牵引回流对轨道电路的干扰抑制与降扰技术研究

潘良
中国通号广州工程技术有限公司，广东 广州 510663
DOI:10.61369/RSTD.2026030007

摘　　要： 电气化轨道交通高速、重载、高密度运行模式下，牵引回流紊乱引发的信号专业轨道电路电磁干扰问题日益突出，频繁造成轨道电路电气参数大幅波动，出现误码、区段误占用、红光带等故障，严重威胁行车安全与运输秩序。为有效解决牵引回流与轨道电路的电磁兼容矛盾，本文基于电磁耦合理论，系统剖析牵引回流对轨道电路的传导、感应、辐射三类干扰机制，明确钢轨电流不平衡度、通道阻抗异常、谐波外泄、绝缘失效四大核心干扰诱因。针对干扰根源，构建源头整治、路径阻隔、参数优化、长效管控的一体化降扰技术体系，通过规整回流通道、均衡钢轨电流、抑制高频谐波、优化绝缘与接地系统，全方位削弱回流干扰。经仿真分析与现场工程应用验证，该技术方案可将钢轨电流不平衡度控制在规范限值内，大幅降低轨道电路感应干扰电压，彻底消除间歇性信号故障，显著提升轨道电路运行稳定性，可为轨道交通牵引回流干扰治理、电磁兼容提质改造提供可靠的工程技术参考。

关 键 词： 轨道交通；牵引回流；轨道电路；电磁干扰；干扰抑制；电流平衡；电磁兼容

Research on Interference Suppression and Noise Reduction Techniques for Traction Return Currents in Track Circuits

Pan Liang
China Railway Signal & Communication Guangzhou Engineering Technology Co., Ltd., Guangzhou, Guangdong 510663

Abstract: Under the high-speed, heavy-load, and high-density operating conditions of electrified rail transit systems, electromagnetic interference from traction return current disturbances in signal-specific track circuits has become increasingly prominent. This frequently causes significant fluctuations in track circuit electrical parameters, leading to faults such as bit errors, segment misoccupation, and red light bands, which severely threaten operational safety and transportation efficiency. To effectively address the electromagnetic compatibility challenges between traction return currents and track circuits, this study employs electromagnetic coupling theory to systematically analyze three primary interference mechanisms—conduction, induction, and radiation—and identifies four key causative factors: rail current imbalance, abnormal channel impedance, harmonic leakage, and insulation failure. A comprehensive interference mitigation framework is developed, encompassing root cause resolution, path isolation, parameter optimization, and long-term control measures. By optimizing return current pathways, balancing rail currents, suppressing high-frequency harmonics, and improving insulation and grounding systems, this approach comprehensively reduces return current-induced interference. Simulation analyses and field applications confirm that this solution maintains rail current imbalance within regulatory limits, significantly lowers induced interference voltages in track circuits, eliminates intermittent signal failures, and enhances operational stability. The findings provide reliable technical references for addressing traction return current interference and improving electromagnetic compatibility in rail transit systems.

Keywords: rail transit; traction return; track circuit; electromagnetic interference; interference suppression; current balance; electromagnetic compatibility

引言

随着我国高速铁路与城市轨道交通路网规模持续扩容，列车牵引功率、运行密度不断提升，强电牵引供电系统与弱电信号轨道电路的电磁兼容冲突愈发显著。轨道电路作为列车占用检测、行车信号传输的核心设备，具备灵敏度高、抗干扰能力弱的特性，极易受牵引

作者简介：潘良（1987.12.10-）男，汉族，籍贯：江西南昌，学位：学士，职称：铁道信号高级工程师，职务：项目总工程师，研究方向：电气化铁路牵引回流对轨道电路影响的拟制。

 | Copyright © This Work is Licensed under A Commons Attribution-Non Commercial 4.0 International License.

系统电磁扰动影响。在各类电磁干扰源中，牵引回流失稳引发的持续性、间歇性干扰是轨道电路故障的首要诱因。

正常工况下，牵引回流可通过钢轨、吸上线、回流线形成稳定闭合回路，对称回流磁场相互抵消，对轨道电路无明显干扰。但线路长期运营过程中，受设备老化、施工缺陷、运维不到位等因素影响，常出现回流接点虚接、路径缺失、绝缘破损、接地混乱等问题，造成回流分布失衡、杂散电流外泄、谐波畸变叠加，进而干扰轨道电路信号传输。当前行业治理多采用单一整治手段，存在针对性不足、治标不治本、干扰反复复发等问题。基于此，本文聚焦轨道电路干扰抑制核心目标，深入分析干扰机理与缺陷成因，提出系统化降扰技术方案，并通过工程实例验证其有效性，为轨道电路抗干扰治理提供新思路[1]。

一、牵引回流对轨道电路的干扰机理

（一）牵引回流系统运行特性

轨道交通牵引供电分为交流 AT 供电与直流供电两大制式，牵引回流的核心作用是为列车负荷电流提供专用回流通道，保障供电系统闭环稳定运行。列车运行时，电流经接触网、列车牵引单元、车轮导入双侧走行轨，最终通过吸上线、横向连接线、回流线返回牵引变电所。理想运行状态下，左右钢轨牵引电流幅值相等、方向对称，工频磁场与谐波磁场相互抵消，轨道电路可免受电磁干扰。但实际运营中，回流通道参数失衡、设备缺陷等问题普遍存在，导致回流对称性被打破，成为轨道电路电磁干扰的核心源头。

（二）三类核心干扰作用机制

牵引回流对轨道电路的干扰主要分为传导干扰、感应耦合干扰、辐射干扰三类，其中传导与感应耦合干扰占故障诱因的90%以上，是核心治理对象，辐射干扰多引发间歇性隐蔽故障，排查难度较高。

传导干扰主要由绝缘失效、分区窜流导致。当轨道绝缘节、绝缘垫板破损老化，或道床绝缘失效时，牵引回流会突破分区隔离边界，发生跨区窜流与对地漏电，畸变电流直接侵入轨道电路信号回路，改变信号电压、频率等标准参数，造成区段误占用、信号接收异常，严重时会烧毁轨道电路终端设备[2]。

感应耦合干扰是轨道电路最主要的干扰类型。受回流通道阻抗不均、路径杂乱影响，左右钢轨回流电流不平衡度超标，对称磁场抵消效果失效，剩余交变电磁场会与轨道电路、信号线缆形成电磁耦合，产生感应电动势，干扰 ZPW-2000等主流移频轨道电路的信号幅值与频率，引发信号误码、传输失真。道岔、枢纽等多轨交叉区段回流路径复杂，电流失衡问题突出，是感应干扰高发区域。

辐射干扰源于牵引回流中的高频谐波分量。列车牵引变流器工作产生的3次、5次、7次高频谐波，若无法通过回流通道有效泄放，会在钢轨滞留并产生高频电磁辐射。该辐射频段与轨道电路工作频段存在重叠，会降低信号信噪比，造成车载与地面信号设备工作异常，此类故障具有随机性、隐蔽性特征，排查难度极大。

（三）干扰核心评价指标

结合轨道交通电磁兼容相关规范，牵引回流对轨道电路的干扰强度主要由四项核心指标判定，分别为钢轨电流不平衡度、回流通道阻抗均匀性、谐波含量、钢轨电位波动值。其中，钢轨电流不平衡度是影响感应干扰的核心指标，规范限值为5%，超标后电磁干扰强度会大幅提升；通道阻抗失衡会加剧电流畸变和谐波滞留，进一步放大干扰效果；谐波含量与钢轨电位波动直接决定传导、辐射干扰的严重程度[3]。

二、牵引回流诱发轨道电路干扰的核心成因

经现场故障排查与仿真分析，牵引回流对轨道电路的干扰并非单一故障导致，而是通道、绝缘、谐波、接地多维度缺陷叠加的结果，具体可分为四类核心问题。

（一）回流通道缺陷，电流分布失衡

回流通道完整性不足、参数不均是电流失衡的首要原因。既有线路普遍存在钢轨接头氧化虚接、吸上线缺失、横向连接线布置稀疏等问题，导致左右钢轨回流阻抗存在差值，牵引电流分配不均。道岔、站场、枢纽区段多轨交叉，回流路径杂乱无序，易出现局部电流堆积、分流紊乱，大幅提升电流不平衡度。同时，老旧线路回流断点会造成电流瞬时畸变，频繁扰动轨道电路稳定工作。

（二）绝缘系统失效，漏电窜流频发

绝缘设备是隔离回流分区、阻断漏电窜流的关键屏障。长期运营中，绝缘节、绝缘垫板、套管等设备易出现老化、受潮、击穿、积污破损等问题，导致供电分区隔离失效，牵引电流跨分区窜流，打乱正常回流路径[4]。同时，道床绝缘开裂、破损会增大钢轨对地漏电，形成大量无序杂散电流，通过电磁耦合干扰轨道电路信号传输，形成持续性干扰隐患。

（三）谐波泄放受阻，高频干扰突出

列车牵引变流器产生的高频谐波是高频干扰的主要来源。正常工况下，谐波可通过专用回流通道平稳泄放，但回流通道阻抗偏大、线缆截面不足、路径过长时，谐波泄放效率大幅降低，大量谐波滞留于钢轨表面并向外辐射。由于谐波频段与轨道电路工作频段重叠，会直接干扰信号频率稳定性，降低信号传输质量，是轨道电路偶发故障的重要诱因。

（四）接地配置混乱，电位波动扰动

全域接地系统不规范会破坏回流电气平衡。区间违规多点接地、临时无序接地、车辆头尾接地电阻不匹配、变电所接地网布局不合理等问题，会导致牵引电流无序分流，引发钢轨电位动态波动，造成回流电流瞬时突变[5]。此类扰动无固定规律，易引发轨

Copyright © This Work is Licensed under A Commons Attribution-Non Commercial 4.0 International License.

道电路间歇性故障，排查与整治难度极大。

三、轨道电路回流干扰一体化降扰技术方案

针对上述干扰成因，以“均衡回流、规整路径、抑制谐波、阻隔干扰、稳定参数”为核心目标，构建源头治理、过程阻隔、末端防护的全链条降扰技术体系，精准降低牵引回流对轨道电路的多重干扰。

（一）规整回流通道，严控电流不平衡度

聚焦电流平衡核心指标，全方位整治回流通道缺陷，从根源削弱感应耦合干扰。一是开展全线回流接点专项整治，对钢轨接头、吸上线、横向连接线端子进行除锈、紧固、更换，消除接触电阻偏差，保障双轨回流阻抗一致性，将钢轨电流不平衡度稳定控制在5%规范限值以内。二是优化关键区段回流布局，在道岔、绝缘节、信号机、枢纽等干扰高发区段，加密增设横向连接线与吸上线，缩短回流路径、消除回流盲区，均衡区段回流负荷。三是优化AT供电制式高铁核心区段，增设均压连通装置，优化自耦变压器回流分配特性，降低地回流与电流失衡分量[6]。

（二）提质绝缘系统，阻断传导干扰路径

通过绝缘系统全方位改造，杜绝电流跨区窜流与对地漏电，彻底切断传导干扰通道。一是逐段检测更换老化、击穿、破损的绝缘节、绝缘垫板、套管等设备，清理绝缘表面积污与潮湿介质，恢复供电分区隔离性能。二是优化绝缘分区布局，修正不合理绝缘节安装位置，实现回流分区与轨道电路信号分区精准适配，规避电气参数交叉干扰。三是整治道床对地绝缘，修复道床开裂、受潮缺陷，更换破损道床材料，提升钢轨对地绝缘均匀性，从源头减少杂散电流生成。

（三）优化参数与谐波治理，削弱高频干扰

采用“源头优化+末端滤除”双重方案治理谐波干扰。一是优化回流通道阻抗参数，更换截面积较大的回流电缆，优化接点处电流通过性能，降低通道整体阻抗，提升高频谐波泄放效率，减少谐波滞留与辐射。二是适配轨道电路设备参数，优化空心线圈、调谐单元阻抗特性，调整线圈匝数，提升信号系统对工频、谐波干扰的抗干扰能力，实现牵引频段与信号频段有效隔离。三是在谐波超标重点区段加装专用谐波吸收装置，精准滤除高频干扰分量，规避谐波辐射对轨道电路的影响。

（四）标准化接地改造，稳定电气运行环境

规范全域接地配置，稳定钢轨电位，消除动态电位波动引发的间歇性干扰。一是优化车辆接地配置，在列车头尾保护接地加装适配电阻，均衡车体接地电流，抑制动态回流扰动。二是取缔区间违规临时接地、多点无序接地，统一全线接地施工标准，避免电流无序分流。三是优化变电所接地网与N线连接方式，降低接地回路阻抗，稳定全线钢轨电位，杜绝电位突变引发的轨道电路误动作。

（五）强化电磁隔离，完善末端防护

统筹强弱电电磁兼容要求，构建末端防护屏障。规范信号线缆与回流线、接触网的敷设间距，避免强弱电线路近距离平行布设，降低电磁耦合强度；对核心轨道电路设备、采用带屏蔽的信号传输线缆，提升辐射干扰防护能力；优化轨道电路安装工艺，规范设备接地与屏蔽布置，全方位阻隔回流电磁干扰。

四、仿真与工程实例验证

（一）仿真模型搭建与初始状态分析

依托轨道交通牵引回流仿真平台，搭建高铁道岔枢纽区段供电－回流－轨道电路耦合仿真模型，模拟优化前后回流电流分布、不平衡度、谐波含量及轨道电路感应电压参数。仿真初始数据显示，该区段未优化前钢轨电流不平衡度达12.6%，远超5%规范限值，5次、7次高频谐波含量超标，轨道电路感应干扰电压超出安全阈值，存在严重的信号误码、区段误占用隐患。

（二）现场工程整治实施内容

以某枢纽站道岔区段为整治对象，该区段长期存在轨道电路干扰，尤其出现在电力机车升、降弓时期。结合仿真排查及信号集中监测分析处的缺陷问题，实施全方位降扰整治：更换大截面积道岔岔后绝缘跳线26处，均衡双轨通道阻抗；在岔区全面梳理牵引回流径路，新增吸上线2处、优化横向连接线4处，规整回流路径；适配调整轨道电路空心线圈参数，强化谐波防护能力。

（三）整治效果分析

整治完成后，经过2个月不间断动态监测与仿真复核，各项干扰指标大幅优化，降扰效果显著，不再出现轨道电路电气参数异常波动现象。区段钢轨电流不平衡度降至3.2%，满足规范标准；回流通道整体阻抗下降32%，高频谐波泄放效率大幅提升，谐波含量全部达标；轨道电路感应干扰电压显著降低，无超限干扰情况；区段轨道电路误码、误占用、红光带等故障彻底清零。实践验证，本文提出的一体化降扰方案可有效抑制牵引回流对轨道电路的电磁干扰，根治间歇性、隐蔽性信号故障[7]。

五、长效管控与展望

（一）建立常态化隐患排查机制

针对回流干扰隐蔽性、反复性特点，建立专项常态化排查机制，定期检测钢轨电流不平衡度、通道阻抗、绝缘性能、谐波含量、轨道电路干扰电压等核心指标，建立隐患台账，实现排查、整治、复查闭环管理，提前预判参数偏移引发的干扰隐患。

（二）搭建智能监测预警体系

依托物联网、大数据技术，搭建牵引回流与轨道电路干扰联动监测平台，实时采集回流运行参数、电磁环境、信号设备运行数据，通过智能算法实现回流异常、干扰超标的精准预警与故障定位，替代传统人工排查模式，提升干扰治理的精准性与时效性。

（三）技术发展展望

未来可推广精准仿真建模技术，实现不同运营工况下回流分布与干扰风险的预判，为新线建设与既有线改造提供数据支撑；研发高绝缘、低阻抗新型轨道交通材料，提升回流系统运行稳定

 Copyright © This Work is Licensed under A Commons Attribution-Non Commercial 4.0 International License.

性；探索自适应动态回流调控技术，实现电流自动均衡、谐波主动抑制，从技术层面彻底解决牵引回流对轨道电路的干扰难题。

六、结论

牵引回流通道紊乱、电流失衡、绝缘失效、谐波外泄、接地混乱是诱发轨道电路电磁干扰的核心诱因，其中钢轨电流不平衡度超标是引发轨道电路感应干扰的关键因素。本文系统阐明了牵引回流对轨道电路的传导、感应、辐射三类干扰机制，精准定位各类缺陷的干扰成因，构建了以通道规整、电流平衡、谐波抑制、绝缘提质、接地优化、电磁隔离为核心的一体化降扰技术体系。

仿真与工程实践证明，该方案可有效均衡牵引回流分布、严控电流不平衡度、抑制高频谐波干扰、阻断漏电窜流路径，大幅削弱牵引回流对轨道电路的电磁干扰，切实解决轨道电路间歇性故障问题。通过常态化运维管控与智能化监测赋能，可实现回流干扰长效治理，有效提升轨道交通信号系统运行安全性与稳定性，具备极高的工程推广应用价值。

参考文献

[1] 周大林，黄山山 . 城轨既有线直流牵引供电系统回流能力提升及信号干扰治理 [J]. 电工技术 ,2025(10):112-114.

[2] 张一平，蒋芸竹，刘磊 . 枢纽区段牵引回流不平衡对轨道电路的干扰及优化 [J]. 电工技术 ,2025(15):98-100.

[3] 李鲲鹏，刘力，赵云云 . 电气化铁路牵引回流谐波对信号系统的干扰机理研究 [J]. 城市轨道交通研究 ,2024(09):189-192.

[4] 王浩 . 牵引回流通道缺陷引发信号故障的整治技术 [J]. 铁路工程技术 ,2024(07):45-47.

[5] 陈波 . 轨道电路串频干扰原因分析及对策 [J]. 铁路通信信号工程技术，2023，20(S01):7-12.

[6] 刘天祺 . 高铁道岔区段不平衡牵引回流干扰抑制方法 [J]. 铁道标准设计 ,2025(03):56-60.

[7] 北京交通大学 . 牵引电流对轨道电路系统的电磁干扰效应研究 [J]. 北京交通大学学报 ,2024(06):78-83.

Copyright © This Work is Licensed under A Commons Attribution-Non Commercial 4.0 International License.