

# 桥梁结构健康监测系统设计与应用

马筱欢

广东水利电力职业技术学院 广东广州 510925

**摘要:** 在交通建设项目中,桥梁是重要的运输枢纽,其安全和耐久性能受到行业的重视。桥梁长期荷载,再受到环境侵蚀和材料老化等问题,往往会造成结构的损坏,以此危及交通安全。本文以实现桥梁运行安全为目标,集成传感器、数据处理等技术,设计完整的桥梁健康监测系统。通过明确实施和经济性设计原则,建立多源异质信息监测、构建全寿命周期结构损伤早期预测等策略,并以实例进行验证。结果发现,健康监测系统可以快速识别异常情况,对潜在风险提前预警,从而为桥梁维护工作提供依据,以期促进桥梁工程的智慧化发展。

**关键词:** 桥梁结构;健康监测;系统设计;应用策略

桥梁作为道路运输系统中的关键构件,在连接各地区和保证物流畅通方面起着举足轻重的作用。随着我国在役桥龄的不断增长,结合日益增多的车流和恶劣天气等因素影响,使得在役桥梁的破坏风险急剧增加。而现有手工监测方法效率低下,覆盖范围有限,数据分布不均匀,已很难适应现代化的交通运输安全管控需求。因此,建立精确高效的桥梁健康监测体系,对保证桥梁运行的安全性具有重要意义。文章以理论研究和工程实践为主线,探讨适用于不同类型桥梁的监测策略,以提高结构损伤的辨识准确性和早期预警能力,为实现全寿命范围内的安全控制提供支持。

## 一、健康监测概述

健康监测,关键是通过桥梁运行状况进行在线检测和分析,及时检测和评价结构损伤,以达到提高桥梁服役寿命和降低维修费用的目的。实际应用中,桥梁经长时间的使用,时常会出现混凝土开裂,钢结构腐蚀等病害,如不采取有效措施,将导致结构的承载力降低,乃至倒塌。如2020年,某高速桥梁因支撑结构的陈旧而没有进行相应的更换,造成严重路面沉陷,引发严重交通事故,造成巨大的经济损失。

健康监测必要性体现在:

一是,针对现有安全监测方法存在的不足,拟采用布置传感器的方式,对项目进行24h不间断的实时监测,获取瞬态荷载作用下的结构反应。

二是,为维护决策提供数据支持,防止因维护不当或过度维护而造成的损失。

三是,通过对已建成桥梁进行结构力学行为演变的研究,为进一步的研究和工程设计优化奠定基础。

## 二、系统设计原则

### (一) 数据精准性原则

数据准确是健康监测的关键需求,也是影响结构损伤评价和预警可靠性的关键因素。为了保证收集到的资料真实可靠,需要从传感器选择、布局方案的优化和数据校正等方面进行分析。传感器选取方面,要结合监测特点,选取合适的仪器,比如精度在 $1\mu\epsilon$ 以上的光纤作为应变检测敏感元件,而对于位置测量,则选取误差小于0.5mm的激光位移测量装置。设备在斜拉桥的主要受力区域,如梁桥跨中、索力锚定点等,以规避资料的盲点<sup>[1]</sup>。

构建三个层次校正系统:首先利用滤波算法剔除背景噪音,然后利用温度补偿方法剔除外界的影响,最后与历史参考值进行对比校正。将此方法用于桥梁结构安全监测,其结果与常规方法相比,其测量结果的相对偏差小于3%,为进一步的结构损伤辨识奠定基础。

### (二) 自适应性更新原则

桥梁运行过程中所处的工作条件和状态都在不断发生改变,因此监测系统需要能够考虑持续更新与升级。硬件层次上,采取模块化的设计方式,在传感器和数据采集终端之间保留连接端口,可以按照监测的要求增加或减少设备;还可以搭建开放的计算平台,为新结构损伤辨识提供支持。

## 三、桥梁结构健康监测系统设计与应用探讨

### (一) 多源异构数据融合监测方案

常规结构检测方法主要依靠某种结构数据的识别,容易受到外界因素的影响,从而产生错误的检测结果。多源异构信息融合方法,将结构响应、环境参数和车辆荷载等三种关键信息进行集成,建立结构健康状况评价

的全过程评价方法，从而实现对结构的三维结构损伤进行多维度辨识<sup>[2]</sup>。

传感器布置上，可以采用1kHz频率的应变信号获取方法，收集车辆瞬态载荷作用下的结构受力情况。以10min/次的频率，对环境参数（温/湿度、风速）进行监测，以此构建影响基线（如图1）；采用高清摄像机和车辆动力学相结合的方式采集道路负载信息，精确记录车流量、车型和车轴重量的分配情况。通过对三种不同类型的数据进行时间标记的统一，并将其导入数据库中以供相关分析。

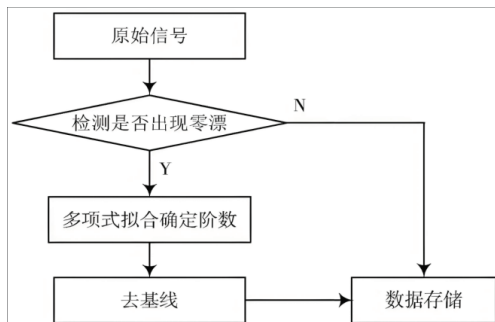


图1 传感器使用示意图

以某380m主跨度斜拉桥为例，通过128个应变传感器，32个环境监测终端，6个交通监测装置，代表联合学习方法，实现对多个传感器的分布式训练。算法快速收集不同数据源的特征，以此明确不同信息的权重，即在桥梁结构中引入2mm宽度的裂纹，使其产生15%的异常振荡，同时将桥梁结构的振动频率由3.2Hz降低到2.9Hz，而外界温度只升高0.5℃。该方法利用多个参量的联合判别，实现裂纹发展到关键阶段的7d内的早期预警，比单项检测时间提早11天，结构损伤辨识精度明显提高，以此提高损伤识别的可信度。

### （二）全生命周期损伤预警模型

桥梁破坏从发生到危害安全性的逐步发展，而采用传统静态门槛预报方法很难准确地反映其破坏演变机理。通过建立以损伤演化动力学特征为基础的分级预警系统，从微观损伤辨识到故障风险预报的全过程控制<sup>[2]</sup>。

模型训练基于10个相同类型的10年大跨度连续梁桥结构破坏数据，建立12种典型混凝土碳化、支座老化等破坏模式。利用LSTM神经网络获取损伤与时间、载荷和环境之间的非线性关联，实现对损伤等级（轻、中、重）和剩余寿命的预估。通过建立相应的动力学门槛，比如以钢筋混凝土为例，按照桥墩所在区域。进行相应预警设置，以防止因“一刀切”而造成的虚报警或漏报警。

以某桥梁结构实时监测为例，针对混凝土碳化情况

预测结果与实测吻合较好，误差不超过0.3mm。系统检测5#桥墩已经出同25mm碳化后，将该模型与海水冲刷率和混凝土的强度衰退关系相融合，判断其为中等损坏，自动推送预警信息，同时给出阻碳剂喷射与阴极防护的联合修补。与2年一次的常规监测相比，模式可提前14个月实现早期识别，有效规避因腐蚀而造成的结构破坏，更加证实动力早期预报对提高桥梁使用寿命具有重要意义。

### （三）无线传感网络分布式监测架构

大跨度的桥梁往往穿越各种复杂地貌，采用传统电缆监测方式，存在着布线费用高和维护困难等缺点。无线传感网络分布式架构的应用，通过对节点自主组织和远程传送，可以实现对监测区域的柔性覆盖和有效的信息传递。

架构基于LoRa扩展无线网络的新型无线传感器网络，实现单节点3公里的无线数据传输，在非视距条件下，网络通信成功率达到90%，能耗比传统蓝牙方案减少60%，并且双AA型电池可以持续工作5年以上。各监测节点均整合微处理器和传感模块，能够独立地进行数据滤波和特征提取等预处理，只向云计算平台上传重要数据，降低数据传输量80%以上<sup>[4]</sup>。节点布置中，以中心点+边点为分层结构，中心点主要进行数据汇总，边点对局部进行集中监测。结合某山区150m主跨度拱桥为例，详见表1：

表1 某山区拱桥监测示例表

项目	数据
桥梁类型及主跨	山区拱桥，主跨150米
监测节点总数	36个
核心节点间距	50米
边缘节点加密间距（应力集中区）	10米（拱脚等部位）
系统建设成本对比	为有线方案的40%
监测精度表现	拱肋因基础不均匀沉降产生0.8mm微小变形时，6个节点同步捕捉应变差异

### （四）结构动力特性追踪系统

结构动力特性作为综合性能的灵敏参数，其动态特征常常比已知损伤发生得更早。这种模态参数在不需要人为施加载荷情况下，通过采集车辆行驶、风力等自然激励下的振动反应，来实时跟踪结构的动态性能。

系统基于随机子空间方法，对由多个传感器获取的振动数据进行分析，并对空间模型进行SVD分析，建立复杂环境下的状态空间建模方法，实现对多个典型工况下的多模态特征的有效辨识，使其与常规的多目标检测方法相比提高40%以上<sup>[5]</sup>。根据振型避开原理，在简支梁桥中、连续梁桥的反弯点等处，分别布置监测点，保

证检测结果的信噪比不低于20dB。

#### (五) 数字孪生可视化监测平台

传统监测数据多为图形化方式,很难直接反映建筑物的空间状况和破坏情况。基于数字孪生可视化技术,建立与真实桥梁等效的3D模型,将监测信息与虚拟环境进行实时的映射,以达到可视化、可交互监测的目的。

通过BIM和GIS结合,实现对结构部件的准确识别和三维建模。采用WebGL的方法来进行可视化绘制,并在网页上实现50万个工件的平滑加载。监测资料采用分层的方式进行叠加:采用云图色差的方式,将变形量的变化用箭头表示,破坏部位用红色突出表示。整合数值模拟软件,可以模拟50t重载列车荷载作用下的结构反应分析,从而为维护计划的优选奠定基础。

#### (六) 极端天气应急监测机制

极端气候条件下,如台风、暴雨,容易引起桥梁的突发性破坏,而常规监测手段往往会出现断电、掉线等现象。极端天气应急监测系统,采用三阶段应对措施,保证在灾害发生的整个过程中,监测资料的连续性和完整性。

灾难发生24小时前,系统将采集频率由kHz提高到5kHz,并将采集时间缩短到1min,对风速和桥梁的位移进行监测。当灾难来临时,触发双路电源(主要网络+储能电池)和抗干扰的传送信道(4G/5G的双重模式),使核心节点具有72个小时的生命周期;在灾害发生1小时内,系统会根据灾害发生前后的数据,自动产生损毁评定报告,并将其与灾害发生之前的资料进行比较,找出是否存在异常变化。

### 四、强化应用策略

#### (一) 优化传感器布设的拓扑结构

传感器设计,根据结构受力特性建立优化拓扑网络结构,是保证监测效果的关键。通过数值仿真和野外测试,明确节点位置,即在应力集中的地方,增加应变传感器,在振动敏感地区,增加加速度计<sup>[6]</sup>。利用图论算法对无线传感器网络的信息发送进行最优处理,将网络数据发送延时保持在50ms内。

#### (二) 建立数据安全共享机制

监测数据纳入交通及桥梁结构相关信息,从而构建保密传送+授权等级的监测系统。为避免资料泄漏,使用SM4国家密码算法进行加密;通过对不同的使用者权限进行不同设定,如维护部门可以看到即时数据,而研究机构只可以获得经过脱敏处理的数据。

#### (三) 推动监测数据与养护流程的深度融合

突破监测和维修工作之间的信息隔离,并将监测资料

融入维修工作当中。系统可依据受损程度,自动产生维修计划,确定维修位置和方案等数据,并将施工调度系统与物料购买关联,从而达到监测、决策、实施的闭环管控。

#### (四) 加强监测系统的标准化建设

当前监测行业还没有形成统一的技术规范,需要建立国家相关标准,不仅包括传感器性能指标,也要涉及数据格式和预警阈值标准。可以根据公路桥梁结构健康监测监测系统相关技术规程,对数据采集频率、格式和传输方式进行规范,保证各系统间数据的互联互通,显著提高监测的普及程度。

### 结语

综上,桥梁结构健康监测系统的建立,通过多源数据融合,结合全生命周期早期预警,从而构建智能化的健康监测平台,为智能交通环境下的安全运行提供科学依据和技术支持。多源信息有效结合,可以有效避免单个信息的错误判断;基于全生命周期结构状态建模,能够实时跟踪结构的状态;通过数字孪生,提高监测直观性;基于突发事件的监测,提高对环境的自适应能力。通过以上技术应用,形成从监测到分析、决策的完整技术体系。未来随着人工智能和物联网等领域的不断进步,监测体系将朝着轻量级和自主决策的方向发展。将微尺度传感技术和边界计算技术融合,可以更大程度地减少系统造价,相关桥梁健康监测体系必将成为我国平安交通的重要组成部分。

### 参考文献

- [1]张兴.桥梁工程中的结构健康监测与预警系统设计[J].科技资讯,2024,22(19):204-207.
- [2]赵汗青,简方梁,淡丹辉,赵一鸣,殷晓波.大跨连续钢桁梁桥健康监测系统设计及应用[J].世界桥梁,2024,52(06):56-63.
- [3]贺晓铭.在役公路隧道结构健康监测系统设计与应用[J].黄河水利职业技术学院学报,2024,36(02):40-45.
- [4]高洪,胡俊亮.城市轨道桥梁群健康监测系统设计及应用[J].世界桥梁,2023,51(05):60-68.
- [5]罗利,罗子圣.结构健康监测系统在地震作用下大跨度桥梁动力响应分析的应用[J].建筑结构,2023,53(S1):2122-2126.
- [6]雷珍珍,梁清清.在役桥梁健康监测与状况评估系统设计及应用[J].中国水运,2023,(11):140-142.