

基于本征系数的大口径望远镜装调方法

梁琼心^{1,2}, 黄金龙^{1*}, 潘年¹, 陈科位¹

¹ 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

摘要 波前探测是辅助望远镜装调的主要技术手段, 针对大口径光学系统内部空间受限的问题, 提出一种基于本征模式系数求解失调量的计算机辅助装调方法。相比传统的灵敏度矩阵法, 本文方法计算量小, 不需要对探测器进行分区处理, 简化了波前重构矩阵的构造。通过分析本征模式系数与次镜失调量的关系, 建立两者之间的灵敏度矩阵模型, 对 1 m 口径同轴三反望远镜进行装调仿真, 在次镜偏心为 ± 0.3 mm、倾斜为 $\pm 0.2^\circ$ 的失调范围内, 两步迭代实现了像差校正, 得到的中心视场波前像差均方根值(RMS)均小于 $\lambda/14$ 。该研究对未来大口径光学系统的装调工作有很好的实用价值。

关键词 成像系统; 同轴三反; 像差校正; 波前曲率传感器; 本征函数; 灵敏度矩阵

中图分类号 TH743

文献标志码 A

doi: 10.3788/LOP202158.1211001

Alignment Method of a Large Aperture Telescope Based on the Eigen Coefficient

Liang Qiongxin^{1,2}, Huang Jinlong^{1*}, Pan Nian¹, Chen Kewei¹

¹ Institute of Optics and Electronics, Chinese Academy of Sciences, Chengdu, Sichuan 610209, China;

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

Abstract Wavefront detection is the main technical means of enhancing telescope alignment. Due to the limited internal space for the large aperture optical system, we propose a computer-aided alignment method based on eigenmode coefficients to solve misalignments in telescopes. Compared with the traditional sensitivity matrix method, in the proposed method, the amount of calculation is small, the detector does not need to be partitioned, and the structure of the wavefront reconstruction matrix is simplified. We analyze the relationship between the eigenmode coefficient and the misalignment of the secondary mirror, and establish a sensitivity matrix model between the two. The alignment of the 1-m aperture on-axis three-mirror telescope was simulated. In the misalignment range of decenter ± 0.3 mm and the tilt $\pm 0.2^\circ$ for the secondary mirror, an aberration correction was achieved in two-step iteration, and the root-mean-square of the central field wavefront aberration was less than $\lambda/14$, which has a good practical value for the alignment of large aperture optical systems in the future.

Key words imaging system; on-axis three-mirror; aberration correction; wavefront curvature sensors; eigenfunctions; sensitivity matrix

OCIS codes 110.6770; 040.1520; 120.1880

收稿日期: 2020-09-11; 修回日期: 2020-09-27; 录用日期: 2020-10-10

基金项目: 中国科学院“西部之光”(YA18K005-2018)

* E-mail: huangjl@ioe.ac.cn

1 引言

为了提高聚光能力和分辨率,望远镜口径不断增大,系统的装调难度也随之增加。天文望远镜在使用过程中,由于重力、风力等因素的影响,光学元件会发生微小偏移,产生波像差,需实时校正。计算机辅助装调技术就是为解决复杂多自由度光学系统装调难题而发展起来的,常采用 Zernike 系数表征波像差大小,并与失调量建立数学模型,从而计算装调量。中国科学院长春光学精密机械与物理研究所(简称长春光机所)的杨晓飞^[1]利用补偿器分组法提高了调整机构的效率;中国科学院西安光学精密机械研究所的陈建军^[2]通过拆分灵敏度矩阵的方法多次调整光学系统,得到系统全视场均方根值(RMS)均小于 0.08λ ;哈尔滨工业大学的郭继锴^[3]基于主成分分析法对光学系统进行装调,简化了复杂系统的机械结构并提高了装调效率;长春光机所的顾志远^[4]将灵敏度矩阵的数学模型扩展至二阶,并对望远镜校正得到全视场 RMS 均小于 0.1λ 的结果;在此基础上,中国科学院光电技术研究所的曹宇泽等^[5]改用拟合的方式构建灵敏度矩阵,增添精调步骤,并对卡塞格林望远镜校正得到全视场 RMS 均小于 0.03λ 的结果。波前曲率传感器因实现简单、

波前重构速度快、适用于内部结构紧凑的光学系统等特点,在天文自适应光学^[6]、人眼波前像差测量^[7]等领域得到广泛应用。它往往采用 Zernike 多项式曲线拟合法获取 Zernike 系数,该过程需对探测器分区,再根据探测器阵列几何分布结构求出相应的重构矩阵,计算过程较繁杂^[8]。针对这个问题,有研究人员提出一种不需要分区探测的本征函数波前重构法,实现起来比较方便,计算量小,重构精度高^[9]。

本文以口径为 1 m 、 F 数为 1.65 的大口径同轴三反光学系统作为研究对象,因其内部结构的空间限制,采用波前曲率传感器获取波前信息,利用不需要分区探测的本征函数法代替传统 Zernike 多项式曲线拟合法。用本征模式系数描述波像差大小,分析了本征模式系数与光学元件失调量的关系,建立了两者之间的灵敏度矩阵模型,系统校正后得到良好的结果。

2 基本原理

2.1 曲率传感器本征函数法

波前曲率传感器原理如图 1 所示,由菲涅耳衍射理论和几何光学近似可得归一化光强差为^[10-11]

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

式中: I_1 、 I_2 分别为前离焦面 P_1 和后离焦面 P_2 的光强;放大倍数 C 、 D 为非零常数,且 $D/C = (f + l)/(f - l)$, f 为镜子 L_1 的焦距, l 为离焦量; $c_0 = [\lambda f(f - l)] / (2\pi l)$ 和 $c_1 = f/l$ 均为与传感器参数有关的常数; λ 为波长; \mathbf{r}_0 为探测器平面的位置矢量; δ_c 代表光瞳边界处的法向偏导数,在孔径边缘无穷大,其他位置为零; \mathbf{n} 为光瞳边界的法向矢量, $\nabla^2 = \partial^2 / \partial x^2 + \partial^2 / \partial y^2$ 为拉普拉斯算子。

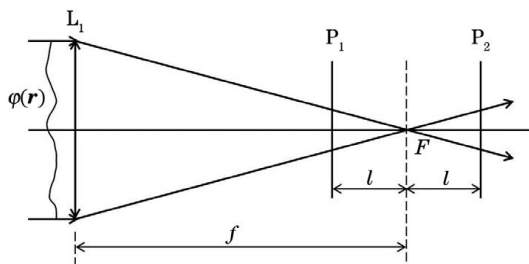


图 1 波前曲率传感器光学原理

Fig. 1 Optical principle of wavefront curvature sensor

由(1)式可知,曲率传感器测量的信号满足 Neumann 边界条件下的泊松方程。在 Neumann 边界条件下,二维拉普拉斯算子的本征函数 $W(\mathbf{r})$ 满足^[9]

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

式中 σ 表示光瞳区域, c 表示光瞳边界, γ^2 为对应的本征值。

在不同齐次 Neumann 边界条件下求解(2)式,可得到不同光瞳区域的拉普拉斯算子本征函数。如单位圆域 $\{0 \leq r \leq 1, 0 < \theta \leq 2\pi\}$ 的拉普拉斯算子本征函数为^[9]

$$D_{nm}(r, \theta) = \begin{cases} \sqrt{2} J_\mu(\gamma_{nm} r) \cos(\mu\theta), & m > 0 \\ J_0(\gamma_{n0} r), & m = 0 \\ \sqrt{2} J_\mu(\gamma_{nm} r) \sin(\mu\theta), & m < 0 \end{cases}, \quad (3)$$

环形光瞳 $\{r_1 \leq r \leq r_2, 0 < \theta \leq 2\pi\}$ 的拉普拉斯算子本征函数为^[12]

$$A_{nm}(r, \theta) = \begin{cases} [Y'_\mu(\gamma_{n\mu}r_1)J_\mu(\gamma_{n\mu}r) - J'_\mu(\gamma_{n\mu}r_1)Y_\mu(\gamma_{n\mu}r)] \cos(m\theta), & m \geq 0 \\ - [Y'_\mu(\gamma_{n\mu}r_1)J_\mu(\gamma_{n\mu}r) - J'_\mu(\gamma_{n\mu}r_1)Y_\mu(\gamma_{n\mu}r)] \sin(m\theta), & m < 0 \end{cases}, \quad (4)$$

式中: r 为极径, θ 为极角; $\mu = |m|, m = 0, \pm 1, \pm 2, \dots$; $J_\mu(\cdot)$ 为 μ 阶第一类 Bessel 函数, $Y_\mu(\cdot)$ 为 μ 阶第二类 Bessel 函数; (3) 式中 $\gamma_{n\mu}$ 为 $\frac{d}{dr}J_\mu(r) = 0$ 的第 n 个正根, (4) 式中 $\gamma_{n\mu}$ 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, $n = 1, 2, \dots$ 。

本征函数 $W_1(\mathbf{r}), W_2(\mathbf{r}), \dots, W_k(\mathbf{r}), \dots$ 是一组正交完备基, 任意波像差 $\varphi(\mathbf{r})$ 可表示为^[9]

$$\varphi(\mathbf{r}) = \sum_{k=1}^{\infty} \alpha_k W_k(\mathbf{r}), \quad (5)$$

式中 α_k 为对应模式 $W_k(\mathbf{r})$ 的大小, 称为本征模式系数。将(2)式和(5)式代入(1)式中, 化简可得

$$S(\mathbf{r}_0) = \left[\frac{C \cdot I_2(-\mathbf{r}_0) - D \cdot I_1(\mathbf{r}_0)}{C \cdot I_2(-\mathbf{r}_0) + D \cdot I_1(\mathbf{r}_0)} - \frac{C - D}{C + D} \right] \cdot \frac{C - D}{2D} = c_0 \sum_{k=1}^{\infty} [-\alpha_k \gamma_k^2 W_k(\mathbf{r})]. \quad (6)$$

由(6)式可知, 从探测器提取光斑, 获得光强分布 I_1 和 I_2 后, 可快速求出本征模式系数^[13]。

2.2 本征模式系数与失调量关系

光学元件的偏心和倾斜会引入波像差, 由(5)式可知, 波像差与本征模式系数存在函数关系, 这说明失调量与本征模式系数也存在一定关系。实际上, 它们的关系非常复杂, 无法直接得到其解析形式。根据泰勒定理, 多元函数 $f(x)$ 在 x_0 的某一邻域内连续且有 $M+1$ 阶连续偏导数, 且 $(x_0 + \Delta x_1, x_0 + \Delta x_2, \dots)$ 为该邻域内的任意点, 则可将 $f(x_0 + \Delta x_1, x_0 + \Delta x_2, \dots)$ 近似地认为是 $(\Delta x_1, \Delta x_2, \dots)$ 的 M 次多项式^[4]。故波像差的第 k 项本征模式系数 α_k 可表示为

$$\alpha_k(\mathbf{X} + \Delta\mathbf{X}) = \sum_{p=0}^M \frac{1}{p!} \left(\sum_{q=1}^N \Delta x_q \frac{\partial}{\partial x_q} \right)^p \alpha_k(\mathbf{X}) + R_{X,M}(\Delta\mathbf{X}), \quad (7)$$

式中 \mathbf{X} 为失调状态下装调自由度, $\Delta\mathbf{X}$ 为偏移量, $R_{X,M}(\Delta\mathbf{X})$ 为展开余项, M 为展开阶数, N 为装调自由度的个数。

3 仿真结果与分析

1 m 口径的同轴三反光学系统结构如图 2(a) 所示, 与图 2(b) 的大型综合巡天望远镜 (LSST)^[14] 类似, 主镜与三镜在同一块镜坯上, 故可视为三镜相对主镜位置保持不变。为了验证本征模式系数灵敏

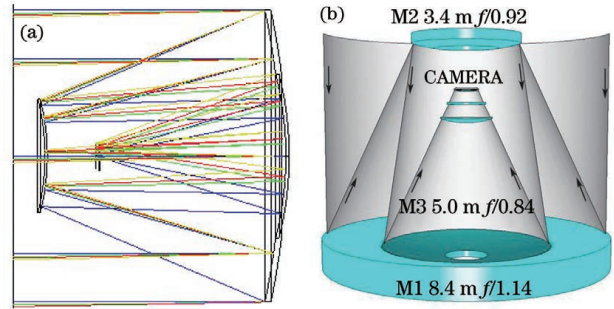


图 2 光学系统结构。(a) 1 m 同轴三反光学系统结构; (b) 8.4 m LSST 光学系统结构

Fig. 2 optical system structures. (a) 1 m on-axis three-mirror optical system structure; (b) 8.4 m LSST optical system structure

度矩阵法的可行性, 以主镜为装调基准, 将预设次镜调整量作为失调量。次镜在装调过程中有 6 个自由度, 分别为沿 x 轴偏心 D_x 、沿 y 轴偏心 D_y 、沿 z 轴偏心 D_z 、绕 x 轴倾斜 T_x 、绕 y 轴倾斜 T_y 以及绕 z 轴倾斜 T_z 。理论上, 由于系统的旋转对称性, 可认为 T_z 对系统像差没有贡献, 不予考虑, 故本文考虑次镜有 5 个自由度的失调量。

利用 Zemax 内置的动态数据交换 (DDE) 与 Matlab 建立通信, 控制次镜的偏心和倾斜误差, 从而产生附加的波像差, 通过探测器获取每个失调状态下前后离焦面的光强分布。仿真采用的检测波长为 632.8 nm, CCD 像元大小为 $10 \mu\text{m} \times 10 \mu\text{m}$ 。根据文献 [10] 中曲率传感器的离焦量 l 满足 $l \gg \frac{\lambda f^2}{\lambda f + r_0}$ 的条件, 其中 r_0 为大气相干长度, 一般在几厘米到几十厘米之间^[15], 本研究选取 $l = 5 \text{ mm}$ 。

3.1 本征模式系数灵敏度矩阵模型的建立

探测器采集的光斑呈环形, 故选用环形光瞳拉普拉斯算子本征函数进行重构。事实上只能用有限个本征函数复原波前, 按文献 [16] 的排序方式, 选择前 50 项环域本征函数进行仿真。图 3 呈现了受失调量影响较大的本征模式系数的变化趋势, 对应的模式序号如表 1 所示, 未列出的本征模式系数表示不随失调量变化或受失调量的影响很小。

由图 3 可知, 在该同轴三反系统中, D_x 和 T_y 主要影响 $\alpha_1, \alpha_6, \alpha_{13}, \alpha_{22}$; D_y 和 T_x 主要影响 $\alpha_2, \alpha_7, \alpha_{14}, \alpha_{23}$; D_z 主要影响 α_8, α_{24} 。在失调量较小情况下, 本征模式系数与装调自由度基本呈线性关系,

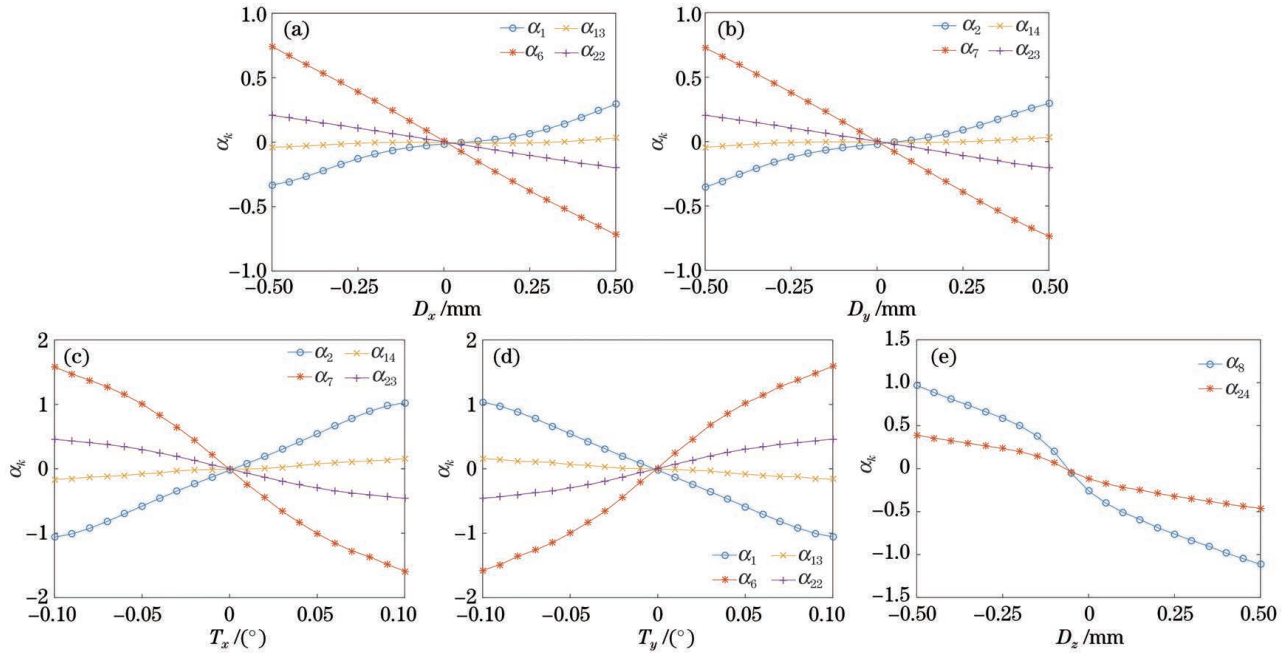


图 3 环形光瞳本征模式系数与各自由度关系曲线。(a) D_x ; (b) D_y ; (c) T_x ; (d) T_y ; (e) D_z

Fig. 3 Relationship between eigenmode coefficient on the annular pupil and the degrees of freedom. (a) D_x ; (b) D_y ; (c) T_x ; (d) T_y ; (e) D_z

表 1 环形光瞳本征模式系数

Table 1 Eigenmode coefficient on the annular pupil

α_k	α_1	α_2	α_6	α_7	α_8	α_{13}	α_{14}	α_{22}	α_{23}	α_{24}
n	1	1	2	2	2	3	3	4	4	4
m	1	-1	1	-1	0	1	-1	1	-1	0

对(7)式进行一阶展开得

$$\alpha_k(\mathbf{X} + \Delta\mathbf{X}) = \alpha_k(\mathbf{X}) + \left(\sum_{q=1}^5 \Delta x_q \frac{\partial}{\partial x_q} \right) \alpha_k(\mathbf{X}) + R_{X,1}(\Delta\mathbf{X}) \approx \alpha_k(\mathbf{X}) + \sum_{q=1}^5 \Delta x_q \frac{\partial \alpha_k(\mathbf{X})}{\partial x_q} \quad (8)$$

将其表示为矩阵形式得

$$\begin{bmatrix} \alpha_1(\mathbf{X} + \Delta\mathbf{X}) \\ \alpha_2(\mathbf{X} + \Delta\mathbf{X}) \\ \vdots \\ \alpha_i(\mathbf{X} + \Delta\mathbf{X}) \\ \vdots \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \alpha_1(\mathbf{X}) \\ \alpha_2(\mathbf{X}) \\ \vdots \\ \alpha_i(\mathbf{X}) \\ \vdots \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \frac{\partial \alpha_1(\mathbf{X})}{\partial x_1} & \frac{\partial \alpha_1(\mathbf{X})}{\partial x_2} & \dots & \frac{\partial \alpha_1(\mathbf{X})}{\partial x_5} \\ \frac{\partial \alpha_2(\mathbf{X})}{\partial x_1} & \frac{\partial \alpha_2(\mathbf{X})}{\partial x_2} & \dots & \frac{\partial \alpha_2(\mathbf{X})}{\partial x_5} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \frac{\partial \alpha_i(\mathbf{X})}{\partial x_1} & \frac{\partial \alpha_i(\mathbf{X})}{\partial x_2} & \dots & \frac{\partial \alpha_i(\mathbf{X})}{\partial x_5} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta x_1 \\ \Delta x_2 \\ \vdots \\ \Delta x_5 \end{bmatrix} \quad (9)$$

(9)式中本征模式系数对装调自由度的偏导数构成的矩阵为灵敏度矩阵。由于灵敏度矩阵随失调量的变化而变化,在失调状态下分别对 5 个自由度进行多次测量,用拟合方式计算失调量对本征模式系数的灵敏度矩阵^[5]。如分别测量 $D_x - 0.3 \text{ mm}$ 、 $D_x - 0.2 \text{ mm}$ 、 \dots 、 D_x 、 \dots 、 $D_x + 0.2 \text{ mm}$ 、 $D_x + 0.3 \text{ mm}$ 处的本征模式系数,

并对其进行一次函数拟合,形如

$$\begin{bmatrix} \alpha_{k_1} - \alpha_{k_0} \\ \vdots \\ \alpha_{k_i} - \alpha_{k_0} \\ \vdots \\ \alpha_{k_7} - \alpha_{k_0} \end{bmatrix} = a \begin{bmatrix} \Delta D_{x_1} \\ \vdots \\ \Delta D_{x_i} \\ \vdots \\ \Delta D_{x_7} \end{bmatrix}, \quad (10)$$

式中 a 为对应失调量对本征模式系数的灵敏度矩阵项。表 2 列出了光学设计状态下的本征模式系数灵敏度矩阵。

表 2 设计状态的本征模式系数灵敏度矩阵

Table 2 Eigenmode coefficient sensitivity matrix of design state

α_i	D_x	D_y	D_z	T_x	T_y
α_1	0.48	0	0.06	0.35	-10.88
α_2	0.01	0.51	0.04	10.44	-0.04
α_6	-1.49	0	-0.01	-0.02	21.68
α_7	0	-1.51	-0.01	-21.31	-0.04
α_8	0	0	-3.13	0	0.04
α_{13}	0.03	0	0	0.08	-1.21
α_{14}	0	0.04	0	1.13	-0.02
α_{22}	-0.42	0	-0.02	-0.01	6.41
α_{23}	0	-0.42	0	-6.29	-0.01
α_{24}	0	0	-1.28	0	0.01

从表 2 看出,灵敏度矩阵有 5 个列向量,每个元素的大小代表次镜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,反之则反。如果灵敏度矩阵中的值相差太大,直接采用该矩阵求解失调量会产生一定的影响。因为系数矩阵的元素数量级差别很大且无一定规则时,该矩阵可能为病态^[2]。同时,由于 D_x 和 T_y 、 D_y 和 T_x 影响相同的本征模式系数,两补偿器间会产生近似相关的现象,从而导致求出的失调量不准确。

这种情况下,可以采用分组补偿器的方法,即将灵敏度矩阵中数值较大的补偿器分为一组,数值较小的补偿器分为一组。当光学系统波前像差较大时,用较灵敏的补偿器去装调;当波像差变得较小时,用较不灵敏的补偿器去装调^[1]。

理论上,要求前后离焦面的光斑大小相同,且计算归一化光强差时两光斑上的点一一对应。但实际轴向偏心 D_z 会改变主次镜的间距,使系统像面位置发生变化,产生离焦。随着 D_z 偏移量增大,前后离焦面光斑对应点的位置逐渐变远,内外圆半径差距逐渐增大,出现光斑对准误差。图 4 给出次镜 $D_z=1$ mm 时的光斑图,下述光斑图均为探测图像中 $600 \text{ pixel} \times 600 \text{ pixel}$ 区域内的图像。

D_z 偏移造成的光斑对准误差会影响装调自由度的计算精度,考虑到 D_z 与其余 4 个自由度影响

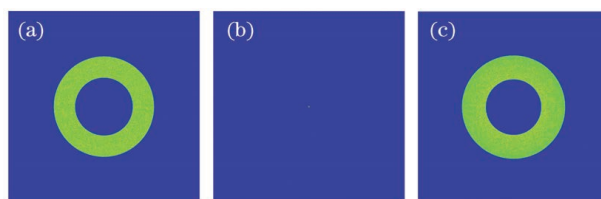


图 4 次镜轴向偏心光斑图。(a)前离焦面;(b)焦面;(c)后离焦面

Fig. 4 Axial decentered spot pattern of secondary mirror. (a) Front defocusing plane; (b) focal plane; (c) back defocusing plane

的本征模式不同,可将其作为优先调整项。故将灵敏度矩阵分成两组补偿,补偿器 A1 的灵敏度矩阵包含 (D_z, T_x, T_y) ,补偿器 A2 的灵敏度矩阵包含 (D_x, D_y) 。离焦的存在会影响 D_z 的计算,仿真中应使外半径大小几乎一致来减小误差,测量关于 D_z 的灵敏度矩阵项时需实时调焦。

若波前曲率传感器发生偏心,如图 5 给出的波前曲率传感器 $D_x=1$ mm 时获取的光斑图所示,光斑在探测器上的位置会发生偏移,但光斑大小不变,对测量结果无影响。若波前曲率传感器发生倾斜,如图 6 给出的 $T_x=1^\circ$ 时获取的光斑图所示,光斑上的点仍然一一对应,对归一化光强差的计算和波前重构影响不大。若波前曲率传感器离焦,如图 7 给出的 $D_z=-0.3$ mm 时获取的光斑图所示,前后离

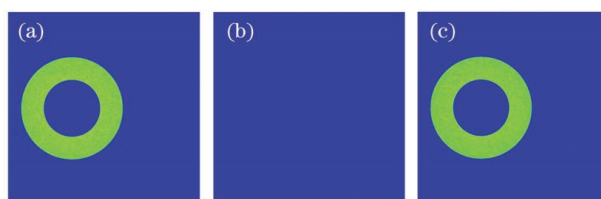


图 5 波前曲率传感器横向偏心光斑图。(a)前离焦面;(b)焦面;(c)后离焦面

Fig. 5 Horizontal decentered spot pattern of wavefront curvature sensor. (a) Front defocusing plane; (b) focal plane; (c) back defocusing plane

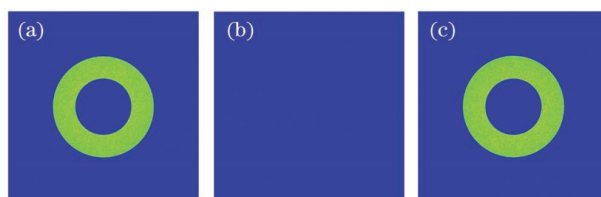


图 6 波前曲率传感器倾斜光斑图。(a)前离焦面;(b)焦面;(c)后离焦面

Fig. 6 Tilted spot pattern of wavefront curvature sensor. (a) Front defocusing plane; (b) focal plane; (c) back defocusing plane

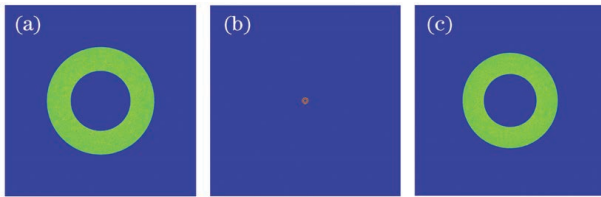


图 7 波前曲率传感器离焦光斑图。(a)前离焦面；
(b)焦面；(c)后离焦面

Fig. 7 Defocus spot pattern of wavefront curvature sensor. (a) Front defocusing plane; (b) focal plane; (c) back defocusing plane

焦面的光斑大小明显不一致且焦面上的点显然不是最佳焦点,经过调整后光斑大小相差不大,对后续计算影响很小。故在实际应用中,注意波前曲率传感器与主镜的对准关系不要偏差太大即可,整个测量过程对波前曲率传感器的安装不敏感。

3.2 同轴三反仿真装调实验

同轴三反光学系统的次镜分别引入 4 组随机失调量,如表 3 所示。

表 3 次镜引入的失调量

Table 3 Misalignment introduced by the secondary mirror

Parameter	1	2	3	4
D_z/mm	0.1570	-0.1140	-0.1080	0.0830
$T_x/(\text{°})$	0.0820	0.0980	-0.1450	-0.1250
$T_y/(\text{°})$	0.1130	-0.1060	0.1090	0.0990
D_x/mm	-0.0180	0.1230	-0.1640	0.0260
D_y/mm	0.0340	0.1150	0.2380	0.0310

先用补偿器 A1 计算较敏感的失调量,如表 4 所示,经过两次迭代后失调量能逐渐收敛,证明了 A1 的可行性。需要进行两次迭代的主要原因如下:

1) A1 的求解不包含横向偏心,而横向倾斜和横向偏心相互补偿,故计算值为粗略的近似解;

2) 本征模式系数与失调量近似线性相关,失调量较大时存在微小的拟合误差,一次迭代后能减小失调量,提高线性相关度;

表 4 A1 装调前后的失调量

Table 4 Misalignment before and after A1 alignment

Parameter	Before alignment	After alignment				
		Calculated value 1	Residual value 1	Calculated value 2	Residual value 2	
1	D_z/mm	0.1570	0.1562	0.0008	0.0122	-0.0114
	$T_x/(\text{°})$	0.0820	0.0617	0.0203	0.0207	-0.0004
	$T_y/(\text{°})$	0.1130	0.0891	0.0239	0.0238	0.0001
2	D_z/mm	-0.1140	-0.0797	-0.0343	-0.0362	0.0019
	$T_x/(\text{°})$	0.0980	0.1168	-0.0188	-0.0100	-0.0088
	$T_y/(\text{°})$	-0.1060	-0.1066	0.0006	-0.0078	0.0084
3	D_z/mm	-0.1080	-0.0903	-0.0177	-0.0174	-0.0003
	$T_x/(\text{°})$	-0.1450	-0.1525	0.0075	0.0234	-0.0159
	$T_y/(\text{°})$	0.1090	0.1073	0.0017	0.0129	-0.0112
4	D_z/mm	0.0830	0.0134	0.0696	0.0711	-0.0015
	$T_x/(\text{°})$	-0.1250	-0.1170	-0.0080	-0.0074	-0.0006
	$T_y/(\text{°})$	0.0990	0.0846	0.0144	0.0139	0.0005

3) 轴向偏心 D_z 会引起光斑对准误差;

4) 在横向偏心或倾斜状态下,光斑的中心遮挡相对光斑中心会发生偏移,如图 8 所示的次镜 $T_x = 0.1^\circ$ 时的光斑图,此时用环域本征函数进行重构会造成一定的波前重构误差。

由补偿器 A1 两次调整后可检测到波像差明显

变小,再用补偿器 A2 计算较小失调量 D_x 和 D_y ,如表 5 所示。

由表 4 和表 5 可知,当横向偏心初始值较小时,装调后的系统失调量接近设计值。当横向偏心初始值较大时,由于横向偏心与倾斜相互补偿,用补偿器 A1 计算的值为粗略估计值,调整后横向倾斜的剩

表 5 A2 装调前后的失调量
Table 5 Misalignment before and after A2 alignment

Parameter	Before alignment	After alignment				
		Calculated value 1	Residual value 1	Calculated value 2	Residual value 2	
1	D_x / mm	-0.0180	-0.0121	-0.0059	-0.0086	0.0027
	D_y / mm	0.0340	0.0255	0.0085	0.0102	-0.0017
2	D_x / mm	0.1230	0.0560	0.0670	0.0234	0.0436
	D_y / mm	0.1150	0.0527	0.0623	0.0110	0.0513
3	D_x / mm	-0.1640	-0.0792	-0.0848	-0.0250	-0.0598
	D_y / mm	0.2380	0.1247	0.1133	0.0291	0.0842
4	D_x / mm	0.0260	0.0164	0.0096	0.0126	-0.0030
	D_y / mm	0.0310	0.0198	0.0112	0.0084	0.0028

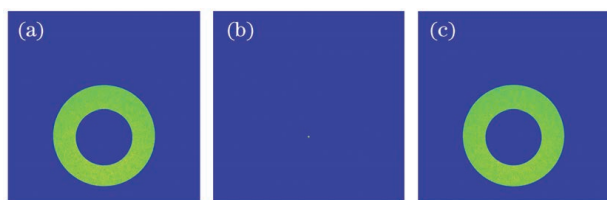


图 8 次镜横向偏心或倾斜光斑图。(a)前离焦面；
(b)焦面；(c)后离焦面

Fig. 8 Horizontal decentered or tilted spot pattern of secondary mirror. (a) Front defocusing plane; (b) focal plane; (c) back defocusing plane

余值与设计值有差距；此时用补偿器 A2 计算得到的 D_x 和 D_y 残差值会较大，这是因为倾斜误差 T_x 和 T_y 引起的剩余波像差要用残差值来补偿，由于矩阵的敏感性，两次迭代后逐步收敛，光学系统的像质变好，达到理想要求。

4 结 论

基于波前曲率传感器本征函数法不需要分区探测、重构精度高等特点，提出了本征模式系数拟合灵敏度矩阵的方法，代替传统灵敏度矩阵采用的 Zernike 系数，简化了重构矩阵的构造，降低了运算复杂度。忽略同轴三反望远镜次镜绕 z 轴旋转的倾斜量 T_z ，但在光学系统实际安装时也要注意 T_z 方向的对齐，以减小镜面加工及检测带来的影响，对其余 5 个自由度进行多次装调仿真，分两组补偿器逐步调整，在失调量较小时，该方法能很好地校正波前像差，得到中心视场波前像差 RMS 均小于 $\lambda/14$ 。结果表明，该方法对同轴三反望远镜装调有较好的指导作用，适用于粗调后的光学系统的进一步精调，是一种可行的计算机辅助装

调方法，为未来更大口径的光学系统装调提供了参考。

参 考 文 献

- [1] 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: 中国科学院研究生院(长春光学精密机械与物理研究所), 2005: 84-88.
- [2] 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: 中国科学院研究生院(西安光学精密机械研究所), 2013: 55-60.
- [3] 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. 郭继锴, 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.
- [4] 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: 中国科学院研究生院(长春光学精密机械与物理研究所), 2016: 23-24.
- [5] 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.
- [6] Yang Q, Ftaclas C, Chun M. Wavefront correction with high-order curvature adaptive optics systems [J]. *Journal of the Optical Society of America A*, 2006, 23(6): 1375-1381.
- [7] Douón F D, Pujol J, Arjona M, et al. Curvature sensor for ocular wavefront measurement [J]. *Optics Letters*, 2006, 31(15): 2245-2247.
- [8] 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.
- [9] 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.
- 黄盛炀, 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.
- [10] Roddier F. Curvature sensing and compensation: a new concept in adaptive optics [J]. *Applied Optics*, 1988, 27(7): 1223-1225.
- [11] 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.
- [12] Huang S Y, Xi F J, Liu C H, 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.
- [13] Xu Q F, Chen B. Automatic spot location and extraction algorithm for grating wavefront curvature sensor [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2019, 56(22): 220101.
- 徐其峰, 陈波. 光栅型波前曲率传感器光斑自动定位提取算法 [J]. *激光与光电子学进展*, 2019, 56(22): 220101.
- [14] Stepp L M, Neill D, Hileman E, et al. LSST Telescope primary/tertiary mirror cell assembly [J]. *Proceedings of SPIE*, 2010, 7733: 54-58.
- [15] Wu P F, Jia L Y. Experimental measurement and analysis of atmospheric coherence length in Xi'an area [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2020, 57(9): 090101.
- 吴鹏飞, 贾璐瑶. 西安地区大气相干长度的实验测量及分析 [J]. *激光与光电子学进展*, 2020, 57(9): 090101.
- [16] Cheng T, Liu W J, Yang K J, et al. Decoupling control algorithm based on laplacian eigenfunction for Woofer-Tweeter adaptive optics system [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2018, 45(9): 0905003.
- 程涛, 刘文劲, 杨康健, 等. 基于拉普拉斯本征函数的 Woofer-Tweeter 自适应光学系统解耦控制算法 [J]. *中国激光*, 2018, 45(9): 0905003.