

文章编号: 0253-2239(2005)08-1057-5

基于液晶显示投影技术的数字影栅云纹相移实现方法^{*}

杨福俊 何小元 孙 伟

(东南大学工程力学系, 南京 210096)

摘要: 影栅云纹是物体离面变形和表面形貌测量常用的一种比较简单的方法,用单纯的影栅云纹法即便在最好的光学系统配置情况下测量精度也只有 1~100 μm 左右,在影栅云纹测试方法中引进相移技术是提高测量精度的主要手段。采用液晶投影仪和数字图像处理技术实现数字影栅云纹测量的准确数字相移,避免了在影栅云纹法中使用结构比较复杂或特制的相移机构。由计算机产生相移条纹图经液晶显示投影,应用实时图像灰度算术相减技术得到数字相移影栅云纹条纹图。该方法具有“基准栅”的栅距和相移步长实时可调,配置高速图像采集系统和图像后处理软件,可将相移技术引入动态测量中,从而提高动态测量的精度的优点。最后的悬臂梁实验结果证实了该方法的有效性。

关键词: 光学测量; 数字影栅云纹; 数字相移; 液晶投影仪; 平滑滤波

中图分类号: O436.3 文献标识码: A

Digital Shadow Moiré Method with Phase-Shifting Based on Liquid Crystal Display Projector

Yang Fujun He Xiaoyuan Sun Wei

(Department of Engineering Mechanics, Southeast University, Nanjing 210096)

Abstract: Shadow moiré is one of the simple optical techniques for topography and out-of-plane displacement measurement. The sensitivity of this procedure is in the range of 1~100 μm in best cases. Introduction of a phase-shifting procedure may further give a better resolution. A new digital shadow moiré method with digital phase-shifting based on liquid crystal display (LCD) projector is presented. One of four computer-generated phase-shifting fringe patterns, with using LCD projector, is projected on the surface of object to be tested while all fringe patterns are projected on a plate for generating phase-shifting moiré fringes. The projected fringe patterns are captured in real time by a charge coupled device (CCD) camera. This new method provides many advantages in performing topography and out-of-plane displacement measurement. First, the spatial line pitch and phase step are readily adjusted to suit the measurement precision. Second, the measuring speed is relatively fast and suit for dynamic testing because the digital phase shifting is no time-consuming comparing with other phase-shifting techniques. The experimental result on a cantilever beam well demonstrates the validity of the new method.

Key words: optical measurement; digital shadow moiré; digital phase-shifting; LCD projector; smooth filtering

1 引 言

影栅云纹是一种有效的三维形貌测量方法,它除了可以用来测量物体曲面的几何形状外,还可以测量平面结构的离面位移,其缺点是测量精度较低,另外由于存在判别条纹级次和凹凸问题,自动化处理程度低。基于现代光电技术及计算机技术形成的数字云纹使云纹朝着高精度、高灵敏度、高空间分辨

力、高测试自动化方向发展,并已取得了很大的进步^[1~4]。Yatagai 等^[3]利用计算机实现了待测物体表面栅线图与参考平面的投影栅线图的实时相减而形成了数字影栅云纹;由于相位移技术具有高精度、高空间分辨力的特点,在影栅云纹测量方法中也得到了广泛的应用。

目前影栅云纹技术中实现相移的方法主要有两

^{*} 国家自然科学基金(10072017)和国家 863 计划(2002AA404140)资助课题。

作者简介: 杨福俊(1968~),男,江苏淮安人,博士,副教授,主要从事光力学测试技术与图像处理研究。

E-mail: yang-fj@seu.edu.cn

收稿日期: 2004-09-07; 收到修改稿日期: 2004-11-24

种。一是采用计算机将数字化的条纹图(相当于试件栅)进行二值化后再与计算机生成的二值参考栅进行逻辑运算得到“逻辑云纹”^[4]。由于参考栅是用计算机生成的,所以这种方法可以通过“移动”参考栅而精确地实现相位移,不需要相移器件。但这种方法主要用于已获得的固定的条纹图,用于实时测量有一定的困难;再者对于条纹灰度分布不均的条纹图进行二值化处理,一方面损失了很多信息,另一方面二值量化后的条纹不一定是光滑的,导致了这种方法不适合于处理低空间频率(较稀疏)的条纹图。二是在测试的光路系统中引入相移。实现这种相移方法必须在实验光路中增加能控制参考栅或试件精确移动的机电系统或设备,每次使用不同栅频的参考栅时须重新计算和标定移动量才能实现相移。

本文介绍一种基于液晶显示投影技术实现数字影栅云纹测量的准确数字相移,由计算机产生相移条纹图经液晶显示投影仪投影,再通过计算机采集系统直接进行算术运算实现数字相移和数字云纹,与通过逻辑运算得到的云纹相比,该方法获得的数字云纹的信息量更丰富,因此解调出的相位更准确。该方法的优点是投影栅线实时可调,不需要相移器件和任何实物光栅,结合高速图像采集系统,能够在动态测量时引入相移,提高测量精度。

2 原 理

2.1 影栅云纹及数字影栅云纹

将一基准栅的栅线投影或反射到试件表面,由基准栅和试件表面上基准栅线的影子干涉便形成影栅云纹条纹图。对于图 1 所示影栅云纹光路布置中,点光源 S 发出的某条光线经过放在 xy 平面处(垂直于纸平面的水平面)的基准栅上点 x_1 至物体表面上 N 点反射后再次经过基准栅上点 x_2 后被放在 O 点照相

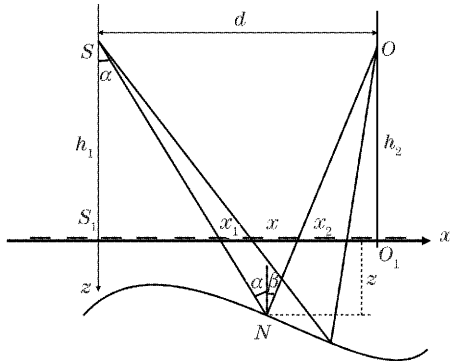


图 1 影栅云纹结构简图。S: 光源, O: 观测点
Fig. 1 Shadow moiré. S: source, O: observer

机接收,假设基准栅是具有栅距 p 、光强透过率为正弦的条形栅,这时成像平面上接收的强度为^[5]

$$I(N) = A(N) \left(1 + \sin \frac{2\pi x_1}{p} \right) \left(1 + \sin \frac{2\pi x_2}{p} \right), \quad (1)$$

式中 $A(N)$ 与物体表面反射率有关,经过滤波后云纹条纹可表示为

$$I(N) = 1 + \frac{1}{2} \cos \left[\frac{2\pi}{p} (x_2 - x_1) \right], \quad (2)$$

令 $\phi = 2\pi(x_2 - x_1)/p$, 根据图 1 可知

$$\phi = \frac{2\pi z}{p} \left(\frac{x}{h_1 + z} + \frac{d - x}{h_2 + z} \right). \quad (3)$$

数字影栅云纹的形成是由图像采集设备采集待测物体表面栅线图与参考平面的投影栅线图通过计算机实时相减而形成的。首先利用计算机产生四幅等步相移正弦条纹图样,然后利用液晶显示投影仪将上述条纹图依次投影到放在图 1 中 xy 平面处的参考平面上(xy 平面处不再放置基准栅),由图像采集系统采集投影在参考平面上的投影栅线并保存在系统的缓存中,此时条纹灰度可表示为

$$I_{i(r)}(x, y) = R(x, y) \left[1 + \sin \left(\frac{2\pi x_r}{p} + \delta_i \right) \right], \quad (4)$$

$i = 0, 1, 2, 3$

移去参考平面再将第一幅正弦条纹图直接投在待测物体表面上,采集物体表面上的变形栅线其灰度分布为

$$I_{i(o)}(x, y) = O(x, y) \left(1 + \sin \frac{2\pi x_o}{p} \right), \quad (5)$$

(4) 式、(5) 式中的 $R(x, y)$ 及 $O(x, y)$ 分别与参考面与物面的反射率有关; δ_i 为引入的相移量, i 为步长。(4) 式、(5) 式中的下标字母 r 及 o 分别表示为与参考面与物面相关的量。尽管在一般情况下参考面与待测面的反射率不尽相同,为方便推导,不妨认为 $R(x, y) \approx O(x, y) = A(x, y)$ 成立,且设 $\phi(x, y) = 2\pi(x_r - x_o)/p$, 则(4) 式与(5) 式相减并取绝对值得到如(6) 式表示的数字云纹条纹图:

$$I_{i(\text{sub})}(x, y) = 2A(x, y) \times \left| \cos \left[\frac{\pi(x_r + x_o)}{p} + \frac{\delta_i}{2} \right] \sin \frac{\phi + \delta_i}{2} \right|, \quad (6)$$

式中第一项为空间频率为 $4\pi/p$ 的载波条纹,最后一项为云纹条纹。如果采用算术相加模式得到的数字云纹可表示为

$$I_{i(\text{add})}(x, y) = 2A(x, y) \times \left\{ 1 + \sin \left[\frac{\pi(x_r + x_o)}{p} + \frac{\delta_i}{2} \right] \cos \frac{\phi + \delta_i}{2} \right\}, \quad (7)$$

由(7) 式可知,算术加模式得到条纹的载波条纹空间

频率为 $2\pi/p$, 同时还增加一个直流项, 这一点可由图 2 的模拟结果明显看出, 其中模拟的参考栅和变形影栅栅距分别为 12 pixel/fringe 和 11 pixel/fringe。所以采用算术减模式, 可以提高测量范围。

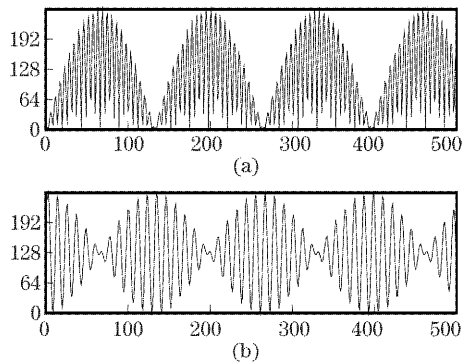


图 2 分别使用(a)图像相减(b)图像相加方法得到的模拟数字影栅云条纹图

Fig. 2 Simulated digital shadow moiré fringe patterns obtained using (a) subtraction and (b) addition methods

2.2 数字相移

文献[5]通过分析式(3)偏微分后, 提出 4 种影栅云纹中可实现的相移方法, 即: 1) 移动光源或相机; 2) 同时移动光源和相机; 3) 改变基准栅的栅距; 4) 沿基准栅面法线方向移动物体。而要实现上述相移必须在光学测试系统中布置一个步进机电控系统。文献[4]介绍的相移逻辑云纹, 首先要二值化变形条纹, 再根据计算出的平均栅距由计算机产生二值参考光栅, 这种方法一方面存在量化误差, 同时相移逻辑运算并不能得到全场的相位, 仍需要对部分分数级条纹进行插值与拟合。

由(6)式可知, 只在投影到参考平面上的条纹中引入相移 $\delta_i (i=0, 1, 2, 3)$, 与采集的试件表面变形栅条纹图相减就可得到相应的数字相移云纹条纹图。(6)式还表明在影栅云纹测量方法中, 云纹条纹信号都是被高阶载波调制的, 一般多采用时间积分成像来“抹平”高阶载波^[7,9], 实现的方法是通过电动机构使基准栅在栅平面内沿栅线方向以高于图像采集系统采样频率抖动, 而本文则采用数字滤波技术消除高阶载波的影响, 避免使用繁杂的电动机构。经过滤波处理后的条纹可表示为

$$g_i(x, y) = A(x, y) \sin[\phi(x, y) + \delta_i], \quad i = 0, 1, 2, 3 \quad (8)$$

如果采用四幅等步相移条纹图投影, 且引入的相移量分别为 $\delta_0 = 0^\circ, \delta_1 = 90^\circ, \delta_2 = 180^\circ, \delta_3 = 270^\circ$; 则相位计算式为

$$\phi(x, y) = \arctan \frac{g_2(x, y) - g_0(x, y)}{g_3(x, y) - g_1(x, y)}, \quad (9)$$

3 计算机模拟与实验分析

3.1 计算机模拟

图 3 为计算机模拟的 4 幅等步长数字相移云纹条纹图, 相移步长 $\Delta\delta = 90^\circ$, 大小均为 256 pixel \times 256 pixel, 被调制的相位分布为高斯双峰马鞍面, 即

$$\phi(i, j) = 19 \left[\exp \frac{-(i-78)^2 - (j-178)^2}{50^2} + \exp \frac{-(i-178)^2 - (j-78)^2}{50^2} \right], \quad (10)$$

模拟的基准栅为 8 pixel/fringe, 对图 3 进行低通数字平滑滤波处理, 得到光滑的相移云纹条纹图结果如图 4 所示。

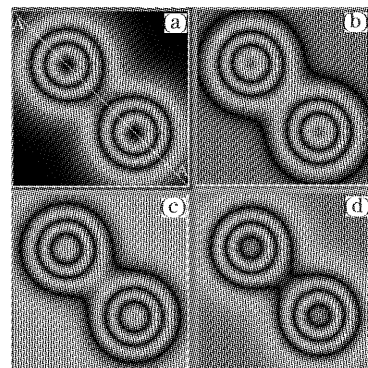


图 3 计算机产生的相移步长为 90° 的影栅云纹条纹图
Fig. 3 Computer-generated phase-shifting shadow moiré fringe patterns with a phase shift step of 90°

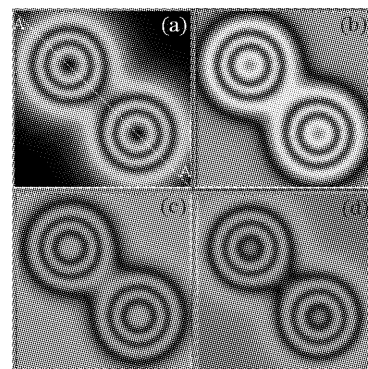


图 4 图 3 经过平滑滤波处理后的结果

Fig. 4 Results of Fig. 3 after smooth filtering

图 5(a)、图 5(b) 分别为图 3(a) 和图 4(a) 中沿截线 A-A 处的条纹强度分布。图 4 及图 5(b) 的结果表明应用图像处理技术不仅能得到光学时间积分成像的效果, 而且使用图像处理技术还能简化实验布置。图 5(c)、图 5(d) 为由(9)式和相位去包裹

技术计算得到的图 3(a)中沿截线 A-A 上的相位分布。由此可见采用相移技术可以自动区分相位凹凸变化,提高了条纹处理的自动化水平。

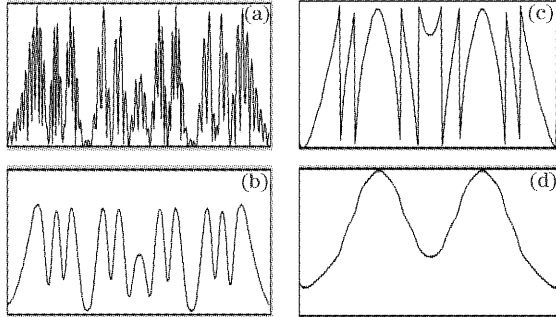


图 5 (a)与(b)分别对应于图 3(a)与图 4(a)中截线 A-A 处的图像灰度分布;(c)与(d)分别对应于图 3(a)中截线 A-A 处条纹图的相位与去“包裹”处理后的相位分布

Fig. 5 (a), (b) Gray-value distribution of cross line A-A corresponding to Fig. 3 (a) and Fig. 4 (a), respectively; (c) phase and (d) unwrapped phase profiles along cross line A-A shown in Fig. 3 (a)

3.2 实验分析

本文实验系统主要包括:商用液晶显示投影仪(SONY VPL-CX6 1024 pixel×768 pixel),图像采集系统及作者编写的相应图像处理软件。被测量的试件由有机玻璃制成的厚 3.0 mm、宽 49.6 mm 及长 278.0 mm 的悬臂梁。由计算机产生四幅等步相移正弦条纹图(一个条纹周期 2π 内每次相移 $\pi/2$ 共 3 次得到 4 幅条纹图)、栅距由软件控制,最小为 4 pixel/fringe。图 1 所示实验结构尺寸为: $h_1 = h_2 = 1220$ mm, $d = 640$ mm, $\beta = 0$, 自由端加载点处产生的挠度 $w = 43.0$ mm。由于实验中自由状态下的悬臂梁表面就可以看作参考平面,所以实验中无需准备参考平面。具体实验过程如下,先由液晶显示投影仪将计算机生成的第一幅条纹图(6 pixel/fringe)投影到加载后的试件表面,采集变形条纹图并存储于计算机的缓存中,再由液晶显示投影仪将四幅等步相移条纹图依次投影到卸载后的试件表面,采集投影的四幅等步相移条纹图并与存放在缓存中的变形条纹图在计算机中依次进行直接实时相减,得到四幅数字相移云纹条纹图。图 6 为经过低通数字平滑滤波处理后的相移云纹条纹图。

图 7 为经过去包裹后的全场相位分布图,图 8 为梁中心轴线上离面变形分布曲线与理论值的比较(注:为便于比较该图理论值曲线是根据材料力学理论计算后量化到 0~255 范围内)。

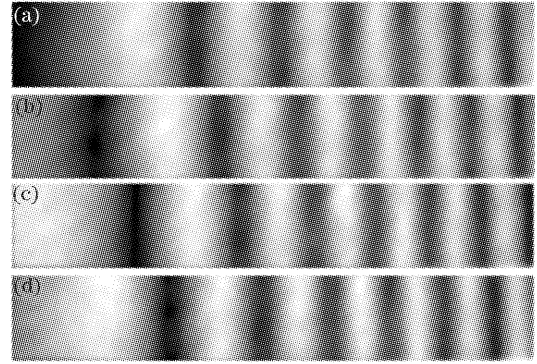


图 6 4 幅数字相移影栅云纹图

Fig. 6 Four digital phase-shifting shadow moiré fringe patterns

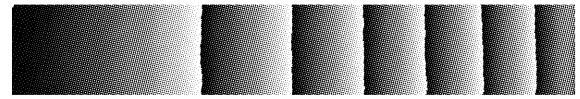


图 7 二维相位分布

Fig. 7 2-D wrapped phase distribution

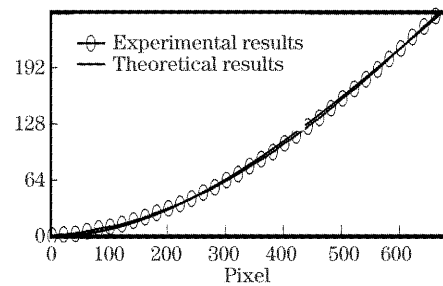


图 8 实验及理论计算获得的悬臂梁中心轴线处的挠度分布结果比较

Fig. 8 A comparison of phase profile on the central cross-section line between experimental and theoretical results

4 结 论

与文献[4~9]介绍各种相移方法相比,本文介绍的相移方法更简单更容易实现。这主要是由于相移仅由计算机软件控制,与光学系统的布置及结构尺寸无关。因此这种数字相移影栅云纹测试技术具有如下特点:1)实验装置简单;2)实时栅频变更,提高了系统测量的灵敏度、精度;3)测量和分析的自动化程度高。尽管基于快速傅里叶变换(Fast Fourier transform)的栅线投影形貌技术只需采集一幅变形条纹图就可以获得离面变形或曲面形貌信息,但该方法的缺点在于一方面要求图像的大小为 2 的整数幂,同时还要对图像进行正反傅里叶交互变换,再者该方法在实行频域滤波时要通过试错来选取合适的滤波窗口,这样就很难避免频谱泄漏^[10~13]。实际上,本文介绍的方法中参考平面上投影的相移条纹

图可事前或事后采集,因此实验中只需采集一幅变形条纹图就可实现相移,所以相移方法配以高速图像采集技术就可以用于动态离面变形的分析研究。

尽管影栅云纹技术的测量精度不及云纹干涉法,但对于研究如薄板、壳等大离面变形来说,其测量精度是足够的。随着现代科技的不断发展,商用液晶显示投影仪的精度和分辨力也将不断提高,相信在不久的将来该方法可应用于研究微结构的离面变形和形貌的测量等。

参 考 文 献

- 1 Y. Arai, S. Yokozeki, T. Yamada. Fringe-scanning method using a general function for shadow moiré[J]. *Appl. Opt.*, 1995, **34**(22): 4877~4882
- 2 Zhang Xiangchun, Song Yaozu. Analysis of measurement accuracy for mini-displacement of moiré fringe by Fourier transform[J]. *Acta Optica Sinica*, 2003, **23**(12): 1445~1450 (in Chinese)
张香春,宋耀祖. 傅里叶变换求取叠栅条纹微小位移的精度分析[J]. *光学学报*, 2003, **23**(12): 1445~1450
- 3 T. Yatagai, M. Ldesawa, Y. Yamaashi *et al.*. Interactive fringe analysis system: application to moiré contourgram and interferogram[J]. *Opt. Engng.*, 1982, **21**(5): 901~909
- 4 A. Asundi, K. H. Yung. Fractional fringe order determination using digital moiré fringes shifting [J]. *J. Experimental Mechanics*, 1995, **10**(1): 51~62
- 5 G. Mauvoisin, Fabrice Bremand, A. Lagarde. Three-dimensional shape reconstruction by phase shifting shadow moiré [J]. *Appl. Opt.*, 1994, **33**(11): 2163~2169
- 6 Kang Xin, He Xiaoyuan. Two-step phase-shifting technique for phase measurement profilometry by grating projection[J]. *Acta Optica Sinica*, 2003, **23**(1): 75~79 (in Chinese)
康新,何小元. 两步相移实现投影栅相位测量轮廓术[J]. *光学学报*, 2003, **23**(1): 75~79
- 7 Yi-Bae Choi, Seung-Woo Kim. Phase-shifting grating projection moiré topography[J]. *Opt. Engng.*, 1998, **37**(3): 1005~1010
- 8 Qian Kemaoy, Miao Hong, Wu Xiaoping. A real-time polarization phase shifting technique for dynamic measurement [J]. *Acta Optica Sinica*, 2001, **21**(1): 64~67 (in Chinese)
钱克矛,缪泓,伍小平. 一种用于动态过程测量的实时偏振相移方法[J]. *光学学报*, 2001, **21**(1): 64~67
- 9 Lianhua Jin, Yutaka Kodera, Toru Yoshizawa *et al.*. Shadow moiré profilometry using the phase-shifting method [J]. *Opt. Engng.*, 2000, **39**(8): 2119~2123
- 10 Zhong Jingang, Zhang Yonglin, Li Fengli *et al.*. Phase indeterminacy in phase analysis methods for spatial carrier fringe pattern[J]. *Acta Optica Sinica*, 2001, **21**(1): 609~614 (in Chinese)
钟金刚,张永林,李丰丽等. 空间载频条纹相位分析法中的相位不确定性[J]. *光学学报*, 2001, **21**(1): 609~614
- 11 Moon-Sik Jeong, Seung-Woo Kim. Phase-shifting projection moiré for out-of-plane displacement measurement [C]. *Proc. SPIE*, 2001, **4317**: 170~179
- 12 Wang Liwu, Su Xianyu, Zhou Libing. Correction algorithm of random phase shifting errors in phase measuring profilometry[J]. *Acta Optica Sinica*, 2004, **24**(5): 614~618 (in Chinese)
王立无,苏显渝,周利兵. 相位测量轮廓术中随机相移误差的校正算法[J]. *光学学报*, 2004, **24**(5): 614~618
- 13 Wang Cheng, Wu Xiaodong, Han Chenyan. A phase-shifting method for moire technique[J]. *Chin. J. Lasers*, 1996, **A23**(3): 221~224 (in Chinese)
王成,武晓东,韩昌元. 投影型莫尔条纹中的相移技术[J]. *中国激光*, 1996, **A23**(3): 221~224