

桥梁结构损伤识别研究现状与展望

吴向男,徐 岳,梁 鹏,李 斌

(长安大学 公路学院,陕西 西安 710064)

摘 要:为了更全面地总结现有桥梁结构损伤识别方法,深入开展桥梁结构损伤识别研究提供系统有效的信息,对现有结构损伤识别方法从数据来源和分析方法 2 大方面进行了总结归纳,理清了各种结构损伤识别方法的脉络关系及技术演变过程,主要包括静、动力损伤识别方法和反演与模式识别方法 2 大类,对基于小波的损伤识别方法作了重点剖析;分析了现有结构损伤识别方法的应用现状、优点和不足,总结了结构损伤识别领域的研究热点。针对桥梁结构的特点,指出建立基于施工监控、荷载试验、健康监测和人工巡检四位一体的多体系损伤识别方法是桥梁结构损伤识别的发展方向。

关键词:桥梁工程;健康监测;损伤识别;小波;模式识别

中图分类号:U445.71 **文献标志码:**A

Research status and prospect of bridge structure damage identification

WU Xiang-nan, XU Yue, LIANG Peng, LI Bin

(School of Highway, Chang'an University, Xi'an 710064, Shaanxi, China)

Abstract: To have a comprehensive summary of existing methods for damage identification of bridge so as to provide systematic and effective information, from aspects of data sources and analytical methods, the existing methods of damage identification were summarized to sort out the technical evolution of the various damage identification methods including the static and dynamic damage identification and inversion and pattern recognition methods, among which the wavelet-damage identification methods were expounded in details. Then, the application status, advantages and disadvantages of various methods were analyzed, and the improvement ideas and methods were summarized. Finally, establishment of four-in-one multi-system damage identification method was proposed based on construction monitoring, load tests, health monitoring and artificial patrol, which is the development trend of the bridge structure damage identification. 6 figs, 60 refs.

Key words: bridge engineering; health monitoring; damage identification; wavelet; pattern recognition

0 引言

结构健康监测系统是指用现场监测方式从营运状态的结构中获取其内部信息并处理数据,来判断和评估结构因损伤或退化导致的主要性能指标改变的有效方法^[1]。结构损伤识别(Damage Identification)是结构健康监测系统的核心。工程结构发生损伤是指与正常结构比较时,在某些方面产生了异常现象,这些现象表现在结构的动态特性、静态特性、表面形态及形状大小等各种特征参数上。结构损伤识别即是对结构进行检测与评估,以确定结构是否有损伤存在,进而判断损伤的位置和程度,以及结构当前的状况、使用功能和结构损伤的变化趋势等^[2]。结构损伤识别研究最先出现并应用在机械、航空航天等领域。很早人们就对大型机械结构进行故障诊断(Fault Diagnosis),并在 20 世纪 60 年代初期,在航空航天和军工等领域,发展了一系列无损诊断技术(NDT)。从 20 世纪 70 年代开始,土木工程领域的学者们开始意识到对大型土木工程结构进行健康监测和安全性评估的重要性。为此开始研究各种有效的损伤识别技术,做了大量的研究工作,并在海洋石油平台的损伤识别和健康监测方面投入了巨额资金,开创了结构损伤识别技术在土木工程领域应用的先河^[3]。

国外对健康监测及损伤识别进行了大量的研究,其中较有代表性的是 Los Alamos 国家实验室和 ASCE 结构健康监测委员会。Farrar, Doebling 和 Sohn 等对损伤识别的研究现状进行了综合回顾^[4-6]。ASCE 健康监测委员会建立的 benchmark 问题,为结构损伤识别理论和方法的发展起到了相当大的作用,国内外很多学者采用不同损伤诊断理论和方法对这些基准问题进行研究。中国从 20 世纪 90 年代开始,在国家的资助下开始桥梁和高层建筑结构方面的健康监测研究^[7-8],上海徐浦大桥和江阴长江大桥是第一批建立的研究性质的桥梁结构健康监测系统。中国学者们对桥梁损伤识别进行了研究,任伟新教授对采用小波变化的桥梁损伤识别的理论进行深入研究^[9];李爱群教授的研究团队建立了润扬长江大桥的健康监测系统,对结构损伤预警进行了深入研究^[10-11];宗周红教授对基于模型修正的损伤识别研究较为深入^[12];西南交通大学智能化

桥梁团队对以铁路桥为背景的损伤识别进行深入研究等^[13]。

经过多年的研究,虽然在结构损伤识别领域已经发展了大量的方法,但是由于土木工程结构损伤分布和损伤程度有很大的随机性、振动源不明确和振动测试环境不可控、独特的个性和相对复杂等特点,这些方法应用在实际工程中时遇到了很多困难。为此,本文首先从数据来源和分析过程两方面回顾损伤识别基本方法,在此基础上,总结目前损伤识别的研究热点,最后对桥梁损伤识别方法的发展进行展望,并指出建立基于施工监控、荷载试验、健康监测和人工巡检四位一体的多体系损伤识别方法是桥梁结构损伤识别的发展方向。

1 基于实测数据的损伤识别研究现状

损伤识别的输入数据是结构的各种实测响应,结构响应可以分为动力响应和静力响应 2 大类,如图 1 所示。其中动力响应又可分为模态类和信号类。

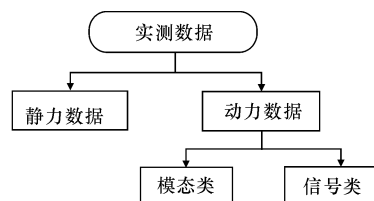


图 1 按数据来源分类

Fig. 1 Data sources classification

1.1 静力损伤识别

目前,结构模型试验、桥梁现场荷载试验较普遍的一种方法是使用静力测试数据进行损伤识别。静态测试数据一般为结构位移和应变,只要试验的测试条件较好,位移和应变的测试精度较高且稳定性好,静力损伤识别方法会得到满意的识别结果。静力损伤识别大多是有反演的优化识别方法,静力测试时,外在荷载一般都是已知的,因此静力损伤识别是以结构响应的误差最小为目标,进行最优化求解的结构输出反演^[14-16]。对运营中的桥梁,由于不能妨碍正常交通,且测试条件无法满足要求,所以静力损伤识别方法不能在线进行,但桥梁结构特有的施工监控、成桥荷载试验为建立健康监测基准模型提供了绝佳的静力损伤识别机会,然而目前还没有充分利用这些全过程信息。

1.2 动力损伤识别

20 世纪 80 年代初以来,土木工程界开始研究基于振动的桥梁结构损伤评估。结构损伤识别初期研究最具代表性且研究最为充分的一个领域是基于模态的结构损伤识别,发展了很多不同的理论和方法,是各种识别方法中文献资料最为丰富的^[17]。

1.2.1 基于模态的损伤识别方法

基于模态的损伤识别方法是通过测试结构振动模态的改变来分析结构的损伤,如基于固有频率的损伤识别法,通过结构频率改变构造合适的指标进行损伤识别;基于振型的损伤识别法;基于曲率模态和应变模态的损伤识别法;基于柔度变化的损伤识别方法;基于能量变化的损伤识别方法等^[18-23]。这些方法的优点是能反映出结构损伤的空间信息,但多数研究是针对低阶振动模态的损伤识别^[24]。

模态类方法在实际应用中主要有 2 个方面的问题,问题一:不利于在早期阶段发现结构损伤,这是因为结构损伤是典型的局部现象,对实际中容易观测的低频整体响应影响较小;问题二:在实际中难以区分模态观测的改变是由于结构损伤造成的还是由于运行状态或环境因素的改变造成的。这是因为即使结构状态并未发生退化,也会由于环境因素(噪声、温度、湿度等)和运行状态的改变使动力观测响应发生改变。

1.2.2 基于信号处理的损伤识别方法

随着信号处理技术的发展,又发展出基于信号处理的损伤识别方法,包括时间域、频率域及时频域方法,主要有傅里叶变换、短时傅里叶变换、Wigner—Ville 分布、小波/包分析、希黄变换(HHT)、盲源分离等^[25]。其中利用小波分析的方法最具有代表性,如图 2 所示。

直接利用小波分析的结构损伤识别方法分为以下 2 种。

(1)基于时域响应的分析方法;又可以分为 3 种:①利用时域分解图的奇异点的方法^[26];②利用小波系数变化的方法^[27-28];③利用小波分解后能量变化的方法^[29]。基于时域响应的分析方法旨在发现损伤发生的时刻。

(2)基于空间域响应的分析方法^[30-32],就是用空间位置的空间坐标轴代替时域响应信号的时间

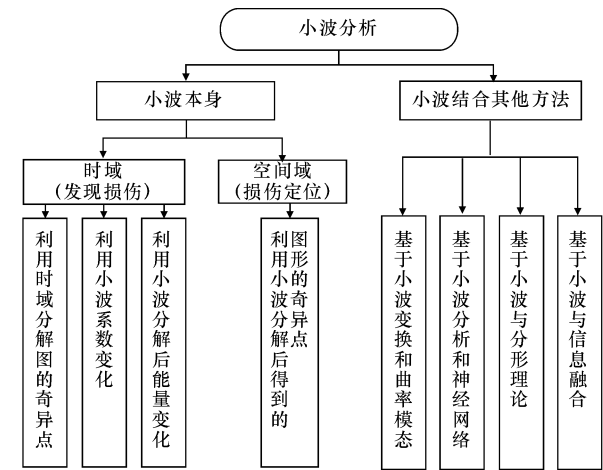


图 2 基于小波分析的损伤识别方法

Fig. 2 Damage identification methods based on wavelet analysis

轴,以空间域响应作为输入进行小波分析。基于空间域响应的分析方法可以确定发生损伤的位置。小波方法本身只能进行损伤发生时刻或损伤发生位置的判别,且前者的应用更多一些。若想识别损伤的程度,则需要将小波与其他方法结合。

小波分析与其他方法联合使用时,大致也分为 2 类:一是将小波分析与模态类识别方法结合,以改善模态识别的灵敏性和精确度;二是把小波分析作为前置处理手段,先利用小波变换对信号进行分解与重构等处理,提取各水平下小波细节的能量特征参数等与损伤相关联的特征量或小波重构系数的统计特性,然后作为模式识别的分类器(如人工神经网络和支持向量机等)或反演算法(如遗传算法)的输入参数来进行损伤的定位和损伤程度判断^[33-35]。主要的 4 种联合方式分述如下。

(1)基于小波变换和曲率振型的结构损伤位置识别。Amaravadi 提出了一种小波分析和曲率振型联合使用的损伤定位方法。首先由振型残差计算曲率振型,再通过小波分析得到曲率模态的小波分解灰度图,进而推断出损伤位置。这种联合方法在一维梁构件上得到了验证。孙增寿等则是对损伤前后结构的曲率模态进行小波变换,通过损伤前后小波变换系数残差的分布统计情况判定损伤的存在并确定其位置^[35]。

(2)基于小波分析和神经网络的损伤识别方法。李宏男等提出了基于“能量-损伤”原理,采用分步识别,逐步确定损伤的思想,综合运用小波包分析和神经网络,把分布在不同频带上的结点能量作为神经

网络的训练样本,以结构健康监测 Benchmark 模型为例验证,能够较好地反映结构的损伤特征^[34]。鞠彦忠等把小波变换作为神经网络的前处理来构造小波神经网络,将小波和神经网络 ART2 相结合,通过数值计算和框架模型试验进行了验证。试验证明这种方法使神经网络抗噪能力增强,损伤识别效果更好^[33]。

(3)基于小波与分形理论。近年来,有些学者将小波与分形联合进行损伤识别研究。小波分形联合进行损伤识别的原理是:应用小波包变换将信号分解到各子频带内,然后分别计算各频带内子信号的关联维数,用关联维数在不同尺度不同频带内的复杂性与不规则性,来提取损伤出现时的非平稳特性。姚昌荣将小波包分析与分形维数联系起来,用小波包将信号分解到各子频带上,再用分形维数描述各子频带信号,分析表明可用小波包的关联维数的互熵定性和定量地诊断结构的损伤程度^[36]。曹茂森等提出了结构损伤诊断的小波细节关联维分析方法,充分利用了小波分析的强局部分析能力和分形的强非线性处理能力^[37]。

(4)小波分析和信息融合在结构损伤识别中的应用。丁幼亮采用信息融合技术对环境激励下的小波包能量谱的识别进行改进,采用 D-S 证据理论解决由于环境激励的随机性所导致的损伤预警问题,并通过 Benchmark 模型的损伤预警试验对其有效性进行验证。郭健在小波和神经网络的基础上提出了耦合神经网络的方法融合应变和加速度传感器的信息进行损伤识别,并对框架模型进行试验研究,识别结果较好^[38]。

结构健康监测及损伤识别中应用小波分析仅几年时间,尤其是在土木工程中的应用研究刚起步,但发展十分迅速。从研究方向上,主要集中在局部领域和简单结构上,推广性不强;从研究手段上,大多是数值模拟研究和部分试验研究,实际应用的研究很少;从研究方法上,正从过去的单纯使用小波分析技术向小波分析与其他方法结合使用的方向发展。小波在数据处理中极大的优势,使得其在结构健康监测和损伤识别中有着广阔的发展空间。

2 基于分析过程的损伤识别研究现状

在损伤识别方法的研究和应用过程中,发展了各种侧重点不同的方法,要想对所有的方法进行统一分类是相当困难的,上边从数据来源方面对损伤识别方法进行了分类,为了更清楚地描述损伤识别的过程,下边从两类识别过程对损伤识别进行描述。

按有无反演,损伤识别过程可分为:①有反演的损伤识别;②正演的模式识别。

2.1 有反演的损伤识别

有反演的损伤识别是一种系统识别的反问题,采用优化算法进行求解。目前有反演的损伤识别方法主要以模型修正理论为基础^[39]。该类方法中,各种不同的具体方法在实现上有所不同,但它们的基本过程是一致的,一般分为 4 步,如图 3 所示。

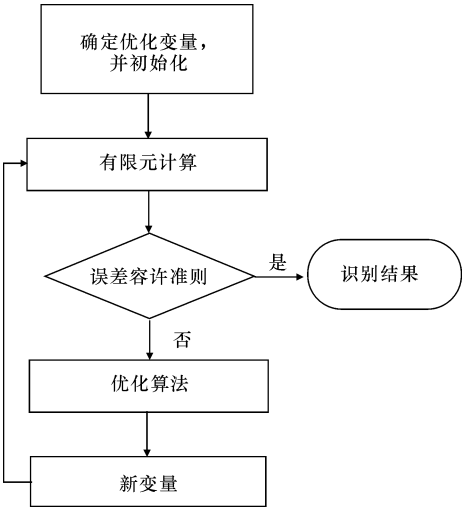


图 3 有反演的损伤识别过程

Fig. 3 Inversion of damage identification process

(1)确定优化变量,并初始化。

(2)有限元计算。

(3)计算理论值与实测值之间的误差,并代入误差容许准则进行判断。若误差在容许范围内,则直接得到识别结果,否则,转至下一步。

(4)最优化算法确定新的优化变量,转至第(2)步。

基于振动信息的模型修正是一种有反演的识别过程,且针对模态类参数进行分析;目标函数确定、待修正参数选择和优化算法是参数型有限元模型修正的 3 大关键问题。

优化算法从早期的基于传统的最优化方法到当

前采用模拟退火算法、遗传算法、混沌优化法等现代完全非线性反演算法的损伤识别方法,在方法本身的研究方面取得了迅猛发展,并成功运用于机械、航空航天等领域,这为其进一步研究和在土木工程中的应用奠定了坚实的基础^[40-43]。

反演方法的缺点是优化方法与有限元方法耦合在一起,相互之间不断的调用,增加了识别问题的复杂性,且优化算法容易使结果陷入局部极小值,当存在测试噪声时,由于优化变量对噪声敏感,会出现相互矛盾的优化方程,造成求解困难。

2.2 正演的模式识别

模式识别(Pattern Recognition)诞生于 20 世纪 20 年代,现在已经发展成为一个比较完整的学科领域^[44]。模式识别方法就是在预设的模式库中寻找与实测损伤指标最接近的模式,从而确定结构的损伤情况。因此,在进行模式识别前,首先应构建合理的损伤指标,再将这些指标组合起来,形成样本模式

库,然后利用模式识别方法进行损伤识别。采用模式识别进行结构损伤识别研究,一般可分为 4 个步骤,如图 4 所示。

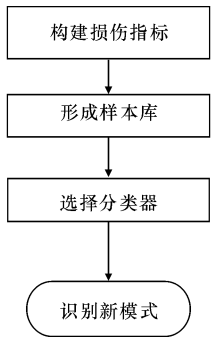


图 4 模式识别过程
Fig. 4 Pattern recognition process

(1)构建损伤指标。模式识别采用的损伤指标包括各种形式,对于静力数据,采用实测到的位移、裂缝和应变作为损伤指标,主要的动力损伤指标可分为 4 大类,如图 5 所示。

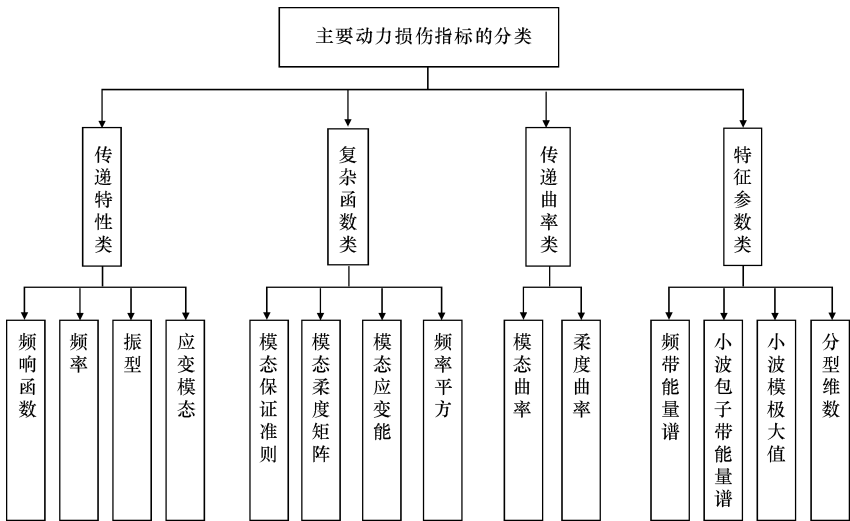


图 5 主要动力损伤指标
Fig. 5 Main dynamic damage indexes

(2)形成样本库。采用模式识别方法进行桥梁结构损伤识别,需要构建庞大的样本库,若考虑各种损伤的耦合效应,则建立的样本库可能达到计算机不可接受的程度。因此,在形成样本库之前先通过结构易损性分析,来缩减样本库。形成样本库的步骤与方法:①易损性分析,主要包括 2 个方面,一是对结构进行力学特性分析,二是建立桥梁病害数据库;②特征选择与提取,分为 3 步:首先相关分析进行特征选择,然后形成优化选择特征子集(采用的方法有模拟退火算

法、遗传算法等),最后进行特征提取(主要的方法有主成分分析、线性鉴别分析、独立分量分析等);③样本选择。如下页图 6 所示。

(3)选择分类器。人工神经网络识别、统计模式识别(支持向量机)。

相对于反演的损伤识别算法,模式识别可以避免病态的优化求解,容易找到全局最优解,且有限元计算与模式识别 2 个计算过程分开,互不干涉降低了识别难度。但同时模式识别过程较多,形成样本库的工作量较大,计算结果可能不稳定。

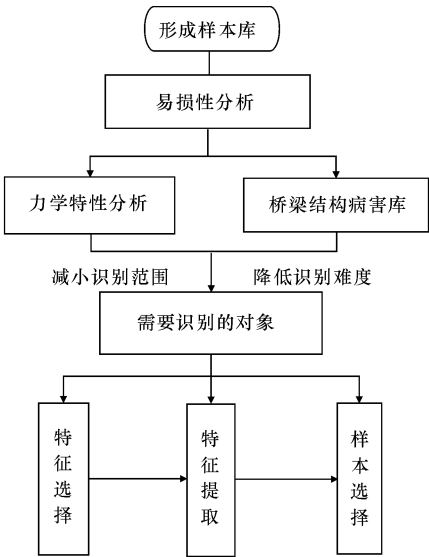


图 6 形成样本库的步骤与方法

Fig. 6 Steps and methods of forming a sample database

3 损伤识别研究热点

以上从数据来源和分析过程 2 个方面系统梳理了现有损伤识别的各种方法,许多方法目前还仅停留在实验室简单模型或数值模型。为了向实桥应用发展,解决实际应用中的问题,现在损伤识别方法的热点研究主要集中在以下 2 个方面:一是考虑不确定性影响的统计识别方法;二是考虑环境因素影响的损伤识别方法。

3.1 考虑不确定性影响的统计识别方法

在损伤识别中,误差对识别的影响能通过应用统计方法得到有效降低。在获取和处理试验数据、振动特性试验分析、损伤识别过程之中,应用统计方法可以提高识别的精度。

采用统计推断方法处理系统识别问题的思想由来已久,基于概率统计理论参数识别方法的研究起源于 1974 年,Collins 等对基于 Bayes 理论的系统识别方法进行了开创性的探索^[45]。此后,随着损伤识别研究的飞速发展,基于概率统计理论的损伤识别方法的研究不断深入。当前,该方法的主要研究应用领域为系统辨识和模式识别。其中,前者是传统模态类确定性损伤识别方法的新发展;后者就是前边提到的正演的模式识别。

3.1.1 统计模态识别

基于统计的模态识别是以大量具有先天不确定性的信号为基础的,其中经典概率统计、贝叶斯理

论、随机有限元模型修正等在结构损伤识别中应用较多,总的来讲统计模型的确定需要较多的试验验证和先验知识^[46]。考虑到结构损伤、模型和荷载的随机性,1990 年 Agbabian 提出了基于概率的结构损伤识别方法,Beck 提出了基于 Bayes 概率理论的结构损伤识别与模型修正方法。Katafygiotis 等采用贝叶斯理论来分析结构测试数据,应用贝叶斯概率框架进行模型修正,并用分析实例验证了该方法^[47]。Papadopoulos 等采用 Monte-Carlo 随机模拟方法计算待识别参数误差的协方差矩阵,结构损伤的概率因子及其置信区间根据识别参数的概率密度函数定义,对仅基于频率测量数据进行结构损伤识别的鲁棒性问题进行了研究^[48]。宗周红等详细综述了基于模型确认的概率损伤识别的研究进展^[49]。

3.1.2 统计模式识别

上节模式识别重在介绍模式识别的基本步骤,此处主要针对模式识别的统计属性进行论述。

Sohn 等建立了结构健康监测统计模式识别方法的统一范式^[4],这个统一范式被分为 4 个过程,即运行评估、数据采集、特征提取与数据压缩以及统计模型建立,其中特征提取与统计模型建立(即分类器的设计)是结构健康诊断统计模式识别研究的重点。

在结构健康监测统计模式识别的统一范式框架内,Sohn 等采用 X-bar 控制图法特征提取并在此基础上进行了损伤定位研究^[50];张启伟采用时间序列 AR 模型的相似性统计分析提取损伤敏感特征向量,进而采用基于统计模式识别的损伤识别方法研究了桥梁结构损伤识别问题^[51]。

目前,在模式识别研究中应用较多之一的是概率神经网络。概率神经网络将 Bayes 估计耦合在前馈神经网络中,神经网络的输出可以看作是对 Bayes 后验概率的估计,根据概率密度函数的无参数估计方法得到分类结果。本质上是一种监督学习的 Bayes 分类器,适用于处理观测噪声条件下的模式识别或分类问题^[52]。以青马大桥为例,在有限元分析的基础上,模拟桥面板不同位置的损伤模式,损伤指标取前 4 阶固有频率和组合参数并输入概率神经网络模型,有效识别了桥面板的损伤位置^[41,53]。Ni 等建立了分别针对悬索桥和斜拉桥结构损伤定位的自适应概率神经网络模型,其对结构损伤定位的效果极大地优于传统概率神经网络^[54]。

基于考虑不确定性的统计识别方法摒弃了确定性的损伤识别方法,更加符合结构损伤的实际状况,但目前这些方法在损伤识别与损伤定位的实用效果上仍没有质的突破。

3.2 考虑环境影响的损伤识别方法

环境因素如交通、环境噪声、温度、湿度等因素会掩盖因损伤引起的结构模型参数的变化,从而使得损伤识别结果存在较大的不确定性。

对香港汀九大桥的分析表明,由温度变化引起的频率变化可达到2%^[55]。如此大的变化足以屏蔽由相当严重的损伤引起的损伤指标的变化,从而导致报警系统的误报或漏报。由于相对较大的噪声干扰,导致很多在航空航天领域以及机械制造领域非常有效的损伤识别方法在用于土木工程结构时却几乎失效。1991年 Wipf 较早地研究了桥梁长期变形和环境温度之间的关系,之后许多学者开始研究考虑环境因素的损伤识别方法。针对大型实际桥梁健康监测损伤识别中考虑环境因素影响的研究成果分类如下。

环境激励下(主要指交通、环境噪声等)的损伤识别方法主要有4类:①仅利用响应数据提取结构的模态参数,再利用基于模态域数据的方法识别损伤,其中基于 NExT 发展了许多损伤识别方法^[56];②复合反演方法,针对第一类方法中环境激励为非白噪声时,即直接由时域响应数据识别结构的物理参数,同时反演出结构的输入信息,通过将物理参数与基准数据相比来识别损伤^[57];③利用结构损伤前后测点响应之间的传递函数来识别损伤,这类方法的优点是不需要测量激励信息,不需要进行模态参数识别,因此不会引入参数识别误差^[58];④应用神经网络的方法。

目前消除环境因素(主要指温度、湿度等)影响的方法主要有两类:①建立动力特性(如频率)与环境因素(如温度)之间的关系来寻求解决环境因素影响的办法;②不对环境因素进行观测,直接从采集到结构响应信号入手,通过信号分析,达到消除环境因素的影响。消除环境因素的影响还可以通过对损伤特征(如频率等)进行主成分分析^[59-60]。

这一阶段的特点是学者关注于环境因素的剔除,从而减少损伤识别结果的不确定性,提高损伤识别准确性。

4 结 语

(1)虽然对损伤识别已经开展了很多的研究工作,但是目前的很多损伤识别方法或者指标仅仅局限于数值模拟或者实验室简单的模型,实际应用中存在测试数据不完备、环境激励下无法获得激振信息、结构所处的外界环境复杂多变、无法得到结构在完好状态下的基准数据、测试噪声的干扰等困难,目前研究热点正试图实现由实验室模型向实际工程结构过渡,但还没真正实现实际复杂结构的早期损伤识别。现有的损伤识别方法,无论是静力的还是动力的,都是用量测结构刚度来推测强度,用弹性阶段行为来推测极限阶段行为,而两者完全不是同一个概念,况且刚度难以反映轻微损伤。

(2)结合桥梁结构的自身特点,结构损伤识别以后的研究方向应集中在以下几个方面:①建立多体系的损伤识别方法;结构损伤识别理论的研究应结合桥梁工程本身的特点,充分应用其全过程信息(包括施工监控、荷载试验、健康监测和人工巡检4个阶段信息),建立多体系、多层次的损伤识别方法(局部与整体结合,静力与动力结合等);②小波分析方法的充分挖掘,建立基于小波分析的损伤识别方法体系;③环境激励下的结构损伤识别方法,研究试验参数变化、环境参数变化对结构损伤识别的影响;④健康监测的设计与开发的统一标准和规程;⑤结构非线性的分析方法。

参考文献:

References:

- [1] Housner G W, Bergman L A, Caughey T K, et al. Structural control: past, present, and future[J]. Journal of Engineering Mechanics, 1997, 123(9): 897-971.
 - [2] Ling S W, Farrar C R, Prime M B, et al. Damage identification and health monitoring of structural and mechanical systems from changes in their vibration characteristics a literature review[R]. New Mexico: Los Alamos, 1996.
 - [3] 黄天立. 结构系统和损伤识别的若干方法研究[D]. 上海: 同济大学, 2007.
- HUANG Tian-li. Study on some methods for identification of structural system and damage[D]. Shanghai: Tongji University, 2007. (in Chinese)

- [4] Sohn H, Farrar C R, Hemez F M, et al. A review of structural health monitoring literature; 1996-2001 [R]. New Mexico: Los Alamos National Laboratory, 2001.
- [5] Farrar C R, Sohn H, Hemez F M, et al. Damage prognosis; current status and future needs [R]. New Mexico: Los Alamos National Laboratory, 2003.
- [6] Farrar C R, Worden K, Todd M D, et al. Nonlinear system identification for damage detection [R]. New Mexico: Los Alamos National Laboratory, 2007.
- [7] 李国强, 李杰. 工程结构动力检测理论与应用 [M]. 北京: 科学出版社, 2002.
LI Guo-qiang, LI Jie. Theory and application of dynamic detection of engineering structures [M]. Beijing: Science Press, 2002. (in Chinese)
- [8] 夏樟华, 宗周红, 李嘉维, 等. 基于健康监测系统的大跨度连续刚构桥移动荷载识别 [J]. 中国公路学报, 2012, 25(5): 95-104.
XIA Zhang-hua, ZONG Zhou-hong, LI Jia-wei, et al. Moving load identification of long span continuous rigid frame bridges based on health monitoring system [J]. China Journal of Highway and Transport, 2012, 25(5): 95-104. (in Chinese)
- [9] 任伟新, 韩建刚, 孙增寿. 小波分析在土木工程结构中的应用 [M]. 北京: 中国铁道出版社, 2006.
REN Wei-xin, HAN Jian-gang, SUN Zeng-shou. Wavelet analysis in civil engineering structures [M]. Beijing: China Railway Publishing House, 2006. (in Chinese)
- [10] 丁幼亮, 李爱群. 润扬长江大桥结构损伤预警系统的设计与实现 [J]. 东南大学学报: 自然科学版, 2008, 38(4): 704-708.
DING You-liang, LI Ai-qun. Design and realization of structural damage alarming system for runyang yangtse river bridge [J]. Journal of Southeast University: Natural Science Edition, 2008, 38(4): 704-708. (in Chinese)
- [11] 丁幼亮, 李爱群, 耿方方. 考虑环境因素影响的悬索桥整体状态预警方法 [J]. 东南大学学报: 自然科学版, 2010, 40(5): 1052-1056.
DING You-liang, LI Ai-qun, GENG Fang-fang. Monitoring and warning of health conditions for suspension bridges under varying environmental conditions [J]. Journal of Southeast University: Natural Science Edition, 2010, 40(5): 1052-1056. (in Chinese)
- [12] 宗周红, 任伟新. 桥梁有限元模型修正和模型确认 [M]. 北京: 人民交通出版社, 2012.
ZONG Zhou-hong, REN Wei-xin. Finite element model updating and model validation of bridge structures [M]. Beijing: China Communication Press, 2012. (in Chinese)
- [13] 单德山, 李乔, 付春雨, 等. 智能桥梁健康监测与损伤评估 [M]. 北京: 人民交通出版社, 2010.
SHAN De-shan, LI Qiao, FU Chun-yu, et al. Smart bridge health monitoring and damage diagnosis [M]. Beijing: China Communication Press, 2010. (in Chinese)
- [14] Sanayei M, Ibaro G R, McClain J A S, et al. Structural model updating using experimental static measurements [J]. Journal of Structural Engineering, 1997, 123(6): 792-798.
- [15] 辛学忠, 苏木标, 陈树礼, 等. 大跨度铁路桥梁健康状态评估的统计对比诊断方法研究 [J]. 铁道学报, 2006, 28(2): 116-121.
XIN Xue-zhong, SU Mu-biao, CHEN Shu-li, et al. Study on the statistical comparison diagnostic method for health State evaluation of long-span railway bridges [J]. Journal of the China Railway Society, 2006, 28(2): 116-121. (in Chinese)
- [16] 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.
HAN Bing, ZHONG Ming, WANG Yuan-feng. Experiment on static characteristic of reinforced concrete column after low-cyclic fatigue damage [J]. China Journal of Highway and Transport, 2011, 24(2): 62-69. (in Chinese)
- [17] 冯新. 土木工程中结构识别方法的研究 [D]. 大连: 大连理工大学, 2002.
FENG Xin. Studies on structural identification method in civil engineering [D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2002. (in Chinese)
- [18] Narkis Y. Identification of crack location in vibrating simply supported beams [J]. Journal of Sound and Vibration, 1994, 172(4): 549-558.
- [19] Kam T Y, Lee T Y. Detection of cracks in structures using modal test data [J]. Engineering Fracture Mechanics, 1992, 42(2): 381-387.
- [20] Salawu O S, Williams C. Bridge assessment using forced-vibration testing [J]. Journal of Structural Engineering, 1995, 121(2): 161-173.
- [21] Pandey A K, Bls was M, Samman M M. Damage de-

- tection from changes in curvature mode shapes[J]. Journal of Sound and Vibration, 1991, 145 (2): 321-332.
- [22] Pandey A K, Biswas M. Damage detection in structures using changes in flexibility[J]. Journal of Sound and Vibration, 1994, 169(1): 3-17.
- [23] 宗周红, Huang D Z, Wang T L. 钢-混凝土组合桥损伤诊断[J]. 土木工程学报, 2004, 37(5): 59-64, 69. ZONG Zhou-hong, Huang D Z, Wang T L. Damage diagnosis of a steel-concrete composite bridge by etr Index[J]. China Civil Engineering Journal. 2004, 37 (5): 59-64, 69. (in Chinese)
- [24] Samman M M, Biswas M. Vibration testing for non-destructive evaluation of bridges II results[J]. Journal of Structural Engineering, 1994, 120(1): 290-306.
- [25] 姜绍飞. 结构健康监测-智能信息处理及应用[J]. 工程力学, 2009, 26(S2): 184-212. JIANG Shao-fei. Structure health monitoring-intelligent information processing and application[J]. Engineering Mechanics, 2009, 26 (S2): 184-212. (in Chinese)
- [26] Hou Z, Noori M, Stamand R. Wavelet-based approach for structural damage detection[J]. Journal of Engineering Mechanics, 2000, 126(7): 677-683.
- [27] Kim H, Melhem H. Fourier and wavelet analyses for fatigue assessment of concrete beams[J]. Experimental Mechanics, 2003, 43(2): 131-140.
- [28] Melhem H, Kim H S. Damage detection in concrete by Fourier and wavelet analyses[J]. Journal of Engineering Mechanics, 2003, 129(5): 571-577.
- [29] Sun Z, Chang C C. Structural damage assessment based on wavelet packet transform [J]. Journal of Structural Engineering, 2002, 128(10): 1354-1361.
- [30] Liem K M, Wang Q. Application of wavelet theory for crack identification in structures [J]. Journal of Engineering Mechanics, 1998, 124(2): 152-157.
- [31] Wang Q, Deng X M. Damage detection with spatial wavelets [J]. International Journal of Solids and Structures, 1999, 36(23): 3443-3468.
- [32] Wang Q, Wang D J, Su X Y. Crack detection of structure for plane problem with spatial wavelets[J]. Acta Mechanica Sinica, 1999, 15(1): 39-51.
- [33] 鞠彦忠, 阎贵平, 陈建斌, 等. 用小波神经网络检测结构损伤[J]. 工程力学, 2003, 20(6): 176-181. JU Yan-zhong, YAN Gui-ping, CHEN Jian-bin, et al. Prediction of structural damage by the wavelet-based neural network[J]. Engineering Mechanics, 2003, 20 (6): 176-181. (in Chinese)
- [34] 王元丰, 钟 铭, 潘玉华. 钢筋混凝土柱低周疲劳损伤后的阻尼性能试验[J]. 中国公路学报, 2011, 24 (5): 32-39. WANG Yuan-feng, ZHONG Ming, PAN Yu-hua. Damping performance test of reinforced concrete columns after Low-cycle fatigue damage[J]. China Journal of Highway and Transport, 2011, 24 (5): 32-39. (in Chinese)
- [35] 孙增寿, 韩建刚, 任伟新. 基于曲率模态和小波变换的结构损伤位置识别[J]. 地震工程与工程振动, 2005, 25(4): 44-49. SUN Zeng-shou, HAN Jian-gang, REN Wei-xin. Damage location identification of structures based on curvature mode and wavelet transform [J]. Earthquake Engineering and Engineering Vibration, 2005, 25(4): 44-49. (in Chinese)
- [36] 姚昌荣. 基于小波与分形理论的斜拉桥健康监测系统研究[D]. 成都: 西南交通大学, 2008. YAO Chang-rong. Research on structural health monitoring system of cable-stayed bridges based on wavelet and fractal theory [D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2008. (in Chinese)
- [37] 曹茂森, 任青文, 王怀洪. 基于小波与分形理论的地震异常检测[J]. 地球物理学报, 2005, 48(3): 672-679. CAO Mao-sen, REN Qing-wen, WANG Huai-hong. A method of detecting seismic singularities using combined wavelet with fractal[J]. Chinese Journal of Geophysics, 2005, 48(3): 672-679. (in Chinese)
- [38] 郭 健. 基于小波分析的结构损伤识别方法研究 [D]. 杭州: 浙江大学, 2004. GUO Jian. Study of structural damage identification based on wavelet analysis[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2004. (in Chinese)
- [39] 张清华. 基于概率可靠度的结构损伤识别理论研究及应用[D]. 成都: 西南交通大学, 2006. ZHANG Qin-hua. Theoretical study and application of damage assessment method nosed on probability theory[D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2006. (in Chinese)
- [40] Chen J C, Garba J A. On orbit damage assessment for large space structures[J]. AIAA Journal, 1987, 26 (9): 1119-1126.

- [41] 冯 新,周 晶,陈健云.一种结构参数识别的两阶段方法[J]. 计算力学学报,2002,19(2):222-227.
FENG Xin, ZHOU Jing, CHEN Jian-yun. A two-stage method for identification of structural parameter[J]. Chinese Journal of Computational Mechanics, 2002, 19(2):222-227. (in Chinese)
- [42] Hao H, Xia Y. Vibration-based damage detection of structures by genetic algorithm[J]. Journal of Computing in Civil Engineering, 2002, 16(3):222-229.
- [43] 周士金,刘荣桂,蔡东升,等. CFRP 索大跨斜拉桥的非线性地震响应控制分析[J]. 中国公路学报, 2011, 24(3):64-71.
ZHOU Shi-jin, LIU Rong-gui, CAI Dong-sheng, et al. Nonlinear seismic response control analysis of long-span cable-stayed bridge with CFRP cables[J]. China Journal of Highway and Transport, 2011, 24(3):64-71. (in Chinese)
- [44] 孙晓丹,欧进萍. 基于动力检测的损伤指标评价方法[J]. 振动与冲击, 2009, 28(1):9-13.
SUN Xiao-dan, OU Jin-ping. Assessment of vibration-based damage indexes in structural health monitoring[J]. Journal of Vibration and Shock, 2009, 28(1):9-13. (in Chinese)
- [45] Collins J D, Kennedy B, Art G C. Statistical identification of structures[J]. AIAA Journal, 1973, 12(2):185-190.
- [46] Yeo I, Shin S, Lee H S, et al. Statistical damage assessment of framed structures from static responses[J]. Journal of Engineering Mechanics, 2000, 126(4):414-421.
- [47] Katafygiotis L S, Yuen K V, Chen J C. Bayesian modal updating by use of ambient data[J]. AIAA Journal, 2001, 39(2):271-278.
- [48] Papadopoulos L, Garcia E. Structural damage identification: a probabilistic approach[J]. AIAA Journal, 1998, 36(11):2137-2145.
- [49] 宗周红,牛 杰,王 浩. 基于模型确认的结构概率损伤识别方法研究进展[J]. 土木工程学报, 2012, 45(8):121-130.
ZONG Zhou-hong, NIU Jie, WANG Hao. A review of structural damage identification methods based on the finite element model validation[J]. China Civil Engineering Journal, 2012, 45(8):121-130. (in Chinese)
- [50] Sohn H, Farrar C R. Damage diagnosis using time series analysis of vibration signals[J]. Journal of Smart Materials and Structures, 2001, 10(3):446-451.
- [51] 张启伟. 桥梁健康监测中的损伤特征提取与异常诊断[J]. 同济大学学报, 2003, 31(3):258-262.
ZHANG Qi-wei. Damage feature extraction and novelty detection for bridge health monitoring[J]. Journal of Tongji University, 2003, 31(3):258-262. (in Chinese)
- [52] Bishop C M. Neural networks for pattern recognition [M]. Oxford:Oxford University. Press, 1995.
- [53] 姜绍飞,倪一清,高赞明. 基于概率神经网络的青马悬索桥损伤定位的仿真研究[J]. 工程力学, 2001(增1):965-969.
JIANG Shao-fei, NI Yi-qing, GAO Zan-ming. Simulation study of tsing ma suspension bridge damage localization based on probabilistic neural network[J]. Engineering Mechanics, 2001(S1):965-969. (in Chinese)
- [54] Ni Y Q, Zhou X T, KO J M, et al. Vibration-based damage localization in ting kau bridge using probabilistic neural network[J]. Advances in Structural Dynamics, 2000(2):1069-1076.
- [55] Ni Y Q, Hua X G, Fan K Q, et al. Correlating modal properties with temperature using long-term monitoring data and support vector machine technique[J]. Engineering Structures, 2005, 27(12):1762-1773.
- [56] Mevel L, Hermans L, Van der Auweraer H. Application of a subspace-based fault detection method to industrial structures[J]. Mechanical Systems and Signal Processing, 1999, 13(6):823-838.
- [57] 李 杰,陈 隽. 未知输入条件下的结构物理参数识别研究[J]. 计算力学学报, 1999, 16(1):32-40.
LI Jie, CHEN Jun. Study on identification of structural dynamic parameters with unknown input information[J]. Chinese Journal of Computational Mechanics, 1999, 16(1):32-40. (in Chinese)
- [58] Zhang H, Schulz M J, Ferguson F, et al. Structural health monitoring using transmittance functions[J]. Mechanical Systems and Signal Processing, 1999, 13(5):765-787.
- [59] De B P, Golnval J C. Principal component analysis of a piezo-sensor array for damage localization[J]. Structural Health Monitoring, 2003, 2(2):137-144.
- [60] Yan A M, Kerschen G, De B P, et al. Structural damage diagnosis under varying environmental conditions-part I: a Linear analysis[J]. Mechanical Systems and Signal Processing, 2005, 19(4):847-864.