

基于机器学习算法的轨道交通弹簧隔振器损伤识别方法

狄会霖¹, 付伟庆^{1,*}, 王瑞萍¹, 赵亮¹, 王建²

(1. 青岛理工大学 土木工程学院, 青岛 266525; 2. 青岛零一测数据科技有限公司, 青岛 266114)

摘要: 为保证轨道交通运行的平稳性和安全性, 减少列车运行振动对周围环境的影响, 一般采用在浮置板下设弹簧隔振器作为减振措施。随着地铁运行时间的增加, 弹簧隔振器不可避免地会产生损伤或吊空, 作为隐蔽结构其不易被日常巡检所发现, 传统的检测方法效率较低, 不能及时发现损伤并维修。利用 ABAQUS 有限元软件构建车辆-轨道耦合模型, 采用均匀设计法对隔振器不同损伤工况进行设计后, 通过有限元模型模拟计算, 得到弹簧隔振器损伤后浮置板的振动响应。编写支持向量机、决策树和随机森林 3 种机器学习算法, 利用模拟计算数据进行识别网络训练, 建立损伤工况和振动响应的映射关系。研究表明, 支持向量机和随机森林算法对损伤位置的识别效果较好; 随机森林算法对损伤数量和损伤程度的识别效果较好。

关键词: 弹簧隔振器; 损伤识别; 机器学习; 均匀设计法

中图分类号: TU352.1 **文献标志码:** A **文章编号:** 1673-4602(2025)02-0001-08

Machine learning-based method for damage identification of spring isolators in rail transit system

DI Huilin¹, FU Weiqing^{1,*}, WANG Ruiping¹, ZHAO Liang¹, WANG Jian²

(1. School of Civil Engineering, Qingdao University of Technology, Qingdao 266525, China;

2. 01DYNA (Qingdao) Test & Data Co., Ltd., Qingdao 266114, China)

Abstract: To ensure the smoothness and safety of rail transit operation and reduce the impact of train vibration on the surrounding environment, spring isolators are commonly used under floating slabs for vibration reduction. With the increase of subway operation time, spring isolators inevitably suffer damage or become suspended. As a concealed structure, it is not easy to be detected by daily inspections. Traditional detection methods are inefficient and cannot timely detect damage for maintenance. In this study, a vehicle-track coupling model was constructed using ABAQUS finite element software. Different damage conditions of isolators were designed using uniform design method, and the vibration response of the floating slab after spring isolator damage was obtained through finite element simulation calculations. Three machine learning algorithms of support vector machine, decision tree and random forest were edited, and simulation calculation data were used to train network identification and establish the mapping relationship between damage conditions and vibration re-

收稿日期: 2023-04-27

基金项目: 国家自然科学基金(52178488)

作者简介: 狄会霖(1998—), 男, 山东济南人。硕士, 研究方向为地铁结构健康监测。E-mail: 375740068@qq.com。

* 通信作者: 付伟庆(1976—), 男, 黑龙江哈尔滨人。博士, 教授, 主要从事结构振动控制与健康监测技术等方面的研究。
E-mail: fuweiqing@qut.edu.cn。

sponses. The results showed that the support vector machine and random forest algorithms performed better in identifying the location of damage. The random forest algorithm performed better in identifying the number and severity of damage.

Key words: spring isolator; damage identification; machine learning; uniform design method

浮置板结构能够对地铁运行中产生的振动进行有效地衰减,随着地铁运行时间的增加,弹簧隔振器作为浮置板减振最重要的结构,会出现各种损伤甚至吊空。损伤的出现会严重影响行车平稳性和安全性,而隔振器作为隐蔽结构不易被日常巡检所发现,所以有必要结合浮置板的振动响应及时识别隔振器的损伤并更换。

机器学习方法在建筑、桥梁和工业结构损伤识别方面研究较多,李行健等^[1]提出一种基于广义 S 变换和神经网络的结构损伤识别方法。王秋潇等^[2]提出一种基于变分模态分解-小波变换-卷积神经网络的损伤识别方法, IASC-ASCE SHM Benchmark 第二阶段结构试验数据证明了所提方法的有效性。李守巨等^[3]利用结构节点垂直位移作为结构损伤数据特征,采用人工神经网络进行建筑节点损伤的识别。王复越等^[4]采用决策树算法建立结构的损伤预测模型,以结构损伤为目的标签,优化后的决策树模型可以对结构的损伤进行很好地分类。安平和等^[5]利用支持向量机算法实现了对桥梁多位置损伤的识别,识别精度达到了 99.68%。谢坤明^[6]利用随机森林算法,对原始振动信号进行训练和预测,准确地识别出了 5 根钢管混凝土结构混凝土脱空的位置,精确度达到了 100%。姜绍飞等^[7]通过建立有限元模型,结合海洋平台的振动响应,利用决策树分类方法识别支撑结构的损伤数量,试验模型的损伤识别准确率可达到 90%。袁瑞杰^[8]基于贝叶斯方法,利用损伤后轨道振动响应对无砟轨道扣件的损伤进行识别。任娟娟等^[9]提取结构振动响应,利用支持向量机对板式无砟轨道砂浆脱空进行识别,取得较好的识别效果,识别准确率达到 90%。目前尚缺少机器学习算法用于城市轨道交通弹簧隔振器损伤识别的研究。

本研究主要利用有限元软件建立车辆-轨道耦合模型,利用均匀设计法对损伤工况进行设计,并利用有限元软件进行浮置板振动响应的计算。编写支持向量机、决策树和随机森林算法利用浮置板振动响应进行训练,对弹簧隔振器的损伤位置、数量和程度进行识别。

1 车辆-轨道耦合有限元模型建立与隔振器损伤设置

1.1 车辆-轨道耦合有限元模型建立

车辆-轨道耦合模型主要包括车辆模型和浮置板轨道模型,分别建立车辆、钢轨、道床和圆弧状混凝土基础,以及扣件和弹簧隔振器的有限元模型。

车体建模过程中采用地铁 B 型车,为了增加计算效率,将车辆简化为多刚体系统,考虑车体和转向架的点头和沉浮运动以及一、二系悬挂的刚度和阻尼。车辆和转向架均采用离散刚体,轮对采用解析刚体,一、二系悬挂均采用弹簧-阻尼单元进行模拟。B 型车的车体、转向架和轮对质量分别为 27000、1950 和 1500 kg;车体和转向架点头惯量分别为 1.32×10^6 和 $1290 \text{ kg} \cdot \text{m}^2$;一系悬挂垂向刚度和阻尼分别为 1300 kN/m 和 15 kN·s/m;二系悬挂垂向刚度和阻尼分别为 2500 kN/m 和 50 kN·s/m。

参照青岛地铁某路段浮置板结构(图 1)建立钢轨和道床的有限元模型,钢轨和道床模型均采用实体建模,钢轨采用 CHC60 型钢轨,混凝土采用 C40 混凝土。扣件和弹簧隔振器在建模中均采用弹簧-阻尼单元进行模拟。

钢轨和轮对的接触主要设置法向接触和切向接触,法向接触设置为 Hertz 非线性接触,确定力与压缩量的关系后,通过力-位移的关系表格导入接触设置中。切向接触设置为罚接触,摩擦系数设置为 0.3。轨道不平顺采用美国六级谱,根据高低不平顺的功率谱密度,构造出轨道不平顺的时域曲线,通过修改 inp 文件中钢轨的顶端坐标实现轨道的高低不平顺。

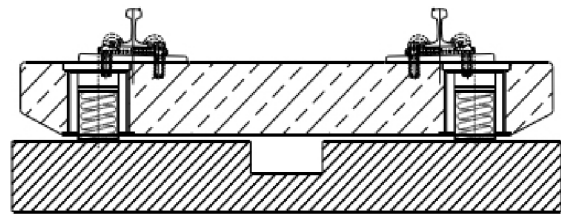


图 1 浮置板结构断面

1.2 损伤工况设置

均匀设计^[10]是利用试验点在试验范围内均匀散布进行设计的一种方法,设计的试验具有全面性、均衡性等优点,可用于因素数和水平数较多的试验,能节省大量的计算时间。与正交设计不同,均匀设计考虑了试验点在试验范围内的均匀散布,可以得到不同试验点下更多的信息,尤其是针对因素和水平多的试验^[11-13]。

考虑弹簧隔振器损伤数量、损伤程度和损伤位置 3 个因素,每种因素下考虑 5 种水平,根据三因素五水平的均匀设计表 $U_{20}(5^3)$ 设计损伤工况,损伤位置、损伤数量及对应的损伤程度,见表 1。利用有限元模型对表中弹簧隔振器损伤工况进行计算,得到浮置板的加速度时程信息。

表 1 浮置板试验设计及加速度最大值、最小值

试验编号	损伤		加速度/($\text{m} \cdot \text{s}^{-2}$)		
	位置	数量/对	损伤程度/%	最大值	最小值
1	相邻浮置板端部	1	30	20.93	-16.87
2		3	20	21.70	-16.61
3		4	90	32.24	-17.06
4		5	50	33.81	-16.71
5	同一浮置板端部	1	90	30.29	-17.02
6		2	50	29.87	-16.91
7		3	70	31.49	-16.58
8		5	20	34.17	-17.05
9	浮置板 1/4 位置	2	30	19.79	-22.67
10		2	70	26.45	-22.16
11		4	30	28.24	-22.60
12		4	70	28.75	-21.52
13	浮置板跨中位置	1	20	17.24	-16.91
14		2	50	19.32	-18.87
15		3	30	18.78	-17.92
16		5	90	21.11	-18.64
17	浮置板 3/4 位置	1	70	17.73	-17.35
18		3	90	21.22	-21.14
19		4	20	19.75	-19.26
20		5	50	22.82	-21.56

1.3 计算结果提取

根据设计表格(表 1),利用建立好的车辆-轨道耦合模型对不同损伤工况进行模拟计算。提取每种试验下相应浮置板位置处的加速度时程曲线,限于篇幅,只给出试验 1、试验 6、试验 10 和试验 14 的时程曲线,如图 2 所示。提取试验 1—20 浮置板的加速度最大值和最小值如表 1 所示。

2 机器学习算法编写与识别训练

本试验以弹簧隔振器损伤后得到的浮置板垂向加速度为研究对象,利用损伤后模拟得到的浮置板垂向加速度时程数据进行试验,完成不同模型的对比验证。本试验采用随机分样法将 20 组模拟得到的浮置板加速度时程数据划分为训练集和预测集,其中 15 组加速度样本作为训练集,其余 5 组作为预测集。每组数据每 0.005 s 取 1 个点,共包含 4801 个加速度数据。因变量包含弹簧隔振器的损伤位置、损伤数量

和损伤程度 3 种分类任务,每个分类任务分为 5 种情况。因此,本试验采用多任务多分类模型。

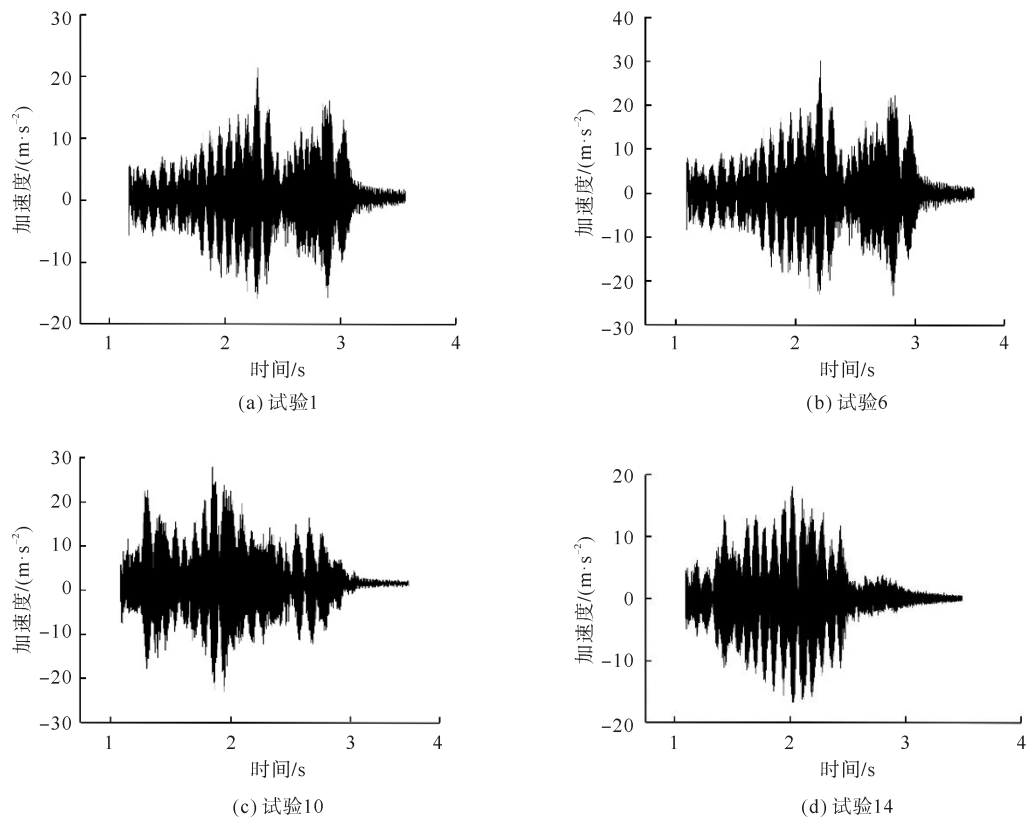


图 2 加速度时程曲线

2.1 支持向量机算法

支持向量机^[14]是 20 世纪 90 年代中期发展起来的基于统计学理论的一种机器学习方法,通过寻求结构化风险最小来提高学习机泛化能力,本质是一个二分类模型。支持向量机适用于较小数据集,对于大数据集,支持向量机的训练复杂程度会变得很高,在构建模型时不能有效地提升运算效率。

基于 Pycharm 平台使用 Python 语言,调用 sklearn 工具包实现支持向量机分类模型的搭建。通过调用线性支持向量机模型,进行模型训练以及验证测试的准确度,同时对模型进行优化。优化过程如图 3 所示,其中,Ploy 为核函数中的多项式核,Linear 为多项式核,Rbf 为径向基函数核, C 为优化目标函数的惩罚系数。

2.2 决策树算法

决策树又称判定树^[15],决策树的构建是通过选用不同的样本纯度度量指标,找到包含关于目标特征的最大信息量的描述性特征,并沿着这些特征值分割数据集,最终产生一个泛化能力强的判定模型。

通过调用决策树分类模型进行模型训练以及验证测试的准确度,同时试验中对模型进行优化。本试验对影响模型最大的 2 个参数进行优化,包括特征选取方法和特征划分点选择方法。优化过程如图 4 所示。

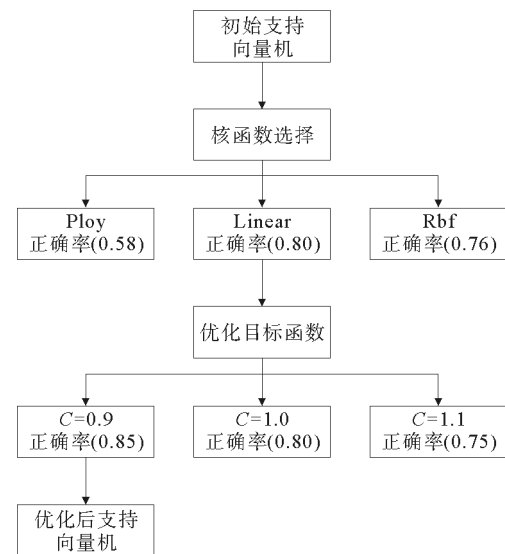


图 3 支持向量机建立过程

2.3 随机森林算法

随机森林^[16-17]是一个包含多个决策树的分类器,也是通过集成学习的思想将多棵树集成的一种算法,它的基本单元是决策树。随机抽取数据进行每一棵决策树的建立,随机地选取特征来进行数据的分类。

通过调用随机森林分类模型,进行模型训练以及验证测试的准确度,同时试验中对模型进行优化。本试验优化对模型影响最大的 2 个参数为决策树的个数和最大深度。优化过程如图 5 所示。

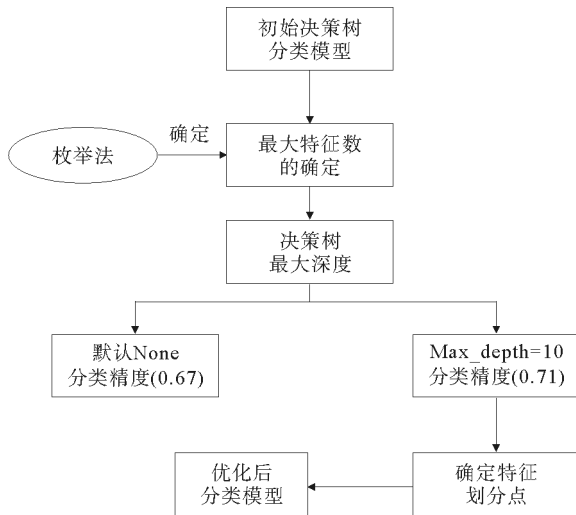


图 4 决策树建立过程

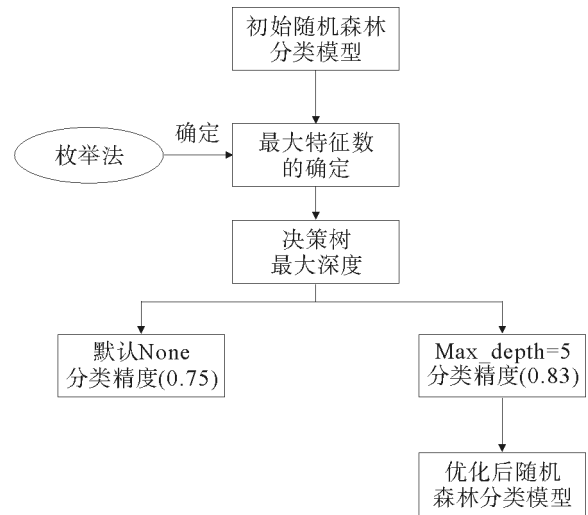


图 5 随机森林建立过程

3 不同算法识别效果分析与对比

在对弹簧隔振器损伤的识别过程中得到损伤位置、损伤数量和损伤程度的混淆矩阵。在损伤位置识别中,混淆矩阵坐标中 0—4 分别表示相邻浮置板端部、同一个浮置板端部、浮置板 1/4 位置、浮置板跨中位置和浮置板 3/4 位置;损伤数量识别中,混淆矩阵中 0—4 分别表示损伤数量为 1~5 对;在损伤程度识别中,0—4 分别表示弹簧隔振器损伤程度为 20%、30%、50%、70%和 90%。混淆矩阵中,T 表示测试集中样本的真实标签和预测标签分布,F 表示测试集中未预测到的结果。

3.1 支持向量机算法

应用支持向量机算法模型进行弹簧隔振器损伤的识别,得到弹簧隔振器不同损伤情况下,损伤位置、损伤数量和损伤程度的测试混淆矩阵如图 6 所示。

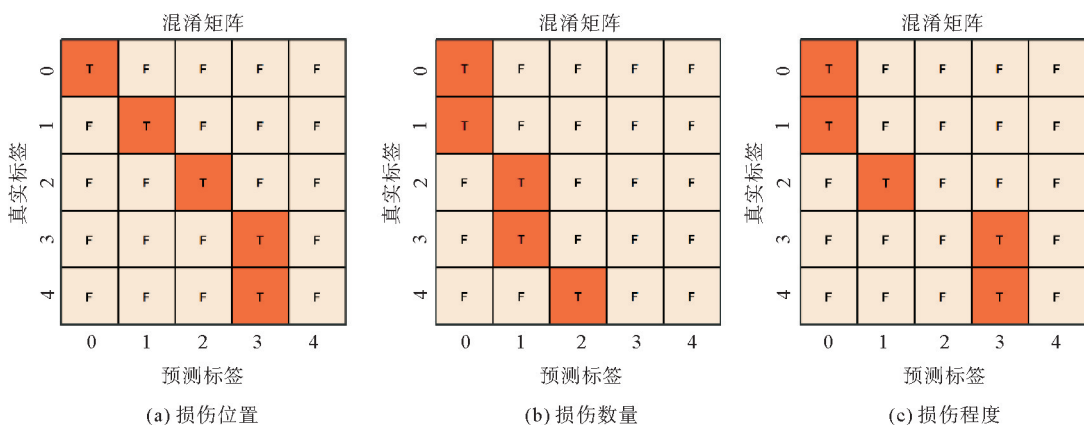


图 6 支持向量机的识别效果

对损伤位置的识别,测试集损伤位置分别为0、1、2、3号位置,损伤位置的预测结果也为0、1、2、3号位置,表示模型预测正确,而4号位置的损伤预测错误,识别精度为80%。对于损伤数量的识别,弹簧隔振器损伤1对时,预测结果正确,而2对、3对、4对损伤时,预测失败,只有在损伤1对时,预测正确。该算法对于损伤数量的识别,识别精度为20%,精度较低。对于损伤程度的识别,在损伤程度为20%、70%时,预测结果准确,该算法对于损伤程度的识别精确度为40%。

3.2 决策树算法

应用决策树算法模型进行弹簧隔振器损伤的识别,得到弹簧隔振器不同损伤情况下,损伤位置、损伤数量和损伤程度的测试混淆矩阵如图7所示。

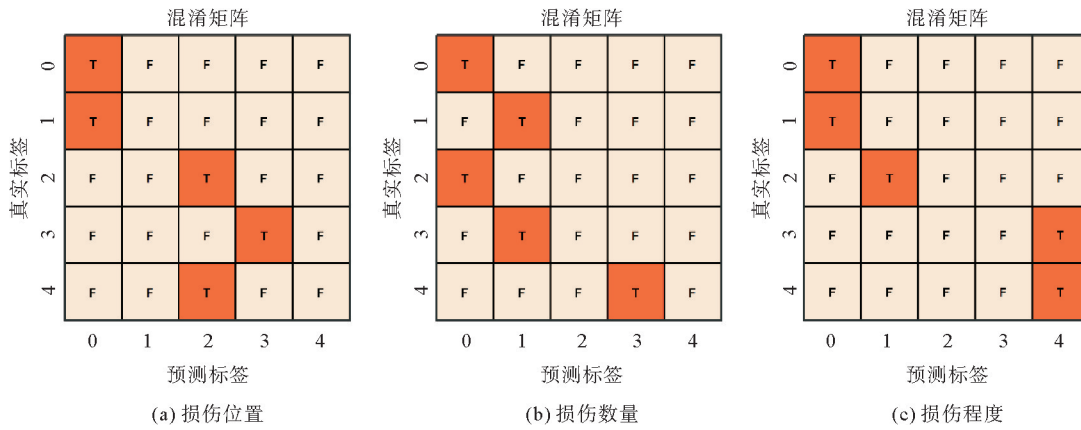


图7 决策树的识别效果

对于损伤位置的识别,损伤位置分别为0、2、3号位置,损伤预测结果为0、2、3号位置,表示模型预测正确,1号、4号损伤位置预测错误,识别精度为60%。对于损伤数量的识别,损伤1对、2对时预测结果正确,3对、4对和5对损伤预测失败。该模型对于损伤数量的识别精度较低,识别精度为40%,但是相对于支持向量机算法,其精度有所提高。对于损伤程度的识别,在损伤程度为20%、90%时,预测结果准确,对于损伤程度的识别精确度为40%。

3.3 随机森林算法

应用随机森林算法模型进行弹簧隔振器损伤的识别,得到弹簧隔振器不同损伤情况下,损伤位置、损伤数量和损伤程度的测试混淆矩阵如图8所示。

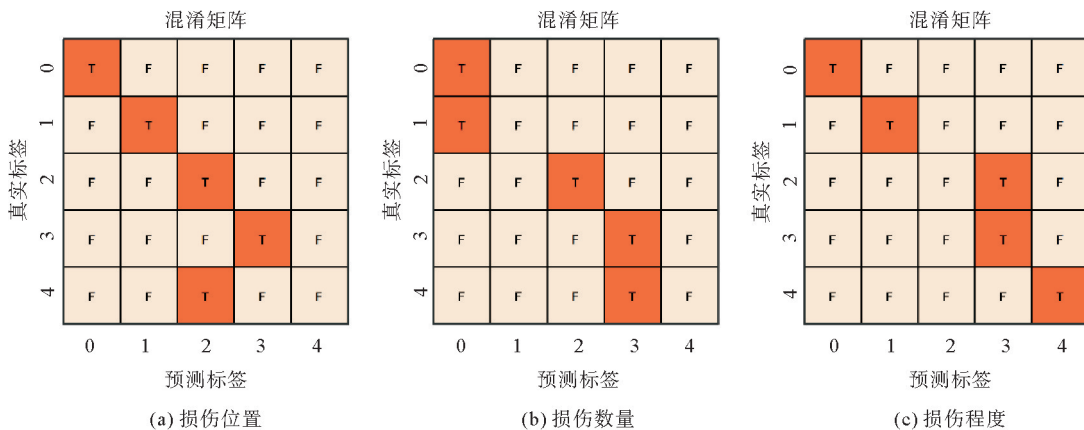


图8 随机森林的识别效果

对于损伤位置的识别,该测试集对损伤位置分别为0、1、2、3号位置,预测正确,4号位置预测错误,识别精度为80%。对于损伤数量的识别,损伤1对、3对、4对时,预测结果正确,2对、5对预测失败。该模

型对于损伤数量的识别精度为 60%,较之前两种模型,精度有所提高。对损伤程度为 20%、30%、70%、90%预测结果准确,因此该算法模型对于损伤程度的识别精确度为 80%,较前两种模型,精度有所提高。

3.4 不同算法识别效果对比

3.4.1 损伤位置识别效果对比

利用支持向量机、决策树和随机森林 3 种算法进行训练和弹簧隔振器损伤位置的预测,识别效果对比如图 9 所示。从图 9 中可以看出,支持向量机、随机森林对 0 号、1 号、2 号和 3 号位置损伤能够进行准确地识别;而在 4 号位置,两种算法对损伤的识别均存在误差,原因在于 2 号和 4 号损伤位置(也就是同一块浮置板的 1/4 和 3/4 位置)损伤后的振动响应基本一致,数据量有限,导致对于损伤的识别存在误差。决策树算法只对损伤比较敏感的部位能够识别,例如 0 号位置(相邻浮置板端部)和 2 号位置(浮置板 1/4 位置),但是对于弹簧损伤前后浮置板振动响应变化不大的位置识别效果较差,例如 1 号损伤位置和 4 号损伤位置。

3.4.2 损伤数量识别效果对比

3 种算法对弹簧隔振器损伤数量的识别效果对比如图 10 所示。对于弹簧隔振器损伤数量的识别,3 种算法的识别效果都不太理想,相比之下随机森林的识别精确度最高。随机森林对弹簧隔振器损伤数量的识别时,在隔振器损伤 2 对、5 对的识别效果存在误差,在弹簧隔振器损伤 1 对、3 对和 4 对,识别效果比较理想。相比之下,支持向量机和决策树两种算法,识别结果均存在比实际损伤数量少的情况,支持向量机和弹簧隔振器损伤数量在 3 对之前,识别效果相对较好,误差率比决策树小;弹簧隔振器的损伤数量达到 3 对以上时,决策树算法相比于支持向量机的识别效果,误差率较小。

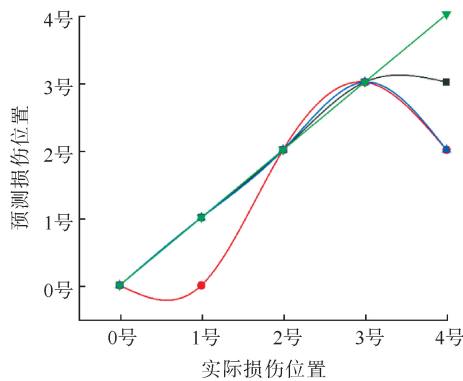


图 9 不同算法对损伤位置识别效果对比

—■— 支持向量机; —●— 决策树;
—▲— 随机森林; —▼— 实际损伤

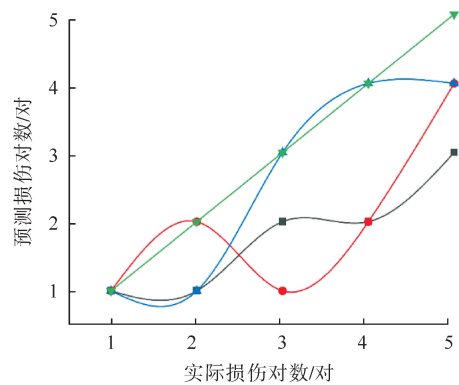


图 10 不同算法对损伤数量识别效果对比

—■— 支持向量机; —●— 决策树;
—▲— 随机森林; —▼— 实际损伤

3.4.3 损伤程度识别效果对比

3 种算法对弹簧隔振器损伤程度识别效果对比如图 11 所示。从图中可知,当隔振器发生 20%、30%、70%和 90%损伤时,随机森林能够对弹簧隔振器的损伤进行精确的识别;尤其是弹簧隔振器发生 50%以上损伤时,浮置板的垂向加速度变化明显,识别效果较好。支持向量机和决策树算法,对小于 50%的损伤,识别效果比较相似,识别效果均存在偏低的情况;对大于 50%的损伤,支持向量机算法识别效果偏低,决策树算法识别效果偏高,两者的误差率基本一致,识别效果比随机森林精确度差。

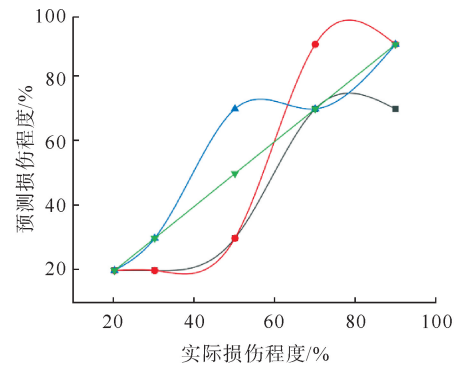


图 11 不同算法对损伤程度识别效果对比

—■— 支持向量机; —●— 决策树;
—▲— 随机森林; —▼— 实际损伤

4 结论

1) 编写了支持向量机、决策树和随机森林3种机器学习算法,利用模型模拟损伤数据进行算法的训练和预测,识别效果表明3种算法均可用于对浮置板弹簧隔振器损伤位置、数量和程度的识别。

2) 对弹簧隔振器损伤位置、损伤数量和损伤程度的识别,支持向量机算法识别准确率分别为80%、20%和40%,决策树算法识别的准确率分别为60%、40%和40%,随机森林算法识别的准确率分别为80%、60%和80%。

3) 3种算法对不同损伤工况识别各有优势,支持向量机和随机森林对损伤位置识别效果较好,随机森林算法对损伤数量和损伤程度识别效果最好。

参考文献(References):

- [1] 李行健,吕建达,赵凌云,等.基于广义S变换和并联神经网络的结构损伤识别研究[J].青岛理工大学学报,2024,45(1):26-35.
LI Xingjian, LÜ Jianda, ZHAO Lingyun, et al. Study on structural damage identification based on generalized S-transform and parallel neural network[J]. Journal of Qingdao University of Technology, 2024, 45(1): 26-35.
- [2] 王秋潇,李行健,任义建,等.基于VMD-WT-CNN的结构损伤识别研究[J].青岛理工大学学报,2023,44(4):101-109.
WANG Qiuxiao, LI Xingjian, REN Yijian, et al. Study on structural damage identification based on VMD-WT-CNN[J]. Journal of Qingdao University of Technology, 2023, 44(4): 101-109.
- [3] 李守巨,刘迎曦,吴玉良,等.基于神经网络的建筑结构节点损伤识别方法[J].大连理工大学学报,2003(3):270-273.
LI Shouju, LIU Yingxi, WU Yuliang, et al. Damage identification of building structure with LM artificial neural networks[J]. Journal of Dalian University of Technology, 2003(3): 270-273.
- [4] 王复越,任毅,赵坦,等.基于决策树算法的钢板探伤预测模型优化[J].鞍钢技术,2022(6):33-38.
WANG Fuyue, REN Yi, ZHAO Tan, et al. Optimization of prediction model for flaw detection of steel plates based on decision tree algorithm[J]. Angang Technology, 2022(6): 33-38.
- [5] 安平和平,邹晓光.基于支持向量机的梁桥多位置损伤识别研究[J].铁道科学与工程学报,2019,16(5):1231-1236.
AN Pinghe, WU Xiaoguang. Multi position damage identification of beam-bridges based on support vector machine[J]. Journal of Railway Science and Engineering, 2019, 16(5): 1231-1236.
- [6] 谢坤明.基于随机森林算法的结构损伤识别[J].福建交通科技,2020(5):91-93.
XIE Kunming. Structural damage identification based on random forest algorithm[J]. Fujian Journal of Transportation Science and Technology, 2020(5): 91-93.
- [7] 姜绍飞,张永强.基于决策树的导管架海洋平台损伤定位[J].沈阳建筑大学学报(自然科学版),2009,25(4):708-711.
JIANG Shaofei, ZHANG Yongqiang. Damage localization for offshore platform structures based on decision tree[J]. Journal of Shenyang Jianzhu University (Natural Science Edition), 2009, 25(4): 708-711.
- [8] 袁瑞杰.基于振动响应的贝叶斯无砟轨道弹性扣件损伤识别[D].武汉:华中科技大学,2021.
YUAN Ruijie. Damage identification of elastic fasteners of ballastless track based on Bayesian method via vibration measurement[D]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology, 2021.
- [9] 任娟娟,杜威,叶文龙,等.基于PSO-SVM的板式无砟轨道CA砂浆脱空损伤识别[J].中南大学学报(自然科学版),2021,52(11):4021-4031.
REN Juanjuan, DU Wei, YE Wenlong, et al. Contact loss identification of CA mortar in prefabricated slab track based on PSO-SVM[J]. Journal of Central South University (Science and Technology), 2021, 52(11): 4021-4031.
- [10] 方开泰,刘千民,周永道.试验设计与建模[M].北京:高等教育出版社,2011.
FANG Kaitai, LIU Qianmin, ZHOU Yongdao. Experimental design and modeling[M]. Beijing: Higher Education Press, 2011.
- [11] 韩智强,左新黛,周勇军,等.基于主成分-逐步回归的大跨弯连续刚构桥冲击系数计算[J].公路交通科技,2022,39(1):72-80.
HAN Zhiqiang, ZUO Xindai, ZHOU Yongjun, et al. Calculation of impact coefficient of long-span curved continuous rigid frame bridge based on principal component-stepwise regression[J]. Journal of Highway and Transportation Research and Development, 2022, 39(1): 72-80.
- [12] 侯交叉,康旭,徐凯,等.基于拟水平正交实验法的磨料水射流切割性能研究[J].机床与液压,2018,46(3):95-98.
HOU Jiaoyi, KANG Xu, XU Kai, et al. Study on cutting performance of abrasive water jet based on quasi horizontal orthogonal experiment[J]. Machine Tool & Hydraulic, 2018, 46(3): 95-98.

(下转第48页)