

# 化工管道应急管理风险评估模型的构建与应用研究

杜成冲 (济宁市应急保障服务中心, 山东 济宁 272000)

**摘要:** 本文针对传统化工管道安全管理中被动响应模式的不足, 构建了一个科学、动态的化工管道应急管理风险评估模型, 综合运用改进的层次分析法 (AHP) 与模糊综合评价法, 结合管道属性、环境因素、历史数据及管理效能等多维指标, 实现风险的量化评估与等级划分, 将该模型应用于某化工园区管廊的实例分析, 验证其能够有效识别高风险管段。

**关键词:** 化工管道; 应急管理; 风险评估; 模型; 构建

中图分类号: TE973 文献标识码: A 文章编号: 1674-5167 (2026) 007-0136-03

## Construction and Application of Risk Assessment Model in Emergency Management of Chemical Pipeline

Du Chengchong (Jining Emergency Support Service Center, Jining Shandong 272000, China)

**Abstract:** To address the limitations of passive response models in traditional chemical pipeline safety management, this study develops a scientific and dynamic emergency risk assessment model. By integrating the improved Analytic Hierarchy Process (AHP) and fuzzy comprehensive evaluation method, the model incorporates multidimensional indicators including pipeline attributes, environmental factors, historical data, and management effectiveness to achieve quantitative risk assessment and classification. An application case study of a chemical industrial park's utility tunnel demonstrates the model's capability in effectively identifying high-risk pipeline sections.

**Keywords:** chemical pipeline; emergency management; risk assessment; model; construction

化工产业是国民经济的重要支柱, 而遍布厂区乃至区域的化工管道网络则是连接生产装置的“动脉”, 近年来国内外发生的多起化工管道事故, 不断警示其潜在风险的严重性与应急管理的极端重要性。传统的化工管道安全管理多依赖于定期巡检、设备检修和事后应急处置, 这种模式具有一定的滞后性, 难以实现对风险的超前预警和精准防控。特别是在复杂的园区环境中, 管道纵横交错, 风险因素交织, 亟需一种能够系统化、量化评估风险的方法, 为应急管理从事后补救向事前预防转变提供技术支撑。风险评估模型通过对潜在危险源、脆弱性及可能后果的系统分析, 可以将模糊的安全问题转化为可量化的风险等级, 是现代化工管道应急管理体系的核心理念与关键工具<sup>[1]</sup>。

### 1 化工管道风险评估模型的构建

#### 1.1 风险评估指标体系建立

一个科学的风险评估模型, 其核心在于指标体系的全面性、评估方法的适用性以及风险等级的合理性。

一个真正有效的风险评估模型, 其价值基石在于三个方面: 指标体系的全面性与代表性, 能够覆盖管道失效的各类诱因和潜在后果; 评估方法的适用性与科学性, 能够有效处理复杂、模糊的风险信息; 风险等级划分的合理性与可操作性, 能为后续的风险管控和应急决策提供清晰指引。风险评估的本质是对事故发生可能性 (Probability, P) 与事故后果严重程度

(Consequence, C) 的综合度量, 通常表达为风险 (Risk, R) 是两者的函数, 即  $R = f(P, C)$ 。这一经典定义构成了化工管道风险评估模型的逻辑起点。基于此, 并紧密结合化工管道在材质、工艺、环境、管理等方面的独特性, 构建了一个层次清晰、结构严谨的多层次评估指标体系。该体系自上而下分为目标层、准则层和指标层<sup>[2]</sup>。

目标层 (A): 化工管道综合风险等级。

准则层 (B):

① B1 事故可能性 (P): 指导致管道失效的事件发生的概率。

② B2 后果严重度 (C): 指管道失效后可能造成的人员、环境、财产和社会影响。

指标层 (C): 对准则层进行细化, 选取具体可评估的指标。

隶属于 B1 的指标:

① C11 管道材质与腐蚀状况;

② C12 服役年限与检测历史;

③ C13 运行压力、温度与波动情况;

④ C14 第三方破坏潜在可能性;

⑤ C15 安全附件 (如安全阀、压力表) 完好率;

⑥ C16 历史事故 / 事件统计。

隶属于 B2 的指标:

① C21 输送介质的危险性 (毒性、易燃性、爆炸

性)；

- ② C22 管道周边人口密度；
- ③ C23 邻近环境敏感性(如水源地、生态保护区)；
- ④ C24 管道直径与存量(影响泄漏量)；
- ⑤ C25 应急设施(如切断阀、喷淋系统)覆盖与可用性；

- ⑥ C26 对企业生产或区域经济的影响程度。

## 1.2 基于改进 AHP 的指标权重确定

由于各指标对总体风险的影响程度不同，需要确定其权重。本研究采用改进的层次分析法(AHP)，通过引入三标度法(如0-1-2标度)构建判断矩阵，减少传统九标度法的主观性和判断困难。具体步骤如下：

①邀请领域专家(设计、运营、安全管理等)对各层级指标进行两两比较。

②构建判断矩阵，并计算其最大特征值和对应的特征向量。

③对特征向量进行归一化处理，得到各指标的权重集  $W$ 。

④进行一致性检验( $CR < 0.1$ )，确保判断逻辑的合理性<sup>[3]</sup>。

## 1.3 基于模糊综合评价的风险等级判定

由于风险评估中存在大量模糊和不确定信息(如“腐蚀较严重”、“人口较密集”)，采用模糊数学理论进行处理更为合适。①确定评语集：将风险等级划分为“低风险(I级)”、“较低风险(II级)”、“中等风险(III级)”、“较高风险(IV级)”、“高风险(V级)”五个等级。②建立隶属度函数：为每个底层指标建立隶属于各个风险等级的隶属度函数，将定量指标和定性评价语言转化为模糊集合。③构建模糊关系矩阵：通过专家打分或现场数据，确定每个指标对各个风险等级的隶属度，形成模糊评价矩阵  $R$ 。④进行模糊合成运算：将权重向量  $W$  与模糊评价矩阵  $R$  进行合成运算，运算公式为： $B = W \cdot R$ 。其中，“ $\cdot$ ”表示合成运算，得到准则层  $B_1$  和  $B_2$  的模糊评价结果。再对  $B_1$  和  $B_2$  进行高一级的模糊运算，最终获得目标层(综合风险)对各风险等级的隶属度向量。⑤风险等级判定：根据最大隶属度原则或加权平均法，将模糊评价结果清晰化，确定最终的风险等级。至此，一个完整的、定性定量相结合的化工管道应急管理风险评估模型构建完成<sup>[4]</sup>。

## 2 化工管道应急管理中风险评估模型的构建与应用

### 2.1 案例背景与数据获取

该园区管廊承载着数十家企业的上百条物料管道，选取其中一条输送苯类物料的 DN300 管道作为评

估对象。通过收集管道设计图纸、巡检记录、腐蚀检测报告、园区人口分布图、环境功能区划以及应急预案等资料，并结合专家现场勘查与打分，获取模型所需的各项基础数据。

### 2.2 风险评估过程

基于收集到的详实数据和专家现场勘查意见，严格遵循构建的风险评估模型流程，对该 DN300 苯类管道进行了系统性的风险评估。

权重计算：首先，邀请前述 5 位来自不同专业背景的资深专家，采用改进的三标度 AHP 法，分别对准则层( $B_1$  事故可能性、 $B_2$  后果严重度)相对于目标层( $A$  综合风险)的重要性，以及各自指标层( $C_{11}$ - $C_{16}$ ,  $C_{21}$ - $C_{26}$ )相对于所属准则层的重要性进行独立的两两比较判断。通过构建判断矩阵、计算特征向量、归一化处理及严格的一致性检验(所有  $CR$  值均  $< 0.1$ )，最终确定了各级指标的权重集。分析权重结果发现：在“事故可能性( $B_1$ )”维度下，“管道材质与腐蚀状况( $C_{11}$ )”和“第三方破坏潜在可能性( $C_{14}$ )”获得了相对最高的权重，反映出专家们认为管道的本体腐蚀状态和外部机械损伤风险是导致该管道失效的最主要诱因；而在“后果严重度( $B_2$ )”维度下，“输送介质的危险性( $C_{21}$ )”和“管道周边人口密度( $C_{22}$ )”的权重显著高于其他指标，凸显了苯的高危害特性以及管道邻近区域人员相对密集(主要是邻近装置的操作人员)是放大事故后果的关键因素。

模糊综合评价：权重确定后，进入模糊评价阶段。针对该管道的每一个底层指标( $C_{11}$  至  $C_{26}$ )，组织同一批专家根据现场勘查结果、检测数据和运行记录，依据预先设定的五个风险等级评语集(低风险 I 级至高风险 V 级)进行独立评价。评价过程允许专家使用定性描述(如“腐蚀局部较严重”、“人口非常密集”)，并通过预设的隶属度函数将其转化为对五个风险等级的隶属度。例如，对于“ $C_{11}$  管道材质与腐蚀状况”，综合专家意见：约 40% 的专家认为当前状况应评定为“较高风险(IV级)”，50% 的专家评定为“高风险(V级)”，10% 的专家认为属于“中等风险(III级)”，由此形成该指标的模糊评价向量(如  $[0, 0, 0.1, 0.4, 0.5]$ )。所有底层指标的评价结果汇总形成模糊关系矩阵  $R$ 。随后，利用第一步计算得到的权重向量  $W$ ，逐层进行模糊合成运算。先计算准则层  $B_1$ (事故可能性)和  $B_2$ (后果严重度)各自的综合评价结果，再将  $B_1$  和  $B_2$  的结果作为目标层  $A$  的输入，进行最终的综合评价<sup>[5]</sup>。

结果分析：模糊合成运算结果显示：在“事故可

能性(B1)”方面,该管道的评价结果对“较高风险(Ⅳ级)”的隶属度最高。深入分析表明,这主要归因于其服役年限已接近设计寿命中期,最近的腐蚀检测报告揭示存在局部腐蚀减薄点(虽未超标但需密切关注),以及管廊区域偶尔有第三方施工活动记录。在“后果严重度(B2)”方面,评价结果明确显示出对“高风险(Ⅴ级)”的最高隶属度。这主要是由于苯介质本身具有高易燃性(闪点低)、爆炸性(爆炸极限范围宽)和中等毒性(吸入危害),且最关键的是,管道在公共管廊上的敷设位置距离下方和邻近装置的操作平台较近,周边50m范围内在正常生产时有一定数量的操作人员活动,一旦发生较大泄漏,极易引发火灾爆炸并造成人员伤亡。综合两个维度的评价结果,通过最大隶属度原则判定,该DN300苯类管道的最终综合风险等级为“Ⅳ级(较高风险)”。

### 2.3 在应急管理中的应用

该苯类管道被评估为“较高风险(Ⅳ级)”的结论,为园区管理部门的精准化、差异化应急管理提供了明确的决策依据和行动方向。基于模型评估结果,园区迅速采取了一系列针对性极强的应急管理强化措施:

**风险预警与动态监控升级:**该管道被正式纳入园区级“高风险管道动态监控清单”,在园区的信息化管理平台上进行显著标识(如红色预警)。显著增加了对该管道的日常巡检频次(如从每日1次增至每日2次),并特别强化了对已发现腐蚀点位的跟踪监测(如增加定点测厚点数和频率)。同时,要求所属企业将该管道的风险状况及管控要求明确传达至相关操作和维护人员,提升一线人员的风险警觉性。

**应急预案的精准化修订与演练强化:**针对该管道评估揭示的主要风险点(腐蚀泄漏、苯的危害特性、周边人员暴露),园区组织修订了该管段的专项现场处置预案。预案修订重点包括:优化泄漏监测报警阈值设置和报警联动程序(确保早发现);细化针对苯泄漏的应急处置程序(强调防爆工具使用、吸附材料选择);特别明确了管道下方及邻近装置人员的紧急疏散路线、集合点和清点方式(针对C22高权重);大幅增加了以苯泄漏为假想情景的实战化应急演练频次(从年度演练提升至季度演练),重点检验堵漏作业、人员疏散、医疗救护等关键环节的协同性和时效性。

**应急资源的优化配置与前置储备:**为确保应急响应的及时性和有效性,园区根据该管道的风险特点和地理位置,优化了应急资源的布局。一是在该管道沿线关键节点(如阀门处、管廊出入口)增补了高灵敏度的苯气体检测报警仪,提升泄漏早期发现能力。二是在距离该管道最近的应急物资储备库(或移动应急

物资点)中,针对性增加了适用于苯介质的专用吸附材料(如活性炭、吸油毡)、化学中和剂、以及适用于管道不同部位泄漏(直管、法兰、阀门)的专用堵漏器材(如堵漏夹具、木楔、堵漏胶)。三是核查并确保就近的消防喷淋系统覆盖该管段且水压充足,必要时增设移动喷淋设备。

**维护检修决策的科学支持与风险源头管控:**园区管理部门向管道所属企业发出书面建议,要求立即对该管道进行更深入的腐蚀状况详查如采用导波检测或更密集的超声扫描,以精确评估局部腐蚀点的严重程度和发展趋势,将该管道的整体更换或严重腐蚀管段的局部更换项目,优先纳入下一个年度或大检修周期的资本支出计划,从源头上消除或显著降低其失效可能性(B1),实现本质安全水平的提升。将风险评估模型的结果直接、有效地转化为具体的应急管理行动,该化工园区成功实现了从以往“平均用力”、“大水漫灌”式的安全管理,向“精准识别”、“有的放矢”、“资源聚焦”的应急管理模式转变,这种基于科学评估的精准管理,提升了园区应对管道风险的针对性和有效性,优化有限安全资源的配置效率,为保障园区的整体安全稳定运行提供了强有力的支撑。

### 3 结语

本研究成功构建了一个融合改进AHP与模糊综合评价理论的化工管道应急管理风险评估模型,能够有效处理风险评估中的不确定性和主观性,将复杂的风险问题系统化、数量化,输出直观的风险等级,为应急预案的定制、应急资源的布局以及管道的预防性维护提供极具价值的决策依据。

#### 参考文献:

- [1] 李涵,夏浩.RBI技术在化工装置压力管道风险评估中的应用[J].现代制造技术与装备,2025,61(08):147-149.
- [2] 阳云凤.基于风险的张城垵化工园区整体性安全评估研究[D].武汉工程大学,2022.
- [3] 杨涛,庞洪晨,许继凯,于洪伟.输气管道沉降的磁应力快速评估技术应用[J].化工设计,2020,30(03):9-10+14+1.
- [4] 胡华胜,王磊,傅如闻.基于RBI技术的化工装置压力管道风险评估与在线检验策略研究[J].中国安全生产科学技术,2014,10(06):171-175.
- [5] 徐阳阳.基于风险矩阵的化工管道泄漏隐患分级管控研究[C]//广西网络安全和信息化联合会.第十一届工程技术管理与数字化转型学术交流论文集.山东中天科技工程有限公司江西分公司,2025:95-97.