

城市轨道交通通信电源系统可靠性设计

李 阳 张 晗 王 骥 鹏

郑州交通发展投资集团有限公司 河南 郑州 450000

摘 要：城市轨道交通通信电源系统是保障通信设备稳定运行的核心支撑。本文分析通信电源系统组成与工作特性，阐述可靠性设计基础要求，包括供电连续性、电压频率稳定性、抗干扰性及环境适应性。探讨可靠性设计关键环节，涵盖电源拓扑结构、元器件选型、冗余设计等。研究系统保护与容错设计，涉及过流过压欠压保护、短路过载保护、容错机制及故障隔离设计。通过系统设计优化，提升通信电源系统可靠性，为轨道交通安全运营提供坚实保障。

关键词：城市轨道交通；通信电源系统；可靠性设计；冗余配置；故障隔离

引言：城市轨道交通作为城市公共交通骨干，其安全高效运营依赖稳定通信系统。通信电源系统作为通信设备动力源泉，其可靠性直接影响轨道交通运行安全与服务品质。复杂电磁环境、动态负载变化及严苛环境条件，对通信电源系统提出更高要求。深入研究通信电源系统可靠性设计，构建科学合理设计体系，提升系统抗干扰能力与供电连续性，成为保障轨道交通安全运营关键课题，对推动城市轨道交通高质量发展具有重要意义。

1 城市轨道交通通信电源系统的组成与工作特性

1.1 通信电源系统的核心组成部分

城市轨道交通通信电源系统是保障通信设备稳定运行的核心支撑，核心组成部分围绕电能的供应、转换与保障构建完整体系^[1]。主电源模块承担主要供电任务，接收城市电网输入电能，为整个通信系统提供基础电能支撑，是电源系统运行的核心单元。备用电源系统作为主电源的补充，主要由蓄电池组构成，在主电源中断时快速投入运行，避免通信设备因断电停止工作。电源转换与分配单元负责将输入电能转换为通信设备所需的标准电压等级，同时将电能合理分配至各类通信负载，确保不同设备获得适配电能。监控与保护单元实时采集电源系统运行参数，对过压、过流、欠压等异常情况进行监测，出现异常时及时触发保护机制，防止设备损坏与系统故障，保障电源系统稳定运行。

1.2 通信电源系统的工作原理

城市轨道交通通信电源系统遵循电能转换、传输与保障的核心工作逻辑，实现电能的稳定供应。主电源模块接收城市电网的交流电能，通过整流模块将交流电能转换为直流电能，经过滤波、稳压处理后，输出符合通信设备要求的稳定电能。电源转换与分配单元对整流后的电能进行进一步处理，根据不同通信设备的电压需求，完成电压等级转换，再通过配电线路将电能精准分配

至各个通信负载。备用电源系统始终处于浮充状态，实时补充电能并维持自身容量，当主电源出现故障或电网中断时，备用电源系统迅速切换至供电模式，持续为通信设备提供电能，直至主电源恢复正常。监控与保护单元全程监测系统运行状态，实时反馈电压、电流、温度等参数，出现异常时立即切断故障回路，启动保护措施，保障系统整体安全。

1.3 城市轨道交通场景下电源系统的运行特性

城市轨道交通场景的特殊性，决定通信电源系统具有独特的运行特性。运行连续性要求极高，城市轨道交通通信系统需24小时不间断运行，电源系统需持续稳定供电，不能出现任何断电间隙，否则会导致通信中断，影响轨道交通运营安全。负载波动性显著，轨道交通运营过程中，通信设备负载会随运营时段、客流量变化而波动，高峰时段各类通信设备满负荷运行，平峰时段负载降低，电源系统需适应这种动态负载变化，维持输出电能稳定。抗干扰能力要求严格，轨道交通场景内存在大量牵引供电设备、电机等干扰源，会产生电磁干扰，电源系统需具备较强的抗干扰能力，避免干扰影响电能质量与系统运行稳定性。环境适应性强，电源系统多安装于地下车站机房，空间封闭、温湿度变化较大，需具备良好的温湿度适配能力，同时抵御粉尘、振动等环境因素影响，确保长期稳定运行。

2 城市轨道交通通信电源系统可靠性设计的基础要求

2.1 供电连续性要求

供电连续性是城市轨道交通通信电源系统可靠性设计的核心基础要求，直接关联轨道交通运营安全。城市轨道交通通信系统承担行车调度、应急处置、乘客服务等关键功能，需24小时不间断运行，电源系统需提供无间断电能供应，杜绝任何形式的断电现象^[2]。设计过程中需通过冗余设计弥补单一供电链路的不足，确保主供电

源出现故障时,备用电源能够无缝衔接,避免供电间隙导致通信中断。供电连续性设计需兼顾电网波动、设备故障等各类突发情况,构建完善的供电保障机制,确保电源系统在各类异常工况下仍能持续输出电能,支撑通信系统稳定运行,满足轨道交通全天候运营的核心需求。

2.2 电压与频率稳定性要求

电压与频率稳定性是保障通信设备正常工作的关键前提,也是电源系统可靠性设计的重要要求。城市轨道交通通信设备对输入电能的电压、频率精度要求严苛,电压过高或过低、频率波动过大,都会导致通信设备运行异常,甚至造成设备损坏。设计过程中需优化电源转换与稳压环节,通过高精度稳压模块、滤波单元,将输出电压控制在设备要求的标准范围内,减少电压波动。同时需采取频率调节措施,抵御城市电网频率波动的影响,确保电源系统输出频率稳定,避免频率偏差影响通信设备的信号传输质量与运行可靠性,为通信系统提供稳定的电能支撑。

2.3 抗干扰性要求

抗干扰性要求是适应城市轨道交通复杂电磁环境的必要设计准则,直接影响电源系统运行稳定性。城市轨道交通场景内存在大量牵引供电设备、电机、信号传输线路等干扰源,会产生强电磁干扰,干扰电源系统的正常运行,导致输出电能质量下降,影响通信设备工作。设计过程中需采取电磁屏蔽、滤波、接地等抗干扰措施,阻断干扰信号的传播路径,减少电磁干扰对电源系统的影响。同时需优化电源系统的电路设计,提升系统自身的抗干扰能力,确保在复杂电磁环境下,电源系统仍能稳定输出合格电能,避免干扰导致系统故障或通信中断。

2.4 环境适应性要求

环境适应性要求是电源系统长期稳定运行的重要保障,需结合城市轨道交通的安装与运行环境进行针对性设计。城市轨道交通通信电源系统多安装于地下车站机房,此类环境空间封闭、通风条件有限,温湿度波动较大,且易积累粉尘、受到振动影响。设计过程中需选用耐温、防潮、防尘性能优良的元器件与设备,优化机房通风与温湿度控制设计,确保电源系统在不同温湿度条件下均能稳定运行。同时需采取防振、防尘措施,保护电源系统核心部件不受损坏,提升系统对地下机房复杂环境的适配能力,延长设备使用寿命,保障电源系统长期可靠运行。

3 城市轨道交通通信电源系统可靠性设计的关键环节

3.1 电源拓扑结构设计

电源拓扑结构设计是通信电源系统可靠性的核心支

撑,直接决定系统电能转换效率与运行稳定性^[1]。设计需结合城市轨道交通通信负载特性,选择适配的拓扑结构,优化电能转换路径,减少转换过程中的能量损耗,提升系统运行效率。拓扑结构需具备简洁、可靠的特点,简化电路复杂度,降低故障发生概率,同时便于后期维护与检修。设计过程中需考虑负载动态变化需求,确保拓扑结构能够适应不同负载工况,维持输出电能稳定,避免因拓扑结构不合理导致系统运行异常,为电源系统可靠运行奠定结构基础。

3.2 元器件选型与参数匹配设计

元器件选型与参数匹配设计是保障电源系统可靠性的关键环节,直接影响系统整体运行质量与使用寿命。选型需优先选用符合轨道交通行业标准、性能稳定的元器件,优先考虑耐温、耐潮湿、抗干扰性能优良的产品,规避质量不合格元器件带来的运行隐患。参数匹配需结合电源系统工作要求与负载特性,确保元器件参数与系统运行参数精准适配,避免参数不匹配导致元器件过热、损坏或系统运行异常。选型与参数匹配需兼顾元器件的兼容性,确保各元器件协同工作,提升系统整体可靠性,减少因元器件问题引发的系统故障。

3.3 冗余设计

冗余设计是提升电源系统可靠性、保障供电连续性的核心手段,需针对系统关键环节进行针对性设计。冗余设计需覆盖主电源、备用电源、核心元器件等关键单元,通过增加备用单元的方式,弥补单一单元故障带来的影响。设计过程中需明确冗余单元的切换逻辑,确保故障发生时,备用单元能够快速、无缝投入运行,避免供电中断。冗余设计需兼顾合理性,避免过度冗余增加系统成本与复杂度,同时确保冗余单元与主用单元性能一致,保障系统切换后运行稳定性,满足通信电源系统不间断供电需求。

3.4 防雷与接地设计

防雷与接地设计是抵御外部恶劣环境、保护电源系统安全的重要环节,需结合城市轨道交通场景特点进行设计。防雷设计需针对雷电过电压、感应过电压等风险,设置合理的防雷装置,阻断雷电信号侵入电源系统,避免雷电冲击损坏核心元器件与设备。接地设计需构建完善的接地系统,确保电源系统、通信设备接地良好,降低接地电阻,及时泄放雷电电流与系统故障电流,避免电位差过大引发设备损坏或人员安全隐患。防雷与接地设计需符合轨道交通通信电源系统技术规范,确保设计方案科学合理,提升系统抵御雷电与静电干扰的能力,保障系统长期安全可靠运行。

4 城市轨道交通通信电源系统的保护与容错设计

4.1 过流、过压、欠压保护设计

过流、过压、欠压保护设计是通信电源系统硬件防护的第一道防线,需基于轨道交通通信负载的额定参数构建分级防护逻辑^[4]。过流保护设计通过配置高精度电流检测单元,实时捕捉回路电流变化,当电流超出设定阈值时,保护模块驱动执行元件动作,限制电流持续升高,避免元器件因热损耗积累出现永久性损坏。过压保护设计聚焦输出侧电压管控,通过稳压反馈链路实时调节输出幅值,电压异常升高时迅速切断高压输入,防止通信设备因过压击穿电路。欠压保护设计则针对电网波动或储能单元衰减引发的电压跌落,在电压低于设备工作阈值时触发保护,避免通信设备因欠压出现数据丢包或逻辑紊乱,通过精准的阈值设定与快速的响应机制,实现对系统的全方位电压电流防护。

4.2 短路与过载保护设计

短路与过载保护设计需兼顾瞬时故障与持续过载的不同防护需求,适配轨道交通电源系统的复杂工况。短路保护设计采用快速动作的保护元件,针对母线短路、元器件击穿等瞬时故障,在微秒级时间内切断故障回路,防止短路电流产生的热效应与电动力损毁电源设备及配电路。过载保护设计则面向持续负载超限场景,通过热累积检测技术判断负载状态,当系统长期处于过载运行时,保护模块逐步限制输出功率,而非直接切断供电,为通信系统预留应急处置时间。设计过程中需优化保护动作的延时特性,区分正常负载波动与故障过载,避免误动作影响供电连续性,实现保护可靠性与系统灵活性的平衡。

4.3 容错机制设计

容错机制设计是保障电源系统在局部故障下仍能维持核心功能的核心手段,依托系统架构的冗余特性构建故障自适应能力。设计需围绕主备电源切换、模块级故障自愈展开,当主电源模块出现故障时,容错控制单元快速识别故障状态,驱动备用模块投入运行,通过优化切换控制算法,消除切换过程中的电压暂降与中断。针对并联运行的电源模块,容错机制设计实现负载的动态重新分配,故障模块退出后,剩余正常模块自动分担负载,维持系统总输出功率稳定。同时,容错设计需融

入智能监控逻辑,实时记录故障模块信息,为后期检修提供数据支撑,确保系统在故障状态下仍能满足通信核心业务的供电需求。

4.4 故障隔离设计

故障隔离设计的核心目标是阻断故障蔓延,将局部故障的影响范围限定在最小单元,保障系统其余部分正常运行。设计需采用分级隔离架构,在电源输入侧、模块输出侧、负载分配侧分别设置隔离单元,形成独立的故障分区。当某一电源模块出现故障时,隔离单元立即动作,切断该模块与系统母线的连接,防止故障模块的电压异常、电流倒灌等问题影响其他正常模块^[5]。针对不同通信负载的重要程度,故障隔离设计划分防护层级,核心通信负载的供电回路配置独立隔离装置,避免非核心负载回路的故障传导至核心系统。通过科学的隔离分区与可靠的隔离元件选型,实现故障的精准隔离,提升电源系统的整体抗故障能力。

结束语

城市轨道交通通信电源系统可靠性设计需综合考虑系统组成、工作特性及运行环境等多方面因素。通过满足供电连续性、电压频率稳定性等基础要求,优化电源拓扑结构、元器件选型等关键环节,并完善保护与容错设计,可有效提升电源系统可靠性。实际应用中,需结合具体项目需求,灵活运用设计方法,确保通信电源系统为轨道交通通信设备提供稳定、可靠的电能支撑,保障轨道交通安全、高效运营。

参考文献

- [1]关庆勇,孙海蓬,刘学升,等.轨道交通外电源通信系统建设方案优化[J].通讯世界,2021,28(4):61-62.
- [2]李进,王津航,杨志杰.城市轨道交通信号电源系统改造研究[J].现代城市轨道交通,2025(4):65-70.
- [3]山笑磊,朱佳,乔恒恒.轨道交通5G民用通信电源系统配置研究[J].科技传播,2022,14(21):138-141.
- [4]孙波.轨道交通通信双电源增加远程报警分析[J].人民公交,2024(20):94-96.
- [5]高宇膺,严牧君,徐晔.城市轨道交通双电源单环网供电系统的远方备自投方案[J].电气化铁道,2023,34(2):74-77.