



DOI:10.12404/j.issn.1671-1815.2402427

引用格式:苏晓娅,秦林波,韩军,等.基于组合赋权法-云模型的 LNG 化工厂安全评价[J].科学技术与工程,2025,25(7):3071-3077.

Su Xiaoya, Qin Linbo, Han Jun, et al. Safety evaluation of LNG chemical plants based on combination weighting method and cloud model [J]. Science Technology and Engineering, 2025, 25(7): 3071-3077.

基于组合赋权法-云模型的 LNG 化工厂安全评价

苏晓娅¹, 秦林波^{1,2*}, 韩军^{1,2}, 赵波^{1,2}, 陈旺生^{1,2}

(1. 武汉科技大学资源与环境工程学院, 武汉 430081; 2. 湖北省工业安全工程技术研究中心, 武汉 430081)

摘要 针对液化天然气(liquefied natural gas, LNG)化工厂安全评价中存在模糊性、随机性等问题,提出了一种基于正态云模型的风险评估方法,该方法基于本质安全化选取评价指标,并通过专家评判量化事故可能性和严重度。通过结合层次分析法(analytic hierarchy process, AHP)和 CRITIC(criteria importance through intercriteria correlation)赋权法确定各指标权重,利用正向云发生器柔化风险矩阵阈值,并通过逆向云发生器优化评价结果,从而得出云特征数字,并生成对应的二维云图。通过将实际云图与标准云图进行对比,确定各评价指标风险等级。以企业 LNG 化工厂为实例,结果表明:该模型有效融合了专家意见,保留了评估结果的随机性和模糊性,实现了风险评价结果可视化,为 LNG 化工厂安全管理提供了一种新的风险评估工具。

关键词 LNG 化工厂; 云模型; 层次分析法(AHP); CRITIC 赋权法; 安全评价

中图分类号 X913.4; **文献标志码** A

Safety Evaluation of LNG Chemical Plants Based on Combination Weighting Method and Cloud Model

SU Xiao-ya¹, QIN Lin-bo^{1,2,*}, HAN Jun^{1,2}, ZHAO Bo^{1,2}, CHEN Wang-sheng^{1,2}

(1. College of Resources and Environment Engineering, Wuhan University of Science and Technology, Wuhan 430081, China;

2. Hubei Provincial Industrial Safety Engineering Technology Research Center, Wuhan 430081, China)

[Abstract] To address the fuzziness and randomness in safety evaluations of liquefied natural gas (LNG) chemical plants, a novel risk assessment method was proposed based on the normal cloud model. The proposed method was based on the selection of evaluation indicators from the perspective of intrinsic safety, which was used to evaluate the severity and likelihood of accidents through expert judgment. The weights of the indicators were determined by combining the analytic hierarchy process (AHP) and the criteria importance through intercriteria correlation (CRITIC). The risk matrix thresholds were softened using a forward cloud generator, and the evaluation results were optimized through a backward cloud generator to obtain cloud characteristic numbers and generate corresponding two-dimensional cloud maps. By comparing the actual cloud map with the standard cloud map, the risk levels of the evaluation indicators were determined. The results show that the model effectively integrates the expert opinions with aims of retaining the randomness and fuzziness, and providing the visualizes the risk assessment results. The novel method also provides a new risk assessment tool for the safety management of LNG chemical plants.

[Keywords] LNG chemical plant; cloud models; analytic hierarchy process (AHP); CRITIC weighting method; safety evaluation

天然气是一种低碳环保能源,因其具有丰富储量和相对低廉价格,被认为是最有潜力的石油替代能源之一^[1]。天然气使用既可以减轻环境污染,也符合全球可持续能源体系转型的大趋势。相比重燃料油和柴油等传统石油燃料,液化天然气(liquefied natural gas, LNG)的使用可以减少 33.7% 污染物排放^[2]。随着中国能源战略不断推进,中国对液化天然气需求急剧增加。根据数据显示,2022 年中国天然

气表观消费量达到 3 663 亿 m³^[3], 占总能源消费量的 9.0%。为了更好地满足清洁能源的储备与使用需求,中国不断加强 LNG 化工厂的建设与发展。尽管 LNG 作为一种清洁能源具有显著的环境优势,但其使用过程的安全风险不容忽视。作为甲 A 类危险化学品,LNG 与空气容易形成爆炸性混合气体,且其快速的相变特性增加了火灾和爆炸事故发生的可能性^[4]。因此,采取科学准确的风险评估方法,全面分析 LNG

收稿日期:2024-04-05 修订日期:2024-07-09

基金项目:湖北省重点研发计划(2021BCA151, 2022BCA085, 2022BEC004)

第一作者:苏晓娅(1999—),女,汉族,山东泰安人,硕士研究生。研究方向:化工安全评价。E-mail:809048219@qq.com。

*通信作者:秦林波(1986—),男,汉族,湖北黄冈人,博士,副教授。研究方向:化工安全技术。E-mail:qinlinbo@wust.edu.cn。

投稿网址:www.stae.com.cn

生产、储存和运输过程中潜在安全隐患,为制定有效预防措施和应急响应策略提供理论和技术支撑,对于确保化工厂安全生产至关重要。

国内外学者对 LNG 化工厂风险评估进行了相关研究。程松民^[5]采用差分自回归移动平均 (autoregressive integrated moving average, ARIMA)、最小二乘支持向量机 (least squares support vector machine, LS-SVM) 和 BP 神经网络 (backpropagation neural network, BPNN) 组合模型对 LNG 化工厂风险事故进行预测;谢长春等^[6]通过层次分析法 (analytic hierarchy process, AHP)-灰色聚类模型构建了 LNG 化工厂安全风险评价方法;邓军等^[7]使用 SAFETI (software for assessment of flammable, explosive and toxic impacts) 软件对 LNG 厂区进行了定量风险评估,并提出了详细的风险管控措施。尽管上述研究极大地丰富了 LNG 化工厂风险评估方法理论,但评价过程存在不确定性和模糊性等问题,影响了评估结果的准确性和可靠性。因此,开发高准确性和可靠性的 LNG 化工厂风险评估方法是学术界亟待解决的难题。

云模型理论已被证明具有良好的普遍性^[8],不仅可以有效反映风险阈值的不确定性,还能处理事故严重度和可能性的随机性和模糊性问题。现提出一种基于正态云模型的风险评估方法,旨在有效地处理评价过程存在的不确定性与模糊性问题。该方法基于云模型钟形隶属函数,通过 MATLAB 软件输出 LNG 化工厂风险等级云图,实现风险评估结果的可视化处理,为 LNG 化工厂安全管理提供了一种新的风险评估工具,具有较高的实际应用价值和推广前景。

1 AHP-CRITIC 权重确定方法

1.1 AHP 法

层次分析法作为主观赋权方法,根据专家对指标成对的比较结果,构建判断矩阵,计算指标权重,可以有效地反映指标重要性^[9]。其主要通过四个步骤确定权重:①判断评价体系中各因素之间的关系,建立递阶层次结构模型;②根据对上一层准则的重要性程度,将同层次的各因素两两对比,进而构建两两对比矩阵 A ;③求解判断矩阵 A 对应于最大特征值的特征向量;④计算一致性率 (consistency rate, CR)、一致性指标 (consistency index, CI) 值,检验一致性^[10]。每一个因素对于其准则的相对权重计算公式为

$$w_i = \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n \frac{a_{ij}}{\sum_{k=i}^n a_{kj}}, \quad i = 1, 2, \dots, n \quad (1)$$

CR、CI 的计算公式为

$$CR = \frac{CI}{RI} \quad (2)$$

$$CI = \frac{\lambda_{\max} - n}{n - 1} \quad (3)$$

式中: a_{ij} 为因素 i 与因素 j 重要性程度的比较结果; w_i 为因素 i 的指标权重值;CR 为一致性比例,当 $CR < 0.10$ 时,则表明判断矩阵 A 的一致性程度被认为在容许的范围内;若 $CR \geq 0.10$ 时,则表明判断矩阵 A 需要重新构建;RI 为随机一致性指标,查表可确定; λ_{\max} 为判断矩阵的最大特征根; n 为矩阵阶数。

矩阵 A 中各元素的数值采用 1~9 标度法确定,如表 1 所示^[11]。

表 1 1~9 标度法的含义^[11]

Table 1 1~9 scale method and its meaning^[11]

| 标度 | 含义 |
|------------|---|
| 1 | 两因素相比,因素 i 同因素 j 同样重要 |
| 3 | 两因素相比,因素 i 比因素 j 稍微重要 |
| 5 | 两因素相比,因素 i 比因素 j 明显重要 |
| 7 | 两因素相比,因素 i 比因素 j 强烈重要 |
| 9 | 两因素相比,因素 i 比因素 j 极端重要 |
| 2, 4, 6, 8 | 上述两相邻判断的中值 |
| 倒数 | i 和 j 相比,如果标度为 3,则 i 和 j 相比就是 1/3 |

1.2 CRITIC 法

CRITIC (criteria importance though intercriteria correlation) 赋权法是由 Diakoulaki 等^[12]在 1995 年提出,用于确定评价标准客观权重的方法。通过综合考虑数据波动情况和指标间的相关性,利用信息量来计算各评价指标的权重。相比熵值法,CRITIC 法考虑了评价指标的冲突性和对比程度。对比强度是指评价指标之间的值差距,以标准差的形式反映出来。对比强度越高,各指标之间的差异就越大。冲突是指通过指标之间的相关性计算出的指标之间的相互影响程度^[13]。该方法主要通过三个步骤完成:①对原始数据进行无量纲化处理;②根据式(4)和式(5)计算标准差和相关系数,分别对评价指标进行波动性分析和冲突性分析;③根据式(6)和式(7)计算各评价指标权重^[14]。公式分别为

$$a_j = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^m (a_{ij} - \bar{a}_j)^2}{m}} \quad (4)$$

$$r_{jk} = \frac{\sum_{i=1}^m [(a_{ij} - \bar{a}_j)(a_{ik} - \bar{a}_k)]}{\sqrt{\sum_{i=1}^m (a_{ij} - \bar{a}_j)^2} \sqrt{\sum_{i=1}^m (a_{ik} - \bar{a}_k)^2}} \quad (5)$$

$$C_j = a_j \sum_{k=1}^m (1 - r_{jk}) \quad (6)$$

$$w_j = \frac{C_j}{\sum_{j=1}^n C_j}, \quad j = 1, 2, \dots, n \quad (7)$$

式中: a_j 为第 j 项评价指标的标准差; \bar{a}_j 为第 j 项指标经过无量纲化处理后的平均数; r_{jk} 为第 j 项评价指标和第 k 项评价指标之间的相关系数; C_j 为第 j 项评价指标的信息量值; w_j 为第 j 项评价指标的权重值。

1.3 综合权重

将依赖结构进行分析的层次分析法和反映数据间的相关性和变异性的 CRITIC 法所得到的权重, 计算得到组合严重度权重值。公式为

$$w_j = \frac{w'_j w_j^*}{\sum_{i=1}^4 w'_i w_i^*}, \quad j = 1, 2, 3, 4 \quad (8)$$

式(8)中: w_j 为第 j 项评价指标的组合权重值; w'_j 为层次分析法所得第 j 项评价指标的权重; w_j^* 为 CRITIC 赋权法所得第 j 项评价指标的权重。

2 LNG 化工厂安全评价云模型

2.1 云模型定义

云模型是李德毅等^[15]提出的, 可用于处理随机性和模糊性的信息, 实现信息定性与定量之间互相转化的方法模型。假定 C 代表在定量论域 U 上定义的定性概念, 若定量值 $x \in U$, 且 x 是 C 的一次随机实现, 则 x 对于 C 的隶属度 $u(x)$ 落在 $[0, 1]$ 区间内, 可视作具有稳定倾向的随机数。因此, 每个 x 可以被视为一云滴, 而 x 在论域 U 中的分布则构成了隶属云^[16]。

云的数字特征包括期望 Ex 、熵 En 和超熵 He , 以上对应数值共同构成了对定性概念的量化表示。期望 Ex 表示论域的中心值; 熵 En 表示一个定性概念可被度量的范围, 并反映了模糊概念的亦此亦彼的裕度; 超熵 He 表示熵 En 的不确定性, 即云图上云滴的离散程度^[17-18]。 Ex 、 En 和 He 计算公式为

$$\begin{cases} Ex = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N x_i \\ En = \frac{1}{N} \sqrt{\frac{\pi}{2}} \sum_{i=1}^N |x_i - \bar{x}| \\ He = \sqrt{\frac{1}{N-1} \sum_{i=1}^N (x_i - \bar{x})^2 - En^2} \end{cases} \quad (9)$$

式(9)中: x_i 为样本观测值, 即为专家打分值; \bar{x} 为样本平均观测值; N 为样本个数, 即专家人数。

当区间存在上下限 $[L_{\min}, L_{\max}]$ 时, 云模型的 Ex 、 En 和 He 的计算公式为

$$\begin{cases} Ex = (L_{\min} + L_{\max})/2 \\ En = (L_{\max} - L_{\min})/6 \\ He = k \end{cases} \quad (10)$$

式(10)中: k 为常数, 依据变量的模糊程度取值为 0.01。

2.2 正态云模型

云模型按照论域的维数划分, 可从一维正态云模型延伸至二维, 乃至 n 维正态云模型。这种由低维到高维的扩展, 使得云模型能够灵活适用于不同领域和复杂度的问题, 为模糊信息的量化处理和不确定性分析提供了强大的数学框架。其中, 二维正态云模型由表示两个定性概念的两组数学特征 (E_x, En_x, He_x) 和 (E_y, En_y, He_y) 构建^[19], 用于表明两个因素共同作用下的模糊性和随机性。二维正态云模型的数学模型表达式为

$$\begin{cases} (x_i, y_i) = F(E_x, E_y, En_x, En_y) \\ ((P_{xi}, P_{yi}) = F(En_x, En_y, He_x, He_y)) \end{cases} \quad (11)$$

$$\mu_i = \exp\left\{-\frac{1}{2}\left[\frac{(x_i - E_x)^2}{P_{xi}^2} + \frac{(y_i - E_y)^2}{P_{yi}^2}\right]\right\} \quad (12)$$

式中: x_i, y_i 为云滴坐标值; E_x, En_x 为期望值; E_y, En_y 为标准差; P_{xi}, P_{yi} 分别为用于生成二维正态云模型中的云滴在 x 方向和 y 方向上的离散度; μ_i 为二维正态云模型的隶属度函数。

n 朵不同云 $E_i(E_{xi}, En_i, He_i)$ ($i = 1, 2, \dots, n$) 加权集成一朵云的过程称为云模型加权集成, 其中 μ_i ($i = 1, 2, \dots, n$) 为每朵云的权重, $E_0(E_{x_0}, En_0, He_0)$ 则为集成后的综合云^[20]。加权集成后的综合云如式(13):

$$\begin{cases} Ex_0 = \sum_{i=1}^n \mu_i Ex_i \\ En_0 = \sqrt{\sum_{i=1}^n (\mu_i En_i)^2} \\ He_0 = \sqrt{\sum_{i=1}^n (\mu_i He_i)^2} \end{cases} \quad (13)$$

将加权集成的综合云与标准云模型进行定量比较称为云模型相似性判定。其基于贴近度的相似性判定方法计算公式为

$$SD = \frac{1}{\sqrt{(Ex_1 - Ex'_1)^2 + (Ex_2 - Ex'_2)^2}} \quad (14)$$

式(14)中: SD 为云模型之间的贴近度; Ex_1 为事故严重度标准云模型的期望值; Ex'_1 为事故严重度实际云模型的期望值; Ex_2 为事故可能性标准云模型的期望值; Ex'_2 为事故可能性实际云模型的期望值。

3 典型实例

3.1 工程概况

以湖北省一个 LNG 化工厂为例进行风险评估。该化工厂主要生产装置为天然气液化装置,该装置的工艺流程主要分为净化工艺、液化工艺和产品储存工艺。主要涉及危险化学品有天然气、乙烯、丙烷、异戊烷,存在的主要危险事故类型包括泄漏扩散、火灾爆炸、中毒窒息等。由于 LNG 具有可燃性、扩散性和低温等特性^[21],若出现管道或容器失效等导致 LNG 泄漏,最终会引发火灾、爆炸等事故。故对 LNG 化工厂开展系统的安全评价并提出相应安全防范措施是至关重要的。

3.2 评价指标体系确定

通过对 LNG 化工厂进行实地查考,获取该 LNG 化工厂有关设备、人员和安全管理等方面的信息,并结合 LNG 化工厂相关安全标准和规范,选取相应的安全指标。从本质安全化的“人-机-环-管”四个方面对 LNG 化工厂进行分析,建立 LNG 化工厂安全状态风险评估的评价指标体系,如图 1 所示。

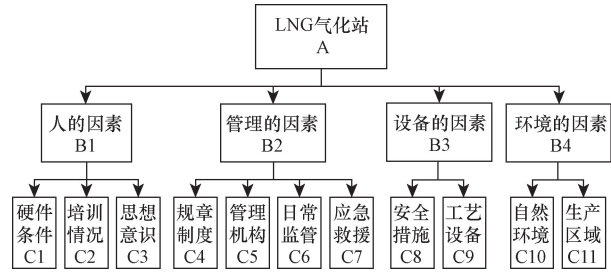


图 1 LNG 化工厂安全评价指标体系

Fig. 1 Safety evaluation index system of LNG chemical plant

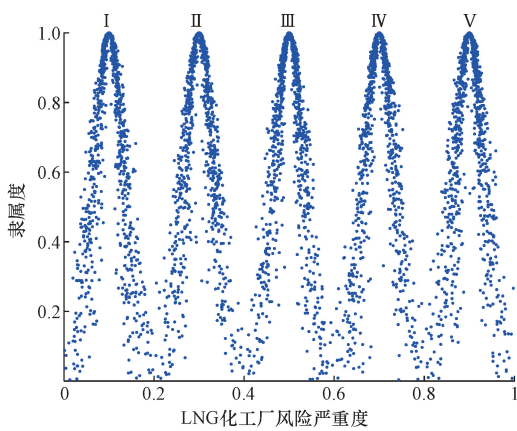
3.3 标准云模型

将事故严重度和事故可能性分为 I ~ V 五个等级^[7,20,22-23],具体参数设置见表 2。根据式(10)可以得到各风险等级所对应的云模型参数,进而得到 LNG 化工厂风险严重度隶属度二维云图,如图 2(a)所示。由于 LNG 化工厂的风险可以表述为 $D = f(\text{事故严重度}, \text{事故发生可能性})$,则风险等级标准云图如图 2(b)所示。其中,风险 D 是一个复合函数,依赖于事故的严重度和发生可能性两个变量。事故严重度描述事故发生时可能导致的损失程度,包括人员伤亡、环境破坏、财产损失等。事故发生可能性则是指在一定条件和时间内事故发生概率。

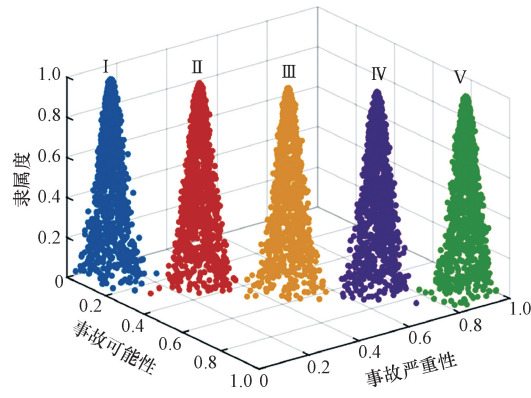
表 2 标准云模型风险分级参数

Table 2 Standard cloud model risk rating parameters

| 风险等级 | 风险值 | 风险等级范围 | 云模型参数 (Ex, En, He) | 可能概率 | 严重度 | | | |
|------|-----|------------|---------------------------|--|------|------|------|------|
| | | | | | 人员/人 | 环境/处 | 设备/台 | 管理/项 |
| I | 低 | [0, 0.2) | (0.1, 0.033, 0.01) | $[1 \times 10^{-5}, 1 \times 10^{-4})$ | 0~1 | 0~1 | 0~1 | 0~2 |
| II | 较低 | [0.2, 0.4) | (0.3, 0.033, 0.01) | $[1 \times 10^{-4}, 1 \times 10^{-3})$ | 1~2 | 1~2 | 1~2 | 2~4 |
| III | 中等 | [0.4, 0.6) | (0.5, 0.033, 0.01) | $[1 \times 10^{-3}, 1 \times 10^{-2})$ | 2~3 | 2~3 | 3~4 | 4~6 |
| IV | 较高 | [0.6, 0.8) | (0.7, 0.033, 0.01) | $[1 \times 10^{-2}, 1 \times 10^{-1})$ | 3~4 | 3~4 | 5~6 | 6~8 |
| V | 高 | [0.8, 1) | (0.9, 0.033, 0.01) | $[1 \times 10^{-1}, 1)$ | 4及以上 | 4及以上 | 6及以上 | 8及以上 |



(a)LNG化工厂事故严重度二维云图



(b)LNG化工厂事故严重度与可能性三维云图

图 2 标准云图

Fig. 2 Standard cloud image

3.4 权重确定

由表 1 对指标进行两两比较,同时根据专家意见,进而确定各因素的相对重要度指标值,构建出判断矩阵,该 LNG 化工厂判断矩阵由表 3 所得。

表 3 LNG 化工厂一级指标打分表
Table 3 Scores on level 1 indicators for LNG chemical plants

| 指标 | 人的因素 | 管理的因素 | 设备的因素 | 环境的因素 |
|-------|------|-------|-------|-------|
| 人的因素 | 1 | 7/4 | 7/8 | 7/3 |
| 管理的因素 | 4/7 | 1 | 1/2 | 4/3 |
| 设备的因素 | 8/7 | 2 | 1 | 8/3 |
| 环境的因素 | 3/7 | 3/4 | 3/8 | 1 |

利用 MATLAB 软件求出 AHP 法权重集,即其特征值 $W = (w_1, w_2, w_3, w_4) = (0.318, 0.182, 0.364, 0.136)$,且 $CR = 6.653 \times 10^{-16} < 0.10$,所使用的判断矩阵在一致性方面是可接受的。将表 4 中专家对于各一级指标的分值依次代入式(4)和式(5),最终得到 CRITIC 法权重集 $W = (w_1, w_2, w_3, w_4) = (0.229, 0.300, 0.243, 0.241)$ 。将 AHP 法权重集和 CRITIC 法权重集代入式(8),得到 AHP-CRITIC 组合权重 $(w_1, w_2, w_3, w_4) = (0.283, 0.169, 0.365, 0.183)$,将以上所得各指标权重值代入式(13),从而得到综合事故严重度云模型为 $(0.650, 0.049, 0.016)$ 。

3.5 风险评估

将收集到的一级评价指标权重代入式(9)和式(10)得到实际云模型参数,见表 4。通过 MATLAB 软件的图形可视化功能,可将各评价指标所对应的实际云模型有效地展现出来,如图 3(a)~图 3(d)所示。由图 3(a)~图 3(d)可以清楚看出 B1、B2 和 B3 的风险等级为 IV 级, B4 的风险等级为 II 级,其中 B2 与 IV 级标准云贴适度比 B1、B3 相比较。从“人-机-环-管”的角度来看,该 LNG 化工厂应重点注意安全管理方面,包括规章制度(特别是安全管理规章制度和岗位安全责任制),管理机构(如人员配置情况,机构设置状态),日常监管和应急预案等。通过着重于以上潜在高风险区域,从而在风险源头上实现本质安全化,是提高化工厂安全水平的关键。

以图 3 中设备的因素 B3 下的工艺设备 C9 为例,将表 5 中该事件发生可能性指标代入式(9),获得工艺设备 C9 事故可能性综合云模型。将表 4 中事故严重度综合云模型同表 5 中的事故可能性综合云模型 $[(0.650, 0.482), (0.049, 0.077), (0.016, 0.049)]$ 代入式(11)和式(12),最终计算并模拟出 C9 的事故云图,见图 3(e)。根据式(14)得出 C9 事件与 III 级和 IV 级风险等级的云贴适度分别为 6.641 和 4.469,由于 III 级的云贴适度高于 IV 级,因此判断 C9 事件的风险等级为 III 级。同理可得其他二级要素的风险等级,从而为 LNG 化工厂的安全管理提供更精确的风险评估结果。

表 6 中最高风险的二级要素为 C9,从图 3(e)也可以直观地看出 C9 的综合风险等级为 III 级,表明了工艺设备对于 LNG 化工厂安全而言至关重要。从实际作业场景来看,LNG 储罐及相关管道由于 LNG 自身特性以及较大存储量的原因,被认为是 LNG 化工厂主要的危险源^[24],故必须从工艺控制、物质隔离和防火措施三个方面对 LNG 储罐采取安全补偿措施。具体措施包括:按照《建筑设计防火规范》(GB 50016—2014)要求,在储罐区设置防火堤和防护墙,以有效隔离火源,减少火灾蔓延的风险。同时,增设安全阀实现一备一用,以确保在任何情况下都能有效控制压力。此外,应配备相应的仪表监测设备,并在储罐周围设置耐腐蚀标识,提高储罐区的识别度和安全性。最后,设置静电接地设施和静电接地报警器,以预防因静电积累引发的火灾或爆炸事故。通过实施以上安全措施,可以大幅降低 LNG 储罐区的风险,保障化工厂的安全生产。

4 结论

(1)采用层次分析法和 CRITIC 赋权法分别从主观和客观两个方面对 LNG 化工厂进行指标权重的确定。通过二维云模型和风险矩阵的结合,不仅解决了传统风险矩阵阈值的不确定性问题,而且实现了风险评估等级的精准识别和直观可视化。该方法能够融合专家的主观判断与实际数据的客观分

表 4 事故严重度评价及云滴参数

Table 4 Accident severity evaluation and cloud droplet parameters

| 一级指标 | 专家 1 | 专家 2 | 专家 3 | 专家 4 | 专家 5 | 实际云模型 |
|------------|------|------|------|------|------|-----------------------|
| 人的因素 B1 | 0.7 | 0.8 | 0.6 | 0.7 | 0.8 | (0.720, 0.080, 0.024) |
| 管理的因素 B2 | 0.8 | 0.8 | 0.7 | 0.8 | 0.9 | (0.800, 0.050, 0.050) |
| 设备的因素 B3 | 0.5 | 0.7 | 0.6 | 0.8 | 0.7 | (0.660, 0.110, 0.029) |
| 环境的因素 B4 | 0.3 | 0.4 | 0.3 | 0.4 | 0.5 | (0.380, 0.080, 0.024) |
| 综合事故严重度云模型 | | | | | | (0.650, 0.049, 0.016) |

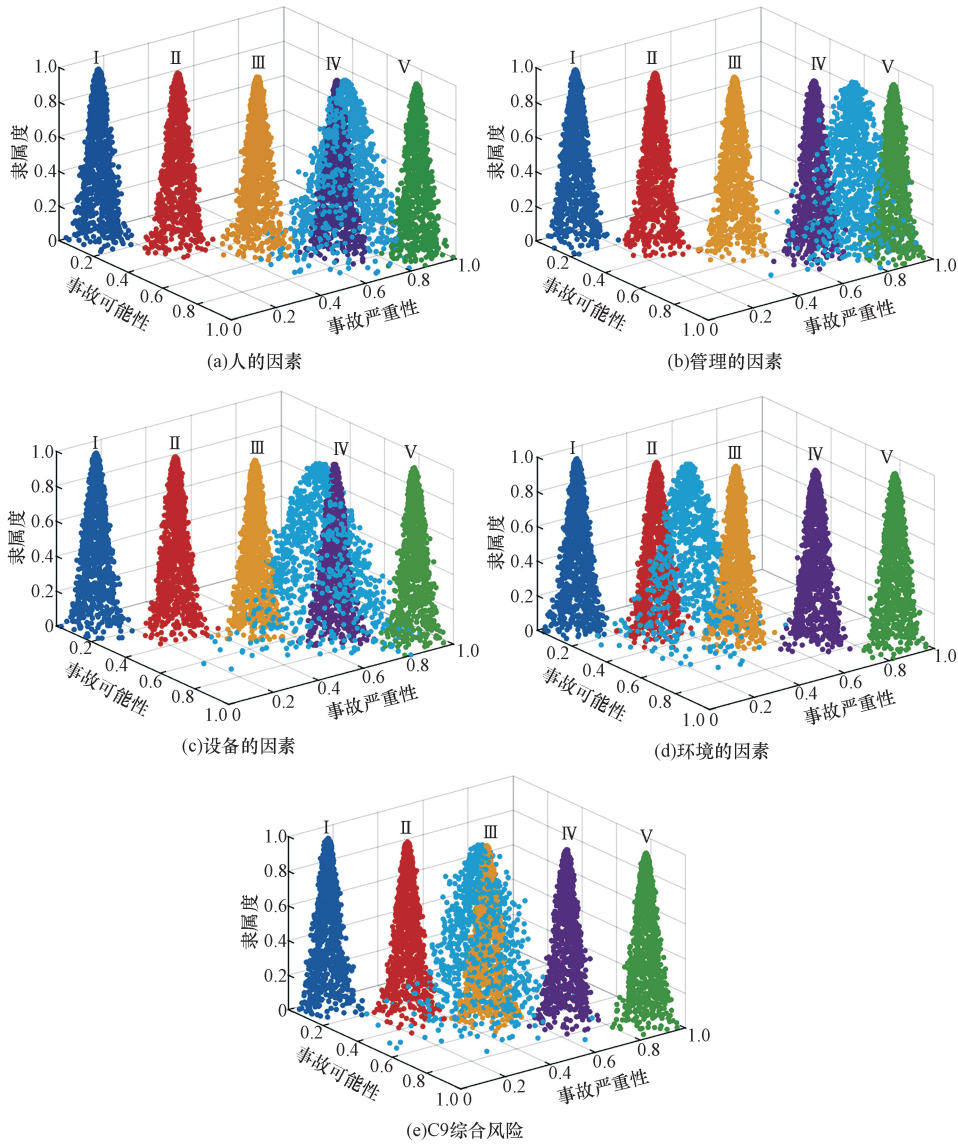


图3 风险评价云图

Fig.3 Risk evaluation cloud

表5 C9 事故可能性评分及云模型参数

Table 5 C9 accident probability and cloud model parameters

| 二级指标 | 专家1 | 专家2 | 专家3 | 专家4 | 专家5 |
|------------|-----------------------|------|------|-----|------|
| 工艺设备 | 0.7 | 0.8 | 0.7 | 0.8 | 0.9 |
| 事故可能性 | 0.48 | 0.53 | 0.33 | 0.5 | 0.57 |
| 事故可能性综合云模型 | (0.482, 0.077, 0.049) | | | | |

表6 二级要素综合风险等级表

Table 6 Combined risk ranking of secondary elements

| 二级指标 | 风险等级 | 二级指标 | 风险等级 |
|------|------|------|------|
| C1 | I | C7 | I |
| C2 | II | C8 | II |
| C3 | II | C9 | III |
| C4 | II | C10 | I |
| C5 | I | C11 | I |
| C6 | II | | |

析,输出包含不确定性和模糊性的综合评价结果,从而有助于决策者制定更有效的风险控制和管理措施。

(2)从二维云模型所得综合权重排序可以看出,设备的因素在 LNG 化工厂安全管理中占据重要地位。鉴于 LNG 固有高危险性,工艺设备成为设备因素中重点关注对象。为了确保本质安全化,必须对这些工艺设备实施一系列有效的安全补偿措施,如加强监管、改进工艺流程、提高设备安全标准等,以降低事故发生风险,保障化工厂安全生产和持续运营。

参 考 文 献

[1] 邹世辉,李志年,周秋月,等. 表面偶联甲基自由基实现低温高效甲烷氧化偶联[J]. 催化学报, 2021, 42(7): 1117-1125.
Zou Shihui, Li Zhinian, Zhou Qiuyue, et al. Surface coupling of

- methyl radicals for efficient low-temperature oxidative coupling of methane [J]. *Chinese Journal of Catalysis*, 2021, 42 (7): 1117-1125.
- [2] Yoo B Y. Economic assessment of liquefied natural gas (LNG) as a marine fuel for CO₂ carriers compared to marine gas oil (MGO) [J]. *Energy*, 2017, 121: 772-780.
- [3] 沈鑫, 周淑慧, 吴春华. 中国天然气市场发展 2022 年回顾与 2023 年展望[J]. *国际石油经济*, 2023, 31(4): 25-36.
Shen Xin, Zhou Shuhui, Wu Chunhua. Development of China's natural gas market in 2022 and outlook for 2023 [J]. *International Petroleum Economics*, 2023, 31(4): 25-36.
- [4] Wu Y J, Sun J G, Yang G, et al. Research on digital twin based temperature field monitoring system for LNG storage tanks [J]. *Measurement*, 2023, 215: 112864.
- [5] 程松民. 基于历史事故数据的液化天然气工厂设备风险事故预测研究[J]. *油气田地面工程*, 2021, 40(11): 21-28.
Cheng Songmin. Research on equipment risk accident prediction of LNG plant based on historical accident data [J]. *Oil-Gasfield Surface Engineering*, 2021, 40(11): 21-28.
- [6] 谢长春, 何冷, 王敏娟, 等. 基于 AHP-灰色聚类模型的液化天然气工厂火灾爆炸危险源安全管理评估[J]. *石化技术*, 2018, 25(12): 78-80.
Xie Changchun, He Leng, Wang Minjuan, et al. Safety management evaluation of fire and explosion hazard in liquefied natural gas (LNG) plant based on AHP- grey clustering model [J]. *Petrochemical Industry Technology*, 2018, 25(12): 78-80.
- [7] 邓军, 梁天天, 程方明. 液化天然气厂区风险量化计算与分级管控[J]. *西安科技大学学报*, 2019, 39(4): 571-580.
Deng Jun, Liang Tiantian, Cheng Fangming. Quantitative risk calculation and grading control of LNG plant area [J]. *Journal of Xi'an University of Science and Technology*, 2019, 39(4): 571-580.
- [8] 李德毅, 刘常昱, 杜鹤, 等. 不确定性人工智能 [J]. *软件学报*, 2004, 15(11): 1583-1594.
Li Deyi, Liu Changyu, Du Yi, et al. Artificial intelligence with uncertainty [J]. *Journal of Software*, 2004, 15 (11): 1583-1594.
- [9] Ma Y C, Wang J S, Xiong J H, et al. Risk assessment for cropland abandonment in mountainous area based on AHP and PCA—take Yunnan Province in China as an example [J]. *Ecological Indicators*, 2024, 158: 111287.
- [10] 王新民, 康度, 秦健春, 等. 层次分析法-可拓学模型在岩质边坡稳定性安全评价中的应用 [J]. *中南大学学报 (自然科学版)*, 2013, 44(6): 2455-2462.
Wang Xinmin, Kang Qian, Qin Jianchun, et al. Application of AHP-extenics model to safety evaluation of rock slope stability [J]. *Journal of Central South University (Science and Technology)*, 2013, 44(6): 2455-2462.
- [11] 朱倩, 周红宇, 张敏祥. 基于改进熵权-云模型的果园运输车适应性评价研究 [J]. *科学技术与工程*, 2023, 23(36): 15420-15426.
Zhu Qian, Zhou Hongyu, Zhang Minxiang. Adaptability evaluation of orchard transporter based on improved entropy weight cloud model [J]. *Science Technology and Engineering*, 2023, 23(36): 15420-15426.
- [12] Diakoulaki D, Mavrotas G, Papayannakis L. Determining objective weights in multiple criteria problems: the critic method [J]. *Computers & Operations Research*, 1995, 22(7): 763-770.
- [13] Mishra A R, Rani P, Pandey K. Fermatean fuzzy CRITIC-EDAS approach for the selection of sustainable third-party reverse logistics providers using improved generalized score function [J]. *Journal of Ambient Intelligence Humanized Computing*, 2021, 13: 295-311.
- [14] 王加闯, 黄明健, 过江. 基于 CRITIC-有限区间云模型的边坡稳定性评价 [J]. *中国安全生产科学技术*, 2019, 15(6): 113-119.
Wang Jiachuang, Huang Mingjian, Guo Jiang. Evaluation of slope stability based on CRITIC-finite interval cloud model [J]. *Journal of Safety Science and Technology*, 2019, 15(6): 113-119.
- [15] 李德毅, 孟海军. 隶属云和隶属云发生器 [J]. *计算机研究与发展*, 1995, 32(6): 15-20.
Li Deyi, Meng Haijun. Affiliated cloud and affiliated cloud generator [J]. *Journal of Computer Research and Development*, 1995, 32(6): 15-20.
- [16] 杨舒云, 刘宏志, 李海生. 改进二维云模型的信息工程监理风险评估 [J]. *科学技术与工程*, 2023, 23(26): 11292-11298.
Yang Shuyun, Liu Hongzhi, Li Haisheng. Improving two-dimensional cloud models for risk assessment of information engineering supervision [J]. *Science Technology and Engineering*, 2023, 23(26): 11292-11298.
- [17] 李江龙, 樊燕燕, 李子奇. 基于熵权-云模型的城市群综合承灾度评价 [J]. *中国安全生产科学技术*, 2020, 16(7): 48-54.
Li Jianglong, Fan Yanyan, Li Ziqi. Evaluation on comprehensive disaster-bearing degree of city cluster based on entropy weight-cloud model [J]. *Journal of Safety Science and Technology*, 2020, 16(7): 48-54.
- [18] 叶琼, 李绍稳, 张友华, 等. 云模型及应用综述 [J]. *计算机工程与设计*, 2011, 32(12): 4198-4201.
Ye Qiong, Li Shaowen, Zhang Youhua, et al. Cloud model and application overview [J]. *Computer Engineering and Design*, 2011, 32(12): 4198-4201.
- [19] 赵志强, 缙锦. 基于拟合的二维正态云模型 [J]. *计算机工程与设计*, 2009, 30(20): 4722-4726.
Zhao Zhiqiang, Gou Jin. 2-D normal cloud model based on fitting [J]. *Computer Engineering and Design*, 2009, 30 (20): 4722-4726.
- [20] 陈樑, 金龙, 黄兵, 等. 基于二维云模型的储罐泄漏风险 Bow-tie 量化分析 [J]. *安全与环境学报*, 2020, 20(3): 809-815.
Chen Liang, Jin Long, Huang Bing, et al. On the quantitative Bow-tie analysis of the tank leakage risk based on the 2-D cloud model [J]. *Journal of Safety and Environment*, 2020, 20(3): 809-815.
- [21] 张春春, 杜睿, 杜秀华. 液化天然气船液货集成控制系统的仿真平台设计 [J]. *实验室研究与探索*, 2011, 30(6): 66-70.
Zhang Chunchun, Du Rui, Du Xiuhua. Design of simulation platform for integrated control of LNG carrier liquid system [J]. *Design of Simulation Platform for Integrated Control of LNG Carrier Liquid System*, 2011, 30(6): 66-70.
- [22] 杨臣剑, 王志荣, 庄春吉, 等. 大型游乐设施风险评估与分级方法研究 [J]. *安全与环境学报*, 2017, 17(3): 845-849.
Yang Chenjian, Wang Zhirong, Zhuang Chunji, et al. On the risk assessment and classification of the large amusement rides [J]. *Journal of Safety and Environment*, 2017, 17(3): 845-849.
- [23] 李维东, 周德红, 肖振航, 等. 基于 Bow-tie 正态云模型的 LNG 储罐风险分析 [J]. *消防科学与技术*, 2021, 40(9): 1322-1327.
Li Weidong, Zhou Dehong, Xiao Zhenhang, et al. Risk analysis of LNG storage tank based on Bow-tie normal cloud model [J]. *Fire Science and Technology*, 2021, 40(9): 1322-1327.
- [24] 林现喜. 基于保护层分析法的大型 LNG 储罐风险分级管控 [J]. *油气田地面工程*, 2021, 40(11): 52-57.
Lin Xianxi. Risk grading management of large-scale LNG tank based on layer of protection analysis method [J]. *Oil-Gasfield Surface Engineering*, 2021, 40(11): 52-57.