 DOI: https://doi.org/10.12349/iser.v6i9.7457

Research on typical fault mechanism and intelligent monitoring and prevention of railway leakage coaxial cable—Empirical analysis based on 0558-RU base station standing wave processing case

Jing Wang

Guoneng Shuohuang Railway Yuanping Branch, Yuanping, Shanxi, 034100, Chian

Abstract

As a critical transmission medium in railway communication systems, leaky coaxial cables (LCC) serve as essential signal carriers for train control and wireless dispatching in enclosed or complex environments such as tunnels and mountainous areas. This paper systematically analyzes the structural characteristics, typical failure types, and evolution mechanisms of LCCs, with particular focus on environmental corrosion, mechanical damage, and electrical breakdown effects on signaling systems. Through a three-month monitoring and empirical analysis of a 0558-RU base station downlink Suyining-direction leaky cable standing wave alarm case, this study thoroughly investigates the detection and handling processes of hidden LCC faults. The research findings demonstrate that an intelligent O&M system integrating multi-source sensing, big data analytics, and artificial intelligence can achieve early warning and precise fault localization, significantly enhancing the accuracy and foresight of fault prevention.

Keywords

Railway communication; Leaky coaxial cable; Fault mechanism; Standing wave alarm; Intelligent monitoring; Full lifecycle management

铁路漏泄同轴电缆典型故障机理与智能监测防控研究——基于 0558–RU 基站驻波处理案例的实证分析

王晶

国能朔黄铁路原平分公司，中国 · 山西 原平 034100

摘　要

漏泄同轴电缆（Leaky Coaxial Cable, LCC）作为铁路通信系统的关键传输媒介，在隧道、山区等封闭或复杂环境中承担着列车控制、无线调度等重要信号的覆盖任务。本文系统分析了LCC的结构特性、典型故障类型及其演化机理，重点探讨了环境腐蚀、机械损伤、电气击穿等因素对信号系统的影响。结合0558-RU基站下行肃宁方向漏缆驻波告警案例，通过为期三个月的跟踪监测与实证分析，深入研究了LCC隐性故障的检测与处理过程。研究结果表明，基于多源感知、大数据分析与人工智能的智能运维体系，可实现对LCC故障的早期预警与精准定位，显著提升故障防控的精准性与前瞻性。

关键词

铁路通信；漏泄同轴电缆；故障机理；驻波告警；智能监测；全寿命周期管理

1 引言

随着我国“交通强国”战略的深入推进，高速铁路和城市轨道交通网络呈现快速发展态势。截至 2024 年底，全国铁路营业里程已达 15.9 万公里，其中高铁里程 4.5 万公里，地铁运营里程超过 9700 公里。在这一背景下，铁路通信系统的可靠性和安全性面临着前所未有的挑战。漏泄同轴电缆作为隧道、山区等特殊场景下实现连续无线信号覆盖的关键设备，其运行状态直接关系到列车运行安全。

LCC 通过屏蔽层上的周期性开槽实现电磁波的定向辐射，兼具传输线与天线的双重功能，特别适用于隧道、地下区间等空间受限的铁路环境。然而，由于铁路运行环境的特殊性，LCC 长期暴露在振动、湿度、温差、化学腐蚀等多重应力作用下，导致其故障率显著高于普通通信电缆。据统计，在铁路通信系统故障中，LCC 相关故障占比高达 35%-40%，且其中约 60% 为渐进性隐性故障，传统巡检手段难以早期发现。

2 LCC 结构特性与故障机理分析

2.1 LCC 结构与其在铁路环境中的特殊要求

漏泄同轴电缆由内导体、绝缘介质、开槽屏蔽层和外

【作者简介】王晶（1984–），男，中国山西怀仁人，本科，助理工程师本科，从事人工智能在铁路通信网智能运维与故障预测中的应用研究。

护套四层结构组成。内导体通常采用铜或铝材，负责高频信号的传输；绝缘介质常用聚乙烯或氟塑料，保证信号传输的稳定性；开槽屏蔽层是 LCC 的核心部件，通过精确设计的槽孔实现电磁波的可控泄漏；外护套则提供机械保护和环境隔离功能。

与普通同轴电缆相比，LCC 在结构上有两个显著特点：一是屏蔽层采用周期性开槽设计，槽孔形状、尺寸和间距根据工作频率和耦合需求精确计算；二是绝缘介质需具备较低的介电常数和损耗因子，以确保信号传输效率。铁路运行环境对 LCC 性能提出了特殊要求。隧道内相对湿度常年在 80% 以上，温差可达 30-50℃，加之列车运行引起的振动加速度可达 0.5-2.0g，这些因素共同作用下，LCC 易出现材料老化、结构疲劳和电气性能劣化。此外，山区铁路还面临雷击、杂散电流等电磁干扰问题，要求 LCC 具备更强的屏蔽和防护能力。

2.2 典型故障类型与演化机制

2.2.1 环境腐蚀与绝缘老化机理

铁路隧道环境中的高湿度、高盐分及有害气体（如 SO_2、NO_x）是导致 LCC 腐蚀和老化的主要因素。研究表明，当相对湿度超过 75% 时，水分会通过外护套微裂纹逐渐渗入，导致绝缘介质吸湿增重（可达 0.5% ~ 1.2%），介电常数上升（增幅可达 10% ~ 15%），最终引发信号泄漏不均匀和传输损耗增加。

2.2.2 机械损伤与结构失效的动力学过程

LCC 在敷设和运行过程中承受多种机械应力作用，包括拉伸应力（主要来源于自重和安装张力）、弯曲应力（发生在转弯处）、挤压应力（来自固定卡具）和振动应力（列车通过时产生）。这些应力长期作用下，材料会发生疲劳损伤，表现为裂纹萌生和扩展。

2.2.3 电气击穿与谐波干扰的电磁机制

LCC 工作在高频条件下（铁路通信常用频段为 400MHz—2.6GHz），电气故障主要表现为局部放电和介质击穿。当绝缘存在缺陷或老化时，电场分布不均匀，局部场强超过临界值（空气中约为 3kV/mm）即引发放电现象。局部放电会产生高频电磁脉冲，干扰正常信号传输，同时加速绝缘劣化。

3 故障对铁路信号系统的影响机制

3.1 信号覆盖均匀性与质量劣化

LCC 故障对信号覆盖的影响主要表现为覆盖盲区、信号波动和质量下降。当屏蔽层出现局部损伤时，该处耦合损耗会发生突变，导致信号辐射不均匀。以 0558—RU 基站案例为例，故障点处的驻波比从正常值 1.05—1.10 上升至 1.30—1.53，相应区域的信号强度波动达 5—8dB，严重影响了 LTE 网络的稳定性。

3.2 系统安全与运行可靠性下降

LCC 故障引起的通信异常会连锁影响列车运行安全。数据表明，当无线通信中断持续时间超过 3 秒时，CTCS—3 级列控系统将触发降级程序；中断超过 10 秒，可能导致列车紧急制动。在 0558—RU 案例中，驻波告警累计达 372 次，其中重要告警 34 次，虽未造成行车事故，但已对运营可靠性构成严重威胁。

系统可靠性可用平均无故障时间（MTBF）和平均修复时间（MTTR）评价。研究表明，采用智能监测系统后，LCC 的 MTBF 可从原来的 2.5 年提升至 4 年以上，MTTR 从 8 小时缩短至 2 小时以内，系统可用性从 99.5% 提高至 99.9% 以上。

3.3 维护成本与生命周期管理压力

LCC 故障导致的维护成本包括直接成本（材料、人工）和间接成本（运营中断、安全风险）。据统计，单次 LCC 故障处理的平均成本为 1.5—3 万元，而更换整段电缆的费用可达 10—30 万元。在 0558—RU 案例中，由于智能监测系统的早期预警，避免了故障扩大化，预计节约维护成本约 15 万元。

4 实证分析：0558–RU 基站漏缆驻波告警案例

4.1 故障概况与监测数据统计

2025 年 3 月至 6 月期间，0558-RU 基站下行肃宁方向漏缆频繁触发驻波告警。监测系统记录显示，累计告警次数达 372 次，其中 6 月上旬重要告警（驻波比 >1.5）集中出现 34 次。驻波比统计特征为：最低值 1.30，最高值 1.53，平均值 1.41，标准差 0.06。告警时间分布具有明显规律性，每日 14：00-18：00 为告警高发时段，与气温日变化趋势吻合，表明故障特性受温度影响显著。

4.2 故障定位与处理过程分析

故障处理过程分为四个阶段：初期监测定位、外观排查、持续验证和最终处置。

第一阶段：智能监测定位（3 月 26 日）

漏缆在线监测系统基于时域反射（TDR）原理，通过分析反射信号的时间和幅度特征，精准定位故障点位于基站下行肃宁方向 125 米处。系统数据显示，该点位驻波比呈现规律性波动，每日告警 2-3 次，每次持续 2-3 小时后自动恢复，表明故障为间歇性特征。

第二阶段：现场外观排查（4 月 22 日）

作业组对定位区段进行详细外观检查，包括缆体表面状态、固定卡具紧固度、接头密封性等。检查结果未见明显异常，无破皮、挤压、变形等可见损伤，排除了外部机械损伤导致故障的可能性。

第三阶段：持续监测验证（4 月 23 日 -6 月 10 日）

通过近两个月的持续监测，发现告警频率呈上升趋势，尤其是环境温度较高时，告警持续时间延长。6 月 10 日进行的二次现场测试显示，从最近接头处测量的数据正常，与监测系统告警形成鲜明对比，进一步证实故障点位于两接头之间的缆体内部。

第四阶段：综合研判与故障处置（6 月 13 日）

基于监测数据趋势分析和现场测试结果，作业组判定故障原因为漏缆内部介质特性不良。6 月 13 日天窗期更换

故障段漏缆后，监测系统显示该点位驻波比恢复至 1.05-1.08 的正常范围，告警彻底消除。

4.3 故障机理验证与根本原因分析

更换下的故障漏缆经实验室解剖分析，发现外导体存在明显变形褶皱（如图 1 所示），褶皱深度约 0.3mm，长度约 15mm，位于距起点 125.3 米处，与监测系统定位结果高度吻合。内导体和绝缘介质未见明显异常。



图 1 故障漏缆外导体变形褶皱示意图

变形褶皱导致屏蔽层槽孔结构变形，改变了电磁波泄漏特性，引起阻抗不连续和信号反射，最终表现为驻波比异常。根本原因分析表明，该变形可能源于敷设过程中的机械应力集中，在温度变化引起的热胀冷缩作用下，缺陷逐渐扩大并显现。

这一案例证实了机械损伤与环境应力协同作用导致的隐性故障机理，也凸显了传统外观检查的局限性，以及智能监测在发现内部缺陷方面的优势。

5 LCC 故障智能防控体系构建

5.1 多源融合的在线监测平台架构

基于 0558-RU 案例的经验，构建了集感知层、传输层、平台层和应用层于一体的 LCC 智能监测平台。

感知层部署多类型传感器，包括：分布式光纤传感器（DTS/DAS）用于温度和振动监测；射频传感器用于驻波比和回波损耗测量；电流电压传感器用于电气参数采集；环境传感器用于温湿度、盐度等环境参数监测。传感器布设密度根据故障概率分布优化设计，重点区域监测点间距不超过 50 米。

传输层采用工业以太网和无线通信混合组网，确保数据实时可靠传输。在铁路环境中，特别考虑了电磁兼容性和防雷保护要求。

平台层基于云计算和大数据技术，构建数据存储、处理和分析能力。平台日均处理数据量超过 10TB，采用时序数据库和分布式存储架构，支持毫秒级数据查询和分析。

应用层提供故障预警、健康评估、决策支持等功能。基于机器学习算法开发的故障预测模型，可实现提前 7—30 天的故障预警，准确率达 85% 以上。

5.2 智能诊断与预测性维护技术

智能诊断系统融合多源监测数据，采用层次化诊断策略：第一层基于规则引擎实现实时异常检测；第二层采用信号处理技术（如小波分析、频谱分析）进行故障特征提取；第三层应用深度学习模型（如 CNN、LSTM）实现故障分类和严重程度评估。

5.3 全寿命周期防控措施与标准化流程

LCC 全寿命周期管理涵盖设计、施工、运维和报废四个阶段，各阶段关键控制点如下：

设计阶段：开展环境适应性设计，选用耐腐蚀、抗疲劳材料；进行可靠性预计和故障模式影响分析（FMEA）；优化槽孔结构设计，减少阻抗波动。

施工阶段：严格控制敷设张力和弯曲半径（通常不小于电缆外径的 15 倍）；规范接头处理工艺，确保防水密封性能；实施施工质量全过程监控。

运维阶段：建立 " 日常巡检 + 定期检测 + 专项评估 " 的多级运维体系；基于监测数据动态调整巡检周期和内容；推广模块化更换和快速修复技术。

报废阶段：制定科学的退役评估标准；规范废旧电缆回收处理流程，提高资源再利用率。

6 结语

本文通过理论分析与案例实证相结合的方法，系统研究了铁路漏泄同轴电缆的故障机理与智能防控策略：

第一，LCC 故障主要源于环境腐蚀、机械损伤和电气击穿三大机理，且多为多因素耦合作用的渐进性过程。0558-RU 基站案例表明，外导体变形等隐性故障难以通过传统手段及时发现，智能监测系统在此类故障的早期预警中发挥关键作用。第二，基于多源信息融合的智能监测平台可实现 LCC 运行状态的实时感知和精准评估。监测数据表明，该系统可将故障定位精度控制在 ±5 米以内，预警准确率超过 85%，显著提升运维效率。第三，预测性维护策略可有效降低 LCC 全寿命周期成本。实证分析显示，智能运维体系可将 MTTR 缩短 75% 以上，运维成本降低 20%-30%，设备使用寿命延长 2-3 年。

随着 5G-R、北斗导航等新技术在铁路领域的推广应用，LCC 将面临更高频段、更高速率的传输需求。未来研究应重点关注以下方向：一是开发基于光子晶体和超材料的新一代 LCC，提升高频传输性能；二是探索数字孪生技术在 LCC 运维中的应用，实现物理实体与虚拟模型的深度融合；三是研究基于区块链技术的 LCC 全寿命周期数据管理，提高数据可信度和追溯性。

只有持续推动技术创新与运维模式变革，才能构建更加安全、高效、智能的铁路通信系统，为交通强国建设提供坚实基础保障。

参考文献

[1] 陈小平. 高速铁路漏泄同轴电缆智能检测系统[J]. 铁道通信信号, 2021,57(12):48-52.

[2] 张国光. 铁路无线列车调度用漏泄同轴电缆的配置及接续技术[J]. 有线电视技术, 2008,(02):115-117.

[3] 王震，江兰，章明明，等. 铁路无线通信用漏泄同轴电缆设计[J]. 电子科技, 2012,25(05):30-33.

[4] 刘爽. 漏泄同轴电缆间耦合分析及隔离度提升研究[D]. 华中科技大学, 2022.