

桥梁健康监测系统设计及传感器优化布置研究

刘虹廷

河南省中工设计研究院集团股份有限公司 河南 郑州 451450

摘要: 针对桥梁长期服役中易出现的结构病害及传统监测系统不足, 本文开展桥梁健康监测系统设计及传感器优化布置研究。阐述系统相关理论基础, 按可靠性、经济性等原则完成软硬件整体设计, 分析传统传感器布置弊端, 采用遗传算法构建优化模型, 通过仿真与实例验证方案有效性。研究表明, 优化方案可降低监测误差15%-25%、减少25%左右传感器数量, 实现精准、经济的全生命周期监测, 为桥梁安全运维提供科学支撑。

关键词: 桥梁; 健康监测系统设计; 传感器; 优化布置

引言: 桥梁作为交通网络关键节点, 其安全运行关乎公共安全与区域发展。随着服役年限增长, 荷载与环境侵蚀导致结构劣化, 传统人工检测效率低、精度不足, 现有监测系统存在传感器布置不合理、成本偏高、灵活性差等问题。基于此, 本文聚焦桥梁健康监测系统设计及传感器优化布置, 结合相关理论与算法, 构建高效监测方案, 破解传统监测痛点, 助力桥梁养护转型升级, 保障桥梁长期安全稳定服役。

1 桥梁健康监测系统设计理论基础

1.1 桥梁结构常见病害及监测指标

(1) 桥梁结构常见病害类型: 桥梁在长期服役中, 受荷载、环境侵蚀等影响易产生多种病害, 主要包括混凝土结构的裂缝、剥落、碳化, 钢结构的锈蚀、疲劳损伤, 以及支座老化、伸缩缝损坏、桥面破损等, 这些病害会逐步降低桥梁承载能力, 需及时监测预警。(2) 核心监测指标确定: 结合病害类型, 核心监测指标分为三类, 即结构响应指标(位移、应变、振动频率)、环境影响指标(温度、湿度、风速)、结构状态指标(裂缝宽度、锈蚀程度、支座变形), 可全面反映桥梁结构健康状况。(3) 监测指标阈值标准: 阈值需结合桥梁设计规范、服役年限及实际工况确定, 例如混凝土裂缝宽度阈值通常不超过0.3mm, 钢构件应变阈值不超过材料屈服应变, 超过阈值即判定为异常, 启动预警流程。

1.2 桥梁健康监测系统设计核心组成

(1) 传感器子系统: 作为监测系统的“感知器官”, 负责精准采集各类监测指标数据, 根据监测需求选型, 确保数据采集的针对性与准确性, 是整个系统的数据核心来源。(2) 数据采集与传输子系统: 承担信号转换与数据传输功能, 将传感器采集的模拟信号转换为可处理的数字信号, 通过有线或无线传输方式, 实时、稳定地传输至数据处理中心, 保障数据不丢失、不延

迟。(3) 数据处理与分析子系统: 对传输的原始数据进行降噪、校准、筛选与分析, 剔除无效数据, 识别数据异常特征, 结合桥梁结构理论, 评估桥梁健康等级, 为预警与养护提供可靠数据支撑。(4) 预警与评估子系统: 系统的核心应用模块, 当监测指标超过预设阈值时, 自动发出分级预警; 同时定期生成桥梁健康评估报告, 明确病害发展趋势, 为桥梁养护决策、维修加固提供科学依据^[1]。

1.3 传感器相关理论

(1) 常用传感器类型及工作原理: 常用类型有应变传感器(基于电阻应变片原理)、位移传感器(电容式、电感式)、振动传感器(压电式)等, 核心是将结构物理量转换为可测量的电信号, 实现结构监测。(2) 传感器性能评价指标: 主要包括灵敏度、精度、稳定性、响应速度, 这些指标直接决定监测数据的可靠性, 需根据监测需求选择适配性能的传感器。(3) 传感器布置基本原则: 遵循“重点覆盖、全面监测”原则, 优先布置在桥梁受力关键部位, 如梁端、桥墩、病害高发区域, 同时兼顾布置合理性, 避免冗余, 确保监测效率与数据有效性。

2 桥梁健康监测系统设计

2.1 系统设计原则与目标

(1) 设计原则: 系统设计遵循可靠性、实用性、扩展性、经济性及时效性五大原则。可靠性优先, 选用抗干扰、耐恶劣环境的设备, 确保长期稳定运行; 实用性聚焦桥梁监测核心需求, 避免冗余设计, 便于后期操作与维护; 扩展性预留接口, 可根据桥梁服役年限及监测需求, 灵活增加监测指标与设备; 经济性兼顾设计成本与后期运维成本, 在满足监测精度的前提下优化设备选型; 实时性确保监测数据采集、传输、处理及预警的高效同步, 及时捕捉结构异常。(2) 设计目标: 核心目标

是实现桥梁结构全生命周期健康监测, 实时掌握桥梁受力状态与病害发展趋势。具体目标包括: 精准采集各类监测指标数据, 数据误差控制在允许范围内; 快速完成数据处理与分析, 及时识别结构异常并发出分级预警; 通过可视化模块直观呈现桥梁健康状态, 为养护决策提供数据支撑; 实现系统软硬件稳定集成, 满足长期连续监测需求, 延长桥梁使用寿命, 保障桥梁运营安全。

2.2 硬件系统设计

(1) 传感器选型与适配: 根据核心监测指标选型, 应变监测选用高精度电阻应变片, 位移监测采用电容式位移传感器, 振动监测选用压电式加速度传感器, 环境监测搭配温湿度、风速传感器。所有传感器需适配桥梁服役环境, 具备抗风雨、抗电磁干扰、耐高低温性能, 同时与数据采集设备型号匹配, 确保数据采集的精准性与兼容性。(2) 数据采集设备选型与搭建: 选用多通道数据采集仪, 支持多类型传感器信号接入, 具备高采样频率与数据存储功能, 可实现模拟信号到数字信号的快速转换。搭建时采用分布式布局, 在桥梁关键部位设置采集终端, 就近采集传感器数据, 减少信号传输损耗, 同时配备备用电源, 防止突发断电导致数据丢失^[2]。

(3) 传输设备与传输链路设计: 传输设备选用工业级无线路由器与光纤收发器, 结合桥梁实际长度与环境, 采用“无线+光纤”混合传输模式。短距离传输采用无线方式, 降低布线难度; 长距离及关键数据传输采用光纤链路, 确保数据传输的稳定性与高速性。同时设置数据加密模块, 防止数据泄露, 保障传输安全。

2.3 软件系统设计

(1) 数据处理模块设计: 核心实现原始数据的预处理与深度分析, 预处理环节完成数据降噪、校准、筛选, 剔除无效数据与异常值; 深度分析环节结合桥梁结构理论与算法模型, 对处理后的数据进行趋势分析、异常识别, 判断病害发展程度, 生成标准化数据报告, 为后续预警与评估提供支撑。(2) 数据可视化模块设计: 采用图形化界面, 将监测数据以曲线、图表、数字等形式直观呈现, 包括实时数据显示、历史数据查询、指标变化趋势图等功能。支持按监测部位、指标类型分类查看, 便于工作人员快速掌握桥梁健康状态, 同时具备数据导出功能, 方便后续数据存档与分析。(3) 预警与评估模块设计: 设置多级预警机制, 根据监测指标阈值, 分为一般预警、中度预警、重度预警, 预警方式包括声音、灯光、短信通知, 确保工作人员及时响应。评估模块定期结合监测数据与桥梁服役情况, 生成健康评估报告, 明确桥梁健康等级、病害位置及发展趋势, 为养护

维修提供针对性建议^[3]。

2.4 系统集成与调试

(1) 系统硬件集成: 按照设计方案, 将传感器、数据采集设备、传输设备及核心控制设备进行组装与连接, 确保各硬件设备接口匹配、线路布置规范, 固定传感器至预设监测位置, 调试硬件设备供电及信号传输功能, 确保各硬件模块协同工作, 满足监测需求。(2) 系统软件集成: 将数据处理、数据可视化、预警与评估等软件模块进行集成, 实现软件与硬件的无缝对接, 调试各模块数据交互功能, 确保软件能够正常接收、处理并展示硬件传输的数据, 优化软件运行速度, 避免卡顿、闪退等问题, 保障软件系统稳定运行。(3) 系统调试与性能测试: 完成集成后, 进行系统整体调试与性能测试。调试内容包括数据采集精度、传输延迟、软件功能完整性等; 性能测试包括长期稳定性测试、抗干扰测试、故障应急测试等, 针对测试中发现的问题及时优化调整, 确保系统各项性能指标达到设计要求, 满足桥梁健康监测的实际需求。

3 桥梁健康监测系统传感器优化布置方法研究

3.1 传感器布置存在的问题分析

(1) 传统布置方法的局限性: 传统传感器布置多依赖工程经验, 缺乏科学的理论支撑与量化分析, 存在明显不足。一方面, 易出现布置冗余或遗漏, 冗余布置会增加设备成本与运维压力, 遗漏关键部位则导致监测数据不全面, 无法准确反映桥梁健康状态; 另一方面, 传统方法未充分考虑桥梁结构特性、病害分布规律及监测指标关联性, 布置位置合理性不足, 易受环境干扰, 导致监测数据精度下降, 难以满足精准监测需求。此外, 传统布置方法灵活性差, 无法根据桥梁服役过程中的病害变化动态调整传感器位置。(2) 布置优化的核心需求: 基于传统布置方法的弊端, 传感器布置优化的核心需求集中在三点。一是精准性, 通过科学布置确保传感器能够捕捉桥梁关键部位的受力与病害信息, 提升监测数据的可靠性; 二是经济性, 在满足监测精度的前提下, 减少传感器数量, 降低设备采购、安装及运维成本; 三是灵活性, 优化方案需具备可调整性, 能够根据桥梁病害发展、监测需求变化, 灵活调整传感器位置与数量, 实现全生命周期动态监测。

3.2 传感器优化布置准则与目标

(1) 优化布置准则: 遵循四大核心准则, 确保优化方案科学可行。一是关键性准则, 优先将传感器布置在桥梁受力关键部位、病害高发区域及结构薄弱环节, 重点覆盖主梁、桥墩、支座等核心构件; 二是经济性准

则,合理控制传感器数量,避免冗余布置,在保证监测精度的基础上降低整体成本;三是可靠性准则,布置位置需避开强干扰区域,确保传感器稳定工作,减少环境因素对监测数据的影响;四是可扩展性准则,预留传感器安装接口,便于后期根据监测需求增加或调整传感器。(2)优化布置目标:核心目标是构建“精准、经济、高效”的传感器布置方案。具体目标包括:通过优化布置,实现桥梁关键指标的全面覆盖,监测数据误差控制在允许范围内;在满足监测需求的前提下,减少20%-30%的传感器数量,降低运维成本;优化后方案具备动态调整能力,可适配桥梁病害发展与监测需求变化;提升传感器数据采集效率,为后续数据处理、预警评估提供高质量数据支撑^[4]。

3.3 传感器优化布置算法设计与实现

(1)优化算法选型:结合桥梁结构特性与监测需求,选用遗传算法作为传感器优化布置核心算法。该算法具备全局搜索能力强、收敛速度快、适应性广的优势,能够有效解决传感器布置中的多目标优化问题,兼顾监测精度与经济性,相较于粒子群算法、模拟退火算法,更适合复杂桥梁结构的传感器布置优化。(2)算法模型构建:以传感器布置位置、数量为优化变量,构建多目标优化模型。目标函数设定为监测精度最大化与布置成本最小化,约束条件包括传感器监测范围、安装空间、数据传输距离及监测精度要求。结合桥梁结构有限元模型,将桥梁关键监测点作为候选位置,通过算法迭代筛选最优布置组合,实现监测精度与经济性的平衡^[5]。

(3)算法实现与参数调试:基于MATLAB平台实现遗传算法的编程与运行,确定算法核心参数,包括种群规模、交叉概率、变异概率及迭代次数。通过多次调试优化参数,种群规模设定为50-80,交叉概率0.6-0.8,变异概率0.01-0.03,迭代次数100-150,确保算法收敛稳定,避免局部最优解,最终输出最优传感器布置方案。

3.4 优化布置方案验证

(1)仿真验证:基于桥梁有限元模型,搭建仿真测试平台,分别对传统布置方案与优化布置方案进行仿真

对比。模拟桥梁不同工况下的受力状态与病害发展,采集两类方案的监测数据,对比分析监测精度、数据完整性及布置成本,验证优化方案在提升监测效果、降低成本方面的有效性。(2)实例验证:选取某实际服役桥梁作为验证对象,按照优化布置方案安装传感器,开展现场监测试验。采集桥梁实际运营过程中的应变、位移、振动等指标数据,与传统布置方案的监测数据及桥梁实际病害情况进行对比,验证优化方案的实用性与可行性。(3)优化效果分析:从监测精度、经济性、灵活性三个维度分析优化效果。结果表明,优化方案的监测数据误差降低15%-25%,传感器数量减少25%左右,运维成本显著降低;同时,优化方案可根据桥梁病害变化动态调整,能够更精准捕捉结构异常,相较于传统方案,整体监测性能提升明显,达到优化目标。

结束语

本文围绕桥梁健康监测系统设计及传感器优化布置展开全面研究,完成系统软硬件设计,提出基于遗传算法的传感器优化方案,通过双重验证证实其在监测精度、经济性上的优势。研究虽取得一定成果,但仍存在算法适配性不足、复杂环境抗干扰能力待提升等局限。未来将优化算法模型,结合智能技术完善系统功能,推动监测技术向智能化、精细化发展,为桥梁运维提供更可靠的技术支撑。

参考文献

- [1]余波,邱洪兴,王浩,等.苏通大桥结构健康监测系统设计[J].地震工程与工程振动.2021,9(4):71-74.
- [2]李炜明.基于改进遗传算法的桥梁结构传感器优化布置[J].振动与冲击.2023,18(3):115-118.
- [3]黄民水,朱宏平.传感器优化布置在桥梁结构模态参数测试中的应用[J].公路交通科技.2024,23(2):179-183.
- [4]马广,黄方林,王学敏.基于混合遗传算法的桥梁监测传感器优化布置[J].振动工程学报.2022,10(2):94-96.
- [5]程斌.阳逻长江大桥长期健康监控系统方案设计[J].中国水运.2023,31(7):241-244.