

轨道交通夜间天窗期施工组织与安全管理研究

朱蒙琳 赵健伦 王 健

郑州交通发展投资集团有限公司 河南 郑州 450000

摘要: 随着我国城市轨道交通网络的快速扩张和运营密度的不断提升, 线路日常维护、设备更新及基础设施改造等施工作业必须在有限的“天窗期”内完成。天窗期通常指列车停运后的夜间时段, 具有时间短、任务重、环境复杂、交叉作业多等特点, 对施工组织与安全管理提出了极高要求。本文系统分析了当前轨道交通夜间天窗期施工中存在的主要问题, 结合国内外先进经验, 从施工组织优化、安全风险识别与控制、信息化技术应用、人员管理机制等方面提出针对性对策。研究表明, 通过构建科学高效的施工组织体系、强化全过程安全管控、推进智能化调度平台建设, 可显著提升天窗期施工效率与本质安全水平, 为城市轨道交通高质量可持续发展提供有力支撑。

关键词: 轨道交通; 天窗期; 施工组织; 安全管理; 风险控制; 智能调度

引言

高密度、高频率的运营模式极大提升了城市通勤效率, 但也压缩了线路维护与改造的可用时间窗口。为保障运营安全与服务质量, 绝大多数城市轨道交通系统采用“夜间停运+日间全负荷运行”的运营模式, 将线路检修、设备更换、轨道调整、信号升级等施工作业集中安排在每日凌晨0:00至4:30左右的“天窗期”(也称“维修窗口期”)内进行。天窗期施工具有鲜明的特殊性: 一是时间窗口极其有限, 通常仅3~5小时; 二是作业环境复杂, 涉及多专业、多工种协同; 三是安全风险集中, 一旦发生事故可能影响次日正常运营; 四是作业强度大, 人员易疲劳。因此, 如何在有限时间内高效、安全地完成施工任务, 成为轨道交通运营管理中的核心难题。本文旨在系统研究轨道交通夜间天窗期施工的组织模式与安全管理机制, 分析当前存在的突出问题, 借鉴国内外先进实践, 提出优化路径与对策建议, 以期提升我国轨道交通运维管理水平提供理论支持与实践参考。

1 天窗期施工的基本特征与挑战

1.1 时间约束性强

天窗期受列车末班与首班发车时间严格限制, 有效作业时间通常不足4小时。扣除进场准备、清场销点、设备调试等必要环节后, 实际可用于核心施工的时间更短。在此条件下, 任何延误都可能导致作业无法完成, 甚至影响次日运营。这种高度压缩的时间资源迫使施工组织必须具备极强的计划性与执行力, 稍有疏漏便可能引发连锁反应, 不仅造成当日任务失败, 还可能打乱后续多日的维修安排, 进而威胁整个系统的运行稳定性。

1.2 多专业交叉作业频繁

天窗期内常同时开展轨道、供电、信号、通信、机

电、土建等多个专业的施工作业。例如, 在一次道岔更换作业中, 需轨道工班、信号工班、接触网班组协同配合。若协调不力, 极易引发工序冲突、资源争用或安全盲区。不同专业队伍往往隶属于不同单位, 其作业习惯、技术标准甚至沟通方式存在差异, 在紧张的夜间环境中, 信息传递的微小偏差都可能被放大为严重的操作失误。此外, 部分作业区域空间狭小, 多个工种在同一物理空间内并行作业, 进一步加剧了现场管理的复杂性, 对统一指挥与流程标准化提出了更高要求。

1.3 安全风险高度集中

夜间作业存在照明不足、人员疲劳、应急响应能力下降等问题。同时, 施工区域与运营线路物理隔离不严、防护措施不到位、违章操作等均可能引发触电、坠落、侵限、设备损坏等安全事故。这反映出夜间施工环境的脆弱性——在能见度低、警觉性弱、支援力量有限的背景下, 原本可控的风险因子极易演变为现实事故^[1]。尤其当涉及高压电、高空作业或轨道侵入等高危场景时, 一旦防护失效, 后果不堪设想。因此, 天窗期不仅是效率的战场, 更是安全的“高压线”。

1.4 人员管理难度大

天窗期作业多为倒班制, 长期夜班易导致生物钟紊乱、注意力下降。加之部分外包单位人员流动性大、安全意识薄弱, 给统一管理和培训带来挑战。一线作业人员在生理节律被打乱的情况下, 判断力与反应速度显著降低, 而高强度的体力劳动又进一步加剧疲劳累积。与此同时, 部分施工单位为降低成本, 雇佣临时工或未经充分培训的人员参与关键作业, 使得安全规程难以有效落地。这种“人”的不确定性, 成为天窗期安全管理中最难控制却最关键的变量。

2 当前天窗期施工组织与安全管理的主要问题

2.1 施工计划编制粗放

当前部分轨道交通运营单位在施工计划编制上仍依赖经验判断,缺乏对作业量、人力配置、设备效能及工艺流程的量化分析。这种粗放式计划往往与现场实际脱节,导致施工过程中频繁出现工序调整、资源短缺或等待现象,严重制约效率。更为突出的是,计划审批流程冗长,难以灵活应对突发设备故障或紧急抢修需求。当一项计划因不可预见因素被迫中断时,后续多日的作业安排可能随之瘫痪,暴露出计划体系缺乏弹性与韧性的问题。

2.2 协同机制不健全

各专业施工单位之间、施工方与调度中心之间缺乏高效的信息共享与协调机制。指令传递仍大量依赖电话或纸质单据,不仅效率低下,还容易因口误、记录不清或传递延迟造成误解。在跨线路、跨区段的大型综合施工中,协调成本成倍增加,常常出现“你等我、我等你”的僵局。更严重的是,部分单位出于本位主义考虑,优先保障自身任务完成,忽视整体进度与安全边界,导致接口管理混乱,埋下安全隐患。这种碎片化的协作模式,已成为制约天窗期整体效能提升的关键瓶颈。

2.3 安全防护体系薄弱

尽管多数单位已建立基本的安全管理制度,但在实际执行中,防护体系仍显薄弱。部分施工现场存在防护员配置不足、警示标识缺失、接地线挂设不规范等问题,未能形成有效的物理与管理双重屏障。对“人机料法环”五大要素的系统性风险辨识不够深入,往往只关注显性危险源,而忽视如沟通失效、流程断点等隐性风险。应急预案多停留在纸面,演练频次不足且形式化严重,一旦发生真实险情,现场人员往往手足无措,错失最佳处置时机。

2.4 技术手段滞后

传统施工管理高度依赖人工记录与纸质台账,不仅效率低下,更难以实现过程追溯与动态监控。管理人员无法实时掌握各作业点的实际进展、人员分布或设备状态,只能依靠事后汇报进行被动干预。在缺乏对人员定位、环境参数、设备运行等关键数据的实时感知能力的情况下,风险预警几乎无从谈起^[1]。这种“黑箱式”管理方式,使得天窗期施工长期处于高风险、低透明的状态,严重制约了安全与效率的同步提升。

2.5 考核激励机制缺失

当前对施工单位的考核多以“是否完成任务”为唯一导向,忽视了安全合规性、作业质量及协同配合等关

键维度。这种单一绩效指标容易诱发“抢工期、保交付”的短视行为,甚至默许违章操作以换取表面效率。同时,缺乏正向激励机制,使得优秀团队与个人得不到应有的认可与奖励,难以形成“比安全、比规范、比协作”的良性竞争氛围。长此以往,安全文化难以扎根,管理要求沦为形式。

3 国内外先进经验借鉴

3.1 新加坡SMRT:智能调度与数字孪生平台

新加坡地铁运营商SMRT率先引入基于BIM与GIS融合的数字孪生平台,将天窗期施工从“经验驱动”转向“数据驱动”。该平台集成施工计划、人员实时定位、设备状态监测、视频监控及环境传感数据,构建出施工区域的全息数字镜像。调度中心可通过可视化界面全景掌握各作业点进展,系统还能自动识别潜在冲突(如两组人员即将进入同一高危区域)并发出预警。更重要的是,平台支持动态资源调度,当某作业点提前完成时,系统可自动推荐将闲置设备或人员调配至滞后区域,实现全局效率最大化。

3.2 国内北京、上海地铁:天窗期“一体化”管理模式

面对日益复杂的施工需求,北京与上海地铁积极探索管理机制创新。北京地铁推行“施工总承包+专业分包”模式,由一家具备综合资质的主体单位统筹区域内所有施工作业,有效减少了多头管理带来的协调摩擦。上海地铁则成立专职的“天窗期施工指挥中心”,实行“一令到底”的垂直调度机制,所有施工指令由指挥中心统一发布,各专业单位必须无条件执行,极大提升了指令权威性与现场执行力。两地实践表明,通过组织重构与权责明晰,可在不增加硬件投入的前提下显著提升天窗期管理效能。

4 优化天窗期施工组织与安全管理的对策建议

4.1 构建科学高效的施工组织体系

施工组织的科学性直接决定天窗期利用效率。首先,应推动施工计划从经验型向数据驱动型转变。通过积累历史作业数据,结合人工智能算法,构建施工耗时预测模型,综合考虑任务复杂度、人员技能水平、设备可用性等多维因素,自动生成最优作业方案。同时,引入滚动计划机制,每周动态调整未来7天的施工安排,增强对突发事件的适应能力。其次,应推广“一体化”施工组织模式,由具备综合能力的单位担任区域总协调人,统一管理轨道、供电、信号等多专业作业,减少接口矛盾与沟通损耗。每日施工前召开简短高效的协调会,明确当日重点任务、风险点及责任分工,确保各方

步调一致^[3]。最后,应优化资源配置机制,建立跨项目、跨线路的共享资源池,通过智能平台实现轨道车、检测仪器等关键设备的动态调配,避免资源闲置与争抢并存的尴尬局面。

4.2 强化全过程安全风险管控

安全是天窗期施工不可逾越的红线,必须贯穿于作业全生命周期。在作业前,应运用HAZOP、JSA等系统化工具对每项任务开展深度风险评估,形成“一作业一清单”的风险档案,重点关注触电、高处坠落、轨道侵限等高频高危场景。在作业中,需健全现场防护体系,严格执行“双确认”制度,即施工负责人与专职防护员共同确认安全条件后方可开工。同时,应积极引入智能安全帽、UWB人员定位、电子围栏等技术手段,实现对人员位置、行为及环境状态的实时监控,并通过AI视频分析自动识别未戴安全帽、越界作业等违章行为,做到风险早发现、早干预。在作业后,应完善应急管理机制,制定分级响应预案,定期开展无脚本实战演练,并与外部消防、医疗等单位建立联动通道,确保突发事件能够快速、有序处置。

4.3 推进信息化与智能化技术应用

技术赋能是破解天窗期管理困境的关键路径。应加快建设集施工计划、人员管理、设备监控、视频分析于一体的智能调度平台,实现“一张图”全景指挥。该平台不仅支持自动排程与冲突预警,还能实时跟踪作业进度,自动生成绩效报告,为管理决策提供数据支撑。在重点施工区域,可推广BIM与IoT融合应用,构建高精度数字模型,并叠加温湿度、振动、气体浓度等传感器数据,实现对施工环境与结构状态的毫秒级感知。现场人员还可通过AR眼镜接收标准化操作指引,减少人为误操作^[4]。长远来看,应积累海量天窗期运行数据,利用大数据分析识别效率瓶颈与安全规律,推动管理从“被动响应”向“主动预测”演进。

4.4 完善人员培训与激励机制

再先进的技术与制度,最终仍需依靠人来执行。因此,必须将“以人为本”理念贯穿于人员管理全过程。一方面,应强化安全教育培训,推行“岗前必训、持证

上岗”制度,重点提升夜间作业安全规程、应急处置技能及新设备操作能力。可借助VR技术构建沉浸式安全体验场景,让员工在虚拟环境中感受违章后果,增强安全敬畏感。另一方面,应建立科学的绩效考核与激励机制,将安全合规性、作业质量、协同配合等纳入KPI体系,并与合同付款、评优评先直接挂钩。通过设立“天窗期安全之星”“高效作业团队”等荣誉,激发员工主动性与归属感。此外,还需关注员工身心健康,合理安排轮休,提供营养晚餐与心理疏导服务,甚至试点疲劳监测手环,实时预警人员状态,从源头防范因疲劳导致的操作失误。

5 结语

本文研究表明:科学的施工组织是提升天窗期效率的基础,需通过计划精细化、资源集约化、协调一体化实现;全过程安全风险管控是底线要求,应构建“预防—监控—应急”三位一体的安全防护体系;信息化与智能化技术是破局关键,可显著提升管理透明度与响应速度;以人为本的管理理念不可或缺,需兼顾效率与人员健康安全。未来,随着5G、人工智能、数字孪生等技术的深入应用,轨道交通天窗期施工将迈向“无人化巡检、少人化作业、智能化决策”的新阶段。相关管理部门应持续创新机制、加大投入、强化协同,推动天窗期施工从“被动应对”向“主动治理”转型,为城市轨道交通高质量发展筑牢安全基石。

参考文献

- [1]湛忠强.轨道交通车站夜间施工风险识别与管控[J].运输经理世界,2025,(05):13-15.
- [2]李宪,王伟鹏,王巍,等.城市轨道交通夜间正线停车运营组织方案研究[J].现代城市轨道交通,2025,(01):110-113.
- [3]张龙斌.城市轨道交通工程施工组织管理研究[C]//中国电力企业管理创新实践(2022年).中国水利水电第十工程局有限公司,2024:527-530.
- [4]谢覃禹,邢璐.城市轨道交通施工期间交通组织研究[J].山东交通科技,2022,(03):17-20+40.