

doi:10.3788/gzxb20164509.0912007

中心支撑 $\phi 610$ mm 圆形主镜的超轻量化设计

包奇红, 沙巍, 陈长征, 任建岳

(1 中国科学院长春光学精密机械与物理研究所, 长春 130033)

(2 中国科学院大学, 北京 100039)

摘 要:为满足轻小卫星相机质量更轻、性能更好的要求,对某离轴三反空间相机 $\phi 610$ mm 口径圆形主镜进行了超轻量化设计。选用背部中心单点支撑方式,采用变筋厚和变筋高的设计形式,结合集成优化方法,设计的主镜质量仅为 6.23 kg,面密度约为 21.3 kg/m^2 。并设计了主镜的支撑结构,仿真分析了组件的静、动力学性能。结果表明:三个方向重力工况下主镜的面形准确度(RMS 值)均优于 6 nm, 4°C 均匀温变载荷工况下主镜的面形准确度优于 1 nm;主镜组件的一阶自然频率为 112 Hz,频响分析的最大应力发生在钛合金柔性连接件的螺栓孔处,最大应力值为 104 MPa,远小于钛合金的屈服极限 870 MPa。主镜轻量化效果显著,主镜组件的静、动力学性能均满足设计要求,本文所述单点支撑形式的最大适用口径为 $\phi 683$ mm,为同类型空间反射镜的超轻量化设计提供了思路和参考。

关键词:超轻量化;中心支撑;变筋厚设计;变筋高设计;集成优化;有限元仿真

中图分类号:TP73; TH703

文献标识码:A

文章编号:1004-4213(2016)09-0912007-7

Ultra-lightweight Design of $\phi 610$ mm Circular Primary Mirror Supported in Centre

BAO Qi-hong^{1,2}, SHA Wei¹, CHEN Chang-zheng¹, REN Jian-yue¹

(1 Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun 130033, China)

(2 University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract: A circular primary mirror of an off-axis three mirror anastigmat space camera with an aperture of $\phi 610$ mm was ultra - lightweight designed to meet the requirement of designing lighter and better satellite cameras. By choosing the back-centre-single point supporting way, using the variable rib thickness and the variable rib height structural style and combining with the integrated optimization design method, the mirror was designed with a weight of only 6.23 kg and the surface density about 21.3 kg/m^2 . The support structure for the mirror was designed and the static and dynamic performances of the mirror subassembly were simulated. The simulation results show that the surface figure error (RMS value) is less than 6nm when the mirror subassembly is under the load condition of gravity in three different directions and is less than 1nm when the temperature variation is within $\pm 4^\circ\text{C}$. The first-order natural frequency of the mirror subassembly is 112 Hz. The results of frequency response analysis present that the maximum stress in the screw hole of the flexible structure is below the yield strength of its material. All performance indexes of the ultra-lightweight mirror designed in this paper meet the requirements of design and the maximum aperture of the mirror which can be supported by single point in centre is $\phi 610$ mm. The design proposes a method and reference to ultra-lightweight design of same type mirrors.

Key words: Ultra-lightweight; Centre support; Variable rib thickness design; Variable rib height design;

基金项目:国家高技术研究发展计划(No. 863-2-5-1-13B)资助

第一作者:包奇红(1992-),男,硕士研究生,主要研究方向为空间相机光机结构设计。Email: qingtian@mail.ustc.edu.cn

导师(通讯作者):任建岳(1952-),男,研究员,博士,主要研究方向为光学遥感器的研制和性能评价。Email: renjy@ciomp.ac.cn

收稿日期:2016-03-21;录用日期:2016-06-01

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

0 引言

随着空间技术的发展,轻小型卫星在众多领域发挥着重要作用.实现轻小卫星的一大关键是所搭载仪器、设备的小型化^[1-2].空间相机作为被动式遥感卫星的有效载荷,其性能的好坏、体积和质量的大小都是影响卫星性能的关键,轻小卫星则对空间相机的质量和性能提出了更严苛的要求.因此设计质量更轻、体积更小和性能更优的空间相机是空间技术发展的必然趋势^[3].

主镜作为空间相机的主要部件,既是构成相机重量的主要部分,也是影响相机成像质量的关键.随着空间相机分辨率的不断提高,主镜的口径越来越大,这不仅使整机质量增加,而且使主镜的自重变形和温度变形加剧,降低了成像质量,进而影响整机性能.因此,大口径主镜的超轻量化设计是轻小卫星相机研究的重点^[4-5].目前国外对大口径反射镜的设计研究有许多成功的例子.日本^[6]ASTRO-F望远镜,SiC主镜口径为 $\phi 710$ mm,采用三角形轻量化孔,镜体重11 kg,背部采用三个Bipod支撑.法国^[7]Pleiades望远镜,主镜材料为微晶玻璃,口径为 $\phi 650$ mm,采用圆形轻量化孔,轻量化率高达85%,镜体侧面采用3个Bipod支撑.南京天文仪器所^[8]用了空间碎片探测望远镜,主镜材料为K4光学玻璃,口径为 $\phi 770$ mm,反射镜的面形峰谷值(Peak-to-Valley value, PV)小于 $\lambda/5$ ($\lambda=632.8$ nm).长春光机所韩光宇等^[9]研究了 $\phi 1\ 000$ mm口径反射镜面形准确度与支撑方式的关系,采用轴向18点浮动支撑和径向3点柔性支撑的组合支撑形式,最终保证主镜面形均方根(Root Mean Square, RMS)值达到 $\lambda/18$.

轻量化设计旨在减轻镜体质量,降低发射成本和支撑结构设计难度的同时,尽量保证光学表面的面形准确度和结构的比刚度^[10].本文对某离轴三反消像散(Three Mirror Anastigmat, TMA)系 $\phi 610$ mm口径的SiC圆形主镜进行了超轻量化设计,设计要求反射镜在1 G重力工况和4℃均匀温升载荷工况下面形变化的PV值小于 $\lambda/10$,RMS值小于 $\lambda/50$,反射镜组件的一阶固有频率不低于100 Hz.本文选用背部中心单点支撑的方式,简化了支撑结构,采用变筋厚和变筋高的设计形式,结合集成优化方法,确定了各结构参量的最佳取值,提高了反射镜的面形准确度,达到了超轻量化设计的目的,并分析了主镜组件的静、动力学性能,结果均满足设计要求.探讨了其他口径反射镜单点支撑的情况,发现对同类型空间反射镜,口径小于 $\phi 683$ mm时,本文提出的单点支撑结构仍能满足设计要求.

1 反射镜超轻量化设计

1.1 反射镜初始结构

反射镜材料的选择主要考虑材料的力学性能和热性能两个方面.与其他常用反射镜材料相比,SiC不仅综合品质高^[11],而且物理、化学性质稳定,能够保证反射镜具有良好的形状和尺寸稳定性,通过研磨、抛光可获得较高的表面质量,是目前制造反射镜的理想材料^[12].在空间领域,背部多点支撑具有较高的面形准确度,是大口径反射镜安装的主要方法.但背部多点支撑结构复杂,体积大,质量大,且因内含挠性或运动部件而降低了整体刚度^[13].相比之下,中心单点支撑结构简单、质量轻、刚度高,而且通过对镜体结构合理的优化设计,仍能获得较高的面形准确度.因此本文选用SiC作为镜体材料,采用背部中心支撑的方式,支撑孔径 $\phi 100$ mm,基于这种支撑方式设计的反射镜初始结构如图1,其中轻量化孔为三角形,轻量化形式为开放式.所用SiC的材料属性见表1,表中CTE表示材料的线膨胀系数(Coefficient of Thermal Expansivity).

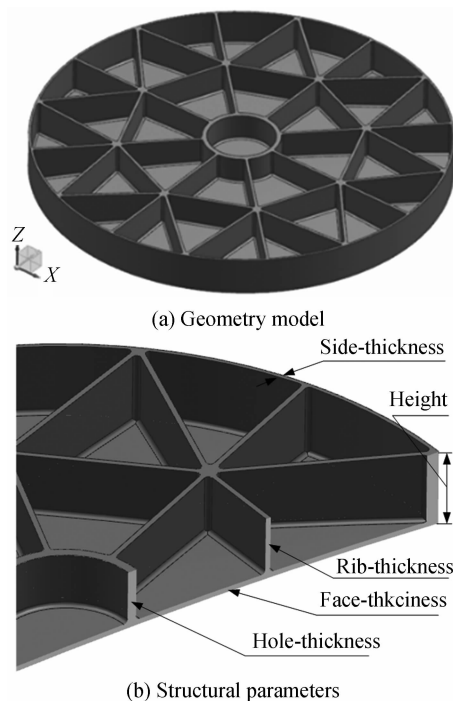


图1 反射镜初始结构

Fig. 1 Original structure of reflective mirror

表1 SiC材料属性

Table 1 Properties of SiC

	Density	Young's modulus	Poisson's ratio	CTE
Unite	g/cm^3	GPa	—	$10^{-6}/K$
SiC	3.2	330	0.3	2.4

1.2 变筋厚设计

变筋厚设计是将反射镜的轻量化筋按照一定的规则进行分组,使不同组的轻量化筋具有不同厚度,通过拓展设计变量、增加设计自由度的方法改善反射镜的面形准确度.由于讨论的反射镜具有中心对称结构,可以按照各组筋与圆心之间的距离,即几何位置,将轻量化筋进行分组,也可以按特定工况下的传力路径对轻量化筋分组.对于背部支撑的大口径 SiC 圆形主镜,在设计和优化时主要考虑 Z 向(光轴方向)重力工况^[14],对于中心单点支撑的反射镜,Z 向重力工况下的传力路径也具有中心对称的特点,因此两种分组方式的结果相同,如图 2.

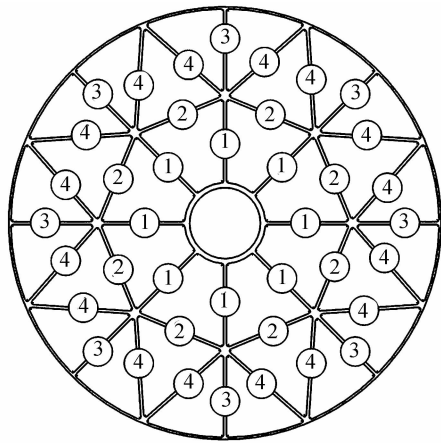


图 2 轻量化筋分组示意图

Fig. 2 Schematic of distribution of lightweight ribs

1.3 变筋高设计

变筋高设计是使不同区域的轻量化筋具有不同的高度.如图 3,利用有限元软件中的 HyperMorph 功能,通过沿筋的高度方向移动筋两端的控制节点,达到变筋高的目的.用三个控制变量 h_1 、 h_2 和 h_3 控制节点的移动量,实现不同区域筋的高度控制,其中 h_1 控制支撑孔处的高度, h_3 控制边缘高度, h_2 控制中间区域的高度,各控制节点之间的筋高线性变化.图中点划线表示各控制变量的初始值,虚线和实线分别表示控制变量的上限和下限.

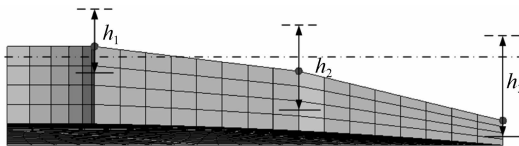


图 3 反射镜背部形状控制变量示意图

Fig. 3 Control variables of the rear surface of the mirror

2 集成优化

2.1 反射镜集成优化

该优化问题的设计变量包括镜面厚 F_t (Face-thickness)、支撑孔壁厚 H_t (Hole-thickness)、外壁厚 S_t (Side-thickness)、轻量化筋厚 $R_{i1} \sim R_{i4}$ (Rib-thickness 1

\sim Rib-thickness 4),如图 1(b)和图 2,以及控制反射镜背部形状的三个变量 h_1 、 h_2 和 h_3 ,如图 3.优化过程中以镜体质量最小为优化目标,以反射镜在 Y 向(裸镜分析时 X 向与 Y 向工况完全相同)和 Z 向重力工况下面形拟合的像质均方根(RMS)值为约束条件,优化问题的数学描述为

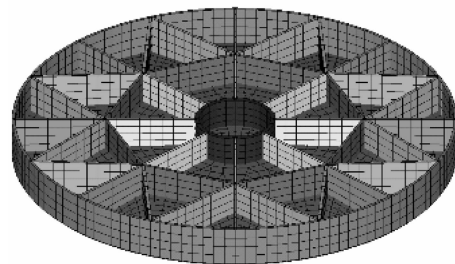
$$\begin{aligned} \min \text{ mass} &= f(F_t, H_t, S_t, R_{i1} \sim R_{i4}, h_1 \sim h_3) \\ \text{s. t. } & \text{RMS}_Y \leq 8, \text{RMS}_Z \leq 10, 4 \leq F_t \leq 6, 4 \leq H_t \leq 8, \\ & 3 \leq S_t \leq 6, 2 \leq R_{i1} \leq 8 \quad (i=1 \sim 4), -10 \leq h_1 \leq 30, \\ & -30 \leq h_2 \leq 10, -50 \leq h_3 \leq 0 \end{aligned}$$

其中 RMS_Y 和 RMS_Z 分别表示反射镜在 Y 向和 Z 向重力工况下的面形 RMS 值,单位为纳米(nm),其余约束条件中的单位为毫米(mm).

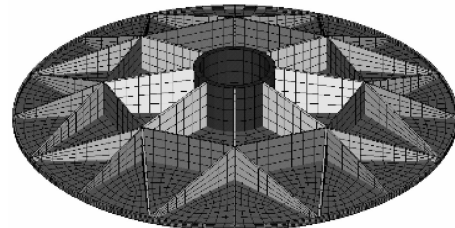
采用多岛遗传算法(Multi-island Genetic Algorithm, MIGA)求解该优化问题.多岛遗传算法模拟自然选择机制,将各变量不同水平的组合编码成基因组,经迁移、交叉和变异后形成新样本,从中评价并选择适应度较高,即对目标函数值更优的样本,不断探索直至获得全局最优解^[15].该算法适应性强、计算效率高,具有比传统遗传算法更优良的全局求解能力,特别适用于此类复杂优化问题的求解.

2.2 优化结果

优化前后的反射镜壳单元模型分别如图 4(a)和(b)所示,各结构变量的初始值、取值范围及最终的优化结果见表 2.可以看到优化结果中各组筋厚的取值不尽相同,而控制背部形状的三个变量的取值更是差异巨大,这说明对大口径中心支撑的反射镜进行变筋厚设计和变筋高设计是十分必要的.优化后的反射镜质量仅为 6.23 kg,面密度约为 21.3 kg/m²,Y 向和 Z



(a) Original finite element model



(b) Optimized finite element model

图 4 优化前后的反射镜有限元模型
Fig. 4 Original and optimized finite element model of the mirror

表 2 设计变量和优化结果(单位:毫米)

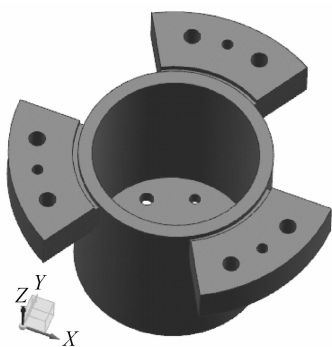
Variable	Domain	Original	Optimized
F_t	[4, 6]	5	4
H_t	[5, 8]	6	8
S_t	[3, 6]	4	3
R_{t1}	[2, 6]	4	4
R_{t2}	[2, 6]	4	2
R_{t3}	[2, 6]	4	2
R_{t4}	[2, 6]	4	3
h_1	[-10, 30]	0	29
h_2	[-30, 10]	0	6
h_3	[-50, 0]	0	-48
mass/kg	--	9.37	6.23
RMS _Y /nm	--	1.685	4.518
RMS _Z /nm	--	33.679	4.427

向自重变形后的镜面面形准确度 RMS 值优于 5 nm, 满足设计要求, 达到了超轻量化设计的目的。

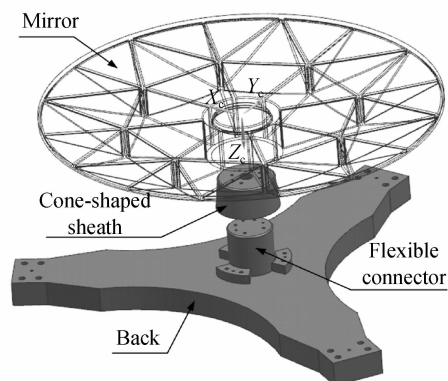
3 反射镜组件分析

3.1 柔性支撑结构

设计的反射镜的柔性支撑结构见图 5。反射镜与锥套胶接, 柔性连接件螺栓锥套与背板, 背板最终与相机整体相连, 从而实现反射镜的固定, 其中锥套材料为殷钢(Invar), 柔性连接件材料为钛合金(TC4), 背板材料为高体份(碳化硅颗粒增强铝基复合材料, SiC/Al), 各材料的性能见表 3。采用背部中心单点支撑的方式可以减小支撑结构装配应力和热应力对反射镜面形的影响, 因而在柔性连接件的设计过程中, 避免了采用复杂的柔性铰链结构, 如图 5(a), 既简化了结构形式, 又提高了连接刚度。同时对背板进行拓扑优化设计, 在保



(a) Flexible connector



(b) Connecting relation

图 5 柔性支撑结构

Fig. 5 Flexible support structure

表 3 结构材料属性

Table 3 Properties of structural materials

Material	Density	Young's modulus	Poisson's ratio	CTE
Unite	g/cm ³	GPa	--	10 ⁻⁶ /K
Invar	8.9	141	0.3	2.4
TC4	4.4	114	0.3	9.1
SiC	3.0	180	0.3	8.0

证结构刚度的同时尽量减小质量, 优化后的背板结构如图 5(b)。

3.2 静力学分析

为了分析反射镜组件的静、动力学性能, 建立反射镜组件的实体单元模型, 对反射镜组件进行静力分析, 包括 X、Y、Z 三个方向的自重变形和 4℃ 均匀温升变形, 面形拟合云图如图 6, 计算结果见表 4。从面形拟合结果可以看出, 主镜组件在 X 向和 Y 向重力工况下反射镜的面形 RMS 值小于 5 nm, Z 向重力工况下的面形 RMS 值小于 6 nm, 均满足设计要求; 背部中心单点支撑的方式不仅简化了柔性支撑结构, 而且大大降低了支撑背板因与反射镜热特性不匹配而对镜面面形产生的影响, 使组件在 4℃ 均匀温升工况下反射镜面形 RMS 值小于 1 nm。

表 4 反射镜面形精度分析结果

Table 4 Analysis results of mirror surface precision

Load case	PV/nm	RMS/nm
Grav_X	23.373	4.352
Grav_Y	23.267	4.348
Grav_Z	24.882	5.728
Temp_4	7.533	0.922

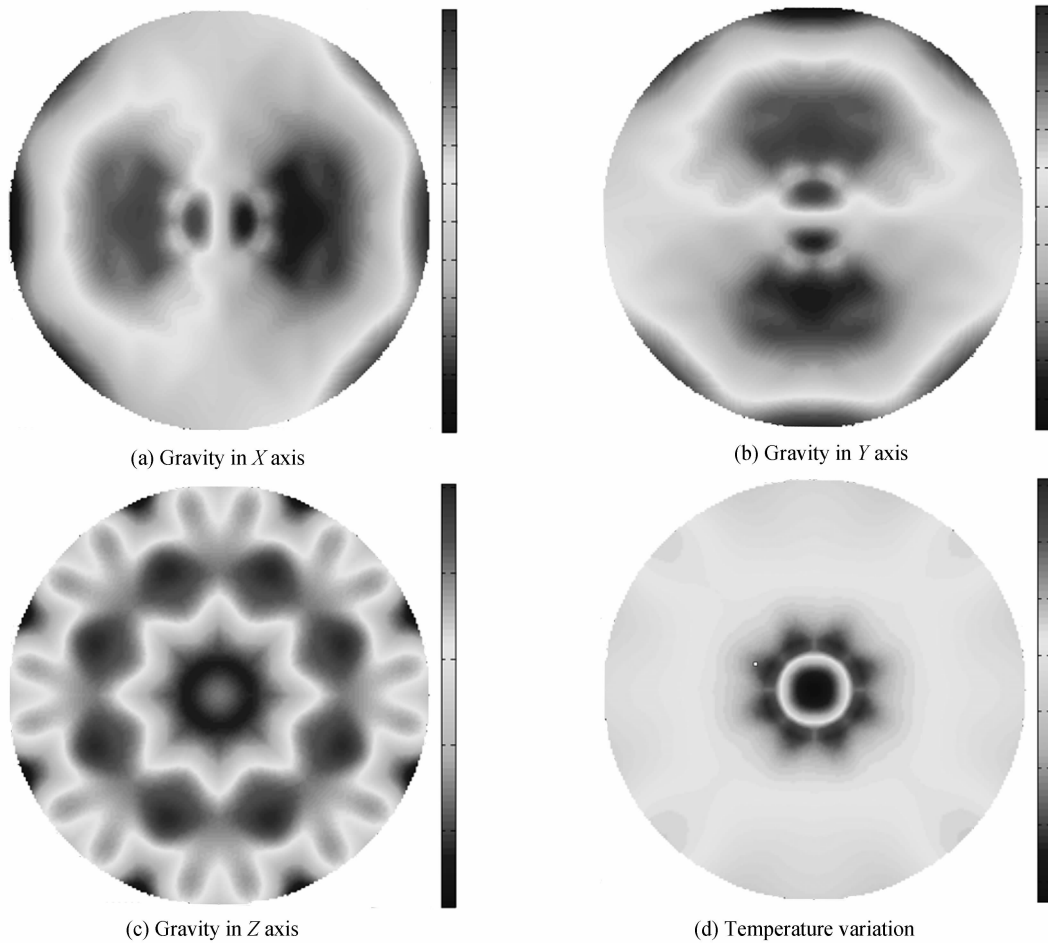


图 6 面形拟合云图

Fig. 6 Fitting nephogram of the mirror

3.3 动态特性分析

3.3.1 模态分析

相机在发射过程中,主镜组件承受着较大的运载动力载荷,为了避免造成永久变形,需要保证主镜组件具有良好的动态刚度,在结构设计阶段模态分析是考

核反射镜组件动态刚度能否满足设计要求的有效方法.图 7 为主镜组件前三阶模态的振型图,表 5 列出了前 3 阶固有频率和振型,可以看到组件的一阶频率为 112 Hz,高于一般载体的一阶固有频率,可以保证主镜组件不发生共振,满足设计要求.

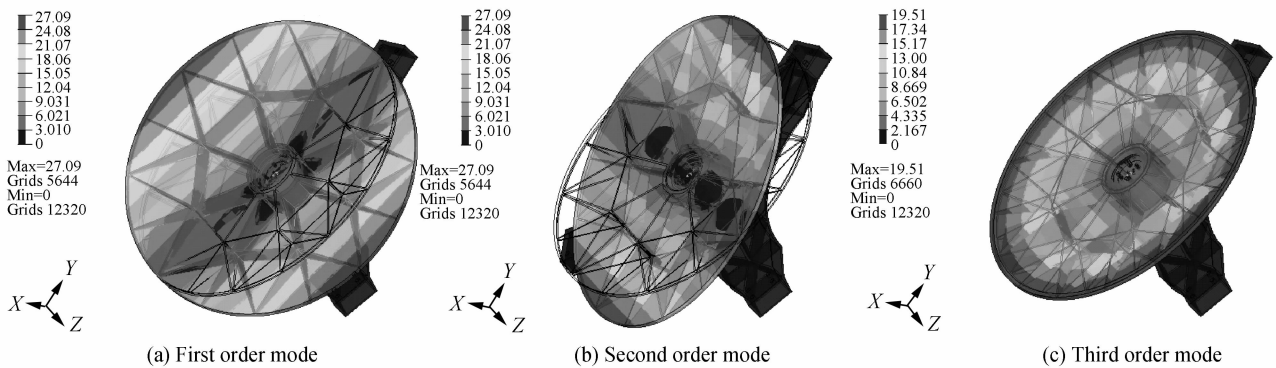


图 7 主镜组件前三阶振型图

Fig. 7 The first three order mode shapes of the subassembly

表 5 主镜组件前 3 阶模态分析结果

Order	Frequency/Hz	Libration form
1	112	The mirror rotates along Y-axis
2	112	The mirror rotates along X-axis
3	193	The mirror rotates along Z-axis

3.3.2 频率响应分析

频率响应分析用于分析结构在简谐激励作用下的响应. 本文分析在加速度激励下结构的响应, 加速度响

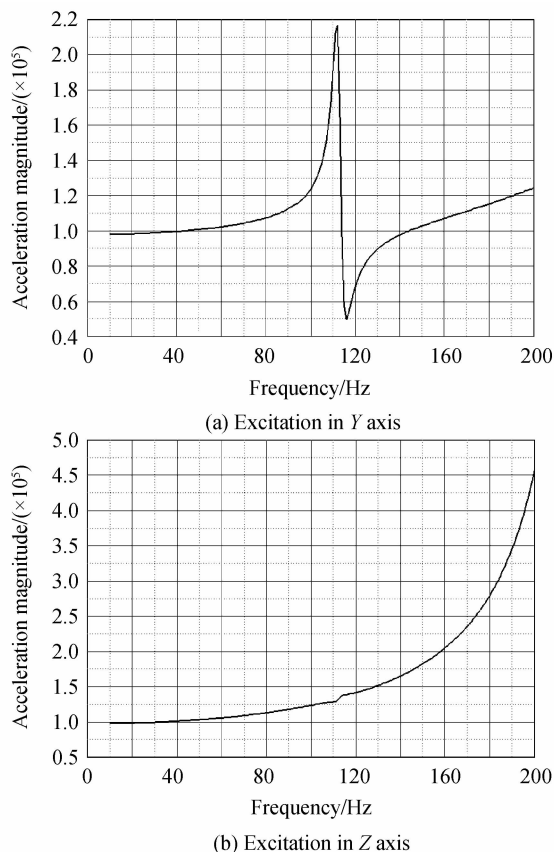


图 8 加速度频率响应曲线

Fig. 8 Frequency response curves of acceleration excitation

表 6 不同口径反射镜的仿真结果

Scaleratio	Aperture of mirror/mm	RMS _X /nm	RMS _Y /nm	RMS _Z /nm	RMS _T /nm	First order frequency/Hz
0.80	488	2.785	2.783	3.666	0.737	140
0.90	549	3.525	3.522	4.639	0.830	125
1.00	610	4.352	4.348	5.728	0.922	112
1.10	671	5.266	5.261	6.930	1.014	102
1.12	683	5.459	5.454	7.185	1.033	100
1.13	689	5.557	5.552	7.314	1.042	99

4 结论

本文针对某 TMA 空间相机大口径圆形主镜, 选用背部中心单点支撑方式, 采用变筋厚设计和变筋高设计, 结合集成优化的方法, 确定了各结构参量的最佳

应曲线可以更好地反应结构的共振特性^[16]. 以背板与机架连接的螺栓孔作为加速度激励的输入点, 沿 Y 向和 Z 向分别输入频率为 10~200 Hz、幅值为 10 g 的加速度激励, 结构阻尼系数取 0.03. 分析结果显示: Y 向激励作用下, 频率 114 Hz 时响应和应力最大, 最大响应点的加速度放大倍数为 2.2, 如图 8(a); Z 向激励作用下, 频响曲线在低频段无峰值, 频率 200 Hz 时最大响应点的加速度放大倍数为 4.5, 如图 8(b); 加速度激励下的最大应力发生在柔性连接件与锥套连接的螺栓孔处, 其值为 104 MPa, 远小于钛合金的屈服应力 870 MPa, 可以保证在动力学载荷条件下主镜组件不发生屈服塑性变形或破坏.

3.4 单点支撑适用口径探讨

在 $\phi 610$ mm 口径反射镜单点支撑满足设计要求的前提下, 进一步讨论其他口径的反射镜单点支撑情况, 以确定单点支撑的适用口径范围. 由于单点支撑的最大适用口径与反射镜材料、轻量化结构、镜体中心厚度以及支撑孔直径等都有一定关系, 因此这里仅讨论与本文所述反射镜具有相同结构特点(径厚比相同、口径与支撑孔径比相同、轻量化形式相同、支撑结构相同)的 SiC 反射镜. 通过对 $\phi 610$ mm 口径的反射镜组件模型按不同比例缩放, 得到不同口径反射镜组件的有限元模型, 按比例缩放保证了不同口径的反射镜具有相同的结构特点. 仿真结果见表 6, 可以看到随着口径的增大, 反射镜的面形准确度和组件的一阶固有频率都在降低, 当口径达到 $\phi 689$ mm 时, 虽然面形准确度仍满足设计要求, 但一阶频率已经降到了 100 Hz 以下, 动态特性不能满足设计要求, 这也充分说明动态特性差是单点支撑的一大缺点. 从表中还可以看到 $\phi 683$ mm 为单点支撑适用口径上限, 而对于口径小于 $\phi 683$ mm 的反射镜, 在结构允许的前提下, 单点支撑均满足设计要求.

取值, 优化设计后的反射镜质量仅为 6.23 kg, 面密度为 21.3 kg/m², 达到了超轻量化设计的目的. 进一步设计了主镜的支撑结构, 并分析了组件的静、动力学性能. 静力分析结果表明, 三向重力工况下反射镜的面形准确度 RMS 值优于 6 nm, 4℃ 均匀温升载荷工况下反

射镜的面形准确度 RMS 值优于 1 nm; 模态分析结果显示, 约束状态下组件的一阶自然频率为 112 Hz, 高于一般载体的一阶固有频率; 频率响应分析的最大应力发生在柔性连接件螺栓孔处, 其值为 104 MPa, 远小于钛合金的屈服应力 870 MPa. 设计的主镜在轻量化方面效果显著, 主镜组件的静、动力学性能均满足设计要求. 最后确定了单点支撑用于与本文所述主镜具有相同结构形式的反射镜的最大适用口径为 $\phi 683$ mm, 为同类型空间反射镜的超轻量化设计提供了思路和参考.

参考文献

- [1] ZHAN Ya-feng, MA Zheng-xin, CAO Zhi-gang. Technology of modern micro satellite and its development direction[J]. *Acta Electronica Sinica*, 2000, 7(4):102-106.
詹亚锋, 马正新, 曹志刚. 现代微小卫星技术及发展趋势[J]. 电子学报, 2000, 7(4):102-106.
- [2] CHEN Yong-he, CHEN Hong-da, FU Yu-tian. Optical design of small-sized camera in visible for micro-satellite[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2015, 44(7):2087-2029.
陈永和, 陈洪达, 傅雨田. 适用于微小卫星平台的小型可见光相机设计[J]. 红外与激光工程, 2015, 44(7):2087-2029.
- [3] ZHANG De-ke, CAO Ying-bin, LIU Rong-jun, et al. Progress and prospect of C/SiC composites used in space optomechanical structures[J]. *Materials Review A*, 2012, 26(7):7-11.
张德珂, 曹英斌, 刘荣军, 等. C/SiC 复合材料空间光机结构的研究进展与展望[J]. 材料导报 A, 2012, 26(7):7-11.
- [4] ZHANG Yuan-yuan, JING Wei, CHENG Yun-tao, et al. Design and finite element analysis of $\phi 510$ mm SiC ultralightweight mirror[J]. *Optics and Precision Engineering*, 2012, 20(8):1718-1724.
张媛媛, 敬畏, 程云涛, 等. $\phi 510$ mm SiC 超轻量化反射镜的设计与有限元分析[J]. 光学精密工程, 2012, 20(8):1718-1724.
- [5] WANG Zhong-shan, HE Xin, FU Liang-liang. Design of large size circular primary mirror of space camera[J]. *Infrared*, 2014, 35(9):15-18.
王忠善, 何欣, 付亮亮. 空间相机用大口径圆形主反射镜设计[J]. 红外, 2014, 35(9):15-18.
- [6] HIDEHIRO K, TAKASHI O, TAKAO N, et al. Cryogenic optical performance of the ASTRO-F SiC telescope [J]. *Applied Optics*, 2005, 44(32):6823-6832.
- [7] GLEYZES M A, LIONEL P, KUBIK P. Pleiades system architecture and main performance[C]. Melbourne: Remote Sensing and Spatial Information Sciences, 2012, XXXIX(B1):537-542.
- [8] 王欣. 空间相机 800mm 口径反射镜与支撑结构优化设计研究[D]. 西安:西安光学精密机械研究所, 2014:9-12.
- [9] HAN Guang-yu, CAO Li-hua, GAO Yun-guo, et al. Supporting and assembling for primary mirrors of 1m aperture telescope[J]. *Optics and Precision Engineering*, 2012, 20(9):1923-1928.
韩光宇, 曹立华, 高云国, 等. 1m 望远镜主反射镜的支撑和装配[J]. 光学精密工程, 2012, 20(9):1923-1928.
- [10] YUAN Jian, SHA Wei, CHEN Chang-zheng, et al. Integrated optimization design of rectangular reflective mirror[J]. *Opto-Electronic Engineering*, 2015, 42(6):85-89.
袁健, 沙巍, 陈长征, 等. 长条形反射镜的集成优化设计[J]. 光电工程, 2015, 42(6):85-89.
- [11] REN Jian-yue, CHEN Chang-zheng, HE Bin, et al. Application of SiC and SiC/Al to TMA optical remote sensor[J]. *Optics and Precision Engineering*, 2008, 16(12):2537-2543.
任建岳, 陈长征, 何斌, 等. SiC 和 SiC/Al 在 TMA 空间遥感器中的应用[J]. 光学精密工程, 2008, 16(12):2537-2543.
- [12] XU Hong, GUAN Ying-jun. Structural design of large aperture SiC mirror subassembly[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2014, 43(S):83-88.
徐宏, 关英俊. 大口径 SiC 轻量化反射镜组件的结构设计[J]. 红外与激光工程, 2014, 43(S):83-88.
- [13] CHEN hong-da, CHEN Yong-he, SHI Ting-ting, et al. Lightweight and mounting design for primary in space camera[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2014, 43(2):535-540.
陈洪达, 陈永和, 史婷婷, 等. 空间反射镜的轻量化及支撑结构设计研究[J]. 红外与激光工程, 2014, 43(2):535-540.
- [14] 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.
- [15] 姜欣, 方立桥, 李明, 等. Isight 参量优化理论与实例详解[M]. 北京:北京航空航天大学出版社, 2012:138-142.
- [16] LIU Pai, HUANG Qiao-lin, YANG Ju-kui. Research on support structure between primary and secondary mirror in large-aperture and long-focal-length space camera[J]. *Spacecraft Recovery & Remote Sensing*, 2014, 35(3):60-67.
刘湃, 黄巧林, 杨居奎. 大口径长焦距相机主次镜支撑结构方案初步研究[J]. 航天返回与遥感, 2014, 35(3):60-67.