

文章编号:1001-5078(2012)02-0124-05

· 激光应用技术 ·

基于 FFT 的散斑干涉术测物体变形

黄芳, 张文静, 王海燕, 于远航, 王文生
(长春理工大学光电工程学院, 吉林 长春 130022)

摘要:在 SPI 测量变形物体三维位相的原理上, 提出了用一个干涉图法, 基于二维 FFT 实现了散斑干涉图三维位相测试的新方法。选用马赫-泽德干涉系统, 用 CCD 分别接收物体变形前后的散斑图, 将两幅散斑图相减可以得到变形物体的散斑干涉条纹图。应用 MATLAB 软件编程对散斑干涉图进行二维 FFT 运算, 获得变形物体的三维位相。由三维位相分布可以判读物体的三维变形, 进而为后续分析物体的三维应力奠定基础。实验表明, 该方法简单、速度快, 精度可达到 $\lambda/10$ 。

关键词:散斑干涉术; 马赫-泽德系统; 散斑干涉条纹; 一个干涉图法; 二维 FFT

中图分类号: TN29 **文献标识码:** A **DOI:** 10.3969/j.issn.1001-5078.2012.02.002

Object deformation measurement based on FFT speckle pattern interferometry

HUANG Fang, ZHANG Wen-jing, WANG Hai-yan, YU Yuan-hang, WANG Wen-sheng
(Department of Optoelectronics Engineering, Changchun University of Science and Technology, Changchun 130022, China)

Abstract: Based on the principle of measuring the 3D phase of deformation object with SPI, one step interference pattern method is proposed. And based on two-dimension FFT, a new method of measuring 3D phase of speckle interferogram is realized. Choosing Mach-Zehnder interference system and using CCD to receive the speckle pattern of the object before and after deformation respectively, the speckle pattern interference figure of a deformation object can be gotten by subtracting the two speckle pattern. Programming with MATLAB software to make Fast Fourier Transform of the speckle pattern interference figure, the 3D phase of the deformation object can be obtained. From the 3D phase distribution, 3D object deformation can be detected and judged. That lays the foundation for further 3D stress analysis of the object. The experiment results show that the method is simple, fast and accurate. The precision can reach up to $\lambda/10$.

Key words: SPI; Mach-Zehnder system; speckle pattern interference fringes; one step interference pattern method; 2D FFT

1 引言

传统的测量位相的方法用移相干涉测量法^[1]和条纹中心测量法^[2]。移相干涉法是通过有规则地改变两相干光之间的光程差来实现位相的测量, 但是当光程差发生变化时, 干涉条纹的位置也作相应的移动, 必须精确控制每一步移动量。因此, 需要用光电面阵探测器对多幅干涉图进行采样。同时为了减少干涉测量的不确定度, 还需要在参考镜上装上压电陶瓷移相器 (PZT) 来记录三幅或者更多的图像 (最常见

的有三个干涉图法^[3]和四个干涉图^[4])。移相干涉术的优点是可以自动消除干涉场中的固定噪声。

条纹中心测量法是通过 CCD 在干涉场中对散斑进行采样, 将干涉图的光强二值化后提取干涉条

基金项目: 总装备部预研基金 (No. 9140A17060306BQ0303) 资助。

作者简介: 黄芳 (1987-), 女, 在读硕士, 主要研究方向是激光散斑干涉测试技术。E-mail: vip_fangfang@yeah.net

收稿日期: 2011-08-30; **修订日期:** 2011-09-26

纹中光强峰谷值点的级次和空间坐标,进而求取波面或被测表面各点的波差值和峰谷值(PV值)来实现位相的测量。该方法必须在一个稳定的环境中,要排除空气扰动和外界震动。其优点是既可以直接采集散斑干涉场的光强分布,也可以脱离干涉系统而处理记录介质上的信息。

与传统方法相比,二维FFT^[5]法不需要引入高精度的移相元件,比如压电陶瓷移相器PZT、位相控制器等。二维FFT法只需要记录一幅散斑干涉条纹图,因此又叫一个干涉图法,通过对采集到的散斑干涉条纹图加入载波实现相位调制。对环境的稳定性要求不高,外界空气扰动和噪声^[6]的影响不大,测量精度高,可以进行动态检测,可以消除大部分误差。在检测物体的位移、应变、振动等方面有很广泛的应用^[7]。

2 散斑干涉术的基本原理

当激光照射到漫反射物体表面时,表面上每一点都有散射光,这些散射光是相干光,仅仅是其振幅与位相不同,而且是随机分布的。这些散射光叠加后,形成对比度比较好的颗粒状结构,这就是散斑^[8],如图1所示。

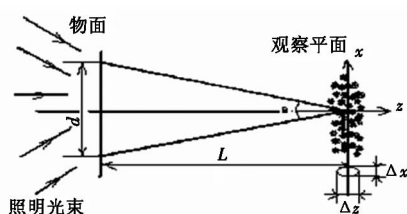


图1 散斑产生原理图

Fig. 1 the produce principle of speckle patter

散斑干涉术的基本原理:如图2所示,物光 I_A 和参考光 I_B 是由同一光源发出的两束相干光。 I_A 照明被测物体表面,被测物体由成像透镜成像,经分束器到CCD; I_B 由反射镜反射到CCD,两束光在CCD上干涉。物体变形前像面上任一点 (x, y) 的光强可表示为:

$$I_1(x, y) = I_A + I_B + 2\sqrt{I_A I_B} \cos \phi \quad (1)$$

式中, I_A 和 I_B 分别为物光和参考光强度; ϕ 是一个随机散斑位相。

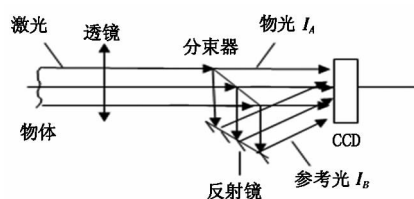


图2 散斑干涉术原理图

Fig. 2 the principle of speckle pattern interference

当物体某点 (x, y) 沿观测方向(与像平面垂直)发生离面 dZ 的变形后,将引起 $\Delta\phi$ 的位相改变:

$$\Delta\phi = \frac{2\pi}{\lambda} dZ \quad (2)$$

这时,像面上点 (x, y) 的光强为:

$$I_2(x, y) = I_A + I_B + 2\sqrt{I_A I_B} \cos(\phi + \Delta\phi) \quad (3)$$

再将变形前的散斑干涉场的图像与变形后的散斑干涉场图像相减并取绝对值,这时:

$$I(x, y) = |I_1 - I_2| = 4\sqrt{I_A I_B} \left| \sin \frac{1}{2}(2\phi + \Delta\phi) \right| \times \left| \sin \frac{1}{2}(\Delta\phi) \right| = I_0(x, y) i(x, y) r(x, y) \quad (4)$$

实际情况, $\Delta\phi$ 变化比 ϕ 变化慢得多,由式(4)可看到它有两个互相调制的函数项,第一项频率高,表示散斑,第二项变化频率低,表示散斑条纹。

当 $\sin(\Delta\phi/2) = 0$ 时,将出现暗条纹。

$$\Delta\phi = 2n\pi$$

$$n = 0, \pm 1, \pm 2, \pm 3, \dots \quad (5)$$

当 $\sin(\Delta\phi/2) = 1$ 时,将出现亮条纹,并且该亮条纹带有散斑点。

$$\Delta\phi = (2n + 1)\pi$$

$$n = 0, \pm 1, \pm 2, \pm 3, \dots \quad (6)$$

3 实验过程

实验采取的是马赫-泽德光路,装置图如图3所示。

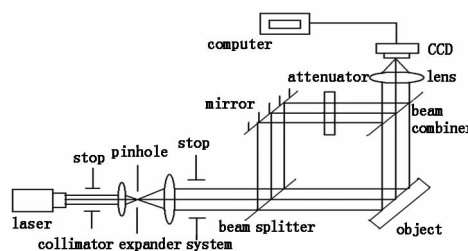


图3 实验装置图

Fig. 3 the layout of experimental

采取马赫-泽德系统除了具有能把物光与参考光分得较开的优点外,另一个优点是能使干涉条纹定位在任意平面,便于干涉图的记录和采集;并且,能更好地满足参考光束和物光束两支光路的相等性使干涉因子(即参考光束和物光束的光程差)的影响减至最小。

实验的物体如图4(a)所示的厚约0.3 cm的矩形小铁板。从氦氖激光器发出的光经过准直扩束系统之后变为光强均匀分布的平行光,再由分束器分成两束相互垂直的光束:物光束和参考光束,它们经过物体以及反射镜反射后,又重新在汇合器汇合并

干涉,最后经过透镜像并用 CCD 进行接收。

在实验中要注意:尽量让分束器与物体平行。

实验时用 CCD 分别接收物体变形前后的散斑图,如图 4(b)和图 4(c)。再通过 MATLAB 将这两幅图进行相减^[9]即得到物体变形的散斑干涉条纹图,如图 4(d)。在图 4(d)中可看到黑白相间的圆形干涉条纹,这个就是分析位相时所需的散斑干涉条纹图。

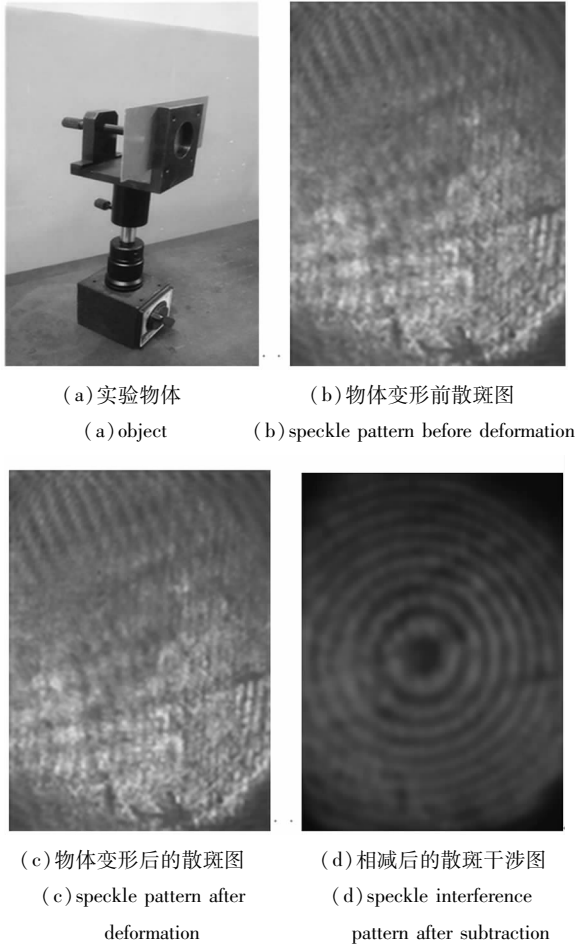


图4 物体及散斑干涉图

Fig. 4 object and speckle interference patterns

4 二维 FFT 法

根据光干涉原理,两个相干波面发生干涉时,其干涉图像的光强分布为^[10]:

$$i(x, y) = a(x, y) + b(x, y) \cos[\phi_0(x, y)] + n(x, y) \quad (7)$$

式中, $a(x, y)$ 是干涉图的背景光强; $b(x, y)$ 是干涉条纹的幅值调制度; $n(x, y)$ 为附加噪声^[10], $\phi_0(x, y) = \phi_s(x, y) - \phi_R(x, y)$; $\phi_s(x, y)$ 为被测物体波面的相位分布函数; $\phi_R(x, y)$ 为参考光波面的相位分布函数; $\phi_0(x, y)$ 为物体变形的位相分布函数。

式(7)中 $a(x, y)$, $b(x, y)$ 均为未知量,故无法

直接从中求解出 $\phi_0(x, y)$,在此采取二维 FFT 的方法,用 CCD 记录一幅干涉图。然后将参考光波在 x , y 方向分别产生倾斜,相当于在 x 方向和 y 方向各引入空间载频 f_x , f_y ,则干涉条纹强度分布可以表达为:

$$i(x, y) = a(x, y) + b(x, y) \cos[\phi_0(x, y) + 2\pi f_0(x \cos \theta + y \sin \theta)] + n(x, y) = a(x, y) + b(x, y) \cos[\phi_0(x, y) + 2\pi f_x x + 2\pi f_y y] + n(x, y) \quad (8)$$

式中, f_0 为与干涉条纹垂直方向的空间载频($f_0 = 1/T$, T 为干涉条纹空间周期)。在一般情况下, $a(x, y)$, $b(x, y)$ 及 $\phi_0(x, y)$ 的变化较之引入的条纹空间频率 f_x , f_y 要缓慢得多,如果能求出 $\phi_0(x, y)$,并且选定 $\phi_R(x, y)$ 为一常量,则被测物体波面的波差函数为 $w(x, y) = \frac{\lambda}{2\pi} \phi_0(x, y)$ 。为了求出 $\phi_0(x, y)$ 将式(8)改为复数表达式:

$$i(x, y) = a(x, y) + c(x, y) \exp(j2\pi f_x x + j2\pi f_y y) + c^*(x, y) \exp(-j2\pi f_x x - j2\pi f_y y) + n(x, y) \quad (9)$$

其中:

$$c(x, y) = \frac{1}{2} b(x, y) \exp[j\phi_0(x, y)] \quad (10)$$

式中,*号表示复共轭。

在干涉图区域内,对式(9)再做 FFT 变换后得:

$$I(f_1, f_2) = A(f_1, f_2) + C(f_1 - f_x, f_2 - f_y) + C^*(f_1 + f_x, f_2 + f_y) \quad (11)$$

其中, $A(f_1, f_2)$ 是干涉图背景光强的频谱; $C(f_1 - f_x, f_2 - f_y)$ 为正一级频谱,而 $C^*(f_1 + f_x, f_2 + f_y)$ 为负一级频谱。

再对式(11)作二维傅里叶逆变换:

$$F^{-1}[c(f_1, f_2)] = c(x, y) = \frac{1}{2} b(x, y) \exp[j\phi_0(x, y)]$$

由此可得位相分布函数:

$$\phi_0(x, y) = \arctan \frac{\text{Im}[c(x, y)]}{\text{Re}[c(x, y)]}$$

5 实验结果分析

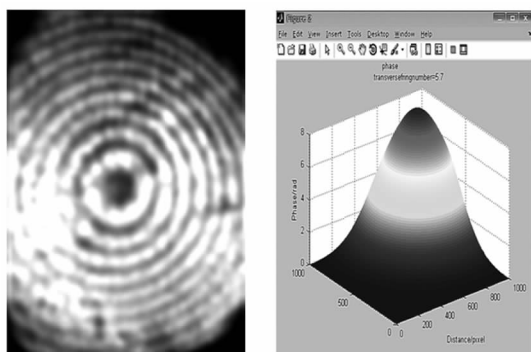
用二维 FFT 对图 3(d)分析后,对于其背景以及对比度都可以自由控制,采用泽尼多项式作为波面相位表达式对图 3(d)中条纹继续进行分析:

$$\begin{cases} \phi_1 = \text{coef} \times x + \text{coef} \times y \\ \phi_2 = \text{coef} \times (2x^2 + 2y^2 - 1) \\ \phi_3 = \text{coef} \times (x^2 - y^2) \\ \phi_4 = \text{coef} \times 2xy \\ \phi_5 = \text{coef} \times (3x^3 + 3xy^2 - 2x) \\ \phi_6 = \text{coef} \times (3x^2y + 3y^3 - 2y) \end{cases}$$

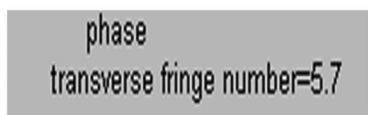
上式即为泽尼多项式,其中 x, y 的取值范围均为 $[-1, 1]$, 将泽尼多项式各项代入式(7)并通过改变各表达式中的系数 coef 后得:

$$I(x, y) = 0.5 + 0.5 \cos[2\pi \times \phi(x, y)] + n(x, y) \quad (12)$$

图 4(d) 经过上面处理后得到图 5(a), 将图 4(d) 再用二维 FFT 进行位相调制, 最后通过 MATLAB 软件可以得到其三维位相并显示出来, 如图 5(a) 是处理后的散斑干涉条纹图, 图 5(b) 为其对应的三维位相图。



(a) 处理后的散斑干涉图 (b) 变形物体的三维位相图
(a) the speckle interference pattern after treatment (b) 3D-phase of deformation object



(c) 图 5(b) 图中文字放大
(c) magnify the word of fig. 5(b)

图 5 MATLAB 模拟图

Fig. 5 MATLAB simulation diagrams

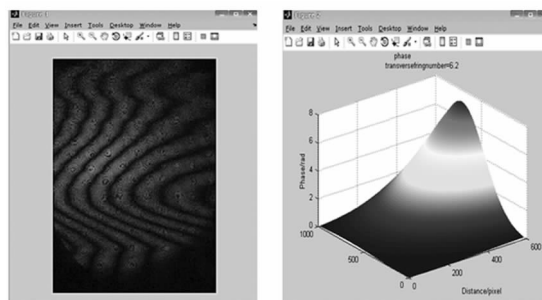
图 5(a) 是将图 4(d) 进行处理之后的散斑干涉条纹图, 处理后的图 5(a) 中条纹清晰、对比度好。此外, 图 5(a) 是物体变形点在物体中心时所得的散斑干涉条纹图, 从图中我们能看出其变形条纹是属于有规则的圆环形条纹, 而且物体变形点在条纹正中心。从条纹中心往外看, 越远离物体变形点(即条纹中心), 物体受力越小, 物体相应的变形越小, 条纹越密集, 图 5(a) 只是截取了一部分疏密程度比较明显的条纹图。图 5(b) 是其相对应的三维位相图, 反应了物体的变形, 位相图中的最高点是物体形变最大处。该位相图中 x 轴代表像素或距离(pixel/distance)且 $x \in \{0, 200, 400, \dots, 1000\}$, z 轴代表位相(phase)且 $z \in \{0, 2, 4, \dots, 8\}$ 。

干涉图中任意两个相邻的干涉条纹之间的光程差为一个波长 λ , 但是物光是经过物体反射后进入 CCD 的, 所以实际上物体变形量为半个波长即 $\lambda/2$ 。

实验中所用 CCD 是产自美国的 SI-6600 型, 其像素为 $2048(H) \times 2950(V)$, 像素尺寸 $3.5 \mu\text{m} \times 3.5 \mu\text{m}$ 。程序中根据水平方向的 2048 个像素的数字图像中的干涉条纹, 滤波后由相邻的极大值或极小值可确定出一个周期像素数, 干涉条纹在 CCD 的视场中部, 用通过视场中心的一条扫描线对干涉条纹进行扫描, 用全场水平方向 2048 个像素除以一周期所占的像素数则可获得干涉条纹的整数部分 N 和小数部分 ΔN , 由式(13)可求得物体变形量 D 。由于 ΔN 是计算机程序自动判读获得, 故测试精度可容易达到 $\lambda/10$ 。

$$D = (N + \Delta N) \lambda \quad (13)$$

本实验采用的是马赫-泽德型光路, 如图 3 所示。实验采用氦氖激光器, 波长为 632.8 nm , 在图 5 的实验中, 一个周期像素数是 359, 则获得条纹数为 5.7, 如图 5(c) 所示。将数据代入式(13)可以求出物体的变形量 $D \approx 3.606 \times 10^3 \text{ nm}$ 。



(a) 变形物体的散斑干涉图 (b) 变形物体的三维位相图
(a) deformation object speckle interference patterns (b) 3D-phase of deformation object



(c) 图 6(b) 图中文字放大
(c) magnify the word of fig. 6(b)

图 6 MATLAB 模拟图

Fig. 6 MATLAB simulation diagrams

为了不失一般性, 本文还分析了变形点不在物体中心的散斑干涉条纹图。如图 6(a) 是物体变形点在物体右边缘处的条纹图。与图 5(a) 相比, 能看出条纹中心不在正中心, 和物体变形点一样, 在条纹图的右边缘处, 因为物体变形点不在中心, 不是规则的受力变形, 所以该条纹并不是很规则的形状。通过分析后得到其三维位相如图 6(b) 所示。此外, 该例的一个周期像素数是 330, 则可以得出其变形条纹的条纹数是 6.2, 如图 6(c) 所示。位相图的最高点是物体形变最大处。由式(13)可知, 物体的变

形量 $D = 3.923 \times 10^3 \text{ nm}$ 。

6 结 论

大量实验表明,本文提出的用一个干涉图法来分析变形物体的散斑干涉条纹图,实现了对变形物体的三维位相测试,根据三维位相,可判读三维变形。在测试中省略了压电陶瓷移相器 PZT、位相控制器等,简化了光学测试系统。散斑干涉条纹图用一个干涉图法处理后条纹清晰、对比度好,测量精度容易达到 $\lambda/10$ 。

参考文献:

- [1] Liu Zhongben, Lu Shihao. Phase shift electronic speckle pattern interferometry measurement in-plane deformation [J]. Journal of Xi'an Institute of Technology, 1994, 14(2): 86-87. (in Chinese)
刘中本, 卢石镐. 相移电子散斑干涉法测量面内变形 [J]. 西安工业学院学报, 1994, 14(2): 86-87.
- [2] Ca Huaiyu, Yu Yi, Huang Zhanhua, et al. A new method based on the curve fitting extraction interference fringes of the center [J]. Journal of Optoelectronics · Laser, 2006, 17(1): 116-118. (in Chinese)
蔡怀宇, 于毅, 黄战华, 等. 一种基于曲线拟合提取干涉条纹中心点的新方法 [J]. 光电子 · 激光, 2006, 17(1): 116-118.
- [3] Wang Wensheng. Interference testing technology [M]. Beijing: Weapon Press, 1992: 225-227. (in Chinese)
王文生. 干涉测试技术 [M]. 北京: 兵器工业出版社, 1992: 225-227.
- [4] Wang Jiyuan, Tian Ailing, Wang Hongjun. 4-Step phase shift of interference measuring phase compensation and simulation [J]. Journal of Xi'an Institute of Technology, 2005, 25(1): 24-26. (in Chinese)
王吉元, 田爱玲, 王红军. 四步相移干涉测量的相位补偿及仿真 [J]. 西安工业学院学报, 2005, 25(1): 24-26.
- [5] Zhao Wenchuan, Su Xianhan. The Fourier analysis method of closed fringe [J]. Laser Journal, 2007, 1(28): 66-67. (in Chinese)
赵文川, 苏显瀚. 闭合条纹图的傅里叶分析方法 [J]. 激光杂志, 2007, 1(28): 66-67.
- [6] Jiang Lihui, Zhao Chunhui, Wang Qi. Study and comparison of speckle noise suppressing algorithms [J]. Laser & Infrared, 2002, 32(6): 431-432. (in Chinese)
蒋立辉, 赵春晖, 王骐. 散斑噪声抑制算法比较研究 [J]. 激光与红外, 2002, 32(6): 431-432.
- [7] Zheng Guangzhao. Electronic speckle interferometry [J]. Journal of Guangdong University of Technology, 2002, 19(3): 11-14. (in Chinese)
郑光昭. 电子散斑干涉术 [J]. 广东工业大学学报, 2002, 19(3): 11-14.
- [8] Chen Shuhan. Application of laser digital speckle measuring object in-plane displacement [J]. Laser & Infrared, 2009, 39(2): 145-146. (in Chinese)
陈书汉. 应用激光数字散斑测量物体面内位移的研究 [J]. 激光与红外, 2009, 39(2): 145-146.
- [9] Wang Fengpeng, Zeng Xiangzhi. The analysis and application of speckle interference based on matlab [J]. Journal of Gannan Normal University, 2007, 3. (in Chinese)
王风鹏, 曾祥志. 基于 Matlab 的散斑干涉分析及应用 [J]. 赣南师范学院学报, 2007, 3.
- [10] Tao Chunxian. The research of electronic speckle photography and speckle interference modulation technique space [D]. Shandong Normal University, 2006: 5-9. (in Chinese)
陶春先. 电子散斑照相与散斑干涉场空间调制技术研究 [D]. 山东师范大学, 2006: 5-9.