

光学面形绝对测量方法仿真和实验研究

孟诗^{1,2}, 刘世杰², 陈磊¹, 周游², 白云波²

¹南京理工大学电子工程与光电技术学院, 江苏 南京 210094;

²中国科学院上海光学精密机械研究所强激光材料重点实验室, 上海 201800

摘要 传统光学干涉检测方法为相对检测法,检测精度一般受限于参考面面形精度,利用绝对检测技术可消除参考面面形误差对干涉测量精度的制约,从而可以实现纳米级精度的面形测量。首先介绍了 N 位旋转平均绝对检测方法和斜入射绝对检测方法;然后对这两种检测方法和面形恢复过程中运用到的三种算法(旋转平均算法、迭代算法、奇偶函数算法)进行了理论推导和模拟仿真分析;最后通过实验验证了这三种方法恢复的面形精度及其可行性,并对各方法的优缺点和适用性进行了分析比较。最终实现了 100 mm 口径平面镜峰谷(PV)值近 $\lambda/40$ 的高精度干涉仪标准平晶绝对面形的测量。

关键词 测量;干涉检测;绝对检测;斜入射; N 位旋转平均

中图分类号 O439

文献标识码 A

doi: 10.3788/LOP55.051201

Simulation and Experimental Study of Absolute Measurement Method for Optical Surface

Meng Shi^{1,2}, Liu Shijie², Chen Lei¹, Zhou You², Bai Yunbo²

¹School of Electronic Engineering and Optoelectronic Technology, Nanjing University of Science and Technology, Nanjing, Jiangsu 210094, China;

²Key Laboratory of High Laser Materials, Shanghai Institute of Optics and Fine Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 201800, China

Abstract The traditional optical interference measurement method is relative detection method, and the detection accuracy is generally limited by the accuracy of the reference surface shape. The use of absolute detection technology can eliminate the constraint of the reference surface shape error on the interference measurement accuracy, which can realize the measurement of the surface shape in nanoscale. Firstly, N bit rotation average absolute detection method and oblique incidence absolute detection method are introduced. Then the theoretical derivation and simulation analysis of two detection methods and three algorithms (rotation average algorithm, iteration algorithm, odd even function algorithm) used in the process of surface restoration are carried out. Finally, the recovered surface shape accuracy and feasibility of the three methods are verified by the experiments. The advantage, disadvantage and applicability of each method are analyzed and compared. At last, the absolute surface measurement of mirror with aperture of 100 mm for high precision interferometer standard flat with peak valley (PV) value of nearly $\lambda/40$ is achieved.

Key words measurement; interference detection; absolute detection; oblique incidence; N bit rotation average

OCIS codes 120.3180; 220.4840; 240.6690

收稿日期: 2017-10-19; 收到修改稿日期: 2017-12-01

基金项目: 国家自然科学基金(11602280)

作者简介: 孟诗(1993—),女,硕士研究生,主要从事光学干涉测量技术方面的研究。E-mail: 470244873@qq.com

导师简介: 刘世杰(1979—),男,博士,硕士生导师,主要从事衍射光学和薄膜光学方面的研究。

E-mail: hsyliu@163.com(通信联系人)

1 引言

光干涉技术是检测高精度平面光学元件面形的重要手段,检测中常用的菲索干涉仪是通过参考面分振幅的方法将准直光束分成参考光和待测光,通过这两束光的相干叠加形成干涉图形,并且由于其共光路的特性,干涉仪对外界干扰具有“脱敏”特性,面形恢复精度高。但是,菲索干涉仪实际上求得的是待测平面相对于参考平面的面形误差,在精度要求较低的情况下,菲索干涉仪的参考面通常被认为是绝对平面,是理想的。当待测平面与参考平面精度量级相当时,会引入较大的误差。因此,能够实现参考面形标定的绝对检测方法就应运而生。

20世纪60年代,Schulz等^[1-2]提出了一种新颖的干涉绝对检测技术:三平面互检法,即通过三个平面两两组合互检,可得到 y 轴方向上的绝对误差。为了改进传统三平面互检方法的不足,以得到全口径内二维全部面形的绝对检测,衍生出了以下许多新的方法。1984年Fritz^[3]提出了基于泽尼克多项式函数的波面拟合法,该方法利用泽尼克多项式函数具有的旋转不变性,在原有方法上再增加一次旋转测量。这种方法以损失待测平面高频信息为代价,得到整个圆形平面的面形数据,但由于泽尼克多项式仅在连续单位圆内保持正交,并不适用于其他形状的待测光学元件,例如矩形平面、椭圆形平面等的平面测量。90年代,亚利桑那大学光学科学中心的Ai等^[4]提出了奇偶函数法,将平面拆分成奇奇、

奇偶、偶奇、偶偶4项,其中后三项可以精确计算出,奇奇项则可根据不同角度的测量次数近似获得。1996年Evans等^[5]提出利用 N 次等角度旋转测量消除系统非旋转对称误差的方法,随后Parks将其运用于奇偶函数法中^[6],2001年Küchel^[7]在此基础上提出了将波面函数分解为旋转对称部分和旋转非对称部分以实现绝对测量。2006年,Griesman^[8]提出了镜面对称法,该方法是奇偶函数法的一种简化,所需构造的子函数仅需关于 y 轴镜面对称。2007年,Vannoni^[9]提出了一种迭代算法,该方法需先假定三个初始波面,对波面进行翻转、旋转等一系列逆向操作,将每次合成的波面与实际测量的波面的差值乘以一个缩放因子叠加到设置的初始波面上,直到残差趋近于零,这时候迭代恢复获得的三个矩阵即为待测三平面的绝对面形数据。本文选取了最新提出的三种绝对检测的方法,介绍了三种方法的检测原理,利用仿真算法验证其正确性,并进行多次对比性实验验证其实验精度。

2 原理

2.1 N 位旋转绝对检测方法

N 位旋转平均检测法的原理如图1所示,待测平面镜分别为A、B、C。该方法在传统的三板互检4次测量的基础上,增加一组 $N-1$ 次旋转测量,并将5组测量得到的波前函数分为偶偶、偶奇、奇偶、奇奇函数4个分量,偶偶、偶奇、奇偶三个分量可通过前4次测量获得,奇奇分量利用旋转平均求近似值获得。

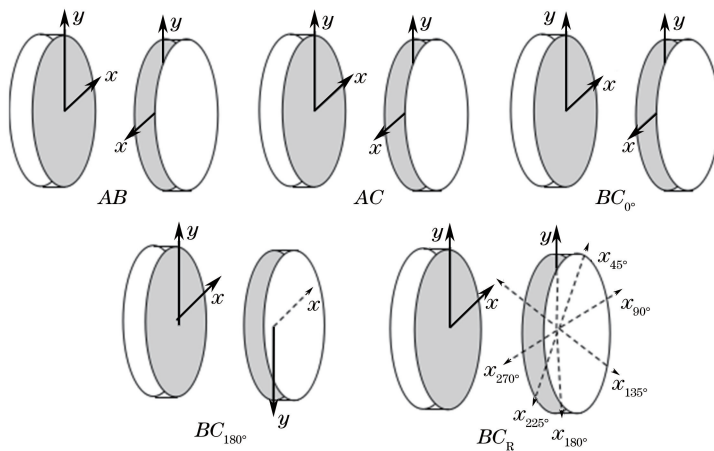


图1 N 位旋转平均检测法测量原理

Fig. 1 Measurement principle of N bit rotation average detection method

图1所示检测原理可以表示为:

$$\begin{aligned} AB &= A(-x, y) + B(x, y), \\ AC &= A(-x, y) + C(x, y), \end{aligned}$$

$$BC_{0^\circ} = B(-x, y) + C(x, y),$$

$$BC_{180^\circ} = B(-x, y) + C(x, y)$$

$$BC_R = B(-x, y) + C_R, \quad (1)$$

式中 C_R 表示将平面 C 相对于 B 旋转 7 次, 每次旋转 45° 得到的 8 个波面进行平均得到的旋转平均值^[10], C_R 是一个旋转不变量。对于极坐标下表示的旋转平均值 $W_R(r, \phi)$ 有:

$$\begin{aligned} W_R(r, \phi) &= \frac{1}{2\pi} \int_0^{2\pi} W(r, \phi) d\phi = \\ \lim_{N \rightarrow \infty} \left[\frac{1}{2\pi} \sum_{k=0}^{N-1} W(r, \phi) \Delta\phi_k \right] &\approx \\ \frac{1}{N} \sum_{k=0}^{N-1} W(r, k\Delta\phi) &\approx \\ \frac{1}{N} \sum_{k=0}^{N-1} W(r, \phi - k\Delta\phi), \end{aligned} \quad (2)$$

式中引入角的常数增量 $\Delta\phi = 2\pi/N$, 计算其平均值, 这是一个 N 位平均的概念。 BC_R 的测量可以通过待测平面 C 相对于参考平面 B 的方位角平均来实现, 其中将平面 C 相对于平面 B 等间隔旋转 $N-1$ 次, 每次旋转角度为 $\Delta\phi = 2\pi/N$, 这就是要得到的平面 C 相对于平面 B 旋转一周的测量结果:

$$\begin{aligned} BC_R &= \frac{1}{N} \sum_{k=0}^{N-1} \{B(-x, y) + [C(x, y)]^{k\Delta\phi}\} = \\ B(-x, y) + \frac{1}{N} \sum_{k=0}^{N-1} [C(x, y)]^{k\Delta\phi} &\approx \\ B(-x, y) + C_R(x, y), \end{aligned} \quad (3)$$

式中 $[C(x, y)]^{k\Delta\phi}$ 表示旋转 k 次 $\Delta\phi$ 角度后的波前, $C_R(x, y)$ 表示波前 $C(x, y)$ 的旋转不变量, 通过等间隔的旋转, 就可以消除 BC_R 中平面 C 的旋转变换部分, 即 C 面的奇奇项 $C_{Roo}(x, y) = 0$, 则 $BC_{Roo} = -B_{oo}$ ^[9]。

通过计算处理, 可得三个平面的绝对面形:

$$\begin{bmatrix} A(x, y) \\ B(x, y) \\ C(x, y) \end{bmatrix} = \frac{1}{2} \begin{bmatrix} 1 & 1 & -1 \\ 1 & -1 & 1 \\ -1 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & -1 \\ 1 & -1 & 1 \\ -1 & 1 & 1 \\ -1 & 1 & 1 \\ -1 & -1 & 1 \\ -1 & -1 & -1 \\ -1 & -1 & -1 \\ 0 & 2 & 0 \\ -2 & -2 & 0 \\ 2 & 2 & 2 \\ -2 & -2 & -2 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} AB_{ee} \\ AC_{ee} \\ BC_{0^\circ ee} \\ AB_{eo} \\ AC_{eo} \\ BC_{0^\circ eo} \\ AB_{oe} \\ AC_{oe} \\ BC_{180^\circ oe} \\ AB_{oo} \\ AC_{oo} \\ BC_{0^\circ oo} \\ BC_{Roo} \end{bmatrix}, \quad (4)$$

式中下标 ee, eo, oe, oo 分别表示偶偶、偶奇、奇偶、奇奇。

2.2 斜入射迭代绝对检测算法

迭代法是通过三个初始零波面通过旋转、翻转等一系列操作与测量波面比较, 差值通过一个缩放因子叠加到初始波面上, 形成下一轮参与计算的初始波面, 在不断的比较与叠加过程中, 差值不断减小趋近于零, 直到小于某一设定阈值时, 即可认为当前得到的波面数据为待测波面的面形误差数据。

斜入射迭代绝对检测法测量原理如图 2 所示。假设有三个平面 K, M, L , 从测量光路中可以看出, 对于斜入射测量, 由于光路中增加一次反射, 到达平面镜 M 上再经由平面镜 M 反射进入干涉仪的待测光束的能量极其微弱, 与参考面 K 反射进入干涉仪参考光束的对比度极差, 所以 M 采用镀有高反膜的平面镜以增强其反射光强度, 平面 K 采用镀有动态膜的标准参考镜以适应不同光强的待测光束, 最终获得满足干涉仪对比度测量要求的干涉条纹。图 2 所示检测原理可以表示为:

$$\begin{aligned} KLM &= K(-x, y) + S_{y,\alpha} L(x, y) + M(x, y), \\ KM &= K(-x, y) + M(x, y), \\ KM_{r,\varphi} &= K(x, y) + M_{r,\varphi}(x, y), \end{aligned} \quad (5)$$

式中 K, L, M 分别表示对应平面镜的波面误差函数。 $S_{y,\alpha}$ 表示倾斜系数, 即平面绕 y 轴旋转 α 的角度; $M_{r,\varphi}$ 表示该平面在 x, y 平面内旋转某一角度 φ , 研究表明最佳斜入射角度为 54° ^[11]。设波面函数用矩阵表示, 假设其中心点为 (i_0, j_0) , 矩阵其他位置变化情况为: $S_{y,\alpha} L(i, j) = 2\cos\alpha \cdot L[(i - i_0)\cos\alpha + i_0, j]$ 。

迭代算法计算程序如下:

1) 设置初始波面矩阵 Kd 和 Md , 该矩阵为随机矩阵或者零矩阵。

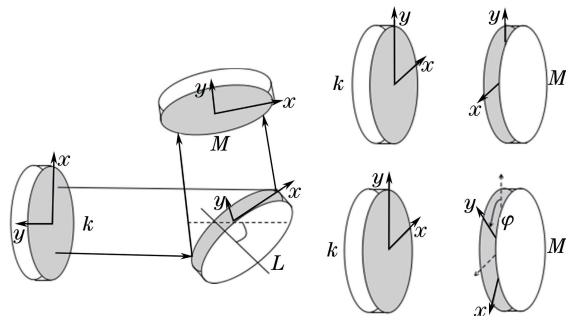


图 2 斜入射迭代绝对检测法测量原理

Fig. 2 Measurement principle of oblique incidence iteration absolute detection method

2) 计算迭代波面矩阵 \mathbf{KMd} 和 $\mathbf{KM}_{r,\varphi}d$ 。

3) 计算实验数据 \mathbf{KM} 和 $\mathbf{KM}_{r,\varphi}$, 以及迭代波面矩阵 \mathbf{KMd} 、 $\mathbf{KM}_{r,\varphi}d$ 的残差 $\Delta(\mathbf{KM})$ 、 $\Delta(\mathbf{KM}_{r,\varphi})$:

$$\Delta(\mathbf{KM}) = \mathbf{KM} - \mathbf{KMd}, \Delta(\mathbf{KM}_{r,\varphi}) = \mathbf{KM}_{r,\varphi} - \mathbf{KM}_{r,\varphi}d. \quad (6)$$

4) 得到新的面形矩阵:

$$\begin{aligned} \mathbf{K}_{\text{new}} = & \mathbf{K}_d + \frac{1}{2} \frac{1}{10} \text{fliplr}(\Delta\mathbf{KM}) + \frac{1}{2} \frac{1}{10} \text{fliplr}(\Delta\mathbf{KM}_{r,\varphi}), \\ \mathbf{M}_{\text{new}} = & \mathbf{M}_d + \frac{1}{2} \frac{1}{10} \Delta(\mathbf{KM}) + \\ & \frac{1}{2} \frac{1}{10} \Delta(\mathbf{KM}_{r,360-\varphi}), \end{aligned} \quad (7)$$

式中 $\text{fliplr}()$ 代表平面在 x 方向上的翻转。

5) 更新波面 \mathbf{Kd} 、 \mathbf{Md} 数据, 迭代循环至残差小于给定的阈值, 否则迭代循环继续。

使用迭代法恢复的波面 M_d 计算待测波面 L :

$$S_{y,\alpha}L = KLM - KM - [M_d(-x, y) - M_d(x, y)], \quad (8)$$

再将 L 扩展至全口径内, $L = S_{y,\alpha}^{-1} \cdot S_{y,\alpha} \cdot L$, 矩阵内缺值部分用立方卷积插值法^[12-13]补齐。

2.3 斜入射奇偶函数绝对检测法

斜入射奇偶函数绝对检测法测试过程与斜入射迭代算法近似。唯一不同的是, 第三次测量结果为 \mathbf{KM}_R , $\mathbf{KM}_R = K(-x, y) + \frac{1}{N} \sum_{k=0}^{N-1} M(r, k\Delta\varphi)$, 对于任意的圆形光学元件, 其波面函数即可以做奇函数 W^o 与偶函数 W^e 分解, 又可以做旋转对称部分 $R(x, y)$ 与旋转非对称部分 $\Omega(x, y)$ 分解, 即:

$$\begin{aligned} W^e(x, y) &= \frac{1}{2} [W(x, y) + W(-x, y)], \\ W^o(x, y) &= \frac{1}{2} [W(x, y) - W(-x, y)], \end{aligned} \quad (9)$$

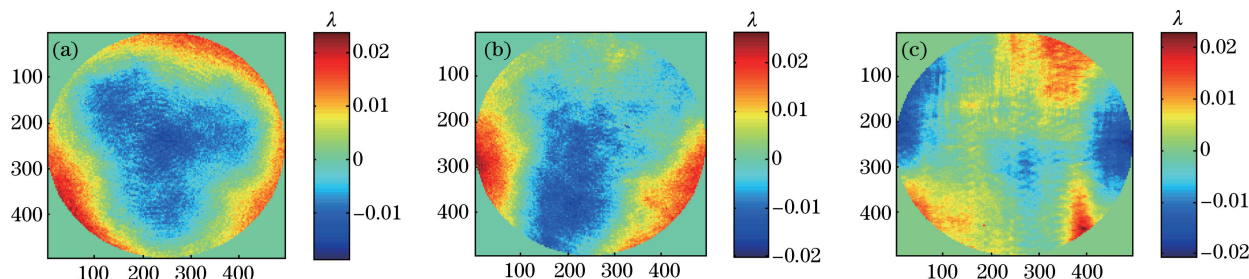


图3 仿真实验所使用的初始面形。(a) A; (b) B; (c) C

Fig. 3 Initial surfaces used in simulation experiment. (a) A; (b) B; (c) C

图4为 N 位旋转平均法得到的仿真结果, 表2为 N 位旋转平均法恢复的面形的 PV 和 RMS 数

$$\begin{aligned} W(x, y) &= R(x, y) + \Omega(x, y), \\ \Omega_R &= (W - R)_R = R - R = 0, \end{aligned} \quad (10)$$

$$\begin{aligned} W^e &= \frac{1}{2} [W + W(-x, y)] = \\ & R + \frac{1}{2} [\Omega + \Omega(-x, y)], \\ W^o &= \frac{1}{2} [W - W(-x, y)] = \\ & \frac{1}{2} [\Omega - \Omega(-x, y)], \end{aligned} \quad (11)$$

所以, $[W^e]_R = W_R$, $[W^o]_R = 0$ 。

将测量结果分解为镜面对称部分和镜面非对称部分:

$$\begin{aligned} KLM^e + KLM^o &= K^e - K^o + \\ S_{y,\alpha} \cdot L^e + S_{y,\alpha} \cdot L^o + M^e - M^o, \\ KM^e + KM^o &= K^e - K^o + M^e + M^o, \\ KM_R^e + KM_R^o &= K^e - K^o + M_R, \end{aligned} \quad (12)$$

$$\begin{aligned} S_{y,\alpha}L &= S_{y,\alpha}L^e + S_{y,\alpha}L^o = \\ KLM^e - KM^e + KLM^o + KM^o - 2 \times KM_R^o, \end{aligned} \quad (13)$$

再将 L 扩展至全口径内, $L = S_{y,\alpha}^{-1} \cdot S_{y,\alpha} \cdot L$, 矩阵内缺值部分用立方卷积插值法补齐。

3 实验

3.1 模拟仿真

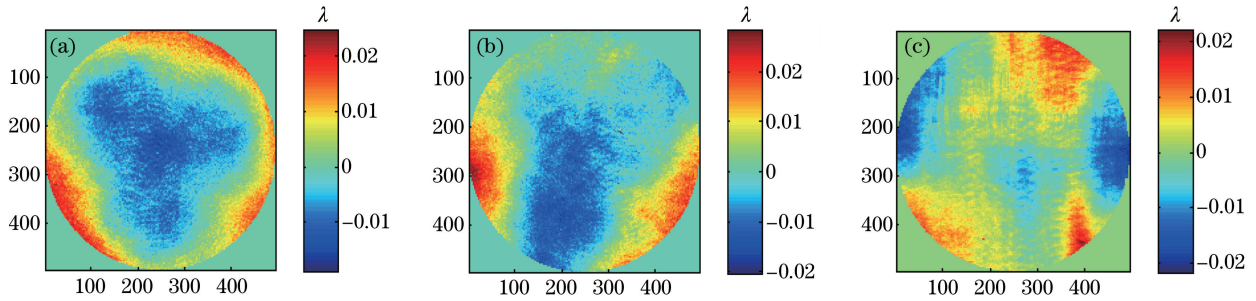
为了验证所提到的三种方法恢复面形的准确性, 下面对这三种方法的恢复能力进行仿真分析, 以干涉仪实测面形结果作为原始数据, 在 Matlab 中仿真模拟干涉过程^[14-15], 将仿真恢复的面形信息与原始数据值进行比较, 从而可以得到各个算法的计算误差大小。图3为仿真实验所使用的初始面形, 表1给出了各初始面形的峰谷 (PV) 值和均方根 (RMS) 值数据。

复,边缘误差主要是计算机的取舍误差和多次旋转过程中的插值误差。 N 位旋转平均法既能够恢复整个波面又不需要对波面进行多项式拟合,且算法简单,能够保留平面全频段信息,不会造成某些频段丢失的情况,最终得到全口径、全频段的测量结果。

表1 初始面形的PV和RMS数据

Table 1 PV and RMS data of the initial surfaces

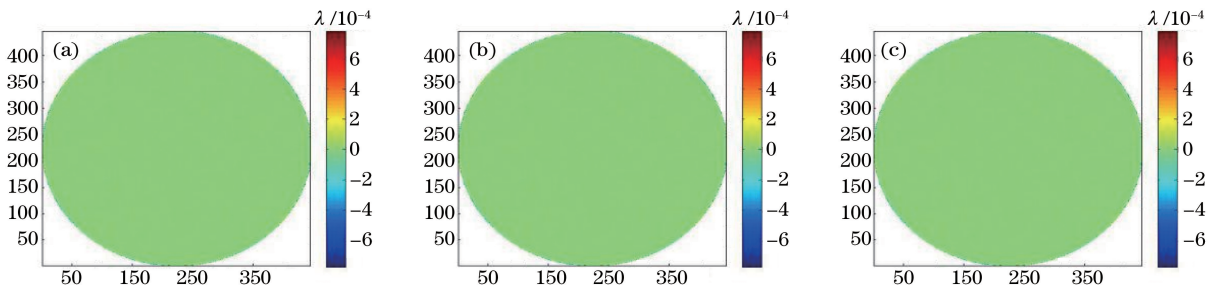
Surface	A	B	C
PV / λ	0.042587	0.046494	0.043457
RMS / nm	4.9632	5.1474	4.1835

图4 N 位旋转平均法得到的仿真结果。(a) A;(b) B;(c) CFig. 4 Simulation results obtained by N bit rotation average method. (a) A; (b) B; (c) C表2 N 位旋转平均法恢复的面形的PV和RMS数据Table 2 PV and RMS data of the recovered surfaces obtained by N bit rotation average method

Surface	A	B	C
PV / λ	0.043511	0.048728	0.043658
RMS / nm	4.9382	5.1183	4.1323

图6为斜入射迭代绝对检测法得到的仿真结果,表3为斜入射迭代绝对检测法恢复的面形的PV和RMS数据,图7为斜入射迭代绝对检测法恢

复波面与原始波面的残差。可以看出,待测平面特征信息均得到恢复,平面 L 的波面误差函数仅含有平面 M 波面误差函数的真实值与仿真值两者差值的镜面非对称部分,除边缘部分存在一些毛刺外,面形特征完全得到了恢复,且恢复精度较高。但迭代过程中每次循环都要对数据进行一次逆旋转操作,由于电荷耦合器件(CCD)上的像素为方形网格结构,所以离散数据在旋转后像素点往往不重叠,这就带来了插值误差,且随着迭代次数的增加,误差累计增大。

图5 N 位旋转平均法恢复波面与原始波面的残差。(a) A;(b) B;(c) CFig. 5 Residual data between the wavefront recovered by N bit rotation average method and original wavefront.

(a) A; (b) B; (c) C

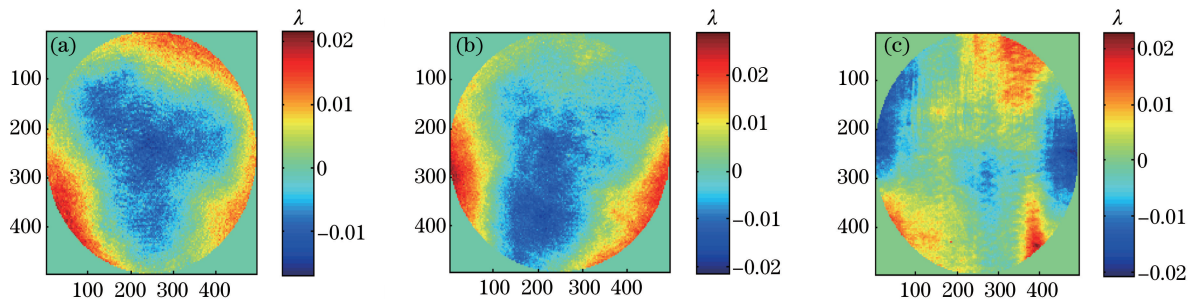


图6 斜入射迭代绝对检测法得到的仿真结果。(a) K;(b) M;(c) L

Fig. 6 Simulation results obtained by oblique incidence iteration absolute detection method. (a) K; (b) M; (c) L

另外由于平面 K 、 M 的获得过程中只存在与 KM 和 KM_r 进行的比较, 所以两者面形特征得以恢复, 但与面形真实值之间存在一定的残差。

图 8 为斜入射奇偶函数绝对检测法得到的仿真结果, 表 4 为斜入射奇偶函数绝对检测法恢复的面形的 PV 和 RMS 数据, 图 9 为斜入射奇偶函数绝对检测法恢复波面与原始波面的残差。可以看出, 奇偶函数法能够完全恢复待测面形的特征, 但是与平面真实值相比残差较大, 因为在计算过程中, 旋转平均值 M_R 被近似认为不含有奇偶函数

项, 这就要求待测元件的波面误差需关于 x 、 y 轴双重对称, 这就对被测元件的面形提出了苛刻的条件, 并且给非圆形待测平面镜的测量增大了难度。

表 3 斜入射迭代绝对检测法恢复面形的 PV 和 RMS 数据
Table 3 PV and RMS data of the recovered surfaces obtained by oblique incidence iteration absolute detection method

Surface	K	M	L
PV / λ	0.038772	0.050428	0.043772
RMS / nm	4.2616	5.236	4.1736

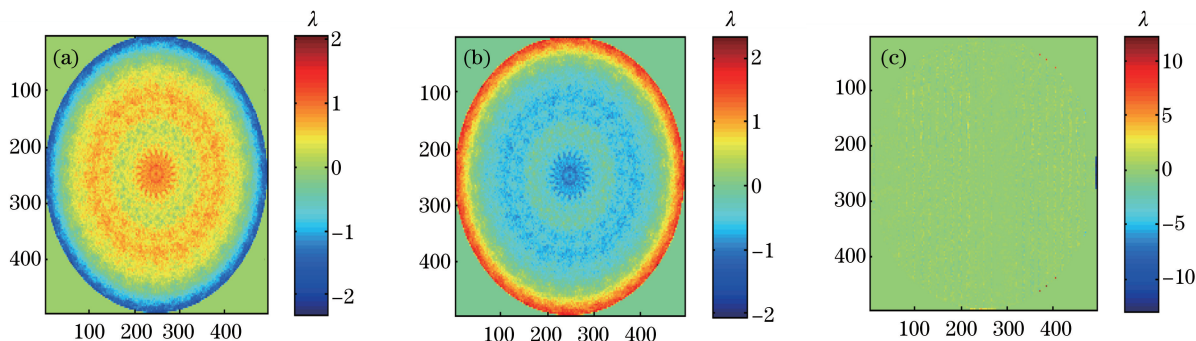


图 7 斜入射迭代绝对检测法恢复波面与原始波面的残差。(a) K ; (b) M ; (c) L

Fig. 7 Residual data between the wavefront recovered by oblique incidence iteration absolute detection method and original wavefront. (a) K ; (b) M ; (c) L

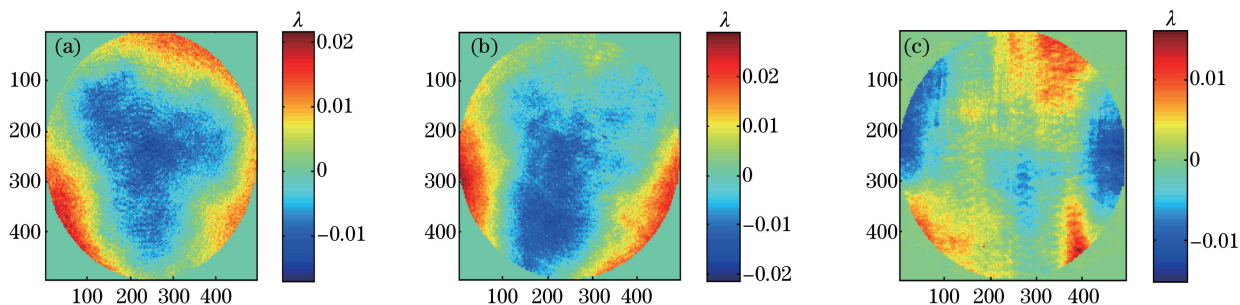


图 8 斜入射奇偶函数绝对检测法得到的仿真结果。(a) K ; (b) M ; (c) L

Fig. 8 Simulation results obtained by oblique incidence odd even function absolute detection method.

(a) K ; (b) M ; (c) L

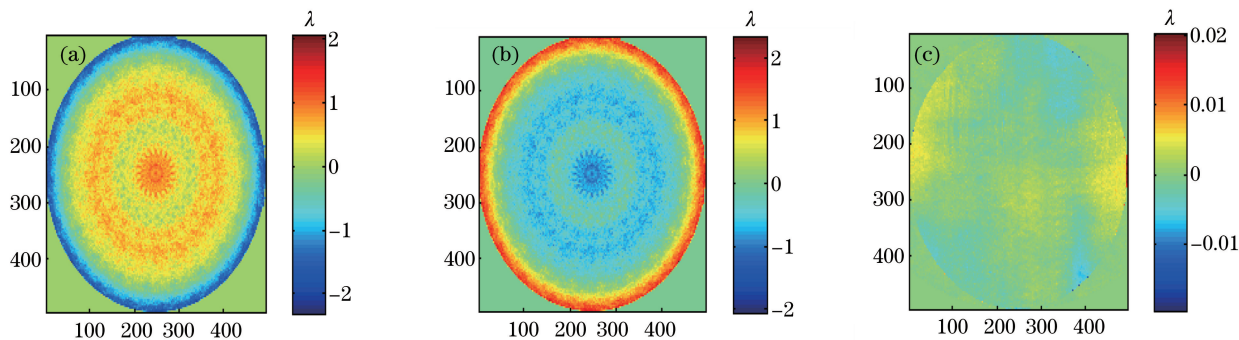


图 9 斜入射奇偶函数绝对检测法恢复波面与原始波面的残差。(a) K ; (b) M ; (c) L

Fig. 9 Residual data between the wavefront recovered by oblique incidence odd even function absolute detection method and original wavefront. (a) K ; (b) M ; (c) L

表 4 斜入射奇偶函数绝对检测法恢复面形的 PV 和 RMS 数据

Table 4 PV and RMS data of the recovered surfaces obtained by oblique incidence odd even function absolute detection method

Surface	K	M	L
PV / λ	0.038772	0.050428	0.031388
RMS /nm	4.2616	5.236	2.7548

对比三类原始数据与仿真恢复面形数据可知,基于 N 位旋转平均法对表面面形恢复的精确度达到 PV 值小于 0.002λ , RMS 值小于 0.03 nm ; 迭代算法对表面面形恢复的精确度达到 PV 值小于 0.004λ , RMS 值小于 0.7 nm ; 奇偶函数算法对表面面形恢复的精确度达到 PV 值小于 0.012λ , RMS 值小于 1.41 nm 。

3.2 实验研究

3.2.1 N 位旋转绝对检测

本次实验所使用的干涉仪为 4D 公司的 FIZCAM 2000, 测试对象为 ZYGO 标准镜 A, 另外两块平板选用 ZYGO 的标准镜 B 和 C, 所使用的旋转装置为 4D 公司生产的五维调整架。实验装置如图 10 所示。

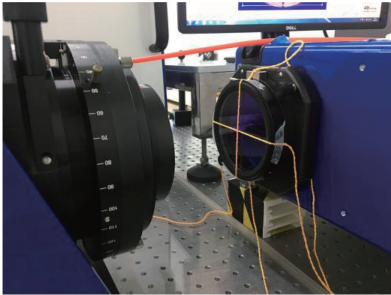


图 10 N 位旋转绝对检测实验装置图

Fig. 10 Experimental setup for N bit rotation absolute detection

本次实验选择的旋转测量次数为 8 次, 旋转间隔为 45° 。为了减少气流扰动和振动等因素对实验结果的影响, 尽量使被测面贴近参考面, 两者距离仅为 80 mm , 最后通过 N 位旋转平均法得到标准镜 A 的结果如图 11 所示。

3.2.2 斜入射绝对检测

同样在 4D 干涉仪上进行测量实验, 测试对象 L 为 ZYGO 的标准镜, 另外两个测试对象 K 、 M 均为 ZYGO 公司的标准参考平面镜, 其中 K 上镀有动态膜, 可对镀有高反膜的平面镜或者普通未镀膜平面镜进行测量, M 上镀有高反膜, 所使用的旋转

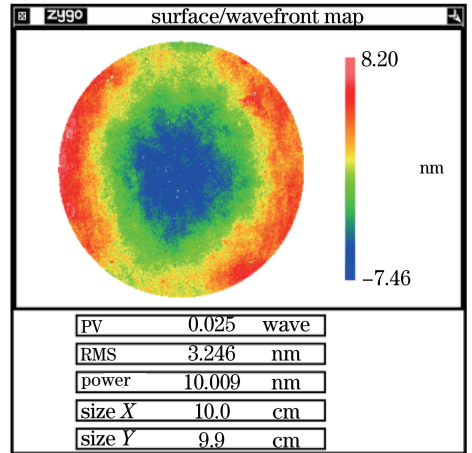


图 11 N 位旋转平均法得到的标准镜 A 的面形结果
Fig. 11 Surface result of standard mirror A obtained by N bit rotation average method

装置为 4D 公司生产的五维调整架, 测试组合为 KLM 、 KM 、 KM_R 、 $KM_{r,\varphi}$, 实验装置如图 12 所示。

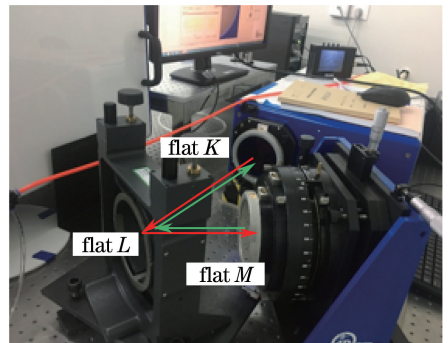


图 12 斜入射绝对检测实验装置图

Fig. 12 Experimental setup for oblique incidence absolute detection

本次实验中 M 选择的旋转角度为 54° , 斜入射角度为 30° , 迭代法恢复的 L 的面形结果和奇偶函数法恢复的 L 的面形结果如图 13 所示。

4 分析与讨论

为了进一步与传统的相对测量方法进行比较, 本次实验还选用了与标准平面镜 A 面形精度相当的参考镜在干涉仪上进行了相对测量, 测量结果如图 14 所示。表 5 为标准平面镜 A 的绝对面形和相对面形的 PV 和 RMS 数据。

由于待测平面与参考平面精度相似, 所以相对测量计算得到的待测面面形中由参考平面的存在所带来的误差无法忽略, 所以相比较而言, 相对测量所得待测平面的 PV 和 RMS 值均高于绝对检测得到的三组数据。

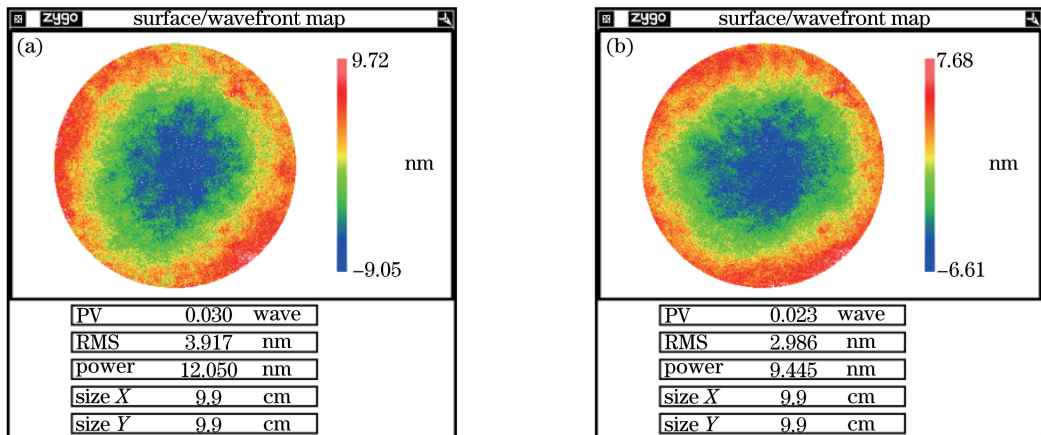


图 13 不同方法得到的 L 的面形结果。(a)迭代法;(b)奇偶函数法

Fig. 13 Surface results of L obtained by different methods. (a) Iteration method; (b) odd even function method

绝对检测法得到的三组测量结果面形恢复值均低于相对测量结果,且重复性较好,与仿真结果相似,奇偶函数法恢复得到的面形的 PV 和 RMS 值整体偏小,迭代法恢复得到的面形中包含迭代得到的 M 面形和真实 M 面形相差的镜面不对称项,所以得到的值偏高。从恢复得到的三组波面面形可以看出,面形特征点基本一致,可以认为实验结果准确且可信。

对于 N 位旋转法和斜入射测量法而言, N 位旋转法计算精度明显高于斜入射测量法,可同时得到待测三平面的波前误差函数,但仅适合各类小尺寸圆形平面的测量。而斜入射测量法拓展了待测平面的可测量区域尺寸,奇偶函数法计算简单,但是仅能得到斜入射待测平面,且精度欠缺,尤其是高频信息部分;迭代法计算虽然耗时较长,但能同时得到三平面的波前误差函数,且斜入射待测平面恢复精度

较高,但是如果阈值设置不当(低于计算上的误差极限),那么迭代容易进入死循环。

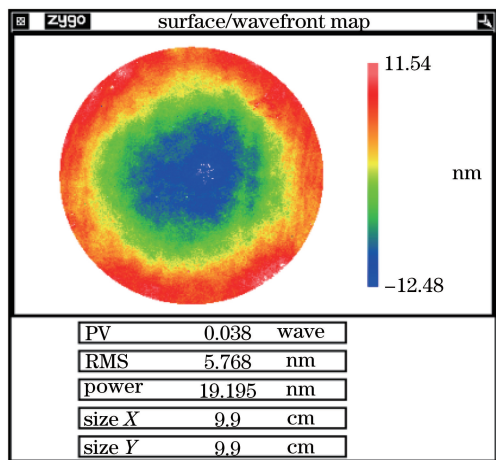


图 14 标准镜 A 的相对面形测量结果

Fig. 14 Relative surface measurement result of standard mirror A

表 5 不同方法得到的标准镜 A 的面形的 PV 和 RMS 数据

Table 5 PV and RMS data of the surface of standard mirror A obtained by different methods

Method	N bit rotation average method	Iteration method	Odd even function method	Relative measurement
PV / λ	0.025	0.030	0.023	0.038
RMS /nm	3.246	3.917	2.986	5.768

5 结 论

介绍了 N 位旋转平均绝对检测方法和斜入射绝对检测方法,对这两种检测方法和面形恢复过程中运用到的三种算法(旋转平均算法、迭代算法、奇偶函数算法)进行理论推导,仿真表明这三种方法恢复面形时产生的偏差如下:基于 N 位旋转测量的绝对测量算法对表面面形恢复的精确度达到 PV 值小于 0.002λ ,RMS 值小于 0.03 nm;迭代算法对表面

面形恢复的精确度达到 PV 值小于 0.004λ ,RMS 值小于 0.7 nm;奇偶函数算法对表面面形恢复的精确度达到 PV 值小于 0.012λ ,RMS 值小于 1.41 nm。并对其进行了实验测量,验证了绝对检测所得结果的准确性,对比得到了这三种方法恢复的面形精度。

参 考 文 献

- [1] Schulz G, Schwider J. Precise measurement of plainness[J]. Applied Optics, 1967, 6 (6): 1077-1084.

- [2] Schulz G. Absolute flatness testing by an extended rotation method using two angles of rotation [J]. *Applied Optics*, 1993, 32 (7): 1055-1059.
- [3] Fritz B S. Absolute calibration of an optical flat[J]. *Optics Engineering*, 1984, 23(4): 379-383.
- [4] Ai C, Wyant J C. Absolute testing of flats decomposed to even and odd function [C]. *SPIE*, 1992, 1776: 73-83.
- [5] Evans C J, Kestner R N. Test optics error removal [J]. *Applied Optics*, 1996, 35(7): 1015-1021.
- [6] Jia X, Xing T W, Wei H M, *et al.* Analysis and simulation of absolute test of flats decomposed to even and odd functions [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2012, 41(2): 500-505.
贾辛, 邢廷文, 魏豪明, 等. 采用奇偶函数法的平面面形绝对测量技术仿真分析[J]. *红外与激光工程*, 2012, 41(2): 500-505.
- [7] Küchel M F. A new approach to solve the three flat problem [J]. *Optik-International Journal for Light and Electron Optics*, 2001, 112(9): 381-391.
- [8] Griesmann U. Three-flat test solution based on simple mirror symmetry [J]. *Applied Optics*, 2006, 45(23): 5856-5865
- [9] Vannoni M. Absolute flatness measurement using oblique incidence setup and an iterative algorithm [J]. *Optics Express*, 2014, 22(3): 3538-3546.
- [10] Liu H H. Study of absolute measurement method of optical plane based on rotating in N positions [D]. Nanjing: Nanjing University of Science and Technology, 2016.
刘欢欢. 基于 N 位旋转测量的光学平面绝对检测技术研究[D]. 南京: 南京理工大学, 2016.
- [11] Yang L L. Measurement of diffraction efficiency for multi-layer diffractive optical elements with oblique incidence [J]. *Acta Optica Sinica*, 2017, 37 (2): 0205003.
杨亮亮. 多层衍射光学元件斜入射衍射效率的测量 [J]. *光学学报*, 2017, 37(2): 0205003.
- [12] Xu L B, Zhou Y, Zhu R H, *et al.* Research progress of wavefront error detection technology for meter-size optical elements in inertial confinement fusion system [J]. *Laser & Optoelectronic Progress*, 2016, 53 (12): 120001.
徐隆波, 周游, 朱日宏, 等. 惯性约束聚变系统中米量级光学元件波面误差检测技术研究进展 [J]. *激光与光电子学进展*, 2016, 53(12): 120001.
- [13] Shi Y P, Liu C L. Positioning accuracy improvement of spot centroid for Shack-Hartmann wavefront sensor [J]. *Laser & Optoelectronic Progress*, 2017, 54(8): 081201.
师亚萍, 刘缠牢. 提高夏克-哈特曼波前传感器光斑质心的定位精度 [J]. *激光与光电子学进展*, 2017, 54(8): 081201.
- [14] Xiang Y, Li K Y, Wang W, *et al.* Analysis of surface distortion of large aperture ultra-thin crystals and exploration of new clamping method with low stress [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2017, 44(2): 0208001.
向勇, 李恪宇, 王伟, 等. 大口径超薄晶体的面形畸变分析和低应力新型夹持方法探索 [J]. *中国激光*, 2017, 44(2): 0208001.
- [15] Liu X M. Absolute testing of the optical flatness [D]. Nanjing: Nanjing University of Science and Technology, 2004.
刘晓梅. 光学平面的绝对检测 [D]. 南京: 南京理工大学, 2004.