

等根据布置的传感器、激光测量系统与无人机影像采集终端进行连续记录并上传至集中平台，平台基于设定的偏差容限与工艺阈值设定预警机制，一旦偏离指标上限即触发自动提示与调度响应，管理人员可在偏差未造成结构性缺陷前介入处理，在数据积累到一定量级后，可基于工况聚类与偏差追因算法构建工艺改进模型，根据比对不同施工条件下的工艺执行效果识别最优路径并更新施工操作规程。在预制装配安装工艺中，吊装时间与拼装精度呈明显关联，数据模型表明当风速超过 6 m/s 时，构件吊装所需定位调整次数平均上升至 3.8 次以上，而在 3 m/s 以下风速条件下定位修正次数保持在 1.6 次以内，作业效率提高约 58%。这种依托数据动态反馈机制所构建的工艺优化路径突破了传统经验驱动的方式，实现工艺从静态规范向动态演化转变，使土建工程施工逻辑更贴近现场实际状态并具备迭代能力。

4.2 数字化与标准化并进

土建工程施工标准的制定与执行历来是保障工程质量与效率的基础要素，而标准的动态适配能力则取决于其数字化表达程度与数据支持水平，在数字化管理环境中，将标准条文嵌入 BIM 模型节点、进度计划与材料清单中，形成可执行、可检验、可追踪的标准逻辑链条已成为技术趋势，研究团队基于浙江某大型装配式住宅工程项目数据，对施工标准化实施前后关键指标进行对比，应用 Python 数据预处理与回归分析模型，对 70 余个施工节点的操作记录与质量评估评分进行分类统计与标准差分析，筛选出最具代表性的施工偏差影响指标，并将结果整理如下表。

表 1: 标准化前后施工关键指标对比表

指标类别	实施前平均值	实施后平均值	改善率
叠合板安装偏差 (mm)	8.2	4.6	43.90%
楼板拼缝高差 (mm)	5.5	2.9	47.30%
构件定位时间 (min)	18.3	11.2	38.80%
节点查验合格率 (%)	86.7	97.4	12.30%

从数据分析结果看，标准化措施实施后构件安装精度显著提升，其中叠合板安装偏差降低至 4.6mm、拼缝高差控制在 3mm 以内，体现出数字标准在精度约束与现场可操作性方面的协调优势，构件定位时间缩短表明施工工序更为清晰且目标导向明确，节点查验合格率提升至 97.4% 反映质量控制更加系统高效，表中改善率来源于整合点云扫描技术与结构健康分析模块、可在现场完成实时检测与数据库匹配并辅助监督人员及时发现偏差趋势与改进方向的现场数据与标准库比对系统自动生成结果，数字化与标准化融合在提升施工一致性与可控性的同时为大规模复制与推广提供技术基础，成为推动土建工程进入智能建造阶段的关键路径。

4.3 数字生态系统构建

土建工程在进入数字化转型阶段后，其管理体系不再是孤立的数据平台或单一技术模块的堆叠，而是逐步向结构化、平台化与生态化体系构建演进，数字生态系统强调在统一的数据逻辑与开放接口架构下构建覆盖设计、招采、施工、交付与运维全流程的技术协同网络。在工程项目全生命周期中，不同阶段产生的数据根据中台结构进行整合，由标准数据结构实现横向兼容与纵向贯通，在保证数据一致性的基础上实现跨阶段反馈与业务同步，以某市政综合管廊工程为例，设计阶段建立的 BIM 模型在进入施工阶段后自动嵌入材料清单、设备参数与施工顺序信息，模型成为现场调度与工艺管理的主控界面，所有现场设备根据 IoT 系统接入平台，生成实时进度数据与资源消耗曲线，管理者依据系统提供的进度偏离图表调整任务分配策略，控制总工期在偏差 2% 以内。项目竣工后模型升级为配合建筑能耗监控系统与故障预警算法实现智能化维护管理的运维平台核心，该生态体系中的所有节点以数据互通为基础、以构建统一平台与标准接口为依据，不再依赖单点式管理系统，具备高度可扩展性与适配性，打通工程建设各参与方之间信息壁垒的数字生态系统将项目管理从静态流程图式控制模式升级为动态数据驱动闭环，使土建工程管理具备强韧性与持续优化能力，推动行业迈向智能建造与智慧运维的深度融合阶段。

5 结论

数字化技术正深刻改变土建工程的管理逻辑与施工体系，推动管理模式逐步向智能协同与数据驱动演进、新工艺在标准化与绿色低碳方向不断融合优化，根据工艺体系与数字平台的深度集成提升项目执行效率与全生命周期质量控制能力，为传统土建工程注入持续演化的技术动能，使推动数字化与新工艺协同发展成为工程建设迈向高质量与可持续转型的核心路径。

参考文献

- 闫海滨. BIM技术在土建工程施工中的应用研究[J].新城建科技,2025,34(01):34-36.
- 陈超. 土建工程管理中的质量控制与安全管理挑战[J].城市建设理论研究(电子版),2024,(31):49-51.
- 张颖. 数字化建筑信息技术在土建工程中的应用研究[J].中国战略新兴产业,2024,(03):74-76.
- 苏静波,张珏,钟春欣,等. 土建工程CAD/BIM技术应用教程[M]. 中国水利水电出版社:2023:12:480.
- 梁军霞. 高层住宅土建工程造价管理存在的问题及优化策略探析[J].房地产世界,2023,(15):103-105.

Research on Traffic Organization Scheme Design and Safety Assessment Method for Expressway Reconstruction and Expansion Projects

Xueyang Zhu

JSTI GROUP Co., Ltd., Nanjing, Jiangsu, 210019, China

Abstract

Against the backdrop of sustained growth in transportation demand and saturation of existing highway service capacity, renovation and expansion projects have become an important means of improving road network efficiency and operational safety. However, highway reconstruction and expansion are usually carried out under uninterrupted or semi interrupted traffic conditions, and construction interference is highly coupled with traffic operation. If the traffic organization plan is not properly designed, it can easily lead to traffic congestion, increased accident risks, and construction safety hazards. This study suggests that introducing a systematic safety assessment mechanism during the scheme design phase can effectively enhance the scientific and safety assurance level of traffic organization schemes for renovation and expansion projects, providing a reference technical path for similar projects.

Keywords

highway renovation and expansion; Traffic organization plan; Construction interference; Operational safety; safety assessment

高速公路改扩建工程交通组织方案设计与安全评估方法研究

朱雪阳

苏交科集团股份有限公司, 中国·江苏南京 210019

摘 要

在交通需求持续增长与既有高速公路服务能力趋于饱和的背景下, 改扩建工程已成为提升路网通行效率和运行安全的重要手段。然而, 高速公路改扩建通常在不中断或半中断交通条件下实施, 施工干扰与交通运行高度耦合, 若交通组织方案设计不当, 极易引发交通拥堵、事故风险上升及施工安全隐患。本研究认为, 通过在方案设计阶段引入系统化安全评估机制, 可有效提升改扩建工程交通组织方案的科学性与安全保障水平, 为类似工程提供可借鉴的技术路径。

关键词

高速公路改扩建; 交通组织方案; 施工干扰; 运行安全; 安全评估

1 引言

随着我国高速公路建设重心由“规模扩张”逐步转向“结构优化与能力提升”, 改扩建工程数量持续增加。大量早期建成的高速公路受限于设计年限、技术标准和交通需求预测偏差, 已难以满足当前高强度、复合化的交通运行需求。通过拓宽车道、优化互通结构或提升技术等级实施改扩建, 已成为延长高速公路使用寿命、提升通行能力的重要工程路径。与新建工程相比, 高速公路改扩建具有显著的“边运营、边施工”特征。施工区域与通行交通高度交织, 交通流在时间和空间尺度上受到持续扰动, 运行状态呈现出明显的非稳

定性。实践表明, 改扩建期间交通事故率普遍高于正常运营阶段, 其成因不仅与交通设施条件变化有关, 更与交通组织方案的合理性密切相关。因此, 如何在复杂施工条件下科学设计交通组织方案, 并对其安全性进行系统评估, 已成为改扩建工程管理中的核心技术问题。

2 基于交通环境与行为特性的施工路段安全风险作用机理分析

高速公路改扩建工程通常在不中断或半中断交通条件下实施, 其交通运行环境呈现出典型的“施工—运营并行”特征。施工活动对既有交通系统的扰动并非单一因素作用结果, 而是由交通需求、道路条件、施工方式及驾驶行为等多重因素耦合形成的复杂过程。多因素共同作用下, 交通运行状态的稳定性显著下降, 为交通安全风险的产生与演化提供了现实基础。

【作者简介】朱雪阳 (1988-), 男, 中国江苏南京人, 本科, 工程师, 从事交通工程领域勘察设计、规划评估、技术咨询及工程方案优化研究。

2.1 施工干扰条件下交通运行环境变化的基础作用机理

在改扩建施工条件下,车道数量减少、通行断面压缩、行驶路径调整等措施直接改变了道路空间结构,使原有交通运行条件发生突变。尤其在施工区及其上下游过渡路段,车辆运行环境在短距离内频繁变化,驾驶员需要在有限时间内完成信息识别和决策调整,交通运行的不确定性显著增加[1]。从交通需求角度看,改扩建工程往往发生在交通量已接近或超过原设计能力的路段,高峰时段交通需求集中,施工干扰使通行能力进一步受限,交通流密度迅速上升。此时,交通系统对外部扰动的缓冲能力明显下降,轻微的制动、变道或施工车辆进出行为即可引发排队扩散和拥堵回溢,增加追尾事故和二次事故风险。施工区临时交通设施与永久设施在连续性和一致性方面存在差异,若标志标线设置不合理或诱导信息不清晰,容易造成驾驶员认知偏差,使交通运行风险进一步放大。上述运行环境变化共同构成改扩建工程交通安全风险形成的外部基础条件。

2.2 交通流特性变化与驾驶行为对安全风险的内在于支撑作用

施工干扰条件下,交通流运行特性发生系统性变化,是交通安全风险形成的内在支撑机制。受限断面内交通流速度整体下降,但不同车辆之间速度差异增大,速度离散度显著提高,交通流稳定性明显削弱。在车道合流、限速突变及施工出入口等关键位置,交通冲突更易集中发生。而驾驶员行为对施工环境的适应性差异进一步加剧了交通运行的不稳定性。部分驾驶员因不熟悉施工区布设,采取保守驾驶策略,而部分驾驶员则因通行受阻产生急躁情绪,频繁变道或加减速,导致交通流内部扰动难以快速消散。当交通流运行状态长期处于高密度、低稳定性区间时,事故风险将以隐性形式持续积累。因此,交通流特性变化与驾驶行为响应并非孤立存在,而是在施工干扰条件下相互作用,共同决定了改扩建工程交通安全风险的基础水平[2-3]。

3 改扩建工程交通组织方案设计与安全风险机理

3.1 施工干扰条件下交通安全风险的非线性演化特征

在高速公路改扩建工程中,交通安全风险并不随施工强度或交通量变化呈现线性增长关系,而是表现出显著的非线性演化特征。这一特征源于交通系统本身的复杂性以及施工干扰对交通运行状态的持续扰动。当施工干扰程度较低、交通需求处于可控区间时,交通系统仍具备一定的自组织和自我调节能力,交通流可通过速度调整和车距变化维持相对稳定运行,此时安全风险主要以潜在形式存在,并未显性化。

随着改扩建施工范围扩大、车道压缩比例增加或交通需求持续上升,交通系统的运行弹性逐步削弱,交通流稳定性明显下降。在高密度运行状态下,车辆之间的速度差异和

加减速频率显著增大,交通流内部扰动难以快速消散,系统运行状态逐渐逼近失稳临界点。当此时叠加突发扰动因素,如施工车辆进出、临时限速调整或驾驶员操作失误,交通运行状态可能在短时间内发生突变,安全风险迅速从潜在状态转化为显性风险,表现为交通冲突集中出现甚至事故频发。

上述非线性演化特征在交通组织方案设计中表现尤为突出。例如,在车道合流区或断面转换区,当交通量接近或超过通行能力阈值时,交通组织方案中看似细微的不合理设置,如合流长度不足、导向标志设置不清或限速变化过于集中,均可能放大交通流内部扰动,引发速度骤降和冲突频率急剧上升。由此可见,在施工干扰条件下,交通组织方案并非简单影响交通运行效率,而是通过改变系统运行状态,使交通安全风险呈现出明显的非线性放大特征。

3.2 交通组织方案对风险演化路径的调控作用

从系统视角看,改扩建工程交通安全风险的形成与发展通常经历“扰动积累—系统临界逼近—风险集中显化”的动态演化过程。在这一过程中,交通组织方案通过对交通运行条件的主动干预,直接影响风险演化路径及其发展速度。车道分配方式、限速策略、交通诱导措施和施工区空间布局等组织要素,共同决定了交通系统在不同阶段的运行状态。

合理的交通组织方案能够通过优化车道利用结构、分散交通流冲突点和引导车辆平稳过渡,有效缓解施工干扰对交通运行的不利影响。例如,通过提前设置渐变限速区、延长合流缓冲距离和优化标志标线信息布局,可降低驾驶员操作的不确定性,减少速度突变和频繁变道行为,使交通系统运行状态保持在相对安全区间,从而延缓系统向失稳阈值逼近,抑制风险快速放大。相反,若交通组织方案设计未充分考虑施工阶段交通需求特征和驾驶行为响应规律,可能导致交通运行安全裕度被显著压缩。当组织措施与实际交通条件不匹配时,交通系统对外部扰动的敏感性显著增强,风险演化路径由“缓慢积累”转向“快速显化”,事故风险在短时间内集中释放。因此,交通组织方案不仅是施工期间交通运行的组织工具,更是调控交通安全风险演化方向和强度的重要技术手段。

在此意义上,将交通安全风险演化机理纳入交通组织方案设计过程,有助于从系统层面理解不同组织措施的安全效应,为后续基于风险导向的交通组织方案安全评估方法构建提供理论支撑[4-5]。

4 交通组织方案安全评估方法构建

为系统刻画高速公路改扩建工程交通组织方案设计与安全评估方法的技术逻辑,本文构建了“运行特征分析—方案识别—风险识别—风险表征—综合评价—动态优化”的闭环技术路线。该路线以改扩建施工条件和交通需求为输入,通过对施工干扰下交通运行特征的分析,形成分阶段交通组织方案;在此基础上,对关键风险点进行识别与量化表征,