

轨道供电维护中杂散电流防治策略

蔡林臻

昆明地铁运营有限公司 云南 昆明 650000

摘 要：城市轨道交通直流供电系统运行中，杂散电流是影响设备寿命与行车安全的隐患之一，多由轨地绝缘下降、回流阻抗失衡、负荷波动及外部耦合干扰引发，会造成金属腐蚀、设备老化、电位异常及信号干扰等问题。本文分析杂散电流的形成机理与各类危害，梳理当下检测监测技术及现存短板，从源头管控、过程治理、运维管控、协同防控四个维度，提出系统化的杂散电流综合防治策略，为轨道供电安全运维提供技术与管理参考。

关键词：轨道供电维护；杂散电流；防治策略

引言：当前城市轨道交通规模化、高密度运营发展，直流轨道供电系统的运行稳定性愈发关键。杂散电流作为轨道供电运维中的隐患之一，受设备老化、工况波动、施工环境等多重因素影响，都会引发杂散电流的变化，从而引发不同程度的设备损坏、结构腐蚀及行车安全事故，严重时威胁轨道交通系统及周边设备的稳定运行。现阶段传统检测防治模式存在效率低、精准度不足等问题，难以适配精细化运维需求。基于此，本文深入探究杂散电流成因与危害，结合现有技术短板，构建全方位、常态化的综合防治体系，助力提升轨道供电运维质量。

1 轨道供电系统杂散电流形成机理与危害分析

1.1 轨道供电系统工作原理

（1）以某地铁为例——直流轨道供电系统整体架构与运行模式。城市轨道交通多采用直流供电模式，系统由牵引变电所、接触轨、列车、回流轨及负极回流装置组成。牵引变电所将高压交流电转换为直流电，通过接触轨为列车供电，列车完成取电后，电流经走行轨回流至变电所，形成一条闭合供电回路，保障列车持续供电。（2）走行轨回流系统的工作机制与核心参数。走行轨是核心回流载体，正常工况下电流沿钢轨单向回流，核心参数包含回流阻抗、轨地绝缘电阻、回流电流值等。系统设计要求钢轨对地保持高绝缘状态，降低电流泄漏概率，保障回流回路稳定、低损耗运行^[1]。（3）供电系统常规运维工况与异常工况界定。常规工况下，供电电压、回流电流稳定，轨地绝缘参数达标，设备无故障运行。异常工况包含绝缘破损、回路阻抗失衡、负荷骤变、外部电磁干扰等，此类工况易打破供电回路平衡，诱发杂散电流问题。

1.2 杂散电流主要形成成因

（1）走行轨绝缘性能下降、破损导致电流泄漏。长

期运行中，轨道绝缘垫老化、破损、受潮，或杂物堆积造成轨地导通，破坏原有绝缘结构，部分回流电流脱离钢轨回路，向大地泄漏形成杂散电流。（2）轨道接地装置不合理、回流回路阻抗失衡。接地装置安装不规范、接地电阻超标，或钢轨接头松动、腐蚀，会导致回流回路阻抗不均，电流优先向低阻抗的大地、管线分流，形成杂散电流。（3）列车启停、负荷波动引发的电流不稳定泄漏。列车启停、加速、制动过程中负荷剧烈波动，回流电流瞬时骤增骤减，动态电流冲击加剧绝缘薄弱处的电流泄漏，增大杂散电流产生概率。（4）周边市政管线、土建结构带来的杂散电流耦合干扰。轨道周边金属管线、混凝土钢筋等土建结构导电性强，会与轨道形成耦合回路，分流回流电流，同时外部杂电干扰会叠加形成耦合杂散电流。

1.3 杂散电流的典型危害

（1）对轨道、钢轨及金属构件的电化学腐蚀损伤。杂散电流流入大地后，会使钢轨、隧道金属构件发生电解除腐蚀，造成金属锈蚀、截面损耗，长期积累会降低轨道结构稳定性。（2）侵蚀供电设备、信号设备，降低设备使用寿命。杂散电流会侵入供电、信号设备内部，造成元器件老化、短路、绝缘击穿，加速设备损耗，大幅缩短设备运维周期与使用寿命。（3）引发轨道电位异常，产生人身安全隐患。杂散电流失衡会导致轨地电位差值变大，出现电位差超标情况，工作人员接触轨道及周边金属结构时，易发生触电安全事故。（4）干扰轨道交通信号系统，影响行车运行安全。杂散电流产生的电磁干扰，会扰乱信号传输精度，导致信号失真、指令异常，引发列车测速、定位偏差，直接威胁行车运行安全。

2 轨道供电维护中杂散电流检测与监测技术

2.1 杂散电流常规检测技术

（1）轨道电位检测技术原理与实操方法。轨道电

位检测是杂散电流排查的基础手段,核心依据电位差原理,通过高精度电压装置检测钢轨与大地间的电位差值,判断电流泄漏情况。实操中多采用定点检测与分段巡检结合的方式,在列车启停区段、轨道绝缘薄弱点重点检测,记录不同工况下的轨地电位波动,为杂散电流隐患判定提供基础数据^[2]。(2)回流电流、泄漏电流现场检测技术。该技术通过电流互感器、便携式检测仪采集走行轨回流电流与大地泄漏电流数据,对比标准回流参数判断回路异常。检测人员沿轨道全线分段测试,捕捉列车动态运行时的电流变化,精准定位电流泄漏点,区分正常回流损耗与异常杂散电流泄漏问题。(3)金属结构腐蚀速率检测与隐患判定方法。通过超声检测、电阻测试等方式,检测轨道周边金属构件、管线的腐蚀损耗程度,结合长期检测数据计算腐蚀速率。依据行业规范对比阈值标准,判定轻微损耗、中度隐患、重度风险等级,针对性排查杂散电流引发的结构性腐蚀隐患。

2.2 智能化实时监测系统构建

(1)分布式监测传感器的选型与布设方案。系统选用高精度电位、电流传感器,适配轨道交通复杂电磁环境。采用分布式布设模式,重点覆盖隧道区段、车站区间、轨道接头及绝缘薄弱区域,实现全线无死角监测,保障数据采集的全面性与代表性。(2)杂散电流数据采集、传输与存储模块设计。采集模块实时捕捉轨道电位、回流电流、腐蚀参数等数据,通过无线传输技术将数据实时上传至后台终端。存储模块采用分区存储模式,分类保存实时数据与历史数据,保障数据完整可追溯,为数据分析提供可靠支撑。(3)基于大数据的杂散电流异常数据识别与预警机制。依托大数据算法对监测数据进行筛选、分析与比对,自动识别电流突变、电位超标、腐蚀加速等异常工况。系统可分级推送预警信息,精准定位故障区段,为运维人员快速处置隐患提供数据支撑。

2.3 检测监测工作现存问题

(1)人工检测效率低、数据误差大、覆盖范围有限。传统人工巡检依赖设备与操作人员经验,检测速度慢,难以适配全线大范围检测。同时人工读数、记录易产生误差,且无法实现全天候检测,易遗漏隐蔽性、间歇性杂散电流隐患。(2)传统监测系统实时性、精准度不足。老旧监测设备采样频率低、精度有限,无法捕捉列车瞬时负荷波动带来的动态杂散电流变化,数据滞后性明显,难以满足精细化运维的监测需求。(3)复杂工况下杂散电流动态监测难度较大。在隧道潮湿、多电磁干扰、列车高密度启停的复杂工况下,杂散电流波动随

机性强、耦合干扰多,现有监测技术难以精准区分干扰信号与异常杂散电流,动态监测精度难以保障。

3 轨道供电维护中杂散电流综合防治策略

3.1 源头防控:优化供电与回流系统设计

(1)提升走行轨绝缘防护性能,定期开展绝缘检测更换。走行轨对地绝缘失效是杂散电流产生的核心源头,强化绝缘防护是首要防控手段。在轨道建设与改造阶段,优先选用高强度、耐老化、防潮耐腐蚀的绝缘垫板、绝缘套管及轨底绝缘材料,全面提升轨地隔离性能。同时建立周期性绝缘检测机制,依托专业检测设备定期排查轨道绝缘状态,重点筛查隧道潮湿区段、车站出入口、轨道接头等易损耗区域,及时更换老化、破损、受潮的绝缘配件,杜绝因绝缘失效引发的电流泄漏问题,从源头降低杂散电流生成量。(2)优化轨道接地、回流装置安装与运维标准。接地与回流装置的规范性直接决定回流回路的稳定性。针对传统装置安装不规范、阻抗失衡等问题,需统一标准化安装流程,严格把控钢轨接头、回流电缆、负极连接点的施工质量,保证回流回路通畅、阻抗均匀。同时细化日常运维标准,定期紧固连接螺栓、清理接头锈蚀与积尘,检测接地电阻、回流阻抗参数,对超标装置及时整改,避免因回路缺陷导致电流分流外泄,保障回流电流完全沿预设回路传输^[3]。(3)均衡供电区间负荷,减少工况波动引发的电流泄漏。列车启停、负荷骤变会产生瞬时冲击电流,加剧绝缘薄弱处的电流泄漏。为此需优化全线供电调度方案,合理分配各牵引变电所供电负荷,均衡不同区间的供电压力,避免单一区间负荷过载。通过智能化调度调控列车运行节奏,减少密集启停、紧急制动等极端工况,平稳供电回路电流波动,降低动态负荷波动带来的杂散电流泄漏概率,提升供电系统运行稳定性。

3.2 过程治理:主动防护技术应用

(1)杂散电流排流装置的选型、安装与运维规范。排流装置是治理杂散电流的核心主动设备,可将泄漏电流精准导回回流系统。需根据线路工况、电流泄漏量级选型适配的极性排流器、强制排流器等设备,在杂散电流高发区段定点安装,规范设备接线与接地方式,避免安装偏差影响防护效果。同时制定常态化运维规范,定期检测设备运行状态、排流效率,清理设备积尘与故障隐患,保障排流装置持续稳定发挥分流导回作用。(2)阴极保护技术在轨道金属构件防护中的应用。针对杂散电流引发的金属构件电化学腐蚀问题,广泛应用阴极保护技术进行防护。该技术通过向轨道钢轨、隧道钢结构、周边金属管线提供保护电流,抵消杂散电流产生的

电解腐蚀效应,抑制金属氧化损耗。结合线路腐蚀现状,采用牺牲阳极法与外加电流法相结合的防护模式,精准调控保护电流参数,适配不同区段的腐蚀防护需求,有效延长金属构件使用寿命。(3)隔离防护技术阻断杂散电流扩散路径。利用电气隔离技术切断杂散电流向周边土建结构、市政管线的扩散通道。在轨道与外部金属结构连接处加装绝缘隔离器件,对隧道钢筋、地下管线进行分段绝缘处理,阻断杂散电流耦合传播路径。同时对轨道全线绝缘屏障进行加固完善,填补绝缘漏洞,缩小杂散电流扩散范围,实现从过程中遏制电流扩散、降低腐蚀危害的治理目标^[4]。

3.3 运维管控:建立常态化防治管理体系

(1)制定杂散电流定期检测、隐患排查运维制度。结合线路运行特点,建立日巡查、周抽检、月全检的常态化检测制度,明确检测项目、频次、标准与责任分区。重点检测轨道电位、泄漏电流、绝缘性能、设备工况等核心参数,全面排查杂散电流隐患,改变传统被动抢修模式,实现隐患早发现、早预判、早治理。(2)强化运维人员专业技能与防治技术培训。定期开展杂散电流防治专项培训,讲解杂散电流形成机理、检测技术、防护设备操作及隐患处置方法,提升运维人员专业能力。结合现场实操演练,强化工作人员对复杂工况隐患的识别与处置水平,规范运维操作流程,杜绝人为操作不当引发的防治失效问题,筑牢运维防控基础。(3)建立杂散电流隐患台账与闭环整改机制。对排查出的各类杂散电流隐患进行分类登记,详细记录隐患位置、风险等级、成因及整改时限,建立完整隐患台账。落实专人负责制,跟踪隐患整改全过程,完成整改后开展复核验收,实现隐患排查、登记、整改、销号的闭环管理,杜绝隐患遗留与反复复发。

3.4 协同防控:多场景综合优化策略

(1)新旧线路杂散电流差异化防治方案。新建线路严格执行高标准绝缘与回流系统设计,提前布局智能化监测与防护设备,从建设阶段规避杂散电流隐患。老旧线路因设备老化、结构局限隐患较多,采用针对性改造方案,重点更换老旧绝缘配件、整改不规范回流装置,

加装防护设备,逐步优化老旧线路防控能力,适配新旧线路不同运行工况。(2)极端天气、高峰运力等特殊工况专项防治措施。暴雨、潮湿天气会降低轨道绝缘性能,早晚高峰列车高密度启停会加剧电流波动,需制定专项防控预案。极端天气前后强化全线绝缘检测,及时清理轨道积水、积污;高峰时段加强供电负荷调控,加密监测频次,实时监控杂散电流动态,及时处置突发异常,降低特殊工况下的安全风险^[5]。(3)与市政工程、周边管线运维的协同防控机制。轨道交通杂散电流易对周边市政金属管线、土建结构造成腐蚀,需建立跨领域协同防控机制。加强与市政运维部门联动,同步开展管线与轨道隐患排查,统筹施工改造计划,避免市政施工破坏轨道绝缘与回流系统,通过协同管控、联合治理,全方位提升区域杂散电流综合防治效果。

结束语

杂散电流防治是城市轨道交通供电运维的重点与难点工作,直接关系到轨道交通设备寿命、结构稳定与行车安全。本文从成因危害、检测技术、综合防治等方面完成系统性分析,形成多维度、全流程的防治方案。通过源头治理、过程防护、常态化运维及跨领域协同的结合模式,可有效降低杂散电流危害。后续需持续依托智能化技术,优化监测预警与防控手段,适配复杂运营工况,持续夯实轨道供电系统安全稳定运行基础。

参考文献

- [1]唐兆军.城市轨道交通走行轨回流系统钢轨电位抑制技术综述.城市轨道交通研究.2024,27(7).253-260.
- [2]暴家良.城市轨道交通钢轨紧固件绝缘垫破损对杂散电流空间分布的影响.电工电能新技术.2023,42(7).121-126.
- [3]张艳丽.地铁杂散电流腐蚀机理以及防护措施研究[J].电气化铁道,2023,9(3):137-139.
- [4]宋大治.地铁场段基地杂散电流泄漏监测与治理[J].城市轨道交通研究,2025,23(7):74-78.
- [5]张凌雁.城市轨道交通工程杂散电流腐蚀防护研究[J].电工技术,2023,16(4):176-179.