

# 基于智能监测的道桥健康状态评估方法研究

温明君

大兴安岭地区加漠公路养护事业中心, 黑龙江省大兴安岭地区, 165000;

**摘要:** 针对道桥健康监测中数据利用不充分、评估主观性强及预警滞后等问题, 本文开展了基于智能监测的健康评价方法研究。文章详细探讨了多源异构监测数据的预处理与特征融合方法, 利用机器学习及深度学习算法实现了结构损伤检测, 并建立了模糊-层次分析法结合动态加权的评价模型。结果表明, 该方法能有效排除外界杂波干扰, 准确探测结构初期损伤, 实现对道桥实际状况的及时有效定量评定, 可为道桥日常维护和运营管理提供科学的决策支持。

**关键词:** 智能监测; 道桥工程; 健康评估; 数据融合; 损伤识别

**DOI:** 10.69979/3029-2727.26.04.011

## 引言

随着我国交通强国战略的提出和发展, 我国的公路桥梁发展取得了举世瞩目的成就, 但同时由于时间的积累, 大量既有道桥结构逐渐进入“老龄化”。根据统计显示, 我国危桥的数量逐年增多, 在一些道路基础设施上, 其服役性能严重下降, 结构垮塌事件频频发生, 对人民的生命财产安全造成了巨大的危害。传统道桥健康监测方法主要采用人工目测法和常规仪器检测法进行桥梁结构安全状态评估, 其存在工作量繁重、时间较长、危险系数高等缺点, 并不能及时发现结构内部的隐性损伤, 也无法对结构物实施 24 小时、实时性的健康监测。近年来, 随着物联网技术、大数据技术、云服务技术和智能感知等新技术的迅速发展, 为道桥健康监测带来了新内涵。智能监测技术可在结构上布置各类传感器来采集结构受力、变形、振动以及环境反应, 进而对结构进行感知。但是海量的监测数据并未得到充分利用以提取其中隐藏的信息, 数据驱动与模型驱动的结合不充分, 造成监测工作普遍陷入“数据多而信息少”的窘境。如何在海量的监测数据分析过程中获取有效的特征参数, 并形成具有较高准确性和稳定性的桥梁结构健康度评价方法是当前道路桥梁养护管理的关键技术难题之一。因此本文拟从结构监测数据分析、损伤智能检测以及健康度整体分析三个方面开展研究工作, 以期形成较为完整合理的道路桥梁结构健康度智能评价方法。旨在提高我国道桥管养的智能化程度。

## 1 多源异构监测数据的采集与预处理技术

### 1.1 监测数据的去噪与异常值处理

实际工程监测得到的数据往往混杂有高频噪声及

低频漂移, 利用原始数据进行分析将严重影响对结构响应特征信息的有效提取。对于高频随机噪声一般采用小波阈值去噪法处理, 其具有良好的时频局部化性质。选取合适的小波基函数以及分解层后, 将信号分解成不同频带的子信号, 并分别对各频带系数进行阈值量化, 有效剔除噪声成分, 重构出真实信号。对于由传感器故障或者传输错误造成的异常值, 则采用基于统计特性的判别准则来识别并剔除掉这些异常点。常用的有拉依达准则( $3\sigma$  准则)和狄克松准则, 通过对数据求其均值及标准差确定置信度区间, 则超出置信区间的离群点即为异常数据。同时由于道桥监测具有时间上的连续性, 可采用移动平均法或者卡尔曼滤波处理方式补充丢失数据以保证监测时间序列完整性和可靠性从而得到较好的原始数据集。

### 1.2 环境因素影响消除与基准修正

道桥结构在不同环境条件下的力学特性会有所不同, 在温度变化下会产生热胀冷缩现象并引起桥梁结构的附加内力和附加变形, 而这些环境激励所激发的结构响应往往会与由于结构损伤所引发的响应交织在一起, 使得结构损伤识别变得困难。为排除温度效应对结构响应的影 响, 常常利用主成分分析(Principle Component Analysis) 法或者独立成分分析(Independent Component Analysis) 法将采集到的响应数据分解开来。通过对数据进行主成分提取, 分离出与温度有关的数据低频分量, 并留下能体现结构本身变化规律的高频残差分量; 另外, 由于传感器自身零点漂移以及结构所处基准状态发生变化的原因, 使得长时间序列监测数据的基准线出现一定程度的偏移, 因此需要构建一个基于结构正常状态的

历史监测数据的动态基准修正模型来对基准线进行修正。建立标准量数据库,采用时间序列法计算该条件下理论标准值并进行比较,以扣除系统偏差,保证评价资料的准确性和一致性。

### 1.3 多源监测数据的时空配准与融合

道桥结构是复杂的空间体,单类型的数据只能反映其局部某一方向上的状态信息,并不能完全代表结构的整体情况;而将不同类型的不同地点的数据进行融合,可以得到更为完整、可信的信息。在对数据进行融合前,数据时空配准问题:由于各传感器采样频率不同,传输延迟不同,需要对采集的数据利用插值或者重采样的方法转换到同一个时间点;另外还需要将传感器的空间位置与结构的有限元模型结合起来,形成空间上的映射关系,在空间维度上完成配准工作。数据融合一般发生在特征层或者是决策层。其中,特征层融合是指从各个传感器的数据中获取一些统计特性(例如平均值、标准差以及最大值)或者频域特性(例如功率谱密度),得到一个特征向量;决策层融合则是基于每一个传感器数据所给出的局部诊断结果,并应用证据理论或者模糊积分来获得全局的结果。通过多源数据融合,有效克服了单一传感器信息片面、易受干扰的缺陷,显著提升了监测数据的信噪比与鲁棒性。

## 2 基于智能算法的结构损伤识别与定位

### 2.1 基于振动响应特征的模式识别方法

振动信号包含大量结构的模态信息,在结构出现损伤后,会使得结构刚度、质量等物理参数发生变化,并导致频率、振型、阻尼比等模态参数发生变化。因此可以通过对加速度传感器所测得的振动信号来进行损伤识别。随着深度学习理论的发展,卷积神经网络(CNN)被应用到振动信号识别中来。此方法以原始振动信号或者振动信号的时频图像为网络输入端口,利用多层卷积及池化操作实现对信号深层次信息的有效提取,省去了传统方法繁琐的手动特征提取环节。经由海量健康和损伤样本学习后,CNN模型可形成振动信号到结构状态间的非线性映射关系,实现损伤模式的自动分类。为提高模型的泛化性,常常采用数据增强方法如添加噪声、时间平移等扩展训练样本集的方法。此外,迁移学习策略也被引入,利用源域模型的知识解决目标域样本不足的问题,有效提升了损伤识别的准确率。

### 2.2 基于应变与位移监测的局部损伤诊断

针对道桥结构的局部损坏(裂缝、腐蚀、支座脱空等),振动响应并不十分敏感,而需要用应变片、位移计以及光纤传感器来精细地检测。光纤布拉格光栅(FBG)传感器具备抗电磁干扰、耐腐蚀、可分布测量的优点,非常适合于桥梁长期健康监测系统。沿着桥梁纵向布置分布式光纤传感系统可以能够对全桥应变分布进行实时跟踪测量。如果某处存在裂缝或者应力集中,则其对应的应变曲线会有明显的突变或奇异点;同时采用DIC技术获取结构表面图像,并通过高分辨率相机记录,通过对图像中各像素点位移量的处理来获得裂缝的萌生及扩展情况。通过对应变与图像进行融合处理,建立基于多源信息的损伤检测方法,从而对损伤部位进行整体上下的全面诊断;对于损伤定位方面,采用波动学原理,在损伤处激发出波动信号,根据其在损伤面处发生反射及透射现象的不同特性,并结合各传感器所测得信号,从而判断出损伤位置,准确地找到损伤位置。

## 3 道桥健康状态综合评估体系构建

### 3.1 评估指标体系的建立与权重分配

评价指标体系应当满足全面、客观、实用的要求。按照整体为一个系统的原则,把道桥分成三个子系统:上部构造物、下部构造物以及附属工程,每一个子系统再分成不同的层次,比如上部构造物可以分成主梁、桥墩、支座、伸缩缝等;然后对于每一层次所选的评价参数即为评价因子,例如应力值、挠度值、最大振幅、开裂宽度等。不同的构件对整个结构的重要性不同,则其评估权重也应该不同。而权重确立又是评估体系的重要部分,传统的AHP是基于专家的经验判断来完成,存在一定的主观性;为保证权重的客观性可以使用组合赋权的方法进行,即将主观赋权法(AHP)和客观赋权法(例如熵权法、变异系数法)结合起来,采用乘法集成或者加法集成方式得到综合权重。其中,客观权由监测数据的变异程度以及信息熵值决定,数据波动越大则蕴含的信息量越多,其权重就越大。通过主客观结合,既尊重了结构力学规律,又体现了实测数据的实际贡献,使得权重分配更加合理。

### 3.2 模糊综合评估模型的构建与应用

道桥健康状态是一个模糊的概念,“好”、“较好”、“较差”间并没有绝对界限,并不容易找到确切的数学语言来表达,模糊综合评判法通过引入隶属度函数比较好地解决指标值到评价等级间的模糊关系。首先按规范要求及历史上统计资料,确定各指标分级标准,例如将

健康程度划分为 I(完好)、II(轻微损伤)、III(中度损伤)、IV(严重损伤)和 V(危险), 并建立各指标对各个级别的隶属度函数, 常用的是梯形、三角形或者正态分布函数。将测试值带入隶属函数, 求得模糊关系矩阵, 并最终利用权重向量经过模糊合成运算后可得评价结果向量, 并依据最大隶属度原则或者加权平均原则判断出道桥当前所处的健康级别; 另外为了反映结构劣化的程度还需要考虑时间因素对结构进行动态评估, 在获取了历次评估结果之后, 从时间的角度来判断其今后的发展情况, 为养护决策提供前瞻性指导作用。

## 4 工程应用实例与结果分析

### 4.1 智能监测系统的布设与运行

针对该大桥的结构特点, 设计并安装了一套完备的智能监测系统。在上部结构方面, 重点对主梁跨中、索塔根部及拉索锚固区布设了 FBG 应变传感器与加速度传感器, 共计布设应变测点 120 个, 加速度测点 40 个。在下部结构方面, 在桥墩底部及桩基顶部安装了倾斜传感器与沉降位移计。环境监测方面, 在桥面设置气象站, 实时监测温湿度、风速风向。各传感器信息均上传到监控中心服务器, 经由自主开发的数据预处理软件实现数据清洗及入库。系统上线以来, 已采集了大量的监测数据, 并获得了某次台风过程中的超大风荷载作用下结构的响应数据。确认了采集系统数据的稳定性和可靠性。

### 4.2 评估结果分析与对比验证

根据本文提出的方法对监测的数据进行了分析。使用了小波阈值法对振动信号进行去噪, 并运用 PCA 消除温度对应变数据的影响后, 将其代入到已经训练好的 CNN 中进行损伤识别, 结果表明主梁跨中的局部位置应力较大, 可能存在疲劳损伤的风险。经与人工检测报告对比, 此位置存在细微裂缝, 证明损伤识别模型正确性较高。最后利用组合赋权-模糊综合评价模型对整座桥梁进行评分。结果表明: 该桥目前所处的健康等级为“二级”, 即处于较好的健康水平, 但个别拉索张力衰减速度较快, 可列为监测的重点对象。最后, 将评价结果与传统《公路桥梁技术状况评定标准》(JTG/TH21) 计算结果比较, 二者呈现的趋势大致相同, 但是本文的方法得到的结果更为灵敏, 能更早地反映结构性能劣化的趋势, 表明所提出的基于机器学习的桥梁健康状态智能评价方法准确度高, 并且具备较好的实用性, 可为管

养单位提供较为合理的养护建议。

## 5 结语

本文围绕着道桥健康监测中的难点进行了从数据预处理、损伤识别以及综合评价的研究并给出了相应的案例证明。可以看出, 利用智能监测的方法可以弥补常规人工手段在道桥检测上的不足之处, 及时掌握道路桥梁的状态及程度。多源信息的数据融合技术和大数据分析机器学习方法, 极大地提升了损伤识别的准确性和鲁棒性; 基于组合赋权和模糊综合评价模型的建立, 使得评价过程更加客观、科学。但是道桥健康监测是动态发展的, 还存在很多问题可以进一步探索。后续的研究工作将主要集中在以下几方面: 第一, 开发成本更低、寿命更长、精度更高的智能传感器, 降低监测系统建设门槛; 第二是强化数字孪生技术应用于道桥监测领域中去, 建立物理实体与虚拟模型实时交互的数字底座; 第三是加强多物理场耦合机理研究工作开展力度, 挖掘环境侵蚀、材料老化以及荷载耦合作用下结构性能退化的机理规律。随着 AI 技术及物联网的发展, 展望未来, 道桥健康监测将朝着更为智能化、自动化以及精准化方向迈进并为保障我国交通基础建设的安全运营做出贡献。

## 参考文献

- [1] 刘国梁, 刘国坤, 颜东煌, 等. 基于机器学习的大跨度斜拉桥监测技术研究现状及展望[J/OL]. 中外公路, 1-15[2026-02-28].
- [2] 张惠宇. 基于技术与管理双重视角下的双层钢桁斜拉桥抗火防护研究及应用[D]. 扬州大学, 2025. 000852.
- [3] 杨东辉, 顾海伦, 伊廷华, 等. 大跨悬索桥加劲梁纵向约束性能诊断与评估进展[J]. 中国公路学报, 2025, 38(11): 112-134.
- [4] 鞠定超, 张云开, 黄永, 等. 面向智能运维的交通基础设施视觉感知与诊断[J]. 土木工程与管理学报, 2025, 42(03): 1-15.
- [5] 毛熊尧. 基于卷积神经网络和传递函数的桥梁结构损伤识别[D]. 武汉工程大学, 2025. 000494.

作者简介: 温明君(1972.6.20-)女, 汉族, 黑龙江省塔河县人, 学士, 副高级工程师, 研究方向: 公路养护。