

道路与桥梁基础设施数字化运维与智能养护研究

邹 展

新疆北新路桥集团股份有限公司, 新疆 乌鲁木齐 830000

[摘要]道路、桥梁等基础设施的管养正处在由被动应对向主动预防的转变之中。传统的、人工的、经验式的巡检和决策存在着覆盖率低、反应慢、资源配置错位等问题。多源传感感知、数字孪生建模、人工智能决策等技术的渗透, 给破解以上问题赋予了新的技术途径。目前的应用实践当中, 感知覆盖的广度以及数据融合的深度还比较欠缺, 决策的智能化程度还处在辅助的阶段。创建起涵盖建档、感知、评价、决策整个流程的技术体系和执行机制, 这是达成存量基础设施安全服役并开展养护资源精确调配的要害之处。

[关键词]道路与桥梁基础设施; 数字化运维; 智能养护

DOI: 10.33142/aem.v8i8.20494

中图分类号: U418.4

文献标识码: A

Research on Digital Operation and Intelligent Maintenance of Road and Bridge Infrastructure

ZOU Zhan

Xinjiang Beixin Road and Bridge Group Co., Ltd., Urumqi, Xinjiang, 830000, China

Abstract: The management and maintenance of infrastructure such as roads and bridges are undergoing a transition from passive response to active prevention. Traditional, manual, and experiential inspection and decision-making methods suffer from issues such as low coverage, slow response, and misplaced resource allocation. The penetration of technologies such as multi-source sensing, digital twin modeling, and artificial intelligence decision-making has provided new technological avenues for solving the above problems. In current application practice, the breadth of perception coverage and the depth of data fusion are still relatively lacking, and the level of intelligent decision-making is still in the auxiliary stage. Establishing a technical system and execution mechanism that covers the entire process of filing, perception, evaluation, and decision-making is crucial for achieving safe service of existing infrastructure and precise allocation of maintenance resources.

Keywords: road and bridge infrastructure; digital operation and maintenance; intelligent maintenance

引言

我国交通基础设施建设重心已经由增量扩张转变为存量优化。大量的桥梁进入了老龄化服役期, 结构上的病害以及突发性的风险同时存在, 养护的需求也越来越大。传统的巡检是依靠人工的目视加定期检测, 周期长、盲区大、主观性强, 不能满足高频次、高精度的运维要求。物联网、人工智能、数字孪生技术的成熟给基础设施管养赋予了从感知到决策的全部技术支撑。怎样把分散的技术整合成可以落地的运维体系, 就是目前的研究和实践所面对的主要问题。就行业的发展趋势而言, 管养模式转型的关键并不是某一个技术的突破, 而是技术体系同组织流程的深度融合。

1 数字化运维与智能养护的基本理论

数字化运维的本质就是把物理基础设施的状态信息

转变成可以被计算、分析的数据资产, 从而促使养护决策由经验判断转变为数据驱动。其理论基础有三个层次, 全生命周期管理理论认为设施从规划、建设、运行到报废的全部过程信息是贯通的、价值是提升的, 基础设施健康监测理论用传感器网络得到结构响应数据, 找出损伤发展规律, 预测性维护理论依靠状态退化模型, 在故障出现之前就采取干预措施。智能养护不同于传统养护的本质特点就是闭环反馈机制的形成。感知层得到结构和环境的数据, 分析层评价状态并预测退化趋势, 决策层产生养护计划, 执行层给出反馈并改进模型, 创建起连续更新的智能循环。循环有效运转依靠数据质量、模型准确度和决策算法三者共同完成。从系统论的角度来看, 数字化运维不是单一技术的叠加, 而是把感知、传输、计算、决策、执行这五个环节有机地结合起来, 形成一个有自我调节能力的管养生

态系统。数据是贯穿全链条的血液，模型是支撑决策的大脑，机制是保证系统持续运转的骨骼。

2 数字化运维与智能养护现状及问题

2.1 数字化运维与智能养护的应用现状

近几年来，数字化管养技术在全国多地进行了大规模的试点。某地区引进的国省干线公路智慧巡检系统包含路网展示、智能道路巡检、视频监控、指挥调度和业务平台五个部分，巡查车装有高清摄像和智能采集系统，可以自动识别路面坑槽、标识缺损等隐患，并即时发出检测报告，对6座大桥实行全天候的位移、沉降、倾斜、振动等参数监测，一旦发现异常立刻定位并发出警报^[1]。另一个地区用某大桥做试点，全桥关键部位安装了109个高精度传感器，包含风速风向仪、动态称重系统、磁通量传感器等品类，配发综合监测、视频聚合、应急监管、智能分析等专项分析模块，可以达成多区域、不同结构形式桥梁监测指标的长时间追踪和比较分析。从技术研发角度来讲，依靠多源数据融合的桥梁损伤诊断模型，借助信息互补以及冗余消除的方式来改进数据品质和决策的可靠性，融合数字孪生技术的桥梁安全监测方法把监测数据同有限元模型互相作用，达成结构安全的即时预估分析。

2.2 数字化运维与智能养护存在的主要问题

目前的实践存在着许多深层次的矛盾。从感知层面来说，传感器布设大多集中在主要的构件上，对于隐蔽部分以及次要部分的覆盖存在盲区，天、空、地、海协同感知体系还处在试点阶段。从数据层面来讲，检测数据、监测数据以及养护记录散布在不同的系统里，格式各异并且缺少标准，造成融合存在诸多难题。决策层面大部分系统还处在阈值报警和可视化展示阶段，缺少基于退化预测的养护方案生成能力。另外，由于数字化运维的初始投入同基层养护单位的技术水平存在较大差别，造成设备的保养以及数据分析等人力需求经常被低估。数字化运维推进遇到的另一个难题就是制度惯性和路径依赖的双重约束。目前养护考核体系仍然以病害修复的数量和及时率为主，对于预防性干预的效果没有量化评价机制，造成基层单位缺少采纳智能决策的动力。数据资产权属不清，检测单位、运维平台、管理部门之间数据共享没有制度保证，信息割裂现象更加严重。问题产生的原因是数字化运维没有被纳入到养护管理的核心制度框架中，而只是作为一种技术手段存在，其价值无法充分发挥出来，是因为缺少组织架构和激励机制的制约。

3 数字化运维与智能养护关键技术应用

3.1 数字化建档与数据融合

数字化建档属于运维体系的数据基础，利用 BIM 和

GIS 融合技术对桥梁、隧道、边坡等结构物进行构件级三维建模，用地理信息系统创建基础设施数字化平台，可以实现空间信息和属性信息的统一管理^[2]。某大型桥梁实践证明，利用三维空间定位技术创建起长大桥梁复杂结构的三维空间定位数字序列模型，给巡查车实施智能化升级之后，在桥面上移动巡查的时候，可以自动找到病害的精确位置并把数据及时上传到建筑信息模型里。数据融合的关键就是创建统一的数据标准和接口规范，使得检测数据、监测数据、养护历史和交通荷载信息可以在同一个框架内相互联系起来进行分析。就技术实现而言，数据融合要经过三个递进层次，物理层的数据采集标准化，保证各个厂商的传感器所产生出来的原始数据可以互相比对，语义层的数据关联映射，用本体建模把构件编码、病害类型和空间位置建立起对应关系，应用层的数据服务化，以 API 接口的形式给决策模块提供数据。三个层次缺一不可，跳过任何一个环节都会造成融合失效。目前实践当中，物理层的标准化发展较快，语义层的映射规则还没有形成行业统一的标准，应用层的数据服务化能力由于平台架构的不同而存在较大差异。

3.2 结构智能感知与病害识别

智能感知技术由原来的单点测量发展为现在的多维协同。在某跨海大桥试点项目的无人机巡检平台、监控系统智能体技术的探索中，利用卫星得到宏观区域形变数据，用无人机完成整个结构的高精度影像覆盖，用地面视频监控与传感器及时获取微观动态异常，用水下机器人逐级探测水下基础盲区。病害识别环节依靠大语言模型、多模态大模型和智能体协同框架，把多种时序数据融合起来，慢慢达成病害精准识别与量测，数字孪生映射以及报告自动生成的目的。该技术路线的主要优点就是把识别出的结果直接映射到三维模型对应的构件上，从而达到病害空间定位和量化记录的目的。感知数据质量控制是容易被忽略的，却是很重要的环节。传感器长期处在户外环境之中，温漂、老化以及供电波动都会造成数据出现失真状况。创建起自动化数据清洗以及异常检测体系，对于保证后续分析的可靠性有着基础性的意义。另外，不同的感知手段之间存在着时空分辨率的不同，卫星数据的宏观覆盖同地面传感器的微观精度怎样相互衔接，这是多源感知体系所面对的方法论难题。

3.3 基于数字孪生的状态评估与风险预警

数字孪生把物理结构的实时监测数据同高保真的有限元模型实施动态互动，让状态评判由静态检测变为持续仿真。融合数字孪生技术的监测方法依靠自研监测设备来布置监测点，确定监测阈值，搭建智能监测系统，把桥梁

结构监测数据同有限元模型交流,从而达成对桥梁结构安全的实时预估剖析^[3]。在风险预警上,2025年台南地震时某大桥的响应实践有借鉴意义,数据中心立即分析数据、评价结构安全,技术人员将震前、震中、震后全部时段的数据进行比对,得出各个结构的响应都迅速回落到震前水平,没有明显的残余变形,根据大量的数据支撑做出了大桥结构没有受到损伤、可以正常通行的科学判断。数据驱动的应急评估能力是人工巡检模式所不能达到的。就技术架构来说,数字孪生带动的状态评估由数据接入、模型仿真的偏差分析以及决策支撑这四个部分构成,各个层级间存在数据汇集至预警呈现这样的连续链条。

数字孪生模型的精度维持是不断的技术难题。结构退化、边界条件改变以及环境影响都会造成模型和实际响应之间存在差异。建立模型参数的在线更新机制,用新获得的监测数据反向修正模型,是保证数字孪生长期有效的必要手段。模型的计算效率和精度之间存在着天然的矛盾,在应急情况下如何快速给出可靠的评价,需要发展多保真度模型切换策略。除此之外,损伤识别的方法上物理驱动路径和数据驱动路径各有优缺点,将两者结合起来,用物理模型给出先验约束,用数据统计捕捉残差偏差,是提高识别鲁棒性的一种可行方式。

3.4 智能养护决策与技术优化

养护决策的智能化就是数字化运维的价值出口。采用人工智能技术可以对道路桥梁的养护数据进行收集和分析,也可以对病害进行预测,还可以生成和评价养护方案。预防性养护从技术、经济、环境三个方面建立层次分析法,根据普通国省道的地理和交通特征提出不同的养护方案,选取北方高寒、南方多雨、西部干旱三个典型路段做实证分析。决策优化的又一重要方面就是养护资源的精准分配,依靠创建病害发展预估模型以及维修优先级智能排序算法,把有限的预算分配给边际效益最好的路段和构件上。

表1 数字化运维与智能养护关键技术功能对照

技术模块	核心功能	典型应用场景
数字化建档与数据融合	构件级三维建模、多源数据关联	全生命周期信息追溯
智能感知与病害识别	多设备协同巡检、病害自动量测	桥面与隐蔽部位检测
数字孪生与风险预警	实时仿真、结构响应对比分析	地震、台风应急评估
智能养护决策	退化预测、优先级排序	预算分配与方案生成

4 数字化运维与智能养护实施路径

4.1 完善数字化运维平台与基础数据管理体系

平台建设不能出现功能重复的情况,应该以业务需求

为导向来进行架构的设计工作。基于BIM的智能道路智慧运维系统创建起感知、数据、平台和应用这四个层次的架构,把多种技术融合起来,达成对整个生命周期信息的全面集成以及智能决策。数据管理体系的重点就是标准化,创建构件编码规则、数据字典和交换接口规范,使各个来源的数据可以相互关联、可以追踪。对已经建成的监测系统,首先要解决数据回流和历史数据数字化的问题,而不是盲目地扩大传感网络。还要创建数据质量评价和定时审核制度,对数据是否完整、准确、及时展开持续监督。只有平台架构和数据治理一起推进,数字化运维才能有稳定的运行根基。

4.2 构建智能巡检与协同运维机制

智能巡检的落地要同现有的养护流程紧密结合。某市道桥设施管护中心采用智能影像采集设备,创建起智能发现、即时取证、精准派单、快速处置的全流程闭环管理模式,大幅缩短了病害处理时间。协同运维机制就是打通管理部门、检测单位、养护施工方之间的信息壁垒,使检测结果直接触发养护工单,处置结果反馈到平台形成记录闭环。某地数字智慧桥群监管平台依靠成熟的建设经验,迅速创建起包含多个桥梁的智慧监管集群,多座大桥相继接入平台达成统一管理以及数据共享的目的。

4.3 推进预防性养护与资源精准配置

由原来的修复性养护转变为现在的预防性养护,是降低全生命周期成本的重要途径。目前桥梁养护策略主要是修复性养护,没有过多地考虑预防性养护,从全寿命周期总成本的角度来看,以修复为主的决策方法虽然初期投入小,但是中后期资源消耗大。实施预防性养护要形成两种能力,即退化预测模型,用历史检测数据和监测数据来预测病害的发展速度;干预时机优化算法,寻找养护成本和设施性能衰减之间的最佳平衡点。从资源配置的角度来说,应该建立网级决策视角,即不能只对单座桥梁进行局部优化,而应该从路网的角度出发,统筹考虑养护资金的分配和实施的时间。

4.4 强化数字化运维保障与智能养护管理机制

技术系统要持续运转,就得有制度支撑。人员能力建设上基层养护单位要具备数据解读、系统操作的基本能力,不能依靠外部技术服务商。标准规范上,智能巡检数据格式、病害判定标准、预警阈值等应该有可操作的技术指南。资金保障上,数字化运维的软件更新、传感器校准和更换、网络通信等持续性的投入应单独在年度预算中列出,不能出现建而不用情况。另外还要探索把预防性养护效果纳入绩效考核体系,用制度激励来促使管养模式发生实质性的转变。

5 结语

道路和桥梁基础设施数字化运维和智能养护本质上就是由经验决策转变为以数据为驱动,由事后修理变为事前预防的一种系统性变革。目前的技术要素已经比较齐全,在各个试点中都显示出很好的效果。真正制约发展的不是某一项技术的先进程度,而是技术体系和管养体制之间的不匹配。就更深一层而言,数字化运维推进要冲破部门壁垒和数据割裂,把技术能力融入日常管养流程当中,让数据驱动决策变成制度化的常规作业而不是额外的负担。未来的发展方向就是,以业务闭环为指引来带动数据闭环,用数据闭环来支撑决策闭环,在有限的资源约束条件下实

现存量基础设施的安全服役和养护效益的持续提升。

[参考文献]

- [1]陈方政.贫困山区公路桥梁数字化养护与管理浅析[J].中国交通信息化,2025(3):140-143.
- [2]翟越,赵腾,雷尚学,等.融合数字孪生技术的桥梁结构安全风险监测与预测方法[J].安全与环境学报,2025,25(8):3069-3079.
- [3]郑大江.基于 BIM 技术的智能道路智慧运维管理研究[J].网络安全和信息化,2025(9):77-79.

作者简介:邹展(1981—),毕业于塔里木大学土木工程专业,现就职于新疆北新路桥集团股份有限公司,中级工程师。