

光学学报

基于夏克-哈特曼传感器的计算机辅助装调方法

吴伟¹, 罗自荣¹, 于乃辉², 尚建忠^{1*}

¹国防科技大学智能科学学院, 湖南 长沙 410073;

²中国人民解放军 31636 部队, 云南 昆明 650300

摘要 夏克-哈特曼传感器是自适应光学中应用最广泛的波前传感器, 它不仅可以测量大气湍流引起的畸变, 还可以测量由风、温度变化和机械应力产生的镜面位置误差引起的像差。基于夏克-哈特曼传感器, 推导了子孔径斜率与装配误差之间的函数关系, 提出了一种基于光学系统失调前后点阵光斑质心偏差信息的计算机辅助装调方法, 将装配误差求解问题转换成多目标优化问题, 可采用多目标智能优化算法进行求解该问题。以某三反光学系统为例, 基于 Python 和 Zemax 联合仿真进行模拟装调, 仿真结果表明, 经三次迭代可将失调误差校正到微米级, 这可满足实际装调需求, 结果验证了所提方法的正确性。

关键词 光学设计; 计算机辅助装调; 夏克-哈特曼传感器; 失调计算; 主动光学; 光学装调

中图分类号 TH743

文献标志码 A

doi: 10.3788/AOS202141.2022001

Computer-Aided Alignment Method Based on Shack-Hartmann Sensor

Wu Wei¹, Luo Zirong¹, Yu Naihui², Shang Jianzhong^{1*}

¹College of Intelligence Science and Technology, National University of Defense Technology, Changsha, Hunan 410073, China;

²The PLA Unit 31636, Kunming, Yunnan 650300, China

Abstract As the most widely used wavefront sensors in adaptive optics, Shack-Hartmann sensors can measure not only the distortions caused by atmospheric turbulence, but also the aberrations brought by mirror position errors, which are usually introduced by wind, temperature change, and mechanical stress. In this paper, we established the functional relation between the subaperture slope and misalignment based on the Shack-Hartmann sensor, and then developed a computer-aided alignment method based on the centroid deviation of lattice spots before and after optical system misalignment. This method converts the misalignment calculation into multi-objective optimization, which can be solved by multi-objective intelligence optimization algorithms. Using a three-mirror optical system as an example, the co-simulation with Python and Zemax was conducted for alignment. The simulation results show that the misalignments are reduced to the micron level after three iterations, which can meet the practical alignment requirements. The simulation results demonstrated the correctness of the proposed method.

Key words optical design; computer-aided alignment; Shack-Hartmann sensor; misalignment calculation; active optics; optical alignment

OCIS codes 220.1140; 220.4610; 110.1080

1 引言

20 世纪 80 年代初期, 光学工程师 Egdall^[1] 提

出了计算机辅助装调(CAA)的思想, 将 5 个视场的干涉测量结果输入到编写好的计算机程序中, 该程序基于测量结果与设计结果的差异计算得到每个镜

收稿日期: 2021-02-08; 修回日期: 2021-04-19; 录用日期: 2021-05-06

基金项目: 国家自然科学基金(51675527)

通信作者: *jz_shang_nudt@163.com

片的装配误差,从而指导装调,这大大降低了反射式光学系统装调的难度。此后,越来越多的学者对计算机辅助装调技术展开了研究,提出了各种各样的装配误差计算方法,如敏感度矩阵法^[2-4]、逆向优化法^[5]、微分波前抽样法^[6]以及基于矢量像差理论的失调量解算方法^[7-10]等。

其中,敏感度矩阵法基于光学系统波像差泽尼克系数与失调参数之间的近似线性关系,建立线性方程组,通过求解该方程组得到失调参数;逆向优化法则直接利用光学设计模型,将镜片的装配参数设置成变量,并在光学设计软件(Zemax 或者 CODE V)中建立优化函数,用实测的泽尼克系数作为优化目标,通过软件自身的优化算法得到镜片的装配误差;微分波前抽样法基于泽尼克系数与装配误差的二次关系,通过对被装调镜片进行定量扰动,建立波像差与装配变量的海森矩阵方程组,通过求解该方程组得到镜片的装配误差;不同于基于数值分析的前几种方法,矢量像差法是一种解析方法,它基于矢量像差理论建立镜片装配参数与波像差之间的解析方程,从而进行计算求解。但是这些方法都是基于泽尼克系数进行计算,在装调过程中需要额外的波前传感器,以获取精确的泽尼克系数。干涉仪^[3,5,10]是计算机辅助装调中最常用的波前检测设备,常作为实验室中评估波前检测新方法的精度基准,但是由于其对环境的要求极为苛刻,振动、噪声、气流变化等都会引入测量误差,不利于计算机辅助装调技术的工程应用。除干涉仪外,夏克-哈特曼传感器法^[11-14]、相位差法^[15-16]等波前检测技术也涌现出来。然而并非所有的光学系统都配备高精度的波前传感设备,因此,部分学者也开始寻求不基于泽尼克系数的计算机辅助装调方法。Luna 等^[17]提出了一种基于离焦星点图形状特征的方法指导装调卡塞格林望远镜;Schmid 等^[18]则根据离焦图像的偏心度和方向角来确定装配误差;Li 等^[19]在分析基于图像均方根半径的优化函数的基础上,也提出了一种基于随机并行梯度下降算法的高效装调方法。

在基于寻求非泽尼克系数装配误差计算的思想下,本文提出了一种基于微透镜阵列和图像传感器(夏克-哈特曼传感器)的计算机辅助装调方法,根据被装调系统在图像传感器上的成像情况,以质心偏差为指标,推导子孔径质心偏差信息与光学系统失调参数之间的函数关系,从而计算得到装配误差,以

指导装调。

2 理论模型分析

2.1 夏克-哈特曼波前检测原理

夏克-哈特曼传感器是自适应光学中应用最广泛的波前传感器,凭借其操作简便、受环境影响小、实时性强、动态范围大的优点^[11-14],已广泛应用于面形检测、像质评估中,其本质上由微透镜阵列和图像传感器(CCD)组成^[13-14](图 1)。微透镜有统一的焦距,CCD 置于微透镜的焦平面位置。被测波前通过微透镜阵列被分割成多个子光束并会聚到焦面上,得到点阵光斑图,将其用 CCD 采集和记录。

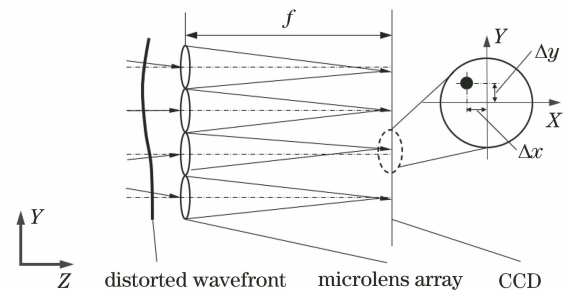


图 1 夏克-哈特曼传感器原理

Fig. 1 Principle diagram of Shack-Hartmann sensor

当被测波前发生改变时,点阵光斑的质心位置会偏离参考光束点阵光斑的质心位置,根据二者的差值可以计算得到子孔径光束沿 x 轴和 y 轴的斜率 k_x 和 k_y ,二者的计算公式为

$$k_x = \Delta x / f, k_y = \Delta y / f, \quad (1)$$

式中: Δx 和 Δy 分别为光斑质心位置沿 x 轴和 y 轴的偏离程度; f 为微透镜的焦距。

根据电磁波理论^[20],设波前前进的方向为 \mathbf{k} ,它垂直于波前,其大小为 $k = 2\pi/\lambda$,用 $\varphi(x, y)$ 表示波像差时,在 x, y 轴方向的斜率分别可以表示为

$$k_x = \partial\varphi(x, y) / \partial x, k_y = \partial\varphi(x, y) / \partial y. \quad (2)$$

根据点阵光斑的质心偏差信息,联立(1)和(2)式,可以计算得到被测的波像差。区域法和模式法是目前两种常用的波前重构算法^[21],根据模式重构算法,当波像差用 n 项泽尼克多项式拟合时,有

$$\mathbf{C} = \mathbf{G}^{-1} \mathbf{K}, \quad (3)$$

其中

$$\mathbf{C} = [c_1 \quad c_2 \quad \cdots \quad c_n]^T, \quad (4)$$

$$\mathbf{K} = [k_x^1 \quad \cdots \quad k_x^m \quad k_y^1 \quad \cdots \quad k_y^m]^T, \quad (5)$$

$$\mathbf{G} = \begin{bmatrix} \iint_{S_1} \frac{\partial Z_1(x,y)}{\partial x} dx dy & \iint_{S_1} \frac{\partial Z_2(x,y)}{\partial x} dx dy & \cdots & \iint_{S_1} \frac{\partial Z_n(x,y)}{\partial x} dx dy \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ \iint_{S_m} \frac{\partial Z_1(x,y)}{\partial x} dx dy & \iint_{S_m} \frac{\partial Z_2(x,y)}{\partial x} dx dy & \cdots & \iint_{S_m} \frac{\partial Z_n(x,y)}{\partial x} dx dy \\ \iint_{S_1} \frac{\partial Z_1(x,y)}{\partial y} dx dy & \iint_{S_1} \frac{\partial Z_2(x,y)}{\partial y} dx dy & \cdots & \iint_{S_1} \frac{\partial Z_n(x,y)}{\partial y} dx dy \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ \iint_{S_m} \frac{\partial Z_1(x,y)}{\partial y} dx dy & \iint_{S_m} \frac{\partial Z_2(x,y)}{\partial y} dx dy & \cdots & \iint_{S_m} \frac{\partial Z_n(x,y)}{\partial y} dx dy \end{bmatrix}, \quad (6)$$

式中： \mathbf{C} 为 n 项泽尼克系数构成的列向量，表示待重构波像差； c_i 表示第 i 项泽尼克多项式系数； \mathbf{K} 为 m 个有效光斑质心偏差信息构成的列向量，通过 CCD 图像传感器计算得到； \mathbf{G} 为基于模式法的波前重构矩阵； $Z_i(x, y)$ 为第 i 项泽尼克多项式； S_i 表示第 i 个子孔径的面积； \mathbf{G}^{-1} 为 \mathbf{G} 的广义逆。

2.2 基于夏克-哈特曼传感器的计算机辅助装调方法

根据前面分析，被测波像差 $\varphi(x, y)$ 可以表征为一系列有效点阵光斑斜率的函数：

$$\varphi(x, y) = f(k_x^1, k_y^1, k_x^2, k_y^2, \dots, k_x^m, k_y^m), \quad (7)$$

通过求解该函数即可得到被测波像差。而系统存在装调误差时，会造成波像差发生变化，该变化量也是装调误差的函数。对一个确定的光学系统，当系统存在 p 个装调误差 ($\delta_1, \delta_2, \dots, \delta_p$) 时，引入的波像差 $\varphi(x, y)$ 可以表示为

$$\varphi(x, y) = f(\delta_1, \delta_2, \dots, \delta_p). \quad (8)$$

计算机辅助装调技术本质上是基于该函数的求解而提出的一系列方法，但目前提出的大部分计算方法都集中于求解泽尼克系数表征的函数 [(8) 式]^[2-10]。实际上，根据 (7) 和 (8) 式，可知点阵光斑的斜率信息也能够反映出失调光学系统的装配误差，即系统的装配误差同样可以表征为一系列点阵光斑斜率的多元非线性函数：

$$\Theta(\delta_1, \delta_2, \dots, \delta_p) = f(k_x^1, k_y^1, k_x^2, k_y^2, \dots, k_x^m, k_y^m). \quad (9)$$

基于 (9) 式，本文提出的计算机辅助装调方法的原理如图 2 所示，以理想光学系统在 CCD 上点阵光斑的质心位置为目标，计算失调光学系统点阵光斑的质心偏差信息，通过多目标智能寻优算法找到某一装配误差状态，使得调整后光学系统的质心偏差

信息趋近于零，从而计算得到失调系统当前的装配误差。文献 [13] 也曾将夏克-哈特曼传感器应用于计算机辅助装调中，用夏克-哈特曼传感器代替干涉仪获取波像差泽尼克系数，从而根据泽尼克系数求解装配误差。本文并不求解泽尼克系数，而是以质心偏差信息为优化目标，将失调光学系统的装配误差计算问题转换成多目标优化问题。

目前，求解多目标优化问题的方法很多，如最小二乘拟合法 (LSF)^[2-4]、粒子群算法 (PSO)^[16]、随机并行梯度下降算法 (SPGD)^[19]、人工神经网络法 (ANN)^[22]、遗传算法 (GA)^[23] 等。本文采用最小二乘拟合法验证所提出方法的正确性，基于波像差与装配误差之间的近似线性关系进行失调计算，根据最小二乘拟合法^[3]，有

$$\Delta \boldsymbol{\delta} = \mathbf{A}^{-1} \Delta \mathbf{W}, \quad (10)$$

式中： $\Delta \boldsymbol{\delta}$ 表示系统相对于理想位置的偏差向量，即装配误差向量； $\Delta \mathbf{W}$ 表示系统存在装配误差时引入的波像差增量； \mathbf{A} 表示该系统的敏感度矩阵， \mathbf{A}^{-1} 为敏感度矩阵 \mathbf{A} 在最小二乘范数条件下的广义逆。因此，当已知 $\Delta \mathbf{W}$ 和 \mathbf{A} 时，通过求解线性方程 [(10) 式]，即可得到系统的失调量。

联立 (3) 和 (10) 式，可得到基于质心偏差信息的装配误差计算公式，即

$$\Delta \boldsymbol{\delta} = \mathbf{A}^{-1} * \Delta \mathbf{W} = \mathbf{A}^{-1} \mathbf{G}^{-1} \Delta \mathbf{K} = \mathbf{M}^{-1} \Delta \mathbf{K}, \quad (11)$$

式中： $\Delta \mathbf{K}$ 为子孔径斜率偏差向量； \mathbf{M} 为失调参数解算矩阵，对于每个确定的系统，该矩阵是固定的，可以通过仿真计算得到； \mathbf{M}^{-1} 为失调参数解算矩阵 \mathbf{M} 的广义逆。由 (11) 式可知，当 \mathbf{M} 已知，通过获取失调光学系统在夏克-哈特曼传感器中的子孔径斜率偏差信息，即可计算求得系统当前的装配误差。

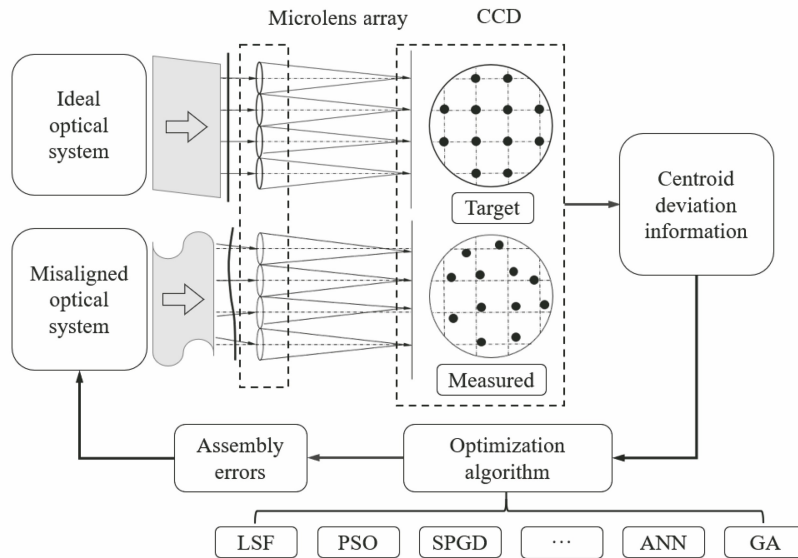


图 2 基于夏克-哈特曼传感器的计算机辅助装调方法
Fig. 2 CAA method based on Shack-Hartmann sensor

3 装调实例分析

为了验证所提出方法的正确性,采用基于 Python 和 Zemax 联合仿真的方法,对某三反光学系统^[24]进行模拟装调实验,模拟装调的光学系统口径为 500 mm,焦距为 5 m, F 数为 10,其光学参数如表 1 所示。

表 1 某三反光学系统的设计参数

Table 1 Design parameters of three-mirror optical system

Surface	Radius / mm	Distance / mm	Conic
Primary mirror (PM)	1501.10	598.32	-0.96680
Second mirror (SM)	389.53	781.32	-2.18720
Flat mirror (FM)	Infinity	355.25	0
Third mirror (TM)	521.13	639.70	-0.51302

该三反光学系统采用偏视场的方案避免了二次遮拦的问题,其光路如图 3 所示。

在实际装调过程,主镜由于体积和质量较大,通常作为基准,不作调整,当粗装调完成以后,固定折

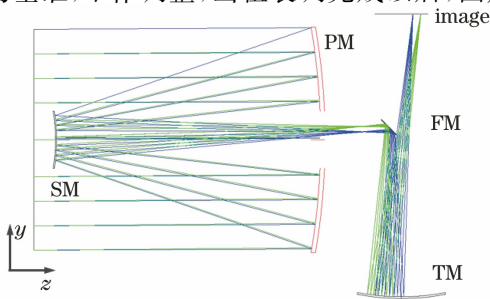


图 3 某三反光学系统的光路图

Fig. 3 Layout of three-mirror optical system

转镜,只调整次镜和三镜。为了验证所提出算法的有效性,不失一般性,对次镜的失调量进行仿真计算。次镜为旋转轴对称结构,不考虑绕光轴的旋转误差,因此次镜的失调误差只有 5 个,分别是沿 x 轴、 y 轴和 z 轴的平移误差(x_{DE}, y_{DE}, z_{DE})以及绕 x 轴和 y 轴的倾斜误差(A_{DE}, B_{DE})。根据(11)式,将待求的失调误差向量定义为

$$\Delta\delta = [x_{DE}, y_{DE}, A_{DE}, B_{DE}, z_{DE}]。 \quad (12)$$

采用的夏克-哈特曼传感器的参数如表 2 所示,其微透镜阵列数为 9×9 ,焦距为 7 mm, F 数为 6.3, CCD 图像传感器的像素数为 512×512 ,尺寸为 $10 \text{ mm} \times 10 \text{ mm}$ 。基于光学设计软件 Zemax 的“LENS ARRAY”面型建立该传感器的光学模型,其光路如图 4(a)所示,无畸变情况下 CCD 像面的点阵光斑如图 4(b)所示。

对于夏克-哈特曼传感器而言,由于被测波前无法覆盖所有的子孔径,因此有必要筛选出携带有效信息的光斑。根据其像面的点阵光斑信息,确定出 69 个有效的点阵光斑[图 4(b)中圈内所示],则由一个视场可以得到 138 个斜率信息。

如图 5 所示,基于动态数据交换接口(PyZDDE),将 Python 强大的数据分析功能和 Zemax 的光学设计与分析功能结合起来,通过 Zemax 获取失调光学系统的点阵光斑图像,以模拟实际装调过程中的图像采集,并将采集图像传递给 Python;通过 Python 实现对点阵光斑图像的处理,通过程序实现多目标智能优化算法,根据理想系统和失调系统的点阵光斑信息计算得到系统当前的装

配误差,并对 Zemax 中光学模型的失调参数进行补偿校正,从而模拟三反系统的装调过程。

表 2 夏克-哈特曼传感器参数

Table 2 Parameters of Shack-Hartmann sensor

Diameter /mm	Size of microlens array	Focus length /mm	Resolution of CCD	Size of CCD /(mm×mm)
10	9×9	7	512×512	10×10

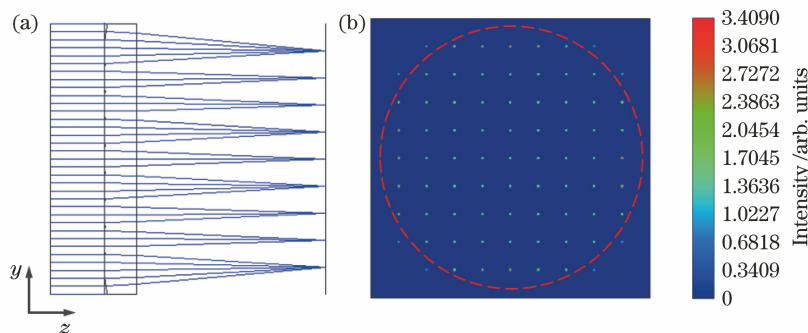


图 4 夏克-哈特曼传感器的仿真模型。(a)光路图;(b)像面图

Fig. 4 Zemax model of Shack-Hartmann sensor. (a) Layout; (b) CCD image

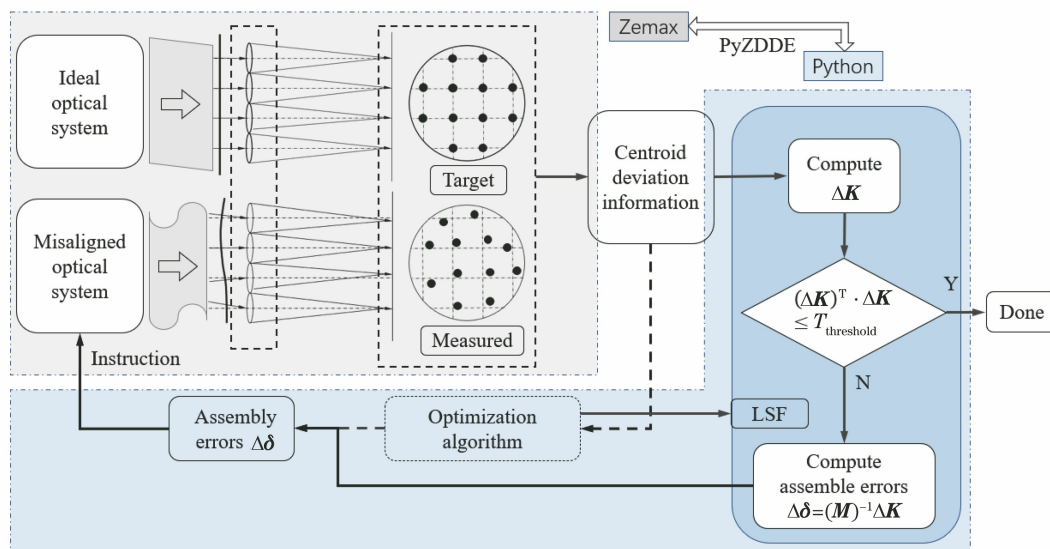


图 5 基于 Python 和 Zemax 联合仿真的装调流程图

Fig. 5 Alignment flow chart based on co-simulation of Python and Zemax

采用最小二乘拟合算法(LSF)计算失调系统的装配误差,根据前文分析,失调参数解算矩阵的维度是 138×5 ,斜率数量大于失调个数,利用一个视场即可求解次镜的 5 个装配误差,获取更多视场下的光斑信息,并且可以降低装调过程中测量误差对算法计算精度的干扰。根据该三反光学系统的结构特点,选择轴外视场($0^\circ, 0.5^\circ$)进行装调实验,具体步骤如下。

1) 获取失调解算参数矩阵 M 。把三反系统次镜的各失调参数改变一个微小量 $\Delta \epsilon$,求出引入失调前后夏克-哈特曼传感器像面上点阵光斑的质心斜率偏差向量 ΔK ,通过取差商 $\Delta K / \Delta \epsilon$ 求得失调解算

参数矩阵 M 。

2) 获取失调光学系统当前的点阵光斑信息,计算其质心斜率偏差向量 ΔK 。

3) 计算 $(\Delta K)^T \cdot \Delta K$,判断其与 $T_{\text{threshold}}$ (阈值)的大小。若其值大于阈值,则执行下一步,否则,程序停止,装调完毕。

4) 计算装配误差 $\Delta \delta$ 。基于(11)式计算系统当前的装配误差 $\Delta \delta$ 。

5) 补偿校正。根据计算的装配误差 $\Delta \delta$ 对失调系统进行补偿校正,并返回步骤 2)。

综上,基于图 5 所示的联合仿真对该三反系统进行模拟装调实验,引入表 3 所示的失调量,得到次镜的

装配误差随装调迭代次数的变化如图 6 和表 3 所示。

由图 6 和表 3 可知,剩余装配误差随着装调次数的增加而逐渐减小,这验证了所提出方法的有效性,基于失调系统点阵光斑的质心偏差信息能够有效求解镜片的装配误差。此外,还可以看出单次失调计算存在一定的求解误差,这是因为文中采用的最小二乘拟合算法是基于波像差与装配误差之间的近似线性关系进行求解的,而实际上这两者之间并不完全呈线性关系,因此一次装调难以达到理想状态,需要进行多次迭代。根据仿真结果,次镜的初始装配误差在 $0.20 \text{ mm}/(^{\circ})$ 数量级的情况下,经过 3 次迭代,其剩余装配误差达到 μm 级,可满足实际

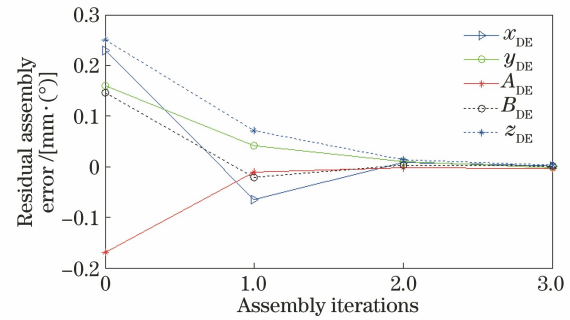


图 6 剩余装配误差随装调次数的变化

Fig. 6 Residual assembly error varying with assembly iterations

装调需求。

表 3 装调过程中剩余装配误差的变化

Table 3 Variance of residual assembly error during alignment

Iterations	x_{DE} / mm	y_{DE} / mm	$A_{DE} / (^{\circ})$	$B_{DE} / (^{\circ})$	z_{DE} / mm
Initial misalignment	0.2300	0.1600	-0.1700	0.1460	0.2500
1 st calculated misalignment	0.2957	0.1183	-0.1589	0.1667	0.1799
Residual error after 1 st alignment	-0.0657	0.0416	-0.0111	-0.0207	0.0701
2 nd calculated misalignment	-0.0743	0.0311	-0.0085	-0.0235	0.0567
Residual error after 2 nd alignment	0.0086	0.0105	-0.0026	0.0028	0.0134
3 rd calculated misalignment	0.0074	0.0123	-0.0011	0.0019	0.0107
Residual error after 3 rd alignment	0.0012	-0.0018	-0.0015	0.0009	0.0027

4 结 论

基于夏克-哈特曼传感器,提出了一种基于微透镜阵列和图像传感器的计算机辅助装调方法。通过图像传感器采集点阵光斑,以光学系统失调前后的点阵光斑质心偏差信息为目标,将光学系统的失调量计算问题转换成多目标优化问题,并建立了相应的装配误差求解模型。利用该求解模型对某三反光学系统进行了模拟装配,仿真结果表明,通过 3 次迭代,系统次镜的剩余装配误差可达到 μm 级,满足实际装调需求,所得结果验证了所提方法的有效性。计算机辅助装调技术是高精度、高成像质量光学系统装调发展的必然方向,也是实现光学系统自动化装调、智能装调、智能制造的重要基础。对比现有大部分基于泽尼克系数的计算机辅助装调方法,所提出的方法只需要微透镜阵列和图像传感器,工业应用性较强。此外,文中采用的最小二乘拟合算法,是基于波像差与装配误差之间的近似线性关系进行求解,具有一定的局限性,后面将深入研究其他优化算法,以解决当前单次解算存在误差以及对线性关系依赖程度高的问题。

参 考 文 献

[1] Egdall I M. Manufacture of a three-mirror wide-field optical system [J]. Optical Engineering, 1985, 24:

242285.

- [2] Jeong H J, Lawrence G N, Nahm K B. Auto-alignment of a three-mirror off-axis telescope by reverse optimization and end-to-end aberration measurements [J]. Proceedings of SPIE, 1987, 0818: 419-430.
- [3] Zhang B, Zhang X H, Wang C, et al. Computer-aided alignment of the complex optical system [J]. Proceedings of SPIE, 2000, 4231: 67-72.
- [4] Zhang T C, Wang Y T, Chang J, et al. Computer-aided alignment for reflective zoom systems [J]. Acta Optica Sinica, 2010, 30(6): 1688-1692.
张庭成, 王涌天, 常军, 等. 反射变焦系统的计算机辅助装调 [J]. 光学学报, 2010, 30(6): 1688-1692.
- [5] 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.
- [6] 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.
- [7] Thompson K P, Schmid T, Rolland J P. The misalignment induced aberrations of TMA telescopes [J]. Optics Express, 2008, 16(25): 20345-20353.
- [8] Kong X H, Fan X W. Alignment of two-mirror aspherical optical system based on vector aberration theory [J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2010,

- 47(8): 082202.
孔小辉, 樊学武. 基于矢量波像差理论的两镜系统装调技术研究[J]. 激光与光电子学进展, 2010, 47(8): 082202.
- [9] 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.
- [10] 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凋解算方法[J]. 光学学报, 2019, 39(7): 0722002.
- [11] Zhou J D, Chang J, Niu Y J, et al. Novel multiple field of view detection method for the off-axis reflection zoom optical system [J]. Acta Physica Sinica, 2016, 65(8): 084208.
周继德, 常军, 牛亚军, 等. 新型离轴反射变焦距光学系统的多视场检测方法[J]. 物理学报, 2016, 65(8): 084208.
- [12] Ma W C, Shen W, Hu D T, et al. Phase modulation characteristics of LCSLM and its applications in aspheric surface measurements [J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2019, 56(22): 222301.
马文超, 申文, 胡栋挺, 等. LCSLM 相位调制特性及其在非球面测量中的应用[J]. 激光与光电子学进展, 2019, 56(22): 222301.
- [13] Wei P, Li X Y, Luo X, et al. Influence of lack of light in partial subapertures on wavefront reconstruction for Shack-Hartmann wavefront sensor [J]. Chinese Journal of Lasers, 2020, 47(4): 0409002.
魏平, 李新阳, 罗曦, 等. 部分子孔径缺光对夏克-哈特曼波前传感器波前复原的影响[J]. 中国激光, 2020, 47(4): 0409002.
- [14] Wang F F. Applied research of the S-H wavefront sensor used on computer aided alignment [D]. Beijing: University of Chinese Academy of Science, 2013: 14-17.
王菲菲. S-H 波前传感器在计算机辅助中的应用研究[D]. 北京: 中国科学院大学, 2013: 14-17.
- [15] Cheng Q, Yan F, Xue D L, et al. Wavefront error testing of off-axis three-mirror anastigmatic system using phase diversity technology[J]. Chinese Journal of Lasers, 2012, 39(10): 1008001.
程强, 闫锋, 薛栋林, 等. 利用相位差异技术检测离轴三反光学系统的波前误差[J]. 中国激光, 2012, 39(10): 1008001.
- [16] Xiong W S, Wang J H. Phase diversity wavefront detection technique based on hybrid particle swarm algorithm [J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2020, 57(3): 030801.
熊文尚, 王继红. 基于混合粒子群算法的相位差波前探测技术[J]. 激光与光电子学进展, 2020, 57(3): 030801.
- [17] Luna E, Salas L, Gutiérrez L, et al. Geometric method to measure astigmatism aberration at astronomical telescopes [J]. Applied Optics, 2007, 46(17): 3439-3443.
- [18] Schmid T, Thompson K, Rolland J. Alignment of two mirror astronomical telescopes (the astigmatic component) [J]. Proceedings of SPIE, 2008, 7017: 70170C.
- [19] Li M, Liu X, Zhang A, et al. Telescope alignment based on the sharpness function of under-sampled images [J]. Chinese Optics Letters, 2019, 17(6): 061101.
- [20] Daniel M. Optical shop testing [M]. Yang L, Wu F, Fan B, et al, Transl. 3rd ed. Beijing: China Machine Press, 2012: 264-292.
(墨)马拉卡拉·丹尼尔(Daniel Malacara). 光学车间检测[M]. 杨力, 伍凡, 范斌, 等, 译. 3版. 北京: 机械工业出版社, 2012: 264-292.
- [21] Li X Y, Jiang W H. Zernike modal wavefront reconstruction error of Hartmann-Shack wavefront sensor [J]. Acta Optica Sinica, 2002, 22(10): 1236-1240.
李新阳, 姜文汉. 哈特曼-夏克传感器的泽尼克模式波前复原误差[J]. 光学学报, 2002, 22(10): 1236-1240.
- [22] 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.
- [23] Zeng Z S, Zhang F, Niu Z Y, et al. Angular position distribution algorithm of micro mirror array based on genetic algorithm [J]. Chinese Journal of Lasers, 2020, 47(8): 0805003.
曾宗顺, 张方, 牛志元, 等. 基于遗传算法的微反射镜阵列角位置分布算法[J]. 中国激光, 2020, 47(8): 0805003.
- [24] Li X Y, Li Y C, Ma Z, et al. Computer-aided alignment method of coaxial three-mirror-anastigmat system [J]. Journal of Applied Optics, 2009, 30(6): 901-906.
李旭阳, 李英才, 马臻, 等. 折轴三反射光学系统的计算机辅助装调技术研究[J]. 应用光学, 2009, 30(6): 901-906.