

低倍率放大重构像全息干涉图

夏建刚

(徐州师范学院物理系, 徐州 221009)

摘 要 以傅里叶变换为基础, 提出了低倍率放大重构像全息干涉条纹的具体方法, 它不仅光路简单, 放大倍率可以人为选择, 而且由此得到的全息干涉条纹效果很好.

关键词 傅里叶变换, 全息干涉.

1 引 言

全息干涉作为检测物体形变、应变的重要手段之一, 在许多领域有着重要的应用^[1~4], 对于较小的待测物体和较密的全息干涉条纹的情况, 一般可采用下面两种方法: 一是光学放大法^[5], 即先将全息干涉条纹记录下来, 然后通过光学系统放大后作进一步检测; 二是全息放大法^[6], 即采用短波长记录, 长波长再现, 从而实现物体及全息干涉条纹的放大. 在很多情况下, 若对放大倍率要求不高(如小于 $10\times$), 可以采用本文介绍的低倍率放大重构像全息干涉法来完成检测.

2 基本原理

图 1 是记录与再现光路原理图. 记录时(见图 1(a)), 被测物 O 被放在傅里叶变换镜的非前焦面上, 且 $s > f'$ (s 是物距, f' 是透镜焦距), 记录面为频谱面(后焦面), 参考光 R 为中心

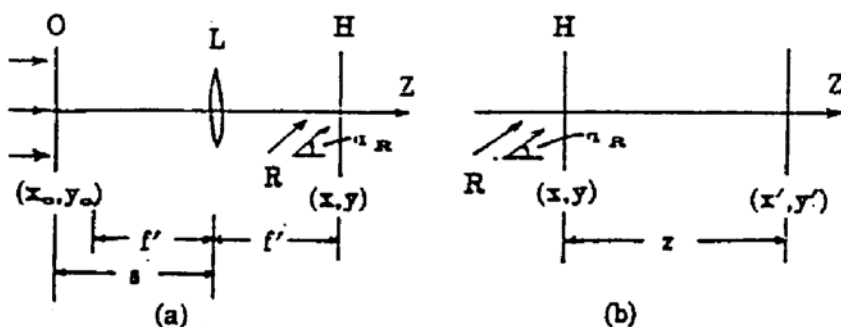


Fig. 1 The principle diagrams of recording and reconstruction

处在 YZ 面内的平行光, 其在频谱面上的光场分布可以表示为:

$$R = R_0 \exp(jky \sin \alpha_R) \quad (1)$$

式中 α_R 为参考光与 Z 轴的夹角. 若被测物的振幅透过率(即振幅分布)为 $t(x_0, y_0)$, 其在频谱面

上的光场分布 T 可以表示为^[7]:

$$T(\zeta, \eta) = b \cdot \mathcal{F}\mathcal{F}[t(x_0, y_0)] \quad (2)$$

式中 ζ, η 为频谱面上的空间频率坐标, b 为一个二次位相因子, $\mathcal{F}\mathcal{F}$ 表示傅里叶变换符号. 让参考光与频谱分布 T 发生干涉, 在频谱面上用此干涉场对全息记录干板曝光. 将处理过(线性处理)的全息干板放入再现光路(图 1(b)), 用参考光作为再现光照射全息干板 H , 在 H 后的光场分布 u 可以表示为:

$$u = u_0 \exp[jky \sin \alpha_R] + u_r + u_g \exp[j2ky \sin \alpha_R] \quad (3)$$

式中 u_0 为一常数, 称为透射项; $u_r = R_0^2 \beta T$ (β 为一常数), 称为原始项; $u_g = R_0^2 \beta T^*$, 称为共轭项. 如果原始项和共轭项满足分离条件(见讨论 3), 按照菲涅耳衍射公式^[8], 在频谱面后 Z 处的平面上由原始项产生的光场分布 U_z 可以表示为:

$$U_z(x', y') = \frac{1}{j\lambda z} \exp(jkz) \exp[j(k/2z)(x'^2 + y'^2)] \iint b \cdot \mathcal{F}\mathcal{F}[t(x_0, y_0)] \exp[j(k/2z)(x^2 + y^2)] \exp[-j(k/z)(xx' + yy')] dx dy \quad (4)$$

式中 x, y 为频谱面的空间坐标. 若 Z 平面(接收面)正好是输入物体的共轭面, 并考虑变换镜 L 的横向放大倍率 M ($M = x'/x_0$), 经计算, 此时由原始项产生的光场分布可以表示为:

$$U_c(x', y') = (b'/M) \cdot t(-x'/M, -y'/M) \quad (5)$$

式中 b' 为一个二次位相因子; 显然, 在共轭面上的光强分布(除了坐标反转外)是原物的准确放大像(即放大的重构像), 放大倍率为 M .

若放在输入面的是一个纯位相物体(为讨论方便起见), 其振幅透过率为:

$$t(x_0, y_0) = \exp[j\psi(x_0, y_0)] \quad (6)$$

该物体发生位相变化(如施加外力等)后, 其振幅透过率变为:

$$t'(x_0, y_0) = \exp\{j[\psi(x_0, y_0) + \Delta\psi(x_0, y_0)]\} \quad (7)$$

在物体发生位相变化前后分别在频谱面对全息干板曝光一次, 若记录和处理是线性的, 把干板放回到记录位置用再现光照射, 两个重构像的原始物光波将发生干涉, 其干涉场的强度分布为(在共轭面上):

$$I = [(b'/M)(t + t')] [(b'/M)(t + t')]^* = (1/M^2)[2 + \exp(j\Delta\psi) + \exp(-j\Delta\psi)] = (4/M^2)\cos^2\{\Delta\psi(-x'/M, -y'/M)/2\} \quad (8)$$

显然, 在共轭面上观察的重构像光强随 $\Delta\psi$ 呈周期性的强弱变化. 由于放大倍率 M 的引入, 使得 $\Delta\psi(x', y')$ 随变量 x', y' 的变化速度较原物体的位相变化 $\Delta\psi(x_0, y_0)$ 慢 M 倍, 因此, 共轭面上的全息干涉条纹被放大了 M 倍, 使原来较小的测量区域变大, 较密集的条纹变稀疏.

实际测量中, 可以根据待测物面积的大小及位相变化的快慢来选择合适的放大倍率. 图 2 给出了重构像放大倍率与物距 s (曲线 I)、重构像像距 s' (曲线 II)之间的关系曲线, 利用图 2, 可以快速的确定某一放大倍率下待测物放置的位置以及全息接收面的位置.

当待测物体的空间频率较低时(一般物体均满足此条件), 可以直接用未经扩束的细激光束作为参考光和再现光, 不会对全息干涉条纹的对比度带来影响.

2 实验结果和讨论

2.1 实验结果

实验光路按照图 3 安排, 从激光器射出的光经分束器 BS 分成两束, 一束经 M_1 反射后直接射向记录介质; 另一束经反射镜 M_2 、扩束准直镜 FA 后照明被测透明物体 O, 该物体被放在傅里叶变换镜的非前焦面上(焦点外侧), 记录介质 H 被放在变换镜 L 的后焦面(应有一离焦量)上. 实验中, 光源采用 1 米 He-Ne 气体激光器, 记录介质采用天津 1 型全息干板; 被测透明物体 O 为一有机玻璃块(通光孔径为 1 平方厘米), 顶部有一受压圆孔, 受压前后分别曝光一次, 曝光后的全息干板采用常规处理(D19 显影, F5 定影, 铁氰化钾漂白液漂白), 处理后的干板被放回到记录位置上, 然后用参考光再现. 当物距为 400 mm 时, 在其共轭面(像距为 1200 mm)上, 可获得放大倍率为 3 的全息干涉条纹(见图 4(a)); 当物距为 330 mm 时, 在其共轭面(像距为 3300 mm)上, 可获得放大倍率为 10 的全息干涉条纹(见图 4(b), 只拍下受压孔附近的放大条纹). 由图 4 不难看出, 在受压孔附近的干涉条纹放大 3 倍后, 仍不易观察, 而放大 10 倍后, 条纹间隔已加大, 可以完成全息检测.

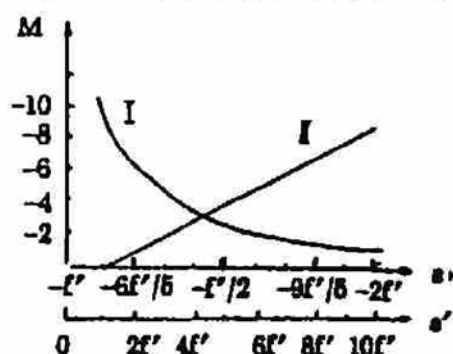


Fig. 2 The relationships between M and S, s'

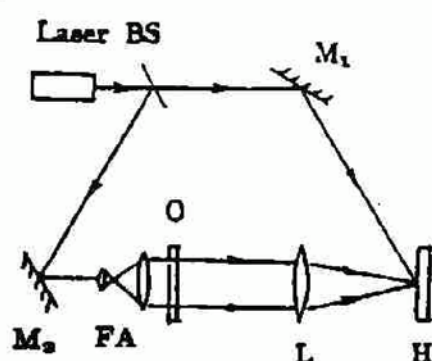


Fig. 3 The experimental setup

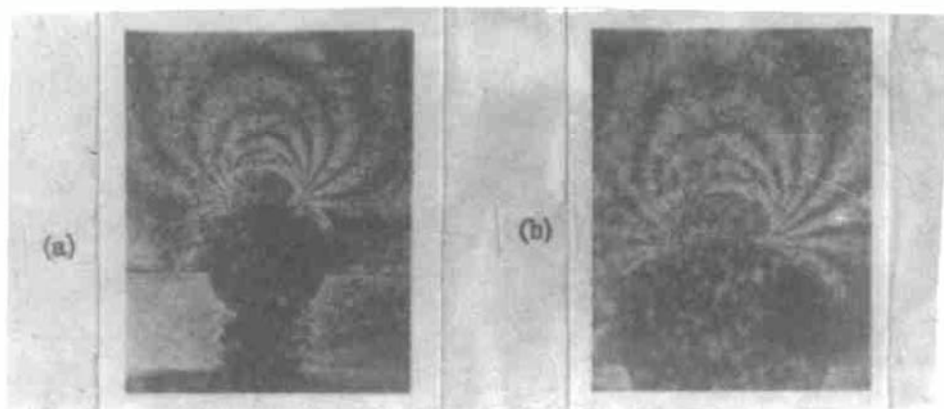


Fig. 4 Photographs of the holographic interference fringes

(a) Magnification is 3; (b) Magnification is 10

2.2 几点讨论

1) 由于变换透镜 L 的焦距一般为 10 cm 数量级, 在低功率(小于 25 mW)激光器照射情况下, 再现像一般不能太远(小于 400 cm), 否则能量太弱, 不利于观察, 这时, 放大倍率一般为 10~15 倍. 但若缩小变换透镜焦距(小于 10 cm), 并增加光源强度, 放大倍率可以增加几十倍.

2) 在上面的讨论中, 虽然没有研究透射项对重构像之间干涉的影响, 但是理论分析表明^[9], 如果参考光和再现光不选择足够大的入射角, 透射项和重构像就会发生重叠; 在本文讨论的情况下(参考光作为再现光), 透射项和重构像分离的条件可以简单的表示为:

$$\operatorname{tg} \alpha_n \leq 3h/2z \quad (9)$$

式中 h 为再现像的宽度, z 为重构像像焦距. 由于本文的研究对像尺寸均较小(厘米数量级), 所以, 一般来讲, 当 α_n 接近 30° 便可以满足要求.

3) 对非透明体的测量, 可以在图 2 的基础上, 加以适当的改变(如图 5 所示), BS_1 为分光板(面积稍大的分束器), 反射光打在待测物体上, 经物体散射后形成物光波, 再经变换镜 L 后在频谱面上进行全息记录.

4) 由于本方法是在频谱面上完成全息记录, 对于一般物体而言, 其频谱分布面积较小(约为 $2 \times 2 \text{ mm}^2$), 所以, 记录介质的使用量非常小(也约有 $2 \times 2 \text{ mm}^2$); 一张 $5 \times 5 \text{ cm}^2$ 的全息干板, 可以连续记录约 64 幅全息图(按 0.5 cm 的间隔计算), 不仅大大节省了记录材料, 而且还为全息干涉的快速记录提供了可能.

综上所述, 低倍率放大重构像全息干涉具有光路简单、记录方便、记录介质用量少、放大倍率可变的优点, 它不仅是对干涉技术的有益补充, 而且也是一种非常实用的全息干涉检测技术.

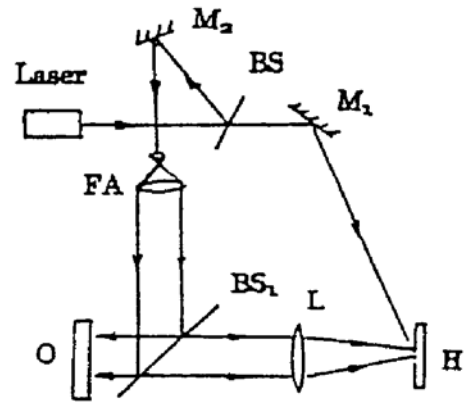


Fig. 5 The experimental setup for the opaque object

参 考 文 献

- [1] K. A. Haines, B. P. Hildebrand, Surface-deformation measurement using the wavefront reconstruction technique. *Appl. Opt.*, 1966, 5(4): 595
- [2] 王仕藩, 袁格, 贺安之等 全息干涉度量学, 北京, 科学出版社, 1989
- [3] A. E. Ennos, Measurement of in-plane surface strain by hologram interference. *J. Sci. Instrum.*, 1968, 2(1): 731
- [4] R. L. Powell, K. A. Stetson, Interferometric vibration analysis by wavefront reconstruction. *J. Opt. Soc. Amer.*, 1965, 55(12): 1593
- [5] 于美文, 光学全息与信息处理, 北京国防工业出版社, 1984, 227
- [6] 于美文, 光学全息与信息处理, 北京国防工业出版社, 1984, 225
- [7] Francis T. S. Yu, *Optical Information Processing* 1983, New York, John Wiley & Sons, 152~157
- [8] 吕道光, 陈家璧, 毛信强, 傅里叶光学, 科学出版社, 1985, 70~73
- [9] 于美文, 光学全息与信息处理, 北京国防工业出版社, 1984, 51~54

Holographic Interference Fringes Magnified Under Low Magnification

Xia Jiangan

(Department of Physics, Institute of Xuzhou Normal, Xuzhou 221009)

(Received 13 September 1993)

Abstract On the basis of Fourier transform, a method of the holographic interference fringes magnified under low magnification is suggested, which has the advantages of simple experimental setup, selective magnification and good quality of the contrast of the holographic interference fringes.

Key words Fourier transform, holographic interference.