

中文引用格式:王东营,陈小平,刘权,等. 基于改进的云模型-FMEA的油气管道风险排序[J]. 中国安全科学学报, 2024, 34(5): 61-68.

英文引用格式:WANG Dongying, CHEN Xiaoping, LIU Quan, et al. Risk ranking of oil and gas pipeline based on improved cloud model-FMEA[J]. China Safety Science Journal, 2024, 34(5): 61-68.

基于改进的云模型-FMEA的油气管道风险排序*

王东营¹高级工程师, 陈小平^{**1}高级工程师, 刘权¹, 赵天浩¹, 闫序²

(1 国家管网集团北京管道有限公司技术研究中心, 北京 100101; 2 中国石油大学(北京)油气生产安全与应急技术应急管理部重点实验室, 北京 102249)

中图分类号: X913.4

文献标志码: A

DOI: 10.16265/j.cnki.issn1003-3033.2024.05.1069

基金项目: 国家自然科学基金资助(51874324); 中国石油天然气集团有限公司-中国石油大学(北京)战略合作科技专项(ZLZX2020-05)。

【摘要】 为解决传统故障模式和影响分析法(FMEA)存在故障优先排序不准确、风险评价主观性过强的问题,提出一种基于混合权重-云模型的油气管道故障模式风险评价方法。首先,调研并分析油气管道失效模式与原因,构建系统FMEA模型;然后,提出基于云模型与混合权重法的专家评价意见处理方法,引入博弈论的思想,降低评价结果的主观性与随机性;最后,使用多准则妥协解排序法(VIKOR)对各个失效模式风险排序,并对比传统FMEA法,验证该方法的可行性与准确性。结果表明:该方法可综合评估管线上各管段的风险因素,量化不同管段上的风险值及同一管段上的最主要的失效模式,实现管道高风险区域的有效定位及管段上风险因素排序。

【关键词】 云模型; 故障模式和影响分析法(FMEA); 油气管道; 风险排序; 博弈论; 多准则妥协解排序法(VIKOR)

Risk ranking of oil and gas pipeline based on improved cloud model-FMEA

WANG Dongying¹, CHEN Xiaoping¹, LIU Quan¹, ZHAO Tianhao¹, YAN Xu²

(1 Technology Research Center, National Pipe Network Group Beijing Pipeline Company Limited, Beijing 100101, China; 2 Key Laboratory of Oil and Gas Production Safety and Emergency Technology Emergency Management Department, China University of Petroleum Beijing, Beijing 102249, China)

Abstract: In order to solve the problems of inaccurate failure priority ranking and excessively subjective risk evaluation in traditional FMEA, a risk evaluation method of oil and gas pipeline failure modes based on a hybrid weights-cloud model was proposed. Firstly, the failure modes and causes of oil and gas pipelines were investigated and analyzed, and the systematic FMEA mode was constructed. Then an expert evaluation opinion processing method was proposed based on the cloud model and the hybrid weight method. The game theory was introduced to reduce the subjectivity and randomness of the evaluation

* 文章编号:1003-3033(2024)05-0061-08; 收稿日期:2023-11-10; 修稿日期:2024-02-20

** 通信作者:陈小平(1981—),男,甘肃定西人,本科,高级工程师,主要从事管网可靠性技术、风光一体化发电用电技术、低阶煤气化制氢技术工作等。E-mail:chenxp02@pipechina.com.cn.

results. Finally, VIKOR was used to rank the risk of each failure mode. The feasibility and accuracy of this method was verified by comparing with the traditional FMEA method. The results show that the method can comprehensively assess the risk factors of pipeline sections, quantify the risk values of different pipeline sections and identify the most important failure modes of the same pipeline section, realizing the effective positioning of pipeline high-risk areas and the ranking of the risk factors of pipeline sections.

Keywords: cloud model; failure mode and effects analysis (FMEA); oil and gas pipelines; risk ranking; game theory; vise kriterijumski optimizaciori racun (VIKOR)

0 引言

截至 2022 年底,我国(含港澳台地区)油气管道覆盖已达 18 万 km^[1]。我国油气管道存在设施分布广、数量大、服役环境复杂、技术和管理水平参差不齐的运行特点,致使油气管道的运行存在较大的风险隐患。油气管道风险评价是排查管道运行风险、提升油气管网运行可靠性的有效手段。因此,全面识别油气管道失效模式并合理评价油气管道运行风险对保障油气管道安全运行具有重要意义。

目前,对于油气管道风险评价方面的研究主要从风险识别与分类、风险分析与计算 2 大方面出发。在油气管道失效模式的识别与分类方面,形成以潜在失效模式与影响分析(Failure Mode and Effects Analysis, FMEA)、失效模式效应与关键性分析法(Failure Mode Effects and Criticality Analysis, FMECA)及安全检查表为代表的失效模式识别方法,识别实现油气管道运行过程中薄弱环节^[2-3]。在油气管道风险分析与计算方面,形成了定量、半定量及定性 3 类风险评价方法,但现有的油气管道风险评价多采用专家打分法量化评价因子^[4-5],导致风险评价结构具有较强主观性,因此,提出了基于失效统计数据 and 可靠性理论的油气管道定量风险评估方法。帅健等^[6]分析了管道和危险材料安全管理局采集的管道失效数据,总结失效原因并确定了油气管道的基本失效概率与修正因子的指标体系,基于风险矩阵模型计算了管道失效风险。周亚薇等^[7]基于可靠性的极限状态法计算风险管段的失效概率,通过采用管道失效后果模型计算管道的失效风险并依据计算结果定量评价地区等级升级后的天然气管道风险。目前,博弈论、云模型等方法被引入到风险评价中,并在洪涝灾害、工业生产系统的风险评价中取得良好效果^[8-10]。唐直帆^[11]建立提出基于云模型的基坑爆破施工风险评价方法,为水工建筑物基坑施工安全评价及控制提供借鉴。吕军^[12]运用云模型改进洪涝灾害风险多级模糊评价

过程,建立基于云模型的洪涝灾害风险评价模型,多角度、全要素地评价与管理巢湖流域洪涝灾害风险。综上所述,现有油气管道风险评价方法依赖于大量数据支撑,在现实生产过程中无法完整、准确获取所需数据,难以克服评价指标随机性和模糊性的现实难题。

鉴于此,采用云模型与 FMEA 相结合的方法,对不同失效模式下的价因子进行打分,基于博弈论的思想及层次分析法(Analytic Hierarchy Process, AHP)确定评价因子的主客观权重,得到评价因子的最优化权重解,最后基于多准则妥协解排序法(Vise Kriterijumski Optimizaciori Racun, VIKOR)得到油气管道失效模式风险准确排序,以期降低油气管道风险评价结果的随机性与主观性。

1 云模型

1.1 基本原理

云模型^[13]是一种系统科学与数学相结合的系统分析方法,其提出的隶属云概念主要反映了客观世界或人类知识中概念的模糊性和随机性,实现定性评价到定量的转换。

将隶属云定义为:设 U 为一个定量论域, $x \in U$, C 为 U 对应的定性概念, x 为定性概念论域 C 的一次随机实现, x 对 C 的隶属度定义为 $\mu(x) \in [0, 1]$, 是一个有稳定倾向的随机值^[14]。 U 中每一个 x 都对应一个 $\mu(x)$, 则 x 在 U 上的分布称为隶属云。将 C 中定性概念进行随机数值转换的结果称为云滴,将云滴记为 $(x, \mu(x))$, 即包含一个 U 中元素 x 与其在转换中对概念 C 的隶属度 $\mu(x)$ 。

正态云是应用最为广泛的,包含参数 E_x 、 E_n 、 H_e 、 E_x 为期望、 E_n 为熵、 H_e 为超熵,分别来描述量化经典样本点、定性概念的不确定性与随机性,正态云记为 (E_x, E_n, H_e) , 如图 1 所示为 $(E_x, E_n, H_e) = (0, 1, 0.1)$ 的云分布。

1.2 云合成

云合成即是将 2 个云模型叠加,得到一个综合

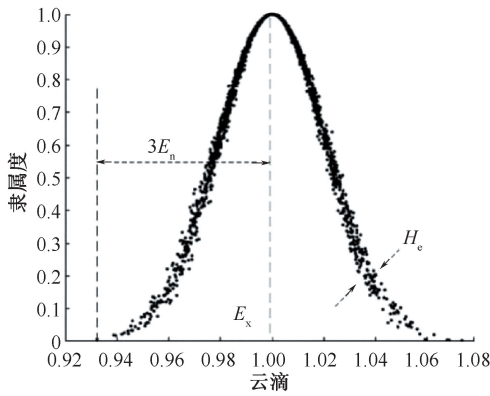


图 1 正态云模型

Fig. 1 Normal cloud model

云模型的过程,综合云模型的合成过程见文献[15]。

1.3 云距离

云距离是指 2 朵云的间距。任剑等^[16]结合相似度阈值 $3E_n$ 规则理念,提出云距离的算法,步骤如下:

1) 设有 2 朵云,分别为 $A=(E_{x1}, E_{n1}, E_{e1})$ 与 $B=(E_{x2}, E_{n2}, E_{e2})$, 2 朵云各自生成对应的云滴 $(x_{Ai}, \mu(x)_{Ai})$ 和 $(x_{Bi}, \mu(x)_{Bi})$, 其中 $\mu(x)_{Ai}$ 为分别对应于云滴 x_{Ai} 和 x_{Bi} 的确定度。

2) 将 2 组 $(x_{Ai}, \mu(x)_{Ai}), (x_{Bi}, \mu(x)_{Bi})$ 分别按照 x_{Ai}, x_{Bi} 由小到大排序,保留落在各自 $3E_n$ 区间的云滴。将筛选后 2 朵云的云滴数记为 n_A, n_B 。

3) 从 n_A 云滴、 n_B 云滴中筛选出 m 个云滴,并重新以 x_{Ai}, x_{Bi} 由小到大重新排序。

4) 计算 2 朵云的距离为:

$$D(Y_A, Y_B) = \sum_{k=1}^m \sqrt{Z^2 + U^2} \quad (1)$$

$$Z = x_{Ak} - x_{Bk} \quad (2)$$

$$U = u(x)_{Ak} - u(x)_{Bk} \quad (3)$$

式中 $D(Y_A, Y_B)$ 为 A, B 这 2 朵云之间的云距离。

2 混合权重确定法

在经典 FMEA 方法中,评价因子严重度 S 、可能性 O 、可探测度 D 的权重设置相同,导致评价结果与实际不符^[17],因此引入 AHP 法,由专家评价 3 个因子的相对重要度 $w_1=(w_{o1}, w_{s1}, w_{d1})$ 。使用基于指标相关性的准则重要性法 (Criteria Importance Though Intercrieria Correlation, CRITIC),计算评价因子间的离散程度,从而确定评价因子间的客观权重 $w_2=(w_{o2}, w_{s2}, w_{d2})$,得到管道 FMEA 失效模式评价

因子的主客观权重,利用博弈论的思想,得到各个评价因子的混合权重。

2.1 主观权重的确定

主成分分析法可将专家意见引入评价因子权重的确定中,采用 9 标度法描述 2 个因子间的相对重要度,构建评价矩阵 C 。

$$C = \begin{matrix} & \begin{matrix} S & D & O \end{matrix} \\ \begin{matrix} S \\ D \\ O \end{matrix} & \begin{bmatrix} 1 & a_{SD} & a_{SO} \\ 1/a_{SD} & 1 & a_{DO} \\ 1/a_{SO} & 1/a_{DO} & 1 \end{bmatrix} \end{matrix} \quad (4)$$

其中, $a_{SD}, a_{SO}, a_{DO} = 1 \sim 9$,用来量化 2 个因子的相对重要程度。

经过计算 C 矩阵的最大特征向量并进行标准化处理,得到权重向量 $w_1=(w_{o1}, w_{s1}, w_{d1})$,最大特征值 λ_{max} ,计算一致性指标 (Consistency Indicators, CI), $CI = \frac{(\lambda_{max} - 3)}{2}$ 以及判断一致性比率

(Consistency Ratio, CR), $CR = \frac{CI}{0.58}$ 。当 $CR < 0.1$ 时,通过一致性检验,评价结果通过检验。

2.2 客观权重的确定

熵权法计算的权重可反映各评价因子在竞争意义上的相对激烈程度系数,但是并未考虑到评价因子间的相关性。DIAOKOULAKI 等^[18]为弥补这一不足,提出由熵权法改进 CRITIC 法,即通过计算样本间相关系数与差异系数衡量指标间的相关性与离散性,得到准确客观评价结果。

油气管道的主要失效模式主要包括:断裂、变形、表面损伤 3 大类^[19-20]。结合以上调研及文献[21]总结的油气管道失效数据库与失效原因,将管道失效模式分为变形、断裂、结构失稳、表面损伤和腐蚀穿孔。

1) 基于 S, O, D 评价指标,对管道的 5 种失效模式,构建初始评估矩阵 X 。

$$X = \begin{matrix} & \begin{matrix} S & O & D \end{matrix} \\ \begin{matrix} P \\ L \\ N \\ T \\ K \end{matrix} & \begin{bmatrix} x_{PS} & x_{PO} & x_{PD} \\ \vdots & \vdots & \vdots \\ \vdots & \vdots & \vdots \\ \vdots & \vdots & \vdots \\ \vdots & \vdots & \vdots \\ x_{KS} & x_{KO} & x_{KD} \end{bmatrix} \end{matrix} \quad (5)$$

式中 P, L, N, T, K 分别对应油气管道变形、断裂、失稳、损伤和腐蚀这 5 种失效模式。

2) 对矩阵 X 标准化处理。计算 S, O, D 列的平

均值 $\bar{x}_S, \bar{x}_O, \bar{x}_D$ 及标准差 S_S, S_O, S_D , 得到标准化矩阵 X^* 。

$$x_{ij}^* = \frac{x_{ij} - \bar{x}_j}{s_j}, j \in \{S, O, D\} \quad (6)$$

式中 $i \in \{\text{变形, 断裂, 失稳, 损伤, 腐蚀}\}$ 。

3) 计算 S, O, D 指标各自的差异系数 v_j 与指标之间的相似系数 r_{pq} 。

4) 由下式求得的指标 j 的权重 $w_j, j \in \{S, O, D\}$ 。

$$w_2 = \frac{B_j}{\sum_{j=1}^n B_j} \quad (7)$$

$$B_j = v_j \sum_{p=1}^3 (1 - r_{pj}), j = S, O, D \quad (8)$$

式中 B_j 为指标冲突性。

2.3 基于博弈论的权重最优化

由 AHP 法得到 S, O, D 因子的权重向量值 w_1 , 由 CRITIC 法得到的权重向量值 w_2 , 通过使用线性组合得到混合权重 $w = aw_1 + bw_2$ 。

基于博弈论思想, 使得线性组合权重与主客观权重偏差最小, 构建最优化方程, 确定目标函数

表 1 油气管道失效原因及后果分析

Table 1 Analysis of causes and consequences of oil and gas pipeline failure

序号	失效模式	失效原因	失效后果
1	变形	地质运动、土壤湿陷、洪水冲刷等外力作用导致管道发生弯曲变形	过量的弯曲变形将导致管体对裂纹的止裂能力下降, 增大失效风险甚至造成管壁断裂
2	断裂	第三方破坏、施工缺陷、泥石流、塌方等自然灾害引起管道断裂失效	介质泄漏, 引发火灾、爆炸、人员中毒等事故
3	结构失稳	由管段的温度急剧变化、沟底局部凸起或发生土壤沉降等引发	发生断裂或开焊, 造成管道内原介质大量外溢, 污染周围环境, 造成经济损失
4	表面损伤	第三方破坏、施工缺陷、自然灾害、腐蚀等造成管道表面金属损伤	由于外力或腐蚀导致金属表面损伤, 易引起泄漏, 导致火灾、爆炸等, 造成人员伤亡
5	腐蚀穿孔	由于管内酸性介质腐蚀、流体冲蚀、大气、土壤等环境因素, 造成局部管壁减薄, 发生穿孔泄漏	局部腐蚀小孔泄漏, 导致池火、喷射火的发生

表 2 油气管道风险划分标度

Table 2 Oil and gas pipeline risk classification scale

风险等级	失效可能性(失效概率)描述	后果严重度	探测度/%	云标度
低风险 L	液体管道: $[(0, 1.29 \text{ 次}/(10^3 \text{ km} \cdot \text{a}))];$ 输气集气管道: $[(0, 2.17 \text{ 次}/(10^4 \text{ km} \cdot \text{a}))];$ 配气管道: $[(0, 4.08 \text{ 次}/(10^5 \text{ km} \cdot \text{a}))]$	极小损失	(85, 100]	(0.390, 0.064, 0.008)
中风险 M	液体管道: $[1.29 \text{ 次}/(10^3 \text{ km} \cdot \text{a}), 4.58 \text{ 次}/(10^4 \text{ km} \cdot \text{a})];$ 输气集气管道: $[2.17 \text{ 次}/(10^4 \text{ km} \cdot \text{a}), 1.41 \text{ 次}/(10^4 \text{ km} \cdot \text{a})];$ 配气管道: $[4.08 \text{ 次}/(10^5 \text{ km} \cdot \text{a}), 2.38 \text{ 次}/(10^5 \text{ km} \cdot \text{a})]$	管道表面损伤石油或气体事件	(65, 85]	(0.5, 0.309, 0.005)

$$F(a, b) = \min \|aw_1 + bw_2 - w_i\|, i = 1, 2 \quad (9)$$

计算得到 a 和 b , 求得最优化混合权重。

3 油气管道 FMEA 排序

3.1 油气管道失效模式的确定与后果分析

考虑变形、断裂、结构失稳、表面损伤和腐蚀穿孔这 5 种管道失效模式, 管道 FMEA 见表 1。每个失效模式都包含严重度、可能性、可探测度 3 个评价指标。使用专家模糊评价法度量 5×3 个指标, 风险评分等级见表 2, 将风险等级划分为 4 级, 分别为低风险、中风险、高风险和极高风险。划分风险标准参照文献[22]中的油气管道事故基本失效概率, 见表 2。收集 t 位专家对不同失效模式的 S, O, D 因子的打分结果, 并将其云量化, 使用云合成方法合成 t 位专家对各失效模式下的评价结果, 得到风险综合云评价矩阵 \hat{V} 。

$$\hat{V} = \frac{1}{t} \times \sum_{k=1}^t v_{ij}^k \quad (10)$$

式中 v_{ij} 为不同失效模式下的专家打分结果, 其中 $i=1 \sim 5, j=S, O, D$ 。

续表 2

风险等级	失效可能性(失效概率)描述	后果严重度	探测度/%	云标度
高风险 H	液体管道:[4.58次/(10 ⁴ km·a),9.09次/(10 ⁶ km·a)]; 输气集气管道:[1.41次/(10 ⁴ km·a),9.79次/(10 ⁶ km·a)]; 配气管道:[2.38次/(10 ⁵ km·a),1.11次/(10 ⁵ km·a)]	①致死或受伤入院; ②损失超过5万美元; ③液体表面损伤导致火灾或结构失稳	(25, 65]	(0.691, 0.064,0.008)
极高风险 VH	液体管道:[9.09次/(10 ⁶ km·a),+∞];输气集气管道: [9.79次/(10 ⁶ km·a),+∞];配气管道:[1.11次/(10 ⁵ km·a),+∞]	导致人员死亡或受伤入 院的管道事故	(0, 25]	(1,0.1, 0.013)

3.2 基于VIKOR确定的风险优先次序

VIKOR方法是由OPRICOVIC等^[23]于1998年提出,是一种基于折中排序的决策方法。该方法利用每个打分样本与最优解、最劣解的相对距离对打分样本排序。根据综合云评价矩阵,用VIKOR法度量各失效模式间的距离,确定失效模式风险排序。

1) 确定最优 $(\widehat{v}_s^+, \widehat{v}_o^+, \widehat{v}_d^+)$ 、最劣解 $(\widehat{v}_s^-, \widehat{v}_o^-, \widehat{v}_d^-)$, $\widehat{v}_s^+, \widehat{v}_o^+, \widehat{v}_d^+$ 为 \widehat{V} 中各失效模式对应 S, O, D 因子 E_x 最大的云量化值,而最劣解则对应 E_x 最小的云量化值。

2) 计算群体效益值 B_i 和个别遗憾值 R_i 。基于群体效益值 B_i 和个别遗憾值 R_i 计算结果,计算不同失效模式下的 Q 值。

$$Q_i = \gamma \frac{B_i - B^-}{B^+ - B^-} + (1 - \gamma) \frac{R_i - R^-}{R^+ - R^-} \quad (11)$$

式中: B^+, B^-, R^+ 和 R^- 均为 B_i 和 R_i 的最大值和最小值; γ 为决策策略系数,取0.5。

表3 单元划分及缺陷分布

Table 3 Unit division and defect distribution

管段	壁厚/ mm	内压/ MPa	外径/ mm	缺陷深度/mm		缺陷长度/mm		焊缝缺陷深度/mm		焊缝缺陷长/mm	
				均值	标准差	均值	标准差	均值	标准差	均值	标准差
1	7.1	6.4	660	1.81	0.36	15	10.5	1.4	0.28	123	26.21
2	10.3	6.4	660	2.35	0.47	22	15.4	1.4	0.28	51	10.87
3	8.7	6.4	660	1.64	0.33	24	16.8	1.4	0.28	39	8.31
4	7.1	6.4	660	1.31	0.26	30	21.0	1.4	0.28	167	35.59
5	12.7	6.4	660	2.00	0.40	16	11.2	1.4	0.28	151	32.18
6	10.3	6.4	660	2.35	0.47	17	11.9	1.4	0.28	75	15.98
7	18.4	12	1 016	2.81	0.56	26	18.2	1.4	0.28	160	34.10
8	26.4	10	1 016	3.50	0.70	22	15.4	1.4	0.28	32	6.82
9	22	10	1 016	2.80	0.56	16	11.2	1.4	0.28	142	30.26
10	26.4	10	1 016	5.09	1.02	25	17.5	1.4	0.28	42	8.95
11	14.6	10	1 016	2.79	0.56	17	11.9	1.4	0.28	43	9.16
12	17.5	10	1 016	2.35	0.47	40	28.0	1.4	0.28	170	36.23

使用AHP法计算FMEA法中3个指标的权重,得到专家主观意见权重,且对结果进行一致性检验: S 的权重为0.58, O 的权重得分为0.31, D 的权重为

根据不同失效模式 Q 值,依次实现对不同失效模式的风险排序。

4 管道风险排序实例分析

以某条长输天然气管道的实际运行数据为例,该条长输天然气管道长120.6 km,管材为X60,直径为660/1 016 mm,运行压力为6.4、10、12 MPa,综合考虑变形、结构失稳、表面损伤、腐蚀及断裂5种失效模式,依据管材类型、壁厚、直径、运行压力、重点穿跨地段进行管段单元划分,综合漏磁内检测的缺陷检测结果,单元划分及各管段的缺陷分布情况见表3。依据管道内检测器的检测结果,里程值为52.160 km处发生黄土湿陷,导致部分管节悬空并发生变形,管道变形处的长度和深度已达到1 388和344 mm。故邀请5位专家评价此管段的FMEA评价因子,使用{VL, L, M, H}进行模糊评价。根据风险划分标准,评价5种失效风险的3种评价因子结果见表4,评价的综合云矩阵见表5。

0.11。使用CRITIC法得到 S, O, D 指标间的差异系数、冲突性系数与权重因子,见表6。使用博弈论思想,离差极小化处理求导得:

表 4 专家打分结果

Table 4 Expert scoring results

失效模式	专家 1			专家 2			专家 3			专家 4			专家 5		
	S	O	D	S	O	D	S	O	D	S	O	D	S	O	D
断裂	L	VH	VH	VH	VH	VH	H	VH	M	H	H	VH	VL	VH	H
变形	H	H	VL	H	L	L	VL	H	VL	L	VH	H	VL	H	H
结构失稳	H	VL	H	VH	L	H	H	L	H	H	H	H	H	L	L
表面损伤	L	H	H	L	VH	H	L	H	H	VL	L	H	L	VL	VL
腐蚀穿孔	VL	VH	L	H	H	L	VH	H	L	VL	L	H	VH	H	L

表 5 专家打分结果云模型

Table 5 Cloud model of expert scoring results

失效模式	D	O	S
变形	(0.338, 0.036, 0.004)	(0.676, 0.032, 0.004)	(0.338, 0.036, 0.004)
结构失稳	(0.614, 0.028, 0.003)	(0.323, 0.032, 0.004)	(0.752, 0.032, 0.004)
表面损伤	(0.552, 0.032, 0.004)	(0.538, 0.036, 0.004)	(0.247, 0.032, 0.004)
腐蚀	(0.385, 0.028, 0.003)	(0.676, 0.032, 0.004)	(0.538, 0.043, 0.005)
断裂	(0.838, 0.072, 0.004)	(0.938, 0.043, 0.005)	(0.538, 0.036, 0.004)

$$\begin{bmatrix} w_1 w_1^T & w_1 w_2^T \\ w_2 w_1^T & w_2 w_2^T \end{bmatrix} \begin{pmatrix} a \\ b \end{pmatrix} = \begin{bmatrix} w_1 w_1^T \\ w_2 w_2^T \end{bmatrix} \quad (12)$$

其中, $w_1 = (0.5215, 0.309, 0.1094)$, $w_2 = (0.346, 0.406, 0.248)$ 。

表 6 CRITIC 法计算结果

Table 6 Results of CRITIC method

风险因子	指标差异系数	指标冲突性	CRITIC 权重
S	0.197	1.926	0.346
O	0.224	1.983	0.406
D	0.199	1.366	0.248

利用求得的归一化后的系数 $(a, b) = (0.4312, 0.5688)$ 计算混合权重: $(w_s, w_o, w_d)^T = (0.448, 0.364, 0.188)^T$

3种权重确定值的对比如图2所示。

由图2可知:由博弈论思想得到的混合权重,兼顾了专家的主观因子重要性判断以及客观数据间离散性,引入最优化的思想,避免决策者直接决策主、

表 7 各评价指标的基准云距离

Table 7 Baseline cloud distance of each evaluation index

失效模式	$D(+, F_i)$	$D(-, F_i)$	$O(+, F_i)$	$O(-, F_i)$	$S(+, F_i)$	$S(-, F_i)$
变形	49.92	48.60	79.74	78.72	50.35	49.08
结构失稳	74.42	73.31	47.62	46.55	85.93	84.86
表面损伤	65.86	64.87	69.35	68.44	46.78	45.58
腐蚀	65.86	64.87	80.62	79.69	66.51	65.62
断裂	94.38	93.41	102.47	102.14	66.34	65.46

依据变形、结构失稳、表面损伤、腐蚀、断裂这5类评价指标的基准云距离结果,由式(11)计算得到VIKOR方法的Q值,依据Q值从小到大排序,实

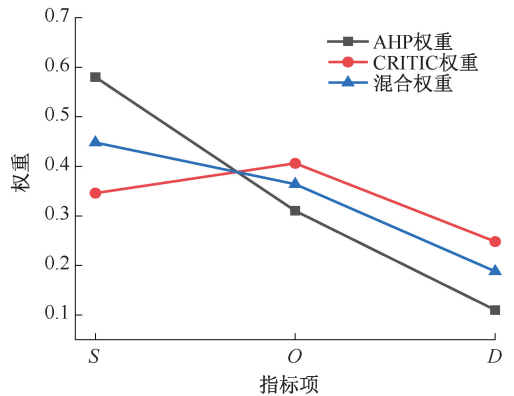


图 2 3种方法权重对比

Fig. 2 Weight comparison of three methods

客观比重。

文中将每种失效模式的3种评价云随机选取100个点,用 $3E_n$ 判据,计算与最优解云 $(0.691, 0.064, 0.008)$ 、“最劣解” $(0, 0.0104, 0.013)$ 的基准云距离,见表7。

现对不同失效模式的风险排序。为验证VIKOR方法的有效性和优越性,对比了VIKOR方法和传统FMEA法的风险排序结果,见表8。

表8 VIKOR法与传统FMEA风险排序结果

Table 8 Results of VIKOR method and traditional FMEA

指标	VIKOR-Q 指标	传统 FMEA 法	排序
断裂	1.36	0.42	1
结构失稳	1.10	0.15	2
腐蚀	0.98	0.14	3
变形	0.77	0.08	4
表面损伤	0.66	0.07	5

计算结果显示,此管段发生断裂的风险最高,其次是结构失稳,建议尽快采取回填等方法进行风险控制同时加强巡线,并在周围配备消防设施。对比表8中VIKOR法与传统FMEA的计算结果,可以看到2种方法得到的风险排序一致,验证了VIKOR模型的有效性。同时观察风险指标,发现VIKOR法得到的指标间差异性较传统FMEA法更显著,辨识度更高,可有效区分失效模式的风险大小,为工程实际提供更加便捷的决策支撑。

5 结论

1) 使用云模型对管道的失效模式风险指标因

子的专家评价结果进行解模糊与合成,考虑评级模糊性的同时,引入评价随机性,更准确地进行意见的合成与量化表达。

2) 使用混合权重法,结合AHP与CRITIC法,分别计算FMEA方法中3个指标因子间的权重,引入博弈论思想,避免权重的确定过于主观或客观,导致评价结果的不准确。

3) 使用VIKOR法对管道5种失效模式进行风险评价,通过与传统FMEA方法结果对比,发现VIKOR法不仅可达到风险量化与排序的目的,而且评价结果不同失效模式间差异显著,为决策者提供更明确的理论支撑。

4) 通过对某管道进行改进的FMEA分析,发现此管段发生断裂失效的风险更高,其次是变形失效。油气管道单元众多,文中仅对管段的5种失效模式进行风险评价,可进一步细分管道的单元模块,并进行失效模式的系统识别,提升文中模型的工程适用性。

参考文献

- [1] 李新民. 管道局50年:铺设管道绕地球4周[N]. 经济参考报, 2023-08-07(007).
- [2] 宁双生. 基于模糊FMECA的管道输油泵安全风险评价[J]. 安全, 2020, 41(8): 13-19.
NING Shuangsheng. Safety assessment of pipeline oil pump based on fuzzy FMECA[J]. Safety & Security, 2020, 41(8): 13-19.
- [3] YU Jianxing, WU Shibo, CHEN Haicheng, et al. Risk assessment of submarine pipelines using modified FMEA approach based on cloud model and extended VIKOR method[J]. Process Safety and Environmental Protection, 2021, 155: 555-574.
- [4] 单克. 基于数据统计及情景模拟的燃气管道定量风险评价方法研究[D]. 北京: 中国石油大学(北京), 2019.
SHAN Ke. Research on quantitative risk assessment method of gas pipeline based on data statistics and scenario simulation[D]. Beijing: China University of Petroleum, Beijing, 2019.
- [5] 张鹏, 彭杨. 考虑随机变量相关性的腐蚀管道失效概率[J]. 石油学报, 2016, 37(10): 1293-1301.
ZHANG Peng, PENG Yang. Failure probability of corroded pipeline considering random variables correlation[J]. Acta Petrolei Sinica, 2016, 37(10): 1293-1301.
- [6] 帅健, 单克. 基于失效数据的油气管道定量风险评价方法[J]. 天然气工业, 2018, 38(9): 129-138.
SHUAI Jian, SHAN Ke. A quantitative risk assessment method for oil and gas pipelines based on failure data[J]. Natural Gas Industry, 2018, 38(9): 129-138.
- [7] 周亚薇, 张振永, 田姗姗. 地区等级升级后的天然气管道定量风险评价技术[J]. 天然气工业, 2018, 38(2): 112-118.
ZHOU Yawei, ZHANG Zhenyong, TIAN Shanshan. Quantitative risk assessment of the natural gas pipelines in upgraded areas[J]. Natural Gas Industry, 2018, 38(2): 112-118.
- [8] 万昔超, 殷伟量, 孙鹏, 等. 基于云模型的暴雨洪涝灾害风险分区评价[J]. 自然灾害学报, 2017, 26(4): 77-83.
WAN Xichao, YIN Weiliang, SUN Peng, et al. Risk division assessment of rainstorm-flood disasters based on cloud model[J]. Journal of Natural Disasters, 2017, 26(4): 77-83.
- [9] 韩峰, 刘志博, 尹文华, 等. 基于二维云模型的沙漠高速公路生态风险评价及优选研究[J]. 安全与环境学报, 2023, 23(10): 3774-3783.
HAN Feng, LIU Zhibo, YIN Wenhua, et al. Ecological risk evaluation and optimum selection of desert expressway schemes based on 2-D cloud model[J]. Journal of Safety and Environment, 2023, 23(10): 3774-3783.

- [10] 张鹏, 游亚菲, 王璟, 等. 基于多维云模型的埋地并行油气管道风险评价研究[J]. 中国安全生产科学技术, 2022, 18(7): 149-156.
ZHANG Peng, YOU Yafei, WANG Jing, et al. Research on risk assessment of buried parallel oil and gas pipelines based on multi-dimensional cloud model[J]. Journal of Safety Science and Technology, 2022, 18(7): 149-156.
- [11] 唐直帆, 祝文化, 文超, 等. 基于云模型的扩机工程进水口基坑施工风险评价[J]. 武汉理工大学学报, 2023, 45(10): 98-103.
TANG Zhifan, ZHU Wenhua, WEN Chao, et al. Construction risk evaluation of expansion engineering inlet pit based on cloud model[J]. Journal of Wuhan University of Technology, 2023, 45(10): 98-103.
- [12] 吕军. 基于云模型的洪涝灾害风险评价与风险管理研究:以巢湖流域为例[D]. 芜湖: 安徽师范大学, 2019.
LYU Jun. Study on risk assessment and risk management of flood disaster based on cloud model: taking Chaohu basin as an example[D]. Wuhu: Anhui Normal University, 2019.
- [13] 李德毅. 知识表示中的不确定性[J]. 中国工程科学, 2000, 2(10): 73-79.
LI Deyi. Uncertainty in knowledge representation[J]. Engineering Science, 2000, 2(10): 73-79.
- [14] 王康, 董四辉. 轨道交通车辆系统安全评价云模型[J]. 中国安全科学学报, 2019, 29(9): 51-56.
WANG Kang, DONG Sihui. Research on cloud model for safety evaluation of rail transit vehicle system[J]. China Safety Science Journal, 2019, 29(9): 51-56.
- [15] 蔡逸伦, 阳富强, 朱伟方, 等. 化工工艺本质安全评价的云模型及应用[J]. 中国安全科学学报, 2018, 28(6): 116-121.
CAI Yilun, YANG Fuqiang, ZHU Weifang, et al. Cloud model for assessing inherent safety assessment of chemical process and its application[J]. China Safety Science Journal, 2018, 28(6): 116-121.
- [16] 任剑. 基于云模型的语言随机多准则决策方法[J]. 计算机集成制造系统, 2012, 18(12): 2 792-2 797.
REN Jian. Linguistic-stochastic multi-criterion decision-making method based on cloud mode[J]. Computer Integrated Manufacturing Systems, 2012, 18(12): 2 792-2 797.
- [17] HASSAN S, WANG Jin, KONTAVAS C, et al. Modified FMEA hazard identification for cross-country petroleum pipeline using fuzzy rule base and approximate reasoning[J]. Journal of Loss Prevention in the Process Industries, 2022, 74: DOI: 10.1016/j.jlp.2021.104616.
- [18] 范成伟, 明杏芬, 付小红, 等. 基于博弈论-后悔理论的装配式建筑施工安全风险评估模型研究[J]. 安全与环境学报, 2022, 22(3): 1 132-1 139.
FAN Chengwei, MING Xingfen, FU Xiaohong, et al. Research on safety risk assessment of prefabricated buildings based on game theory-regret theory[J]. Journal of Safety and Environment, 2019, 22(3): 1 132-1 139.
- [19] 李鹤林. 油气管道失效控制技术[J]. 油气储运, 2011, 30(6): 401-410, 393.
LI Helin. Failure control technique of oil & gas pipeline[J]. Oil and Gas Storage and Transportation, 2011, 30(6): 401-410, 393.
- [20] 刘国志, 彭英伟, 伍东, 等. 天然气管道失效分析与防范对策[J]. 安全与环境工程, 2012, 19(3): 100-104.
LIU Guozhi, PENG Yingwei, WU Dong, et al. Natural gas pipeline failure analysis and precautions[J]. Safety and Environmental Engineering, 2012, 19(3): 100-104.
- [21] 单克, 帅健, 张思弘. 基于修正因子的油气管道失效概率评估[J]. 中国安全科学学报, 2016, 26(1): 87-93.
SHAN Ke, SHUAI Jian, ZHANG Sihong. Adjustment factors based assessment of oil and gas pipelines failure probability[J]. China Safety Science Journal, 2016, 26(1): 87-93.
- [22] 单克, 帅健, 杨光, 等. 美国油气管道基本失效概率评估方法及启示[J]. 油气储运, 2020, 39(5): 530-535.
SHAN Ke, SHUAI Jian, YANG Guang, et al. Evaluation method for basic failure probability of oil and gas pipeline based on accident statistics in the United States and enlightenments[J]. Oil and Gas Storage and Transportation, 2020, 39(5): 530-535.
- [23] METE S, SERIN F, OZ E N, et al. A decision-support system based on Pythagorean fuzzy VIKOR for occupational risk assessment of a natural gas pipeline construction[J]. Journal of Natural Gas Science and Engineering, 2019, 71: DOI: 10.1016/j.jngse.2019.102979.

作者简介: 王东营 (1974—),男,河北衡水人,博士,高级工程师,主要从事管道完整性管理技术、输氢管道关键技术研究、甲烷排放管控关键技术及装备研发等工作。E-mail: wangdy@pipechina.com.cn。

