 DOI: https://doi.org/10.12349/iser.v7i7.11393

Research on Safety Protection Measures for Urban Rail Transit Signal Systems

Hong Ye

Chongqing Rail Transit Operation Co., Ltd. Operations Branch II, Chongqing, 400010, China

Abstract

Urban rail transit construction has become a critical component of infrastructure development and urban planning in major cities. The safety of traffic signal systems directly impacts passenger safety and the operational efficiency of urban transportation networks. However, practical implementation still faces certain risks that may compromise system functionality. Relevant enterprises must prioritize safety protection measures, identify potential hazards, and enhance system reliability and stability. This study begins by examining the composition and operational characteristics of urban rail transit signaling systems, systematically analyzes current technical, managerial, and environmental risks associated with these systems, proposes targeted safety safeguards, and establishes a comprehensive, multi-tiered, intelligent security framework for signaling systems to serve as a reference for stakeholders.

Keywords

urban rail transit; traffic signal system; safety protection

城市轨道交通信号系统安全防护措施研究

叶洪

重庆轨道交通运营有限公司运营二分公司，中国 · 重庆 400010

摘　要

城市轨道交通建设已经成为各大城市基础设施建设、规划内容中的重要基础。交通信号系统的安全性直接关系到广大乘客的生命安全与城市交通的运行秩序。但是在具体运行中还面临着一定风险，威胁到系统功能的发挥。相关企业需要重视安全防护工作的建设，排查风险隐患，提高系统运行的安全性和稳定性。在本文研究工作中，从城市轨道交通信号系统的组成与运行特点入手，系统分析了当前信号系统面临的技术风险、管理风险及外部环境风险，提出针对性的安全防护措施，构建全方位、多层次、智能化的信号系统安全防护体系，以供相关人员参考。

关键词

城市轨道；交通信号系统；安全防护

1 引言

城市轨道交通信号系统向车车通信、全自动运行等方向演进，虽然提升了运行效率，但也使信号系统面临更加复杂的安全威胁。一旦信号系统出现故障或遭受攻击，可能导致列车晚点、停运，甚至引发列车碰撞、脱轨等重大安全事故，造成严重的人员伤亡和财产损失，影响城市正常运行秩序。因此，深入研究城市轨道交通信号系统的安全防护措施，构建科学完善的安全防护体系，是促进城市轨道交通系统稳定运行的关键。相关单位需要提高重视，针对风险采取适当措施，解决存在的影响因素。

【作者简介】叶洪（1973–），男，中国重庆人，本科，工程师，从事城市轨道电务研究。

2 城市轨道交通信号系统的概述

城市轨道交通信号系统是一个复杂的网络化系统，主要由列车自动监控系统、计算机联锁系统、列车自动保护系统和列车自动运行系统等子系统组成。其核心工作原理是在列车与地面设备之间建立连续的无线通信链路，实时传输列车位置、速度、运行方向等信息，从而实现移动闭塞条件下的安全列车追踪间隔控制 [1]。城市轨道交通信号系统的运行具有实时性强、可靠性要求高、复杂性高、环境适应性要求高的显著特点，对安全防护工作提出了更高的要求。

3 城市轨道交通信号系统面临的安全风险

3.1 技术风险

信号系统的技术风险主要源自设备的生命周期特性，以及所处的复杂电磁环境。一，硬件设备老化和可靠性问题是常见的技术风险之一。硬件设备处于全天候连续运行状态，电子元器件和机械部件性能退化是不可避免的情况。随

着使用年限增长，设备硬件逐渐老化、软件运算能力不足等问题越来越突出。例如，车载信号设备故障可能导致列车无法接收轨旁指令，失去速度监控和制动功能引发安全事故[2]。信号机显示异常会导致驾驶员误判行车条件。据相关统计，设备故障占城市轨道交通信号系统安全故障的 60% 以上，严重影响了轨道交通系统的安全稳定运行。

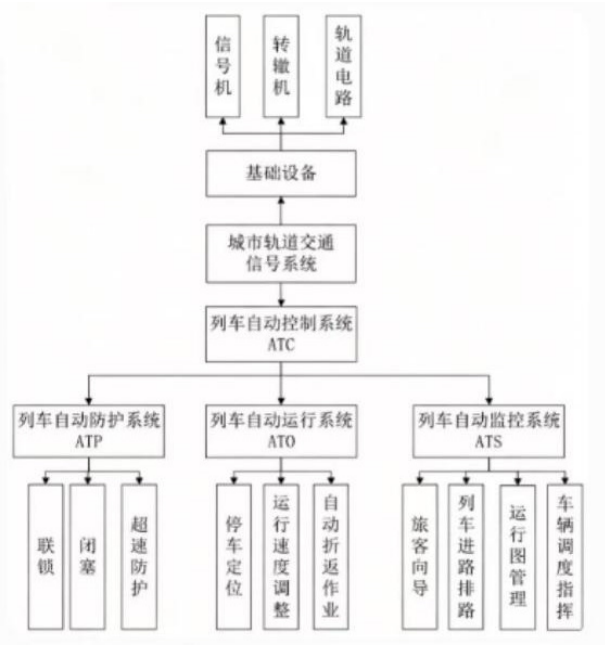


图 1 城市轨道交通信号系统构成

二，软件风险。软件风险主要源于信号系统、软件设计、开发、测试等环节存在的漏洞和缺陷。现阶段软件系统复杂度不断提升，涉及的代码量大幅增加，容易出现设计漏洞、逻辑错误等问题。例如，CBTC 系统的软件若存在逻辑漏洞，可能导致列车位置计算错误和速度控制异常，引发列车碰撞事故。

三，通信故障风险。信号系统的正常运行依赖于稳定的通信网络，一旦通信网络出现故障，将会导致信号传输中断，影响到列车的控制和调度管理。例如，车地通信采用无线通信技术，容易受到电磁干扰的影响，导致通信中断或者信号丢失，增大碰撞风险。

3.2 网络安全风险

网络安全风险主要体现为无线通信信道的脆弱性、系统间隔离不足等不同情况。当前主流信号系统采用 CBTC 技术架构，车地之间的双向无线通信网络是保障列车安全高效运行的核心环节。信号受到干扰，数据包延迟传输甚至堵塞，将会增加撞车风险。系统间隔离不足和内部安全威胁同样存在。随着信号系统以各种方式与综合监控系统、语音广播等公共网络互联，病毒、木马等威胁容易向信号系统扩散。区域间未设置有效的访问控制措施，内外部边界隔离不足，一旦某个系统网络遭受病毒感染，恶意扫描探测程序可能会贯穿整个信号系统网络，形成风暴式攻击危害[3]。此外，内部人员越权访问、误操作、违规操作等威胁，也不容忽视。

3.3 外部环境风险

城市轨道交通信号系统，还面临着一定的外部环境风险。自然环境如台风、雷电、洪水、暴雨等自然灾害，会对下河系统带来一定的影响。导致信号中断，设备损坏，系统无法正常运行。同时还存在电磁干扰风险，主要源于周边电磁环境对信号系统的影响，导致信号传输异常和设备故障。此外还包括人为破坏风险，部分人员因故意或者无意的破坏，导致信号系统、设备、线路或通信网络遭受一定的破坏和影响，引发信号中断。

4 城市轨道交通信号系统的安全防护措施

4.1 基于数字孪生的预测式安全管理

在城市轨道交通信号系统的安全防护工作中，可充分应用数字孪生技术，构建与物理系统高度一致的虚拟映射模型，实现对信号系统运行状态的实时监测、健康评估以及故障预测，从传统的故障后响应转为故障前干预。

一，在设计阶段进行预判性防控。数字孪生仿真技术可以还原不同运营场景，例如极端冲突客流突变，设备故障等情况，精准预判设计方案中可能存在的安全隐患，优化设计细节[4]。

二，在运维阶段开展预测性维护工作。将物理信号设备的运行数据实时同步至数字孪生平台，通过内置算法分析设备的运行趋势，精准预测设备老化、性能衰减，以及隐性故障的发生时间和影响范围，提前制定维修计划。

三，应急阶段的预测性安全防护工作。数字平台开展对全系统的运行监控工作，当监测到异常数据时，自动模拟故障演化的过程，推导各种处理方案的效果，选出最优方案。

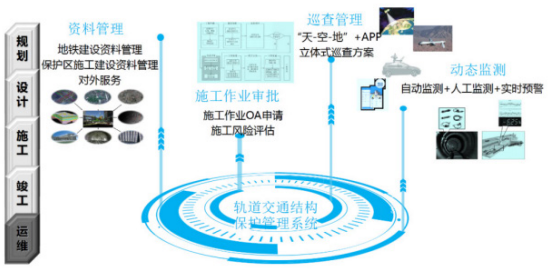


图 2 检测全过程

在具体应用中，通过构建线路及数字孪生环境，研发硬件无感检测与软件智能测试结合的工具矩阵，可以破解传统状态评估中存在的一系列难题。覆盖大铁、城轨、货运全领域，能够预判设备健康状态，规避延误事故，降低维修成本。

4.2 应用内生安全理念，建设防护体系

内生安全理念的核心在于重新定义安全和系统的关系，在传统思路中，安全指的是在设计好系统之后，再添加防火墙、入侵检测等防护模块。内生安全指的是将安全内置于

系统架构的每一层，使其成为系统不可分割的内在属性。在内生安全理念的融入下，推动功能安全与网络安全的有效融合，解决结构性缺陷。

一，构建信号系统内生安全架构，在硬件设计、软件开发阶段嵌入内生安全机制。硬件层面可采用异构冗余设计和动态重构结合的方式，通过不同架构、不同厂家的硬件模块冗余部署，当某一模块被攻击或者出现故障时，系统可自动重构硬件链路，确保了核心功能不中断[5]。软件方面，引入动态目标防御技能，定期随机调整软件运行参数和代码逻辑，从根源上提升系统的抗攻击能力。

二，将内生安全理念覆盖全生命周期，强化安全管理体系的建设。打破系统内部各模块之间的无条件信任关系，将身份验证、行为审计和持续监控内置于每一处数据交换和指令执行中，形成系统性防御，有效规避存在的网络安全隐患。

4.3 多制式协同防护机制的建设

城市轨道交通网络化发展对信号系统提出了更高要求，传统的防护模式已经无法满足需求，因此要实现不同线路、不同制式的多系统互联互通。一是建立多制式信号系统协同防护标准。统一相应的安全防护规范、数据接口和联动机制，确保互联互通场景下的信号安全。同时还要构建跨线路、跨系统的联动平台，整合各线路信号系统、行车调度系统等数据。可以实现跨系统的识别和联动处置，有效规避安全隐患，保障系统的安全稳定运行。

同时还要重视云边协同架构的建设，将安全功能按时效性和计算需求在云边端之间进行动态分配，实现安全防护的去中心化和本地化。传统观念认为，安全关键功能必须部署于专用硬件设备，而云车融合架构，则证明安全功能是可以“上云”，前提是云平台本身要具备足够的安全等级和冗余设计。

在具体应用中，该模式的优势主要体现在边缘响应和云端智能的分工协作方面。紧急制动、列车追踪间隔保障等安全功能对实用性要求最高，部署于边缘节点，确保毫秒级的安全响应。全局性的威胁分析、跨线路的安全协同以及基于大数据的风险评估则上浮至云端，依托更强的算力，实现更智能的决策。

4.4 打造人机环协同机制，实现全维度防护

在城市轨道交通信号系统的安全防护工作中，一般聚焦于软件和设备，而忽略了人员环境与系统的协同作用。因此，相关企业应当重视人机环协同机制的建设，将人员安全、设备安全和环境安全融为一体，构建全维度立体化的安全防护体系。

一是强化人员全流程防护。做好现有人员的培训工作，提高他们的重视，加强各方面的学习，尤其涉及各类虚拟场景，引导运维人员体验各类故障的情况，认识到违规操作的后果。便于运维人员掌握更多先进方法的应用，积累更多经验，从而提升培训效果。

二是优化设备和环境的协同防护。根据不同环境场景的特点，定制设备防护方案。环境感知数据同时送达设备控制系统和人机界面，设备控制系统会根据环境数据自动调整运行参数，人机界面则以可视化的方式向调度员、司机或维保人员呈现环境风险，辅助其决策。

第三，通过人机环协同实现控制闭环。全自动运行模式下，系统默认策略是设备自主决策。当系统置信度较低，或者遇到未建模场景时，必须向人工移交控制权。通过自动执行与人工干预的动态博弈，保留人工干预的灵活性。而且记录每一次协同数据，分析其中的问题，优化设计，可以实现城市轨道交通信号系统安全防护的高效性。

5 结语

综上所述，城市轨道交通信号系统在运行过程中面临着技术风险、网络安全风险和外部环境风险为了有效控制各类风险带来的威胁，需要提高安全防护系统的建设。基于数字孪生构建预测性安全防护工作，融入内生安全理念，关注协同机制建设，打造人机环全维度运行体系，有效规避风险，保障城市轨道交通信号系统安全稳定运行。

参考文献

[1] 王春军. 城市轨道交通信号系统安全防护体系建设研究[J]. 中国新通信,2022,24(10):107-109.

[2] 孙慧. 湿轨条件下城市轨道交通信号系统防护方案[J]. 城市轨道交通研究,2025,28(9):233-238.

[3] 陈鑫鑫. 城市轨道交通信号系统安全防护体系建设方案[J]. 自动化博览,2021,38(1):42-46.

[4] 唐扬波. 城市轨道交通信号系统雷电防护研究[J]. 电子元器件与信息技术,2023,7(2):160-163.

[5] 张永会. 城市轨道交通侧式站台信号系统防护方案研究[J]. 铁道通信信号,2023,59(7):67-72.