

城市地下勘探作业中既有管线 损毁风险预警与防护技术研究

刘自强

(中国电建集团成都勘测设计研究院有限公司, 四川 成都 611130)

摘要 城市地下勘探作业中既有管线损毁风险严重威胁城市运行安全。本文系统剖析勘探扰动机理与多维风险源, 开发高精度探测定位与信息融合技术, 构建基于多源实时监测的智能预警模型及分级响应机制, 并创新融合主动防护(地层改良、隔离屏障、施工调控)与被动防护(结构增强、缓冲耗能、应急阻断)协同体系, 以期为提升勘探作业安全性与城市基础设施韧性提供借鉴, 进而为地下空间开发提供关键技术支撑。

关键词 城市地下勘探; 既有管线; 损毁风险; 风险预警; 防护技术

中图分类号: TU990.3

文献标志码: A

DOI: 10.3969/j.issn.2097-3365.2026.07.006

0 引言

随着城市化进程加速, 地下空间开发规模持续扩大, 勘探作业中既有管线损毁风险日益凸显。供水、燃气、电力等管线作为城市运行的“生命线”, 其安全直接关乎民生保障与城市韧性^[1]。城市(特别是老城区)地下既有管线往往比较复杂, 通过前期管线调查、联系产权单位确认后仍难以完全准确掌握其类型、埋深、走向。复杂地质条件、密集管线交叉及动态扰动等因素易引发勘探过程中的管线破裂、渗漏甚至爆炸等事故, 造成人员伤亡、重大经济损失与社会影响。若是作业过程中损坏国防光缆, 还可能触犯《刑法》。因此, 构建精准高效的风险预警与防护技术体系, 实现损毁风险超前辨识、实时监测与主动防控, 是提升地下作业安全性与城市基础设施韧性的核心需求。

1 勘探作业对既有管线的扰动机理与风险源识别

在勘探作业中, 钻探设备直接击中既有管线是造成管线损坏的常见且严重情形。在作业过程中, 由于地下情况复杂, 管线埋设位置可能存在偏差记录或标识不清等问题, 使得钻探设备在未准确探明管线位置时便贸然施工。当钻探设备的钻头、钻杆等部件直接撞击到管线时, 强大的冲击力会瞬间破坏管线的结构完整性^[2]。对于金属管线, 可能出现破裂、穿孔; 对于塑料等材质管线, 则可能被打断或严重变形。这种直接打击不仅会中断管线的正常使用, 还可能引发介质泄漏, 对周边环境、人员安全以及生产生活造成极大危害, 因此勘探前精准探测管线位置至关重要^[3]。

风险源识别需立足多维度交叉分析。地质风险源涵盖复杂地层条件(高压缩性淤泥、富水砂层、破碎岩体等)及隐伏灾害体(空洞、断层等), 其空间不确定性大幅增加勘探误伤管线概率; 作业风险源集中于工艺选择失当(顶管轴线与管线交叉角 $< 30^\circ$ 时剪切风险倍增)、参数控制偏差(掘进顶力超限或注浆压力不足)及监测盲区(关键节点未布设变形传感器); 管线本体风险源则涉及材质属性(铸铁管抗弯能力仅为钢管的 $1/3$)、服役状态(腐蚀减薄或接口松动)及空间分布(多类型管线 $< 1\text{ m}$ 密集并行时扰动叠加效应显著)。需要特别关注的是高压燃气管、超高压电缆等特殊管线, 其受损可能触发链式灾害, 风险等级需提升至最高阈值^[4]。

2 既有管线高精度探测、定位与信息融合技术

2.1 多源管线探测技术原理与适用性

多源管线探测技术通过集成物探、测绘及人工智能算法实现地下管线的精准识别与空间定位^[5]。电磁感应法基于金属管线导电特性, 发射交变电磁场激发管线二次场, 适用于埋深 $\leq 5\text{ m}$ 的金属管道定位, 对燃气、供水等铁磁性管线探测精度达 $\pm 10\text{ cm}$; 地质雷达利用高频电磁波反射原理, 通过介电常数差异识别非金属管线轮廓, 在混凝土排水管、电缆通道探测中优势显著, 但其分辨率随埋深增加而衰减($> 8\text{ m}$ 时误差增至 $\pm 30\text{ cm}$)。高密度电阻率法通过布设电极阵列分析土层电性结构, 可辨识塑料管等绝缘体在富水地层中的异常区, 尤其适用于岩溶区管线空洞隐患

作者简介: 刘自强(1989-), 男, 本科, 工程师, 研究方向: 建设工程安全生产管理。

探测。惯性定位与陀螺仪导向技术结合顶管机内置传感器实时记录管线三维轨迹,对深埋(>15 m)管线动态施工定位误差 $\leq 0.1\%$ 里程^[6]。多源技术需依据管线材质、埋深、地质噪声等约束条件优化组合。例如:在电磁干扰城区宜采用地震波束成型技术抑制背景噪声,而在密集交叉管段则依赖探地雷达层析成像实现毫米级分辨。

2.2 探测精度提升与误差控制

探测精度提升需突破复杂环境下的信号干扰与定位漂移瓶颈。硬件抗干扰优化通过多频段自适应传感器阵列抑制电磁噪声,增强非金属管线识别能力;高精度惯性导航系统结合温漂补偿技术,显著提升深埋管线动态轨迹定位稳定性。多源数据协同融合构建空地一体化观测网络:地表高程畸变采用激光扫描校正,浅层电性结构通过钻孔电阻率反演约束,融合电磁与地震波数据的概率加权模型有效解决交叉管线空间分辨难题。全流程误差抑制实施系统性控制:施工前设备标定消除系统偏差,探测中同步定位与振动补偿技术避免时移误差,后处理阶段引入深度学习算法智能识别地质杂波与虚影干扰。针对岩溶区等特殊环境,极化敏感的全波形反演技术可精准区分管线目标与地质异常,大幅提升复杂场景探测可靠性。

2.3 多源数据融合与三维建模

多源数据融合通过集成地质勘探、管线探测及施工动态监测数据,构建全域地下空间数字孪生体。融合架构采用时空基准统一技术,将电磁定位点云、钻孔岩芯参数、InSAR 地表形变监测流与顶管机实时姿态数据协同校正,消除坐标系差异与时间异步误差;智能关联引擎基于图神经网络解译管线-岩土相互作用关系,自动匹配物探异常区与地质构造特征,识别隐伏管线交叉冲突区。三维动态建模依托 BIM+GIS 双平台耦合,融合地层界面概率分布模型生成参数化地质体,管线实体通过非均匀有理 B 样条(NURBS)曲面精确表达材质接口与服役状态,实现支护结构应力场、地下水流场与管线变形的多物理场耦合仿真。模型动态更新机制通过施工监测数据流驱动实时修正地层参数,预演不同勘探工艺下的管线位移风险云图,为防护决策提供沉浸式空间推演平台。

3 基于多源监测的管线损毁风险预警体系构建

3.1 风险预警指标体系

风险预警指标体系涵盖地质环境、管线状态及作业扰动三大类核心参数。地质环境指标包括地层位移速率、土压力失衡度与地下水渗透压变幅,实时捕捉土体失稳前兆;管线本体状态指标聚焦接口错位角、

管材应变梯度及腐蚀电位漂移,精准量化结构损伤程度;作业扰动指标纳入掘进顶力偏差率、振动加速度谱强度及注浆压力波动系数,动态评估施工机械的扰动强度。指标融合采用层次化赋权模型,依据管线类型(高压燃气、供水等)与地质敏感性(岩溶、软土等)动态调整阈值权重。通过物联网传感器群实时采集多维数据,结合长短期记忆网络(LSTM)预测指标演化趋势,实现“稳态监测—异常诊断—临界预警”三级响应,形成覆盖勘探全周期的风险态势感知网络。

3.2 多维度监测技术选型与布设

多维度监测技术需依据风险特征适配布设策略。地质环境监测采用分布式光纤传感网络实时捕捉地层位移与孔隙水压变化,辅以微震传感器阵列识别岩体破裂信号;浅层异常区嵌入阵列式倾角计,动态反馈土体失稳趋势。管线本体监测重点部署管壁应变片组与管节接口位移计,燃气管线增设气体微泄漏激光光谱探头;深埋管线融合陀螺仪轨迹追踪与声波导波技术,全周期量化管体形变与腐蚀损伤。作业扰动监测在施工机械关键节点安装振动加速度计与液压压力传感器,同步采集顶进力、注浆压力等动态参数。布设方案遵循“隐蔽性—鲁棒性—经济性”原则:狭窄空间采用无线自组网传输,减少布线干扰;高电磁干扰区采用屏蔽铠装传感器;深埋区构建光纤—无线混合中继网络,确保数据连续回传。

3.3 监测数据采集、传输与处理

监测数据采集采用分布式架构实现多源异构数据高效整合。智能感知层通过嵌入式传感器(光纤应变计、微震探头、气压变送器等)实时采集地层位移、管体形变及机械振动等参数,狭窄区域采用无线自组网节点实现无盲区覆盖。可靠传输层构建光纤—5G 混合网络:浅层监测点通过 LPWAN 低功耗回传;深埋区采用铠装光缆抗电磁干扰;高实时性数据(顶管机液压参数)经 5G 切片专网直传。边缘智能处理层部署网关级计算单元,运行轻量化 LSTM 模型实现数据降噪与特征提取,通过时间序列异常检测算法实时过滤环境干扰,生成结构化风险特征流。中心平台采用流式计算引擎动态融合多维度特征,结合管线材质、埋深及地质敏感性标签,输出风险等级图谱,支撑预警决策闭环。

3.4 风险预警模型与阈值设定

风险预警模型采用动态贝叶斯网络融合多源异构数据,构建“地质—管线—作业”耦合风险演化链。阈值自适应机制依据管线属性分级设定核心指标临界值:刚性管道以接口错位容限与混凝土裂缝宽度为主控阈值,柔性管线侧重环向应变梯度及曲率突变判据;

高压燃气管线增设微泄漏气体扩散浓度与土壤气压骤变双因子联动阈值。风险演化建模通过隐马尔可夫链刻画异常状态迁移规律,结合地层参数实时反演结果动态修正失稳概率权重。分级响应机制设计三级预警:初级预警触发施工参数微调(注浆压力补偿);中级预警启动支护强化与机械限速;高级预警执行停工避险及应急注浆隔离。

4 既有管线主动与被动防护技术体系

4.1 主动防护技术

主动防护技术通过超前干预降低管线损毁风险,核心涵盖地层改良、隔离屏障及施工调控三大方向。地层改良技术采用MJS工法桩实施全方位高压注浆加固,通过40 MPa水泥浆液渗透填充岩土裂隙(水泥掺量 $\geq 40\%$),提升管线周边土体强度与均质性;针对岩溶区实施速凝浆液空洞充填,同步植入钢管桩增强抗变形能力。隔离屏障技术在管线与施工区之间构建刚性防护体系:微型顶管幕(直径0.8~1.5 m)形成超前支护网络;高压燃气管线采用钢套管复合结构(外套D2400 mm钢管内衬玻璃夹砂管),双面焊接确保密封性,管间灌注低收缩水泥砂浆缓冲外部荷载。施工动态调控技术基于实时监测数据优化作业参数:通过顶力闭环控制系统限制顶进偏差率 $\leq 15\%$;在软土区实施分级降水与同步回灌(回灌率 $\geq 80\%$),采用防渗膜阻断水土流失;振动敏感区启用低转速掘进模式,结合智能注浆系统动态补偿地层损失量,实现扰动源头精准抑制。

4.2 被动防护技术

被动防护技术通过缓冲耗能机制降低管线受扰后的损毁程度,涵盖结构抗损设计、变形缓冲层及灾变应急控制三大领域。结构抗损设计针对高风险区管线采用增强型复合管材:高压燃气管线植入碳纤维增强聚合物(CFRP)内衬层,抗弯刚度提升40%;混凝土管道环向配置预应力钢绞线网,抑制裂缝扩展。变形缓冲体系在管线周边构建能量耗散层:采用高密度泡沫混凝土回填层(密度 $\leq 0.8 \text{ g/cm}^3$)吸收地层形变能;管土界面敷设楔形橡胶垫层(压缩模量 $\geq 8 \text{ MPa}$),通过弹性变形消解不均匀沉降冲击;岩土交界面设置立体土工格栅加筋带,分散剪切应力。灾变应急控制部署智能阻断系统:管道关键节点安装记忆合金自锁装置(触发应变 $\geq 5\%$),在超限变形时自动闭阀;漏水点配置膨胀止水环(遇水膨胀率300%),实现渗漏自主封堵;结构体预埋微型爆破索,受塌方冲击时定向释放支撑腔室缓冲压应力。被动防护体系与主动技术协同,形成“预防—消解—应急”全链条防护网。

4.3 防护效果评估与验证

防护效果评估采用多尺度实测验证方法,贯穿材料性能、结构响应及系统防灾安全链条。材料级验证对钢套管双面焊接接头实施气压试验(30 min压降 $\leq 1\%$),内衬玻璃夹砂管开展三点弯曲试验(极限曲率 $\geq 0.05 \text{ m}^{-1}$);缓冲层泡沫混凝土经落锤冲击测试(能量吸收率 $\geq 80\%$),楔形橡胶垫层通过百万次疲劳加载保持压缩回弹率 $> 90\%$ 。结构级验证构建缩尺试验场:MJS工法桩加固区加载模拟顶进扰动(顶力 \leq 设计值120%),实测管线位移量控制在管径的0.5%以内;钢管混凝土复合管段在3倍设计水土压力下,接口错台量稳定在 $\pm 0.5 \text{ mm}$ 阈值区间。系统防灾验证搭建全尺寸灾变模拟平台:触发5%拉伸应变激活记忆合金自锁装置(响应时间 $< 15 \text{ s}$);向膨胀止水环注水加压至0.3 MPa,验证300%体积膨胀率下的渗漏封堵时效性;通过爆破索定向释放模拟塌方冲击,结构残余承载力仍高于设计荷载70%。所有验证数据经数字孪生平台比对理论模型误差率 $< 8\%$,实现防护效能可量化、可追溯、可迭代。

5 结束语

城市地下勘探作业中的管线安全是保障城市运行的关键。本文系统剖析了勘探扰动致损机理与风险源,构建融合多源高精度探测、定位与信息融合技术的风险识别体系。在此基础上,建立基于多维实时监测数据的智能预警模型与分级响应机制,并提出主动干预(地层改良、隔离屏障、施工调控)与被动防护(结构增强、缓冲耗能、应急阻断)协同的技术体系。研究成果为超前辨识风险、精准预警与高效防护提供了系统性解决方案,可提升勘探作业安全性与城市基础设施韧性,对推动城市地下空间安全开发具有重要的实践价值。

参考文献:

- [1] 沈旭甜,张娟.复杂环境下地下综合管线探测技术研究[J].建设科技,2025(15):41-43,47.
- [2] 张莉.市政工程建设中地下管线探测技术的应用研究[J].城市建设理论研究(电子版),2025(05):208-210.
- [3] 樊涛,刘洋.测绘工程中的地下管线与地质勘探技术研究[C]//广西网络安全和信息化联合会.第二届工程技术管理与数字化转型学术交流论文集.咸阳地稷信息技术有限公司,陕西御龙科技有限公司,2024.
- [4] 曹佃龙.地下管线探测方法及测量质量控制研究[J].科学技术创新,2024(09):123-126.
- [5] 李骄阳.地下管线物探原理及探测方法分析[J].江西建材,2022(11):43-44,48.
- [6] 郑细华.城市地下管线物探中的干扰因素及排除方法[J].大众标准化,2025(19):134-136.