

文章编号: 0253-2239(2009)01-0007-05

# 分块式空间望远镜波前传感及控制方法的仿真研究

张晓芳 董冰 黄一帆 毛珩 王姗姗 俞信

(北京理工大学光电工程系, 北京 100081)

**摘要** 分块式空间望远镜的波前传感及控制方法是实现高分辨率成像的关键。空间望远镜在轨展开后,由于空间环境及光学系统本身的特点,存在位置和面形误差,波前误差动态范围大、空间频率覆盖宽,需要采用分级校正的方法逐步减小误差。给出了波前校正流程及相应的波前传感及控制方法。利用 Zemax 软件建立了同轴偏场三反射镜系统仿真模型,并对主镜进行了分块设计。针对该系统模型,建立了分块式空间望远镜系统波前传感及控制集成仿真软件,通过分析分块主镜的波前误差校正过程验证了算法的可行性。

**关键词** 自适应光学; 波前传感; 集成仿真; 分块式空间望远镜

**中图分类号** TB133 **文献标识码** A **doi:** 10.3788/AOS20092901.0007

## Simulation Research on Wavefront Sensing and Correction Algorithms for Segmented Space Telescope

Zhang Xiaofang Dong Bing Huang Yifan Mao Heng Wang Shanshan Yu Xin

(Department of Optoelectronic Engineering, Beijing Institute of Technology, Beijing, 100081, China)

**Abstract** Wavefront sensing and control algorithms play a very important role in high-resolution imaging of segmented space telescope. In this paper, a coaxial three-mirror anastigmat system is modeled by Zemax and the primary mirror is a segmented design. After space telescope deployment, the wavefront errors have a wide dynamic range in amplitude and spatial frequency, so a multistage wavefront correction control strategy is proposed to reduce wavefront errors gradually. The wavefront correction process and the wavefront sensing and correction algorithms performed in each step are given in detail. Integrated simulation software is developed to verify our algorithms. Wavefront correction results of segmented primary mirror give a good demonstration of the feasibility of our algorithms.

**Key words** adaptive optics; wavefront sensing; integrated simulation; segmented space telescope

## 1 引言

发展大口径、高分辨率空间望远镜在对地遥感、深空探测等领域具有重要意义。受整镜加工能力和运载火箭整流罩尺寸的限制,空间望远镜的主镜一般采用分块可展开式设计,即将主镜划分为若干较小的子镜,发射时将子镜折叠以减小发射尺寸,到达预定轨道后再展开成工作状态<sup>[1]</sup>。由于主镜展开机构的精度有限,各分块镜存在六自由度的位置误差。同时,受空间微重力环境及热环境的影响,镜面将产生重力变形和热变形。这些因素将导致出瞳波前畸变,成像质量严重下降。目前常用的解决方法是利用自适应光学技术对波前误差进行实时校正,其中分块主

镜的波前传感及控制技术是空间望远镜能否实现高分辨率成像的关键,也是目前的研究重点之一。

美国在空间望远镜的研究方面一直处于领先地位,正在研制的詹姆斯-韦伯空间望远镜(JWST)的主镜直径达 6.5 m,包含 18 块六边形分块子镜,采用了复杂的波前传感及控制算法以实现主镜各分块镜的共相位成像,目前已进行了大量的理论研究和地面实验<sup>[2]</sup>。中国对分块式空间望远镜的研究起步较晚,以基础理论研究和仿真为主<sup>[3][4]</sup>。在建立分块式空间望远镜系统仿真模型的基础上,提出对波前误差进行分级校正,给出了各个校正阶段的波前传感及控制方法,并通过仿真验证了该控制方案的可行性。

收稿日期: 2008-10-15; 收到修改稿日期: 2008-11-07

作者简介: 张晓芳(1973—),女,博士后,副教授,主要从事自适应光学与空间光学等方面的研究。

E-mail: zhangxf@bit.edu.cn

## 2 光学系统模型

空间望远镜的设计有多种形式,其中同轴偏场三反射镜系统的三个反射镜全部采用非球面镜,具有较强的消像差能力,且结构紧凑,易于在轨装调<sup>[5]</sup>。以主镜直径为 5 m,视场角为 $\pm 0.3^\circ$ 的同轴偏场三反射镜系统为例,用 Zemax 软件建立了系统模型。为实现对每个分块镜的单独控制,用 Zemax 的非顺序模式对主镜进行建模。

如图 1 所示,主镜由中心八边形镜和周围的八个环扇形分块镜组成。主镜中心镜和三镜采用刚性连接作为系统主光轴调整及分块镜共相位调整的基准。主镜边缘分块镜后面布置六自由度位置致动器和面形致动器,分别用于校正分块镜的位置误差和面形误差(如图 2 所示);次镜后面布置六自由度位置致动器(如图 3 所示)用于主光轴对准;变形镜位于出瞳面,用于全系统波前误差校正;快速倾斜镜用于校正光轴的抖动。

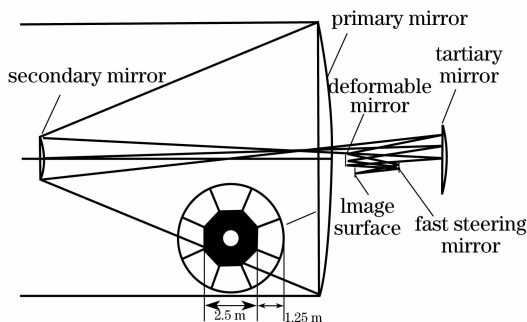


图 1 具有分块主镜的同轴三镜消像散系统

Fig. 1 Coaxial three mirror anastigmat system with a segmented primary mirror

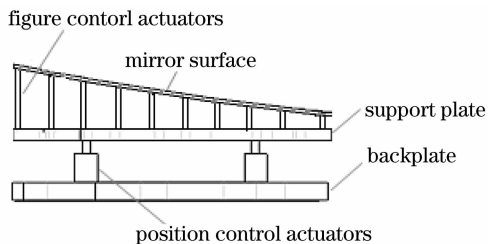


图 2 边缘分块镜结构图

Fig. 2 Structure of edge segmented mirror

## 3 波前误差的控制流程

空间望远镜在轨展开后,误差源主要包括各镜的位置误差,镜面加工制造误差,空间重力、温度环境变化导致的镜面变形以及由于致动器和镜面连接产生的镜面变形等。分块式主镜为主要的误差源之一,其误差的特点是动态范围大、空间频率覆盖宽、



图 3 六自由度位置致动器

需要采取分级校正的方法<sup>[6]</sup>。即在主镜各分块镜后面布置六自由度位置致动器和少量面形致动器用于校正大动态范围、低空间频率误差,出瞳位置处配置变形镜用于校正小动态范围、高空间频率误差。这样可以满足校正大动态范围和高空间频率误差的要求,避免了制造同时具备大行程和高空间频率的校正器。

空间望远镜上天后,要捕获一个合适的自然星,以其为信标,波前控制过程可以分为六个步骤。

1) 主光轴调整<sup>[7]</sup>。次镜展开后,其相对于主镜中心镜存在六自由度位置误差,需要由次镜后面的六自由度位置致动器进行校正。最终实现主镜中心分块镜光轴、次镜光轴与后续光学系统光轴重合。波前传感采用相位恢复法<sup>[8]</sup>或哈特曼-夏克法。波前控制采用灵敏度矩阵反演法<sup>[9]</sup>。主光轴调整结束后,主镜中心镜、次镜和三镜在后续步骤中都不再调整。

2) 分块镜扫描捕获。主镜展开后,分块镜的像可能落在视场以外,需要采用适当的扫描函数驱动分块镜位置致动器进行扫描<sup>[10]</sup>,直到所有分块镜的像都进入探测器视场。经过优化选择<sup>[10]</sup>,采用阿基米德螺旋线扫描。捕获所有分块镜的像之后,还需要将各分块镜的像按对应位置排列在中心镜的像周围,这样可以方便确认各分块镜所成的像。

3) 分块镜合像。其目的是去除大尺度的分块镜倾斜误差。分块镜的光斑质心位置和分块镜倾斜之间存在近似线性关系,通过调整各分块镜倾斜可以使各分块镜光斑质心和中心镜光斑质心重合,进行光强叠加。

4) 分块镜共相位。主镜展开后,边缘分块镜和中心镜之间的沿光轴方向平移误差可以达到毫米量级,这种大尺度的误差检测通常分为粗测和精测两步。首先是粗测,考虑在边缘分块镜和中心镜的底板上装一对边缘传感器测量分块镜的平移误差<sup>[11]</sup>,

边缘传感器可以是电容位移传感器、电感位移传感器或其它形式的传感器,这一步称为粗共相。粗共相后分块镜的平移误差可以小于  $20\ \mu\text{m}$ 。之后进行精测,利用色散瑞利干涉法<sup>[12]</sup>精确测出分块镜之间的平移误差,可以达到纳米量级的精度,称为精共相。精共相后,由相位恢复法测量出瞳波像差,用灵敏度矩阵反演法计算出分块镜各自由度的位置误差<sup>[9]</sup>,由位置致动器进行校正。

5) 分块镜面形误差校正。分块镜面形误差由分块镜后布置的面形致动器进行校正。采用相位恢复法获取出瞳波前相位差,再折算为分块镜面形误差,由灵敏度矩阵反演法计算出各个致动器需要产生的变形量。

6) 全系统波前校正。在完成上述 1)~5) 步以后,波前误差中的低频分量已经大部分被校正,为了进一步提高成像质量,消除面形误差中的高频分量,需要在出瞳位置处放置一个变形镜进行校正。该变形镜需要具备高空间频率误差校正能力,可以使用具有高致动单元数的微机电系统(MEMS)变形镜或液晶空间光调制器。全口径的波前传感仍采用相位恢复法。

需要说明的是,分块镜的共相位精度会受到分块镜面形误差的影响<sup>[13]</sup>,所以 4)~5) 步需要迭代进行。

## 4 仿真分析

为了验证空间望远镜波前传感和控制算法的可行性,需要建立一个包含误差的输入输出,硬件模型及算法等在内的集成仿真系统<sup>[14]</sup>。以 Matlab 作为主工作平台开发图形用户界面,同时以光学设计软件 Zemax 和有限元分析软件 Ansys 作为服务器,通过各自的接口函数库对 Matlab 发出的指令做出响应。Zemax 主要用于计算空间望远镜在各种位置和面形误差情况下的出瞳波前误差(WFE)、点扩展函数(PSF)、斯特列尔比(SR)、光学传递函数(MTF)等像质参数,Matlab 通过 Zemax 返回的像质参数可以控制校正流程。Ansys 主要用于分析在各种温度和重力环境下的镜面变形、分块镜面形致动器的影响函数及分块镜在面形致动器作用下产生的镜面变形等。Ansys 计算获得的面形误差数据一般需要经过坐标转换和格式转换后输入光学设计软件<sup>[15]</sup>。

以分块式主镜的误差校正过程 2)~6) 为例来验证波前传感和控制算法的有效性。由于主镜各边缘分块镜的校正过程类似,仅给出顶部分块镜的仿真过程。分块镜的位置误差在展开机构的误差限内

随机生成,面形误差由前 37 阶环扇域正交的泽尼克多项式<sup>[16]</sup>构造。分块镜初始位置误差如表 1 所示。分块镜初始面形误差如图 4 所示,其中 PV 值  $3.62\lambda$ ,RMS 为  $0.33\lambda$ , $\lambda=0.6328\ \mu\text{m}$ 。分块镜面形致动器排布如图 5 所示,共有 31 个方形排布的面形致动器。变形镜为含有 963 个致动器的 MEMS 变形镜,变形镜致动器排布如图 6 所示。

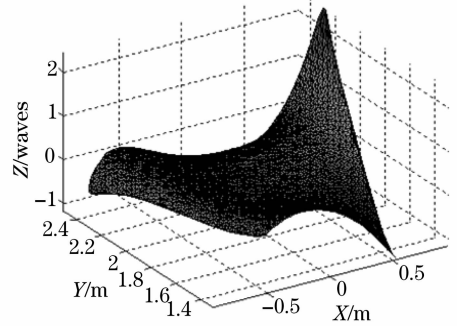


图 4 顶部分块镜镜面变形

Fig. 4 Surface deformation of top petal

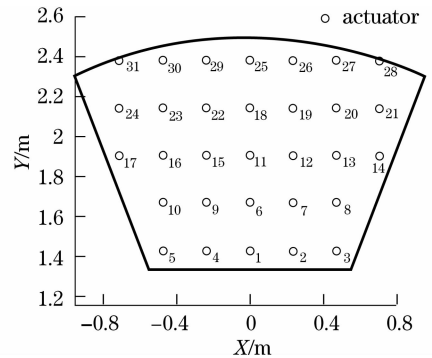


图 5 分块镜面形致动器排布

Fig. 5 Layout of figure control actuators

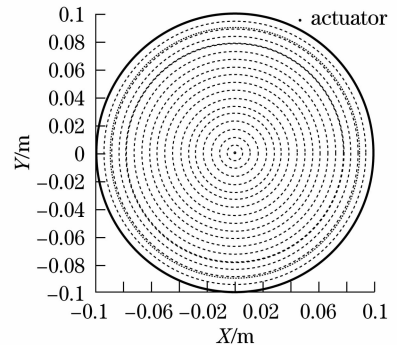


图 6 变形镜致动器排布

Fig. 6 Actuator arrangement of the deformable mirror

分块镜扫描捕获过程如图 7 所示,图中螺旋线代表分块镜像的运动轨迹,阴影区代表成像 CCD 的探测区域。扫描捕获完成后,需要将各分块镜的像按相应位置排列在中心镜周围,如图 7 所示。

表 1 顶部分块镜位置误差变化表

Table 1 Position error variation of top segmented mirror

	Decenter-X /mm	Decenter-Y /mm	Decenter-Z /mm	Tilt-X /(")	Tilt-Y /(")
Initial error	0.13	0.16	-0.14	-78	32
After Image scan	0.13	0.16	-0.14	-14.05	-4.92
After Image stack	0.13	0.16	-0.14	-1.68	2.70
After Co-phasing	$-2.67 \times 10^{-5}$	$-1.45 \times 10^{-4}$	$2.78 \times 10^{-6}$	$3.19 \times 10^{-3}$	$-5.15 \times 10^{-4}$

顶部分块镜经扫描捕获、分块镜合像、分块镜共相位后的位置误差变化如表 1 所示。由表 1 可见,分块镜位置误差在共相位调整后已经基本消除。

分块镜面形误差校正前后的出瞳波面分别如图 8,图 9 所示。可以看到面形校正后像差主要集中在分块镜边缘部分,导致校正后波像差 PV 值较大。剩余面形误差经变形镜校正后的出瞳波面如图 10 所示。

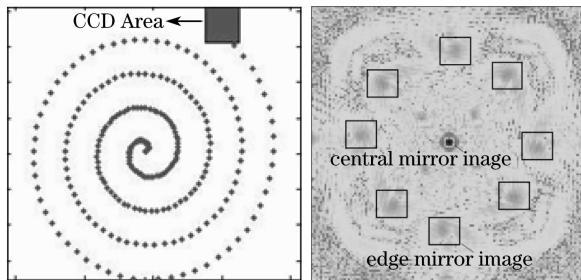


图 7 分块镜扫描捕获过程

Fig. 7 Image scanning and capture process of segmented mirror

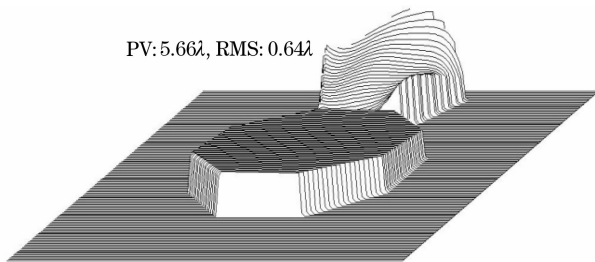


图 8 分块镜面形误差校正前出瞳波面

Fig. 8 Exit-pupil wavefront aberration before surface error correction

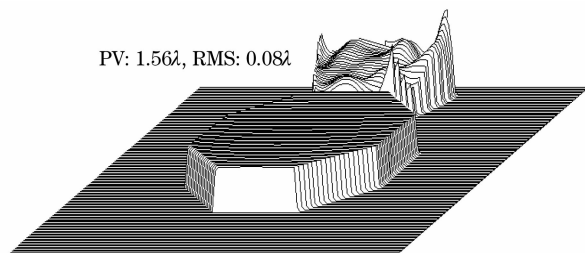


图 9 分块镜面形误差校正后出瞳波面

Fig. 9 Exit-pupil wavefront aberration after surface error correction

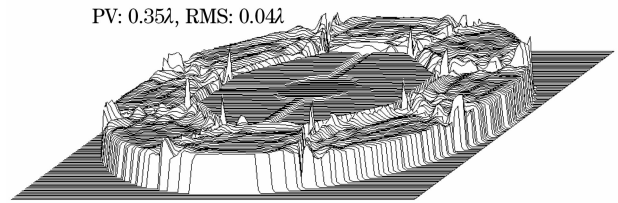


图 10 变形镜校正后出瞳波面

Fig. 10 Exit-pupil wavefront aberration after corrected by deformable mirror

## 5 结 论

分块式空间望远镜的波前传感及控制方法是实现高分辨率成像的关键。分块式空间望远镜展开后的波前误差具有动态范围大、空间频率覆盖宽的特点,需要采用分级校正的办法逐步减小误差。对一种典型的分块式空间望远镜,给出了具体的波前控制流程及相应的波前传感和控制算法。同时,针对该系统建立了一套集成仿真软件,通过分析分块主镜的误差校正过程验证了算法的可行性。

## 参 考 文 献

- Chen Xiaoli, Fu Danying. Solutions for space optical remote sensor with large aperture and ultrahigh resolution [J]. *Spacecraft Recovery and Remote Sensing*, 2003, **24**(4): 19~24
- 陈晓丽,傅丹鹰. 大口径甚高分辨率空间光学遥感器技术途径探讨[J]. *航天返回与遥感*, 2003, **24**(4): 19~24
- Lee D. Feinberg, Bruce H. Dean, David L. Aronstein *et al.*. TRL-6 for JWST wavefront sensing and control[C]. *Proc. SPIE* 2007, **6687**: 668708-1~23
- Zhang Wei, Deng Jian, Long Funian *et al.*. Image quality evaluation for segmented mirror synthetic aperture optics[J]. *Acta Optica Sinica*, 2008, **28**(4): 687~691
- 张伟,邓键,龙夫年等. 子孔径合成光学成像系统像质评价研究[J]. *光学学报*, 2008, **28**(4): 687~691
- Long Weijun, Wang Zhile, Zhou Yanping. Imaging Analysis and Computer Simulation of Optical Synthetic Aperture Telescope [J]. *Acta Optica Sinica*, 2004, **24**(8): 1009~1014
- 龙伟军,王治乐,周彦平. 光学综合孔径望远镜成像分析及计算机仿真[J]. *光学学报*, 2004, **24**(8): 1009~1014
- David N. Jacobson, Max Nein, Larry Craig *et al.*. Design of a large lightweight space telescope optical system for the Next Generation Space Telescope[C]. *SPIE*, 1998, **3356**: 74~88
- Dong Bing, Yu Xin. Multistage wavefront control for a segmented primary mirror with annular-sector subaperture[C]. *SPIE*, 2007, **6622**: 662215-1~10

- 7 Huang Yifan, Li Lin, Cao Yinhua. Computer-aided alignment for space telescope optical system[C]. *SPIE*, 2006, **6149**: 61490-1~7
- 8 Heng Mao, Xiao Wang, Dazun Zhao. Application of phase-diverse phase retrieval to wavefront sensing in non-connected complicated pupil optics[J]. *Chinese Optics Letters*, 2007, **5**(7): 397~399
- 9 Dong Bing, Yu Xin. On-orbit position error correction of segmented primary mirror of high-resolution space telescope[J]. *Acta Optica Sinica*, 2009, **29**(1): 55~59  
董冰, 俞信, 高分辨率空间望远镜分块主镜位置误差的在轨校正[J], *光学学报*, 2009, **29**(1): 55~59
- 10 Zhang Xiaofang, Yu Xin, Wang Xia *et al.*. Optimal analysis for segmented mirror capture and alignment in space optics system [C]. *SPIE*, 2008, **7010**: 70104G-1~10
- 11 Didier Rozière, S. Buous, A. Courteville. Position sensor for segmented mirror[C]. *SPIE*, 2004, **5495**: 660~669
- 12 Eric H. Smith, Gopal Vasudevan, Robert Reardon *et al.*. Coarse phasing of segmented mirrors using a dispersed fringe sensor[C]. *SPIE*, 2003, **4850**: 469~477
- 13 Fang Shi, Scott A. Basinger, David C. Redding. Performance of dispersed fringe sensor in the presence of segmented mirror aberrations-modeling and simulation[C]. *SPIE*, 2006, **6265**
- 14 Scott A. Basinger, Laura A. Burns, David C. Redding *et al.*. Wavefront sensing and control software for a segmented space telescope[C]. *SPIE*, 2003, **4850**: 362~369
- 15 Coronato P. A., Juergens R. C. Transferring FEA results to optics codes with Zernikes: a review of techniques[C]. *SPIE*, 2003, **5176**: 128~136
- 16 Wang Xiao, Mao Heng, Zhao Dazun. Simulation of wavefront reconstruction based on polynomials orthogonalized in an annulus sector domain [J]. *Transactions of Beijing Institute of Technology*, 2007, **27**(3): 260~265  
王潇, 毛珩, 赵达尊. 基于环扇域正交多项式的波前重构仿真[J]. *北京理工大学学报*, 2007, **27**(3): 260~265