

智慧施工技术在复杂地形公路工程中的应用

夏天成

新疆北新路桥集团股份有限公司，新疆乌鲁木齐，830000；

摘要：公路工程建设地域跨度大，环境异质性强，特别是在山地、丘陵等复杂地形条件下，其剧烈的地形起伏和多变的气候条件进一步加剧建设管理的难度，传统的管理模式已不能满足现代高速公路建设的精细化和动态化需求。在这样的背景下，建立涵盖全流程、融合多种要素的综合管理系统，是公路工程项目和施工企业应对复杂地形的核心诉求，基于此，文章分析智慧施工技术在复杂地形公路工程中的应用。

关键词：智慧施工；施工技术；技术应用；复杂地形公路

DOI：10.69979/3029-2727.26.02.009

引言

新一轮科技革命的浪潮，给智慧施工的建设注入强大动力，以信息时代为基础，以 BIM、物联网、大数据等前沿技术为依托，促进公路工程建设管理向智能化、集成化和信息化方向发展，通过搭建集成系统平台，实现对工程全过程和各个环节的精确监控，实现人员、机械、材料、工艺、环境等关键施工要素的闭环控制，有效识别风险隐患，控制质量安全事故。在新时代下，智慧施工已经成为必然的选择，它不仅改变传统的施工模式，帮助企业实现高效的管理目标，还可以提高工程质量和社会信誉，增强企业的可持续发展能力^[1]。

1 公路工程施工管理中普遍存在的问题

在公路工程建设管理中，存在着一些普遍存在的问题，亟须解决，受项目分布广、工期长等固有特点的制约，目前的建设决策主要依靠现场巡查记录和基层单位的信息反馈，但这种信息收集方法也有明显的局限性：一是人工收集不可避免地会有遗漏，较难保证信息的全面性和时效性；二是由于一线员工的专业素养参差不齐，可能会出现误判、漏判关键信息，导致决策失败风险增加，导致项目管理失去科学指导。虽然一些企业已经采用信息化管理平台，对施工数据进行集中管理，但是系统之间的协同效果仍然不够理想，各子系统之间数据标准不统一，接口兼容性差，导致信息传递受阻，出现典型的“信息孤岛”现象，这种分散的状态迫使管理者对同类数据进行重复录入，不仅增加管理人员的工作量，也造成对海量数据资源的深度挖掘和利用，严重制约信息化管理的实用价值。当前的管理体制在功能设计方面存在着明显的缺陷，针对公路工程中普遍存在的质量缺陷、安全隐患和施工难点问题，缺乏有效的动态监控和智能预警机制，一旦发生突发事件，往往由于反应滞后而迅速蔓延开来，造成难以估计的经济和人员伤亡，直

接威胁到公司财产安全和工作人员的生命健康。

2 智慧施工技术在复杂地形公路工程中的应用

2.1 智慧施工技术集成和整合

2.1.1 技术集成框架

智慧施工技术是将多种先进技术有机融合在一起，实现对施工现场的全过程监控、精细管控和高效协同作业，是现代工程管理领域的前沿研究方向，其核心是以统一的标准为基础，融合多种专业技术和模型，对项目各个专项内容进行统筹设计和规划。以此为基础，通过对项目三维可视化建模，实现对项目进度、工程量、设计方案和线路布置等关键因素的整体把握，最终形成详尽、完整的施工图集，为项目管理决策提供可靠的数据支持^[2]。

2.1.2 BIM 与 GIS 的协同赋能

建筑信息模型（BIM）以构建精细可视化模型为核心，在模型中嵌入海量、异构的工程数据，该集成模型突破单纯信息存储的局限，实现对数据的深层次挖掘和应用，能够全面刻画工程对象的物理和功能特征。BIM 是创新的数字化方法，它贯穿于从设计到建设到运营的整个过程，为参与各方提供统一的数据来源，保证信息在生成、管理和共享过程中的无缝流转，该系统具有工程资源优化配置、数据自动计算、高效查询、灵活组合拆分等功能，为项目各方服务。地理信息系统（GeographicInformationSystem, GIS）是以地理坐标为基础的综合信息平台，立足地学，融合多源异构数据，形成对空间分析和决策支持的强大能力，在对空间位置信息进行解析的基础上，利用地图和 3-D 场景对多维信息进行分层展示。

BIM 和地理信息系统各有优势和互补，二者的结合为协同应用开辟一条新的途径，BIM 为地理信息系统为空间分析提供精细的对象模型载体，地理信息系统赋予

BIM 模型宏观地理环境语境和空间分析能力, 协同驱动公路项目三维数字化进程, 在实际应用中, 可以通过基于工业基础代码体系赋予 BIM 构件丰富的属性信息, 并通过特定数据映射机制, 实现 BIM 几何模型和 GIS 数据模型之间的准确对应。

2.2 测绘技术的应用方法

2.2.1 无人机测绘技术的工程实践

该系统将高精度传感器和航空测量模块相结合, 可以有效地获取复杂地形的信息, 该技术能够快速获取大范围地形起伏、地物特征等关键空间信息, 其飞行控制灵活, 特别适合传统测绘方法无法覆盖的陡坡、峡谷等区域, 显著提高地形数据的完备性和精度。在工程应用中, 公路设计图采用双坐标系, 即桩点以国家大地坐标系绝对坐标进行定位, 横断面测量采用桩点相对坐标系, 但目前尚无统一的方法, 这种坐标体系可以直观地反映桩点和截面节点在空间上的关联性。在获取原始坐标数据的基础上, 利用点云处理技术进行坐标系的变换, 该方法的核心是利用三角形几何原理, 将断面的相对位置参数映射到绝对坐标, 平面坐标变换需要综合考虑起点号、目标点间距和初始方位角等因素, 并且经过严格的数学推导才能实现, 高程数据的处理也遵循一定的逻辑: 以已知点的绝对高程作为参考, 结合断点的相对高程, 通过迭代求出目标点的实际高程^[3]。

2.2.2 GIS 与 BIM 融合的三维建模方法

通过对无人机采集到的地形数据进行预处理, 并将其导入 GIS 与建筑物信息模型集成平台中, 利用 Civil3D 等专业软件对点云数据进行表面重建, 建立满足工程规范的数字化地形模型, 该模型经过单位归一化和坐标标定, 输出为交互式扩展标注语言格式文件, 为三维造型提供基本的数据源。BIM 技术在以上文件的基础上进行处理, 构建高速公路全要素数字化模型, 实现从规划、设计、施工到管理全生命周期的应用, 在方案比较阶段, 利用三维模型可以动态地展示不同线路的地形适应性。在设计优化方面, 为土方平衡分析和结构设计提供支持; 在施工管理方面, 及时掌握施工进度和设计变更情况, 尤其是在工程量计算方面, 利用高精度地形模型自动提取断面轮廓线, 并利用相邻断面之间的几何关系, 准确求取土方面积和土石方体积。本文提出基于多边形角点坐标的解析几何方法, 采用相邻断面平均面积和中心距离乘积的方法来计算开挖面面积, 大大提高了人工测量的效率。平面坐标转换模型计算方式为:

$$XD = XK + KD - K \cdot \cos\theta$$

$$YD = YK + KD - K \cdot \sin\theta$$

式中: K 为起点测点编号; D 为目标测点编号; θ

为起点方位角; (XK, YK) 为起点绝对坐标; (XD, YD) 为 D 点转换后坐标。

3 实例应用

3.1 项目概况

某隧道双孔明开挖断面设计净高 2.6 米×2.4 米, 顶板、底板各厚 300mm, 中间隔板厚 300mm, 该工程由 5 个竖井组成, 主体结构为现浇混凝土结构, 覆盖层厚度 1.24—5 米。其中, 130 米的明挖段需跨越既有地铁线路施工, 其中 5 条 220kV 高压输电线路和 1 条 10kV 高压输电线路交叉穿越, 导线最低点距地面只有 12 米, 在多雨的季节, 隧道开挖和结构物的施工过程中, 若控制不当, 极易出现质量缺陷和安全事故^[4]。

3.2 前期筹备工作

在项目启动阶段就建立数字化的管控系统, 对组织结构进行优化, 并对其进行分级管理, 班组提前将拟进场人员信息录入系统, 提交进场申请, 经项目层初审合格后, 操作人员需进行线上准入评审, 合格方可纳入实名管理库; 审核不合格者不得进入。在施工前, 各班组必须在系统中提交作业申请, 包括施工地点、施工内容、施工时段和人员配备, 规定每班必须有一名组长、一名施工员、一名安全员和几名有资质的工人, 项目层对施工条件进行核实后, 方可实施。实践中, 企业需将智能终端同步部署到工地中, 也就是将具有自动违章识别和远程语音警告功能的智能监控设备和执法记录仪安装到工作区域, 并通过物联网接入监控平台, 与数字化监控系统进行集成, 监控范围应覆盖所有的工作面和人员活动范围, 无关的人员和机器不允许进入。

3.3 施工过程管控

3.3.1 施工工序质量管控要素

在对施工过程进行系统分解的基础上, 利用鱼刺图工具对各过程特征进行分析, 构建质量缺陷的致因模型, 从多个维度对质量风险进行前瞻性辨识, 形成标准化质量要素管理表。例如, 土钉墙的施工工艺是: 土方开挖、土钉钻孔、绑扎钢筋、注浆、铺设钢筋网片、喷射混凝土, 其中, 人员层次涉及多个工种的协作, 需要加强组织和协调; 机械层级覆盖的设备种类繁多, 需要优化调度结构; 材料层次要严格按照设计要求进行, 重点是孔深、钢筋规格和位置精度的控制; 在技术层面上, 存在一些隐蔽的风险, 例如加强筋的可靠度、注浆的密实度、喷浆的厚度和混凝土的强度不足; 在环境层面上, 需要关注气候变化对施工工况和质量稳定性的影响^[5]。

3.3.2 安全风险分级管控

根据施工流程, 对危险点进行分段、分区排查以及

对设备和工种排查,运用作业危险分析方法对危险源进行风险识别和致因分析,结合作业条件风险评估方法,对危险源进行定量分类,并对其进行风险等级划分,提出针对性的控制措施,最后,形成以施工安全管理为核心的风险分级管控清单。通过对土钉墙支护工程的系统

辨识和评价,得出相应的风险等级管控清单,临时用电不规范,施工方案执行不到位,违章作业行为和施工质量缺陷引发的连锁安全隐患是作业过程中的主要危险源。

表1 土钉墙施工风险分级管控清单

风险点	作业活动	主要危险因素	潜在事故类型	风险等级	管控措施	责任层级
土方开挖	土方开挖	司机操作不规范、机械故障、未执行专项方案	坍塌	较大风险	规范操作流程、定期检修机械、严格执行方案	公司/项目/班组
	土方运输	驾驶员技能不足、车辆性能缺陷、超载、道路条件不符	车辆伤害	一般风险	持证上岗、车辆日常检查、限载运输、改善通行条件	项目/班组
土钉成孔	钻孔作业	机械操作失误、用电违规、未按参数成孔	机械伤害/触电/坍塌	较大风险	规范用电管理、严格按设计参数施工	公司/项目/班组
钢筋安放	钢筋笼安装	加工质量不达标、人员无防护、登高措施缺失	物体打击/高处坠落	一般风险	加强钢筋笼验收、配备劳保用品、完善登高防护	项目/班组
	焊接作业	用电违规、设备老化、无防护、违规操作	触电/高处坠落	一般风险	规范用电、设备定期检测、设置防护装置、严禁违章作业	项目/班组
注浆	水泥浆灌注	用电隐患、浆液配比错误、操作失误、违规登高	触电/高处坠落/坍塌	较大风险	强化用电监管、严控浆液质量、规范操作流程、落实登高防护	公司/项目/班组
钢筋网片施工	网片绑扎	连接不牢、登高作业不规范、防护缺失	高处坠落	一般风险	确保绑扎质量、规范登高行为、配备安全防护装备	项目/班组
喷射混凝土	混凝土喷射	设备故障、用电违规、违章操作、无登高措施	触电/高处坠落/坍塌	较大风险	设备日常维保、规范用电、标准化操作、完善登高设施	公司/项目/班组

3.3.3 全过程动态管控机制

在数字化管理平台的基础上,将质量要素清单和风险控制清单层层分解到作业班组,确定每个环节的责任人,采用班组自检、项目部自检、公司远程视频监控三级联动机制,实现对质量安全关键节点的动态监控,现场问题及时沟通、处理、存档。施工结束后由项目部进行回顾分析,追溯根本原因,并对后续计划进行优化,对分包商建立月度绩效考核制度,对分包商进行直接考核,对年评D级的分包商列入黑名单[6]。

3.4 实施效果

项目实施效果明显,依托“智能终端+数字化管理平台+全过程监控”的智慧施工系统,项目建设的全过程控制效能有质的飞跃,项目通过技术创新推动管理水平的提升,最终实现多个关键指标的突破:项目质量达到一次100%验收通过率的优异成绩,安全生产状况持续平稳,全程零事故记录;劳动力管理系统全面实行实名制登记,覆盖率达到100%,劳动争议有效规避;现场管理效率和资源分配精度同步提高,带动项目整体效益的大幅提升[7]。

4 结论

综上所述,在“交通强国”战略的实施过程中,基于复杂地形条件下的公路工程建设正遭遇施工安全管

控、生态环境保护与工程质量保障等多重难题。智慧施工技术在复杂地形条件下的高速公路建设中的应用,对于提高建设质量,推动产业智能化转型,具有重要的战略意义,研究成果将为我国道路交通高质量发展提供可复制的技术范例和管理借鉴,未来需要进一步加强技术集成和标准体系建设,促进其大规模应用。

参考文献

- [1] 王俊华.智慧施工技术在复杂地形公路工程中的应用[J].智能建筑与智慧城市,2025,(11):154-156.
- [2] 郭根辉.基于智慧工地的公路工程项目施工过程管控[J].黑龙江交通科技,2025,48(03):110-114.
- [3] 张翼.智慧施工技术在复杂地形公路工程中的应用探索[J].现代工程科技,2025,4(04):101-104.
- [4] 李二斌.绿色智能建造与施工材料和施工设备智慧管理在公路路面施工中的应用[J].工程与建设,2025,39(01):212-215.
- [5] 张乐.基于物联网的公路工程智慧施工管理模式及其实施路径[J].产业创新研究,2025,(02):112-114.
- [6] 李晶.智慧公路交通工程与VR技术融合的创新实践[J].张江科技评论,2024,(09):171-173.
- [7] 胡晓骏.公路工程智慧建设管理方法与应用研究[J].内蒙古公路与运输,2023,(06):25-29.