

9 点促动变形镜性能测试及在空间相机中的应用研究

陈新东

(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 针对空间相机像差特点设计了校正低阶像差的 9 点促动变形反射镜, 变形镜能够产生离焦、像散和彗差。对变形镜进行测试, 结果表明变形镜在 0.5 h 间隔中的静态特性达到 0.02λ ($\lambda = 632.8 \text{ nm}$), 促动器控制面形的重复性精度达到 0.01λ 。采用 4D 干涉仪的 Burst 检测功能检测了变形镜的动态响应特性, 其响应频率高于 28 Hz。应用变形镜为折叠镜, 以空间相机为平台实验变形镜对离轴三反系统像差的校正。采用干涉仪和平面反射镜测量系统的波像差, 采用系统像差响应构建变形镜响应函数, 校正后系统波像差由 0.122λ 降低至 0.0896λ , 57.2 lp/mm 空间频率处的系统传递函数由 0.364 提升至 0.428。实验结果证明了变形镜能够有效地校正系统像差。

关键词 光学设计; 变形镜; 系统像差校正; 静态/动态特性; 主动光学

中图分类号 O438 **文献标识码** A **doi:** 10.3788/AOS201333.1023001

Testing of a 9-Points Deformable Mirror and Its Application in Space Camera System

Chen Xindong

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

Abstract A 9-point active deformable mirror is designed according to the low order aberrations of space cameras, which can generate defocus, astigmatism and coma. The static and dynamic characters are tested. The testing results show that the static character can reach 0.02λ ($\lambda = 632.8 \text{ nm}$) in several testing at 30 minutes time interval, and the repeatability accuracy is 0.01λ . The dynamic character is tested by the 'Burst measure' function of 4D interferometer. The response frequency is up to 28 Hz. The deformable mirror is applied to a space camera system as the fold mirror and the aberrations of the system are corrected. The testing results show that the root-mean-square (RMS) of wavefront is reduced from 0.122λ to 0.0896λ , and the modulation transfer function of system is improved from 0.364 to 0.428 at space frequency of 57.2 lp/mm . The test results verify the aberration correction ability of the deformable mirror.

Key words optical design; deformable mirror; system aberration correction; static/dynamic character; active optics

OCIS codes 220.1080; 330.4460; 230.3990

1 引 言

变形镜技术是自适应光学中的关键技术之一。采用波前探测(波前传感)系统得到波前的畸变后, 通过变形镜控制算法得出变形镜的控制信号, 变形镜在控制信号的驱动下发生与畸变波前相位共扼的变形, 对入射的畸变波前进行校正。目前, 变形镜技术已经广泛应用于成像系统、激光光学和天文学望

远镜中^[1-7]。

在空间光学系统中, 波前像差的主要来源是热变形和空间-地面力环境的差别, 表现出的像差形式为低阶像差, 因此设计一种较少促动器、成本低、系统复杂性低的变形反射镜具有重要的实用价值。这种变形镜的设计是在尽量少的促动器下实现高精度的低阶像差校正。连续镜面、分立促动器的变形镜

收稿日期: 2013-01-22; **收到修改稿日期:** 2013-03-04

基金项目: 国家自然科学基金(61036015)

作者简介: 陈新东(1982—), 男, 博士, 主要从事主动光学与自适应光学、光学加工检测等方面的研究。

E-mail: chenxd08@yahoo.cn

具有校正动态范围大、技术成熟度高的优点。同时,这种变形镜可以直接作为光学系统反射镜之一,而不必增加新的光学元件来校正系统的像差。地基大型望远镜中就是采用这种思想而发展和应用了自适应变形次镜技术^[8-9]。

针对空间相机中易于出现像散、彗差等低阶像差,设计了一种新型的孔径外排布促动器的变形镜,并采用有限单元法对促动器的位置进行了优化^[10];根据设计结果制造了有效口径为 120 mm、厚度为 5 mm 的平面变形反射镜,变形镜有 3 点固定支撑、9 点促动支撑;经过响应函数的确定、校正力的求解和施加、镜面再检测等实验,表明该变形镜能够产生高精度离焦、像散和彗差,且具有较大的动态范围^[11]。

在上述设计和实验的基础上,对平面变形镜的静态、动态特性进行了检测,并将平面变形镜应用在空间相机中进行系统像差校正实验。检测结果表明,该平面变形镜在 1 h 内的镜面的响应方均根(RMS)变化小于 0.02λ ($\lambda=632.8\text{ nm}$);动态响应频率能够达到 28 Hz;对空间相机系统像差进行校正后,系统的调制传递函数(MTF)由 0.364 提升至 0.428(57.2 lp/mm)。

2 平面变形镜介绍

2.1 平面变形镜的设计

变形镜实验系统包括变形镜组件,(如图 1 所示)、镜面检测设备、控制和计算系统,如图 2 所示。变形镜的镜面直径为 150 mm,有效口径为 120 mm,厚度为 5 mm,材料为 K9 玻璃。变形镜共有 9 个促动点和 3 个固定支撑点,支撑点为孔径外分布方式。关于促动点数目、排布方式的有限元优化参见文献^[10]。由于变形镜面镜厚比较大,加工采用粘接固定支撑并采用传统抛光法抛光,最后利用磁性介质辅助抛光技术进行抛光^[12]。抛光后的镜面面形为

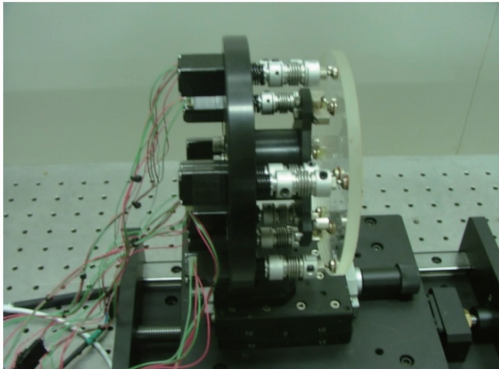


图 1 平面变形镜组件

Fig. 1 Plane deformable mirror module

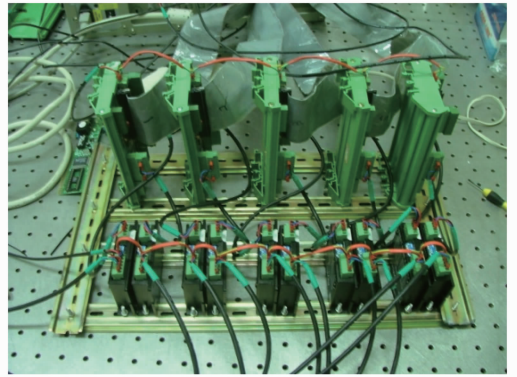


图 2 控制扩展接口

Fig. 2 Control elements ports

(去除平移、倾斜、离焦和像散) 0.026λ 。

变形镜采用的促动器为高精度的直线步进电机。该步进电机的位移精度是微米量级的,精度达不到变形镜要求的纳米量级精度,因此一般通过在采用电机作为力促动器时,在电机的促动端增加一定的机械结构实现高精度的促动力^[10-11]。在步进电机促动端增加了一个柔性弹簧联轴节,将步进电机的位移转换为力作用到镜面上。镜面检测实验表明,步进电机促动一步时,镜面的响应 RMS 在干涉仪的检测误差范围内,表明促动力精度满足要求。联轴节再通过粘接到反射镜背部的柔性支撑结构与镜面相连,促动器与刚性底座采用螺钉连接,如图 1 所示。促动器的最大促动力约为 10 N。

促动器由基于数字信号处理技术(DSP)的运动控制器可编程多轴控制器(Pmac)控制卡的工控机(上位机)进行控制,Pmac 卡通过扩展接口连接步进电机的驱动器,如图 2 所示,采用 VB 编程将计算得到的位移传递给控制卡并最终驱动促动器实现镜面变形。镜面检测设备采用的是 4D 动态干涉仪。

2.2 平面变形镜的校正能力

变形镜校正像差的基本过程是通过计算或检测获得镜面响应函数,然后求解并施加校正力,最后再检测校正后的面形。采用的方法是通过干涉仪检测获得 9 个促动器构成的镜面响应函数,采用模态算法求解校正力^[13],最后再利用干涉仪进行检测。在求解出变形镜产生(Zernike 系数) 2000 nm 像散、400 nm 的彗差和 500 nm 的离焦需要施加的促动器信号并通过控制系统促动电机,得到的镜面面形经 4D 干涉仪检测并拟合后,像差系数分别为 1982, 401.6, 508 nm,并且镜面的残差均在 $\lambda/30$ 以内,表明设计的变形镜能够产生上述高精度面形。

3 变形镜的静态和动态特性检测

3.1 静态特性检测

变形镜的静态特性测试过程：首先检测平面反射镜的面形误差并拟合成 Zernike 多项式，然后根据离焦、像散和彗差的系数求解校正力并施加促动器信号，将平面镜的校正至 RMS 最小的状态，保持

促动力不变，间隔一段时间进行检测。

由于镜面加工时保留了一定的离焦和像散，并且在 9 点集成安装时由于工艺问题也使镜面产生了一定的残留像差，校正前的镜面面形如图 3(a) 所示，校正离焦、像散和彗差后的镜面面形如图 3(b) 所示。

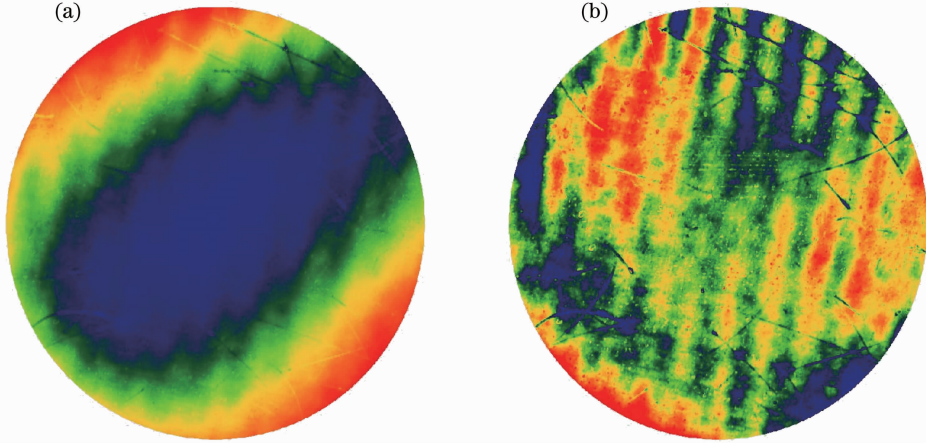


图 3 (a)校正前；(b)校正后的镜面面形

Fig. 3 Mirror surface (a) before correction and (b) after correction

校正前后镜面的像差 Zernike 系数如表 1 所示，其中 (R, A) 为极坐标， R 为半径， A 为角度，可以看到变形镜能够有效地校正离焦、像散和彗差，对 Y 向三叶像差变形镜也具备较好的校正能力，但是对于球差，由于促动器仅有两圈分布，不能校正；对 X 向三叶像差，由于固定点的存在，不能校正，因此在变形镜加工过程中这两项像差要去除。

表 1 校正前后的镜面面形的部分 Zernike 系数

Table 1 Partial Zernike coefficients before and after correction

Zernike terms	Before correction /nm	After correction /nm
Power $2R^2 - 1$	155.6	-0.62300
Astig $X R^2 \cos(2A)$	-60.54	2.272
Astig $Y R^2 \sin(2A)$	-159.6	-4.722
Coma $X (3R^2 - 2) R \cos A$	-11.17	2.280
Coma $Y (3R^2 - 2) R \sin A$	2.912	-5.439
Trefoil $X R^3 \cos(3A)$	21.81	27.38
Trefoil $Y R^3 \sin(3A)$	-45.49	2.589

保持促动力不变，检测变形镜的静态特性。每隔 0.5 h 进行一次检测，检测结果表明，在测试的时间内镜面面形变化小于 0.02λ 。从检测结果的 Zernike 系数来看，镜面发生的变化主要是像散——最易于产生的像差形式，像差系数变化最大约为 20 nm。从干涉条纹来看，有一定的倾斜量产生，这

可能是实验中并没有将调整架完全固定在光学隔振平台上导致的变形镜组件整体倾斜。如果要求更高的精度，则需要去除促动结构的蠕变和环境的影响，通过在促动结构中增加力促动器形成促动力的闭环就能够进一步提高变形镜的静态特性。

将变形镜的促动器归零，然后再重新施加促动信号，多次测试表明变形镜的镜面面形变化小于 0.01λ ，具有很好的重复性。

3.2 变形镜的动态特性检测

利用 4D 干涉仪(Fiz Cam 2000 Ep)的 Burst 检测功能对变形镜的动态响应频率进行检测。Burst 检测功能的特点是先进行干涉条纹数据采集和存储，但是不进行面形数据处理，这样减小了检测时间，提高了检测频率。这种检测方式的最小检测间隔为 0.035 s，检测时间频率大于 28 Hz。在实验过程中发现在控制链路中 VB 控制软件通过上位机与 Pmac 卡之间的通信占用了一定的时间，导致控制频率下降，通过在 PEWIN(Pmac 内置控制软件)中直接施加控制信号的方法大大减少了通信时间。以像散为例，通过 PEWIN 编程控制，使变形镜循环不断施加两组不同的力，产生两个方向的像散，采用 Burst 检测功能检测得到的镜面面型，检测后处理结果如图 4 所示。测试结果表明变形镜的动态响应频率能够达到 28 Hz。

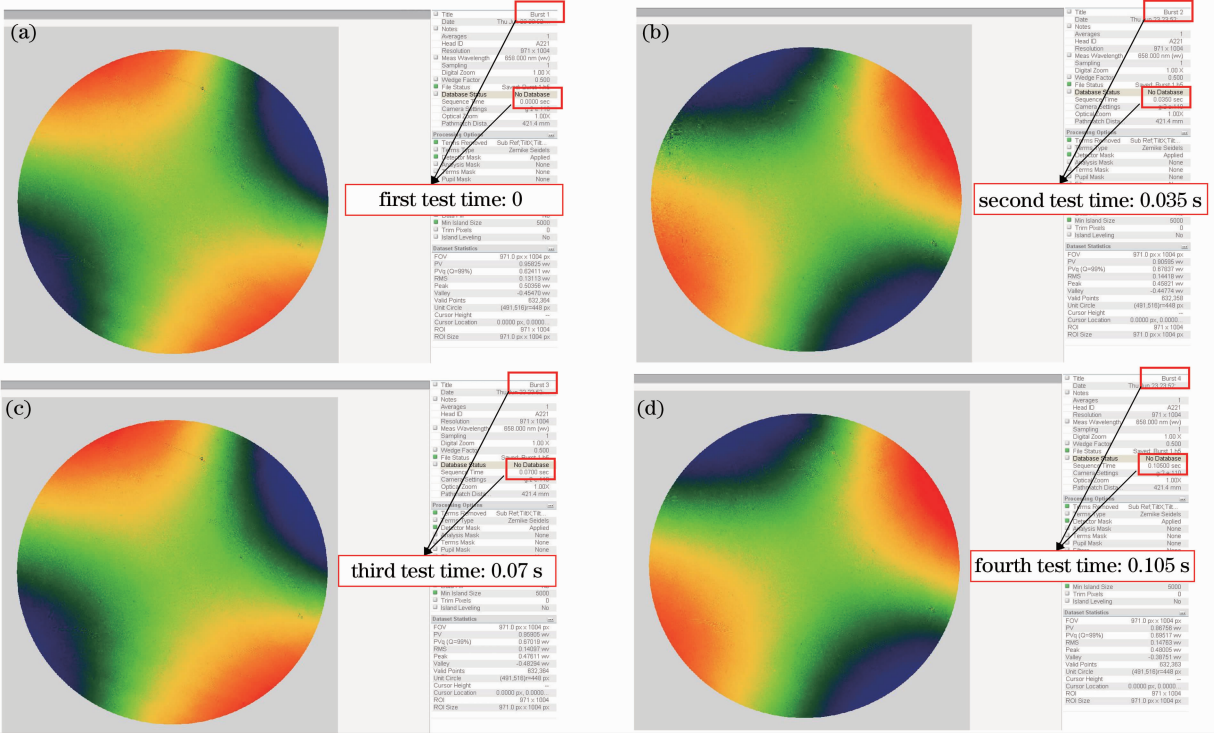


图 4 Burst 检测镜面动态响应(前 4 次)

Fig. 4 Surface dynamic response tested by ‘Burst’ testing (first four times)

4 应用主动变形镜的系统像差校正

4.1 系统介绍

在完成主动变形镜的标定与测试后,开展了应用主动变形镜校正实际光学系统像差的实验研究。

离轴三反消像散系统能够实现长焦距、大视场下的高分辨成像,避免了同轴系统中的中心遮拦问题,因此在空间对地遥感等领域的应用日益广泛^[14-16]。以某一空间相机为例,开展了有限元及光学仿真分析^[17]。分析结果表明,在重力释放及±4℃均匀温变影响下,空间相机中产生的波前变化主要是离焦、像散和彗差,相比之下,球差等其他低阶像差和高级像差变化要小一个量级,设计的变形镜也是以像散和彗差为校正目标。

以采用离轴三反系统的空间相机原理样机为平台,开展了变形镜校正离轴三反系统像差的实验研究。设计的实验方案为,利用干涉仪、相机光学系统、平面反射镜检测系统的波像差,通过校正前后的系统波像差来验证变形镜对系统像差的校正。该实验方案以波像差为目标,无论变形镜在实际工作中采用开环或闭环的方式,都能够直接反映变形镜对相机实际成像中波像差的校正情况。

在空间相机中,主动变形镜为平面反射镜,在光

路中位于三镜与干涉仪之间,在系统中作为折转镜;系统检测光路如图 5 所示,激光干涉仪发出的球面波会聚至光学系统的焦平面,然后继续传播依次经过主动变形镜(折叠镜)、三镜、次镜、主镜,经过平面镜反射后再次经过光学系统,进入到干涉仪中,通过分析干涉条纹即可得到系统的波像差分布。

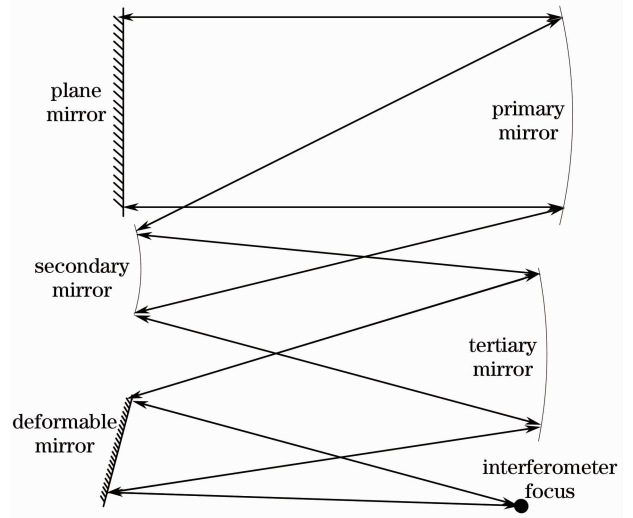


图 5 光学系统波像差主动校正光路

Fig. 5 Experimental setup of optical system active aberration correction

4.2 实验过程及结果

系统装调完毕后的波像差如图6所示,波像差 RMS 为 0.122λ ,主要像差为 Y 方向的三叶像差 (Trefoil)。系统 MTF 如图7所示,系统选用的 CCD 器件物理尺寸为 $8.75\ \mu\text{m} \times 8.75\ \mu\text{m}$,因此其截止频率约为 $57.2\ \text{lp/mm}$,归一化频率约为 0.34;由图中可以看到,对应 $57.2\ \text{lp/mm}$ 空间频率的 MTF 为 0.364。

由于折叠镜与光轴成一定的倾斜角度放置,因此折叠镜自身面形的像散会引起系统的其他像差,也就是说由于折叠镜的倾斜,“降低了”各促动器引起的波像差的正交性,增大了各促动器像差响应的交联。为了实现高精度的系统像差校正,实验采用系统像差的方法构建了变形镜的响应函数,即分别促动各促动器,检测促动前后的系统像差变化就是该促动器的响应函数,分别测定各个促动器的系统像差响应函数组成变形镜的响应函数。校正信号的

优化算法采用阻尼最小二乘法。

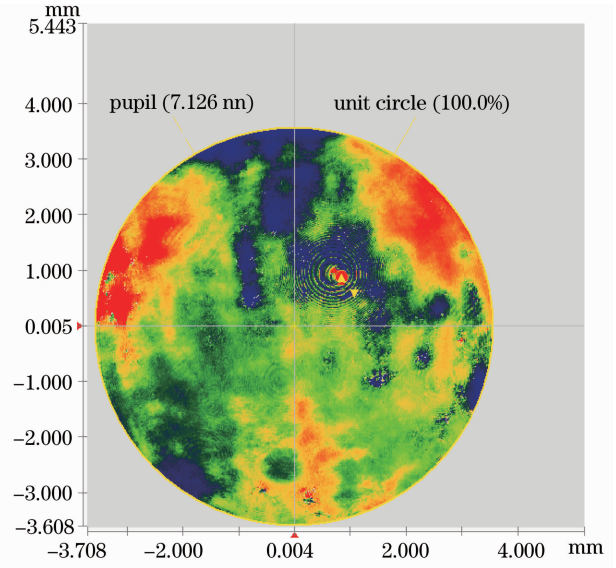


图6 校正前系统波像差

Fig. 6 Wavefront aberration before correction

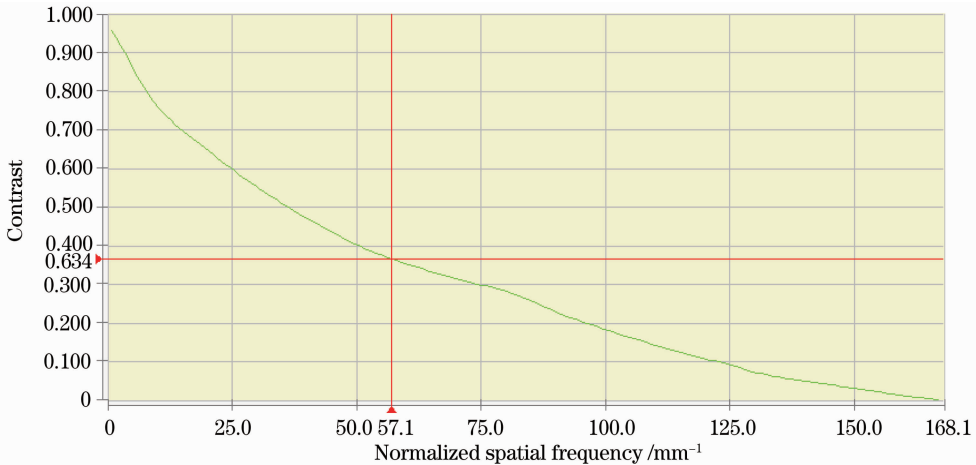


图7 校正前 MTF

Fig. 7 MTF before correction

根据系统像差的检测结果,采用系统像差响应函数计算出校正信号并施加促动,校正后检测系统波像差如图8所示,RMS 值由 0.122λ 减小为 0.0879λ ;MTF 如图9所示,对应 $57.2\ \text{lp/mm}$ 空间频率的 f_{MTF} 由 0.364 提升至 0.428,提升幅度为 17.6%,系统成像质量有明显改善。

从表2所示的校正前后拟合波面的 Zernike 多项式系数来看,在波像差中占主要地位的 Trefoil X 与 Trefoil Y 均显著减小,尤其是 Trefoil Y 分量的降低尤其明显;Astig X、Coma Y 也得到了有效的校正;Astig Y 与 Come X, Primary Spherical 有所

增大。因为实验中采用了整个系统的像差响应函数,计算校正信号时并不是以校正单个像差为目标,而是以优化减小整个系统的波像差为目标,校正的精度同样是受到促动器的精度及其交联的影响。采用这种校正方式使校正信号的求解更加简明,实验结果证明这种校正方式是有效的;此外测量的误差也引起了像差系数拟合的误差。

5 结论

针对空间相机在轨运行时易于出现的低阶像差,开展应用在空间相机离轴三反系统的主动变形

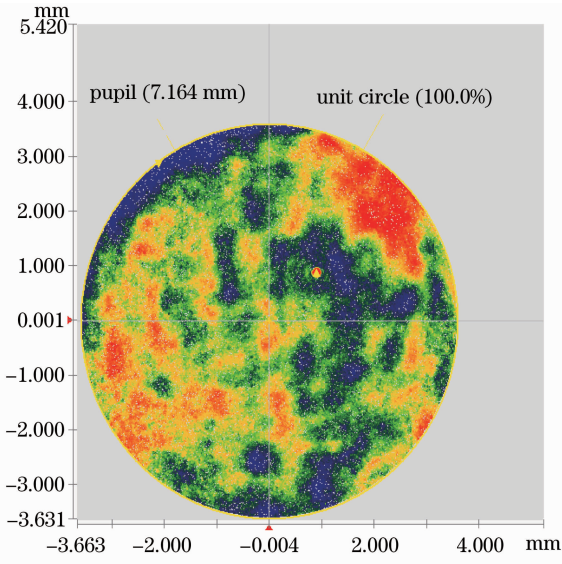


图 8 校正后系统波像差

Fig. 8 Wavefront aberration after correction

表 2 校正前后波面的 Zernike 多项式系数对比
Table 2 Comparison of Zernike coefficients before and after correction

Order	Aberration	Before correction	After correction
0	Piston	0.0000	-0.0002
1	Tilt X	-0.0003	-0.0000
2	Tilt Y	-0.0001	-0.0002
3	Power	0.0521	0.0018
4	Astig X	0.0799	0.0434
5	Astig Y	-0.0154	0.0933
6	Coma X	-0.0030	0.0787
7	Coma Y	0.0662	0.0072
8	Primary spherical	-0.0153	-0.0341
9	Trefoil X	-0.1026	-0.0732
10	Trefoil Y	0.1899	-0.0204

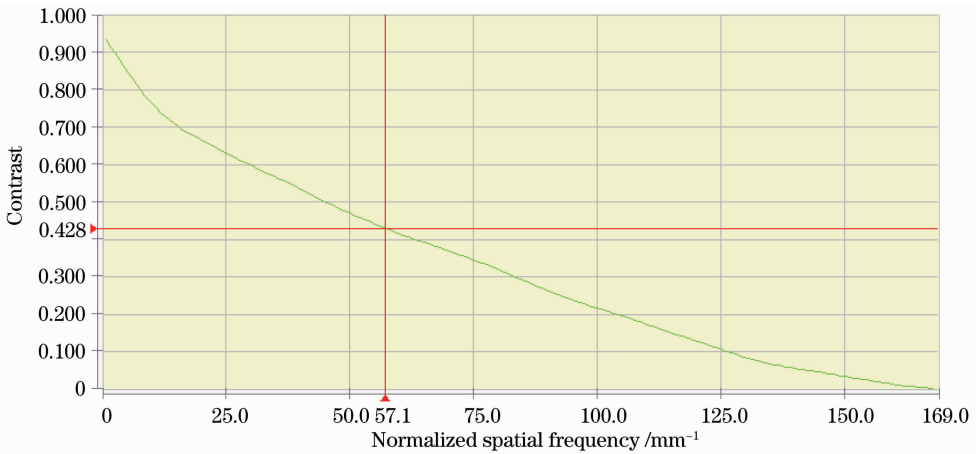


图 9 校正后的 MTF

Fig. 9 MTF after correction

镜的设计和实验研究。测试了变形镜的静态特性和重复性,实验表明变形镜具有良好的静态特性和重复性。采用 4D 干涉仪的 Burst 检测功能检测了变形镜的动态特性,其响应频率约 28 Hz。在空间相机中应用该变形镜,有效降低了系统的波像差,提高了系统的 MTF。下一步将开展变形镜对空间相机各视场波像差平衡控制研究和提高变形镜闭环控制精度的研究。

参 考 文 献

1 R. H. Freeman, J. E. Pearson. Deformable mirrors for all seasons and reasons [J]. Appl Opt, 1982, 21(4): 580-588.
2 N. Devaney, E. Dalimier, T Farrell, et al.. Correction of ocular and atmospheric wavefronts comparison of the performance of various deformable mirrors [J]. Appl Opt, 2008, 47 (35):

6550-6562.
3 A. W. Dreher, J. F. Bille, R. N. Weinreb. Active optical depth resolution improvement of the laser tomographic scanner [J]. Appl Opt, 1989, 28(4): 804-808.
4 H. Hofer, L. Chen, G. Y. Yoon, et al.. Improvement in retinal image quality with dynamic correction of the eye/aberrations [J]. Opt Express, 2001, 8(11): 631-643.
5 B. Hermann, E. J. Fernández, A. Unterhuber, et al.. Adaptive optics ultrahigh resolution optical coherence tomography [J]. Opt Lett, 2004, 29(18): 2142-2144.
6 T. K. Barrett, D. G. Bruns, T. J. Brinkley, et al.. Adaptive secondary mirror for the 6.5-m MMT [C]. SPIE, 1998, 3353: 2-1.
7 A. Riccardi, G. Brusa, P. Salinari, et al.. Adaptive secondary mirrors for the large binocular telescope [C]. SPIE, 2003, 5169: 159-168.
8 Yang Licheng, Ling Ning. Analysis of wavefront errors of active deformable mirror [J]. Acta Optica Sinica, 2009, 29 (3): 569-574.
杨李成, 凌 宁. 能动变形反射镜波面误差特性分析及实验研究

- [J]. 光学学报, 2009, 29(3): 569-574.
- 9 Ning Yu, Yu Hao. Experimental research on spatial fitting capability of Zernike aberration of 20 element bimorph deformable mirror [J]. Acta Optica Sinica, 2009, 29(7): 1756-1760.
宁禹, 余浩. 20单元双压电片变形镜对Zernike像差空间拟合能力的实验研究[J]. 光学学报, 2009, 29(7): 1756-1760.
- 10 Chen Xindong, Zheng Ligong, Zhang Xuejun. Continuous facesheet DM with discrete push-pull actuators, design and analysis of a novel topology [J]. Chinese J. Lasers, 2011, 38(s1): s116007.
陈新东, 郑立功, 张学军. 一种新型的变形镜促动器排布-设计与分析[J]. 中国激光, 2011, 38(s1): s116007.
- 11 Chen Xindong, Zheng Ligong, Luo Xiao, et al.. A deformable mirror with 9 actuated points for low order aberration correction-design and experiments [J]. Acta Optica Sinica, 2012, 32(3): 0322001
陈新东, 郑立功, 罗霄, 等. 校正低阶像差的9点促动变形镜—设计与实验[J]. 光学学报, 2012, 32(3): 0322001.
- 12 Deng Weijie, Zhang Feng, Li Ruigang. Magnetic medium assistant polishing technology [J]. Chinese J Lasers, 2011, 38(s1): s116004.
邓伟杰, 张峰, 李锐钢. 新型磁性材料辅助光学抛光技术的研究[J]. 中国激光, 2011, 38(s1): s116004.
- 13 R. N. Wilson, F. Franza, L. Noethe. A system for optimizing the optical quality and reducing the costs of large telescopes [J]. J Mod Opt, 1987, 34(4): 485-509.
- 14 Chang Jun, Weng Zhicheng, Jiang Huilin, et al.. Design on three-reflective-mirror system used in space [J]. Acta Optica Sinica, 2003, 23(2): 216-219.
常军, 翁志成, 姜会林, 等. 用于空间的三反射镜光学系统设计[J]. 光学学报, 2003, 23(2): 216-219.
- 15 L. R. Jone. Development of a wide field-of-view, unobscured, three mirroranastigmat [C]. SPIE, 1992, 1762: 39-49.
- 16 R. Melsheimer. A very wide field, very fast telescope [C]. SPIE, 2000, 4003: 456-463.
- 17 Chen Xindong. Research on Deformable Mirrors Applied to Space-Borne Camera [D]. Changchun: Chanchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, 2012. 28-31, 103-111.
陈新东. 应用于空间相机的主动变形镜研究[D]. 长春: 中国科学院长春光学精密机械与物理研究所, 2012. 28-31, 103-111.

栏目编辑: 李文喆