

# 利用分布式动应变及传递率的结构损伤识别\*

周新新<sup>1,2</sup>, 郑东健<sup>1,2</sup>, 施彦彤<sup>1,2</sup>, 赵 汉<sup>1,2</sup>

(1. 河海大学水利水电学院 南京, 210098)

(2. 水文水资源与水利工程科学国家重点实验室 南京, 210098)

**摘要** 为了提高分布式光纤传感器监测结构动态响应的精度并提高损伤诊断的准确性, 运用长短期记忆神经网络, 建立布里渊增益谱-频率数据关系模型, 确定布里渊光时域分析技术中振幅传输模式扫描的固定频率。基于分布式光纤振动传感信息沿光纤密集分布特点, 通过计算应变传递率梯度, 提出了基于分布式动应变传递率梯度的损伤指标。不同损伤程度的悬臂梁分布式光纤振动传感实验表明, 该方法能够实现结构损伤位置的诊断, 且对毫米级裂纹仍有较强的敏感性。

**关键词** 分布式光纤; 振动传感; 固定频率; 应变传递率梯度; 损伤识别

**中图分类号** TH113

## 引言

大型土木水利和交通工程结构在长期服役中易受损, 进而影响结构的安全性。基于振动的健康诊断需大量传感器, 系统复杂且成本高。近年来, 随着分布式光纤动态快速传感技术的发展<sup>[1]</sup>, 分布式振动传感及其应用已成为研究热点。Li 等<sup>[2]</sup>利用振幅传输布里渊光时域分析 (amplitude transfer-Brillouin optical time domain analysis, 简称 AT-BOTDA) 为布里渊光时域分析提供动态测量能力, 获取沿光纤长度的时域动态分布应变。AT-BOTDA 模式通过扫描预设的小范围固定频率, 计算中心频率的光强值, 得到布里渊增益谱 (Brillouin gain spectrum, 简称 BGS) 的频移, 从而获取动态应变。然而, 固定频率的选择具有一定主观性, 可能导致部分测点的动态应变数据丢失。理论上, BGS 谱线为洛伦兹线型<sup>[3]</sup>, 通过谱线进行洛伦兹曲线拟合 (Lorentzian curve fitting, 简称 LCF) 可以确定固定频率, 但洛伦兹拟合方法在确定初始参数<sup>[3]</sup>时存在误差, 影响拟合效果。随着机器学习技术的发展, 基于分布式光纤振动传感获取了大量数据, 机器学习方法被用于拟合洛伦兹曲线, 从而提高 LCF 精度, 高质量提取布里渊固定频率<sup>[4-5]</sup>。长短期记忆网络 (long short term memory, 简称 LSTM) 作为循环神经网络 (recurrent neural network, 简称 RNN) 的特殊类型, 能够自动捕捉序

列数据中的依赖关系, 可以有效解决梯度问题。

分布式光纤动应变感知是近年来研究的热点, 在结构模态分析和结构损伤诊断等方面的运用已有报道。Zheng 等<sup>[6]</sup>研究了运用分布式光纤动应变识别结构模态的方法。Morgese 等<sup>[7]</sup>使用分布式光纤获取动态应变, 通过比较裂缝引起的应变峰值与移动荷载引起的桥梁基础应变之间的差异进行损伤诊断。

目前, 应用分布式光纤动应变进行结构损伤诊断存在敏感性不足、初始状态指标获取困难等问题。传递函数可在未知激励条件下进行损伤识别, 受环境影响小, 适合在役结构<sup>[8]</sup>。在较小损伤情况下, 应变传递率指标对损伤的敏感性减弱。实际上, 损伤指标的导数可以较灵敏地反映无损伤到有损伤位置的指标变化, 而分布式传感具有沿光纤密集采集应变优势, 通过计算应变传递函数及其梯度变化, 提高传统传递率函数诊断的损伤敏感性。

笔者分析了分布式光纤振动传感的基本原理和特点, 为了提高光纤动态应变传感的敏感性和精度, 结合 LSTM 建立 BGS 频率关系模型, 确定洛伦兹曲线初始参数, 并运用分布式光纤振动传感信息沿光纤密集分布的特点, 通过计算应变传递率梯度, 提出基于分布式动应变传递率梯度的损伤指标, 从而实现结构损伤程度和损伤位置的诊断。不同损伤程度的悬臂梁分布式光纤振动传感实验表明, 笔者所提出方法

\* 国家自然科学基金资助项目 (52179128)

收稿日期: 2023-10-25; 修回日期: 2023-12-11

有效可行、运用方便,可以对桥梁、混凝土坝等大型结构的分布式损伤进行远程实时诊断,这对准确掌握结构健康状态和及时开展维护具有重要意义。

## 1 结构损伤动应变诊断原理

### 1.1 AT-BOTDA 技术原理

布里渊光时域分析原理是分别将高频脉冲光和低频连续光注入到光纤两端,当频差与光纤某位置布里渊频移  $\nu_B$  一致时,会引起受激的布里渊散射。脉冲光的部分能量将传递给连续光,使连续光强度增加。通过监测不同位置处连续光光强改变量,得到对应的布里渊增益系数,推出  $\nu_B$ 。根据目前的实验研究<sup>[9-10]</sup>,  $\nu_B$  在一定范围内与温度和应变变化保持线性关系。

传统的布里渊光时域分析为获取沿光纤全长分布的应变,需要扫描整个BGS,具有耗时长、传感速度慢的缺点。预泵浦脉冲布里渊光时域分析中振幅传输模式无需扫频,为动态应变监测提供条件。

在AT-BOTDA模式中,假设在不同的动态应变下,沿传感光纤的BGS形状保持不变,只发生左右平移<sup>[6]</sup>,因此估计中心频率避免了对谱线的频率范围进行扫描,提高了测量速度。

为了保证应变频移之间的良好转换,在实际应用中需要根据静态状态下的初始应变分布选择固定频率,使在动态条件下中心频率向左或向右发生频移时,能够得到较好质量的测量结果。

### 1.2 固定频率选择与应变传递率损伤指标

#### 1.2.1 固定频率选择

理论上BGS的谱线满足洛伦兹线型,洛伦兹函数的数学表达式为

$$f(x) = Y + \frac{h}{1 + \left(\frac{x-X}{\omega}\right)^2} \quad (1)$$

其中:  $Y$  为函数  $f(x)$  中的最小值;  $h$  为函数值中最大值与最小值的差;  $X$  为布里渊频移,即峰值对应频率;  $2\omega$  为频谱半峰全宽;  $x$  为频率值。

目前,洛伦兹方程的参数主要依据传统法取值或BGS曲线的非线性最小二乘法(nonlinear least squares method,简称NLSM)拟合确定。考虑到NLSM拟合效果依赖初始值的选取以及机器学习具有较强非线性映射能力,笔者运用现场采集的数据和LSTM算法,对实测的BGS散点数据进行网络训练,拟合BGS曲线,再从BGS拟合曲线中提取反

映结构特征的洛伦兹方程的4个参数( $Y, X, h, \omega$ )初始值,以提高洛伦兹曲线的拟合精度。

LSTM<sup>[11]</sup>是RNN的一种变体,在RNN的基础上增加了门控机制,通过门控单元控制信息的遗忘和刷新,解决了RNN梯度消失问题。

由LSTM拟合BGS曲线,获得4个参数初始值后,采用非线性最小二乘法拟合洛伦兹曲线,确定  $Y, h, X$  和  $\omega$ 。将拟合的洛伦兹曲线峰值左下方1.5 dB及2.5 dB处  $f(x)$  的值( $Y+h-1.5$ )和( $Y+h-2.5$ )代入式(1),得到各测点的扫频范围为

$$x_{1.5} = X - \omega \sqrt{\frac{1.5}{h-1.5}} \quad (2)$$

$$x_{2.5} = X - \omega \sqrt{\frac{2.5}{h-2.5}} \quad (3)$$

采集系统的固定频率  $x$  取  $(\min(x_{1.5}) + \max(x_{2.5}))/2$ , 以满足各测点扫描频率的要求。 $\min(x_{1.5})$  为各测点BGS峰值左下方1.5 dB处的频率最小值,  $\max(x_{2.5})$  为各测点BGS峰值左下方2.5 dB处的频率最大值。

#### 1.2.2 应变传递率损伤指标

应变传递率与对应的标量传递率和结构的物理性质有关。发生损伤后,结构几何性质改变,导致单元间的应变传递率突变。因此,可以通过应变传递率诊断结构损伤位置。为便于进行损伤定位,采用相邻点的应变传递率计算,构建基于应变传递率的损伤指标,即

$$D(i) = \sum [T_i^D(\omega) - T_i^U(\omega)] \quad (4)$$

其中:  $T_i^U(\omega)$  和  $T_i^D(\omega)$  分别为结构损伤前后,第  $i$  个自由度相对于参考自由度  $j$  的应变传递率。

基于应变传递率的损伤指标在毫米级裂纹下,敏感度不高,在未损伤部位仍会产生较大损失指标量值。为此,笔者通过求取应变传递率梯度,构造基于应变传递率梯度的损伤指标,以提高结构损伤识别效果。

应变传递率是关于应变频响函数的函数,一阶梯度为

$$T_{ij}'(\omega) = \frac{dT_{ij}(\omega)}{d\omega} = \frac{d}{d\omega} \left( \frac{\epsilon_i(\omega)}{\epsilon_j(\omega)} \right) \quad (5)$$

其中:  $\epsilon_i(\omega)$  和  $\epsilon_j(\omega)$  为  $i$  单元和  $j$  单元处应变频响函数。

建立的损伤指标为

$$\nabla D(i) = \sum [T_i^D(\omega) - T_i^U(\omega)] \quad (6)$$

其中:  $T_i^U(\omega)$  和  $T_i^D(\omega)$  分别为结构损伤前后第  $i$  个自由度相对于参考自由度  $j$  的应变传递率梯度。

## 2 悬臂梁模型实验

### 2.1 模型建立

本实验利用AT-BOTDA分布式光纤传感技术采集不同实验工况下的悬臂梁模型的动态动应变数据。图1为实验系统整体示意图。实验系统由铝合金悬臂梁(长为0.6 m、宽为0.03 m、高为0.008 m)、冲击力锤、光纤以及如图2所示的NBX-6050A光纳仪组成。光纤从距悬臂梁自由端0.1 m处开始布设,考虑到悬臂梁约束问题,在距离固定端0.02 m处停止布设,并保持光纤与悬臂梁粘结牢固,使传感光纤处于悬臂梁中线。

图3为粘贴好光纤传感器的悬臂梁。光纤动应变采集间隔为0.05 m,沿悬臂梁长度方向有10个动应变采集点,形成9个等长度的单元。悬臂梁采集点位置如图4所示。实际采集点到光纳仪的光纤长

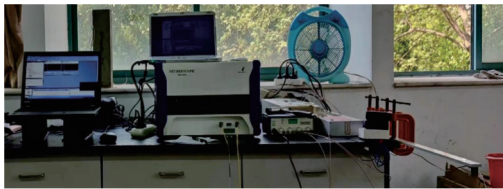


图1 实验系统整体示意图

Fig.1 Overall schematic diagram of the test system



图2 NBX-6050A 光纳仪

Fig.2 NBX-6050A neubre scope

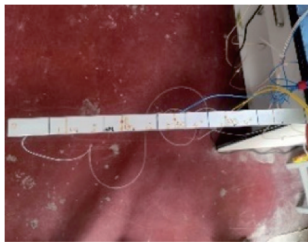


图3 悬臂梁

Fig.3 Cantilever beam

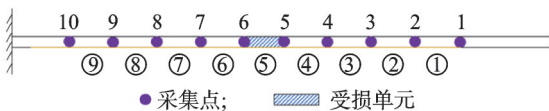


图4 悬臂梁采集点位置

Fig.4 Cantilever beam measuring point location

度分别为 2.669, 2.721, 2.772, 2.823, 2.875, 2.926, 2.977, 3.029, 3.080 和 3.131 m。例如,1号采集点到光纳仪的光纤长度为 3.131 m。

### 2.2 动态信号采集

NBX-6050A 光纳仪采集悬臂梁动态应变,性能参数选择 50 m 监测范围,初始测量参数设置如表 1 所示。

表 1 初始测量参数设置

Tab.1 Initial measurement parameter settings

参数	采样间隔/m	初始频率/ GHz	终止频率/ GHz	扫频步长/ MHz
数值	0.05	10.500	11.098	2

首先,进行初始测量,获得分布式光纤传感器的初始应变。

初始应变测量完毕,10个测点共获取10条布里渊增益谱曲线。实验重复14组,共获取63 000个布里渊增益-频率数据对。根据得到布里渊增益-频率数据对,分别使用传统法<sup>[9]</sup>、反向传播(back propagation,简称BP)<sup>[12]</sup>神经网络及LSTM,得到洛伦兹方程参数初值,再由NLSM拟合洛伦兹曲线,得到4个参数( $Y, h, X$ 和 $\omega$ )。

其次,采用均方根误差(root mean squared error,简称RMSE)定量评价3种初值提取方式拟合的洛伦兹曲线拟合性能,即

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum (B_m - B_c)^2}{N}} \quad (7)$$

其中: $B_m$ 为实测的布里渊增益; $B_c$ 为拟合的布里渊增益; $N$ 为布里渊增益总数。

以8号测点的BGS为例,采用3种初值选取方式拟合的洛伦兹曲线拟合结果如图5所示。可见,

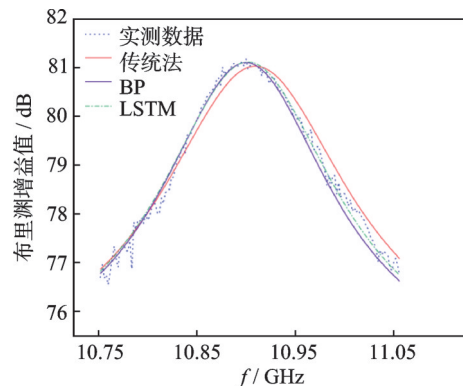


图5 拟合结果

Fig.5 Fitting results



BP 和 LSTM 确定的初值与传统方法相比具有更好的洛伦兹曲线拟合效果,且 LSTM 的初值拟合效果最佳。

表 2 为拟合效果评价指标。根据式(2)和式(3)获取 8 号测点固定频率扫描范围。传统法、BP 和 LSTM 这三种方法对应的扫频范围分别为 10.846~10.818 GHz, 10.842~10.816 GHz 和 10.842~10.816 GHz。

表 2 拟合效果评价指标

**Tab.2 Fitting effect evaluation index**

方法	RMSE/ dB	Y/dB	h/dB	X/GHz	$\omega$ /GHz
传统法	0.263	74.525	6.503	10.911	0.118
BP	0.213	76.560	6.583	10.900	0.107
LSTM	0.169	74.476	6.636	10.902	0.111

1~10 测点的均方根误差如图 6 所示。LSTM 方法相较于其他方法具有更小的均方根误差,说明使用 LSTM 方法确定初值拟合的洛伦兹曲线精度更高。

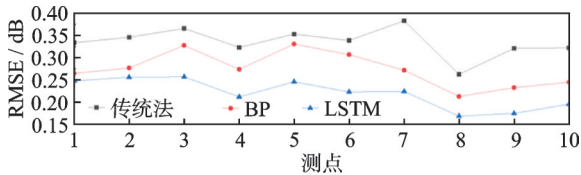


图 6 1~10 测点的均方根误差

Fig.6 Root mean square error of 1~10 measuring point

然后,根据式(3)和式(4)计算得到  $x_{1.5}$  和  $x_{2.5}$ ,连续 3 次实验计算得到的固定频率为 10.835 GHz, 10.838 GHz 和 10.836 GHz。动态测量参数设置如表 3 所示。

表 3 动态测量参数设置

**Tab.3 Dynamic measurement parameter settings**

参数	空间采样 间隔/m	固定频率/ GHz	扫频步长/ MHz	重复次数
取值	0.05	10.836	2	4 000

通过在 5,6 号采集点之间的 5 号单元锯切深度为  $a$  的裂纹来模拟悬臂梁的损伤,裂纹的长度与悬臂梁的宽度一致。5 号单元裂纹损伤如图 7 所示。损伤程度定义为裂纹深度与截面高度的比值,即  $a/h$ 。实验工况如表 4 所示,损伤程度分别为 0, 10%, 30% 和 40%。

最后,使用冲击力锤对 4 号测点进行激励,采集

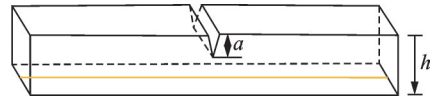


图 7 5 号单元裂纹损伤

Fig.7 Crack damage in unit 5

表 4 实验工况

Tab.4 Test conditions

工况	损伤程度/%	损伤位置
1	0	—
2	10	5,6 采集点中间
3	30	5,6 采集点中间
4	40	5,6 采集点中间

悬臂梁动态应变数据。以各工况的 5 号采集点为例,5 号采集点动态应变检测结果如图 8 所示。

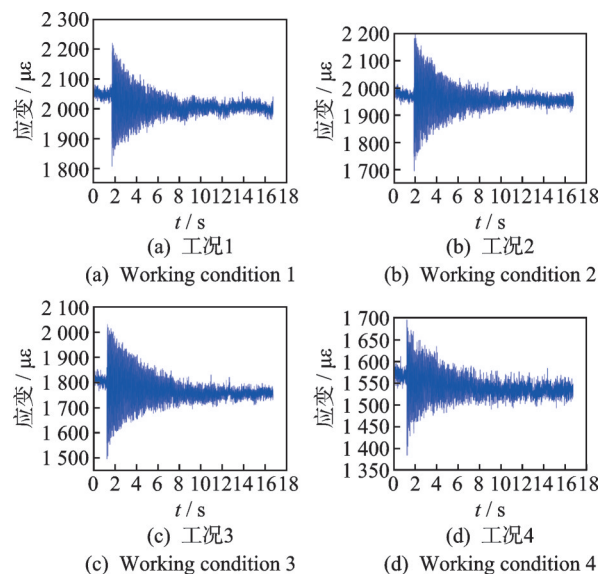


图 8 5 号采集点动态应变检测结果

Fig.8 Dynamic strain detection results at point 5

### 3 损伤识别

根据式(4)和式(6)计算 3 种损伤工况下的损伤识别指标。不同工况下,各单元的损伤识别指标数值如表 5 所示。

工况 2 损伤指标如图 9 所示。当损伤程度为 10% 时,振型变化值在未损伤的 6 号单元处最大,出现识别混乱。未损伤单元的  $D$  值与受损单元的  $D$  值数值大小较为接近,混淆损伤位置的判别。损伤指标  $\nabla D$  值在损伤程度为 10% 的工况下,在未损伤单元处趋近于 0,仍能够准确反映出损伤位置。

表 5 损伤识别指标数值  
Tab.5 Damage identification index value

工况	损伤指标	单元								
		1	2	3	4	5	6	7	8	9
2	$D$	57.60	64.51	69.12	81.00	115.5	86.60	69.90	63.36	62.21
	$\nabla D$	0.005	0.014	0.018	0.001	0.901	0.018	0.067	0.059	0.045
	振型变化	0.117	0.119	0.190	0.181	0.213	0.246	0.082	0.074	0.085
3	$D$	104.8	120.5	209.5	257.0	523.8	91.82	91.87	73.32	68.09
	$\nabla D$	0.053	0.075	0.068	0.074	5.260	0.790	0.400	0.362	0.280
	振型变化	0.158	0.160	0.178	0.177	0.356	0.133	0.066	0.068	0.053
4	$D$	16.24	25.98	28.42	32.00	812.00	60.00	12.00	16.24	15.43
	$\nabla D$	1.400	1.850	2.060	3.290	35.00	0.720	1.790	1.890	2.040
	振型变化	0.079	0.127	0.131	0.163	0.396	0.091	0.068	0.057	0.048

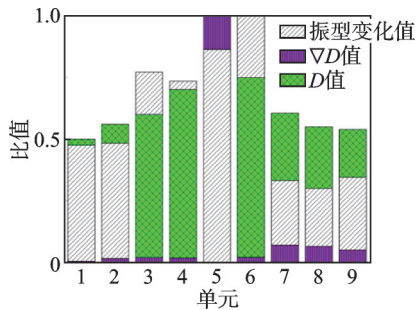


图9 工况2损伤指标

Fig.9 Damage index of working condition 2

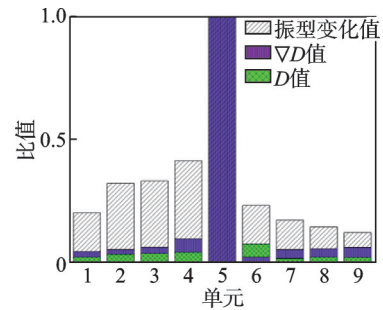


图11 工况4损伤指标

Fig.11 Damage index of working condition 4

工况 3 损伤指标如图 10 所示。当损伤程度为 30% 时, 损伤指标  $\nabla D$  值能较好地识别损伤位置, 未受损单元处的  $D$  值和振型变化值仍较大, 影响损伤位置的识别。

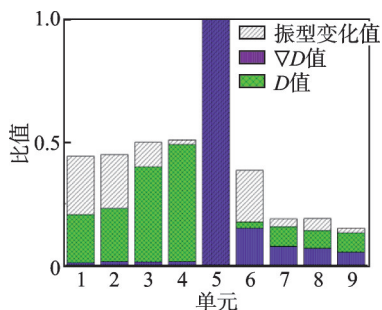


图10 工况3损伤指标

Fig.10 Damage index of working condition3

工况 4 损伤指标如图 11 所示。当损伤程度为 40% 时, 损伤指标  $\nabla D$  值、 $D$  值及振型变化值均可识别出损伤位置, 而振型变化值的识别精度较低。

综上所述, 在损伤程度为 10% 的情况下, 损伤指

标  $\nabla D$  表现出更高的识别精度。这表明  $\nabla D$  对结构中微小裂纹损伤具有更为敏感和精准的探测能力。

损伤指标  $\nabla D$  值与损伤程度之间的关系如图 12 所示。可见, 随着裂纹深度的增加,  $\nabla D$  值呈现快速增大的趋势,  $\nabla D$  与损伤程度(裂纹深度与截面高度的比值)之间呈现明显的非线性关系。

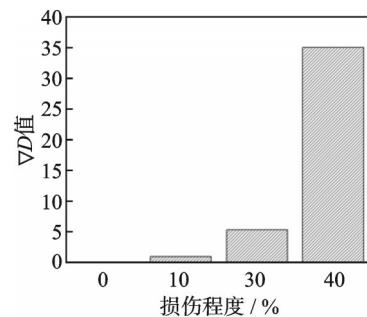


图12  $\nabla D$ 值与损伤程度之间的关系

Fig.12 Relationship between  $\nabla D$  value and damage degree

## 4 结 论

1) 基于分布式光纤传感器监测悬臂梁的动态

响应应变,提出了利用基于应变传递率梯度的损伤指标( $\nabla D$ 值)进行结构损伤识别的新方法。实验结果表明,该方法能够准确识别不同损伤工况下悬臂梁的损伤位置,为工程结构的安全运行提供了新的保障手段。

2) 利用 LSTM 算法拟合实测 BGS 曲线,并提取 4 个参数( $Y, h, X$  和  $\omega$ )的初始值。相较于传统方法, LSTM 能够实现更高精度的洛伦兹曲线拟合,提高了数据处理的准确性。

3) 通过采用光纤传感器,克服了点式传感器的布设限制,实现更为灵活、密集和高分辨率的结构监测。这种技术不仅提高了监测的灵活性,而且为结构健康监测提供了更为详实的数据,利用应变传递率梯度进行损伤识别,可削弱噪声的影响,提高数据的质量和可靠性。

4) 损伤指标( $\nabla D$ 值)与振型变化的对比结果表明,当裂纹深度为截面高度的 10% 时,无损单元与损伤单元的  $\nabla D$  值差异显著,有效避免了误判,验证了  $\nabla D$  值在毫米级裂纹的情况下对损伤位置的准确识别能力。

## 参 考 文 献

- [1] PELED Y, MOTIL A, YARON L, et al. Slope-assisted fast distributed sensing in optical fibers with arbitrary Brillouin profile [J]. *Optics Express*, 2011, 19(21): 19845-19854.
- [2] LI C H, GUZIK A, KISHIDA K. The high-performance BOTDA based systems for distributed strain sensing [C] // *The 3rd International Forum on Opto-Electronic Sensor-Based Monitoring in Geo-Engineering*. Suzhou, China: [s.n.], 2010: 1-10.
- [3] 吕健刚, 韦春桃. 基于 BOTDA 布里渊背向散射光谱数据的拟合算法 [J]. *光学技术*, 2015, 41(4): 380-384.  
LÜ Jiāngāng, WEI Chūntāo. Fitting algorithm for BOTDA Brillouin back scattered-light spectrum data [J]. *Optical Technique*, 2015, 41(4): 380-384. (in Chinese)
- [4] WU H, WANG L, GUO N, et al. Brillouin optical time domain analyzer assisted by support vector machine for ultrafast temperature extraction [J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2017, 35(19): 4159-4167.
- [5] 王成亮, 杨庆胜, 李军, 等. 基于神经网络的光纤温度和

应变快速解调方法 [J]. *激光技术*, 2022, 46(2): 254-259.

WANG Chengliang, YANG Qingsheng, LI Jun, et al. Fast demodulation method of optical fiber temperature and strain based on neural network [J]. *Laser Technology*, 2022, 46(2): 254-259. (in Chinese)

- [6] ZHENG F, SU H Z, ANSARI F. Modal analysis of structures based on distributed measurement of dynamic strains with optical fibers [J]. *Mechanical Systems and Signal Processing*, 2021, 159: 107835.
- [7] MORGESE M, WANG C W, TAYLOR T, et al. Distributed detection and quantification of cracks in operating large bridges [J]. *Journal of Bridge Engineering*, 2023, 29(1): 04023101.
- [8] 张宇. 基于动态分布式应变的海管损伤监测方法研究 [D]. 大连: 大连理工大学, 2017.
- [9] 张丹, 施斌, 吴智深, 等. BOTDR 分布式光纤传感器及其在结构健康监测中的应用 [J]. *土木工程学报*, 2003, 36(11): 83-87.  
ZHANG Dan, SHI Bin, WU Zhishen, et al. Distributed optical fiber sensor based on botdr and its application to structural health monitoring [J]. *China Civil Engineering Journal*, 2003, 36(11): 83-87. (in Chinese)
- [10] 黎敏, 廖延彪. 光纤传感器及其应用 [M]. 武汉: 武汉大学出版社, 2012: 193-195.
- [11] 尚秋峰, 李雪丽. 基于 LSTM 的布里渊增益谱提取方法 [J]. *光子学报*, 2023, 52(1): 114-123.  
SHANG Qiufeng, LI Xueli. Extraction method of Brillouin gain spectrum based on long short term memory network [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2023, 52(1): 114-123. (in Chinese)
- [12] 曹志远. 基于机器学习算法的 BOTDA 信号提取技术 [D]. 北京: 北京交通大学, 2019.



**第一作者简介:**周新,女,2000年12月生,硕士生。主要研究方向为水工结构安全监测。

E-mail: 1971884622@qq.com

**通信作者简介:**郑东健,男,1965年1月生,博士、教授、博士生导师。主要研究方向为水工结构安全与健康诊断。

E-mail: zhengdj@hhu.edu.cn