

用于动态测量的双通道光学相位测量轮廓术

任守强

方 强

(西北核技术研究所, 西安 710024) (西安交通大学应用物理系, 西安 710049)

摘 要 提出了利用编码光两个采样值实现相位测量轮廓术的原理。设计了一种偏振分光双通道测量系统, 实现了两个采样值的同时记录, 因而实现了动态测量, 拓展了相位测量轮廓术的应用范围。文中给出了实验结果。

关键词 相位测量轮廓术, 双通道系统, 动态测量。

1 引 言

相位测量轮廓术^[1](PMP)是一种高性能的光学三维面形测量技术,它具有并行处理能力,对被测表面反射率变化及噪声的敏感性低,自动化测量程度高。然而,实现相位测量轮廓术通常需要三次以上的采样。由于在技术上难以同时实现三个以上的采样,相位测量轮廓术只能用于静态表面的测量。在工程实践和科学研究中,动态表面测量也是经常需要解决的问题。目前,傅里叶变换轮廓术^[2]和莫尔轮廓术^[3]都可以实现动态面形的测量,但前者对突变结构及反射率变化敏感,后者自动化程度低。本文在对相位测量轮廓术深入分析的基础上,提出了利用两个采样值实现相位测量轮廓术的依据和原理。设计了利用偏振分光的双通道测量系统,实现了两个采样值的同时记录。这就使得相位测量轮廓术能够用于动态表面的测量,为动态表面的测量提供了一种优越方法。本文给出了验证该方法的实验结果。

2 测量原理

在相位测量轮廓术中,采用正弦光对被测表面进行编码,编码后的计量场强度分布为:

$$I(x, y, \delta) = I_0 r(x, y) \{1 + V(x, y) \cos [\Phi(x, y) + \delta]\} \quad (1)$$

其中, I_0 为编码光的背景强度, $r(x, y)$ 为物表面的反射率, $V(x, y)$ 为条纹对比度, $\Phi(x, y)$ 为表面轮廓引起的相位变化,也就是要测的量, δ 为可控相位调制量。在该计量场中,轮廓信息 $\Phi(x, y)$ 可以通过改变 δ 并探测相应的强度值来提取。由三角函数的性质,一般需要三个不同 δ 处的采样值,才可以导出 $\Phi(x, y)$ 。

在相位测量轮廓术的实现中,可以用两种方法形成正弦编码光:一种是将正弦光栅用投影仪投影到被测表面,另一种办法是用干涉的方法形成正弦条纹。通常都是尽可能将条纹对比度做成常数。在测量所用的局部调制区中,对比度完全可视为常数。因此,计量场的分布

可写为:

$$I(x, y, \delta) = I_{or}(x, y) \{1 + V \cos [\Phi(x, y) + \delta]\} \quad (2)$$

在这种计量场中, 只需两次采样就可解出 $\Phi(x, y)$ 。

取 $\delta = 0$ 和 $\delta = \delta_0$ 时的采样值,

$$I(x, y, 0) = I_{or}(x, y) \{1 + V \cos \Phi(x, y)\} \quad (3)$$

$$I(x, y, \delta_0) = I_{or}(x, y) \{1 + V \cos [\Phi(x, y) + \delta_0]\} \quad (4)$$

由(3), (4)式可得:

$$\begin{aligned} VI(x, y, \delta_0) \cos \Phi(x, y) - VI(x, y, 0) \cos [\Phi(x, y) + \delta_0] \\ = I(x, y, 0) - I(x, y, \delta_0) \end{aligned} \quad (5)$$

$$\because \cos [\Phi(x, y) + \delta_0] = \cos \Phi(x, y) \cos \delta_0 - \sin \Phi(x, y) \sin \delta_0$$

$$\begin{aligned} \therefore VI(x, y, 0) \sin \delta_0 \sin \Phi(x, y) + V[I(x, y, \delta_0) - I(x, y, 0) \cos \delta_0] \cos \Phi(x, y) \\ = I(x, y, 0) - I(x, y, \delta_0) \end{aligned} \quad (6)$$

$$\text{令 } P = I(x, y, 0) \sin \delta_0, Q = I(x, y, \delta_0) - I(x, y, 0) \cos \delta_0,$$

(6)式化为:

$$P \sin \Phi(x, y) + Q \cos \Phi(x, y) = \frac{1}{V} [I(x, y, 0) - I(x, y, \delta_0)] \quad (7)$$

令 $M = \sqrt{P^2 + Q^2}$, $\cos \beta = P/M$, $\sin \beta = Q/M$, 则(7)式可变成:

$$\sin [\Phi(x, y) + \beta] = \frac{1}{MV} [I(x, y, 0) - I(x, y, \delta_0)] \quad (8)$$

因此:

$$\Phi(x, y) = \arcsin \frac{I(x, y, 0) - I(x, y, \delta_0)}{MV} - \arcsin \frac{I(x, y, \delta_0) - I(x, y, 0) \cos \delta_0}{M} \quad (9)$$

其中, $\Phi(x, y)$ 为 $\Phi(x, y)$ 在主值区间的值。将该值用相位展开算法^[4]展开即可求出 $\Phi(x, y)$, 然后根据测量系统中物体面形空间坐标与相位分布之间的关系, 就可以获得物表面的轮廓。

3 双通道动态测量系统

上节给出了利用两个采样值实现相位测量轮廓术的原理, 如果能实现这两个采样值的同时记录, 就可用相位测量轮廓术实现动态测量, 图 1 为一种利用光偏振特性进行分光的双通道相位测量轮廓术动态测量系统原理图, 两周期相同的正弦光栅由两投影仪分别投影到被测表面上, 在两投影仪前各放置一偏振片, 它们的偏振方向互相垂直。这两套投影仪相对于分束镜互为共轭。投影到被测表面上的光场经成像透镜和分束镜后分别成像在两个探测器

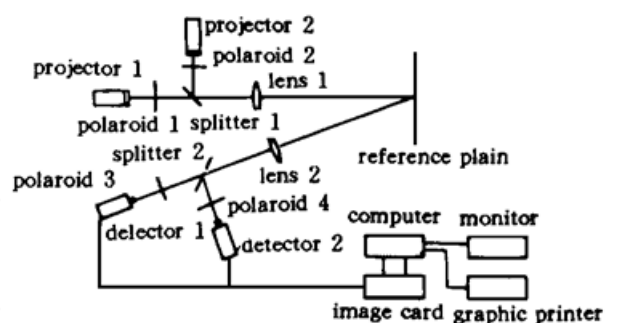


Fig. 1 The principle arrangement of measurement system

上。在两探测器前各放一个偏振片，其偏振方向分别与投影仪前的偏振片方向重合，这样就在测量空间中形成了两个独立的测量通道。在两投影仪中，将两光栅错开一个确定的相移角，就可在探测器上同时得到具有一定相位差的两个采样值，因而可以实现两采样值的同时记录，实现动态测量。

在该硬件系统上，尚需配上计量软件才能形成一个完整的计量系统。计量软件要完成以下任务：

- 1) 计量信号采集：完成两计量信号的同步采样；
- 2) 系统定标：建立所测相位值 $\Phi(x, y)$ 与被测轮廓坐标之间的联系，定标方法与相位测量轮廓术中所用方法相同；
- 3) 信号处理：包括抑制信号噪声、相位解算及相位展开；
- 4) 相位与轮廓坐标转换：将所测相位分布变换成轮廓坐标；
- 5) 轮廓信息输出：将测量的轮廓信息按所需要的形式输出，如三维立体图、等高线和某个截面图等。

作者按上述方法在实验室中建立了一套完整的测量系统。这里要指出，双通道相位测量轮廓术能利用相位展开原理自动判别条纹的凹凸性，其数据处理量只与采样计算的点数有关，与编码光结构无关。

4 原理实验

在所建立的实验系统上对一个半球面的模型进行了原理实验。在测量时，步进电机驱动的平台带动模型做平动。在计算机控制下，两台探测器进行同步采样，采样时间为 $1/30$ s，在该期间内，模型可以看成是静止的。图 2 为该模型的实物照片。图 3 和图 4 分别为两个通道获得的采样图像，两图像的相位差(相位调制量)为 $\pi/3$ 。



Fig. 2 Real object photograph



Fig. 3 Sample pattern of channel 1



Fig. 4 Sample pattern of channel 2

图 5 为求解出的相位图，图 6 为最后得到的表面轮廓三维立体图。该结果表明通过两次采样可以实现相位测量轮廓术，并能应用于动态测量。



Fig. 5 Phase fringe pattern

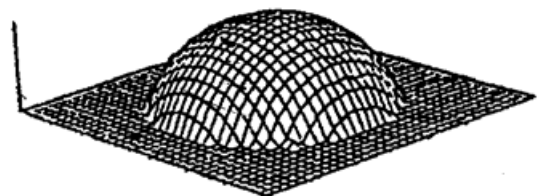


Fig. 6 Three-dimension stereo map

总 结 本文提出了利用两个采样值实现相位测量轮廓术的原理, 给出了进行相位解码的一般公式。从原理上讲, 这种方法可以用于静态测量。但由于一个测量系统的精度随所采集信息的富裕度的增加而增加。因此, 它用于静态测量的精度要低于常规的相位测量轮廓术实现方法。作者认为, 此法宜用于动态表面的测量。本文设计了一种基于偏振分光的双通道面形测量系统, 利用该系统可以实现两个采样值的同时记录, 从而实现了动态测量。实验表明, 这种方法是可行的。它拓宽了相位测量轮廓术的应用范围。

从理论上讲, 利用任意已知的相位调制量 δ_0 都可以求出 $\Phi(x, y)$ 。但在实际测量中, 探测值 $I(x, y, 0)$ 和 $I(x, y, \delta_0)$ 总存在着探测误差。这种误差是由于实际系统的各种实施误差造成的, 因而总存在着测量误差。在系统实施误差相同的情况下, 对于不同的相位调制量 δ_0 , 测量结果会不相同。理论上存在着一个使测量误差最小的 δ_0 值。此外, 条纹密度、探测器动态范围、相位调制量、物表面反射特性及光照度匹配等都是影响测量精度的因素, 这些参数是互相制约的。有关这方面的工作正在开展, 其结果待成熟后发表。本文实验所用的 $\pi/3$ 相位调制量是任选的一个值, 并不是最佳相位调制量。

最后需要指出, 本文提出的利用偏振分光实现双通道测量的系统不适用于具有消偏振特性的表面。对于这种表面, 可以用分频段的方法实现双通道系统, 即将本文所给系统中的偏振片对换成位于两个不同频段的滤波片对。

参 考 文 献

- [1] V. Srinivasan, H. C. Liu, M. Halioua, Automated phase-measuring profilometry of 3-D diffuse objects. *Appl. Opt.*, 1984, **23**(18): 3105~ 3108
- [2] Mitsuo Takeda, Kazuhiro Mutch, Fourier transform profilometry for the automatic measurement of 3-D object shapes. *Appl. Opt.*, 1983, **22**(24): 3977~ 3982
- [3] Duncan T. Moore, Bruce E. Truax, Phase-locked moire fringe analysis for automated contouring of diffuse surfaces. *Appl. Opt.*, 1979, **18**(1): 91~ 96
- [4] William W. Macy, Jr., Two-dimensional fringe-pattern analysis. *Appl. Opt.*, 1983, **22**(23): 3898~ 3901

Two-Channel Phase Measuring Profilometry Used in Dynamic Measurement

Ren Shouqiang

(Northwest Institute of Nuclear Technology, Xi'an 710024)

Fang Qiang

(Department of Applied Physics, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049)

(Received 6 April 1996; revised 20 June 1996)

Abstract A new method of phase measuring profilometry, which uses only two samples of the coded intensity, is presented. By using polarization property, a two-channel measuring system is designed, by which the two samples can be recorded simultaneously. Based on this system, the phase measuring profilometry can be used in the measurement of dynamic profile. This method broadens the application range of the measuring profilometry. The experimental results verify the reliability of the proposed methods.

Key words phase measuring profilometry, two-channel system, dynamic measurement.