

项长生, 刘海龙, 赵 驰, 等. 基于 CART 算法的桥梁损伤动力数据分析方法[J]. 长安大学学报(自然科学版), 2023, 43(4): 50-59.
XIANG Chang-sheng, LIU Hai-long, ZHAO Chi, et al. Dynamic data analysis method of bridge damage based on CART decision tree[J].
Journal of Chang'an University (Natural Science Edition), 2023, 43(4): 50-59.

DOI:10.19721/j.cnki.1671-8879.2023.04.006

基于 CART 算法的桥梁损伤动力数据分析方法

项长生^{1,2}, 刘海龙², 赵 驰¹, 苏天涛¹

(1. 兰州理工大学 土木工程学院, 甘肃 兰州 730050; 2. 兰州理工大学
西部土木工程防灾减灾教育部工程研究中心, 甘肃 兰州 730050)

摘 要:针对传统损伤检测方法难以准确识别桥梁结构损伤程度的不足, 利用分类回归树(classification and regression tree, CART)算法在数据挖掘方面的优势, 通过计算基尼系数选取合适的特征对数据样本进行分类, 提出一种损伤检测方法对桥梁的损伤动力信息进行学习分类。首先利用附加质量方法构建结构动力响应数据集, 计算附加质量的模态应变能指标 ξ , 对结构损伤进行定位; 然后将 ξ 作为决策树的特征, 输入到 CART 算法中进行训练, 对损伤程度进行分类和识别, 并对该方法进行抗噪性验证, 最后通过简支梁和连续梁算例进行验证分析。研究结果表明: 基于附加质量的损伤识别指标能准确定位损伤, 且 CART 算法能够有效识别桥梁结构的损伤程度, 在 2%、5% 噪声水平下, 2 种算例的损伤程度识别准确率分别达到 99%、95% 和 95%、90% 以上, 具有较高准确率和较强鲁棒性; 该方法为桥梁结构损伤程度识别提供了一种新的参考。

关键词:桥梁工程; 损伤识别; CART 算法; 附加质量法; 模态应变能

中图分类号:U411

文献标志码:A

文章编号:1671-8879(2023)04-0050-10

Dynamic data analysis method of bridge damage based on CART algorithm

XIANG Chang-sheng^{1,2}, LIU Hai-long², ZHAO Chi¹, SU Tian-tao¹

(1. School of Civil Engineering, Lanzhou University of Technology, Lanzhou 730050, Gansu, China;
2. Western Center of Disaster Mitigation in Civil Engineering, Ministry of Education, Lanzhou
University of Technology, Lanzhou 730050, Gansu, China)

Abstract: Aimed at the defect that traditional damage detection methods were difficult to accurately identify the damage degree of bridge structure, a damage detection method was proposed, which can learn and classify the damage dynamic information of bridge by calculating Gini coefficient to sort data samples through selecting appropriate features, great advantages of CART decision tree algorithm were taken in data mining. Firstly, the add-mass method was used to construct structural dynamic response data set, and modal strain energy index ξ of add-mass was calculated to locate structural damage. Then, ξ was taken as the feature of decision tree and input into the CART algorithm for training, and then the damage degree was classified and

收稿日期: 2022-12-16

基金项目: 国家自然科学基金项目(51868045)

作者简介: 项长生(1976-), 男, 安徽安庆人, 副教授, 工学博士, E-mail: xiangcs@lut.edu.cn。

通讯作者: 苏天涛(1989-), 男, 甘肃兰州人, 工学博士研究生, E-mail: sutt5008@163.com。

identified, meanwhile, anti-noise of this method was verified. Finally, the simple supported beam and continuous beam were used for verification analysis. The results show that the damage identification index ξ based on added mass can accurately locate the damage, and the CART classifier can effectively identify the damage degree of the bridge structure. The damage classification accuracy of the two cases can reach 99%, 95% and 95%, 90% with 2% and 5% noise levels, respectively, which means this method achieves a high accuracy and strong robustness, and can provide a new reference for identifying damage degree of bridge structures. 4 tabs, 19 figs, 23 refs.

Key words: bridge engineering; damage recognition; CART algorithm; add-mass method; modal strain energy

0 引言

在桥梁结构中,基于动力指纹的损伤识别方法是振动损伤识别领域中应用最为广泛的方法^[1]。常见的动力指纹包括:固有频率、柔度矩阵、模态应变能、曲率模态等^[2-6]。

Kim 等提出一种非破坏性的损伤检测方法,根据结构固有频率和振型的变化构造出 2 个损伤识别指标对试验梁进行损伤检测,结果表明该方法能够有效定位损伤和准确估计裂纹尺寸^[7]。项长生等提出基于模态曲率效用信息熵的损伤识别方法,通过计算互重变化矩阵和权重-概率系数,综合反映结构的损伤位置和损伤程度^[8]。吴桐等提出利用损伤前后荷载-挠度曲线的曲率面积差参数来识别结构局部位置损伤,并对一简支 T 梁桥和有机玻璃桥进行损伤识别试验,结果表明该方法能够提高噪声环境下损伤识别能力^[9]。Shi 等提出了一种利用模态应变能的灵敏度量损伤的新方法^[10]。Entezami 等利用模态应变能灵敏度与 Tikhonov 正则化方法量化结构损伤,并在平面桁架上验证了该方法的有效性^[11]。基于动力指纹的损伤识别方法能够直接识别结构损伤位置,但难以识别结构的损伤程度,通常需要利用优化算法对损伤信息进行自学习量化。常见的算法有 BP 神经网络、支持向量机(SVM)、决策树等。其中,决策树作为监督学习算法之一,常见的有迭代树 3 代(ID3)算法、C4.5 算法、分类回归树(CART)算法等,被广泛用于风险管控^[12]、故障诊断^[13]及环境质量预测^[14-15]等领域,但在桥梁结构损伤识别领域应用较少。Salkhordeh 等通过多个案例证明了决策树能够预测地震后框架结构的损坏情况^[16]。Mariniello 等通过数值模拟和试验证明了决策树集成(DTE)可以有效识别损伤^[17]。张秀英等利用 CART 算法对土壤中 Zn 浓度进行预测,预测

准确率达 80.49%^[18]。庞梦洋等利用 RS-CART 算法对航空发动机故障进行诊断,结果表明 RS-CART 算法的诊断准确率较其他算法提升 20%^[19]。

CART 算法具备多种决策树算法的功能和优点,自动制定分类规则并设定阈值,实用性强、分类精度高、操作简单;运行速度快、易于理解、结构清晰;能够明确指出变量对于分类的重要性,选择与分类相关的变量。同时,在实际工程应用中,由于测量模态信息不足以及噪声等因素的影响,结构损伤识别的可靠性和准确性也会受到影响。

综上所述,本文引进决策树算法对桥梁结构的损伤程度进行识别,采用附加质量法提取结构模态特征,基于 CART 算法建立了桥梁结构损伤分类模型。首先计算附加质量的模态应变能指标 ξ ,然后使用指标 ξ 进行损伤定位,最后提取不同噪声水平下的特征 ξ ,输入到 CART 算法中对桥梁结构损伤程度进行识别,并对该算法的适用性和有效性通过简支梁与连续梁 2 个案例进行验证。

1 CART 算法模型

1.1 CART 算法模型介绍

分类回归树在决策树 ID3 算法的基础上进行了优化,其主要由根节点、内部节点、叶子节点构成,如图 1 所示。

1.2 基尼系数

决策树算法在对目标进行分类时,首先需要通过选取合适的特征来构建节点,特征的选取通常采用信息增益、信息增益比或基尼系数 G_{mi} 来度量。其中,CART 算法通过计算 G_{mi} 对数据集进行分类。节点概率分布的 G_{mi} 采用式(1)计算

$$G_{mi} = \sum_{i=1}^{N_1} p(i)[1 - p(i)] =$$

$$1 - \sum_{i=1}^{N_1} p(i)^2 \quad (1)$$

式中: N_1 为样本数据的类别总数; i 为样本类别编号; $p(i)$ 为样本点归属于第 i 类的概率。

CART 算法对样本集进行分类时, 假定任意特征 Y 的切分点 x_i 将训练样本集 S 分为 S_1 和 S_2 两部分, 则其 G_{ini} 可表示为

$$G_{\text{ini}}(S, Y) = \frac{|S_1|}{S} G_{\text{ini}}(S_1) + \frac{|S_2|}{S} G_{\text{ini}}(S_2) \quad (2)$$

式中: $G_{\text{ini}}(\cdot)$ 为基尼系数函数。

图 2 为 G_{ini} 变化曲线。 $p(i) = 0.5$ 时, 表示样本类别最混沌; $p(i) = 0$ 时, 表示所有样本类别均为 1; $p(i) = 1$ 时, 表示所有样本类别均为 0。

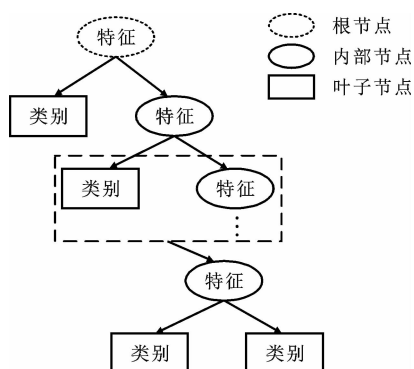


图 1 CART 算法模型

Fig. 1 Model of CART algorithm

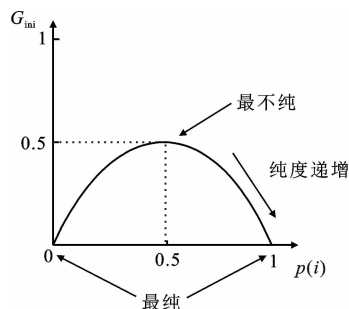


图 2 基尼系数变化

Fig. 2 Changes of G_{ini}

CART 算法数据分析方法步骤如下:

步骤(1), 设节点的数据集为 S , 根据式(2)计算出不同特征 Y 及其切分点 x_i 的基尼系数。

步骤(2), 选择基尼系数最小的特征 Y 及其对应的切分点 x_i 作为最优特征与最优切分点, 从现节点生成 2 个子节点, 将 S 分配到 2 个子节点 S_1 和 S_2 中。

步骤(3), 递归调用步骤(1)和步骤(2), 直到满足分类结束条件即可停止。

步骤(4), 生成分类树。

1.3 CART 算法数据分析

本文将基于动力指纹的损伤识别指标作为特征, 输入到 CART 算法中, 输出结构损伤程度决策树。

假设有 n 个损伤指标, 即决策树模型有 n 个特征, 结构单元损伤程度共有 5 种工况 A、B、C、D、E, 表示单元刚度分别降低 5%、10%、15%、20%、25%, 并在测量数据中添加一定程度的噪声。每种工况随机产生 100 组数据, 5 种工况共产生 500 组样本集(表 1), 前 80% 作为训练集, 后 20% 为测试集, 将样本集输入到 CART 算法中, 输出损伤程度决策树。

表 1 CART 算法数据集

Tab. 1 Dataset of CART algorithm

ID	1	2	...	n	类别
1	$x_{1,1}$	$x_{1,2}$	...	$x_{1,n}$	A
2	$x_{2,1}$	$x_{2,2}$	...	$x_{2,n}$	C
3	$x_{3,1}$	$x_{3,2}$	...	$x_{3,n}$	B
4	$x_{4,1}$	$x_{4,2}$	...	$x_{4,n}$	B
...
500	$x_{500,1}$	$x_{500,2}$	...	$x_{500,n}$	E

2 损伤动力数据来源

2.1 附加质量

采用 Hou 等提出的通过附加虚拟质量影响结构固有频率与破坏因子之间的灵敏度来选择合适的质量值^[20-21]。将附加质量在结构上移动, 结构的动态响应会发生变化, 通常损伤区域的动态参数变化较其他位置更明显。通过该方法能为损伤定位和定量提供更多模态信息, 附加质量过程如图 3 所示。图 3 中: m 为附加质量; k 为结构模态阶数; N 为单元编号; ω_{kN} 为附加质量在第 N 个单元时结构的第 k 阶固有频率; $\hat{\omega}$ 为前 k 阶频率组成的向量; W_m 为质量 m 在不同位置时的频率矩阵。

考虑简支梁结构前 k 阶模态, 当质量 m 添加至 l_1 段时, 可获得前 k 阶固有频率; $\hat{\omega}_1 = (\omega_{11}, \omega_{21}, \dots, \omega_{k1})^T$; 然后将质量 m 移动到 l_2 时, 得到 $\hat{\omega}_2 = (\omega_{12}, \omega_{22}, \dots, \omega_{k2})^T$; 依次将质量 m 移动至 l_j , 最终会形成一个与附加质量位置有关的频率矩阵 W_m , 如式 3 所示

$$W_m = (\hat{\omega}_1, \hat{\omega}_2, \dots, \hat{\omega}_N) = \begin{bmatrix} \omega_{11} & \omega_{12} & \dots & \omega_{1N} \\ \omega_{21} & \omega_{22} & \dots & \omega_{2N} \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ \omega_{k1} & \omega_{k2} & \dots & \omega_{kN} \end{bmatrix} \quad (3)$$

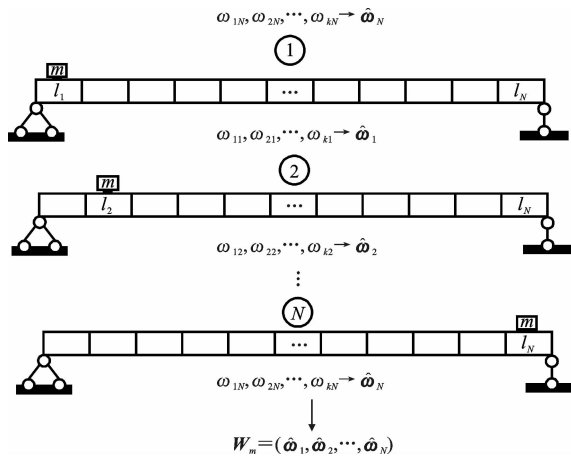


图3 逐点附加质量

Fig. 3 Point by point added mass

结构损伤表现为单元刚度降低,用向量形式表示为 $\mu = (\mu_1, \mu_2, \dots, \mu_N)^T$, μ_{i_1} 表示第 i_1 个单元损伤后刚度与其原始刚度的比值,即第 i_1 个单元的损伤因子, $i_1 = 1, 2, \dots, N$ 。整个受损结构的刚度矩阵 $K^d(\mu)$ 可表示为

$$K^d(\mu) = \sum_{i_1=1}^N \mu_{i_1} K_{i_1} \quad (4)$$

因此,当附加质量 m 移动到第 j 个单元时,结构的第 k 阶固有频率对损伤因子 μ_{i_1} 的灵敏度 $R_{kj}(\mu_{i_1}, m)$ 可表示为

$$R_{kj}(\mu_{i_1}, m) = \frac{\Phi_{kj}^T(\mu_{i_1}, m) K_{i_1} \Phi_{kj}(\mu_{i_1}, m)}{2\omega_{kj}(\mu_{i_1}, m)} \quad (5)$$

式中: $\Phi_{kj}(\mu_{i_1}, m)$ 为第 j 个单元附加质量后的第 k 阶振型向量; $\omega_{kj}(\mu_{i_1}, m)$ 为结构第 k 阶固有频率; K_{i_1} 为第 i_1 个单元的刚度矩阵。

根据式(5)可调整 m 对未损伤结构有限元模型进行灵敏度分析,以确定最佳的附加质量。

2.2 模态应变能

具有 n 个自由度的结构,假设其动态行为线性且近似离散^[22],其自由振动可表示为

$$(K - \omega_k^2 M) \Phi_k = 0 \quad (6)$$

式中: K 、 M 分别为结构单元刚度矩阵和质量矩阵; Φ_k 为第 k 阶模态振型; ω_k 为第 k 阶固有频率。

一般而言,结构损伤前后质量不产生变化,即与质量无关,可视为局部刚度的变化,其变化会引起结构振动特性的改变,如振型、频率等。结构损伤前后单元模态应变能可表示为

$$M_{SE_{i_2j}}^u = \frac{1}{2} \Phi_{i_2}^T K_j \Phi_{i_2} \quad (7)$$

$$M_{SE_{i_2j}}^d = \frac{1}{2} \Phi_{i_2}^{dT} K_j^d \Phi_{i_2}^d \quad (8)$$

式中: $M_{SE_{i_2j}}^u$ 、 $M_{SE_{i_2j}}^d$ 分别为结构损伤前和损伤后单元 j 的第 i_2 阶模态应变能; Φ_{i_2} 、 $\Phi_{i_2}^d$ 分别为损伤前后第 i_2 阶振型; K_j 、 K_j^d 分别为第 j 个单元损伤前后的刚度矩阵。

由于结构损伤后的单元刚度 K_j^d 不易获得,通常由损伤前刚度 K_j 代替 K_j^d 计算。

在实际操作中,获取所有模态数据一般不可实现。因此,仅考虑提取结构前 k_1 阶模态数据计算模态应变能,并作量纲一化处理,结果如下

$$M_{SEj}^u = \frac{1}{k_1} \sum_{i_2=1}^{k_1} \left| \frac{\frac{1}{2} \Phi_{i_2}^T K_j \Phi_{i_2}}{\sum_{j=1}^N \frac{1}{2} \Phi_{i_2}^T K_j \Phi_{i_2}} \right| \quad (9)$$

$$M_{SEj}^d = \frac{1}{k_1} \sum_{i_2=1}^{k_1} \left| \frac{\frac{1}{2} \Phi_{i_2}^{dT} K_j \Phi_{i_2}^d}{\sum_{j=1}^N \frac{1}{2} \Phi_{i_2}^{dT} K_j \Phi_{i_2}^d} \right| \quad (10)$$

式中: M_{SEj}^u 、 M_{SEj}^d 分别为量纲一化后结构损伤前和损伤后第 j 个单元的模态应变能; k_1 为模态阶数。

对式(9)和式(10)作差,可得到模态应变能差指标 ξ_j ,表达式如(11)所示,利用该指标可对结构损伤进行判定。式(11)可表示为

$$\xi_j = |M_{SEj}^u - M_{SEj}^d| \quad (11)$$

2.3 噪声模拟

由于实际工程中存在噪声,测量结果可能与结构真实响应有所差异。因此,在数值模拟过程中,先将所获取的振型进行量纲一化处理,然后添加一系列随机数来模拟环境噪声^[23],添加方式为

$$\Phi_{i_2j}^n = \Phi_{i_2j} + \Phi_{\max, i_2} r_{\text{random}} \delta \quad (12)$$

式中: $\Phi_{i_2j}^n$ 、 Φ_{i_2j} 分别为添加噪声前后结构的振型向量; Φ_{\max, i_2} 为第 i_2 阶振型向量中的最大值; r_{random} 为均值和标准差分别为 0 和 1 的随机数; δ 为振型中噪声水平,在数值上等于振型误差的标准差。

3 损伤识别步骤

(1)利用 ANSYS 软件建立桥梁结构有限元模型,在结构不同位置依次附加质量,提取结构响应数据,绘制并分析固有频率与附加质量位置之间的关系曲线,选择合适质量。

(2)根据式(11)计算局部位置附加质量时的模态应变能指标 ξ ,利用指标 ξ 识别结构损伤位置,并进行抗噪性分析。

(3)将指标 ξ 作为决策树的特征,输入到 CART 算法中进行训练,输出损伤程度决策树。

4 简支梁结构算例

设简支梁长 9.96 m,混凝土强度采用 C30,弹性模量 $E=3 \times 10^{10}$ Pa,泊松比 $\nu=0.3$,材料密度 $\rho=2500$ kg/m³;ANSYS 建模时,截面单元选用 Plane82;梁单元类型选用 Beam189,简支梁划分为 24 个单元,25 个节点;附加质量单元选用 Mass21,如图 4~图 6 所示。

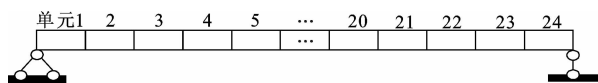


图 4 简支梁模型

Fig. 4 Model of simply supported beam

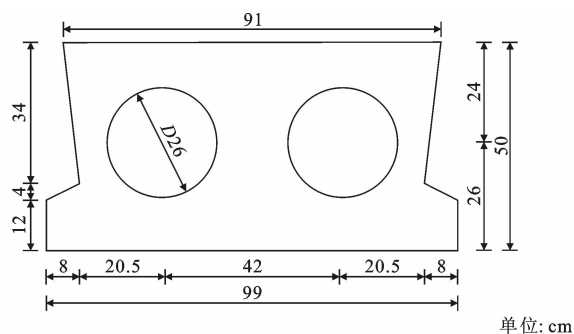


图 5 简支梁横截面

Fig. 5 Cross section of simply supported beam

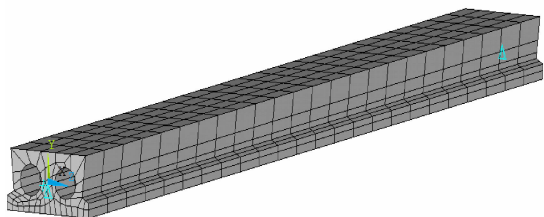


图 6 简支梁有限元模型

Fig. 6 Finite element model of simply supported beam

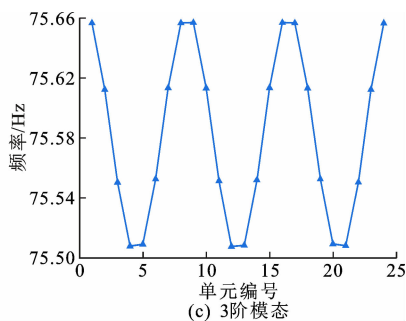
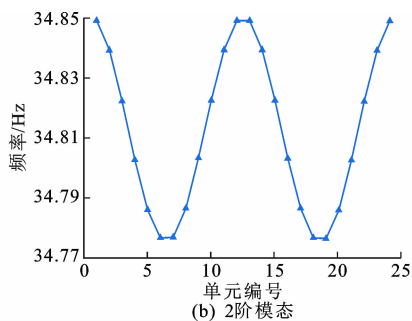
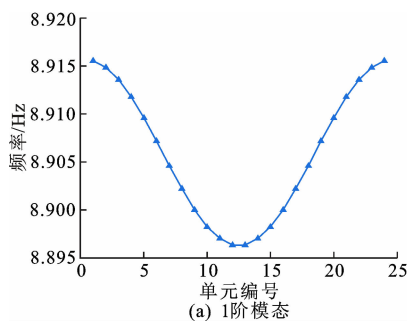


图 7 质量位置-频率曲线

Fig. 7 Mass position-frequency curves

4.3 抗噪性分析

为了研究所提损伤指标的抗噪性,根据式(12),在工况 2 的模式数据中分别添加 5%和 10%噪声水

通过折减结构单元刚度来模拟损伤发生,设置单点和 2 点损伤情况。

工况 1:跨中单元 12 刚度分别降低 5%、10%。

工况 2:单元 6 刚度降低 15%,同时单元 12 降低 10%。

4.1 附加质量的影响

对简支梁有限元模型进行灵敏度分析,通过耦合连接,将 Mass21 单元依次添加在结构各 Beam189 单元中间节。然后提取结构模态信息,计算得到附加质量约为 60 kg。

图 7 为跨中单元 12 刚度降低 5%时,附加质量移动位置对结构前 3 阶固有频率的影响。由图 7 可知:附加质量靠近支座单元时,结构固有频率变化不明显;随着附加质量的移动,固有频率逐渐减小,当附加质量移动到结构模态振型的波腹位置时固有频率达到最小,说明此时结构损伤敏感性最强。

4.2 损伤定位分析

已知附加质量为 60 kg,为简化计算,将其分别布置在简支梁结构的 1/8、1/6、1/4、1/3、1/2 跨单元,如图 8 所示。按照损伤工况 1 和工况 2 情形进行计算,识别结果如下。

图 9 为工况 1 损伤识别结果。由图 9 可知:单点刚度降低 5%与 10%时,指标 ξ 在损伤位置(单元 12)均出现较大峰值,说明所提指标能够有效识别简支梁单点损伤位置,且附加质量越靠近损伤单元,指标的峰值越大,定位效果越好。

图 10 为工况 2 损伤识别结果。图 10 中 5 条识别曲线在单元 6、12 均出现峰值,与设定损伤位置一致,说明指标 ξ 能够有效定位简支梁 2 点损伤。

平,经计算,其识别结果如图 11 所示。由图 11 可知:添加 5%噪声水平后,指标 ξ 不仅在损伤位置出现峰值,未损伤单元也出现突变,损伤定位精度降

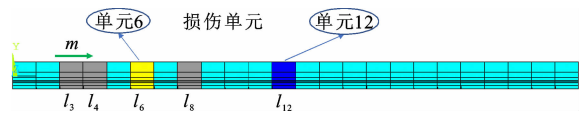


图 8 简支梁损伤工况示意
Fig. 8 Damage case of simply supported beam

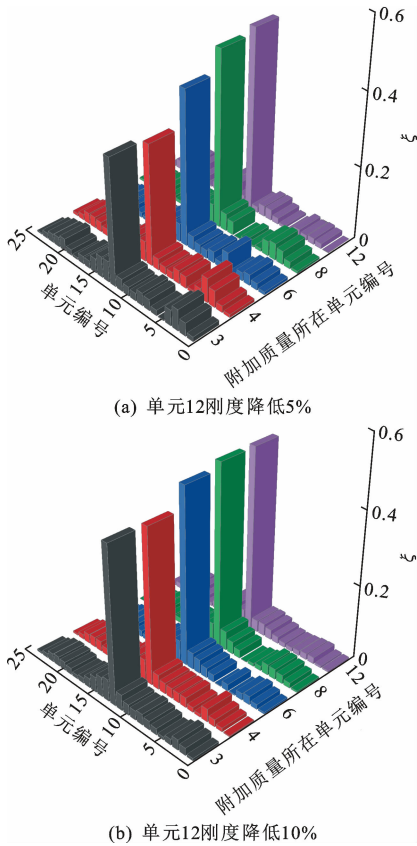


图 9 单点损伤识别结果
Fig. 9 Single point damage identification results

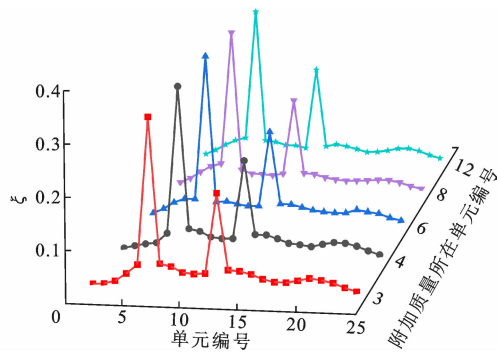


图 10 两处损伤识别结果
Fig. 10 Two-points damage identification results

低;随着噪声水平增大至 10%,损伤识别曲线变得更加紊乱,此时单一识别曲线已无法定位损伤。但综合分析 5 条损伤识别曲线,单元 6、单元 12 均出现峰值,而其他单元呈无规则变化,据此判定只有单元 6、单元 12 发生损伤。

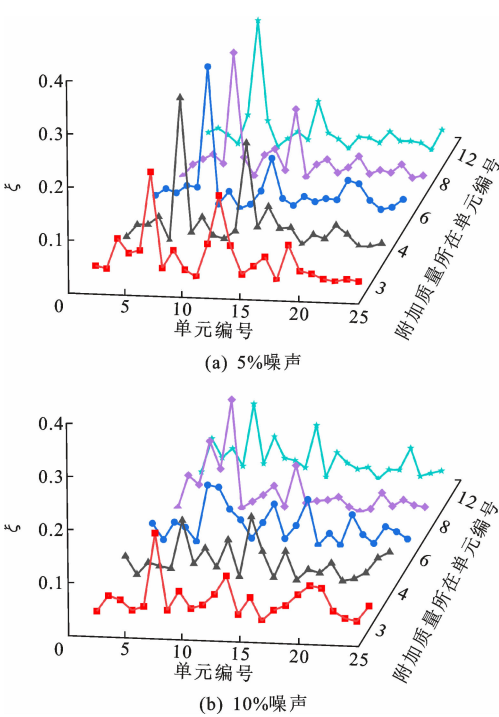


图 11 添加噪声后两点损伤识别结果
Fig. 11 Two points damages identification results with noises

4.4 损伤量化分析

利用 CART 算法来量化结构的损伤程度,同时为了提高其抗噪性,以简支梁单元 12 单点损伤为例,噪声水平分别取 2%、5%、7%、10%,共设 5 种损伤程度(刚度下降 5%、7%、10%、13% 和 15%),附加质量依次添加在简支梁单元 3、单元 4、单元 6、单元 8、单元 12 处,计算指标 ξ_{i_3} (i_3 表示附加质量所在单元)。每种损伤程度在不同噪声水平下随机产生 300 组数据,5 种损伤程度共产生 1 500 组数据,其前 80% 为 1 200 组训练样本,后 20% 为 300 组测试样本。将所有样本数据输入 CART 算法后,其分类正确率如表 2 所示,分类结果如图 12 所示。

表 2 损伤程度识别结果
Tab. 2 Identification results of damage degree

噪声水平/%	样本数量	正确识别率/%
2	300	99
5	300	95
7	300	87
10	300	63

根据表 2 可知,2%噪声时几乎可以精确识别损伤程度,5%噪声时分类准确率也达到 95%。随着噪声水平持续增大,分类准确率明显降低,在 10% 噪声水平下降至 63%。

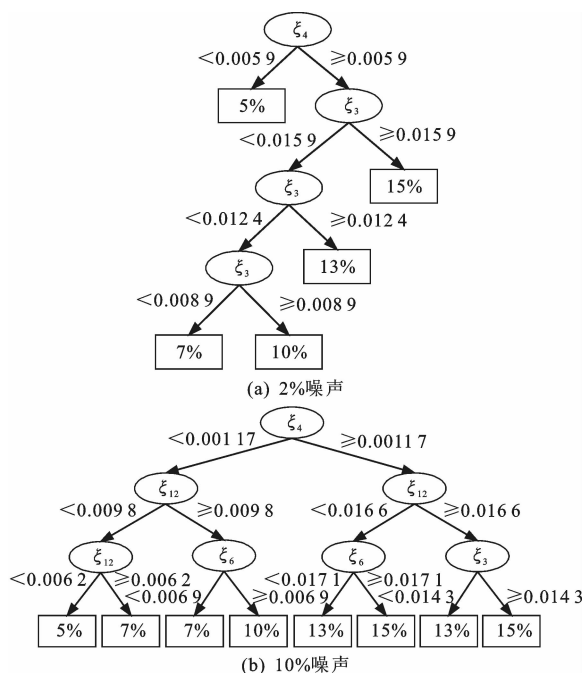


图 12 损伤分类结果

Fig. 12 Damage classification results

由图 12(a)可知,2%噪声水平时,CART 算法需要 2 个特征来识别简支梁损伤程度,分别为 ξ_3 和 ξ_4 ,其分类结果如下:

- (1) 当 $\xi_4 < 0.0059$ 时,可识别单元损伤程度 5%;
- (2) 当 $\xi_3 < 0.0089$ 时,可识别单元损伤程度 7%;
- (3) 当 $0.0089 \leq \xi_3 < 0.0124$ 时,可识别单元损伤程度 10%;
- (4) 当 $0.0124 \leq \xi_3 < 0.0159$ 时,可识别单元损伤程度 13%;
- (5) 当 $\xi_3 \geq 0.0159$ 时,可识别单元损伤程度 15%。

由图 12(b)可知,随着噪声水平增大至 10%,损伤分类所需的特征增加,其中,7%、13%、15%损伤程度均需要多个特征才能完成分类,虽然分类效率降低,但 CART 算法依然能够有效识别简支梁结构的损伤程度。

5 连续梁结构算例

建立等跨连续梁结构模型如图 13 所示,该梁总长度为 40 m,截面形式采用单箱单室(图 14),采用 C40 混凝土,弹性模量 $E = 3.25 \times 10^{10}$ Pa,泊松比 $\epsilon = 0.2$,材料密度 $\rho = 2500$ kg/m³。

利用 ANSYS 软件建立连续梁有限元模型,划分

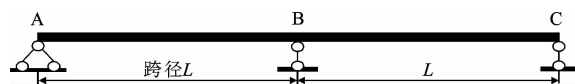
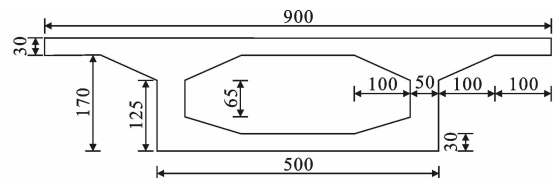


图 13 两跨连续梁模型

Fig. 13 Model of two-span continuous beam



单位: cm

图 14 箱梁截面

Fig. 14 Cross section of box girder

为 40 个单元,41 个节点,单元类型采用 Beam189,如图 15 所示。

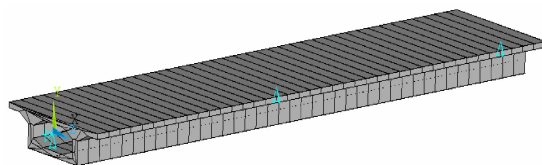


图 15 连续梁有限元模型

Fig. 15 Finite element model of continuous beam

附加质量依次添加在连续梁结构单元 4、单元 8、单元 15、单元 20、单元 30、单元 35 处,如图 16 所示。附加质量约为 2720 kg,损伤考虑了 2 种工况。

工况 1:左跨 1/4 截面(单元 5)单元刚度降低 5%,同时右跨 1/2 截面(单元 30)单元刚度降低 10%。

工况 2:左跨 1/5 截面(单元 4)单元刚度降低 5%、1/2 截面(单元 10)单元刚度降低 15%、右跨 3/4 截面(单元 35)单元刚度降低 10%。

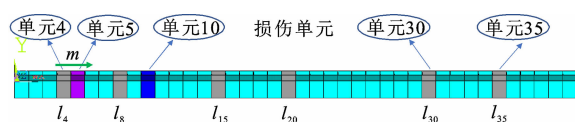


图 16 连续梁损伤工况示意

Fig. 16 Damage conditions of continuous beam

5.1 附加质量位置对固有频率的影响

表 3 为连续梁局部位置附加质量后结构固有频率变化。由表 3 可知,添加附加质量后,结构的固有频率减小,且在振型波腹位置最明显,这与简支梁固有频率变化规律相同。

5.2 损伤定位分析

根据连续梁附加质量的位置设定,进行损伤识别指标 ξ 的计算,其识别结果如图 17 所示。

由图 17 可知,指标 ξ 可以有效定位连续梁结构

表 3 连续梁结构固有频率变化

Tab. 3 Natural frequency variations of continuous beam structure			
附加质量所在单元编号	1 阶固有频率/Hz	2 阶固有频率/Hz	3 阶固有频率/Hz
未添加	9.484 3	13.660 9	33.043 7
4	9.474 0	13.639 7	32.939 3
8	9.452 1	13.604 7	32.979 7
15	9.452 1	13.604 7	32.979 7
20	9.484 1	13.660 9	33.040 5
30	9.446 9	13.608 3	33.040 5
35	9.462 5	13.618 9	32.916 8

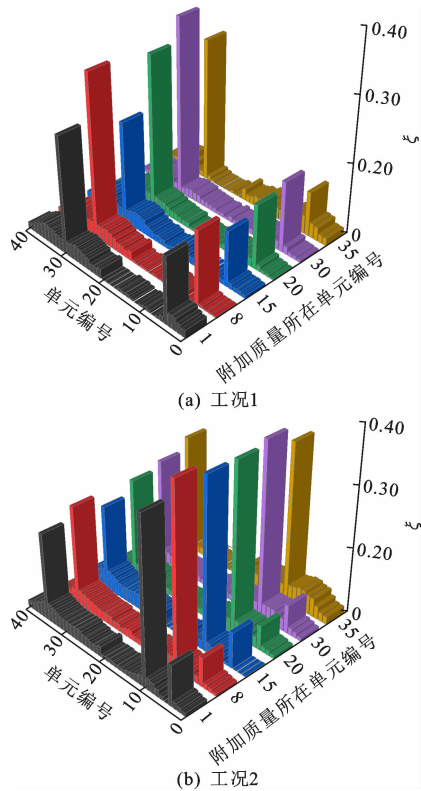


图 17 连续梁识别结果
Fig. 17 Continuous beam identification results

2 点和多点损伤。观察发现,2 点损伤时,附加质量设置在靠近跨中的单元 8、单元 30,指标定位效果最佳。3 点损伤时,附加质量的位置对指标峰值的影响不明显,但依然可为损伤定位提供参考。图 17(b)中,靠近支座位置单元 4 因其损伤程度较小,峰值较低,容易造成误判,但附加质量移动至该位置附近时,峰值明显,仍可判定损伤位置。

5.3 抗噪性分析

对连续梁工况 1 进行抗噪性分析,噪声水平设定为 10%,经计算其识别结果如图 18 所示。
由图 18 可知,损伤单元和未损伤单元均有峰值出现,如 l_4 曲线(附加质量在单元 4,其他曲线名称

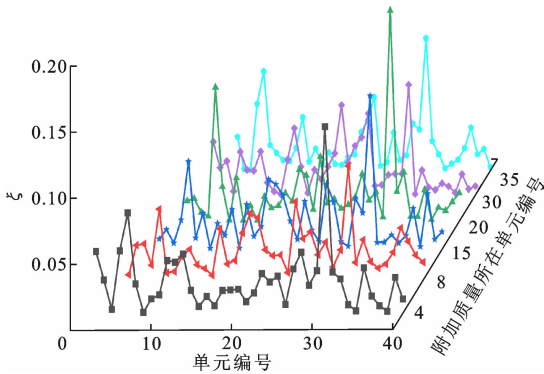


图 18 10%噪声水平下识别结果
Fig. 18 Identification results of 10% noise

类似)上的单元 5、单元 11、单元 28、单元 30; l_8 曲线上的单元 5、单元 20、单元 26、单元 30; l_{15} 曲线上的单元 5、单元 16、单元 24、单元 30; l_{20} 曲线上的单元 5、单元 19、单元 30,但通过附加质量处于不同位置的曲线对比分析可知,只有单元 5、单元 30 均出现了峰值,由此推断该 2 处单元出现损伤。进一步说明附加质量法能够提高指标 ξ 在噪声环境下的损伤定位可靠性。

5.4 损伤量化分析

对连续梁损伤量化时,噪声水平取 2%和 5%,损伤工况如表 4 所示,附加质量依次添加在连续梁结构单元 4、单元 8、单元 15、单元 20、单元 30、单元 35 处,计算指标 ξ ,4 种工况共产生 1 200 组数据。将所有样本输入 CART 算法后,损伤分类结果如图 19 所示。

表 4 连续梁损伤预测工况
Tab. 4 Damage prediction conditions of continuous beam

工况	不同单元刚度降低值/%	
	单元 5	单元 30
C1	5	10
C2	15	5
C3	10	20
C4	20	15

可见,在 2%和 5%噪声水平下,CART 算法的损伤分类准确率分别达到 95%和 90%以上。如图 19 所示,2%噪声水平时,CART 算法需要一个特征 ξ_1 即可识别连续梁单元 5、单元 30 损伤程度。

6 结 语

(1)结构局部位置附加质量,增加了损伤识别所需模态数据的数量,且提高了局部损伤的敏感性,指标 ξ 能够有效识别出损伤位置,具有较高的准确性和抗噪性。

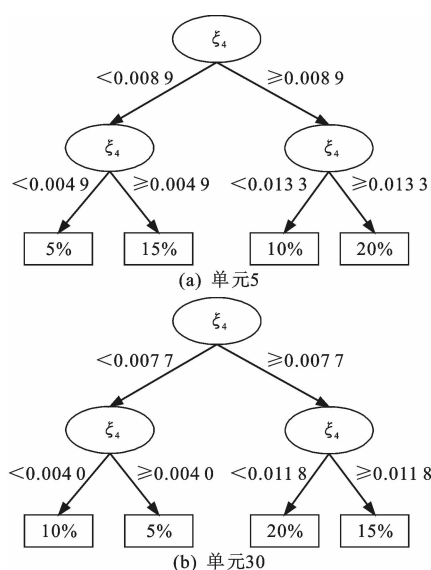


图 19 2% 噪声损伤分类结果

Fig. 19 Classification results of 2% noise damage

(2) 基于 CART 算法的动力数据分析方法能够有效量化简支梁和连续梁结构的损伤程度,分类效率和可靠性较高,且具有较好的鲁棒性,当噪声水平较小时,损伤程度分类准确率达到 95% 以上,可为桥梁结构损伤识别提供新的参考。

(3) 该方法有待于试验和实际工程验证,并进一步优化 CART 算法,以减小噪声对分类结果的影响,减少构建学习模型所需的训练样本集,提高算法训练过程的计算效率。

参考文献:

References:

- [1] 孙健敏,李 丹,颜王吉. 基于模态参数灵敏度的损伤方程组求解正则化方法研究[J]. 计算力学学报, 2022, 39(1): 70-79.
SUN Jian-min, LI Dan, YAN Wang-ji. Regularization methods for solving modal sensitivity-based damage equations: A comparative study[J]. Chinese Journal of Computational Mechanics, 2022, 39(1): 70-79.
- [2] YAN A M, GOLINVAL J C. Structural damage localization by combining flexibility and stiffness methods[J]. Engineering Structures, 2005, 27(12): 1752-1761.
- [3] YANG Q W, SUN B X. Structural damage identification based on best achievable flexibility change[J]. Applied Mathematical Modelling, 2011, 35(10): 5217-5224.
- [4] HOU J L, LI Z K, ZHANG Q X, et al. Local mass addition and data fusion for structural damage identification using approximate models[J]. International Jour-

nal of Structural Stability and Dynamics, 2020, 20(11): 2050124.

- [5] NALITOLELA N, PENNY J E T, FRISWELL M I. Updating model parameters by adding an imagined stiffness to the structure[J]. Mechanical Systems and Signal Processing, 1993, 7(2): 161-172.
- [6] LEE E T, EUN H C. Damage identification of a frame structure model based on the response variation depending on additional mass[J]. Engineering With Computers, 2015, 31(4): 737-747.
- [7] KIM J T, RYU Y S, CHO H M, et al. Damage identification in beam-type structures: Frequency-based method vs mode-shape-based method[J]. Engineering Structures, 2003, 25(1): 57-67.
- [8] 项长生, 李凌云, 周 宇, 等. 基于模态曲率效用信息熵的桥梁结构损伤识别[J]. 振动与冲击, 2020, 39(17): 234-244.
XIANG Chang-sheng, LI Ling-yun, ZHOU Yu, et al. Damage identification of beam structures based on modal curvature utility information entropy[J]. Journal of Vibration and Shock, 2020, 39(17): 234-244.
- [9] 吴 桐, 唐 亮, 周志祥. 基于挠度曲率面积差的桥梁结构损伤识别方法[J]. 工程科学与技术, 2021, 53(6): 165-174.
WU Tong, TANG Liang, ZHOU Zhi-xiang. Deflection curvature area difference method for damage location of bridge structures[J]. Advanced Engineering Sciences, 2021, 53(6): 165-174.
- [10] SHI Z Y, LAW S S, ZHANG L M. Damage localization by directly using incomplete mode shapes[J]. Journal of Engineering Mechanics, 2000, 126(6): 656-660.
- [11] ENTEZAMI A, SHARIATMADAR H. Damage detection in structural systems by improved sensitivity of modal strain energy and Tikhonov regularization method[J]. International Journal of Dynamics and Control, 2014, 2(4): 509-520.
- [12] 朱文会, 王夏晖, 杨欣桐, 等. 基于决策树的区域地块风险管控模式预测[J]. 中国环境科学, 2021, 41(12): 5771-5778.
ZHU Wen-hui, WANG Xia-hui, YANG Xin-tong, et al. Prediction performance of risk management and control mode in regional sites based on decision tree[J]. China Environmental Science, 2021, 41(12): 5771-5778.
- [13] 李 鹏, 雷雨秋, 刘宗杰, 等. 基于决策树算法的断路

- 器弹簧操动机构振动诊断技术[J]. 高压电器, 2021, 57(9):1-8, 18.
- LI Peng, LEI Yu-qiu, LIU Zong-jie, et al. Vibration diagnosis technology of technology of spring operating mechanical for circuit breaker-based on decision tree algorithm[J]. High Voltage Apparatus, 2021, 57(9): 1-8, 18.
- [14] 董红召, 许慧鹏, 卢 滨, 等. 城市交通道路氮氧化物浓度的 CART 回归树预测研究[J]. 环境科学学报, 2019, 39(4):1086-1094.
- DONG Hong-zhao, XU Hui-peng, LU Bin, et al. A CART-based approach to predict nitrogen oxide concentration along urban traffic roads[J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2019, 39(4):1086-1094.
- [15] 丁 慷, 陈报章, 王 瑾, 等. 基于决策树的统计预报模型在臭氧浓度时空分布预测中的应用研究[J]. 环境科学学报, 2018, 38(8):3229-3242.
- DING Su, CHEN Bao-zhang, WANG Jin, et al. An applied research of decision-tree based statistical model in forecasting the spatial-temporal distribution of O_3 [J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2018, 38(8): 3229-3242.
- [16] SALKHORDEH M, MIRTAHERI M, SOROUSHIAN S. A decision-tree-based algorithm for identifying the extent of structural damage in braced-frame buildings[J]. Structural Control and Health Monitoring, 2021, 28(11):1545, 2263.
- [17] MARINIELLO G, PASTORE T, MENNA C, et al. Structural damage detection and localization using decision tree ensemble and vibration data[J]. Computer - Aided Civil and Infrastructure Engineering, 2021, 36(9):1129-1149.
- [18] 张秀英, 孙 棋, 王 珂, 等. 基于决策树的土壤 Zn 含量预测[J]. 环境科学, 2008, 29(12):3508-3512.
- ZHANG Xiu-ying, SUN Qi, WANG Ke, et al. Prediction of Zn content in soil based on decision tree[J]. Environmental Science, 2008, 29(12):3508-3512.
- [19] 庞梦洋, 索中英, 郑万泽, 等. 基于 RS-CART 决策树的航空发动机小样本故障诊断[J]. 航空动力学报, 2020, 35(7):1559-1568.
- PANG Meng-yang, SUO Zhong-ying, ZHENG Wan-ze, et al. Small sample fault diagnosis of aeroengine based on RS-CART decision tree[J]. Journal of Aerospace Power, 2020, 35(7):1559-1568.
- [20] HOU J L, JANKOWSKI L, OU J P. Structural damage identification by adding virtual masses[J]. Structural and Multidisciplinary Optimization, 2013, 48(1):59-72.
- [21] 杨秋伟, 刘济科. 结构损伤识别的附加质量方法[J]. 工程力学, 2009, 26(5):159-163.
- YANG Qiu-wei, LIU Ji-ke. Structural damage identification by adding given masses[J]. Engineering Mechanics, 2009, 26(5):159-163.
- [22] ENTEZAMI A, SHARIATMADAR H, SARMADI H. Structural damage detection by a new iterative regularization method and an improved sensitivity function[J]. Journal of Sound and Vibration, 2017, 399: 285-307.
- [23] 曹 晖, 林秀萍. 结构损伤识别中噪声的模拟[J]. 振动与冲击, 2010, 29(5):106-109, 243.
- CAO Hui, LIN Xiu-ping. Noise simulation in structural damage identification[J]. Journal of Vibration and Shock, 2010, 29(5):106-109, 243.