

拼接式望远镜光学系统及其子镜失调误差仿真

雷存栋^{1,2} 郑列华¹ 车英²

¹中国科学院上海技术物理研究所, 上海 200083

²长春理工大学光电工程学院, 吉林 长春 130022

摘要 为了完成直径 2 m 拼接红外相机的项目, 采用圆形子镜加抛物面扇形分块镜的主镜拼接方案, 完成了相机的光学系统设计; 为了分析拼接失调误差对望远镜系统的影响, 通过主镜的抛物面方程导出了拼接误差的波像差表达式, 由此建立了波像差与干涉亮纹之间的线性关系, 并在光线追迹的基础上, 利用泽尼克多项式对其进行了仿真和验证, 提出了基于泽尼克多项式实现拼接误差的线性反演方法, 通过编写 Python 程序模拟了单个子镜拼接过程中的误差反演。结果表明当拼接平移误差小于 0.1 mm(或倾斜误差小于 0.1°)时, 采用干涉检测的方法, 得到的反演偏差优于 0.5%, 且随着拼接误差的继续减小而趋近于零。

关键词 几何光学; 分块拼接望远镜; 泽尼克系数; 数值仿真

中图分类号 TH751

文献标识码 A

doi: 10.3788/LOP52.112203

Segmented Telescope Optical System and Its Maladjustment Error Analysis of Aspheric Sector-Shaped Sub-mirror

Lei Cundong^{1,2} Zheng Liehua¹ Che Ying²

¹Shanghai Institute of Technical Physics, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 200083, China

²School of Opto-Electronics Engineering, Changchun University of Science and Technology, Changchun, Jilin 130022, China

Abstract In order to accomplish the project of infrared telescope with $\phi 2$ m aspheric segmented primary mirror, the infrared telescope optical system design is finished, its primary mirror consists of a circular center mirror and 8 sector-shaped segment mirrors. For the purpose of analyzing the influences of segmented mirrors' maladjustments on whole optical system, a wavefront aberration representation is derived through aspheric surface equation, then the linear relation between wavefront aberration and interference bright fringe is established, and based on optical raying tracing, the linear relation is verified by using simulation method with fringe Zernike coefficients. A linear retrieval method of stitching errors base on Zernike coefficients is proposed, a Python-based program is compiled in order to simulate errors retrieval in the stitching process of single sector-shaped segment. The simulation results show that when the stitching translation tolerance is less than 0.1mm (or angular tolerance is less than 0.1°), testing by interference method, the retrieval deviation is better than 0.5%, and continues to decrease to near zero.

Key words geometric optics; segmented telescope; Zernike coefficients; numerical simulation

OCIS codes 080.1010; 110.6770; 220.1140; 120.2650

1 引言

为了满足空间望远镜对大视场和高分辨的要求, 新一代空间相机必然会增大光学系统的口径, 超大口径光学系统在空间的应用会受到空间运载工具的限制, 采用镜面折叠和拼接技术将是行之有效的途径^[1-2]。国际上已建成一批地基超大口径拼接望远镜^[3-5], 下一步必然会将大口径拼接光学系统延伸到空间应用, 为

收稿日期: 2015-02-15; 收到修改稿日期: 2015-03-15; 网络出版日期: 2015-08-26

基金项目: 国家重点基础研究发展计划(2011CB013206)

作者简介: 雷存栋(1971—), 男, 博士研究生, 主要从事仪器科学与技术方面的研究。E-mail: leicd2012@foxmail.com

导师简介: 车英(1964—), 男, 博士, 教授, 博士生导师, 主要从事测控技术及仪器、现代兵器测试技术与系统等方面的研究。E-mail: cheying@cust.edu.cn

此,国内也相应地开展了这方面的研究^[6-8]。

主镜拼接过程可以分为粗调和精调两部分,粗调借助三坐标测量仪或球径仪等检测设备可以使拼接误差接近微米量级,实现精确共焦,在此基础上进行精调,实现共相,共相调节是镜面拼接的关键,在设计和使用拼接镜前,应综合考虑各种误差并进行相位恢复^[9-10],而通过成熟的软件对拼接系统进行建模和仿真真是拼接误差分析普遍采用的方法^[11-13],如美国的 James Webb 拼接望远镜建立了“Webb SLOM”数学模型对望远镜进行全面地系统地仿真^[14-15]。

本课题组所承担的中科院重点型号背景预研项目“2 m 合成孔径红外相机研制任务”要求相机的 2 m 主镜采用拼接反射镜,本文为此设计了基于拼接主镜的望远镜光学系统,并对分块镜的失调误差进行了分析和仿真验证,在此基础上提出了拼接误差的线性反演算法,并通过仿真验证了该算法在本项目中应用的可行性。

2 拼接望远镜设计

大型拼接望远镜分块镜面普遍采用六边形,如美国的 KECK、HET, 西班牙的 GTC, 国内的 LAMOST 等,六边形镜胚要磨去的材料较少,但其内外边缘都不是圆形,对于 2 m 口径的拼接镜而言,如果采用六边形拼接,增加了拼接的难度和光学加工的成本,为此考虑采用一块大的中心圆镜再加上四周形状相同的 8 个小的扇形镜拼接方案,如图 1 所示。根据项目要求并结合实际的加工工艺情况,扇形分块镜的外径按要求定为 $R = 1 \text{ m}$,内径设定为 $r = 0.61 \text{ m}$,中心镜口径为 $\phi 1.2 \text{ m}$,扇形两边夹角 45° ,考虑到镜面背部支撑及调节机构占用的空间及装配工艺的要求,每个相邻的扇形分块镜之间需要留出适当的平行间隙,假设每个扇形侧边到中间分界线的距离为 d ,光学设计时,根据 d 的值就可以求出每个扇形分块镜的顶点坐标,以第 1 块扇形为例,连接扇形顶点 A 点和圆心 O ,如图 2 所示,根据 $\triangle AOM$ 和 $\triangle AON$ 之间的关系,可以得到扇形顶点 A 的坐标:

$$\begin{cases} R \sin \theta = d \\ \omega = 22.5^\circ - \theta \\ X_A = -R \sin \omega = -R \sin[22.5^\circ - a \sin(d/R)] \\ Y_A = R \cos \omega = R \cos[22.5^\circ - a \sin(d/R)] \end{cases} \quad (1)$$

同理,可以求出其他各点的坐标。

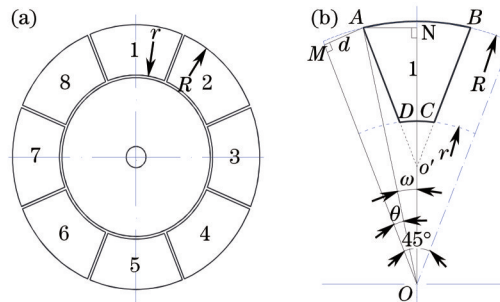


图 1 (a) 分块拼接主镜以及 (b) 分块子镜示意图

Fig.1 Schematic of (a) segmented primary mirror and (b) single mirror

望远镜光学系统采用主次镜折反结构,主镜拼接分块镜用 Zemax 软件非序列光学元件表示,拼接母镜设计为抛物面,口径 $\phi 2 \text{ m}$,曲率半径为 $R_0 = 3.25 \text{ m}$,考虑到子镜调节机构的装配要求,各拼接子镜间留有 20 mm 的间隙,最终设计结果如图 2 所示。机构设计模型如图 3 所示。

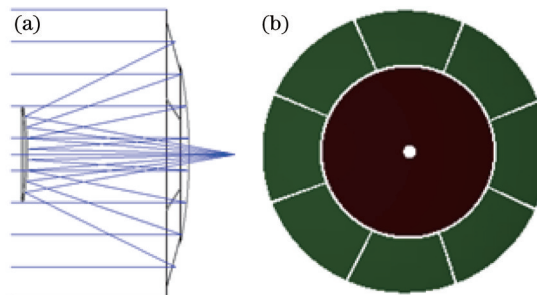


图 2 (a) 望远镜系统以及 (b) 非序列元件示意图

Fig.2 Schematic of (a) telescope system and (b) non-sequential components

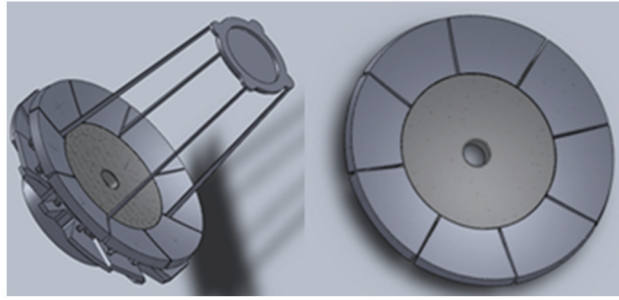


图3 红外望远镜结构模型

Fig.3 Structure model of infrared telescope

为了分析拼接子镜间 20 mm 的间隙对光学系统性能的影响,对子镜间存在 20 mm 的间隙和没有间隙的两种情况下的 Zemax 软件追迹的调制传递函数(MTF)曲线进行了比较,对比曲线如图 4 所示,从图中可以看出,间隙导致了 MTF 下降,但下降幅度不大,不影响设计的要求。

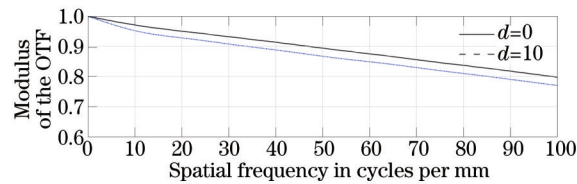


图4 MTF 曲线图

Fig.4 MTF curves

3 拼接失调误差仿真

主镜拼接过程,首先是通过粗调完成精确共焦,这个过程比较容易实现。在实现共焦之后,需要借助光学检测的方法对拼接失调误差进行检测,单个扇形分块镜存在 5 种影响拼接的位置失调误差,分别为 X, Y, Z 轴上的平移误差,用 $\varepsilon_x, \varepsilon_y, \varepsilon_z$ 表示和绕 X, Y 轴的旋转角度误差 α_x, α_y 。这 5 种失调误差都对像差有影响,也可能同时存在于检测的结果之中,如何定量分析这些失调误差造成的影响,并从检测的结果中将这误差分离出来是拼接镜共相检测的关键,为此需要对失调误差进行分析。

3.1 失调误差数学分析

拼接母镜是以其中心为原点,以 Z 轴为回转轴的 $K=-1$ 的抛物面,其面形方程表示如下:

$$Z = (x^2 + y^2)/2R_0, \quad (2)$$

当存在 ε_x 误差时,将 $x = x - \varepsilon_x$ 代入(2)式,得

$$Z = [(x - \varepsilon_x)^2 + y^2]/(2R_0) = (x^2 + y^2)/(2R_0) - x\varepsilon_x/R_0 + \varepsilon_x^2/(2R_0), \quad (3)$$

忽略微小量 $\varepsilon_x^2/(2R_0)$ 项,(3)式可表示为

$$Z = (x^2 + y^2)/(2R_0) - x\varepsilon_x/R_0, \quad (4)$$

当同时存在 $\varepsilon_x, \varepsilon_y, \varepsilon_z$ 时,忽略各误差平方项,出瞳处的波前分布可以表示为

$$W(x, y) = \frac{x^2 + y^2}{2R_0} - \varepsilon_z \frac{x^2 + y^2}{2R_0^2} - \varepsilon_x \frac{x}{R_0} - \varepsilon_y \frac{y}{R_0}. \quad (5)$$

在空气中,由 $\varepsilon_x, \varepsilon_y, \varepsilon_z$ 误差引起的波像差 $\Delta W(x, y)$ 在像面上的干涉亮条纹的分布为 $\Delta W(x, y) = m\lambda (m = 0, \pm 1, \pm 2, \dots)$, 即

$$-\varepsilon_z \frac{x^2 + y^2}{2R_0^2} - \varepsilon_x \frac{x}{R_0} - \varepsilon_y \frac{y}{R_0} = m\lambda \quad (m = 0, \pm 1, \pm 2, \dots), \quad (6)$$

由(6)式可知,当仅有 ε_x 误差时,

$$\varepsilon_x = -\frac{m\lambda R_0}{x} (m = 0, \pm 1, \pm 2, \dots). \quad (7)$$

可见,对于给定的微小误差 ε_x ,条纹级数 m 与 x 成正比,误差 $\varepsilon_y, \varepsilon_z$ 依此类推。对于微量倾斜误差 α_x

和 α_y , 可以用平移误差 ε_x 和 ε_y 表示:

$$\begin{aligned}\varepsilon_x &= R\alpha_x \approx R_0\alpha_x \\ \varepsilon_y &= R\alpha_y \approx R_0\alpha_y\end{aligned}\quad (8)$$

式中 R 为镜面上的点 (x,y) 到母镜焦点的距离, $Z(x,y)$ 为坐标点 (x,y) 对应的 Z 轴坐标, 可见倾斜误差产生了放大 R_0 倍的等效平移误差, 故也同样与干涉级数 m 接近正比关系。

波像差也可以用泽尼克多项式描述, 其前9项多项式与像差 $W(\rho, \theta)$ 对应的关系为^[6]:

$$\begin{aligned}W(\rho, \theta) &= Z_1 - Z_4 + Z_9 + \text{piston} \\ &\rho \sqrt{(Z_2 - 2Z_7)^2 + (Z_3 - 2Z_8)^2} \times \\ &\cos\left[\theta' - \tan^{-1}\left(\frac{Z_3 - 2Z_8}{Z_2 - 2Z_7}\right)\right] + \text{tilt} \\ &\rho^2(2Z_4 - 6Z_9 \pm \sqrt{Z_5^2 + Z_6^2}) \pm \text{focus} \\ &2\rho^2 \sqrt{Z_5^2 + Z_6^2} \cos^2\left[\theta' - \frac{1}{2} \tan^{-1}\left(\frac{Z_6}{Z_5}\right)\right] + \text{astigmatism} \\ &3\rho^3 \sqrt{Z_7^2 + Z_8^2} \cos\left[\theta' - \tan^{-1}\left(\frac{Z_8}{Z_7}\right)\right] + \text{coma} \\ &6\rho^4 Z_9 \text{ spherical}\end{aligned}\quad (9)$$

式中 ρ, θ 表示单位圆内的各点半径和角度, Z_i 表示第 i 项多项式系数, 与同干涉条纹一样, 泽尼克多项式也应该与拼接误差之间存在接近正比的关系。

3.2 拼接误差仿真

为了分析单一扇形分块镜中单一拼接误差与泽尼克系数的关系, 首先在 Zemax 软件输入一组 ε_x 的值, 作为最顶层扇形分块的 X 轴平移位置误差并进行光学追迹, 从而得到了一组由 ε_x 误差导致的像差泽尼克系数, 利用(9)式中的像差公式, 对所表征的像差进行求解, 得到的数据列于表1。

表1 ε_x 像差数据 ($\lambda = 0.6328 \mu\text{m}$)

Table 1 Aberrations data of ε_x ($\lambda = 0.6328 \mu\text{m}$)

No	ε_x /mm	Tilt / λ	Focus / λ	Asti / λ	Coma / λ
1	-1.5	2.51	30.66	33.86	18.073
2	-1.0	1.54	21.034	22.413	12.132
3	-0.5	0.77	10.42	11.207	6.066
4	-0.1	0.15	2.07	2.241	1.213
5	-0.01	0.01	0.206	0.224	0.121
6	0.01	-0.015	-0.206	-0.224	-0.121
7	0.1	-0.154	-2.062	-2.241	-1.213
8	0.5	-0.771	-10.24	-11.207	-6.065
9	1.0	-1.543	-20.29	-22.41	-12.13
10	1.5	-2.637	-31.873	-33.82	-17.87

根据表1绘制的 ε_x 像差曲线如图5所示, 同样求得另外4种拼接误差的像差曲线如图6~9所示。从中可以看出拼接误差与泽尼克多项式之间明显存在线性相关, 且倾斜像差是平移像差的 10^3 倍, 这与(8)式中 α_x

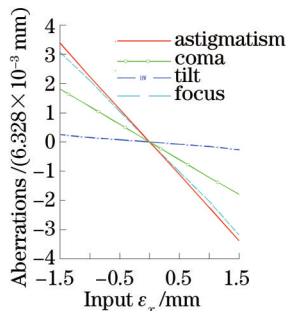


图5 ε_x 像差曲线

Fig.5 ε_x aberration curves

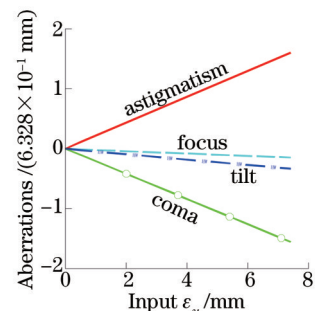


图6 ε_y 像差曲线

Fig.6 ε_y aberration curves

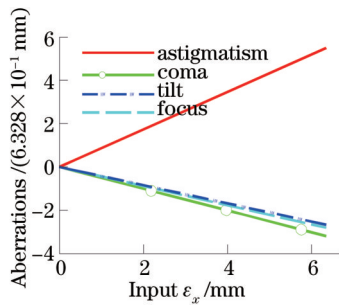


图7 ϵ_x 像差曲线

Fig.7 ϵ_x aberration curves

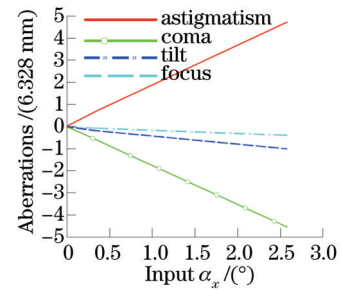


图8 α_x 像差曲线

Fig.8 α_x aberration curves

与 ϵ_x 像差相差 $R_0 = 3.25 \times 10^3$ 倍相符。

(4)式中忽略了 $\epsilon_x^2/2R_0$ 项,这是非线性误差的来源,因此,非线性误差百分比 γ 可以表示为

$$\gamma = \frac{\epsilon_x^2/2R_0}{-\epsilon_x x/R_0 + \epsilon_x^2/2R_0} \times 100\% = \frac{\epsilon_x}{-2x + \epsilon_x} \times 100\% \approx \frac{\epsilon_x}{-2x} \times 100\% . \tag{10}$$

由于 x 远远大于 ϵ_x ,因而即使 ϵ_x 远离线性区间,非线性失真依然很小。

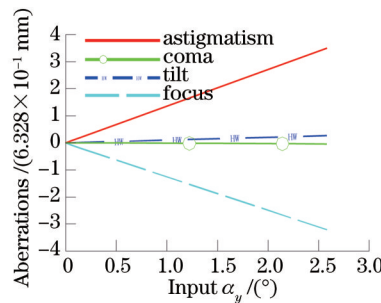


图9 α_y 像差曲线

Fig.9 α_y aberration curves

3.3 拼接误差反演

依据以上拼接误差分析的结果,可以利用泽尼克多项式求解拼接误差,例如,对于单个子镜,用(9)式计算出的泽尼克像差组成一个灵敏度矩阵,用 A 表示,相应的泽尼克系数项用 B 矩阵表示,5种拼接反演误差用矩阵 X 表示,利用3个矩阵的线性关系 $AX = B, X = A \setminus B$ 就可以实现误差反演。

为了进行验证,利用Python编程语言,编写了模拟主镜拼接过程中的误差检测与反演的程序,通过动态数据交换(DDE)与Zemax软件进行实时通信以模拟单个子镜的拼接过程:先在模拟程序中随机设定一组5个10 mm级的初始值,作为拼接子镜的初始误差,通过DDE自动赋值给Zemax软件中的单个子镜的影响拼接的5个位置偏移参数,然后发送指令给Zemax软件对赋值后的主镜进行光线追迹,程序由DDE获取追迹后的泽尼克系数,利用泽尼克像差的线性关系,通过泽尼克系数计算各拼接误差的反演值并加以保存,然后基于反演的结果,重新减小设定的误差,再进行迭代,直至以上5种拼接误差,分别降到 5×10^{-6} 量级,得到了如图10所示的反演误差分布。

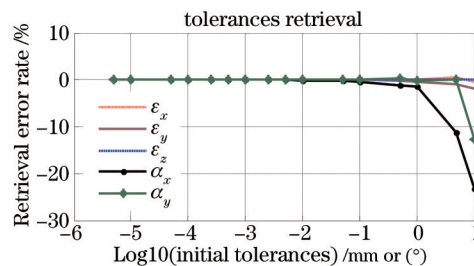


图10 反演误差比率曲线

Fig.10 Error rate curves of tolerances retrieval

从图10可以看出,当存在粗大拼接误差,如平移误差大于1 mm(或倾斜误差大于1°)时,按照这种方法

进行反演的偏差很大,实际上,此时拼接误差已经超出干涉条纹正常采样的范围,因而所采集的干涉条纹已不能正确地反映拼接误差,在实际拼接时,会进行粗调以减小粗大误差。当拼接误差小于1 mm(或 1°)时,反演误差落在 $\pm 3\%$ 以内且迅速收敛,说明拼接粗调误差控制到这个范围以后,可以进入精调,此时可以在干涉仪上进行拼接检测,当拼接误差小于0.1 mm(或 0.1°)时,反演误差控制在 $\pm 0.5\%$ 以内,且随着拼接误差的继续减小而趋近于零,说明一旦干涉仪上能够正常显示干涉条纹,随着调节精度的提高,利用本算法进行的拼接误差反演会越调越准确。

4 结 论

在完成对2 m口径的非球面拼接望远镜光学系统进行设计的基础上,对主镜的拼接失调误差进行了数学分析,分析结果表明抛物面扇形分块镜拼接失调误差与泽尼克多项式像差之间在一定范围内存在线性关系,在此基础上提出了拼接误差的反演算法,并运用编程的方法,在Zemax软件光学设计模型上,对单个子镜拼接过程中的误差反演情况进行了模拟,依照模拟的结果,可以明确该反演方法的适用范围以及反演精度随误差变化的情况,为红外拼接相机主镜拼接误差的求解提供了理论依据,通过模拟实验证明了该拼接误差反演方法具有算法简洁,反演精度高等特点,可以应用于红外拼接相机项目。

参 考 文 献

- 1 Huang Chen, Wang Jianjun, Gao Xin, *et al.*. Survey for foreign infrared astronomical telescopes[J]. *Laser & Infrared*, 2013, 43(3): 235-239.
黄 晨, 王建军, 高 昕, 等. 国外红外天文望远镜发展现状[J]. *激光与红外*, 2013, 43(3): 235-239.
- 2 Chen Baogang, Dong Lei, Lin Xudong. Segmented mirror of fourier telescope field experimental system[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2011, 40(1): 87-91.
陈宝刚, 董 磊, 林旭东. 傅里叶望远镜外场实验系统拼接主镜[J]. *光子学报*, 2011, 40(1): 87-91.
- 3 Prter L, Wizinowich. Optical engineering at Keck Observatory: design and performance of the telescopes, adaptive optics and interferometer[C]. *SPIE*, 2006, 6034: 603401.
- 4 Garry A C, Terry S M, Jerry E N. Phasing the mirror segments of the W M Keck Telescope[C]. *SPIE*, 1994, 2199: 622-637.
- 5 Li Yan, Yuan Xiangyan, Cui Xiangqun. A Study of a method for the coplanar splicing of segments into a large-aperture mirror based on the keck method[J]. *Astronomical Research & Technology*, 2009, 6(2): 147-153.
李 艳, 袁祥岩, 崔向群. 基于Keck方法的大型拼接镜面共面方法的研究[J]. *天文研究与技术*, 2009, 6(2): 147-153.
- 6 Deng Jian, Zhang Wei, Zuo Baojun, *et al.*. Misadjustment tolerance study of the sub-mirror's for segmented mirror synthetic aperture optics[J]. *Optical Technique*, 2007, 33(1): 130-133.
邓 键, 张 伟, 左保军, 等. 拼接式合成孔径光学系统的失调误差分析研究[J]. *光学技术*, 2007, 33(1): 130-133.
- 7 Jiang Zhenyu, Li Lin, Huang Yifan, *et al.*. Computer-aided alignment method of segmented primary mirror system[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2009, 38(7): 1858-1861.
姜震宇, 李 林, 黄一帆, 等. 拼接子镜系统计算机辅助装调研究[J]. *光子学报*, 2009, 38(7): 1858-1861.
- 8 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 健, 龙夫年, 等. 子孔径合成光学系统像质评价研究[J]. *光学学报*, 2008, 28(4): 687-691.
- 9 Wei Xiaofeng, Geng Zexun, Cao Li, *et al.*. A novel imaging performance index and pupil optimization method for optical synthetic aperture system[J]. *Acta Optica Sinica*, 2014, 34(11): 1111001.
魏小峰, 耿则勋, 曹 力, 等. 一种新的光学合成孔径系统成像性能指标与光瞳优化方法[J]. *光学学报*, 2014, 34(11): 1111001.
- 10 Chen Xindong. Testing of a 9-points deformable mirror and its application in space camera system[J]. *Acta Optica Sinica*, 2013, 33(10): 1023001.
陈新东. 9点促动变形镜性能测试及在空间相机中的应用研究[J]. *光学学报*, 2013, 33(10): 1023001.
- 11 Chen Yiwei, Wang Fei, Wang Gaowen, *et al.*. New sub-aperture stitching algorithm based on transformation[J]. *Acta Optica Sinica*, 2013, 33(9): 0912004.
陈一巍, 王 飞, 王高文, 等. 基于变换的子孔径拼接新算法[J]. *光学学报*, 2013, 33(9): 0912004.
- 12 Liao Zhou, Qiu Qi, Zhang Yudong. Numerical simulation of segmented telescope[J]. *Acta Optica Sinica*, 2014, 34(7): 0722002.

- 廖周, 邱琪, 张雨东. 分块拼接望远镜的数值仿真[J]. 光学学报, 2014, 34(7): 0722002.
- 13 Zhang Xiaofang, Dong Bing, Huang Yifan, *et al.*. Simulation research on wavefront sensing and correction algorithms for segmented space telescope[J]. Acta Optica Sinica, 2008, 29(1): 7-11.
- 张晓芳, 董冰, 黄一帆, 等. 分块式空间望远镜波前传感及控制方法的仿真研究[J]. 光学学报, 2008, 29(1): 7-11.
- 14 Joseph M, Howard. Optical modeling activities for NASA's James Webb Space Telescope (JWST): IV Overview and Introduction of MATLAB based toolkits used to interface with optical design software[C]. SPIE, 2007, 6668, 666804.
- 15 Robert S. Upton. Presentation, analysis, and simulation of active alignment strategies for the James Webb Space Telescope[C]. SPIE, 2009, 7433, 743302.
- 16 Kingslake, R Thompson, B J, *et al.*. Applied Optics and Optical Engineering Vol VI[M]. New York, NY (USA): Academic Press, 1980: 28-37.

栏目编辑: 韩峰