

轨道交通信号安全风险识别与防控体系建设

周智超

徐州地铁运营有限公司, 中国·江苏 徐州 221000

摘要: 轨道交通信号系统是保证列车安全运行的重要基础设施, 它的安全性同乘客的生命财产安全以及城市公共交通秩序的稳定有着直接的关系。伴随着我国轨道交通网络规模不断扩大、列车运行密度不断增大, 信号系统所面临的安全风险也越来越复杂, 传统的事后处理模式已经不能适应现代化运营管理的要求了。本文从轨道交通信号系统安全风险的特征入手, 对信号安全风险主要类型及成因机制进行了梳理, 从技术防控、管理机制、应急响应三个方面构建起一个多层次的防控体系架构, 并且根据目前行业的实际情况提出了一些建设性的建议。研究表明, 创建起以风险识别为先决条件、以技术控制为基础、以制度管理为保证、以应急响应为依托的综合性管控体系, 是改善轨道交通信号安全管理水平的一种方式。

关键词: 轨道交通; 信号系统; 安全风险识别; 防控体系

Rail transit signal safety risk identification and prevention and control system construction

Zhou Zhichao

Xuzhou Metro Operation Co.,Ltd, China Jiangsu Xuzhou 221000

Abstract: Rail transit signal system is an important infrastructure to ensure the safe operation of trains. Its safety is directly related to the safety of passengers' lives and property and the stability of urban public transport order. With the continuous expansion of the scale of China's rail transit network and the increasing density of train operation, the safety risks faced by the signal system are becoming more and more complex, and the traditional post-processing mode has been unable to meet the requirements of modern operation management. Starting from the characteristics of the safety risk of rail transit signal system, this paper sorts out the main types and causes of the signal safety risk, builds a multi-level prevention and control system architecture from three aspects of technology prevention and control, management mechanism and emergency response, and puts forward some constructive suggestions according to the actual situation of the current industry. The research shows that the establishment of a comprehensive management and control system with risk identification as the prerequisite, technical control as the basis, system management as the guarantee, and emergency response as the basis is a way to improve the level of rail transit signal safety management.

Keywords: Rail transit; Signal system; Safety risk identification; Prevention and control system

0 引言

轨道交通是城市客运的骨干形式, 承担着大运量、高密度的旅客运输任务, 信号系统是保证轨道交通安全有序运行的中枢神经系统。信号系统包含列车自动控制(ATC)、联锁系统、调度集中系统等许多子系统, 任何一个子系统出现故障或者失效都会造成列车晚点、冲突甚至事故。近些年来, 国内外轨道交通领域由于信号系统故障造成的运营中断事件频发, 暴露出信号安全管理工作在风险识别、隐患排查、应急处置等各方面的不足。目前我国城市轨道交通运营线路总长已经突破了1万公里大关, 运营的城市已经超过55个, 高强度的网络化运营给信号系统安全、可靠地运行带来了更高的要求。同时信号系统技术更新加快、设备接口越来越复杂、网络化架构引入了新

的威胁, 使风险防控工作所遇到的困难也越来越多。在此情况下, 对信号安全风险进行系统的识别研究, 并创建起一套科学完备的防控体系, 有着十分重要的理论价值和现实意义。

1 轨道交通信号安全风险的类型与成因

轨道交通信号安全风险包含设备硬件、软件系统、人员操作、外部环境、网络安全等各个方面的内容, 各种风险互相联系、互相影响, 具有复合性和系统性。从设备角度来讲, 信号系统一直处在高负荷运转的状态之中, 轨道电路、应答器、车载设备、地面控制器等关键部件随着服役年限的增长, 器件老化、绝缘性能变差、接触件松动等情况开始出现, 而且由于列车运营时间窗口有限, 设备定期维护很难做到彻底全面, 潜在隐患容易被积累下来而延

误,软件层面的风险也不能忽略,现代信号系统高度依赖计算机控制和逻辑运算,软件版本更新、参数配置失误、逻辑判断出错等问题一旦在系统运行时发生,会引发控制指令异常或者防护功能失灵,软件类故障常常隐蔽且排查起来比较困难,人员因素是信号安全风险中最为不确定的因素之一,操作人员对于规程的理解有误、疲劳状态下误操作、维修作业中安全卡控不到位,都会对信号系统的正常运作造成干扰,外部环境上,雷击、洪涝、地震等自然灾害对地面以及地下信号设备造成的损害不能小视,电磁干扰源增多也给信号传输带来了持续的威胁,信号系统网络化、智能化程度不断提高,系统对外部网络的依赖度提升,网络攻击、数据篡改、非法入侵等信息安全风险也成了轨道交通信号安全管理中不可避免的新型风险来源。从以上可以看出,各种风险并不是孤立存在的,设备故障由于维护不到位会变大,人员操作失误由于管理制度不健全会频繁发生,网络安全威胁由于防护手段落后而难以应对,多种风险的叠加和耦合使得信号安全管理的复杂程度大大增加,必须从系统的角度来整体把握。

2 信号安全风险识别方法与体系框架

2.1 基于故障模式与影响分析的风险识别方法

故障模式与影响分析(FMEA)是轨道交通信号安全风险识别中使用最广的定量和定性相结合的方法之一。该方法通过系统地列举出系统各个功能单元可能出现的各种故障模式,对每一个故障模式所造成的上级系统或者整个运营的安全影响程度进行分析,并结合发生概率和可探测性来确定风险的优先级顺序,从而为维护策略的制定和防控资源的分配提供依据。信号系统的FMEA一般用子系统作为分析单位,对联锁逻辑、列车检测、速度控制等主要功能模块分别建立故障树和影响矩阵,把定性描述同风险优先数(RPN)计算结合起来,找出高风险的故障模式。城市轨道交通ATP(列车自动防护)系统里速度超限时没有触发制动的故障模式RPN值一般较高,应该被当作重点防控对象进行管理。实践当中FMEA的有效性很大程度上取决于分析团队对系统结构、历史故障数据是否熟悉,因此需要建立信号系统故障数据库,搜集到足够的失效案例作为分析的参考,并且要不定期对FMEA结果加以回顾更新,从而适应设备技术状况的变化。

2.2 基于运营数据的动态风险监测机制

随着轨道交通信号系统数字化程度的提高,大量的运营数据可以实现实时采集、分析,给动态风险监测赋予了新的技术途径。将车载数据记录仪(DRU)、地面监测设

备、SCADA系统等所获取的数据加以整合后,便能够达成对于信号设备运行状况的持续监测,从而迅速察觉到设备性能出现劣化之前发出的预警信号。轨道电路分路灵敏度渐进性下降、应答器报文误码率周期性波动、列车定位偏差统计趋势异常等都可以作为风险预警的特征指标,在设备实际失效之前发出检修指令。基于机器学习的异常检测算法在该领域有较好的应用前景,用历史正常的运行数据建立基线模型,可以自动识别出偏离正常范围的状态特征,从而帮助维护人员判断隐患等级和处置优先级。但是数据驱动的方法有效与否要取决于数据的质量以及标注样本的数量,实际使用中会遇到数据采集不完全、故障样本少、模型泛化能力差等问题,需要依靠领域知识和专家经验来加以补充和完善,从而形成一种数据驱动和机理分析相结合的混合监测方式。

2.3 人因风险识别与管控路径

人因风险在信号系统安全事件中所占比例较大,人因风险识别和管控是防控体系建设中不可缺少的环节。人因风险的识别一般使用任务分析法(HTA)、认知可靠性与错误分析方法(CREAM)等工具来拆解信号维修、调度操作、应急处置等典型的作业场景里人员行为的步骤,找出认知负荷过大、操作界面设计不合理、规程描述不清等造成失误的薄弱环节。管控路径上应该从工程、管理、培训这三个层次一起发力,即从工程层面优化人机界面设计,减少操作歧义,增加防误操作锁闭装置;从管理层面完善作业票制度和双人复核机制,加强关键作业的安全卡控;从培训层面针对不同的岗位设计贴近实际场景的应急演练,提高人员在复杂工况下应对能力及规范操作水平。另外建立人因事件报告和学习制度,鼓励一线员工如实反映操作失误和险兆事件,在无惩罚的环境中收集信息,从组织、文化等层面找出系统的隐患,这是不断改进人因风险水平的有效途径。

3 信号安全防控体系的建设路径

3.1 技术防控体系的构建

信号安全技术防控体系的中心就是依靠冗余设计、故障导向安全原则和主动健康管理手段,把信号系统安全失效的概率控制在可以接受的范围内。冗余设计属于信号安全的基础性保障,对安全关键功能采取双机热备或者三取二表决的架构,保证单点故障不会造成系统的崩溃;故障导向安全原则是指系统在任何不确定或者异常的情况下,自动切换到最保守的安全模式(紧急停车或者降级运营),而不是保持正常功能,该原则已经在ATP、联锁等安全防

护系统中得到了应用。主动健康管理 (PHM) 属于近些年来技术防控范畴内的重要发展, 它是在设备的关键部位装设传感器, 借助振动分析, 热成像, 电气参数监测等技术手段, 对设备的剩余使用寿命实施预测性评价, 进而把传统的定期预防性维护转变为以状态为基础的预测性维护, 显著削减非计划停机和过量维修。网络安全防护要参照 IEC62443 等工业控制系统安全标准, 对信号系统实行分区分域管理, 在信号内网和外部网络之间设置工业防火墙和入侵检测系统, 创建信号系统专用的安全审计和漏洞管理系统, 阻止网络侧的威胁渗透到信号控制层, 塑造起物理层、网络层和应用层的纵深防御体系。

3.2 安全管理制度的完善

技术手段的有效发挥需要有完善的制度作为保障, 制度层面的建设是信号防控体系不可缺少的部分。从制度架构上来说, 应当以安全管理体系 (SMS) 为总纲, 把信号安全风险管理融入到企业的整体安全管理体系当中, 确定各个层级的安全责任划分, 创建起风险登记册制度, 从而达到对已识别风险实施动态跟踪并完成闭环管理的目的。维护管理制度上要创建起信号设备整个生命周期的档案管理机制, 明确设备台账、检修记载、故障处置报告等填写标准和归档程序, 给数据驱动的风险分析赋予可靠的基础数据支撑。信号系统的软件更新、参数修改、设备更换等变更工作一直被视为高风险环节, 在执行变更之前必须按照变更审核和测试验证程序来进行, 每一项变更都要有充分的仿真测试和现场检验作为依据, 保留完整的变更记录。另外定期对运营数据进行安全绩效分析, 把信号故障率、晚点率、危险事件数等重要安全指标纳入绩效考核体系, 用数据化的方式推动安全管理由经验驱动转向证据驱动, 从而提高制度执行的准确性、有效性。

3.3 应急响应机制的优化

应急响应机制属于信号安全防控体系的最后一道防线, 响应速度以及处理情况会牵涉到信号故障事件造成的影响力大小及危害程度。一套完善的信号故障应急响应机制应该具有快速判断、分级响应、协同处置和事后复盘这四个主要功能。快速判断上, 调度指挥中心要装备信号系统状态可视化监测平台, 当出现故障报警时, 能立刻找到故障所在位置和类型, 并依照预案库里的故障处置流程图来做出初步判定, 从而缩减从故障被察觉到开始执行处置措施的时间段; 分级响应上, 应依照故障影响范围和安全风险等级创建分级响应制度, 明晰各个等级所对应的责任主体、处置权限以及上报请求, 防止因为响应层级混乱而

造成处置速度慢下来; 协同处置上, 信号、行车、维修、客运等各专业之间要创建起信息共享和协作界面, 在网络化运营情况下, 跨线路故障波及范围大, 跨部门协调尤其重要; 事后复盘上, 每次信号故障处置结束之后, 都要开展原因剖析和经验总结工作, 把处置过程里出现的问题反馈给制度改良和技术改善环节, 创建起“应急处置 - 经验提炼 - 体系改善”的闭环迭代体系, 不断加强应急响应的整体效能。

3.4 信息化平台对防控体系的支撑作用

信息化平台是把上面提到的技术防控、管理制度、应急响应三者有机结合起来的载体, 是现代轨道交通信号安全防控体系达到整体效能最大化的重要支撑。目前, 一些先进的轨道交通运营企业已经开始建设信号系统综合健康管理平台, 用统一的数据接口标准把车载、地面、机房等各种设备的数据汇集起来, 从而达到对信号系统运行状态的全方位、实时监控的目的。从数据应用的角度出发, 平台把故障诊断专家系统、风险预警模型以及维修工单管理模块融合起来, 从而达成从状态监测到维修调度的全过程数字化治理, 进而切实加强信号维护工作中的计划性与针对性。从安全管理角度来说, 信息化平台可以承担起风险登记册的创建和维护、隐患排查整改的追踪以及安全绩效统计分析等任务, 从而达成安全管理工作的留痕可追溯和数据可视化的目的, 进而给管理决策赋予即时参照。从应急响应角度来说, 平台可以和调度指挥系统进行深度整合, 使故障信息能够自动推送出去, 应急预案可以一键调阅, 处置进度也可以实时更新, 从而缩减信息传递过程中的时间浪费。从更长远角度来说, 伴随着数字孪生、人工智能等技术的不断发展, 以信号系统数字孪生模型为基础的仿真推演和智能预测能力将持续扩大信息化平台的能力范围, 给信号安全防控赋予愈加前瞻性技术支撑, 促使轨道交通信号安全管理朝着智能化、主动化的方向前进。

4 结语

轨道交通信号安全风险识别和防控体系是系统工程, 包含技术、管理、人员、信息化等各方面共同推进。本文对信号安全风险类型及成因进行了梳理, 用 FMEA 分析、运营数据监测、人因风险识别等方法体系进行研究, 并从技术防控、管理制度、应急响应、信息化平台四个方面提出防控措施, 为现代轨道交通信号安全管理提供一个综合性的防控体系框架。研究表明, 单一种类的技术手段或者管理措施不能很好地应对目前信号安全风险的多样化、复杂化趋势, 只有坚持风险全面识别、技术主动防控、制度

规范约束、信息资源整合相结合的综合治理思路，才能真正提高信号系统的安全保障水平。轨道交通智能化发展越来越深入，信号安全防控技术在人工智能辅助决策、数字孪生仿真验证、网络安全主动防御等方面会出现新的成果，相关的防控体系也会不断升级以满足轨道交通行业的高质量发展需求。

参考文献：

[1] 张克礼. 城市轨道交通行车安全管理体系构建与风险防控策略分析[J]. 运输经理世界, 2025(15): 1-3.

[2] 李承叡. 城市轨道交通信号系统安全风险辨识与控

制对策研究[D]. 北京交通大学, 2022.

[3] 刘晓, 黄鸿, 曹辉. 轨道交通信号系统风险定量评价和安全预警系统研究[J]. 铁路技术创新, 2024(11): 92-97.

[4] 蒋圣超. 城市轨道交通信号系统安全风险评价研究[J]. 科技创新与应用, 2025(31): 69-70.

[5] 陈佳民. 轨道交通信号系统信息安全风险监测方法研究[D]. 北京交通大学, 2018.

作者简介：周智超（1989.01-），男，汉族，江苏徐州人，本科，中级工程师，研究方向：城市轨道交通信号方向。