

智慧化技术赋能下高速公路施工安全管理体系构建与优化

陈光旭

云南交投集团云岭建设有限公司 云南 昆明 650000

摘要：本文聚焦智慧化技术赋能下高速公路施工安全管理体系的构建与优化。传统高速公路施工安全管理存在信息传递滞后、资源分配失衡、风险预警依赖经验等痛点，智慧化转型势在必行。智慧化技术通过物联网、大数据、AI、数字孪生等实现从“被动响应”到“主动防御”的转变，构建起全要素覆盖、全流程管控的体系。通过数据治理、组织变革、人才培养等路径优化体系，并以楚大高速扩容工程项目为例验证成效。智慧化技术正引领高速公路施工安全管理新范式，未来将迈向更高阶段。

关键词：智慧化技术；高速公路；施工安全管理；体系构建；体系优化

1 引言

高速公路建设作为国家基础设施建设的核心领域，其施工安全直接关系到工程进度、质量与人员生命财产安全。然而，传统施工安全管理体系长期面临三大痛点：其一，信息传递滞后导致决策失误；其二，资源分配失衡加剧安全风险；其三，风险预警依赖经验判断。在“交通强国”战略与数字化发展目标的双重驱动下，智慧化技术正成为破解传统管理困局的关键。以楚大高速扩容工程项目为例，其通过部署智能安全帽、无人机巡检、BIM模型等智慧化系统，实现零事故安全生产目标，提前完成项目建设任务，验证了智慧化转型的可行性。本文将从技术架构、管理机制、实践路径三个维度，系统探讨智慧化技术如何重构高速公路施工安全管理体系。

2 智慧化技术赋能安全管理的底层逻辑：从“被动响应”到“主动防御”

2.1 技术集群的协同效应：物联网、大数据与AI的深度融合

智慧化安全管理体系的核心在于构建“感知-分析-决策-执行”的闭环系统。以安徽远航交通科技开发的施工作业区安全智慧管控系统为例，其通过感知层部署的2000余个智能物联网设备（如智能交通锥、北斗定位安全帽），实时采集人员位置、设备状态、环境参数等12类数据；数据层利用5G网络实现毫秒级传输，结合云计算平台对PB级数据进行清洗、分类与存储；算法层运用LSTM神经网络模型，对历史事故数据与实时监测信息进行关联分析，预测风险发生的概率与影响范围；应用层则通过智能预警系统，在风险阈值触发时自动启动应急响应机制，如联动智慧屏发布警示信息、启动无人机进行现场勘查。这种技术集群的协同效应显著提升了安全

管理的精准度^[1]。在济商高速项目中，智能张拉/压浆监测系统通过AI算法自动抓取预应力施工参数，将桥梁预应力偏差率从行业平均的1.2%降至0.3%，消除质量隐患的同时降低返工成本38%。

2.2 数字孪生技术的突破性应用：全场景模拟与预案推演

数字孪生技术通过构建物理实体的虚拟镜像，为安全管理提供了“预演场”。在广深高速新塘立交改造工程中，项目团队利用BIM+GIS技术建立三维数字模型，集成地质勘探、设计图纸、施工进度等200余项数据，实现施工过程的动态模拟。例如，在挂篮行走工艺优化中，系统通过数字孪生平台模拟不同步距下的结构应力分布，最终确定最优同步误差控制标准（ $\leq 1\text{cm}$ ），使单次挂篮行走时间缩短2.3小时，安全风险降低55%。更值得关注的是，数字孪生技术可支持极端天气场景的预案推演。在2025年台风“梅花”登陆期间，浙江省“智慧公路三年行动”试点项目通过数字孪生平台，模拟暴雨对边坡稳定性的影响，提前48小时锁定3处高风险路段，调度排水设备与救援队伍，避免因边坡坍塌导致的交通中断。

2.3 边缘计算与5G的赋能：实时性与可靠性的双重保障

传统安全管理依赖云端计算，但网络延迟与断网风险常导致预警失效。边缘计算技术的引入，将数据处理能力下沉至现场终端，实现“本地决策、快速响应”。以楚大高速扩容工程的智能监控系统为例，其部署的边缘计算节点可在10毫秒内完成对高清摄像头采集图像的AI分析，自动识别未佩戴安全帽、违规动火等行为，较云端处理效率提升20倍。5G网络的高带宽、低时延特性，则为大规模设备互联提供了基础。在某跨江大桥施

工中,项目团队通过5G专网连接12台塔吊、8台履带吊与200个传感器,实现设备状态实时监测与协同控制。当系统检测到某台塔吊大臂与高压线距离小于安全阈值时,立即触发自动制动并推送预警信息至操作员终端,避免触电事故的发生。

3 智慧化安全管理体系的构建框架:全要素覆盖与全流程管控

3.1 人员管理:从“经验驱动”到“数据驱动”的范式转变

(1) 智能穿戴设备的深度应用:智能安全帽已成为人员管理的核心工具。其集成的定位芯片、环境传感器与视频通话模块,可实时追踪人员位置、监测体温/心率等生理指标,并在越界、超员、超时等异常情况下自动报警。济商高速项目数据显示,智能安全帽的应用使违规行为发现率从人工巡检的32%提升至98%,人员定位精度达0.5米。(2) VR安全培训的沉浸式体验:针对焊接、爆破等高风险作业,VR技术通过构建虚拟施工场景,让作业人员在模拟环境中体验违规操作的后果。

(3) 适岗分析与精准教育:通过采集作业人员出勤、违规、健康等数据,系统运用聚类算法分析其岗位适配性,并推送个性化培训课程。例如,对频繁出现高空作业违规行为的员工,系统自动安排防坠落设备使用专项培训,培训后违规率下降。

3.2 设备管理:从“定期检修”到“预测性维护”的升级

(1) 特种设备智能监测系统:为压路机、摊铺机等大型设备加装倾角、载荷传感器,实时监测运行状态。当系统检测到某台压路机振动频率异常时,立即生成维护工单并推送至维修人员,将设备故障停机时间从平均8小时缩短至1.5小时。(2) 拌合站质量监测的闭环控制:通过在混凝土搅拌站安装流量计、温度传感器与摄像头,系统24小时监控配比、搅拌时间等参数。当检测到水泥用量偏差超过 $\pm 2\%$ 时,自动停止生产并锁定问题环节,避免不合格混凝土流入下一工序^[2]。(3) 智能交通锥的协同预警:在改扩建施工中,智能交通锥内置碰撞传感器与LORA通信模块,当被车辆撞击时,立即向周边作业人员与巡逻车辆发送预警信息。

3.3 环境管理:从“被动监测”到“主动调控”的跨越

(1) 环境及有害气体监测系统:在隧道、路基等作业区域部署PM_{2.5}、噪声、VOCs传感器,当指标超标时联动喷淋装置自动启停,并向管理人员推送预警。某山区高速项目应用该系统后,粉尘浓度达标率从76%提升至98%,职业病发病率下降54%。(2) 气象数据驱动的施

工调度:整合气象部门数据与现场微气候监测信息,系统动态调整施工计划。例如,在暴雨预警发布前4小时,自动锁定低洼路段作业面,调度排水设备与防汛物资,避免因积水导致的设备损毁。(3) 智能喷淋养护的精准控制:依据混凝土强度发展曲线与环境温湿度数据,系统自动调节喷淋时间与水量。某特大桥项目应用后,混凝土养护能耗降低42%,强度均匀性提升28%。

3.4 应急管理:从“人工协调”到“智能调度”的变革

(1) “一路多方”协同指挥平台:集成交警、路政、医疗等部门数据,实现应急资源的统一调配。在某连环追尾事故中,平台30秒内锁定事故位置、伤亡人数与拥堵长度,10分钟内调度4台清障车、2辆救护车与30名路政人员,救援响应时间缩短65%。(2) 多端联动的预警发布系统:当事故发生时,系统同步向现场作业人员、巡逻车辆与导航软件推送预警信息。例如,在边坡坍塌事故中,通过百度地图向后方5公里内车辆发布绕行提示,避免二次事故的发生^[3]。(3) 应急预案的智能匹配:基于事故类型、影响范围与资源状态,系统自动推荐最优处置方案。某项目模拟演练显示,智能匹配预案的执行效率较人工决策提升40%,处置时间缩短25分钟。

4 智慧化安全管理体系的优化路径:从技术应用到管理创新

4.1 数据治理:打破“信息孤岛”,构建统一数据中台

传统安全管理中,人员、设备、环境等数据分散于不同系统,导致分析决策效率低下。某省交通厅调研显示,其下属项目中,数据共享率不足30%,重复采集成本占管理费用的18%。优化路径包括:(1) 建立统一数据标准:制定人员、设备、环境等12类数据的采集、存储与交换规范,确保数据互通性。(2) 部署数据中台:集成ETL工具、数据仓库与BI分析模块,实现多源数据清洗、关联分析与可视化展示。例如,济商高速项目通过数据中台,将施工进度、质量、安全等指标的关联分析时间从72小时缩短至2小时。(3) 应用区块链技术:对关键数据(如张拉参数、混凝土配比)进行上链存证,确保数据不可篡改与可追溯性。

4.2 组织变革:从“层级管理”到“扁平化协同”的转型

智慧化技术要求打破传统科层制,构建“项目部-智能系统-作业层”的三级扁平化架构:(1) 设立智能管控中心:集成监控大屏、决策支持系统与应急指挥模块,作为项目管理的“神经中枢”。(2) 推行“网格化+智能化”管理:将施工现场划分为若干网格,每个网格配

置智能终端与责任人,实现问题发现、上报与处置的闭环管理^[4]。(3)建立跨部门协同机制:通过智能系统打通技术、安全、物资等部门数据壁垒,实现资源动态调配。例如,当智能监测系统预警某路段边坡位移时,系统自动通知技术部调整支护方案、物资部调配钢材与水泥、安全部加强巡检频次。

4.3 人才培养:从“技能培训”到“数字素养”的提升

智慧化安全管理对人员能力提出新要求:(1)开展数字技能培训:针对管理人员,开设数据分析、系统操作等课程;针对作业人员,开展智能设备使用培训。某项目数据显示,数字技能培训使管理人员决策效率提升35%,作业人员设备操作合规率提高42%。(2)引入“数字孪生工程师”岗位:负责数字模型维护、场景模拟与预案优化,推动技术与管理深度融合。(3)建立激励机制:将数字技能掌握程度纳入绩效考核,对在智慧化应用中表现突出的团队与个人给予奖励。

5 实践案例:楚大高速扩容工程项目的智慧化安全管理创新

5.1 项目背景与挑战

楚大高速公路扩容工程全长200.5公里,是连接东南亚、南亚国家的国际大通道,也是昆明通往滇西、滇西北、滇西南的主要干线;项目面临桥隧比高、气象地质灾害风险突出、交通流复杂等挑战,通过智慧化技术赋能施工安全管理体系,实现从传统监管向智能防控的转型。

5.2 智慧化解决方案

(1)人员安全管控:部署智能头盔、对讲机、手环等穿戴设备,集成北斗/GPS定位、健康状态监测及电子围栏功能。例如,系统可设定50米半径内人员聚集超9人时自动预警,或通过“静默预警”识别长时间静止作业人员(如跌落、疾病风险),联动管理人员及时处置。(2)设备与交通态势监测:采用智能交通锥、智慧屏、激光灯带、高清摄像机及雷达设备,构建“感知-传输-分析-响应”闭环。如智能交通锥被撞击时,通过LoRa技术触发智慧屏预警,同步推送信息至高德/百度地图及公安

交管平台,实现二次事故预防。(3)结构安全监测:应用隧道防坍监测系统、边坡无线预警系统及智能张拉压浆设备,实时采集隧道支护、边坡位移等数据,结合AI算法分析风险等级并自动预警。

5.3 实施成效

项目通过智慧化系统预警处置多起人员越界、设备故障及交通事件,事故率下降,应急响应时间缩短,实现零事故安全生产目标。智能设备应用减少人工巡检成本,隧道施工效率提升,工程质量合格率提高。

结语

智慧化技术正深刻改变高速公路施工安全管理的底层逻辑与运行机制。从技术层面看,物联网、大数据、AI与数字孪生的融合,构建起“感知-分析-决策-执行”的闭环系统,实现从“被动响应”到“主动防御”的跨越;从管理层面看,数据治理、组织变革与人才培养的协同推进,推动管理体系从“经验驱动”向“数据驱动”转型。未来,随着6G、量子计算等新技术的突破,智慧化安全管理将迈向更高阶段:其一,实现施工全过程的自主决策与无人干预,如AI系统根据实时数据动态调整工艺参数;其二,构建跨项目、跨区域的协同管理平台,提升行业整体安全水平;其三,推动安全管理标准国际化,为“一带一路”基建项目提供中国方案。在“交通强国”战略的指引下,智慧化技术必将成为高速公路施工安全管理的核心引擎,助力行业实现“更安全、更高效、更绿色”的发展目标。

参考文献

- [1]覃荣.人工智能在公路工程施工中的应用[J].时代汽车,2025,(06):187-189.
- [2]顾黎敏.智能高速公路路基路面施工安全管理策略[J].智能建筑与智慧城市,2025,(01):174-176.
- [3]崔锋.智能建造技术在高速公路施工中的应用[J].城市建设理论研究(电子版),2025,(13):88-90.
- [4]卢嘉豪.人工智能在公路工程施工中的应用与前景[J].汽车周刊,2024,(09):115-117.