

# 铁路运营安全评估体系构架研究

舒晓东

国能新朔准池铁路(山西)有限责任公司 山西 朔州 036000

**摘要:** 本文聚焦铁路运营安全评估体系构架研究, 阐述系统安全、风险管理等理论基础及构建原则, 明确风险识别等构成要素, 介绍实施优化举措, 探讨评估模型与算法优化, 以构建科学全面、动态智能体系, 提升铁路运输安全。

**关键词:** 铁路运营安全; 评估体系; 风险评估; 动态管理

## 1 铁路运营安全评估体系的理论基础

### 1.1 铁路运营安全相关理论

铁路运营安全评估体系构建依赖多学科理论, 系统安全理论、风险管理理论与事故致因理论是核心。系统安全理论以“人-机-环-管”全系统视角识别风险, 认为安全是系统各要素协同结果, 如列车脱轨可能因轨道、司机、天气、维护流程等多因素叠加, 为评估体系全面性提供依据。风险管理理论围绕“风险识别-评估-控制-监控”流程, 指导评估体系量化分析风险、排序优先级, 如用风险矩阵法划分等级, 辅助资源分配。事故致因理论(如瑞士奶酪模型)表明事故是多道防护屏障失效所致, 促使评估体系关注薄弱环节, 像信号系统故障预警、人员培训不足等, 为评估指标设计提供理论支撑, 共同保障评估体系科学性与系统性。

### 1.2 评估体系的重要性与作用

铁路运营安全评估体系是保障铁路运输安全的关键防线, 具有三大核心作用。其一, 风险预警功能。通过定期的全面评估, 能够提前发现潜在的安全隐患, 将风险扼杀在萌芽状态, 避免其演变为严重事故。例如, 通过对设备故障率的持续监测以及人员违规率的统计分析, 可以及时发现轨道的隐性损伤、作业人员操作不规范等潜在问题。再如, 对桥梁结构健康状况的定期检测评估, 能提前察觉桥梁的细微裂缝、结构变形等情况, 防止因桥梁结构问题引发列车脱轨等重大安全事故。从而有效防止严重事故的发生。其二, 决策支撑作用。评估结果为安全管理决策提供了详实、可靠的数据依据。针对评估中发现的“外部环境风险防控薄弱”等问题, 可以制定沿线防护网升级、加强周边环境巡查等切实可行的改进方案, 实现资源的优化配置。其三, 持续改进意义。动态评估能够实时跟踪安全状态的变化, 准确衡量管控措施的实际效果<sup>[1]</sup>。

### 1.3 构建评估体系的原则

构建铁路运营安全评估体系需要严格遵循四大原则。全面性原则要求评估体系必须覆盖铁路运营的全流程和全要素, 不仅要涵盖列车运行、车站作业等关键环节, 还要包括人员、设备、环境等各类要素。任何范围的遗漏都可能导致风险失控, 例如, 不能仅仅关注设备的安全状况, 还要充分考虑人员心理因素、地质灾害等潜在风险。科学性原则规定评估指标必须符合铁路运营的实际规律, 数据来源要可靠准确, 评估方法要科学适配。例如, 设备故障率指标应基于长期的运维数据进行统计分析, 风险评估要结合定量与定性方法, 确保评估结果的客观性和准确性。可操作性原则要求评估指标简洁明确、易于量化, 评估流程简便快捷, 能够适应实际工作场景的需求。动态性原则强调评估体系要随着运营环境、技术发展、政策变化等因素及时进行调整, 确保始终紧密贴合实际需求。

## 2 铁路运营安全评估体系的构成要素

### 2.1 风险识别

风险识别是评估体系的起点, 需通过多维度、多方法结合, 实现风险的全面覆盖与精准定位。首先, 识别维度需涵盖“人-机-环-管”四大系统: 人员维度包括值班员、信号工、线路工的技能水平、安全意识、工作状态; 设备维度包括轨道、信号等系统的运行状态与老化程度; 环境维度包括自然环境(暴雨、暴雪)、外部人为环境(行人入侵、沿线施工)、公共环境(宿舍、办公、消防设施); 管理维度包括制度完善性、应急响应能力、考核机制合理性。其次, 识别方法需多样化, 包括资料分析法(如梳理历史事故数据、设备运维记录, 总结高频风险点)、现场调研法(如深入基层、线路现场排查, 观察作业人员操作、设备运行情况)、专家访谈法(邀请铁路安全专家、一线工作人员, 识别隐性风险如“夜间作业人员疲劳操作”)、风险清单法(基于行业标准与企业经验, 制定标准化风险清单, 逐一核对

排查)。通过多维度与多方法结合,形成完整的风险清单,为后续评估奠定基础。

## 2.2 风险评估指标体系

风险评估指标体系是评估体系的核心,需按“层级化、模块化”设计,从目标层、准则层、指标层构建三级结构。目标层为“铁路运营安全综合评估”,体现评估的核心目的;准则层对应“人-机-环-管”四大系统,形成四个评估模块;指标层则是准则层下的具体量化或定性指标。人员安全模块包括“安全培训达标率”(年度培训考核合格人数/总人数)、“人员违规操作率”(月度违规操作次数/总操作次数)、“健康体检覆盖率”(年度体检人数/总人数);设备安全模块包括“设备故障率”(月度故障设备台数/总设备台数)、“智能监测覆盖率”(安装监测设备的关键设备数/关键设备总数)、“维护计划执行率”(完成维护的设备数/计划维护设备数);环境安全模块包括“自然灾害预警响应率”(预警后及时采取措施的次数/预警总次数)、“线路入侵事件发生率”(月度入侵事件次数/线路总长度)、“消防设施完好率”(完好消防设施数/总消防设施数);管理安全模块包括“应急预案完善率”(符合标准的应急预案数/总应急预案数)、“应急演练频次”(年度演练次数)、“安全投入占比”(安全经费/总运营经费)。指标需明确计算方法与评价标准,如“设备故障率 $\leq 0.5\%$ ”为合格,确保评估可操作。

## 2.3 风险评估方法与模型

风险评估方法与模型需根据评估目标与数据特点选择,形成“定性定量结合、静态与动态互补”的方法体系。定性方法适用于难以量化的指标,如专家打分法(邀请5-10名铁路安全专家,对“应急预案可行性”“人员安全意识”等指标打分,取平均值)、故障类型和影响分析法(FMEA),通过分析设备故障类型(如信号机断电、列车制动失效)及其对运营的影响,确定风险等级。定量方法适用于可量化指标,如加权综合评价法(通过层次分析法确定各指标权重,如设备故障率权重0.2、人员违规率权重0.15,计算综合得分)、风险矩阵法(以“可能性”“影响程度”为坐标轴,划分低、中、高、极高四个风险等级,如“暴雨导致路基塌陷”可能性低但影响程度高,定为高风险)。还需引入系统动力学模型、贝叶斯网络模型等复杂模型,实现多因素交互作用下的风险评估,提升评估的精准性。方法与模型的选择需兼顾科学性与实用性,避免过度复杂导致基层难以执行。

## 3 铁路运营安全评估体系的实施与优化

### 3.1 评估体系的实施保障

铁路运营安全评估体系有效实施,需从组织、制度、技术、人员四方面构建保障机制。组织保障上,成立专门评估管理部门,明确职责分工,如铁路局设“安全评估中心”,负责计划制定、实施组织与结果汇总;基层单位配评估专员,落实数据收集与初步评估,防止责任分散。制度保障方面,出台管理办法,明确评估周期(月度专项、季度综合、年度全面)、流程(数据收集-指标计算-风险分析-报告提交)及结果应用规则(与部门绩效挂钩),确保评估规范化。技术保障需搭建信息化评估平台,对接设备、人员、调度等系统,实现数据自动采集与指标实时计算,减少人工误差。人员保障要开展评估技能培训,提升工作人员指标理解、数据处理与方法应用能力,确保评估专业、结果可靠。

### 3.2 评估体系的动态优化机制

铁路运营安全评估体系并非处于静态,而是需要构建动态优化机制,以此紧密跟随内外部环境的变迁,持续实现精准适配。该机制主要涵盖三条优化路径。

(1) 基于评估结果优化。定期对评估数据进行深度剖析,精准识别评估指标与方法存在的缺陷。若发现某些新风险未被现有指标覆盖,就应及时新增相关指标,确保评估的全面性;若评估方法主观性过强,可引入定量分析方法作为补充,提升评估的客观性与科学性<sup>[2]</sup>。

(2) 基于运营变化优化。当铁路运营场景、技术以及政策出现调整时,评估体系需同步更新。例如,新线路开通会带来新的运营条件与风险,落实新条例可能改变安全要求,此时都需新增相应指标。(3) 基于行业经验优化。密切跟踪国内外先进实践,积极借鉴优秀案例,不断丰富评估维度。优化流程应形成闭环,先提出建议,经专家论证、试点验证后再全面推广,避免盲目调整。

### 3.3 与其他管理体系的融合

铁路运营安全评估体系要实现高效运行,还需与现有管理体系进行深度融合,以此避免资源浪费与管理冲突,其融合方向主要有以下三个方面。一是与质量管理体系融合。将安全评估指标巧妙纳入质量管理目标体系之中,实现设备运维数据的共享共用。在开展质量管理审核工作时,同步检查安全评估的执行情况,确保安全与质量管理工作相互促进、协同发展;二是与环境管理体系融合。针对外部环境风险开展全面评估,共享生态环境监测数据,将环境指标有机纳入安全评估范畴,实现安全管理与环境保护的协同共进,共同保障铁路运营的可持续发展;三是与应急管理体系融合。把应急评估结果作为改进应急管理体系的重要依据,推动应急管理体系不断优化流程。同时,要统一数据标准与流程规

范,建立跨体系的数据共享平台,实现“一次评估、多体系应用”,提高管理效率。

#### 4 铁路运营安全评估模型与算法

##### 4.1 静态评估模型

静态评估模型适用于某一特定时间点的安全状态评估,核心是通过固定指标与权重实现风险量化,常用模型包括风险矩阵法、加权综合评价法。风险矩阵法以“风险可能性”(如设备故障发生概率)和“风险影响程度”(如事故造成的经济损失、人员伤亡)为二维坐标轴,划分4-5个风险等级(如低、中、高、极高),例如“信号机故障”可能性为“中”(每月1-2次),影响程度为“高”(导致列车延误1-2小时),判定为“高风险”,该模型简单直观,适用于基层部门快速风险排序。加权综合评价法需先通过层次分析法确定各指标权重(如人员模块权重0.3、设备模块权重0.3、环境模块权重0.2、管理模块权重0.2),再将指标实际值标准化(如将“设备故障率5%”标准化为0.2),通过“指标标准化值 $\times$ 权重”求和得出综合得分,得分越高安全水平越高,该模型可实现多指标综合量化,适用于季度、年度安全状态评估,如某铁路局年度综合得分为85分(满分100分),判定为“安全水平良好”。静态模型的优势是计算简便、结果稳定,缺点是无法反映风险动态变化,需与动态模型结合使用<sup>[1]</sup>。

##### 4.2 动态评估模型

动态评估模型适用于跟踪安全状态随时间的变化趋势,实现风险的实时预警,常用模型包括系统动力学模型、贝叶斯网络模型、机器学习预测模型。系统动力学模型通过构建“人-机-环-管”系统的因果反馈回路,模拟不同因素对安全状态的动态影响,如模拟“人员培训频率增加 $\rightarrow$ 违规操作率下降 $\rightarrow$ 事故发生率降低”的因果链条,预测未来3-6个月的安全趋势,为长期安全规划提供依据。贝叶斯网络模型基于概率推理,可处理不确定信息,如通过历史数据确定“设备老化”“维护频率”与“故障概率”的条件概率关系,当实时监测到“设备运行时长超5000小时”(老化信号)、“维护间隔超3个月”(维护不足)时,动态更新故障概率,实现风险实时预警。机器学习预测模型(如LSTM神经网络)则通过海量历史数据(如设备运行数据、人员操作记录、环

境数据)训练模型,预测未来短期内的安全指标变化,如预测未来7天的“列车正点率”“设备故障次数”,提前识别异常趋势,该模型适用于高铁等对实时性要求高的场景。动态模型的优势是能捕捉风险动态演变,缺点是对数据量、技术能力要求较高,需依托信息化平台支撑。

##### 4.3 算法优化方向

随着铁路智能化发展,铁路运营安全评估模型算法需朝“精准化、智能化、轻量化”优化,核心路径有三:一是多源数据融合算法优化。传统算法多依赖单一数据,未来要融合物联网数据(如轨道传感器、列车诊断系统数据)、气象数据、人员生物特征数据(如司机心率、疲劳度监测数据)等,借助联邦学习、数据融合算法(如卡尔曼滤波)处理多源异构数据,减少偏差、提升精度。例如融合轨道位移与降雨量数据,更精准预测路基塌陷风险;二是智能预警算法优化。现有算法多基于固定阈值预警,未来引入深度学习算法(如Transformer模型),实现基于趋势的预警,如分析设备故障频次“缓慢上升趋势”,提前1-2个月预警,提升预警提前量;三是轻量化算法优化。现有复杂模型(如深度学习模型)算力需求大,难在基层车站、列车终端部署,未来用模型压缩算法(如剪枝、量化),在保证精度前提下降低算力需求,如压缩LSTM模型部署在列车车载终端,实现实时风险评估。还要优化算法可解释性,通过SHAP值、LIME算法解释机器学习模型决策逻辑,让基层人员理解预警原因,提升算法应用接受度。

铁路运营安全评估体系构架研究意义非凡且极为重大,它如一座坚固的堡垒,精心构建起一套全面且科学的保障框架,全方位、无死角地守护着铁路运输安全。未来,伴随铁路智能化浪潮,评估体系必须与时俱进,融合多源数据、增强智能预警、达成算法轻量化,持续完善以贴合实际,筑牢安全防线。

##### 参考文献

- [1]吴璧君,姜阳,张建平,孟宏,魏众.高速铁路安全治理法律法规保障研究[J].综合运输,2022,44(02):33-37+61.
- [2]孙健,王玉玲.城市道路下穿高速铁路的关键技术研究[J].中国市政工程,2021,(05):77-81+119.
- [3]程伟,杨新华.铁路运营安全评估体系构架研究[J].铁道技术标准(中英文),2024,6(9):30-35.