

文章编号 1004-924X(2024)17-2625-10

宽频段振动干扰不敏感的白光干涉测量

刘 乾*, 密 乐, 黄小津

(中国工程物理研究院 机械制造工艺研究所, 四川 绵阳 621999)

摘要:传统白光干涉测量方法对振动干扰非常敏感,振动干扰会引起扫描步长误差,进而降低白光干涉的测量精度。为抑制振动干扰的影响,提出一种三点反正弦的白光干涉测量算法。三点反正弦法将干涉图序列中每相邻三幅分为一组,利用扫描过程中干涉条纹连续移动的特点,从每组干涉图的有效条纹区域计算出相移偏差,进而得到每幅干涉图的实际扫描步长。基于计算的实际扫描步长,构建了非等步长的调制度与相位最小二乘计算方法,并重构表面高度。由于计算步长仅利用三幅干涉图,三点反正弦法频段响应宽,能够探测快变、大幅的扫描步长误差。仿真和实验证实,在振动干扰下三点反正弦法能获得高达 0.5% 的测量准确性(台阶高度为 10 μm),并适合多种类构型表面形貌的测量。理论分析和实验表明,三点反正弦法能够抑制多种形式扫描步长误差的影响,适用于宽频段振动干扰下的白光干涉测量。

关键词:表面形貌测量;白光干涉测量;粗糙度;振动

中图分类号:TH742 **文献标识码:**A **doi:**10.37188/OPE.20243217.2625

White-light interferometry immune to vibration disturbance over wide frequency region

LIU Qian*, MI Le, HUANG Xiaojin

(Institute of Machinery Manufacturing Technology, China Academy of Engineering Physics,
Mianyang 621999, China)

* Corresponding author, E-mail: liuqianblue@126.com

Abstract: The traditional white-light interferometer is highly sensitive to vibrations, causing scanning step errors and reducing measurement accuracy. To address this, a three-point arcsine (3P-Asin) algorithm is proposed. This method divides WLI interferograms into groups of three adjacent frames, with overlap between groups. By analyzing fringe movement, the phase shift deviation and exact scanning step are determined. Using this step, a least-squares method calculates phase and modulation for non-equal step scanning to reconstruct surface height. The 3P-Asin algorithm detects fast and large scanning step errors using only three interferograms, with no approximation. Simulations and experiments show it achieves an accuracy of 0.5% for a 10 μm step height and adapts to various surfaces in mechanical machining. Both theoretical and experimental results demonstrate that the 3P-Asin algorithm effectively attenuates scanning step er-

收稿日期:2024-05-19;修订日期:2024-06-25.

基金项目:国防科工局技术基础科研项目(No. JSZL2022212B001)

rors across a wide frequency range, making it suitable for WLI in vibrating environments.

Key words: topography measurement; white-light interferometry; roughness; vibration

1 引言

表面形貌关系到界面的腐蚀、摩擦、润滑、密封和光传播等性能,是精密检测重点关注的项目。白光干涉(又称“相干扫描干涉”)是高精度表面形貌测量的重要手段,在微纳制造、光学加工和微电子等领域的应用非常广泛^[1-3]。白光干涉通过短相干光源照明确定干涉级次,避免了单波长干涉的 2π 歧义,可用于不连续、高陡度、粗糙表面的形貌测量。白光干涉测量的核心过程是以特定已知步长对表面进行垂直扫描,对采集的白光干涉信号进行相干包络计算进而确定零级条纹的位置。在扫描过程中,振动干扰使扫描步长偏离预设值,传统算法无法精确处理受到干扰的信号,进而导致测量误差甚至测量失败。振动干扰主要影响两个环节:(1)导致调制度和相位计算误差,影响相干包络峰值位置提取及相位复原;(2)使步长偏离预设值,在表面高度重构时直接产生误差。振动干扰导致的扫描步长误差是随机的、宽频段的,无法预先探测并补偿。因此,白光干涉仪一般应用于隔振良好的实验室环境,难以应用于加工现场或在机测量等存在振动干扰的场合,应用范围受到很大限制。

研究人员采用主动式和被动式方法降低振动干扰对白光干涉测量精度的影响。主动式方法在白光干涉仪上附加干涉测距光路,检测扫描步长误差并进行补偿。这类方法使用干涉测距光路直接探测扫描器的位置变化^[4-6],或者构造一个与白光干涉光路共用的探测干涉光路,并在后端将白光与探测光分离^[7-8]。主动式方法的光路与控制系统复杂,对器件的响应速度和控制性能要求较高。被动式方法是基于干涉信号相位与扫描步长的关系,利用算法反求实际的扫描步长,并对干涉信号进行修正。Schmit等在假定相邻干涉图的扫描步长相等但未知(即扫描局部线

性)的前提下,采用Hariharan算法从干涉图中计算表面相位,再对相邻表面相位求差计算扫描步长^[9],该方法计算一个步长共需要6幅干涉条纹图(六点法)。基于同样思路,陈磊等采用Groot算法计算相位以抑制短相干包络的影响,该方法计算一个步长共需要8幅干涉图(八点法)^[10]。受限于所采用的相位算法,上述两种方法只能处理 $\pi/2$ 相移(对应 $\lambda/8$)小幅偏差的情况,适用于低频、小幅度干扰的情况。Liu, Zhang先后提出了迭代计算求解白光干涉扫描步长的方法^[11-12],该类方法无需扫描局部线性的假设,能够适应快速变化扰动,但存在计算速度慢、错误收敛的问题。

为使白光干涉仪在更宽频段范围内抵抗振动干扰的影响,需减少被动式算法所采用的干涉图数量,本文提出一种三点反正弦法(Three-point Arcsine Method, 3P-Asin),利用相邻3幅干涉图计算扫描步长误差,然后通过仿真和实验证实了该方法的精度和适用性,并分析测试了其抗振能力。

2 原理

在白光干涉中,干涉条纹一个周期的变化对应于半个波长的纵向扫描步长。基于此关系,三点反正弦法计算扫描步长的基本思想是,测量过程中干涉条纹在表面连续移动,根据条纹移动算出相移量,然后从相移量计算实际扫描步长。白光干涉信号的光强模型为:

$$I_j(x) = A(x) + \exp\left\{-\frac{[z_j - h(x)]^2}{L^2}\right\} \times B(x) \cos\{2k[z_j - h(x)] + \varphi_0\}, \quad (1)$$

式中: x 是像素空间序号, j 是纵向扫描点序号, A 是背景强度, B 是调制度幅度, h 是表面高度, z_j 是纵向扫描高度, L 是光源的相干长度, φ_0 是反射引入的相位偏置,波数 $k=2\pi/\lambda$, λ 是等效中心波长。算法流程如图1所示。

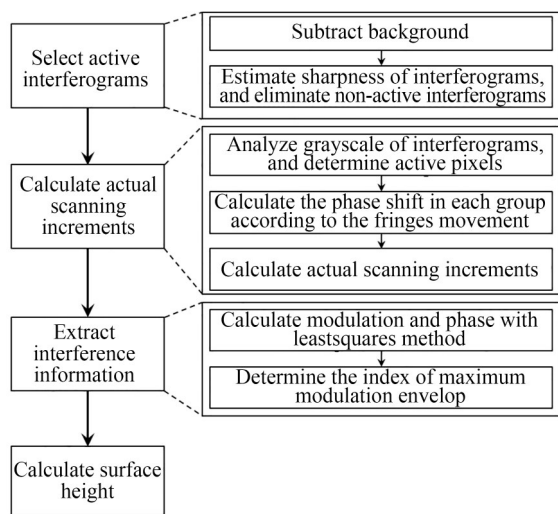


图 1 三点反正弦法流程

Fig. 1 Flowchart of three-point arcsine algorithm

2.1 有效干涉图筛选

白光干涉测量的扫描过程中,采集的干涉图序列两端存在一些不含有条纹的干涉图,需要剔除。一种简单的方法是:采用图像清晰度评价算子^[13]分析每一帧干涉图在空间上的灰度变化,如果总体清晰度小于阈值,则说明此幅干涉图的干涉条纹不明显,属于无效干涉图。

首先,为消除背景强度的干扰,取每一像素纵向数据的灰度平均值,从原始干涉图中减去该值,得到无背景干涉图:

$$I_j(x) = \exp\left\{-\frac{[z_j - h(x)]^2}{L^2}\right\} B(x) \cos\{2k[z_j - h(x)] + \varphi_0\}. \quad (2)$$

然后,采用清晰度算子评价每一帧无背景干涉图的清晰度,清晰度大于阈值的干涉图认定为有效干涉图。为适用于不同反射率的表面,本文采用归一化清晰度进行评价。在扫描范围内等间隔选取 10 帧无背景干涉图评定其标准差,取最大值作为参考 S_0 ,计算每一帧无背景干涉图的标准差 S_j ,归一化清晰度为 $s_j = S_j/S_0$ 。经过实际测试,阈值定为 0.015, $s_j > 0.015$ 的干涉图为有效干涉图。通过有效干涉图的判断,确定整个扫描范围出现条纹的区间,记为有效扫描区间。

2.2 实际扫描步长计算

扫描步长的计算原理是根据条纹的移动量反求相位变化,进而得到扫描步长。由于光源相

干长度有限,干涉条纹并没有完全覆盖测量视场的全部区域,但相邻扫描位置的干涉图上条纹覆盖区域基本不变。因此,计算扫描步长时先对干涉图进行分组,根据灰度变化记录条纹覆盖的有效像素点,记为集合 A 。

此处重点描述扫描步长的计算方法。预设的扫描步长为 $\lambda/8$,对应的相移量为 $\pi/2$ 。对干涉图分组,每 3 帧($j-1, j, j+1$)作为一组,如图 2 所示。令每组干涉图之间的扫描步长、调制度相同,以第 j 帧干涉图作为参考,从式(2)出发,有效像素点的光强模型可以简化成:

$$I_{j+i}^n(x) = B(x) \cos[\varphi(x) + i \cdot (\frac{\pi}{2} + \epsilon)], \quad i = -1, 0, 1, \quad (3)$$

式中:表面相位 $\varphi = 2k(z_j - h) + \varphi_0$, $\pi/2 + \epsilon = 2k\Delta_j$, 扫描步长 $\Delta_j = z_{j+1} - z_j = z_j - z_{j-1}$, ϵ 表示本组实际相移量相对于 $\pi/2$ 的偏离量,简称相移偏量。通过三角函数运算可以得到:

$$\epsilon_j(x) = \arcsin\left[-\frac{I_{j-1}^n(x) + I_{j+1}^n(x)}{2I_j^n(x)}\right]. \quad (4)$$

式(4)表明,从三帧相邻干涉图中一个像素的光强可以解析得到 3 帧干涉图之间的相移偏量 ϵ 。对集合 A 所有有效像素计算的 $\epsilon_j(x)$ 求平均,作为第 j 组的相移偏量,即:

$$\epsilon_j = \frac{1}{N} \sum_{x \in A} \epsilon_j(x), \quad (5)$$

式中 N 为第 j 组有效像素的数量。通过相位与光程差之间的对应关系,能够得到第 j 组的实际扫描步长为:

$$\Delta_j = \frac{\frac{\pi}{2} + \epsilon_j}{2k}. \quad (6)$$

为保证计算步长的连贯性,相邻两组之间需

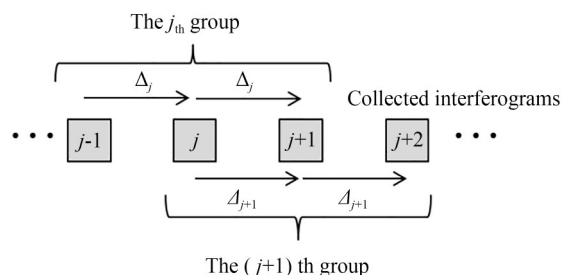


图 2 计算扫描步长的示意图

Fig. 2 Sketch of calculating scanning increment

有两幅干涉图重叠。以第 1 帧有效干涉图作为起始位置,对 Δ_j 累加计算,得到每一帧干涉图的实际扫描位置 z_j 。

2.3 调制度与相位提取

从白光干涉信号中获得每个像素点的调制度和相位是表面高度重构的前提。存在干扰时,白光干涉信号是非等步长采样的,传统的等步长

$$\begin{bmatrix} A \\ b \\ c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 3 & \sum c_{j+i} \\ \sum c_{j+i} & \sum c_{j+i}^2 \\ \sum s_{j+i} & \sum s_{j+i} c_{j+i} \end{bmatrix}$$

式中: $s_{j+i} = -\sin(2k\Delta_{j+i})$, $c_{j+i} = \cos(2k\Delta_{j+i})$, 求和符号表示对 i 在 -1 至 1 范围内求和。计算 x 像素在第 j 帧上的调制度和相位,得到:

$$\begin{cases} B_j = \sqrt{b^2 + c^2} \\ \Phi_j = \arctan \frac{c}{b} \end{cases} \quad (9)$$

式(7)~式(9)省略了变量 A, B, I, Φ 的像素序号 x 。获得像素 x 在扫描方向上的调制度之后,取有效扫描区间内调制度最大点的序号,记为 $J(x)$ 。

2.4 表面高度计算

得到每个像素最大调制度的序号相当于确定了干涉零级条纹的纵向位置。为了获得更精确的表面高度,结合相位信息计算表面高度为:

$$h(x) = z_{J(x)} - \frac{\Phi_{J(x)}(x)}{2k}. \quad (10)$$

与六点法^[9]、八点法^[10]相比,三点反正弦法计算扫描步长具有以下优势:(1)仅对 3 帧干涉图进行等步长近似,减少了干涉图数量,有利于应对步长快速变化的情况;(2)相移偏量 ϵ 是严格解析计算得到的,处于 $-\pi/2 \sim \pi/2$ 之间,对应的扫描步长在 $0 \sim \lambda/4$ 之间,有效计算范围大。与迭代方法^[11-12]相比,三点反正弦法计算过程简单,不需迭代,不存在不收敛的问题。

3 数值仿真

3.1 扫描步长的计算精度

三点反正弦法计算扫描步长的精度,是表面高度重构精度的保证。

仿真参数参照实际装置,具体如下:光源中心波长为 $0.55 \mu\text{m}$,光谱宽度为 $0.1 \mu\text{m}$,对应的

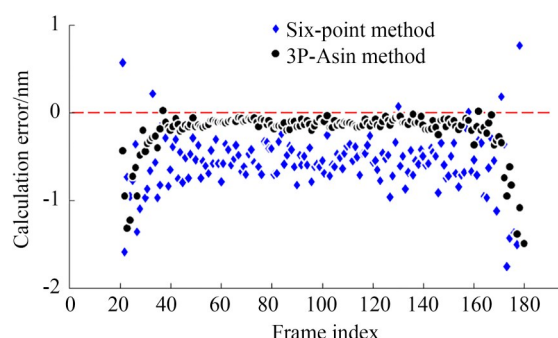
方法不再适用。根据实际得到的扫描步长,用最小二乘方法计算调制度和相位。对第 j 组坐标 x 的像素点建立优化目标为:

$$F = \sum_{i=-1}^1 \left\{ I_{j+i} - [A + B_j \cos(\Phi_j + 2k\Delta_{j+i})] \right\}^2, \quad (7)$$

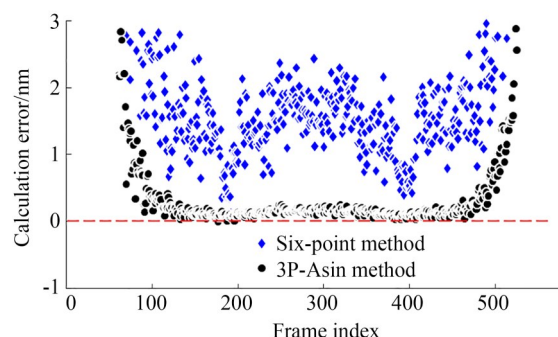
式中 I 是采集的干涉图灰度。采用最小二乘可得到:

$$\begin{bmatrix} \sum s_{j+i} \\ \sum s_{j+i} c_{j+i} \\ \sum s_{j+i}^2 \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} \sum I_{j+i} \\ \sum c_{j+i} I_{j+i} \\ \sum s_{j+i} I_{j+i} \end{bmatrix}, \quad (8)$$

相干长度为 $3 \mu\text{m}$ 。测量对象为 $5 \mu\text{m}$ 的台阶。为保证条纹的连续性,台阶沿垂直交界线方向倾斜。为模拟实际照明的空间不均匀性,干涉图的背景和调制度设置为高斯函数分布。预设扫描步长为 $0.55 \mu\text{m}/8 = 68.8 \text{ nm}$ 。生成图像时在灰度上加入方差为 2,呈高斯分布的随机白噪声。分别研究三点反正弦法处理扫描步长存在线性



(a) +50%线性误差干扰
(a) With +50% linear scanning error disturbance



(b) -50%线性误差
(b) With -50% linear disturbance

图 3 存在线性扫描误差情况下的步长计算误差

Fig. 3 Scanning increment calculation error with linear disturbance

误差、正弦振动和随机误差等干扰因素的情况。

3. 1. 1 线性误差

线性误差是一种最基本的误差,主要来自低频干扰和扫描器误差。仿真中,分别以偏离预设值±50%的扫描步长生成干涉图,即实际步长分别为103.1,34.8 nm。分别采用三点反正弦法与六点法计算扫描步长,计算误差如图3所示,统计标准误差(Root Mean Square Error, RMSE)见表1。三点反正弦法的计算误差明显小于六点法,尤其是在对白光干涉扫描至关重要的中间部分。

3. 1. 2 正弦振动

正弦振动是基础的振动形式。仿真中,分别在预设扫描步长中加入低频和高频信号模拟振动干扰。低频振动的归一化频率为0.005,幅度为1 μm;高频振动的归一化频率为0.1,幅度为40 nm。归一化频率定义为振动频率与干涉图采集频率之比。计算步长的误差如图4和表1所示,两种振动情况下三点反正弦法的计算误差都要小于六点法。

3. 1. 3 随机误差

随机误差来源于高频干扰和电子噪声。在预设扫描步长中增加高斯分布的白噪声,噪声的标准差为10 nm。在随机误差干扰下,两种方法计算的步长误差如图5和表1所示,三点反正弦法更有优势。

3. 2 表面高度重构精度

为研究振动干扰下表面高度的重构效果,对含有多种干扰误差的情况进行分析。扫描步长中加入线性误差(+20%)、两种正弦误差(频率为0.005、幅度为500 nm;频率为0.06、幅度为40 nm)、随机误差(标准差为3 nm),并模拟阻尼引起的振动幅度衰减。

仿真测量高5 μm的台阶,共生成232幅干涉图,在生成干涉图时加入灰度噪声(方差为1)。由于干扰信号比较复杂,扫描步长远偏离预设值68.8 nm,并且振动频率和幅值不定,如图6所

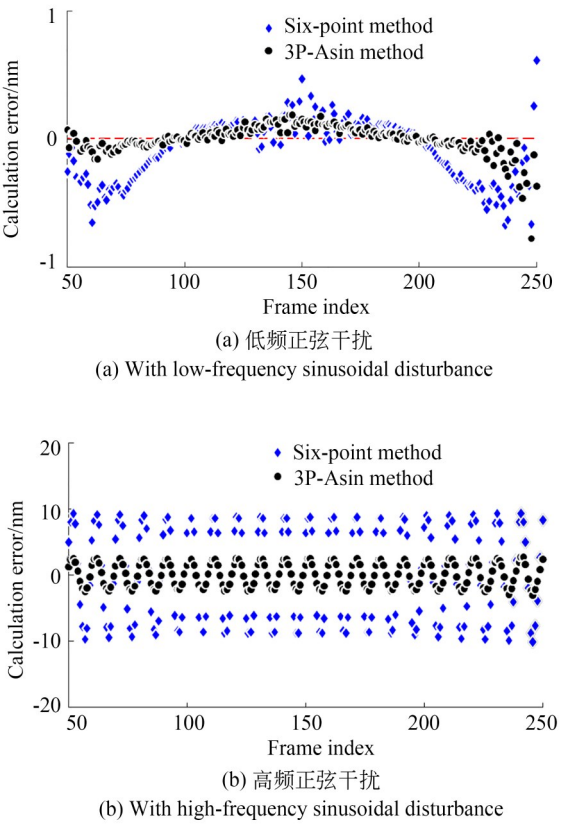


图4 存在正弦振动干扰的步长计算误差
Fig. 4 Scanning increment calculation error with sinusoidal disturbance

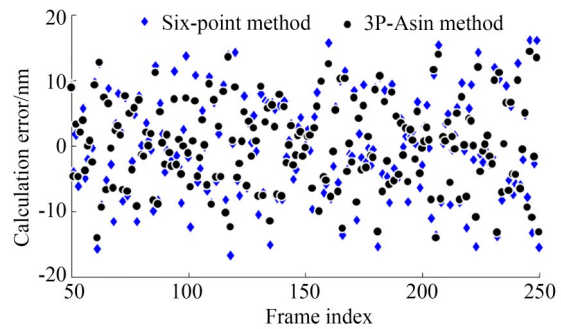


图5 存在随机误差的步长计算误差
Fig. 5 Scanning increment calculation error with random disturbance

表1 不同振动干扰下扫描步长计算的 RMSE
Tab. 1 RMSE of scanning increment calculation with different disturbances

Method	Linear		Sinusoidal		Random
	+50% error	−50% error	Low frequency	High frequency	
3P-Asin	0.050	0.050	0.075	1.9	6.3
Six-point	0.170	0.460	0.220	9.2	7.4

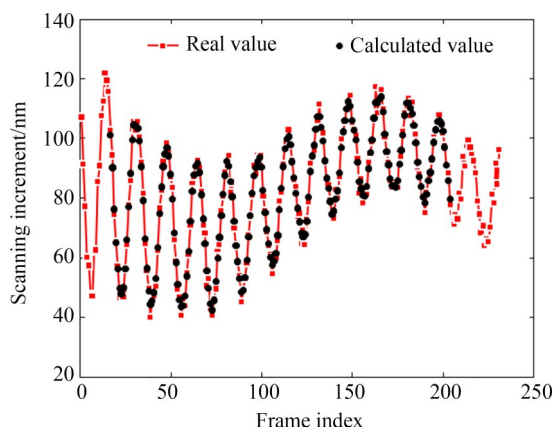


图 6 三点反正弦法计算的扫描步长

Fig. 6 Calculated scanning increment with 3P-Asin algorithm

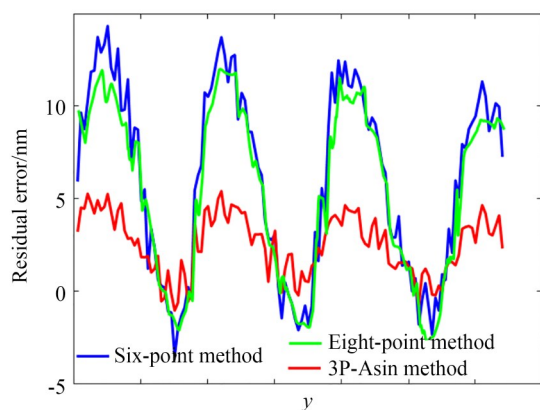
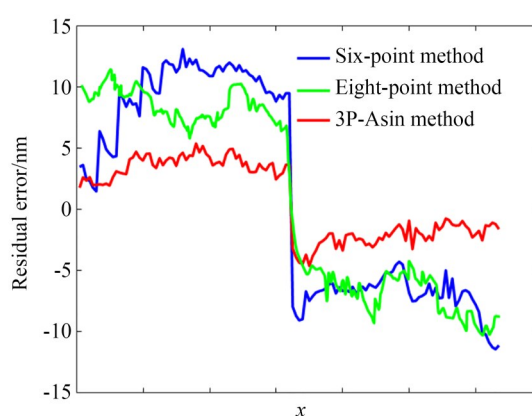
(a) 平行于台阶方向
(a) Along to the step direction(b) 垂直于台阶方向
(b) Normal to the step direction

图 7 台阶形貌的残余误差轮廓

Fig. 7 Residual errors of reconstructed topography of step

仿真结果表明:(1)三点反正弦方法抑制振动干扰的效果优于六点法和八点法;(2)在中高频大幅振动干扰或扫描步长误差较大时,三点反正弦方法具有明显优势,这与其点数少、有效计算范围大、无近似误差有关。

4 实验

为验证三点反正弦法的有效性,在振动干扰下实验测量了多种构型的表面形貌。所用的白光干涉仪安装于未采取隔振措施的光学平台上,物镜放大倍率为 $10\times$,电子目镜倍率 $0.5\times$,测量区域为 $1.7\text{ mm}\times 1.4\text{ mm}$ 。光源为白光 LED,其

等效中心波长 $\lambda=605\text{ nm}$,光谱的半高宽 $\Delta\lambda=110\text{ nm}$,相干长度 $l_c=3.3\text{ }\mu\text{m}$ 。预设扫描步长为 69 nm ,相机采集干涉图的频率为 50 Hz 。压电扫描器工作于开环模式,行程为 $120\text{ }\mu\text{m}$,标称分辨率为 2 nm 。

分别采用三点反正弦法、六点法和八点法重构表面高度,并计算其与真实台阶形貌相减的残余误差。图 7 给出了平行与垂直于台阶方向的两条轮廓的残余误差。图 7(a)中,残余误差呈波纹状分布,这属于存在扫描误差的典型表现。六点法和八点法的残余误差幅度接近,三点反正弦法的表面误差 RMS 值(3.1 nm)仅为六点法的 40%。采用三点反正弦法重构台阶的高度误差为 4.6 nm ,而六点法、八点法分别为 $17.2, 16.5\text{ nm}$ 。由此可见,三点反正弦法对振动干扰的抑制作用更明显。

4.1 准确性

首先,采用一个标准台阶作为测试对象以验证方法的准确性。台阶的计量高度为 $(1.768\pm 0.010)\text{ }\mu\text{m}$ 。测量时,白光干涉仪附近的空气压缩机处于工作状态,引起高频干扰,同时敲击平台引入冲击振动。每次测量采集 261 幅干涉图,其中一幅干涉图如图 8 所示。采用三点反正弦法计算的扫描步长如图 9 所示,可以看出,受到周围

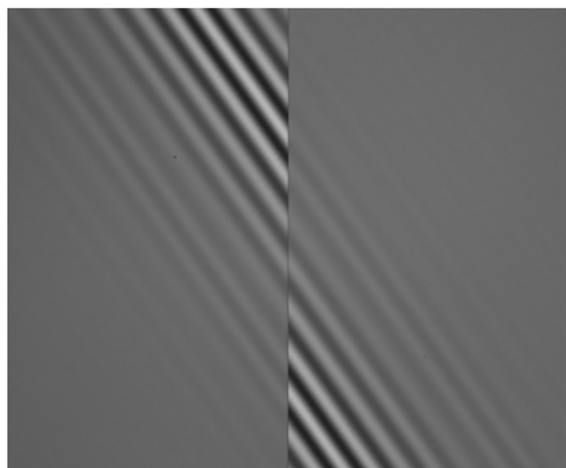


图 8 测量台阶采集的白光干涉图之一

Fig. 8 Captured one interferogram of measuring step

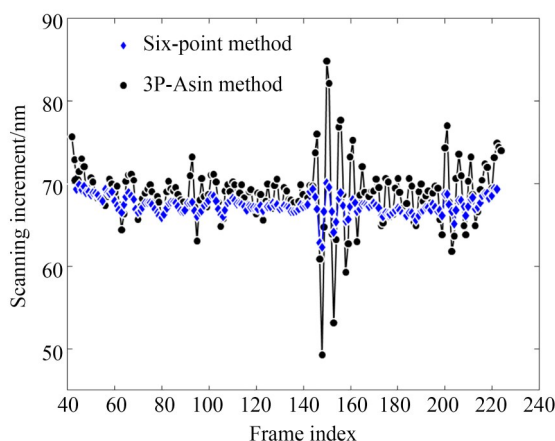


图 9 计算的扫描步长

Fig. 9 Calculated scanning increment

环境高频噪声的影响,扫描步长随机偏离预设步长值,同时扫描步长变化也体现了敲击引入的冲击振动干扰。测量的台阶表面轮廓如图 10 所示。采用三点反正弦法得到的台阶高度为 $1.770\ 0\ \mu\text{m}$,偏离计量值 $2.0\ \text{nm}$,在计量值的不确定度范围内。台阶上下表面的粗糙度(S_q)均为 $1.6\ \text{nm}$ 。为做对比,采用六点法重构了台阶形貌,其高度为 $1.749\ 4\ \text{nm}$,台阶面粗糙度为 $2.9\ \text{nm}$ 。对此台阶重复测量 8 次,得到的高度测量结果如图 11 所示。可以看出,即使存在振动干扰,三点反正弦法得到的台阶高度与计量值非常接近,8 次测量的平均值为 $1.770\ 2\ \mu\text{m}$,比计量值偏大 $2.2\ \text{nm}$ 。8 次台阶高度测量的 RMSE 为 $1.98\ \text{nm}$ 。采用六点法得到的台阶平均高度比计量值

偏小 $20.5\ \text{nm}$,其原因是六点法不能适应振动的快速变化,导致计算的扫描步长偏小(见图 9)。

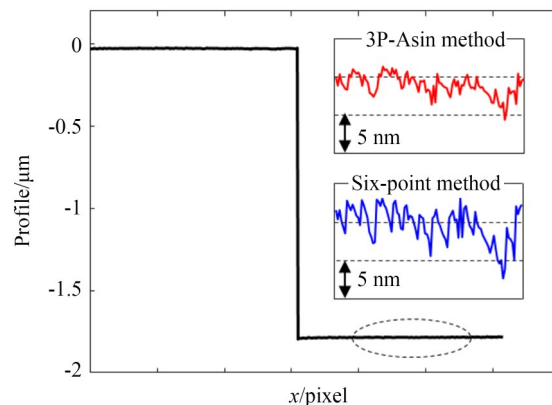


图 10 台阶测量结果的轮廓(插图为虚线部分的放大图)

Fig. 10 Measured profiles of step (Insets are enlarged profiles circled with dashed lines)

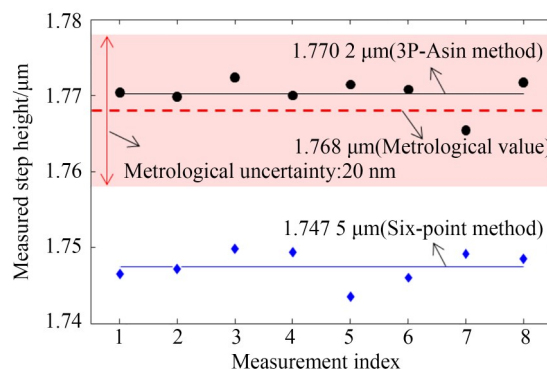


图 11 台阶高度的测量结果

Fig. 11 Measured step heights

4.2 适应性

由于三点反正弦法计算步长对条纹连续性有要求,需对其适应性进行实际测试。在振动干扰情况下对精密、超精密加工中的一些典型表面进行测量,包括:抛光的陶瓷球表面(曲率半径为 $25\ \text{mm}$)、单点金刚石车削的微沟槽表面(沟槽深度为 $6\ \mu\text{m}$ 、周期为 $100\ \mu\text{m}$)、磨削的不锈钢表面(粗糙度为 S_a 为 $0.1\ \mu\text{m}$)、硬质合金刀具车削的钛合金表面(粗糙度 S_a 为 $1.0\ \mu\text{m}$)。测试对象涉及金属和非金属材料,表面类型包含平面、曲面和微结构表面等,基本上涵盖了精密、超精密加工中常见的表面类型。三点反正弦法能够精确地从振动干扰的白光干涉图中重构这些工件的表

面形貌,如图 12 所示。由此可见,三点反正弦法能够胜任多种构型的表面形貌测量,具有广泛的适应性。

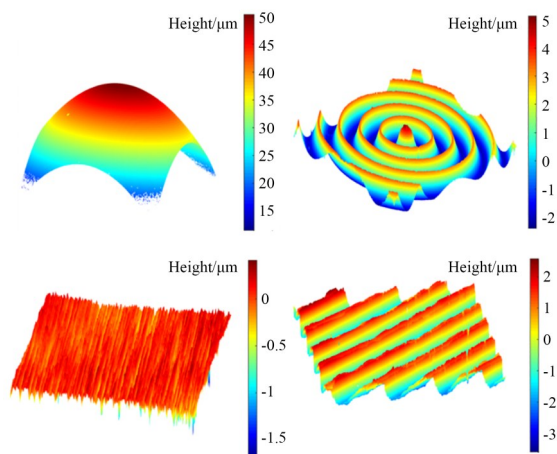


图 12 三点反正弦法重构的多种表面

Fig. 12 Diverse surface reconstructed with 3P-Asin algorithm

4.3 计算速度

三点反正弦法仅采用简单的数学运算,不涉及迭代或优化过程。在算法设计上,像素灰度数据在帧内并无运算关联,可以采用矩阵并行计算,提高计算速度。在 8 核 2.6GHz CPU 的计算机上处理上述台阶测量过程采集的 263 帧 516×614 像素的白光干涉图,三点反正弦法耗时 6.0 s,与六点法相当(6.7 s),远少于迭代法的 17.6 s 耗时。

5 抗振动性能分析

5.1 理论分析

振动干扰可以分解成简谐基频信号的叠加,因此主要针对简谐振动进行分析。振动对干涉测量的影响在于引入扫描步长误差,因而抗振动性能主要体现在能否准确计算扫描步长。三点反正弦方法能够计算处于 $[-\pi/2, \pi/2]$ 内的相位,因此理论上可以计算 $[-\lambda/8, \lambda/8]$ 内的步长误差。这是三点反正弦方法能够应用的边界条件。

假设受到幅度 A 、频率 f_v 的简谐振动干扰,白光干涉仪在 t_1, t_2 两个时刻连续采集图像的步长误

差为:

$$\Delta = 2A \cos(2\pi f_v t_0) \sin\left(\pi \frac{f_v}{f_s}\right), \quad (11)$$

式中 $t_0 = (t_1 + t_2)/2$, 是两次采样的中心时刻, f_s 是相机的帧频。步长误差取决于振动的幅度与频率,也与采样的时刻有关。考虑采样时刻影响最大的情况(式(11)的余弦取 1), 分成两种情况:(1)中高频振动($f_v/f_s > 1/10$); (2)低频振动($f_v/f_s \leq 1/10$)。对于情况(1), 当 $f_v = (n + 1/2)f_s$ 时(n 为整数), $\Delta = 2A$, 因此振幅 A 应小于 $\lambda/16$ (约 40 nm)。此时,振动的幅频积 $P = Af_v < (n + 1/2)f_s \lambda/16$ 。 $n=0$ 时约束最严,此时 $P < f_s \lambda/32$ 。对于情况(2), 正弦函数取一阶近似,有 $P < f_s \lambda/16/\pi$ 。其他频段振动干扰对三点反正弦法的约束处于这两种极端情况之间。取最严格的限制,三点反正弦法能够适应幅频积不大于 $f_s \lambda/50$ 的振动干扰。

从以上分析可以看出:(1)三点反正弦方法对抗振动的能力与采样速度、等效波长有关,对中高频和低频振动的约束基本相同,振动幅频积应不大于 $f_s \lambda/50$; (2)振动频率为干涉图采集频率一半时影响最大,为获得更宽频段的抗干扰效果,应当提高相机帧频与扫描速度。

5.2 实验测试

为测试三点反正弦法对振动干扰的敏感性,在一系列不同频率和幅度的简谐振动下测量标准台阶高度,以台阶高度测量误差表征方法的有效性。台阶的标称高度为 $10 \mu\text{m}$ 。白光干涉仪的相机帧频为 50 Hz。简谐振动依靠压电陶瓷促动器推动位移台产生。每种振动下测量台阶 16 次,评定台阶高度,并与无振动干扰的测量高度进行比较。无振动下测量台阶 16 次,高度平均值为 $9.9684 \mu\text{m}$, 标准差为 3.7 nm。3 种幅度(10, 20, 30 nm)在 5~50 Hz 频段内简谐振动干扰下的台阶高度测量结果如图 13 所示。台阶高度测量误差随着振动幅度增加而增大。在振动频率为 25 Hz 时,台阶高度存在最大的测量分散性和误差,此时三点反正弦法最敏感,这与理论分析相符。振动频率远离 25 Hz 时,测量结果的重复性和准确度明显提升。台阶高度的测量误差总体在 8% 以内,在 0~10 Hz, 40~50 Hz 的频段,测量精度优于 1%,甚至 0.5%,后者已经接近白光干涉仪

在实验室环境下的测量精度。为获得更宽频段的抗振动性能,需要提升扫描速度与帧频,或者

采用机械隔振措施对频率为相机帧频一半的振动进行有效衰减。

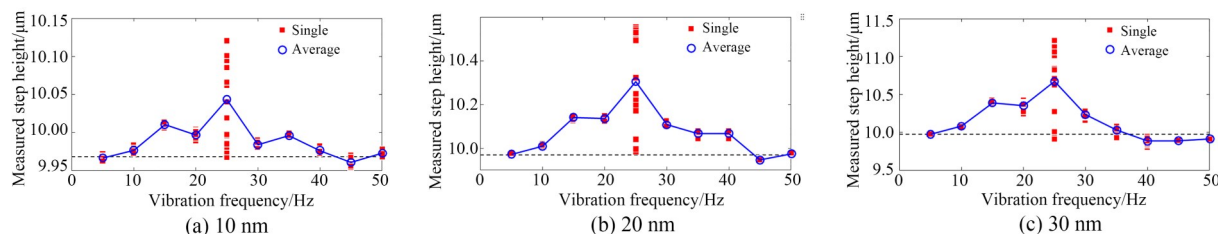


图 13 不同幅度简谐振动干扰下测量的台阶高度

Fig. 13 Measured step heights under sinusoidal disturbances with different amplitudes

6 结 论

根据白光干涉条纹移动量与扫描步长成正比的关系,本文提出了对振动干扰不敏感的三点反正弦方法。该方法能够准确计算扫描步长,可应对线性误差、宽频段振动、随机误差等因素的干扰,并抵抗幅频积不大于 $f_s\lambda/50$ 的振动干扰,抗振效果随着扫描速度和相机帧频的增加而提升。

三点反正弦法测量高度的准确度优于0.5%(台阶高度为10 μm),达到纳米量级的重复性,且能够适应精密、超精密加工中多种加工工艺和材料的表面形貌测量。三点反正弦法能够应用于加工现场、原位测量等振动干扰的场景下,对于提高加工效率和精度具有重要意义。该方法也能够用于理想环境下的白光干涉测量或修正压电扫描器的误差。

参考文献:

- [1] 吴俊杰,刘俭,魏佳斯,等. 双测头复合型微纳米测量仪的研制[J]. 光学精密工程, 2020, 28(2): 415-423.
WU J J, LIU J, WEI J S, *et al.* Development of double probe composite micro-and nano measuring instrument [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2020, 28 (2): 415-423. (in Chinese)
- [2] 崔长彩,杨成,李子清,等. 蓝宝石衬底表面形貌检测和评价系统[J]. 光学精密工程, 2021, 29 (11): 2556-2566.
CUI CH C, YANG CH, LI Z Q, *et al.* Measuring and evaluating system for surface morphology of sapphire substrates[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2021, 29 (11): 2556-2566. (in Chinese)
- [3] 程磊,何洪途,叶敏恒,等. 纳米金刚石磨粒团聚对熔石英摩擦磨损性能的影响[J]. 光学精密工程, 2023, 31(7): 1031-1042.
CHENG L, HE H T, YE M H, *et al.* Effect of nanodiamond abrasive agglomeration on tribological properties of fused silica[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2023, 31(7): 1031-1042. (in Chinese)
- [4] KIYONO S. Self-calibration of a scanning white light interference microscope[J]. *Optical Engineering*, 2000, 39(10): 2720-2725.
- [5] SCHMIT J. High-stability white-light interferometry with reference signal for real-time correction of scanning errors[J]. *Optical Engineering*, 2003, 42 (1): 54-59.
- [6] LEI Z L, LIU X J, ZHAO L I, *et al.* A rapid measurement method for structured surface in white light interferometry [J]. *Journal of Microscopy*, 2019, 276(3): 118-127.
- [7] CHEN L C, YEH S L, TAPILOUW A M, *et al.* In-situ scanning white light interferometry employing dual-sensing configuration and active fringe-locking strategy[J]. *International Journal of Nanomanufacturing*, 2012, 8(1/2): 40-53.
- [8] TERESCHENKO S, LEHMANN P, GOLLOR P, *et al.* Vibration compensated high-resolution scanning white-light Linnik-interferometer[C]. *Optical Measurement Systems for Industrial Inspection X. Munich, Germany*. SPIE, 2017: 1032940.
- [9] SCHMIT J, OLSZAK A. High-precision shape

- measurement by white-light interferometry with real-time scanner error correction [J]. *Applied Optics*, 2002, 41(28): 5943-5950.
- [10] 韩志刚, 陈磊. 对包络变化及移相误差不敏感的宽带光八步移相算法[J]. *红外与激光工程*, 2015, 44(4): 1236-1242.
- HAN ZH G, CHEN L. Eight-step phase shifting algorithm for broadband light interferometry insensitive to envelop variation and phase shifting error [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2015, 44(4): 1236-1242. (in Chinese)
- [11] CUI K H, LIU Q, HUANG X J, *et al.* Scanning error detection and compensation algorithm for white-light interferometry[J]. *Optics and Lasers in Engineering*, 2022, 148: 106768.
- [12] WU X Z, ZHU L L, FANG F Z, *et al.* Research on the quality control technology of micro-topography machining based on *in situ* white light interferometry[J]. *Measurement*, 2023, 220: 113257.
- [13] 郭立强, 刘恋. 结合斜变换与方差的图像聚焦测度[J]. *光学精密工程*, 2021, 29(7): 1731-1739.
- GUO L Q, LIU L. Image focus measure based on slant transform and variance [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2021, 29(7): 1731-1739. (in Chinese)

作者简介:



刘 乾(1983—),男,山东单县人,博士,研究员,博士生导师,2006年于北京理工大学获得学士学位,2009年、2015年于中国工程物理研究院分别获得硕士和博士学位,主要从事精密测量、光学检测技术与仪器方面的研究。
E-mail: liuqianblue@126.com