

基于激光散斑照相术的三维变形测试

张文静 黄芳 王文生

(长春理工大学现代光学测试实验室, 吉林 长春 130022)

摘要 基于散斑照相术的基本原理,利用电荷耦合器(CCD)记录,电寻址液晶(EALCD)再现,从而对物体三维变形进行了相位的测试。用数字技术实时显示干涉条纹,取代了传统散斑照相术中的记录干板,省去了传统方法中干板显影、定影等化学处理过程;利用数字图像处理技术实现了四步相移法,并通过相位展开实现了三维变形相位测试,省略了压电位移器、位移控制器等器件,简化了测试系统,缩短了测试时间,测试精度容易达到 $\lambda/10$ 。实验研究表明,该研究方法简单、高效,能快速获得具有高对比度的散斑条纹。

关键词 测量;散斑照相术;电荷耦合器;电寻址液晶;四步相移法;三维变形测试

中图分类号 TN29 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/LOP48.111202

Three-Dimensional Deformation Testing Based on Laser Speckle Photography

Zhang Wenjing Huang Fang Wang Wensheng

(Laboratory of Contemporary Optical Measure Technology, Changchun University of Science and Technology, Changchun, Jilin 130022, China)

Abstract Based on the principle of speckle photography, with charge-coupled device (CCD) as a recorder, electrically addressed liquid crystal display (EALCD) as a read-out element, the 3D phase measurement of a deformed object is performed. Using digital technology interference fringes displayed in real-time, instead of recording media used in the traditional speckle photography, can leave out the chemical process of developing and fixing. Using digital image processing technology realizes four steps phase shifting and with phase-unwrapping method 3D deformation phase testing is realized. So piezoelectric translator (PZT), phase controller and so on can be omitted, thus testing system is simplified, testing time is reduced and testing precision can easily reach up to $\lambda/10$. The experimental result shows that the research method is not only simple and high-efficiency, but also can obtain high contrast speckle fringes.

Key words measurement; speckle-photography; charge-coupled device; electrically addressed liquid crystal display; four steps phase shifting; three-dimensional deformation testing

OCIS codes 120.5050; 120.6150; 100.6890

1 引言

利用激光散斑照相术可以测量面内位移、应力、形变、倾斜、振动、温度、密度等许多物理参数的场分布^[1,2]。传统的散斑照相术是利用全息干板作为信息的记录介质,并且需要显影、定影等一系列照相处理过程,因而散斑照相术的应用受到一定的限制,实验数据的采集与处理需要大量的工作时间,不能进行实时测量^[3]。为了克服上述困难,本文采用了电荷耦合器(CCD)与电寻址液晶(EALCD)相结合进行记录和光学再现,从而实现了动态测量。

利用 CCD 记录的干涉条纹图是二维图像,为了显示出条纹的三维信息就要应用相位展开^[4],需采用三

收稿日期: 2011-06-15; **收到修改稿日期**: 2011-07-21; **网络出版日期**: 2011-09-30

基金项目: 总装备部预研基金(9140A17060306BQ0303)资助课题。

作者简介: 张文静(1986—),女,硕士研究生,主要从事激光散斑照相术方面的研究。E-mail: jing860204@163.com

导师简介: 王文生(1944—),男,教授,博士生导师,主要从事现代光学测试技术方面的研究。

E-mail: wwsciom@163.com(通信联系人)

步相移法或四步相移法。三步相移法必须有已知的固定的相移,并且必须严格地调校相位控制器,使参考光路中玻璃平板的偏转有对应的相移,否则引起较大的测量误差。而四步相移法避免了这一缺点,其相移可以固定为任意值,因此不需要调校相位控制器^[5]。本文利用数字图像处理实现了四步相移法,从而取代了传统光学方法的压电位移器、相位控制器,计算机控制的电子快门,不但简化了光学系统,而且缩短了图像采集与处理的时间,减少了误差源,测试精度容易达到 $\lambda/10$ 。

本文利用了激光散斑具有自身相干性的特点,采用 CCD 作为记录手段,高精度图像采集系统和高速电子计算机作为图像处理工具,操作简单,图像处理速度快,可以做到动态测量,实时显示物体的位移和形变信息。具有传统的光学干涉测量技术无法比拟的优越性,且比一般光学测量方法有着设备简单、可靠、防振性能好的特点。

2 散斑照相的基本原理

用一束激光照射漫射体,在同一底片上记录物体位移(或形变)前后的两个或多个散斑图,再用光学方法从中抽取表面位移或形变的信息,这种方法称为散斑照相术^[6]。散斑图的记录是用激光照明具有粗糙表面的物体,由 CCD 记录。在记录一次后,将物体有一微小变形,再记录一次。这样,可认为两次记录的激光散斑图的强度分布相同,但两者有相对的相位移。将两次记录的散斑图通过计算机数字技术进行叠加,得到叠加后的散斑图。设在第一次图像采集时,接收端散斑的强度分布为 $\phi_1(x, y)$,则经过位移后的强度分布为

$$\phi_2(x, y) = \phi_1(x - M\Delta x, y), \quad (1)$$

于是,被测物位移前用 CCD 采集到的散斑图像为

$$S_1 = t\phi_1(x, y), \quad (2)$$

式中 t 为采集灰度值与实际光强的比率,位移后为

$$S_2 = t\phi_1(x - M\Delta x, y), \quad (3)$$

设两次图像采集条件完全相同,则在计算机内将两幅灰度图像进行等强度叠加(本实验中可用计算机进行图像叠加运算时的比率控制),得到合成图像为

$$S = \tau(S_1 + S_2) = \tau t[\phi_1(x, y) + \phi_2(x, y)] = \tau t[\phi_1(x, y) + \phi_1(x - M\Delta x, y)] = \tau t\phi_1(x, y) * [\delta(x, y) + \delta(x - M\Delta x, y)], \quad (4)$$

式中 M 为散斑照相物镜的垂轴放大率,*为卷积, τ 为等强度合成时,两图像在 S 中所占的灰度百分比约各占50%,则 $\tau = 0.5$ ^[7]。

对散斑图的处理,通常采用两种方法:一种是全场分析法,即双曝光散斑图用准直激光全场照明,然后应用傅里叶分析透镜获得散斑图的频谱分布,并在频谱平面用滤波孔使某些频谱分量透过并进入成像系统。这样在成像面上即可获得由滤波孔位置所决定的全场投影条纹;另一种是逐点分析法,即使用细激光束垂直透过二次曝光散斑图,在其后面距离即处平行放置观察屏,每次考察底片上一个小区域的频谱。

图1为全场分析法的光路,设散斑相对于光轴对称排列,且其连线与 x 轴夹角为 θ ,则此散斑对可用一对函数表示:

$$\begin{aligned} A\delta(x - x_1, y - y_1) + A\delta(x + x_2, y + y_2) = \\ A\delta\left(x - \frac{l}{2}\cos\theta, y - \frac{l}{2}\sin\theta\right) + \\ A\delta\left(x + \frac{l}{2}\cos\theta, y + \frac{l}{2}\sin\theta\right), \end{aligned} \quad (5)$$

做傅里叶变换,在变换平面上将得到它们的频谱,应用欧

拉公式并令 $f_x = \frac{x}{\lambda}f, f_y = \frac{y}{\lambda}f$,整理后为

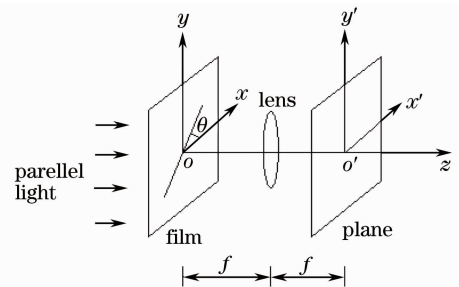


图1 全场分析法的光路

Fig. 1 Optical path of full field analysis

$$F = A\delta(x - x_1, y - y_1) + A\delta(x + x_2, y + y_2) = A\exp\left(-i2\pi - f_x \frac{l}{2} \cos \theta + f_y \frac{l}{2} \sin \theta\right) + A\exp\left[i2\pi\left(f_x \frac{l}{2} \cos \theta + f_y \frac{l}{2} \sin \theta\right)\right] = 2A\cos\left(\frac{\pi}{\lambda f} \mathbf{l} \cdot \mathbf{r}\right), \quad (6)$$

所以,变换平面上的光强分布可表示为

$$I = 4I_1 \cos^2 \frac{\delta}{2}, \quad (7)$$

式中 $I_1 = A^2$, $\delta = \frac{2\pi}{\lambda f} \mathbf{l} \cdot \mathbf{r}$, \mathbf{l} 为位移矢量, \mathbf{r} 为变换平面上的位置矢量。并且当 $\mathbf{r} = n\lambda f$ ($n = 0, \pm 1, \pm 2, \dots$) 出现亮条纹; 当 $\mathbf{r} = \left(n + \frac{1}{2}\right)\lambda f$ ($n = 0, \pm 1, \pm 2, \dots$) 出现暗条纹。这些条纹分布在散斑图上, 构成位移矢量 \mathbf{l} 与 \mathbf{r} 方向投影的等值线族^[8]。

3 散斑照相三维变形实验装置

如图 2 所示, He-Ne 激光器的光经过准直扩束系统后, 将直径约为 0.8 mm 的光束扩展到直径 25~50 mm 的平行光束。然后平行光束照射到分束器上, 反射光射到物体表面, 经物体散射后再次经过分束器到达 CCD。CCD 记录下含有物体表面相位信息的散斑图, 输入到计算机中, 并存储起来。物体发生微小变形后, 再次用上述方法采集物体变形后的散斑图, 存储在计算机上。将两次变形后的散斑图通过计算机数字程序得到叠加图。

再现时如图 3 所示, 在 EALCD 后面放上傅里叶透镜, CCD 放在傅里叶变换透镜的后焦平面, 然后将数字散斑叠加图通过计算机(电脑 1)写入 EALCD, 用激光照射 EALCD, 调节 CCD 的前后位置, 即可在像面上得到干涉条纹图。由于双曝光全息干涉术再现的原始物波和变形后的物波共光路, 当参考准直单色光照明 EALCD 时, 即使再现的照明光束与记录的参考光束位置不同, 使再现物波产生畸变, 但再现的原始物波和变形后的物波畸变相同, 其相对畸变是零。因此 EALCD 放置位置不同, 不影响实验结果。这一理论分析得到实验验证, 改变 EALCD 位置, 重构的干涉条纹不变化。

准直扩束系统由显微物镜, 针孔和准直物镜组成。显微物镜的放大倍率为 40 倍, 数值孔径(NA)为 0.6。针孔直径为 10 μm 。准直物镜的焦距为 $f=300$ mm, 口径为 $D=50$ mm。由于激光光束截面是高斯分布, 能量分布不均匀, 通过针孔进行空间滤波, 同时也提高了空间相干度, 减少相干噪声。光源发出的光束口径由原来的 1.5 mm 扩束准直到 50 mm, 得到的光束既可以保证实验所用 CCD 与 EALCD 的光照面积, 又使得光束亮度分布均匀。

CCD 在实验中主要用于散斑图和干涉条纹图的记录。实验中所用的 CCD 是 CV-M300C, 其面阵尺寸为 8.8 mm×6.6 mm, 分辨率为 752 pixel×582 pixel, 采样速率为 25 frame/s, 像素尺寸为 11.6 μm ×13.5 μm 。

空间光调制器^[9]按照输入控制信号的方式不同可分为光寻址和电寻址。电寻址液晶是读、写器件, 可以直接接收来自计算机的数字信号, 因而具有可编程性、可控制性和灵活性。实验中采用的电寻址液晶是 EALCD, 其分辨率为 1024 pixel×768 pixel, 像素尺寸为 13 μm ×10 μm , 透射率为 14% (在波长 600 nm 处), 采样速率为 60 frame/s。

实验中为得到清晰的条纹图, 根据实际情况和实验要求, 实验中选用相对孔径为 1/6, 焦距 300 mm 的傅里叶透镜。

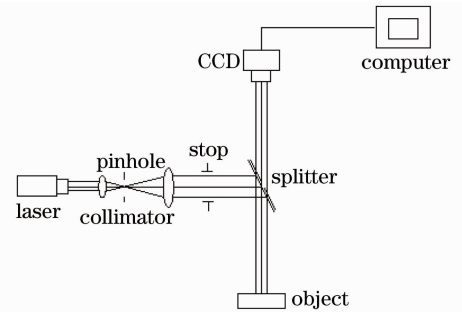


图 2 散斑场记录配置图

Fig. 2 Configuration diagram of speckle field recording

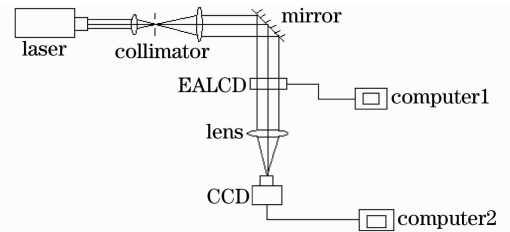


图 3 全场再现配置图

Fig. 3 Configuration diagram of full field reconstruction

4 散斑与条纹图像处理

实验中选择铁片作为物体,如图 4(a)所示。铁片表面的反射光由 CCD 记录形成散斑图,记录得到的散斑图如图 4(b)和(c)所示。图 4(b)是不对物体施加外力,即物体没有变形时的散斑图,图 4(c)是施加一微小外力,即物体有一微小变形时的散斑图。图 4(d)是图 4(b)和(c)通过计算机数字程序叠加而成。

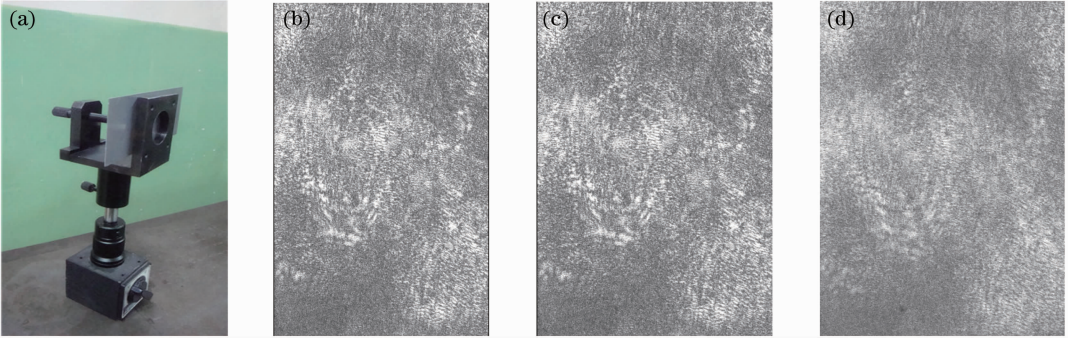


图 4 物体和散斑图

Fig. 4 Object and speckle patterns

由于 CCD 记录的条纹图只是二维图像,要由三维图像表示其信息,可以采用四步相移算法来实现。四步相移的基本思想就是在参考光路中使相位改变四次,通过反正切变换后得到相位差分布^[10]。三步相移法由于记录变形前后物体的变化状态,所以在光路中借助平行平板玻璃来实现,用计算机控制的压电位移器使平行平板玻璃转动一定角度,相应的相位移为 90° ,这样必须严格地校正压电位移器。四步相移法避免了这一缺点,其相移可以为任意确定值,本文将得到的一幅干涉图利用数字技术即 Matlab 程序实现了四步相移。这不仅简化了测试系统,还减少了记录时间,更适于物体快速变形的需求。设四个光强分布公式如下,每次相移为 $\pi/2$,

$$I_1(x, y) = A^2 + B^2 + 2AB \cos(\delta - \varphi), \quad (8)$$

$$I_2(x, y) = A^2 + B^2 + 2AB \cos\left(\delta - \varphi - \frac{\pi}{2}\right) = A^2 + B^2 + 2AB \sin(\delta - \varphi), \quad (9)$$

$$I_3(x, y) = A^2 + B^2 + 2AB \cos(\delta - \varphi - \pi) = A^2 + B^2 - 2AB \cos(\delta - \varphi), \quad (10)$$

$$I_4(x, y) = A^2 + B^2 + 2AB \cos\left(\delta - \varphi - \frac{3\pi}{2}\right) = A^2 + B^2 - 2AB \sin(\delta - \varphi), \quad (11)$$

于是可得

$$\tan(\delta - \varphi) = \frac{I_4 - I_2}{I_1 - I_3} = \frac{\sin(\delta - \varphi)}{\cos(\delta - \varphi)}, \quad (12)$$

反正切变换后可以得到相位差:

$$\Delta\varphi = \delta - \varphi = a \tan\left(\frac{I_4 - I_2}{I_1 - I_3}\right). \quad (13)$$

由(13)式计算可以得到相位差分布 $\Delta\varphi$,但是正切函数的周期性使 $\Delta\varphi$ 必被截断在反正切函数的主值区间 $[-\pi/2, \pi/2]$ 内。根据(13)式中正弦和余弦函数的正负,可以扩展 $\Delta\varphi$ 的区间范围,也即相位差 $\Delta\varphi$ 扩展后的相位分布在 $[-\pi, \pi]$ 内。

物体的相位变化往往超出 $[-\pi, \pi]$,为了得到原始物体的相位,需要将包裹相位连接成连续光滑的曲面,这一过程称作“相位展开”或“相位解包裹”^[11]。一维相位展开过程如图 5 所示,其中纵坐标表示相位差 $\Delta\varphi$,单位为弧度。

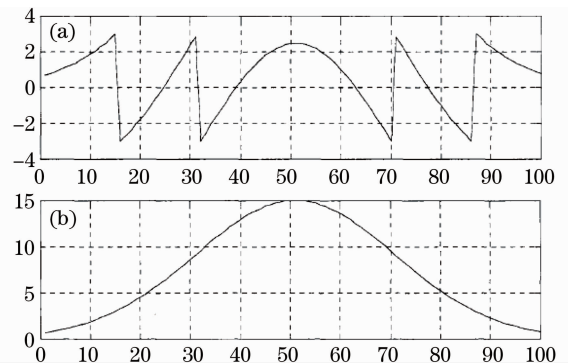


图 5 一维相位展开过程示意图。(a)未展开时相位;
(b)展开后相位

Fig. 5 One-dimensional phase-unwrapping process map.
(a) Phase before unwrapping; (b) phase after unwrapping

5 实验结果分析

再现时,将叠加图 4(d)通过计算机输入到 EALCD 上,利用全场分析法通过 CCD 记录得到干涉条纹,如图 6(a)所示。将所得到的条纹图经过数字技术即 Matlab 程序处理,则得到其对应的三维变形相位图,如图 6(b)所示。

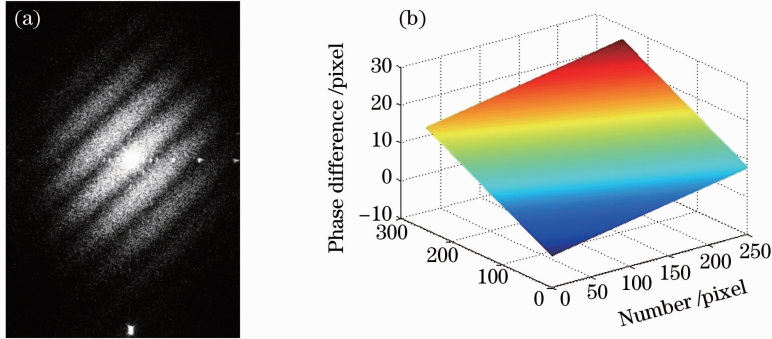


图 6 (a)条纹和(b)三维相位图

Fig. 6 (a) Fringes and (b) 3D phase image

由图 6(b)可以看出,三维相位图有一定的倾斜角度,这跟直条纹的倾斜有关。光程差 d 与干涉条纹数 N 的关系为

$$d = \frac{1}{2} N \lambda, \quad (14)$$

式中 λ 为 He-Ne 激光器的波长。光程差 d 与物体变形前后的位移量 l 都是波长量级,所以三维相位图的倾斜角度 θ 的大小可以近似等于 $\tan \theta$ 的大小,即

$$\theta \approx \tan \theta = \frac{d}{l} = \frac{N \lambda}{2l}, \quad (15)$$

式中,由图 6(a)可知, $N=7$; $\lambda=0.6328 \mu\text{m}$; 实验中, $l=10 \mu\text{m}$, 则 $\theta \approx 0.22148 \text{ rad}$ 。

而相位图的大小只是表示在一定范围内的相位变化。本文利用四步相移法,为了便于图像处理,每次移动的是条纹图的像素数,因此只能表示在一定像素数的范围内相位差大小。物体变形前后的相位差与位移的关系为

$$\Delta \phi = \frac{2\pi}{\lambda} (\mathbf{k}_1 - \mathbf{k}_2) \cdot \mathbf{L}, \quad (16)$$

式中 \mathbf{k}_1 为光照明方向的单位矢量; \mathbf{k}_2 为观察方向的单位矢量; \mathbf{L} 为位移矢量。由此可知,位移量与相位差成正比,即三维相位图可以表示出三维变形的形貌。

实验表明,计算机控制的压电位移器每次相位移时间约 3 s,要完成电子快门封闭、压电位移器移动、快门开启和光信息记录过程,四次相位移时间约 12 s。数字相移技术是由计算机程序控制,可在 40 ms 内完成一个干涉条纹记录(CCD 记录 25 frame/s),而数字相移技术的四步相移法是后处理,提高了记录时间近 300 倍,更适于物体快速变形的测量需求。更重要的是,所有压电位移器件,都有位移误差和重复精度问题,即影响测试精度,而数字相移技术不存在重复精度问题。

6 结 论

本文利用散斑照相术的基本原理,对物体变形进行了实验研究。利用 CCD 和 EALCD 取代传统散斑照相术中记录干板,实现了数字化记录和再现;数字四步相移算法省去了压电位移器、相位控制器等器件,缩短了实验时间,简化了实验系统,测试精度容易达到 $\lambda/10$;通过相位展开技术实现了散斑三维变形相位测试;根据三维变形与三维应力的关系,进而可分析计算三维应力。

参 考 文 献

- 1 K. D. Kihm. Applications of laser speckle photography for thermal flow problems[C]. *SPIE*, 1998, **8166**: 171~200

- 2 R. J. Prypuniewicz. Speckle metrology techniques and their application[C]. *SPIE*, 1985, **556**: 90~98
- 3 Zhou Chengpeng. Research on the Algorithm of Three Dimensional Reconstruction Based on Digital Holography[D]. Hefei: Anhui University, 2007. 7~9
周成鹏. 基于数字全息的三维重构算法研究[D]. 合肥: 安徽大学, 2007. 7~9
- 4 Song Yaozu, Wu Ying, Guo Zengyuan. Investigation in electronic speckle photography [J]. *Journal of Test and Measurement Technique*, 1998, **10**(23): 533~538
宋耀祖, 吴 鹰, 过增元. 电子散斑照相技术的研究[J]. 测试技术学报, 1998, **10**(23): 533~538
- 5 Wang Wensheng. Interference Testing Technology[M]. Beijing: Weapon Industry Press, 1992. 258~261
王文生. 干涉测试技术[M]. 北京: 兵器工业出版社, 1992. 258~261
- 6 V. Petrov. Real time speckle photography: a break through[C]. *SPIE*, 1996, **2951**: 110~116
- 7 Wang Qin, Huang Liqing, Wang Yongchang. Real-time method of measuring little displacement by speckle photography [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2003, **32**(6): 1010~1012
王 勤, 黄丽清, 王永昌. 利用散斑照相检测微小位移的实时方法[J]. 光子学报, 2003, **32**(6): 1010~1012
- 8 Zhao Zhigang, Gao Haiyan. Non-destructive testing of the laser speckle photography[J]. *Journal of Xinxiang Teachers College*, 2006, **20**(2): 20~22
赵志刚, 高海燕. 激光散斑照相术的无损检测[J]. 新乡师范高等专科学校学报, 2006, **20**(2): 20~22
- 9 Wang Zhijiang, Wu Shudong. Imaging Optics[M]. Beijing: Science Press, 1991. 30~31
王之江, 伍树东. 成像光学[M]. 北京: 科学出版社, 1991. 30~31
- 10 Chen Xiushan, Li Enpu, Zhao Jianlin *et al.*. Measurement and reconstruction of 3D acoustic wave field using digital holographic interferometry[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2010, **39**(1): 95~99
陈秀山, 李恩普, 赵建林 等. 三维超声驻波场的数字全息测量与重建研究[J]. 光子学报, 2010, **39**(1): 95~99
- 11 Dong Keping. Fundamental Research and Realization of Digital Holographic Microscopy [D]. Kunming: Kunming University of Science and Technology, 2006. 39~40
董可平. 数字全息显微术理论研究与实现[D]. 昆明: 昆明理工大学, 2006. 39~40