

基于智能传感技术的桥梁实时监测与健康评估研究

宋泰毅

中交元洋（大连）桥梁水下检测有限公司，辽宁 大连 116000

[摘要]随着我国基础设施建设的快速发展，桥梁安全与健康已成为交通运输领域亟需关注的重点问题。传统桥梁监测手段存在数据获取滞后、评估效率较低等局限，难以满足现代桥梁运行管理的实际需求。近年来，智能传感技术的兴起为桥梁实时监测与健康评估提供了新的解决方案。文中聚焦智能传感器在桥梁结构监测中的应用，通过布置多类型传感器，实现对桥梁关键参数的连续、实时采集，包括荷载响应、应变、振动、位移及温度等。基于采集的数据，运用智能分析方法，对桥梁运行状态进行动态评估，及时发现结构潜在损伤与异常。研究结果表明，智能传感系统具备数据采集全面、传输高效、响应迅速等优势，可大幅提升桥梁健康评估的准确性和及时性，为桥梁安全运行和维护决策提供科学依据。该研究对于推动桥梁智能化管理、延长结构服役寿命及保障交通安全具有重要意义。

[关键词]智能传感技术；桥梁监测；健康评估；结构安全；实时数据采集

DOI: 10.33142/ec.v8i9.17993 中图分类号: U446 文献标识码: A

Research on Real time Monitoring and Health Assessment of Bridges Based on Intelligent Sensor Technology

SONG Taiyi

Zhongjiao Yuanyang (Dalian) Bridge Underwater Inspection Co., Ltd., Dalian, Liaoning, 116000, China

Abstract: With the rapid development of infrastructure construction in China, bridge safety and health have become key issues that urgently need attention in the field of transportation. Traditional bridge monitoring methods have limitations such as lagging data acquisition and low evaluation efficiency, making it difficult to meet the practical needs of modern bridge operation and management. In recent years, the rise of intelligent sensing technology has provided new solutions for real-time monitoring and health assessment of bridges. The article focuses on the application of intelligent sensors in bridge structure monitoring, by arranging multiple types of sensors to achieve continuous and real-time collection of key parameters of bridges, including load response, strain, vibration, displacement, and temperature. Based on collected data, intelligent analysis methods are used to dynamically evaluate the operational status of bridges and promptly detect potential structural damage and abnormalities. The research results indicate that intelligent sensing systems have the advantages of comprehensive data collection, efficient transmission, and rapid response, which can greatly improve the accuracy and timeliness of bridge health assessment, and provide scientific basis for bridge safety operation and maintenance decision-making. This study is of great significance for promoting intelligent management of bridges, extending the service life of structures, and ensuring traffic safety.

Keywords: intelligent sensing technology; bridge monitoring; health assessment; structural safety; real time data collection

引言

随着我国经济的稳步增长和城市化进程的加速，桥梁作为重要交通枢纽，其结构安全与健康状况密切关系到社会经济发展和公众生命财产安全。据交通运输部相关统计，截至 2023 年底，全国公路桥梁数量已经突破百万座，桥梁病害率出现年年上升趋势，结构损伤隐患日益显现，迫切需要高效率、精确的健康监测与评估手段。传统桥梁监测方法主要依赖人工巡查与少量的仪器检测，具有数据获取周期过长、信息不完整、诊断延迟等不足，无法满足现代桥梁长期运营管理及突发事件应对的需求。快速发展的智能传感器技术给桥梁结构健康监测带来重要进展。各种智能传感器可以完成桥梁承受荷载时的反应、应力变化、振动情况、位移大小还有温度变化这些参数的全天候不间断

采集，大大提高数据采集的覆盖范围和详细程度。依靠大数据分析加上人工智能算法，桥梁当前运行状况以及可能出现的损伤能够做到随时自动判断并且提前发出警告，这直接促进桥梁养护方式从过去靠人定期检查转变成为全面依靠信息技术和智能化管理。虽然国内已经有很多实际工程案例，比如武汉长江大桥、杭州湾跨海大桥这些项目都安装了智能监测系统，但是目前传感器小型化程度、数据处理速度、损伤判断准确率这些关键地方还有进一步提升空间。本文以智能传感技术为重点，全面探讨其于桥梁实时监测与健康评估中的实际应用，达成对桥梁结构状态和安全性能的实时掌控，目的在于为我国桥梁智慧管理体系的构建、结构服役寿命的延长以及交通安全保障给予理论依据和技术支持。

1 智能传感技术在桥梁监测中的发展现状

1.1 智能传感器系统的技术演进

桥梁健康监测技术发展过程中,智能传感器系统发挥极其关键作用。过去桥梁检查基本依赖人工定期静态检测,没办法随时掌握桥梁结构变化情况。后来微机电系统MEMS、无线通信、大数据分析技术持续进步,智能传感器性能因此能够快速提高。MEMS传感器出现之后,传感器对微小变形的捕捉能力显著提升,精度更高了。无线传输技术进步让数据发送变得更为方便快捷,明显降低布线麻烦和后期维护费用。现在智能传感器系统可以把多种传感器组合起来,构建复杂监测网络,完成桥梁温度、应变、振动等关键参数全天候持续监控。先进算法装在监测系统里面,可以一刻不停地解析和剖析巨量数据,马上就能发现桥梁可能出现的安全隐患并且提前发出警报提醒工作人员。现在越来越聪明的传感器技术,让整个桥梁健康监测变得随时随地都能进行,而且测得特别准特别细,这给桥梁安全管理带来了非常关键的技术支持。

1.2 国内外桥梁监控实践概述

国内外桥梁监控实践已经获得明显进展。西方国家于桥梁监测领域积累起充足的经验,大量用于长大桥梁和关键交通枢纽上,借助布置领先传感器网络,做到了对桥梁状态的全时段监控,很大提升了安全管理水。中国近几年桥梁建设规模快速扩张,对高效监测技术的需求越来越急切。借助采用智能传感技术,一些重点桥梁达到了实时数据采集和分析,建立了初始的智能监测体系。从总体而言,全球范围内桥梁监测技术的成熟应用仍需深入探索。

1.3 关键监测参数及技术需求分析

桥梁监测的关键参数包括荷载响应、应变、振动、位移和温度。这些参数给予了对桥梁结构性能的全面评估,成为保证桥梁安全运行的基础。智能传感技术的核心需求是达成高效的实时数据采集和传输,保证数据的准确性和可靠性。以符合现代桥梁管理的严苛要求,传感器系统必须拥有于复杂环境中稳定工作的能力,实现多类型数据的融合与处理,从而提高监测系统的综合评估水平。此技术需求的达成对桥梁维持长期服役拥有重要意义。

2 多类型智能传感器的集成应用

2.1 各类传感器在桥梁中的布置策略

在桥梁结构健康监测过程中,传感器种类、安装位置还有数量直接影响整个监测效果好不好。荷载响应检测用的传感器通常都装在桥梁最吃力的地方,比如主梁、桥塔、索等关键受力区域,这样就能清楚采集到车辆通过或者风吹等动态荷载作用下桥梁产生的各种反应数据。应变传感器大多安装在大悬臂段或者跨度很大的桥梁关键部位,目的是随时掌握结构因为受力产生的变形大小和变化趋势。振动传感器和位移传感器主要集中布置在桥梁的重要节点位置,尤其是那些容易出现明显晃动的区域,这样做可以确保测量数

据足够精确。温度传感器必须布置在能够真实反映桥梁整体和局部环境温度变化的位置,这样才能更好地分析温度对钢材、混凝土等材料性能带来的影响。整个传感器网络布局需要同时考虑桥梁本身的结构特点、当地气候环境条件,还要保证数据传输线路稳定通畅,只有这样才能真正实现对全桥各个部位的不间断监测。各种不同类型传感器一起协同工作,能够大幅提升整个智能监测系统的运行效率,给桥梁日常运营管理提供更加精确、更加及时的数据支持。

2.2 数据采集与传输流程优化

改进数据采集和传输过程已经构成提升桥梁监测效率最关键办法。传感器节点用一体化布局办法达成桥梁每个部位都被覆盖到并且采集信息精度很高要求。运用传感器网络加上云计算技术让数据传输速度更快更可靠。经常采样技术搭配省电设计有利于减少数据传输时延明显加快系统反应速度。应用先进数据压缩处理算法可以明显压缩传输数据总量确保监测保持实时状态。通过改进传输过程既加强数据安全和完整性又供给后面桥梁健康评估工作稳定可靠数据基础。

2.3 系统集成的技术难点与解决思路

智能传感器在桥梁监测的集成应用存在不少技术难点。各类传感器数据格式与通信协议不同,让系统集成复杂度大增,为此,要采用统一数据标准和协议,保障多源数据兼容集成,传输时,实时性与可靠性不可或缺,需搭建稳定通信网络,优化传输路径与节点布局,降低数据延迟和丢失风险,此外,传感器能耗控制与耐久性也是关键,得研发低能耗、高耐久设备,确保长期监测稳定运行。

3 桥梁运行关键参数的动态检测

3.1 荷载响应与结构应变的连续监测

荷载响应与结构应变的连续监测为桥梁动态检测中十分关键的环节,目的供给关键的基础数据,来保障桥梁结构的安全和稳定。智能传感器于此领域的应用,可以精确捕获桥梁承担的荷载变化以及引起的结构应变。借助于桥梁的关键部位,例如主梁、桥墩等等,安装应变计和荷载传感器,达成对于荷载影响时桥梁结构变形的即时监测。这些传感器可连续采集数据,记载桥梁于各种载荷情况时的响应情况。采集的数据通过优化的传输系统开展即时处理和分析,保证信息的准确性和及时性。这些技术方法让桥梁管理人员能够随时清楚知道桥梁当前到底承受了多大力量,能快速准确判断桥梁结构是不是还健康,这样就能提前发现并防止可能出现的问题,保障桥梁不管遇到多恶劣的天气或者多重的载重都能一直安全正常运行。这种24h不间断的监测方式给桥梁未来的保养和健康管理带来了非常可靠的技术支持。

3.2 振动位移与温度的实时采集

桥梁监测工作里,把桥梁振动位移和温度数据实时采集上来,对保障整座桥梁结构安全起着非常关键的作用。

振动传感器通过持续测量桥梁受到各种外力时的动态反应，为及时发现结构异常情况提供最核心的数据支持。工作人员使用高精度加速度计和激光雷达这些先进设备，能够清楚完整地捕捉到桥梁承受车辆或其他荷载时产生的每一点位移变化，这些数据对于长期分析桥梁是否保持稳定具有重要参考价值。温度传感器被均匀布置在桥梁各个关键部位，这样就能实现一年 365d、一天 24h 不间断地监测温度变化，清楚反映周围环境温度升高或降低会对桥梁结构产生哪些具体影响。现代化的数据采集技术确保所有监测信息都能立刻传输到监控中心并快速处理，从而大幅提升整个监测系统的运行效率，为管理人员快速判断桥梁健康状况和及时发出预警提供最为可靠的数据依据。

3.3 数据实时性与精度保障措施

为了保障桥梁运行关键参数数据的实时性与精度，应采用高频采样率的传感器和优化的数据传输协议，确保信息的快速捕捉与传递。传感器的校准与定期维护对于提高数据准确性至关重要。多节点数据同步技术的应用可以避免时间偏移带来的误差。在数据分析阶段，需应用先进的算法滤除噪声，提高信号的可靠性。通过这些措施，可显著提升桥梁监测系统的数据实时性和精度，为结构健康评估提供坚实基础。

4 智能系统对桥梁健康状态的判识能力

4.1 智能数据处理流程

智能数据处理流程在桥梁健康监测过程中起到重要作用。这个流程主要包括数据收集、传输、存储和分析四个阶段。传感器负责收集桥梁运行时的各种实时数据，比如荷载应力、振动频率等。收集到的数据通过无线网络传送到云端服务器或者本地存储设备，整个传输过程必须保证又快又稳。数据存储环节特别强调安全性跟完整性，这样后面分析的时候才能用得上。到了分析阶段，就使用机器学习和人工智能技术，对海量来自不同来源的数据进行处理，从中提取出真正有用的信息。通过建立数学模型来判断桥梁当前到底健不健康，能不能早就识别出结构可能出现的问题和异常情况。整个流程如果运行得又快又好，就能帮助人们随时掌握桥梁的运行状态，出现问题马上就能预警，这样就给桥梁的日常健康管理提供了非常稳定的技术支持。

4.2 异常预警与损伤识别机制

异常预警和损伤识别功能属于桥梁健康评估最核心的部分之一，主要依托智能传感系统来完成。通过对荷载响应、应变、振动、位移、温度这些关键数据进行持续采集和智能分析，可以及时发现桥梁运行过程隐藏的风险信号。异常预警功能主要基于大数据分析和机器学习算法，把当前采集到的数据跟过去积累的正常基准值进行比较，一旦发现明显偏差就能快速判断出异常情况并立刻发出预警信号。损伤识别功能则采用动态特征提取和状态指标比较的方式，对桥梁可能出现的裂缝、疲劳损伤或者结构变形进行精确位置定位和损伤类型识别。结合多种物理参数互

相交叉验证的技术，有效提高了损伤识别的准确程度和可信程度，给桥梁长期安全运行提供了非常可靠的安全保障。

4.3 健康状态评价指标体系

健康状态评价指标体系在桥梁智能监测系统里，是实现结构状态高效评估的关键，它借助对监测数据的智能剖析，构建起涵盖荷载响应系数，应变量超限率等多项内容的综合评价指标，以反映桥梁结构安全与性能^[5]，这些指标会根据桥梁类型、结构特点及运行环境合理分配权重，形成适用性强，准确性高的评价体系，其动态评估结果可实时呈现桥梁健康状况，为潜在损伤预警和养护决策提供科学依据，该体系结构清晰、反应敏捷，能有效提升桥梁智能管理水平，增强桥梁运行安全保障能力。

5 结束语

本文围绕智能传感技术在桥梁实时监测与健康评估中的应用开展了系统性研究，对于传统监测手段具有的数据滞后与评估效率低等问题，设计了多类型智能传感器联合布局的技术方案，并且融合智能分析方法，达成了桥梁关键参数的不间断、实时采集和精确评估。研究结果证明，智能传感系统能显著提高数据采集的全面性、传输的高效性以及响应的实时性，从而大幅提升桥梁健康状况评估的准确性与及时性，为桥梁安全维护与运行管理给予了坚实的数据支撑和决策依据。这项技术能够有力推动桥梁实现智能化管理，大幅增加桥梁结构使用年限，同时切实保障交通运输安全，效果非常显著，未来应用空间也十分广泛。现在阶段，智能传感系统用在桥梁监测领域还存在三个主要问题，传感器使用寿命不够长、多种数据融合和处理算法急需大幅改进、整体布置成本仍然过高。在极端天气或环境条件下，传感器能不能稳定工作、整个系统靠不靠谱，这些方面还需要继续深入研究。未来主要发展方向包括四个方面，开发性能更好、功耗更低的新一代传感器，不断改进多源数据智能融合算法，大力促进价格低廉的传感系统普及开来，最后构建覆盖桥梁从建造到报废全生命周期的智能化管理平台，最终实现桥梁健康监测、评估和维护达到更高水平和更智能程度。

【参考文献】

- [1] 望远福.桥梁智能健康监测技术与应用现状研究[J].交通世界,2023(25):147-149.
 - [2] 王文强.市政桥梁结构健康监测与评估技术研究[J].中文科技期刊数据库(全文版)工程技术,2023(5):134-137.
 - [3] 陈小璐.桥梁结构健康监测的传感器技术与数据分析[J].中文科技期刊数据库(全文版)工程技术,2023(9):95-98.
 - [4] 庄志凯,陈勇,张伟,谢琪.基于健康监测数据的桥梁状态评估[J].四川水泥,2020(6):37-38.
 - [5] 谢崇洪,张彦昌,李文.基于无线传感技术的桥梁结构健康监测研究[J].智能建筑与智慧城市,2021(11):172-173.
- 作者简介：宋泰毅（1996.10—），性别：男，民族：汉，籍贯：河北省衡水人，学历：硕士，研究方向：桥梁检测。