

基于本征系数的大口径望远镜失调量解算

梁琼心^{1,2}, 黄金龙^{1*}, 王鲲鹏³, 薛莉³¹中国科学院光电技术研究所, 四川 成都 610209;²中国科学院大学, 北京 100049;³北京跟踪与通信技术研究所, 北京 100094

摘要 针对大口径望远镜光学系统内部空间限制的特点, 为了实现失调量校正, 提出了一种基于本征系数的失调量解算方法。该方法首先利用波前曲率传感器的原理, 通过交替测量前后离焦面的方式采集光斑图。然后, 利用无需分区探测的本征函数法进行波前重构, 利用本征系数来表征系统波像差, 并依据失调量建立灵敏度矩阵模型。最后, 根据失调状态与理想状态的本征系数即可求解出失调量。与其他技术途径相比, 该方法具有无需添加光学元件、无需分区探测、运算简单的特点。主镜直径为 1.8 m 的望远镜实验结果表明, 当次镜偏心距离范围为 $-0.9 \sim 0.9$ mm、倾斜角范围为 $-0.2^\circ \sim 0.2^\circ$ 时, 利用本征系数灵敏度矩阵法得到的计算值的误差均小于 10%, 对大口径望远镜中的应用具有一定的意义。

关键词 光学设计; 大口径望远镜; 曲率传感器; 本征系数; 灵敏度矩阵; 失调量解算

中图分类号 TH743

文献标志码 A

doi: 10.3788/AOS202141.1922001

Misalignment Calculation of Large Aperture Telescope Based on Eigen Coefficient

Liang Qiongxin^{1,2}, Huang Jinlong^{1*}, Wang Kunpeng³, Xue Li³¹*Institute of Optics and Electronics, Chinese Academy of Sciences, Chengdu, Sichuan 610209, China;*²*University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China;*³*Beijing Institute of Tracking and Telecommunication Technology, Beijing 100094, China*

Abstract Aiming at the characteristic of the internal space limitation of the optical system of large aperture telescope, in order to realize the correction of the misalignment, a method for solving the misalignment based on the eigen coefficient is proposed. Firstly, based on the principle of wavefront curvature sensor, the light spot patterns are collected by alternately measuring the front and back defocused surfaces. Then, the wavefront is reconstructed by the eigenfunction method without partition detection, the eigen coefficients are used to characterize the system wave aberration, and the sensitivity matrix model is established according to the misalignments. Finally, the misalignments can be solved according to the eigen coefficients of the misalignment state and the ideal state. Compared with other technical approaches, this method has the characteristics of no need to add optical components, no partition detection, and simple operation. The experimental results by the telescope with the primary mirror diameter of 1.8 m show that when the eccentric distance range of the secondary mirror is from -0.9 mm to 0.9 mm and the tilt angle range is from -0.2° to 0.2° , the errors of the calculated values obtained by the eigen coefficient sensitivity matrix method are less than 10%, which has certain significance for the application of large aperture telescopes.

Key words optical design; large aperture telescope; curvature sensor; eigen coefficient; sensitivity matrix; misalignment calculation

OCIS codes 220.1000; 110.6770; 040.1520; 120.1880

收稿日期: 2021-03-26; 修回日期: 2021-04-15; 录用日期: 2021-04-29

基金项目: 中国科学院青年创新促进会资助项目(2021376)

通信作者: *huangjl@ioe.ac.cn

1 引言

随着航天技术的发展,轨道上的空间碎片数量逐年增加。为了确保航天活动正常进行,需要精确探测空间碎片的位置,进而引导航天器机动规避这些碎片^[1]。地基光电望远镜具有作用距离远、探测能力强的优点,因此成为探测空间碎片的重要工具^[2]。增大望远镜的视场是提高搜索效率的首要技术途径。为了提高望远镜的集光能力和空间分辨率,望远镜的口径不断增大,但装调难度也在不断增加^[3]。在使用过程中,受到各种因素的影响,镜面会发生失调,进而导致望远镜成像质量下降,观测精度降低,无法精确观测空间碎片等目标^[4]。因此,在解算大口径大视场望远镜的失调量后再对镜子的位置进行校正具有重要意义。杨晓飞^[5]利用分组补偿器法对光学系统进行装调实验,使像质达到了要求。陈建军^[6]利用分组补偿器法对灵敏度矩阵进行分组,有效地装调了光学系统。郭继锴等^[7]利用主成分分析法对灵敏度矩阵进行处理,减少了光学元件的调整量,降低了装调难度。曹宇泽等^[8]采用拟合的方式建立了灵敏度矩阵模型,失调校正后的全视场均方根(RMS)小于 0.03λ ,其中 λ 为光波波长。郭攀等^[9]利用矢量波像差理论对两反光学系统进行装调,最终得到的结果满足使用要求。

由于许多大口径望远镜光学系统存在内部空间受限、后工作距较小、光线容易被遮挡等问题,因此最好采用无需添加检测光学元件的方法来获取波前信息,并利用此信息来求解失调量。波前曲率传感器具有不用预留检测元件位置、实现简单、重构速度快等特点,因此在大口径大视场望远镜中得到了广泛应用,如大视场巡天望远镜(WFST)、大型综合巡天望远镜(LSST)^[10]等。波像差常用 Zernike 系数表示,在利用曲率传感器获取该系数时,需要对探测器进行分区处理,这大大增加了计算量^[11]。针对该问题,本文提出了本征系数灵敏度矩阵法,该方法计算失调量时,具有无需分区探测、重构矩阵结构简单、计算量较小等优势。本文对主镜直径为 1.8 m 的望远镜进行了失调量解算实验。首先,利用单个探测器测量中心视场的光强分布。然后,利用曲率传感器本征函数法重构波前,并利用得到的本征系数构建灵敏度矩阵模型。最后,将计算得到的失调量与实测值进行比较,发现二者基本相符,这表明该方法对大口径望远镜失调有良好的校正效果。

2 基本原理

2.1 曲率传感器本征函数法

波前曲率传感器利用前后离焦面的光强分布来重构波像差,其原理如图 1 所示,其中 F 为光学系统的成像焦点, l 为离焦量, f 为光学系统的焦距, φ 为入射波前, L_1 为透镜。根据理论推导,两个离焦面的归一化光强差可用 Neumann 边界条件下的泊松方程^[12-13]表示,其表达式为

$$S(\mathbf{r}_0) = \left[\frac{C \cdot I_2(-\mathbf{r}_0) - D \cdot I_1(\mathbf{r}_0)}{C \cdot I_2(-\mathbf{r}_0) + D \cdot I_1(\mathbf{r}_0)} - \frac{C - D}{C + D} \right] \cdot \frac{C - D}{2D} = c_0 \left[\nabla^2 \varphi(c_1 \mathbf{r}_0) - \frac{\partial}{\partial \mathbf{n}} \varphi(c_1 \mathbf{r}_0) \cdot \delta_c \right], \quad (1)$$

式中: I_1 为前离焦面 P_1 的光强; I_2 为后离焦面 P_2 的光强; \mathbf{r}_0 为位置矢量; C 、 D 为非零的放大倍数且 $D/C = (f+l)/(f-l)$; $\nabla^2 = \partial^2/\partial x^2 + \partial^2/\partial y^2$ 为拉普拉斯算子; δ_c 为光瞳边界的法向偏导数,下标 c 为光瞳边界; \mathbf{n} 为光瞳边界的法向矢量; $c_0 = [\lambda f(f-l)]/(2\pi l)$ 和 $c_1 = f/l$ 为与传感器参数相关的常数; $\nabla^2 \varphi(c_1 \mathbf{r}_0)$ 为波前曲率; $\frac{\partial}{\partial \mathbf{n}} \varphi(c_1 \mathbf{r}_0)$ 为波前径向斜率。

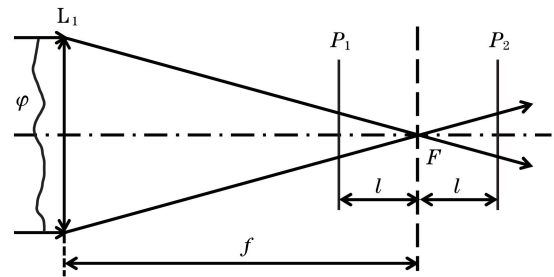


图 1 波前曲率传感器原理

Fig. 1 Principle of wavefront curvature sensor

在 Neumann 边界条件下,二维拉普拉斯算子的本征函数 $W(\mathbf{r})$ 的表达式^[14]为

$$\begin{cases} \nabla^2 W(\mathbf{r}) = -\gamma^2 W(\mathbf{r}), & \mathbf{r} \in \sigma \\ \frac{\partial W(\mathbf{r})}{\partial \mathbf{n}} = 0, & \mathbf{r} \in c \end{cases}, \quad (2)$$

式中: γ^2 为本征值; σ 为光瞳区域。

由于在光瞳区域 σ 中,本征函数是一组正交完备基,因此任意波像差 $\varphi(\mathbf{r})$ 的表达式^[14]为

$$\varphi(\mathbf{r}) = \sum_{k=1}^{\infty} \alpha_k W_k(\mathbf{r}), \quad (3)$$

式中: α_k 为第 k 项本征模式系数,简称为本征系数,可描述对应本征模式 $W_k(\mathbf{r})$ 的大小。将(2)、(3)式

代入(1)式中,可得

$$S(\mathbf{r}_0) = \left[\frac{C \cdot I_2(-\mathbf{r}_0) - D \cdot I_1(\mathbf{r}_0)}{C \cdot I_2(-\mathbf{r}_0) + D \cdot I_1(\mathbf{r}_0)} - \frac{C - D}{C + D} \right] \cdot \frac{C - D}{2D} = c_0 \sum_{k=1}^{\infty} [-\alpha_k \gamma_k^2 W_k(\mathbf{r})]. \quad (4)$$

由此可知,测量光强分布 I_1 和 I_2 并计算得到 $S(\mathbf{r}_0)$ 后,可利用(4)式快速算出本征系数。

对于不同的光瞳区域,求解其在相应 Neumann 边界条件下的方程组(2),即可得到它的本征函数,如圆环形光瞳的本征函数^[15]为

$$A_{nm}(r, \theta) = \begin{cases} [Y'_\mu(\gamma_{n\mu} r_1) J'_\mu(\gamma_{n\mu} r) - J'_\mu(\gamma_{n\mu} r_1) Y'_\mu(\gamma_{n\mu} r)] \cos(m\theta), & m \geq 0 \\ -[Y'_\mu(\gamma_{n\mu} r_1) J'_\mu(\gamma_{n\mu} r) - J'_\mu(\gamma_{n\mu} r_1) Y'_\mu(\gamma_{n\mu} r)] \sin(m\theta), & m < 0 \end{cases}, \quad (5)$$

式中: r 为极径, $r_1 \leq r \leq r_2$, 其中 r_1 和 r_2 分别为圆环形光瞳的内外圆半径; θ 为极角, $0 < \theta \leq 2\pi$; $\mu = |m|$, $m = 0, \pm 1, \pm 2, \dots$; $J'_\mu(\cdot)$ 为第一类第 μ 阶 Bessel 函数; $Y'_\mu(\cdot)$ 为第二类第 μ 阶 Bessel 函数; $\gamma_{n\mu}$ 为 $Y'_\mu(\gamma r_2) J'_\mu(\gamma r_1) - J'_\mu(\gamma r_2) Y'_\mu(\gamma r_1) = 0$ 的第 n 个正根, $n = 1, 2, \dots$, $J'_\mu(\cdot)$ 为 $J_\mu(\cdot)$, $Y'_\mu(\cdot)$ 为 $Y_\mu(\cdot)$ 的导数。

2.2 本征系数灵敏度矩阵法

在装调过程中,当光学元件发生偏心或倾斜时都会引入像差。(3)式描述了波像差与本征系数的函数关系,这表明元件失调与本征系数间存在一定的关联。但是,它们的关系十分复杂,难以求解出它们的函数解析形式。根据多元函数的泰勒定理,函数 $f(x)$ 在 x_0 点的某个邻域内连续且存在 $M+1$ 阶连续的偏导数。若 $x_0 + \Delta x$ 为这个邻域中的任意点,则可近似认为 $f(x_0 + \Delta x)$ 是 Δx 的 M 次多项式^[16]。因此,波像差第 k 项本征系数 α_k 的表达式^[17]为

$$\alpha_k(\mathbf{X} + \Delta \mathbf{X}) = \sum_{p=0}^M \frac{1}{p!} \left(\sum_{q=1}^N \Delta x_q \frac{\partial}{\partial x_q} \right)^p \cdot \alpha_k(\mathbf{X}) + R_{X,M}(\Delta \mathbf{X}), \quad (6)$$

式中: \mathbf{X} 为待测状态下包含多个装调自由度值的矩阵; $\Delta \mathbf{X}$ 为设计的包含已知偏移量的矩阵; q 为装调自由度个数, $q = 1, \dots, N$; p 为展开阶数, $p = 0, \dots, M$; $R_{X,M}(\Delta \mathbf{X})$ 为展开余项; Δx_q 为装调自由度。

经过粗调后,望远镜的失调量通常较小。由文献[17]可知,本征系数与装调自由度在失调量较小时基本呈线性关系,对(6)式进行一阶展开后的表达式为

$$\alpha_k(\mathbf{X} + \Delta \mathbf{X}) = \alpha_k(\mathbf{X}) + \left(\sum_{q=1}^N \Delta x_q \frac{\partial}{\partial x_q} \right) \alpha_k(\mathbf{X}) + R_{X,1}(\Delta \mathbf{X}) \approx \alpha_k(\mathbf{X}) + \sum_{q=1}^N \Delta x_q \frac{\partial \alpha_k(\mathbf{X})}{\partial x_q}. \quad (7)$$

本征系数和装调自由度的关系可用矩阵形式表示为

$$\begin{bmatrix} \alpha_1(\mathbf{X} + \Delta \mathbf{X}) \\ \vdots \\ \alpha_k(\mathbf{X} + \Delta \mathbf{X}) \\ \vdots \\ \alpha_K(\mathbf{X} + \Delta \mathbf{X}) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \alpha_1(\mathbf{X}) \\ \vdots \\ \alpha_k(\mathbf{X}) \\ \vdots \\ \alpha_K(\mathbf{X}) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \frac{\partial \alpha_1(\mathbf{X})}{\partial x_1} & \frac{\partial \alpha_1(\mathbf{X})}{\partial x_2} & \dots & \frac{\partial \alpha_1(\mathbf{X})}{\partial x_N} \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ \frac{\partial \alpha_k(\mathbf{X})}{\partial x_1} & \frac{\partial \alpha_k(\mathbf{X})}{\partial x_2} & \dots & \frac{\partial \alpha_k(\mathbf{X})}{\partial x_N} \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ \frac{\partial \alpha_K(\mathbf{X})}{\partial x_1} & \frac{\partial \alpha_K(\mathbf{X})}{\partial x_2} & \dots & \frac{\partial \alpha_K(\mathbf{X})}{\partial x_N} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta x_1 \\ \Delta x_2 \\ \vdots \\ \Delta x_N \end{bmatrix}, \quad (8)$$

式中: K 为本征系数总项数。(8)式中本征系数对失调量的偏导数构成的矩阵即为本征系数灵敏度矩阵。

由(8)式可知,灵敏度矩阵随着失调量的变化而变化,可以采取拟合的方式来计算本征系数的灵敏度矩阵^[8]。在待测装调状态下,对每个装调自由度分别进行多次测量。在沿 x 轴偏心距离为 D_x 的条件下,取光学元件偏移量 ΔD_{x_j} 为 $-0.3, -0.2, -0.1, 0, 0.1, 0.2, 0.3$ mm, 测量次数 $j = 1, \dots, 7$, 并依次测量 $D_x + \Delta D_{x_j}$ 处的本征系数 α_{k_j} , 以及待测装调状态下的本征系数 α_{k_0} , 再将其拟合成一次函数,形式为

$$\begin{bmatrix} \alpha_{k_1} - \alpha_{k_0} \\ \vdots \\ \alpha_{k_j} - \alpha_{k_0} \\ \vdots \\ \alpha_{k_7} - \alpha_{k_0} \end{bmatrix} = a \begin{bmatrix} \Delta D_{x_1} \\ \vdots \\ \Delta D_{x_j} \\ \vdots \\ \Delta D_{x_7} \end{bmatrix}, \quad (9)$$

式中: a 为相应的本征系数灵敏度,其代表相应自由度对各像差的敏感程度,数值越大说明该自由度对像差的影响越大。

在实际的光学系统中,只能用有限个本征模式重构波前,故要着重考虑本征系数的选取。由文

献[17]可知,在失调量较小的情况下,本征系数与装调自由度近似呈线性关系。由此可知,本征系数的选取与失调量密切相关,将其归纳为三个原则。

1) 选取的本征系数要随失调量的变化而明显变化,进而可以避免测量微小变化量时产生的误差,保证计算灵敏度矩阵的精度。

2) 本征系数与失调量要呈显著的线性关系,以减小灵敏度矩阵项的拟合误差。

3) 选取的本征系数要求能反映光学元件全部装调自由度的变化情况,以确保计算失调量的正确性和精度。

通过分析光学系统中失调量与多项本征系数的关系,依据上述原则从中选择代表性的本征系数,不仅可以减少计算量,还可以提高计算速度和校正精度。

3 实验参数分析

3.1 1.8 m 望远镜光学系统主要参数

为了验证本征系数灵敏度矩阵法解算失调量的可行性,在主镜直径为 1.8 m 的望远镜上进行实验,其光学系统如图 2 所示。其中,主镜 L_1 是旋转抛物面,次镜 L_2 是双曲面,两者可构成卡塞格林光学系统,三镜 L_3 是平面反射镜,可将光波反射到电

荷耦合元件(CCD)探测器中。该光学系统的焦距为 5404.4 mm,表 1 列出了该望远镜光学系统的主要参数。图 3 为设计状态下望远镜的包围分布能量和调制传递函数(MTF)图。

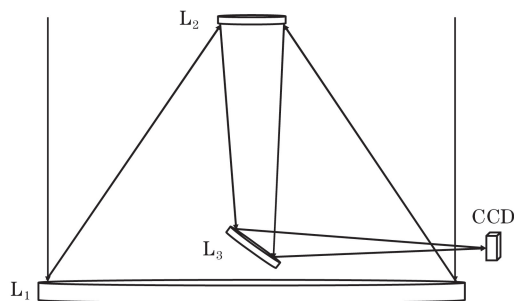


图 2 主镜直径为 1.8 m 的望远镜光学系统

Fig. 2 Optical system of telescope with primary mirror diameter of 1.8 m

表 1 主镜直径为 1.8 m 的望远镜光学系统的主要参数

Table 1 Main parameters of optical system of telescope with primary mirror diameter of 1.8 m

Optical element	Radius of curvature /mm	Aspherical coefficient	Optical aperture /mm
L_1	5400.000	-1.0000	1760
L_2	714.313	-1.0714	231
L_3			309

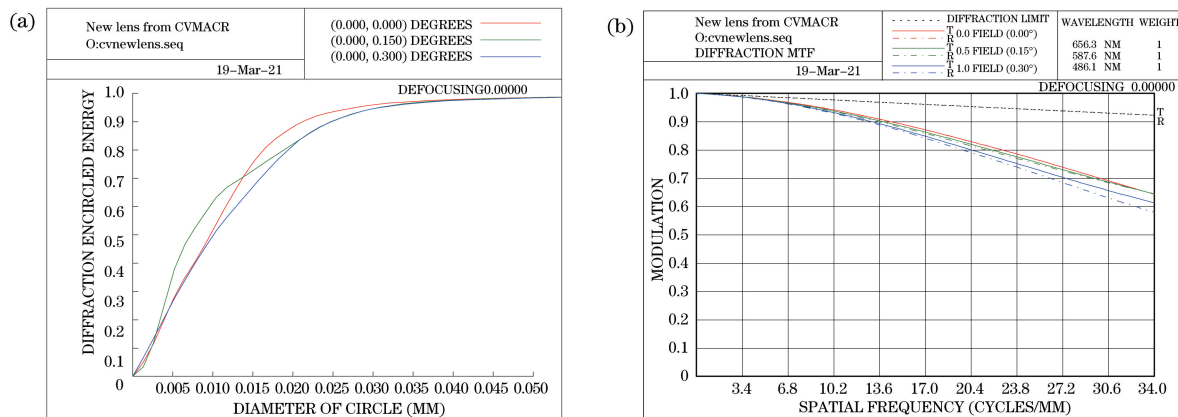


图 3 设计状态下望远镜的包围分布能量和 MTF。(a) 包围分布能量;(b) MTF

Fig. 3 Diffraction encircled energy and MTF of telescope under designed state. (a) Diffraction encircled energy; (b) MTF

由图 2 可知,若在该光学系统内部放置检测的光学元件,光线容易被遮挡,导致检测结果缺少部分波前信息,影响后续失调校正工作。由于系统中只有单个探测器,因此将单个 CCD 器件作为光强探测器,将其移动至两个对称的离焦面处,分别测量它们的光强分布以实现波前曲率传感器的功能。当交替测量的速度远高于波前变化的速度时,两次测量可近似为同步测量。该方法不仅解决了空间限制的问题,还减小了不同探测器性能差异带来的测量误差。

根据文献[12]中波前曲率传感器的离焦量选取条件 $l \gg \frac{\lambda f^2}{\lambda f + r_0}$,在保证测量精度的前提下,选取离焦量 l 为 11 mm。其中, r_0 为大气相干长度。

将主镜作为失调校正基准,由于三镜是平面反射镜,其失调只会引起像点位置偏移,对波像差无影响,因此本实验仅将次镜调整量作为失调量。理论上次镜有 6 个装调自由度,分别为沿 x 轴的偏心距离 D_x 、沿 y 轴的偏心距离 D_y 、沿 z 轴的偏心距离

D_z 、绕 x 轴的倾斜角度 T_x 、绕 y 轴的倾斜角度 T_y 和绕 z 轴的倾斜角度 T_z 。由于次镜在该光学系统中旋转对称,因此可认为 T_z 不影响系统波像差。此外,每次调整 D_z 时均需重新聚焦,这可能会产生误差。考虑到实际应用的复杂性,由于比较前后离焦面光斑的圆环半径可对 D_z 进行调整,因此实验中不考虑 D_z 。

3.2 实验基准与本征系数的选取

由于重力、温度和风力等因素的影响,望远镜安装后不可能与设计状态完全一致,因此将装调后像质较好的光学系统视为理想状态,并将其视为失调校正实验的基准。图 4 为基准状态下的焦面图像。实验中将较亮的星作为探测目标以验证方法的可行性,图 4 中用圆圈圈出的光斑即为本实验的探测目标。

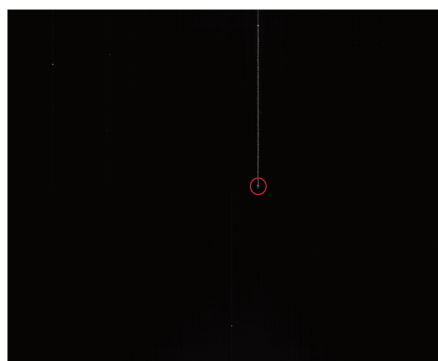


图 4 基准状态下的焦面图像

Fig. 4 Focal plane image under reference state

图 5 为基准状态下的前后离焦面图像。利用 MATLAB 对图 5 进行处理,获得的目标光斑如图 6 所示,提取的光斑采样数约为 128×128 。

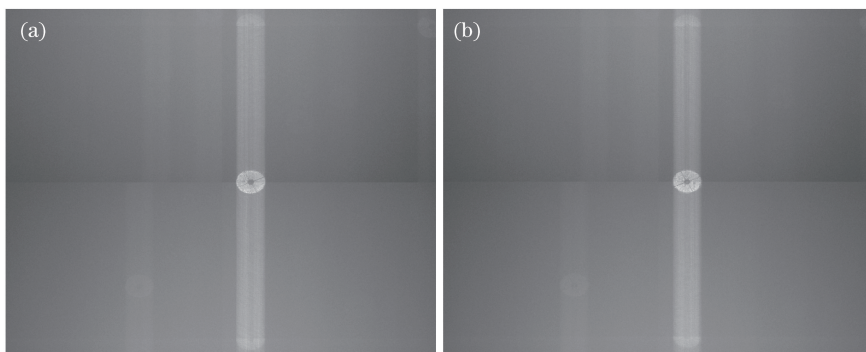


图 5 基准状态下的离焦面图像。(a)前离焦面;(b)后离焦面

Fig. 5 Images of defocused surfaces under reference state. (a) Front defocused surface; (b) back defocused surface

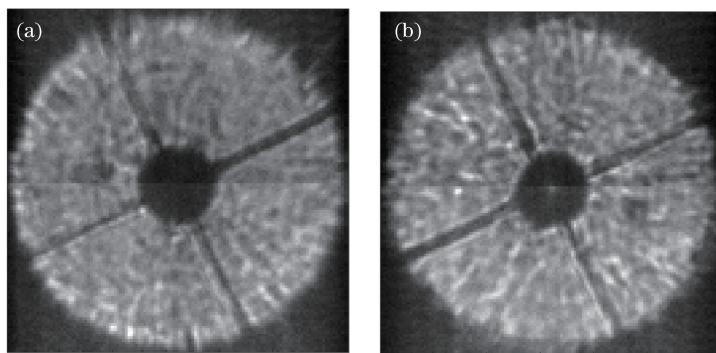


图 6 在基准状态下,离焦面中的目标光斑图像。(a)前离焦面;(b)后离焦面

Fig. 6 Target spot images in defocused surfaces under reference state. (a) Front defocused surface; (b) back defocused surface

由图 6 可知,该光学系统存在遮拦,CCD 探测得到的是环形光斑。针对每个光学系统不同的灵敏度矩阵,研究该系统失调对本征系数产生的影响,结果如图 7 所示。

从图 7 中可以看出,大气湍流等环境因素对波像差的测量影响很大,本征系数随失调量的变化会有浮动。当失调量较小时,本征系数与各自由度大

致呈线性关系,故需尽快完成每一组数据测量,以减少环境变化等因素造成的误差。此外,还可以发现, D_x 和 T_y 主要影响的是 α_2 ,次要影响的是 α_1 、 α_6 和 α_7 , D_y 和 T_x 主要影响的是 α_6 ,次要影响的是 α_1 、 α_2 和 α_7 。依据本征系数的选取原则,可以确定该望远镜光学系统选取的环形光瞳本征系数,结果如表 2 所示。

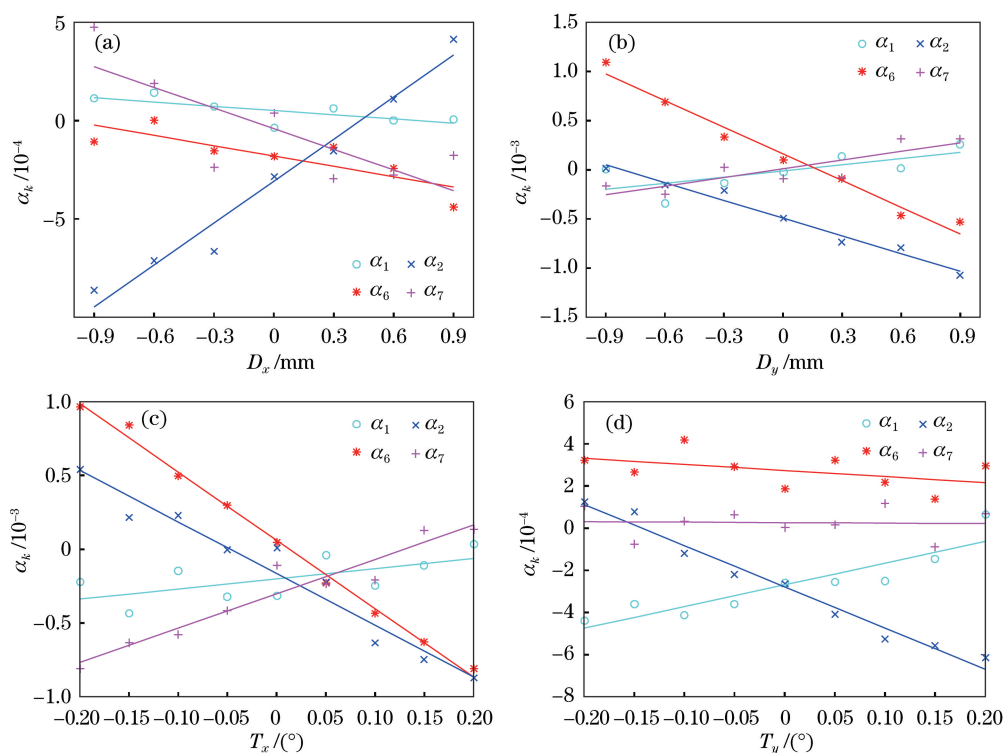


图 7 本征系数与各自由度的关系。(a) D_x ; (b) D_y ; (c) T_x ; (d) T_y

Fig. 7 Relationship between eigen coefficient and each degree of freedom. (a) D_x ; (b) D_y ; (c) T_x ; (d) T_y

表 2 环形光瞳本征系数的选取

Table 2 Selection of eigen coefficients of annular pupil

Parameter	$n=1,$	$n=1,$	$n=2,$	$n=2,$
	$m=1$	$m=-1$	$m=1$	$m=-1$
α_k	α_1	α_2	α_6	α_7

4 测量实验与结果

4.1 单个装调自由度的实验

利用传统的装调方法调整后,光学系统的像质基本达到了使用要求,但是无法实现进一步的精确调整。将该状态视为基准状态,人为引入次镜的偏心或倾斜,并将引入的失调量作为实测值。将本征系数灵敏度矩阵法计算得到的值与实测值进行对比,以验证方法的正确性。

首先,在基准状态下调整次镜沿 x 轴的偏心距离引入失调量 D_x ,在仅有一个装调自由度的情况下,(8)式变为

$$\begin{bmatrix} \alpha_1(\mathbf{X} + \Delta\mathbf{X}) \\ \vdots \\ \alpha_i(\mathbf{X} + \Delta\mathbf{X}) \\ \vdots \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \alpha_1(\mathbf{X}) \\ \vdots \\ \alpha_i(\mathbf{X}) \\ \vdots \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \frac{\partial \alpha_1(\mathbf{X})}{\partial x_1} \\ \vdots \\ \frac{\partial \alpha_i(\mathbf{X})}{\partial x_1} \\ \vdots \end{bmatrix} \cdot \Delta x_1. \quad (10)$$

测量失调状态下的本征系数 $\alpha_i(\mathbf{X})$ 以及在偏移 $\Delta\mathbf{X}$ 状态下的本征系数 $\alpha_i(\mathbf{X} + \Delta\mathbf{X})$, 并利用(9)式计算出对应失调状态下的灵敏度矩阵,将其代入(10)式后可计算出 D_x 的计算值 Δx_1 。 D_x 计算值与实测值的比较如表 3 所示。

表 3 D_x 计算值与实测值的比较

Table 3 Comparisons of calculated values and measured values of D_x

Calculated value / mm	Measured value / mm	Residual value / mm
-0.8835	-0.9	0.0165
-0.6045	-0.6	-0.0045
-0.2843	-0.3	0.0157
0.2898	0.3	-0.0102
0.5975	0.6	-0.0025
0.9237	0.9	0.0237

然后,将望远镜光学系统调回基准状态,调整次镜沿 y 轴的偏心距离引入失调量 D_y ,计算对应的本征系数和灵敏度矩阵并代入(10)式,可得表 4 所示的结果。

接着,在基准状态下调整次镜沿 x 轴的倾斜角度 T_x ,其计算值与实测值的比较如表 5 所示。

同理,按照上述步骤可得沿 y 轴的倾斜角度 T_y 的结果,如表 6 所示。

表 4 D_y 计算值与实测值的比较Table 4 Comparisons of calculated values and measured values of D_y

Calculated value /mm	Measured value /mm	Residual value /mm
-0.9230	-0.9	-0.0230
-0.6444	-0.6	-0.0444
-0.2792	-0.3	0.0208
0.2726	0.3	-0.0274
0.6333	0.6	0.0333
0.8412	0.9	-0.0588

表 5 T_x 计算值与实测值的比较Table 5 Comparisons of calculated values and measured values of T_x

Calculated value /($^{\circ}$)	Measured value /($^{\circ}$)	Residual value /($^{\circ}$)
-0.1946	-0.20	0.0054
-0.1447	-0.15	0.0053
-0.0969	-0.10	0.0031
-0.0465	-0.05	0.0035
0.0498	0.05	-0.0002
0.1083	0.10	0.0083
0.1630	0.15	0.0130
0.1979	0.20	-0.0021

表 6 T_y 计算值与实测值的比较Table 6 Comparisons of calculated values and measured values of T_y

Calculated value /($^{\circ}$)	Measured value /($^{\circ}$)	Residual value /($^{\circ}$)
-0.1996	-0.20	0.0004
-0.1595	-0.15	-0.0095
-0.1024	-0.10	-0.0024
-0.0456	-0.05	0.0044
0.0497	0.05	-0.0003
0.1022	0.10	0.0022
0.1423	0.15	-0.0077
0.1979	0.20	-0.0021

由表 3~6 可知,当仅有一个装调自由度时,本征系数灵敏度矩阵法计算得到的失调量与引入的失调量基本吻合,这表明该方法在大口径望远镜的失调校正实验中是可行的。

4.2 基于分组补偿器原理的实验

由文献[17]可知,在有多个装调自由度时,采用分组补偿器法可以有效减小波像差。由图 7 可知,

横向偏心和横向倾斜主要影响相同的本征系数,会产生相同的像差。若同时计算偏心距离和倾斜角度,会造成近似相关的现象,可能会导致求解得到的失调量不准确。在实际应用中,倾斜比偏心灵敏,进而需对它们进行分组补偿。通常情况下,波像差较大时,计算较灵敏的倾斜角度以进行装调补偿。当波像差变小时,计算较不灵敏的偏心距离以进行装调补偿^[17]。

为了验证偏心补偿器和倾斜补偿器的实用性,同样以上述调整好的状态为基准,分别引入横向偏心距离 D_x 和 D_y 、横向倾斜角度 T_x 和 T_y 。计算对应失调状态下的灵敏度矩阵,并求出失调量,结果如表 7 和表 8 所示。可见利用本征系数灵敏度矩阵法得到的残差值较小,校正后的系统接近基准状态,表明该方法适用于分组补偿器。

表 7 横向偏心距离计算值与实测值的比较

Table 7 Comparisons of calculated values and measured values of horizontal eccentric distance

Horizontal eccentric distance	Calculated value /mm	Measured value /mm	Residual value /mm
D_x	0.9015	0.9	0.0015
D_y	0.9147	0.9	0.0147

表 8 横向倾斜角度计算值与实测值的比较

Table 8 Comparisons of calculated values and measured values of horizontal tilt angle

Horizontal tilt angle	Calculated value /($^{\circ}$)	Measured value /($^{\circ}$)	Residual value /($^{\circ}$)
T_x	0.1996	0.2	-0.0004
T_y	0.2081	0.2	0.0081

4.3 实验误差分析

计算值存在残差的原因是实验中有多种因素会产生误差,这些误差主要包括以下几个方面。

1) 光斑对准误差。由(4)式可知,曲率传感器前后离焦光斑的对应点应一一对准,但在实际操作中,目标光斑可能没有完全对准,或者选取的焦面位置存在偏移,这均会导致光斑上的点没有一一对准。

2) 选取的基准状态仍存在失调。横向偏心和横向倾斜会相互补偿,残差值中可能包含了原基准状态失调的补偿值。

3) 外界因素导致的误差,如大气湍流变化、背景噪声起伏等。

4) 整个测量和计算的过程中忽略了次镜四根支撑柱的遮挡,导致某些波前信息缺失。

5) 由表 3~6 可知,本征系数与失测量呈近似线性相关,但会存在微小的起伏,即灵敏度矩阵存在拟合误差。

6) 在次镜偏心或倾斜的情况下,光斑中心遮拦相对光斑中心可能会发生偏移。在利用环形光瞳本征函数进行波前重构时,存在一定的重构误差。

7) 实验用一个 CCD 探测器测量两个离焦面,调整其移动时会产生机械误差,或者引起定位不准。

8) 由图 5 可知,探测器分成四个区域读取数据,理论上计算归一化光强差时对应点相减可以相互抵消,但是测量需要时间,光斑随时间变化,在探测器的相对位置会发生微小改变。因此,交替测量的前后离焦面的光斑相对位置可能不同。

此外,需要注意的是在 CCD 探测器探测到稳定的图像后再进行采集,并且采集多幅图像以应对环

境突变造成的不可用现象。同时,在实际应用中需要多次测量调整,这样才会接近理想设计状态。

4.4 实验结果分析

由表 3~8 可以发现,当次镜在偏心距离为 $-0.9\sim 0.9$ mm、倾斜角度为 $-0.2^\circ\sim 0.2^\circ$ 时,经过一次计算的结果接近实测值,其计算值的误差均小于 10%。为了说明误差在可接受范围内,对光学系统进行仿真分析。图 8 为次镜偏心距离 $D_y = 0.09$ mm 时望远镜的包围分布能量和 MTF 图。图 9 为次镜倾斜角度 $T_y = 0.02^\circ$ 时望远镜的包围分布能量和 MTF 图。与设计状态下的图 3 进行对比可知,在该误差范围内,超过 80% 的衍射能量在 $2\text{ pixel}\times 2\text{ pixel}$ 像元中,且 MTF 接近设计状态,表明利用本征系数灵敏度矩阵法计算得到的失测量对望远镜校正后能达到预先设定的成像要求。

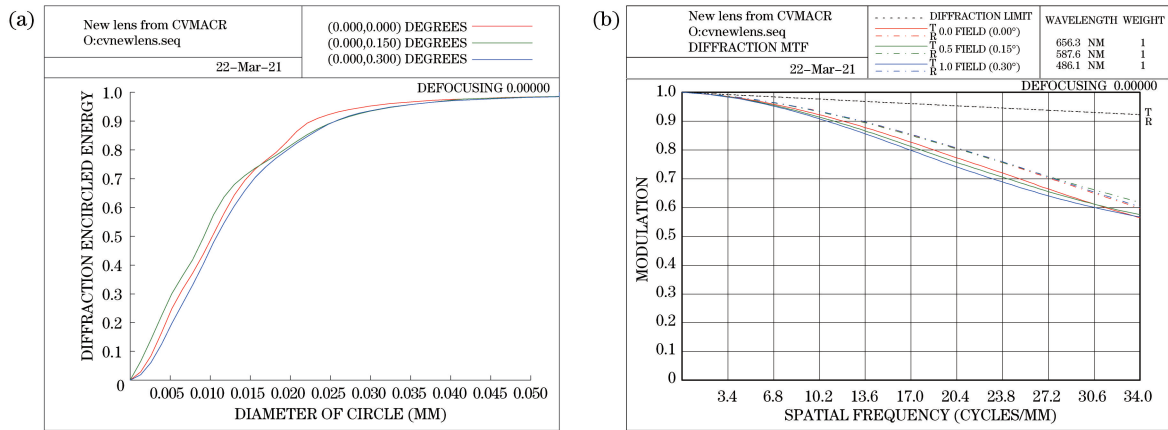


图 8 当 $D_y = 0.09$ mm 时,望远镜的包围分布能量和 MTF。(a) 包围分布能量;(b) MTF

Fig. 8 Diffraction encircled energy and MTF of telescope when $D_y = 0.09$ mm.

(a) Diffraction encircled energy; (b) MTF

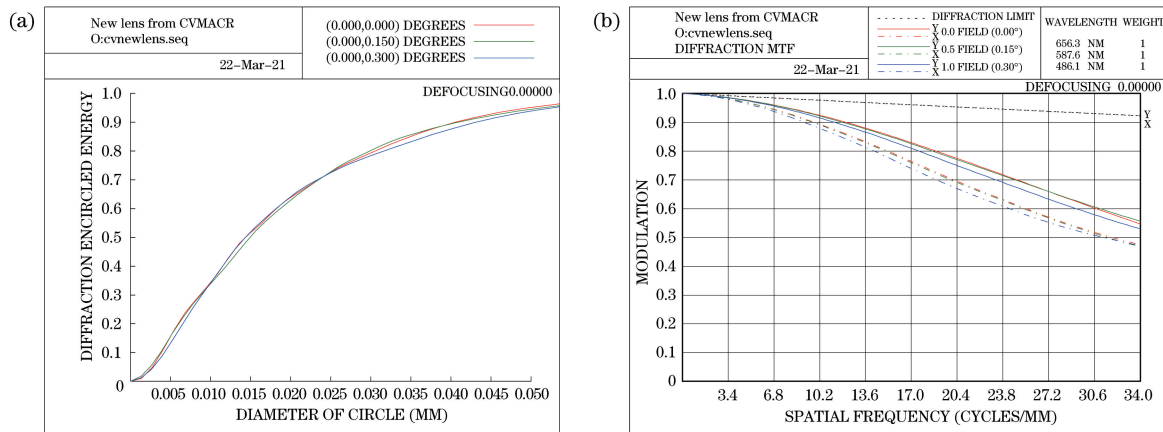


图 9 当 $T_y = 0.02^\circ$ 时,望远镜的包围分布能量和 MTF。(a) 包围分布能量;(b) MTF

Fig. 9 Diffraction encircled energy and MTF of telescope when $T_y = 0.02^\circ$.

(a) Diffraction encircled energy; (b) MTF

5 结 论

由于波前曲率传感器无需添加检测光学元件,本征函数法不用分区探测且计算量比 Zernike 多项式拟合法少,因此采用本征系数来表征波像差。在实验中,将光学系统装调好的状态作为基准状态,发现利用本征系数灵敏度矩阵法计算得到的失调量与预设的失调量基本相符。实验结果表明,当次镜偏心距离为 $-0.9\sim 0.9$ mm、倾斜角度为 $-0.2^\circ\sim 0.2^\circ$ 时,本征系数灵敏度矩阵法的计算误差均小于 10%。仿真分析结果表明,在该误差范围内,校正后的系统可以达到预先设定的成像要求,证明了该方法的可行性。在实际应用中,将光学设计状态作为解算基准,可以获取较好的像质。本文仅考虑了中心视场的验证,后续工作将利用多组曲率传感器,将该方法推广到大视场中。

参 考 文 献

- [1] Zhang H F, Long M L, Deng H R, et al. Development and application for ground-based space debris laser ranging [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2020, 49(11): 1149004.
张海峰, 龙明亮, 邓华荣, 等. 地基空间碎片激光测距技术发展与应用 [J]. *光子学报*, 2020, 49(11): 1149004.
- [2] Wang J L. Development of technologies for detection and identification of space objects with ground-based E-O systems [J]. *Journal of Spacecraft TT&C Technology*, 2015, 34(6): 489-499.
王建立. 空间目标地基光电探测与识别技术的发展 [J]. *飞行器测控学报*, 2015, 34(6): 489-499.
- [3] Yang F, Wang F G, Chen B G, et al. Status and development of tertiary mirror technology in large aperture telescope [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2013, 50(5): 050005.
杨飞, 王富国, 陈宝刚, 等. 大口径望远镜中三镜技术现状及发展趋势 [J]. *激光与光电子学进展*, 2013, 50(5): 050005.
- [4] Ming M, Wang J L, Zhang J X, et al. Error budget and analysis for optical system in large telescope [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2009, 17(1): 104-108.
明名, 王建立, 张景旭, 等. 大口径望远镜光学系统的误差分配与分析 [J]. *光学精密工程*, 2009, 17(1): 104-108.
- [5] Yang X F. Study on the computer-aided alignment of three-mirror optical system [D]. Changchun: Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, 2005: 84-88.
杨晓飞. 三反射镜光学系统的计算机辅助装调技术研究 [D]. 长春: 中国科学院长春光学精密机械与物理研究所, 2005: 84-88.
- [6] Chen J J. Application of computer aided alignment technique to an three-mirror off-axis optical system [D]. Xi'an: Xi'an Institute of Optics and Precision Mechanics, Chinese Academy of Sciences, 2013: 55-60.
陈建军. 计算机辅助装调技术在离轴三反相机装调中的应用 [D]. 西安: 中国科学院西安光学精密机械研究所, 2013: 55-60.
- [7] Guo J K, Wang Z L, Lu M. Off-axis three-mirror anastigmatic system alignment and application based on principal component analysis [J]. *Acta Optica Sinica*, 2019, 39(3): 0322002.
郭继镛, 王治乐, 陆敏. 基于主成分分析法的离轴三反系统装调及其应用 [J]. *光学学报*, 2019, 39(3): 0322002.
- [8] Cao Y Z, Ma W L. Application of two step sensitivity matrix method in Cassegrain telescope alignment [J]. *Opto-Electronic Engineering*, 2020, 47(2): 180536.
曹宇泽, 马文礼. 两步式灵敏度矩阵法在卡塞格林望远镜装调中的应用 [J]. *光电工程*, 2020, 47(2): 180536.
- [9] Guo P, Zhou J, Ding X Y, 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.
郭攀, 周军, 丁晓宇, 等. 基于矢量波像差理论的两反系统装配失调解算方法 [J]. *光学学报*, 2019, 39(7): 0722002.
- [10] Xin B, Claver C, Liang M, et al. Curvature wavefront sensing for the large synoptic survey telescope [J]. *Applied Optics*, 2015, 54(30): 9045-9054.
- [11] Liu R F, Shen F. Study on algorithms for wavefront reconstruction of curvature sensor [J]. *Opto-Electronic Engineering*, 2005, 32(10): 6-9.
刘若凡, 沈锋. 曲率波前传感器波前重构算法的研究 [J]. *光电工程*, 2005, 32(10): 6-9.
- [12] Roddier F. Curvature sensing and compensation: a new concept in adaptive optics [J]. *Applied Optics*, 1988, 27(7): 1223-1225.
- [13] Deng L G, Chen X, Lu C H. Theoretical investigation and scheme analysis of the curvature wave-front sensor for adaptive optics [J]. *Optical Technique*, 2003, 29(4): 487-489, 492.
邓罗根, 陈新, 鲁长宏. 自适应光学曲率波前传感器的衍射理论及其方案分析 [J]. *光学技术*, 2003, 29(4): 487-489, 492.

- [14] Huang S Y, Xi F J, Liu C H, et al. Phase retrieval using eigenfunctions to solve transport-of-intensity equation[J]. *Acta Optica Sinica*, 2011, 31(10): 1001002.
黄盛扬, 习锋杰, 刘长海, 等. 本征函数法求解光强传输方程的相位反演方法[J]. *光学学报*, 2011, 31(10): 1001002.
- [15] Huang S, Xi F, Liu C, et al. Phase retrieval on annular and annular sector pupils by using the eigenfunction method to solve the transport of intensity equation[J]. *Journal of the Optical Society of America A*, 2012, 29(4): 513-520.
- [16] Gu Z Y. Misalignment corrections in reflective telescopes[D]. Changchun: Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, 2016: 23-24.
顾志远. 反射式望远镜失调校正技术研究[D]. 长春: 中国科学院长春光学精密机械与物理研究所, 2016: 23-24.
- [17] Liang Q X, Huang J L, Pan N, et al. Alignment method of large aperture telescope based on eigen coefficient[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2021, 58(12): 1211001.
梁琼心, 黄金龙, 潘年, 等. 基于本征系数的大口径望远镜装调方法[J]. *激光与光电子学进展*, 2021, 58(12): 1211001.