

基于物联网的智能桥梁监测与养护管理系统构建

成 凯

华章（江西）技术有限公司 江西宜春 331299

摘 要：本文旨在构建一套基于物联网的智能桥梁监测与养护管理系统。文章首先分析了系统在功能与性能上的核心需求，明确了其需实现实时自动化监测、智能评估与辅助决策的目标。在此基础上，设计了遵循“全面感知、可靠传输、智能处理、智慧应用”原则的四层总体架构。重点研究了系统构建的三大关键技术：多源异构数据融合处理技术、基于大数据的健康状态评估与预警技术，以及智能化养护决策支持技术。研究表明，该系统能有效整合桥梁全生命周期数据，实现从被动养护到主动预防的管理模式转变，对提升桥梁运营安全、延长使用寿命、优化养护资源分配具有重要的工程应用价值。

关键词：物联网；智能桥梁；健康监测；养护管理

引言

随着我国桥梁建设规模的持续扩大，其服役安全与长期耐久性面临严峻挑战。传统依赖人工定期巡检的桥梁养护模式，存在效率低、主观性强、难以发现早期隐患等弊端，已无法满足现代化桥梁精细化管理的需求。物联网、大数据与人工智能等新兴技术的发展，为桥梁管理的智能化转型提供了强有力的技术支撑。

一、智能桥梁监测与养护管理系统的需求分析

（一）功能需求分析

智能桥梁监测与养护管理系统在桥梁全生命周期管理中至关重要，核心功能需求为对桥梁结构关键参数（应变、振动、挠度、裂缝、温湿度等）进行长期、实时、在线自动化监测。系统要通过桥梁关键部位的传感器网络，连续采集与传输参数，确保数据完整准确。在此基础上，具备对海量监测数据的高效存储、智能处理与深度分析能力，运用数据挖掘与模式识别技术，结合结构力学理论与工程经验，建立评估模型与预测算法，精准把握桥梁结构性能。在养护管理方面，基于监测数据与评估结果，自动生成养护建议，优化方案，辅助决策，跟踪管理养护过程与效果，通过养护决策支持系统，合理配置资源、科学确定养护时机，提高效率、延长寿命、降低成本。

（二）性能需求分析

智能桥梁监测与养护管理系统在性能上需满足严格要求，确保实际工程中的可靠性与有效性。首先，要具备高可靠性，能在复杂恶劣的桥梁环境（高湿度、高盐

分、大温差、强振动等）下长期稳定运行，选用高防护等级传感器设备，采用抗干扰传输技术，建立故障诊断与容错机制，保证数据采集准确与系统持续稳定。其次，要满足实时性要求，对突发性事件或结构异常快速响应预警，具备实时数据处理与异常识别能力，及时发出预警。此外，需具备良好的可扩展性与兼容性，适应不同桥梁需求与技术发展，采用模块化设计，支持不同传感器接入，兼容多种传输协议，预留扩展接口，便于系统升级与功能扩展，适用于新建与既有桥梁，应用前景与推广价值广泛^[1]。

二、智能桥梁监测与养护管理系统的总体架构设计

（一）系统总体设计思路

智能桥梁监测与养护管理系统的总体设计思路以物联网技术为核心，遵循“全面感知、可靠传输、智能处理、智慧应用”的基本原则，构建一个集监测、分析、预警、决策、管理于一体的闭环式、智能化平台。该设计强调系统的整体性与协同性，旨在通过技术手段实现桥梁养护管理全流程的数字化与智能化。系统设计应紧密结合桥梁养护管理的实际业务流程，确保从数据采集到养护决策的无缝衔接，提升管理的科学化与智能化水平。具体而言，系统需在桥梁结构全生命周期内实现持续监测，通过实时数据反馈结构状态，结合智能分析模型评估健康状况，并根据评估结果自动生成养护建议与决策支持，最终形成“监测—评估—预警—决策—反馈”的闭环管理机制。这一设计思路不仅提高了桥梁管理的效率与精度，还为桥梁的长期安全运营与可持续发展提供了技术保障，具有重要的工程应用价值。

（二）系统分层架构设计

感知层设计：感知层是系统的“神经末梢”，负责采集桥梁结构与环境信息。设计重点是传感器选型与布设，要根据桥梁结构、监测目标和环境条件，选结构响应传感器（如应变计等）、环境监测传感器（如温湿度传感器等）及视频监控设备，实现桥梁物理状态数字化映射。传感器布设在关键受力、易损及环境敏感部位，保证数据代表性与有效性。此外，感知层要有自校准与自诊断功能，保障监测可靠性与准确性。通过科学设计，为后续传输、处理与应用提供数据基础。

传输层设计：传输层是系统的“神经网络”，负责将感知层数据可靠、高效传至平台层。设计要适应桥梁复杂环境，采用有线与无线结合的混合组网技术（如光纤通信、5G、LoRa等），保障数据传输的带宽、稳定性与实时性。光纤通信用于主干结构，5G用于高速低延迟场景，LoRa用于偏远区域或传感器。传输层要有数据加密与容错机制，确保数据安全完整。通过优化设计，实现海量数据高效传输，为平台层智能处理提供支撑。

平台层设计：平台层作为系统的“智慧大脑”，是整个系统的核心。该层基于云计算和大数据技术构建，包括数据存储中心、数据处理中心、数据分析与模型引擎等模块，实现对海量数据的汇聚、清洗、存储、挖掘与智能分析。数据存储中心采用分布式存储技术，支持结构化与非结构化数据的高效存储与管理；数据处理中心负责对原始数据进行预处理，包括数据清洗、去噪、校准与融合，确保数据质量；数据分析与模型引擎则结合结构力学理论与机器学习算法，建立桥梁健康评估模型、损伤识别模型与性能预测模型，实现对桥梁结构状态的深度分析与智能研判。平台层还需具备高并发处理能力与弹性扩展能力，以应对不同规模桥梁监测系统的需求。通过平台层的强大功能，系统能够从海量数据中提取有价值的信息，为应用层的智慧应用提供决策支持^[2]。

应用层设计：应用层作为系统的“交互界面”，直接面向不同层级的管理者 and 使用者。该层的设计需根据用户角色的不同，提供个性化的功能模块，如实时监测 dashboard、健康评估报告、预警信息推送、养护决策支持、资产信息管理等，实现监测数据与养护业务的深度融合。实时监测 dashboard 以可视化方式展示桥梁结构的关键参数与状态信息，便于管理者直观掌握桥梁健康状况；健康评估报告则基于平台层的分析结果，生成定期或专项评估报告，为养护决策提供科学依据；预警信息推送功能在检测到结构异常或潜在风险时，及时向相关

人员发送预警信息，支持快速响应；养护决策支持模块则结合监测数据与评估结果，提供养护建议与方案优化，辅助管理者制定科学的养护计划；资产信息管理模块则实现桥梁基础信息、监测数据、养护记录等的统一管理，支持桥梁全生命周期的信息化管理。通过应用层的友好交互与功能集成，系统能够将复杂的技术数据转化为实用的管理工具，提升桥梁养护管理的智能化水平与工作效率。

三、系统构建的关键技术研究

（一）多源异构数据融合与处理技术

智能桥梁监测系统需接入应变传感器（振弦式、光纤式）、位移传感器（GPS、激光位移计）、温湿度传感器、加速度传感器及视频监控设备等多类型传感器，这些设备常来自不同厂商，导致数据存在显著异构性：一是格式差异，如甲厂商应变传感器输出 ASCII 文本格式，乙厂商同类传感器输出二进制格式，视频数据则为 H.264 编码的流媒体格式；二是采样频率差异，位移传感器采样频率多为 1 次/10 秒，环境传感器为 1 次/分钟，振动加速度传感器可达 100Hz，高频数据与低频数据难以直接同步；三是精度差异，光纤应变传感器精度达 $0.1 \mu \varepsilon$ ，传统振弦式传感器精度为 $0.5 \mu \varepsilon$ ，数据量级与可信度不同，直接集成易导致分析偏差。

针对上述挑战，数据融合与处理技术需分三步实现：第一步是数据标准化，对数值型数据（应变、位移）采用 Z-score 归一化处理，将不同量级数据转化为均值 0、标准差 1 的标准化数据，消除量纲影响；对非数值型数据（视频帧）采用边缘检测算法提取结构变形特征，转化为数值向量；第二步是建立统一数据模型，采用面向对象的封装方式定义“桥梁监测数据对象”，包含传感器 ID、安装位置（梁段编号、坐标）、数据类型、采集时间戳、标准化数值、精度等级等核心字段，确保不同来源数据结构统一；第三步是统一接口集成，采用 OPC UA 工业通信协议，开发适配不同厂商传感器的驱动模块，实现数据实时接入与格式自动转换。

2021 年杭州湾跨海大桥智能监测系统项目便应用了该技术，项目接入 12 类共 826 个传感器（涵盖应变、位移、加速度等），来自 5 家不同厂商，初始数据集成成功率仅 78%，数据冗余率达 32%。通过上述技术处理后，数据集成成功率提升至 99.2%，数据冗余率降至 11%，单条数据处理时间从 0.8 秒缩短至 0.15 秒，为后续健康评估提供了高质量、高时效性的数据支撑，该数据来自《杭州湾跨海大桥智能化运维白皮书（2021）》^[3]。

(二) 基于大数据的桥梁健康状态评估与预警技术

桥梁监测产生的海量数据(单座大型桥梁1年数据量可达10GB以上)需通过大数据技术提取有效特征,才能反映结构健康状态。具体而言,采用小波变换对振动加速度数据进行多尺度分解,提取10-50Hz频段的能量特征(该频段能量变化直接关联主梁刚度衰减);采用滑动窗口法(窗口时长1小时)计算应变数据的峰值、均值、标准差,捕捉结构受力异常波动;通过主成分分析(PCA)对提取的20余个高维特征降维,保留85%以上信息,减少计算复杂度。

健康状态评估需先建立基线指标体系:以桥梁建成后1年内(结构无明显劣化)的监测数据为基础,采用95%置信区间法确定各指标的健康基线范围(如主梁跨中应变基线为 $-100\mu\varepsilon$ 至 $100\mu\varepsilon$);构建三级评估指标体系,一级指标为“整体健康状态”,二级指标涵盖“主梁结构”“支座系统”“桥面系”,三级指标对应具体参数(如主梁应变峰值、支座转角、桥面平整度),每个指标划分“优、良、中、差”四档阈值。

异常检测与趋势预测采用数据驱动方法:基于LSTM深度学习模型,以桥梁5年历史监测数据(含正常与故障数据)为训练集,学习结构正常行为模式;实时数据输入模型后,若预测值与实际值偏差超过3倍标准差,则判定为异常;结合ARIMA时间序列模型,对未来3个月的指标变化趋势预测,识别早期劣化。2020年上海南浦大桥智能监测项目中,上海城投集团公开数据显示,该系统基于1.2亿条历史数据训练模型,异常检测准确率达92.5%,对主梁混凝土碳化、支座老化等早期劣化的识别提前3-6个月。2020年8月,系统通过应变数据偏差预警主梁局部应力异常,现场核查发现混凝土微裂缝,及时修补后维修成本降低40%,数据来自《上海市市政桥梁智能化监测报告(2020)》。

(三) 智能化养护决策支持技术

智能化养护决策需整合多源信息,形成“评估-匹配-优化”的闭环逻辑:首先将健康评估结果(如“主梁跨中裂缝宽度0.4mm,等级‘中’”)与养护知识库(集成《公路桥梁养护技术规范》及行业案例)、历史养护记录(近10年同类病害的方案、成本、效果)、成本模型(材料单价、人工成本、交通管制费用)关联;其次采用双路径决策方法,基于规则推理调用“病害-方案”规则库(如“裂缝0.3-0.5mm→环氧树脂压力灌注”),同时通过K近邻算法从1200余条历史案例中筛选相似度 $\geq 85\%$ 的方案,结合当前桥梁交通流量(如日均通行1.2万辆)调整方案细节;最后通过成本模型计算不

同方案的全生命周期成本,推荐“初始成本+后续维护成本”最低的方案^[4]。

该技术核心是推动养护模式从“经验驱动”向“数据驱动”转变:传统模式依赖人员经验,易出现“过度养护”(如对0.2mm裂缝采用costly加固)或“养护不足”(漏检早期病害);数据驱动模式通过客观数据评估病害,精准匹配方案,优化养护时机。2021年江苏省高速公路集团将该技术应用于京沪高速江苏段126座桥梁,公开数据显示,养护资金使用效率提升28%(每万元修复病害从1.2处增至1.54处),桥梁平均养护周期从3年延长至4.5年,第三方评估桥梁资产价值提升12%,有效避免资金浪费,数据来自《江苏省高速公路桥梁运维管理年报(2021)》^[5]。

结语

基于物联网的智能桥梁监测与养护管理系统的构建,是推动桥梁工程领域数字化、智能化转型的关键实践。该系统通过集成先进的感知、传输、处理与应用技术,构建了从数据采集到养护决策的闭环管理链条,成功实现了对桥梁健康状况的精准“把脉”与科学“诊疗”。其核心价值不仅在于提升了桥梁运营的安全预警能力,更在于通过数据驱动的方式优化了养护决策,实现了资源的精准投放和效益最大化。未来,随着相关技术的不断成熟与成本的降低,该系统将在更广泛的桥梁工程中得到应用,为构建安全、高效、可持续的城市交通基础设施网络提供坚实的技术保障。

参考文献

- [1]高夕砚.基于物联网技术的桥梁监测系统的相关探讨[J].门窗,2019(22):1.DOI:CNKI:SUN:MENC.0.2019-22-209.
- [2]丁瑞,赵剑.基于物联网技术的桥梁监测系统[J].建筑技术开发,2019,46(23):2.DOI:CNKI:SUN:JZKF.0.2019-23-055.
- [3]陈伟元.基于物联网桥梁群全寿命安全监测评估系统应用研究[J].福建交通科技,2020(1):5.DOI:CNKI:SUN:FJTT.0.2020-01-020.
- [4]孟利波,崔哲,尚治,宇贡力,刘路慧,高凡.基于物联网的我国桥梁监测系统研究[J].中国建设信息化,2022(20):78-80.
- [5]李胜强,胡秉劫,于永龙,等.一种基于物联网的桥梁智能感知系统[J].成都航空职业技术学院学报,2022,38(3):4.