

# 基于博弈论-集对分析法的海底管道 泄漏风险评估

刘 吼

(中海石油(中国)有限公司深圳分公司, 深圳 518067)

**摘要:** 为准确评估海底管道运行中存在的泄漏风险, 在调研国内外海底管道事故数据库的基础上, 建立了海底管道泄漏风险评估指标体系, 分别通过G1法和熵权法对各项指标进行主观、客观赋权, 利用博弈论协调两种权重之间的关系, 最后采用集对分析法对指标进行处理, 得到不同管段的泄漏风险等级。结果表明, 博弈论组合赋权的权重结果更合理, 组合权重大于0.06的指标从大到小依次为渔船密度、航运船密度、台风、海水腐蚀、H<sub>2</sub>S腐蚀、地震和管道埋深; 管段12和管段20的风险等级较高为IV级, 且通过集对势分析, 得到管段9、13、15、20处在同势区, 说明风险具有向更高一级发展的趋势。可以通过采取限制船舶航速、禁止在管道保护区停泊、设置天气预警装置、加强巡线、设置警告牌等措施降低管道泄漏风险。研究结果对于海底管道的安全运行管理具有指导意义。

**关键词:** 海底管道; 泄漏风险; 博弈论-集对分析; 组合赋权

中图分类号: TE88

文献标识码: B

DOI: 10.19291/j.cnki.1001-3938.2024.03.007

## Risk Assessment of Submarine Pipeline Leakage based on Game Theory-set Pair Analysis

LIU Hou

(Shenzhen Branch of CNOOC (China) Co., Ltd., Shenzhen 518067, China)

**Abstract:** In order to accurately assess the leakage risk existing in the operation of submarine pipelines, an index system of submarine pipeline leakage risk assessment was established on the basis of investigation of submarine pipeline accident databases at home and abroad. G1 method and entropy weight method were used to assign subjective and objective weights to each index, and the relationship between the two weights was coordinated by game theory. Finally, set pair analysis method was used to process the indicators. The leakage risk levels of different pipe segments are obtained. The results show that the weight of the combination of game theory is more reasonable, and the index with the combination weight greater than 0.06 is the density of fishing vessels, the density of shipping vessels, typhoon, seawater corrosion, H<sub>2</sub>S corrosion, earthquake and pipeline buried depth in order from the largest to the smallest. The higher risk level of pipe segments 12 and 20 is level IV, and through the set pair potential analysis, it is found that pipe segments 9, 13, 15 and 20 are in the same potential area, indicating that the risk has a tendency to develop to a higher level. The risk of pipeline leakage can be reduced by limiting ship speed, prohibiting berthing in pipeline protection area, setting up weather warning device, strengthening patrol line, setting up warning sign and so on. The research results are expected to provide guidance for improving the operation and management level of submarine pipelines.

**Key words:** submarine pipeline; leakage risk; game theory-set pair analysis; combination weighting

## 0 前 言

随着我国经济水平的不断提高，人们对油气资源的需求量也不断提升，开发海上油气资源已成为接续陆上资源的主要手段。海底管道的安全平稳运行对于保障能源安全、维持海洋生态多样性具有重要意义<sup>[1-2]</sup>。目前，已有学者围绕海底管道运行中的潜在风险进行了评价。张新生等<sup>[3]</sup>从扰动程度、安全属性和预防措施等三个方面，利用概率神经网络对管道风险进行了评价；余杨等<sup>[4]</sup>利用毕达哥拉斯算法和贝叶斯网络，计算了管道泄漏的失效概率；淳明浩等<sup>[5]</sup>结合主成分分析法对影响海管运行的风险因子进行量化，获取了不同管段的综合因子排名。以上研究采用的评价方法具有一定的科学性，但部分方法过于复杂，且在权重计算时只考虑单一类别对权重的影响，指标值的柔化处理不够。基于此，在调研国内外海底管道事故数据库的基础上，建立海底管道泄漏风险评价指标体系，结合博弈论和集对分析法对指标值进行处理，以此得到不同管段的泄漏风险等级。

## 1 构建海底管道泄漏风险评价指标体系

海底管道平铺在海底或深埋在海泥中，所

处环境恶劣，同时由于管道长期服役及海底环境的腐蚀会导致管体发生泄漏；此外，管道的保护措施即承载体的承受能力也会影响管体泄漏事故的发生概率。由此可见，影响海底管道泄漏的因素众多，且与陆上油气管道有较大区别。英联合王国海上石油作业者协会（UKOOA）在1989年建立了专门统计海底管道（含立管）的失效数据库 PARLOC（pipeline and riser loss of containment: North Sea experience），统计的失效原因多为第三方破坏、腐蚀和结构缺陷<sup>[6]</sup>；美国安全与环境执行局（BSEE）统计了墨西哥湾和太平洋海域的海洋平台作业事故，其中因第三方破坏和腐蚀造成的事故后果占绝对比例<sup>[7]</sup>；王红红等<sup>[8]</sup>统计了1986—2016年期间，中海油所辖的315条管道发生过事故频率和所在海域，将事故原因分为腐蚀、第三方破坏、自然与地质灾害、工程质量问题等。

基于此，结合待评价海底管道所在海域的生态环境和管道自身属性，参照上述事故数据的统计结果，从管道腐蚀、第三方破坏、自然灾害、误操作、管道结构缺陷和管理缺陷等因素出发，建立风险评价指标体系，如图1所示。

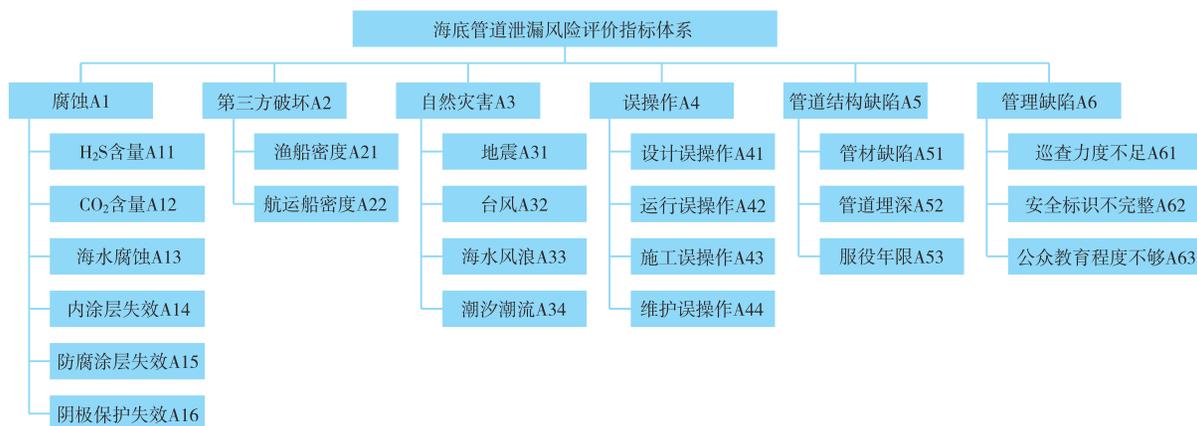


图1 海底管道泄漏风险评价指标体系

将风险等级划分为低（I）、较低（II）、中（III）、较高（IV）和高（V），其中H<sub>2</sub>S腐蚀、CO<sub>2</sub>腐蚀、海水腐蚀、防腐层失效、阴极保护失效、渔船密度、航运船密度、地震、台风、管材缺陷、管道埋深和服役年限等可通过现场监测数据、运行参数和历史维修记录获得，属于可量化指标，

参照CCS《海底管道系统规范》（2021版本）要求划分等级区间，具体见表1，其中台风等级为语言型定量描述，风险等级I~V分别对应量化评价价值1、3、5、7、9；其余为不可量化指标，通过专家经验获取评价价值，等级区间分别为[0, 1.6)、[1.6, 4.8)、[4.8, 7.6)、[7.6, 8.8)、[8.8, 10.0)。

表1 定量评价指标风险等级划分结果

评价指标	指标层量化	风险等级				
		I	II	III	IV	V
H <sub>2</sub> S腐蚀	H <sub>2</sub> S含量/(mg·m <sup>-3</sup> )	< 50	[50~100)	[100~150)	[150~200)	≥ 200
CO <sub>2</sub> 腐蚀	CO <sub>2</sub> 分压/kPa	< 100	[100~200)	[200~300)	[300~400)	≥ 400
海水腐蚀	海水电阻率/(Ω·m)	≥5	[4.5~5)	[4~4.5)	[3.5~4)	< 3.5
防腐涂层失效	防腐层失效点个数/(个·dm <sup>-1</sup> )	< 2	[2~6)	[6~10)	[10~20)	≥ 20
阴极保护失效	阴极保护率/%	≥95	[90~95)	[85~90)	[80~85)	< 80
渔船密度	渔船密度/(艘·km <sup>-1</sup> ·a <sup>-1</sup> )	< 0.1	[0.1~1)	[1~10)	[10~20)	≥ 20
航运船密度	航运船密度/(艘·航道 <sup>-1</sup> ·a <sup>-1</sup> )	< 500	[500~1 000)	[1 000~1 500)	[1 500~2 000)	≥ 2 000
地震	地震烈度(参照GB/T 17742—2020)	< 3	[3~5)	[5~7)	[7~9)	≥ 9
台风	台风等级(参照GB/T 19201—2006)	热带低压	热带风暴	强热带风暴	台风	强台风或超强台风
管材缺陷	缺陷密度/(个·m <sup>-1</sup> )	< 10 <sup>-4</sup>	[10 <sup>-4</sup> ~10 <sup>-3</sup> )	[10 <sup>-3</sup> ~10 <sup>-2</sup> )	[10 <sup>-2</sup> ~10 <sup>-1</sup> )	≥ 10 <sup>-1</sup>
管道埋深	管道埋深/m	≥2	[1.5~2)	[1.0~1.5)	[0.5~1.0)	< 0.5
服役年限	服役年限/a	< 5	[5~10)	[10~15)	[15~20)	≥ 20

## 2 博弈论组合赋权

主观权重虽可一定程度反映海底管道运行的真实情况，但容易受主观情绪和专家认知的影响；客观赋权通过真实样本数据获取指标权重，但对于个别指标的赋权差异较大。对于海底管道泄漏风险评价而言，指标权重需充分利用主观经验和客观事实的内在规律，故采用博弈论组合赋权的方法使各方案的基本权重与理想权重的偏差最小化，以便最大程度保留原始方案信息，公式为

$$(w^*)^T = \sum_{j=1}^g a_j^* \cdot w_j^T \quad (1)$$

式中： $w^*$ ——最优权重组合；

$a_j^*$ ——第 $j$ 种赋权方法的最优组合系数， $j=1\sim g$ ，本研究 $g=2$ ；

$w_j$ ——第 $j$ 种赋权方法的基本权重。

将公式(1)转化为最优化问题，即可求解 $a_j^*$ 。主观赋权采用G1法，客观赋权采用熵权法<sup>[9]</sup>。

## 3 集对分析法

将各指标的实际风险大小与等级结成集对，通过计算两者之间的联系度确定管段所属风险等级<sup>[10]</sup>。联系度用 $\mu$ 表示，计算方法为

$$\mu = a + bp + cq \quad (2)$$

式中： $a$ ——统一度；

$b$ ——差异度；

$c$ ——对立度；

$p$ ——差异度标记系数；

$q$ ——对立度标记系数。

由于风险等级划分为5个，故将集对分析扩展为5元联系度，通过隶属度函数计算单一指标的联系度，计算方法为

$$\mu_{n1} = \begin{cases} 1 & x_n \in [0, s_1] \\ 1 - \frac{2(x_n - s_1)}{s_2 - s_1} & x_n \in (s_1, s_2], \text{ 且 } s_1 \neq s_2 \\ -1 & x_n \in (s_2, s_5] \end{cases} \quad (3)$$

$$\mu_{n2} = \begin{cases} -1 + \frac{2x_n}{s_1} & x_n \in [0, s_1] \\ 1 & x_n \in (s_1, s_2] \\ 1 - \frac{2(x_n - s_2)}{s_3 - s_2} & x_n \in (s_2, s_3] \\ -1 & x_n \in (s_3, s_5] \end{cases} \quad (4)$$

$$\mu_{n3} = \begin{cases} 1 & x_n \in (s_2, s_3] \\ -1 + \frac{2(x_n - s_1)}{s_2 - s_1} & x_n \in (s_1, s_2], \text{ 且 } s_1 \neq s_2 \\ 1 - \frac{2(x_n - s_3)}{s_4 - s_3} & x_n \in (s_3, s_4], \text{ 且 } s_3 \neq s_4 \\ -1 & x_n \in (0, s_1], \text{ 且 } x_n \in (s_4, s_5] \end{cases}$$

$$(5)$$

$$\mu_{n4} = \begin{cases} 1 & x_n \in (s_3, s_4] \\ -1 + \frac{2(x_n - s_2)}{s_3 - s_2} & x_n \in (s_2, s_3], \text{且 } s_2 \neq s_3 \\ 1 - \frac{2(x_n - s_4)}{s_5 - s_4} & x_n \in (s_4, s_5] \\ -1 & x_n \in (0, s_2] \end{cases} \quad (6)$$

$$\mu_{n5} = \begin{cases} 1 & x_n \in (s_4, s_5] \\ -1 + \frac{2(x_n - s_3)}{s_4 - s_3} & x_n \in (s_3, s_4], \text{且 } s_3 \neq s_4 \\ -1 & x_n \in (0, s_3] \end{cases} \quad (7)$$

式中： $\mu_{nk}$ ——评价指标值  $x_n$  在第  $k$  个风险等级上的联系度；

$s_1 \sim s_5$ ——风险等级的阈值，对于越小越优的指标依次取上限阈值，对于越大越优的指标依次取下限阈值。

最后，结合指标权重和单一联系度计算复合联系度，即

$$\mu_k = \sum_{n=1}^m w^* \mu_{nk} \quad (8)$$

式中： $\mu_k$ ——待评价管段在第  $k$  个风险等级上的复合联系度；

$w^*$ ——最优权重组合；

$m$ ——指标个数。

## 4 实例验证

### 4.1 基础数据获取

以南海某海域的海底管道为例，该地区管道采用双层结构 API X60 管线钢，内管直径为 200~300 mm，外管直径为 400~500 mm，海域水深 15~30 m。取 20 个不同的混输管段为研究对象，结合海文信息、附近海域船只往来信息和管道运行参数确定可量化指标；邀请 5 位熟悉该海域和管道情况的专家确定不可量化指标，将 5 位专家的意见按照学历、工作年限和职称进行意见整合，最终结果见表 2。

### 4.2 指标权重计算

针对表 2 的数值采用熵权法进行赋权，得到地震、台风及巡查力度不足的权重较大。自然灾害会引发地表变形、海床发生地面运行，此时管道容易裸露、悬空甚至断裂，但考虑到目前气象

表 2 评价指标取值结果

指标	管段1	管段2	管段3	...	管段20	客观权重	主观权重	组合权重
A11	174	282	253	...	289	0.045 65	0.073 19	0.064 38
A12	50	58	65	...	47	0.044 01	0.032 44	0.036 14
A13	4.2	3.7	4.1	...	2.6	0.034 68	0.081 04	0.066 20
A14	3	0.5	0.6	...	1.8	0.041 16	0.052 07	0.048 58
A15	3.5	4.2	5.6	...	6.7	0.040 23	0.037 24	0.038 20
A16	92	92	88	...	85	0.031 83	0.031 21	0.031 41
A21	12	9	16	...	28	0.033 95	0.093 32	0.074 32
A22	1 700	1 230	2 150	...	2 490	0.060 05	0.077 00	0.071 58
A31	3	2	1	...	1	0.069 67	0.057 47	0.061 37
A32	5	5	7	...	7	0.065 71	0.071 15	0.069 41
A33	1.8	2.5	2.1	...	2	0.032 49	0.021 34	0.024 91
A34	2.7	3	3.4	...	2.9	0.039 65	0.020 55	0.026 66
A41	1.5	2.5	1.7	...	3.1	0.047 42	0.021 56	0.029 84
A42	1.9	2.5	3	...	3.4	0.032 54	0.034 48	0.033 86
A43	3.2	2.5	3.2	...	1.6	0.029 64	0.029 02	0.029 22
A44	1.9	2.7	2.2	...	3.5	0.043 83	0.030 38	0.034 68
A51	0.005	0.010	0.027	...	0.003	0.060 95	0.036 01	0.043 99
A52	0.8	1.0	1.2	...	0.5	0.059 57	0.061 50	0.060 88
A53	10	5	2	...	15	0.039 78	0.031 16	0.033 92
A61	4.5	5.9	4.5	...	5.5	0.064 41	0.049 17	0.054 05
A62	7.3	5	5.4	...	6.2	0.044 48	0.029 50	0.034 29
A63	7.9	4.6	6.7	...	3.5	0.038 30	0.029 20	0.032 11

部门预报准确性的提升，可通过各项减缓措施减少自然灾害对管道的拖拽和冲刷行为，因此自然灾害并不是影响海底管道泄漏的最主要因素。此外，管输介质中  $H_2S$  含量、渔船密度和航运船密度相对较大，数据对应的风险等级多在 IV 级以上，但熵权法得到的权重较小，这与熵权法对变异性较小的数据集指标不敏感有关。由此可见，需要采用 G1 法进行主观赋权，结合博弈论确定出主、客观方法对应的最优组合系数分别为 0.68、0.32，结合公式 (1) 计算得到组合权重。组合权重大于 0.06 的指标从大到小依次为渔船密度、航运船密度、台风、海水腐蚀、 $H_2S$  腐蚀、地震和管道埋深。绘制不同权重结果的雷达图，如图 2 所示。组合权重结果位于两种赋权方法的中间，说明权重进行了柔化处理，结果与实际情况相符。

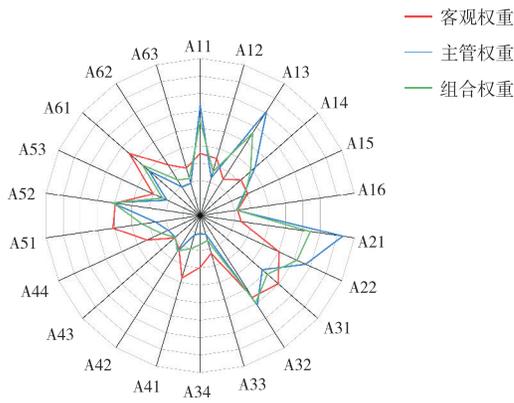


图2 不同权重结果的雷达图

4.3 联系度计算

以管段1的A11可量化指标和A61不可量化指标为例，进行单一联系度计算，将管段1指标为A11的评价结果174代入公式(3)~公式(7)，其中 $s_1$ 、 $s_2$ 、 $s_3$ 、 $s_4$ 、 $s_5$ 分别为50、100、150、200、300，对应等级I~V的单一指标联系度分别为-1、-1、0.04、1、-0.04；同理，将A61的评价结果4.5代入公式(3)~公式(7)，其中 $s_1$ 、 $s_2$ 、 $s_3$ 、 $s_4$ 、 $s_5$ 分别为1.6、4.8、7.6、8.8、10.0，对应等级I~V的单一指标联系度分别为-0.8125、1、0.8125、-1、-1。依次类推，得到管段1不同指标在各自风险等级上的单一联系度，结果见表3。

最后，利用公式(8)结合组合权重结果，计算复合联系度并对风险等级进行评价，计算及评价结果见表4，并根据最大联系度准则确定不同管段所处的风险等级，结果如图3所示。

其中，管段12和管段20的风险等级较高，为IV级，这两个管段的共同特征是受船只抛锚、脱锚及重物坠落的影响较大，且所处区域海洋资源丰富，渔业航行活动较多；海水电阻率较低、含盐量大，在电化学腐蚀和冲刷腐蚀的作用下，处于全浸区和海泥区的管道腐蚀趋势较强；管道埋深较浅，一方面可促使潮汐在局部管段形成湍流，加快防腐层的剥离，另一方面也增加了船锚和第三方重物造成的管道局部凹陷和变形；此外，巡查力度不足、安全标识不完整和公众教育程度不够也是管道泄漏不可忽略的因素。风险评价结果与现场实际情况相符，证明了博弈论-集对分析法用于海底管道泄漏风险评价是可行的。

表3 管段1的单一联系度结果

指标	风险等级				
	I	II	III	IV	V
A11	-1	-1	0.040 0	1	-0.040 0
A12	1	0	-1	-1	-1
A13	1	-0.200 0	1	0.200 0	-1
A14	-0.562 6	1	0.562 6	-1	-1
A15	0.256 0	1	-0.256 0	-1	-1
A16	-0.125 0	1	0.125 0	-1	-1
A21	-1	-1	0.600 0	1	-0.600 0
A22	-1	-1	0.200 0	1	-0.200 0
A31	1	1	-1	-1	-1
A32	-1	-1	1	1	-1
A33	0.875 0	1	-0.875 0	-1	-1
A34	0.312 5	1	-0.312 5	-1	-1
A41	1	0.875 0	-1	-1	-1
A42	0.812 5	1	-0.812 5	-1	-1
A43	0	1	0	-1	-1
A44	0.812 5	1	-0.812 5	-1	-1
A51	-1	0.111 1	1	-0.111 1	-1
A52	-1	-1	0.627 5	1	-0.627 5
A53	-1	-0.528 3	1	0.528 3	-1
A61	-0.812 5	1	0.812 5	-1	-1
A62	-1	-0.785 7	1	0.785 7	-1
A63	-1	-1	0.500 0	1	-0.500 0

表4 复合联系度及风险评价结果

管段编号	评价等级					评价结果
	I	II	III	IV	V	
管段1	-0.270 9	-0.016 8	0.215 8	-0.023 0	-0.812 5	III
管段2	-0.657 6	0.415 9	-0.510 3	-0.020 5	-1.000 0	II
管段3	-0.021 5	0.312 4	-0.250 5	-0.210 2	-1.000 0	II
...	...	...	...	...	...	...
管段20	-0.672 3	-0.126 5	-0.212 5	0.678 5	-0.345 6	IV

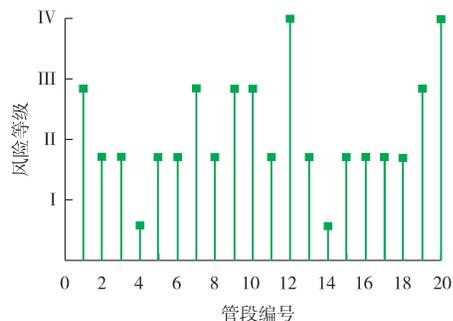


图3 不同管段所处的风险等级

集对分析法还可通过同一度  $a$  和对立度  $c$  的比值, 确定集对势  $e=|a/c|$ , 如以实际风险为高风险作为理想参照, 则  $e>1$  表示实际风险与理想风险在同势区, 该管段具有不稳定的风险态势; 反之同理。不同管段的集对势结果如图4所示。根据图4可知, 管段9、13、15、20处在同势区, 说明目前风险有增加的趋势; 管段8、12、14处在均势区, 说明目前风险基本保持稳定; 其余管段处在反势区, 说明风险有降低的趋势。因此, 应重点关注风险发展较快的管段, 从限制船舶航速、禁止在管道保护区停泊、设置天气预警装置、加强巡线、设置警告牌、对管道添加缓蚀剂或定时清管、增加混凝土防护板和填充沙袋等方面全面降低海底管道泄漏风险, 提高管道完整性管理水平。

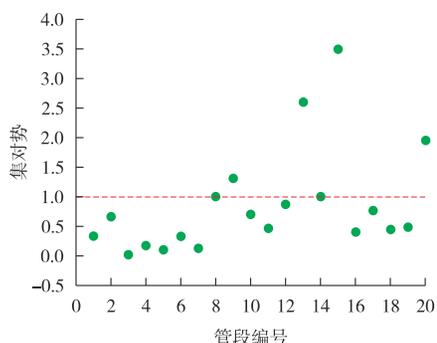


图4 不同管段的集对势结果

## 5 结 论

(1) 为避免单一赋权方法的主观性和片面性, 采用博弈论组合赋权的方式糅和了G1法和熵权法的结果, 使得海底管道泄漏风险评价结果更合理。组合权重大于0.06的指标从大到小依次为渔船密度、航运船密度、台风、海水腐蚀、H<sub>2</sub>S腐蚀、地震和管道埋深。

(2) 将各指标的实际风险大小和风险等级组成集对, 应用集对分析法实现单一联系度向复合联系度的转变, 其风险评价结果与现场实

际相符, 并通过集对势分析, 得到了不同管段的风险发展趋势, 为进一步制定海底管道泄漏风险减缓措施提供了实际参考。

(3) 海底管道处于复杂多变的环境中, 今后还应将动态权重或动态概率融入模型中, 实现不同工况、不同场景下的风险评价与预测。

## 参考文献:

- [1] 张新生,何思宇.海洋生态环境下海底管道泄漏耦合风险[J].消防科学与技术,2020,39(9):1236-1240.
- [2] 梅海粟,周润智,张卫朋,等.油气田管道完整性管理效益评估[J].焊管,2023,46(4):60-68.
- [3] 张新生,杨青.基于GMM-PNN模型的海底油气管道风险等级评价[J].安全与环境学报,2021,21(3):935-942.
- [4] 余杨,高涵韬,徐立新,等.基于毕达哥拉斯模糊贝叶斯网络的海底管道泄漏风险分析[J].中国安全生产科学技术,2022,18(11):19-25.
- [5] 淳明浩,崔文勤,杨肖迪,等.海底管道风险评估方法研究与应用[J].石油工程建设,2020,46(增刊1):120-125.
- [6] 杨青.基于第三方破坏的海底管道风险评估研究[D].西安:西安建筑科技大学,2021.
- [7] 方娜,陈国明,朱红卫,等.海底管道泄漏事故统计分析[J].油气储运,2014,33(1):99-103.
- [8] 王红红,刘国恒.中国海油海底管道事故统计及分析[J].中国海上油气,2017,29(5):157-160.
- [9] 徐先锋,邢鹏飞,王岁红,等.基于博弈论G1-EW-TOPSIS法的岩体质量评价和应用[J].黄金科学技术,2022,30(5):704-712.
- [10] 刘标,刘斌,王天赐,等.基于DEMATEL-SPA的老龄油气管道风险评价研究[J].石油管材与仪器,2022,8(4):53-56,61.

作者简介: 刘 吼(1989—),男,湖南益阳人,本科,工程师,现主要从事海洋石油生产工艺管理、长输管道安全管理工作。

收稿日期: 2023-08-03

修改返回日期: 2024-01-16

编辑: 董 超

欢迎投稿 欢迎订阅