

BIM 技术在隧道施工智能管理中的实践研究

韦世顺

(广西路桥工程集团有限公司道桥分公司, 广西 南宁 530200)

摘要 针对岩溶与软岩交错隧道施工中存在的地质不确定性、工序冲突与安全风险耦合问题, 需构建集成“地质—结构—机电”的 BIM 一体化模型, 建立统一坐标与编码体系, 实现 4D 进度智能管控、BIM+ 物联网安全预警与协同平台资源优化。将 WBS 与断面参数绑定, 采用挣值法驱动计划调整; 将应力、收敛、瓦斯、涌水监测数据与模型位置精确关联, 构建多参数联合判别机制; 协同平台自动完成算量与资源时窗冲突消解, 旨在为复杂地质隧道施工提供可复制的数字化管理路径。结果表明, 施工周期缩短 15%, 工序衔接时间减少 37.8%, 安全事故率下降 30%, 预警响应时间缩短 40%。

关键词 BIM; 隧道施工; 进度管控; 安全预警; 资源优化

中图分类号: U45; TP3

文献标志码: A

DOI: 10.3969/j.issn.2097-3365.2026.14.029

0 引言

西南岩溶区隧道施工面临断裂密集、涌水波动与软岩变形等多源不确定性, 叠加喷射、拱架、注浆与机电安装等多工序交叉作业, 交通与通风占位冲突频发^[1]。传统依赖人工报工与离散监测的管理模式难以支撑复杂工况下的及时决策与精细管控^[2]。BIM 作为工程数字基础, 可承载设计、地质与工序等多维数据, 实现三维一体表达与 4D 可视化推演。然而, 既有研究多集中于设计阶段或单点监测, 缺乏将掌子面地质变化、支护状态、进度与资源协同联动的施工期一体化方案。本文以广西岩溶软岩交错隧道为依托, 构建 BIM 与物联网深度融合的智能管控体系, 为复杂地质隧道数字化施工提供参考路径。

1 工程概况

本工程位处典型岩溶地貌带的公路隧道, 设计里程长 1 200 m, 围岩以灰岩与泥质粉砂岩互层为主, 岩溶发育率约 35%, 软岩段占比 28%。从工程环境与地质耦合关系来看, 分区性强且断裂密集, 局部含水性高, 溶洞与裂隙发育, 开挖扰动后易出现结构失稳。项目把建筑信息模型作为工程数字基础, 构建地质与构造一体化三维模型, 承载设计、地质、工序等多源数据, 支撑进度与安全的联动认知与决策。从施工期管理诉求出发, 需要把掌子面地质变化、支护状态与资源投入进行同步感知与可视表达, 为后续智能管控模块预留数据接口。

2 BIM 技术在隧道施工智能管理中的关键应用

2.1 基于 BIM 的施工进度智能管控

立足于隧道岩溶与软岩交错的施工情境, 把线路中线与断面参数同 WBS 任务分解绑定到 BIM 构件, 生成可驱动计划时标的 4D 模型^[3-4]。现场把每日掘进长度、喷射混凝土方量与钢拱架安装数量经物联网采集入库, 系统把这些时态数据与里程进度基线对齐, 自动比对实际与计划。为使管控更具可执行性, 模块以偏差阈值联动流程调整与预警。为使偏差度量可操作, 选用挣值法对进展信息进行量化, 并以阈值规则触发计划重排与工序协调, 公式如下:

$$SV=EV-PV \quad (1)$$

式(1)中, SV 表示进度偏差, 为计划与实际差额的度量; EV 为挣值, 代表已完成工作按预算计量的价值; PV 为计划值, 对应计划时刻的预算价值。单位以 m 或 CNY 表示。

兼顾成本维度的联动决策, 进一步计算成本偏差, 以形成进度与资源的双约束判断, 公式如下:

$$CV=EV-AC \quad (2)$$

式(2)中, CV 表示成本偏差, 用于衡量预算与实际支出差额; EV 为挣值; AC 为实际成本。单位以 CNY 表示。

当偏差被识别为地质突变所致, 系统把掌子面地质标签与支护状态关联, 定位突变界面与涌水级别变化, 并输出工序调整建议, 如缩短单循环进尺、提高初期支护强度、追加注浆班组, 同时把资源占位在 4D

作者简介: 韦世顺 (1995-), 男, 本科, 助理工程师, 研究方向: 隧道施工技术。

模型中重排；交通与通风时窗随之联动更新，降低交叉作业拥堵风险。

2.2 BIM+ 物联网的施工安全风险预警

鉴于隧道位处岩溶发育与软岩交错的复杂场景，本研究把20个监测点的应力计、围岩收敛传感器、瓦斯浓度仪与涌水流量计接入边缘网关，按统一坐标把监测点精确锚定到BIM模型的断面与里程位置，并且

以时序数据流在模型中同步刷新风险点热区，可在施工端口以颜色分级直观呈现掌子面与邻近区的风险分布，总体架构与数据流转见图1。

从安全管控的处置链条来看，系统把单点阈值与趋势判断相结合，先以阈值触发预警，再以滑动窗口对异常持续性进行校核，同时把预警等级与施工工序库进行关联，形成停掘、加密通风、加固支护与补充

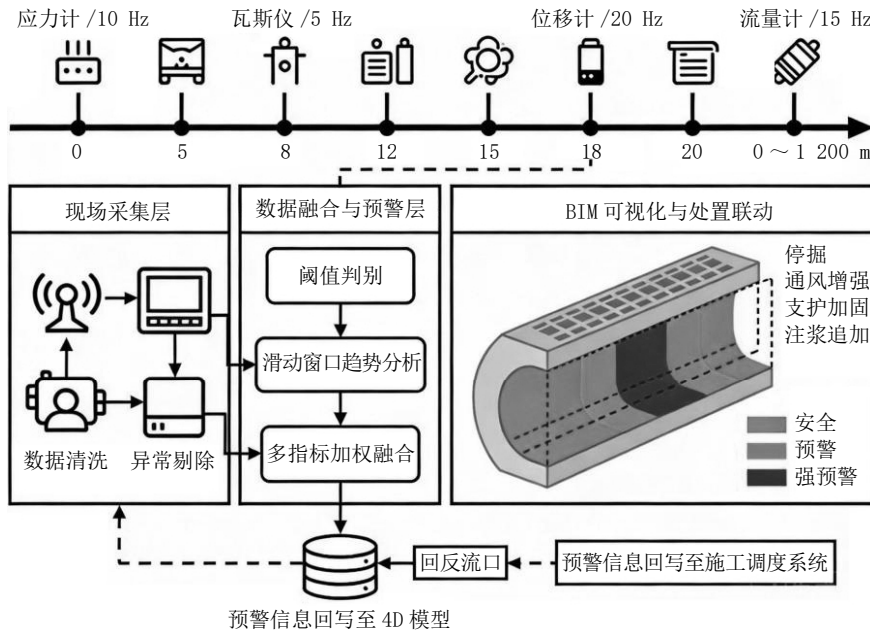


图1 BIM+ 物联网施工安全风险预警架构图

注浆的联动建议，并且在BIM模型中把机电与交通资源的占位时窗进行同步更新。为使应力判据具备可落地的工程适配性，选用允许应力与安全系数的乘积作为预警阈值，公式如下：

$$Y=S \times K \quad (3)$$

式(3)中， Y 表示应力预警阈值(单位：MPa)， S 为围岩或支护的允许应力(单位：MPa)， K 为安全系数(无量纲)，取值随围岩级别与施工阶段进行分档设定。

由此推导出的多参数融合机制把瓦斯浓度、涌水流量与位移速率按指标权重进行联合判别，当两项及以上达到预警等级时把风险升级为强预警，并且把掌子面循环进尺即时缩减，同时在平台侧生成含处置清单与责任人指派的任务单，借助消息推送把决策传达到现场班组与机电维保单位，提升从识别到处置的连贯性与及时性。

2.3 BIM协同平台的资源优化配置

鉴于隧道多工序交叉与资源占位耦合的现实情境，本研究把BIM协同平台当作统一调度枢纽来使用，整

合人员、设备、材料三类资源库，按构件编码与工序清单进行关联，并把WBS、4D时标以及物联网监测条目统一到同一数据模型中，用于驱动跨专业协同和细化到里程的资源计划。平台在算量环节把模型构件属性中的混凝土标号、钢拱架规格与锚杆间距进行自动汇总，生成BOM与台班折算清单，同时以路段级约束如供电容量、通风能力与运输通道拥堵度进行边界校核，实现由模型到可执行资源计划的闭环表达(见表1)。

进一步观察施工组织的动态性，需重点关注岩溶涌水与软岩变形引起的阶段性波动，平台把地质标签与支护状态绑定到排程规则，当监测数据触发阈值时自动下调单循环进尺、延长喷射保压时间，并且把挖掘机与湿喷机进场时间进行重排，减少待工与占位冲突。调度算法以优先级队列与时窗冲突消解策略来开展资源匹配，把关键工序占位进行优先锁定，并设置人员二次调配冻结期以降低频繁切换造成的效率损失；结果层以指标看板同步展示设备利用率、材料浪费率与待工时间的运行态，配合周计划滚动调整与例行协

调例会，把任务指派通过消息推送同步到施工、监测与机电三类人员，并在调度面板中回写闭环状态。

表 1 BIM 协同平台资源调配前后对比表

指标	平台应用前	平台应用后
设备利用率	65%	82%
材料浪费率	12%	5%
平均待工时间	3.2 h	1.1 h
配料偏差率	7%	3%
周转材料占用天数	18 d	11 d
机电占位冲突工单数	9 次/月	3 次/月
人员二次调配率	21%	9%

3 BIM 技术应用效果评估与总结

3.1 施工效率提升效果分析

从隧道掘进的多工序交叉与资源占位耦合关系来看，本研究把 WBS 任务拆解与线路断面参数绑定到 4D 模型，并把每日掘进、喷射与拱架安装的时序数据回写至协同平台，形成以偏差阈值驱动的节拍管理与资源重排。鉴于岩溶与软岩交错带来的工序不确定性，系统把地质标签与支护状态嵌入排程规则，使计划与现场反馈在同一数据底座内进行持续校核与修正，从而压缩非生产性等待。平台在算量环节把混凝土标号、钢拱架规格与锚杆间距自动汇总为 BOM，并以供电容量与运输拥堵度进行边界校核，使排程由模型到执行形成闭环。

从效率变化的关键指标来看，施工周期由计划 180 d 压缩为实际 153 d，缩短 15%，其主要缘由是单循环进尺与支护强度联动后降低了返工与停滞时窗；工序衔接时间由平均 4.5 h 降至 2.8 h，减少 37.8%，体现出交通与通风时窗在 4D 模型中的协同重排效果；人工成本总额降低 12%，与人员二次调配冻结期减少频繁切换密切相关。为提高论证的可比性与统计口径一致性，关键指标对比见表 1。

表 1 BIM 应用前后施工效率指标对比表

指标	应用前	应用后	变化幅度
施工周期	180 d	153 d	-15%
工序衔接时间	4.5 h	2.8 h	-37.8%
人工成本	CNY 12 000 000	CNY 10 560 000	-12%

3.2 安全风险管控效果评估

鉴于广西该隧道工程处于岩溶与软岩交错的高风险场景，本研究对 BIM+ 物联网预警体系的管控效果开

展评估，关注从识别、决策到处置的链条连续性与工程适配性。把应力、收敛、瓦斯与涌水监测点按统一坐标锚定至 BIM 断面位置，并以单点阈值叠加滑动窗口趋势判断与多参数联合判别进行风险识别，处置侧把停掘、加固支护、加密通风与注浆任务单在平台中生成并推送至施工与机电维保单位，同时联动更新交通与通风时窗。结合季度口径的核心指标观察，单位施工面积安全事故发生率由 0.8 次/10 000 m² 降至 0.56 次/10 000 m²，下降 30%，与掌子面地质标签、支护状态及机电占位的三端联动处置紧密相关；预警响应时间由 30 min 压缩至 18 min，减少 40%，缘由囊括边缘网关近端判别降低数据上行等待、任务单模板化明确责任与处置路径以及 4D 时标驱动设备与人员的即时重排。进一步观察现场管理链路，误报被压降使停掘指令更加收敛，漏报减少使掌子面临时加固更及时，资源调度侧的优先级队列把关键工序占位优先锁定，减少待工与冲突^[5]。由此可以看出，该体系把风险识别精度与处置执行力同步提升，在断裂密集与涌水波动阶段呈现更稳健的安全运营态势。

4 结束语

本研究构建了基于 BIM 的岩溶隧道施工智能管控体系，实现了模型、数据与协同三端的深度融合。通过统一坐标编码将断面参数、支护工序与机电接口绑定，配合动态 LOD 与语义化点云回写，提升了可施工性校核精度；数据治理以属性字典与版本冻结保障语义一致性，边缘网关实现近端校验；协同平台以优先级队列消解资源冲突，任务单与责任矩阵提升处置闭环效率。工程实践表明，该体系显著提升了施工效率与安全水平。后续研究可引入序列预测与物理信息融合模型，推动智能管控由项目试点向制度化、规模化发展。

参考文献：

[1] 卢凡. 基于 BIM 技术的公路隧道施工管理与优化研究 [J]. 汽车周刊, 2025(09):163-164,173.
 [2] 何磊. BIM 技术在公路隧道施工进度管理中的应用与效益分析 [J]. 城市建筑空间, 2025,32(S1):207-208.
 [3] 吕文杰, 康鹏程, 樊献友. BIM 技术在隧道施工中的应用研究 [J]. 四川建筑, 2024,44(04):145-147,150.
 [4] 汝承明. BIM 技术在城市隧道施工管理中的应用研究 [J]. 工程与建设, 2024,38(03):727-728,733.
 [5] 马纪波. 基于 BIM 技术的隧道施工安全协同管理研究 [J]. 新城建科技, 2024,33(05):160-162.