

DOI:10.16799/j.cnki.csdqyfh.2023.02.049

桥梁结构损伤识别研究现状与展望

刘琦, 聂鹏, 戴华林, 王亚凤, 洪姣
(天津城建大学 计算机与信息工程学院, 天津市 300384)

摘要: 随着经济的快速发展, 结构损伤识别作为桥梁健康监测的核心也得到了迅猛发展。为了全面总结现有桥梁结构损伤的识别方法, 从基于结构响应类型的损伤识别方法、基于分析过程的损伤识别方法和结构智能损伤识别方法三个层面进行了详尽的剖析与总结, 理清了各种结构损伤识别方法的脉络关系和技术演变过程。通过系统化分析, 汇总了上述三大类损伤识别方法的主流算法, 分析了各算法的优势与不足, 最终对桥梁结构损伤研究领域未来的研究方向与走势进行了展望。

关键词: 桥梁工程; 结构损伤; 健康监测; 识别算法

中图分类号: U445.7

文献标志码: A

文章编号: 1009-7716(2023)02-0193-04

0 引言

土木结构, 是人类社会中不可或缺的组成部分。海量的大型土木结构在服役过程中, 会出现各种内外因素不可避免地使其稳定性下降、出现伤亡事故的可能性大幅上涨^[1]。桥梁的健康监测系统需对结构内部进行切实有效的实时监测。技术人员执行健康监测任务时, 需要通过分析系统所采集数据, 对结构既存损伤进行识别, 管护人员得以通过修缮使桥梁结构的健康状况得到提升。桥梁健康监测系统是指利用目前的高新技术, 实时获得桥梁结构响应数据, 通过分析数据以判断桥梁结构损伤的系统^[2], 如图1所示。而在桥梁健康监测系统运行过程中, 结构损伤识别是健康监测系统的核心, 即对结构进行检测和评估, 确定结构是否损伤及损伤具体位置、轻重程度和变化趋势。

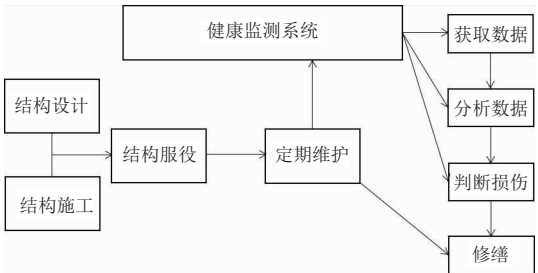


图1 健康监测系统在土木桥梁结构中的应用

国内外学者在桥梁的结构损伤识别方面进行了大量探索。王凌波等^[3]根据近年国内外桥梁健康监

测领域的成果, 总结性阐述了桥梁健康监测在系统、算法、损伤预警等多方面取得的技术进展, 及BHM (Bridge Health Monitoring, 简称BHM) 技术现今的研究热点和未来发展方向。郭天惠等^[4]采用不同应变计所测得两种应变值, 校正桥梁健康监测系统采集的应变数据辅助系统的运行。Kwon等^[5]创造性开发了基于人工神经网络(ANN)行为预测的、能在复杂荷载条件下进行桥梁健康监测的建筑信息模型(BIM)框架, 并在韩国一座桥梁应用, 试验证明了该模型的良好预测精度。

近代人工智能、现代传感技术、信息融合等各类高新技术的蓬勃发展亦带动了结构损伤识别技术进步。本文依据方法实现过程中所应用数据的类型、方法分析过程的具现化差异, 对结构损伤识别方法进行划分, 归纳了近年来学者所取得的研究成果。同时介绍了目前主流的结构智能损伤识别方法, 总结所提及算法的优点与不足, 最终对桥梁结构损伤识别技术的发展与改进方向进行了展望。

1 基于结构响应类型的损伤识别研究现状

识别方法根据结构损伤识别过程中所用模型的结构响应样本数据类型, 可被划分为基于静力响应的结构损伤识别、基于动力响应的损伤识别、以及基于动静力响应结合损伤识别, 如图2所示。

1.1 基于静力响应的结构损伤识别方法

在识别结构损伤时可以直接通过现有的传感技术从结构中收集应变、位移、挠度等静力响应数据, 通过采集结构节点数据, 并将其对比、计算, 分析结构内部的损伤。静力损伤识别过程通常是被改良的反演识

收稿日期: 2022-07-12

基金资助: 天津自然科学基金面上项目(18JCYBJC85600);
天津市教科研计划项目(2019KJ094)

作者简介: 刘琦(1979—), 女, 博士, 讲师, 从事桥梁结构损伤研究教学工作。

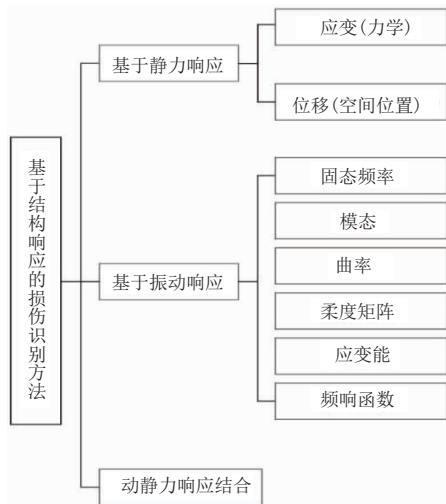


图2 基于结构响应的损伤识别方法分类

别过程。静态测试通常会显示外部负载。因此,通过最大化结构响应误差的削减的力度,达成求解的结构输出反演最优化,是静力损伤识别的主要目的^[6-7]。真实的自然环境中,通过传感器采集所得的原始数据,初始样本数据难免包含噪声信息。采取有效方法对数据内部的噪声信息进行针对性识别并分离,处理后的样本数据才能够有效应用于损伤识别。

1.2 基于动力响应的结构损伤识别方法

是否拥有对结构坏点高度敏感的样本参数,对基于动力响应的损伤识别方法至关重要,适当选择模态数据决定了损伤识别任务的难易程度。通常用于损伤识别直接定位的物理参数必须是局部变量,且有两个重要先决条件,一是对结构局部坏点高度灵敏;二是位置坐标的函数^[8],通常分为结构性动态测试、提取损坏相关的特征参数以及算法应用识别损伤三步^[9]。算法根据处理时的差异可分为基于模态的损伤识别方法和基于信号处理的损伤识别方法。目前主流的算法包括傅里叶变换、短时傅里叶变换、小波分析和盲源分离法等,如图3所示。与静力响应数据相比动力响应数据同样受噪声影响较大。

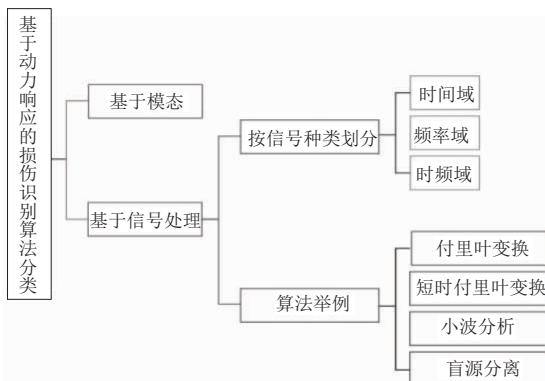


图3 基于动力响应的损伤识别方法分类

1.3 基于动静力响应结合的结构损伤识别方法

基于动静力响应相结合的结构损伤识别方法相较于对动力或静力响应数据单独调用的方法,由于动力响应参数和静力响应参数在样本采集、数据分析等方面均有较大差异,将两者完美地结合使用具有一定挑战性。目前学术界对于动静力结合的结构损伤识别方法研究与课题数量有限,亟待学者对该领域的方法进行发明与创新。

2 基于分析过程的损伤识别研究现状

2.1 基于模型的损伤识别方法

目前基于模型的损伤识别方法,按照修正目标数可划分为基于单目标和多目标优化修正方法两类,修正参数内容多为模态参数、模态参数的派生参数和响应面三类。Berman等^[10]利用模态样本解决扰动矩阵最小值问题,并修正模型,创立了最标准化的模态修正法。Zhao等^[11]通过比较模态频率、模态形状和特定系统中刚度变化的柔度敏感性,确定模态柔度对损坏最敏感,使得其更好地识别结构损伤。现今很多学者将人工智能和统计学与有限元模型修正相结合进行多目标修正以解决单目标模型修正无法应用于复杂土木结构的问题。

2.2 基于数据驱动的损伤识别方法

数据驱动的损伤识别方法与模型驱动的损伤识别方法相对应,实验使用数据采集装置获得的样本数据进行,通过分析所得的测量数据,发现数据异常值,确定结构损伤位置和损伤程度。常用的损伤识别方法有傅里叶变换、自回归滑动平均模型(ARMA)、基于概率统计的贝叶斯(Bayesian)模型修正和基于蒙特卡洛(Monte-Carlo)随机模拟的方法等,其中小波分析方法受到更多研究者的青睐。

小波分析指使用小波变换分析输入信号的细节并提取特征的过程。通常学术界在利用小波分析进行损坏识别时,按照响应不同,划分为两类,如图4所示。一是基于时域响应的分析方法,其中包括利用小波系数波动、利用小波分解能量波动和利用时域分解图不连续点三种方法。二是基于空间域响应的分析方法,包含将小波分析与模态类识别方法结合,或者使用小波分析担任预处理任务,并先使用小波来处理输入信号。再利用模式识别的分类器或反演算法使用处理后的信号来完成对于结构内部的损伤定位和具体的损伤程度判断^[12]。

小波方法只能对损伤发生时刻及位置研判,若

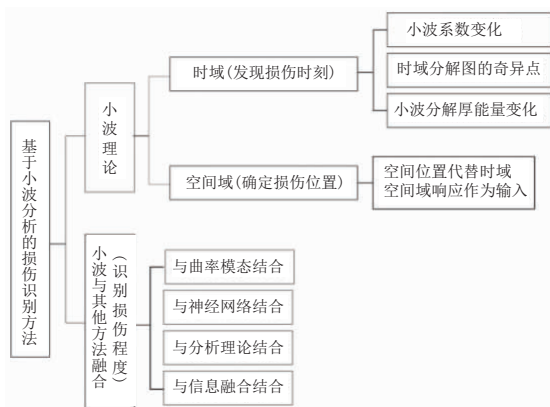


图4 小波分析理论及相关延展的损伤识别方法分类

使用小波分析直接对具体的结构损伤轻重程度进行辨析,需结合小波法与其他技术。杜志军等^[13]应用小波分析法处理三层钢框架,不同既定条件下高效准确地识别了结构损伤。吴壮^[14]在移动荷载作用下以大冶湖特大桥主桥有限元模型进行结构损伤识别,成功证明小波的结构损伤识别能力。常虹^[15]混合应用小波分析将加速度数据进行预处理预判损伤发生位置,再使用神经网络判断结构损伤程度。由于小波分析方法中难以将一维的良好特性扩展到二维之外,当算法使用的数据为二维图像或更高维时,小波分析则需要改良优化或混合其他算法。

3 结构智能损伤识别研究现状

人工智能的快速发展,在带动科学界革新与进步的同时,也为土木等学术领域带来蓬勃发展。其中机器学习方法在对结构损伤识别的任务中表现不俗,取得了骄人的成绩。人工智能高度模拟人脑的特性、高度契合健康监测系统的智能特性,使其在土木领域受到学者的广泛关注并应用于各式复杂结构,在结构损伤识别中体现了重要的研究价值和应用价值。

3.1 遗传算法

遗传算法是最早被应用于结构损伤识别的智能算法之一。早期学者 Holland^[16]提出遗传算法,并初步阐述了最原始遗传算法的基本原理,之后它便成为系统识别领域重要的数学优化工具。Guo 和 Li^[17]通过遗传算法创立了一套完整的多步损伤定位定量识别方案;Cha 等^[18]使用多目标遗传算法 NSGA-II,借助于模态应变能识别了存在于三维结构内部的损伤;Maers 和 Surace^[19]使用模态分析理论建立了目标函数,并对桁架结构进行方法验证识别。

遗传算法在损伤识别任务中具有良好的自适应性,能够有效处理非线性问题,具有抗噪性、鲁棒性。

但当数据量较大时,遗传算法存在收敛速度慢、控制变量较多等弊端,因此大数据训练前,需要对算法进行优化使用。

3.2 主成分分析法

通常,结构智能损伤识别方法需要大量的样本数据作为支撑,但获取的原始数据难以避免地存在噪声,只有进行数据预处理才能高效完成损伤识别。主成分分析法(Principal Component Analysis,简称 PCA)是进行数据压缩的经典数学统计分析方法,能够保证在数据的特征信息损失最少的情况下,将高维数据进行降维处理。李振环^[20]将 PCA 与小波阈值法联合使用,通过多工况进行研究实验,获得了良好的降噪效果。

传统 PCA 是将所有的监测数据一并进行分析,无法区分有损数据和无损数据,因此存在一定局限性。Posenato 学者利用时间窗口中的特征向量进行对比分析,以高敏高速的特性进行损伤识别,称为 MPCA(Moving Principal Component Analysis)法。张舸^[21]以建立的数据集为基础,应用机器学习建立 MPCA 所获得的特征与结构损伤状态之间的对应关系,获得更好的损伤识别效果。

3.3 神经网络与深度学习

机器学习算法中包含 BP 神经网络、决策树、支持向量机(SVM)等浅层学习算法。浅层学习算法的特征在于其隐含层的层数少,运算速度快,处理效率高。浅层学习算法适用于处理数据规模较小的情况,但容易陷入局部最优解、无法处理大数据任务。神经网络由于其能够保留训练过程的记忆,随之与结构健康时的历史数据对比确定损伤,且能过滤噪声并从数据中分辨损伤原因和类型,较为适应于结构损伤识别任务。当今的土木结构越来越复杂,在进行损伤识别过程中需要处理很大批量的不同种类的监测数据,浅层学习难于满足大数据时代的需求,因此深度学习算法受到众多学者们的广泛关注与研究。

深度学习(Deep Learning)是机器学习(Machine Learning)领域的一个分支,是一个前沿的科学研究方向。深度学习能够使机器模拟人脑的思维过程,让机器像人类一样拥有分析、模仿、学习文字、图像、声音等多类型的数据。Jia 等^[21]应用深度神经网络(Deep Neural Network),对各种工况下测量的滚动轴承参数齿轮箱数据,挖掘特征进行诊断故障;Avci 和 Abdeljaber^[22]利用自组织神经网络(Self-Organization Maps),通过对钢结构模型不同工况下的响应数据进

行训练,取得了良好的识别效果;Abdeljaber 等人^[23]首次提出基于一维卷积神经网络(1D-CNN)的结构损伤监测系统;骆勇鹏等^[24]使用 1D-CNN 处理结构的加速度数据,在简支梁、钢框架桥等结构验证了方法的可行性和可靠性。周之等^[25]使用径向基神经网络,对悬梁臂模拟损伤进行了有效识别。

深度学习的学习能力强、覆盖范围广、可移植性强,但作为大数据时代的产物,使用深度学习处理实际问题时,为了达到良好的学习效果,必须使用足够大的数据集作为支撑,否则会遇到机器学习不够充分,导致识别效果不佳的问题。

4 结构损伤识别方法展望

如何使土木结构的稳定性得到足够保障是整个社会需要共同研究的课题。目前损伤识别方法在实际工作中遇到了很多困难,各类问题使得桥梁结构损伤识别方法的革新创造之路仍然漫长。解决下述现今土木领域中三个重要的问题,能够使桥梁结构损伤识别技术得到里程碑式发展:

(1)多角度结合桥梁不同种类数据的方法研究

桥梁损伤检测所应用数据随所用模型而改变。某种类型的风险检测往往是基于特定理论体系或数据模型进行实验和研究,并根据结果评估对故障造成的损害。目前多角度结合的损伤识别方法相关研究较少,但仅从基于动静力响应结合的损伤识别方法可以证明,多角度结合桥梁不同种类数据的方法更加的高效、准确,具有较高的研究价值。

(2)土木结构早期损伤研究

结构内部在出现已定义的明显结构损伤前,存在称为早期损伤或潜在损伤的细微结构变化^[26]。早期损伤对于结构系统的影响较小,不会使结构模态参数有显著变化,亦不会使结构外观上与功能上产生人为可以观测到的显著变化。通过更先进的技术手段探查结构的早期损伤,及时修缮与维护工作,能够在结构发生重大损伤、造成实际损失前阻止其发生。

(3)现场数据采集过程的优化与改良

现场测试数据的指标精度直接影响损伤识别任务的结果精度^[27],保证测试数据准确性最直接的方法是针对数据采集装置的改进。监测结构损伤状态所需的采集装置数目、布局等同样影响测试数据精度。因此,未来研究方向除了损伤识别的理论与方法外,如何收集高精度测试数据同样需要深入研究。

参考文献:

- [1] 朱宏平,余璟,张俊兵.结构损伤动力检测与健康监测研究现状与展望[J].工程力学,2011,28(2):1-17.
- [2] 张舸.基于桥梁仿真长期监测数据的人工智能损伤识别方法研究[D].广东:华南理工大学,2020.
- [3] 王凌波,王秋玲,朱钊,等.桥梁健康监测技术研究现状及展望[J].中国公路学报,2021,34(12):25-45.
- [4] 郭天惠,崔耀月.基于荷载试验修正的桥梁健康监测系统设计[J].公路,2021,66(8):201-205.
- [5] Kwon T H, Park S H, Park S I, et al. Building information modeling-based bridge health monitoring for anomaly detection under complex loading conditions using artificial neural networks[J]. Journal of Civil Structural Health Monitoring, 2021, 11(2):1301-1319.
- [6] 韩冰,钟铭,王元丰.钢筋混凝土柱低周疲劳损伤后的静力性能试验[J].中国公路学报,2011,24(2):62-69.
- [7] 张向东.基于振动的损伤检测方法的理论和实验研究[D].山西:太原理工大学,2002.
- [8] 胡利平.动态法桥梁损伤检测与识别技术面临的挑战[J].无损检测,2005(5):252-255.
- [9] Berman A, Nagy E. Improvement of a large dynamic analytical model using ground vibration test data [C]// Proceedings of the 23rd Structures, Structural Dynamics and Materials Conference.1982.
- [10] Zhao J, Dewolf J T. Sensitivity Study for Vibrational Parameters Used in Damage Detection [J]. Journal of Structural Engineering, 1999, 125(4):410-416.
- [11] Yun C B, Lee H J. Substructural identification for damage estimation of structures[J]. Structural Safety, 1997, 19(1):121-140.
- [12] 吴向男,徐岳,梁鹏,等.桥梁结构损伤识别研究现状与展望[J].长安大学学报(自然科学版),2013,33(6):49-58.
- [13] 杜志军,刘国辉,袁颖.基于小波包分解的框架结构损伤识别研究[J].山西建筑,2009,35(8):69-70.
- [14] 吴壮.移动荷载作用下基于最优小波包分解的桥梁损伤识别[D].湖北:武汉理工大学,2019.
- [15] 常虹.基于小波分析和神经网络的结构损伤识别研究[D].吉林大学,2010.
- [16] Holland J H. Outline for a logical theory of adaptive systems[J]. Journal of the Association for Computing Machinery, 1962, 9(3):297-314.
- [17] Guo H Y, Li Z L. A two-stage method to identify structural damage sites and extents by using evidence theory and micro-search genetic algorithm [J]. Mechanical Systems & Signal Processing, 2009, 23(3):769-782.
- [18] Sung, Min, Cha, et al. A New Migration Method of the Multipopulation Genetic Algorithms[J]. Journal of KISS : Software and Applications, 2001, 28(1):26-30.
- [19] Mares C, Surace C. AN APPLICATION OF GENETIC ALGORITHMS TO IDENTIFY DAMAGE IN ELASTIC STRUCTURES[J]. Journal of Sound & Vibration, 1996, 195(2):195-215.
- [20] 李振环.基于主成分分析和灰色关联分析的梁桥结构损伤检测[D].广东:暨南大学,2020.

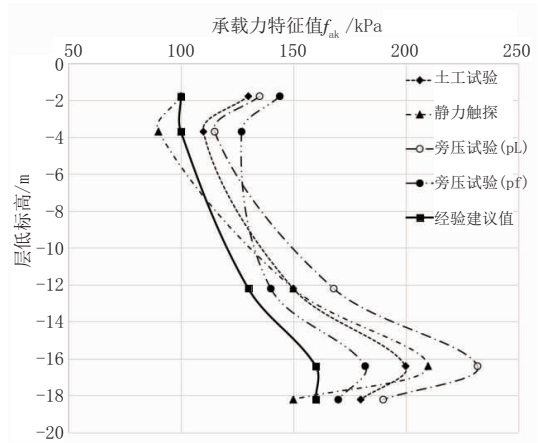


图5 地基土修正后承载力特征值曲线图
修正后的 λ 、 K 值见表4所列。

表4 λ 、 K 值修正表

地层	p_L 法		p_f 法	
	K	f_{ak}/kPa	λ	f_{ak}/kPa
⑤黏土	1.87	135	0.70	144
⑥粉质黏土	2.40	115	0.70	127
⑧ ₁ 粉质黏土	2.40	168	0.80	140
⑧ ₂ 粉砂	6.10	232	0.70	182
⑨ ₁ 粉质黏土	4.80	190	0.46	170

3 结 语

旁压试验确定地基土承载力特征值数值分布规律基本与查表法相吻合,明显反映出不同深度地基土的工程性质。勘察报告中经综合研判提供的承载

力数值在满足建设需要的前提下较为安全、可靠。

通过多种勘察手段的综合对比分析,旁压试验极限压力 p_L 法中,⑤黏土安全系数 K 值乘以0.78折减;⑧₂粉砂可提高安全系数 K 值1.6~1.8倍;⑨₁粉质黏土的安全系数 K 值提高1.7~2.5倍。

在临塑压力 p_f 法中,⑧₁粉质黏土修正系数 λ 在规范推荐数值的基础上提高为0.8;⑨₁粉质黏土修正系数 λ 取值需要进一步折减。修正后的旁压试验承载力曲线线型与静力触探、土工试验规律性更加一致。

(3)在工程实践中,应采用多种勘察手段,综合计算、评价、分析,相互印证,保证提供的计算参数具有客观性、安全性及经济性。

参考文献:

[1] GB/T 50123—2019,土工试验方法标准[S].

[2] JGJ/T 69—2019,地基旁压试验技术标准[S].

[3] TB 10018—2018,铁路工程地质原位测试规程[S].

[4] DB/T 29-247—2017,天津市岩土工程勘察规范[S].

[5] DB/T 29-20—2017,天津市岩土工程技术规范[S].

[6] 《工程地质手册》编委会.工程地质手册(第五版)[M].北京:中国建筑工业出版社,2018.

[7] 刘浩.天津地铁5号线工程沁河南道站岩土工程勘察报告[R].天津市市政工程设计研究院,2011.

[8] 刘浩.北辰区0310地块岩土工程勘察报告[R].天津市市政工程设计研究院有限公司,2020.

(上接第196页)

[21] Jia F,Lei Y,Lin J,et al. Deep neural networks: A promising tool for fault characteristic mining and intelligent diagnosis of rotating machinery with massive data [J].Mechanical Systems and Signal Processing,2016,72-73:303-315.

[22] AVCI, ONUR, ABDELJABER, OSAMA. Self-Organizing Maps for Structural Damage Detection: A Novel Unsupervised Vibration-Based Algorithm[J]. Journal of Performance of Constructed Facilities,2016,30(3).

[23] Abdeljaber O,Avci O,Kiranyaz S,et al.Real-time vibration-based structural damage detection using one-dimensional convolutional neural networks [J]. Journal of Sound & Vibration,2017,388: 154-170.

[24] 骆勇鹏,王林堃,廖飞宇,等.基于一维卷积神经网络的结构损伤识别[J].地震工程与工程振动,2021,41(4):145-156.

[25] 周之,刘冰.基于径向基网络的结构损伤程度检测[J].无损检测,2014,36(1):11-14.

[26] 马宏伟,杨桂通.结构损伤探测的基本方法和研究进展[J].力学进展,1999,29(4):513-527.

[27] 吴杰.桥梁结构损伤识别若干问题研究[D].广东:华南理工大学,2020.