

Construction and application of third-party damage risk assessment model in pipeline integrity management

Yanke Gong

Central China Branch of China National Petroleum and Natural Gas Pipeline Group Co., Ltd., Wuhan, Hubei, 430000, China

Abstract

With the expansion of oil and gas pipeline networks, third-party damage (TPD) has emerged as a critical external risk affecting pipeline integrity. To enhance risk identification and prevention capabilities, this study develops a multi-source data-integrated third-party damage risk assessment model based on pipeline integrity management principles. The Analytic Hierarchy Process (AHP) is employed to determine weighting factors, while a Bayesian Network (BN) framework is established for causal reasoning. The model comprehensively considers geographical environment, construction activities, regulatory compliance, and pipeline vulnerability. Through GIS implementation, it achieves spatial visualization and dynamic zoning of risk levels. Using the Southwest China Long-Distance Natural Gas Pipeline as a case study, the model demonstrates approximately 21% higher prediction accuracy than traditional methods, effectively identifying high-risk sections and supporting differentiated prevention strategies. This research provides scientific foundations and engineering references for establishing proactive pipeline integrity management systems.

Keywords

pipeline integrity management; third-party damage; risk assessment model; Bayesian network; GIS

管道完整性管理中第三方破坏风险评估模型构建与应用

宫研科

国家石油天然气管网集团有限公司华中分公司, 中国·湖北 武汉 430000

摘 要

随着油气管网规模的扩大, 第三方破坏 (TPD) 已成为影响管道完整性的重要外部风险。为提升风险识别与防控能力, 本文基于管道完整性管理理念, 构建融合多源数据的第三方破坏风险评估模型。采用层次分析法 (AHP) 确定权重, 并结合贝叶斯网络 (BN) 建立因果推理体系, 综合考虑地理环境、施工活动、监管水平及管道脆弱性等因素。利用GIS实现风险等级空间可视化与动态分区。以西南地区长输天然气管道为例, 模型预测精度较传统方法提升约21%, 能有效识别高风险区段并支持差异化防控。研究为构建主动防御型管道完整性管理体系提供了科学依据与工程参考。

关键词

管道完整性管理; 第三方破坏; 风险评估模型; 贝叶斯网络; GIS

1 引言

随着我国能源结构调整和油气管网互联互通工程的推进, 长输管道作为能源运输的“动脉”, 其安全稳定运行对国民经济与公共安全具有战略意义。近年来, 第三方破坏事故频发, 成为导致管道失效和重大泄漏事故的关键因素。根据国内外统计数据, 约 40% ~ 50% 的管道失效事件与外部施工、农业机械挖掘、地面荷载及人为破坏等第三方活动有关。这类风险具有突发性强、隐蔽性高、监管难度大的特点, 传统的静态风险评估方法难以满足实时监测与动态防控的需求。

管道完整性管理体系的核心目标是通过系统化、科学化的风险评估与控制, 确保管道全寿命周期的安全可控。本文在系统梳理国内外管道风险评估研究成果的基础上, 结合大数据分析、空间信息技术与概率建模方法, 构建适用于第三方破坏场景的动态风险评估模型。研究从风险源识别、影响因子量化、模型建立及结果验证四个维度展开, 探索一种可操作、可更新、可量化的第三方破坏风险评估框架, 为油气管道主动防控体系建设提供方法支撑。

2 第三方破坏风险特征与影响因素分析

2.1 风险成因与行为特征

第三方破坏主要来源于非管道单位的施工、农用机械作业、非法占压及不当钻探等外部行为。这些活动多具有计划外、临时性和隐蔽性特征, 通常发生在城市扩张区、交通

【作者简介】宫研科 (1989-), 男, 中国陕西西安人, 本科, 工程师, 从事油气储运工程、阴极保护研究。

交叉带和农村基础设施改造区域。事故机理分析表明，外力破坏可导致管道涂层损伤、局部屈曲甚至瞬时穿孔，诱发泄漏、火灾或爆炸事件。其风险具有高度的空间关联性和时间随机性，受到地理环境、管线埋深、土壤性质及施工监管等多重因素影响。

2.2 主要风险影响因子

结合事故案例与现场调研，第三方破坏风险可归纳为四类关键影响因子：（1）外部干扰因素：包括地表施工密度、人口密集度、交通线路分布等；（2）管道自身特征：如埋深、管径、压力等级与防护结构；（3）环境条件：地形坡度、土壤电阻率、土地利用类型等自然参数；（4）管理与防护水平：如巡检频次、监控系统覆盖率、应急响应能力。各因子间存在非线性耦合关系，对风险水平产生叠加效应。

2.3 第三方破坏风险的时空分布规律

基于历史数据统计发现，第三方破坏事件在空间上呈“节点集中、带状扩散”的分布特征，事故多集中于道路交叉口、施工密集区及城乡结合带；在时间上具有明显的季节性波动，春夏施工旺季事故率显著上升。风险在地理空间上具有动态演化特性，受经济活动强度与土地利用变化影响明显。这为建立基于GIS的动态风险分区提供了理论基础。

3 第三方破坏风险评估模型的理论框架

3.1 模型总体思路

本研究基于管道完整性管理理念，构建了“风险源—脆弱性—防护能力”三维耦合的第三方破坏风险评估框架。该框架从外部威胁、管道自身特征及防护系统能力三个维度出发，综合考虑环境因素、施工活动、结构脆弱性及管理水平的综合影响。通过层次分析法（AHP）确定各指标权重，以贝叶斯网络（BN）为核心建立因果关系模型，实现风险概率的动态推演与可视化表达。模型利用GIS空间数据实现地理要素与风险等级的耦合映射，形成“数据—模型—空间”联动体系。整体评估流程包括五个阶段：①多源数据采集与清洗；②因子标准化与权重分配；③贝叶斯网络建模与推理；④GIS风险分布可视化；⑤结果验证与动态更新。通过该流程，模型实现了从定性识别、定量计算到空间展示的全链条评估机制，既可为宏观规划提供依据，也能支撑实时风险监测与决策优化，具有较强的工程适用性与动态可扩展性。

3.2 层次分析法的权重确定

为保证风险因子权重分配的科学与客观性，本研究采用层次分析法（AHP）进行多指标定量赋权。通过专家问卷与历史事故数据，构建风险因素判断矩阵，对一致性进行检验（ $CR < 0.1$ ），确保权重计算可靠。结果表明，外部施工密度与管道埋深在总体权重中占比分别为0.23和0.19，是影响风险等级的主导因素；土地利用类型（0.14）与人口密集度（0.12）次之，体现出人类活动强度对风险分布的显

著影响；而监测系统完善度（0.10）和巡检频次（0.08）虽权重较低，但在风险防控环节中发挥重要作用。通过对不同权重方案进行敏感性分析发现，模型结果对主要指标变化具有良好的响应特性，说明AHP法能够合理反映各风险因子的重要性排序。该权重体系不仅为贝叶斯网络提供先验概率分布输入，也为后续动态调整提供量化依据，实现了定性判断与定量计算的有机结合。

3.3 贝叶斯网络模型构建

在确定权重体系的基础上，构建了以贝叶斯网络为核心的第三方破坏风险评估模型。BN模型以节点表示风险因子，以有向边表示因果关系，能够通过条件概率反映多因素之间的非线性依赖。模型结构分为三层：输入层包含外部干扰、环境条件、管道特性及管理能力等风险变量；中间层为组合节点，用于描述因子间的相互作用关系；输出层则输出风险等级或破坏概率值 $P(TPD)$ 。参数学习过程中结合专家经验与历史事故数据，采用最大似然估计（MLE）与EM算法优化条件概率表（CPT），以提高模型推理精度。通过网络结构学习算法（如K2算法）自动挖掘潜在因果路径，模型具备良好的可解释性与可更新性。最终模型可根据实时数据输入自动修正风险预测结果，实现动态评估。依据输出概率区间，风险等级被划分为低（ $P < 0.25$ ）中（ $0.25 \leq P < 0.5$ ）高（ $0.5 \leq P < 0.75$ ）与极高（ $P \geq 0.75$ ）四级，实现了风险识别的精细化与量化表达，为管道安全管理提供了智能决策支撑。

4 模型应用与验证分析

4.1 数据来源与区域概况

本研究选取西南地区一条天然气长输管道作为典型案例，该管道全长215 km，穿越丘陵、平原及城镇混合区，沿线地形复杂、建设活动频繁，极具代表性。研究所用数据涵盖近五年管道运行与外部施工信息，包括第三方施工记录、外力破坏事故统计、地形坡度、人口密度、交通网络分布及巡检频次等。数据主要来源于企业管道完整性管理系统、地方施工许可数据库、卫星遥感影像及地理信息系统（GIS）空间数据集。对缺失数据采用插值与加权平均法进行补充，以提高样本覆盖率和时效性。该区域地形起伏大、城乡交错，施工活动密集，是第三方破坏风险的典型高发地带，为验证模型的适用性与稳健性提供了理想研究场景。

4.2 风险分区与结果分析

基于AHP-BN风险评估模型的输出结果，采用GIS空间插值与分级渲染技术生成第三方破坏风险分布图。结果表明，高风险区主要分布在交通密集的公路交叉口、城镇扩张区及施工集中的工业带，占管线总长度的12.8%；中风险区沿主要公路两侧呈带状分布，占比约34.6%；其余区域风险相对较低。通过与历史事故数据对比，模型预测与实际事故点重合率达84%，表明模型具备较高的空间预测精

度。进一步的灵敏度分析发现，外部施工强度与管道埋深是影响风险等级的关键变量，当施工强度提升 1 级或埋深减少 20%，风险指数上升约 0.15。分析结果验证了模型在多因素耦合条件下对管道风险变化的敏感响应能力，为后续防控资源的空间优化配置提供了可靠依据。

4.3 模型验证与精度评估

为评估模型性能，采用 ROC 曲线与 AUC 指标进行统计验证。结果显示，模型 AUC 值为 0.89，处于“高精度预测”区间，说明其风险分类效果优异。与传统模糊综合评价法相比，AHP-BN 模型在风险等级识别中的误判率降低约 21%，且对小样本数据的适应性更强。在交叉验证中，模型预测结果与实际风险等级的相关系数达到 0.82，表现出较好的稳定性和可靠性。为确保模型可持续应用，研究建立了条件概率表动态更新机制，可通过周期性导入新数据自动修正模型参数，实现风险评估的长期迭代优化。应用结果表明，该模型在实际管道管理系统中运行良好，能够有效支撑第三方破坏风险的实时监测与预警分析，为油气企业构建数字化、智能化的管道完整性管理体系提供了坚实的数据与算法基础。

5 第三方破坏风险防控与管理对策

5.1 基于模型结果的防控策略优化

在第三方破坏风险评估模型的指导下，管道运营单位可实现防控措施的差异化和科学化配置。对于模型识别出的高风险区，应在管线沿线加密部署振动光纤传感器、声发射探测器与地表微振动监测仪，实现对外力扰动的实时捕捉和动态报警。通过多源监测数据融合与时序特征分析，可实现“早识别、早预警、早干预”的全流程防护。在中风险区，应重点提升巡检频率与方式，利用无人机搭载多光谱传感器、可见光与红外成像设备，快速识别违章施工与地表变形异常。对于低风险区，则可依托大数据平台建立智能预警系统，分析施工许可、气象条件与地表活动的变化趋势，动态调整风险等级。经试点运行验证，应用该模型的管道防控系统预警准确率提升约 19%，响应时间平均缩短 30%，显著提高了风险防范的主动性与处置效率。

5.2 数字化监管平台建设

基于风险评估模型的输出结果，可构建集监测、分析与决策于一体的数字化管道安全监管平台。系统以“数字孪生+GIS+物联网（IoT）”为核心技术框架，通过传感终端、无人巡检设备及遥感影像实现管道状态与周边环境的三维动态可视化。平台中嵌入 AI 识别算法，对施工机械、地面开挖与土层扰动进行智能识别与风险判定，实现从静态监测向智能预警的转变。管理端通过云计算与大数据分析技术，

对管道运行参数、地理信息及历史风险数据进行多维关联分析，生成风险热力图与趋势预测曲线，为运维人员提供决策支持。该系统的实施不仅提升了信息共享与资源协同能力，也使监管模式由“人工巡查+被动防控”向“数字监测+主动预防”转变，为建立智能化、可追溯的管道完整性管理体系奠定了基础。

5.3 长效机制与制度保障

要确保第三方破坏防控体系的持续有效运行，需建立覆盖“政府监管—企业落实—公众参与”的长效机制。在制度层面，应完善管道保护法律法规，推动《油气管道保护法》《城市地下空间管理条例》等法规与地方性管理细则的衔接执行，明确各方责任边界。建立跨部门协同监管机制，将施工许可审批、地下管线信息共享与动态监测系统纳入统一平台，形成“规划—审批—监管—反馈”的闭环管理体系。同时，应完善企业内部风险评估与绩效考核机制，将防控成效与管道安全考核挂钩。引入第三方评估机构开展年度风险复核与责任追溯，提升制度公信力与执行力。通过定期更新风险档案、完善信息化追踪体系，可实现风险数据动态化管理与持续优化，确保第三方破坏防控工作从“项目化管理”走向“制度化保障”，从被动防御转向主动治理，构建可持续的安全监管生态。

6 结语

第三方破坏是当前管道完整性管理中最具突发性与不确定性的外部风险。本文构建的基于 AHP-BN-GIS 的多维风险评估模型，实现了风险识别的量化、空间化与动态化，为油气管道安全运行提供了科学支撑。研究结果表明，该模型能有效预测高风险区段并指导防控资源优化配置。未来工作可进一步引入机器学习与多源时空数据融合技术，构建自学习型风险评估系统，实现从“事后应对”向“事前预防”的转变。该研究为管道企业构建主动防御体系与数字化完整性管理平台提供了技术参考与应用路径。

参考文献

- [1] 谢娜娜,郑显丰,袁昕.浅谈燃气管道完整性管理中第三方施工破坏管理措施[J].科技创新导报,2019,16(36):194-197.
- [2] 邵博文.天然气管道第三方破坏动态风险分析与事故后果管控研究[D].浙江海洋大学,2023.
- [3] 过前宇.天然气管道第三方破坏和自然灾害监测预警系统构建研究[D].浙江海洋大学,2023.
- [4] 杨青.基于第三方破坏的海底管道风险评估研究[D].西安建筑科技大学,2021.
- [5] 谢娜娜,郑显丰,袁昕.浅谈燃气管道完整性管理中第三方施工破坏管理措施[J].科技创新导报,2019,16(36):194-197.