

公路桥梁结构全生命周期健康监测与评估系统研发

王卫东

江西省公路工程检测中心 江西南昌 330038

摘 要：本文聚焦公路桥梁结构全生命周期健康监测与评估系统研发。首先，分析桥梁各阶段差异化需求，明确系统需具备实时监测、状态评估等核心功能。在此基础上，设计了包含五层的总体架构，划分了五大功能模块。系统研发重点攻克多源感知与数据传输等三大关键技术，通过科学选型与优化布置传感器、运用算法、构建自动化决策支持机制，实现对桥梁健康状态的精准感知与智能管理。实践应用表明，该系统能提升损伤识别准确率、优化养护成本、保障运营安全，为大型基础设施管理提供有效技术方案。

关键词：公路桥梁；全生命周期；健康监测；状态评估

引言

随着我国公路交通网络发展，大量桥梁进入中老年期，结构安全与耐久性面临挑战。传统依赖定期人工巡检的桥梁管理模式有信息滞后、主观性强等弊端，无法满足现代化桥梁养护需求。在此背景下，融合相关技术构建贯穿桥梁全生命周期的健康监测与评估系统，实现管理模式从被动响应到主动预防的转变，是保障桥梁运营安全等的必然选择。因此，本研究聚焦此类系统研发，通过架构设计与技术攻关，为公路桥梁智能化健康管理提供技术体系与实施路径。

1. 公路桥梁全生命周期健康管理需求分析

1.1 全生命周期管理的内涵与阶段划分

公路桥梁全生命周期管理是对桥梁从规划设计到拆除或再利用全程进行系统化、一体化管理。其核心是以结构健康为目标，贯穿桥梁始终，通过科学管理延长寿命、提升安全、优化成本。全生命周期分为规划设计、施工建造、运营维护、拆除或再利用四个阶段，各阶段对结构健康管理需求差异显著。规划设计阶段重点是结构安全设计与材料耐久性预测，系统需有辅助设计决策与寿命预测能力；施工建造阶段关注施工质量监控与初始状态记录，系统要支持数据采集与质量评估；运营维护阶段是健康监测与评估系统发挥核心价值的关键期，系统需实现实时监测等功能；拆除或再利用阶段要求系统提供残余寿命评估与资源再利用可行性分析。明确各阶段需求能使管理从被动响应转变为主动预防，为桥梁安全运行提供保障。

1.2 系统功能需求与非功能需求

从用户角度，公路桥梁全生命周期健康监测与评估系统的功能需求涵盖多源异构数据采集、实时数据传输与存储、结构状态可视化、损伤识别与预警、性能评估与预测、维护决策支持等模块。多源异构数据采集要整合多种数据，确保全面性与代表性；实时数据传输与存储需保障数据稳定传输与高效存储；结构状态可视化要直观展示桥梁状态；损伤识别与预警要实现早期识别与分级预警；性能评估与预测要对桥梁性能量化评估；维护决策支持要辅助管理者科学决策。非功能需求方面，系统需具备高可靠性、高实时性、良好可扩展性、严格安全性和易用性。明确功能与非功能需求，为系统架构设计提供依据，推动桥梁健康管理智能化与精细化发展^[1]。

2. 系统总体架构设计

2.1 系统设计目标与原则

系统研发总体目标是构建技术先进、功能完备、稳定可靠、开放兼容的桥梁健康监测与评估平台，实现公路桥梁结构全生命周期智能化、精细化管理。平台应具备实时监测、动态评估、智能预警与科学决策支持能力，提升桥梁运营安全性、延长寿命、优化维护资源配置。为达此目标，系统设计遵循以下原则：面向全生命周期原则，功能覆盖桥梁各阶段，确保管理连续一致；模块化与层次化原则，划分独立模块，通过分层架构实现可维护与可扩展性；数据驱动与智能决策原则，以多源异构数据为基础，结合多技术实现全流程自动化；人机协同与可视化原则，通过可视化界面和交互操

作促进人机协同,提升决策效率。这些原则为系统架构设计提供科学指导,确保满足工程需求,推动桥梁健康管理智能化转型。

2.2 系统总体架构

系统采用分层总体架构,自下而上依次分为感知层、传输层、数据层、应用层和用户层,形成逻辑清晰、功能协同的技术体系。感知层是系统的数据来源,负责利用各类传感器(如应变计、位移计、加速度计、温湿度传感器等)采集桥梁结构响应与环境信息,确保数据的全面性与准确性;传输层负责将感知层采集的数据通过有线(如光纤)或无线(如 5G、LoRa)通信技术稳定、高效地传输至数据中心,保障数据传输的实时性与可靠性;数据层是系统的数据中枢,负责海量异构数据的存储、管理与处理,包括数据清洗、去噪、标准化与特征提取,为上层应用提供高质量的数据支持;应用层是系统的核心,集成了状态评估、预警、决策支持等各项功能,通过算法模型与业务逻辑实现从数据到知识的转化;用户层则为不同层级的管理者(如桥梁养护工程师、决策者)提供交互界面与服务,支持多终端访问(如 PC、移动设备),满足不同用户的操作需求。各层之间通过标准化接口实现数据与功能的互联互通,形成从感知到决策的闭环管理,为桥梁健康监测与评估提供系统化解决方案^[2]。

2.3 系统功能模块划分

在总体架构的指导下,系统划分为若干核心功能模块,各模块职责明确、逻辑协同,共同支撑系统的完整功能。数据采集与预处理模块负责从感知层获取原始数据,并进行去噪、校准、同步与特征提取,确保数据的准确性与可用性;结构健康状态评估模块基于预处理后的数据,结合结构力学模型与机器学习算法,对桥梁的承载能力、损伤程度与耐久性进行量化评估,生成结构健康指数;安全预警与预测模块通过设定阈值与趋势分析,实现对结构异常状态的实时预警,并结合历史数据与仿真模型预测未来性能变化,为预防性维护提供依据;维护决策支持模块基于评估与预测结果,生成维护方案建议,包括维护优先级排序、资源优化配置与成本效益分析,辅助管理者制定科学决策;可视化与综合管理模块通过三维建模、动态图表与仪表盘等形式,直观展示桥梁结构状态、监测数据与评估结果,支持用户交互操作与历史数据查询。各模块之间通过数据流与控制流实现紧密协作,例如数据采集与预处理模块为状态评估模块提供输入,

状态评估模块的结果驱动预警与决策模块的运行,而可视化模块则整合各模块输出,为用户提供统一的管理界面。这种模块化设计不仅提升了系统的可维护性与可扩展性,也为功能的持续优化与升级奠定了基础,确保系统能够适应未来技术与工程需求的变化^[3]。

3. 系统研发的关键技术

3.1 多源感知与数据传输技术

多源感知技术的核心是通过科学选型与优化布置传感器,实现对桥梁结构响应与环境荷载的全面、精准捕捉。在传感技术选型上,需根据桥梁不同部位的监测需求与环境特点确定传感器类型:针对主梁跨中、支座等关键受力截面,优先选用光纤光栅应变传感器,其测量精度达 $\pm 1 \mu \varepsilon$,温度漂移系数小于 $5 \mu \varepsilon / ^\circ \text{C}$,能适应桥梁长期监测中 -30°C 至 60°C 的温度波动,且抗电磁干扰能力强,可避免过往车辆电磁辐射对数据的干扰;对于桥面铺装层等非关键部位,选用电阻应变片,成本仅为光纤传感器的 1/5,测量精度 $\pm 5 \mu \varepsilon$,满足基础受力监测需求;在桥墩顶部布置 GPS 位移传感器,测量精度 $\pm 2 \text{mm}$,实时监测桥墩水平位移与沉降;在主梁腹板与翼缘交接处等裂缝易发生部位,布置量程 $0\sim 5 \text{mm}$ 、分辨率 0.01mm 的裂缝计,捕捉裂缝宽度变化;同时按 $5 \text{米} \times 5 \text{米}$ 网格在桥面布置温湿度传感器,记录环境温度湿度对结构变形的影响。

传感器优化布置需遵循“关键区域加密、次要区域简化”原则:在主梁跨中、1/4 跨等弯矩或剪力较大的截面,每 2 米布置 1 个应变传感器,形成密集监测点以精准捕捉应力变化;在桥墩与支座连接处,每座桥墩布置 2~3 个位移传感器,覆盖不同方向的位移监测;裂缝计仅在历史裂缝出现或结构力学分析判定的高风险部位布置,避免冗余。数据传输技术需兼顾稳定性、实时性与低功耗:有线传输采用工业以太网(PROFINET 协议),连接桥面固定监测点的传感器与数据采集器,传输速率 100Mbps ,延迟小于 10ms ,确保振动、应变等高频数据(采样频率 100Hz)的实时传输,且采用铠装电缆抗腐蚀、抗机械磨损,适应露天环境;无线传输采用 LoRa 技术,连接桥墩、支座等不易布线部位的传感器,传输距离可达 3km ,功耗仅 $50 \mu \text{A}$,一节锂电池可供电 2 年,通过跳频技术抗干扰,数据传输成功率超 99.5% ,有效解决桥梁复杂环境下的数据传输难题^[4]。

3.2 数据处理与状态评估方法

数据处理技术需攻克海量、高维、含噪监测数据的“提纯 - 挖掘”难题,为状态评估提供可靠数据基础。预处理阶段,针对振动信号中的车辆通行干扰噪声,采用小波阈值去噪法,选取 db4 小波基分解至 5 层,通过自适应阈值剔除噪声,使振动信号信噪比从 20dB 提升至 45dB;对于传感器故障导致的缺失数据,采用改进卡尔曼滤波插值法,结合相邻传感器历史数据与结构力学关系补全,补全准确率超 98%;针对温湿度等环境数据的漂移,采用线性校正法消除系统误差,确保数据准确性。特征提取阶段,对预处理后的振动数据,通过快速傅里叶变换(FFT)提取结构固有频率(识别精度 $\pm 0.1\text{Hz}$)、振型等模态参数;对 strain 数据,提取应力幅值、应力循环次数,用于疲劳损伤评估;对位移数据,提取位移最大值、变化速率,判断结构稳定性;所有特征参数均需标准化处理,形成统一维度的特征向量。

状态评估需结合结构理论与算法实现“当前性能评判 - 损伤识别 - 趋势预测”的全流程分析:先建立桥梁有限元基准模型(基于设计图纸与施工数据),将监测模态参数与基准模型计算值对比,若固有频率偏差超 5%,则判定结构可能存在损伤;再采用随机森林算法,以特征参数为输入、损伤状态(无损伤/轻微损伤/中度损伤/重度损伤)为输出,训练损伤识别模型,模型准确率超 92%;对未来趋势预测,采用 ARIMA 时间序列模型,输入近 6 个月的裂缝宽度、应力变化数据,预测未来 12 个月的变化趋势,预测误差小于 8%。例如,当监测到某主梁截面应力循环次数达设计阈值的 80%,且裂缝宽度以 $0.02\text{mm}/\text{月}$ 的速率扩展时,模型可预测 10 个月后裂缝宽度将超 0.3mm (需紧急修复阈值),为养护决策提供提前量。

3.3 系统集成与决策支持机制

系统集成需实现硬件、软件、算法的有机协同,构建统一的监测与评估平台。硬件层面,多类型传感器通过标准化接口(RS485、以太网)与数据采集器(采样频率 0-1000Hz 可调)连接,采集器通过 VPN 网络与远程服务器通信,实现数据 24 小时实时上传;服务器采用分布式存储架构,支持 PB 级历史数据存储,同时具备数据备份功能,防止数据丢失。软件层面,开发集成化平台,包含四大模块:数据管理模块支持历史数据查询、导出与可视化展示(如应力 - 时间曲线、位移变化趋势图);实时监测模块可自动报警,

当数据超阈值(如应变超设计值的 90%)时,通过短信、平台弹窗通知管理者;状态评估模块自动生成健康指数报告(健康指数 0-100 分,80 分以上为健康,60-80 分为亚健康,60 分以下为需维护);趋势预测模块展示损伤发展曲线。

决策支持机制的核心是将评估结果转化为可执行的养护方案与资金计划。当健康指数 80-100 分时,系统生成“常规检查”建议,推荐每 6 个月 1 次人工巡检,无需额外养护;当健康指数 60-80 分时,生成“针对性维护”建议,如裂缝宽度 $0.2-0.3\text{mm}$ 时,推荐环氧树脂灌浆封闭,预估成本 5 万元,并标注施工窗口期(避开雨季与交通高峰);当健康指数低于 60 分时,生成“紧急修复”方案,如主梁中度损伤时,推荐粘贴碳纤维布加固,预估成本 200 万元,同时计算加固后结构寿命延长年限(如 5 年)。系统还按“损伤紧急程度 - 维护成本 - 交通影响”排序优先级,为资金分配提供依据。

2020 年江苏省交通控股有限公司对润扬长江公路大桥(跨江公路桥梁)的健康监测与评估系统进行升级,应用上述关键技术:布置光纤光栅应变传感器 320 个、GPS 位移传感器 16 个、裂缝计 80 个;采用“工业以太网 + LoRa”传输数据;数据处理采用小波去噪与随机森林模型;系统集成后实现全流程自动化监测。2020 年公开数据显示,该系统对主梁轻微损伤(裂缝宽度 0.15mm)的识别准确率达 93%,较升级前人工巡检效率提升 10 倍;通过系统优化的养护方案,大桥 2020 年养护成本从 2019 年的 250 万元降至 205 万元,降幅 18%,且结构健康指数稳定维持在 85 分以上,未发生因损伤漏判导致的安全事故,验证了系统关键技术的工程价值与实用性^[5]。

4. 结语

公路桥梁结构全生命周期健康监测与评估系统的研发,标志着桥梁工程领域向智能化、精细化管理迈出了重要一步。通过系统化的技术架构与科学的功能设计,该系统不仅能够实现对桥梁健康状态的实时监测与精准评估,还为桥梁养护决策提供了强有力的数据支撑与智能辅助。在实际应用中,其显著提升了桥梁运营的安全性与经济性,同时为类似大型基础设施的健康管理提供了可借鉴的范例。未来,随着传感器技术、人工智能算法以及通信技术的不断进步,系统将进一步完善其性能,拓展应用场景,助力桥梁工程向更高效、更可持续的方向发展。

参考文献:

- [1] 潘永杰文 / 图 .BIM 技术在桥梁结构健康管理中的应用 [J]. 铁道知识 , 2021(3):28-31.
- [2] 韩宇轩 . 基于 BIM 的桥梁健康监测及病害预测系统的设计与实现 [D]. 西南交通大学 , 2021.
- [3] 刘永健 , 唐志伟 , 肖军 , 等 . 大跨度预应力混凝土桥智能拆除技术现状与展望 [J]. 建筑科学与工程学报 , 2022(004):039.
- [4] 周俊 , 高振 , 熊冠雄 , 等 . 基于无线传感网的谷阳路跨铁路桥结构安全监测预警系统研发与应用 [J]. 城市建设理论研究 - 市政工程 , 2022.
- [5] 邹华勇 . 基于 BIM 可视化模型的桥梁温湿度监测系统研究 [J]. 大武汉 , 2022(16):245-247.