高速公路施工全过程安全风险动态管控技术探讨

黄　杨

四川省交通建设集团有限责任公司隧道工程分公司 四川 610041

【摘　要】：高速公路工程通常具有线路跨度长、施工环境复杂、露天作业占比高、高危工序集中、交叉作业频繁等特点，其施工全过程安全风险呈现出显著的动态性、随机性和耦合性。传统静态安全管控模式多依赖事前风险排查、固定制度约束和人工现场巡检，难以适应施工工况、地质环境、天气条件及人员设备状态的实时变化，容易出现风险管控滞后、隐患处置不及时、高危工序监管缺位等问题，进而成为诱发边坡坍塌、高空坠落、机械伤害、隧道险情及临时用电事故的重要原因。为破解传统安全管理模式局限，构建全过程、动态化、智能化的安全风险管控体系，已成为高速公路施工安全管理的重要方向。本文结合四川省山区高速公路建设安全管控实际，围绕施工准备、路基施工、桥梁施工、隧道施工、路面施工及收尾交工的全过程，分析各阶段安全风险的动态变化特征，梳理当前动态管控工作中存在的短板与不足，重点探讨 BIM+GIS 可视化监测、物联网智能感知、风险动态分级评估、信息化闭环管控等技术的现场应用路径，并提出适配高速公路施工现场的全过程动态安全管控优化策略，旨在提升高速公路施工安全风险预判、预警和应急处置能力，降低安全事故发生率，为公路工程安全标准化、智能化施工管理提供实践参考。

【关键词】：高速公路施工；全过程施工；安全风险；动态管控；智能监测技术

DOI:10.12417/2811-0536.26.10.009

1 引言

随着我国交通基础设施建设持续推进，高速公路网络不断向山区、丘陵复杂地质区域延伸，工程建设难度、施工复杂程度、安全管控难度持续提升。四川省地形地质条件复杂，省内山区高速公路项目多穿行于川西高原与深切河谷地带，具有隧道占比高、高墩大跨桥梁多、高边坡与深基坑工程集中、汛期暴雨频发、地质灾害易发等特点。高速公路施工涵盖临时设施搭建、土石方开挖、高边坡支护、桥梁桩基浇筑、隧道掘进、架梁施工、路面摊铺等数十道工序，各工序衔接紧密、交叉作业密集，且受暴雨、大风、高温、霜冻等自然天气影响极大，安全风险始终处于动态变化状态。传统高速公路安全管理以静态管控、事后处置为主，施工前完成风险辨识、编制专项安全方案，施工过程依靠安全员人工巡查排查隐患，风险评估等级长期固定不变，无法适配施工工况动态变化。在复杂地质施工、高危工序交替作业场景下，静态管控模式极易遗漏阶段性新增风险、隐蔽性风险和耦合性风险，导致安全管控与现场实际脱节，小型隐患累积演变为重大安全事故，严重制约工程施工安全、质量与进度管控。全过程安全风险动态管控以“事前预判、事中监测、事后复盘、动态更新”为核心理念，打破传统静态管理壁垒，依托智能化监测技术、动态风险评估模型、信息化闭环管理体系，实现高速公路施工全周期、全工序、全要素的风险动态识别、分级预警、精准管控。基于此，本文结合高速公路施工全流程作业特点，深入剖析动态安全风险管控的技术要点、现存问题及优化路径，为提升公路工程安全管理精细化水平提供支撑。

2 高速公路施工全过程安全风险动态特征

高速公路施工周期长、工序多、场景杂，不同施工阶段的风险类型、风险等级、诱发因素存在显著差异，整体呈现动态变化、多源耦合、突发易发、隐蔽性强的核心特征，具体可分为四大特性：

（1）风险时序动态变化性：高速公路施工分为施工准备、路基、桥梁、隧道、路面、交工收尾六大阶段，各阶段核心施工工序不同，主导安全风险随之动态切换。施工准备阶段风险集中于临时用电、临建设施搭建、场地平整机械作业和山区便道通行等；路基施工阶段以高边坡失稳、土石方坍塌、深基坑积水滑坡、弃渣场失稳风险为主；桥梁施工存在高空坠落、架梁倾覆、桩基塌孔、高墩模板及塔吊电梯作业等风险；隧道施工伴随塌方、涌水突泥、瓦斯及有毒有害气体超标、软岩大变形等风险；路面施工多为机械碰撞、高温施工烫伤、沥青摊铺火灾及交通组织风险。随着施工工序推进，旧风险逐步消除、新风险持续产生，风险时序动态变化特征显著。

（2）风险多因素耦合叠加性：施工现场人员、机械、环境、管理四大风险因素相互耦合、相互影响。山区施工场景下，连续降雨会导致土体含水率升高、边坡稳定性下降，叠加机械重载碾压、人工开挖扰动

和爆破振动，会大幅提升边坡坍塌、滑坡及落石风险；高温天气会导致施工人员疲劳作业、注意力下降，叠加临时用电老化、机械设备高温故障，极易诱发触电、机械伤害事故。单一风险因素往往不会直接引发事故，多因素动态叠加是施工安全事故的核心诱因。

（3）风险突发不确定性强：露天施工的特性，让高速公路施工受自然环境影响极大，暴雨、强风、雷暴、突发山体落石等极端天气具有极强突发性，无固定规律可循。同时，施工人员违章操作、机械设备突发故障、隐蔽地质缺陷暴露等人为与工程隐患，均会导致安全风险瞬间升级，突发事故防控难度大，对安全管控的实时性、快速响应性要求极高。

（4）隐蔽性风险动态滋生：相较于显性违章、设备故障等直观风险，施工过程中存在大量动态隐蔽风险，如路基分层填筑压实不足导致的内部隐患、隧道围岩应力缓慢释放引发的支护变形、边坡土体内部裂隙发育、深基坑支护结构渐进变形等。此类风险初期无明显表象，会随着施工荷载、时间推移逐步累积，静态排查难以发现，需通过动态实时监测实现提前预判。

3 高速公路施工全过程安全风险动态管控核心技术

动态管控技术是实现高速施工安全精细化管理的核心支撑，区别于传统人工管控模式，现代动态管控依托数字化、智能化技术，构建实时监测、动态评估、分级预警、闭环处置的全流程管控体系，核心应用技术如下。

（1）BIM+GIS 可视化动态仿真管控技术：BIM 技术具备三维建模、4D 时序仿真、场景模拟、数据联动更新等优势，GIS 技术则适合高速公路线性工程的空间地理分析。二者结合，可基于工程图纸和地理信息数据构建全线三维模型，结合施工进度计划完成 4D 动态仿真，模拟各工序施工流程、交叉作业场景和高危作业工况，提前识别施工过程中的潜在安全风险，优化专项施工方案与安全防护方案。在施工过程中，将现场施工进度、工序完成情况、风险监测数据实时录入 BIM+GIS 模型，实现模型与施工现场同步动态更新。针对高边坡、深基坑、桥梁高墩、隧道围岩等高危结构，通过模型实时展示结构变形、沉降数据变化，直观呈现风险动态演变趋势，解决传统管控风险可视化程度低、预判难度大的问题。同时，可完成施工风险分区标注，按红、橙、黄、蓝四级风险分级可视化展示，实现高危区域精准管控。

（2）物联网智能感知实时监测技术：物联网智能感知技术是动态风险数据采集的核心手段，通过在施工现场布设多元化智能监测终端，可实现全要素动态数据自动采集、实时传输。目前高速公路工程主流应用的监测设备包括：边坡沉降位移传感器、雨量计、基坑支护结构变形与地下水位监测设备、隧道围岩收敛仪、拱顶下沉监测点、瓦斯及有害气体传感器、人员 UWB 定位设备、桥梁高墩垂直度与风速监测、架桥机运行监控、塔吊及施工电梯安全监控、环境气象传感器、临时用电智能监测装置等。各类监测终端可 24 小时不间断采集施工现场结构变形、应力变化、温湿度、风速雨量、设备运行状态、人员位置、用电负荷等动态数据，通过计算设备完成数据预处理，剔除干扰数据后实时上传至管控平台。当监测数据接近预警阈值时，系统自动触发声光预警、平台弹窗预警，实现风险早发现、早预警、早处置，彻底弥补人工巡检间隔长、夜间监管空白、隐蔽风险无法排查的短板。

（3）动态风险分级评估技术：传统安全风险评估多为一次性静态评估，无法适配施工工况动态变化。动态风险分级评估技术以风险矩阵法、LEC 法、灰色模糊综合评价等为核心，结合实时监测数据、施工进度、环境变化、人员作业状态，建立动态评估模型，定期更新风险等级。系统根据现场动态数据，自动对各施工区域、各工序风险进行重新评级，动态划分重大、较大、一般、较低四级风险，同步更新风险管控清单与管控措施。对于暴雨天气下的边坡、持续掘进的隧道、高空架梁作业等动态升级风险，自动提升管控等级，加密监测频次、增加现场监护人员；对于工序完工、隐患整改完毕的区域，自动降低风险等级，实现风险管控的动态适配、精准匹配。

（4）信息化闭环动态管控技术：依托智慧工地安全管理平台，构建“风险识别-动态监测-预警推送-隐患整改-复查销号-台账归档”的全闭环动态管控流程。平台整合人员管理、设备管理、隐患排查、应急管理、监测预警等功能模块，所有安全管控工作全程线上动态更新。系统自动记录每一项风险的演变过程、预警记录、整改措施、整改时限、责任人，杜绝传统管理隐患整改拖延、责任不清、台账造假、闭环不严等问题。同时，平台可自动生成阶段性安全风险分析报告，梳理施工全过程风险变化规律、高频隐患类型，为后续施工安全方案优化、风险预控提供数据支撑，实现全过程动态管控的标准化、规范化。

4 当前高速公路施工动态安全管控存在的主要问题

（1）动态管控体系落地流于形式：目前多数高速公路建设项目已搭建动态安全管控框架，但普遍存在

重建设、轻落地的问题。部分项目仅完成智慧平台、监测设备的基础布设，但未建立常态化动态评估、定期风险更新机制，风险等级依旧长期固定，动态监测数据未有效用于现场管控。同时，动态管控责任体系不健全，各班组、各岗位动态管控职责划分模糊，导致技术设备闲置、动态管控流于表面，未真正替代传统静态管理模式。

（2）智能化监测应用碎片化：多数施工项目智能化监测设备应用单一、系统不兼容，存在碎片化问题。边坡、隧道、人员、设备、环境监测系统相互独立，数据无法互联互通、整合分析，仅能实现单一维度数据监测，无法实现多因素耦合风险的综合研判。同时，部分项目监测设备布设不合理、维护不到位，野外施工环境下传感器损坏、数据断连、数据失真问题频发，导致动态监测数据准确性、连续性不足，无法支撑精准风险评估。

（3）人员动态管控能力不足：施工一线安全员、现场管理人员多依赖传统管理经验，对 BIM+GIS 仿真、智能监测、动态风险评估等新技术、新方法掌握不足，不会分析动态监测数据、不会识别风险演变趋势，仅能处理显性违章问题，难以开展深层次动态风险管控。同时，施工一线作业人员安全意识薄弱，对动态预警指令配合度低，存在预警后不整改、违规冒险作业的情况，导致动态管控“最后一公里”落实不到位。

（4）高危工序动态专项管控缺失：高边坡开挖、隧道掘进、架梁施工、深基坑作业等高风险工序，本身风险动态变化速度快、事故危害大，但目前多数项目仍缺乏针对性的工序动态管控机制。在高危工序施工过程中，相关单位未根据开挖深度、支护进度、天气变化实时调整管控方案，监测频次固定、管控措施一成不变，无法适配高危工序的动态风险升级规律，这也是高速公路施工重特大安全事故的主要隐患。

（5）风险预警处置机制不完善：部分项目安全预警阈值设置不合理，存在过度预警、无效预警问题，导致管理人员产生麻痹心理，忽视有效预警；同时，缺乏分级预警处置流程，红、橙、黄、蓝不同等级预警的处置时限、处置标准、应急措施没有明确规范，预警后处置混乱、响应滞后，动态预警的防控价值无法充分发挥。

5 结论

高速公路施工安全风险的动态性、耦合性、突发性、隐蔽性，决定了传统静态安全管控模式无法适配现代高速工程施工安全管理需求。全过程安全风险动态管控依托 BIM+GIS 可视化仿真、物联网智能监测、动态分级评估、信息化闭环管理等核心技术，实现了施工全周期风险的实时监测、动态研判、精准预警、闭环处置，有效解决了传统管理风险滞后、管控粗放、隐患累积等问题，大幅提升了高速公路施工安全管理的精细化、智能化、标准化水平。

当前高速公路工程建设项目的动态安全管控仍存在体系落地不实、技术应用碎片化、人员能力不足、高危工序管控薄弱、预警处置不完善等问题。在后续工程施工管理中，可通过健全标准化动态管控体系、搭建一体化智能监测平台、强化全员专业能力、落实高危工序专项管控、完善分级处置机制、建立长效复盘机制等措施，充分发挥动态管控技术的价值，实现安全管理从“事后事故处置”向“事前风险预控、事中动态管控”转变，有效防范和遏制各类施工安全事故，保障高速公路工程施工安全、高效、有序推进，为交通基建工程安全管理高质量发展提供坚实支撑。

参考文献：

[1] 交通运输部.公路工程施工安全技术规范(JTG F90-2015)[S].北京:人民交通出版社,2015.

[2] 杨检,杨飞,周婧婷.基于动态贝叶斯网络的公路施工安全风险预警研究[J].公路交通科技,2026.

[3] 李晓猛,侯效伟,李靖.高速公路工程施工现场安全风险智能化管控技术[J].工程安全与环保,2025.

[4] 王浩宇.智慧工地背景下高速公路施工安全动态管控体系构建[J].交通世界,2025(12):89-91.

[5] 张磊.BIM+GIS 技术在高速公路施工风险动态监测中的应用[J].工程技术研究,2024,9(18):112-114.

[6] 刘树林.高速公路改扩建工程边通车边施工安全动态管控技术[J].建筑安全,2025,40(03):45-48.

[7] 陈建军.公路工程施工多源风险耦合动态防控策略研究[J].道路交通科学,2024.

[8] 交通运输部.公路工程施工安全监测与预警系统技术要求[Z].2025.