

老龄化桥梁结构健康监测技术的发展与应用

段孟中

中铁二院（成都）咨询监理有限责任公司 四川成都

【摘要】随着桥梁老龄化问题凸显，结构健康监测技术愈发关键。该技术综合运用多种传感手段，实时采集桥梁应变、振动等数据，经数据分析处理精准评估结构状态，及时察觉病害隐患，为养护维修提供科学依据，有效保障老龄桥梁安全运营，延长其使用寿命，降低安全风险。

【关键词】老龄化桥梁；结构健康监测；传感技术；数据分析；安全保障

【收稿日期】2025 年 3 月 5 日

【出刊日期】2025 年 4 月 6 日

【DOI】10.12208/j.jer.20250160

Development and application of bridge structure health monitoring technology for aging

Mengzhong Duan

CREEC (Chengdu) Consulting and Supervision Co., Ltd., Chengdu, Sichuan

【Abstract】As the issue of bridge aging becomes more prominent, structural health monitoring technology is becoming increasingly critical. This technology integrates various sensing methods to collect real-time data on bridge strain and vibration. Through data analysis and processing, it accurately assesses the structural condition, promptly identifies potential hazards, and provides scientific evidence for maintenance and repair. It effectively ensures the safe operation of aging bridges, extends their service life, and reduces safety risks.

【Keywords】Aging bridge; Structural health monitoring; Sensor technology; Data analysis; Safety guarantee

引言

当今社会，众多桥梁服役多年渐入老龄化。这些桥梁承载着繁重交通，结构性能不断退化，安全隐患增多。一旦发生垮塌等事故，将严重危及生命财产、阻碍交通。探究老龄化桥梁结构健康监测的技术意义重大，如何精准、高效监测其健康状况成为亟待解决的问题。

1 老龄化桥梁现状剖析

在交通基础设施的版图中，老龄化桥梁占据着不容忽视的位置。随着岁月的推移，众多桥梁步入“老龄期”，它们因长期暴露于复杂恶劣的服役环境，承受着车辆荷载的反复碾压以及自然环境的持续侵蚀，各类病害犹如潜藏的暗流，逐渐浮出水面，严重威胁着桥梁的安全运营。

从材料劣化的角度来看，混凝土作为桥梁的主要结构材料，在长期的外界作用下，出现开裂现象屡见不鲜^[1]。车辆荷载的频繁冲击，使混凝土内部应力不断变化，微观裂缝逐步发展并相互贯通；与此自然环境中的雨水、有害化学物质等持续渗透，加速了混凝土的碳化进程，降低了其对内部钢筋的保护作用。而钢筋一旦开

始锈蚀，体积膨胀会进一步加剧混凝土的开裂，形成恶性循环，极大地削弱了桥梁结构的承载能力。据相关统计，在已有的老龄化桥梁病害中，混凝土开裂和钢筋锈蚀的占比高达 60% 以上，成为影响桥梁安全的首要因素。

除了材料劣化，桥梁结构的功能性缺陷也日益凸显。早期设计标准相对较低，随着交通流量的迅猛增长以及重型车辆的日益增多，部分桥梁的通行能力已难以满足现实需求^[2]。桥面铺装磨损严重，不仅影响行车舒适性，还增加了车辆行驶的不稳定性；桥梁的伸缩缝装置老化、损坏，导致梁体变形受阻，进一步加剧了结构的内力重分布，影响了桥梁的整体耐久性。

综上所述，随着时间的推移与环境因素的侵蚀，老龄化桥梁面临着诸多严峻的病害问题 and 功能性缺陷，如混凝土碳化、钢筋锈蚀导致的结构强度降低，以及支座老化、伸缩缝损坏等引发的桥梁变形异常与行车舒适性下降等状况。寻求可靠、高效的监测手段，借助先进的传感技术与智能分析系统，实时掌握桥梁结构的健康状况，精准识别应力集中区域、裂缝扩展趋势等潜

作者简介：段孟中，男，汉族，湖南娄底，工程师，大学本科，研究方向为道路桥梁。

在隐患,并及时采取诸如结构加固、病害修复等有效措施,无疑是保障老龄化桥梁持续稳定服役、维护交通运输安全的关键所在。

2 监测技术手段及应用

在老龄化桥梁结构健康监测体系里,传感器技术作为数据采集的基石,其重要性不言而喻。应变片,这一经典的传感器类型,在桥梁监测领域扮演着不可或缺的角色。它能敏锐地捕捉桥梁关键部位应力的细微变化。在实际操作中,需运用精细工艺,将应变片精准粘贴于桥梁的主梁、桥墩等关键结构处^[3]。当桥梁在交通荷载、环境因素等多种复杂因素的共同作用下,发生哪怕极其微小的变形时,应变片的电阻值便会随之产生相应变化。随后,这种电阻值的变化会经由专业的测量电路,转换为便于检测与分析的电信号。

振动特性与位移情况,同样是评估桥梁健康状况的重要指标。在这方面,加速度传感器和 GPS 技术发挥着至关重要的作用。加速度传感器被合理地布置在桥梁的特定位置,如桥面、桥塔等。这些位置能够高效捕捉桥梁在车辆通行、风荷载作用下所产生的振动响应。通过对采集到的振动数据进行专业、深入的分析,技术人员可以获取桥梁的固有频率、阻尼比等关键动态参数。这些参数犹如桥梁的“健康密码”,一旦出现异常波动,极有可能暗示桥梁结构存在潜在损伤。与此 GPS 技术凭借其高精度的定位能力,在桥梁位移监测方面大显身手^[4]。无论是因长期沉降导致的竖向位移,还是受水平力影响产生的横向位移, GPS 系统都能凭借其先进的定位算法和稳定的信号传输,精准测定并将数据实时传输至监测系统,为桥梁健康状况的评估提供关键的位移数据。

多源数据采集完成后,借助先进的数据传输技术,这些宝贵的数据能够迅速、准确地汇聚至监测系统核心。在监测系统内部,专业分析软件发挥着关键作用。这些软件运用复杂而精妙的算法,对海量数据进行深度挖掘与分析。一方面,软件会对各种监测数据进行融合处理,通过先进的数据处理技术消除数据误差与干扰,从而还原出桥梁最真实的工作状态。另一方面,软件会依据预先设定的健康评估模型,对桥梁的实时健康状态进行量化评估。评估结果会以直观易懂的可视化界面呈现给运维人员。运维人员通过这一可视化界面,能够一目了然地掌握桥梁的健康状况,进而为后续的维护、加固等运维决策提供科学、有力的支撑,确保老龄化桥梁在服役期内始终保持安全稳定运行。

3 数据分析与病害预警

在老龄化桥梁结构健康监测体系中,数据采集仅是开端,海量数据的深度分析与有效利用才是核心所在。当传感器持续不断地采集桥梁在各种工况下的振动、应变、位移等数据后,如何从这些繁杂的数据中挖掘出关键信息,成为亟待解决的问题。此时,大数据分析技术和机器学习算法发挥着至关重要的作用。大数据分析技术凭借强大的数据处理能力,能够快速筛选、整合数据,梳理出数据间潜在的逻辑关系;机器学习算法则通过对大量历史数据的学习,自动构建起复杂的数据模型,精准捕捉结构行为特征^[5]。运用深度学习中的卷积神经网络,对桥梁振动数据进行特征提取,能够有效识别出不同振动模式下隐藏的结构状态信息,从而挖掘出数据的内在关联。

基于对数据的深度挖掘,研究人员能够构建出贴合桥梁实际情况的结构退化模型。该模型充分考虑桥梁在长期使用过程中,受自然环境侵蚀、交通荷载冲击等多种因素影响,结构性能逐渐劣化的规律。通过模拟不同因素对桥梁结构的影响,模型能够预测桥梁在未来一段时间内的结构状态变化趋势。为了实现病害的及时预警,还需依据结构退化模型设定科学合理的预警阈值。这一阈值并非固定不变,而是根据桥梁的设计标准、使用年限、实际运行状况等动态调整。以桥梁的应变监测为例,当监测到的应变值接近或超出依据模型计算得出的安全应变阈值时,系统会自动判定结构可能出现异常情况。

一旦监测指标异常突破阈值,病害预警系统便会即刻启动。预警信息会以多种形式,如短信、弹窗等,迅速传达至养护人员手中^[6]。这一及时的预警机制,让养护人员能够提前介入桥梁维护工作,依据预警信息精准定位可能存在病害的部位,制定针对性的维修方案。通过精准维修,不仅能够有效阻止病害进一步发展,避免桥梁安全事故的发生,还能大幅提高养护工作效率,降低养护成本。在某座老龄化桥梁监测中,系统提前预警了一处关键部位的应力集中问题,养护人员迅速采取加固措施,成功消除了安全隐患,防患于未然,保障了桥梁的安全稳定运行。

4 技术实践成效与挑战

在实际应用场景中,老龄化桥梁结构健康监测技术已展现出显著成效。众多处于老龄阶段的桥梁,因长期承受交通荷载、自然环境侵蚀等作用,结构性能逐渐劣化,面临较高的安全风险。借助先进的健康监测技术,能够实时、精准地掌握桥梁结构的工作状态。在某座具有数十年历史的城市主干道桥梁上,通过部署全面的

监测系统,成功捕捉到结构关键部位应力变化异常信息^[7]。运维人员依据这些数据,提前对桥梁进行加固维修,有效避免了可能因结构局部失效引发的突发坍塌事故,确保了日常交通的顺畅运行,也保障了过往行人与车辆的安全。从经济层面来看,精准的监测数据为桥梁维修养护工作提供了科学依据,避免了以往盲目性的大规模维修,大幅降低了不必要的维修成本,实现了资源的高效利用。

该项技术在实际过程中也遭遇了诸多棘手难题。传感器的长期稳定性问题较为突出。桥梁服役环境复杂多变,温度的剧烈波动、湿度的大幅升降,以及风雨等恶劣天气的频繁侵袭,都会对传感器的性能产生负面影响。经过长时间运行,部分传感器会出现漂移、信号衰减甚至失效等状况,这使得监测数据的连续性与可靠性大打折扣。复杂环境下数据的准确性难以保证。在强风、暴雨等极端天气条件下,环境噪声干扰严重,监测系统采集到的数据中夹杂大量无效信息,如何从这些复杂数据中准确提取反映桥梁真实结构状态的有效信号,成为亟待解决的关键问题。不同桥型的结构特点、力学性能以及服役环境存在显著差异,现有的健康监测技术难以做到对所有桥型具有普适性^[8]。大跨度悬索桥与中小跨径梁桥,其结构受力模式和关键监测部位截然不同,如何针对不同桥型制定个性化、高效的监测方案,拓展健康监测技术的应用广度与深度,仍是当前研究的重点与难点。

为进一步推动老龄化桥梁结构健康监测技术在实际工程中的广泛应用,科研人员与工程技术人员需要紧密协同合作。科研人员应凭借深厚的理论知识储备,专注于前沿技术的探索与研发,如开发更精准的传感器系统和高效的数据处理算法;工程技术人员则需依据丰富的实践经验,在现场监测方案制定、设备安装与维护等环节发挥关键作用。双方持续开展深入研究,针对传感器长期稳定性差、数据传输可靠性低以及结构损伤识别准确率不高等技术难题展开联合攻关,致力

于通过技术创新与优化,提升监测系统的整体性能,为桥梁的安全运营提供坚实保障,确保其在复杂环境与长期使用过程中始终维持稳定状态。

5 结语

老龄化桥梁结构健康监测技术已取得显著进展,切实保障桥梁安全。展望未来,随着科技进步,传感器性能将不断提升,数据分析将更智能高效,有望实现全域全时精准监测,为桥梁全生命周期管理筑牢根基,让老龄桥梁持续稳健承载交通重任。

参考文献

- [1] 谢书建,蒋纤纤.无损检测技术在桥梁道路工程中的应用[J].建材发展导向,2025,23(06):31-33.
- [2] 冯旭.铁路复杂桥梁桥面附属施工关键技术研究[J].城市建设理论(电子版),2024,(36):141-143.
- [3] 黄文波,戚萱.桥梁智能健康监测技术及应用分析[J].高科技与产业化,2024,30(11):34-35.
- [4] 李君.智能传感技术在桥梁结构健康监测中的应用研究[J].智能建筑与智慧城市,2024,(11):167-169.
- [5] 付珍珍,王慧敏,范鹏震,等.桥梁结构健康监测技术的发展与应用研究[J].科技与创新,2024,(21):173-175+178.
- [6] 刘仕江.数字孪生技术在公路养护中的应用研究[J].江西建材,2024,(10):87-89.
- [7] 盛伟伟.物联网 RFID 技术在大跨径桥梁结构健康监测中的应用研究[J].铁道建筑技术,2024,(12):163-166.
- [8] 尹烜.桥梁智慧检测技术应用研究——以珠海燕羽大桥为例[J].新城建科技,2024,33(09):100-102.

版权声明: ©2025 作者与开放获取期刊研究中心(OAJRC)所有。本文章按照知识共享署名许可条款发表。

<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>

