

长程轮廓仪用于筒状超光滑表面测量的 误差分析及校正

李 顺^{1,2} 巩 岩¹

¹ 中国科学院长春光学精密机械与物理研究所应用光学国家重点实验室, 吉林 长春 130033
² 中国科学院研究生院, 北京 100049

摘要 为了提高使用长程轮廓仪对筒状超光滑非球面进行面型测量的精度, 研究并总结了测量过程中常见的误差源及校正方法。针对测量过程中对结果影响较大的转台转轴与待测筒状镜光轴之间的倾斜和偏心误差做了详细的分析, 提出利用数据处理校正这部分误差的方法。编写了相应的数据处理程序, 通过数值模拟实验对该程序进行了验证。实验结果表明, 该程序能够有效去除转台转轴与待测镜之间倾斜和偏心产生的系统误差, 提高长程轮廓仪用于筒状镜面型测量时的测量精度。在转台转轴与待测镜之间具有 $5 \mu\text{m}$ 的偏心 and 大约 $1'$ 的倾斜时, 使用该程序还原 50 nm 量级的面型轮廓, 还原精度为均方根值(RMS) 2.8 nm , 峰-谷值(PV) 18.5 nm 。

关键词 光学测量; 误差分析; 数据处理; 长程轮廓仪; 掠入射望远镜; X 射线光学

中图分类号 TH74 文献标识码 A doi: 10.3788/AOS201131.1112001

Error Analysis and Correction during Measurement of Tube-Shaped Super-Smooth Mirrors Using Long Trace Profiler

Li Shun^{1,2} Gong Yan¹

¹ State Key Laboratory of Applied Optics, Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun, Jilin 130033, China
² Graduate University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China

Abstract To improve the accuracy of long trace profiler for measuring the surface profile of tube-shaped super-smooth mirrors, some common errors and correcting methods are studied and summed up. The errors caused by the tilt and decenter between the rotating axis of rotary table and the axis of tube-shaped mirror under test during measurement will influence the result very much. These errors are in detail analyzed, and a correction method through data processing is presented. Then, a data processing code is programmed, and a numerical-simulation experiment is given to decide the properties of the code. Experimental results indicate that the code can remove the tilt and decenter errors between rotary table and mirror under test effectively, and improve the accuracy of tube-shaped mirror measurement using long trace profiler. When there is $5 \mu\text{m}$ decenter and $1'$ tilt between the rotary table and mirror under test, using the code to restore the surface profile at the order of 50 nm , the restoration accuracy is root-mean-square (RMS) 2.8 nm and peak-to-valley (PV) 18.5 nm .

Key words optical measurement; error analysis; data processing; long trace profiler; grazing incidence telescope; X-ray optics

OCIS codes 120.6650; 340.7470; 220.4840; 120.3930

1 引 言

太阳软 X 射线掠入射成像望远镜是进行太阳活动观测、预测空间天气变化的重要仪器, 工作在 $0.6 \sim 6 \text{ nm}$ 的软 X 射线波段。由于在这个波段范

围内几乎所有介质的折射率都接近 1, 所以 X 射线光学系统多采用掠入射式^[1,2]。掠入射望远镜大多采用由一组同轴共焦的二次曲面组成的 Wolter I 型或者其改进结构^[3~6]。这些掠入射系统的反射镜

收稿日期: 2011-05-04; 收到修改稿日期: 2011-05-29

基金项目: 国家自然科学基金(40974110, 40674098)资助课题。

作者简介: 李 顺(1981—), 男, 博士研究生, 主要从事光学系统设计方面的研究。E-mail: lishun156@163.com

导师简介: 巩 岩(1968—), 男, 博士, 研究员, 主要从事光学系统设计、短波段光学仪器以及光机系统集成等方面的研究。E-mail: gongy@sklao.ac.cn(通信联系人)

都是大离轴量的筒状二次曲面,入瞳是遮拦比很高的圆环。掠入射望远镜的这种特殊结构形式不仅增加了优化设计的难度,对光学物镜的加工和检测也提出了更高的要求^[7,8]。由于 X 射线的波长极短,容易发生散射,因此工作在 X 射线波段的光学元件对表面粗糙度的要求很高。为了保证成像质量,工作在掠入射情况下的 X 射线光学元件的面型要求也达到了微弧度和纳米级。在如此高的精度要求下对筒状超光滑表面的面型进行测量,是 X 射线望远镜制造的核心技术。目前,国际上对此类筒状超光滑非球面面型的测量,通常采用长程轮廓仪(LTP)干涉扫描的方法^[8,9]。

LTP 是一种基于细光束干涉原理,通过光束扫描对超光滑光学表面进行面型测量的设备^[10~14]。它通常被用来测量同步辐射光学元件的超光滑表面,在较好的环境控制下,可以达到微弧度的测量精度。使用 LTP 测量表面面型的一个重要优点是它不需要参考面,而是使用光学头直接对被测表面进行扫描,得到被测表面不同采样点的斜率,进一步积分得到被测面的面型。由于 LTP 的这些特点,人们开始研究将其改造用于 X 射线空间望远镜的筒状超光滑表面的面型测量,并取得了一定的研究成果^[8,9,15~18]。本文在总结前人将 LTP 用于筒状超光滑表面面型测量研究成果的基础上,研究了在测量筒状超光滑表面时,主要误差源对 LTP 系统测量结果的影响^[14,19~22]。针对 LTP 用于筒状超光滑表面测量时,转台转轴与被测量表面光轴之间的倾斜和偏心误差(以下简称倾斜和偏心误差)对测量结果造

成的影响做了详细的分析。编写了能够去除测量结果中倾斜和偏心误差的数据处理程序,该程序能够有效校正测量结果中的倾斜和偏心误差,还原被测表面的真实轮廓,提高系统的测量精度。

2 共路扫描 LTP 的基本结构和误差源分析

2.1 共路扫描 LTP 的基本结构

由于一般的同步辐射用光学元件多为条形,其有效的光学表面近似为一个矩形的平面,因此对这些表面测量时只需在矩形区域内进行二维扫描。常见的用来测量同步辐射光学元件的 LTP 通常只能对光学表面做二维扫描,并不能进行三维的立体扫描。而用于空间软 X 射线望远镜的掠射物镜为筒状结构,其光学表面是一个立体的圆筒,要对其进行面型测量,必须对传统的 LTP 进行改进,使其具有三维扫描的能力,能够对圆筒状的表面进行全面的立体扫描。用于测量筒状掠入射物镜的 LTP 与通常用于同步辐射元件测量的 LTP 的主要区别在于:1)变扫描头的水平扫描运动为垂直扫描运动,使扫描时筒状镜能够竖直放置(光轴竖直),避免水平放置时受重力的影响而发生变形;2)增加精密转台系统,使 LTP 不仅能够对筒状镜进行竖直方向的扫描,还能够进行水平方向的扫描,同时精密转台系统还要能够配合竖直扫描导轨对扫描点的位置进行精确定位。设计的用于筒状超光滑掠射物镜面型测量的共路扫描长程轮廓仪(CSLTP)的基本结构如图 1 所示^[16]。

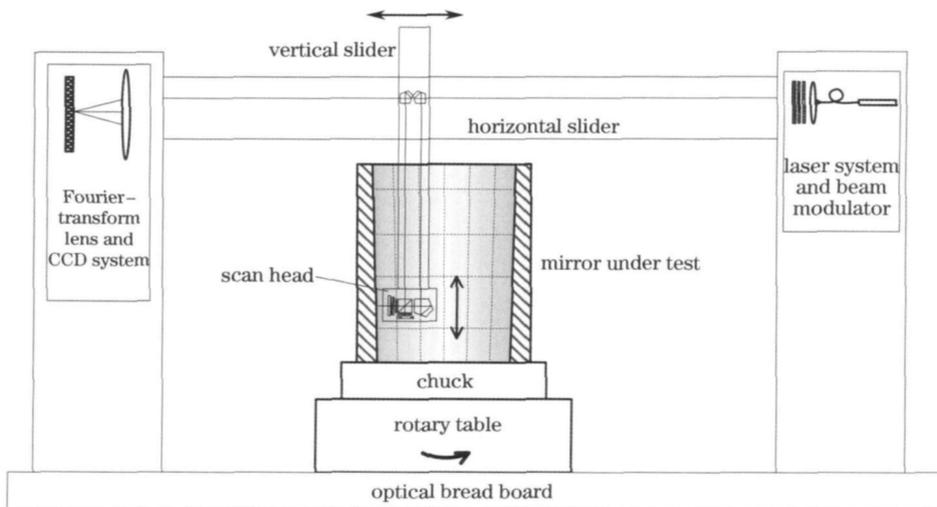


图 1 CSLTP 结构示意图

Fig. 1 Schematic of the CSLTP

使用 CSLTP 对筒状超光滑表面进行面型测量时,需使用两种扫描方式:沿转台转轴方向(竖直方向,以下简称轴向)扫描和沿水平圆周方向扫描。两种扫描采样路线见图 1 中待测镜上虚线部分。对扫描得到的数据进行处理,最终得到筒状超光滑表面的面型数据。进行轴向扫描时,首先将转台转到一定角度固定,通过扫描头沿垂直方向导轨的上下运动,对待测筒状镜(MUT)进行轴向的扫描。完成一次扫描后,转动转台到下一角度并固定,开始下一条轴向扫描;轴向扫描全部完成后,控制扫描光束由竖直方向变为水平方向,并将光学扫描头固定在一定高度,通过转动转台对 MUT 进行圆周方向的扫描;完成一次圆周扫描后,将光学头移动至下一扫描高度并固定,转动转台开始第二条圆周方向的扫描。完成扫描后将得到 MUT 表面上轴向及圆周方向采样点的斜率,经过进一步处理可以得到 MUT 面型数据。

2.2 测量误差的分析及校正方法简介

使用 LTP 系统进行超光滑表面面型测量时,必须对测量过程中出现的误差进行校正,才能得到正确的结果。通常影响 LTP 系统测量结果的误差源主要有以下几个^[19~22]:温度漂移、元件自身重力、空气扰动、随机机械振动、光源的稳定性、探测器及放大电路的噪声、导轨运动时的随机动态噪声、傅里叶变换透镜的像差。使用 CSLTP 系统测量筒状超光滑表面时,除了受上述各种误差的影响外,还受到转台转轴和 MUT 光轴之间的倾斜和偏心以及转台自身的转动误差和随机动态噪声的影响。

Qian 等^[19,20]曾经对使用 LTP 系统进行面型测量时,温度漂移、元件重力以及空气扰动等因素对测量结果的影响及校正方法做了比较深入的研究。他们认为,温度漂移误差是由于测量系统周围环境温度的变化引起的干涉条纹移动造成的;而测量元件和光学扫描头自身的重力,在扫描运动过程中会造成支撑机械结构的倾斜,引起光路的变化,造成测量

误差。这两种误差对测量光束和参考光束的影响是同步的,可以利用参考信号对测量信号进行校正去除这部分误差的影响。而对于空气扰动、随机机械振动、光源的稳定性、探测器及放大电路的噪声以及导轨运动的随机动态误差,除了提高工作环境条件、增加隔振措施、采用稳定性高的光源、合理设计探测器及放大电路以及采用高精度的导轨外,由于这些误差都是随机误差,可以采用多次测量求平均值的方法减少这些随机误差的影响。傅里叶变换透镜像差的影响可以结合光学设计的结果根据傅里叶变换透镜的像差曲线对测量结果进行校正。在使用 CSLTP 系统测量筒状超光滑表面时特有的误差中,对测量结果影响较大的是倾斜和偏心误差,它直接影响了轴向和圆周采样数据的大小,必须采取适当的措施进行校正,才能得到较为准确的测量结果。而转台自身转动的动态噪声为随机误差,可以使用多次测量求平均值的方法进行校正;转台的转动误差可以通过反转方法^[23]校正或采用高精度转台减小其影响。

3 系统倾斜和偏心误差的分析及校正方法

为了研究 CSLTP 系统中倾斜和偏心误差对测量结果的影响,建立了以下数学模型。首先假设 MUT 为理想的筒状抛物面,转台的转轴和 MUT 的光轴之间有大小为 φ 的倾斜,并且在 x 和 y 方向上分别有大小为 a 和 b 的偏心。通过对理想抛物面方程进行坐标变换,分别求其各点竖直方向和水平圆周方向的斜率,即可以模拟出当 MUT 具有一定的倾斜和偏心时对 CSLTP 系统测量结果的影响。经过数学运算,可以得到在系统倾斜和偏心的影响下,理想抛物面上各点竖直方向(沿转台转轴方向)和圆周方向(沿垂直转台转轴平面与抛物面的交线方向)的斜率可以分别表示为

$$\frac{dr}{dz} = \frac{R_p \cos \varphi - z \sin^2 \varphi - r \sin \theta \sin \varphi \cos \varphi - b \sin \varphi}{r - r \cos^2 \theta \sin^2 \varphi + z \sin \theta \sin \varphi \cos \varphi + R_p \sin \theta \sin \varphi + a \cos \theta + b \sin \theta \cos \varphi}, \quad (1)$$

$$\frac{dr}{r d\theta} = \frac{a \sin \theta - b \cos \theta \cos \varphi - r \sin \theta \cos \theta \sin^2 \varphi - z \cos \theta \sin \varphi \cos \varphi - R_p \cos \theta \sin \varphi}{r - r \cos^2 \theta \sin^2 \varphi + z \sin \theta \sin \varphi \cos \varphi + a \cos \theta + b \sin \theta \cos \varphi + R_p \sin \theta \sin \varphi}, \quad (2)$$

式中 R_p 为抛物面顶点曲率半径, r, θ 和 z 为采样点的圆柱坐标值, a, b 和 φ 分别为相应的偏心和倾斜量。由于在实际进行面型测量时倾斜和偏心量通常为微弧度和微米级,远小于筒状镜的曲率半径、采样点坐标等参数,可以按以下步骤对(1)和(2)式中的倾斜和偏心量 φ, a 和 b 做近似处理。

1) 首先将(1)式和(2)式中的 $\sin \varphi$ 和 $\cos \varphi$ 分别近似为 φ 和 1 可以分别得到

$$\frac{dr}{dz} \approx \frac{R_p - z\varphi^2 - r\varphi \sin \theta - b\varphi}{r - r\varphi^2 \cos^2 \theta + z\varphi \sin \theta + R_p \varphi \sin \theta + a \cos \theta + b \sin \theta}, \quad (3)$$

$$\frac{dr}{r d\theta} \approx \frac{a \sin \theta - b \cos \theta - r\varphi^2 \sin \theta \cos \theta - z\varphi \cos \theta - R_p \varphi \cos \theta}{r - r\varphi^2 \cos^2 \theta + z\varphi \sin \theta + a \cos \theta + b \sin \theta + R_p \varphi \sin \theta}. \quad (4)$$

2) 然后将(3)式和(4)式中的一阶以上小量近似为零,得到

$$\frac{dr}{dz} \approx \frac{R_p - r\varphi \sin \theta}{r + z\varphi \sin \theta + R_p \varphi \sin \theta + a \cos \theta + b \sin \theta}, \quad (5)$$

$$\frac{dr}{r d\theta} \approx \frac{a \sin \theta - (b + z\varphi + R_p \varphi) \cos \theta}{r + a \cos \theta + (b + z\varphi + R_p \varphi) \sin \theta}. \quad (6)$$

3) 舍去(5)式和(6)式分母中的小量,得

$$\frac{dr}{dz} \approx \frac{R_p}{r} - \varphi \sin \theta, \quad (7)$$

$$\frac{dr}{r d\theta} \approx \frac{a \sin \theta - (b + z\varphi + R_p \varphi) \cos \theta}{r}. \quad (8)$$

(7)式和(8)式代表了倾斜和偏心误差在 MUT 各采样点斜率中的主要部分,将其与没有倾斜和偏心误差时理想抛物面镜的轴向和圆周采样斜率

($\frac{dr}{dz} = \frac{R_p}{r}, \frac{dr}{r d\theta} = 0$)对比,可以得到倾斜和偏心误差

在测量结果中的基本特征。由(7)式可以得到,轴向采样斜率基本不受偏心误差的影响,而倾斜对它的影响也只是在每条轴向采样斜率上增加了随采样角度变化的分量。由(8)式可以得到,倾斜和偏心误差对圆周采样斜率的影响可以等效为一个振幅和初始相位受采样点位置以及倾斜和偏心误差大小影响的正弦信号。根据倾斜和偏心误差的这些特点,编写了相应的数据处理程序,对轴向采样数据采用减去自身平均值的方法,对圆周采样数据采用正弦拟合的方法,分别去除测量结果数据中的倾斜和偏心分量,提高了使用 CSLTP 测量筒状超光滑表面面型的测量精度。

4 数值模拟实验及结果

4.1 数值模拟实验

为了验证上述数据处理程序的可靠性,使用软件对上述方法进行了数值模拟和验证。首先根据实验室加工的 Wolter I 型筒状掠射物镜(如图 2 所示)的面型数据,模拟了具有一定量倾斜和偏心的表面轮廓数据,进一步得到选定采样点的轴向和圆周方向的斜率数据。将这些斜率数据作为测量数据,使用数据处理程序校正测量数据中的倾斜和偏心误差,并进一步减去理想面型轮廓得到仅有加工误差

的表面轮廓。最后将得到的表面轮廓与原始的表面轮廓数据比较,从而验证数据处理程序的可靠性。整个模拟实验的流程图如图 3 所示。

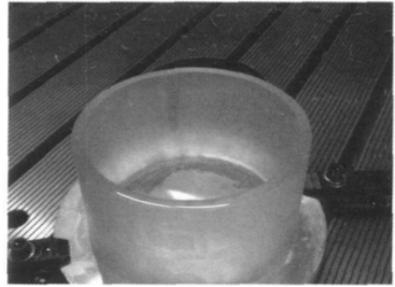


图 2 Wolter I 型筒状掠入射物镜

Fig. 2 Wolter type I tube-shaped grazing incidence mirror

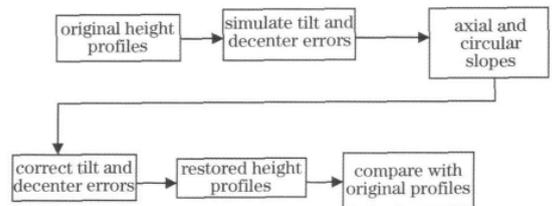


图 3 数值模拟实验流程图

Fig. 3 Flow chart for numerical-simulation experiment

程序模拟生成的具有一定量倾斜 $\varphi = 300 \mu\text{rad}$ (约 $60''$)和偏心 $d = 5 \mu\text{m}$ 的筒状抛物面各设定采样点的轴向和圆周采样斜率数据如图 4 所示。

将采样点轴向和圆周方向的斜率数据作为输入数据,使用前文中所述的数据处理程序对数据中的倾斜和偏心误差进行校正,然后与理想面型比较,最终得到只包括加工误差的面型轮廓,如图 5 所示。根据现有筒状镜的测量结果得到的原始面型轮廓如图 6 所示。为了比较数据处理程序的精度,将原始面型轮廓与还原得到的面型轮廓相减得到图 7 所示的结果,进一步计算得到还原精度误差为均方根(RMS)2.8 nm,峰-谷值(PV)18.5 nm。由图 7 可以看出,虽然数据处理程序在整个面型的大部分区域有效地还原了原始的面型轮廓,但在个别地方还有较大的误差存在,尤其是在整个表面的边缘,这里的误差量级几乎与原始面型轮廓的起伏相当。因此,有必要对数据处理程序的精度做详细的分析。

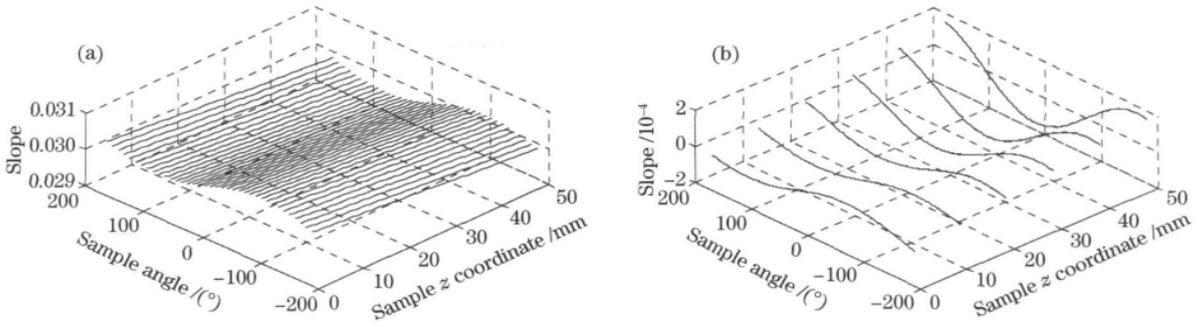


图 4 具有 $300 \mu\text{rad}$ 的倾斜和 $5 \mu\text{m}$ 的偏心时筒状抛物面镜轴向(a)和圆周(b)采样斜率

Fig. 4 (a) Axial and (b) circular sampling slopes of tube-shaped paraboloid mirror with $300 \mu\text{rad}$ tilt and $5 \mu\text{m}$ decenter

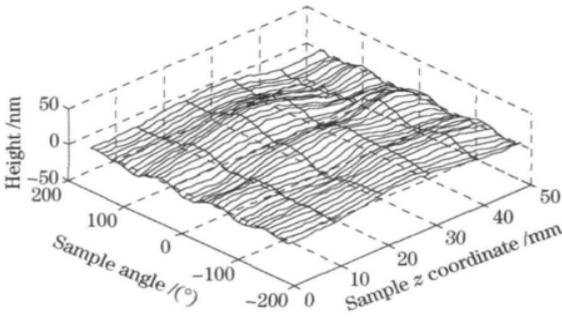


图 5 由数据处理程序得到的面型轮廓

Fig. 5 Restored surface profiles obtained from the code

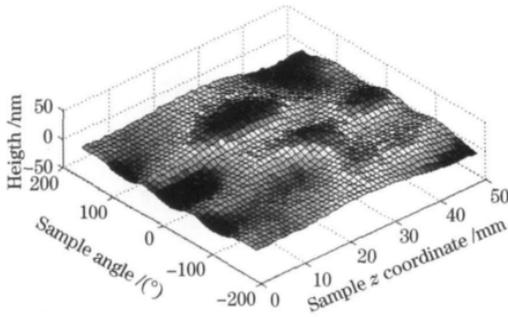


图 6 原始面型轮廓

Fig. 6 Original surface profiles

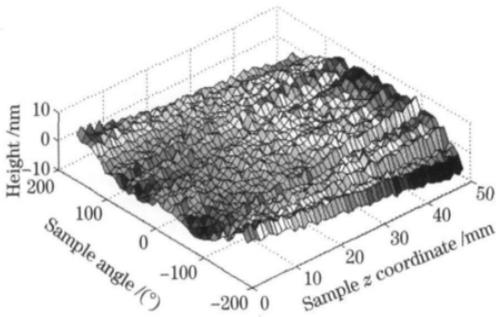


图 7 还原面型与原始面型的差值

Fig. 7 Difference between original and restored surface profiles

4.2 校正精度的分析

在数据处理程序中使用了(7)式和(8)式来表示系统的倾斜和偏心对采样点斜率的影响,而精确的表达式应该为(1)式和(2)式。因此要研究数据处理程序的误差,首先要分析近似公式所具有的精度。为此使用近似(3)~(8)式分别计算了没有加工误差的理想抛物面面型轮廓各采样点的斜率,并与准确值相比较,分析各个近似公式具有的精度。当 $R_p = 2.4315, z \in (0, 50) \text{ mm}, r \approx 80 \text{ mm}$,且系统具有 $d = 5 \mu\text{m}$ 的偏心和 $\varphi = 300 \mu\text{rad}$ 的倾斜时,使用近似公式得到的斜率值与严格计算值之间的最大误差如表 1 所示。

表 1 近似公式引起的表面采样斜率误差

Table 1 Slope errors of surface sampling caused by approximation formulas

| | (3),(4) | (5),(6) | (7),(8) |
|------------------------------|------------------------|-----------------------|-----------------------|
| Maximum axial slope error | 1.39×10^{-9} | 7.13×10^{-8} | 7.30×10^{-6} |
| Maximum circular slope error | 1.34×10^{-11} | 4.50×10^{-8} | 4.40×10^{-8} |

由表 1 可以看到(7)式和(8)式引起的最大轴向斜率误差为 7.30×10^{-6} ,最大圆周采样斜率误差为 4.40×10^{-8} 。当 MUT 的加工误差大于这些近似误差时,使用近似(7)式和(8)式能够得到比较正确的值。而当 MUT 的加工误差与使用的公式引起的误差相当或更小时,就必须采用更加精确的公式才能得到准确的结果。在处理圆周采样点斜率数据时,使用(8)式采用正弦拟合的方法去除单个周期的正弦信号。如果加工面型轮廓中含有相同频率的正弦成分,同样会被当成倾斜和偏心误差而去除,致使得到的面型轮廓不完全,造成测量结果不准确。图 8 和图 9 分别为数据处理时某条圆周采样数据处理的结果和原始的面型轮廓数据。可以看出,数据处理程序将加工误差中的正弦基频成分完全去除,导致

处理结果与原始数据相比存在较大偏差。因此,如果加工误差中含有比较多的正弦基频成分,就不能简单地使用正弦拟合去除倾斜和偏心误差,必须采用更高精度的拟合方法[如使用(4)式或(6)式采用非线性拟合的方法]才能得到准确的结果。

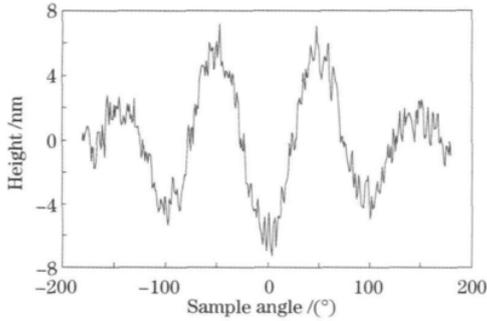


图 8 数据处理程序得到的某条圆周采样点高度轮廓
Fig. 8 Restored height profiles of circular sampling data by data processing code

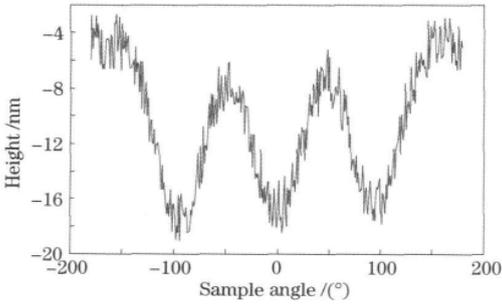


图 9 相应圆周采样点原始高度轮廓
Fig. 9 Original height profiles of that circular sampling data

5 结 论

对使用 CSLTP 测量筒状超光滑表面过程中误差源对测量结果的影响及校正方法做了简要的总结,并且针对 CSLTP 转台转轴与 MUT 光轴之间倾斜和偏心误差对测量结果的影响做了详细的分析,编写了用于 CSLTP 测量筒状超光滑表面的数据处理软件。使用数值实验对该软件进行了验证,分析了数据处理软件能够达到的精度,并提出了进一步提高数据处理精度的方法。数值实验结果表明,该软件能够有效去除系统倾斜和偏心误差,还原表面面型轮廓。在系统具有 $d=5\ \mu\text{m}$ 的离轴和 $\varphi=300\ \mu\text{rad}$ (约 $60''$) 的倾斜时,能够有效还原 $50\ \text{nm}$ 量级的面型轮廓,还原误差为 RMS 值 $2.8\ \text{nm}$, PV 值 $18.5\ \text{nm}$ 。

参 考 文 献

- James R. Lemen, Dexter Duncan, Christopher Edwards *et al.*. The solar X-ray imager for GOES [C]. *SPIE*, 2004, **5171**: 65~76
- Li Baoquan, Zhu Guangwu, Wang Shijin *et al.*. The solar X-EUV imaging telescope [J]. *Chinese J. Geophysics*, 2005, **48**(2): 235~242
李保权, 朱光武, 王世金等. 太阳 X-EUV 成像望远镜[J]. *地球物理学报*, 2005, **48**(2): 235~242
- Kuang Yuguang. Optical design of X-ray imaging telescope[J]. *Acta Optica Sinica*, 1981, **1**(3): 239~246
匡裕光. X射线成像望远镜光学设计[J]. *光学学报*, 1981, **1**(3): 239~246
- James E. Harvey, Andrey Krywonos, Patrick L. Thompson *et al.*. Grazing-incidence hyperboloid-hyperboloid designs for wide-field X-ray imaging applications[J]. *Appl. Opt.*, 2001, **40**(1): 136~144
- Timo T. Saha, William Zhang. Equal-curvature grazing-incidence X-ray telescopes [J]. *Appl. Opt.*, 2003, **42**(22): 4599~4605
- Li Shun, Gong Yan. Design of grazing incidence optical system [J]. *Acta Optica Sinica*, 2009, **29**(8): 2276~2281
李 顺, 巩 岩. 掠入射光学系统设计 [J]. *光学学报*, 2009, **29**(8): 2276~2281
- Patrick L. Thompson, James E. Harvey. Systems engineering analysis of aplanatic Wolter type I X-ray telescopes [J]. *Opt. Engng.*, 2000, **39**(6): 1677~1691
- Shinan Qian, Haizhang Li, Peter Z. Takacs. Penta-prism long trace profiler (PPLTP) for measurement of grazing incidence space optics [C]. *SPIE*, 1996, **2805**: 108~114
- Haizhang Li, Xiaodan Li, Manfred W. Grindel *et al.*. Measurement of X-ray telescope mirrors using a vertical scanning long trace profiler [J]. *Opt. Engng.*, 1996, **35**(2): 330~338
- Peter Z. Takacs, Shinan. Qian, J. Colbert. Design of a long-trace surface profiler [C]. *SPIE*, 1987, **749**: 59~64
- Yang Zhao, Zhi Li, Dacheng Li *et al.*. Principle of π -phase plate long trace profiler for synchrotron radiation optics [J]. *Opt. Commun.*, 2001, **200**(1-6): 23~26
- Li Zhi, Zhao Yang, Li Dacheng *et al.*. A diffractive long trace profiler for large aspherical optics [J]. *Acta Optica Sinica*, 2002, **22**(10): 1224~1228
李 直, 赵 洋, 李达成等. 衍射型长程大型非球面轮廓测量仪 [J]. *光学学报*, 2002, **22**(10): 1224~1228
- Shinan Qian, Peter Z. Takacs. Equal optical path beamsplitter for a pencil beam interferometer and shearing interferometer [J]. *Opt. Engng.*, 2003, **42**(4): 929~934
- Shinan Qian, Peter Z. Takacs. Design of multiple-function long trace profiler [J]. *Opt. Engng.*, 2007, **46**(4): 043602
- Haizhang Li, Peter Z. Takacs, Tom Oversluizen. Vertical scanning long trace profiler: a tool for metrology of X-ray mirrors [C]. *SPIE*, 1997, **3152**: 180~187
- Li Shun, Gong Yan, Zhang Wei *et al.*. Design of co-path scanning long trace profiler for measurement of X-ray space optical elements [C]. *SPIE*, 2010, **7544**: 754421
- Cui Tiangang, Wang Yonggang, Ma Dongmei *et al.*. Design of online measuring device for surface profile of Wolter type I mirror [J]. *Opt. & Precision Engng.*, 2010, **18**(8): 1801~1806
崔天刚, 王永刚, 马冬梅等. Wolter I型反射镜面形在线检测装置设计 [J]. *光学精密工程*, 2010, **18**(8): 1801~1806
- Cui Tiangang, Zhang Hongji, Ma Dongmei *et al.*. Improvements of surface profile measuring device for Wolter type-I mirror [J]. *Acta Optica Sinica*, 2011, **31**(4): 0412007
崔天刚, 张宏吉, 马冬梅等. Wolter I型反射镜面形检测装置的改进 [J]. *光学学报*, 2011, **31**(4): 0412007
- Shinan Qian, Giovanni Sosterio, Peter Z. Takacs. Precision

- calibration and systematic error reduction in the long trace profiler [J]. *Opt. Engng.*, 2000, **39**(1): 304~310
- 20 Peter Z. Takacs, Eugene L. Church, Cynthia J. Bresloff *et al.*. Improvements in the accuracy and the repeatability of long trace profiler measurements [J]. *Appl. Opt.*, 1999, **38** (25): 5468~5479
- 21 Peter Z. Takacs. Cylinder lens alignment in the LTP[C]. *SPIE*, 2005, **5921**: 592105
- 22 Valeriy V. Yashchuk, Steve C. Irick, Alastair A. MacDowell *et al.*. Air convection noise of pencil-beam interferometer for long trace profiler[C]. *SPIE*, 2006, **6317**: 63170D
- 23 Eric Marsh, Jeremiah Couey, Ryan Vallance. Nanometer-level comparison of three spindle error motion separation techniques [J]. *ASME J. Manuf. Sci. Engng.*, 2006, **128**(1): 180~187

栏目编辑：何卓铭