

一种基于二阶灵敏度矩阵的离轴望远镜装调法

刘柱^{1,2}, 彭起^{1,2*}, 任戈^{1,2}, 向春生^{1,2}, 谭玉凤^{1,2}

¹中国科学院光电技术研究所光束控制重点实验室, 四川 成都 610209;

²中国科学院大学, 北京 100049

摘要 如何检测光学元件的偏心和倾斜误差是离轴望远镜系统装调中的一个关键问题。针对这一问题, 提出了一种二阶灵敏度矩阵法。在偏心范围为(-3 mm, 3 mm)和倾斜范围为(-3 mrad, 3 mrad)时, 绘制了 Zernike 系数与失调误差的关系曲线, 该曲线与数据间的拟合优度都大于 0.99, 并求解出两个灵敏度矩阵, 依据矩阵进行仿真实验, 结果表明, x , y 轴的均方根值分别为 0.0023 mm 和 0.0043 mm, 倾斜均方根值分别为 0.0177 mrad 和 0.0031 mrad。仿真实验验证, 与传统的灵敏度矩阵法相比, 该方法具有更高的精度。

关键词 成像系统; 离轴望远镜; 失调误差; 泽尼克系数; 二阶灵敏度矩阵

中图分类号 O436

文献标志码 A

doi: 10.3788/LOP202259.0811002

Second-Order Sensitivity Matrix Method for Aligning Off-Axis Telescopes

Liu Zhu^{1,2}, Peng Qi^{1,2*}, Ren Ge^{1,2}, Xiang Chunsheng^{1,2}, Tan Yufeng^{1,2}

¹Key Laboratory of Optical Engineering, Institute of Optics and Electronics, Chinese Academy of Sciences, Chengdu, Sichuan 610209, China;

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

Abstract Detecting a decenter or tilt is a key problem in aligning an off-axis telescope system. Therefore, this paper proposes a second-order sensitivity matrix method. When the ranges of decenter and tilt are from -3 mm to 3 mm and from -3 mrad to 3 mrad, respectively, the relation curves between the Zernike coefficient and misalignment are drawn. All their goodness of fit is larger than 0.99. Based on these curves, two sensitivity matrixes are solved and verified using simulation experiments. The results are as follows: The root mean squares (RMSs) of the x -axis decenter and y -axis decenter are 0.0023 mm and 0.0043 mm, respectively, and the RMSs of x -axis tilt and y -axis tilt are 0.0177 mrad and 0.0031 mrad, respectively. The simulation results show that this method is more precise than the traditional sensitivity matrix method.

Key words imaging system; off-axis telescope; misalignment error; Zernike coefficient; second-order sensitivity matrix

1 引言

轴对称光学系统可以通过检测干涉图进行快速

准确校准, 但离轴光学系统由于离轴反射镜的存在, 破坏了系统的轴对称性, 会在系统中引入了彗差。另外, 离轴光学系统对于镜片位置更加敏感, 其装调

收稿日期: 2021-03-11; 修回日期: 2021-04-04; 录用日期: 2021-04-21

基金项目: 四川省科委优秀青年基金(2019JDJQ0012)

通信作者: *phiqi@163.com

精度更容易影响到系统的成像质量^[1]。因此,离轴光学系统比轴对称光学系统的装调要更困难^[2]。

近年,由于天文领域对高性能离轴望远镜的需求,装调对准技术也得到不断的发展^[3]。目前主要的装调技术有节点像差理论(NAT)法^[4-6]、人工神经网络(ANN)法^[7-8]和灵敏度矩阵法^[9-13]等。NAT方法利用矢量来解释波像差(如彗差、像散和球差),尤其是在恶劣条件下,NAT方法的计算精度更高,但这种方法的推导过程非常复杂,通常是对像差进行定性分析。随着人工智能的发展,ANN方法被逐渐应用于装调领域^[14-16]。ANN方法可以学习和存储不同类型数据之间的非线性映射关系,经过训练后,可以准确有效地计算预测值,但是,由于失调误差的预测精度取决于ANN中映射算法本身,并且映射算法通常具有针对性,光学系统以及外界环境的改变均会影响其预测精度,因而该方法暂时未得到广泛使用。

灵敏度矩阵法由于其简单有效,在光学装调领域中得到了广泛应用。该方法采用Zernike多项式^[17-19]表征系统波前像差。假设波前像差与失调误差之间存在线性关系,那么便可以认为Zernike多项式系数与失调量之间存在一个线性关系矩阵,通过计算由失调误差和Zernike多项式系数组成的超定方程组,得到该线性关系的矩阵,该矩阵表示Zernike多项式系数对于单位失调误差变化量的敏

感程度。当失准范围较小时,该方法可以为失准状态的逆估计带来较高的精度和收敛性^[2]。

然而,2007年,Kim^[20]发现当失调误差大于设计公差时,Zernike多项式系数与波前像差之间的关系是非线性的,这意味着在一些失调误差较大的情况下,采用灵敏度矩阵法进行对准是不可行的。这是因为当失调误差范围过大时,会破坏Zernike多项式系数与失调量之间的线性关系,从而导致精度不足以满足光学系统的对准要求。为了解决这一问题,我们提出了精度更高、检测范围更广的二阶灵敏度矩阵法。二阶灵敏度矩阵法借助二次项矩阵来表征失调误差与Zernike系数之间的非线性关系,因而相对于传统方法,它具有更高的精度和更广的适用性。

2 基本理论

2.1 灵敏度矩阵法

由于Zernike多项式的正交完备性,因此,单位圆中的任何图像 $f(x, y)$ 都可以通过以下公式^[21]进行唯一展开:

$$f(x, y) = \sum_{p=0}^{\infty} \sum_{q=0}^{\infty} Z_{pq} V_{pq}(\rho, \theta), \quad (1)$$

其中, p 为阶数,取值通常为 $0, 1, 2, \dots$; q 为项数,取值通常为 $0, 1, 2, \dots$; ρ 为极径; θ 为极角; Z 为Zernike多项式系数; V 为Zernike多项式的具体表达式。

光学系统的波前像差通常用幂级函数展开来描述。如果将(1)式转换为极坐标,简化后得到:

$$f(\rho, \theta) = Z_1 + Z_2 \rho \cos \theta + Z_3 \rho \sin \theta + Z_4 (2\rho^2 - 1) + Z_5 \rho^2 \cos 2\theta + Z_6 \rho^2 \sin 2\theta + Z_7 (3\rho^2 - 2) \rho \cos \theta + Z_8 (3\rho^2 - 2) \rho \sin \theta + Z_9 (6\rho^4 - 6\rho^2 + 1) + \dots, \quad (2)$$

式中, $Z_1 \sim Z_9$ 分别为活塞、 y 轴倾斜、 x 轴倾斜、离焦、像散、 90° 像散、水平彗差、垂直彗差、球差情况下的Zernike多项式系数。由于光学系统的成像质量主要受低阶像差的影响,而Zernike多项式的前三个系数对系统像差没有影响,因此本文主要分析 $Z_4 \sim Z_9$ 对系统像差的影响。

在灵敏度矩阵法中,假定Zernike多项式系数与失调量之间存在线性关系。每一个Zernike多项式系数都可以由具有Zernike灵敏度的不同失调参数的线性组合得到,进而可得

$$\Delta \mathbf{Z} = \mathbf{A} \times \Delta \mathbf{B}, \quad (3)$$

式中, $\Delta \mathbf{Z}$ 为实测位置与理想位置的泽尼克系数之差组成的矩阵, $\Delta \mathbf{B}$ 为失调误差矩阵(如偏心误差或倾斜误差), \mathbf{A} 为Zernike灵敏度矩阵。它们的矩阵形式如下:

$$\Delta \mathbf{Z} = [\Delta Z_1 \quad \dots \quad \Delta Z_m]^T = [Z_1 \quad \dots \quad Z_m]^T - [Z_1^i \quad \dots \quad Z_m^i]^T, \quad (4)$$

$$\mathbf{A} = \begin{bmatrix} \frac{\partial Z_1}{\partial x_1} & \dots & \frac{\partial Z_1}{\partial x_n} \\ \vdots & & \vdots \\ \frac{\partial Z_m}{\partial x_1} & \dots & \frac{\partial Z_m}{\partial x_n} \end{bmatrix}, \quad (5)$$

$$\Delta \mathbf{B} = [\Delta x_1 \quad \dots \quad \Delta x_n]^T = [x_1 \quad \dots \quad x_n]^T - [x_1^i \quad \dots \quad x_n^i]^T, \quad (6)$$

式中, Δx_1 是被测状态和理想状态之间的位置差(此处指偏心 and 倾斜)。只要获得 $\Delta \mathbf{Z}$ 和 $\Delta \mathbf{B}$ 的相关数据,就可以通过求解超定方程计算灵敏度矩阵 \mathbf{A} 。按以下形式定义一个评价函数:

$$\Phi(\Delta \mathbf{B}) = (\mathbf{A} \times \Delta \mathbf{B} - \Delta \mathbf{Z})^T \times (\mathbf{A} \times \Delta \mathbf{B} - \Delta \mathbf{Z}). \quad (7)$$

当评价函数有极小值时,系统的像差较小,该方程的求解便是有物理意义的,即找到一个合适的装调位置使得系统的像差有极小值。所以(7)式可写为

$$\nabla\Phi(\Delta\mathbf{X})=\nabla[(\mathbf{A}\times\Delta\mathbf{B}-\Delta\mathbf{Z})^T(\mathbf{A}\times\Delta\mathbf{B}-\Delta\mathbf{Z})]=0, \quad (8)$$

$$\Delta\mathbf{B}=(\mathbf{A}^T\times\mathbf{A})^{-1}\times\mathbf{A}^T\times\Delta\mathbf{Z}. \quad (9)$$

通过(9)式可得系统的失调量,可以依据装调光学系统。然而,当误差范围大于设计公差时,失调量与 Zernike 系数是非线性的,这意味着 Zernike 系数不能再用一阶偏导数来处理,而是需要用高阶偏导数来处理。

2.2 二阶灵敏度矩阵法

如果误差范围较大,灵敏度矩阵的非线性将是影响计算精度的主要因素。针对这一缺点,提出了二阶灵敏度矩阵法。由泰勒公式可知,连续无穷可导的函数可以写成不同阶导数的和的形式。基于

此,对灵敏度矩阵 \mathbf{A} 中的矩阵元素进行了修正,让 Zernike 系数对失调误差进行二阶求导数。所以(3)式可写成

$$\Delta\mathbf{Z}=\mathbf{A}'_s\times\Delta\mathbf{B}+\frac{1}{2}\mathbf{A}''\times\Delta\mathbf{B}^{(2)}+\delta(\Delta\mathbf{Z}), \quad (10)$$

$$\Delta\mathbf{Z}=[Z_1\cdots Z_m]^T-[Z_1^i\cdots Z_m^i]^T, \quad (11)$$

$$\mathbf{A}'_s=\begin{bmatrix} (\frac{\delta Z_1}{\delta x_1})_{\text{constant}} & \cdots & (\frac{\delta Z_1}{\delta x_n})_{\text{constant}} \\ \vdots & & \vdots \\ (\frac{\delta Z_m}{\delta x_1})_{\text{constant}} & \cdots & (\frac{\delta Z_m}{\delta x_n})_{\text{constant}} \end{bmatrix}, \quad (12)$$

$$\Delta\mathbf{B}=[x_1\cdots x_n]^T-[x_1^i\cdots x_n^i]^T, \quad (13)$$

$$\mathbf{A}''=\begin{bmatrix} \frac{\delta^2 Z_1}{\delta x_1^2} & \cdots & \frac{\delta^2 Z_1}{\delta x_n^2} \\ \vdots & & \vdots \\ \frac{\delta^2 Z_m}{\delta x_1^2} & \cdots & \frac{\delta^2 Z_m}{\delta x_n^2} \end{bmatrix}, \quad (14)$$

$$\Delta\mathbf{B}^{(2)}=(\Delta\mathbf{B}\times\Delta\mathbf{B}^T)\times\mathbf{I}_{(n)}\times\begin{bmatrix} 1 \\ 0 \\ \vdots \\ 0 \end{bmatrix}_{(n\times 1)}+(\Delta\mathbf{B}\times\Delta\mathbf{B}^T)\times\mathbf{I}_{(n)}\times\begin{bmatrix} 0 \\ 1 \\ \vdots \\ 0 \end{bmatrix}_{(n\times 1)}+\cdots+(\Delta\mathbf{B}\times\Delta\mathbf{B}^T)\times\mathbf{I}_{(n)}\times\begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ \vdots \\ 1 \end{bmatrix}_{(n\times 1)}, \quad (15)$$

$$\delta(\Delta\mathbf{Z})=\frac{\mathbf{A}^{(n)}}{(n+1)!}\times\Delta\mathbf{B}^{(n)}, \quad (16)$$

其中, \mathbf{A}'_s 表示为矩阵 \mathbf{A}_s 内元素的一阶导; $\Delta\mathbf{B}^{(2)}$ 表示矩阵内部元素平方得到一个规模不变的矩阵; n 表示为求导阶次项系数,其取值为 $0, 1, 2, \dots$; m 表示为求导阶次项系数,其取值为 $0, 1, 2, \dots$, 在实际应用中可以求得; $\mathbf{I}_{(n)}$ 表示 n 阶的单位矩阵; $\delta(\Delta\mathbf{Z})$ 表示高阶误差, 由于系统的三阶像差与失调误差的关系呈二次非线性关系, 所以 $\delta(\Delta\mathbf{Z})$ 在实际中是可以省略的, 不过对于五阶及以上的高阶像差, 则需要对 $\delta\Delta\mathbf{Z}$ 做进一步的取舍考虑; $(\frac{\delta Z_m}{\delta x_n})_{\text{constant}}$ 表示函数 Z_m 关于 x_n 的一阶导函数中的常量项。 $\Delta\mathbf{Z}, \Delta\mathbf{B}$ 可从光学设计软件中直接得到, (10) 式可以借助数值仿真软件用阻尼最小二乘法来求解。在实际装调中, 可以通过(13)式得到灵敏度矩阵 \mathbf{A}' 和 \mathbf{A}'' , 并结合波前传感器在不同视场角探测的 Zernike 系数来计算离轴光学系统的失调误差。

3 仿真实验

3.1 光学系统结构

实验采用 Radiant 公司的 ZEMAX[®] 软件, 建立

了离轴反射望远镜光学系统模型, 具体参数如表 1 所示, 其中光阑的离轴距离为 446 mm, 光源的波长为 550 nm。离轴光学系统的阴影模型如图 1 所示。

表 1 离轴望远镜元件参数表

Table 1 Parameters of off-axis optical system

Item	Radius / mm	Semi-diameter / mm	Thickness / mm	Conic
Aperture	∞	316	1500	0
Primary mirror	-2668.8	800	-1166.35	-1
Secondary mirror	-336.1	120	1200	-1

在离轴光学系统的对准过程中, 由于主镜尺寸较大, 主镜的位置通常是固定不变的, 通常是通过调整次镜的空间位置来减小小像差。通过模拟建立了一个视场离轴的光学系统模型, 该模型次镜是旋转对称的, 所以 z 轴倾斜对系统像差影响不大; 由于 z 轴上的偏心量代表了光学系统的离焦量, 容易对准, 因此在实验仿真中不考虑。因此, 共有四种失准 (x 轴偏心、 x 轴倾斜、 y 轴偏心和 y 轴倾斜) 需要校准。通过仿真数据验证了二阶灵敏度矩阵法的正确性。

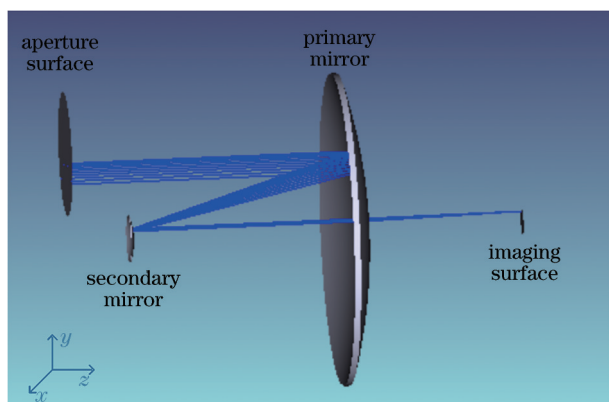


图 1 离轴光学系统的阴影模型
Fig. 1 Shaded model of off-axis optical system

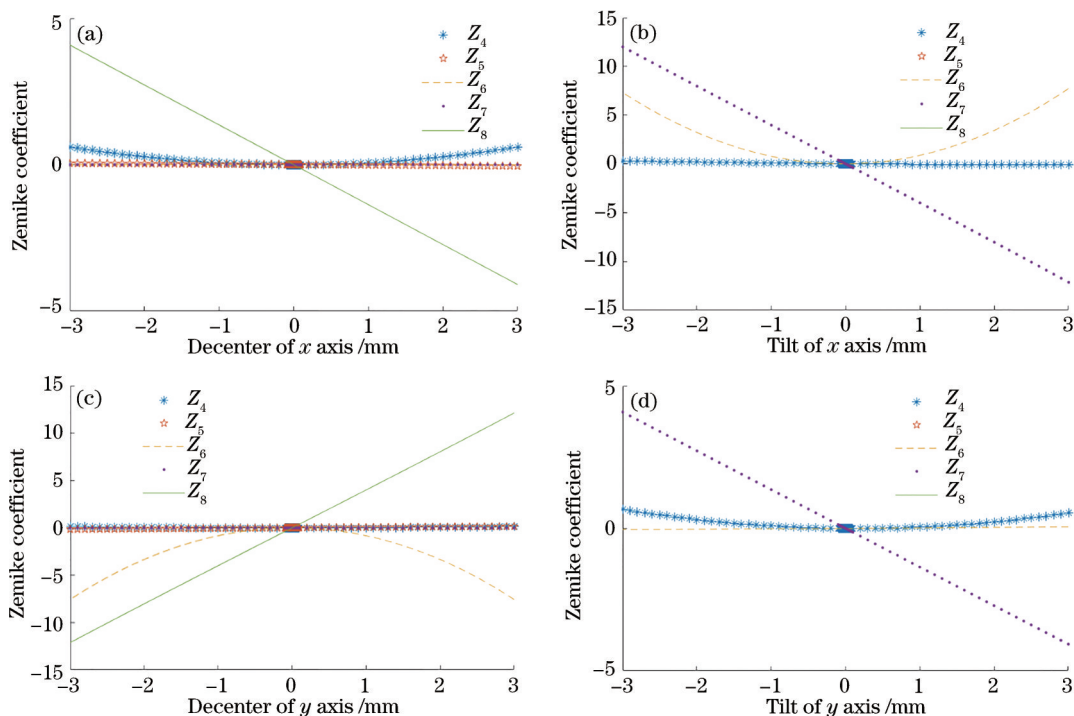


图 2 Zernike 系数与不同失调量关系曲线。(a) x 轴离轴误差; (b) x 轴倾斜误差; (c) y 轴离轴误差; (d) y 轴倾斜误差
Fig. 2 Relationship curve between Zernike coefficients and different misalignments. (a) X -axis decenter error; (b) x -axis tilt error; (c) y -axis decenter error; (d) y -axis tilt error

为了验证曲线的正确性,计算了图 3 中曲线的拟合优度,如表 2 所示。拟合优度越接近 1,曲线的可信度越高,因此可以用图 3 中曲线来计算失调和 Zernike 系数之间的关系函数。从图 3(a)可以看出, Z_4 和 Z_8 两者间的数值的数量级一样,因此,忽略 Z_4 是不准确的,特别是在实际工程应用中,图 3(b)、图 3(c)、图 3(d)的也有类似情况。但是,当 x 轴偏心足够大时, Z_4 甚至比 Z_8 大,这就是为什么传统的灵敏度矩阵法不适用于失调量大的系统。为了验证文中方法的可行性,将对数据进行更深入的处

3.2 仿真结果

对离轴光学系统的结构进行建模后,通过改变不同的失调量可以得到相应的 Zernike 系数,绘制了 Zernike 系数和失调量之间的关系曲线,如图 2 所示。可以看到,图 2(a)中的 Z_8 、 Z_4 曲线,图 2(b)中的 Z_7 、 Z_6 曲线,图 2(c)的 Z_7 、 Z_4 曲线,图 2(d)中的 Z_8 、 Z_6 曲线变化比较明显,说明当失调范围很小时,其他的 Zernike 系数小到可以忽略不计,而以受影响较显著的 Zernike 系数代替。但是,当失调范围较大时, Zernike 系数和失调量之间的关系并非都是线性的。为了进一步验证这一说法,展开上述分析的图 2 中受影响较大的曲线,如图 3。

理,通过失准量和相应的 Zernike 系数,得到传统灵敏度矩阵和新灵敏度矩阵,并比较两种矩阵的差异。

由于某些 Zernike 系数(图 2(a)中的 $Z_1, Z_2, Z_3, Z_5, Z_6, Z_7$)比最大的两个系数(图 2(a)中的 Z_4 和 Z_8)小两个数量级以上,所以在接下来的分析中可以选择忽略极小的那些 Zernike 系数。在这种情况下,得到了离轴望远镜对准的传统灵敏度矩阵和采用二阶灵敏度矩阵法的新方法矩阵。为了避免彗差零点效应,测量了 $0^\circ, 0.7^\circ, 1^\circ$ 不同视场下的波前像差。

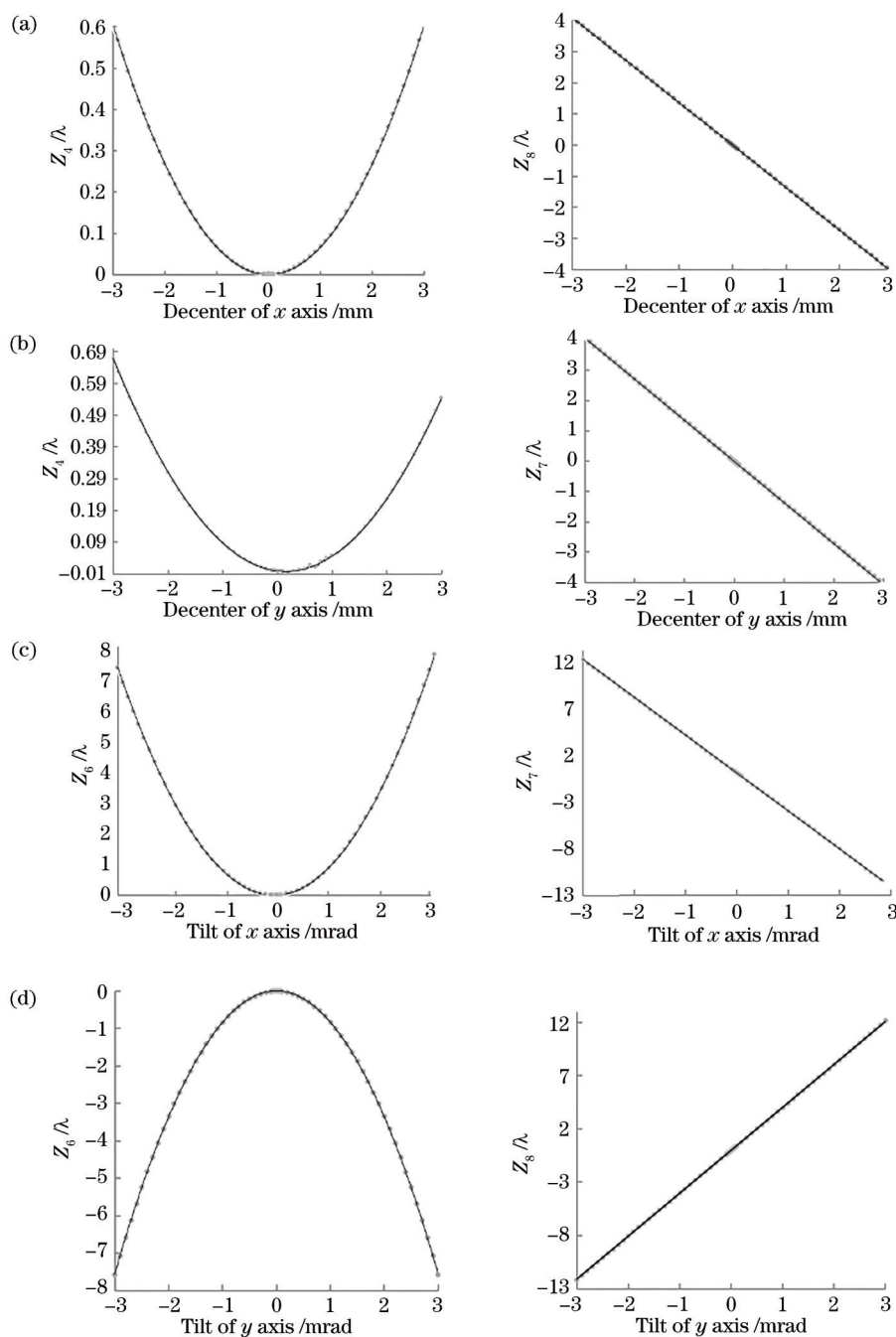


图 3 图 2 中受影响较大的曲线展开图。(a) Z_4, Z_8 与 x 轴离轴误差关系曲线图;(b) Z_4, Z_7 与 y 轴离轴误差关系曲线图;(c) Z_6, Z_7 与 x 轴倾斜误差关系曲线图;(d) Z_6, Z_8 与 y 轴倾斜误差关系曲线图

Fig. 3 Fig. 2 expanded graph of the curve affected greatly. (a) Relationship curve between Z_4, Z_8 and x -axis decenter; (b) relationship curve between Z_4, Z_7 and y -axis decenter; (c) relationship curve between Z_6, Z_7 and x -axis tilt; (d) relationship curve between Z_6, Z_8 and y -axis tilt

表 2 曲线拟合优度

Table 2 Goodness of curve fitting

Item	Fig. 3(a)		Fig. 3(b)		Fig. 3(c)		Fig. 3(d)	
	Z_4	Z_8	Z_6	Z_7	Z_4	Z_7	Z_6	Z_8
Goodness of fit	0.998	0.997	0.993	0.996	0.997	0.997	0.994	0.995

用传统方法和新方法分别计算了 61 组不同视场下的不同错位数据,并随机选取 5 组计算结果。其中

传统方法计算结果和真实值的对比结果如表 3,新方法与实际值的对比结果如表 4。

表 3 真实值与传统方法计算值的差别

Table 3 Difference between actual value and calculate value by traditional method

Group No.	XADE /mm		YADE /mm		XATE /mrad		YATE /mrad	
	AV	CV	AV	CV	AV	CV	AV	CV
1	3.0	3.6633	-2.9	-3.4042	3.0	3.6613	2.7	3.0248
2	2.8	3.3278	1.7	1.3406	2.3	2.2692	2.1	1.9371
3	1.6	1.2468	1.3	0.8823	-1.6	-1.2389	1.4	1.0186
4	-0.7	-0.4704	-0.8	-0.5457	1.1	0.7456	0.8	0.5263
5	0.2	0.3017	0.3	0.3214	-0.5	-0.378	0.4	0.3478

注:表格中的 XADE 为 x -axis decenter error 缩写;YADE 为 y -axis decenter error 缩写;XATE 为 x -axis tilt error 缩写;YATE 为 y -axis tilt error 缩写;AV 为 actual value 的缩写;CV 为 calculate value 的缩写

表 4 真实值与新方法计算值的差别

Table 4 Difference between actual value and calculate value by new method

Group No.	XADE /mm		YADE /mm		XATE /mrad		YATE /mrad	
	AV	CV	AV	CV	AV	CV	AV	CV
1	3.0	2.9999	-2.9	-2.8974	3.0	3.0072	2.7	2.7007
2	2.8	2.7998	1.7	1.6962	2.3	2.2974	2.1	2.0968
3	1.6	1.5997	1.3	1.2922	-1.6	-1.6013	1.4	1.3966
4	-0.7	-0.6998	-0.8	-0.7972	1.1	1.0617	0.8	0.7997
5	0.2	0.2003	0.3	0.3011	-0.5	-0.5067	0.4	0.4052

注:表格中的 XADE 为 x -axis decenter error 缩写;YADE 为 y -axis decenter error 缩写;XATE 为 x -axis tilt error 缩写;YATE 为 y -axis tilt error 缩写;AV 为 actual value 的缩写;CV 为 calculate value 的缩写

从表 3 可以看出,当失调误差绝对值逐渐减小时,灵敏度矩阵法的计算值越来越接近实际值。由于 Zernike 系数与失调误差呈线性关系,灵敏度矩阵法的估计误差随失调扰动的增大而增大^[22-23],因此,传统的灵敏度矩阵法在误差较小时是有效的,但是,当 x 轴离轴、 x 轴倾斜、 y 轴离轴、 y 轴倾斜这四种失调量误差较大时,精度会有所影响。从表 4 可以看出,新方法的精度很高,且不受大偏差的影响。与表 3 相比,二阶灵敏度矩阵法在误差相同的情况下,精度优于传统方法。为了更直观地显示它们精度的差异,求解了均方根值,如表 5 所示。

由表 5 可知,传统方法的均方根误差值均高于新方法,说明二阶灵敏度矩阵法比传统的灵敏度矩阵法具有更高的精度。原因是,当系统失调量较大时,失调量与 Zernike 系数之间的关系是非线性的,传统的灵敏度矩阵法不再适用于计算失调量。为了研究新方法是否适用于大偏差情况,增加了两种方法对大偏差的计算结果,随机选取三组数据如表 6 所示,可知,当失调量变大时,传统方法的误差较大,无法忽略。但是,新方法的误差仍然较小。因此,二阶灵敏度矩阵法比灵敏度矩阵法具有更广泛的应用范围。

表 5 两种方法的精度对比

Table 5 Comparison of accuracy between two methods

Method	X-axis decenter error /mm	Y-axis decenter error /mm	X-axis tilt error /mrad	Y-axis tilt error /mrad
Traditional method	0.4258	0.353	0.3766	0.2665
New method	0.0023	0.0043	0.0177	0.0031

表 6 两种方法的精度误差

Table 6 Accuracy difference between traditional method and new method

Type of misalignment	Group No.	Actual value	Traditional method		New method	
			Calculate value	Error	Calculate value	Error
X-axis decenter error /mm	1	4.0	6.3012	2.3012	4.0038	0.0038
	2	5.0	9.6860	4.686	5.0051	0.0051
	3	6.0	13.8255	7.8255	6.0070	0.007
Y-axis decenter error /mm	1	3.7	5.5684	1.8684	3.6177	-0.0823
	2	-5.2	-10.0917	-4.8917	-5.2823	-0.0823
	3	6.3	15.9132	9.6132	6.2126	-0.0838
X-axis tilt error /mrad	1	-3.8	-5.7484	-1.9484	-3.8186	-0.0186
	2	4.7	8.6559	3.9559	4.7305	0.0305
	3	5.6	12.304	6.704	5.6801	0.0801
Y-axis tilt error /mrad	1	3.0	3.6701	0.6701	3.0029	0.0029
	2	4.4	7.6610	3.261	4.4329	0.0329
	3	-6.1	-14.7609	-8.6609	-6.2079	-0.1079

4 总 结

提出了一种二阶灵敏度矩阵法来表征离轴光学系统中装调误差与 Zernike 多项式系数的映射关系。该方法在传统线性灵敏度矩阵的基础上添加了 Zernike 系数与失调误差的二阶非线性矩阵,不仅提高了精度,而且增加了适用范围。首先从理论出发,推导了基于二阶灵敏度矩阵法的失调误差求解公式;然后以一个离轴两反式望远镜为例,分别用传统灵敏度矩阵和二阶灵敏度矩阵进行了失调误差的求解,在相同的失调误差范围下,二阶灵敏度矩阵法具有更高的精度;最后逐渐增加系统失调误差,发现在传统灵敏度矩阵法的求解精度已经完全不够的情况下,二阶灵敏度依旧有一个可以接受的精度,因而证明了二阶灵敏度矩阵法相比于传统灵敏度矩阵法具有更宽的适用范围。

参 考 文 献

- [1] Gross H. Handbook of optical systems[M]. New York: Wiley, 2012.
- [2] Kim S, Yang H S, Lee Y W, et al. Merit function regression method for efficient alignment control of two-mirror optical systems[J]. Optics Express, 2007, 15(8): 5059-5068.
- [3] Liu Z, Peng Q, Xu Y J, et al. Misalignment calculation on off-axis telescope system via fully connected neural network[J]. IEEE Photonics Journal, 2020, 12(4): 19844311.
- [4] Zhang X B, Zhang D, Xu S Y, et al. Active optical alignment of off-axis telescopes based on nodal aberration theory[J]. Optics Express, 2016, 24(23): 26392-26413.
- [5] Ju G H, Ma H C, Yan C X. Aberration fields of off-axis astronomical telescopes induced by rotational misalignments[J]. Optics Express, 2018, 26(19): 24816-24834.
- [6] Ju G H, Yan C X, Gu Z Y, et al. Aberration fields of off-axis two-mirror astronomical telescopes induced by lateral misalignments[J]. Optics Express, 2016, 24(21): 24665-24703.
- [7] Oteo E, Arasa J. New strategy for misalignment calculation in optical systems using artificial neural networks[J]. Optical Engineering, 2013, 52(7): 074105.
- [8] Guerra-Ramos D, Diaz-García L, Trujillo-Sevilla J, et al. Piston alignment of segmented optical mirrors via convolutional neural networks[J]. Optics Letters, 2018, 43(17): 4264-4267.
- [9] Lee H, Dalton G B, Toshi I A, et al. Computer-guided alignment I: phase and amplitude modulation of alignment-influenced optical wavefront[J]. Optics Express, 2007, 15(6): 3127-3130.
- [10] Lee H, Dalton G B, Toshi I A, et al. Computer-guided alignment I: phase and amplitude modulation of alignment-influenced optical wavefront[J]. Optics Express, 2007, 15(6): 3131-3139.
- [11] Han X Z, Hu X Q, Yu X. Precisely integrated wavefront sensorless calibration of high-resolution space optical system with large position errors[J]. Acta Optica Sinica, 2011, 31(6): 0626003.

- 韩杏子, 胡新奇, 俞信. 高分辨率空间光学系统位置误差的无波前传感综合校正[J]. 光学学报, 2011, 31(6): 0626003.
- [12] Guerra-Ramos D, Diaz-García L, Trujillo-Sevilla J, et al. Piston alignment of segmented optical mirrors via convolutional neural networks[J]. Optics Letters, 2018, 43(17): 4264-4267.
- [13] Gao Z S, Chen L, Zhou S Z, et al. Computer-aided alignment for a reference transmission sphere of an interferometer[J]. Optical Engineering, 2004, 43(1): 69-74.
- [14] Oteo E, Arasa J. New strategy for misalignment calculation in optical systems using artificial neural networks[J]. Optical Engineering, 2013, 52(7): 074105.
- [15] Wang Y, Zhang X, Wang L J, et al. Freeform optical system alignment based on artificial neural networks[J]. Acta Optica Sinica, 2013, 33(12): 1211001. 王钰, 张新, 王灵杰, 等. 基于人工神经网络方法的自由曲面光学系统装调[J]. 光学学报, 2013, 33(12): 1211001.
- [16] Zhang D G, Fu Y T. Surrogate model used for computer aided alignment[J]. Infrared and Laser Engineering, 2013, 42(3): 680-685. 张东阁, 傅雨田. 计算机辅助装调的代理模型方法[J]. 红外与激光工程, 2013, 42(3): 680-685.
- [17] Dai X Y, Tan Y, Ren G, et al. Analysis of image quality detection performance of scanning Hartmann technology[J]. Acta Optica Sinica, 2020, 40(7): 0712002. 戴勋义, 谭毅, 任戈, 等. 扫描哈特曼方法的像质检测性能分析[J]. 光学学报, 2020, 40(7): 0712002.
- [18] Bi J C, Gao Z S, Zhu D, et al. An optical coherence tomographic aberration correction method based on the particle swarm optimization algorithm[J]. Acta Optica Sinica, 2020, 40(10): 1011002. 毕津慈, 高志山, 朱丹, 等. 基于粒子群优化算法的光学相干层析像差校正方法[J]. 光学学报, 2020, 40(10): 1011002.
- [19] Zhou M Y, Hou J F, Wang D G, et al. Design and verification of depolarized derotator alignment scheme in astronomical telescope[J]. Chinese Journal of Lasers, 2020, 47(6): 0604005. 周明尧, 侯俊峰, 王东光, 等. 天文望远镜无偏消旋镜装调方案设计及验证[J]. 中国激光, 2020, 47(6): 0604005.
- [20] Kim Y, Yang H S, Kim S W, et al. Alignment of off-axis optical system with multi mirrors using derivative of Zernike polynomial coefficient[J]. Proceedings of SPIE, 2009, 7433: 74330C.
- [21] Thibos L N, Applegate R A, Schwiegerling J T, et al. Standards for reporting the optical aberrations of eyes [J]. Journal of Refractive Surgery, 2002, 18(5): S652-S660.
- [22] Kim E D, Choi Y W, Kang M S, et al. Reverse-optimization alignment algorithm using Zernike sensitivity[J]. Journal of the Optical Society of Korea, 2005, 9(2): 68-73.
- [23] Harmon L D. Studies with artificial neurons, I: properties and functions of an artificial neuron[J]. Kybernetik, 1961, 1(3): 89-101.