

doi: 10.3788/gzxb20164507.0722003

视频空间相机 $\Phi 330$ mm 口径主镜组件设计

李宗轩, 邢利娜, 解鹏

(中国科学院长春光学精密机械与物理研究所 小卫星技术国家地方联合工程研究中心, 长春 130033)

摘 要: 为满足视频空间相机中反射镜组件的轻量化、高刚度、高稳定性和短加工周期的要求, 采用基于 ZERODUR 微晶玻璃的背部单拱形镜体轻量化方案, 设计了一种外圆芯轴粘接的柔性支撑结构. 通过有限元工程分析与基于响应面优化设计, 确定了支撑结构的最优尺寸. 对反射镜组件进行了模态试验, 并完成了镜面的非球面光学加工与检测. 试验结果表明: 主镜组件的一阶自然频率为 332.5 Hz, 与分析结果之间的相对误差为 2.5%; 主镜组件在绕光轴分别旋转 0° 、 120° 与 240° 方向进行光学检测时, 面形精度均方根值均优于 $\lambda/40$, 实现了地面重力对反射镜面形检测零影响, 组件满足设计要求.

关键词: 空间相机; 主镜组件; 柔性支撑; 有限元; 光学检测; 零重力

中图分类号: TH133

文献标识码: A

文章编号: 1004-4213(2016)07-0722003-6

Design of the $\Phi 330$ mm Primary Mirror Assembly of Spaceborne Video Camera

LI Zong-xuan, XING Li-na, XIE Peng

(National & Local United Engineering Research Center of Small Satellite Technology, Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun 130033, China)

Abstract: Crucial requirements were proposed on the Primary Mirror Assembly (PMA), such as high lightweighting, high stiffness, high stability and short manufacturing cycle. In order to satisfy those, a meniscus-like mirror lightweighting scheme based on ZERODUR was designed, and the flexural support structure bonded to the outer ring of the mirror shaft was optimized. Through a finite element analysis and design approach, the optimal dimensions of the flexural support were obtained. In order to verify the finite element analysis results, a modal test was performed on the PMA, and the required aspherical optical surface was polished and tested. Test results show that, the first natural frequency of PMA is 332.5 Hz, the relative deviation is only 2.5% to compare with the analysis result; the surface figure of PMA maintains a constant RMS of $\lambda/40$ while rotating at 0° , 120° and 240° around the horizontal optical axis respectively; the influence of zero-gravity state is achieved on surface figure of PMA. The PMA satisfies the design requirements.

Key words: Space telescope; Primary mirror assembly; Flexible structure; Finite element method; Optical testing; Zero Gravity

OCIS Codes: 220.4840; 120.4640; 120.4880

0 引言

“吉林一号”视频卫星是国内以遥感图像产品商业化为目的所驱动研制的航天对地遥感卫星. 计划到 2030 年, 将实现 138 颗视频卫星在轨运行, 在 10 min 内实现对全球任意一点的重访. 该卫星的载荷为一台高分辨率可见光视频相机, 能够以 4K 制式, 实现对地面定点目标拍摄彩色凝视视频图像. 其相对孔径为

$1/10$, 地面像元分辨率达 1.1 m, 与美国 Google 公司 Skysat-1 卫星相机的分辨率相当^[1]. 卫星的总体布局采用了将载荷光机结构与卫星结构相融合的星载一体化设计思想. 同时为了缩小体积与减轻重量, 高分辨视频相机的光学系统选用了同轴卡塞格林形式. 330 mm 口径主镜作为孔径光阑, 其面形精度的好坏, 将直接影响最终的成像质量.

目前国内外对空间主反射镜结构的研究, 主要集

基金项目: 国家高技术研究发展计划 (No. 2015AA7015090) 资助

第一作者: 李宗轩 (1986-), 男, 助理研究员, 博士, 主要研究方向为空间光学遥感器光机集成分析. Email: lizongx@126.com

收稿日期: 2016-01-25; 录用日期: 2016-03-04

<http://www.photon.ac.cn>

中于 500 mm 口径以上的中大口径反射镜, KIHM^[3]、李志来^[4]等分别研究了 1 m 口径量级的圆形主反射镜组件结构, CHENG^[5]、袁健^[6]、朱俊青^[7]等分别研究了 500 mm 口径量级的空间反射镜结构. 上述研究都分别对主镜镜体进行了类似三明治夹心结构的轻量化设计, 并在反射镜背部或侧面粘接柔性支撑元件, 实现对镜体的支撑. 这致使反射镜轻量化镜体制备与加工周期长, 且三点支撑方案也增大了设计的难度与加工装配的复杂度^[8-9].

本文研究的主镜, 其口径为 330 mm, 高分辨视频相机对主反射镜的要求为: 在三向正交重力与 10℃ 温升的分别作用下, 反射面面形精度均方根值 (Root Mean Square, RMS) $\leq \lambda/40$ ($\lambda = 632.8 \text{ nm}$), 反射镜组件的一阶自然频率高于 150 Hz, 加工周期为 3 个月. 若对镜体进行芯层轻量化设计或采用多点柔性支撑方案, 需要对镜体进行轻量化加工, 并在光学加工过程中进行多次消应力试验, 消除支撑结构装配残余应力对镜面面形的影响, 加工周期无法保证^[10]. 为满足上述设计要求, 本文提出采用基于 ZERODUR 微晶玻璃的背部单拱形轻量化方案, 并对其支撑结构进行了优化

表 1 空间反射镜常用材料特性

Table 1 Material properties of space mirror

Material	Density/ ($\text{g} \cdot \text{mm}^{-3}$)	Young's modulus /MPa	Thermal conductivity/ ($\text{W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$)	CTE/ ($10^{-6} \cdot \text{K}^{-1}$)	(E/ρ)/ ($10^4 \text{ N} \cdot \text{m} \cdot \text{g}^{-1}$)
ZERODUR	2.53	90 600	1.64	0±0.05	3.58
Be	1.85	303 000	216	11.3	15.6
RB-SiC	3.05	330 000	158	2.6	10.6
Al	2.68	68 200	167	23.6	2.55
ULE	2.21	67 600	1.31	0.015	3.08

由表 1 可知, 金属铍材料比刚度最高, 但热胀系数大且有剧毒, 加工过程风险较大; SiC 材料虽然比刚度高且同时热稳定好, 但硬度大, 光学抛光周期长, 且需要改性才能提高表面致密度; ULE 低膨胀玻璃特性略逊于 ZERODUR; 铝合金则物理特性最差. ZERODUR 微晶玻璃具有最佳的热稳定性与较低的密度, 同时光学加工性能、机械加工性能与稳定性最佳, 且供货稳定. 综合后面讨论的镜体轻量化方式, 选用 ZERODUR 微晶玻璃为主镜镜体材料.

1.2 主镜的背部单拱形轻量化方案

空间反射镜的轻量化方案, 通常有蜂窝芯层设计, 泡沫芯层设计, 半开放加强筋设计与开放加强筋设计等方案. 上述轻量化方案, 需要对玻璃镜体进行机械加工, 去除背部的材料, 形成轻量化芯层; 或者对轻量化芯层与面板进行焊接. 加工周期长且极易产生机械加工残余应力. 目前通过对镜体背部光学铣磨可实现的几种常见轻量化形式如图 1. Yoder 将具有相同外包络尺寸与镜面曲率, 而具有不同背部轮廓形式的轻量化

设计.

1 主镜组件设计

空间反射镜组件在加工、检测、装调、运输、发射与在轨运行期间, 要经历重力释放、振动、冲击、温度变化等力学与热学载荷作用, 必须保证在经受上述载荷后, 镜面的面形精度不超出光学设计允差. 通常主镜组件由光学加工性能好的反射镜镜体和提供机械接口的支撑结构所组成, 概括来说, 设计要点为

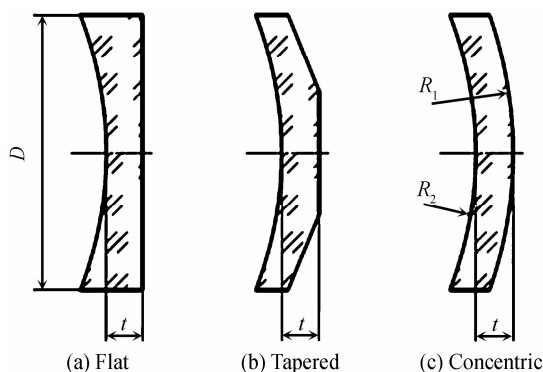
1) 主镜具有高的比刚度, 高的光学稳定性与热稳定性;

2) 支撑结构在具有良好的热匹配性的同时, 具有良好的动、静态结构刚度与强度.

1.1 主镜的材料选择

反射镜由反射面 (反射光学薄膜) 与刚性镜体构成. 镜体的作用是保持反射面的正确空间位置与面形. 因此, 要求反射镜的镜体材料具有好的光学加工性, 高的热稳定性与结构稳定性. 目前国内可用的空间反射镜材料及其特性如表 1.

方案进行了比较, 列于表 2^[11]. 其衡量的标准是镜体的皮尔森比 (Pearson's Ratio). 该值越高, 表征镜体的轻量化效率越高. 可见背部单拱形轻量化方式可以实现最高的轻量化效率. 并且由于镜体后部突出, 其质心远离镜面, 易于实现支撑结构与质心的共面, 以减小光轴水平检测时镜面的像散变形. 本文对 330mm 口径主镜采用了上述背部单拱形的实心反射镜轻量化方案, 通过变薄镜体实现减重^[12].



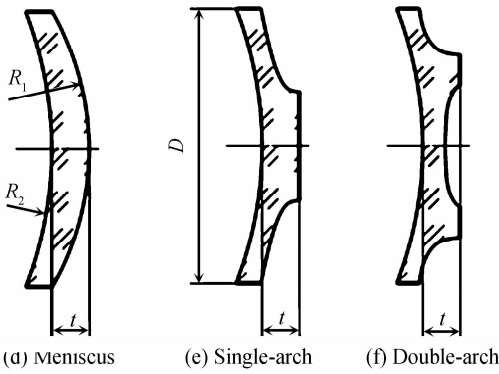


图 1 几种常见的镜体背部轻量化方案

Fig. 1 Examples of mirror light-weighting by contouring the rear surface

表 2 不同背部轻量化形式的特性比较

Table 2 Comparison of different Contoured-Back light-weighting Mirrors

Figure view	Configuration	Relative weight/%	Pearson's ratio
(a)	Flat back	100	4.9
(b)	Tapered back	55	8.9
(c)	Concentric meniscus	92	5.3
(d)	Meniscus ($R_2 < R_1$)	55	8.8
(e)	Single-arch	31	15.8
(f)	Double-arch	47	10.4

镜体设计有中心孔用于透光,在镜体后部芯轴突出部提供柔性支撑的粘接环面.镜体总厚为 55 mm,中心透光孔直径为 96 mm,镜面非球面最佳拟合球半径为 1 280 mm.设计的镜体如图 2.

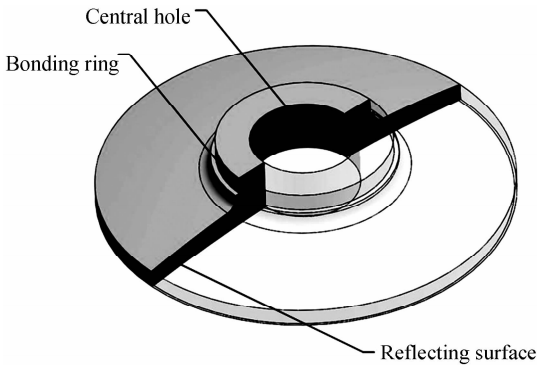


图 2 轻量化镜体半剖示意图

Fig. 2 The light-weighted design of PM

由于镜体减薄会导致刚度降低,自重变形增大,对镜体进行了初步的有限元分析,边界条件为约束其粘接面节点的 3 个自由度,其在 3 个方向自重变形后,拟

表 3 镜体自重变形面形分析结果

Table 3 Surface error of PM due to gravity

Load	Surface figure error	
	RMS/nm	PV/nm
X gravity	4.1	17.5
Y gravity	4.1	17.5
Z gravity	2.5	10.2

合镜面得到的面形误差 RMS 值列于表 3.可知镜体的自重变形 RMS 远小于 15nm,满足使用要求.

1.3 柔性支撑结构设计

反射镜的支撑结构在提供机械接口的同时,需要保证反射镜自重作用下的面形精度、组件的动态结构刚度与热稳定性.支撑结构作为反射镜镜体与外界机械接口的中间介质,一般设计有柔性环节.其通过自身的变形,实现镜体与接口之间应变的柔性过渡,减小反射镜镜体中的应变能,从而减小镜面的面形误差.但柔性环节不能过于薄弱,否则组件的结构刚度会过低,因此需要进行权衡设计.

本文提出一种采用内环与外环均布柔性槽的环形柔性支撑结构,如图 3.支撑件材料为线胀系数与 ZERODUR 一致的 4J32 钢钒合金钢.分别在环形支撑的外侧设计有 3 处均布且宽度为 2 mm 的外环弧形柔性槽,在内侧设计有 3 处均布且宽度为 2 mm 的内环弧形柔性槽.在支撑外圆设计有 3 处均布机械接口,环形支撑的内圆与镜体粘接.令外环弧形柔性槽对圆心的张角为 A ,内环弧形柔性槽对圆心的张角为 B ,需要优化两处结构参数,实现支撑结构的最优性能.

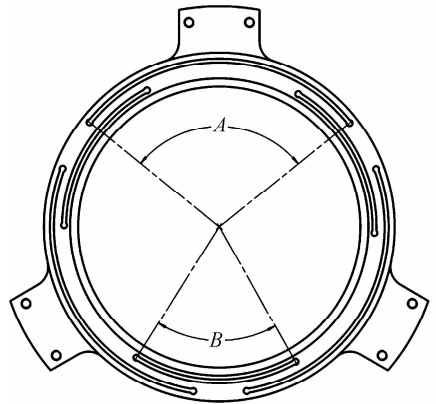


图 3 柔性支撑结构

Fig. 3 The schematic of flexural support structure

主镜组件结构见图 4.主镜在完成外形机械加工后,柔性支撑通过环氧双组份结构胶粘接于主镜后部芯轴外圆.为了消除结构粘接应力,对组件进行了温度

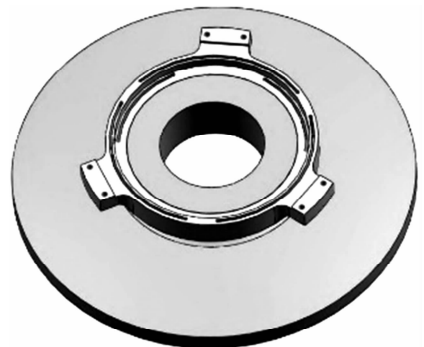


图 4 主镜组件结构方案

Fig. 4 The schematic of PMA structure

循环与随机振动消应力试验. 消除应力后, 再对镜面进行光学抛光.

2 主镜组件有限元分析与优化

为了研究支撑结构尺寸参数对反射镜组件力学与热学性能的影响, 利用 MSC/PATRAN 建立了主镜组件的有限元模型, 进行尺寸优化研究. 全模型由 8 节点 6 面体单元构成, 单元总数为 22518, 如图 5.

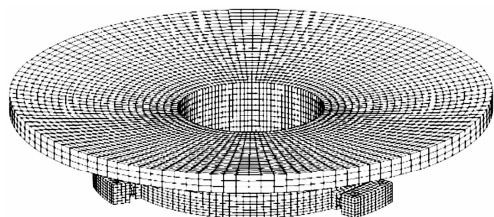


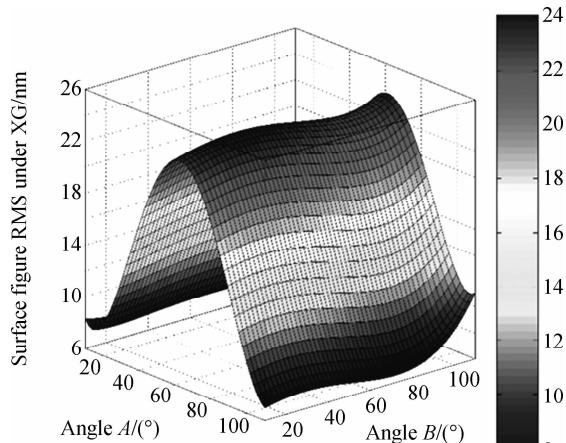
图 5 主镜组件有限元模型

Fig. 5 The finite element model of PMA

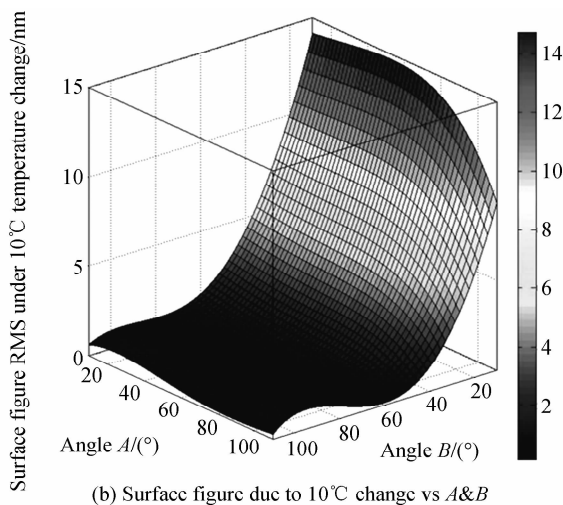
2.1 支撑结构柔性尺寸优化设计

以环形支撑结构内环柔性槽对圆心的张角 A 和外环柔性槽对圆心的张角 B 为二元独立变量, 进行了基于有限元方法的响应面分析. 分别以主镜组件在 X 向(即径向)自重变形下的面形 RMS 值, 10°C 温升下的面形 RMS 值与一阶自然频率为响应量进行分析. 每种分析都在在 A 、 B 变量的可取值域范围内(即 $10^\circ \sim 110^\circ$)进行了 10×10 等间隔数据点(共计 100 个组合)的有限元求解计算. 之后对每种分析的三维计算结果数据, 利用多项式拟合, 得到了三维响应曲面, 见图 6.

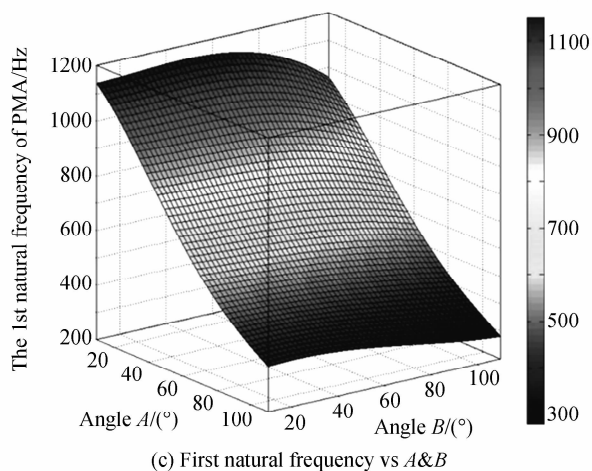
由图 6(a)可知, 需在 A 取值接近 10° 或接近 110° 时, X 向自重变形面形才能满足要求. A 在 60° 附近, 出现了不满足要求的极大值“屋脊”, B 影响不明显; 由图 6(b)可知, A 取值越大, 则温度变形面形越好, B 影响同样不明显, 但在取值范围内全部满足要求; 由图 6(c)可知, 在 A 、 B 可取值范围内, 主镜组件的一阶频率都高于 200Hz , 全部满足要求; 综合上述结论可知, 在图 6(a)中找到 $60^\circ < A < 110^\circ$ 区域内附近的曲面极小值, 即



(a) Surface figure due to X gravity vs A & B



(b) Surface figure due to 10°C change vs A & B



(c) First natural frequency vs A & B

图 6 柔性支撑的优化分析响应面

Fig. 6 Response surface of optimal design process

可认为此处对应的 A 与 B 是最优参数. 据此, 利用绘制图 6(a)的 matlab 二元拟合多项式, 进行二元函数求极值计算, 得到主镜柔性支撑结构最优的参数为: 外圆张角 $A=109^\circ$, 内圆张角 $B=66^\circ$.

2.2 主镜组件的静力学分析

在确定支撑结构的最优柔性参数后, 对主镜组件进行了静力学分析, 考核其在重力与温度载荷下的结构稳定性^[16]. 分别沿 X / Y 向(即径向)与 Z 向(即轴向)施加 1g 自重载荷, 并分别施加 10°C 均匀温度载荷, 边界条件为约束支撑 3 个安装面上的节点. 利用 Sigfit 对变形后的镜面节点数据拟合, 得到变形后的 RMS 与 PV 值^[14], 见表 4. 可见在自重与温度载荷下, 镜面变形 RMS 值远小于 $\lambda/40$ (15nm), 满足设计要求.

表 4 主镜组件静力学分析结果

Table 4 Static analysis results of PMA

Load	RMS/nm	PV/nm
$X\ G$	5.9	31.9
$Y\ G$	5.9	29.6
$Z\ G$	3.0	13.1
$\Delta t 10$	0.5	1.7

2.3 主镜组件的模态分析

利用 Lanczos 法对主镜组件进行了正则模态分析,并将前 3 阶模态分析结果列于表 5.可见主镜组件的一阶自然频率为 341.0 Hz,远高于要求的 150 Hz.

表 5 主镜组件模态分析结果

Table 5 Modal analysis results of PMA

Mode No	Natural frequency/Hz	Mode of vibration
1	341.0	Rotate about X axis
2	341.0	Rotate about Y axis
3	444.4	Piston along Z axis

3 模态试验

为了验证对主镜组件柔性支撑结构优化与分析的准确性与合理性,采用模态测试的方法获取镜体自由模态的一阶自然频率,以便对有限元分析结果进行校核.由于镜体为 ZERODUR 玻璃材料,脆性较大.为了降低试验风险,采用铝制镜体模拟件,在设计时保证质心相对位置和质量与玻璃镜体的一致性,支撑件仍为殷钢材料,尺寸与优化设计结果一致.采用北京东方振动和噪声技术研究所研制的 DASP V10 动态信号采集系统作为模态测试系统.主镜组件置于软质海绵垫上,利用固结有加速度传感器的力锤对其进行敲击以提供激励信号,并在镜面边缘粘贴有敏感方向为竖直方向的加速度传感器以拾取镜体的振动响应信号.图 7 所示为模态测试现场.通过对激励信号与响应信号采取变时基分析方法进行处理,可以得到镜体结构传递函数的幅频特性、相频特性与相干特性曲线,由上至下分别如图 8.

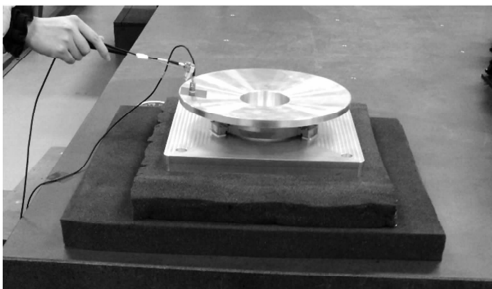


图 7 模态测试现场

Fig. 7 Model test layout of PMA

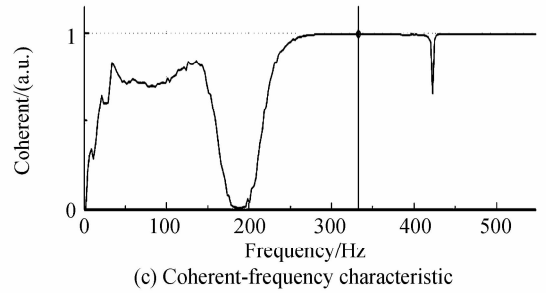
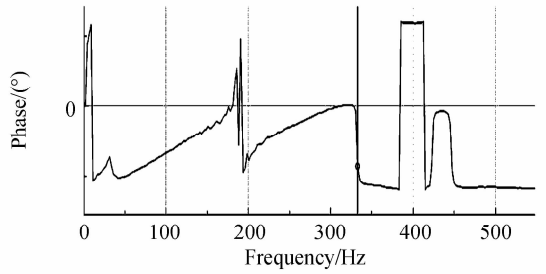
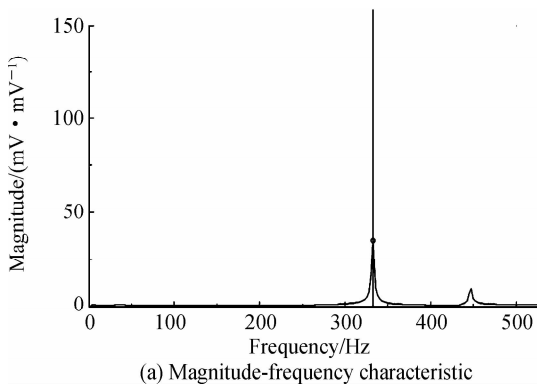


图 8 主镜组件结构传递函数幅频特性、相频特性
Fig. 8 The MF, PF, coherent characteristics of PMA structure transfer function

可知主镜组件自由模态的一阶自然频率为 332.5 Hz,在此频率处相干系数为 1,相干特性良好,模态辨识准确.实验结果与仿真结果的数值对比列于表 6.可知两者间相对误差仅为 2.5%,充分验证了仿真分析结果的准确性,并保证了主镜实际性能可以满足使用要求.

表 6 主镜组件模态分析与试验结果对比

Table 6 Comparison between analysis and test results

Analysis result/Hz	Test result/Hz	Relative error
341.0	332.5	2.5%

4 主镜的光学加工与检测

在经过模态试验验证后,对主镜组件正样进行了镜面的非球面光学加工.加工过程中进行光学检测时光轴沿水平方向,并利用 Offner 零位补偿法进行干涉检验,检验设备为 Zygo GPI XP/D 型静态干涉仪.在加工检测开始,约定一个 0°方向,每次检测都在此方向进行.完成光学加工后,将主镜绕光轴分别旋转了 120°与 240°进行面形检测,以验证支撑结构设计的合理性,检测结果见图 9.

由图 9 可见,主镜在沿 0°、120°与 240°方向进行非球面光学检测,其面形精度值 RMS 均能保持在 $\lambda/40$.说明主镜组件结构能够良好地抵抗镜体径向自重变形对面形精度的影响,实现了地面检测状态下的零重力影响.由于主镜在检测时受到沿着反射镜径向的地面 1 g 重力,在随视频卫星发射入轨后组件将受到反向的 1 g 重力释放作用.这保证了主镜面形在轨工作时与地面检测状态的一致,从而保证了视频相机在轨的成像质量.

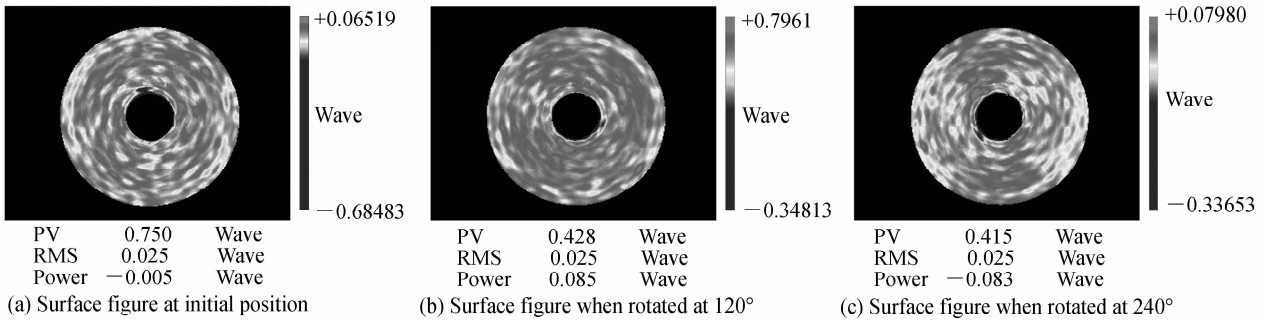


图9 非球面主镜的光学检测结果

Fig. 9 Optical test results of aspherical PM

5 结论

本文根据“吉林一号”视频卫星相机的工程需要,设计了 330 mm 口径的主镜组件.采用基于 ZERODUR 微晶玻璃材料的背部单拱形镜体轻量化方案,并对支撑结构进行了基于二元独立变量的响应面优化方法的设计与有限元仿真.通过模态试验验证了有限元分析的准确性,组件一阶自然频率为 332.5 Hz;通过光学检测试验,验证了地面重力对主镜面形检测的零影响,主镜面形精度始终保持在 $\lambda/40$,从而验证了上述优化设计方法的准确性,为同等尺寸量级的空间反射镜设计提供了一种新的途径.

参考文献

- [1] WEI Lei, JIN Guang, XIE Xiao-guang, *et al.* Optimized design of primary load-bearing structure for earth observation micro-satellite. [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2015, **23**(11): 3183-3191.
魏磊, 金光, 谢晓光, 等. 地对观测微小卫星主承力结构的优化设计与试验[J]. *光学精密工程*, 2015, **23**(11): 3183-3191.
- [2] KIRAN M. SkySat-1: Very high-resolution imagery from a small satellite[C]. SPIE, 2014, **9241**: 924111E.
- [3] KIHM H. Design optimization of a 1-m lightweight mirror for a space telescope[J]. *Optical Engineering*, 2013, **52**(9): 091806.
- [4] LI Zhi-lai, XU Hong, GUAN Ying-jun. Structural design of 1.5 m mirror subassembly for space camera[J]. *Optics and Precision Engineering*, 2015, **23**(6): 1635-1641.
李志来, 徐宏, 关英俊. 1.5 m 口径空间相机主镜组件的结构设计[J]. *光学精密工程*, 2015, **23**(6): 1635-1641.
- [5] HUANG T M, HSU M Y. Design and analysis of isostatic mounts on a spaceborne lightweight primary mirror[C]. SPIE, 2013, **8836**: 836-839.
- [6] YUAN Jian, REN Jian-yue. Improvement and optimization of lightweight structure for SiC reflective mirror [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2015, **44**(8): 0812004.
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.
- [7] ZHU Jun-qing, SHA Wei, CHEN Chang-zheng, *et al.* Position layout of rear three point mounting for space rectangular mirror[J]. *Optics and Precision Engineering*, 2015, **23**(9): 2562-2569.
- [8] ZHANG Li-min, WANG Fu-guo, AN Qi-chang, *et al.* Application of Bipod to supporting structure of minitype reflector[J]. *Optics and Precision Engineering*, 2015, **23**(2): 438-443.
张丽敏, 王富国, 安其昌, 等. Bipod 柔性结构在小型反射镜支撑中的应用[J]. *光学精密工程*, 2015, **23**(2): 438-443.
- [9] SHAO Liang, WU Xiao-xia, CHEN Bao-gang, *et al.* Passive support system of light-weighted SiC primary mirror [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2015, **23**(5): 1380-1386.
邵亮, 吴小霞, 陈宝刚, 等. SiC 轻量化主镜的被动支撑系统[J]. *光学精密工程*, 2015, **23**(5): 1380-1386.
- [10] LI Zong-xuan, CHEN Xue, ZHANG Lei, *et al.* Design of Cartwheel flexural support for a large aperture space mirror [J]. *Acta Optica Sinica*, 2014, **34**(6): 0622003.
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.
- [11] PAUL R. Y. Opto-mechanical systems design [M]. Bellingham: SPIE Press, 2005.
- [12] JURANEK H, KLEER G, DÖLL W. Use of glass ceramic as a structural material for a high precision space telescope[C]. SPIE, 1994, 2210, 407-418.
- [13] TONY H, ANDREW C, GEORGE G, *et al.* Game-changing approaches to affordable advanced lightweight mirrors: extreme Zerodur lightweighting and relief from the classical polishing parameter constraint [C]. SPIE, 2011, 8125, 81250U.
- [14] LI Rong, WANG Sen, SHI Hu-li, *et al.* Thermal analysis on the main reflector in deep-space solar observatory[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2014, **43**(3): 0322002.
李蓉, 王森, 施浒立, 等. 深空太阳天文台磁场望远镜主反射镜热分析[J]. *光子学报*, 2014, **43**(3): 0322002.
- [15] LI Wen-jie, WANG Shao-xin, MU Quan-quan, *et al.* Using the equivalent stress to analyze the effect of temperature change on surface accuracy of the bonded mirror[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2015, **44**(12): 1212001.
李文杰, 王少鑫, 穆全全, 等. 用等效应力法分析温度变化对胶粘反射镜面形的影响[J]. *光子学报*, 2015, **44**(12): 1212001.
- [16] KEITH B. D. Integrated optomechanical analysis [M]. Bellingham: SPIE Press, 2008.