 邹宝成, 张祝伟

北京空间机电研究所先进光学遥感技术北京市重点实验室, 北京 100094

摘要 离轴三反光学系统多采用长条形反射镜,为尽可能提高反射镜面形精度,其支撑结构形式多为柔性支撑;为了保证结构力学性能的基础上满足轻量化的需求,支撑亦多采用壳体点阵结构。本文基于尺寸优化技术,建立了长条形反射镜的参数化有限元模型以及双轴圆弧切口柔性铰链支撑的多参数优化模型,分别应用可行方向法及自适应响应面优化算法得到了质量约束下刚度最优的反射镜面板、筋板厚度参数以及刚度约束下镜面面形最优的柔铰支撑几何尺寸参数,并应用参数试验方法对该柔性支撑安装角度及安装轴向位置进行了独立变量的影响分析。对于背板的设计,本文提出了一种基于点云三维重建的点阵结构设计仿真优化方法,采用贪婪三角化投影算法对点阵结构包络生成的点云进行网格重构,保证了点阵结构模型的连续性与真实性。经过仿真验证,优化参数下重力、温度、强迫位移各工况下反射镜综合面形误差(0.018 λ)和装调方向重力下刚体位移(0.007 mm)均达到最优。表明基于点云三维重建的点阵结构设计仿真优化方法合理可行,可推广应用于类似结构形式的反射镜支撑。

关键词 长条形反射镜; 柔性支撑; 点阵结构; 点云; 优化算法

中图分类号 TN216

文献标志码 A

DOI: 10.3788/AOS231368

1 引言

离轴三反光学系统具有大视场、无色差、长焦距、无中心遮拦等优点,被广泛应用于国内外多种型号的空间光学遥感器中^[1-2]。离轴三反光学系统中通常将长条形反射镜作为其核心光学元件,长条形反射镜镜体及其支撑结构的设计对系统的成像质量有着重要的影响,为降低发射成本,既要求尽可能地减小结构质量,又要求尽量提高反射镜的面形精度和保证系统的动、静力学刚度和热尺寸稳定性,这历来都是空间光机结构设计的难点。

合理的柔性支撑设计可以在满足反射镜支撑刚度的前提下解决温度载荷及装配应力引起的镜面面形下降的矛盾^[3],运用计算机辅助设计/计算机辅助工程(CAD/CAE)技术对柔性结构参数进行预估及优化,根据仿真结果判断参数修正方向及修正量再进行设计迭代,是一种高效的反射镜支撑系统设计解决方案。近年,与传统材料相比较,增材制造点阵结构因其具有更高的轻量化效率、比刚/强度,以及力学性能可设计等优良特性,在空间遥感相机领域的应用研究越来越广泛^[4]。

近年来,国内外学者在空间遥感应用上对柔性支撑以及增材制造点阵结构的力学性能做了大量研究。

柳鸣等^[5]设计了某星载激光通信中光电跟瞄系统中颈口侧壁开槽形式的反射镜柔性支撑,重力和温变作用下的镜面面形精度分别达到2.05 nm和8.88 nm。马胜鹏等^[6]采用三维点阵胞元填充某太阳同步轨道卫星搭载反射镜支撑架,对其点阵夹层结构进行了尺寸优化设计。张牧尧等^[7]基于移动阈值切面法,对190 mm的铝合金反射镜支撑杆件进行非均匀点阵尺寸优化设计,优化后其轻量化率以及面形精度均优于传统轻量化形式的反射镜。由于点阵结构的复杂性,其分析计算量巨大,目前国内外学者对点阵结构多采用等效均质化分析方法,快速有效地预测点阵填充结构的力学性能是目前增材制造点阵结构在空间遥感应用中迫切需要解决的问题之一。为此,本文提出了基于有限元精确建模的力学仿真技术。

为了验证柔性支撑CAE优化技术的设计效率并探索点阵结构合理有效的仿真策略,本文根据长条形反射镜的尺寸形状和面形精度要求,采用一种双轴圆弧切口柔性支撑结构,从反射镜的尺寸优化^[8]、支撑位置角度以及柔性支撑尺寸参数优化设计方面出发,运用有限元优化算法对反射镜组件进行了详细分析与改进,并基于点云三维重建算法进行了点阵结构的设计仿真优化,研究了反射镜柔性支撑及点阵结构优化设计的工程方法,可为类似结构支撑形式的建模仿真提

收稿日期: 2023-08-04; 修回日期: 2023-08-31; 录用日期: 2023-09-11; 网络首发日期: 2023-09-22

基金项目: 民用航天项目(D040101)

通信作者: *807666208@qq.com

供有益参考。

2 反射镜组件设计

2.1 设计要求

反射镜组件设计时要综合考虑镜面面形精度、刚体位移、倾角、质量、动力学性能。本文反射镜为光学系统中的三镜,各项设计指标的具体要求如下:

- 1)在综合因素影响作用下,反射镜组件的镜面面形均方根(RMS)值优于 $\lambda/50$;
- 2)反射镜组件的一阶基频优于 120 Hz;
- 3)反射镜组件质量小于 7 kg;
- 4)装调方向重力下反射镜镜面刚体位移不超过 0.01 mm;
- 5)发射环境 20 g 过载条件下反射镜组件各零件材料应力安全系数大于 1。

2.2 材料选择

良好的反射镜材料^[9]应具有比刚度高、热膨胀系数小、导热率高、光学加工性质良好、稳定性优良等性质,其中比刚度高利于付出更少的质量代价获得更好

的力学性能,热膨胀系数小可使等量温度变化条件下反射镜光学面形变化小,导热率高利于降低反射镜自身温度梯度以保持面形。根据相机的前期论证结果及已有的工程经验,三镜备选材料包括微晶玻璃(Zerodur)、超低膨胀石英玻璃(ULE)、碳化硅(SiC)等。

SiC 三镜比刚度最高,通过轻量化可实现质量最轻,导热系数相比玻璃材料较高,但热胀系数较大,且加工周期较长。Zerodur 与 ULE 相比模量虽然较高,但自身密度也大,从而基频也更低。ULE 热膨胀系数最低,可采用焊接工艺实现全封闭结构,从而达到综合最优的性能。因三镜组件质量指标较为严苛,综合考虑反射镜材料的性能、获得渠道、工艺性、加工难度等因素,三镜材料选用 ULE。

三镜支撑结构材料考虑与光学反射镜材料的热匹配性以及加工工艺性,选择低热膨胀系数的 4J32 钢铜及比刚度高、稳定性好的 TC4 钛合金,材料参数如表 1 所示。

表 1 三镜组件材料参数

Table 1 Parameters of materials for tertiary mirror components

Material	Density / (kg·m ⁻³)	Elastic modulus /GPa	Poisson ratio	Linear expansion coefficient / (10 ⁻⁶ °C ⁻¹)
ULE	2210	67.6	0.17	0.03
Invar	8180	145	0.25	0.05
TC4	4450	110	0.34	9.1
2216 epoxy adhesive	1000	0.689	0.43	102

2.3 反射镜优化设计

反射镜基体轻量化外形结构可以分为背面平板形、单拱形、双拱形、弯月面形和双面凹形等^[10],基体背部轻量化孔主要有开放型、封闭型、双开放的封闭型和组合型,形式主要有三角形、六边形、正方形、圆形、扇形和异形蜂窝等^[11]。

本文三镜装调采用光轴水平的方式,支撑结构需要支撑在反射镜质心面以达到最好的装调状态面形。三镜镜面曲率半径较大,背部开放式结构质心过于靠近反射镜面,支撑面难以通过质心而产生三镜的自重弯矩降低面形精度^[12-13]。在相同的边长及筋板厚度条件下,三角形轻量化结构虽轻量化率较低,但刚度最好。故镜体采用背部封闭型三角形轻量化筋的结构。

为尽可能降低航天遥感器的发射成本,在满足成像指标的前提下,相机对反射镜组件有严苛的质量约束,因此对反射镜组件的各零件质量根据估测尺寸、结构材料及加工水平等进行合理分配,最终分配详见表 2。

在保证质量约束的前提下对 ULE 反射镜进行轻量化设计,本文三镜采用弯月面外形结构,既能够实现高刚度的背部封闭设计,又能保证质心面位于镜厚中

表 2 反射镜组件质量分配

Table 2 Mass distribution of mirror components

Part	Mass distribution /kg
Reflector	≤4.5
Back support structure	≤0.5
Backplate support structure	≤2

心附近,给支撑结构留有足够余量,同时与相同厚度的背面平板形镜体结构相比质量较轻。

对于背部支撑方式,Yoder 等^[14]研究了反射镜径厚比与自重条件下变形的关系,并总结出如下经验公式:

$$\delta = \frac{3\rho g r^4}{16Et^2}, \quad (1)$$

式中: δ 为能接受的反射镜镜面自重条件下的最大形变,即形变峰谷(PV)值,PV 值取波长的 1/5; ρ 为材料的密度; g 为重力加速度; r 表示反射镜半径(对于长条形反射镜取对角线长度的一半); E 为材料的弹性模量; t 代表反射镜厚度。由式(1)即可初步得到三镜的厚度 t 为 56 mm。

三镜采用蜂窝夹芯结构,其结构性能主要由反射面板厚度、底板厚度和夹芯层结构决定。反射面板厚

度影响整体结构刚性、镜坯制作工艺和光学加工工艺性。反射面板厚度过大时,镜体整体质量增加,比刚度降低;反射面板厚度过小时,镜坯制作工艺要求过高,光学加工时容易出现“印透”效应。底板增强了其结构刚性。夹芯层是反射镜高比刚度的主要贡献者,其结构参数对反射镜结构性能有很大的影响。夹芯层的结构参数主要包括外环厚度、格板厚度和格板间距等。一般来讲,采用较大的格板间距工艺制作难度相对降低,但是结构刚性降低,光学加工难度增加;采用较小的格板间距能够提供较好的结构刚性,从而降低光学加工时出现“印透”效应的可能性,但可能会导致结构质量过大。因此,夹芯层结构参数的选取要兼顾设计质量、整体刚性、制作工艺性和光学加工工艺性。

建立反射镜的参数化有限元模型,模型采用壳单元以便设置优化参数,将镜面板厚度、底板厚度、格板

厚度等作为优化变量,反射镜自由模态频率作为优化目标,质量作为约束条件,采用可行方向(MFD)算法对模型进行尺寸优化求解,其中各厚度变量在参数化模型中进行了标识,如图 1 所示,得到夹芯轻质三镜的结构参数如表 3 所示,目标函数的迭代历史曲线如图 2 所示。

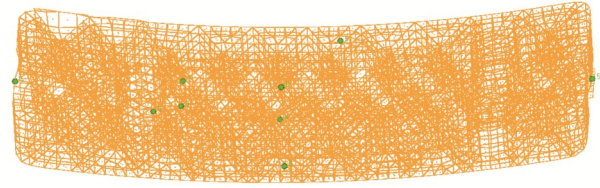


图 1 反射镜镜体参数化模型

Fig. 1 Parametric model of mirror

表 3 三镜结构参数

Table 3 Structure parameters of tertiary mirror

unit: mm

Caliber	Panel thickness	Base plate thickness	Grid plate thickness	Grid plate spacing	Outer ring thickness
540×180	5	4	3	44	5

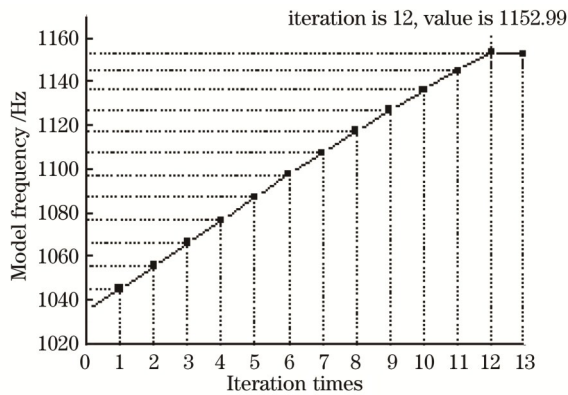


图 2 优化目标迭代历史曲线

Fig. 2 Iterative history curve of optimal objective

根据优化后的结构参数建立反射镜的三维几何模型,并分析计算反射镜的自由模态,一阶非零频率达到 1153 Hz,与优化过程中输出的目标结果一致,说明反射镜刚度达到了最优,如图 3 所示。

2.4 支撑方案设计

反射镜按照支撑点的位置分为三种:周边支撑、背部支撑及侧面支撑^[15]。周边支撑一般以反射镜底面和侧面为定位基准面,与镜室用胶黏结,其优点是结构简单,但外形尺寸大、笨重且无柔性结构受温度影响大。背部支撑是在镜子背部设置定位盲孔,通过与反射镜线胀系数相匹配的柔性过渡件将反射镜与支撑件联接在一起,可消除因装配和温度梯度产生的应力,其支撑点的数目根据反射镜外轮廓尺寸来确定^[16]。侧面支撑是在反射镜侧边适当位置加工适当数量的孔,设置柔性结构与镜体粘接固定,可有效防止热载荷对面形的影响。对于文中的长条形反射镜选用 ULE 材料背部

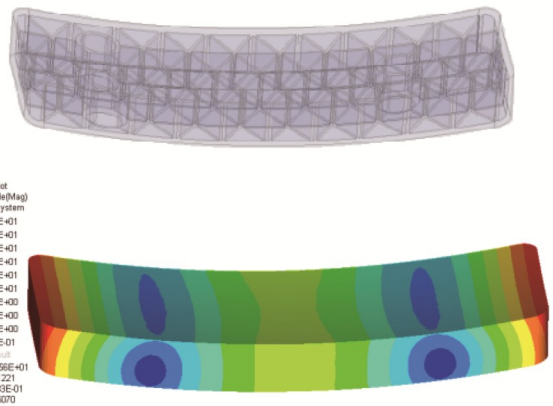


图 3 反射镜几何模型及一阶自由模态

Fig. 3 Mirror geometry model and first order free mode

及侧面封闭结构,侧面无法加工,考虑质量指标要求,传统的周边托框支撑也不可行,因此采用较合适的背部支撑方式。

长条形反射镜没有经验公式用于确定支撑点的数量与位置,通过多种方案的尝试比较,最终选用背部三点支撑^[17]。支撑点位置应用参数试验方法进行确定,参数试验方法将可筛选出的设计因子分别作为独立变量,研究其参数变化对响应的影响。本文的反射镜结构形式已确定,支撑位置变量可变化的范围有限,适合采用参数试验方法进行支撑点位置的快速计算。对反射镜三个支撑孔进行约束,并保证支撑约束在反射镜质心面处,支撑点在宽度方向上对称分布,在长度方向上到光轴距离相等,计算反射镜在自重作用下的面形精度 PV 与 RMS 值,将支撑点长、短边方向间距作为调节变量,更新迭代计算模型直到满足光学设计指标。

最终确定支撑三点的位置为长边方向间距为 329.7 mm,短边方向间距为 90 mm。

虽然支撑刚度越大,反射镜适应重力变形的能力越强,但支撑结构材料一般与反射镜材料的热胀系数不一致,导致温变应力对反射镜面形精度影响较大。同时加工、装调误差带来的反射镜组件强迫位移产生不确定的装配应力,也会影响反射镜的面形精度。故需要合理地提高支撑结构柔性,以卸载热应力、装配应力,同时还要满足刚度的要求。

柔性铰链被广泛应用于支撑结构的柔性设计领域,其具有无机械摩擦、结构简单、释放自由度和灵敏度高特点^[18-19]。本文设计了一种双轴圆弧切口柔性铰链结构,如图 4 所示。由于反射镜采用三点背部支撑形式,且支撑点在三点宽度方向上对称分布,每个柔性支撑结构需要仅约束两个方向的自由度以满足半运动学安装定位原理,因此设计中将 3 个柔性铰链沿着各自柔节中心面方向对心安装,便可保证镜体结构 6 个方向的运动通过弹性支撑被单独制约,不会因为过约束产生装配应力。

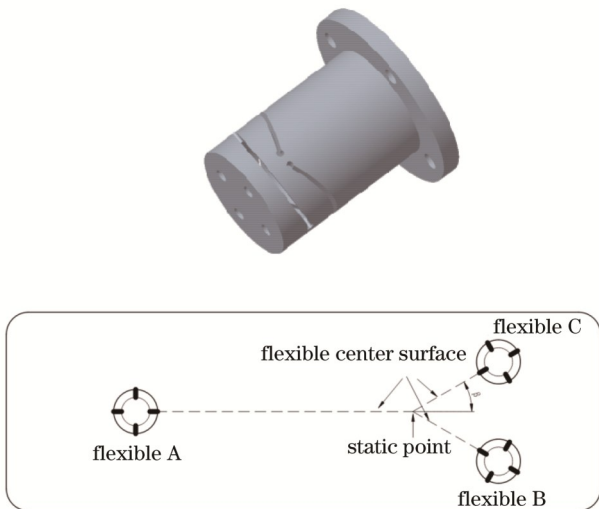


图 4 柔性铰链结构及对心安装示意图

Fig. 4 Schematic diagram of flexure hinge structure and center installation

柔性支撑结构设计为通过螺钉连接的两个零件部分,其中一个零件为与反射镜的支撑孔粘接的嵌套,另一个零件为与背板支撑结构连接的柔铰支撑。嵌套的作用是引出反射镜与金属结构件的安装接口,避免反射镜直接与结构硬接触产生的应力恶化镜面面形。背板支撑结构的作用是将 3 个柔铰支撑组合连接,将反射镜按照光学系统布局固定安装在主承力结构的设计位置。为了保证满足质量指标及对温度变化的适应性,嵌套选用低膨胀合金(4J32),柔铰支撑选用钛合金材料(TC4)。

为降低加工成本,背板支撑采用增材制造点阵结构,设计为中空并用钛合金三维点阵结构进行填充,整

体仍为薄壁封闭结构形式,以满足其轻质量高刚度的要求。

反射镜组件最终设计方案模型如图 5 所示,由反射镜、嵌套、柔铰支撑和背板支撑结构组成,总质量为 6.8 kg。

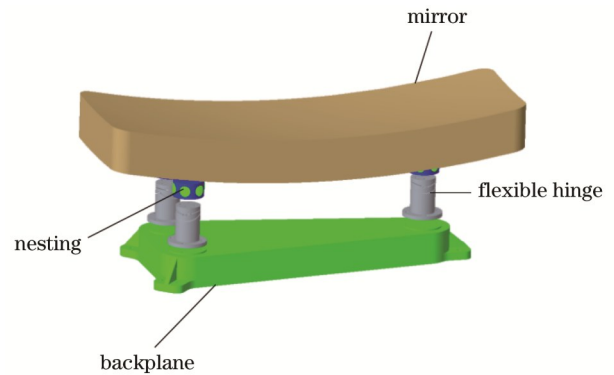


图 5 反射镜组件模型

Fig. 5 Model of mirror components

3 柔性支撑结构仿真优化

反射镜组件支撑方案确定后,进行柔性支撑的刚度设计,需要考虑三个因素的影响:柔性铰链安装角度 β (图 4 中)、柔性铰链安装轴向位置、柔性铰链几何尺寸参数。

3.1 柔铰安装角度的影响分析

柔性铰链安装角度 β 指的是对称分布的两个柔节中心面与宽度方向对称面之间的夹角。反射镜在温度载荷下会循柔节自由度的方向产生膨胀或收缩变形,而在三组柔节自由度方向的交点处(静态点)保持静止。不同的安装角度 β 则会影响静态点所处的位置,从而影响镜面面形的大小。

建立不同安装角度 $\beta(0^\circ\sim 90^\circ)$ 的三镜组件有限元模型,进行一阶约束模态、重力载荷、 2°C 均匀温度载荷、 0.01 mm 安装点强迫位移等工况下的仿真计算,并提取镜面节点位移拟合面形误差进行分析,得到了如图 6 所示的各工况参数影响结果。其中综合因素面形分析是在加工面形 $\lambda/60$ 的基础上对各工况镜面面形叠加得出的结果。

分析结果表明,安装角度为 45° 时组件一阶约束模态最低, 0° 时最高,但均远大于 120 Hz 的设计指标要求,且波动范围在 1 Hz 以内,可认为影响不大。重力载荷作用下安装角度 10° 时镜面面形最小,从 0° 到 90° 整体呈现逐渐增大的趋势, 0° 与 90° 状态下柔性铰链柔节中心面虽然在一个方位,但柔性槽的轴向位置不同,故而对镜面面形的影响是不一致的。温度载荷作用下镜面面形随安装角度的变化呈现先减小后增大的整体趋势,安装角度为 20° 时镜面面形达到最小, $40^\circ\sim 70^\circ$ 之间面形波动最小基本保持不变,分析认为是此范围内

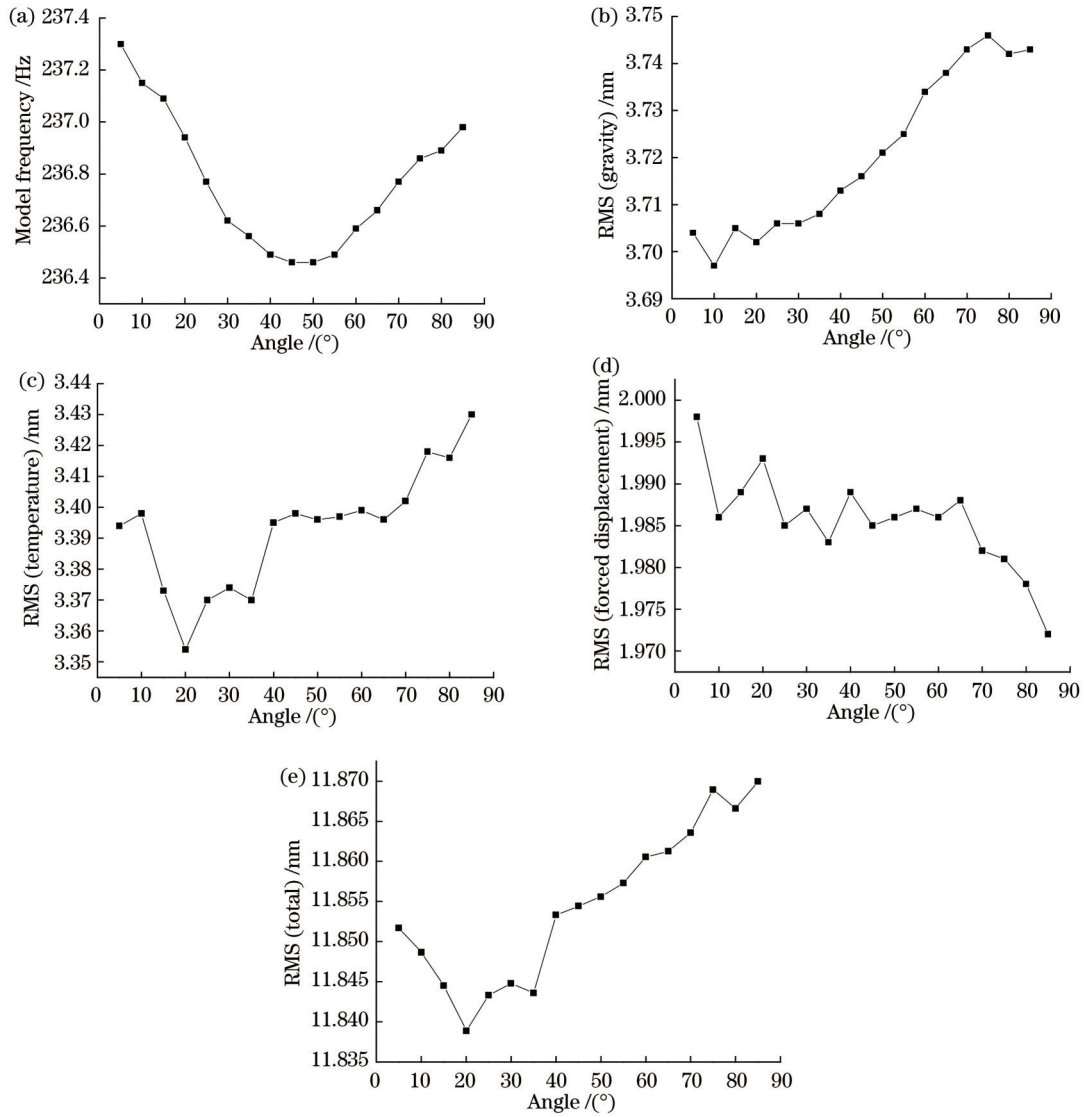


图6 柔性铰链安装角度的影响分析结果。(a) 约束模态分析;(b) 重力载荷面形分析;(c) 温度载荷面形分析;(d) 强迫位移面形分析;(e) 综合因素面形分析

Fig. 6 Analysis results of influence of flexure hinge mounting angle. (a) Constrained model analysis; surface shape analysis of (b) gravity load; (c) temperature load; (d) forced displacement; (e) comprehensive factor

支撑的静态点位置变化较小,整体支撑刚度也变化较小所致。强迫位移作用下镜面面形从 0° 到 90° 呈现波动减小的变化趋势,但波动范围较小,可认为基本不变。上述因素中温度载荷作用对镜面面形的影响最大,综合因素作用下镜面面形随安装角度的变化趋势整体与温度载荷作用一致,亦在 20° 时达到最小。重力载荷、温度载荷和强迫位移作用下镜面面形波动范围均在 0.1 nm 以下,柔性铰链安装角度的影响可以忽略,但分析结果仍提供了优选参考方案。因此选取 20° 作为本文反射镜柔性支撑的合适安装角度。

3.2 柔铰安装轴向位置的影响分析

柔性铰链与反射镜通过注胶粘接,此粘接点与反射镜质心的相对轴向位置不同,镜面受镜体自身重力作用会产生不同的弯矩,从而对镜面面形产生较大影响。

以柔性铰链底部位置与反射镜重心的轴向距离为参考变量,通过不断调整此变量值更新三镜组件的有限元模型,并同时仿真计算约束模态、重力、温度、强迫位移载荷下镜面面形误差,得到变量影响趋势如图7所示。

分析结果表明,柔铰安装轴向位置主要影响重力载荷作用下的反射镜面面形,对温度、强迫位移作用下的镜面形变影响很小;综合因素作用下镜面面形随柔铰底部与反射镜质心轴向距离的变化趋势整体与重力载荷作用一致,在 13 mm 处达到最小,并在此位置上下 0.5 mm 范围内基本保持不变;一阶约束模态也在此范围内达到最大。故选取 $13\text{ mm}\pm 0.5\text{ mm}$ 作为本文反射镜柔性支撑的合适安装轴向位置参考值。

3.3 柔铰几何尺寸参数的影响分析

柔性铰链需要合理设计其柔度,以使其既满足反

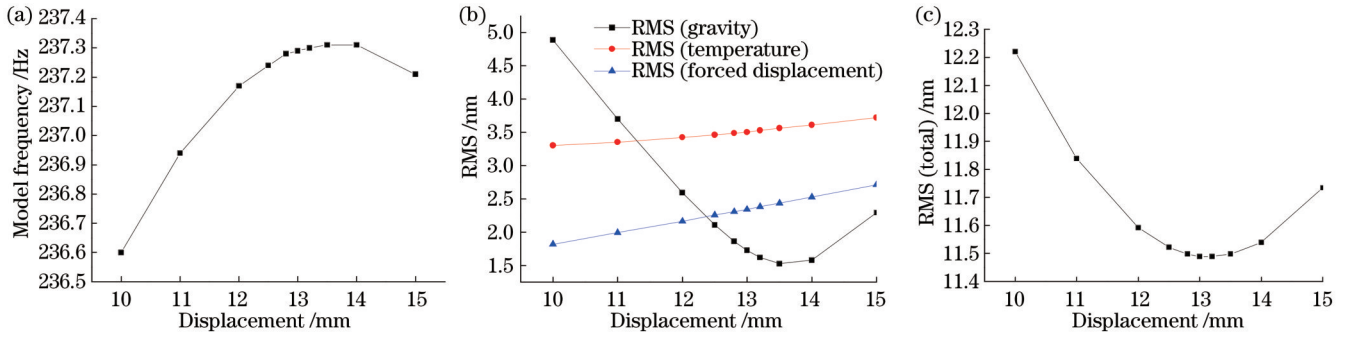


图 7 柔铰安装轴向位置的影响分析结果。(a)约束模态分析;(b)重力、温度、强迫位移面形分析;(c)综合因素面形分析
Fig. 7 Analysis results of influence of axial position of flexure hinge installation. (a) Constrained model analysis; (b) surface shape analysis of gravity, temperature, and forced displacement; (c) surface shape analysis of comprehensive factor

射镜热形变卸载的要求,又保证支撑组件足够的动、静态刚度。Paros 和 Weisbord^[20]建立了单轴圆弧形柔性铰的刚度理论模型,其弯曲刚度表示为

$$K \approx \frac{2Ebt^{\frac{5}{2}}}{9\pi r^{\frac{1}{2}}}, \quad (2)$$

式中: r 为柔铰圆孔半径; t 为柔铰圆孔间最小宽度距离; b 为柔铰的径向厚度。可以看出,影响单轴圆弧形柔铰整体形变的关键部分为其圆弧切口部分。

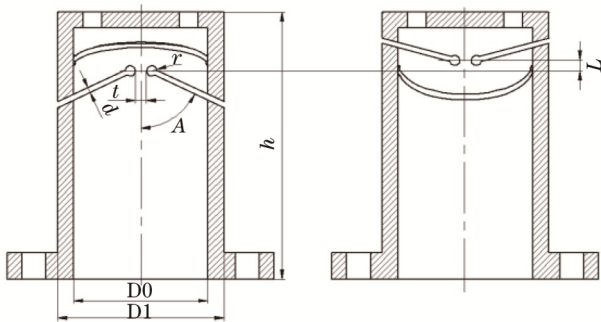


图 8 双轴圆弧切口柔铰尺寸参数

Fig. 8 Dimension parameters of flexible hinge with biaxial arc incision

本文设计的双轴圆弧切口柔铰几何参数如图 8 所示。由单轴柔铰刚度理论可知, $r, t, b [(D0-D1)/2]$ 为影响柔铰部分弯曲刚度的主要变量,但也要考虑柔铰切口槽角度 A 、宽度 d 、柔铰轴向间距 L 、柔铰高度 h 对整体轴向刚度、扭转刚度的影响。由此建立了柔铰的多参数优化模型,将上述参数采用形状变量的方式组织于优化系统中,以柔铰支撑刚度为约束条件,将反射镜面综合因素影响下的面形值作为目标函数,采用自适应响应面法 (ARSM) 对目标函数进行优化求解,最终得到柔铰各尺寸参数如表 4 所示。

表 4 柔铰几何参数

Table 4 Geometric parameters of flexible hinge

r /mm	t /mm	b /mm	A /($^{\circ}$)	d /mm	L /mm	h /mm
1	2	3	65	1	2	50

4 增材制造点阵结构仿真优化

4.1 基于点云三维重建的增材制造点阵结构设计仿真方法

点阵结构是由具有周期性排布的三维胞元和周围面板组成的新型夹芯结构,具有轻质、高比刚度、高比强度、隔热、减震、降噪、可设计等优点^[21-22]。

本文背板支撑采用基于杆连接的体心立方 (BCC 型) 胞元点阵加周围薄壁封闭蒙皮组成主要承力结构,外留三处实心安装接口,胞元构型如图 9 所示。

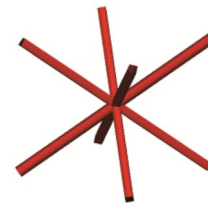


图 9 BCC 胞元构型

Fig. 9 Cell configuration of BCC

为尽量提高点阵结构的支撑性能,需要对增材点阵进行仿真优化。传统的方法是首先进行点阵结构的均质化分析,在微尺度上计算其力学性能,然后提取等效参数作为材料输入,在宏观尺度下对外形结构进行计算分析得到宏观的力学性能。本文建立了点阵结构的详细几何模型,并进行点阵结构梁单元的快速生成,同时采用点云三维重建技术建立其周围蒙皮支撑结构的有限元模型。

首先选取背板支撑除安装法兰面外所占据的实体空间按一定厚度进行抽壳,将中空部分实体化并建立一定大小的 BCC 型单胞点阵单元;对实体进行点阵单元的填充。填充完成后,将点阵整体导出为梁单元。对点阵梁单元进行处理,去除孤立的梁单元以及长度短小的部分,保证梁单元的连续性和整体性,并提取点阵包络轮廓边界上的杆端节点生成点云,过程如图 10 示。

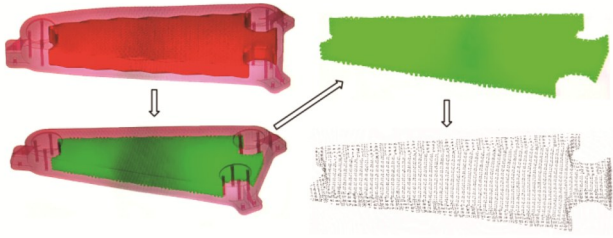


图 10 点阵填充与点云生成

Fig. 10 Lattice filling and point cloud generation

采用贪婪三角化投影算法对上述得到的点云进行三角化网格重构,首先由于三角化算法输入必须为有向点云,需要计算点云法向量;然后应用贪婪三角化投影算法对有向点云进行三角化,得到如图 11 所示的三角网格模型,具体流程为:

- 1) 将点云通过法线投影到某个二维坐标平面内;
- 2) 对投影得到的点云做平面内的三角化,从而得到各点的拓扑连接关系,平面三角化过程应用基于 Delaunay 三角剖分的空间区域增长算法;
- 3) 根据平面内投影点的拓扑连接关系确定各原始三维点间的拓扑连接,即可重建得到三角网格模型。

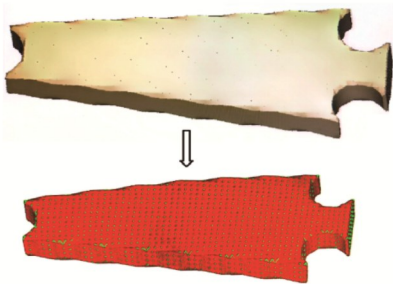


图 11 点云三角化网格重构

Fig. 11 Grid reconstruction of point cloud triangulation

点云三维重建后,将三角化网格导出为有限元网格单元,作为周围蒙皮支撑结构的内边界;另外对支撑结构外边界进行网格划分,内、外边界结合可生成结构的实体网格。由于内边界网格为点阵表面节点插值生成,保证了点阵结构与蒙皮结构单元的连续性。最终得到背板支撑结构的仿真模型如图 12 所示。

4.2 点阵结构尺寸优化及仿真验证

背板支撑的蒙皮点阵模型的主要尺寸参数包含点阵梁单元杆径 R 、胞元边长尺寸 a 和蒙皮厚度 T 。将建立好的背板参数化模型代入上述优化好的反射镜及柔性支撑模型中。背板支撑刚度主要影响反射镜镜面的刚体位移,故设置镜面刚体位移为目标函数进行参数尺寸优化求解,得到蒙皮点阵模型参数最优值如表 5

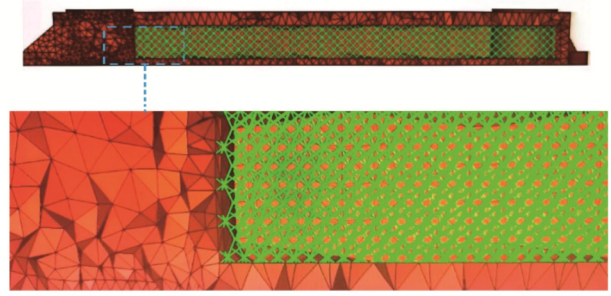


图 12 背板蒙皮点阵仿真模型

Fig. 12 Simulation model of backplane skin lattice

表 5 背板支撑结构参数

Table 5 Structure parameters of backplane support unit:mm

R	a	T
0.8	6	4.5

所示。

为了对上述优化得到的结构参数进行验证,按优化结果重新对三镜组件进行有限元建模,如图 13 所示。仿真计算其一阶基频、装调方向重力、均匀温升 2°C 、 0.01 mm 安装点强迫位移下的镜面面形,并综合镜面加工面形 ($\lambda/60$) 和上述工况的影响得到最终使用面形,表 6 中的分析结果表明一阶基频、组件质量及综合面形均满足设计指标要求。



图 13 反射镜组件有限元模型

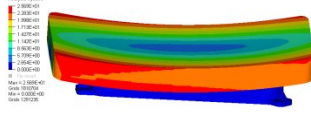
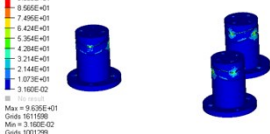

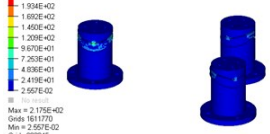
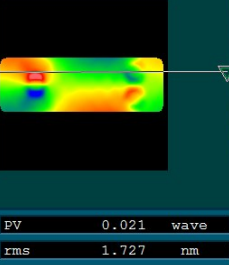
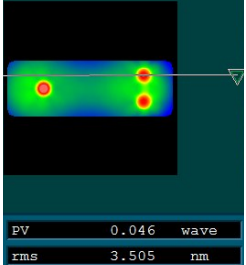
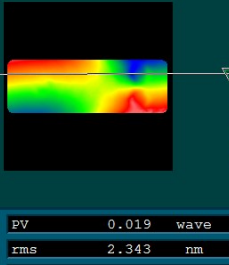
Fig. 13 Finite element model of mirror components

5 结 论

本文针对离轴光学系统中的长条弯月形反射镜,设计了一种双轴圆弧切口柔性铰链,并采用可行方向法对反射镜进行了尺寸优化,应用参数试验方法对柔铰的安装角度及安装位置进行了优化迭代,采用自适应响应面法对柔铰尺寸参数进行了多参数优化,基于点云三维重建算法建立了背板点阵结构的仿真优化模型,最后进行了有限元仿真验证。优化结果表明,当柔铰安装角度 β 为 20° 、安装位置为轴向距离 $13\text{ mm} \pm 0.5\text{ mm}$ 、几何参数 $r/t/b$ 为 $1/2/3\text{ mm}$ 时反射镜综合面形达到最优 (0.018λ),背板支撑蒙皮点阵结构参数 $R/a/T$ 为 $0.8/6/4.5\text{ mm}$ 时镜面刚体位移达到最优,同时一阶基频、组件质量及过载应力安全系数均满足设计要求。

表 6 反射镜组件仿真结果

Table 6 Simulation results of mirror components

First order fundamental frequency	20 g overload in X direction	20 g overload in Y direction	20 g overload in Z direction
237.3 Hz > 120 Hz	Maximum stress: 96.4 MPa Safety factor: 9.1 > 1	Maximum stress: 128.4 MPa Safety factor: 6.8 > 1	Maximum stress: 217.5 MPa Safety factor: 4.0 > 1
			
Surface error under gravity of assembly direction PV: 0.021λ RMS: 0.003λ (1.727 nm)	Uniform temperature rise of 2 °C PV: 0.046λ RMS: 0.006λ (3.505 nm)	Forced displacement of installation point 0.01 mm PV: 0.019λ RMS: 0.004λ (2.343 nm)	
			
RMS of surface shape error	0.018λ (11.4 nm) < λ/50		
Rigid body displacement under gravity of assembly direction	0.007 mm < 0.01 mm		

参 考 文 献

[1] 李海星, 丁亚林, 张洪文. 矩形反射镜结构支撑技术研究[J]. 光学学报, 2015, 35(5): 0523002.
Li H X, Ding Y L, Zhang H W. Support system study of rectangular mirror[J]. Acta Optica Sinica, 2015, 35(5): 0523002.

[2] 李延伟, 张景国, 谢新旺, 等. 大口径矩形 SiC 扫描反射镜组件的设计[J]. 激光与光电子学进展, 2022, 59(5): 0522001.
Li Y W, Zhang J G, Xie X W, et al. Design of large-aperture rectangular SiC scanning mirror assembly[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2022, 59(5): 0522001.

[3] 李宗轩, 陈雪, 张雷, 等. 大口径空间反射镜 Cartwheel 型柔性支撑设计[J]. 光学学报, 2014, 34(6): 0622003.
Li Z X, Chen X, Zhang L, et al. Design of cartwheel flexural support for a large aperture space mirror[J]. Acta Optica Sinica, 2014, 34(6): 0622003.

[4] 张啸雨, 刘畅, 施丽铭, 等. 蒙皮点阵一体化支撑结构的移动可变形组件优化设计及空间站应用[J]. 固体力学学报, 2022, 43(5): 551-563.
Zhang X Y, Liu C, Shi L M, et al. Optimal design of movable deformable components of skin lattice integrated support structure and its application in space station[J]. Chinese Journal of Solid Mechanics, 2022, 43(5): 551-563.

[5] 柳鸣, 张立中, 李响, 等. 空间轻小型反射镜柔性支撑设计与动力学分析[J]. 光电工程, 2018, 45(5): 47-56.
Liu M, Zhang L Z, Li X, et al. Design of flexure support of space compact reflector subassembly and dynamic analysis[J]. Opto-Electronic Engineering, 2018, 45(5): 47-56.

[6] 马胜鹏, 邓昊宇, 王春洁, 等. 空间热环境下反射镜支撑结构

点阵轻量化设计[J]. 计算机仿真, 2023, 40(3): 354-358, 441.
Ma S P, Deng H Y, Wang C J, et al. Lattice lightweight design of reflector support structure in space thermal environment[J]. Computer Simulation, 2023, 40(3): 354-358, 441.

[7] 张牧尧, 苏云, 王超. 基于空间反射镜的点阵结构非均匀尺寸优化设计[J]. 航天返回与遥感, 2021, 42(2): 123-129.
Zhang M Y, Su Y, Wang C. Optimal design of non-uniform size of lattice structure based on space mirror[J]. Spacecraft Recovery & Remote Sensing, 2021, 42(2): 123-129.

[8] 王伟之, 高卫军, 郭崇岭, 等. 空间相机结构设计中的拓扑优化及尺寸优化[J]. 航天返回与遥感, 2012, 33(6): 67-73.
Wang W Z, Gao W J, Guo C L, et al. Topology and size optimization technologies applied in structure design of space camera[J]. Spacecraft Recovery & Remote Sensing, 2012, 33(6): 67-73.

[9] 刘韬, 周一鸣, 江月松. 国外空间反射镜材料及应用分析[J]. 航天返回与遥感, 2013, 34(5): 90-99.
Liu T, Zhou Y M, Jiang Y S. Research and application of foreign space mirror materials[J]. Spacecraft Recovery & Remote Sensing, 2013, 34(5): 90-99.

[10] 张剑寒, 方刚, 张宇民. 空间反射镜轻量化技术的研究进展[J]. 光学仪器, 2009, 31(3): 84-89.
Zhang J H, Fang G, Zhang Y M. Study development of lightweight technology on space-borne mirror[J]. Optical Instruments, 2009, 31(3): 84-89.

[11] 井玉安, 韩静涛, 果世驹, 等. 普碳钢蜂窝夹芯板的面外压缩性能[J]. 北京科技大学学报, 2007, 29(12): 1234-1240.
Jing Y A, Han J T, Guo S J, et al. Out-of-plane compressive characteristics of brazing mild steel honeycomb structures[J]. Journal of University of Science and Technology Beijing, 2007,

- 29(12): 1234-1240.
- [12] 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.
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.
- [13] 邵梦旗, 张雷, 李林, 等. 超轻空间相机主支撑背板的优化设计[J]. 光学学报, 2019, 39(3): 0322001.
Shao M Q, Zhang L, Li L, et al. Optimization design of supporting backplate for ultra-light space camera[J]. Acta Optica Sinica, 2019, 39(3): 0322001.
- [14] Yoder P R. Opto-mechanical system design[M]. 3rd ed. Boca Raton: CRC Press, 2006: 373-375, 428-433.
- [15] 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.
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.
- [16] 吴清文, 杨洪波, 杨近松, 等. 空间相机中主镜及其支撑方案设计与分析方法[J]. 光学技术, 2004, 30(2): 153-156.
Wu Q W, Yang H B, Yang J S, et al. Design and analysis for primary mirror and its support of space camera[J]. Optical Technique, 2004, 30(2): 153-156.
- [17] 袁健, 任建岳. 碳化硅反射镜轻量化结构的改进与优化[J]. 光子学报, 2015, 44(8): 0812004.
Yuan J, Ren J Y. Improvement and optimization of lightweight structure for SiC reflective mirror[J]. Acta Photonica Sinica, 2015, 44(8): 0812004.
- [18] 李宗轩, 张雷, 姚劲松, 等. Cartwheel型双轴柔性铰链设计[J]. 光学精密工程, 2013, 21(9): 2317-2325.
Li Z X, Zhang L, Yao J S, et al. Design of cartwheel bi-axial flexural hinge[J]. Optics and Precision Engineering, 2013, 21(9): 2317-2325.
- [19] 杜云松, 李铁民, 姜晓, 等. 平面柔性铰链机构的柔度计算方法[J]. 清华大学学报(自然科学版), 2016, 56(6): 633-639.
Du Y S, Li T M, Jiang Y, et al. Compliance calculation method for planar flexure-based mechanisms[J]. Journal of Tsinghua University (Science and Technology), 2016, 56(6): 633-639.
- [20] Paros J M, Weisbord H. How to design flexure hinges[J]. Machine Design, 1965, 37(27): 151-156.
- [21] Lu C X, Hsieh M, Huang Z F, et al. Architectural design and additive manufacturing of mechanical metamaterials: a review[J]. Engineering, 2022, 17: 44-63.
- [22] 黄安坤, 温耀杰, 张百成, 等. 增材制造金属点阵结构性能研究进展[J]. 航空制造技术, 2023, 66(11): 90-101.
Huang A K, Wen Y J, Zhang B C, et al. Research progress on properties of metal lattice structure by additive manufacturing[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2023, 66(11): 90-101.

Design Method of Flexible Support and Lattice Structure for Long Strip Mirror

Liu Pengpeng*, Wu Jun, Chang Junlei, Pang Shoucheng, Zou Baocheng, Zhang Zhuwei
Beijing Key Laboratory of Advanced Optical Remote Sensing Technology, Beijing Institute of Space Mechanics & Electricity, Beijing 100094, China

Abstract

Objective The design of the mirror body and its supporting structure exert an important influence on the system imaging quality. It is necessary to reduce the structural mass as much as possible, improve the surface shape accuracy of the mirror as much as possible, and ensure the dynamic and static stiffness and thermal dimensional stability of the system to reduce the transmission cost. Meanwhile, this has always been a difficult point in designing spatial optical machine structures. Reasonable flexible support design can solve the contradiction of mirror surface shape decline caused by temperature load and assembly stress on the premise of satisfying the mirror support stiffness. Computer-aided design/computer-aided engineering (CAD/CAE) technology is employed to predict and optimize the parameters of the flexible structure, and the direction and amount of parameter correction are determined according to the simulation results before design iteration. It is an efficient design solution for mirror support systems. In recent years, compared with traditional materials, the additive manufacturing lattice structure has been widely applied in space remote sensing cameras due to its excellent characteristics such as higher lightweight efficiency, specific stiffness/strength, and mechanical properties that can be designed. The complex lattice structures result in huge analysis and calculation amounts. At present, scholars at home and abroad mostly adopt the equivalent homogenization analysis method for lattice structures, and an urgent problem is to predict the mechanical properties of lattice filled structures quickly and effectively. To this end, a mechanical simulation technique based on accurate finite element modeling is proposed.

Methods Based on the size optimization technique, we build a parametric finite element model of a rectangular reflective mirror and a multi-parameter optimization model of biaxial circular cut-out flexure hinge support. First, the feasible direction method and adaptive response surface optimization algorithm are applied respectively to obtain the thickness parameters of the mirror plate and the rib plate (Table 3) and the geometric size parameters of the flexible hinge support (Table 4). The influence of independent variables on the installation angle (Fig. 6) and the installation axial position (Fig. 7) of the flexible support is analyzed by the parametric test method. Second, a simulation optimization method of lattice

structure design based on three-dimensional point cloud reconstruction is studied. Lattice filling and point cloud generation (Fig. 10) are utilized to reconstruct the grid of point clouds generated by the lattice structure envelope (Fig. 11), which can ensure the continuity and authenticity of the lattice structure model and obtain the backplane support parameters (Table 5). Finally, finite element modeling (Fig. 13) and simulation verification (Table 6) are carried out for the mirror assembly.

Results and Discussions The optimization results show that when the installation angle β is 20° , the installation position is $13 \text{ mm} \pm 0.5 \text{ mm}$, and the geometric parameter $r/t/b$ is $1/2/3 \text{ mm}$ (Table 4), the composite surface shape of the mirror reaches the optimal value (0.018λ) (Table 6). When the skin and lattice structure parameter $R/a/T$ of the backplane support is $0.8/6/4.5 \text{ mm}$ (Table 5), the rigid body displacement of the mirror reaches the optimal value (0.007 mm). At the same time, the first order fundamental frequency and component mass meet the design requirements.

Conclusions We propose a simulation optimization method for lattice structure design based on three-dimensional point cloud reconstruction. The results show that the simulation optimization method is reasonable and feasible, and can meet the design requirements of mirror support structures with similar structural forms.

Key words rectangular reflective mirror; flexible support; lattice structure; point cloud; optimization algorithm