

基于韧性治理理论的城市轨道交通信号系统风险管理问题与对策研究

王琦

中国矿业大学公共管理学院(应急管理学院) 江苏 徐州 221000

摘要:城市轨道交通信号系统面临诸多风险,传统管理模式存在局限。韧性治理理论聚焦系统应对扰动能力,与信号系统需求契合。本文分析其核心内涵与适用性,指出信号系统风险管理现状问题,从构建备用体系、强化抗干扰、打破信息孤岛等方面提出策略,并给出实施路径与保障措施,以提升信号系统韧性,保障轨道交通安全稳定运行。

关键词:城市轨道交通;信号系统;韧性治理;风险管理;实施路径

引言:城市轨道交通作为城市交通动脉,信号系统是其安全高效运行的关键。然而,自然灾害、设备故障等扰动频发,传统风险管理难以应对复杂风险。韧性治理理论强调系统应对扰动的综合能力,涵盖预防、响应、学习等阶段,与信号系统需求高度适配。研究基于韧性治理的信号系统风险管理,对提升系统韧性、保障轨道交通安全稳定运行意义重大。

1 韧性治理理论的核心内涵与适用性分析

1.1 韧性治理理论的核心要素

韧性治理聚焦于系统在遭遇各类扰动时的综合应对能力,这种能力体现在吸收冲击、快速恢复以及持续适应的完整链条中,贯穿于灾前预防、灾中响应以及灾后学习提升的各个阶段^[1]。从关键维度来看,冗余性是韧性治理的重要支撑,它意味着系统需配置一定数量的备用资源,当部分组件出现故障或遭受破坏时,备用资源能够迅速投入使用,保障系统基本功能的正常运行。鲁棒性则强调系统具备强大的抗干扰能力,无论面对何种外部干扰,都能维持自身结构的稳定与功能的正常发挥。灵活性要求系统能够根据扰动情况的变化,动态调整自身的运行策略与资源配置,以更好地适应新环境。学习性注重系统从过往经历中汲取经验教训,通过反馈机制不断优化自身的运行模式与应对策略,实现能力的持续提升。协同性突出多元主体之间的紧密合作,在面对复杂扰动时,不同主体能够打破壁垒,共享信息、协同行动,形成强大的治理合力。在治理模式上,韧性治理摒弃了传统的被动应对方式,转向主动适应。它借助多元主体的协同合作、先进技术的赋能以及制度层面的创新,全方位提升系统的韧性水平,使系统在面对不确定性与风险时更具韧性与活力。

1.2 韧性治理理论在城市轨道交通信号系统中的适用性

城市轨道交通信号系统具有显著的技术复杂性,涉及众多精密设备与复杂算法;同时对运行环境高度依赖,环境因素的变化可能直接影响其性能;并且各子系统之间网络关联紧密,一个环节出现问题可能引发连锁反应。这些特征使其极易受到自然灾害、设备故障、人为攻击等多种扰动的冲击。而韧性治理理念与城市轨道交通信号系统的需求高度契合。通过冗余设计,为关键设备与环节配备备用组件,可增强系统在故障发生时的稳定性;借助智能监测技术,实时掌握系统运行状态,及时发现潜在风险;运用动态调度策略,根据实时情况灵活调整信号控制,提升系统的抗干扰能力。这些手段与韧性治理的预防、响应、学习逻辑紧密相连,能够有效提升城市轨道交通信号系统的韧性水平。

2 城市轨道交通信号系统风险管理的现状与问题

2.1 信号系统风险管理的传统模式

在城市轨道交通信号系统风险管理的传统模式中,风险识别环节主要聚焦于设备故障、信号干扰、人为操作失误等相对固定的静态风险^[2]。这些风险类型基于过往经验总结得出,对于常规运营场景下的风险把控具有一定作用。然而,对于极端天气引发的信号设备损坏、网络攻击导致的系统瘫痪等动态扰动,传统模式缺乏有效的预判机制,难以提前识别潜在风险。风险评估方面,传统模式过度依赖历史数据与经验模型。历史数据虽能反映部分风险规律,但面对非线性风险,如级联故障这类一个故障引发多个相关故障连锁反应的情况,难以准确量化其传播路径与影响范围。经验模型在应对复杂多变的实际场景时,也存在局限性,无法全面、精准地

评估风险程度。风险应对策略上，传统模式以“事后修复”为主导。当风险事件发生后，才对受损设备或系统进行修复，缺乏“事前预防—事中协同—事后优化”的全周期管理机制。这使得系统在面对风险时较为被动，无法在风险萌芽阶段就采取有效措施加以遏制，也难以在风险处置过程中实现多部门、多环节的协同合作，更无法在事后对管理策略进行优化完善。

2.2 韧性治理视角下的关键问题

从韧性治理视角审视，城市轨道交通信号系统存在诸多关键问题。冗余性方面，关键设备如区域控制器、通信链路等缺乏备用方案。一旦这些关键设备出现故障，由于没有备用设备及时顶替，极易引发系统瘫痪，严重影响轨道交通的正常运营。协同性层面，信号系统与车辆、轨道、供电等子系统间信息流通不畅，存在明显的信息孤岛现象。这使得在面对风险扰动时，难以有效阻断扰动传播路径，一个子系统的问题可能迅速蔓延至其他子系统，扩大风险影响范围。学习性上，风险数据分散存储，缺乏统一整合与分析。在学习性方面，风险数据分散存储的问题较为突出，这直接导致数据缺乏统一整合与分析。而现有的分析工具，在应对这一状况时也显得较为落后，难以从海量的历史事件数据中提取有价值的风险规律。如此一来，便无法基于这些规律优化管理策略，进而提升系统应对风险的能力。适应性方面，面对5G干扰、人工智能攻击等新型风险，现有技术体系与管理制度更新速度缓慢，无法及时适应新风险特征，导致系统在面对新型风险时防御能力不足。

3 基于韧性治理的信号系统风险管理策略

3.1 构建多层次备用体系

在硬件层面，于关键节点进行双链路通信部署，同时配备备用电源以及冗余控制器。双链路通信可保证在一条通信链路出现故障时，另一条链路能迅速接替工作，维持信号传输的稳定性。备用电源能在主电源供电中断时及时供电，避免信号系统因断电而停止运行。冗余控制器的设置则确保单个控制器故障时，其他控制器可无缝衔接，保障整体运行不受影响。为提升硬件备用体系的可靠性，需对所有备用设备进行定期巡检与模拟故障测试，确保在实际故障发生时能精准响应^[3]。软件方面，开发智能切换算法至关重要。该算法能够实时监测主备系统状态，当主系统出现异常时，自动实现主备系统的无缝切换，将故障恢复时间大幅缩短，降低对轨道交通运营的影响。网络冗余需设计多路径信号传输网络。通过构建多条不同的信号传输通道，避免因单一通道出现阻塞或故障，导致信号无法正常传输，进而引发

信息中断，保障信号传输的可靠性与稳定性。

3.2 强化抗干扰能力

技术升级是抵御外部干扰的关键。采用抗电磁干扰、防篡改的加密通信协议，可有效防止外部信号对信号系统的干扰以及恶意攻击，确保信号传输的准确性与安全性。同时搭配信号滤波技术，进一步过滤杂波信号，提升核心数据传输的纯净度。针对环境因素，要依据不同地区极端天气特点，优化设备防护等级。例如在高温地区，选用耐高温材料与散热性能良好的设备，可使设备在50摄氏度以上高温环境下仍能稳定运行；在沙尘地区，增强设备的防尘密封性能，保证信号系统在沙尘浓度达到500毫克每立方米以上的恶劣环境下仍能稳定运行。动态监测方面，部署分布式传感器网络。这些传感器分布在信号系统的各个关键部位，实时监测设备状态与环境参数。一旦发现异常，能及时发出预警，使运维人员提前采取措施，预防潜在风险演变为实际故障，分布式传感器网络使潜在风险预警时间提前至少15分钟。

3.3 打破信息孤岛

数据共享需建立跨子系统的平台，依托云计算与大数据技术搭建安全可靠的数据交互架构，实现信号、车辆、轨道、供电等数据的实时交互与融合分析，打破各子系统间的数据壁垒，为协同调度与应急联动提供全面、精准的数据支撑。协同调度要开发智能调度算法。此算法根据扰动类型，如设备故障、客流激增等，动态调整信号配时与列车运行计划。在设备故障时，合理调整信号，引导列车避开故障区域；客流激增时，优化列车运行间隔，提高运输效率。应急联动需制定跨部门应急预案。明确信号系统与其他子系统，如消防、医疗等的协同响应流程，确保在突发事件发生时，各部门能迅速、有序地开展救援工作。

3.4 构建闭环反馈机制

风险数据库整合历史风险事件数据，建立分类标签与关联分析模型。通过对大量历史数据的分析，挖掘风险传播规律，为风险评估与应对提供参考。数据库需实现数据的实时更新与多维度检索，涵盖风险事件的发生时间、地点、原因、处置过程及结果等全要素信息，同时支持与实时监测系统的数据对接，实现历史数据与实时数据的融合分析。智能分析利用机器学习算法预测风险发生概率与影响范围。基于历史数据与实时监测信息，机器学习算法能对风险进行精准预测，为决策提供科学的数据支持。可引入多种算法模型进行对比优化，选取预测精度最高的模型作为核心分析工具，并配备算法监测模块，实时监控算法运行状态，确保预测结果的

可靠性。迭代优化根据风险处置效果反馈,动态调整管理策略与技术参数。形成“识别—评估—应对—优化”的闭环,不断提升信号系统应对风险的能力。建立专门的反馈评估小组,对每次风险处置工作进行全面复盘,量化处置效果,结合评估结果制定针对性的优化方案,同时将优化措施纳入后续的管理规范与技术标准,实现管理体系的持续完善。

3.5 推动技术与管理创新

技术适配研发适应新型风险的信号系统技术体系,立足前瞻性风险防控需求,加强产学研协同创新。针对量子通信干扰、自动驾驶协同等新型风险,开展专项技术与成果转化应用,确保信号系统能适应未来轨道交通智能化、无人化发展趋势。制度创新建立弹性化管理制度,结合实际运营场景细化调整权限与流程。允许在扰动期间临时调整信号配时、列车编组等运营规则,提高系统应对突发情况的灵活性。人员培训开展韧性治理理念培训,定期组织实战化应急演练强化实操能力。提升运维人员对复杂风险的识别与处置能力,使其在面对风险时能迅速、准确地采取应对措施,保障信号系统的安全稳定运行。

4 实施路径与保障措施

4.1 实施路径

在短期规划中,首要任务是完成关键设备的冗余改造工作。针对城市轨道交通信号系统里那些对运行起着关键作用且易出现故障的设备,通过增加备用设备、优化设备布局等方式,提升系统在面对设备故障时的冗余能力。同时,部署智能监测系统,利用先进的传感器与数据分析技术,对信号系统的运行状态进行实时监测,及时发现潜在风险。此外,建立初步的数据共享平台,打破信号系统内部以及与其他相关子系统间的数据壁垒,实现基础数据的初步共享与交互^[4]。中期阶段,重点在于实现跨子系统的协同调度。通过开发先进的智能调度算法与协同管理平台,使信号系统能够与车辆、轨道、供电等子系统实现高效协同,根据实际运营情况动态调整运行策略。大力推广智能分析工具,借助机器学习、大数据分析等技术,对信号系统运行数据进行深度挖掘,为风险评估与决策提供科学依据。并且,对应急预案进行持续优化,提高预案的针对性与可操作性。长

期来看,要构建全周期韧性治理体系。从信号系统的规划、设计、建设、运营到维护,全流程融入韧性治理理念,形成技术、管理、制度协同创新的良好生态,不断提升信号系统应对各类风险的能力。

4.2 保障措施

组织保障方面,成立跨部门韧性治理专项小组。该小组由信号系统运维部门、技术研发部门、管理部门等多部门人员组成,明确各成员职责分工,建立高效协作机制,定期召开会议协调推进,确保各项工作顺利推进。资金保障上,设立专项基金。此基金专门用于支持冗余设备采购、技术升级以及人员培训等与韧性治理相关的工作,为实施路径的落实提供坚实的资金后盾。技术保障层面,与高校、科研机构展开深度合作。借助高校与科研机构的专业人才与先进技术,开展韧性治理关键技术研发,攻克技术难题,为信号系统韧性提升提供技术支撑。文化保障方面,培育“预防为主、协同共治”的韧性文化。通过开展培训、宣传等活动,提升全员风险意识,使全体人员充分认识到韧性治理的重要性,积极主动参与到信号系统风险管理工作中。

结束语

基于韧性治理理论的城市轨道交通信号系统风险管理研究,为应对系统面临的风险提供了新思路。通过构建多层次备用体系、强化抗干扰能力等策略,可有效提升系统韧性。实施路径与保障措施的规划,确保了策略的落地实施。持续推进相关工作,有助于保障城市轨道交通信号系统安全稳定,为城市交通的顺畅运行提供坚实支撑,推动城市轨道交通事业高质量发展。

参考文献

- [1]张清波,孟亚楠,巩圣亮,等.城市轨道交通行车安全管理中设备老化问题及维护对策[J].时代汽车,2025(12):19-21.
- [2]许永顺.城市轨道交通信号系统有线通信网络的服务质量策略[J].城市轨道交通研究,2024,27(11):53-57.
- [3]郭京威.基于通信技术的城市轨道交通信号控制系统研究[J].铁路采购与物流,2024,19(07):53-55.
- [4]王德文,葛健,费瑞东等.城市轨道交通信号系统的信息安全[J].运输经理世界,2022,(13):139-141.