

# 高精度全息干涉计量——相移技术的应用

郑 文 谭玉山

(西安交通大学机械工程系, 西安 710049)

## 提 要

本文介绍了一种精确的全息干涉相位测量系统。采用双曝光、双参考光束,并引入相移技术,能够同时获得全场  $256 \times 256$  个点的相位变化值;相位测量的重复性优于 2%,全场处理时间少于 2 分钟。

关键词: 全息干涉计量, 相移, 相位图。

## 一、前 言

应用全息干涉技术测量变形场时,必须首先准确地求得条纹图的相位分布,由相位值与相应的灵敏度矢量(由测量系统几何参数决定)求出物表面的位移<sup>[1]</sup>,才能得知变形。就全场而言,要处理的信息量很大,因而对测量速度、自动化程度有较高要求。条纹分析的方法很多,通常用抽取条纹骨架的方法,比较干涉图中不同空间位置上光强的大小来进行。探测到的光强大小不仅与两干涉波面的相对相位有关,而且受背景光强及探测器特性的影响;用计算机处理时一般需要通过人机对话才能完成。所以,能达到的精度、速度都非常有限。

本文报道的相移法<sup>[2,3]</sup>,在很大程度上克服了以上不足。其基本思想是:通过人为改变两干涉波面的相对位相,比较干涉场中同一点在不同时刻光强的大小来求解该点的相位值。这种方法的主要特点有:(1)很高的测量精度(可达  $\lambda/100$ );(2)处理速度快;(3)在条纹对比度很低的情况下仍能得到良好的结果;(4)相位测量不受背景光强起伏的影响;(5)可同时获得全场各点的相位值(本文为  $256 \times 256$ )。综合测量系统的实用化、自动化、速度、精度及设备的要求,相移干涉计量有很突出的优越性,故它在干涉检测领域定会有越来越广泛的应用。

## 二、双参考光束相移全息干涉计量

采用双参考光束的二次曝光法,通过改变两参考光束的相对相位,从而改变再现的物体变形前后两物波波面的相位,达到相移的目的。再现形成的条纹场可表示为:

$$I_i(x, y) = I_0(x, y) \{1 + m(x, y) \cdot \cos[\varphi(x, y) + \delta_i]\}, \quad (1)$$

式中  $\varphi(x, y)$  为物体变形引起的相位变化,  $\delta_i$  为引入的相移量,  $I_0$  为背景光强,  $m$  为对比度。

取  $\delta_i$  分别为  $0, \frac{2}{3}\pi, \frac{4}{3}\pi$  可求得:

$$\varphi(x, y) = \arctan \left[ \frac{\sqrt{3} (I_3 - I_2)}{2I_1 - I_2 - I_3} \right]. \quad (2)$$

从(2)式可以看出,理想情况下相位测量与背景光强  $I_0$  及条纹对比度  $m$  无关,且每一点的相位计算不受周围其它点的影响,此即相移方法的最大优点。判断分子分母的符号,求出的  $\varphi$  值域为  $[-\pi, \pi]$ ,并量化为  $0 \sim 255$  灰度级。进行相位展开后,即得到所求相位场。

所用测量系统如图 1 所示。计算机通过 D/A 控制线性较好的压电陶瓷 PZT 的驱动电压,移动  $M_4$  获得准确的相移量。光路中采用一密封罩,以减少气流、尘粒的影响,保证两参考光束的相对稳定性;采用线性好、动态范围大和噪声低的 CCD 摄像机。干涉图经 CCD、Povisson-plus 图像板被数字化成  $512 \times 512 \times 8 \text{ bit}$  的数字图像,对其进行隔行隔列的  $3 \times 3$  平均,缩小为  $256 \times 256$  存于图像板帧存中。从 PZT 控制、图像摄取,到平滑滤波、相位计算及展开等一系列操作都是在计算机控制下自动完成

对全场  $256 \times 256$  个点的处理时间少于 2 分钟。采用本系统进行了实际测量,图 2(a) 为一有脱胶缺陷的蜂窝结构板在真空加载时的双曝光全息图及计算得出的相位图。原始条纹图中,背景光强起伏较大,条纹对比度平均为 0.23,很难分清缺陷和背景。相位图中完全消除了背景光强的干扰,缺陷位置及各部分变形情况非常清楚。图 2(b) 为一刚体位移平板的

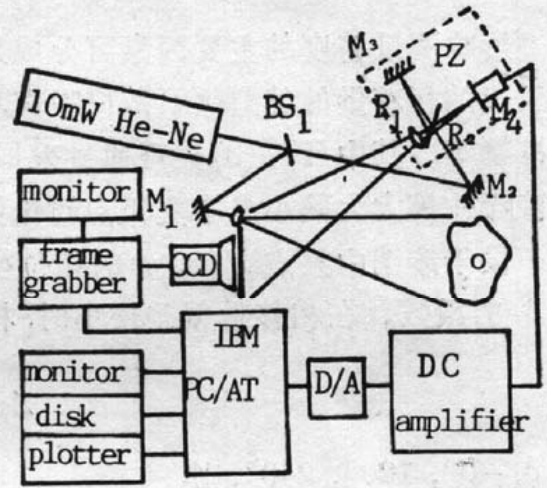
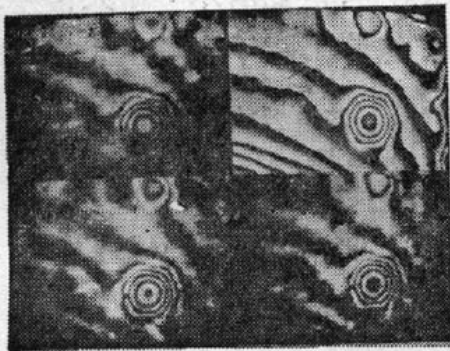
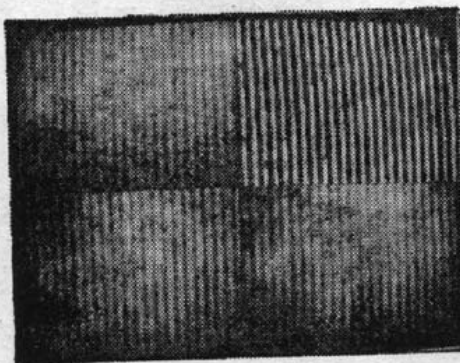


Fig. 1 Phase measurement system

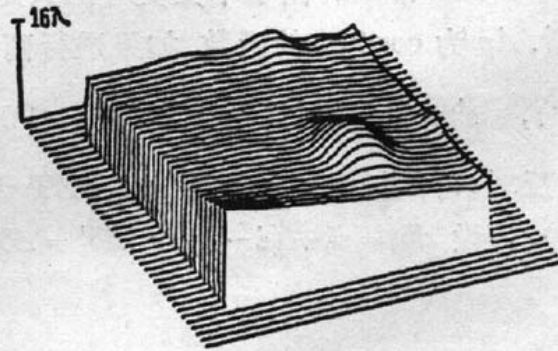


(a)

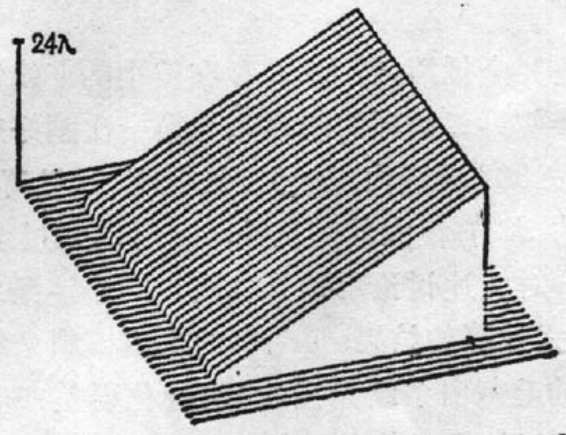


(b)

Fig. 2 Original fringe pattern and phase map



(a)



(b)

Fig. 3 Three-dimensional display of the out-of-plane displacement

实验结果, 原始图的散斑噪声大, 对比度平均为 0.1。图 3(a)、(b) 为相应离面位移的三维图形。

### 三、精 度

影响测量精度的主要因素可分成几类: (1) 相移器非线性、标定不准确, 尘粒、气流、振动等引起的相移量的偏差; (2) 散斑噪声, 探测器电噪声及其非线性; (3) 干板记录非线性、复位不准确等。其中 (2)、(3) 类可通过采用 CCD、低通滤波、多帧平均、系统参数选择及细致的实验操作等大大减小。本文重点讨论第 (1) 类的影响。

设干涉图中某点  $P(x, y)$  的相位变化  $\varphi_0(x, y)$  与相移量无关。由 (2) 式计算的相位值是  $\delta_i$  的函数。在相移量偏差较小时, 相位计算误差可近似为 (设  $\varphi = f(\delta_i)$ ):

$$\Delta\varphi \approx \sum_{i=1}^3 \frac{\partial f(\delta_i)}{\partial \delta_i} \Delta\delta_i$$

取  $\delta_i = 0^\circ, 120^\circ, 240^\circ$ , 则:

$$\begin{aligned} \Delta\varphi = & \frac{1 - \cos 2\varphi_0(x, y)}{3} \Delta\delta_1 + \frac{1 + \cos [2\varphi_0(x, y) + 60^\circ]}{3} \Delta\delta_2 \\ & + \frac{1 + \cos [2\varphi_0(x, y) - 60^\circ]}{3} \Delta\delta_3. \end{aligned} \quad (3)$$

由此得知, 相位计算误差与相移量偏差在同一量级, 且变化周期为原条纹图的 2 倍, 可见测量精度主要取决于两参考光束相对移动量的准确性与稳定性。特别地, 当  $\Delta\delta_1 = \Delta\delta_2 = \Delta\delta_3 = \varepsilon$  时,  $\Delta\varphi = \varepsilon$  为一常数。由于本文关心的只是  $\varphi$  的相对量, 故此时不会引入误差。

从 (3) 式来看,  $\Delta\varphi$  为  $\cos 2\varphi_0$  的函数, 如果进行两次测量, 使第二循环的相移量  $\delta'_i = \delta_i + 90^\circ$ , ( $i = 1, 2, 3$ ),  $\varphi'_0 = \varphi_0 + 90^\circ$ ,  $\bar{\varphi} = \frac{1}{2}(\varphi' + \varphi - 90^\circ)$ , 则  $\Delta\bar{\varphi} = \frac{1}{2}(\Delta\varphi' + \Delta\varphi)$ ,  $\Delta\varphi'$  与  $\Delta\varphi$  的余弦项符号相反, 故可能抵消部分误差。当 PZT 为线性时, 相移量偏差也一定为线性 (假定电压线性增加), 可设  $\Delta\delta_i = \varepsilon_0 + (i-1) \cdot \varepsilon$ ,  $\Delta\delta'_i = \Delta\delta_i + \alpha_0$  ( $i = 1, 2, 3$ ;  $\varepsilon_0, \varepsilon, \alpha_0$  为常数), 由 (3) 式得:

$$\Delta\bar{\varphi} = \frac{1}{2}(\Delta\varphi' + \Delta\varphi) = \varepsilon_0 + \varepsilon + (\alpha_0/2), \quad (4)$$

误差完全抵消。若 PZT 存在较小的非线性, 采用以上方法, 能消除大部分误差。一般情况下, 很难使第二循环的相移量与第一次刚好差  $90^\circ$ , 可以很容易证明, 只要两次测量的相移差在  $90^\circ \pm 30^\circ$  范围内, 这种方法就有效, 且离  $90^\circ$  越近, 平均的效果越好。由振动、气流、尘粒引起的  $\Delta\delta$  有很大的随机性,  $\Delta\varphi$  只能通过多次平均来减小。

对上述讨论用计算机模拟的干涉条纹进行了验证。结果如图 4 所示。图中光滑曲线为由 (3) 式计算的结果; 带毛刺的是由模拟条纹计算的  $\varphi(x, y)$  与理想值  $\varphi_0(x, y)$  相减的结果, 曲线的毛刺由条纹光强 8 bit 量化误差产生 (约为  $\pm 0.5^\circ$ )。由图 4 看出, 作者推导的误差公式能很好地描述相移量偏差引起的相位误差, 且可用两个测量周期平均的方法有效地减小。

另外, 对两个实验结果进行了研究, 以考查系统的测量精度。首先, 如图 2(b) 所示的刚体位移平板, 理想情况下, 其相位变化量应在同一平面之内。以此为根据, 计算了平板在不

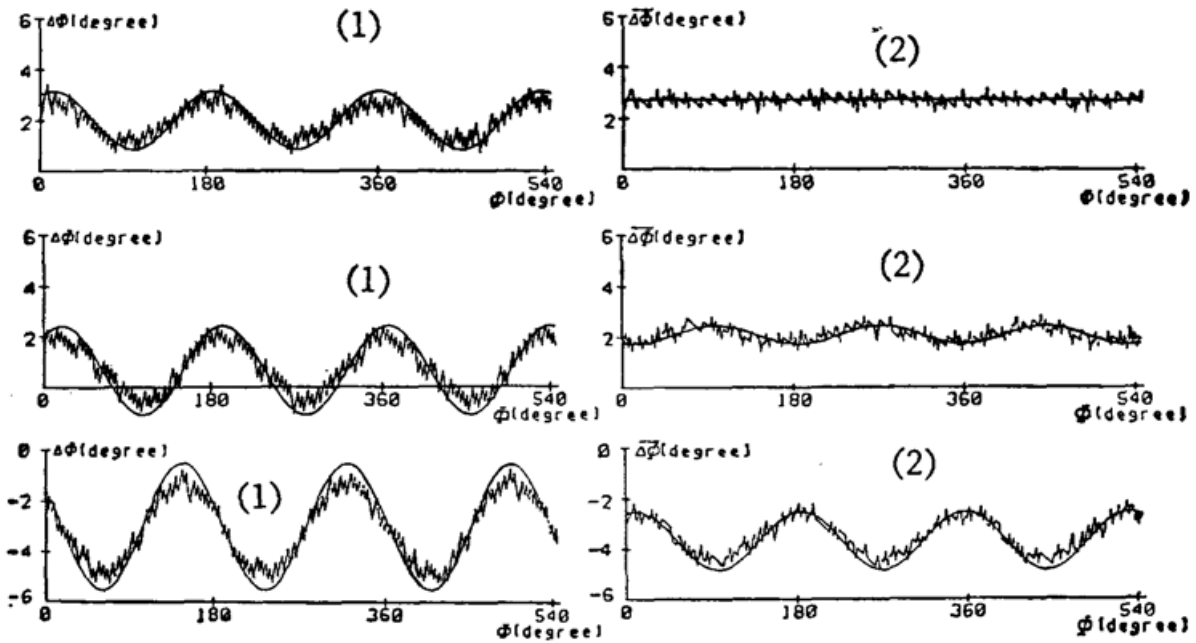


Fig. 4 Phase error estimate

Phase stepping: (a) Linearity, (1)0, 122, 244. (2)0, 122, 244; 91.5, 213.5, 335.5; (degree) (b) Small nonlinearity, (1)-2, 120, 244; (2)-2, 120, 244; 89.5, 213, 338; (c) Randomness, (1)-6, 122, 235. (2)-6, 122, 235; 93, 216, 326

同位移量(不同条纹数)时的相位图,平面度相对误差约为  $\pm 0.5\%$ ;其次,对一占 256 像素的条纹图进行了 20 次重复测量,图 5 为一截面 20 次测量的相位分布,其重复性优于 2%。

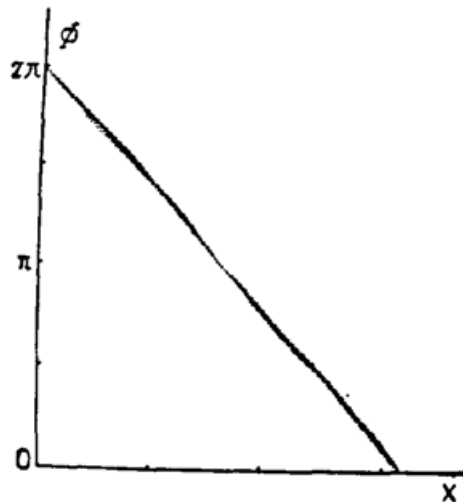


Fig. 5 Repeatability test (20 times)

## 五、结 论

本文将相移技术应用于双参考光束、双曝光全息干涉计量中,运用数字图像处理技术,大大提高了条纹分析的速度和精度;设计了一种实用的测量系统,并较详细地考查了该系统的测量误差,充分证明了它的实用价值。

## 参 考 文 献

- [ 1 ] J. E. Sollid; *Appl. Opt.*, 1969, **8**, No. 7 (Jul), 1587~1592.  
[ 2 ] J. H. Bruning; *Appl. Opt.*, 1974, **13**, No. 11 (Nov), 2693~2703.  
[ 3 ] Ming Chang; *Appl. Opt.*, 1985, **24**, No. 22 (Nov), 3780~3783.  
[ 4 ] E. Wolf; *«Progress in Optics»*, (University of Rochester, N. Y., U. S. A., 1980), 40~44.

## Accurate holographic interferometry—application of phase stepping technique

ZHENG WEN AND TAN YUSHAN

(*Department of Mechanical Engineering, Xian Jiaotong University, Xian 710049*)

(Received 8 June 1990; revised 6 September 1990)

### Abstract

A system for accurate phase determination using two-reference-beam, double-exposure holographic interferometry and phase-stepping technique is described. It calculates the interference phase pointwise with repeatability better than 2%, and takes less than 2 min for a  $256 \times 256 \times 8$  bit image.

**Key words:** holographic interferometry, phase stepping, phase map.