

# 高分辨率空间望远镜分块主镜位置误差的在轨校正

董 冰 俞 信

(北京理工大学光电工程系, 北京 100081)

**摘要** 针对同轴偏场三反射镜系统用 Zemax 软件建立了主镜分块模型,提出了基于灵敏度矩阵反演的分块镜位置误差校正方法。对于非圆形的环扇形分块镜,采用环扇域正交的 Zernike 多项式拟合出瞳波像差。仿真计算了分块镜的灵敏度矩阵,验证了分块镜位置误差和出瞳像差变化量间的线性关系。仿真结果表明,当分块镜具有五个校正自由度时可以将光学系统恢复到设计状态,当分块镜只有三个校正自由度时会有少量剩余误差。

**关键词** 空间光学; 位置误差校正; 灵敏度矩阵; 分块主镜; 自由度; 高分辨率空间望远镜

**中图分类号** TB133 **文献标识码** A **doi:** 10.3788/AOS20092901.0055

## On-Orbit Position Error Correction of Segmented Primary Mirror of High-Resolution Space Telescope

Dong Bing Yu Xin

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

**Abstract** A coaxial three-mirror anastigmat system with a segmented primary mirror is modeled in Zemax. A position error correction method for segmented mirror based on sensitivity matrix retrieval is proposed. For the annular-sector segmented primary mirror, the exit-pupil aberration is fitted with annular-sector Zernike orthogonal polynomials. The sensitivity matrix of segmented mirror is calculated and the linear relationship between segment position error and exit-pupil aberration variation is verified. Simulation results show that the optical system can be recovered to the design state on condition that the segment has five corrective degrees of freedom, but small residual errors will remain in three degrees of freedom correction.

**Key words** space optics; position error correction; sensitivity matrix; segmented primary mirror; degree of freedom; high-resolution space telescope

### 1 引 言

受镜面加工能力和运载火箭整流罩尺寸的限制,大口径、高分辨率空间望远镜的主镜通常采用分块可展开设计<sup>[1]</sup>。由于主镜展开机构的精度有限,主镜的各个分块镜将存在六自由度的位置误差,必须由分块镜后连接的位置致动器实施在轨校正,以满足空间望远镜高分辨率成像的要求。美国目前正在研制的詹姆斯-韦伯空间望远镜(JWST)采用了复杂的波前探测和控制算法以实现主镜各分块镜的共相位成像,并已进行了大量的地面实验<sup>[2]</sup>。我国目前对分块式空间望远镜的波前误差探测及校正主

要进行了一些基础理论的研究<sup>[3~5]</sup>。对于分块镜的位置误差校正问题,王姗姗等<sup>[6]</sup>分析了校正分块镜位置误差所需的最少自由度,惠梅等<sup>[7]</sup>对分块镜位置致动器的驱动点位置进行了优化,戴妍峰等<sup>[8]</sup>研究了用序列二次规划法校正分块镜的位置误差。

本文以同轴偏场三反射镜系统为例,用 Zemax 建立了主镜分块模型,用基于灵敏度矩阵反演的方法对主镜分块镜的位置误差进行了仿真校正。

### 2 光学系统建模

空间望远镜的设计可以有多种形式,其中同轴

收稿日期: 2008-05-31; 收到修改稿日期: 2008-07-11

作者简介: 董 冰(1983-),男,博士研究生,主要从事自适应光学和空间光学方面的研究。E-mail: icybird@bit.edu.cn

导师简介: 俞 信(1941-),男,教授,博士生导师,主要从事自适应光学、空间光学、光信息处理等方面的研究。

E-mail: yuxin@bit.edu.cn

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。美国的下一代空间望远镜(NGST)即采用了这种设计方案<sup>[9]</sup>。本文针对某口径 5 m,视场角为  $\pm 0.3^\circ$  的同轴偏场三反射镜系统的主镜进行了分块设计,用 Zemax 软件建立了系统模型。由于主镜包含多个分块镜,为了实现对每个分块镜的单独控制,需用 Zemax 软件的非顺序模式(Non-sequential mode)对主镜进行建模。主镜分块后的系统光路如图 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。在望远镜发射时主镜各个环扇形分块镜上下交错收拢以减小尺寸,到达预定轨道后再展开成工作状态。

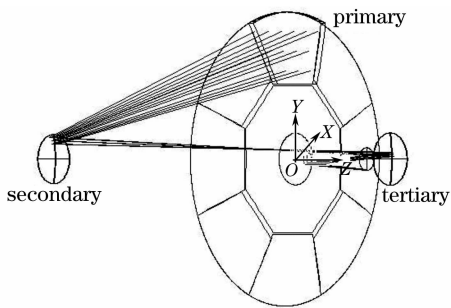


图 1 具有分块主镜的同轴三镜消像散系统

Fig. 1 Coaxial three-mirror anastigmatic system with a segmented primary mirror

分块镜的位置误差和选取的坐标系有关。本文以系统光轴与主镜的交点为坐标原点建立坐标系(如图 1),分块镜在六个自由度上都有可能产生位置误差。由于主镜面形具有圆对称性,分块镜绕光轴  $Z$  的旋转对像差影响很小,可不予考虑。分块镜其余五个自由度分别是  $X$  方向偏心( $D_x$ )、 $Y$  方向偏心( $D_y$ )、 $Z$  方向平移( $D_z$ )、 $X$  方向倾斜( $T_x$ )和  $Y$  方向倾斜( $T_y$ )。

### 3 主镜位置误差的在轨校正

空间望远镜在轨展开后,由于存在主镜展开机构定位误差、镜面热变形和重力变形、镜面加工制造误差等,校正前的主镜初始波前误差可以达到毫米量级<sup>[10]</sup>。在校正主镜分块镜误差之前首先要进行主光轴调整,即以主镜中心镜作为基准固定不动,去除次镜和三镜的位置误差。主光轴调整完成后,次镜和三镜位置也固定不动,利用主镜分块镜后面的位置致动器依次去除各分块镜的位置误差,最终实现整个主镜面的共相位拼接。

主镜分块镜的位置误差校正一般分为两个阶

段,即粗调整和精调整。所谓粗调整,即根据像面的光强分布调整边缘分块镜的像斑位置与中心分块镜的像斑位置基本重合,去除分块镜的粗大误差,为进一步的精调整提供条件。精调整是指通过测量出瞳波像差对分块镜的位置误差进行精确校正,一般具有纳米级的调整精度。精调整中的波前探测一般采用色散条纹法和相位恢复法<sup>[10]</sup>。本文讨论的分块镜位置误差校正属于精调整范畴。由于八个环扇形分块镜的调整具有相似性,本文仅以主镜顶部的一个分块镜(图 1)为例进行分析。

#### 3.1 主镜分块镜位置误差校正方法

光学系统的像差和结构参数在一定范围内存在近似线性的关系。设光学系统像差用  $F$  表示,元件结构参数用  $X$  表示,则两者之间的关系可表示为

$$\mathbf{A}\Delta\mathbf{X} = \Delta\mathbf{F}, \quad (1)$$

式中  $\Delta\mathbf{X}$  为结构参数的改变量,即分块镜的位置误差, $\Delta\mathbf{F}$  为实际系统相对于设计系统的像差变化量。设计系统像差由光学设计软件得到,实际系统像差可以由干涉仪或其他波前传感装置测得。矩阵  $\mathbf{A}$  称为灵敏度矩阵,可以通过对每个结构参数依次施加微小改变量并计算像差求出:

$$\mathbf{A} = \begin{pmatrix} \frac{\delta f_1}{\delta x_1} & \cdots & \frac{\delta f_1}{\delta x_n} \\ \vdots & \vdots & \vdots \\ \frac{\delta f_m}{\delta x_1} & \cdots & \frac{\delta f_m}{\delta x_n} \end{pmatrix}, \quad (2)$$

式中  $\delta x$  为结构参数的微扰, $\delta f$  为对应像差参数的变化量。

求解(1)式即可得到分块镜位置误差  $\Delta\mathbf{X}$ :

$$\Delta\mathbf{X} = \mathbf{A}^+ \Delta\mathbf{F}, \quad (3)$$

式中  $\mathbf{A}^+$  为矩阵  $\mathbf{A}$  的 Moore-Penrose 广义逆。

根据求得的位置误差对分块镜进行调整,如果调整后像质不满足要求可以再次测量像差并调整分块镜位置,直至像差收敛。

#### 3.1 分块镜的波像差拟合函数

光学系统的出瞳波像差是反映系统成像质量的重要指标。对于具有圆形光瞳的光学系统,一般用在单位圆内正交的 Zernike 多项式拟合出瞳波像差,以 Zernike 系数作为像差参数<sup>[11]</sup>。采用的三反射镜系统的入瞳位在主镜上,顶部分块镜和中心镜之间没有位置误差时的出瞳波像差如图 2 所示。在合像过程中,中心分块镜作为基准固定不动,出瞳波面的变化主要集中在光瞳顶部的环扇形区域内。对于这样的非圆形光瞳,原有的 Zernike 多项式将失

去正交性,拟合的 Zernike 系数之间不独立。解决方法是用 Gram-Schmidt 正交化方法推导出在单位圆顶部环扇区域内正交的 Zernike 多项式,然后用该多项式拟合出瞳像差。仿真表明这种方法比用圆域正交 Zernike 多项式具有更好的数值稳定性<sup>[12]</sup>。

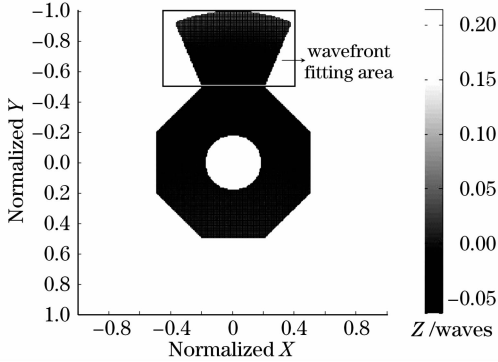


图 2 无位置误差时的出瞳波像差图

Fig. 2 Wavefront aberration map at exit pupil without position error

本文以圆域正交的条纹 Zernike 多项式为基函数,用 Gram-Schmidt 正交化方法可以推导出环扇域正交的 Zernike 多项式。环扇域正交 Zernike 多项式的前 9 项分别为

表 1 分块镜的灵敏度矩阵

Table 1 Sensitivity matrix of segmented mirror

Zernike term	$D_x=1 \text{ mm}$	$D_y=1 \text{ mm}$	$D_z=1 \text{ mm}$	$T_x=1''$	$T_y=1''$
$\Delta Z_1$	0	-140.51	-1025.12	-6.97	0
$\Delta Z_2$	-92.30	0	0	0	4.59
$\Delta Z_3$	0	-21.33	390.49	-1.14	0
$\Delta Z_4$	0	0.83	3.77	0.021	0
$\Delta Z_5$	0	-0.49	0.14	-0.012	0
$\Delta Z_6$	0.77	0	0	0	-0.019
$\Delta Z_7$	0.13	0	0	0	-0.003
$\Delta Z_8$	0	0.071	-0.048	0.0018	0
$\Delta Z_9$	0	0	-0.0052	0	0

由表 1 可见,分块镜各自由度误差都只对部分 Zernike 系数产生影响,且主要影响 Zernike 多项式的低阶项系数,高阶项的 Zernike 系数变化逐渐趋向于零,说明分块镜位置误差引起的像差主要是低空间频率像差。本文采用 Zernike 多项式的前 9 项表征系统像差。由于同轴偏场空间望远镜的视场较小,可以只对中心视场的像差进行探测。

分块镜的位置误差和出瞳像差的变化在一定范围内存在线性关系。只有当这种线性关系成立时才可以由(1)式计算分块镜位置误差。下面举例对这一线性关系进行验证。设分块镜的初始位置误差如下:

$$\begin{aligned}
 Z_1 &= 1, \\
 Z_2 &= 5.654x, \\
 Z_3 &= 7.381y - 5.631, \\
 Z_4 &= 30.49x^2 + 30.49y^2 - 47.31y + 16.83, \\
 Z_5 &= 47.24xy - 37.48x, \\
 Z_6 &= 12.96x^2 - 50.66y^2 + 75.3y - 27.44, \\
 Z_7 &= 287x^2y + 287y^3 - 233.8x^2 - 653.9y^2 + \\
 &\quad 480y - 112.7, \\
 Z_8 &= 179.7x^3 + 179.7xy^2 - 293.1xy + 105.7x, \\
 Z_9 &= 137.5x^2y - 385.3y^3 + 858.7y^2 - \\
 &\quad 118.0x^2 - 627.6y + 150.6,
 \end{aligned} \quad (4)$$

(4)式与同阶圆域正交 Zernike 多项式相比有相似的相位分布和像差含义<sup>[12]</sup>,多项式系数的变化量即(1)式中的  $\Delta F$ 。如无特殊说明,下文中的 Zernike 多项式均指环扇域正交 Zernike 多项式。

### 3.3 分块镜的灵敏度矩阵

分块镜各个自由度的位置误差都将引起出瞳像差的变化,通过对分块镜的五个自由度分别施加微小误差后计算 Zernike 系数变化量,再由(2)式即可得到分块镜的灵敏度矩阵  $A$  如表 1 所示。

$D_x=0.05 \text{ mm}$ ,  $D_y=-0.05 \text{ mm}$ ,  $D_z=0.02 \text{ mm}$ ,  $T_x=3''$ ,  $T_y=-2''$ 。同时存在上述误差时计算出瞳像差的变化量列于表 2 第一行。将表 1 中分块镜的各自由度误差单独作用时对应的 Zernike 系数变化量进行线性叠加得到的结果列于表 2 的第二行,可以看出这两行数据极为接近,即说明线性关系成立。仿真表明在如下范围内分块镜位置误差和出瞳像差变化量之间都满足线性关系:

$$\begin{aligned}
 |D_x| < 1 \text{ mm}, \quad |D_y| < 1 \text{ mm}, \quad |D_z| < 1 \text{ mm}, \\
 |T_x| < 20'', \quad |T_y| < 20''
 \end{aligned}$$

表 2 线性关系验证

Table 2 Linear relation verification

Zernike term	$\Delta Z_1$	$\Delta Z_2$	$\Delta Z_3$	$\Delta Z_4$	$\Delta Z_5$	$\Delta Z_6$	$\Delta Z_7$	$\Delta Z_8$	$\Delta Z_9$
Coefficient 1	-34.3764	-13.7931	5.4426	0.0963	-0.0083	0.0762	0.0126	0.0008	-0.0001
Coefficient 2	-34.3869	-13.7950	5.4563	0.0969	-0.0087	0.0765	0.0125	0.0009	-0.0001

## 4 仿真校正

设在粗调整完成后分块镜的各自由度位置误差可以减小到如下范围以内:

$$|D_x| < 0.1 \text{ mm},$$

$$|D_y| < 0.1 \text{ mm},$$

$$|D_z| < 0.02 \text{ mm},$$

$$|T_x| < 5'', \quad |T_y| < 5'',$$

在此误差范围内随机生成一组误差数据,用本文第

表 3 分块镜位置误差校正

Table 3 Position error correction for segmented mirror

	$D_x/\text{mm}$	$D_y/\text{mm}$	$D_z/\text{mm}$	$T_x/(\text{''})$	$T_y/(\text{''})$	PV/ $\lambda$	RMS/ $\lambda$	SR
Before correction	-0.07	0.08	-0.02	-2	4	105.46	23.04	0.51
After correction	$-3.49 \times 10^{-5}$	$-1.52 \times 10^{-4}$	$2.24 \times 10^{-6}$	$3.13 \times 10^{-3}$	$-6.15 \times 10^{-4}$	0.28	0.058	0.88

表 3 所示的校正过程要求分块镜的位置致动器具有五个校正自由度,而实际上由于分块镜的各自由度之间具有补偿关系,可以根据像质要求适当减少分块镜的校正自由度,可减少光机系统的复杂程度、提高可靠性、降低成本<sup>[6]</sup>。分析表 1 可见,  $D_x$  和  $T_y$ ,  $D_y$  和  $T_x$  对应列之间存在近似相关,也就是  $D_x$  和  $T_y$ 、 $D_y$  和  $T_x$  引起的像差变化是一致的,它们之间可相互补偿。下面仿真分块镜只有  $D_z$ 、 $T_x$ 、 $T_y$  和只有  $D_x$ 、 $D_y$ 、 $D_z$  三个校正自由度的情况。为了方便

表 4 三自由度位置误差校正

Table 4 Position error correction with three degrees of freedom

	$D_x/\text{mm}$	$D_y/\text{mm}$	$D_z/\text{mm}$	$T_x/(\text{''})$	$T_y/(\text{''})$	PV/ $\lambda$	RMS/ $\lambda$	SR
Initial	-0.07	0.08	-0.02	-2	4	105.46	23.04	0.51
After correction [ $D_z$ , $T_x$ , $T_y$ ]	-0.07	0.08	-0.00025	-1.58	-1.40	0.45	0.066	0.85
After correction [ $D_x$ , $D_y$ , $D_z$ ]	0.20	0.10	-0.00032	-2	4	0.72	0.080	0.81

## 5 结 论

研究了高分辨率空间望远镜主镜分块镜位置误差的在轨校正方法。对于非圆孔径的环扇形分块镜,需用在环扇域正交的 Zernike 多项式拟合出瞳波像差。仿真结果表明,分块镜位置误差和出瞳像差的变化存在线性关系,可用灵敏度矩阵反演的方法计算分块镜位置误差;当分块镜具有五个调整自由度时可以将光学系统恢复到设计状态,当分块镜只有三个校正自由度时会产生少量剩余误差。实际

二节所述的方法进行仿真校正。校正前后分块镜的位置误差、出瞳波像差的峰值(PV)和均方根(RMS)值、系统施特雷尔比(SR)如表 3 所示。已知在没有分块镜位置误差时出瞳波像差的 PV 值为  $0.28\lambda$ , RMS 值为  $0.058\lambda$  ( $\lambda = 632.8 \text{ nm}$ ), 系统施特雷尔比为 0.88。从表 3 可见,校正后分块镜的各个自由度误差都已经接近于零,像质指标也都恢复到设计值。

对比,设分块镜初始位置误差和表 3 中的数据相同,校正结果如表 4 所示。

根据表 4,当分块镜只有三个校正自由度时,校正后各自由度的误差都不为零,某些校正自由度上的误差被完全保留,由另外三个自由度进行补偿。校正后系统的成像质量有很大提高,但是和设计值相比仍有所下降,说明只调整分块镜的部分自由度会产生剩余误差。

上波前探测误差和镜面的面形误差等因素都会对分块镜位置误差的在轨校正产生影响,还需进一步深入和完善。

## 参 考 文 献

- Chen Xiaoli, Fu Danying. Solutions for space optical remote sensor with large aperture and ultrahigh resolution [J]. *Spacecraft Recovery & 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传感器技术途径探讨[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
- 3 Heng Mao, Xiao Wang, Dazun Zhao. Application of phase-diverse phase retrieval to wavefront sensing in non-connected complicated pupil optics[J]. *Chin. Opt. Lett.*, 2007, **5**(7): 397~399
  - 4 Dong Bing, Yu Xin. Multistage wavefront control for a segmented primary mirror with annular-sector subaperture[C]. *Proc. SPIE*, 2007, **6622**: 662215
  - 5 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
  - 6 Wang Shanshan, Qu Dandan, Zhu Qiudong *et al.*. Determination of limited freedoms for restoration error correction of segmented mirrors in space[J]. *Optical Technique*, 2006, **32**(4): 504~510  
王姗姗,曲丹丹,朱秋东等. 校正空间分块镜复位误差所需的最少自由度的确定[J]. *光学技术*, 2006, **32**(4): 504~510
  - 7 Hui Mei, Luo Jingjing, Zhao Yuejin *et al.*. The optimization of the three driving points on each fan-shaped mirror of the segmented mirrors[J]. *Optical Technique*, 2008, **34**(2): 166~169  
惠 梅,罗晶晶,赵跃进等. 分块镜扇形子镜驱动点位置优化计算[J]. *光学技术*, 2008, **34**(2): 166~169
  - 8 Dai Yanfeng, Liu Zaozhen. Research on cophasing optimized algorithms for space-based telescope segmented primary mirror [J]. *Optical Technique*, 2008, **34**(3): 419~421  
戴妍峰,刘藻珍. 空间望远镜分块式主镜共相位调整的优化算法研究[J]. *光学技术*, 2008, **34**(3): 419~421
  - 9 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]. *Proc. SPIE*, 1998, **3356**: 74~88
  - 10 David Redding, Scott Basinger, David Cohen *et al.*. Wavefront control for a segmented deployable space telescope[C]. *Proc. SPIE*, 2000, **4013**: 546~558
  - 11 Zhang Bin, Han Changyuan. Study on optimization of computer-aided alignment of a three-mirror off-axis aspherical optical system[J]. *Acta Optica Sinica*, 2001, **21**(1): 54~58  
张 斌,韩昌元. 离轴非球面三反射镜光学系统装调中计算机优化方法的研究[J]. *光学学报*, 2001, **21**(1): 54~58
  - 12 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