

空间望远镜主镜的主动支撑面形校正分析

王昕彤^{1,2}, 刘 光^{1,2}, 郭 亮¹, 吴清文¹

(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)

摘要: 大型空间望远镜的主镜由于受重力、温度和装配等因素的影响, 会产生面形误差, 影响光学系统的成像效果。为了提高空间望远镜主镜对重力、温度的适应性, 采用 400mm 弯月镜进行了主动支撑面形校正研究。主动支撑方案由 3 个固定支撑和 7 个主动支撑构成, 利用 Zernike 系数和最小二乘法计算力促动器的校正力大小。使用有限元仿真软件分析了镜子在重力工况和稳态温度工况下, 校正前后的面形结果。分析结果显示, 采用本文的主动支撑方案, 各工况下被校正后的主镜面形精度达到均方根(RMS)值 $<\lambda/20$ 的设计指标, 面形质量有明显的提高。同时, 在重力工况中引入了实际装调中可能存在的安装误差等因素, 仿真结果显示装配误差对校正结果影响较小, 说明主动支撑系统具有较高稳定性。

关键词: 空间望远镜; 主动支撑; 力促动器; 面形校正; 有限单元法

中图分类号: TG580.23+3 **文献标识码:** B

Active Support Surface Correction Analysis of Space Telescope Primary Mirror

WANG Xin-tong^{1,2}, LIU Guang^{1,2}, GUO Liang^{1*}, WU Qing-wen¹

(1. Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Science, Changchun Jilin 130033, China; 2. University of Chinese Academy of Science, Beijing 100049, China)

ABSTRACT: Due to the influence of gravity factor, temperature factor and assembly factor, the main mirror of space telescope can cause surface shape error, affecting the imaging quality of optical system. In order to improve the adaptability of primary mirror to the gravity and temperature, this article used a 400mm meniscus lens to research the active support surface shape correction. The active support scheme consisted of three fixed supports and seven active supports. Zernike coefficient and the least squares method were adopted to calculate the correction force of force actuator. Moreover, finite element simulation software was used to analyze the surface shape change of primary mirror before and after correction under gravity condition and steady-state temperature condition. After using the proposed active support scheme, the accuracy of corrected main mirror shape in various working conditions reaches the design index, and the root mean square (RMS) value is less than $\lambda/20$. The quality of surface shape is obviously improved. Meanwhile, the possible installation errors and other factors in the actual installation and adjustment are introduced in the gravity condition. Simulation results show that the assembly error has less influence on correction results, so that the active support system has higher stability.

KEYWORDS: Space telescope; Active support; Force actuator; Surface correction; Finite element method

1 引言

空间望远镜不受大气干扰, 拍摄到的图像比地基望远镜更为清晰, 已成为探索暗物质、系外类地行星的重要设备。作为光学系统的主要光学元件, 主反射镜在空间望远镜中具有重要的地位^[1]。随着空间望远镜主镜口径的不断增大, 由重力、温度、装配等因素引起的主镜面形误差将会直接导致

光学系统成像质量下降^[2,3]。为了改善镜面变形, 欧洲南方天文台(ESO)首先成功将主动支撑用于地基的 3.5 米新技术望远镜(the New Technology Telescope, NNT)^[4]。在空间望远镜方面, 著名的哈勃望远镜(Hubble Space Telescope, HST)就采用了主动光学技术, 其主镜背后除了 3 个被动支撑点以外, 还配有 24 个促动器^[5,6]。被认为哈勃接替者的韦布望远镜(James Webb Space Telescope, JWST)采用拼接式主镜, 每块子镜的背后用 1 个促动器来调整镜面曲率, 其余 6 个促动器来调整子镜的自由度^[7,8]。主动支撑的发展是人们

基金项目: 国家自然科学基金项目(61605203)

收稿日期: 2018-08-22 修回日期: 2018-09-29

追求高质量空间光学系统的必然结果^[8]。

大口径望远镜建造前通常建造缩比镜进行主动支撑实验。如 3.5 米 NTT 的实验装置为口径为 1050mm,厚度为 18.9mm 的球面反射镜,其轴向有 75 个主动点,校正后的面形精度可达 68nm;我国南京天文仪器厂在建造 4 米大天区望远镜(LAMOST)前,先采用口径为 500mm,厚度为 6mm 的实验镜进行了主动光学实验,其背部有 58 个主动点,校正后的面形精度为 20~40nm^[9];长春光机所针对 2mSiC 厚镜设计了 680mm 缩比镜主动支撑方案,仿真显示 9 点主动支撑方案校正效果良好,能够校正 97% 以上的像散和 91% 以上的三叶^[10]。

本文设计了空间望远镜主反射镜的缩比镜来进行主动支撑面形校正研究,要求校正后的面形能达到镜子的加工精度 $RMS < \lambda/20$ ($\lambda = 632.8\text{nm}$) 的指标。仿真分析表明,采用主动支撑方案,各工况下被校正后的面形精度均满足指标要求。

2 主反射镜支撑方案

2.1 相关参数

为进行主反射镜的主动支撑面形仿真分析,设计口径为 400mm 弯月形,K9 材料的缩比镜。其厚度根据式(1),取光轴方向重力工况的最大变形量 $\omega_{\max}$ 不大于 5λ ,圆整后得镜面厚度 t 为 12mm。缩比镜的尺寸如图 1 所示,参数在表 1 中列出。

$$\omega_{\max} = \frac{3}{16} \frac{g\rho}{E} (1 - \nu^2) \left(\frac{5 + \nu}{1 + \nu} \right) \frac{r^4}{t^2} \quad (1)$$

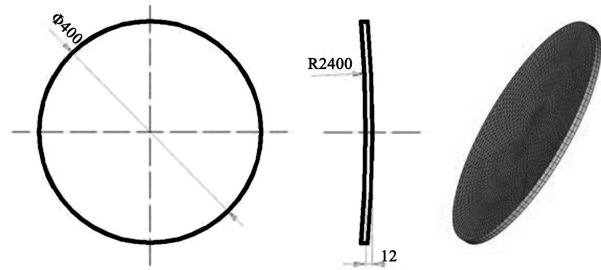


图 1 主镜的缩比模型

表 1 400mm 弯月镜参数

参数名称	数值
主镜材料	K9
密度 $\rho/(\text{ton} \cdot \text{mm}^{-3})$	2.53×10^{-9}
弹性模量 E/MPa	81320
泊松比 ν	0.209
线胀系数 $A/(10^{-6}/^\circ\text{C})$	7.5

2.2 主动支撑方案

空间反射望远镜的定位方案有中心支撑、周边支撑、侧

面支撑(悬挂法和浮托法)以及背部支撑(三点支撑和六点支撑)^[11],如图 2 所示,本文的 400mm 弯月镜采用背部三点支撑实现弯月镜的定位,另外采用 7 个力促动器来校正面形。

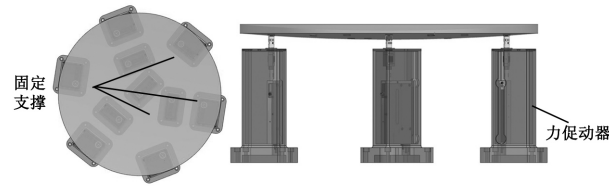


图 2 主动支撑分布

力促动器的直线运动通过音圈直线电机实现,测量校正力大小的拉压力 S 型传感器,一端通过连接件与电机输出杆相连,另一端与促动器推杆相连。如图 3 所示,促动器推杆采用柔性结构,以保证校正力沿轴向垂直作用于主镜。为避免各组件因热变形不同而引起面形误差,推杆仍采用与主镜热膨胀系数相同的殷钢材料。



图 3 促动器结构

3 面形拟合与校正力求解

主动光学建立在小变形假设、线性定律、收敛定律和正交定律的假设和物理定律上^[12-14]。当镜面光滑且连续时,对于单个促动器,在一定弹性范围内,镜面变形 W 与作用力 f 的大小呈线性关系。又由于满足线性定律,多个促动器所引起的镜面变形可以进行叠加,得到

$$W(x, y) = \sum_{i=1}^n w_i(x, y) f_i \quad (2)$$

$w_i(x, y)$ 为第 i 个力促动器的响应函数,它表示第 i 个力促动器对镜子施加单位作用力时,镜面各点产生的变形。将每个力促动器的响应函数按列排列,构成镜子的刚度矩阵 C 。

为了抵消某一工况下产生的变形,应产生一个相反的变形量 $-W$,使

$$-W = Cf \quad (3)$$

其中, f 为促动器的校正力。

由于 Zernike 多项式与 Seidel 像差对应,在单位圆内具有正交性和回转不变性。为便于实验和计算,镜面的总变形和刚度矩阵都可以用 Zernike 多项式表示,因此式(3) 可改写为

$$\begin{bmatrix} a_1 \\ a_2 \\ \vdots \\ a_m \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{\partial a_1}{\partial f_1} & \frac{\partial a_1}{\partial f_2} & \cdots & \frac{\partial a_1}{\partial f_n} \\ \frac{\partial a_2}{\partial f_1} & \frac{\partial a_2}{\partial f_2} & \cdots & \frac{\partial a_2}{\partial f_n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \frac{\partial a_m}{\partial f_1} & \frac{\partial a_m}{\partial f_2} & \cdots & \frac{\partial a_m}{\partial f_n} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} f_1 \\ f_2 \\ \vdots \\ f_n \end{bmatrix} \quad (4)$$

其中, $a_i (i = 1, 2, \cdots, m)$ 为 Zernike 系数, m 表示要校正的 Zernike 系数为 m 项, n 表示力促动器个数。

镜面的总变形和刚度矩阵由有限元计算得到,力促动器校正力的求解通常有阻尼最小二乘法^[3] 和非线性规划中的序列二次规划法^[8], 本文采用最小二乘法求得式(3) 的解为

$$f = - (C^T C)^{-1} C^T W \quad (5)$$

4 有限元仿真分析

在 HyperMesh 仿真环境下建立弯月镜的有限元模型,模型包含 4269 个六面体单元,1423 个镜面节点,背面有 7 个点 对应 7 个主动支撑位置。对 7 个力促动器分别施加单位力, 获得各力促动器响应的变形云图,构成弯月镜的刚度矩阵, 如图 4 所示。

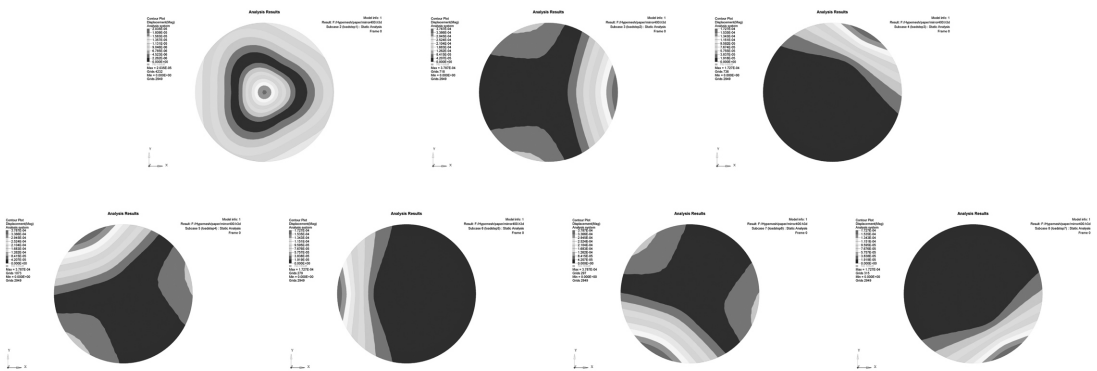


图 4 400mm 弯月镜的刚度矩阵图

空间望远镜的装配和实验在地面进行,而进入太空环境后只承受微重力,反射镜支撑结构会发生回弹。另外空间望远镜通常直接暴露在复杂多变的空间热环境中,较大的温度变化将会导致望远镜的离焦和像质的改变。因此本文主要针对空间望远镜主镜的重力工况和温度工况进行有限元仿真分析。

4.1 重力场

在弯月镜的光轴方向和垂直于光轴的方向各施加 $-1g$ 的重力加速度,观察主镜的面形。将仿真得到的各节点位移转化为 Zernike 系数,求解 7 个力促动器的校正力。在主反射镜各力促动器的位置上施加对应的校正力,再次进行工况分析,并与校正前的面形进行比较。当重力沿光轴方向时,7 个力促动器的校正力均在 5N 以内,如表 2 所示。由图 5a、d 两图可以看出,校正后的面形质量明显提高,波峰波谷(PV) 值由 335.327nm 降低至 72.075nm, RMS 值由 75.774nm 降低至 15.064nm。重力沿垂直于光轴方向的两个工况,在力促动器校正后,面形也明显改善,如图 5b、c、e、f 所示。校正前和校正后重力各工况下的面形精度如表 3 所示, PV 值达到 $\lambda/8$, RMS 值达到 $\lambda/40$ 。

表 2 光轴方向重力下力促动器的校正力

促动器序号	校正力/N
1	4.42746
2	4.8092
3	4.43463
4	4.8092
5	4.4348
6	4.80922
7	4.43478

表 3 重力场下校正前后的面形精度比较

工况	校正前		校正后	
	PV/nm	RMS/nm	PV/nm	RMS/nm
G_Z	335.327	75.774	72.075	15.064
G_X	243.840	55.874	36.178	6.122
G_Y	253.899	55.877	39.172	6.122

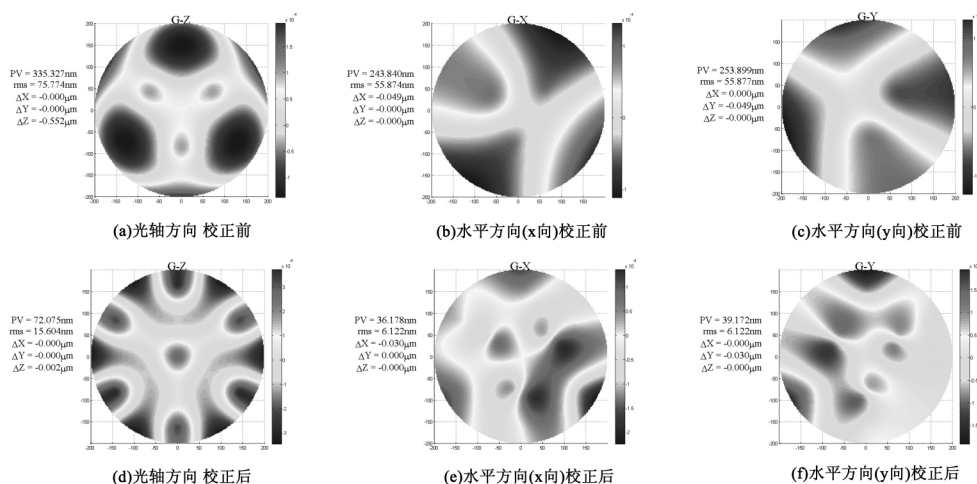


图5 重力场下校正前后主反射镜的面形

4.2 温度场

空间望远镜处于复杂的真空热环境中,温度的变化会使望远镜主镜和支撑结构产生形变。仿真时以 20°C 为参考温度,在 $\pm 5^{\circ}\text{C}$ 的变化范围内,每隔 1°C 设置一个稳态温度工况对主镜进行仿真,将多次仿真获得的 RMS 值随温度变化绘制如图 6 所示的曲线。从曲线图可看出,主镜的面形精度随稳态温度呈线性变化,并在 20°C 参考温度的左右对称。

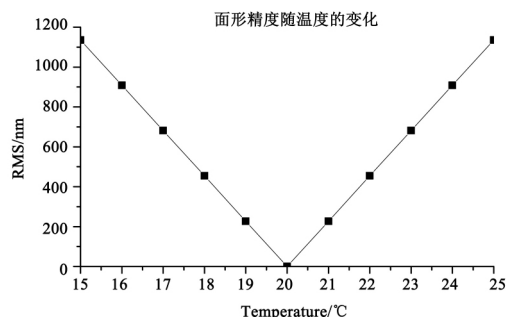


图6 主镜面形精度随温度变化图

在参考温度 20°C ,稳态温度 22°C 的工况下,观察主反射镜的面形,与重力场相比,温度场引起的变形更大,原因是固定的三点支撑限制了主镜的径向膨胀。光学系统受温度影响而产生的平移、倾斜和离焦可以通过调整次镜和主镜的间距来改善,因此在剔除离焦等刚体位移后求解主动校正力的大小。图 7a、b 两图为校正前后主镜温度场下的面形图,从图中可看出校正后的面形质量仍有明显的改善,PV 值从 1873.01nm 降低至 163.315nm ,RMS 值从 454.214nm 降低至 19.199nm ,校正后 RMS 值达到 $\lambda/32$ 。

4.3 装配误差等综合影响

以上主镜面形的校正是在有限元仿真的理想条件下,7 个力促动器都精准安装时完成的。而实际装调中,促动器安

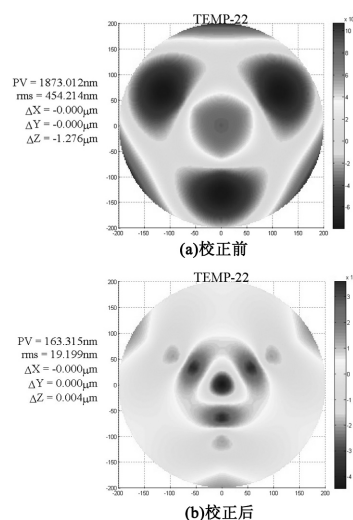


图7 22°C 温度场下的主镜面形图

装和转接件的加工存在一定误差^[4],这将会影响面形校正效果。因此在光轴方向的重力工况下,用有限元仿真计算了实际装调中安装误差对校正结果的影响,结果如表 4 所示。

表4 装配误差等对校正的影响

误差来源	校正后的面形精度统计 RMS/nm
理想状态(光轴)	15.064
理想状态(水平)	6.122
力促动器支撑点位置偏差 2mm (光轴)	25.398
力促动器支撑点位置偏差 2mm (水平)	6.565
力促动器推杆倾斜 1° (光轴)	16.513
力促动器推杆倾斜 1° (水平)	6.123
综合影响(光轴)	30.294
综合影响(水平)	8.977

表4中,引入安装误差得到的校正结果是经15次仿真后取平均值得到。其中前两项为理想状况下的校正结果,面形精度为RMS值分别为15.064nm和6.122nm,最后两项为综合考虑了装配误差影响的面形精度,分别为30.294nm和8.977nm,达到 $\lambda/20$,满足设计指标。从校正前后的RMS值对比可看出安装误差带来的影响较小,说明主动支撑系统具有一定稳定性。

5 结论

本文针对400mm弯月形缩比镜,提出了力促动器主动校正方案,利用有限元仿真分析了重力场和温度场下主动支撑系统的校正效果。校正后面形精度RMS值为:光轴下重力工况15.064nm,水平下重力工况6.122nm,2℃温升工况下19.199nm。采用主动支撑方案后,各工况下的面形精度达到 $RMS < \lambda/30$,使主镜面形有了明显的改善并达到设计指标。此外,本文还考虑了实际装调中可能存在的误差,仿真了重力场下装配等综合因素对校正结果的影响。综合影响下的RMS值 $< \lambda/20$,表明主动支撑系统受安装误差的影响较小,具有一定稳定性。本文各工况下的有限元分析为后续的实验提供了仿真依据。

参考文献:

- [1] 吴清文,等. 空间相机中主镜及其支撑方案设计与分析方法[J]. 光学技术, 2004, (2): 153-156.
- [2] 陈世平. 空间相机设计与实验[M]. 北京: 中国宇航出版社, 2009: 1-20.
- [3] 陈洪达,等. 空间反射镜的轻量化及支撑设计研究[J]. 红外与激光工程, 2014, 43(2): 535-540.
- [4] R R Wilson. The history and development of the ESO active optics system[J]. Messenger, 2003, 113: 9.
- [5] Y Pierre, L Olivia, L H John. The line of sight jitter of the hubble space telescope[J]. Proc SPIE, 1993, 1945: 55-61.
- [6] 袁健. 大型空间相机出瞳镜精密调整结构设计分析[D]. 中国科学院研究生院(长春光学精密机械与物理研究所), 2015.
- [7] J M Howard, K A Parrish, Q H Kong. Integrated modeling activities for the James Webb Space Telescope[C]. structural thermal

optical analysis, Proc SPIE, 2004, 5487: 600-610.

- [8] B Carl, et al. Structural-thermal-optical performance (STOP) sensitivity analysis for the James Webb Space Telescope[J]. Proc SPIE, 2005, 5867.
- [9] 曾春梅, 郭培基, 余景池. 0.5m超薄镜主动支撑面形校正及实验[J]. 光学精密工程, 2010, 18(03): 570-578.
- [10] X Cui, et al. The optical performance of LAMOST telescope[J]. Ground-based & Airborne Telescopes III, 2010, 7733(6): 7-8.
- [11] 胡佳宁. 基于SiC厚镜的大口径主镜面形校正技术的研究[D]. 中国科学院长春光学精密机械与物理研究所, 2017.
- [12] R N Wilson, F Franza, L Noethe. Activeoptics: a system for optimizing the optical quality and reducing the costs of large telescopes[J]. Journal of Modern Optics, 1987, 34(4): 485-509.
- [13] L Noethe, et al. Active optics 2: results of an experiment with a thin 1m test mirror[J]. Journal of Modern Optics, 1988, 35(9): 1427-1457.
- [14] 李宏壮,等. 400mm薄镜面主动光学实验系统[J]. 光学精密工程, 2009, 17(9): 2076-2083.
- [15] 李宏壮,等. 薄反射镜主动光学实验系统[J]. 光电工程, 2009, 36(6): 120-125.
- [16] 邵亮,等. 1.2m微晶主镜的新型支撑[J]. 光学精密工程, 2016, 24(10): 2462-2470.

作者简介



王昕彤(1994-),女(汉族),吉林省长春市人,硕士研究生,主要研究领域为主动光学技术;

刘光(1991-),男(汉族),江西省赣州市人,博士研究生,主要研究领域为空间光学遥感器光机热集成分析与主动光学技术;

郭亮(1982-),男(汉族),黑龙江省哈尔滨市人,副研究员,硕士研究生导师,主要研究领域为传热传质学和航空/航天光学遥感器热控技术;

吴清文(1968-),男(汉族),四川省简阳市人,研究员,博士研究生导师,主要研究领域为光学精密工程的CAD/CAE/CAM技术的应用研究及塑料注射成型模具的CAD/CAE技术。

(上接第120页)

- [8] 张开冉,王若成. 道路交通警告标志的辨识度评价[J]. 安全与环境学报, 2016, 16(1): 6-9.
- [9] 安俊峰,刘海东,潘雷,等. 基于PCA和灰度直方图特征融合的交通标志的分类研究[J]. 公路, 2017, 62(4): 184-190.
- [10] 李毕祥,方兰. 交通事故现场视觉图像优化识别仿真研究[J]. 计算机仿真, 2017, 34(4): 387-390.

作者简介



苏正青(1992-),男(汉族),河北深县人,硕士生,研究方向:图形,图像处理;

马巧梅(1969-),女(汉族),山西晋中人,博士,副教授,研究方向:图形图像处理,信息安全技术。