

交通工程施工网格化安全管理与数智化的融合应用研究

周嘉军¹ 王礼圣² 苏少雄² 张仕雄³ 迟旭² 杨超³ 宋原武³

1.嘉兴市交通工程质量安全管理服务中心, 浙江 嘉兴 314001

2.嘉兴市乍嘉苏高速公路有限责任公司, 浙江 嘉兴 314000

3.浙江交工金筑交通建设有限公司, 浙江 杭州 310000

[摘要]当前交通工程施工安全管理面临责任链条逐级衰减、风险感知动态滞后、多参建方信息协同不畅等突出痛点,传统管理模式已难以适应大型复杂工程的精细化管控需求。本文提出一种网格化管理与数智化技术深度融合的安全治理新范式,形成“技术感知-网格定位-责任派单-闭环处置”的自动化业务流程,并以乍嘉苏高速公路改扩建工程为例进行实证验证。研究表明,该融合模式能够有效实现安全责任的精准压实、风险隐患的动态管控和应急响应的快速联动,为交通工程施工安全管理的转型升级提供理论支撑与实践参考。

[关键词]交通工程施工; 网格化安全管理; 数智化技术; 安全风险防控

DOI: 10.33142/ec.v9i8.20231

中图分类号: U298.1

文献标识码: A

Research on the Integrated Application of Grid-based Safety Management and Digital Intelligence Technology in Traffic Engineering Construction

ZHOU Jiajun¹, WANG Lisheng², SU Shaoxiong², ZHANG Shixiong³, CHI Xu², YANG Chao³, SONG Yuanwu³

1. Jiaxing Traffic Engineering Quality and Safety Management Service Center, Jiaxing, Zhejiang, 314001, China

2. Jiaxing Zhajiasu Expressway Co., Ltd., Jiaxing, Zhejiang, 314000, China

3. Zhejiang Jiaogong Jinzhu Transportation Construction Co., Ltd., Hangzhou, Zhejiang 310000, China

Abstract: The current safety management of transportation engineering construction is facing prominent pain points such as the gradual decline of the responsibility chain, dynamic lag in risk perception, and poor information coordination among multiple participating parties. The traditional management mode is no longer suitable for the refined control needs of large and complex projects. This article proposes a new paradigm of security governance that deeply integrates grid management and digital technology, forming an automated business process of "technology perception - grid positioning - responsibility assignment - closed-loop disposal", and empirically verifying it with the Zhajiasu Expressway reconstruction and expansion project as an example. Research has shown that this fusion mode can effectively achieve precise compaction of safety responsibilities, dynamic control of risks and hidden dangers, and rapid linkage of emergency response, providing theoretical support and practical reference for the transformation and upgrading of construction safety management in transportation engineering.

Keywords: traffic engineering construction; grid based security management; digital intelligence technology; safety risk prevention and control

引言

交通建设工程具有线性分布、点多面广、参建单位众多等特征,其施工安全管理长期面临多重挑战。一是责任链条纵向衰减、横向割裂。大型改扩建工程涉及建设、设计、施工、监理等十余类主体,管理层级较多,安全责任极易逐级衰减,各业务部门之间因职能壁垒形成信息孤岛。二是风险管控动态滞后、感知迟钝。工序转换频繁、作业

环境多变,更有“边通车边施工”等特殊工况,传统以人工巡检、纸质记录为主的监管手段难以满足动态管控需求。三是应急响应信息断链、协同低效。突发事件发生后,因缺乏统一的信息平台和标准化指挥流程,资源调度、指令传递等环节往往陷入混乱。因此,亟须探索一种能够破解责任虚化与信息滞后的解决方案。

围绕工程安全管理,国内外学者从管理流程重构和技

术工具应用两个维度展开了持续探索。在组织管理层面,引入网格化管理理念,研究表明将施工区域划分为最小管理单元并明确责任人,能够有效实现管理重心下移和责任的精准定位^[1,2]。在技术应用层面,物联网、人工智能、BIM 等数智化技术已被尝试用于施工风险的实时监测、违章行为的自动识别和施工方案的安全模拟^[3-5]。然而,现有研究呈现明显的管理与技术分离态势^[6,7]。一方面,网格化管理研究多聚焦于责任划分与制度建设,对借助技术手段提升运行效率缺乏深入探讨。另一方面,数智化技术研究往往侧重于算法优化和系统功能开发,忽视了责任载体和业务流程。这限制了安全管理整体效能的提升。

基于此,本文提出“网格化+数智化”深度融合的安全管理新范式。该范式以网格工点为数智化技术的部署提供明确的空间标定和执行主体,将物联网感知、AI 识别、大数据分析 with BIM 可视化等功能模块精准嵌入网格责任体系,形成“技术感知-网格定位-责任派单-闭环处置”的自动化业务流。本文以乍嘉苏高速公路改扩建工程为实证载体,阐述融合模式的应用场景与实践成效,为交通工程施工安全管理的转型升级提供理论支撑与可推广的实践路径。

1 网格化安全管理的内涵与实施路径

1.1 网格化安全管理的内涵

网格化安全管理是基于空间划分与责任下沉的精细化管理模式。其核心是将交通工程施工区域按地理空间、施工工序、风险等级等维度划分为若干网格单元,每个网格单元配备专职安全管理人员,明确职责与标准,实现“区域全覆盖、责任无盲区”。与传统模式相比,网格化安全管理具有以下特征:责任精准化、流程标准化、响应高效化。从数智化融合视角看,网格化管理本质是在组织层面为技术落地搭建标准接口,使每条信息有责任归属,每项任务有管理流程。

1.2 网格化安全管理的实施路径

网格化安全管理实施遵循科学划分网格、建立责任矩阵、制定管理标准三条路径。

第一阶段,科学划分网格单元。网格划分需综合考虑交通工程的施工内容、风险分布和现场管理需求,以分部、分项工程或施工区域段落为基本单元进行划分。一级网格针对全线项目,网格长为建设单位、项目指挥,每月网格安全分析例会。二级网格针对分部/标段,网格长为标段负责人、专职安全员,每周全覆盖排查。三级网格针对最小工点班组,班组长为网格员,每日班前交底、现场巡查。各网格工点现场设置公示牌,公示网格名称、风险等级、网格长联系方式、隐患上报电话,落实日查、周检、月督查常态化检查机制。

第二阶段,建立网格责任矩阵。该责任矩阵将原有的线性责任链条重构为覆盖横向与纵向的垂直网络结构。纵向上,从指挥部安全生产业务领导小组到一线人员,形成六级责任链条;横向上,遵循“业务管理必须包含安全管理”的原则,所有业务部门均纳入该矩阵。该矩阵可实现岗位权限、预警推送目标和任务执行实体的自动匹配。

第三阶段,制定网格管理标准。标准化是自动化流转的前提。针对红、橙、黄、蓝不同风险等级的网格,需制定差异化的管理标准。比如,红色等级网格要求每月组织参建单位对项目风险情况进行分析研判,动态辨识更新风险,及时优化管控措施。黄色等级网格要求每 2 个月组织分析研判,动态辨识更新风险,及时优化管控措施。

2 数智化技术的应用场景

物联网、大数据分析、人工智能视觉识别以及 BIM,分别从实时数据采集、趋势推演、智能判识和虚拟仿真四个维度,与网格责任体系形成互补和联动,共同支撑起从感知到决策再到处置的完整链条。

表 1 网格化安全管理的实施路径

实施阶段	核心任务	与数智化的融合
科学划分网格单元	依据施工段落、工程类别及风险等级,将整体工程拆解为“标段—分部工程—网格工点”三级体系,为每一处工点配置独立的数字编码。	充当物联网感知设备的空间定位基准;构成 BIM 模型构件挂接与数据关联的底层节点;同时作为后续数据统计与绩效核算的最小颗粒度单元。
建立网格责任矩阵	为每个网格明确网格长、专职安全员及作业班组长三级责任人,在纵向上打通从指挥部到班组的指挥链路,在横向上将工程、安全、合约等业务部门全部纳入管理范畴。	为系统自动派单与任务分配指明具体的执行角色;为安全积分考核提供明确的责任追溯对象;为不同岗位的人员权限配置提供基础依据。
制定网格管理标准	依据红、橙、黄、蓝四级风险等级,对网格分别设定差异化的检查频次、专项管控措施清单及整改验收标准。	为系统自动派发日常检查任务内置触发规则;为预警信息的分级推送设定相应的判断阈值;为闭环整改计时与超期督办提供标准化的流程模板。

2.1 物联网技术：实现施工风险的实时感知

在扩建和改造工程中，高风险作业如高墩施工、大型吊装和深基础开挖等分布在多个网格区域。风速、水位和有害气体浓度等参数变化动态频繁。传统模式下，监测工作依赖安全人员定期定点巡查，但检查频率低且覆盖范围有限。一旦参数突然超过阈值，信息传递不及时，就会延误处理时机。

网格监测设备布设严格执行浙江公路智慧工地规范，高边坡、深基坑网格布设位移、沉降一体化传感；跨线施工、互通匝道网格全覆盖 AI 视频识别，违规预警阈值参照省交通工程安全监测统一标准设置，预警记录自动归档至省级安全台账。

物联网传感设备以单元形式部署在各网格作业点，每个传感器均绑定至对应网格的数字编码。当风速超出限值、水位接近预警线或有害气体浓度超标时，系统会根据传感器的绑定编码自动匹配对应的网格负责人、安全员及作业团队，并通过 APP 推送预警信息，同时触发现场声光报警。系统将根据预设规则自动确定接收人、处理要求及时限。物联网与网格化融合，将风险监控从常规的现场检查转变为全天候扫描，并实现从分步通知到精准直接推送的预警机制，从而对异常事件作出即时响应。

网格四级风险严格遵循浙江省交通工程风险分级标准，蓝色为一般风险、黄色较大风险、橙色重大风险、红色特大风险；橙、红色 III/IV 级网格单独建立专项风险管控清单，绘制网格风险分布图，落实重大隐患挂牌督办、“一事一办”闭环机制。

2.2 大数据技术：提升安全风险的预判能力

交通工程建设周期长，不同阶段和不同网格的风险表现差异较大。以往，隐患记录、违章台账和设备故障信息往往分散存储在纸质文档或独立表格中，跨时段、跨维度的综合分析难以开展，管理决策较多依赖个人经验，资源投放也缺乏明确依据。

平台基于各网格数据生成省级标准化“风险隐患一张图”，集成风险分级、隐患点位、整改状态、网格责任人全部信息，作为指挥部、行业监管部门日常监管核心可视化载体。

通过搭建以网格为最小分析单元的大数据平台，可以对隐患类型、发生频次、整改耗时、人员违章积分和培训完成率等多源数据进行整合与关联分析。平台能够生成网格风险热力图，直观反映各区域的安全状态分布；同时采用时序分析方法识别高发隐患类别和风险集中时段，对违章频次异常偏高的作业人员进行画像标注。所有分析成果

均落到具体网格和责任人，决策指令可以直接指向特定工点和岗位。这样，管理决策的基础从经验判断转向数据支撑，资源配置也从“面面俱到”的粗放模式走向“精准施治”的差异化模式。

平台自动生成全省统一格式的风险三张清单，按月动态更新，同步上传至行业监管平台。

2.3 人工智能技术：强化安全隐患的智能识别

施工现场点多面广、人员流动性大，安全帽佩戴不规范、安全带未正确系挂及非授权区域闯入等违章行为时有发生。单靠安全员现场巡查，无法做到全时段覆盖，且违章处理往往停留在口头提醒层面，与个人和班组的考核缺乏关联。

项目在各网格关键位置安装监控摄像头，通过 AI 算法实时分析视频画面。一旦识别出未戴安全帽等违章情形，系统自动截取画面并比对人员信息，即时将违章记录推送至所属网格负责人和班组长，同时扣除当事人及其所在网格的安全积分。所有违章记录存入个人安全档案，当累计扣分达到设定阈值时，系统会触发停工培训甚至解约预警。网格负责人须在限定期限内核实并在 APP 中反馈处置结果，形成完整闭环。AI 与网格的结合，使安全监管从劳动密集型转向技术密集型，违章行为由随机抽检变为全程自动筛查，处理手段也由口头批评升级为可追溯的信用管理，实现了全天候智能监控与闭环处置。

2.4 BIM 技术：构建施工安全的虚拟管控场景

交通工程中大型桥梁顶推、既有结构拆除等作业环节空间受限、工序紧凑，方案审查若仅依靠二维图纸和文字说明，风险点不易直观呈现；而传统安全交底多采用集中讲解方式，作业人员理解程度参差不齐，容易留下隐患。

对此，项目以网格工点作为空间参照基准，建立 BIM 三维模型，并将责任信息、监测数据和施工进度与每个网格的模型构件关联。在设计阶段，通过碰撞检测和工序模拟提前排查潜在冲突；施工准备阶段，利用模型进行可视化交底；施工过程中，管理者点击任一构件即可调取责任人信息、历史隐患记录、实时监测数据和设备状况。紧急工况下，BIM 模型可充当电子沙盘，展示人员分布、疏散路线和救援资源部署。借助 BIM 与网络的联动，BIM 不再限于设计辅助，而是升级为贯穿施工全程的安全管控中枢，网格在其中起到串联空间、进度、安全和管理的作用，实现了从“按图施工”到“依模管控”的转变。

本项目 BIM 数字孪生遵循 DB33/T 1394-2024 公路工程智慧工地规范，对接浙江省交通 BIM 公共底座；针对乍嘉苏改扩建边通车边施工工况，对桥梁顶推、旧桥拆除

IV 级危大工程开展 BIM 工序模拟专项验收, BIM 模型成果同步归档至省级工程数字档案库。

3 网格化与数智化的融合机制

3.1 以网格为载体, 实现数智化技术的精准落地

网格化管理为数智化技术的现场部署划定了清晰的空间载体和责任边界。每个网格工点拥有唯一数字编码, 凡是布设在该网格内的监测设备、采集的数据和产生的预警信息均与编码自动关联, 形成物理空间与数字空间的对应关系。这种基于网格的设备布设方式, 确保了每一条感知数据都能精确指向具体的工程部位。

网格化管理的责任体系为数智化系统提供了明确的执行主体。当物联网传感器监测到环境参数超限或 AI 视频分析识别出违章行为时, 系统根据事件发生位置自动匹配所属网格, 并即时将预警或整改任务推送至该网格对应的责任人手机 APP。这种“技术感知-网格定位-责任派单”的自动化流程, 实现了从发现问题到启动处置的无缝衔接。以隐患排查为例, 监理人员通过 APP 拍照上报隐患后, 系统自动关联网格信息并推送给该网格的施工负责人; 整改完成后, 责任人在线上传验证照片, 监理在线确认销号, 整个过程权责清晰、轨迹可溯。

以网格为单元的数据汇聚与积分评价, 为安全管理的量化考核提供了客观标尺。系统以网格为单位自动统计隐患排查数量、整改及时率、人员违章频次、教育培训完成率等多维数据, 生成每个网格的安全积分和风险画像。积分结果与班组的绩效薪酬、评优评先直接挂钩。这种将技术监测数据通过网格载体转化为可量化、可比较的管理指标的做法, 既提升了考核的客观公正性, 也激发了基层单位和作业人员自主管理的内生动力。

3.2 以数智化技术为支撑, 提升网格化管理的运行效率

数智化技术通过信息处理的智能化, 显著提升了网格化管理的日常运行效率。在信息采集环节, 移动 APP 替代了传统的纸质记录和电话汇报, 现场网格员可通过随手拍功能完成隐患的描述, 照片、时间、位置信息自动关联上传。在流程流转环节, 数字化系统按照预设规则自动推送整改通知、跟踪整改状态、触发验收流程, 将传统模式下的线下协调转变为线上自动流转。在数据统计环节, 系统以网格为单位自动汇总隐患排查数量、整改闭环率、人员积分变化等指标, 一键生成各类安全管理台账和统计报表。

数字化技术带来的信息透明共享, 也增强了网格管理的协同性和约束力。统一平台打破了建设、施工、监理等单位间的信息壁垒, 各方实时查看检查记录、整改情况和验收结果。系统对所有操作留痕, 从隐患上报到销号归档全程可追溯, 为事后责任认定提供依据, 也对各级管理人员形成监督, 促使网格职责落到实处。这种以数据驱动替代人工协调的模式, 使网格化管理从依赖个人自觉的软约束, 提升为由系统流程保障的硬性管理, 显著提高了执行效率和规范性。

3.3 构建“网格+数智”的安全管理闭环

网格化与数智化的融合最终需要形成覆盖全链条的管理闭环。在风险识别阶段, 系统根据网格施工内容和风险等级自动匹配管控措施和检查标准; 在实时监控阶段, 物联网与 AI 持续扫描各网格安全状态, 发现偏离或违章立即记录; 在预警与处置阶段, 系统对异常信息分类并判定严重程度, 将预警或整改任务精准推送至对应网格负责人, 并启动限时督办机制; 责任人处置完毕后通过 APP 提交核验材料, 主管在线审核确认, 完成销号归档。



图1 网格化与数智化的融合机制

隐患闭环实行三级复核机制,一般网格隐患监理线上核销号;橙、红色重大网格隐患整改完成后,需建设单位安全管理部门复核,同步 24 小时内将隐患信息推送至市交通工程监管机构,全程留痕可追溯,满足双重预防机制隐患上报时限要求。

整个循环不是单向流程,而是具备自我优化能力的闭环。系统持续记录各网格的隐患数据、整改效率和复发情况,并通过大数据分析识别哪些管控措施有效、哪些环节存在薄弱点,从而为调整风险等级和优化管理标准提供依据。比如,某类隐患在特定网格中反复出现,系统会自动上调其风险等级并增加检查频次,同时向管理人员推送风险提示。由此,安全管理从静态的制度约束逐步演变为动态的持续改进过程。

4 “网格+数智”体系的实践案例

在乍嘉苏改扩建工程这类长距离、复杂工况的线性项目中,传统的粗放式管理难以满足精细化管控要求。为此,项目引入基于网格工点的数字孪生技术,搭建了与现场实体一一映射、动态更新的数字化模型,从宏观段落到微观工点均实现可视、可管、可控。

乍嘉苏高速改扩建严格落实《浙江省高速公路改扩建工程施工安全管理十二条措施》,依托网格划分将施工区、通行区、导改缓冲区独立划分子网格,通过物联网车流监测、AI 占道识别实现边通车边施工动态分区分管,解决改扩建交叉作业安全痛点。本融合体系与浙江省“浙路品质”智慧监管平台、安全码智控体系打通,网格工点数字编码同步生成省级统一“工点码”,人员、设备绑定对应人员码、设备码,隐患台账自动同步至省级监管系统,满足全省交通工程数字化台账替代纸质档案的强制要求。

4.1 工程实体的数字化拆解与锚定

项目采用工程结构分解方法,将全线工程逐级拆分为路段、单位工程和分项工程,每个网格工点对应特定路基

段落、桥梁墩台或路面作业区。系统为每个工点建立独立的数字身份和资料库,通过工点维护模块,管理人员可随时添加或更新信息,确保物理现场与数字管理空间保持精准对应和同步联动。

4.2 网格工点的动态信息融合

在乍嘉苏项目中,所有与具体工点相关的管理要素均集成在网格框架内。通过人员管理和设备管理模块,可以调取各班组、操作人员及机械设备的实时状态;隐患排查和安全检查功能则将现场发现的问题及整改闭环情况与网格联动显示;危大工程清单中的专项方案也直接关联至对应工点。由此,每个网格工点能够实时反映其安全生产、质量状况和资源配置等综合信息。

系统数据接口兼容 DB33/T 1394-2024 智慧工地地方标准数据规范,实现网格风险热力图、隐患闭环数据向省交通工程智监平台自动上报。

4.3 基于数字孪生的网格积分评价体系

项目依托各网格工点的动态数据,自动计算并更新每个工点及作业人员的安全绩效评分,管理人员可直观查看排名,并通过详情功能追溯扣分原因。该机制将抽象的安全管理要求量化为可比较的积分,并将责任精确落实到最小作业单元和个人,有效调动了基层班组自主管理的积极性,在项目内部形成了良性的安全竞争氛围。

通过数字孪生技术与网格工点的精细化管控,项目成功将大型复杂工程分解为若干可独立管控的小单元,又借助数字化手段将其整合为统一的整体,实现了微观精准管控与宏观统筹协调的有机结合,显著提升了工程管理的透明度和可追溯性。

系统按网格月度积分自动生成红、黄预警牌,黄牌网格限期整改,连续两月红牌对班组采取停工教育、人员清退措施;网络安全积分同步纳入参建单位浙江省交通建设市场信用评价,强化考核约束力。



图2 乍嘉苏高速公路改扩建工程的网格工点界面图

5 结论

本文立足交通工程施工安全管理的现实困境,对网格化管理与数智化技术融合的理论内涵和应用路径进行了系统梳理,得出以下主要结论:

(1) 网格化管理为解决施工安全责任分散问题提供了一种有效的组织工具。通过将工程划分为最小责任单元,并建立纵横结合的责任矩阵,能够实现管理重心的有效下沉和责任边界的清晰界定,从而在一定程度上缓解传统模式下安全职责逐级弱化的问题。

(2) 物联网、大数据分析、AI 识别和 BIM 等数智化技术,各自从实时感知、趋势研判、自动判识和虚拟仿真等角度为安全管理提供了有力支撑,四者互为补充,共同构建起覆盖现场监测与后台分析的技术防线。

(3) 本“网格+数智”融合范式完全契合浙江省交通工程数字化改革、平安百年品质工程、双重预防机制建设工作部署,所有技术流程、管理体系均满足省内交通建设现行监管规范,可在全省高速改扩建、线性交通工程标准化复制推广,为全省交通工程智慧安全管控提供标准化落地路径。

[参考文献]

[1]何厚全,成虎,张建坤.网格化建筑施工安全监管模式及

运行机制研究[J].中国安全科学学报,2013,23(9):6.

[2]翁彦博,李婷婷,刘丰.施工建设项目安全生产网格化管理评价指标体系构建研究[J].现代职业安全,2023(9):50-53.

[3]邢树刚,焦建,张晓妮,等.BIM 技术在施工阶段安全应用的研究综述[J].黑龙江科技信息,2020(7):109-110.

[4]李士茹,牛洪民.物联网技术在建筑工程施工现场安全监测中的应用研究[J].奥秘,2022(24):34-36.

[5]Daniel E I , Oshodi O S , Nwankwo N I ,et al.The Use of Digital Technologies in Construction Safety: A Systematic Review[J].BUILDINGS,2025,15(8):1386.

[6]Junior C F M , Biotto C N , Serra S M B .The integration of construction planning and budget using Building Information Modelling (BIM): a systematic literature review[J].Caderno Pedag ó gico,2024,21(4):3611.

[7]苗春刚.基于“一网四格”模式的地铁项目安全责任体系研究[D].石家庄:河北地质大学,2017.

作者简介:周嘉军(1993—),男,汉族,浙江嘉兴人,嘉兴市交通工程质量安全管理服务中心工程师,研究方向为工程管理。