

城镇燃气管道第三方施工破坏防护技术及管理策略

张岩岩 (济南平阴港华燃气有限公司, 山东 济南 250400)

摘要: 围绕城市燃气管道在第三方施工扰动下的防护问题, 本文构建“技术+管理”协同机制。提出分布式光纤预警系统用于毫米级变形监测, 设计HDD隔离套管工艺以减控应力传导, 开发集成RFID与GIS的可视化地签与电子围栏系统, 实现施工行为精准识别与主动预警。在此基础上, 建立六步闭环管理流程与四方微信群协同机制, 覆盖施工前识别、过程监护与事故响应, 形成“感知—判定—联动—追溯”的风险防控链条。研究成果具备良好工程适应性, 适用于密集建成区的地下燃气管网安全防护。

关键词: 光纤预警; 定向钻护管; 电子围栏; 闭环管控

中图分类号: TU996.7 **文献标识码:** A **文章编号:** 1674-5167 (2026) 006-0100-03

Protection Technologies and Management Strategies for Preventing Third-Party Construction Damage to Urban Gas Pipelines

Zhang Yanyan (Jinan Pingyin Ganghua Gas Co., Ltd., Jinan Shandong 250400, China)

Abstract: Focusing on the protection of urban gas pipelines against disturbances caused by third-party construction, this paper constructs a “Technology + Management” collaborative mechanism. A distributed optical fiber early warning system is proposed for millimeter-level deformation monitoring, and an HDD (Horizontal Directional Drilling) isolation casing process is designed to reduce and control stress transmission. Furthermore, a visualized ground tag and electronic fence system integrating RFID and GIS is developed to achieve precise identification of construction activities and active early warning. On this basis, a six-step closed-loop management process and a WeChat group coordination mechanism involving four parties are established, covering pre-construction identification, process monitoring, and accident response, thereby forming a risk prevention and control chain of “Perception—Judgment—Linkage—Traceability”. The research results demonstrate good engineering adaptability and are suitable for the safety protection of underground gas pipeline networks in densely built-up urban areas.

Keywords: Optical Fiber Early Warning; HDD Casing Protection; Electronic Fence; Closed-Loop Control

随着城市地下空间开发强度持续提升, 燃气管道与轨道交通、市政基建等工程交汇频繁, 第三方施工导致燃气管道破坏事件频发, 成为城市运行安全的重要隐患^[1]。尤其在高压燃气管道与基坑施工净距不足的极限工况下, 传统的被动保护与分散管理方式难以满足实时预警与应急响应要求。本文基于2022年典型钻穿事故, 聚焦燃气管道在复杂环境下的防护问题, 研究范围不仅包括此类高风险、高压管道, 也兼顾了城市中更为普遍、事故频发的中、低压管道。因此, 构建一个能够适应全压力级制、并根据风险评估实施分级管控的综合防护体系。综合应用了传感技术、隔离工程、信息物联与闭环管理思维, 开展系统性研究, 旨在构建兼具实效性、可复制性的防护体系, 为类似工程提供技术支撑与管理参考^[2]。

1 燃气管道破坏事故分析

2022年9月13日16时42分, 某市轨道交通四号线二期工程施工期间, 人民东路站基坑西侧地铁围护桩在进行水平定向钻作业时击穿埋深3.8m的A燃气管道, 导致约1960m³天然气瞬时泄漏。事故触发Ⅲ级应急响应, 疏散周边7200人, 造成直接经济损

失1238万元, 影响 4.6×10^4 户用气, 事故被认定为“较大燃气第三方施工破坏责任事故”。事发管道运行11年, 管径610mm, 压力3.6MPa, 管道与地铁施工存在2.3m水平净距。事故钻孔操作违规, 致管道发生典型脆性剪切失效, 形成55mm×32mm椭圆穿孔并伴有轴向裂纹。燃气公司5h35min内完成处置。事故暴露出第三方违规施工与燃气企业监护失效问题, 为后续防护技术与管理策略研究提供事实依据^[3]。

2 第三方施工破坏防护关键技术

2.1 光纤监测预警技术

针对燃气管道与地铁基坑仅2.3m净距的极限工况, 提出在已敷设通讯硅管内嵌分布式传感光纤(DSS), 构建应变-振动双参量监测系统, 覆盖范围 $\pm 15\text{m}$, 定位精度0.5m^[4]。系统采用蛇形缠绕单模光纤和高强度光缆, 配合相敏OTDR与 ϕ -OTDR技术, 实现 $1\mu\epsilon$ 应变与0.01g振动分辨率。预警算法基于小波包能量熵与应变阈值, 设置三级响应机制: 当 $\Delta E > 0.35$ 或应变累积超 $1500\mu\epsilon$ 时触发一级报警。结合频谱分析建立频率-能量判别模型, 识别旋挖钻和冲击锤作业特征频率, 实现精准识别。系统在72h

连续试验中误报率控制在 0.8%，施工期成功捕获 7 次超限事件，干预时间均小于 15min，监测数据延迟低于 200ms。

技术实施需重点解决信号衰减问题，在管道弯头处（曲率半径 6D）采用弧形导槽过渡，降低微弯损耗至 0.15dB/km 以下，同时开发温度-应变成耦算法，表达式如下：

$$\varepsilon_{\text{真实}} = \varepsilon_{\text{测量}} - \alpha \Delta T \quad (1)$$

其中： $\varepsilon_{\text{真实}}$ 为实际应变值（单位： $\mu\varepsilon$ ）； $\varepsilon_{\text{测量}}$ 为光纤测量应变值（单位： $\mu\varepsilon$ ）； α 是温度补偿系数（取值 $11.6\mu\varepsilon/^\circ\text{C}$ ）； ΔT 为温度变化量（单位： $^\circ\text{C}$ ）。该补偿模型经恒温水箱标定验证，在 10-45 $^\circ\text{C}$ 工况下最大残差为 $7.2\mu\varepsilon$ ，满足工程监测需求，整套系统部署成本约 8 万元/km，使用寿命与管道设计寿命同步，为高密度建设区燃气管网防护提供可复制方案^[5]。

该解耦算法的提出，是解决分布式光纤传感技术在实际工程应用中的核心难题。其基本原理在于，分布式光纤传感的测量信号同时对温度和应变两个物理量敏感。在燃气管道的埋地环境中，温度变化是常态，其来源包括季节性温差、昼夜温差、土壤湿度变化乃至管道输送介质的温度波动。这些温度变化会引起光纤本身的热胀冷缩，从而产生一个“视应变”信号，该信号与由第三方施工等外部机械荷载引起的真实结构应变信号叠加在一起，若不加以区分，将导致严重的测量误差，甚至引发误报或漏报。

具体而言，温度补偿系数 α 的精准标定是实现高精度监测的关键，通常通过恒温环境下的无应力光缆温度循环试验获取。在实际部署中，常采用“双光缆”方案，通过不受力的测温光缆获取 ΔT ，结合传感光缆读数，剔除温度效应，提取真实机械应变 ε 。该解耦方法是实现毫米级变形监测与低误报率（0.8%）的技术基础，显著提升了预警系统的准确性与可靠性。

2.2 钻探避让隔离工艺

为解决城市轨道交通施工与燃气管线交叉造成的穿透风险，在既有 A 管道外侧增设 DN800 钢套管（Q345B 材质，外径 813mm，壁厚 16mm，长 30m），作为物理隔离构筑物^[6]。套管铺设采用水平定向钻（HDD）工艺，导向轨迹为抛物线形，曲率半径控制在 40D，进出口点分别距地铁围护桩 5.0m 与管道中心线 8.0m，避让地铁锚索区（张力 1200kN），保障路径平顺与应力分布可控。扩孔分三级进行，形成直径 900mm 孔道，外壁与土体预留 $\geq 50\text{mm}$ 间隙，增强界面稳定性。根据 CJJ/T 98-2014 规范，套管至围护桩水平净距 1.8m，满足 1.5D 限值要求。为确保模拟结果的准确性，本次有限元分析模型构建过程充

分考虑了现场工况的复杂性。首先，在几何建模方面，建立了包含地铁围护桩、土体、既有燃气管道及新建 HDD 隔离套管的三维实体模型，模型尺寸范围为 $100\text{m} \times 60\text{m} \times 40\text{m}$ ，以消除边界效应对关键区域计算结果的影响。其次，在材料属性定义上，土体采用能够反映其弹塑性、剪胀性和应力路径相关性的莫尔-库仑（Mohr-Coulomb）本构模型，其参数通过现场取样土工试验获得；燃气管道、隔离套管及围护桩均采用理想弹塑性模型，其屈服强度、弹性模量等参数依据相应钢材等级（L415M、Q345B）和混凝土标号确定。

在模拟加载与边界条件设置上，模型首先通过施加重力荷载并进行地应力平衡计算，以还原初始应力场。随后，通过“生死单元”技术模拟地铁基坑的开挖过程，并分步施加围护桩上的锚索预紧力（1200kN）及基坑开挖引起的侧向土压力。模型的边界条件设置为：底部完全固定，四周施加法向约束。通过以上精细化建模与分步加载分析，可以真实地再现施工扰动下“土体-结构”相互作用的力学行为，从而可靠地评估隔离套管对应力的削减效果。

采用 ABAQUS 建立三维土-管-桩耦合模型模拟结构响应，加载 1200kN 锚索荷载与侧压力后，管道最大 Mises 应力由 243MPa 降至 92MPa，降低 62.1%，显著优于 L415M 钢管设计强度控制值。本工艺为复杂市政施工条件下燃气管道保护提供了结构可靠、可推广的技术路径^[7]。

2.3 电子围栏防护系统

在燃气管道抢修过程中存在定位滞后问题，构建融合超高频 RFID 与电子围栏的四维协同防护系统。感知层通过 TPU 封装地签（ $90 \times 60 \times 5\text{mm}$ ）埋设于管顶 300mm 处，间距 5m，写入 EPC-96 数据包，存储管径、材质、埋深与风险等级，支持 ISO 14443A 协议，手机 NFC 可实现近距读取。LoRaWAN 网关组成数据传输层，通信距离 $\leq 50\text{m}$ ；平台决策层集成 GIS 地理围栏与无人机 RTK 定位（精度 $\pm 10\text{cm}$ ）；应用层依托“燃气管家”小程序，推送预警响应延迟 $\leq 2\text{s}$ 。系统构建静态、动态与应急三重防护逻辑：静态模式支持施工前调取三维坐标；动态模式监测施工设备进入缓冲区自动预警；应急模式支持通过地签 ID 上报事故点并联动调取上下游数据。通信接口兼容 OPC UA 与 Modbus TCP，数据交互周期 $\leq 5\text{s}$ ，供电采用太阳能+锂电池模式，具备 IP67 防护，设计寿命 ≥ 8 年，适用于地下燃气管网高密度施工环境的风险可视化管控需求。

经济性与标准化方面，试点段 6km 部署成本 11.8 万元（地签 1200 只 \times 80 元/只 + 围栏主机 4 台 \times 2.5

表 1 电子围栏与可视化地签关键技术指标对比表

指标项	电子围栏系统	可视化地签	集成优势
定位精度	±10cm (RTK)	±0.2m (NFC)	动静互补
响应延迟	≤ 2s	实时读取	并行处理
数据容量	云端存储	128bit/ 标签	轻量 - 海量协同
供电方式	太阳能 + 锂电池	无源	能耗优化
防护等级	IP67	IP68	全环境适应
单点成本	25000 元 / 主机	80 元 / 标签	规模部署经济性

万元 / 台)，折合单位造价 98.3 元 / m，显著低于传统示踪带（150 元 / m）方案，关键性能指标对比见表 1，该系统在 2023 年某路改造工程中验证，第三方施工报备时间由 45min 压缩至 8min，人工探挖点定位误差降至 0.2m，为高密度城区燃气管网防护建立标准化模板。

3 管理策略体系建设

3.1 建立权责对等的协同约束机制

第三方施工破坏的有效管控始于施工前期的权责界定。依据相关法律法规，应建立燃气公司与施工方权责对等的协同机制，并固化为标准化流程。施工方必须在取得施工许可前与燃气公司签订《管道安全保护协议》，明确燃气公司提供管道信息并进行交底，施工方制定并经审核的专项保护方案，以及缴纳安全保证金。协议中还应明确违约责任和惩戒措施，设定违规行为清单及阶梯式违约金，并对发生破坏事故的施工单位实施“黑名单”制度，限制其承接本区域工程项目。通过事前协议约束，可将“被动监护”转为“主动共管”，从源头上降低违规施工的动机。

3.2 第三方施工闭环管控

针对 2022 年某市 A 燃气管道被地铁钻穿事件，构建了六步 PDCA 闭环管控流程，包括巡查、风险分级、交底、旁站监护、联合验收和绩效评价。巡查由城燃、地铁及监理员联合实施，发现动土行为后 30min 内上传 GIS 坐标并启动风险评估，一级风险按标准化清单识别。现场交底 4h 内完成，明确安全要求。旁站监护全程记录，旁站率与验收通过率均 ≥ 98%。联合验收实行限时整改与复核，结果上传平台。绩效评价基于巡查、交底、旁站等记录，三方月度打分，低于 90 分启动约谈，连续两次低于 90 分列入黑名单并暂停投标资格。通过安全协议将量化指标固化为合同条款，确保第三方施工风险可量化、可追溯、可考核。

3.3 信息共享应急机制

为解决调度中心响应延迟问题，构建了“城燃—地铁—市政—公安”四位一体的应急协同微信群体系，群号与 GIS 网格编码绑定，确保 7×24h 在线，信息推送延迟控制在 24s 内。群机器人自动带出标准化模板，避免误填，涵盖事故点坐标、管径、压力等级等

信息。四方职责明确：城燃调度校验信息并下发，地铁停运与断电，市政封路与停泵，公安管制与疏散，响应回读确认，形成闭环联动。模板涵盖关阀、疏散、通风、监测等关键动作，自动汇总估算完成时间，目标 ≤ 30min，逾时提醒责任人。联动机制固化，季度演练频次 ≥ 1 次，评估标准设 A 级 ≤ 20min、B 级 20–30min、C 级 > 30min，演练结果与年度绩效挂钩，确保快速处置可复制、可持续。

4 结语

本文围绕城市燃气管道在第三方施工扰动下的风险防护问题，提出了“技术防线 + 管理闭环”的综合防控体系。研究表明：分布式光纤技术可实现毫米级变形与振动联动监测，HDD 隔离套管具备良好应力削减效果，电子围栏系统在定位精度与响应时效方面优于传统方案。同时，六步 PDCA 流程与四方应急微信群联动机制构建起可量化、可考核、可追溯的管理体系。各项成果在实际工程中得以验证，具备良好的工程适应性和推广价值，为城市复杂地下管网运行安全提供了多维支撑。

参考文献：

- [1] 吴兵. 第三方施工破坏城镇燃气管道问题分析[J]. 中华建设, 2025(11):54-55.
- [2] 韩明. 关于城镇燃气管道工程建设及其设备安全管理分析[J]. 中国设备工程, 2025(14):50-52.
- [3] 芦亚男. 基于物联网的城镇燃气管道第三方破坏实时预警技术研究[J]. 中国设备工程, 2025(10):208-210.
- [4] 刘昊, 丁文文. 城镇燃气管道泄漏带气抢修与安全防护措施研究[J]. 石化技术, 2024,31(11):378-379.
- [5] 唐国平, 陈玉宝, 陈培宁, 等. 城镇燃气管道腐蚀检测与防护研究[J]. 管道技术与设备, 2021(03):27-30.
- [6] 雷婷, 游蕙榕. 城镇燃气管道腐蚀防护对策研究[J]. 清洗世界, 2020,36(07):117-118.
- [7] 李雯. 如何有效加强城镇燃气管道后建工程管理[J]. 中国石油和化工标准与质量, 2018,38(06):60-61.

作者简介：

张岩岩 (1986-)，女，汉族，山东济南人，本科学历，初级燃气工程师，研究方向：燃气工程。