

同步辐射用光学元件面形绝对检测方法的研究

林维豪^{1,2} 罗红心¹ 宋 丽¹ 张翼飞¹ 王 劫¹

(¹ 中国科学院上海应用物理研究所, 上海 201204)
(² 中国科学院研究生院, 北京 10049)

摘要 为实现同步辐射用光学元件面形的绝对检测, 发展了镜面旋转对称三平板检测法。该方法将菲佐干涉法检测到的波前函数关于 y 轴分解成镜面对称部分与镜面非对称部分, 再利用 N 次旋转取平均值消除镜面非对称部分, 从而通过计算获得待测平面的绝对面形分布。推导了镜面旋转对称法检测矩形平面镜面形的公式, 应用该方法设计了高精度矩形平面镜的测试实验, 并进行了误差分析。实验结果表明, 与传统三平板绝对测量方法相比较, 两种方法在高度轮廓误差和斜率误差方面的计算结果都符合较好, 其对比后的残差均方根(RMS)值分别为 $\lambda/500$ ($\lambda=632.8$ nm) 与 $0.93 \mu\text{rad}$ 。

关键词 测量; 菲佐干涉仪; 绝对检测; 镜面旋转对称; 斜率误差

中图分类号 TH744; TN247 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/AOS201232.0912005

Absolute Flatness Measurement of Optical Elements in Synchrotron Radiation

Lin Weihao^{1,2} Luo Hongxin¹ Song Li¹ Zhang Yifei¹ Wang Jie¹

(¹ Shanghai Institute of Applied Physics, Chinese Academy of Science, Shanghai 201204, China)
(² Graduate University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract A modified method based on mirror rotational symmetry is developed to determine the absolute flatness deviations of optical elements in synchrotron radiation. The novel method is described in terms of functions that are symmetric or antisymmetric with respect to reflections at y axis. Absolute deviations of three flats can be obtained when mirror asymmetric errors are removed by N -position rotation average method. The formulas are derived for measuring the absolute surface error of the rectangular flat, and experiments on high accuracy rectangular flat are performed to verify the method. Compared with the measurement results obtained by Zygo's three-flat application, our method is calibrated to an accuracy of better than $\lambda/500$ ($\lambda = 632.8$ nm) root mean square (RMS) on height and $0.93 \mu\text{rad}$ RMS on slope error. The theoretical derivation, experimental results, and error analysis are presented.

Key words measurement; Fizeau interferometer; absolute measurement; mirror rotational symmetry; slope error

OCIS codes 120.3180; 340.6720

1 引 言

高精度光学面形的测量是光学研究和发展的关键之一, 由于同步辐射光学的迅猛发展, 对平面反射镜面形的高精度测量提出了越来越高的要求。同步辐射用光学元件的表面质量和形貌参数将直接影响聚焦或准直后的光束质量, 影响光束线的传输性

能^[1]。因此, 精确测量反射镜的表面轮廓对于同步辐射光束线的整体质量非常重要。目前用于实现同步辐射光学表面测量的主要设备为干涉仪与长程面形仪, 由于长程面形仪测量原理上是一维的, 且测量速度较慢, 因此两维的快速干涉测量法仍然是检测高精度光学平面的重要手段之一, 但其检测精度受

收稿日期: 2012-02-29; **收到修改稿日期**: 2012-05-03

基金项目: 国家青年自然科学基金(11105215)资助课题。

作者简介: 林维豪(1986—), 男, 博士研究生, 主要从事光学检测方面的研究。E-mail: linweihao@sinap.ac.cn

导师简介: 王 劫(1963—), 男, 研究员, 博士生导师, 主要从事同步辐射应用和 X 射线光学工程等方面的研究。

E-mail: wangjie@sinap.ac.cn (通信联系人)

参考面精度的制约。为了满足同步辐射用光学元件的高精度检测要求,就必须消除干涉仪的系统误差和参考平面误差,实现绝对检测。

对光学平面绝对检测方法的研究,最早的理论是 Lord Rayleigh 在 1893 提出的液体平面法,即使用液体表面代替干涉仪的参考面。用液体表面作为基准参考面虽然很理想,但是对实验条件要求很苛刻,必须要液体处于静止状态。而环境的微小振动,温度的变化,气流的影响等都会使液体表面处于不断的波动中,这样测量时就会引入较大的误差。20 世纪 60 年代末, Schulz 等^[2~5]提出了一种崭新的解决思路——三平板法,即利用 3 个平面,两两组合进行干涉检测,从而实现无基准平面的绝对检测。在干涉检测中,两个平面是相对放置的,这就意味着一个平面的坐标系相对于另一个平面是关于 y 轴翻转的,3 次测量得到的 3 个方程有 4 个未知量,因此该方法只能局限于测量 y 轴方向上的绝对误差。

为了克服传统三平板法的不足,衍生出许多新的方法。其中最典型的是 Fritz^[6]在 1984 提出的基于 Zernike 多项式函数的波面拟合法,以及 90 年代 Arizona 光科学中心 Ai 等^[7]发展的“奇偶函数法”。前者利用 Zernike 多项式函数形式的旋转不变性,将所有波面都写成 Zernike 多项式的组合,根据方

程分别求得每个波面各自的 Zernike 多项式系数。这种方法的优点是测试整个波面可程序化,便于计算机辅助处理。但局限性在于波面拟合使得高频信息丢失。而奇偶函数法不需要进行最小二乘法计算和多项式拟合,利用函数的对称特性,将面形函数分成 4 个子函数项,通过翻转或旋转,从而在适当的数学处理后分别求出每个子函数项,实现平面的绝对检测。两种方法由于受理论方面的约束,都无法直接应用于矩形平面的绝对测量。

进入 21 世纪,光学平面的绝对检测又有新的发展。Kuchel^[8]与 Griesmann^[9,10]分别提出了旋转对称法和镜面对称法,较之以前的三平板法,处理更加简单。国内在绝对检测技术方面也进行了大量研究工作^[11~15],但都尚未对矩形镜的干涉绝对测量进行过报道。本文在镜面对称法的基础上发展出适合于同步辐射用矩形镜的绝对测量方法,并考虑了此方法可能引入的误差。

2 基本原理

2.1 旋转对称理论

菲佐干涉仪通过参考反射波面和测试反射波面形成的干涉条纹,得到被测平面相对于参考面的面形误差。如图 1 所示,统一规定直角坐标系。

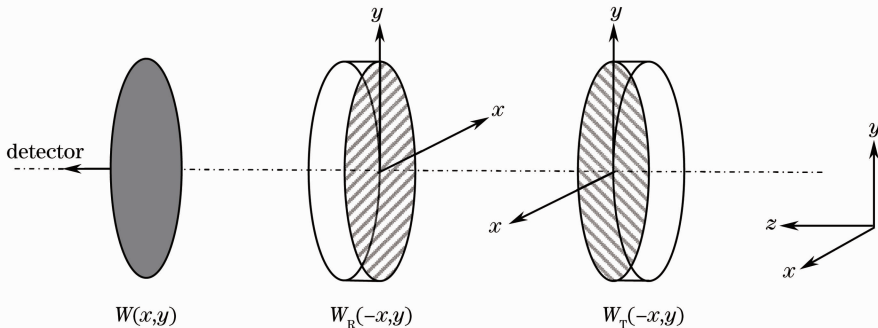


图 1 干涉仪原理简图

Fig. 1 Sketch of interferometer principle

用 $W(x, y)$ 表示干涉后的波前函数,那么

$$W(x, y) = W_R(-x, y) + W_T(x, y), \quad (1)$$

式中 $W_R(-x, y)$ 表示从参考面反射的波前函数,负号表示处于参考面位置的平面坐标系在 x 轴有相对翻转, $W_T(x, y)$ 表示从测试面反射的波前函数。

对于任意的圆形光学元件,其波面函数在极坐标下可表述成 $W(r, \theta)$, 将其分解成两部分: 旋转对称部分 $W^R(r)$ 与旋转非对称部分 $\Omega(r, \theta)$ ^[8~10,16]。定义算子 $[\cdot]^R$ 表示对函数进行方位角平均操作, 分离出 θ 。旋转非对称部分在一个周期内的方位角平

均值为 0。

若引入角度增量 $\Delta\theta = 2\pi/N$, 旋转对称函数 $W^R(r)$ 的积分表达式可以用有限项的求和近似:

$$W^R(r) = \frac{1}{2\pi} \int_0^{2\pi} W(r, \theta) d\theta = \lim_{N \rightarrow \infty} \left[\frac{1}{2\pi} \sum_{k=0}^{N-1} W(r, \theta_k) \Delta\theta \right] \approx \frac{1}{N} \sum_{k=0}^{N-1} W(r, \theta + k\Delta\theta), \quad (2)$$

式中 N 为正整数, 近似后的结果被称为波面函数

$W(r, \theta)$ 的 N 次旋转平均值。根据公式表明, N 值越大, 近似效果越好。

2.2 镜面对称理论

对任意的波面函数 $W(x, y)$ 可以分解成关于 y 轴对称的偶函数 $W^e(x, y)$ 与非对称的奇函数 $W^o(x, y)$ ^[9,10]:

$$\begin{cases} W^e(x, y) \stackrel{\text{def}}{=} \frac{1}{2} [W(x, y) + W^x(x, y)] \\ W^o(x, y) \stackrel{\text{def}}{=} \frac{1}{2} [W(x, y) - W^x(x, y)] \end{cases}, \quad (3)$$

式中算符 $[\cdot]^x$ 表示对函数进行关于 y 轴的镜面对称操作。再结合旋转对称理论, 可以得到

$$[W^e]^R = W^R, \quad [W^o]^R = 0. \quad (4)$$

(4) 式表明了一个重要的结论, 即镜面对称部分包含了所有的旋转对称信息, 镜面非对称部分的方位角平均值为零。

3 矩形平面的绝对测量方法

针对矩形平面的绝对测量, 传统的方法是首先利用 3 个圆形平面的绝对测量技术获得参考面的绝对面形, 再将已知参考面与待测矩形镜进行干涉测量, 从测量结果中减去参考面即可获得矩形平面的绝对面形。但这种间接测量方法过程繁琐, 且对参考镜的装载位置要求严格, 无法精确保证每次测量的空间位置一致。由于绝对测量理论中都有涉及平

面旋转, 而且 3 个平面在理论中处于对称关系, 可以互换位置, 因此, 用原有的理论无法直接应用于矩形镜的测量。

本文在镜面对称法的理论上加以改进, 利用两个圆形平面和一个待测矩形镜, 即可求出矩形平面的绝对面形。奇偶函数法需要每个平面都能关于 x 与 y 轴双重对称, 而镜面对称法则只要求每个平面关于 y 轴对称, 这对于处理矩形镜时, 只要平面能满足关于一个方向对称即可, 实验更加简便。将 3 个平面按照图 2 所示在非佐干涉仪上进行两两组合测量。设 3 个平面的面形偏差函数分别为 $A(x, y)$ 、 $B(x, y)$ 、 $C(x, y)$, 其中 C 面为矩形平面。同时, 规定以测试面的坐标系为基准, 那么, 位于参考面位置的平面坐标系在 x 轴有 180° 的翻转。图 2 中的上半部分表示参考面位置, 下半部分表示为测试面位置。 M_1 、 M_2 、 M_3 、 M_4 分别表示干涉仪的相对测量结果, 其中 M_2 表示将 B 面旋转 N 次的平均测量结果, 每次 B 面旋转 $\Delta\theta = 2\pi/N$ 。因此, 可以得到 4 次组合测量方程:

$$\begin{cases} M_1(x, y) = A(-x, y) + B(x, y) = A^x + B \\ M_2(x, y) = A(-x, y) + [B(x, y)]^R = A^x + B^R \\ M_3(x, y) = A(-x, y) + C(x, y) = A^x + C \\ M_4(x, y) = B(-x, y) + C(x, y) = B^x + C \end{cases}, \quad (5)$$

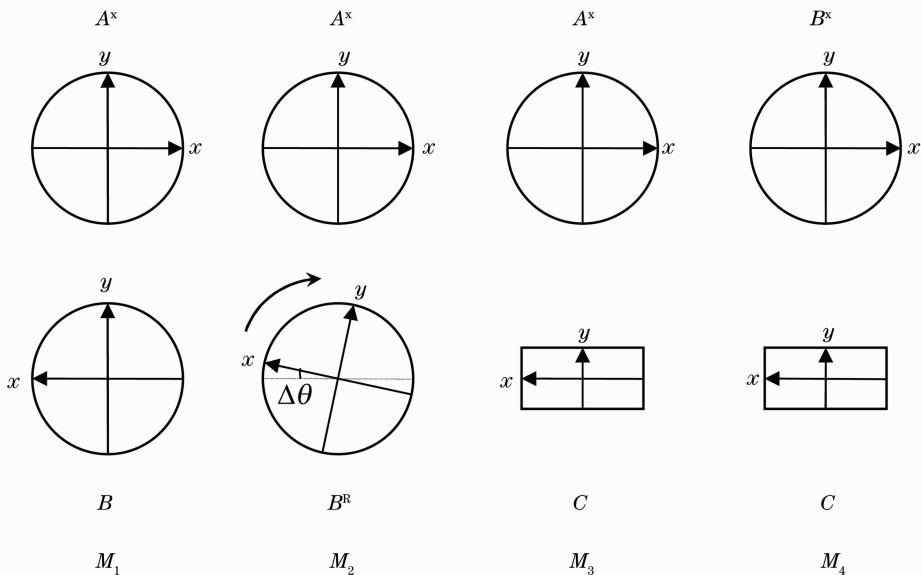


图 2 3 个平面的组合干涉测量

Fig. 2 Combined interferometric measurements of three flats

结合(3)、(4)式,(5)式可变换为

$$\begin{cases} M_1^e + M_1^o = (A^e + A^o)^x + B^e + B^o = A^e - A^o + B^e + B^o \\ M_2^e + M_2^o = (A^e + A^o)^x + (B^e + B^o)^R = A^e - A^o + B^R + 0 \\ M_3^e + M_3^o = (A^e + A^o)^x + C^e + C^o = A^e - A^o + C^e + C^o \\ M_4^e + M_4^o = (B^e + B^o)^x + C^e + C^o = B^e - B^o + C^e + C^o \end{cases} \quad (6)$$

通过分别求各个平面的偶函数与奇函数部分,再叠加即可求得3个平面的面形:

$$\begin{cases} A = -M_2^o + \frac{1}{2}(M_1^e + M_3^e - M_1^o) \\ B = M_1^o - M_2^o + \frac{1}{2}(M_1^e + M_4^e - M_3^o) \\ C = -M_2^o + M_3^o + \frac{1}{2}(M_3^e + M_4^e - M_1^e) \end{cases} \quad (7)$$

本方法中的运算只涉及数据关于y轴的左右翻转,计算简便。特别要说明的是,由于C面为矩形,实验测得的 M_3 、 M_4 数据为矩形形式, M_1 、 M_2 则为圆形形式,且 M_1 、 M_2 的数据范围大于 M_3 、 M_4 。因此,数据的点点运算必须是在统一的空间坐标系下完成。两个圆形镜子的组合测量可以确定圆心在CCD上的准确位置,任何面形数据都以此基准得到相应

的空间坐标。

本方法中认为将B平面N次旋转后取平均值可将B平面的旋转非对称部分消去,这也是(6)、(7)式成立的前提条件,而这也意味着N值必须取无限大。显然,在实际的实验测量中,N只能取有限值。因此,必须合理地选择N值,既要能满足精度要求,又能尽量减少实验次数。

此处用 Ω_B 代表B平面的旋转非对称部分,由于 $\Omega_B(r, \theta) = \Omega_B(r, \theta + 2\pi)$,旋转非对称函数是周期函数,其傅里叶级数展开为

$$\Omega_B(r, \theta) = \sum_{n=1}^{\infty} (C_n \cos n\theta + D_n \sin n\theta), \quad (8)$$

那么,N次旋转的平均值可以表述成:

$$\overline{\Omega_B} = \frac{1}{N} \sum_{k=0}^{N-1} \sum_{n=1}^{\infty} \left[C_n \cos n\left(\theta + k \frac{2\pi}{N}\right) + D_n \sin n\left(\theta + k \frac{2\pi}{N}\right) \right], \quad (9)$$

用指数形式表示为

$$\begin{aligned} \overline{\Omega_B} &= \frac{1}{N} \sum_{k=0}^{N-1} \sum_{n=1}^{\infty} \left\{ c_n \exp\left[in\left(\theta + k \frac{2\pi}{N}\right)\right] + d_n \exp\left[-in\left(\theta + k \frac{2\pi}{N}\right)\right] \right\} = \\ &= \frac{1}{N} \sum_{n=1}^{\infty} \left\{ c_n \exp(in\theta) \left[\sum_{k=0}^{N-1} \exp\left(ink \frac{2\pi}{N}\right) \right] + d_n \exp(-in\theta) \left[\sum_{k=0}^{N-1} \exp\left(-ink \frac{2\pi}{N}\right) \right] \right\}. \end{aligned} \quad (10)$$

由(10)式可得,只有当n为N的整数倍时, $\overline{\Omega_B} \neq 0$,对于其余的n值, $\overline{\Omega_B} = 0$ 。从而得到一个非常重要的结论:B平面在经过N次平均旋转测量后,其旋转非对称部分中,除了角频率为 $nN\theta$ 项以外($n = 1, 2, 3, \dots$),其余项都变成零。例如实验中将采取 $N = 12$,那么表明除了角频率为 $12\theta, 24\theta, 36\theta, \dots$ 项的平均值不为零,其他项都归为零。这也从另一个方面显示,若用于旋转实验的B平面面形精度较高,面形的旋转非对称误差中低频分量所占比例较大,高频分量较小的时候,那么取较小的N值即可达到理想的近似效果。Evans等^[17~19]利用Zernike多项式构造的面形误差函数分析了旋转次数N对精度的影响,发现对于高精度的面形,N取5次,仿真的残差均方根(RMS)值约为1 nm,即可消除的角频率达到 5θ 。通常用36项Zernike多项式来表示面形误差,其对应

的最高角频率就为 5θ 。而将截止角频率提高到 12θ ,可近似认为12次平均旋转测量后,旋转非对称面形误差趋于零。

4 实验结果

为验证本方法的有效性,在Zygo GPI-XP干涉仪上进行实验研究,其工作波长为 $\lambda = 632.8 \text{ nm}$,CCD像素个数为 640×480 ,每个像素的分辨尺寸为 $370 \mu\text{m}$ 。选取Zygo公司制作的两块口径为152 mm的高精度标准透射镜,分别标记为1、2镜,另外将待测的有效尺寸为 $145 \text{ mm} \times 40 \text{ mm}$ 的矩形平面镜标记为3镜。其中1、2、3镜用于测试的平面分别对应为A、B、C面。实验室保持恒温(23 ± 0.5) $^{\circ}\text{C}$ 。

按照图2所示步骤进行3个镜面的两两组合测量。每次测量都须将干涉条纹调整到零条纹时再进

行测试,且每次测量取 16 次平均,以降低空气扰动的影响。首先测量干涉仪的随机误差,实验中对 3 个平面两两组合连续测量 50 次,每次测量取 16 次波面平均,测得结果 RMS 值误差(即干涉仪重复性精度)为 0.00028λ ;将镜面取下,隔 1 min 再重新装上,测试完后再取下,如此反复测量 50 次,同样每次测量取 16 次平均,50 次测量结果 RMS 值误差(即干涉仪的复现性精度)为 0.00081λ ,两者综合得到干涉仪测量随机 RMS 值误差为 0.00086λ 。在 1、2 镜

上分别做交叉丝标记用于辅助调整,保证位置坐标的空间一致性。对于 2 镜的旋转测量,每次将 2 镜旋转 30° ,即测试 12 次。另外,特别要说明的是,矩形镜 3 在两次测试中始终保持位置不变,即要保证 1、2 两镜与 3 镜的干涉空间位置一致,否则会引入较大位置偏差。将 14 次测量得到的波差数据导出,消除测量波面的倾斜和常数项,利用自编的算法程序,计算得到 3 个平面的绝对面形偏差,如图 3 所示,PV 为峰谷值。

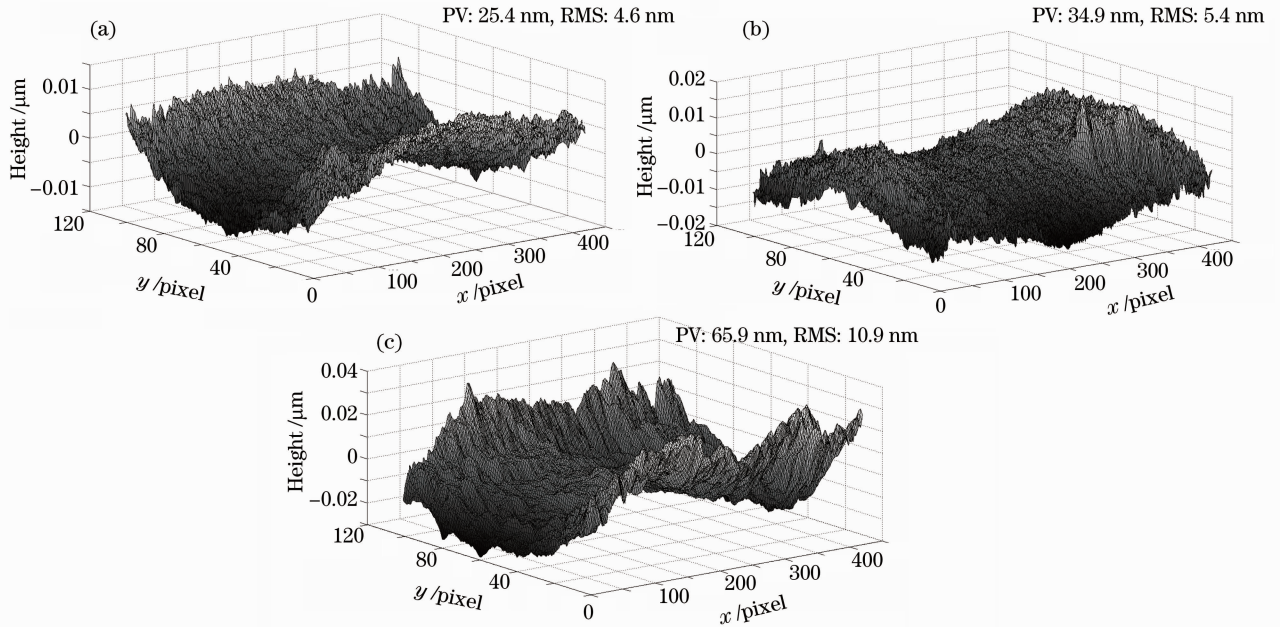


图 3 (a) A, (b) B, (c) C 三个面的绝对面形

Fig. 3 Absolute flatness of three surfaces (a) A, (b) B, (c) C

为了分析本方法的精度,与 Zygo 干涉仪自带的传统三平板绝对检验程序的计算结果作比较。Zygo 干涉仪自带的绝对检验程序只涉及最简单的代数运算,不引入任何计算误差,但是其缺点是只能检测 x 、 y 两方向上的绝对面形分布。本文取 3 个平面的水平方向上的测试结果作对比,结果如表 1 与图 4 所示。

由于同步辐射中对光学元件表面面形质量的要求为斜率误差,即光学元件的表面斜率分布。此处,以矩形平面 C 的水平与垂直两个方向的斜率误差作比较,结果如表 2 与图 5 所示。

5 讨论

通过对比,可见两种方法的测量结果符合较好。实验中测得干涉仪的测量随机 RMS 值误差为 0.00086λ 。本方法与 Zygo 干涉仪的自带绝对测量结果相比较,高度测量的残差 RMS 值为 $\lambda/500$ ($\lambda = 632.8 \text{ nm}$),斜率的残差 RMS 值为 $0.93 \mu\text{rad}$ 。

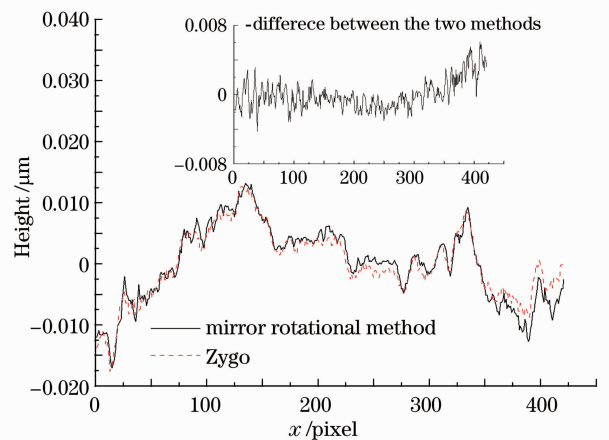


图 4 矩形平面 C 在水平方向上的两种方法高度测量结果对比(附加图为两曲线差值)

Fig. 4 Comparison of measured results of the height of rectangular plane C in horizontal direction by the two methods (the insert is the difference of two curves')

表 1 两种方法在水平方向高度测量的标准偏差($\lambda=632.8\text{ nm}$)Table 1 Standard deviations of measured height of three planes in horizontal direction by two methods ($\lambda=632.8\text{ nm}$)

Flat	Standard deviations (RMS/ λ)	Standard deviations of 90% central area (RMS/ λ)
A	0.0028	0.0020
B	0.0033	0.0023
C	0.0027	0.0019

表 2 两种方法下矩形平面的水平与垂直方向上的斜率误差 PV 与 RMS 值

Table 2 PV and RMS values in horizontal and vertical slope errors of rectangular plane by two methods

Method	Horizontal slope		Vertical slope	
	PV / μrad	RMS / μrad	PV / μrad	RMS / μrad
Mirror rotational symmetric method	12.67	1.97	11.93	2.66
Zygo's three-flat application	11.09	1.64	11.87	2.66

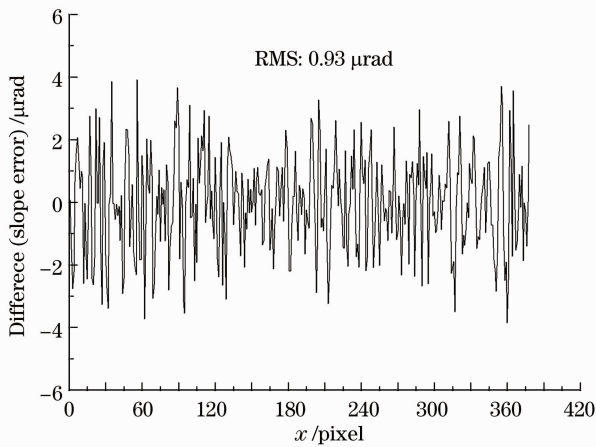


图 5 矩形平面 C 在水平方向上的两种方法斜率误差测量结果之差

Fig. 5 Difference of measured results of slope error of rectangular plane C in horizontal direction by two methods

由图 4 的对比曲线可知,两种方法测量的结果只在边缘有明显的变化。有效面积取全部平面的 90%,得到表 1 中的对比残差 RMS 值将显著减少。以矩形平面 C 为例,残差 RMS 值由 0.0027λ 减小到 0.0019λ 。这主要是卸载、旋转镜面时的应力变化所可能引入的面形偏差。本实验周期较长,需要不断地卸装载、旋转镜面,这势必会导致镜面的边缘受应力变化而使测量结果的偏差变大。

本实验通过旋转 12 次,将可消去的角频率误差提高到 12θ 项,可基本上认为旋转非对称面形误差趋于零。在旋转过程中,由于受到干涉仪调整精度的限制,难免会产生旋转对准误差,从而造成测试面的偏心、倾斜和离焦。检测数据中心点坐标存在最大 2 pixel 的偏移,而采样数据点数也存在一定量的偏差。本文通过像素平移将各位置检测数据中心重合以消除偏心的影响,然后再进行后续运算,因此这里

忽略了旋转轴与干涉仪光轴偏心引入的测量误差。

通过以上分析,可以认为该方法的主要误差来源于随机误差。单次干涉仪测量的不确定度 $\delta_0 = 0.00086\lambda$,由(7)式及不确定度的计算原则,12 次平均旋转测量后的不确定度为

$$\delta^2(M_2^0) = \delta^2(M_2^2) = \frac{1}{2}\delta^2(M_2) = \frac{1}{2 \times 12}\delta_0^2.$$

因此可以计算出 3 个平面的绝对测量结果的不确定度为

$$\begin{bmatrix} \delta_A \\ \delta_B \\ \delta_C \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0.645 \\ 0.917 \\ 0.917 \end{bmatrix} \delta_0 = \begin{bmatrix} 0.00055\lambda \\ 0.00079\lambda \\ 0.00079\lambda \end{bmatrix}. \quad (11)$$

由(11)式可知,相比单次干涉仪的测量不确定度,本方法的绝对面形误差的不确定度减小了。

6 结 论

本文发展的镜面旋转对称方法可以用于矩形平面的绝对测量,拓展了传统三平板绝对测量方法的应用范围。从理论上推导其测量公式,并对存在的误差进行了分析,且应用该方法对高精度矩形平面镜进行了实验测试。实验结果表明,与传统三平板绝对测量方法相比较,两种方法在高度轮廓误差和斜率误差方面的计算结果都符合较好,其对比后的残差 RMS 值分别为 $\lambda/500$ ($\lambda = 632.8\text{ nm}$) 与 $0.93\ \mu\text{rad}$,从而验证了方法的可行性,为高精度光学平面面形的检测提供了一种有效的方法。

参 考 文 献

- Luo Hongxin, Wang Jie, Xiao Tiquiao. Optical elements metrology in synchrotron radiation[J]. *Chinese J. Lasers*, 2009, **36**(s2): 134~139
- 罗红心,王 劫,肖体乔. 同步辐射用光学元件的检测[J]. *中国激光*, 2009, **36**(s2): 134~139

- 2 G. Schulz, J. Schwider. Precise measurement of planeness[J]. *Appl. Opt.*, 1967, **6**(6): 1077~1084
- 3 G. Schulz, J. Schwider. Establishing an optical flatness[J]. *Appl. Opt.*, 1971, **10**(4): 929~934
- 4 J. Grzanna, G. Schulz. Absolute testing of flatness standards at square-grid points[J]. *Opt. Commun.*, 1990, **77**(2-3): 107~112
- 5 G. Schulz, J. Grzanna. Absolute flatness testing by the rotation method with optimal measuring-error compensation[J]. *Appl. Opt.*, 1992, **31**(19): 3767~3780
- 6 B. S. Fritz. Absolute calibration of an optical flat [J]. *Opt. Eng.*, 1984, **23**(4): 379~383
- 7 C. Y. Ai, J. C. Wyant. Absolute testing of flats by using even and odd functions[J]. *Appl. Opt.*, 1993, **32**(25): 4698~4705
- 8 M. F. Kuchel. A new approach to solve the three flat problem [J]. *Optik*, 2001, **112**(9): 381~391
- 9 U. Griesmann. Three-flat test solutions based on simple mirror symmetry[J]. *Appl. Opt.*, 2006, **45**(23): 5856~5865
- 10 U. Griesmann, Q. Wang, J. Soons. Three-flat tests including mounting-induced deformations[J]. *Opt. Eng.*, 2007, **46**(9): 093601
- 11 Xu Chen, Chen Lei. Absolute flatness measurement of optical surfaces[J]. *Optical Technique*, 2006, **32**(5): 775~778
徐 晨, 陈 磊. 光学平面绝对检测方法的研究[J]. *光学技术*, 2006, **32**(5): 775~778
- 12 Yang Peng, Wu Fan, Hou Xi. Simulation analysis of absolute measurement for rotationally asymmetric surface error [J]. *Opto-Electronic Engineering*, 2011, **38**(1): 93~97
杨 鹏, 伍 凡, 侯 溪. 旋转非对称项面形误差绝对检测的仿真分析[J]. *光电工程*, 2011, **38**(1): 93~97
- 13 Wang Ping, Tian Wei, Wang Rudong *et al.*. Rotating chuck test for removing chuck error of optical surface [J]. *Acta Optica Sinica*, 2011, **31**(8): 0812004
王 平, 田 伟, 王汝冬等. 旋转支撑法去除元件面形测量的夹持误差[J]. *光学学报*, 2011, **31**(8): 0812004
- 14 Xu Yang, Tang Feng, Wang Xiangzhao *et al.*. Measurement error analysis of absolute flatness test [J]. *Chinese J. Lasers*, 2011, **38**(10): 1008009
徐 洋, 唐 锋, 王向朝等. 平面面形绝对检验技术测量误差分析[J]. *中国激光*, 2011, **38**(10): 1008009
- 15 Zhang Jianfeng, Cao Xuedong, Jing Hongwei *et al.*. Rotation method for system error calibration of interferometer [J]. *Opto-Electronic Engineering*, 2011, **38**(12): 69~74
张建锋, 曹学东, 景洪伟等. 基于旋转法的干涉仪系统误差标定[J]. *光电工程*, 2011, **38**(12): 69~74
- 16 R. E. Parks, L. Shao, C. J. Evans. Pixel-based absolute topography test for three flats [J]. *Appl. Opt.*, 1998, **37**(25): 5951~5951
- 17 C. J. Evans, R. N. Kestner. Test optics error removal [J]. *Appl. Opt.*, 1996, **35**(7): 1015~1021
- 18 R. E. Parks, C. J. Evans, P. J. Sullivan *et al.*. Measurements of the LIGO pathfinder optics[C]. *SPIE*, 1997, **3134**: 95~111
- 19 W. T. Estler, C. J. Evans, L. Z. Shao. Uncertainty estimation for multi-position form error metrology [J]. *Precision Engineering*, 1997, **21**(2-3): 72~82

栏目编辑: 王晓琰