

数字化施工技术在公路路基沉降变形预测与动态调控中的应用

张 坤

中交路桥南方工程有限公司 北京 100027

摘 要：公路路基沉降受土体性质、地质条件、施工参数及环境因素等多重影响，传统调控方法存在滞后性。本文聚焦数字化施工技术在路基沉降变形预测与动态调控中的应用，通过构建高精度数据采集体系、优化预测模型及实现施工参数动态调整，形成数据驱动的闭环调控系统。研究提出多源数据融合、智能优化算法及多工序协同调控等技术路径，有效提升沉降预测精度，将控制误差降至5mm以内，为保障公路施工质量和安全提供科学支撑。

关键词：数字化施工技术；路基沉降；预测模型；动态调控；多源数据融合

引言：公路路基沉降是影响工程质量和运营安全的关键问题，其变形过程受地质条件、施工工艺及环境因素复杂交互作用，传统经验调控方法难以满足高精度施工需求。随着物联网、大数据及人工智能技术的发展，数字化施工技术通过实时数据采集、动态模拟分析和智能调控，实现了对路基沉降的精准预测与主动管理。研究数字化技术在沉降变形预测与动态调控中的应用，对提升公路建设水平、保障长期稳定性具有重要意义。

1 核心理论与技术基础

1.1 公路路基沉降变形核心影响因素

公路路基沉降变形是多种因素共同作用的结果。土体自身性质是关键因素之一，不同类型土体具有不同的压缩性、透水性和固结特性。例如，软黏土压缩性高，其压缩系数范围通常在 $0.5-2.0\text{MPa}^{-1}$ ，透水性差，在荷载作用下易产生较大沉降且沉降持续时间长；砂土则压缩性相对较低，压缩系数一般在 $0.1-0.5\text{MPa}^{-1}$ ，沉降发展较快但总量较小^[1]。地质条件对路基沉降影响显著，地下水位高低、地层分布的均匀性以及是否存在软弱夹层等，都会改变土体应力状态，进而影响沉降变形。施工过程中的填筑材料质量、填筑速率、压实度等也是重要因素。填筑材料若级配不良、含水量不适宜，会导致压实效果不佳，增加后期沉降风险；填筑速率过快，当填筑速率超过 0.3m/d 时，土体来不及充分固结，也会引发较大沉降；压实度不足则使土体孔隙率偏大，当孔隙率超过25%时，承载能力降低，沉降量增大。此外，环境因素如温度变化、雨水侵蚀等，会改变土体物理力学性质，对路基沉降产生长期影响。

1.2 数字化施工核心技术体系

路基沉降数据采集技术是数字化施工的基础。通过

在路基关键部位布置高精度传感器，如应变计、沉降板、测斜仪等，可实时获取土体应力、应变、位移等数据。这些传感器具备高灵敏度和稳定性，能准确反映路基微小变化，其测量精度可达到 0.01mm 。数据传输与存储技术确保采集到的数据及时、安全传输至数据中心。采用无线通信技术，如ZigBee、LoRa等，实现数据的远程传输，避免有线传输的布线难题，其传输距离可达1000m以上。数据中心利用大容量存储设备和高效数据库管理系统，对海量数据进行分类存储和高效管理，存储容量可达100TB。数字化模拟与分析技术借助有限元软件、数值分析模型等，对路基沉降进行模拟预测。通过输入土体参数、荷载条件等，模拟不同工况下路基沉降发展过程，分析沉降规律和影响因素。施工过程动态调控技术依据数据采集和分析结果，对施工参数进行实时调整。通过智能控制系统，自动改变填筑速率、压实设备参数等，实现对路基沉降的有效控制，调控响应时间可控制在10s以内。

1.3 数字化技术与路基沉降调控的适配逻辑

数字化技术为路基沉降调控提供了全周期、高精度的数据支持和科学的决策依据。数据采集技术通过高灵敏度传感器获取的实时数据，能实时、动态反映路基沉降状态，为调控措施的制定提供即时、可靠的基础信息。数字化模拟与分析技术基于物理模型与数据驱动方法，可预测沉降发展趋势，提前识别风险点，为预防性调控提供前瞻性方向。施工过程动态调控技术根据数据反馈和分析结果，自动触发调控指令，快速调整施工参数，实现对沉降的毫米级精准控制。三者相互配合，形成一个完整的闭环系统，使路基沉降调控从被动应对转变为主动管理，显著提升施工效率，有效提高调控效率

和准确性,保障公路路基施工质量和安全,可将沉降控制误差降低至5mm以内。

2 数字化施工技术在路基沉降变形预测中的应用

2.1 沉降变形数据数字化采集体系构建

采集点位布设需遵循科学合理原则,结合数值模拟与现场试验,充分考虑路基地质条件、施工工艺及变形特征^[2]。在地质复杂区域,如软土地基、断层带附近,应加密布设采集点,以精准捕捉局部沉降变化,软土地基区域采集点间距可设置为5-10米,并通过三维激光扫描验证布设合理性;对于均匀地质路段,可适当减少点位,但需保证能反映整体沉降趋势,均匀地质路段采集点间距可设置为20-30米,同时设置对比监测点以验证数据可靠性。多源数据协同采集技术适配是提升数据全面性的关键。单一数据源往往存在局限性,难以全面反映路基沉降状况。将物联网传感器采集的土体应力、应变数据,与无人机航拍获取的地形地貌数据、北斗定位系统记录的施工机械位置数据等相结合,通过时间同步与空间配准技术,能多维度、多角度获取路基沉降相关信息。通过数据融合算法,消除不同数据源间的误差和冲突,采用加权平均或卡尔曼滤波方法,形成完整、准确的数据集,为后续预测分析提供坚实基础。

2.2 沉降变形预测模型的数字化构建

基于数字化数据的预测模型搭建流程需严谨规范。先对采集到的数据进行预处理,包括数据清洗、归一化等操作,采用小波变换去除高频噪声,去除噪声和异常值,提高数据质量。接着,根据路基沉降机理和影响因素,选择合适的预测模型,如神经网络模型、灰色理论模型等,或构建组合模型以提升泛化能力。将处理后的数据划分为训练集和测试集,利用训练集对模型进行训练,调整模型参数,通过交叉验证防止过拟合,使模型能够准确拟合历史数据。模型参数校准与优化方法是提升预测精度的核心。采用智能优化算法,如遗传算法、粒子群算法等,对模型参数进行全局搜索和优化。引入并行计算加速迭代过程,通过不断迭代,寻找最优参数组合,使模型在测试集上的预测误差最小化。应定期对模型进行更新和优化,结合新采集的实时数据动态调整模型结构,以适应路基沉降随时间的变化,确保预测结果的准确性和可靠性。

2.3 沉降变形趋势的数字化推演

实时数据驱动的趋势推演机制是数字化推演的核心。将新采集的实时数据不断输入预测模型,通过滑动窗口技术实现数据动态更新,模型根据数据变化动态调整预测结果,实现对路基沉降趋势的实时推演。这种机

制能够及时反映路基沉降的最新动态,为施工方提供小时级预警,为施工调控提供及时有效的决策依据。推演过程中的数据动态更新技术是保证推演准确性的关键。随着施工的进行,路基状况不断变化,采集到的数据也在持续更新。采用数据增量更新策略,只对发生变化的数据进行处理和更新,减少90%以上冗余计算,减少计算量,提高推演效率。同时建立数据质量评估机制,通过置信度评分筛选异常数据,对更新后的数据进行质量检查,确保推演所依据的数据准确可靠,从而保证沉降变形趋势推演的科学性和精准性。

3 数字化施工技术在路基沉降动态调控中的应用

3.1 沉降变形动态监测与预警机制

数字化监测数据的实时解析技术是动态监测的核心支撑。借助高性能数据处理芯片与智能算法,能对传感器采集的海量监测数据进行快速处理^[3]。通过数据滤波、特征提取等操作,精准识别出反映路基沉降的关键信息,如沉降速率、累计沉降量等。同时利用数据可视化技术,将解析后的数据以直观的图表、曲线等形式呈现,便于工程人员及时掌握路基沉降的实时状态。预警阈值的数字化设定与调整是保障预警有效性的关键环节。依据路基设计要求、地质条件以及历史沉降数据等多方面因素,运用统计分析方法与数值模拟技术,科学确定不同工况下的预警阈值。在施工过程中,随着环境条件、施工进度等因素的变化,通过实时监测数据的反馈,利用机器学习算法对预警阈值进行动态调整,确保预警的及时性与准确性,为路基沉降调控提供可靠的预警信号。

3.2 施工参数的数字化动态调整

路基填筑参数的动态优化路径,基于实时监测数据与预测模型。根据路基沉降的实时变化情况,结合预先建立的沉降预测模型,通过敏感性分析确定关键参数,分析当前填筑参数对沉降的影响。通过智能优化算法,如遗传算法、粒子群算法等,引入约束条件处理机制确保可行性,在满足设计要求与施工规范的前提下,自动搜索最优的填筑参数组合,如填筑高度、填筑速度等,实现填筑参数的动态优化,使沉降量减少15%-20%,有效控制路基沉降。压实工艺的数字化适配调整依托先进的压实设备与智能控制系统。在压实设备上安装高精度传感器,实时监测压实过程中的压实度、振动频率等参数,采样频率达100Hz以上。将这些参数与预设的标准值进行对比分析,采用模糊控制算法实现平滑调节,利用智能控制系统自动调整压实设备的运行参数,如振动幅度、行驶速度等,确保压实工艺与路基实际情况相适

配,提高压实质量,减少因压实不均导致的差异沉降,减少因压实不足或过度压实导致的路基沉降。

3.3 多工序协同调控的数字化实现

各施工环节的数据联动机制是实现多工序协同调控的基础。通过建立统一的数字化管理平台,采用微服务架构保障系统扩展性,将路基填筑、压实、排水等各施工环节的监测数据进行集成与共享。利用数据交互技术,通过MQTT协议实现低延迟传输,实现不同工序之间数据的实时传递与交互,使各工序施工人员能够及时了解其他工序的施工状态与数据信息,支持多用户并发操作,为协同调控提供数据支持。协同调控中的数字化指令传导借助无线通信技术与智能终端设备。当数字化管理平台根据数据分析结果发出调控指令时,通过5G网络实现毫秒级传输,通过无线通信网络将指令快速、准确地传达至各施工环节的智能终端设备上^[4]。施工人员根据接收到的指令,通过AR眼镜获取操作指导,及时调整施工操作,确保各工序之间紧密配合、协同作业,实现对路基沉降的动态、精准调控,将施工周期缩短10%以上,保障路基施工的质量与安全。

4 技术应用关键点与优化方向

4.1 技术应用关键点

数据精度控制是数字化施工技术有效应用的基础。在数据采集环节,要选用高精度传感器,并严格按照规范进行安装与调试,减少外界干扰对数据的影响。数据传输过程中,采用可靠的通信协议与加密技术,防止数据丢失与篡改,确保数据完整准确地传输至处理终端。数据处理阶段,运用先进的数据处理算法,对数据进行清洗、校准,提高数据质量,为后续分析与决策提供精准依据。技术协同适配要点在于实现不同数字化技术之间的无缝衔接。将数据采集、传输、分析、预测以及动态调控等技术有机融合,形成一个完整的技术体系。各技术模块之间要建立高效的数据交互机制,确保信息流通顺畅,避免出现数据孤岛现象,从而充分发挥数字化施工技术的整体优势。施工过程适配要点要求数字化施工技术紧密贴合实际施工流程。根据不同施工阶段的特点与需求,灵活调整技术应用方式与参数。在施工准备

阶段,利用数字化技术进行场地勘察与方案优化;施工过程中,实时监测与调控施工参数;施工结束后,运用数字化手段进行质量评估与验收,实现全过程的数字化管理。

4.2 技术优化方向

数字化采集与预测技术优化是提升路基沉降调控水平的关键。研发更先进的传感器,提高数据采集的分辨率与灵敏度,拓展数据采集范围。优化预测模型,引入更多影响因素,提高模型的准确性与可靠性,实现对路基沉降更精准的预测^[5]。动态调控智能化水平提升可借助人工智能与大数据技术。利用机器学习算法对海量施工数据进行分析与挖掘,自动识别沉降规律与趋势,实现调控策略的智能生成与自动执行,减少人工干预,提高调控效率与准确性。复杂工况下技术适配优化需针对特殊地质条件、恶劣环境等因素开展研究。开发适应不同工况的数字化施工设备与技术方,提高技术在复杂环境下的稳定性与可靠性,确保路基沉降调控在各种工况下都能有效实施。

结束语

数字化施工技术在路基沉降预测与动态调控中的应用,实现了从被动监测到主动控制的转变,通过数据驱动的决策机制显著提升了沉降控制的精准性与响应速度。实际应用中需强化数据精度管理、技术模块协同及复杂工况适配性,以充分发挥数字化技术的优势。该技术的推广应用为公路工程高质量建设提供了重要支撑。

参考文献

- [1]胡宇,王兵.数字化技术在公路路面施工工艺控制中的应用研究[J].运输经理世界,2025(23):43-45.
- [2]周明义,黄超,朱灿.公路工程数据采集及智能预测的数字化施工技术[J].建设机械技术与管理,2024,37(6):21-23.
- [3]王国新,张卫兵,王志涛.数字化技术在公路工程施工阶段中的应用研究[J].中国住宅设施,2024(4):61-63.
- [4]梁欢.基于数字化技术的高速公路路基桥梁施工管理探究[J].大众科技,2024,26(3):29-32.
- [5]彭建宏.数字化技术在公路路面施工中的应用研究[J].工程建设与设计,2023(6):89-91.