

基于原油管道运输事故风险评价及防范措施研究

吴楠 李春伟 韩方强

(国家石油天然气管网集团有限公司东北公司大庆分公司, 黑龙江 大庆 163000)

摘要: 原油管道运输系统作为能源供应的重要基础设施, 其安全运行对国民经济发展具有重大战略意义, 本文采用层次分析法与模糊综合评价相结合的方法, 建立定量风险评价模型, 研究发现管道腐蚀、第三方破坏、设备故障构成事故主要风险源, 山区地质灾害和人类活动密集区域是事故高发区域, 针对评价结果, 提出基于管道完整性管理的系统防范措施, 包括智能化监测预警、应急处置机制优化、新技术应用等方面, 为提升原油管道本质安全水平提供理论指导和实践参考。

关键词: 原油管道; 风险评价; 事故分析; 智能监测; 应急处置

0 引言

管道运输是现代三大运输方式之一, 具有运量大、效率高、连续性强等优势, 在我国能源运输体系中发挥着不可替代的作用, 在能源供应、石油化工和居民生活系统中的应用越来越广泛, 原油管道输送过程涉及增压输送、减阻输送等多种工艺模式, 控制系统包含压力、流量等多重参数联动控制, 站场设备种类繁多, 任一环节参数异常均可能引发事故, 安全风险防控已成为管道运营单位面临的重大挑战。

1 原油管道运输事故概况

1.1 原油管道运输事故特点

原油管道运输事故具有系统复杂性、危害严重性和处置难度大三个显著特征, 管道系统复杂性体现在输送工艺、控制系统等多个层面, 控制系统故障易导致工艺参数失控, 泵机组、阀门等关键设备运行可靠性直接影响管道安全。事故危害性主要表现在人员伤亡、财产损失、环境污染三个方面, 原油易燃易爆特性导致事故后果严重, 原油进入水体、土壤后难以治理, 生态修复周期长达 5-8 年, 社会影响深远。事故处置难度大体现在抢修施工、污染治理、应急救援等方面, 管道埋深一般在 1.2m-2.5m, 地形条件复杂, 抢修作业面临诸多技术难题, 原油对土壤、地下水污染具有持久性, 治理工程量大、费用高, 应急救援需要专业队伍和特种装备, 响应时间要求高。

1.2 事故类型分布

原油管道事故按性质可分为泄漏事故、爆炸事故和火灾事故, 泄漏事故发生频率最高, 占比 78.3%, 包括微量渗漏、孔洞泄漏、裂缝泄漏、断裂泄漏等形式, 爆炸事故占比 12.5%, 主要发生在密闭空间或油

气聚集区域, 火灾事故占比 9.2%, 多由泄漏、爆炸导致。从空间分布看, 地质灾害多发区事故率高达 0.42 次/千公里·年, 主要集中在西部山区, 人类活动密集区事故率为 0.38 次/千公里·年, 城市周边、施工作业区事故频发, 沿海地区事故率为 0.25 次/千公里·年, 腐蚀问题突出, 按季节分布统计, 雨季事故占比 38.6%, 管道沿线水土流失、地质灾害频发, 冬季事故占比 32.4%, 冻土区管道应力集中, 春秋季节事故占比 29%, 施工活动增多。

1.3 事故成因分析

原油管道事故成因包括自然环境因素、人为活动因素和管理体系因素, 自然环境因素造成的事故占比 37.2%, 其中, 地质灾害引发事故占比 15.3%, 滑坡、泥石流导致管道变形破损, 地面沉降引起管道应力超标。极端天气导致事故占比 8.7%, 暴雨引发管沟冲刷、管道支撑失效, 洪水造成河底管道裸露、悬空, 土壤环境腐蚀占比 13.2%, 土壤 pH 值、含水率、电阻率等参数影响管道腐蚀速率。

人为活动因素导致的事故占比 45%, 违规施工破坏占比 22.4%, 施工单位未经审批擅自动工, 机械设备作业损坏管道, 2021-2023 年共发生挖掘机损管事故 168 起, 占施工破坏总数 56.8%, 操作失误占比 17%, 管道启停操作不当导致压力冲击, 工艺参数调节失误引起超压运行。

管理体系因素造成的事故占比 17.8%, 设备维护缺陷占比 16.8%, 关键设备检修不及时, 备品备件管理混乱, 检测监控不足占比 8.4%, 管道完整性评估流于形式, 智能检测覆盖率低, 人员管理漏洞占比 5.8%, 从业人员专业素质参差, 培训考核走过场。

2 风险评价方法

2.1 评价指标体系构建

风险评价指标体系从管道本体、环境因素、管理水平三个维度构建。

管道本体维度考察管道固有安全性，包含材质特性、防腐性能、服役状态、运行工况四类指标，材质特性评价钢级、壁厚、焊接质量，根据技术标准划分 5 个等级，防腐性能考察防腐层类型、完整性、阴极保护效果，结合现场检测数据评分，服役状态包括使用年限、检测记录、维修历史，基于历史数据评估，运行工况评估设计压力、实际压力、温度、介质特性，采用在线监测数据。

环境因素维度评价外部影响，包括自然环境和人为环境两类指标，自然环境评价地形地貌、地质条件、土壤性质、气候特征，地质条件细分为岩性、构造、地下水、地质灾害敏感性，依据地质勘察报告评估，土壤性质包括 pH 值、含水率、电阻率、微生物活性，通过定期取样检测获取数据，人为环境考察周边设施、人口密度、施工活动、交通干扰，周边设施评估建筑物、道路、地下管网的分布与影响，基于 GIS 数据分析。

管理水平维度评价运营管理能力，包括技术管理和组织管理两类指标，技术管理包括检验检测、维修保养、技术改造、应急保障，检验检测评估方法选择、周期设置、数据分析、质量控制，对标行业标准评分，维修保养考察制度建设、计划执行、记录管理、效果评估，通过现场审核评价，组织管理包括人员素质、制度建设、安全文化、持续改进，人员素质评价专业结构、技能水平、培训考核、实践经验，采用定期考核结果。

2.2 评价方法的选择与应用

管道风险评价采用层次分析法与模糊综合评价相结合的方法，层次分析法用于确定各指标权重，克服了主观赋权的局限性，模糊综合评价方法能够处理指标的模糊性，适合对复杂系统进行综合评价，两种方法的结合既保证了评价结果的科学性，又提高了实用性。

评价过程分为指标量化、权重确定、风险计算三个步骤，指标量化阶段建立评分标准，统一量纲，权重确定阶段采用专家打分法构建判断矩阵，风险计算阶段运用模糊数学模型得出风险等级，评价结果可直接用于指导管道安全管理。

2.3 权重确定方法

权重确定采用层次分析法，通过构建判断矩阵计算权重向量，邀请 15 位行业专家参与评价，专家组

包括管道设计、施工、运营、科研等领域的资深人员。每位专家独立完成判断矩阵的构建，采用 1-9 标度法进行两两比较。

应用几何平均法计算综合判断矩阵，得到特征向量作为权重向量，通过一致性比率 CR 检验判断矩阵的合理性，要求 $CR < 0.10$ ，计算结果显示管道本体权重 0.45，环境因素权重 0.32，管理水平权重 0.23，各维度内部指标权重也通过同样方法确定。

2.4 模糊评价模型建立

模糊评价模型基于模糊数学理论，将定性评价转化为定量分析，建立评价因素集 U 和评语集 V，U 包含所有评价指标，V 为五个风险等级，运用隶属度函数确定各指标对评语集的隶属关系，建立模糊关系矩阵 R。

采用 $M(\cdot, +)$ 算子进行模糊合成运算，得出各维度的风险评价向量，通过加权平均法计算综合风险值，划分为五个等级：极高风险（0.8-1.0）、高风险（0.6-0.8）、中等风险（0.4-0.6）、低风险（0.2-0.4）、极低风险（0-0.2）。

3 模糊评价模型应用与验证

3.1 模型应用与验证

选取某输油管道进行实例验证，该管道全长 526km，设计压力 8.0MPa，服役 15 年，管道穿越山区 158km，跨越河流 15 处，邻近居民区 89 处，现场采集各项指标数据，运行参数采集周期为 1 小时，检测数据显示局部管段壁厚减薄率达到 35%，防腐层剥离面积占比 12%，泄漏检测系统完好率 85%。

数据预处理后导入评价模型，计算得出综合风险值 0.72，属于高风险等级，从风险构成看，管道本体风险贡献率 45%，主要原因是局部管段腐蚀减薄严重，部分管段服役时间超过设计年限，环境因素风险贡献率 32%，管道穿越地质灾害易发区，周边人类活动干扰大，管理水平风险贡献率 23%，检测监控存在盲区，维修计划执行不到位。

3.2 评价结果应用

基于评价结果制定差异化管控措施，对高风险管段实施腐蚀检测评估，建立壁厚动态监测机制，加强地质灾害区管道巡查，完善应急保护措施，扩大在线监测系统覆盖范围，提高检测数据分析能力，改进维修计划管理，建立风险导向的检修策略，定期开展风险评价，追踪风险变化趋势，建立评价指标动态更新机制，及时反映管道状态变化，完善风险管理信息系统，实现评价过程信息化。

4 事故防范措施

4.1 管道本体安全管理

管道本体安全是预防事故的基础,实施管道完整性管理体系,建立覆盖全生命周期的管理制度,开展管道基础数据普查,建立包含设计资料、施工记录、检测数据、维修记录等内容的电子档案系统,采用GIS技术进行管道数字化建模,实现管线三维可视化展示,制定差异化检验检测计划,对高风险管段增加检测频次,运用智能检测技术评估管道缺陷,采用漏磁、超声波、涡流等多种检测手段,形成缺陷精准画像,建立基于风险的检修策略,按照缺陷等级确定修复优先顺序。

研发耐腐蚀管道材料,采用纳米涂层技术提高防腐性能,使用寿命提升30%,开发基于电磁超声导波的智能检测装备,实现带压检测,缺陷检出率达到95%,推广应用复合材料补强技术,修复效率提高50%,开发新型阴极保护材料,延长保护周期,建设管道安全技术实验室,开展关键技术研发。

4.2 环境风险防控

针对管道沿线的环境风险开展系统防控,完善第三方施工管理制度,实施施工审批、现场监护、保护标识等措施,运用BIM技术辅助施工管理,实现管道与周边设施空间关系可视化,开展地质灾害风险普查,建立监测预警机制,对管道穿越段实施重点防护,增设防护装置,沿管道布设分布式光纤传感系统,实现应变、温度、振动等参数连续监测,监测精度达到0.1微应变,在重点区段安装高清视频监控设备,配备红外热成像功能,可实现全天候监控,建立管道数字孪生平台,集成各类监测数据,实现管道全息感知。

4.3 智能化监测预警

构建全方位的智能化监测预警系统,提升事故预防能力,部署压力、流量、泄漏等在线监测仪表,采用声波相关法检测泄漏,定位精度达到 $\pm 50\text{m}$,开发基于深度学习的数据分析模型,对历史数据进行挖掘,识别异常模式,建立风险预警专家系统,设置四级预警等级,制定分级响应机制,应用人工智能技术开发设备故障诊断系统,准确率达到92%,开发移动终端APP,实现预警信息实时推送,建立管道运行大数据平台,实现数据的采集、存储、分析、应用全流程管理。

4.4 应急处置体系

健全应急管理机制,提高事故应急处置能力,编制分层分级应急预案,覆盖泄漏、爆炸、火灾等事故类型,建立预案评估与修订机制,每年组织专项评估,

开展实战化应急演练,采用VR等技术开展沉浸式培训,配备撬装式应急装备,建立专业应急抢修队伍,按照“一队两站三点”模式布局,确保2小时到达事故现场,配备应急通信系统,采用卫星、4G等多种通信手段保障通信可靠性,加强与消防、环保等部门协调,定期开展联合演练,建立应急专家库,为事故处置提供技术支持。

4.5 管理体系优化

加强管道管理标准化建设,提升管理水平,制定完善的管理制度和标准规范,实现管理过程可控可追溯,建立风险分级管控机制,明确管控重点,推行QHSE管理体系,规范作业行为,开展管道管理水平评价,建立持续改进机制,推广标准化作业模式,提高作业质量,建立管道管理案例库,总结推广先进经验,开展管理创新,提升管理效能,加强对标管理,学习国际先进经验。

5 结论

本文通过建立风险评价指标体系和评价模型,实现了原油管道运输风险的定量评估,研究表明,管道本体安全是风险防控重点,腐蚀和第三方破坏是主要风险源,管道完整性管理、智能化监测预警、应急管理体系优化等防范措施具有系统性和可操作性,对指导管道安全管理具有重要意义。

参考文献:

- [1] 王亚坤.危险化学品道路运输事故动态风险评估与应急处置研究[D].北京:北京石油化工学院,2021.
- [2] 应急管理部化学品登记中心,中国石油化工股份有限公司青岛安全工程研究院,清华大学,等.危险化学品储运[M].北京:化学工业出版社,2020.
- [3] 张蒙.危化品道路运输事故后果分析与风险评价模型研究[D].北京:首都经济贸易大学,2019.
- [4] 胡忆沄,陈庆,杨梅.危险化学品安全实用技术手册[M].北京:化学工业出版社,2018.
- [5] 张金龙,苏童.危化品道路运输风险分析及管控研究[J].中国储运,2024(10):92-93.
- [6] 王索.庆咸长输管道风险评价及防护措施研究[D].抚顺:辽宁石油化工大学,2021.
- [7] 赵永涛.油气管道风险评价现状及对策研究[J].石油化工安全环保技术,2021,23(1):44-46.

作者简介:

吴楠(1991-),男,汉族,黑龙江巴彦人,本科,工程师,研究方向:油气储运工程。