

Research on the Application of Bridge Structure Health Monitoring and Evaluation System

Yufu Pu

Sujiao Group Testing and Certification Co., Ltd., Nanjing, Jiangsu, 211112, China

Abstract

This article conducts comprehensive and in-depth research and discussion on the health monitoring and evaluation system for bridge structures, systematically analyzing the practical application value and implementation path of this technology system in modern bridge engineering. The article first clarifies the core components of the system, covering key modules such as high-precision sensor deployment, multi-source data acquisition and stable transmission, intelligent data analysis and processing, structural state evaluation and early warning, etc. All links work together to achieve full process and real-time monitoring of bridge structural status. The study further emphasizes that the bridge structure health monitoring and evaluation system is not only an important technical means to ensure the safety of bridge operation and prevent major safety accidents, but also can optimize maintenance strategies through long-term data accumulation, effectively extend the service life of bridges, and provide scientific basis for bridge operation and maintenance management, disease control, and expansion decisions, significantly improving the intelligent and scientific level of bridge lifecycle management. In addition, based on current engineering application practices, the article objectively summarizes the practical problems of the system in terms of long-term reliability of sensors, efficient processing of massive data, precise identification of complex damages, and multi system fusion adaptation. Based on industry development trends, the article provides a forward-looking outlook on the future development direction of bridge structure health monitoring and evaluation from the dimensions of technological innovation, standard improvement, and intelligent upgrading.

Keywords

bridge structure; Health monitoring; Evaluation system; Case Analysis

桥梁结构健康监测与评估系统应用研究

普玉富

苏交科集团检测认证有限公司, 中国·江苏·南京 211112

摘要

本文围绕桥梁结构健康监测与评估系统展开全面、深入的研究与探讨, 系统解析了该技术体系在现代桥梁工程中的实际应用价值与实施路径。文章首先明确了系统的核心构成, 涵盖高精度传感器布设、多源数据采集与稳定传输、智能数据分析与处理、结构状态评估与预警等关键模块, 各环节协同运作, 实现对桥梁结构状态的全流程、实时化监测。研究进一步强调, 桥梁结构健康监测与评估系统不仅是保障桥梁运营安全、防范重大安全事故的重要技术手段, 更能通过长期数据积累优化养护策略, 有效延长桥梁使用寿命, 同时为桥梁运维管理、病害治理、改扩建决策提供科学依据, 显著提升桥梁全生命周期管理的智能化与科学化水平。此外, 文章结合当前工程应用实践, 客观梳理了系统在传感器长期可靠性、海量数据高效处理、复杂损伤精准识别、多系统融合适配等方面存在的现实问题, 并立足行业发展趋势, 从技术创新、标准完善、智能升级等维度, 对桥梁结构健康监测与评估领域的未来发展方向进行了前瞻性展望。

关键词

桥梁结构; 健康监测; 评估系统; 实例分析

1 引言

桥梁作为交通基础设施的关键组成部分, 其结构健康状况直接关系到交通的安全与顺畅。随着桥梁建设规模的不断扩大和服役年限的增长, 桥梁结构健康监测与评估系统的应用变得日益重要。该系统能够实时、动态地监测桥梁结构

的响应, 及时发现潜在的安全隐患, 为桥梁的维护、管理和决策提供科学依据^[1]。

2 桥梁结构健康监测与评估系统的组成

2.1 传感器

传感器是桥梁结构健康监测系统的前端感知设备。应变传感器可以测量桥梁结构在荷载作用下的应变变化, 如光纤光栅应变传感器在大型跨海大桥中被广泛应用。加速度传感器能够监测桥梁在风荷载、地震荷载等动态荷载作用下的振动加速度, 像在山区高墩桥梁中, 加速度传感器可实时捕

【作者简介】普玉富(1991-), 男, 中国云南大理人, 本科, 工程师, 从事交通运输工程、桥梁隧道试验检测研究。

捉桥梁的振动情况。还有位移传感器、温度传感器等，它们分别从不同的角度获取桥梁结构的状态信息。

2.2 数据采集与传输

数据采集系统负责将传感器获取的模拟信号转换为数字信号，并进行初步的处理和存储。在一些大型桥梁中，如港澳大桥，由于桥梁结构庞大，需要布置大量的传感器，其数据采集系统必须具备高采样频率、大容量存储和稳定的数据传输能力。数据传输方式包括有线传输（如光纤传输）和无线传输（如 ZigBee、GPRS 等）。有线传输稳定性高，适用于长距离、大数据量的传输，而无线传输则具有灵活性强、安装方便等优点，适用于一些难以布线的区域。大桥结构健康监测系统集成后将包括的下列四个子系统。

这四个子系统将运行于四个层次：第一层次是传感器子系统的各传感器在线拾取大桥关键部位的信号；第二层次是将采集到的传感器信号转换成数字信号存储在本地工业用计算机内，同时通过计算机光纤网络输送到数据处理与管理子系统；第三层次是由计算机服务器与工作站组成的计算机系统完成数据的后处理、归档、显示及存储；并根据健康评估系统的指令为其提供特定格式和内容的数据以及处理结果；第四层次是健康评估系统根据监测系统送来的数据进行分析、统计、阈值判别给出评估意见及报警信息，并为养护工作提出建议。

2.3 数据分析处理

数据分析处理是桥梁结构健康监测与评估系统的核心环节。通过对采集到的数据进行分析，可以得到桥梁结构的各种响应特征。常用的分析方法包括时域分析、频域分析、小波分析等。时域分析可以直接观察桥梁结构的响应随时间的变化规律，在桥梁遭受突发事件（如车辆碰撞）后的结构状态评估中具有重要作用。频域分析则能够揭示桥梁结构的固有频率等动力特性，对于识别桥梁结构的损伤具有较高的灵敏度。小波分析结合了时域和频域的优点，在处理非平稳信号方面具有独特的优势，可用于分析桥梁在复杂荷载作用下的结构响应。

监测中心内部、数据中心内部网络架构不变，对监测中心到网络中心间的网络连接进行升级优化，采用基于二进制流、文本文件、数据库文件三种数据存储模式。

升级监测中心到数据中心间 VPN 设备版本，增加接入带宽，并优化安全策略。增加数据中心的接入线路数量及带宽，同时应用负载均衡技术，进一步提升接入

带宽、网络安全性与可靠性等，满足更多并发、更大数据量的传输需求。网络层预留基于 4G/5G 的传输接口，未来作为应急备份方案^[2]。

3 桥梁结构健康监测与评估系统的应用实例分析

3.1 某跨江大桥概况

该跨江大桥为单跨 730m 的悬索桥，主跨大、交通繁忙。

主桥采用加劲钢桁梁，由主桁架、上下平联、横向桁架组成。主桁架采用华伦式，桁高 5m，桁宽 17.5m，小节间长度 5.0m，大节间（即一个标准节段）长度 10.0m，在每小节处均设横向桁架。上、下平联采用 X 型体系。所有杆件均采用宜加工的工字型截面。全桥共分 73 个节段组拼安装，节段最大吊装长度 10m，节段最大吊装重量 42T。每个节段在工地拼装场地组拼，采用施工缆索吊装就位拼装。

由于地理位置重要，实时监测桥梁健康状况至关重要。大桥安装了应变传感器、加速度传感器和风速仪等设备。应变传感器布置于主塔和主梁关键部位，监测车辆和风荷载作用下的应变；加速度传感器用于监测振动特性。长期数据分析发现，在特定风向和风速下，桥梁振动加速度异常波动，经验证为桥塔附近缆索风致振动引起。为此，采取附加阻尼器等措施抑制缆索振动，确保桥梁安全运营。（二）监测系统的设计原则

大桥结构监测要求监测系统与外部系统互联互通、数据共享，实时展示监测结构”等规定，同时应考虑遵循“先进、适用、稳定、安全、经济、实用”的原则，系统具有有效性、可靠性、经济性及灵活性的特点：

有效性：系统的监测数据与预警信号必须有较高的准确性，以降低无谓的复检及应急处理投入。

可靠性：系统必须具有较低的故障率以及较好的耐久性，以降低维护成本。

经济性：系统造价必须合理，具有较高的性价比，以适应刚构桥梁对状态监测与安全预警的需求。

灵活性：系统的传感技术以及数据采集、传输方式必须灵活，并可与人工检测灵活组合，以适应不同桥梁的具体特点有针对性地进行监测与预警。

为了满足《公路桥梁结构监测技术规范》对于单体桥梁结构健康监测系统应与省级长大桥梁结构健康监测平台、部级长大桥梁结构数据平台实现系统互联、数据共享，三级系统平台应统一数据接口、数据格式和传输协议的要求，更新了结构健康监测系统软件平台数据接口、数据格式和传输协议。

3.2 监测系统检查及维修

系统自诊断分为系统硬件系统的诊断以及各系统软件的自诊断。作为一个完整的健康监测系统，需要从各方面考虑系统的完好性。既需要考虑结构的硬件系统，也要考虑系统的软件系统，看软件系统是否能完好的工作。软件系统包括信号传输、显示的功能，报表的生成，数据的运转等，这些都需要进行分析，以保证整个系统的完好。

远程监视和控制结构监测系统成为一种趋势也成为一种必要。用户通过因特网访问大桥健康系统，能够及时察看系统的运行状态并及时发现问题、解决问题。方便桥梁管理人员地实时查看健康监测系统的状态及预警信息，迅速快捷地做出应对措施处理。维护健康监测系统更加方便简化，大大减少人员上桥维护次数，节约人力、时间、财力等。

健康监测系统数据作为桥梁状态信息的第一手监测资料,需采取各种措施保证监测数据安全。特别是在硬件设备、软件系统出现故障后,如何保证数据安全至关重要。传感器等硬件系统及采集控制程序等软件系统在运行过程中的损坏不可避免,因此需采用适当措施保证监测数据的安全,拟采取以下措施:定期对监测数据数据库进行备份;派专人对监测数据进行监测,如发现数据异常,及时派人排查问题,并提出处置意见,减少无效数据;在确定传感器硬件系统损坏后,按服务响应程序及时对硬件进行修复或更换;对传感器维护更换后,采取数据修复理论,消除传感器维护对监测数据的影响,保证数据一致性^[9]。

4 桥梁结构健康监测与评估系统应用的意义

4.1 保障桥梁安全

通过实时监测桥梁结构的响应,可以及时发现结构的损伤和安全隐患,如裂缝的产生、构件的变形等,从而采取相应的措施进行修复和加固,避免桥梁发生灾难性的破坏。

4.2 延长桥梁使用寿命

基于监测数据,可以对桥梁结构的性能退化进行准确评估,合理安排桥梁的维护和保养工作。根据结构的疲劳损伤情况,调整车辆荷载限制或提前进行局部构件的更换,从而延缓桥梁结构的性能衰退,延长其使用寿命。

4.3 提升桥梁管理决策的科学性

桥梁结构健康监测与评估系统提供的数据为桥梁管理部门提供了丰富的信息。管理人员可以根据监测数据制定更加合理的桥梁维护计划、交通管制措施等,提高桥梁管理的效率和科学性。

5 桥梁结构健康监测与评估系统应用中存在的问题

5.1 传感器的耐久性和可靠性

在桥梁长期服役过程中,传感器可能会受到环境因素的影响,导致其性能下降甚至失效。在海边的桥梁,盐雾环境可能会腐蚀传感器的金属部件,影响传感器的测量精度和寿命。

5.2 数据处理与分析的复杂性

由于桥梁结构健康监测系统采集的数据量大、数据类型复杂,如何从海量的数据中提取有效的信息并准确评估桥梁结构的健康状况是一个挑战。不同的分析方法可能会得出不同的结果,需要建立更加科学合理的数据分析框架。

5.3 系统的成本效益问题

建设和维护桥梁结构健康监测与评估系统需要投入大量的资金,包括传感器的采购、安装,数据采集与传输设备的配置,以及数据分析软件的开发等。如何确保系统带来的

效益能够弥补系统的建设和维护成本,是在推广应用该系统时需要考虑的重要因素。

6 桥梁结构健康监测与评估系统的未来发展方向

6.1 传感器技术的创新

研发更加耐用、高精度、自诊断功能的传感器,以适应桥梁复杂的服役环境。例如,开发新型的光纤传感器,利用光纤的抗电磁干扰、耐腐蚀等优点,提高传感器的性能。

6.2 大数据与人工智能技术的融合

随着大数据和人工智能技术的发展,将其应用于桥梁结构健康监测与评估领域。利用大数据技术对海量的监测数据进行存储和管理,通过人工智能算法对数据进行分析和处理,提高桥梁结构健康状况评估的准确性和智能化水平。

6.3 多源信息融合

将桥梁结构健康监测数据与桥梁设计资料、施工过程数据、维护历史数据等多源信息进行融合,建立更加全面的桥梁结构健康评估模型,为桥梁的全寿命周期管理提供更加准确的决策依据。

7 结论

桥梁结构健康监测与评估系统在现代桥梁工程建设与运维管理中具有不可替代的重要意义。通过对该系统的核心组成、典型工程应用实例、实际应用价值、现存问题及未来发展趋势进行综合分析可以看出,当前桥梁结构健康监测技术已在保障桥梁运营安全、延长结构使用寿命、提升桥梁管理决策科学性等方面取得了显著成效。然而,在实际工程应用中,该技术体系仍面临诸多挑战,主要包括传感器长期服役的耐久性不足、海量监测数据处理难度大、损伤识别精度有限以及系统建设与运维成本较高等问题,一定程度上制约了其规模化推广与深度应用。

随着新型传感技术、大数据分析、人工智能算法以及多源信息融合等前沿技术的快速发展,桥梁结构健康监测与评估系统将在智能化、自动化、精准化方向持续升级完善。未来,该系统将进一步实现结构状态实时感知、病害智能预警、寿命精准预测和全生命周期精细化管理,为提升桥梁工程安全水平、推动交通基础设施可持续发展提供更加坚实可靠的技术支撑。

参考文献

- [1] 江锐.基于云计算的桥梁结构健康监测物联网系统设计与应用研究[D].广东:华南理工大学,2020.
- [2] 刘强,崔浩.市政桥梁结构健康监测系统研究与应用[J].传奇故事,2024(24):15-17.
- [3] 骆维斌.基于厦门BRT桥梁结构群的桥梁健康监测与安全预警集成系统研究[D].兰州交通大学,2016.