

1.8 m 空间长条反射镜柔性支撑技术研究

李宗轩^{1,3*}, 张昌昊^{1,2,3}, 张德福^{1,3}, 马 斌^{1,2,3}, 李云峰^{1,2,3}

(1. 中国科学院长春光学精密机械与物理研究所, 吉林 长春 130033;

2. 中国科学院大学, 北京 100049;

3. 中国科学院天基动态快速光学成像技术重点实验室, 长春 130033)

摘要:1.8 m×0.5 m 口径的长条形主反射镜是某空间离轴三反光学系统的重要光学元件, 其面形精度的好坏是决定光学系统在轨成像质量的关键。为保证主镜组件结构的稳定性、可靠性及反射镜的面形精度, 提出一种适用于大尺寸长条形反射镜的双轴柔性支撑结构。首先, 基于运动学等效原理提出双轴柔性支撑的初始结构, 建立了柔性环节刚度数学模型并研究了其刚度特性。然后, 对柔性支撑的安装位置进行了参数化研究并对柔性支撑的关键尺寸进行了优化设计。最后, 确定了反射镜组件的最终设计方案。仿真与试验结果表明, 反射镜组件一阶固有频率为 104 Hz。X/Y 两个光轴分别对径向施加 1 G 重力时面形精度 RMS 值分别为 4.81 nm、6.09 nm, 优于 $\lambda/50$ ($\lambda=632.8$ nm), 均满足设计要求。组件正样动力学环境试验表明, 反射镜组件的动力学特性良好, 柔性支撑系统稳定可靠, 与仿真结果一致。目前反射镜全口径面形精度已加工至 $\lambda/30$ RMS, 并在此精度下进行了自重 0°/180°的±1 G 面形检测试验, 结果显示其稳定性良好。

关键词:空间光学; 离轴三反光学系统; 长条反射镜; 柔性支撑; 有限元方法; 动力学实验

中图分类号: TP394.1; TH691.9

文献标志码: A

doi: 10.37188/CO.2022-0131

Flexural mounting technology of a 1.8 m space-borne rectangular mirror

LI Zong-xuan^{1,3*}, ZHANG Chang-hao^{1,2,3}, ZHANG De-fu^{1,3}, MA Bin^{1,2,3}, LI Yun-feng^{1,2,3}

(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;

3. Key Laboratory of Space-Based Dynamic Fast Optical Imaging Technology,
Chinese Academy of Sciences, Changchun 130033, China)

* Corresponding author, E-mail: lizongxuan@ciomp.ac.cn

Abstract: The rectangular primary mirror with aperture of 1.8 m×0.5 m is the crucial component of an off-axis Three Mirror Anastigmat (TMA) space optical system. In order to guaranty the structural stability and reliability of the Primary Mirror Assembly (PMA) and the surface figure error (RMS value) of the mirror, a bi-axial flexural support has been proposed for the large-size rectangular mirror. First, based on the principle of kinematic equivalent, the initial structure of the bi-axial flexural support was designed and the analytical

收稿日期: 2022-06-13; 修订日期: 2022-07-26

基金项目: 吉林省科技发展计划项目 (No. 20200201294JC)

Supported by Science and Technology Development Program of Jilin Province (No. 20200201294JC)

formula for stiffness and its characteristic was studied as well. Then the mounting position and the key dimensions of the flexural supports were studied and optimized. Finally, the final optimization design scheme of the PMA was determined. Experimental results indicate that the surface figure error (RMS value) of the PMA under 1 G gravity in X and Y directions are 4.81 nm and 6.09 nm respectively when the optical axis is placed horizontally, which are less than $\lambda/50$ ($\lambda=632.8$ nm). The first-order natural frequency is 104 Hz, which can satisfy the design requirements. The dynamic tests have shown that the dynamic characteristics of the mirror assembly are good, and the flexural support system is stable and reliable. Now the mirror has been polished to have a surface figure better than $\lambda/30$ RMS. Zero Gravity optical testing has been performed under ± 1 G respectively, which shows good coincidence with the analytical results.

Key words: space optics; off-axis TMA optical system; rectangular mirror; flexural support; finite element method; dynamic test

1 引言

随着遥感技术的不断发展,人们对空间光学遥感器的要求也越来越高。离轴三反光学系统无中心遮拦,易于实现高传函、大视场的成像要求,越来越被广泛应用于空间光学领域^[1]。离轴三反系统的反射镜面形精度直接影响成像质量。在材料、尺寸确定的情况下,选择合理的支撑结构即可以消除光学元件及其支撑组件在外界热载荷作用下产生的应力,又能够隔离反射镜在加工测试、装配以及正常在轨运行时承受的振动、冲击,释放反射镜在以上复杂条件下受到的外力,从而保证镜面面形精度。因此,设计合理的柔性支撑结构是反射镜组件结构研制中的核心问题^[2-4]。

目前较常见的大口径反射镜支撑技术主要为点式支撑。点式支撑又可分为中心支撑、周边支撑及背部支撑3种^[5]。周边支撑是将反射镜四周与镜框胶粘到一起,适合较小口径的反射镜;中心支撑采用中心环定位,适合小口径圆形反射镜;背部支撑是在反射镜背部加工盲孔,安装柔性支撑将重力分配给反射镜背部的多个支撑点,适当选择支撑点数量及位置可以有效降低重力面形精度的影响。朱俊青等建立了针对长度为200~1600 mm、长宽比为0.4~1的长条形实体反射镜背部三点支撑集成参数化模型,得到了最优支撑位置^[6]。Huo等提出了一种基于精确约束方法的新型支撑并且详细设计了一个支持1 m主镜的实际案例^[7]。王朋朋等为了提高空间离轴相机反射

镜组件的设计效率,以反射镜及柔节为研究对象提出了一种参数优化设计方法^[8]。

某离轴三反光学系统中的主反射镜通光口径为1.8 m×0.5 m,为离轴高次非球面。反射镜材料为反应烧结碳化硅(RB-SiC)。该长条形反射镜采用背部支撑结构^[9-10]。本文针对上述需求,通过优化设计得到柔性支撑最优结构、尺寸及安装位置等以保证反射镜面型精度。提出一种基于运动学等效原理的适用于大尺寸长条形反射镜的双轴柔性支撑,研究了其刚度特性,并对柔性支撑的安装位置及关键尺寸进行了优化设计。最后进行反射镜组件的动力学试验和光学检测试验,验证了结构设计的正确性。

2 长条反射镜支撑形式

图1为所设计的大尺寸反射镜的支撑结构示意图。该反射镜组件由碳化硅轻量化镜体、殷钢(Invar)锥套、柔性支撑、反射镜基板等结构件组成,柔性支撑用于保证反射镜的面形精度与定

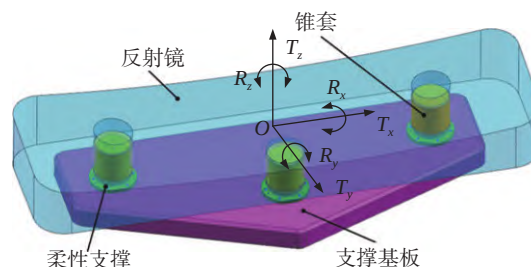


图1 大尺寸长条形反射镜的支撑结构原理示意图

Fig. 1 Schematic diagram of mounting structure of a rectangular mirror with large aperture

位精度。反射镜的定位精度是指反射镜装调后在光学系统中相对其他光学元件的位置精度, 良好的支撑结构应使反射镜满足光学系统的失调要求^[11]。而且支撑结构也不能对反射镜造成过约束。

笛卡尔空间直角坐标系中, 反射镜具有 T_x 、 T_y 、 T_z 3 个平动自由度, R_x 、 R_y 、 R_z 3 个转动自由度。为了保证反射镜的指向和位置精度, 其 6 个自由度需要被完全约束, 基于背部三点式支撑的反射镜常基于三点定位原理^[12-13], 两种基本约束形式及各支撑点的约束自由度与释放自由度情况如图 2 和表 1 所示。

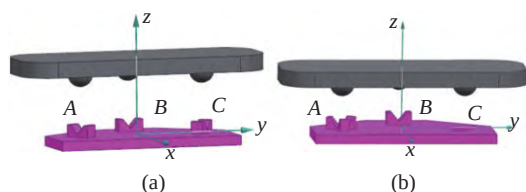


图 2 典型的反射镜约束方式。(a) “2-2-2”约束方式; (b) “3-2-1”约束方式

Fig. 2 Typical constraints for a mirror. (a) 2-2-2 Constraint; (b) 3-2-1 Constraint

表 1 典型反射镜约束方式各支撑点的自由度

Tab. 1 Degree of freedom at each support point for mirror's typical constraints

(a) “2-2-2”约束方式		
支撑点	约束自由度	释放自由度
A	T_x, R_x	T_y, T_z, R_y, R_z
B	T_y, R_y	T_x, T_z, R_x, R_z
C	T_z, R_z	T_x, T_y, R_x, R_y
(b) “3-2-1”约束方式		
支撑点	约束自由度	释放自由度
A	T_x, T_y, T_z	R_x, R_y, R_z
B	T_y, R_z	T_x, T_y, T_z, R_x
C	R_x	T_x, T_y, T_z, R_y, R_z

图 2(a) 是形式为“2-2-2”的约束方式, 即将反射镜的 3 个支撑结构视为 3 个万向球铰, 在反射镜承力基板上与球铰对应的 3 个位置开设 3 个 V 形槽, 每个 V 形槽限制 2 个自由度, 由此, 反射镜的 6 个自由度就被精确定位, 如表 1(a) 所示。图 2(b) 是形式为“3-2-1”的约束方式, 该约束方式为典型的“球铰-V 形槽-平面”约束形式。反

射镜在 3 处球铰支撑下被完全约束于支撑平台上, 其中 A 处凹槽约束了镜体 3 个自由度, B 处约束了 2 个自由度, C 处约束了 1 个自由度, 由此, 反射镜的 6 个自由度被精确定位, 如表 1(b) 所示。

3 反射镜柔性支撑设计

3.1 双轴柔性支撑设计

3.1.1 等效支撑结构

图 3(a) 所示的细长柔性杆与图 2 中的反射镜 3 个万向球铰支撑具有相同的支撑效果, 细长柔性杆的支撑端点有绕其 3 个正交方向上的转动自由度 θ_x 、 θ_y 、 θ_z 和与柔性杆轴线垂直的两个正交方向上的平动自由度 T_x 、 T_y , 约束沿轴的平动自由度 T_z 。为了得到与柔性杆运动特性相同的并具有 5 个自由度的柔性支撑, 将柔性杆等效为一种串联式双轴柔性铰链, 如图 3(b) 所示。根据串联柔性结构自由度相加原理, 在圆柱体的正交方向上开设柔性槽可以释放上端的 3 个转动自由度和 2 个平动自由度。

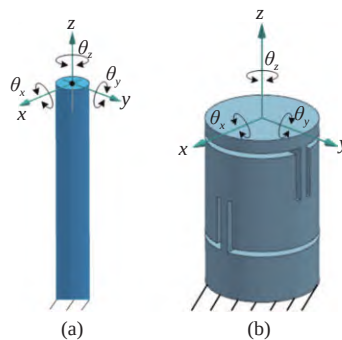


图 3 基于运动学等效原理的双轴柔性铰链

Fig. 3 A bi-axial flexural hinge based on kinematic equivalence principle

3.1.2 双轴柔性支撑

根据上述反射镜支撑与约束原理, 本文中的大尺寸长条反射镜采用“2-2-2”形式的反射镜约束方法。为了得到具体的支撑拓扑形式, 对串联式双轴柔性铰链进行“运动学等效设计”。运动学等效, 即柔性结构具有相同的运动学特性而几何结构与力学性能等不同, 二者之间形成“运动学等效 (Kinematic Equivalence)”^[13]。将图 3(b) 的柔性铰链等效设计为图 4 所示的适合反射镜支撑的双轴柔性支撑, 该柔性支撑为带法兰安装面的空心柱体双轴柔性支撑。其柔性结构的形成过程

如下:先在外包络半径为 r_o 的空心柱体上经过电火花线切割加工出两边对称分布的倒“L”型切口柔性槽,形成两个相对的短直梁,进而产生能绕 x 方向转动的柔性环节;向下偏置一定距离后绕中心轴旋转 90° 再加工出一个两边对称分布的“L”型切口柔性槽,形成另外两个相对的短直梁,产生能绕 y 方向转动的柔性环节。在产生柔性环节后,空心柱体会形成刚性较大的上支撑平台和下法兰安装端面。

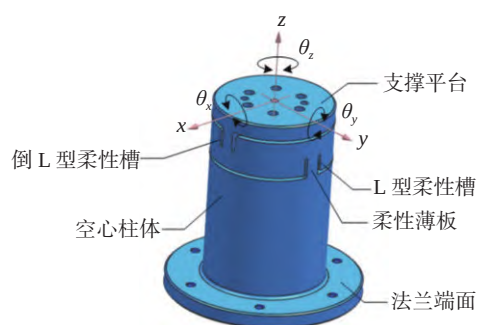


图 4 双轴柔性支撑

Fig. 4 Bi-axial flexural support

该双轴柔性支撑可以对反射镜进行自由度约束,在反射镜背部布置 3 个双轴柔性支撑,以对反射镜形成“2-2-2”三点式等效约束方式。每处支撑都可以对反射镜进行轴向约束,此外,通过调整支撑的安装角度还可以对反射镜的切向自由度进行约束,由此就能够对反射镜进行精确约束和定位。

3.2 双轴柔性支撑的结构分析

为了使柔性支撑的柔性环节可以消除反射镜在外载荷作用下所产生的应力,需要考察柔性支撑在各自由度上是否可以在载荷作用下产生足够的形变,同时保持一定的结构刚度。因此需要对影响柔性支撑刚度的关键尺寸进行参数化优化设计,实现柔性支撑的功能需求。

图 4 所示的柔性支撑,柔性槽中间的结构可以等效为一种典型的短直梁柔性簧片 (Leaf/Blade type flexure) 结构,由双轴柔性支撑的结构特点可知,在载荷的作用下允许柔性短直梁发生形变与小位移的运动。根据固体力学原理,可以推导出柔性短直梁在可变形方向上的结构刚度公式。如图 5 所示,设单个柔性短直梁高为 a ,厚度为 t ,宽度为 w ,由于短直梁的厚度 t 较小,则可忽略双轴柔性铰链圆柱体曲率的影响。 w 的长度可表示为:

$$w = r_o - r_i, \quad (1)$$

其中, r_o 、 r_i 分别为空心柱体的外半径与内半径。

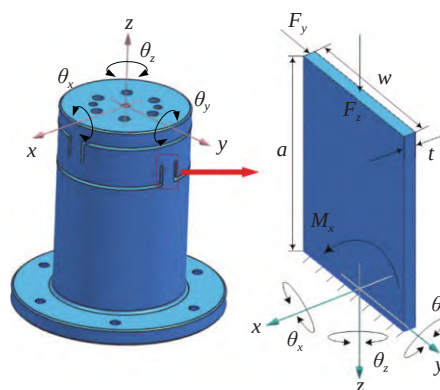


图 5 等效柔性短直梁示意图

Fig. 5 Schematic diagram of equivalent flexural short straight beam

在外界载荷作用下,短直梁沿 x 方向上的刚度公式可表示为^[13]:

$$k_x = \frac{k_z t^2}{(1 - \nu^2)a^2 + 2.4(1 + \nu)t^2} = \frac{Et^3(r_o - r_i)}{(1 - \nu^2)a^3 + 2.4a(1 + \nu)t^2}, \quad (2)$$

短直梁沿 z 方向上的刚度公式可表示为:

$$k_z = \frac{Etw}{a} = \frac{Et(r_o - r_i)}{a}, \quad (3)$$

短直梁沿 y 方向的转动刚度公式可表示为:

$$k_{\theta_y} = \frac{Et^3(r_o - r_i)}{12a(1 - \nu^2)}, \quad (4)$$

短直梁沿 z 方向的转动刚度公式可表示为:

$$k_{\theta_z} = \frac{Et^3(r_o - r_i)}{12} \left[\frac{1}{2(1 + \nu)} \left(4 + 2.52 \frac{t}{r_o - r_i} \right) + \frac{(r_o - r_i)^2}{(1 - \nu^2)a^2 + 2.4(1 + \nu)t^2} \right], \quad (5)$$

式中, E 为柔性叶片材料弹性模量, ν 为材料泊松比。

3.3 柔性环节的刚度特性分析

对柔性铰链进行刚度分析,选取材料为钛合金 (TC4),其密度为 4.44 g/mm^3 ,杨氏弹性模量 E 为 109 GPa ,泊松比为 0.34 。由式 (3)~式 (5) 可知,柔性结构中有 3 个影响刚度的尺寸变量,分别为柔性短直梁的高度 a 、短直梁的厚度 t ,短直梁的宽度 w 。

给定柔性支撑的柔性环节短直梁尺寸初值,依次选择其余结构参数作为参变量,运用控制变量法,在备选的尺寸范围内依次对柔性铰链的结

构参数取不同的值, 使用 MATLAB 编写程序, 研究刚度随结构尺寸参数的变化情况, 进而为双轴柔性铰链的结构设计与尺寸优化提供科学依据, 短直梁的尺寸初值与尺寸范围见表 2。

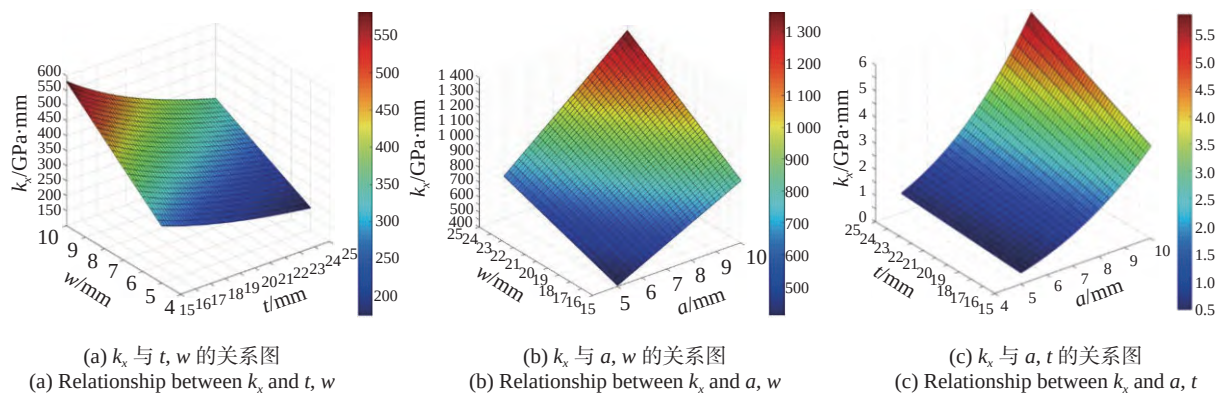
表 2 短直梁的尺寸初值

Tab. 2 Initial size values of the short straight beam

尺寸变量	初值/mm	尺寸范围/mm
a	20	15~25
t	8	5~10
w	12	7~15

3.3.1 短直梁沿 x, z 方向上的刚度分析

由式 (2) 可知, k_x 与短直梁的高度 a 、厚度 t 、宽度 w 不是简单的线性关系, 分别设定 a 为 20 mm、 t 为 8 mm、 w 为 12 mm, 使用 MATLAB 编写程序研究刚度 k_x 随各结构尺寸参数的变化情况, 关系图如图 6(彩图见期刊电子版)所示。结果表明: 要想使柔性支撑在 x 方向上达到一定的柔度, 需要减小短直梁的厚度 t 与宽度 w 的尺寸值。权衡结构刚度与柔性支撑消除反射镜在外载荷作用下所产生的应力的能力之间的平衡关系, 对柔性支撑的关键尺寸展开优化设计。

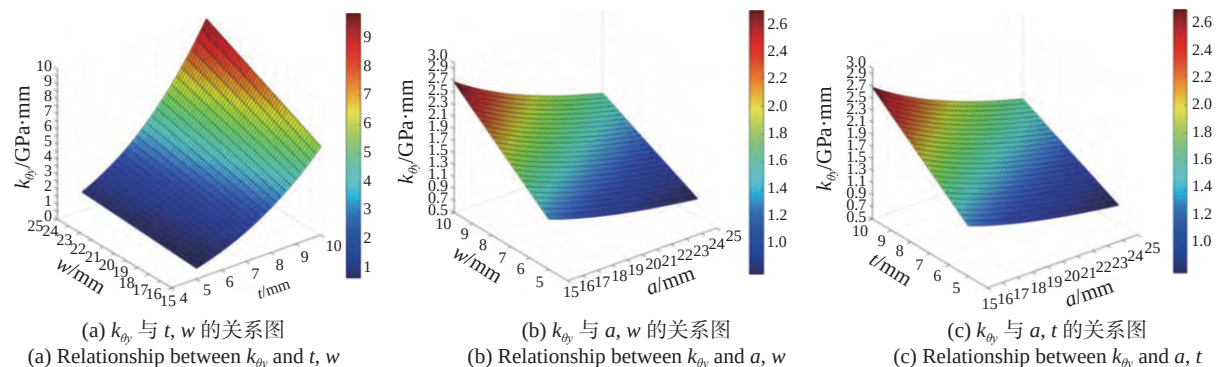
图 6 k_x 与短直梁的高度 a 、厚度 t 、宽度 w 的关系图Fig. 6 Relationship between k_x and height a , thickness t , width w of the short straight beam

同理, 由式 (3) 可知, k_z 与高度 a 成反比, 与短直梁的厚度 t 、宽度 w 的取值成正比。对于单个柔性支撑来说, 增加短直梁高度 a 或者减小短直梁的厚度 t 或宽度 w 均会使柔性支撑在其轴向上的整体刚度下降。由于大尺寸反射镜自身重量较大, 短直梁高度 a 要尽可能小一些, t, w 的取值要尽可能大, 这样会提升柔性支撑的轴向支撑能力, 从而保证反射镜在此方向上不会发生较大的刚体

位移, 同时对于提高反射镜组件的整体静、动态刚度均有利。

3.3.2 短直梁沿 y, z 方向上的转动刚度分析

与 3.3.1 类似, 分别设定 a 为 20 mm、 t 为 8 mm、 w 为 12 mm 进行分析, 得到短直梁沿 y 方向的转动刚度 $k_{\theta y}$ 与短直梁的高度 a 、厚度 t 、宽度 w 的关系图, 如图 7(彩图见期刊电子版)所示。可见, 柔性支撑沿 y 方向的转动刚度值明显

图 7 $k_{\theta y}$ 与 a, t, w 的关系图Fig. 7 Relationship between $k_{\theta y}$ and a, t, w

小于其他自由度上的刚度值,此方向的转动刚度是柔性支撑的薄弱环节。此转动刚度同样随着短直梁的高度 a 的增大而减小,随着厚度 t 、宽度 w 尺寸的增大而增大。

同理可以得到柔性支撑沿 z 方向的转动刚度值明显大于其他自由度上的刚度值。以上分析得到了柔性短直梁的刚度特性与关键尺寸的关系,为第 4 节进行柔性支撑的尺寸参数优化提供设计参考。

4 反射镜柔性支撑设计优化

图 8 为柔性支撑与反射镜重心平面的相对位置关系示意图,重心平面即为反射镜重心所在的平面,定义柔性支撑的柔性回转中心为柔性支撑作用点,重心平面为 ε 的零值面。当柔性支撑回转中心位于零值面左侧时,其值为负值,此时柔性支撑回转中心靠近反射镜后背板;当柔性支撑回转中心位于零值面右侧时,其值为正值,此时柔性支撑回转中心靠近反射镜前面板。

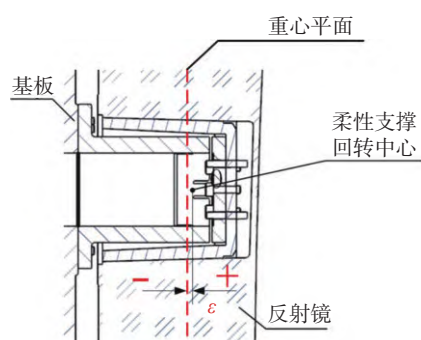


图 8 柔性支撑与重心平面的位置关系
Fig. 8 Relationship between the flexural support and CG plane

建立如图 9 所示的大尺寸长条形反射镜的有限元模型,并定义反射镜长边为优化坐标系的 x 方向,反射镜短边为优化坐标系的 y 方向,对柔性支撑的结构优化设计将在该有限元模型上展开。

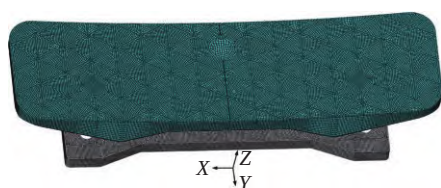


图 9 反射镜组件有限元模型
Fig. 9 Finite element model of the mirror assembly

4.1 轴向安装位置的优化设计

光轴是光学系统中光束的中心线或者光学系统的对称轴。作为离轴反射镜,1.8 m 长条主反射镜的光轴如图 10 所示。

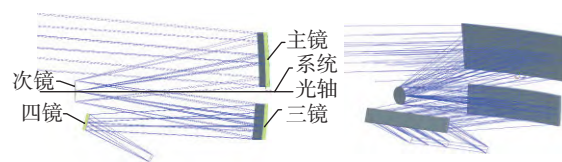


图 10 1.8 m 长条反射镜的光轴
Fig. 10 Optical axis of 1.8 m rectangular mirror

反射镜在光轴水平放置时会受到 x 、 y 向重力的作用,对反射镜组件在自重载荷作用下进行静力学分析,分别改变柔性支撑 1 和柔性支撑 2(3) 的回转中心到反射镜重心所在平面距离 ε_1 、 ε_2 ,可以得到 ε_1 、 ε_2 对面形精度 RMS 值的影响关系曲线,如图 11 所示。在结构振动中,高阶频率对整体的影响不大,因此通常只关注前几阶模态是否会引起系统共振,在这个过程中,着重关注一阶固有频率是否会引起系统共振。一阶振型即为系统在一阶固有频率下的振动形态。图 12 所示为

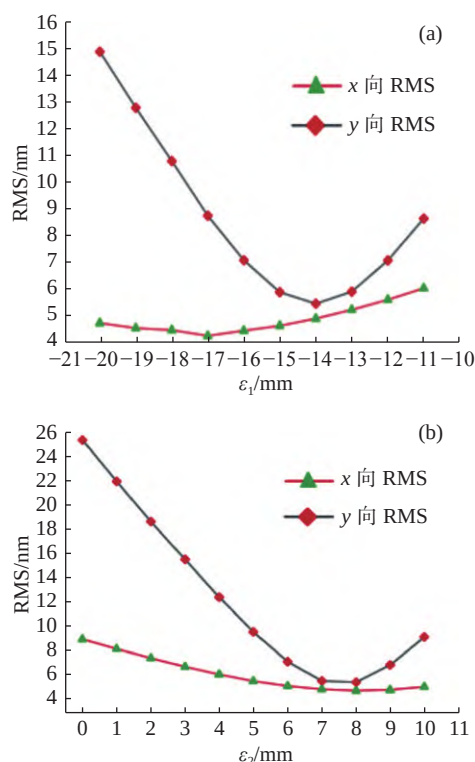


图 11 ε_1 (a)和 ε_2 (b)对 RMS 值的影响

Fig. 11 Effect of ε_1 (a) and ε_2 (b) on the surface figure RMS

ε_1 、 ε_2 对反射镜组件的一阶固有频率的影响关系曲线。

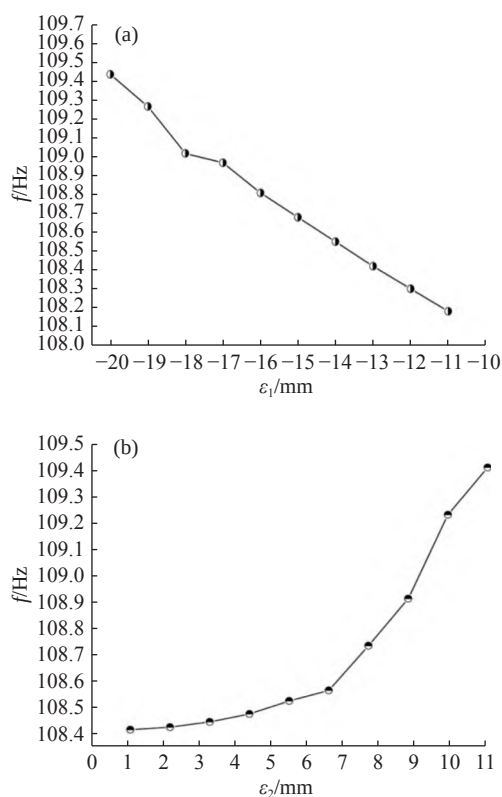


图 12 ε_1 (a)和 ε_2 (b)对反射镜组件一阶固有频率的影响

Fig. 12 Effect of ε_1 (a) and ε_2 (b) on the first-order natural frequency of PMA

保持 ε_2 不变时, 对 ε_1 依次取不同设计值。可见, 反射镜在 x 、 y 向重力作用下的面形精度存在两个较好的位置, 当 $\varepsilon_1 = -14$ mm 时, 反射镜在 x 、 y 向自重作用下的面形精度 RMS 分别为 4.89 nm、5.45 nm; 当 $\varepsilon_1 = -17$ mm 时, 反射镜在 x 、 y 向自重作用下的面形精度 RMS 分别为 4.24 nm、8.45 nm。两种安装位置的一阶固有频率分别为 108.55 Hz、108.97 Hz。经过综合比较分析, 选定柔性支撑 1 的理想支撑点位于靠近反射镜后背板且距重心平面 14 mm 的中性面上。

同理, 保持 ε_1 不变时, 对 ε_2 依次取不同的设计值进行比较分析, 最终选定 $\varepsilon_2 = 8$ mm。此种情况下, 反射镜在 x 、 y 向自重作用下的面形精度 RMS 分别为 4.82 nm、5.51 nm, 一阶固有频率为 108.91 Hz。可认为柔性支撑 2 和柔性支撑 3 的理想支撑点位于靠近反射镜前面板且距重心平面 8 mm 的中性面上。

根据上文的轴向安装位置优化设计结果, 可

以确定反射镜的最佳支撑作用点位置。其中: 柔性支撑 1 的最佳轴向支撑作用点与反射镜后背板之间的距离为 70.6 mm, 柔性支撑 2、3 的最佳轴向支撑作用点与反射镜后背板之间的距离为 92.6 mm。3 个柔性支撑对于反射镜的最佳支撑作用位置不在上述重心平面上, 而是存在一定的偏离。当柔性支撑的实际支撑作用点位于该面上或者在该面附近时, 镜体内部各部分体积的重力矩平衡, 所以反射镜由于自重作用产生的镜体弯曲变形最小, 该作用面称为镜体的中性面。由本章前面的分析可知, 最佳支撑作用位置位于反射镜的中性面上, 所以可以得到以下结论: 对于本文中的大尺寸长条反射镜而言, 其中性面必为一个过重心的曲面, 而非平面。

因此, 为了使反射镜在光轴水平放置方向下加工检测时由自重变形导致的镜面变形最小, 同时兼顾反射镜镜面矢高的变化对柔性支撑空间尺寸的限制, 将柔性支撑 1 设计的“矮”一些, 柔性支撑 2 和柔性支撑 3 设计的“高”一些。这种柔性支撑 1 和柔性支撑 2、3 的非等高、差异化设计, 可以实现反射镜的轴向最优支撑。

4.2 安装角度位置优化设计

双轴柔性铰链为回转对称结构体, 在和其余组件进行装配时, 其与装配基准面之间的安装角度 θ 是结构设计需要考虑的问题。如图 13 所示, 设柔性支撑在安装时, 基板的对称平面 yo_z 为柔性支撑的安装基准面, 以每个柔性支撑上部分柔性平台中心为原点, 建立柔性支撑的相对参考坐标系 $x_i y_i z_i$, 设柔性支撑上部分柔性转动中心和其回转轴所在平面 $y_i o_i z_i$ 与平面 yo_z 之间的夹角为所述的安装角度 $\theta_i (i=1,2,3)$ (定义柔性支撑沿自身转轴逆时针旋转安装为正方向)。为了得到柔性支撑的最佳安装角度, 改变 θ_i 的值, 研究其对大尺寸长条反射镜组件面形精度和结构动

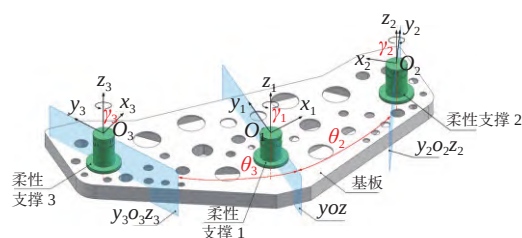


图 13 柔性支撑的安装角度

Fig. 13 Mounting angle of the flexural supports

态刚度的影响。

柔性支撑 1 位于反射镜组件的对称中心处, 由其结构特征可知, 安装角度只能为 $\theta_1=0^\circ$ 或 $\theta_1=90^\circ$ 。同样对反射镜组件在自重载荷作用下进行静力学分析, 可以得到反射镜面形 RMS 值与组件一阶固有频率如表 3 所示, 同时可以得到两种安装角度在 x 、 y 向自重作用下的镜面变形云图, 如图 14(彩图见期刊电子版)所示。

表 3 柔性支撑 1 在不同安装角度下的镜面面形值
Tab. 3 Surface figure error of flexural support No.1 at different mounting angles

角度 θ°	x 向 RMS/nm	y 向 RMS/nm	一阶固有频率/Hz
0	10.1	28.5	108.75
90	3.97	5.34	106.36

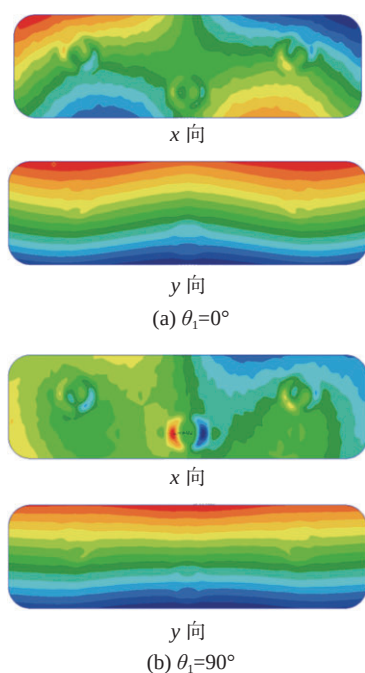


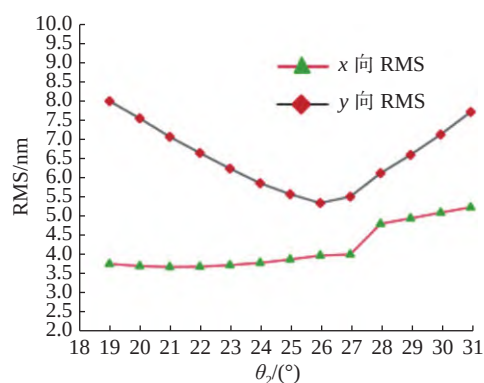
图 14 不同 θ_1 值 1 G 自重作用下的镜面变形 (去除刚体位移)

Fig. 14 Surface deformation at different θ_1 values under 1 G gravity (removed rigid-body displacement)

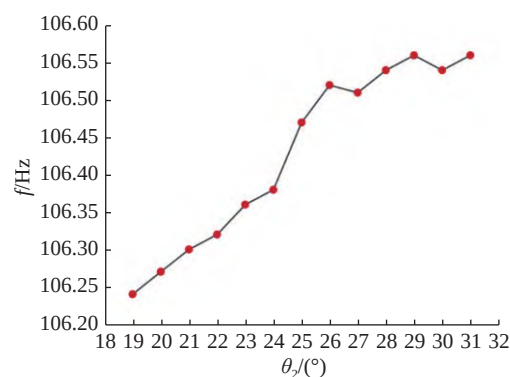
对比分析柔性支撑 1 在两种安装角度下, 镜面面形精度 RMS 值可知, 在安装角度 $\theta_1=90^\circ$ 时, x 向、 y 向自重作用下反射镜组件的面形精度 RMS 值比 0° 时分别减小了 60.7%、81.2%, 虽然组件的一阶固有频率略有降低, 但是综合面形结果来看, 柔性支撑以 $\theta_1=90^\circ$ 安装时可对反射镜形成更好的支撑效果。

当 $\theta_1=90^\circ$, 柔性支撑 2、3 绕自身回转轴 z_i 旋

转安装时, 安装角度 θ_2 、 θ_3 的变化范围分别为 $(-180^\circ, 0]$ 、 $[0, 180^\circ)$, 由于两支撑关于 yo 平面对称安装, 以下只讨论柔性支撑 2 的安装角度优化过程。为了提高计算效率, 首先利用大步长寻优方法在安装角度范围内对 θ_2 值进行分析, 确定安装角度的最优区间后, 在此区间内, 改变 θ_2 的参数, 可以得到光轴水平放置 1G 自重作用下的柔性支撑 2 安装角度 θ_2 对镜面面形精度的影响曲线以及反射镜组件一阶固有频率的影响曲线, 结果见图 15。



(a) θ_2 对 RMS 值的影响
(a) Effect of θ_2 values on the RMS



(b) θ_2 对组件一阶固有频率的影响
(b) Effect of θ_2 values on the first-order natural frequency

图 15 θ_2 对 RMS 和一阶固有频率的影响

Fig. 15 Effect of different θ_2 values on the RMS and first-order natural frequency

分析镜面面形结果和反射镜组件一阶固有模态信息, 权衡反射镜镜面变形与结构刚度在光学系统成像中的重要性, 确定 $\theta_2=26.0^\circ$, $\theta_3=26.0^\circ$ 。此情况下, 在 y 向自重作用下的镜面面形值最小, $RMS=5.51$ nm, x 向自重作用下的镜面面形 $RMS=3.97$ nm, 为最优值。柔性支撑沿轴向(光轴方向)的精确安装位置和柔性支撑的精确安装角度可以使反射镜进行精确定位, 补偿由重力载荷引起的

镜面面形精度退化。此外, 柔性支撑的非柔性方向上的平动刚度、弯曲刚度、扭转刚度很大, 因此合适的安装角度也可以弥补柔性支撑柔性环节刚性不足的缺点, 使组件的整体静动态刚度有所提升, 这对于保持反射镜在各种工况下的镜面变形有积极的贡献。

4.3 柔性支撑的尺寸参数优化设计

在确定柔性支撑的轴向安装位置和安装角度之后, 为了进一步提高和改善反射镜的镜面面形精度和结构可靠性, 得到对反射镜形成最佳支撑效果的柔性支撑, 需要对柔性支撑的关键尺寸进行优化设计。

在柔性支撑关键尺寸的优化设计中, 主要考察柔性环节尺寸参数对反射镜组件横向自重变形

时面形精度的影响, 并研究对反射镜组件一阶固有频率的影响。柔性短直梁的宽度 w 由柔性支撑的外包络半径 r_o 和内径 r_i 共同决定, 但由于柔性支撑的外包络尺寸受到殷钢锥套的限制, 取 $r_o=39$ mm。因此, w 的取值仅由柔性支撑内径 r_i 决定。

依次选择柔性支撑的关键结构参数作为参变量, 运用控制变量法, 分析改变柔性支撑的关键结构参数对镜面面形精度和一阶固有频率的影响。为保持两个关键尺寸为设计初值, 改变另一个关键尺寸参数研究其对反射镜组件面形精度的影响, 如图 16 所示。图 17 为反射镜组件一阶固有频率随柔性支撑关键尺寸参数的变化曲线图。

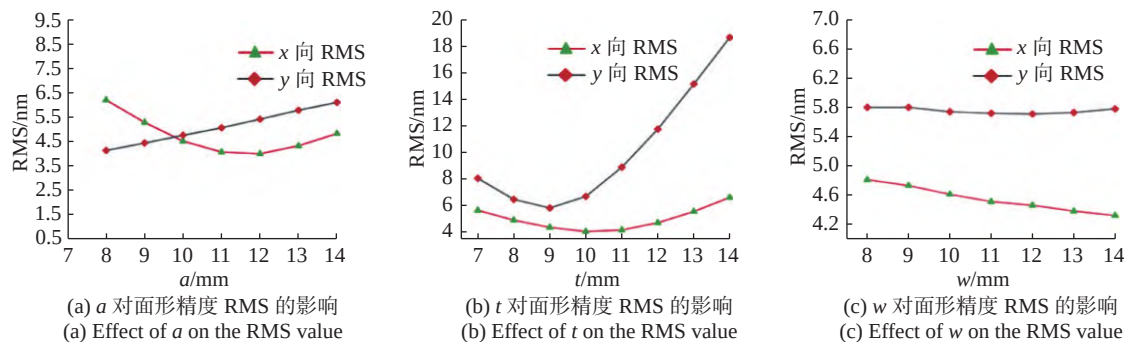


图 16 柔性支撑的不同尺寸对面形精度的影响

Fig. 16 Effect of different sizes of flexural support on the RMS value

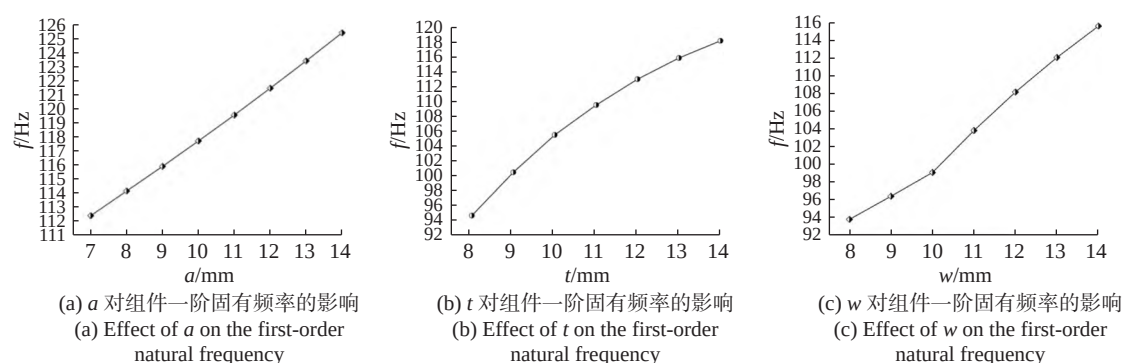


图 17 柔性支撑不同尺寸对一阶固有频率的影响

Fig. 17 Effect of different sizes of flexural supports on the first-order natural frequency

分析柔性支撑关键尺寸参数对反射镜面形精度和组件一阶固有频率的影响, 结合对柔性支撑刚度的分析, 考虑到反射镜支撑孔的结构空间限制, 最终确定的柔性支撑关键尺寸为 $a=14$ mm, $t=9$ mm, $w=14$ mm。

在得到反射镜柔性支撑的最佳位置和柔性支撑的关键尺寸后, 对柔性支撑的结构尺寸进行详细设计, 如图 18 所示。其中 $\Phi=117$ mm, $r_o=r_i=41$ mm, $w=18$ mm, $t=14$ mm, $h=110$ mm, $c=3$ mm, $a=18$ mm, $L=146$ mm, $b_1=15$ mm, $b_2=14$ mm。

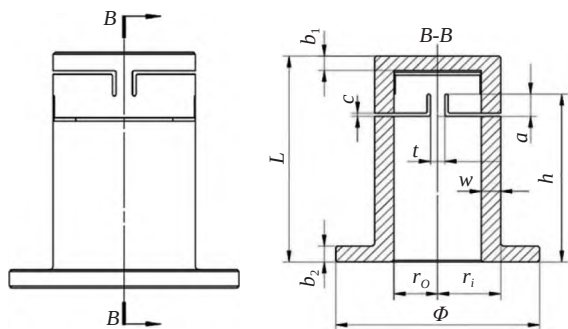


图18 柔性支撑结构示意图

Fig. 18 Schematic diagram of the flexural supports' structure

5 反射镜组件力学分析

根据反射镜柔性支撑的详细设计尺寸进行重新建模,形成组件装配体后,建立有限元力学分析模型。

5.1 自重载荷分析

反射镜在光轴水平放置时受到 x 、 y 方向的重力影响。对反射镜组件分别施加 x 向和 y 向的 1 G 重力载荷,可以得到反射镜在自重载荷作用下的镜面变形结果,去除镜面刚体位移后利用 sigfit 软件拟合获取的镜面面形结果如图 19(彩图见期刊电子版)所示。

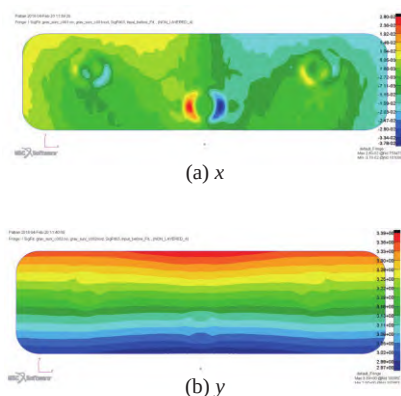


图19 镜面在 x 、 y 向自重作用下的变形(去除刚体位移)
Fig. 19 Surface deformation under 1 G gravity in x and y directions (rigid-body displacement removed)

sigfit 光机集成软件分析结果表明,反射镜在 x 、 y 向自重载荷作用下的镜面面形精度 PV 值分别为 44.8 nm 、 41.2 nm , RMS 值分别为 4.81 nm 、 6.09 nm ,满足反射镜组件面形精度的设计要求。

5.2 模态分析

利用 MSC/NASTRAN 软件对反射镜组件进行正则模态分析,可获得固有频率和振型信息,反射镜组件前 3 阶固有频率分别为 106.75 、 114.53 、 150.9 Hz ,满足设计要求,同时也远大于发射入轨时空相机整机一阶自然频率大于 60 Hz 的要求。前三阶模态振型如图 20(彩图见期刊电子版)所示。其中,1 阶模态的振型表现为沿 x 方向的转动,2 阶模态的振型表现为沿 z 方向的转动,3 阶模态的振型表现为沿 y 方向的移动。

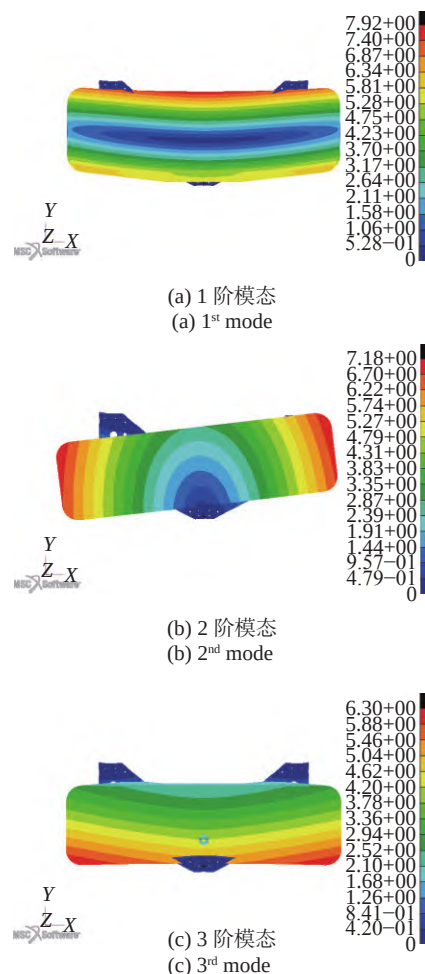


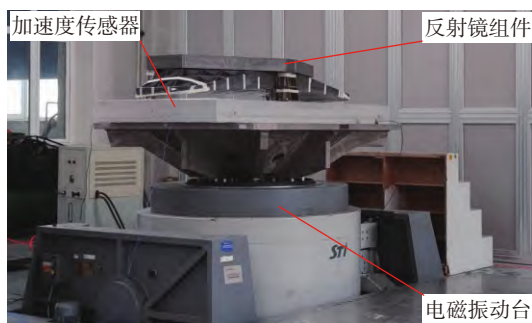
图20 主镜组件前三阶模态振型
Fig. 20 The first three modes of PMA

6 反射镜组件试验

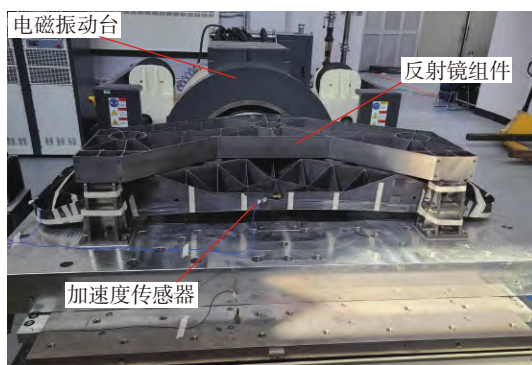
6.1 动力学试验

为了验证组件设计的科学性与合理性,并分析仿真模型的可靠性,对反射镜组件进行动力学环境试验,进而获取其一阶固有频率,根据相机组

件级试验条件, 制定了该力学样机组件的环境试验项目、试验流程与试验条件。对组件进行“0.2 g 扫频—正弦振动—0.2 g 扫频”试验, x 、 y 、 z 3 个方向均重复上述流程, 试验时反射镜结构振动响应数据分别由粘接于反射镜上的 1 号与粘接于反射镜基板的 2 号三向加速度传感器采集获得。图 21 所示为动力学试验现场。本次试验在中国科学院长春光学精密机械与物理研究所环境试验站开展, 所用设备为丹麦 BK 公司的 LMS-V964 型 9 吨级电磁振动台。



(a) Z 向
(a) Z direction



(b) Y 向
(b) Y direction

图 21 动力学试验现场图

Fig. 21 Dynamic test scene site map

由图 22 组件 x 方向扫频响应曲线可知, 反射镜组件的一阶自然频率试验值为 106.3 Hz, x 方向上组件的仿真分析固有频率值为 106.75 Hz, 二者相差 0.4%, 充分验证了有限元分析的准确性。且在 100 Hz 内没有谐振峰。

图 23 为组件 y 方向扫频响应曲线, 反射镜组件的主谐振峰频率为 151.55 Hz, 对应仿真分析固有频率值为 150.9 Hz, 二者相对误差仅 0.4%。

图 24 为 z 方向(光轴方向)上的正弦扫频试验结果, 该方向一阶频率为 104 Hz, 与仿真结果 106.75 Hz 相差 2.75 Hz, 相对误差 2.6%。

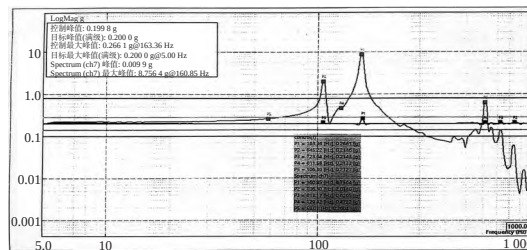


图 22 x 方向扫频试验结果

Fig. 22 Swept frequency test results in x direction

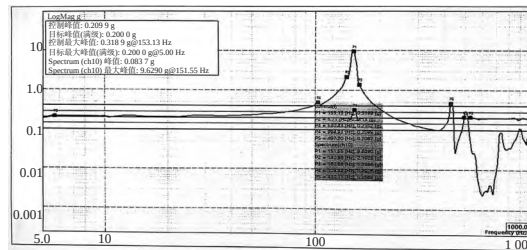


图 23 y 方向正弦扫频试验

Fig. 23 Sweep sine vibration result in y direction

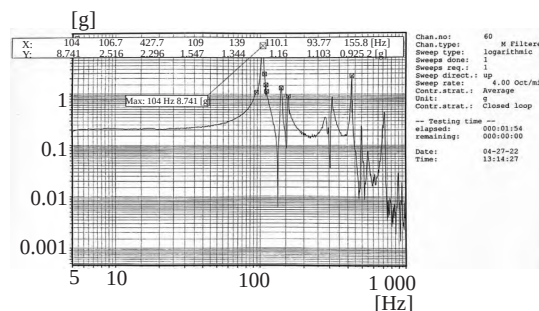


图 24 z 方向随机振动试验

Fig. 24 Random vibration test in z direction

组件在 3 个方向的正弦扫频试验结果表明, 有限元仿真分析准确度极高, 最大相对误差仅为 2.6%。一阶频率大于 100 Hz 且在正弦振动时无谐振放大。

6.2 光学检测试验

为了验证柔性环节轴向位置对反射镜在径向重力作用下面形精度的影响, 对高面形精度的反射镜进行重力变化的检测试验。由于地面试验始终在地球重力场内进行, 所有试验件受到 1 G 竖直方向的重力作用^[14]。因此重力场相对于主镜方向的变化就可以转化为主镜在重力场中自身方位的变化。在光轴水平检测状态下, 通过主镜绕自身光轴旋转一定角度, 便可实现上述变化。

反射镜目前经过光学加工面形精度 RMS 值已至 $\lambda/30$ ($\lambda=632.8$ nm)。在此精度下, 各视场实

际通光子口径面形值已优于 $1/60$ 波长 RMS。绕水平光轴旋转 180° , 在此期间重力场方向不变。则试验镜的受力状态变化相当于在 180° 方向上受到了竖直向上的 2 倍重力作用。对受力状态变化前后的面形进行光学检测, 可以反映主镜在受到径向重力作用下的面形精度变化。

1.8 m 主镜的非球面检测光路如图 25 所示。该检测方式为基于 CGH 的非球面零位 (Null lens) 补偿干涉检验法。根据非球面反射镜的参数设计并制造了检测光路的 CGH。干涉仪所发射出的氦氖 (He-Ne) 激光平面波经过 CGH, 转化为与待检反射镜非球面相匹配的非球面波前, 被检测非球面反射后又回到干涉仪内部, 与分光产生的参考波前形成干涉并产生条纹。通过对干涉仪内焦面上条纹的图像分析。

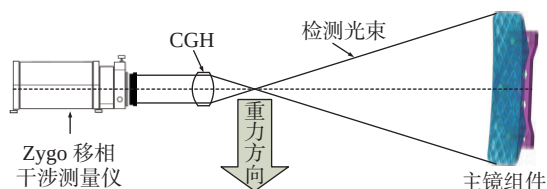


图 25 反射镜非球面干涉检验原理图

Fig. 25 Schematic diagram of mirror aspheric interferometry optical testing layout

图 26 为 1.8 m 主镜在加工方向 (定义为 0° 方

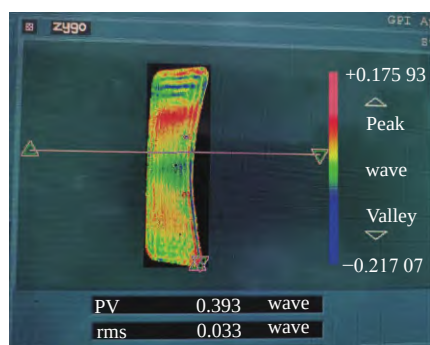


图 26 反射镜 0° 方向的面形检测结果

Fig. 26 The surface figure of the mirror tested in 0° direction

参考文献:

- [1] JI H R, ZHU ZH B, TAN H, *et al.*. Design of a high-throughput telescope based on scanning an off-axis three-mirror anastigmat system[J]. *Applied Optics*, 2021, 60(10): 2817-2823.
- [2] 李叶文, 李宗轩, 刘瑞婧, 等. 空间光学遥感器长条形反射镜集成优化设计[J]. *科学技术与工程*, 2019, 19(35): 375-381.
- LI Y W, LI Z X, LIU R J, *et al.*. Integrated optimization design of rectangular mirror for space optical remote sensor[J]. *Science Technology and Engineering*, 2019, 19(35): 375-381. (in Chinese)

向)进行检测时得到的 RMS 值为 $\lambda/30$ 面形结果; 图 27 为主镜相对于 0° 方向绕光轴旋转 180° 之后得到的检测结果。通过对比可以发现: 180° 方向检测结果 RMS 值仍保持为 0.033λ , 验证了 1.8 m 长条形反射镜柔性支撑优化仿真研究结果。

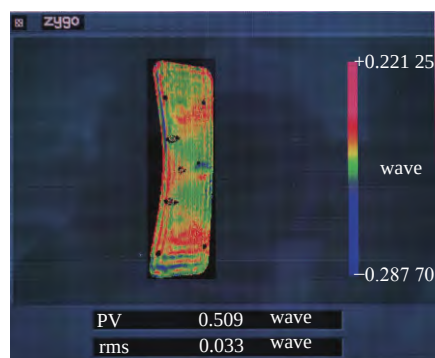


图 27 反射镜 180° 方向的面形检测结果

Fig. 27 The surface figure of the mirror tested in 180° direction

7 结 论

本文围绕大口径长条主反射镜柔性支撑展开研究。分析了反射镜的空间自由度与支撑原理, 提出了既不产生过约束又不对反射镜产生欠约束的反射镜支撑方案。基于运动学等效原理设计了一种适用于支撑大尺寸长条形反射镜的双轴柔性支撑结构。对柔性支撑的柔性环节进行了数学物理建模, 并据此对柔性支撑安装位置及关键尺寸进行优化设计。对反射镜及其柔性支撑结构进行了重力场变化下的面形检测试验, 结果表明: 光轴水平放置方向 ± 1 G 自重作用下 1.8 m 主镜面形 RMS 值均为 0.033λ , 小于 $\lambda/50$ ($\lambda=632.8$ nm)。对反射镜组件进行了模态分析与动力学环境试验, 结果表明组件的一阶固有频率为 104 Hz, 优于设计要求, 仿真分析结果准确可靠。

- [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. (in Chinese)
- [4] 曲慧东, 魏加立, 董得义, 等. 长条形空间反射镜组件轻量化结构设计[J]. 红外与激光工程, 2021, 50(6): 20200404.
QU H D, WEI J L, DONG D Y, *et al.*. Lightweight structural design of rectangular space mirror assembly[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2021, 50(6): 20200404. (in Chinese)
- [5] KIHM H, YANG H S. Design optimization of a 1-m lightweight mirror for a space telescope[J]. *Optical Engineering*, 2013, 52(9): 091806.
- [6] 朱俊青, 沙巍, 陈长征, 等. 空间长条形反射镜背部三支撑点的设置[J]. 光学精密工程, 2015, 23(9): 2562-2569.
ZHU J Q, SHA W, CHEN CH ZH, *et al.*. Position layout of rear three point mounting for space rectangular mirror[J]. *Optics and Precision Engineering*, 2015, 23(9): 2562-2569. (in Chinese)
- [7] HUO T L, YU J J, ZHAO H ZH. Design of a kinematic flexure mount for precision instruments based on stiffness characteristics of flexural pivot[J]. *Mechanism and Machine Theory*, 2020, 150: 103868.
- [8] 王朋朋, 辛宏伟, 朱俊青, 等. 长条反射镜及柔节的参数优化设计[J]. 红外与激光工程, 2021, 50(8): 20200493.
WANG P P, XIN H W, ZHU J Q, *et al.*. Parametric optimization design of rectangular reflective mirror and flexible component[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2021, 50(8): 20200493. (in Chinese)
- [9] 刘福贺, 程志峰, 石磊, 等. 长条形反射镜支撑结构设计与分析[J]. 红外与激光工程, 2015, 44(5): 1512-1517.
LIU F H, CHENG ZH F, SHI L, *et al.*. Design and analysis of supporting structure for rectangular mirror[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2015, 44(5): 1512-1517. (in Chinese)
- [10] 杨秋实, 张继友, 于建海, 等. 大口径空间反射镜支撑变形误差分析方法研究[J]. 航天返回与遥感, 2020, 41(3): 60-70.
YANG Q SH, ZHANG J Y, YU J H, *et al.*. Research on error analysis of support deformation for large aperture space mirrors[J]. *Spacecraft Recovery & Remote Sensing*, 2020, 41(3): 60-70. (in Chinese)
- [11] 刘小涵, 李双成, 李美莹, 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): 20210025.
LIU X H, LI SH CH, LI M X, *et al.*. Supporting structure design for primary and tertiary mirror of off-axis TMA system[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2021, 50(8): 20210025. (in Chinese)
- [12] KRUIS J R C G. *Design, analysis, testing and applications of two-body and three-body kinematic mounts*[D]. Lausanne: École Polytechnique Fédérale de Lausanne, 2016.
- [13] HOWELL L L, MAGLEBY S P, OLSEN B M. 柔顺机构设计理论与实例[M]. 陈贵敏, 于靖军, 马洪波, 等译. 北京: 高等教育出版社, 2015.
HOWELL L L, MAGLEBY S P, OLSEN B M. *Handbook of Compliant Mechanisms*[M]. CHEN G M, YU J J, MA H B, *et al.*, trans. Beijing: Higher Education Press, 2015. (in Chinese)
- [14] LI Z X, CHEN X, WANG SH J, *et al.*. Optimal design of a $\Phi 760$ mm lightweight SiC mirror and the flexural mount for a space telescope[J]. *Review of Scientific Instruments*, 2017, 88(12): 125107.

作者简介:



李宗轩(1986—), 男, 河北衡水人, 博士生导师, 副研究员, 主要从事空间光机集成分析与设计方面研究。E-mail: lizongxuan@ciomp.ac.cn