

基于物联网的公路桥梁健康监测与检测技术研究

阳枝萍

新疆北新科技创新咨询有限公司, 新疆 乌鲁木齐 830000

[摘要]公路桥梁是交通运输网络的重要支点,保障着人们日常生活的出行安全以及生命财产安全。伴随物联网技术的发展,桥梁健康监测试验由传统的人员巡查方式升级为全天候实时监测方式。全面归纳物联网在桥梁监测系统的体系框架建设、主要监测技术和数据处理手段等内容,并对桥梁应力变形监测、桥梁振动响应监测、桥梁裂缝检测、桥梁环境监测等关键技术进行解析。利用5G+LoRa技术的分布式桥梁健康监测系统每隔0.5秒能读取到一次桥梁的状态数据,挠度测量量程是0~19mm,测量误差不到0.5%,可以长期处于低功耗状态下工作十余年。碳纳米管传感技术在施加载荷以及裂纹发生发展的过程中可以对电阻的变化进行观测从而实现实时检测,给混凝土结构提供了一种低成本的监测解决方案,根据实际工程应用状况了解其布置方法、信号采集、后期处理以及报警系统的效果,并对仪器稳定性和网络安全性、维护费用等方面给出智能化、协同化的发展方向建议。

[关键词]物联网;桥梁健康监测;传感器技术

DOI: 10.33142/ec.v9i6.19832

中图分类号: U446

文献标识码: A

Research on Health Monitoring and Detection Technology for Highway Bridges Based on the Internet of Things

YANG Zhiping

Xinjiang Beixin Science and Technology Innovation Consulting Co., Ltd., Urumqi, Xinjiang, 830000, China

Abstract: Highway bridges are important support points of transportation networks, ensuring the safety of people's daily travel and the safety of their lives and property. With the development of Internet of Things technology, bridge health monitoring experiments have been upgraded from traditional personnel inspection methods to all-weather real-time monitoring methods. Comprehensively summarize the system framework construction of the Internet of Things in bridge monitoring systems, including main monitoring technologies and data processing methods, and analyze key technologies such as bridge stress and deformation monitoring, bridge vibration response monitoring, bridge crack detection, and bridge environmental monitoring. The distributed bridge health monitoring system using 5G+LoRa technology can read the status data of the bridge every 0.5 seconds, with a deflection measurement range of 0-19mm and a measurement error of less than 0.5%, which can work in a low-power state for more than ten years. Carbon nanotube sensing technology can observe changes in resistance during the application of loads and the development of cracks, achieving real-time detection and providing a low-cost monitoring solution for concrete structures. Based on the actual engineering application situation, the layout method, signal acquisition, post-processing, and alarm system effects can be understood, and intelligent and collaborative development direction suggestions can be provided for instrument stability, network security, maintenance costs, and other aspects.

Keywords: Internet of Things; bridge health monitoring; sensor technology

引言

公路桥梁经过长时间的使用会受到车辆荷载以及周围环境的影响及桥梁本身的材料老化等许多原因而使得桥梁逐渐发生老化现象。传统的手工检查手段有检查频率低、主观性强、病害滞后等问题,不能达到目前对桥梁安

全防护的需求。物联网技术的应用给桥梁检测提供了新的技术方法,在桥梁上布设大量的传感节点可以及时监控到桥梁的应变信息、振动情况、位移变化等多方面信息,从而建立起桥梁的数字孪生模型,提前预警桥梁承载能力下降的趋势,大大减少了由于桥梁坍塌造成的人员伤亡及财

产损失。相关统计数据显示,特大跨度桥梁健康监测系统一般安装 300~500 个传感器,加速度、应变、位移、温湿度以及索力等为常用的检测参数,裂缝扩展、索力偏差、疲劳损伤等占据异常报警的比例较大。如何构建合理的系统结构、选择合适的感知技术、搭建有效的数据分析、警报机制等都是目前的研究热点问题。

1 物联网技术与公路桥梁健康监测概述

物联网就是利用信息感知装置把真实世界的所有物体接入到互联网,从而能够自动化地识读并进行信息传送与管理的一种网络架构。桥式结构健康检测中,物联网就是用传感器节点、通信网络、大数据处理平台三者有机结合的方式形成了一条从感知到决策的整体技术链路。桥梁健康监测的目标是提取出能够体现桥梁安全程度的重要量值,针对不同的桥梁构造以及损伤原因,监测对象分为四个方向:环境因素(温度、湿度、风速、风向、有无结冰情况)、外力作用(汽车荷载、抗震反应)、结构特征变化(变形、位移、开裂)、结构受力反应(应变、应力、振型)。监测项目的选择要针对桥梁类型及服役时间及历史病害情况而进行个性化配置,防止出现过量监测与缺失监测同时存在的现象。物联网对桥梁检测提供的主要好处在于它的及时性、准确性以及整体性,从及时性来说,借助 5G 组网技术可以将检测的数据发送到中央监测台来实现超远距离多个点分布式实时在线监测,大大减少了从数据获取到警报反馈的时间差。准确性可以通过对多种传感器检测数据的整合分析以及在节点设备端处理来达到毫米级别的高精度检测,从而符合对桥梁检测所需要的精密要求。协同性上,物联网架构可以实现多种参数之间的对比分析,把应变、振动和温度等不同类型的混杂信号整合起来分析出结构异常行为的先兆特征。

2 公路桥梁健康监测系统总体架构设计

2.1 系统设计原则与目标

桥梁健康监测系统设计应符合可靠可扩展经济标准和标准化的要求。可靠指的是系统能够在野外环境恶劣条件下长时间地可靠运作,传感器要有防水防尘抗电磁干扰的能力;可扩展指的是系统能够根据需要增加或者减少测试点以及扩展相关功能;经济是指系统能够在满足其监控需求的情况下尽可能降低建设和管理的成本;标准化是指系统接口标准化、数据格式规范化、通讯协议标准化,方便数据交换与接入;系统的目的是对桥梁结构的状态进行实时监测、自动报警并提供参考建议,使养护方式由被动式的定期检查转变为依状态主动式的精确化养护。

2.2 感知层结构与传感器布设

感知层即传感层是监控系统的最底层,它由各种各样的传感器以及数据获取装置构成。在选择传感器时需要从所测物理量、准确度、适用环境及造价等角度进行分析,如位移监测可以使用静态水准仪来达到亚毫米位移量的检测精度;对待测混凝土构件的裂缝情况,智能相机+图像处理软件可以自动对裂缝位置以及宽度大小进行判定。X 射线衍射技术通过对金属晶体晶格间距的反推得到相应的应力状况信息,成为一种新型的预应力钢绞线应力测量手段,在近五十座大桥桥面上得到了应用实践。布置传感器时要以重要截面为主,按照冗余设置、合理安置的原则,重要截面如应力集中断面、梁端锚固段附近、跨中、支点、接头等处均应加强监测。

2.3 网络传输层设计

网络传输层的任务是把感知层获取的信息安全地发送到处理中心,在桥梁的空间位置以及网络环境的基础上,可以采取有线和无线相结合的方式,近端使用超低功耗无线网络技术来搭建监测节点,一个监测节点内由一个控制器管理若干个传感器,用 TDMA 方式来划分通信时间片防止竞争发生。远距离传输利用 4G/5G 公共网络,以 MQTT 消息队列技术来提高信息的采集速度和传送效率。对于一些偏僻的桥梁可以用多跳串形网络架构,控制结点一层一层往上传递数据直到中心结点处。在传输层的设计中要尽量保证数据传输的正确性、及时性以及安全性,能够做到断网恢复,脱机存储。

2.4 数据处理与应用层构建

数据处理与应用层负责数据存储及分析、展示、告警等功能,在系统中使用面向对象的编程语言和可视化的图形框架编写采集程序,通过串行通信或者网络通信接口同硬件之间进行交互;数据预处理使用的是均值排除法来获取一定时间段内的 100 个测量数据的滑动平均阈值,从而达到去除离群点的目的;应用层包含数据库管理模块、分析评估模块、告警提示模块三部分。依托数字模型平台对监测的原始数据、特征变量、病害资料以及设计、施工资料进行统一归档管理,分析处理系统嵌入数据预处理、统计学回归、变化规律探索、振型辨识等五十多个专业的数学模型算法,能够方便地以拖拽的形式组装成一套流程。

3 基于物联网的桥梁检测关键技术

3.1 桥梁结构应力与变形监测技术

应力及变形是体现桥梁结构工作状态的重要参数;应变检测主要使用的是电阻应变片以及光纤光栅传感器,碳纳米管水泥基复合材料具有压阻性质,可利用其电阻的变

化来观察结构刚度的改变,从而给混凝土结构健康监测开辟一种新方式;变形检测主要是对挠度、沉降以及转角进行检测;基于 5G 融合感知通讯的方式,应用差分干涉测量的方法来进行无接触式、高频次的动态挠度观测,在此基础上运用二阶盲识别算法去除掉由于风引起的扰动误差,达到亚毫米级监测精度;静力水准仪用来观测桥梁墩台的沉降情况,多个测点构成一个连通管体系,依据液面高低差来求得相应的沉降大小;而对于大跨径桥梁来说,则可以借助 GPS 以及北斗系统对其进行三维位移监测。

3.2 振动与动态响应检测技术

振动特性体现桥梁的整体刚度以及阻尼系数还有边界状态这些动力性能特征。加速度传感器是进行振动测量的主要工具,现代 MEMS 加速度传感器体积小、能耗低、频带宽等特点适合用于连续实时监测。压电器件基于压电效应实现将物理参量转化为精确的电学信号,对桥梁结构物的损伤进行探测分析。而振动分析采用的方法可以是时域上的也可以是频域上的,利用傅里叶变化提取出结构体的固有频率、振型和阻尼率参数。无线传感器节点能够记录下桥梁的振动、应力与环境温度等相关信息,其监控模块由协调器进行管理,允许分布式的并行采集。汽车荷载产生的强制振动反应可以用来分析冲击系数、动态放大倍数,在一定程度上也可以判断桥梁板的平整情况以及伸缩装置的工作状态,同时还可以通过随机振动的测量结果采用模态分析的方法得到桥梁的结构动力特性指标。

3.3 裂缝与损伤识别技术

裂缝是混凝土桥梁最常见的一种破坏类型,而其裂缝宽度、裂缝长度以及发展速度也是衡量结构安全性的重要参数。传统的裂缝检查依靠的是人工观察以及裂缝宽度仪进行测量,工作量并且比较主观。计算机视觉下的裂缝检测技术则是通过深度学习模型对裂缝区域进行分割,经典的 U-Net 神经网络经过 11000 张图像训练以后,可以精确地分辨出混凝土中的裂缝以及非金属裂缝。裂缝几何量化使用的方法为骨架提取法,在 256×256 像素分辨率的情况下裂缝宽度像素误差小于 5%,手机作为移动感知端以众包的形式来获取裂缝图像并带有 GPS 定位坐标信息,从而达到分布式服役桥梁裂缝核查的目的。对于钢桥来说,超声导波及声发射法也可以用来对疲劳开裂进行早期监测,再加上无人机巡检技术能够极大地提高复杂部位开裂检测的覆盖率和施工速度。

3.4 环境参数实时监测技术

环境条件是影响桥梁使用寿命的关键因素之一,在气

温的作用下会有热胀冷缩现象,形成附加内力;湿度过大或过小会影响混凝土硬化和钢筋腐蚀速度;风速风向会对斜拉桥和悬索桥的抗风能力有较大影响。4G 物联网远程温湿度监控系统采用高灵敏度传感器,可以在 -40°C 到 80°C 低温范围内以及 $0 \sim 100\%$ 湿度区间进行监测工作,并且利用 4G 无线传输技术将采集的数据实时发送至上云服务,当出现异常时,会及时以短信、电话及邮箱等多种方式发送报警信息。冰点检测装置用来检测桥面是否结冰,系统投入使用之后桥梁结冰预警准确率达到 100%,机房高温故障减少 85%,应急响应时间缩短超过 60%。风速风向仪一般设在桥塔或者主梁的顶部用来检测风场特性作为风振分析及运营控制的基础。

4 桥梁健康监测数据处理与评估方法

4.1 数据采集与预处理

数据采集是监控系统最基础的部分,传感器输出电信号必须经过放大器放大、滤波器滤波以及 AD 变换之后才能进入监测系统的采集软件,由串口通讯控件基于串行通信方式或者使用网络通讯接口利用 TCP/IP 协议完成对传感器的自动监测及控制作用,采集的数据会受到环境噪声、电磁干扰以及设备本身的损坏等的影响,可能会出现一些异常值以及空缺值。对于这种异常值可以运用拉依达准则或者箱型图来找出异样点,缺失值可以通过线性插补或者相邻点代替的方法来进行补充填补,均值去除法则是通过对当前连续时间段中的 100 条监测数据进行滑动求平均来达到去除异常的目的。在清洗完之后对数据进行统一规范化能够去掉量纲的影响,方便下一步的操作。

4.2 大数据分析 with 状态评估

桥梁监测数据是大规模、多元化的、异质性的、时空相关的,传统的统计手段不能很好发挥其作用,大数据统计分析技术为建筑结构状态评估提供了新手段。工程结构智能监测云平台包含数据预处理、统计回归、趋势分析、模态分析、吊杆索力分析、钢结构疲劳分析等一系列算法模块;通过主成分分析和独立成分分析找出结构响应的主要特性,减少数据信息量。通过 WBS 结构树按桥梁整体、上部结构、下部结构、桥面系及构件五个级别建立监测数据和检验数据之间的联系。状态评级采用层次分析的方法,在载重量、适用性和耐久性的基础上评定桥梁的技术状况。基于机器学习的技术例如支持向量机和随机森林可以创建出结构响应到结构状态之间的映射模型。表 1 列出了以上几种常见的大数据分析技术的基本思想、应用领域以及其利弊。

表 1 桥梁健康监测常用大数据分析方法对比

分析方法	核心原理	主要用途	优势	局限性
主成分分析	通过线性变换将高维数据降维, 提取主要特征分量	数据降维、特征提取、异常检测	计算效率高, 可消除变量间的相关性	丢失部分信息, 对非线性数据处理能力有限
独立成分分析	将观测信号分解为统计独立的非高斯成分	盲源分离、振动信号分解	能够分离独立源信号, 识别隐含因素	对噪声敏感, 成分顺序不确定
层次分析法	将复杂问题分解为多层次结构, 两两比较确定权重	桥梁技术状况综合评定	结构清晰, 易于理解和操作	主观性强, 一致性检验要求高
支持向量机	通过核函数将数据映射到高维空间寻找最优分类超平面	损伤识别、状态分类	小样本下泛化能力强, 可处理非线性问题	参数选择敏感, 大规模样本训练慢
随机森林	集成多个决策树, 通过投票或平均输出结果	状态预测、特征重要性排序	抗过拟合能力强, 可处理高维数据	模型可解释性差, 内存消耗大

4.3 智能预警与风险识别

预警是监控系统的主要输出内容, 预警机制的有效与否对整个系统的有效性有着重要影响。传统的预警是以单一测点阈值超标的方式进行告警, 在一定程度上产生了较多报警假阳性的情况。优化策略给出了风险事件报警以及风险状态告警双层联动机制: 风险事件用特征参数指标超限事件表示, 风险状态使用成桥状态来体现结构的安全水平。在特征参数越界产生风险事件报警之后, 系统依据事先设置好的规则链判定是否具有危险性, 如果有就进行风险状态告警, 反之就只是作为事件记录下来。风险状态有蓝、黄、橙、红四种等级, 对应不同的应急预案等级。基于三十孔桥梁连续近一年运行监测结果表明, 该系统自主报警精确度超过 85%, 通过规则链识别之后橙色级别以上的警报准确率超过 95%。

5 结语

物联网技术对公路桥梁健康检测产生巨大影响, 其包括感知层智能传感器、传输层无线通信以及应用层大数据分析形成完整的方案架构, 分布式光纤传感、碳纳米管自感知混凝土、计算机视觉等一系列新兴技术的应用使得检测精准度逐渐提高, 覆盖面逐步扩大, 目前设备稳定性,

复杂环境下的数据传输稳定性, 不同来源数据之间的整合分析等问题依然有待解决, 智能化方面, 边缘计算缓解了上传至云端的数据量问题, 数字孪生建模可以实现设备层次上的精确建模, 机器学习可以提高损伤探测的准确性。协同化方面, 监测系统与养管系统的结合日益紧密, 基于大数据的决策将成为主流。伴随 5G、AI 及新型传感的发展, 桥梁健康检测会向更加深入地感知, 更高层次的判断, 更加及时的预报的方向进行转变。

[参考文献]

- [1]周坤宇,于丽霞.基于 5G+LoRa 技术的分布式桥梁健康监测系统设计[J].电子制作,2025,33(1):8-12.
- [2]邢政浩,张鹏.智慧云与传感器在桥梁健康监测中的应用[J].四川建材,2026,52(4):98-100.
- [3]尚子煜,陈伏彬.振动测试技术在公路桥梁耐久性评估中的应用[J].城市建设理论研究(电子版),2026(1):153-155.
- [4]唐登维.基于振动测试的桥梁结构损伤识别方法研究[J].山西建筑,2026,52(2):161-163.

作者简介: 阳枝萍 (1993—), 毕业于重庆师范大学涉外商贸学院国际金融专业, 中级工程师, 现就职于新疆北新科技创新咨询有限公司。