

长输油气管道第三方破坏智能识别与应急响应机制研究

李 辉

国家石油天然气管网集团有限公司华南分公司 广东 广州 510000

摘要：长输油气管道是我国能源战略通道的核心载体，第三方破坏已成为长输油气管道安全运行的首要威胁，传统人工巡检与被动防护模式存在响应滞后、漏报率高、协同不足等短板。本文围绕长输油气管道第三方破坏智能防控需求，系统梳理第三方破坏类型与成因，构建以分布式光纤传感、视频智能识别、无人机巡检、多源数据融合为核心的智能识别技术体系^[3]，设计“感知—识别—预警—研判—处置—复盘”全链条应急响应机制，提出端边云协同架构、AI模型迭代优化、分级响应与政企联动、闭环管理等关键实现路径，并结合工程应用验证技术有效性。研究成果可为长输油气管道智能化防护、风险前置管控与高效应急处置提供理论支撑与工程参考，提升管道本质安全水平。

关键词：长输油气管道；第三方破坏；智能识别；光纤传感；应急响应；多源融合

1 引言

长输油气管道是国家能源战略通道，具有跨区域、长距离、高压、大流量、埋地隐蔽、途径地形复杂、连续运行等特征。随着经济的发展和城镇化与基础设施建设快速推进，管道沿线机械开挖、非法占压、打孔盗油、施工扰动等第三方行为，具有突发性、隐蔽性、随机性强的特点，这些行为将会引发管道变形、泄漏、火灾爆炸事故频发，造成人员伤亡、环境破坏与重大经济损失，严重威胁公共安全与能源供应稳定。据行业统计，我国管道事故中60%以上是由第三方破坏引发。《中华人民共和国石油天然气管道保护法》与《生产安全事故应急条例》明确要求企业强化风险监测预警与应急处置能力。传统防护依赖人工巡线、固定视频值守与事后处置，存在覆盖不足、误报率高、响应滞后、信息孤岛、协同不畅等问题，难以适配高后果区、复杂地形、全天候防控的现实需求。以人工智能、物联网、光纤传感、大数据为代表的数字技术为管道安全赋能，推动第三方破坏防控从“人防+技防”向“智防”转型。本文聚焦智能识别与应急响应两大核心环节，构建技术体系与运行机制，实现早发现、准识别、快预警、实处置、可追溯，为长输油气管道安全高效运行提供解决方案。

2 长输油气管道第三方破坏类型与风险特征

2.1 破坏类型与成因

1.机械施工破坏：道路、建筑、管线交叉施工中挖掘机、打桩、顶管、定向钻、爆破等未报备、未探管、未防护作业，直接损伤管道，占比最高，具有突发性、破坏力强特点。2.非法扰动与盗油：打孔窃油、私开口、非法挖掘，隐蔽性强、处置难度大，易引发泄漏与爆炸，后果严重。3.占压与违规作业：建筑物、构筑物占压管道，重型车辆碾压、堆载导致管道应力过载、沉降变

形、防护层破坏^[1]。4.地质与工程叠加风险：施工诱发滑坡、沉降、冲刷，加剧管道失效概率。5.农业与民生活动：农田深耕、挖沟、建房、取土等无意识损伤，多发于农村段。

2.2 风险特征

●隐蔽性：埋地管道难以直观观测，破坏行为前期不易察觉。

●突发性：第三方施工多无报备，短时间内可造成严重后果。

●扩散性：油气泄漏易引发火灾、爆炸、土壤水体污染，次生灾害链长。

●区域性：高后果区（城镇、人口密集区、水源地）风险等级显著提升。

●复杂性：地形地貌、气象、交通、农耕干扰叠加，导致监测信号噪声大、识别困难。

3 第三方破坏智能识别技术体系

3.1 总体架构

采用端边云协同三层架构：

端侧：分布式光纤传感（DAS/DVS）、视频摄像头、微震传感器、无人机、巡检终端，实现全域数据采集。

边侧：边缘计算网关、现场工控单元，完成实时信号预处理、AI推理、本地告警与快速定位。

云侧：管道安全管控平台，提供模型训练、数据融合、风险研判、工单派发、复盘迭代能力。

3.2 核心智能识别技术

3.2.1 分布式光纤振动/声波传感（DAS/DVS）利用管道伴行光缆实现无电、长距离、全天候监测，定位精度可达米级，响应时间秒级。通过提取振动频谱^[2]、时域、能量、持续时长特征，识别机械开挖、人工挖掘、车辆碾压、打孔、爆破等行为。

关键优化：采用增强型 oDSP 与盲点纠错算法，提升微弱信号有效性；基于深度学习区分施工振动与降雨、农耕、交通干扰，显著降低误报率。

适用场景：全线路连续监测，尤其适用于荒漠、山区、长距离无人区段。

3.2.2 基于深度学习的视频智能识别

在高后果区、交叉施工点、站场周边部署高清智能摄像头，采用 YOLO v5/v8、CNN 等模型，实时识别挖掘机、钻机、重型车辆、明火、人员聚集等目标。

关键优化：ROL区域限定，过滤巡检人员、动物、车流等干扰；多光谱融合提升夜间与恶劣天气识别率。

联动机制：与 DAS 预警信号触发视频复核，减少无效巡检。

3.2.3 空天地一体化巡检

卫星遥感：高分辨率卫星定期扫描，周期性识别地表占压、施工扰动、异常形变、植被变化。

无人机巡检：航线自动规划，可见光 / 红外成像，AI实时识别施工机械、违章占压，适用于人工难以到达区域。

地面巡检终端：工单化闭环，现场拍照回传、定位打卡、风险标注。

3.2.4 多源数据融合识别

将光纤振动、声学、视频、无人机、GIS、气象、施工报备信息融合，构建特征层+决策层融合模型，提升复杂场景鲁棒性：

单一源误报→多源交叉验证→置信度加权→最终判定。

输出：事件类型、风险等级、经纬度、影响范围、处置建议。

3.3 AI 模型优化与抗干扰策略

1. 场景化样本库：建立机械施工、农耕、降雨、交通、动物活动等样本，实现地域自适应阈值配置。

2. 混合专家模型 (MoE)：多子模型并行处理，提升弱信号检测与多类型事件泛化能力。

3. 自学习迭代：基于人工复核结果持续标注，自动更新模型，降低运维依赖，通过持续迭代优化精准捕捉第三方破坏行为特征。

4. 分级告警规则：按振动强度、持续时间、距离管道距离划分蓝 / 黄 / 红三级，匹配不同响应策略。

4 第三方破坏应急响应机制设计

4.1 设计原则

● 预防为主、预警先导：把风险控制萌芽阶段。

● 统一指挥、分级响应：企业主体、政企联动、权责清晰。

● 快速高效、闭环管理：接警—研判—派单—处置—复核—归档。

● 科技支撑、智能决策：AI 辅助方案生成、资源调度、后果推演。

4.2 应急响应分级 (参照国家与地方预案)

● 红色 (I 级)：管道已泄漏、起火、爆炸，威胁生命与重大设施，启动最高响应，政企联动，关阀断源、疏散、抢险。

● 橙色 (II 级)：严重破坏迹象，高后果区内施工逼近管道，风险极高。

● 黄色 (III 级)：可疑施工、振动持续，需现场核查与制止。

● 蓝色 (IV 级)：轻微扰动，远程监测与重点盯防。

4.3 全流程应急响应闭环

4.3.1 智能感知与精准识别

端侧实时采集→边缘预处理→AI 识别→多源融合判定→生成告警 (类型、位置、等级、置信度)。

4.3.2 预警推送与分级研判

平台自动推送至指挥中心、段长、巡护员，遵循“5 分钟接警、20 分钟处置”要求。

结合 GIS、高后果区、人口、气象进行风险研判，确定响应等级。

4.3.3 协同处置

● 蓝色：远程监测、视频复核、电话提醒。

● 黄色：巡护员赶赴现场，制止违规、取证、下达告知书。

● 橙色：启动企业预案，关闭相关阀室、管控流量，联合住建、公安、应急部门叫停施工。

● 红色：启动政企联动预案，疏散群众、抢险堵漏、消防医疗、环境监测、舆情引导。

4.3.4 现场指挥与资源调度

智能平台提供：周边应急资源、抢修方案、阀室位置、疏散路径、气象风向，辅助指挥决策。

4.3.5 终止与复盘

隐患消除 / 事故控制→响应终止。

复盘：原因分析、处置效能、模型优化、预案修订、责任闭环。

4.4 政企协同与制度保障

● 企业与地方应急、公安、住建、交通建立信息共享与联动机制。

● 施工报备线上化，实现“先报备、再探管探缆、后施工”，第三方施工作业提前预警。

● 明确信息上报时限及渠道：第一时间电话报告、达到书面报告等级的突发事件 1 小时内书面初报，按要求

续报、终报；渠道：平台、短信、电话、APP、分级推送至运维、抢修、管理、应急、公安、消防、卫健等。

●定期联合演练，检验预案与协同效率。

5 工程应用与效能分析

5.1 应用案例

案例一：某国家管网干线采用DAS+智能视频+无人机+云平台体系，覆盖高后果区与复杂地形：综合识别准确率 $\geq 95\%$ ，定位精度 $\leq 10\text{m}$ 。车辆穿行误报率从33%降至12%，暴雨误报减少86%，农耕误报下降81%。年均成功预警第三方破坏数十起，响应时间 < 3 分钟，实现“零重大事故”。告警闭环率100%，巡护成本下降，处置效率显著提升。

案例二：某地区油气管道打孔盗油事件：某地区长输油气管道周边的智能摄像头监测到有可疑人员在管道附近活动，系统自动发出预警。值班人员通过视频分析发现可疑人员有打孔盗油的迹象，立即通知公安部门和管道运维人员。公安部门迅速出警，在现场将可疑人员抓获，同时管道运维人员对管道进行检查和修复。此次事件中，智能识别系统及时发现异常情况，应急响应机制快速响应，成功阻止了打孔盗油行为，保障了管道的安全运行。

5.2 效能指标

指标	传统模式	智能识别+应急响应
覆盖范围	间断、盲区多	全域连续、空天地一体
识别准确率	60%-70%	$\geq 95\%$
平均响应时间	30-60min	$\leq 3-5\text{min}$
误报率	高	显著降低
处置闭环	弱	全流程可追溯
人力成本	高	下降30%-50%

6 现存问题与改进方向

6.1 主要问题

- 复杂地形、强干扰场景模型泛化性仍需提升。
- 多厂商设备协议不统一，数据融合难度大。
- 政企数据共享与联动标准化不足。
- 边缘计算与低功耗适配仍有优化空间。
- 应急演练与实战贴合度有待加强。

6.2 改进方向

- 大模型深度赋能：引入管道安全大模型，实现自然语言交互、智能研判、方案生成。
- 标准化与开源生态：推进传感、数据、接口统一标准。
- 数字孪生：构建管道三维孪生，实现破坏过程模拟、后果推演、可视化指挥。
- 轻量化边缘AI：降低算力依赖，提升偏远地区离线可靠运行。

●常态化闭环运维：制度保障模型迭代、预案更新、演练评估。

7 结论与展望

7.1 结论

第三方破坏是长输油气管道安全运行的突出风险，智能识别与应急响应一体化机制是实现主动防控的核心路径。本文构建的端边云协同智能识别体系与全链条闭环应急响应机制，通过分布式光纤传感、深度学习、多源融合、分级联动等技术与制度创新，有效解决传统模式漏报、误报、响应慢、协同差等痛点，工程应用验证其可靠性与经济性。未来应持续推进数字技术与管道安全深度融合，以数字孪生、大模型、物联网为支撑，构建全域感知、精准识别、智能预警、高效处置、持续迭代的现代化防护体系，为国家能源通道安全稳定运行提供坚实保障。

7.2 展望

未来，长输油气管道第三方破坏智能识别与应急响应机制的研究可以从以下几个方面进行深入探索：

1.进一步优化智能识别算法，提高在复杂环境下的识别精度和可靠性。例如，结合更多的传感器数据和机器学习算法，对不同类型的第三方破坏行为进行更精准的识别^[4]。2.加强应急响应机制的建设和演练，提高应急处置能力和协同作战水平。定期组织应急演练，检验和改进应急预案，确保在实际事故发生时能够迅速、有效地进行应对。3.推动智能识别与应急响应机制与其他技术的融合，如5G技术、大数据分析、数字孪生等。利用5G的高速传输能力和低延迟特性，实现数据的实时传输和处理；通过大数据分析挖掘潜在的风险因素；利用数字孪生技术构建管道的虚拟模型，为应急决策提供更直观、准确的支持。4.加强国际合作与交流，借鉴国外先进的技术和经验，共同应对长输油气管道第三方破坏的挑战。

总之，长输油气管道第三方破坏智能识别与应急响应机制的研究是一个不断发展和完善的过程，需要持续投入和创新，以保障国家能源运输的安全和稳定。

参考文献

- [1]张行,凌嘉瞳,刘思敏,等.基于移动设备位置数据的油气管道第三方破坏行为识别研究[J].石油科学通报,2022,7(2):261-269.
- [2]彭东华,徐鲁帅,信权宇,等.管道高后果区第三方破坏智能识别方法[J].油气储运,2023,42(7):793-798.
- [3]韩永焱,张莹.基于分布式光纤振动传感的智能安全监测系统在油气管道的应用[J].石油天然气学报,2025.
- [4]邓志强,陈远鹏,袁尹,等.长输管线智能巡查系统在油气长输管道中的应用研究[J].自动化应用,2024,65(16):294-297.