

公路施工安全风险识别与动态预警机制构建

康 东

新疆北新岩土工程勘察设计有限公司 新疆 乌鲁木齐 831400

摘要: 随着我国交通基础设施建设的持续推进,公路工程项目规模不断扩大、施工环境日益复杂,安全生产形势面临严峻挑战。传统的静态、事后型安全管理方式已难以满足现代公路施工对风险防控的高要求。本文围绕公路施工安全风险识别与动态预警机制构建展开系统性研究。首先,分析当前公路施工中存在的主要安全风险类型及其成因;其次,基于事故致因理论和系统安全工程思想,提出多维度、全过程的风险识别框架;再次,结合物联网(IoT)、大数据、人工智能等新一代信息技术,设计“感知—分析—预警—响应”一体化的动态预警机制架构。研究表明,构建科学、智能、闭环的动态预警机制,可显著提升公路施工安全管理水平,降低事故发生率,具有重要的理论价值与实践意义。

关键词: 公路施工;安全风险识别;动态预警;物联网;智能监控;风险管理

引言

近年来,我国高速公路网持续扩展,国省干线改造升级加速推进,农村公路“村村通”工程深入实施,公路建设进入高质量发展阶段。然而,在施工过程中,由于作业面广、工序交叉、人机混合作业频繁、地质气候条件多变等因素,安全事故频发,严重威胁施工人员生命安全与工程进度。传统安全管理多依赖人工巡检、经验判断和事后追责,缺乏对风险的前瞻性识别与动态化管控能力。随着数字中国战略的深入推进,以物联网、5G、边缘计算、人工智能为代表的新一代信息技术为构建智能化、主动式安全预警体系提供了技术支撑。因此,如何系统识别公路施工全过程中的安全风险,并建立一套高效、精准、可落地的动态预警机制,成为当前工程安全管理领域亟待解决的关键问题。

1 公路施工安全风险类型与成因分析

1.1 主要安全风险类型

公路施工现场复杂动态,安全风险多样且耦合。高处作业风险突出,桥梁墩柱、边坡支护等场景中,临边防护差、平台不稳,易致人员坠落。大型机械应用广泛,因操作空间受限、视线盲区、维护不及时或驾驶员疲劳,机械与车辆伤害事故频发。深基坑、隧道及高填方路基施工,地质勘察不充分、支护设计不合理等,会引发坍塌或滑坡,破坏力大、救援难。临时用电管理不善,线路混乱、漏电保护缺失、违规用火用电,易引发火灾或触电。改扩建或穿城路段,交通导改不合理、警示不足,社会车辆易误入,造成事故。极端天气如暴雨、大风等,降低能见度、影响作业人员状态,放大作业风险。

1.2 风险成因分析

系统安全工程视角下,公路施工事故是“人一机—

料—法—环”子系统交互致防御体系失效的结果。人的不安全行为是直接诱因,如安全意识淡薄、违章操作、未培训上岗、疲劳作业等。物的不安全状态表现为设备老化、防护装置失效、材料堆放乱、临时设施不稳等,埋下物理隐患。管理缺陷也不容忽视,部分施工单位安全责任制形式化、投入不足、排查走过场、预案未演练,遇风险难应对^[1]。外部环境不确定性加剧风险不可控,复杂地质、恶劣天气、密集交通流、邻近构筑物干扰等,相互交织、动态变化,使风险具高度非线性和时变特性,传统静态管理模式难胜任,需构建动态预警机制。

2 公路施工安全风险识别框架构建

2.1 理论基础

构建科学有效的风险识别框架,必须依托坚实的理论支撑。本文综合借鉴海因里希事故因果连锁理论与瑞士奶酪模型的核心思想。前者强调事故是由一系列相互关联的事件链引发的,若能在任一环节阻断链条,即可避免事故发生;后者则形象地将安全防御体系比作多层奶酪,每层代表一道屏障,只有当所有屏障同时出现漏洞并对齐时,危险才能穿透并导致事故。这两种理论共同指向一个结论:风险识别必须覆盖事故发生的全链条、全要素,而非仅关注末端表现。在此基础上,引入Bowtie风险分析模型,将特定风险事件置于中心位置,左侧系统梳理可能导致该事件的危险源与触发条件,并设置相应的预防性屏障;右侧则分析事件一旦发生可能造成的后果,并配置缓解性控制措施。这种双向分析结构不仅有助于全面识别风险点,还能清晰展示各道防线的作用机制,为后续预警策略的制定提供逻辑依据。

2.2 多维度风险识别方法

针对公路施工的时空动态特性,本文提出“四维—

体”的风险识别框架。在空间维度上,依据施工区域的功能划分,如路基施工区、桥梁结构区、隧道进出口、拌合站及办公生活区等,分别识别其特有的风险模式。例如,桥梁区重点关注高空坠落与吊装作业风险,而拌合站则需防范粉尘爆炸与机械卷入风险。在时间维度上,风险识别应随施工阶段演进而动态调整。土方开挖阶段以边坡稳定和地下管线保护为主,结构施工阶段聚焦模板支撑与高空作业,路面铺设阶段则需关注沥青高温烫伤与摊铺机械协同作业安全。主体维度强调对不同参与方的行为风险进行差异化识别^[2]。一线工人可能存在习惯性违章,技术人员可能因交底不清导致操作偏差,管理人员若安全投入不足或监管缺位,则会系统性放大风险。技术维度则充分利用BIM与GIS融合技术,将施工进度计划、三维模型与风险数据库进行关联,在虚拟环境中对高风险工序如架桥机过孔、爆破作业等进行仿真推演,提前暴露潜在冲突点与薄弱环节,实现风险的可视化预判。

2.3 风险识别工具与流程

在具体操作层面,风险识别需依托一套标准化、可执行的工具与流程。首先,应建立基于行业规范与历史事故数据库的标准化风险清单,作为识别工作的基础参照。其次,组织由安全专家、技术负责人和一线班组长组成的评估小组,采用层次分析法(AHP)或德尔菲法,对各项风险的发生概率与后果严重度进行量化打分,形成风险矩阵。现场巡查仍是不可或缺的手段,尤其应结合无人机航拍技术,对高边坡、桥梁顶部、深基坑底部等人工难以到达的区域进行定期影像采集与比对分析,及时发现微小但关键的变形或隐患。对于动火作业、受限空间进入、高处作业等高危活动,必须严格执行作业许可制度(PTW),在审批环节强制嵌入风险识别与控制措施确认流程,确保风险在作业开始前已被充分辨识并有效管控。通过上述方法的综合运用,可形成一份动态更新、责任明确、措施具体的《公路施工安全风险台账》,为后续的动态预警提供坚实的数据基础与逻辑支撑。

3 动态预警机制设计

3.1 机制构建原则

动态预警机制的设计必须遵循若干核心原则,以确保其实用性与有效性。首要原则是实时性,即系统应能实现秒级甚至毫秒级的数据采集与处理,并在风险达到阈值后迅速发出预警,为现场处置争取宝贵时间。其次是精准性,预警系统需通过多源数据融合与智能算法,最大限度减少误报(将正常状态误判为风险)和漏报(未能识别真实风险),提升预警信息的可信度与权威性^[3]。第三是闭环性,预警不应止于信息推送,而必须配套完

整的响应、处置、反馈与验证流程,形成管理闭环,确保风险真正被消除。最后是可扩展性,机制架构应模块化、标准化,能够灵活适配不同规模、不同地质条件、不同施工工艺的公路工程项目,避免“一刀切”式的僵化应用。

3.2 技术架构:“感知—分析—预警—响应”四层模型

3.2.1 感知层:多源异构数据采集

在感知层,通过部署多元化的物联网终端实现对人、机、环、管全要素的立体化监测。作业人员佩戴集成UWB或北斗定位芯片的智能手环,可实时追踪其位置轨迹,一旦进入电子围栏划定的危险区域(如正在吊装的构件下方),系统立即触发告警。关键施工设备如塔吊、挂篮、摊铺机等加装振动、倾角、应力传感器,持续监测其运行状态与结构健康。环境监测站则负责采集温湿度、风速、降雨量、边坡位移等关键参数。同时,部署具备AI视觉分析能力的高清摄像头,可自动识别未佩戴安全帽、未系安全带、烟火烟雾等典型违章或异常行为。

3.2.2 传输层:高速可靠通信网络

传输层依托5G与工业Wi-Fi6构建高速、低延时的通信网络,确保海量感知数据能够稳定上传。为减轻云端负担并提升响应速度,在工地现场部署边缘计算节点,对视频流、传感器数据进行本地预处理与初步分析。

3.2.3 分析层:智能风险评估引擎

分析层是整个机制的“大脑”,包含规则引擎与机器学习模型两大核心。规则引擎基于专家经验与规范要求,设定明确的阈值触发条件,如边坡日位移量超过5毫米或风速超过10米/秒即启动预警。机器学习模型则利用历史事故与运行数据训练而成,能够识别复杂的非线性风险模式,预测未来一段时间内的高风险时段或区域。多源数据通过D-S证据理论或贝叶斯网络进行融合,最终输出一个综合风险指数(CRI),作为预警决策的量化依据。

3.2.4 预警与响应层

预警与响应层负责将分析结果转化为具体的行动指令。系统根据CRI值实施四级预警:蓝色预警记录备案,由班组自行核查;黄色预警推送至专职安全员,要求两小时内完成整改;橙色预警直达项目经理,必要时下令局部停工;红色预警则触发最高级别响应,系统可自动切断相关区域电源或锁定危险设备,并同步启动应急预案。预警信息通过移动APP弹窗、短信、现场广播及LED显示屏等多通道同步推送,确保信息触达无死角^[4]。更重要的是,每一条预警都必须由责任人确认接收、上传整改措施照片,系统通过图像识别或人工复核后方可关闭预警,从而实现真正的闭环管理。

3.3 动态更新机制

预警机制的生命力在于其自适应与进化能力。系统在运行过程中会不断积累新的数据,包括成功预警的案例、未能预警的事故(漏报)以及错误发出的警报(误报)。通过对这些事件进行回溯分析,系统可以自动调整规则引擎中的阈值参数,优化机器学习模型的权重与结构,甚至发现新的风险关联模式。这种基于在线学习的动态更新机制,使得预警系统能够随着时间推移和项目经验的积累而变得越来越“聪明”,逐步逼近“零漏报、低误报”的理想状态,从而持续提升公路施工的安全韧性。

4 机制实施的保障措施

4.1 制度保障

再先进的技术若缺乏制度支撑,也难以落地生根。首先,必须将动态预警机制正式纳入企业的安全生产责任体系,明确从企业法人到一线工人的各级安全职责,并将预警响应情况作为绩效考核的重要指标。其次,应制定专门的《智能预警系统运行管理办法》,详细规定系统的日常运维、数据管理、预警响应流程、故障处理及保密要求等,确保系统运行有章可循。最后,建立与预警效果挂钩的奖惩机制,对及时响应预警、成功避免事故的个人或团队给予表彰奖励,对屡次忽视预警、导致隐患扩大的行为进行严肃问责,从而在制度层面筑牢安全防线。

4.2 技术保障

技术保障是机制稳定运行的基石。在硬件选型上,应优先选择经过工程验证、可靠性高的传感器与通信设备,避免因设备故障导致数据失真或中断。在软件平台方面,可考虑构建本地化私有云或混合云架构,既保障核心数据的安全可控,又能利用公有云的弹性算力处理峰值负载。同时,必须建立常态化的设备校准与维护制度,定期对传感器进行精度校验,对网络设备进行巡检,对AI模型进行版本更新,确保整个技术体系始终处于最佳工作状态。

4.3 人员协同

技术最终需要人来操作和响应。因此,必须加强对全体参建人员的培训宣贯,使其充分理解预警信息的含义、响应流程及自身职责,消除对新技术的陌生感与抵触情绪。可设立“数字安全员”这一新型岗位,专门负责预警系统的日常监控、数据分析与初步研判,充当技术与现场之间的桥梁。此外,应推动建设单位、监理单位与施工单位之间的信息共享与协同联动,将预警信息同步推送至各方管理平台,形成多方共治、齐抓共管的良好局面,共同织密公路施工的安全防护网。

5 结语

本文探讨公路施工安全风险识别方法,创新构建基于新一代信息技术的动态预警机制。公路施工安全风险具多源、动态、耦合特性,需系统性识别框架应对。“感知—分析—预警—响应”四层架构整合多源数据,借规则引擎与机器学习模型实现风险实时感知与智能研判。分级预警与闭环管理确保风险信息有效处置,提升安全管理主动性与精准性,其成功实施需制度、技术、人员协同保障。展望未来,数字孪生技术有望构建“镜像工地”,实现风险超前模拟干预;强化学习可优化预警策略;构建风险知识图谱能转化个体经验为集体智慧。动态预警机制将成为智慧工地核心,引领公路施工安全管理迈向“零事故”目标。

参考文献

- [1]X.W.ZouP,田辉,王玥琳,etal.复杂系统视角下公路施工安全风险[J].工程管理学报,2025,39(04):81-87.
- [2]肖娅.山区公路施工安全风险评估与防护策略[J].汽车周刊,2025,(09):143-145.
- [3]解则斌.LQ集团公路项目施工安全风险管理研究[D].山东财经大学,2025.
- [4]谭立.公路工程施工中的安全管理与风险控制研究[J].全面腐蚀控制,2025,39(07):113-115.