

文章编号: 1672-8785(2025)07-0001-11

星载大口径 SiC 平面反射镜的 优化设计及应用

邓 容^{1,2,3*} 袁海涛^{1,2} 孙小进^{1,2,3} 陈凡胜^{1,2,3} 孙胜利^{1,2,3} 陈忠明⁴

(1. 中国科学院上海技术物理研究所, 上海 200083;

2. 红外探测全国重点实验室, 上海 200083;

3. 中国科学院大学, 北京 100049;

4. 中国科学院上海硅酸盐研究所, 上海 201899)

摘 要: 针对空间相机二维指向机构中碳化硅(SiC)平面反射镜的轻量化与刚度提升需求, 提出了一种基于半封闭背板结构的创新设计方案。通过构建背部半封闭拓扑构型并用其替代传统开放结构, 结合工艺孔尺寸调控实现了刚度提升。建立了指向镜的有限元模型, 并将三种设计方案进行了对比。仿真结果表明, 方案 2 在保证面形精度指标的前提下, 质量由 12.8 kg 降至 10.7 kg (降幅为 16.4%), 一阶固有频率由 730 Hz 提高到 1528 Hz (增幅为 109%), 刚度质量比提高 1.5 倍, 性能指标显著优于传统开放结构(方案 1)和大孔径方案(方案 3)。优化后的指向镜通过了正弦振动试验, 面形精度的均方根(Root Mean Square, RMS)值提高了一倍, 由 0.073λ 提升至 0.036λ ($\lambda=632.8$ nm)。本研究提出的半封闭背板设计突破了传统轻量化结构的刚度局限, 为其他空间反射镜设计提供了新方法。

关键词: 碳化硅反射镜; 轻量化; 半封闭结构; 二维指向机构; 指向镜

中图分类号: TN213; V474.1+1 **文献标志码:** A

DOI: 10.3969/j.issn.1672-8785.2025.07.001

Optimization Design and Application of Spaceborne Large-Aperture SiC Plane Mirror

DENG Rong^{1,2,3*}, YUAN Hai-tao^{1,2}, SUN Xiao-jin^{1,2,3}, CHEN Fan-sheng^{1,2,3},SUN Sheng-li^{1,2,3}, CHEN Zhong-ming⁴

(1. Shanghai Institute of Technical Physics, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 200083, China;

2. National Key Laboratory of Infrared Detection Technologies, Shanghai 200083, China;

收稿日期: 2025-03-09

作者简介: 邓容(1982-), 男, 副研究员, 湖南双峰人, 主要研究方向为空间光学遥感仪器扫描机构研制及试验验证。

***通讯作者:** E-mail: drdengrong@mail.sitp.ac.cn

3. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China;

4. Shanghai Institute of Ceramics, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 201899, China)

Abstract: Aiming at the requirements of lightweight and stiffness improvement of silicon carbide (SiC) plane mirror in the two-dimensional pointing mechanism of space camera, an innovative design scheme based on semi-closed backplate structure was proposed. By constructing a semi-closed topological configuration on the back and replacing the traditional open structure with it, the stiffness was improved by combining the control of the process hole size. The finite element model of the pointing mirror was established, and three design schemes were compared. The simulation results show that, under the premise of ensuring the surface shape accuracy index, the mass of scheme 2 was reduced from 12.8 kg to 10.7 kg (a decrease of 16.4%), the first-order natural frequency was increased from 730 Hz to 1528 Hz (an increase of 109%), and the stiffness-to-mass ratio was increased by 1.5 times. The performance index was significantly better than that of the traditional open structure (scheme 1) and the large aperture scheme (scheme 3). The optimized pointing mirror passed the sinusoidal vibration test, and the root mean square (RMS) value of the surface shape accuracy was doubled from 0.073λ to 0.036λ ($\lambda = 632.8$ nm). The semi-closed backplane design proposed in this study breaks through the stiffness limitations of traditional lightweight structures and provides a new approach for the design of other space mirrors.

Key words: SiC mirror; lightweight; semi-closed structure; two-dimensional pointing mechanism; pointing mirror

0 引言

随着航天事业的蓬勃发展,空间相机的扫描机构和二维指向机构由于可以扩大观测视场而得到越来越广泛的应用。二维指向机构是空间相机的关键部件之一,其轻量化设计对空间相机整机意义重大。而 SiC 平面反射镜(即指向镜)的轻量化设计尤为重要。

在国内外的反射镜轻量化设计研究中,对平面反射镜的研究相对较少,且未见半封闭结构平面反射镜的应用。美国 ITT 公司对地球静止轨道气象卫星扫描反射镜各种轻量化孔的形状(如三角形、四边形、六边形等)和尺寸进行了详细分析,选择了背部开放式三角形轻量化孔^[1]。在国内,中国科学院上海技术物理研究所对风云四号卫星扫描镜的轻量化设计中采用了背部开放式三角形轻量化孔^[2]。中国科学院长春光学精密机械与物理研究所、哈尔滨工业大学、中国科学院西安光学精密机械研究所等对三反或两反光学系统的主反射镜进行轻量化设计^[3-8],或者对主反射镜结构进行拓扑优化^[9-13],取得了不少成果,而这些主反射镜都不是平面反射镜。

十余年前,受制于大口径 SiC 反射镜镜坯

的制造工艺水平,指向镜的轻量化相对保守。为了进一步推进轻量化并提高指向镜的支撑刚度,在材料、外形轮廓以及安装接口不变的情况下,针对大口径 SiC 平面反射镜(即指向镜)进行了优化设计,并对优化前后的三种方案进行了有限元仿真分析与比较。最后对优化后的指向镜进行了装调测试和正弦振动试验,达到了优化设计目标。

1 结构设计

指向镜为平面反射镜,且为动镜,通过二维正交轴系旋转实现任意方向的精确指向。与离轴抛物面或自由曲面主反射镜相比,平面反射镜在面密度相等的情况下刚度低且加工难度更大。为便于指向镜实现二维指向,采用背部三点支撑,且支撑位置相对集中在指向镜的中心。指向镜采用 SiC 材质制作,外形轮廓为椭圆,厚度方向上采用蝶形结构,沿长轴方向进行削边处理,即中间厚、边缘薄。

图 1 为指向镜(方案 1)的三维模型图。指向镜采用碟形结构,其外形尺寸为 $634\text{ mm} \times 542\text{ mm}$,中间厚度为 80 mm ,边缘厚度为 25 mm 。轻量化孔为方孔,轻量化孔筋厚度为 3.5 mm ,圆角半径为 6 mm 。指向镜面板厚度

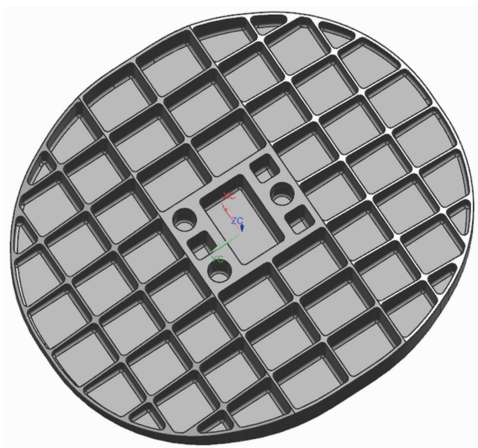


图 1 指向镜(方案 1)的三维模型图

为 5 mm, 指向镜周边筋厚度为 4.5 mm。指向镜质量为 12.8 kg, 面密度为 45.5 kg/m^2 。

目标优化指标如下: 实现指向镜质量降幅大于等于 15% 的同时, 突破传统轻量化设计的刚度衰减局限, 使其基频增幅大于等于 50%。

在继承二维指向机构既有结构的基础上, 受工程型号任务多重约束: 其一, 基于空间光学系统材料兼容性要求, 在铍(Be)与 SiC 的选型论证中, 任务指标严格限定材料体系维持不变, 因此维持 SiC 材料以规避 Be 毒性风险; 其二, 受限于指向机构运动包络边界, 反射镜的几何轮廓需严格继承原型设计参数, 镜体的外形轮廓尺寸不变; 其三, 为确保与现有伺服驱动控制系统兼容, 镜体安装界面的定位基准、支撑孔位置、孔径及公差等均需保持与原有接口一致。这三项约束条件(材料、几何包络、安装接口)构成指向镜优化设计的边界, 要求结构改进须在拓扑重构层面实现性能突破。

在所有轻量化镜子中, 夹层蜂窝结构是刚度质量比最高的设计形式^[14]。本方案实施参数化轻量化设计时, 针对面板与加强筋厚度协同减薄引发的刚度弱化问题, 创新性地引入背板强化机制。通过反应烧结整体成型或常压烧结结合焊接工艺, 在镜体背部构建半封闭背板, 有效补偿面板与加强筋壁厚减薄带来的刚

度损失。该设计突破传统开放结构的力学性能局限, 可实现轻量化率与基频特性的协同提升。

基于以上分析, 得到优化设计方案 2 和 3 (三维模型分别如图 2 和图 3 所示)。指向镜采用碟形、半封闭结构, 其外形尺寸为 $634 \text{ mm} \times 542 \text{ mm}$, 中间厚度为 80 mm, 边缘厚度为 25 mm。轻量化孔为方孔, 轻量化孔筋厚度为 3 mm, 圆角半径为 4 mm。指向镜面板厚度为 4 mm, 背板厚度为 3 mm, 指向镜周边筋厚度为 4 mm。如图 2 所示, 方案 2 中背板开孔尺寸为 $\Phi 16 \text{ mm}$, 指向镜质量为 10.7 kg, 面密度为 38 kg/m^2 。如图 3 所示, 方案 3 中背板为翻边结构, 且翻边宽度为 15 mm, 指向镜质量为 10.4 kg, 面密度为 37 kg/m^2 。

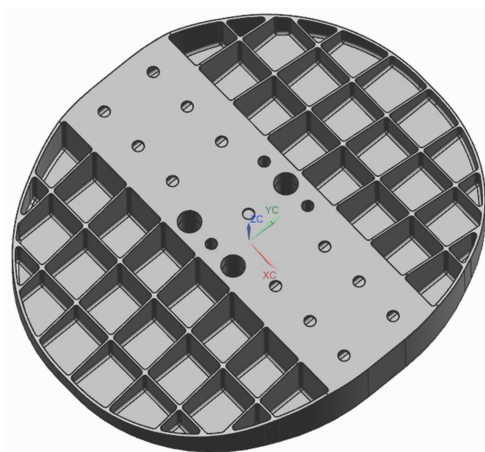


图 2 指向镜(方案 2)的三维模型图



图 3 指向镜(方案 3)的三维模型图

表 1 三种指向镜方案的设计结果

	方案 1	方案 2	方案 3
外形尺寸/mm	634×542×80	634×542×80	634×542×80
镜面面板厚度/mm	5	4	4
筋厚度/mm	3.5	3	3
周边筋厚度/mm	4.5	4	4
背板厚度/mm	—	3	3
背板开孔尺寸/mm	—	Φ16	55.5×34.5
质量/kg	12.8	10.7	10.4

scan_mirror_sim1 : Solution paqjiagong 结果
Subcase - Static Loads 1, 静态步长 1
位移 - 节点, 幅值
最小值: 0.000E+000, 最大值: 8.969E-005, 单位 = mm
变形: 位移 - 节点 幅值



图 4 指向镜(方案 1)在抛光加工状态下的重力变形图

表 1 列出了三种方案的设计结果。可以看出, 优化设计后, 方案 2 的质量比方案 1 减小 2.1 kg, 降幅为 16.4%; 方案 3 的质量比方案 1 减小 2.4 kg, 降幅为 18.8%。因此, 方案 2 和方案 3 均满足优化设计目标减重 15% 的要求, 且减重最优的是方案 3。

2 仿真分析及讨论

基于以上指向镜的结构设计, 分别对优化前后的三种方案进行有限元仿真分析。重点分析镜体的静力学变形和基频模态。

2.1 静力学分析

在指向镜的静力学分析中, 三种工况分别

如下:

(1) 指向镜水平放置后进行镜面抛光加工状态, 此时背部平面固定约束; (2) 指向镜处于竖直检测状态且短轴垂直于地面, 三个安装孔固定约束; (3) 指向镜处于竖直检测状态且长轴垂直于地面, 三个安装孔固定约束。

仿真分析结果如图 4~图 12 所示。其中, 图 4~图 6 分别为指向镜(方案 1)在三种工况下的重力变形图。图 7~图 9 分别为指向镜(方案 2)在三种工况下的重力变形图。图 10~图 12 分别为指向镜(方案 3)在三种工况下的重力变形图。

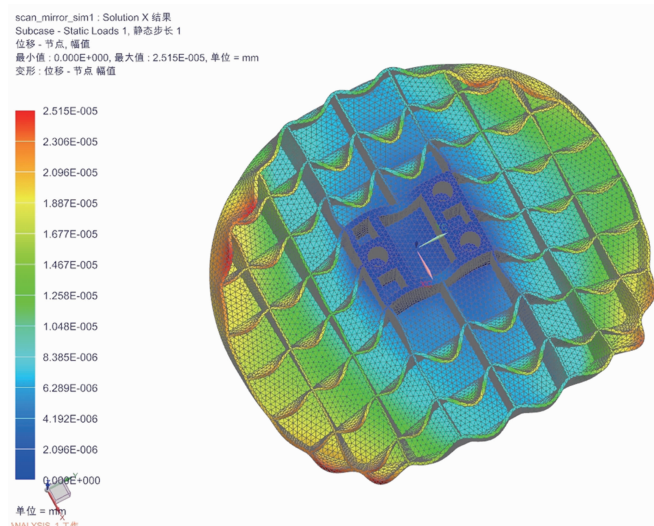


图 5 指向镜(方案 1)在竖直检测状态且短轴垂直于地面时的重力变形图

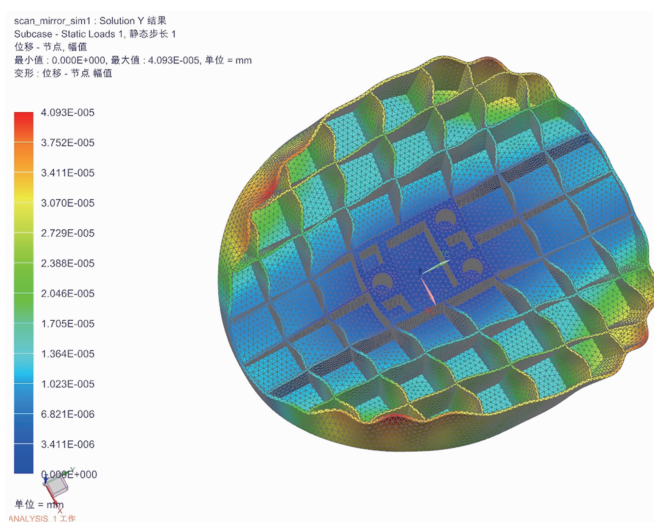


图 6 指向镜(方案 1)在竖直检测状态且长轴垂直于地面时的重力变形图

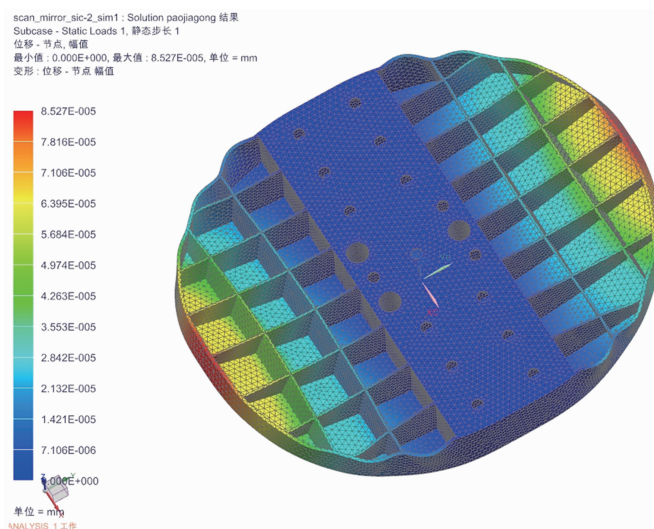


图 7 指向镜(方案 2)在抛光加工状态下的重力变形图

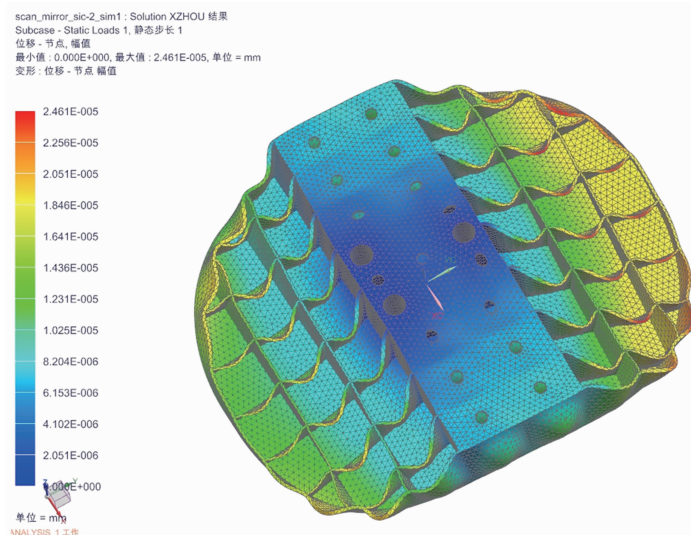


图 8 指向镜(方案 2)在竖直检测状态且短轴垂直于地面时的重力变形图

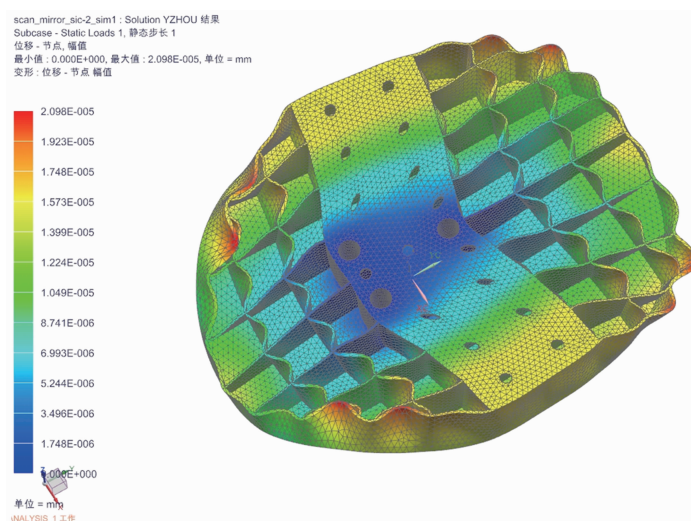


图 9 指向镜(方案 2)在竖直检测状态且长轴垂直于地面时的重力变形图

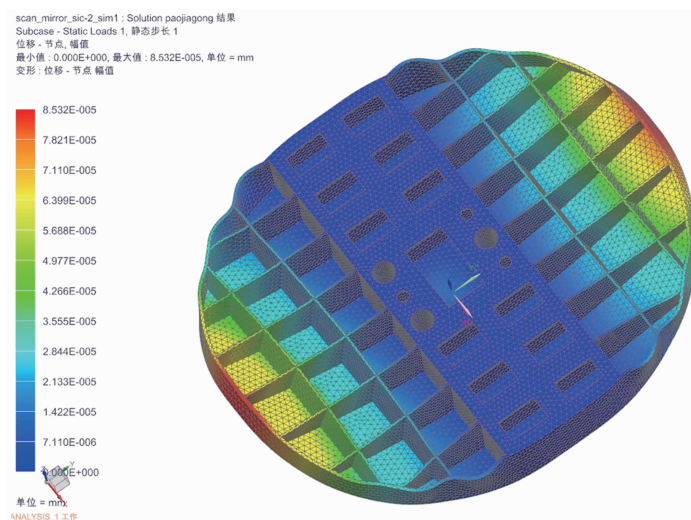


图 10 指向镜(方案 3)在抛光加工状态下的重力变形图

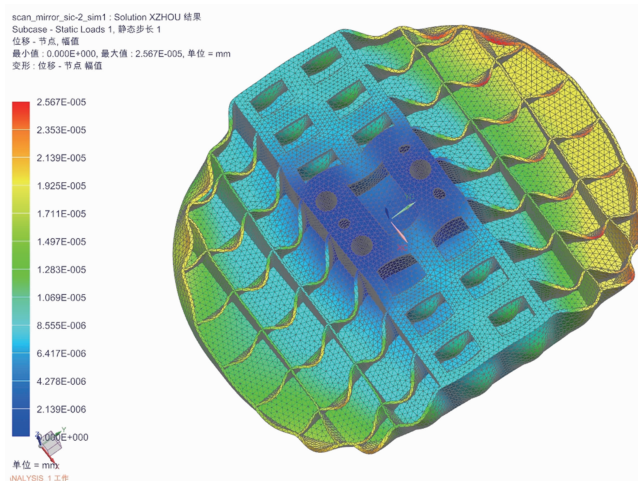


图 11 指向镜(方案 3)在竖直检测状态且短轴垂直于地面时的重力变形图

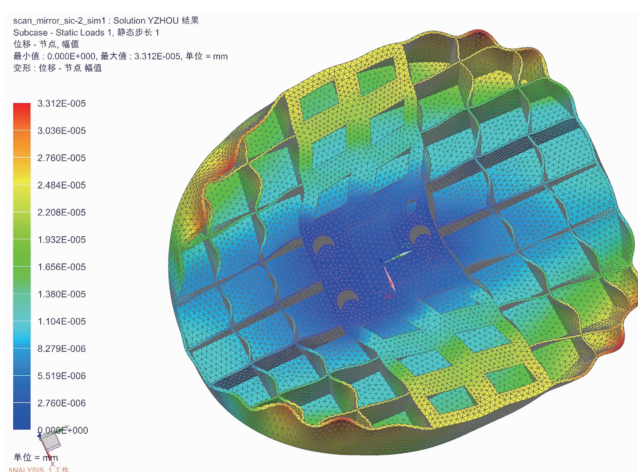


图 12 指向镜(方案 3)在竖直检测状态且长轴垂直于地面时的重力变形图

表 2 不同工况下指向镜的最大变形量(单位为 mm)

工况	方案 1	方案 2	方案 3
镜面水平	8.97×10^{-5}	8.53×10^{-5}	8.53×10^{-5}
短轴垂直于地面	2.52×10^{-5}	2.46×10^{-5}	2.57×10^{-5}
长轴垂直于地面	4.09×10^{-5}	2.10×10^{-5}	3.31×10^{-5}

在三种工况下, 指向镜的最大变形量的有限元仿真分析结果如表 2 所示。可以看出, 与方案 1 相比, 方案 2 在镜面抛光加工状态下的指向镜最大变形量稍有减小; 而在竖直检测状态下, 无论短轴还是长轴垂直于地面, 指向镜的最大变形量均减小。

与方案 1 相比, 方案 3 在竖直检测状态且短轴垂直于地面时的指向镜最大变形量增大; 而在镜面抛光加工状态、竖直检测状态且长轴垂直于地面两种工况下, 指向镜的最大变形量

均减小。

2.2 动力学分析

由于三种方案中指向镜的安装接口一致, 对指向镜进行动力学分析, 分析自由状态下的前三阶固有频率(结果见表 3)。由表 3 可知, 方案 2 中指向镜的前三阶固有频率都有提高, 其中第一阶固有频率由 730 Hz 增大到 1528 Hz, 增幅约为 109%, 满足优化设计目标增大 50% 的要求; 刚度质量比提高至方案 1 的 2.5 倍。而方案 3 中指向镜的第一阶固有频率由

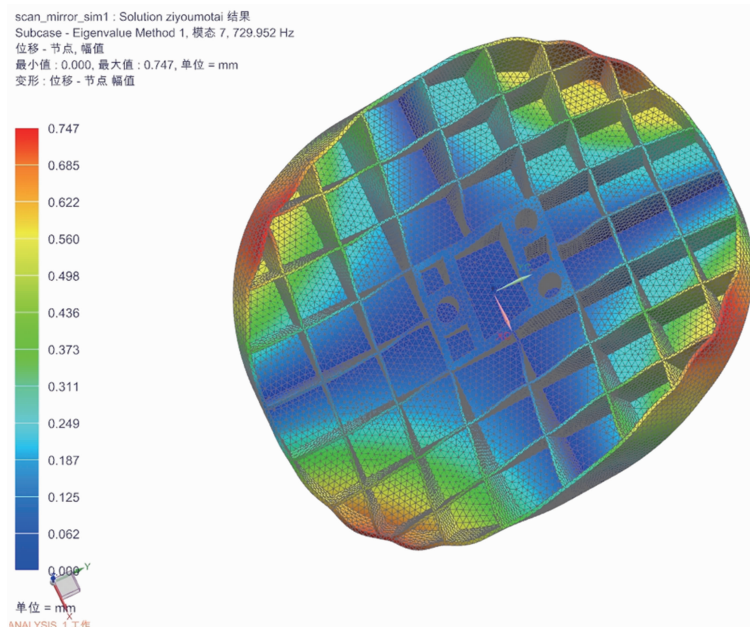


图 13 指向镜(方案 1)的第一阶自由模态

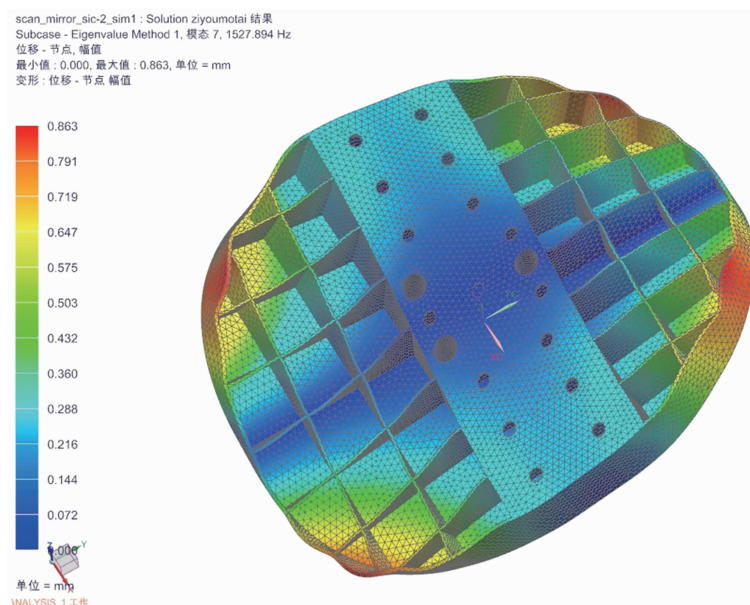


图 14 指向镜(方案 2)的第一阶自由模态

表 3 三种方案的前三阶固有频率(单位为 Hz)

模态	方案 1	方案 2	方案 3
1	730	1528	1059
2	2014	2215	2110
3	2286	2929	2650

730 Hz 增大到 1059 Hz, 增幅约为 45%。尽管刚度有所提高但是不满足优化设计目标要求。

方案 2 与方案 3 的核心差异体现在工艺孔径参数上。仿真结果表明, 工艺孔径与基频特

性存在显著负相关性: 当孔径缩减时, 结构刚度提高。若是在地面非真空条件下应用, 则可将工艺孔尺寸尽可能缩小, 或者去除工艺孔(设计成背板全封闭结构形式), 从而实现支撑刚度最优。

图 13~图 15 所示分别为三种方案中指向镜的第一阶自由模态。可以看出, 三种方案的第一阶自由模态的振型基本一致, 均为马鞍形。

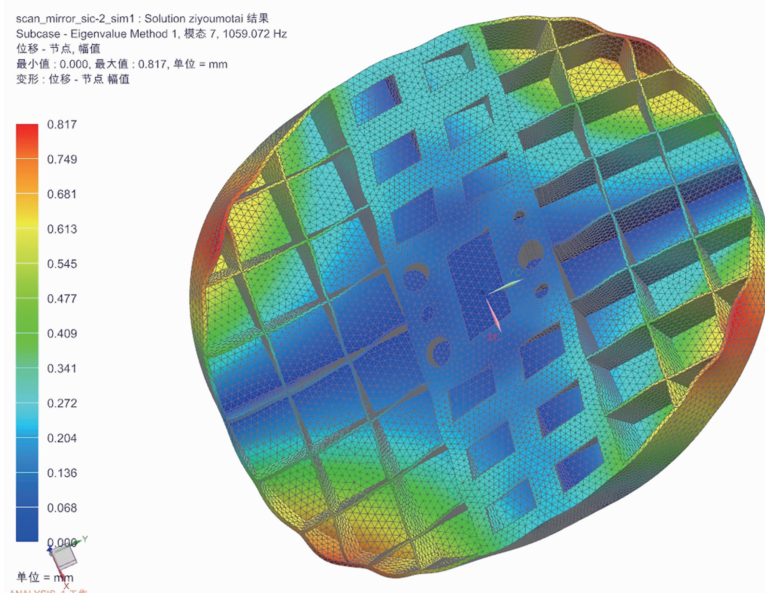


图 15 指向镜(方案 3)的第一阶自由模态

综上分析, 方案 2 与方案 3 均满足结构减重要求(分别减重 2.1 kg 与 2.4 kg), 但在关键动力学性能指标方面存在显著差异。数据显示, 方案 2 的一阶固有频率达到 1528 Hz, 比原始方案提升 109%, 完全满足优化设计要求; 而方案 3 虽质量比方案 2 减轻 0.3 kg, 但其一阶固有频率仅提升至 1059 Hz, 未能达到技术指标阈值。基于动力学特性在系统可靠性中的重要地位, 虽然方案 2 的质量微增 0.3 kg, 但其在关键的刚度指标上的显著优势(提升 109%)具有决定性价值。经综合权衡, 最终选定方案 2 作为实施方案。

3 装调测试结果及应用

中国科学院上海硅酸盐研究所采用常压烧结合焊接工艺完成方案 2 的镜坯制备。图 16 所示为优化设计后方案 2 的指向镜镜坯。

指向镜(方案 2)在某工程任务中得到了实际应用。指向镜镜坯制作后, 完成镜坯的铣磨、镜面粗抛光、物理气相沉积(Physical Vapor Deposition, PVD)改性、精抛光和镜面镀膜等工序。然后, 指向镜在某空间相机二维指向机构上进行了装调测试, 并且随二维指向机构进行了验收级的正弦振动试验。结果表明, 考核顺利通过, 试验前后指向镜的面形 RMS 值



图 16 指向镜(方案 2)镜坯

基本不变。

采用 Zygo 干涉仪对指向镜的面形精度进行了检测。图 17 为指向镜(方案 1)在正弦振动试验后的面形图, 图 18 为指向镜(方案 2)在正弦振动试验后的面形图。可以看出, 指向镜(方案 1)背部开放, 支撑刚度相对较弱, 面形图上像散很明显; 而优化后指向镜(方案 2)的支撑刚度提高, 装调后无像散, 面形精度相应提高。

表 4 列出了方案 1 和方案 2 中的指向镜在正弦振动试验后的面形精度测试结果。可以看出, 方案 2 的面形精度 RMS 值为 0.036λ ($\lambda = 632.8 \text{ nm}$), 比优化前的方案 1 提高了一倍, 对于提高空间相机的光学成像质量起到了重要的作用。

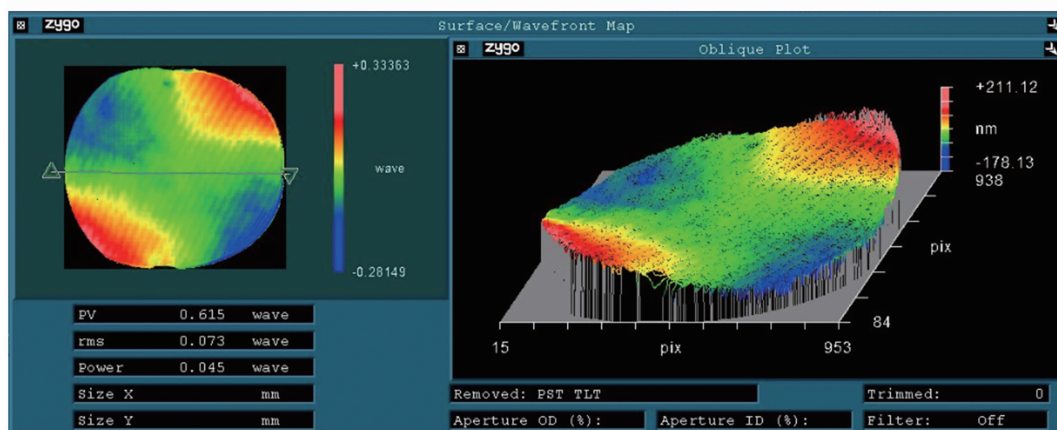


图 17 指向镜(方案 1)在正弦振动试验后的面形图

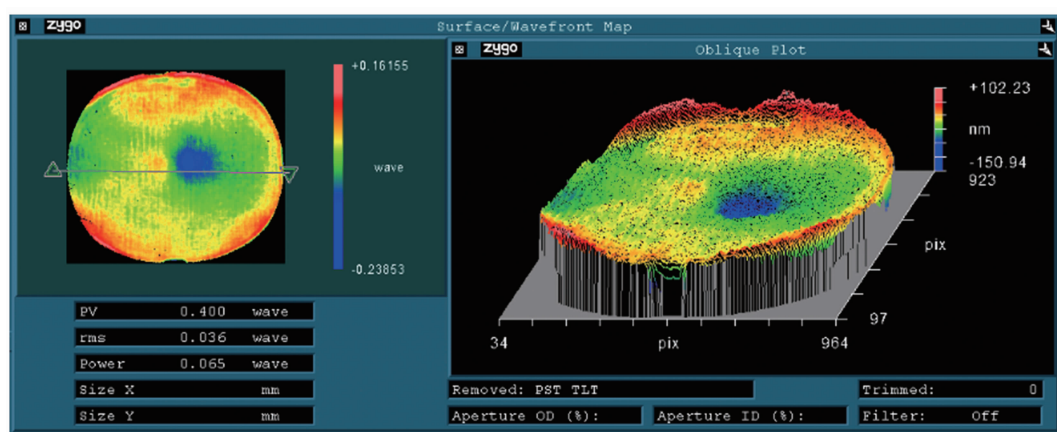


图 18 指向镜(方案 2)在正弦振动试验后的面形图

表 4 指向镜在正弦振动试验后的面形精度测试结果
(单位为 λ ($\lambda=632.8 \text{ nm}$))

	方案 1	方案 2
峰谷值	0.615	0.400
均方根值	0.073	0.036
离焦量	0.045	0.065

本团队自主研制的半封闭结构指向镜已在某型号空间相机中实现了工程化应用,且在轨运行稳定。相机光学传递函数相应增大,提高了空间相机的在轨成像性能,为新一代卫星光学载荷的研制提供了关键技术储备。

4 结束语

本文基于空间相机指向镜的工程约束,创新性地提出采用半封闭背板结构的优化方法,成功化解了传统开放结构刚度不足与轻量化要求进一步提升的矛盾。

经过优化设计,指向镜的质量由 12.8 kg 降至 10.7 kg (减重 16.4%),一阶固有频率从 730 Hz 跃升至 1528 Hz (提升 109.3%),刚度质量比提高 1.5 倍。优化后的指向镜通过了正弦振动试验;与原设计方案相比,镜面面形精度 RMS 值从 0.073λ ($\lambda=632.8 \text{ nm}$) 提升至 0.036λ ,相机光学传递函数相应增大,空间相机的在轨成像性能得到提高。

工程实践表明,半封闭背板结构(即“面板-蜂窝-背板”复合构型)为空间反射镜设计提供了新方法。本研究成果已成功应用于某型号卫星的空间相机,其设计方法对大口径空间光学系统的轻量化设计具有指导价值。

参考文献

- [1] Hookman R A, Zurmehly G E, Hodgman N S. Scanning mirror design considerations for a geosta-

- tionary spaceborne radiometer [C]. *SPIE*, 1992, **1693**: 318–329.
- [2] 叶虎勇, 陈桂林. 地球同步轨道三轴稳定卫星的扫描镜设计及考虑 [J]. *红外技术*, 2003, **25**(6): 1–5.
- [3] 张学军, 李志来, 张忠玉. 基于 SiC 材料的空间相机非球面反射镜结构设计 [J]. *红外与激光工程*, 2007, **36**(5): 577–582.
- [4] 吴清彬, 陈时锦, 董申. 参数优化方法在轻质反射镜结构设计中的应用 [J]. *光学精密工程*, 2003, **11**(5): 466–471.
- [5] 郭喜庆, 王悦勇. 大口径反射镜几种轻量化孔结构形式的分析 [J]. *光学精密工程*, 2000, **8**(6): 518–521.
- [6] 闫勇, 贾继强, 金光. 新型轻质大口径空间反射镜支撑设计 [J]. *光学精密工程*, 2008, **16**(8): 1533–1539.
- [7] 国绍文, 王武义, 张广玉, 等. 空间光学系统反射镜轻量化技术综述 [J]. *光学仪器*, 2005, **27**(4): 78–82.
- [8] 刘宏伟. 基于有限元法的空间相机主镜设计 [D]. 长春: 中国科学院长春光学精密机械与物理研究所, 2003.
- [9] 闫勇, 金光, 杨洪波. 空间反射镜结构轻量化设计 [J]. *红外与激光工程*, 2008, **37**(1): 97–101.
- [10] 徐文静. 空间大口径反射镜及其支撑结构的设计研究 [D]. 西安: 中国科学院西安光学精密机械研究所, 2020.
- [11] 徐佳坤. 空间光学遥感器 2 m 大口径反射镜组件结构优化研究 [D]. 长春: 中国科学院长春光学精密机械与物理研究所, 2022.
- [12] 黄拓. 空间离轴相机反射镜组件超轻量化技术研究 [D]. 西安: 中国科学院西安光学精密机械研究所, 2020.
- [13] 郎明, 胡瑞, 张媛媛, 等. 3 m 级大口径空间光学主反射镜的轻量化结构优化 [J]. *航天返回与遥感*, 2020, **41**(5): 55–63.
- [14] Vukobratovich D. *Lightweight Mirror Design* [M]// Ahmad A. *Handbook of Optomechanical Engineering*. Boca Raton: CRC Press, 1999.