

## 2 m 主镜主动支撑优化设计

郭万存, 吴清文, 杨近松, 黄 勇, 高志良

(中国科学院长春光学精密机械与物理研究所, 吉林 长春 130033)

**摘 要:** 结合某空间光学系统的任务需求, 对其 2 m 口径主镜的支撑难点作了详细的论述。为了使主镜达到光学设计所要求的面形精度, 运用了结构有限元法和优化设计方法对主镜进行了支撑位置优化; 并分别针对主镜轴向 1 g 重力载荷、轴向 1 g 重力载荷耦合 1 °C 均匀温升两种工况, 以主镜镜面 RMS 为目标函数、力驱动器驱动力为优化变量进行了多参数优化。通过优化获得了最佳的驱动力组合, 镜面 RMS 分别达到 19 nm、43 nm。该方法具有一定的应用价值。

**关键词:** 主动光学; 优化设计; 有限元

**中图分类号:** V11      **文献标志码:** A      **文章编号:** 1007-2276(2013)06-1480-05

## Optimum design of active supporting system for a 2 m primary mirror

Guo Wancun, Wu Qingwen, Yang Jinsong, Huang Yong, Gao Zhiliang

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

**Abstract:** Based on a space optical system launch mission, the supporting radius of the 2 m primary mirror of the optical system subject to axial 1 g inertial load was optimized to achieve the minimum surface deformation. Taking surface error of the primary mirror as objective function and force actuator inputs as design variables, a mathematical model coupling finite element analysis and optimization algorithms was build. The optimum force actuator inputs of the primary mirror were investigated with the optimization model under axial 1 g inertial load condition and axial 1 g inertial load coupled with 1 °C temperature load condition, and the surface RMS of the primary mirror with optimum force actuator inputs are 19 nm and 43 nm respectively. It shows that the optimization method of primary mirror with active supporting system discussed in this paper is applicable.

**Key words:** active optics; optimization design; finite element

## 0 引言

随着空间探索任务需求的不断增长,总体对空间光学系统提出的指标要求越来越高。主镜作为空间光学系统的重要部件,其材料选取、结构形式和支撑方案不仅直接决定主镜面形精度和整个光学系统的性能,而且影响项目的研制成本和研制周期。为了满足空间光学系统的高指标要求,主镜的口径需要设计得很大。受质量、加工制造等方面的限制,大口径主镜的设计和装调很难通过传统的背部轻量化、三点被动支撑等技术解决<sup>[1-3]</sup>。据目前的资料显示,国外的大口径主镜一般采用主动支撑、子镜拼接的方法达到预期的设计指标,如已在轨运行的哈勃望远镜、即将发射的 JWST 等。国内开展主镜主动支撑的研究稍晚,目前尚无在空间工作的主动光学系统,因此,大口径主镜主动支撑技术是目前亟待解决的难题。

文中根据某空间光学系统的任务需求,运用结构有限元法和优化设计方法对其光学系统中的 2 m 大口径主镜进行了主动支撑优化设计。

## 1 主镜结构设计及支撑位置优化

主镜主动支撑是在传统被动支撑的基础上,通过安装在主镜背部的力驱动器或者位移驱动器施加作用力或者强制位移,达到消除主镜在工作载荷下镜面畸变的目的。文中 2 m 主镜主动支撑优化设计包括主镜支撑位置优化及给定载荷下主镜力驱动器驱动力优化两方面的内容。

### 1.1 结构设计

参考以往项目反射镜设计的经验,2 m 主镜结构拟采用三角形孔轻量化,以获得较高的刚度<sup>[4-5]</sup>。主镜材料选用 SiC, SiC 材料比刚度大,力学性能好,加工制造技术较为成熟,其材料属性见表 1。

表 1 主镜材料属性表

Tab.1 Material property of the primary mirror

Material	Elastic modulus /MPa	Poisson ratio	Density /kg·m <sup>-3</sup>	Thermal expansion coefficient/°C <sup>-1</sup>
SiC	400 000	0.25	3.05×10 <sup>3</sup>	2.5×10 <sup>-6</sup>

主镜结构形式如图 1 所示。有两种可选方案,图(a)为传统的背部加强筋式结构,图(b)为薄镜式结构。

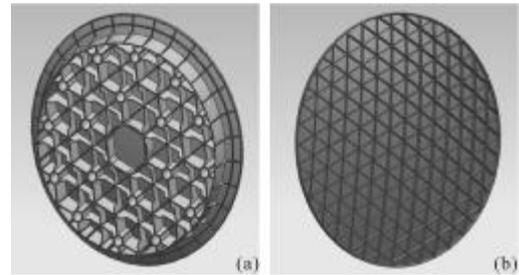


图 1 主镜结构形式

Fig.1 Structure pattern of the primary mirror

背部加强筋式主镜结构的刚度较好,已在多个空间光学任务中得到了验证,但是这种结构的质量远远大于同等口径的薄镜式主镜结构,而且难以发挥主动支撑的优势。因此,2 m 主镜结构设计方案选择薄镜式主镜结构,结构参数见表 2。

表 2 主镜结构参数

Tab.2 Structure parameters of the primary mirror

Mirror diameter /mm	Spherical radius of the mirror /mm	Mirror thickness /mm	Rib thickness /mm	Rib height /mm	Mass of the mirror/kg
2 000	3 800	10	5	45	174

### 1.2 支撑位置优化

2 m 主镜工作在空间微重力、冷黑环境中,其支撑方案要从主镜所处的力学、热学载荷考虑。为了避免“过定位”引起的镜面弯曲变形,在主镜背部采用 120°分布的三点柔性支撑,柔性支撑提供主镜径向柔度,以改善主镜在温度载荷下的镜面畸变<sup>[6-7]</sup>。同时在柔性支撑后端安装位移驱动器,使主镜在光轴方向具备微位移运动的能力,增加整个光学系统的灵活性。

主镜背部三点柔性支撑通过柱面开槽的柔节实现,如图 2 所示。图为(a)正面视角,图(b)为侧面视角,该柔节已在某在轨空间相机中得到应用。

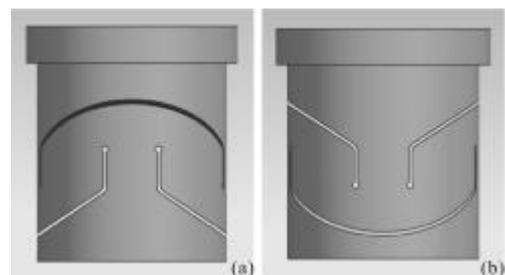


图 2 柔性支撑结构

Fig.2 Flexible supporting structure

为了使三点柔性支撑达到最好的支撑效果,文中采用 MSC.PATRAN 建立了 2 m 主镜的有限元模型,以主镜在轴向 1 g 重力载荷下的镜面 RMS 为优化目标,使用 MSC.NASTRAN 对主镜三点柔性支撑支撑圈半径进行了优化。2 m 主镜有限元模型由壳单元组成,如图 3 所示,图(a)为正面视角,图(b)为背面视角。

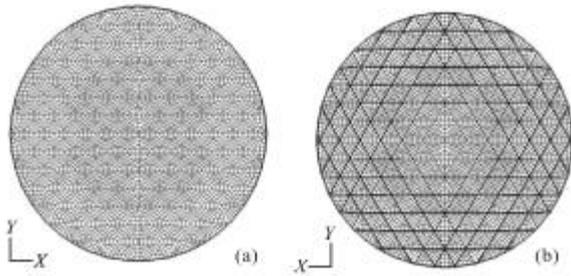


图 3 主镜有限元模型

Fig.3 Finite element model of the primary mirror

通过优化,主镜在 1 g 重力载荷下的镜面 RMS 随支撑圈半径变化曲线如图 4 所示。

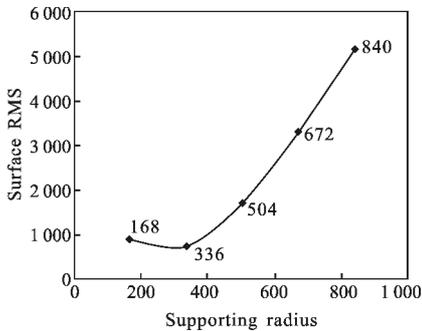


图 4 主镜镜面 RMS 随支撑半径变化曲线

Fig.4 Surface RMS of the primary mirror vs. supporting radius

从图 4 可以看出,当支撑圈半径为 336 mm 时,2 m 主镜在 1 g 重力载荷下的镜面面形较好,此时镜面变形如图所示。因此,2 m 主镜三点柔性支撑支撑圈半径为 336 mm。

## 2 主动支撑优化设计

为了使 2 m 主镜在空间环境中满足镜面面形要求,在主镜背部三点柔性支撑的基础上,还需要在主镜背部布置力驱动器。其背部可供安装力驱动器的位置很多,为了尽可能降低系统复杂度,应选择最有效的位置安装力驱动器。力驱动器优化是指优化 2 m

主镜在给定载荷下的驱动力输入,以使主镜镜面 RMS 达到最小。

力驱动器优化的理论依据为叠加原理<sup>[1]</sup>。设主镜在给定载荷下镜面上任意节点 i 的位移为  $d_i'$ , 则节点 i 在给定载荷和所有力驱动器作用下的位移为:

$$d_i = d_i' + \sum_j x_j d_i^j \quad (1)$$

式中:  $x_j$  为第 j 个力驱动器的驱动力;  $d_i^j$  为节点 i 在第 j 个力驱动器单位力作用下的位移。则主镜镜面误差函数为:

$$E = \sum_i w_i (d_i' + \sum_j x_j d_i^j)^2 \quad (2)$$

式中:  $w_i$  为节点 i 的加权系数; E 为  $x_j$  的函数。

2 m 主镜背部三点柔性支撑及力驱动器的布局如图 5 所示。

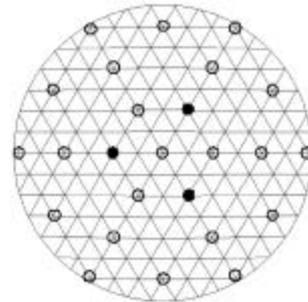


图 5 主镜支撑点及力驱动器布局

Fig.5 Supporting location and force actuator layouts of the primary mirror

图中,实点圆圈表示柔性支撑位置,空心圆圈表示力驱动器位置,力驱动器共计 22 个。按照文中方法编写程序,分别以 2 m 主镜在轴向 1 g 重力载荷、轴向 1 g 重力耦合 1 °C 均匀温升载荷下的镜面 RMS 作为优化目标,以力驱动器的驱动力为优化变量,进行多参数优化。优化结果见表 3。

可以看出,力驱动器按图 5 从左到右、从上到下的顺序编号,工况 1 表示轴向 1 g 重力载荷工况,工况 2 表示轴向 1 g 重力载荷耦合 1 °C 均匀温升工况。按照表中的最佳驱动力组合建立新的分析模型,计算主镜在两种工况下的镜面变形,其结果见表 4 所示;力驱动器工作时及力驱动器不工作时主镜在工况 1 条件下的变形云图分别如图 6(a)、图 6(b)所示;力驱动器工作时及力驱动器不工作时主镜在工况 2

条件下的变形云图分别如图 7(a)、图 7(b)所示。

表 3 力驱动器驱动力优化结果

Tab.3 Optimum forces of the force actuators

No.	Forces of the force actuators(N)	
	Loadcase 1	Loadcase 2
1	-2.74E+01	-7.49E+00
2	-4.64E+01	-2.55E+01
3	-2.89E+01	-7.47E+00
4	-5.25E+01	-4.11E+01
5	-4.97E+01	-1.57E+01
6	-4.49E+01	-2.56E+01
7	-4.56E+01	-2.26E+01
8	-4.61E+01	-1.47E+02
9	-3.05E+01	-5.01E+00
10	-5.14E+01	-2.11E+01
11	-1.74E+00	-5.52E+02
12	-5.90E+01	-1.64E+02
13	-3.96E+01	-3.50E+01
14	-3.38E+01	-1.21E+01
15	-5.50E+01	-1.53E+02
16	-4.25E+01	-2.53E+01
17	-4.24E+01	-2.26E+01
18	-4.39E+01	-3.50E+01
19	-5.58E+01	-1.91E+01
20	-3.41E+01	-1.00E+01
21	-4.08E+01	-2.51E+01
22	-3.05E+01	-6.11E+00

表 4 主镜镜面面形优化结果

Tab.4 Optimum surface figures of the primary mirror

	Without force actuators		With force actuators	
	RMS	Fringe	RMS	Fringe
Loadcase 1	751	Fig.6(a)	19	Fig.6(b)
Loadcase 2	966	Fig.7(a)	43	Fig.7(b)

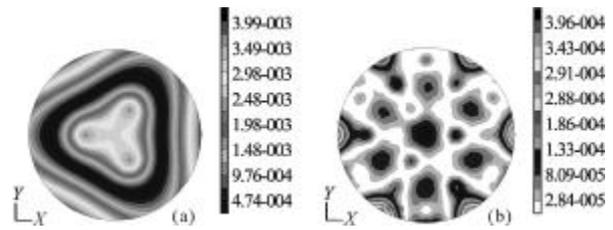


图 6 主镜在工况 1 作用下镜面变形云图

Fig.6 Deformation fringes of the primary mirror subject to loadcase 1

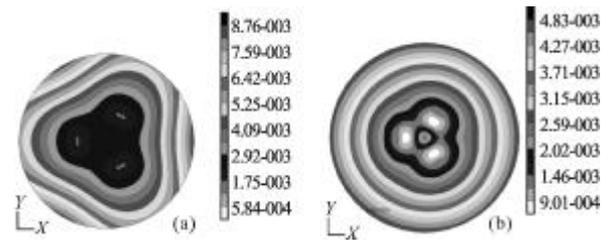


图 7 主镜在工况 2 作用下镜面变形云图

Fig.7 Deformation fringes of the primary mirror subject to loadcase 2

从表 4 可以看出,当力驱动器以优化后的驱动力工作时,2 m 主镜镜面面形得到了很好的改善,主镜在工况 1 及工况 2 条件下的镜面 RMS 分别达到 19 nm、43 nm。从图 6 中可以看出,工况 1 条件下力驱动器工作后 2 m 主镜镜面最大位移由  $3.99 \times 10^{-3}$  mm 减小到  $3.96 \times 10^{-4}$  mm;从图 7 中可以看出,工况 2 条件下力驱动器工作后 2 m 主镜镜面最大位移由  $8.76 \times 10^{-3}$  mm 减小到  $4.83 \times 10^{-3}$  mm。力驱动器以优化后的驱动力工作时 2 m 主镜镜面 RMS 值的显著改善及镜面最大位移的显著减小充分体现了 2 m 主镜主动支撑的作用。

### 3 结论

结合了某空间光学系统的任务需求,对其 2 m 主镜结构进行了详细的分析;运用结构有限元法和优化设计方法对主镜进行了支撑位置优化,并分别针对主镜轴向 1 g 重力载荷、轴向 1 g 重力载荷耦合 1 °C 均匀温升两种工况,对主镜驱动器的驱动力作了优化。通过优化获得了最佳的驱动力组合,镜面 RMS 分别达到 19 nm、43 nm。文中所述的优化设计方法不仅能用于项目论证时期的结构分析计算,在进入初样阶段以后,还可以根据此方法结合力驱动器的实测数据进行优化迭代,迅速找到合适的驱动力输入。因此,文中的主动支撑优化方法具有一定的

应用价值。

#### 参考文献:

- [1] Doyle Keith B, Genberg Victor L, et al. Integrated optomechanical analysis of adaptive optical systems [C]// SPIE, 2004, 5718: 20-27.
- [2] Zeng Chunmei, Yu Jingchi, Guo Peiji. Design of ultra-lightweight and high precision 2 m SiC segmented mirror[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2012, 41(11): 3034-3039. (in Chinese)  
曾春梅, 余景池, 郭培基. 2 m 超轻高精度 SiC 分块镜的设计[J]. *红外与激光工程*, 2012, 41(11): 3034-3039.
- [3] Wang Baoxu, Wu Fan, Jiang Shilei, et al. Optomechanical analysis and structure optimization of infrared cassegrain optical system[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2012, 41(7): 1872-1878. (in Chinese)  
汪宝旭, 伍凡, 蒋世磊, 等. 卡式红外光学系统光机分析及结构优化[J]. *红外与激光工程*, 2012, 41(7): 1872-1878.
- [4] Zhang Rui, Chen Zhiyuan, Yang Shimo, et al. Optimize and redesign the primary mirror supporting system of space solar telescope[J]. *Optical Technique*, 2007, 33(1): 23-26. (in Chinese)  
张锐, 陈志远, 杨世模, 等. 空间太阳望远镜主镜支撑结构的优化设计[J]. *光学技术*, 2007, 33(1): 23-26.
- [5] Chen Fulin, Zhang Jingxu, Wu Xiaoxia, et al. Deformation of thin primary mirror fitted with its vibration mode [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2011, 40(11): 2238-2243. (in Chinese)  
陈夫林, 张景旭, 吴小霞, 等. 模态振型拟合薄镜面变形分析[J]. *红外与激光工程*, 2011, 40(11): 2238-2243.
- [6] Guo Shaoweng, Wang Wuyi, Zhang Guangyu, et al. Lightweight mirror technology for space optical systems [J]. *Optical Instruments*, 2005, 27(4): 78-82. (in Chinese)  
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.
- [7] Fan Lili, Zhang Jingxu, Yang Fei, et al. Impact of the supports of primary mirror in equatorial telescope on its surface deformation [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2012, 41(1): 173-177. (in Chinese)  
范李立, 张景旭, 杨飞, 等. 极轴式望远镜主镜支撑结构对镜面变形的影响[J]. *红外与激光工程*, 2012, 41(1): 173-177.