

太阳望远镜低时空频率波前像差校正技术

赵思旻^{1,2}, 顾乃庭^{1,2*}, 黄林海^{1,2}, 肖亚维^{1,2}, 张兰强^{1,2}, 程云涛^{2,3}, 杜宗政^{2,3}

(1. 中国科学院光电技术研究所 自适应光学重点实验室, 四川 成都 610209;

2. 中国科学院大学, 北京 100049;

3. 中国科学院光电技术研究所 光学轻量化与新材料技术中心, 四川 成都 610209)

摘要: 针对大口径太阳望远镜系统运行过程中由于静态位置失配误差、风载弯沉等准静态位置失配误差以及热变形等非失配误差引起的波前像差导致成像质量下降的问题, 在对太阳望远镜系统波前像差时空分频的基础上, 提出采用次镜刚体位移对太阳望远镜低时空频率波前像差校正的方法, 建立起次镜刚体位移与像差校正量的关系, 并通过数值仿真及实验验证了采用次镜刚体位移对上述来源像差的校正能力。数值仿真和实验结果表明: 次镜刚体位移能够对望远镜系统运行过程中的低时空频率波前像差进行有效校正, 其中, 对位置失配误差校正后像差 RMS 值低于原值的 9%, 对非失配误差校正后像差 RMS 值低于原值的 40%, 对多源混合误差校正后像差 RMS 值低于原值的 15%。

关键词: 成像系统; 像差校正; 灵敏度矩阵法; 次镜; 太阳望远镜

中图分类号: TH743 **文献标志码:** A **DOI:** 10.3788/IRLA20220887

0 引言

大口径太阳望远镜系统在运行过程中受太阳辐射导致的光机结构变形、不同指向重力弯沉、风载光机结构变形、环境温度变化等因素影响, 产生波前像差, 导致太阳望远镜系统成像质量显著下降, 制约太阳大气成像分辨率。这些像差按来源分类为静态位置失配波前像差、准静态位置失配波前像差和非失配波前像差, 其像差形式以低阶像差为主, 时间频率上以低时间频率像差为主。

在两镜系统中, 一般以主镜为基准, 通过调整次镜刚体位置补偿由于装配或等效装配关系改变引起的波前像差。文献分析结果表明^[1-3], 次镜沿光轴方向的平移可以按比例补偿离焦和球差, 次镜沿垂直于光轴方向的平移和倾斜可以按比例补偿倾斜、彗差、像散。建立系统波前像差与次镜刚体位置关系后, 通过六自由度平台对次镜刚体位置进行调整, 实现对低

阶像差的校正。次镜刚体位移校正波前像差一般用于光学望远镜观测前的静态装调, 尚未发现用于观测过程中的位置失配、非失配波前像差校正的文献报道。

常见的计算机辅助装调方法有矢量波像差法、评价函数退化法、人工神经网络法和灵敏度矩阵法。鞠国浩^[4]等将矢量波像差法应用于离轴三反望远镜单个侧向离心量的计算, 得到计算离心量误差值小于 2.2% 的结果; 郭攀^[5]等使用矢量波像差法对两反系统装调, 得到轴上视场像差均方根 (Root Mean Square, RMS) 值为 0.112λ 的装调效果, 矢量像差法对面型误差和元件失调均有较高的计算能力, 但是在实际像差校正场景下受限于构建模型参数的精确性, 且需要多视场的检测; 刘波等^[6]使用评价函数退化法对 R-C 系统进行精装调, 得到系统轴上视场像差 RMS 为 0.078λ 的装调结果, 评价函数退化法将系统实测波像差代入光学设计软件中计算元件的失调量, 计算精度依赖于光学设计软件中的算法, 精确度较低; 左晓舟^[7]

收稿日期: 2022-12-13; 修订日期: 2023-03-21

基金项目: 国家自然科学基金项目 (12022308, 12073031); 国家重点研发计划项目 (2021YFC2202200, 2021YFC2202201, 2021YFC2202204, 2021YFC2202004)

作者简介: 赵思旻, 男, 硕士生, 主要从事大口径望远镜像差校正方面的研究。

导师(通讯作者)简介: 顾乃庭, 男, 研究员, 博士, 主要从事大口径望远镜技术、自适应光学技术、干涉测量技术、偏振成像技术等方面的研究。

等使用人工神经网络法对两镜系统进行装调,得到轴上视场像差优于 $\lambda/16$ 的结果;王钰等^[8]将人工神经网络法运用于三镜系统的失调量解算,得到失调量均方根误差小于 7.04% 的结果。人工神经网络法较好地解决了系统像差与失调量的非线性关系,但受到训练样本以及网络结构优劣的影响,需要找到样本数量和神经网络复杂程度的最优配置才能使计算结果更为精确;灵敏度矩阵法是目前应用最广泛的装调方法,传统的灵敏度矩阵法是一阶线性模型^[9-11],当元件失调量较大时拟合效果较差,中国科学院长春光学精密机械与物理研究所的顾志远将灵敏度矩阵扩展到二阶^[12],较好地解决了系统波像差与元件失调量关系非线性的问题,并运用于离轴望远镜的装调,得到全视场波前像差 RMS 小于 0.1λ 的效果;中国科学院光电技术研究所的曹宇泽^[13]使用二阶灵敏度矩阵法对卡塞格林系统进行仿真调整,得到全视场波前像差 RMS 均小于 0.03λ 的结果。上述装调方法均有各自的优缺点,其中二阶灵敏度矩阵法以数学模型简单、所需样本数量少、计算精度高被广泛应用^[14],但其尚未用于望远镜运行过程中的位置失配及非失配波前像差的校正。

基于以上背景,文中提出对太阳望远镜的波前探测数据进行时空分频,分解出由次镜刚体校正的低时空频率像差成分,根据次镜刚体位移量与系统像差变化量的关系以及次镜刚体调整机构的行程能力计算次镜刚体校正量,在不增加光学系统复杂度的前提下实现对望远镜系统运行过程中由于静态位置失配误差、风载弯沉等准静态位置失配误差以及热变形等非失配误差引起低时空频率像差的实时校正,提升太阳望远镜成像分辨力,并通过数值仿真和实验验证的方法对 60 cm POST (Prototype for the Chinese Large Solar Telescope) 太阳望远镜系统进行不同来源像差的校正研究,结果表明,次镜刚体位移对位置失配误差、非失配误差和多源混合误差引起波前像差均能进行有效校正。

1 低时空频率像差校正理论分析

太阳望远镜在实际观测过程中的波前像差按其来源具体可分为三种类型:第一类为光学装调误差引起的静态位置失配波前像差,此类像差大多来源于主次镜位置失调;第二类为太阳辐射结构变形、指向相

关结构弯沉、风载结构变形等引起的准静态位置失配波前像差,此类像差形式与静态位置失配波前像差相同,可以等效为主次镜位置失调所产生像差;第三类为低频加工误差、镜面热变形、环境温度变化等引起的非失配波前像差,此类像差往往表现为任意大小的像差组合。上述因素引起的波前像差主要以低阶像差(如倾斜、离焦、像散、彗差、球差)为主,且其时间频率较低,对于这些低阶低频的像差,将其定义为望远镜运行过程中的低时空频率像差。

夏克-哈特曼波前探测器能够实现对太阳望远镜运行过程中波前像差的实时探测,当太阳望远镜处于静态状态下时,太阳望远镜次镜的空间位置 X 与夏克-哈特曼波前探测器的波前探测数据 Φ 存在如下关系:

$$\Phi = F(X) \quad (1)$$

太阳望远镜的次镜共有六个自由度的位移量,分别为 X 轴平移量 D_x 、 Y 轴平移量 D_y 、 Z 轴平移量 D_z 以及绕 X 轴旋转量 T_x 、绕 Y 轴旋转量 T_y 、绕 Z 轴旋转量 T_z 。由于次镜关于 Z 轴旋转对称,绕 Z 轴旋转量 T_z 不会对波前探测数据产生影响,故次镜共有五个方向上的位移对夏克-哈特曼波前探测器的波前探测数据 Φ 产生影响。利用次镜刚体位移对波前探测数据产生影响,实质上是影响系统像差的这一特性,可以达到使用次镜刚体位移对太阳望远镜系统像差进行校正的目的。

将望远镜次镜在某单一自由度方向上进行位移,如 T_x ,分别测量其在 -0.05° 、 -0.04° 、 \dots 、 $+0.05^\circ$ 处的夏克-哈特曼波前数据 Φ ,并分解为各项 Zernike 系数,文中采用的 Zernike 多项式的波前图样如图 1 所示,其中, Z_1 项为活塞像差, Z_2 项、 Z_3 项分别为 X 和 Y 方向上的倾斜像差, Z_4 项为离焦像差, Z_5 项、 Z_6 项分别为 45° 和 0° 像散, Z_7 项、 Z_8 项分别为 X 方向和 Y 方向上的彗差, Z_9 项为球差。在五个自由度方向上均进行此操作,并代入灵敏度矩阵中进行拟合,得到次镜位移量与 Zernike 系数的数学关系如下:

$$Z - Z_0 = A\Delta X.^2 + B\Delta X + \delta \quad (2)$$

式中: Z 为当前位置处的 Zernike 系数; Z_0 为起始位置处的 Zernike 系数; A 、 B 分别为二次项系数矩阵和一次项系数矩阵; ΔX 表示次镜沿每个自由度方向上的位移量; δ 为残差余项; $\Delta X.^2$ 表示次镜每个自由度方向

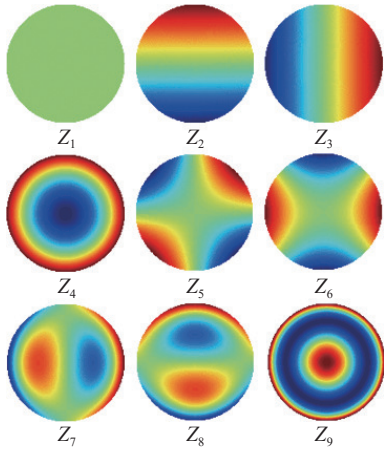


图 1 Zernike 多项式与其波前图样

Fig.1 Zernike polynomials and their wavefront patterns

上位移量的平方所形成的矩阵,如公式(3)所示:

$$\Delta X.^2 = [\Delta D_x^2 \quad \Delta D_y^2 \quad \Delta D_z^2 \quad \Delta T_x^2 \quad \Delta T_y^2]' \quad (3)$$

在望远镜实际运行中,对系统像差的校正转化为求解使得轴上视场像差的 Zernike 系数 Z 取最小值的次镜位移量,文中采用最小二乘法的方式进行求解。根据次镜位移量由位姿调整机构对次镜的位姿进行实时调整,最终实现对望远镜实际运行中低时空频率像差的实时闭环校正。

2 太阳望远镜次镜刚体校正数值仿真

2.1 60 cm 太阳望远镜系统描述

格里高利系统是常见的太阳望远镜形式,文中对 POST 太阳望远镜系统^[15-17]进行次镜刚体位移校正的数值仿真研究,望远镜光学布局和装置图如图 2 所示,系统参数如表 1 所示。

为建立 Zernike 系数与次镜位置变化量的数学关

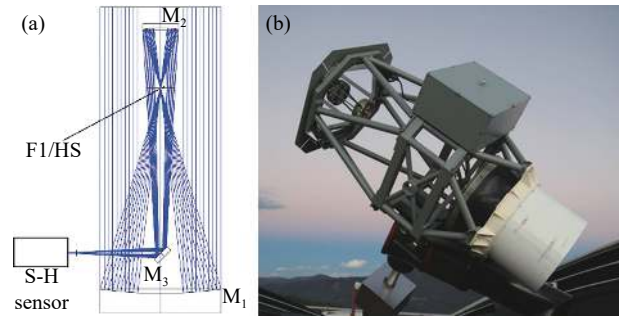


图 2 POST 光学布局图 (a) 与装置图 (b)^[15]

Fig.2 Optical configuration (a) and the components (b) of the POST^[15]

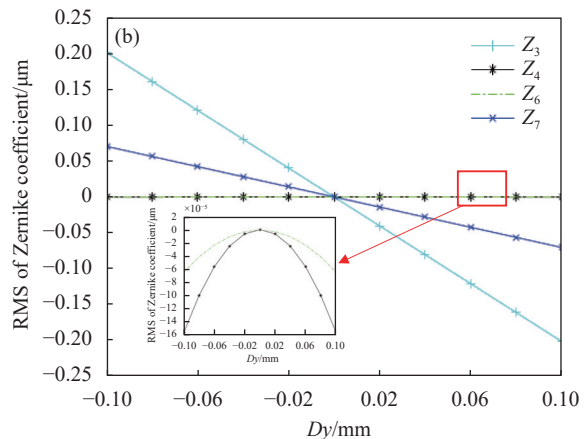
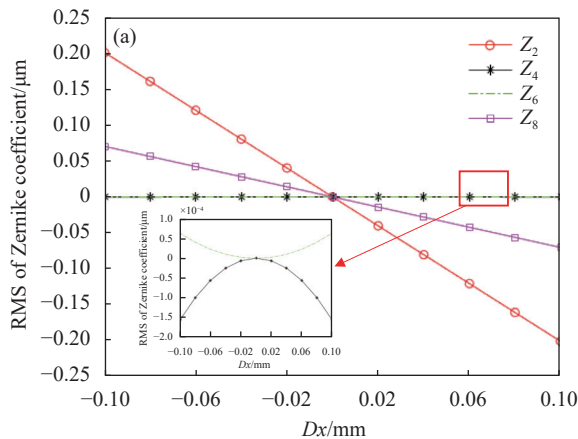
表 1 望远镜参数

Tab.1 Telescope parameters

Surface	Mechanical diameter d/mm	Radius of curvature r/mm	Interval D/mm	Conic factor
Primary mirror	600	-2 040	-1 320	-1
Secondary mirror	180	504.812	-	-0.466

系,保证系统像差次镜校正量的精确计算,对次镜进行五个自由度方向上的位置扰动,每个自由度方向上等间距选取 11 个采样点,受次镜位置影响的像差与次镜位置变化量的关系如图 3 所示。

分析可得, D_x 和 T_y 对系统像差中的 Z_2 项、 Z_8 项有着相同程度的影响,但是其对 Z_4 项、 Z_6 项的影响不同,因此当系统像差中的 Z_2 项、 Z_8 项需要校正时,需要同时对 D_x 、 T_y 进行调整,在保证减小 Z_2 项、 Z_8 项的同时尽可能降低 Z_4 项、 Z_6 项。 D_y 和 T_x 对系统像差中 Z_3 项、 Z_7 项、 Z_4 项、 Z_6 项的校正, D_z 对系统像差中 Z_4 、 Z_9 项的校正也遵循以上原则。通过对次镜在 D_x 、 D_y 、 D_z 、 T_x 、 T_y 五个自由度方向上的位置调整,达到最小化系统像差的目的。



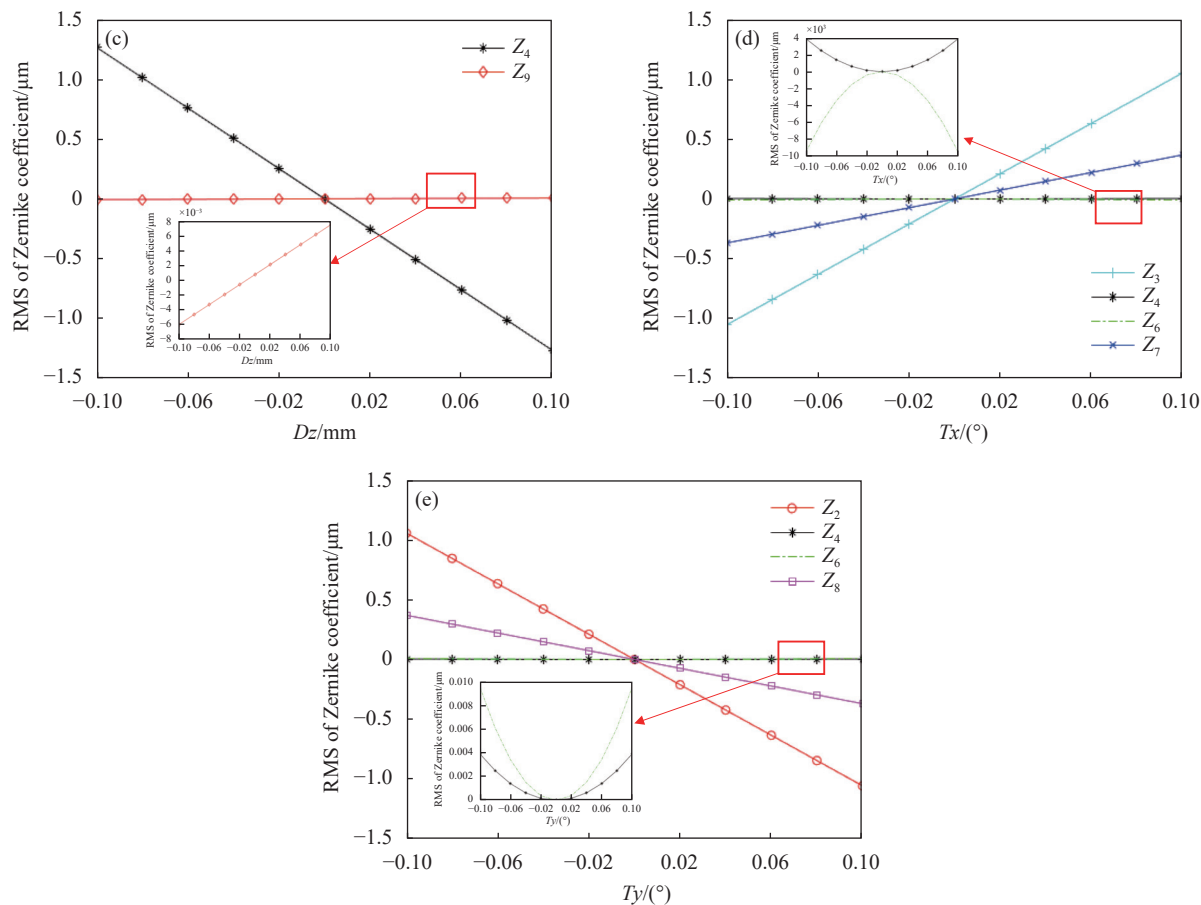


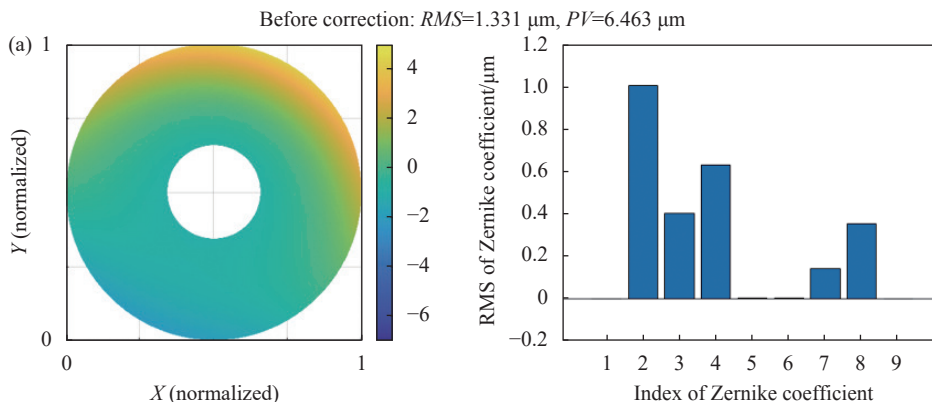
图 3 Zernike 系数受次镜五个自由度方向位移影响曲线图。(a) x 方向平移; (b) y 方向平移; (c) z 方向平移; (d) x 方向旋转; (e) y 方向旋转
 Fig.3 Curve of Zernike coefficients affected by the displacement in the direction of five degrees of freedom of secondary mirror. (a) Translation around x axis; (b) Translation around y axis; (c) Translation around z axis; (d) Rotation around x axis; (e) Rotation around y axis

2.2 位置失配误差引起像差的反演与补偿

通过引入不同类型的像差,能够验证由建立起数学关系计算得到的次镜位移量对系统像差的校正能力。由指向相关结构弯沉、风载结构变形、太阳辐射结构变形等准静态位置失配误差引起的像差与静态位置失配像差形式相同,以倾斜、离焦、彗差为主,同

时含有少量像散与球差。

位置失配误差引起像差的次镜刚体校正效果如图 4 所示,使用次镜刚体校正后,系统像差 RMS 值由 1.331 μm 降低至 0.005 μm ,次镜刚体位移校正效果良好,位置失配误差引起像差被完全校正。



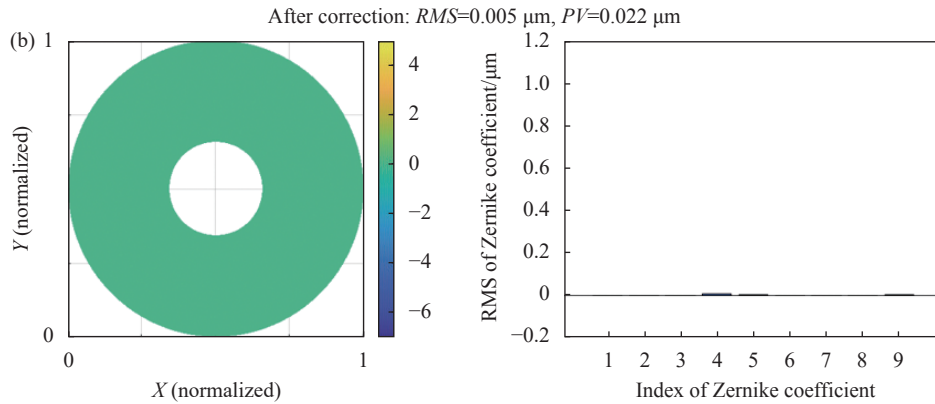


图 4 位置失配误差引起像差的波前图和 Zernike 系数。(a) 校正前; (b) 校正后

Fig.4 Wavefront diagram and Zernike coefficients of aberration caused by position mismatch error. (a) Before correction; (b) After correction

2.3 非失配误差引起像差的反演与补偿

对于镜面热变形、环境温度变化、低频加工误差等因素引入的非失配误差,其具有低阶像差大小以任意比例组合的特点,与主次镜间位置失配引起的像差

组合比例具有显著区别,但是从形式上看,依然以倾斜、离焦、彗差、像散、球差为主。对非失配误差进行反演与补偿的研究,次镜刚体位移校正结果如图 5 所示。

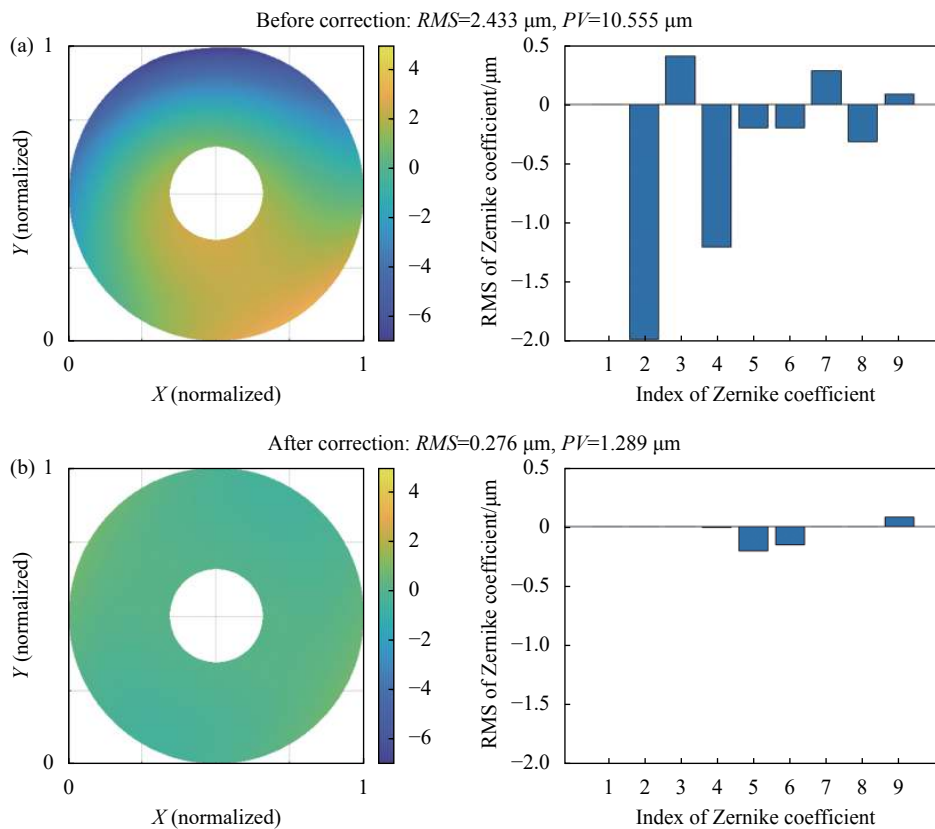


图 5 非失配误差引起像差的波前图和 Zernike 系数。(a) 校正前; (b) 校正后

Fig.5 Wavefront diagram and Zernike coefficients of aberration caused by non-mismatch error. (a) Before correction; (b) After correction

分析波前数据,波前像差 RMS 值由 2.433 μm 降低至 0.276 μm ,其中倾斜、离焦、彗差项被完全校正,

Z_6 项 0° 像散由 $-0.197 \mu\text{m}$ 降低至 $-0.150 \mu\text{m}$, 剩余像差以 Z_9 项球差、 Z_6 项 0° 像散为主 (次镜对 Z_5 项无校正

能力),对其继续校正会产生更大量的倾斜、彗差、离焦,不满足整体像差 RMS 最小化的条件。据此可以得出结论,对于由非失配误差引入的像差,次镜刚体位移对倾斜、离焦、彗差校正效果好,对像散和球差也有一定的校正效果。

2.4 多源混合误差引起像差的反演与补偿

太阳望远镜在实际运行过程中的像差来源总是

多种的,对包含了位置失配误差和非失配误差的多源混合误差的校正反映了次镜刚体位移在太阳望远镜运行过程中实际的校正效果,如图 6 所示。次镜刚体校正后,系统像差 RMS 值由 $1.337\ \mu\text{m}$ 降低至 $0.279\ \mu\text{m}$,剩余像差主要以 Z_9 项球差和 Z_6 项 0° 像散为主,次镜刚体位移对望远镜运行过程中多源混合误差也具有较好的校正效果。

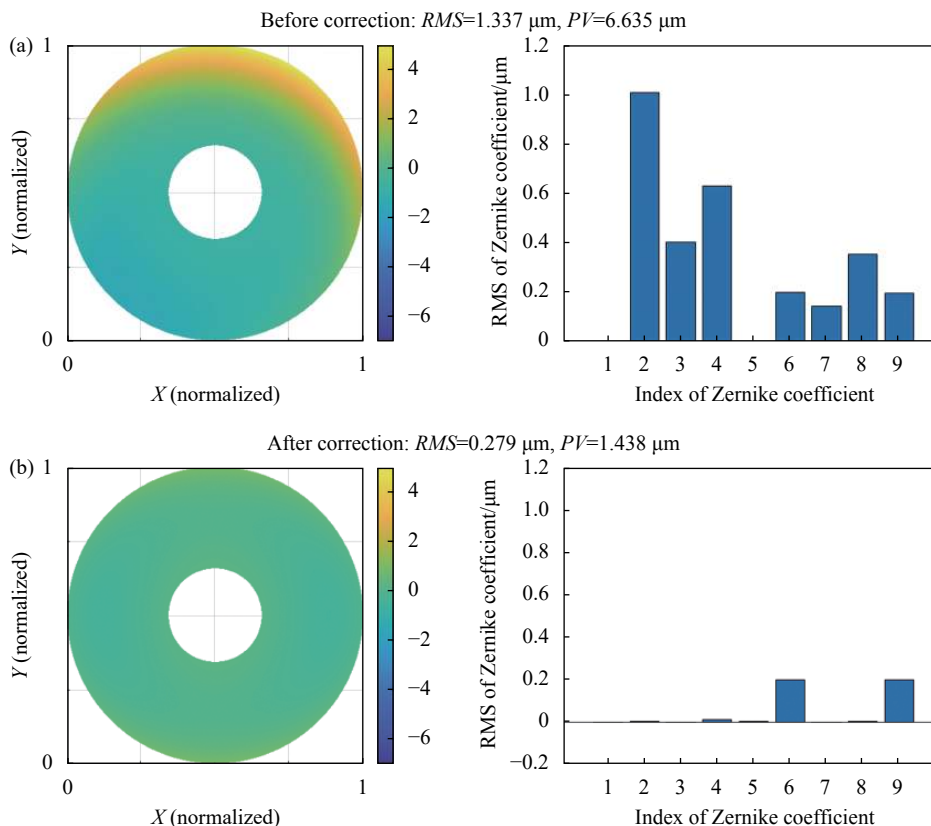


图 6 多源混合误差引起像差的波前图和 Zernike 系数。(a) 校正前; (b) 校正后

Fig.6 Wavefront diagram and Zernike coefficient of aberration caused by multi-source mixed error. (a) Before correction; (b) After correction

分析次镜刚体位移对位置失配误差、非失配误差、多源混合误差的校正情况,得到次镜刚体位移像差校正的总体原则:在校正某一像差时总会影响其他像差,这些像差也应被降低,或是其增大量小于那些被校正的像差,即校正后,系统像差的总 RMS 值降低。

3 太阳望远镜次镜刚体校正实验验证

3.1 实验光路

实验使用与主镜同焦点的光源代替主镜,同时使用 Hexapod 对次镜的位移量进行控制,使用哈特曼相

机对环境光进行标定,消除环境光的影响后,对轴上视场出瞳面波前像差进行测量。光路图和实际布局如图 7 所示。

文中研究的望远镜系统属于同轴系统,经过穿轴处理,并通过物像关系调整各个光学元件的前后间距,完成粗装调,并使用灵敏度矩阵法精装调后,在该位置重新测量灵敏度矩阵,通过随机调整光学元件的位置、改变变形镜面型的方式引入不同误差来源的像差,分别对位置失配像差、非位置失配像差、多源混合像差各进行了五组次镜刚体校正实验。

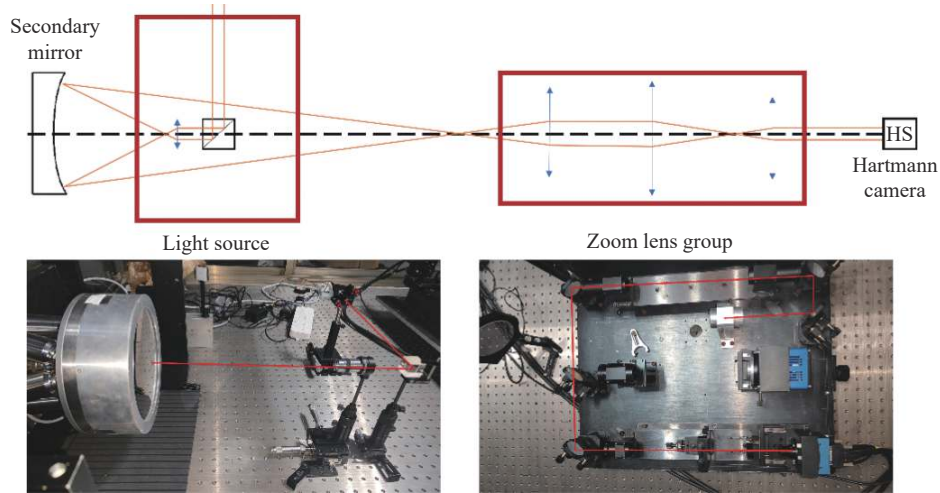


图 7 实验装置布局图

Fig.7 Layout of experimental device

3.2 位置失配像差校正

次镜刚体位移对五组位置失配误差的校正前后

对比如图 8 和图 9 所示。次镜刚体位移对非失配误差有良好的校正效果, 每组像差的 RMS 值均降低至

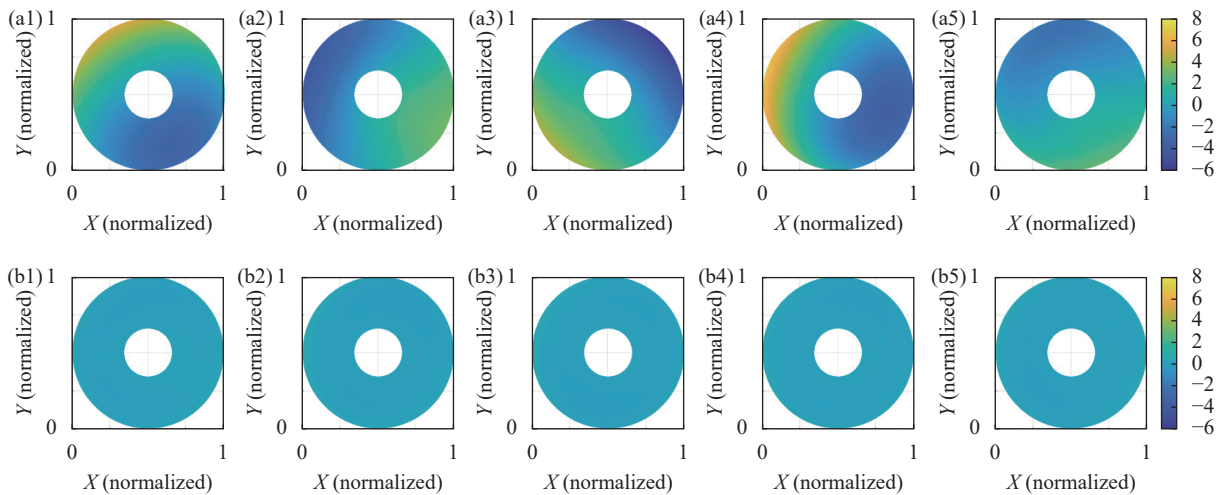


图 8 位置失配误差引起像差的波前图校正前后对比。(a1)~(a5) 校正前;(b1)~(b5) 校正后

Fig.8 Wavefront diagram of aberration caused by position mismatch error. (a1)-(a5) Before correction; (b1)-(b5) After correction

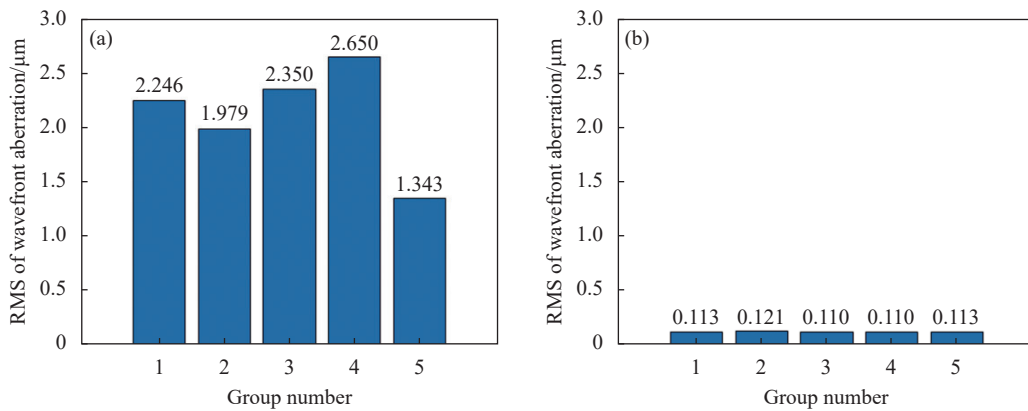


图 9 位置失配误差引起像差的 RMS 值校正前后对比。(a) 校正前;(b) 校正后

Fig.9 RMS of aberration caused by position mismatch error. (a) Before correction; (b) After correction

原 RMS 值的 9% 以下。以剩余球差最小的第五组数据为例,对各项 Zernike 系数的前后变化进行研究,如表 2 所示,倾斜、离焦、彗差得到大量校正,剩余量受 Hexapod 精度影响无法降低,球差也得到了改善,由

0.131 μm 降低至 0.089 μm , 剩余像差主要以光路透镜引入的球差为主,分析灵敏度矩阵,降低剩余的球差会产生更大量的离焦,无法进一步校正。

表 2 第五组实验数据-位置失配误差引起像差校正 (单位: μm)

Tab.2 Group 5 experimental data-correction of aberration caused by position mismatch error (Unit: μm)

	Z_2	Z_3	Z_4	Z_5	Z_6	Z_7	Z_8	Z_9	RMS
Before correction	-1.257	0.437	0.019	-0.050	-0.024	-0.111	0.020	0.131	1.343
After correction	-0.001	0.018	0.044	-0.027	-0.033	-0.028	0.003	0.089	0.113

3.3 非失配像差校正

次镜刚体位移对五组非失配误差的校正前后对比如图 10 和图 11 所示。次镜刚体位移对非失配误差有较好的校正效果,每组像差的 RMS 值均降低至

原 RMS 值的 40% 以下,以剩余球差最小的第六组数据为例,对各项 Zernike 系数的前后变化进行研究,如表 3 所示,倾斜、离焦得到了大量校正, Z_8 项 Y 方向彗差由 0.148 μm 降低至 0.107 μm , 但并未完全校正,

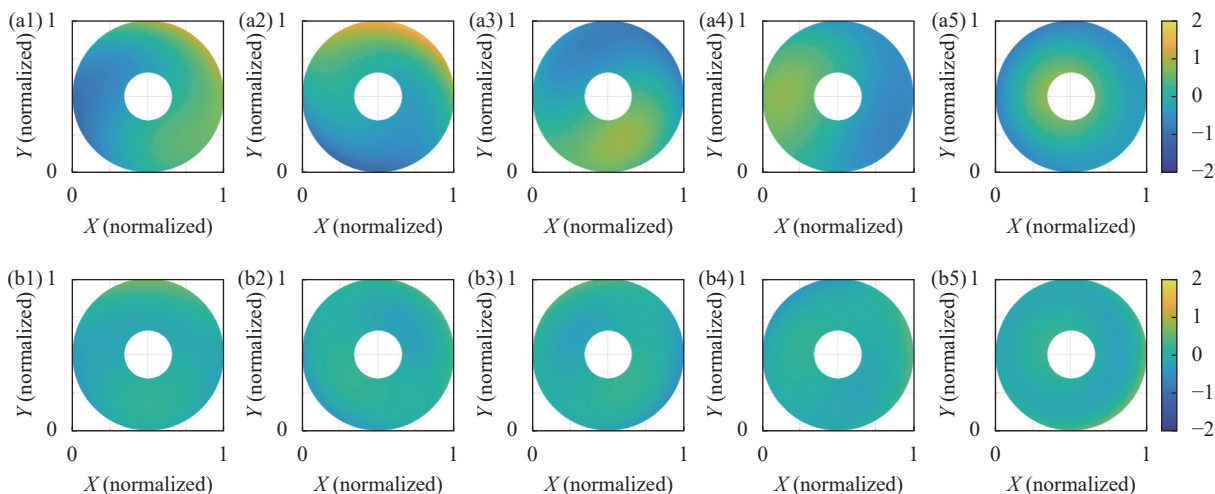


图 10 非失配误差引起像差的波前图校正前后对比。(a1)-(a5) 校正前;(b1)-(b5) 校正后

Fig.10 Wavefront diagram of aberration caused by non-mismatch error. (a1)-(a5) Before correction; (b1)-(b5) After correction

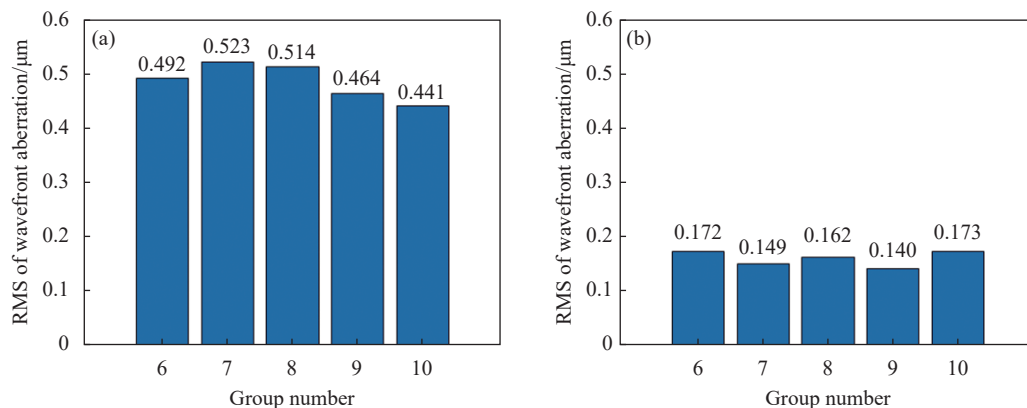


图 11 非失配误差引起像差的 RMS 值校正前后对比。(a) 校正前;(b) 校正后

Fig.11 RMS of aberration caused by non-mismatch error. (a) Before correction; (b) After correction

表 3 第六组实验数据-非失配误差引起像差校正 (单位: μm)

Tab.3 Group 6 experimental data-correction of aberration caused by non-mismatch error (Unit: μm)

	Z_2	Z_3	Z_4	Z_5	Z_6	Z_7	Z_8	Z_9	RMS
Before correction	0.016	0.443	0.103	-0.005	0.115	-0.001	0.148	0.012	0.492
After correction	0.031	0.036	0.037	0.006	0.121	-0.002	0.107	-0.008	0.172

分析灵敏度矩阵,其原因是 D_x 和 T_y 对 Z_2 、 Z_8 项的影响相同,校正 Z_8 项会产生更大量的倾斜,故无法进一步校正。

3.4 多源混合像差校正

次镜刚体位移对五组多源混合误差的校正前后对比如图 12 和图 13 所示。次镜刚体位移多源混合像差有较好的校正效果,每组像差的 RMS 值均降低

至原 RMS 值的 15% 以下,以初始像差值最大的第 15 组数据为例,对各项 Zernike 系数的前后变化进行研究,如表 4 所示,倾斜、离焦得到了大量校正, Z_5 、 Z_6 项像散也得到了校正,分析灵敏度矩阵,其原因在于初始像差中存在较大量的倾斜,能够按一定比例校正像散。

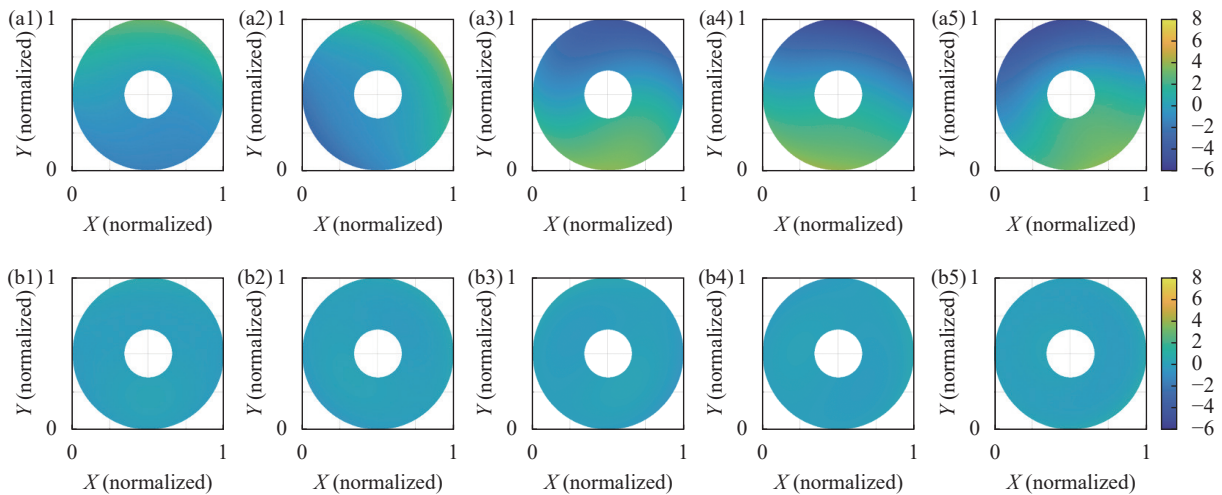


图 12 多源混合误差引起像差的波前图校正前后对比。(a1)~(a5) 校正前;(b1)~(b5) 校正后

Fig.12 Wavefront diagram of aberration caused by multi-source mixed error. (a1)-(a5) Before correction; (b1)-(b5) After correction

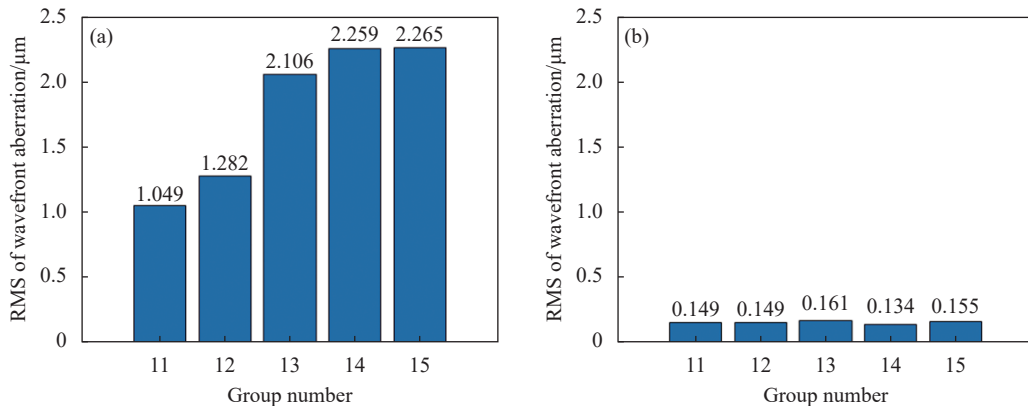


图 13 多源混合误差引起像差的 RMS 值校正前后对比。(a) 校正前;(b) 校正后

Fig.13 RMS of aberration caused by multi-source mixed error. (a) Before correction; (b) After correction

表 4 第 15 组实验数据-多源混合误差引起像差校正 (单位: μm)

Tab.4 Group 15 experimental data-correction of aberration caused by multi-source mixed error (Unit: μm)

	Z_2	Z_3	Z_4	Z_5	Z_6	Z_7	Z_8	Z_9	RMS
Before correction	-2.029	0.809	-0.576	-0.090	-0.054	-0.068	-0.009	0.127	2.265
After correction	-0.023	-0.003	0.014	-0.012	-0.0007	0.102	-0.035	0.108	0.155

4 结 论

针对太阳望远镜在运行过程中由于位置失配、非失配误差引起低时空频率像差问题,提出了次镜刚体位移校正低时空频率像差的方法,并对三种不同来源像差进行了数值仿真及实验验证。结果表明:次镜刚体位移对动态位置失配误差引起像差的校正效果良好,校正后像差 RMS 值低于原值的 9%;对非失配误差引起的像差也具有一定的校正效果,校正后像差 RMS 值低于原值的 40%,其中对倾斜、离焦、彗差校正效果较好,对像散和球差的校正效果较差;对于多源混合误差,次镜刚体位移也具有较好的校正能力,校正后像差 RMS 值低于原值的 15%。次镜刚体位移校正的方式能够在不增加光学元件的前提下降低太阳望远镜系统运行过程中的低时空频率像差,具有良好的发展前景和应用价值。

参考文献:

[1] Shack R V, Thompson K. Influence of alignment errors of a telescope system on its aberration field[C]//Optical Alignment I. Proceedings of SPIE, 1980, 251: 146-153.

[2] Thompson K. Description of the third-order optical aberrations of near-circular pupil optical systems without symmetry [J]. *Journal of the Optical Society of America A*, 2005, 22(7): 1389-1401.

[3] Buchroeder R A. Tilted component optical systems[D]. Tucson: University of Arizona, 1976.

[4] Ju Guohao. Research of active optical wavefront control methods for off-axis reflective astronomical telescopes [D]. Changchun: Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, 2017. (in Chinese)

[5] Guo Pan, Zhou Jun, Ding Xiaoyu, et al. Method to solve assembly misalignment of two-reverse system based on vector wave aberration theory [J]. *Acta Optica Sinica*, 2019, 39(7): 0722002. (in Chinese)

[6] Liu Bo, Ding Yalin, Jia Jiqiang, et al. Computer aided alignment of R-C optical system [J]. *Infrared and Laser*

Engineering, 2016, 45(3): 0318001. (in Chinese)

[7] Zuo Xiaozhou, Wang Zhangli, Zhao Jin, et al. Adaptive alignment technology of two-mirror reflection system [J]. *Journal of Applied Optics*, 2022, 43(4): 780-786. (in Chinese)

[8] Wang Yu, Zhang Xin, Wang Lingjie, et al. Freeform optical system alignment based on artificial neural networks [J]. *Acta Optica Sinica*, 2013, 33(12): 1211001. (in Chinese)

[9] Wang Bin, Wu Fan, Ye Yutang. Computer aided alignment for of-axis TMA system [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2016, 45(11): 1118006. (in Chinese)

[10] Sun Jingwei, Lv Tianyu, Yao Lishuang, et al. Design and assembly of transmitter-telescope [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2014, 22(2): 369-375. (in Chinese)

[11] Zhang Xiangming, Jiang Feng, Kong Longyang, et al. Research on optical alignment technology for Cassegrain system [J]. *Journal of Applied Optics*, 2015, 36(4): 526-530. (in Chinese)

[12] Gu Zhiyuan, Yan Changxiang, Li Xiaobing, et al. Application of modified sensitivity matrix method in alignment of off-axis telescope [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2015, 23(9): 2595-2604. (in Chinese)

[13] Cao Yuze, Ma Wenli. Application of two step sensitivity matrix method in Cassegrain telescope alignment [J]. *Opto-Electronic Engineering*, 2020, 47(2): 180536. (in Chinese)

[14] Liu Zhu, Peng Qi, Ren Ge, et al. Second-order sensitivity matrix method for aligning off-axis telescopes [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2022, 59(8): 0811002. (in Chinese)

[15] Rao C H, Gu N T, Liu Y Y, et al. POST—prototype for the Chinese Large Solar Telescope [J]. *Journal of Astronomical Telescopes, Instruments, and Systems*, 2019, 5(2): 024004.

[16] Gu N T, Cheng L, Cheng Y T, et al. Thermal control for light-weighted primary mirrors of large ground-based solar telescopes [J]. *Journal of Astronomical Telescopes, Instruments, and Systems*, 2019, 5(1): 014005.

[17] Rao C H, Gu N T, Rao C H, et al. First light of the 1.8-m solar telescope—CLST [J]. *Science China Physics, Mechanics & Astronomy*, 2020, 63(10): 109631.

Low spatio-temporal frequency wavefront aberration correction technology of solar telescope

Zhao Simin^{1,2}, Gu Naiting^{1,2*}, Huang Linhai^{1,2}, Xiao Yawei^{1,2},
Zhang Lanqiang^{1,2}, Cheng Yuntao^{2,3}, Du Zongzheng^{2,3}

(1. Key Laboratory of Adaptive Optics, Institute of Optics and Electronics, Chinese Academy of Sciences, Chengdu 610209, China;

2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China;

3. Lightweight Optics and Advanced Materials Technology Center, Institute of Optics and Electronics, Chinese Academy of Sciences, Chengdu 610209, China)

Abstract:

Objective Solar telescopes are important equipment for conducting solar physics research and predicting space weather. During operation, large aperture solar telescope systems are affected by factors such as optical and mechanical structural deformation caused by solar radiation, gravitational deflection in different directions, wind-borne optical structural deformation, and environmental temperature changes, resulting in wavefront aberrations, leading to significant degradation in the imaging quality of the solar telescope system, and restricting the resolution of solar atmospheric imaging. Adaptive optical systems are the main means of correcting low spatio-temporal frequency aberrations during the operation of solar telescopes, but their correction of low-order aberrations wastes a large amount of travel and sacrifices their ability to correct high-order aberrations. Therefore, it is necessary to correct the low spatio-temporal frequency aberrations during the operation of the solar telescope without increasing the complexity of the solar telescope system.

Methods A simulation system and an experimental system have been established for the 60 cm POST solar telescope system. The sensitivity matrix of the displacement of the secondary mirror rigid body is calculated, and the low spatio-temporal frequency aberration is introduced using a deformable mirror to simulate low-order aberrations. The aberration of the optical system's field of view on the axis is observed using a Hartmann camera. The displacement of the secondary mirror rigid body required for correcting the aberration is calculated using the sensitivity matrix method. Finally, the introduced low spatio-temporal frequency aberration is corrected by adjusting the position of the secondary mirror rigid body. The results of the system fine assembly are shown (Fig.4).

Results and Discussions The low spatio-temporal frequency aberrations for simulated solar telescope systems are corrected, the ability of secondary mirror rigid body displacement is quantitatively analyzed to correct different types of low-order aberrations, and the principles for correcting low spatio-temporal frequency aberrations are provided. The simulation results are verified through experiments, where the RMS value of the aberration after correction for the position mismatch error of the secondary mirror pair is lower than 9% of the original value (Fig.9), the RMS value of the aberration after correction for the non-mismatch error is lower than 40% of the original value (Fig.10), and the RMS value of the aberration after correction for the multi-source mixing error is lower than 15% of the original value (Fig.11).

Conclusions A wavefront correction algorithm and implementation system for specific scenes have been

constructed with adaptive optics. The real-time wavefront correction has been completed using a hexapod driven secondary mirror. The studies of correction for position mismatch error, non-mismatch error, and multi-source mixed error have been conducted, and multiple sets of experiments have been conducted. Without increasing the complexity of the optical system, the low spatio-temporal frequency aberration of the system has been reduced, and the imaging resolution of the solar telescope has been improved. The secondary mirror rigid body displacement correction method can reduce the low spatio-temporal frequency aberration during the operation of solar telescope systems without adding optical components, and has good development prospects and application value.

Key words: imaging system; aberration correction; sensitivity matrix method; secondary mirror; solar telescope

Funding projects: National Natural Science Foundation of China (12022308, 12073031); National Key Research and Development Program of China (2021YFC2202200, 2021YFC2202201, 2021YFC2202204, 2021YFC2202004)