

# 公路桥梁结构健康监测技术的研究与应用

夏广熙

中建新疆建工土木有限公司, 中国·新疆 乌鲁木齐 830054

**摘要:** 公路桥梁结构健康监测技术通过实时监测桥梁的关键参数, 提前发现潜在损伤, 优化维护策略, 提升安全性和使用寿命。论文探讨了主要技术, 包括传感器、无线传感网络、光纤传感、大数据及人工智能, 分析了技术应用中的挑战, 并展望了未来智能化趋势。

**关键词:** 公路桥梁; 结构健康监测; 传感器技术

## Research and Application of Health Monitoring Technology for Highway Bridge Structures

Guangxi Xia

China Construction Xinjiang Civil Engineering Co., Ltd., Urumqi, Xinjiang, 830054, China

**Abstract:** The health monitoring technology for highway bridge structures can detect potential damage in advance, optimize maintenance strategies, and improve safety and service life by monitoring key parameters of the bridge in real time. The paper explores the main technologies, including sensors, wireless sensor networks, fiber optic sensing, big data, and artificial intelligence, analyzes the challenges in technology applications, and looks forward to future trends in intelligence.

**Keywords:** highway bridges; structural health monitoring; sensor technology

## 0 前言

公路桥梁作为交通基础设施的关键组成部分, 承载着巨大的交通流量, 并且随着桥梁使用年限的增长以及交通负荷的增加, 桥梁结构的安全性和耐久性受到严峻考验。近年来, 环境因素如气候变化、地震和洪水等自然灾害进一步加剧了桥梁的结构退化。桥梁的安全问题已成为全球关注的焦点, 尤其是随着桥梁事故频发, 如何确保桥梁的长期安全运行成为工程界亟待解决的难题。为了应对这些挑战, 桥梁结构健康监测技术 (Structural Health Monitoring, SHM) 应运而生。该技术通过实时监测桥梁的结构状态, 能够提前发现潜在的损伤或异常, 从而避免重大事故的发生。这不仅有助于优化桥梁的维护策略, 降低运营和维护成本, 同时也能延长桥梁的使用寿命, 确保公众的交通安全<sup>[1]</sup>。因此, 研究和高效发展的桥梁结构健康监测技术, 不仅具有重要的工程意义, 也具有巨大的社会和经济价值。论文将通过探讨桥梁健康监测技术的核心理论和主要技术, 梳理当前的研究现状, 分析该领域面临的挑战, 并展望未来的发展趋势。

## 1 公路桥梁结构健康监测的理论基础

公路桥梁作为复杂结构, 其力学行为受多种因素影响, 包括自重、交通荷载、风荷载和温度变化等。这些因素可能导致桥梁在长期使用中出现裂缝、腐蚀和疲劳等损伤, 从而削弱其承载能力。因此, 了解桥梁的力学行为和损伤机理是开展结构健康监测的理论基础。

结构健康监测技术 (SHM) 旨在通过实时或定期监测桥梁关键参数, 评估其安全性。这项技术依赖于结构力学、

材料科学和信号处理等多学科理论。通过监测数据, 能够及时发现结构损伤并作出相应的评估和预警, 为桥梁的维护和修复决策提供科学依据。

健康监测中选取的关键指标包括应力、应变、位移、加速度、温度和振动等。应力和应变反映结构受力状态, 位移监测几何变形, 振动监测用于分析结构动力特性, 而温度则评估环境对桥梁的影响<sup>[2]</sup>。通过模态分析等理论方法, 能够识别结构的动力特性, 推断桥梁可能的损伤位置和程度。

总之, 公路桥梁结构健康监测的理论基础包括对桥梁力学特性和关键监测指标的理解, 以及基于监测数据的科学分析方法。这些理论为桥梁的长期安全运行提供了重要保障。

## 2 公路桥梁结构健康监测的核心技术

### 2.1 传感器技术

传感器技术是桥梁结构健康监测系统的基础, 它通过对结构的物理参数进行精确测量, 提供反映结构健康状态的关键信息。常见的传感器类型包括应变传感器、位移传感器、加速度计和温度传感器等。应变传感器主要用于监测桥梁结构的应变变化, 尤其在关键部位 (如主梁和支座) 布置传感器能够实时反映桥梁的受力和变形情况。位移传感器通常用于测量桥梁的沉降、倾斜等几何形变, 尤其在桥梁基础设施的长期监测中, 位移数据是评估桥梁稳定性的重要依据<sup>[3]</sup>。加速度传感器则用于记录桥梁在动态荷载下的振动响应, 通过分析这些振动数据可以识别结构中的潜在损伤。此外, 温

度传感器监测环境温度的变化,帮助理解温度应力对桥梁结构的影响。传感器布置的合理性和数据采集的精度直接影响监测系统的有效性。

## 2.2 无线传感网络技术

无线传感网络技术(WSN)在桥梁健康监测中应用广泛。它通过无线方式传输传感器采集的数据,减少了传统有线传输中的安装复杂性和维护成本。无线传感器节点通过自组网方式相互通信,数据通过中继节点传输至中央数据处理系统。由于桥梁结构通常跨度较大,WSN的多跳传输机制可以有效覆盖整个桥梁结构区域。WSN技术在桥梁监测中的优势在于布设灵活、可扩展性强,并能够实时监测桥梁的健康状况。随着无线通信技术的发展,传感器节点的功耗和通信延迟问题逐步得到改善,使得无线传感网络在桥梁监测领域得到了更广泛的应用。

## 2.3 光纤传感技术

光纤传感技术是结构健康监测中应用较为先进的技术之一,尤其适用于桥梁等大型结构的监测。光纤传感器基于光波在传输过程中的调制效应,可以高灵敏度地检测结构的应变、温度等参数。光纤布拉格光栅(FBG)传感器作为光纤传感的代表,具有抗电磁干扰、耐腐蚀、重量轻等优点,特别适用于恶劣环境下的长期监测。FBG传感器可以沿桥梁的关键结构部分布置,通过测量反射光波的波长变化来判断应变和温度的变化<sup>[4]</sup>。这种技术在桥梁的长期监测中表现出很高的稳定性和准确性,尤其在应对环境干扰方面具有显著优势。

## 2.4 动态监测与模态分析技术

动态监测技术通过记录桥梁在车辆荷载、风载等外部作用下的振动响应,分析结构的动力特性。模态分析技术作为动态监测的重要手段,能够通过提取结构的固有频率、振型和阻尼比等模态参数来识别桥梁的动力学行为。当桥梁出现损伤时,其模态参数会发生明显变化,因此,通过模态分析可以有效识别结构中的损伤位置和程度。动载荷下的模态响应不仅可以反映桥梁整体的健康状况,还能够捕捉局部结构的异常,特别是在早期损伤检测中具有重要意义。

## 2.5 大数据与人工智能技术

随着桥梁健康监测技术的不断发展,大数据与人工智能技术逐渐成为监测领域的重要工具。健康监测系统产生的海量数据需要有效的存储、处理和分析。大数据技术通过集成多源数据,能够从海量监测数据中提取出有效信息。人工智能技术,尤其是机器学习和深度学习算法,在损伤识别和状态预测方面展现出强大的潜力。通过对历史监测数据的训练,机器学习模型可以自动识别结构的健康状态,提前预警可能的结构问题。深度学习技术则可以通过构建复杂的神经网络模型,自动学习和提取数据中的深层次模式,从而提高损伤检测的准确性。

## 2.6 无人机与视觉监测技术

近年来,无人机技术结合视觉监测逐渐应用于桥梁结构的外观检测。无人机的灵活性和高机动性使其能够在难以接近的桥梁部位进行检查,特别是在桥梁的高空和桥底部分。通过搭载高分辨率摄像头和红外成像设备,无人机能够捕捉桥梁表面裂缝、腐蚀、剥落等外部损伤情况。结合图像处理技术和计算机视觉算法,可以对桥梁表面的损伤进行自动识别与分类,从而提高外观检测的效率和精度。视觉监测技术通过大量图像数据的处理和分析,可以与结构健康监测数据相结合,为桥梁健康评估提供更加全面的信息支持。

# 3 结构健康监测技术的挑战与解决方案

## 3.1 技术成本与传感器布置难题

结构健康监测技术在桥梁工程中的应用面临的一个重要挑战是高昂的技术成本。大规模桥梁结构通常需要布置大量的传感器,以覆盖关键受力部位和薄弱环节。这种高密度传感器布置不仅增加了设备成本,还提高了施工与维护成本。此外,桥梁结构复杂多样,传感器布置需要根据结构形式、应力分布、交通流量等因素进行优化,以确保采集数据的全面性和准确性。不同类型的传感器适用于不同的监测目标。例如,应变传感器适用于局部应力集中区域,而位移传感器则适用于跨桥的整体形变监测。复杂的布置要求带来了设计难度,并进一步增加了项目的经济负担。因此,如何在降低成本的同时实现传感器的合理布置,成为桥梁健康监测技术应用的关键问题之一。

面对这些挑战,研究者提出了一些解决方案。例如,通过多功能传感器整合技术,一台传感器能够同时监测多个参数,减少了传感器数量的需求。另外,模块化、便携式的监测系统设计正在逐渐推广,使得在施工和后期维护过程中,系统的安装和调整变得更加灵活和经济。这些技术创新在一定程度上降低了桥梁健康监测的初始成本,提高了传感器布置的效率。

## 3.2 数据传输与处理的复杂性

在结构健康监测过程中,桥梁产生的监测数据量通常非常庞大,尤其是对于长期监测项目,数据传输与处理的复杂性成为另一个重要挑战。传统有线传输方式容易受到桥梁结构跨度、地理环境等因素的影响,布线困难且成本高昂。无线传感网络虽然在一定程度上解决了数据传输问题,但由于桥梁的跨度较大,无线信号在长距离传输中可能受到干扰,导致数据丢失或传输延迟。为了应对这些问题,近年来,低功耗广域网(LPWAN)技术逐渐被引入桥梁监测中,提供更远距离、更低功耗的数据传输能力。结合边缘计算技术,部分数据可以在传感节点本地进行预处理,仅传输关键信息至中央处理系统,减少了数据传输压力。同时,大数据处理平台的应用,能够在海量数据中提取有用信息,实现对结构健康状况的快速诊断和评估。

### 3.3 长期监测系统的稳定性与可靠性

桥梁结构健康监测系统的长期运行面临着设备稳定性和系统可靠性方面的考验。传感器和其他监测设备在长期暴露于户外环境时,可能受到温度变化、湿度、腐蚀等因素的影响,导致传感器性能退化甚至失效。此外,监测系统中的数据采集、存储和传输设备在长期运行中也存在硬件故障或电力供应不稳定的问题,尤其是在偏远地区的桥梁,监测设备维护困难,使得系统的稳定运行更具挑战性。解决这些问题需要加强对传感器设备的环境适应性设计,采用耐腐蚀、抗干扰的材料和技术。同时,监测系统可以引入冗余设计,通过冗余传感器和数据校验机制,提高系统在恶劣环境下的可靠性。此外,远程监控与自动故障检测功能的开发,也有助于及时发现设备故障并进行维护。

### 3.4 数据分析与决策支持的挑战

数据分析是桥梁健康监测系统的核心环节之一,由于桥梁结构复杂、环境多变,获取的大量监测数据往往存在复杂性和不确定性。不同类型的桥梁在受力模式、损伤机理等方面存在显著差异,如何从数据中提取有效的信息、进行准确的结构状态评估是一项重大挑战。传统的数据分析方法在应对多维数据和非线性损伤识别时,往往显得不足。随着机器学习和人工智能技术的引入,结构健康监测系统可以借助算法自动提取数据中的模式和特征,进一步提高损伤识别和健康评估的精度。然而,机器学习模型的构建与训练需要大量的标注数据,而标注工作通常耗时耗力且成本较高。此外,机器学习模型对监测数据的依赖性较强,数据异常或缺失可能影响模型的准确性。因此,未来的研究方向应包括开发更加高效的无监督学习算法和数据增强技术。

### 3.5 标准化与规范化的挑战

桥梁结构健康监测技术在全球范围内应用广泛,但在标准化和规范化方面尚存不足。不同国家和地区在桥梁监测系统的设计、安装、数据采集和分析方法上缺乏统一的标准,这导致了监测结果的可比性和可靠性存在差异。没有统一的标准,桥梁监测项目之间的经验和难以共享和推广,监测结果的可信度和公认度也难以保障。为了解决这一问题,亟须制定国际性或区域性的桥梁结构健康监测技术标准,涵盖传感器类型选择、监测指标设定、数据分析方法和结果评估体系等内容。此外,标准化还可以促进行业内部的技术交流与合作,加快新技术的推广和应用,并提高监测系统在实际工程中的实施效果。

## 4 桥梁结构健康监测技术的发展趋势

桥梁结构健康监测技术的未来发展呈现出多元化和智能化的趋势。新型传感器技术的发展为监测精度和覆盖范围提供了更多可能。纳米材料和智能材料等新兴传感器不仅具有更高的灵敏度,还能适应更复杂的环境条件,使得桥梁健康监测变得更加高效和可靠。

多技术融合是另一个重要趋势。随着大数据、人工智能、云计算和物联网等技术的快速发展,桥梁监测系统能够整合多种技术手段,实现对桥梁结构的全面监测。通过数据融合,健康监测系统可以更加准确地识别损伤、评估结构状态,并提供智能化的决策支持。人工智能,尤其是机器学习和深度学习技术,将在损伤预测、健康评估和维护决策中扮演关键角色。

智能化桥梁健康监测体系的构建也是未来的发展方向。基于传感器网络、无人机、智能算法的系统将能够实现桥梁的全生命周期管理,从设计、施工到运行维护,实现主动预防和维护管理的智能化。未来,随着 5G 通信技术的广泛应用,桥梁监测的实时性和数据传输能力将进一步提升,使得桥梁监测系统更加智能和高效。总的来看,桥梁结构健康监测技术将朝着更加智能、精准、经济高效的方向发展,以应对日益复杂的基础设施维护需求。

## 5 结语

桥梁结构健康监测技术对于保障桥梁的安全运行和延长其使用寿命具有重要意义。通过应用传感器技术、无线传感网络、光纤传感、大数据和人工智能等多种手段,桥梁的损伤识别和健康评估得到了显著提升。然而,技术成本、数据处理、系统可靠性等方面仍然面临挑战。随着新型传感器和智能化技术的发展,未来的桥梁健康监测系统将更加高效和智能,推动桥梁管理的全面升级。

### 参考文献:

- [1] 张敬伟,满新杰.结构健康监测技术在公路桥梁养护中的应用[J].交通节能与环保,2023,19(S1):143-146.
- [2] 章关永.光纤传感器技术在桥梁状态监测中的应用[J].世界桥梁,2002(2):27-29+32.
- [3] 刘首林.无线传感网络在桥梁健康监测中的应用分析[J].城市建设理论研究(电子版),2019(21):44-45.
- [4] 龙志辉,张海波.光纤传感技术的桥梁结构检测分析[J].运输经理世界,2022(31):104-106.