

用连续相位扫描进行振动定量分析

贾书海 乐开端 谭玉山

(西安交通大学机械学院激光与红外应用研究所 西安 710049)

提要 利用光学连续相位扫描和正弦相位调制相结合,提出一种 ESPI 时间平均测振的定量分析方法。由于采用光学连续相位扫描,该方法具有较强的抗环境干扰能力,不需要精确校准光学相移器,并且能自动定量地给出物体的全场振幅分布。

关键词 连续相位扫描,电子散斑,振动测量

1 引言

随着工业技术的发展,人们对机械结构的振动控制要求越来越高,相应地对测振技术也提出了更高的要求。目前常用的测振技术均采用单点测量方法,常用的是加速度传感器,这会给被测物体带来附加质量,影响物体的固有振动特性。电子散斑(ESPI)是目前发展较快的一项技术,已广泛应用于无损检测、形变测量等领域。用 ESPI 测量物体振动具有非接触、精度高和全场同时测量等优点,且不会影响物体的固有振动特性。但用 ESPI 时间平均法测量物体振动时,得到的振动信息是第一类零阶贝塞尔函数。由于贝塞尔函数随自变量增加迅速衰减的特性和散斑条纹图存在着极大的背景光强和散斑噪声,使高阶条纹对比度很差。ESPI 用于形变等测量得到的是余弦条纹,易于进行定量分析,而贝塞尔条纹的定量分析较为困难。

目前,已提出一些提高振动条纹质量^[1]和定量分析振动的方法^[2~4],但在实际应用中,都存在测量结果质量不高、测量范围小的缺点。本文提出用相移器进行光学相位连续扫描消除背景和散斑效应的影响,提高贝塞尔条纹质量,增加干涉条纹图的信噪比,并采用正弦相位调制对其进行定量分析,可以得到高质量的振动测量结果。

2 测量原理

2.1 连续相位扫描

当物体以频率 f , 振幅 $a_0(x, y)$ 振动时,在 t 时刻引起的像面上的相位变化为

$$\varphi = \frac{2\pi}{\lambda} g \cdot a_0(x, y) \cdot \cos(2\pi f t + \varphi_0) \quad (1)$$

其中 g 为和光路布置有关的几何参数,当入射光、反射光方向和物体振动方向一致时, $g = 2$; x, y 为像面上的坐标值。

一般情况下,物体的振动频率远高于 CCD 摄像机的工作频率(25 帧/秒)。当振动频率高

于摄像机工作频率约 5 倍时,光强信号在 CCD 靶面上积分,摄像机的每帧输出图像可表示为^[5]

$$I = I_0 + I_r + 2 \sqrt{I_0 I_r} \cos \Phi(x, y) \cdot J_0 \left[\frac{4\pi}{\lambda} a_0(x, y) \right] \quad (2)$$

I_0, I_r 为物光场和参考光场的强度, $\Phi(x, y)$ 为物光场和参考光场的相位差, $\cos \Phi(x, y)$ 为一个随机项,在像面上对应于散斑, J_0 为第一类零阶贝塞尔函数,代表了振动信息。

由(2)式可以看出,由于背景光强($I_0 + I_r$)及散斑项 $\cos \Phi$ 的存在,并且, J_0 函数随振幅的增加变化幅值迅速衰减,从而使条纹图的对比度降低,很难观察到高阶条纹。将这样的时间平均条纹图直接用于定量分析,难以得到好的测量结果。

文献[3]提出采用四步离散光学相移的方法来消除背景光强和散斑项的影响。但实践证明,由于测量过程中不可避免的环境干扰和相移器标定的不准确,使背景和散斑项不能完全消除,造成测量结果的质量不高。

引起散斑的是一个余弦项,当 $\Phi = 0, \pi$ 时, $\cos \Phi = \pm 1$, 此时 I 取最大和最小值,为此在参考光路中引入光学相移器,使参考光的相位以步长 $\Delta\alpha$ 在足够大的范围内连续扫描,寻找每一点处 I 的最大和最小值,得到两幅图像 I_{\max}, I_{\min} , 并取

$$I = I_{\max} - I_{\min} = 4 \sqrt{I_0 I_r} J_0 \left[4\pi \frac{a_0}{\lambda} \right] \quad (3)$$

这样就会完全消除背景光强和散斑项 $\cos \Phi$ 的影响,可以观察到更多的条纹,增加测量范围,并且使条纹的信噪比增加,为振动的定量分析提供了基础。这种方法不像离散相移需要精确地校准相移器,这里只是光学相位连续扫描,因而不需要精确校准相移器。此方法抗环境干扰能力较强,因为环境干扰只会引起 Φ 的一个附加变化,只要总的扫描范围 $\Sigma \Delta\alpha$ 大于 2π , 环境干扰并不影响最大最小值的正确性。

2.2 时间平均电子散斑振动测量的自动定量分析

时间平均 ESPI 的振动条纹是一个零阶贝塞尔函数,不像一般的 ESPI 静态测量的余弦条纹易于定量分析,正弦相位调制(SPM)是定量分析振动的少数几种方法之一^[3]。本文将上述连续相位扫描和正弦相位调制相结合,可有效地提高振动测量效果。

对于余弦条纹,采用三步相移解调时,在参考光路中分别引入 $-\alpha, 0, \alpha$ 相移值,相应的光强为 I_1, I_2, I_3 , 可得相位角为

$$\theta = \arctan \left[\frac{1 - \cos \alpha}{\sin \alpha} \cdot \frac{I_1(x, y) - I_3(x, y)}{2I_2(x, y) - I_1(x, y) - I_3(x, y)} \right] \quad (4)$$

一般取 $\alpha = 120^\circ$, 此时误差最小^[6]。

在参考光路中引入一个和物体振动同频率的偏置参考振动。对物体振动进行正弦相位调制,摄像机的输出可表示为

$$I = I_0 + I_r + 2 \sqrt{I_0 I_r} \cos \Phi \cdot J_0 \left[\frac{4\pi}{\lambda} (a_0^2 + a^2 + 2a_0 a \cos \beta)^{1/2} \right] \quad (5)$$

a_r 为参考振动的幅值, β 为参考振动和物体振动的振动相位差。

当参考振动的振动相位变化时,贝塞尔条纹会发生移动,这相当于余弦条纹的相移,所以可将其当作余弦条纹采用振动相移技术进行解调,只是这里(4)式中的 I_1, I_2, I_3 分别为同相参考振动、无参考振动、反相参考振动的三幅时间平均条纹图,分别对应余弦条纹引入 $-\alpha, 0, +\alpha$ 相移时的条纹图,故应用(4)式即可得振幅相应的相位值。参考振动和物体振动同相、无参考

振动、反相的三幅条纹图可表示为

$$I_1 = I_0 + I_r + 2 \sqrt{I_0 I_r} \cos \phi \cdot J_0 \left[\frac{4\pi}{\lambda} (a_0 + a_r) \right] \tag{6a}$$

$$I_2 = I_0 + I_r + 2 \sqrt{I_0 I_r} \cos \phi \cdot J_0 \left[\frac{4\pi}{\lambda} a_0 \right] \tag{6b}$$

$$I_3 = I_0 + I_r + 2 \sqrt{I_0 I_r} \cos \phi \cdot J_0 \left[\frac{4\pi}{\lambda} (a_0 - a_r) \right] \tag{6c}$$

将(6) 式中 I_1, I_2, I_3 直接用于(4) 式, 由于条纹的信噪比很低, 故测量结果存在较大的误差^[2]。将上述连续相位扫描法用于振动定量分析, 可以消除背景项和 $\cos \phi$ 项, 并使测量受环境干扰的影响小, 提高测量效果。经过连续相位扫描后所得图像可表示为

$$I_1' = 4 \sqrt{I_0 I_r} J_0 \left[\frac{4\pi}{\lambda} (a_0 + a_r) \right] \tag{7a}$$

$$I_2' = 4 \sqrt{I_0 I_r} J_0 \left[\frac{4\pi}{\lambda} a_0 \right] \tag{7b}$$

$$I_3' = 4 \sqrt{I_0 I_r} J_0 \left[\frac{4\pi}{\lambda} (a_0 - a_r) \right] \tag{7c}$$

将 I_1', I_2', I_3' 代入(4) 式, 就可以求得以角度(介于 $[-\pi, \pi]$ 之间) 表示的振幅, 即振幅的包裹相位值。经过相位去包裹处理可以得到振幅的连续相位值。由于这里是将贝塞尔条纹看作余弦条纹进行解调, 因而存在误差, 需要经过误差校正才能得到正确的结果。将计算相位值和真实相位值做成误差查找表, 通过查表就可以校正这种误差^[3]。

3 测量装置和结果

3.1 测量装置

实验所用的系统装置及光路布置如图 1 所示。信号发生器产生的信号经功率放大器和驱动器驱动被测物体振动, 并经过正弦信号相移网络驱动 SPM 产生和物体同频率的参考振动。正弦相移网络可以对 500 Hz~ 15 kHz 的正弦调制信号进行连续和离散相移, 并可连续调节参考振动的振幅。光学相移器(PS) 在计算机和 D/A 板的控制下, 可以按不同步长实现光学相位连续扫描。相移器和正弦相位调制器采用作者所在研究所的专利——低压电陶瓷相移器, 在 0~ 10 V 范围内可产生 0~ 6π 的光学相移。CCD 摄像机, MPE-1000 图像采集卡及 Pentum 166 微机构成了图像采集和处理系统。

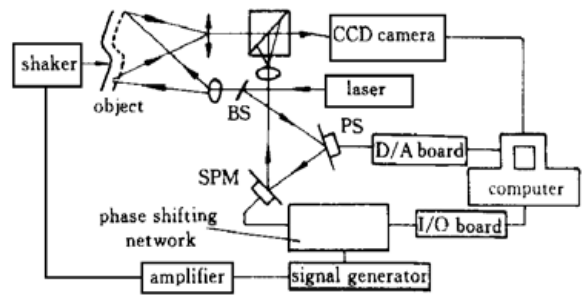


图 1 振动测量系统的结构框图

Fig. 1 Schematic diagram for vibration measurement

测量过程在计算机的控制下完成光学相位连续扫描和参考振动信号的连续相移和离散相移, 测量速度很快, 仅需 15 s 就可得到全场振动数据。

由于振动条纹比静态变形条纹质量差, 相位解调后会存在许多误差点, 给相位去包裹带来困难。去包裹时, 误差会沿去包裹方向扩展, 造成去包裹相位图上出现“拉线”现象。

分析误差扩展的原因,发现“拉线”现象是由于去包裹时误差点所在行在“拉线”的起始端少加了 2π (或多加了 2π) 的相位造成的,因而误差点所在行和其相邻的无误差点的行存在 2π 的相位误差,通过沿每一列检验相邻点间的相位差值,并将差值大于某一给定阈值的点做 2π 的相位修正,就可以校正去包裹时的相位误差扩展,消除去包裹相位图上的“拉线”现象。

3.2 偏置参考振动的调整

2.2 节的理论分析表明,偏置参考振动的振幅和相位对测量结果有较大的影响。其振幅影响 J_0 条纹移动量的大小,相当于余弦条纹相移的精度,而其相位影响到由(5)式到(6)式是否成立,因而偏置参考振动的调整是测量的关键。偏置参考振动可按下述方法调整:停止物体振动,逐渐增大参考振动的幅值,使计算机实时显示图像达到最暗,此时参考振动的振幅对应了 J_0 的第一零点,即 $\frac{4\pi}{\lambda} a_r = 2.4048$ 。然后按比例减小参考振动的振幅,使 $\frac{4\pi}{\lambda} a_r = \frac{2\pi}{3}$, 即得所需的参考振动的振幅。这样当把(7)式中的 Bessel 函数当作余弦函数代入(4)式时,相当于 $\alpha = 120^\circ$ 。

调整偏置参考振动的相位时,激励物体振动,连续调整参考振动的相位,使计算机实时显示条纹图的零阶条纹变得最亮和最宽,此时摄像机的输出图像由(5)式变为(6)(c)式, J_0 函数的自变量最小,因而零阶条纹将达到最亮和最宽状态,此时的参考振动即为反相参考振动。将参考振动反相,则得到同相参考振动。

3.3 测量结果

实验中对一四周固定的 $65\text{ mm} \times 65\text{ mm}$ 方铜板进行测量,铜板厚 0.5 mm 。图 2 是铜板在

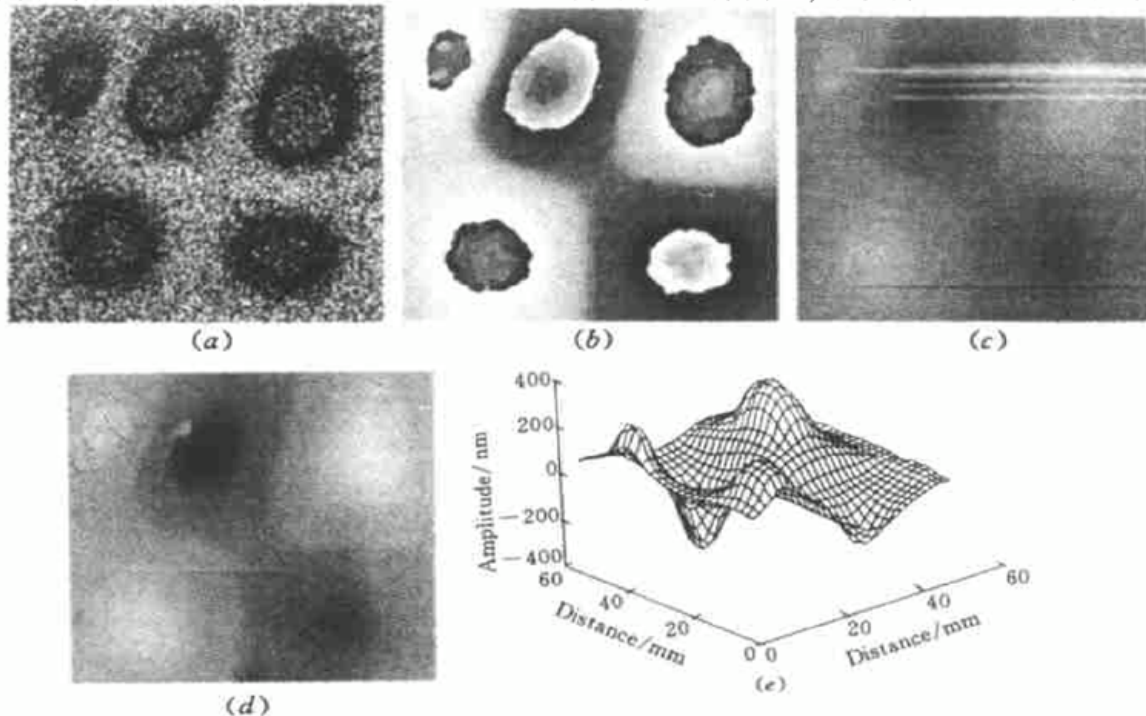


图 2 振动测量结果

(a) ESPI 时间平均条纹; (b) 解调后的包裹相位图; (c) 去包裹相位图;
(d) 误差校正后的相位图; (e) 振动形态的三维显示

Fig. 2 Results of vibration measurement

(a) time-average fringe of ESPI; (b) wrapped phase map; (c) unwrapped phase map;
(d) phase map after error-correcting; (e) wire frame representation of amplitude

1520 Hz 时的振动测量结果: (a) 是 ESPI 时间平均条纹图, (b) 是经过振动相移解调后振幅的包裹相位图, (c) 是去包裹相位图, (d) 是图(c) 经过去包裹误差校正后的结果, (e) 是振幅的三维显示结果。比较(c) 和(d), 可以清楚地看到经过去包裹误差校正后, 相位误差扩展已被校正, “拉线”现象完全消除。从图(e) 可以直观地看到物体的振动形态及各点的振幅大小。表明连续相位扫描技术用于振动的定量分析是完全可行的, 可以得到较好的测量效果。

由于这种方法是利用振动相移的方法解调贝塞尔条纹, 因而可以达到相移法测量变形的同等精度, 即 $\lambda/30$, 远高于人工条纹级数判读法的精度, 并且其最小可测振幅小于贝塞尔函数的第一零点。

理论分析和实验表明, 影响测量精度的一个重要因素是正弦相位调制器的振动相移精度, 这主要是由参考振动的振幅和相位决定的。测量时应按 3.2 节所述方法仔细调整参考振动的振幅和相位。

参 考 文 献

- 1 Fan Hua. A study on the key techniques and quality optimization in practicality of laser TV-holography, Ph. D thesis of Xi'an Jiaotong University, 1998. 44~ 48 (in Chinese)
- 2 Henrik O. Saldner. Phase-stepped television holographic technique for measuring phase and amplitude maps of small vibrations. *Appl. Opt.*, 1996, **35**(20): 3791~ 3798
- 3 Karl A. Stetson, William R. Brohinsky. Fringe-shifting technique for numerical analysis of time-average holograms of vibrating objects. *J. Opt. Soc. Am. A*, 1988, **5**(9): 1472~ 1476
- 4 Suezou Nakadate. Vibration measurement using phase-shifting speckle pattern interferometry. *Appl. Opt.*, 1986, **25**(22): 4162~ 4167
- 5 Geir O. Rosvold, Ole. J. Lokberg. Effect and use of exposure control in vibration analysis using TV holography. *Appl. Opt.*, 1993, **32**(5): 684~ 691
- 6 Zheng Wen. The study of theory and applied system on the phase-shifting holography and speckle pattern interferometry measurement, Ph. D thesis of Xi'an Jiaotong University, 1991. 15~ 23 (in Chinese)

Phase Continue Scanning ESPI Technique for Measuring Vibration Mode

Jia Shuhai Yue Kaiduan Tan Yushan

(Laser & IR Institute, School of Mechanical Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049)

Abstract In this paper, the phase continue scan is combined with the sinusoidal phase modulation to determine the vibration amplitude of object by time-average ESPI. Because the phase continue scan technique is adopted, this method has the advantage of a high anti-disturbance capability without exactly calibrating the optical phase-shifter.

Key words phase continue scan, ESPI, vibration measurement