

文章编号:1001-4888(2019)05-0791-09

基于应变指标和 D-S 证据理论 的简支梁桥损伤识别^{*}

简正坤, 刘习军, 张素侠

(天津大学 机械工程学院, 天津 300072)

摘要: 为了提高桥梁结构的损伤识别准确率,并摆脱对桥梁损伤前信息的依赖,提出基于应变指标和 D-S 证据理论(Dempster 提出由 Shafer 完善形成的一种推理理论)的损伤识别方法。首先采用结构损伤状态下的动态应变响应分别构建应变标准差(SSD)指标和平均伪比能(APSED)指标;然后利用曲线拟合技术对两个应变指标进行改进;最后根据 D-S 证据理论融合两个改进的指标来定位损伤。将所提方法用于一个简支梁桥的数值模型,讨论了损伤程度和测试噪声对损伤识别结果的影响,发现 SSD 和 APSED 对噪声具有较强的鲁棒性,且损伤识别结果准确率高,并通过实验研究验证了所提方法的有效性。

关键词: 应变指标; D-S 证据理论; 简支梁桥; 损伤识别

中图分类号: U447; TU317

文献标识码: A

DOI: 10.7520/1001-4888-18-107

0 引言

工程结构的健康监测在近年来取得很大的进展,基于振动信号的损伤检测方法是一大热点,国内外许多学者对其进行了深入研究。振动信号主要是通过各种类型的传感器获得的,常用于结构健康监测系统的传感器有加速度传感器和应变类传感器,其中,根据加速度信号可以分析得到结构的动力特性参数,其反映的是结构的整体特征,对结构的局部损伤不敏感^[1];应变则是反映结构局部特性的结构响应数据,随着近年来传感器技术的迅速发展,尤其是光纤布拉格光栅传感器的应用,使得大型土木结构的应变测量成为可能。Ding 等^[2]把单元应变模态的变化作为损伤指标来识别损伤位置。Wang 等^[3,4]结合统计矩理论构造了应变响应统计矩指标,用损伤前后的指标变化定位损伤位置,指出应变统计矩指标有较强的鲁棒性,并用梁式结构和板结构验证了该方法的有效性。吴加权等^[5]以应变计获取不同损伤状况下钢筋混凝土梁的应变响应信息,研究了预损伤钢筋混凝土梁结构频率、振型、模态阻尼等动力特性在不同损伤状况下的演变规律,实现了环境激励下钢筋混凝土桥梁结构的损伤识别。李雪艳等^[6]提出用应变脉冲响应协方差指标来进行损伤识别,该指标有较好的抗噪性,对损伤敏感,且对结构损伤程度呈现一致性变化。陈晓强等^[7]基于“比能”的概念提出了平均伪比能(Pseudo Strain Energy Density, APSED)指标,并将其用于桥梁的损伤识别。综上所述,根据应变响应构造损伤指标,直接在时域内进行损伤识别,具有对局部损伤敏感、抗噪性能较强和算法简单的优点。

由于测量噪声、模型参数误差等不确定性因素的存在,由单种损伤指标来判断损伤位置常常导致误

^{*} 收稿日期: 2018-05-11; 修回日期: 2018-09-13

基金项目: 国家自然科学基金(51479136, 51009107); 天津市自然科学基金(17JCYBJC18700); 天津市交通运输科技发展计划项目(2018B-33)资助

通讯作者: 张素侠(1978—), 女, 博士, 副教授。主要研究领域: 结构的损伤监测与健康监控。Email: zhangsux@tju.edu.cn

判和漏判的问题,利用多种损伤识别的结果进行数据融合能有效地解决此问题。刘涛等^[8]将数据融合技术用于钢筋混凝土板实验模型,分析了常用的数据融合 Bayes 方法和 D-S 证据理论(Dempster 提出由 Shafer 完善形成的一种推理理论)的损伤识别有效性。刘习军等^[9,10]将 D-S 证据理论用于梁式桥的损伤识别。张清华等^[11]指出 D-S 证据理论在处理不确定因素等方面比概率理论和 Bayes 理论更有优势。

由于应变指标具有对局部损伤较为敏感的特性,本文提出应变标准差(Strain Standard Deviation, SSD)指标,结合文献^[7]提出的平均伪比能(Average Pseudo Strain Energy Density, APSED)指标,采用 D-S 证据理论的数据融合技术,提出基于应变指标和 D-S 证据理论的损伤识别方法,将所提方法用于简支梁桥的数值模拟和实验测试,验证了所提方法的有效性。

1 基本理论

1.1 应变指标

应变对结构的局部损伤具有较高的敏感性,当结构某测点处发生损伤时,该测点的应变会相应增大,采用动态应变响应构造损伤指标,可以根据损伤指标沿结构的分布有无突变来判断结构是否发生损伤。把振动信号的统计特征作为损伤指标,可以降低识别过程中的不确定性,包括噪声的影响等;基于统计理论,定义测点处的无量纲应变标准差(SSD)指标:

$$SSD_i = \sqrt{\frac{1}{n_i} \sum_{k=1}^{n_i} \left(\epsilon_{i,k} - \frac{1}{n_i} \sum_{k=1}^{n_i} \epsilon_{i,k} \right)^2} \quad (i = 1, 2, \dots, n) \quad (1)$$

其中, $\epsilon_{i,k}$ 为第 i 个测点在 k 时刻的应变响应; n_i 为采样点数; n 为测点总数。

伪比能(PSED)是典型的结构局部能量指标,可以从能量改变的角度来识别损伤,根据结构测点的动态应变响应计算各测点的平均伪比能(APSED)^[7]:

$$APSED_i = \frac{1}{n_i} \sum_{k=1}^{n_i} \frac{E \epsilon_{i,k}^2}{2} \quad (i = 1, 2, \dots, n) \quad (2)$$

利用应变指标 SSD 和 APSED 来判断损伤,具有不必求结构振型、无需建立计算模型的优点,但同时都存在“边界效应”,即靠近支座位置的损伤指标突变较小,无法判断损伤是否发生,特别是针对小损伤的工况。一般的解决办法是通过结构损伤前后的指标之差来判断损伤位置,而现役桥梁结构损伤前的响应信息往往是缺失的,加之损伤前后的输入激励不同,也会影响损伤识别效果,因此,利用曲线拟合技术构造损伤前的指标信息,可以确保激励的一致性。本文采用基于最小二乘法的多项式拟合,拟合函数为:

$$S(x) = a_0 + a_1 x + a_2 x^2 + a_3 x^3 + \dots + a_n x^n \quad (3)$$

拟合效果的关键在于多项式阶数的选取,当 n 取值较低时,拟合较粗糙,当 n 取值较高时,容易受个别误差较大数据的影响。根据 SSD 曲线和 APSED 曲线线性的特点,最终决定选取多项式拟合阶数 $n=4$ 。

通过损伤后的 SSD 和 APSED 指标与拟合出的损伤前的指标的变化来定位损伤,改进的应变指标定义为应变标准差变化(SSDC, SSD Change)和平均伪比能变化(APSEDC, APSED Change):

$$APSEDC_i = APSED_i^d - APSED_i^a \quad (4)$$

$$SSDC_i = SSD_i^d - SSD_i^a \quad (5)$$

其中, $APSED_i^d$ 和 SSD_i^d 为损伤后的应变指标, $APSED_i^a$ 和 SSD_i^a 为用曲线拟和出的损伤前应变指标。

1.2 D-S 证据理论

20 世纪 70 年代, Dempster^[12] 和 Shafer^[13] 提出一种不确定性推理理论,即 D-S 证据理论。在基于 D-S 证据理论的损伤识别问题中,设所有能识别的结果用集合 Θ 表示,即为辨识框架。

设 R 为辨识框架幂集 2^Θ 的一个集类, A 为 Θ 子集,若有集合函数 $m: R \rightarrow [0, 1]$ 满足:

$$\begin{aligned} (1) & m(\phi) = 0 \\ (2) & \sum_{A \in 2^\Theta} m(A) = 1 \end{aligned} \quad (6)$$

则称 m 为辨识框架 Θ 上的基本置信指派函数; $m(A)$ 为 A 的基本置信指派。其中 ϕ 代表空集。当 $A=\Theta$ 时, $m(\Theta)$ 不能进行分配, 当 A 为 Θ 的子集且 $m(A) \neq 0$ 时, 称 A 为 m 的焦元。令辨识框架下的两个证据分别为 E_1 和 E_2 , 其对应的基本信度分配函数分别为 m_1 和 m_2 , 对应的焦元分别为 A_i 和 B_j , 则组合后证据集合 C 为:

$$m(C) = \begin{cases} 0 & C = \phi \\ \frac{\sum_{A_i \cap B_j = C} m_1(A_i) m_2(B_j)}{1 - \sum_{A_i \cap B_j = \phi} m_1(A_i) m_2(B_j)} & \forall C \subset \Theta, C \neq \phi \end{cases} \quad (7)$$

应用 D-S 证据理论进行数据融合的具体步骤为: 首先确定辨识框架中实际问题对应的证据; 其次计算其基本置信指派函数是否满足公式(6)的条件, 并确定各证据对应的基本信度分配函数; 最后通过公式(7)数据融合得到新证据。

1.3 损伤识别方法

基于 D-S 证据理论的损伤识别方法, 把结构上的每个测点 c_i 当做 D-S 证据理论中的子集。损伤位置由两组应变指标 SSDC 和 APSEDC 初步确定。结构出现损伤后该位置的应变相应增大, 由于完好结构的应变指标是通过曲线拟合得到的, 有必要对其进行修正, 引入修正参数 η_i , 当该测点改进的应变指标小于 0 时, $\eta_i=0$, 其他情况 $\eta_i=1$ 。在数据融合之前对每个测点的应变指标进行预处理, 分配概率分布函数值, 指标 SSDC 和 APSEDC 的基本信度分配函数 m_1 和 m_2 表示为:

$$m_1(c_i) = \frac{\eta_i \text{SSDC}_i}{\sum_{i=1}^n \eta_i \text{SSDC}_i}, \quad m_2(c_i) = \frac{\eta_i \text{APSEDC}_i}{\sum_{i=1}^n \eta_i \text{APSEDC}_i} \quad (8)$$

根据式(7)和式(8)对两种损伤指标的识别结果进行数据融合, 由 D-S 方法数据融合的结果来判断损伤。综上, 基于应变指标和 D-S 证据理论的损伤识别方法的步骤为:

- (1) 测量结构在损伤状态下各测点的动态应变响应;
- (2) 根据式(1)和式(2)构造各测点的应变指标 SSD_i 和 APSED_i ;
- (3) 进行曲线拟合, 得到改进的应变指标 SSDC 和 APSEDC;
- (4) 由式(7)和式(8)进行数据融合来判断损伤位置。

值得注意的是, 文中数值模拟应变响应是在计算得到各节点的位移后, 通过二阶中心差分法近似计算位移的二阶导数, 第 i 个节点的表面应变可表示为:

$$\epsilon_{i,k} = \frac{\omega_{i-1,k} + \omega_{i+1,k} - 2\omega_{i,k}}{l^2} \frac{h}{2} \quad (9)$$

其中, $\omega_{i,k}$ 表示第 i 个测点 c_i 处在 k 时刻的位移; h 为梁截面的高度; l 为单元长度。

2 数值模拟

2.1 简支梁桥有限元模型

通过简支梁桥数值模拟来验证基于应变指标和 D-S 证据理论的损伤识别方法的正确性。简支梁

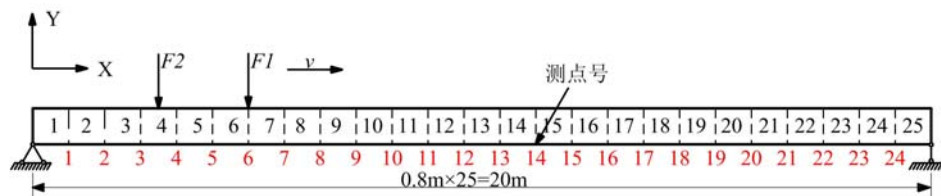


图1 简支梁桥有限元模型

Fig. 1 The FEM of simply supported beam bridge

桥长为 20m, 采用 Euler-Bernoulli 梁单元, 划分为 25 个单元, 其有限元模型如图 1 所示; 截面上下对称, 高度为 1m; 截面面积为 3.6m^2 , 截面惯性矩为 0.492m^4 ; 弹性模量 $E=3.45 \times 10^{10}\text{Pa}$, 密度 $\rho=2420\text{kg/}$

m^3 , 采用 Rayleigh 阻尼模型, 前两阶阻尼比 $\zeta=0.02$ 。在进行数值仿真时, 荷载的形式按照实际车辆与桥面板的接触力荷载进行简化得到。移动荷载的速度按照正常行驶的车辆速度范围考虑, 其数值大小对损伤识别结果影响较小; 常值荷载和简谐荷载的大小会影响动态应变的变化范围, 但对测试点应变指标的相对大小影响较小, 故对损伤识别结果无影响; 移动荷载的间距按照实际车辆轴距范围确定, 但是数值模拟中两个力的间距对损伤识别结果无影响。最后荷载大小、速度和间距按照实际工况简化为: 两个间距为 2.5m 的力 F_1 和 F_2 以 $v=10\text{m/s}$ 匀速通过简支梁桥, 其表达式为:

$$\begin{aligned} F_1 &= 1 \times 10^5 [1 + 0.1\sin(10\pi t) + 0.05\sin(30\pi t)] \text{ N} \\ F_2 &= 1 \times 10^5 [1 - 0.1\sin(10\pi t) + 0.05\sin(50\pi t)] \text{ N} \end{aligned} \quad (10)$$

为兼顾测试数据的精度和计算规模, 采样频率为 200Hz, 采样时间为 3s。在简支梁桥底部共布置了 24 个测点, 编号为 1~24。简支梁桥的位移响应可通过 Newmark 法求得, 再通过式(9)可求得结构的应变响应。假定结构的损伤只与单元刚度折减有关, 通过单元刚度折减来模拟损伤, 共设置 4 种损伤工况, 具体如表 1 所示。由于实际测试中, 测量误差为 5%左右, 对于损伤程度小于 5%的微小损伤, 以目前的研究方法难以进行准确识别, 故本文不对损伤程度小于 5%的工况进行研究。工况 1 时, 测点 3、13、19 的应变响应如图 2 所示。

表 1 简支梁桥的损伤工况设置

Tab. 1 Damage cases for the simply supported beam bridge

工况编号	1	2	3	4
损伤单元	3	3	3	3, 13, 19
损伤程度	15%	10%	5%	10%, 10%, 10%

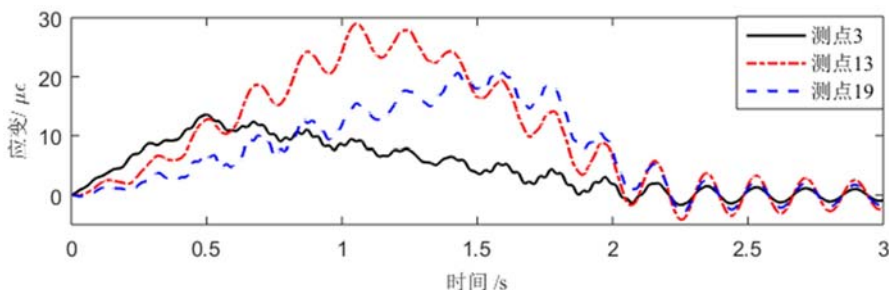


图 2 工况 1 测点 3、13、19 的应变响应

Fig. 2 The strain responses of measurement point 3, 13, 19 in damage case 1

2.2 损伤程度对识别结果的影响

在损伤位置的识别过程中, 现有的损伤识别方法多数是通过损伤指标的突变来判断损伤位置, 而对于小损伤的工况, 损伤指标突变不明显, 很难直接判断损伤位置, 因此, 有必要研究提出的基于应变指标和 D-S 证据理论的损伤识别方法对损伤程度的敏感性。工况 1、2、3 为靠近支座的单位置损伤工况, 损伤程度依次为 15%、10%、5%, 用动态应变响应在时域内构造损伤指标 SSD 和 APSED, 三种工况下的应变指标沿结构分布情况如图 3 所示。由图 3 可看出, 应变指标 SSD 和 APSED 沿结构的分布都呈现出跨中位置较大, 而靠近支座的位置损伤指标值较小的规律; 三种工况的指标 SSD 和 APSED 均在测点 3 处有轻微突变, 但即使是损伤程度为 15% 的工况 1, 由于突变较小, 也无法认为能识别损伤, 因此认为应变指标 SSD 和 APSED 对损伤的敏感性较低, 需要拟合出简支梁桥损伤前的应变指标, 通过应变指标的变化来判断损伤。

根据应变指标计算值和拟合值的变化来定位损伤, 三种工况下的损伤指标 SSDC 和 APSEDC 如图 4 所示, 可以看出工况 1、2、3 的 SSDC 和 APSEDC 曲线在测点 2、3 处都有明显突变, 且突变程度与损伤程度呈现一致性变化; 但在没有预设损伤的位置仍然有一定程度的突变出现, 例如在测点 24 处, 指标 SSDC 和 APSEDC 均有一个小的突变出现, 不能准确地判断损伤发生的位置, 可能会发生误判和漏判。因此, 需要通过 D-S 证据理论把两种证据组合起来判断损伤位置, 通过 D-S 证据理论数据融合后的结

果如图 5 所示,在三种损伤工况下,数据融合结果在测点 2 和测点 3 处有峰值,可以认为在测点 2 到测点 3 之间有损伤。数据融合结果受损伤程度大小的影响较小,对于工况 3 的小损伤也能准确识别,验证了方法的有效性,同时可以看出提出的损伤识别方法在小损伤识别时的优越性。值得注意的是,以上结果均是在不添加噪声的情况下得到的。

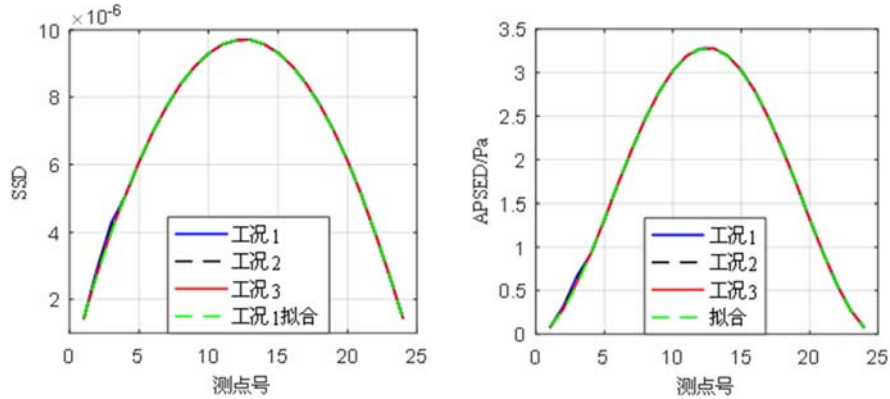


图 3 工况 1、2、3 的应变指标

Fig. 3 The strain indexes of damage case 1, 2, 3

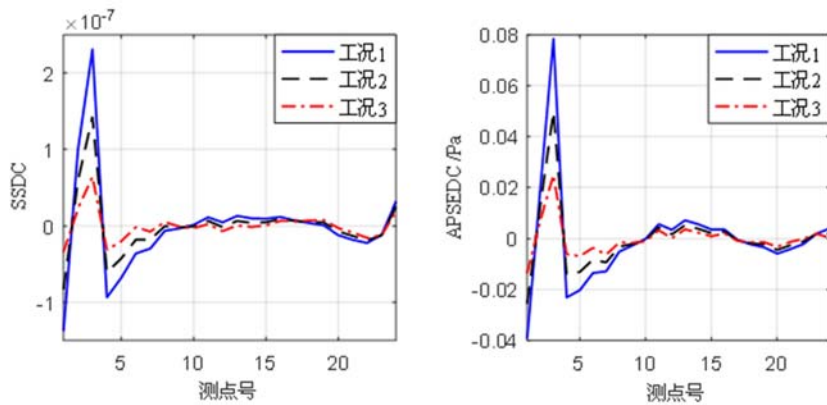


图 4 工况 1、2、3 的 SSDC 和 APSEDC 曲线

Fig. 4 The SSDC and APSEDC curves of damage case 1, 2, 3

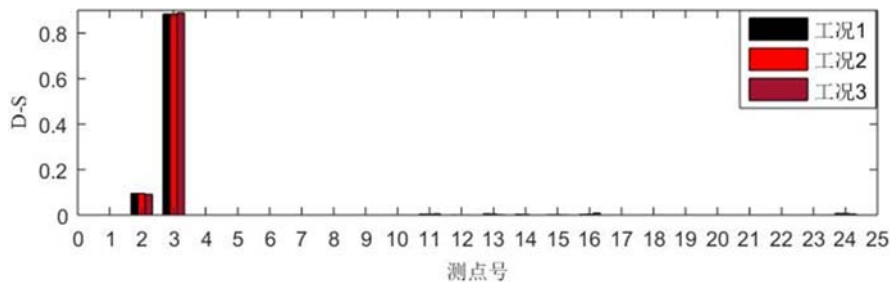


图 5 工况 1、2、3 数据融合的结果

Fig. 5 The data fusion identified results of damage case 1, 2, 3

2.3 噪声对识别结果的影响

为了研究噪声对损伤识别效果的影响,计算得到应变响应 ϵ_i 后,在计算响应中加入均值为 0,标准差为 1 的随机噪声,其计算公式可表示为: $\epsilon_{i, \text{noise}} = \epsilon_i + E_p N_{\text{oise}} \text{std}(\epsilon_i)$, 其中 ϵ_{noise} 为添加噪声后的动态应变响应; E_p 为噪声水平; N_{oise} 为均值为 0,标准差为 1 的随机数字序列; $\text{std}(\epsilon_m)$ 为应变响应的标准差。在应变响应中添加 10% 的噪声,采样频率为 200 Hz,采样时间为 3 s。

工况 4 为多位置损伤的工况,预设的三个位置的损伤程度均为 10%,通过 1.3 中所述损伤识别步

骤(1)、(2)、(3),得到无噪声工况和添加 10%噪声工况下的应变指标 SSDC 和 APSEDC,如图 6 所示,可以看出,靠近跨中的损伤位置突变量最大,而靠近支座的损伤位置突变量较小,这是很多损伤识别方法都存在的问题;对比无噪声和添加 10%噪声的应变指标,可以看出添加噪声前后的 SSDC 指标和 APSEDC 指标变化趋势及值的大小基本一致,仅在少数的位置有较小的改变,可以认为应变指标 SSDC 和 APSEDC 均对噪声具有较强的鲁棒性;进一步研究噪声对识别效果的影响,结合 D-S 证据理论融合两种损伤指标 SSDC 和 APSEDC 的识别结果,如图 7 所示,可以看出在测点 2、3、12、13、18、19 的位置指示出有损伤,与预设损伤吻合,说明对于多损伤工况提出的方法仍然有效;添加 10%噪声后仍能准确判断出损伤位置,说明提出的损伤识别方法具有较强的抗噪能力。

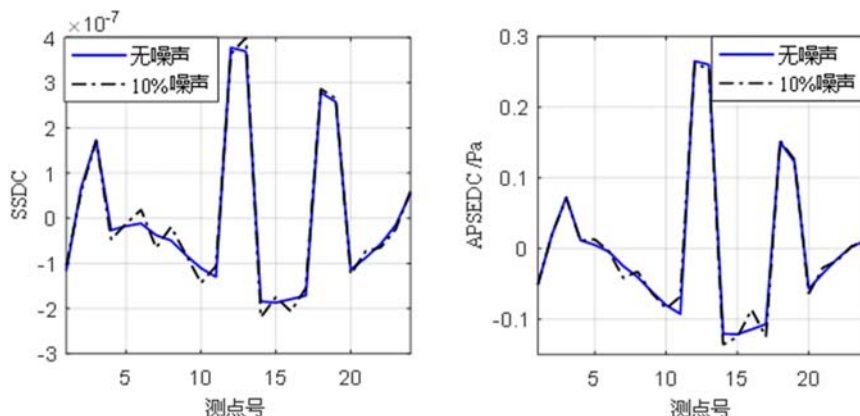


图 6 工况 4 的 SSDC 和 APSEDC 曲线

Fig. 6 The SSDC and APSEDC curves of damage case 4

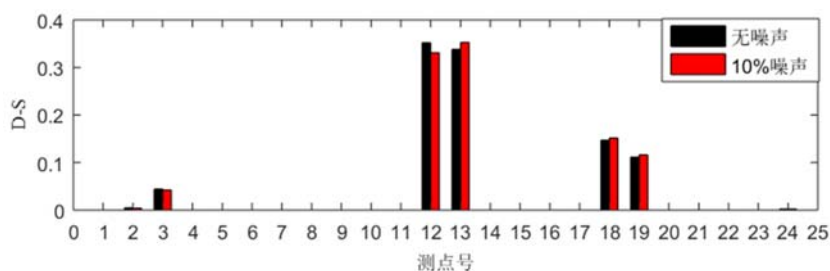


图 7 工况 4 数据融合后的识别结果

Fig. 7 The data fusion identified results of damage case 4

3 实验验证

为验证提出的基于应变指标和 D-S 证据理论的损伤识别方法的有效性,对移动荷载作用下简支梁桥的损伤识别做了实验研究。实验简支梁模型的材料为有机玻璃(PMMA),尺寸为 $1500\text{mm} \times 150\text{mm} \times 15\text{mm}$ (长 $\times$ 宽 $\times$ 高),密度为 1190.4kg/m^3 ,弹性模量 $E=5.24 \times 10^9\text{Pa}$,划分为 15 个单元,共 16 个节点。应变片用于测试简支梁模型的动态应变响应,其布置原则为沿桥向均匀布置;加速度传感器用于模态分析,测量动态应变响应时将其取下,在简支梁底部分布了 14 个应变片和 4 个加速度传感器,其测点编号及传感器分布如图 8 所示。

实验中模型车辆的速度和重量要能够使得测试简支梁桥模型产生明显振动,以降低测试误差对损伤识别结构的影响。实验中为模拟车辆在桥梁上行驶的工况,车辆间距不宜太大,使其在桥上行驶所占时间比例适宜。本文研究所用移动车辆模型为前后两轴,共四个车轮,前后轮轴距为 143mm ,车辆重量为 $F=0.489 \times 9.8=4.792\text{N}$ 。为了使其保持直线行驶,在模型桥上增加了横向限位装置,如图 9 所示,全桥包括引桥加速段、模型桥实验段和出桥减速段,引桥加速段的作用是使小车模型在到达模型桥实验段前达到匀速状态,出桥减速段的作用是使得小车模型通过模型桥后减速直到完全停止。

实验简支梁桥在三种工况下进行了测试,分别为完好状态和两种损伤状态,记做工况 0~工况 2。简支梁桥的损伤为长为 $b=10\text{mm}$ 、深度为 d 的对称缺口,根据单元等效刚度来计算单元损伤程度,损伤工况设置如表 2 所示。在力锤激励的作用下对三种工况进行模态实验,采样频率为 1kHz ,三种工况下的前四阶频率如表 3 所示,三种损伤工况下简支梁桥的模态参数发生了变化,说明简支梁桥实验模型确实发生了损伤,但由于其相对改变量较小,无法通过该模态参数来进一步识别损伤。

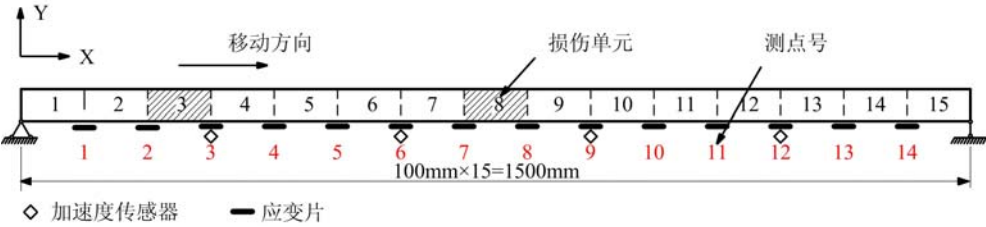


图 8 简支梁桥的测点编号及传感器分布

Fig. 8 The measurement point number and sensor distribution of simply supported beam bridge

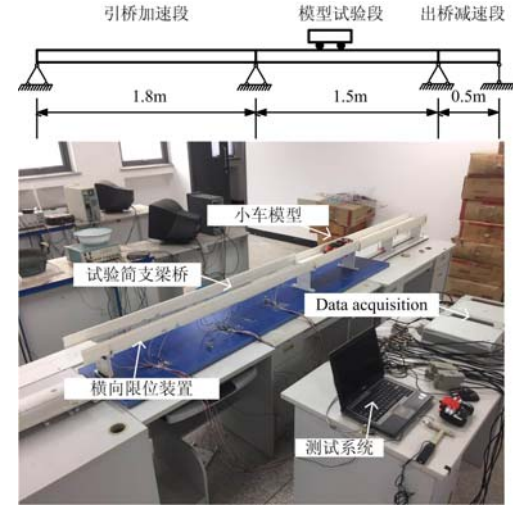


图 9 实验设置示意图

Fig. 9 Schematic experimental set-up

表 2 实验简支梁桥工况设置

Tab. 2 Damage cases for the experimental simply supported beam bridge

工况编号	损伤单元编号	缺口深度 d/mm	损伤程度
1	8	12	16.0%
2	3, 8	12, 12	16.0%, 16.0%

表 3 实验工况 0、1、2 的前四阶模态频率

Tab. 3 The first four modal frequencies of experimental damage case 0, 1 and 2

模态频率/Hz	1 阶	2 阶	3 阶	4 阶
工况 0	5.127	20.752	47.241	84.229
工况 1	4.883	20.508	45.898	83.984
工况 2	4.783	20.007	42.968	82.031

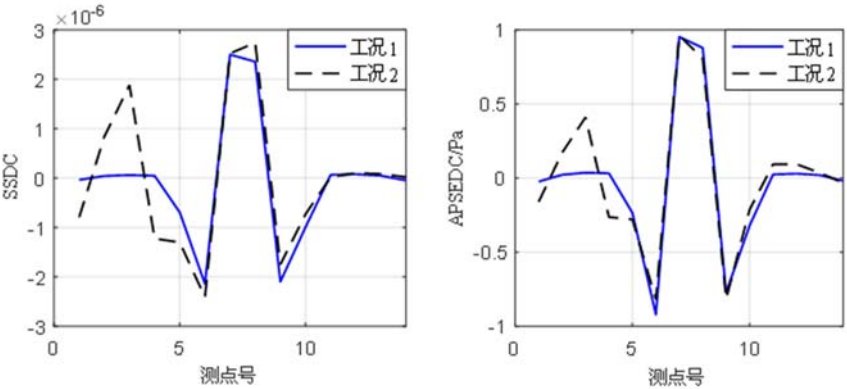


图 10 实验工况 1、2 的 SSDC 和 APSEDC 曲线

Fig. 10 The SSDC and APSEDC curves of experimental damage case 1 and 2

简支梁桥底部布置的应变片用于采集动态应变响应,采样频率为 200Hz ,小车的行驶速度为 1.7m/s ,采样时间为 1s ,工况 1 和工况 2 分别对应单位位置损伤和多位置损伤工况。通过 1.3 中所述损伤识别步骤(1)、(2)、(3),得到两种工况下的应变指标 SSDC 和 APSEDC,如图 10 所示。工况 1 和工况 2 的应

变指标 SSDC 和 APSEDC 均在测点 7 和测点 8 的位置有明显突变;工况 2 在测点 2 和测点 3 的位置也有明显突变;除此之外,工况 2 在测点 12 和测点 13 位置也有一定程度的突变,与预设的损伤工况不符,这就带来了判断损伤的困难,可能会导致误判。

把 SSDC 和 APSEDC 的识别结果通过 D-S 证据理论进行数据融合来判断损伤位置,结果如图 11 所示,工况 1 和工况 2 在测点 7 和测点 8 位置的数据融合结果均显示 7 单元出现了损伤;工况 2 在测点 2 和测点 3 处的数据融合结果显示单元 3 也出现了损伤,与预设损伤工况相符;此外,当利用本文方法进行简支梁桥的损伤测试时,可通过对测量响应进行去噪处理,以降低其影响,或者进行多次测量,由多次数据融合结果的平均值来判断损伤;实验测点数较少也可能导致损伤识别的结果有偏差,因此在实际测量过程中,可通过对重要的结构密布测点,以监测结构是否发生损伤。本文提出的基于应变指标和 D-S 证据理论的损伤识别方法摆脱了对完好结构响应的需求,且不用建立结构的有限元模型,计算花费较少,适合工程中的在线监测。

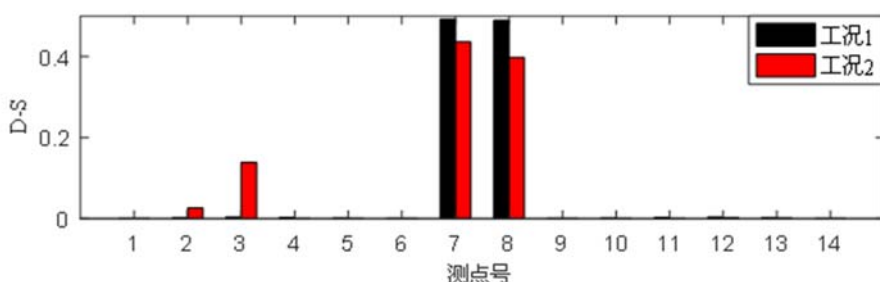


图 11 实验工况 1、2 数据融合的结果

Fig. 11 The data fusion identified results of experimental damage case 1 and 2

4 结论

提出了移动荷载作用下基于应变指标和 D-S 证据理论的简支梁桥损伤识别方法,实现了不需要知道完好结构响应,不用建立结构有限元模型,通过测量损伤状态下的动态应变响应就可实现对损伤位置的直接判断;对一简支梁桥进行数值模拟和实验测试,研究了损伤程度和测量噪声对应变指标和损伤识别效果的影响,结果表明:

(1) 应变指标 SSD 和 APSED 与结构损伤程度呈现一致性变化,但对于损伤位置靠近支座或者小损伤的工况,损伤指标的变化量较小。通过曲线拟合来近似得到健康结构的应变指标曲线,由改进的应变指标 SSDC 和 APSEDC 结合 D-S 证据理论的数据融合识别结果与预设工况吻合,且能识别靠近支座的小损伤。

(2) 应变指标 SSD 和 APSED 对噪声具有较强的鲁棒性,添加噪声后提出的损伤识别方法仍能准确地判断损伤位置,损伤识别方法对噪声敏感性较低。

(3) 通过实验研究了单位位置和多位置损伤工况,提出的损伤识别方法均能准确地定位出损伤位置,验证了本文提出方法的有效性。

参考文献:

- [1] Humar J. Performance of vibration-based techniques for the identification of structural damage[J]. Structural Health Monitoring, 2006, 5(3):215-241.
- [2] Ding B D, Tang M, Shang Y N. Damage location identification of truss structure based on strain modal method [J]. Advanced Materials Research, 2014, 919-921:51-57.
- [3] Wang D, Xiang W, Zhu H. Damage identification in beam type structures based on statistical moment using a two-step method[J]. Journal of Sound & Vibration, 2014, 333(3):745-760.
- [4] Xiang W, Wang D, Zhu H. Damage identification in a plate structure based on strain statistical moment[J]. Advances in Structural Engineering, 2014, 17(11):1639-1656.

- [5] 吴加权, 李红艳, 叶飞, 等. 基于应变响应的预损伤钢筋混凝土梁损伤识别研究[J]. 实验力学, 2018, 33(2): 299—306 (WU Jiaquan, LI Hongyan, YE Fei, et al. On the damage identification of pre-damaged reinforced concrete beam based on strain response[J]. Journal of Experimental Mechanics, 2018, 33(2): 299—306 (in Chinese))
- [6] 李雪艳, 张惠民. 基于应变脉冲响应协方差的损伤识别方法研究[J]. 力学学报, 2017, 49(5): 1081—1090 (LI Xueyan, ZHANG Huimin. Study of damage identification method on the covariance of strain impulse response function[J]. Chinese Journal of Theoretical and Applied Mechanics, 2017, 49(5): 1081—1090 (in Chinese))
- [7] 陈晓强, 朱宏平, 閤东东. 基于伪比能的梁式结构损伤识别[J]. 振动与冲击, 2008, 27(2): 29—33 (CHEN Xiaoqiang, ZHU Hongping, GE Dongdong. Damage identification of beam structures based on pseudo strain energy density[J]. Journal of Vibration and Shock, 2008, 27(2): 29—33 (in Chinese))
- [8] 刘涛, 李爱群, 缪长青, 等. 基于数据融合的结构损伤识别方法研究[J]. 工程力学, 2008, 25(1): 16—21 (LIU Tao, LI Aiqun, MIAO Changqing, et al. Study of structural damage identification methods based on data fusion [J]. Engineering Mechanics, 2008, 25(1): 16—21 (in Chinese))
- [9] 刘习军, 商开然, 张素侠, 等. 基于小波包变换的梁式结构损伤定位方法[J]. 实验力学, 2015, 30(3): 305—312 (LIU Xijun, SHANG Kairan, ZHANG Suxia, et al. On the damage localization of beam structure based on wavelet packet transform[J]. Journal of Experimental Mechanics, 2015, 30(3): 305—312 (in Chinese))
- [10] 王晓春, 刘习军, 张素侠. 基于提升小波变换和互相关函数的梁式桥损伤检测[J]. 实验力学, 2017, 32(4): 487—494 (WANG Xiaochun, LIU Xijun, ZHANG Suxia. On the beam bridge damage detection based on lifting wavelet transform and cross correlation function[J]. Journal of Experimental Mechanics, 2017, 32(4): 487—494 (in Chinese))
- [11] 张清华, 李乔, 唐亮. 基于证据理论的结构损伤识别研究[J]. 振动工程学报, 2007, 20(2): 200—205 (ZHANG Qinghua, LI Qiao, TANG Liang. Study of structural damage identification based on evidence theory[J]. Journal of Vibration Engineering, 2007, 20(2): 200—205 (in Chinese))
- [12] Dempster A P. Upper and lower probabilities induced by a multivalued mapping[J]. Annals of Mathematical Statistics, 1967, 38(2): 325—339.
- [13] Shafer G. A mathematical theory of evidence[M]. Princeton University Press, Princeton, NJ, 1976.

Damage identification in simply supported beam bridge based on strain index and D-S evidence theory

JIAN Zheng-kun, LIU Xi-jun, ZHANG Su-xia

(Mechanical Engineering of Tianjin University, Tianjin 300072, China)

Abstract: In order to improve the accuracy of bridge structure damage identification, and get rid of the dependency on the information before damage, a damage identification method based on strain index and D-S evidence theory is proposed. Firstly, the dynamic strain response of damaged structure is used to construct the strain standard deviation (SSD) index and the average pseudo strain energy density (APSED) index. Secondly, both of the two strain indexes are modified by the curve fitting technique. Finally, based on the D-S evidence theory, two improved indexes are fused to locate the damage. The method is applied to the damage identification of a simply supported beam bridge with numerical model, and the effects of damage degree and test noise are discussed. The results show that SSD and APSSED have strong robustness to the noise, and high accuracy of damage identification can be achieved. The effectiveness of the proposed method is eventually verified by the experimental investigation.

Keywords: strain index; D-S evidence theory ; simply supported beam bridge; damage identification