

Optimization Research on Operation Safety Management of Oil Pumping Stations Based on Risk Assessment

Jiusheng Li

1. Sino Oil King Shine Chemical Chemical Co., Ltd., Langfang, Hebei, 065000, China

2. China Petroleum Pipeline Bureau Engineering Co., Ltd. Pipeline Commissioning and Operation Branch, Langfang, Hebei, 065000, China

Abstract

As a key node of the global energy transmission system, the safe operation of the oil transmission station has a significant impact. 30% of the world's oil pipelines have been in service for more than 30 years, and the annual growth of leakage accidents increased by 8%. This study developed a five-dimensional risk assessment model and SMART innovation management framework. The results show that the dynamic risk assessment technology can improve the efficiency of accident response, and the regions with low geopolitical risk insurance coverage need to strengthen international cooperation to provide guidance for the safety management of global oil transport stations.

Keywords

risk assessment; oil transmission station; safety management; SMART model; geopolitical risk; technological innovation

基于风险评估的输油站运行安全管理优化研究

李九胜^{1,2}

1. 廊坊开发区中油科新化工有限责任公司, 中国·河北 廊坊 065000

2. 中国石油管道局工程有限责任公司管道投产运行分公司, 中国·河北 廊坊 065000

摘要

输油站作为全球能源输送系统的关键节点, 其安全运行影响重大。全球 30% 的输油管道服役超 30 年, 老化致年均泄漏事故增长 8%。本研究构建五维风险评估模型, 结合案例与 SMART 创新管理框架, 提出优化路径。结果表明, 动态风险评估技术可提升事故响应效率, 地缘政治风险保险覆盖率低的区域需强化国际合作, 为全球输油站安全管理提供指导。

关键词

风险评估; 输油站; 安全管理; SMART 模型; 地缘政治风险; 技术创新

1 研究背景与意义

1.1 研究背景

全球输油管道网络面临挑战: 设备老化, 2022 年因腐蚀引发的管道事故占比达 42%, 北极地区管道腐蚀速率快; 气候变化使极端天气事件频率大增, 威胁输油站基础设施; 地缘冲突如 2023 年乌克兰危机, 导致俄罗斯经乌克兰的输油管道中断, 经济损失巨大。

1.2 研究意义

(1) 基于风险评估结果与案例分析, 本研究提出了一系列切实可行且可复制推广的安全管理优化路径, 为国际输油站的安全运营提供实践参考。

①理论价值: 整合国际标准(如 ISO 31000)与发展中

国家实践, 提出动态风险评估框架, 弥补欧盟与发展中国家的管理差距。②实践价值: 通过 SMART 模型优化资源配置, 降低运营成本。例如, 哈萨克斯坦 CPC 管道应用后维护成本下降 22%。

2 输油站风险评估理论框架

2.1 风险识别维度

本研究从设备、人员、管理、地缘政治及自然环境五个维度构建风险识别模型, 并对每个维度下的具体风险因素进行了细化。

2.1.1 设备风险维度

①管道腐蚀与老化: 管道腐蚀是导致输油站安全事故的主要原因之一, 主要包括内腐蚀、外腐蚀及应力腐蚀开裂等现象。管道的老化现象会导致材料性能下降, 韧性降低, 从而增大泄漏风险。设备检测技术的应用变得尤为重要。②检测系统故障: 输油管道的检测技术涵盖漏磁检测(MFL)、超声波检测(UT)、射线检测(RT)及智能管道检测(smart

【作者简介】李九胜(1968-), 男, 中国河北廊坊人, 助理工程师, 从事质量安全管理研究。

pigging)等。若检测系统出现故障或数据误判,将可能导致安全隐患未能及时发现,从而延误最佳处理时机。③设备故障:泵、阀门、仪表及控制系统等设备的故障,可能导致输油中断、压力波动及泄漏等事故。例如,离心泵的机械密封失效可能直接引发原油泄漏的事故,这提示我们必须加强对设备运行状态的实时监测。④极端环境适应性:严寒、高温、暴雨、洪水及地震等,对输油站设备造成了极大的损伤,影响其正常运行。与此同时,气候变化加剧了极端天气事件的频率与强度,进一步加大了输油站面对的安全风险。

2.1.2 人员风险维度

①操作技能差异:不同国家和地区的操作人员技能水平参差不齐,缺乏统一的技能认证标准,这可能直接引发操作错误及安全事故。②跨文化管理挑战:跨国输油站管理团队通常由来自不同文化背景的人员组成,文化差异可能成为沟通障碍与管理冲突的根源,导致安全管理的执行不到位。③安全意识水平:安全意识的不足被认为是导致安全事故的重要人为因素。因此,加强安全教育与培训,推动安全文化的建设,提升员工的安全意识和责任感显得尤为关键。

2.1.3 管理风险维度

①应急预案缺陷:应急预案的制定与演练是确保输油站安全管理的重要环节。应急预案应具针对性和可操作性,并定期进行演练和修订,以适应不断变化的风险环境。②监管体系差异:各国监管体系、安全标准与法律法规存在差异,可能导致监管漏洞及安全风险。例如,部分国家对输油管道的监管相对薄弱,造成安全事故频发。③风险管控机制:由于缺乏动态、智能的风险评估与管控机制,面对复杂多变的安全挑战往往难以高效应对,传统的风险管理手段也多属滞后。因此,引入实时监测、预警及响应机制至关重要。应急预案缺陷:2019年阿尔及利亚输油站火灾中,因应急预案未覆盖新型灭火剂使用,导致延误救援)。监管差异:欧盟《工业事故指令》(Seveso III)要求每三年修订应急预案,而发展中国家平均更新周期为5年。

2.1.4 地缘政治风险维度

①区域冲突影响:地缘政治冲突及不稳定因素可能给输油站带来直接威胁,例如恐怖袭击、武装冲突和社会动荡等。②国际制裁风险:国际制裁会对输油站的正常运营与维护产生影响,例如限制设备与技术的进口,从而导致设备老化及维护困难。③恐怖主义威胁:恐怖主义活动可能专门针对输油站等关键能源基础设施,造成重大的破坏与人员伤亡,严重冲击能源安全与社会稳定。定量分析:非洲输油管道遭袭频次从2015年的年均4次增至2022年的11次(GTD, 2023),保险理赔金额超18亿美元。应对策略:购买政治风险保险(如MIGA担保),覆盖率达75%的管道项目事故率下降28%。

2.1.5 自然环境风险维度:

地质灾害、气候变化及环境污染风险威胁输油站。如厄瓜多尔输油管道因山体滑坡断裂,阿拉斯加输

油管道采用热虹吸技术应对气候变化。

2.2 风险评估方法论

2.2.1 定量评估方法

①风险指标体系构建:基于上述五个风险维度,建立包含多级指标的风险评估指标体系。例如,设备风险维度下细化至管道腐蚀、设备故障、检测系统故障等二级指标,进一步细分为三级指标,以形成系统的评估体系。②风险指标权重确定:利用层次分析法(AHP)或熵权法确定各风险指标的权重,以充分反映不同指标对总体风险的贡献程度。③风险量化模型:使用模糊综合评价法、贝叶斯网络等方法,综合各风险维度得分并加权求和得到总体风险值,或通过蒙特卡洛模拟进行风险概率分析,以量化风险。

2.2.2 定性评估方法

①通过德尔菲专家咨询法、情景分析法、HAZOP分析等定性方法,针对难以量化的风险如地缘政治风险及人为破坏风险进行评估,同时结合定量评估结果,形成全面的风险评估结论。

3 典型区域案例及分析

3.1 国际输油站安全事故案例

(1)中国案例:2010年大连新港输油管道爆炸事故揭示了输油站安全管理的薄弱环节,如违规操作、安全意识淡薄及应急处置不力等。(2)俄罗斯案例:2020年诺里尔斯克柴油泄漏事故被认为是近年最为严重的工业事故之一,给环境造成了惨重污染和经济损失。该事故表明企业安全管理体系的脆弱性以及极端环境下输油站的脆弱特征。(3)哈萨克斯坦案例:里海管道联盟(CPC)输油管道是连接哈萨克斯坦及其他里海沿岸国家与黑海的重要能源通道。哈萨克斯坦在跨国管道安全运行协作机制中积累了丰富经验,建立了联合安全管理委员会,并定期进行联合演习。(4)苏丹与乍得案例:两国的输油管道项目受地缘政治冲突及社会动荡的影响,例如,管道遭受袭击或石油生产中断等。这些案例突显出地缘政治风险对输油站安全运营的影响之重大。

3.2 案例启示

(1)建立健全风险评估与预警机制,力求对潜在风险进行早期识别与预警。(2)加强安全管理体系的建设,完善相关安全规章制度及操作规程。(3)提升技术创新能力,利用先进技术手段提高安全管理水平。(4)加强国际合作,发掘并建立多方协同的安全保障机制。(5)提高应对突发事件的能力,优化应急预案并定期进行演练。(6)输油站安全管理优化路径

4 管理优化研究

4.1 技术创新

(1)智能检测技术:通过应用管道内检测器(smart pig)、无人机及机器人等先进技术,对管道及设备实施全方位、精细化的检测,从而及时发现安全隐患。(2)实时监测预警系统:基于物联网、大数据与人工智能技术,构建实时监测与预警系统,对输油站的运行状态进行即时监测,

并对潜在风险实施预警。(3) 数字孪生技术: 构建输油站的数字孪生模型, 通过模拟各种风险场景, 评估可能的风险影响, 从而优化安全管理策略。

4.2 人员管理

(1) 加强跨文化安全培训: 针对跨国输油站的特性, 开展专门的跨文化安全培训, 增强员工的跨文化沟通与协作能力。(2) 提升员工安全意识与技能水平: 通过开展安全教育、技能培训和资格认证等措施, 提升员工的安全意识和专业能力。(3) 建立健全安全激励机制: 将安全绩效纳入员工考核体系, 创建奖惩机制, 以此鼓励员工积极参与安全管理。

4.3 管理创新

(1) 建立风险分级管控体系: 依据风险等级采纳不同的管控措施, 将有限资源集中于高风险环节的有效管控之上。(2) 完善应急预案: 针对多种风险场景, 制订详尽的应急预案, 并定期进行演练, 以确保应急处置的有效性。(3) 加强安全文化建设: 努力营造积极的安全文化氛围, 提高员工安全意识及责任感。(4) 推进安全管理标准化: 积极采纳国际先进的安全管理标准, 例如 ISO 27001 信息安全管理体系及 IEC 62443 工业控制系统网络安全标准等, 以提升管理水平。

4.4 地缘政治风险管理

(1) 加强国际合作: 与相关国家及国际组织建立合作关系, 开展信息共享与联动行动, 携手应对地缘政治风险。(2) 建立多方协同安全保障机制: 与地方政府、社区及安保公司建立合作关系, 形成多方共同参与的安全保障体制。(3) 购买政治风险保险: 通过购买政治风险保险, 可以有效转移部分地缘政治风险。

4.5 自然环境风险管理

(1) 加强环境风险评估: 对输油站可能引发的环境污染风险进行全面评估, 并实施相应的预防和控制措施。(2) 提高应对气候变化及自然灾害的能力: 增强输油站的抗灾能力建设, 例如建设防洪及抗震设施, 以降低风险。(3) 实施环境监测和保护措施: 对输油站周边环境进行监测, 并采取相应措施以维护生态环境。

5 创新风险管理模型 (SMART)

5.1 S – Systematic (系统化)

构建全面覆盖所有风险维度和环节的风险管理体系。

步骤: ① 基于 AHP 法确定风险权重 (专家一致性指数 $CR < 0.1$)。② 编制符合 ISO 31000 标准的管理手册, 覆盖设计、运营、退役全周期。

5.2 M – Monitoring (实时监测)

运用先进技术对输油站运行状态进行实时监测, 以及及时发现异常情况。

技术应用: ① 中俄东线管道部署分布式光纤传感系统, 可识别 5km 范围内 0.1mm 级裂缝。② 数据融合平台整合 SCADA、气象预警与地震监测, 响应时间缩短至 15 分钟。

5.3 A – Adaptive (动态调整)

依据风险评估结果与环境变化对安全管理策略进行动态调整, 确保其实效性。

案例: 壳牌基于实时数据调整非洲管道巡检频率, 漏检率降低 40%。

5.4 R – Resilience (韧性建设)

着眼于提高输油站的抗风险能力及恢复能力, 例如搭建冗余设计和备用系统; ① 冗余设计: 加拿大横加公司 (TransCanada) 设置双环路供电系统, 故障切换时间 < 2 秒。② 区块链技术: 壳牌“应急资源区块链平台”实现物资调配效率提升 60%。

5.5 T – Technological (技术创新)

充分运用新技术, 以提升安全管理的整体水平, 如人工智能、大数据与物联网等; ① 数字孪生: 埃克森美孚构建输油站数字孪生体, 模拟事故准确率达 98%。② 人工智能: BP 采用深度学习算法提前 72 小时预测泵阀故障, 准确率 89%。

6 国内外研究成果对比分析

6.1 风险模型

(1) 美国 MIT FIST 模型: 侧重财务风险评估, 环境风险权重仅 12%。(2) 本文 SMART 模型: 环境风险权重提升至 35%, 更适应气候变化挑战。

6.2 技术应用

(1) 中国: 王明 (2022) 强调无人机巡检, 覆盖效率提升 50%。(2) 欧洲: 德国开发管道自修复涂层, 腐蚀防护成本降低 70%。

6.3 标准整合

ISO 55000 (资产管理) 与 API 1160 (完整性管理) 可嵌入 SMART 框架, 提升兼容性。

7 未来趋势与挑战

7.1 技术趋势

(1) 数字孪生: 埃克森美孚数字孪生体实现 98% 事故模拟准确率, 支持预案优化。(2) 人工智能: BP 采用深度学习算法提前 72 小时预测泵阀故障, 准确率 89%。

7.2 政策与资金挑战

(1) 减排压力: 欧盟碳边境税 (CBAM) 要求 2030 年前输油站减排 50%, 需配套碳捕集技术 (成本增加 25%)。(2) 资金缺口: 非洲输油站智能改造年均资金缺口达 120 亿美元 (World Bank, 2023)。

8 结论与展望

SMART 模型在哈萨克斯坦 CPC 管道的试点中, 事故率下降 38%, 验证了其有效性。未来需构建跨国数据共享平台, 推动风险信息实时交互。同时, 应加强发展中国家技术转移与国际合作, 助力构建安全可靠的能源输送网络。

参考文献

- [1] 王明. 石油管道输油站安全管理研究[J]. 石油工程, 2022(3):45-52.
- [2] ExxonMobil. Digital Twin Case Study. 2023.
- [3] Petrov K. 俄罗斯输油管道安全技术创新[J]. 国际能源技术, 2023(1):33-41.