

文章编号 1004-924X(2015)11-3069-08

双 Fabry-Perot 干涉腔型光纤声发射传感器

赵江海^{1,2*}, 章小建²

(1. 中国科学院 合肥物质科学研究院 先进制造技术研究所, 江苏 常州 213164;

2. 常州先进制造技术研究所, 江苏 常州 213164)

摘要:设计了一种新型的双 Fabry-Perot 腔光纤传感器用于材料损伤引起的声发射信号检测。基于低细度 Fabry-Perot 腔多光束干涉原理,建立了光纤 Fabry-Perot 传感器检测声发射信号的数学模型。分析双 Fabry-Perot 腔正交点稳定工作机制,设计并制作了具有双 Fabry-Perot 腔结构的光纤声发射传感器来保持传感器正交点的稳定性。通过模拟 AE 信号检测与热应力干扰实验对设计的传感器进行了实验验证。实验一通过冲击振动与折断铅笔芯产生两类模拟声发射信号,使用商用的压电传感器和光纤传感器进行对比实验,结果表明光纤传感器能够成功检测到两类模拟声发射信号,灵敏度为 12.9 nm,带宽达到 30 kHz。实验二对传感器进行工作点稳定测试,结果表明双 F-P 腔的控制机制能够保证传感器工作在正交点,解决了传感器输出信号衰减的问题。

关键词:声发射;光纤传感器;双 Fabry-Perot 腔;正交点;材料损伤检测

中图分类号:TN253 **文献标识码:**A **doi:**10.3788/OPE.20152311.3069

Fiber-optic acoustic emission sensors with dual Fabry-Perot interferometric cavities

ZHAO Jiang-hai^{1,2*}, ZHANG Xiao-jian²

(1. *Institute of Advanced Manufacturing Technology, Hefei Institute of Physical Science, Chinese Academy of Sciences, Changzhou 213164, China;*

2. *Changzhou Institute of Advanced Manufacturing, Changzhou 213164, China*)

* *Corresponding author, E-mail: jhzhao@iamt.ac.cn*

Abstract: A novel fiber-optic sensor with dual Fabry-Perot (F-P) cavities was reported to detect the Acoustic Emission (AE) signals induced by the damage in composite and metal materials. A sensing model for detecting the AE signals of the fiber-optic sensor was established based on the multi-beam interference principle of the low finesse F-P cavity. The operating mechanism for stabilizing the quadrature-point of the dual F-P cavity sensor was analyzed, and then the fiber-optic sensor with a dual F-P probes was designed and manufactured to maintain the stability of the quadrature-point. The operating performance of the designed sensor was verified by two types of experiments on simulating AE signal detection and thermal stress interference experiments. In the first experiment, two kinds of AE signals were generated by shock vibration and breaking pencil leads and they were detected and compared with a piezoelectric sensor and a optical fiber sensor. The test results show that the optical sensor successfully measures the simulated two kinds of AE signals and it possesses a sensitivity of

收稿日期:2015-07-24;修订日期:2015-09-06.

基金项目:国家自然科学基金资助项目(No. 50905176)

12.9 nm and a frequency response of 30 kHz. In the second experiment, the stability of operating points of the sensor was detected, and the results indicate that control mechanism of the dual F-P cavities ensures the sensor to operate at the quadrature-point, and overcomes the signal attenuation of the sensor outputs.

Key words: acoustic emission; fiber-optic sensor; dual Fabry-Perot cavities; quadrature point; material damage detection

1 引言

大多数金属和非金属材料在形变和损伤时都会产生弹性波形式的声发射(Acoustic Emission, AE)信号^[1]。AE波在材料中传播时会在试件表面产生微小的机械振动,通过高灵敏度的光纤传感器对试件表面的瞬态位移进行转换、放大和处理,然后对这些AE信号进行识别、分析与判断,并依此评价材料的损伤缺陷与构件的工作寿命的过程即为光纤AE检测技术。

目前,光纤AE检测技术已应用于飞行器结构缺陷识别、大型桥梁与隧道的健康监控及材料损伤检测等领域^[2-4]。依据解调原理不同,光纤AE传感器主要分为强度、相位、波长和偏振调制等类型。其中,强度调制传感器解调简单,但检测精度不高^[5]。基于波长调制的光纤光栅AE传感器体积小易复用,但存在温度、应力交叉敏感等问题^[6]。而那些具有新型传感机理的光纤AE传感器距离工程应用还存在一定的差距^[7]。

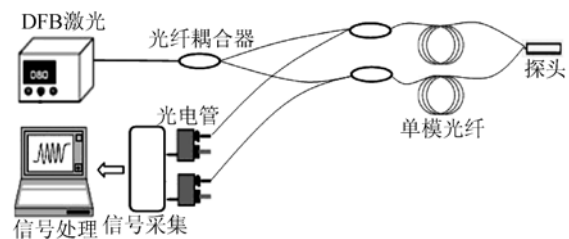
在关于光纤AE检测研究的报道中,基于相位调制的干涉型光纤传感器的应用较广泛。光纤迈克尔逊传感器和光纤马赫-曾德尔传感器具有较高的灵敏度,在光纤AE检测研究初期已有所应用^[8]。赛格奈克光纤传感器适合分布式检测,可用于大型混凝土构件中AE信号的检测^[9]。光纤Fabry-Perot(F-P)传感器具有体积小、灵敏度高和单光纤信号传输等优点,已成为近年来干涉型光纤AE传感器的主要类型之一。在实际应用中,受制造误差和环境温度的影响,光纤F-P传感器的工作点容易偏离线性区(正交点),进入输出信号衰减的饱和区,通常采用双波长正交保持^[10-11]和光源波长调谐^[12-13]两种方法来稳定工作点。Zhao等^[11]采用密集波分复用器滤出两路处于正交相位的输出光,实验表明基于双波长正交保持的光纤F-P传感器能够成功检测到模拟

AE信号,但输出信号的正交性随量程的增加而降低。Kort等^[12]依据光纤光栅(FBG)传感器反馈的环境温度变化调节光源波长,控制光纤F-P传感器工作在正交点,提高了传感器的灵敏度,但该系统构成复杂且成本高。本文设计了一种新型的光纤F-P传感器用于模拟AE弹性波检测,采用双F-P腔结构稳定传感器的工作点,解决了该类传感器输出信号衰减的问题。该方法简单、成本低,具有良好的工程实用性。

2 双F-P腔传感器的工作原理

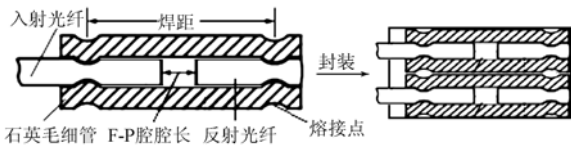
2.1 系统构成

本文提出的传感系统由超窄线宽分布式反馈(Distributed Feedback, DFB)激光器、 1×2 单模光纤耦合器、传感探头、光电探测器、信号采集与处理等部分构成,如图1(a)所示。激光器输出光经 1×2 单模光纤耦合器(50:50)两次分光后进入双F-P腔传感探头,由探头返回的两路正交干涉光经光电探测器与信号调理电路进行相应的转换处理后,经采集板进入信号处理单元。光纤传感探头由两个低细度非本征光纤F-P腔构成,每个F-P腔由入射光纤、反射光纤及用于固定与准直两根光纤的石英毛细管构成,传感探头结构如图1(b)所示。其中,入射与反射光纤为两段端部抛光的单模光纤,端面反射率约为4%。



(a) 传感系统构成

(a) Configuration of fiber-optic F-P sensor system



(b) 双 F-P 腔传感探头
(b) Sensing probe with dual F-P cavities

图 1 传感系统及其探头组成

Fig. 1 Schematic diagrams of sensor system and its probe

2.2 光纤 AE 检测数学模型

根据多光束干涉理论,若入射光纤 F-P 腔光束为单色光,在 F-P 腔端面反射率近似相等的条件下,F-P 腔的反射光干涉光强 I_{gr} 为:

$$I_{gr} = \frac{(2 - 2\cos \theta)R}{1 + R^2 - 2R\cos \theta} I_{g0}, \quad (1)$$

式中: I_{g0} 为 F-P 腔的入射光光强; R 为 F-P 腔端面的反射率; θ 为 F-P 腔反射光的干涉相位, θ 与腔长的关系为:

$$\theta = \frac{4\pi nL}{\lambda} = \frac{4\pi nLf}{c}, \quad (2)$$

式中: n 为 F-P 腔折射率, $n \approx 1$; L 为 F-P 腔长; λ 与 f 分别为 F-P 腔入射光的波长与频率; c 为光速。

在光源不满足单色光条件,具有一定光谱分布的情况下,可用近似的高斯分布表征其光谱分布,表达式为:

$$I_{g0} = I_{z0} \frac{2}{\Delta f} \left(\frac{\ln 2}{\pi} \right)^{\frac{1}{2}} \exp \left[-\frac{4 \ln 2 (f - f_0)^2}{\Delta f^2} \right], \quad (3)$$

式中: f_0 为光源输出光的中心频率; Δf 为光源线宽; I_{z0} 为对应于中心频率的输出光光强。

将式(3)带入式(1)中,并设 $f - f_0 = \delta f$,可得到高斯谱分布的光源频率为 f 的光束入射 F-P 腔,则反射光干涉强度 $I_{gr}(f)$ 为:

$$I_{gr}(f) = \frac{(2 - 2\cos \theta)R}{1 + R^2 - 2R\cos \theta} I_{z0} \frac{2}{\Delta f} \left(\frac{\ln 2}{\pi} \right)^{\frac{1}{2}} \cdot \exp \left[-\frac{4 \ln 2 (f - f_0)^2}{\Delta f^2} \right]. \quad (4)$$

F-P 腔的端面反射率 $R \approx 4\% \ll 1$,因此多光束干涉可等效为双光束干涉,考虑 F-P 腔反射面引起的半波损失造成的附加相位 π ,对式(4)积分,得到总的反射光干涉强度 I_{grz} 为:

$$I_{grz} = \int_{-\infty}^{+\infty} 2R \left[1 - \cos \left(\frac{4\pi}{c} nL (f_0 + \delta f) + \pi \right) \right] \cdot I_{z0} \frac{2}{\Delta f} \left(\frac{\ln 2}{\pi} \right)^{\frac{1}{2}} \exp \left[-\frac{4 \ln 2 \delta f^2}{\Delta f^2} \right] d\delta f. \quad (5)$$

令光源的相干长度为:

$$L_c = \frac{4 \ln 2 c^2}{\pi 2 \Delta f^2}. \quad (6)$$

对式(5)积分可得:

$$I_{grz} = 2RI_{z0} \{ 1 + \exp[-(2L/L_c)^2] \cos \theta \} = A(1 + V \cos \theta), \quad (7)$$

式中: A 为常量, $A = 2RI_{z0}$; V 为干涉条纹对比度, $V = \exp(-(2L/L_c)^2)$ 。

由式(7)可以看出,在入射光束的光谱分布为高斯型,F-P 腔为低细度干涉腔条件下,条纹对比度为高斯函数,即 F-P 腔反射光的干涉光强为一被高斯函数包络的余弦函数。当入射 F-P 腔的光束为单色光时,线宽 Δf 为零,代入式(7),条纹对比度 V 等于 1,得到 F-P 腔的反射光干涉强度为:

$$I_{grz} = A(1 + \cos \theta). \quad (8)$$

令 AE 弹性波产生的应力场作用于距它一段距离的光纤 F-P 探头上。将 F-P 腔粘接在试件上,此时应力波产生的应力场作用于构成 F-P 腔的石英毛细管上,毛细管轴向应变效应引起的相位改变在相位总体变化中起主要作用。设石英毛细管上两黏接点的距离为 d ,由长度为 Δx 的石英毛细管微段构成,如图 2 所示。

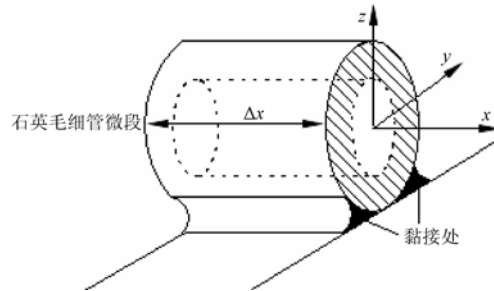


图 2 石英毛细管微段示意图

Fig. 2 Schematic diagram of differential segment of silica glass capillary

为便于分析,用单频正弦信号模拟应力波。应力波产生的应变场分布为:

$$\epsilon_x = N_0 \sin(2\pi f_L t), \quad (9)$$

式中: N_0 为 Lamb 波的初始幅值; f_L 为 AE 源产生的应力波的频率。

应力波作用毛细管上产生轴向应变 ϵ_x ,使得微段长度改变到 $\Delta x(1 + \epsilon_x)$,则由石英毛细管微段引起的 F-P 腔干涉光的相位变化为:

$$\Delta\theta = \frac{4\pi n}{\lambda} \epsilon_x \Delta x. \quad (10)$$

对所有微段引起的 F-P 腔干涉光的相位变化求和并取极限,得到受应力波作用后的 F-P 腔干涉光相位为:

$$\theta = \theta_0 + \frac{4\pi n}{\lambda} \int_0^d \epsilon_x dx, \quad (11)$$

式中 θ_0 为 F-P 腔干涉光的初始相位。

根据图 2 所示的坐标系,将式(8)带入式(10),则有:

$$\begin{aligned} \theta &= \theta_0 + \frac{4\pi n}{\lambda} \int_{-d/2}^{+d/2} N_0 \sin(2\pi f_L t) dx = \\ &\theta_0 + \frac{4\pi n d}{\lambda} N_0 \sin(2\pi f_L t). \end{aligned} \quad (12)$$

将式(11)带入式(5),则 F-P 腔的干涉光强为:

$$I_{\text{gzr}} = A + AV \cos[\theta_0 + \beta \sin(2\pi f_L t)], \quad (13)$$

式中 β 为常量, $\beta = 4\pi N_0 nd/\lambda$ 。

当 F-P 腔长远小于光源相干长度时,干涉条纹对比度 $V \approx 1$ 。将式(12)按贝塞尔函数为系数的三角级数展开,可得:

$$\begin{aligned} I_{\text{gzr}} &= A + A \cos[\beta \sin(2\pi f_L t)] \cos \theta_0 - \\ &A \sin[\beta \sin(2\pi f_L t)] \sin \theta_0 = \\ &A + A [J_0(\beta) + 2 \sum_{n=1}^{\infty} J_{2n}(\beta) \cos(4n\pi f_L t)] \cos \theta_0 - \\ &A \left\{ 2 \sum_{n=1}^{\infty} J_{2n-1}(\beta) \sin[(4n-2)\pi f_L t] \right\} \sin \theta_0, \end{aligned} \quad (14)$$

式中三角级数的系数 $J_n(\beta)$ 为第一类贝塞尔函数,可用无穷级数计算。

忽略式(13)级数中的高阶项,仅取一阶项进行近似,则有:

$$I_{\text{gzr}} \approx A + A [J_0(\beta) + 2J_2(\beta) \cos(4\pi f_L t)] \cos \theta_0 - 2AJ_1(\beta) \sin(2\pi f_L t) \sin \theta_0. \quad (15)$$

通过调节 F-P 探头的初始腔长,使 EFPI 光纤传感器工作在正交状态 ($\theta_0 \approx N\pi/2$, N 为奇数),只取交流分量可得:

$$I_{\text{gzr}} \approx -2AJ_1(\beta) \sin(2\pi f_L t). \quad (16)$$

由此可见, $-2AJ_1(\beta) \sin(2\pi f_L t)$ 即为待检测的 AE 波。因此,该信号只需经过光电转换、放大与滤波等处理,就能得到待检测的 AE 波。

3 双 F-P 腔稳定机制

由式(7)可以看出, F-P 腔输出的干涉光强为

一被高斯函数包络的余弦函数。依据灵敏度定义,对式(7)微分得到反射光的干涉光强对腔长的灵敏度为:

$$k_s = \left| \frac{dI_{\text{gzr}}}{dL} \right| = 8RI_{\text{g0}} \exp \left[- \left(\frac{2L}{L_C} \right)^2 \right] \cdot \left[\frac{2L}{L_C} \cos \theta + \frac{\pi f}{c} \sin \theta \right]. \quad (17)$$

本文选取 $2RI_{\text{g0}} = 1$, F-P 腔长为 $17 \sim 19 \mu\text{m}$, 依据式(7)和式(17)得到传感器的输出光强曲线与灵敏度曲线,如图 3 所示。由图可见,当 F-P 腔长位于输出光强曲线的线性区中点(正交点)时,传感器有最大灵敏度;当 F-P 腔长处于曲线波峰或波谷时,灵敏度最低。因此必须控制传感器的工作点位于正交点附近,以保证其灵敏度。

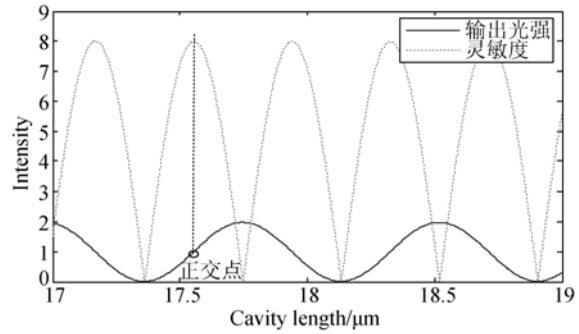


图 3 光纤 F-P 传感器输出的干涉光强度与灵敏度曲线
Fig. 3 Interference-intensity and sensitivity curves of F-P sensors

由式(2)可知, F-P 腔的输出干涉光相位与其腔长及入射光波长有关,可以通过改变腔长或波长来实现两个 F-P 腔输出信号的正交。本文提出的工作点稳定技术通过设置构成传感探头的两个 F-P 腔的长度差,使得传感器输出两路相位正交的光束,其中一路处于饱和,另一路则处于线性区,从而提高了传感器的灵敏度。传感探头的两路输出光的相位差为:

$$\Delta\theta_L = 4\pi n((L_{01} + \Delta L_{01}) - (L_{02} + \Delta L_{02}))/\lambda, \quad (18)$$

式中: L_{01} 与 L_{02} 分别为两个 F-P 腔的初始长度, ΔL_{01} 与 ΔL_{02} 分别为两个 F-P 腔的长度变化量。

在式(18)中,通过设置两个 F-P 腔的初始长度差,使 $\Delta\theta_L$ 为 $\pi/2$ 的奇数倍,则能保证两路输出光的相位处于正交状态。实际使用中,环境温度作用于 F-P 腔的石英毛细管(传感部分),产生的

热应力会引起两个 F-P 腔初始长度的改变,改变量为:

$$\Delta L_{01} = \Delta L_{02} = \alpha_g L_g \Delta t, \quad (19)$$

式中: L_g 为构成 F-P 腔的石英毛细管长度, Δt 为温度变化量, α_g 为石英毛细管的热膨胀系数。

由式(19)可见,为抵消温度引起的初始正交相位变化,设计传感探头时,两个 F-P 腔的石英毛细管长度应一致,由热应力引起的腔长改变量相等。结合式(18)可知,在低频热应力的干扰下,因两个 F-P 腔的初始长度改变引起的相位变化相互抵消,从而保证了传感器两路输出信号的正交。

由式(7)可知,处于正交相位的两个 F-P 腔的反射光干涉光强 I_1 和 I_2 分别为:

$$I_1 = A(1 + V \cos \theta_{01}), \quad (20)$$

$$I_2 = A(1 + V \sin \theta_{01}), \quad (21)$$

式中 θ_1 与 θ_2 为两路输出光的干涉相位。

当 F-P 腔长远小于光源相干长度时,干涉条纹对比度 $V \approx 1$,此外在仿真中选取 $2RI_{g0} = 1$ 。依据以上两式得到两个 F-P 腔的归一化输出光强,如图 4 所示。

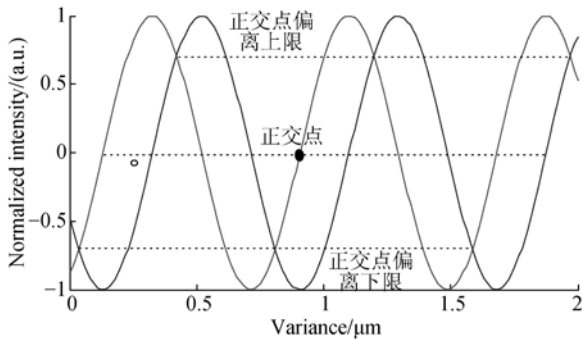


图 4 两个 F-P 腔的归一化输出光强

Fig. 4 Normalized light-intensity of dual F-P cavities

由图可见,传感器的工作点在正交点偏离上限与下限之间变化,腔长变化范围为光源波长的 $1/8$ (相位变化为 $\pi/2$)。在极限处,两个 F-P 腔的工作点均远离正交点,偏离达到最大。

取正交点偏离上下限之间的曲线段为传感器的线性工作范围,以传感器输出的一路为例(式(20)),相位变化区间为 $[5\pi/4, 7\pi/4]$,用最小二乘法拟合得到直线方程 $f_N(\theta)$ 为:

$$f_N(\theta) = 0.9374\theta - 4.4160. \quad (22)$$

依据式(22),用传感器线性度表达其输出信

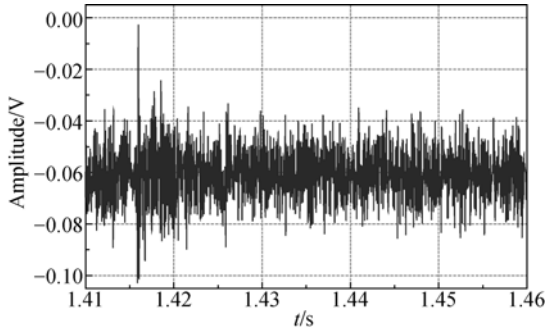
号的失真度。在正交点处信号的输出失真最小,偏差为 -0.0018 ;在正交点偏离上下限处失真最大,偏差分别为 0.029 和 -0.027 ,传感器的理论线性度为 2.05% 。

4 实验结果与分析

根据图 1 设计了用于检测折断铅笔芯(PLB)与落球冲击两类模拟 AE 信号的实验方案。光源选用超窄线宽分布式(Distributed Feedback, DFB)激光器模块(天津峻峰光电 DL-BF9-CLS1550),工作波长为 1550 nm ,使用 1×2 光纤耦合器(天津峻峰光电 KCP- 1×2 -1550-50/50)进行分光,分光比为 $50:50$ 。依据式(9),制作腔长分别为 $17.9\ \mu\text{m}$ 和 $22\ \mu\text{m}$ 的两个 F-P 探头,相位差约为 $21 \times \pi/2$,把两个 F-P 传感探头封装在一起,然后用环氧树脂胶固定在一块 $300\text{ mm} \times 300\text{ mm} \times 5\text{ mm}$ 的铁板上。距离探头 10 cm 处折断一根 2H 铅笔芯产生模拟 AE 波,采用本文设计的光纤 F-P 传感器与谐振式压电陶瓷(PZT)AE 传感器(鹏翔科技 PXR15)进行对比检测,记录的波形如图 5 所示。依据板波理论,AE 源在薄板中主要激励起扩展波与弯曲波。由测试结果可知,两种传感器记录的波形基本都为幅值较大的弯曲波,不含扩展波。其原因是 PLB 引起的模拟 AE 信号的幅值很小,幅值较小的扩展波淹没于噪声中。对比两类传感器的输出信号,光纤 F-P 传感器成功检测到了 PLB 模拟 AE 信号,具有较好的信噪比(Signal to Noise Ratio, SNR)。由于信号幅值小,采用低通滤波滤噪,截止频率为 5 kHz ,对检测波形(图 5)进行快速傅里叶变换(FFT),结果如图 6 所示。从图中可见,光纤 F-P 传感器比 PZT 传感器具有更好的检测带宽和频率响应。

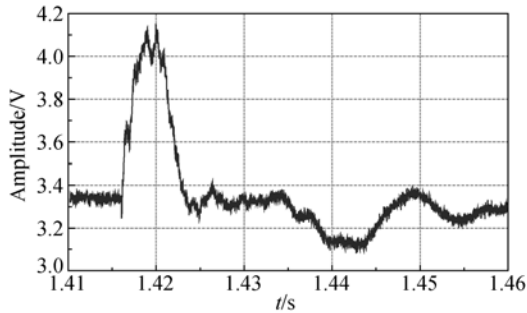
在距离探头 10 cm 处用落球冲击产生模拟 AE 波,PZT 传感器与光纤传感器记录的波形如图 7 所示。可见,PZT 传感器检测的 AE 波基本为弯曲波,不含扩展波成分,而光纤 F-P 传感器记录的波形既有弯曲波成分又有扩展波成分。其原因是 PZT 传感器为离面位移应力传感器,即 PZT 传感器对引起试件表面法向位移的弯曲波敏感;而光纤 F-P 传感器为面内应力传感器,即

对引起试件表面切向位移的扩展波敏感。另外，小的径向尺寸使得光纤传感器对包含大量法向位移的弯曲波也很敏感。



(a) 压电传感器

(a) Piezoelectric(PZT) sensors

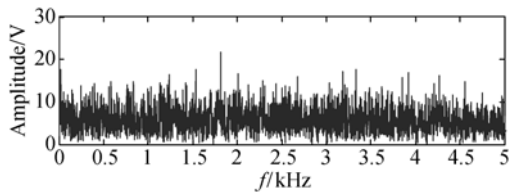


(b) 光纤 F-P 传感器

(b) F-P sensors

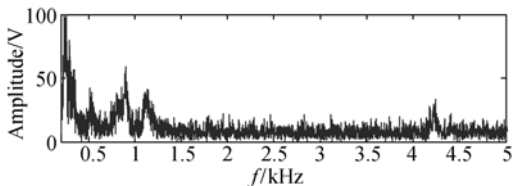
图 5 不同传感器记录的 PLB 的 AE 波形

Fig. 5 AE signals of PLB recorded by different sensors



(a) PZT 传感器

(a) PZT sensors



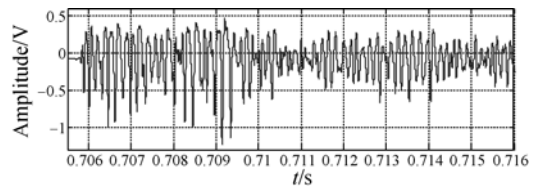
(b) 光纤 F-P 传感器

(b) F-P sensors

图 6 PLB 的 AE 波形 FFT 结果

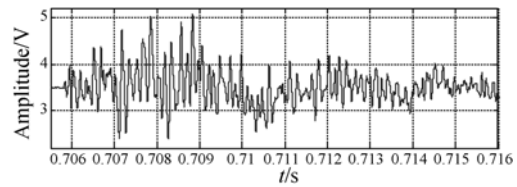
Fig. 6 FFT of AE signals of PLB

通过对检测波形(图 7)进行 FFT,结果如图 8 所示。可见,低速冲击引起的 AE 波频谱主要反映在低频段,光纤传感器比 PZT 传感器具有更大的检测频宽。其原因在于试验使用的 PZT 传感器为谐振式传感器,而光纤 F-P 传感器为宽带传感器。



(a) 压电传感器

(a) Piezoelectric sensors

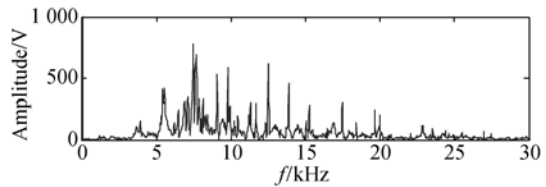


(b) 光纤 F-P 传感器

(b) F-P sensors

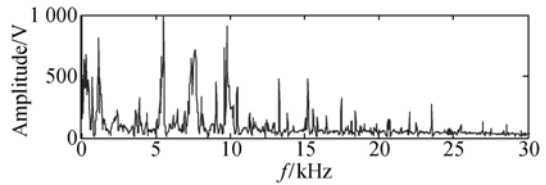
图 7 落球冲击产生的 AE 信号

Fig. 7 AE signals generated by shock of falling ball recorded by different sensors



(a) PZT 传感器信号 FFT

(a) FFT of AE signals detected by PZT sensors



(b) 光纤 F-P 传感器信号 FFT

(b) FFT of AE signals detected by F-P sensors

图 8 落球冲击产生的 AE 信号的 FFT 结果

Fig. 8 FFT of AE signals generated by shock of falling ball

为验证传感器工作点的稳定性,对 F-P 传感器探头加热后进行冲击引起的模拟 AE 信号检测,如图 9 和图 10 所示。当温度 $t=20\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时,1 号探

头(腔长为 $17.9 \mu\text{m}$)的工作点偏离正交点,而 2 号传感探头(腔长为 $22 \mu\text{m}$)的工作点位于正交点;当温度 $t=25^\circ\text{C}$ 时,2 号探头(腔长为 $22 \mu\text{m}$)的工作点偏离正交点,而 1 号传感探头(腔长为 $17.9 \mu\text{m}$)的工作点位于正交点。

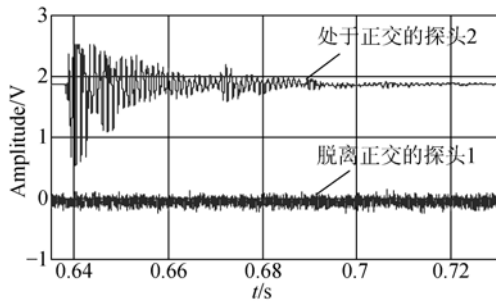


图 9 温度为 20° 时光纤 F-P 传感器的两路输出波形

Fig. 9 Two output signals of fiber-optic sensors at $t=20^\circ$

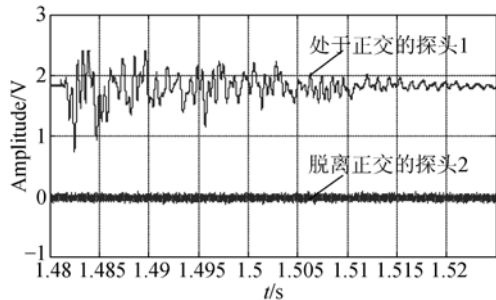


图 10 温度为 25° 时光纤 F-P 传感器的两路输出波形

Fig. 10 Two output signals of fiber-optic sensors at $t = 25^\circ$

分析实验结果可知,当 F-P 探头温度从 20°C 加热到 25°C 的过程中,传感系统的两路输出信号的工作点先位于正交点,然后偏离,依次循环;但两路输出信号的工作点不会同时偏离正交点,其中总有一路输出信号位于正交点,从而保证了传感器的灵敏度。

参考文献:

- [1] LIU T Q, HAN M. Analysis of π -phase-shifted fiber Bragg gratings for ultrasonic detection[J]. *IEEE Sens. J.*, 2012, 12(7): 2368-2373.
- [2] 梁艺军,刘俊锋,张巧萍,等. 环形腔全光纤 F-P 干涉仪的声发射检测实验研究[J]. *光学精密工程*, 2009, 17(8): 1825-1831.
- LIANG Y J, LIU J F, ZHANG Q P, *et al.*. Ring cavity all fiber F-P interferometer used in detection

of acoustic emission [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2009, 17(8): 1825-1831. (in Chinese)

[3] WU Q, YU F M, OKABE Y J, *et al.*. Application of a novel optical fiber sensor to detection of acoustic emissions by various damages in CFRP laminates[J]. *Smart Materials and Structures*, 2014, 24(1): 015011.

[4] VERSTRYNGE E, PFEIFFER H, WEVERS M. A novel technique for acoustic emission monitoring in civil structures with global fiber optic sensors[J]. *Smart Materials and Structures*, 2014, 23(6): 065022.

[5] HAN M, LIU T Q, HU L L, *et al.*. Intensity-de-

termining the measurement accuracy by the SNR of the output signal. In the experiment without simulated AE source, the noise threshold of the sensor system is about 60 mV. When the output signal of the sensor system changes from the maximum to the minimum (the change amplitude is 1.8 V), the conversion function changes 0.5 cycles, the length of the F-P cavity changes to 1/4 of the incident wavelength ($0.3875 \mu\text{m}$), so the resolution of the sensor system is about $0.06 \times 0.3875 / 1.8 \approx 12.9 \text{ nm}$.

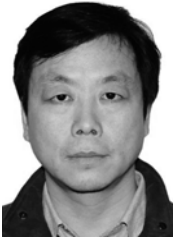
Fiber F-P sensor has a wide frequency response range. In theory, it can reach several hundred MHz, so the bandwidth of the sensor system mainly depends on the upper cutoff frequency of the filter. In the fiber F-P sensor system, the upper cutoff frequency of the filter is 30 kHz, the test results in Fig. 8 also show that the upper limit of the frequency response of the sensor system is about 30 kHz.

5 结 论

本文研究了双 F-P 腔光纤 AE 传感器的检测机理与实验。通过建立入射光光谱为高斯分布的低细度 F-P 腔传感模型,得出 F-P 腔的输出光强为一被高斯函数包络的余弦函数;为保证其灵敏度,光纤 F-P 传感器的工作点必须位于正交点附近,因此又提出了一种采用双腔长结构保持传感器正交点的稳定技术。该方法简单灵活,传感器两路输出信号的正交精度高,抗环境干扰的能力强。为验证传感器的性能,建立了模拟 AE 信号检测与热应力干扰两类实验。测试结果表明,传感器在检测 PLB 与落球冲击两类模拟 AE 波时,比传统的商用压电传感器具有更好的灵敏度和频率响应特性,其分辨率为 12.9 nm,频率响应上限为 30 kHz;热应力干扰实验验证了该传感器具有良好的工作点稳定性。

- modulated fiber-ring laser sensor system for acoustic emission detection[J]. *Optics Express*, 2013, 21(24): 29269-29276.
- [6] JIANG M S, LU S Z, SAI Y Z, *et al.*. Acoustic emission source localization technique based on least squares support vector machine by using FBG sensors[J]. *Journal of Modern Optics*, 2014, 61(20): 1634-1640.
- [7] FU T, LIU Y J, LI Q L, *et al.*. Fiber optic acoustic emission sensor and its applications in the structural health monitoring of CFRP materials[J]. *Optics and Lasers in Engineering*, 2009, 47(10): 1056-1062.
- [8] HUANG D T, YE H S L, HSU S C. Measurement of objects with low vibration frequencies using modified Michelson interferometry[J]. *Journal of Optics*, 2011, 13(8): 085401.
- [9] YUAN L B, ZHOU L M, JIN W. Detection of acoustic emission in structure using Sagnac-like fiber-loop interferometer[J]. *Sensors and Actuators A*, 2005, 118(1): 6-13.
- [10] 单宁. 一种高方向灵敏度光纤 F-P 超声传感系统设计研究[J]. *传感技术学报*, 2015, 28(4): 487-491.
- SHAN N. Design and research of an optica fiber F-P ultrasound sensor with high directivity sensitivity[J]. *Chinese Journal of Sensors and Actuators*, 2015, 28(4): 487-491. (in Chinese)
- [11] ZHAO J H, SHI Y K, SHAN N, *et al.*. Stabilized fiber-optic extrinsic Fabry-Perot sensor system for acoustic emission measurement[J]. *Optics and Laser Technology*, 2008, 40(6): 874-880.
- [12] KORT B, ELFED L, GABRIEL L, *et al.*. Feedbackstabilized interrogation technique for EFPI/FBG hybrid fiber-optic pressure and temperature sensors[J]. *IEEE Sensors Journal*, 2012, 12(1): 133-138.
- [13] XIAO S H, JIANG Y, LIU D, *et al.*. Quadrature operation point locked techniques for interrogating extrinsic Fabry-Perot interferometric sensors[J]. *Microwave and Optical Technology Letters*, 2013, 55(9): 2117-2120.

作者简介:



赵江海(1974—),男,湖北钟祥人,博士,副研究员,2008年于西北工业大学获得博士学位,目前主要从事机器人与传感器方面的研究。E-mail: jhzhao@iamt. ac. cn



章小建(1985—),男,江苏如皋人,学士,工程师,2008年于江苏理工学院获得学士学位,主要从事机器人与传感器方面的研究。E-mail: xjzhang@iamt. ac. cn

(版权所有 未经许可 不得转载)