

城市桥梁结构健康监测系统设计与应用分析

边要乐

河南中平交科研究设计院有限公司 河南 平顶山 467000

摘要:城市桥梁结构健康监测系统设计复杂且关键,需结合桥梁类型、服役环境与监测需求,遵循“全面覆盖、精准监测”等原则,采用分层架构。系统核心技术涵盖感知层监测技术与设备、传输层通信技术、数据处理层分析技术。应用实施流程包括监测方案制定、系统安装调试、运行维护与预警响应。当前系统存在监测方案针对性不足、数据处理诊断精度不高等问题,需从监测方案制定、技术选型优化,并完善应用管理机制,实现监测与养护深度融合,保障桥梁安全运营。

关键词:城市桥梁;结构健康监测;系统设计;应用分析

引言:城市桥梁作为交通网络的关键枢纽,其结构安全至关重要。城市桥梁结构健康监测系统能实时掌握桥梁状态,为安全运营提供保障。然而,该系统设计复杂,需结合桥梁结构类型、服役环境与监测需求,且涉及感知、传输、数据处理等多层核心技术。同时,在应用实施流程中,从监测方案制定到运行维护,每个环节都关乎系统效能。当前系统仍存在诸多问题,本文将深入探讨其总体设计、核心技术、应用流程,并提出优化策略与完善管理机制。

1 城市桥梁结构健康监测系统设计

城市桥梁结构健康监测系统的设计是一项复杂且关键的任务,必须紧密结合桥梁的结构类型,涵盖梁桥、拱桥、斜拉桥、悬索桥等不同形式,充分考虑其独特的力学特性与结构特点。同时,要综合评估桥梁所处的服役环境,包括气候条件、交通流量、地质状况等,以及明确的监测需求,如应变、位移、振动、温度等参数的监测要求。在此基础上,遵循“全面覆盖、精准监测、稳定可靠、经济实用”的核心原则展开设计。(1)系统总体架构采用分层设计理念,主要划分为感知层、传输层、数据处理层和应用层四个关键部分。感知层作为系统的基石,承担着采集桥梁结构及环境各类参数的重任,通过部署在桥梁关键部位的传感器,如应变传感器、加速度传感器、位移传感器等,实时获取桥梁的力学和环境信息。传输层则负责将感知层采集到的监测数据进行可靠传输,采用有线或无线通信技术,确保数据传输的实时性和准确性,为后续处理提供保障。数据处理层运用先进的算法和模型,对采集到的海量数据进行分析、诊断,评估桥梁的健康状态,及时发现潜在的安全隐患。应用层为用户提供直观的可视化界面,展示桥梁的实时状态和历史数据,同时发出预警信息,并为养

护决策提供科学支持,是系统价值的重要体现。(2)系统设计还需充分考虑桥梁的特殊环境因素,如振动、潮湿、电磁干扰等,选用适应性强、稳定性高的设备。并且预留一定的扩展接口,以便后期根据实际需求增加监测参数或升级设备,保证系统的长期有效性和先进性^[1]。

2 城市桥梁结构健康监测系统核心技术组成

2.1 感知层监测技术与设备

感知层是结构健康监测系统的“感官”,通过各类传感器采集桥梁结构及环境参数。根据监测内容的不同,传感器可分为结构响应传感器、环境参数传感器及荷载参数传感器三大类。结构响应传感器包括应变计(如光纤应变计、电阻应变计),用于监测桥梁关键部位(如主梁、墩柱、拉索)的应变变化;位移计(如GPS位移监测仪、激光位移计),测量桥梁的竖向、横向位移及沉降;加速度传感器,采集桥梁在车辆荷载、风荷载作用下的振动响应;裂缝计,监测混凝土结构裂缝的宽度与发展趋势。环境参数传感器主要包括温度传感器、湿度传感器、风速风向传感器,用于采集桥梁所处环境的气象数据,分析环境因素对结构性能的影响。荷载参数传感器包括称重传感器、车流量监测仪,用于统计交通荷载的大小、类型及分布情况,为桥梁承载能力评估提供依据。

2.2 传输层通信技术

传输层的核心是实现监测数据从感知层到数据处理层的高效、可靠传输,主要采用有线通信与无线通信相结合的方式。有线通信适用于固定监测点且布线方便的场景,如桥梁主梁、墩柱等部位,常用技术包括以太网、光纤通信等,具有传输速率高、稳定性强、抗干扰能力好的优势,可满足大量实时数据的传输需求。无线通信适用于难以布线或移动监测的场景,如桥梁拉索、

临时监测点等,常用技术包括Wi-Fi、LoRa、4G等。Wi-Fi适用于短距离、高带宽数据传输;LoRa具有低功耗、远距离传输的特点,适合低速率传感器数据传输;4G则适用于需要远程传输数据的场景,可实现监测数据的异地实时传输。此外,传输层需配备数据缓存与断点续传功能,避免因网络中断导致数据丢失,同时采用加密技术保障数据传输安全。

2.3 数据处理层分析技术

数据处理层是结构健康监测系统的“大脑”,负责对采集的原始数据进行处理、分析与诊断。首先进行数据预处理,通过滤波、去噪、异常值剔除等方法,去除原始数据中的干扰信号与错误数据,提高数据质量,例如采用小波变换滤波技术处理振动信号中的噪声。其次进行特征提取,从预处理后的数据中提取能够反映桥梁结构健康状态的特征参数,如应变峰值、振动频率、模态参数等。最后进行健康状态评估与诊断,采用结构力学分析、机器学习、模式识别等技术,建立桥梁健康状态评估模型,将提取的特征参数与预设的阈值或健康状态基准值进行对比,判断桥梁是否存在损伤及损伤的位置、程度。例如,通过分析桥梁振动频率的变化,识别结构刚度的退化情况;利用机器学习算法对历史监测数据进行训练,实现对桥梁健康状态的自动诊断与预警。

3 城市桥梁结构健康监测应用实施流程

3.1 监测方案制定

监测方案的制定作为城市桥梁结构健康监测系统有效应用的关键前提,必须紧密围绕桥梁的结构特性、服役时长、交通荷载状况以及所处的环境条件等多方面因素,精准明确监测目标与具体内容。(1)在制定过程中,首先要对桥梁展开细致的结构分析,凭借专业的力学知识与工程经验,精准识别出关键监测部位。例如,对于梁桥而言,跨中位置在车辆荷载作用下受力复杂,支座处是桥梁与基础的连接关键,均需重点监测;斜拉桥的拉索承担着桥梁的主要拉力,索塔作为支撑结构,其稳定性至关重要;拱桥的拱肋是主要受力构件,这些部位都应纳入重点监测范围。(2)要根据桥梁可能出现的损伤类型,科学确定监测参数。如老龄梁桥易出现应变异常、裂缝扩展和沉降等问题,就需重点监测这些参数;斜拉桥则要着重监测拉索张力变化和索塔位移情况。(3)要合理确定监测设备的选型与布置方案,依据监测参数要求,挑选合适类型、精度及量程的传感器,并科学布置监测点,保证监测数据全面、准确反映桥梁结构状态,同时兼顾安装可行性与经济性^[2]。

3.2 系统安装与调试

系统安装与调试是保障城市桥梁结构健康监测系统稳定、可靠运行的关键环节,必须严格遵循相关施工规范与操作流程。(1)在传感器安装环节,要充分考虑传感器类型以及监测部位的具体特点,精准选择适宜的安装方式。例如,应变计通常采用粘贴式安装,安装前需确保粘贴面平整、清洁,无油污、灰尘等杂质,以保证粘贴牢固,从而准确获取桥梁结构的应变数据;GPS位移监测仪应安装在桥梁顶部视野开阔、无遮挡的位置,确保其能够稳定接收卫星信号,精准测量桥梁的位移变化。(2)传输设备安装时,要着重做好防水、防潮、防雷等防护措施。采用防水密封材料对设备接口进行密封处理,安装防潮装置,设置可靠的防雷接地系统,以保障通信线路的稳定,避免因环境因素导致设备损坏或通信中断。(3)系统调试分为单机调试与联调两个阶段。单机调试主要检查传感器输出信号是否正常、传输设备通信是否畅通;联调则对整个系统进行全面测试,验证数据采集、传输、处理全流程的顺畅性,确保监测数据准确无误、系统响应迅速,对发现的问题及时整改,直至系统完全达到设计要求。

3.3 运行维护与预警响应

城市桥梁结构健康监测系统投入运行后,构建一套完备且高效的运行维护机制,是保障系统长期稳定、可靠运行的核心要素。(1)要制定详细的设备维护计划,定期对系统中的各类设备进行全面检查、精准校准与妥善维护。比如,每半年对应变计进行一次严格校准,确保其测量数据的准确性;每年对传输设备的通信性能展开全面测试,及时发现并解决潜在的通信故障。对于老化、出现故障的设备,要迅速进行更换,保证系统始终处于良好的运行状态。(2)安排专业技术人员对监测数据进行实时监控与深度分析。一旦监测数据超出预设的预警阈值,系统应立即自动触发预警信号,可通过声光报警、短信通知等多种方式及时告知运维人员。运维人员需迅速对预警信息进行核实,深入分析预警产生的原因。若确认桥梁结构存在损伤,应立即启动应急预案,采取交通管制、限载通行、维修加固等有效措施,全力防止事故的发生。此外,还应定期生成全面、详细的监测报告,为桥梁的养护维修和管理决策提供科学、可靠的依据。

4 城市桥梁结构健康监测系统现存问题与优化策略

4.1 现存问题分析

当前城市桥梁结构健康监测系统在设计与应用中仍存在诸多问题。一是监测方案针对性不足,部分监测系统采用通用化设计,未充分结合桥梁的具体结构特点与

实际损伤风险,存在监测参数冗余或关键参数缺失的情况,导致监测数据无法有效反映桥梁健康状态。二是数据处理与诊断精度不高,部分系统的数据预处理方法简单,难以有效去除复杂环境下的干扰信号;健康状态评估模型多基于传统结构力学分析,对复杂损伤的识别能力不足,易出现误判、漏判现象。三是系统运行稳定性差,部分传感器、传输设备在桥梁振动、潮湿、腐蚀等恶劣环境下易出现故障,导致数据采集中断;数据传输过程中存在信号衰减、干扰等问题,影响数据实时性。四是系统应用与管理脱节,部分监测系统仅实现数据采集与显示功能,未与桥梁养护管理体系有效结合,监测数据未充分用于养护决策,导致系统应用价值未得到充分发挥。

4.2 系统设计优化策略

为有效解决系统设计中存在的问题,需从监测方案制定与技术选型两个关键维度进行深度优化。(1)在监测方案制定环节,严格遵循“一桥一策”的精细化原则。对每座桥梁开展全面且细致的结构安全评估,综合考量桥梁的设计参数、服役年限、所处环境以及过往损伤记录等多方面因素,精准识别出具有个性化的损伤风险点。基于这些风险点,有针对性地确定监测部位与参数,摒弃传统监测方案中可能存在的冗余监测内容,确保每一项监测指标都能切实反映桥梁的健康状况,从而提升监测工作的有效性与精准度。(2)在技术选型方面,优先挑选能够适应桥梁恶劣环境的高性能设备。例如,采用防水、耐腐蚀性能优异的光纤传感器来替代传统的电阻应变计,有效延长设备使用寿命,降低维护成本;运用光纤通信结合LoRa无线通信的混合传输模式,充分发挥两种通信方式的优势,增强数据传输的稳定性与可靠性;在数据处理层,积极引入深度学习等更先进的算法技术,构建精准的损伤识别模型,显著提高桥梁健康状态诊断的精度与效率,为桥梁的安全运营提供坚实保障^[3]。

4.3 应用管理机制完善

为有效破解系统应用与管理相互脱节的难题,构建一体化的应用管理机制迫在眉睫。(1)要搭建桥梁健康监测与养护管理协同平台,打通监测系统与桥梁养护管理数据库之间的数据通道,实现监测数据和养护记录的深度共享与有机融合。如此一来,养护人员能依据实时、准确的监测数据,为桥梁量身定制科学合理的养护方案,提升养护工作的精准度。(2)组建专业化的运维团队,汇聚结构工程、计算机、通信等多领域的专业人才,形成技术合力。由该团队全面负责系统的日常运行维护、数据深度分析以及预警响应工作,保障系统运维的专业性和高效性。(3)完善预警响应机制,明确划分预警等级标准,并制定与之对应的详细处置流程。加强与交通、公安等部门的协同联动,确保在预警事件发生时,能够迅速响应、高效协作,充分发挥监测系统对桥梁安全的坚实保障作用。

结束语

城市桥梁结构健康监测系统设计需兼顾桥梁特性、环境及监测需求,以分层架构实现全面精准监测。系统依赖感知、传输、数据处理层核心技术,确保数据采集、传输、分析的高效准确。然而,当前系统存在监测方案针对性弱、数据处理精度低、运行稳定性差及应用管理脱节等问题。为此,需从监测方案“一桥一策”、技术选型高性能化两方面优化设计,提升监测精准度与效率;同时,构建桥梁健康监测与养护管理协同平台,组建专业化运维团队,完善预警响应机制,实现监测与养护的深度融合。如此,方能充分发挥系统价值,为城市桥梁的安全运营与科学养护提供有力支撑。

参考文献

- [1]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+121.
- [2]赵汗青,简方梁,淡丹辉,等.大跨连续钢桁梁桥健康监测系统设计及应用[J].世界桥梁,2024,52(06):56-63.
- [3]张洪.公路桥梁试验检测与信息工程结合在桥梁健康监测中的应用研究[J].信息系统工程,2024,(04):56-59.