

# 基于光纤 Sagnac 传感技术的结构冲击定位

程竹明<sup>1,2</sup>, 曾捷<sup>1</sup>, 常晨<sup>1</sup>, 宋雪刚<sup>1</sup>, 梁大开<sup>1\*</sup>

<sup>1</sup>南京航空航天大学机械结构力学及控制国家重点实验室, 江苏 南京 210016;

<sup>2</sup>安徽工业大学电气与信息工程学院, 安徽 马鞍山 243002

**摘要** 冲击定位可为结构冲击损伤提供准确的位置信息。基于光纤布拉格光栅(FBG)传感器存在解调频率低、需要训练样本等缺点,提出了一种利用光纤 Sagnac 传感技术实现结构冲击定位的方法。基于此方法的传感系统主要由宽带光源、光纤 Sagnac 干涉仪、光探测器以及数据采集与处理单元构成。当粘贴在结构表面的传感探头受到冲击应力波作用时,Sagnac 干涉仪相位受到调制,从而导致输出的光强发生变化,通过光探测器将光信号转换为电压信号输出。首先,对传感系统采样的时域信号进行小波降噪和去直流干扰处理,再利用 Db4 小波包进行能量特征提取与信号重构,并获取应力波到达 2 端的传感器的时间,最后利用时差法进行冲击定位。为了验证该冲击载荷定位系统的有效性,对长度为 100 cm 的钢管结构进行了 35 次低速冲击实验。结果表明,该方法可以有效地识别冲击位置,最大定位误差和最大均方根误差分别为 0.65 cm 和 0.36 cm。研究结果可为结构冲击定位提供另外一种可靠的方法。

**关键词** 光纤光学; 光纤传感器; Sagnac 效应; 小波包分析; 冲击定位; 时差法

中图分类号 TH744

文献标识码 A

doi: 10.3788/AOS201838.1006004

## Structural Impact Localization Based on Optical Fiber Sagnac Sensing Technique

Cheng Zhuming<sup>1,2</sup>, Zeng Jie<sup>1</sup>, Chang Chen<sup>1</sup>, Song Xuegang<sup>1</sup>, Liang Dakai<sup>1\*</sup>

<sup>1</sup> State Key Laboratory of Mechanics and Control of Mechanical Structures,

Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing, Jiangsu 210016, China;

<sup>2</sup> College of Electrical and Information Engineering, Anhui University of Technology,

Maanshan, Anhui 243002, China

**Abstract** Impact localization can provide accurate location information for structural impact damages. As fiber Bragg grating has low sampling frequency and requires training samples, a method for structural impact localization based on optical fiber Sagnac sensing technique is proposed. The sensing system mainly consists of broadband light source, optical fiber Sagnac interferometers, photo-detectors and data acquisition card. The phase of the interferometer can be modulated when the sensing probe stuck on structure is affected by impact stress waves. Therefore, the output light intensity can be changed and converted to voltage signal by photo-detector. Firstly, the impact response signals are de-noised and direct current interferences are eliminated by wavelet transform. Secondly, the energy characteristics are extracted, time-domain signals are reconstructed by wavelet packet analysis, and the time of wavelet arrival to the two sensors is acquired. Lastly, impact position is calculated by time-difference method. The result shows that 35 impacts on the steel pipe with the length of 100 cm have a maximum error of 0.65 cm, and a maximum root-mean-square error of 0.36 cm, respectively. This research can provide a novel and available method for structural impact localization.

**Key words** fiber optics; fiber sensors; Sagnac effect; wavelet packet analysis; impact localization; time-difference method

**OCIS codes** 060.2370; 120.5790; 240.6690

收稿日期: 2018-03-15; 修回日期: 2018-04-10; 录用日期: 2018-05-08

基金项目: 国家自然科学基金-联合基金项目(U1537102)、航空科学基金(20170252004)、安徽高校自然科学研究重点项目(KJ2018A0042)、机械结构力学及控制国家重点实验室开放课题(MCMS-0516K01)

\* E-mail: liangdk@nuaa.edu.cn

# 1 引 言

航空航天飞行器、输油输气管道等大型结构在服役过程中,遭受冰雹、飞石、维修工具掉落等冲击时可能会产生比较隐蔽的结构损伤。如果不能及时找到损伤位置并进行损伤修复,结构的局部力学性能将会逐步退化,结构强度和稳定性也随之下降,从而造成严重的安全隐患。因此,结构健康监测对保证结构的安全运行具有非常重要的意义<sup>[1-2]</sup>。

冲击定位是结构健康监测的重要组成部分,识别冲击位置可以为冲击损伤状态评估提供准确的位置信息,国内外众多学者在此领域开展了深入研究。压电传感器由于频率响应范围宽、灵敏度高、动态性能好,在结构冲击监测领域得到了广泛研究与应用<sup>[3-6]</sup>。近年来,以光纤布拉格光栅(FBG)为代表的传感器因具有尺寸小、质量小、耐腐蚀、抗电磁干扰和耐高温能力强等优点,在结构健康监测领域受到了越来越多的关注<sup>[7-10]</sup>。2012年,Jang等<sup>[11-12]</sup>利用FBG阵列采集大量样本训练神经网络和向量回归机,构建出冲击响应信号和冲击位置之间的关系模型,并利用该模型对冲击位置进行识别。2013年,Lu等<sup>[13]</sup>利用FBG阵列,结合小波包信号分析和支持向量机算法,对复合材料结构的低速冲击进行定位。2014年,路士增等<sup>[14]</sup>利用FBG构建传感器网络,结合小波变换、频谱分析和支持向量机分类算法,对碳纤维复合材料板低速冲击区域定位进行了研究。2015年,Shrestha等<sup>[15]</sup>在加筋复合材料板上利用FBG传感器结合参考数据库比对的方法,进行了低速冲击定位研究。2017年,张法业等<sup>[16]</sup>采用扩散映射结合支持向量机的方法,利用4个FBG对小尺寸铝合金薄板进行了冲击定位研究。可见,FBG传感系统由于信号采样频率比较低,难以采用具有强实时性的时差法对结构冲击进行定位。目前的研究大多需要对被监测结构进行样本采集与训练,但在某些工程应用中,为了防止对材料结构造成不必要的损伤,冲击样本测试是不允许的。该类方法工作量大、算法相对复杂,因而具有一定的局限性。

本文提出了一种基于光纤 Sagnac 传感技术的结构冲击定位方法,利用光纤 Sagnac 传感器采样频

率高、互易性好、对光源相干性要求低等优点<sup>[17-18]</sup>,搭建了冲击定位系统,通过小波变换和小波包分析等算法,结合时差定位法对管道结构进行了冲击定位研究。该方法不需要进行样本训练,具有算法简单、实时性强等优点,能够很好地满足工程应用的实际需要。

# 2 光纤 Sagnac 传感原理

如图 1 所示,光纤 Sagnac 传感器系统结构由光源、Sagnac 干涉仪(由传感探头、偏振控制器、 $2 \times 2$ 耦合器、延迟线圈构成)、光探测器(PD)及数据采集单元(DAQ)组成。光源输出的光波在端口 1 处经 3 dB 耦合器按 1:1 分成顺时针传播的光束 3 和逆时针传播的光束 4,两束逆向传输的光均经过偏振控制器、传感探头和延迟线圈之后在耦合器会合。若传感探头没有受到外界信号的调制,理想情况下传感器不形成干涉现象。

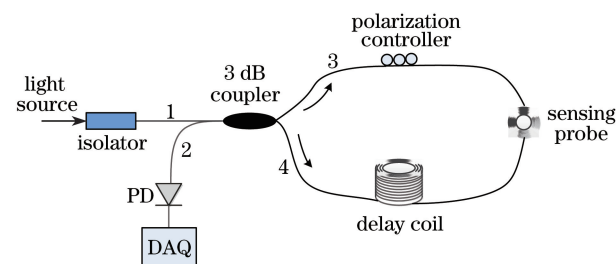


图 1 光纤 Sagnac 传感器原理图

Fig. 1 Schematic of optical fiber Sagnac sensor

当结构受到外部冲击作用时,冲击产生的应力波在结构中传播至传感探头上。此时,两束光波相位将被应力波所调制。Sagnac 干涉仪光环路具有良好的互易性,因此应力波对干涉仪两臂的作用可忽略不计。假设光波在传输过程中无损耗,且 3 dB 耦合器具有理想的分光比,则返回耦合器的两束光波场  $E_{cw}$ 、 $E_{ccw}$  可分别表示为<sup>[19]</sup>

$$E_{cw} = 0.5E_0 \exp\{j[\omega t + \phi_1 - \phi_s(t - t_1)]\}, \quad (1)$$

$$E_{ccw} = 0.5E_0 \exp\{j[\omega t + \phi_2 - \phi_s(t - t_2)]\}, \quad (2)$$

式中: $E_0$  为光源光波的振幅; $\omega$  为光波的角频率; $\phi_1$  和  $\phi_2$  分别为两束光波在光探测器处的初相位; $\phi_s$  为冲击应力波导致传感探头处两束光波相位的变化; $t_1$  和  $t_2$  分别为光波沿顺时针和逆时针方向从传感探头返回到光探测器所需的时间。

两束光的合成光强为

$$I_{out} = (E_{cw} + E_{ccw}) \cdot (E_{cw} + E_{ccw})^* = 2 \times 0.5^2 E_0^2 \{1 + \cos[(\phi_1 - \phi_2) + \phi_s(t - t_1) - \phi_s(t - t_2)]\} = 0.5E_0^2 [1 + \cos(\Delta\phi + \Delta\phi_s)], \quad (3)$$

式中:  $\Delta\phi = \phi_1 - \phi_2$ ,  $\Delta\phi_s = \phi_s(t - t_1) - \phi_s(t - t_2)$ 。

由于输出光是一个包含不同频率成分的宽频信号,故难以直接用公式对其进行描述。假设冲击应力波信号中某一单频信号作用于传感探头,其对于干涉仪形成的相位调制可以表示为

$$\phi_s(t) = \phi_{s0} \cos(\omega_n t), \quad (4)$$

式中:  $\phi_{s0}$  为相位变化的幅值,与冲击应力波的强度成正比;  $\omega_n$  为冲击响应信号的某一单频信号频率。

此时,

$$\Delta\phi_s = \phi_{s0} \cos[\omega_n(t - t_1)] - \phi_{s0} \cos[\omega_n(t - t_2)] = 2\phi_{s0} \sin\left[\omega_n\left(t - \frac{t_1 + t_2}{2}\right)\right] \sin\left[\omega_n\left(\frac{t_1 - t_2}{2}\right)\right]. \quad (5)$$

干涉仪光环路中存在延迟线圈,导致  $t_1 \gg t_2$ , 因此

$$t_1 + t_2 \approx t_1 - t_2 = L_d/c = \Delta\tau, \quad (6)$$

式中:  $L_d$  为延迟线圈的长度;  $c$  为光波在光纤中的传播速度。

将(6)式代入(5)式,可得

$$\Delta\phi_s = 2\phi_{s0} \sin\left[\omega_n\left(t - \frac{\Delta\tau}{2}\right)\right] \sin\left[\omega_n\left(\frac{\Delta\tau}{2}\right)\right]. \quad (7)$$

将(7)式代入(3)式,并且只考虑交流信号成分,则干涉仪的输出光强可以表达为

$$I_{\text{out}} = 0.5E_0^2 \cos\left\{\Delta\phi + 2\phi_{s0} \sin\left[\omega_n\left(t - \frac{\Delta\tau}{2}\right)\right] \sin\left[\omega_n\left(\frac{\Delta\tau}{2}\right)\right]\right\}. \quad (8)$$

从(8)式可以看出,输出光强中包含了冲击应力波对传感探头进行相位调制的时间信息。当包含各种频率成分的应力波叠加作用于传感探头上时,干涉仪会测量到总光强变化输出。利用光探测器将其转换成电压输出,再通过高速数据采集卡采集信号并交计算机进行数据处理,就可得到冲击应力波传播到传感探头的时长。

### 3 实验系统与定位算法

#### 3.1 实验系统

实验对象为一根长度为 100 cm,内径、外径分别为 5.6 cm 和 6.0 cm 的不锈钢钢管,钢管通过 4 个磁性支座固定在实验台上。考虑到固定支座部分对实验有一定的影响,选取钢管的有效长度为 80 cm。图 2 为实验中的冲击测试点及传感器的粘贴位置示意图,按照 10 cm 的间隔将钢管划分出 9 个坐标点,第 1 个坐标点和第 9 个坐标点分别是传感探头  $S_1$  和  $S_2$  的粘贴位置,其余 7 个点作为冲击点。

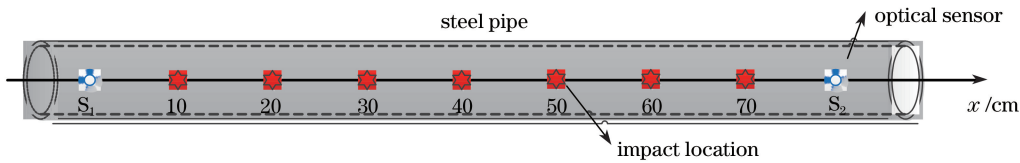


图 2 传感探头及冲击点位置的示意图

Fig. 2 Schematic of locations of impact points and sensing probes

图 3 为冲击定位实验系统实物装置图。实验系统由 1 台超辐射发光二极管 (SLD) 光源、2 台光纤 Sagnac 干涉仪、2 个光探测器、1 块高速数据采集卡 (型号: NI USB-6366) 以及 1 台计算机 (PC) 组成。SLD 光源的中心波长为 1310 nm, 3 dB 带宽为 20 nm, 功率为 2 mW。由于实验对象为圆柱形结构,采用平面环形无骨架传感探头。通过一个外径

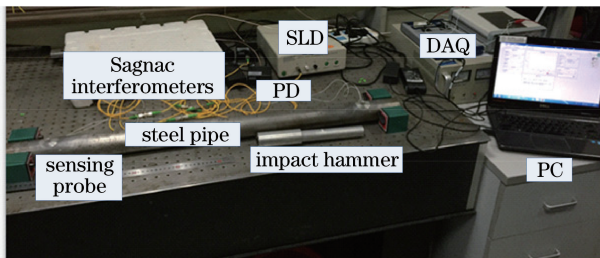


图 3 冲击定位系统实物装置图

Fig. 3 Physical devices of impact localization system

为 1.5 cm 的铝环来固定光纤的绕制内径,按照由内向外的顺序将 3 m 长的单模光纤绕制成平面环形探头,并利用紫外线胶水在紫外线的照射下进行快速固化处理,然后取下铝环,利用 AB 胶以 1:1 的调配比例将探头粘贴到经过清洁处理的钢管的对应位置上。冲击锤被用来产生低速冲击,其冲击能量为 0.1 J。

#### 3.2 冲击定位算法

基于时差法的管状结构冲击定位原理如图 4 所示,  $L$  为两个传感探头  $S_1$  和  $S_2$  之间的距离。以  $S_1$  的位置为参考原点,假设在  $S_1$  和  $S_2$  之间存在一个冲击信号,其与两个探头之间的距离分别为  $L_1$  和  $L_2$ ,冲击应力波到达  $S_1$  和  $S_2$  的时间分别为  $T_1$ 、 $T_2$ , 则

$$\begin{cases} L_1 = vT_1 \\ L_2 = vT_2 \\ L_1 + L_2 = L \end{cases}, \quad (9)$$

冲击点位置  $x$  可表示为

$$x = \frac{1}{2}(L - \Delta T \cdot v), \quad (10)$$

式中:  $\Delta T = T_2 - T_1$  为应力波到达两个传感探头的时间差;  $v = 5200 \text{ m/s}$ , 为应力波在钢管中的传播速度。

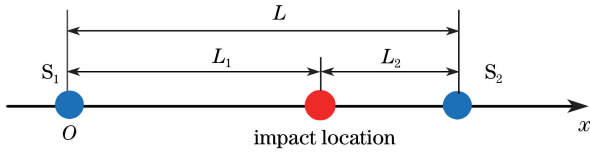


图 4 时差定位法原理图

Fig. 4 Schematic of time difference-based method

## 4 实验及结果分析

### 4.1 信号预处理

实验中设定系统采样频率为  $2 \text{ MHz}$ 。以  $x = 60 \text{ cm}$  冲击点为例, 钢管受到冲击锤的低速冲击作用时, 产生的应力波会在钢管中先后到达  $S_1$ 、 $S_2$  位置, 传感系统采集到的  $S_1$  和  $S_2$  对应的原始冲击响应信号如图 5 所示。由图 5 可以看出, 冲击响应信号包含了比较大的直流干扰分量和系统噪声, 影响了系统的信噪比与后续信号分析, 因此需要对原始信号进行相应的预处理。

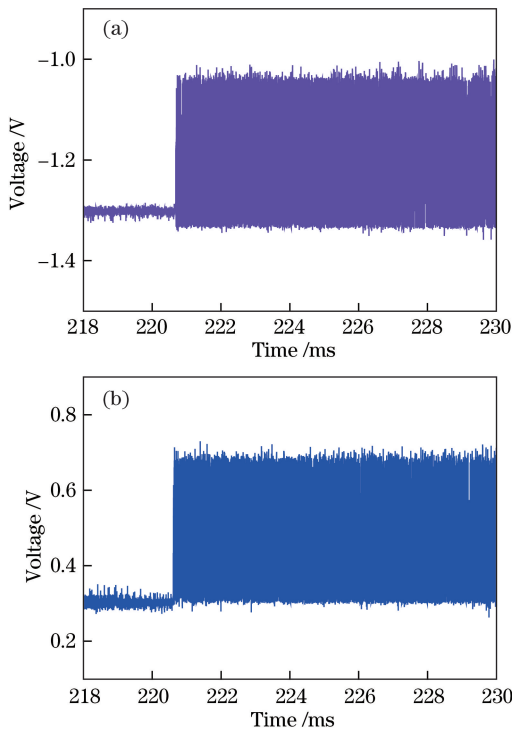


图 5 冲击响应信号。(a)  $S_1$  信号; (b)  $S_2$  信号

Fig. 5 Impact response signals. (a) Signal of sensor 1; (b) signal of sensor 2

小波变换具有良好的时频特性, 在非平稳信号处理上拥有突出的优点。另外, 软阈值滤波不但能有效消除高频随机信号和特定尺度的噪声, 而且能很好地保留突变信号。因此, 实验中选择小波软阈值滤波算法对冲击响应信号进行降噪处理, 处理后的信号如图 6 所示。与图 5 相对比, 信号中的噪声得到了有效抑制, 信噪比明显提高。利用小波变换对信号进行 8 层分解, 由分解结果可知, 直流干扰分量主要来源于低频系数的影响。将低频系数除去, 对仅保留高频系数的信号进行重构, 得到的信号如图 7 所示。可以看出, 此时信号中已经消除了直流干扰分量。从图 7 还可以看出,  $S_1$  输出电压幅值略小于  $S_2$ 。应力波在沿钢管传播过程中能量的衰减大小与距离有关, 而  $S_1$  距离冲击点位置比  $S_2$  稍远, 因此  $S_1$  感测到的应力波能量小于  $S_2$ 。

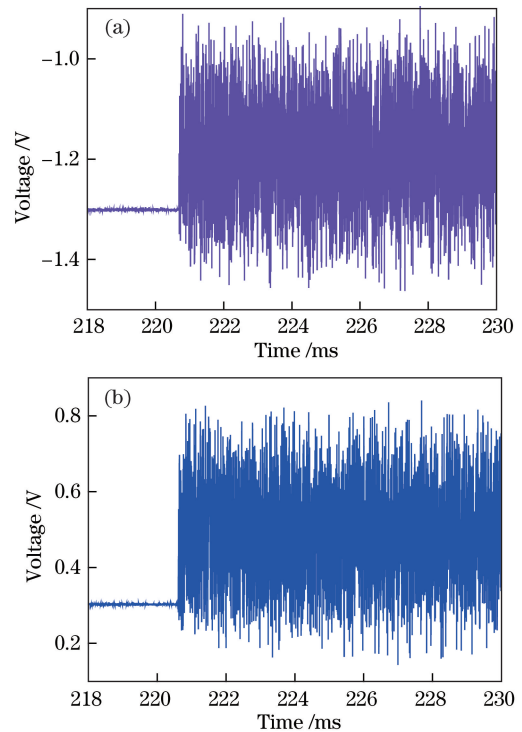


图 6 小波降噪的时域信号。(a)  $S_1$  信号; (b)  $S_2$  信号

Fig. 6 Signals of de-noising by wavelet transform.

(a) Signal of sensor 1; (b) signal of sensor 2

### 4.2 小波包分析

小波包是由小波函数进行线性组合而成的一系列基函数, 小波包分析可克服小波变换仅对信号低频成分进行逐层分解而导致信号高频段的频率分辨率和低频段的时间分辨率较差的缺点。其对信号的高、低频部分逐层进行细分, 并能够根据被分析信号的特征自适应地选择相应频带, 使之与信号频谱相匹配, 提高信号的时-频分辨率。冲击响应信号是宽



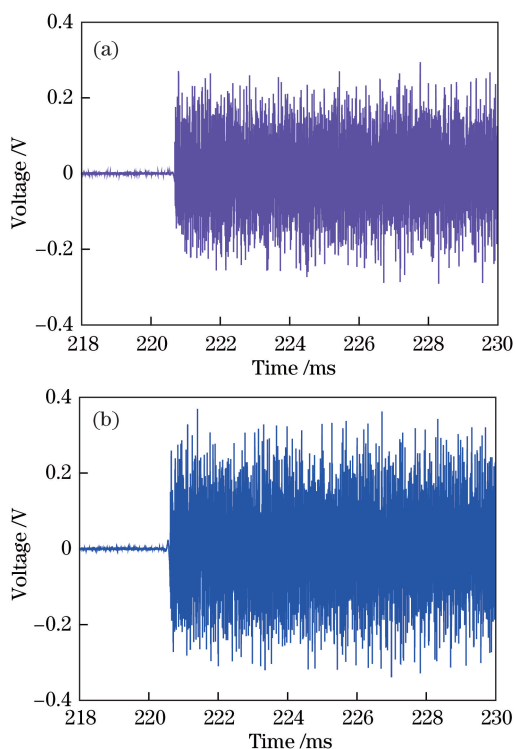


图 7 小波变换重构时域信号。(a)  $S_1$  信号;(b)  $S_2$  信号  
Fig. 7 Reconstructed signals by wavelet transform.  
(a) Signal of sensor 1; (b) signal of sensor 2

带信号,包含了各种不同频率的分量,不同频率的应力波传播速度不同,因此只有提取每组冲击响应信号同一频段的窄带信号才能得到比较准确的波达时间差。选取在信号重构和能量集中度方面具有优异性能的 Db4 小波包,将信号分解成 5 层,并求出第 5 层 1~32 节点的能量谱,如图 8 所示。图 8 显示,两组冲击响应信号的前 4 个节点能量都远大于其他节点能量,说明冲击响应信号主要由频率位于 0~125 kHz 区间的低频分量构成。

根据图 8 中两组冲击响应信号的第 2 节点能量最大的特征,利用小波包对 31.25~62.5 kHz 频段的信号进行重构,得到对应的窄带时域信号如图 9 所示。实验中通过阈值法判断传感系统采样得到的时域信号中的电压突变点,可得到冲击应力波到达  $S_2$  的时长为 220.596 ms,到达  $S_1$  的时长为 220.675 ms,两者的时间差为  $\Delta T = 0.079$  ms。将时间差代入(9)式,计算出冲击点的位置为  $x = 60.54$  cm。

### 4.3 实验结果及分析

为了验证该冲击载荷定位系统的有效性,以  $S_1$  为参考原点,分别对预先划分好的 7 个冲击点各进行 5 次冲击实验,利用上述算法得到对应的 35 次冲击识别位置。实验结果如表 1 所示,表 1 中的 1<sup>st</sup>,

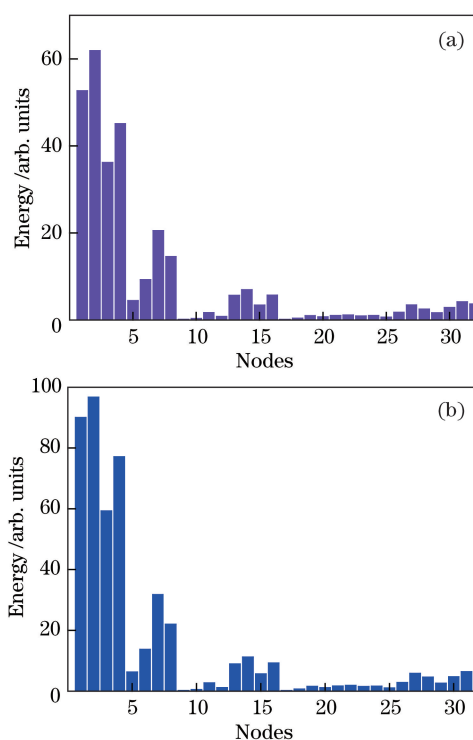


图 8 冲击响应信号小波包能量谱。  
(a)  $S_1$  信号能量谱;(b)  $S_2$  信号能量谱  
Fig. 8 Wavelet packet energy spectra of impact response signals. (a) Signal energy spectrum of sensor 1; (b) signal energy spectrum of sensor 2

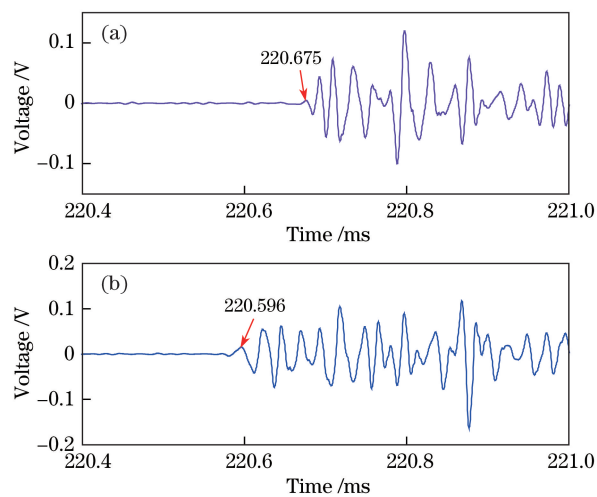


图 9 窄带信号波达时间差。(a)  $S_1$  信号;(b)  $S_2$  信号  
Fig. 9 Time difference of narrow-band signals.  
(a) Signal of sensor 1; (b) signal of sensor 2

2<sup>nd</sup>, ..., 5<sup>th</sup> 分别表示第 1 次,第 2 次, ..., 第 5 次冲击识别位置坐标。

从表 1 可以看出,系统对冲击位置识别的最大误差为 0.65 cm,最大均方根误差(RMSE)为 0.36 cm。误差分布无明显规律,误差主要来源于以下两个方面:1)数据采集卡的采样频率最高为 2 MHz,同一

组时域信号中相邻两个采样点的时间间隔为  $0.5 \mu\text{s}$ , 时间分辨率有限, 导致传感系统在判断应力波的到达时刻时会出现一定的误差; 2) 定位中采用的是多

次冲击测试的平均波速, 没有测量特定频率段中应力波的传播波速, 在一定程度上影响了定位精度。若在后续的研究中加以改进, 则能进一步减小定位误差。

表 1 冲击定位实验的结果

Table 1 Results of impact localization experiments

Reference position /cm	Recognized position /cm					Maximum error /cm	RMS error /cm
	1 <sup>st</sup>	2 <sup>nd</sup>	3 <sup>rd</sup>	4 <sup>th</sup>	5 <sup>th</sup>		
10	10.10	10.12	10.23	10.36	10.34	0.36	0.25
20	19.88	20.24	19.85	19.83	19.72	0.28	0.20
30	30.51	29.86	29.89	29.98	29.73	0.51	0.27
40	39.74	40.39	40.04	39.87	39.35	0.65	0.36
50	49.62	49.65	50.02	49.68	49.88	0.38	0.28
60	60.54	59.58	59.76	60.07	60.28	0.54	0.33
70	69.85	69.68	69.77	70.32	69.39	0.61	0.36

## 5 结 论

针对光纤光栅传感器在结构冲击定位方面存在的不足, 提出了一种基于光纤 Sagnac 传感技术的结构冲击定位方法。对传感系统检测到的冲击响应信号进行小波变换和小波包分析, 重构出具有高分辨率的窄带时域信号, 利用时差法实现了结构低速冲击的准确定位。实验结果表明, 该方法无需样本训练, 可以实现对外部冲击点的实时定位, 且定位精度比较高。与 FBG 传感器所构成的冲击定位系统相比较, 该方法具有以下优点:

1) 系统灵敏度高。在实验中  $0.1 \text{ J}$  能量的冲击下, 输出信号没有经过放大处理, 电压幅值达到  $0.3 \text{ V}$  以上。系统监测到应力波的衰减历程为  $0.12 \text{ s}$  左右, 由此换算, 可实现  $600 \text{ m}$  以上的管道结构冲击定位, 为更低能量冲击信号和大尺寸结构的监测提供了技术保证。

2) 系统成本低。系统对光源的要求低, 可采用宽带光源, 降低了成本。通过光探测器直接将光强信号转换为电压输出, 与 FBG 传感系统采用波长解调仪相比, 成本更低。

3) 适用于工程应用。传感器的工作频率高, 不需要样本训练就可实现实时冲击定位, 计算量小, 因此, 该系统更适用于工程实际需要。

## 参 考 文 献

- [1] Sharif-Khodaei Z, Ghajari M, Aliabadi M H. Determination of impact location on composite stiffened panels[J]. Smart Materials and Structures, 2012, 21(10): 105026.
- [2] Lu G, Liang D K, Hu X L, et al. Energy detection

of low velocity impact on fiber optic composite material structure [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2010, 31(3): 577-581.

陆观, 梁大开, 胡兴柳, 等. 光纤复合材料结构低速冲击判位研究 [J]. 仪器仪表学报, 2010, 31(3): 577-581.

- [3] Kundu T, Das S, Jata K V. Detection of the point of impact on a stiffened plate by the acoustic emission technique [J]. Smart Materials and Structures, 2009, 18(3): 035006.
- [4] Qiu L, Yuan S F, Zhang X Y, et al. A time reversal focusing based impact imaging method and its evaluation on complex composite structures [J]. Smart Materials and Structures, 2011, 20(10): 105014.
- [5] Zhang J K, Zhang X. An efficient approach for predicting low-velocity impact force and damage in composite laminates [J]. Composite Structures, 2015, 130: 85-94.
- [6] Mickens T, Schulz M, Sundaresan M, et al. Structural health monitoring of an aircraft joint [J]. Mechanical Systems and Signal Processing, 2003, 17(2): 285-303.
- [7] Sai Y Z, Zhao X, Hou D L, et al. Acoustic emission localization based on FBG sensing network and SVR algorithm [J]. Photonic Sensors, 2017, 7(1): 48-54.
- [8] Xiong Z L, Liang D K, Li T W, et al. Impact localization by using fiber Bragg grating sensors based on correlation dimension [J]. Chinese Journal of Lasers, 2016, 43(8): 0804001.  
熊稚莉, 梁大开, 李彤韡, 等. 基于关联维数的光纤布拉格光栅的冲击定位 [J]. 中国激光, 2016, 43(8): 0804001.
- [9] Luo B B, Zou W G, Zhao M F, et al. Ph sensor based on fiber grating with extremely large tilt angle and its sensitivity enhancement [J]. Acta Optica

- Sinica, 2017, 37(1): 0106009.
- 罗彬彬, 邹文根, 赵明富, 等. 极大倾斜角度光纤光栅 pH 值传感器及其增敏研究[J]. 光学学报, 2017, 37(1): 0106009.
- [10] Wang Y, Zhao K, Liu J P. Optical fiber Bragg grating temperature monitoring based on volume phase grating dispersion demodulation[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2016, 53(10): 101202.
- 王彦, 赵凯, 刘加萍. 基于体相位光栅色散解调的布拉格光纤光栅温度监测[J]. 激光与光电子学进展, 2016, 53(10): 101202.
- [11] Jang B W, Park S O, Lee Y G, *et al.* Detection of impact damage in composite structures using high speed FBG interrogator[J]. Advanced Composite Materials, 2012, 21(1): 29-44.
- [12] Jang B W, Lee Y G, Kim J H, *et al.* Real-time impact identification algorithm for composite structures using fiber Bragg grating sensors[J]. Structural Control & Health Monitoring, 2012, 19: 580-591.
- [13] Lu J Y, Wang B F, Liang D K. Wavelet packet energy characterization of low velocity impacts and load localization by optical fiber Bragg grating sensor technique[J]. Applied Optics, 2013, 52(11): 2346-2352.
- [14] Lu S Z, Jiang M S, Sui Q M, *et al.* Identification of impact location by using fiber Bragg grating based on wavelet transform and support vector classifiers[J]. Chinese Journal of Lasers, 2014, 41(3): 0305006.
- 路士增, 姜明顺, 隋青美, 等. 基于小波变换和支持向量多分类机的光纤布拉格光栅低速冲击定位系统[J]. 中国激光, 2014, 41(3): 0305006.
- [15] Shrestha P, Kim J H, Park Y, *et al.* Impact localization on composite wing using 1D array FBG sensor and RMS/correlation based reference database algorithm[J]. Composite Structures, 2015, 125: 159-169.
- [16] Zhang F Y, Jiang M S, Sui Q M, *et al.* Acoustic emission localization technique based on fiber Bragg grating sensing network and signal feature reconstruction[J]. Acta Physica Sinica, 2017, 66(7): 074210.
- 张法业, 姜明顺, 隋青美, 等. 基于光纤光栅的冲击激励声发射响应机理与定位方法研究[J]. 物理学报, 2017, 66(7): 074210.
- [17] Hang L J, He C F, Wu B. A new pipeline leakage detection system based on linear optical fiber Sagnac interferometer and its location technology[J]. Chinese Journal of Lasers, 2007, 34(6): 820-824.
- 杭利军, 何存富, 吴斌. 一种新的直线型 Sagnac 光纤干涉仪管道泄漏检测系统及其定位技术[J]. 中国激光, 2007, 34(6): 820-824.
- [18] Xu H Y, Xu Q, Xiao Q, *et al.* Disturbance detection in distributed fiber-optic sensor based on time-delay estimation[J]. Acta Optica Sinica, 2010, 30(6): 1603-1607.
- 许海燕, 徐镏, 肖倩, 等. 基于时延估计的分布式光纤传感定位[J]. 光学学报, 2010, 30(6): 1603-1607.
- [19] Jang T S, Lee S S, Kim Y G. Surface-bonded fiber optic Sagnac sensors for ultrasound detection[J]. Ultrasonics, 2004, 42: 837-841.