

文章编号:1002-2082(2017)03-0469-07

基于奇偶函数法的绝对检测实验研究

李宇琛^{1,3,4}, 韩森^{2,3,4}, 吴泉英^{1,3}, 唐寿鸿^{2,4}, 李雪园⁴, 王全召⁵

(1. 苏州科技大学, 江苏 苏州 215009;

2. 上海理工大学, 上海 200093;

3. 苏州慧利仪器有限责任公司企业研究生工作站, 江苏 苏州 215123;

4. 苏州慧利仪器有限责任公司, 江苏 苏州 215123;

5. 苏州维纳仪器有限责任公司, 江苏 苏州 215123)

摘要:针对平面干涉检测技术的检测精度受限于参考面面形精度的问题,提出使用基于奇偶函数的高精度绝对检测方法消除干涉系统中参考面面形误差的影响。对旋转角度误差与旋转偏心误差对绝对检测方法测量精度的影响进行了仿真分析。利用商用菲索干涉仪,设计和分析了绝对检测精度实验及重复性实验。仿真结果显示:旋转角度误差在达到 0.13° 时,测量误差PV值为 0.0001λ ;旋转偏心误差达到3 pixel时,测量误差PV值为 0.005λ 。实验结果显示:测得实际样品的绝对检测精度 PV_{10} 值为 0.0415λ ,RMS值为 0.0087λ ,小于常规干涉检测所得结果;对同一平面两次独立的绝对检测结果进行点对点作差处理,从而获得残差图,其残差图 PV_{10} 值为 0.004λ RMS值为 0.0005λ 。实验结果表明了该方法的高重复性和有效性。

关键词:光学干涉测量;绝对检测;奇偶函数;面形精度

中图分类号:TN206; O436.1; TH744

文献标志码:A

doi:10.5768/JAO201738.0303007

Absolute test of flats based on even or odd functions

Li Yuchen^{1,3,4}, Han Sen^{2,3,4}, Wu Quanying^{1,3}, Tang Shouhong^{2,4}, Li Xueyuan⁴, Wang Quanzhao⁵

(1. Suzhou University of Science and Technology, Suzhou 215009, China;

2. University of Shanghai for Science and Technology, Shanghai 200093, China;

3. Suzhou H&L Instruments LLC Company Graduate Workstation, Suzhou 215123, China;

4. Suzhou H&L Instruments LLC, Suzhou 215123, China;

5. Suzhou W&N Instruments LLC, Suzhou 215123, China)

Abstract: Aiming at the problem that detection accuracy of plane interferometry is limited by accuracy of reference surface shape, it is proposed to eliminate influence of reference surface error in interference system by using high precision absolute detection method based on parity function. Influences of rotation angle error and rotation eccentricity error on measurement accuracy of absolute detection method are simulated. Experiments and repetitive experiments of absolute detection accuracy are designed and analyzed by commercial Fischer interferometer. Simulation results show that measurement error PV value is 0.0001λ when rotation angle error reaches 0.13° ; measurement error PV value is 0.005λ when rotation eccentricity error reaches 3 pixels. Experimental results show that absolute detection accuracy of actual sample PV_{10} value is

收稿日期:2016-12-28; 修回日期:2017-02-16

基金项目:国家重点研发计划项目(2016YFF0101900)

作者简介:李宇琛(1990—),男,山东济宁人,硕士研究生,主要从事高精度平面面形检测方面研究工作。

E-mail:522858333@qq.com

通信作者:韩森(1961—),男,博士,博士生导师,主要从事光学干涉计量研究工作。E-mail:senhanemail@126.com

0.041 5 λ and RMS value is 0.008 7 λ , which is smaller than that of conventional interference detection. Point to point processing is done for two independent absolute detection results in the same plane, in this way residual graph is obtained with PV₁₀ value is 0.004 λ and RMS value is 0.000 5 λ . Experimental results show that this method is highly reproducible and effective.

Key words: optical interferometry; absolute test; even or odd functions; surface accuracy

引言

目前对于高精度光学平面的加工与检测是科研领域的研究热点之一,高精度光学平面的加工必须有更高精度的检测技术作为支撑。光学干涉测量方法是检验高精度光学平面的有效手段,在干涉平面测量中,通常使用一个高精度平面($\lambda/20$)作为参考镜,而检验一块高精度的平面需要更高精度的平面作为参考基准^[1]。因此,测试精度受参考平面精度的制约,这就提出了平面绝对检测要求。平面绝对检测是通过消除干涉仪器的系统误差和参考平面误差对测量结果的影响,从而得到被测平面面形绝对值的测量。

三平面绝对检测以及它的扩展是目前平面绝对检测的主要手段之一。G. Schulz 和 J. Schwider^[2]等人于 1967 年和 1971 年提出并发展了传统的三平面绝对检测,可得到平面上沿径向轴线上的绝对面形分布。1954 年 P. B. Keenan^[3]提出了一种伪剪切干涉计量测试技术,通过两平面在某一固定位置的测量结果和被检平面在 2 个相互垂直方向移动后的测量结果相减后再累加求出被检平面的绝对面形分布。1984 年 B. S. Fritz^[4]提出了泽尼克多项式拟合法,利用泽尼克多项式特性将平面的表面面形分解为某些正交基函数,然后采用最小二乘法将这些基函数拟合合成被检平面的绝对面形。1992 年 Chiayu Ai 和 J. C. Wyant^[5-6]提出了奇偶函数法,这种方法将平面面形分解为偶奇、奇偶、偶偶、奇奇函数项,再根据 6 次测量的结果分别求出这 4 项的值。2001 年 K. R. Freischlad^[7]提出了旋转剪切的方法,这种方法也是在传统三平面绝对检测的基础上提出的。

由于上述方法在实际应用中各有不同的缺点,因此它们还只是一种实验室方法^[8]。基于奇偶函数的六步绝对检测算法^[5-6]和仿真测量^[9],在仿真测量中,旋转次数越多,其理论精度越高。然而,在实际的高精度测量中,旋转次数越多,引入的旋转角度误差和旋转偏心误差就越大。如

PV $\ll 1/20\lambda$,多次旋转对绝对测量精度和重复性影响非常大。本文依据四步绝对检测算法^[10],利用商用非索型干涉仪搭建实验系统进行测量^[11-12]。

1 测量原理

文中讨论的平面绝对检测基于非索干涉系统,方法为奇偶函数四步旋转测量方法。在奇偶函数法中,函数 $F(x, y)$ 可以用偶偶函数项 F_{ee} 、奇偶函数项 F_{oe} 、偶奇函数项 F_{eo} 、奇奇函数项 F_{oo} :

$$F(x, y) = F_{ee} + F_{oe} + F_{eo} + F_{oo} \quad (1)$$

函数的奇偶项、偶奇项和偶偶项很容易精确得到,而奇奇项可以用傅立叶正弦级数第一项 $F_{oo, 2\text{odd}}$ 来进行近似,通过旋转 90° 的运算可以算出奇奇项分量中的第一项,其基本原理如图 1 所示。

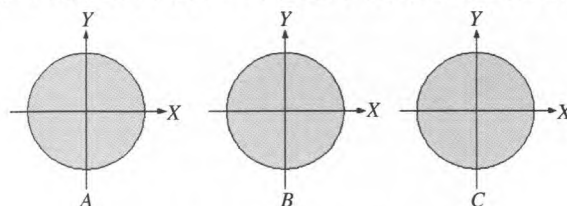


图 1 三平面的正面坐标轴示意图

Fig. 1 Front view of three flats

图 1 所示的 $A(x, y)$ 、 $B(x, y)$ 、 $C(x, y)$ 为测量过程中使用的 3 个平面,首先在每个平面上建立直角坐标系 xoy ,将这 3 个平面两两进行干涉,得到 4 组干涉测量的数据,测量步骤如图 2 所示,其中平面 B 与平面 C 沿 X 轴翻转得到 B^x 与 C^x ,平面 A 逆时针旋转 90° 得到 A^{90} 。

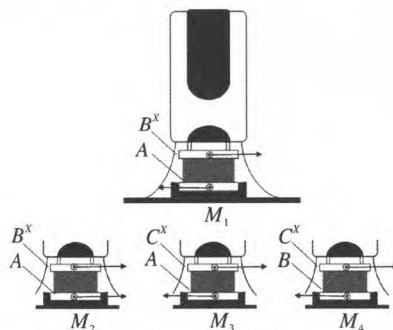


图 2 四步旋转测量方法

Fig. 2 Four steps rotation measurement method

四步旋转测量方法的函数表达式为

$$\begin{aligned} M_1 &= A + B^X, M_2 = A^{90} + B^X, M_3 = A + C^X, \\ M_4 &= B + C^X \end{aligned} \quad (2)$$

通过旋转 90° 的方式联立方程可解出平面 A、B、C 的奇偶项、偶奇项、偶偶项和奇奇项,因此通过 4 次组合测量就能够确定 3 个平面的绝对面形误差分布,即:

$$\begin{aligned} A &= A_{ee} + A_{oe} + A_{eo} + A_{oo,2odd\theta} \\ B &= B_{ee} + B_{oe} + B_{eo} + B_{oo,2odd\theta} \\ C &= C_{ee} + C_{oe} + C_{eo} + C_{oo,2odd\theta} \end{aligned} \quad (3)$$

根据以上理论推导得出的奇偶函数平面绝对测量结果,须使第二步的 90° 旋转尽量精确,同时干涉系统的检测光学系统与参考镜及被测平面共光轴。

2 仿真实验与分析

在三面互检法的实验中,3 个被测平面需要相

互交换位置测量,且有一个被测平面需要旋转一定的角度,这就要求在互换、旋转和翻转后被测平面的空间坐标轴对准。实验中实际旋转角度与理论角度的差异、平面旋转中心与系统光学中心的差异都会影响测量结果的正确性。鉴于此,本文对绝对检测技术能够达到的理论精度和影响检测精度的因素进行了模拟分析,以实现平面面形绝对检测技术应用于实际时的优化配置。

2.1 仿真实验

首先,采用泽尼克多项式前 36 项构建原始平面 A、B、C,把平面 A、B、C 按图 2 所示步骤输入到计算机中进行模拟 4 次测量。分别得到 4 次测量结果 M_1 、 M_2 、 M_3 、 M_4 ,并在将 4 次测量结果输入到计算机中得到平面 A' 、 B' 、 C' ,模拟的 3 个平面与计算出的 3 个平面的偏差,如图 3 所示。其算法偏差的 PV 值在 10^{-5} nm 量级,RMS 值在 10^{-6} nm 量级,达到高精度测量的理论要求。

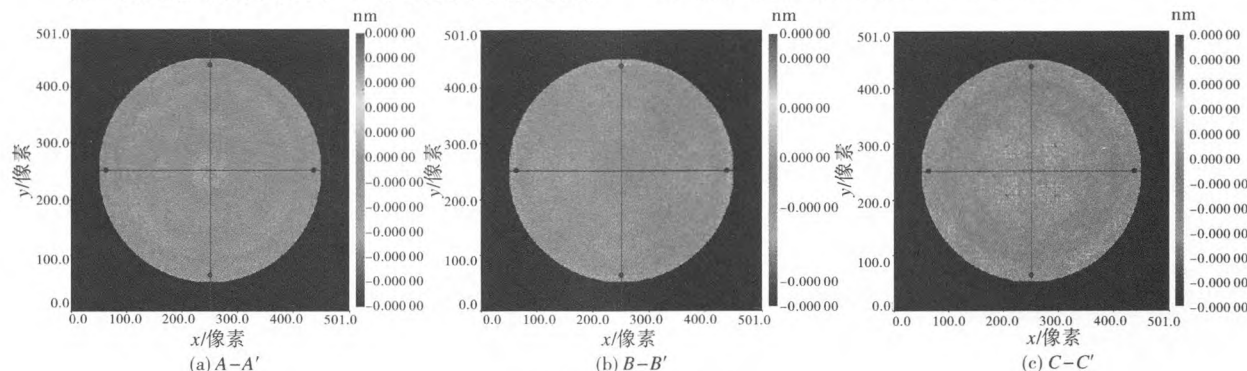


图 3 三平面的计算误差

Fig. 3 Calculation error of three planes

2.2 旋转角度误差的影响

在实际测量中,实际旋转角度会与理论旋转角度有一定的差异,即旋转角度误差。在如图 2 所示的第二步中,需要将平面 A 逆时针旋转 90° ,因此旋转角度误差的不同可能会导致不同的测量结果。使用泽尼克多项式前 36 项构建 3 个平面 A、B、C,在仿真过程中,软件干涉图直径为 400 pixel,平面 A 的实际旋转角度为理论旋转角度(90°)叠加一个旋转角度误差($1'$),并对得到的测量结果两两相减,进行点对点作差处理,模拟结果如图 4 所示。

由图 4 可以看出,测量误差随着旋转角度误差的增大而增大,当旋转角度误差达到 $8'$ (0.13°) 时,测量误差 PV 值为 0.0001λ ,与文献[9]中使用六步旋转测量法仿真实验,旋转角度误差为 0.1° 时对测量结果的影响相吻合。

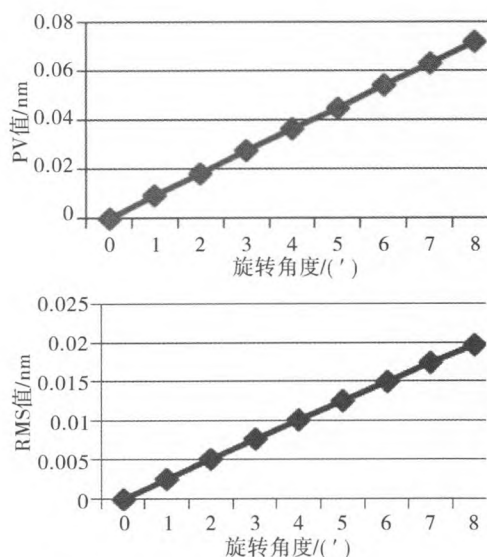


图 4 旋转角度误差对测量误差的影响

Fig. 4 Impact of rotation error on measurement error

2.3 旋转偏心误差的影响

在实际测量中,平面旋转中心与光学系统中存在横向偏移,即旋转偏心误差。图 5 为在 X 方向等量偏心(1/2 pixel)的情况下对绝对检测方法的测量误差进行模拟分析的结果。

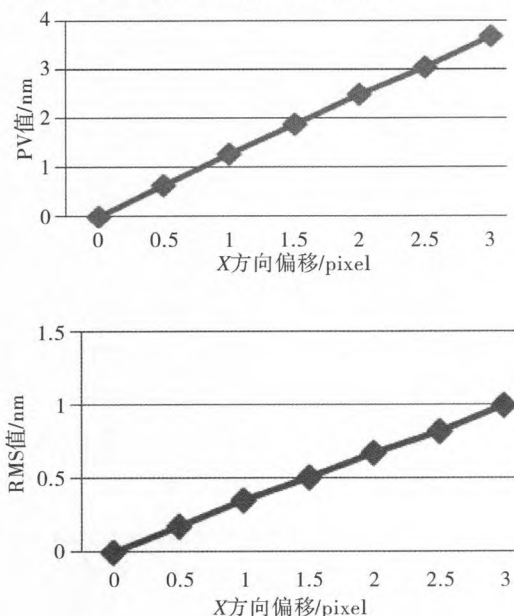


图 5 旋转偏心对测量误差的影响

Fig. 5 Impact of rotation eccentricity on measurement error

由图 5 可以看出,测量误差随着旋转偏心误差的增大而增大,当发生 3 pixel 的旋转偏心误差时,测量误差 PV 值为 0.005λ ,此时,旋转偏心误差为系统的重要误差源。因此进行绝对检验时,必须进行精确的旋转中心定位。

3 实验研究

3.1 实验仪器与参数设计

在实际测量中,采用苏州慧利仪器生产的 HOOL L9600 干涉仪进行测量,如图 6 所示。HOOL 干涉仪是以移相干涉技术为原理的干涉仪,采用的是菲索干涉仪光路,它是一款高精度干涉测量仪器,其系统误差优于 $\lambda/500$ ($\lambda = 632.8 \text{ nm}$)。

为了减小环境的扰动,所有实验装置置于防震气浮光学平台上,并且由屏蔽罩笼罩,实验室中应尽可能减小人为等因素产生的扰动。

我们选取 150 mm 口径的标准平面镜 B、C,以及 150 mm 口径的被测平面 A 进行测量。并将 3

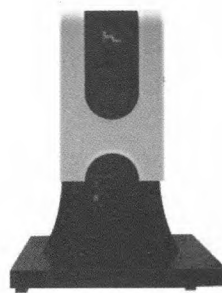


图 6 HOOL L9600 干涉仪

Fig. 6 HOOL L9600 interferometer

个平面的 x 、 y 方向预先标定好,以便测量时确定平面的安放位置。

3.2 实验步骤

在本实验中,我们选被测平面 A、标准平面镜 B 和 C 在 HOOL 干涉仪上进行测量。由于被测平面要旋转,将被测平面 A 放置在旋转台上,可以确保 A 逆时针旋转 90° 时的旋转角度误差小于 $2'$,即测量误差 PV 值小于 $0.000 05 \lambda$ 。

对于旋转偏心误差,我们将一个可以随被测平面旋转的十字线装置安装在旋转台上,将被测平面在 0° 位置时十字线中心与被测平面在 90° 位置时十字线中心调整至与系统光轴重合,并将旋转中心的坐标输入到计算机中,可将旋转偏心误差控制在 2 pixel (0.375 mm/pixel) 以内,即测量误差 PV 值小于 $0.002 5 \lambda$ 。

将 3 个平面与仪器放置在同一环境下进行等温处理后,按测量原理,实验步骤如下:

- 1) 在参考平面位置装上标准平面镜 B,被测平面位置装上被测平面 A;
- 2) 校准被测平面 A 的旋转中心;
- 3) 调整完毕后,测量并记录干涉结果 M_1 ;
- 4) 将被测平面 A 逆时针旋转 90° ,调整完毕后,测量并记录干涉结果 M_2 ;
- 5) 将标准平面镜 B 取出,换上标准平面镜 C,并将被测平面 A 旋转至步骤 1 位置。调整完毕后,测量并记录干涉结果 M_3 ;
- 6) 将被测平面 A 取出,换上标准平面镜 B,调整完毕后,测量并记录干涉结果 M_4 ;
- 7) 将 4 次测量得到的干涉结果 M_1 、 M_2 、 M_3 、 M_4 输入计算机进行计算,得到平面 A、B、C 的绝对形貌。

3.3 实验结果及分析

PV 值通常被用于描述元件或系统的光学质量,描述一个波前的 PV 值可以理解为该波前的最高点 to 最低点的间距。PV 值容易受到粗大误差的干扰,为了保证 PV 值测量的重复性,HOOL 干涉仪以 PV_{10} 代替 PV, PV_{10} 即以波面上最高的 10 个点的均值减去最低的 10 个点的均值。PV、 PV_{10} 分别用如下公式表示:

$$PV = W_{\max} - W_{\min}$$

$$PV_{10} = \frac{\sum_{k=1}^{10} w_{\max,k}}{10} - \frac{\sum_{k=1}^{10} w_{\min,k}}{10} \quad (3)$$

因此,在本文中,使用 PV_{10} 和 RMS 这 2 个数字波面指标来评价实验数据的可重复性和实验检测精度。

按上述步骤进行测量,可得到各位置的测量结果 M_1 、 M_2 、 M_3 、 M_4 的面形分布,并由此计算出被测平面 A 的绝对面形;各面形分布以及面形的 PV_{10} 值、RMS 值如图 7 所示。

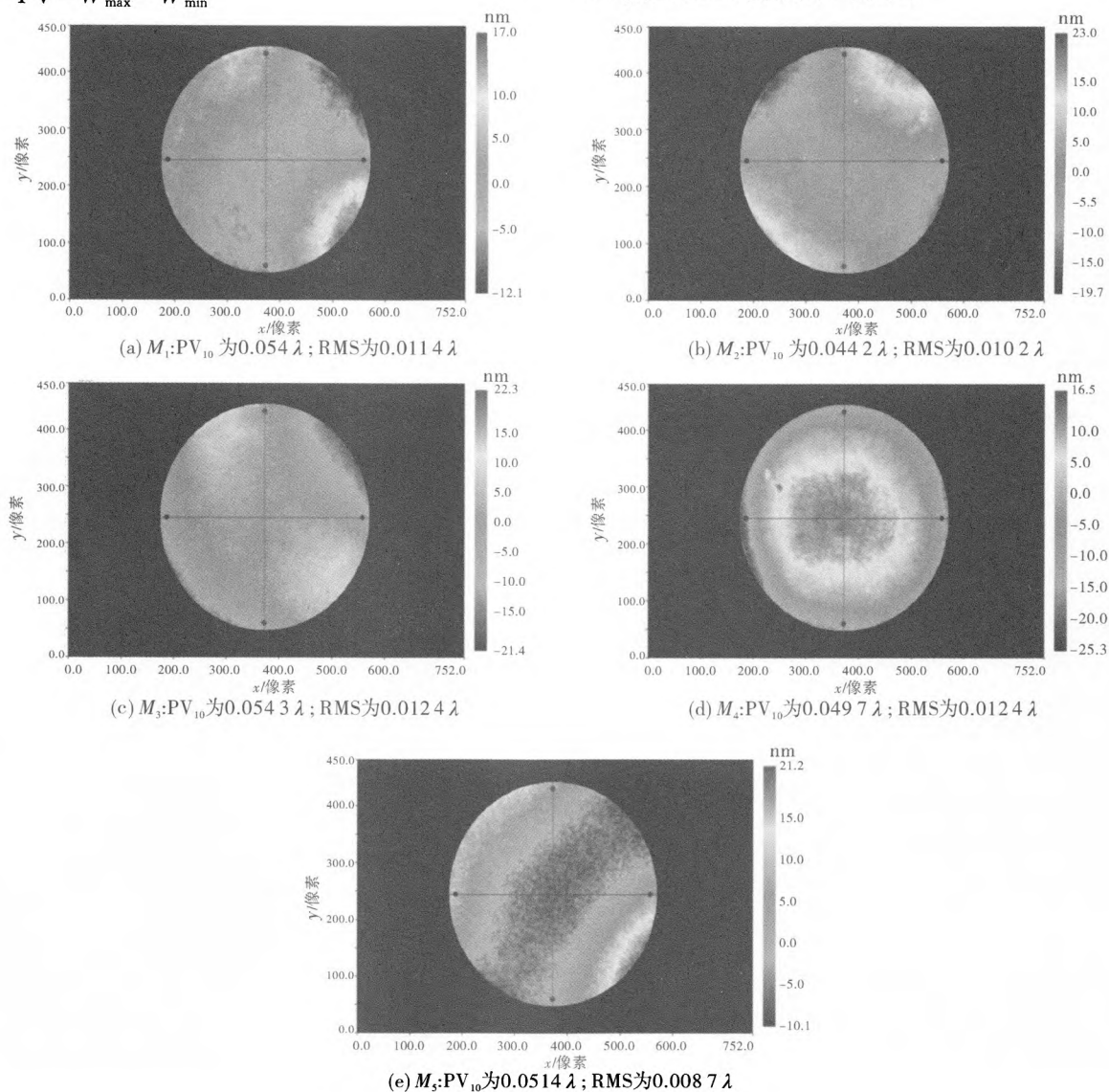


图 7 各位置检测结果及被测平面 A 的绝对面形

Fig. 7 Result of four measurements and surface profile of flat A

从图 7 的这组结果可以看出,被测平面 A 的 PV_{10} 值为 0.0415λ , 小于 M_1 的 0.054λ 和 M_2 的 0.0442λ ; 被测平面 A 的 RMS 值为 0.0087λ , 小于 M_1 的 0.0114λ 和 M_2 的 0.0102λ 。在本实验中对说明这些数据,通过绝对检测的方法可

以减少干涉仪系统误差的影响,提高被检面的检测精度。

由于空气扰动、环境震动的影响,平面面形绝对检测结果会在一定范围内浮动,而使用绝对检测的意义在于被检平面与参考平面精度相当,可

剔除参考面面形的影响。所以在高精度检测中,检测结果的重复性是检测结果精度的前提。为了考察绝对检测的重复性,表 1 记录了这次检测中

10 组数据的中间过程和最终结果的 PV₁₀ 值和 RMS 值,用标准差 σ 来表征检测的重复性:

$$\sigma=\sqrt{(1/N)\sum_{i=1}^N(x_i-\mu)^2}$$
 (4)

表 1 10 次测量结果及标准差
Table 1 Results of 10 measurements and standard deviation

名 目	M ₁		M ₂		M ₃		M ₄		A	
	RMS/λ	PV ₁₀ /λ	RMS/λ	PV ₁₀ /λ	RMS/λ	PV ₁₀ /λ	RMS/λ	PV ₁₀ /λ	RMS/λ	PV ₁₀ /λ
1	0.011 4	0.054 0	0.010 2	0.044 2	0.012 3	0.054 3	0.012 4	0.049 7	0.008 7	0.041 5
2	0.011 3	0.053 8	0.009 8	0.043 2	0.012 4	0.054 8	0.012 6	0.050 0	0.008 8	0.041 1
3	0.011 4	0.054 0	0.010 0	0.043 7	0.012 7	0.054 5	0.012 6	0.050 5	0.008 6	0.041 2
4	0.011 3	0.053 8	0.010 0	0.044 3	0.012 3	0.053 4	0.012 5	0.050 5	0.008 7	0.042 4
5	0.011 4	0.054 0	0.010 1	0.044 5	0.012 3	0.053 2	0.012 6	0.050 4	0.008 8	0.042 0
6	0.011 4	0.053 6	0.010 1	0.045 0	0.012 3	0.053 2	0.012 6	0.050 8	0.008 8	0.042 1
7	0.011 3	0.054 6	0.010 0	0.044 2	0.012 6	0.054 7	0.012 6	0.051 1	0.008 8	0.041 4
8	0.011 6	0.054 2	0.009 9	0.043 3	0.012 4	0.053 3	0.012 5	0.050 9	0.008 7	0.040 8
9	0.011 5	0.054 5	0.010 0	0.044 7	0.012 4	0.053 8	0.012 5	0.050 0	0.008 8	0.041 8
10	0.011 5	0.054 8	0.010 0	0.044 7	0.012 4	0.053 3	0.012 5	0.050 1	0.008 9	0.041 9
平均值	0.011 4	0.054 1	0.010 0	0.044 1	0.012 4	0.053 8	0.012 5	0.050 4	0.008 7	0.041 6
标准偏差	0.000 1	0.000 3	0.000 1	0.000 6	0.000 1	0.000 6	0.000 1	0.000 4	0.000 1	0.000 5

从表 1 中可以看出:1)绝对检测得到的结果 A 比传统的检测方法得到的结果(M₁、M₂)精度要高,尤其是 RMS 值精度;2)实验结果重复性较好,绝对检测得到结果的 PV₁₀ 值重复性在 ±λ/1 000 范围内,RMS 值重复性在 ±λ/7 000 范围内。

上述的重复性仅仅是讨论的测量结果数字指标(即 PV₁₀、RMS)的重复性,为了讨论各个位置的整体面形分布的重复性,将同一被测平面两次独立的绝对检测结果进行点对点作差处理,用残留误差的大小反映整体面形分布的重复性。如图 8 所示,其残差图 PV₁₀ 值为 0.004 λ,RMS 值为 0.000 5 λ,所以对于各个位置,整体面形分布的重复性较好。

4 结论

本文根据现代高精度光学平面检测工业测量精度高、测量稳定可靠等要求,尤其是部分光学平面的表面面形精度远远超出现有商用干涉仪的面形检测水平,介绍了一种基于奇偶函数的绝对检测方法,分别就旋转角度误差及旋转偏心误差对测量误差的影响进行了仿真分析,仿真结果显示绝对检测技术对旋转偏心误差敏感。因此,在进行绝对检测时,应进行严格的旋转中心定位。并

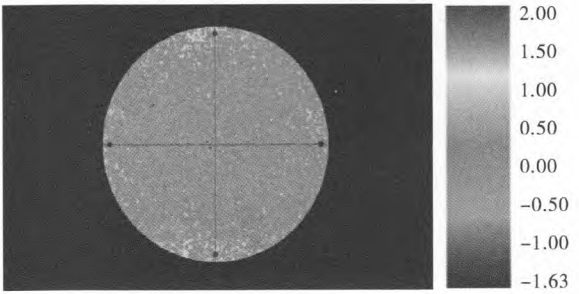


图 8 两次绝对检测分别测量同一平面的结果之差
Fig. 8 Difference between same flats obtained from two independent absolute tests

基于商用干涉仪搭建了实验系统进行验证,测得实际样品的绝对检测精度是 PV₁₀ 值为 0.041 5λ,RMS 值为 0.008 7λ,小于常规干涉检测所得结果。实验结果表明:使用本文方法可以减少干涉仪器的系统误差和参考平面误差的影响,提高被检平面的检测精度。对测量重复性进行研究,实验结果显示其 PV₁₀ 值重复性在 ±λ/1 000 范围内,RMS 值重复性在 ±λ/7 000 范围内;并对同一平面两次独立的绝对检测结果进行点对点作差处理,从而获得残差图,其残差图 PV₁₀ 值为 0.004λ,RMS 值为 0.000 5λ,表明测量结果的重复性高,实现了高精度平面面形检测,对光学平面加工与检测具有一定的指导意义。

参考文献:

- [1] Zhu Yucong, Yang Guogang, Dong Taihuo. Absolute calibration and fabrication of standard optical surface[J]. Acta Metrologica Sinica, 1989, 10(4): 285-289.
朱郁葱, 杨国光, 董太和. 标准光学面形的建立与绝对检测[J]. 计量学报, 1989, 10(4): 285-289.
- [2] Schulz G, Schwider J. Precise measurement of planeness[J]. Applied Optics, 1967, 6(6): 1077-1084.
- [3] Keenan P B. Pseudo-shear interferometry[J]. SPIE, 1984, 123: 2-9.
- [4] Fritz B S. Absolute calibration of an optical flat[J]. Opt. Eng. , 1984, 23(4): 379-383.
- [5] Ai C, Wyant J C. Absolute testing of flats decomposed to even and odd function[J]. SPIE, 1992, 1776: 73-83.
- [6] Ai C, Wyant J C. Absolute testing of flats by using even and odd function [J]. Appl. Opt. , 1993, 32 (25): 4698-4705.
- [7] Freischlad K R. Absolute interferometric testing based on reconstruction of rotational shear [J]. Appl. Opt. , 2001, 40(10): 1637-1648.
- [8] Liu Xiaomei. Absolute measurement of optical flat[D]. Nanjing: Nanjing University of Science & Technology, 2004.
刘晓梅. 光学平面的绝对检测[D]. 南京: 南京理工大学, 2004.
- [9] Jia Xin, Xing Tingwen, Wei Haoming, 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.
- [10] Han S, Novak E. High accuracy absolute flatness testing using a commercial interferometer [J]. SPIE, 2000, 4231: 277-282.
- [11] Zhao Huawei, Wang Jun. A new method of absolutely measuring the surface shape error of optical plane[J]. Applied Optics, 1991, 12(2): 53-55.
赵华伟, 王军. 一种用于光学平面面形误差绝对测量的新方法[J]. 应用光学, 1991, 12(2): 53-55.
- [12] Peng Jianhua, Shen Yibing, Wang Kaiwei, et al. Error impact analysis and experimental research for absolute testing of spherical surfaces[J]. Infrared and Laser Engineering, 2012, 41(5): 1346-1350.
彭建华, 沈亦兵, 汪凯巍, 等. 球面绝对检测方法的误差影响分析及实验研究[J]. 红外与激光工程, 2012, 41(5): 1346-1350.