攻击类型、影响范围等方面开展分析，将分析结果推送至前端，拓扑图、热力图、雷达图等可视化工具，及时更新。从交互的角度而言，可视化界面提供钻取分析、筛选查询等操作。安全人员可根据实际需要，与可视化界面交互。举例而言，当界面将某台设备的颜色标准为红色时，安全人员点击界面，便能获取设备型号、IP 地址、近期运行日志、关联流量数据、历史安全事件等更为详细的信息，从而精准把握设备运行状态。

4 工控网络安全态势感知与可视化的挑战与对策

4.1 挑战分析

态势感知模型与可视化技术能有效提升工控网络安全风险防控能力，然而，实践层面，态势感知模型与可视化技术的应用，仍面临着多重挑战。

一是实时性不足。工控网络对响应速度要求极高，部分攻击行为如参数篡改、指令注入可在秒级内对生产造成影响。现有分析模型中复杂的机器学习算法，如深度学习模型推理耗时较长，流处理框架在处理高并发数据时也可能出现延迟，导致告警与响应滞后，错过最佳处置时机。

二是准确性有待提升。工控网络中设备类型多样、协议复杂，设备启停、工艺调整等正常生产行为产生的数据与异常威胁数据相似，易被模型误判为攻击。同时，针对 5G 工业网关的未知攻击等新型工控威胁缺乏特征库支持，导致模型漏报，影响态势评估的精准性。

三是互操作性差。不同厂商的工控设备、安全产品采用差异化的协议与数据格式，如甲厂商的态势感知系统与乙厂商的防火墙无法直接互通数据，告警信息与日志格式不统一，导致多系统协同监测时出现数据孤岛，无法形成完整的态势视图。此外，部分老旧工控设备，如运行超过 10 年的 PLC，缺乏标准化的接口，难以接入态势感知系统，易形成监测盲区。

4.2 应对策略

实时性、准确性、交互性等方面的挑战，严重影响了态势感知模型与可视化技术在保障工控网络安全中的作用。对此，应采取有效的策略，全面改进态势感知模型与可视化技术，切实提升工控网络安全水平。

针对实时性不足的问题，可从模型优化与边缘计算部署两方面入手。模型优化方面，采用轻量化算法替代复杂算法，如将深度学习模型通过 TensorRT 工具进行量化压缩，减少模型参数与计算量，降低推理延迟。对算法流程进行简化，如在边缘节点先采用简单的规则匹配筛选出疑似异常数据，再将疑似数据传输至中心节点进行深度分析，减少数据传输量与中心节点的处理压力 [3]。边缘计算部署方面，在工厂车间、区域变电站等靠近数据采集点的位置部署边缘计算节点，实现数据的本地化处理，如边缘节点可实时分析 PLC 设备的运行数据，发现异常时本地触发简单响应，无需等待中心节点的指令，大幅缩短响应时间。

针对准确性有待提升的问题，可构建多模型融合体系，并打造威胁情报库。不同算法，在数据分析、风险识别、危害研判中，有着不同的优势和适用范围。举例而言，孤立森林算法具有快速异常检测能力，能够在最短的时间内找出异常，基于威胁情报的特征匹配算法则具有精准识别能力，能够精准定位风险。可构建多模型融合体系，协同发挥各类算法在风险识别中的作用，有效解决单一算法导致的偏差问题。威胁情报库的构建，能够提升态势感知模型对新型威胁的识别能力。应以企业内部的历史安全事件数据为基础，全面整合行业专用威胁情报，打造本地化的情报库，同时，做好情报库的动态更新。

针对交互性差的问题，应从老旧设备改造以及标准化建设两个方面采取好措施。老旧设备改造方面，对已经无法接入系统的老旧设备，可部署外挂式采集模块，以非侵入式方式获取设备数据。以老旧 PLC 为例，可在通信线路旁部署信号采集器，解析设备的通信数据。同时，结合新形势下工控网络安全风险防控的需要，制定老旧设备的替换计划，以具备标准化接口、安全功能的新型设备，逐步替换老旧设备。标准化建设方面，不同厂商系统数据共享性差，使得工控网络安全态势感知中存在着数据孤岛的问题。可采用 OPC UA for Security 等工控安全标准统一数据交换格式，并围绕互联互通规范、接口协议、数据结构以及预警格式等方面，推进行业标准化建设。

5 结语

工控网络安全态势感知模型的构建以及可视化技术的应用，能够有效提升工控网络安全风险防控能力。应深刻认识到态势感知、可视化的作用，并结合当前面临的问题，从实时性、准确性、交互性三个方面，采取好策略。

参考文献

[1] 王海达，杨龙保，胡传超.流域集控中心工控网络节点安全态势感知方法探析[J].数字技术与应用，2025（02）：77-79.

[2] 王强.基于GWO-GRU的工控网络安全态势预测模型分析[J].计算机应用文摘，2023（17）：123-125.

[3] 张晋宾.工控网络安全新兴理念及发展态势分析[J].自动化博览，2024（01）：16-21.

 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