

通信传输线路外力故障定位方法与闭环运维策略

—— 基于市政施工场景

程思远

山西通信通达微波技术有限公司, 山西 太原 030032

DOI:10.61369/ME.2026060015

摘 要 : 城市更新、道路改造、雨污分流等市政工程持续推进,施工机械开挖、路基碾压、管线交叉作业造成的外力破坏,已成为城区通信光缆中断的首要诱因。根据联通县域线路三年运维台账统计,市政施工引发的线路故障占全年故障总量 62.7%,频繁造成 5G 承载网、政企专线及公众宽带大面积中断,直接影响政务、民生通信稳定并增加运维赔付压力。基层通信运维长期采用被动抢修模式,存在故障定位慢、排查盲目、抢修流程不规范、隐患治理不彻底等问题,难以适应市政多点交叉施工的复杂场景。本文结合山西晋中灵石联通一线外线维修工作实际,系统分析市政施工光缆故障类型及成因,针对传统运维短板,依托 OTDR 检测技术与动态台账管理,构建故障快速定位方法,建立集隐患预判、精准定位、分级抢修、质量复核、溯源追责、长效防控于一体的闭环维修体系。通过灵石县新建街雨污分流改造工程 2025 年 4 月—10 月半年试点应用,该策略可将故障平均定位时长压缩 75%,整体修复时长缩短 44.8%,重复故障发生率下降 66.2%。研究成果可有效提升县域通信线路运维质效,为基层运营商管线防护与政企协同运维提供实践参考。

关 键 词 : 市政施工;外力破坏;通信传输线路;OTDR 故障定位;闭环维修;光缆运维

External Force Fault Location Method and Closed-Loop Operation and Maintenance Strategy for Communication Transmission Lines—Based on Municipal Construction Scenarios

Cheng Siyuan

Shanxi Communication Access Microwave Technology Co., Ltd., Taiyuan, Shanxi 030032

Abstract : Municipal projects such as urban renewal, road reconstruction, and rainwater and sewage diversion continue to advance. External force damage caused by construction machinery excavation, subgrade compaction, and pipeline crossing operations has become the primary cause of communication cable interruptions in urban areas. According to the three-year operation and maintenance ledger statistics of China Unicom's county-level lines, line failures caused by municipal construction account for 62.7% of the total annual failures, frequently resulting in large-scale interruptions of 5G bearer networks, government and enterprise private lines, and public broadband, directly affecting the stability of government and people's livelihood communications and increasing the pressure on operation and maintenance compensation. The long-term passive repair mode adopted by grassroots communication operation and maintenance faces issues such as slow fault localization, blind troubleshooting, irregular repair processes, and incomplete hidden danger treatment, making it difficult to adapt to the complex scenarios of municipal multi-point cross construction. This paper combines the actual work of front-line external line maintenance for Lingshi Unicom in Jinzhong, Shanxi Province, systematically analyzes the types and causes of cable failures in municipal construction, and addresses the shortcomings of traditional operation and maintenance. Relying on OTDR detection technology and dynamic ledger management, it constructs a rapid fault localization method and establishes a closed-loop maintenance system integrating hidden danger prediction, precise localization, hierarchical repair, quality review, traceability and accountability, and long-term prevention and control. Through a half-year pilot application from April to October 2025 in the rainwater and sewage diversion reconstruction project of Xinjian Street in Lingshi County, this strategy can compress the average fault localization time by 75%, shorten the overall repair time by 44.8%, and reduce the recurrence rate of failures by 66.2%. The research results can effectively improve the quality and efficiency of county-level communication line operation and maintenance, providing practical references for grassroots operators in pipeline protection and collaborative operation and maintenance between government and enterprises.

Keywords : municipal construction; external force damage; communication transmission lines; OTDR fault location; closed-loop maintenance; optical cable operation and maintenance

引言

城镇化建设过程中，市政基础设施改造工程常态化开展，县城城区通信光缆多沿道路、绿化带及综合管网敷设，与施工区域高度重叠，极易受到机械作业破坏。相较于线路老化、自然灾害等故障，市政外力破坏具有突发性强、破坏力度大、影响范围广的特点，是造成县城城市通信网络不稳定的核心人为因素。

县城传输光缆作为 5G 回传、政务专网、家庭宽带业务的基础载体，线路中断将直接导致大面积业务掉线，严重影响通信服务质量与运营商运维口碑。2025 年 4 月至 10 月，山西省晋中市灵石县新建街全线开展雨污分流道路施工改造，沿线主干光缆、管道光缆、架空光缆集中暴露在施工风险区域，同类外力故障集中爆发。当前县城基层运维班组仍依赖人工经验巡线排查故障，技术手段单一、流程体系不完善，同时政企施工信息互通不足、现场监护缺位、隐患整改流于形式，造成同类故障反复发生。

现有研究多侧重 OTDR 技术原理或宏观管线保护政策，较少结合县城一线抢修场景、雨污分流道路改造专项工程构建可落地的全流程闭环运维体系。本文基于灵石联通外线运维实际工作，从故障成因、运维短板、技术优化、体系建设、现场验证五个维度开展研究，形成一套适配县城市政雨污分流道路改造施工场景的标准化维修管控方案。

一、市政施工外力破坏线路故障类型及成因

（一）故障主要类型

结合 2025 年灵石县新建街雨污分流改造工程沿线外线故障抢修台账，市政施工引发的光缆损伤可划分为四类，各类故障处置难度、隐蔽程度差异显著：

第一类，机械开挖硬性断纤故障。为市政施工最严重故障，挖掘机盲目开挖沟槽、路基清表作业直接切断主干光缆、管道光缆，集中出现在新建街雨污管网开槽、基坑开挖现场，故障表象明显、告警触发迅速，但修复工程量大、中断影响范围最广。

第二类，管道挤压隐性损伤。路基回填、路面碾压、管线顶管施工过程中，外力挤压导致塑料管道变形、光缆受压扭曲，出现单芯衰耗骤升、间歇性断连问题，无明显外观破损，仅表现为网络卡顿、丢包，依靠人工巡线完全无法识别，定位难度最高。

第三类，架空光缆刚蹭破损。道路拓宽、路面破除、大型建材吊装作业中，机械臂、脚手架刚蹭新建街沿线架空吊线与光缆，造成外护套开裂、纤芯微损伤，长期风吹震动后逐步发展为断线故障，属于滞后型隐患。

第四类，施工遗留次生隐患。沟槽开挖修复后未按照规范回填、未恢复光缆防护套管、未补设警示标识，裸露光缆长期受车辆震动、雨水侵蚀，数月后发生二次故障，是新建街同一路段重复故障的主要来源。

（二）故障成因分析

一是政企协同机制不完善。灵石县新建街雨污分流改造项目前期管线勘察不全面，施工单位未提前对接灵石联通获取光缆路由、埋深、接头信息，施工方案缺少管线专项保护措施，现场开挖作业人员不掌握地下通信管线分布情况。

二是现场施工管理不规范。施工单位重进度、轻安全，未落实“先探后挖、人工试挖”规范，依靠大型机械大面积野蛮开挖，新建街全线施工点位缺少通信管线警示防护与运维旁站监护。

三是运维前置防控不足。传统月度巡检模式无法匹配新建街

连续 7 个月高频次开挖施工节奏，缺少专项施工动态台账，高危开挖路段缺少提前布防与全程监护，隐患预判能力薄弱。

四是故障排查技术单一。基层运维过度依赖人工徒步巡线，未充分利用 OTDR 精细化测试手段，挤压类隐性故障排查效率低、耗时长，错过最佳修复窗口。

二、现有线路抢修运维工作短板

（一）故障定位效率偏低

传统故障排查以人工巡查为主，依托运维人员经验判断故障区间，新建街改造路段管线交错、路由复杂，人工排查盲目性大。尤其针对挤压衰耗类隐性故障，人工排查基本无法识别，平均定位时长普遍超过一小时，严重拖慢整体抢修进度。

（二）抢修流程缺少标准化

班组抢修无统一作业规范，资源调配、熔接作业、现场防护、隐患恢复流程不统一。主干光缆断裂重大故障存在设备、人员调配滞后问题，普通配线故障存在资源浪费、抢修不彻底等问题，维修质量参差不齐，返工情况频发。

（三）重现场抢修、轻事后管控，未形成闭环链条

多数基层运维的工作重心集中在“尽快恢复通信”，抢修完成、网络通断正常即视为处置结束，普遍忽略三大后续环节：一是没有留存完整故障检测数据、现场影像证据；二是未对违规施工单位开展责任认定与追责；三是未针对新建街事故点位更新防护方案、纳入重点巡检台账。最终导致新建街同一施工路段反复出现同类故障，运维投入陷入重复消耗。

（四）长效防控机制缺失，源头治理力度薄弱

短期抢修只能解决单点线路故障，无法从根源规避重复破坏。灵石联通与住建、城管、施工项目部缺少常态化沟通渠道，施工计划提前报备、联合现场交底、竣工联合验收机制不健全；新建街施工高发区域依旧沿用常规巡检频次，没有针对性提升巡检密度、优化硬件防护，长期运维风险持续累积。

三、市政施工故障快速定位技术优化方案

以 OTDR 检测技术为核心，联动光缆静态台账、市政施工动态台账，构建“机房端精准测距—台账交叉研判—现场分段核查”三级定位模式，从技术层面解决排查盲目性问题。

（一）OTDR 双向精细化测试

故障告警触发后，第一时间在就近机房对故障光缆两端分别开展双向 OTDR 测试，摒弃单一单向测距模式。一方面通过反射峰、损耗台阶精准测算断点、挤压损伤与机房的直线距离；另一方面通过波形细节区分故障类型：尖锐反射峰对应完全断纤，平缓损耗台阶对应光缆挤压、接头受损，微弱波动对应外护套蹭蹭微损伤。结合光缆百米桩、接头盒记录，快速锁定 100m 以内故障区间，将模糊片区定位转化为精准里程定位。

（二）双台账交叉研判

完善两套动态更新台账：一是县城城区光缆静态台账，完整收录每一条光缆路由走向、埋深、管道编号、接头盒位置、架空杆路坐标；二是市政施工动态台账，安排专人每日对接灵石县住建、城管、街道办、新建街雨污分流项目部，汇总在建项目施工范围、开工工期、开挖方式、机械类型。故障发生后，将故障发生时间、OTDR 测算里程与施工台账交叉比对，优先锁定正在开展机械开挖的新建街施工点位，大幅缩减现场排查范围。

（三）分段分区现场核查

按照“由远及近、先高后低”原则，将锁定区间划分为若干小段，安排抢修人员分组核查。优先排查大型机械作业面、沟槽开挖段、管线交叉路口，快速排除无故障段落，最终确认精确故障点位；针对隐蔽管道损伤，辅以管道探测仪、地下管线探测设备复核，避免遗漏隐性故障。

四、六维闭环维修体系构建

针对灵石县新建街雨污分流改造施工故障特点，构建覆盖全流程的闭环运维体系，实现从被动抢修向主动防控转变。

（一）前置隐患预判

建立市政施工项目全周期摸排机制，新项目开工 3 个工作日内完成现场踏勘，核对施工范围与光缆路由重叠区域。针对一般施工点位布设警示桩、反光警示带、防护挡板；针对新建街全线大型开挖、路基破除等高风险工程，安排运维人员全程旁站监护，实时制止盲目开挖行为；提前梳理沿线老旧裸露光缆，在施工窗口期完成套管加固、局部路由迁改，从硬件层面提升抗破坏能力。

（二）故障精准定位

固化 OTDR 双向测试、台账比对、分段核查的标准化流程，纳入班组日常作业规范，杜绝人工盲巡，全面提升故障定位效率与准确率。

（三）分级标准化抢修

按照故障影响范围、业务等级划分三级抢修预案：

一级故障（主干光缆断裂、片区大面积断网、涉及政企应急

通信）：立即启动 24 小时应急抢修预案，半小时内集结抢修班组、全套熔接设备、备用光缆，优先保障政务、医疗、公安专线临时恢复，2 小时内完成主干应急熔接。

二级故障（配线光缆破损、小区、沿街商户断网）：30 分钟内人员到场，当日完成熔接修复、线路加固与全面测试。

三级故障（光缆微损、衰耗异常、仅存在故障隐患）：当日完成隐患整改，建立专项台账，连续三周跟踪复测。

统一编制《市政外力故障现场抢修作业规范》，规范现场安全防护、熔接指标、套管恢复、现场清理全流程。

（四）多层次质量验收

改变仅以通断为标准的验收模式，修复后通过 OTDR 复测衰耗指标、核查防护设施恢复情况、持续监测网络稳定性，留存影像及测试资料，建立可追溯故障档案。新建街所有故障修复点位全部单独归档，便于后期复查。

（五）违规溯源追责

对于人为违规施工造成的光缆故障，第一时间固定现场照片、视频、OTDR 检测记录等证据，对接新建街施工项目部、灵石县市政主管部门开展责任认定，依据《电信条例》《通信基础设施建设与保护条例》要求施工单位承担抢修费用、线路赔偿；组织施工方管理人员开展管线保护交底培训，明确违规开挖处罚标准，形成警示效应，杜绝同一施工班组重复违规。

（六）长效协同防控

建立灵石联通与县市政部门月度沟通机制，实现县域各类道路改造、雨污分流工程施工计划提前报备。按月复盘新建街故障数据，优化高危路段防护方案，对施工密集区域加密巡检频次，实现隐患常态化管控。

五、试点应用效果分析

本文体系于 2025 年 4 月—10 月在灵石县新建街雨污分流改造施工片区试点应用，以全线多条施工密集主干光缆开展实践验证，运维指标提升显著：

一是故障定位效率大幅提升，平均定位时长由 78 分钟缩短至 19 分钟，定位准确率提升至 98.7%；

二是整体抢修效率明显优化，平均修复时长下降 44.8%，重大故障应急处置能力显著增强；

三是重复故障有效治理，新建街同点位重复故障率由 31.5% 降至 10.6%，降幅达 66.2%；

四是运维成本持续下降，无效巡线、返工维修、故障赔付成本显著降低，县域运维精细化水平全面提升。

六、结论

市政施工外力破坏是当前县域通信线路运维的核心难题，传统人工抢修模式效率低、管控弱、隐患反复多发。本文结合灵石联通 2025 年新建街雨污分流改造一线运维实践，系统梳理故障成因与运维短板，建立基于 OTDR 精准检测的快速定位方法，构

建集预判、定位、抢修、验收、追责、防控为一体的闭环维修体系。经灵石县半年试点验证，该方案可显著提升故障处置效率、降低重复故障概率、优化运维质量，落地性强、投入成本低，适合山西省内各地市、县域联通基层运维班组推广应用。

未来可结合分布式光纤监测、无人机巡检、大数据预警等智能化手段，进一步提升外力故障预判能力，深化政企数字化协同，推动县域通信线路运维向智能化、精细化闭环管理方向升级。

参考文献

[1] 张健 .通信光缆线路外力故障排查与应急抢修策略 [J]. 通信技术, 2022,55 (08):102–107.

[2] 李宏伟 .城市市政施工对通信管线的破坏防控及运维管理 [J]. 工程技术研究, 2023,8 (12):189–191.

[3] 王磊 .基于 OTDR 技术的光缆故障快速定位方法优化研究 [J]. 数字通信世界, 2022 (09):56–58.

[4] 陈峰 .通信传输线路闭环运维管理体系构建与实践 [J]. 通信电源技术, 2023,40 (05):145–147.

[5] 李新美 .通信固网接入层光缆线路故障定位与维护策略 [J]. 工程技术研究, 2025,7 (12):137–139.

[6] 田振兴, 周亚单, 周建 .管道光缆施工损伤智能化防护与政企协同机制构建 [J]. 管道保护, 2026 (02):45–51.

[7] 孙中胜 .通信光缆线路常见外力故障及全周期维护探讨 [J]. 信息通信, 2019 (09):186–187.

[8] 王道明 .城市地下管线保护技术与市政施工协同管控研究 [J]. 工程管理前沿, 2025 (08):78–83.

[9] 赵宏波, 赵子岩, 丁健 .基于双向 OTDR 测试的长距离城区光缆线路故障精准测量 [J]. 光通信研究, 2011 (01):63–64.

[10] 国务院办公厅 .关于加强城市地下管线建设管理的指导意见 [国办发〔2014〕27号][Z].2014.