

【自动化技术】

低频光纤 Bragg 光栅加速度传感器实验

杨光, 黄俊斌, 顾宏灿, 孙金卫, 李硕

(海军工程大学 兵器工程系 新概念武器研究室, 武汉 430033)

摘要:对低频光纤 Bragg 光栅加速度传感器的原理进行了分析,对一种基于悬臂梁结构的、4元低频光纤 Bragg 光栅加速度传感器阵列的加速度灵敏度、线性度以及动态范围等性能参数进行了实验研究。结果表明:这种低频光纤 Bragg 光栅加速度传感器在实际应用中是可行的,其灵敏度较高,线性度良好,动态范围为 88 ~ 137 dB,在 50 ~ 200 Hz 频率范围内具有较平坦的灵敏度频响曲线,但在 200 Hz 以上出现谐振,光纤光栅加速度传感器的频率特性有待于进一步的改进。

关键词:加速度传感器;光纤 Bragg 光栅;低频

中图分类号:TP212.1

文献标识码:A

文章编号:1006-0707(2011)07-0099-03

随着振动测试技术的发展和高精度测试的需要,研制高性能的振动传感器势在必行。光纤传感技术的出现,给传感器的发展带来了前所未有的生命力。国内外研制了多种光纤振动加速度传感器^[1]。李国利等^[2]直接将光纤光栅与质量块竖向相连,通过振子的上下振动使光纤光栅产生应变。该传感器具有较高的测量灵敏度和分辨率,但是光纤光栅很容易损坏。王广龙等^[3]设计了一种新型差动式光纤 Bragg 光栅加速度计。该加速度计可以进行温度自补偿,理论和有限元仿真分析表明该加速度计灵敏度可达到 52.7 pm/g,固有频率为 250 Hz。2005 年清华大学的曾楠^[4]采用了一种等腰三角形单悬臂梁结构的传感装置,消除了矩形悬臂梁结构,完成了对加速度信号的测量。同年,长安大学的王建华等^[5]采取了一种矩形双悬臂梁结构弥补了单悬臂梁结构抗扭特性差的缺点,实现了对加速度信号的测量。专利号为 200510019733 的中国专利“可调谐匹配滤波解调的光纤光栅振动传感器”将光纤光栅直接粘贴在悬臂梁上,光纤光栅得到很好的保护^[6]。2009 年同济大学的沈洋和孙利民^[7]设计了一种新型的高灵敏度温度自补偿型光纤光栅加速度传感器,通过参数优化,在保证量程和量测频率范围的前提下使灵敏度达到了 240 Pm/ms⁻²。光纤光栅加速度传感器与传统加速度传感器相比,不但能抗电磁干扰,而且体积小、质量轻、动态范围宽、精度高、能在恶劣环境下工作^[8],因此受到极大重视。光纤光栅传感技术是在光纤传感技术的基础上发展起来的。近几年,光纤光栅加速度传感器也成为了一个研究热点。

1 光纤 Bragg 光栅加速度传感器原理

光纤 Bragg 光栅(fiber Bragg grating, FBG)传感技术^[9]是通过在光纤内部写入的光栅反射或透射 Bragg 波长光谱的检测,实现被测结构的应变和温度量值的绝对测量。光纤

Bragg 光栅加速度传感器^[10]是利用光栅的波长调制原理,即利用外界的微扰振动来改变光栅的栅距,再转化为对应的波长变化量,通过检测波长的变化来测量加速度的大小。结构^[11]如图 1 所示,光纤光栅两端直接固定在外壳上,避免了栅区粘贴带来的光纤光栅反射波啁啾或多峰现象,其中 c 为该系统的阻尼。

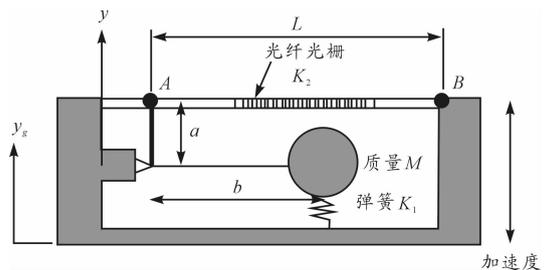


图 1 光纤 Bragg 光栅加速度传感器原理

该系统的运动都可看作弹簧(k) - 阻尼(c) - 质量块(m)的单自由度系统,系统的动力学方程为^[12]

$$m\ddot{y} + c\dot{y} + ky = -m\ddot{v}_g \quad (1)$$

式中: y 为质量块和外壳的相对位移; v_g 为被测物相对地面振动的位移; $\ddot{v}_g = \ddot{v}_{g0} \sin \omega t$; k 为系统刚度, $k = (a/b)^2 k_1 + k_2$ 。

该结构动力稳态响应的振幅为

$$\rho = \frac{m\ddot{v}_{g0}}{k} D \quad (2)$$

式中 D 为动力放大系数,表达式为

$$D = [(1 - \beta^2)^2 + (2\beta\xi)^2]^{-1/2}$$

在实际工作中,为了保证加速度振动传感器能有较宽的频响范围且幅值和相位失真均较小,应要求阻尼比 ξ 选择在 0.6 ~ 0.7 之间,这样加速度传感器的上限工作频率就可取在系统无阻尼固有频率的 80% 左右,例如当 $\xi = \frac{c}{c_c} = 0.6$,

$0 < \beta = \frac{\tilde{\omega}}{\omega_0} < 0.8$ 时, $D \approx 1$ 。

这样,当加速度传感器在其工作频带内工作时,光纤光栅的应变为

$$\varepsilon = \frac{a/b}{l} \rho = \frac{a/b}{l} \cdot \frac{m}{k} \cdot \ddot{v}_{g^0} \quad (3)$$

由光纤光栅应变传感原理可知

$$\varepsilon = \frac{\Delta\lambda_B}{\lambda_B(1-P)}$$

代入(3)式整理得

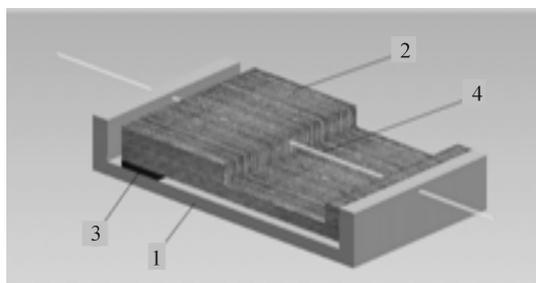
$$\Delta\lambda_B = \lambda_B(1-P) \frac{a/b}{l} \cdot \frac{m}{k} \cdot \ddot{v}_{g^0} = K \ddot{v}_{g^0} \quad (4)$$

式中: $\Delta\lambda_B$ 为波长变化; P 为光纤有效弹光系数;传感器的灵敏度系数为

$$K = \lambda_B(1-P) \cdot \frac{a/b}{l} \cdot \frac{m}{k} = \lambda_B(1-P) \cdot \frac{a/b}{l} \cdot \frac{m}{(a/b)^2 k_1 + k_2} \quad (5)$$

可见光纤光栅的波长变化与待测结构物的加速度成线性关系,这样通过测量波长变化就可实现加速度的测量^[12]。

本研究对北京理工大学江毅教授提供的4元光纤光栅加速度传感器阵列进行了实验测试。传感器采用悬梁结构,其结构示意图^[11]如图2所示,尺寸规格约为:36 mm × 20 mm × 10 mm。加速度计由1个L型刚性悬臂梁、1个集中质量块、1个弹簧和1个光纤光栅元件组成。为探测施加加速度引起的应变,Bragg光栅置于A、B两点的中心。元件粘贴在加速度计A点和B点。光纤光栅要预紧,使其始终处于一定程度的张力作用下。4元光纤Bragg光栅加速度传感器阵列实物如图3所示。通过这个结构,光纤光栅在其测量长度上总是承受均匀应变分布,在很宽的幅值范围内可保持良好的分辨率。



1. 基座;2. 悬梁;3. 弹簧;4. 光纤光栅

图2 光纤 Bragg 光栅加速度传感器结构

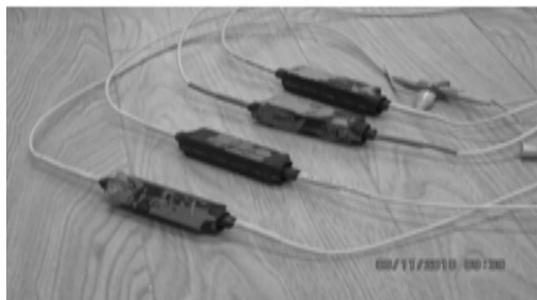


图3 光纤 Bragg 光栅加速度传感器实物

2 低频光纤 Bragg 光栅加速度传感器阵列测试

为了掌握实际制作的悬臂梁式低频光纤光栅加速度传感器的性能,以指导传感器的改进与优化,本研究测试了光纤光栅加速度传感器阵列中4元光纤光栅加速度传感器的加速度灵敏度、线性度以及动态范围。

2.1 加速度灵敏度测试

光纤光栅加速度传感器的加速度灵敏度测试原理是利用一个经校准的振动加速度计给出待测光纤光栅加速度传感器在振动台上所承受的振动加速度,读取光纤光栅加速度传感器承受加速度激励后输出的波长位移幅值,即可得到其加速度灵敏度。在测量频率范围内选择1/3倍频程频点进行测量后,即可得到该频率范围内加速度传感器的加速度灵敏度频响曲线。

实验在振动台上进行,实验系统如图4所示。笔者加工制作了加速度传感器实验夹具。实验过程中首先在2202型振动台台面安装夹具和6100型参考加速度计,再将待测光纤光栅加速度传感器固定在夹具上;在5~500Hz频率范围内选择1/3倍频的中心频率,采用一定幅值的正弦信号驱动振动台;加速度计与一台3114型电荷放大器相连,输出信号幅度通过一台TDS2024型示波器读取,记录光纤光栅加速度传感器的波长位移值;最后对加速度传感器加速度灵敏度进行计算。

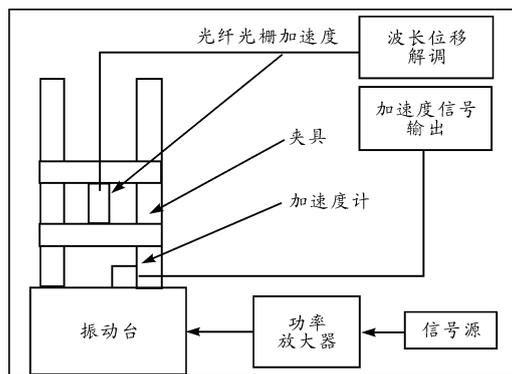


图4 加速度实验系统

实验过程中,将4元不同工作波长的光纤光栅加速度传感器串接后固定于实验夹具。图5为4元光纤光栅反射光的光电探测信号。4元光纤光栅加速度传感器的工作波长分别为1528.5、1538.6、1548.4、1561 nm。4元光纤光栅加速度传感器均正常反射,但是1528.5 nm波长的光纤光栅加速度传感器结构封装不理想,未能有效传感,所以实验中只测试了3元光纤光栅加速度传感器的加速度灵敏度频响曲线。图6为振动频率60 Hz解调仪的扫描频率为1000 Hz时的解调仪输出信号。图7为振动频率250 Hz解调仪的扫描频率为4000 Hz时的解调仪输出信号。图8为3元光纤光栅加速度传感器在5~500 Hz的加速度灵敏度曲线,其中:系列1为工作波长1538.6 nm的光纤光栅加速度传感器的响应;系列2为工作波长1548.4 nm的光纤光栅加速度传

传感器的响应;系列3为工作波长1561 nm的光纤光栅加速度传感器的响应。

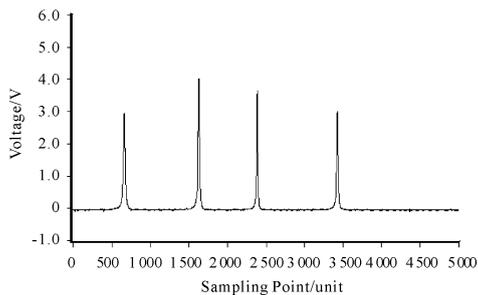


图5 4元光纤光栅加速度传感器反射光的光电探测信号

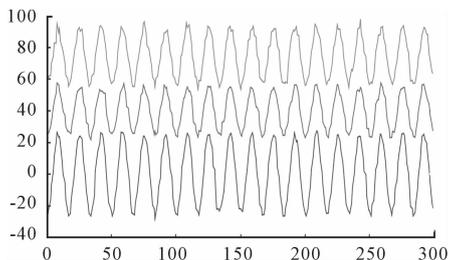


图6 振动频率60 Hz扫描频率1000 Hz时解调仪的输出信号

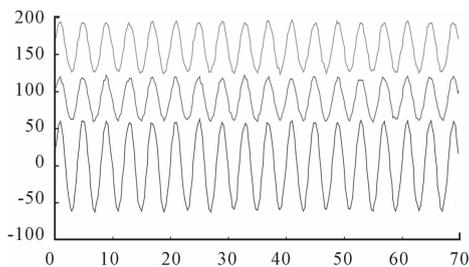


图7 振动频率250 Hz扫描频率4000 Hz时解调仪的输出信号

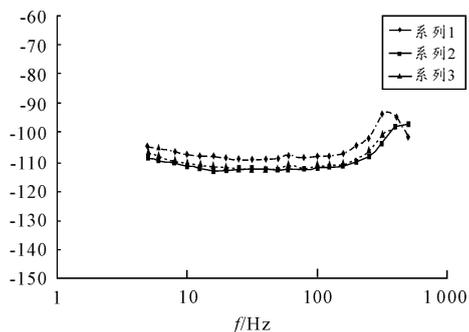


图8 光纤光栅加速度传感器的加速度灵敏度频响曲线

由图5~8可见,在200 Hz频率以下光纤光栅加速度传感器的加速度灵敏度频响曲线较平坦,但在200 Hz以上出现谐振,光纤光栅加速度传感器的频率特性有待于进一步的

改进。

2.2 线性度测试

实验系统如图4所示。将工作波长1548.4 nm的光纤光栅加速度传感器固定于实验夹具,信号发生器发出正弦激励信号,使实验夹具上下垂直振动。激励频率为50 Hz,逐步加大激励功率,并记录加速度计与光纤光栅加速度传感器的输出电压值和波长位移值。图9为线性度测试结果。

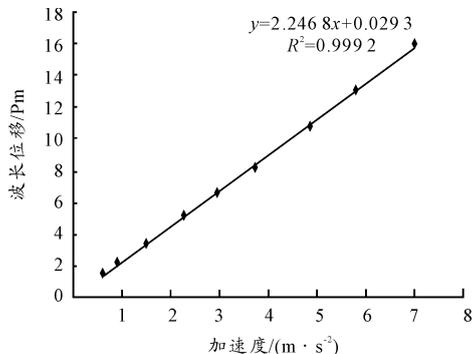


图9 光纤光栅加速度传感器线性度测试结果

由图9中可以看出,随加速度输入激励的增大,光纤光栅加速度传感器响应也随之增大,由于振动台功率的限制,实验中光纤光栅加速度传感器最大输出只能达到15.97 pm,测试中光纤光栅加速度传感器响应无失真,线性度为0.9992。

2.3 动态范围测试

记录工作波长1548.4 nm的光纤光栅加速度传感器无信号激励时系统的输出,实验时间为22 h左右,环境干扰较小。关闭振动台的驱动,在0~500 Hz频带范围内测得输出信号的噪声谱密度级如图10所示。

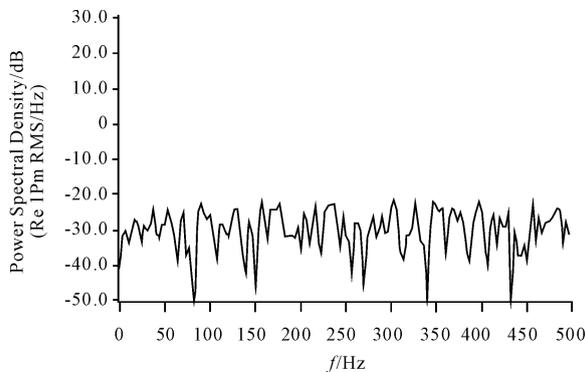


图10 光纤光栅加速度传感器噪声谱密度级

根据图8,在50 Hz频点,光纤光栅加速度传感器的噪声级低于-25 dB(参考值 $1\text{Pm}/\sqrt{\text{Hz}}$)。工作波长1548.4nm的光纤光栅加速度传感器50Hz频点的灵敏度为-113 dB(参考值 $1\text{Pm}/\mu\text{ms}^{-2}$),则在50 Hz频点,光纤光栅加速度传感器系统的最小可测加速度为88 dB(参考值 $1\mu\text{ms}^{-2}/\sqrt{\text{Hz}}$)。在线性度测试中,50 Hz单频点光纤光栅加速度传感器的无失真响应达到15.97 Pm,即24 dB(参考值1Pm),对应的加速度为137 dB(参考值 $1\mu\text{ms}^{-2}/\sqrt{\text{Hz}}$), (下转第114页)