

面向智能养护的公路结构信息采集与建模一体化系统研究

李鹏¹ 陈柯¹ 侯智佳¹ 李长顺² 张会吉¹

1. 黑龙江省交通规划设计研究院集团有限公司, 中国·黑龙江 哈尔滨 150000

2. 黑龙江省交投公路建设投资有限公司, 中国·黑龙江 哈尔滨 150000

摘要: 随着城市基础设施建设的不断扩张, 公路养护管理工作面临着更加庞大的网络结构、海量的信息量和更精细化的养护需求等要求。传统养护技术在信息准确量收、模型构建精度、辅助决策等方面存在较为突出的不足, 无法满足公路信息化养护的需求。本文以基于智能化养护的需求建立公路结构的信息采集与建模一体式系统为主题, 阐述系统技术标准, 提出系统采用模块化、协同式的集成方式, 并用案例说明该系统可提升信息精度、实现模型高级定制、提供强大智能辅助决策等方面的优势, 以期对公路养护“智能化”转型的认知提供理论支撑及实践指导。

关键词: 公路养护; 信息采集; 结构建模; 一体化系统; 智能决策

Research on the Integrated System of Highway Structure Information Collection and Modeling for Intelligent Maintenance

Li Peng¹, Chen Ke¹, Hou Zhijia¹, Li Changshun², Zhang Huiji¹

1. Heilongjiang Provincial Communications Planning and Design Institute Group Co., LTD, China Heilongjiang Harbin 150000

2. Heilongjiang Jiaotou Highway Construction Investment Co., LTD, China Heilongjiang Harbin 150000

Abstract: With the continuous expansion of urban infrastructure construction, highway maintenance and management work is confronted with requirements such as a more extensive network structure, a vast amount of information, and more refined maintenance demands. Traditional maintenance technologies have relatively prominent deficiencies in terms of accurate information measurement and collection, model construction accuracy, and auxiliary decision-making, and thus cannot meet the demands of information-based maintenance for highways. This paper takes the establishment of an integrated system for information collection and modeling of highway structures based on the demands of intelligent maintenance as its theme, elaborates on the technical standards of the system, proposes that the system adopts a modular and collaborative integration approach, and uses cases to illustrate the advantages of the system in terms of improving information accuracy, achieving advanced model customization, and providing powerful intelligent auxiliary decision-making. With the aim of providing theoretical support and practical guidance for the understanding of the "intelligent" transformation of highway maintenance.

Keywords: Highway maintenance; Information collection; Structural modeling; Integrated system; Intelligent decision-making

0 引言

随着交通基础设施规模的扩大和使用年限的增加, 传统公路养护模式逐渐暴露出信息采集粗放、数据孤立、决策依赖经验等局限性, 难以满足现代公路养护的智能化需求。智能公路养护技术的发展是交通基础设施现代化进程中的一个重要里程碑。随着信息技术、传感技术、大数据分析和人工智能的快速发展, 智能公路养护技术已经成为现实。智能公路养护技术的核心在于其能够实时监测公路

状况, 并通过数据分析预测公路的养护需求。这包括对路面的裂缝、坑洼、磨损等损伤的检测, 以及对路面结构健康状况的评估。在此背景下, 集信息采集、建模与智能决策于一体的系统研究成为提升公路养护水平的关键方向。

1 公路智能养护概述

1.1 公路智能养护的内涵

智能化养护是使用物联网、人工智能、大数据等现代技术对公路结构物整个全生命周期的状态监测、智能分析

和决策的养护。主要就是通过对于养护全过程的实时信息采集和实时数据研究的掌握,准确感知公路结构物的健康状况,提前识别存在的风险点,提供定制的精细化养护建议,实现针对问题(包括表面破坏和力学特性退化等)的养护,由传统的经验养护转变为基于数据的科学决策养护。从传统的定时修理到按需护理,通过构建数字化孪生路况、通过智能算法提升决策过程,智能化养护实现了资源配置效率的提升和运营管理水平的提高,使公路资产管理由传统的粗放型模式向新型高效可持续式发展转型,成为公路养护在新时代变革创新的重要引擎。

1.2 智能养护对公路结构信息采集与建模的技术需求

智能养护以高精度信息采集、精细化建模技术为支撑,这就必须保证信息采集的全面性、即时性、多尺度性,除了进行以往的公路病害、桥梁裂缝等养护诊断外,还需要扩展到对内部结构健康情况的持续性监测,对结构内部应力、位置、振幅、温度等多种参数的综合测量。建模上需要集成不同来源的信息建立高质量的三维结构模型,对结构演变过程进行模拟预测。信息采集与建模耦合是智能养护决策分析的重要基础。智能传感器、无人机激光扫描和 BIM+GIS 集成建模等新技术将是主流。高精度、快速、智能化的信息采集与建模技术不但提升了公路结构健康状况评价的准确度,而且能够为开展预防性养护与维修服务提供有效的科技支撑。

2 面向智能养护的公路结构信息采集与建模一体化系统实施策略

2.1 公路结构信息采集模块的实施策略

为采集更多更准确的公路结构信息,加速公路结构的信息采集。需要研发一种全方位、无限制、采集精准的数据采集技术手段,包括高清图片采集技术、光学雷达扫描技术、地理雷达检测技术和无线传感器组网技术等,并从地面到空中全方位考虑,保障采集数据的全面性和精准性。在系统设计中应适当地布设变形、位移、振动、温度等多种传感器,从而形成一个分布式的监控网络,利用无人机的航摄快速完成大面积的高效扫描,例如,广东省沿海桥梁群采用基于 5G 网络的智能化传感系统和光学雷达系统,对路段的 24 小时不间断的数据采集与精确高程变形检测。此信息采集模块的提升除了提升了信息采集的效率,也为后续的公路结构模型构建和智能分析提供了详细的、可靠的基底数据,增强了智能养护系统的实时感知能力,完善的信息采集体系对自然灾害预测和长期功能转变

的研究提供了数据基础,助推着智能化决策能力的发展。

2.2 公路结构信息建模模块的实施策略

构建公路模型单元是建立高精度智慧化养护决策的关键步骤,将 BIM(BIM-建筑信息模型)、GIS(GIS-地理信息系统)、FEM(FEM-有限元技术)等技术与激光雷达、地雷达等高精度设备融合,通过数据采集,经过数据去噪、数据清洗处理,使得模型正确有效,对数据缺失通过线性插值法进行数据处理,保证数据完整性。具体计算公式如下:

$$x_{t_0} = \frac{x_{t_1}(t_0 - t_2) + x_{t_2}(t_1 - t_0)}{t_1 - t_2}$$

其中, t_1 和 t_2 为缺失值前后的已知时间点, x_{t_1} 和 x_{t_2} 为对应时刻的数值。此方法能在确保当有数据缺失的情况下可以找出并计算出数据缺失值,使得模型更精确。此模块的完善既提升了路面结构的可视化水平,又能为后期智慧化的养护决策提供强有力的信息依据,进一步加大道路构件健康实时化监测及反应速度。

2.3 采集与建模模块协同优化实施策略

优化公路智慧检测系统的整体运行效率,重点在于优化采集和建模部分之间的工作,保障相关数据信息的及时性和准确性。对整个公路智慧检测流程采用边缘计算技术和云计算技术。由边缘节点首先对采集数据进行初步筛选以及处理工作,将剩余数据传递至云层,由云计算方法对数据进行深度分析,并构建相关模型。在此过程中节省了数据传递以及数据计算的时间,同时运用 CSSE 模型中的裂缝识别法结合卷积神经网络(CNN)对相关算法进行改进,能够提升裂缝识别的精准度。下图 1 展示了 CSSE 模型结构图,详细说明了该模型如何通过优化卷积神经网络结构,提升裂缝识别的准确度和处理效率。

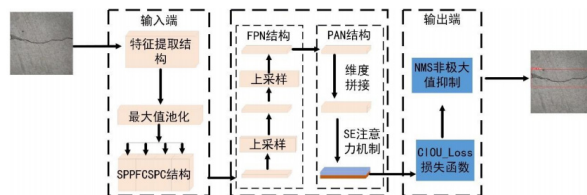


图1 CSSE模型结构图

通过这种协同优化的实施策略,系统能够实时更新模型,提升养护决策的准确性与响应速度,确保公路结构的健康状况能够得到及时有效的监控和维护。

2.4 基于智能养护需求的一体化系统集成实施策略

一体化系统集成需面向智能养护的全链条需求,需要集成各项活动的数据采集、数据分析、模型构建与决策支

持等部分,实现一致性的框架、标准化的接口、模块化的实施方式的完整系统。该系统需要具备多源数据的融合与智能分析与图像化展现,并能动态响应、在线模型结构与智能模拟预测。即借助物联网与大数据技术,实现对传感器、采集设备、建模软件与智能决策系统的合理协同。例如,浙江省的智能高速项目,基于 BIM+GIS+IoT 集成平台,集成路面检测车、桥梁传感器与气象监测设备,突破数据流动壁垒,实现结构健康的即时可视与自动建议。这类针对智能养护要求的一体集成,不仅大幅提高系统响应速度与智能水平,还可以大幅提高公路养护管理的科学性、可预见性,并可促进跨省域、跨部门数据共享与智能协同运维。

3 面向智能养护的公路结构信息采集与建模一体化系统实施效果

3.1 信息采集精度与效率提升效果分析

一体化系统结合精度很高的激光雷达、无人机航测和多功能传感器网络,可以有效地收集不同类型的信息,并对其进行综合处理。与过去所采用厘米级定位的技术相比,其数据采集的精度已经大大提高,达到了毫米级定位精度,大大改善了病害识别和微小结构检测的效果。结合自动化数据采集和数据实时上传,显著提升了数据采集效率,现场工作时长大大减少,达到节省 40% 以上。例如湖南省的某高速公路桥梁群,通过使用无人机激光扫描和地面移动测量车辆对桥梁进行检测,通过采用一体化系统缩短检测周期为原来的 50%,即原来花费 15 天完成对桥梁的病害检测,现缩减为 7 天完成,同时裂缝检测精度达到毫米级,避免误报 30% 以上。这种高精度快速数据采集方式不仅大大缩短了测试的周期,节省人力,并且也为后面建立模型和分析提供更为优质的基础数据,从而提升了公路桥梁整体健康监测和响应的能力。

3.2 建模精细化与数据完整性提升效果分析

通过一体化数据融合与智能建模大大提升道路构造模型的详细程度和真实性,并显著增强数据的完整性。该模型在几何精度、材质属性和病害信息的表达等方面同步提升,并能适用于多种规模、多个物理场模拟分析。以上述山东省一条高速公路的隧道群建设模型为例,基于激光雷达和地质雷达混合数据采集构建成超高精度、基于几何变形计算原理的三维 BIM 模型,该模型涵盖了隧道壁构筑物、排水分散机构、表层裂隙等内容,模型的高精度性达到微米级。相比于传统的处理工艺,该数据的完整性至少提升 20%,能够更加真实地表达建筑物的现状及其病害的

发展趋势。这样对模型的细分和数据的完整性提升,进而有利于对设施健康的评价和养护决策的科学,以及公路建设基础的数字化和视觉化水平的提升。基于三维可视模型的构筑,提供一手数据的实时信息以便于实现智能巡检和预判危情的发生,以此提高养护决策的定位的准确性和预见性。

3.3 系统协同运行稳定性与可靠性分析

一体化系统在架构设计上采用模块化与冗余配置策略,在整个数据采集、传输、分析、建模的过程中,均可稳定有效运转,可支持多设备接入,实现动态数据流转和边缘计算,并能够在不同环境中及多数据源输入环境下高效率稳定地运行。以重庆市某山地高速公路养护智能化项目为例,在该项目上部署了边缘计算节点的大数据云平台,实现了 24 小时动态监测、动态更新,该系统在执行中数据计算时间控制在秒级别,设备在线率在 99% 以上。即使处于极端天气和恶劣环境的条件下,信息收集和建模仍然可以保持高效、稳定的状态,相较于原有分布式的系统,故障率下降了 35%,可实现公路养护工作长时间、精细维护,对于智慧型路面管理提供强大技术支撑。具备高度可模块升级性和扩充性的系统,可满足未来技术发展趋势及规模性扩展。

3.4 智能养护决策支持能力提升效果分析

通过集成信息采集与建模数据,结合人工智能分析算法,一体化系统实现了从病害识别到养护决策的全流程智能化。能根据系统的设施健康状况自行编排要维护的优先顺序、资源分配等决策,并保证了决策的合理和快速执行。比如,浙江省的一个智慧公路工程项目运用了这一个体化平台,结合既往维修记录资料以及当前的检测资料,根据设施健康情况实现了系统可以自动分析,制定出最优维修计划,原本需要两周的维修前置时间变为三天,并提升了 90% 以上的准确率。具有智能判断的维护决策支援功能不单单是维护了维护资源分配、加快了决策的速度,同时也减少了维护成本,提升了路基的运转安全和长久耐久能力,开启了公路维护管治由经验式向决策式、数位化的转变。此种决策系统还具备自我学习的功能,可以通过不断调优算法模型改进长期的决策精度,还可以改变不同环境的运行方案。

4 结语

面向智能养护的公路结构信息采集与建模一体化系统,突破传统公路养护的信息化、高精度、决策性限制,通过多源的数据采集、智能模型构建与智能决策,有效提

升数据采集效率、模型高精度水平以及决策的科学性。经实际案例验证其可靠稳定性与适用性，具有良好的使用前景。后续随着物联网、人工智能和大数据技术的不断深入，一体化系统将会进一步改进以实现更加精准的高速公路结构健康监测与智能决策，助力交通基础设施管养向数字化、智能化、绿色化转型与升级。

参考文献：

[1] 陈卓，王勇，罗小云等. 基于智能协同的公路养护管理平台研发与应用[J]. 公路交通技术，2021, 37(5):6-6.

[2] 陈光海，袁胜古，郑慧. 轻量化公路路况快速检测系统在农村公路养护中的应用[J]. 江西交通科技，2023(3):61-68.

[3] 金国平. “天 - 空 - 地”一体化监测技术在高速公路智慧养护中的应用[J]. 北方交通，2023(4):84-86.

[4] 孙剑，张德东，李景程. 混凝土养护抗压一体化机器人智能检测系统研究[J]. 智能城市，2023, 9(8):116-118.

[5] 周飞. 信息化技术在高速公路建设管理中的应用[J]. 中文科技期刊数据库 (引文版) 工程技术，2022(5):4-4.

作者简介：李鹏 (1982.02-)，男，汉族，黑龙江省哈尔滨市人，正高级工程师，工程硕士，研究方向：公路数字化信息采集、AI 深度学习算法、智能视觉识别、透视变换技术等，建设涵盖在役公路基础信息采集、治理、分析、仿真、可视化的高精度数字化技术体系。