

## 浅析土木工程结构健康监测研究进展

张 玉

重庆建筑技工学校，重庆

**摘 要** | 阐述了实施土木工程结构健康监测的必要性，介绍了结构健康监测系统的内涵、组成、监控内容、监控系统功能及其工程应用，讨论了结构损伤检测中的两类方法，重点对损伤识别中的动力指纹法、模型修正法、神经网络法、遗传算法进行了分析和比较，阐述了健康监测领域今后的主要研究问题和发展方向。

**关键词** | 健康检测；损伤识别；模型修正；神经网络；遗传算法

Copyright © 2021 by author (s) and SciScan Publishing Limited

This article is licensed under a [Creative Commons Attribution-NonCommercial 4.0 International License](https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/). <https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/>



重大土木工程结构,如水坝、桥梁、电厂、军事设施、高层建筑等,在遭受地震、洪水、飓风、爆炸等自然或人为灾害时的安全问题,与人民的生命财产息息相关,已经引起人们的广泛关注。上述重要结构在经历了极端灾害性事件后,立即对他们的健康状况做出评估是非常必要的,实时地监测和预报结构的性能,及时发现和估计结构内部损伤的位置和程度,预测结构的性能变化和剩余寿命并做出维护决定,合理疏散居民,对提高工程结构的运营效率,保障人民生命财产安全具有极其重大的意义。因此,结构的健康监测技术成为当前国内外研究的热点问题。

作者简介: 张玉, 重庆建筑技工学校, 学生。

文章引用: 张玉. 浅析土木工程结构健康监测研究进展 [J]. 土木工程进展, 2021, 3 (4): 105-111.

<https://doi.org/10.35534/ace.0304019c>

## 1 健康检测概述

结构健康监测 (Structural Health Monitoring, SHM) 是指利用现场的无损传感技术, 通过包括结构响应在内的结构系统特性分析, 达到检测结构损伤或退化的目的。

结构健康监测技术研究的目的就是通过结构中的传感器网络来实时获取结构对环境激励 (人为的或自然的) 的响应, 并从中提取结构的损伤和老化信息, 为结构的使用和维护工作提供参考, 因而可降低维护费用, 预报灾难性事件的发生, 将损失降低至最小。

对于结构健康监测的关键, 就技术上而言, 主要是先进传感器的优化布设和信息的高效传输; 就理论上而言, 主要是结构识别理论和状态评估理论的发展。

因此, 健康检测有可能将目前广泛采用的离线、静态、被动的损伤检测, 转变为在线、动态、实时的监测与控制, 这将导致结构工程安全监控、减灾防灾领域的一场革命。

可见, 结构健康监测是一门综合性技术, 涉及到结构动力学、信息技术 (如信号的传输、处理、存贮与管理)、传感器技术、优化设计等多个学科。

一个完善的智能健康检测专家系统简单来说可以分为3个部分, 即信号采集、信号处理和损伤诊断。其中, 损伤诊断是健康监测的核心问题, 是对结构进行安全性评估和维护决策的基础。

一般, 健康监测系统应包括以下几个部分: (1) 传感系统。由传感器、二次仪表及高可靠性的工控机等部分组成, 用于将待测物理量转变为电信号。(2) 信号采集与处理系统。一般安装于待测结构中, 实现多种信息源、不同物理信号的采集与预处理, 并根据系统功能要求对数据进行分解、变换以获取所需要的参数, 以一定的形式存储起来。(3) 通信系统。将处理过的数据传输到监控中心。(4) 监控中心和报警设施。利用可实现诊断功能的各种软硬件对接收到的数据进行诊断, 包括结构是否受到损伤以及损伤位置、损伤程度等。传感器监测到的实时信号, 经过采集与处理, 由通信系统传送到监控中心进行分析, 判断损伤的发生、位置、程度, 从而对结构的健康状况作出评估。如发现异常,

发出报警信息。

一般大型桥梁健康监测系统对以下几方面进行监控：（1）结构的固定模态及其相对应的结构阻尼；（2）桥梁在正常车辆荷载及风载作用下的结构响应和力学状态；（3）桥梁在突发事件（如强烈地震、意外大风或其他严重事故等）之后的损伤情况；（4）桥梁结构构件的真实疲劳状况；（5）桥梁重要非结构构件（如支座）和附属设施的工作状态；（6）大桥所处的环境条件，如风速、温度、地面运动等。

大型桥梁因其桥型、重要性、使用年限等因素的不同，其健康监测系统的预期目标也有所不同。国外从20世纪80年代中后期开始建立了各种规模的桥梁健康监测系统。我国自20世纪90年代起也在一些大型重要桥梁上安装了不同规模的健康检测系统。如在香港的青马桥、汲水门桥和汀久桥上安装了保证桥梁运营阶段安全的“风和结构健康监测系统”，可以监测作用在桥梁上的外部荷载（包括环境荷载、车辆荷载等）与桥梁的响应；在上海徐浦大桥上安装的带有研究性质的结构状态监测系统，其目的是为了获得大型桥梁健康检测的经验，监测内容包括车辆荷载、中跨主梁的标高和自振特性，以及跨中截面的温度和应变、斜拉索的索力和振动水平；在江阴长江公路大桥上安装的健康监测系统，主要监测加劲梁的位移、吊索索力、锚跨主缆索股索力以及主缆、加劲梁、吊索的振动加速度等；在南京长江大桥上安装的健康监测系统，主要进行温度、风速风向、地震及船舶撞击、墩位沉降，以及恒载几何线形、结构振动、支座位移等方面的监测。

## 2 损伤检测

结构损伤识别是通过结构的关键性能指标的测试和分析，判断结构是否受到损伤；如果结构受到损伤，则损伤位置、损伤大小如何；为判断结构能否继续使用及其剩余寿命估计提供决策依据。

结构的损伤识别主要包括4个层次：（1）结构是否发生损伤；（2）对损伤的定位；（3）对结构损伤大小进行评价；（4）对结构的剩余寿命进行估计。目前关于结构损伤识别的第一层次的研究已经成熟，而关于损伤定位与损伤识

别大小方面的研究是核心，也是难点。

结构损伤检测技术按检测目标可分为局部检测和整体检测2大类。局部法依靠无损检测技术对特定构件进行精确的检测、查找，描述缺陷的部位；而整体法试图评价整体结构的状态，可以间断或连续地评价结构的健康，确定损伤存在的可疑区域。在大型土木工程的健康监测中多综合利用局部法和整体法。

局部检测方法有目测法、回弹法、染色法、光干涉、声发射法、射线法、超声波技术，等等。局部检测方法需要预先知道结构损伤的大体位置，并且要求检测仪器能够到达损伤区域，对于大型复杂结构，无法给出整体结构的损伤信息。

整体检测方法大致可以分为动力指纹法、模型修正法、神经网络法、遗传算法等。动力指纹法是通过分析与结构动力特性相关的动力指纹变化来判断结构的真实状况。结构一旦发生损伤，其结构参数，如刚度、质量、阻尼等会发生改变，从而导致相应的动力指纹的变化，这些动力指纹的改变可以看作结构损伤发生的标志，借以诊断结构的损伤。常用的动力指纹有：频率、振型、模态曲率、应变模态、柔度、频响函数、模态保证准则（MAC）、坐标模态保证准则（COMAC）、能量传递比（ETR）等。使用单一测试动力特性的方法有频率比法、振型差法、应变模态法、曲率模态法等；使用多个测试动力特征的方法有柔度差阵、刚度差阵、均载变形—曲率法、能量损伤指纹、能量商差指纹等；使用其他测试响应的方法如FRF波形指纹法，包括WCC、ATM、SAC等几个指纹法。大量的模型和实际结构试验表明，结构频率实测较准，但它对局部变化不敏感；振型尤其是高阶振型对局部刚度变化比较敏感，但却很难精确测量。MAC、COMAC等依赖于振型的动力指纹都存在类似的问题，而模态曲率、应变模态则在低幅值振动测试中变化量级过小而难以起到有效的判别作用。有些指标如ETR、单元模态应变能可以较有效地确定损伤位置或发展，然而这些指标对噪声比较敏感，容易湮没于噪声中。

目前已有的研究表明，动力指纹法对实验室内的简单模型结构而言是成功的，应用于实际的结构上结果还不太理想。可以说，到目前为止，动力参数法

对结构损伤识别的能力仍然十分有限。动力指纹法的应用或许需要依赖于寻找新的综合性损伤指标及试验技术的发展。

模型修正法主要利用动力试验数据（通常为模态参数或加速度时程记录、频响函数等），通过条件优化约束，不断地修正结构模型的刚度分布，从而得到结构刚度变化的信息，实现结构的损伤判别与定位。这种方法在划分和处理子结构上具有很多优点。用于无损评估的有限元模型修正方法包括模态柔度法、最优矩阵修正法、灵敏度矩阵修正法、特征结构分配法、测量刚度改变法和综合模态参数法。

模型修正法在损伤识别过程中由于振动测试模态集不完备、测试自由度不足以及测量噪信比高等原因，修正所需的信息不够，易导致解答的不唯一性。因此任何模型修正方法必须处理有限元模型详细分析与相对离散信息之间的不匹配。解决方法如下：（1）减少有限元模型自由度，如采用缩聚法或动边界条件进行子结构模型修正，也可将不完备实测模态振型扩展至与有限元模型相同的自由度。（2）通过良态建模、合理划分子结构以及最优测点布置来获取最大信息量解决问题。（3）统计分析方法。该方法是从统计的角度，考虑特征参数的不确定性及其统计分布特征，可利用相关的随机有限元模型分析研究特征值问题从而评估损伤，或利用谱密度估计的统计特性来获得模态参数的修正概率密度函数表达式来分析损伤等，包括广义的贝叶斯统计方法、规则化方法、模糊逻辑方法等。

神经网络用于损伤识别的基本原理是：根据结构在不同状态的反应，通过特征提取，选择对结构损伤敏感的参数作为网络的输入向量，结构的损伤状态作为输出，建立损伤分类训练样本集。将样本集送入神经网络进行训练，建立输入参数与损伤状态之间的映射关系，训练后的网络具有模式分类功能。将待测结构进行测试的动力参数输入网络，得出损伤状态信息。

应用人工神经网络（ANN）的结构损伤诊断方法不需要结构动力特性的先验知识，具有损伤诊断非参数的优点。神经网络具有很强的非线性映射能力，特别适合于非线性模式识别和分类，能够滤出噪声或在有噪声情况下正确识别，在这一点上，比模型修正法和信号处理法适用范围更广。

目前应用于结构损伤识别的有基于误差反向传播算法的神经网络（BP）、径向基函数神经网络（RBF）、自组织神经网络（ART）等。人工神经网络法的主要局限性在于训练数据集的获取，其准确性在很大程度上取决于训练数据集的完备程度。

遗传算法是一种基于自然遗传和自然选择机理寻优的方法，将其引入损伤评估的最优化方法中，在测试获取信息不多的情况下，能迅速判定损伤位置和程度，即使模态信息部分丢失时，遗传算法寻优能力丝毫不受影响。遗传算法只需计算各可行解的目标值而不要求目标函数的连续性，不需要梯度信息，并采取多线索的并行搜索方式进行优化，因而不会陷入局部最小，且使用方便，鲁棒性强。

### 3 结语

大型桥梁健康监测需进一步研究的问题如下：

（1）利用振动模态测试分析技术和系统识别理论，结合大型桥梁结构自身的特点，探索适用于大型土木工程结构的模型修正方法。

（2）寻求通用的损伤量化指标。在基于振动的故障诊断和预测中，要求不论信号的来源和频段，经过信号处理后，即可根据识别出的信号来判断结构是否处于损伤状态。因此，应该设计一种损伤尺度，将结构损伤程度进行分级量化。

（3）新型传感器和激振器的研制。新型传感器的使用，使得原本没有生命的桥梁被赋予了自感知和自诊断的能力。其中包括光纤传感器、压电传感器、形状记忆合金传感器以及微型激振器等。

（4）传感器的最优布置技术。结构模型试验和在线监测都需要对传感器的最优布置技术进行研究。

大型复杂结构的各种非线性因素，使得神经网络和遗传算法在结构的健康检测和诊断方面具有良好的应用前景。小波分析具有刻画信号局部特征的“数学显微镜”功能，在数据的处理方面具有非常明显的优势。

## 参考文献

- [1] 曾储惠. 南京长江大桥健康监测和状态评估的研究 [D]. 中南大学土建学院, 2004.
- [2] 张治国. 基于模态分析理论和神经网络的斜拉桥拉索损伤识别研究 [J]. 中南公路工程, 2007, 32 (2): 67-72.

# Analysis of the Research Progress of Civil Engineering Structure Health Monitoring

Zhang Yu

*Chongqing construction technical school, Chongqing*

**Abstract:** This paper expounds the necessity of the implementation of civil engineering structural health monitoring, this paper introduces the connotation, composition of structural health monitoring system, monitoring contents, monitoring and control system function and its engineering application, discusses the methods of two kinds of structural damage detection, the key to power the fingerprint in the damage identification method, model modification method, neural network and genetic algorithm are analyzed and compared, The main research problems and development direction in the field of health monitoring in the future are described.

**Key words:** Health detection; Damage identification; Model modification; Neural network; Genetic algorithm