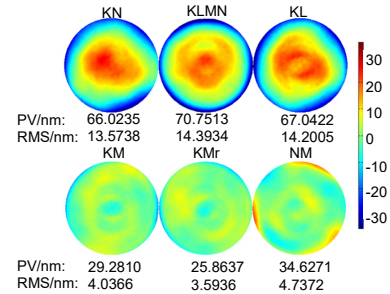


DOI: 10.12086/oe.2021.210047

基于改进六步翻转法的平行平板面形及均匀性绝对检测方法

张 帅^{1,2}, 全海洋^{1*}, 侯 溪¹, 胡小川¹, 吴高峰¹¹中国科学院光电技术研究所, 四川 成都 610209;²中国科学院大学, 北京 100049

摘要: 本文提出了一种改进六步翻转法, 同时实现平行平板均匀性以及绝对面形的测量, 结合相应的稀疏迭代算法, 进一步实现高精度的均匀性和绝对面形误差的重构。通过相应的理论分析和实验验证工作, 进一步证明了该方法的有效性和达到亚纳米级检测精度的能力。利用本文所提出的方法与传统绝对平面检测方法以及材料均匀性测量方法进行交叉对比, 其中绝对平面测量结果之间差异优于 1.7 nm RMS, 均匀性测量精度差异不超过 2.3 nm RMS。实验结果表明了两者具有高度一致性, 同时具有较好的重复性, 验证了文章提出的方法的准确性。并且根据不确定度分析表明, 该方法与传统的透射法相比提高了测量精度。

关键词: 光学检测; 干涉计量; 绝对检测; 不确定度评估**中图分类号:** TN247**文献标志码:** A

张帅, 全海洋, 侯溪, 等. 基于改进六步翻转法的平行平板面形及均匀性绝对检测方法[J]. 光电工程, 2021, 48(7): 210047

Zhang S, Quan H Y, Hou X, *et al.* Absolute testing of planarity and inhomogeneity with modified six-step method[J]. *Opto-Electron Eng*, 2021, 48(7): 210047

Absolute testing of planarity and inhomogeneity with modified six-step method

Zhang Shuai^{1,2}, Quan Haiyang^{1*}, Hou Xi¹, Hu Xiaochuan¹, Wu Gaofeng¹¹Institute of Optics and Electronics, Chinese Academy of Sciences, Chengdu, Sichuan 610209, China;²University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China

Abstract: We describe a modified six-step method to simultaneously measure the inhomogeneity of sample plate and the planarity of the four surfaces in an absolute manner, along with a high-efficiency iterative algorithm for data reduction. Combined with the iterative algorithm, the errors of inhomogeneity and flatness can be estimated with pixel-level spatial resolution in a fast and effective manner. The simulation and experiments prove the validity of the method and the measurement capability of reaching sub-nanometer accuracy. The method presented in this paper is cross-compared with traditional absolute testing method and the method of inhomogeneity. The difference between absolute plane measurements is less than 1.7 nm RMS, and the difference of inhomogeneity measurement accuracy is less than 2.3 nm RMS. The experimental results show that these two methods are highly consistent and have

收稿日期: 2021-02-04; 收到修改稿日期: 2021-04-26

基金项目: 国家自然科学基金面上项目资助(61675209)

作者简介: 张帅(1994-), 男, 硕士研究生, 主要从事高精度 X 射线光学元件面形检测装置的研究。

E-mail: zhangshuai18@mailsucas.ac.cn

通信作者: 全海洋(1989-), 男, 博士, 主要从事高精度光学检测技术及不确定度的研究。E-mail: aalsea111.1989@163.com

版权所有©2021 中国科学院光电技术研究所

good repeatability, which verifies the accuracy of the methods proposed in this paper. Uncertainty analysis indicates that the proposed method improves the measurement uncertainty, compared with the classical transmission method.

Keywords: optical testing; interferometry; absolute test; uncertainty evaluation

1 引言

随着光学技术的飞速发展,以微电子装备、航空航天、精密测量为代表的先进光学系统对光学元件的光学面形以及均匀性提出了越来越高的要求。均匀性是度量材料折射率变化的关键参数。一般采用标准相位测量干涉仪(standard phase measuring interferometry)进行测量,具体的方法有液浸法^[1-2]和透射法^[3-8]。在实际应用过程中,由于液浸法过于繁琐,因此研究方向主要聚焦在绝对测量技术,即把材料非均匀引起的表面偏差与系统误差分开的测量技术。绝对面形检测是一个复杂的过程,通常需要多次测量才能得到相应的面形误差分布^[9-10]。与绝对面形检测类似,对于均匀性的绝对检测也需要通过多次测量。透射法是均匀性检测最常用的方法,为了实现均匀性的绝对检测,需要通过四次透射测量(the four-step transmission method)以消除样品板两个绝对面形误差以及参考平面和干涉仪引入的系统误差从而实现绝对测量。然而,杂散光干扰是四步透射测量法不可忽视的干扰项。多光束干涉引起的强度失真可以通过波长调谐法和复杂的数据处理计算,从频域内的多个干涉条纹中分离出目标信号^[11-16];或者在被测样品板的两个表面之间人为引入一个小楔角来分离杂散光束,但是楔角选取不当则会带来额外的测量不确定度。另一种简单的方法叫做“窗口翻转法”(window-flipping method),通过翻转窗口来测量窗口的后表面,避免杂散光的引入。但翻转法无法完全消除参考平面的表面误差。借助于绝对面形检测技术(例如三平板测试^[15,17-21]),可以预先获得绝对面形以备将来使用,但这是另一个复杂的过程。因此为了简化整个测量过程,需要同时测量样品的绝对面形和折射率不均匀性。

本文提出了一种改进的六步法(modified six-step method),与传统的透射法或绝对测量方法不同,该方法可以同时实现测量两个表面间没有楔角的抛光样品(如平行平板)的均匀性以及相应的绝对面形,提高了测量效率。同时,借助高效的数据稀疏迭代算法^[19],可以快速有效地重构平板样品的均匀性和绝对面形误差,实现高分辨率的绝对检测。理论仿真和实验研究验证了该方法的有效性,并且测量精度可以达到亚纳

米量级。通过测量不确定度分析表明,与传统的四步透射法相比,改进的六步翻转法进一步提高了测量不确定度。此外,该方法可有效地应用于高精度抛光样品的测量,并可推广到斜入射式大口径光学元件(如同步辐射装置、惯性约束聚变中的大型光学元件以及巨型望远镜)的测量。

2 改进的六步法

对于经典的六步透射法,如图1所示,步骤如下:

第一步:从透射平板(TF)和反射平板(RF)形成的光腔中取出被测样品(SUT),测量空腔状态下面形数据 S_{KN} :

$$S_{KN} = S_{F,K} + S_N \quad (1)$$

本文采用 Vannoni 提出的符号线性算子^[20], $S_{F,K}$ 表示 K 面绕 y 轴翻转后的面形,即 $S_{F,K}(x, y) = S_K(-x, y)$; N 表示 RF 的前表面。

第二步:放入样品 SUT,使 RF 通过 SUT 反射,并进行透射测量得到相应的测量数据 S_{KLMN} :

$$S_{KLMN} = S_{F,K} + (1-n)(S_L + S_{F,M}) + S_N + \delta \quad (2)$$

式中: δ 为样本的不均匀性, n 为样品的折射率; $S_{F,M}$ 表示表面 M 绕 y 轴翻转后的面形。

第三步:测量 SUT 前表面 L 反射的波前:

$$S_{KL} = S_{F,K} + S_L \quad (3)$$

第四步:调整 SUT 以获得从内后表面 M 反射的测量值:

$$S_{KLM} = S_{F,K} + (1-n)S_L - nS_{F,M} + \delta \quad (4)$$

由 SUT 的不均匀性引起的表面偏差(波前)可根据式(1)~式(4)得到:

$$\delta = n(S_{KLMN} - S_{KN}) - (n-1)(S_{KLM} - S_{KL}) \quad (5)$$

因此,只要给定 SUT 的厚度,就可以计算出相应折射率的变化。本文仅讨论由不均匀性引起的表面偏差。这种方法的主要优点是完全消除了 K、L、M 和 N 四个绝对面形误差所引入的误差。然而,在具体应用中,将待测样品插入光腔中可能会在相应的干涉仪腔中发生多光束干涉,从而导致无法用标准相移方法评估的强度失真。在这种情况下,必须在 SUT 的两个表面之间引入一个小楔角来消除干扰,而楔角的引入会限制该方法的通用性。

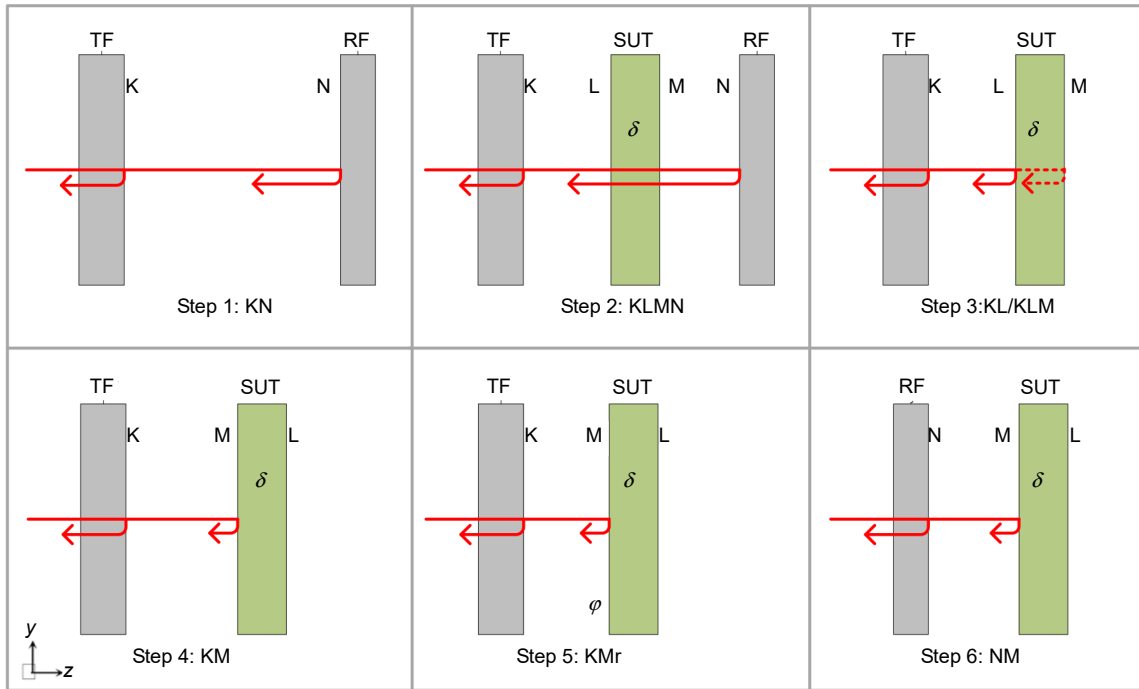


图 1 样品 SUT 非均匀性测量以及 K、L、M、N 四个表面的绝对面形测量 (TF 透射标准平面、RF 标准平面、SUT 测试样品)的六步测量步骤

Fig. 1 Six-step procedure for inhomogeneity evaluations, as well as absolute planarity measurements of the four surfaces K, L, M, N. (TF: Transmission flat, RF: Standard flat, SUT: Sample under test)

在此基础上，四步窗口翻转方法可以通过简单地翻转 SUT 用后表面的测量数据来代替 S_{KLM} 测量数据 (步骤四)。

绕 y 轴翻转 SUT，测量 S_{KM} ：

$$S_{KM} = S_{F_y,K} + S_M \quad (6)$$

由式(1)~式(3)和式(6)，得到了 SUT 的不均匀性：

$$\delta = (S_{KLMN} - S_{KN}) + (n-1) \left[S_{KL} + S_{F_y,(KM)} \right] - (n-1)(S_K + S_{F_y,K}) \quad (7)$$

由于 SUT 的两个表面 L 和 M 是在反射中独立测量的，因此不需要引入楔角(对于非常平行的 SUT，可以使用傅里叶变换相移干涉术^[12-13])，从而可以测量两个表面之间没有楔角的光滑样品(如平行的透明样品)。如式(7)所示，翻转法的缺点是不能彻底消除系统误差。如果不消除或补偿系统误差，则对测量精度有很大的影响。为了同时实现对 SUT 和四个表面的不均匀性绝对测量，需要引入两个额外的测量(步骤五和步骤六)。

第五步：将 SUT 绕 z 轴旋转一个固定角度，并进行旋转测量(实际中广泛使用 54°)：

$$S_{KM_r} = S_{F_y,K} + S_{R_\varphi M} \quad (8)$$

式中： $R_\varphi M$ 表示平面 M 绕 z 轴旋转固定角度 φ 。

第六步：用 RF 代替 TF，测量 S_{NM} ：

$$S_{NM} = S_{F_y,N} + S_M \quad (9)$$

理论上，由式(1)、式(6)、式(8)可计算出 TF 绝对面形的偶数项：

$$S_K^e = \frac{S_K + S_{F_y,K}}{2} = \frac{S_{KN}^e + S_{KM}^e - S_{NM}^e}{2} \quad (10)$$

式中：“e”表示提取面形偶数项的操作。至此，通过五步测量法可得到非均匀性：

$$\begin{aligned} \delta &= (S_{KLMN} - S_{KN}) + (n-1) \left[S_{KL} + S_{F_y,(KM)} - 2S_K^e \right] \\ &= (S_{KLMN} - S_{KN}) \\ &+ (n-1) \left\{ S_{KL} + S_{F_y,(KM)} - \left[S_{KN}^e + S_{KM}^e - S_{NM}^e \right] \right\} \quad (11) \end{aligned}$$

另一方面，四个表面的绝对面形可以通过简单地添加一个旋转测量来计算(步骤五)。由于偶数项已经得到，奇数量可以通过旋转测量来求解^[21-22]。实际上，旋转测量求解的是表面($S_{K^{RV}}$)的旋转变化分量，而面形(S_K^o)的奇数项就包含在旋转变量部分中：

$$S_K^o = \frac{S_K - S_{F_y,K}}{2} = \frac{S_{K^{RV}} - S_{F_y,(K^{RV})}}{2} \quad (12)$$

当奇偶项代入后，可以同时求解得到四个面的面

形误差。因此, 采用改进的六步翻转法(图 1)可同时实现样品绝对面形和均匀性的绝对测量。

在上述式(6)和式(8)所涉及计算中, 通常采用基于 Zernike 多项式的拟合方法来获得旋转变分量(低空间频率滤波)的部分解。为了获得更高的计算精度, 本文结合式(1)~式(3)、式(6)、式(8)~式(9)所描述的物理过程, 将改进六步翻转法形成的求解模型归纳如下:

$$\begin{aligned}
 S_{K_{new}} &= S_K \\
 &+ \omega \frac{S_{F_y} \left[\Delta S_{KN} + \Delta S_{KLMN} + \Delta S_{KL} + \Delta S_{KM} + \Delta S_{KM_t} \right]}{5}, \\
 S_{L_{new}} &= S_L + \omega \frac{\Delta S_{KLMN} + (1-n)\Delta S_{KL}}{2(1-n)}, \\
 S_{M_{new}} &= S_M \\
 &+ \omega \frac{\Delta S_{KLMN} + (1-n) \left\{ \Delta S_{KM} + S_{R^{-1}} \left[\Delta S_{KM_t} \right] + \Delta S_{NM} \right\}}{4(1-n)}, \\
 S_{N_{new}} &= S_N + \omega \frac{\Delta S_{KN} + \Delta S_{KLMN} + S_{F_y} \left[\Delta S_{NM} \right]}{3}, \\
 \delta_{new} &= \delta + \omega \cdot \Delta S_{KLMN}, \tag{13}
 \end{aligned}$$

式中: $\Delta(\cdot)$ 为残余误差, 它描述了测量数据与计算数据间的差异, 并通过多次迭代计算得到近似解^[19]。 ω 是求解模型的加速参数, 当选择合适的加速参数可以进一步加快迭代的收敛速度。

3 仿真结果

为验证上述方法, 本文使用具有高频信息的实验数据作为四个表面 K、L、M、N 的面形误差和均匀性误差(图 2)。然后对每一次测量引入测量噪声(1.0 nm PV 和 0.1 nm RMS), 得到组合实验结果。预期实验结

果如图 3 所示。图 2 显示表面 M 具有正 Power 像差, 而其他表面则是负 Power 像差。因此, 当正 Power 与负 Power 相加时, 相应实验结果的 Power 将被部分消除, 如图 3 所示。

运用上述方法, 得到绝对测试结果如图 4 所示, 其中给出了 K、L、M、N 的重建面形和均匀性分布。重建面形残余误差是用上述迭代算法得到的重建面形与理论面形的差值。从残差图可以看到, 各个面的重建残差均在亚纳米 RMS 量级。其中, 当测量随机误差在 0.1 nm RMS 时, 由样品板均匀性引起的表面误差的不确定度在 0.17 nm RMS。

4 实验结果

本文利用 6 inch(1 inch=2.54 cm)英寸相移 Fizeau 干涉仪(光轴水平), 进一步开展了相关实验验证工作。首先, 用两个标准平板 K 和 N 测量了一个 6 inch 平行平板($\phi 150 \text{ mm} \times 6 \text{ mm}$)的绝对面形 L、M 和折射率不均匀性 δ 。在确保实验操作和实验室温度的前提下进行独立重复测量^[23], 得到面形测量重复性约为 1.5 nm RMS。图 5 显示了使用改进的六步翻转法的绝对测量结果, 其中分别给出了平行平板两个表面 L、M 的绝对面形和折射率不均匀性引起的面形误差。

另一方面, 本文通过交叉验证的方法来检验改进六步翻转方法的有效性。为了获得表面 L 和 M 的绝对面形误差, 预先用三平板法对两个标准平面 K 和 N 进行了标定^[18-21]。结果如图 6(a)和图 6(b)所示。通过使用傅里叶变换相移干涉法(FTPSI)处理 Fizeau 干涉仪采集的数据, 得到由于均匀性引起的面形误差, 结果如图 6(c)所示。

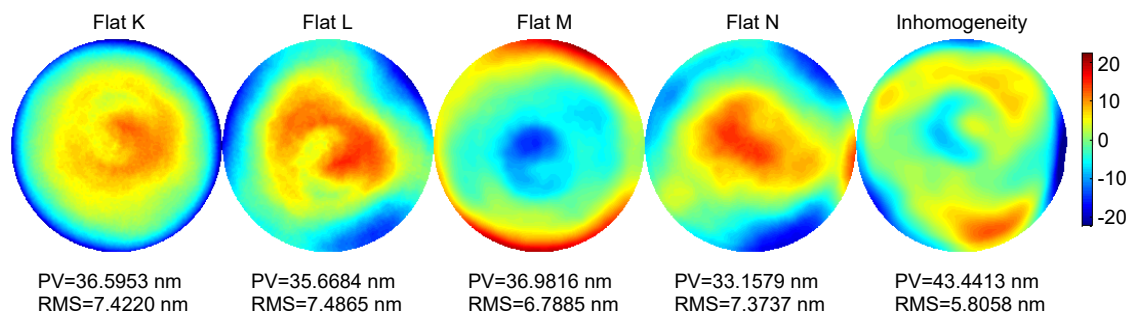


图 2 原始实验表面 K、L、M、N 的面形误差和由于样板不均匀而产生的面形误差

Fig. 2 Example figure errors of original experimental surfaces K, L, M, N and figure error due to inhomogeneity of the sample plate

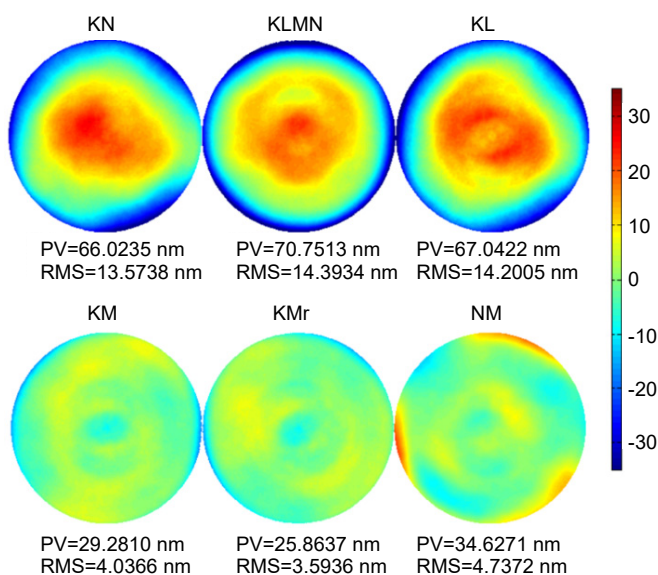


图 3 六步翻转试验的示例模拟实验结果(每次测量的测量噪声为 0.1 nm RMS)
 Fig. 3 Example experimental results of simulation with six-step flipping test (the measurement noise of each measurement is 0.1 nm RMS)

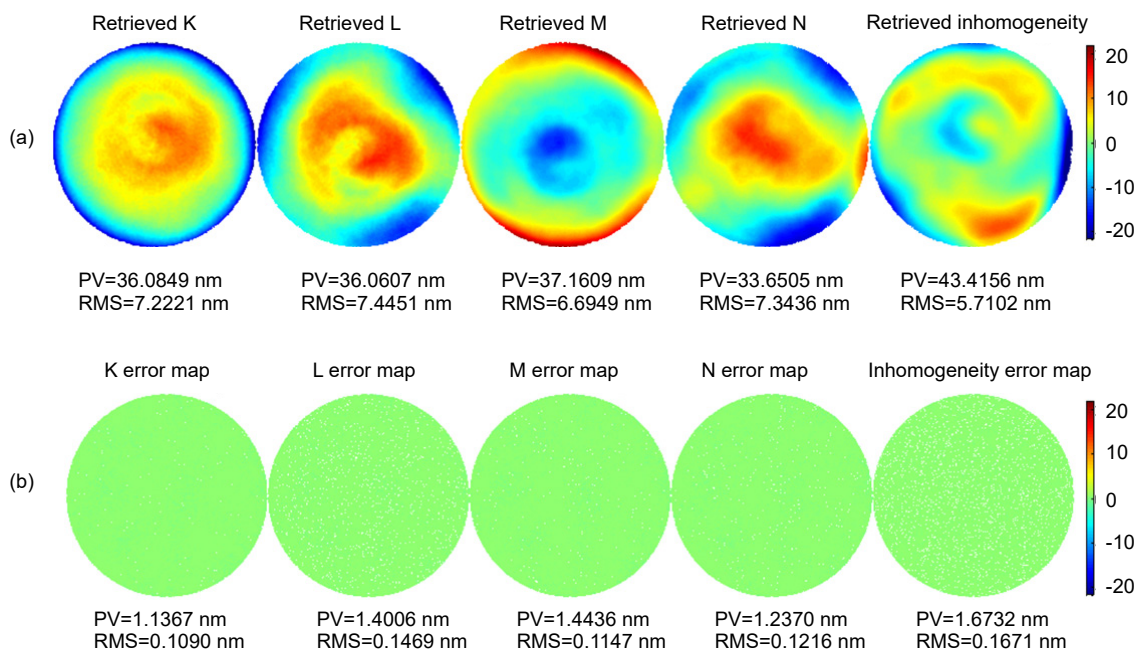


图 4 (a) 通过迭代算法计算得到的 K、L、M、N 表面的面形误差和由于样板不均匀而产生的面形误差; (b) 各个表面对应的测量残差图
 Fig. 4 (a) Retrieved figure errors of surfaces K, L, M, N and figure error due to inhomogeneity of the sample plate by the iterative algorithm; (b) The associated measurement error maps with respect to the original surfaces

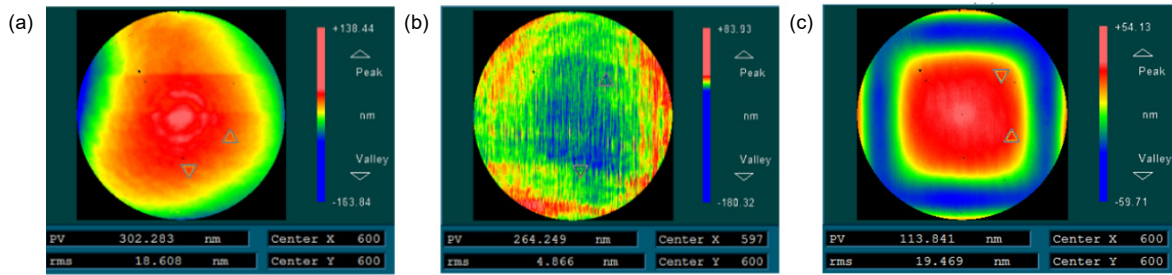


图 5 本文所提出改进的六步翻转法, 计算出表面 L 绝对面形(RMS=18.61 nm) (a); 表面 M 绝对面形 (RMS=4.87 nm) (b)和折射率不均匀性(RMS=19.47 nm) (c)引起的面形误差

Fig. 5 Retrieved figure errors of (a) surface L (RMS=18.61 nm), (b) surface M (RMS=4.87 nm), and (c) figure error due to inhomogeneity (RMS=19.47 nm) of the PPP by the proposed iterative algorithm

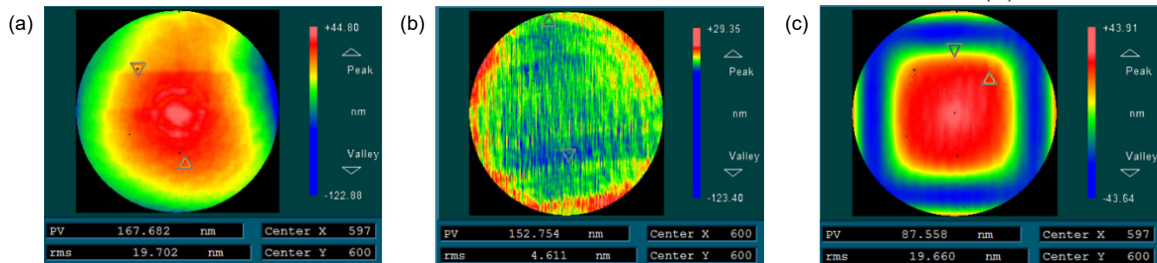


图 6 通过傅里叶变换相移干涉法(FTPSI), 计算得到(a)表面 L 绝对面形(RMS=19.71 nm); (b) 表面 M 绝对面形(RMS=4.62 nm)和(c) 折射率不均匀性(RMS=19.67 nm)而引起的面形误差

Fig. 6 Retrieved figure errors of (a) surface L (RMS=19.71 nm), (b) surface M (RMS=4.62 nm), and (c) figure error due to inhomogeneity (RMS=19.67 nm) of the PPP by the proposed iterative algorithm

通过对比图 5 和图 6 所示的面形图, 可以看到其 RMS 差异不超过 1 nm。图 7 则是图 5 和图 6 之间点对点像素之间的残差, 其值不超过 2.3 nm RMS。实验结果表明了两者具有高度一致性, 同时具有较好的重复

性, 验证了本文提出的改进六步翻转方法的准确性。

5 不确定度分析

在实际应用过程中, 需要对可能影响测量精度的

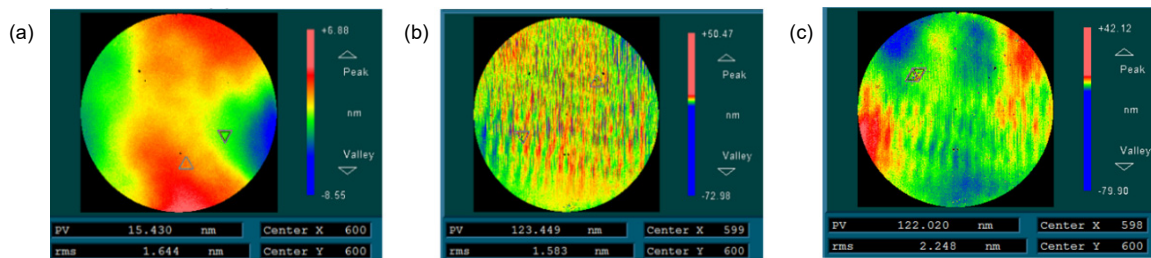


图 7 图 5 和图 6 点对点对应像素的差异。(a) 所述方法与三平面法的 L 面残差图(RMS=1.65 nm);

(b) 所述方法与三平法得到的 M 面残差图(RMS=1.59 nm);

(c) 所述方法与 FTPSI 法得到的不均匀性之间的残差图(RMS=2.25 nm)

Fig. 7 Differences between Fig. 5 and Fig. 6 pixel by pixel. (a) Difference map of surface L between the proposed method and three-flat method (RMS=1.65 nm); (b) Difference map of surface M between the proposed method and three-flat method (RMS=1.59 nm); (c) Difference map of inhomogeneity between the proposed method and FTPSI method (RMS=2.25 nm)

因素进行进一步研究。在改进的六步翻转法进行测量中, 干涉仪随机噪声和实验操作引起的误差是影响最终测量不确定度的两个主要误差源, 与经典的四步翻转法类似。用两种不同的方法对不均匀性进行测量, 评估两种测量方法结果的一致性, 并对本文所提出的方法进行总体测量不确定度评估。

5.1 随机噪声引入的测量不确定度

第一个误差源是干涉仪由于环境影响而产生的随机噪声, 如空气湍流、振动、探测器噪声等。对于高精度检测来讲, 环境是影响其测量不确定度的主要因素。

对于经典的四步透射法(式(5)), 随机噪声引起的非均匀性绝对测量误差如下^[3-5]:

$$\sigma_{\delta}^{\text{Tran}} = \sqrt{2n^2 + 2(n-1)^2} \varepsilon, \quad (15)$$

式中: ε 为干涉仪重复性误差。定义随机误差传播系数为 $c_{\text{coef}} = \sigma / \varepsilon$, 当折射率为 1.515 时, 透射法的随机误差传播系数为 2.2036。如果随机噪声的均方根误差为 1.5 nm, 则测量误差约为 3.3 nm RMS。对于改进的六步翻转法(式(11)), 随机噪声引起的不均匀性测量误差如下:

$$\sigma_{\delta}^{\text{Flp}} = \sqrt{2 + 3.25(n-1)^2} \varepsilon. \quad (16)$$

式(11)中 S_{KM}° 被平均项 $(S_{\text{KM}}^{\circ} + S_{\text{KMf}}^{\circ}) / 2$ 代替。在这种情况下, 当折射率为 1.515 时, 改进的六步翻转法的随机误差传播系数为 1.7, 接近四步透射法的一半。如果随机噪声的均方根误差为 1.5 nm, 则测量误差约为 2.6 m RMS, 这与实验结果一致(图 7(c)所示)。因此对于折射率大于 1.0 的情况, 改进的六步翻转法的系数均小于四步透射法的系数(如图 8 所示)。

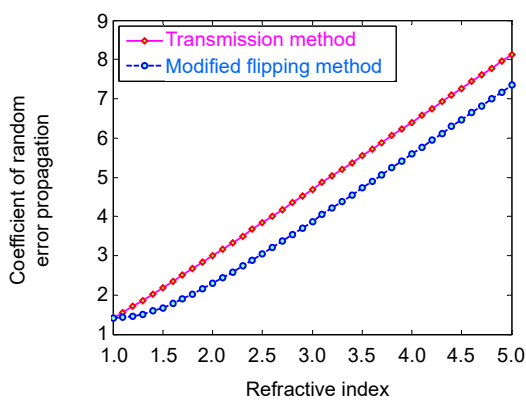


图 8 随机误差传播系数与折射率的关系
Fig. 8 Coefficient of random error propagation versus refractive index

由随机噪声引起的四个待测表面的绝对面形测量误差可以用类似的方法得到。另一方面, 每次测量都会引入随机误差, 由此引起的不确定度可通过蒙特卡洛试验来评估^[19]。

5.2 实验操作引入的测量不确定度

另一个主要误差源是由实验操作引起的误差, 包括角度误差、旋转测量 S_{KMf} 的旋转轴未对准以及在两个不同位置处 RF 和 SUT 翻转方向未对齐。这些误差主要在步骤四到步骤六的测量过程中引入(图 1)。蒙特卡洛试验结果表明, 在均匀性引起的面形误差图中, 0.5° 角度误差引起的最大误差约为 0.07 nm RMS, 单个像素(沿 x 和 y 轴)的对准误差引入的面形误差约为 0.10 nm RMS(其他四个面形误差均小于 0.06 nm RMS)。

5.3 合成标准测量不确定度

在用上述两个误差源(即第四步至第六步的三次测量中, 干涉仪重复性误差为 0.1 nm RMS, 角度误差为 0.5°, 对准误差为 1 个像素)进行蒙特卡洛重复试验后, 折射率不均匀性测量的最大误差约为 0.21 nm RMS。这比仿真得到的最大误差(0.17 nm RMS)略大, 表明由于环境影响引起的随机误差是该方法测量不确定度的主要因素。

如果用五倍的噪声(即 0.5 nm RMS 随机噪声)进行重复模拟实验, 那么不均匀性测量的最大误差约为 0.86 nm RMS。根据式(16), 由随机噪声引起的非均匀性测量误差为 $1.7\varepsilon = 1.7 \times 0.5 \approx 0.85$ nm RMS。这也表明由实验操作(添加两个额外的测量)引起的误差比由随机误差引起的误差小得多。

综上所述, 本文提出的改进的六步翻转法可有效地同时重建四个表面的绝对面形和待测样品的折射率均匀性分布, 且其测量不确定度接近实验噪声水平。测量不确定分析表明, 高重复性干涉仪、温度控制实验室和高稳定性支撑工装等是高精度光学表面测量所必需的基础条件。同时, 附加测量(如多次旋转)可进一步降低随机噪声引起的测量不确定度。在实践中, 由于实验操作引起的误差可以用误差匹配方法来进行评估和控制^[24]。

此外, 输入折射率、回溯误差、平板温度梯度以及重新安装引起的面形变化等因素, 也会影响测量的不确定度。为了获得更高精度的测量结果, 必须在全面地了解整个测量过程的基础上识别和控制这些系统误差。这些误差源也是影响其他绝对测量方法精度的主要因素^[18-21, 23-24]。

6 结论

本文提出了一种改进的六步翻转法, 同时实现了平行平板绝对面形和均匀性的绝对测量, 并开展了相应的理论仿真和实验验证工作。与传统的透射方法不同, 改进的六步翻转法不需要引入楔角, 从而增强了方法的通用性。而与绝对面形检测方法相比, 本文提出的六步翻转法不仅可以获得四个面的绝对面形, 还能同时获得被测样品的均匀性分布。理论仿真和实验研究验证了该方法的有效性, 仿真及实验结果表明该方法的测量精度可以达到亚纳米量级。测量不确定度分析表明, 改进的六步翻转法相比传统的四步透射法进一步提高了测量不确定度。该方法可用于高精度平行平板的测量, 并可推广到大口径光学平板的折射率均匀性和绝对面形测量。

参考文献

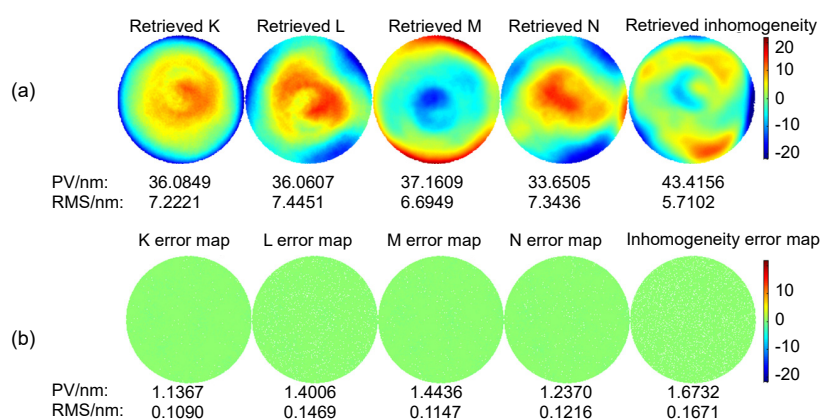
- [1] Adachi I, Asuda M T, Nishiyama S. A testing of optical materials by the Twyman type interferometer[J]. *Atti Fond Giorgio Ronchi Contrib 1st Nax Ottica*, 1961, **16**: 666–674.
- [2] Guo Y W. A surface shape test method for a thin flat mirror[J]. *Optik*, 2018, **152**: 116–126.
- [3] Ai C, Wyant J C. Measurement of the inhomogeneity of a window[J]. *Opt Eng*, 1991, **30**(9): 1399.
- [4] Roberts F E, Langenbeck P. Homogeneity evaluation of very large disks[J]. *Appl Opt*, 1969, **8**(11): 2311–2314.
- [5] Schwider J, Burow R, Elssner K E, et al. Homogeneity testing by phase sampling interferometry[J]. *Appl Opt*, 1985, **24**(18): 3059–3061.
- [6] Li Q, Liu A, Gao B, et al. Error analysis of absolute test method of inhomogeneity of optical materials[J]. *J Appl Opt*, 2013, **34**(3): 463–468.
李强, 刘昂, 高波, 等. 光学材料光学不均匀性绝对测量误差分析[J]. *应用光学*, 2013, **34**(3): 463–468.
- [7] Zhang R, Chen L, Zhu W H, et al. Measuring optical homogeneity of parallel plates based on simultaneous phase-shifting by lateral displacement of point sources[J]. *Acta Photonica Sin*, 2018, **47**(1): 0112002.
张瑞, 陈磊, 朱文华, 等. 点源异位同步移相法检测平行平晶的光学均匀性[J]. *光子学报*, 2018, **47**(1): 0112002.
- [8] Gao B, Li Q, Liu A, et al. Measuring refractive index of transparent plate by low-coherent interference[J]. *Chin J Lasers*, 2019, **46**(8): 0804004.
高波, 李强, 刘昂, 等. 基于短相干技术的光学平板折射率测量方法[J]. *中国激光*, 2019, **46**(8): 0804004.
- [9] Evans C J, Hocken R J, Estler W T. Self-calibration: reversal, redundancy, error separation, and 'absolute testing'[J]. *CIRP Ann*, 1996, **45**(2): 617–634.
- [10] Hou X, Zhang S, Hu X C, et al. The research progress of surface interferometric measurement with higher accuracy[J]. *Opto-Electron Eng*, 2020, **47**(8): 200209.
侯溪, 张帅, 胡小川, 等. 超高精度面形干涉检测技术进展[J]. *光电工程*, 2020, **47**(8): 200209.
- [11] Park J, Chen L F, Wang Q D, et al. Modified Roberts-Langenbeck test for measuring thickness and refractive index variation of silicon wafers[J]. *Opt Express*, 2012, **20**(18): 20078–20089.
- [12] Deck L L. Multiple-surface phase-shifting interferometry[J]. *Proc SPIE*, 2001, **4451**: 424–431.
- [13] Mantel K, Schwider J. Interferometric homogeneity test using adaptive frequency comb illumination[J]. *Appl Opt*, 2013, **52**(9): 1897–1912.
- [14] Ren H, Ma L, Liu X, et al. Optical element test with multiple surface interference[J]. *Opt Precision Eng*, 2013, **21**(5): 1144–1150.
任寰, 马力, 刘旭, 等. 多表面干涉下的光学元件面形检测[J]. *光学精密工程*, 2013, **21**(5): 1144–1150.
- [15] Xue J C, Shi Q K, Chai L Q, et al. Spatial fourier fringe analysis with single three-surface interferogram[J]. *Chin J Lasers*, 2006, **33**(9): 1260–1264.
徐建程, 石琦凯, 柴立群, 等. 三表面干涉条纹空域傅里叶分析[J]. *中国激光*, 2006, **33**(9): 1260–1264.
- [16] Guo R H, Liao Z S, Li J X, et al. Optical homogeneity measurement of parallel plates by wavelength-tuning interferometry using nonuniform fast Fourier transform[J]. *Opt Express*, 2019, **27**(9): 13072–13082.
- [17] Chen Z Y, Zhao W C, Zhang Q C, et al. Shape measurement of stressed mirror based on stereoscopic phase measuring deflectometry[J]. *Opto-Electron Eng*, 2020, **47**(8): 190435.
陈贞屹, 赵文川, 张启灿, 等. 基于立体相位测量偏折术的预应力薄镜面形检测[J]. *光电工程*, 2020, **47**(8): 190435.
- [18] Fritz S B. Absolute calibration of an optical flat[J]. *Opt Eng*, 1984, **23**(4): 234379.
- [19] Quan H Y, Hou X, Wu F, et al. Absolute measurement of optical flats based on basic iterative methods[J]. *Opt Express*, 2015, **23**(12): 16305–16319.
- [20] Vannoni M V, Sordini A, Molesini G. Calibration of absolute planarity flats: generalized iterative approach[J]. *Opt Eng*, 2012, **51**(8): 081510.
- [21] Griesmann U. Three-flat test solutions based on simple mirror symmetry[J]. *Appl Opt*, 2006, **45**(23): 5856–5865.
- [22] Li Y C, Han S, Wu Q Y, et al. Absolute test of flats based on even or odd functions[J]. *J Appl Opt*, 2017, **38**(3): 469–475.
李宇琛, 韩森, 吴泉英, 等. 基于奇偶函数法的绝对检测实验研究[J]. *应用光学*, 2017, **38**(3): 469–475.
- [23] Huan H Y, Xi H, Wu F. Evaluating surface repeatability for interferometric measurement: a comparative study[J]. *Proc SPIE*, 2016, **9684**: 96842M.
- [24] Hou X, Yang P, Wu F, et al. Comparative experimental study on absolute measurement of spherical surface with two-sphere method[J]. *Opt Lasers Eng*, 2011, **49**(7): 833–840.

Absolute testing of planarity and inhomogeneity with modified six-step method

Zhang Shuai^{1,2}, Quan Haiyang^{1*}, Hou Xi¹, Hu Xiaochuan¹, Wu Gaofeng¹

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

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



(a) Retrieved figure errors of surfaces K, L, M, N and figure error due to inhomogeneity of the sample plate by the iterative algorithm;

(b) The associated measurement error maps with respect to the original surfaces.

Overview: For many international projects, such as EUV lithography, Synchrotron Radiation Facility and Inertial Confinement Fusion, there are a variety of optical materials that must be produced with excellent optical flatness and refractive index homogeneity. Inhomogeneity is a measure of the variation in the refractive index within a material. Several methods can be used to measure the inhomogeneity based on standard phase measuring interferometry, including liquid immersion method and transmission method. Since the use of liquid is inconvenient for some applications, many researchers turn to develop techniques that can separate surface deviation caused by inhomogeneity from system errors (i.e. absolute test techniques). Absolute measurement of surface is a complex process that involves multiple measurements. As to absolute measurement of inhomogeneity, transmission method is the most popular. The transmission method with four measurements is able to remove the error contributions of the surfaces of the sample plate, as well as the errors of the return flat and interferometer. Another straightforward method called “window-flipping method”, measuring the rear surface of the window by flipping the window, can avoid this problem. But the flipping method inherently has a big uncertainty introduced by systematic effects—the surface error of transmission flat cannot be removed completely. With the aid of absolute test techniques (such as three-flat test), it is possible to measure the surface in advance and store them for later use. But it is also a complex process. To simplify the whole measurement process, it is necessary to measure the absolute planarity and inhomogeneity of the sample plate at the same time. In this paper, a modified six-step method to simultaneously measure the inhomogeneity of the sample plate and the four surfaces in an absolute manner is presented. Unlike the classical transmission method, the modified flipping method can test a polished sample that has no wedge between the two surfaces (such as parallel transparent plates). With the help of a high-efficiency iterative algorithm for data reduction, the errors of inhomogeneity and flatness are estimated with pixel-level spatial resolution in a fast and effective manner without using the polynomial fitting. The example experiments prove the validity of the method and the measurement capability of achieving sub-nanometer RMS accuracy. Uncertainty analysis suggests that the modified six-step flipping method improves the measurement uncertainty, compared with the classical four-step transmission method. Furthermore, this method can be effectively applied to measure high quality polished samples and extended to measure large optical materials at oblique incidence (such as large optics in Synchrotron Radiation Facility, Inertial Confinement Fusion, and giant telescopes).

Zhang S, Quan H Y, Hou X, *et al.* Absolute testing of planarity and inhomogeneity with modified six-step method[J]. *Opto-Electron Eng*, 2021, 48(7): 210047; DOI: 10.12086/oe.2021.210047

Foundation item: General Program of National Natural Science Foundation of China (61675209)

* E-mail: alsea111.1989@163.com