

中文引用格式:唐华彬,许磊,陈思宇,等. 基于 BOA-SAM-FTA 的超期服役压力管道风险评估[J]. 中国安全科学学报, 2026, 36(4): 57-64.

英文引用格式:Tang Huabin, Xu Lei, Chen Siyu, et al. Risk assessment for overdue in-service pressure pipelines based on BOA-SAM-FTA[J]. China Safety Science Journal, 2026, 36(4): 57-64.

基于 BOA-SAM-FTA 的超期服役压力 管道风险评估*

唐华彬¹, 许磊¹教授, 陈思宇^{**2}高级工程师, 马松华³高级工程师

(1 中国石油大学(北京)克拉玛依校区工学院, 新疆 克拉玛依 834000; 2 招商新疆特种设备检验技术研究院有限公司, 新疆 乌鲁木齐 830011; 3 中国石油新疆分公司 采油工艺研究院, 新疆 克拉玛依 834000)

中图分类号:X944.4

文献标志码:A

DOI: 10.16265/j.cnki.issn1003-3033.2026.04.0454

资助项目:中国石油新疆油田分公司科技项目(2024-C4013)。

【摘要】 为预防超期服役压力管道失效,在故障树分析法(FTA)基础上,提出基于蝴蝶优化算法(BOA)与相似聚合法(SAM)相结合的方法,分析超期服役压力管道失效概率。首先,分析超期压力管道失效原因,建立失效故障树;然后,通过邀请专家评估故障树底事件,并通过 SAM 方法和改进 BOA-SAM 聚合专家意见,计算对比 2 种方法的不确定性值来评估聚合的准确性(不确定性值越小,聚合结果越精确);最后,计算顶事件失效概率并进行重要度分析。结果表明:改进后的 BOA-SAM 方法所得聚合结果的不确定性值,均显著低于传统 SAM 方法,其中最明显的为底事件 X_6 ,其不确定性值降低 7.6%,顶事件的失效概率为 0.117 641;应力腐蚀开裂、第三方破坏、焊缝开裂和介质中 H_2S 含量偏高等为事故发生的关键因素。

【关键词】 蝴蝶优化算法(BOA); 相似聚合法(SAM); 故障树分析法(FTA); 超期服役压力管道; 风险评估; 失效概率

Risk assessment for overdue in-service pressure pipelines based on BOA-SAM-FTA

Tang Huabin¹, Xu Lei¹, Chen Siyu², Ma Songhua³

(1 School of Engineering, China University of Petroleum-Beijing at Karamay, Karamay Xinjiang 834000, China; 2 China Merchants Xinjiang Special Equipment Inspection & Research Institute Co., Ltd., Urumqi Xinjiang 830011, China; 3 Oil Production Technology Research Institute, Petro China Xinjiang Oilfield Company, Karamay Xinjiang 834000, China)

Abstract: To investigate the failure issues of overdue in-service pressure pipelines, this paper proposed a method based on integration of BOA and SAM for analyzing the failure probability of such pipelines, building upon the FTA framework. First, the causes of failure in overdue in-service pressure pipelines

* 文章编号:1003-3033(2026)04-0057-08; 收稿日期:2025-11-10; 修稿日期:2026-01-10

** 通信作者:陈思宇(1989—),男,新疆乌鲁木齐人,硕士,高级工程师,主要从事特种设备检验检测与安全评估等方面的工作。E-mail: 838781634@qq.com。

were analyzed, and a fault tree for failure was established. Then, experts were invited to evaluate the basic events of fault tree, and their opinions were aggregated using SAM method and an improved BOA-SAM approach. The accuracy of aggregation was assessed by comparing the uncertainty values of two methods (the lower the uncertainty value, the more precise the aggregation result). Finally, the failure probability of the top event was calculated, and an importance analysis was conducted. The results show that the uncertainty values of the aggregation results obtained using the improved BOA-SAM are significantly lower than those of SAM method. Notably, for the basic event X_6 , the uncertainty value decreased by 7.6%. The failure probability of the top event is calculated to be 0.117 641. Stress corrosion cracking, third-party damage, weld cracking and excessive H_2S content in the medium are identified as the key factors contributing to the occurrence of accidents. This study provides a scientific and logical approach for risk assessment and failure analysis of overdue in-service pressure pipelines.

Keywords: butterfly optimization algorithm (BOA); similarity aggregation method (SAM); fault tree analysis (FTA); overdue in-service pressure pipelines; risk assessment; failure probability

0 引言

石化能源等领域的压力管道是油气生产加工产业链的核心设施,其高温高压、介质高危等特性使得失效风险直接关联公共安全。随着管道老龄化加剧,超期服役问题日益突出。其中压力管道失效概率较设计寿命内升高 3~5 倍,氢致开裂、应力腐蚀等材料劣化引发的隐蔽性缺陷显著增加了泄漏与燃爆风险^[1-3]。在此背景下开展超期服役压力管道精准风险评估,既是实现《十四五国家应急体系规划》中存量风险动态管控的必然要求,也为解决管道老龄化与安全生产矛盾提供了关键技术支撑。

当前,学者们针对压力管道风险评估开展了大量研究。赵雪^[4]基于故障树分析法(Fault Tree Analysis, FTA)系统分析了海底油气管道溢油事故风险,明确了主要风险因素。顾文婷等^[5]针对长输管道建立的故障树模型,采用蒙特卡罗模拟量化了复杂系统的泄漏概率,验证了逻辑树方法在工程风险评估中的适用性。王东营等^[6]提出基于改进云模型的失效模式与影响分析(Failure Mode and Effects Analysis, FMEA)风险排序方法,通过博弈论确定专家权重。王大庆等^[7]提出的模糊专家判断法,通过建立语义变量与失效概率的隶属度函数,成功解决了小样本条件下失效后果概率的量化难题。陈丽娜等^[8]将 T-S 模糊故障树与贝叶斯网络相结合,得到了注水管道失效概率计算方法。值得注意的是,近年来,模糊故障树的应用深度不断拓展, Diao Xu 等^[9]提出一种基于层次分析法和模糊故障树分析的石化管道泄漏多米诺效应风险分析方法,

将管道泄漏视为多米诺效应的初始事件,构建以火灾或爆炸事故为顶事件的故障树模型。Adabavazeh 等^[10]运用模糊故障树揭示了管道腐蚀的多因素耦合机制,而 Qin Guojin 等^[11]在此基础上发展的改进模糊故障树方法,通过融合相似聚合法(Similarity Aggregation Method, SAM),构建了专家经验向底事件概率的转化通道。该方法采用模糊综合评价处理专家判断的模糊性,借助 SAM 算法聚合多源异构数据,在氢脆致管道失效案例中展现了良好的工程适用性。

然而, SAM 在模糊故障树分析中的应用存在一个关键性技术缺陷,即松弛因子 β 的确定过程具有较强的主观性。由于不同决策者可能选择不同的 β 值,导致对同一系统的分析结果出现显著差异。鉴于此,笔者拟提出一种蝴蝶优化算法(Butterfly Optimization Algorithm, BOA)-SAM-FAT^[12]方法,构建以专家意见聚合结果的不确定性值为目标函数的优化模型,利用 BOA 的全局和局部搜索能力,自动寻优得到使不确定性值最小的 β ,从而客观确定 β 值,提高分析结果的可靠性和一致性。

1 基于 BOA-SAM 的改进模糊故障树法

1.1 FTA

FTA 是一种通过逻辑门连接基本事件、中间事件和顶事件的树状图形分析方法。该方法通过计算顶事件发生概率实现风险量化,并通过最小割集识别关键失效路径,广泛应用于工业系统风险评估。

1.2 BOA

BOA 是一种模拟蝴蝶觅食行为的群体智能优化算法^[13-14],通过香味感知机制搜索全局和局部。

1) 全局搜索。当蝴蝶能够感知到其他蝴蝶的香味时,当前蝴蝶将朝着香味最浓的目标移动,计算公式为:

$$\mathbf{x}_i^{t+1} = \mathbf{x}_i^t + (r^2 \times \mathbf{g}^* - \mathbf{x}_i^t) \times f_i \tag{1}$$

式中: $\mathbf{x}_i^t$ 为第 t 此迭代的第 i 只蝴蝶的位置向量; r 为随机数,取值为 $(0,1)$; $\mathbf{g}^*$ 为当前最优解向量; f_i 为第 i 只蝴蝶的香味值。

2) 局部搜索。当蝴蝶感知不到其他蝴蝶的香味时,将做随机移动,计算公式为:

$$\mathbf{x}_i^{t+1} = \mathbf{x}_i^t + (r^2 \times \mathbf{x}_j^t - \mathbf{x}_k^t) \times f_i \tag{2}$$

式中 $\mathbf{x}_j^t, \mathbf{x}_k^t$ 分别为第 j, k 只蝴蝶在 t 次迭代中的解向量。

1.3 改进 BOA-SAM 方法

针对传统 SAM 中松弛因子 β 取值主观性强的问题,引入 BOA 实现 β 值的智能优化。通过建立以不确定性值 $H(\tilde{\mathbf{R}}_i)$ 为目标函数的优化模型,利用 BOA 的全局/局部搜索机制自动确定最优 β 值。其中,不确定性值作为关键评价指标,其数值越小表明专家意见的聚合结果越精确,该方法可显著提升专家意见聚合的客观性和可靠性^[15]。

$$H(\tilde{\mathbf{R}}_i) = \int_{-\infty}^{\infty} \mu \tilde{\mathbf{R}}_i(\beta) d\beta, 0 \leq \beta \leq 1 \tag{3}$$

式中: $H(\tilde{\mathbf{R}}_i)$ 为聚合结果的不确定性值; $\mu \tilde{\mathbf{R}}_i(\beta)$ 为聚合后模糊数的隶属函数。

2 超期服役压力管道风险评估模型构建

采用 BOA 改进模糊故障树模型,评估超期服役压力管道失效可能性,其流程如图 1 所示。

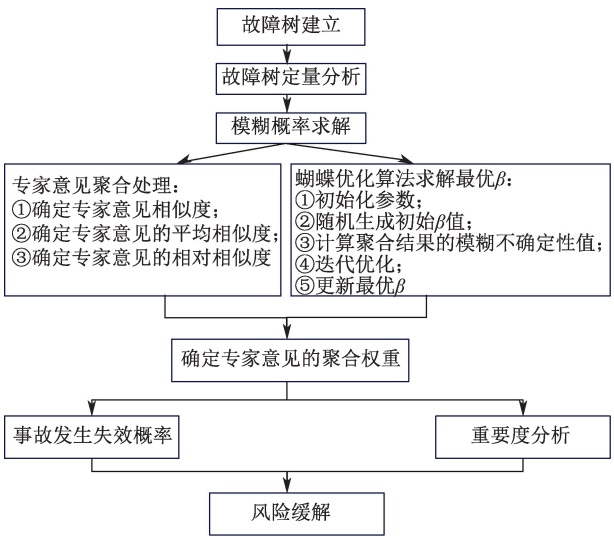


图 1 风险评估流程

Fig. 1 Risk assessment process

2.1 建立故障树模型

在分析超期压力管道系统事故和潜在危险时,考虑到故障树顶事件是“压力管道失效”,压力管道失效的原因多种多样,通过文献与现场调研建立故障树模型,故障树事件说明见表 1。故障树模型如图 2 所示。

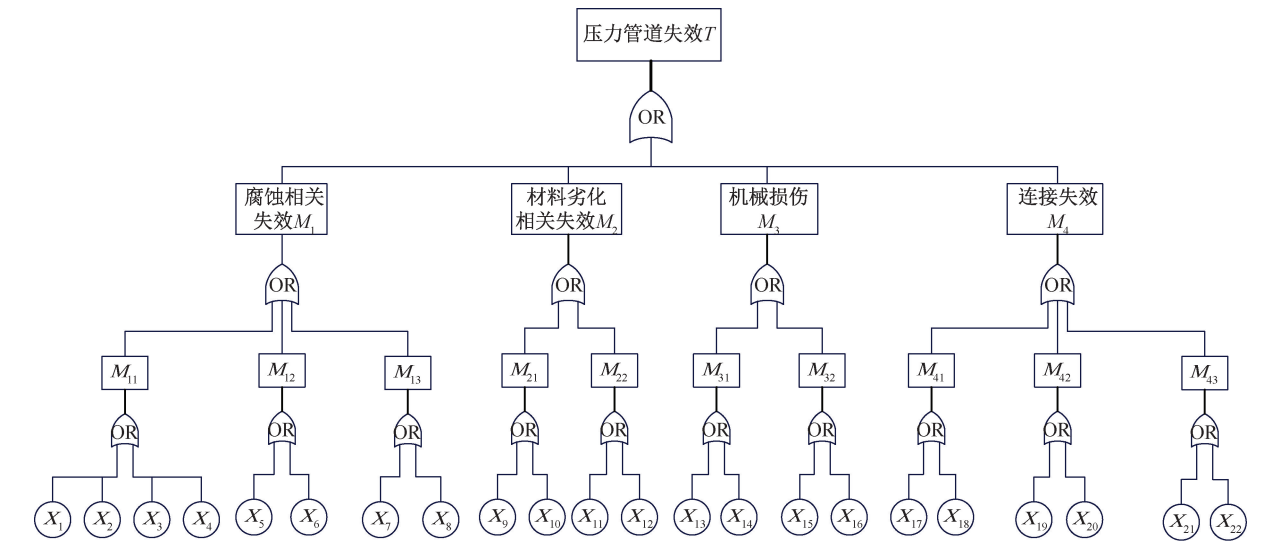


图 2 压力管道系统失效故障树

Fig. 2 Fault tree for failure of pressure pipelines system

表 1 故障树事件说明

Table 1 Description of fault tree event		
事件及编号	事件及编号	事件及编号
压力管道失效 T	螺纹失效 M_{42}	内涂层厚度减少或脱落 X_{12}
腐蚀相关失效 M_1	焊接缺陷 M_{43}	第三方破坏 X_{13}
材料劣化相关失效 M_2	输送流速偏高 X_1	外部冲击 X_{14}
机械损伤相关失效 M_3	介质中 H_2S 含量偏高 X_2	施工缺陷 X_{15}
连接失效 M_4	介质中 CO_2 含量偏高 X_3	焊缝开裂 X_{16}
内部腐蚀 M_{11}	应力腐蚀开裂 X_4	密封垫片劣化 X_{17}
外部腐蚀 M_{12}	外部化学腐蚀 X_5	螺栓预紧力不足 X_{18}
特殊腐蚀 M_{13}	杂散电流腐蚀 X_6	螺纹腐蚀泄漏 X_{19}
温度影响 M_{21}	氢脆 X_7	过度拧紧滑丝 X_{20}
涂层失效 M_{22}	腐蚀疲劳 X_8	根部未焊透 X_{21}
外部破坏 M_{31}	高温老化 X_9	热影响区裂纹 X_{22}
内部缺陷 M_{32}	低温脆性 X_{10}	
法兰泄漏 M_{41}	防腐层下积水 X_{11}	

2.2 求取底事件概率

将模糊综合评价法与 FTA 相结合,以捕捉与基本事件失效发生相关的任意不确定性,并量化其失败概率。邀请专家根据其专业知识以及工作经验来评估每个基本事件发生的可能性。在语义评价方法中,事件通常被分类为不同程度的可能性如图 3 所示。图中语言术语的数量被确定为 7 个,分别为极低 (Very Low, VL)、低 (Low, L)、较低 (Medium Low, ML)、中 (Medium, M)、较高 (Medium High, MH)、高 (High, H)、极高 (Very High, VH)。然而,仅用这些语义值并不能量化事件失效概率,故通过模糊集理论将专家提供的语义值转化为可能性值。

2.2.1 聚合专家意见

采用 SAM 聚合专家判断,并将这些语言判断转换为模糊数。

1) 计算相似度见下式:

$$S(\widetilde{R}_i, \widetilde{R}_j) = \frac{\int_x (\min \{ \mu_{\widetilde{R}_i}(x), \mu_{\widetilde{R}_j}(x) \}) dx}{\int_x (\max \{ \mu_{\widetilde{R}_i}(x), \mu_{\widetilde{R}_j}(x) \}) dx} \quad (4)$$

$$\mathbf{AM} = \begin{bmatrix} 1 & S_{12} & \cdots & S_{1j} & \cdots & S_{1n} \\ \vdots & \vdots & & \vdots & & \vdots \\ S_{i1} & S_{i2} & \cdots & S_{ij} & \cdots & S_{in} \\ \vdots & \vdots & & \vdots & & \vdots \\ S_{n1} & S_{n2} & \cdots & S_{nj} & \cdots & 1 \end{bmatrix} \quad (5)$$

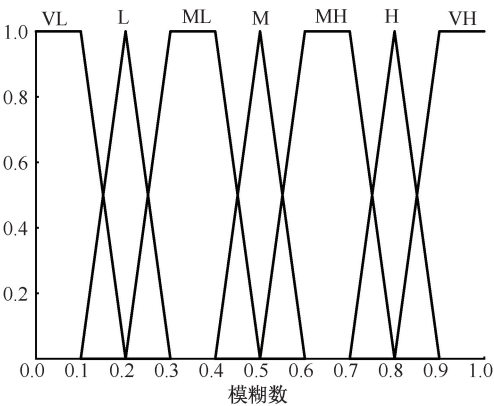


图 3 专家判断的自然语言模糊数

Fig. 3 Number of natural language fuzziness judged by experts

式中: $S(\widetilde{R}_i, \widetilde{R}_j)$ 为 2 位专家对同一事件评价的相似性度量函数; $\widetilde{R}_i$ 和 $\widetilde{R}_j$ 分别为专家 i 和专家 j 对同一事件的评级为梯形模糊数; $\mu_{\widetilde{R}_i}(x)$ 和 $\mu_{\widetilde{R}_j}(x)$ 分别为 $\widetilde{R}_i$ 和 $\widetilde{R}_j$ 的隶属函数。在测量所有的 S_{ij} 后,构建一个协议矩阵 (Agreement Matrix, AM), 表示专家之间的一致程度。

2) 专家平均一致程度计算如下:

$$B_i = \frac{1}{N-1} \sum_{i \neq j}^N S(\widetilde{R}_i, \widetilde{R}_j) \quad (6)$$

式中 N 为专家总数。

3) 专家的相对一致程度计算如下:

$$R_i = \frac{B_i}{\sum_{i=1}^N B_i} \quad (7)$$

4) 确定专家的聚合权重, 见下式:

$$W_i = \beta \phi_i + (1 - \beta) R_i \quad (8)$$

式中: $\beta \in [0, 1]$; ϕ_i 为专家的权重分配具体赋值, 情况见表 2。

表 2 专家能力指标体系

Table 2 Expert competence indicator system					
职称		学历		现场工作经验	
等级	权值	等级	权值	等级	权值
正高级	5	博士	5	≥ 25	10
副高	4	硕士	4	$15 \leq q < 25$	8
中	3	本科	3	$8 \leq q < 15$	6
初	2	大专	2	$2 \leq q < 8$	4
技术	1	中专	1	$q < 2$	2

5) 汇总专家意见见下式:

$$\widetilde{R} = \sum_{i=1}^N (W_i \cdot \widetilde{R}_i) \quad (9)$$

2.2.2 去模糊化阶段

去模糊化过程将模糊数转化为清晰的数字,以便在模糊环境中进行分析和决策。采用质心法进行去模糊化:

$$P_f(a,b,c,d) = \frac{c^2 + d^2 + cd - a^2 - b^2 - ab}{3(c + d - a - b)}$$

(10)

式中: P_f 为去模糊化后的模糊可能性值; a 、 b 、 c 、 d 分别为梯形模糊数的参数。

2.2.3 将可能性值转换为失效概率值

将每个基本事件的模糊可能性值转换为失效概率 P ,通过 Onisawa^[16]公式计算:

$$P = \begin{cases} \frac{1}{10^k}, P_f \neq 0 \\ 0, P_f = 0 \end{cases}$$

(11)

式中 k 为系数。可得:

$$k = \left[\left(\frac{1 - P_f}{P_f} \right) \right]^{\frac{1}{3}} \times 2.301$$

(12)

2.3 改进 BOA-SAM 方法的步骤

提出 BOA-SAM 法,通过优化松弛因子,提高聚合结果的准确性和鲁棒性。

具体步骤为:首先,在 Matlab 程序中输入专家的基本信息和专家评价的模糊数,松弛因子的值为任意给出 $[0, 1]$ 之间的数字;其次,利用传统 SAM 法聚合这些数据得到结果;最后,计算聚合结果的不确定性值。这项操作将在 BOA 程序中迭代成百上千次,逐一得到与不确定性值对应的松弛因子,最后得到对应最小不确定性值的松弛因子,进而计算故障树底事件的失效概率。

2.4 顶事件概率计算

故障树定量分析的目的在于计算顶事件的概率,根据其发生概率大小,对系统发生事故作出安全性评价。在图 2 中,每个基本事件通过逻辑“或”门与中间事件

连接,并且相互独立。逻辑“或”门的计算如下:

$$P(T) = 1 - \prod_{i=1}^n [1 - P(X_i)]$$

(13)

式中: n 为基本事件总个数; $P(X_i)$ 为第 i 个基本事件的失效概率; $P(T)$ 为顶事件的概率。

2.5 基本事件重要度分析

顶事件概率是了解系统整体状况的有用指标。然而,为更深入了解系统的失效模式,需要进行重要度分析,以评估基本事件发生概率的变化率对顶事件发生概率的影响程度。采用概率重要度来分析每个基本事件对顶事件产生的影响,计算公式如下:

当逻辑门为“或”门时,公式为:

$$I_j = \frac{\partial P(T)}{\partial P(X_j)} = \prod_{j=1, i \neq j}^n [1 - P(X_j)]$$

(14)

3 案例分析

以西北某油田作业区为例,该区域现有压力管道长为 42.5 km。经统计,超期服役管道占比约为 28.3%。该作业区管道长期处于高温、高压环境,老化问题突出,风险评估需求迫切。

3.1 收集专家的语言判断

由 7 名专家组成专家组,专家概况及相对权重得分和专家对每个基本事件的评价见表 3 和表 4。

表 3 专家简介及其权重得分

Table 3 Expert brief introduction and weight scores					
专家	专家 职位	现场工 作经验	教育 水平	总权 值	权重
1	工程师	4	硕士	11	0.113
2	高级工程师	20	博士	18	0.185
3	高级工程师	14	硕士	15	0.155
4	高级工程师	9	硕士	14	0.144
5	高级工程师	13	硕士	15	0.155
6	教授	1	博士	12	0.124
7	教授	1	博士	12	0.124

表 4 专家对各个基本事件的判断
Table 4 Expert judgments on all basic events

专家	1	2	3	4	5	6	7	专家	1	2	3	4	5	6	7
X_1	L	H	H	L	L	ML	ML	X_{12}	VL	M	M	VL	M	L	VL
X_2	VH	H	VH	H	M	H	VH	X_{13}	MH	ML	MH	MH	H	MH	H
X_3	L	L	ML	ML	L	M	ML	X_{14}	ML	ML	MH	MH	L	MH	H
X_4	M	MH	H	MH	MH	MH	H	X_{15}	M	ML	M	M	ML	ML	ML
X_5	ML	ML	H	H	M	MH	MH	X_{16}	MH	M	MH	M	MH	H	VH
X_6	MH	L	MH	MH	H	ML	ML	X_{17}	M	ML	M	ML	ML	ML	ML
X_7	ML	H	L	H	L	ML	M	X_{18}	ML	ML	M	ML	ML	ML	ML
X_8	VL	H	VL	H	VL	MH	MH	X_{19}	L	ML	ML	ML	L	ML	ML
X_9	ML	L	ML	L	L	ML	ML	X_{20}	L	ML	M	ML	L	ML	ML
X_{10}	VL	L	VL	VL	L	ML	ML	X_{21}	ML	ML	MH	ML	L	MH	H
X_{11}	VL	VL	VL	VL	L	VL	M	X_{22}	ML	ML	VL	VL	VL	ML	ML

3.2 BOA-SAM 的运用

传统 SAM 中松弛因子往往由决策者主观决定,通过文献调研发现其值往往取 0.5。采用改进的 BOA-SAM 求取最优松弛因子,通过 Matlab 程序求取,但是由于 BOA 的搜索过程具有一定随机性,导致每次得到的最优值不同,因此,运行 500 次 BOA 算法,取平均值作为最优值,求得最优松弛因子为 0.97。

BOA-SAM 与 SAM 不确定性值的区别如图 4 所示,从图 4 可以看出,与传统 SAM 相比,改进 BOA-SAM 所得到的聚合结果具有更低的不确定性值,其中,底事件 X_6 的不确定性值降低 7.6%,最为明显。

3.3 求解基本事件失效概率

取经过 BOA-SAM 算法算出的最优松弛因子为 0.97,利用式(8)—式(12)汇总专家意见,将聚合后的专家评价模糊数进行去模糊化,求解得到传统

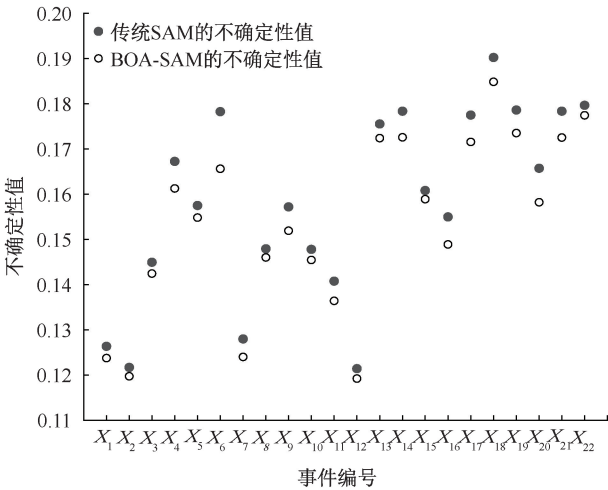


图 4 BOA-SAM 与 SAM 不确定性值的区别

Fig. 4 Difference between uncertainty values of BOA-SAM and SAM

SAM 与改进 BOA-SAM 的不确定性值以及故障树底事件失效概率,结果见表 5。

表 5 SAM 和 BOA-SAM 聚合结果的不确定性值以及基本事件失效概率

Table 5 Basic event failure probability and uncertainty values of SAM and BOA-SAM aggregation results

编号	SAM 的不 确定性值	BOA-SAM 的不 确定性值	失效概率	编号	SAM 的不 确定性值	BOA-SAM 的不 确定性值	失效概率
X_1	0.124 934	0.124 756	0.003 142	X_{12}	0.121 400	0.119 235	0.000 908
X_2	0.121 699	0.119 735	0.036 210	X_{13}	0.175 556	0.172 402	0.012 423
X_3	0.144 954	0.142 456	0.000 885	X_{14}	0.178 368	0.172 599	0.005 431
X_4	0.167 275	0.161 276	0.015 686	X_{15}	0.160 820	0.158 907	0.002 556
X_5	0.157 508	0.154 840	0.008 741	X_{16}	0.154 994	0.148 911	0.013 526
X_6	0.178 275	0.165 630	0.005 659	X_{17}	0.177 496	0.171 582	0.002 121
X_7	0.127 985	0.124 010	0.003 998	X_{18}	0.190 239	0.184 878	0.001 827
X_8	0.147 938	0.146 021	0.003 588	X_{19}	0.178 633	0.173 522	0.000 997
X_9	0.157 211	0.151 943	0.000 688	X_{20}	0.165 729	0.158 212	0.001 255
X_{10}	0.147 806	0.145 462	0.000 174	X_{21}	0.178 368	0.172 537	0.003 865
X_{11}	0.140 769	0.136 410	0.000 073	X_{22}	0.179 66	0.177 46	0.000 352

3.4 求解顶事件概率及重要度分析

根据式(13)和表 5 得到的各个基本事件的失效概率,再通过故障树的运算逻辑法则,得到顶事件的失效概率,计算得到 $P(T) = 0.117\ 641$ 。根据式(14)得到各个基本事件的概率重要度,分布如图 5 所示。文中提出的 BOA-SAM-FTA 方法通过 BOA 动态优化松弛因子(最优值为 0.97),能够显著降低专家意见聚合过程的不确定性值。表明专家意见的离散程度系统性降低。不确定性值的压缩直接反映了聚合过程更可靠,模糊数隶属函数的收敛性增强,使去模糊化后的失效概率更贴近真实数据分布。

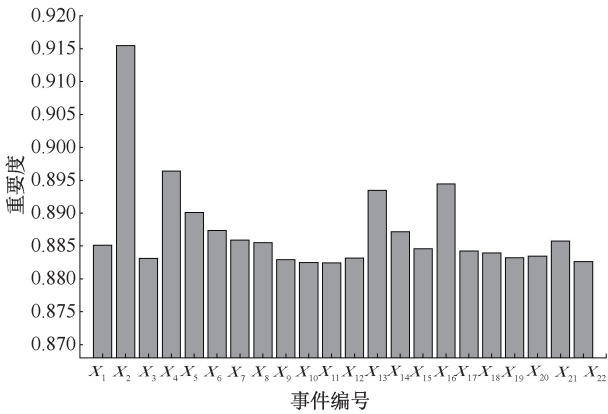


图 5 底事件重要度排名

Fig. 5 Importance ranking of basic events

4 结 论

1) 提出基于 BOA-SAM-FTA 的风险评估模型,针对传统 SAM 方法中松弛因子 β 取值主观性强导致聚合结果不确定性高的问题,构建了以最小化不确定性值为目标函数的 BOA 优化模型。在西北某油田超期服役压力管道的案例应用中,算法自动寻优得到最优松弛因子 $\beta = 0.97$ 。对比分析表明,改进后的 BOA-SAM 方法在所有底事件上的聚合不确定性值均显著低于传统 SAM 方法(默认 $\beta=0.5$),其中离散度最大的底事件 X6(杂散电流腐蚀)的不确定性值降低了 7.6%。这证明该方法能有效压缩专家意见的模糊区间,显著提升专家经验向失效概率转化过程的客观性与精确度。

2) 量化了超期服役压力管道的失效风险并识别了关键致因路径。基于改进模型计算得出,该研究区域超期服役压力管道系统的顶事件失效概率为 0.117 641,处于较高风险水平。概率重要度分析结果显示,应力腐蚀开裂、第三方破坏、焊缝开裂和介质中 H_2S 含量偏高等是导致压力管道失效的关键因素。表明在高温高压及含硫环境下,材料劣化与外部机械损伤的耦合作用是导致超期管道失效的核心机制。

3) 由于 BOA-SAM-FTA 分析方法的结果也受到隶属函数的影响。因此,在使用此方法时,必须选择合适的隶属函数。为了摆脱这种束缚,未来的研究应该侧重于消除分析结果随隶属函数变化所带来的影响。

参 考 文 献

- [1] 刘可,臧明旭,吴树林,等. 风险评估为基管控措施为翼:长输油气管道安全管理探析[J]. 中国石油和化工, 2025(4): 57-59.
- [2] 任乐峰,孟祥坤,陈国明. 滩海油气管道泄漏风险演化与评估[J]. 中国安全科学学报, 2021, 31(1): 159-164.
Ren Lefeng, Meng Xiangkun, Chen Guoming. Risk evolution and evaluation for oil and gas leakage of pipeline in shallow sea[J]. China Safety Science Journal, 2021, 31(1): 159-164.
- [3] 卢石磊,汤东川,邢国庆,等. 油气管道风险评价及管控[J]. 化工管理, 2025(4): 81-84.
Lu Shilei, Tang Dongchuan, Xing Guoqing, et al. Risk assessment and control of oil and gas pipelines[J]. Chemical Engineering Management, 2025(4): 81-84.
- [4] 赵雪. 基于故障树分析法海底油气管道溢油事故风险分析[J]. 化工管理, 2025(2): 88-91.
Zhao Xue. Risk analysis of oil spill accidents in submarine oil and gas pipelines based on fault tree analysis method[J]. Chemical Engineering Management, 2025(2): 88-91.
- [5] 顾文婷,李超,毕中毅. 基于事故树分析法的长输管道泄漏因素分析[J]. 石油工业技术监督, 2010, 26(4): 19-24.
Gu Wenting, Li Chcm, Bi Zhongyi. Analyses on the leakage factors of long-distance pipelines based on the fault-tree analysis method[J]. Technology Supervision in Petroleum Industry, 2010, 26(4): 19-24.
- [6] 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.
Wang Dongying, Chen Xiaoping, Liu Quan, et al. Risk ranking of oil and gas pipelines based on improved cloud model-FMEA[J]. China Safety Science Journal, 2024, 34(5): 61-68.
- [7] 王大庆,张鹏. 油气输送管线失效后果模糊事件树分析[J]. 安全与环境学报, 2014, 14(3): 88-92.
Wang Daqing, Zhang Peng. Analysis of failure consequences of oil and gas transmission pipelines by using a fuzzy event tree[J]. Journal of Safety and Environment, 2014, 14(3): 88-92.
- [8] 陈丽娜,齐光峰,韩庆,等. 基于 T-S 模糊故障树和贝叶斯网络的注水管道失效概率计算方法研究[J]. 安全、健康和环境, 2022, 22(9): 38-45.
Chen Li'na, Qi Guangfeng, Han Qing, et al. Research on failure probability calculation method of water injection pipelines based on T-S fuzzy fault tree and Bayesian network[J]. Safety, Health & Environment, 2022, 22(9): 38-45.
- [9] Diao Xu, Jiang Juncheng, Ahmed M, et al. Risk analysis of domino effect of leakage accident of petrochemical pipeline based on analytic hierarchy process and fuzzy fault tree analysis[J]. Safety Science, 2025, 187: DOI:10.1016/j.ssci.2025.106852.

[10] Nazila A, Mehrdad N, Atefeh A, et al. Assessing the reliability of natural gas pipeline system in the presence of corrosion using fuzzy fault tree[J]. Ocean Engineering, 2024, 311:DOI:10. 1016/j. oceaneng. 2024. 118943.

[11] Qin Guojin, Li Ruiling, Yang Ming, et al. Failure probability estimation of natural gas pipelines due to hydrogen embrittlement using an improved fuzzy fault tree approach[J]. Journal of Cleaner Production, 2024, 448:DOI:10. 1016/j. jclepro. 2024. 141601.

[12] 张冰鉴,苏秦,刘海龙. 基于 FTA-BN 的云 ERP 不安全事件的人因失误分析[J]. 中国安全科学学报,2023,33(2): 38-47.
Zhang Bingjian, Su Qin, Liu Hailong. Human error analysis for unsafe events of cloud ERP based on FTA-BN[J]. China Safety Science Journal,2023,33(2):38-47.

[13] 重庆邮电大学. 基于改进蝴蝶优化算法的移动机器人路径规划方法: CN, 202211622467. 0[P]. 2023-04-07.

[14] 魏博,汤荣杰,郑英豪,等. 基于改进蝴蝶优化算法的移动机器人路径规划[J]. 北京工业大学学报,2025,51(3): 295-307.
Wei Bo, Tang Rongjie, Zheng Yinghao, et al. Improved butterfly optimization algorithm for mobile robot path planning[J]. Journal of Beijing University of Technology,2025,51(3):295-307.

[15] Lu Mingming, Jin Yajing, Lin Jieqiong, et al. Fuzzy fault tree analysis of EVAC system based on improved SAM-FFTA with butterfly optimization algorithm [J]. Engineering Failure Analysis, 2023, 154: DOI: 10. 1016/j. engfailanal. 2023. 107658.

[16] Takehisa O. Subjective analysis of system reliability and its analyzer[J]. Fuzzy Sets and Systems, 1996, 83(2): 249-269.

作者简介： 唐华彬 （2001—）,男,四川内江人,硕士研究生,研究方向为承压设备风险评估。E-mail:thb1527566913@163.com。

