

智慧市政背景下道路桥梁全生命周期监测系统构建

刘思军

南昌华路建设咨询监理有限公司 江西南昌 330000

摘要: 随着智慧市政建设推进,道路桥梁安全运营与管理要求提高。针对传统监测模式实时性不足等问题,本文提出构建道路桥梁全生命周期监测系统。该系统基于新一代信息技术,整合各阶段数据,通过协同架构实现动态监测与智能分析。研究探讨了总体设计方案,涵盖多源异构数据采集与融合等技术。此系统可提升监测精准度与时效性,为养护决策提供依据,延长设施寿命、降低成本,为城市基础设施精细化管理提供技术支撑。

关键词: 智慧市政;道路桥梁;全生命周期;监测系统

引言

城市道路桥梁是保障城市功能、支撑经济社会发展的“生命线”。近年来,城市化加速、交通荷载增长,既有道路桥梁面临结构老化等挑战,传统巡检、检测模式存在覆盖有限等弊端,难以满足现代城市对基础设施安全保障的精细化、智能化需求。智慧市政理念提供新思路,通过物联网等技术与市政基础设施管理融合,实现城市部件一体化管理。在此背景下,构建道路桥梁全生命周期动态监测系统,整合数据、提升管理科学性成为行业发展重要方向。目前,国内外学者在桥梁结构健康监测领域开展大量研究,但多集中于单点技术突破,缺乏全生命周期数据链条的系统性整合,在设计与运营阶段数据割裂等问题上未形成成熟方案。此外,现有系统多针对大型桥梁,对城市中小型桥梁和普通道路普适性监测方案研究少,难以适应智慧市政大规模推广需求。

一、智慧市政与全生命周期监测的理论基础

(一) 智慧市政的内涵与发展趋势

智慧市政是城市信息化高级阶段,利用新一代信息技术对城市基础设施进行感知、互联、分析和运作,强调从传统管理向主动、系统治理转变。在道路桥梁领域,能实时掌握设施状态等。当前发展趋势有三:感知层泛在精准,通过部署传感器全方位采集信息;数据处理平台智能,构建大数据中心挖掘数据;应用服务协同一体,融合多系统提升管理效能。理解其内涵与趋势,为全生命周期监测系统构建提供方向与技术选型依据。

(二) 道路桥梁全生命周期管理的概念与框架

道路桥梁全生命周期管理将桥梁从规划到拆除视为

整体统筹管理,突破传统管理局限。其管理框架含规划设计信息创建移交、施工质量控制记录、运营养护性能监测评估、最终处置资源化利用四个环节,以数据特别是BIM技术为核心支撑。阐述该概念与框架,为全生命周期监测系统定位提供逻辑边界,监测系统需考虑与前后数据的兼容性和互操作性。

(三) 结构健康监测技术的基本原理

结构健康监测技术通过布设传感器网络采集结构响应信息,评估结构损伤、安全和耐久性。原理基于多学科交叉,当结构损伤时物理特性改变致响应变化,技术通过捕捉响应参数反演结构状态,技术链条含数据采集、传输、处理提取、诊断评估,数据处理提取是核心。阐明原理为全生命周期监测系统提供科学依据,确保监测结果科学可靠^[1]。

(四) 全生命周期监测系统的构建需求与意义

在智慧市政背景下,构建道路桥梁全生命周期监测系统有现实需求和战略意义。需求源于桥梁安全运营、市政管理精细化、技术发展驱动。构建该系统能改变桥梁养护模式,建立性能退化模型,优化资金投入、延长寿命,极端事件后快速评估结构,保障公共安全,为城市路网智慧精细化管理提供支撑,推动城市治理现代化。

二、全生命周期监测系统的构建框架

(一) 系统总体架构设计

系统总体架构设计是监测系统的顶层设计,决定系统组成、关系及数据流动路径。本系统采用分层架构,自下而上分为感知层、传输层、平台层和应用层。感知层由各类传感器组成,负责采集物理量;传输层运用有线和无线通信技术传输数据;平台层基于云计算平台,

承担数据存储等功能；应用层为用户提供多样化服务。分层架构高内聚、低耦合，利于系统开发、升级和扩展，保障长期可用性和投资效益。

（二）数据采集与传输模块设计

数据采集与传输模块连接物理与数字世界，核心目标是确保数据准确、完整、实时和可靠。数据采集需考虑传感器选型、布设方案和采集策略，以适应不同监测需求；数据传输要解决通信协议选择、网络拓扑构建和数据安全保障问题，针对不同数据和传感器选择适宜通信技术，并设计安全机制。该模块为监测系统提供高质量原始数据，决定系统有效性和可靠性^[2]。

（三）数据处理与分析模块设计

数据处理与分析模块是监测系统的“大脑”，将原始监测数据转化为有价值信息。其设计包含数据处理、特征提取、状态评估和预测预警四个环节。数据处理确保数据质量，特征提取获取关键参数，状态评估诊断桥梁健康状态，预测预警预测结构趋势并触发预警。该模块实现数据到知识的升华，为桥梁管理提供决策依据，是预防性养护和科学化管理的核心支撑。

（四）系统集成与平台构建关键技术

系统集成与平台构建将各模块整合为综合监测平台，涉及多项关键技术。包括建筑信息模型与监测系统融合，实现监测数据三维可视化；大数据管理与分析，采用分布式存储和计算框架处理海量数据；云计算与微服务架构，降低成本，提高系统灵活性；可视化与人机交互，以直观方式呈现分析结果。这些技术确保监测系统成为实用化工具平台，服务于智慧市政管理决策^[3]。

三、系统实施中的关键问题与优化方向

（一）多源异构数据的融合与标准化问题

全生命周期监测系统涉及的数据来源极为广泛，包括不同类型、不同厂家、不同采样频率的传感器数据，设计阶段的BIM模型数据，施工过程的记录数据，以及定期检测报告等非结构化数据。这些数据在格式、精度、时空基准和语义描述上存在显著差异，形成了典型的多源异构数据环境。如果不能有效解决这些数据的融合与标准化问题，系统将沦为一个个“数据孤岛”的集合，无法进行综合分析与深度挖掘。核心问题在于缺乏统一的行业标准来规范数据采集、存储和交换的格式。优化方向在于，首先，在系统设计初期就应建立一套覆盖传感器数据、模型数据、文档数据的元数据标准和数据字典，对每一类数据的定义、单位、精度、时空坐标等进

行严格规范。其次，构建一个数据中台或数据融合引擎，通过ETL（抽取、转换、加载）工具，将各类异构数据按照统一标准进行清洗、转换和整合，形成结构化的、可供分析的主题数据仓库。此外，应积极推动行业数据接口协议的标准化，鼓励设备制造商采用开放协议，从源头上促进数据的互联互通。解决这一问题的价值在于，它为后续的数据分析、损伤识别、性能预测和决策支持奠定了坚实的数据基础，是实现监测系统智能化、知识化的前提^[4]。

（二）实时监测与预警机制的可靠性问题

监测系统的核心价值在于其能够实时发现结构的异常状态并及时发出预警，这一功能的可靠性直接关系到桥梁的运营安全。当前面临的挑战主要来自两个方面：一是预警模型本身的准确性，二是整个监测链路的稳定性。预警模型若过于敏感，会产生大量误报，导致管理资源浪费和“狼来了”效应；若过于迟钝，则可能漏报真实的险情，造成严重后果。监测链路中的任何一个环节，如传感器失效、通信中断、服务器宕机或软件bug，都可能导致预警功能的失效。优化方向在于，首先，预警机制应从单一阈值报警向多级、多指标的综合智能预警转变。这需要结合结构力学理论，建立能够反映结构内在逻辑关系的物理模型，并利用机器学习算法，从长期监测数据中学习结构在正常、损伤及极端状态下的响应特征，构建更为精准的预警判据。其次，必须建立系统自身的健康自诊断与冗余备份机制。通过对传感器数据进行相关性分析和一致性检验，可以识别出失效或漂移的传感器。关键的数据传输路径和服务器应采用冗余设计，确保在部分组件故障时系统仍能降级运行。此外，定期对预警模型进行校准和更新，使其能够适应结构性能的退化与环境的变化。提升这一可靠性的价值在于，它确保了监测系统能够成为一个值得信赖的“电子哨兵”，为桥梁的应急管理和预防性养护提供及时、准确、有效的决策依据，真正发挥其保障公共安全的核心作用。

（三）系统运维与数据安全保障问题

一个复杂的监测系统在建成投用后，将面临长期的运维挑战和严峻的数据安全风险。运维工作包括传感器的定期标定与更换、通信设备的维护、服务器的升级、软件的更新以及故障的排查等，需要持续投入专业的人力和物力。数据安全则更为关键，监测数据不仅涉及桥梁的结构安全，属于重要的基础设施信息，其长期积累

还可能暴露城市交通流量等敏感信息。面临的主要问题包括：运维成本高昂且缺乏专业团队；数据在传输和存储过程中可能被窃取、篡改或丢失；系统平台可能遭受网络攻击，导致服务中断或数据泄露。优化方向在于，运维方面，应推行预防性维护策略，通过系统自身的诊断功能预测设备寿命，提前安排维护，同时探索“运维外包”或“购买服务”的模式，由专业公司提供整体运维服务，降低业主单位的管理负担。数据安全方面，必须构建全方位的安全防护体系。在数据传输层，采用SSL/TLS等加密协议；在数据存储层，对敏感数据进行加密存储，并实施严格的访问控制和权限管理；在网络边界，部署防火墙、入侵检测/防御系统；在应用层，定期进行安全漏洞扫描和渗透测试。此外，必须建立完善的数据备份与灾难恢复机制，确保在发生意外时能够迅速恢复数据和系统服务。解决这些问题的价值在于，它保障了监测系统能够长期、稳定、安全地运行，保护了国家重要基础设施信息资产的安全，维护了系统的公信力和持续服务能力^[5]。

（四）系统推广应用中的现实障碍与对策

尽管全生命周期监测系统技术先进、效益显著，但在实际工程中的大规模推广应用仍面临诸多现实障碍。首先是成本障碍，一套完整的监测系统初期投入较高，包括硬件设备、软件平台、安装调试等费用，对于许多资金紧张的养护单位而言是一笔不小的开支。其次是技术认知障碍，部分管理者和决策者对新技术缺乏深入了解，对其投入产出比持怀疑态度，更倾向于依赖传统的定期人工检测。再次是标准规范障碍，目前关于桥梁监测系统的设计、施工、验收、运维及数据应用等方面的国家和行业标准尚不完善，导致市场鱼龙混杂，工程质量参差不齐，影响了用户的信心。针对这些障碍，应采取以下对策：在成本方面，通过技术创新和国产化替代降低核心传感器和硬件成本；推广模块化、标准化的系统设计，降低定制化开发成本；探索“政府引导、市场运作”的多元化投融资模式。在技术认知方面，加强对决策层和技术层的培训与宣贯，通过建设示范工程，用实际数据和案例直观展示系统在提升安全、优化养护、延长寿命等方面的巨大经济效益和社会效益。在标准规范方面，加快相关国家、行业和地方标准的编制与出台工作，规范市场准入，引导行业健康有序发展。克服这

些推广障碍的价值在于，能够加速先进监测技术从“盆景”走向“风景”，使其成为城市桥梁管理的标配，从而全面提升我国桥梁基础设施的智慧化管理水平和安全服役水平。

结语

智慧市政背景下道路桥梁全生命周期监测系统构建是复杂系统工程，涉及多学科交叉与多技术融合，每一步都需严谨科学态度与创新技术手段。本文探讨智慧市政与全生命周期监测理论，明确内涵、趋势及构建需求，阐述监测系统总体架构设计与模块功能实现。构建中，数据采集与传输模块提供原始数据，是后续基础；数据处理与分析模块将监测数据转化为有价值信息，为桥梁管理提供依据；系统集成与平台构建确保模块整合，形成综合监测平台。但系统落地面临多源异构数据融合与标准化、实时监测与预警可靠性、系统运维与数据安全保障及推广障碍等问题。针对这些，本文提出优化方向，如建立统一数据标准、构建智能预警机制等。未来，物联网等技术发展将为该系统带来更广阔空间，新技术提升智能化与决策支持能力，行业标准完善与推广模式创新加速普及，该系统将成智慧市政重要支撑，保障城市基础设施安全与可持续发展。总之，该系统构建是技术与管理理念革新，标志我国桥梁管理向数据驱动、主动预防转变，是技术进步与智慧城市建设要求。

参考文献

- [1] 汪佳丽, 王震. 高校大型仪器设备全生命周期智慧管理系统构建[J]. 中国政府采购, 2022(11): 57-61.
- [2] 魏琳, 金霏霏. 城镇排水系统在线监测整体方案建设[J]. 四川环境, 2020, 39(6): 4. DOI: 10.14034/j.cnki.schj.2020.06.031.
- [3] 刘海萍, 蒋艳琦, 邹兵兵, 等. 基于全生命周期管控的智慧高速建设研究[J]. 建筑技术研究, 2021, 3(12): 21-22. DOI: 10.12238/btr.v3i12.3541.
- [4] 丁超, 魏晓莉, 唐雅勤, 等. 智慧城市背景下基于北斗定位的建筑管控平台研究[J]. 智能建筑与城市信息, 2021, 000(001): 44-47, 55.
- [5] 杨晶, 王丽园, 刘兴东, 等. 高速公路全生命周期智慧巡养管理系统设计与实现[J]. 公路, 2021(011): 066.