

部分补偿数字莫尔移相干涉的回程误差消除

张丽琼,王劭溥,胡 摇,郝 群

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

摘 要: 为了实现非球面面形误差的高精度测量,研究了基于部分补偿原理的数字莫尔移相干涉技术中回程误差的消除方法。通过建立实际干涉仪和建模理想干涉仪,并运用数字莫尔移相干涉技术,获得实际干涉仪像面与被测非球面面形误差相关的波前;分析了该测量系统的误差,提出采用逆向优化法消除大面形误差时的回程误差实现被测非球面的面形误差检测。实验结果表明:与轮廓仪结果对比,面形误差较小时二分之一法重构面形误差,峰谷值和均方根值分别优于 $\lambda/20$,面形误差较大时运用逆向优化法消除回程误差,重构的非球面面形误差峰谷值和均方根值偏差均优于 $\lambda/5$ 。基于逆向优化法的部分补偿数字莫尔移相干涉非球面检测,有效消除了大面形误差时的回程误差,可实现高精度的面形误差重构检测。

关键词: 回程误差; 数字莫尔移相干涉; 部分补偿; 二分之一法; 逆向优化法

中图分类号: TH744 **文献标志码:** A **DOI:** 10.3788/IRLA201847.0117005

Retrace error elimination for partial compensation digital Moiré phase shifting interferometry

Zhang Liqiong, Wang Shaopu, Hu Yao, 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: A digital Moiré phase-shifting interferometry with partial compensation lens was expounded to test the figure error of aspheric surfaces with high accuracy measurement. The real interferometer and the ideal interferometer model were established to obtain the real and ideal wavefront at the image plane of the interferometer. Then the image wavefront in the real interferometer related to the surface figure error of the aspheric surface under test was obtained by using the digital Moiré phase-shifting technique. The error analysis of this measuring system was presented, and the reverse optimization procedure was applied to eliminate retrace error for the large figure error and reconstruct the test aspheric surface large figure error. Experimental results show that, compared to the profilometer, for the small figure error, the accuracy of the aspheric surface figure error measurement with the one-half method can achieve less than $\lambda/20$, both PV error and RMS error. For the large figure error, the reverse optimization method need to be used to obtain the accuracy of aspheric surface errors measurement of less than $\lambda/5$, both PV error

收稿日期:2017-06-04; 修订日期:2017-08-09

基金项目:国家自然科学基金仪器专项(51327005)

作者简介:张丽琼(1977-),女,讲师,博士,主要从事光学精密干涉测量方面的研究。Email:zhanglqoe@126.com

and RMS error. Partial compensating digital Moiré phase shifting interferometry for the test aspheric surface error based on reverse optimization procedure can effectively correct the retrace error, and reconstruct the large figure error of aspheric surfaces with high-accuracy.

Key words: retrace error; digital Moiré phase-shifting interferometry; partial compensation; one-half method; reverse optimization procedure

0 引言

非球面具有增加设计自由度、改善像质、减小体积和减轻系统重量等优点^[1-3],然而要满足非球面的设计要求和制造需求,非球面检测仪器必须同时具有高精度、较大的动态范围和一定的通用性^[4]。

非球面的常用检测方法主要有轮廓法和干涉法。其中,轮廓法包括接触式探针和非接触式光学探针扫描法^[5],主要受限于测量时间长,其扫描运动机构的定位精度也影响测量精度的进一步提高。干涉法检测是实现非接触、高精度非球面检测的主要方法。其中零位干涉法通过设计零位补偿镜完全补偿非球面的法线像差,使干涉条纹数量接近零,可实现高精度的非球面测量,但必须为不同参数的非球面设计特定的零位补偿器或全息器件^[6-7],通用性差,装调繁琐且增加了时间和成本。非零位干涉测量是扩大测量动态范围、实现高精度通用化非球面测量的主要方法,非零位干涉测量包括长波长法、剪切法、双波长法、亚奈奎斯特法和部分补偿法等。所有的非零位干涉测量由于违反了零位条件,需要校准由于测试光线和参考光线在干涉仪中不共路所产生的回程误差,才能获得高精度非球面面形误差测量结果。

美国亚利桑那大学光学中心在亚奈奎斯特法非球面测试中,对非零干涉仪进行建模,最先将逆向优化用于非零干涉仪的校准,可测量与最佳拟合球偏离 60λ ,探测器像面光程差达 300λ 的非球面波前,获得的 PV 值偏差和 RMS 值偏差分别优于 0.76λ 和 0.12λ ^[8-9]。浙江大学在部分补偿 PZT 机械相移干涉法非球面测量中,分别采用了二分之一法和逆向优化法校正回程误差,其中,逆向优化法重构非球面面形误差 PV 值和 RMS 值仿真偏差均优于 $10^{-8}\lambda$ ^[10-11]。南京理工大学在多重倾斜波面非零位干涉法中,提

出虚实波面求差法和逆向算法消除回程误差法相结合的自由曲面面形重构,PV 值重构精度优于 $\lambda/20$ ^[12]。

笔者课题组提出基于部分补偿原理和数字莫尔移相干涉技术相结合的非零干涉法用于非球面面形误差测量^[13-14]。部分补偿镜不需要完全补偿非球面的法线像差,允许存在一定的剩余波前,条纹只需满足其密度小于探测器分辨力这一要求;数字莫尔移相干涉技术只需采集一幅包含非球面面形误差信息的实际干涉图,通过与四步移相的理想干涉图莫尔相乘,并低通滤波,从而将实际干涉仪像面波前中包含非球面的面形误差信息的复杂波面解算出来,该复杂波前已经不包含剩余波前,但是在面形误差较大时需要校准面形误差引入的回程误差。2014 年,笔者课题组将基于部分补偿原理和数字莫尔移相干涉相结合的非零干涉法用于离焦球面镜的面形误差测量,采用二分之一法重构面形误差,与 Zygo 相移干涉仪(GPI XP-IV)测量结果比较,获得面形误差分布起伏一致,点对点相减后 PV 值和 RMS 值偏差为 0.0785λ 和 0.0235λ ^[15],分别优于 $\lambda/10$ 和 $\lambda/20$ 。

文中根据实际干涉仪运用光学设计软件和数学软件相结合建模理想干涉仪,采用的数字移相干涉莫尔滤波算法消除了非零干涉原理导致的剩余波前。当被测非球面附加大面形误差时,由于回程误差导致二分之一法重构面形误差引入较大误差,提出运用逆向优化法消除回程误差实现面形误差的高精度重构。非球面检测实验结果表明,采用逆向优化法消除回程误差的部分补偿数字莫尔移相干涉,可在较大面形误差时实现非球面面形误差的高精度重构检测。

1 测量系统及其工作原理

1.1 系统光路结构

图 1 为基于部分补偿原理的数字莫尔移相干涉

非球面检测系统光路结构。它由基于部分补偿原理的实际干涉仪、理论干涉仪组成,干涉仪光路结构为改进型菲索干涉仪光路。

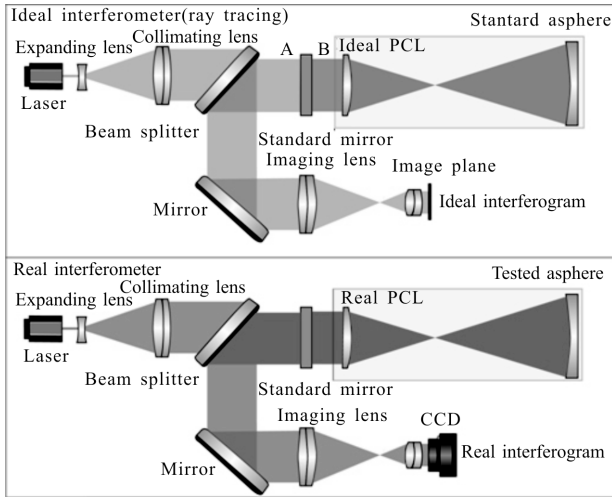


图 1 检测系统光路结构

Fig.1 Optical structure of detecting system

在实际干涉仪中,激光器发出的光经扩束准直后变为宽口径平行光束,平行光经分束镜透射后入射到标准平面镜分为透射光和反射光两路。标准平面镜 A 面透射率和反射率之比为 7:3。被标准平面镜反射的光作为系统参考光,从标准平面镜透射的光作为检测光,经过部分补偿镜入射到包含面形误差的被测非球面表面后返回,返回的检测光再次透过部分补偿镜和标准平面镜。经标准平面镜反射的参考光和经标准平面镜透射的检测光发生干涉,干涉光经分束镜反射后再经平面镜反射入射到成像系统,成像于 CCD 面阵探测器,由 CCD 探测器采集一幅实际干涉图。

同时,在光学设计软件中根据实际干涉仪光学组件参数和位置建模理想干涉仪,在检测光路中的被测非球面为不包含面形误差的标准非球面,通过光线追迹在成像面获得一幅理论干涉图。

1.2 数字莫尔移相原理

该系统的基本工作原理如图 2 所示。理论干涉图经数字移相的方法获得相位依次相差 $\pi/2$ 的四幅移相理论干涉图,将一幅实际干涉图分别与四幅移相理论干涉图相乘,并经低通滤波器滤波,获得四幅移相莫尔图,对四幅移相莫尔图进行相位解算,获得包含被测非球面面形误差的测量波前。

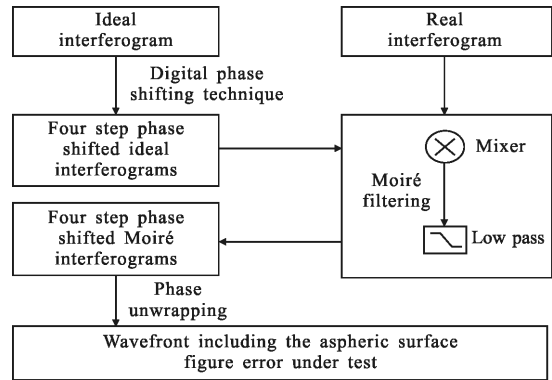


图 2 检测系统工作原理

Fig.2 Principle of detecting system

通过光线追迹获得的理想干涉图中干涉场的光强分布表示为:

$$I_1(x, y) = I_{1,d}(x, y) + I_{1,a}(x, y) \cos \left\{ \frac{2\pi}{\lambda} [W_0(x, y)] + 2\pi f_x x \right\} \quad (1)$$

式中: $W_0(x, y)$ 为理想干涉仪中的检测光与平面参考光的波前差,称之为经理想的部分补偿镜补偿后的剩余波前; $I_{1,d}(x, y)$ 和 $I_{1,a}(x, y)$ 分别为理论干涉图的直流和交流光强分布; f_x 为莫尔技术处理需要附加的倾斜条纹载波空间频率,不妨假设该载波施加在 x 方向。由干涉仪采集的实际干涉图中干涉场的光强分布表示为:

$$I_T(x, y) = I_{T,d}(x, y) + I_{T,a}(x, y) \cos \left\{ \frac{2\pi}{\lambda} [W_T(x, y)] + 2\pi f_x x \right\} \quad (2)$$

式中: $W_T(x, y)$ 为实际干涉仪中的检测光与平面参考光的波前差; $I_{T,d}(x, y)$ 和 $I_{T,a}(x, y)$ 分别为实际干涉图的直流和交流光强分布。公式(1)和公式(2)分别减去直流光强分布并采用莫尔滤波合成法后生成的莫尔干涉图表示为:

$$I_m(x, y) = [I_1(x, y) - I_{1,d}(x, y)] [I_T(x, y) - I_{T,d}(x, y)] = \frac{1}{2} I_{1,a}(x, y) + I_{T,a}(x, y) \cos \left\{ \frac{2\pi}{\lambda} [W_T(x, y) + W_0(x, y)] + 2\pi(f_T + f_x)x \right\} + \frac{1}{2} I_{1,a}(x, y) + I_{T,a}(x, y) \times \cos \left\{ \frac{2\pi}{\lambda} [W_T(x, y) - W_0(x, y)] + 2\pi(f_T - f_x)x \right\} \quad (3)$$

式中: 第一项为和频项; 第二项为差频项, 第二项即为莫尔条纹项, 其空间频率远小于第一项的空间频率。将上述莫尔相乘结果通过低通滤波器后获得莫尔条纹干涉图, 如果采用四步移相, 取理论干涉图和实际干涉图条纹载频相等 $f_1 = f_T = f$, 则四幅移相莫尔干涉图光强表示为:

$$I_{m,lowpass}(x,y) = \frac{1}{2} I_{l,a}(x,y) I_{T,a}(x,y) \cos\left\{\frac{2\pi}{\lambda} [W_T(x,y) - W_0(x,y)] + \frac{k}{4} \pi\right\} \quad (4)$$

式中: $k=0, 1, 2, 3$, 令

$$W_E(x,y) = W_T(x,y) - W_0(x,y) \quad (5)$$

式中: $W_E(x,y)$ 即为需要求解的包含了被测非球面面形误差的波前。根据公式(4)得到四幅莫尔图的光强分布分别为 $I_{m,lowpass1}(x,y)$ 、 $I_{m,lowpass2}(x,y)$ 、 $I_{m,lowpass3}(x,y)$ 和 $I_{m,lowpass4}(x,y)$, 则包含非球面面形误差的位相分布表示为:

$$\delta(x,y) = \arctan\left[\frac{I_{m,lowpass4}(x,y) - I_{m,lowpass2}(x,y)}{I_{m,lowpass1}(x,y) - I_{m,lowpass3}(x,y)}\right] \quad (6)$$

对公式(6)中的位相分布进行解包裹, 获得通过数字莫尔移相干涉技术求解的包含非球面面形误差的波前差 $W_E(x,y)$ 。下面将详细介绍通过波前差 $W_E(x,y)$ 重构出被测非球面面形误差的方法。

2 回程误差消除及面形误差重构

以 $W_{asp,fig}(x,y)$ 表示被测非球面的面形误差, 则有:

$$W_E(x,y) = f[W_{asp,fig}(x,y)] \quad (7)$$

理想情况下, 实际干涉仪中的干涉仪组件不存在参数误差、面形误差和装调位置误差等, 对探测器探测波前的影响为零, 而在求解波前差 $W_E(x,y)$ 过程中, 不存在移相误差。如果对公式(6)的包裹位相分布进行解包裹时无残差或存在少量残差, 可忽略滤波过程引入的波前求解误差, 被测非球面的面形误差表示为:

$$W_{asp,fig}(x,y) = f^{-1}[W_E(x,y)] \quad (8)$$

求解公式(8)即可获得非球面的面形误差, 通常采用二分之一法进行重构, 因此, 被测非球面的面形误差可用 $W_E(x,y)$ 表示为:

$$W_{asp,fig}(x,y) = W_E(x,y)/2 \quad (9)$$

当面形误差较小时, 公式(9)重构面形误差一般可以实现满足要求的测量精度。

2.1 回程误差分析

图 3 所示为非零位干涉中回程误差示意图, 从非球面反射回来的光线和入射到参考镜的参考光线不重合表现为回程误差。基于部分补偿原理的非零结构干涉仪的回程误差包含部分补偿系统的回程误差以及由被测非球面面形误差引入的回程误差。

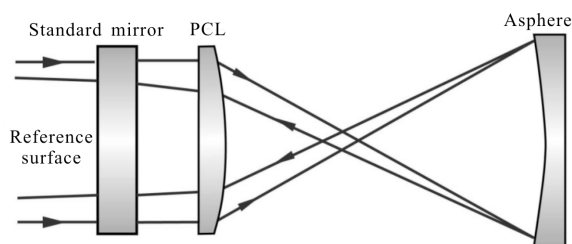


图 3 非零位干涉中回程误差示意图

Fig.3 Schematic diagram of retrace error in non-null interferometry

基于部分补偿原理的数字莫尔移相干涉非球面非零位测量系统, 理想干涉仪中的部分补偿镜没有完全补偿标准非球面的法线像差, 导致理想干涉仪中标准非球面和理想部分补偿镜返回的检测光与参考光不共光路产生剩余波前 $W_0(x,y)$, 该剩余波前即为非零结构部分补偿系统产生的回程误差。

实际干涉仪中, 携带面形误差的被测非球面取代理想干涉仪中的标准非球面, 此时, 被测非球面的面形误差引入新的回程误差。通过实际干涉仪和精确的虚拟干涉仪建模, 以及数字移相干涉技术、莫尔合成和低通滤波过程, 消除了非零位部分补偿系统产生的回程误差, 即剩余波前 $W_0(x,y)$ 。因此, 在求解的波前差 $W_E(x,y)$ 中只剩下被测非球面面形误差引入的回程误差, 当面形误差较小时, 该回程误差可以忽略, 大多采用公式(9)的二分之一法重构面形误差。

当被测非球面的面形误差较大时, 由于被测非球面的面形误差导致的参考光和检测光不重合产生的回程误差, 用公式(9)中简单的二分之一关系重构面形误差将导致较大的误差, 而公式(8)中左边的非球面面形误差和右边莫尔滤波求解的波前的解析表达式一般很难求解。

2.2 逆向优化法重构面形误差

当被测非球面的面形误差较大时, 通过构建实际干涉仪, 并根据实际干涉仪光学组件参数和位置构建精确的理想干涉仪模型, 然后采用逆向迭代优化消除回程误差, 可实现被测非球面面形误差的精确重构, 该重构过程不需要解算 $W_E(x,y)$ 和 $W_{asp,fig}(x,y)$ 的解析关系。

一般来说, 检测携带面形误差的旋转对称高次非球面光学元件的方程可表示为:

$$z = W_{asp,fig} + \frac{ch^2}{1 + \sqrt{1 - (1+k)(ch)^2}} + a_4h^4 + a_6h^6 \dots \quad (10)$$

式中： h 为径向的光线坐标，第二项及后面的项为旋转对称高次非球面方程，第一项为附加在被测非球面的面形误差，在光学设计软件中，用 Zernike 边缘系数定义的非球面多项式来描述被测非球面的表面变形，则：

$$W_{\text{asp,fig}} = \sum_{i=1}^N A_i Z_i(\rho, \varphi) \quad (11)$$

式中： N 为 Zernike 系数的序号； A_i 为第 i 个 Zernike 边缘多项式的系数； ρ 为归一化的径向光线坐标； φ 为以角度表示的光线坐标。通过求得 A_i 即可求解被测非球面的面形误差。

逆向优化法具体实现过程为：

(1) 获得实际干涉仪像面波前，首先建模理想干涉仪，并搭建实际干涉仪对被测非球面进行检测采集一幅实际干涉图，然后通过数字莫尔移相干涉技术求解出 $W_e(x, y)$ ，已知理论干涉仪中的剩余波前 $W_0(x, y)$ ，则实际干涉仪中的像面波前可表示为：

$$W_T(x, y) = W_0(x, y) + W_e(x, y) \quad (12)$$

(2) 求解实际干涉仪像面波前的泽尼克多项式拟合系数，对实际干涉仪像面波前采用 Zernike 多项式为基底进行波面拟合，运用最小二乘法求解获得实际干涉仪像面波前的 Zernike 多项式系数。

(3) 光线追迹和逆向优化求解面形误差，将求解的 Zernike 多项式系数作为评价函数 ZERN 操作数的目标值，在理想干涉仪模型的标准非球面上附加 Zernike 边缘系数定义的非球面多项式，并作为变量描述非球面表面变形。最后进行光线追迹和多次逆向优化，使得理想干涉仪像面波前不断逼近实际干涉仪探测器波前；记逆向优化过程中 Zernike 边缘系数改变时标准非球面上的面形误差为 $W_{\text{asp,var}}$ ，当理想干涉仪标准非球面上附加波前 $W_{\text{asp,var}}$ 后的像面波前和实际干涉仪探测器波前 $W_T(x, y)$ 相同时，标准非球面上附加的 Zernike 边缘系数定义的曲面即为附加在被测非球面的面形误差 $W_{\text{asp,fig}}$ 。

因此，逆向迭代优化利用数学软件和光学设计软件，在建模的理想干涉仪中，以实际干涉仪中被测非球面的面形误差为变量，实际干涉仪探测器波前为优化目标，利用光线追迹和逆向优化，可实现被测非球面面形误差的重构。

3 仿真实验验证

运用光学设计软件和数学软件仿真验证通过二倍法和逆向优化方法获得较大面形误差的重构结

果。首先搭建理想干涉仪实验模型和实际干涉仪实验模型，结合数字移相和莫尔干涉滤波原理，运用数字莫尔移相干涉技术对实际干涉图和理想干涉图进行处理，对一凹抛物面反射型非球面镜进行仿真。

仿真实验使用激光器光源的波长为 532 nm，非球面的通光口径为 $D=108$ mm，顶点曲率半径为 1 727.2 mm。采用一片口径为 86 mm 的双凸透镜作为部分补偿镜，对该非球面进行部分补偿，双凸透镜的前后表面曲率半径分别为 $r_1=760$ mm， $r_2=-4 965$ mm，厚度为 20 mm，玻璃折射率 1.519 473。

利用光学设计软件对图 1 的理想干涉仪进行建模，部分补偿镜和标准非球面之间的距离调整为 2 985 mm，像面位置处得到干涉条纹如图 3(a)理想干涉图所示，此时剩余波前 PV 为 $1.647 9\lambda$ 。在理想干涉仪中的标准非球面上附加由 37 项 Zernike 边缘系数定义的非球面多项式表示的非球面面形误差，建模包含面形误差的被测非球面的实际干涉仪，像面位置处即为实际干涉仪的干涉图如图 4(b)所示。

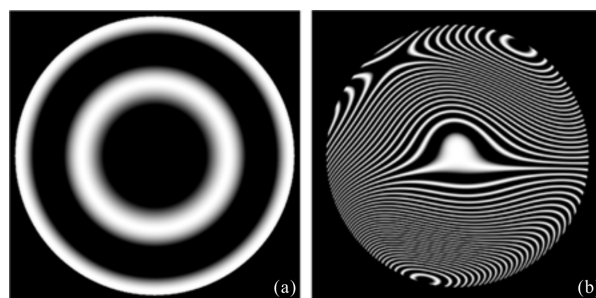


图 4 理想和实际干涉图

Fig.4 Ideal and real interferogram

数字莫尔移相干涉技术处理需要附加倾斜条纹以分离莫尔相乘后的高频成分和低频成分，图 5(a)和(b)分别为加倾斜后的理想干涉图和实际干涉图。实际干涉仪中标准非球面预设的面形误差 PV 值和 RMS 值分别为 $11.234 5\lambda$ 和 $1.887 1\lambda$ 。

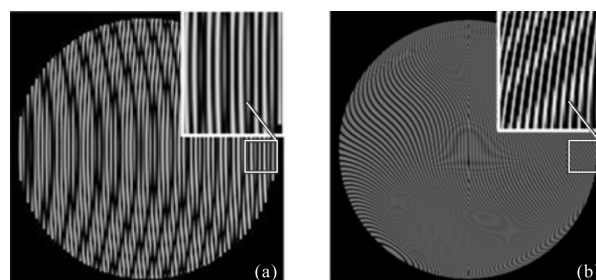


图 5 加倾斜的理想和实际干涉图

Fig.5 Ideal and real interferogram with tilt

加倾斜的四幅移相理想干涉图和加倾斜的实际干涉图分别莫尔相乘并低通滤波,对四幅移相莫尔图进行相位解算,获得实际干涉仪探测器探测波前中包含面形误差的复杂波前,然后分别采用二分之一法和逆向优化法重构求解非球面上附加的面形误差。

以阵列探测器的像素坐标为横纵坐标,将二分之一法或逆向优化法重构出的各像素点对应的非球面面形误差值与预设的相应点非球面面形误差的真值分别相减,可获得面形误差点对点求解偏差。

图 6(a)和(b)分别为二分之一法求解的被测非球面的面形误差结果及其与预设值的点对点相减偏差;图 6(c)和(d)分别为逆向优化法重构求解的面形误差及其与预设值的点对点相减偏差。二分之一法求解的面形误差 PV 值和 RMS 值分别为 11.003 9λ 和 1.876 9λ。图 6 中的 Aperture D 为抛物面的通光口径直径, D=108 mm。逆向优化法面形重构求解的面形误差峰谷 PV 值和 RMS 值分别为 11.249 9λ 和 1.900 0λ。

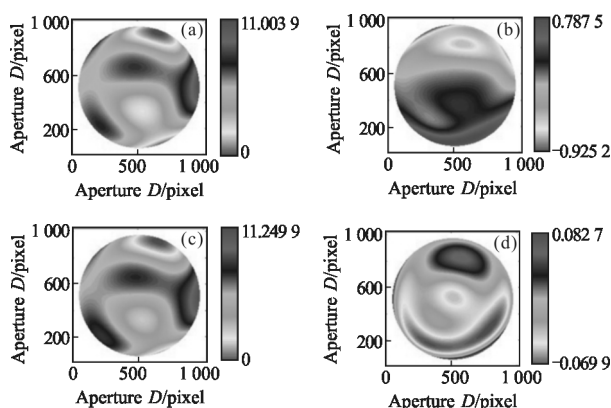


图 6 附加大面形误差时被测非球面的重构结果

Fig.6 Reconstruction results of tested aspheric surface with the additional large figure error

附加大面形误差时,使用二分之一法和逆向优化法面形重构求解面形误差的 PV、RMS 值及其与预设面形误差之间偏差值比较如表 1 所示。

表 1 附加大面形误差时的仿真重构结果

Tab.1 Reconstruction results of the tested asphere with the additional large figure error

Method	PV/λ	RMS/λ	δ PV/λ	δ RMS/λ
Actual	11.234 5	1.887 1	-	-
One half	11.003 9	1.876 9	-0.230 6	-0.010 2
Reverse optimization	11.249 9	1.900 0	0.015 4	0.012 9

二分之一法重构面形误差获得 PV 值偏差大于 λ/10, RMS 值偏差约为 λ/100 的仿真结果。逆向优化法重构面形误差可获得 PV 值偏差和 RMS 值偏差均优于 λ/50 的仿真结果。仿真实验结果表明,附加较大面形误差时,二分之一法重构面形误差的 PV 值偏差较大,逆向优化法在较大面形误差时可有效消除回程误差,实现高精度面形误差重构。

4 实际实验验证

构建图 1 和 2 所示的部分补偿数字莫尔移相干涉测量系统,分别测量两个抛物面反射非球面镜。

抛物面测量实验使用激光器光源的波长为 632.8nm,理想干涉仪和实际干涉仪的口径为 81mm,被测非球面和相应补偿镜的结构参数如表 2 所示。表 2 中, D 为被测非球面的通光口径, R₀ 为被测非球面的顶点曲率半径, r₁ 和 r₂ 分别为补偿透镜的前后表面曲率半径, d 为补偿透镜的厚度,两个补偿镜的玻璃材料均为 K9, Di_{S_{PCL}} 为补偿透镜和被测非球面的距离。

表 2 被测非球面及其补偿镜的结构参数

Tab.2 Structural parameters of tested asphere and PCL

No.	D/mm	R ₀ /λ	r ₁ /mm	r ₂ /mm	d/mm	Di _{S_{PCL}} /mm
1	108	-1 727.2	1 036.95	-3 982.86	12	3 327.9
2	76.2	-877	578.4	-3 350	22	1 836.04

根据建模的理想干涉仪参数,在实际干涉系统中采用精密导轨将抛物面 1 和 2 与其补偿镜的距离分别定位为 3 327.9 mm 和 1 836.04 mm,精细调整后在被测非球面上加载一定的倾斜然后分别采集一幅实际干涉图。利用数字莫尔移相干涉技术处理抛物面 1 和 2 的实际干涉图与对应的四步移相理想干涉图,获得公式(5)中包含非球面面形误差的波前差。

对抛物面 1 的波前差结果采用二分之一法重构抛物面的面形误差,图 7(a)所示为二分之一法重构抛物面 1 的面形误差结果,获得的面形误差峰谷 PV 值和 RMS 值分别为 0.648 3λ 和 0.107 5λ。图 7(b)为采用轮廓仪扫描的抛物面绝对面形与拟合的标准非球面的相对面形误差结果,面形误差峰谷 PV 值和 RMS 值分别为 0.676 5λ 和 0.130 3λ。二者的 PV 值偏

差和 RMS 值偏差分别为 0.0282λ 和 0.0227λ , 均优于 $\lambda/20$ 。图 7 中的 Aperture D 为被测抛物面 1 的透光口径直径, $D=108\text{ mm}$ 。

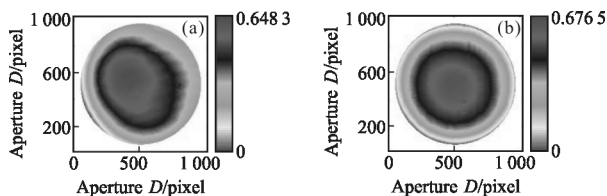


图 7 抛物面 1 面形误差用二分之一法重构结果和轮廓仪测量结果
Fig.7 Reconstruction results of the small figure error of paraboloid 1 with the half one method and the profilometers

对抛物面 2 的面形误差分别采用二分一法和逆向优化法重构, 图 8(a)所示为二分一法重构抛物面 2 的面形误差结果, 获得的面形误差峰谷 PV 值和 RMS 值分别为 11.1392λ 和 3.5215λ , 图 8(b)为逆向优化法重构抛物面 2 的面形误差结果, 获得的面形误差峰谷 PV 值和 RMS 值分别为 11.2750λ 和 3.6203λ 。轮廓仪扫描的抛物面与拟合的标准非球面的相对面形误差峰谷 PV 值和 RMS 值分别为 11.4852λ 和 3.6798λ 。图 8(c)和(d)分别为二分一法和逆向优化法面形重构求解抛物面反射镜 2 的面形误差与轮廓仪测量结果之间点对点相减的偏差。二分一法与轮廓仪结果点对点相减后偏差的峰谷 PV 值和 RMS 值分别为 1.1302λ 和 0.1614λ , 逆向优化法与轮廓仪结果点对点相减偏差的峰谷 PV 值和 RMS 值分别为 0.3446λ 和 0.0730λ 。

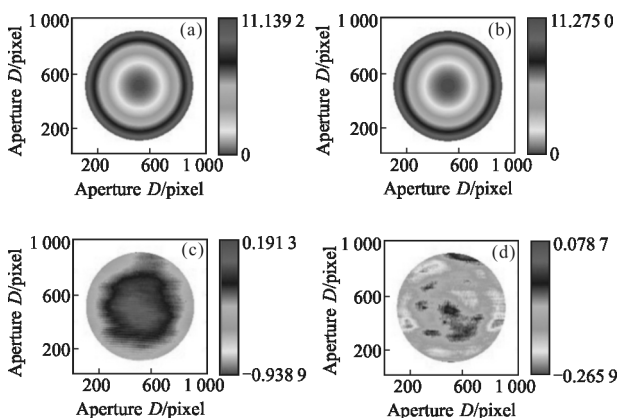


图 8 抛物面 2 大面形误差实验的重构结果

Fig.8 Reconstruction results of the paraboloid 2 with large figure error

表 3 所示为二分一法和逆向优化法重构抛物

面反射镜 2 面形误差的 PV、RMS 值分别与轮廓仪测量结果 PV、RMS 值偏差值比较。二分之一法与轮廓仪结果的峰谷 PV 值偏差和 RMS 值偏差分别为 0.3460λ 和 0.1574λ , 逆向优化法与轮廓仪结果的峰谷 PV 值偏差和 RMS 值偏差分别为 0.2102λ 和 0.0586λ 。

表 3 抛物面 2 的面形误差重构结果

Tab.3 Reconstruction results of paraboloid 2 with the large figure error

Method	PV/ λ	RMS/ λ	δ PV/ λ	δ RMS/ λ
Profilometer	11.485 2	3.679 8	-	-
One half	11.139 2	3.521 5	0.346 0	0.157 4
Reverse optimization	11.275 0	3.620 3	0.210 2	0.058 6

实验结果表明, 当被测非球面面形误差的 PV 值大于 10λ , 由于回程误差的存在, 二分之一法重构面形误差产生较大的误差, 采用逆向优化法重构, 获得的被测非球面的面形误差分布形状、PV 值偏差和 RMS 值偏差数量级都有显著提升。因此, 逆向优化法可有效消除回程误差实现被测非球面面形误差的高精度重构。

5 结论

非球面非零检测是实现通用化非球面检测的主要方法。文中研究了基于部分补偿原理的数字莫尔移相干涉技术实现高精度非球面面形误差非零检测方法, 阐述了基于部分补偿原理的数字莫尔移相干涉技术非球面检测的原理, 重点研究了该方法在较大面形误差时, 采用逆向优化法用于消除回程误差实现非球面面形误差重构检测。仿真实验比较验证了分别采用二分一法和逆向优化求解被测非球面的面形误差的结果, 在附加面形误差较大时逆向优化法校正回程误差可有效改进被测非球面面形误差的重构检测精度。对抛物面反射镜 1 和 2 进行测量的实验结果表明: 在较小面形误差时, 二分之一法可实现 PV 值和 RMS 值优于 $\lambda/20$ 的重构精度, 在较大面形误差时, 采用逆向优化法消除回程误差, 可实现 PV 值和 RMS 值优于 $\lambda/5$ 的非球面面形误差重构精度。因此, 基于部分补偿原理的数字莫尔移相干涉技

术非球面检测,采用逆向优化法修正回程误差,可在较大面形误差时实现 PV 值偏差和 RMS 值偏差均优于 $\lambda/5$ 的非球面面形误差检测。

参考文献:

- [1] Zhang Zhao, Sun Jingxu, Liu Zexun, et al. Optical design of THz image surface scanning with an off axis parabolic mirror [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2016, 45(7): 0703003. (in Chinese)
- [2] Li Hang, Yan Changxiang. Design of wide-angle lens for 8 mega-pixel mobile phone camera [J]. *Chinese Optics*, 2014, 7(3): 456-461. (in Chinese)
- [3] Wang Yunqi, Liu Weiqi, Zhang Daliang, et al. Design of off-axis three-mirror optical system with wide field of view based on transfer matrix [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2016, 45(4): 0418003. (in Chinese)
- [4] Shi Tu, Yang Yongying, Zhang Lei, et al. Surface testing methods of aspheric optical elements [J]. *Chinese Optics*, 2014, 7(1): 26-46. (in Chinese)
- [5] Wang Xiaokun. Fabrication and testing of an off-axis aspheric surface with abnormal shape [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2014, 43(9): 2959-2963. (in Chinese)
- [6] Li Ming, Luo Xiao, Xue Donglin, et al. Design of CGH for testing large off-axis asphere by considering mapping distortion [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2015, 23(5): 1246-1253. (in Chinese)
- [7] Meng Xiaohui, Wang Yonggang, Li Wenqing, et al. Fabricating and testing of $\phi 420$ mm high-order aspheric lens [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2016, 24(12): 3068-3075. (in Chinese)
- [8] Gappinger R O, John E. Greivenkamp. Iterative reverse optimization procedure for calibration of aspheric wave-front measurements on a nonnull interferometer [J]. *Appl Opt*, 2004, 43(27): 5152-5161.
- [9] Sullivan J J. Non-Null interferometer for testing of aspheric surfaces[D]. US: University of Arizona, 2015: 430-457.
- [10] Liu Dong, Shi Tu, Zhang Lei, et al. Reverse optimization reconstruction of aspheric figure error in a Non-Null interferometer[J]. *Appl Opt*, 2014, 53(24): 5538-5546.
- [11] Shi Tu, Zang Zhongming, Liu Dong, et al. Retrace error correction for Non-Null testing of optical aspheric surface[J]. *Acta Optica Sinica*, 2016, 36(8): 147-157. (in Chinese)
- [12] Shen Hua. Research on Key Techniques of Tilted-Wave-Interferometer Used in the Measurement of Freeform Surfaces [M]. Nanjing: Nanjing University of Science & Technology, 2014: 55-74. (in Chinese)
- [13] Liu Huilan, Hao Qun, Zhu Qiudong, et al. Testing an aspheric surface using part-compensating lens [J]. *Transactions of Beijing Institute of Technology*, 2004, 24(7): 625-628. (in Chinese)
- [14] Zhu Q, Hao Q. Aspheric surface test by digital Moiré method[C]//SPIE, 3rd International Symposium on Advanced Optical Manufacturing and Testing Technologies: Optical Test and Measurement Technology and Equipment, 2007, 6723: 672355.
- [15] Hao Q, Hu Y, Zhu Q D. Digital Moiré phase-shifting interferometric technique for aspheric testing [J]. *Applied Mechanics & Materials*, 2014, 590: 623-628.