

基于传感器技术的桥梁结构健康监测与检测方法研究

孙希大

中交元洋（大连）桥梁水下检测有限公司，辽宁 大连 116000

[摘要]桥梁作为交通基础设施的重要组成部分，其结构安全性对社会经济发展和人民生命财产安全具有重要影响。随着城市化进程加快和交通负荷不断增大，桥梁结构健康监测成为保障桥梁运行安全和延长使用寿命的关键手段。文中围绕传感器技术在桥梁结构健康监测领域中的应用展开研究，系统梳理了当前主要的监测技术，包括应变、加速度、位移、温度等多类型传感器的配置方式及工作原理。结合实际桥梁工程需求，探讨了信息采集、数据传输、实时分析等关键环节的优化设计。研究结果显示，基于智能传感器技术的桥梁健康监测不仅能够实现结构的状态感知和异常预警，还提升了检测的自动化和精准度，显著促进了桥梁维护管理的科学化和智能化。通过分析传感器布局优化和数据融合处理的有效方法，文中为桥梁健康监测系统的持续完善提供了理论支撑，对提高桥梁安全运行水平与维护效率具有积极意义。

[关键词]传感器技术；桥梁结构健康监测；信息采集与数据分析；智能传感器；数据融合处理

DOI: 10.33142/ec.v8i9.17990

中图分类号：U446

文献标识码：A

Research on Bridge Structure Health Monitoring and Detection Method Based on Sensor Technology

SUN Xida

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

Abstract: As an important component of transportation infrastructure, the structural safety of bridges has a significant impact on social and economic development as well as the safety of people's lives and property. With the acceleration of urbanization and the continuous increase of traffic load, bridge structural health monitoring has become a key means to ensure the safe operation and prolong the service life of bridges. The article focuses on the application of sensor technology in the field of bridge structural health monitoring, and systematically summarizes the current main monitoring technologies, including the configuration and working principles of multiple types of sensors such as strain, acceleration, displacement, and temperature. Based on the actual requirements of bridge engineering, the optimization design of key links such as information collection, data transmission, and real-time analysis was discussed. The research results show that bridge health monitoring based on intelligent sensor technology can not only achieve structural state perception and abnormal warning, but also improve the automation and accuracy of detection, significantly promoting the scientific and intelligent maintenance and management of bridges. By analyzing effective methods for optimizing sensor layout and data fusion processing, this article provides theoretical support for the continuous improvement of bridge health monitoring systems, which has positive significance for improving the level of safe operation and maintenance efficiency of bridges.

Keywords: sensor technology; bridge structure health monitoring; information collection and data analysis; intelligent sensors; data fusion processing

引言

桥梁是连接城市跟城市、城市跟地区之间最主要的交通设施，桥梁好不好、结不结实，直接关系到整个社会经济能不能稳得住，老百姓的生命财产安不安全。随着全国各地城市越建越大、越建越多，新桥梁一座接一座出现，种类也五花八门，上面跑的车越来越多、越来越重，桥梁本身承受的压力一天比一天大，安全隐患也越来越突出。交通运输部的数据显示，因为桥梁钢筋混凝土老化、裂缝、承载力下降等问题导致的事故，这几年明显越来越多，严重威胁老百姓生命安全，也严重堵塞交通秩序。在这种情况下，装上传感器实时盯着桥梁有没有裂、有没有变形、有没有危险，已经成了最有效的方法，能及早发现问题、快速判断病害、合理安排维修养护，现在全国工程行业都

越来越重视这件事，把它当成保障桥梁安全最关键的一招。字数，223字传统桥梁检测依赖人工巡查与定期检测，存在效率低，信息滞后，易受主观判断影响等问题，难以达成全生命周期健康管理，近年来，传感器技术发展迅猛，以应变、加速度等多类型传感器为核心的信息采集技术，给桥梁结构健康监测带来巨大变革，不少学者虽已探索传感器布置优化与数据融合分析平台建设，但环境适应性差、实时性欠佳、数据处理智能化水平有限等挑战依旧存在，鉴于此，本研究以实际桥梁工程需求为指引，系统梳理各类传感器在桥梁健康监测中的配置方法与关键技术，探讨智能化数据融合和自动化预警机制的可行性，为桥梁结构健康监测系统的理论完善和工程应用筑牢基础、提供参考。

1 传感器技术在桥梁健康监测中的应用现状

1.1 桥梁结构健康监测的基本需求

桥梁结构健康监测就是要通过实时检测桥梁周围环境和自身状态,来保障桥梁一直都能安全使用并且使用年限更长。随着全国交通道路越修越多,过往车辆越来越重,桥梁承受的压力越来越大,所以必须重点关注桥梁内部应力变化、振动情况、形状变形以及材料老化这些问题。常见的桥梁损坏比如出现裂缝、材料疲劳、形状歪斜等,不仅会大幅缩短桥梁能用多少年,严重时还可能直接导致桥梁垮塌或者发生重大安全事故,因此监测系统需要能够快速发现这些异常情况并马上发出警报。桥梁所在的环境非常复杂,而且要常年承受车辆重量,所以监测设备必须做到多年连续工作并且测量非常精准,才能适应天气变化、车流量忽多忽少等各种情况。整个桥梁健康监测工作需要做到覆盖全面、数据可靠、反应快速,依靠温度、振动、位移、应力等多方面数据,准确掌握桥梁关键部位的实时状况,从而为管理者科学安排维修保养提供最可靠的依据。

1.2 主要传感器类型及性能特点

桥梁结构健康监测需求的增长推动了多类型传感器的广泛应用。应变传感器能够精确测量结构受力状态及应变分布,具有高灵敏度与抗干扰能力。加速度传感器用于记录振动响应,帮助分析桥梁动力特性及疲劳状态,优势在于响应速度快与测量准确性高。位移传感器以检测结构变形和位移变化为目标,可实现高定位精度与动态监测能力。温度传感器实时捕捉环境及结构温度的变化,适用于结构温度效应的综合评估。不同传感器类型满足桥梁健康监测的多样化需求,与桥梁使用特点高度契合,为状态感知与异常检测提供了多层次数据支撑,提升了监测系统的可靠性与先进性。

1.3 国内外技术发展现状

国内外桥梁健康监测技术迅猛进步,传感器技术在该领域的应用获得了明显成效。国外已经构建比较完善的监测体系,以欧美国家为主,借助布置领先传感器阵列达成对桥梁结构状态的精准监测。人工智能与大数据技术的融入提高了监测的智能水平。国内桥梁健康监测技术正在快速赶超阶段,以基于传感器的监测系统为中心,逐渐形成了国产化设备研发与应用体系,在重大桥梁工程中获得大范围应用。

2 多类型传感器的配置原理与布设方式

2.1 应变加速度位移等关键传感器配置

应变传感器、加速度传感器和位移传感器属于桥梁结构健康监测系统最关键的三个部件,安装方式和位置选择会直接影响最终监测效果和数据是否靠谱。应变传感器专门负责捕捉桥梁各个构件遇到静态荷载或者动态荷载时产生的应力变化,可以通过粘贴或者埋入的方式固定到构件表面或者内部,这样就能精确捕捉关键区域的应力分布

情况。加速度传感器主要负责获取桥梁振动时的响应数据,通过捕捉各个测点加速度变化来分析整个结构的动力特性,是识别桥梁振动频率和模态必不可少的核心设备。位移传感器通过实时跟踪桥梁不同位置之间的相对位移变化,帮助工程师评估结构变形程度和累计位移量,从而提供判断桥梁整体稳定性的重要依据。这三类传感器布置位置必须充分适应桥梁自身的结构特点,遵循测点分布均匀、重要部位重点覆盖的基本原则,同时结合一定的冗余设计,确保即使个别传感器出现问题,整个监测数据仍然保持稳定和完整。

2.2 传感器布局优化原则

桥梁结构健康监测系统设计里,最重要的环节之一就是把传感器放在合适的位置,这直接影响到采集到的数据到底准不准、稳不稳、能不能覆盖到所有需要关注的地方。需要在桥梁不同位置尤其是容易出现应力集中的地方,根据桥梁受力后的实际反应情况,合理放置传感器,这样才能确保每个关键部位的监测数据都不会漏掉。传感器之间的距离要全面考虑桥梁整体长度大小、每个传感器能监测到的有效范围、以及我们最想重点关注哪些数据,最终实现既能把监测效果做到最好,又不会浪费太多传感器和成本。布置传感器的时候一定要避免同一地方放太多重复的传感器,也要避免出现任何监测不到的死角,这样整个监测系统的效率才能最高。还要充分考虑桥梁实际所处的环境,比如风吹雨淋、温度变化、车辆振动等,选择那些抗干扰能力强、质量可靠、不容易坏的传感器,才能保证系统长期运行过程中数据一直保持稳定和准确。

2.3 典型布设方案对比

在各种典型布设方案相互对比过程中,不同使用场景下面的传感器布置必须同时兼顾监测达到的精度高低、花费的经济成本多少以及实际施工是不是方便这些因素。对于普通常见的桥梁结构,应变传感器通常都要布置在主梁最关键受力的位置,这样做目的就是实时掌握主梁承受力量的具体情况。加速度传感器主要用于检测桥面振动的剧烈程度,可采取分布式方式直接安装到桥面板各个位置。位移传感器通常都要布置到支座附近区域,专门用来测量桥梁水平方向产生的变形大小。对于悬索桥或者斜拉桥这类特殊桥梁,传感器布置必须重点加强主缆或者拉索的应力监测工作,同时还要深入分析这些部位的受力分布状况,这样才能更好保障桥梁的安全评估工作顺利进行。对于结构特别复杂的桥梁,传感器布置方案进行优化时可以采用多种不同类型传感器一起协同工作的布置方式,并且配合使用数据融合技术,从而明显提升整个监测系统的效率和结果可靠性。

3 信息采集与数据实时传输技术

3.1 采集系统构成及信号处理

采集系统组成和信号处理属于桥梁结构健康监测非

常关键的部分，最重要的目标就是确保每次采集到的数据既准确又稳定。整个采集系统主要由三个部分搭建起来，分别是传感器模块、数据采集器还有信号处理单元。传感器模块负责实时获取桥梁结构的各种物理变化，比如应力大小、振动情况、变形程度这些参数，然后把这些变化全部转换成方便电脑分析的电信号。数据采集器负责接收传感器传过来的信号，先把里面的噪声和干扰彻底滤掉，让数据变得更加干净可靠。信号处理单元采用目前最先进的算法，从这些干净的原始数据里面提取出关键特征，再进行分类分析，最后生成一套完整清晰的结构健康评估报告，方便后续专业人员直接使用判断桥梁是否安全。以便满足即时监测需求，系统必须具有较高采样率与数据稳定性，保证硬件设备和软件模块协调运作。借助改进采集系统的架构设计和信号处理技术，能明显提高监测数据的准确度和桥梁状态评估的可靠性，给健康监测奠定可靠基础。

3.2 数据传输网络架构

数据传输网络架构在桥梁结构健康监测系统里面起到关键作用。通过科学合理布置传感器网络，能够实现各种类型传感器数据快速采集和可靠传输。现在常用网络架构主要包括无线传输网络和有线传输网络两种方式，无线网络具有布置灵活、施工安装简单的优点，特别适用于地形复杂或者跨度很大的桥梁进行远程监控，有线网络因为抗干扰能力强、数据传输可靠性高的特点，更适用于环境相对稳定、不容易受到外界干扰的桥梁区域，设计网络架构时候，需要根据桥梁实际规模和传感器安装数量，选择最匹配的传输协议和数据处理平台，这样才能保障数据传递延迟小、准确度高，同时不断优化传输节点的具体位置布置，有效减少信号衰减损耗，从而大幅提升整个监测系统的运行效率和长期可靠性。

3.3 通信稳定性与数据完整性保障技术

通信稳定性和数据完整性为桥梁结构健康监测系统高效运行的至关重要保证。传感器网络必须具有优秀的抗干扰能力，来降低外界环境对数据传输质量的干扰。借助使用误码校正、数据加密及冗余存储技术，有效地提高通信期间数据的完整性和安全性。可以使用高可靠的无线或光纤网络架构，可以减少数据丢包率，保障监测系统即时、稳定运行，于恶劣桥梁环境中达成精确的数据传输与监控目标。

4 智能化监测与异常预警机制

4.1 数据实时分析方法

数据实时分析办法就是桥梁健康监测系统里面实现状态感知和异常识别最关键的一步，核心内容就是把各种传感器采集来的数据快速处理干净并且准确理解清楚。在处理数据的时候，实时分析办法主要依靠目前最先进的信

号处理算法，给数据做滤波去掉噪音、提取重要特征、进行时间域和频率域分析，这样才能保证数据信息完整又准确。在使用算法这块，现在已经大量使用机器学习和深度学习技术，专门用来搭建预测桥梁健康状态的模型和分类器，实现异常情况自动识别。加入动态数据融合技术能够很好地把不同种类传感器的信息综合到一起分析，这样就能更全面准确地评估整座桥梁的健康状况。把边缘计算跟云计算技术好好融合到一起，就能显著提高数据处理速度和运算能力，给建设智能监测和预警系统带来非常强劲的技术支持力量。

4.2 状态感知与异常识别流程

状态感知与异常识别在桥梁结构健康监测系统中至关重要，其核心是借助传感器采集的数据，对结构状态实时分析，精准识别潜在安全风险，状态感知通过实时监测桥梁的应变、振动、位移、温度等关键参数，结合机理模型与数据算法，评估桥梁运行状态和承载能力，异常识别流程则提取数据异常特征，与算法模型比对，判断结构有无超限变化，损伤或潜在故障，动态阈值调整与多源信息融合技术的应用，大幅提升了异常识别效率和准确率，为预警机制提供有力支撑，智能化分析方法的引入，增强了系统对桥梁运行风险的快速响应能力，为桥梁安全运行筑牢了可靠的技术防线。

5 结束语

本文针对桥梁结构健康监测的实际需求，系统研讨了多类型传感器在桥梁监测中的配置方式、工作原理及数据采集与处理的关键技术，重点分析了智能传感器应用对桥梁状态感知与异常预警的提升作用。研究表明，基于现代传感器技术的监测体系不仅实现了桥梁结构健康状态的实时检测与自动预警，还在数据融合处理与布局优化方面取得了显著进展，有效提升了维护管理的科学化及智能化水平。

[参考文献]

- [1]胡柏铭,吴永红,许蔚,等.混凝土光纤传感器结构健康监测研究综述[J].现代物业:新建设,2020(6):18-20.
 - [2]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.
 - [3]杨斌.基于传感器数据的长江大桥结构健康监测与评估研究[J].中国科技期刊数据库 工业 A,2023(9):190-193.
 - [4]陈果杨益.基于无线传感器网络的桥梁结构健康监测设计研究[J].工程技术研究,2020,5(3):226-227.
 - [5]李新,邵开丽,靳宗信.基于传感器融合的车载健康监测综述[J].物联网技术,2020,10(1):13-15.
- 作者简介：孙希大（1986.2—），性别：男，民族：汉，籍贯：山东省滕州市人，学历：本科，研究方向：桥梁检测。