

铁路信号电缆防损伤、防干扰施工工艺改进与应用

郭 腾

中国铁路通信信号上海工程局集团有限公司 湖南 娄底 417000

摘 要：铁路信号电缆施工过程中易受机械、环境损伤及电磁干扰影响，传统施工工艺管控粗放、抗干扰措施不足、质量检测存在短板，易遗留隐蔽故障，威胁铁路行车运营安全。本文系统分析电缆损伤与干扰成因，从精细化防护、隔离布线、屏蔽接地及全过程质控等方面优化施工工艺。经工程实践验证，改进工艺可有效降低施工返工率，提升电缆抗干扰能力与施工质量，具备较高的工程推广应用价值。

关键词：铁路信号；电缆防损伤；防干扰施工；工艺改进；应用

引言：信号电缆是铁路信号系统的关键传输载体，其施工质量直接关乎铁路信号传输稳定性与行车安全。当下传统施工模式存在防护措施单一、电磁兼容管控缺失、检测手段滞后等问题，在复杂电气化铁路工况下，电缆损伤、信号串扰、瞬态干扰等故障频发。为破解现场施工痛点，本文针对性优化防损伤、防干扰施工工艺，构建全流程质量管控体系，以此提升铁路电缆施工标准化与精细化水平。

1 铁路信号电缆施工故障成因与传统工艺缺陷分析

1.1 信号电缆常见损伤类型及成因

(1) 机械损伤：施工拖拽牵引力过大或角度突变，造成电缆护套划伤、拉伸变形及内部导体扭曲；弯曲半径小于标准要求（铠装电缆小于外径 10 倍、无铠装小于外径 8 倍），致使导体折损、绝缘层开裂；槽道进出口及支架边缘未作防护钝化处理，敷设中产生硬性摩擦切割护套；回填土石未筛分、夯压操作过猛，挤压电缆致结构畸变、导体截面缩减^[1]。(2) 环境损伤：电缆沟槽排水不畅，长期潮湿浸泡加速护套老化开裂，水分渗入绝缘层降低绝缘电阻；酸碱性土壤或化学腐蚀介质侵蚀，破坏护套完整性并腐蚀金属屏蔽层与导体；季节性温差循环与紫外线辐射导致外护层硬化脆裂，抗冲击性能下降；运营期外力撞击、落石碾压、冻胀应力或维修作业误伤，引发电缆绝缘破损、芯线断裂等结构性损坏。

1.2 信号电缆干扰类型及产生机理

(1) 电磁干扰：铁路沿线高压电力电缆、牵引变电设备及接触网系统运行时产生工频电磁场，通过电磁辐射、感性耦合或阻性耦合进入信号回路叠加干扰电压；列车升降弓瞬间产生高频暂态脉冲及电弧放电，耦合至邻近信号电缆，造成信号瞬断、误码率升高乃至联锁逻

辑紊乱，严重威胁行车安全。(2) 施工工艺干扰：信号电缆与电力电缆同槽混敷或交叉间距不足，引发电磁串扰；屏蔽层接地方式错误、接地电阻超标或接地线断线，削弱屏蔽效能并引入共阻抗耦合；电缆中间接头屏蔽层处理不规范，破坏传输线均匀性引入反射干扰；布线间距未按频率分区设置，导致邻线间信号串扰与传输失真加剧。

1.3 传统施工工艺核心缺陷

(1) 防损伤施工缺陷：敷设操作缺乏精细化管控，拖拽速度与张力无实时监测手段；防护措施单一，依赖简易橡胶垫、尼龙绳等临时防护，特殊路段（过轨、出入土、桥隧过渡段）未作专项加强防护；缺少全流程护套完整性检测标准，损伤隐患隐蔽留存。(2) 防干扰施工缺陷：未按电磁兼容要求分区布线，强弱电混沟问题突出；屏蔽接地采用锡焊搭接工艺，接触电阻大且易氧化脱落，接地长期可靠性无法保障；未建立施工阶段电磁干扰预控机制，工艺标准执行流于形式，无量化验收指标。(3) 质量检测缺陷：施工验收仅依赖绝缘电阻测试、导通试验等常规手段，对护套微裂纹、屏蔽层不连续、接头隐性故障等深层缺陷缺乏诊断能力；未引入时域反射、局部放电检测等在线诊断技术，干扰隐患难以精准定位，隐蔽性缺陷长期留存威胁运营安全。

2 铁路信号电缆防损伤、防干扰施工工艺改进设计

2.1 电缆防损伤精细化施工工艺改进

(1) 敷设工艺优化：制定电缆敷设张力分级控制标准，采用牵引力监测装置实时把控拖拽力度，杜绝过载拉伸；明确弯曲半径执行下限（铠装电缆不小于外径 10 倍、无铠装不小于外径 8 倍），配置专用转角滑轮组及导向架，强制满足半径要求；按设计规范预留电缆余量

(直埋段每 100m 预留 2%~3%, 桥隧过渡段增设 S 形余弯), 消除热胀冷缩及沉降引发的附加应力损伤。(2) 分区防护工艺改进: 直埋区段采用细砂或筛分土回填并敷设保护盖板或警示带, 埋深严格执行标准(普通地段 $\geq 0.8\text{m}$, 过轨 $\geq 1.0\text{m}$, 站内槽道 $\geq 0.5\text{m}$); 槽道区段所有支架、托板及进出口转角加装橡胶护线条或聚氨酯内衬, 消除硬接触摩擦源; 穿管段选用内壁光滑无毛刺的 HDPE 管或镀锌钢管, 管口做喇叭口倒角处理; 跨路过渡段增设钢槽包封或混凝土包封保护层, 防止振动及外力冲击损伤^[2]。(3) 成品保护工艺优化: 建立电缆敷设完成区挂牌标识与隔离防护制度, 划定成品保护责任区, 明确各作业班组防护职责; 交叉施工期间对已敷设电缆铺设防压盖板或搭设临时防护棚; 回填作业采用人工分层覆土配合轻型夯具压实, 严禁大型机械直接碾压电缆区域; 回填完成后按 5% 比例抽检埋深和护套外观完整性, 建立成品保护巡查台账, 对破坏行为进行责任追溯, 严控二次损伤风险。

2.2 电缆防干扰施工工艺改进

(1) 布线隔离工艺优化: 严格划分强弱电缆敷设区域, 信号电缆与高压电力电缆水平间距按电压等级差异化控制(25kV 牵引供电回路间距不小于 2.5m, 10kV 电力电缆不小于 1.5m, 低压电力电缆不小于 0.6m), 受条件限制时设置混凝土隔板或金属隔离槽进行物理分隔; 多根信号电缆同槽敷设按工作频率分层排列, 高频与低频回路间设置间隔支架, 高、低频率电缆分组绑扎并保持 0.15m 以上间距, 降低邻线串扰。(2) 屏蔽接地工艺改进: 内屏蔽铁路数字信号电缆屏蔽层采用室外单端接地、室内通过防雷保安器接地方式, 屏蔽连接线采用截面积不小于 1.5mm² 多股铜线, 接地电阻严格控制在 4 Ω 以内; 铝护套与屏蔽层在电缆两端均需接地; 贯通地线连接采用压接工艺替代锡焊搭接, 接地端子做热镀锌防腐处理, 确保接地回路长期可靠性, 有效消除接触不良与地电位差引起的环流干扰^[3]。(3) 复杂工况抗干扰优化: 电气化铁路区段信号电缆全线采用铝护套屏蔽结构并增设铠装层, 增强电场屏蔽效能; 牵引变电所、分区所周边 200m 强干扰区域, 电缆沟槽壁敷设接地铜网并增设屏蔽钢管防护; 对易受脉冲干扰的进站信号机等关键回路, 在电缆终端加装铁氧体磁环或低通滤波模块, 有效抑制高频暂态干扰耦合进入信号通道。

2.3 施工配套质控工艺优化

(1) 施工前勘察与技术交底工艺: 施工前全面踏勘沿线电缆径路, 绘制障碍物分布图, 标注高压电力电缆、接地装置等干扰源位置及场强数据; 采用电磁环

境测试仪对强干扰区域进行场强量化测定; 组织设计、施工、监理三方技术交底, 针对特殊路段和强干扰区域编制专项施工方案及应急处置预案, 明确工艺控制重点与验收标准。(2) 施工过程动态质控工艺: 建立工序自检、互检、专检三级质控体系, 对敷设张力、弯曲半径、接地电阻、屏蔽层连续性等关键参数实施逐段检测与记录; 实行隐蔽工程影像留存及举牌验收制度, 上道工序验收不合格不得转入下道工序; 配备专职质量巡查员, 对工艺执行情况进行随机抽查, 发现偏差当即整改并记录备案, 确保施工隐患即查即改^[4]。(3) 竣工检测工艺升级: 优化检测流程, 将绝缘电阻测试、直流耐压试验、屏蔽层导通检测、时域反射 TDR 特性阻抗测试、近端串扰及插入损耗测试有机整合为系统化检测序列, 覆盖电缆机械完整性、屏蔽连续性和信号传输质量三大维度; 编制竣工检测报告, 对各项电气性能指标量化评定, 确保电缆线路机械完整性和电磁兼容性全面达标。

3 铁路信号电缆防损伤、防干扰施工改进工艺工程应用与效果分析

3.1 工程应用概况

(1) 工程施工场景: 选取某铁路信号改造工程作为改进工艺应用试点。工程范围涵盖站内及区间信号电缆更新改造, 敷设各型信号电缆总计约 508.6 百米, 涉及联锁道岔 145 组、信号机 104 架、方向盒 70 个、变压器箱 218 个、终端电缆盒 102 个。现场工况涵盖直埋、槽道、穿管、过轨等多种敷设场景, 电磁环境包含牵引供电接触网区段及变电所周边强干扰区域。(2) 施工实施方案: 组建专项整治组, 采用整区间槽道式电缆布放工法, 将埋设于地下的电缆重新放置于地面电缆槽内, 解决因冻土、季节性变化造成的电缆电气特性不良等问题。施工中全面推行精细化防损伤敷设工艺、标准化防干扰布线与屏蔽接地工艺, 配置牵引力监测装置、专用转角滑轮组、接地电阻测试仪等设备。施工重难点集中于既有线改造中多根电缆并行区段的目标识别、过轨段落的深度控制以及复杂电磁环境下的屏蔽接地质量控制。

3.2 改进工艺现场应用流程

(1) 前期准备阶段: 全面踏勘沿线电缆径路, 绘制障碍物分布图, 标注高压电力电缆、接地装置等干扰源位置及场强数据。编制防损伤、防干扰专项施工方案, 明确各工序工艺控制标准与验收要求。组织设计、施工、监理三方技术交底, 对施工人员进行工艺标准、电缆性能特点、施工图纸解读等专项培训。完成电缆、防护材料、接地材料及施工机具的进场检验。(2) 现场

施工阶段：敷设作业中采用牵引力监测装置实时控制拖拽力度，配置专用转角滑轮组强制满足弯曲半径要求。直埋段采用细砂回填并敷设保护盖板，槽道段支架及进出口加装橡胶护线条，跨路段增设钢槽包封。布线隔离方面，信号电缆与电力电缆严格按电压等级控制水平间距，受条件限制时设置混凝土隔板或金属隔离槽进行物理分隔。屏蔽接地采用单端接地方式，接地电阻控制在 4Ω 以内。过道电缆按标准沉降至安全深度。针对强干扰区域，在电缆终端加装铁氧体磁环或低通滤波模块。工序间执行自检、互检、专检三级质控。（3）收尾检测阶段：对已敷设电缆实行挂牌标识与隔离防护，回填作业采用人工分层覆土配合轻型夯具压实。组织绝缘电阻测试、屏蔽层导通检测、时域反射 TDR 特性阻抗测试、近端串扰及插入损耗测试等系统性检测。逐项验收各工序质量，对检测不合格项立即组织整改，整改完成后复验直至达标，编制竣工检测报告归档^[5]。

3.3 施工效果对比分析

（1）损伤防控效果对比：传统工艺下，室外设备电缆配线平均返工率为 10.9%。采用改进工艺后，通过精细化敷设管控、分区防护和成品保护措施，电缆配线返工率降至 2.2%，降幅达 8.7 个百分点。仅电缆配线一项工序即可节省直接费用 1952 元。电缆识别环节采用精准识别装置后，单根电缆识别所需人员从 6 人减至 3 人，日均识别数量从 3 根提升至 17 根。（2）抗干扰性能对比：传统工艺下，由于屏蔽接地技术不全面，信号设备遭受雷电及电磁干扰损害概率较高。改进工艺实施后，屏蔽层采用单端接地方式并优化接地连接工艺，接地体改良后干扰电场强度由约 410V/m 降至个位数值，趋近于零。内屏蔽铁路数字信号电缆屏蔽性能指标提高 30%，线组间抗干扰能力显著增强。（3）施工效率与安全性对比：改进工艺通过工厂化预配、插接化作业等集约化生产方式，以 4 股道车站为例，现场安装工期由原 1~2 个月缩短至 2 周左右。槽道式布放工法彻底改变了传统“掘地三尺”查找故障的模式，作业效率大幅提升。精准识别装置避免了“开缆验明”对电缆本体的不可逆损伤，从源头保障了营业线施工安全。

3.4 工艺应用问题与优化对策

（1）现场应用存在的问题：复杂地形条件下（如高原冻土区段、桥隧过渡段）槽道敷设与防护施工受限；部分施工人员对精细化工艺标准掌握不到位，传统操作习惯难以短期内转变；既有线改造中多根电缆并行、埋设环境复杂的区段，目标识别仍存在一定难度；不同工况下的防护方案适配性有待进一步提升。（2）长效优化对策：制定覆盖全工况的标准化施工手册，细化各类场景的防损伤、防干扰作业流程与验收标准；建立常态化人员培训与考核机制，强化施工人员对工艺标准、新型工装设备操作技能的掌握；推广精准识别装置、智能放缆车、芯线智能成端器等智能化施工装备；完善施工全过程影像留存与可追溯管理；建立运维阶段电缆线路定期检测与状态评估机制，实现损伤与干扰隐患的早期预警与主动防控。

结束语

本文结合铁路施工现场工况，完成信号电缆防损伤、防干扰施工工艺的优化升级，有效解决了传统工艺施工缺陷，显著降低电缆损伤概率，大幅弱化电磁干扰对信号系统的影响，同时提升施工效率、节约工程成本。针对现场应用存在的工况适配、人员操作等问题提出优化对策，可为铁路信号电缆施工及运维提质增效提供可靠的技术参考与实践依据。

参考文献

- [1] 王鹏, 张宇, 李鑫. 电气化铁路信号电缆电磁干扰机理及施工防护工艺优化 [J]. 铁路通信信号工程技术, 2024, 21(6): 45-50.
- [2] 刘彦明. 铁路信号电缆施工机械损伤隐患及精细化施工工艺改进 [J]. 铁道工程学报, 2023, 40(9): 89-94.
- [3] 龙真真, 王锐东. 铁路信号工程中电缆损伤防护与抗干扰施工技术研究 [J]. 江西建材, 2025, 16(3): 132-134.
- [4] 陈俊峰, 赵晨. 复杂工况下铁路信号电缆敷设工艺优化及电磁防护措施 [J]. 电气化铁道, 2023, 34(4): 67-71.
- [5] 周凯. 高速铁路信号电缆施工缺陷成因及防干扰防损伤优化技术 [J]. 工程技术研究, 2022, 7(18): 118-120.