

油气储运管道事故后果模拟与应急资源优化配置

葛红伟 (东明县发展和改革局油田服务中心, 山东 菏泽 274500)

摘要: 油气储运管道作为能源输送的核心设施, 其安全运行关乎社会经济发展与生态环境稳定。但由于管道老化、外部干扰或操作失误等因素, 泄漏、爆炸等事故频发, 容易造成人员伤亡、环境破坏及能源供应中断等连锁后果。为此, 本文聚焦事故后果模拟与应急资源配置的意义, 对油气储运管道事故后果进行模拟, 进而探讨其应急优化配置, 希望为提升管道事故应对能力提供科学依据。

关键词: 油气储运管道; 事故后果模拟; 应急资源优化配置

中图分类号: TE88

文献标识码: A

文章编号: 1674-5167 (2025) 021-0163-03

Simulation of Oil and Gas Pipeline Accident Consequences and Optimal Allocation of Emergency Resources

Ge Hongwei (Oilfield Service Center, Dongming County Development and Reform Bureau, Heze Shandong 274500, China)

Abstract: As the core facilities of energy transmission, the safe operation of oil and gas storage and transportation pipeline is related to social and economic development and ecological environment stability. However, due to pipeline aging, external interference or operational errors and other factors, leakage, explosion and other accidents occur frequently, which is easy to cause casualties, environmental damage and energy supply interruption and other chain consequences. Therefore, this paper focuses on the significance of accident consequence simulation and emergency resource allocation, simulates the consequences of oil and gas storage and transportation pipeline accidents, and then discusses its emergency optimal allocation, hoping to provide a scientific basis for improving pipeline accident response ability.

Key words: Oil and gas storage and transportation pipeline; Simulation of accident consequences; Optimal allocation of emergency resources

油气储运管道的安全运行是保障能源供应链稳定与生态安全的关键环节。随着管道网络规模的扩大与服役年限的增加, 由腐蚀、第三方破坏或自然灾害引发的事故风险日益凸显。此类事故不仅可能导致有毒物质扩散、火灾爆炸等直接危害, 还可能因应急资源调度滞后加剧次生灾害, 对区域社会经济秩序形成冲击。

当前, 事故应急处置面临危害范围动态变化、资源需求时空差异等多重挑战, 亟须建立精准化的事故影响预测模型与适应性强的资源调配体系, 从而实现风险快速响应与损失有效控制。

1 事故后果模拟与应急资源优化配置的意义

油气储运管道承担着能源输送的重要职能, 其事故风险具有突发性、连锁性与扩散性特征。一旦发生泄漏、爆炸等事故, 不仅会直接威胁管道沿线人员安全与生态环境, 还可能因可燃气体扩散、火灾蔓延等次生灾害, 对周边居民区、交通网络及关键基础设施造成严重冲击。在此背景下, 开展事故后果模拟与应急资源优化配置研究, 是提升管道安全管理科学性与应急响应有效性的核心基础^[1]。

从事故防控角度看, 事故后果模拟通过动态推演泄漏物质扩散轨迹、火灾热辐射范围及爆炸冲击波影

响, 能够精准识别事故危害的时空分布特征。例如, 在复杂地形或人口密集区域, 模拟结果可指导优化监测点位布局与预警阈值设定, 显著提升风险早期干预能力。而应急资源优化配置则聚焦于事故响应的高效性与协同性。

实际救援中, 应急资源的分布不均、调度迟滞或供需错配, 可能延误黄金救援时间。构建多目标优化模型, 统筹考虑资源调度成本、响应时效性及动态需求匹配, 能够实现救援力量、物资储备与运输路径的全局最优配置。

2 油气储运管道事故后果模拟

2.1 典型事故类型及其危害特征分析

气储运管道事故主要包括泄漏、火灾与爆炸三种典型类型, 其危害特征因事故场景、介质性质及外部环境差异而显著不同。泄漏事故是管道运行中最常见的事故形式, 通常由腐蚀穿孔、机械损伤或第三方施工破坏引发。以输送原油或天然气的管道为例, 泄漏可能导致可燃气体在低洼区域聚集, 形成爆炸性混合气体; 若介质为含硫原油或高毒性化工产品, 泄漏物质可能直接污染土壤、地下水及周边植被, 威胁农业生态与居民健康。

例如, 在山区管道泄漏场景中, 受地形坡度影响,

泄漏油品可能沿沟谷快速扩散，侵入河流或农田，造成跨区域生态破坏。实际模拟中需结合介质挥发性、泄漏速率及地表渗透性，动态评估污染范围与持续时间，为封堵作业与污染治理提供依据^[2]。

火灾事故多由泄漏气体遇明火或静电引发，其危害主要表现为热辐射与火焰蔓延。例如，液化天然气（LNG）管道火灾可能产生高强度热辐射，导致邻近建筑物结构损毁、人员灼伤，甚至引燃周边植被形成二次火场。在模拟中，需量化不同风速条件下的火焰高度、热辐射强度及安全距离阈值，明确人员疏散范围与消防力量部署优先级。

爆炸事故通常由密闭空间内可燃气体浓度达到爆炸极限引发，冲击波与碎片飞溅是其主要危害形式。例如，城市地下天然气管道爆炸可能损毁道路、地下管线及周边建筑，引发交通瘫痪与次生灾害。模拟需重点分析爆炸压力波传播规律、建筑结构承压极限，为划定警戒区域与加固关键设施提供决策支持。

2.2 事故影响范围与扩散路径的多因素耦合

油气储运管道事故的影响范围与扩散路径受介质物性、管道压力、地形地貌及气象条件等多因素动态耦合作用，需以多维度建模实现精准预测。在介质物性层面。例如，天然气因密度低于空气易向上扩散，但遇低温环境可能形成“重气云”滞留于地表；原油泄漏后因黏度高、流动性差，易在地表形成油膜并缓慢渗透。实际模拟中需结合介质相态变化、溶解度及挥发性，构建多相流扩散模型，预测不同时间节点的污染边界。

在地形地貌层面。丘陵地带泄漏气体可能沿山谷风向形成“烟羽效应”，扩大暴露区域；平原地区则易受地表粗糙度影响，扩散路径更为复杂。例如，某成品油管道在湿地环境泄漏后，油品随地下水流向扩散至下游水源保护区，需以水文地质参数与地表径流模型耦合，模拟污染羽三维迁移路径，划定地下水监测井位。

在气象条件层面。风速决定气体扩散速率，风向影响危害区域分布，湿度与温度则可能改变介质挥发速率或燃烧效率。例如，在高温干燥气候下，原油火灾的热辐射强度显著提升，扩大安全撤离半径；而在静风条件下，可燃气体易在泄漏点周边积聚，增加爆炸风险。

2.3 环境承载能力与社会脆弱性评估

油气储运管道事故后果的严重性不仅取决于事故本身，还与区域环境承载能力和社会脆弱性密切相关，需通过综合评估实现风险精准防控。环境承载能力指区域生态系统对污染物的吸收、降解及恢复能力。例

如，在生态敏感区，即使小规模泄漏也可能因生物链富集效应引发长期生态灾难；而在工业区，土壤硬化与人工排水系统可能限制污染扩散，但需警惕有毒物质通过管网侵入城市水体。实际模拟中需整合土壤类型、植被覆盖度、水体自净能力等参数，评估不同区域的生态修复难度与成本，优先划定高风险保护区并制定差异化应急处置方案。

社会脆弱性反映区域人口、基础设施及应急资源对事故的抵抗与恢复能力。例如，在人口密集的城乡接合部，管道爆炸可能导致大量人员伤亡与房屋损毁，且医疗资源不足可能延误伤员救治；而在偏远地区，尽管人口密度低，但交通条件差、应急队伍到达时间长，可能导致事故初期失控，需通过脆弱性指标体系量化区域抗灾能力短板，优化应急资源预置与救援路径规划。

3 油气储运管道应急资源优化配置

3.1 基于事故场景的应急资源需求分级评估

油气储运管道事故应急资源需求的分级评估是优化配置的前提，其根据事故类型、危害程度及环境条件，构建动态化、差异化的资源需求预测体系。在具体工作中，需对泄漏、火灾、爆炸等典型事故场景进行精细化分类，明确不同场景下关键应急资源的种类与数量阈值。例如，泄漏事故需重点配置堵漏装备、吸附材料及环境检测设备，而火灾爆炸事故则对消防力量、医疗救援及工程机械的需求更为迫切。同时，需结合事故影响范围的时空属性，量化不同阶段的资源消耗规律，如火灾扑救初期需快速调集高压水炮与泡沫灭火剂，后期则需增加污染清理设备与人员轮换保障^[3]。

在实际操作中，资源需求评估需深度融合地理信息系统与实时监测数据。整合管道沿线人口密度、敏感生态区分布及交通网络拓扑结构，可动态划定高风险区域，并基于此预判资源需求的区域优先级。例如，针对穿越人口密集区的管道段，需提前储备医疗资源与疏散工具；对于临近水源或湿地的管段，则需强化水体保护类物资储备。

此外，气象条件与事故演化趋势的实时反馈，可进一步修正资源需求的时空分布模型，避免因信息滞后导致的资源错配。

3.2 多目标约束下的应急资源布局与调度模型

应急资源布局与调度需要在有限的时间、空间及成本约束下实现救援效能最大化，其本质是多目标协同优化的复杂决策过程。在实际工作中，模型构建需重点考量以下核心要素：一是资源储备库的选址问题，需综合评估覆盖半径、运输可达性及区域风险等级，

确保关键资源在预设时间内抵达事故现场；二是运输路径的动态优化，需结合实时路况、天气变化及交通管制措施，规划多批次资源的接力运输方案，避免路径拥堵或二次事故风险；三是资源调度优先级冲突的权衡，例如在跨区域事故中，需平衡本地资源保障与外部支援的投入比例，防止因过度抽调本地资源导致区域防御能力下降。

多目标优化模型需嵌入“成本—时效—效果”三重约束机制。在成本维度，需统筹资源调用费用、运输损耗及闲置库存成本，以生命周期成本分析确定最优储备规模；在时效维度，需设定不同响应阶段的资源到位时间阈值，如泄漏事故的黄金堵漏时间通常不超过 2h，模型需确保堵漏装备在该窗口期内抵达；在效果维度，则需量化资源投入与事故损失削减的关联性，例如增加消防车辆部署可缩短火势控制时间，从而间接降低环境恢复成本。

为实现上述目标，模型需采用智能算法求解帕累托最优解集，并通过情景模拟验证方案的鲁棒性。事故演化过程中，资源需求可能因次生灾害或处置难度升级发生突变，模型须具备实时数据接入与快速重规划功能。例如，当火灾蔓延引发相邻储罐连锁风险时，模型需立即触发资源增补机制，重新分配周边区域的消防力量与冷却物资。

3.3 动态需求驱动的应急资源优先级分配机制

油气储运管道事故的应急资源优先级分配以实时数据反馈与自适应决策模型，实现资源投入与事故演化的精准匹配。在具体工作中，优先级分配机制首先依赖于多源数据的深度融合，涵盖事故现场监测数据、环境参数及资源实时状态。构建动态风险评估模型，可量化不同时间节点的资源缺口，并根据事故危害的扩散趋势调整优先级^[4]。例如，在泄漏事故初期，堵漏设备与专业人员的快速到位是核心需求；随着污染范围扩大，环境监测设备与吸附材料的优先级逐步提升。

这种动态调整需要依托智能算法对多维数据进行实时解析，生成资源分配权重矩阵，确保关键资源在黄金救援窗口期内精准投放。实际应用中，优先级分配机制需嵌入应急指挥系统，形成“监测—评估—决策—执行”的闭环流程。

一方面，运用物联网设备实时追踪资源运输进度与消耗情况，动态更新资源可用性状态；另一方面，结合事故场景的演化模拟结果，预判未来时间节点的需求变化，提前触发资源补充或重新分配指令。例如，当火灾扑救过程中出现风向突变导致火势扩散时，系统可自动提升移动式消防设备与空中支援的优先级，

并协调周边资源向高风险区域倾斜。

3.4 跨区域协同救援的资源共享与联动机制

油气储运管道事故往往具有跨行政区划的影响特征，单一区域的应急资源储备与调度能力难以应对大规模灾害，需以跨区域协同机制实现资源共享与联动响应。

在具体工作中，协同机制构建标准化协议框架与信息互通平台，打破行政壁垒与数据孤岛，需建立区域间应急资源联合储备目录，明确各类资源的分布位置、数量及调用权限，并制定统一的资源编码与调度流程。例如，区域应急管理平台实时可视化资源库存，一旦某地发生事故，可快速检索周边可用资源并触发协同调度协议，减少跨区调拨的行政协调成本。在指挥层面，设立跨区域应急指挥部，整合各地救援力量与专家资源，实行统一指令下达与行动协调，避免多头指挥导致的资源内耗。例如，在长输管道跨省泄漏事故中，指挥部可统筹上下游省份的监测力量与处置队伍，分段实施污染拦截与封堵作业。

在技术层面，需构建资源运输路径协同优化模型，综合考虑跨区域交通网络、运输工具载具兼容性及路况实时信息，设计多模态联运方案，最大限度缩短资源到位时间。针对资源储备薄弱地区，需以协议约定由邻近资源富集区域提供后备支援，并配套建立资源调用成本补偿机制，激发区域间协作积极性^[5]。

4 结语

构建油气储运管道事故动态模拟体系与多目标应急资源优化模型，为事故风险防控提供了科学化、精准化的决策支持。耦合环境社会评估与跨区域协同机制可显著提升应急响应效能。未来，相关研究人员需进一步深化多灾种耦合演化机理研究，推动智能决策平台与数字孪生技术的深度融合，以实现管道安全管理的全域感知与自适应调控，为能源基础设施韧性提升注入新动能。

参考文献：

- [1] 张院乐, 李霆. 油气储运工程中安全与环保管理工作探讨 [J]. 石化技术, 2024, 31(11): 324-326.
- [2] 梁乐乐. 油气储运中长输管道的安全性提升研究 [J]. 中国石油和化工标准与质量, 2024, 44(15): 19-21.
- [3] 陈思. 油气储运工程中安全环保精细化管理 [J]. 化工设计通讯, 2023, 49(09): 8-10+13.
- [4] 叶杨. 油气管道第三方破坏风险分析与安全防护研究 [D]. 中国石油大学(华东), 2020.
- [5] 李慧婷. 基于“情景—应对”的油气管道泄漏事故应急预案研究 [D]. 山东师范大学, 2018.