

中文引用格式:穆晶晶,刘庆龙,王金山,等. CCUS 油田地上注入系统高风险场景发生概率评估方法[J]. 中国安全科学学报, 2025, 35(10):131-139.

英文引用格式:MU Jingjing, LIU Qinglong, WANG Jinshan, et al. A method for assessing probability of high-risk scenarios of CCUS aboveground injection system in oilfields[J]. China Safety Science Journal, 2025, 35(10):131-139.

CCUS 油田地上注入系统高风险场景 发生概率评估方法^{*}

穆晶晶^{1,2}, 刘庆龙², 王金山³, 段潍超², 刘仁涛², 赵东风^{**4}教授

(1 中国石油大学(华东)机电工程学院, 山东 青岛 266580;

2 青岛欧赛斯环境与安全技术有限公司, 山东 青岛 266520;

3 万华化学集团股份有限公司, 山东 烟台 264000;

4 中国石油大学(华东)化学工程学院, 山东 青岛 266580)

中图分类号:X937

文献标志码:A

DOI: 10.16265/j.cnki.issn1003-3033.2025.10.1068

【摘要】为实现CO₂捕集、利用和封存(CCUS)油田CO₂注入过程的动态风险管控,预防CO₂泄漏事故的发生,提出一种高风险场景发生概率动态评估方法。融合基于灰色模型(GM)-支持向量机(SVM)的三参数威布尔设备失效概率数值模型与模糊Petri网(FPN)模型,提出改进后的FPN新模型;再针对CCUS地上CO₂注入系统进行风险分析,创建CO₂泄漏事故链条,定量预测事故发生概率,改进后的FPN新方法考虑设备失效概率随时间 t 变化这一动态特性及保护层对风险的影响。结果表明:当 $t = 500$ h时,风险呈指数增长;安全阀这一保护层的重要度最高;当 $t = 303$ 天时,系统残余风险达到中石油风险可接受标准 1×10^{-5} ,即在该时间点之后,系统风险变为不可接受;增加液位高高连锁保护层可将系统风险不可接受的时间延长至5 832天,大大减少维修周期和成本。

【关键词】 CO₂捕集、利用和封存(CCUS); 地上注入系统; 高风险场景; 发生概率; 动态量化评估; 模糊Petri网(FPN)

A method for assessing probability of high-risk scenarios of CCUS aboveground injection system in oilfields

MU Jingjing^{1,2}, LIU Qinglong², WANG Jinshan³, DUAN Weichao², LIU Rentao²,
ZHAO Dongfeng⁴

(1 College of Mechanical and Electronic Engineering, China University of Petroleum (East China),

Qingdao Shandong 266580, China; 2 Qingdao OASIS Environmental & Safety Technology

Co., Ltd., Qingdao Shandong 266520, China; 3 Wanhua Chemical Group Co., Ltd.,

Yantai Shandong 264000, China; 4 College of Chemistry and Chemical Engineering, China

University of Petroleum (East China), Qingdao Shandong 266580, China)

^{*} 文章编号:1003-3033(2025)10-0131-09; 收稿日期:2025-06-12; 修稿日期:2025-08-17

^{**} 通信作者:赵东风(1968—),男,山东淄博人,博士,教授,主要从事化工过程安全、安全评价新技术、安全工程信息化技术等方面的研究。
E-mail: zhaodf@vip.sina.com。

Abstract: To achieve dynamic risk management and control during the CO₂ injection process in CCUS oilfields and prevent CO₂ leakage accidents, a dynamic assessment method for the probability of high-risk scenarios was proposed. Firstly, a novel improved FPN model was developed by integrating a three-parameter Weibull distribution model for equipment failure probability based on Grey Model (GM) and Support Vector Machine (SVM) with FPN model. Subsequently, the risk analysis was conducted on the above ground CO₂ injection system of CCUS process. The CO₂ leakage accident chain was established to quantitatively predict the accident occurrence probability. The dynamic characteristic of equipment failure probability changing with time (t) and the impact of protection layers on risk were taken into account by the improved FPN. The results indicate that when $t=500$ h, the risk exhibits an exponential increase. The safety valve is identified as the protection layer with the highest importance. When $t=303$ days, the system's residual risk reaches the PetroChina risk acceptance criterion of 1×10^{-5} , indicating that the system risk becomes unacceptable beyond this point. It is recommended to add a high-high level interlock protection layer, which extends the time until system risk becomes unacceptable to 5 832 days, thereby significantly reducing maintenance frequency and costs.

Keywords: carbon capture utilization and storage (CCUS); above ground injection system; high-risk scenarios; probability of occurrence; dynamic quantitative evaluation; fuzzy petri net (FPN)

0 引言

将 CO₂ 驱油与 CO₂ 捕集、利用和封存 (Carbon Capture Utilization and Storage, CCUS) 结合, 不仅能实现 CO₂ 的资源化利用^[1], 还能提高社会、经济效益^[2-3]。油田 CO₂ 地上注入系统注采压力高、注气周期长、注入总量大, 安全生产管控难度大; 且国外对 CO₂ 提高采收率项目的监管已制定出相应导则和技术指南, 而我国 CO₂ 驱油安全风险监管体系相对空白, 目前仍未出台相关法律。因此, 针对该系统开展 CO₂ 泄漏风险评估的相关研究具有重要意义。

目前, CO₂ 注入系统是 CCUS 工程的重要一环, 学者针对其存在的泄漏风险已作出大量研究, 但大都围绕地下井筒部分展开分析。如甘满光等^[4]自主研发了数值模拟 WellRisk 软件, 实现了 CO₂ 沿井筒泄漏风险的定量化评估; 郑长远等^[5]结合实测数据, 采用数值模拟方法分析了西宁盆地 CO₂ 井筒泄漏点喷发过程的动力学机制及伴随的化学变化特征; CAI Yuna 等^[6]建立了瞬态井筒-储层全耦合模型, 研究 CO₂ 注入与井筒泄漏之间的相互作用, 提出泄漏质量与注入质量之比这一无量纲参数, 并建立了该比值随时间变化的经验关系。地上注入系统 (包含井筒与地面的连接部分) 最大工作压力为 28 MPa, 温度范围为 -45~50 ℃, 存在高风险场景, 风险同样不可小觑; 且地面为人员活动区域, 相比于地下井筒区域, 地上部分的泄漏扩散更快, 对人产生伤害

的概率更大。此外, 模糊 Petri 网 (Fuzzy Petri Net, FPN) 作为一种图形化分析系统事故演化的工具, 其在风险判别方面具有显著优势。但传统 FPN 中各库所可信度为恒定值, 最终解得风险值也为一个恒定值, 属于静态风险评估, 无法体现设备失效的动态特性及保护层对风险的影响, 难以捕捉 CO₂ 泄漏及事故的动态发展, 其分析结果与生产实际具有偏差, 给 CCUS 过程安全管理带来一定局限性。

鉴于此, 笔者拟结合灰色模型 (Grey Model, GM) 和支持向量机 (Support Vector Machine, SVM), 构建三参数威布尔设备失效概率数值模型与 FPN 模型, 提出改进后的 FPN 模型, 分析 CCUS 地上 CO₂ 注入系统风险, 创建 CO₂ 泄漏事故链条, 考虑设备失效概率随失效时间 t 变化这一动态特性及保护层对风险的影响, 定量预测 CO₂ 泄漏事故发生概率, 以期建立预警机制, 保障系统安全运行。

1 动态量化评估模型建立

1.1 FPN 概念

典型的 Petri 网结构主要分为库所、托肯、变迁和有向弧^[7]。FPN 是在 Petri 网基础上加入了模糊集理论, 不仅充分考虑了专家知识的不确定性, 还保留了 Petri 网的数学特征和图形描述功能。此外, 在传统 FPN 中引入保护层库所, 进一步增强了对 FPN 路径动态分析的完善性。改进的 FPN 可表示为一个九元集合组: $\{P, L, Q, F, IN, OUT, W, V, D\}$ 。

其中, $P = \{p_1, p_2, \dots, p_m\}$ 为故障库所集; $F = \{f_1, f_2, \dots, f_i\}$ 为命题集, 与 p_i 相互对应; $Q = \{q_1, q_2, \dots, q_n\}$ 为变迁集, 即风险的发生过程; $L = \{l_1, l_2, \dots, l_m\}$ 为保护层库所集; W 指有向弧的权函数, 包括输入权值和输出权值, 分别表示库所 P 对变迁 Q 成立的支持度和变迁 Q 对库所 P 成立的支持度; $V = \{\mu_1, \mu_2, \dots, \mu_m\}$ 表示故障库所 P 和保护层库所 L 的可信度集合; $D = \{d_1, d_2, \dots, d_m\}$ 表示变迁发生的阈值集合, 即变迁 Q 发生需满足 $w_i \times \mu_i \geq d_i$ 。IN 表示 $P \rightarrow Q$, 输入库所 P 到变迁 Q 连接情况; OUT 表示 $Q \rightarrow P$, Q 到输出库所 P 连接情况。

1.2 FPN 动态量化评估模型建立

1.2.1 设备失效概率数值模型

在 CCUS 实际工程中, 某一设备或某个保护装置失效的可能性并非一个定值^[8], 而是随着时间的推移逐步变化的。为使设备故障概率更符合实际, 利用威布尔三参数分布函数^[9-10]计算设备的动态失效概率, 该方法能有效拟合设备在实际运行中的可靠性样本数据^[11-12]。定义设备失效率函数为:

$$\lambda(t) = \frac{\alpha}{\beta} \left(\frac{t - \gamma}{\beta} \right)^{\alpha-1} \quad (1)$$

式中: λ 为设备失效率; t 为失效时间; h ; α 为形状参数, 表示瞬时失效率随时间的变化率; β 为尺度参数; γ 为位置参数。

目前 CCUS 工程中 CO_2 注入系统投产时间较短, 可供研究数据不够充分, 只能在小样本情形下进行估计。GM 在处理小样本数据时, 可提供快速且可靠的分析结果。SVM 在小样本处理、非线性分析以及高维特征识别等领域展现出显著优势, 该算法在设备故障诊断方面获得了广泛验证。因此, 采用 GM-SVM 方法进行威布尔分布的参数估计^[13]。

已有研究证明, 利用 GM 理论求解参数估计问题, 一次性得到 3 个参数估计值时, 只有位置参数 γ 的精度较高, 参数 β 和 α 效果一般。因此, 需要再运用 SVM 优良的回归拟合能力获得尺度参数 β 和形状参数 α 。具体步骤如下:

1) 经验分布函数计算。三参数威布尔分布的累计分布函数 $F(t)$ 为:

$$F(t) = 1 - \exp - \left(\frac{t - \gamma}{\beta} \right)^\alpha \quad (2)$$

为减小误差, 提高参数估计的准确性, 采用近似中位秩公式计算样本的经验分布函数。

$$F(t_i) = \frac{i - 0.3}{n + 0.4} \quad (3)$$

式中: i 为失效数据样本序号, 称为秩, $i = 1, 2, \dots, n$; n 为样本数量; t_i 为第 i 个数据样本的失效时间。

2) 位置参数估计。根据设备故障数据建立 GM (1,1), 方程如下:

$$\frac{d\hat{x}(k)}{dt} + a\hat{x}(k) = b \quad (4)$$

$$\hat{x}(k) = c \exp(-ak) + \frac{b}{a} \quad (5)$$

式中: $\hat{x}(k)$ 为第 k 个数据点的预测值; a 为发展系数, 控制系统发展的态势; b 为灰色作用量, 反映数据变化的关系; c 为普通系数。

式(2)变形可得:

$$t = \beta \exp \left[\frac{1}{\alpha} \ln \ln \left(\frac{1}{1 - F(t)} \right) \right] + \gamma \quad (6)$$

式(6)可变形为:

$$t = c \exp(-ax) + \frac{b}{a} \quad (7)$$

式(5)和式(7)有着相同的形式, 因此, 利用 GM 估计参数 a 、 b 、 c , 再采用最小二乘法得到参数 α 、 β 、 γ 的估计值, 具体过程如下:

$$B = \begin{bmatrix} -\frac{1}{2}(t_1 + t_2) & 1 \\ -\frac{1}{2}(t_2 + t_3) & 1 \\ \vdots & \vdots \\ -\frac{1}{2}(t_{n-1} + t_n) & 1 \end{bmatrix} \quad Y = \begin{bmatrix} \frac{t_2 - t_1}{x_2 - x_1} \\ \frac{t_3 - t_2}{x_3 - x_2} \\ \vdots \\ \frac{t_n - t_{n-1}}{x_n - x_{n-1}} \end{bmatrix}$$

$$[a \quad b] = (B^T B)^{-1} B^T Y \quad (8)$$

$$M = \begin{bmatrix} 1 & \exp(-ax_1) \\ 1 & \exp(-ax_2) \\ \vdots & \vdots \\ 1 & \exp(-ax_n) \end{bmatrix} \quad N = \begin{bmatrix} t_1 \\ t_2 \\ \vdots \\ t_n \end{bmatrix}$$

$$[c \quad d] = (M^T M)^{-1} (M^T N) \quad (9)$$

由式(4)一式(9)可求出 GM 的参数 a 、 b 、 c , 继而推出威布尔 3 个参数估计值: $\alpha = 1/a$, $\beta = c$, $\gamma = b/a$ 。

3) 形状参数和尺度参数估计。支持向量机回归(Support Vector Regression, SVR)是从 SVM 中衍生的一种专用于回归预测的算法。运用 SVR 算法获得形状参数 α 和尺度参数 β , 步骤如下:

步骤 1: 位置参数 γ 已由灰色估计法计算得出, 三参数威布尔分布转化为 2 参数威布尔分布, 令

$T=t-\gamma$, 则式(2)可变形为:

$$F(T) = 1 - \exp - \left(\frac{T}{\beta} \right)^\alpha \quad (10)$$

式(10)为2参数威布尔分布, 将其进行线性恒等变换:

$$\ln \ln \frac{1}{1 - F(T)} = \alpha \ln T - \alpha \ln \beta \quad (11)$$

令

$$\begin{cases} x = \ln T \\ y = \ln \ln \frac{1}{1 - F(T)} \\ g = -\alpha \ln \beta \\ \omega = \alpha \end{cases} \quad (12)$$

式中: ω 为法向量; g 为位移项。则式(11)可简化为:

$$y = \omega x + g \quad (13)$$

步骤2: 比较威布尔分布参数估计问题和 SVR 算法, 只要把 x, y 看作 SVM 的训练样本 (x, y) , 2 个问题就是等价的。因此, 估计参数 β 和 α 可转化为估计参数 ω 和 g 。对于线性样本集, 采用线性核函数 $K(x_i, x_j)$, 通过 Matlab 编程 SVR 算法, 线性拟合失效数据, 得到直线斜率即为尺度参数 β , 由直线的斜率和截距可确定形状参数 α , 结果表示为:

$$\hat{\omega} = \sum_{i=1}^N (\hat{a}_i^* - \hat{a}_i) x_i \quad (14)$$

$$\hat{g} = y_j - \sum_{i=1}^N (\hat{a}_i^* - \hat{a}_i) x_i x_j \quad (15)$$

$$\begin{cases} \hat{\beta} = \exp \left(\frac{-\hat{g}}{\hat{\alpha}} \right) \\ \hat{\alpha} = \hat{\omega} \end{cases} \quad (16)$$

4) 误差分析。为检验参数估计的精确度, 采用决定系数 R^2 和归一化均方根误差 (Normalized Root Mean Square Error, NRMSE) 分析失效样本的估计值与实际值的误差^[14]。 R^2 的理想值为 1, 代表预测值完全等于实测值。NRMSE 考虑了数据的尺度, 用来衡量预测值与真实值之间的差异, 其范围值通常在 0~1, 越接近 0 表示模型的预测结果与真实值越接近, 预测精度越高。 R^2 和 NRMSE 的计算如下:

$$\text{NRMSE} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n [\tilde{F}(t_i) - \hat{F}(t_i)]^2}{\sum_{i=1}^n \tilde{F}(t_i)}} \quad (17)$$

$$R^2 = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n [\tilde{F}(t_i) - \hat{F}(t_i)]^2}{\sum_{i=1}^n [\tilde{F}(t_i) - F(t_i)]^2} \quad (18)$$

式中: $\tilde{F}(t_i)$ 为样本失效概率实际值; $\hat{F}(t_i)$ 为样本失效概率估计值; $F(t)$ 为失效概率的真实值均值。

1.2.2 基于 FPN 的动态风险评估模型

首先, 融合工艺管道和仪表流程图 (Piping and Instrument Diagram, PID)、工艺流程图 (Process Flow Diagram, PFD)、系统隔离设施和现场操作规程等多源异构数据, 针对 CO₂ 地上注入系统划分泄漏单元; 然后, 从物质风险、工艺风险、操作风险 3 个维度出发, 基于危险与可操作性研究 (Hazard and Operability Study, HAZOP) + 保护层分析 (Layer of Protection Analysis, LOPA) 方法确定该系统高风险场景, 从而确立初始事件; 最后, 将关于时间的设备失效概率数值模型作为初始库所的动态可信度, 代入到 FPN 计算中, 结合触发事件及各保护层, 建立动态风险量化评估模型, 如图 1 所示。

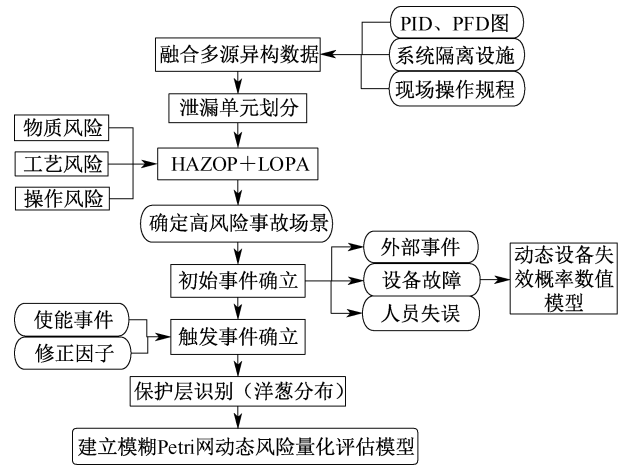


图1 FPN 动态风险量化评估模型建立步骤

Fig. 1 Steps of establishing FPN dynamic risk quantitative evaluation model

2 风险动态量化评估方法的案例应用

2.1 FPN 模型实例

选取某油田 CO₂ 注入单元中, 因基本过程控制系统 (Basic Process Control System, BPCS) 回路失效导致 CO₂ 储罐泄漏这一高风险事故场景, 建立 FPN 模型。初始事件为: 腐蚀引起 BPCS 控制阀故障, 导致液位控制系统故障; 保护层包括液位控制系统、液位高报警及人员响应、紧急切断阀和安全阀。按

图 1 步骤构建改进后的 FPN 评估模型,共包含 14 个库所,其中,有 4 个保护层库所,如图 2 所示。

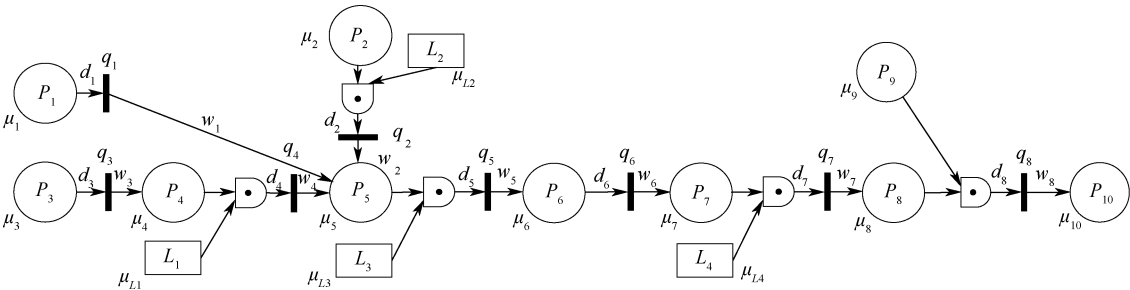


图 2 CO₂ 储罐超压泄漏场景 FPN 模型

Fig. 2 FPN model of CO₂ storage tank overpressure leakage scenario

模型中各库所含义见表 1。

表 1 库所和变迁的含义

Table 1 Meaning of repositories and transitions			
库所	含义	库所	含义
P_1	腐蚀引起控制阀故障, BPCS 回路失效	q_2	物料反窜, 引起 CO ₂ 储罐液位高
P_2	泵故障停	q_3	引起进料量增多
P_3	人员误开大阀	q_4	引起 CO ₂ 储罐液位高
P_4	进料量增多	q_5	引起 CO ₂ 储罐液位高高
P_5	CO ₂ 储罐液位高	q_6	引起 CO ₂ 储罐压力升高
P_6	CO ₂ 储罐液位高高	q_7	引起 CO ₂ 储罐泄漏
P_7	CO ₂ 储罐压力升高	q_8	引起人员窒息伤亡
P_8	CO ₂ 储罐泄漏	L_1	液位控制系统液位控制系统故障
P_9	人员暴露	L_2	紧急切断阀失效
P_{10}	人员窒息伤亡	L_3	液位高报警及人员响应失效
q_1	引起 CO ₂ 储罐液位高	L_4	安全阀失效

2.2 初始事件动态失效概率

在 CO₂ 注入系统当前的温度压力条件下, 阀门易发生腐蚀泄漏, 因此, 控制阀是装置平稳运行的关键。收集某油田 CO₂ 注入系统 BPCS 回路控制阀的部分故障数据, 见表 2。

表 2 BPCS 回路控制阀失效数据

Table 2 Failure data of BPCS loop control valve			
序号	失效时间 t/h	序号	失效时间 t/h
1	778	11	1 333
2	837	12	1 389
3	860	13	1 424
4	912	14	1 525
5	960	15	1 531
6	1 017	16	1 695
7	1 042	17	1 762
8	1 068	18	1 800
9	1 147	19	1 871
10	1 267	20	2 019

先假设数据符合三参数威布尔分布, 求出该组数据的中位秩得到初始样本集 $A_1 = \{(t_1, F(t_1)), (t_2, F(t_2)), \dots, (t_n, F(t_n))\}$ 对三参数威布尔分布的累积分布函数做线性化处理, 求出样本集 $A_2 = \{(x_1, y_1), (x_2, y_2), \dots, (x_n, y_n)\}$ 。其中, $y = \ln \ln \frac{1}{1 - F(T)}, x = \ln T, m = -\alpha \ln \beta$ 。若样本集 A_1 服从三参数威布尔分布, 则样本集 A_2 应呈一条直线^[15], 将 A_2 样本集以及代入参数估计结果后, 绘制数据拟合图, 如图 3 所示。

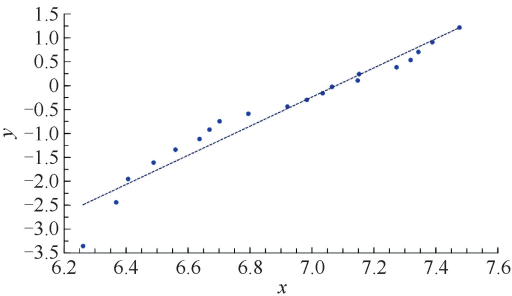


图 3 样本数据点的直线拟合

Fig. 3 Linear fitting of sample data

由图 3 可知: A_2 样本集中各点基本在一条直线上, 拟合效果很好, 因此, 可确定控制阀失效数据符合威布尔分布。

2 种方法的分析结果见表 3。

表 3 2 种估计方法结果对比

Table 3 Comparison of results of two estimation methods					
估计方法	α	β	γ	R^2	NRMSE
GM	2. 912	1 176. 499	253. 966	0. 980	0. 070
GM-SVM	2. 540	1 184. 731	253. 966	0. 985	0. 061

由表 3 可知: 拟合优度 $R^2 > 0.9$, 拟合精度较高。GM 和 GM-SVM 这 2 种方法对尺度参数 β 和形状参数 α 的估计值差别不大。GM-SVM 方法的 NRMSE 值更接近于 0, R^2 更接近于 1, 说明 GM-SVM 的参数

估计精度高于 GM 法。选取 GM-SVM 方法估计威布尔分布 3 个参数,最终设备失效率函数为:

$$\lambda(t)=0.002\left(\frac{t-253.9663}{1184.7313}\right)^{1.5404} \quad (19)$$

将式(19)代入到 FPN 计算中,初始事件概率由一个值变为数学关系式。通过监控企业设备失效数据,代入设备运行时间,可求得设备当前及未来的失效概率取值,实现风险动态更新及预警。

2.3 事故场景发生概率

按照系统风险不可接受的时间越久越好的原则(变迁 q 取值变化对风险不可接受时间无影响时取原值),由敏感性分析结果可得, $q_1 \sim q_8$ 最终权值为 0.90、0.95、0.95、0.92、0.93、0.93、0.95、0.95; 阈值表示变迁 q 发生需满足的条件,仅用来验证变迁是否发生,不参与 FPN 模型事故概率计算,参考海上平台可靠性数据库(Offshore Reliability Data, OREDA)^[16] 确定各变迁阈值。 $q_1 \sim q_8$ 最终阈值取 0.003、0.002、0.002、0.004、0.001、0.001、0.000 5、0.001。

CO₂ 储罐泄漏引起人员窒息伤亡的高风险事故场景的发生路径分别由 P_1 、 P_2 、 P_3 引起。其中,路径 1 的初始库所可信度代入式(19),路径 2、路径 3 的初始事件均为一个固定值概率,可信度取值分别为: $\mu_2 = 0.1$ 、 $\mu_3 = 0.02$ 、 $\mu_9 = 0.5$ 、 $\mu_{L_1} = 0.1$ 、 $\mu_{L_2} = 0.16$ 、 $\mu_{L_3} = 0.0824$ 、 $\mu_{L_4} = 0.01$, 事故场景发生概率分别为:

$$\begin{cases} y_1 = 6.44 \times 10^{-7} \left(\frac{t-253.9663}{1184.7313}\right)^{1.5404} \\ y_2 = 5.32 \times 10^{-6} \\ y_3 = 6.12 \times 10^{-7} \end{cases} \quad (20)$$

可见:由 P_2 泵故障引发的事故场景发生概率更大,因此,在设备运行期间更应关注机泵的修理与维护。针对事故路径 1,当 $t = 7\,283\text{ h} \approx 303$ 天时,该油田 CO₂ 地上注入系统残余风险超标。即在该时间点之后,系统风险变为不可接受,此时需采取措施,重点关注该系统设备的运行状态。

3 风险动态量化评估方法结果讨论

3.1 敏感性分析

由于 CO₂ 为常规介质,且 CCUS 地上注入系统的阀门、泵、压力容器等设备与 OREDA 数据库中的设备在功能、材料及运行条件方面具有较高相似性,因此,失效概率数据可参考 OREDA 数据库、相关文献

[8, 17–18]及行业标准(如 IEC 61508)等,初步确定一组变迁 $q_1 \sim q_8$ 权值 0.92、0.95、0.95、0.92、0.95、0.95、0.97、0.97。在此基础上,根据 CO₂ 驱地上注入系统的特殊性,进行敏感性分析,选取敏感性最高的一组为最终取值,结合实际作出以下修正:分别在原值基础上将 q_1 增加/减少 0.01、增加/减少 0.02,共分为 5 组,比较每组取值下 y_1 、 y_2 、 y_3 (3 条事故路径发生概率)的变化。利用 y_1 计算系统风险不可接受时间,选取敏感性最高的一组为最终权值, $q_2 \sim q_8$ 同理。为使列表直观,将 $10^{-7} \left(\frac{t-253.9663}{1184.7313}\right)^{1.5404}$ 简化看作 Z ,见表 4。

表 4 变迁 $q_1 \sim q_8$ 权值敏感性分析

Table 4 Sensitivity analysis of transition $q_1 \sim q_8$ weights						
变迁	权值	$y_{1(1)}$ (权值 -0.02)	$y_{1(2)}$ (权值 -0.01)	y_1 (权值)	$y_{1(3)}$ (权值 +0.01)	$y_{1(4)}$ (权值 +0.02)
q_1	0.92	6.30Z	6.37Z	6.44Z	6.51Z	6.58Z
q_2	0.95	6.44Z	6.44Z	6.44Z	6.44Z	6.44Z
q_3	0.95	6.44Z	6.44Z	6.44Z	6.44Z	6.44Z
q_4	0.92	6.44Z	6.44Z	6.44Z	6.44Z	6.44Z
q_5	0.95	6.30Z	6.37Z	6.44Z	6.51Z	6.58Z
q_6	0.95	6.30Z	6.37Z	6.44Z	6.51Z	6.58Z
q_7	0.97	6.30Z	6.37Z	6.44Z	6.51Z	6.58Z
q_8	0.97	6.30Z	6.37Z	6.44Z	6.51Z	6.58Z

由表 4 可知: q_1 和 y_1 呈正相关性;在相同条件下,随着 q_2 增大, y_2 也相应增大, q_2 只对由 P_2 泵故障停机引起的路径 2 的事故发生概率有影响; y_3 随着 q_3 、 q_4 的增大而增大, q_3 只对路径 3 的事故发生概率有影响,由于动态评估范围针对路径 1,因此,这 2 条路径不做考虑; q_5 与 y_1 、 y_2 、 y_3 均呈正相关性, q_5 与风险不可接受时间呈负相关性。 q_6 、 q_7 、 q_8 与 q_5 同理。动态事故概率 y_1 对 q_1 、 q_5 、 q_6 、 q_7 、 q_8 的变化较为敏感。当达到相同的风险不可接受时间(303 天)时,敏感性最高的因素为变迁 q_1 。在实际应用中,企业可根据自身需要对各变迁进行取值,若要严格管控系统风险,则尽可能取大值,此时风险不可接受时间更小,系统相应的安全程度更高。

3.2 动态模型验证

为验证基于 GM-SVM 方法估计的三参数威布尔分布设备失效概率函数与 FPN 融合的新方法的可靠性,采用 LOPA 定量分析 CO₂ 储罐泄漏同一高风险事故场景,计算其事故概率并将结果与文中方法进行对比研究。计算式为:

$$f_i^C = f_i^1 \times P_i^E \times P_i^C \times \prod_{j=1}^J \text{PFD}_{ij} \quad (21)$$

式中: f_i^C 为初始事件 i 的后果 C 的发生频率, 次/a; f_i^1 为初始事件 i 的发生频率; P_i^E 为使能事件发生概率, 若没有使能事件则 P_i^E 取 1; P_i^C 为条件修正因子, 若没有条件修正, 则 P_i^C 取 1; PFD_{ij} 为初始事件 i 中第 j 个保护层的要求时危险失效概率。

CO_2 注入系统 BPCS 回路控制阀故障概率取 0.01, 运用 LOPA 方法计算可得事故场景风险 f_i^C 为 0.92×10^{-5} 。利用 Matlab 做出 y_1 对应的函数图像, 如图 4 所示。由图 4 可知: LOPA 方法计算结果为一个恒定数值, 只能简单判定系统风险是否达到中石油标准 1.0×10^{-5} , 无法体现风险随时间的动态演化规律, 且 LOPA 方法中的风险值均来源于数据库或专家评判, 具有一定局限性; 文中改进的动态评估方法将初始库所置信度由传统方法中的定值变为一个关于时间 t 的数学式, 考虑了 CO_2 注入系统的动态特性, 能够实时更新该事故链条的风险动态演化特征。此外, 传统 LOPA 方法并未比较各独立保护层的重要程度, 文中方法加入了保护层库所, 通过去掉某一保护层, 计算事故后果概率, 反向得出各保护层的重要度并进行排序, 使得定量评估分析更加全面。

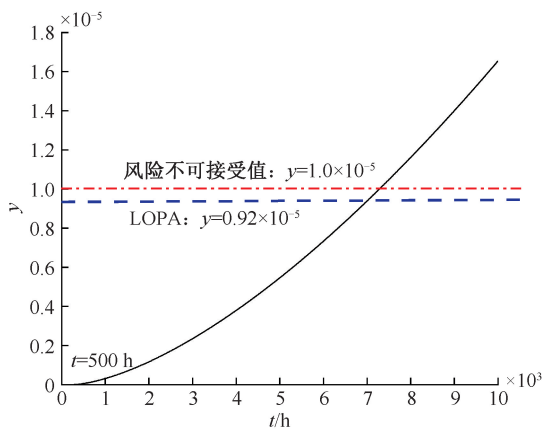


图 4 事故场景发生概率函数曲线

Fig. 4 Accident scenario probability function curve

由图 4 可知: 从 $t=500$ h 时间点开始, 事故场景发生概率逐渐呈指数形式增长。该生产设施应在运行 500 h 后加强检修和预防性维护, 并提高人员巡检频率和人员安全意识, 有利于设备维修人员及时了解装置的可靠性情况, 从而为设备维修策略提供理论指导。

3.3 保护层重要度分析

在 FPN 的计算中, 分别去掉保护层 L_3 、 L_4 , 计算

最终事故场景的发生概率, 由事故路径 1 结果可知: 当保护层 L_3 失效时, 设备运行 1 644 h 即 69 天后, 事故发生的概率大于 1.0×10^{-5} , 系统风险变为不可接受; 当保护层 L_4 失效时, t 为任意值, 系统风险均不可接受。由此可知: 与液位高报警及人员响应保护层失效相比, 安全阀失效对系统风险的影响更大, 据此可反推该保护层的重要程度最高。因此, 必须加强对安全阀的检修和维护, 确保其正常运行, 避免发生事故。

3.4 风险管控建议措施

由于系统风险在较短时间内便达到不可接受水平, 且当保护层失效时, 风险也很快不可接受, 建议在该 CO_2 注入系统增加 CO_2 储罐液位高高联锁保护层 L_0 。增加位置如图 5 所示。

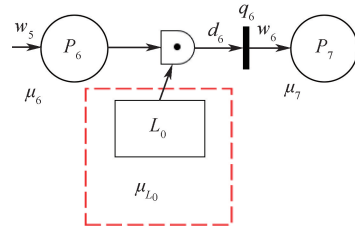


图 5 建议保护层的位置

Fig. 5 Location for the suggested protective layer

增加液位 SIS 保护层 L_0 后, 其可信度 μ 取 0.01, 计算 FPN 模型的路径 1, 得到 CO_2 储罐泄漏引发人员窒息伤亡事故场景的动态概率关系为:

$$y_{1(0)} = 6.44 \times 10^{-9} \left(\frac{t - 253.9663}{1184.7313} \right)^{1.5404} \quad (22)$$

经计算, 当 $t \approx 5832$ 天时, 该系统残余风险达到可接受标准。增加 SIS 液位保护层 L_0 前, 该油田 CO_2 循环注入站设备自投用 303 天后, 系统残余风险不可接受; 而增加 L_0 后, 系统残余风险达标时间增至 5832 天, 风险可接受时间大大延长, 减少了维修成本, 从而实现对设备现有维修策略的优化。

增加保护层 L_0 后, 计算 FPN 模型的路径 2、路径 3, 得到 CO_2 储罐泄漏引发人员窒息伤亡事故场景的发生概率为: $y_{2(0)} = 5.32 \times 10^{-8}$ 、 $y_{3(0)} = 6.12 \times 10^{-9}$ 。

分别计算去掉保护层 L_3 、 L_4 后, 各场景达到风险可接受标准所用的时间 t 越小, 表明该保护层的重要度越高。可得: $t_{L_{3(0)}} \approx 1162$ d, $t_{L_{4(0)}} \approx 303$ d, 表示去掉 L_4 安全阀这一保护层后, CO_2 储罐泄漏事故发生时间最快, 对系统失效影响最大, 即 L_4 保护层重要程度最高, 与 3.3 节讨论结果一致。

4 结 论

- 1) 相较于传统风险评估,动态风险量化评估模型可实时更新风险值,预测系统何时达到风险不可接受阈值以及量化保护层的重要度,指导企业优化安全措施(如优先维护安全阀、增设联锁系统),降低事故发生概率。
- 2) 从 $t = 500\text{ h}$ 时间点开始,高风险事故场景发生概率逐渐呈指数增长,该生产设施应在运行 500 h 后加强检修和预防性维护。当 $t = 7\,283\text{ h} \approx 303\text{ 天}$ 时,系统残余风险达到中石油风险可接受标

准 1×10^{-5} , 即在该时间点之后,系统风险变为不可接受,建议增加一个液位高高联锁保护层 L_0 , 系统风险可接受时间将延长至 $5\,832\text{ 天}$ 。

3) 当保护层 L_3 失效时,设备运行 69 天 后,系统风险变为不可接受;对系统失效影响程度最大的是安全阀这一保护层,日常管理中应提高对其检测频率。

4) 未来可将文中方法嵌入 CCUS 智慧工艺系统,构建油气生产物联网,根据 CO_2 注入系统的特殊性,设置远程泄漏监测,实现井、站各类风险数据的实时采集、自动报警及远程启停等,保障 CCUS CO_2 地上注入系统的安全运行。

参 考 文 献

[1] SU Xiaoning, LIU Pengfei, MEI Yingdan, et al. The impact of carbon capture, utilization, and storage (CCUS) projects on environmental protection, economic development, and social equity[J]. Journal of Cleaner Production, 2024, 482: DOI:10.1016/j.jclepro.2024.144218.

[2] 宋新民, 王峰, 马德胜, 等. 中国石油二氧化碳捕集、驱油与埋存技术进展及展望[J]. 石油勘探与开发, 2023, 50(1):206-218.

SONG Xinmin, WANG Feng, MA Desheng, et al. Progress and prospect of carbon dioxide capture, utilization and storage in CNPC oilfields[J]. Petroleum Exploration and Development, 2023, 50(1): 206-218.

[3] 邓一荣, 汪永红, 赵岩杰, 等. 碳中和背景下二氧化碳封存研究进展与展望[J]. 地学前缘, 2023, 30(4):429-439.

DENG Yirong, WANG Yonghong, ZHAO Yanjie, et al. Carbon dioxide storage in china: current status, main challenges, and future outlooks[J]. Earth Science Frontiers, 2023, 30(4): 429-439.

[4] 甘满光, 雷宏武, 张力为, 等. 基于数值模拟的 CO_2 地质封存项目井筒泄漏风险定量化评价方法[J]. 工程科学与技术, 2024, 56(1):195-205.

GAN Manguang, LEI Hongwu, ZHANG Liwei, et al. Quantitative evaluation method of wellbore leakage risk of CO_2 geological storage project based on numerical simulation[J]. Advanced Engineering Sciences, 2024, 56(1): 195-205.

[5] 郑长远, 蔡雨娜, 雷宏武, 等. 天然 CO_2 沿井筒泄漏两相反应流动特征模拟[J]. 安全与环境工程, 2024, 31(1): 196-204, 239.

ZHENG Changyuan, CAI Yu'na, LEI Hongwu, et al. Simulation on two-phase reactive flow characteristics of natural CO_2 leakage along wellbore[J]. Safety and Environmental Engineering, 2024, 31(1): 196-204, 239.

[6] CAI Yuna, YANG Diansen, FENG Guanhong, et al. Transient $\text{H}_2\text{O}-\text{CO}_2$ wellbore leakage under evolving recharge conditions considering CO_2 phase change[J]. Journal of Cleaner Production, 2024, 450: DOI:10.1016/j.jclepro.2024.141942.

[7] 孔岱, 李红伟. 模糊 Petri 网在压缩机故障诊断中的应用[J]. 计算机工程与设计, 2018, 39(1):271-275.

KONG Dai, LI Hongwei. Fuzzy Petri nets and its application in fault diagnosis of compressor[J]. Computer Engineering and Design, 2018, 39(1): 271-275.

[8] 胡瑾秋, 曹雅琴, 张来斌, 等. 考虑保护层响应的炼化过程系统风险动态转移模型[J]. 中国安全科学学报, 2015, 25(3):83-89.

HU Jinqiu, CAO Yaqin, ZHANG Laibin, et al. Model considering response of protection layers for systematic risk dynamic transfer in refinery process[J]. China Safety Science Journal, 2015, 25(3): 83-89.

[9] 盐见弘, 徐新明. 可靠性技术的最新动向[J]. 世界科学, 1992(9):41-43, 38.

YAN Jianhong, XU Xinming. Latest trends in reliability technology[J]. World Science, 1992(9):41-43, 38.

[10] 张放. 计算机联锁设备寿命分析及其方法研究[D]. 北京:中国铁道科学研究院, 2018.

ZHANG Fang. Study on the equipment service life of computer interlocking and its analysis method[D]. Beijing: China Academy of Railway Sciences, 2018.

[11] 王慧,赵国超,宋宇宁,等. 基于改进的威布尔分布的液压支架可靠性评估方法[J]. 中国安全科学学报, 2018, 28(5): 99-104.

WANG Hui, ZHAO Guochao, SONG Yuning, et al. Reliability evaluation method of hydraulic support based on improved Weibull distribution[J]. China Safety Science Journal, 2018, 28(5): 99-104.

[12] JIANG Renyan. Study on probability plot correlation coefficient of the log-Weibull distribution[J]. Journal of Shanghai Jiaotong University: Science, 2015, 20(3): 298-301.

[13] 高斌,曹克强,胡良谋,等. 基于 GM-SVM 的三参数威布尔分布参数估计[J]. 机械强度, 2018, 40(3): 632-638.

GAO Bin, CAO Keqiang, HU Liangmou, et al. 3-Parameter Weibull distribution estimation based on GM and SVM[J]. Journal of Mechanical Strength, 2018, 40(3): 632-638.

[14] 曲秋影. 化工园区安全风险动态管控技术研究[D]. 青岛:中国石油大学(华东), 2021.

QU Qiying. Research on dynamic management and control technology of risk in chemical industry park[D]. Qingdao: China University of Petroleum (East China), 2021.

[15] 赵冰锋,吴素君. 三参数威布尔分布参数估计方法[J]. 金属热处理, 2007(增 1): 443-446.

ZHAO Bingfeng, WU Sujun. Parameter estimation methods for 3-parameter Weibull distribution[J]. Heat Treatment of Metals, 2007(S1): 443-446.

[16] 李昀潼,李选民. 安全可靠性数据库 OREDA 使用方法探讨[J]. 炼油技术与工程, 2019, 49(9): 39-42.

LI Yuntong, LI Xuanmin. Discussion on the use method of safety and reliability database OREDA[J]. Petroleum Refinery Engineering, 2019, 49(9): 39-42.

[17] 刘庆龙,曲秋影,赵东风,等. 基于多源异构数据融合的化工安全风险动态量化评估方法[J]. 化工学报, 2021, 72(3): 1 769-1 777.

LIU Qinglong, QU Qiying, ZHAO Dongfeng, et al. Dynamic quantitative assessment method of chemical safety risk based on multi-source heterogeneous data fusion[J]. CIESC Journal, 2021, 72(3): 1 769-1 777.

[18] 王猛. 基于 Petri 网模型的高铁沿线外部环境安全风险研究[J]. 中国安全科学学报, 2022, 32(增 1): 57-62.

WANG Meng. Study on safety risk of external environment along high-speed rail based on Petri net model[J]. China Safety Science Journal, 2022, 32(S1): 57-62.



作者简介： 穆晶晶（2001—），女，山西大同人，硕士研究生，主要研究方向为 CCUS 油田风险分析。E-mail: 1097814110@qq.com。