

# 油气管道泄漏事故情景构建与应急资源优化配置模型

高 帅 (山东莱克工程设计有限公司, 山东 东营 257000)

**摘要:** 油气管道泄漏事故的复杂性与破坏性对现代应急管理体系提出了严峻挑战。本文基于情景分析理论与资源运筹学原理, 构建了覆盖“致灾机理解析—多维情景建模—资源动态配置—协同机制创新”的全链条应急管理框架。通过引入模糊逻辑理论与多目标优化算法, 实现了泄漏事故情景的动态演化模拟与应急资源的精准调度。研究结合典型案例验证了模型在提升响应效率、降低事故损失方面的有效性, 为油气管道安全运行提供了系统性的应急解决方案。

**关键词:** 油气管道; 泄漏事故; 情景构建; 应急资源

中图分类号: X937 文献标识码: A 文章编号: 1674-5167 (2025) 025-0157-03

## Scenario Modeling and Emergency Resource Allocation Optimization for Oil & Gas Pipeline Leakage Incidents

Gao Shuai(Shandong Lake Engineering Design Co., Ltd., Dongying Shandong 257000, China)

**Abstract:** The complexity and destructiveness of oil & gas pipeline leakage incidents pose significant challenges to modern emergency management systems. This study develops an integrated emergency management framework encompassing “hazard mechanism analysis - multi-dimensional scenario modeling - dynamic resource allocation - collaborative mechanism innovation” based on scenario analysis theory and resource operations research principles. By incorporating fuzzy logic theory and multi-objective optimization algorithms, the model achieves dynamic simulation of leakage scenarios and precision allocation of emergency resources. Case studies demonstrate the model’s effectiveness in improving response efficiency and reducing incident losses, providing a systematic emergency solution for pipeline safety operations.

**Keywords:** oil & gas pipelines; leakage incidents; scenario modeling; emergency resources

### 1 油气管道泄漏事故情景构建的多维框架

#### 1.1 致灾因子的层次化解析

##### 1.1.1 管道本体状态

①腐蚀程度: 外腐蚀速率与土壤电阻率、阴极保护有效性相关, 内腐蚀则受介质含水率、硫化物含量影响。某原油管道检测显示, 含水率超 0.5% 的管段腐蚀速率提升 3-5 倍。②材料老化: 聚乙烯 (PE) 管道服役超 15 年后, 应力开裂风险增加 40%; 钢管焊缝缺陷随年限增长, 泄漏概率呈指数上升。

##### 1.1.2 外部环境压力

①第三方活动: 管道周边 50m 范围内的施工活动使泄漏风险提高 20 倍, 机械挖掘导致的管道损伤占第三方破坏事故的 65%。②气象灾害: 强降雨引发的滑坡对山区管道威胁最大, 10 年一遇暴雨可使管道位移风险增加 30%; 高温干旱地区管道热胀冷缩引发的接口泄漏占比达 18%。

##### 1.1.3 人为因素影响

①操作失误: 误判压力参数导致超压运行, 占人为因素事故的 55%; 应急处置流程不熟悉使初期响应失败率达 32%。②管理漏洞: 巡检频率不足 (低于规范要求的 50%) 的管道, 泄漏事故发生率是合规管理管道的 4.2 倍。

#### 1.2 情景构建的三维坐标体系

##### 1.2.1 X 轴: 泄漏物理属性

①介质类型: 原油 (高粘度、易凝固)、天然气 (易燃易爆)、成品油 (挥发性强); ②泄漏形态: 孔状泄漏 (孔径 < 10cm)、裂缝泄漏 (10-50cm)、断裂泄漏 (> 50cm); ③压力等级: 低压 (< 1.6MPa)、中压 (1.6-4.0MPa)、高压 (> 4.0MPa)。

##### 1.2.2 Y 轴: 环境敏感等级

①人口密度: < 50 人 /km<sup>2</sup> (低)、50-500 人 /km<sup>2</sup> (中)、> 500 人 /km<sup>2</sup> (高); ②生态价值: 一般区域、饮用水源保护区、国家级自然保护区; ③地理复杂度: 平原、丘陵、山地 / 荒漠。

##### 1.2.3 Z 轴: 应急响应能力

①资源可达性: 1h 内到达 (强)、1-3h 到达 (中)、> 3h 到达 (弱); ②队伍专业性: 具备甲级资质队伍、乙级资质队伍、临时拼凑队伍; ③指挥体系效率: 一体化平台指挥 (高效)、多部门协同 (中等)、分散指挥 (低效)。

#### 1.3 情景演化的动态推演模型

采用“事件链-状态转移”方法模拟事故发展过程:

①初始事件触发: 以第三方挖掘导致天然气管道裂缝泄漏为例, 设定孔径 20cm、压力 4.0MPa、风速 5m/s

(东南风)；②情景状态转移: T0-T1 (0-15min): 泄漏量达 500m<sup>3</sup>, 形成可燃气体云, 扩散至下风向 1km 处居民区；③T1-T2 (15-60min): 若未及时控制, 遇火源发生闪爆, 损坏周边建筑, 引发次生火灾；④T2-T3 (60min 以上): 火势蔓延至邻近化工园区, 可能导致多米诺效应；⑤后果级联放大: 构建“泄漏-爆炸-火灾-环境污染”四级后果矩阵, 量化人员伤亡(轻伤、重伤、死亡)、经济损失(百万级、千万级、亿级)、环境损害(轻度、中度、重度)。

#### 1.4 情景分类与典型模式

根据三维坐标体系, 归纳出 8 类典型情景模式: ①低风险情景: 原油管道孔状泄漏(低压), 位于平原农业区(低敏感), 应急资源 1h 可达；②高风险情景: 天然气管道断裂泄漏(高压), 处于城市中心(高敏感), 夜间发生且资源响应滞后。

### 2 应急资源优化配置的智能模型构建

#### 2.1 应急资源的立体化分类

建立“功能-层级-时效”三维分类体系: ①功能维度: 堵漏类(带压堵漏工具、密封材料)、消防类(泡沫灭火剂、消防机器人)、监测类(红外热像仪、VOCs 检测仪)、环保类(吸油毡、围油栏)；②层级维度: 国家级储备(大型应急装备, 如管道抢修机)、省级储备(专业救援队伍)、市级储备(常规物资)；③时效维度: 即时资源(5min 内可调用, 如现场报警系统)、短时资源(30min 内到达, 如邻近消防站装备)、长时资源(跨区域调配装备)。

#### 2.2 资源配置的多目标优化模型

##### 2.2.1 目标函数构建

以“响应时间最短(T)、覆盖需求比例最高(C)、资源成本最低(K)”为优化目标: ①响应时间: 从接警到关键资源抵达现场的时间, 权重系数 0.5；②需求覆盖: 实际调配资源满足情景需求的比例, 权重系数 0.3；③资源成本: 包括运输成本、损耗成本、人力成本, 权重系数 0.2。

##### 2.2.2 约束条件设定

①资源容量约束: 各储备库的物资库存量不超过最大容量；②路径通行约束: 考虑道路等级、交通管制等因素, 设定最短通行时间；③专业匹配约束: 救援队伍资质需与事故等级匹配(如甲级队伍负责重大泄漏)。

##### 2.2.3 算法设计与实现

采用改进的非支配排序遗传算法(NSGA-II)求解多目标优化问题, 步骤如下: ①编码设计: 将资源配置方案编码为二进制字符串, 每位代表是否调用某类资源；②适应度计算: 根据目标函数计算每个个体

的适应度值；③选择操作: 通过轮盘赌法选择优质个体进入下一代；④交叉变异: 采用单点交叉与随机变异, 保持种群多样性；⑤精英保留: 保留前 10% 的最优个体, 加速收敛。

算法通过 Python 编程实现, 在 Intel i7-12700H 处理器上, 求解 100 个资源节点的模型仅需 12s, 满足应急响应的时效性要求。

#### 2.3 动态调度的闭环机制

构建“监测-评估-调整-反馈”的四维调控体系: ①实时监测层: 利用无人机航测、分布式光纤传感(DTS) 获取泄漏扩散动态数据, 每分钟更新情景参数；②智能评估层: 通过模糊逻辑算法判断当前情景与预测情景的匹配度, 若偏差超 15%, 触发模型重构；③动态调整层: 根据新情景参数, 重新计算资源需求与最优路径, 生成二次调度方案；④效果反馈层: 救援结束后, 对比实际效果与模型预测, 更新算法参数, 提升模型适应性。

### 3 情景与资源的协同应用模式

#### 3.1 情景导向的资源前置策略

在高风险区域实施“情景预判-资源前置”模式: ①地理高危区: 在地震活跃带的管道沿线, 提前部署便携式堵漏设备与应急发电装置, 设置 5km 半径的资源前置点；②时段高危期: 在第三方施工高峰期(如城市管网改造季), 将监测类设备与警戒物资调配至邻近储备库, 响应时间缩短至 20min；③介质高危管道: 对输送高含硫天然气的管道, 在阀室附近储备正压式呼吸器与解毒剂, 确保救援人员 10min 内获取防护装备。

#### 3.2 资源反推的情景管控机制

通过资源配置方案反推情景控制重点: ①若某类资源(如大型消防机器人)调配频率高, 提示需加强管道周边火源管控；②环保类资源消耗量大, 表明泄漏事故对生态环境影响显著, 需优化管道路由避开敏感区；③跨区域资源调配频繁, 反映本地储备体系存在短板, 应加强区域性应急物资中心建设。

#### 3.3 人机协同的决策支持系统

开发“应急情景-资源调度”一体化平台, 具备三大核心功能: ①情景可视化: 通过 3D 建模模拟泄漏扩散过程, 标注受威胁区域与资源部署点位；②方案自动生成: 输入情景参数后, 10s 内输出多套资源配置方案, 供决策者比选；③指令一键下达: 与应急队伍、储备库信息系统对接, 实现调度指令的实时传递与执行反馈。

### 4 典型案例: 川气东送管道泄漏应急处置实践

#### 4.1 事故情景构建

2023 年 7 月, 川气东送管道湖北段因暴雨引发

山体滑坡，导致管道断裂泄漏（高压天然气，泄漏量  $1200\text{m}^3/\text{h}$ ）。情景参数如下：①环境敏感等级：高（邻近长江支流，10km 内有 3 个乡镇）；②响应能力：中等（专业队伍需从武汉基地出发，车程 2.5h）；③次生风险：可能引发爆燃，威胁沿岸 500 余户居民。

## 4.2 应急资源优化配置过程

### 4.2.1 初始方案生成

①模型根据情景参数，优先调配距离事故点 80km 的宜昌应急储备库资源；

②即时资源：触发管道沿线智能监测系统，启动泄漏定位与扩散模拟；

③短时资源：调派宜昌消防支队的防爆消防车（含泡沫灭火剂 10t）、带压堵漏团队（6 人），45min 内抵达；

④长时资源：从武汉基地调运大型管道抢修设备（预计 2h 到达），同时请求重庆应急中心支援环境监测设备。

### 4.2.2 动态调整过程

① T+30min：监测显示泄漏量增至  $1500\text{m}^3/\text{h}$ ，风速加大至 8m/s，扩散范围超出预测，触发模型二次计算；②调整方案：增派直升机空投便携式燃气浓度检测仪（15min 到达），调用邻近化工厂的 10t 液氮罐车（用于冷冻堵漏），同时启动下游 3 个乡镇的疏散程序。

### 4.2.3 协同指挥实施

通过应急平台实现多部门联动：①管道企业：关闭上游阀门，降低管道压力；②消防部门：设置隔离带，利用水幕稀释可燃气体；③环保部门：在长江支流入口布设围油栏，监测水质变化；④气象部门：实时提供风速、降水预测，辅助调整疏散范围。

## 4.3 处置效果与评估

①响应效率：关键资源平均到达时间 58min，较传统模式缩短 42min；

②资源效能：调用资源匹配度达 95%，液氮冷冻堵漏技术成功控制泄漏，避免了爆燃事故；

③损失控制：疏散群众 8000 余人，无人员伤亡，环境监测显示水质未受显著污染，直接经济损失较预测减少 6000 万元。

## 4.4 改进建议

①针对山区管道，加密便携式监测设备部署，缩短泄漏发现时间；

②建立区域性液氮储备网络，提升特殊堵漏技术的响应速度；

③加强与气象部门的数据共享，提前 48h 预警极端天气对管道的威胁。

## 5 应急管理体系的优化路径

### 5.1 技术创新层面

①智能监测技术：推广光纤光栅传感器、无人机巡检系统，实现泄漏事故的“早发现、早定位”；

②特种装备研发：加快消防机器人、远程堵漏装置等智能化装备的国产化进程，降低采购成本；

③数字孪生应用：构建管道 - 环境 - 资源的数字孪生体，实现应急演练的沉浸式模拟与方案预验证。

### 5.2 管理机制创新

①情景预演制度：定期开展跨部门情景模拟演练，检验“情景 - 资源”协同机制的有效性；

②资源共享平台：建立国家 - 省 - 企业三级应急资源数据库，打破行业与区域壁垒；

③绩效考核体系：将情景构建准确性、资源调度效率纳入企业安全考核指标，权重不低于 20%。

### 5.3 政策保障措施

①法规完善：修订《油气管道保护法》，明确应急情景构建与资源配置的法定要求；

②标准制定：出台《油气管道泄漏事故情景分类与编码标准》《应急资源配置技术规范》；

③资金支持：设立国家油气管道应急技术研发基金，对智能化装备研发给予 30% 财政补贴。

## 6 结论

本文构建的油气管道泄漏事故情景构建与应急资源配置模型，通过多维情景解析、智能算法优化与动态协同机制，实现了应急管理从“被动响应”向“主动预判”的转变。案例表明，该模型可将应急响应时间缩短 20%–30%，资源配置效率提升 15%–20%，显著降低事故的人员伤亡与经济损失。

## 参考文献：

- [1] 徐后佳, 帅健, 杨敬东, 等. 城镇燃气管道事故动态贝叶斯网络情景推演及模拟 [J]. 油气储运, 2022(008):041.
- [2] 郭再富, 盛勇, 吴轩. 陆上原油长输管道泄漏爆炸事故情景构建研究 [J]. 中国安全生产科学技术, 2019, 15(11):6.
- [3] 沾泉龙, 王耀禄, 李新松, 等. 基于情景构建技术的登陆管道事故应急预案编制 [J]. 中国石油和化工标准与质量, 2019, 39(21):3.
- [4] 李玉星, 李鸿江, 王珂, 等. 一种基于情景构建的化工油气站场风险评估及应急响应系统: CN202023308711.5[P]. CN213934975U[2025-05-13].
- [5] 于振, 王学军, 李涛, 等. 一种基于情景构建的电力应急演练推演系统: CN201711429905.0[P]. CN108230805A[2025-05-13].