

基于误差提取算法辅助装调的离焦误差校正方法

张汉琳 张蓉竹

Defocusing error correction method based on error extraction algorithm assisted installation and adjustment

ZHANG Hanlin, ZHANG Rongzhu

引用本文:

张汉琳, 张蓉竹. 基于误差提取算法辅助装调的离焦误差校正方法[J]. 应用光学, 2024, 45(6): 1245–1251. DOI: 10.5768/JAO202445.0603005

ZHANG Hanlin, ZHANG Rongzhu. Defocusing error correction method based on error extraction algorithm assisted installation and adjustment[J]. Journal of Applied Optics, 2024, 45(6): 1245–1251. DOI: 10.5768/JAO202445.0603005

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.5768/JAO202445.0603005>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

基于目标航迹的引导误差校正方法研究

Guidance error correction method based on target track

应用光学. 2023, 44(5): 1088–1094 <https://doi.org/10.5768/JAO202344.0503005>

基于梯形与正弦相移算法的非线性误差校正

Nonlinear errors correction based on trapezoidal plus sinusoidal phase shifting algorithm

应用光学. 2022, 43(2): 304–310 <https://doi.org/10.5768/JAO202243.0203005>

相位编码条纹投影轮廓术的相位展开误差校正方法

Phase unwrapping errors correction for phase-encoding based on fringe projection profilometry

应用光学. 2020, 41(5): 978–983 <https://doi.org/10.5768/JAO202041.0502007>

基于波像差判据的同步相移显微干涉检焦方法

Synchronous phase-shifting microscopic interference focal detection method based on wave aberration criteria

应用光学. 2021, 42(4): 703–708 <https://doi.org/10.5768/JAO202142.0403002>

白光显微干涉测量曲面样品形貌误差的校正方法

Calibration method of topography error of white light interferometry on curved surface sample measurement

应用光学. 2024, 45(2): 422–429 <https://doi.org/10.5768/JAO202445.0203004>

中心不重合径向剪切干涉迭代波前重构算法仿真分析

Simulation analysis of iterative wavefront reconstruction algorithm for center-offset radial shearing interference

应用光学. 2024, 45(1): 118–125 <https://doi.org/10.5768/JAO202445.0102006>



关注微信公众号, 获得更多资讯信息

文章编号: 1002-2082 (2024) 06-1245-07

基于误差提取算法辅助装调的离焦误差校正方法

张汉琳, 张蓉竹

(四川大学 电子信息学院, 四川 成都 610044)

摘要: 在大数值孔径 (NA) 球面面形检测中, 被测球面偏离理想共焦位置引入的离焦误差严重影响检测精度。为了对离焦误差进行精确提取和有效校正, 提高元件终检位置的调整效率, 设计了一种基于误差提取算法辅助装调的离焦误差校正方法。通过离焦误差提取算法实现离焦量的定量提取, 并判断调整方向, 快速精准地将大 NA 球面调整至零条纹位置, 大幅减小离焦误差; 辅助装调后再利用 Zernike 波面拟合算法消除离焦项以及大 NA 球面引入的球差项进行精调。实验结果表明: 利用该方法对大 NA 球面进行校正, 离焦量提取误差均在 3% 以内, 此方法增大了元件的离焦误差提取和补偿范围, 可将离焦量上限扩展至 $\pm 25 \mu\text{m}$, 最终实现亚纳米级校正精度。

关键词: 大数值孔径; 干涉检测; 离焦误差; Zernike 波面拟合算法

中图分类号: TN206

文献标志码: A

DOI: 10.5768/JAO202445.0603005

Defocusing error correction method based on error extraction algorithm assisted installation and adjustment

ZHANG Hanlin, ZHANG Rongzhu

(School of Electronics and Information Engineering, Sichuan University, Chengdu 610044, China)

Abstract: In large numerical aperture (NA) spherical surface shape detection, the defocusing errors introduced by the measured sphere deviating from the ideal confocal position will seriously affect the detection accuracy. In order to accurately extract and effectively correct defocusing errors and improve the efficiency of adjusting the final inspection position of components, a defocusing error correction method based on the error extraction algorithm assisted installation and adjustment was designed. The defocusing error extraction algorithm was used to quantitatively extract the defocusing amount and determine the direction of adjustment, so that the large NA spherical surface could be adjusted to zero fringe position quickly and accurately, and the defocusing errors could be greatly reduced. After auxiliary installation and adjustment, Zernike wavefront fitting algorithm was used to eliminate the defocusing term and the spherical difference term introduced by the large NA spherical surface for fine adjustment. The experimental results show that the defocusing extraction errors is within 3% by using the proposed method to correct large NA spherical surface. This method increases the range of defocusing errors extraction and compensation for components, and can extend the upper limit of defocusing amount to $\pm 25 \mu\text{m}$, which ultimately achieves the sub-nanometer correction accuracy.

Key words: large numerical aperture; interference detection; defocusing error; Zernike wavefront fitting algorithm

引言

在光学成像系统中, 透镜的数值孔径 (num-

erical aperture, NA) 是决定系统性能的关键参数之一, 大 NA 透镜能够有效对光束进行紧聚焦^[1], 提高

收稿日期: 2024-01-09; 修回日期: 2024-05-25

基金项目: 国家重点研发计划 (2022YFF07129031)

作者简介: 张汉琳 (2001—), 女, 硕士研究生, 主要从事精密光学检测技术研究。E-mail: 2394252117@qq.com

通信作者: 张蓉竹 (1975—), 女, 博士, 教授, 博士生导师, 主要从事激光与光电子技术、精密光学制造与测试技术研究。

E-mail: zhang_rz@scu.edu.cn

成像的清晰度和细节捕捉能力。然而,大 NA 球面透镜本身像差较大,因此在实际使用中对其面形精度提出了更高的要求^[2],尤其是在诸如光刻机这样的精密系统中,为了提高光刻投影物镜的分辨率,必须对透镜的面形精度进行严密监控^[3-4]。

利用斐索干涉仪^[5]进行面形精度检测是目前最常用的手段之一,与点衍射干涉技术^[6]和绝对检测技术^[7]相比,其测量过程和数据处理算法相对简单、快捷^[8]。干涉检测虽然具有很高的精度,但对检测过程中的环境和光路调整要求严格,对大 NA 光学元件的面形精度进行检测时,被测球面一旦偏离理想共焦位置,引入的离焦误差将对检测精度产生严重影响^[9]。因此,必须对系统中的离焦误差进行精确提取和有效校正。现有的校正方法主要是通过拟合波前相位数据并消去倾斜项、离焦项来实现校正^[10-11],这种方法在小 NA 情况下能够达到几十纳米的校正精度。在此基础上,王道档等^[12-13]根据离焦误差的高阶近似模型对大 NA 球面引入的高阶球差进行了校正。

上述传统离焦误差校正方法是利用算法将最终干涉图中的残余误差进行提取和补偿,在这一步计算之前,需要将待测球面尽可能地调整到离焦量最小的位置,而这一过程目前都是凭经验完成的。在调整待测球面的稳定位置时,需要前后反复调整,并凭借肉眼实时观察条纹变化,此过程比较繁琐耗时,并且会由于肉眼判断零条纹位置不够准确而影响最终的检测精度。为了提高元件终检位置的调整效率,本文提出离焦误差提取算法来判断大 NA 球面初始位置所对应的离焦量以及调整方向,根据这2个信息快速高效地将被测球面调整至最佳测量位置。针对存在较大离焦量的被测球面,本文从波前离焦引入的光程差出发,定量分析离焦量与波像差之间的关系并提出离焦误差提取算法,建立仿真模型,实现离焦量的提取及辅助装调;然后利用Zernike波面拟合技术^[14]消除离焦项与球差项,校正残余的离焦误差;最后根据理论分析和仿真结果,对球面面形检测中的离焦误差进行提取与校正。

1 相移干涉检测中的离焦误差

利用斐索干涉仪进行球面面形检测的光路如图1所示。以凸面镜检测为例,从光源发出的入射光,一部分在参考球面表面发生反射,作为参考光

束,另一部分在待测球面表面发生反射,携带待测球面面形信息作为待测光束,两相干光束会合后发生干涉,形成干涉条纹。

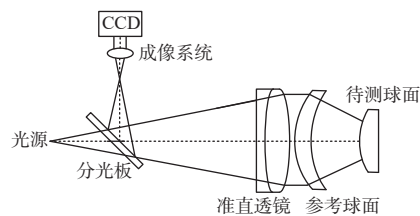


图1 相移干涉检测光路图

Fig. 1 Optical path diagram of phase-shift interference detection

理想情况下,待测球面球心与参考球面曲率中心准确重合,干涉场光强表达式如下:

$$I = I_1 + I_2 + 2\sqrt{I_1 \cdot I_2} \cos \varphi \quad (1)$$

式中: I_1 和 I_2 分别为两相干光束的光强; φ 为两相干光束的相位差。

实际检测过程中无法确保待测球面处于理想位置,当出现波前离焦情况时,即2个球面的曲率中心存在微小轴向偏移,该偏移量将在系统中引入轴向离焦误差,此时干涉场光强表达式发生相应改变,如式(2)所示:

$$I = I_1 + I_2 + 2\sqrt{I_1 \cdot I_2} \cos \left(\varphi + \frac{2\pi}{\lambda} \cdot D_{OP} \right) \quad (2)$$

式中: D_{OP} 为波前离焦引入的光程差; λ 为光源波长。

下面对波前离焦引入的光程差进行定量分析,波前离焦示意图如图2所示。

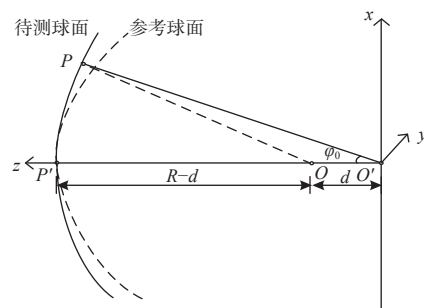


图2 波前离焦示意图

Fig. 2 Schematic diagram of wavefront defocus

图2中实线为待测球面,虚线为参考球面。设待测球面球心 O' 为坐标系原点, O 为参考球面曲率中心, d 为离焦量, R 为待测球面的曲率半径, $P(x, y, z)$ 为待测球面上任一点, φ_0 为 P 点相对于 z 轴的孔径角。由图2可知, P 点处由波前离焦引

入的光程差可表示为

$$D_{OP} = 2(|OP| - |OP'|) = 2 \left[R \sqrt{1 + \left(\frac{d}{R}\right)^2} - 2\frac{zd}{R^2} - (R-d) \right] \quad (3)$$

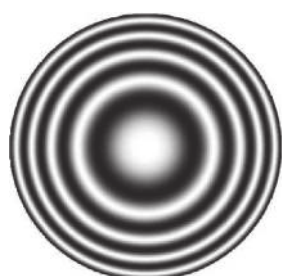
在式(3)中, 令 $\delta = \frac{d}{R}$, $\cos \varphi_0 = \frac{z}{R} = \sqrt{1 - \rho^2 NA^2}$ 。

由于实际离焦量 d 是 μm 量级, 因此可将式(3)化简为

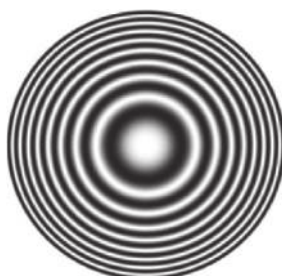
$$\begin{aligned} D_{OP} &= 2R \left(\sqrt{1 + 2\delta(1 - \cos \varphi_0)} - 1 \right) = \\ &= 2d \left(1 - \sqrt{1 - \rho^2 NA^2} \right) = \\ &= 2d \left(\frac{1}{2} \rho^2 NA^2 + \frac{1}{8} \rho^4 NA^4 + \frac{1}{16} \rho^6 NA^6 + \frac{5}{128} \rho^8 NA^8 \right) \end{aligned} \quad (4)$$

式中: ρ 为归一化径向距离; NA 为待测球面数值孔径。

由式(4)可知, 离焦误差的大小与离焦量 d 以及 NA 成正比。图3(a)和3(b)给出了 $NA=0.7$ 时不同离焦量对应的干涉图。从图3可以看出, 随着离焦误差的出现, 干涉图像偏离了0级状态。如果基于这样的干涉条纹进行数据处理, 必然会在面形数据的解算结果中引入明显误差。



(a) 5 μm 干涉图



(b) 10 μm 干涉图

图3 不同离焦量对应的干涉图

Fig. 3 Interferograms corresponding to different defocusing amount

利用四步相移、解包裹运算后可以得到离焦误差引入的附加相位, 以无离焦情况为标准, 计算其对应残差均方根 (root mean square, RMS) 值分别

为 6.939 6 rad 和 14.019 2 rad。可见, 随着离焦量的增大, 由离焦引入的附加相位也随之增大。

上述分析是基于理想待测球面展开的, 在对具有一定面形误差的待测球面进行检测时, 需要分析离焦量对实际检测精度的影响。本文在理想球面上叠加一个幅值为 0.15 μm 的 peaks 函数作为随机面形误差, 对其进行仿真分析。当 NA 为 0.9、离焦量为 10 μm 时, 若不去除离焦误差, 最终面形重构残差 RMS 值为 8.157 3 λ , 而去除离焦误差后, 残差 RMS 值为 0.015 7 λ 。可见离焦误差对实际面形的检测精度产生接近 3 个数量级的影响, 因此在面形检测时需要离焦误差进行有效校正。

由于大 NA 镜面对面形检测具有更高的精度要求, 因此本文对具有相同离焦量 $d=5 \mu\text{m}$ 时, $NA=0.7$ 和 $NA=0.9$ 镜面的解包裹相位进行了计算, 如图4所示。

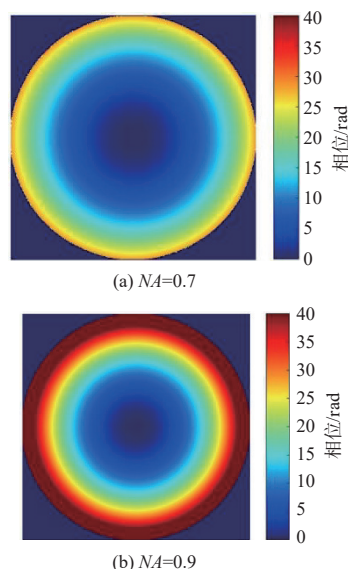


图4 不同 NA 对应的解包裹相位图

Fig. 4 Unwrapping phase diagrams corresponding to different NA

对比图4(a)和4(b)可知, 当 NA 由 0.7 增大到 0.9 后, 经解包裹运算后解调出的波面相位数据显著增大, 以无离焦情况为标准计算对应残差 RMS 值分别为 6.939 6 rad 和 12.971 7 rad。可见, 在离焦量相同情况下, 大 NA 球面对离焦误差更敏感, 因此在检测大 NA 球面时, 将其精确地调至零条纹位置可有效减小离焦误差。

2 离焦误差的提取及校正

根据上述分析可知, 大 NA 球面对离焦误差更

敏感,在实际操作中,利用传统方法将大 NA 球面调整至最佳测量位置需要耗费很多时间、精力。为了避免调整过程中的重复性,本文提出离焦误差提取算法辅助被测球面调整至最佳测量位置。

2.1 离焦误差提取算法

由于 Zernike 各阶多项式与经典像差存在对应关系^[15],因此离焦引入的光程差可由 Zernike 多项式表示^[16]为

$$D_{OP} = a_3 Z_3 + a_{10} Z_{10} + a_{21} Z_{21} + a_{36} Z_{36} \quad (5)$$

式中: Z_3 为离焦项; Z_{10} 为主球差项; Z_{21} 为二阶球差项; Z_{36} 为三阶球差项; a_i 分别为 Z_i 的系数 ($i=3,10,21,36$)。离焦项系数 a_3 可表示为^[17]

$$a_3 = \left(\frac{1}{2} NA^2 + \frac{1}{8} NA^4 + \frac{9}{160} NA^6 + \frac{1}{32} NA^8 + O(NA) \right) d \quad (6)$$

由式 (6) 可得离焦量 d 与数值孔径 NA 、离焦项系数 a_3 之间的关系式为

$$d = \frac{a_3}{\left(\frac{1}{2} NA^2 + \frac{1}{8} NA^4 + \frac{9}{160} NA^6 + \frac{1}{32} NA^8 \right)} \quad (7)$$

将测得的光程差 D_{OP} 利用 36 项 Zernike 多项式拟合后,把求得的离焦项系数 a_3 与 NA 一起代入式 (7),可反推得到离焦量的大小。

对此进行仿真验证。令 $\lambda=632.8$ nm, 针对一个曲率半径为 90 mm、 NA 为 0.9 的标准凸面镜,设置离焦量为 5 μm ,对所得干涉图进行解包裹运算后得到原始波前相位数据,利用 Zernike 多项式拟合后得到离焦项系数 $a_3=4.314$ 1。由于离焦项系数为正值,因此为焦外离焦,将离焦项系数 a_3 和 NA 代入式 (7) 中,得到提取出的离焦量 $d=5.147$ 3 μm ,与实际离焦量的偏差为 2.95 %。

同理,针对离焦量为 -5 μm 的干涉图,利用误差提取算法得到离焦项系数 $a_3=-4.313$ 7。由于离焦项系数为负,因此为焦内离焦,提取出的离焦量 $d=-5.146$ 9 μm ,与实际离焦量的偏差为 2.94 %。

2.2 离焦误差校正

根据算法所判断的离焦量和调整方向将被测球面调整至最佳测量位置后,可得到近似零条纹的干涉图,利用 Zernike 拟合算法对其进行拟合,可校正残留的离焦误差,具体校正流程如图 5 所示。

图 6(a) 给出了一幅具有较大离焦量的原始干涉条纹图,波面像差 RMS 值为 3.871 5 λ 。利用上述离焦误差提取算法对其进行处理,得到离焦项

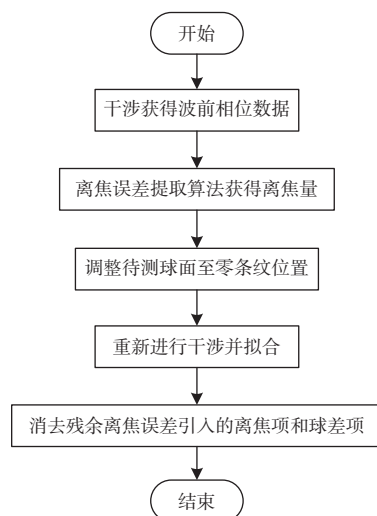


图 5 离焦误差校正流程图

Fig. 5 Flow chart of defocusing error correction

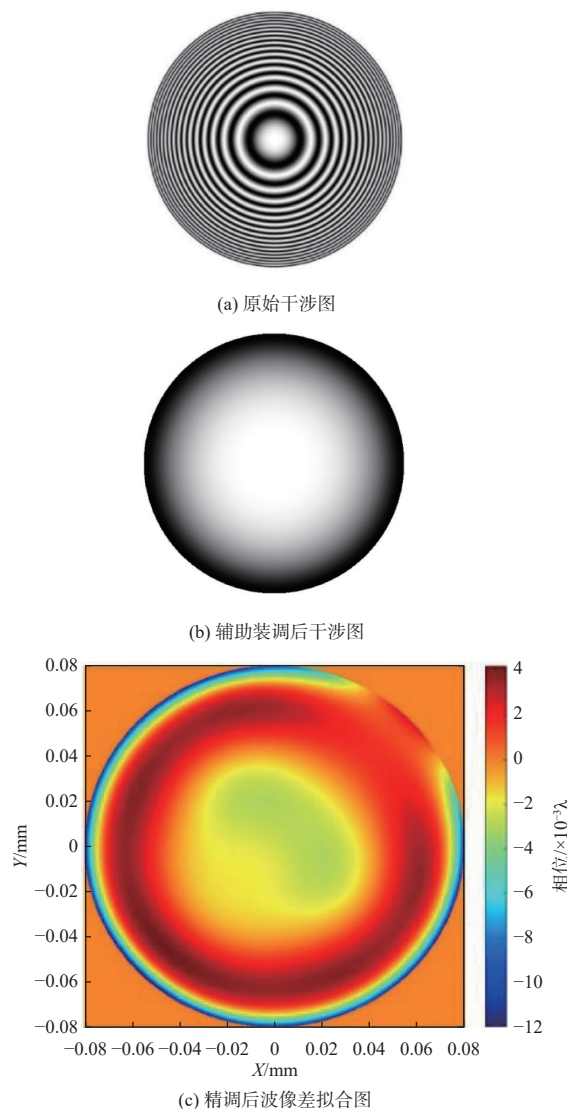


图 6 校正算法各步骤结果图

Fig. 6 Results diagram of each step of calibration algorithm

系数 $a_3=8.197\ 0$, 实测离焦量 $d=9.780\ 3\ \mu\text{m}$ 。由于该离焦量系数为正值, 因此根据实测离焦量将待测球面向焦外调整 $9.780\ 3\ \mu\text{m}$, 得到辅助装调后的零条纹干涉图如图 6(b) 所示。对其进行 Zernike 多项式拟合, 得到离焦项系数 $a_3=-0.241\ 8$ 。对比辅助装调前的离焦项系数值 $8.197\ 0$, 可知离焦误差已受到较大抑制, 但仍有残余离焦误差, 调整后的波面像差 RMS 值为 $0.114\ 2\ \lambda$, 仍无法满足亚纳米级检测精度。再利用 Zernike 多项式波前拟合技术得到残留离焦像差的具体量并去除。在对装调后的波像差数据进行 Zernike 多项式拟合过程中, 将离焦项 Z_3 以及由波前离焦引入的一阶球差项 Z_{10} 、二阶球差项 Z_{21} 、三阶球差项 Z_{36} 的系数置 0, 可消除离焦像差及球差, 以实现精调。精调后的波像差拟合图如图 6(c) 所示, 对应的波面像差 RMS 值为 $0.000\ 3\ \lambda$ 。

若利用传统方法校正离焦误差, 则需要不断调整待测球面镜前后位置, 直至肉眼判断干涉图为近似零条纹状态, 此过程较为繁琐。本文提出的辅助装调方法能够根据被测球面的离焦量和调整方向进行调整, 大幅提高装调效率。此外, 传统离焦误差补偿算法需要先将干涉条纹控制在近 0 级范围, 此时离焦误差大约在几个微米量级。本文算法通过干涉条纹分布计算初始位置存在的误差, 然后调整到近理想位置后再利用算法对残余的离焦误差进行补偿, 这实际上增大了元件的离焦误差提取和补偿范围。

为了进一步验证本文算法的有效性, 我们又对 $NA=0.9$, 离焦量在 $-25\ \mu\text{m}\sim 25\ \mu\text{m}$ 范围内, 以 $1\ \mu\text{m}$ 为步长的 50 组数据进行仿真, 得到的离焦误差原始值与实测值对比图如图 7 所示。

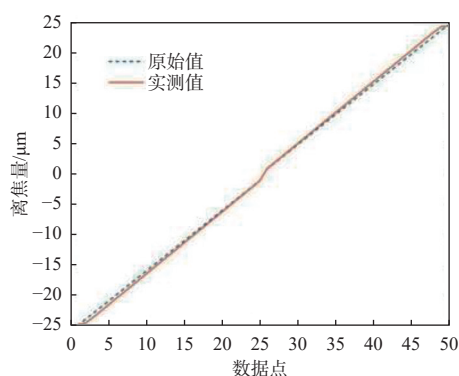


图 7 离焦误差原始值与实测值对比图

Fig. 7 Comparison between original and measured values of defocusing errors

从图 7 可以看出, 50 组数据的离焦量提取误差均不超过 $0.7\ \mu\text{m}$, 即离焦量误差均在 3% 以内, 验证了本文算法可实现对零条纹位置精确判断。利用上述实测值分别对其进行辅助装调, 得到相应的零条纹干涉图, 再利用 Zernike 波前拟合算法进一步精调, 得到的最终校正精度图如图 8 所示。

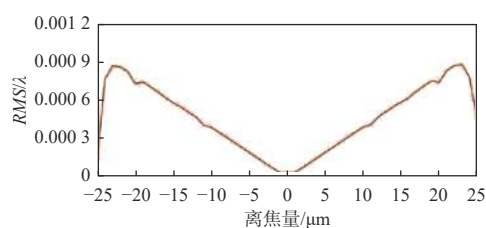


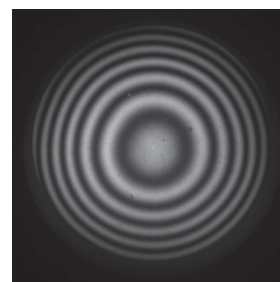
图 8 不同离焦量最终校正精度图

Fig. 8 Final correction accuracy diagram for different defocusing amount

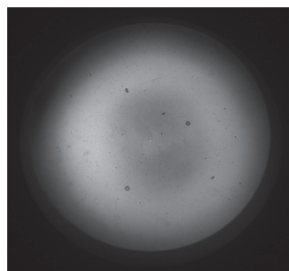
从图 8 可以看出, 利用本文方法处理离焦量在 $-25\ \mu\text{m}\sim 25\ \mu\text{m}$ 范围内的干涉图, 最终校正精度均不超过 $0.001\ 5\ \lambda$, 因此本文方法可将离焦量上限扩展至 $\pm 25\ \mu\text{m}$, 在此范围内进行检测, 最终能实现亚纳米级检测精度。实际检测过程中还需要考虑操作误差、空气扰动和外界振动等环境干扰因素, 以及 Zernike 拟合误差等可能影响最终检测精度的误差因素。

2.3 实验验证

为了验证本文方法的有效性, 使用 Zygo 干涉仪对一个 $NA=1.1$ 的球面进行实际检测。首先根据球面的基本参数确定检测位置, 得到的干涉条纹如图 9(a) 所示。然后利用离焦误差提取算法得到此时球面的离焦项系数值为 $-1.422\ 0$, 波面像差 RMS 值为 $0.412\ 3\ \lambda$, 计算出实测离焦量为 $d=-0.942\ 5\ \mu\text{m}$ 。根据这一数据, 利用线位移分辨率为 $0.1\ \text{nm}$ 的压电陶瓷将待测球面向焦内调整 $0.942\ 5\ \mu\text{m}$, 得到辅助装调后的干涉图如图 9(b) 所示。此时离焦项系数值为 $-0.124\ 6$, 可见离焦误差已得到较大抑制。



(a) 初始干涉条纹图



(b) 辅助装调后的干涉图

图9 实验干涉条纹图

Fig. 9 Experimental interference fringe patterns

从图9可以看出,调整后的干涉图已接近零条纹状态,满足检测条件。利用 Zernike 波面拟合技术对被检球面解包裹相位数据进行处理,在此基础上进一步将离焦项和一阶球差项、二阶球差项、三阶球差项的系数置0,得到如图10所示的波像差拟合图,该球面的表面检测结果 RMS 值为 0.0074λ 。因此,通过实验验证了本文所提检测方案的可行性,提高了检测元件精确位置的装调的效率。

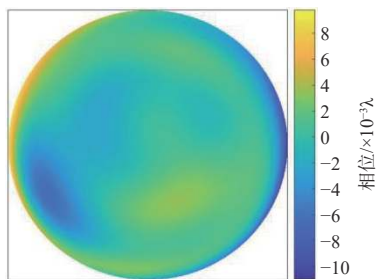


图10 辅助装调后波像差拟合图

Fig. 10 Fitting diagram of wavefront aberration after auxiliary installation and adjustment

3 结论

针对球面面形检测中离焦误差的校正,本文提出了一种基于误差提取算法辅助装调的离焦误差校正方法。该方法首先利用波前离焦引入的光程差与离焦量之间的关系模型,实现了离焦量的定量提取,并判断调整方向,根据此离焦量快速精准地调整干涉仪中待测球面的位置,以实现辅助装调,从而大幅度减小了离焦误差。然后通过基于 Zernike 多项式的波前拟合技术消除离焦项和球差项,以实现精调,进一步校正残留的离焦误差。利用本文提出的离焦误差提取算法对 $NA=0.9$, 不同离焦量的大 NA 球面进行处理,提取出的离焦量误差均在 3% 以内。仿真结果表明,该方法能快速精

准地将被测球面调整至零条纹位置,并将离焦量检测范围扩展至 $\pm 25\mu\text{m}$,且最终波像差 RMS 值达到亚纳米级校正精度,验证了本文提出的误差提取算法辅助装调方法的有效性。

参考文献:

- [1] 李艳秋,南雁北,陈雨情,等.极紫外光刻机曝光系统光学设计研究与进展[J].*光学学报*,2023,43(15):1522002-1-16.
LI Yanqiu, NAN Yanbei, CHEN Yuqing, et al. Research and progress on optical design of exposure systems in extreme ultraviolet lithography[J]. *Acta Optica Sinica*, 2023, 43(15): 1522002-1-16.
- [2] 于新峰.高数值孔径光刻投影物镜成像理论及像质补偿和检测技术研究[D].长春:中国科学院大学(中国科学院长春光学精密机械与物理研究所),2023.
YU Xinfeng. Study on the vector imaging theory together with image performance compensation and testing for hyper numerical aperture lithographic lens[D]. Changchun: University of Chinese Academy of Sciences(Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences), 2023.
- [3] 张德福,李显凌,芮大为,等.193 nm 投影光刻物镜光机系统关键技术研究进展[J].*中国科学:技术科学*,2017,47(6):565-581.
ZHANG Defu, LI Xianling, RUI Dawei, et al. Key technology progress of optomechanical systems in 193 nm projection objective[J]. *Scientia Sinica Technologica*, 2017, 47(6): 565-581.
- [4] 李昂,李艳秋,韦鹏志,等.大数值孔径($NA=0.55$)变倍率极紫外光刻投影物镜偏振像差高精度检测方法[J].*光学学报*,2022,42(23):64-75.
LI Ang, LI Yanqiu, WEI Pengzhi, et al. High-precision measurement method of polarization aberrations for large numerical aperture ($NA=0.55$) variable-magnification extreme ultraviolet lithography projection objective[J]. *Acta Optica Sinica*, 2022, 42(23): 64-75.
- [5] 刘婷.高精度小平面干涉检测技术研究[D].西安:西安工业大学,2015.
LIU Ting. Research on high precision small plane interferometric testing technique[D]. Xi'an: Xi'an Technological University, 2015.
- [6] 李瑶,杨甬英,王晨,等.点衍射干涉检测技术[J].*中国光学*,2017,10(4):391-414.

- LI Yao, YANG Yongying, WANG Chen, et al. Point diffraction interference detection technology[J]. *Chinese Optics*, 2017, 10(4): 391-414.
- [7] 王青蓝, 全海洋, 胡松, 等. 光刻物镜波像差绝对检测技术综述[J]. *光电工程*, 2023, 50(5): 42-65.
- WANG Qinglan, QUAN Haiyang, HU Song, et al. Review of absolute measurement of wavefront aberration in lithography objective[J]. *Opto-Electronic Engineering*, 2023, 50(5): 42-65.
- [8] 刘东. 光电干涉检测技术[M]. 杭州: 浙江大学出版社, 2020: 157-165.
- LIU Dong. Interferometric optical testing[M]. Hangzhou: Zhejiang University Press, 2020: 157-165.
- [9] 王道档. 高精度点衍射球面干涉检测技术及系统研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2012.
- WANG Daodang. Point diffraction interferometric system for spherical surface testing[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2012.
- [10] RIMMER M P, KING C M, FOX D G. Computer program for the analysis of interferometric test data[J]. *Applied Optics*, 1972, 11(12): 2790-2796.
- [11] 李贤辉, 吴清文, 杨洪波. 光学工程分析中的镜面面形处理新方法[J]. *光学技术*, 2003(6): 752-753.
- LI Xianhui, WU Qingwen, YANG Hongbo. New method of mirror surface figure treatment in optical engineering analysis[J]. *Optical Technique*, 2003(6): 752-753.
- [12] 王道档, 杨甬英, 陈晓钰, 等. 基于差分方法的高精度球面调整误差校正[J]. *光电子·激光*, 2013, 24(1): 127-132.
- WANG Daodang, YANG Yongying, CHEN Xiaoyu, et al. High-precision calibration of spherical surface misalignment based on difference method[J]. *Journal of Optoelectronics-Laser*, 2013, 24(1): 127-132.
- [13] 王道档, 杨甬英, 陈晓钰, 等. 高精度球面检测中调整误差的精确校正[J]. *纳米技术与精密工程*, 2013, 11(1): 20-26.
- WANG Daodang, YANG Yongying, CHEN Xiaoyu, et al. Accurate calibration of misalignment in high-precision spherical surface testing[J]. *Nanotechnology and Precision Engineering*, 2013, 11(1): 20-26.
- [14] 范琦, 王云飞, 杨百愚, 等. 基于相位恢复的光学元件面形检测技术研究[J]. *应用光学*, 2015, 36(2): 242-246.
- FAN Qi, WANG Yunfei, YANG Baiyu, et al. Testing optical surface with phase recovery[J]. *Journal of Applied Optics*, 2015, 36(2): 242-246.
- [15] 谢苏隆. Zernike 多项式拟合曲面中拟合精度与采样点数目研究[J]. *应用光学*, 2010, 31(6): 943-949.
- XIE Sulong. Sampling point number in curved surface fitting with Zernike polynomials[J]. *Journal of Applied Optics*, 2010, 31(6): 943-949.
- [16] DORBAND B, TIZIANI H J. Testing aspheric surfaces with computer-generated holograms analysis of adjustment and shape errors[J]. *Applied Optics*, 1985, 24(16): 2604-2611.
- [17] 王道档, 杨甬英, 邵卫红, 等. 球面干涉检测中改进的调整误差校正方法[J]. *浙江大学学报(工学版)*, 2012, 46(10): 1932-1936.
- WANG Daodang, YANG Yongying, SHAO Weihong, et al. Improved method for misalignment calibration in interferometric testing of spherical surface[J]. *Journal of Zhejiang University(Engineering Science)*, 2012, 46(10): 1932-1936.