

西南地区复杂地质条件下油气管道地质灾害风险评估与防控技术研究

熊妮¹, 宋超², 邓勇¹, 何禹来¹, 毕婷¹, 白雪儿¹

1. 中国石油西南油气田分公司重庆气矿, 重庆 402160

2. 中国石油天然气管道工程有限公司成都分公司, 四川 成都 610000

DOI:10.61369/ERA.2026020020

摘要: 西南地区作为我国油气资源战略通道的核心承载区, 其地质环境呈现喀斯特地貌广布、断裂构造发育、强降雨频发的典型特征。油气管道在穿越此类复杂地质单元时, 面临着滑坡、崩塌、岩溶塌陷等多灾种耦合作用的严峻挑战。本文构建了基于多源数据融合的地质灾害风险动态评估模型, 提出了覆盖“预防-监测-应急”全链条的复合防控技术体系, 并在川渝页岩气外输管道、中缅原油管道等工程中验证了技术可行性。研究突破传统单灾种评估范式, 通过三维地质建模、机器学习修正、数字孪生协同设计等技术手段, 形成了具有地域适配性的风险管控解决方案, 为同类复杂地质环境下的管道安全运营提供了理论支撑与实践范式。

关键词: 西南地区; 油气管道; 地质灾害; 风险评估; 防控技术

Study on Risk Assessment and Prevention Technology of Oil and Gas Pipeline Geological Disaster under Complex Geological Conditions in Southwest China

Xiong Ni¹, Song Chao², Deng Yong¹, He Yulai¹, Bi Ting¹, Bai Xue'er¹

1. China Petroleum Southwest Oil and Gas Field Branch Chongqing Gas Mine, Chongqing 402160

2. China Petroleum and Natural Gas Pipeline Engineering Co., Ltd. Chengdu Branch, Chengdu, Sichuan 610000

Abstract: As the core region of China's strategic oil and gas resource corridor, the southwestern area exhibits typical karst topography, well-developed fault structures, and frequent heavy rainfall. When traversing such complex geological units, oil and gas pipelines face severe challenges from multi-hazard interactions including landslides, rockfalls, and karst subsidence. This study establishes a dynamic geological disaster risk assessment model based on multi-source data fusion, proposes a comprehensive prevention and control system covering the "prevention-monitoring-response" chain, and validates technical feasibility through projects like the Sichuan-Chongqing shale gas transmission pipeline and China-Myanmar crude oil pipeline. The research breaks through traditional single-hazard assessment paradigms by employing 3D geological modeling, machine learning corrections, and digital twin collaborative design. This approach develops regionally adaptive risk management solutions, providing theoretical support and practical paradigms for pipeline safety operations in similar complex geological environments.

Keywords: southwest region; oil and gas pipeline; geological disaster; risk assessment; prevention and control technology

西南地区特殊的地质构造与气候条件, 使其成为油气管道地质灾害高发区域。伴随国家能源战略推进, 该区域油气管道里程不断增长, 保障管道安全运行成为关键问题。传统地质灾害评估与防控技术在应对多灾种耦合、复杂地质条件时存在局限, 亟需开展创新研究。本研究聚焦西南地区复杂地质条件下油气管道地质灾害风险评估与防控技术, 对保障国家能源安全、推动地质工程技术发展意义重大。

一、地质灾害风险动态评估模型构建

(一) 多源数据融合与指标体系优化

西南地区油气管道地质灾害风险评估采用“空-天-地”一

体化数据采集架构。机载 LiDAR 以厘米级精度获取地表地形数据, 生成数字高程模型 (DEM), 为地质体空间解析提供基础。

结合钻孔岩芯编录获取的地层岩性、结构面产状等垂向信息, 利用高密度电阻率法探查地下介质电性差异, 瞬变电磁法探测低阻

异常体分布,通过地球物理探测数据与钻孔信息交叉验证,构建空间分辨率达 $0.5\text{m}\times 0.5\text{m}\times 1\text{m}$ 的三维地质模型,实现对褶皱、断层、岩溶洞穴等地质构造的精准刻画^[1]。

管道运行数据采集方面,开发 SCADA 系统与光纤传感网络专用数据交互接口。基于布里渊光时域反射(BOTDR)原理的分布式光纤传感技术,实现沿管道千米级长度应变监测,精度达 $\pm 1\mu\epsilon$,配合 SCADA 系统采集的压力、温度等参数,构建包含力学响应与环境变量的多维数据集。通过时间序列同步技术,统一多源数据采集频率至毫秒级,为动态风险评估提供连续、实时数据支持。

指标体系构建采用熵权法与层次分析法(AHP)耦合优化策略。以川东地区37处历史地质灾害点为样本,运用决策树算法从坡度、坡向、岩土体弹性模量、年降雨量、地下水位变幅等30余项候选指标中筛选出12项关键致灾因子。熵权法依据数据离散程度客观赋权,AHP通过专家知识结构化主观赋值,再经遗传算法优化权重组合系数,形成主客观融合的权重体系。在岩溶发育区,该体系突出地下空洞体积指数的关键作用,相比传统赋值方法,更符合实际风险演化规律。

(二) 风险评估模型创新

空间维度上,基于 ANSYS 有限元分析平台,建立地质体-管道耦合数值模型。以中缅管道龙陵段为例,导入三维地质模型数据,采用黏弹塑性本构方程模拟岩土体力学行为,壳单元模拟管道结构^[2]。地震工况模拟时,依据区域地震动参数区划图输入Ⅷ度地震加速度时程,模拟结果显示断层错动引发的管道轴向应变达材料屈服强度临界值,为管道抗震设计中增设柔性接头、加强环等构造措施提供量化依据。

时间维度上,构建降雨-地震-人类活动多情景动态模拟系统。引入马尔可夫链预测模型,以历史灾害事件为状态转移样本,结合气象预报、地震监测台网及管道施工活动数据,实现未来72小时灾害发生概率的时空动态推演。通过设置不同情景参数,可模拟极端降雨叠加地震作用下的风险演化路径,为应急资源调配提供前瞻性决策支持。

风险评价体系突破传统二维矩阵模式,构建“破坏潜力-暴露度-脆弱性”三维评估框架。破坏潜力评估引入岩土体能量释放率概念,基于摩尔-库仑强度理论与能量守恒定律,量化地质灾害孕育过程的能量积聚与释放。暴露度分析采用空间叠置与缓冲区分析技术,计算管道与潜在灾害体的空间耦合程度。脆弱性评估融合管道材料疲劳损伤与腐蚀速率模型,预测灾害作用下管道结构失效概率。在滇东北泥石流高发区的应用表明,该三维体系有效修正了传统二维矩阵的风险误判问题。

(三) 风险分级管控策略

依据风险评估结果,实施“高风险严防控、中低风险强监测”的差异化管控策略。在贵州织金段岩溶塌陷高风险区,采用抗浮锚杆与微型桩组合支护技术。抗浮锚杆深入稳定基岩提供竖向抗拔力,微型桩形成桩-土复合结构增强土体整体性。现场拉拔试验显示,该组合支护体系极限抗拔承载力显著提升,满足管道基础稳定性要求。同时,边坡表层铺设生态格构梁,实现工程防护与植被恢复协同。

中低风险区段依托无人机智能巡检系统提升监测效率。建立包含无人机续航里程、地形复杂度、历史灾害密度的多目标优化

模型,采用 Dijkstra 算法求解带权重最短路径。通过预设巡检任务参数,无人机自动规划巡检航线,搭载的高分辨率相机与激光雷达同步采集管道及周边地质体影像数据,经图像识别算法自动提取裂缝、沉降等病害信息,相比传统人工巡检,效率大幅提高,数据采集完整性与准确性显著增强^[3]。

二、复合地质灾害防控技术体系

(一) 灾害预防技术

西南油气管道灾害防治体系深度融合多学科前沿技术,构建起与地质环境高度适配的预防性技术矩阵。基于数字孪生理念打造的管道-地质体协同设计平台,创造性整合 BIM 精细化建模与 GIS 空间分析技术,形成具备物理实体全息映射、多物理场耦合仿真及自主决策能力的智慧化系统。在川南页岩气管道工程实践中,研发团队依托钻孔岩芯数据构建地层三维剖面,综合运用高密度电阻率法与地震波 CT 成像技术,构建起厘米级精度的数字孪生模型,实现地下地质构造的“可视化”呈现^[4]。

采用流固耦合算法开展多工况力学仿真,精准量化地下水渗流对岩土体参数的弱化效应。通过遗传算法实施管道路径多目标优化,将穿越高风险地质段长度、工程开挖量、支护成本及运行安全系数纳入优化函数,经数百次迭代计算,成功使管道规避岩溶发育核心区数公里,实现工程经济性与安全性的双重提升。

在岩溶区边坡防护领域,开创性地实施微生物诱导碳酸钙沉淀(MICP)技术与生态护坡的协同治理方案。通过精准调控巴氏芽孢杆菌代谢过程,在岩土界面构建生物胶结层。现场监测数据显示,特定养护周期内形成的碳酸钙胶结层平均厚度达毫米级,土体黏聚力提升幅度超30%,内摩擦角增大值超 5° ,形成兼具强度与韧性的生物岩土复合体。

配套研发的土工格室-乡土植物协同防护系统,构建起立体化生态防护网络。土工格室为植被根系提供三维生长空间,精选的狼尾草、狗牙根等乡土植物种,凭借其强大的环境适应性,快速形成覆盖度超90%的植被层。该系统不仅实现坡面径流拦截效率超85%,更通过根系加筋作用使边坡稳定性系数提升15%以上,形成具有自修复能力的生态屏障。

柔性防护材料领域取得突破性进展,研发的工程用高延性混凝土(ECC)采用微观力学设计原理,通过纳米级PVA纤维的空间桥接效应,构建起三维裂缝控制网络。在云南昭通边坡防护工程中,ECC防护面板经受住毫米级变形考验,纤维拔出功较普通混凝土提升200%,展现出卓越的能量吸收能力。配套开发的智能记忆合金支护系统,集成光纤光栅传感与形状记忆合金相变技术,实现围岩变形的实时监测与主动响应。当监测到位移速率超限值,形状记忆合金丝可在30秒内完成马氏体向奥氏体的相变过程,快速提供设计所需的支护反力,形成动态平衡的智能支护体系。

(二) 监测预警技术

监测预警技术的突破性进展已成为地质灾害超前防控体系的核心支柱,其技术内核在于多模态感知技术的深度融合与智能算法的迭代创新。兰成渝管道部署的分布式光纤传感与InSAR技术融合监测体系,采用时空协同的数据采集与处理策略,构建起天地空一体化的立体监测网络。分布式光纤传感系统基于布里渊光

时域分析 (BOTDA) 技术, 通过解析光纤中光信号的布里渊频移特性, 实现沿管道轴线连续分布的形变监测, 空间分辨率突破至米级量测精度, 可精准捕获由土体蠕变、滑坡牵引效应引发的管道微米级形变特征。

InSAR 监测系统通过解析 Sentinel-1 卫星合成孔径雷达数据, 运用小基线集干涉测量 (SBAS-InSAR) 算法, 实现监测区域地表形变的亚毫米级精度探测, 时间分辨率优化至天级更新频次, 可完整刻画大范围地表形变场的时空演化规律。双源监测数据经卡尔曼滤波算法实现时空域融合校正, 有效抑制大气扰动与系统噪声, 使形变监测数据的信噪比提升^[6]。在川东北典型滑坡体的长期监测实践中, 该融合监测体系成功将灾害识别窗口前移至形变加速临界期, 为应急处置赢得黄金响应时间。

基于长短期记忆网络 (LSTM) 构建的灾害前兆智能识别系统, 开创了多源异构数据深度特征融合的新范式。该系统整合气象水文数据链 (降雨强度、地下水位动态)、地震监测台网信息流、管道结构健康监测参数等多模态数据, 通过注意力机制 (Attention Mechanism) 实现特征重要度的自适应加权, 突出强降雨、地震动等关键诱因在灾害孕育过程中的主导作用。在川西地区 2018-2023 年地质灾害事件回溯分析中, 该系统对 17 起典型滑坡事件实现全链条预警, 平均预警时效提前数小时, 使灾害漏报率控制在个位数百分比区间。

移动式边坡雷达与无人机协同监测平台, 构建起“宏观形变场扫描-微观特征解析”的分级监测架构。边坡雷达采用调频连续波 (FMCW) 体制, 在 3km 监测半径内实现亚毫米级位移分辨率的连续扫描, 可实时捕捉边坡表层形变场的时空异质性特征。无人机搭载轻量化 LiDAR 与高光谱成像载荷, 通过自主避障航迹规划算法, 对雷达监测发现的形变异常区实施厘米级精度的立体测绘, 实现构造裂缝宽度 0.1mm 级的量化解析, 数据回传时延压缩。在泸定地震震后次生灾害监测中, 该协同监测体系提供近实时的三维形变场数据, 为地质灾害链式演化研判提供关键支撑。

(三) 应急处置技术

应急处置技术的革新是降低地质灾害损失的关键一环, 其核心在于构建快速响应与高效修复的技术矩阵。管道抢修快速封堵装置采用液压驱动的楔形密封结构, 通过优化密封件唇口几何参数与膨胀材料力学性能, 实现了带压管道的毫米级密封。在云南

保山段管道应急作业中, 该装置通过液压系统驱动楔形密封件快速膨胀, 紧密贴合管道内壁, 在 10MPa 压力工况下, 从部署到完成封堵仅耗时 28 分钟, 较传统机械式封堵方式效率提升, 有效减少介质泄漏量, 降低灾害损失。

带压开孔技术创新采用磁吸式导向钻具, 利用永磁体与管道金属之间的磁耦合作用实现钻具的精准定位, 结合陀螺仪姿态控制系统实时监测钻具姿态, 确保开孔位置精度。在 DN800 管道不停输开孔作业中, 该技术有效控制介质泄漏量, 保障了管道输送的连续性与安全性, 突破了传统带压开孔作业的技术瓶颈^[7]。

灾害体原位加固材料研发取得突破性进展。地质聚合物注浆材料以工业废渣为主要基料, 通过碱激发反应形成非晶态胶凝结构, 具有早期强度高、耐久性好、环保等优点。其 28 天抗压强度达到 45MPa, 弹性模量与岩土体具有良好匹配度。在重庆武隆段滑坡治理工程中, 采用高压注浆工艺, 在一定压力下将地质聚合物浆液注入滑坡体, 形成有效加固半径的结石体, 增强滑坡体整体稳定性^[7-10]。

碳纤维网格加固系统采用浸渍树脂粘结工艺, 经有限元模拟优化网格布设与粘结参数, 显著提升危岩体稳定性系数。植被混凝土基材喷播技术采用梯度配比, 表层添加纳米二氧化硅防腐, 底层掺入纤维增强抗冲刷能力, 在保障管道防腐层前提下, 实现边坡快速绿化与生态恢复。

三、结论

本研究构建的地质灾害风险动态评估模型, 通过多源数据融合与三维耦合分析, 实现了风险要素的量化表征与时空演化预测。提出的复合防控技术体系, 在多个国家级油气管道工程中验证了技术效能, 其中数字孪生协同设计、MICP 生态护坡、智能记忆合金支护等技术达到国际先进水平。研究成果突破了传统被动防控模式, 建立了主动适应复杂地质环境的理论与技术装备体系, 对保障国家能源通道安全、推动地质工程领域技术创新具有重要学术价值与实践意义。未来研究将聚焦深部地质灾害与管道相互作用机制, 以及极端气候情景下的风险演化规律, 持续完善复杂地质条件下管道安全保障技术体系。

参考文献

- [1] 庞丽娟. 物探技术在地质灾害风险评估与防范中的应用 [J]. 华北自然资源, 2025(1): 96-99
- [2] 殷祥瑞, 张邵贺, 周卫军, 李腾, 宋小平, 张彦成. 三维激光扫描技术在矿山地质灾害风险评估中的应用研究 [J]. 中国金属通报, 2025(1): 183-185
- [3] 周伟. GIS 技术下的地质灾害风险评估 [J]. 中文科技期刊数据库 (全文版) 自然科学, 2025(5): 106-108
- [4] 张文山. 矿井施工过程中地质灾害风险评估与防控技术 [J]. 中文科技期刊数据库 (引文版) 工程技术, 2024(12): 013-016
- [5] 申耀东, 邓宝信, 王盈, 李雪阳. 地质灾害监测与预警技术在输油气管道上的应用研究 [J]. 中文科技期刊数据库 (全文版) 自然科学, 2024(4): 0182-0184
- [6] 陈莹莹. 矿山地质灾害风险评估与防控技术研究 [J]. 世界有色金属, 2023(18): 217-219
- [7] 贺文章, 杜楠楠, 张彦妮. 油气管道泄漏事故成因机理与防控体系研究 [J]. 石化技术, 2024, 31(09): 297-298.
- [8] 赵国深, 赵嘉玲, 刘思好, 等. 油气管道施工智能化安全管控技术研究 [J]. 中国石油和化工标准与质量, 2022, 42(04): 174-176+179.
- [9] 王宇. 长输油气管道地质灾害防治统筹管理浅析 [J]. 化工矿产地质, 2021, 43(04): 356-363.
- [10] 刘越. 油气管道监测与防护技术创新实践 [C]// 江西省工程师联合会. 第二届智能工程与经济建设学术研讨会论文集 (三). 秦皇岛中石油昆仑燃气有限公司; , 2025: 286-289. DOI: 10.26914/c.cnkihy.2025.035376.