

智能监测系统在既有桥梁结构健康诊断中的应用与优化

潘宏永 410928199007196310

摘要：我国交通基础设施建设已进入建养并重的发展阶段，大量既有桥梁因服役年限增长、荷载等级提升与自然环境侵蚀，结构健康问题逐渐凸显，传统人工检测方式存在效率低、覆盖不全、滞后性强等弊端，无法满足常态化健康诊断的需求。智能监测系统依托传感技术、物联网与大数据分析，为既有桥梁结构健康状态的实时感知与精准诊断提供了全新解决方案。本文梳理了智能监测系统在既有桥梁健康诊断中的核心应用框架，分析当前应用过程中存在的传感器稳定性不足、数据冗余度高、诊断模型泛化能力弱等问题，从传感器布置优化、数据降噪与特征提取、诊断模型迭代三个维度提出针对性优化路径，为提升既有桥梁健康诊断的精准性与可靠性提供参考。

关键词：智能监测系统；既有桥梁；结构健康诊断；优化路径

一、引言

截至 2023 年底，我国公路桥梁总数已超过 100 万座，其中服役超过 20 年的既有桥梁占比超过 30%，部分早期建设的桥梁设计荷载标准偏低，长期承受远超设计预期的交通荷载，叠加酸雨、温湿度变化、冻融循环等环境因素的侵蚀，结构内部不可避免会产生混凝土开裂、钢筋锈蚀、钢结构疲劳损伤等病害，若不能及时发现并处置，极易引发垮桥等恶性安全事故。传统的桥梁健康诊断主要依靠定期人工检测，依赖检测人员的肉眼观测与简单仪器测量，不仅难以发现结构内部的隐性损伤，检测结果也受检测人员专业水平影响存在较大主观性，且检测周期长，无法实现对结构健康状态的连续跟踪。

随着物联网、人工智能技术的快速发展，智能监测系统开始广泛应用于桥梁工程领域，通过在桥梁关键部位布置各类传感器，实时采集结构的应力、应变、位移、振动频率等参数，结合数据分析模型实现对结构健康状态的自动诊断，能够有效弥补传统检测方式的不足，为既有桥梁的养护决策提供数据支撑。本文围绕智能监测系统在既有桥梁结构健康诊断中的应用展开分析，针对现存问题提出优化方案，具有一定的工程实践价值。

二、智能监测系统在既有桥梁健康诊断中的核心应用

2.1 结构状态参数的实时采集与传输

智能监测系统的基础功能是对既有桥梁关键位置的结构响应参数进行实时采集，目前应用较为广泛的传感器包括应变传感器、加速度传感器、位移传感器、温湿度传感器、钢筋锈蚀传感器等，能够覆盖结构静力参数与动力参数的采集需求。对于大跨度预应力混凝土连续梁桥、斜拉桥等结构，通常会在主梁跨中、支点，斜拉索锚固端等受力关键部位布置传感器，实时采集结构的应力变化与振动响应数据，通过物联网无线传输模块将采集到的数据传输至云端数据平台，实现数据的集中存储与管理，管理人员可以随时通过终端查看桥梁的实时运行状态，打破了传统检测在时间与空间上的限制。

2.2 基于数据的结构损伤识别与健康诊断

结构健康诊断的核心目标是识别结构是否存在损伤、判断损伤的位置与程度，智能监测系统依托采集到的连续数据，结合机器学习、深度学习等智能算法，能够实现损伤的自动识别与诊断。目前常用的诊断思路是通过对比桥梁健康状态下的基准参数与当前监测参数，提取参数变化中的损伤特征，比如结构固有频率的下降、振型的改变都能够反映结构刚度的变化，以此判断结构是否产生损伤。对于混凝土桥梁，通过钢筋锈蚀传感器采集的锈蚀电流参数，结合环境温湿度数据，能够精准预测钢筋锈蚀的发展速度，评估结构的剩余使用寿命，为养护决策提供依据。

三、当前智能监测系统应用存在的主要问题

虽然智能监测系统在既有桥梁健康诊断中已经得到了较多应用，但实际应用过程中仍然存在不少问题，限制了诊断精度与可靠性的提升。首先是传感器的稳定性与耐久性不足，既有桥梁大多布置在野外环境，长期经受温湿度变化、雨水侵蚀、车辆振动等影响，部分传感器容易出现零点漂移、数据失真甚至失效的问题，而且既有桥梁的传感器更换难度大、成本高，严重影响监测数据的连续性与可靠性。其次是数据冗余问题，为了提升监测覆盖范围，很多桥梁布置了大量传感器，产生了海量的监测数据，其中包含大量噪声数据与冗余数据，不仅增加了数据存储与传输的成本，也容易干扰损伤特征的提取，降低诊断模型的准确性。第三是诊断模型的泛化能力不足，目前大部分智能诊断模型都是针对特定桥梁的监测数据训练得到的，不同桥梁的结构形式、运营环境、病害类型存在较大差异，训练好的模型直接应用到其他桥梁时，诊断精度会大幅下降，无法适配大量不同

类型既有桥梁的诊断需求。

四、智能监测系统的优化路径

4.1 传感器布置与选型的优化

针对传感器稳定性不足的问题，首先要根据既有桥梁的结构特点与病害风险，优化传感器的选型与布置方案。对于暴露在野外环境的传感器，优先选择防护等级高、抗干扰能力强的产品，比如采用光纤传感器代替传统的电传感器，光纤传感器具有抗电磁干扰、耐腐蚀、传输距离远的优势，更适合桥梁野外长期监测的需求。在布置方案上，摒弃传统均匀布置的思路，结合结构有限元分析，确定结构的损伤敏感位置，仅在关键敏感位置布置传感器，既能够保证监测数据的有效性，又减少了传感器的数量，降低了成本与故障概率。此外，可以建立传感器健康状态评估模块，对传感器输出数据的异常性进行实时检测，及时识别失效传感器并发出提醒，保证监测数据的可靠性。

4.2 数据预处理与特征提取的优化

针对数据冗余与噪声干扰的问题，需要优化数据预处理与特征提取流程。首先采用小波变换、经验模态分解等方法对原始监测数据进行降噪处理，滤除环境干扰产生的噪声信号，提升数据的质量。然后采用主成分分析、自编码神经网络等方法对高维监测数据进行降维处理，提取能够反映结构健康状态变化的核心特征，剔除冗余信息，不仅能够降低数据存储与计算的成本，还能够提升诊断模型的训练效率与精度。针对数据缺失问题，可以建立基于生成对抗网络的数据补全模型，利用相邻传感器的相关数据补全缺失的监测数据，保证数据的连续性。

五、结论

智能监测系统为既有桥梁结构健康诊断提供了高效、实时的技术手段，能够有效提升桥梁养护的科学性与安全性，降低安全事故发生的概率。当前智能监测系统在应用过程中仍然存在传感器耐久性不足、数据冗余、诊断模型泛化能力弱等问题，通过优化传感器选型与布置、优化数据预处理与特征提取、采用迁移学习提升模型泛化能力等措施，能够有效提升智能监测系统的应用效果，更好地满足既有桥梁健康诊断的需求。未来随着智能传感与人工智能技术的进一步发展，智能监测系统将会在更多既有桥梁养护中得到应用，为我国交通基础设施的安全运行提供更有力的保障。

参考文献

- [1] 李爱群, 缪长青. 大跨桥梁结构健康监测系统研究与应用[J]. 土木工程学报, 2019, 52(2): 47-60.
- [2] 张宇峰, 李扬, 张峰. 既有桥梁结构健康监测数据处理与损伤识别方法研究进展[J]. 中国公路学报, 2021, 34(8): 1-18.
- [3] 宗周红, 钟儒勉, 郑沛娟. 基于深度学习的桥梁结构损伤识别研究进展与展望[J]. 中国公路学报, 2020, 33(3): 1-17.
- [4] 王树仁. 既有公路桥梁健康智能监测系统优化设计[D]. 长安大学, 2022.