

基于电子散斑剪切干涉技术的振动检测研究

于长淞

(中国科学院 长春光学精密机械与物理研究所, 长春 130033)

摘要:为实现物体振动的测量,将频闪照明和电子散斑干涉技术相结合测量物体振动,利用比被测物体振动周期短的脉冲激光照明物体,将物体在一个振动周期内的两个位置当作双曝光静态变形来处理。采用虚拟仪器软件LabVIEW控制同步信号,以四周固定的矩形平板为测量对象,得到了激振频率为100Hz和200Hz时的干涉条纹图。实验结果表明该系统结构简单且具有很高的同步精度。

关键词:电子散斑剪切干涉; LabVIEW; 时间平均法; 频闪法; 振动检测;

中图分类号: TH741

文献标识码: A

文章编号: 1672-9870(2011)03-0010-03

Vibration Detection Based on Electronic Speckle Shearing Interferometry

YU Changsong

(Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun 130033)

Abstract: For the realization of the object vibration measurement, stroboscopic lighting and electronic speckle pattern interferometry are combined to detect vibration, using a short pulse laser illuminate object which possesses shorter vibration than the measured object. And then handle the object's two positions in one vibration cycle as static deformation of double exposure. Control synchronizing signal using virtual instrument software LabVIEW, the rectangular plate with around fixed as a measuring object, obtained interferogram when the excitation frequency of 100Hz and 200Hz. The experimental results indicate that the system is simple and has high synchronization accuracy.

Key words: ESSPI; LabVIEW; time-average method; stroboscopic method; vibration detection

电子散斑剪切干涉技术(Electronic Speckle Shearing Pattern Interferometry ESSPI)是一种综合了激光、视频、电子及数字图像处理等技术的现代光测方法。它可以完成位移、应变、表面缺陷、裂纹检测和流体场、温度场等多种测试,因其通用性强、测量精度高、频率范围宽、测量迅速简便及全场实时测量等优点,近年来获得了快速发展^[1]。

已有的光学非接触测振方法主要是激光频闪照相法、激光多普勒效应法^[2]和电子散斑干涉法等,这些测试方法都具有测量精度和灵敏度高等优点。电子散斑剪切干涉技术相对于其它干涉技术对光源的相干性要求和环境的要求较低,从而有利于工业现场的应用。由于电子剪切散斑干涉术的灵敏度取决

于剪切值的大小,因此测量范围可调,相应地扩大了测量范围^[3]。杨福俊等^[4]提出利用液晶投影仪将单幅散斑图投影到待测物体表面的方法,采用时间序列数字图像相关软件计算离面位移,但系统结构较为复杂。陈炳泉等提出过一种频闪散斑干涉方法,结构较为简单,但需要采用专门的频闪光调制器。

本文所采用的电子散斑剪切干涉仪在测量振动时可以采用时间平均法和频闪法两种测量方法。时间平均法用于振动的定性测量及无损检测,该方法的可测面积要远大于频闪法。频闪法用于对振动进行定量检测,通过调整光脉冲在振动周期中的触发位置来检测任意瞬时的振动分布,同时由于脉冲频率与振动频率相等,可以采用相移技术,从而得到离

收稿日期: 2011-06-23

基金项目: 国家自然科学基金项目(60538020)

作者简介: 于长淞(1983-),男,硕士,研究实习员,主要从事光学检测方面的研究。E-mail: changsongyu@yahoo.cn。

面振动位移梯度的相位分布图。

1 电子散斑剪切干涉仪结构

电子散斑剪切干涉仪结构如图1所示,为了实现时间平均法和频闪法两种方法的结合,干涉仪的光源采用半导体激光器(LD),通过控制LD的电源输出一定频率的电脉冲(当频率为零时即为连续电信号),就可以控制半导体激光器输出相应频率的激光脉冲。LD输出的相干光经过扩束准直后照射在被测物体表面上,被测物可以利用激振器使其振动,相干光被物体反射后进入迈克尔逊干涉仪,此时光被分光棱镜分为两路,再分别被两个反射镜反射,最后经过物镜成像在CCD靶面上。为了形成剪切干涉,需要使其中一个反射镜旋转一个很小的角度,这样就可以使物面上相邻两点的像经过迈克尔逊干涉仪后成像于CCD靶面的同一点上,从而产生了剪切干涉。干涉仪中使用了压电晶体(PZT)用于平移反射镜 M_1 以实现相移,步进电机控制一个旋转反射镜 M_2 来实现剪切。

干涉仪利用虚拟仪器软件LabVIEW控制光源脉冲和激振信号的同步,所采用的NI公司PCI-6251型数据采集卡是一款高速M系列多功能DAQ板卡,是控制系统的核心硬件,它的作用是输出控制干涉仪所需要的多种波形,产生控制激振器的正弦波、产生脉冲波控制激光器电源输出的电脉冲频率,同时控制压电晶体及步进电机以分别实现相移控制和剪切控制,相应的控制软件由LabVIEW8.5编写。计算机通过图像采集卡接收CCD采集到的散斑图像,并实现图像的同步(与CCD图像采集同步)相减以实时显示散斑条纹图随物体振动的变化情况。

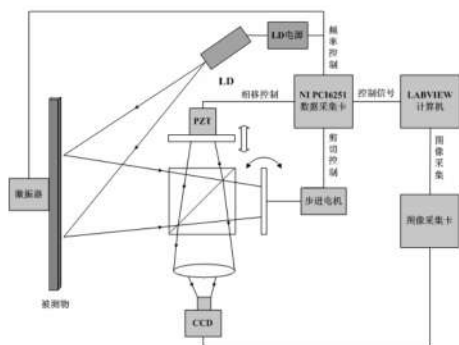


图1 电子散斑剪切干涉仪结构示意图

Fig.1 Schematic of electronic speckle shearing pattern interferometer

2 振动测量的原理分析

时间平均法和频闪法是目前最常用的两种散斑测量振动的方法^[6-10],这两种方法各有优点,时间平均法适于作振动的定性分析及无损检测,而频闪法可对振动进行定量分析,得到振动的离面位移梯度。

一般情况下,物体的振动频率要比摄像机的记录场频要高得多,因此CCD对像面光强的采集过程实质上是对在其采样时间内的像面光强信号的时间积分平均,因此称其为时间平均法,该方法具有测量可靠、实现方便和抗干扰能力强等特点。时间平均法测量振动需要分两步进行,首先当物体处于静止状态时CCD先采集一幅被测表面的剪切散斑图,此时在CCD靶面上的光强分布为:

$$I_1(x, y) = 2a^2 \{1 + \cos[\varphi(x, y)]\}$$

式中, a 表示反射光波的振幅,此时假设两相邻剪切点的光强相等, $\varphi(x, y)$ 表示两剪切点之间光波的相位差,是一随机量。随后物体被激振,这时CCD靶面上散斑图的光强分布发生了变化,如果物体的振动频率大于等于CCD的图像采集频率的5倍,那么CCD所采集到的图像可以认为是CCD靶面上的光强分布对时间的积分,即

$$I(x, y)_{ave} = \frac{1}{T_f} \int_0^{T_f} 2a^2 \{1 + \cos[\varphi(x, y) + \Delta(x, y, t)]\} dt$$

式中, T_f 表示CCD采集图像的周期, $\Delta(x, y, t)$ 为由离面振动所引起的两剪切点之间光波相位差的改变量。当采用相干光垂直照射被测物体并沿 x 方向剪切时,相对位相变化量可表示为:

$$\Delta(x, y, t) = \delta x \frac{4\pi}{\lambda} \frac{\partial w}{\partial x} \sin \omega t$$

式中, λ 表示相干光波波长, δx 表示 x 方向的剪切量, w 表示由振动引起得离面位移量, ω 表示振动的角频率。将(3)式代入(2)式,同时采用“减模式”,即用物体静止时所采集到的第一幅散斑图减去振动后采集的散斑图,最终得振动剪切散斑干涉图光强分布为:

$$I(x, y) = I_1(x, y) - I(x, y)_{ave} = 2a^2 \cos \varphi(x, y) \left[1 - J_0 \left(\delta x \frac{4\pi}{\lambda} \frac{\partial w}{\partial x} \right) \right] \quad (4)$$

式中, J_0 为零阶一类贝赛尔函数。由上式可知,最终所得的散斑干涉图由贝赛尔函数调制产生明暗相间的散斑条纹图。为了实时显示散斑图随物体振动的变化过程,以上相减运算的时间必须小于CCD的图像采集时间,这样就可以连续显示散斑图的变化过程。

频闪法是将频闪照明和电子散斑干涉相结合,

采用比被测物体的振动周期很短的脉冲激光照明物体,将物体振动在一个周期内的两个位置当作双曝光静态变形来处理,其实质是利用瞬时窄光波脉冲测量物面振动的瞬时分布,这样可以利用相移技术和相位解包裹方法得到物体被测表面的相位分布图。

本文所采用的方法实现了以上两种方法的结合,可以更有效的进行振动检测。在测量物体振动时,首先采用时间平均法对振动进行实时的定性分析,可以确定零级条纹的位置,同时也可以用来对物体进行无损检测,若要对振动进行进一步的分析,则可以采用频闪法。

3 实验结果

采用频闪法测量物面振动时,首先调整相干光源,使其输出的光脉冲频率等于振动频率,同时尽可能压缩光脉冲的宽度,以使物面由振动引起的离面位移在脉冲宽度内基本没有变化,具体光脉冲信号与振动信号的同步关系如图2所示。

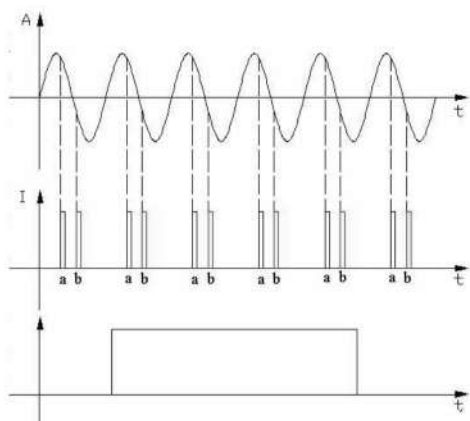


图2 光脉冲信号与振动信号同步示意图

Fig.2 Diagram of optical pulse signal and vibration signal synchronization

在物面静止时,通过CCD采集一幅电子散斑剪切干涉图,物体振动后,CCD再采集一幅电子散斑剪切干涉图,然后采用减模式,即用振动前所采集的干涉图减去振动后所采集的干涉图,得到频闪法电子散斑剪切干涉条纹图,由于CCD所采集的电子散斑剪切干涉图与瞬时振动分布相关,因此最终得到的频闪法电子散斑剪切干涉条纹图中的条纹分布反映的是物面瞬时振动的分布。

利用频闪法测量物体振动时,以四周固定的矩形薄板为实验对象,其大小为36mm×27mm,测量时

采用波长532nm的绿光激光器照明,沿水平方向剪切。激振器采用简谐音频激振方式利用大功率音箱对薄板激振,采用逐行扫描CCD以保证实时采集物面散斑图像,所得到的电子散斑剪切干涉条纹图如图3所示,其中图a为激振频率100Hz时的散斑条纹图,图b为激振频率200Hz时的散斑条纹图,同时图b的激振力大于图a的激振力。

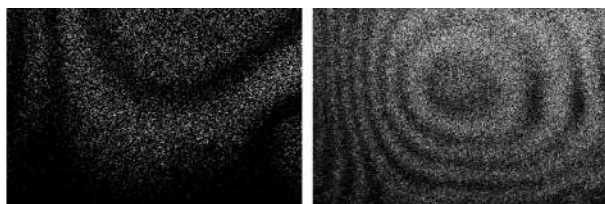


图3 频闪法电子散斑剪切干涉条纹图

Fig.3 Electronic speckle shearing interferogram of stroboscopic method

在实验对象和实验条件相同情况下采用时间平均法测量振动所得的电子散斑剪切干涉条纹图如图4所示,其中图a为激振频率100Hz时的散斑条纹图,图b为激振频率200Hz时的散斑条纹图,同时图b的激振力大于图a的激振力。

通过比较可知,由于频闪法实质上是利用瞬时窄光波脉冲测量物面振动的瞬时分布,该方法将周期性振动问题简化为准静态问题进行研究,所获得的物像光强分布被给定相位下面内位移(或离面位移方向导数)的余弦函数所调制,条纹的可见度比时间平均法有明显的改善。

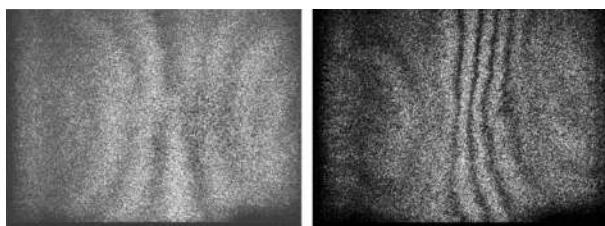


图4 时间平均法电子散斑剪切干涉条纹图

Fig.4 Electronic speckle shearing interferogram of time-average method

4 结论

由于电子散斑剪切干涉术具有高精度、非接触、实时性及抗干扰能力较强等优点,因而具有很好的应用前景。本文将频闪照明和电子散斑干涉相结合,利用NI公司PCI-6251数据采集卡作为控制系统硬件,通过LabVIEW编程实现光源脉冲控制和激振信号控制,对物体振动进行研究。以四周固定

(下转第18页)

光谱进行修正与非线性拟合。定性的分析模拟所需LED的光谱特性并定量的分析其辐照度。

3 计算机光谱分析

利用上述方法对太阳光光谱与LED混合光谱进行拟合,拟合结果如图4-6所示。

图4所示为单色LED模拟曲线与太阳光谱的对比。由图中可以看出LED有很好的单色性,峰值半宽度也只有二十几纳米。在可见光的400nm范围内,假设单色LED的峰值半宽度为20nm,那么需要20个光谱依次顺接的LED便可以模拟出太阳光谱。在此过程中,光谱半宽越窄即LED的单色性越好,那么模拟出的谱线越接近。

图5为白色LED光谱曲线与太阳光谱曲线的对比,由图中我们可以看出此白光LED是利用发蓝色的芯片激发其它色荧光粉产生混合光称白色的。波长为455.7nm的光波能量最高。

图6所示为白光LED与各单色LED共同模拟的曲线,从图中可以看出混合光模拟的曲线比单色与纯白色LED模拟的曲线相对与阳光光谱更为接近。

4 结论

(上接第12页)

的矩形平板为测量对象,得到了相应的剪切散斑干涉条纹图。实验结果表明,该系统结构简单且具有很高的同步精度,为下一步采用相移技术定量测量奠定了基础。

参考文献

- [1] 刘龙,孟光,范蓉平.电子散斑干涉技术在振动测试中的应用[J].振动工程学报,2004,17(1):1084-1086.
- [2] 杜振辉,李淑清,蒋诚志,等.激光光栅多普勒效应微小振动测量[J].光学学报,2004,24(6):836-837.
- [3] 陆福一,张朝晖.剪切散斑干涉术的无损检测研究,光子学报[J].1993,22(1):70-76.
- [4] 杨福俊,房亮,何小原.基于单幅数字散斑投影及离面相关的振动测量[J].光学技术,2007,32(3):536-540.
- [5] 陈炳泉.频闪散斑干涉术的研究,光学学报,2004,24

根据对LED光谱测试结果,若通过选取光谱范围多样、半宽度适当的LED可以在一定程度上模拟出太阳光谱,进而得到一种高质量、节能环保的舒适光源。目前单色LED的颜色只局限于红、蓝、绿、黄等颜色,且单色LED的光谱范围单一、半宽度都比较宽,给实验的完善带来实际的困难,同时模拟结果会受到多种因素的影响,如采集光谱时环境条件的影响,采集仪器的灵敏度,LED工作状态的影响等。但是由上述实验结果可看出,利用LED模拟太阳光谱是可行的。

参考文献

- [1] 郝海涛.白光LED用荧光材料的制备及性能研究[D].太原理工大学,2006.
- [2] 王晓明,郭伟玲,高国.沈光地LED新一代照明源[D].北京工业大学北京市光电子技术实验室,2009.
- [3] 李有桢,王金城.白光LED光源光度色度特性测量与评价[D].中国海洋大学,2007.
- [4] 杨志文.光学测量[M].北京:北京理工大学出版社,1995.
- [5] 刘贤德,麻英暖,唐家让,等.测绘光学基础[M].苏联科学与技术杂志社,1986.
- [6] Ira N.赖文.分子光谱学[M].北京:高等教育出版社,1985:267-268.
- (11):1566-1568.
- [6] 李新忠,宋文武,王希军.激光散斑计量技术及其应用[J].光电信息,2005,20(4):16-20.
- [7] 景超.电子散斑剪切相移干涉术的研究[D].天津:天津大学博士学位论文,2006,36-43.
- [8] Casillas F J, Davila, Rothberg S J, Garnica G. Small amplitude estimation of mechanical vibrations using electronic speckle shearing pattern interferometry[J]. Optical Engineering, 2004, 43(4): 880-887.
- [9] Hung Y Y. Shearography: a new optical method for strain measurement and nondestructive testing [J]. Optical Engineering, 1982, 21(8): 391-395.
- [10] Toh S L, Shang H M, Chau F S, et al. Flaw detection in composites using time-average shearography [J]. Optical Laser Technology, 1991, 23(2): 25-30.