

用全息横向错位法判别物体变形方向

范叔钟

(机制教研室)

摘 要

本文提出了利用干版横向错位法来判别物体表面变形方向的原理,分析了干版移动方向与干涉条纹变化之关系,并用实验结果加以验证。

Determination of the Direction of Deformation on Surface by Lateral Shearing Holographic Interferometry

Fan Shu-zhong

Abstract

In this paper a principle for determining the direction of deformation on surface by lateral shearing holographic interferometry is proposed and the relationship between the direction of movement of holographic plate and the change of interferometric fringes is discussed. The principle is verified by means of experimental results.

一、引 言

对于非透明物体表面,采用漫反射处理,在一定条件下,应用激光全息干涉技术,采用两次曝光法时所得到的全息图,可以很方便地用来确定被测物点的位移量或变形量。在一定条件下,变形量可用下述公式计算:

$$d = \frac{1}{2}m\lambda$$

其中 λ 为激光光波波长, m 为全息图再现现象上干涉条纹级数^{[1][2]}。而相邻两测点的相对位移量为

$$\Delta d = \frac{1}{2} n \lambda$$

其中 n 为再现现象上相邻两点的干涉条纹数。正因为干涉条纹数可以准确确定, 而波长又事先已知, 因而被测点位移量 d 或被测点间相对位移量 Δd 就可以精确测定。但是, 公式中缺少反映变形方向的部份, 以致于单凭干涉条纹数无法判别物面变形方向, 而工程研究中, 确定物面变形或位移方向是极其重要的, 有时甚至比研究位移量还要重要。

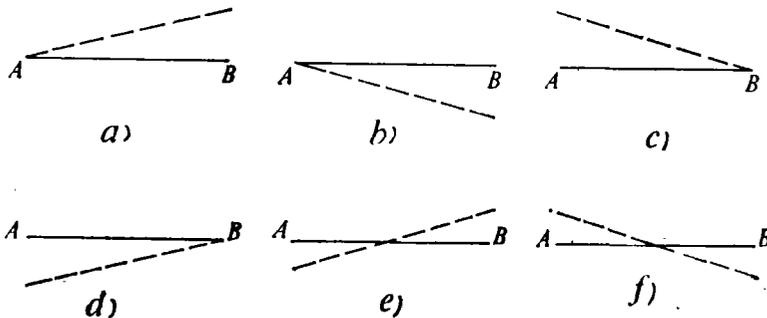


图 1

图 1 (a) 至图 1 (f) 表示物面上两点 A 和 B 几种不同的相对位移情况。其中实线表示物面原来的位置, 虚线表示变形后的位置。如果 A 与 B 相对位移量相等, 采用两次曝光法时, 再现现象上干涉条纹数量及分布情况将会相同。这说明单凭干涉条纹图样, 虽然可以应用上述公式计算出 A 与 B 两点间相对位移量, 但无法确定变形方向。

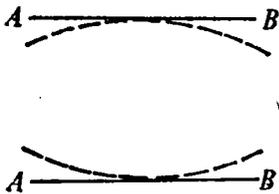


图 2

图 2 表示物面另外两种变形情况, 这两种情况下, 干涉条纹图样由于相似, 不仅无法确定变形方向, 而且还会误认为 A 与 B 之间存在着相对位移量, 而实际上是 A 与 B 之间相对位移量可能是零。

为了辨认位移方向, 可以在两次曝光法获得的全息图的基础上, 在被测物面上人为附加一个已知方向的力, 以得到另一张全息图。根据这两张全息图再现现象上的干涉条纹图样, 也可以确定物面变形方向。但多数情况下是不允许采用附加外力的。这时, 我们认为可以采用横向错位干涉法加以辨认。这种方法是首先按两次曝光法获得一张全息图。称为原全息图, 其再现现象上干涉条纹图样称为原干涉条纹图样。当然, 它是可以用来确定变形量或位移量的。此后, 还重覆进行一次上述试验。但在第二次曝光前, 除了物面因受载有变形之外, 还要使干版在横向方向上, 即平行于物面方向上作微小移动, 之后方进行第二次曝光, 以获得另一张全息图, 称为错位全息图, 其再现现象干涉条纹图样称为错位干涉条纹图样。根据这两张图样, 既可以确定变形量又可以确定变形方向。

二、原 理

错位干涉条纹图样与原干涉条纹图样上的条纹分布有明显的差别，这种差别与物面变形方向有直接关系。

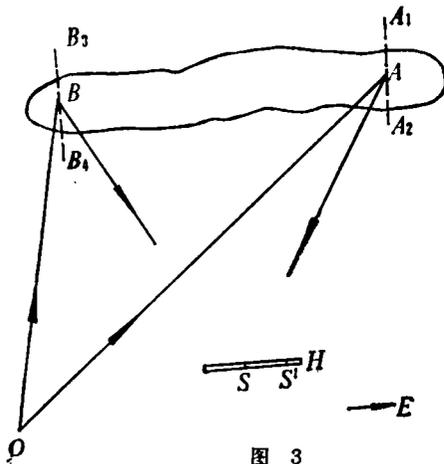


图 3

图 3 表示物面上变形情况及光路布置图。图中 H 为干版， S 为观察点， O 为照射光源， A 为在观察点右边物面上被测点， B 为在观察点左边物面上被测点， A_1 和 A_2 分别为 A 点向后变形和向前变形后的位置， B_1 和 B_2 分别为 B 点向后变形和向前变形后的位置。错位干涉时，干版 H 向右移动，移动量为 E ，移动后的观察点为 S' 。

被测点位于观察点右边的 A 点，向后位移于 A_1 点，两位置的光程差 Δ_1 为

$$\Delta_1 = (OA_1 + A_1S) - (OA + AS)$$

错位干涉时，干版向右移动 E ，其光程差 δ_1 为

$$\delta_1 = (OA_1 + A_1S') - (OA + AS)$$

$$\begin{aligned} \delta_1 - \Delta_1 &= (OA_1 + A_1S') - (OA + AS) - (OA_1 + A_1S) + (OA + AS) \\ &= A_1S' - A_1S \end{aligned}$$

从图 3 上可以看出 $A_1S' < A_1S$ ，即

$$\delta_1 - \Delta_1 < 0$$

$$\delta_1 < \Delta_1$$

这表明错位干涉条纹图样上，被测点 A 的条纹级数比原干涉条纹图样上的条纹级数要低，即条纹变少变稀。

若 A 点是向前变形至 A_2 ，则光程差 Δ_2 为

$$\Delta_2 = (OA + AS) - (OA_2 + A_2S)$$

错位干涉时，其光程差 δ_2 为

$$\delta_2 = (OA + AS) - (OA_2 + A_2S')$$

光程差 Δ_2 及 δ_2 与相应的干涉条纹图样上条纹级数相一致。它们的差值为

$$\delta_2 - \Delta_2 = A_2S - A_2S'$$

从图 3 也可以看出 $A_2S > A_2S'$ ，则

$$\delta_2 - \Delta_2 > 0$$

$$\delta_2 > \Delta_2$$

这表明与原干涉条纹图样相比较，错位干涉条纹图样上被测点条纹级数要提高，即图样上相

应位置条纹变多、变密。

以上分析可以得出结论：凡被测点位于观察点右边时，当错位干涉条纹图样上条纹变少、变稀之处，其变形方向是向后；条纹变多、变密之处，其变形方向是向前。

若被测点位于观察点左方时，干版错位方向仍然向右，被测点 B 向后位移至 B_3 时，其相应的光程差为

$$\Delta_3 = (OB_3 + B_3S) - (OB + BS)$$

$$\delta_3 = (OB_3 + B_3S') - (OB + BS)$$

$$\delta_3 - \Delta_3 = B_3S' - B_3S$$

从图 3 可以看出 $B_3S' > B_3S$ ，即

$$\delta_3 - \Delta_3 > 0$$

$$\delta_3 > \Delta_3$$

若被测 B 点向前移动至 B_4 时，其相应的光程差分别为

$$\Delta_4 = (OB + BS) - (OB_4 + B_4S)$$

$$\delta_4 = (OB + BS) - (OB_4 + B_4S')$$

$$\delta_4 - \Delta_4 = B_4S - B_4S'$$

同样可以从图 3 看出 $B_4S < B_4S'$ ，即

$$\delta_4 < \Delta_4$$

由此也可以得出相应的结论：凡被测点位于观察点的左方时，错位干涉条纹图样上，凡干涉条纹变多、变密之处，其变形方向是向后；变少、变稀之处，是向前变形。

以上分析可以列表如下：

干 版 向 右 错 位 时			
	$\delta_i - \Delta_i$	条纹变化情况	物面变形方向
被测点位于观察点右边	$\delta_1 - \Delta_1 = A_1S' - A_1S$	少	后
	$\delta_2 - \Delta_2 = A_2S - A_2S'$	多	前
被测点位于观察点左边	$\delta_3 - \Delta_3 = B_3S' - B_3S$	多	后
	$\delta_4 - \Delta_4 = B_4S - B_4S'$	少	前

通过以上分析，可以清楚看到，利用横向错位干涉法，很容易确定物面上被测点的变形方向。

三、分 析

1 上面分析的情况，是建立于干版向右方错位的条件下。不难发现。如果干版向左方错位时，对错位全息图也会有影响的。

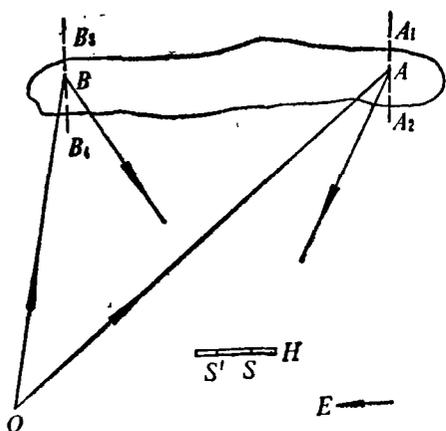


图 4

图 4 表示的是干版向左错位时光路布置图。其分析方法与图 3 相同。分析结果综合为下述公式：

$$\Delta_1 = (OA_1 + A_1S) - (OA + AS)$$

$$\delta_1 = (OA_1 + A_1S') - (OA + AS)$$

$$\delta_1 - \Delta_1 = A_1S' - A_1S$$

但此处 $A_1S' > A_1S$ ，即 $\delta_1 - \Delta_1 > 0$ ， $\delta_1 > \Delta_1$

$$\delta_2 - \Delta_2 = A_2S - A_2S'$$

此处 $A_2S < A_2S'$ ，即 $\delta_2 < \Delta_2$

$$\delta_3 - \Delta_3 = B_3S' - B_3S < 0$$

$$\delta_3 < \Delta_3$$

$$\delta_4 - \Delta_4 = B_4S - B_4S' > 0$$

$$\delta_4 > \Delta_4$$

其相应结论列表如下：

干 版 向 左 错 位 时			
	$\delta_i - \Delta_i$	条纹变化情况	物面变形方向
被测点位于观察点右边	$\delta_1 - \Delta_1 = A_1S' - A_1S$	多	后
	$\delta_2 - \Delta_2 = A_2S - A_2S'$	少	前
被测点位于观察点左边	$\delta_3 - \Delta_3 = B_3S' - B_3S$	少	后
	$\delta_4 - \Delta_4 = B_4S - B_4S'$	多	前

其相应的结论是：在干版向左错位情况下，凡被测点位于观察点左方的，其错位干涉条纹图样上干涉条纹变多、变密之处，其变形方向是向前；反之，变形方向是向后。而被测点位于观察点右方时，干涉条纹变多、变密之处，变形方向是向后，干涉条纹变少、变稀之处，其变形方向是向前。

2. 一个连续表面，全息图再现象上干涉条纹分布规律没有突然变化情况下，一旦某点的变形方向被确认之后，其周围各点的变形方向理当然是与之相同的。但物面上不同位置，错位干涉条纹图样上条纹变化程度是有差别的。这种差别影响了辨认变形方向的方便性。

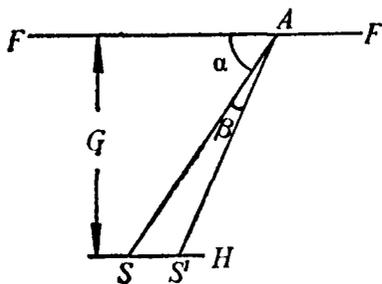


图 5

图 5 所示 FF 为物面， A 为被测点， H 为干版，干版是向右移动的情况，由于干版移动量 E 比 G 少得多， β 角是很小的。原干版条纹图样与错位干涉条纹图样上条纹级数变化值与绝对值 $|\delta_i - \Delta_i|$ 成正比，由于 β 角很小，可以认为

$$|\delta_i - \Delta_i| = E \cos \alpha$$

当被测点离观察点越远, α 值越小, 所以在相同 E 值下, $|\delta_i - \Delta_i|$ 也越大, 相应的条纹变化量也较大, 这是有利于辨认变形方向的。特别是该点的条纹级数较低时, 显示出的优越性越大, 这时, 应当用这些点来作为对比点。但是, 当该位置上条纹级数很高时, 在数条纹中有些不便之处。若接近观察点的位置上, 如果条纹阶数较低, 也可以被选作为被测点, 由于此点相应的 α 值较大, $E \cos \alpha$ 值较小, 两张干涉条纹图样上, 条纹级数的差别不大, 但相对变化值很大, 仍然有利于变形方向的辨别。以被测点为 A 为例来加以说明, 其变化值的绝对值为

$$|\delta_i - \Delta_i| = |A_i S' - A_i S|$$

其相对变化值为

$$\begin{aligned} \frac{|A_i S' - A_i S|}{A_i S} &= \frac{E \cos \alpha}{G} = \frac{E}{G} \sin \alpha \cos \alpha \\ &= \frac{E}{2G} \sin 2\alpha \end{aligned}$$

随着 α 的增加, 相对变化量也增加, 说明也有利于判别方向的。

3. 辨认物面上某点的变形方向, 是按照错位全息图再现象上条纹级数与原全息图再现象上条纹级数之差别来确定的, 就数学关系而言, 是按 $\delta_i - \Delta_i$ 的正负值来辨认变形方向。为了保证 $\delta_i - \Delta_i$ 值有出现正值或负值的可能性, Δ_i 值必须保证一定量, 即所取的被测点应具有有一定变形量, 否则会引起误判断。这一条件必须首先得到保证。

4. 错位移动量 E 值应当适当, E 值过小, 会使 $\delta_i - \Delta_i$ 差值甚小, 不利于判别; 反之, 若 E 值过大, 会使错位干涉条纹图样上条纹过密以致无法判断变形方向。

四、实 验

实验用的试件如图 6 所示, 材料为钢。夹持方式如图 7 所示。第一类加载方式如图 8 所

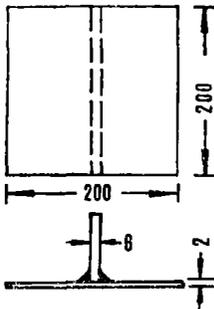


图 6

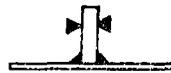


图 7

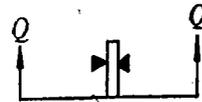


图 8

示, 实验结果所对应的全息图再现象的干涉条纹图样如图 9 所示。其中图 9(a) 为未错位时情况, 图 9(b) 为干版左移时情况, 图 9(c) 为干版右移情况。实验结果与理论分析完全一致。

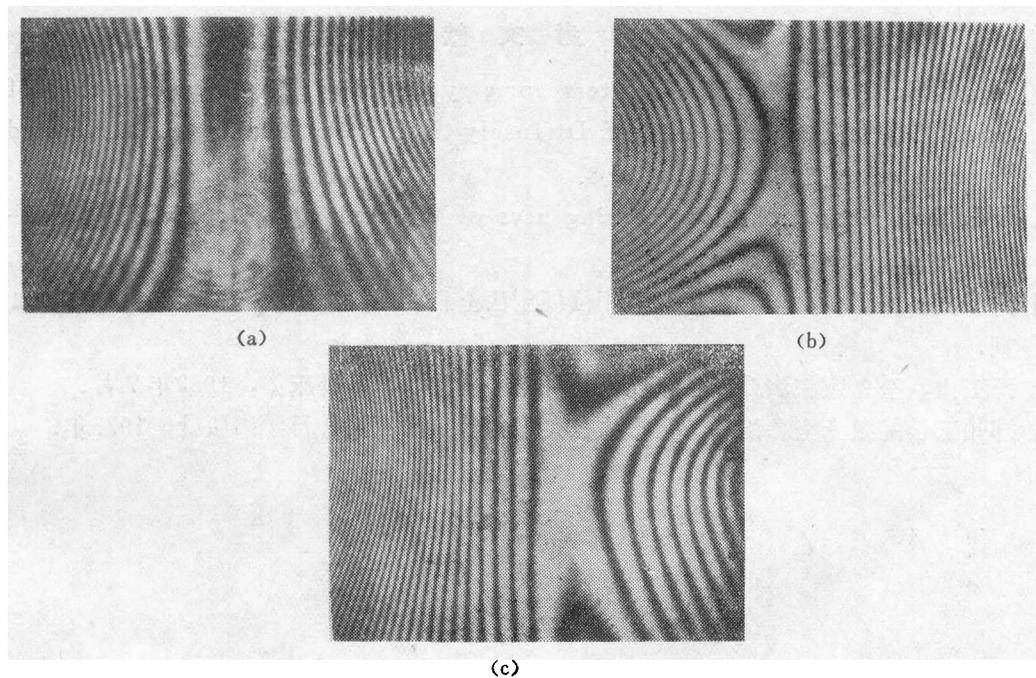


图 9

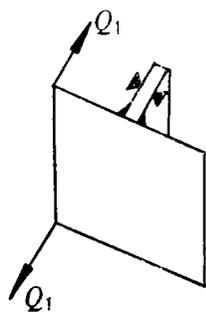


图 10

第二类加载方式如图10所示，干版移动量为 0.03mm 。图11为所对应的实验结果，其中图11(a)为未错位时情况，图11(b)为干版左移的情况，图11(c)为干版右移的情况。其实验结果也与理论分析完全一致。这说明物面变形复杂时也同样可以用横向错位法来辨认物面各处的变形方向。

以上分析表明横向错位法用来判别物面变形方向是简单有效的，辨认容易而可靠。

本文形成过程中，得到了北京邮电学院徐大雄付教授的热情指导。我校机械系邢英杰同志参加了部份实验。特此表示感谢。

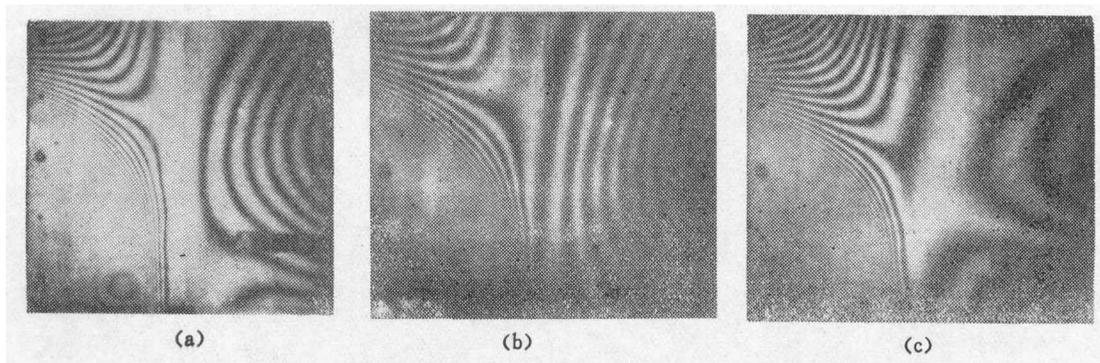


图 11

参 考 文 献

- [1] Jon, E. Sollid, Holographic Interferometry Applied to Measurement of Small Static Displacements of Diffusely Reflecting Surfaces, 《Applied optics》, Aug. 1969, Vol. 8, No. 8.
- [2] E. R. Robertson, The Engineering uses of Coherent Optics, London, Cambridge university press, 1976.
- [3] 向豪英, 张海根, 参考光正弦被相位调制法全息测振, 天津大学学报, 1982年第2期.
- [4] 谭玉山, 全息照相法分析生产现场的机床结构特性, 《机床》, 1982年7月.
- [5] 郑州工学院激光全息组等, 全息法在实验力学中的应用, 科学出版社, 1977年.