

文章编号: 0253-2239(2007)11-1997-6

物体表面形貌的正弦相位调制实时干涉测量技术研究*

何国田^{1,3} 王向朝^{1,3} 曾爱军²

{ 1 中国科学院上海光学精密机械研究所信息光学实验室, 上海 201800
2 上海恒益光学精密机械有限公司, 上海 201800
3 中国科学院研究生院, 北京 100039 }

摘要: 表面形貌干涉测量技术是一种高精度的非接触式测量技术, 在工业生产和科学研究中具有广泛的应用。提出一种实时测量表面形貌的正弦相位调制干涉测量新技术。该技术用激光二极管作光源, 用自制的高速图像传感器探测干涉信号, 通过信号处理电路实时解相得到被测表面所对应的相位分布, 实时分析相位获得物体表面形貌。该技术消除了光强和部分外界干扰的影响, 提高了系统的测量精度。楔形光学平板表面形貌的测量结果表明, 测量点为 60×60 个的情况下, 测量时间小于 8.2 ms , 重复测量精度(RMS)为 4.3 nm 。

关键词: 光学测量; 表面形貌; 实时测量; 正弦相位调制干涉仪; 激光二极管; 图像传感器

中图分类号: TN247 文献标识码: A

Real-Time Surface Profile Measurement Using Sinusoidal Phase-Modulating Interferometry

He Guotian^{1,3} Wang Xiangzhao^{1,3} Zeng Aijun²

{ 1 *Shanghai Institute of Optics and Fine Mechanics, the Chinese Academy of Sciences, Shanghai 201800*
2 *Shanghai Hengyi Optics and Fine Mechanics Co., Ltd., Shanghai 201800*
3 *Graduate University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100039* }

Abstract: A sinusoidal phase-modulating (SPM) interferometer for real-time surface profile measurement is proposed and analyzed. A laser diode and a high-speed image sensor are used as the light source and the photo detector. The phase corresponding to each measurement point on the surface is calculated by a signal processing circuit. The surface profile is obtained by the phase distribution. The interferometer is insensitive to vibrations of the optical components and fluctuations in the light source. The surface profile of an optical wedge was measured. For 60×60 measurement points, the measurement time was less than 8.2 ms . Repeatability in the measurements was 4.3 nm .

Key words: optical measurement; surface profile; real-time measurement; sinusoidal phase-modulating interferometer; laser diode; image sensor

1 引 言

表面形貌对器件的功能有很大的影响。随着微电子学、微机电系统技术的飞速发展, 制造出的器

件尺寸越来越小, 加工精度越来越高。因此表面形貌的光学干涉测量技术得到广泛研究与应用^[1~6]。

利用光学干涉方法测量表面形貌, 常用的方法

* 国家自然科学基金(60578051)、上海市科委国际合作计划项目(051107085)和上海市青年科技启明星计划项目(06QB14047)资助课题。

作者简介: 何国田(1965—), 男, 四川人, 博士研究生, 主要研究方向为高速图像传感技术和光学测量等方面的研究。
E-mail: slhgt@siom.ac.cn

导师简介: 王向朝(1957—), 男, 辽宁凌源人, 研究员, 博士生导师, 主要从事信息光电子技术方面的研究。
E-mail: wxz26267@siom.ac.cn

收稿日期: 2006-10-17; 收到修改稿日期: 2007-09-19

有外差干涉法、移相干涉法、正弦相位调制 (SPM) 干涉法等^[7~9]。外差法干涉仪结构复杂,且要求产生高精度的频差。移相干涉法对移相精度要求高,易受环境干扰。正弦相位调制干涉法具有相位调制简单、测量精度高、抗干扰能力强等优点,在位移、振动、表面形貌、微角度等测量领域已成为一项重要的高精度测量技术^[10~13]。激光二极管 (LD) 由于具有波长可调谐、功耗低、体积小等优点,在正弦相位调制干涉测量中常用作光源。目前有实时测量和非实时测量两种方法。日本 Takamasa Suzuki 等^[14]提出一种实时测量表面形貌的正弦相位调制半导体激光干涉仪,它采用积分法,用高速 CCD 图像传感器连续采集 4 幅干涉图,再用电路对干涉信号进行计算得到待测相位正切值,最后由查表电路得到待测表面形貌值。该干涉仪在满足一定条件下对 50×40 个测量点进行测量得到测量结果需要 20 ms,重复测量精度为 $\lambda/60$ 。在查表过程中一个测量点的数据至少有二次暂存于随机存取存储器 (RAM),得到一帧数据才用直接内存访问方式输入计算机,传输过程是非实时的。同时,相位调制深度与两干涉臂的光程差有关,而光程差易受外界干扰影响。因此,该正弦相位调制干涉测量仪在测量表面形貌时存在测量时间较长,精度易受光强波动^[13]和外界干扰影响的缺点。

因此,本文提出一种高精度实时测量表面形貌的正弦相位调制干涉测量新技术,利用乘法电路、低通滤波与锁相电路、除法电路和微处理器得到被测物体的表面形貌。采用该技术测量表面形貌只需要一幅干涉图,从采集、滤波、鉴相、显示都是实时进行的,延迟的时间很小。

2 原 理

用于表面形貌实时测量的正弦相位调制干涉仪如图 1 所示。激光二极管出射的激光经过透镜 1 准直、扩束后,由分束器 (BS) 分成两束光,其中一束为参考光入射到参考镜上,另外一束为物光入射到被测物体表面上。它们分别被参考镜和被测物体表面反射,然后参考光透过分束器,物光被分束器反射,它们在 CCD 探测面上形成干涉信号。该信号由自制的基于低速 CCD 的高速图像传感系统探测后,输入信号处理电路。在时序电路作用下,该干涉信号分别经信号处理电路 1 和 2 处理得到相应信号 $P_1(x, y, t)$ 、 $P_2(x, y, t)$ 。 $P_1(x, y, t)$ 、 $P_2(x, y, t)$ 与正弦调制电压信号 $V(t)$ 经锁相电路后得到信号

$P(x, y)$ 。每一个 $P(x, y)$ 值分别对应待测物体表面上一点的面形貌值 $r(x, y)$ 。 $P(x, y)$ 由鉴相电路实时鉴相得到待测表面形貌 $r(x, y)$ 。

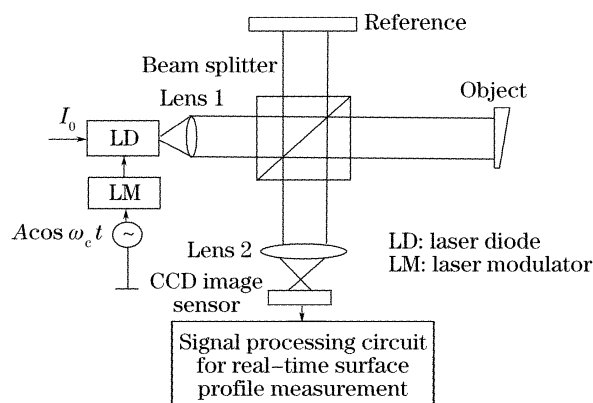


图 1 正弦相位调制实时表面形貌干涉测量仪

Fig. 1 Schematic diagram of the sinusoidal phase modulating interferometer for real-time surface profile measurement

实时测量表面形貌的信号处理电路如图 2 所示,它由信号处理电路 1、信号处理电路 2 和实时鉴相电路组成。信号处理电路 1 和 2 相同,由放大器、计算器、低通滤波器组成;实时鉴相电路由消除光强与外界干扰影响的锁相电路与实时获得表面形貌的鉴相电路组成。

CCD 输出的干涉信号经信号处理电路 1 与信号处理电路 2 处理后得到被测物体表面所对应的相位分布信号 $P_1(x, y, t)$ 与 $P_2(x, y, t)$,其过程为

1) 获取相位信号 $P_1(x, y, t)$ 与 $P_2(x, y, t)$

激光二极管由直流电流 i_0 和正弦电流 $\Delta i(t)$ 通过激光调制器 (LM) 驱动,设正弦电压信号与电流信号分别为

$$V(t) = A \cos \omega_c t, \quad (1)$$

$$\Delta i(t) = a \cos \omega_c t, \quad (2)$$

$$a = K_{LM} A, \quad (3)$$

式中 A 为振幅, ω_c 为角频率, K_{LM} 为激光调制器的转换系数。激光二极管输出波长与光强分别为

$$\lambda(t) = \lambda_0 + \Delta \lambda(t) = \lambda_0 + \beta_1 a \cos \omega_c t, \quad (4)$$

$$g(t) = g_0 + \Delta g(t) = \beta_2 (i_0 + a \cos \omega_c t), \quad (5)$$

式中 λ_0 为激光二极管的中心波长, β_1 与 β_2 分别为激光二极管的波长调制系数和光强调制系数。CCD 接收到的干涉信号为

$$s(x, y, t) = s_1(x, y, t) + s_0(x, y, t) \cos[z(x, y) \cos \omega_c t + a_0 + a_r(x, y, t)], \quad (6)$$

式中 (x, y) 为被测物体表面的位置坐标, z 为正弦相位调制深度; s_1 为信号直流分量, s_0 为信号交流分量的振幅,它们受光强变化 $g(t)$ 影响,其表达式为

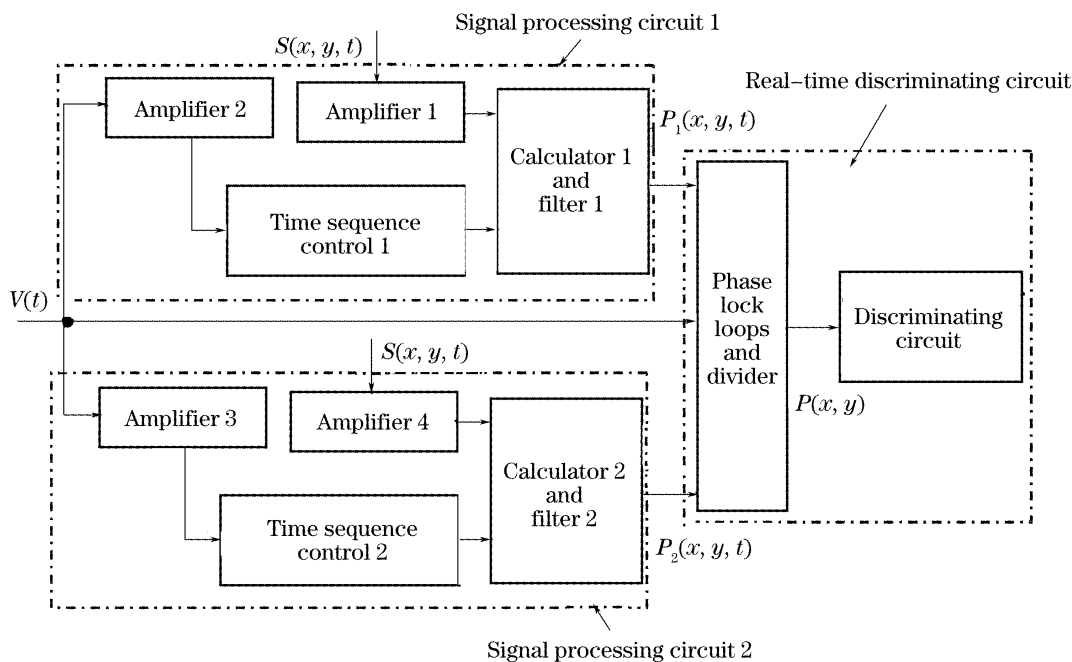


图 2 实时测量表面形貌的信号处理电路

Fig. 2 Signal processing circuit for real-time surface profile measurement

$$s_1(x, y, t) = g(t - \tau_0) + g(t - \tau_r), \quad (7)$$

$$s_0(x, y, t) = 2 \sqrt{g(t - \tau_0)g(t - \tau_r)}, \quad (8)$$

式中 $\tau_0 = l_0/c, \tau_r = l_r/c, l_0$ 与 l_r 分别为物体光和参考光的光程, c 为光速. $\tau_0 - \tau_r \ll 1; \alpha_0$ 为参考镜静止时干涉信号的相位, 它由两干涉臂的初始光程差 $2D_0$ 决定, 即有

$$\alpha_0 = (4\pi/\lambda)D_0, \quad (9)$$

$\alpha_r(x, y, t)$ 为被测物体表面形貌引起的干涉信号的相位变化, 受光强变化影响并与时间有关, 它与被测物体表面的形貌值之间的关系为

$$\alpha_r(x, y, t) = \frac{4\pi}{\lambda_0}r(x, y, t), \quad (10)$$

式中 $r(x, y, t)$ 为被测物体表面形貌的测量值.

将(6)式展开并忽略其中的直流分量可得^[15]

$$s(x, y, t) = s_0 \{ \cos \alpha(x, y, t) [J_0(z) - 2J_2(z) \cos 2\omega_c t + \dots] - \sin \alpha(x, y, t) [2J_1(z) \cos \omega_c t - 2J_3(z) \cos \omega_c t + \dots] \}, \quad (11)$$

式中 $\alpha(x, y, t) = \alpha_0 + \alpha_r(x, y, t), J_n$ 为 n 阶贝塞尔函数. 干涉信号 $s(x, y, t)$ 经过放大器 1 后与通过放大器 2 的调制信号 $a \cos \omega_c t$ 作鉴相计算并滤波, 可得到电信号

$$P_1(x, y, t) = K_1 K_2 K_m K_L s_0 A J_1(z) \sin \alpha(x, y, t), \quad (12)$$

式中 K_1 为放大器 1 的增益, K_2 为放大器 2 的增益, K_m 为计算电路 1 的系数, K_L 为滤波器 1 的增益.

信号处理电路 2 如图 2 虚框所示, 它由放大器 3 和 4、运算器 2、低通滤波器 2、时序控制电路 2 组成. 同理可得, 电信号为

$$P_2(x, y, t) = K_s s_0 A J_2(z) \cos \alpha(x, y, t), \quad (13)$$

式中 K_s 为系统转换系数

$$K_s = K_{s1} K_{s2} K_{sm} K_{sL}, \quad (14)$$

式中 K_{s1} 为放大器 3 的增益, K_{s2} 为放大器 4 的增益, K_{sm} 为计算电路 2 的系数, K_{sL} 为滤波器 2 的增益.

由(12)或(13)可知, 只要测得相位信号 $P_1(x, y, t)$ 或 $P_2(x, y, t)$, 通过反正弦函数变换可获

得待测相位, 即获得待测表面形貌. 但待测相位与干涉信号交流分量 s_0 、一阶贝塞尔函数 $J_1(z)$ 、交流驱动电压振幅等有关, 且 z 易受外界影响, 当激光二极管输出光强随正弦调制电流变化时, s_0 与 $J_1(z)$ 的乘积不是一个定值, 转换系数随光强变化, 从而影响测量精度.

2) 消除光强变化与外界干扰对测量精度的影响

为了消除光强变化对测量结果的影响, 采用了一套与信号处理电路 1 完全相同的信号处理电路 2, 其输出为 $P_2(x, y, t)$. 利用锁相技术与除法运算处理信号 $P_1(x, y, t)$ 与 $P_2(x, y, t)$, 即可消除光强变化和部分外界干扰对测量结果的影响, 其电路框图如图 3 所示.

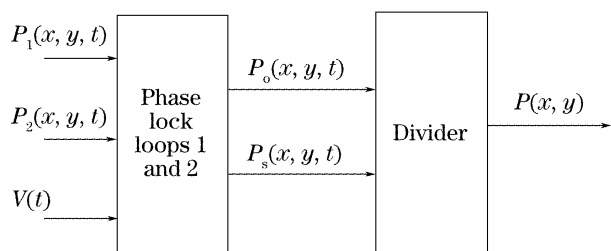


图 3 消除光强变化影响的电路框图

Fig. 3 Block diagram of the circuit for eliminating the influences of intensity changes

将 $P_1(x, y, t)$ 、 $P_2(x, y, t)$ 与 $V(t)$ 同时输入锁相电路,其输出的交流信号分别为

$$P_o(x, y, t) = K_o \sin \alpha(x, y, t), \quad (15)$$

式中 $K_o = K_1 K_2 K_m K_L s_0 A J_1(z)$ 。

$$P_s(x, y, t) = K_s \cos \alpha(x, y, t), \quad (16)$$

将信号 $P_o(x, y, t)$ 与信号 $P_s(x, y, t)$ 送入除法器运算,其输出信号为

$$P(x, y) = K \tan \alpha(x, y), \quad (17)$$

定义

$$K = \frac{K_1 K_2 K_m K_L J_1(z_0)}{K_{s1} K_{s2} K_{sm} L_{sL} J_2(z_0)}, \quad (18)$$

式中调制深度 $z_0 = 4\pi a \beta_1 D_0 / \lambda_0^2$ [11]。由于 z_0 受两干涉臂的初始光程差 D_0 影响,当机械振动导致干涉仪中有关元件相对位置微小变化,或干涉仪中两臂空气扰动导致 z_0 变化,从而引起相位测量误差。锁相电路锁定 z_0 ,大大降低了外界干扰对测量精度的影响。

从(17)式和(18)式可知,由于采用实时锁相技术与除法运算,使得整个测量装置的输出信号与由调制电流引起的光源光强波动无关,从而消除了光源光强波动和部分外界干扰对测量结果的影响。

3) 实时鉴相电路与表面形貌

在 $\alpha(x, y, t) = 2n\pi \pm \pi/2 (n = 0, 1, 2, \dots)$ 范围内,由(17)式可得

$$\alpha(x, y) = \alpha_0 + \alpha_r(x, y) = \arctan[P(x, y)/K]. \quad (19)$$

从(19)式可看出,相位与光强变化无关。不考虑(19)式中的直流 α_0 项,得到信号 $P(x, y)$ 与被测表面形貌值 $r(x, y)$ 之间的关系式为

$$r(x, y) = \frac{\lambda}{4\pi} \arctan[P(x, y)/K]. \quad (20)$$

由(20)式可知, $P(x, y)$ 与 $r(x, y)$ 一一对应,只要得到 $P(x, y)$,就能实时获得 $r(x, y)$ 。

因此实时鉴相电路的功能有:一是消除光强与外界干扰对测量精度的影响,二是通过反正切变换

解相位,从而实时得到待测物体的表面形貌。采用微处理器(如 ADuc812,它是一个全集成高性能的12位数据采集系统)来完成该功能,只需简单几条语句就可完成解相功能(锁相由单独电路完成)。

因此,CCD输出的干涉信号由实时测量表面形貌的信号处理电路进行实时鉴相处理,可得到被测表面所对应的相位分布,通过相位分析即可实时获得物体表面形貌。

3 分析与讨论

采用正弦相位调制半导体激光干涉仪实时测量二维表面形貌,对干涉信号用积分法采集得^[14]

$$P_i(x, y) = \int_{(T/4)(i-1)}^{(T/4)i} s(x, y, t) dt, \quad (21)$$

式中 T 为滤波器的截止频率, $T = 2\pi/\omega_c$ 。根据积分法得^[16]

$$P_c = -P_4 + P_1 - P_2 + P_3 = A_c \cos \alpha(x, y), \quad (22)$$

$$P_s = -P_4 + P_1 + P_2 - P_3 = A_s \sin \alpha(x, y), \quad (23)$$

$$A_c = \frac{8}{\pi} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{J_{2n}(z)}{2n} [1 - (-1)^n] \sin(2n\theta), \quad (24)$$

$$A_s = \frac{8}{\pi} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{J_{2n-1}(z)}{2(n-1)} (-1)^n \sin[(2n-1)\theta], \quad (25)$$

当 $z = 2.45, \theta = 56^\circ$ 时,则 $A_c = A_s$,故待测相位为

$$\alpha(x, y) = \arctan[P_s(x, y)/P_c(x, y)], \quad (26)$$

所以待测表面形貌为

$$r(x, y) = \frac{\lambda}{4\pi} \arctan(P_s/P_c). \quad (27)$$

其鉴相方法采用查表法,将测得的 $P_s(x, y)/P_c(x, y)$ 值作为地址,从只读存储器(ROM)中取出待测的相位 $\alpha(x, y)$,再用(27)式计算出表面形貌 $r(x, y)$ 。

该方法测量时间主要包括 CCD 光电转换时间、计算时间(P_s, P_c)、查表时间,它们是串行工作的。其过程是先将 $P_s(x, y)/P_c(x, y)$ 值保存于随机存取存储器中,以 $P_s(x, y)/P_c(x, y)$ 值为地址,从只读存储器(将正切相位值预先存储在此)中得到相位 $\alpha(x, y)$ 转移到随机存取存储器暂存后,用 DMA 方式输入计算机,并用(27)式计算后显示出表面形貌。每次测量需采集至少四幅干涉图。同时,因外界环境影响,满足实验条件($z = 2.45, \theta = 56^\circ, A_c = A_s$)是很困难的。

本文测量时间由三部分组成,CCD 光电转换时间、低通滤波占用的时间、解相运算时间,其他延迟时间在纳秒量级,忽略不计。设 CCD 的帧频为 800 frame/s,则获得一帧干涉图(含 CCD 曝光时

间)占用 1.25 ms;低通滤波的移相角小于 180° ,其延迟时间小于 $T/2$,本文工作的截止频率为 100 Hz,占用时间为 5 ms;解相运算时间需要 10 条指令,平均每条指令按 3 个时钟周期,占用时间小于 8 ms。由于解相与曝光、低通滤波并行工作,因此整个表面形貌的测量时间小于 8 ms。

本文采用实时采集、实时鉴相、实时显示的方法,只需采集一幅图即可得到待测物体的表面形貌,不带附加条件,同时采用锁相等电路,消除了光强变化和部分外界干扰对测量精度的影响。

4 实 验

实验光路如图 1 所示。用激光二极管作光源(波长为 785 nm),波长调制系数为 0.156 nm/mA,激光调制器的转换系数为 0.001 mA/mV。CCD 探

测器的有效像素设置为 60×60 ,帧频为 800 frame/s。被测物体是一楔形光学平板。信号处理电路 1 中放大器 1 的增益 K_1 为 60.2,放大器 2 的增益 K_2 为 88.6,计算单元的系数 K_m 为 $5 \times 10^{-5}/\text{mV}$ 。选用一个四阶低通滤波器,增益 K_L 为 100。信号处理电路 2 的参量与信号处理电路 1 相同。调节干涉仪两干涉臂之间的初始光程差约为 6 mm,此时正弦相位调制深度^[8]为 2.63,实测系数 K 为 1.077。

楔形光学平板的表面形貌测量结果如图 4(a)所示,过一段时间之后,重复其测量过程,再对楔形光学平板的表面形貌进行测量,其测量结果如图 4(b)所示。其多次测量的重复测量精度(RMS)为 4.3 nm。为了获得测量表面形貌的延迟时间,在微处理器中设置了计时程序,进行了多次测量,其测量时间均小于 8.2 ms,与理论值相符。

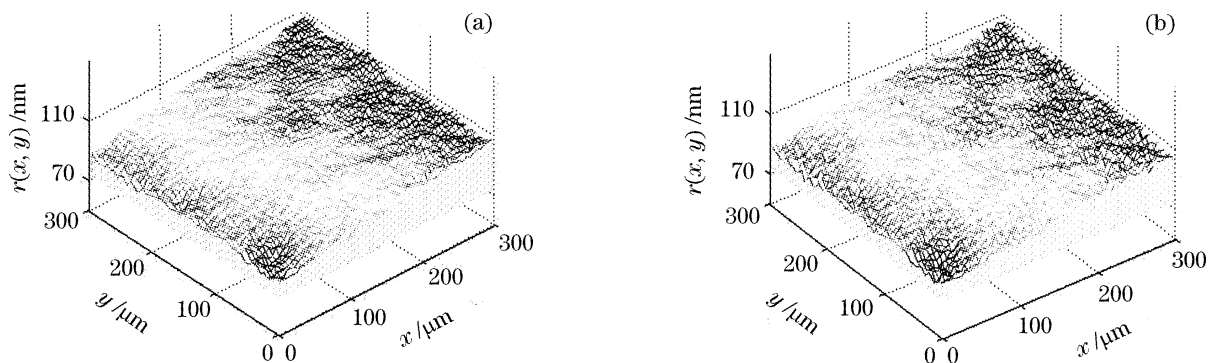


图 4 楔形光学平板的表面形貌图测量结果(a)与相隔几分钟后的测量结果(b)

Fig. 4 (a) The surface profile of an optical wedge, (b) the surface profile of the same optical wedge measured after an interval of a few minutes

为了说明消除光强变化影响的电路的作用,断开信号处理电路 2。修改微处理器的程序,根据(12)式,(20)式测量表面形貌,其重复测量精度为 6.56 nm。这说明设计的消除光强影响的电路可以明显降低光强变化与外界干扰对测量精度的影响。

光路部分和图像传感器保持不变,用文献[8]方法对楔形光学平板表面进行形貌测量,测量区域与上述测量区域相同。实验中干涉信号由 CCD 图像传感器接收并转换电信号,经过图像采集卡输入到计算机中。图像处理程序将信号进行处理获得楔形光学平板的表面形貌值。用该方法测得的楔形光学平板表面形貌如图 5 所示。其重复测量精度为 1.23 nm,测量一次需要约 2 min(非实时测量)。

比较图 5 与图 4 可知,两种测量方法获得的表面形貌相似,但文献[8]测量所需时间太长。本方法同实时测量方法(文献[14])相比,测量点数从 50×40 增加到 60×60 ,测量时间从 20 ms 减少到

8.2 ms,重复测量精度从 14 nm 提高到 4.3 nm。

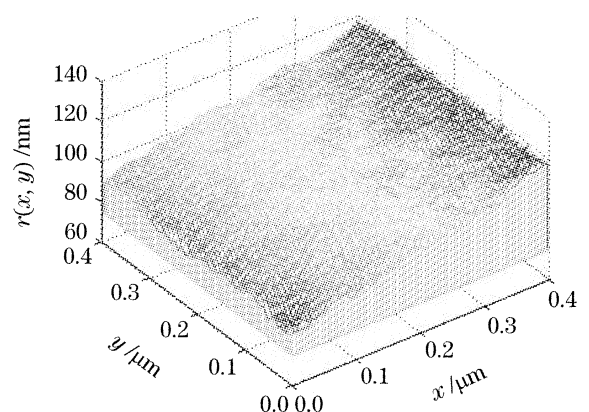


图 5 采用参考文献[8]方法测得的楔形光学平板表面形貌
Fig. 5 The surface profile of the optical wedge measured with the interferometer in Ref. [8]

5 结 论

提出了一种物体表面形貌的正弦相位调制实时

干涉测量方法。利用两信号处理电路对干涉信号进行实时鉴相处理和相位分析,实现了表面形貌的实时测量,避免了使用计算机进行复杂的解相运算。同时,该方法消除了光强变化和外界干扰对测量精度的影响。采用该方法测量了楔形光学平板的表面形貌,测量时间小于 8.2 ms,重复测量精度为 4.3 nm。

致谢 感谢日本新潟大学 Osami Sasaki 教授为本研究提供了进行对比实验所需的设备、处理程序及实验指导。

参 考 文 献

- 1 R. Shinozaki, O. Sasaki, T. Suzuki. Fast scanning method for one-dimensional surface profile measurement by detecting angular of a laser beam[J]. *Appl. Opt.*, 2004, **43**(21): 4157~4163
- 2 C. J. Tay, C. Quan, Y. Fu *et al.*. Instantaneous velocity displacement and contour measurement by use of shadow moiré and temporal wavelet analysis[J]. *Appl. Opt.*, 2004, **43**(21): 4164~4171
- 3 F. Chen, G. M. Brown, M. Song. Overview of three-dimensional shape measurement using optical methods[J]. *Opt. Engng.*, 2002, **39**(1): 10~22
- 4 Xiangzhao Wang, Osami Sasaki, Yuuichi Takebayashi *et al.*. Sinusoidal phase-modulating Fizeau interferometer using a self-pumped phase conjugator for surface profile measurements[J]. *Opt. Engng.*, 1994, **33**(8): 2670~2674
- 5 Osami Sasaki, Yuuichi Takebayashi, Xiangzhao Wang *et al.*. Exact measurement of flat surface profiles by object shifts in a phase-conjugate Fizeau interferometer[J]. *Opt. Engng.*, 1995, **34**(10): 2957~2963
- 6 Jin Guofan, Li Jingzhen. *Laser Surveying* [M]. Beijing: Science Press, 1998. 5~300 (in Chinese)
金国藩,李景镇. 激光测量学[M]. 北京: 科学出版社, 1998. 5~300
- 7 J. Bruning, D. Herriott, J. Gallagher *et al.*. Digital wavefront measuring interferometer for testing optical surfaces and lenses [J]. *Appl. Opt.*, 1974, **13**: 2693~2701
- 8 O. Sasaki, H. Okazaki. Sinusoidal phase modulating interferometry for surface profile measurement[J]. *Appl. Opt.*, 1986, **25**(18): 3137~3140
- 9 Luan Zhu, Liu Liren, Liu Deaan *et al.*. Double shearing wavefront testing[J]. *Acta Optica Sinica*, 2004, **24**(10): 1417~1420 (in Chinese)
栾 竹,刘立人,刘德安 等. 双剪切波面干涉测量法[J]. 光学学报, 2004, **24**(10): 1417~1420
- 10 O. Sasaki, T. Okamura, T. Nakamura. Sinusoidal phase modulating Fizeau interferometer[J]. *Appl. Opt.*, 1990, **29**(4): 512~515
- 11 Takamasa Suzuki, Osami Sasaki, Shuich Takayama *et al.*. Real-time displacement measurement using synchronous detection in a sinusoidal phase modulating interferometer[J]. *Opt. Engng.*, 1993, **32**(5): 1033~1037
- 12 Li Dailin, Wang Xiangzhao, Wang Xuefeng *et al.*. Composite-light-source interferometer for real-time micro-vibration measurement[J]. *Chin. J. Lasers*, 2004, **31**(3): 350~353 (in Chinese)
李代林,王向朝,王学锋 等. 复合光源实时微振动干涉测量仪 [J]. 中国激光, 2004, **31**(3): 350~353
- 13 Wang Xuefeng, Wang Xiangzhao, Yu Danyang *et al.*. Photothermal modulation laser diode interferometer insensitive to external disturbances[J]. *Acta Optica Sinica*, 2001, **21**(11): 1368~1371
- 14 Takamasa Suzuki, Osami Sasaki, Jinsaku Kaneda *et al.*. Real time two dimensional surface profile measurement in a sinusoidal phase modulating laser diode interferometer[J]. *Opt. Engng.*, 1994, **33**(8): 2754~2758
- 15 Takamasa Suzuki, Osami Sasaki, Takeo Maruyama. Phase locked laser diode interferometry for surface profile measurement [J]. *Appl. Opt.*, 1989, **28**(20): 4407~4410
- 16 O. Sasaki, H. Okazaki, M. Sakai. Sinusoidal phase modulating interferometer using integrating-bucket method[J]. *Appl. Opt.*, 1987, **26**(6): 1089~1093