

数字散斑干涉技术在振动分析中的应用

郑文 谭玉山

(西安交通大学机械系, 西安 710049)

提 要

首次将相移技术应用于频闪数字散斑干涉计量中,对物体的振动进行了定量分析。实验证明,这种方法有广泛的实用价值。另外,介绍了一套自动分析系统,讨论了各参数对测量结果的影响。

关键词 频闪,散斑干涉计量,相移。

1 前 言

数字散斑干涉计量(DSPI)在变形及振动测量中已有广泛的应用,但存在条纹质量不高,背景噪声大,颗粒感强,要进行定量分析比较困难的缺点。一般来讲,干涉条纹图可表示为

$$I(x, y) = I_0(x, y) \cdot \{1 + m(x, y) \cos[\Delta\varphi(x, y)]\},$$

式中要求解的量是相位值 $\Delta\varphi$, 而 I_0 及 m 都是未知的, 因而可以说单幅条纹图并没有包括足够的信息来进行被测参数的自动分析。一般的分析方法是比较干涉图中各点的光强, 抽取条纹强度最大或最小点, 然后判别级数、插值等, 速度很慢, 受背景噪声干扰大, 精度低。很显然, 用这种方法对散斑相关条纹进行自动分析几乎是不可能的。

相移技术的发展克服了传统方法存在的不足, 实现了条纹的自动分析。现已将其应用于变形和振动时间平均电子散斑干涉(ESPI)条纹的分析中^[1~3], 但结果都较差。本文首次将相移技术用于频闪 DSPI 振动条纹的分析中, 采用低通滤波、图像变换等处理手段, 快速、准确地获得了理想的测量结果。

2 基本 原 理

采用双散斑场干涉的光路布置(图1所示)。设周期性振动物体在任一时刻 t 离开平衡位置的离面位移为 $a(t)$, 干涉场可表示为:

$$I_t(x, y, t) = I_0(x, y) \cdot \{1 + m(x, y) \cdot \cos[k \cdot a(x, y, t) + \phi(x, y)]\}.$$

I_0 为平均光强, m 为调制度, $\phi = \phi_0 - \phi_r$, 为平衡位置物场与参考场的相位差,

$$k = \frac{2\pi}{\lambda} (1 + \cos \theta),$$

θ 如图1所示, $a(x, y, t)$ 为 t 时刻的离面位移。

在 t_1 时刻, 摄像机采图后得到的信号强度为:

$$I_{V_1} = \frac{T_V}{2\pi} \int_{-\pi p}^{\pi p} I_t \cdot d\omega t$$

$$= T_V \cdot p \cdot I_0 \cdot \left\{ 1 + \frac{m}{2\pi p} \cdot \int_{-\pi p}^{\pi p} \cos [k \cdot a(t+t_1) + \phi] \cdot d\omega t \right\}.$$

p 为频闪光脉冲占空比, T_V 为摄像机取图时间 (1/25 s), ω 为振动频率。同样, 在 t_2 时刻采另一帧数据, 并引入相移量 δ :

$$I_{V_2} = T_V \cdot p \cdot I_0 \cdot \left\{ 1 + \frac{m}{2\pi p} \cdot \int_{-\pi p}^{\pi p} \cos [k \cdot a(t+t_2) + \phi + \delta] \cdot d\omega t \right\},$$

二者相减后得:

$$I = |I_{V_2} - I_{V_1}| = \frac{T_V \cdot I_0 \cdot m}{\pi} \left| \int_{-\pi p}^{\pi p} \left\{ \sin \left[\frac{k \cdot a(t+t_2) + k \cdot a(t+t_1) + \delta}{2} + \phi \right] \right. \right.$$

$$\left. \cdot \cos \left[\frac{k \cdot a(t+t_2) - k \cdot a(t+t_1) + \delta}{2} \right] \right\} \cdot d\omega t \right| \quad (1)$$

当 $p \rightarrow 0$ 时, 可以忽略时间积分效应的影响。由于 ϕ 的分布是无规的, 平方后取集平均, 则

$$E = \langle I^2 \rangle = \frac{T_V^2 I_0^2 \cdot m^2}{\pi^2} \cdot (2\pi p)^2 \cdot \cos^2 \left[\frac{k \cdot a(t_2) - k \cdot a(t_1) + \delta}{2} \right]$$

$$\cdot \left\langle \sin^2 \left[\frac{k \cdot a(t_2) + k \cdot a(t_1) + \delta}{2} + \phi \right] \right\rangle$$

$$= 2T_V^2 \cdot I_0^2 \cdot m^2 \cdot p^2 \cdot \{1 - \cos [k \cdot a(t_2) - k \cdot a(t_1) + \delta]\}.$$

从上式中可以看出, 用相移方法能够很容易地求出物面上任一点在两个不同时刻 t_1 和 t_2 的相位差。取 $\delta = 0^\circ, 120^\circ, 240^\circ$, 得到相应的条纹图 E_1, E_2, E_3 , 并推得:

$$\varphi = \arctg \frac{\sqrt{3}(E_3 - E_2)}{(2E_1 - E_2 - E_3)} \quad (2)$$

φ 为求得的初始相位。计算出来的相位 φ 在 $\left(-\frac{\pi}{2}, \frac{\pi}{2}\right)$ 内, 如果比较 (2) 式右边分子、分母的正负, 可将其值域扩展为 $[-\pi, \pi]$ ^[4]。相位展开后, 就得到连续的相位分布 φ_{cont} ^[5], 进而求出物体在振动的任意两时刻的位移差为:

$$a(t_2) - a(t_1) = \frac{\varphi_{\text{cont}}}{k}.$$

若物体作振幅为 a 的正弦振动, 即 $a(t) = a \cdot \sin \omega t$, 则:

$$a = \frac{\varphi_{\text{cont}}}{k \cdot (\sin \omega t_2 - \sin \omega t_1)} \quad (t_1 \neq t_2).$$

a 为负时, 表示振动的相位相反。

3 实验研究

采用双散斑场干涉的光路布置, 整个系统如图 1 所示。计算机输出的数字量经 D/A、直流放大器, 转换成一定的稳定电压, 驱动压电陶瓷来改变光程, 从被测物体的照明光路中引入相移量 (从参考光束引入亦可)。信号发生器输出的正弦信号分别被送到声光开关驱动

源及功率放大器。驱动源产生一脉冲电压加在声光开关上,对连续波激光进行调制,产生频闪照明,光脉冲的宽度,相位可以随意调节,功放输出的正弦电压驱动激振器,使被测物体在与光脉冲同样频率下振动。

CCD 摄像机、PCV ision-plus 图像采集卡及 IBM-PC/AT 微机构成了图像处理系统。物体成像于 CCD 靶面,并被数字化为 $256 \times 256 \times 8 \text{ bit}$ 图像。在计算机控制下, t_1 时刻取一幅图, t_2 时刻取相应相移量下的三幅图,存放于帧存贮器中。数据采集完成后,自动进行相减运算、平方变换、条纹预处理、相位计算等操作。由于图像卡有两帧 $512 \times 512 \times 8 \text{ bit}$ 存贮空间,所有的计算、数据传递、存贮等都在内存和帧存之间进行,使处理速度非常快,整个过程仅需 5 分钟。

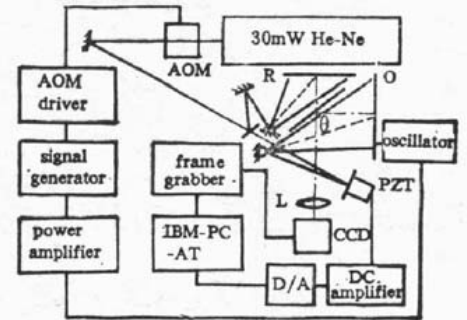
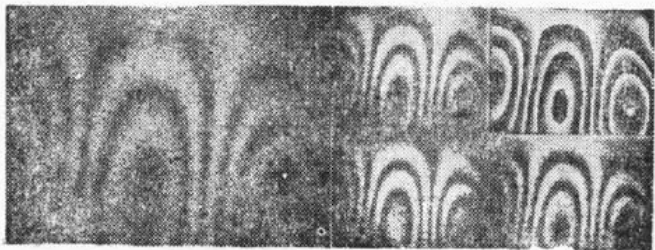
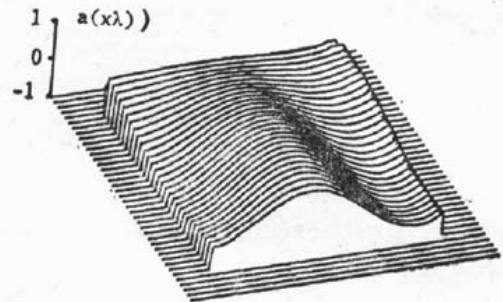


Fig. 1 DSPI vibration measuring system



(a)

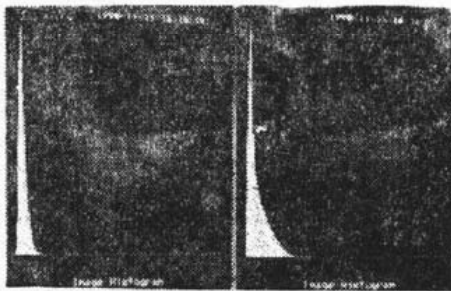


(c)

Fig. 2

(a) Original correlation fringes. (b) Processed fringes and phase-map. (c) Vibration amplitude distribution. ($\omega t = \pm \pi/2, p = 1/9, f = 3880 \text{ Hz}, F = 5.6$)

被测物体为一 3 mm 厚, $20 \times 20 \text{ cm}$ 单边固定的铝板,图 2 给出了它在 3880 Hz 的谐振



(a) (b)

Fig. 3 Grey level histograms of (a) original correlation fringes and (b) processed fringes in fig. 2

频率下的 DSPI 相关条纹、变换及低通滤波后条纹和相应的相位图。原始条纹图中散斑背景噪声很大,预处理后依然存在局部的光强起伏,所以计算出的相位图中可能会有一些噪声点。对其进行不同窗口的中值滤波可以达到消噪声的目的,保证相位展开的顺利进行。图 2(c) 给出了物体的振幅分布。从实验结果来看,本文所描述的方法能够快速、准确地测量全场的离面振动,并将其清楚地显示出来;物体各部分振动的相对相位能自动地获得;相移方法受对比度的影响很小,但对条纹图的信噪比仍有一定要求。图 2 中原始相关条纹及预处理后条纹的灰度级直方图统计如图 3 所示,他们的灰度值都很低,噪声也大,用抽取条纹骨架的方法是不可能做到自动分析的。

4 测量精度及参数选择

相移 DSPI 用于振动的定量分析中,勿需干板的处理、复位、再现等操作,非常方便。但

由于采用低分辨率的记录装置,必然会导致测量精度的降低;从(1)式中可以看出,得到的相关条纹实际上包含一个高频载波项,相位的测量总是受散斑背景噪声的影响,虽然用滤波的方法可以大部分消除,但仍会给计算结果带来一定误差.所以,它不可能达到全息干涉计量那样高的精度.另外,用这种方法进行的自动分析依然是建立在一定条纹质量基础之上的,如果条纹信噪比过低,就较难自动进行相位展开,需要人机对话才能完成,测量误差也会增大.

实验过程中,频闪光脉冲占空比 p 的选择十分重要.一方面, p 较大时,由于时间积分效应的存在,使计算发生偏离,并且条纹质量也会下降.在(1)式中,若设

$$\omega t_2 = \frac{\pi}{2}, \quad \omega t_1 = \frac{3\pi}{2},$$

则有

$$E = \langle I^2 \rangle = \frac{1}{2} \left(\frac{T_V \cdot I_0 \cdot m}{\pi} \right)^2 \left| \int_{-\pi p}^{\pi p} \cos \frac{2ka \cdot \cos \omega t + \delta}{2} \cdot d\omega t \right|^2$$

采用数字积分方法求出 E_i , 计算 φ 及 φ_{cont} , 并与理想值比较来考查算法带来的偏差. 设

$$\varepsilon = \frac{2ka - \varphi_{\text{cont}}}{2ka} \times 100\%.$$

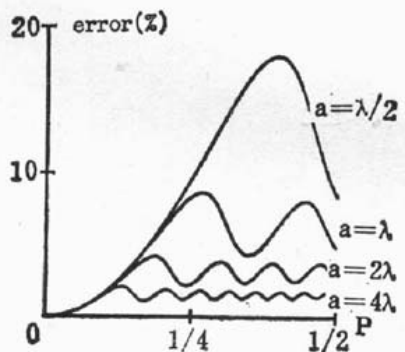


Fig. 4 Errors for the different a and p .

$$(\omega = \pm \pi/2, \theta = 0)$$

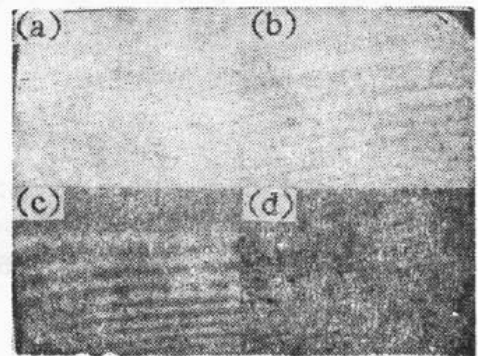


Fig. 5 Original correlation fringes of different F number ($p = 1/10$):

(a) 16; (b) 8; (c) 4; (d) 2

图4给出了各种 p 和 a 值下的误差曲线.很明显,只要 $p < \frac{1}{6}$, ε 将低于 5%, 这对 DSPI 来说已是足够的了.

另一方面, p 很小时,每帧原始图像可表示为:

$$I \doteq T_V \cdot I_0 \cdot p \{ 1 + m \cdot \cos [k \cdot a(t) + \phi] \} + V_e.$$

V_e 为电噪声,对同一探测器来说,它是恒定的.信号强度与 p 成正比,如果 p 过小,照明光会很弱,而 T_V 又是确定的,所以电噪声、散斑背景噪声的影响将很大,反而会带来更大的误差.

提高条纹信噪比的有效措施就是选取适当的 p 值和镜头相对孔径,在不引入太大误差的前提下,获取最高对比度条纹.实验中一般取 p 为 $\frac{1}{15} \sim \frac{1}{7}$. CCD 的像元面积比较小,镜头孔径可以选得大一些,这样既保证了入射光有足够的能量,又能减小条纹的颗粒性.采用频

闪照明, 在不同 F 数下得到的同一变形物体的相关条纹如图 5 所示. 测量时取 $F=2.8\sim 5.6$.

影响精度的另一个重要因素是相移量 δ 的准确性. 相移器本身的移位误差小于 2%, 主要是环境干扰诸如气流、振动、尘粒等的影响, 因此必须尽量缩短取像间隔时间, 采用尽量少的相移步数. 本系统中, 在不同相移量下摄三帧图的时间仅为 20 sec, 比较容易克服外界干扰.

5 结 论

本文所提出的频闪相移数字散斑干涉技术, 在振动的定量分析中明显地显示出了它的优越性: 全场测量, 速度快、自动化程度高; 测量精度高, 位移的大小、相对方向均可清楚地表示出来; 采用低分辨率记录装置, 操作简单、方便.

相移方法的引入, 可以将 DSPI 的测量精度提高一个量级, 但是, 精度的提高必然导致对环境的稳定性要求更加严格. 测量过程中, 光脉冲占空比大小、摄像机镜头相对孔径等参数的选择, 都要以尽量提高条纹信噪比为前提; 散斑噪声、电噪声的影响可用非线性变换、低通滤波等方法来减小.

参 考 文 献

- [1] K. Creath, *Appl. Opt.*, 1985, **24** (18): 3053~3058
- [2] S. Johansson, K. G. Predko. *J. Phys. E: Sci. Instrum.*, 1989, **22**: 289~292
- [3] S. Nakadate, *Appl. Opt.*, 1986, **25** (22): 4162~4167
- [4] M. Chang, P. H. Ching, *Proc. SPIE*, 1985, **599**: 149~154
- [5] T. Kreis, *J. Opt. Soc. Am. A*, 1986, **3** (6): 847~855

Applications of DSPI in vibration measurement

ZHENG WEN TAN YUSHAN

(Department of Mechanical Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049)

(Received 5 December 1990; revised 8 July 1991)

Abstract

A new method is presented to extract quantitative information of vibration objects by using phase-stopping stroboscopic digital speckle pattern interferometry (DSPI), and it has been proved powerful. An automated analysis system is introduced. The effects of system parameters on measuring results are discussed.

Key words stroboscopic, speckle pattern interferometry, phase-stepping.