

文章编号 1004-924X(2015)03-0645-07

基于狭缝光阑的剪切散斑干涉动态测量

王永红*, 冯家亚, 王鑫, 刘佩, 李骏睿, 杨连祥
(合肥工业大学 仪器科学与光电工程学院, 安徽 合肥 230009)

摘要:为了精确、实时地测量物体表面的动态形变,提出了基于狭缝光阑的空间载波剪切散斑干涉系统。该系统通过倾斜迈克尔逊干涉仪的一个平面镜来产生剪切量和载波频率,实现空间频谱的移动;采用一个可调节的狭缝光阑控制散斑大小和空间频谱宽度。基于傅里叶变换与反变换在空间频率域上提取所需的频谱并计算相位图,最后通过一幅干涉条纹图得到相位分布信息。采用该系统对一个中心加载、四周固支的薄铝板进行了动态测量,分析了光学系统参数对测量结果的影响。结果表明,采用像素尺寸为 $4.65\ \mu\text{m}\times 4.65\ \mu\text{m}$ 的高分辨率相机,焦距为 8 mm 的成像镜头,设置剪切量为 25 mm,狭缝光阑 X 方向的尺寸为 1 mm 时,可得到高质量的剪切散斑相位图。该方法可以在 25 frame/s 的采集速度下,以 43.6° 的视场角实现动态形变的测量,可测形变峰值为 $0.5\sim 30\ \mu\text{m}$ 。

关键词:剪切散斑干涉术;空间载波相移;傅里叶变换法;迈克尔逊干涉仪;狭缝光阑;动态形变

中图分类号: O436.1 **文献标识码:** A **doi:** 10.3788/OPE.20152303.0645

Shearing speckle interferometry based on slit aperture for dynamic measurement

WANG Yong-hong*, FENG Jia-ya, WANG Xin, LIU Pei, LI Jun-rui, YANG Lian-xiang

(School of Instrument Science and Opto-electronics Engineering,
Hefei University of Technology, Hefei 230009, China)

* Corresponding author, E-mail: yhwang@hfut.edu.cn

Abstract: To measure the dynamic deformation of an object surface in real time accurately, this paper proposes a spatial carrier phase-shifting shearing speckle system based on a slit aperture. A Michelson interferometer was used to generate a shearing distance and a spatial frequency shift by tilting a small angle in one of the two mirrors. A slit aperture was used to control the speckle size and the spatial spectral width. The Fourier transform and inverse transform were applied to accurate calculation of the phase and to obtain the phase distribution by using only a single image. Finally, the shearing speckle system was used to measure the dynamic deformation of a circumferentially fixed thin aluminum plate with a point load at the center. The effects of optical system parameters on the measuring results were analyzed. The experimental results show that when the shearing distance is 25 mm and the slit aperture size in X direction is 1 mm, it is possible to obtain a better phase-map quality by using a higher spatial frequency CCD camera with a pixel size of $4.65\ \mu\text{m}\times 4.65\ \mu\text{m}$ and an image

收稿日期:2014-08-11;修订日期:2014-09-24.

基金项目:国家自然科学基金资助项目(No. 51375136);安徽省国际科技合作计划资助项目(No. 12030603012);中航工业产学研专项资助项目(No. CXY2013HFGD22)

lens with a focus length of 8 mm. It demonstrates that the shearing speckle system obtains the information of deformation in real time under a capturing rate of 25 frame/s and an angle of view field 43.6° , and the measurable range of displacement peak value is from $0.5 \mu\text{m}$ to $30 \mu\text{m}$.

Key words: shearing speckle interferometry; spatial carrier phase-shifting; Fourier Transform (FT) method; Michelson interferometer; slit aperture; dynamic deformation

1 引言

剪切散斑干涉技术^[1-4]是一种全场、非接触、高精度和高灵敏度的光学测量方法,广泛应用于航空航天和精密机械制造等领域^[5-6]。实现该项测量的关键技术是如何直接获得并计量变形引起的相位差。近年来,人们已对相位检测技术进行了广泛研究,提出了多种相位检测方法。在散斑计量中,常用的相位检测方法主要有时间相移技术和空间相移技术。时间相移技术^[7-8]是指在时间序列上采集图像,在各帧图像之间形成固定的相位差,但这种方法容易受到外部环境,如振动,温度波动,或被测物本身的快速运动等的干扰。因此,在研究动态问题时常采用空间相移技术^[9-10]。

空间相移技术可以采用多个相机,利用相机的不同空间位置来实现相移;也可以采用单一相机,利用空间载波^[11-12]来实现相移。空间载波法通过一幅干涉条纹图就可以得到相位分布信息,能够以低成本实现动态形变测量。空间载波的相位计算方法分为空域法和频域法两类。空域法采用正弦拟合计算相位,利用邻域内像素组成方程组计算待求相位;而频域法采用傅里叶分析,在频域提取所需的频谱并通过反变换得到待求相位。在空间相移中引入载波有两种常见方法:一种方法是采用一个光阑并引入倾斜参考光,1996年 Pedrini 发明的基于马赫-曾德尔干涉仪的空间相移系统^[13]便是基于这种方法;但是由于马赫-曾德尔干涉仪由多个分离的元器件组成,各器件之间难以校直,并且存在多个反光表面,大大降低了光照强度,从而使系统对外部干扰更加敏感。2013年朱猛提出了一种单孔径的空间载频技术^[14],该技术采用了一个改良的迈克尔逊装置,将球面镜作为迈克尔逊结构的两个反射镜;但其载波频率受到球面镜的曲率半径的限制,且球面镜比平面镜结构复杂。另一种方法是最早由 Duffy 提出的双孔载频剪切散斑干涉法^[15-17],其

载波频率与像距和双孔间距有关。当测量不同尺寸的物体或者成像条件改变时,需要重新设计双孔间距。

本文在剪切散斑干涉系统中采用了基于狭缝光阑的空间载波相移技术,通过倾斜迈克尔逊干涉仪的一个平面镜来产生剪切量和载波频率,从而实现空间频谱的移动;同时采用一个可调节的狭缝光阑来控制散斑尺寸和空间频谱宽度。对 CCD 采集到的载频干涉图像进行快速傅里叶变换(FFT),包含相位信息的两个频谱带会被载波频率分离开,而频谱带的形状取决于所选择的光阑形状。最后选择合适的滤波器提取所需的频谱带并进行相位计算。为了使各频谱带之间不相互混叠,文中对 CCD 相机的空间分辨率、剪切量、狭缝光阑的形状及尺寸参数进行了分析。

2 测量原理

2.1 光路结构

基于迈克尔逊干涉仪的空间载波剪切散斑干涉系统的原理如图 1 所示。

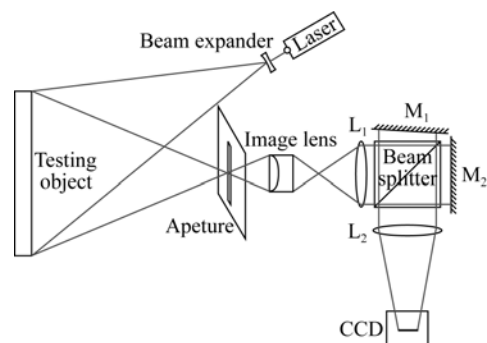


图 1 空间载波相移系统的示意图

Fig. 1 Schematic diagram of spatial carrier phase-shifting shearing speckle system

激光通过扩束镜后以扩散光的形式照亮被测物。漫反射光通过迈克尔逊装置成像在 CCD 靶面上。迈克尔逊干涉仪由 1 个分束器和 2 个平面

镜(M_1, M_2)组成。漫射光由分束器分成两束光,再分别由平面镜 M_1 和 M_2 反射,通过透镜 L_2 后在 CCD 靶面上干涉成像。迈克尔逊结构的优点是很容易改变剪切角和剪切方向^[18]。将迈克尔逊结构中的一个平面镜 M_1 倾斜一个小角度 θ ,通过平面镜 M_1 反射的光束将偏转 $\beta(\beta=2\theta)$ 角照射到 CCD 靶面上,在 X 方向上产生剪切量 Δx ,两束相互倾斜的光同时产生 X 方向的载波频率 f_0 。在镜头的焦平面上放一个光阑,通过控制光阑尺寸调节散斑大小以及空间频谱的宽度。因为光阑在镜头的焦平面上,所以在成像系统中形成孔径光阑,而不是视场光阑,因此不会限制视场角。由透镜 L_1 和 L_2 组成的 $4f$ 系统起到了扩大视场的

$$I = |u_1(x+\Delta x, y)|^2 + |u_2(x, y)|^2 + |u_1(x+\Delta x, y)||u_2(x, y)| \times \exp\{i[\varphi(x+\Delta x, y) + 2\pi f_0 \cdot x - \varphi(x, y)]\} + |u_1(x+\Delta x, y)||u_2(x, y)| \times \exp\{-i[\varphi(x+\Delta x, y) + 2\pi f_0 \cdot x - \varphi(x, y)]\}. \quad (3)$$

式(3)的后两项包含了相位差 $\varphi(x+\Delta x, y) - \varphi(x, y)$ 的信息。对散斑干涉图的强度 I 进行

$$FT(I) = U_1(f_x + f_0, f_y) \otimes U_1^*(f_x + f_0, f_y) + U_2(f_x, f_y) \otimes U_2^*(f_x, f_y) + U_1(f_x + f_0, f_y) \otimes U_2^*(f_x, f_y) + U_2(f_x, f_y) \otimes U_1^*(f_x + f_0, f_y), \quad (4)$$

其中: $U_1(f_x + f_0, f_y) = FT(u_1)$, $U_2(f_x, f_y) = FT(u_2)$, \otimes 表示卷积运算, $*$ 表示共轭。式(4)前两项是低频项,主要含有背景光信息;后两项互为共轭,含有干涉图的相位信息。由于载波的引入,后两项分别产生了不同方向的移动。当各个频谱带相互分离时,便可以分离出含有相位信息的频谱部分,从而计算出相位。频谱带的形状取决于所选择的光阑的形状,当采用狭缝光阑时,得到的理想空间频谱图如图 2 所示。 $U_1(f_x + f_0, f_y) \otimes U_2^*(f_x, f_y)$ 的中心位于 $(f_0, 0)$ 处, $U_2(f_x, f_y) \otimes U_1^*(f_x + f_0, f_y)$ 的中心位于 $(-f_0, 0)$ 处, $FT(I)$ 的频谱带宽为 $4f_s$, f_s 为 U_1, U_2 的最大空间频率^[12,16], f_{\max} 为 CCD 相机的最大空间频率。

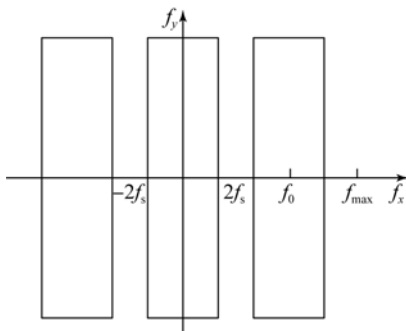


图 2 剪切散斑干涉图的空间频谱示意图

Fig. 2 Schematic of spatial frequency domain of a shearogram

作用。由平面镜 M_1 和 M_2 反射的两束光的波前分别表示为:

$$u_1(x, y) = |u_1(x+\Delta x, y)| \times \exp[i\varphi(x+\Delta x, y) + 2\pi f_0 \cdot x],$$

$$u_2(x, y) = |u_2(x, y)| \times \exp[i\varphi(x, y)], \quad (1)$$

其中: $|u|$ 是波阵面振幅; Δx 是 X 方向上的剪切量; f_0 为沿 X 方向所施加的载波频率, $f_0 = \sin \beta / \lambda$; β 是光束 u_1 与 CCD 靶面垂直方向的夹角,称为剪切角; λ 为激光器的波长。剪切散斑干涉图的强度为:

$$I(x, y) = |u_1 + u_2|^2 = u_1 u_1^* + u_2 u_2^* + u_1 u_2^* + u_2 u_1^*. \quad (2)$$

联立式(1)和式(2)可得:

$$I(x, y) = |u_1(x+\Delta x, y)|^2 + |u_2(x, y)|^2 + |u_1(x+\Delta x, y)||u_2(x, y)| \times \exp\{i[\varphi(x+\Delta x, y) + 2\pi f_0 \cdot x - \varphi(x, y)]\} + |u_1(x+\Delta x, y)||u_2(x, y)| \times \exp\{-i[\varphi(x+\Delta x, y) + 2\pi f_0 \cdot x - \varphi(x, y)]\}.$$

傅里叶变换,由于空域的乘法相当于频域的卷积,可得:

$$FT(I) = U_1(f_x + f_0, f_y) \otimes U_1^*(f_x + f_0, f_y) + U_2(f_x, f_y) \otimes U_2^*(f_x, f_y) + U_1(f_x + f_0, f_y) \otimes U_2^*(f_x, f_y) + U_2(f_x, f_y) \otimes U_1^*(f_x + f_0, f_y), \quad (4)$$

选择合适的窗函数取出集中在 f_0 附近的频谱带 $U_1(f_x + f_0, f_y) \otimes U_2^*(f_x, f_y)$, 再做傅里叶逆变换,可得:

$$u_1 u_2^* = FT^{-1}\{U_1(f_x + f_0, f_y) \otimes U_2^*(f_x, f_y)\}. \quad (5)$$

通过复数运算得出:

$$\psi(x, y) + 2\pi f_0 x = \arctan \frac{\text{Im}(u_1 u_2^*)}{\text{Re}(u_1 u_2^*)}, \quad (6)$$

其中: $\psi(x, y) = \varphi(x+\Delta x, y) - \varphi(x, y)$, 为两束光的随机相位差。通过式(6)可以分别求得被测物加载前后的相位分布 $\psi(x, y) + 2\pi f_0 x$ 和 $\psi'(x, y) + 2\pi f_0 x$, 相减后可得到由变形引起的相位差 $\Delta\psi$ 。当照明方向几乎垂直于被测物表面时,相位差与物体的离面位移导数 $\partial w / \partial x$ 的关系为:

$$\Delta\psi = \psi'(x, y) - \psi(x, y) = \frac{4\pi\Delta x}{\lambda} \cdot \frac{\partial w}{\partial x}, \quad (7)$$

其中: Δx 为剪切量。

2.2 光学系统的参数分析

如图 2 频谱图所示,只截取了 $U_1 \otimes U_2^*$ 的频谱带来计算相位差,但为了增大信噪比,希望可以扩宽 $U_1 \otimes U_2^*$ 所占据的频谱范围。由图 2 可知,当 CCD 相机的最大空间频率 f_{\max} 、载波频率 f_0 都增大时, $U_1 \otimes U_2^*$ 所占据的频谱带宽 $4f_s$ 也相应地增大。同时,为了使频谱分开,必须保证:

$$4f_s \leq f_0 \leq 2f_{\max}/3. \quad (8)$$

采样定理表明:如果 CCD 相机的像素尺寸为 δx ,那么 CCD 相机可以记录的最大空间频率为 $f_{\max}=1/(2\delta x)$ 。 $f_0=\sin\beta/\lambda$,联立式(8)可知剪切角为:

$$\beta \leq \arcsin(\lambda/3\delta x). \quad (9)$$

由式(9)可知,相机像素尺寸越小,剪切角 β 的上限值越大。已知 $f_0=\sin\beta/\lambda$,载波频率 f_0 的上限值也就越大,根据式(8), f_s 也越大。因此空间载波剪切散斑干涉技术对 CCD 相机的空间分辨率要求较高。

散斑平均尺寸 Δs 与光阑尺寸 D 成反比例关系: $\Delta s=1.22\lambda f/D$ (λ 为激光波长, f 为镜头焦距)。 U_1, U_2 的最大空间频率 $f_s=1/2\Delta s$,结合 $2f_s \leq f_{\max}/3=1/6\delta x$ 可得 $\Delta s \geq 6\delta x$,因此,为了避免频谱混叠,一个散斑至少要覆盖 6 个像素^[12,16]。令光阑尺寸为:

$$D \leq 1.22\lambda f/6\delta x. \quad (10)$$

同时由 $4f_s \leq f_0$ 推导出光阑尺寸 D 和剪切角 β 的关系:

$$D \leq 1.22 \cdot f \cdot \sin\beta/2. \quad (11)$$

由公式 $f_s=1/2\Delta s=2D/2.44\lambda f$ 可知, f_s 与光阑尺寸成正比例关系,因此光阑还作为一个空间滤波器限制了 U_1, U_2 的最大空间频率 f_s 。故光阑尺寸要慎重选择:一方面为了提高信噪比,可增大光阑尺寸使得 f_s 足够大,得到更大的频谱信息;另一方面,光阑尺寸必须同时满足式(10)和式(11),从而避免频谱发生混叠。一旦频谱混叠,则很难提取出所需要的频谱带,得到的相位图也将布满噪声。

综上所述,首先选择一个高分辨率的摄像头,然后根据测量要求确定剪切角。为增大频谱带宽,一般剪切量可取大一些,但注意不能超过剪切角的上限值 $\beta=\arcsin(\lambda/3\delta x)$ 。然后仔细调节光阑尺寸,在满足式(10)和式(11)的条件下,取光阑尺寸的上限值,做到既能避免频谱混叠,又使得 $U_1 \otimes U_2^*$ 的频谱带宽 $4f_s$ 尽可能大,以获得最大信噪比。

3 实验和讨论

3.1 实验装置

根据图 1 所示的原理图建立了一个空间载波相移系统,如图 3 所示。在实验中,光源采用波长

为 532 nm 的单纵模绿光激光器,成像镜头采用日本腾龙公司的焦距为 8 mm 的镜头(镜头规格为 1.69 cm),在镜头的焦平面上放一个尺寸可调节的光阑,4f 系统由两个焦距都为 100 mm 的透镜 L_1, L_2 组成。迈克尔逊剪切结构由 1 个边长为 50 mm 的分束器和 2 个直径为 40 mm 的平面镜 M_1, M_2 组成。采用一个 150 万像素(1 360 pixel \times 1 040 pixel, $4.65 \mu\text{m} \times 4.65 \mu\text{m}$) 的 CCD 相机来记录剪切散斑图像,CCD 型号为 STC-CL152A,靶面尺寸为 1.27 cm(1/2 inch)。已知像素尺寸 $\delta x=4.65 \mu\text{m}$,剪切角理论值 $\beta=\arcsin(\lambda/3\delta x)=2.18^\circ$ 。对一个四周固支、中心加载的白色喷漆铝板进行动态测量,测量距离为 220 mm,得到的最大视场角为 43.6° ,测量范围为 $176 \text{ mm} \times 132 \text{ mm}$ 。

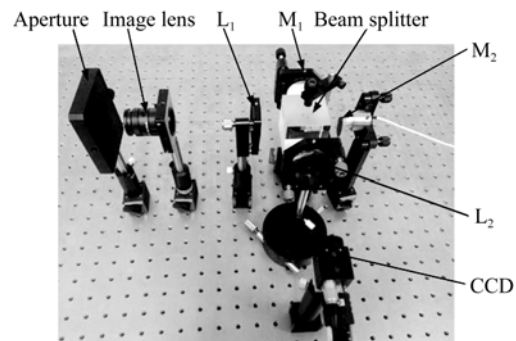


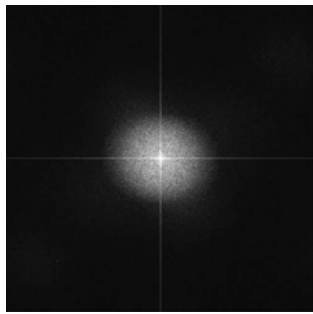
图 3 空间载波相移系统实验装置

Fig. 3 Experiment installation of spatial carrier phase-shifting shearing speckle system

3.2 光阑型号的选择

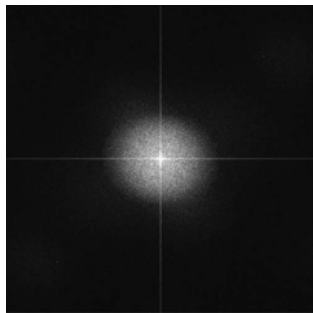
平面镜 M_1 倾斜一个小角度 θ 产生 X 方向的载波频率,实验需要在 X 方向分离出频谱,因此需要控制 X 方向的光阑尺寸,既可以选择圆孔径光阑,也可以选择狭缝光阑。

通过实验对可变圆孔径光阑 GCM-5702M 和狭缝光阑 GCM-560101M 进行了对比。GCM-5702M 的通光孔径在 1~12 mm 可调节,GCM-560101M 的狭缝尺寸为 $0 \times 40 \text{ mm} \sim 10 \text{ mm} \times 40 \text{ mm}$ 。当被测物在 X 方向的剪切量大约为 8 mm 时,分别使用这两个光阑,得到的频谱图如图 4 所示。圆孔径光阑会产生频谱混叠,而狭缝光阑可以分开频谱。



(a) 圆孔径光阑得到的频谱图

(a) Spectral image captured with an aperture stop



(b) 狭缝光阑得到的频谱图

(b) Spectral image captured with a slit aperture

图 4 剪切量大约为 8 mm 时的频谱图

Fig. 4 Spectral images captured with a shear of 8 mm

当剪切量为 8 mm 时,相应的剪切角也较小,载波频率 f_0 也较小,为了避免频谱混叠,要使 $U_1 \otimes U_2^*$ 所占据的频谱带宽 $4f_s \leq f_0$,因此光阑尺寸要足够小。在本实验中,将狭缝光阑 X 方向的缝隙调节到亚毫米级时(小于 1 mm),可以分开频谱。然而由于市场上圆孔径光阑的最小孔径一般都在 1 mm 以上,无法满足 $4f_s \leq f_0$,因此造成了频谱混叠。狭缝光阑的另一个优点是 Y 方向的狭缝尺寸始终为 40 mm,从而使照射到 CCD 靶面的激光更强,因此,狭缝光阑对激光强度的要求低于圆孔径光阑。在实验中选择型号为 GCM-560101M 的狭缝光阑。

3.3 实验分析

空间相移技术能大幅提高干涉信号相位测量的分辨率,分辨率可达 $\pi/20 \sim \pi/30$,对应的变形或位移测量的灵敏度可达到 10 nm 左右,而且测量灵敏度与剪切量是成正比的。设置不同的剪切量,并对 CCD 相机记录下来的剪切散斑图像进行傅里叶变换。图 5 展示了剪切量分别为 8, 15, 25 mm 时得到的傅里叶频谱图,方框内为所要提取的频谱

带。根据图 5 可知:剪切量越大,载波频率 f_0 越大, $U_1 \otimes U_2^*$ 所占据的频谱范围 $4f_s$ 越大,测量灵敏度也越高,因此本实验中选定剪切量为 25 mm。

因为很难准确地将狭缝光阑 X 方向的尺寸调节到很小,所以通过观察傅里叶频谱图来微调光阑尺寸,在避免频谱混叠的情况下,光阑尺寸越大越好。图 5(c)中,剪切量为 25 mm 时,狭缝光阑 X 方向的尺寸约为 1 mm。

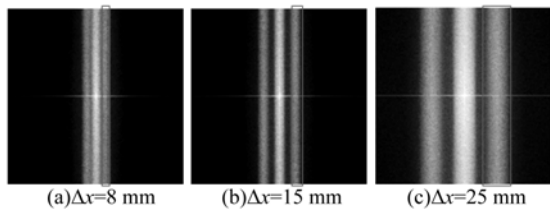


图 5 不同剪切量下的傅里叶频谱图

Fig. 5 Spectral images captured with different shears

为了得到高质量的相位图,选择剪切量为 25 mm,此时对一个四周固支、中心采用螺旋测微结构加载的白色喷漆铝板进行动态测量。记录加载前的图像作为参考图,再采用 CCD 相机以 25 frame/s 的帧频速率获取一系列被测物在不同加载下的剪切散斑干涉图。若采用高速相机,可以得到更高频率的采集速度(如 1 000 frame/s)。采用傅里叶变换与反变换的方法提取出不同载荷下的相位值 $\phi(x, y) + 2\pi f_0 x$,再根据式(7)得到表征物体离面位移的相位差 $\Delta\phi$,测量结果如图 6 所示。图 6(a)~(f)分别显示了载荷由小到大的形变滤波^[19]相位图。对图 6(a)~(f)所示的相位图分别进行解包裹处理,得到连续分布的相位图,相位分布三维图如图 7 所示。

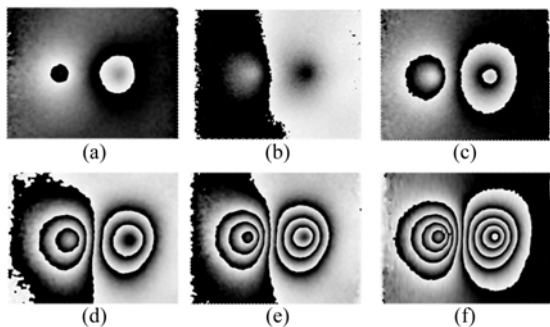


图 6 载荷逐渐增大得到的滤波相位图

Fig. 6 Filtered phase maps under increasing load

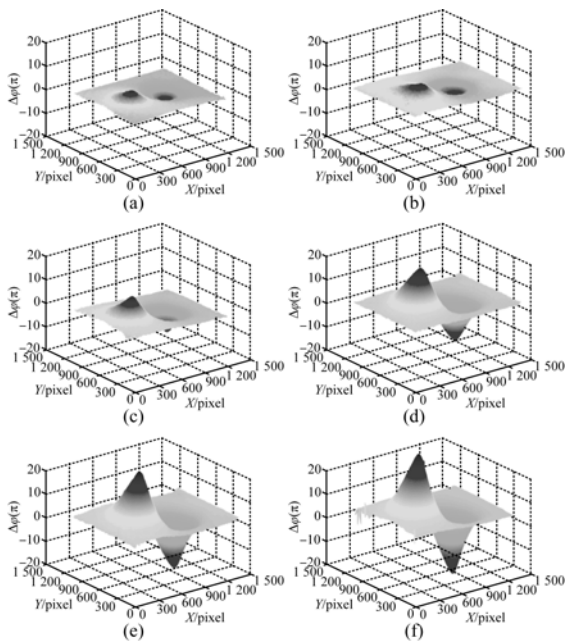


图 7 (a)~(f)是图 6(a)~(f)对应的去包裹相位三维图
Fig. 7 Three-dimensional plots of unwrapped phase maps according to fig. 6(a)~(f).

空间相移技术的测量精度约为 $\lambda/10$, 它对环境的要求低, 测量过程也较简单, 只需要提取一幅图经过变换就可以得到全场相位图, 进行动态过

程测量, 满足一般的工业要求。

5 结 论

本文根据工业现场对实时测量物体表面动态形变的要求, 提出了一种基于迈克尔逊干涉仪的空间载波剪切散斑干涉法。该方法通过单幅剪切干涉条纹图就可以快速检测相位, 从而实现对被测物的动态实时测量。为了得到高的信噪比并避免频谱混叠, 文中分析了光学系统的参数: CCD 相机的分辨率, 剪切角以及光阑的型号与尺寸对测量结果的影响。实验结果表明, 当采用焦距为 8 mm 的镜头, 像素尺寸为 $4.65 \mu\text{m} \times 4.65 \mu\text{m}$ 的高分辨率相机, 剪切量定为 25 mm, 选用狭缝光阑并设置其 X 方向尺寸为 1 mm 时, 可以得到高质量的剪切散斑相位图。在 25 frame/s 的采集速度下, 以 43.6° 的视场角实现了动态形变测量, 可测形变峰值为 $0.5 \sim 30 \mu\text{m}$ 。此外, 迈克尔逊光路很容易改变剪切角和剪切方向, $4f$ 系统使视场角不再受分光棱镜的限制, 整个系统结构简单且稳定, 十分适用于动态变形的测量。

参考文献:

- [1] STEINCHEN W, YANG L. *Digital Shearography: Theory and Application of Digital Speckle Pattern Shearing Interferometer* [M]. Washington DC: SPIE Press, 2003.
- [2] YANG L, CHEN F, STEINCHEN W, et al.. Digital shearography for nondestructive testing: potentials, limitations and applications [J]. *Holography Speckle*, 2004, 1(2):69-79.
- [3] 王永红, 梁恒, 王硕, 等. 数字散斑相关方法及应用进展 [J]. *中国光学*, 2013, 6(4):470-480.
WANG Y H, LIANG H, WANG SH, et al.. Advance in digital speckle correlation method and its applications [J]. *Chinese Optics*, 2013, 6(4):470-480. (in Chinese)
- [4] 朱猛, 李翔宇, 黄战华, 等. 双孔载频剪切散斑干涉法测量表面动态形变 [J]. *光学精密工程*, 2013, 21(7):1701-1706.
ZHU M, LI X Y, HUANG ZH H, et al.. Measurement of dynamic deformation using speckle shearography with carrier frequency generated by double-aperture [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2013, 21(7):1701-1706. (in Chinese)
- [5] YANG L. Recent developments in digital shearography for nondestructive testing [J]. *Mater. Eval.*, 2006, 64(7):704-709.
- [6] KRUPKA R, WALZ T H, ETTEMAYER A. Industrial applications of shearography for inspection of aircraft components [J]. *SPIE*, 2005, 5852:476-479.
- [7] CREATH K. Phase-shifting speckle interferometry [J]. *Applied Optics*, 1985, 24(18):3053-3058.
- [8] 杨连祥, 祝连庆, 谢辛, 等. 电子散斑干涉测量中相移技术的新发展 [J]. *北京信息科技大学学报*, 2013, 28(2):1-8.
YANG L X, ZHU L Q, XIE X, et al.. New development of phase-shift techniques in electronic speckle pattern interferometry [J]. *Journal of Beijing Information Science and Technology University*, 2013, 28(2):1-8. (in Chinese)
- [9] SERVIN M, CUEVAS F J. A novel technique for spatial phase-shifting interferometry [J]. *Modern Optics*, 1995, 42(9):1853-1862.

- [10] BHDURI B, KOTHIYAL M P, KRISHNA M N. Digital speckle pattern interferometry (DSPI) with increased sensitivity: use of spatial phase shifting[J]. *Optics Communications*, 2007, 272: 9-14.
- [11] 蔡怀宇,李宏跃,朱猛,等.用空间载频法测量玻璃平板的厚度均匀性[J].*光学精密工程*,2013,21(2):260-266.
CAI H Y, LI H Y, ZHU M, *et al.*. Measurement of thickness uniformity for glass plate by spatial carrier [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2013, 21(2): 260-266. (in Chinese)
- [12] 朱猛,李翔宇,龙宁波,等.大视场双缝载频散斑干涉成像检测系统[J].*光学精密工程*,2014,22(1):13-17.
ZHU M, LI X Y, LONG N B, *et al.*. Double-slit based carrier frequency speckle interferometer system with large viewing field [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2014, 22(1):13-17. (in Chinese)
- [13] PEDRINI G, ZOU Y L, TIZIANI H J. Quantitative evaluation of digital shearing interferogram using the spatial carrier method [J]. *Pure Appl. Opt.*, 1996,5(3):313-321.
- [14] ZHU M, ZHANG H, LI X Y, *et al.*. Single-aperture spatial phase-shifting technique for speckle shearography based on modified Michelson interferometer[J]. *Optical Engineering*,2013,52(9):1-7.
- [15] SIROHI R S, BURKE J, HELMERS H, *et al.*. Spatial phase shifting for pure in-plane displacement and displacement-derivative measurements in electronic speckle pattern interferometry [J]. *Appl. Opt.*, 1997,36(23):5787-5791.
- [16] BHADURI B, MOHAN N K, KOTHIYAL M P, *et al.*. Use of spatial phase shifting technique in digital speckle pattern interferometry (DSPI) and digital shearography (DS) [J]. *Opt. Express*, 2006,14(24):11598-11607.
- [17] BHADURI B, MOHAN N K, KOTHIYAL M P. Simultaneous measurement of out-of-plane displacement and slope using a multiaperture DSPI system and fast Fourier transform [J]. *Appl. Opt.*, 2007,46(23): 5680-5686.
- [18] WU S, HE X, YANG L. Enlarging the angle of view in Michelson interferometer-based shearography by embedding a 4f system [J]. *Appl. Opt.*, 2011, 50(21):1699-1705.
- [19] 王永红,李骏睿,孙建飞,等.散斑干涉相位条纹图的频域滤波处理[J].*中国光学*,2014,7(3):389-495.
WANG Y H, LI J R, SUN J F, *et al.*. Frequency domain filtering for phase fringe patterns of digital speckle pattern interferometry [J]. *Chinese Optics*, 2014, 7(3):389-495. (in Chinese)

作者简介:



王永红(1972—),男,安徽合肥人,博士后,教授,研究生导师,1994年、2004年于合肥工业大学分别获得学士、博士学位,1997年于中科院安徽光机所获得硕士学位,主要从事精密测试技术及仪器、光电检测、机器视觉等方面的研究。
E-mail: yhwang@hfut.edu.cn



冯家亚(1990—),女,湖北洪湖人,硕士研究生,2012年于合肥工业大学获得学士学位,主要从事散斑干涉测量技术的研究。E-mail: fly0526@163.com

(版权所有 未经许可 不得转载)