

DOI:10.3969/j.issn.1001-4551.2019.07.011

基于光学相干层析的结构振动监测研究*

黄跃鑫¹, 张秋坤¹, 伏喜斌², 黄学斌², 钟舜聪^{1,3*}

(1. 福州大学 机械工程及自动化学院, 福建 福州 350108; 2. 厦门市特种设备检验检测院, 福建 厦门 361000; 3. 上海大学 机电工程及自动化学院, 上海 200072)

摘要:针对光学非接触式的振动测量问题,对基于频域光学相干层析技术搭建的振动测量系统进行了研究,通过记录位移随时间的变化实现了对振动信号的测量。研究了振动测量过程中,光谱仪采集的干涉条纹的模糊现象与被测目标瞬时速度的关联;建立了系统可测量的最大振动频率和 CCD 相机的曝光时间之间的关系,即曝光时间越短,则系统可测量的振动频率越大;对函数信号发生器驱动激励器产生的振动信号进行了测量试验。研究结果表明:光学相干层析技术是一种有效的光学非接触式振动测量方法,在基于振动的结构健康监测领域具有广阔的应用前景。

关键词:光学相干层析;振动测量;曝光时间;结构健康监测

中图分类号:TH113.2⁺1;TH744.1;TN209

文献标志码:A

文章编号:1001-4551(2019)07-0717-05

Structural vibration monitoring based on optical coherence tomography

HUANG Yue-xin¹, ZHANG Qiu-kun¹, FU Xi-bin², HUANG Xue-bin², ZHONG Shun-cong^{1,3}

(1. School of Mechanical Engineering and Automation, Fuzhou University, Fuzhou 350108, China;
2. Xiamen Special Equipment Inspection Institute, Xiamen 361000, China; 3. School of
Mechatronics Engineering and Automation, Shanghai University, Shanghai 200072, China)

Abstract: Aiming at the problem of vibration measurement technologies using non-contact optical measuring devices, a system of vibration measurement based on frequency-domain optical coherence tomography (OCT) was investigated, which vibration signals measured by recording the change of displacement with time. It was found that the blurring of interference fringes collected by spectrometer was related to the instantaneous velocity of detected, the maximum frequency which is measurable by the system was increased with the decrease of exposure time of the CCD camera. A signal generated by vibration exciter driven of a function signal generator was tested. The results indicate that the OCT is an effective optical non-contact measuring technology for the vibration measurement, it has great potential applications in the vibration-based structural health monitoring.

Key words: optical coherence tomography (OCT); vibration measurement; exposure time; structural health monitoring

0 引言

机械振动测量是解决工程振动问题的有效手段,一直是结构健康监测、微机电系统、旋转机械、听觉和

声学等领域的研究热点。传统的振动测量主要为机械式振动测量方法,该方法运用各种传感器,将机械振动转换成电压或电流的变化,再对电压或电流进行实时测量记录,以实现振动的测量,通过对振动信号进行特征提取,实现对结构缺陷的检测^[1]。

收稿日期:2018-12-31

基金项目:国家自然科学基金资助项目(51675103);机械系统与振动国家重点实验室开放项目(MSV-2018-07);上海市自然科学基金资助项目(18ZR1414200);福建省质量技术监督局科技项目(FJQI2016050, FJQI2017021, FJQI2012028)

作者简介:黄跃鑫(1990-),男,福建漳州人,硕士研究生,主要从事无损检测及仪器方面的研究。E-mail:599069594@qq.com

通信联系人:钟舜聪,男,教授,博士生导师。E-mail:zhongshuncong@hotmail.com

相比于传统振动测量方法,光学非接触式的测量方法更加适用于热变形检测、旋转结构振动测量等领域。目前已有的光学非接触式检测方法包括激光外差干涉仪^[2]、激光多普勒振动位移计^[3]、光学相干层析成像系统^[4]等。激光多普勒振动测量方法等对光源的单色性及系统的稳定性要求较高。相比而言,光学相干层析技术可以使用宽带光源,并且具有低成本、体积小等优点。光学相干层析技术早期主要用于眼科^[5-6]及其他医学领域^[7-9],能够非侵入式地对活体器官组织的内部微观结构进行高分辨率成像。随着技术的进步,光学相干层析技术逐渐应用到工业领域^[10-12],对于薄膜涂层的检测具有很好效果。光学相干层析系统可以分为时域系统和频域系统^[13]。

基于频域光学相干层析技术的振动测量方法,本研究将对振动测量过程中出现的干涉条纹模糊现象进行分析论证。

1 系统结构与原理

光学相干层析系统基于迈克尔逊干涉结构搭建,干涉结构可分为两种:自由空间结构、光纤结构。自由空间结构的系统复杂度较高,需要仔细调整光路以保证光路的垂直性,但不存在光纤结构的高色散特性^[14-15]。

基于自由空间结构搭建的频域光学相干层析系统如图 1 所示。

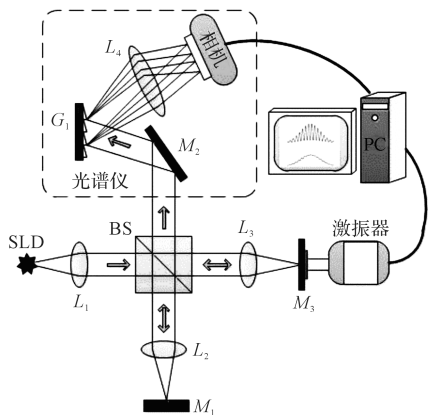


图 1 自由空间型频域光学相干层析系统

该系统采用超辐射发光二极管(SLD)作为光源,光源的中心波长为 850 nm,带宽为 105 nm,空间的相干长度为 3.2 μm 。光源发出的宽带弱相干光经透镜 L_1 准直后成平行光,经过 50×50 的分束器 BS 分光成等光强的参考光束和样品光束,分别照射至参考镜 M_1 和粘贴在激振器头部的反射镜 M_3 后返回,返回的两束光束再次经过分束器 BS 耦合后一起被后续的光谱仪系统接收。光谱仪采用刻线光栅 G_1 分光,平行入射

的光束照射至光栅表面后,不同波长的光分量会以不同的角度反射,在聚焦透镜 L_4 的作用下被二维面阵 CCD 相机接收,最终得到依波长分布的光谱信号。当参考臂的光束和样品臂的光束两者的光程相近的时候,两束光发生干涉,耦合光的光强随着波长出现强弱变化,即耦合光束的光谱出现干涉条纹,而且干涉条纹的疏密程度与参考光和样品光得两者光程差成正比。该系统能够精确测量激振器头部反射镜表面的位移变化,同时记录测量时间,从而实现振动测量。

传统的光学相干层析系统通过对干涉条纹信号进行快速傅里叶变换来获取被测物体的空间位置信息。由于计算机只能实现有限样本的运算,快速傅里叶变换也只能在有限的区间内进行,这就不可避免地存在由于时域截断产生的能量泄露问题,时域截断导致了频域的离散,离散频谱的幅值、相位和频率都可能产生较大的误差^[16],因此,传统光学相干层析系统的空间分辨率通常只有几微米。

本文采用频谱校正理论对干涉条纹信号进行校正,能够得到纳米级的空间分辨率^[17],从而实现高精度的振动测量。

2 高频振动测量实验与分析

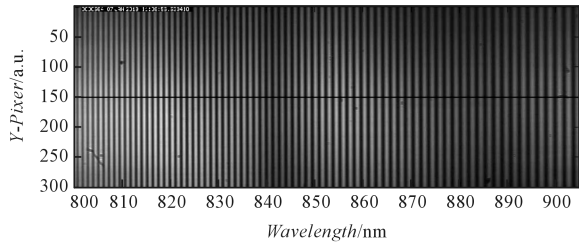
笔者利用本研究搭建的频域光学相干层析系统进行高频振动测量。激振器产生的正弦振动信号频率为 40 Hz,振幅为 0.4 mm,CCD 相机的曝光时间设置为 50 μs ,帧率为 6 000 fps。

实验结果发现,对于同一振动信号,在某些时刻能保持清晰的干涉条纹图像,在其他时刻变得模糊不清。干涉条纹图像如图 2 所示。

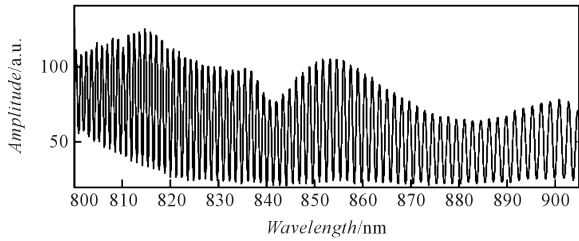
二维面阵 CCD 相机采集到的干涉条纹图像如图 2(a, c) 所示。其中:纵坐标即 CCD 相机的 Y 轴;横坐标是 CCD 相机的 X 轴经变换后得到的波长^[18]。图 2(a, c) 中第 150 行的曲线图如图 2(b, d) 所示。纵坐标为光强的相对值。

针对干涉条纹出现模糊现象的原因,本研究给出的分析结果是:CCD 相机采集到的干涉条纹图像是感光元件在曝光时间内所有干涉图像的积分结果,对于低频低振幅振动,在曝光时间内振动体的位移改变量很小,干涉条纹图像几乎一致,积分的结果条纹清晰;对于高频高振幅振动,在曝光时间内振动体的位移改变量大,干涉条纹的图像包含各种相位状态,积分的结果使得条纹变得模糊。

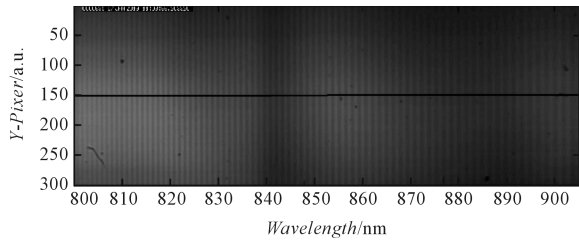
对于本研究搭建的频域光学相干层析系统,当激振器头部的被测反射镜静止时,光谱仪采集到的光谱



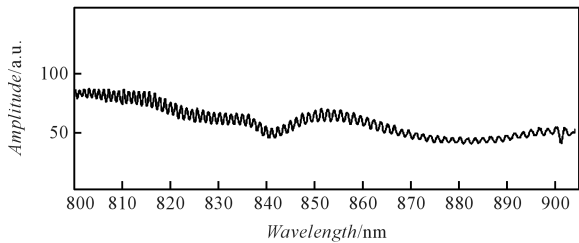
(a) 清晰的干涉条纹图像



(b) 清晰干涉条纹光谱图



(c) 模糊的干涉条纹图像



(d) 模糊干涉条纹光谱图

图2 干涉条纹图像

信号可以简单表示为:

$$E_{(\lambda)} = G_{(\lambda)} * \left[I_r + I_s + \sum 2 \sqrt{I_r} * I_s \cos \left(2 * \frac{2\pi}{\lambda} * S \right) \right] \quad (1)$$

式中: $G_{(\lambda)}$ —光源的功率谱密度函数; I_r —参考光的光强; I_s —样品光的光强; S —被测反射镜表面相对参考镜的光程差。

当激振器产生振动时, S 将随时间变化,因此,光谱仪在 CCD 相机曝光时间内采集到的光谱信号可以表示为:

$$E_{(\lambda)} = G_{(\lambda)} \int_{t_1}^{t_2} \left(I_r + I_s + 2 \sqrt{I_r} I_s \cos \left(\frac{4\pi}{\lambda} (s(t_1) + v(t) * t) \right) \right) dt = G_{(\lambda)} (I_r + I_s) (t_2 - t_1) + G_{(\lambda)} * 2 \sqrt{I_r} I_s * \frac{\lambda}{4\pi v(t)} * \left[\sin \left(\frac{4\pi}{\lambda} (s(t_1) + v(t)t_2) \right) - \sin \left(\frac{4\pi}{\lambda} (s(t_1) + v(t)t_1) \right) \right] \quad (2)$$

式中: t_1 —CCD 相机曝光起始时间; t_2 —CCD 相机曝光终止时间; $s(t_1)$ —曝光起始时刻被测反射镜表面相对光程零点的位置差; $v(t)$ —振动的速度时间函数。

从式(2)可以看出:干涉结果受振动速率影响。

假设速度为 0 时,干涉条纹强度为 1,则干涉条纹强度与速度的关系如图 3 所示。

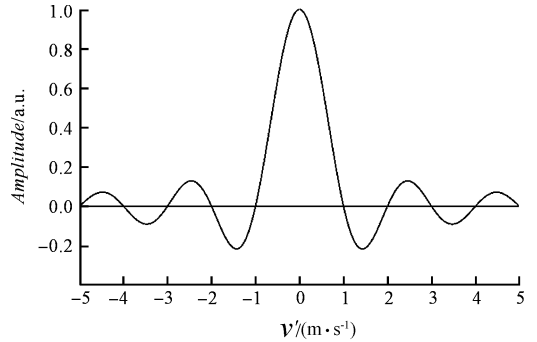


图3 干涉条纹强度与速度的关系

图 3 中,横坐标 v' 定义为模糊速度,满足如下关系:

$$v' < \frac{\lambda_0}{2(t_2 - t_1)} \quad (3)$$

式中: λ_0 —光源的中心波长。

当中心波长为 850 nm,CCD 相机的曝光时间为 50 μ s 时,模糊速度 v' 为 0.008 5 m/s。当振动体的瞬时速度等于模糊速度 v' 时,干涉强度为 0,光谱仪采集到的干涉图像混叠,无法识别条纹,此时并无法识别振动体的位置信息。因此,为了保证测量结果的准确性,进行振动体振动测量时,需保证振动体的瞬时速度小于模糊速度 v' ,可测量的最大速度由相机的曝光时间决定。

振动的瞬时速度由振动频率和幅值决定。以正弦振动为例,有:

$$s(t) = \alpha \sin(2\pi f t + \theta) \quad (4)$$

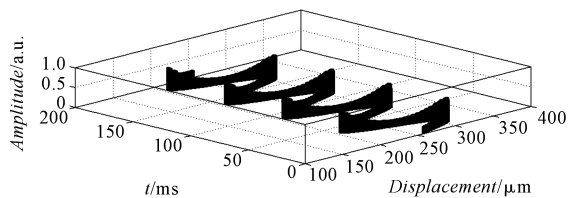
式中: $s(t)$ —振动的位移时间函数; α —振动幅值; f —振动频率; θ —初始相位。

对式(4)求导,可得振动的速度函数,再根据式(3)可得本研究搭建的系统可测的最大振动频率满足以下关系:

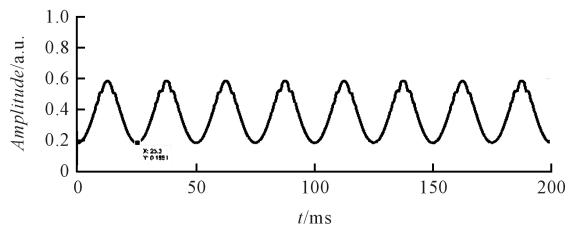
$$f < \frac{\lambda_0}{4\pi\alpha(t_2 - t_1)} \quad (5)$$

当 CCD 相机曝光时间为 50 μ s,中心波长为 860 nm,正弦振动的振幅为 50 μ m 时,根据式(5)可得出避免出现干涉条纹模糊的最大可测振动频率为 27.37 Hz。根据上述参数,对不同频率的正弦振动信号进行模拟。

20 Hz 正弦振动信号的干涉条纹信号模拟结果如图 4 所示。



(a) 干涉强度按时间和空间位置的三维展开图

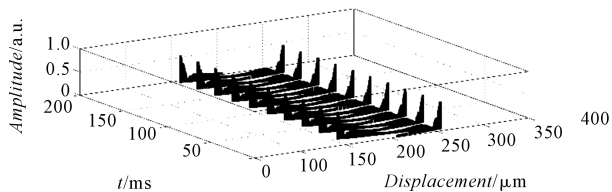


(b) 干涉强度在时间上的展开图

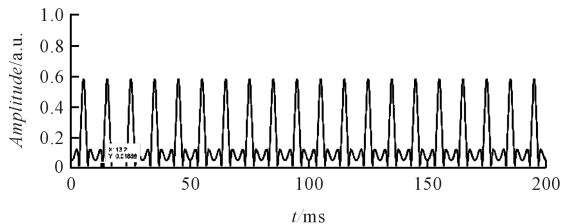
图 4 20 Hz 正弦振动信号的干涉条纹信号模拟结果

从图 4 中可以看出:对于频率为 20 Hz 的正弦振动信号,虽然干涉强度在不同的时间位置有波动,但是最小值依然有 0.186 1,代表干涉条纹依然清晰可以识别。

50 Hz 正弦振动信号的干涉条纹信号模拟结果如图 5 所示。



(a) 干涉强度按时间和空间位置的三维展开图



(b) 干涉强度在时间上的展开图

图 5 50 Hz 正弦振动信号的干涉条纹信号模拟结果

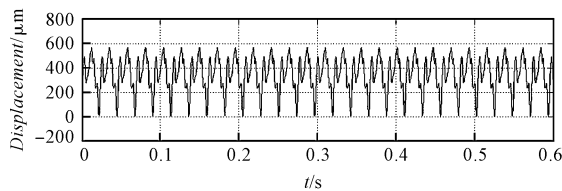
从图 5 中可以看出:对于频率为 50 Hz 的正弦振动信号,在部分时间的干涉强度可以保持很好,但是最小的干涉强度只有 0.018,与最大的干涉强度相差甚大,代表此时的干涉条纹非常模糊,通过计算可得该时刻的振动瞬时速度刚好对应一倍模糊速度 v' 。

3 实际振动信号测量实验

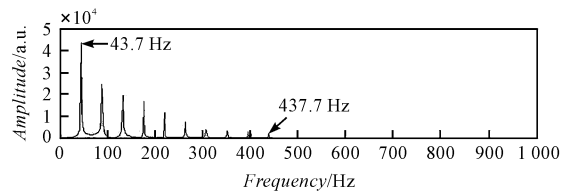
笔者利用所搭建的频域光学相干层析系统,对实际振动信号进行测量。

利用函数信号发生器自动生成一组 10 次谐波信

号驱动激振器振动, CCD 相机的曝光时间设置为 4 μ s,测量结果如图 6 所示。



(a) 位移/时间测量结果



(b) 傅里叶变换结果

图 6 多频振动测量结果

在测得的激振器振动头的表面位置与时间的关系图中,在 0.6 s 时间内,位移结果保持了严格的周期性,说明了系统测量的准确度高、稳定性好;对该位移信号进行时间积分求频率成分,从该振动信号的频率成分图中可以看出,该频率确实由 10 个频率成分组成,一次谐波频率为 43.7 Hz,最高谐波成分频率值为 437.7 Hz。

实验结果表明:该系统能精准地记录下振动体在每个时刻的位置,经信号处理后,可以得到振动体的振动频率,可用于工程实践的检测。

4 结束语

基于频域光学相干层析技术,本研究搭建了一套振动测量系统,该系统能够提供高精度的位移测量,同时记录测量时间即可实现有效的振动测量;对实验过程中发现的干涉条纹模糊现象进行了分析论证,结果表明该系统可测量的最大振动频率和 CCD 相机的曝光时间相关,曝光时间越短,可测量的振动频率越大。

实验结果表明:本研究搭建的频域光学相干层析振动测量系统能够很好地实现光学非接触式振动测量。

参考文献 (References):

[1] ZHONG S, OYADIJI S O. Sampling interval sensitivity analysis for crack detection by stationary wavelet transform [J]. *Structural Control & Health Monitoring*, 2013, 20 (1):45-69.

- [2] KOKKONEN K, KAIVOLA M. Scanning heterodyne laser interferometer for phase-sensitive absolute-amplitude measurements of surface vibrations [J]. **Applied Physics Letters**, 2008, 92(6):372.
- [3] DAUKŠEVIČIUS R, BUBULIS A, JURĖNAS V, et al. Investigation of dynamics of cantilever-type microstructure by laser Doppler vibrometry [J]. **Ultragarsas "Ultrasound"**, 2004, 52(3):29-32.
- [4] ZHONG S, ZHANG Q. Enhanced optical coherence vibration tomography for subnanoscale-displacement-resolution calibration of piezoelectric actuators [J]. **Sensors and Actuators A: Physical**, 2015(233):42-46.
- [5] 史国华, 丁志华, 戴云, 等. 光纤型光学相干层析技术系统的眼科成像 [J]. **中国激光**, 2008, 35(9):1429-1431.
- [6] RASHNO A, KOOZEKANANI D D, DRAYNA P M, et al. Fully automated segmentation of fluid/cyst regions in optical coherence tomography images with diabetic macular edema using neutrosophic sets and graph algorithms [J]. **IEEE Transactions on Biomedical Engineering**, 2018, 65(5):989-1001.
- [7] FREITAS A Z, ZECELL D M, VIEIRA N D, et al. Imaging carious human dental tissue with optical coherence tomography [J]. **Journal of Applied Physics**, 2006, 99(2):024906.
- [8] WELZEL J, REINHARDT C, LANKENAU E, et al. Changes in function and morphology of normal human skin: evaluation using optical coherence tomography [J]. **British Journal of Dermatology**, 2004, 150(2):220-225.
- [9] 陈炜, 薛平. 光学相干层析成像技术的医学诊断应用 [J]. **光子学报**, 1999, 28(11):970-973.
- [10] OH J T, KIM S W. Polarization-sensitive optical coherence tomography for photoelasticity testing of glass/epoxy composites [J]. **Optics Express**, 2003, 11(14):1669-1676.
- [11] JUUTI M, TUONONEN H, PRYKRI T, et al. Optical and terahertz measurement techniques for flat-faced pharmaceutical tablets: a case study of gloss, surface roughness and bulk properties of starch acetate tablets [J]. **Measurement Science and Technology**, 2008, 20(1):015301.
- [12] WILLIAMS B M, ATKINSON D, ZHANG J, et al. Non-destructive analysis of flake properties in automotive paints with full-field optical coherence tomography and 3D segmentation [J]. **Optics Express**, 2017, 25(16):18614.
- [13] FERCHER A F. Optical coherence tomography-development, principles, applications [J]. **Zeitschrift Für Medizinische Physik**, 2010, 20(4):251-276.
- [14] 罗曼婷, 游腾飞, 张秋坤, 等. 基于平稳小波变换的时域光学相干层析系统 [J]. **应用光学**, 2015, 36(4):543-549.
- [15] 俞晓峰, 丁志华, 陈宇恒, 等. 光纤型光学相干层析成像系统的研制 [J]. **光学学报**, 2006, 26(2):235-238.
- [16] 丁康, 张晓飞. 频谱校正理论的发展 [J]. **振动工程学报**, 2000, 13(1):14-32.
- [17] ZHONG J, ZHONG S, ZHANG Q, et al. Two-dimensional optical coherence tomography for real-time structural dynamical characterization [J]. **Optics & Lasers in Engineering**, 2015, 66(3):74-79.
- [18] 童俊海, 钟舜聪, 张秋坤, 等. 基于干涉条纹的光谱仪光谱标定方法研究 [J]. **机电工程**, 2017, 34(8):856-859, 905.

[编辑:李辉]

本文引用格式:

黄跃鑫, 张秋坤, 伏喜斌, 等. 基于光学相干层析的结构振动监测研究 [J]. **机电工程**, 2019, 36(7):717-721.HUANG Yue-xin, ZHANG Qiu-kun, FU Xi-bin, et al. Structural vibration monitoring based on optical coherence tomography [J]. **Journal of Mechanical & Electrical Engineering**, 2019, 36(7):717-721.《机电工程》杂志: <http://www.meem.com.cn>