

DOI: 10.11835/j.issn.2096-6717.2021.213



桥梁健康监测 2020 年度研究进展

单德山, 罗凌峰, 李乔

(西南交通大学 土木工程学院, 成都 610031)

摘要:桥梁健康监测利用通讯传感设备远程记录运营中的结构持续响应,通过对信号数据的处理分析实现桥梁结构的实时预警与安全评估,从而达到保护结构正常运营、延长结构使用寿命、指导桥梁结构管养与维护决策的目的。桥梁健康监测技术作为桥梁工程领域新兴的分支,已逐渐成为一个热门研究方向。为了促进该领域研究进一步发展,指导健康监测系统在桥梁工程中更高效的应用,对桥梁健康监测系统的信号降噪、信号预警、模态参数识别、有限元模型修正、损伤识别、状态预测与评估等关键技术方法的研究现状进行了详细介绍,并对 2020 年度内相关研究进展及应用进行了总结与评述,最终发现机器学习方法正越来越广泛地应用到现阶段桥梁健康监测各项关键技术的研究中。

关键词:桥梁健康监测系统;信号降噪;模态参数识别;有限元模型修正;损伤识别

中图分类号:U446.2 **文献标志码:**A **文章编号:**2096-6717(2022)01-0129-06

State-of-the-art review of the bridge health monitoring in 2020

SHAN Deshan, LUO Lingfeng, LI Qiao

(School of Civil Engineering, Southwest Jiaotong University, Chengdu 610031, P. R. China)

Abstract: The bridge health monitoring system (BHMS) continuously measures and records the structural responses by using a variety of sensors and communication devices in the bridge operation process. The automatic analysis of signal data can be done effectively in the BHMS to fulfill the timely danger warning and safety assessment. The BHMS leads to the better transportation operation of bridges, the longer service life of bridges, and the more reasonable determination of the bridge management and maintenance for engineers. For the sake of the more efficient application of health monitoring system in bridge engineering, this paper summarizes the current states of several representative BHMS techniques: signal denoising, signal warning, modal parameter identification, finite element model updating, damage identification, condition prediction and assessment. Then, the related researches and applications of these key techniques during 2020 are summarized and discussed. Consequently, it is found that the machine learning methods have been more and more widely used in the current research of key technologies of the bridge health monitoring.

Keywords: BHMS; signal denoising; modal parameter identification; finite element model updating; damage identification

在车辆荷载、风荷载、温度荷载、环境随机振动等激励作用下,桥梁健康监测实时、连续地采集结构响应,通过计算机数学方法^[1]展开信号分析工作,提取结构响应的特征值和阈值(如模态频率、阻尼比、最大位移值、最大应力值等)作为桥梁结构安全预警与状态评估的依据,进而为桥梁管养维护提供决策。目前,中国已有不少大跨桥梁结构都安装有健康监测,如苏通大桥、虎门二桥、润扬大桥、港珠澳大桥、

青马大桥等。

然而,如何使桥梁健康监测产生的海量监测数据利益最大化,是该研究方向发展至关重要的问题。通常,传统的桥梁健康监测实施流程如图 1 所示^[2]。

桥梁健康监测的研究意义在于积累桥梁健康监测系统设计 and 科研素材,最终目标是实现桥梁损伤诊断与状态评估。现阶段,桥梁健康监测的技术难点与研究热点主要是:

收稿日期:2020-08-04

基金项目:国家自然科学基金(51978577、51678489);国家重点研发计划(2016YFC0802202);国家重点基础研究发展计划(2013CB0363);中电建路桥集团资助科研项目(SCMQ-201728-ZB)

作者简介:单德山(1968-),男,教授,博士生导师,主要从事桥梁健康监测理论研究,E-mail:dsshshan@163.com。

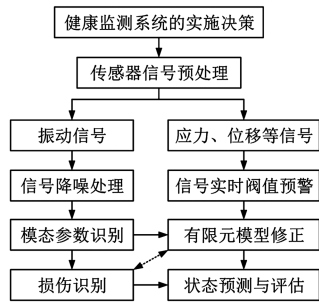


图 1 桥梁健康监测系统的实施流程

1)信号降噪;2)信号预警;3)模态参数识别;4)有限元模型修正;5)损伤识别;6)状态预测与评估。

1 信号降噪研究

由于野外实测信号具有复杂噪声,因此不能将桥梁健康监测系统集成到的初始信号直接用来分析,还应对其进行降噪处理^[3-4]。结构监测信号的降噪处理通常分为滤波方法、分解重构方法两种。滤波处理通常只能完成实验中模型桥振动信号的降噪工作,难以有效剔除野外桥梁实测振动信号中的复杂噪声。因此,近年来信号分解重构技术已广泛应用于桥梁健康监测,并展现出良好的性能。目前,信号分解重构技术研究主要集中在小波变换法(WT)、经验模态分解法(EMD)及其改进方法上。

熊春宝等^[5]针对桥梁 GNSS-RTK 变形监测中多路径效应和随机噪声的影响,采用切比雪夫(Chebyshev)滤波抑制多路径效应,通过自适应完备集合经验模态分解算法(CEEMDAN)提取得到噪声的 IMF 分量,再使用小波变换(WT)方法剔除随机噪声,从而提出了一种针对桥梁 GNSS 位移信号降噪处理的有效方法。同年,熊春宝等^[6]针对环境激励下桥梁结构动态变形监测信号的噪声问题,提出了改进 EEMD-小波阈值联合去噪方法,利用平均周期图法和相关系数法双重判定准则剔除虚假 IMF 分量;最后通过一座大跨斜拉桥健康监测的实际工程应用案例验证了所提位移信号降噪方法的有效性。

杨海涛^[7]针对集合经验模态分解算法(EEMD)与补充集合经验模态分解算法(CEEMD)的不足(即模态混叠现象引发的不可逆误差),采用多尺度排列熵算法(MPE)随机检索 IMF 噪声成分,将自适应完备集合经验模态分解算法(CEEMDAN)与静态离散小波变换算法(SWT)、支持向量机(SVM)相结合,从而提出了桥梁加速度信号降噪新方法。

王尧伟^[8]基于统计学原理,针对桥梁加速度监测信号,提出了一种新的奇异值重构阶次确定方法,以不同噪声级别的仿真信号验证了该方法应用效果;在此基础上,建立了基于奇异值重构的改进经验小波变换方法(IEWT),再将其与传统经验小波变换方法进行对比以验证所提算法的能力,进而建立了基于桥梁模态参数识别的最优经验小波变换组合比选规则;最后,将所提算法应用于某大跨悬索桥加速度监测信号的降噪处理,如图 2 所示。

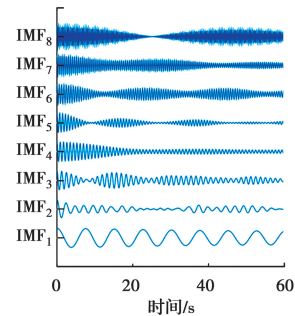


图 2 采用 IEWT 所得某悬索桥的本征模态函数(IMFs)

黄书亭等^[9]提出一种结合数学形态学的改进经验小波变换(EWT)方法,基于 MATLAB 编制识别的程序,以南京长江大桥的实测加速度数据为依托,对其进行模态参数识别。

2 信号预警研究

目前,桥梁健康监测信号的预警方法主要分为固定阈值法和动态阈值法两种。固定阈值法是将修正后有限元模型的分析结果作为理论固定阈值,而动态阈值法则是依据海量监测信号的统计特性或回归模型,在信号趋势项基线上设定随之动态变化的阈值曲线。

刘洋^[10]针对城市高架桥的健康监测信号数据,将修正后有限元模型所得阈值与数据处理后统计所得阈值进行了对比分析,发现后者比模型计算所得阈值更合理,从而提出了高架桥健康监测信号的动态阈值预警方法。

魏鑫等^[11]在对牡丹江红岭高架桥的监测数据分析时,考虑季节性温度变化的影响,建立了温度作用与应变监测值之间的时变多元回归模型,进而提出了桥梁健康监测信号的实时动态预警机制。

胡铁明等^[12]依托某在役桥梁健康监测系统,依据对竖向位移-温度的数据相关性建立其回归方程,进而剔除温度对竖向位移变化的影响,得出了在桥梁正常运营过程中由车辆载荷引起的竖向位移变化,并对竖向位移的变化残差进行分级预警,为桥梁主梁挠度信号的动态预警机制提供了借鉴参考。

Ni 等^[13]依据汀九大桥主梁端部纵向位移响应与温度信号的相关性,拟合得到“温度-纵向位移”的贝叶斯回归模型,并将贝叶斯回归模型与可靠性理论相结合,建立了数据异常指标。当有新的监测数据输入时,可依据此异常指标对梁端纵向位移信号实时报警,并对梁端伸缩缝的健康状况进行评价。

Cao 等^[14]利用东海大桥健康监测系统集成所得的海量风速计、加速度计信号数据,模拟了涡激振动(VIV)的预测数学模型,从而提出大跨悬索桥涡激振动响应预警机制。

徐一超等^[15]针对江阴长江公路大桥伸缩缝位移长期监测信号数据,根据船撞后梁端转角的自振特性,选取了幅值、一阶横向自振周期峰值以及短时自功率谱密度幅值作为特征设定阈值,提出了桥梁船撞指标的预警机制。

毛琳等^[16]基于统计学原理,采用无模型指标训练法对万埠大桥进行了安全状态预警,通过该法计算得到桥梁结构应

变及倾角值的安全阈值,将监测系统实时监测数据与安全阈值进行对比,取得了良好的效果。

3 模态参数识别研究

在桥梁健康监测中,结构的模态参数识别通常颇具难度。桥梁结构的模态参数主要是指结构的频率、振型和阻尼比,它们反映了结构的系统特性。针对桥梁运营中的环境激励,研究者们提出了多种较成熟的运营模态分析方法(OMA),例如随机子空间法(SSI)、环境激励法(ERA)、频域分解法(FDD)、峰值拾取法(PP)、随机减量法(RDT)、时域参数识别法(ITD)等。上述 OMA 方法又可以分为频域方法(FDD、PP)和时域方法(SSI、ERA、RDT、ITD)。频域方法通常识别功率谱密度(PSD)的峰值或直接输出 PSD 矩阵的奇异值,但由于频域模态识别方法每次重新运算都需要初步校准,且对噪声非常敏感,因此该类方法在桥梁健康监测中存在较大的局限性。时域方法通常着重于稳定图的自动解析,以获取有代表性的模态,目前大跨桥梁健康监测中使用最多的时域方法是随机子空间法(SSI)。然而,现阶段无论时域方法还是频域方法,都亟需解决如何高效过滤虚假模态这一难题,从而实现桥梁模态参数的自动化识别,为实时有限元模型修正和快速损伤诊断提供技术可能。

Soyöz 等^[17]使用 FDD 方法分别识别了更换吊索前后的某大跨悬索桥模态参数,并与有限元计算结果进行了对比验证,发现悬索桥吊索更换对大跨悬索桥的动力特性具有一定影响。Jian 等^[18]提出了一种利用小波分析识别桥梁振型的新方法,并根据所建立的车桥耦合系统有限元模型进行了广泛的数值研究,进一步验证了不同桥梁运营情况下所提出方法的准确性和鲁棒性。

2020 年,一些学者另辟蹊径,采用并非加速度计的其他传感器成功识别了运营桥梁的模态参数,一定程度上达到了节省桥梁健康监测系统成本的目的。Kaloop 等^[19]采用双重滤波和多项式预测方法处理应变监测信号,并估计公路钢板梁桥的动态特性,取得了不错的模态参数识别效果。刘欣悦^[20]在此研究的基础上,首先剔除了应变信号中温度效应引起的趋势项成分,以所提取的动应变部分作为数据源,采用 SSI 方法成功识别了某大跨公路悬索桥的模态参数(如图 3 所示)。熊文等^[21]提出了一种基于高帧视频分析的桥梁动力特性非接触识别算法,通过高帧视频的动态定位与跟踪,精准识别安装在结构表面具有特殊几何形状的标志点,获取了某斜拉桥的振动时程信息,识别了结构模态参数。

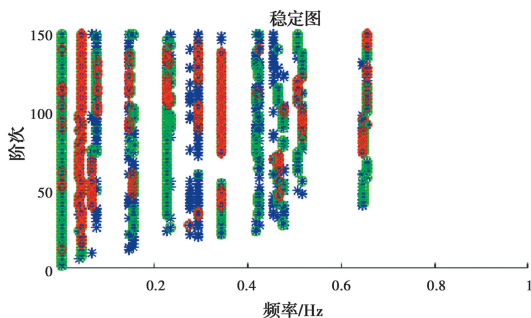


图 3 时域内分离温度效应后所得动应变的稳定图

陈永高等^[22]为了剔除稳定图中的虚假模态和避免模态遗漏的问题,提高在线自动化模态参数识别的精确度,提出了一种基于滑动窗口和相似度的桥梁模态参数自动化识别算法,最后将所提算法应用到某斜拉桥模态参数识别,将识别结果与有限元结果对比后,验证了所提算法的可靠性。祝青鑫等^[23]为了实现桥梁模态参数的自动化识别,将主成分分析(PCA)、均值聚类法和层次聚类法相结合来滤除虚假模态,之后以 SSI 算法识别模态参数,提出了一种可靠的桥梁模态参数自动化识别方法。

4 有限元模型修正研究

桥梁结构有限元模型修正通常是通过调整设计参数(密度和刚度)来实现的,调整参数的方法又分为灵敏度矩阵法(SA)^[24]和响应面法(RSM),其中响应面法具有更高的计算效率。替代模型技术引入了参数敏感性分析的统计性质,将试验设计、参数子结构、多元逐步回归、假设检验等计入到结构有限元模型计算中,此外,替代模型技术还能与 SA 和 RSM 有机结合。近年来,为了提高复杂桥梁结构有限元模型修正的计算效率,越来越多的学者采用 Kriging 预估器和响应面模型等替代模型方法来逼近结构响应与修正参数之间的关系,以提升有限元模型修正的计算速率。

2020 年,徐恒志等^[25]利用联合静动力的有限元模型修正方法对某混凝土 T 形叠合梁进行了有限元模型修正。李坤等^[24]针对灵敏度方法的不适用性问题,引入广义交叉验证(generalized cross validation, GCV),考虑正则化参数的选取对结果精度和效率都有重要影响,通过钢桁架桥模型的数值仿真分析例证了所提桥梁有限元模型修正方法的可靠性。由于传统有限元模型修正技术难以满足大跨度桥梁结构多尺度修正的要求,肖祥等^[26]在考虑了位移影响线与模态振型间的关系、应变影响线与应变模态间的关系基础上,论证了影响线代替相应模态振型的合理性,基于实测位移、应力影响线和频率建立了一种大跨度桥梁多尺度有限元模型修正方法,最后通过一座大跨斜拉桥的多尺度有限元模型修正验证了所提方法。康志锐等^[27]基于响应面法,以设计参数为自变量,利用前 3 阶竖向模态频率构造目标函数,从而进行迭代优化,通过对波形钢腹板 PC 组合箱梁桥有限元模型的修正进行了验证。

同年,许多学者对桥梁结构有限元模型修正的响应面方法以及其他替代模型方法展开了进一步深入和改进。冀伟等^[28]为了缩小波形钢腹板钢箱-混凝土组合箱梁桥有限元值与实测值之间的偏差,提出了采用响应面法和 Fmincon 算法相结合的桥梁有限元模型修正方法;杨雅勋等^[29]提出以二阶多项式与径向基函数相结合的改进响应面法,将其应用到一座系杆拱桥的有限元模型修正中,选择该桥的铺装层厚度、拱肋、主梁、横梁及吊杆的弹性模量和密度作为待修正参数,取得了良好的修正后有限元模型;高鹏等^[30]以一座四跨混凝土连续刚构箱梁桥为依托工程建立了有限元模型,并根据其结构特点确定了 4 个结构参数作为待修正参数,采用响应面法根据桥梁实桥加载数据对其结构参数进行了修正;王生武

等^[31]以一座飞燕式系杆拱桥为工程背景,基于该桥静动载试验数据,采用响应面方法进行了有限元模型修正,修正后的有限元模型代表性较好;于振刚等^[32]对桥梁进行了子结构划分,并利用人工神经网络作为替代模型,建立单目标及多目标优化的方法进行了结构有限元模型修正,利用钢管混凝土拱桥的静动力试验实测结果得以验证。

此外,也有不少学者对桥梁有限元模型修正的优化识别算法开展了进一步深入的研究工作。秦世强等^[33]考虑到实测数据的不确定性,为了同时获取桥梁结构有限元模型修正的局部最优解和全局最优解,提出了一种改进的稳态遗传算法(ISSGA),通过一种双角度算子来判定目标函数的可行解,进而实现目标函数局部最优和全局最优解的寻找。康俊涛等^[34]使用一种分种群的粒子群优化算法应用于一个桁架的模型修正过程,寻优结果表明,所提算法可以寻找到定义域内的全部极值,避免了漏解现象的发生,并将算法应用于一个桁架的模型修正过程。Xia 等^[35]为了提高有限元模型修正寻优收敛过程的性能和检测全局极值的概率,提出了一种改进粒子群优化(MPSO)与响应面法相结合的模型修正方法。与遗传算法相比较,通过某斜拉桥有限元模型修正的计算结果验证了所提方法的优越性。Tran-Ngoc 等^[36]将正交对角化(OD)和改进粒子群优化(IPSO)相结合,解决了结构有限元模型修正中寻优识别过早收敛的问题,最后通过某大型铁路桥梁结构的有限元模型修正进行了验证。

不确定性有限元模型修正仍是该方向的研究重点。何森^[37]采用径向基神经网络(RBF)作为替代模型,使用细菌觅食算法作为寻优识别手段,根据某大跨悬索桥健康监测数据采集到的实测数据进行了区间不确定性有限元模型修正。图 4 所示为该桥第 5、6 阶模态频率实测值区间与修正后有限元模型计算结果区间的对比情况。

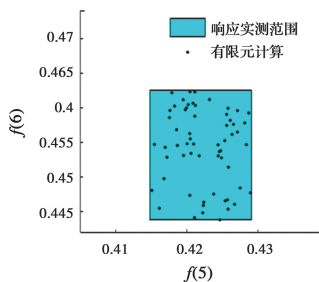


图 4 区间不确定性有限元模型修正结果与实测值比较

5 损伤识别研究

由于桥梁损伤识别仍未实现自动化快速分析,故损伤诊断技术还无法在桥梁健康监测系统中得到广泛应用。现阶段,桥梁损伤识别研究主要从时域信号(如加速度时程等)中提取结构特征(如模态参数、模态曲率等),然后通过模式识别和机器学习方法从中挖掘损伤信息,力图准确、快速地实现损伤定位和损伤程度诊断。

Tan 等^[38]依据布置在过桥车辆上的加速度信号数据以及车桥耦合(VBI)模型,使用提取的桥梁模态形状来检测桥梁局部损伤,研究表明,所提取的桥梁结构振型可以用来评估

桥梁的状态,并识别局部损伤。Liu 等^[39]同样依据车桥耦合(VBI)模型,提出了一种数据驱动方法,仅利用过桥车辆采集的振动信号来实现桥梁损伤诊断。研究表明,不同损伤程度情况下的车辆加速度信号具有非线性趋势,低频和高频响应都包含了损伤程度的重要信息。李振环等^[40]依据移动荷载作用下的车桥耦合振动理论,通过利用基于主成分分析和小波阈值降噪的损伤检测方法,对含噪数据进行降噪,提升了损伤识别结果的精度。王昊^[41]发现结构损伤程度与模态振型叠加平均能量差之间存在正相关关系,进而提出了根据平均能量差的大小来识别桥梁结构不同位置的损伤程度。

杨建喜等^[42]以桥梁健康监测系统中采集的加速度信号为输入,通过 CNN 模型提取其多时间窗口内传感器拓扑相关性特征;再将该特征矩阵输入 LSTM 模型,获取了时间维度特征,从而实现了结构损伤模式分类;最后通过某连续刚构桥结构缩尺模型的损伤识别进行了验证。Kilic 等^[43]采用先进的无损检测技术(NDT)获取桥面分层、裂缝和钢筋腐蚀等桥梁结构损伤信息,取得了良好的效果。Obrien 等^[44]针对运营中的混凝土桥梁结构,使用挠度、梁端转角和加速度响应来构造局部损伤指标,发现了损伤指标与温度激励之间具有明显的非线性相关性关系。张安安等^[45]通过采集多点加速度信号合成二维加速度灰度图,提取加速度响应的空间-时间信息,再接入 SVR 提取深层损伤特征,进而建立了一种基于去噪自编码器和 SVM 的铁路桥梁结构损伤识别方法。Khandel 等^[46]提出了一种基于光纤光栅传感器的预应力混凝土梁损伤识别方法,该方法利用人工神经网络建立了梁上不同测点应变响应分布之间的关系,在不需详细载荷信息的情况下检测和定位传感器位置损伤与否,最后通过一座大型预应力混凝土桥梁结构试验验证了所提方法。

6 状态预测与评估研究

桥梁健康监测系统研究的最终目标是实现结构状态的快速预测与实时评估。然而,对于大跨复杂桥梁结构而言,影响其整体结构状态的因素众多,计算工作量大,现阶段尚未完全实现桥梁结构综合状态的快速预测与实时评估。

Deng 等^[47]采用 SVM 建立了悬索桥吊索日疲劳损伤与交通荷载参数之间的回归模型,然后将动态称重系统(WIM)数据输入回归模型来预测主缆或吊架的剩余寿命,评估其疲劳状态。

Li 等^[48]通过模拟交通流监测数据来研究伸缩缝的累积位移,将大跨悬索桥竖向滑动支座累积位移统计值与磨损准则规定的临界值比较,实现了对滑动支座磨损状况的评估。

Liu 等^[49]提出了一种基于深度学习的桥梁状态评估数据建模方法,根据历史检测数据(源自 NBI 数据库),采用卷积神经网络(CNN)训练模型,通过数据驱动的方式预测了公路桥梁构件的剩余寿命。

Lu 等^[50]利用深度信任网络(DBN)对随机交通荷载作用下缆索支撑桥梁进行了可靠性状态评估,考虑结构非线性和高阶超静定特性,推导了相关的数学模型,进而探究了悬索桥吊杆疲劳腐蚀损伤对结构系统可靠性的重要影响,具有重

要的工程意义和科研价值。

7 结论与展望

通过对桥梁健康监测中多项关键技术方法的研究现状进行详细介绍,并对这些技术方法在 2020 年中的相关研究进展进行了总结和评述,以期促进对桥梁健康监测有更全面深入的理解。桥梁健康监测作为桥梁工程领域一个新兴发展的研究分支,在中国已经发展了十几年,尤其是实测信号数据的降噪处理、模态参数识别等研究和应用已经发展得较为成熟,而与之相关的有限元模型修正和损伤识别等技术方法仍尚不完善,有待进一步研究。

与上一年相比,2020 年度桥梁结构模态参数的自动化识别研究不再拘泥于仅依靠各类聚类算法的帮助,而是结合相似度等数学原理来解决虚假模态辨识问题。此外,越来越多的有限元模型修正研究开始计入监测数据的不确定性,采用改进的替代模型方法以及更复杂、更优越的优化识别算法,开展了更深入的研究工作。与此同时,桥梁损伤识别研究也不再拘泥于将自振频率、振型、模态曲率等模态参数作为损伤指标,转而通过桥梁健康监测时域信号的异常变化来作为寻找结构损伤的突破口。综上所述,在各类机器学习算法的支持下,桥梁健康监测的各项关键技术已在 2020 年度取得了显著、深入的研究成果。

总体来说,桥梁健康监测的研究及应用仍处于起步阶段,信号降噪、信号预警和模态参数识别等研究仍需要进一步完善,有限元模型修正、损伤识别、结构状态预测与评估等重难点技术的研究工作仍有许多困难需要克服,这也需要新一代桥梁工作者不懈努力,建立跨学科学习与合作机制,不断探索与创新。

参考文献:

- [1] SUN L M, SHANG Z Q, XIA Y, et al. Review of bridge structural health monitoring aided by big data and artificial intelligence: From condition assessment to damage detection [J]. *Journal of Structural Engineering*, 2020, 146(5): 04020073.
- [2] 单德山, 罗凌峰, 李乔. 桥梁健康监测 2019 年度研究进展[J]. *土木与环境工程学报(中英文)*, 2020, 42(5): 115-125.
- [3] 李小珍, 郑净, 宋立忠, 等. 轨道交通桥梁减振降噪 2019 年度研究进展[J]. *土木与环境工程学报(中英文)*, 2020, 42(5): 223-234.
- [4] 雷晓燕, 张新亚, 罗锟. 高架轨道桥梁结构振动与噪声预测方法及控制研究进展[J]. *铁道学报*, 2020, 42(12): 150-161.
- [5] 熊春宝, 王猛, 于丽娜. 桥梁 GNSS-RTK 变形监测数据的多滤波联合去噪处理[J]. *测绘通报*, 2020(7): 93-96, 142.
- [6] 熊春宝, 于丽娜, 常翔宇. 基于 EEMD-小波阈值去噪的桥梁结构模态参数识别[J]. *天津大学学报(自然科学与工程技术版)*, 2020, 53(4): 378-385.
- [7] 杨海涛. 基于多尺度局部模式滤波的桥梁动力信号噪声模态识别方法[D]. 长春: 吉林大学, 2020.
- [8] 王尧伟. 经验小波变换在桥梁模态参数识别中的最优组合形式研究[D]. 成都: 西南交通大学, 2020.
- [9] 黄书亭, 刘福寿, 李国芬, 等. 改进 EWT 用于大跨径桥梁模态参数识别[J]. *噪声与振动控制*, 2020, 40(6): 204-209, 233.
- [10] 刘洋. 基于结构计算与海量样本数据统计的桥梁预警指标方法研究[D]. 合肥: 安徽建筑大学, 2020.
- [11] 魏鑫, 吴学伟, 程培嵩. 基于组件式 GIS 的桥梁健康监测数据集成及预警研究[J]. *公路工程*, 2020, 45(6): 79-85.
- [12] 胡铁明, 马钦, 齐璐. T 型刚构桥竖向位移监测多级预警阈值设定[J]. *沈阳大学学报(自然科学版)*, 2020, 32(5): 410-415.
- [13] NI Y Q, WANG Y W, ZHANG C. A Bayesian approach for condition assessment and damage alarm of bridge expansion joints using long-term structural health monitoring data [J]. *Engineering Structures*, 2020, 212: 110520.
- [14] CAO S G, ZHANG Y, TIAN H, et al. Drive comfort and safety evaluation for vortex-induced vibration of a suspension bridge based on monitoring data [J]. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 2020, 204: 104266.
- [15] 徐一超, 张宇峰. 基于健康监测系统的桥梁船撞报警指标研究与应用[J]. *黑龙江交通科技*, 2020, 43(10): 104-105, 108.
- [16] 毛琳, 林旭, 代力. 中小跨径桥梁结构安全状态评估研究[J]. *公路工程*, 2020, 45(5): 214-219.
- [17] SOYÖZ S, AYTULUN E, APAYDIN N, et al. Modal identification of the first Bosphorus bridge during hanger replacement [J]. *Structure and Infrastructure Engineering*, 2020, 16(12): 1605-1615.
- [18] JIAN X D, XIA Y, SUN L M. An indirect method for bridge mode shapes identification based on wavelet analysis [J]. *Structural Control and Health Monitoring*, 2020, 27(12): e2630.
- [19] KALOOP M R, ELBELTAGI E, HU J W. Estimating the dynamic behavior of highway steel plate girder bridges using real-time strain measurements [J]. *Applied Sciences*, 2020, 10(12): 4215.
- [20] 刘欣悦. 考虑温度效应的大跨度悬索桥应变模态参数识别[D]. 成都: 西南交通大学, 2020.
- [21] 熊文, 程瑜. 基于高帧视频分析的桥梁振动与模态非接触识别算法[J]. *东南大学学报(自然科学版)*, 2020, 50(3): 433-439.
- [22] 陈永高, 钟振宇. 环境激励下桥梁结构模态参数识别的

- 改进随机子空间算法[J]. 振动与冲击, 2020, 39(16): 196-204.
- [23] 祝青鑫, 王浩, 茅建校, 等. 基于聚类分析的桥梁结构模态参数自动识别方法[J]. 东南大学学报(自然科学版), 2020, 50(5): 837-843.
- [24] 李坤, 张宇鑫. 基于灵敏度矩阵分析的钢桁架桥模型修正[J]. 建筑钢结构进展, 2021, 23(1): 94-100.
- [25] 徐恒志, 刘才玮, 苗吉军, 等. 基于静动力测试的混凝土 T 形梁有限元模型修正[J]. 青岛理工大学学报, 2020, 41(5): 45-51.
- [26] 肖祥, 赵曼, 陈一, 等. 基于实测影响线的大跨度桥梁有限元模型修正[J]. 工程与建设, 2020, 34(1): 48-52.
- [27] 康志锐, 张巍, 宋帅, 等. 基于响应面的波形钢腹板 PC 组合梁桥有限元模型修正方法的试验研究[J]. 铁道科学与工程学报, 2020, 17(5): 1186-1192.
- [28] 冀伟, 邵天彦. 波形腹板钢箱-混凝土箱梁桥的有限元模型修正[J]. 西南交通大学学报, 2021, 56(1): 1-11.
- [29] 杨雅勋, 杨福利, 陈东. 改进响应面法在桥梁结构有限元模型修正中的应用[J]. 公路交通科技, 2020, 37(10): 83-91, 133.
- [30] 高鹏, 孙宁. 基于实测数据的高墩大跨混凝土梁桥高精度有限元模拟方法[J]. 公路, 2020, 65(5): 75-82.
- [31] 王生武, 李泽东, 任伟新. 一座飞燕式系杆拱桥的有限元模型修正[J]. 中外公路, 2020, 40(6): 201-207.
- [32] 于振刚, 李岩, 钟以琛. 一种基于元模型的桥梁静动力有限元模型修正方法[J]. 中外公路, 2020, 40(4): 79-84.
- [33] 秦世强, 张亚州, 康俊涛. 基于改进稳态遗传算法的桥梁有限元模型修正[J]. 中山大学学报(自然科学版), 2020, 59(4): 79-88.
- [34] 康俊涛, 张亚州, 秦世强. 考虑多峰值同时寻优的结构有限元模型修正[J]. 兰州大学学报(自然科学版), 2020, 56(5): 681-689.
- [35] XIA Z Y, LI A Q, LI J H, et al. Model updating of an existing bridge with high-dimensional variables using modified particle swarm optimization and ambient excitation data [J]. Measurement, 2020, 159: 107754.
- [36] TRAN-NGOC H, HE L Q, REYNDERS E, et al. An efficient approach to model updating for a multispan railway bridge using orthogonal diagonalization combined with improved particle swarm optimization [J]. Journal of Sound and Vibration, 2020, 476: 115315.
- [37] 何淼. 大跨度悬索桥有限元模型不确定性修正[D]. 成都: 西南交通大学, 2020.
- [38] TAN C J, ZHAO H, OBRIEN E J, et al. Extracting mode shapes from drive-by measurements to detect global and local damage in bridges [J]. Structure and Infrastructure Engineering, 2020: 1-15.
- [39] LIU J X, CHEN S H, BERGÉS M, et al. Diagnosis algorithms for indirect structural health monitoring of a bridge model via dimensionality reduction [J]. Mechanical Systems and Signal Processing, 2020, 136: 106454.
- [40] 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]. 广州: 暨南大学, 2020.
- [41] 王昊. 基于视觉测量及振动理论的桥梁结构损伤识别研究[D]. 昆明: 昆明理工大学, 2020.
- [42] 杨建喜, 张利凯, 李韧, 等. 联合卷积与长短记忆神经网络的桥梁结构损伤识别研究[J]. 铁道科学与工程学报, 2020, 17(8): 1893-1902.
- [43] KILIC G, CANER A. Augmented reality for bridge condition assessment using advanced non-destructive techniques [J]. Structure and Infrastructure Engineering, 2021, 17(7): 977-989.
- [44] OBRIEN E J, HEITNER B, ŽNIDARIČ A, et al. Validation of bridge health monitoring system using temperature as a proxy for damage [J]. Structural Control and Health Monitoring, 2020, 27(9): e2588.
- [45] 张安安, 邓芳明, 吴翔. 基于 DAE 和 SVR 的铁路桥梁损伤定位与识别技术 [J]. 公路, 2020, 65(5): 106-111.
- [46] KHANDEL O, SOLIMAN M, FLOYD R W, et al. Performance assessment of prestressed concrete bridge girders using fiber optic sensors and artificial neural networks [J]. Structure and Infrastructure Engineering, 2021, 17(5): 605-619.
- [47] DENG Y, ZHANG M, FENG D M, et al. Predicting fatigue damage of highway suspension bridge hangers using weigh-in-motion data and machine learning [J]. Structure and Infrastructure Engineering, 2021, 17(2): 233-248.
- [48] LI G L, HAN W S, CHEN X, et al. Wear evaluation on slide bearings in expansion joints based on cumulative displacement for long-span suspension bridge under monitored traffic flow [J]. Journal of Performance of Constructed Facilities, 2020, 34(1): 04019106.
- [49] LIU H, ZHANG Y F. Bridge condition rating data modeling using deep learning algorithm [J]. Structure and Infrastructure Engineering, 2020, 16(10): 1447-1460.
- [50] LU N W, LIU Y, NOORI M, et al. System reliability assessment of cable-supported bridges under stochastic traffic loads based on deep belief networks [J]. Applied Sciences, 2020, 10(22): 8049.