

公路工程施工安全风险防控体系优化研究

杨彩霞 庞达英太

内蒙古交通集团有限公司呼和浩特分公司 内蒙古 呼和浩特 010000

摘 要：公路工程施工长期面临作业环境开放、机械流动频繁、人员分散流动以及气候地形条件多变等复杂因素，安全风险防控的难度在各类基础设施建设中居于前列。现行防控体系虽已建立基本的制度框架，但在风险辨识的系统性、评估的动态性、预警的及时性以及应急响应的协同性方面仍存在显著短板。本文基于风险管理全过程理论，从风险辨识、风险评估、风险预警和风险处置四个环节系统审视公路工程施工安全风险防控体系的深层缺陷，揭示其根源在于静态化管理思维与动态风险特征之间的结构性矛盾。在此基础上，提出以动态风险矩阵升级、全员风险认知重塑、层级责任网络重构和数字化预警平台建设为核心的优化路径，构建适应公路施工流动性特点的主动型、全周期安全风险防控体系，为提升行业本质安全水平提供理论支持。

关键词：公路工程；施工安全；风险防控；动态评估；数字化预警

引言

公路工程施工安全事故的频发态势始终是行业管理的痛点。与房屋建筑或市政工程相比，公路施工具有鲜明的线性分布特征——作业面绵延数公里乃至数十公里，人员、机械随工序推进频繁迁移，施工环境穿越不同地形地貌与气候区，这些特殊性使得风险暴露点高度分散、管控半径急剧扩大，传统以固定场区为核心的封闭式管理模式难敷其用。近年来，行业主管部门相继出台了《公路工程施工安全技术规范》和《公路水运工程安全生产监督管理办法》等文件，施工企业也普遍建立了安全生产责任制和应急预案体系，但制度文件的完备并未等价转化为现场风险的有效受控。隐患重复出现、同类事故周期性发生、应急响应迟滞等现象表明，当前安全风险防控体系在运行机制层面存在深层梗阻。因此，有必要跳出“制度补丁”式的局部修补思维，从系统科学视角对防控体系的结构、流程与功能进行整体性优化设计，使其真正具备对动态风险的适应性管控能力。

1 公路工程施工安全风险的基本特征与防控逻辑

1.1 风险因子的多元性与耦合性

公路工程施工安全风险的来源极为广泛，可大致归为人的不安全行为、物的不安全状态、环境的不利条件和管理缺失四类。然而，这四类因子并非孤立作用，而是通过复杂的因果链相互耦合。例如，施工便道在雨后湿滑（环境因素）导致车辆运输效率下降，现场管理人员为追赶进度（管理因素）要求驾驶员增加往返频

次，驾驶员在疲劳状态下（人的因素）操控带病运转的自卸车（物的因素）于陡坡路段发生侧翻。这一典型事故链条显示，风险防控不能按因子类别分兵把守，而必须建立对多因素耦合效应的识别与阻断机制。

1.2 施工阶段的差异性风险剖面

不同施工阶段的风险谱系存在显著差异。路基开挖阶段以高边坡坍塌和爆破伤害为主要风险；桥涵施工阶段则集中于高空作业坠落和支架体系失稳；路面摊铺阶段以机械碾压伤害和沥青高温烫伤为突出风险；隧道施工阶段则涵盖瓦斯爆炸、突泥涌水和支护坍塌等复合型风险^[1]。这意味着防控体系不能适用“一套标准管到底”的简化逻辑，而应依据施工阶段的推进动态调整风险管控重心和资源配置方案。

1.3 防控体系的系统科学定位

从系统科学的角度审视，安全风险防控体系本质上是一个多层级、多主体、多信息流耦合的复杂系统。其功能不在于消除所有风险——这在工程施工的开放动态环境中既不可能也不经济——而在于将剩余风险控制可在接受阈值之内。有效的防控体系应具备四个基本属性：全面性，即无遗漏地覆盖所有风险源和暴露环节；灵敏性，即对风险状态的升维变化能够快速感知；鲁棒性，即在部分环节失效时整体功能不致崩溃；学习性，即能从既往事故和未遂事件中提取经验并反馈至体系改进。

2 现行防控体系的主要缺陷分析

2.1 风险辨识的系统性缺失

风险辨识是防控全链条的起始环节,然而现行辨识工作多依赖于开工前的“一次性”危险源普查,且辨识方法以检查表和专家经验为主。这一模式存在三重局限:其一,开工前辨识所依据的设计文件和地质勘察资料与现场揭露实际往往存在偏差,施工过程中揭示的新风险缺乏制度化的补充辨识渠道;其二,线性工程跨越不同地质单元,统一的辨识清单无法捕捉各段落特有的局部风险;其三,随着工序转换,前一阶段不显著的风险在后一阶段可能急剧放大,但阶段交接时的风险“再辨识”往往流于形式。这些问题共同导致辨识结果与现场实际之间的偏差随时间推移持续扩大。

2.2 风险评估的动态性不足

当前风险评估普遍采用静态的风险等级矩阵法,即在项目初期对辨识出的风险源赋予固定的发生概率和后果严重度等级,形成一张“静态风险分布图”。但施工安全风险的核心特性恰恰在于其条件依赖性和时间变异性——同一处高边坡,晴天的风险等级与暴雨后截然不同;同一台起重设备,新进场时与连续运转数月后的风险状态不可同日而语。静态评估结果的持续使用,本质上是用过时信息指导当前决策,其科学基础不牢^[2]。更深层的问题在于,评估过程中对各风险源之间的关联效应缺少考量,忽略了“链式风险”的级联放大可能,导致评估结果对重大风险场景的估计趋于保守不足。

2.3 风险预警的时效性滞后

预警机制是连接风险评估与应急响应之间的桥梁,但现行预警工作主要依赖人工巡查和定期报表。施工安全管理人员每日沿作业面巡查的频次和覆盖面受限于人力资源,对突发性风险的发现往往滞后于风险演化速度。更为关键的是,现场监测数据(如深基坑位移、高边坡沉降、瓦斯浓度等)与安全管理部门之间存在传递层级过多、处理周期过长的问題,数据的采集、上报、分析、预警发布四个环节之间缺乏自动化衔接。当预警信息最终传递至决策者时,风险态势可能已经发生了质的恶化,预警的窗口期被消耗殆尽。

2.4 应急响应的协同性薄弱

应急管理是风险失控后的最后防线。当前大多数施工项目虽编制了应急预案,但预案的可操作性和针对性不足是普遍问题——“千案一面”的模板化现象突出,针对具体工程特有风险(如跨越通航河流的桥梁施工防撞应急、傍山路段施工的滑坡紧急避险)的专项处置方案缺失。更值得关注的是预案的“孤岛化”现象:施工单位的应急预案与属地政府的区域应急体系之间缺乏有

效衔接,信息通报、资源调度、人员疏散等关键环节的协同机制未经过实质性磨合。当事故规模超出项目部自行处置能力时,外部救援力量从接报到抵达现场的时间窗口内,项目自身的先期处置往往因缺乏明确的升级触发条件和移交程序而陷入混乱。

3 体系优化的理论基础与设计原则

3.1 全过程动态风险管理理论

优化设计须以全过程动态风险管理理论为基石。该理论强调风险管理的四个环节——辨识、评估、预警、处置——不是依次完成的线性序列,而是循环往复、持续迭代的闭环过程。在公路施工场景下,这意味风险辨识须随施工推进分段滚动进行,风险评估须引入时间维度变参量,预警机制须与实时监测数据挂钩,应急响应须具备按事故演化态势动态调级的灵活性。闭环的另一层含义是每一次应急处置结束后,须回溯至辨识和评估环节进行修正,确保同类风险场景的识别阈值和防控措施得到迭代优化。

3.2 主动型安全与本质安全

优化方向应从“被动响应型”转向“主动预控型”。被动型安全的逻辑是“事故发生了再处置”,其技术路线侧重于完善应急手段;主动型安全则致力于“事故发生前切断致因链”,其核心策略包括源头消减(以更安全的工艺替代高风险工艺)、隔离防护(以物理屏障分隔人-机-环接触面)和冗余设计(为关键环节设置多重保护)。对于公路施工而言,主动型安全的重点在于将安全考量前置到施工组织设计阶段,而非在施工过程中不断打补丁。本质安全的理念更进一步,要求从装备选型和工艺方案层面消除或大幅降低固有风险。

3.3 优化设计的三项原则

据此确立体系优化的三项设计原则。其一是“风险驱动”原则——防控资源的配置不按平均主义分配,而是依据动态风险评估结果向高风险时段、高风险段落和高风险工序倾斜。其二是“冗余适度”原则——关键防控节点(如隧道施工的瓦斯监测、深基坑的支护体系)应设置功能重叠的备用通道,但冗余层级需在经济性和安全性之间取得平衡。其三是“闭环时效”原则——从风险感知到干预措施落地的全链条时间应小于风险从可接受状态演化为不可接受状态的特征时间,这是决定防控体系有效性的关键约束。

4 优化路径的具体构建

4.1 风险辨识与评估的动态化升级

首先,将“一次性”辨识升级为“滚动式”辨识,按施工段落和工序节点设置强制性的风险再辨识节点,每个节点需出具阶段风险评估报告并经独立审核后方可进入下一工序。其次,将静态风险矩阵升级为动态风险矩阵——风险的发生概率和后果严重度不再固定不变,而是按气象条件、施工进度、设备役龄、人员班组更替等调节因子进行实时修正,生成随时间轴演变的动态风险图谱^[3]。再次,引入耦合风险分析方法,运用解释结构模型对多风险因子之间的传导路径进行结构化建模,识别关键控制节点和连锁失效路径,避免风险评估的“碎片化”。

4.2 全员风险认知与责任网格化

风险防控效能的提升不能仅靠少数安全管理人员,必须激活全员参与机制。应构建“风险认知金字塔”培训体系:项目负责人层面侧重风险战略认知与资源调度决策能力;技术管理人员层面侧重风险分析与控制措施的方案化能力;一线作业人员层面侧重岗位风险辨识和异常状态报告能力,采用“风险卡”制度将各工种的关键风险点及其应对要点浓缩为便携式随身指南。与之配合的是责任网格化管理——将施工作业区按空间坐标划分为网格单元,每个网格单元的安全责任明确绑定至具体岗位和个人,网格边界随工作面移动而动态调整,确保责任链条不留盲区。

4.3 数字化预警与智能监控平台

信息化手段是实现预警时效性跃升的关键杠杆。应构建以“感知层—传输层—处理层—应用层”为架构的数字化预警平台。感知层部署各类传感器(位移计、应变计、雨量计、视频监控等)和智能安全帽、车载定位终端等人员机械感知设备;传输层依托施工现场自组网和5G通信实现数据实时回传;处理层利用边缘计算节点实现数据就地快速处理与异常模式识别,同时将处理结果上传至云端进行大数据关联分析;应用层面向不同层级用户提供定制化预警信息推送——一线班组长接收即时报警信号,项目管理层接收日趋势报告,企业总部接收周风险态势分析。关键在于建立分级预警阈值体系,不同风险等级对应不同的信息推送路径和处置授权层级,避免“信息过载”和“预警疲劳”。

4.4 应急能力的体系化与常态化

应急能力的优化应从“有预案”升级为“预案有

效”。具体路径包括:第一,实行应急预案的“一工程一策”,禁止直接套用模板,每个项目须基于其动态风险评估结果编制针对性预案,并绘制应急资源“热力图”,明确最近的医疗点、消防站、应急物资储备库的位置和联络方式。第二,建立应急演练的“实战化”制度,将桌面推演、功能演练和全面演练按比例组合,其中全面演练每半年不少于一次,演练后须在72小时内完成评估报告并据此修订预案^[4]。第三,构建“项目—企业—属地”三级应急联动协议,明确事故升级的量化触发条件和各级响应的承诺,将外部救援力量纳入项目应急通讯录和调度体系,确保超出现场处置能力时能够平滑移交指挥权。

5 结语

公路工程施工安全风险防控体系的优化,本质上是将管理范式从“静态合规”向“动态适应”的根本转变。本文通过系统剖析现行体系在辨识、评估、预警、应急四个环节的结构性缺陷,明确了问题根源在于管理体系的时间分辨率与施工风险的动态演化速率之间严重失配。在此基础上提出的优化路径——动态风险评估升级、全员责任网格化、数字化预警平台和实战化应急体系——构成了彼此支撑、协同增效的整体解决方案。其核心要义是将防控体系的响应速度压缩至风险演化特征时间之内,将管控粒度细化至每个作业网格和每道工序节点,将责任边界从模糊的群体分担转化为精准的个人绑定。这一转型的实现依赖于管理理念、组织方式和信息技术的三重突破,但其方向是明确的:唯有使安全风险防控体系具备与施工系统本身同量级的动态适应能力,公路工程施工的本质安全水平才有可能获得实质性跃升。

参考文献

- [1] 李志鹏,王伟,刘洋.公路工程施工阶段安全风险动态评估方法研究[J].中国公路学报,2023,36(4):189-198.
- [2] 赵振华,陈国梁,孙丽丽.基于数字孪生的基础设施施工安全预警体系构建[J].安全与环境学报,2024,24(2):567-574.
- [3] 王海峰,张明,李晓东.线性工程施工安全风险耦合机理与防控策略[J].中国安全科学学报,2022,32(11):128-135.
- [4] 刘建新,周华,吴志刚.公路工程应急管理能力评估与提升路径[J].公路交通科技,2025,42(1):215-223.