

引用格式: 毕彩霞. 基于数据和知识双驱动的储气库地面管道腐蚀风险评价[J]. 油气藏评价与开发, 2024, 14(4): 657-666.

BI Caixia. A corrosion risk assessment method for underground gas storage ground pipeline based on data and knowledge dual drivers[J]. Petroleum Reservoir Evaluation and Development, 2024, 14(4): 657-666.

DOI: 10.13809/j.cnki.cn32-1825/te.2024.04.016

## 基于数据和知识双驱动的储气库地面管道腐蚀风险评价

毕彩霞

(中国石化石油勘探开发研究院, 北京 102206)

**摘要:** 储气库设备繁多, 工艺流程复杂, 风险因素众多, 对其进行风险分析与评价的研究与应用尤为重要。近年来, 储气库地面工艺管道腐蚀失效事故频发, 准确有效地分析储气库地面工艺管道腐蚀失效的原因对其安全运行至关重要。采用数据和知识融合双驱动的风险评价方法, 首先, 对储气库地面工艺管道腐蚀失效数据进行统计分析, 并建立贝叶斯腐蚀预测模型, 在此基础上分析导致储气库地面工艺管道腐蚀失效的基本事件。其次, 建立了腐蚀失效的知识模型, 利用储气库地面工艺管道的腐蚀失效故障树详细分析了导致腐蚀失效的原因。通过各个基本事件的结构重要度系数, 确定了各个基本事件在故障树结构上的重要性。最后, 将储气库地面工艺管道腐蚀失效的影响因素总结为四大类, 生成判断矩阵并确定不同影响因素的相对权重值, 为模糊综合评价中权重因子的确定提供依据, 得出储气库地面工艺管道腐蚀失效的风险级别。通过储气库地面工艺管道腐蚀风险评价实例应用, 研究可为储气库的安全管理与运行提供科学依据。

**关键词:** 数据和知识双驱动; 储气库地面管道; 腐蚀失效; 风险评价; 模糊综合评价法

中图分类号: TE97

文献标识码: A

### A corrosion risk assessment method for underground gas storage ground pipeline based on data and knowledge dual drivers

BI Caixia

(Sinopec Petroleum Exploration and Production Research Institute, Beijing 102206, China)

**Abstract:** The research and application of risk analysis and evaluation for underground gas storage facilities are critical due to their diverse equipment, complex process flows, and numerous risk factors. In particular, corrosion failure accidents in ground process pipelines at these facilities have become increasingly common in recent years. Effective and accurate analysis of the causes of these corrosion failures is essential for ensuring the safe operation of underground gas storage facilities. This article presents a risk assessment methodology that leverages data and knowledge fusion. The process begins with a statistical analysis of the corrosion failure data from ground process pipelines in underground gas storage facilities, from which a Bayesian corrosion prediction model is developed. This model serves as the foundation for analyzing the basic events that lead to corrosion failure in these pipelines. Subsequently, a knowledge model of corrosion failure is established, and a detailed analysis of corrosion causes is conducted using the fault tree specific to corrosion failure in ground process pipelines. The importance of each basic event within the fault tree is quantified through the structural importance coefficient assigned to each event. The analysis categorizes the influencing factors of corrosion failure into four main groups. A judgment matrix is then created to determine the relative weight values of these different influencing factors. This matrix is crucial for setting the weight factors in the fuzzy comprehensive evaluation, which ultimately determines the risk level of corrosion failure in ground process pipelines at underground gas storage facilities. By applying examples of corrosion risk assessments for ground process pipelines, this study provides a scientific basis for enhancing safety management and operational practices at underground gas storage facilities.

**Keywords:** data and knowledge dual driven; underground gas storage ground pipeline; corrosion failure; risk assessment; fuzzy comprehensive evaluation

储气库具有布局复杂、外部环境严酷、输送量大、安全管理复杂等特点, 是重大危险源及高风险集中场所<sup>[1]</sup>。储气库的安全问题对天然气存储系统的稳定运行起到关键作用, 储气库内部设备设施复杂多样, 大多数设备之间

都由管线相连接, 具有管道规格型号多、管径小、输送介质压力高的特点。在采气期, 采气脱水流程具有天然气介质含水的特点, 因此, 储气库管线更易有腐蚀问题。腐蚀会损害储气库的材料强度和稳定性, 并且可能导致储

收稿日期: 2024-05-13。

作者简介: 毕彩霞(1971—), 女, 硕士, 高级工程师, 主要从事油气田设备完整性管理及评价技术、安全工程技术研究工作。地址: 北京市昌平区百沙路197号中国石化科学技术研究中心, 邮政编码: 102206。E-mail: sinopec\_bicx@126.com

基金项目: 中国石化科技项目“复杂地质条件地下储气库建库及安全高效运行技术研究”(P21024)。

气库泄漏或完全失效,从而造成储气库安全事故。因此在储气库的设计、建设和维护过程中,必须采取适当的措施来识别和评估腐蚀风险<sup>[2-3]</sup>。

针对储气库注采频率快、时效要求高、安全风险大等特点<sup>[4]</sup>,国内外众多专家学者在储气库风险评价、设备设施风险分析和站场设备监测方面开展了相关研究。骆正山等<sup>[5]</sup>将功效系数法引入盐岩储气库系统的评估与控制中,提出一种基于集成赋权-功效系数法的盐岩储气库稳定性评估模型;XUE等<sup>[6]</sup>通过深入研究储气库正常参数与影响参数的因素之间的相关性,提出了一种确定技术参数的方法;LI等<sup>[7]</sup>压缩空气储能用高压地下储气室的规划、设计、建造和运行提供了一定的理论支持和实践指导;李娟等<sup>[8]</sup>对西部某油田集输管道的腐蚀特性进行了研究,考察了实验温度、腐蚀介质pH值、CO<sub>2</sub>含量、H<sub>2</sub>S含量和Cl<sup>-</sup>含量对集输管道钢材腐蚀速率的影响,并开展了投加缓蚀剂防腐技术措施研究;骆正山等<sup>[9]</sup>针对储气库注采管柱的内腐蚀速率预测问题,建立了基于阿基米德优化算法与核极限学习机相结合的模型提高腐蚀速率预测精度;黄剑华等<sup>[10]</sup>通过对储气库采气系统CO<sub>2</sub>腐蚀规律和各种腐蚀因素进行研究分析,对比分析不同腐蚀防护技术和手段,明确了油气藏型储气库更适合通过加注缓蚀剂对CO<sub>2</sub>腐蚀进行防护。

也有诸多学者开展定量分析方法,康健等<sup>[11]</sup>通过定性和定量分析相结合,开发一种基于多层次危险因素筛查的安全性评价方法。首先,用故障树分析(FTA)明确危险因素,根据设备分类培养风险因素,采用德尔菲法进行一级筛选。其次,提出模糊认知图(FCM),根据权重分布意见进行二级筛选。最后,将现代工业工程作为一个复杂系统,采用模糊综合评价(FCE)计算总体安全水平。孙晓宇<sup>[12]</sup>采用层次分析法和模糊综合评价方法,定量评价油气集输系统安全风险。在这种多层次危险因素筛查的安全性评价方法基础上,提出基于数据和知识融合的双驱动风险分析评价模型,并应用在储气库地面管道上。

以中原储气库为例,提出数据和知识融合的双驱动站场风险分析评价模型,应用在储气库站场的注采管道上。创新点为构建数据驱动(基于收集的储气库腐蚀的监测数据,对其进行分析研究)和知识融合(引入适宜的风险评价方法,并对储气库风险进行识别、分析、评价),进而开展储气库腐蚀风险评价方法研究,并验证模型适用性与准确性,为储气库安全运行提供可靠支撑。

通过查找集输站场储气库数据,具体的数据类别可以包括储气库传感器数据、SCADA系统数据、检修及维修数据、实测数据和第三方数据等,其中储气库的腐蚀数据、建设数据、地理数据以及储气库检测监测数据等属于重要的数据类别<sup>[13]</sup>。对已收集的数据进行预测拟合,建立相关模型。对已建立的模型进一步分析其影响因素,

建立故障树模型,确定导致顶事件发生的主要子事件,确定各个基本事件在故障树结构上的重要性,得到结构重要度系数并进行排序。利用层次分析法确定储气库风险因子的权重并进行重要性评分和归一化处理,再进行一致性检验,确定风险因子分级。使用模糊评价法建立模型:首先建立评语集,再建立模糊关系矩阵,最后进行模糊变换,对储气库腐蚀的各种风险源进行分析评价。

## 1 基于数据和知识双驱动的储气库地面管道腐蚀风险模型

储气库工艺系统按照功能划分为双向输气管道、注采集输系统。双向输气管道功能区包括:长输管道及阀室、进出站阀组清管分离系统、过滤计量系统、燃料气系统、排污放空等系统。注采集输功能区包括:注采集输管道、注采井站工艺装置进出站阀组、清管分离、计量、增压及脱水装置、放空排污等工艺系统。储气库工艺系统按照设计压力可分为高压、次高压、中低压燃气工艺系统。其中,高压系统设计压力30 MPa,包括增压工艺管道、注气管道,是储气库工艺系统的关键。

针对储气库地面工艺管道的腐蚀失效问题,提供了将数据获取与分析、知识推理与融合相结合的方法,数据处理采用最小二乘法,知识推理利用故障树分析法,两者结合确定储气库工艺管道腐蚀风险影响因子。在此基础上,构建风险评价模型见图1,最终利用层次-模糊综合评价法对储气库地面工艺管道腐蚀风险进行分析评价。以中原文96储气库为例进行了贝叶斯腐蚀预测模型有效性验证,提高了风险评价的准确性与可靠性。

### 1.1 基于贝叶斯的腐蚀深度预测法

对储气库地面工艺设施进行腐蚀检测分析,统计工艺管线腐蚀检测数据,分析发现了时间对数与储气库外部最大腐蚀深度的对数之间存在非线性关系。提出了腐蚀深度的非线性模型,给出预测模型及置信区间,根据储气库最大腐蚀深度的对数分布可以得到最大腐蚀深度置信区间,置信曲线公式等于腐蚀深度曲线乘一个与时间有关的放大(缩小)系数(图2)。

在非线性模型中,确定最大腐蚀深度概率密度分布的关键是确定参数 $y$ 、 $x$ 的概率密度分布。

基于腐蚀预测函数关系式(1)一式(4),进一步求解 $y_0$ 、 $x_0$ 、 $\sigma_y$ 、 $\sigma_x$ 。

$$\ln d = \ln y + x \ln t \quad (1)$$

$$\ln y = \ln y_0 + \varepsilon_y \quad \varepsilon_y \sim N(0, \sigma_y^2) \quad (2)$$

$$x = x_0 + \varepsilon_x \quad \varepsilon_x \sim N(0, \sigma_x^2) \quad (3)$$

$$\ln d \sim N(0, \ln y_0 + x_0 \ln t \sigma_y^2 + \sigma_N^2 \ln^2 t) \quad (4)$$

式(1)一式(4)中: $d$ 为最大腐蚀深度,单位mm; $y$ 为模型

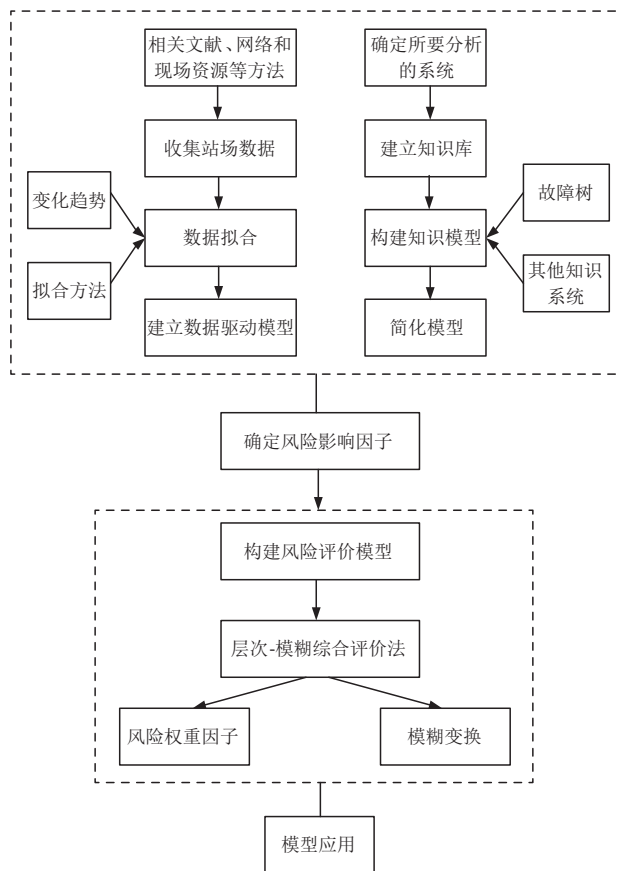
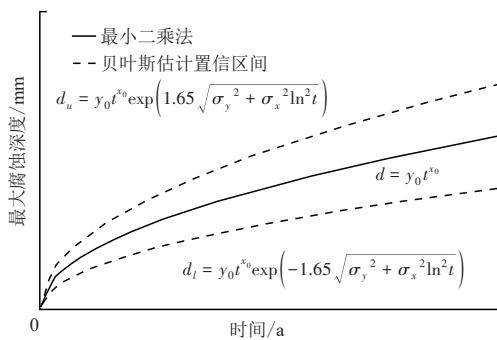


图1 储气库地面工艺管道腐蚀风险模型建立流程  
Fig. 1 Process for establishing a corrosion risk model for underground gas storage facilities



注:  $d_u$  为最大腐蚀深度贝叶斯估计置信区间的上限, 单位 mm;  $d_l$  为最大腐蚀深度贝叶斯估计置信区间的下限, 单位 mm;  $u, l$  为置信区间变量。

图2 贝叶斯预测模型及置信区间  
Fig. 2 Bayesian prediction model and confidence interval

参数, 取值 20.1~107.3;  $t$  为腐蚀时间, 单位 a;  $x$  为模型参数, 取值 0~0.92;  $N$  为正态分布;  $y_0, x_0$  分别为  $y, x$  的期望值;  $\varepsilon_y, \varepsilon_x$  为不相关误差;  $\sigma_y, \sigma_x$  分别为  $\varepsilon_y, \varepsilon_x$  的标准差。

## 1.2 故障树分析法

故障树分析(Fault Tree Analysis 简称 FTA)是一种可

靠性工程技术, 通过建立故障树模型来分析系统的失效原因及其概率, 以及制定有效的预防措施<sup>[14-15]</sup>。故障树分析通常从系统的顶事件出发, 通过逆推分析系统的故障发生机理和隐含失效, 然后将这些故障原因和因果关系以树状结构呈现出来, 形成故障树<sup>[16]</sup>。

在故障树分析中, 逻辑门用于表示故障树节点之间的逻辑关系, 包括“与”门、“或”门和“非”门。

“与”门的故障树结构函数为:

$$P(T) = 1 - \prod_{i=1}^n (1 - X_i) \quad (5)$$

“或”门的故障树结构函数为:

$$P(T) = \prod_{i=1}^n X_i \quad (6)$$

式(5)~式(6)中:  $T$  为顶事件;  $P(T)$  为顶事件发生概率;  $X_i$  为基本事件;  $n$  为独立事件个数。

结构重要度系数是结构重要度分析中的一种指标, 是评估系统可靠性和确定最优解决方案的关键指标之一, 用于表示故障树中每个节点对系统失效率的贡献程度。结构重要度系数越高, 表明节点对系统可靠性的影响越大。

结构重要度系数可计算:

$$I_{\phi}(i) = \frac{1}{G} \sum_{r=1}^p \frac{1}{n_i(X_i \in E_r)} \quad (i = 1, 2, 3, \dots, n) \quad (7)$$

式中:  $E_r$  为最小割集;  $p$  为基本事件的个数;  $r$  为最小割集中基本事件个数的起点;  $G$  为包含基本事件  $X_i$  的最小割集总数;  $I_{\phi}(i)$  为基本事件  $X_i$  的结构重要度系数;  $n_i$  为基本事件  $X_i$  所在最小割集中基本事件的数量。

## 1.3 层次-模糊综合评价法

### 1.3.1 层次分析法

层次分析法(AHP)是一种综合运用定量与定性方法来分析决策因素之间相对重要性的工具<sup>[17]</sup>。AHP 允许将不同的因素和层次结构分解成数量化数值来进行比较和选择, 可以将复杂的问题结构化为易于处理的层次结构, 从而帮助决策者进行分析和决策。

在判断矩阵中, 每个评价要素都将针对相邻层次的所有其他要素进行两两比较, 并记录相对重要性的程度值, AHP 的标度标准主要采用标度 1—标度 9 尺度法进行确定, 具体见表 1。

比较权重比时, 需要考虑评价结果、专家建议、评价主体和目标需求等因素。为此, 可从方案的最底层开始, 逐层建立比较矩阵, 对每个层次的评价指标进行两两比较, 得到相对权重比。

通过比较权重最终形成的判断矩阵:

$$A = \begin{bmatrix} a_{11} & \cdots & a_{1n} \\ \vdots & & \vdots \\ a_{n1} & \cdots & a_{nn} \end{bmatrix} \quad (8)$$

表1 层次分析法标度标准

标度	说明
1	前指标与后指标具有相同重要性
3	前指标比后指标稍微重要
5	前指标比后指标明显重要
7	前指标比后指标强烈重要
9	前指标比后指标极端重要
2,4,6,8	表示以上相邻判断的中间取值,即小于和大于2个奇数之间的模糊表达
倒数	2个要素 <i>i</i> 和 <i>j</i> 的重要性之比为 $a_{ij}$ ,则要素 <i>j</i> 和 <i>i</i> 的重要性之比为 $a_{ij}$ 的倒数

判断矩阵A具有如下3个特性:

$$\begin{cases} a_{ii} = 1 \\ a_{ji} = \frac{1}{a_{ij}} \\ a_{ij} = \frac{a_{ik}}{a_{kj}} \quad (i, j, k = 1, 2, 3, \dots, n) \end{cases} \quad (9)$$

式中:以顶事件*T*表示目标, $a_i$ 、 $a_j$ 、 $a_k$ 表示因素。 $a_{ij}$ 为 $a_i$ 对 $a_j$ 的相对重要性数值; $a_{ji}$ 为 $a_j$ 对 $a_i$ 的相对重要性数值; $a_{ik}$ 表示 $a_i$ 对 $a_k$ 的相对重要性数值; $a_{kj}$ 为 $a_k$ 对 $a_j$ 的相对重要性数值。并由 $a_{ij}$ 组成*T-U*判断矩阵A,其中,*U*表示工艺管道腐蚀失效因素的集合。

在建立层次结构模型,并确定判断矩阵A的相对权重向量时,权重计算方法为方根法。

计算步骤:①求解判断矩阵A的最大(绝对值)特征值 $\lambda_{\max}$ ;②利用矩阵特征方程求出特征向量*m*;③对特征向量*m*进行归一化处理得到相对权重向量 $W_i$ 。

利用矩阵特征方程计算 $\lambda_{\max}$ 值:

$$Am = \lambda_{\max} m \quad (10)$$

式中: $\lambda_{\max}$ 为A的最大特征值,*m*称为A对应于 $\lambda_{\max}$ 的特征向量(*m*为非零向量)。

将判断矩阵A的每一行元素进行求积,即:

$$m_i = \prod_{j=1}^n a_{ij} \quad (11)$$

对式(11)所得结果开*n*次方根,即:

$$\omega_i = \sqrt[n]{\prod_{j=1}^n a_{ij}} \quad (12)$$

式(11)一式(12)中: $m_i$ 为不同因素的特征向量; $\omega_i$ 为*n*维特征向量。

然后作归一化处理,得到所需相对权重向量。计算方法为:

$$W_i = \frac{\omega_i}{\sum \omega_i} \quad (13)$$

一致性检验是层次分析法中用于检验判断矩阵是否合理的方法。

计算一致性指标:

$$C_1 = \frac{\lambda_{\max} - z}{z - 1} \quad (14)$$

式中: $C_1$ 为判断矩阵的一般一致性指标;*z*为矩阵阶数。

通过式(14)可以看出,当 $C_1$ 越大时,判断矩阵的偏离程度越大,系统的一致性越差;反之,当 $C_1$ 越小时,系统的一致性越好。为了衡量判断矩阵随机一致性比率 $C_R$ 的大小,引入了判断矩阵随机一致性指标 $R_1$ 。其中, $R_1$ 是已经预先计算好了的一个常数,用于衡量判断矩阵与随机矩阵的一致性水平。当 $z=1, 2, \dots, 11$ 时, $R_1$ 的取值分别为0, 0, 0.58, 0.90, 1.12, 1.24, 1.32, 1.41, 1.45, 1.49, 1.51。

当判断矩阵的阶数为1或2时, $R_1=0$ ,表明这样的矩阵不需要进行一致性检验,可以保证完全一致性。然而,当判断矩阵的阶数为3或更高时,需要计算 $C_R$ 来判断矩阵的一致性程度。

$$C_R = \frac{C_1}{R_1} \quad (15)$$

一般来说,当所求得的 $C_R < 0.1$ 时,认为构建的判断矩阵A的误差在允许范围之内,同时认为判断矩阵A通过了一致性检验,否则需要重构或调整判断矩阵A。

### 1.3.2 模糊综合评价法

模糊综合评价法是一种以模糊数学为基础的多指标综合评价方法。它是旨在解决多因素决策问题中,因各因素之间难以精确量化而引入模糊数学概念的一种数学分析方法。

#### 1) 构建模糊关系矩阵

运用模糊综合评价法,首先可将风险等级评价分为5个等级,分别为极小、较小、中等、较大、极大。然后根据专家访谈法、问卷调查法等,分别构建二级指标相对于其隶属的一级指标的满意度评价矩阵。

#### 2) 根据权重系数合成模糊综合评价结果

根据前述内容计算得到的权重系数特征向量,通过将模糊评价矩阵相乘,可以得到全面的评价结果。

## 2 储气库地面管道腐蚀风险分析应用实例

结合腐蚀风险模型,以中原文96储气库为例,根据储气库的壁厚监测报告,得知注采站壁厚检测点总数共126个,其中注采站内81个,45个监测点分布在其余5个井场中。每月对126个检测点进行壁厚检测3次,最终取得每月壁厚平均值,得到年腐蚀速率。其中选取年腐蚀速率最大的点,对其进行显著性分析,并进行贝叶斯腐蚀预测模型有效的验证。地面工艺管道腐蚀数据的收集,见表2。

## 2.1 建立基于贝叶斯的地面工艺管道腐蚀预测模型

### 1) 应用贝叶斯参数计算概率分布

独立样本计算时,根据式(1)一式(4),应用 Matlab 软件,采用先验概率和后验概率同分布的原则,应用马尔科夫链蒙特卡洛方法(MCMC)进行抽样样本的近似数值计算,根据概率密度法取最大值,得到概率密度分布(图3)。

### 2) 腐蚀深度计算结果

贝叶斯腐蚀深度预测结果见图4。

根据已建立的模型,可以得到随时间变化的储气库最大腐蚀深度,从而可以预估储气库腐蚀损伤的程度和影响。

## 2.2 储气库地面工艺管道腐蚀故障树分析

根据分析,确定故障树顶事件  $T$  为“腐蚀失效”。从而,将导致腐蚀失效的最直接原因——外腐蚀、内腐蚀和

腐蚀开裂作为故障树的中间事件,以便进一步分析。

储气库地面工艺管道腐蚀穿孔主要有多个因素导致。其中,内腐蚀和外腐蚀是主要的原因,应力腐蚀开裂、初始缺陷和储气库本身条件等也会引起地面工艺管道穿孔。一方面,地面工艺管道内部腐蚀可能由于内防腐失效、防腐措施失效、特定介质腐蚀和非金属材料与金属材料之间产生缝隙腐蚀等原因导致。另一方面,土壤腐蚀、大气腐蚀和电流腐蚀等都可能引起储气库地面工艺管道外腐蚀的发生。储气库腐蚀失效故障树见图5。表3为故障树的基本事件。

根据以上基本事件,建立储气库地面工艺管道腐蚀失效故障树见图6—图8。

### 1) 最小割集

针对储气库腐蚀失效的事件,进行了故障树分析,发现有245个最小割集。这些最小割集中,三阶最小割集占了216个,五阶最小割集占了8个,十阶最小割集占了12个,十一阶最小割集占了9个。具体的最小割集见表4。根据上述分析可以得出:外腐蚀发生可能性最大,基本事件  $X_1$  储气库抗腐蚀性差重复出现次数为79次。

### 2) 结构重要度

根据计算得出各个基本事件的结构重要度排序为:

$$I_{[X_{11}]} > I_{[X_{22}]} = I_{[X_{23}]} = I_{[X_{24}]} = I_{[X_{25}]} > I_{[X_{27}]} = I_{[X_{31}]} = I_{[X_{34}]} = I_{[X_{35}]} = I_{[X_{36}]} = I_{[X_{37}]} > I_{[X_{26}]} > I_{[X_{21}]} = I_{[X_{27}]} = I_{[X_{28}]} = I_{[X_{29}]} = I_{[X_{30}]} > I_{[X_{14}]} = I_{[X_{15}]} = I_{[X_{16}]} = I_{[X_{17}]} = I_{[X_{18}]} = I_{[X_{19}]} = I_{[X_{20}]} = I_{[X_{31}]} = I_{[X_{32}]} > I_{[X_{38}]} = I_{[X_{39}]} = I_{[X_{10}]} > I_{[X_{11}]} = I_{[X_{12}]} > I_{[X_{13}]} > I_{[X_{34}]} = I_{[X_{35}]} = I_{[X_{36}]} = I_{[X_{40}]} > I_{[X_{33}]} > I_{[X_{41}]} > I_{[X_{42}]} = I_{[X_{43}]} > I_{[X_{45}]} = I_{[X_{46}]} = I_{[X_{47}]} > I_{[X_{48}]} = I_{[X_{49}]} = I_{[X_{50}]} > I_{[X_{37}]} = I_{[X_{38}]} = I_{[X_{39}]}。基本事件结构重要度见表5。$$

从基本事件  $X_1$  储气库抗腐蚀性差入手,是储气库腐

表2 地面工艺管道腐蚀检测数据

Table 2 Detection data for corrosion state of pipe wall for surface process

时间/a	最大腐蚀深度/mm	时间/a	最大腐蚀深度/mm
1	1.25	8	3.26
2	1.96	9	3.60
3	2.24	10	3.68
4	2.50	11	3.92
5	2.70	12	4.05
6	2.84	13	4.31
7	2.95	14	4.36

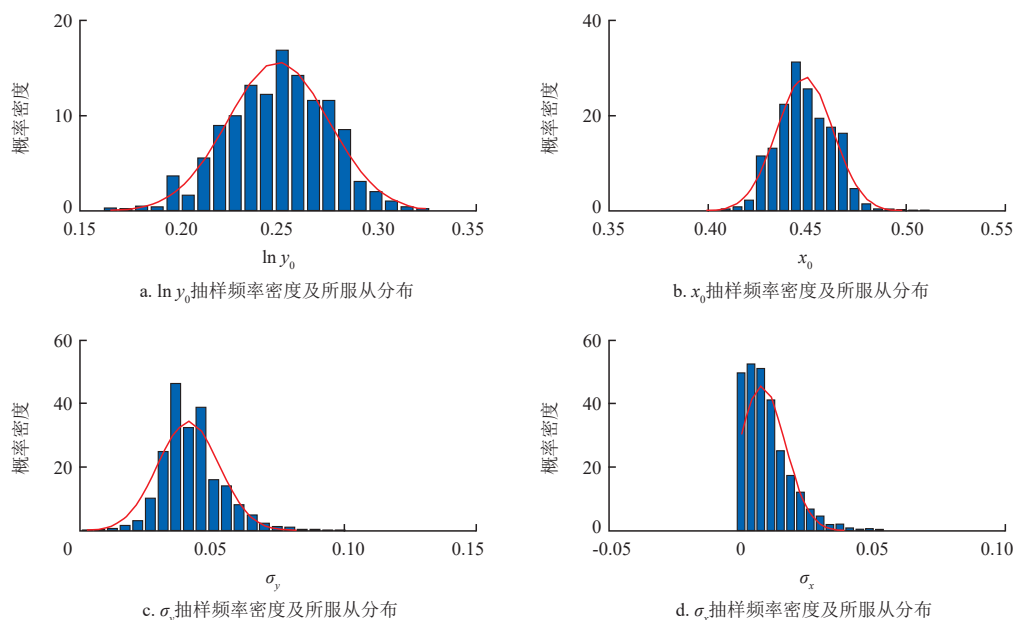


图3 独立样本贝叶斯参数概率密度分布

Fig. 3 Probability density distribution of Bayesian parameters for independent samples

表3 腐蚀故障树基本事件  
Table 3 Basic event of corrosion fault tree

事件符号	事件	事件符号	事件
$T$	腐蚀失效	$X_{16}$	土壤pH值低
$M_1$	外腐蚀	$X_{17}$	土壤含水率高
$M_2$	内腐蚀	$X_{18}$	土壤含盐量高
$M_3$	腐蚀开裂	$X_{19}$	土壤电阻率低
$M_4$	土壤腐蚀	$X_{20}$	土壤硫酸盐还原菌含量高
$M_5$	大气腐蚀	$X_{21}$	大气相对湿度
$M_6$	电流腐蚀	$X_{22}$	储气库埋深过浅
$M_7$	外防腐措施失效	$X_{23}$	土层开挖
$M_8$	土壤中腐蚀储气库因素	$X_{24}$	跨沟外露
$M_9$	防腐绝缘层失效	$X_{25}$	阀组处外露
$M_{10}$	第三方破坏	$X_{26}$	温度
$M_{11}$	初始缺陷	$X_{27}$	大气含水量
$M_{12}$	储气库外露	$X_{28}$	大气中硫化物含量
$M_{13}$	大气腐蚀因素	$X_{29}$	风向和风速
$M_{14}$	开始缺陷	$X_{30}$	降尘
$M_{15}$	内腐蚀失效	$X_{31}$	阴极保护失效
$M_{16}$	特定介质腐蚀	$X_{32}$	电流干扰
$M_{17}$	防腐措施失效	$X_{33}$	管龄过大
$M_{18}$	酸性介质含量高	$X_{34}$	腐蚀检测结果差
$M_{19}$	应力腐蚀	$X_{35}$	内防腐层质量差
$M_{20}$	拉应力	$X_{36}$	储气库质量不达标
$X_1$	储气库抗腐蚀性差	$X_{37}$	水击
$X_2$	防腐绝缘涂层过薄	$X_{38}$	介质流速高
$X_3$	防腐绝缘涂层破损	$X_{39}$	介质泥沙含量高
$X_4$	防腐绝缘涂层老化剥离	$X_{40}$	介质中水含量高
$X_5$	防腐绝缘涂层粘结力低	$X_{41}$	H <sub>2</sub> S含量高
$X_6$	防腐绝缘涂层下部积水	$X_{42}$	CO <sub>2</sub> 含量高
$X_7$	防腐绝缘涂层脆性过大	$X_{43}$	O <sub>2</sub> 含量高
$X_8$	储气库上方违章施工	$X_{44}$	衬里脱落
$X_9$	储气库上层移动	$X_{45}$	内涂层变薄
$X_{10}$	沿线管压严重	$X_{46}$	缓蚀剂失效
$X_{11}$	设计不合理	$X_{47}$	清管效果差
$X_{12}$	施工监管不严格	$X_{48}$	存在应力集中
$X_{13}$	施工缺陷	$X_{49}$	存在残余应力

蚀失效预防措施的首要选择。如果控制措施效果不佳, 可以首先考虑采取措施防止第三方破坏以控制储气库的腐蚀失效, 包括对基本事件 $X_{22}$ 储气库埋深过浅、 $X_{23}$ 土层开挖、 $X_{24}$ 跨沟外露和 $X_{25}$ 阀组处外露采取针对性措施。其次采取措施预防防腐绝缘层的失效, 包括对基本事件 $X_2$ 防腐绝缘涂层过薄、 $X_3$ 防腐绝缘涂层破损、 $X_4$ 防腐绝缘涂层老化剥离、 $X_5$ 防腐绝缘涂层粘结力低、 $X_6$ 防腐绝缘涂

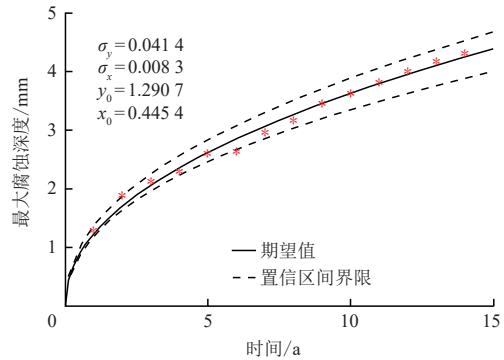
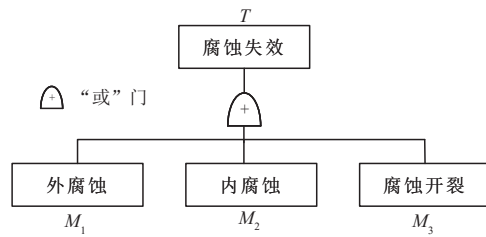


图4 基于贝叶斯的腐蚀深度预测结果  
Fig. 4 Bayesian-based corrosion depth prediction results



注: $M_i$ 为中间事件。

图5 储气库地面工艺管道腐蚀失效故障树  
Fig. 5 Fault tree for corrosion failure of surface process pipelines in underground gas storage facilities

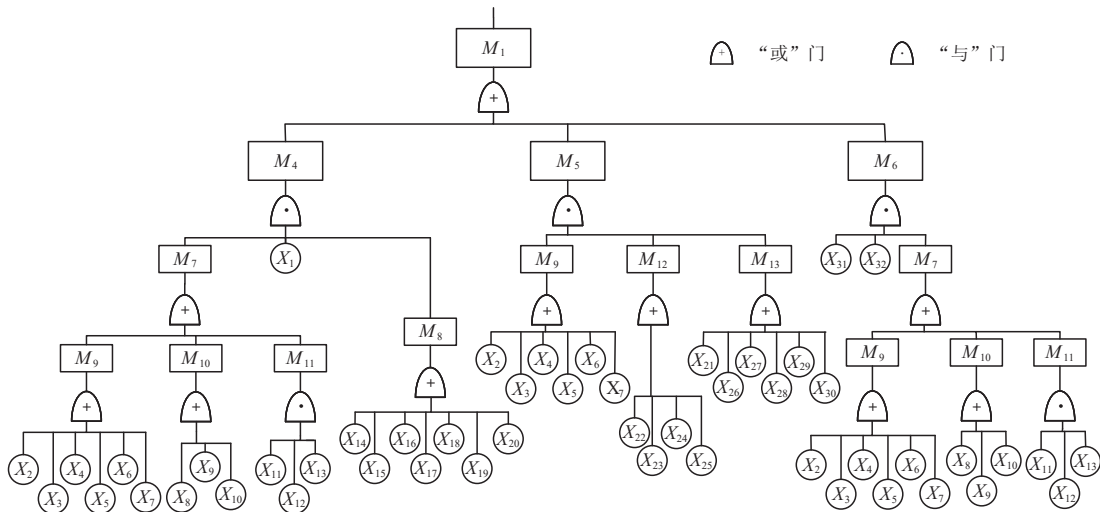


图6 储气库地面工艺管道外腐蚀失效故障树

Fig. 6 Fault tree for corrosion failure outside surface process pipelines in underground gas storage facilities

表4 储气库地面工艺管道腐蚀失效最小割集

Table 4 Minimum cut set for corrosion failure of surface process pipelines in underground gas storage facilities

序号	最小割集	序号	最小割集	序号	最小割集	序号	最小割集	序号	最小割集
1	{X <sub>1</sub> , X <sub>2</sub> , X <sub>14</sub> }	50	{X <sub>2</sub> , X <sub>23</sub> , X <sub>27</sub> }	99	{X <sub>1</sub> , X <sub>5</sub> , X <sub>20</sub> }	148	{X <sub>7</sub> , X <sub>24</sub> , X <sub>29</sub> }	197	{X <sub>7</sub> , X <sub>21</sub> , X <sub>25</sub> }
2	{X <sub>2</sub> , X <sub>21</sub> , X <sub>22</sub> }	51	{X <sub>2</sub> , X <sub>23</sub> , X <sub>28</sub> }	100	{X <sub>2</sub> , X <sub>24</sub> , X <sub>26</sub> }	149	{X <sub>7</sub> , X <sub>24</sub> , X <sub>30</sub> }	198	{X <sub>2</sub> , X <sub>22</sub> , X <sub>26</sub> }
3	{X <sub>2</sub> , X <sub>31</sub> , X <sub>32</sub> }	52	{X <sub>2</sub> , X <sub>23</sub> , X <sub>29</sub> }	101	{X <sub>2</sub> , X <sub>24</sub> , X <sub>27</sub> }	150	{X <sub>11</sub> , X <sub>12</sub> , X <sub>13</sub> , X <sub>31</sub> , X <sub>32</sub> }	199	{X <sub>2</sub> , X <sub>22</sub> , X <sub>27</sub> }
4	{X <sub>1</sub> , X <sub>8</sub> , X <sub>14</sub> }	53	{X <sub>2</sub> , X <sub>23</sub> , X <sub>30</sub> }	102	{X <sub>2</sub> , X <sub>24</sub> , X <sub>28</sub> }	151	{X <sub>1</sub> , X <sub>6</sub> , X <sub>15</sub> }	200	{X <sub>2</sub> , X <sub>22</sub> , X <sub>28</sub> }
5	{X <sub>1</sub> , X <sub>11</sub> , X <sub>12</sub> , X <sub>13</sub> , X <sub>14</sub> }	54	{X <sub>4</sub> , X <sub>23</sub> , X <sub>30</sub> }	103	{X <sub>2</sub> , X <sub>24</sub> , X <sub>29</sub> }	152	{X <sub>1</sub> , X <sub>6</sub> , X <sub>16</sub> }	201	{X <sub>2</sub> , X <sub>22</sub> , X <sub>29</sub> }
6	{X <sub>1</sub> , X <sub>3</sub> , X <sub>14</sub> }	55	{X <sub>4</sub> , X <sub>24</sub> , X <sub>26</sub> }	104	{X <sub>2</sub> , X <sub>24</sub> , X <sub>30</sub> }	153	{X <sub>1</sub> , X <sub>6</sub> , X <sub>17</sub> }	202	{X <sub>2</sub> , X <sub>22</sub> , X <sub>30</sub> }
7	{X <sub>1</sub> , X <sub>4</sub> , X <sub>14</sub> }	56	{X <sub>4</sub> , X <sub>24</sub> , X <sub>27</sub> }	105	{X <sub>2</sub> , X <sub>25</sub> , X <sub>26</sub> }	154	{X <sub>1</sub> , X <sub>6</sub> , X <sub>18</sub> }	203	{X <sub>3</sub> , X <sub>22</sub> , X <sub>26</sub> }
8	{X <sub>1</sub> , X <sub>5</sub> , X <sub>14</sub> }	57	{X <sub>4</sub> , X <sub>24</sub> , X <sub>28</sub> }	106	{X <sub>2</sub> , X <sub>25</sub> , X <sub>27</sub> }	155	{X <sub>1</sub> , X <sub>6</sub> , X <sub>19</sub> }	204	{X <sub>5</sub> , X <sub>31</sub> , X <sub>32</sub> }
9	{X <sub>1</sub> , X <sub>6</sub> , X <sub>14</sub> }	58	{X <sub>4</sub> , X <sub>24</sub> , X <sub>29</sub> }	107	{X <sub>2</sub> , X <sub>25</sub> , X <sub>28</sub> }	156	{X <sub>1</sub> , X <sub>6</sub> , X <sub>20</sub> }	205	{X <sub>6</sub> , X <sub>31</sub> , X <sub>32</sub> }
10	{X <sub>1</sub> , X <sub>7</sub> , X <sub>14</sub> }	59	{X <sub>4</sub> , X <sub>24</sub> , X <sub>30</sub> }	108	{X <sub>2</sub> , X <sub>25</sub> , X <sub>29</sub> }	157	{X <sub>1</sub> , X <sub>7</sub> , X <sub>15</sub> }	206	{X <sub>7</sub> , X <sub>31</sub> , X <sub>32</sub> }
11	{X <sub>1</sub> , X <sub>9</sub> , X <sub>14</sub> }	60	{X <sub>4</sub> , X <sub>25</sub> , X <sub>26</sub> }	109	{X <sub>2</sub> , X <sub>25</sub> , X <sub>30</sub> }	158	{X <sub>1</sub> , X <sub>7</sub> , X <sub>16</sub> }	207	{X <sub>9</sub> , X <sub>31</sub> , X <sub>32</sub> }
12	{X <sub>1</sub> , X <sub>10</sub> , X <sub>14</sub> }	61	{X <sub>4</sub> , X <sub>25</sub> , X <sub>27</sub> }	110	{X <sub>3</sub> , X <sub>23</sub> , X <sub>26</sub> }	159	{X <sub>1</sub> , X <sub>7</sub> , X <sub>17</sub> }	208	{X <sub>10</sub> , X <sub>31</sub> , X <sub>32</sub> }
13	{X <sub>1</sub> , X <sub>2</sub> , X <sub>15</sub> }	62	{X <sub>4</sub> , X <sub>25</sub> , X <sub>28</sub> }	111	{X <sub>3</sub> , X <sub>23</sub> , X <sub>27</sub> }	160	{X <sub>1</sub> , X <sub>7</sub> , X <sub>18</sub> }	209	{X <sub>5</sub> , X <sub>25</sub> , X <sub>26</sub> }
14	{X <sub>1</sub> , X <sub>2</sub> , X <sub>16</sub> }	63	{X <sub>4</sub> , X <sub>25</sub> , X <sub>29</sub> }	112	{X <sub>3</sub> , X <sub>23</sub> , X <sub>28</sub> }	161	{X <sub>1</sub> , X <sub>7</sub> , X <sub>19</sub> }	210	{X <sub>5</sub> , X <sub>25</sub> , X <sub>27</sub> }
15	{X <sub>1</sub> , X <sub>2</sub> , X <sub>17</sub> }	64	{X <sub>4</sub> , X <sub>25</sub> , X <sub>30</sub> }	113	{X <sub>3</sub> , X <sub>23</sub> , X <sub>29</sub> }	162	{X <sub>1</sub> , X <sub>7</sub> , X <sub>20</sub> }	211	{X <sub>5</sub> , X <sub>25</sub> , X <sub>28</sub> }
16	{X <sub>1</sub> , X <sub>2</sub> , X <sub>18</sub> }	65	{X <sub>5</sub> , X <sub>23</sub> , X <sub>26</sub> }	114	{X <sub>3</sub> , X <sub>23</sub> , X <sub>30</sub> }	163	{X <sub>1</sub> , X <sub>9</sub> , X <sub>15</sub> }	212	{X <sub>5</sub> , X <sub>25</sub> , X <sub>29</sub> }
17	{X <sub>1</sub> , X <sub>2</sub> , X <sub>19</sub> }	66	{X <sub>5</sub> , X <sub>23</sub> , X <sub>27</sub> }	115	{X <sub>3</sub> , X <sub>24</sub> , X <sub>26</sub> }	164	{X <sub>1</sub> , X <sub>9</sub> , X <sub>16</sub> }	213	{X <sub>5</sub> , X <sub>25</sub> , X <sub>30</sub> }
18	{X <sub>1</sub> , X <sub>2</sub> , X <sub>20</sub> }	67	{X <sub>5</sub> , X <sub>23</sub> , X <sub>28</sub> }	116	{X <sub>3</sub> , X <sub>24</sub> , X <sub>27</sub> }	165	{X <sub>1</sub> , X <sub>9</sub> , X <sub>17</sub> }	214	{X <sub>6</sub> , X <sub>23</sub> , X <sub>26</sub> }
19	{X <sub>1</sub> , X <sub>8</sub> , X <sub>15</sub> }	68	{X <sub>5</sub> , X <sub>23</sub> , X <sub>29</sub> }	117	{X <sub>3</sub> , X <sub>24</sub> , X <sub>28</sub> }	166	{X <sub>1</sub> , X <sub>9</sub> , X <sub>18</sub> }	215	{X <sub>6</sub> , X <sub>23</sub> , X <sub>27</sub> }
20	{X <sub>1</sub> , X <sub>8</sub> , X <sub>16</sub> }	69	{X <sub>5</sub> , X <sub>23</sub> , X <sub>30</sub> }	118	{X <sub>3</sub> , X <sub>24</sub> , X <sub>29</sub> }	167	{X <sub>1</sub> , X <sub>9</sub> , X <sub>19</sub> }	216	{X <sub>6</sub> , X <sub>23</sub> , X <sub>28</sub> }
21	{X <sub>1</sub> , X <sub>8</sub> , X <sub>17</sub> }	70	{X <sub>5</sub> , X <sub>24</sub> , X <sub>26</sub> }	119	{X <sub>3</sub> , X <sub>24</sub> , X <sub>30</sub> }	168	{X <sub>1</sub> , X <sub>9</sub> , X <sub>20</sub> }	217	{X <sub>6</sub> , X <sub>23</sub> , X <sub>29</sub> }
22	{X <sub>1</sub> , X <sub>8</sub> , X <sub>18</sub> }	71	{X <sub>5</sub> , X <sub>24</sub> , X <sub>27</sub> }	120	{X <sub>3</sub> , X <sub>25</sub> , X <sub>26</sub> }	169	{X <sub>1</sub> , X <sub>10</sub> , X <sub>15</sub> }	218	{X <sub>7</sub> , X <sub>25</sub> , X <sub>26</sub> }
23	{X <sub>1</sub> , X <sub>8</sub> , X <sub>19</sub> }	72	{X <sub>5</sub> , X <sub>24</sub> , X <sub>28</sub> }	121	{X <sub>3</sub> , X <sub>25</sub> , X <sub>27</sub> }	170	{X <sub>1</sub> , X <sub>10</sub> , X <sub>16</sub> }	219	{X <sub>7</sub> , X <sub>25</sub> , X <sub>27</sub> }
24	{X <sub>1</sub> , X <sub>8</sub> , X <sub>20</sub> }	73	{X <sub>5</sub> , X <sub>24</sub> , X <sub>29</sub> }	122	{X <sub>3</sub> , X <sub>25</sub> , X <sub>28</sub> }	171	{X <sub>1</sub> , X <sub>10</sub> , X <sub>17</sub> }	220	{X <sub>7</sub> , X <sub>25</sub> , X <sub>28</sub> }
25	{X <sub>3</sub> , X <sub>22</sub> , X <sub>27</sub> }	74	{X <sub>5</sub> , X <sub>24</sub> , X <sub>30</sub> }	123	{X <sub>3</sub> , X <sub>25</sub> , X <sub>29</sub> }	172	{X <sub>1</sub> , X <sub>10</sub> , X <sub>18</sub> }	221	{X <sub>7</sub> , X <sub>25</sub> , X <sub>29</sub> }
26	{X <sub>3</sub> , X <sub>22</sub> , X <sub>28</sub> }	75	{X <sub>4</sub> , X <sub>31</sub> , X <sub>32</sub> }	124	{X <sub>3</sub> , X <sub>25</sub> , X <sub>30</sub> }	173	{X <sub>1</sub> , X <sub>10</sub> , X <sub>19</sub> }	222	{X <sub>7</sub> , X <sub>25</sub> , X <sub>30</sub> }
27	{X <sub>3</sub> , X <sub>22</sub> , X <sub>29</sub> }	76	{X <sub>1</sub> , X <sub>11</sub> , X <sub>12</sub> , X <sub>13</sub> , X <sub>15</sub> }	125	{X <sub>4</sub> , X <sub>23</sub> , X <sub>26</sub> }	174	{X <sub>1</sub> , X <sub>10</sub> , X <sub>20</sub> }	223	{X <sub>8</sub> , X <sub>31</sub> , X <sub>32</sub> }
28	{X <sub>3</sub> , X <sub>22</sub> , X <sub>30</sub> }	77	{X <sub>1</sub> , X <sub>11</sub> , X <sub>12</sub> , X <sub>13</sub> , X <sub>16</sub> }	126	{X <sub>4</sub> , X <sub>23</sub> , X <sub>27</sub> }	175	{X <sub>3</sub> , X <sub>21</sub> , X <sub>22</sub> }	224	{X <sub>3</sub> , X <sub>31</sub> , X <sub>32</sub> }
29	{X <sub>4</sub> , X <sub>22</sub> , X <sub>26</sub> }	78	{X <sub>1</sub> , X <sub>11</sub> , X <sub>12</sub> , X <sub>13</sub> , X <sub>17</sub> }	127	{X <sub>4</sub> , X <sub>23</sub> , X <sub>28</sub> }	176	{X <sub>4</sub> , X <sub>21</sub> , X <sub>22</sub> }	225	{X <sub>11</sub> , X <sub>12</sub> , X <sub>26</sub> , X <sub>33</sub> , X <sub>34</sub> , X <sub>35</sub> , X <sub>36</sub> , X <sub>40</sub> , X <sub>42</sub> , X <sub>44</sub> }
30	{X <sub>4</sub> , X <sub>22</sub> , X <sub>27</sub> }	79	{X <sub>1</sub> , X <sub>11</sub> , X <sub>12</sub> , X <sub>13</sub> , X <sub>18</sub> }	128	{X <sub>4</sub> , X <sub>23</sub> , X <sub>29</sub> }	177	{X <sub>5</sub> , X <sub>21</sub> , X <sub>22</sub> }	226	{X <sub>11</sub> , X <sub>12</sub> , X <sub>26</sub> , X <sub>33</sub> , X <sub>34</sub> , X <sub>35</sub> , X <sub>36</sub> , X <sub>40</sub> , X <sub>43</sub> , X <sub>44</sub> }
31	{X <sub>4</sub> , X <sub>22</sub> , X <sub>28</sub> }	80	{X <sub>1</sub> , X <sub>11</sub> , X <sub>12</sub> , X <sub>13</sub> , X <sub>19</sub> }	129	{X <sub>6</sub> , X <sub>23</sub> , X <sub>30</sub> }	178	{X <sub>6</sub> , X <sub>21</sub> , X <sub>22</sub> }	227	{X <sub>11</sub> , X <sub>12</sub> , X <sub>26</sub> , X <sub>33</sub> , X <sub>34</sub> , X <sub>35</sub> , X <sub>36</sub> , X <sub>40</sub> , X <sub>41</sub> , X <sub>45</sub> }
32	{X <sub>4</sub> , X <sub>22</sub> , X <sub>29</sub> }	81	{X <sub>1</sub> , X <sub>11</sub> , X <sub>12</sub> , X <sub>13</sub> , X <sub>20</sub> }	130	{X <sub>6</sub> , X <sub>24</sub> , X <sub>26</sub> }	179	{X <sub>7</sub> , X <sub>21</sub> , X <sub>22</sub> }	228	{X <sub>11</sub> , X <sub>12</sub> , X <sub>26</sub> , X <sub>33</sub> , X <sub>34</sub> , X <sub>35</sub> , X <sub>36</sub> , X <sub>40</sub> , X <sub>41</sub> , X <sub>46</sub> }
33	{X <sub>4</sub> , X <sub>22</sub> , X <sub>30</sub> }	82	{X <sub>1</sub> , X <sub>3</sub> , X <sub>15</sub> }	131	{X <sub>6</sub> , X <sub>24</sub> , X <sub>27</sub> }	180	{X <sub>2</sub> , X <sub>21</sub> , X <sub>23</sub> }	229	{X <sub>11</sub> , X <sub>12</sub> , X <sub>26</sub> , X <sub>33</sub> , X <sub>34</sub> , X <sub>35</sub> , X <sub>36</sub> , X <sub>40</sub> , X <sub>41</sub> , X <sub>47</sub> }
34	{X <sub>5</sub> , X <sub>22</sub> , X <sub>26</sub> }	83	{X <sub>1</sub> , X <sub>3</sub> , X <sub>16</sub> }	132	{X <sub>6</sub> , X <sub>24</sub> , X <sub>28</sub> }	181	{X <sub>2</sub> , X <sub>21</sub> , X <sub>24</sub> }	230	{X <sub>11</sub> , X <sub>12</sub> , X <sub>26</sub> , X <sub>33</sub> , X <sub>34</sub> , X <sub>35</sub> , X <sub>36</sub> , X <sub>40</sub> , X <sub>42</sub> , X <sub>45</sub> }
35	{X <sub>5</sub> , X <sub>22</sub> , X <sub>27</sub> }	84	{X <sub>1</sub> , X <sub>3</sub> , X <sub>17</sub> }	133	{X <sub>6</sub> , X <sub>24</sub> , X <sub>29</sub> }	182	{X <sub>2</sub> , X <sub>21</sub> , X <sub>25</sub> }	231	{X <sub>11</sub> , X <sub>12</sub> , X <sub>26</sub> , X <sub>33</sub> , X <sub>34</sub> , X <sub>35</sub> , X <sub>36</sub> , X <sub>40</sub> , X <sub>42</sub> , X <sub>46</sub> }
36	{X <sub>5</sub> , X <sub>22</sub> , X <sub>28</sub> }	85	{X <sub>1</sub> , X <sub>3</sub> , X <sub>18</sub> }	134	{X <sub>6</sub> , X <sub>24</sub> , X <sub>30</sub> }	183	{X <sub>3</sub> , X <sub>21</sub> , X <sub>23</sub> }	232	{X <sub>11</sub> , X <sub>12</sub> , X <sub>26</sub> , X <sub>33</sub> , X <sub>34</sub> , X <sub>35</sub> , X <sub>36</sub> , X <sub>40</sub> , X <sub>42</sub> , X <sub>47</sub> }
37	{X <sub>5</sub> , X <sub>22</sub> , X <sub>29</sub> }	86	{X <sub>1</sub> , X <sub>3</sub> , X <sub>19</sub> }	135	{X <sub>6</sub> , X <sub>25</sub> , X <sub>26</sub> }	184	{X <sub>3</sub> , X <sub>21</sub> , X <sub>24</sub> }	233	{X <sub>11</sub> , X <sub>12</sub> , X <sub>26</sub> , X <sub>33</sub> , X <sub>34</sub> , X <sub>35</sub> , X <sub>36</sub> , X <sub>40</sub> , X <sub>43</sub> , X <sub>45</sub> }
38	{X <sub>5</sub> , X <sub>22</sub> , X <sub>30</sub> }	87	{X <sub>1</sub> , X <sub>3</sub> , X <sub>20</sub> }	136	{X <sub>6</sub> , X <sub>25</sub> , X <sub>27</sub> }	185	{X <sub>3</sub> , X <sub>21</sub> , X <sub>25</sub> }	234	{X <sub>11</sub> , X <sub>12</sub> , X <sub>26</sub> , X <sub>33</sub> , X <sub>34</sub> , X <sub>35</sub> , X <sub>36</sub> , X <sub>40</sub> , X <sub>43</sub> , X <sub>46</sub> }
39	{X <sub>6</sub> , X <sub>22</sub> , X <sub>26</sub> }	88	{X <sub>1</sub> , X <sub>4</sub> , X <sub>15</sub> }	137	{X <sub>6</sub> , X <sub>25</sub> , X <sub>28</sub> }	186	{X <sub>4</sub> , X <sub>21</sub> , X <sub>23</sub> }	235	{X <sub>11</sub> , X <sub>12</sub> , X <sub>26</sub> , X <sub>33</sub> , X <sub>34</sub> , X <sub>35</sub> , X <sub>36</sub> , X <sub>40</sub> , X <sub>43</sub> , X <sub>47</sub> }
40	{X <sub>6</sub> , X <sub>22</sub> , X <sub>27</sub> }	89	{X <sub>1</sub> , X <sub>4</sub> , X <sub>16</sub> }	138	{X <sub>6</sub> , X <sub>25</sub> , X <sub>29</sub> }	187	{X <sub>4</sub> , X <sub>21</sub> , X <sub>24</sub> }	236	{X <sub>1</sub> , X <sub>11</sub> , X <sub>12</sub> , X <sub>26</sub> , X <sub>34</sub> , X <sub>35</sub> , X <sub>36</sub> , X <sub>40</sub> , X <sub>42</sub> , X <sub>44</sub> , X <sub>48</sub> }
41	{X <sub>6</sub> , X <sub>22</sub> , X <sub>28</sub> }	90	{X <sub>1</sub> , X <sub>4</sub> , X <sub>17</sub> }	139	{X <sub>6</sub> , X <sub>25</sub> , X <sub>30</sub> }	188	{X <sub>4</sub> , X <sub>21</sub> , X <sub>25</sub> }	237	{X <sub>1</sub> , X <sub>11</sub> , X <sub>12</sub> , X <sub>26</sub> , X <sub>34</sub> , X <sub>35</sub> , X <sub>36</sub> , X <sub>40</sub> , X <sub>43</sub> , X <sub>44</sub> , X <sub>48</sub> }
42	{X <sub>6</sub> , X <sub>22</sub> , X <sub>29</sub> }	91	{X <sub>1</sub> , X <sub>4</sub> , X <sub>18</sub> }	140	{X <sub>7</sub> , X <sub>23</sub> , X <sub>26</sub> }	189	{X <sub>5</sub> , X <sub>21</sub> , X <sub>23</sub> }	238	{X <sub>1</sub> , X <sub>11</sub> , X <sub>12</sub> , X <sub>26</sub> , X <sub>34</sub> , X <sub>35</sub> , X <sub>36</sub> , X <sub>40</sub> , X <sub>41</sub> , X <sub>44</sub> , X <sub>49</sub> }
43	{X <sub>6</sub> , X <sub>22</sub> , X <sub>30</sub> }	92	{X <sub>1</sub> , X <sub>4</sub> , X <sub>19</sub> }	141	{X <sub>7</sub> , X <sub>23</sub> , X <sub>27</sub> }	190	{X <sub>5</sub> , X <sub>21</sub> , X <sub>24</sub> }	239	{X <sub>1</sub> , X <sub>11</sub> , X <sub>12</sub> , X <sub>26</sub> , X <sub>34</sub> , X <sub>35</sub> , X <sub>36</sub> , X <sub>40</sub> , X <sub>41</sub> , X <sub>44</sub> , X <sub>50</sub> }
44	{X <sub>7</sub> , X <sub>22</sub> , X <sub>26</sub> }	93	{X <sub>1</sub> , X <sub>4</sub> , X <sub>20</sub> }	142	{X <sub>7</sub> , X <sub>23</sub> , X <sub>28</sub> }	191	{X <sub>5</sub> , X <sub>21</sub> , X <sub>25</sub> }	240	{X <sub>1</sub> , X <sub>11</sub> , X <sub>12</sub> , X <sub>26</sub> , X <sub>34</sub> , X <sub>35</sub> , X <sub>36</sub> , X <sub>40</sub> , X <sub>42</sub> , X <sub>44</sub> , X <sub>49</sub> }
45	{X <sub>7</sub> , X <sub>22</sub> , X <sub>27</sub> }	94	{X <sub>1</sub> , X <sub>5</sub> , X <sub>15</sub> }	143	{X <sub>7</sub> , X <sub>23</sub> , X <sub>29</sub> }	192	{X <sub>6</sub> , X <sub>21</sub> , X <sub>23</sub> }	241	{X <sub>1</sub> , X <sub>11</sub> , X <sub>12</sub> , X <sub>26</sub> , X <sub>34</sub> , X <sub>35</sub> , X <sub>36</sub> , X <sub>40</sub> , X <sub>42</sub> , X <sub>44</sub> , X <sub>50</sub> }
46	{X <sub>7</sub> , X <sub>22</sub> , X <sub>28</sub> }	95	{X <sub>1</sub> , X <sub>5</sub> , X <sub>16</sub> }	144	{X <sub>7</sub> , X <sub>23</sub> , X <sub>30</sub> }	193	{X <sub>6</sub> , X <sub>21</sub> , X <sub>24</sub> }	242	{X <sub>1</sub> , X <sub>11</sub> , X <sub>12</sub> , X <sub>26</sub> , X <sub>34</sub> , X <sub>35</sub> , X <sub>36</sub> , X <sub>40</sub> , X <sub>43</sub> , X <sub>44</sub> , X <sub>49</sub> }
47	{X <sub>7</sub> , X <sub>22</sub> , X <sub>29</sub> }	96	{X <sub>1</sub> , X <sub>5</sub> , X <sub>17</sub> }	145	{X <sub>7</sub> , X <sub>24</sub> , X <sub>26</sub> }	194	{X <sub>6</sub> , X <sub>21</sub> , X <sub>25</sub> }	243	{X <sub>1</sub> , X <sub>11</sub> , X <sub>12</sub> , X <sub>26</sub> , X <sub>34</sub> , X <sub>35</sub> , X <sub>36</sub> , X <sub>40</sub> , X <sub>43</sub> , X <sub>44</sub> , X <sub>50</sub> }
48	{X <sub>7</sub> , X <sub>22</sub> , X <sub>30</sub> }	97	{X <sub>1</sub> , X <sub>5</sub> , X <sub>18</sub> }	146	{X <sub>7</sub> , X <sub>24</sub> , X <sub>27</sub> }	195	{X <sub>7</sub> , X <sub>21</sub> , X <sub>23</sub> }	244	{X <sub>11</sub> , X <sub>12</sub> , X <sub>26</sub> , X <sub>33</sub> , X <sub>34</sub> , X <sub>35</sub> , X <sub>36</sub> , X <sub>40</sub> , X <sub>41</sub> , X <sub>44</sub> }
49	{X <sub>2</sub> , X <sub>23</sub> , X <sub>26</sub> }	98	{X <sub>1</sub> , X <sub>5</sub> , X <sub>19</sub> }	147	{X <sub>7</sub> , X <sub>24</sub> , X <sub>28</sub> }	196	{X <sub>7</sub> , X <sub>21</sub> , X <sub>24</sub> }	245	{X <sub>1</sub> , X <sub>11</sub> , X <sub>12</sub> , X <sub>26</sub> , X <sub>34</sub> , X <sub>35</sub> , X <sub>36</sub> , X <sub>40</sub> , X <sub>41</sub> , X <sub>44</sub> , X <sub>48</sub> }

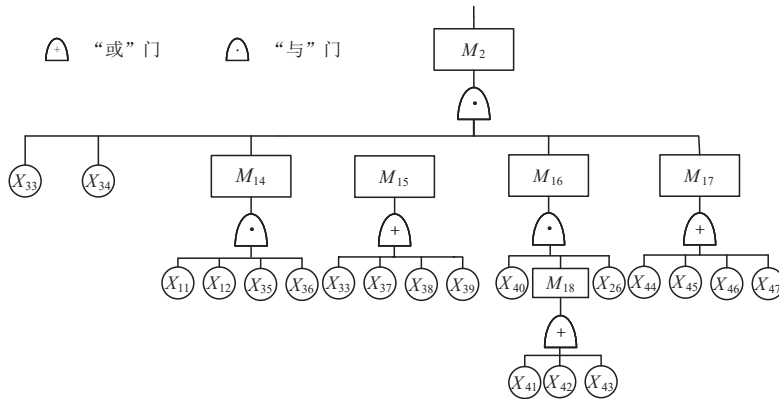


图7 储气库地面工艺管道内腐蚀失效故障树

Fig. 7 Fault tree for corrosion failure inside surface process pipelines in underground gas storage facilities

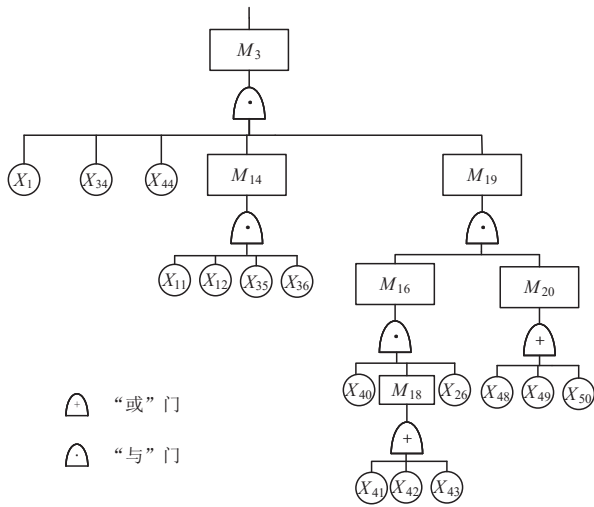


图8 储气库地面工艺管道腐蚀开裂失效故障树

Fig. 8 Fault tree for corrosion cracking failure of surface process pipelines in gas storage facilities

层下部积水和 $X_7$ 防腐绝缘涂层脆性过大采取针对性措施。因此,在储气库管理和运行过程中,应从多个方面入手,进行全面的储气库腐蚀失效预防措施。

根据故障树分析结果得出,在储气库发生腐蚀失效时,外腐蚀的可能性最大,因此应该着重加强对储气库外腐蚀的预防,如:加大对储气库的防腐绝缘层的保护、定期检查和修复储气库外部损坏等。同时,结构重要度排序表明:针对储气库抗腐蚀性差的结构重要度最大,第三方破坏以及施工缺陷次之,因此可以从提高储气库的防腐性、加大内外检查频率等方面入手,防止储气库腐蚀失效的发生。对于储气库内腐蚀和腐蚀开裂,故障树分析结果显示:产生这些故障的主要因素为特定介质的腐蚀和腐蚀检测结果差。因此,在采取管控措施时可以从提高储气库的耐腐蚀性、输送介质的净化等方面入手。这

表5 基本事件结构重要度

Table 5 Importance of basic event structure

基本事件	结构重要度	基本事件	结构重要度
$X_1$	$I_{[X_1]}=0.999\ 999\ 991\ 511$	$X_{26}$	$I_{[X_{26}]}=0.999\ 028\ 455\ 528$
$X_2$	$I_{[X_2]}=0.999\ 899\ 547\ 574$	$X_{27}$	$I_{[X_{27}]}=0.998\ 996\ 608\ 722$
$X_3$	$I_{[X_3]}=0.999\ 899\ 547\ 574$	$X_{28}$	$I_{[X_{28}]}=0.998\ 996\ 608\ 722$
$X_4$	$I_{[X_4]}=0.999\ 899\ 547\ 574$	$X_{29}$	$I_{[X_{29}]}=0.998\ 996\ 608\ 722$
$X_5$	$I_{[X_5]}=0.999\ 899\ 547\ 574$	$X_{30}$	$I_{[X_{30}]}=0.998\ 996\ 608\ 722$
$X_6$	$I_{[X_6]}=0.999\ 899\ 547\ 574$	$X_{31}$	$I_{[X_{31}]}=0.929\ 608\ 106\ 613$
$X_7$	$I_{[X_7]}=0.999\ 899\ 547\ 574$	$X_{32}$	$I_{[X_{32}]}=0.929\ 608\ 106\ 613$
$X_8$	$I_{[X_8]}=0.899\ 887\ 084\ 961$	$X_{33}$	$I_{[X_{33}]}=0.023\ 187\ 361\ 927$
$X_9$	$I_{[X_9]}=0.899\ 887\ 084\ 961$	$X_{34}$	$I_{[X_{34}]}=0.031\ 739\ 169\ 359$
$X_{10}$	$I_{[X_{10}]}=0.899\ 887\ 084\ 961$	$X_{35}$	$I_{[X_{35}]}=0.031\ 739\ 169\ 359$
$X_{11}$	$I_{[X_{11}]}=0.422\ 219\ 906\ 607$	$X_{36}$	$I_{[X_{36}]}=0.031\ 739\ 169\ 359$
$X_{12}$	$I_{[X_{12}]}=0.422\ 219\ 906\ 607$	$X_{37}$	$I_{[X_{37}]}=0.000\ 000\ 000\ 000$
$X_{13}$	$I_{[X_{13}]}=0.403\ 280\ 526\ 167$	$X_{38}$	$I_{[X_{38}]}=0.000\ 000\ 000\ 000$
$X_{14}$	$I_{[X_{14}]}=0.929\ 608\ 106\ 613$	$X_{39}$	$I_{[X_{39}]}=0.000\ 000\ 000\ 000$
$X_{15}$	$I_{[X_{15}]}=0.929\ 608\ 106\ 613$	$X_{40}$	$I_{[X_{40}]}=0.031\ 739\ 169\ 359$
$X_{16}$	$I_{[X_{16}]}=0.929\ 608\ 106\ 613$	$X_{41}$	$I_{[X_{41}]}=0.010\ 693\ 670\ 076$
$X_{17}$	$I_{[X_{17}]}=0.929\ 608\ 106\ 613$	$X_{42}$	$I_{[X_{42}]}=0.010\ 693\ 670\ 076$
$X_{18}$	$I_{[X_{18}]}=0.929\ 608\ 106\ 613$	$X_{43}$	$I_{[X_{43}]}=0.010\ 693\ 670\ 076$
$X_{19}$	$I_{[X_{19}]}=0.929\ 608\ 106\ 613$	$X_{44}$	$I_{[X_{44}]}=0.014\ 551\ 549\ 120$
$X_{20}$	$I_{[X_{20}]}=0.929\ 608\ 106\ 613$	$X_{45}$	$I_{[X_{45}]}=0.005\ 847\ 938\ 359$
$X_{21}$	$I_{[X_{21}]}=0.998\ 996\ 608\ 722$	$X_{46}$	$I_{[X_{46}]}=0.005\ 847\ 938\ 359$
$X_{22}$	$I_{[X_{22}]}=0.999\ 968\ 216\ 225$	$X_{47}$	$I_{[X_{47}]}=0.005\ 847\ 938\ 359$
$X_{23}$	$I_{[X_{23}]}=0.999\ 968\ 216\ 225$	$X_{48}$	$I_{[X_{48}]}=0.002\ 926\ 827\ 408$
$X_{24}$	$I_{[X_{24}]}=0.999\ 968\ 216\ 225$	$X_{49}$	$I_{[X_{49}]}=0.002\ 926\ 827\ 408$
$X_{25}$	$I_{[X_{25}]}=0.999\ 968\ 216\ 225$	$X_{50}$	$I_{[X_{50}]}=0.002\ 926\ 827\ 408$

些措施可以降低故障发生的概率,提高储气库的安全性和可靠性。

### 2.3 层次-模糊综合分析

#### 2.3.1 储气库地面工艺管道腐蚀失效因素划分

把储气库地面工艺管道腐蚀失效的影响因素总结为

四大类:腐蚀,自然环境,储气库设备,第三方破坏。各个单元以及各个单元所对应的因素和专家打分见表6。

根据上表6,构建一个判断矩阵A(表7),其中 $a_1$ 、 $a_2$ 、 $a_3$ 、 $a_4$ 表示二级因素。

### 2.3.2 层次单排序

根据公式(11),求不同因素的特征向量 $m_i$ ,得到:腐蚀因素的特征向量 $m_1=90$ ,自然环境因素特征向量 $m_2=\frac{1}{15}$ ,储气库设备因素特征向量 $m_3=\frac{25}{3}$ ,第三方破坏因素特征向量 $m_4=\frac{1}{50}$ 。

根据公式(12),计算 $m_i$ 的4次方根 $\omega_i$ ,得到:腐蚀因素的4次方根 $\omega_1=3.0801$ ,自然环境因素的4次方根 $\omega_2=0.5081$ ,储气库设备因素的4次方根 $\omega_3=1.6990$ ,第三方破坏因素的4次方根 $\omega_4=0.3760$ 。

对得出的特征向量集合 $\omega = [\omega_1, \omega_2, \dots, \omega_n]^T$ (T为转置符号)进行进一步的归一化处理,按照公式(13),计算得到: $W_1 = 0.5439, W_2 = 0.0897, W_3 = 0.3000, W_4 = 0.0664$ 。

$\sum \omega_i$ 为所有 $\omega_i$ 的求和,即 $\sum \omega_i = 5.6632$ 。 $W_i$ 为 $\omega_i$ 的相对权重向量,同理, $W_2$ 、 $W_3$ 、 $W_4$ 分别为 $\omega_2$ 、 $\omega_3$ 、 $\omega_4$ 的相对权重向量。

所以,求得的相对权重向量集合如下:

$$W = [W_1, W_2, W_3, W_4]^T = [0.5439, 0.0897, 0.3000, 0.0664]^T \quad (16)$$

表6 储气库地面工艺管道腐蚀失效因素  
Table 6 Corrosion failure factors in surface process pipelines of underground gas storage facilities

一级因素	二级因素	三级因素	评分
储气库腐蚀失效	腐蚀	外部腐蚀	26
		内部腐蚀	20
		防腐措施失效	7
	自然环境	土壤因素	4
		大气因素	4
	储气库设备	储气库本身缺陷	13
		设计施工问题	17
	第三方破坏	人为破坏	3
地层运动		6	

表7 判断矩阵  
Table 7 Judgment matrix

判断矩阵A	腐蚀 $a_1$	自然环境 $a_2$	储气库设备 $a_3$	第三方破坏 $a_4$
腐蚀 $a_1$	1	6	3	5
自然环境 $a_2$	1/6	1	1/5	2
储气库设备 $a_3$	1/3	5	1	5
第三方破坏 $a_4$	1/5	1/2	1/5	1

### 1) 储气库失效权重一致性检验

首先求得最大特征值 $\lambda_{\max}$ 。

$$AW = \begin{bmatrix} 1 & 6 & 3 & 5 \\ 1/6 & 1 & 1/5 & 2 \\ 1/3 & 5 & 1 & 5 \\ 1/5 & 1/2 & 1/5 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 0.5439 \\ 0.0897 \\ 0.3000 \\ 0.0664 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 2.31410 \\ 0.37315 \\ 1.26180 \\ 0.28003 \end{bmatrix} \quad (17)$$

式中:W为相对权重向量集合。

$$\lambda_{\max} = \sum_{i=1}^4 \frac{(AW)_i}{nW_i} = 4.2095 \quad (18)$$

根据公式(14)计算一致性指标 $C_1 = 0.0698$ 。

计算一致性比率,根据矩阵随机一致性指标取得: $R_1=0.9$ 。

因为 $C_R = 0.0776 < 0.1000$ ,通过一致性检验。所以储气库失效相对权重向量集合为[0.5439, 0.0897, 0.3000, 0.0664]。

### 2) 建立评价集与权重集

由层次分析法依次得到了储气库腐蚀失效故障树模型的四类风险源因素,已建立 $U =$ [腐蚀,自然环境,储气库设备,第三方破坏],它们的权重分别为:[0.5439, 0.0897, 0.3000, 0.0664],为了后续计算的简便,将所求得的权重进一步简化为[0.54, 0.09, 0.30, 0.07]。即:

$$Q = [q_1, q_2, q_3, q_4] = [0.54, 0.09, 0.30, 0.07] \quad (19)$$

式中:Q为简化后的权重集, $q_1$ 、 $q_2$ 、 $q_3$ 、 $q_4$ 为简化后的向量。

从储气库失效权重矩阵可以看出,式(19)表示储气库地面工艺管道的腐蚀风险所占的权重为54.4%。

### 3) 建立评价等级集合

在储气库设备腐蚀损伤评价中,可以通过检测和测量储气库内部最大腐蚀深度来进行预测和评估储气库腐蚀损伤的程度和影响,评价应符合石油天然气行业标准《钢质管道金属损失缺陷评价方法:SY/T 6151—2022》和石油天然气行业标准《钢质油气管道凹陷评价方法:SY/T 6996—2014》的规定,见表8。

取5个评价等级分别为极小、较小、中等、较大、极大,其对应评价等级分别为1、2、3、4、5。形成评价等级集合 $V =$ [风险极大,风险较大,风险一般,风险较小,风险极小]。

表8 储气库地面工艺管道腐蚀损伤评价  
Table 8 Evaluation of corrosion damage in surface process pipelines of underground gas storage facilities

级别	最大蚀坑深度	腐蚀状态
轻	小于1 mm	1
中	[1, 2]mm	2
重	[10%, 50%]壁厚	3
严重	(50%, 80%]壁厚	4
穿孔	大于80%壁厚	5

4) 建立模糊关系矩阵  $R$ 

$$R = \begin{bmatrix} 0.500 & 0.250 & 0.125 & 0.125 & 0 \\ 0.250 & 0.500 & 0.125 & 0.125 & 0 \\ 0.125 & 0.250 & 0.500 & 0.125 & 0 \\ 0.250 & 0.375 & 0.250 & 0.125 & 0 \end{bmatrix} \quad (20)$$

5) 建立模糊综合评价模型  $B$ 

$$B = QR = [0.347 \ 50, 0.281 \ 25, 0.246 \ 25, 0.125 \ 00, 0] \quad (21)$$

根据最大隶属度原则,从评价结果  $B$  得出储气库地面工艺管道腐蚀失效风险为“风险极大”级别。“风险极大”和“风险较大”级别的比例占到了 62.9%。

## 3 结论

1) 为实现储气库地面工艺管道腐蚀泄漏风险的评价,提出了基于储气库地面工艺管道的知识模型,得到了以“腐蚀失效”为顶上事件的储气库腐蚀失效故障树的四类风险源因素:腐蚀,自然环境,储气库设备,第三方破坏。

2) 以中原储气库为例,研究表明:储气库地面工艺管道的腐蚀风险所占权重为 54.4%。根据地面工艺管道最大腐蚀深度检测数据,采用层次-模糊综合分析法得到该储气库地面工艺管道腐蚀失效风险为“风险极大”级别。

3) 与以往研究相比,该模型在构建方法和算法选择上有所创新,结合了贝叶斯预测及知识数据双驱动、层次-模糊综合评价法,提高了风险评价的准确性与可靠性。在实施管控措施时,可以从提高储气库地面工艺管道的耐腐蚀性、净化输送介质等方面入手,降低故障发生的风险,并提高储气库的安全性。

## 参考文献

- [1] 糜利栋, 曾大乾, 刘华, 等. 天然气地下储气库智能化建设关键技术及其发展趋势[J]. 石油与天然气地质, 2024, 45(2): 581-592.  
MI Lidong, ZENG Daqian, LIU Hua, et al. Key technologies and development trends for intelligent construction of underground gas storage facilities[J]. Oil & Gas Geology, 2024, 45(2): 581-592.
- [2] LIU Y M, TAN X, BAO Y Q. Machine learning-assisted intelligent interpretation of distributed fiber optic sensor data for automated monitoring of pipeline corrosion[J]. Measurement, 2024, 226: 114190.
- [3] 糜利栋, 曾大乾, 刘华, 等. 中国石化地下储气库一体化综合平台研发与应用[J]. 油气藏评价与开发, 2023, 13(6): 781-788.  
MI Lidong, ZENG Daqian, LIU Hua, et al. Development and application of Sinopec integrated management platform for underground gas storage[J]. Petroleum Reservoir Evaluation and Development, 2023, 13(6): 781-788.
- [4] 糜利栋, 曾大乾, 李遵照, 等. 中国石化地下储气库智能化建设进展及展望[J]. 世界石油工业, 2023, 30(6): 88-95.  
MI Lidong, ZENG Daqian, LI Zunzhao, et al. Progress and prospect of intelligent of Sinopec underground gas storage[J]. World Petroleum Industry, 2023, 30(6): 88-95.
- [5] 骆正山, 宁清云, 骆济豪. 盐岩储气库稳定性评估模型与应用研

究[J]. 智能计算机与应用, 2024, 14(1): 43-48.

- LUO Zhengshan, NING Qingyun, LUO Jihao. Stability assessment of gas storage reservoirs based on integrated assignment-efficacy factor [J]. Intelligent Computer and Applications, 2024, 14(1): 43-48.
- [6] XUE T F, SHI X L, WANG G B, et al. Study on repairing technical parameters of irregular gas storage salt caverns[J]. Energy, 2024, 293: 130484.
- [7] LI F Q, LI F F, SUN R, et al. A study on the transient response of compressed air energy storage in the interaction between gas storage chambers and horseshoe-shaped tunnels in an abandoned coal mine [J]. Energies, 2024, 17(4): 953.
- [8] 李娟, 陈莉, 顾晓敏. 油田集输管道腐蚀特性及防腐技术研究[J]. 化学工程师, 2024, 38(2): 51-54.  
LI Juan, CHEN Li, GU Xiaomin. Research on corrosion characteristics and anticorrosion technology of oilfield gathering and transportation pipeline[J]. Chemical Engineer, 2024, 38(2): 51-54.
- [9] 骆正山, 于瑶如, 骆济豪, 等. 基于IAOA-KELM的储气库注采管柱内腐蚀速率预测[J]. 安全与环境学报, 2024, 24(3): 971-977.  
LUO Zhengshan, YU Yaoru, LUO Jihao, et al. Prediction of corrosion rate in gas storage injection-production string based on IAOA-KELM [J]. Journal of Safety and Environment, 2024, 24(3): 971-977.
- [10] 黄剑华, 赵春, 赵建国. 油气藏型储气库 CO<sub>2</sub> 腐蚀防护技术研究 [J]. 油气田地面工程, 2024, 43(3): 76-81.  
HUANG Jianhua, ZHAO Chun, ZHAO Jianguo. Research on CO<sub>2</sub> corrosion protection technology of oil and gas reservoir type gas storage[J]. Oil-Gasfield Surface Engineering, 2024, 43(3): 76-81.
- [11] 康健, 王雨涛, 张璐, 等. 基于层次筛选的风险评价方法在油气集输系统中的应用[J]. 北京石油化学学院学报, 2017, 25(1): 46-50.  
KANG Jian, WANG Yutao, ZHANG Lu, et al. Research on risk evaluation on oil gas gathering and transportation system based on multi-layer risk factors screening[J]. Journal of Beijing Institute of Petrochemical Technology, 2017, 25(1): 46-50.
- [12] 孙晓宇. 基于FCE-RAM的油气集输系统风险条块结合评定方法研究[J]. 北京石油化学学院学报, 2017, 25(4): 45-50.  
SUN Xiaoyu. Risk grade evaluation on oil & gas gathering and transportation system based on fuzzy comprehensive evaluation and risk assessment matrix[J]. Journal of Beijing Institute of Petrochemical Technology, 2017, 25(4): 45-50.
- [13] ZHANG G Q, ZHU S N, ZENG D Q, et al. Sealing capacity evaluation of underground gas storage under intricate geological conditions[J]. Energy Geoscience, 2024, 5(3): 100292.
- [14] SOLEIMANI M, SHAHBEIGI S, ESFAHANI N M. A Bayesian network development methodology for fault analysis; case study of the automotive after treatment system[J]. Mechanical Systems and Signal Processing, 2024, 216: 111459.
- [15] XU L, WANG Y F, MO L, et al. The research progress and prospect of data mining methods on corrosion prediction of oil and gas pipelines[J]. Engineering Failure Analysis, 2023, 144: 106951.
- [16] 刘毅璠, 闫怡飞, 宋运存, 等. 储气库套管柱环空压力影响因素动态评价[J]. 石油管材与仪器, 2022, 8(5): 51-56.  
LIU Yipan, YAN Yifei, SONG Yuncun, et al. Risk assessment of annular pressure buildup in natural gas storage[J]. Petroleum Instruments, 2022, 8(5): 51-56.
- [17] BIGDELI F, JAVIDI M, PAKSHIR M, et al. Risk assessment of the corrosion resistance performances for epoxy coatings under drilling environments using AHP method[J]. International Journal of Pressure Vessels and Piping, 2021, 193: 104470.

(编辑 尹淑容)