

猫眼波前定位虚实结合干涉非球面参数误差测量 (特邀)

胡 摇, 陶 鑫, 郝 群

(北京理工大学精密光电测试仪器及技术北京市重点实验室, 北京 100081)

摘要: 非球面广泛应用于光学系统中。表征非球面的基本参数包括顶点曲率半径、圆锥系数以及高阶非球面系数, 它们贯穿了非球面的设计、制造、检测、装调过程。对非球面参数的高精度测量是加工和装调的前提。提出了一种基于虚实结合干涉仪的部分补偿非球面参数误差测量系统。在该系统中, 采用部分补偿干涉法测量剩余波前, 复用干涉仪利用轴向扫描透镜的猫眼波前定位法测量补偿镜与被测镜之间的间距, 采用虚实结合迭代算法进行参数误差求解。该系统仅需在部分补偿干涉光路中引入会聚透镜, 装调简单, 测量精度高。通过一个四次非球面参数误差测量实验验证了该方法的有效性和精度。

关键词: 仪器科学与技术; 非球面参数误差测量系统; 虚实结合干涉法; 猫眼波前定位
中图分类号: TH74 **文献标志码:** A **DOI:** 10.3788/IRLA20220497

Virtual-real combination interferometry for aspheric surface parameter error measurement with cat-eye-wavefront positioning (*invited*)

Hu Yao, Tao Xin, Hao Qun

(Beijing Key Laboratory for Precision Optoelectronic Measurement Instrument and Technology, School of Optics and Photonics, Beijing Institute of Technology, Beijing 100081, China)

Abstract: Aspheric surfaces are widely used in optical systems. Aspheric surface parameters, including vertex radius of curvature, conic constant, and high-order aspheric coefficients participate in optical design, manufacture, measurement, alignment and assembly. Precision measurement for aspheric surface parameters is the basis for manufacture, alignment and assembly. A partial compensation measurement system is proposed based on virtual-real combination interferometer for aspheric surface parameter error measurement. In this measurement system, residual wavefronts are measured by partial compensation interferometry. The interferometer is multiplexed in cat-eye-wavefront positioning method to measure the compensation distance which is the distance between compensator and aspheric surface under test. Aspheric surface parameter errors are calculated by virtual-real combination iterative algorithm. The system only needs to introduce a converging lens into the optical path of partial compensation interferometry, which is easy to align and assemble, and has high measurement accuracy. The effectiveness and accuracy are verified through the measurement of a 4th-order aspheric surface.

Key words: instrument science and technology; aspheric parameter error measurement system; virtual-real combination interferometry; cat-eye wavefront positioning.

收稿日期: 2022-07-20; 修订日期: 2022-08-30

基金项目: 国家自然科学基金 (51735002); 中国科学院战略性先导科技专项 (XDA25020317)

作者简介: 胡摇, 女, 副教授, 博士, 主要从事智能干涉仪、计算成像方面的研究。

0 引言

非球面相比球面有更多的自由度,可以有效地降低光学系统的像差、体积和质量^[1-3]。因此,非球面被越来越广泛地用于先进的光学系统中,例如空间望远镜^[4]、光刻机^[5]、星载遥感相机^[6]、星载光谱仪^[7]和激光武器^[8]等领域。

非球面参数是表征一个非球面的整体形状的基本变量。对于回转对称非球面,非球面的表达式^[3]可以表示为:

$$z = \frac{r^2}{R + \sqrt{R^2 - (1 + K)r^2}} + \sum_{i=2}^n A_{2i} r^{2i} \quad (1)$$

式中: z 为非球面在对称轴 z 轴方向的矢高; $r = \sqrt{x^2 + y^2}$ 为非球面上的点 (x, y, z) 距离 z 轴的径向距离; R 为非球面的顶点曲率半径; K 为非球面的圆锥系数; A_{2i} 为高阶非球面系数。其中 R 、 K 和 A_{2i} 即为非球面参数,决定了非球面的面型,表征了非球面的基本光学性质。随着光学设计和加工水平的提高,包含高阶项的高阶非球面逐步得到应用,对上述非球面参数的测量成为光学系统加工和装调过程中的迫切需求。

首先,非球面的顶点曲率半径 R 是最重要的参数,学者们基于各种原理对 R 的测量方法进行了研究。清华大学的王浩等人^[9]采用光线追迹法测量了一个抛物面的 R ; 浙江大学的杨甬英等人^[10]利用部分零补偿干涉法,通过多次等步长移动部分补偿镜与被测镜之间的间距求解出补偿距离,进而求解出 R ; 亚拉巴马大学亨维尔分校的 Ying Pi 等人^[11]利用二次非球面离轴三共焦位置的干涉图特征测量 R ; 北京理工大学的杨佳苗等人^[12]采用差动共焦方法测量了抛物面的 R 。这些方法假设非球面的圆锥系数 K 不存在误差,当 K 存在误差时,求解存在偏差。

为了消除 K 的影响,一些学者研究了可以同时测量 R 和 K 的方法。墨西哥国立自治大学的 Rufino Díaz-Urbe 等人^[13]采用节点工作法,对一个椭球面的 R 和 K 进行了测量; 哥伦比亚国立大学的 Yobani Mejia 等人^[14]采用一系列 Hartmann 图像测量了一个近似抛物面的顶点曲率半径和 K ; 中国科学院长春光学精密机械与物理研究所的陈新东等人^[15]采用零补

偿干涉法定位被测面,采用激光跟踪仪测量光路间隔,以求解二次非球面的顶点曲率半径和 K ; 中国科学院长春光学精密机械与物理研究所的熊玲等人^[16]采用摆臂式轮廓测量方法扫描被测面获取被测面表面轮廓点云分布,再通过拟合计算非球面参数,实现了顶点曲率半径和 K 的同时测量,不过使用的计算模型暂不适用于高阶非球面。

对 R 、 K 和 A_{2i} 的同时测量是高阶非球面在将来广泛应用时不可避免的课题。已有一些方法对其进行了探索。采用三坐标测量的点云数据进行拟合求解非球面参数是最常用的方法,因为三坐标测量机具有测量精度高和自由度高的两大优势,在测量领域中得到了广泛的使用。在拟合方法中,拟合算法因为耦合问题往往存在一定的求解偏差,需要特殊的拟合算法。例如新加坡南洋理工大学的 Zhaomin Wang 等人^[17]采用更高阶的分量对 R 和 K 进行求解,再求解需要的 A_{2i} ,但该方法没有考虑更高阶分量的非球面参数误差可能对 R 和 K 造成的影响,会导致 R 和 K 的求解偏差,进而导致高阶非球面参数 A_{2i} 的求解偏差。

笔者在前期的工作中^[18-21]关注了部分补偿干涉法中非球面参数误差与剩余波前,以及补偿距离即补偿镜与被测非球面间距之间的关系,构建了剩余波前、补偿距离和被测非球面参数之间的数学模型,并提出虚实结合迭代算法实现了高阶非球面参数误差的求解。其中,补偿距离的测量精度对被测非球面的测量精度有着直接的影响。以下两种方式可获得补偿距离: 第一种^[18-20]是针对部分补偿镜设计消球差透镜组,将补偿镜从猫眼位置向实际被测位置移动,通过导轨记录这段位移,进而求解补偿距离。该方式操作较为复杂: 部分补偿镜与消球差透镜组相接触,在安装并取下消球差透镜组过程中易导致补偿镜姿态发生变化; 被测镜在测量过程中也需要进行移动,对导轨的精度有着较高的要求。第二种^[21]是采用差动共焦的方案实现补偿距离的测量,但是系统非常复杂,在部分补偿干涉系统之外还需要复杂的差动共焦测距系统。

为了实现对高阶非球面参数误差的高精度测量,同时简化测量过程和测量装置,文中提出了一种基于

虚实结合干涉仪的非球面参数误差测量系统,该系统在部分补偿干涉法测量剩余波前的基础上,复用干涉仪利用轴向扫描透镜的猫眼波前定位方法测量补偿距离,结合虚实结合迭代算法求解出被测非球面的参数误差。该系统在保证测量精度的同时,系统复杂程度相比之前采用差动共焦的方案得到了有效的降低。

1 测量理论与系统

1.1 虚实结合部分补偿非球面测量系统

首先介绍虚实结合干涉仪,以及如何利用它实现非球面的面型参数误差的测量。

虚实结合部分补偿非球面测量系统如图 1 所示,由实际的部分补偿干涉系统(图 1(a)),虚拟的部分补偿干涉系统(图 1(b))以及数据处理部分(图 1(g))组成。在测量过程中,由实际干涉仪部分补偿镜 PC 与

被测非球面镜 SUT 构成实际的部分补偿干涉系统,测量获得实际的剩余波前。按照实际干涉仪、PC 的标定结果, SUT 的设计参数以及补偿距离的设计值构成虚拟的部分补偿干涉系统,仿真获得虚拟的剩余波前。当实际的 SUT 存在面形误差时,实际补偿距离可能发生变化,实际的剩余波前与虚拟的剩余波前也存在偏差。调整虚拟干涉系统中的补偿距离,并优化 SUT 的面形,当实际剩余波前与虚拟剩余波前相同时,实际干涉系统中的 SUT 与虚拟干涉系统中的 SUT 相同。此时虚拟干涉系统中加载的面形误差即为实际 SUT 的面形误差。考虑到面型参数误差造成的面形误差对剩余波前的影响是回转对称的,若提取出剩余波前的回转对称误差,并通过修改虚拟干涉仪的非球面参数使得剩余波前的回转误差最小,此时虚拟干涉仪中的非球面参数误差即为实际 SUT 的非球面参数误差。

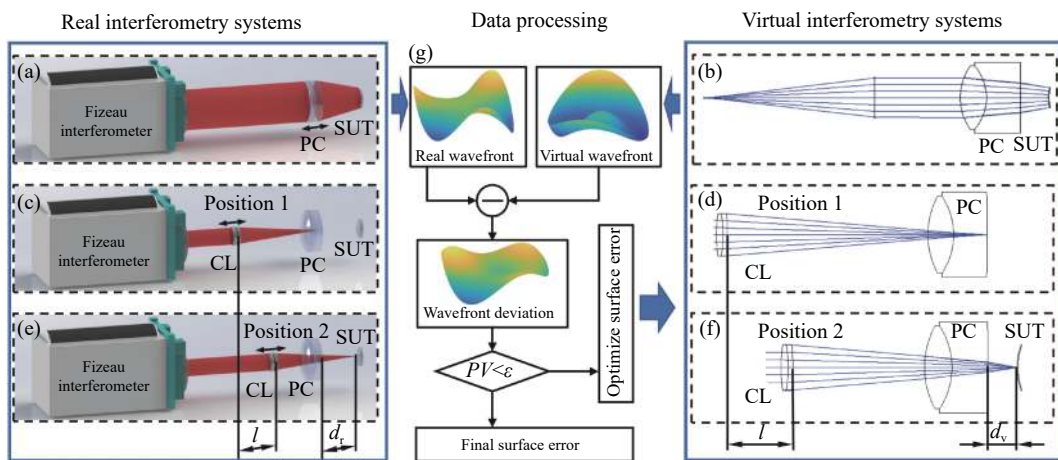


图 1 基于猫眼波前定位的虚实结合部分补偿干涉系统。PC: 部分补偿镜; SUT: 被测面; CL: 会聚透镜

Fig.1 Virtual-Real partial compensation interferometry system based on cat-eye-wavefront positioning. PC: partial compensator; SUT: surface under test; CL: convergent lens

之前的研究^[21]表明,上述非球面参数误差求解的过程中需要两个关键测量数据:一是实际部分补偿干涉系统测得的剩余波前;二是某种方法测得的补偿距离。为了提高补偿距离的测量精度和测量稳定性,降低系统复杂性,文中提出猫眼波前定位法,并在实际干涉系统中加入轴向扫描用的会聚透镜 CL,具体原理如下。

1.2 猫眼波前定位与补偿距离测量

猫眼波前定位法的原理如图 2 所示。干涉仪发

出的准直激光束经由 CL 形成会聚光,入射之后的任意表面后发生反射,再次经过 CL 后返回干涉仪,此时干涉仪测量获得的波前定义为猫眼波前 (cat's-eye wavefront)。如图 2(b) 所示,以 PC 的后表面定位为例,当会聚光焦点恰好在该表面时,光束上下翻转近似原路返回,得到的猫眼波前峰谷 (peak-to-valley, PV) 值最小。如图 2(a) 或图 2(c) 所示,当 CL 发生轴向偏移时,由于焦点偏离待定位面,引入了离焦为主的像差,干涉仪检测到的猫眼波前也会发生变化,猫

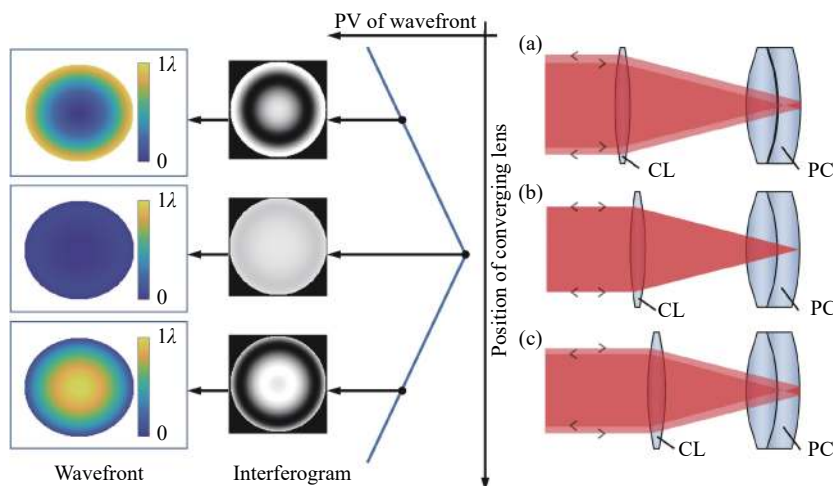


图 2 猫眼波前定位原理图

Fig.2 Schematic of cat-eye-wavefront positioning

眼波前的 PV 值会随之增大。

利用猫眼位置的波前 PV 达到最小值的特性进行定位, 结合测位移装置可以对补偿距离进行测量, 其原理如图 1 (c)~(f) 所示。对于每一个光学表面, 猫眼波前都会有相似的表现。利用这一点, 可以通过检测猫眼波前 PV 值最小的位置对 CL 的后续表面进行精确定位。

在实际系统中可以通过实际干涉仪测量猫眼波前, 调整 CL 使光会聚在补偿镜最后一面, 此时猫眼波前 PV 值最小, 对应 CL 的位置记为位置 1, 如图 1(c) 所示。继续调整 CL 使光会聚在被测非球面镜, 此时猫眼波前 PV 值再次达到最小, 对应 CL 的位置记为位置 2, 如图 1(e) 所示。位置 1 与位置 2 之间的间距即为实际干涉系统中 CL 的移动距离, 可以采用测位移装置获取, 记为 l 。

为保证实际干涉仪补偿距离 d_r 与虚拟干涉仪中补偿距离 d_v 一致, 进行如下优化: 将标定得到的 CL 准确参数加载进虚拟干涉系统, 优化 CL 与 PC 之间的间距, 将光会聚在 PC 的最后一面, 使得猫眼波前的 PV 值最小, 此时会聚透镜的位置即为虚拟系统中的位置 1, 如图 1(d) 所示。之后调整 CL 的轴向位置向 PC 靠近距离 l , 即将 CL 定位至位置 2, 如图 1(f) 所示。此时在虚拟系统中加入 SUT, 优化 SUT 轴向位置, 使得猫眼波前 PV 值最小, 此时 PC 与 SUT 之间的间距即为虚拟系统中的补偿距离 d_v 。且上述过程完全模拟实际测量过程, 因此实际干涉系统中的补偿距

离 $d_r=d_v$ 。

1.3 参数误差测量流程与计算流程

结合上述原理, 参数误差的测量过程主要分两步, 第一步使用干涉仪、PC、SUT 组成实际部分补偿干涉系统, 调整 PC 与 SUT 的间距, 使得剩余波前的 PV 值最小, 此时可以认为补偿距离是实际最佳补偿距离, 测量此时部分补偿法的剩余波前。第二步将 CL 置于 PC 与干涉仪之间, 按照 1.2 节流程测得猫眼位置 1 和 2 之间的位移 l 。

计算的流程主要分两步, 第一步是利用位置 1 和位置 2 之间的位移 l , 通过 1.2 节末尾所述方法求解实际干涉系统中的最佳补偿距离 d_r 。第二步是利用参考文献 [21] 所述的虚实结合迭代算法求解出被测非球面的面形参数误差, 此处不再赘述。

2 实验

2.1 实验系统

实验系统如图 3 所示。测量系统包括部分补偿干涉系统 (partial compensated interferometry system, PCIS) 和补偿距离测量系统, 而补偿距离测量系统包含猫眼波前定位系统 (cat's-eye wavefront positioning system) 和测量 CL 轴向位移的迈克尔逊激光外差干涉仪。其中猫眼波前定位系统复用了部分补偿干涉系统, 仅多出了一个 CL, 且该 CL 是可安装与拆除的, 因此系统结构简单, 易于装调且适用性广。

当未安装 CL 时, PC、SUT 与干涉仪构成部分补

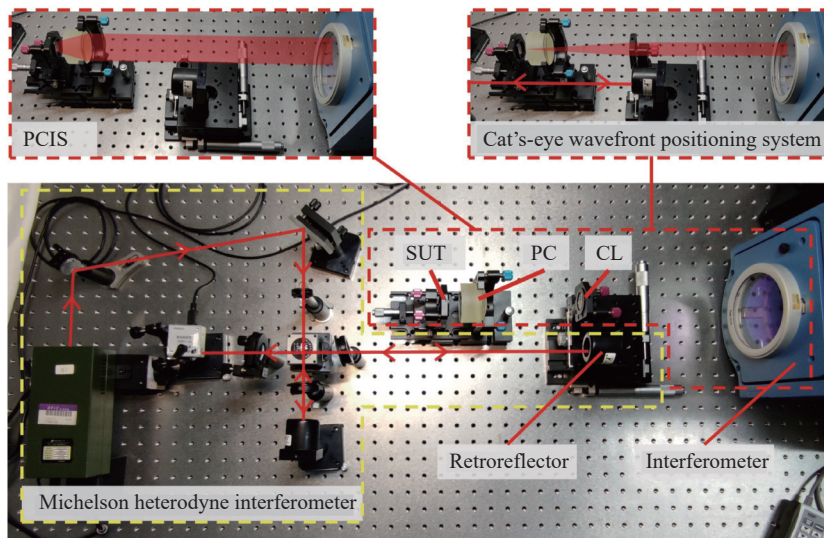


图 3 非球面参数误差测量系统

Fig.3 Aspheric surface parameter errors measurement system

补偿干涉系统,用于测量系统最佳补偿波前。实验所用的干涉仪是 Zygo Dynafiz 4 in (1 in=2.54 cm) 动态干涉仪。调节 PC 与 SUT 之间的间距,当干涉仪采集到的剩余波前的 PV 值最小时,固定 PC 与 SUT,并测量获得此时的剩余波前,即最佳补偿波前。

之后在平移台上安装 CL,置于干涉仪出射的准直光束中,CL 会将准直光会聚,当会聚光会聚在 PC 后表面或 SUT 表面附近时,干涉仪中可以采集到反射回干涉仪的猫眼波前形成的干涉图。根据猫眼波前 PV 值最小特性定位位置 1 和位置 2。同时平移台上安装有一个角锥棱镜,该棱镜为迈克尔逊激光外差干涉测距系统的一部分,可记录 CL 移动的位移。通过迈克尔逊双频激光干涉测距系统,可以高精度地测量出位置 1 到位置 2 之间的位移。激光外差测距系统中使用的双频激光器为 PT-1105 C,数字采集卡的型号为 PT-1313 B。

SUT 的名义参数,即参数的设计值如表 1 所示,是一个凸的四阶非球面。

表 1 被测非球面的名义参数

Tab.1 Nominal parameters of SUT

| Parameter | R/mm | K | A_4 |
|----------------|---------|---------|-------------------------|
| Designed value | 35.8256 | -0.6291 | 1.4398×10^{-7} |

PC 的设计参数如表 2 所示,采用一个双胶合透镜,最后一面没有镀增透膜以保证采用猫眼波前测量

补偿距离时测量光返回到干涉仪。

CL 采用一个双胶合透镜,透镜的标定参数如表 3 所示。

表 2 PC 的设计参数

Tab.2 Designed parameters of PC

| Surface | 1 | 2 | 3 |
|--------------|-------|--------|----------|
| Radius/mm | 58.86 | -41.54 | -1074.58 |
| Thickness/mm | 15.3 | 20 | — |
| Aperture/mm | 46 | 50.8 | — |
| Glass | ZF4 | ZF7 | — |

表 3 会聚透镜的参数

Tab.3 Parameters of CL

| Surface | 1 | 2 | 3 |
|--------------|--------|---------|----------|
| Radius/mm | 92.233 | -66.841 | -196.175 |
| Thickness/mm | 4 | 2.5 | — |
| Aperture/mm | 25.4 | 25.4 | — |
| Glass | H-K9L | H-ZF2 | — |

2.2 实验结果

在实际部分补偿干涉系统中测量实际的剩余波前,当剩余波前 PV 值最小时,空间坐标归一化的剩余波前如图 4(a) 所示。在虚拟干涉仪中仿真获得虚拟的剩余波前,归一化的虚拟剩余波前如图 4(b) 所示。实际剩余波前与虚拟剩余波前的偏差如图 4(c) 所

示。因为回转对称非球面的参数只会产生回转对称的像差,非回转对称像差由随机面形误差造成。对实际剩余波前与虚拟剩余波前的偏差进行泽尼克分解,

只保留回转对称的面形误差,以消除非回转对称的面形误差,可以获得如图 4(d) 所示的回转对称的剩余波前偏差。

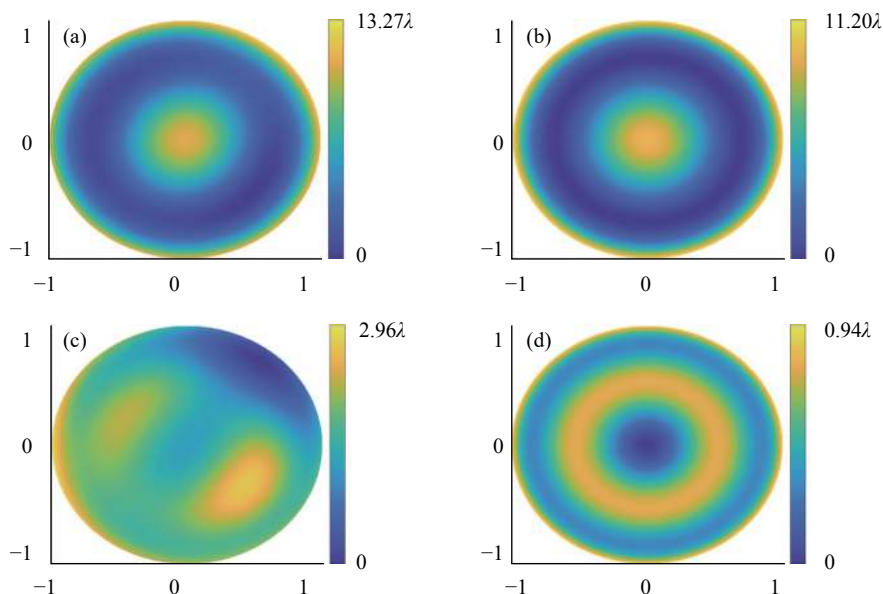


图 4 剩余波前与偏差。(a) 实际剩余波前;(b) 初始虚拟剩余波前;(c) 实际与初始虚拟剩余波前的偏差;(d) 偏差中的回转对称部分

Fig.4 Residual wavefront and deviation. (a) Real compensation wavefront; (b) Initial virtual compensation wavefront; (c) Deviation between the real and initial virtual compensation wavefront; (d) Rotationally symmetric component of the deviation

在猫眼波前测量系统中,会聚光在 PC 后表面与 SUT 表面附近反射回干涉仪的猫眼波前可被动态干涉仪实时监测,同时迈克尔逊双频激光干涉仪可以检测 PC 的位置。图 5 为猫眼波前在位置 1 与位置 2 附近时 PV 值与会聚透镜位置之间的关系。位置 1 为会聚光会聚在 SUT 表面附近时的情况,位置 2 为会聚光会聚在 PC 后表面附近时的情况。

猫眼波前探测时会聚光焦点从 PC 后表面移动至 PC 表面所需要的位移 l 。再通过虚拟干涉系统,利用这个位移求解出实际最佳补偿距离 d_r 。进行了 10 次测量的测量结果如表 4 所示。

通过位置 1 与位置 2 之间的差值,可以获得采用

10 次测量的平均值为 16.1888 mm, 当置信度系数 $k=3$ 时,平均值的 A 类不确定度为 0.0013 mm。

利用参考文献 [21] 中的求解模型求解,迭代过程结果如图 6 所示。特别注意的是,CL 和 PC 与设计值

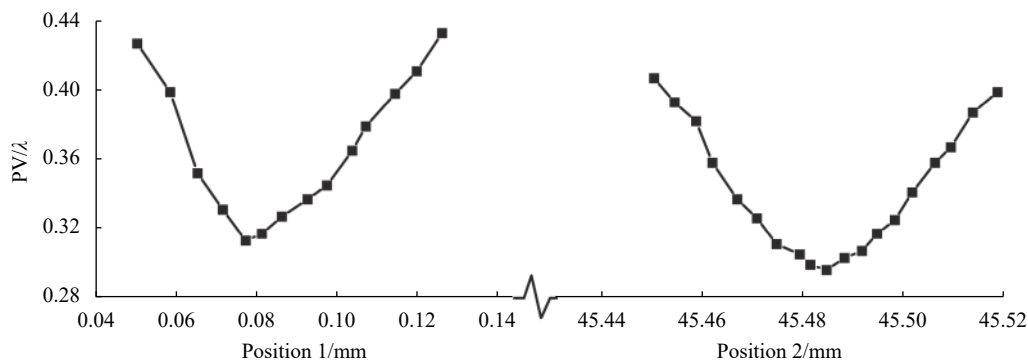


图 5 猫眼波前随位置变化

Fig.5 Deviation of cat's-eye wavefront with the position

表 4 补偿距离测量结果

Tab.4 Measured result of compensation distances

| No. | l/mm | d_r/mm |
|-----|---------|----------|
| 1 | 45.1666 | 16.1898 |
| 2 | 45.1688 | 16.1904 |
| 3 | 45.1714 | 16.1910 |
| 4 | 45.1639 | 16.1892 |
| 5 | 45.1626 | 16.1888 |
| 6 | 45.1622 | 16.1887 |
| 7 | 45.1588 | 16.1879 |
| 8 | 45.1545 | 16.1868 |
| 9 | 45.1568 | 16.1874 |
| 10 | 45.1604 | 16.1883 |

均存在制造误差,需要对 CL 和 PC 进行标定,标定的内容有 CL 和 PC 的各面曲率、透镜厚度以及折射

率。实际求解时使用的是标定结果。

迭代计算获得的非球面参数误差如表 5 所示。表 5 中将松下公司三坐标测量仪 UA3P 测量的表面轮廓采用高斯-牛顿法^[22]进行拟合的结果作为实际值,用以比较求解的非球面参数。通过虚实结合迭代算法求得的顶点曲率半径为 35.7482 mm,相对误差为 2.321%;圆锥系数为-0.6286,相对误差为 7.948%;四阶非球面系数为 -4.883×10^{-7} ,相对误差为 2.995%。

最终获得的虚拟波前如图 7(b) 所示,虚拟波前与图 7(a) 中的实际波前的偏差如图 7(c) 所示,消除非回转对称的面形误差、只保留回转对称的面形误差如图 7(d) 所示。其中图 7(c) 所示的波前偏差相比初始的图 4(c) 中的波前偏差有所降低,且波前偏差中主要是非回转对称的偏差。

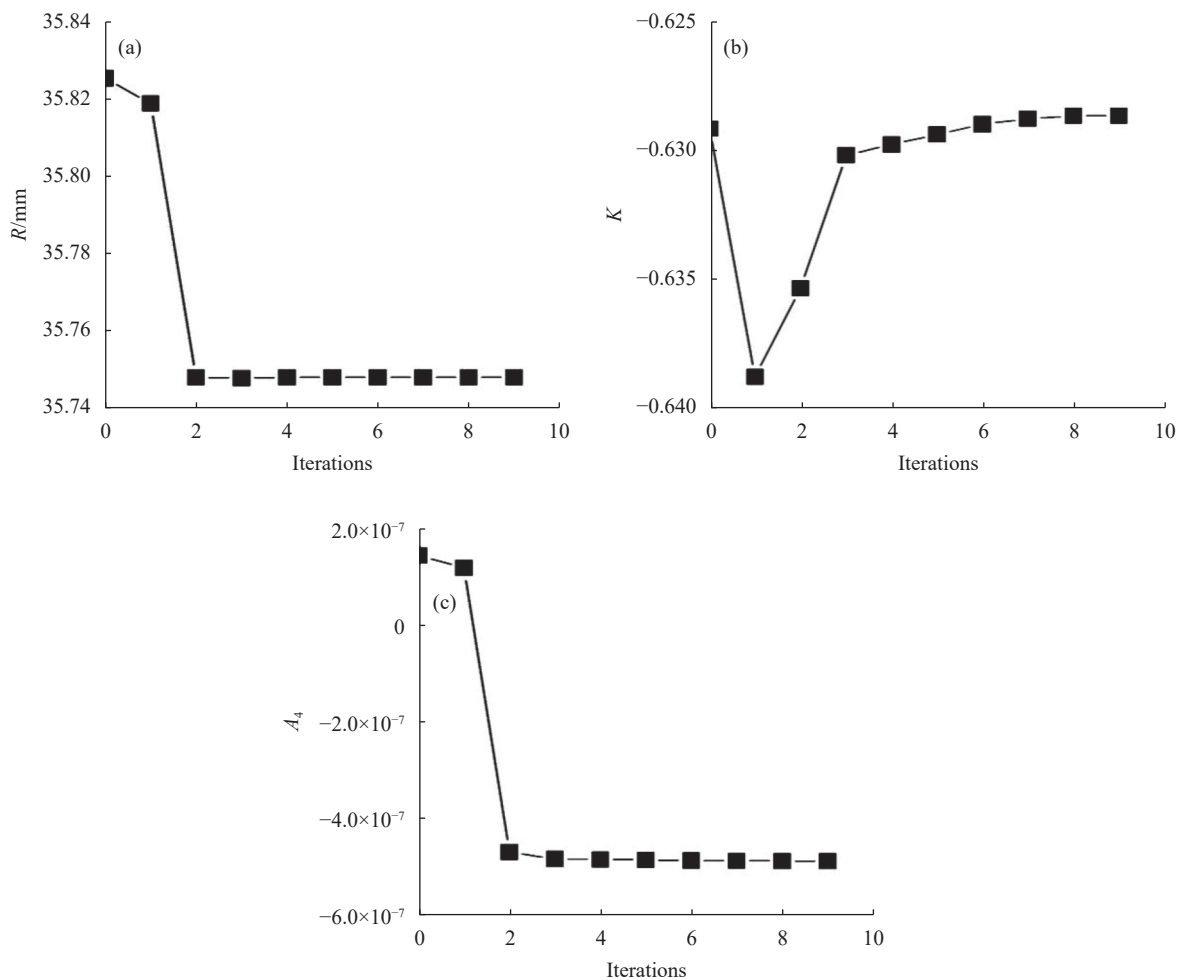


图 6 参数误差求解迭代结果

Fig.6 Iteration results of parameter error calculation

表 5 非球面参数求解结果

Tab.5 Calculated result of aspheric surface parameters

| Parameter | R/mm | K | A_4 |
|--------------------|----------|----------|-------------------------|
| Real value by UA3P | 35.7569 | -0.629 1 | -4.741×10^{-7} |
| Proposed method | 35.7482 | -0.628 6 | -4.883×10^{-7} |
| Error | -0.008 3 | 0.000 5 | -1.42×10^{-8} |
| Relative error | 2.321‰ | 7.948‰ | 2.995% |

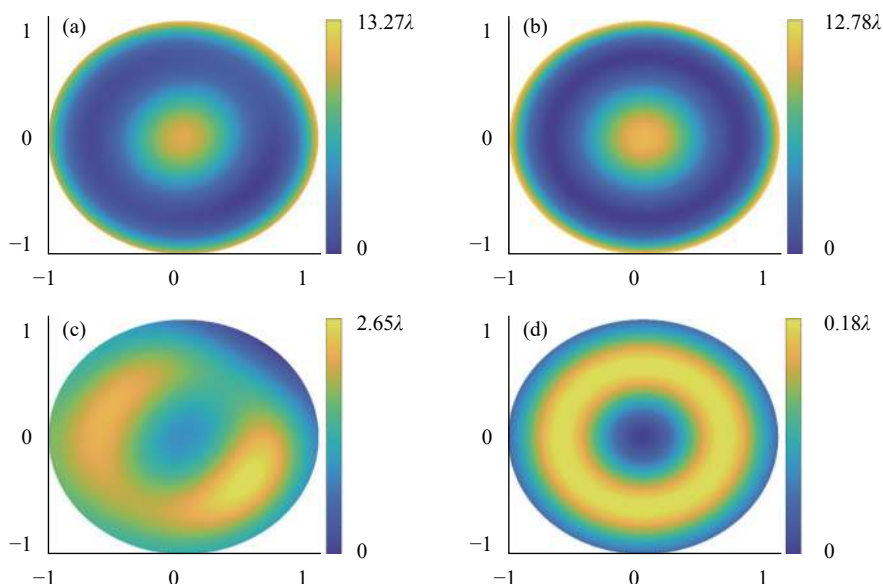


图 7 虚实结合干涉仪剩余残差。(a) 实际剩余波前; (b) 优化后虚拟剩余波前; (c) 实际与优化后虚拟剩余波前的偏差; (d) 偏差中的回转对称部分
Fig.7 Residual error in virtual-real combination interferometer. (a) real compensation wavefront; (b) optimized virtual compensation wavefront; (c) deviation between the real and optimized virtual compensation wavefront; (d) rotationally symmetric component of the deviation

2.3 误差分析

在求解非球面参数误差的过程中, 补偿距离是一个重要参数, 直接影响非球面参数的测量精度。在求解的过程中采用 10 次补偿距离测量的平均值 16.1888 mm, 由表 4 中的数据可以计算出置信度为 3 时的 A 类不确定度为 0.0013 mm。为分析其影响, 将补偿距离设置为 16.1875~16.1901 mm, 间距为 0.0001 mm, 分别求解非球面参数, 得到的结果如图 8 所示。

从图 8 可以看出, R 与补偿距离成近似的线性关系, 补偿距离的测量精度直接决定了 R 的测量精度, 当补偿距离的不确定度为 0.0013 mm 时, R 从 35.7495 mm 线性减小至 35.7469 mm, 最大偏差相较测量结果 35.7482 mm 的偏差为 0.0013 mm, 可认为此次测量结果 R 的不确定度为 0.0013 mm。 K 和

A_4 与补偿距离没有明显的线性关系, 但是 K 和 A_4 在此次测量中呈现出明显的负相关关系。公式 (2) 为含有四次非球面参数误差的公式^[21]:

$$\Delta D_4 = \frac{(K + \Delta K + 1)}{8(R + \Delta R)^3} - \frac{(K + 1)}{8R^3} + \Delta A_4 \quad (2)$$

式中: ΔD_4 为非球面面形偏差的幂级数拟合的四阶项; ΔR 为顶点曲率半径误差; ΔK 为圆锥系数误差; ΔA_4 为非球面的四阶参数误差。由此可见, ΔK 和 ΔA_4 确实成负相关。

经分析可知, K 的不确定度为 0.0002, A_4 的不确定度为 6×10^{-10} 。

除去上述补偿距离测量误差的影响, 实际测量结果与作为真值的 UA3P 的测量结果仍存在一定偏差。造成该偏差的可能原因有两个: 一是测距的迈克尔逊干涉仪的阿贝误差和余弦误差造成的测量补偿

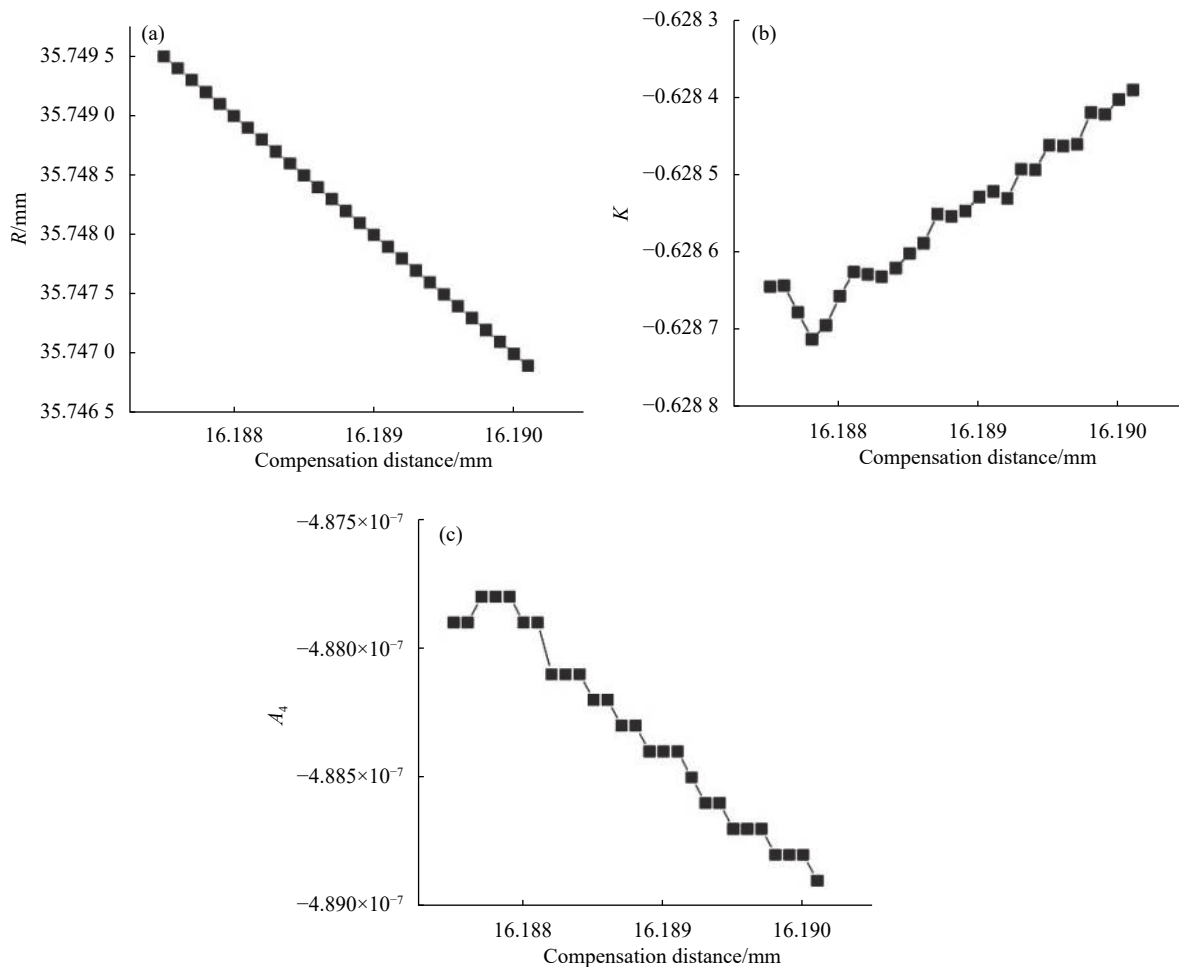


图 8 误差分析

Fig.8 Error analysis

间距时的系统误差,需要对导轨的直线度、导轨移动方向与光轴之间的夹角进行标定;二是非回转对称的装调误差与非回转对称的像差造成的系统误差,可利用曲率半径接近的标准球面镜进行标定,为了消除PC非旋转对称面形误差的影响,需要对其面形进行标定。在高精度测量应用中,上述误差可通过标定进一步减小,拟在后续的研究中开展。

3 结 论

文中提出了一个基于虚实结合干涉仪的部分补偿非球面参数误差测量系统。该系统采用部分补偿法测量部分补偿后的剩余波前,采用猫眼波前定位方法测量补偿距离,即补偿镜与非球面被测镜之间的间距。利用剩余波前和补偿距离迭代优化计算出非球面被测镜的参数误差。

通过实验测量了一个凸的非球面,其顶点曲率半

径为 35.7482,相对误差为 2.321%,圆锥系数为-0.6286,相对误差为 7.948%,四阶非球面系数为 -4.883×10^{-7} ,相对误差为 2.995%。

上述原理和系统研究为高阶非球面的面形误差和参数误差一体化干涉测量奠定了技术基础,装置简单,无需移动被测面,有望应用于大口径非球面的参数误差测量。

参考文献:

[1] Liang Zijian, Yang Yongying, Zhao Hongyang, et al. Advances in research and applications of optical aspheric surface metrology [J]. *Chinese Optics*, 2022, 15(2): 161-186. (in Chinese)

[2] Chen Baohua, Wu Quanying, Tang Yunhai, et al. Processing method of large off-axis aspheric mirror [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2021, 29(5): 1095-1102. (in Chinese)

- [3] Malacara D. Optical Shop Testing[M]. 3rd ed. New York: Wiley-Interscience, 2006.
- [4] Wang Fengpu, Li Xinnan, Xu Chen, et al. Optical testing path design for LOT aspheric segmented mirrors with reflective-diffractive compensation [J]. *Chinese Optics*, 2021, 14(5): 1184-1193. (in Chinese)
- [5] Li Meixuan, Wang Li, Dong Lianhe, et al. Application of aspheric technique in immersion lithography lighting system [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2017, 46(11): 1118003. (in Chinese)
- [6] Zhang Chao, Xing Hui, Song Junru, et al. Measurement of optical axis eccentricity of a large-aperture concave ellipsoid mirror [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2021, 50(12): 20210196. (in Chinese)
- [7] Wang Xin, Liu Qiang, Shu Rong. Application of Schmidt optical system with wide-field of view and fast focal ratio to aerospace imaging spectrometer [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2019, 27(3): 533-541. (in Chinese)
- [8] Lv Chenyang, Zhan Renjun, Cui Ying. Collimating lens design and aspheric optimization method of laser cauterization gun [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2021, 50(3): 20200219. (in Chinese)
- [9] Wang H, Li Y, Zeng L, et al. A simple ray tracing method for measuring the vertex radius of curvature of an aspheric mirror [J]. *Optics Communications*, 2004, 232(1): 61-68.
- [10] Yang Y, Zhang L, Shi T, et al. Determination of aspheric vertex radius of curvature in non-null interferometry [J]. *Applied Optics*, 2015, 54(10): 2838-2844.
- [11] Pi Y, Reardon P J. Determining parent radius and conic of an off-axis segment interferometrically with a spherical reference wave [J]. *Optics Letters*, 2007, 32(9): 1063-1065.
- [12] Yang J, Qiu L, Zhao W, et al. Laser differential confocal paraboloidal vertex radius measurement [J]. *Optics Letters*, 2014, 39(4): 830-833.
- [13] Díaz-Uribe R, Cornejo-Rodriguez A. Conic constant and paraxial radius of curvature measurements for conic surfaces [J]. *Applied Optics*, 1986, 25(20): 3731-3734.
- [14] Mejía Y, Díaz-Uribe R, Pacheco A L, et al. Measuring conic constant and vertex radius of fast convex conic surfaces from a set of Hartmann patterns [J]. *Optics Communications*, 2016, 363: 166-175.
- [15] Chen Xindong, Li Ruigang. Research on geometric parameter measurement method using laser tracker in null lens asphere testing [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2015, 42(5): 0508007. (in Chinese)
- [16] Xiong L, Qi E, Luo X, et al. Stitching swing arm profilometer test for large aperture aspherics [J]. *Chinese Optics Letters*, 2019, 17(11): 112201.
- [17] Wang Z, Qu W, Asundi A. A simplified expression for aspheric surface fitting [J]. *Optik*, 2017, 140: 291-298.
- [18] Hao Q, Li T, Hu Y, et al. Vertex radius of curvature error measurement of aspheric surface based on slope asphericity in partial compensation interferometry [J]. *Optics Express*, 2017, 25(15): 18107-18121.
- [19] Hao Q, Li T, Hu Y. Partial compensation interferometry for measurement of surface parameter error of high-order aspheric surfaces [C]//2017 International Conference on Optical Instruments and Technology: Optical Systems and Modern Optoelectronic Instruments, 2018, 10616: 106160L.
- [20] Hao Q, Li T, Hu Y, et al. Partial compensation interferometry measurement system for parameter errors of conicoid surface [J]. *Review of Scientific Instruments*, 2018, 89(6): 063102.
- [21] Hao Q, Tao X, Hu Y, et al. Interferometric measurement of high-order aspheric surface parameter errors based on virtual-real combination iterative algorithm [J]. *Optics Express*, 2021, 29(17): 27014-27030.
- [22] Sha D, Quan S, Zhu Q, et al. Research on optical aspherical surface's fitting method [J]. *Acta Photonica Sinica*, 1995, 24(2): 152-157. (in Chinese)