

探讨轨道交通信号的可靠性和安全性

马 增

徐州地铁运营有限公司 江苏 徐州 221000

摘要：城市轨道交通信号系统具有高密度高依赖性、自动化智能化、接口复杂联动强、运行环境固定等特点。其安全性设计遵循故障-安全原则，构建多层次防护体系并进行安全完整性等级认证管理。但当前系统存在复杂化隐性风险、接口安全耦合、维护保障挑战及外部干扰等问题。可通过强化系统设计与验证、深化接口测试、构建智能运维体系、完善安全管理与人员培训等策略提升可靠性与安全性。

关键词：城市轨道交通；信号系统；可靠性；安全性；故障-安全；优化策略

引言：城市轨道交通作为城市交通的关键动脉，其信号系统是保障列车安全、高效运行的基石。该系统具有高密度运行依赖性强、自动化智能化程度高、接口复杂联动紧密以及运行环境相对固定等特点。然而，当前信号系统在发展中面临系统复杂化带来的隐性风险、子系统接口安全耦合、维护保障挑战以及外部因素干扰等诸多问题。为有效应对这些挑战，提升系统可靠性与安全性，需从系统设计、接口测试、运维体系构建及安全管理等多方面协同发力。

1 城市轨道交通信号系统的核心特点

城市轨道交通信号系统作为保障列车安全、高效运行的关键基础设施，因其独特的运营需求，具备一系列显著特点。（1）高密度与高依赖性是其首要特征。城市轨道交通客流量大，为满足运输需求，列车运行密度极高，在部分繁忙线路，最小行车间隔甚至不足两分钟。如此高密度的运行，要求信号系统必须具备极高的可靠性，能够连续、稳定且无差错地工作，一旦出现故障，哪怕是短暂的信号中断，都可能引发列车晚点、运营秩序混乱，甚至导致严重的安全事故。（2）自动化与智能化程度高也是重要特点。当前，城市轨道交通普遍采用基于通信的列车控制系统（CBTC），该系统借助先进的通信技术，实现了列车自动防护、自动驾驶乃至全自动运行。其系统逻辑复杂，涉及大量的数据处理、算法运算和实时控制，对系统的稳定性和准确性要求严苛。

（3）接口复杂且联动性强同样不可忽视。信号系统并非孤立存在，而是需要与屏蔽门、综合监控、通信等多个系统进行深度集成与联动。各系统之间通过复杂的接口进行数据交互和协同工作，任何一个接口出现故障，都可能像多米诺骨牌一样引发连锁反应，影响整体的安全性和可靠性。（4）城市轨道交通运行环境相对封闭固定，线路条件、站台位置等基本固定不变，这为信号系

统实现精确的控制与防护提供了有利条件，有助于提升系统的整体性能^[1]。

2 信号系统安全性设计的核心分析

2.1 故障-安全原则的基石作用

故障-安全原则是信号系统设计过程中一以贯之的根本性指导原则。其核心要义在于，当信号系统内部的任何元器件，像继电器、芯片以及通信通道等出现故障时，系统必须具备自动将输出导向预定义的、对行车安全最为有利状态（即“安全侧”）的能力。在实际的轨道交通运营场景里，这一原则有着具体且关键的应用体现。例如，当信号机的灯丝发生断丝故障时，系统会迅速且自动地将信号显示切换为红灯。红灯在轨道交通信号体系中代表着禁止通行，这一转变能够及时阻止列车进入可能存在危险的区域，有效避免因信号显示错误而引发的列车碰撞等严重事故。再如，ATP（列车自动保护）计算机作为信号系统的核心控制设备之一，一旦其出现故障，系统会立即触发紧急制动机制，使列车在最短时间内停下。这一设计确保了即便在关键设备故障的情况下，列车也不会继续危险运行，从而切实保障了乘客和列车自身的安全。故障-安全原则通过这种强制性的安全导向机制，从根本上杜绝了单一故障引发重大行车危险的可能性，为轨道交通的安全运营筑牢了坚实根基^[2]。

2.2 多层次的安全防护体系

现代基于通信的列车控制系统（CBTC）构建了一套严密且全面的纵深防御体系。第一层防护由列车自动防护系统构成，该系统能够实时、精准地计算列车的安全制动曲线，依据列车当前的速度、位置以及线路条件等参数，动态调整制动参数，防止列车出现超速情况或者与前车发生追尾事故。第二层防护是联锁系统，它负责确保进路、道岔和信号之间的逻辑关系绝对正确无误，通过对道岔位置、信号机显示状态以及进路占用情况等

进行实时监测和逻辑判断,只有当所有条件都满足安全要求时,才会开放相应的信号,允许列车进入进路。第三层防护主要应用于全自动运行线路,设有障碍物检测、站台门联动等多重防护措施,进一步增强了系统的安全性。

2.3 安全完整性等级认证与管理

为确保信号系统具备足够高的安全性,现代轨道交通信号系统严格遵循国际标准,如IEC61508、EN5012X系列等,对系统的安全相关功能进行细致的等级划分。在系统开发过程中,采用严格的开发流程,从需求分析、设计、编码到测试,每个环节都遵循相应的安全标准和规范。进行全面的测试验证,涵盖单元测试、集成测试、系统测试和验收测试等,确保系统在各种工况下都能稳定、可靠地运行。同时,引入独立的第三方评估机构,对系统的安全完整性等级进行客观、公正的评估。通过这些措施,从管理流程上保证安全性被系统地设计和实现,使信号系统能够达到其目标安全完整性等级。

3 当前系统存在的潜在问题与挑战

3.1 系统复杂化带来的隐性风险

现代信号系统朝着高度集成与软件化的方向迅猛发展,这一趋势虽提升了系统的功能与性能,却也引入了新的风险源——逻辑缺陷和软件错误。由于系统逻辑架构日益复杂,软件代码量大幅增加,这些缺陷往往隐藏在繁杂的程序逻辑之中。它们可能在特定的条件组合下才会被触发,例如特定的时间序列、特定的输入参数组合等。而在常规的测试过程中,受限于测试用例的数量和覆盖范围,很难将所有可能的条件组合都涵盖进去,这就导致部分潜在缺陷难以被及时发现。更为严峻的是,多个子系统可能存在类似的逻辑设计,一旦某一逻辑缺陷在多个子系统中同时存在,就可能引发“共性故障”,进而对整个信号系统的安全稳定运行造成严重威胁。

3.2 子系统间接口的安全耦合

信号系统与屏蔽门、供电等众多外部系统实现了深度联动,这种联动虽然提高了轨道交通运营的效率 and 安全性,但也使得接口成为安全防护的薄弱环节。接口协议的不完善是首要问题,不同系统采用的接口协议可能存在差异,在数据格式、传输速率、通信机制等方面若缺乏统一规范,就容易导致信息传输错误或混乱。此外,信息传输过程中的延迟或丢失现象也时有发生,这可能是由于网络拥塞、设备故障等原因引起。例如,当列车已启动,但因接口问题导致屏蔽门状态信息未能及时准确传输,使得屏蔽门未完全关闭,这将对乘客的人身安全构成极大威胁^[3]。

3.3 维护保障体系面临的挑战

随着信号系统设备的长期运行,设备老化问题不可避免,元器件的故障率也会随之上升。在这种情况下,预防性维护工作显得尤为重要。然而,若预防性维护不到位,不能按照规定的周期和标准对设备进行检查和维护,就无法及时发现潜在的故障隐患。同时,备品备件管理不善也会影响故障的及时处理,若备品备件库存不足或型号不匹配,在设备出现故障时将无法及时更换。此外,维护人员技能不足也是一个突出问题,若维护人员缺乏专业的培训和实践经验,在面对复杂的故障时可能无法准确判断和处理,从而直接降低系统的整体可靠性与安全性。

3.4 外部因素引入的干扰

信号系统在运行过程中还面临着诸多外部因素的干扰。无线通信作为信号系统的重要组成部分,可能受到电磁干扰的影响,例如来自周边无线电设备、高压输电线路等的电磁辐射,可能导致通信信号中断或失真,影响系统的正常指挥和控制。另外,轨旁设备的安装位置往往受到线路条件、空间限制等因素的影响,可能存在物理防护盲区。这些盲区容易受到外界物体的侵入,如异物掉落、人为破坏等,进而对轨旁设备的正常运行造成干扰,威胁系统的安全防护效果。

4 提升系统可靠性与安全性的优化策略

4.1 强化系统设计与验证

在信号系统的设计阶段,应着重采用更为丰富多样的冗余架构,其中异构冗余是一种极为有效的设计方式。异构冗余通过采用不同原理、不同技术实现的冗余组件,能够有效避免因相同设计逻辑或技术缺陷引发的共性故障。例如,在关键控制模块中,同时采用基于微处理器的控制和基于专用硬件逻辑的控制两种方式,当其中一种方式出现故障时,另一种方式仍能保证系统的正常运行。此外,加强软件工程的规范化管理至关重要。严格遵循软件开发的各个流程和标准,从需求分析、设计、编码到测试,每个环节都要进行精细把控。同时,引入形式化验证等先进技术,运用数学方法和工具对安全关键逻辑进行严格证明,确保其正确性和可靠性。通过形式化验证,能够在软件开发的早期发现潜在的设计缺陷和逻辑错误,避免这些问题在后续阶段引发严重的安全事故。

4.2 深化接口安全分析与测试

信号系统与众多外部系统存在接口连接,这些接口的安全性直接关系到整个系统的稳定运行。因此,需要对所有外部接口进行全面、系统的危险源识别和风险评

估。详细分析接口在数据传输、协议交互、物理连接等方面可能存在的安全隐患,并评估其可能对系统造成的影响程度。在此基础上,制定更为严谨、细致的接口安全协议,明确接口的通信规则、数据格式、安全机制等要求。同时,开展充分的压力测试、边界测试和故障注入测试。压力测试模拟接口在高负载情况下的运行状态,检验其在极限条件下的性能和稳定性;边界测试关注接口在输入参数处于边界值时的行为表现,确保其不会出现异常;故障注入测试则通过人为制造各种故障场景,验证接口在异常情况下的安全防护能力和容错机制^[4]。

4.3 构建预测性智能运维体系

在科技飞速发展的当下,大数据与人工智能技术日新月异,将其深度融入信号系统运维管理领域,蕴含着不可估量的潜力。(1)通过在信号设备关键部位精心部署各类高精度传感器,能够实时、精准地采集设备运行状态数据,涵盖温度、电压、电流、振动等关键参数,为后续分析提供丰富详实的基础信息。(2)运用先进的大数据分析技术,对这些海量数据进行深度剖析与挖掘,从中提取有价值的信息与规律,进而构建科学合理的设备故障预测模型。借助该模型,可实现对设备故障的提前精准预警与全面健康管理。(3)基于设备的实际运行状态以及故障预测结果,推动运维模式从传统的“计划修”向“状态修”革新。依据设备实时需求灵活安排维护工作,提前对存在隐患的设备进行维修或更换,有效遏制设备故障的进一步恶化,显著提升维护工作的前瞻性与精准性,最大程度降低设备故障对信号系统稳定运行的干扰与影响。

4.4 完善安全管理与人员培训

为切实提升信号系统的可靠性与安全性,需建立健全一套全面且细致、覆盖系统全生命周期的安全管理制度。(1)在系统规划阶段,明确安全目标与要求,将其融入整体设计方案;开发建设过程中,严格把控安全标准,对硬件选型、软件开发、接口设计等环节进行安全审查;运行维护阶段,制定详细的日常巡检、定期维护、故障处理等安全操作规范;退役报废阶段,确保设

备数据彻底清除,防止信息泄露引发安全风险。(2)人员是保障系统安全的关键因素,要持续加强对设计、维护和运营人员的安全理念与技能培训。针对设计人员,开展安全设计规范、风险评估方法等培训,提升其安全设计能力;维护人员重点培训设备故障诊断、维修技巧、安全操作流程等;运营人员则侧重于系统运行监控、应急指挥等方面的培训。(3)通过常态化开展应急演练,模拟信号系统突发故障场景,如信号中断、设备故障等,让相关人员在实战中熟悉应急处置流程,提升快速响应和协同配合能力,确保在真实故障发生时能够迅速、准确地采取措施,有效降低故障影响,筑牢人防屏障,保障信号系统安全稳定运行。

结束语

城市轨道交通信号系统作为保障列车安全高效运行的核心,其特点鲜明,安全性设计严谨,但当前也面临系统复杂化、接口安全、维护保障及外部干扰等诸多挑战。为提升其可靠性与安全性,需从多方面发力,强化系统设计与验证、深化接口安全测试、构建预测性智能运维体系、完善安全管理与人员培训。这些优化策略相互关联、协同作用,形成全方位保障。未来,随着技术持续进步,我们应不断探索创新,持续完善信号系统,以适应城市轨道交通日益增长的需求,为乘客提供更安全、便捷、高效的出行服务,推动城市轨道交通事业高质量发展。

参考文献

- [1]张爽,潘晓军,张强,等.城市轨道交通信号故障列车应急运行控制研究[J].现代城市轨道交通,2020(6):92-96.
- [2]郭金丽.信息化城市轨道交通信号设备风险识别和分析方法[J].IT经理世界,2021,22(5):91-92.
- [3]刘湘国,邓礼万.城市轨道交通信号系统的运营维护及管理路径探讨[J].江西建材,2020(5):72,74.
- [4]戴汀.城市轨道交通信号安全隐患分析[J].数字通信世界,2020(03):82-83.