

# CCD 和电寻址液晶在全息位移测量中的应用

范真节<sup>1</sup> 宁成达<sup>2</sup> 逢浩君<sup>1</sup> 王文生<sup>1</sup>

(<sup>1</sup> 长春理工大学现代光学测试技术研究室, 吉林 长春 130022; <sup>2</sup> 空军航空大学航空军械工程系, 吉林 长春 130022)

**摘要** 将 CCD 与电寻址液晶(EALCD)相结合, CCD 作为记录介质, 用于全息图和全息再现像的记录, EALCD 则代替传统光学全息中曝光后的全息干板, 用于数字全息图的再现。这种方法不仅避免了传统全息记录材料显影、定影等过程, 也避免了全息材料非线性记录等缺点, 并可以实现普通的数字全息较难实现的基于相位移法的位移测试。利用双曝光数字全息干涉法, 在实验中对反射式被测物体生成的菲涅耳全息图进行了光学再现, 并得到了准确的数据, 验证了该方法的实用性。实验结果表明, CCD 与 EALCD 相结合, 可以实现数字全息图的光学再现, 通过获得的干涉条纹, 可精确测定物体位移量。

**关键词** 全息干涉; 位移测量; 电耦合器件; 电寻址液晶; 菲涅耳全息图; 光学再现

**中图分类号** TN26

**OCIS** 090.1995 120.2880

**文献标识码** A

## Holographic Displacement Measurement Based on CCD and EALCD

Fan Zhenjie<sup>1</sup> Ning Chengda<sup>2</sup> Pang Haojun<sup>1</sup> Wang Wensheng<sup>1</sup>

<sup>1</sup> *Laboratory of Contemporary Optical Measure Technology, Changchun University of Science and Technology, Changchun, Jilin 130022, China*

<sup>2</sup> *Department of Aviation Ordnance Engineering, Air Force Aviation University, Changchun, Jilin 130022, China*

**Abstract** A new method of holography combining CCD and electrically addressed liquid crystal display (EALCD) is presented. CCD is used to record and reconstruct hologram, and EALCD is used to reconstruct the digital hologram in stead of holographic plate after exposure of traditional optical holography. This method avoids the developing, fixing processes of traditional hologram recording material, averts the shortcoming about nonlinear recording of holographic material, and can realize the displacement measurement based on phase shift method with which general digital hologram is unable to achieve. In order to certify the practicality of this method, double-exposure digital holographic interferometry has been used in experiment, and Fresnel hologram of reflective measured objects is obtained. The optical reconstruction is proceeded, and accurate experimental data has been gained. Experimental results indicate that the combination of the CCD and EALCD can realize the optical reconstruction of digital hologram, and the displacement of object can be accurately calculated through the interference fringes.

**Key words** holographic interferometry; displacement measurement; charge-coupled device; electrically addressed liquid crystal display; Fresnel hologram; optical reconstruction

## 1 引言

传统测量物体位移的方法与数字全息相比, 差异比较明显。传统使用的测量仪器主要是位移计和千分表, 由于自身仪器的限制, 它们的测量精度相对较低, 同时无法进行全场观测。而利用电耦合器件(CCD)和电寻址液晶(EALCD)相结合的数字全息干涉术来测量物体的位移, 具有记录时间短、实验操作流程简单、受外界环境干扰小、精度高等优点。数字全息干涉术因自身的巨大优势<sup>[1]</sup>, 已在军事和工程领域广泛运用。

全息干涉术通常包含记录与再现两个过程。本文对全息图的记录、存储和再现过程采用了不同的方式。

**收稿日期:** 2009-05-25; **收到修改稿日期:** 2009-09-18

**基金项目:** 总装备部十一五预研基金(9140A17060306BQ0303)资助课题。

**作者简介:** 范真节(1984—), 男, 硕士研究生, 主要从事数字全息方面的研究。E-mail: fanzhenjie1984@163.com

**导师简介:** 王文生(1943—), 男, 教授, 主要从事现代光学测试方面的研究。E-mail: wwsciom@163.com

其一是以 CCD 数字化记录原件等代替普通全息记录材料记录全息图,记录的全息图经数字化处理后存储在计算机中;其二是用计算机模拟再现取代光学衍射来实现所记录物场的数字再现。本文提出一种新的再现方法,将全息图转移到数字介质——在 EALCD 上以光学形式实现全息图的再现。整个过程避免了传统全息记录材料显影、定影等过程以及材料非线性记录等缺点,给全息技术的发展和應用增加了新的方法<sup>[2]</sup>。

## 2 全息干涉术的基本理论

### 2.1 双曝光全息干涉术原理

双曝光全息干涉术在全息图记录过程中,对感光材料做两次曝光:一次是记录初始物光波(标准波面)的全息图,一次是记录变化后的物光波(变形波面)的全息图。这两张全息图记录在同一张感光层上,当用光波再现时可出现物体变化前后的两个物波,这两个光波是相干的,因而可以观察到它们之间的干涉条纹。若两次曝光是在相同的照明条件下,曝光时间相同,那么重现波的振幅将相同,干涉条纹有较高的对比度。通过条纹的分布情况可以了解波面的变化,从而得到物体的变化信息。

双曝光全息干涉术对光学系统的像差要求相对较小,且当重现光束的位置与记录全息图所用的参考光束位置不同时,像的大小、形变和位移相对两波是相同的,干涉条纹的结构不发生变化,所以双曝光全息干涉术不存在复位的问题。因此,从实验的角度看,双曝光全息干涉术是比较简单的<sup>[3]</sup>。

假设在感光介质上,初始物光波

$$O(x, y) = o(x, y) \exp[j\varphi_0(x, y)], \quad (1)$$

变形后物光波

$$O'(x, y) = o(x, y) \exp[j\varphi'_0(x, y)], \quad (2)$$

参考光波为

$$R(x, y) = r(x, y) \exp[j\varphi_r(x, y)]. \quad (3)$$

若两次曝光时间相同,则在感光介质上第一次记录全息图的曝光量可表示为

$$I_1(x, y) = o^2 + r^2 + OR^* + O^*R, \quad (4)$$

第二次记录全息图的曝光量

$$I_2(x, y) = o^2 + r^2 + O'R^* + O'^*R, \quad (5)$$

总的曝光量

$$I(x, y) = I_1(x, y) + I_2(x, y) = 2(r^2 + o^2) + or \exp[j(\varphi_0 - \varphi_r)] + or \exp[-j(\varphi_0 - \varphi_r)] + or \exp[j(\varphi'_0 - \varphi_r)] + or \exp[-j(\varphi'_0 - \varphi_r)]. \quad (6)$$

在线性记录条件下,全息图的复振幅透过率正比于曝光光强

$$t(x, y) = t_0 + \beta I(x, y). \quad (7)$$

当用原参考光照明这样透过率的全息图时,则在全息图的透射光波中,正一级衍射重现的原始物波复振幅和变形物光波分量分别为

$$O_j = \beta or^2 \exp(j\varphi_0), \quad O'_j = \beta or^2 \exp(j\varphi'_0). \quad (8)$$

再现的原始物光波和变形物光波沿同一方向传播,产生干涉,干涉条纹反映了物体表面的变化情况。干涉条纹的强度分布为

$$I_j(x, y) = a(x, y) + b(x, y) \cos[\varphi(x, y) + \Delta\varphi], \quad (9)$$

式中  $a(x, y) = 2\beta^2 o^2 r^4$ ,  $b(x, y) = 2\beta or^2$ ,  $\varphi(x, y) = \varphi_0 - \varphi'_0$ ,  $\varphi(x, y)$  为物体位移而形成的干涉相位,也就是需要寻求的相位差。因为  $I_j(x, y)$  可以测出,所以(9)式包含了 3 个未知量: $\varphi(x, y)$ ,  $a(x, y)$  和  $b(x, y)$ 。为了解决这个问题,可以利用 3 个干涉图法,即在参考光路中使相位变化 3 次,从而得到 3 个光强分布公式,设引入的附加相位差  $\Delta\varphi$  为  $-\beta, 0, \beta$ , 则

$$\begin{aligned} I_1(x, y) &= a(x, y) + b(x, y) \cos[\varphi(x, y) - \beta], \\ I_2(x, y) &= a(x, y) + b(x, y) \cos[\varphi(x, y)], \\ I_3(x, y) &= a(x, y) + b(x, y) \cos[\varphi(x, y) + \beta]. \end{aligned} \quad (10)$$

这样,用已知的相位  $\beta$  扫描 3 个不同的干涉图对每一采样点,联解(10)式得

$$\frac{I_3(x,y) - I_1(x,y)}{I_3(x,y) - 2I_2(x,y) + I_1(x,y)} = \tan \varphi(x,y) \cotan \frac{\beta}{2}, \quad (11)$$

如果选择  $\beta=90^\circ$ , 则(11)式可化为

$$\varphi(x,y) = \arctan \frac{I_3(x,y) - I_1(x,y)}{I_3(x,y) - 2I_2(x,y) + I_1(x,y)}, \quad (12)$$

设物体位移量为  $L$ , 观察到的干涉条纹数为:  $N = N_0 + \Delta N = \varphi/(2\pi)$ , 根据

$$L = (\lambda/2)(N + \Delta N) \quad (13)$$

可求出物体的位移量<sup>[4]</sup>。式中  $\Delta N = \Delta N_1 + \Delta N_2$ ,  $\Delta N_1 = a/c$ ,  $\Delta N_2 = b/c$ ,  $\lambda = 632.8 \text{ nm}$ 。图 1 为干涉条纹示意图,  $a, b$  为图中所示的部分干涉条纹的宽度,  $c$  为干涉条纹周期。

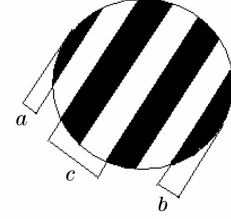


图 1 条纹示意图

Fig.1 Schematic of stripes

## 2.2 CCD 的分辨率要求

一般来说,传统全息技术的理论与实验技术也适用于数字全息技术,但与传统记录材料的高分辨率(1000 lp/mm 以上)和大记录面积(100 mm×100 mm 以上)相比,目前的数字全息技术在有限距离内只能记录和再现较小物体的低频信息,而且对记录条件有其自身的要求。若要将数字全息技术用于全息干涉计量,用 CCD 代替干版记录干涉图,并由计算机数字再现或 EALCD 实现光学再现,则必须考虑记录系统适应 CCD 的分辨率要求。对于传统光学全息,由于银盐干版的分辨率高达  $10^3 \text{ lp/mm}$  量级,能记录物光与参考光以较大夹角形成的干涉图。而对于 CCD,它的分辨率一般只有  $10^2 \text{ lp/mm}$  量级,物光与参考光的夹角必须很小。设 CCD 像元之间的距离为  $\Delta\xi$ , 由于一个条纹周期至少要两个像元,因此它能记录的最大空间频率为

$$f_{\max} = 1/(2\Delta\xi). \quad (14)$$

设物光与参考光的最大夹角为  $\theta_{\max}$ , 则由光栅方程得

$$2d \sin(\theta/2) = \lambda, \quad (15)$$

式中  $d$  为条纹的周期,  $d = 2\Delta\xi$ , 于是有

$$f_{\max} = (2/\lambda) \sin(\theta_{\max}/2), \quad (16)$$

因为  $\theta_{\max}$  很小, 故由(16)式可得

$$\theta_{\max} = \lambda/(2\Delta\xi). \quad (17)$$

通常,物光与参考光的夹角在几度以内。把 CCD 的相关参数代入(17)式,可得本测量系统中物光与参考光的夹角要求不超过  $8^\circ$ 。

## 2.3 CCD 与 EALCD 的技术匹配

光学图像在光学仪器中的传递受到两方面的限制<sup>[5]</sup>:一是孔径光阑拦掉了超过截止频率的高频信息;二是视场光阑限制了视场以外的物空间。由此可以得到通过光学信道的信息量公式。信息量=频带宽度×空间宽度。等式右边称为空间带宽积,用  $S_w$  表示。空间带宽积是空间信号在空间域和频谱域中所占的空间量度,  $S_w$  越大,标志着通过光学系统能获得更多的信息。大孔径、大视场的高质量光学系统正是光学工作者追求的目标。

如果图像在空域所占据的面积是矩形,其各边长为  $L_x, L_y$ , 频域中的带宽为  $B_x, B_y$ , 则有  $S_w = 4L_x L_y B_x B_y$ 。空间带宽积具有传递不变性,当图像发生空间位移、缩放、受到调制或变换操作时,为了不丢失信息,应使空间带宽积保持不变。因此,实验装置中应用的各关键器件参数的选取也要通过空间带宽积来确定。实验装置中, EALCD 的尺寸是给定的,则 CCD 的尺寸应与之相对应,可由(12)式确定。

$$\lambda f = N_1 D_1 D_2. \quad (18)$$

EALCD 像素尺寸为 13(H)  $\mu\text{m} \times 10$ (V)  $\mu\text{m}$ , 分辨率为 1024(H)  $\times$  768(V), 采样速率为 60 frame/s, 面阵 CCD 相机分辨率为 752(H)  $\times$  582(V), 像素尺寸为 11.6(H)  $\mu\text{m} \times 13.5$ (V)  $\mu\text{m}$ , 采样速率为 25 frame/s; CCD 的分辨率和采样速率决定了系统的分辨率和采样速率,所以对于本系统所选择的 CCD 与 EALCD 是合适的。

### 3 实验

实验光路系统如图 2 和图 3 所示。本实验采用图 2 所示的实验光路,选用一角硬币作为实验物体,物体到达 CCD 靶面的距离为 35.8 cm。通过调节实验物体右边的微调旋钮,来达到物体位移的目的。按照图 2 所示,CCD1 摄像机接收到信息,再把接收到的图像传到计算机。当用平行光照射被测物体表面,被测物体表面反射和散射的光携带物体的表面信息,与参考光束产生干涉,形成菲涅耳全息图。由 CCD1 记录,通过图像采集卡,经过模/数(A/D)转换,把变形前后的菲涅耳全息图存储在计算机中<sup>[6,7]</sup>。

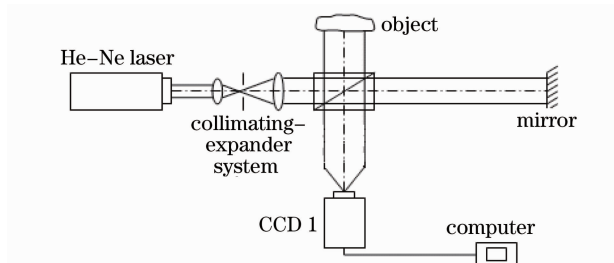


图 2 菲涅耳全息记录原理图

Fig. 2 Fresnel holographic recording schematic diagram

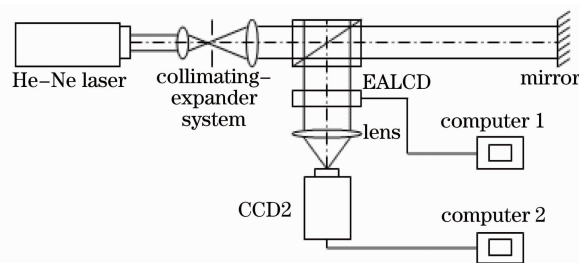


图 3 菲涅耳全息再现光路原理图

Fig. 3 Fresnel holographic reconstructed schematic diagram

再现时,将存储在计算机中的一角硬币的菲涅耳全息图写入 EALCD 中,将 EALCD 准确复位在 CCD1 记录全息图时的位置,在 EALCD 后面放置成像透镜,用原参考光束照射 EALCD,调节 CCD2 的位置,即可记录到被测物体一角硬币位移前后的再现像,如图 4 所示。

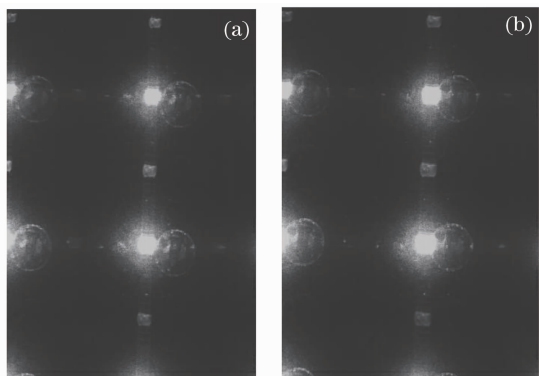


图 4 位移前(a),后(b)光学再现像

Fig. 4 Optical reconstruction before (a) and after (b) displacement

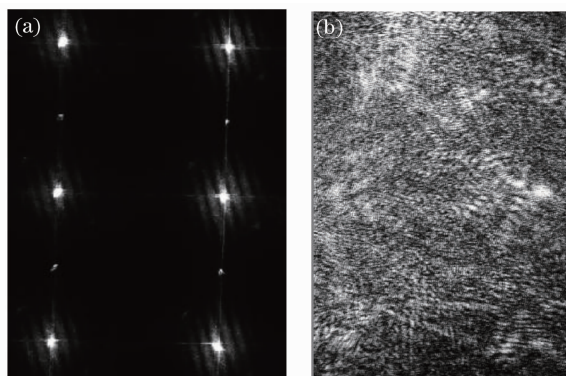


图 5 (a) 干涉条纹, (b) 菲涅耳全息图的叠加图

Fig. 5 (a) Interference fringes, (b) Fresnel holographic superposition

利用双曝光干涉法,将位移前后两幅在相同条件下记录的菲涅耳全息图通过 Matlab 程序进行数字叠加,再通过光学再现,得到最终所需要的干涉条纹,如图 5(a)所示。位移前后菲涅耳全息图的叠加图,如图 5(b)所示。由图 5(a)可以得出,  $\Delta N_1 = a/c = 0.25$ ,  $\Delta N_2 = b/c = 0.5$ , 因此  $\Delta N = \Delta N_1 + \Delta N_2 = 0.75$ , 故  $N = N_0 + \Delta N = 3 + 0.75 = 3.75$ ; 所以根据(13)式可以计算出物体的位移量为  $d \approx 1.18 \mu\text{m}$ 。

### 4 结论

在研究全息干涉术基本原理的基础上,提出采用数字菲涅耳全息双曝光法测量物体的微小位移,利用光敏电子成像器件 CCD 代替传统的记录材料全息干板作为全息图记录介质,把由 CCD 记录到的全息条纹图写入到 EALCD,再由参考光照射 EALCD, EALCD 上的条纹图经参考光调制后,衍射得到再现图像。这既改善了传统全息难以实时的缺点,同时也兼具了数字全息可以对全息图进行数字图像处理以获得更好的再现图像的优点,实现了全息记录和存储的数字化。

## 参 考 文 献

- 1 Wang Yang, Yu Jia, Liu Huiping *et al.*. Application and foreground of the digital technology on holography[J]. *Laser J.*, 2004, **25**(4): 13~15  
王 杨, 于 佳, 刘惠萍 等. 数字技术在光学全息领域的应用与前景展望[J]. 激光杂志, 2004, **25**(4): 13~15
- 2 J. Yamaguchi, S. Kato. Image formation in phase-shifting digital holography and application on microscopy[J]. *Appl. Opt.*, 2001, **40**(34): 6177~6186
- 3 Zhang Yan, Liu Xuan. Comparison of digital reconstruction methods of reesnel hologram [J]. *J. Shandong Normal University (Natural Science)*, 2007, **22**(3): 47~49  
张 燕, 刘 轩. 菲涅耳全息图的数字再现方法比较[J]. 山东师范大学学报(自然科学版), 2007, **22**(3): 47~49
- 4 Jia Xiaojun. Probing into technique of image enhancement based on Matlab[J]. *J. Weinan Teachers University*, 2008, **23**(2): 68~70  
贾小军. 基于 Matlab 的图像增强技术研究[J]. 渭南师范学院学报, 2008, **23**(2): 68~70
- 5 Ma Lihong, Wang Hui, Li Yong *et al.*. 3-D rebuilding based on numerical reconstruction of the hologram[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2006, **35**(4): 595~598  
马利红, 王 辉, 李 勇 等. 全息模拟再现像的三维重构[J]. 光子学报, 2006, **35**(4): 595~598
- 6 C. Wagner, S. Seebacher, W. Osten *et al.*. Digital recording and numerical reconstruction of lensless Fourier holograms in optical metrology[J]. *Appl. Opt.*, 1999, **38**(22): 4812~4820
- 7 Zhong Liyun, Zhang Yimo, Lü Xiaoxu *et al.*. Analysis of the characteristics about the digital holography of the spherical reference wave[J]. *Acta Optica Sinica*, 2004, **24**(9): 1210~1213  
钟丽云, 张以谟, 吕晓旭 等. 球面参考光波数字全息的一些特点分析及实验[J]. 光学学报, 2004, **24**(9): 1210~1213