

# 抗干扰并行物方差动轴向的高精度三维形貌测量

朱星星<sup>1</sup>, 易定容<sup>1\*</sup>, 叶一青<sup>1</sup>, 孔令华<sup>2</sup>, 刘志群<sup>1</sup>

<sup>1</sup>华侨大学机电及自动化学院, 福建 厦门 361021;

<sup>2</sup>福建工程学院机械与汽车工程学院, 福建 福州 350118

**摘要** 分析并行物方差动轴向测量方法在样品表面反射率变化以及照明光不均匀情况下的两种乘法性误差, 并提出一种误差修正模型。构建表征乘法性扰动干扰的图像灰度矩阵的数学表达式, 通过对数差动消去乘法性扰动干扰误差, 以达到误差修正的目的。最后通过两组对比实验, 对误差修正模型进行实验验证。对高度为 4.739  $\mu\text{m}$ 、周期为 50  $\mu\text{m}$  的台阶样品进行形貌测量, 测量的相对误差由修正前的 2.91% 降低到修正后的 0.78%。在低倍数物镜和光照不均匀测量条件下, 对表面反射率不均匀的硬币进行快速三维形貌实验, 该方法测量结果与光学表面轮廓仪测得的结果相比, 相对偏差为 1.62%。两组实验结果表明, 本文方法能较好地修正乘法性误差的影响, 可提升适应性。本文方法可为智能制造在线检测提供适用性强、高效率、高精度的微观形貌检测。

**关键词** 测量; 三维形貌测量; 并行物方差动测量; 非均匀照明; 反射率变化; 误差修正

中图分类号 TH742

文献标志码 A

doi: 10.3788/AOS202040.0412001

## High-Precision Three-Dimensional Shape Measurement Based on Anti-Interference Parallel Object-Side Differential Axial

Zhu Xingxing<sup>1</sup>, Yi Dingrong<sup>1\*</sup>, Ye Yiqing<sup>1</sup>, Kong Linhua<sup>2</sup>, Liu Zhiqun<sup>1</sup>

<sup>1</sup> College of Mechanical Engineering and Automation, Huaqiao University, Xiamen, Fujian 361021, China;

<sup>2</sup> School of Mechanical & Automotive Engineering, Fujian University of Technology, Fuzhou, Fujian 350118, China

**Abstract** This study analyze two multiplicative errors of parallel object-side differential axial measurements method under the surface reflectance change and illumination non-uniformity condition, and an error correction model is proposed. The mathematical expression of the image gray matrix which can characterize multiplicative disturbance interference is constructed, and the multiplicative disturbance interference errors can be eliminated via logarithmic difference, which corrects the errors. The verification of the error correction model is then achieved by analyzing two comparative experiments. In the experiments, the morphometry of the step sample with 4.739  $\mu\text{m}$  height and 50  $\mu\text{m}$  period is measured. The relative error of the measurement is reduced from 2.91% before correction to 0.78% after correction. Under low-magnification objective lens and illumination inhomogeneity measurement condition, a fast three-dimensional morphology experiment is conducted on coins with uneven surface reflectance. The relative deviation of the measurement result is 1.62% compared with those obtained by optical surface profiler. Both the experimental analyses demonstrate that the proposed method can successfully correct the effects of multiplicative errors and improve the adaptability. The proposed method can provide microtopography detection for on-line detection of intelligent manufacturing with high applicability, efficiency, and precision.

**Key words** measurement; three-dimensional morphometry measurement; parallel object-side differential measurement; non-uniform illumination; reflectivity change; error correction

**OCIS codes** 120.6650; 180.1790; 100.6890; 110.4280

## 1 引 言

随着精密加工技术的进步, 对复杂物体三维微观形貌的在线测量<sup>[1]</sup>已成为精密加工行业的共同需

求。工业制造的环境比较复杂, 含有较多噪声干扰, 想要保证测量精度, 测量手段就需具有较高的抗干扰能力。物体表面微观形貌测量方法分为接触式和非接触式两种<sup>[2]</sup>。其中, 非接触式测量具有不破坏

收稿日期: 2019-08-29; 修回日期: 2019-09-30; 录用日期: 2019-10-21

基金项目: 国家自然科学基金(51775200)

\* E-mail: yidr@hqu.edu.cn

物体,不存在受力变形干扰等优点,可以测量一些不可接触的物体,因而成为微观形貌测量领域的研究热点。非接触式测量方法有干涉法<sup>[3-4]</sup>、结构光法<sup>[5-7]</sup>和共聚焦测量法等<sup>[8]</sup>,尤其是共聚焦测量法,国内学者对其进行了大量研究。

北京理工大学 Zhao 等<sup>[9]</sup>研究了双轴共聚焦的微观形貌测量方法。该方法在成像面反向等距离放置两个针孔,利用透过针孔的光强差值与样本表面离焦量成比例的特性进行轴向测量,其测量精度达纳米量级,相对误差为 0.5%。华侨大学刘志群等<sup>[10]</sup>研究了并行物方差动轴向的测量方法。该方法与激光扫描差动共焦测量方法(一次只能获取一个水平位置的差动信号)不同,可以在同一瞬间并行获取多个水平位置的差动信号,因此其具有更高的测量效率。该方法首先获取待测物面在焦前和焦后等距离位置的两幅图像,之后对两幅灰度图像相减获取差动图像,最后根据刻度好的测量曲线还原出物体表面的真实高度。并行物方差动轴向测量方法在测量台阶高度为 500 nm 的标准量块时,平均误差为 2.9 nm,相对误差为 0.58%。以上两种方法都属于共焦差动法。在共焦差动法中,样本表面高度与探测器探测到的光强信号(即像素灰度值)所构建的差动信号成正比,因此测量精度会受像素灰度值的影响,测量系统的抗干扰能力会影响测量方法的适用范围和适用环境。为此,抗干扰方法成为了纳米精度微观形貌检测领域的一个研究重点。

在抗干扰性方面,哈尔滨工业大学 Liu 等<sup>[11]</sup>提出了改进型差分共聚焦显微镜,根据干扰信号对形貌检测的影响,将干扰信号分为乘法性干扰和加法性干扰。针对乘法性干扰,提出使用两探测器所得信号的差值除以和值的误差修正方法,该方法能有效地抑制乘法性干扰。哈尔滨工业大学赵晨光<sup>[12]</sup>设计了同步移相干涉共焦显微成像技术。该技术能利用差动共焦的正负对称特点判断相位主周期位置,然后在该主周期内利用相位的关系算出离焦量,还原了三维形貌并且能消除样品表面反射率变化的影响。

对基于激光扫描的差动共焦测量方法的研究起步较早,因此其误差修正方法已经比较成熟。关于新近才提出的并行物方差动轴向的测量方法,还未见其误差分析及误差补偿方法的报道。本文在并行物方差动轴向测量方法的基础上,提出一种修正还原结果中存在非均匀照明、反射率变化等乘性干扰

误差的方法,同时使用低倍物镜刻度测量曲线,扩展了物方差动轴向测量方法的测量范围,最后通过理论分析和实验,验证本文方法的正确性和可行性。

## 2 并行物方差动轴向测量方法分析

### 2.1 测量原理

并行物方差动轴向测量(PDCM)方法的基本原理与激光扫描差动共焦原理<sup>[13]</sup>相似,基于差动信号,利用差动曲线与物体表面离焦量成比例关系获取三维表面微观形貌。文献<sup>[10]</sup>对该方法进行了详细介绍。简单来说,该方法使用与测量物镜物方焦面及探测器成像面共轭放置的数字微镜器件(DMD),用数字针孔开关来取代传统激光扫描共聚焦的照明针孔,并基于数字微镜器件与探测器共轭及虚拟针孔概念实现针孔探测,从而实现多点同时并行测量,达到提高测量效率的目的。该方法首先获取待测物体在焦前和焦后等距离位置的两幅图像,之后对两幅灰度图像相减获取差动图像,最后根据刻度好的测量曲线还原出物体表面的真实高度,原理图如图 1 所示。

### 2.2 测量曲线的刻度

并行物方差动轴向测量方法对每一个不同放大倍率或者不同数字孔径的测量物镜,都要刻好测量曲线。刻度曲线获取方法在文献<sup>[10]</sup>中有详细介绍。根据图 1 所示原理图或者图 2 所示实物图,该系统使用 10×、数值孔径(NA)为 0.25 的物镜(Motic, China),以平面反射镜为样本,使用滨松 sCMOS Flash 摄像头作为探测器。其操作过程描述如下:第 1 步,取平面反射镜放置在载物台上聚焦,获取参考零平面;第 2 步,将载物台移动到焦前  $u_F$  为 10  $\mu\text{m}$  的位置,控制 DMD 单点照明模式,驱动压电陶瓷电机(PCM, PI, P-725.4CD)进行步长为 0.5  $\mu\text{m}$  的轴向扫描,从而获取 200 张对应不同轴向位置的单点图像,再读出图像中对应像素的灰度值,生成对应高度与像素灰度值的曲线,即焦前轴向响应曲线  $I_F$ ;第 3 步,将载物台移到焦后  $u_A$  为 10  $\mu\text{m}$  处,与第 2 步作同样的操作,获得焦后轴向响应曲线  $I_A$ ;第 4 步,将对应生成的高度与灰度值的曲线进行相减处理,获取差动信号曲线  $I_D$ 。该差动曲线  $I_D$  使得刻度样品与物镜的距离(即表面高度  $u$ )和在该位置的灰度差值  $I_D$  联系起来。刻度实验所获得的焦前灰度相应曲线  $I_F$ 、后轴向相应曲线  $I_A$ 、两者所构建的差动曲线  $I_D$  如图 3 所示。

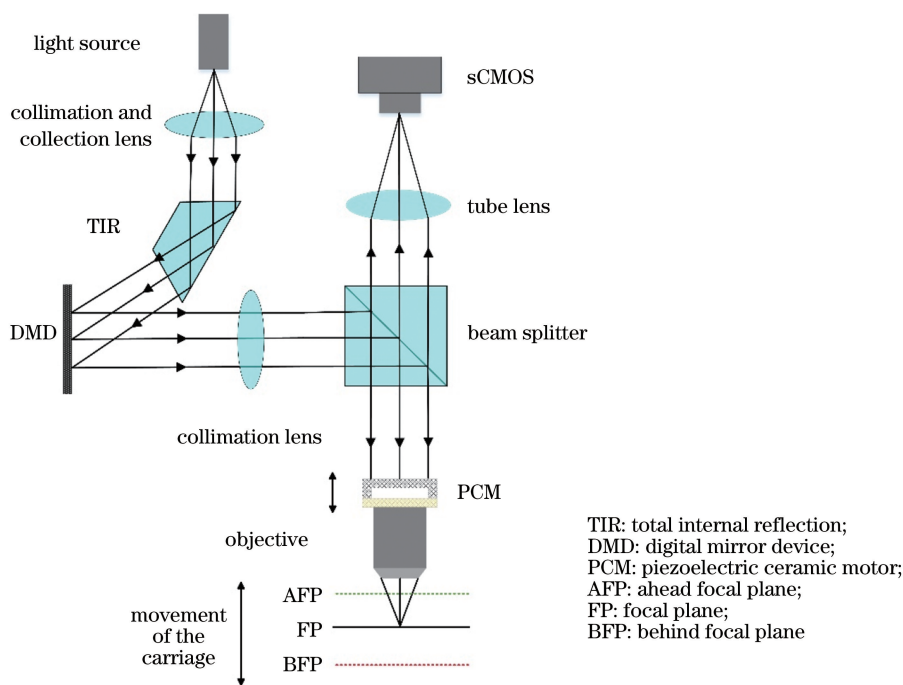


图 1 并行物方差动轴向测量方法的原理示意图

Fig. 1 Principle illustration of parallel object-side differential axial measurement method

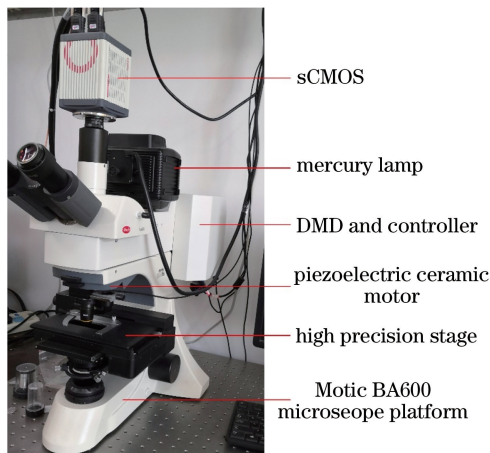


图 2 并行物方差动轴向测量方法的实验平台

Fig. 2 Experimental setup of the parallel object-side differential axial measurement method

由图 3 可以看出,本文方法由于使用了低倍物镜,差动响应曲线  $I_D$  的线性区间接接近  $20 \mu\text{m}$ ,比文献[9]中在使用  $20\times$ 、NA 为 0.75 物镜测量条件下的线性测量范围  $10 \mu\text{m}$  增加 1 倍,说明并行物方差动轴向测量方法的测量范围与所使用的测量物镜相关,越小倍数物镜测量范围越大。截取图 3 中刻度曲线在  $[-7 \mu\text{m}, 7 \mu\text{m}]$  范围线性度高的区间,并将其归一化拟合为一次函数,其表达式为

$$I_D(u) = -0.1364u + 0.05315, \quad (1)$$

式中: $u$  为物体表面相对于参考面的高度,单位为  $\mu\text{m}$ 。

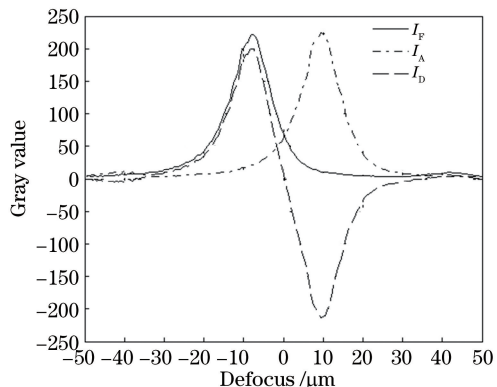


图 3 轴向测量刻度曲线图

Fig. 3 Calibration curve of axial measurement

### 2.3 并行物方差动轴向测量方法的误差分析

采用图 3 所示的刻度曲线,对一枚旧硬币表面沟槽进行形貌还原,还原所得 3D 形貌如图 4 所示。图 4(a)为在焦前  $10 \mu\text{m}$  位置处拍摄的硬币图像,该硬币表面粗糙,存在许多划痕。同时从图 4(a)中还可以看出,物体在离开  $10\times$ 、NA 为 0.25 测量物镜焦面  $10 \mu\text{m}$  ( $u_F = 10 \mu\text{m}$ ) 时,实验显微成像系统明显存在光照不均匀的现象,在实线圈范围内光照强度明显低于其他位置。图 4(b)为采用并行物方差动轴向测量方法对硬币表面形貌还原的结果,可以看出,硬币台阶高度存在明显变化,在实线圈区域内,台阶高度明显低于其他位置台阶高度,且虚线框标记出硬币沟槽中存在局部隆起。通过多次实验对

比分析,发现并行物方差动轴向测量方法所得结果会受光照不均匀的影响,该影响在高倍数物镜或者视场中心光照均匀情况下不明显,在低倍数物镜大视场情况下比较严重。对比图 4(a)及图4(b)可以看出,相比于其他区域,光照不均匀会导致实线圈内图像相对变暗,而相对变暗会导致在同一高度的样品的还原高度降低。针对虚线框标记中硬币沟槽中

的局部隆起,通过触针测量以及别的观察手段验证,该局部隆起与实物有偏差,这是测量方法误差所致。图 4(a)中沟槽中央(虚线椭圆内部)比沟槽边缘(虚线椭圆两侧)反射率更高。通过对比图 4(a)及图 4(b)发现,表面反射率变化也会导致测量高度不同,反射率高的位置,轴向响应强度较强,图像像素灰度值较大,测量所得的表面高度偏高。

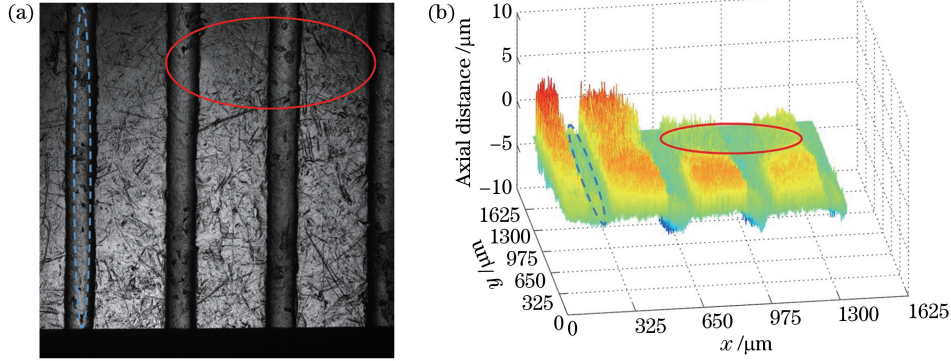


图 4 误差干扰影响硬币表面形貌。(a) 非均匀照明;(b)非均匀照明对硬币形貌还原的影响  
Fig. 4 Coin surface morphology is affected by disturbance error. (a) Uneven illumination;  
(b) effect of coin surface reduction by uneven illumination

### 3 误差修正方法

针对并行物方差动轴向测量方法存在的误差问题,构建如下误差修正数学模型。

在非均匀照明  $n_g$ 、待测样品表面可变反射率  $n_f$ 、相机热噪声参量  $n_a$  的影响下,焦前、焦后获取灰度图像矩阵  $M_F$  和  $M_A$  与这些参量的关系为

$$M_F = n_{g1} n_{f1} (M_1 + n_a), \quad (2)$$

$$M_A = n_{g2} n_{f2} (M_2 + n_a), \quad (3)$$

式中: $M_1$ 、 $M_2$  为不存在干扰影响下的理想灰度矩阵,下角标 1 和 2 分别代表焦前和焦后。

将焦前、焦后获取的灰度图像矩阵  $M_F$  和  $M_A$  取对数作差,可以表示为

$$M = \lg(M_F) - \lg(M_A) = \lg\left(\frac{M_1 + n_a}{M_2 + n_a}\right) + \lg\left(\frac{n_{g1}}{n_{g2}}\right) + \lg\left(\frac{n_{f1}}{n_{f2}}\right). \quad (4)$$

#### 3.1 修正非均匀照明带来的误差

采用表面平整、反射率恒定的样品表面,如平面反射镜,作为参考。将平面反射镜置于载物台上聚焦,取与样品在焦前、焦后相同位置的图像,构成灰度矩阵  $M_{JF}$  和  $M_{JA}$ ,可以表示为

$$M_{JF} = n_{g1} M_3, \quad (5)$$

$$M_{JA} = n_{g2} M_3, \quad (6)$$

式中: $M_3$  为不存在干扰影响下平面反射镜的理想

灰度矩阵。由于  $M_{JF}$  和  $M_{JA}$  关于焦面对称,故  $M_{JF}$  和  $M_{JA}$  的理想灰度矩阵是相同的。

同样将平面镜与样品在焦前、焦后相同位置的灰度矩阵  $M_{JF}$  和  $M_{JA}$  取对数作差,可得

$$M_J = \lg(M_{JF}) - \lg(M_{JA}) = \lg\left(\frac{n_{g1}}{n_{g2}}\right). \quad (7)$$

将待测样品焦前、焦后灰度图像矩阵的对数差  $M$  减去平面反射镜在相同位置处图像矩阵的对数差  $M_J$ ,得

$$M' = M - M_J = \lg\left(\frac{M_1 + n_a}{M_2 + n_a}\right) + \lg\left(\frac{n_{f1}}{n_{f2}}\right). \quad (8)$$

由于  $n_a \ll M_1, M_2$  可以直接舍去,故

$$M' \approx \lg\left(\frac{M_1}{M_2}\right) + \lg\left(\frac{n_{f1}}{n_{f2}}\right). \quad (9)$$

(9)式所构建的差动信号  $M'$  不再包含光照参数  $n_g$ ,说明这种差动信号的构建方式能够消除非均匀光照  $n_g$  的影响。

#### 3.2 修正表面反射率不均带来的误差

台阶沟槽部分受反射率不同的影响,在其底部形成向上异常凸起的形状。针对这一现象,可构造一个能反映反射率不同影响因子的矩阵,根据(9)式所得结果,只需将能反映反射率不同影响因子的矩阵取对数,再对其作差,就能达到校正误差干扰的目的。反射率矩阵可以预先实测获得,对于只有有限个不同高度台阶表面的样品,也可以分别获取每个等高台阶

表面清晰聚焦的图像,具体方法如下。

对样品台阶上表面聚焦获取灰度矩阵  $M_S$ ,该图像灰度矩阵  $M_S$  的灰度值变化能反映沟槽上表面反射率  $n_f$  的变化。类似地,对台阶沟槽底部聚焦可获得样品图像灰度矩阵  $M_X$ ,该图像  $M_X$  灰度变化能反映台阶下表面区域反射率的变化。

$$M_S = n_{f3} M_4, \quad (10)$$

$$M_X = n_{f4} M_5, \quad (11)$$

式中: $M_4$ 、 $M_5$  为不存在反射率扰动干扰的影响下,待测样品在沟槽表面清晰聚焦时的理想灰度值矩阵。用聚焦于台阶上表面图像的灰度矩阵  $M_S$  除以底部聚焦灰度矩阵  $M_X$ , 并取对数来近似表示反射率不同的影响。

$$M_f = \lg\left(\frac{M_S}{M_X}\right) \approx \lg\left(\frac{n_{f1}}{n_{f2}}\right). \quad (12)$$

将(12)式代入(9)式,获得消除光照矩阵  $n_g$  及反射率矩阵  $n_f$  的新的差动信号构建方程,即

$$M'' = M' - M_f = \lg(M_1) - \lg(M_2). \quad (13)$$

从(13)式可以看出,该修正方法可以抑制加性噪声干扰  $n_a$  和乘性噪声干扰  $n_g$ 、 $n_f$ 。根据(4)、(9)、(13)式可以得到消除干扰的结果  $M''$  与实验所获取的图像  $M_F$ 、 $M_A$ 、 $M_{JF}$ 、 $M_{JA}$ 、 $M_S$  和  $M_X$  的关系为

$$M'' = \lg\left(\frac{M_F}{M_A}\right) - \lg\left(\frac{M_{JF}}{M_{JA}}\right) - \lg\left(\frac{M_S}{M_X}\right). \quad (14)$$

最后只需获取焦前、焦后灰度图像  $M_F$ 、 $M_A$ ,平面反射镜灰度图像  $M_{JF}$ 、 $M_{JA}$  和沟槽上、下台阶表面图像  $M_S$ 、 $M_X$ ,然后再根据对数差动的刻度曲线就能完成三维形貌还原。

将获得的焦前  $I_F$ 、焦后  $I_A$  曲线取对数作差,得对数差动曲线  $I_L$ ,如图 5 所示。由于在刻度曲线时,所取的单点为视场中心的点,该情况可以看作是

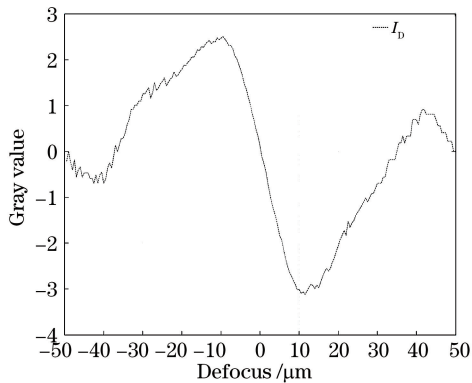


图 5 轴向测量的对数差动共焦显微刻度曲线图

Fig. 5 Logarithmic differential confocal microscopy calibration curve of axial measurement

光照均匀、不存在反射率影响的情况。截取图 5 中刻度曲线在  $[-7 \mu\text{m}, 7 \mu\text{m}]$  线性度高的区间,并将其拟合为一次函数,其表达式为

$$I_L(u) = -0.29284u + 0.01251. \quad (15)$$

## 4 测量实验与结果

### 4.1 标准样品误差修正前后的对比实验

为了验证根据(14)式构建差动信号的并行物方差动轴向测量方法的测量精度,以 APPNANO 的 STEP-Si-5-1 为样本,测量区域选择 STEP-Si-5-1 中高度为  $4.739 \mu\text{m}$ 、周期为  $50 \mu\text{m}$  的台阶区域,测量位置如图 6 虚线所示。

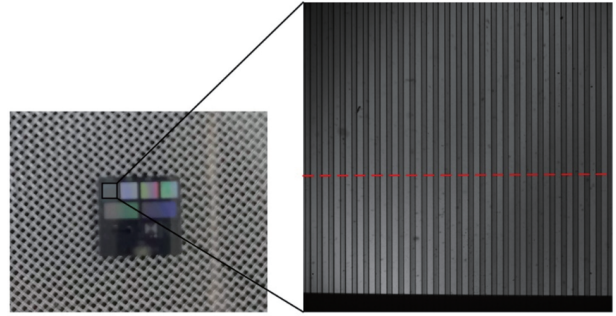


图 6 实验样本 STEP-Si-5-1 及测量位置

Fig. 6 Experimental sample STEP-Si-5-1 and measurement position

将标准样品 STEP-Si-5-1 放置在载物台上,完成聚焦后,移动载物台,分别在焦前  $10 \mu\text{m}$ 、焦后  $10 \mu\text{m}$  处各取一张图像,然后根据刻度好的测量曲线对标准样品进行 3D 形貌重建。由于获取的图像大小是  $2048 \text{ pixel} \times 2048 \text{ pixel}$ ,每个像素的物理尺寸是  $6.5 \mu\text{m} \times 6.5 \mu\text{m}$ ,且采用的是  $10\times$ 、NA 为 0.25 的物镜,则图像获取样本区域的大小为  $1331.2 \mu\text{m} \times 1331.2 \mu\text{m}$ 。台阶样品的周期为  $50 \mu\text{m}$ ,在全视场图像范围内大约存在 26 个台阶。取图 6 中虚线位置靠右的 13 个台阶,其轴向高度的测量结果数值如表 1 所示,修正前被测台阶面的平均高度值为  $4.877 \mu\text{m}$ ,相对误差为 2.91%,修正后被测台阶面的平均高度值为  $4.776 \mu\text{m}$ ,相对误差为 0.78%。

### 4.2 非标准样品误差修正前后的对比实验

为验证修正方法的适用性,以一角硬币为样本,并将其放置在载物台上,实物及测量位置(由方框标出)如图 7 所示。聚焦完成后,分别在焦前、焦后  $10 \mu\text{m}$  处和沟槽上、下台阶表面各取一张图像,再以平面反射镜为样本,在硬币焦前、焦后相同位置各取一张图像,如图 8 所示。

表 1 STEP-Si-5-1 台阶样品的测量结果

Table 1 Measurement results of step sample in STEP-Si-5-1

Step number	Pre-corrected measurement / $\mu\text{m}$	Corrected measurement / $\mu\text{m}$	Step number	Pre-corrected measurement / $\mu\text{m}$	Corrected measurement / $\mu\text{m}$
1	5.552	4.825	8	4.824	4.694
2	5.508	4.686	9	4.552	4.683
3	5.425	4.853	10	4.426	4.693
4	5.313	4.684	11	4.115	4.947
5	5.404	4.852	12	4.167	4.742
6	4.983	4.872	13	4.225	4.904
7	4.904	4.653			



图 7 硬币实物及测量位置示意图

Fig. 7 Photo of a dime as the second experimental sample

先根据(8)式将硬币焦前、焦后  $10\ \mu\text{m}$  处的两幅图像  $M_F$ 、 $M_A$  取对数作差,将平面反射镜在相同位置的光斑图像  $M_{JF}$ 、 $M_{JA}$  取对数作差,再将前后两个差值取差后可修正非均匀光照的影响;然后使用(12)式,用修正了非均匀光照的结果减去上、下表面图像  $M_S$ 、 $M_X$  之比的对数,可以修正反射率的影响,所得结果如图 9 所示。相比于图 4(b)直接差动还原的结果,该误差修正方法消除了非均匀光照造成的上表面部分位置突起,使上表面高度基本一致,沟槽也较为明显。

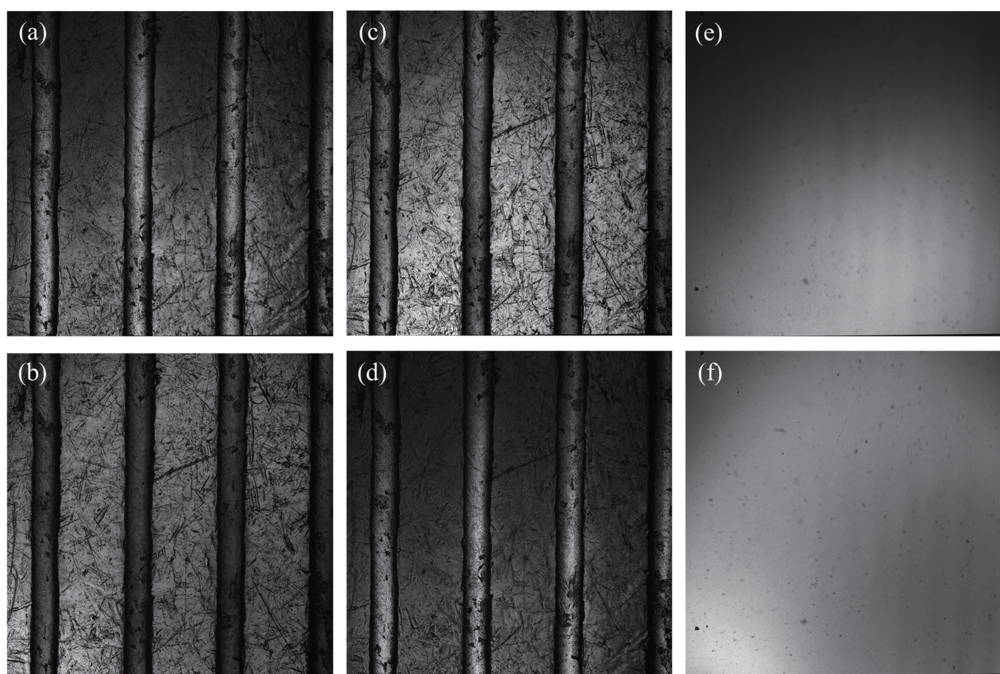


图 8 本文方法对硬币表面形貌的测量图。(a)  $M_F$ ; (b)  $M_A$ ; (c)  $M_S$ ; (d)  $M_X$ ; (e)  $M_{JF}$ ; (f)  $M_{JA}$

Fig. 8 Measurement images of coin surface morphology by the proposed method. (a)  $M_F$ ; (b)  $M_A$ ; (c)  $M_S$ ; (d)  $M_X$ ; (e)  $M_{JF}$ ; (f)  $M_{JA}$

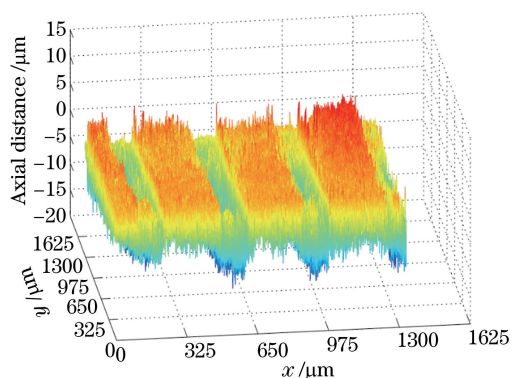


图 9 误差修正后硬币表面形貌的还原结果

Fig. 9 Reduction result of coin surface morphology after error compensation

取  $y$  方向  $669.5 \mu\text{m}$  修正前、后的截面,如图 10 所示。在修正前的沟槽截面中,箭头所指沟槽存在异常突起,而修正后的沟槽截面突起消失且沟槽底部的高度基本一致。通过对比可以看出,沟槽底部的突起能很好地被修正,4 个台阶的平均高度为  $11.938 \mu\text{m}$ 。

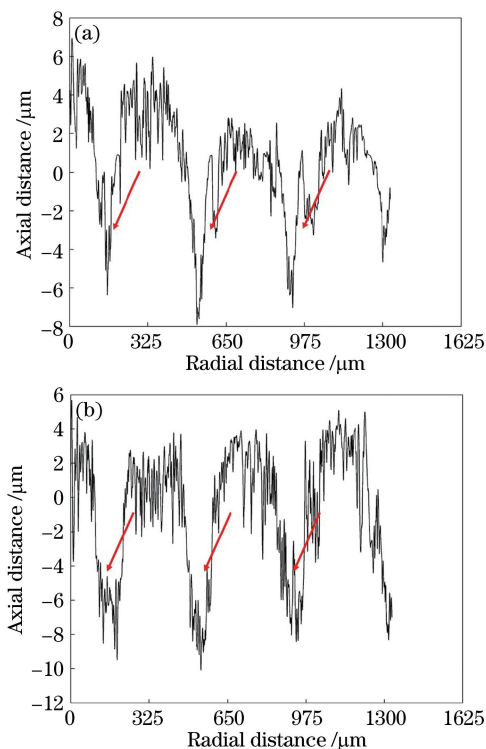


图 10 硬币表面形貌截面的还原结果。(a)误差修正前;  
(b)误差修正后

Fig. 10 Reduction of coin surface morphology. (a) Before error compensation; (b) after error compensation

将硬币的相同部位置于基于白光干涉原理的光学表面轮廓仪(Zygo NewView 7300)上,测量结果如图 11 所示,高度值为  $12.134 \mu\text{m}$ 。该方法所测结

果与白光干涉仪所测结果的相对误差为  $1.62\%$ 。

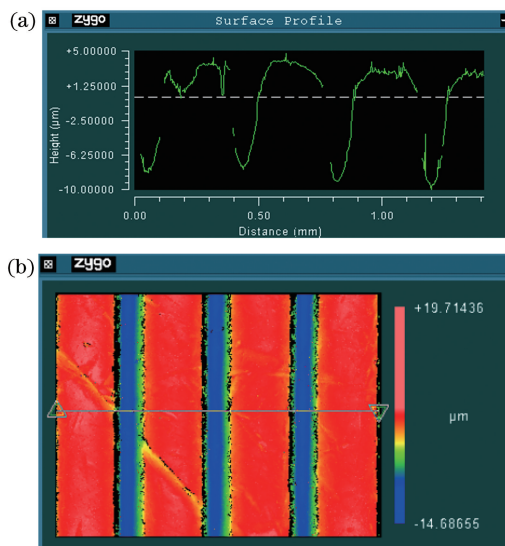


图 11 光学表面轮廓仪高度测量曲线。(a)样品高度二维截面图;(b)样品三维高度形貌俯视图

Fig. 11 Height measurement curve of optical surface profilometer. (a) Two-dimensional section view of sample height; (b) top view of three-dimensional height profile of the sample

## 5 结 论

在并行物方差动轴向测量方法的高精度、高测量速度的基础上,使用低倍物镜,可扩展测量范围。针对低倍物镜能扩大视场范围,非均匀光照及样品表面反射率不均等问题,提出一种修正方法来修正非均匀光照和反射率变化等因素对还原精度的影响。对高度为  $4.739 \mu\text{m}$ 、周期为  $50 \mu\text{m}$  的台阶标准样品进行测量,修正前被测台阶面的平均高度值为  $4.877 \mu\text{m}$ ,相对误差为  $2.91\%$ ,修正后被测台阶面的平均高度值为  $4.776 \mu\text{m}$ ,相对误差为  $0.78\%$ 。再以硬币为样品,对其表面三维形貌进行还原,还原结果显示,本文方法能较好地抑制非均匀光照和反射率变化对还原结果的影响。所获得的硬币的台阶平均高度值为  $11.938 \mu\text{m}$ ,与其同样位置处在光学表面轮廓仪上获得的高度测量结果  $12.134 \mu\text{m}$  相比,相对偏差为  $1.62\%$ 。

抗干扰并行物方差动轴向测量方法在测量过程中需要 6 张图像,相比修正前的方法需要多 4 幅图像。然而,采用平面镜获取的标志照明均匀程度的图像可以提前获取,标志样品表面反射率不均匀性的图像也可以在测量前获取,且可通过图像模式匹配及图像校准方法把反射率的数据应用在实测样本上。在智能制造工业产品在线检测过程中,本文方

法在测量过程中仅需获取待测样本焦前、焦后 2 张图像,所以具有很高的测量速度,可适用于普通显微镜。本方法可为智能制造工业产品在线检测提供高效率、高精度的在线测量。

## 参 考 文 献

- [1] Zhu Z D. 3D-measurement of micro structure of surface and the application in manufacture [J]. *Modular Machine Tool & Automatic Manufacturing Technique*, 2010(6): 61-65.  
朱正德. 表面微观结构的三维测量及其在制造业中的应用[J]. *组合机床与自动化加工技术*, 2010(6): 61-65.
- [2] Ding S W, Zhang X H, Yu Q F, et al. Overview of non-contact 3D reconstruction measurement methods [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2017, 54(7): 070003.  
丁少闻, 张小虎, 于起峰, 等. 非接触式三维重建测量方法综述[J]. *激光与光电子学进展*, 2017, 54(7): 070003.
- [3] Wu Z, Li Y, Xiangli B, et al. Full-field heterodyne long-cavity interferometry [J]. *Acta Optica Sinica*, 2019, 39(9): 0912003.  
伍洲, 李杨, 相里斌, 等. 全视场外差长腔干涉测量技术[J]. *光学学报*, 2019, 39(9): 0912003.
- [4] Liu G M, Yu X C, Ren H X, et al. Three-dimensional shape measurement method based on laser shearing interference [J]. *Laser & Infrared*, 2018, 48(4): 464-468.  
刘光明, 余学才, 任华西, 等. 激光剪切干涉三维形貌测量[J]. *激光与红外*, 2018, 48(4): 464-468.
- [5] Mao A, Sun J F, Lu Z Y, et al. Dynamic background light interference suppression technology based on invisible structured light three-dimensional imaging [J]. *Acta Optica Sinica*, 2019, 39(7): 0711004.  
毛奥, 孙建锋, 卢智勇, 等. 隐形结构光三维成像动态背景光干扰抑制技术[J]. *光学学报*, 2019, 39(7): 0711004.
- [6] Dan D, Lei M, Yao B L, et al. DMD-based LED-illumination super-resolution and optical sectioning microscopy[J]. *Scientific Reports*, 2013, 3: 1116.
- [7] Liu Z Q, Yi D R, Kong L H, et al. Research on the structured light illumination parallel object-side differential rapid measurement method [J]. *Chinese Journal of Scientific Instrument*, 2017, 38(12): 2987-2993.  
刘志群, 易定容, 孔令华, 等. 结构光照明并行物方差动快速测量方法研究[J]. *仪器仪表学报*, 2017, 38(12): 2987-2993.
- [8] He B F, Ding S Y, Wei C E, et al. Review of measurement methods for areal surface roughness [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2019, 27(1): 78-93.  
何宝凤, 丁思源, 魏翠娥, 等. 三维表面粗糙度测量方法综述[J]. *光学精密工程*, 2019, 27(1): 78-93.
- [9] Zhao W Q, Jiang Q, Qiu L R, et al. Dual-axes differential confocal microscopy with high axial resolution and long working distance [J]. *Optics Communications*, 2011, 284(1): 15-19.
- [10] Liu Z Q, Yi D R, Kong L H, et al. Object-side based differential axial measurement based on parallel confocal microscopy [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2017, 25(6): 1449-1457.  
刘志群, 易定容, 孔令华, 等. 基于并行共聚焦显微系统的物方差动轴向测量[J]. *光学精密工程*, 2017, 25(6): 1449-1457.
- [11] Liu J, Tan J B, Bin H, et al. Improved differential confocal microscopy with ultrahigh signal-to-noise ratio and reflectance disturbance resistibility [J]. *Applied Optics*, 2009, 48(32): 6195-6201.
- [12] Zhao C G. Research on confocal simultaneous phase-shifting interference imaging microscopy[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2011: 45-63.  
赵晨光. 同步移相干涉共焦显微成像技术研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2011: 45-63.
- [13] Tan J, Wang F. Theoretical analysis and property study of optical focus detection based on differential confocal microscopy [J]. *Measurement Science and Technology*, 2002, 13(8): 1289-1293.