

双曝光数字全息三维变形测试

范俊叶, 尹博超, 王文生

(长春理工大学 光电工程学院, 吉林 长春 130000)

摘要: 全息三维变形测试在军事、工业测试中有重要意义, 而传统的全息术由于记录、显影、定影、再现、复位等条件使其应用受到限制。文中应用 CCD 实现了数字全息, 不仅避免了传统全息显影、定影等过程, 也避免了全息材料非线性记录等缺点, 并基于双曝光全息干涉术和四步相移法原理, 实现了数字相移, 取代了传统的应用压电位移器等机械相移法, 实现了物体的三维变形测试。由物体变形的二维等高线图和三维立体图, 可判读物体变形的大小、变形的方向和变形的形状。大量的实验表明, 该方法不仅简化了全息干涉测试的光学装置, 而且具有操作简单, 测试精度高, 其精度容易达到 $1/10$ 波长。

关键词: 三维变形测试; 双曝光全息干涉术; 数字全息; 四步数字相移法

中图分类号: TN26 **文献标志码:** A **文章编号:** 1007-2276(2014)05-1582-05

Three-dimensional deformation measurement based on double exposure digital holographic technology

Fan Junye, Yin Bochao, Wang Wensheng

(Photoelectric Engineering Institute, Changchun University of Science and Technology, Changchun 130000, China)

Abstract: Holographic three-dimensional deformation test has important significance in the military, industrial test, however its applications are limited because of the requirements of traditional holographic recording, development, fixing, reconstruction and home position. In this paper, applying the charge-coupled device(CCD) digital holography was realized. It avoided not only the developing, fixing processes of traditional hologram recording material, but also the shortcoming of nonlinear recording of holographic material. Based on double exposure holographic interferometry and four-step phase shift method principle the digital phase shift was achieved, replaced the traditional mechanical phase shift method with piezoelectric translator, and the 3D deformation of an object was tested. From the 2D contour map and 3D plot of object deformation, the size, shape, and deformation direction of the deformed object could be interpreted. A lot of experiment results show that these method can not only simplify the optical layout of holographic interference testing, but also easy operate and increase measure precision. The precision can be up to $1/10$ wavelength.

Key words: three-dimensional deformation tests; double exposure holographic interferometry; digital holography; four-step digital phase shifting method

收稿日期: 2013-09-05; 修订日期: 2013-10-11

基金项目: 总装备部预研基金(9140A17060306BQ0303)

作者简介: 范俊叶(1988-), 女, 硕士生, 主要从事数字全息三维应变测试方面的研究。Email: fanjunyem@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和现代光学系统设计方面的研究。

Email: wwsciom@163.com

0 引言

1967年,顾德门(Goodman)和劳伦斯(Lawrence)提出了数字全息技术^[1]。该技术采用光敏电子成像器件代替传统全息记录材料来记录全息图。通过计算机数值重现的方法将全息图进行再现,获得原物波的全息再现像。进入20世纪90年代,随着光电子技术和计算机技术的快速发展,高分辨率的电子成像器件逐步走向成熟,数字全息和数字全息干涉术应用领域从三维再现^[2-3]、信息储存^[4],发展到了位移和形变测量^[5]、相貌测量^[6]。1994年德国科学家U. Schnars和W. Juptner通过CCD摄像机成功记录了全息图,并通过数值再现的方法获得了更清晰的再现像^[7]。1997年Tong Zhang和Ichirou Yamaguchi提出了相移数字全息^[8]。这种方法不必采用离轴光路法^[9]即可去除零级光和共轭像,但是需要引入相移记录多幅全息图,故对装置和环境的稳定性要求很高,并且如何减小相移误差也成为关键性的问题。

随着相移干涉术的发展,实现相移的方法有多种,传统相移方法有旋转玻璃板相移法、压电陶瓷相移法^[10]。平行平板相移法^[11]虽然简单容易实现,但是旋转角度很难确定,该相移的精度低。压电陶瓷相移法具有精度高、装置小巧、操作简单的优点,但该相移器的位移存在一定程度非线性,需要进行标定及非线性补偿。参考文献[12]也实现了数字全息,并利用该技术测试了物体三维变形,但应用了电寻址液晶(EALCD)。文中应用CCD并把数字全息和数字相移技术结合起来,消除了零级衍射斑和参考光的影响,简化了光学测试装置,省去了电寻址液晶硬件,实现了纯数字全息三维测试。论文应用Matlab软件,编辑了四个干涉图法数字相移程序,结合图像处理方法,通过对全息干涉条纹精确控制使其定向移动,实现了四步相移,获得四个干涉图。应用四步相移法原理和相位去包裹方法,确定了物体变形引起的三维位相差,实现物体变形的三维测试。

1 基于双曝光数字全息的相移干涉术测量原理

1.1 双曝光全息干涉术测量原理

双曝光全息干涉术是研究两次曝光期间物体产

生的变化。重现光束的位置与记录双曝光全息图时所用的参考光束的位置不同时,像的大小、变形和位移对两波是相同的,因此干涉条纹的结构不发生变化。由于物体的微小位移或变形主要影响物体的位相,设变形前后的物波分别为 $A_{01}(x, y)$ 、 $A_{02}(x, y)$,参考光为 $A_r(x, y)$,变形前后的物光波的振幅分布为 $a_{01}(x, y)$ 、 $a_{02}(x, y)$,参考光波的振幅分布为 $a_r(x, y)$,则在全息干板上第一次记录全息图的曝光量为:

$$H_1(x, y) = t(a_{01}^2 + a_r^2 + A_{01}^* A_r + A_{01} A_r^*) \quad (1)$$

第二次记录全息图的曝光量为:

$$H_2(x, y) = t(a_{02}^2 + a_r^2 + A_{02}^* A_r + A_{02} A_r^*) \quad (2)$$

对于线性记录的振幅全息图,叠加后的全息图的复振幅透过率为 $T(x, y)$ 可表示为:

$$T = T_0 + ktI = T_0 + kt[2a_r^2 + (a_{01}^2 + a_{02}^2) + (A_{01} + A_{02})A_r^* + (A_{01}^* + A_{02}^*)A_r] \quad (3)$$

式中: T_0 为记录介质本身振幅透过率; k 为曝光曲线系数; t 为曝光时间。

文中是用CCD记录全息图。通过计算机模拟光学再现的过程使物体振幅与位相信息再现的方法即再现算法。CCD在平面 xy 上记录全息图,设 a 和 b 为CCD像面尺寸,物面到CCD的距离为 d ,参考光为振幅为 R_0 的平行光,与 z 轴夹角为 θ ,则参考光 x 方向波数 $k_0 = \sin\theta/\lambda$,CCD在 xy 平面上记录的全息图可以写为:

$$I(x, y) = \{ |O(x, y)|^2 + R_0^2 + R_0 O(x, y) \exp(-i2\pi k_0 x) + R_0 O^*(x, y) \exp(i2\pi k_0 x) \} \cdot \text{rect}\left(\frac{x}{a}\right) \text{rect}\left(\frac{y}{b}\right) \quad (4)$$

将公式(4)代入公式(5)的离轴全息的菲涅耳再现公式进行计算,便可以得到被记录物体的再现像的复振幅 $\psi(x_0, y_0)$, $\psi(x_0, y_0)$ 其绝对值表示再现像的表面强度信息,相位表示再现像的表面形貌信息,公式(5)中DFT表示傅里叶变换,则离轴菲涅耳全息图再现公式为:

$$\psi(x_0, y_0) = \exp[-(i\pi/\lambda d)(x_0^2 + y_0^2)] \cdot \text{DFT}\{I(x, y) \cdot \exp[-(i\pi/\lambda d)(x^2 + y^2)]\} \quad (5)$$

数字全息图再现像的分离条件为将公式(4)代入公式(5),傅里叶变换为:

$$\text{DFT}\left\{\text{rect}\left(\frac{x}{a}\right)\text{rect}\left(\frac{y}{b}\right)\right\} \cdot \exp\{-[i\pi/\lambda d(x^2 + y^2)]\} =$$

$$\text{absinc}(ax_0)\text{sinc}(by_0) \otimes \exp\{i\lambda\pi d(x_0^2+y_0^2)\} \quad (6)$$

从数学角度可以看出公式(6)就是物体的菲涅耳衍射,数字再现等于全息图的频谱和公式(6)的卷积。

1.2 四个干涉图测量原理

传统的通过全息干涉图求物体位相变化的方法有三种,分别是一个干涉图法、三个干涉图和四个干涉图法。一个干涉图法只需记录一幅干涉条纹图,不需要使用相移控制器件,操作简单,但是要进行两次二维傅里叶变换,运算量相对较大;三个干涉图法是通过在参考光路中引入三次固定且已知的相移,这样必须严格的调校位相控制器,否则会引起较大的测量误差。四个干涉图法避免了这一缺点,其相移可以固定为任意值,也不必调校位相控制器。如果在参考光路中使位相改变四次,那么可获得四个光强分布公式。设每次相移为 β ,那么其公式为:

$$I_1(x, y) = a(x, y) + b(x, y)\cos[\phi(x, y)] \quad (7)$$

$$I_2(x, y) = a(x, y) + b(x, y)\cos[\phi(x, y) + \beta] \quad (8)$$

$$I_3(x, y) = a(x, y) + b(x, y)\cos[\phi(x, y) + 2\beta] \quad (9)$$

$$I_4(x, y) = a(x, y) + b(x, y)\cos[\phi(x, y) + 3\beta] \quad (10)$$

因为 $I_1(x, y)$ 可以测出,故有四个未知量: a, b, ϕ 和 β ,联解方程组可计算出变形物体每一点的位相:

$$\cos\beta = \frac{I_1(x, y) - I_2(x, y) + I_3(x, y) - I_4(x, y)}{2[I_2(x, y) - I_3(x, y)]} \quad (11)$$

$$\Delta\phi(x, y) = \arctan \frac{I_1 - 2I_2 + I_3 + (I_1 - I_3)\cos\beta + 2(I_2 - I_1)\cos^2\beta}{\sqrt{1 - \cos^2\beta} \cdot [I_1 - I_3 + 2(I_2 - I_1)\cos\beta]} \quad (12)$$

由变形物体每一点的位相和全息测试光路,可确定变形物体每一点的位移矢量 $\vec{L}(x, y)$:

$$\Delta\phi(x, y) = \frac{2\pi}{\lambda} (\vec{k}_1 - \vec{k}_2) \cdot \vec{L}(x, y) \quad (13)$$

式中: \vec{k}_1 和 \vec{k}_2 分别是观察点光的照明方向的单位矢量和观察方向的单位矢量; \vec{L} 是物体的位移矢量。通过公式(12)、(13)可计算出 $\vec{L}(x, y)$ 。将这两式应用到变形物体的每一点,可求得每一点的位移矢量,从而获得物体变形的三维形貌图。

2 实验装置

图 1 所示为数字全息记录的测试装置。实验中采用 He-Ne 激光器作为光源,功率为 5 mW。通过显微物镜、空间滤波器和准直透镜组成的扩束系统将激光束滤波、扩束、准直为均匀光束。通过分束器将平行光分成两束光,一束作为参考光经反射镜入射

到 CCD(型号 SI-3300,分辨率为 2 048(H)×2 950(V));另一束作为物光束,照明待测物体,经物体漫反射后进入 CCD,与参考光干涉。因 CCD 位于菲涅耳衍射近场区,故所记录的是菲涅尔全息图。

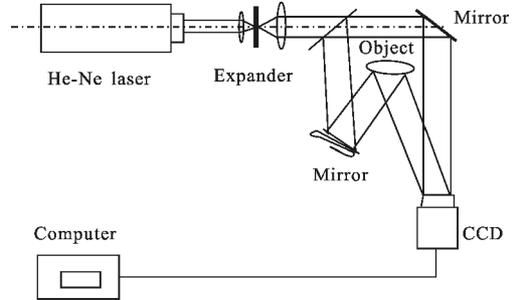


图 1 全息记录配置图

Fig.1 Layout of holographic recording

作为实例,文中测试了铁板的受应力后的三维变形,图 2 所示为待测物体的变形平台。物体受力前记录第 1 幅全息图,通过变形工作台的螺杆使铁板受力,铁板发生微小突起变形,记录变形后的第 2 幅全息图,将二幅全息图分别输入到基于 Matlab 所编的程序中,进行数字再现,再现后的二物波叠加,获得二维等高线图,如图 3 所示。

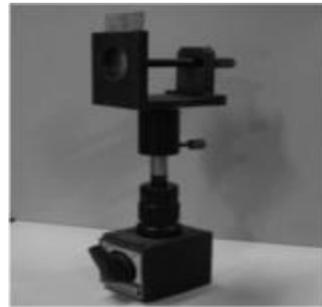


图 2 实验物体

Fig.2 Tested object

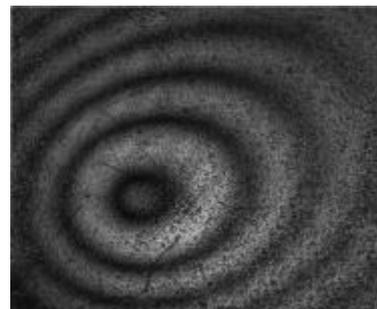


图 3 二维干涉条纹图

Fig.3 2D interference fringe

3 图像处理及测量结果

为了提高干涉条纹的对比度,应用 Butterworth 算法对图 3 进行低通滤波,消除 CCD 记录过程中杂光等带来的高频噪声,并使图像灰度均匀;应用局部灰度拉伸和 Laplacian 锐化获得了高对比度的干涉图。

为了获得变形物体的三维立体图采用四步相移法,文中基于 Matlab 编程,实现了数字相移,取代了压电位移器、位相控制器等相移硬件。首先确定干涉条纹如图(图 4(a))的中心位置,即确定铁板变形中心,并确定干涉条纹周期,然后控制干涉条纹向中心方向精确移动 1/4 倍的,因为一个条纹周期对应 2π 的位相跃迁,故等同于在参考光中引入 $\pi/2$ 的位相变化,得到干涉图 2(图 4(b))。重复执行这个过程两次,得到干涉图 3(图 4(c))和干涉图 4(图 4(d)),即实现了四步数字相移。由公式(12)可知,应用四步相移法时相移量不必严格是 $\pi/2$,它可以是任意值。

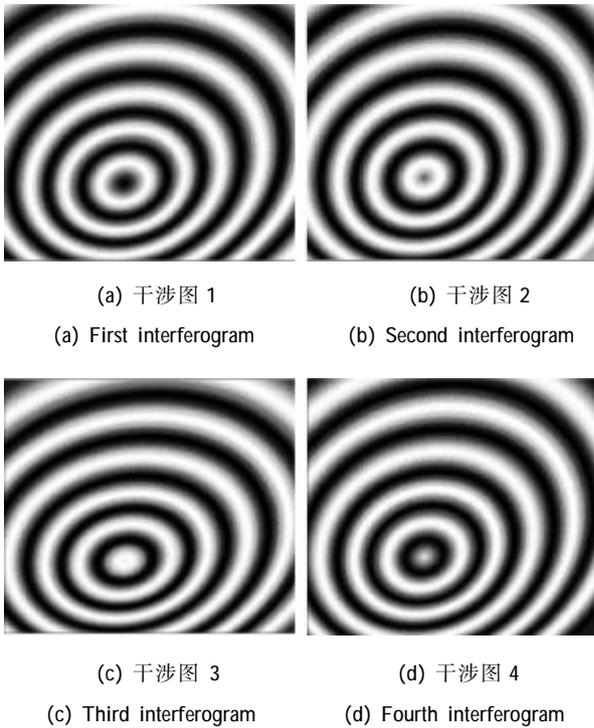


图 4 四步相移产生的干涉图

Fig.4 Interferograms of four-step phase shifting

金属薄片变形引起的位相变化 $\Delta\phi(x, y)$,由于反正切函数的主值区间是 $[-\pi/2, \pi/2]$, $\Delta\phi$ 本应该被限制在此范围,但是因为正切函数是周期函数,所以可以扩展 $\Delta\phi$ 的区间范围,如下式所示:

$$\Delta\varphi = \begin{cases} \Delta\phi - \pi, \sin\Delta\phi < 0, \cos\Delta\phi < 0 \\ \Delta\phi, \sin\Delta\phi < 0, \cos\Delta\phi > 0 \\ \Delta\phi, \sin\Delta\phi > 0, \cos\Delta\phi > 0 \\ \pi - \Delta\phi, \sin\Delta\phi > 0, \cos\Delta\phi < 0 \end{cases} \quad (14)$$

式中: $\Delta\varphi$ 是 $\Delta\phi$ 相位的扩展,扩展后的相位分布在 $[-\pi, \pi]$,但物体的相位变化往往超 $[-\pi, \pi]$,需对叠加的相位去包裹。应用常用的最小二乘法对图 5 进行相位去包裹处理可获得物体变形产生的三维位相图,此即就是被测物体的三维变形,如图 6 所示。

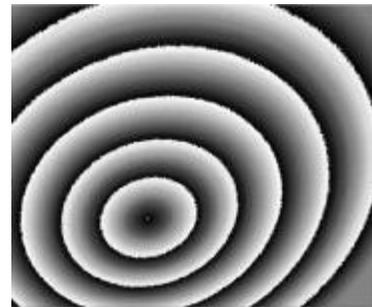


图 5 包裹位相差

Fig.5 Wrapped phase difference

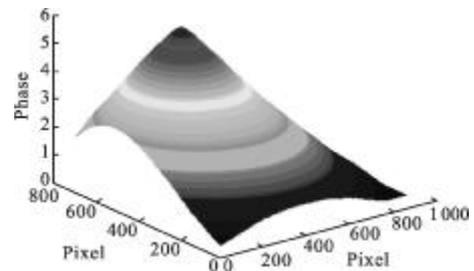


图 6 位相三维立体图

Fig.6 3D phase plot

由全息干涉图产生的包裹位相差图(图 5)可以得出待测薄板的受力中心位置和最大变形量,由三维位相差图(图 6)得出薄板的变形形状和变形方向。由图 6 可知变形方向垂直于受力面,方向向上。判读图 6 干涉条纹数为 6.3,由公式 $d = N \cdot \frac{\lambda}{2}$ 可求出铁板的最大变形量为 $1.993 \mu\text{m}$ 。

4 结论

文中基于数字全息原理,设计了数字全息记录测试装置,基于四步相移法技术,利用 Matlab 软件,编辑了四个干涉图法数字相移程序,实现了由二维到三维物体变形的测量。文中实现的数字相移法不

仅可取代压电位移器、位相控制器等器件,降低全息测试装置的成本,而且可提高测试的速度和精度,给出被测物体变形的大小,变形的方向与最大变形量。大量实验表明,该方法的测量精度可容易达到 1/10 波长。

参考文献:

- [1] Goodman J W, Lawrence R W. Digital image formulation from electronically detected hologram [J]. *Appl Phys Lett*, 1967, 11(3): 77-79.
- [2] Liang Yanming, Wu Qi, Zhou Jianying. The design and reconstruction of computer generated holograms of three-dimensional light fields: [J]. *Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Sunyatseni*, 2010, 49(5): 56-60. (in Chinese)
梁艳明, 吴琦, 周建英. 三维光场的计算全息设计与再现研究[J]. *中山大学学报(自然科学版)*, 2010, 49(5): 56-60.
- [3] Zhang Xiaojie. Research of holographic display based on LCDSLM[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2007: 51-57. (in Chinese).
张晓洁. 基于 LCD 空间光调制器全息显示的若干问题研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2007: 5-57.
- [4] Zhang Xinzhen. Photorefractive volume holographic high density optical storage and its applications [D]. Tianjin: Nankai University, 2001: 34-41. (in Chinese).
张心正. 光折变体全息高密度光存储器及其应用 [D]. 天津: 南开大学, 2001: 34-41.
- [5] Zhou Canlin, Kang Yilan. Deformation measurement by digital holography[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2004, 33(20): 171-179. (in Chinese).
周灿林, 亢依澜. 数字全息干涉法用于变形测量 [J]. *光子学报*, 2004, 33(20): 171-179.
- [6] Wang Yujia. Method of dual-wavelength digital holography for micro-structured surface topograph [D]. Beijing: Beijing University of Technology, 2012: 1-43. (in Chinese)
王羽佳. 微结构表面形貌测量的双波长数字全息成像方法研究[D]. 北京: 北京工业大学, 2012: 1-43.
- [7] Adams M, Kreis T H, Juptner W. Particle measurement with digital holography[C]//SPIE, 1999, 3823: 38-43.
- [8] Wang Haiyan. Study on phase retrieval algorithm and its application [D]. Hefei: Anhui University, 2011: 10-15. (in Chinese)
王海燕. 相位恢复算法及应用研究 [D]. 合肥: 安徽大学, 2011: 10-15.
- [9] Liu Qiuyu. Study on the applications of digital holography in the displacement measurement[D]. Chengdu: University of Electronic Science and Technology, 2004: 1-52. (in Chinese)
刘秋武. 数字全息及其在位移测量中应用的研究 [D]. 成都: 电子科技大学, 2004: 1-52.
- [10] He Yong, Chen Lei, Wang Qing, et al. Phase shifting Twyman-Greens interferometer and application [J]. *Infrared Technology and Application*, 2003, 32(4): 339-344. (in Chinese)
何勇, 陈磊, 王青, 等. 相移式泰曼-格林红外干涉仪[J]. *红外技术与应用*, 2003, 32(4): 339-344.
- [11] Cong Fangyong. Study on the technology of parallel plate interferometer measurement [D]. Nanjing: Nanjing University of Technology, 2008: 06. (in Chinese)
从方勇. 平行平板干涉测量技术研究[D]. 南京: 南京理工大学, 2008: 06.
- [12] Guo Jun, Huo Furong, Zhou Yan, et al. Digital holographic interferometry based on EALCD [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2011, 40(11): 2223-2228. (in Chinese)
郭俊, 霍富荣, 周岩. 利用 EALCD 的数字全息干涉术[J]. *红外与激光工程*, 2011, 40(11): 2223-2228.