

高频振动外差激光干涉仪研究

Research of Heterodyne Interferometer of High-frequency Vibration

左爱斌/ZUO Ai-bin, 于梅/YU Mei, 马明德/MA Ming-de, 杨丽峰/YANG Li-feng, 刘爱东/LIU Ai-dong

中国计量科学研究院, 北京 100013

National Institute of Metrology, Beijing 100013, China

[摘要] 光外差激光干涉测量技术具有非接触、超高灵敏度的优点, 用于微小振动的测量有独特的优势。采用外差激光干涉技术, 结合正交正弦逼近法, 在国家高频基准振动台上实现了纳米级的振动位移和相位测量。

[关键词] 外差干涉仪; 正弦逼近法; 振动测量; 相位移

[中图分类号] TN248, TH744

[文献标识码] A

[文章编号] 1000-7857(2006)11-0013-02

Abstract: Based on the non-contact and super-sensitivity of the heterodyne interfere technique, and its particular advantage at minuteness vibration test, we set up a heterodyne interferometer and use the sine-approximate method, and got the nanometer level displacement and phase shift measurement of high-frequency vibration at the national standard device.

Key Words: heterodyne interferometer; sine-approximate method; vibration measurement; phase shift

CLC Numbers: TN248, TH744

Document Code: A

Article ID: 1000-7857(2006)11-0013-02

1 前言

随着科学进步和社会的发展, 对机械振动测量的要求也不断提高, 主要体现在振动频率范围的拓宽和测量精度的提高两个方面, 同时对于测量振动的加速度、速度和位移传感器及测量仪的绝对校准的要求也越来越高。因此, 世界各国计量和工程测试方面的单位和专家都加大了这方面的研究。振动测量最简单的方法是条纹计数法, 一般用氦-氖激光作双光束干涉仪的光源, 即当两束光的光程差变化 $1/2$ 个波长时, 能产生一个振动干涉条纹, 这样计数器进行条纹计数就能测量出振动的位移, 但这种方法能够测量的分辨率还不够高, 经光路或计数方案改进后, 也只能分辨出几十纳米的位移。在高频振动的情况下, 由于振动的频率高, 幅值非常小, 常常需要测量到纳米量级, 所以条纹计数法在高频振动测量中不宜采用。外差干涉测量最显著的特点是利用载波技术, 将被测物理量的信息转换成调频或者调相信号, 具有抗干扰能力强、测量速度快、信噪比高、易于实现高分辨率测量等特点, 得到了很大的发展, 用于微小振动的测量有独特的优势^[1-6]。

2 高频振动测量的一般方法

之前, 高频振动测量一般采用贝塞尔函数法, 贝塞尔函数法使用的干涉仪与普通条纹计数法的干涉仪相同。使用频率分析仪测量光电信号中与振动频率的基波或某次谐波的幅值, 就能得到正比于以振动位移为变量的各阶贝塞尔函数值的指示。在某些特殊的位移值, 贝塞尔函数值为零, 利用这一性质可以测量振动的位移, 该方法有 J_0 零值法、 J_1 零值法、 J_1 最大值法、 J_1/J_2 法及 J_1/J_3 法等。其中又由于一阶贝塞尔函数值较大、信噪比好, 国际标准中列入了一阶贝塞尔函数零值法(即 J_1 零值法)。由于贝塞尔函数值为零的值是一系列间断不连续的点, 所以测量的位移也是不连续的, 上述前 2 种方法只能测量一定大小的振幅, 后 3 种方法也只能测量一定范围内的振幅, 且都只能测量振动加速度计灵敏度的幅值, 而不能测量灵敏度的相移。目前只有采用 ISO16063-11 “激光干涉绝对法振动校准”推荐的正弦逼近法校准技术, 才能实现 1 Hz~10 kHz 宽频带范围内振动传感器幅频和相频特性的绝对测量, 该测量技术运用虚拟仪器技术和功能强大的信号处理软件, 集成化和自动化程度高^[7-9]。

收稿日期: 2006-09-11

作者简介: 左爱斌, 男, 北京市北三环东路 18 号中国计量科学研究院, 工程师, 主要从事力学计量和激光技术的研究;

E-mail: zuoab@nim.ac.cn

Vienna: Austria, 1991(323).

[2] ICRU. International Commission on Radiological Units and Measurements, ICRU report 53[R]. Bethesda, Maryland: U.S.A.

[3] SANDERSON D C, CRESSWELL A J, et al. An airborne gamma-ray spectrometry survey of nuclear sites in Belgium [J]. Journal of Environmental Radioactivity, 2004, 72(1-2): 213-224.

[4] GUILLOT L. Extraction of full abstraction

peaks in airborne gamma-spectrometry by filtering techniques coupled with a study of the derivatives Comparison with the window method[J]. Journal of Environmental Radioactivity, 2001, 53(3): 381-398.

[5] ALLYSON J D, SANDERSON D C W. Monte carlo simulation of environmental airborne gamma-spectrometry[J]. Journal of Environmental Radioactivity, 1998, 38(3): 259-282.

[6] 王南萍, 熊盛青, 周锡华, 等. 航空伽玛能谱仪对 ^{137}Cs 点源响应特征及全谱数据的提取技术[J]. 核技术, 2005, 28(4): 313-318.

[7] 中国地球物理学会. 中国地球物理学会年刊 2002[C]. 北京: 地震出版社, 2002: 190.

[8] DUBOIS G, DE CORT M. Mapping ^{137}Cs deposition: data validation methods and data interpretation [J]. Journal of Environmental Radioactivity, 2001, 53(3): 271-289. (责任编辑 胡春华)

3 外差正弦逼近法高频振动实验装置

外差正弦逼近法采用两路正交的信号,能够同时测量出振动的灵敏度和相移,它分为零差正弦逼近法和外差正弦逼近法2种,其中零差正弦逼近法主要用于中低频振动的测量。根据中国计量院的实验,其测量频率在800 Hz以内比较理想。外差正弦逼近法主要用于高频测量,高频振动测量系统的原理框图如图1。

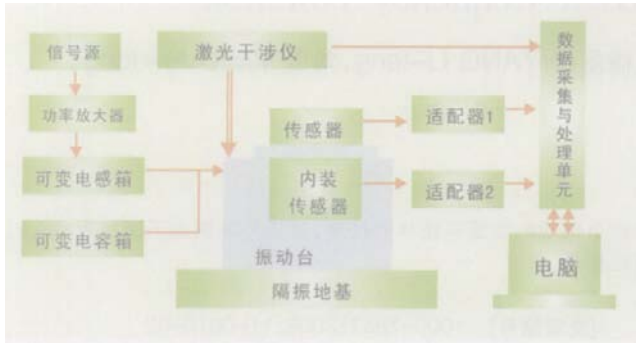


图1 高频振动测量系统的原理框图

Fig. 1 Operating principle of vibration measurement

其中可变电感和电容箱是为了与压电振动台的阻抗进行匹配,信号发生器产生的正弦信号经功率放大器后驱动振动台,安装在振动台面上的传感器将此信号感应并经信号调理器放大转换成电压信号,送入到数据采集卡中,激光干涉仪产生的光信号经振动台面反射后,被光电接收器接收后放大,最后也送入数据采集卡中。计算机将采集到的两路信号经一系列相关数据处理后,能够实时地在屏上显示振动台及传感器的振动波形,同时也将计算出加速度计灵敏度的幅值和相移。

4 外差测量原理及激光干涉仪的系统组成

外差干涉技术就是使用2束频率略有差别的光进行干涉,2束频率不同的干涉光用复数形式表示为:

$$V_1(x, y) = a_1(x, y) \exp[i(\omega_1 t + \phi_1(x, y))] \quad (1)$$

$$V_2(x, y) = a_2(x, y) \exp[i(\omega_2 t + \phi_2(x, y))] \quad (2)$$

那么,干涉场的光强

$$I_1(x, y) = (V_1 + V_2)(V_1 + V_2)^* \\ = a_1^2(x, y) + a_2^2(x, y) + 2a_1(x, y)a_2(x, y)\cos[\Delta\omega t + \Delta\phi(x, y)] \quad (3)$$

其中 $\Delta\omega = \omega_1 - \omega_2$ 是2束光的频率差,即拍频; $\Delta\phi = \phi_1 - \phi_2$ 是待测相位,含有待测位移信息。

光电检测器D检测到的激光调制信号可以表示为:

$$u(t) = \hat{u} \cos \varphi_{\text{Mod}}(t) \quad (4)$$

其中, u 为输出电信号, $\hat{u}$ 是它的幅值。

干涉信号的调相值为:

$$\varphi_{\text{Mod}} = \varphi_M(t) + \varphi_0(t) + \varphi_C(t) \quad (5)$$

其中, φ_M 是与被测振动量成比例的相位调制项, φ_0 是光电检测器信号的初相位, φ_C 是外差式激光干涉仪频移所产生的附加相位。

根据外差干涉的原理,我们研制了马赫-泽德式外差式激光干涉仪,如图2。

其中双线箭头代表光路信号通道,单线箭头代表电信号通道。光源为0.63282 μm波长的稳频氦-氖激光器(He-Ne Laser)。激光器发出的光束经1/2波片P1后,经偏振分光镜PBS1后被分离为测量光束和参考光束。参考光束经过反射镜M1,由布拉格盒BC(Bragg cell)进行声光调制后,经反射镜M2,射向偏振分光镜PBS2。测量光束经过偏振分光镜PBS1、PBS2、1/4波片P2后,经组合透镜L聚焦后,照射在运动物体DUT表面后被反射回来,在

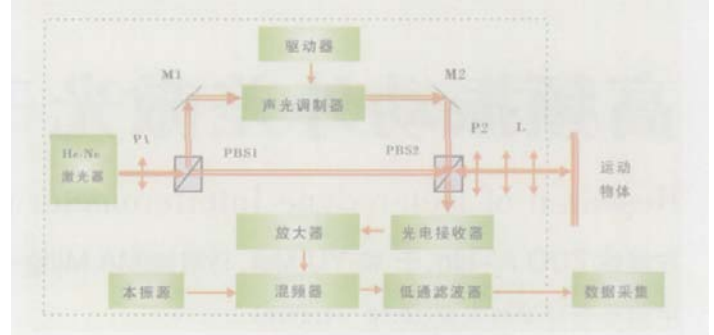


图2 外差式激光干涉仪示意图

Fig. 2 Schematic diagram of heterodyne interferometer

分光镜PBS2与参考光束发生干涉,并由光电检测器D完成干涉信号的接收和检测放大,进入混频器MIX,与本振信号LO进行混频,最后经滤波器LP进行低通滤波后送入到数据采集卡DAQ。

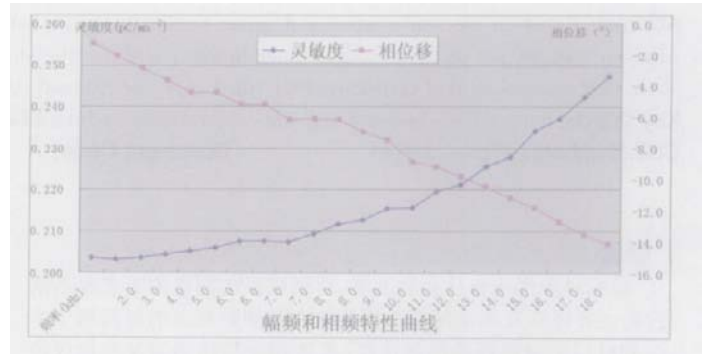


图3 加速度计幅频和相频特性测量曲线

Fig. 3 Experimental curve of accelerometer sensitivity

5 实验数据与结论

系统组建以后,我们将传感器2270M8安装在压电高频振动台上,并使用型号B&K 2635作为适配器进行测量,在2~20 kHz的频率范围内振动实验,得到的实验数据曲线如图3。

经过大量的理论分析和实验测试,我们认为,所研制的外差激光干涉仪能够满足高频振动测量的需要,在相当宽的频率和位移范围内,能够实现加速度计灵敏度的幅值和相移测量。

参考文献(References)

- [1] ISO16063-11 Methods for the calibration of vibration and shock transducers. Part 11: Primary vibration calibration by laser interferometry (third edition) [S]. 1999.
- [2] MONCHALIN J P, AUSSEL J D. Laser ultrasonic development towards industry applications [J]. IEEE ultrasonic Symposium, 1988, 90: 1044-1043.
- [3] 汤俊雄, 万炼. 微振动振幅的测量[J]. 光学学报, 1989, 9(12): 1092-1097.
- [4] 赵洋, 周挺, 李达成. 外差干涉仪中声光调制器特性对测量精度的影响[J]. 光学学报, 1999, 19(10): 1368-1374.
- [5] 郭广平. 光外差纳米技术及其在光测力学中的应用研究 [D]. 天津大学博士学位论文, 1996.
- [6] 王仕康, 沈熊. 激光多普勒技术 [M]. 北京: 清华大学出版社, 1985.
- [7] MARTENS H.-J. V. Traceability of vibration and shock measurements by laser interferometry [J]. Measurement, 2000, 28: 3-20.
- [8] 于梅, 等. 正弦逼近法振动传感器幅相特性测量技术的研究[J]. 计量学报, 2004, 25(4): 34-38.
- [9] 孙桥, 等. 振动幅相特性测量中正弦逼近法的软件实现及研究[J]. 中国计量, 2004 (3): 73-74.

(责任编辑 胡春华)