

油气站场安全风险评估与动态预警优化的研究综述

强富平

国家管网集团西部管道有限责任公司, 新疆 乌鲁木齐

收稿日期: 2025年9月16日; 录用日期: 2025年11月28日; 发布日期: 2025年12月10日

摘要

油气站场作为石油石化产业链的关键节点, 涉及天然气、液化石油气等易燃易爆、有毒有害介质, 且存在高压、低温等复杂工艺条件, 易发生泄漏、火灾、爆炸等事故, 对人员、财产及生态环境构成严重威胁。安全风险评估是预防事故、提升站场安全管理水平的核心技术手段。本文从多个维度系统性地梳理油气站场的核心风险源, 构建了全面的安全风险评估指标体系, 并探讨了相应的评估方法。针对现有评估体系中动态性不足、人为因素量化困难等问题, 提出融合物联网与人工智能的动态风险预警优化方向, 为油气站场安全风险精准管控提供理论与实践参考。

关键词

油气站场, 风险评估, 预警优化

A Review of Research on Safety Risk Assessment and Dynamic Early Warning Optimization in Oil and Gas Stations

Fuping Qiang

China West Pipeline Company, China Oil and Gas Pipeline Network Corporation Petro, Urumqi Xinjiang

Received: September 16, 2025; accepted: November 28, 2025; published: December 10, 2025

Abstract

Oil and gas stations, as key nodes in the petroleum and petrochemical industry chain, involve flammable, explosive, toxic, and hazardous media such as natural gas and liquefied petroleum gas. They also

face complex process conditions such as high pressure and low temperature, making them prone to leakage, fire, explosion, and other accidents, posing serious threats to personnel, property, and the ecological environment. Safety risk assessment is a core technical means to prevent accidents and enhance the safety management level of stations. This paper systematically sorts out the core risk sources of oil and gas stations from multiple dimensions, constructs a comprehensive safety risk assessment index system, and discusses corresponding assessment methods. Addressing the issues of insufficient dynamism and difficulties in quantifying human factors in the existing assessment system, this paper proposes a direction for dynamic risk early warning optimization that integrates the Internet of Things (IoT) and artificial intelligence, providing theoretical and practical references for precise control of safety risks in oil and gas stations.

Keywords

Oil and Gas Station, Risk Assessment, Early Warning Optimization

Copyright © 2025 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

如今是全面智能化发展的黄金时期，石油石化行业也迎来全面智能化发展阶段，其中油气站场作为石油石化行业的重要组成部分，承担着保障民生质量的重要使命。随着油气站场规模的不断扩大，其安全发展值得引起关注。传统的安全管理模式多依赖事后整改的经验，难以辨别潜在威胁，需通过科学的安全风险评估体系实现事前预防、事中控制、事后整改全过程闭环管理[1]。为此，诸多学者对油气站场的安全风险评估做了相应的工作。蒋毅等通过考虑主观因素和客观因素对评价结果的影响从最优关联系数和最劣关联系数两方面综合确定了站场各风险区块的安全风险系数[2]。丁华提出了采用基于HAZOP 和 LOPA 的风险评估方法[3]。孙勇等通过专家打分、层次分析等评价方法建立了输油气站场区域化管理综合评价体系[4]。刘琪通过基于层次分析法(AHP)的风险评估和基于故障树分析(FTA)的风险评估提出技术性与管理性预防措施[5]。

目前多数评估方法以静态评估为主，难以适应设备老化、工艺变更等动态风险变化。为此本文以多系统融合为原则，构建油气站场安全风险评估体系，并提出智能化优化路径，为油气站场安全管理提供新的思路。

2. 油气站场风险概述

油气站场具有工艺复杂、介质高危、作业环境特殊等特征，其风险管控直接关系到安全生产、人员生命及生态环境安全。本节基于油气站场的功能定位从风险的来源、性质、影响范围等多维度系统梳理了油气站场风险的分类体系。

2.1. 按油气站类型风险维度分类

1. 分输站

分输站通过调压计量设备向用户分配气体，其中部分站点集成清管功能形成清管分输站。分输站涉及高压、易燃、易爆介质，且设备密集、操作环节多，风险点主要集中在设备故障、介质泄漏、操作失误、外部干扰四大类[6]。

(1) 设备故障风险

设备是分输站运行的核心载体，其故障可能直接导致输送中断或安全事故，主要风险设备及故障类型如下：

- 压力调节失控(超压/欠压)，导致下游管道破裂或用户断供；
- 流量计无法监测流量异常，延误泄漏发现；
- ESV 突发泄漏时无法及时切断介质，导致泄漏量扩大；
- 管道及阀组造成介质泄漏，如油气泄漏易引发火灾、爆炸。

设备故障的主要诱因包括：长期高压运行导致的疲劳损伤、介质中的杂质磨损、腐蚀、维护不及时等原因。

(2) 介质泄露风险

分输站的介质泄漏是最危险的风险之一，泄漏源多、扩散快，易引发火灾、爆炸或中毒事故，主要泄漏场景包括：密封点泄漏、设备破损泄漏和泄漏后的次生风险等。

(3) 操作管理

人为操作失误或管理漏洞是诱发事故的重要因素，尤其分输站的压力调节、阀门操作等环节对人员技能要求高，常见风险包括：人员操作失误风险和管理漏洞风险等。

(4) 环境风险

分输站的外部环境因素也会威胁其安全运行，主要包括：第三方破坏风险、自然灾害与极端天气风险和周边环境风险[7]。

2. 加压站

加压站核心作用是补偿油气在管道输送过程中因摩擦、高程差等产生的压力损失，确保油气介质能够按照设计流量、压力稳定输送至目标站场或终端用户，是保障长输管道输送效率与输送半径的关键设施。根据输送介质的不同，加压站可分为输油加压站与输气加压站，二者在设备选型与运行逻辑上存在差异，但功能定位与风险特征具有共性规律。

(1) 输油加压站风险点

输油加压站输送介质多为原油、汽油、柴油等液态烃类，具有黏度高、易凝、易积聚、泄漏后易形成液池等特点，风险点集中于泄漏、燃爆、环境污染等风险。

(2) 输气加压站风险点

输气加压站输送介质为天然气，其主要成分为甲烷，具有易燃易爆、无色无味、泄漏后易扩散、密度比空气轻等特点，风险点集中于泄漏、扩散快、影响范围广等风险点。

3. 首末站

首末站分为首站(起点站)和末站(终点站)，主要承担油气源头输送、终端接收、分配的关键职能，其运行状态直接决定整条管道的安全性、稳定性与经济性。

(1) 首站风险点

首站通常靠近油气生产源头，如油田、气田、炼油厂、LNG 接收站等，核心任务是将上游来的油气进行初步处理后，加压或增压输送至干线管道。首站具有油气接收与缓冲环节的风险，包括储罐泄漏、储罐超压、输油泵故障、过热等风险点。

(2) 末站风险点

末站位于管道终点，靠近用户端，如炼油厂、石化厂、城市燃气管网、油库等，核心任务是接收干线管道输送的油气，降压、稳压后分配至下游用户或储存。末站具有干线油气接收与减压环节的风险，包括减压装置故障、水击冲击、分输管道泄漏、用户端回流等风险。

2.2. 按设备风险维度分类

1. 站内设备

站内设备集中承担介质加压、存储、计量、调控功能，风险点多与高压、密闭、连续运行特性相关，具体可按设备类型分类：

(1) 核心动力设备

输油泵和压缩机若振动未及时监测，可能造成振动与机械失效风险、温度异常与过热风险、密封失效风险、爆炸风险等[8]。

(2) 存储设备

储罐和缓冲罐异常时会造成超压或负压风险、介质分层与腐蚀风险、静电积聚风险等[8]。

(3) 调控与计量设备

阀门故障的风险包括开关卡滞、密封泄漏、误操作风险等；计量与监测设备失效会产生延误处置风险。

(4) 辅助系统设备

辅助系统设备包括换热器、加热炉、消防系统等。其中换热器会产生泄漏风险，加热炉易出现回火或熄火风险，消防系统失效时会导致火灾发生时无法及时灭火，可能造成火势蔓延，扩大事故后果。

2. 管道沿线设备

管道沿线设备长期暴露于户外，受自然环境、第三方活动、地质条件影响显著，风险点更侧重外部干扰与环境适应性。

(1) 沿线截断阀

远程控制截断阀因通信信号中断、电磁阀故障，导致紧急情况下无法远程触发关闭，延误泄漏控制；手动截断阀的阀门长期暴露户外，阀杆锈蚀、操作机构卡滞，紧急时无法快速手动关闭，导致介质持续泄漏[9]。

(2) 阴极保护系统设备

整流器故障、阳极地床腐蚀等会导致管道保护电位偏离标准值，管道失去防腐保护，加速外壁腐蚀。阳极块因土壤电阻率过高、阳极与管道接触不良，导致保护电流不足，管道局部出现腐蚀穿孔[10]。

(3) 清管与检测设备

清管器因管道变形、管器自身故障等风险卡在管道内，导致管道堵塞、输送中断。若强行加压推动，可能引发管道破裂[11]。

(4) 监测设备

埋地管道泄漏监测仪可能因土壤干扰、设备老化，导致无法及时检测到管道微量泄漏，尤其在偏远地区，设备维护不及时，失效概率更高。

(5) 埋地管道外部干扰风险：

埋地管道外部干扰风险包括第三方施工损伤和环境因素风险。当房地产开发、市政工程挖掘时容易造成第三方施工损伤，未提前查询管道走向，直接机械开挖破坏管道，是近年来管道泄漏事故的主要原因之一[12]；在地震带、滑坡体、采空区，地质沉降、滑坡等环境因素会导致管道拉伸、弯曲甚至断裂，引发介质泄漏。

3. 构建油气站场动态风险评估体系

3.1. 动态风险评估架构

动态风险评估体系的构建需围绕“数据层 - 模型层 - 应用层 - 保障层”四层架构展开，架构图如

图 1 所示。



Figure 1. System architecture diagram

图 1. 系统架构图

- 数据层：构建数据采集网络

数据是动态评估的基础，需覆盖站内设备、管道沿线、环境、人为操作四大维度，确保数据实时性、准确性与完整性。

- 模型层：建立风险评估模型

高影响 - 高动态因子：输油泵振动超标、管道内腐蚀速率、第三方施工入侵。

中影响 - 中动态因子：阀门扭矩异常、储罐压力波动、可燃气体浓度。

低影响 - 低动态因子：人员培训资质、设备老化年限。

- 应用层：实现动态管理

应用层需将风险数据转化为可操作的管理动作，核心功能包括：实时风险监控与预警、风险处置与应急响应、风险闭环管理。

- 保障层：确保体系稳定运行

动态风险评估体系需依托“技术、人员、制度”三大保障，避免数据断联、模型失效、执行缺位。

3.2. 动态风险评估模型

动态风险评估采用层次分析法(AHP)+ 模糊综合评价法 + 实时权重修正的组合模型，该组合模型的核心逻辑是：

- 定初始权重(AHP);
- 修实时权重(动态因子驱动);
- 算风险得分(模糊综合评价)。

1. 层次分析法法确定初始权重

层次分析法法通过将风险因子重要性转化为判断矩阵，再通过一致性检验确保权重的合理性，适用于输油气站场多因子的初始重要性量化。

- (1) 风险因子体系构建

首先明确评估对象的风险因子体系，确保因子无遗漏、不重复，如表 1 所示。

- (2) 构建判断矩阵

邀请 5~7 名跨专业专家，对同一层级因子进行两两比较，采用 1~9 标度法打分，得到判断矩阵 A ，

其中 n 为同一层级因子数。

Table 1. Risk factor system

表 1. 风险因子体系

一级因子	二级因子	因子含义
设备风险(C_1)	输油泵振动值(F_1)	泵轴承座振动有效值
	压缩机排气温度(F_2)	压缩机出口气体温度
	高压管道压力(F_3)	管道内介质实际压力
环境风险(C_2)	第三方施工距离(F_4)	施工点与管道的直线距离
	极端天气等级(F_5)	气象部门发布的暴雨/雷电等级(级)
人为风险(C_3)	操作失误率(F_6)	月度操作失误次数/总操作次数(%)
	应急培训覆盖率(F_7)	持证应急人员数/总人员数(%)
管理风险(C_4)	设备检修周期合规率(F_8)	按期检修设备数/总设备数(%)

$$A = (a_{ij})_{mn}$$

(3) 计算初始权重

采用几何平均法计算权重, 步骤如下:

计算判断矩阵每行元素的乘积, 其中 $i = 1, 2, 3, \dots, n$

$$M_i = \prod_{j=1}^n a_{ij}$$

计算 M_i 的 n 次方根

$$w'_i = \sqrt[n]{M_i}$$

归一化处理, 得到初始权重

$$\omega_{0i} = \frac{w'_i}{\sum_{i=1}^n w'_i}$$

(4) 一致性检验

避免专家打分逻辑矛盾, 需通过一致性检验:

计算判断矩阵的最大特征值 λ_{\max} , 其中 $(A\omega_0)_i$ 为判断矩阵 A 与权重向量 ω_0 的乘积第 i 个元素。

$$\lambda_{\max} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \frac{(A\omega_0)_i}{\omega_{0i}}$$

计算一致性指标:

$$CI = \frac{\lambda_{\max} - n}{n - 1}$$

查平均随机一致性指标 RI, 见表 2:

计算一致性比例 CR:

$$CR = \frac{CI}{RI}$$

Table 2. Average random agreement index (RI)
表 2. 平均随机一致性指标(RI)

n (因子数)	1	2	3	4	5	6
RI	0	0	0.58	0.9	1.12	1.24

若 $CR < 0.1$, 判断矩阵一致性合格, 权重有效; 否则需重新打分。

2. 实时权重修正

实时权重修正的核心是: 高动态因子的权重随其实时状态偏离阈值的程度动态提升, 低动态因子权重保持稳定, 确保风险评估聚焦当前高风险因子。

(1) 动态因子分类

根据因子状态变化频率, 将指标层 $F_1 \sim F_8$ 分为两类:

高动态因子: 输油泵振动值(F_1)、压缩机排气温度(F_2)、高压管道压力(F_3)、第三方施工距离(F_4)、极端天气等级(F_5);

低动态因子: 操作失误率(F_6)、应急培训覆盖率(F_7)、设备检修周期合规率(F_8), 权重保持初始值不变。

(2) 动态因子的偏离度计算

定义偏离度 $D_i(t)$ 为 t 时刻因子实际状态与安全阈值的偏离程度, 反映因子当前的紧急程度, 公式如下:

$$D_i(t) = \begin{cases} \frac{X_i(t) - X_{i,\max}}{X_{i,\max} - X_{i,\text{safe}}} & (\text{正向因子}) \\ \frac{X_{i,\text{safe}} - X_i(t)}{X_{i,\text{safe}} - X_{i,\min}} & (\text{负向因子}) \end{cases}$$

其中:

$X_i(t)$: t 时刻第 i 个因子的实际监测值;

$X_{i,\max}$: 因子的极高风险阈值;

$X_{i,\text{safe}}$: 因子的安全阈值;

$X_{i,\min}$: 因子的极低风险阈值;

$D_i(t) \in [0,1]$: $D_i(t)=0$ 表示因子处于安全状态, $D_i(t)=1$ 表示处于极高风险状态。

(3) 实时权重修正

高动态因子的实时权重 = 初始权重 $\times (1 + \text{修正系数} \times \text{偏离度})$, 修正系数 k 根据因子对系统的影响程度设定, 其中 k_i 一般取 0.5~2.0, 影响越大 k 越大:

$$\omega_{ti} = \begin{cases} \omega_{0i} \times (1 + k_i \times D_i(t)) & (\text{高动态因子}) \\ \omega_{0i} & (\text{低动态因子}) \end{cases}$$

3.3. 模型迭代优化

每季度基于风险预警准确率、事故复盘结果调整模型参数: 若某因子多次未及时预警, 需提升其权重; 若某阈值频繁误报, 需结合设备实际运行数据修正阈值。

4. 油气站场动态风险预警模型总结

4.1. 油气站场动态风险评估模型实施挑战

本文构建的“层次分析法(AHP)+ 模糊综合评价法 + 实时权重修正”组合模型及迭代优化机制, 为

输油气站场动态风险评估提供了理论框架,但从理论到实践落地,需直面数据、场景适配、体系融合及不确定性等挑战。

1. 数据获取与质量控制挑战

动态风险评估模型的输入需要实时、准确和全维度的数据来源,目前模型在数据获取以及质量控制阶段存在数据采集不完全、数据质量不佳、数据传输不稳定等挑战,可通过分阶段补全数据采集能力、建立数据质量管控流程、强化数据安全传输等手段应对此挑战。

2. 模型在不同站场的适应性挑战

输油气站场类型多样,核心风险因子、设备特性、工况参数差异显著,模型若直接套用统一参数,易出现评估偏差。可通过开发场景自适应模块应对此挑战。

3. 与现有安全管理体系(SMS)的融合挑战

输油气企业普遍已建立安全管理体系(SMS),涵盖风险辨识、作业许可、应急处置等流程,若动态风险评估模型独立运行,易形成数据孤岛、流程重复等问题,从而增加管理成本。可通过推动模型与SMS数据的流程对接和明确融合后的职责与考核应对此挑战。

4. 模型结果的不确定性挑战

动态风险评估模型的输出受主观假设、数据噪声、场景简化等因素影响,存在不确定性,若不科学量化与沟通,易导致过度依赖模型或质疑模型可信度,不确定性来源复杂、不确定性未有效传递等因素会导致模型结果的不确定。可通过量化不确定性并可视化输出和加强不确定性沟通与培训等方式应对此挑战。

4.2. 油气站场动态风险预警优化方向

当前油气站场安全风险评估仍面临动态性不足、人为因素量化难、智能化水平低等挑战,需从以下方向优化:

1. 强化人为因素的量化分析

人为因素是事故的重要诱因,但现有评估多以定性描述为主,缺乏量化方法。可以引入人为可靠性分析(HRA),通过人员技能水平、培训时长、作业环境复杂度等指标构建量化模型,将人为因素纳入风险矩阵的可能性维度,提升评估准确性。

2. 融合AI与大数据技术提升评估智能化

利用AI算法挖掘历史事故数据、设备运行数据,预测风险发展趋势。例如:基于某类泵的历史故障数据,训练故障预测模型,提前1个月预测泵的泄漏风险;利用大数据分析不同区域、不同类型站场的风险特征,建立区域风险地图,为宏观安全管理提供决策支持。

3. 关注特殊站场的个性化评估

针对LNG站、含硫化氢站场等特殊类型,需制定个性化评估方案。LNG站需重点评估低温脆裂、BOG积聚风险,采用低温材料性能检测和BOG浓度实时监测补充评估;含硫化氢站场需增加有毒气体扩散模拟,预测泄漏后硫化氢的扩散范围,制定针对性防护措施。

5. 结束语

油气站场安全风险评估是预防事故、提升安全管理水平的核心手段,本文通过系统分析核心风险、构建评估方法、提出优化方向,得出以下结论:油气站场的风险源于介质、设施、环境、人员等多维度耦合,不同评估方法各有适配场景。未来需通过动态监测、人为因素量化、AI技术融合,构建“实时化、精准化、智能化”的风险评估体系,为油气站场的本质安全提供支撑。

参考文献

- [1] 李健, 杨蒙蒙. 城市燃气管道隐患安全管理现状与措施分析[J]. 石化技术, 2024, 31(12): 322-323.
- [2] 蒋毅, 安兆敬, 吴森, 等. 基于区间直觉模糊数和灰色关联的输油站场安全性评估[J]. 四川地质学报, 2021, 41(1): 146-150.
- [3] 丁华. 基于 HAZOP 和 LOPA 的油气站场工艺安全评价[J]. 化工安全与环境, 2022, 35(48): 2-6.
- [4] 孙勇, 刘朝阳, 李秋娟, 等. 输油气站场区域化管理综合评价方法及应用[J]. 油气储运, 2024, 43(6): 702-709.
- [5] 刘琪. 输油气站压力容器与收发球筒的风险评估与事故预防[J]. 流程工业, 2025(5): 75-77.
- [6] 张剑锋, 屠明刚. 天然气输气分输站标准工艺过程危险性分析及防范[J]. 中国石油和化工标准与质量, 2016, 36(18): 7-8.
- [7] 侯振海, 徐向宇. 浅谈长输天然气分输站场作业活动风险分级管控[J]. 石化技术, 2022, 29(12): 217-218.
- [8] 侯杰. 输油气站场设备全生命周期管理体系的构建与实施[J]. 流程工业, 2025(7): 38-41.
- [9] 齐先志, 谢成, 王唯, 等. 输油管道截断阀的优化设定[J]. 石油工程建设, 2023, 49(5): 38-41+61.
- [10] 李军龙, 徐星, 巩毅超, 等. 长输油气站场阴极保护[J]. 天然气与石油, 2016, 34(3): 79-82+10.
- [11] 蔡国. 输气管道清管器卡堵诊断与应急处置方法[J]. 石化技术, 2023, 30(9): 75-77.
- [12] 张岗虎, 赵文丹, 邵常林. 谈油气管道站场施工安全管理[J]. 交通企业管理, 2019, 34(5): 93-94.