

## 基于星点图椭圆度分布的光学系统装配误差计算方法

吴 伟<sup>1,2</sup>, 罗自荣<sup>1</sup>, 杨慧哲<sup>2</sup>, 曹玉君<sup>3</sup>, 尚建忠<sup>1</sup>

1. 国防科技大学 智能科学学院, 湖南 长沙 410073;
2. 国防科技大学 前沿交叉学科学院, 湖南 长沙 410073;
3. 湖南交通工程学院 高科技研究院, 湖南 衡阳 421001)

**摘要:** 计算机辅助装调技术的出现大大降低了光学系统装调的难度,但是目前提出的大部分装配误差计算方法都基于波像差系数,在应用过程中还需要额外的波前传感器。基于星点图在不同视场中的椭圆度分布,提出了一种不依赖于波前传感器的装配误差计算方法,该方法只需要 CCD 或 CMOS 等图像传感器即可实现光学系统的装配误差计算。基于矢量像差理论推导了该方法的理论基础,采用椭圆度参数量化了装配误差对星点图的影响规律,揭示了椭圆度分布与装配误差之间的非线性函数关系,在此基础上,以多视场下的星点图椭圆度分布为优化目标,将光学系统的装配误差求解问题转化成多目标优化问题,可通过智能优化算法进行求解。以 Hilbert 两反式光学系统为例,基于三个视场的椭圆度分布计算次镜的四个侧向装配误差,仿真结果表明该方法的计算精度可达微米级,满足实际装调需求,验证了该方法的正确性,对促进计算机辅助装调技术的工程化应用具有重要意义。

**关键词:** 计算机辅助装调; 装配误差计算; 星点图; 椭圆度

**中图分类号:** TH743      **文献标志码:** A      **DOI:** 10.3788/IRLA20210391

## Misalignments calculation method for optical systems based on the ellipticity distribution of stellar image

Wu Wei<sup>1,2</sup>, Luo Zirong<sup>1</sup>, Yang Huizhe<sup>2</sup>, Cao Yujun<sup>3</sup>, Shang Jianzhong<sup>1</sup>

1. College of Intelligence and Science, National University of Defense Technology, Changsha 410073, China;
2. College of Advanced Interdisciplinary Research, National University of Defense Technology, Changsha 410073, China;
3. Academy of Hi-Tech Research, Hunan Institute of Traffic Engineering, Hengyang 421001, China)

**Abstract:** Computer aided alignment (CAA) plays an important role in the assembly of optical systems. However, most proposed CAA methods are based on wavefront aberrations, which need the aid of an additional high precision wavefront sensor (WFS). Based on the ellipticity distribution of stellar image in different fields of view (FOVs), a misalignments calculation method for aligning optical systems efficiently without WFSs was proposed, which only needed an image sensor such as CCD/CMOS. Based on the nodal aberration theory, the theoretical basis of the proposed method was introduced and the ellipticity distribution of stellar image under the effect of misalignments and FOVs was analyzed, which revealed the essence of the proposed method. The ellipticity distribution could be expressed as a function of misalignments, just like the wavefront aberrations. Based on those, the process of misalignments calculation for optical systems was established and it turned to be a

收稿日期:2021-06-15; 修订日期:2021-07-19

基金项目:国家自然科学基金(51675527); 湖南省自然科学基金(2020JJ4279)

作者简介:吴伟,男,博士生,主要从事计算机辅助装调方面的研究。

导师简介:尚建忠,男,教授,博士生导师,博士,主要从事智能机械与数字化设计方面的研究。

multi-objective optimization problem which could be solved by optimization algorithms. The method was tested in Hilbert telescope, which was a typical two-mirror optical system, and four lateral misalignments were used to be calculated according to the ellipticity distribution in three FOVs. The simulation results show that the precision of misalignments calculation can reach up to micron level and verify the correctness of the proposed method, which can promote the application of CAA and provide new insights for non-WFS optical alignment.

**Key words:** computer aided alignment; misalignments calculation; stellar image; ellipticity

## 0 引言

自计算机辅助装调 (computer aided alignment, CAA) 技术提出以来, 光学系统的装调过程变得越来越高效化和数字化。在过去的几十年, 为了提高光学系统的装配性能和装调效率, 研究人员提出了多种 CAA 方法, 如敏感度矩阵法<sup>[1]</sup>、逆向优化法<sup>[2]</sup>、神经网络法<sup>[3]</sup>以及基于矢量像差理论的解析计算方法<sup>[4]</sup>等。但是, 上述方法都是基于装配误差和波像差系数之间的数值或解析关系进行求解。例如: 敏感度矩阵法<sup>[1]</sup>是基于失调量与波像差系数之间的近似线性关系; 逆向优化法<sup>[2]</sup>通过在光学设计软件中建立以泽尼克系数为目标的优化函数, 采用软件内置的最小二乘算法不断优化该函数值进而得到装配误差; 神经网络法<sup>[3]</sup>则是通过建立装配误差与波像差系数之间的人工神经网络模型, 从而预测装配误差状态, 其预测精度完全取决于所建立的模型精度; 即使是近几年发展起来的矢量像差理论法<sup>[4]</sup>, 可以解析地描述装配误差、面形误差和波像差系数之间的函数关系, 也必须测量不同视场中的波像差系数。上述所有方法在实际应用过程中还需要额外的波前传感器以获取波像差系数, 从而指导装调, 不利于计算机辅助装调技术的工程化应用, 在无波前传感器的光学系统中使用十分受限。

因此, 部分学者开始研究不依赖波前传感器的 CAA 方法: Oteo 等人<sup>[5]</sup>提出了一种基于点扩散函数 (point spread function, PSF) 质心位置信息的装配误差计算方法, 并对某透射式光学系统进行了仿真验证; 孙敬伟等人<sup>[6]</sup>通过研究装配误差与离焦星点图外轮廓之间的关系, 提出了适用于 RC 望远镜的装调方法; 李敏等人<sup>[7]</sup>提出了一种直接基于成像清晰度函数的望远镜在线校正方法, 并通过实验进行了验证, Ju 等人<sup>[8]</sup>通过研究彗差和像散对 PSF 几何特征的影响规律, 也提出一种基于图像的波前传感方法, 可应用于子镜拼接光学系统的装调过程。

随着智能制造领域的快速发展以及国家的战略需求, 对装调手段的工程化应用提出了越来越高的要求, 传统依赖波像差的装调方式逐渐成为 CAA 技术工程化应用的瓶颈, 亟待更加高效易行的方法。在光学检测中, 有一种快速、可靠且灵敏度高的装配误差检测方法——星点检验法, 但是实际操作过程中的效率和效果与检测人员的经验直接相关。基于此, 文中基于矢量像差理论推导了星点图与装配误差之间的非线性函数方程, 并以椭圆度参数为特征指标, 替代人工经验, 量化装配误差对椭圆度的影响规律, 提出一种基于椭圆度分布的 CAA 方法, 该方法直接基于 CCD 或 CMOS 等图像传感器获取星点图像, 无需测量光学系统的波像差, 具有较强的工程应用价值。

## 1 理论分析

### 1.1 星点图与装配误差的理论模型

Shack 通过引入矢量乘法的概念, 将 Hopkins 建立的旋转轴对称光学系统的波像差标量形式改为矢量形式, 如公式 (1) 所示, 奠定了矢量像差理论的基础<sup>[9]</sup>。

$$W = \sum_j \sum_{p=0}^{\infty} \sum_{n=0}^{\infty} \sum_{m=0}^{\infty} (W_{klm})_j (\vec{H} \cdot \vec{H})^p (\vec{\rho} \cdot \vec{\rho})^n (\vec{H} \cdot \vec{\rho})^m \quad (1)$$

式中:  $k = 2p + m$ ;  $l = 2n + m$ ;  $\vec{H}$  表示像面上归一化的视场矢量;  $\vec{\rho}$  表示归一化的光瞳矢量; 如图 1 所示,  $(W_{klm})_j$  表示第  $j$  个表面上对应的像差系数。

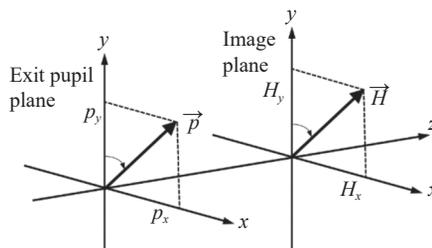


图 1 光瞳矢量和视场矢量的示意图

Fig.1 Conventions for the pupil vector and field vector

Thompson<sup>[9]</sup>通过总结 Shack 和 Hopkins 的工作,发现对于失调的光学系统,并没有增加新的像差类型,而是系统的像差场特性发生了改变,在视场矢量中应该引入一个额外的偏心向量 $\vec{\sigma}_j$ ,从而得到失调光学系统的波像差矢量形式,如公式(2)所示,并将矢量像差理论推往新的高度。

$$W = \sum_j \sum_{p=0}^{\infty} \sum_{n=0}^{\infty} \sum_{m=0}^{\infty} (W_{klm})_j \left( (\vec{H} - \vec{\sigma}_j) \cdot (\vec{H} - \vec{\sigma}_j) \right)^p \left( \vec{\rho} \cdot \vec{\rho} \right)^n \left( (\vec{H} - \vec{\sigma}_j) \cdot \vec{\rho} \right)^m \quad (2)$$

式中: $\vec{\sigma}_j$ 表示第  $j$  个表面由于失调引入的视场偏心矢量。

基于公式(2)可以解析地分析装配误差对波像差系数的影响规律,部分学者致力于求解这一方程,从而针对不同的光学系统提出了相应的失调量解析计算方法。文中并不直接求解该方程,而是将装配误差的计算问题视为一个黑匣子,若失调系统中存在  $m$  个装配误差,则任意视场下的波像差可以表示为:

$$W = W(\delta_1, \delta_2, \dots, \delta_m, H_x, H_y) \quad (3)$$

式中: $(\delta_1, \delta_2, \dots, \delta_m)$ 表示待求的  $m$  个装配误差; $(H_x, H_y)$ 表示对应的视场。

进一步,可以推导得到光学系统失调状态下基于波像差的 PSF 方程<sup>[10]</sup>,如公式(4)所示:

$$PSF = \frac{1}{\pi} \iint_{(\rho_x, \rho_y)} A(\rho_x, \rho_y) \exp[jW(\delta_1, \delta_2, \dots, \delta_m, H_x, H_y)] \times \exp[i(\rho_x^2 + \rho_y^2)f] \exp[i2\pi(H_x\rho_x + H_y\rho_y)] d\rho_x d\rho_y \quad (4)$$

式中: $A(\rho_x, \rho_y)$ 表示出瞳面上的幅值函数; $\rho_x, \rho_y$ 分别表示光瞳矢量沿  $x$  轴和  $y$  轴的分量。

PSF 的实测结果即为星点图,由公式(4)可以看出,星点图直接受到装配误差的影响,因此,对于经验丰富的装调人员可以直接根据星点图来评估系统的装配误差。以某两反式光学系统为例,模拟理想情况和存在不同装配误差情况下星点图像的变化,如图2所示。

由图2可以看出,由于装配误差的存在,星点图像发生严重退化,其形状和方向与装配误差存在一定的函数关系,这也是光学检测中星点检测法的依据,技师凭借个人经验并根据星点图的特征判断装配误差的类型和大小,从而指导装调。联立公式(3)、(4)可以简化得到星点图与装配误差和视场的非线性

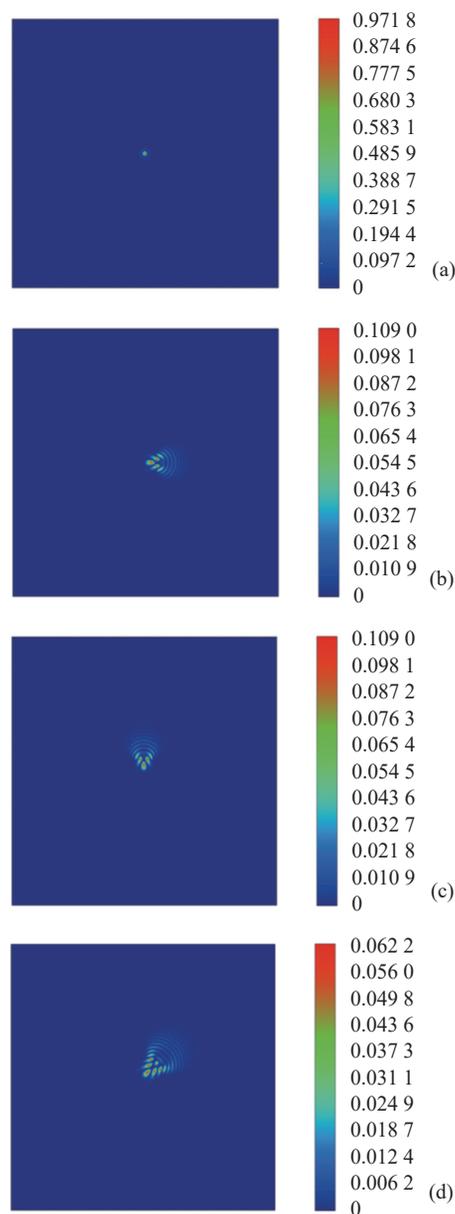


图2 不同装配误差下的星点图。(a)理想情况下;(b)存在  $x$  向装配误差;(c)存在  $y$  向装配误差;(d)同时存在  $x$  向和  $y$  向装配误差

Fig.2 Stellar images for different assembly errors. (a) Without misalignments, and with misalignment in (b)  $x$  direction; (c)  $y$  direction and (d)  $x$  &  $y$  direction

函数,如公式(5)所示:

$$PSF = f(\delta_1, \delta_2, \dots, \delta_m, H_x, H_y) \quad (5)$$

### 1.2 星点图的特征参数:椭圆度

直接求解多元非线性方程(5)无疑是一件耗费时间和精力的工作,受逆向优化法<sup>[2]</sup>的启发,可以通过确定星点图的特征参数,从而量化装配误差的影响,如泽尼克系数是波像差的特征参数一样,进而可以根

据该特征参数指导装调。实际上,星点图像探测已经是天文观测中的一项重要工作,已有数个模型计算星点图像的特征参数来量化分析温变、重力、振动等因素对星点图像的影响,目前最常用的方法是 Kaiser-Squire-Broadhurst (KSB+) 模型<sup>[11]</sup>,可以降低测量噪声对星点检测的影响,文中采用该模型计算星点图的特征参数,如公式 (6) 所示:

$$\begin{cases} Q_{ij} = \iint \text{Weight}(\theta_1, \theta_2) \text{PSF}(\theta_1, \theta_2) \hat{\theta}_i \hat{\theta}_j d\theta_1 d\theta_2 \\ e_1 = Q_{11}/T, e_2 = Q_{22}/T \\ i, j = 1, 2 \end{cases} \quad (6)$$

其中

$$\begin{cases} \hat{\theta}_1 = \theta_1 - \bar{\theta}_1, \bar{\theta}_1 = \iint \text{PSF}(\theta_1, \theta_2) \theta_1 d\theta_1 d\theta_2 \\ \hat{\theta}_2 = \theta_2 - \bar{\theta}_2, \bar{\theta}_2 = \iint \text{PSF}(\theta_1, \theta_2) \theta_2 d\theta_1 d\theta_2 \\ Q_1 \equiv Q_{11} - Q_{22}, Q_2 \equiv 2Q_{12} \\ T \equiv Q_{11} + Q_{22} \end{cases} \quad (7)$$

式中:  $\text{PSF}(\theta_1, \theta_2)$  表示图像传感器采集的星点图;  $\theta_1, \theta_2$  表示星点图的二维坐标变量;  $\text{Weight}(\theta_1, \theta_2)$  表示二维高斯权重函数;  $e_1$  和  $e_2$  分别表示计算得到的两个椭圆度参数。

因此,基于 KSB+模型,星点图的特征参数可以用两个椭圆度分量  $e_1$  和  $e_2$  来描述,这两个椭圆度分量是望远镜探测重力透镜效应影响下的星点图的重要参数,在文中用于评估和计算装配误差的影响。

### 1.3 基于椭圆度分布的装配误差计算方法

基于椭圆度分布参数  $e_1$  和  $e_2$  建立优化函数 (merit function, MF), 如公式 (8) 所示,从而将装配误差计算问题转换成多目标优化问题,可通过智能优化算法进行求解。装配误差的计算过程如图 3 所示,其中  $f_1 \sim f_k$  分别表示选择的第一个视场至第  $k$  个视场。针对多目标优化求解问题,目前已经提出了多种智能优化算法,如遗传算法、模拟退火算法、蚁群算法和粒子群算法等。

$$MF = \frac{\sum W_i (V_i - T_i)^2}{\sum W_i} \quad (8)$$

式中:  $V_i$  和  $T_i$  分别表示当前的和目标的椭圆度分布参数;  $W_i$  表示权重因子。

具体计算过程如下:

(1) 获取目标椭圆度分布。对于失调的光学系统,将待求解的  $m$  个装配误差组合设为  $(\delta_{11}, \delta_{12}, \dots, \delta_{1m})$ ,

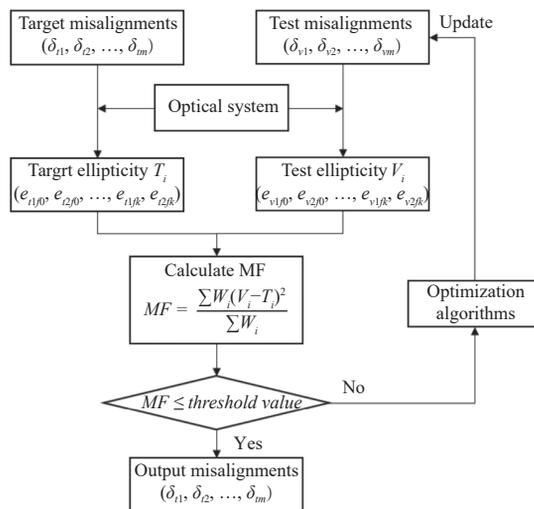


图 3 装配误差计算流程图

Fig.3 Flow chart of misalignment calculation

测量失调光学系统在  $k$  个不同视场下的星点图,基于 KSB+模型计算得到实际的椭圆度分布  $(e_{1f1}, e_{2f1}, \dots, e_{1fk}, e_{2fk})$ ,即为优化函数中的目标值;

(2) 获取测试的椭圆度分布。随机生成装配误差种子  $(\delta_{v1}, \delta_{v2}, \dots, \delta_{vm})$ ,并将其代入到待装调系统的光学设计模型中,进而获取该失调状态下的星点图,从而计算得到当前状态下的椭圆度分布  $(e_{v1f1}, e_{v2f1}, \dots, e_{v1fk}, e_{v2fk})$ ,即为优化函数中的当前值;

(3) 计算评价优化函数 MF 值。考虑到各个视场的椭圆度分量比重相同,将权重因子都设置为 1,并根据公式 (8) 计算 MF 值;

(4) 比较 MF 值和阈值的大小。若 MF 值大于阈值,则根据智能优化算法更新装配误差种子,并返回到步骤 (2), 否则执行下一步;

(5) 输出当前的装配误差种子即为待求的装配误差  $(\delta_{s1}, \delta_{s2}, \dots, \delta_{sm})$ 。

## 2 失调光学系统的椭圆度分布特点

分析失调光学系统星点图的椭圆度在不同装配误差和不同视场中的分布规律,以揭示该方法的本质和可行性,以 Hilbert 两反式望远镜为对象,研究装配误差和视场对系统椭圆度分布的影响。

### 2.1 Hilbert 光学系统

Hilbert 望远镜为典型的两反式光学系统,其主镜 (PM) 和次镜 (SM) 均采用双曲面型,在设计阶段能够实现对三阶球差和三阶彗差的校正。光学设计参

数如表 1 所示,系统口径为 304.8 mm,  $F$  数为 8.59, 全视场角为  $\pm 0.15^\circ$ , 系统布局如图 4 所示。

表 1 Hilbert 光学系统的设计参数

Tab.1 Design parameters for the Hilbert optical system

Surface	Conic	Radius/mm	Thickness/mm	Semi-Diameter/mm
PM	-1.06	-1 291.2	-485.5	152.4
SM	-3.309 5	-425	649.2	40

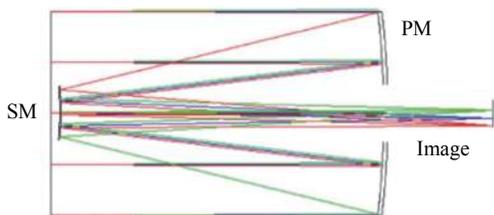


图 4 Hilbert 光学系统的布局图

Fig.4 Optical layout of Hilbert optical system

在装调过程中,由于主镜体积较大,常作为装调基准,对次镜进行装配调整,需要准确获取次镜的装配误差,而次镜轴向误差不是装调难点,因此文中以次镜的侧向失调误差为例进行分析,定义为 XDE/YDE 和 ADE/BDE,分别表示次镜绕  $x/y$  轴的偏心和倾斜。

2.2 装配误差对椭圆度的影响

为了分析不同装配误差对椭圆度分量的影响,文中基于 Zemax 光学设计软件模拟次镜的侧向失调,从而获取不同装配误差状态下的星点图像,并计算出相应的椭圆度分量。分别设置四组不同的失调状态,如表 2 所示。

表 2 引入的四种失调状态案例情况

Tab.2 Four cases of introduced misalignment status

Type	XDE/mm	YDE/mm	ADE/(°)	BDE/(°)
Case 1	[-0.50 +0.50]	0	0	0
Case 2	0	0	[-0.50 +0.50]	0
Case 3	[-0.50 +0.50]	0.2	0	0
Case 4	0	0	[-0.50 +0.50]	-0.2

图 5 为中心视场下,椭圆度参数  $e_1$  和  $e_2$  随表 2 中失调参数变化而变化的曲线。由图 5(a)可以看出,不存在其他装配误差时,次镜的偏心误差 XDE 只对椭圆度的分量  $e_1$  有影响,且二者之间近似成二次函数

关系,而对椭圆度的分量  $e_2$  没有影响;当次镜只存在倾斜误差 ADE 时,如图 5(b)所示,对椭圆度分量  $e_2$  也没有影响,与  $e_1$  成偶次函数关系;相比之下,如图 5(c)所示,对于案例 3,在案例 1 的基础上引入 0.2 mm 的偏心误差 YDE 后,可以发现两个椭圆度分

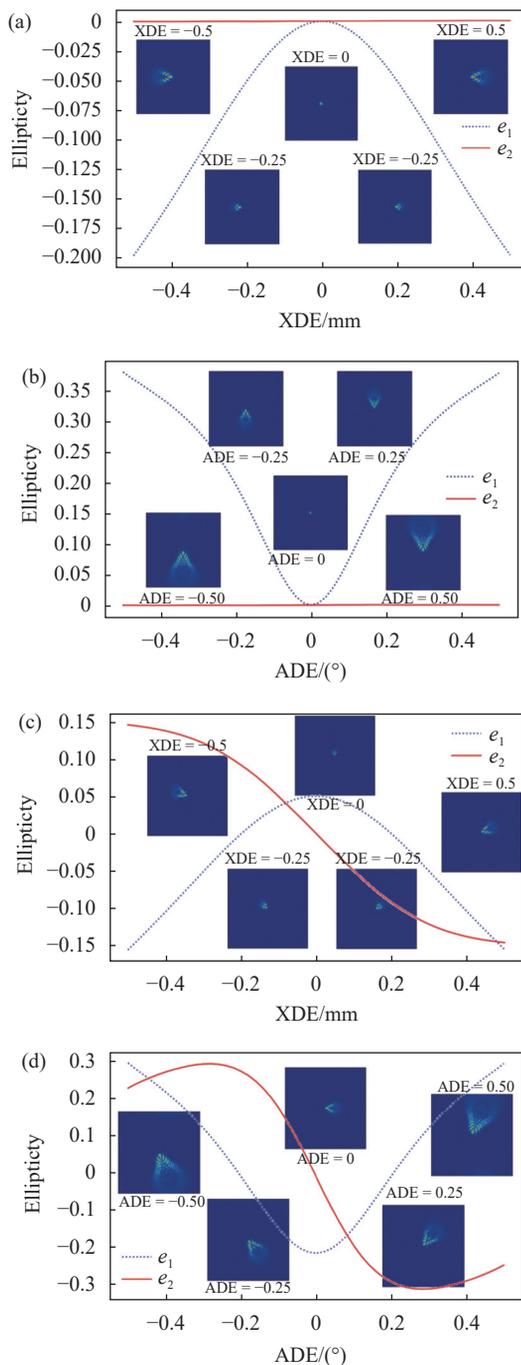


图 5 不同失调情况下的点扩散函数及椭圆度分布。(a) 案例 1; (b) 案例 2; (c) 案例 3; (d) 案例 4

Fig.5 Distribution of PSF and ellipticity under different misalignment status. (a) Case 1; (b) Case 2; (c) Case 3; (d) Case 4

量都受到 XDE 的影响,对案例 4 也呈现同样的情况,如图 5(d) 所示。

因此,可以看出,装配误差对椭圆度分量存在确定的函数关系,并且装配误差的状态不同,其椭圆度分布也不同,根据椭圆度的分布来求解装配误差是合理的。但是,建立具体的解析方程来计算装配误差是一个繁琐的过程,文中不直接求解方程(5),而是将其看成一个黑盒子,通过构建评价函数将装配误差计算问题转变成多目标非线性优化的问题,进而可以通过智能优化算法来进行求解。对于求解更多的装配误差时,单视场中的两个椭圆度参数是不够的,还需要建立更多的约束条件。基于泽尼克系数求解装配误差时也存在这个问题,大部分学者通过获取不同视场下的泽尼克系数进行解决,下面对不同视场下的椭圆度分布进行分析。

### 2.3 视场对椭圆度的影响

模拟理想情况和存在一定失调状态(-0.1 mm/0.1 mm/0.1°/-0.1°)时,全视场范围下椭圆度的分布规律。基于 Zemax 软件获取两种情况下椭圆度在全视场中的分布结果分别如图 6 和图 7 所示,FOVX/FOVY

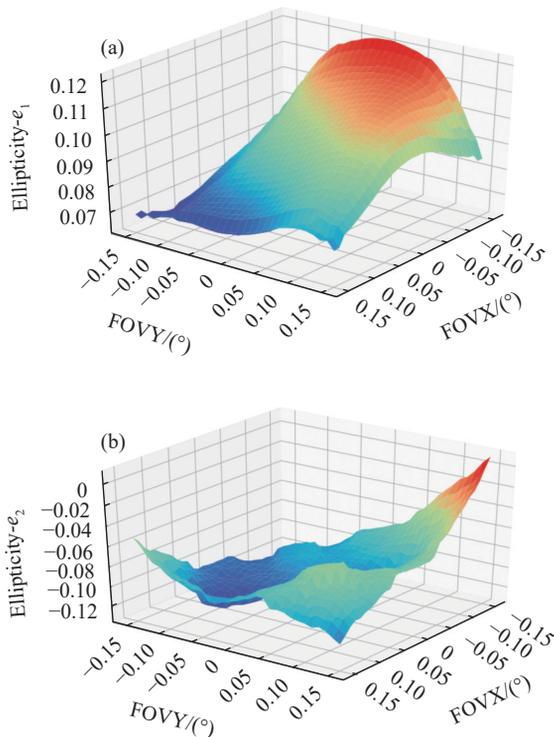


图 7 存在失调时的椭圆度分布。(a)  $e_1$ ; (b)  $e_2$

Fig.7 Distribution of ellipticity (a)  $e_1$ , (b)  $e_2$  in misaligned status

分别表示视场在 x/y 方向的分量。

从图 6 和图 7 可以看出,椭圆度的两个分量都会受到视场的影响,也就是说,在不同视场下,椭圆度分量是不同的,并且光学系统的失调状态发生变化时,其对应视场的椭圆度分量也跟着改变。因此,可以通过合理地增加视场数量来获取更多的椭圆度分量,以解决实际装调过程中多装配误差的计算问题。

### 3 装配误差案例计算与分析

由前文分析可知基于椭圆度分布计算装配误差的合理性,基于所提出的方法对 Hilbert 系统进行装配误差计算和分析,以验证装配误差求解的精度。

根据图 3 所示的装配误差计算流程,计算两反式光学系统的四种侧向失调误差(XDE/YDE/ADE/BDE),文中通过在光学设计软件中对次镜进行随机失调预置,以替代实际失调的光学系统,并根据三个视场的星点图像计算椭圆度分布,以其作为目标值进行装配误差计算。三个视场包括一个轴上视场和两个轴外视场,分别为(0°, 0°), (0°, 0.15°)和(0.15°, 0°)。

表 3 列出了两组引入的随机装调误差以及相应的计算结果。通过对比两组装配误差的计算值及误

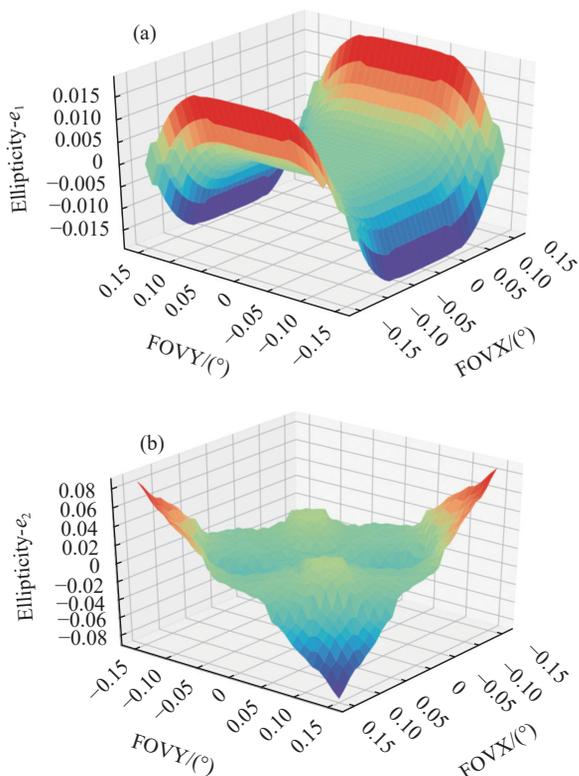


图 6 理想状态时的椭圆度分布。(a)  $e_1$ ; (b)  $e_2$

Fig.6 Distribution of ellipticity (a)  $e_1$ , (b)  $e_2$  in ideal status

差值,发现该方法能够有效地求解失调系统中的装配误差,并且其解算精度高达微米级 ( $10^{-3}$  mm/°),满足实际装调需求。

表 3 引入的装配误差与计算的结果

Tab.3 Introduced misalignments and calculated results

Type	XDE/mm	YDE/mm	ADE/(°)	BDE/(°)
Introduced I	0.2000	0.3700	0.2500	-0.1300
Calculated I	0.1996	0.3703	0.2501	-0.1297
Error I	0.0004	-0.0003	-0.0001	-0.0003
Introduced II	0.0400	0.0370	0.0250	-0.0130
Calculated II	0.0403	0.0371	0.0248	-0.0128
Error II	-0.0003	-0.0001	0.0002	-0.0002

绘制表 3 中第二组装配误差状态下的全视场椭圆度分布,如图 8 所示。其中,图 8(a) 和图 8(b) 分别为椭圆度参数  $e_1$  和  $e_2$  在引入失调状态 II 时的全视场分布,图 8(c) 和图 8(d) 分别为椭圆度参数  $e_1$  和  $e_2$  在引入计算误差 II 时的全视场分布,显然,它们几乎是

一样的。更进一步,对比图 6、图 7 和图 8,也可以发现,不同的装配误差在全视场中的椭圆度分布是完全不同的,这也说明了基于星点图的椭圆度分布来求解装配误差是切实可行的。

文中采用智能优化算法中的粒子群算法<sup>[12]</sup>更新装配误差计算步骤(4)中的误差种子搜索误差目标值,粒子数和迭代次数都设置为 30。基于粒子群算法求解表 3 中第二组装配误差的过程和结果如图 9 所示。其中,图 9(a) 表示在优化过程中评价函数 MF 值随迭代次数的变化曲线,可以看出它最终几乎收敛到零,说明找到了最佳的拟合数值;图 9(b) 和图 9(c) 分别表示第 1 次、第 15 次迭代之后误差种子的分布,可以看出随着 MF 值的降低,30 个粒子群种子都在向待求的装配误差目标值逼近;图 8(d) 表示搜索的最终结果,即为表 3 中第二组计算出的装配误差值。

在星点图的实际检测过程中,其图像受到读取噪声、背景暗电流噪声、光子噪声等误差的影响。为了模拟不同强度的噪声对失调量解算精度的影响,在获取的理想星点图像中叠加随机生成的噪声图像,再进

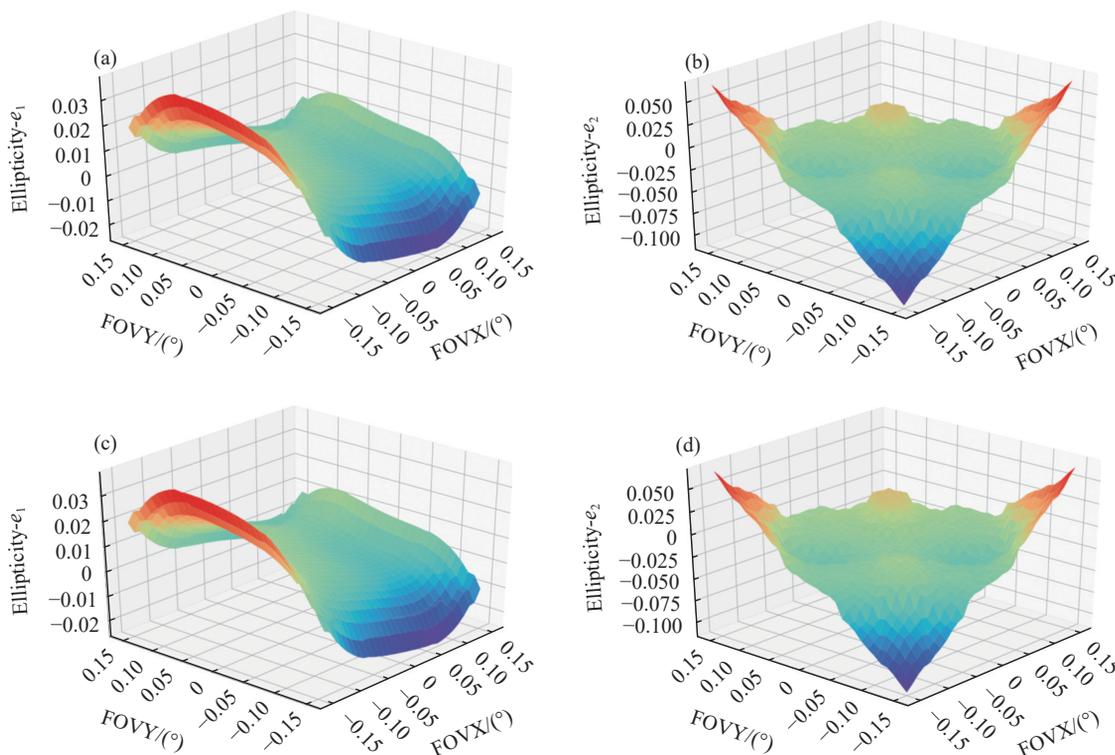


图 8 引入失调 II 时椭圆度参数 (a)  $e_1$  和 (b)  $e_2$  的分布;引入计算 II 时椭圆度参数 (c)  $e_1$  和 (d)  $e_2$  的分布

Fig.8 Distribution of ellipticity parameter (a)  $e_1$  and (b)  $e_2$  in the case of introduced II, distribution of ellipticity parameter (c)  $e_1$  and (d)  $e_2$  in the case of calculated II

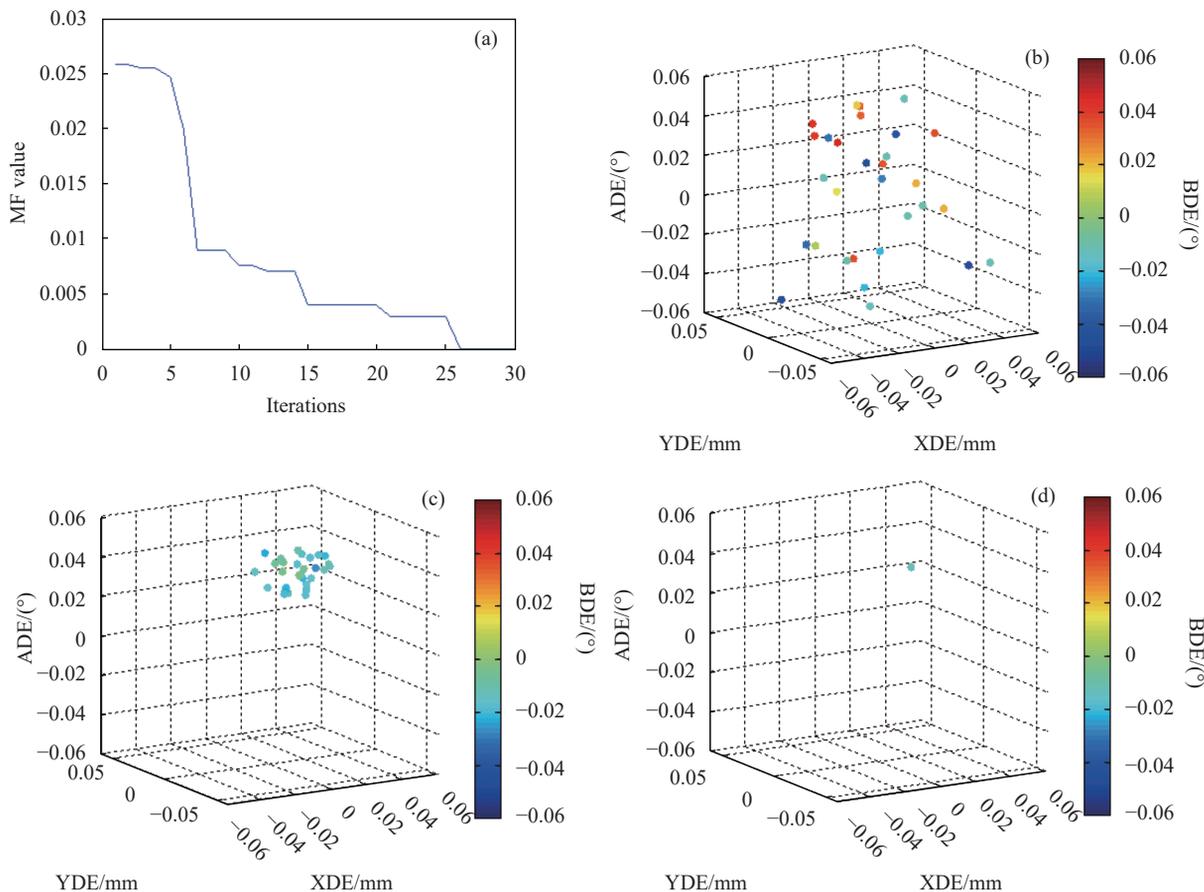


图 9 引入失调误差 II 的求解过程及结果。(a) MF 值随迭代次数的变化; (b) 第 1 次迭代后的粒子群分布; (c) 第 15 次迭代后的粒子群分布; (d) 输出的装配误差值

Fig.9 Processes and results in the case of introduced II. (a) Variation of MF value with iteration times; (b) Distribution of particle swarm after the 1st iteration; (c) Distribution of particle swarm after the 15th iteration; (d) Output misalignment

行装配误差计算。假设噪声服从泊松分布,采用信噪比 (SNR) 来表征不同的噪声强度,如公式 (9) 所示:

$$SNR(dB) = 10 \cdot \log_{10} \left[ \frac{\sum_{x=1}^M \sum_{y=1}^N (f(x,y) + g(x,y))^2}{\sum_{x=1}^M \sum_{y=1}^N (g(x,y))^2} \right] \quad (9)$$

式中:  $M$ 和 $N$ 分别为图像长度和宽度上的像素个数;  $f(x,y)$ 和 $g(x,y)$ 分别为理想图像和加入的噪声图像在点 $(x,y)$ 的灰度值。

失调量的相对求解精度 $\xi$ 采用公式 (10) 进行计算:

$$\xi = \left| \frac{XDE_t - XDE_s}{XDE_t} \right| + \left| \frac{YDE_t - YDE_s}{YDE_t} \right| + \left| \frac{ADE_t - ADE_s}{ADE_t} \right| + \left| \frac{BDE_t - BDE_s}{BDE_t} \right| \quad (10)$$

式中: 下脚标  $t$  和  $s$  分别表示引入的和计算的失调量。

以表 3 中第一组引入的失调量为目标,基于文中提出的方法对不同信噪比状态进行求解,其解算精度如图 10 所示。由图 10 可知,噪声的强度直接影响失

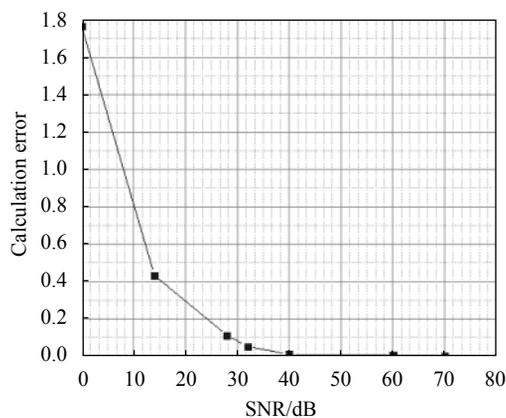


图 10 不同信噪比下的失调量解算精度

Fig.10 Misalignment calculation error in different SNR

调量的解算精度,噪声越大,失调量的相对解算精度越小,但是当  $SNR \geq 40$  dB 时,文中所提出的方法能够达到很高的求解精度,相对解算精度低于 1%,可满足实际装调需求。

## 4 结 论

文中基于星点检测法,以椭圆度参数量化装配误差对星点图像的影响,提出了一种基于星点图椭圆度分布的装配误差计算方法,在实际使用过程中只需使用 CCD 或 CMOS 等图像传感器采集系统的星点图像,可以实现在无波前传感器的情况下求解失调光学系统的装配误差,具有较强的工程应用价值。该方法的核心在于不直接求解装配误差与星点图椭圆度分布之间的解析方程,而是将光学系统视为一个黑盒子,通过建立装配误差与椭圆度参数分布之间的评价函数,从而将装配误差计算问题转化为多目标优化问题,进而可以通过多种智能优化算法进行求解,可为基于非波前传感器的计算机辅助装调技术提供新的思路。文中方法的有效性虽然只在两反式光学系统中进行了验证,但是文中通过理论分析及仿真已经说明基于星点检测原理的该方法也可适用于其他反射式或透射式光学系统的装配误差计算。

### 参考文献:

- [1] Wang B, Wu F, Ye Y T. Computer aided alignment for off-axis TMA system [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2016, 45(11): 1118006. (in Chinese)
- [2] Kim S H, 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] Zhang D G, Fu Y T. Surrogate model used for computer aided alignment [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2013, 42(3): 680-685. (in Chinese)
- [4] Ju G H, Yan C X, Gu Z Y, et al. Computation of astigmatic and trefoil figure errors and misalignments for two-mirror telescopes using nodal-aberration theory [J]. *Applied Optics*, 2016, 55(13): 3373-3386.
- [5] Oteo E, Dorado J F, Arasa J, et al. Novel method for misalignments measurement on imaging systems through quality image analysis [C]//Proceedings of SPIE, 2011, 8082: 80823C.
- [6] Sun J W, Chen T, Wang J L, et al. RC telescope alignment based on out-of-focus stellar image [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2011(3): 728-736. (in Chinese)
- [7] Li M, Liu X, Zhang A, et al. Telescope alignment based on the sharpness function of under-sampled images [J]. *Chinese Optics Letter*, 2019, 17(6): 31-35.
- [8] Ju G H, Xu B Q, Di X, et al. Analytic approach for segment-level wavefront sensing in the global alignment progress based on image feature analysis [J]. *Journal of Astronomical Telescopes Instruments & Systems*, 2020, 6(2): 009003.
- [9] Thompson K P, Rolland J P. A page from "the drawer": How Roland Shack opened the door to the aberration theory of freeform optics[C]//Proceedings of SPIE, 2014, 9186: 91860A.
- [10] Cheng Q. Precise alignment of off-axis three-mirror reflecting optical system based on phase diversity [J]. *Chinese Optics Letter*, 2015, 13(13): 32-35.
- [11] Heymans C, Brown M, Barden M, et al. Cosmological weak lensing with the HST GEMS survey [J]. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 2005, 361(1): 160-176.
- [12] Zhang G Y, Huo J, Yang M, et al. Binocular camera calibration based on dual update strategy weighted differential evolution particle swarm optimization [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2021, 50(4): 20200280. (in Chinese)