

油田储运设施易燃易爆介质泄漏事故应急救援路径优化及安全保障

乔政博 (中国石油化工股份有限公司西北油田分公司油田治安消防中心, 新疆 巴音郭楞 841604)

摘要: 油田储运设施易燃易爆介质泄漏事故具有突发性强、扩散快和次生灾害风险高等特点, 对应急救援路径规划与安全保障提出了更高要求。围绕提升救援效率与人员安全的双重目标, 系统分析应急救援核心需求, 构建以“快速响应、风险可控、资源协同”为导向的路径优化目标体系。将多源感知、智能算法与应急管理机制深度融合, 可显著缩短救援响应时间, 降低高危暴露概率, 提高多专业协同效率。相关成果可为油田储运设施及类似高危行业泄漏事故应急处置体系优化提供技术参考与决策支持。

关键词: 储运设施; 易燃易爆介质; 应急救援路径; 风险动态评估; 安全保障体系

中图分类号: TE88 **文献标识码:** A **文章编号:** 1674-5167 (2026) 012-0160-03

Oilfield Storage and Transportation Facility Emergency Rescue Path Optimization and Safety Assurance for Flammable and Explosive Medium Leakage Accidents

Qiao Zhengbo (Oilfield Public Security and Firefighting Center, Northwest Oilfield Company, Sinopec, Korla Xinjiang, 841604, China)

Abstract: Leakage accidents of flammable and explosive media in oilfield storage and transportation facilities are characterized by strong suddenness, rapid diffusion, and high risk of secondary disasters, which place higher demands on emergency rescue path planning and safety assurance. Focusing on the dual objectives of improving rescue efficiency and personnel safety, this paper systematically analyzes the core needs of emergency rescue and constructs a path optimization objective system guided by “rapid response, controllable risk, and resource synergy.” The deep integration of multi-source perception, intelligent algorithms, and emergency management mechanisms can significantly shorten rescue response time, reduce the probability of high-risk exposure, and improve multi-disciplinary coordination efficiency. The relevant results can provide technical reference and decision support for optimizing emergency disposal systems for leakage accidents in oilfield storage and transportation facilities and similar high-risk industries.

Keywords: Storage and Transportation Facilities; flammable and explosive media; emergency rescue path; dynamic risk assessment; safety assurance system

随着油气田开发规模不断扩大和生产环境日趋复杂, 易燃易爆介质泄漏事故的防控压力持续增加。此类事故往往伴随爆炸、中毒及环境污染等复合风险, 一旦处置不及时或路径组织不合理, 极易造成严重人员伤亡和财产损失。近年来, 随着物联网、大数据、无人机及智能导航等技术快速发展, 为应急救援路径精细化优化提供了新的技术支撑。在此背景下, 系统梳理油田储运设施易燃易爆介质泄漏事故的应急需求特征, 构建多目标路径优化模型, 并配套完善的安全保障体系, 对于提升应急体系整体韧性具有重要现实意义。

1 油田储运设施易燃易爆介质泄漏事故应急救援核心需求

1.1 快速响应

系统性压缩“报警—调度—出动—到达”的全过程时间, 实现救援力量的最早介入^[1]。一方面, 应依托智能调度平台和最优路径算法, 综合考虑道路等级、

实时交通状态、通行能力及路口等待时间, 动态计算最短可达路径; 另一方面, 要建立应急优先通行机制, 如绿波通行、路口信号优先控制及应急车道预留等, 减少途中不必要延误。

1.2 风险可控

应急路径优化必须嵌入风险约束机制, 实现“时间最优”与“安全最优”的协同平衡。具体而言, 基于泄漏介质物性参数、泄漏量级、气象实时数据及地形模型, 构建动态风险场, 并按风险等级对区域进行分级标识; 在路径规划过程中, 将高风险区设置为强约束或高权重惩罚区, 引导救援路线主动绕避。

1.3 资源协同

应急路径优化需从单车最优升级为系统级协同优化, 实现“人一车一物”精准匹配与有序投送。依据事故等级和发展态势, 自动生成资源需求清单, 明确首批、增援及保障梯队配置; 结合各类资源点空间分布和道路承载能力, 优化多车辆协同行进路径与出动

时序,避免多车集中拥堵或路线冲突;通过现场分区布控与集结点管理,引导不同专业力量按功能分区进入作业区域,提高现场组织效率。

2 油田储运设施易燃易爆介质泄漏事故应急救援路径优化目标

2.1 最短响应时间

在油田储运设施易燃易爆介质泄漏事故应急处置中,响应时间直接关系到事故可控程度与人员生命安全,是路径优化的首要目标^[2]。实现最短响应时间,并非简单追求几何距离最短,而是要在综合交通运行状态下获得“时间意义上的最优路径”。一方面,应以路径长度为基础约束,通过高精度路网建模识别可通行道路,剔除断头路、限行路及低承载道路,提高路径搜索有效性;另一方面,要引入动态车速模型,综合考虑不同道路等级、实时拥堵指数、天气影响及应急车辆优先通行能力,对行驶时间进行精细化预测。同时,路口等待时间是城市及油区道路延误的重要来源,应通过信号优先控制、绿波带设计及应急放行机制进行动态修正。在算法层面,可构建以“行程时间最小”为目标函数的多源加权模型,实现对路径长度、平均车速与节点延误的综合优化。

2.2 最低风险暴露

在易燃易爆介质泄漏场景下,单纯追求速度最优可能导致救援力量穿越高风险区域,增加人员伤害和装备损毁概率。因此,将风险暴露最小化作为核心优化目标之一具有必要性与紧迫性^[3]。该目标的实现关键在于构建动态风险场模型,将爆炸影响区、有毒气体扩散区及热辐射危险区进行空间量化表达,并转化为路径规划中的惩罚权重。具体实施时,应基于泄漏介质性质、泄漏速率、气象条件(尤其是风向风速)及地形起伏,对危险区范围进行快速预测,并按风险等级进行分区编码。在路径搜索过程中,对高风险区域设置高权重甚至禁行约束,引导算法优先选择安全通道。同时,应建立风险实时更新机制,一旦监测到风场变化或泄漏强度调整,系统可自动刷新风险图并触发路径重规划。

2.3 最高资源可达

应急救援的有效性不仅取决于首车到达速度,还取决于后续多类专业力量能否快速、有序到位。因此,将资源可达性最大化作为优化目标,是提升整体处置能力的重要体现。该目标强调从系统层面优化救援资源空间覆盖与调度效率。首先,应基于油田区域消防站、医疗点、抢修队及物资库的空间分布,构建资源可达性评价模型,识别响应盲区和薄弱区域;其次,在路径规划与出动决策中,引入资源匹配约束,根据

事故类型和等级自动计算所需资源组合,并优化各类力量的出发点选择与行进路线,避免重复调度或关键资源迟到;再次,通过多路径并行规划和梯队化投送机制,实现“首车快速到达、主力有序跟进、保障力量及时补位”的协同格局。同时,可结合覆盖半径分析与服务区优化方法,对现有应急资源布局提出优化建议,从源头提升整体响应能力。

3 油田储运设施易燃易爆介质泄漏事故应急救援路径优化策略

3.1 动态风险评估

动态风险评估是实现应急路径安全优化的前提基础。油田储运设施易燃易爆介质泄漏后,其危险范围具有明显的时空演化特征,受介质物性、泄漏强度、风向风速及地形起伏等多因素共同影响^[4]。如果风险评估滞后或静态化,极易导致路径规划失真。因此,应构建以多源数据融合为核心的动态风险评估体系。在源头层面,应快速识别泄漏介质类别(如天然气、硫化氢、轻烃等)及泄漏规模,调用相应扩散模型,形成初始危险区预测;在环境层面,应接入实时气象数据,重点关注风向突变、风速增强及稳定度变化对气体羽流扩展的影响,并结合地形数字高程模型(DEM)分析低洼聚集区、沟谷导流区等敏感地带;在时间维度上,应采用滚动更新机制,对风险区进行分钟级修正。

3.2 多目标协同

应急救援路径优化本质上是典型的多目标决策问题,单一目标最优往往难以满足复杂事故处置需求。因此,有必要构建多目标协同优化机制,在响应时间、风险暴露与资源可达之间实现动态平衡。在模型构建层面,建立加权多目标函数,将时间成本、风险权重和资源匹配度统一纳入评价体系,并根据事故等级和处置阶段动态调整权重。例如,事故初期可适度提高时间权重,而在危险区扩大阶段则应提高安全权重。在路径生成层面,应同步输出主路径与备用路径,主路径用于常态快速通行,备用路径用于主路径受阻或风险突变时快速切换,避免单一路径失效带来的被动局面。在调度层面,应结合多车协同算法,合理分配不同救援力量的行进通道与到达时序,防止“多车同路”造成拥堵或相互干扰。

3.3 场景适配

油田分布区域类型多样,不同地貌条件对应急车辆通行能力影响显著。如果路径优化忽视场景差异,容易出现“理论最优、现场难行”的问题。因此,必须建立面向典型地貌的差异化路径适配策略。在沙漠油区,应重点考虑松散地表对车辆通过性的影响,通

过地表承载力评估与越野通行模型, 优先选择硬化道路或压实通道, 必要时规划机动越野路径; 在滩涂及低洼区, 结合潮汐、水位及地表含水率信息, 动态识别易陷区域, 路径规划应主动绕避软基和积水带; 在山地油区, 则需重点分析坡度、弯道半径及落石风险, 优先选择缓坡线路和稳定路段。

4 油田储运设施易燃易爆介质泄漏事故应急救援安全保障体系

4.1 路径安全保障

在井场周边、关键道路节点及下风向敏感区域布设气体浓度与微气象传感器, 形成固定监测网络, 实现对可燃气体、硫化氢等关键指标的连续采集。同时, 结合无人机机动巡检能力, 对泄漏羽流边界、地面障碍及交通状况进行快速空中侦察, 并通过图像识别与浓度反演技术生成动态风险分级图^[5]。监测数据应实时回传至应急指挥平台, 与路径规划系统联动, 一旦发现危险区扩大或道路受阻, 可自动触发预警并更新推荐路线。在复杂油区环境中, 构建高可靠智能导航通信体系。采用北斗/GPS双模融合定位, 并辅以惯导或基站差分修正, 提高定位精度与连续性; 在车载终端中引入AR可视化技术, 将风险区边界、推荐路径及禁行区域叠加显示于导航界面, 提升驾驶员态势感知能力; 依托应急专网或专用通信链路, 保障指挥中心与救援车辆之间的信息实时互通, 避免公网拥塞造成指令延迟。在事故处置高峰期, 建立应急优先交通管制机制。在条件允许的油区或园区主干道上预留应急通行车道, 必要时通过临时隔离设施快速启用; 利用可变情报板、广播及导航平台发布绕行信息, 引导社会车辆提前分流, 与属地交管部门建立联动机制, 在关键路口实施人工或智能信号优先控制。

4.2 人员安全保障

依据泄漏介质毒性、爆炸危险等级及现场气象条件, 实施分级防护配置。进入高风险区作业人员必须配备正压式空气呼吸器、防爆防静电服及必要的气体检测仪; 在中风险区域可配置轻型防护与便携监测设备。与此同时, 应严格执行上风向布控原则, 将现场指挥部、集结区及医疗保障点设置在上风安全区域, 并保持足够安全距离。进入危险区作业时间、人数及轮换周期应纳入指挥系统统一管控, 避免人员长时间暴露。建立常态化培训与实战化演练机制, 重点突出“泄漏处置+路径执行”一体化训练。演练内容应涵盖风险判识、路径快速选择、途中突发情况处置及多队伍协同等关键环节, 并尽量模拟夜间、恶劣天气及通信受限等复杂情景。通过桌面推演与现场实战相结合的方式, 持续检验路径优化系统的适用性和人员执

行能力。同时, 建立演练评估与复盘机制, 对响应时间、路线偏差及协同效率进行量化分析, 形成持续改进闭环。长期坚持可显著提升队伍快速决策和现场应变水平。为一线人员配备可穿戴生理监测手环, 实时采集心率、血氧及体温等指标, 并接入指挥平台进行阈值预警; 一旦出现异常, 系统自动提示撤离或轮换。

4.3 资源与环境安全保障

构建“中心库—区域库—现场前置点”三级储备体系: 中心库负责大型装备与战略物资储备, 区域库承担快速支援职能, 现场前置点则配置高频消耗物资与机动装备。通过GIS可达性分析优化各级库点布局, 确保重点井区和高风险区域处于合理服务半径内。在调度层面, 建立基于距离、通行时间及库存状态的智能匹配机制, 实现物资就近调配与快速补给, 减少无效调运时间。易燃易爆介质泄漏除爆炸风险外, 还可能引发水体与土壤污染。应在应急预案中同步嵌入环境防控措施。对于可能进入水体的泄漏, 应迅速布设围油栏、吸附毡等拦截设施, 防止污染扩散; 对地面泄漏区域, 应划定污染隔离带, 必要时实施覆土或吸附处理, 控制污染迁移。同时, 应结合无人机遥感与地面监测对污染范围进行动态评估, 为后续修复提供依据。当事故影响范围可能波及周边人员时, 必须迅速组织有序疏散。应基于风险预测结果划定分级疏散区, 提前规划多条疏散路线, 并根据人群特征实施差异化引导, 如老弱群体优先选择距离近、坡度缓的安全通道, 大规模人群则引导至集中转运点统一转移。预警信息应通过广播、短信及移动终端多渠道发布。

综上所述, 油田储运设施易燃易爆介质泄漏事故的高效处置依赖于路径优化与安全保障的协同推进。以快速响应为牵引、以风险动态可控为约束、以资源协同为支撑的多目标优化框架, 能够有效提升救援路径科学性与执行可靠性。

参考文献:

- [1] 阎荣辉, 陈志勇, 杨佐英, 等. 新形势下长庆油田井控管理创新与实践[J]. 石油工业技术监督, 2025, 41(09):1-6.
- [2] 李玉萍. 基于人工智能的海上油田消防安全管理分析与研究[J]. 内蒙古石油化工, 2025, 51(07):7-10.
- [3] 陈辉, 陈刚, 王栋森. 浅谈海上平台火灾、爆炸现场应急处置预案[J]. 中国石油和化工标准与质量, 2025, 45(12):68-70.
- [4] 米嘉臣. 油田供水管网改造工程施工安全风险及预防探讨[J]. 石化技术, 2025, 32(06):200-202.
- [5] 于连波. 海外油田开发中的安全风险与应急管理系统研究[J]. 化工管理, 2025, (08):111-114.