

文章编号 1004-924X(2015)09-2595-10

## 改进的灵敏度矩阵法在离轴望远镜装调中的应用

顾志远<sup>1,2</sup>, 颜昌翔<sup>1\*</sup>, 李晓冰<sup>3</sup>, 胡春晖<sup>1</sup>, 王洋<sup>1,2</sup>

(1. 中国科学院 长春光学精密机械与物理研究所, 吉林 长春 130033;

2. 中国科学院大学, 北京 100049;

3. 长春奥普光电技术股份有限公司, 吉林 长春 130033)

**摘要:**为了在较大失调范围内准确求解离轴梅逊式无焦卡塞格林望远镜元件的失调量,提出了基于改进的灵敏度矩阵模型的计算机辅助装调方法。分析了传统灵敏度矩阵法的原理及局限性,并在传统方法的数学模型中加入二次修正项,对传统计算机辅助装调技术进行了改进。针对离轴望远镜系统,分析了次镜失调状态下系统的像差特性,分别采用改进模型和传统模型对系统失调量与像差间的映射关系进行近似,并对失调望远镜系统进行仿真装调。仿真装调结果表明:在次镜偏心为±8 mm、倾斜为±1.5°的失调范围内,传统方法计算得到的次镜  $x$ 、 $y$ 、 $z$  偏心量和  $\alpha$ 、 $\beta$  倾斜量均方根误差分别是:2.689 mm、2.494 mm、0.194 mm 和 0.500°、0.525°;而改进方法对应的计算结果为:0.404 mm、0.323 mm、0.047 mm 和 0.064°、0.065°,显示改进后的灵敏度矩阵方法的失调量求解准确度大幅优于传统方法。最终,采用改进方法对望远镜进行装调,得到了轴上视场波像差(均方根值 RMS)为 0.056 $\lambda$ ( $\lambda=632.8$  nm),边缘视场波像差 RMS 均优于 0.1 $\lambda$  的良好装调结果。得到的结果满足设计要求。

**关键词:**离轴望远镜;计算机辅助装调;灵敏度矩阵;失调;Zernike 系数

**中图分类号:**TH743;TH703 **文献标识码:**A **doi:**10.3788/OPE.20152309.2595

## Application of modified sensitivity matrix method in alignment of off-axis telescope

GU Zhi-yuan<sup>1,2</sup>, YAN Chang-xiang<sup>1\*</sup>, LI Xiao-bing<sup>3</sup>, HU Chun-hui<sup>1</sup>, WANG Yang<sup>1,2</sup>

(1. Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics,  
Chinese Academy of Sciences, Changchun 130033, China;

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

3. Changchun UP Optotech Co., Ltd., Changchun 130033, China)

\* Corresponding author, E-mail: yancx@ciomp.ac.cn

**Abstract:** To calculate the misalignments of optical elements accurately in an off-axis Mersenne afocal Cassegrain telescope, a computer-aided alignment method based on modified sensitivity matrix model was proposed. The principle and limitations of conventional sensitivity matrix method were analyzed. By means of adding a quadratic correction term to conventional sensitivity matrix model, the conventional computer-aided alignment technology was improved. For the off-axis telescope, the aberration characteristics were analyzed when the secondary mirror was misaligned. The modified

收稿日期:2014-11-20;修订日期:2015-01-20.

基金项目:国家 863 高技术研究发展计划资助项目(No. 2011AA12A103);中国地质调查局资助项目(No. 1212011120227)

model and conventional model were used to approximate the mapping relationships between misalignments and aberrations. Then the alignment of misaligned telescope was simulated. The simulation results in the range of decenter  $\pm 8$  mm and tilt  $\pm 1.5^\circ$  for a secondary mirror show that the root mean square error of  $x$ -,  $y$ -,  $z$ -decenters and  $\alpha$ -,  $\beta$ -tilts of the secondary mirror calculated by conventional method are 2.689 mm, 2.494 mm, 0.194 mm and  $0.500^\circ$ ,  $0.525^\circ$  respectively, and the corresponding calculations by modified method are 0.404 mm, 0.323 mm, 0.047 mm and  $0.064^\circ$ ,  $0.065^\circ$  respectively. The calculation accuracy of the modified sensitivity matrix method is much higher than that of the conventional method. Finally, the telescope is well aligned with the modified method, and the results give that the Wavefront Errors(WFEs) RMS on axis is  $0.056\lambda$  ( $\lambda=632.8$  nm), while the WFEs RMS(Root Mean Square) in marginal field of view are better than  $0.1\lambda$ . The results meet the design requirements.

**Key words:** off-axis telescope; computer-aided alignment; sensitivity matrix; misalignment; Zernike coefficient

## 1 引言

20 世纪 80 年代 Ira M. Egdall 提出了计算机辅助装调的概念<sup>[1]</sup>, 经过几十年的研究和发展, 衍生了许多关于成像系统装调的理论和方法。

灵敏度矩阵法是目前应用最为广泛的计算机辅助装调方法。该方法将表征系统波像差的 Zernike 系数表示为不同失调量的线性组合, 线性组合的系数矩阵称为灵敏度矩阵<sup>[2-3]</sup>。亚利桑那大学的 Anastacia M. Hvisc 利用该方法分析了南非大型望远镜(SALT)望远镜球差校正器的失调像差特性<sup>[4]</sup>; 长春光机所的孙敬伟利用灵敏度矩阵法完成了发射望远镜的装调, 实现了系统波像差(均方根值, RMS)为  $0.1467\lambda$  ( $\lambda=632.8$  nm, 下同)的装调结果<sup>[5]</sup>; 赵阳等根据投影物镜小比率模型的灵敏度矩阵, 将系统波像差 RMS 由 50.864 nm 调高到 25.993 nm<sup>[6]</sup>。光学设计软件 Code V 集成的装调分析模块采用的也是灵敏度矩阵法。但是有研究指出<sup>[7]</sup>, 该方法在元件失调量远大于设计公差的情况下求解不准确, 其原因是表征系统波像差的 Zernike 系数与失调量的函数关系存在非线性。

为了解决灵敏度矩阵法的弊端, 研究人员尝试寻找新的计算机辅助装调方法。Seonghui Kim 直接利用光学设计软件自带阻尼最小二乘算法, 将系统实测波像差与设计残差的差值作为评价函数来对元件失调量进行求解, 该方法通过 2 次调整将卡塞格林望远镜的波像差从  $0.283\lambda$

调整到  $0.194\lambda$ , 但该方法尚不能用于多镜系统装调<sup>[7]</sup>; 史广维利用矢量像差理论<sup>[8]</sup>对两反望远镜系统进行了装调模拟, 得到了较高精度的计算结果, 但当元件的偏心量和倾斜量较大时, 系统像差计算不准确, 并且无法应用于光阑离轴系统<sup>[9]</sup>; Hanshin Lee 利用微分波前采样法(Differential Wavefront Sampling)研究了多镜系统装调问题<sup>[10]</sup>。此外, 近年来还有采用基于人工神经网络的数值算法来进行计算机辅助装调的报道<sup>[11-12]</sup>。

离轴系统由于可以做到无中心遮拦, 在望远镜设计中应用日益广泛, 但该系统装调难度较大, 尤其是元件粗装调时定位误差通常较大, 难以达到同轴系统的精度。现有的关于计算机辅助装调的报道中, 元件失调范围通常设置比较小, 由此降低了计算机辅助装调技术的实用性。本文通过在灵敏度矩阵法数学模型中加入二次修正项, 降低了表征波像差的 Zernike 系数与失调量的函数关系存在非线性的影响, 提高了传统方法在元件定位误差较大的情况下失调量的求解精度, 并利用改进方法对口径为 500 mm 的离轴望远镜进行装调, 获得了良好的成像质量。

## 2 改进的灵敏度矩阵法原理

光学系统在失调状态下都会引入像差, 针对一个确定的光学系统, 系统的波像差是元件装调状态的复杂函数。可以用向量  $\mathbf{U}=(x_1, x_2, \dots, x_n)$  来表示系统中所有的元件装调自由度, 包括元件的平移和定轴转动。根据泰勒定理, 光学系统在失调状态

下,表征第  $j$  个视场的出瞳面波前像差的第  $i$  项 Fringe Zernike 系数  $Z_i^{(j)}$  可以表示为:

$$Z_i^{(j)}(\mathbf{U}) = Z_i^{(j)}(\mathbf{N} + \Delta\mathbf{M}) = \sum_{p=0}^m \frac{1}{p!} \left[ \sum_{q=1}^n \Delta m_q \frac{\partial}{\partial x_q} \right]^p Z_i^{(j)}(\mathbf{N}) + R_{N,m}(\Delta\mathbf{M}). \quad (1)$$

其中: $\mathbf{N}=(x_{01}, x_{02}, \dots, x_{0n})$ 为光学系统  $n$  个装调自由度的设计状态; $\Delta\mathbf{M}=(\Delta m_1, \Delta m_2, \dots, \Delta m_n)$ 为  $n$  个装调自由度上的失调量; $R_{N,m}(\Delta\mathbf{M})$ 为展开

$$\begin{bmatrix} Z_1^{(j)}(\mathbf{N} + \Delta\mathbf{M}) \\ \vdots \\ Z_i^{(j)}(\mathbf{N} + \Delta\mathbf{M}) \\ \vdots \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Z_1^{(j)}(\mathbf{N}) \\ \vdots \\ Z_i^{(j)}(\mathbf{N}) \\ \vdots \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \frac{\partial Z_1^{(j)}(\mathbf{N})}{\partial x_1} & \frac{\partial Z_1^{(j)}(\mathbf{N})}{\partial x_2} & \dots & \frac{\partial Z_1^{(j)}(\mathbf{N})}{\partial x_n} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ \frac{\partial Z_i^{(j)}(\mathbf{N})}{\partial x_1} & \frac{\partial Z_i^{(j)}(\mathbf{N})}{\partial x_2} & \dots & \frac{\partial Z_i^{(j)}(\mathbf{N})}{\partial x_n} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta m_1 \\ \Delta m_2 \\ \vdots \\ \Delta m_n \end{bmatrix}. \quad (3)$$

式(3)中,由 Zernike 系数对装调自由度的偏导数构成的矩阵即是灵敏度矩阵。由于难以获得  $Z_i^{(j)}(x_1, x_2, \dots, x_n)$  的解析形式,通常采用差商来代替微商,从而得到关于 Zernike 系数和失调量的线性方程组,这就是传统灵敏度矩阵法的数学原理。

在失调量非常小的情况下,Zernike 系数与失调量基本呈线性关系,这时灵敏度矩阵法的计算结果比较准确,但是在失调量比较大的情况下,Zernike 系数与失调量呈现出较显著的非线性关系时,该方法就无法得到精确的解。

### 2.2 改进的灵敏度矩阵法

若对式(1)做二阶展开,则可以表示为:

$$Z_i^{(j)}(\mathbf{N} + \Delta\mathbf{M}) = Z_i^{(j)}(\mathbf{N}) + \left[ \sum_{q=1}^n \Delta m_q \frac{\partial}{\partial x_q} \right] Z_i^{(j)}(\mathbf{N}) +$$

$$Z_i^{(j)}(\mathbf{N} + \Delta\mathbf{M}) = \Delta\mathbf{M} \cdot (\mathbf{A}_i^{(j)})_{n \times n} \cdot \Delta\mathbf{M}^T + \Delta\mathbf{M} \cdot (\mathbf{B}_i^{(j)})_{n \times 1} + Z_i^{(j)}(\mathbf{N}). \quad (6)$$

其中: $(\mathbf{A}_i^{(j)})_{n \times n} = \begin{bmatrix} a_{i11}^{(j)} & \dots & a_{i1n}^{(j)} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ a_{in1}^{(j)} & \dots & a_{inn}^{(j)} \end{bmatrix}$ ,

$$a_{ipq}^{(j)} = a_{iqp}^{(j)}; (\mathbf{B}_i^{(j)})_{n \times 1} = \begin{bmatrix} b_{i1}^{(j)} \\ \vdots \\ b_{in}^{(j)} \end{bmatrix}.$$

对于每一个视场的每一项 Zernike 系数,都可以建立式(6)所示方程,最终可以得到关于  $n$  个失调量的方程组。

$$\begin{bmatrix} Z_i^{(j)}(\mathbf{N} + \Delta\mathbf{M}_1) - Z_i^{(j)}(\mathbf{N}) \\ \vdots \\ Z_i^{(j)}(\mathbf{N} + \Delta\mathbf{M}_k) - Z_i^{(j)}(\mathbf{N}) \end{bmatrix} = \mathbf{M}_{k \times \left(\frac{n^2+3n}{2}\right)} \mathbf{P}_{\left(\frac{n^2+3n}{2}\right) \times 1}. \quad (7)$$

余项。

### 2.1 传统的灵敏度矩阵法

对式(1)做一阶展开:

$$Z_i^{(j)}(\mathbf{N} + \Delta\mathbf{M}) = Z_i^{(j)}(\mathbf{N}) + \left[ \sum_{q=1}^n \Delta m_q \frac{\partial}{\partial x_q} \right] Z_i^{(j)}(\mathbf{N}) + R_{N,1}(\Delta\mathbf{M}) \approx Z_i^{(j)}(\mathbf{N}) + \sum_{q=1}^n \Delta m_q \frac{\partial Z_i^{(j)}(\mathbf{N})}{\partial x_q}. \quad (2)$$

将式(2)表示为矩阵形式:

$$\begin{aligned} & \frac{1}{2} \left[ \sum_{q=1}^n \Delta m_q \frac{\partial}{\partial x_q} \right]^2 Z_i^{(j)}(\mathbf{N}) + R_{N,2}(\Delta\mathbf{M}) \approx \\ & Z_i^{(j)}(\mathbf{N}) + \sum_{q=1}^n \Delta m_q \frac{\partial Z_i^{(j)}(\mathbf{N})}{\partial x_q} + \\ & \frac{1}{2} \sum_{q=1}^n \Delta m_q^2 \frac{\partial^2 Z_i^{(j)}(\mathbf{N})}{\partial x_q^2} + \\ & \frac{1}{2} \sum_{\substack{p,q=1 \\ p \neq q}}^n \Delta m_p \Delta m_q \frac{\partial Z_i^{(j)}(\mathbf{N})}{\partial x_p} \frac{\partial Z_i^{(j)}(\mathbf{N})}{\partial x_q}. \quad (4) \end{aligned}$$

利用光线追迹方法,式(4)中的导数值可以用线性拟合值来代替:

$$Z_i^{(j)}(\mathbf{N} + \Delta\mathbf{M}) = Z_i^{(j)}(\mathbf{N}) + \sum_{q=1}^n \Delta m_q b_q + \frac{1}{2} \sum_{q=1}^n \Delta m_q^2 a_{qq} + \frac{1}{2} \sum_{\substack{p,q=1 \\ p \neq q}}^n \Delta m_p \Delta m_q a_{pq}. \quad (5)$$

将式(5)表示为矩阵形式:

在实际装调过程中, $Z_i^{(j)}(\mathbf{N} + \Delta\mathbf{M})$ 为光学检测得到的 Zernike 系数; $Z_i^{(j)}(\mathbf{N})$ 为光学设计残差; $(\mathbf{A}_i^{(j)})_{n \times n}$ 、 $(\mathbf{B}_i^{(j)})_{n \times 1}$ 分别为二次和一次项系数矩阵,都可以由光线追迹手段得到,方法如下:

利用光学设计软件对光学系统模型进行样本容量为  $k$  的随机失调实例分析,即对于每一个  $\Delta\mathbf{M}$ ,都可以利用光线追迹得到对应的  $Z_i^{(j)}(\mathbf{N} + \Delta\mathbf{M})$ ,从而建立关于二次项系数和一次项系数的线性方程组(7),共含  $k$  个方程。

方程组(7)的极小范数最小二乘解为:

$$P(\frac{x^2+3y}{2})_{\times 1} = pinv(M_{k \times (\frac{x^2+3y}{2})}) \times \begin{bmatrix} Z_i^{(j)}(N+\Delta M_1) - Z_i^{(j)}(N) \\ \vdots \\ Z_i^{(j)}(N+\Delta M_k) - Z_i^{(j)}(N) \end{bmatrix}, \quad (8)$$

$pinv(M_{k \times (\frac{x^2+3y}{2})})$  是  $M_{k \times (\frac{x^2+3y}{2})}$  的 M-P 广义逆。

二次项系数和一次项系数得到之后,系统失调量的求解即可转化为由式(6)构成的多元二次方程组的最优解问题。

### 3 改进的灵敏度矩阵法对离轴望远镜的装调分析与计算

#### 3.1 失调望远镜系统的像差特性

待装调的离轴梅逊式卡塞格林望远镜参数如表 1 所示。

表 1 望远镜光学系统参数

Tab. 1 Optical parameters of telescope

光学面	曲率 半径/mm	间隔 /mm	非球面 系数	直径/mm	离轴 量/mm
主镜(光阑)	-7 500	-2 250	$K=-1$	500	-700
折叠镜	Infinity	1 250	0	230	—
次镜	500	Infinity	$K=-1$	40	-46.7
像面	Infinity	—	—	—	—

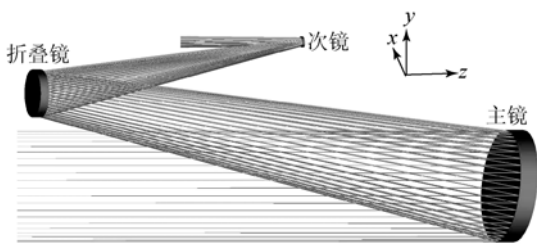


图 1 望远镜的光学结构图  
Fig. 1 Layout of telescope

图 1 所示为该望远镜的光学结构图。该望远镜为光阑离轴系统,全视场角  $2\omega=0.116^\circ$ ,角放大率为 15 倍,全视场内波像差 RMS 设计值优于  $1/100\lambda$ 。

由于主镜公差严、自重大,故将主镜作为整个系统的装调基准。折叠镜无光焦度,仅使用经纬仪就可以将其调整在公差范围内,故仅需研究失调次镜的像差特性及其失调量计算方法。

由于次镜为离轴抛物面镜,所以次镜有 5 个有效的光学自由度:沿  $x, y, z$  轴的偏心和绕  $x, y$  轴的转动,用向量表示:  $\Delta M = [\Delta x, \Delta y, \Delta z, \Delta \alpha, \Delta \beta]$ 。

利用 Code V 和 Matlab 基于 COM 接口通信方法可以方便地分析失调次镜的像差特性。由于望远镜为离轴系统,粗装调时元件的定位误差较大,为保证在失调量较大的情况下本文方法的有效性,故在分析与建模过程中次镜的失调范围设置如表 2 所示:

表 2 次镜的失调范围

Tab. 2 Misaligned range of secondary mirror

$\Delta x/mm$	$\Delta y/mm$	$\Delta z/mm$	$\Delta \alpha/(\circ)$	$\Delta \beta/(\circ)$
$\pm 8$	$\pm 8$	$\pm 8$	$\pm 1.5$	$\pm 1.5$

以轴上视场为例,在表 2 所示的失调范围内,研究次镜在仅有 2 个维度失调的情况下, Zernike 系数随失调量大小的变化形式,得到的分析结果如图 2 所示。图中选取了 5 种典型情况,每种失调量等间距选取 30 个采样点。

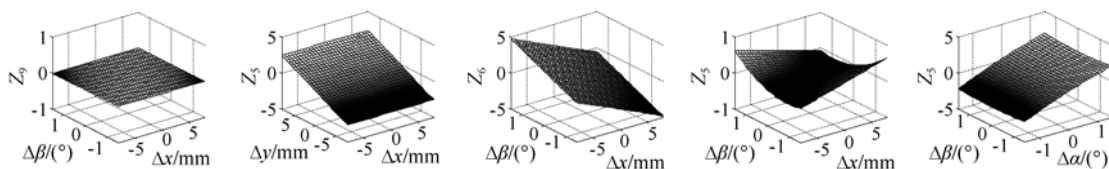


图 2 Zernike 系数随失调量大小的变化形式  
Fig. 2 Zernike coefficients vs misalignment variables

从图 2 中可以得到函数  $Z_i^{(j)}(N+\Delta M)$  在失调区间内是连续平滑函数,可以进行泰勒展开并

利用多项式近似。在两种失调量共同作用的情况下,函数  $Z_i^{(j)}(N+\Delta M)$  表现出了多种形式:2 个变

量均对某一像差系数没有贡献,如  $Z_9$  vs.  $(\Delta x, \Delta\beta)$ ; 一个变量对某一像差系数没有贡献,另一个变量与该像差系数呈线性关系,如  $Z_5$  vs.  $(\Delta x, \Delta y)$ ; 2 个变量与某一像差系数都呈线性关系,如  $Z_6$  vs.  $(\Delta x, \Delta\beta)$ ; 其中一个变量表现出线性关系,而另一个则表现显著的非线性关系,如  $Z_5$  vs.  $(\Delta x, \Delta\beta)$ ; 2 个变量均表现为非线性关系,如  $Z_5$  vs.  $(\Delta\alpha, \Delta\beta)$ , 而 Zernike 系数与失调量之间关系的非线性是灵敏度矩阵模型计算不准确的主要原因之一。系统某一维度的失调量与特定像差系数的函数关系与其他维度的失调量数值有着密切关系。例如图 2(d) 中,  $Z_5$  与  $\Delta\beta$  的函数关系随  $\Delta x$  取值不同而发生变化, 当  $\Delta x = -8$  mm 时,  $Z_5$  在失调区间内随  $\Delta\beta$  基本呈单调递减变化; 当  $\Delta x = 8$  mm 时,  $Z_5$  在失调区间内随  $\Delta\beta$  基本呈单调递增变化, 这就会导致相应的灵敏度系数符号发生改变。故当系统失调量比较大的情况下, 失调状态与理想状态下的灵敏度矩阵差异可能非常大, 而灵敏度矩阵方法依然采用理想状态下得到的灵敏度系数来计算失调量, 因此会导致方程求解收敛缓慢, 或者无法得到准确的解。

### 3.2 改进的灵敏度矩阵法模型建立

建立模型的首要任务是利用光学设计软件对系统模型进行随机失调实例分析, 收集足够多的样本数据。样本数据应该尽可能的丰富和多样, 才能获得高精度的近似模型来真实地反映失调状

态下望远镜的像差特性。但增加样本容量会同时增加计算时间。综合考虑以上因素, 选择 30 000 个样本用于建立改进的灵敏度矩阵模型, 这样可将模型建立时间控制在 2 h 以内。

对于两镜系统, 次镜围绕零彗差点的旋转只会引入与视场成线性比例的像散, 而不会引入彗差<sup>[13]</sup>, 所以装调过程中应该对系统做多个视场的检测, 同时模型的建立也需要考虑多个视场, 仿真分析及实际装调检测过程采用的视场依次是:  $F(0, 0)$ 、 $F(0.058^\circ, 0)$ 、 $F(0, 0.058^\circ)$ 、 $F(-0.058^\circ, 0)$ 、 $F(0, -0.058^\circ)$ 。

光学系统在失调状态下主要产生初级像差。对于无焦系统, 出射光束的平行度是一项重要指标, 所以装调时还要考虑离焦像差, 故建模与计算采用 Fringe Zernike 系数  $Z_4$  到  $Z_9$  项。

利用 Matlab 在表 2 所示的失调范围内, 按照均匀分布产生各失调量的随机分布样本, 每个样本模型对应一个实际失调状态。通过光线追迹, 即可得到 5 个视场下每一组失调量  $\Delta\mathbf{M}$  对应的  $Z_i^{(j)}(N + \Delta\mathbf{M})$ , 同时也可以得到设计状态下的  $Z_i^{(j)}(N)$ 。根据二次和一次项系数矩阵计算方法, 可建立关于次镜失调量的多元二次方程组:

$$Z_i^{(j)}(N + \Delta\mathbf{M}) = \Delta\mathbf{M} \cdot (\mathbf{A}_i^{(j)})_{5 \times 5} \cdot \Delta\mathbf{M}^T + \Delta\mathbf{M} \cdot (\mathbf{B}_i^{(j)})_{5 \times 1} + Z_i^{(j)}(N), \quad (8)$$

其中:  $4 \leq i \leq 9; 1 \leq j \leq 5$ 。

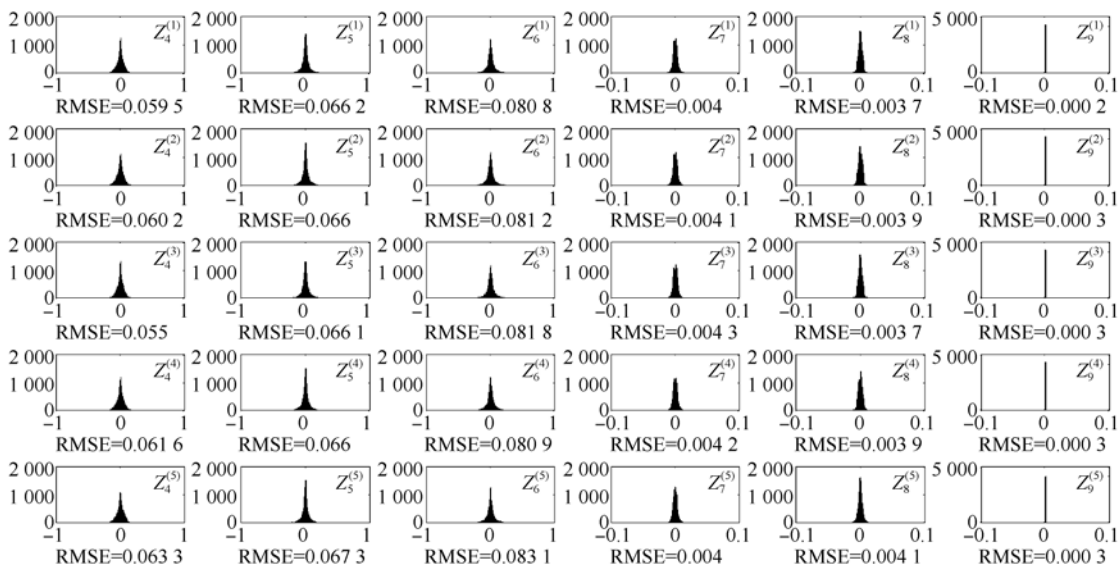


图 3 改进模型的计算误差

Fig. 3 Calculation errors of modified model

为了验证模型的近似精度,利用 Matlab 重新随机生成 10 000 组失调量向量  $\Delta\mathbf{M}$ ,代入由式(8)构成的方程组中,以光线追迹的结果为真值,统计模型的计算误差。图 3 所示为拟合误差频数直方图,给出了相应 Zernike 系数的拟合均方根误差(RMSE),图中横轴表示拟合误差,纵轴表示频数。

为了说明改进方法在模型近似精度上优于传统灵敏度矩阵法,使用之前的 30 000 个样本建立

灵敏度矩阵模型,利用之前重新生成的 10 000 组失调量验证模型的近似精度,图 4 所示为传统模型的计算误差分布情况。

由图 3、图 4 可知,改进的灵敏度矩阵模型的近似精度要大幅优于传统模型。分别采用改进方法和传统方法来进行仿真装调实验,进一步比较两种方法的装调效果。

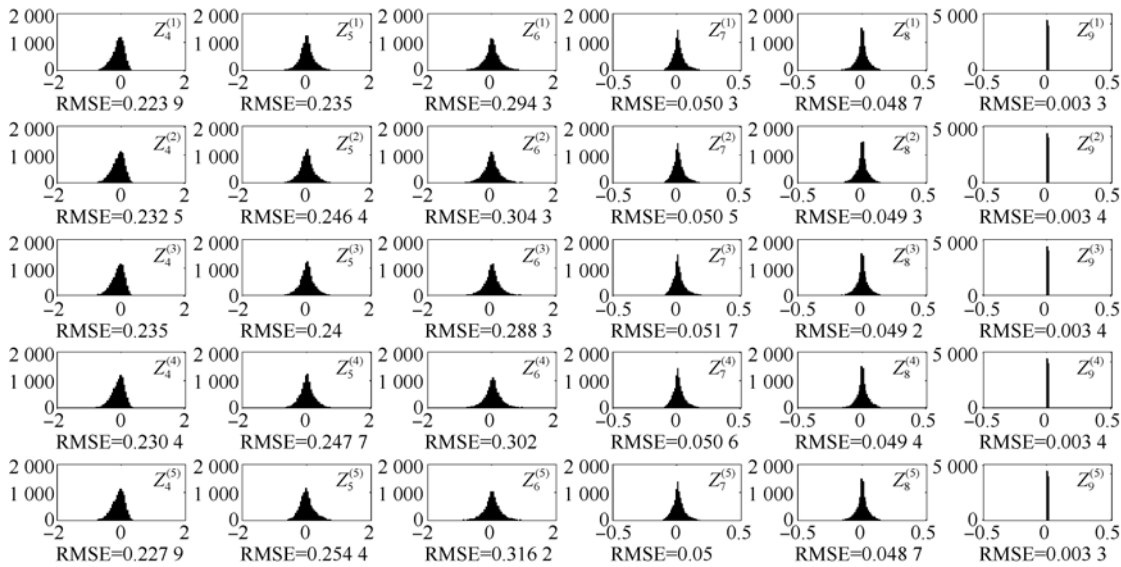


图 4 传统模型的计算误差

Fig. 4 Calculation errors of conventional model

### 3.3 望远镜仿真装调实验

利用光学设计软件,对望远镜装调进行模拟:在表 2 所示的区间内按均匀分布随机生成 500 组失调量,作为失调量的真实值。将这些失调量分别输入到光学设计软件中,计算出每一组失调量对应的出瞳面波像差,以此作为实际装调中干涉检测获取的波前误差数据。分别利用改进方法和

传统方法,根据 Zernike 系数计算失调量,通过失调量的计算值与真实值的比对,验证两种方法的装调效果。改进的灵敏度矩阵法和传统方法的计算结果分别如图 5、图 6 所示,图中直线  $y=x$  上的点表示失调量的计算值与真实值相等的理想情况,表 3 为两种方法的计算均方根误差。

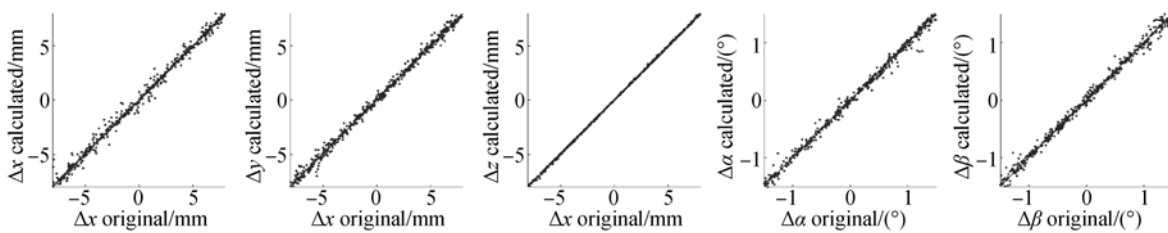


图 5 改进的灵敏度矩阵法得到的失调量计算值与真实值比较

Fig. 5 Comparison of calculated value and true value for each misalignment variable with modified sensitivity matrix method

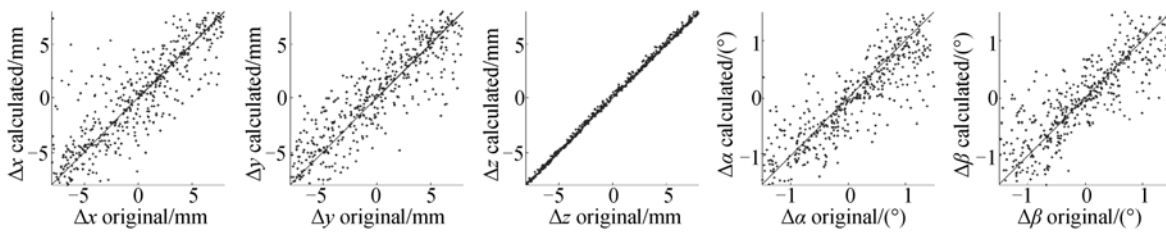


图 6 传统的灵敏度矩阵法得到的失调量计算值与真实值比较

Fig. 6 Comparison of calculated value and true value for each misalignment variable with conventional sensitivity matrix method

表 3 改进方法与传统方法的计算均方根误差

Tab. 3 Root mean square errors of calculations obtained with modified and conventional methods

失调量	$\Delta x/\text{mm}$	$\Delta y/\text{mm}$	$\Delta z/\text{mm}$	$\Delta\alpha/(\text{^\circ})$	$\Delta\beta/(\text{^\circ})$
改进方法计算均方根误差	0.404	0.323	0.047	0.064	0.065
传统方法计算均方根误差	2.689	2.494	0.194	0.500	0.525

根据上面分析可知,灵敏度矩阵方法在系统失调量较大的情况下失效,计算结果与真实值相比偏离较大,难以用于实际装调。而本文方法计算精度明显提高,同时也拥有较高的计算速度:给定一组波前数据,仅需 1~2 s 即可计算出对应的系统失调量。

#### 4 实际装调过程与结果

望远镜的装调工作可以分为两步进行:(1)主镜旋转对称轴及折转镜角度的标定;(2)次镜的调整。实际装调布局如图 7 所示。

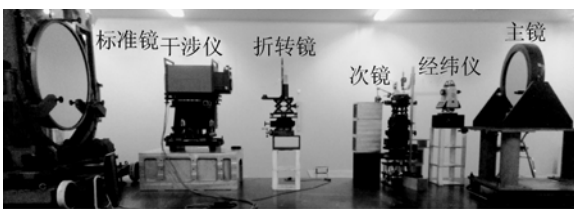


图 7 实际装调布局

Fig. 7 Layout of actual alignment

本文研究的望远镜属于光阑离轴系统,主镜的旋转对称轴与系统光轴重合,故必须先标定主镜的旋转对称轴来作为轴上视场波像差的检测基准。

利用标准平面镜构建主镜的零位干涉检测光路,由于对于单个抛物面反射镜来讲,只有轴上视场才能做到无像差成像,轴外视场成像存在像散和彗差,所以通过调整标准镜的俯仰与扭摆,使检测得到的波像差达到最小,即可精确地标定系统光轴。然后利用经纬仪标定折转镜使其与标准镜平行。次镜的装调过程中,通过调整干涉仪,使其出射光束与标准镜垂直,可以检测系统轴上视场的波像差;通过调整标准镜的俯仰与扭摆,同时相应调整干涉仪的俯仰与扭摆,可以检测轴外视场的波像差。经过粗装调后,系统 5 个视场的波像差检测结果如表 4 所示。

表 4 失调状态下 5 个视场的波像差检测结果

Tab. 4 Testing results of wave aberration in 5 FOVs with misaligned mirror

$F(0,0)$	$F(0.058^\circ,0)$	$F(0,0.058^\circ)$	$F(-0.058^\circ,0)$	$F(0,-0.058^\circ)$
PV 2.028 wave rms 0.387 wave Power 0.519 wave	PV 2.016 wave rms 0.393 wave Power 0.541 wave	PV 2.182 wave rms 0.447 wave Power 0.772 wave	PV 2.181 wave rms 0.394 wave Power 0.434 wave	PV 1.964 wave rms 0.397 wave Power 0.609 wave

由于光学设计软件与实际干涉检测获取波面的坐标基准不同,干涉图还需进行旋转及镜像处理,根据处理后的 Zernike 系数利用改进的灵敏度矩阵法计算次镜失调量,计算结果如表 5 所示。

表 5 次镜失调量计算结果

Tab. 5 Misalignment calculation results of secondary mirror

失调量	$\Delta x/\text{mm}$	$\Delta y/\text{mm}$	$\Delta z/\text{mm}$	$\Delta\alpha/(\text{^\circ})$	$\Delta\beta/(\text{^\circ})$
计算值	0.984	-3.246	0.586	0.192	-0.060

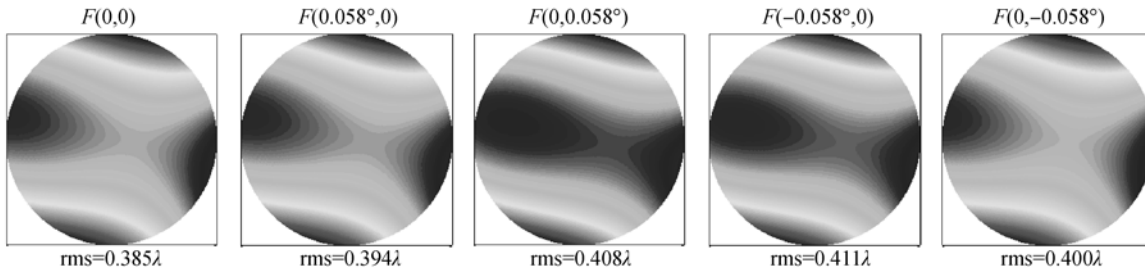


图 8 根据次镜失调量的计算值得到的波前结果

Fig. 8 Wavefront results obtained by misalignment calculation results of secondary mirror

将计算出的失调量带入到光学设计软件中进行验证,得到的波前结果如图 8 所示,Zernike 系

数的实际装调检测结果与计算所得结果如表 6 所示。

表 6 Zernike 系数的计算结果和检测结果比较

Tab. 6 Comparison of calculation results and testing results of Zernike coefficients

		$F(0,0)$	$F(0.058^\circ,0)$	$F(0,0.058^\circ)$	$F(-0.058^\circ,0)$	$F(0,-0.058^\circ)$
$Z_4$	检测结果	0.263	0.274	0.380	0.232	0.310
	计算结果	0.248	0.267	0.357	0.328	0.237
	误差	-0.015	-0.007	-0.023	0.096	-0.073
$Z_5$	检测结果	-0.760	-0.767	-0.826	-0.834	-0.779
	计算结果	-0.783	-0.794	-0.767	-0.779	-0.804
	误差	-0.023	-0.027	0.059	0.055	-0.025
$Z_6$	检测结果	0.434	0.424	0.485	0.309	0.367
	计算结果	0.399	0.421	0.411	0.382	0.390
	误差	-0.035	-0.003	-0.074	0.073	0.023
$Z_7$	检测结果	-0.055	-0.098	-0.122	-0.120	-0.088
	计算结果	-0.096	-0.095	-0.096	-0.098	-0.095
	误差	-0.041	0.003	0.026	0.022	-0.007
$Z_8$	检测结果	0.056	0.090	0.095	0.160	0.052
	计算结果	0.047	0.050	0.048	0.045	0.047
	误差	-0.009	-0.040	-0.047	-0.115	-0.005
$Z_9$	检测结果	-0.015	-0.016	0.028	0.001	-0.007
	计算结果	-0.001	-0.001	-0.001	-0.001	-0.001
	误差	0.014	0.015	-0.029	-0.002	0.006

结合表6,从表4与图8比较来看,改进的灵敏度矩阵法计算出的失调状态波前与实际检测波前符合良好,说明了计算结果的正确性。

在实际的装调环境下,会有一些因素(气流扰动、振动、视场检测误差等)影响波前检测精度。这些误差源都会导致干涉仪获取的 Zernike 系数不准确,从而增加失调量的解算误差;调整机构各

维度之间存在运动关联以及调整精度也会影响计算机辅助装调的效果,故在实验中需要进行多次迭代调整。参考文献[14]中的调整机构运动关联解耦方法,经过几次调整后,系统波像差的检测结果如表7所示,最终获得了系统轴上视场波像差为 $0.056\lambda$ ,轴外视场波像差均小于 $0.1\lambda$ 的良好装调结果。

表7 调整完成后5个视场的波像差检测结果

Tab.7 Testing results of wave aberration in 5 FOVs after alignment

$F(0,0)$	$F(0.058^\circ,0)$	$F(0,0.058^\circ)$	$F(-0.058^\circ,0)$	$F(0,-0.058^\circ)$
PV 0.348 wave rms 0.056 wave Power 0.044 wave	PV 0.512 wave rms 0.094 wave Power 0.203 wave	PV 0.593 wave rms 0.066 wave Power 0.028 wave	PV 0.403 wave rms 0.063 wave Power 0.093 wave	PV 0.366 wave rms 0.062 wave Power 0.073 wave

## 5 结论

本文提出了改进的灵敏度矩阵法,通过在传统模型中加入二次项,提高了模型的计算精度。分别利用传统方法和改进方法对一个离轴望远镜进行了装调分析与计算,分析了次镜失调状态下望远镜的像差特性。500次的仿真装调实验结果显示,在次镜偏心 $\pm 8\text{ mm}$ 、倾斜 $\pm 1.5^\circ$ 的失调范围

内,传统方法计算得到的次镜  $x$ 、 $y$ 、 $z$  偏心量和  $\alpha$ 、 $\beta$  倾斜量的均方根误差分别是:2.689 mm, 2.494 mm, 0.194 mm 和  $0.500^\circ$ 、 $0.525^\circ$ ;而改进方法对应的计算结果分别是:0.404 mm, 0.323 mm, 0.047 mm 和  $0.064^\circ$ 、 $0.065^\circ$ ,失调量的计算精度大幅提高。最终采用改进方法对望远镜进行了实际装调,得到了轴上视场波像差为 $0.056\lambda$ 、轴外视场波像差均小于 $0.1\lambda$ 的良好装调结果,进一步说明了本文方法的实用价值。

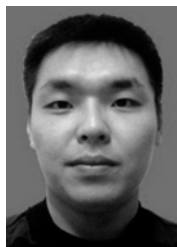
## 参考文献:

- [1] EGDALL I M. Manufacture of a three-mirror wide-field optical system [J]. *Opt. Eng.*, 1985, 24(2): 285-289.
- [2] 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, 2004.  
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 Science, 2004. (in Chinese)
- [3] 巩盾, 田铁印, 王红. 利用 Zernike 系数对离轴三反射系统进行计算机辅助装调[J]. *光学精密工程*, 2010, 18(8): 1754-1759.

- GONG D, TIAN T Y, WANG H. Computer aided alignment of off-axis three mirror system by using Zernike coefficients [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2010, 18(8): 1754-1759. (in Chinese)
- [4] HVISC A M, BURGE J H. Alignment analysis of four-mirror spherical aberration correctors [C]. *SPIE Astronomical Telescopes + Instrumentation. International Society for Optics and Photonics*, 2008: 701819-701819-12.
- [5] 孙敬伟, 吕天宇, 姚丽双, 等. 发射望远镜的设计与装调[J]. *光学精密工程*, 2014, 22(2): 369-375.  
SUN J W, LV T Y, YAO L SH, et al.. Design and assembly of transmitter-telescope [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2014, 22(2): 369-375. (in Chinese)
- [6] 赵阳, 巩岩. 投影物镜小比率模型的计算机辅助装调[J]. *中国光学*, 2012, 5(4): 394-400.

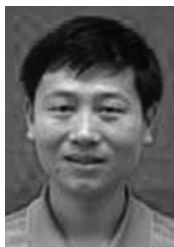
- ZHAO Y, GONG Y. Computer aided alignment of small scale projected objective [J]. *Chinese Journal of Optics and Applied Optics*, 2012, 5(4):394-400. (in Chinese)
- [7] KIM S, YANG H S, LEE Y W, *et al.*. Merit function regression method for efficient alignment control of two-mirror optical systems [J]. *Optics Express*, 2007, 15(8):5059-5068.
- [8] THOMPSON K P. *Aberration fields in tilted and decentered optical systems* [D]. Arizona: The University of Arizona, 1980.
- [9] 史广维. 基于矢量波像差理论的反射望远镜系统装调研究[D]. 长春: 中国科学院长春光学精密机械与物理研究所, 2011.
- SHI G W. *Study of reflective telescopes alignment based on vector wavefront aberration* [D]. Changchun: Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Science, 2011. (in Chinese)
- [10] LEE H, DALTON G B, TOSH I A J, *et al.*. Computer-guided alignment II: Optical system alignment using differential wavefront sampling [J]. *Optics Express*, 2007, 15(23):15424-15437.
- [11] OTEO E, ARASA J. New strategy for misalignment calculation in optical systems using artificial neural networks [J]. *Optical Engineering*, 2013, 52(7):074105-074105.
- [12] 王钰, 张新, 王灵杰, 等. 基于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.
- WANG Y, ZHANG X, WANG L J, *et al.*. Free-form optical system alignment based on artificial neural networks [J]. *Acta Optica Sinica*, 2013, 33(12):1211001. (in Chinese)
- [13] MANUEL A M. *Field-dependent aberrations for misaligned reflective optical systems* [D]. Arizona: The University of Arizona, 2009.
- [14] 顾志远, 颜昌翔, 胡春晖, 等. 光学系统计算机辅助装调的坐标基准过渡方法[J]. *光学学报*, 2014, 34(3):0322003.
- GU ZH Y, YAN CH X, HU CH H, *et al.*. Coordinate datum transition method for optical system computer-aided alignment [J]. *Acta Optica Sinica*, 2014, 34(3):0322003. (in Chinese)

#### 作者简介:



顾志远(1986—),男,辽宁丹东人,博士研究生,2009年于大连理工大学获得学士学位,主要从事光学系统设计与装调方面的研究。E-mail: zhiyuangu@gmail.com

#### 导师简介:



颜昌翔(1973—),男,湖北洪湖人,研究员,2001年于中国科学院长春光学精密机械与物理研究所获博士学位,主要从事空间光学遥感技术方面的研究。E-mail: yanxc@ciomp.ac.cn

(版权所有 未经许可 不得转载)