

公路路基填筑施工智能监测与质量控制研究

杨 维

(四川路桥盛通建筑工程有限公司, 四川 成都 610000)

摘 要 本文聚焦于智能监测与公路路基填筑施工的交叉融合, 探索了数据感知、智能分析、动态优化、区块链应用等方面的技术创新与管理变革, 分析了智能监测在路基填筑质量管控中的重要意义, 进而从多源异构传感器协同感知、多层级智能化数据分析、开放兼容的系统集成架构等角度阐述了面向路基填筑的智能监测系统设计思路, 并在此基础上重点探讨了融合智能监测的质量评估、预测、动态优化控制等方法创新, 分析了智能监测驱动下公路路基填筑质量管理的发展趋势, 旨在为促进行业数字化、智慧化转型升级提供借鉴。

关键词 公路路基填筑施工; 智能监测; 质量控制

中图分类号: U416.1

文献标志码: A

DOI: 10.3969/j.issn.2097-3365.2025.15.010

0 引言

公路作为国民经济和社会发展的基础设施, 其建设质量事关交通运输效率、行车安全和工程投资效益。路基填筑作为公路工程的基础环节, 其施工质量更是直接决定了路体结构的完整性、稳定性和耐久性。近年来, 以物联网、大数据、人工智能为代表的新一代信息技术蓬勃发展, 正加速向工程建设领域渗透融合。智能监测作为工程管理信息化、智能化的核心抓手, 通过构建全方位、全过程、全天候的监测感知网络, 实现工程现场的透明化和过程的可视化, 为质量管控提供更加及时、准确、全面的数据支撑。

1 公路路基填筑施工质量控制的重要性

1.1 质量控制是实现工程效益最大化的关键环节

工程质量直接关系到公路的使用性能和寿命, 进而影响整个工程的投资效益。路基填筑作为公路工程的基础, 其施工质量的优劣对公路的耐久性和安全性具有决定性作用。通过在填筑施工过程中实施严格的质量控制措施, 可以从源头上预防和减少质量缺陷, 避免因返工、维修等导致的成本增加和工期延误, 从而实现工程效益的最大化^[1]。同时, 高质量的路基填筑也是树立企业品牌形象、提高市场竞争力的重要砝码。可见, 质量控制已成为现代公路工程施工管理中不可或缺的关键环节, 对于实现工程效益的最大化具有重要战略意义。

1.2 质量控制是应对复杂路基病害的有效手段

公路路基常存在诸如不均匀沉降、高液限土破坏、

湿陷性黄土地基等复杂工程问题和病害隐患。如果在施工过程中疏于质量管控, 则极易埋下病害隐患, 导致路面开裂、车辙、波浪等病害的发生, 严重影响公路的使用性能和安全。而通过在填筑施工的关键环节和重点部位实施精准的质量控制, 如优化施工工艺、加强原材料质量管理、实时监测压实度等, 则可以最大限度地规避上述质量风险。尤其在特殊土质、不良地质等复杂路基条件下, 更需要通过主动预控、动态管理等质量控制手段, 实现质量状况的量化评估和反馈优化, 为应对复杂路基病害挑战提供坚实的保障。

1.3 质量控制是践行可持续发展理念的重要抓手

在可持续发展理念日益深入人心的新时代, 公路工程建设也面临着更高的节能环保要求。将节材、低碳、耐久等指标纳入质量控制范畴, 对于推动公路路基填筑施工的绿色化、生态化具有重要意义^[2]。例如: 在填筑材料选择上, 优先采用工业废渣等再生材料, 减少天然材料开采; 在施工机械配置上, 优选节能环保型设备, 提高能源利用效率; 在现场管理中, 加强扬尘、噪声、固废等污染防控, 最大限度地减少施工活动对环境的负面干扰。可以说, 将可持续发展理念融入质量控制全过程, 通过对各施工环节、工序实施精细化管理, 是新时期公路工程高质量建设的必由之路。

2 公路路基填筑施工智能监测系统设计

2.1 多源异构传感器协同感知方案

在公路路基填筑施工智能监测系统设计中, 首要任务是实现对施工过程关键质量参数的全面精准感知。

鉴于路基填筑工程的复杂性和动态性,单一类型传感器难以满足多场景、全过程的监测需求。为此,本文提出一种多源异构传感器协同感知方案。该方案综合应用变形、应力、温度、湿度等多种类型传感器,构建起全维度、多尺度的质量参数感知网络。同时,针对不同施工工艺、作业环境,遴选差异化的同类传感器,发挥各自优势,互补不足。通过多源传感器的一体化集成与智能协同,可获取更全面、更准确的质量状态信息,为后续智能分析、质量预警奠定数据基础。值得一提的是,传感器选型还需统筹兼顾本质安全性、稳定性、经济性等多重因素,以期达到监测性能、工程适用性和成本投入的最优平衡。总之,以多源异构传感器协同感知为核心的智能监测方案,可为动态把控路基填筑施工质量提供坚实的数据支撑。

2.2 多层次智能化数据分析体系

公路路基填筑施工智能监测系统的另一核心在于构建多层次智能化数据分析体系,充分挖掘海量监测数据中蕴藏的质量管控知识。鉴于监测数据来源多样、格式复杂,数据治理是分析应用的首要环节,通过制定统一的数据标准规范,运用数据清洗、融合等技术,夯实后续分析的数据基础。在数据预处理阶段,利用信号处理、特征工程等手段,提取对质量状态描述最为准确、敏感的关键特征参数,在确保信息完整性的同时降低数据维度,减轻计算负荷^[3]。基于优选的特征参数,结合专家经验、工程先验知识,运用机器学习、深度学习等人工智能技术,建立起映射监测数据与工程质量状态的预测模型,形成从数据到决策的端到端分析路径。分析结果与三维可视化工程场景相融合,直观呈现质量演变全景,辅助工程管理人员及时洞悉质量风险,科学制定应对策略。多层次智能化分析体系的构建,使得质量管控决策从经验驱动走向数据驱动、知识驱动,助推路基填筑施工迈向更高质量、更高效益。

2.3 开放兼容的系统集成架构

公路路基填筑施工智能监测系统在顶层设计上须坚持开放兼容的理念,与智慧建造各业务系统及管理平台无缝集成。系统架构需预留标准化的数据交换接口,与 BIM、GIS 等平台构建双向连接,将设计阶段的模型数据、施工过程的机械设备信息等引入监测场景,同步反馈监测数据,实现数字孪生、实景建模等信息应用。监测系统与工程管理各职能模块也应做到互

联互通,将监测数据嵌入质量、进度、成本等业务流程,建立与各专项系统的协同联动机制,将质量管控与进度把控、成本优化等目标统筹兼顾。为提升系统集成架构的灵活性、扩展性,可引入微服务、容器化等先进架构思想,对各功能模块解耦重组,实现模块化、组件化部署,灵活适配业务变化。开放兼容、智能协同的监测系统集成架构,是实现路基填筑智能建造、提升工程管理水平的关键举措,对于传统粗放式管理模式的变革具有重要意义。

3 基于智能监测的公路路基填筑施工质量控制方法

3.1 多源监测数据融合驱动的质量评估

智能监测系统产生的海量多源异构数据蕴藏着路基填筑施工质量演变规律。要充分发掘这一数据价值,实现对施工质量状态的全面评估,需构建面向全过程、多尺度的数据融合分析框架。具体而言,在时间维度上,通过时间序列分析、变化点检测等方法,刻画质量指标的动态变化趋势,把握质量演进脉络^[4];在空间维度上,利用空间插值、地统计学建模等技术,揭示质量水平的空间分布规律,识别质量的薄弱区段;在语义维度上,运用本体推理、知识图谱等人工智能技术,深度挖掘质量影响因素间的复杂关联,探寻质量评估的内在机理。

以公路路基压实度质量评估为例。首先,将不同时间点获取的压实度监测数据进行汇聚,利用时间序列平滑、分解等技术,刻画压实度指标随时间的波动规律,判断其变化趋势是否符合设计要求。同时,针对施工现场不同区域布设的压实度传感器,采用克里金插值等空间统计分析方法,获取整个施工区域的压实度空间分布图谱,直观呈现质量的均匀性。在此基础上,运用关联规则挖掘、因果推理等智能算法,探究压实度与含水量、干密度等多源监测数据之间的关联模式,揭示这些要素与压实质量的内在作用机制。通过融合多源监测数据所构建的质量评估模型,能够实时评判压实施工的质量状态,当评估结果低于预设阈值时,及时预警质量风险。工程管理人员可据此迅速判断问题根源,动态调整碾压遍数、振动频率等工艺参数,从而实现路基压实质量的闭环控制。类似的融合分析思路也可推广应用于路基沉降、强度等其他质量评估场景。

3.2 机理驱动的质量演化规律刻画与预测

揭示路基填筑施工质量演化规律是实现预测性质

量控制的重要基础。在大数据分析的同时,更需重视工程机理知识的融合应用。具体而言,可通过理论分析与数值模拟相结合的方式,构建能够刻画路基填筑质量演化过程的机理模型,包括变形沉降、强度增长、湿度场—应力场耦合等。

在模型构建过程中,一方面要立足于土力学、岩石力学等学科的基本定律,确保模型的物理合理性;另一方面,要充分融合工程地质、水文气象等环境要素的动态监测数据,提升模型对实际复杂工况的适用性。同时,基于海量质量监测数据对模型参数进行修正和优化,进一步提升模型精度。

以湿陷性黄土地基的沉降质量预测为例。首先,基于非饱和土力学理论,构建能够反映湿陷性黄土固结变形特征的本构模型,如双应变硬化弹塑性模型等。在模型中引入降雨入渗、蒸发等水分迁移过程的数学描述,体现湿度场与应力场的耦合作用机制。然后,利用现场布设的孔隙水压力、含水量等传感器的实时监测数据,对模型中的渗透系数、湿陷系数等关键参数进行率定,提升模型对实际工程环境的适用性。在此基础上,将机理模型预测的沉降量作为智能算法(如支持向量机、神经网络等)的输入特征,同时将现场沉降监测数据作为训练样本,构建融合机理特征的沉降预测模型。这种混合建模范式不仅能充分利用监测大数据训练模型,提高预测精度,还能借助机理模型的外推性,对未监测区域、长期变形趋势做出合理预估,减少数据驱动模型的黑盒特性,增强预测结果的物理解释力。工程管理人员可根据预测的沉降趋势动态优化施工工艺,预防沉降超限,确保路基施工质量,体现出机理驱动的质量预测方法相较于传统经验判断的优越性。

3.3 动态反馈的智能质量优化决策

基于智能监测数据获得的质量评估与预测结果,可通过构建多目标优化模型,在满足质量约束条件的前提下,同时兼顾工期、成本等管理目标,求解出各项施工工艺参数的最优配置组合。将优化结果与工程专家知识相融合,形成切实可行的质量控制策略,并实时反馈至施工现场予以执行。动态反馈优化控制闭环的构建,使得路基填筑施工过程在不断自我评估、预测、优化中逐步趋于最优状态,质量源于设计的理念也由此得以落地^[5]。

以碾压施工质量优化控制为例,通过融合压实度、

含水量等多源监测数据构建的质量评估模型,可实时判定当前碾压质量是否满足要求。若评估结果低于设计阈值,质量预测模型还能预判在当前施工工艺下的最终压实度趋势。基于评估与预测信息,构建碾压质量动态优化模型,目标函数为综合考虑实际压实度与目标值偏差、工期延误风险、成本增量等因素后的加权总价值,决策变量为碾压机具类型、碾压遍数、振动频率、行进速度等工艺参数,约束条件包括最终压实度须达标、工期不超限等,求解该多目标优化模型,即可得到当前工况下的最优碾压施工组合策略,通过动态反馈优化控制,碾压过程在机理约束下不断自我改进,最终实现一次成型,质量、进度、成本效益得以同步提升。

4 结束语

智能监测技术与质量控制方法的融合创新,正成为新时代公路工程高质量发展的重要驱动力。随着物联网、大数据、人工智能等新兴技术的日益成熟和广泛应用,智慧化、信息化已成为行业发展的必然趋势。在这一背景下,公路路基填筑施工质量控制也迎来了从传统经验驱动向数据驱动、从事后被动应对向事前主动预控的范式转变。然而,理论创新到工程应用的转化落地仍面临诸多挑战。未来,相关工作者要进一步增强使命担当,深化产学研用协同创新,加快核心技术攻关。在智能传感、边缘计算、知识工程、密码学等领域持续发力,打造技术、产品、解决方案的全栈式创新能力,为工程质量管理提供更加先进、可靠、智能的技术支撑,扎实推进新技术、新方法的工程适用性研究,因地制宜地开展试点示范,不断完善行业标准规范,营造数字化转型的良好生态。

参考文献:

- [1] 尚立波,李营.公路路基填筑施工质量控制措施研究[J].中国新技术新产品,2024(09):96-98.
- [2] 李国鹏.公路路基填筑碾压工艺及质量控制[J].建材发展导向,2023,21(16):79-82.
- [3] 张长璞.市政道路路基工程施工工艺及质量控制分析[J].新材料·新装饰,2023,05(05):159-162.
- [4] 田雷,张文进.高地下水位条件下路基填筑施工质量控制探析[J].科技创新与应用,2023,13(29):141-144.
- [5] 姜绳.既有公路路基改扩建施工关键技术及质量控制研究[J].工程建设与设计,2024(14):134-136.