

多系统联动降低长输油气管道损害风险研究

余霄鹏（国家石油天然气管网集团有限公司福建分公司，福建 福州 350000）

摘要：长输油气管道作为国家能源输送的关键基础设施，其安全运行至关重要。然而，管道面临着自然因素、人为因素及自身因素等多方面的损害风险，严重威胁能源供应、经济发展与社会稳定。本文剖析长输油气管道损害风险类型及危害，详细阐述光纤预警系统、高后果区视频监视系统、无人机巡检系统的工作原理与功能特点，构建多系统联动机制，包括数据融合与共享、智能分析与决策、协同响应机制等，并通过实际案例分析验证其在降低管道损害风险方面的显著成效。研究成果为长输油气管道安全管理提供有效策略，对保障能源运输安全具有重要意义。

关键词：长输油气管道；风险防控；光纤预警；视频监视；无人机巡检；系统联动

1 长输油气管道损害风险分析

1.1 风险类型

1.1.1 自然因素风险

地震频发区域，强烈地震波致使地面剧烈震动和位移，管道承受巨大应力，引发变形、破裂，如汶川地震中部分管道受损泄漏。洪水冲刷浸泡会破坏管道基础，使其悬空、移位，稳定性降低。泥石流凭借强大冲击力，裹挟泥沙石块，可直接砸毁管道，造成毁灭性破坏。

1.1.2 人为因素风险

第三方施工因对管道位置不明，使用大型机械盲目挖掘、钻孔，常挖断损坏管道。打孔盗油违法犯罪行为，不仅造成油气资源损失，打孔处密封不严还会引发泄漏、爆炸等事故。管道运行中，操作人员违规操作阀门、泵等设备，导致压力异常，引发管道破裂。

1.1.3 管道自身因素风险

管道长期与土壤、水、氧气接触，受电化学腐蚀、微生物腐蚀影响，壁厚减薄、强度降低，最终穿孔泄漏。随着使用年限增长，管道性能老化，韧性、密封性能变差，故障风险增加。制造过程中，原材料或加工工艺缺陷会在管道内部留下裂纹、砂眼等，在运行压力、应力作用下扩展，引发破坏。

表1 三种风险类型占比情况表

风险类型	自然因素风险	人为因素风险	管道自身因素风险
占比	30%	45%	25%

1.2 风险危害

1.2.1 安全事故危害

油气管道爆炸会产生强大冲击波摧毁周边建筑与致人员伤亡，火灾释放热能伤人并且破坏生态环境。另外油气泄漏不仅挥发气体增加风险，还会污染土壤、

水源，威胁饮用水的安全。

1.2.2 经济损失

油气管道泄漏将直接导致资源浪费、影响企业效益。不仅管道维修人力、物力、财力消耗巨大，因泄露导致的生产中断若引发连锁反应将致更大损失，第三方责任事故还需企业赔偿加重负担，如青岛输油管道爆炸事故。

1.2.3 社会影响

油气管道事故可能导致油气供应中断，使工厂停工、居民生活受扰，影响社会正常运转。重大事故将引发社会恐慌，降低公众对企业和政府信任，破坏社会秩序和公共安全，影响社会稳定和谐。

表2 风险危害程度对比情况

风险危害	安全事故危害	经济损失	社会影响
危害程度（以1-5级衡量，5级为最严重）	5	4	4

2 长输油气管道多系统工作原理

2.1 光纤预警系统

2.1.1 系统构成及工作原理

由光纤传感器、信号传输设备、数据处理单元组成。光纤传感器沿管道同沟敷设，基于光弹效应和干涉原理，将管道周边振动、应变转化为光信号变化。信号经传输设备（光纤通信技术）传至数据处理单元，利用OTDR、Φ-OTDR等技术分析处理，识别异常信号并定位、确定类型。如施工机械作业产生振动，系统可捕捉光信号变化计算施工位置并发出预警。

2.1.2 功能特点

具有高灵敏度，能检测微小振动应变，早期发现潜在威胁。可实时不间断监测管道，及时察觉异常。长距离监测能力强，单条光纤可覆盖数公里至数十公里，减少传感器节点，降低成本。不受电磁干扰，在

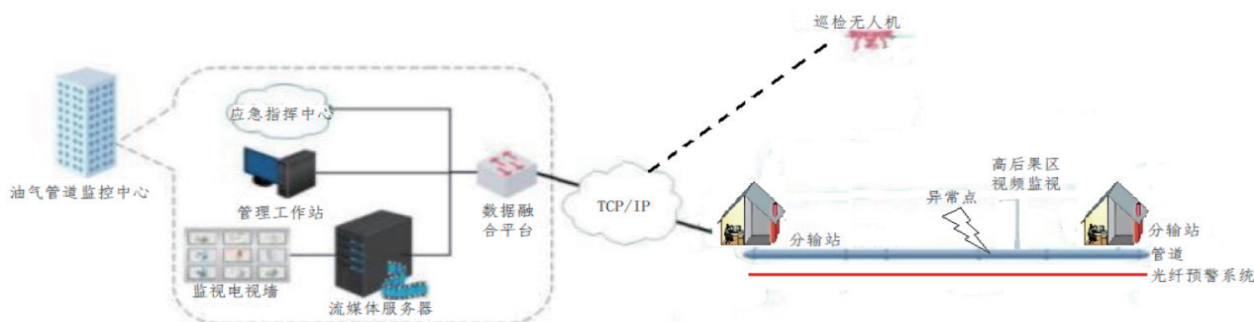


图 1 信息共享与协同工作示意图

复杂电磁环境下稳定工作。

2.2 高后果区视频监视系统

2.2.1 系统架构及监测原理

由前端摄像机、传输网络、监控中心构成。前端摄像机安装于高后果区，具备高清、智能分析功能。传输网络（有线或无线）将视频数据传至监控中心。监控中心管理、存储和分析数据，通过图像识别技术，利用目标检测和行为分析算法，识别人员、车辆、施工机械等目标及异常行为，如人员非法靠近挖掘时触发预警。

2.2.2 技术优势

直观呈现现场情况，管理人员如临现场。借助定位和图像识别技术准确定位异常事件。智能预警功能依预设规则自动识别异常并及时报警，准确性高。视频数据存储可用于事故分析追溯，为改进管理提供依据。

2.3 无人机巡检系统

2.3.1 硬件设备及巡检流程

选用长续航、高稳定性、大载荷无人机平台，如大疆经纬 M300 RTK，搭载高清摄像头、红外热成像仪、气体检测仪等传感器及 4G/5G 或数传电台通信设备。首先依管道走向、地形和环境规划航线，避开障碍物和禁飞区。巡检时按航线飞行，传感器采集数据并实时传输至地面控制中心，工作人员利用图像识别和数据分析软件评估管道状况，发现异常及时处理。

2.3.2 应用优势

高效灵活，相比人工巡检大幅缩短周期，可抵达复杂地形区域，视野广阔，提供详细信息，不受地形限制，能在危险区域替代人工，保障人员安全，全面发现隐患。

3 多系统联动机制

3.1 信息共享与协同流程

3.1.1 数据融合平台搭建

数据融合平台基于云计算和大数据技术架构，运

用分布式存储和并行计算技术高效处理海量数据。平台设立统一数据接口标准，对来自光纤预警、视频监视和无人机巡检系统的异构数据进行清洗、转换与归一化处理，整合至同一数据库。例如，将光纤预警的温度、应变数据，视频监视的图像视频数据，无人机的地理坐标和巡检报告数据等深度融合，为协同分析筑牢数据基础，实现多源数据的互联互通与综合利用。

3.1.2 协同工作流程设计

当光纤预警系统检测到异常信号，立即将预警信息推送至数据融合平台，平台同步触发高后果区视频监视系统和无人机系统聚焦预警区域。视频监视系统迅速调整摄像头参数获取清晰画面，无人机系统快速规划最优路径前往勘查。

各系统实时回传采集信息至平台，智能分析模块综合判断生成风险评估报告与应对建议，推送至运营管理人员终端，指导其开展应急处置，确保各系统紧密协作、高效联动，形成完整风险防控闭环。

3.2 应急联动策略制定

3.2.1 应急预案编制要点

应急预案依风险类型和级别精细编制。小型泄漏事故发生时，预案明确现场紧急切断气源、设置警戒区域、快速调配抢修人员和设备等措施；大型自然灾害引发严重管线损坏时，预案涵盖多部门协同作战，消防部门防控火灾、救援部门疏散人员、管线运营企业全力抢修恢复供气，同时清晰界定资源调配流程与渠道，保障应急物资如抢险设备、防护用具、备用管材等及时供应，确保应急响应有序、高效。

3.2.2 模拟演练与优化

定期组织模拟演练检验应急联动效能。如某次演练案例模拟地震致管线多处断裂泄漏事故，演练中各系统依流程协同作业，有效检验了信息传递及时性、部门协作默契度与预案可行性。

演练后总结问题，对应急预案优化调整，如细化

部门职责分工、完善物资储备清单、补充新型应急处置措施,持续提升应急响应能力与风险防控水平。

4 多系统联动应用案例分析

4.1 案例一:第三方施工破坏事件

2023年5月15日10时许,西气东输陕西山区段光纤预警系统报警,显示持续强振,疑似第三方大规模施工。同时视频监控显示多台大型施工机械靠近管道作业。应急指挥中心接警后迅速核实并启动应急程序,就近巡线小组赶赴现场管控,派无人机侦察,后者利用高清摄像头和热成像仪回传实时图像和数据。

经分析,指挥中心判定施工威胁管道安全,部分防腐层已受损,若不制止将导致严重事故。随即启动《第三方施工破坏应急预案》,通知抢修队赶赴现场,并联系当地应急、公安部门协助。

在各部门配合下,巡线人员1小时内到达,制止施工并设置警戒区。随后,抢修队和政府人员赶到,经过6小时作业,修复加固防腐层,消除隐患。

4.2 案例二:地质灾害事件

2024年8月雨季,川气东送湖北段光纤预警系统报警,山区段现持续强振信号。同时,视频监控显示因暴雨山体滑坡,有石块滚落至管道附近。应急指挥中心接双系统报警后,即刻启动应急机制,通知就近巡线小组勘查、处置,调度无人机用高清摄像头与红外热成像仪拍摄、检测侦察并回传数据。

经分析,指挥中心判定山体滑坡挤压、位移管道,有破裂与泄漏风险,遂启动应急预案,通知抢修队携设备赶赴现场,同时联系当地应急、消防、交通等部门支援。各部门协作下,巡线人员先到现场警戒、疏散居民。之后抢修队与政府救援力量陆续抵达。经12小时奋战,抢修人员修复、加固管道,防护滑坡区,排除隐患。应急指挥中心借视频监控与无人机实时掌握情况,高效调度,保障应急处置顺利完成。

4.3 多系统联动应用效果

据查相关文献,无人机巡检效率较徒步巡查提升192%,体力劳动强度由Ⅱ级降为Ⅰ级,无线视频监控告警识别准确度可达到97.45%,结合以上案例应用多系统联动可有效降低管道运行体力劳动强度、降低管道损害风险,切实提高管道运行安全。

5 现存问题与优化方向

5.1 现存问题

5.1.1 技术方面

现阶段光纤预警系统、视频监控系统及无人机巡检系统在多系统联动方面尚有一些实际问题存在。如

多系统依然存在系统兼容性难题,不同厂家的光纤预警、视频监视及无人机系统,在硬件接口、通信协议与软件平台上差异明显,互联互通较为困难;在实际应用中,数据精准度亦是有待提升,其中光纤预警系统易受环境噪声、电磁干扰,出现误报、漏报;视频监视系统在复杂气象下图像识别准确率降低;无人机巡检系统因定位精度和检测设备性能,数据也存在一定误差。

5.1.2 管理方面

长输油气管道保护涉及多部门,职责划分不清、信息沟通不畅,导致应急处置与日常管理协作效率低。部分管线运营企业运维管理薄弱,专业技术人员少,制度不完善。设备维护、软件升级不及时,致系统性能衰退,影响监测预警效果。人员培训不足,运维人员难掌握新技术、新设备,危及系统稳定运行,需强化运维管理体系建设。

5.2 优化方向

技术上,加快行业标准制定,统一接口与协议,促进系统集成;加大研发,开发抗干扰、高精度设备与算法,提升数据质量。管理上,构建跨部门协调机制,明确职责,搭建信息共享平台,加强沟通;完善运维管理体系,培养人才,制定运维计划与考核标准,保障系统高效稳定运行。

6 结论与展望

多系统联动在长输油气管道风险防控成效显著,实现全方位精准监测保护,其联动策略为管线安全运行提供有效保障,对能源行业安全管理实践具有重要指导意义,为后续研究与实践奠定坚实基础。未来研究可深化人工智能在风险评估与决策应用,探索区块链保障数据安全共享,加强国际合作交流,借鉴国外先进经验,持续完善风险防控体系,助力能源行业迈向更安全、高效、可持续发展阶段,为全球能源安全贡献智慧与力量。

参考文献:

- [1] 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.
- [2] 庄礼贤.光纤预警系统在长输管道中的应用[J].现代传输,2024(1):36-39.

作者简介:

余霄鹏(1988-),男,汉族,湖南临湘人,硕士,国家石油天然气管网集团有限公司福建分公司,高级工程师,研究方向:仪器仪表自动化。