

大跨度桥梁结构健康监测系统的键技术研究

齐韶杰

山东交通学院 250357

DOI:10.12238/ems.v7i9.15210

[摘要] 大跨度桥梁结构健康监测系统通过实时监测和数据分析对结构状态进行评价,是确保桥梁安全运行的一项键技术。本文对大跨桥梁健康监测系统进行概念和构成说明,该系统由传感器网络、数据采集、传输、处理模块构成。着重对系统中的键技术——高精度传感技术在多参数动态监测中的应用进行分析;高效的数据采集和传输技术,保证信息的可靠性;数据预处理和特征提取技术提高了信号的质量;结构状态评估和损伤识别方法对异常进行精准定位;预警和决策支持系统为风险的预防和控制提供了科学依据。研究显示,协同优化上述技术是提高监测系统效能最核心的环节,对于今后桥梁智能化运维有重要参考价值。

[关键词] 大跨度桥梁结构; 健康监测系统; 键技术

引言

随着桥梁老龄化和极端气候的频繁发生,常规的人工检测方式已经很难满足实时性和精准性的要求。结构健康监测系统(SHMS)利用智能感知和数据分析技术,为桥梁的安全运营带来了革命性的技术支持。本文在总结国内外研究状况的基础上,系统阐释大跨桥梁健康监测系统构成架构,并着重分析高精度传感、数据融合、损伤识别等键技术进展及面临的应用挑战,目的是为促进桥梁全生命周期管理水平的提高提供理论参考和技术支撑。

一、大跨桥梁结构健康监测系统

(一) 大跨桥梁结构健康监测系统的概念

大跨桥梁结构健康监测系统通过设置一系列传感器和数据采集设备,实时了解桥梁服役期间的健康状态,对桥梁各物理指标进行连续监控,然后对桥梁结构安全性和可靠性进行评价的智能化系统。该系统一般由振动传感器、应变计、位移传感器、温度监测仪器组成,可对桥梁结构进行变形、应力、振动频率等多种数据实时采集。对这些资料进行分析可以及时发现可能出现的破坏或老化现象,为桥梁维修和加固提供科学依据^[1]。另外,大跨桥梁结构健康监测系统可以协助有关管理部门对桥梁进行远程监控和动态管理,保障其在各种环境情况下的安全使用。随着科技的持续发展,近几年基于无线传感网络、大数据分析、人工智能技术构建的健康监测系统已逐步走向成熟,这极大地提高桥梁结构健康管理的准确性和效率^[2]。

(二) 大跨桥梁结构健康监测系统的组成

其一,传感器网络作为系统核心部分,承担着桥梁各部

分实时数据的采集任务。常用的传感器有应变计、加速度计、位移传感器、温度传感器,它们按照不同的监测需要设置于桥梁关键部位例如桥面和桥墩上、主梁、支撑结构等来得到结构对多种荷载、温度变化、环境情况的反应数据^[3]。其二,数据采集模块,用于对传感器的输出信号进行实时采集和处理,主要负责对信号进行采集,初步放大和滤波等工作,保证数据质量。为增强系统的监测能力和扩展性,现代桥梁健康监测系统普遍采用无线传感器网络(WSN)技术,通过无线信号传输,避免了传统有线网络的布设限制,从而提高了系统的灵活性和适应性。数据传输系统的主要职责是通过有线或无线手段,将收集到的初始数据传送到中央处理平台,以确保在数据传输过程中不会受到任何干扰,并能迅速地将这些信息反馈给监控人员。其三,数据处理平台,它是将传回的数据经过预处理、储存、分析、可视化等过程中的一个重要环节。该技术平台利用高效的数据处理技术,如数据融合、滤波、去噪,来提取结构健康状况的核心信息,并采用特定的模型和分析手段来实时评估和诊断结构损伤^[4]。

二、大跨度桥梁健康监测系统的键技术

(一) 高精度传感技术

高精度传感技术作为大跨度桥梁健康监测系统的键技术,主要工作在于精确,实时获取桥梁结构受各种荷载、温度、风力等外在因素影响的动态响应数据。传感器作为系统中的一个重要部件,需要具有高灵敏度、高稳定性、高可靠性等特点,这样才能够保证监测数据准确以及系统长期有效运行。大跨度桥梁健康监测中常采用的传感器有应变传感器、加速度计、位移传感器、温度传感器。这些传感器可以对桥

梁服役期间的振动、变形、应力、温度等物理量进行实时监控,尤其当桥梁遇到极端天气、地震、交通荷载时,能有效地捕捉结构的细微变化并对可能出现的破坏或异常状态进行及时地反馈。高精度传感技术核心是提高传感器测量精度及抗干扰能力。随着传感技术的持续进步,光纤传感技术和无线传感器网络(WSN)在桥梁健康监测方面的应用变得越来越广泛^[5]。光纤传感器灵敏度高、抗电磁干扰能力强、能在恶劣环境中稳定运行、传输距离远、适用于大跨径桥梁监测。并且无线传感器网络通过无线通讯技术对数据进行实时采集及传输,规避了常规有线传感器布设复杂且费用高的问题,有利于简化桥梁监测系统安装及维修流程。为进一步提高传感技术的准确性,以多传感器数据融合为基础的桥梁健康监测技术在最近几年也逐步被运用到桥梁健康监测当中,并通过对不同种类传感器数据进行融合,本发明能够对桥梁健康状况有一个较为全面的认识,提升损伤检测准确度以及监测覆盖范围。

(二) 数据采集与传输技术

数据采集和传输技术作为大跨径桥梁健康监测系统的核心部分,对监测数据质量和传输效率有着直接的影响。桥梁健康监测系统需要对来自各种传感器的海量数据进行实时采集,覆盖桥梁动态响应、应力、变形、温度变化等情况。为保证这类数据准确完整,数据采集技术应具有高灵敏度、低噪声、高稳定性。常用数据采集方法有模拟信号采集、数字信号采集、混合信号采集等。现代桥梁监测系统伴随着科技的进步而逐步使用数字化数据采集,这样既可以提高数据处理精度又可以降低传统模拟信号所造成的错误。另外,采集模块采样频率,信号放大与滤波功能对于数据质量非常重要,特别是当桥梁结构遇到复杂荷载以及外部环境干扰等情况下,数据采集模块要求抗干扰能力强、信号处理精度高,才能确保数据可靠有效。随着无线传感器网络(WSN)和物联网技术的不断进步,桥梁健康监测系统在数据传输方面已经逐渐从传统的有线方式转向无线方式。无线传输既可以降低布线成本、增强安装灵活性,又可以实现复杂环境下更有效、更稳定地数据传输。

常用的无线传输技术有Wi-Fi、ZigBee、LoRa,它们在桥梁监测方面各有其优点,适合不同数据传输的需要。以ZigBee技术为例,其低功耗,短距离传输以及高密度网络部署等优点适合对桥梁部分地区进行实时数据采集;但LoRa技术具有远距离和低功耗等优点,适用于桥梁的大面积监控。

同时数据传输是否可靠、稳定也是保证监测系统正常工作的关键所在。为避免无线信号传输时产生干扰,很多系统使用多跳传输、冗余数据传输、自适应传输技术,来提高系统抗干扰能力以及数据完整性。在5G技术逐渐得到应用的今天,它所具有的高速率,低时延和大连接等特性也给桥梁健康监测系统带来了更有效的传输解决方案。

(三) 数据预处理与特征提取

数据预处理及特征提取作为大跨度桥梁健康监测系统数据分析的第一步,对增强监测系统精度及可靠性起着至关重要的作用。由于桥梁健康监测系统采集到了海量实时数据,其中通常含有噪声、冗余信息、不完全部分等信息,所以,数据预处理目的就是清洗和去噪、对缺失值进行填补等运算,提高后续分析准确性与有效性。常用的数据预处理方法主要有数据去噪,归一化处理、标准化处理、插值处理,而去噪又是最关键步骤,这是因为实际监控过程,传感器由于受到环境因素,设备老化等因素的影响,其采集数据中往往含有噪声。常见的去噪方法有小波变换和卡尔曼滤波,这些去噪方法能有效地压制噪声信号并保存桥梁结构中的有效信息。另外,对缺失值进行处理是数据预处理的一个重要步骤,而缺失数据会因为设备故障,传感器故障或者信号传输不稳而出现,所以,使用合适的插值方法来弥补缺失值可以保证数据完整性和一致性。

数据预处理结束之后,特征提取是数据分析的第二步,其目的是从海量繁杂的监测数据中挖掘出反映桥梁健康状态的重要信息。桥梁结构健康状态一般与桥梁动态特性紧密相关,所以特征提取主要集中在时间域、频率域、时频域不同视角下桥梁响应特征参数提取上。时间域特征提取集中于对数据进行均值,标准差,峰值和脉冲度统计量的提取,它们能较好地体现桥梁日常运行时的基本动态特性;在频率域的特征提取过程中,主要是利用傅里叶变换或小波变换等技术,将时间序列的数据转换为频谱信息,进而准确地提取出桥梁的固有频率、模态频率和其他一些重要参数以及这些频率特征可以有效地揭示桥梁受各种荷载作用时的振动响应特征;在进行时频域特征提取时,综合考虑了时间和频率的波动,并运用了如短时傅里叶变换和希尔伯特-黄变换等时频分析手段,以获取桥梁在各个时间段内的动态响应特性。利用这些特征提取方法可使原始时间序列数据变成具有实际意义的特征向量,它们不但能够有效地反映桥梁健康状况,而且能够为之后的损伤识别和故障诊断奠定基础。

(四) 结构状态评估与损伤识别

结构状态评估和损伤识别作为大跨径桥梁健康监测系统的核心一环,主要工作就是通过分析所收集的监测数据来实现,对桥梁当前健康状态进行判断,及时发现可能出现的破坏或者异常情况。桥梁结构状态对桥梁安全性及使用寿命有直接影响,所以,准确、高效地进行损伤识别与状态评估技术非常重要。结构状态评估一般要依靠各种数据分析方法进行,其中主要有统计分析、模态分析、机器学习。对该桥动态响应数据进行模态识别可以得到该桥固有频率、模态振型以及其他反映其整体刚度与质量分布特征的重要特征参数。桥梁刚度与质量分布随桥梁服役时间变化而改变,从而对其模态特性产生影响。所以,对桥梁进行模态分析和对比,能够有效地识别桥梁不同时刻的健康状况,并及时地发现桥梁结构性能退化趋势。

损伤识别技术在结构状态评估方面发挥着重要作用,它以桥梁监测数据为主要研究对象,通过深入分析桥梁监测数据来精确地识别桥梁结构损伤的部位,种类以及程度。传统损伤识别方法一般都是建立在振动信号分析的基础上,例如模态频率法、曲率法、振型法,这几种方法都是通过比较分析桥梁振动模态参数变化情况,从而推断出结构是否发生损伤。但传统方法存在的局限性是对损伤检测准确性要求高以及对复杂桥梁结构的损伤识别常受诸多因素干扰。近年来,随着机器学习、深度学习等技术的快速发展,数据驱动损伤识别方法已逐步成为人们关注的焦点。这些方法在构造桥梁健康状态数学模型的基础上,将海量历史数据与实时监测数据相结合,实现对数据中可能存在损伤模式的自动提取、分类和预测。在损伤识别领域,支持向量机(SVM)、神经网络、随机森林等算法的运用显著提升了损伤检测的准确性和工作效率。

(五) 预警与决策支持系统

预警与决策支持系统在大跨度桥梁的健康监测中扮演着核心角色,其主要目的是通过对实时监测数据的深入分析,迅速识别可能的风险,并为决策者提供科学且有力的决策参考。该系统核心功能就是把桥梁健康状况和可能存在的安全隐患预测出来,以便及时地对桥梁进行养护,加固或者维修工作做出预警信息。预警系统设计需建立在海量实时监测数据基础上,并通过评估桥梁结构状态,综合事故历史数据、环境因素等来确定可能诱发桥梁破坏的危险因素。如桥梁振

动响应、位移变化及其他动态数据分析可预测桥梁潜在疲劳损伤或者极端荷载作用结构损伤。基于此,该系统可以按照预设阈值发出预警信号提醒有关管理部门或者维护人员采取适当措施,以避免或者降低安全事故。决策支持系统的核心思想是将健康的监测数据和预警信息相结合,为桥梁的管理者提供一个全方位的决策参考。

本系统既是信息传递平台又是智能化分析工具,通过数据分析及预测模型辅助决策者对桥梁长期健康状况及未来发展趋势进行评价,并给出具体养护管理建议。在实践中,决策支持系统一般综合运用了各种方法与技术,其中既有以模糊逻辑,灰色系统,专家系统为核心的决策模型又有以人工智能与机器学习为核心的自适应决策算法。这些技术可以对复杂多变量的数据进行处理,模拟出桥梁在各种场景中的性能,为管理者制定最佳的修复与加固方案。例如,基于历史数据和实时监测信息,系统可以为决策者预测未来某一时期的桥梁的损伤演变趋势,指导其合理安排养护周期和预算,避免过度维修或维护不足的问题。

结语

本文重点对大跨度桥梁健康监测关键技术进行分析研究,揭示高精度传感、高效数据传输、智能评估算法与其他核心技术之间的协同关系。研究证明,多源数据融合和机器学习方法深度应用可以显著提高系统识别结构异常精度和预警时效。在未来物联网和数字孪生技术不断发展的背景下,健康监测系统将朝着智能化和集成化的方向进化,从而为桥梁的安全运营和长效维护提供更加有力的技术保障。

[参考文献]

- [1] 乔杰, 张国平. 桥梁结构运营智能健康监测系统设计与研究[J]. 科学与财富, 2023: 122-124.
- [2] 刘慧杰. 一种基于四层架构的桥梁健康监测系统 Web 端应用平台[J]. 长江信息通信, 2024, 37(2): 193-195.
- [3] 赵清杰. 基于智能健康监测的桥梁变形及稳定性分析[J]. 工程机械与维修, 2023(4): 56-59.
- [4] 罗利, 罗子圣. 结构健康监测系统在地震作用下大跨度桥梁动力响应分析的应用[J]. 建筑结构, 2023, 53(S01): 2122-2126.
- [5] 向东刚, 邹云华, 龚凯. 特大悬索结构桥梁健康监测系统设计及运用[J]. 交通工程, 2024, 24(11): 109-115.