

逆向迭代离轴非球面检测方法

任王涛^{1,2*}, 徐洪艳^{2**}

¹中国科学院光电技术研究所质检中心, 四川 成都 610209;

²中国科学院大学, 北京 100049

摘要 离轴非球面广泛应用于现代光学系统中, 一般需要特定的光学辅助元件对其进行检测, 为此提出一种逆向迭代非零检测法。该方法可以不借助光学辅助元件, 适用于检测同一类的离轴非球面。首先设计检测光路, 并采用逆向迭代法去除非零误差。然后对系统误差、调整误差和随机误差等进行分析补偿以及各项误差的处理方法。最后通过仿真模拟, 逆向迭代求解离轴非球面的面形方均根值为 0.133λ , 与仿真模拟的实际面形一致, 仿真拟合的残差在 $10^{-5}\lambda$ 以内。逆向迭代非零检测法是针对离轴非球面一种高精度和通用型的非零检测方法。

关键词 光学器件; 离轴非球面; 面形误差; 逆向迭代; 精度分析

中图分类号 O432.2 文献标志码 A

doi: 10.3788/LOP57.212301

Method of Inverse Iteration Off-Axis Aspheric Surface Detection

Ren Wangtao^{1,2*}, Xu Hongyan^{2**}

¹Quality Inspection Center, Institute of Optics and Electronics, Chinese Academy of Sciences, Chengdu, Sichuan 610209, China;

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

Abstract Off-axis aspheric surfaces are widely used in modern optical systems and generally require specific auxiliary optical elements to be detected. Accordingly, this study proposes a reverse iterative non-zero detection method that can be used to detect the same type of off-axis aspheric surfaces without auxiliary optical elements. First, we design a detection optical path and established a reverse iteration method to eliminate non-zero errors. Next, we analyze and compensated the system, adjustment, and random errors, as well as their processing methods. Finally, through a simulation, we obtain the RMS value of the surface shape of the off-axis aspheric surface using reverse iteration as 0.133λ , which is consistent with the actual surface shape of the simulation. The residual error of the simulation fitting is within $10^{-5}\lambda$. In conclusion, the reverse iterative non-zero detection method is a high-precision and universal non-zero detection method for off-axis aspheric surfaces.

Key words optical devices; off-axis aspheric surface; surface shape error; reverse iteration; accuracy analysis

OCIS codes 230.1150; 120.4290; 120.4630; 120.5700; 120.6650

1 引言

非球面光学元件的设计比较灵活, 这可以有效确保光学系统的性能。由于非球面的设计自由度多, 其检测难度随着自由度的增多而增大, 所以不能像平面镜和球面光学元件一样得到大规模的应用^[1]。与非球面相比, 离轴非球面失去了原有的对称性, 使得检测难度更大。一般对离轴非球面采用

光学辅助元件进行零检测, 但每个离轴非球面都需要一个专用的辅助光学元件, 所以检测的成本高和周期长^[2]。非零位检测的方法比较灵活, 其能够对一定范围内的离轴非球面面形进行检测, 但零位条件被测试面的理论形状偏离了参考面, 造成检测值与真实值之间存在一定偏差, 即回程误差^[3]。探测器探测到的波前为回程误差与离轴非球面面形误差的混叠, 这给面形的重构带来一定难度。

收稿日期: 2020-02-10; 修回日期: 2020-03-05; 录用日期: 2020-03-10

基金项目: 国家自然科学基金(12022308)

* E-mail: 406167081@qq.com; ** E-mail: xhy@ioe.ac.cn

传统的面形重构技术通过从最终的波前信息减去离轴非球面与参考面之间的几何偏差来获取被测面的面形信息,但其只适用于小口径和小非球面度的离轴非球面。随着球面口径的增大和非球面度的增多,重构面形的精度会越来越低^[4]。

综上所述,本文提出一种逆向迭代重构技术。利用该技术对离轴非球面的面形进行检测,在光学追迹软件中对离轴非球面面形的检测光路进行仿真建模。将被测离轴非球面的初始形状作为理想值,将 Zernike 多项式表征的离轴非球面作为面形误差,设相应的 Zernike 多项式的系数为变量^[5]。将实际的探测波前作为目标函数,对其进行拟合优化可以求解被测离轴非球面的面形。该技术若在理论上能够搭建合适的检测光路,就可以得到检测波前,最终对其进行逆向迭代可以得到离轴非球面的面形。目前,非球面补偿器以及 CGH (Comparative Genomic Hybridization) 片是检测离轴非球面最高精度的元件^[6],但缺点是需要一对一检测,成本较高^[7]。逆向迭代法是以现有的器材来搭建检测光路,辅以算法可以提高解调精度,对离轴非球面的检测具有高精度和低成本的优点。逆向迭代求解法是基于理论建模和实验系统的光线追迹而实现的,其可以巧妙避开离轴非球面的非球面度对最终波前的影响,同时在算法解调的过程中可以较好地去除回程误差以及调整误差等影响,通用性较强。

2 离轴非球面的检测系统

常用的非球面一般为轴对称旋转非球面,可以表示为

$$z = \frac{c^2 r^2}{1 + \sqrt{1 - (1+k)c^2 r^2}} + a_1 r^2 + a_2 r^4 + a_3 r^6 + \dots + a_n r^{2n}, \quad (1)$$

式中: c 为顶点曲率的半径; r 为非球面的半径; k 为二次曲线常数, k 值不同,表示非球面的种类不同; $a_1, a_2, a_3, \dots, a_n$ 为非球面高次项的系数,若值都为零,此时表示二次曲面方程。对于离轴非球面,需要在原有非球面的基础上给出通光口径和离轴量等参数^[8]。

当 $-1 < k < 0$ 时,(1)式表示椭球面方程,其光学性质为光从一个焦点发出在另一个焦点上会聚。对于离轴非球面同样拥有该性质,可根据该性质来设计光路以检测离轴非球面的面形^[9]。

该测量系统中,探测器的波前函数包含被测离

轴非球面的面形、系统结构参数、系统结构误差、干涉仪本身误差以及环境因素等因素^[10],可以表示为

$$W_{\text{det}} = f(X_{\text{woff-asp}}, X_{\text{system}}, \epsilon, o), \quad (2)$$

式中: $X_{\text{woff-asp}}$ 为被测离轴非球面的面形; X_{system} 为系统代入的误差波前; ϵ 和 o 为不同的环境因素; $f(\cdot)$ 为各项参数叠加的求解函数。通常情况下,系统组装完毕后, X_{system} 值是不变的,而 ϵ 和 o 值可以控制在一个极小的范围之内,若将这些影响因素除去,那么对于 W_{det} 的影响因素将只剩下 $X_{\text{woff-asp}}$ 。

离轴非球面的面形检测系统如图 1 所示。从图 1 可以看到,干涉仪出射平行的测试光束经过透镜 1 后,会聚成球面波的形式并照射在测试镜上,经过测试镜反射后继续以球面波的形式传播,经过透镜 2 后形成平行光,最后平行光经过反射镜反射后沿原路返回,此时携带测试镜面形信息的波前被干涉仪接收,波前信息经过解调后,通过计算可得到测试镜的面形信息。

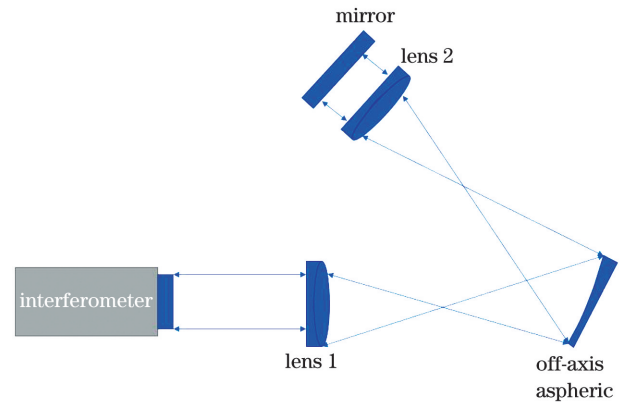


图 1 离轴非球面的检测系统

Fig. 1 Off-axis aspheric detection system

系统中透镜 1、透镜 2 和反射镜均为固定参数的标准镜,干涉仪为 Zygo 标准干涉仪,所以该系统对于离轴非球面的面形检测有一定的通用性。但难点在于最终波前信息的处理,最终的波前信息包含系统误差、调整误差以及环境因素等,实验需将这些误差信息剔除之后才能对最终的波前信息进行逆向迭代以求解离轴非球面的面形。

3 算法分析

该检测系统中,最终的波前信息可通过干涉仪直接获取,但需要求解离轴非球面面形的均方根 (RMS) 值^[11]。通过仿真建模来建立一个最终的波前和离轴非球面面形的函数关系,表达式为

$$W_{\text{det}} \approx g(W_{\text{woff-asp}}), \quad (3)$$

式中: $g(\cdot)$ 为只有离轴非球面面形误差对最终波前

的求解函数; $W_{\text{woff-asp}}$ 为离轴非球面的实际面形误差。通过对 W_{det} 进行反函数运算, 可得到

$$W_{\text{woff-asp}} = g^{-1}(W_{\text{det}}) \quad (4)$$

一般来说, 光学元件经过精密抛光后, 其面形会变得连续且平缓, 而通过干涉仪检测所得的面形误差频率主要集中在中低频^[12]。因此, $W_{\text{woff-asp}}$ 可以采用有限项标准的 Zernike 多项式的线性组合来表示, 表达式为

$$W_{\text{woff-asp}} = \sum_{i=1}^l b_i Z_i(\rho, \theta) \quad (5)$$

式中: b 为 $W_{\text{woff-asp}}$ 的 Zernike 多项式的系数, 只要求得各项系数就可以求解离轴非球面的面形; $Z_i(\rho, \theta)$ 为 Zernike 多项式, ρ 为原点到点 (x, y) 的长度, θ 为 ρ 与 x 轴的夹角; l 为多项式的项数。

当按照系统结构建立模型时, 有着与(3)式表现形式类似的函数关系, 表达式为

$$W_{\text{det}}^* = g(W_{\text{woff-asp}}^*) \quad (6)$$

式中: W_{det}^* 为拟合后的波前; $W_{\text{woff-asp}}^*$ 为拟合后的面形误差。此时待求解面形可以表示为

$$b_i = g^{-1} C_i \quad (7)$$

$$b_i^* = g^{-1} C_i^* \quad (8)$$

式中: C 为 W_{det} 的 Zernike 多项式的系数; b^* 为 $W_{\text{woff-asp}}^*$ 的 Zernike 多项式的系数; C^* 为 W_{det}^* 的 Zernike 多项式的系数。当模型中像面波前与实际

波前一致时, 此时可以判定为待求解面形与实际面形一致。将面形作为变量, $W_{\text{woff-asp}}^*$ 可表示为

$$W_{\text{woff-asp}}^* = g^{-1}(W_{\text{det}}^*) \quad (9)$$

为了便于判断实际波前与仿真波前的一致性, 可以采用 Zernike 多项式来表示, 表达式为

$$W_{\text{det}} = \sum_{i=1}^l C_i Z_i(\rho, \theta) \quad (10)$$

$$W_{\text{det}}^* = \sum_{i=1}^l C_i^* Z_i(\rho, \theta) \quad (11)$$

结合上述等式可以得到在系统模型和实际系统中, 此时满足(7)式和(8)式。

除了与被测面的面形不一致外, 其他实际系统的结构与模拟系统一致。当 $W_{\text{woff-asp}}$ 与 $W_{\text{woff-asp}}^*$ 一致时, 此时模拟面形与实际面形一致, 最终波前 W_{det} 与 W_{det}^* 也一致, 而多项式系数也足够接近。

目标函数可以用 b_i^* 来表示, 可表示为

$$W_{\text{woff-asp}} \approx W_{\text{woff-asp}}^* = \sum_{i=1}^l b_i^* Z_i(\rho, \theta) \quad (12)$$

基于系统建模的逆向迭代优化重构面形的流程如图 2 所示, 面形误差由 37 项 Zernike 多项式来表示, 其中 $O(b_i^*)$ 为对最终多项式系数的评价判断函数; j 为评价函数值。一般采用干涉法来检测最终被测面的面形, 而 Zernike 多项式可以满足绝大多数面形精度的要求。

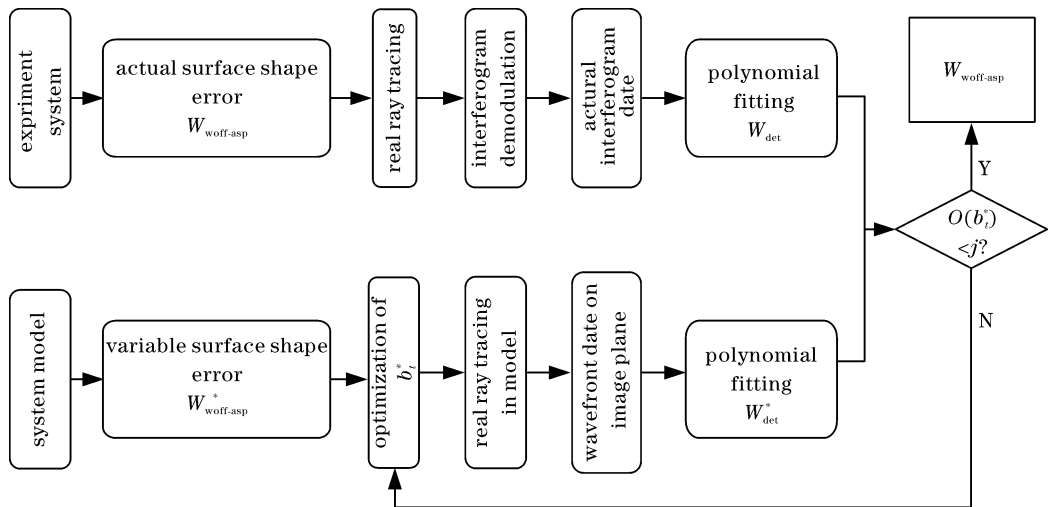


图 2 逆向迭代优化重构面形的流程

Fig. 2 Reverse iterative optimization and reconstruction process

对圆锥系数 $k = -0.5$ 、离轴量大于原始主镜半径 R 和 RMS 值为 0.1λ (λ 为波长) 的离轴非球面进行逆向迭代以求解面形, 并与传统方法直接解调面形信息进行比较, 结果如图 3 所示。

从图 3 可以看到, 传统的解调方法对于小口径

二次项离轴非球面的面形解调有一定的精度保证, 对于中口径二次项离轴非球面已经无法保证解调精度, 对于高次项离轴非球面已经难以保证解调面形的精度; 对于逆向迭代法, 无论是二次项还是高次项的中、小口径离轴非球面均可以保证解调精度。

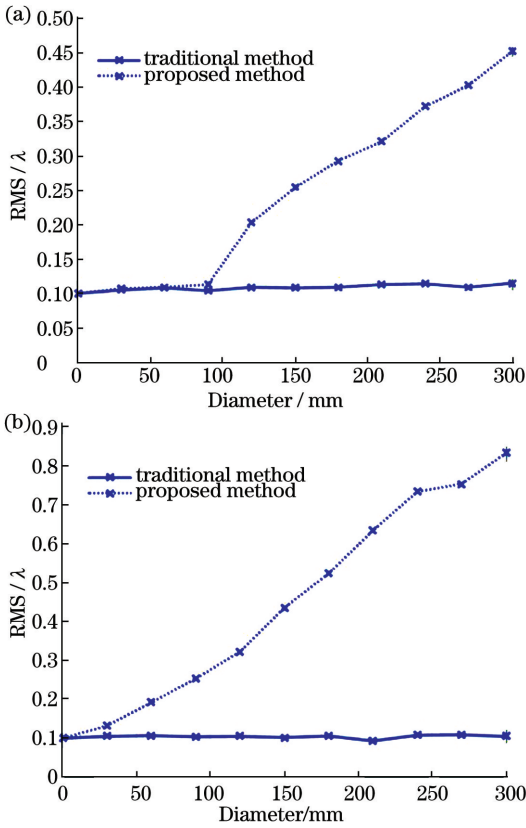


图3 离轴非球面面形在不同阶数的仿真结果。
(a)二次项;(b)高次项
Fig. 3 Simulation results of off-axis aspheric surface shapes at different orders.
(a) Quadratic term; (b) higher order items

4 误差分析

若实验各器件都位于理想的设定位置,可通过建立的模型直接逆向迭代来求解离轴非球面的面形信息,但在实际建立的系统中包含系统误差、调整误差和随机误差等。对于系统误差,可将检测系统空载以标定其他实验器件对最终波前的影响。对于调整误差,其包含离轴非球面的倾斜、偏心以及测试镜与校准光路镜之间的间距误差,这些误差对于最终波前的影响较大,所以必须求解这些误差才能很好地逆向迭代离轴非球面的面形 RMS 值。对于随机误差,可通过多次逆向迭代离轴非球面的面形来求解平均值并消除。

光学元件经过精密抛光后,其面形会变得连续且平缓,通过干涉仪检测所得的面形误差频率主要集中在中低频,而 Zernike 多项式表征的面形也为中低频信息,1~37 项多项式可以表征绝大多数的面形信息,其中包含调整姿态误差项,可设其为变量并随其他面形信息量一同设为变量,并通过逆向迭

代来求解调整误差量。之后求解面形的过程中,可以直接剔除这些调整姿态误差项求解面形即可。

选取 $k = -0.5$ 、口径为 160 mm 和一定的面形 RMS 值为 0.1λ 的高阶离轴非球面,通过附加一定的调整误差来逆向迭代求解离轴非球面的面形。图 4 和图 5 为采用逆向迭代法对调整误差的补偿能力。

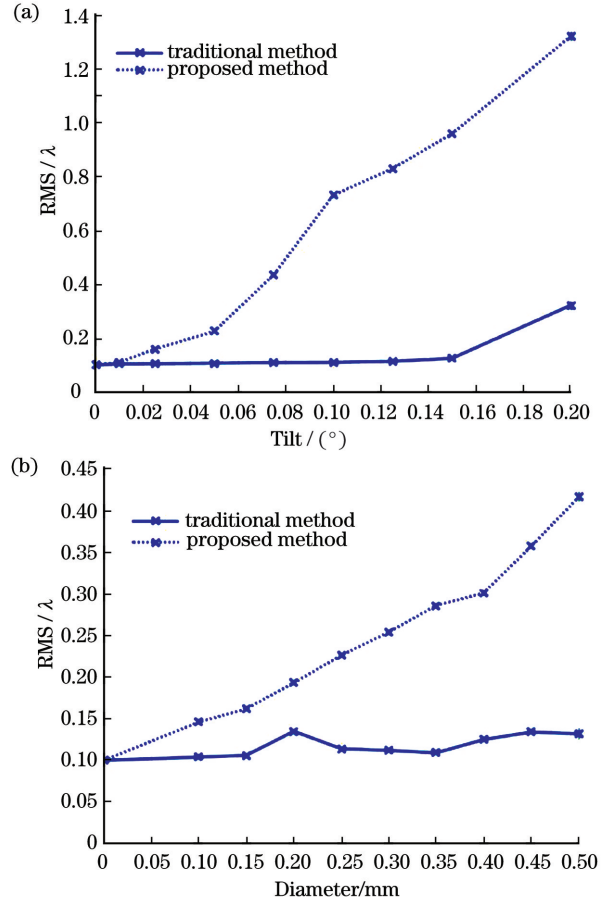


图4 离轴非球面在不同情况下的补偿效果。
(a)倾斜;(b)偏心

Fig. 4 Effect of off-axis aspheric surface under different conditions. (a) Tilt; (b) eccentricity

图 4 为采用逆向迭代法对离轴非球面在倾斜和偏心情况下的补偿能力。从图 4 可以看到,对于离轴非球面,其倾斜误差容限为 0.15° ,偏心量误差容限为 0.5 mm,超过这个误差之后算法会失去原有的补偿能力。

图 5 为采用逆向迭代法对离轴非球面与其他校准器件之间的间距误差补偿效果。从图 5 可以看到,离轴非球面与透镜 1 的误差容限为 0.01 mm,与透镜 2 的误差容限为 5 mm。与透镜 1 的误差容限较小,精度要求较高;与透镜 2 的误差容限较大,精度要求较低。

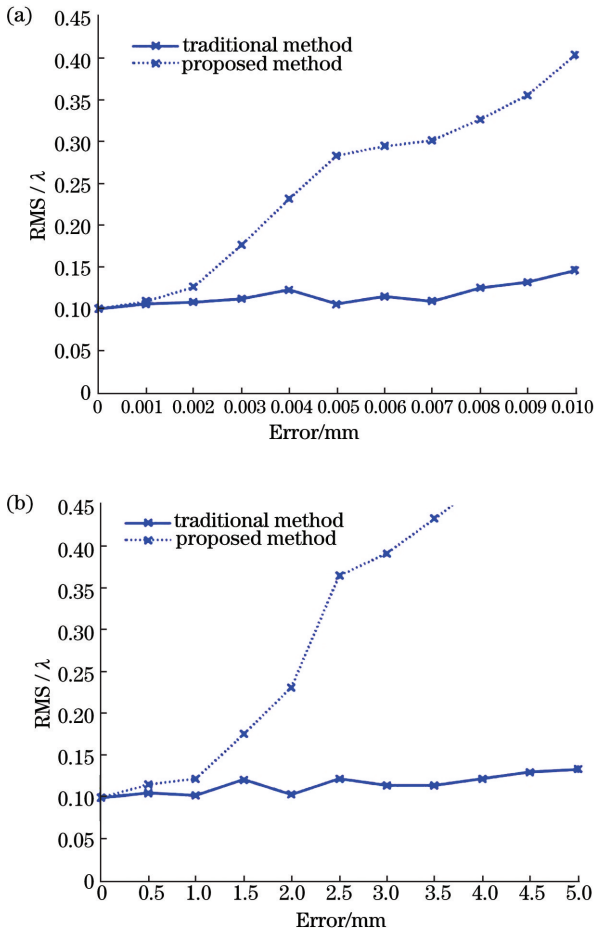


图5 离轴非球面与不同透镜的间距误差补偿效果。

(a)透镜 1;(b)透镜 2

Fig. 5 Effect of pitch error between off-axis aspheric surface and different lenses. (a) Lens 1; (b) lens 2

采用逆向迭代法不仅可以确定实验系统的误差容限,同时也能判断实际情况中的实验条件是否可行,实验结果表明逆向迭代法有很好的补偿效果。

5 仿真模拟

对 $k = -0.5$ 、口径为 160 mm、离轴量为 160 mm、顶点曲率半径为 -800 mm 以及附加一定高次项的离轴非球面进行仿真模拟。图 6(a)为理想状态下的干涉波前,图 6(b)为附加随机调整误差项的最终干涉波前经过逆向迭代求解的离轴非球面面形。图 7 为解调后的面形。

将 Zernike 多项式的 1~37 项作为变量,逆向迭代求解离轴非球面的面形并将其作为自变量,采用该方法解调得到的最终面形如图 7(a)所示。从图 7(a)可以看到,求得面形 RMS 值为 0.139λ ,峰谷值为 0.635λ 。图 7(b)为仿真离轴非球面的面形。

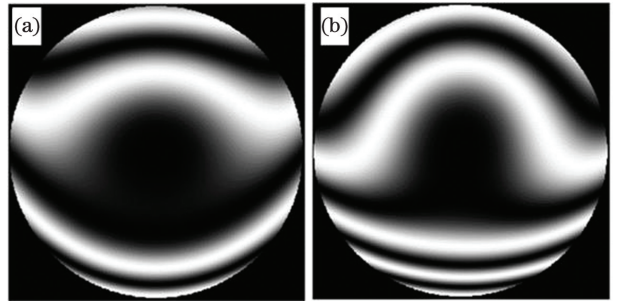


图6 不同情况下的干涉图样。

(a)只附加面形;(b)附加随机调整误差项

Fig. 6 Interference patterns in different situations.

(a) Only surface shape is added;

(b) random adjustment error term is added

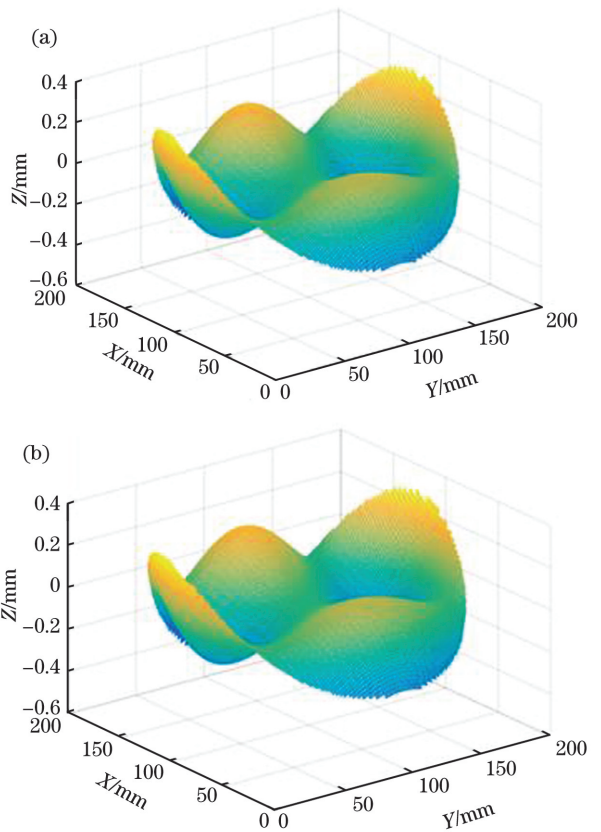


图7 不同方法解调后的面形。

(a)逆向迭代;(b)仿真模拟

Fig. 7 Face shapes demodulated by different methods.

(a) Reverse iteration; (b) simulation

从图 7(b)可以看到,面形 RMS 值为 0.139λ ,峰谷值为 0.635λ 。对图 7 的残差进行拟合,残差的峰谷值小于 $10^{-3}\lambda$,RMS 值小于 $10^{-5}\lambda$ 。

6 结 论

离轴非球面的面形检测系统中,采用逆向迭代重构法对离轴非球面的面形进行求解,分析该方法

对于二次项和高次项离轴非球面的面形求解效果。由于系统对误差信息较敏感,为此分析系统误差、调整误差和随机误差对最终波前的影响以及各项误差的处理方法。最终的仿真模拟中,选取附加原始面形 RMS 值为 0.1λ 的离轴非球面并给予随机调整误差项,采用逆向迭代法来求解离轴非球面的面形信息,求解结果与仿真模拟的面形残差 RMS 值均在 $10^{-5}\lambda$ 以内,满足面形求解精度的要求,为之后求解离轴非球面的面形奠定基础。由于误差因素较多,该方法还需进一步探索。

参 考 文 献

- [1] Zhu J, Hou W, Zhang X D, et al. Design of a low F -number freeform off-axis three-mirror system with rectangular field-of-view [J]. *Journal of Optics*, 2015, 17(1): 015605.
- [2] Zhang H D, Wang X K, Xue D L, et al. Surface testing method for ultra-large convex aspheric surfaces [J]. *Chinese Optics*, 2019, 12(5): 1147-1154.
张海东, 王孝坤, 薛栋林, 等. 一种针对超大口径凸非球面的面形检测方法 [J]. *中国光学*, 2019, 12(5): 1147-1154.
- [3] Ma S, Zhu R, Quan C, et al. Blind phase error suppression for color-encoded digital fringe projection profilometry [J]. *Optics Communications*, 2012, 285(7): 1662-1668.
- [4] Zhong B, Chen X H, Wang J, et al. Fabrication and test of high-precision off-axis aspheric lens [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2018, 47(7): 0718003.
钟波, 陈贤华, 王健, 等. 高精度离轴非球面透镜的制造与检测 [J]. *红外与激光工程*, 2018, 47(7): 0718003.
- [5] Shi T, Liu D, Zhang L, et al. Reverse optimization reconstruction method for aspheric testing in a nonnull interferometer [J]. *Acta Optica Sinica*, 2014, 34(6): 0612007.
师途, 刘东, 张磊, 等. 非球面非零位检测的逆向优化面形重构 [J]. *光学学报*, 2014, 34(6): 0612007.
- [6] He Y H, Li Q, Gao B, et al. Measurement of the transmission wavefront of a large-aperture aspheric lens based on computer-generated hologram [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2019, 56(2): 021202.
何宇航, 李强, 高波, 等. 基于计算全息元件的大口径非球面透镜透射波前检测方法 [J]. *激光与光电子学进展*, 2019, 56(2): 021202.
- [7] Liu X Y. Design of aspheric microlens made by photoresist reflow method [J]. *Acta Optica Sinica*, 2019, 39(2): 0208001.
刘向阳. 光刻胶热熔法制备的非球面微透镜的设计方法 [J]. *光学学报*, 2019, 39(2): 0208001.
- [8] Jia M, Xue C X. Design of dual-band infrared optical system with Q-type asphere [J]. *Acta Optica Sinica*, 2019, 39(10): 1022001.
贾孟, 薛常喜. 基于 Q-type 非球面的双波段红外光学系统设计 [J]. *光学学报*, 2019, 39(10): 1022001.
- [9] Xi J P, Li B, Ren D X, et al. Research progress of measurement technology for large-diameter aspheric elements on grinding stage [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2018, 55(3): 030008.
席建普, 李彬, 任东旭, 等. 大口径非球面元件磨削轮廓测量技术研究进展 [J]. *激光与光电子学进展*, 2018, 55(3): 030008.
- [10] Zhang L, Li D, Zhou S, et al. Spacing calibration of adaptive null compensator in free form surface interferometer [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2018, 45(11): 1104005.
张磊, 李东, 周胜, 等. 自由曲面干涉仪中自适应零位补偿器间距标定 [J]. *中国激光*, 2018, 45(11): 1104005.
- [11] Wang X K, Zheng L G, Zhang B Z, et al. Testing of large aspheric surfaces by subaperture stitching interferometry [J]. *Journal of Applied Optics*, 2009, 30(2): 273-278.
王孝坤, 郑立功, 张斌智, 等. 子孔径拼接检测大口径非球面技术的研究 [J]. *应用光学*, 2009, 30(2): 273-278.
- [12] Li F Z, Zhao J L, Li R G, et al. Design and fabrication of CGH for aspheric surface testing and its experimental comparison with null lens [J]. *Proceedings of SPIE*, 2010, 7656: 765643.