

文章编号: 1001-3806(2011)05-0626-03

用灰度值改进双曝光测量物体微小形变的方法

周剑超, 官爱玲*, 杜源

(昆明理工大学 理学院 激光研究所, 昆明 650093)

摘要: 数字全息是用数字的方式记录和处理全息图像, 通常在使用双曝光法测量物体微小形变时, 对于形变量接近入射波长一半的情况一般使用相移的方法, 这种方法需要拍摄多幅全息图。为了简化过程, 提出将灰度值和双曝光方法相结合测量物体的微小形变。该方法通过画出条纹图的灰度曲线, 判断条纹级数, 计算出物体形变量; 只需拍摄两幅全息图。通过理论分析和实验验证, 取得了满意的结果。结果表明, 该方法在一定的范围内是可行的。

关键词: 全息; 灰度值; 双曝光; 物体形变

中图分类号: O438.1 **文献标识码:** A **doi:** 10.3969/j.issn.1001-3806.2011.05.014

Improvement method of measuring object deformation by using double-exposure with gray-level

ZHOU Jian-chao, GONG Ai-ling, DU Yuan

(Institute of Laser, School of Science, Kunming University of Science and Technology, Kunming 650093, China)

Abstract: The usual method for recording and processing hologram images is digital holography, which is also suitable for double-exposure to measuring object deformation. However, the deformation near half of the optical wavelength is based on phase-shift method, and it needs more than three hologram images. In order to simplify the method, the double-exposure with gray-level was extended to measure deformation. By using the gray-level, with the image of gray-level distributions, the fringe numbers can be calculated and then the out-of-plane displacement was obtained. This method only needs take two images. Through theoretical analysis and experimentation, the result is satisfactory, which show this method works well in a certain extent.

Key words: holography; gray-level; double-exposure; object deformation

引言

数字全息干涉计量技术是用数字的方式记录和处理全息图像, 通过数字图像处理改进图像质量和提取信息, 是测量位移、形变和振幅等物理量的有效手段^[1-2]。该技术在力学、热学、电学、无损检测等领域有广泛的应用, 尤其是在力学领域里, 相关测量理论较为成熟。但是, 目前一些全息干涉测量方法在测量形变量接近或者小于入射波长一半的情况时, 为了能产生清晰的条纹, 通常会引入相移技术^[3], 需要拍摄多幅全息图片, 后期的处理也比较麻烦。通过数字图像处理技术, 画出条纹图的灰度曲线, 可以很好地得到条纹的级数, 进而算出物体的形变量, 本方法只需拍摄两幅全息图。

1 测量原理

双曝光法是通过两次曝光将物体变形前后的物光波通过互补金属氧化物半导体 (complementary metal

oxide semiconductor, COMS) 或电荷耦合元件 (charge-coupled device, CCD) 记录下来, 再现时, 通过两个波面之间的干涉条纹了解波面的变化, 从而分析两次曝光之间对应的物体的变形^[3-9]。

如图 1 所示, 形变对应的相位差 $\Delta\varphi$ 可以表示为^[10-11]:

$$\Delta\varphi = \frac{2\pi}{\lambda} [(\overline{SA} + \overline{AV}) - (\overline{SA'} + \overline{A'V})] \quad (1)$$

由于法向形变相对而言很小, 因此, 可以认为形变方向垂直于表面, 那么(1)式可以写为:

$$\Delta\varphi = \frac{2\pi}{\lambda} (2\overline{AA'}) \quad (2)$$

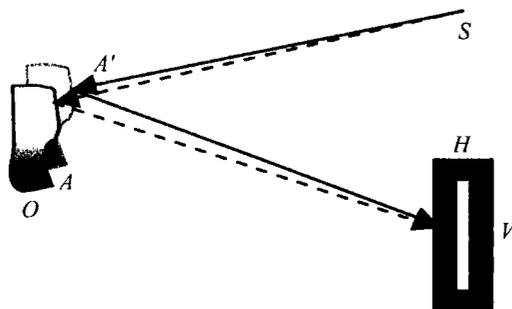


Fig. 1 The measuring principle

作者简介: 周剑超 (1986-), 男, 硕士研究生, 现主要从事数字全息和光电检测方面研究。

* 通讯联系人。E-mail: ailingong@sina.com

收稿日期: 2010-11-30; 收到修改稿日期: 2011-01-29

光程差 $2AA'$ 可以表示为 $2\Delta L$, 上式改写为:

$$\Delta\varphi = \left(\frac{2\pi}{\lambda}\right)2\Delta L \quad (3)$$

式中, ΔL 是离面形变。

亮条纹级数 N 对应着相位变化, 它们之间的关系:

$$\Delta\varphi = 2N\pi \quad (4)$$

从(3)式和(4)式中可以很容易得到离面形变 ΔL 的表达式^[7]:

$$\Delta L = \frac{N\lambda}{2} \quad (5)$$

两次曝光后, 当用原来记录时所用的参考光再现时, 其干涉光强为^[5,12]:

$$I = (\tau\beta R_0^2 O_0)^2 (1 + \cos\Delta\varphi) \quad (6)$$

式中, τ 是曝光时间, β 为感光材料 $t-E$ (即复振幅透射率和曝光量) 关系曲线直线部分的斜率, R_0 和 O_0 分别是参考光和物光的振幅, $\Delta\varphi$ 就是两次曝光期间由于物体形变引起的光程变化对应的相位改变量。令 $I_0 = (\tau\beta R_0^2 O_0)^2$, I_0 定义为平均光强, 是个常量, 因此(6)式可以写为:

$$I/I_0 = 1 + \cos\Delta\varphi \quad (7)$$

上式给出了光强和相位差的对应关系。

通过以上的讨论可以看出, 相位差反映了形变量, 而光强可以用灰度值表示。这就是本文中所用方法的理论基础。

2 实验

2.1 实验设备

实验光路如图 2 所示。图中, LD 是半导体激光器, 波长为 532nm; 分束镜 1, 分束镜 2 是透反比为 6:4 的分束镜; M_1 是全反镜; L_1 是小孔滤波器; L_2 和 L_3 是扩束镜; MI 是迈克尔逊干涉仪, 精度为 100nm, 用于在对物体边缘加压的过程中测量最大形变量, 验证计算结果; 300×10^4 像素的 CMOS; O 是待测物体, 是一个不锈钢片, 长 3.5cm, 高为 1.5cm。为了增加不锈钢片的反射效果, 在其被测量面贴有等厚的玻璃片。

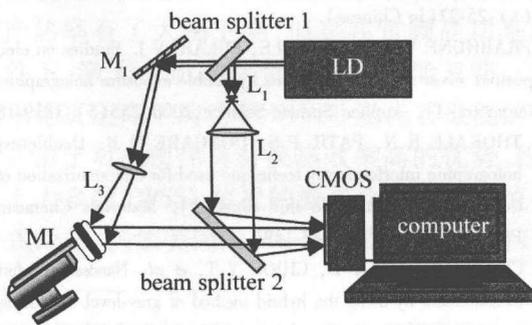


Fig. 2 Experimental optical path

CMOS 采集到。由于固定端形变前后不会发生位移, 因此总是 0 级亮条纹, 以此为基准来计算其它条纹级数。在本实验中为了便于计算, 将亮条纹定义为整数级数, 暗条纹定义为对应的半整数级数^[4,11,13]。

实验时, 先记录未发生形变时的物光波, 再记录发生微小形变后的物光波, 再现时两个物光波干涉, 形成干涉条纹。分析干涉条纹级次 N , 可以得到物体的形变量。而干涉条纹级次 N 可以通过画出条纹的纵向灰度曲线分布图得到。

由于相邻的完整的明纹和暗纹之间的灰度值差为 255, 即 255 个灰度值对应于 π 的相位变化, 因此, 以此为基础, 可以推算出非完整的条纹对应的级数。

若某一条非完整的条纹对应的灰度值为 a , 则该条纹对应的级数^[10-11]: $n = (255 - a)/(2 \times 255)$ (8) 整幅灰度曲线图读出的条纹总级次:

$$N = m + n \quad (9)$$

式中, m 是灰度曲线图中可以读出的完整条纹级次。将 N 值代入(5)式, 就可以得到离面形变 ΔL 。

图 3a 是对应于最大形变为 1800nm 的干涉条纹图, 图 3b 是纵向的灰度分布曲线, 图中纵坐标为灰度值, 横坐标为图 3a 中始末条纹的像素距离, 在计算时不用考虑。可以看出, 该条纹图共有 6 级完整的亮条纹和一条不完整的条纹。不完整的条纹对应灰度值为 165, 则其对应的条纹级次为: $(255 - 165)/(2 \times 255) \approx 0.35$, 则总的条纹级数 $N = 6.35$, 代入(5)式计算出最大形变量为 1689nm, 相对误差为 6.17%。

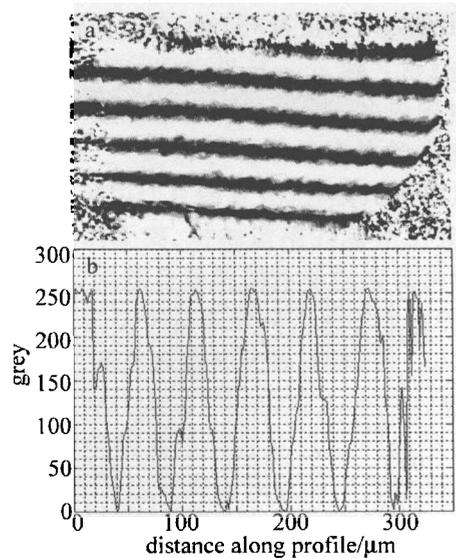


Fig. 3 1800nm deformation

a—interference fringe image b—grey-level distributions image

图 4a 是对应最大形变为 1000nm 的干涉条纹图, 图 4b 是纵向的灰度分布曲线, 可以看出, 该条纹图共有 4 级完整的亮条纹和一条不完整的条纹。不完整的条纹对应灰度值为 248, 对应的条纹级次为: $(255 - 248)/$

2.2 形变测量

将不锈钢片底端固定在支架上, 保证其固定端被

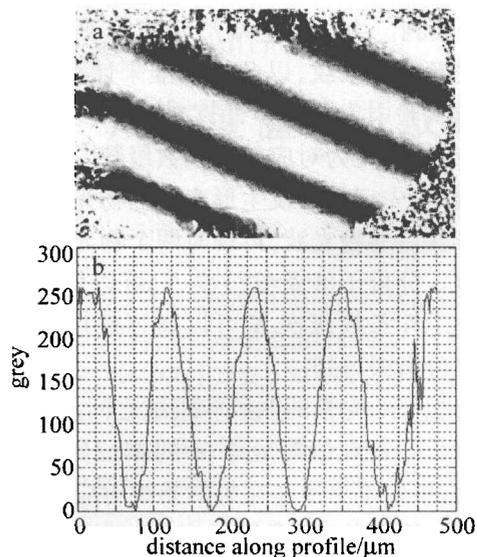


Fig. 4 1000nm deformation

a—interference fringe image b—grey-level distributions image

$(2 \times 255) \approx 0.027$, 则总的条纹级数 $N = 4.027$, 代入(5)式计算出最大形变量为 1071nm, 相对误差为 7.10%。

图 5a 是对应于最大形变为 200nm 的干涉条纹图, 图 5b 是纵向的灰度分布曲线, 由于形变量很小, 再现的全息干涉图中无法判断其暗条纹是否完整, 从它的灰度曲线图中可以看到其最亮点灰度值为 250, 最暗点灰度值为 47, 末端灰度值为 78。它的最亮点灰度并未达到 255, 这是因为在形变过程中物体反射光强发生了微小的变化, 为了保持计算结果的一致, 仍然使用 255 作为最亮点标准。对应的条纹级数: $(255 - 78) / (2 \times 255) \approx 0.69$, 则条纹级数 $N = 0.69$, 代入(5)式计算出最大形变量为 183nm, 相对误差为 8.2%。

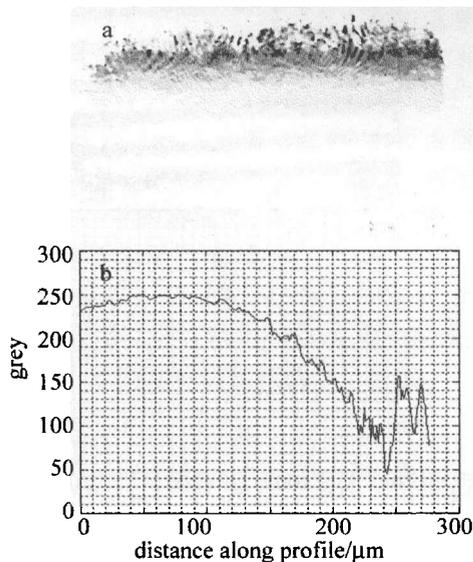


Fig. 5 200nm deformation

a—interference fringe image b—grey-level distributions image

需要说明的是, 在本实验中由于不锈钢片的受力点和固定点之间并不垂直和平行, 因此在形变的过程中, 不锈钢片上的形变方向是倾斜的, 故再现的干涉条

纹也是倾斜的。

该方法适用于一定的测量范围。当形变量增大时, 干涉条纹变得越来越密, 当条纹级次难以分辨时, 该方法不再适应。当形变量减小时, 干涉条纹变得越来越疏, 如果对应的条纹级次小于 0.5, 形变量小于半个波长, 相对误差大于 10%。

3 结论

上述计算结果表明, 本文中使用的相关理论和测量方法是可行的。该方法简单易行, 对设备和实验条件要求不高, 操作方便, 具有实用价值。通过改善实验装置和使用高分辨率的 COMS, 可以减少误差, 提高测量精度。

参考文献

- [1] LI J P, CAI Y L. Measurement of displacement direction by using reference-object holographic method [J]. *Laser Journal*, 2002, 23(3): 41-43 (in Chinese).
- [2] LI G Ch, GENG Y H, REN D Q, *et al.* Measurement of deformation direction of object by auxiliary plate micro-angle-displacement modulation holographic method [J]. *Chinese Journal of Science Instrument*, 2004, 25(4): 477-480 (in Chinese).
- [3] YU Q T, LÜ X X, ZHANG Q Sh. A new method of four-step phase-shifting digital hologram based on arbitrary phase shifts [J]. *Laser Technology*, 2009, 33(4): 409-412 (in Chinese).
- [4] KUMAR U P, MOHAN N K, KOTHIAL M P. Measurement of static and vibrating microsystems using microscopic TV holography [J]. *Optik*, 2011, 122(1): 49-54.
- [5] XIONG B H, LI J Ch. Holographic interference measurement—principles and methods [M]. Beijing: Science Press, 2009: 323-337 (in Chinese).
- [6] GORTHI S S, RASTOGI P. Simultaneous measurement of displacement, strain and curvature in digital holographic interferometry using high-order instantaneous moments [J]. *Optics Express*, 2009, 17(20): 17784-17791.
- [7] LÜ P, CHEN Zh M, WANG X, *et al.* Measuring density distribution of jet subsonic flow field based on dual hologram interferometry [J]. *Applied Laser*, 2009, 29(3): 219-222 (in Chinese).
- [8] YANG K, LIU Zh, WANG W Sh. Study on object displacement measure using double-exposure digital image hologram method [J]. *Journal of Changchun University of Science and Technology*, 2009, 9(1): 25-27 (in Chinese).
- [9] PRABHUNE V B, SHINDE N S, FULARI V J. Studies on electrodeposited silver sulphide thin films by double exposure holographic interferometry [J]. *Applied Surface Science*, 2008, 255(5): 1819-1823.
- [10] THOKALE R N, PATIL P S, DONGARE M B. Double-exposure holographic interferometry technique used for characterization of electrodeposited cobalt oxide thin films [J]. *Materials Chemistry and Physics*, 2002, 74(2): 143-149.
- [11] CHIEN C H, WU Y D, CHIOU Y T, *et al.* Nanoscale deformation measurement by using the hybrid method of gray-level and holographic interferometry [J]. *Optic and Laser in Engineering*, 2006, 44(1): 80-91.
- [12] SU X Y, LI J T. Information optics [M]. Beijing: Science Press, 1999: 111-156 (in Chinese).
- [13] FAN M X, ZHANG Y A, LI Zh F. Application of reflecting real-time digital holography in thermal stress field of rock [J]. *Laser Technology*, 2010, 34(4): 502-505 (in Chinese).