

高速铁路路基全流程信息化施工创新技术

孟军立 张宁军 刘伟 曹 涛 乔 润

中铁三局集团有限公司 山西 太原 030000

摘 要：高速铁路建设对路基施工质量提出严苛要求，传统施工模式已难以满足高精度、高效率的建设需求。本文分析了高铁路基施工在动态荷载响应、变形控制、工序协同及环境适应性等方面的特点与技术要求，剖析了当前信息化应用中技术协同不足、数据利用低效等问题。重点阐述了勘察设计阶段的三维协同与智能优化技术、施工过程的智能感知与自动化控制技术、施工过程协同管理的多源信息交互与智能决策支持技术、验收交付的数字化验收与资产构建技术，以及运维监测的长期感知与预警技术，构建了覆盖全流程的信息化技术体系，为提升高铁路基施工质量与效率提供技术支撑。

关键词：高速铁路；路基全流程信息化施工；创新关键技术

引言：高速铁路建设中，信息化技术为解决路基施工中的难题提供了新路径，但当前存在技术碎片化、数据不畅通等问题。本文基于高铁路基施工的特殊性，从勘察设计、施工过程、数据管理、验收交付及运维监测五个阶段，系统研究全流程信息化创新技术，旨在打破技术壁垒，实现数据贯通与智能协同，推动高铁路基施工向数字化、智能化转型，为行业技术升级提供理论与实践参考。

1 高速铁路路基施工特点与技术要求

1.1 高速铁路路基施工核心特点

与普通铁路相比，高速铁路路基施工呈现出以下技术特殊性。（1）动态荷载响应敏感。列车时速达300-350km/h时，轮轨作用产生的动应力是普通铁路的3-5倍，且荷载循环频率更高，要求路基结构具备更强的抗疲劳性能。（2）变形控制严苛。路基工后沉降需控制在15mm以内（无砟轨道区段），差异沉降不得超过5mm/20m，施工中需实时监测路基压缩量、侧向位移等参数，避免轨道平顺性受影响。（3）施工具有多工序协同性强。从地基处理、填料摊铺到压实成型，各环节需精准衔接，例如CFG桩复合地基施工中，桩体间距误差需控制在±50mm内，否则会影响整体承载均匀性。（4）环境适应性要求高。在软土、黄土等特殊地质区段，要结合地质条件创新施工工艺，如采用真空预压联合堆载的方式加速软基固结，确保施工质量与工期平衡。

1.2 高速铁路路基施工关键技术要求

高速铁路路基施工关键技术要求如下：（1）结构稳定性。要求路基填料压实度达到96%以上（基床表层），通过重型击实试验控制填料级配，避免颗粒离析导致的强度不均。（2）对地基处理技术，要根据地质条件选择

合适方案，如深厚软土层采用水泥土搅拌桩+碎石垫层复合处理，确保地基承载力特征值 $\geq 180\text{kPa}$ 。（3）沉降控制要贯穿施工全周期，采用“分层碾压+实时监测”技术，每层压实厚度不超过30cm，碾压过程中通过智能压实监测系统（ICM）实时反馈压实度，偏差超限时自动报警。工后需进行不少于6个月的沉降观测，采用二等水准测量精度（每公里高差中误差 $\leq 2\text{mm}$ ），确保沉降趋于稳定。（4）耐久性要求明确，需通过设置防渗层、排水盲沟等措施，避免雨水渗透导致路基软化，同时选用抗冻性、水稳定性优良的填料，适应复杂气候环境^[1]。

2 高速铁路路基施工信息化现状与问题

2.1 信息化应用现状

当前高速铁路路基施工信息化已实现基础技术覆盖。感知层面，各类传感器已用于采集压实度、沉降等关键参数，数据传输依赖无线网络实现实时上传。设计阶段普遍采用BIM技术进行三维建模，施工过程中引入智能设备进行自动化作业，形成从设计到施工的初步数字化链条。数据管理方面，搭建了基础信息平台，用于存储施工进度、质量检测等数据，部分项目尝试通过算法对数据进行简单分析，为管理决策提供参考。标准体系建设取得一定进展，针对数据采集格式、设备接口等制定了部分规范，推动了不同系统间的初步协同。

2.2 现存主要问题

技术协同性不足：各环节信息化技术多独立应用，感知层数据与设计模型、管理平台间缺乏深度对接，数据流转存在壁垒，难以形成闭环管理。智能设备与传统施工工艺融合度低，自动化作业范围有限，技术潜力未充分发挥。数据质量与利用低效：多源数据格式不统一，存在冗余、误差等问题，标准化处理机制不完善。

数据分析停留在表层,缺乏深度挖掘算法,难以将数据转化为有效的决策支持信息,数据价值未充分释放。标准与保障体系不完善:现有标准对全流程信息化覆盖不全,部分关键环节缺乏统一规范,导致系统兼容性差。信息化人才储备不足,施工人员技术应用能力有限,且安全保障机制对数据加密、权限管理等考虑不足,存在信息泄露风险。技术集成度偏低:数字孪生、人工智能等先进技术应用处于初级阶段,未形成与路基施工特性适配的成熟解决方案,技术集成度不足以支撑全流程智能化管理,整体信息化水平仍有较大提升空间^[2]。

3 高速铁路路基全流程信息化施工创新关键技术

3.1 勘察设计阶段:地质信息数字化融合与设计参数智能优化技术

勘察设计阶段的核心在于通过数字化手段实现地质信息与设计方案的精准融合,主要技术有:(1)三维地质建模技术。以多源数据采集为基础,整合无人机倾斜摄影获取的地表三维点云数据、地质雷达探测的地下介质反射信号,以及跨孔地震CT生成的地层波速分布剖面,通过点云配准、信号反演和数据插值算法,构建包含地层界面、岩土体物理力学参数的三维模型。模型采用细分网格技术,网格尺寸可精确至厘米级,确保地质细节的完整呈现。(2)BIM与GIS技术的协同应用。BIM平台通过参数化建模工具定义路基结构的构件属性,如基床表层的厚度、填料类型等参数,并与GIS系统中的地形、地貌数据关联,形成包含地理坐标的三维设计模型。设计参数的调整可通过算法驱动自动更新,实现横断面、边坡防护等构件的快速生成与修改。内置的优化模块基于有限元分析原理,对地基处理方案的关键参数进行迭代计算,通过对比不同桩长、桩距组合下的结构响应数据,输出符合沉降控制要求的最优参数组合。

(3)地质参数智能反演与设计方案的动态适配技术。基于现场勘察的离散数据,通过机器学习算法构建地质参数预测模型,对未勘察区域的岩土体力学特性进行精准推断。将反演得到的连续地质参数场与BIM设计模型实时关联,当地质参数发生变化时,系统自动触发设计方案的适应性调整,重新计算地基处理参数与结构尺寸,确保设计方案始终与实际地质条件保持最优匹配状态,提升设计的动态响应能力。

3.2 施工过程:智能感知与自动化控制技术

地基处理环节的关键技术如下:(1)无线传感网络监测技术。在地基处理区域按网格布设微型传感器节点,节点集成压力、位移与含水率监测模块,通过自组网实现数据无线传输。采用低功耗设计确保长期稳

定运行,数据采集频率可动态调节,满足不同施工阶段监测需求。监测数据经网关汇聚后上传至管理平台,通过数据融合算法生成地基力学状态分布图,实时反映地基处理过程中的应力变化与变形特征,为施工参数调整提供依据。(2)智能压实监测系统。通过在压路机上集成多类传感器,实现施工参数的实时采集。北斗定位终端提供厘米级定位数据,结合加速度传感器采集的振动信号,通过振动压实理论计算实时压实度。车载终端采用可视化界面,以热力图形式展示不同区域的压实质量差异,当监测值超出设定阈值时,通过声光报警装置提示操作人员进行补压。(3)级配碎石摊铺的自动找平系统。由机器视觉模块与执行机构组成,高清摄像头采集摊铺层表面图像,通过图像识别算法计算实际高程与设计高程的偏差值,将偏差信号传输至电液伺服系统,驱动熨平板进行高度调整。控制系统采用PID算法,确保调整过程的稳定性与精度,使摊铺高程偏差控制在 $\pm 3\text{mm}$ 范围内。(4)人机协同作业平台。通过AR眼镜实现虚实信息的叠加显示。眼镜内置的空间定位模块获取操作人员的实时位置与视角,结合BIM模型数据,将设计标高、压实边界等信息以三维虚拟线条的形式投射到现实场景中^[3]。

3.3 施工过程协同管理:多源信息交互与智能决策支持技术

该阶段核心技术聚焦施工全流程的高效协同与动态决策。(1)多方协同工作平台采用分布式数据共享架构,集成建设、施工、监理等主体的业务系统,通过实时消息队列实现跨单位信息交互。平台内置权限动态配置模块,基于角色分配数据访问权限,支持施工方案、变更指令的在线会签与版本追溯,解决传统管理中信息滞后与流转低效问题。(2)施工动态智能调度系统整合资源数据与现场工况,通过时空关联算法生成进度热力图,实时追踪关键工序完成情况。系统嵌入资源优化模型,结合施工强度与设备利用率数据,自动生成机械配置与人员排班方案,并通过移动端推送给作业班组,实现资源动态调配。(3)基于知识图谱的工艺智能管控系统将施工规范转化为结构化规则,关联地质条件、设备参数与质量检测数据,形成工艺决策网络。当现场出现异常参数时,系统通过规则匹配推送历史解决方案与预防措施,辅助管理人员快速处置,提升问题响应效率。

3.4 验收交付:数字化验收与数字资产构建技术

验收交付阶段的关键技术有:(1)三维激光扫描技术。通过高速激光测距仪对成型路基进行全方位扫描,获取高密度点云数据。扫描过程采用多站式测量方法,通过靶标实现不同站点数据的拼接,确保点云模型的整

体性与精度。点云处理软件通过去噪、简化等算法优化数据,生成与BIM设计模型比对的基础数据。比对分析模块采用几何特征匹配算法,计算高程、坡度等指标的偏差值,生成详细的偏差报告,涵盖每个检测点的具体位置与偏差数值。(2)无损检测数据融合系统整合地质雷达、面波仪等设备的检测数据,通过数据配准技术将不同设备的检测结果映射到统一坐标系下。系统采用图像分割算法对雷达图像与面波频散曲线进行分析,识别路基内部的空间洞、松散等缺陷区域,通过三维建模技术构建缺陷的空间分布模型。缺陷定位采用多源数据融合算法,结合各设备的检测精度权重,提高定位准确性,使缺陷边界误差控制在 $\pm 10\text{cm}$ 范围内。(3)路基数字资产包包含从勘察到施工的全周期数据,通过数据压缩与轻量化处理技术,减小BIM模型的存储体积,确保在不同终端的高效加载与浏览。数字资产采用分布式存储架构,通过云服务器实现数据的集中管理与多终端访问,支持权限管理功能,不同用户可根据权限获取相应的数据访问权限。

3.5 运维监测:长期感知与性能演化预警技术

运维监测阶段的关键技术有:(1)光纤光栅(FBG)传感器阵列沿路基纵向与横向间隔布设,传感器通过特殊封装工艺实现对温度、应变、沉降等参数的同步监测。光栅的中心波长随外界物理量变化而发生偏移,通过解调仪测量波长偏移量可计算相应的参数值。传感器采用无源设计,无需现场供电,通过光纤传输信号,具备抗电磁干扰、耐腐蚀等特性,适应恶劣的野外环境。(2)数字孪生运维模型基于实体路基的BIM模型构建,通过数据接口接收实时监测数据,实现物理实体与虚拟模型的动态映射。模型采用有限元分析方法,模拟路基在列车荷载、温度变化、地下水作用下的力学响应,计算结构的应

力分布与变形趋势。预警系统设置多级阈值,当监测数据或模拟结果超出阈值时,自动触发预警信号,通过平台推送至相关管理人员。(3)无人机巡检系统按预设航线定期对路基进行航拍,获取高分辨率表面图像。AI图像识别模块采用深度学习算法,对图像中的边坡、排水系统等关键部位进行特征提取与分析,识别病害。识别模型通过大量样本训练优化,具备较高的准确率,可适应不同光照与天气条件下的图像识别需求^[4]。

结束语

本文系统梳理了高速铁路路基全流程信息化施工的创新技术,明确了各阶段的核心技术要点,涵盖从勘察设计到运维监测的全周期。通过解决技术协同、数据管理等关键问题,构建了一体化信息化技术框架。研究表明,全流程信息化技术可有效适配高铁路基施工的严苛要求,提升施工精准度与管理效率。未来需进一步完善标准体系,深化先进技术融合应用,持续优化技术方案,以推动该领域技术的迭代升级,为高速铁路工程建设提供更有力的技术保障。

参考文献

- [1]汪阳杰.高速铁路路基CFG桩复合地基施工技术研究[J].中文科技期刊数据库(全文版)工程技术,2025(6):229-232.
- [2]李健.铁路路基防护工程施工技术要点分析[J].交通科技与管理,2023(15):54-56.
- [3]刘鹏,张英.基于信息化技术的交通工程路基路面协同设计与施工优化研究[J].数码设计(电子版),2024(7):0499-0501.
- [4]甘生俊,唐梅.铁路桥梁建造技术全流程施工工艺智能化升级改造研究[J].土木工程,2024,13(10):1879-1886.