

基于光纤布拉格光栅振动传感器和极限学习机的 工字钢梁损伤识别

李亦佳, 王正方, 王静*, 隋青美

山东大学控制科学与工程学院, 山东 济南 250061

摘要 围绕工字钢梁损伤识别问题, 研制了一种新型两端固定梁结构光纤布拉格光栅 (FBG) 振动传感器, 实现了工字钢梁振动响应的有效获取。在此基础上, 研究了工字钢梁损伤自动识别方法, 利用其对 FBG 振动传感器获取的振动响应进行处理。该方法采用小波包能量比变化偏差 (ERVD) 作为损伤特征, 进而基于极限学习机 (ELM) 算法实现工字钢梁损伤状态识别。传感器仿真模拟和实验测试结果表明: 设计的 FBG 振动传感器频率响应范围为 10~350 Hz, 在加速度响应范围为 0.2g~3.0g 时, 灵敏度为 6.7 pm/g, 具有良好的线性度和横向抗干扰能力。工字钢梁损伤识别实验结果表明: 所提方法对工字钢梁的损伤状态识别准确率达到 96.7%, 与常规的基于 back propagation (BP) 神经网络的损伤识别方法相比, 准确率提高了 3.4 个百分点。

关键词 光纤光学; 光纤布拉格光栅振动传感器; 能量比变化偏差; 极限学习机; 损伤识别

中图分类号 TP212.9

文献标志码 A

doi: 10.3788/CJL202148.1610004

1 引言

工字钢梁是建筑物、桥梁等大型基础设施工程结构的主要承重部件^[1-2], 梁结构一旦受损, 将严重威胁基础设施的安全使用, 甚至引发重大安全事故, 对工字钢梁的安全状态进行监测和损伤进行自动识别是亟需解决的工程问题^[3]。通过在工字钢梁关键位置安装高性能传感器获取其振动响应, 进而利用损伤识别方法判断梁结构的安全状态是当前的主要解决思路。其中, 及时准确获取工字钢梁的振动响应是实现损伤识别的前提^[4], 而合理地选择特征和有效地识别损伤的方法是判断损伤状态的关键。

围绕上述两大问题, 国内外学者开展了大量研究并取得了诸多研究成果。在振动信号获取方面, 由于工字钢梁服役环境恶劣, 传统基于电信号的振动传感器 (线圈式、压电式等) 在抗电磁干扰能力、防水防潮性能、组网等方面存在不足^[5]; 光纤布拉格光

栅 (FBG) 传感器以质量轻、体积小、灵敏度高、抗电磁干扰、组网容易、结构设计灵活和便于实现多物理量监测等诸多优点, 在基础设施工程结构监测领域得到了广泛的应用^[6-8]。当前, 常用的 FBG 振动传感器主要有基于嵌入式^[9]、芯轴式^[10]、膜片或梁式^[11-15]等多种结构。其中, 梁式结构的 FBG 加速度传感器以结构设计灵活、动态范围大等特点, 成为主流的 FBG 振动传感器之一, 受到国内外学者的广泛关注。例如: Feng 等^[12] 使用两根悬臂梁交叉的结构设计了高灵敏度光纤光栅加速度传感器, 传感器的频率响应平坦区约 150 Hz, 灵敏度可达 218.4 pm/g; Khan 等^[13] 设计了一种 L 形改进悬臂梁振动传感器, 在 50 Hz 频率以下, 灵敏度为 46 pm/g, 150 Hz 频率以上, 灵敏度为 306 pm/g; 李岚等^[14] 基于简支梁结构实现了低成本加速度检测; 曾宇杰等^[15] 设计了一种基于 L 形刚性梁和弹性膜片的 FBG 加速度计, 其频率测量范围为 20~70 Hz, 灵敏度约为 220 pm/g。以上传感器在各自应用领取均取得了

收稿日期: 2020-12-24; 修回日期: 2021-01-25; 录用日期: 2021-03-01

基金项目: 国家自然科学基金 (41877230)、山东省重点研发计划 (2019GGX01027)、山东省自然科学基金 (ZR2018MEE052)

通信作者: *wangjingz@sdu.edu.cn

很好的效果,然而现有传感器难以满足工字钢梁宽频率响应和较高灵敏度的测量需求,因此亟待研发新型 FBG 振动传感器,实现工字钢梁振动响应的准确获取。

在准确获取振动响应的基础上,采用可靠的损伤识别方法对振动信号进行处理,进而给出工字钢梁的安全状态是最终的落脚点。在基于振动信息的梁结构损伤识别方面,传统的基于频率、振型、柔度和刚度等动力特性的损伤评估方法^[16-18]能够对梁式结构的损伤程度、损伤位置进行估计,然而基于频率、振型等方法难以准确评估结构局部损伤,基于柔度、刚度信息的方法往往难以准确测量,导致损伤识别不准确。另一种是基于振动信号特征的损伤识别方法,普遍是特征提取方法,如 Hilbert-Huang 变换、卡尔曼滤波、小波变换等。其中,总体平均经验模态分解(EEMD)^[19-21]能够抑制模态混淆,实现振动响应的有效提取,但该方法存在计算量较大、白噪声不能被完全中和的问题;自适应广义卡尔曼滤波方法(AEKF-UI)^[22]能够准确地追踪损伤发生的时间、位置和程度,但初始状态和噪声统计特性并不总是完全已知的;因对损伤较为敏感,小波包能量谱^[23]的能量变化特征具有噪声鲁棒性,可有效表征结构的损伤状态,已成为特征提取的优选方法。在振动特征有效提取的基础上,近年来发展了大量基于神经网络的损伤识别技术,用于梁结构损伤状态的自动识别,代表性的如:Tran-Ngoc 等^[24]采用的人工神经网络,估计了梁结构的损伤位置和程度;He 等^[25]利用的卷积神经网络,使用结构响应递推图,反映了桥梁的内部结构、相似度和损伤信息;Yang 等^[26]结合的柔度曲率法和卷积神经网络,实现了桥梁损伤识别。但是神经网络识别方法需要较多的初始样本、较长的训练时间,限制了其推广应用。

围绕工字钢梁状态可靠监测和损伤有效识别的需求,本文设计了一种两端固定结构的新型

FBG 振动传感器。首先提取振动信号的小波包能量比变化偏差(ERVD)作为损伤特征;然后利用训练简单、训练速度快、泛化能力好的极限学习机(ELM)分类算法识别工字钢梁损伤状态。结果表明:所提方法可有效识别工字钢梁结构的损伤程度,损伤识别准确率达到 96.7%,证明了所提基于 FBG 振动传感器结合 ELM 算法的方法对工字钢梁损伤识别的可行性和有效性,具有良好的应用前景。

2 新型结构 FBG 振动传感器设计

2.1 FBG 振动传感原理和传感器结构

根据 FBG 传感理论,忽略温度作用,光纤光栅中心波长随轴向应变变化的关系为

$$\frac{\Delta\lambda_B}{\lambda_B} = (1 - P_e)\epsilon, \quad (1)$$

式中: $\Delta\lambda_B$ 为应变引起的 FBG 中心波长偏移量, λ_B 为 FBG 中心波长; ϵ 为 FBG 的有效应变; P_e 为光纤的有效弹光系数。研制了一种两端固定工形截面梁结构的新型 FBG 振动传感器,该传感器采用 FBG 作为敏感元件,敏感元件粘贴在工形截面梁上表面。在振动信号激励下,当工形截面梁发生挠度变形时,梁表面应变增大,使 FBG 产生轴向应变,进而引起 FBG 中心波长偏移,即可实现振动信号的检测。

新型 FBG 振动传感器如图 1 所示。工形截面梁两端分别固定在支撑架上,有效长度为 20.0 mm,宽度为 8.0 mm,厚度为 0.2 mm;振子是直径 Φ 为 10.0 mm,高度为 8.0 mm 的圆柱结构,通过螺丝固定在工形截面梁正下方的中心位置处。为增加振动传感器频率测量范围并提升其加速度灵敏度,采用工形截面梁作为振动传感器的核心敏感部件,工形截面梁关键部位尺寸如图 1(a)所示,其中虚线处为粘贴的短栅距光纤光栅^[27],其中心波长为 1551.418 nm,3 dB 带宽为 0.25 nm。

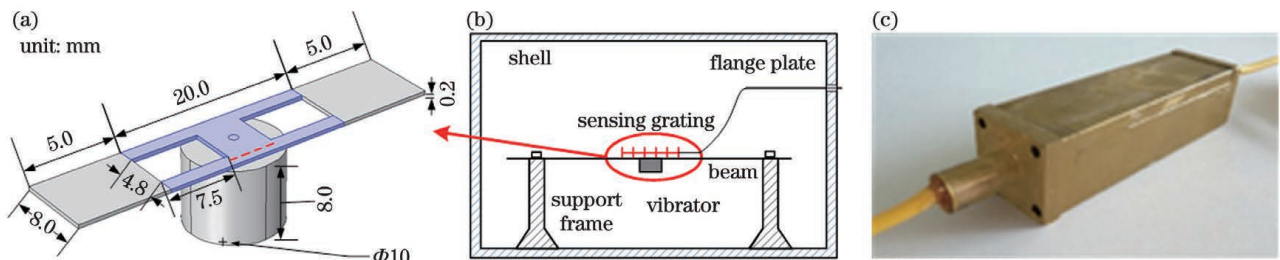


图 1 新型 FBG 振动传感器。(a)工字型截面;(b)结构图;(c)实物图

Fig. 1 New FBG vibration sensor. (a) I-typed section; (b) structure diagram; (c) physical drawing

2.2 传感器仿真分析

采用 COMSOL Multiphysics 软件对新型 FBG 振动传感器的敏感部件进行仿真;采用长方体结构模拟梁结构,在该结构中去掉两块体积为 $7.5\text{ mm} \times 4.8\text{ mm} \times 0.2\text{ mm}$ 的长方体区域,形成工形截面梁;采用直径 Φ 为 10.0 mm ,高度为 8.0 mm 的圆柱体模拟振子质量块,质量块与梁中

心固定连接。在该工形截面梁结构两端施加固定约束,在振子上施加振动信号,对传感器在不同振动频率和加速度下的响应特性进行仿真分析。本次仿真中,完整网格包含 36327 个域单元、9714 个边界元和 932 个边单元。该工形截面梁结构一阶模态的位移云图和应变云图如图 2 所示,仿真所得一阶谐振频率为 568.6 Hz 。

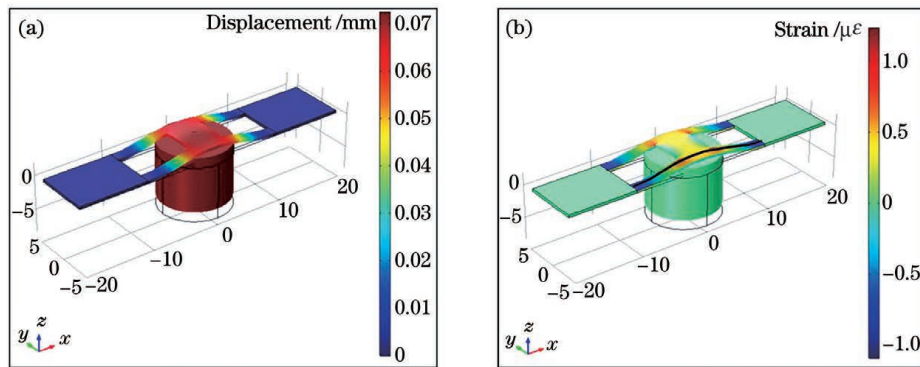


图 2 传感器模态仿真。(a)一阶模态位移云图;(b)一阶模态应变云图

Fig. 2 Modal simulation of the sensor. (a) Displacement nephogram of the first order modal; (b) strain nephogram of the first order modal

为有效避免光纤光栅应变分布不均匀导致的啁啾效应(光谱展宽、传感精度降低),提取光纤光栅粘贴位置处的应变分布。图 3(a)是图 2(b)中长为 20.0 mm 的黑色曲线位置的应变分布,从中选取应

变较均匀区域粘贴光纤光栅。图 3(b)是图 1(a)中长为 5.0 mm 的虚线位置的应变分布,可以看出在该区域内应变波动较小,可认为该区域应变较均匀,因此选择该区域粘贴光纤光栅。

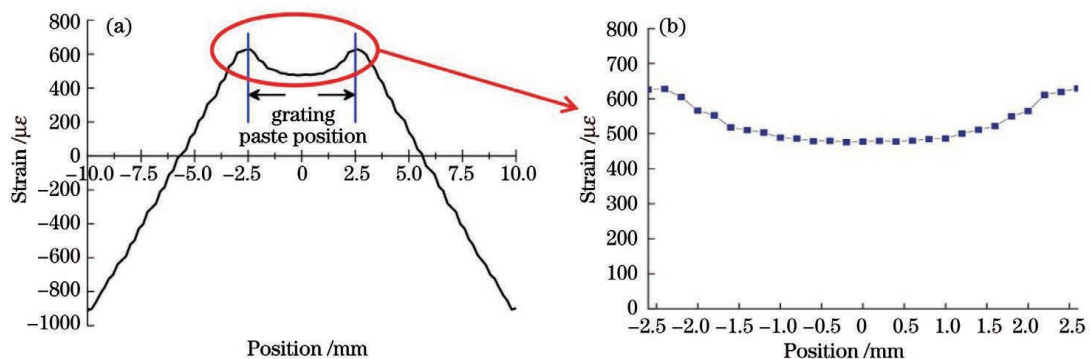


图 3 应变分布。(a)长度为 20.0 mm 的黑色曲线位置的应变分布;(b)光栅粘贴位置处的应变分布

Fig. 3 Strain distribution. (a) Strain distribution of black curve position with length of 20.0 mm ; (b) strain distribution at the grating paste position

对该传感器在不同频率、不同加速度条件下的振动响应特性进行仿真分析。加速度为 $2.0g$ 时,该传感器对 $0\sim 1000\text{ Hz}$ 不同频率振动信号的响应特性曲线如图 4(a)所示。仿真结果表明,在频率为 $0\sim 400\text{ Hz}$ 时,该传感器具有较好的平坦响应区。在振动频率为 300 Hz 时,逐步增大加速度,并提取光纤光栅中心位置的最大应变。在加速度为 $0\sim 4.0g$ 时,最大应变随加速度的变化曲线如图 4(b)所示,结

果表明该传感器的最大应变随加速度线性增大。

2.3 传感器性能测试实验

将研制的 FBG 振动传感器粘贴在振动台中心位置处,通过计算机与伺服控制系统施加标准的正弦激励信号,检测传感器的频谱特性和冲击特性。实验采用振动台(ES-1.5-150 型,苏州东菱振动实验仪器公司)施加激励,同时采用光纤光栅解调仪(SM130,美国 MOI 公司)实时记录光纤振动传感器

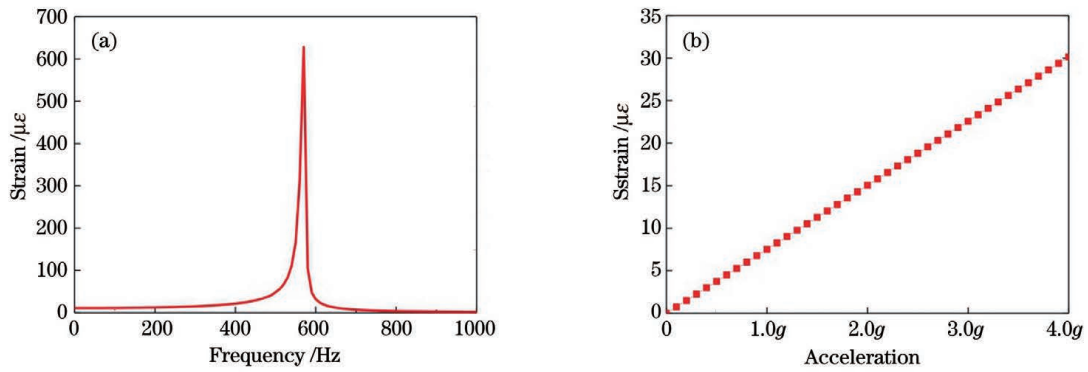


图 4 传感器性能仿真。(a) 加速度为 2.0g 时的频率响应; (b) 振动频率为 300 Hz 时的加速响应
 Fig. 4 Sensor performance simulation. (a) Frequency response at acceleration of 2.0g; (b) accelerated response at vibration frequency of 300 Hz

的波长数据, 实验系统如图 5 所示。

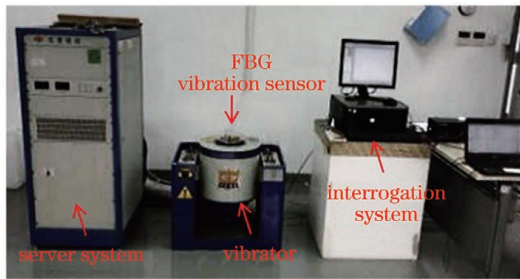


图 5 传感器测试系统
 Fig. 5 Testing system of the sensor

在不同频率和加速度激励下, 对该传感器的时频响应特性进行了测试。外界激励的频率分别为 90 Hz 和 350 Hz, 加速度分别为 1.0g 和 3.0g 时, 该传感器的时域和频域检测结果如图 6 所示。从时域信号可以看出, FBG 振动传感器输出波形符合正弦波形; 图 6(b)、(d) 是对时域信号进行快速傅里叶变换 (FFT) 得到的频谱曲线, 测量结果和实验设置频率参数一致。因此该传感器具有良好的时频响应特性。

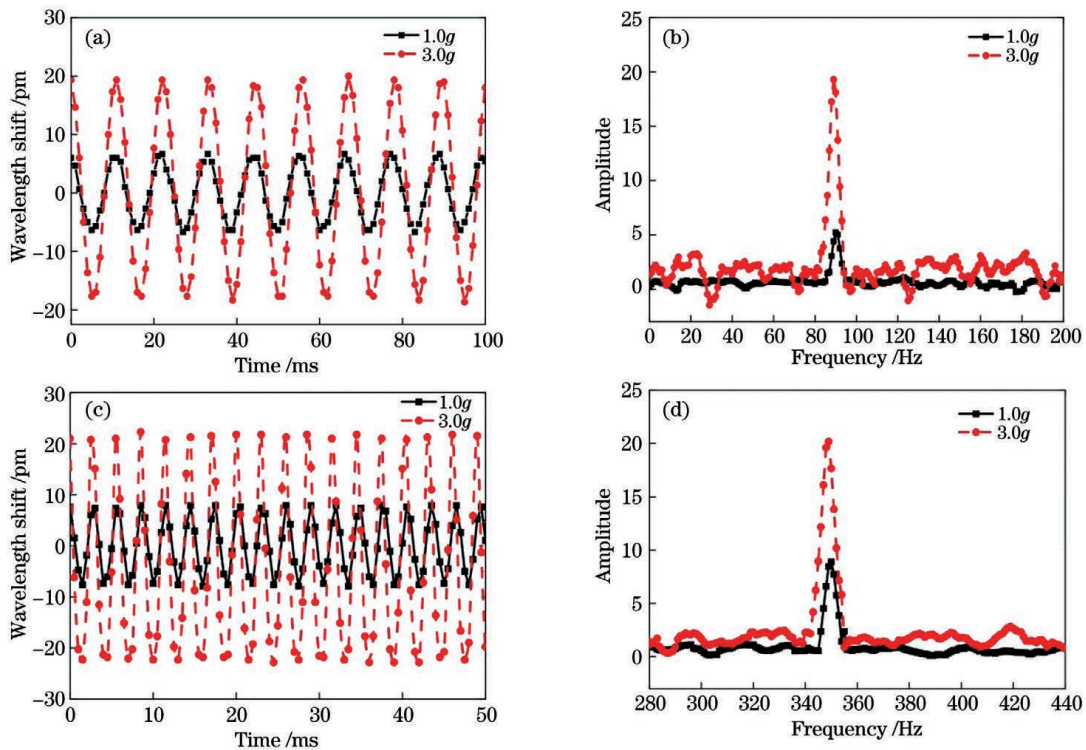


图 6 传感器时频特性响应曲线。(a) 90 Hz 时域; (b) 90 Hz 频域; (c) 350 Hz 时域; (d) 350 Hz 频域
 Fig. 6 Time-frequency response curves of the sensor. (a) Time domain at 90 Hz; (b) frequency domain at 90 Hz; (c) time domain at 350 Hz; (d) frequency domain at 350 Hz

为验证传感器的幅频特性,在加速度一定的条件下,研究传感器中心波长最大漂移量与不同频率的对应关系。设定激励的加速度为 $2.0g$,在 $10\sim 800\text{ Hz}$ 逐渐增加传感器频率,在 $10\sim 400\text{ Hz}$,步长为 20 Hz ;在 $400\sim 800\text{ Hz}$,步长为 10 Hz 。记录传感器中心波长的最大值,曲线如图 7 所示。可以看出传感器在该加速度下的固有频率约为 543.9 Hz ,与仿真结果 568.6 Hz 较好吻合,频率稍有偏差是传感器组装误差等原因导致的。

在不同频率和加速度激励下,对该传感器的光谱图进行了测试。外界激励的频率分别为 90 Hz 和 350 Hz ,加速度分别为 $1.0g$ 和 $3.0g$ 时,该传感器的光谱如图 8 所示。可以看出 FBG 光谱随着加速度的

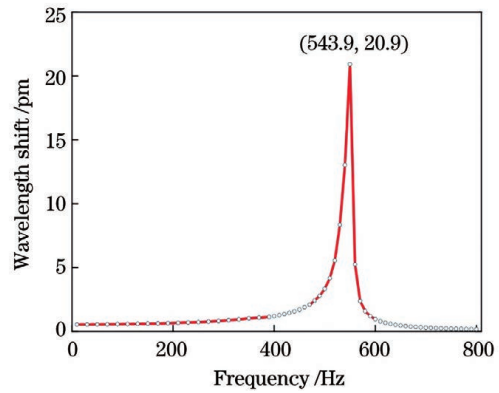


图 7 传感器幅频特性响应曲线

Fig. 7 Amplitude frequency response curve of sensor
增加未发生展宽,说明该传感器有效避免了啁啾现象。

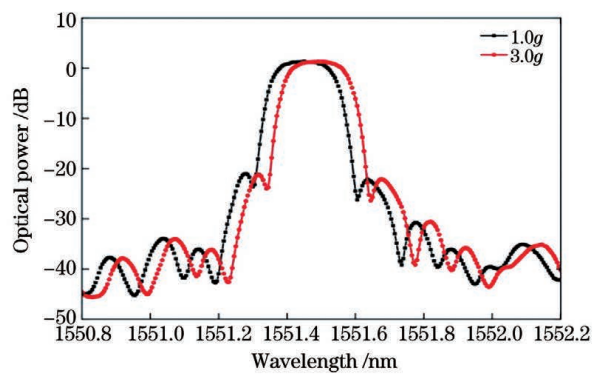
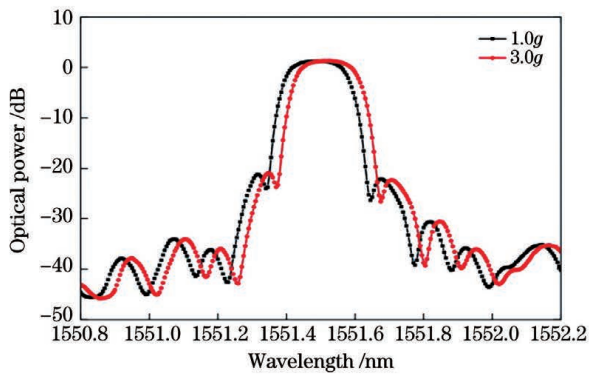


图 8 不同频率下短距光栅的光谱。(a) 90 Hz ; (b) 350 Hz

Fig. 8 Spectra of short grating at different frequencies. (a) 90 Hz ; (b) 350 Hz

当频率一定时,对该传感器的加速度响应特性进行了测试。外界激励的频率为 300 Hz 时,对该传感器的加速度响应特性进行了测试,步长为 $0.2g$,每步重复 3 次实验,加速度响应特性曲线如图 9 所示。结果表明:传感器的加速度和波长偏移量呈准线性关系,线性拟合度均在 99% 以上,线性度良好;传感器的灵敏度为 6.7 pm/g ;传感器的重复性误差约为 1.7% ,具有较好的重复性。

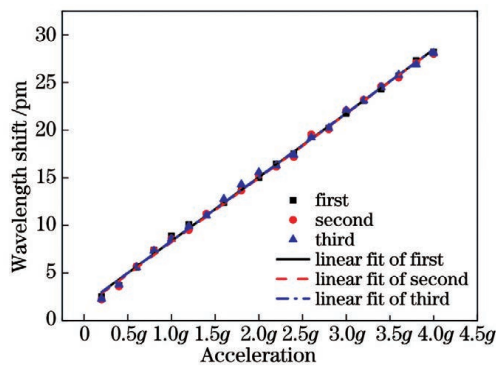


图 9 加速度响应重复性曲线

Fig. 9 Acceleration response repeatability curve

为验证传感器的横向抗干扰特性,分别在纵向和横向上施加频率为 90 Hz ,幅度为 $3.0g$ 的激励信号,传感器的抗干扰特性如图 10 所示。纵向响应和横向响应分别为 38.0 pm 和 1.6 pm ,横向灵敏度为纵向灵敏度的 4.2% ,说明该传感器在载荷作用下产生近似单一自由度的振动,具有较强的横向抗干扰特性。

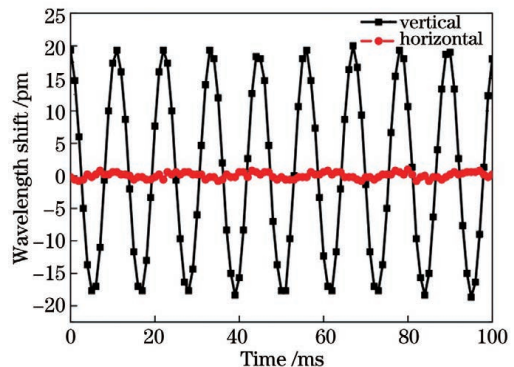


图 10 抗干扰特性曲线

Fig. 10 Anti-interference characteristic curve

综上所述,针对工字钢梁的振动信号获取问题,

设计的新型结构 FBG 振动传感器的频率为 10~350 Hz,在加速度为 0.2g~3.0g 时,传感器灵敏度为 6.7 pm/g,具有较好的重复性和横向抗干扰能力。

3 工字钢梁特征提取和损伤识别

3.1 实验介绍

实验采用了长度为 300 mm 的 12# I 型工字钢梁,将钢梁两端分别固定,有效振动的长度为 200 mm,钢梁截面方向与地面垂直。在实际情况中,疲劳或腐蚀引起的梁结构性能退化多表现为横截面的不规则损伤,而横截面的一个或多个裂缝被认为是梁结构损伤^[28]。在实验中,利用 4 mm 厚的圆锯造成的切口模拟梁结构损伤,如图 11 所示。

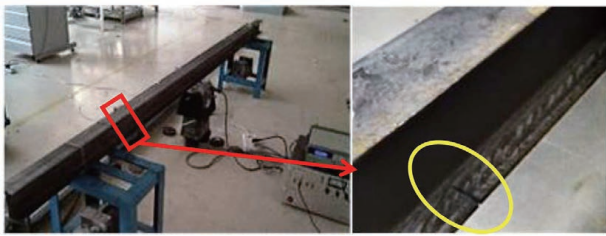


图 11 工字梁结构损伤模拟

Fig. 11 Structural damage simulation of I-beam

提出工字钢梁结构的三种工况,其中两种损伤

状态对应于梁结构不同位置的损伤。模拟损伤位于钢梁的下翼,具体三种工况:1)健康状态;2)一道损伤,裂缝位于工字钢梁下端的横梁上,距离左端起始位置 22 mm,裂缝宽 4 mm、深 32 mm;3)两道损伤,第一道裂缝位置、宽度和深度与工况 2)中裂缝一致,第二道裂缝距离左端起始位置 87 mm,裂缝宽 4 mm、深 32 mm。在不同的工况条件下进行实验,将 FBG 传感器粘贴在工字钢梁侧壁上表面的中心位置处,粘贴方向与工字钢梁轴线平行。工字钢梁结构损伤工况和 FBG 传感器粘贴位置如图 12 所示。

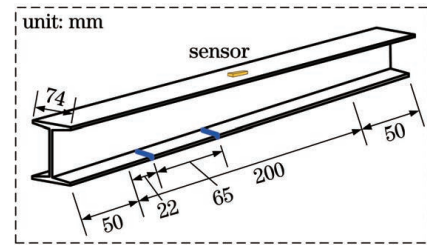


图 12 工字钢梁工况示意图

Fig. 12 Schematic of I-beam working condition

实验采用激振台(JZ-20,北京远东测振仪器厂)对工字钢梁施加频率为 2 Hz、加速度为 2.0g 的激励,激振位置为工字钢梁中间正下方。三种工况下所得时域信号如图 13(a)、(c)、(e)所示,对应的频

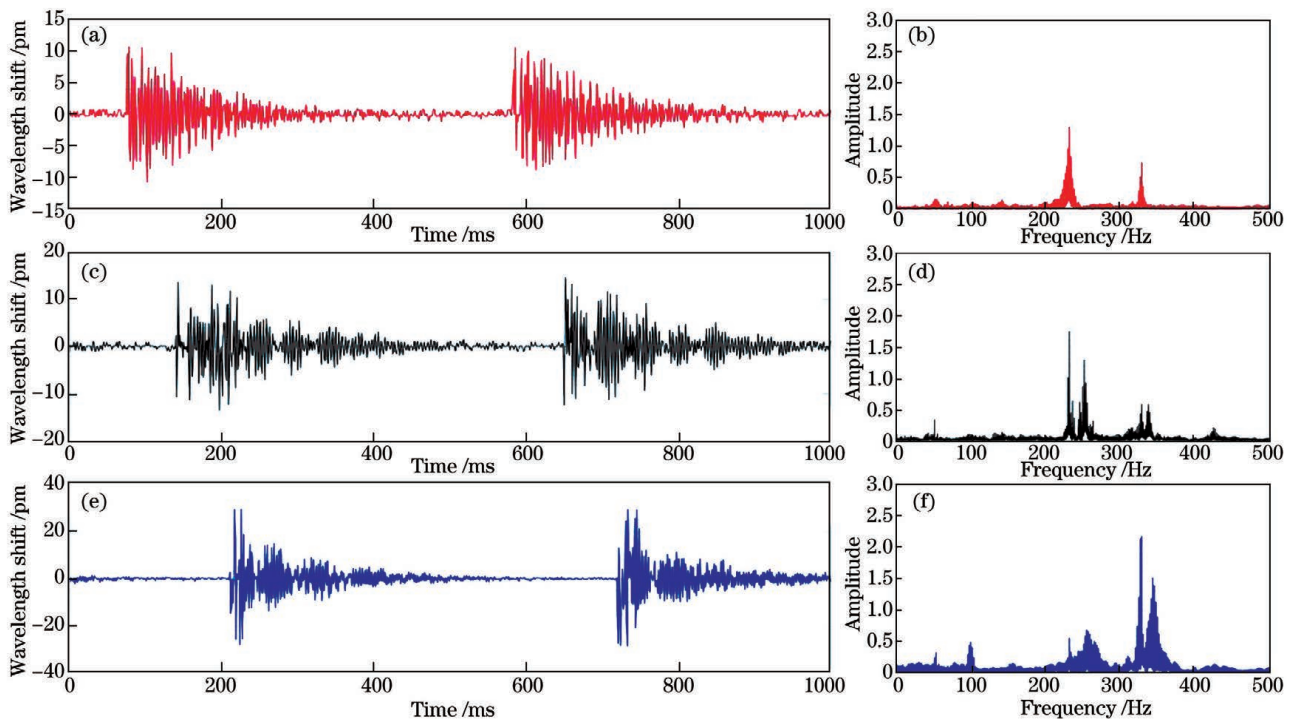


图 13 传感器时频域响应特性。(a)健康状态的时域响应;(b)健康状态的频域响应;(c)一道损伤的时域响应;(d)一道损伤的频域响应;(e)两道损伤的时域响应;(f)两道损伤的频域响应

Fig. 13 Time-frequency domain response characteristic of the sensor. (a) Time domain response of health status; (b) frequency domain response of health status; (c) time domain response of one crack; (d) frequency domain response of one crack; (e) time domain response of two cracks; (f) frequency domain response of two cracks

域分析图如图 13(b)、(d)、(f) 所示。结果表明:损伤状态下信号频率分布偏高,但无明显的差异,不能直接对工字钢梁的损伤进行识别。

3.2 基于小波包能量谱的特征提取

小波包能量对信号变化十分敏感,若被测结构发生损伤,信号分量中某个或某几个分量会发生能量的增减。由于观测噪声的能量在各频带分布较为均匀,故采用各频带能量相对于所有能量的变化 I 表示,各特征频带的能量比 I_k 作为损伤识别参数,公式为

$$I_k = E_{f_{k,j}} / \left(\sum_{i=1}^{2^j} E_{f_{i,j}} / 2^j \right), k = 1, 2, \dots, m, \quad (2)$$

式中: i 、 j 分别表示小波包函数的调制参数、尺度参数; $f_{i,j}(t)$ 表示小波包组分能量信号,小波包组分能量 $E_{f_{i,j}}$ 可视为存储于组分信号 $f_{i,j}(t)$ 的能量; m 表示选取 m 个较大能量的频带信号。对各频带的

能量比 I_k 进行归一化处理,然后通过能量比 I_k 的变化(ERV),使用 V 表示,判断结构的损伤情况,即

$$V_k = |I_{uk} - I_{dk}|, \quad (3)$$

式中: V_k 为第 k 个特征频带的能量比变化; I_{uk} 和 I_{dk} 分别为结构在健康状态和损伤状态下第 k 个特征频带的能量比。为识别被测结构不同的损伤状态,在各特征频带能量比变化 V_k 的基础上,提出了结构损伤指标,小波包 ERVD,使用 D 表示:

$$D = \sqrt{\sum_{k=1}^m (V_k - \bar{V})^2}, \quad (4)$$

式中: \bar{V} 为多次重复实验测得的健康状态信号小波包能量谱分布的均值。

采用小波包能量分析的方法,对三种工况下的实验数据进行小波包分解。采用了 db19 作为小波函数,分解层次为 6。根据(2)式计算三种工况下的能量比 I 。所得实验结果如图 14 所示。

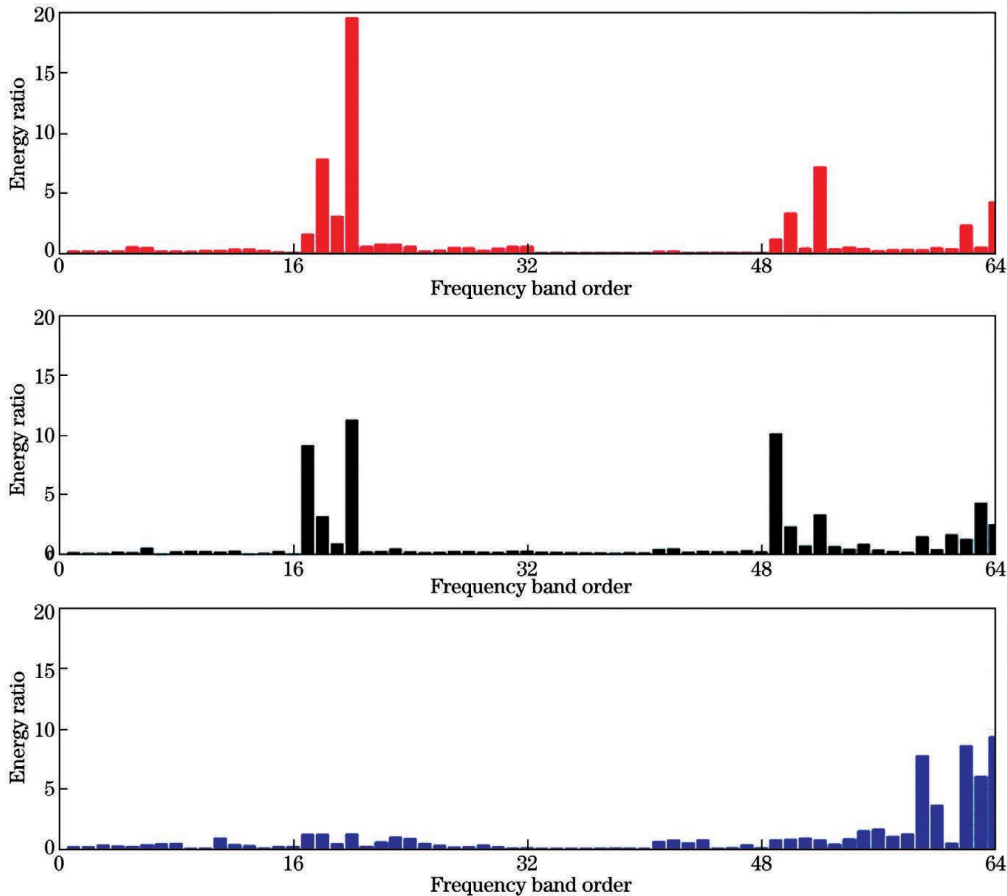


图 14 三种工况频带的能量比。(a)健康状态;(b)一道损伤;(c)两道损伤

Fig. 14 Energy ratio of three operating frequency bands. (a) Health status; (b) one crack; (c) two cracks

实验结果表明:工况 1) 的特征频带能量比主要分布于第 20 频带附近,且第 20 频带附近能量比较大,即相对集中分布于低频;工况 2) 的特征频带能量比分布比较分散,相比工况 1),第 20 频带附近能

量减弱,第 50 频带和第 60 频带附近的能量增大;工况 3) 的特征频带能量比主要分布于第 60 频带附近,且与前两种工况相比,第 60 频带附近能量比大幅增加,即相对集中分布于高频。总之,能量比在高

低频带的分布差异可反映被测结构的损伤程度。

为了更好地识别结构损伤程度,根据(4)式计算三种工况小波包 D 。所得实验结果如图 15 所示。实验结果表明:结构损伤指标 D 在工况 1)中约为 3.2;在工况 2)中大幅增大,约为 15.7,在工况 3)中 D 进一步增大,约为 23.0。由此可见,随着工字钢

梁损伤程度的增加,损伤指标特征增大,证明了结构损伤指标 D 可以较好地反映梁结构的损伤状态。故采用 D 直接作为表征梁结构损伤状态的特征量。同时在三种工况下,能量比加权变化不是一个恒定值,不同的实验会有一个较小范围的波动,这主要是实验室的噪声信号引起的。

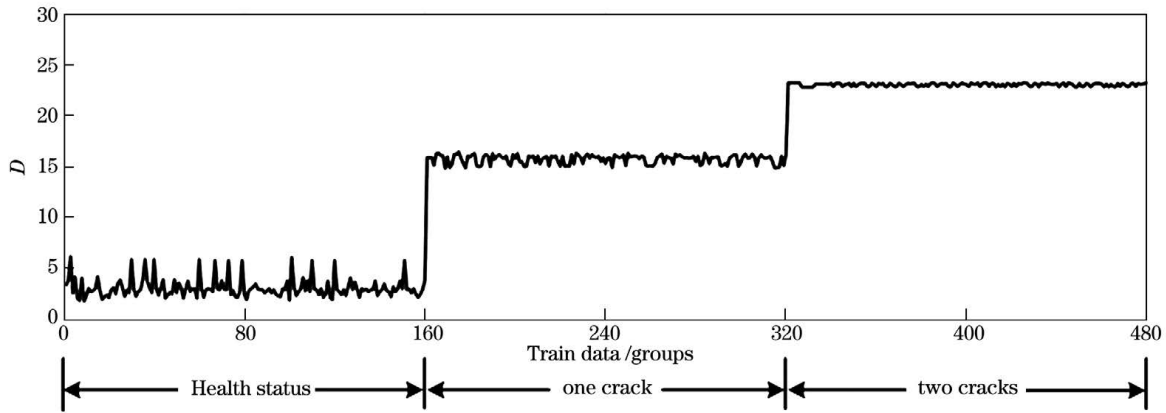


图 15 小波包能量比特征

Fig. 15 Wavelet packet energy ratio characteristic

3.3 基于 ELM 的工字钢梁损伤识别

将图 15 中的 3 维 480 组(160 组健康状态, 160 组一道损伤, 160 组两道损伤)特征信息作为所有损伤识别模型的训练数据样本;另取传感器检测到的 3 维 90 组(30 组健康状态, 30 组一道损伤, 30 组两道损伤)特征信息作为损伤识别的测试数据样本。

ELM 最早在 2006 年由 Huang 等^[29]提出,工作原理是以随机的方式实现输入层权重的调整和隐含层阈值的产生。与传统的使用梯度下降反复迭代得到网络参数的 back propagation(BP)神经网络相比,ELM 只是对隐含层之中的节点个数进行明确,具有训练参数少、学习速度快、泛化能力强的优点^[30-31]。假设有 N 个任意样本 $\{(x_p, t_p), x_p \in \mathbf{R}^n, t_p \in \mathbf{R}^q\}$, 其中 $\mathbf{R}^n, \mathbf{R}^q$ 分别指 n, q 维向量,对于一个有 L 个隐藏神经元的 ELM,输出函数可表示为

$$f(x) = h(x)\mathbf{H}^T \left(\frac{I}{c} + \mathbf{H}\mathbf{H}^T \right)^{-1} \mathbf{T}, \quad (5)$$

式中: \mathbf{H} 为神经网络隐藏层矩阵;输入 x 经过隐藏层映射后的输出 $h(x) = [h_1(x), h_2(x), \dots, h_L(x)]$; \mathbf{T} 为预测目标向量; I/c 为给对称矩阵对角元素加上的偏置量。

根据 ELM 理论,用训练数据构建 ELM 损伤识别模型。该损伤识别模型的输入层为 1 个节点,输出层为 1 个节点。结构损伤模式和对应的输出形式如表 1 所示。

表 1 损伤模式和对应的输出形式

Table 1 Damage mode and corresponding output form

Damage mode	Output form
Health status	1
One crack	2
Two cracks	3

为验证所构建的 ELM 损伤识别模型的有效性,设计了 BP 损伤识别模型作为对比,并使用未参与建模的测试数据分别对两个损伤识别模型的有效性进行验证,结果如表 2 所示。在三种工况 90 组测试样本中,ELM 和 BP 损伤识别模型识别错误样本分别为 3 组和 6 组,损伤识别准确率分别为 96.7%、93.3%。为更直观表示,将 90 组测试样本以具体识别情况画出,结果如图 16 所示。

表 2 两种损伤识别模型的验证结果

Table 2 Verification result of two damage identification models

Recognition model	Number of tests /groups	Number of errors /groups	Accuracy /%
ELM	90	3	96.7
BP	90	6	93.3

由实验结果可知,测试样本为 90 组,其中前 30 组为工字钢梁结构健康状态,ELM 损伤识别模型识别错误样本 2 组,同工况下,BP 损伤识别模型

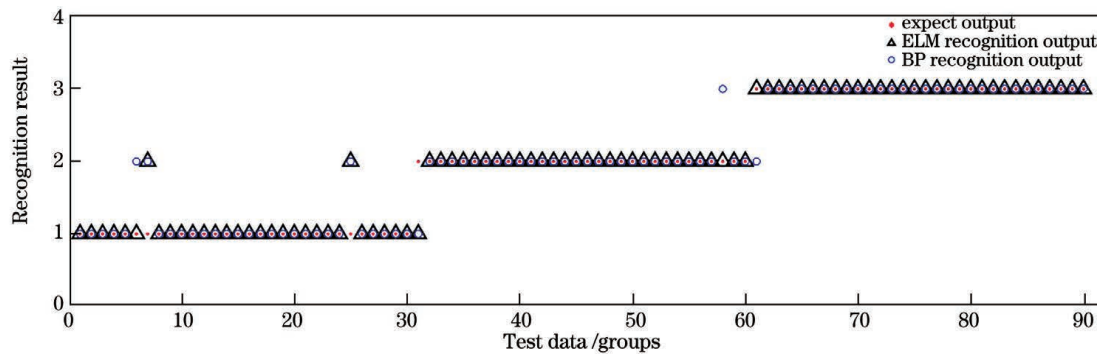


图 16 ELM 和 BP 识别对比结果

Fig. 16 Identification and comparison results between ELM and BP

识别错误样本 3 组;30 至 60 组工况为一道损伤, ELM 损伤识别模型识别错误样本 1 组, BP 损伤识别模型识别错误样本 2 组;最后 30 组工况为两道损伤, ELM 损伤识别模型识别错误样本 0 组, BP 损伤识别模型识别错误样本 1 组。结果表明,采用小波包能量谱方法对梁结构损伤时域信号进行特征提取后,采用 ELM 方法进行损伤识别,损伤识别准确率达到 96.7%,与准确率为 93.3%的 BP 损伤识别模型相比,准确率更高,同时验证了 ELM 损伤识别模型的有效性。

4 结 论

围绕工字钢梁状态可靠监测和损伤有效识别的需求,研制了一种两端固定梁结构的新型 FBG 振动传感器,进而提出 ELM 分类方法,实现了对梁结构的损伤识别。对传感器进行仿真模拟和性能测试实验,结果表明,在加速度为 $0.2g \sim 3.0g$ 、工作频率为 $10 \sim 350$ Hz 时,传感器具有良好的加速度响应特性,且具有较好的重复性和横向抗干扰能力。将其应用到梁结构损伤识别过程中进行检验,使用小波包 ERVD 作为损伤特征,利用 ELM 方法对梁结构损伤进行识别,初步测试结果表明该方法学习速度快、泛化能力好,损伤程度识别准确率达到 96.7%,比 BP 损伤识别准确率高 3.4 个百分点。利用 FBG 振动传感技术,以 ERVD 作为损伤识别特征的 ELM 识别方法具有有效性,适用于梁结构损伤识别研究,具有良好的应用前景。

参 考 文 献

- [1] Toydemir B, Kocak A, Sevim B, et al. Ambient vibration testing and seismic performance of precast I beam bridges on a high-speed railway line[J]. Steel and Composite Structures, 2017, 23(5): 557-570.
- [2] Tian S Z, Wen K, Wang D P. Study on damage location of steel beam based on Long-gage fiber grating sensor[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2013, 50(4): 040603.
田石柱, 温科, 王大鹏. 基于长标距光纤光栅传感器的钢梁损伤定位研究[J]. 激光与光电子学进展, 2013, 50(4): 040603.
- [3] Thambiratnam D. Preserving our infrastructure through structural health monitoring[C]// Proceedings of the 26th International Congress on Sound and Vibration ICSV 2019, July 7-11, 2019, Montreal, Canada. Montreal: The Annual Congress of the International Institute of Acoustics and Vibration, 2019: 3085.
- [4] Li X H, Shi D Y, Yu Z H. Nondestructive damage testing of beam structure based on vibration response signal analysis[J]. Materials, 2020, 13(15): 3301-3314.
- [5] Liu J, Liu S T, Gao R J, et al. An accurate analytical expression for predicting the performance of piezoelectric cantilever based actuators and sensors [J]. Optics and Precision Engineering, 2018, 26(2): 380-387.
刘骥, 刘书田, 高仁璟, 等. 基于压电悬臂梁的驱动器与传感器性能分析的精确解析模型[J]. 光学精密工程, 2018, 26(2): 380-387.
- [6] Chen Y, Chen Y W, Liu Z Q, et al. A gear fault detection method based on a fiber Bragg grating sensor[J]. Chinese Journal of Lasers, 2020, 47(3): 0304007.
陈勇, 陈亚武, 刘志强, 等. 基于光纤布拉格光栅传感的齿轮故障检测方法[J]. 中国激光, 2020, 47(3): 0304007.
- [7] Liu Z, Liu P Z, Zhou C Y, et al. Structural health monitoring of underground structures in reclamation area using fiber Bragg grating sensors[J]. Sensors, 2019, 19(13): 2849-2863.
- [8] Li H, Zhao Q C, Jiang S D, et al. FP cavity and FBG cascaded optical fiber temperature and pressure

- sensor[J]. Chinese Optics Letters, 2019, 17(4): 040603.
- [9] Liang T C, Lin Y L. Ground vibrations detection with fiber optic sensor[J]. Optics Communications, 2012, 285(9): 2363-2367.
- [10] Zhang Y S, Qiao X G, Liu Q P, et al. Study on a fiber Bragg grating accelerometer based on compliant cylinder[J]. Optical Fiber Technology, 2015, 26: 229-233.
- [11] Wei L, Yu L L, Jiang D Z, et al. Fiber Bragg grating accelerometer based on diaphragm and diamond structure[J]. Chinese Journal of Lasers, 2019, 46(9): 0910003.
魏莉, 余玲玲, 姜达州, 等. 基于膜片与菱形结构的光纤布拉格光栅加速度传感器[J]. 中国激光, 2019, 46(9): 0910003.
- [12] Feng D Y, Qiao X G, Yang H Z, et al. A fiber Bragg grating accelerometer based on a hybridization of cantilever beam[J]. IEEE Sensors Journal, 2015, 15(3): 1532-1537.
- [13] Khan M M, Panwar N, Dhawan R. Modified cantilever beam shaped FBG based accelerometer with self temperature compensation [J]. Sensors and Actuators A: Physical, 2014, 205: 79-85.
- [14] Li L, Dong X Y, Zhao C L, et al. Simply-supported beam-based fiber Bragg grating vibration sensor[J]. Infrared and Laser Engineering, 2011, 40(12): 2497-2500.
李岚, 董新永, 赵春柳, 等. 简支梁结构的光纤光栅振动传感器[J]. 红外与激光工程, 2011, 40(12): 2497-2500.
- [15] Zeng Y J, Wang J, Yang H Y, et al. Fiber Bragg grating accelerometer based on L-shaped rigid beam and elastic diaphragm for low-frequency vibration measurement[J]. Acta Optica Sinica, 2015, 35(12): 1206005.
曾宇杰, 王俊, 杨华勇, 等. 基于 L 形刚性梁与弹性膜片结构的低频光纤光栅加速度传感器[J]. 光学学报, 2015, 35(12): 1206005.
- [16] Zhao L W, Zhan Y Z, Zi H G. Numerical research on damage detection of simple supported beam based on the natural frequency vector method[J]. Applied Mechanics and Materials, 437: 513-516.
- [17] Wang S Q, Xu M Q. Modal strain energy-based structural damage identification: a review and comparative study[J]. Structural Engineering International, 2019, 29(2): 234-248.
- [18] Stutz L T, Rangel I C S S, Rangel L S, et al. Structural damage identification built on a response surface model and the flexibility matrix[J]. Journal of Sound and Vibration, 2018, 434: 284-297.
- [19] Han J P, Zheng P J, Wang H T. Structural modal parameter identification and damage diagnosis based on Hilbert-Huang transform[J]. Earthquake Engineering and Engineering Vibration, 2014, 13(1): 101-111.
- [20] Huang C J, Hu J Y, Yang Y F. Persistent scatterer detection method based on empirical mode decomposition[J]. Acta Optica Sinica, 2019, 39(5): 0528006.
黄长军, 胡纪元, 杨亚夫. 一种基于经验模态分解的永久散射体探测方法[J]. 光学学报, 2019, 39(5): 0528006.
- [21] Zhang Y, Lian J J, Liu F. An improved filtering method based on EEMD and wavelet-threshold for modal parameter identification of hydraulic structure [J]. Mechanical Systems and Signal Processing, 2016, 68/69: 316-329.
- [22] Mu T F, Zhou L. Structural damage identification using adaptive extended Kalman filter with unknown inputs[J]. Journal of Vibration Engineering, 2014, 27(6): 827-834.
穆腾飞, 周丽. 输入未知条件下基于自适应广义卡尔曼滤波的结构损伤识别[J]. 振动工程学报, 2014, 27(6): 827-834.
- [23] Shen C, Qian D L. Experimental investigation of the seismic damage effect of foundation on frame-core tube structures considering foundation soil based on the wavelet packet energy[J]. Journal of Vibration and Shock, 2019, 38(16): 174-180.
沈超, 钱德玲. 基于小波包能量的地基土对框筒结构地震损伤影响试验研究[J]. 振动与冲击, 2019, 38(16): 174-180.
- [24] Tran-Ngoc H, Khatir S, de Roeck G, et al. An efficient artificial neural network for damage detection in bridges and beam-like structures by improving training parameters using cuckoo search algorithm [J]. Engineering Structures, 2019, 199: 109637.
- [25] He H X, Zheng J C, Liao L C, et al. Damage identification based on convolutional neural network and recurrence graph for beam bridge[J]. Structural Health Monitoring, 2020, 4: 1392-1408.
- [26] Yang S Q, Huang Y. Damage identification method of prestressed concrete beam bridge based on convolutional neural network[J]. Neural Computing and Applications, 2021, 33(2): 535-545.
- [27] Wang Z F, Wang J, Sui Q M, et al. Optimal design of miniature FBG soil pressure sensor and its application to geotechnical model test[J]. Journal of Engineering Geology, 2015, 23(6): 1085-1092.
王正方, 王静, 隋青美, 等. 微型 FBG 土压力传感器的优化设计及其模型试验应用研究[J]. 工程地质学

- 报, 2015, 23(6): 1085-1092.
- [28] Palechor E U L, Bezerra L M, de Moraes M V G, et al. Damage identification in beams using additional rove mass and wavelet transform [J]. *Frattura Ed Integrità Strutturale*, 2019, 13(49): 614-629.
- [29] Huang G B, Zhu Q Y, Siew C K. Extreme learning machine: theory and applications [J]. *Neurocomputing*, 2006, 70(1/2/3): 489-501.
- [30] Kourehli S S, Ghadimi S, Ghadimi R. Vibration analysis and identification of breathing cracks in beams subjected to single or multiple moving mass using online sequential extreme learning machine [J]. *Inverse Problems in Science and Engineering*, 2019, 27(8): 1057-1080.
- [31] Bayat M, Ahmadi H R, Mahdavi N. Application of power spectral density function for damage diagnosis of bridge piers [J]. *Structural Engineering & Mechanics*, 2019, 71(1): 57-63.

Damage Identification of I-Beam Based on Fiber Bragg Grating Vibration Sensor and Extreme Learning Machine

Li Yijia, Wang Zhengfang, Wang Jing*, Sui Qingmei

School of Control Science and Engineering, Shandong University, Jinan, Shandong 250061, China

Abstract

Objective The potential damages of an I-beam structure may lead to safety accidents and adversely affect the safe operation of large-scale infrastructures such as buildings and bridges. The structural state monitoring and damage identification of an I-beam are critical to ensure its safe operation. Compared with traditional electronic-based vibration monitoring techniques, the fiber Bragg grating (FBG) sensor is small, high in sensitivity, anti-electromagnetic interference, and easy multiplexing. It is thus preferred to be employed for collecting the vibration signal of the I-beam structure of the infrastructure. However, the existing FBG vibration sensors are difficult to meet the requirements of wide frequency response and high sensitivity measurement of I-beam. Therefore, the first issue to be solved is the accurate sensing techniques of vibration signals. Apart from vibration sensing, another issue to be tackled lies in the damage identification of I-beam structure. The neural network and its transformer-based identification methods that have been developed recently depend on a large amount of training data and are slow in training, which limit its generalization in practical applications. To solve the aforementioned two issues, a novel FBG vibration sensor with two ends fixed beam was designed for vibration sensing. Moreover, the extreme learning machine (ELM) algorithm was employed to identify the damage state of the I-beam. We hope the results can be helpful to promote the safety monitoring and damage evaluation techniques of I-beam structures.

Methods In this paper, a novel FBG vibration sensor with a double-ended fixed beam structure was designed, and the ELM-based automatic damage identification method of the I-beam was studied. First, a novel I-shape beam structure was designed as vibration-sensitive components of the FBG sensor. Then, we performed finite element simulations as well as testing experiments on the sensor to test its performance. After that, the energy ratio variation deviation (ERVD) of the wavelet packet was extracted as the damage feature to characterize the damage state of the I-beam. In addition, then the ELM algorithm was followed for the damage evaluation of the I-beam, The back propagation (BP) based damage identification method was used as a baseline model for comparison.

Results and Discussions In this paper, a novel FBG sensor with a beam structure fixed at both ends was developed, and the ELM classification method was used to realize the damage identification of the beam structure. The results of the simulation and experiments show that the novel FBG vibration sensor has good acceleration response and time-frequency response characteristics within the acceleration range of $0.2g$ – $3.0g$ and the operating frequency range of 10–350 Hz. The natural frequency of the sensor, when the acceleration was $2.0g$ was about 543.9 Hz (Fig. 7), agreed well with the simulation result of 568.6 Hz. The sensitivity of the sensor was approximately $6.7 \text{ pm}/g$, and the repeatability error of the sensor was about 1.7% (Fig. 9). The lateral sensitivity was 4.2% of the longitudinal sensitivity (Fig. 10). In addition, the structural damage index, ERVD, was about 3.2 for Case 1), and it significantly increased to about 15.7 for Case 2). For Case 3), the ERVD increased to about 23.0, which indicated that it was capable of reflecting the damage state of the beam structure (Fig. 15). After being

tested on 90 groups of test samples under three working conditions, the accuracy rates of damage identification of the ELM and BP-based damage evaluation models were 96.7% and 93.3%, respectively (Table 2 and Fig. 16).

Conclusions Focusing on the requirements of reliable condition monitoring and effective damage identification of I-beam, this paper developed a novel FBG vibration sensor with a fixed beam structure at both ends and then proposed the ELM classification method to realize the damage identification of the beam structure. The results of the simulation and performance test of the sensor show that the sensor has good acceleration response characteristics in the range of acceleration $0.2g$ – $3.0g$ and operating frequency 10–350 Hz and has a good repeatability and a lateral anti-interference ability. It was applied to the beam structural damage identification process for inspection, using the ERVD as the damage feature, and the ELM was used to identify the beam structure damage. The preliminary test shows that its learning speed is fast, the generalization ability is good, and the damage degree identification accuracy reaches 96.7%, which is 3.4 percent higher than BP damage identification method.

Key words fiber optics; fiber Bragg grating vibration sensor; energy ratio variation deviation; extreme learning machine; damage identification

OCIS codes 060.3735; 130.6010; 110.7410; 150.1135; 350.1820