

# 东北地区高速铁路 27.5kV 高压电缆运营维护关键技术 与体系化策略研究

姜青峰

牡丹江供电段 黑龙江 牡丹江 157000

**摘要：**东北地区气候严酷，地理环境多样，高铁27.5kV单相交流电缆作为牵引供电系统，在运维方面将面临严峻考验。本文以国铁集团2023年牵引供电电缆隐患排查研讨会材料汇编为基础，例举了铁路供电电缆存在的隐患问题，结合东北地区（以沈阳铁路集团和哈尔滨局铁路集团为例）气候特征，从东北地区高铁电缆的实际问题出发，提出了实现防患于未然的实实在在解决问题的具体措施和办法。提出这些措施和办法，旨在为东北高铁供电电缆的运维构建一套适合东北区域特殊性的“排查-整治-监测-预警-预防”一体化管理体系。该体系强调源头适应性设计、过程强化管控、智能监测预警及标准化应急流程，以提升电缆设备在恶劣环境下的可靠性，为保障东北乃至全国高寒地区高铁供电安全提供系统的理论支撑与实践指南。

**关键词：**东北高寒地区；高速铁路；电缆隐患；隐患防范措施；状态监测；适应性运维

## 1 引言：高铁供电电缆的现状

2023 年国铁集团组织的全国性高铁供电电缆隐患排查，系统性地揭示了电缆在全生命周期管理中存在的深层问题。这些问题并非孤立存在，而是相互关联，共同构成了影响供电安全的潜在风险链条。排查发现的主要问题归纳如下：

### 1.1 设计选型与施工遗留的“先天不足”

环境适应性缺陷：部分早期项目在电缆及附件的选型方面，耐低温、抗腐蚀等级未充分考虑特殊地域（如高寒、沿海）气候，材料在极端环境下提前老化或劣化。敷设安装工艺不达标：存在电缆弯曲半径不足、牵引力过大导致内部隐形损伤、接地施工不规范（如接地线截面不足、连接工艺粗糙）等历史遗留问题<sup>[1]</sup>。防护措施欠缺：部分区段电缆沟排水、防火、防机械损伤的设计与施工存在缺陷，电缆长期处于潮湿、积水或外力压迫的不利环境中。

### 1.2 外护套与接地系统隐患突出

外护套破损普遍：因施工回填问题、后期其他工程交叉施工、外部腐蚀等原因，导致电缆外护套破损的点位较多，且未被及时发现和处理。接地问题：本次排查的重灾区，集中表现为：护层保护器（SPD）型号不匹配或失效；单芯电缆金属护层环流超标现象普遍，表明接地方式不当或多点接地隐患严重；部分接地引线腐蚀、连接点松动，导致接地电阻超标。

### 1.3 电缆通道或电缆沟环境恶化

电缆沟积水、杂物堆积严重：大量电缆沟（管）存在

长期积水、淤污问题，加快乐电缆腐蚀，也影响散热。消防隐患（易燃物堆积）与动物啃咬风险并存。防火分隔缺失：同沟敷设的多回电缆之间、强弱电电缆之间，缺少有效的防火隔离措施，一旦失火易造成事故扩大<sup>[2]</sup>。

### 1.4 运维监测与管理短板

状态感知能力不足：依赖人工定期巡检，对电缆本体绝缘状态、接头温度、护层环流等关键参数的实时在线监测覆盖严重不足，无法实现故障预警。基础台账与定位不准：部分区段电缆路径、接头位置、型号参数等基础资料不完整、不准确，给故障查找和精准运维带来巨大困难。预防性试验执行不到位：因天窗点时间紧张、设备庞大（串联谐振）等原因，预防性试验（如耐压试验、振荡波局放测试）未能按周期有效开展，缺陷无法提前发现，更主要的原因是耐压试验设备（串联谐振）无法再铁路沿线实施试验<sup>[3]</sup>。

## 2 东北地区铁路供电电缆隐患类型

### 2.1 极端低温直接引发的材料与物理性故障

聚合物材料低温脆化与开裂：电缆绝缘层、外护套（尤其早期使用的普通PVC、PE材料）及硅橡胶、冷缩附件在持续-30℃以下的极端低温中，玻璃化转变温度被逾越，材料柔韧性丧失，变得硬脆。在风力晃动、轻微机械应力或周期性敷设弯曲处，极易产生微裂纹。这些裂纹是后续水分、潮气侵入的通道，直接导致绝缘电阻下降，为绝缘击穿和外护套破损埋下伏笔。密封与粘接界面失效：电缆终端、中间接头的密封胶、填充胶及冷缩管在低温下收缩性能变化，弹性恢复力减弱<sup>[4]</sup>。长期热胀冷缩

循环后,密封界面产生缝隙,形成“呼吸效应”,吸入潮气并内部凝露,是导致附件内部受潮放电的主要原因。

## 2.2 冻融循环与水文地质环境导致的机械与腐蚀故障

**水分冻胀:** 电缆沟、井内积水或渗入电缆周围土壤的水分冬季结冰,体积膨胀约9%,产生巨大的不均匀挤压力,可导致电缆护套变形、铠装层凹陷、甚至电缆本体压扁。**冻土效应:** 在季节冻土区,地基的周期性冻胀(冬季)和融沉(春季)导致电缆支架、管道发生位移、扭曲。电缆长期承受拉、压、剪交变应力,产生机械疲劳,可能导致连接部位松动、接头受拉,甚至拉断接地引线(北京局冬季施工问题)。**融雪剂引发的强腐蚀环境:** 冬季为保障道岔等运行,大量使用的氯盐类融雪剂随雪水融化渗入电缆沟。其高浓度的氯离子环境对电缆的金属铠装层、铜屏蔽层、接地铜排及连接螺栓造成电化学腐蚀,腐蚀速率远高于常态。这不仅直接破坏外护套系统,更会导致接地体截面减小、连接点电阻激增,严重影响接地系统有效性,并可能因腐蚀穿孔引发主绝缘故障<sup>[5]</sup>。

## 2.3 巨大温差与高湿环境诱发的电气故障

**连接部位热疲劳与接触劣化:** 东北地区年温差可达70°C以上,昼夜间也可能有剧烈温差。金属导体(如设备线夹、螺栓)反复的热胀冷缩会在接触面产生微动磨损,破坏导电膏或氧化层,导致接触压力松弛、接触电阻稳步上升。这一过程是“温水煮青蛙”式的,最终在负荷电流下引发局部过热、烧熔,是连接故障的重要诱因。**凝露导致绝缘性能劣化:** 夏季或昼夜温差大时,电缆隧道、箱变、接头柜内部空气湿度饱和,在温度较低的电缆金属表面、瓷套、环氧套管上极易产生凝露。凝露水膜使绝缘表面电阻急剧下降,诱发沿面闪络;若侵入已存在微裂纹的附件内部,则直接引发内部放电。

## 2.4 特殊环境叠加导致的运维挑战与故障特性

**故障发生的季节性与滞后性:** 许多故障在冬季严寒期“孕育”(如产生微裂纹、密封失效),但症状(如放电、击穿)可能延迟到春季融雪潮气侵入或夏季高负荷时才显现,给故障溯源和预防性排查带来困难。**预防性检测与应急抢修窗口期短:** 漫长冬季极寒天气下,人工巡检、红外测温等户外作业效率低、安全性差。同时,低温环境下的电缆附件安装(如应力锥安装、密封处理)工艺要求极高,施工质量难以保证,抢修后复发率高。多因素耦合,故障根源复杂:一次故障往往是“低温脆化+冻胀损伤+潮气侵入”或“腐蚀+接触松动+过载”等多个环境因素与电气因素共同作用的结果,分析诊断需综合考虑。

东北地域性电缆故障的核心特征是:环境应力(低温、冻融、温差、腐蚀)作为主导诱因,与电缆系统固

有弱点相互作用,加速并放大了共性故障的发生与发展。因此,对该区域的电缆运维管理,必须从“环境适应性”角度出发,在设计选型、施工规范、状态监测和检修策略上采取针对性措施,变被动应对为主动防御,以保障高铁在极端气候下的运行安全。

## 3 东北地区高铁供电电缆隐患排除及应对措施

### 3.1 电缆主绝缘隐患提前防范办法

**材料升级:** 强制采用耐-40°C及以下低温、高抗撕性能的绝缘材料(如高性能交联聚乙烯、硅橡胶)。**防潮密封强化:** 对终端、接头采用双重密封结构,并在安装时严格控制环境湿度与清洁度。**实时状态监测:** 对重点区段接头应采用电缆运行状态实时监测与预警系统(行波或局部放电在线监测),捕捉早期绝缘劣化信号。

### 3.2 电缆外护套隐患防范措施

**抗逆设计:** 采用非金属铠装或重防腐涂层金属铠装电缆。**机械防护:** 在冻土区,电缆沟设计需有防冻胀基础(如砂石换填),并预留电缆伸缩余量。**环流在线监测:** 全线部署护层环流在线监测,实时预警外护套破损导致的多点接地。**主动防腐:** 在融雪剂使用区,定期对电缆沟进行清水冲洗,降低氯离子浓度。

### 3.3 附件与连接隐患防范措施

**工艺冻结:** 制定《极寒环境电缆附件安装作业指导书》,严格规定低温预热、扭矩控制、密封处理等工艺红线。**智能巡检:** 运用无人机红外测温定期普查户外终端、设备线夹,及时发现过热点。**预防性紧固:** 在每年秋季,对全线电气连接点进行力矩校核与紧固,并涂抹导电膏防氧化。

### 3.4 接地系统隐患防范措施

**材料与规格提升:** 接地体采用铜覆钢等防腐材料,并加大截面裕度(如提升至常规的1.5倍)。**接地方式优化:** 在长电缆线路中,优先采用交叉互联接地,并配套高性能护层保护器,以有效抑制环流。**动态监测:** 安装接地电阻在线监测装置,实时掌握其变化,避免因冬季土壤冻结造成“安全假象”。

## 4 加强从被动应对到主动预防的维护体系

### 4.1 日常运行维护

这是最基本、最频繁的维护工作,主要依靠人工或简单工具进行。

**定期巡视检查:** 内容:检查电缆路径有无开挖、下沉、积水;检查电缆本体、终端头、接头有无外破、变形、污秽、放电痕迹;检查接地箱、护层保护器是否完好;检查电缆通道防火、排水设施是否正常。方式:人工步行或车辆巡视,重点区段增加频次。红外测温:内

容：使用红外热像仪对电缆终端、接头、接地连接点等关键部位进行测温，发现因接触不良、环流等引起的异常过热。特点：非接触、不停电，是发现隐性热缺陷最有效的手段之一，应定期（如每季度或半年）执行。定期预防性试验：按照《电力设备预防性试验规程》等标准，在停电状态下进行的电气性能检验。绝缘电阻测试：使用兆欧表测量电缆主绝缘及外护套的绝缘电阻，判断其是否受潮或整体劣化。这是最基础的试验。电缆交流（超低频0.1HZ）耐压试验并测量泄漏电流值：对电缆施加2U<sub>0</sub>及以上交流电压，通过泄漏电流值的变化判断绝缘状况，有效发现XLPE电缆的绝缘缺陷。

#### 4.2 状态维护策略优化

将日常定期巡视检查、电缆耐压试验、外护套测试和局部放电检测等测试数据整合，驱动决策升级。建立电缆档案：记录所有巡视、试验、检测数据，形成电缆的“健康档案”。实施状态评价与风险评估：按照《电缆线路状态评价导则》（QGDW456-2010）标准，依据档案数据，对电缆线路的健康状态进行分级（正常、注意、异常、严重），评估故障风险。从“定期检修”向“状态检修”过渡：根据状态评价结果，对“注意”状态设备加强监测，对“异常”状态设备安排计划性停电检修，对“健康”设备可适当延长试验周期，实现资源优化与精准维护。

#### 4.3 基于大数据与人机协同维护展望

今天，我们处在AI与大数据技术迭代快速发展的时代，AI+5G（6G）赋能+物联网会改变传统的电缆检修模式。在大数据智能时代，人机协同维护是当前工业设备管理领域最前沿的演进方向，它标志着从传统的、经验驱动的“主动维护”向高度智能化、预测性的“智慧维护”的范式转变。

在“排查-整治-监测-预警-预防”闭环管理体系中，将来会装上一个“智能大脑”和“数字神经网络”，使其运行得更精准、更高效、更自主。常规的维护办法正经

历深刻变革，终将走向人工智能时代，其路径包括：从“人工为主”到“人机协同”：无人机巡检、机器人巡线会补充和替代部分人工劳动。从“停电试验”到“在线监测”：分布式光纤测温（DTS）、环流在线监测、电缆在线实时监测与预警等技术的普及，可实现电缆线路状态在线实时监测。从“周期固定”到“动态优化”：基于大数据和人工智能的状态预测，会推动维护策略向“预测性维护”的高级阶段发展。

### 5 结论

保障东北高寒地区高速铁路27.5kV高压电缆的安全运行，是一项融合了普适性技术规律与特殊地域挑战的系统工程。该体系工程强调：在设计源头，通过材料选型、结构设计和规范提升，预先植入抵御严寒、冻融、温变的基因。在施工验收环节，通过严控环境、强化工艺追溯和深化试验，筑牢质量根基，杜绝“先天不足”。在运维管理层面，通过构建专业化组织、实施差异化周期策略、部署智能化监测网络，实现从“被动应对”到“主动预警-精准干预”的转变。在故障处理方面，通过优化适应冬季作业的定位技术和修复工艺，强化应急保障，提升快速查找故障、恢复电缆安全运行的能力。

#### 参考文献

- [1]张雄,冯光伟.HDPE管在高速铁路电力电缆过轨管中的应用[J].铁路技术创新,2025,(05):100-104.
- [2]牛威杨.神经网络与行波算法融合在高速铁路电缆故障定位中的应用[J].机械制造,2025,63(02):86-90.
- [3]张羽腾,张翔鸥,倪俊琪,等.既有高速铁路接触网供电电缆改架空工程实践[J].电气化铁道,2024,35(05):98-103.
- [4]朱光亚,沈青,李军,等.严寒运行工况下高速铁路供电电缆附件界面绝缘匹配劣化特性[J].高电压技术,2025,51(03):1361-1370.
- [5]王州龙,张楠.高速铁路高架段信号电缆雷电感应力过电压计算研究[J].重庆理工大学学报(自然科学),2023,37(12):284-292.