

城市轨道交通线路维保施工安全效能评价指标体系的构建及应用

赖文华

重庆轨道交通运营有限公司 重庆 401120

摘要：本文聚焦城市轨道交通线路维保施工安全效能评价，概述维保施工内容与流程，明确安全效能内涵及人员、设备、环境、管理四大影响因素。分析现状，指出事故类型与管理、技术、人员层面的问题。进而构建包含人员安全、设备安全、环境安全、管理安全四类指标的评价体系。因此，选择改进熵权-突变级数的线性组合评价方法，阐述其优势与步骤。该研究为城市轨道交通维保施工安全管理提供科学依据，助力提升安全效能，保障线路稳定运营。

关键词：城市轨道交通；线路维保施工；安全效能评价；指标体系构建

1 城市轨道交通线路维保施工安全概述

1.1 城市轨道交通线路维保施工内容与流程

城市轨道交通线路维保施工，针对轨道、供电、信号、通信系统及附属设施，开展周期性与临时性维护，以排查隐患、修复故障，保障线路运营。轨道系统维保包括钢轨打磨、轨枕更换等，利用专业设备检测轨道平顺性等参数，精准处理超标部位。供电系统维保侧重接触网检修、变电所设备维护等，排查接触网磨损、绝缘子老化等问题。信号系统维保涉及转辙机调试等，确保信号传输与联锁关系准确可靠。通信系统维保涵盖光纤线路检测等，保障运营调度指令传达顺畅。附属设施维保则检查修复站台屏蔽门、排水系统等；线路维保施工遵循标准化流程：一是施工计划，根据线路运营年限、设备老化情况及日常检测数据，制定维保计划，明确施工内容、时间、地点与责任人。二是审批，提交计划至运营管理部门，经安全评估与冲突协调后获施工许可。三是准备，组织人员培训、配备设备物资、设置安全防护，完成技术交底。四是实施，严格按方案作业，执行安全规程。五是验收，由技术、安全等部门联合检查施工质量，确认是否达标。六是总结，梳理施工问题与经验，优化后续方案。这一系列施工内容与流程，构成了城市轨道交通线路维保的完整体系，确保线路安全、高效运行，为乘客提供优质的出行服务。

1.2 安全效能的内涵及影响因素

1.2.1 安全效能的内涵

在城市轨道交通线路维保施工领域，安全效能是指在维保作业过程中，通过整合人员、设备、环境、管理等资源，实现风险防控、隐患治理、事故预防的综合能

力，其核心是“以最小的安全投入实现最优的安全保障效果”。安全效能不仅体现为施工过程中“零事故、零伤亡”的直接成果，还包括施工质量对线路长期运营安全的支撑作用，以及安全管理体系的可持续优化能力^[1]。具体而言，安全效能包含三个维度：一是风险管控效能，即识别、评估及化解施工风险的及时性与有效性；二是作业执行效能，即施工人员按规程操作、设备按标准运行的规范性与稳定性；三是管理保障效能，即安全制度、组织协调、应急响应等管理措施的完善性与落地性。

1.2.2 安全效能的影响因素

安全效能受人员、设备、环境、管理四大核心要素交织影响。（1）人员因素是主观核心。施工人员资质证书完备性、专业技能熟练度决定作业质量，安全意识与责任心影响违规操作概率。如未持证、技能不足易致设备调试失误，安全意识淡薄会引发未按规定设置防护等风险。（2）设备因素是物质基础。施工设备完好程度、性能稳定性关乎作业安全，老化设备易故障停机，精度不足的检测设备可能漏判隐患，设备维护不及时、更新滞后会放大安全风险。（3）环境因素是外部条件。自然环境中暴雨、高温等灾害可能破坏场地、影响设备性能；作业环境里隧道狭窄、通风不良易致人员疲劳，照明不足可能引发碰撞、坠落，周边运营线路列车通行增加施工隔离防护难度。（4）管理因素是组织保障。安全管理制度完善程度、权责清晰度影响管理效率，施工组织方案合理性、部门协调顺畅度关系作业节奏，应急处置机制健全度决定事故损失控制能力。

2 城市轨道交通线路维保施工安全现状分析

近年来我国城市轨道交通里程激增，维保施工规模

扩大,但安全管理挑战重重,安全效能提升存在短板。2020-2024年,全国轨道交通维保施工领域发生120余起安全事故,人员违规操作占比45%,如未执行停电流程、防护缺失等;设备故障引发占25%,像老旧检测设备误判等;环境因素诱发占15%,多为暴雨积水、高温短路;管理协调不当占15%,如施工计划冲突。管理层面,安全管理制度重形式轻落实,现场检查与考核问责机制缺失;风险评估依赖经验,缺乏量化标准;信息化水平低,数据共享差,难动态监测预警。技术层面,维保技术升级滞后,老旧线路依赖人工检测,新型设备应用培训不足。人员层面,维保队伍流动性大,新员工占比上升,岗前培训周期缩短,技能与安全意识参差不齐,是安全效能提升的薄弱点^[2]。

3 城市轨道交通线路维保施工安全效能评价指标体系构建

3.1 人员安全指标

人员是维保施工安全的核心主体,其技能水平、安全意识及生理状态直接影响作业风险。技能水平方面,需重点考核特种作业人员持证率(如高压电工、轨道车司机持证比例)及年度技能考核合格率,确保操作人员具备专业资质与实操能力。例如,某地铁公司统计显示,未持证人员违规操作引发的事故率是持证人员的3.2倍。安全意识指标包括安全培训覆盖率(年度人均培训时长 ≥ 40 小时)和违规操作次数/百人(如未佩戴安全帽、未执行“停电挂牌”制度等),通过行为数据量化人员安全习惯。某线路试点智能安全帽监测系统后,违规操作率下降67%。疲劳程度指标则关注夜间作业时长占比(建议不超过总工时的40%)及工时合规率(单日连续作业 ≤ 8 小时),避免因疲劳导致注意力下降。研究表明,夜间作业超10小时的班组,设备误操作概率增加2.1倍。此外,可引入心理测评工具(如压力指数问卷)评估人员心理状态,但需平衡数据隐私与实用性。

3.2 设备安全指标

设备可靠性是维保施工安全的基础,需从故障率、维护质量及智能化水平三方面构建指标。设备可靠性以关键设备故障率(如接触网断线次数/百公里、轨道几何尺寸超限率)和平均修复时间(MTTR)为核心,反映设备健康状态与维修效率。例如,某城市轨道交通网络数据显示,接触网故障导致的延误占比达28%,需优先优化巡检周期。维护质量指标包括检修计划完成率(月度计划执行偏差 $\leq 5\%$)和隐患整改闭环率(从发现到整改完成的时间 ≤ 72 小时),确保设备问题得到及时处理。某线路通过引入数字化工单系统,将隐患整改时效从5天缩

短至2天。智能化水平指标涵盖在线监测设备覆盖率(如轨道状态监测系统、接触网张力传感器)和故障预测准确率(基于大数据的剩余寿命预测误差 $\leq 15\%$)。智能探伤车的应用使钢轨裂纹检出率从人工检查的75%提升至92%,显著降低漏检风险^[3]。

3.3 环境安全指标

环境因素对维保施工安全的影响具有隐蔽性和突发性,需从作业空间、气象条件及周边干扰三方面管控。作业空间指标包括隧道通风达标率(氧气浓度 $\geq 19.5\%$ 、粉尘浓度 $\leq 2\text{mg}/\text{m}^3$)和照明强度符合率(作业面照度 $\geq 150\text{lx}$),避免因空间密闭或视线不足引发事故。某隧道因通风不良导致一氧化碳超标,造成3名施工人员中毒,凸显环境监测的重要性。气象条件指标关注暴雨/大风预警响应率(提前2小时启动应急预案)和高温作业防护措施执行率(提供防暑药品、轮换作业),降低极端天气对施工的影响。例如,夏季高温时段($\geq 35^\circ\text{C}$)作业事故率是常温时段的1.8倍,需强制安排避暑休息。周边干扰指标涵盖施工区域侵限事件数(如工具、材料侵入行车限界)和交叉作业协调效率(多部门联合施工会议频次 ≥ 2 次/周),减少因空间冲突或沟通不畅引发的次生风险。某车站改造项目中,因未及时协调信号与轨道施工,导致设备碰撞损失超50万元。

3.4 管理安全指标

管理安全是维保施工安全的保障,需从制度执行、应急能力及协同效率三方面构建指标。制度执行指标包括安全交底记录完整率(每次施工前签字确认)和安全检查频次达标率(日常检查 ≥ 1 次/日、专项检查 ≥ 1 次/月),确保安全措施落实到位。某线路通过电子化交底系统,将记录完整率从82%提升至98%。应急能力指标涵盖应急预案演练覆盖率(年度演练 ≥ 2 次/班组)和突发事件处置时效(从事件发生到初步控制 ≤ 15 分钟),提升应对突发风险的能力。例如,某地铁公司模拟接触网断线演练后,实际故障处置时间缩短40%。协同效率指标关注多部门联合施工协调会议次数(如工务、供电、信号部门联席会)和信息共享平台使用率(实时上传施工进度、设备状态),打破信息孤岛。某智慧运维平台上线后,跨部门沟通效率提升60%,减少因信息滞后导致的施工延误。

4 城市轨道交通线路维保施工安全效能评价方法选择与应用

4.1 评价方法选择

当前城市轨道交通安全评价领域常用方法包括层次分析法(AHP)、熵权法、突变级数法、模糊综合评价

法等,但单一方法均存在局限性。层次分析法依赖专家主观判断,易受经验影响导致权重偏差;熵权法仅基于数据客观计算,忽视指标实际重要性差异;模糊综合评价法在模糊边界界定上易产生误差;传统突变级数法对指标归一化处理的合理性不足。结合线路维保施工安全效能评价的需求,需兼顾评价的客观性与实用性:既要依托实际数据避免主观臆断,又要结合行业经验体现指标主次关系,同时适应多维度、多指标的复杂评价场景^[4]。改进熵权-突变级数的线性组合评价方法,通过熵权法获取指标客观权重,利用突变级数法处理多目标决策问题,再通过线性组合融合两者优势,既能减少主观因素干扰,又能精准反映各维度对安全效能的影响程度,符合评价体系科学性、系统性的要求,因此成为最优选择。

4.2 基于改进熵权-突变级数的线性组合评价方法

该组合方法以“客观赋权+多准则决策+线性融合”为核心逻辑。改进熵权法针对传统熵权法对极端数据敏感的问题,通过数据标准化预处理优化信息熵计算,更精准提取指标数据中的有效信息,确定各指标的客观权重,体现不同指标在实际安全管理中的数据贡献度差异;突变级数法基于突变理论,将复杂的安全效能评价系统分解为人员、设备、环境、管理四个子系统,每个子系统按指标重要性排序形成递阶结构,通过突变模糊隶属函数实现指标值的归一化处理,无需主观设定权重即可完成子系统内部的优劣排序,解决了多指标耦合下的评价难题;线性组合环节通过引入融合系数,将改进熵权法得到的客观权重与突变级数法的子系统评价结果进行加权整合,既保留了数据驱动的客观性,又通过融合系数融入行业专家对各子系统重要性的判断,实现“客观数据+主观经验”的有机结合,提升评价结果的可靠性与适用性。

4.3 评价方法应用步骤

以某地铁线路2023年第三季度维保施工为例,具体步骤如下:(1)数据采集与预处理。收集28项指标数据(如培训覆盖率、设备故障率、夜间作业时长、应急预案演练次数等),剔除异常值(如某日设备故障率数据录入错误达10%,远超平均值0.3%),并通过极差法标准化至[0,1]区间,消除量纲影响;(2)熵权计算与权重分配。计算各指标熵值,确定权重。例如,管理指标

(制度执行、应急能力、协同效率)因数据波动大(不同班组执行率差异显著),权重分配为0.38,高于环境指标(0.19),反映当前安全管控需优先强化制度与应急;(3)突变级数分析与子系统评分。将人员、设备、环境、管理视为独立突变体,构建势函数并求解分叉集方程,确定子系统安全状态。例如,环境子系统因“夜间照明不足”(达标率68%)和“交叉作业协调效率低”(会议频次1次/周),得分为0.62(满分1分),低于其他子系统,表明环境风险是主要短板;(4)综合评价与结果应用。通过线性组合生成安全效能指数(78.5分,良好等级),其中环境因素拉低总分6.2分。据此提出改进建议:增设移动照明设备、开发跨部门协同APP、加强夜间作业工时监管。后续跟踪显示,措施实施后环境子系统得分提升至0.75,综合指数达82.3分,验证方法有效性。改进熵权-突变级数法通过“数据-权重-矛盾-综合”的逻辑链条,实现了从局部到整体、从静态到动态的安全效能评价,为城市轨道交通维保施工管理提供了科学决策支持,具有较高的行业推广价值。

结束语

城市轨道交通线路维保施工安全效能评价是保障运营安全的关键。本研究构建的评价指标体系全面涵盖人员、设备、环境和管理各维度,结合改进熵权-突变级数的线性组合评价方法,实现了客观数据与主观经验的融合,提升了评价的科学性和实用性。通过实证分析,可精准定位维保施工中的安全薄弱环节,为制定针对性改进措施提供依据。未来,随着技术发展,可进一步优化评价方法,推动城市轨道交通维保施工安全管理向智能化、精细化迈进。

参考文献

- [1]张伟.城市轨道交通建设中的浅埋暗挖机械化施工技术[J].设备管理与维修,2020(14):159-161.
- [2]沙金硕.城市轨道交通线路选线设计思路探究[J].铁道建筑技术,2021(04):48-51.
- [3]陈发达.贵阳市轨道交通工程安全建设和智慧运维技术[J].现代城市轨道交通,2021,(11):101-108.
- [4]赫少攀,廖福强.城市轨道交通一体化运维管理分析研究[J].铁道运营技术,2021,(03):17-19.