

文章编号 : 0253-2239(2001)07-0841-05

实时全息术检测透明物的一种新方法*

熊秉衡 王正荣 张永安 余灿麟

(昆明理工大学激光研究所, 昆明 650051)

摘要: 介绍了实时全息术检测透明物的一种新方法,它采用物光再现的参考光和参考光通过全息图的直透光所形成的干涉图纹检测透明物体的变化。证明了这组干涉图纹与用参考光再现的物光和物光通过全息图的直透光所形成的干涉图纹分布规律相似,仅在相位上相差 π 。还讨论了这组干涉图纹的衬比和获得最佳衬比的条件。此方法可消除物光光路上某些因素带来的相位畸变,避开待测物体自发光的干扰,并可在全息图后方任意位置进行记录,这使实时全息术在实践中更具有灵活性,有助于它在更广阔领域内的应用。

关键词: 实时全息术; 条纹衬比; 物光再现的参考光; 相位畸变

中图分类号: TN247 文献标识码: A

1 引 言

在实时全息术中采用液门可带来多方面的好处,如复位精度高、可提高乳胶感光灵敏度、便于控制显影黑度等。然而由于液门窗口尺寸限制,用实时全息法所检测的物体尺寸不能太大。同样,近年发展的新记录材料光折变晶体、量子阱材料等虽有其它的优越性,但它们的尺寸更小。为了在较小尺寸的液门或晶体材料窗口下获得较大的检测截面,需采用大口径透镜以缩放光束,并在物体的成像面上进行检测。这时往往出现两个问题,一是物体成像面的位置有时会使记录装置不便安放;二是大口径光学元件十分昂贵。价格较低的大口径的光学元件往往会带来某种程度的相位畸变。此外,实时全息术用于物体的燃烧场分析、电弧等离子体诊断技术等方面时,将面对能自己发光的物体。这时,物体自身发射的光,不能与参考光干涉,却能对乳胶起感光作用,从而带来严重的噪声。为此,需在检测光路上加装适当的滤波器,滤去物体自发光,只让信号光通过。不过,这需要付出降低信号光的代价并提高研究的费用。在缩放光束的情况下,必须在全息图后面的成像面上进行记录,有时是很不方便的,特别是像面较远、实验室空间较小的情况下。为解决以上问题,我们用物光再现的参考光和原来的参考光的干涉光场(以后简称“参考光场”)图纹来检测透明

物体状态的变化。对这组条纹观察时,可以在参考光透过全息图的路径上的任意位置观察,有很大的灵活性。若不需要放大图纹,可采用平行光作为参考光。若欲放大图纹,则可采用发散或会聚光作为参考光。文中证明了这组干涉条纹与用参考光再现的物光和在实时检测中物体直接散射的物光的干涉光场(以后简称“物光场”)图纹的分布规律是相同的,讨论了这组干涉条纹的衬比并导出了获得最佳衬比的条件。这种方法可以消除物光光路上由于某些因素带来的相位畸变,可完全避开自发光的干扰;并获得了在“参考光场”任意位置进行记录的灵活性。此方法既实用又简便,它有助于实时全息术在更广阔领域内的应用。

2 实验光路和原理

实验光路布局如图 1 所示。图中 BS 为分束镜, M_1 、 M_2 为反射镜, SF 为空间滤波器, L 为扩束凹透镜, CL_1 是直径为 300 mm 的大准直透镜, CL_2 是直径为 450 mm 的大会聚透镜, CL_3 是直径为

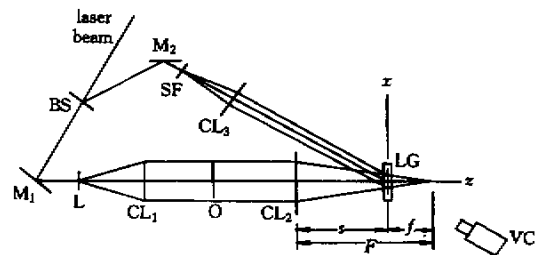


Fig. 1 Schematic diagram of the optical setup for this real-time holographic testing method

* 国家自然科学基金(46764010) \ 云南省科委应用基础研究基金(97D027Q)资助项目。

100 mm的准直透镜, LG 是液门, 它具有一个尺寸为 80 mm × 100 mm 的窗口, O 为待检测透明物体。设物光光束经 L、CL₁ 扩束准直后的有效直径为 D, CL₂ 的焦距为 F, 液门通光有效直径为 d, 置于液门内的全息干版离透镜 CL₂ 的距离为 S, 干版离透镜 CL₂ 焦点的距离为 f。此时, 直径为 D 的平行光束在记录平面上的缩小倍数 N 为

$$N = f/F = d/D. \quad (1)$$

设物光光束的中心光线垂直入射在全息干版上。取坐标如图 1 所示。全息干版位于 x-y 平面内, 物光束中心与 Z 轴重合并沿 Z 轴正向传播。如果透镜 CL₁、CL₂ 是不会带来相位畸变的理想透镜, 将待测透明物体 O 放入光路, 设这时紧贴物后平面上的光场复振幅分布为:

$$O(x, y) = O_0(x, y) \exp[j\Phi_0(x, y)], \quad (2a)$$

对于散射效应极微的透明物体, 准直光束通过后, 仍可视为准直光束, 再通过透镜后, 仍有聚焦现象。于是, 物光复振幅在 x-y 平面上的分布可表示为^[1]

$$O(x, y) = O_0(x, y) \exp[j\Phi_0(x, y)] \times \exp[-(jk/2f)(x^2 + y^2)], \quad (2b)$$

式中 $f = F - S$ 。一般情况下, 透镜口径越大越难制作, 也越昂贵。若物光光路上的透镜质量不够好, 所成的像有某种程度的畸变, 将透镜由于质量等因素对光束产生的相位畸变用一个相位函数 $P(x, y)$ 表示, 则(2b)式可改写为

$$O(x, y) = O_0(x, y) \exp[j\Phi_0(x, y)] \times \exp[-(jk/2f)(x^2 + y^2)] \exp[jP(x, y)]. \quad (3)$$

参考光是由高质量的 $\phi 100$ 准直透镜 CL₃ 产生的平行光束, 与 z 轴的夹角为 θ 。它在干版平面上的复振幅分布为

$$R(x) = R_0 \exp[-(k \sin \theta)x]. \quad (4)$$

令 $\delta = \Phi_0(x, y) - (k/2f)(x^2 + y^2) + P(x, y) + (k \sin \theta)x$,

$$(5)$$

则相应于曝光时间 t 的曝光量 $E(x, y)$ 为

$$E(x, y) = t [|O(x, y)|^2 + R_0^2] \times [1 + V \cos \delta] = t [I_0 + I_R] \times [1 + V \cos \delta] = E_0 [1 + V \cos \delta] \quad (6)$$

式中 $E_0 = (I_0 + I_R)t$ 为平均曝光量, V 为条纹衬比度, $V = 2B^{1/2}(1+B)$, $B = I_R/I_0$ 为光束比。

在只考虑零级和一级衍射的情况下, 经曝光、化学处理后所获得的相位型薄全息图的复振幅透射率 $T_a(x, y)$ 可表示为^[2,3]

$$T_a(x, y) = b_t \exp[j\gamma E] = KJ_0(\alpha) \times \left\{ 1 + A \exp\left[j\left(\delta + \frac{\pi}{2}\right)\right] + A \exp\left[-j\left(\delta - \frac{\pi}{2}\right)\right] \right\}, \quad (7)$$

式中

$$K = b_t \exp[j\gamma E_0], \quad \alpha = \gamma E_0 V, \quad (8)$$

$$A = J_1(\alpha) J_0(\alpha),$$

其中 $J_0(\alpha)$ 和 $J_1(\alpha)$ 为贝塞尔函数。若待测物体只在相位分布上变化 $\Delta\Phi_0(x, y)$, 而在振幅分布上没有发生变化, 则变化了的物光在全息平面上的复振幅分布 $O'(x, y)$ 可表示为

$$O'(x, y) = O_0(x, y) \exp[j\Phi_0(x, y) - (k/2f)(x^2 + y^2) + P(x, y) + \Delta\Phi_0(x, y)] \quad (9)$$

以参考光 $R(x, y)$ 和变化了的物光 $O'(x, y)$ 同时照射全息图时, 将产生六项衍射光 U_1 、 U_2 、 U_3 、 U_4 、 U_5 、 U_6 如下:

$$\begin{aligned} [R(x, y) + O'(x, y)]T_a(x, y) &= U_1 + U_2 + U_3 + U_4 + U_5 + U_6, \\ U_1 &= KJ_0(\alpha)R_0 \exp[-(k \sin \theta)x] \\ U_2 &= KJ_0AR_0 \exp\{j[\Phi_0(x, y) - (k/2f)(x^2 + y^2) + P(x, y) + \pi/2]\} \\ U_3 &= KJ_0AR_0 \exp\{j[-\Phi_0(x, y) + (k/2f)(x^2 + y^2) - P(x, y) - (k \sin \theta)x + \pi/2]\} \\ U_4 &= KJ_0O_0(x, y) \exp\{j[\Phi_0(x, y) - (k/2f)(x^2 + y^2) + P(x, y) + \Delta\Phi_0(x, y)]\} \\ U_5 &= KJ_0AO_0(x, y) \exp\{j[2\Phi_0(x, y) - (k/2f)(x^2 + y^2) + 2P(x, y) + \Delta\Phi_0(x, y) + (k \sin \theta)x + \pi/2]\} \\ U_6 &= KJ_0AO_0(x, y) \exp\{j[-(k \sin \theta)x + \Delta\Phi_0(x, y) + \pi/2]\} \end{aligned} \quad (10)$$

其中 U_2 、 U_4 两项衍射光沿物光方向传播, 它们的光场, 也就是“物光场”的辐照度分布为

$$\Phi_{24} = (U_2 + U_4)(U_2 + U_4)^* = [KJ_0]^2 [(AR_0)^2 + O_0^2 + 2AR_0O_0 \cos(\Delta\Phi_0 - \pi/2)]; \quad (11)$$

而 U_1 、 U_6 两项衍射光沿参考光方向传播, 它们的光场, 也就是“参考光场”的辐照度分布为

$$\Phi_{16} = (U_1 + U_6)(U_1 + U_6)^* = [KJ_0]^2 [(AO_0)^2 + R_0^2 + 2AR_0O_0 \cos(\Delta\Phi_0 + \pi/2)]. \quad (12)$$

由(11)式、(12)式可见,两光场在干版平面的干涉条纹分布规律是相同的,只是两者在相位上恰好反相(相位差为 π),前者的亮纹位置恰好为后者的暗纹位置。仔细考察它们的相位函数便可发现: U_1 具有原来参考光的性质,只是振幅有所衰减。 U_6 带有物体振幅分布的信息 $O_0(x, y)$ 以及相位变化的信息 $\Delta\Phi_0(x, y)$,却不具有原来物光的相位函数 $\Phi_0(x, y)$,也不受相位畸变函数 $P(x, y)$ 的影响,并且衍射光沿原来参考光的方向传播,其分布与传播距离无关。 U_2 与 U_4 则不同,它们的相位函数表明:它们具有原来物光束的性质,会聚于焦点,然后再发散。它们带有物体相位变化的信息,但是还同时都带有相位畸变函数 $P(x, y)$ 的影响。因此,我们取干涉项 U_1 与 U_6 替代干涉项 U_2 与 U_4 来研究物体的变化。这可以避免透镜较差时所带来的相位畸变,从而获得精确的检测结果;也可避免由于待测物体自身的某种相位的不均匀性所引起光场的不均匀(如环氧树脂所制作的一些试件),并可完全避开自发光的干扰。此外,还可更为灵活地在任意位置进行记录。

3 干涉条纹衬比

由(12)式和条纹衬比的定义,有

$$V = \frac{\Phi_{16\max} - \Phi_{16\min}}{\Phi_{16\max} + \Phi_{16\min}} = \frac{2O_0R_0A}{R_0^2 + (AO_0)^2} = \frac{2B^{1/2}A}{B + A^2}. \quad (13)$$

在光束比 B 保持不变的情况下, V 对 A 求导,得

$$V' = 2B^{1/2}[(B - A^2)(B + A^2)^{-2}],$$

当 $V' = 0$ 时,

$$B = A^2 = [J_1(\alpha)J_0(\alpha)]^2. \quad (14)$$

由(14)式可见,为获得“参考光场”的最佳条纹衬比,应使曝光、处理后的实时全息图的相位调制度达到上式的要求。在实时全息术中,一旦选定了参物光束比 B ,根据(14)式和文献[3,4]中的表1就可以得到相应于最佳条纹衬比的相位调制度 α 。至于在实践过程中如何控制实验条件以使所拍摄的实时全息图达到所期望的 α 之值,可参看文献[3,5,6]。值得注意的是,这种情况下所获得的最佳纹衬比的条件,与“物光场”的干涉条纹的最佳纹衬比的条件^[3,5,6]相比较,两者恰好互为倒数(即干涉项 U_1 与 U_6 的干涉图纹与干涉项 U_2 与 U_4 的干涉图纹,这两者之最佳衬比条件恰好互为倒数)。

4 实 验

下面介绍几个实验实例。

实验1:物体 O 是一个带有方格标记的玻璃平板。将它记录在实时全息图上。再现时,用两片毛玻璃作为观察屏。第一片放在“参考光场”中,第二片放在“物光场”中,并使它们的平面均与带有方格标记的玻璃平板平面相平行。图2(a)是第一片毛玻璃上物体的图像,方格标记保持了原来的形状,且前后移动毛玻璃位置时,屏上图像也都一样。第二片毛玻璃上物体的图像,只在像面及附近很小景深范围是无畸变的,在其他位置均有畸变。图2(b)表示了第二片毛玻璃屏放在焦点前方呈现的凸枕形畸变,图2(c)为第二片毛玻璃屏放在焦点后方呈现的凹枕形畸变。

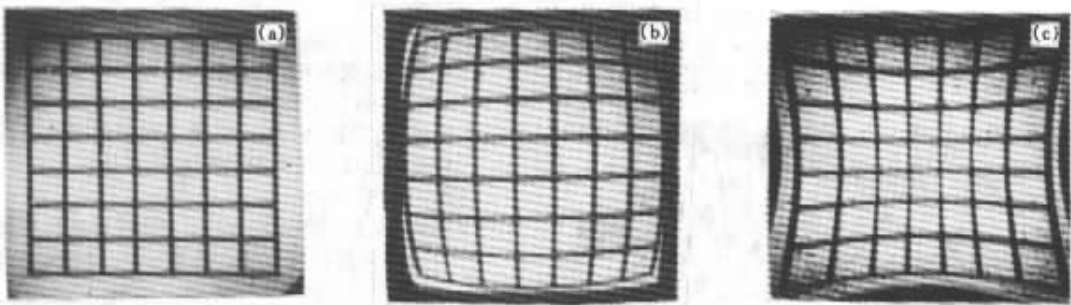


Fig. 2 A piece of checked square glass as the transparent object recorded by real-time holography. (a) The reconstructing image of the object on the first screen in the “conference light field”; (b) The reconstructing distortion image of the object on the second screen at the position before the focus of the image lens CL_2 ; (c) The reconstructing distortion image of the object on the second screen at the position behind the focus of the image lens CL_2 .

实验2:物体 O 是一个夹持在加力架上的有机玻璃平板。这是地震基础研究中关于微破裂成核过程与应力场关系的模拟试验。试件加力后的干涉条

纹图也通过上述两片毛玻璃作为观察屏进行观察。图2(a)是第一片毛玻璃屏上样品的干涉条纹,它可放在“参考光场”中任意位置。由于它不受物光光路

上光学元件相位畸变带来的影响,用它来分析试件的受力是直观而方便的。不需要考虑相位畸变带来的影响。图 3(b)是放在透镜 CL_2 象面的第二片毛玻璃屏上样品的干涉条纹,将它与图 3(a)相比较,两光场的干涉条纹分布规律是相同的,前者的亮纹位置恰好为后者的暗纹位置。

实验 3:物体是酒精灯火焰燃烧场。图 4(a)是第一块毛玻璃上燃烧场的干涉条纹,类似实验 2,屏可放在“参考光场”中的任意位置进行记录,非常方便。此外,它还不受酒精灯燃烧场自身发光的影响,无需使用滤色片就可以获得反衬度很好的干涉条纹。图 4(b)是放在透镜 CL_2 像面上的第二块毛玻璃屏上物体的图像和干涉条纹,图 4(a)与图 4(b)的条纹分布规律是相同的,前者的亮纹位置恰好为后者的暗纹位置。当第二块毛玻璃放在距离 CL_2 象面较远的位置上时,图纹都有一定的畸变。

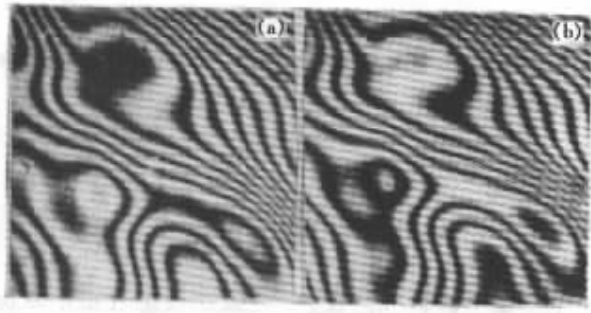


Fig. 3 Experiments used in imitation of a process of an earthquake. A plexiglass plane sample mounted on a loader. The interference fringes on the replay image of the loaded sample in real-time holography; (a) Interference fringes on the replay image of the loaded sample on the first screen in “reference light field”; (b) Interference fringes on the replay image of the loaded sample on the second screen in “reference light field”

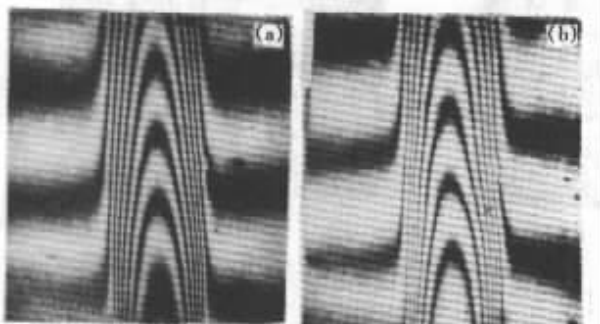


Fig. 4 Combustion field of an alcohol burner. (a) Interference fringes of the replay image of the combustion field on the first screen in “reference light field”; (b) Interference fringes of the replay image on the second screen in “reference light field”

在“物光场”中,将屏放在透镜 CL_2 像面上进行记录,有时是非常不便的。例如,对于我们实验室的光路布局而言,像面位置距离液门就太远,约为 2 米。几乎已经到达实验室的墙角,摆放相机或摄像机都非常困难。并且,由于燃烧物体的燃烧场自身发光的影响,需使用滤色片才能获得衬比度好的干涉条纹。

结语 在实时全息干涉计量术中可以采用“参考光场”的干涉条纹对透明物体进行实时检测。这种方法可以消除物光光路上由于某些因素带来的相位畸变,在用于待测物体有自身发光现象的问题时还可以避免物体自发光的干扰,并可在“参考光场”中任意位置进行记录。这种方法带来的好处是显而易见的,特别是对大截面透明物体的检测,它降低了缩放光束的光学元件的质量要求,降低了设备的费用,也因而较为容易地获得较大的检测截面。在我们的实验中,液门窗口只有 $80\text{ mm} \times 100\text{ mm}$,而检测的截面达到了 400 mm 的线度。至于使用这种方法对模拟地震实验试件的受力分析^[7]和对酒精灯、火箭推进剂样品燃烧场的温度场分析^[6,8],我们以后讨论。此方法既实用又简便,它有助于实时全息术在更广阔领域内的应用。

参 考 文 献

- [1] Rodriguez-Vera R, Berriel-Valdos L R, Morales-Romero A A *et al.*. Holographic techniques in the colour reproduction of two-dimensional images. *Opt. Engng.*, 1989, **28**(2): 191 ~ 196
- [2] 史密斯 H M. 全息记录材料. 北京: 科学出版社, 1984. 12
- [3] 熊秉衡, 王正荣, 张永安等. 利用卤化银乳胶制作具有予期相位调制度的、位相型、薄全息光栅的研究. 光学学报, 1997, **17**(8): 1021 ~ 1027
- [4] 熊秉衡, 王正荣, 张永安等. 同时获得高亮度检测光场和高衬比度干涉条纹的实时全息记录方法. 光学学报, 1999, **19**(5): 604 ~ 608
- [5] 熊秉衡, 王正荣, 张永安等. 可获得高反衬度干涉条纹的实时全息记录方法. 光子学报, 1996, **25**(8): 707 ~ 712
- [6] 王正荣, 熊秉衡, 张永安等. 用实时全息术研究低速变化过程的一种简易系统. 光学学报, 1997, **17**(6): 572 ~ 576
- [7] 杨润海, 许昭永, 赵晋明等. 微破裂成核过程和应力(场)关系的实验研究. 地震研究, 1998, **21**(2): 128 ~ 133
- [8] 王正荣, 熊秉衡, 张永安等. 用实时全息法配合摄像机研究固体火箭推进剂的燃烧过程. 激光杂志, 1998, **19**(6): 18 ~ 20

A Novel Testing Method of Transparent Objects in Real-Time Holography

Xiong Bingheng Wang Zhengrong Zhang Yongan She Canlin

(*Laser Institute , Kunming University of Science and Technology , Kunming 650051*)

(Received 10 November 1999 ; revised 19 April 2000)

Abstract : A real-time holographic testing method of transparent objects by using the interference pattern formed by the reconstruction of the reference wave and the original reference wave is introduced. The above interference fringe pattern is proved to be similar to the pattern which is formed by the reconstruction of the initial object wave and the wave scattered by the object during observation. The principle of this method and the characteristic function of the contrast of the interference pattern are presented. The phase distortion caused by any optical element in object optical path can be eliminated and the unexpected light emitted by the under testing object itself can be also avoided by using this method.

Key words : real-time holography ; contrast of fringes ; reconstruction of the reference wave ; phase distortion