

## X 射线柱面反射镜的非零位干涉测量

邓婷<sup>1,2</sup>, 刘锋伟<sup>1\*</sup>, 覃蝶<sup>1,2</sup>, 徐燕<sup>1</sup>, 吴永前<sup>1</sup>, 陈强<sup>1</sup><sup>1</sup>中国科学院光电技术研究所, 四川 成都 610209;<sup>2</sup>中国科学院大学, 北京 100049

**摘要** 针对拼接干涉测量技术除了引入拼接误差, 还将引入机械运动误差的问题, 为此提出一种 X 射线反射镜的非零位干涉测量方法, 无需拼接便可实现零回程误差的高精度干涉测量。利用一块高精度平面镜来标定干涉系统在全视场范围内的回程误差。通过将待测非球面镜划分成多个子孔径, 每个子孔径可近似看作一个平面, 这样可以从标定数据库中找到该子孔径所对应的回程误差, 通过简单的矩阵拼接可得到整个待测非球面镜的回程误差。以 X 射线椭圆柱面反射镜为例进行实验, 实现 X 射线椭圆柱面反射镜非零位干涉测量面形的回程误差有效标定, 相比于拼接干涉测量方法二者结果一致性较好, 证实所提方法的正确性。

**关键词** X 射线光学; X 射线镜; 面形检测; 回程误差; Zernike 多项式

中图分类号 O436.1

文献标志码 A

doi: 10.3788/AOS202242.0434001

## Non-Null Interferometric Test of X-Ray Cylindrical Reflect Mirror

Deng Ting<sup>1,2</sup>, Liu Fengwei<sup>1\*</sup>, Qin Die<sup>1,2</sup>, Xu Yan<sup>1</sup>, Wu Yongqian<sup>1</sup>, Chen Qiang<sup>1</sup><sup>1</sup>Institute of Optics and Electronics, Chinese Academy of Sciences, Chengdu, Sichuan 610209, China;<sup>2</sup>University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China

**Abstract** In this paper, a non-null interferometric measurement method of X-ray mirror is proposed, which can achieve high precision interferometric measurement of zero ratrace error without splicing. A high precision plane mirror is used to calibrate the ratrace error of the interference system in the full field of view. By dividing the aspherical mirror into several sub-apertures, each sub-aperture can be approximately regarded as a plane, so that the ratrace error corresponding to the sub-aperture can be found from the calibration database, and the ratrace error of the entire aspherical mirror can be obtained by simple matrix splicing. Taking the X-ray elliptic cylindrical mirror as an example, the ratrace error of the non-null interferometric surface shape of the X-ray elliptic cylindrical mirror is effectively calibrated. Compared with the splicing interferometric method, the results of the two methods are consistent, which confirms the correctness of the proposed method.

**Key words** X-ray optics; X-ray mirrors; surface test; ratrace error; Zernike polynomial

## 1 引言

同步辐射光源因其具有高准直、高偏振、高强度以及窄脉冲等优点而成为品质较好的先进 X 射线光源<sup>[1]</sup>, 然而决定其性能的 X 射线反射镜一般是具有大弧矢半径、小子午半径的细长条非球面镜。在同步辐射 X 射线波段, 反射镜的传输效率和成像束

斑强烈依赖于反射镜的形貌精度和表面质量, 因此对于 X 射线反射镜的面形表征与检测是一个具有挑战性的难题<sup>[1-2]</sup>。

为了解决掠入射反射镜面形检测的难题, 长程轮廓仪(LTP)和纳米测量仪(NOM)被提出并用于 X 射线聚焦镜的面形检测<sup>[3-4]</sup>。经过几十年的发展, 多个研究机构已研制出了多种型号的反射式轮廓测

收稿日期: 2021-06-29; 修回日期: 2021-08-01; 录用日期: 2021-08-20

基金项目: 国家自然科学基金(61905255)

通信作者: \*fengweiliu@126.com

量仪,如 LTP-II、LTP-MF(LTP-Multiple Functions)、DLTP(Developmental LTP)、FSP(“Flag” Shape Profiler)和 ESAD(Extended Shear Angle Difference)等<sup>[5-9]</sup>,测量精度已由最初的  $3\ \mu\text{rad}$  提高到小于  $50\ \text{nrad}$ <sup>[8-11]</sup>。反射式轮廓测量仪具有较高的测量精度和测量效率,但因其一般进行一维检测,所以主要用于面形验收检测、设备诊断以及装调标定。对于指导 X 射线反射镜的高精度加工,则需要获取具有高分辨率的 X 射线反射镜的二维面形信息,此时反射式轮廓测量仪已不再满足其检测需求<sup>[1]</sup>。

另一种检测 X 射线反射镜的常用手段是拼接干涉技术,相比于反射式轮廓测量仪能直接获取 X 射线反射镜的二维面形信息且精度更高,常用于指导 X 射线反射镜的高精度加工。拼接干涉技术的原理是在非零位干涉的前提下,先将待测镜划分多个子区域以减小干涉测量条纹的密度,再将干涉仪所获得的子孔径相位信息进行算法上的拼接,可以得到待测镜的整体面形信息。拼接干涉技术至今已发展出三种技术方案,分别是基于主动角度控制系统的拼接干涉技术、基于测角系统的拼接干涉测量技术以及基于测角辅助装置的角度主动控制技术<sup>[12-14]</sup>,这些技术的检测精度可以达到亚纳米量级。但拼接干涉技术不仅算法繁琐,还存在大量的误差,如系统回程误差、空间位置误差、相邻子孔径角度误差、单个子孔径的校准误差以及空气扰动和环境温度所带来的非线性误差,这些误差都会影响最终的拼接精度,而且拼接次数越多,误差累计越大<sup>[15]</sup>。

为了解决 X 射线反射镜在高精度加工阶段二维高精度面形检测的问题,提出一种基于回程误差标定的 X 射线反射镜非零位干涉测量方法。此方法将干涉仪直接测得的相位信息减去标定得到的回程误差来获取待测镜的相位信息,在提高 X 射线反射镜测量精度的同时一次性得到 X 射线反射镜的面形分布。

## 2 基本原理

干涉测量方式分为零位干涉测量方式与非零位干涉测量方式,它们的区别在于是否使用零位补偿器件。零位干涉系统中有与待测件完全匹配的补偿器件,使待测光束尽可能按原路返回至干涉系统,因此精度高,但通用性偏低。非零位干涉系统因为在测量过程中偏离零位条件,使光束不再以原路返回而造成一定的误差,但因其不需要制作相应的补偿

元件,所以具有很强的通用性。

本文使用菲佐干涉仪来测量 X 射线椭圆柱面反射镜的面形,其工作原理如图 1 所示。因为 X 射线椭圆柱面反射镜的面形是近平面的非球面,所以用平面参考镜对其进行检测。激光器产生的高功率稳频激光光束经参考透镜后,一部分光反射回干涉系统,另一部分光透过参考透镜至待测镜表面。参考波面与待测非球面面形之间的偏差会导致 CCD(Charge-coupled Device)上产生干涉条纹,干涉条纹的形状和密度表示了待测非球面与参考面之间的偏差大小。

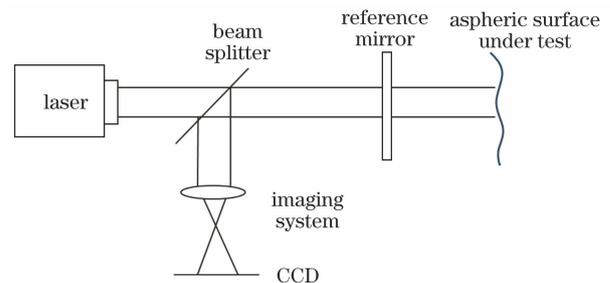


图 1 菲佐干涉仪的非球面非零位干涉检测系统

Fig. 1 Aspheric non-null interference detection system of Fizeau interferometer

在非零位测量中,干涉条纹所表示的偏差实际包含三部分。1)待测非球面理论面形与参考镜面形之间的偏差;2)待测非球面镜本身的面形误差;3)系统误差,这部分误差包括环境不确定度、仪器不确定度以及回程误差<sup>[16]</sup>。在干涉检测中,环境误差的大部分,如气流扰动等可以通过多次平均测量来实现最小化;仪器不确定度虽然不可消除,但可以挑选合适的元器件使误差减小。系统误差中的回程误差如图 2 所示,该误差由参考镜和待测非球面理论面形之间的差异使待测光线与参考光线不共路造成,与

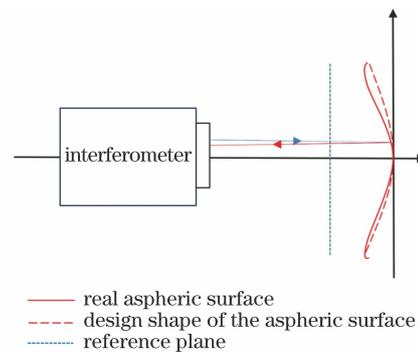


图 2 菲佐干涉仪中非球面非零位检测系统的回程误差示意图

Fig. 2 Retrace error diagram of aspherical non-null detection system of Fizeau interferometer

面形误差所形成的干涉条纹混杂在一起,难以区分,若想得到待测镜高精度的面形信息,则必须将回程误差从中剔除。

为了实现非球面非零位测量过程中回程误差的标定,提出泛采样 Zernike 多项式拟合的方法。该方法是一种针对干涉测量系统的通用化回程误差标定方法,并且无需光学系统建模。

首先在干涉仪的待测镜位置处放置一块高精度的平面反射镜。然后利用精密微位移台来控制该平面反射镜进行两个正交方向上的倾斜,通过设置不同的倾斜量进行泛采样,便能得到该干涉测量系统在整个视场范围内不同倾斜方向及密度的干涉条纹。通过相移算法求解不同条纹所对应的相位,即可得到该状态下系统的回程误差。以不同位置处的倾斜系数为自变量,利用曲面拟合手段便可得到表达回程误差的 Zernike 多项式各项系数的曲面分布,这也称为系统回程误差的标定文件。表 1 给出了 Zernike 多项式前几项的值与几何面形对应的物理意义,其中  $x$  和  $y$  分别为笛卡儿直角坐标系的横纵坐标。干涉仪通常用 Zernike 多项式来拟合面形,这样更能反映面形的误差,更精准地表示面形。

表 1 Zernike 多项式及物理意义<sup>[17]</sup>

Table 1 Zernike polynomials and their physical significance<sup>[17]</sup>

Number of term	Polynomial	Classical name
$Z_0$	1	Piston or bias
$Z_1$	$x$	Tilt $x$
$Z_2$	$y$	Tilt $y$
$Z_3$	$2(x^2 + y^2) - 1$	Power
$Z_4$	$x^2 - y^2$	Astigmatism $x$
$Z_5$	$2xy$	Astigmatism $y$
$Z_6$	$x[3(x^2 + y^2) - 2]$	Coma $x$

在对 X 射线柱面反射镜进行实际测量的过程中,将干涉仪测量得到的相位划分为若干个子区域,如果子区域划分得足够小,那么每个子区域可近似为一个斜平面。计算每个子区域的倾斜系数,进而通过与参考文件对比可以找到该子区域回程误差的 Zernike 多项式中各项系数的值,对 Zernike 多项式进行拟合就能得到该区域内的回程误差。遍历所有子区域,便得到了整个 X 射线柱面镜在非零位测量过程中的回程误差分布。令干涉仪直接测量得到的相位减去该回程误差,即为标定后 X 射线柱面反射镜的相位信息,表达式为

$$\varphi_{\text{calibrated}} = \varphi_{\text{interferometer}} - \varphi_{\text{hy\_error}}, \quad (1)$$

式中: $\varphi_{\text{calibrated}}$  为 X 射线反射镜标定后的相位信息; $\varphi_{\text{interferometer}}$  为干涉仪直接测量得到的相位; $\varphi_{\text{hy\_error}}$  为 X 射线反射镜非零位测量中的回程误差。

### 3 面形检测过程及方法

采用口径为 150 mm、波长为 632.8 nm、相机分辨率为 1024 pixel×1024 pixel 的自研菲佐干涉仪。通过设定泛采样的步长以及采样点数目,利用五维微位移运动平台来控制标定平面镜沿 X 轴和 Y 轴方向进行偏转,五维微位移运动平台的参数如下。X、Y 和 Z 方向的量程均为 ±45 mm,分辨率均为 0.001 mm;绕 X 和 Y 方向旋转的分辨率均为 0.0001°,量程均为 ±7.5°;绕 Z 方向旋转的分辨率为 0.001°,量程均为 ±12.5°。在采样前需建立微位移运动平台的参数与相位面倾斜系数之间的映射关系,这样可以保证采样数据的正交完备性。图 3 中的 X 和 Y 轴分别表示 X 和 Y 方向的 Zernike 多项式倾斜系数,实心方块是微位移控制台沿 X 和 Y 正交方向运动的采样点。采样需在干涉测量系统的全视场范围内进行,以保证待测 X 射线柱面镜的最大斜率能包含于标定数据集内。图 4 表示了不同采样点位置处干涉仪实测倾斜相位的分布。图 5 表示了本文所采用的干涉测量系统的实际标定现场。如此,完成该干涉测量系统在全视场范围内的泛采样。

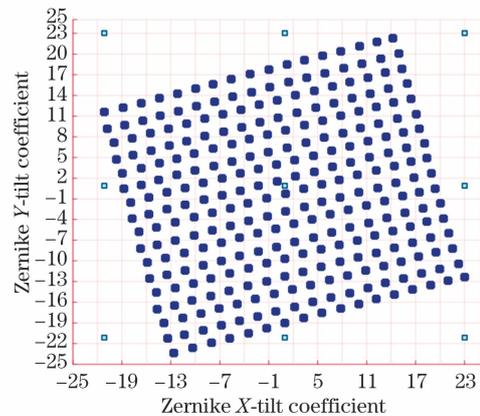


图 3 微位移平台运动参数与相位面倾斜系数之间的映射关系

Fig. 3 Mapping relationship between motion parameters of micro-displacement platform and tilt coefficient of phase surface

回程误差是由参考光与被测光的非共光路造成的,其可以用 Zernike 多项式的前 36 项来表示,回

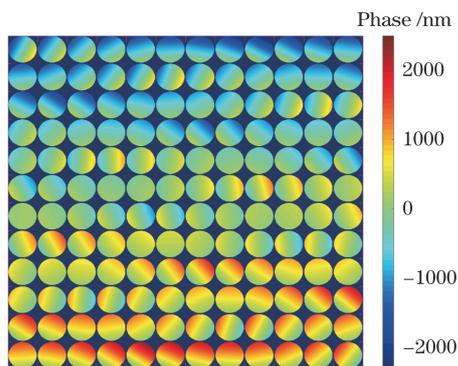


图 4 不同采样点位置处于干涉仪实测倾斜相位的分布示意图

Fig. 4 Distribution diagram of tilted phase measured by interferometer at different sampling points

程误差的各阶 Zernike 多项式系数均可看作以 X 和 Y 方向的倾斜系数为自变量的二元函数。因此,在标定文件的制作过程中,利用高次曲面拟合便可得到回程误差的各阶 Zernike 多项式系数在干涉测量

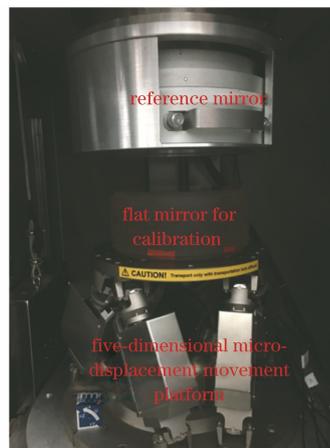


图 5 本文所采用的干涉测量系统的实际标定现场  
Fig. 5 Actual calibration field of interferometry system used in this paper

系统中整个视场范围内的曲面分布。图 6 表示了第 4、12、17、21、29 和 36 阶 Zernike 多项式系数与 X 和 Y 方向的倾斜系数之间的关系。

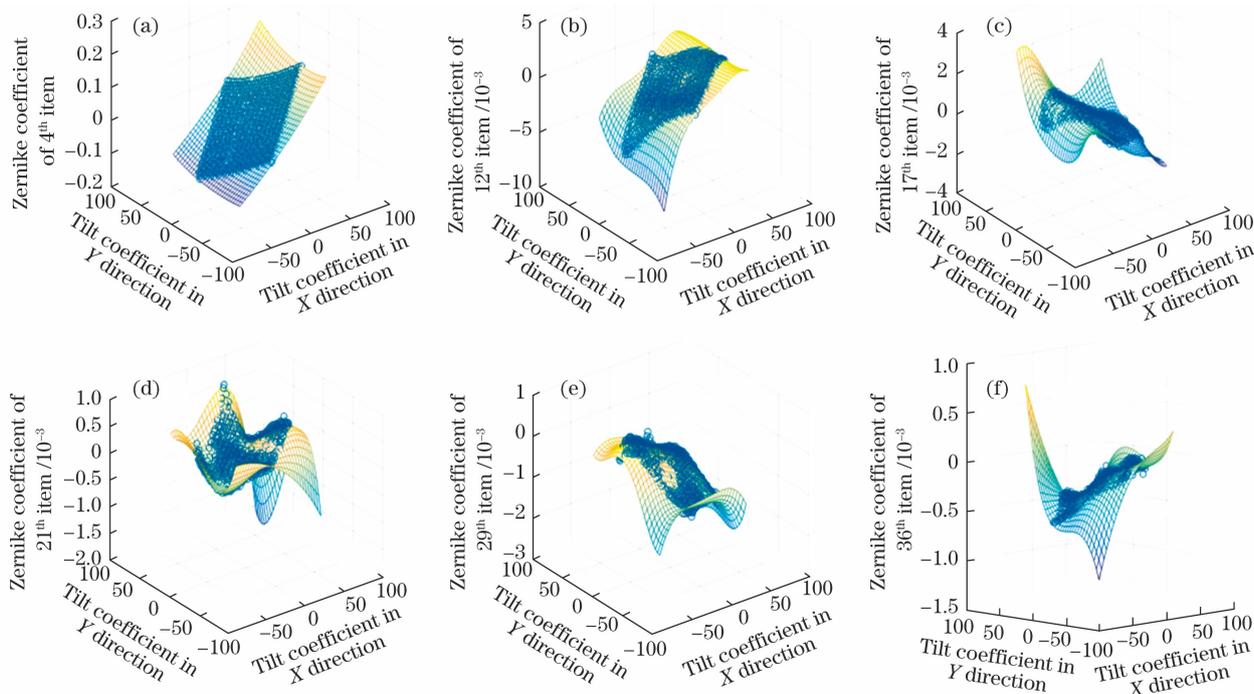


图 6 Zernike 像差各项系数与 X 和 Y 方向倾斜系数之间的关系。(a)第 4 项;(b)第 12 项;(c)第 17 项;  
(d)第 21 项;(e)第 29 项;(f)第 36 项

Fig. 6 Relationship between Zernike aberration coefficients and tilt coefficients in X and Y directions.  
(a) 4<sup>th</sup> item; (b) 12<sup>th</sup> item; (c) 17<sup>th</sup> item; (d) 21<sup>th</sup> item; (e) 29<sup>th</sup> item; (f) 36<sup>th</sup> item

制作完成标定文件后,只要求得待测相位的倾斜系数,即可得到该位置下干涉测量系统的回程

误差分布。图 3 的各个采样点位置处在所设计的干涉测量系统中的回程误差分布如图 7 所示。

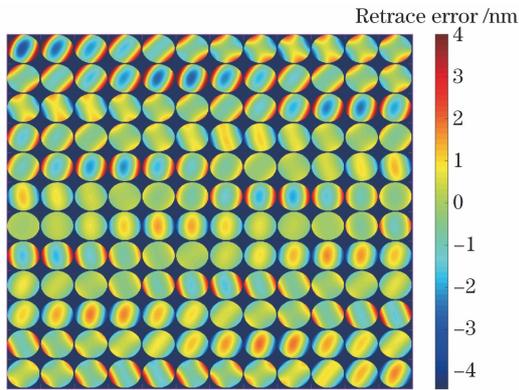


图 7 图 3 的各个采样点位置处在所设计的干涉测量系统中的回程误差分布

Fig. 7 Retrace error distribution of each sampling point of Fig. 3 in designed interferometry system

#### 4 分析与讨论

本文对图 8(a)尺寸为  $119.3 \text{ mm} \times 77.9 \text{ mm}$  的 X 射线椭圆柱面反射镜进行检测,其椭圆方程满足

$$\frac{x^2}{a^2} + \frac{y^2}{b^2} = 1, \quad (2)$$

式中:  $a = 300100$ ;  $b = 43.782677$ 。检测现场如图 8(b)所示。

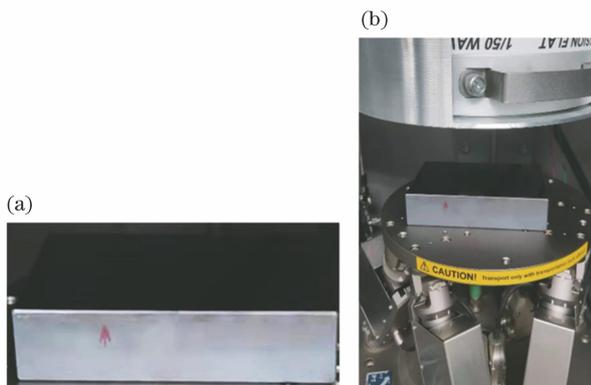
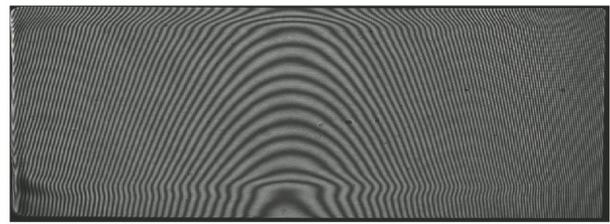


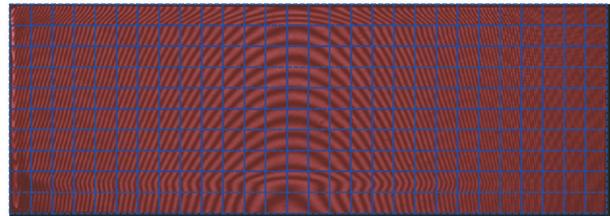
图 8 检测实验平台。(a)X 射线反射镜;(b)检测现场图  
Fig. 8 Test platform. (a) X-ray reflectors;  
(b) test site map

针对 X 射线柱面反射镜,其面形为典型的非球面,对应的相位在空间不同位置处的斜率不一致,这就导致干涉条纹在空间不同位置处的倾斜方向以及条纹密度都在变化,如图 9(a)所示。

因此,在柱面反射镜回程误差标定的过程中,必须对其进行子孔径划分,子孔径的划分示意图如图 9(b)所示。应该指出的是,子孔径的大小和形状决定了子孔径内相位倾斜系数拟合的准确性以及计算效率。子孔径划分得越小,每个子孔径内相位的形状越接近于平面,斜面拟合就越接近于真实相位,



(a)



(b)

图 9 实测干涉条纹分布。(a)实测干涉条纹;  
(b)子孔径的划分示意图

Fig. 9 Measured interference fringe distribution.  
(a) Measured interference fringe; (b) schematic of subaperture division

结果也越准确。

为了寻找合适的子孔径尺寸,仿真模拟了子孔径尺寸为  $700 \text{ pixel} \times 700 \text{ pixel}$  的第 7 项 Zernike 多项式的像差,如图 10 所示,将每个子孔径按理想平面进行拟合再依次拼接。将得到的面形与理想像差相减,方均根(RMS)和峰谷值(PV)随子孔径尺寸的变化趋势如图 11 所示。从图 11 可以看到,随着子孔径尺寸的减小,PV 和 RMS 值也逐渐减小;当子孔径尺寸趋于  $10 \text{ pixel} \times 10 \text{ pixel}$  时,PV 和 PMS 值趋于 0,表示此时拼接像差与理想像差已非常接近。

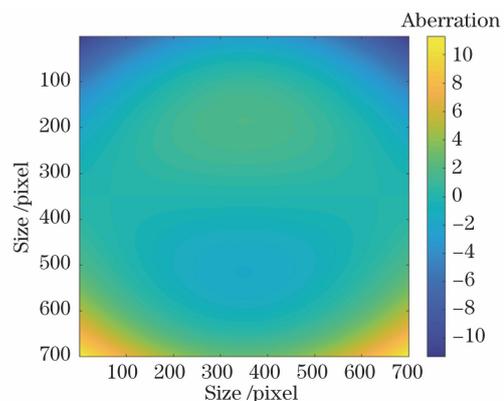


图 10 第 7 项 Zernike 多项式表示的像差  
Fig. 10 Aberration represented by Zernike polynomial in 7<sup>th</sup> item

子孔径的大小不仅决定了检测精度,还决定着计算效率,子孔径划分得越多,则计算的次数也就越多,因此整个过程的耗时增加,计算效率随子孔径尺

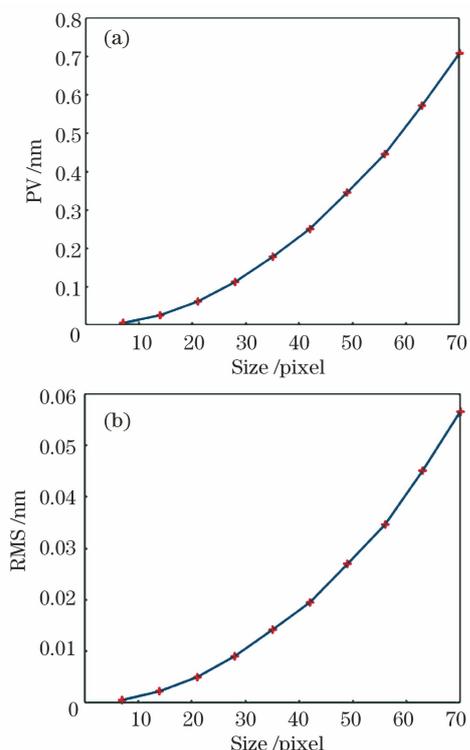


图 11 理想像差减拼接面形后不同参数与孔径尺寸的关系。(a) PV 值随子孔径尺寸变化的分布曲线；(b) RMS 值随子孔径尺寸变化的分布曲线

Fig. 11 Relationship between different parameters and aperture size after ideal aberration subtracting splicing surface shape. (a) Distribution curve of PV value with subaperture size; (b) distribution curve of RMS value with subaperture size

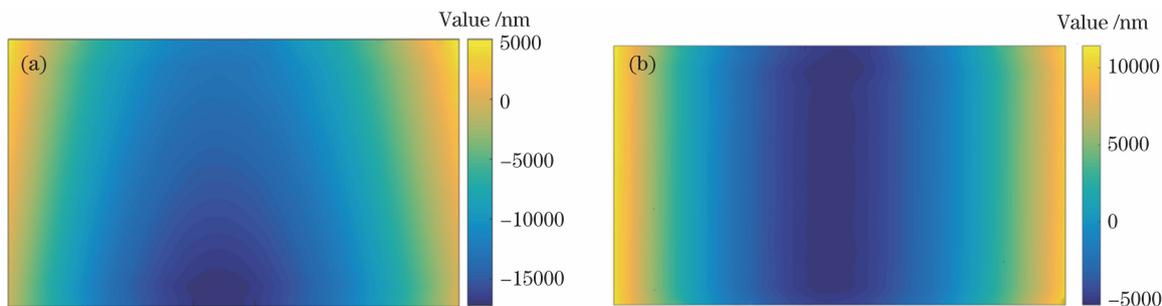


图 13 去倾斜前后的 X 射线反射镜面形分布。(a)去倾斜前;(b)去倾斜后

Fig. 13 Specular distribution of X-ray reflection with and without tilt. (a) With tilt; (b) without tilt

为了验证该方法的正确性,采用孔径拼接干涉测量技术对该柱面镜进行拼接实验,图 15(b)为拼接测量结果。口孔径个数设为 5,每个区域的度为 250 mm,拼接重叠区域度为 125 mm。与干涉仪直接测量结果相减可得到孔径拼接的回程误差分布,如图 15(a)所示,可知回程误差的 PV 值为 302.76 nm,RMS 值为 58.38 nm。对比图 15(a)与图 14(a)发现,两种方法标定出的回程误差空间

寸的变化曲线如图 12 所示。在保证精度的情况下,采用 10 pixel×10 pixel 的正方形区域来划分子孔径。

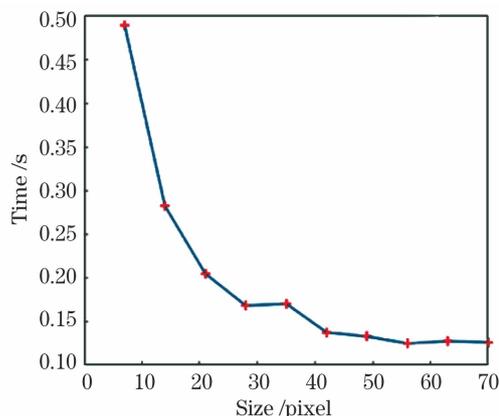


图 12 计算效率随子孔径尺寸的变化曲线  
Fig. 12 Variation curve of computational efficiency with sub-aperture size

由于干涉仪直接测得的 X 射线反射镜面形如图 13(a)所示,可以看到面形整体存在倾斜。去倾斜后,该柱面镜的面形分布如图 13(b)所示,可以看到面形的 PV 值为 16791.19 nm,RMS 值为 4689.76 nm。采用所提方法标定得到的回程误差分布如图 14(a)所示,可以看到回程误差的 PV 值为 195.48 nm,RMS 值为 25.67 nm。标定后柱面镜的面形分布如图 14(b)所示,可以看到面形的 PV 值为 16877.01 nm,RMS 值为 691.02 nm。

分布较为一致,这基本证实了所提方法可有效标定出 X 射线柱面反射镜在非零位测量过程中的回程误差。二者均方根的结果偏差较大,分析主要存在两方面原因。1)子孔径拼接干涉测量法本身存在拼接误差,在测量不同子孔径的过程中存在机械运动偏差;2)标定法得到的结果与直接测量得到的结果之间在点对点相减的过程中存在对准偏差。

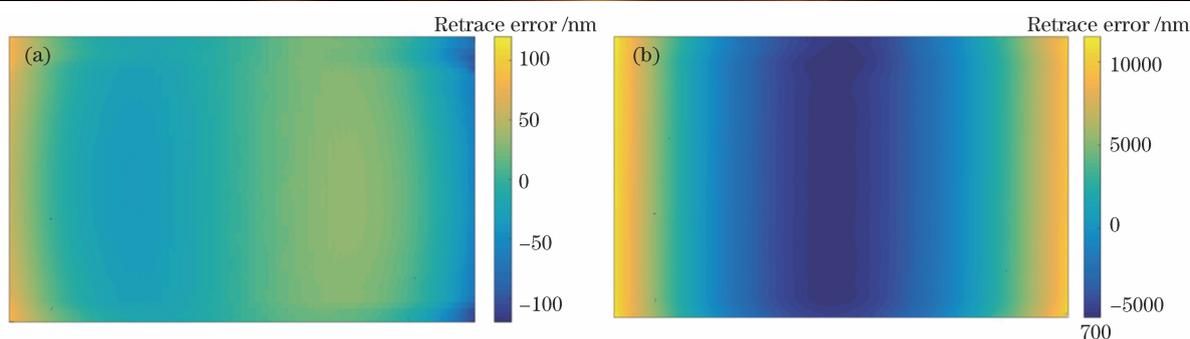


图 14 采用标定法得到的结果。(a)回程误差分布;(b) X 射线反射镜的面形分布

Fig. 14 Results are obtained by calibration method. (a) Retrace error distribution; (b) surface map of X-ray mirror

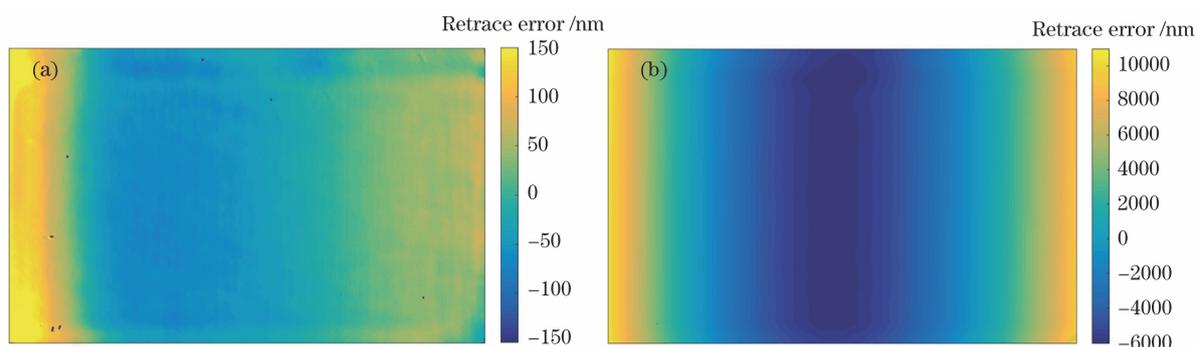


图 15 拼接干涉法的测量结果。(a)回程误差分布;(b) X 射线反射镜的面形分布

Fig. 15 Measurement results of splicing interferometry. (a) Retrace error distribution; (b) surface map of X-ray mirror

## 5 结 论

针对 X 射线柱面反射镜面形高精度检测的难题,对 X 射线柱面反射镜的非零位干涉误差来源进行分析,提出用平面镜来标定系统的回程误差以测得待测镜准确的面形信息,并对其原理与方法进行详细介绍。针对工程实例对一口径为  $119.3 \text{ mm} \times 77.9 \text{ mm}$  的 X 射线椭圆柱面反射镜进行检测,测得 PV 值为  $16877.01 \text{ nm}$ ,RMS 值为  $4691.02 \text{ nm}$ 。该方法不仅对 X 射线反射镜有效,同样也适用于其他非球面,甚至自由曲面的检测,具备通用性。

### 参 考 文 献

- [1] Li M, Wu J L, Wu Y Q, et al. A review on the fabrication technology of X-ray reflector[J]. Opto-Electronic Engineering, 2020, 47(8): 200205. 李明, 吴介立, 吴永前, 等. X 射线反射镜研制技术的现状和发展[J]. 光电工程, 2020, 47(8): 200205.
- [2] Shi Y N, Xu X D, Huang Q S, et al. Development of relative angle determinable stitching interferometry for high-accuracy X-ray focusing mirrors[J]. Proceedings of SPIE, 2017, 10385: 103850M.
- [3] Takacs P Z, Feng S C K, Church E L, et al. Long trace profile measurements on cylindrical aspheres[J]. Proceedings of SPIE, 1989, 0966: 354-364.
- [4] Siewert F, Zeschke T, Arnold T, et al. Linear chirped slope profile for spatial calibration in slope measuring deflectometry[J]. Review of Scientific Instruments, 2016, 87(5): 051907.
- [5] Irick S C, McKinney W R, Lunt D L J, et al. Using a straightness reference in obtaining more accurate surface profiles from a long trace profiler[J]. Review of Scientific Instruments, 1992, 63(1): 1436-1438.
- [6] Qian S N, Wang Q P, Hong Y L, et al. Multiple functions long trace profiler (LTP-MF) for National Synchrotron Radiation Laboratory of China[J]. Proceedings of SPIE, 2005, 5921: 592104.
- [7] Lacey I, Artemiev N A, Domning E E, et al. The developmental long trace profiler (DLTP) optimized for metrology of side-facing optics at the ALS[J]. Proceedings of SPIE, 2014, 9206: 920603.
- [8] Jiang X M, Wang J Q, Qin Q, et al. Chinese high energy photon source and the test facility[J]. Scientia Sinica (Physica, Mechanica & Astronomica), 2014, 44(10): 1075-1094. 姜晓明, 王九庆, 秦庆, 等. 中国高能同步辐射光源及其验证装置工程[J]. 中国科学: 物理学 力学 天文学, 2014, 44(10): 1075-1094.

- [9] Geckeler R D. ESAD shearing deflectometry: potentials for synchrotron beamline metrology [J]. Proceedings of SPIE, 2006, 6317: 63171H.
- [10] Siewert F, Lammert H, Noll T, et al. Advanced metrology: an essential support for the surface finishing of high performance X-ray optics [J]. Proceedings of SPIE, 2005, 5921: 592101.
- [11] Qian S N, Idir M. Innovative nano-accuracy surface profiler for sub-50 nrad RMS mirror test [J]. Proceedings of SPIE, 2016, 9687: 96870D.
- [12] Vivo A, Barrett R, Perrin F. Stitching techniques for measuring X-ray synchrotron mirror topography [J]. Review of Scientific Instruments, 2019, 90(2): 021710.
- [13] Yumoto H, Mimura H, Handa S, et al. Stitching-angle measurable microscopic-interferometer: surface-figure metrology tool for hard X-ray nanofocusing mirrors with large curvature [J]. Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment, 2010, 616(2/3): 203-206.
- [14] Huang L, Xue J P, Gao B, et al. One-dimensional angular-measurement-based stitching interferometry [J]. Optics Express, 2018, 26(8): 9882-9892.
- [15] Zhang S, Hou X. Research progress of high-precision surface metrology of a K-B mirror [J]. Chinese Optics, 2020, 13(4): 660-675.  
张帅, 侯溪. K-B 镜面形高精度检测技术研究进展 [J]. 中国光学, 2020, 13(4): 660-675.
- [16] Zhang J. Uncertainty analysis for super-accuracy Fizeau interferometer [D]. Beijing: University of Chinese Academy of Sciences, 2011: 35-36.  
张健. 超高精度菲索干涉仪不确定度分析 [D]. 北京: 中国科学院大学, 2011: 35-36.
- [17] Qian Z Y, Yang H M, Zhu F H. Flatness measurement method based on digital-wavefront interferometry [J]. Measurement Technique, 2017(7): 7-9.  
钱征宇, 杨慧敏, 朱绯红. 基于数字波面干涉的平面度测试方法 [J]. 计量技术, 2017(7): 7-9.