

# 基于多属性决策-FCEM耦合模型的LNG储罐泄漏风险分析

周德红 彭诗雨

武汉工程大学资源与安全工程学院

DOI:10.12238/jssse.v1i1.6235

**[摘要]** 针对LNG储罐泄漏风险因素交叉关联难以评估的问题,提出了基于MADM问题的ANP-CRITIC-FCEM耦合模型,并对LNG储罐泄漏风险进行分析。从“场所”“设备”“工艺”“人员”和“物质”五个角度出发,构建了针对LNG储罐区的微观“五高”风险辨识体系。综合考虑不同风险要素间的冲突性和相互影响,引入博弈论思想建立ANP-CRITIC组合赋权模型,并将综合权重代入模糊综合评价(FCEM)模型,构建风险量化的储罐泄漏风险分析模型。以某工厂的LNG储罐区为例,进行储罐泄漏风险分析。结果表明该储罐区的LNG储罐泄漏风险等级为IV级,高风险设备是权重最大且风险程度最高的一级要素,需要及时监控并提出安全管理措施。经过与现有风险评估报告进行对比分析,该模型的风险分析结果与工厂安全评价报告的评价结果基本一致,证明了该模型客观性和可靠性。

**[关键词]** 风险辨识; 网络层次分析法; CRITIC法; 模糊综合评价; LNG储罐; 泄漏风险分析  
**中图分类号:** X820.4 **文献标识码:** A

## Leakage Risk Analysis of LNG Storage Tanks Based on MADM-FCEM Coupled Model

Dehong Zhou Shiyu Peng

School of Resource & Safety Engineering, Wuhan Institute of Technology

**[Abstract]** Aiming at the problem that the cross-correlation of LNG storage tank leakage risk factors is difficult to assess, a coupled model with ANP-CRITIC-FCEM based on the MADM problem is proposed. And the leakage risk of LNG storage tanks was analysed with the model. A micro "five high" risk identification system for LNG storage tank areas was constructed from the five perspectives of "place", "equipment", "process", "personnel" and "material". Considering the conflicting nature and mutual influence among different risk elements comprehensively, the game theory was introduced to establish the ANP-CRITIC combination weighting model, and the comprehensive weight was substituted into the fuzzy comprehensive evaluation (FCEM) model to construct the risk quantification of the storage tank leakage risk analysis model. Taking the LNG storage tank area of a certain factory as an example, conduct a risk analysis of tank leakage. The results indicate that the risk level of LNG tank leakage in this tank farm is Level IV, with "High-risk equipment" being the most heavily weighted and risky Level 1 indicator. which requires timely monitoring and proposed safety management measures. Timely monitoring and proposed security management measures are necessary. After comparative analysis with the existing risk assessment report, the risk analysis results of the model are basically consistent with the evaluation results of the plant safety evaluation report, which proves the objectivity and reliability of the model.

**[Key words]** Risk identification, Analytic network process, CRITIC, Fuzzy Comprehensive Evaluation, LNG storage tanks, Leakage risk analysis

随着全球能源供应形势越发紧张,液化天然气(Liquefied Natural Gas, LNG)开始在许多国家和地区被列为首选燃料<sup>[1]</sup>。近年来,中国能源结构朝着“煤降气升”的大方向调整,LNG在许多行业得到广泛应用<sup>[2,3]</sup>。然而,随着LNG能源的普遍应用,LNG

泄漏事故频繁发生。尤其LNG储存量非常大,一旦泄漏扩散面广,对周边的人员、设备、建筑和环境造成极大危害,甚至导致严重的事故后果。

为不断提高LNG在储运过程中的安全性,国内外针对LNG的

泄漏风险及扩散后果进行了大量的数值分析和仿真模拟。Kim等<sup>[4]</sup>运用故障树分析量化了LNG储罐的相关风险,计算出故障频率;Oka和Ota<sup>[5]</sup>运用FERC模型等方法评估了液化天然气释放导致池扩散和池火灾的危害和后果;李维东等<sup>[6]</sup>将Bow Tie—正态云模型应用在LNG储罐泄漏事故的动态模拟,定量分析出不同因素的风险等级,实现风险等级的量化处理;王文正等<sup>[7]</sup>结合事故树模型和模糊集理论,构建了针对LNG储罐泄漏事故的三角模糊事故树模型,分析了基本事件对LNG储罐泄漏事故发生的影响。

通过分析现有课题发现:国内外对LNG储罐泄漏风险评估的研究多采用层次分析法(AHP)和熵权法对风险因素进行赋权。上述两种方法无法充分考虑风险要素间的相关性,评估结果与实际情况存在一定偏差。

为了克服上述问题,本文基于提出了一种基于多属性决策-FCEM的综合评估模型。此模型依照风险类型划分泄漏事故的风险要素,建立针对LNG储罐区的微观“五高”风险体系和储罐泄漏风险评估指标体系;基于多属性决策,应用网络分析法(Antalytic Network Process, ANP)和CRITIC模型计算储罐泄漏风险要素的主观和客观权重,并结合博弈论思想计算综合权重;根据事故风险要素的可能性和严重度,结合综合权重结果,利用模糊综合评价定量分析出LNG储罐泄漏事故、各级风险指标的风险等级。根据多属性决策-FCEM耦合模型的结论,结合现场实际情况,有针对性地提出整改措施和解决方案,及时进行整改,大大降低LNG储罐泄漏事故发生的概率。

## 1 “五高”安全风险因素辨识体系

传统的风险控制模型强调从事故本身出发,把事故当做预防的终点和研究对象,仅仅重视事故的预防和应急能力,忽略事故发生前的复杂演变过程,因而存在一定的滞后性。引用徐克<sup>[8]</sup>提出的“五高”风险体系,将该理论从微观的角度应用在化工领域,进行针对性的风险分级。

“五高”风险辨识从LNG储罐区可能造成LNG泄漏、爆炸的“五高”风险要素出发,分析导致事故发生的潜在原因。针对造成事故的致灾物,围绕事故的承灾体和受灾面防护制定控制措施。

高风险场所——LNG储罐区、LNG拦蓄区、LNG火炬区。其中,LNG储罐区是集中储存LNG的场所,相较于其他区域其事故发生的可能性更大、后果更严重。

高风险设备——高风险设备表征为设备的本质安全化程度<sup>[9]</sup>,包括储罐附件、安全附件、管线和储罐。

高风险工艺——加注工艺、调压工艺、BOG回收工艺、PCS工艺等。高风险工艺常表征为监测监控的失效率水平。

高风险人员——主要包括无证上岗人员、“三违”人员、特殊作业人员。

高风险物质——包括甲烷、氮气和乙烷(9%)、丙烷等其他烃类化合物。

## 2 基于多属性决策的赋权模型

多属性决策(Multiple Attribute Decision-Making, MADM)是一种重要的决策科学方法<sup>[10]</sup>,目前广泛应用在工程管理、社会工作等领域<sup>[11-13]</sup>。MADM是一种针对有限数量方案的选择和排序方法,权重计算是其重要的研究内容,权重的合理性直接影响研究结果的准确性<sup>[14,15]</sup>。

相比于传统的MADM方法,ANP模型在同一层次内部存在循环支配的网络层次结构,考虑要素间的相关性,在模型内部进行双向比较并提供反馈<sup>[16]</sup>,更加适用于多属性决策问题<sup>[17]</sup>。而CRITIC模型弥补了熵权法仅考虑指标变异程度的局限性<sup>[18]</sup>,考虑到各要素之间的相对重要性和冲突性<sup>[19]</sup>,更加适用于多属性决策问题。

### 2.1 LNG储罐泄漏事故评估指标体系的构建

LNG储罐泄漏事故的动态风险评估模型从“五高”风险体系的角度出发,分级评估造成LNG储罐泄漏事故各风险要素之间的相互影响及风险程度。本文结合现场管理的五大要素——“人”、“机”、“料”、“法”、“环”,根据“五高”风险要素辨识体系,构建包括5个一级指标、17个二级指标的LNG储罐泄漏事故风险评估指标体系(表1)。风险评估指标体系结构如图1所示。

表1 LNG储罐泄漏事故评估指标体系

目标层	准则层	
	一级指标	二级指标
LNG 储罐泄 漏事故的 风险程度(A)	高风险场所 (B <sub>1</sub> )	LNG 储罐区 C <sub>11</sub>
		LNG 拦蓄区 C <sub>12</sub>
		LNG 火炬区 C <sub>13</sub>
	高风险设备 (B <sub>2</sub> )	LNG 罐体附件 C <sub>21</sub>
		管线 C <sub>22</sub>
		安全附件 C <sub>23</sub>
		储罐 C <sub>24</sub>
	高风险工艺 (B <sub>3</sub> )	BOG 回收工艺 C <sub>31</sub>
		加注工艺 C <sub>32</sub>
		调压工艺 C <sub>33</sub>
		PCS 工艺 C <sub>34</sub>
	高风险人员 (B <sub>4</sub> )	无证上岗人员 C <sub>41</sub>
		“三违”人员 C <sub>42</sub>
		特殊作业人员 C <sub>43</sub>
	高风险物质 (B <sub>5</sub> )	甲烷 C <sub>51</sub>
		氮气 C <sub>52</sub>
		其他烃类化合物 C <sub>54</sub>

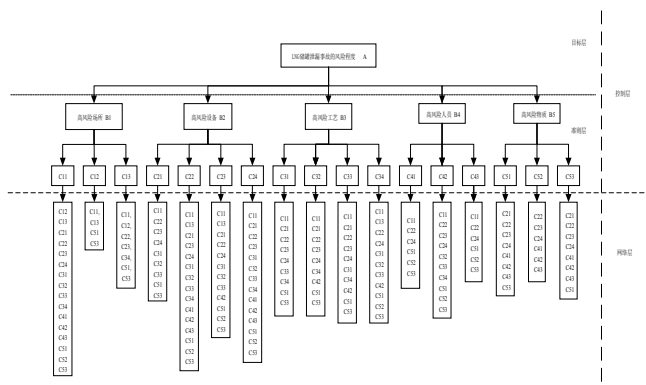


图1 LNG储罐泄漏事故评估指标体系

2.2 ANP模型

网络层次分析法(ANP)是Saaty教授<sup>[20]</sup>在层次分析法(AHP)的基础上提出的适应非独立递阶层次结构的多属性决策方法。在导致事故发生的演变过程中,同一层级的内部关系类似于一个复杂网络,不同风险要素可能存在相互影响和自影响,LNG储罐泄漏事故具有上述的典型特征。

ANP模型考虑到事故要素间的相互影响和自影响,用非线性结构代替线性层次结构,加入反馈机制<sup>[9,10]</sup>。该模型弥补了AHP无法考虑同一层级内部要素间相互关系的缺陷,一定程度上提高了LNG储罐泄漏事故评估模型权重计算的准确性和全面性。

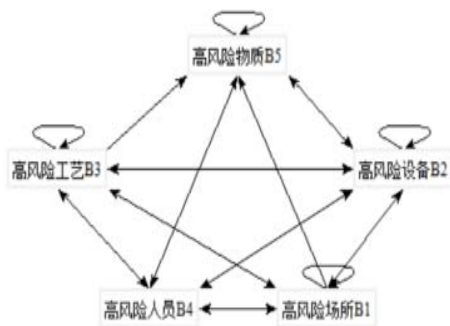


图2 LNG储罐泄漏事故评估ANP网络结构

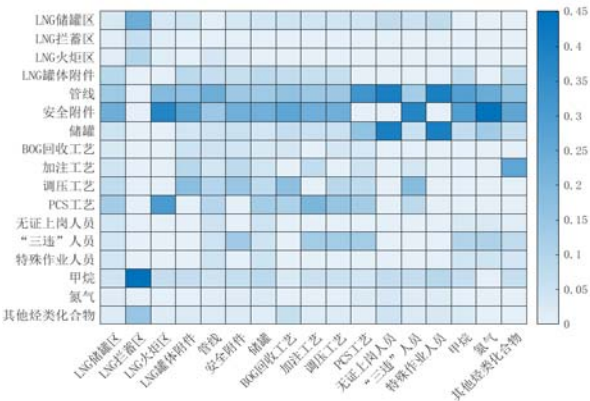


图3 LNG储罐泄漏风险因素关联热图

ANP模型包括控制层和网络层两个部分。控制层类似于AHP的递进层次结构,包括决策目标和多个决策准则。每一个准则相互独立,仅受目标的控制<sup>[21,22]</sup>。网络层则是各元素或元素组交叉影响的网络结构(如图1和图2所示),网络层的要素之间存在相互作用和关系,如图3所示。

根据不同风险指标之间的关联情况,ANP模型分别利用1~9标度对同一层级的不同风险要素两两比较,构造两个指标间的比较矩阵,得到5个一级指标判断矩阵和52个二级指标判断矩阵。分别计算判断矩阵的一致性比率CR,进行一致性分析,确保所有判断矩阵的CR均小于可接受的水平(0.01)。

根据特征根法获得排序向量,构造初始超矩阵 $A_{i,j}$ ,

$$A_{i,j} = \begin{bmatrix} a_{1,1} & a_{1,2} & \dots & a_{1,n} \\ a_{2,1} & a_{2,2} & \dots & a_{2,n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ a_{5,1} & a_{5,2} & \dots & a_{5,n} \end{bmatrix} \quad (1)$$

超矩阵 $A_{i,j}$ 是通过元素两两比较而得出的,因此列向量是元素集 $B_i$ 中元素 $C_{i,1} \sim C_{i,n}$ 受到元素集 $B_j$ 中元素 $C_{j,1} \sim C_{j,n}$ 影响程度的排序向量。特殊地,如果 $B_j$ 中的元素不受到 $B_i$ 的影响,则 $a_{ij} = 0$ 。

对计算得到的5个非负的超矩阵进行归一化处理,求得加权超矩阵 $W_{i,j}$ ,

$$W_{i,j} = \begin{bmatrix} W_{1,1} & W_{1,2} & \dots & W_{1,n} \\ W_{2,1} & W_{2,2} & \dots & W_{2,n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ W_{5,1} & W_{5,2} & \dots & W_{5,n} \end{bmatrix} \quad (2)$$

为了可以更加准确地反映出不同风险因素之间的相互关系,对加权矩阵求极限,确保超矩阵达到稳态,得到各个风险因素的权重 $\omega_i$ <sup>[23]</sup>。

2.3 CRITIC模型

由于ANP模型的结果是建立在假设决策者完全理性的基础上<sup>[24,25]</sup>。在实际的模拟中,由于专家资质、水平、经历等要素的差异,不同专家的风险偏好有所差异,权重结果主观性强。为解决这一问题,研究引用CRITIC方法降低权重的主观性,提高结果的科学性。

CRITIC(Criteria Importance Through Intercriteria Correlation)法是Diakoulaki<sup>[26]</sup>等提出的一种客观赋权方法,相比于熵权法通过指标差异性计算权重<sup>[27]</sup>,CRITIC法根据指标的对比强度和冲突性综合衡量权重<sup>[28,29]</sup>,进一步削弱了主观因素对权重的影响,降低ANP模型导致的综合权重的主观性。

假设有m个指标( $i=1, 2, \dots, m$ ),每个指标有n个数据信息( $j=1, 2, \dots, n$ ),具体计算过程如下。

(1)划分指标为正向指标和负向指标,对正向和负向指标分别进行无量纲化处理,如式(3)所示。

$$\begin{cases} x_{ij}^* = \frac{x_{ij} - x_{(j) \min}}{x_{(j) \max} - x_{(j) \min}} \\ x_{ij}^* = \frac{x_{(j) \max} - x_{ij}}{x_{(j) \max} - x_{(j) \min}} \end{cases} \quad (3)$$

(2)计算指标的标准差 $\sigma_i$ 。

$$\sigma_i = \sqrt{\frac{\sum_{j=1}^n (x_{ij}^* - \bar{x}_i)^2}{n-1}} \quad (4)$$

$$\bar{x}_i = \frac{\sum_{j=1}^n x_{ij}^*}{n} \quad (5)$$

其中,  $\sigma_j$  表征指标间的对比强度,  $n$  为指标  $i$  的数据样本总数,  $\bar{x}_{ij}$  为  $n$  个数据样本的均值。

(3) 以第  $i$  项与第  $k$  项指标为例, 计算指标间的 Pearson 相关系数  $r_{ik}$ 。

$$r_{ik} = \frac{\sum_{j=1}^n (x_{ij} - \bar{x}_i)(x_{kj} - \bar{x}_k)}{\sqrt{\sum_{j=1}^n (x_{ij} - \bar{x}_i)^2 \sum_{j=1}^n (x_{kj} - \bar{x}_k)^2}} \quad (i \neq k) \quad (6)$$

式中,  $r_{ik} \in [-1, 1]$ ,  $r_{ik} \in [-1, 0)$  时, 表示指标  $i$  和指标  $k$  呈负线性相关;  $r_{ik} \in (0, 1]$  时, 表示指标  $i$  和指标  $k$  呈正线性相关;  $r_{ik}$  越趋近于  $-1$  和  $1$ , 说明指标间的相关性越强。

(4) 根据  $r_{ik}$  计算指标  $i$  的冲突性  $R_i$ 。

$$R_i = \sum_{k=1}^m 1 - r_{ik} \quad (7)$$

(5) 根据对比强度和冲突性综合计算指标  $i$  的信息量。

$$C_i = \sigma_i \sum_{k=1}^m 1 - r_{ik} \quad (8)$$

(6) 对信息量  $C_i$  进行归一化, 计算指标权重  $\omega_2$ 。

$$\omega_2 = \frac{C_i}{\sum_{i=1}^m C_i} \quad (9)$$

### 2.4 基于博弈论的组合权重计算

单一的权重计算模型无法兼顾指标的主、客观信息。为了兼顾专家主观经验和既往的客观数据案例, 充分发挥两种赋权方法的优势, 平衡主客观权重, 实现综合权重和单一权重之间偏差最小化<sup>[30]</sup>, 引入博弈论的思想计算最优综合权重。

假设主观权重结果  $W_1 = (\omega_{11}, \omega_{12}, \dots, \omega_{1n})$ ; 客观权重结果为  $W_2 = (\omega_{21}, \omega_{22}, \dots, \omega_{2n})$ 。若对两组权重结果进行随机系数组合, 则通用公式如式 (10) 所示:

$$W = \alpha_1 W_1^T + \alpha_2 W_2^T \quad (\alpha_1 + \alpha_2 = 1) \quad (10)$$

引入博弈论的权重聚合思想<sup>[31]</sup>, 以离差最小化为目标构造式 (11) 所示函数。

$$\min \left\| \sum_{i=1}^2 \alpha_i W_i^T - W_i \right\|_2 = \min \left\| \alpha_1 W_1^T - W_1 + \alpha_2 W_2^T - W_2 \right\|_2 \quad (11)$$

根据矩阵微分性质求一阶导数得到式 (12)。

$$\begin{pmatrix} W_1 W_1^T & W_1 W_2^T \\ W_2 W_1^T & W_2 W_2^T \end{pmatrix} * \begin{pmatrix} \alpha_1 \\ \alpha_2 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} W_1 W_1^T \\ W_2 W_2^T \end{pmatrix} \quad (12)$$

对式 (12) 得到的最优组合系数  $\alpha = \{\alpha_1, \alpha_2\}$  按照式 (13) 进行归一化处理, 得到最优权重系数。

$$\alpha_i^* = \frac{|\alpha_i|}{|\alpha_1| + |\alpha_2|} \quad (13)$$

将权重系数  $\alpha^* = \{\alpha_1^*, \alpha_2^*\}$  代入公式 10, 计算得到最优综合权重  $W$ 。

$$W = \alpha_1^* W_1^T + \alpha_2^* W_2^T \quad (14)$$

## 3 多属性决策—FCEM耦合模型

### 3.1 模糊综合评价模型

模糊综合评价 (Fuzzy Comprehension Evaluation, FCE) 是一种常用的模糊数学算法, 能够科学地量化模糊的定性概念<sup>[32]</sup>。在实际的 LNG 储存系统中, 许多泄漏风险指标具有不确定性和模糊性<sup>[33, 34]</sup>, 应用 FCE 模型可以综合考虑到系统空间的复杂性和指标信息的不确定性, 降低评估过程的模糊性, 提升评估的科学性和准确性。

(1) 根据上文综合权重结果, 构建指标权重集。

$$B_i = (W_{C_1}, W_{C_2}, \dots, W_{C_t}) \quad (15)$$

$t$  为该指标下的二级指标个数。

(2) 依据相关法律法规和调研结果确立风险等级和所有风险等级阈值, 利用 Delphi 法邀请本行业具有相关资质的专家针对 LNG 储罐区  $m$  个指标的风险等级 ( $k$ ) 打分, 根据评分结果构造评价矩阵  $C_i$ 。

$$C_i = (c_{i(1)}, c_{i(2)}, \dots, c_{i(n)}) \quad (i=1, 2, \dots, m) \quad (16)$$

式中,  $c_{i(k)}$  代表专家评分值属于  $k$  等级的比例。

(3) 根据式 (17) 计算一级指标的评估矩阵中各矩阵如下:

$$P = B_i * C_i \quad (17)$$

(4) 计算目标层的隶属度矩阵  $S$

$$S = P^* A \quad (18)$$

(5) 为了计算事故的模糊综合评价得分, 假设风险等级矩阵为  $L = (E_{X_1}, E_{X_2}, \dots, E_{X_n})^T$ , 利用式 (19) 计算 LNG 储罐泄漏事故的安全风险值:

$$R = S * L \quad (19)$$

式中,  $E_{X_k}$  为  $k$  风险等级风险值的中位数。

### 3.2 基于多属性决策—FCEM的耦合模型

根据上文所述, 构建基于多属性决策—FCEM 的耦合模型主体, 如图 4 所示。

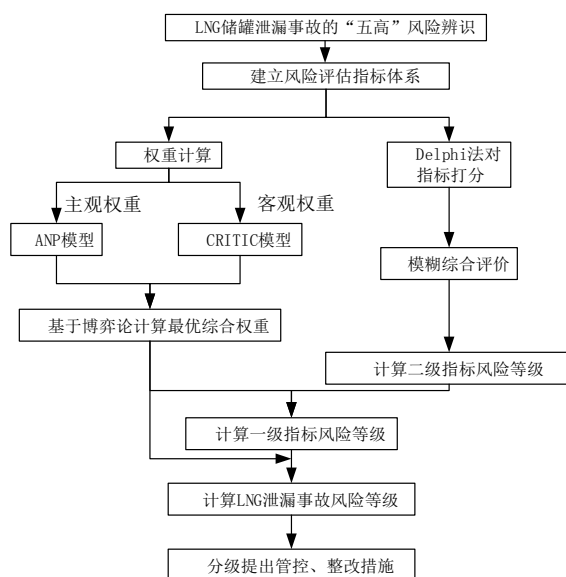


图4 多属性决策—FCEM耦合模型框架

表2 LNG储罐泄漏事故评估指标权重

一级指标	权重			二级指标	二级权重			总权重		
	$\omega_1$	$\omega_2$	$\omega$		$\omega_1$	$\omega_2$	$\omega$	$\omega_1$	$\omega_2$	$\omega$
高风险场所B1	0.0384	0.0387	0.0385	LNG储罐区 C11	0.7802	0.7829	0.7814	0.0299	0.0303	0.0301
				LNG拦蓄区 C12	0.0078	0.0827	0.0413	0.0003	0.0032	0.0016
				LNG火炬区 C13	0.2121	0.1344	0.1774	0.0082	0.0052	0.0069
高风险设备B2	0.5269	0.5125	0.5205	LNG罐体附件 C21	0.1042	0.1058	0.1049	0.0549	0.0542	0.0546
				管线 C22	0.3629	0.3339	0.3499	0.1912	0.1711	0.1822
				安全附件 C23	0.3990	0.3803	0.3906	0.2102	0.1949	0.2034
				储罐 C24	0.1339	0.1801	0.1545	0.0706	0.0923	0.0803
高风险工艺B3	0.2517	0.2559	0.2536	BOG回收工艺 C31	0.1114	0.1376	0.1231	0.028	0.0352	0.0312
				加注工艺 C32	0.1808	0.1801	0.1805	0.0455	0.0461	0.0458
				调压工艺 C33	0.4008	0.4052	0.4028	0.1009	0.1037	0.1022
				PCS工艺 C34	0.3070	0.2771	0.2936	0.0773	0.0709	0.0744
高风险人员B4	0.1081	0.1251	0.1157	无证上岗人员 C41	0.1347	0.1751	0.1527	0.0146	0.0219	0.0179
				“三违”人员 C42	0.7188	0.6547	0.6901	0.0777	0.0819	0.0796
				特殊作业人员 C43	0.1466	0.1703	0.1572	0.0158	0.0213	0.0183
高风险物质B5	0.0748	0.0677	0.0716	甲烷 C51	0.6527	0.6322	0.6435	0.0488	0.0428	0.0461
				氮气 C52	0.1218	0.1152	0.1189	0.0091	0.0078	0.0085
				其他烃类化合物 C53	0.2256	0.2526	0.2377	0.0169	0.0171	0.0170

4 实例分析

以湖北省黄冈市的某500×104m<sup>3</sup>/d的LNG工厂的储罐区为实例进行安全风险分析。原料天然气在站内调压至6.94MPa,经过3.2km长的DN300的原料气管线输送至LNG工厂。工厂LNG储罐区采用2台30000m<sup>3</sup>的双金属单容罐,储罐设安全控制系统和消防系统,实行超压保护和负压保护。

4.1 指标权重计算

利用ANP和CRITIC法分别对LNG储罐泄漏事故风险要素进行主观赋权和客观赋权,得到权重序列和。根据博弈论。分别计算主客观权重的分配系数,得到主观权重分配系数  $\alpha_1$  为0.553, 客观权重分配系数  $\alpha_2$  为0.447。

根据综合赋权模型对LNG储罐区进行风险指标权重计算,结果如表2所示。

4.2 基于Delphi法的LNG泄漏事故风险评分

由于风险是由导致事故发生的可能性和事故后果严重度共同决定的,本研究根据行业风险分级标准,按照五分位法从可能性和后果严重度两方面综合分析,将LNG储罐风险要素由低到高划分为5个等级<sup>[35]</sup>(表4)。分别为: I 低风险、II 一般风险、III 中风险、IV 较大风险、V 重大风险<sup>[36]</sup>。根据式4、5分别计算不同等级的数值特征,代入式6计算确定度,绘制云滴;构建标准云模型(图8)<sup>[6,37]</sup>。邀请有相关资质的专家根据分级标准对各风险要素进行打分,同时确定不同风险要素的相互影响程度和风险程度。

表3 LNG储罐泄漏事故风险等级

风险等级	风险程度	风险描述	风险等级阈值
I	低风险	事故可能性低; 事故后果不严重; 风险程度可忽略不计	[0, 0.1)
II	一般风险	可能引发轻微事故; 后果不严重; 风险程度较小	[0.1, 0.3)
III	中风险	引发事故的可能性较低; 事故后果相对严重; 风险在可接受范围内	[0.3, 0.5)
IV	高风险	引发事故可能性高; 事故后果相对严重; 风险程度较高; 必要时需采取措施, 并定期监测	[0.5, 0.8)
V	重大风险	事故发生可能性高; 一旦发生事故, 后果严重; 需要立刻停工整改检查, 降低风险	[0.8, 1.0]

表4 “高风险设备”的指标评分

高风险设备 B2	专家1	专家2	专家3	专家4	专家5	综合权重 $\omega$
LNG罐体附件C21	0.5	0.7	0.6	0.8	0.7	0.1049
管线C22	0.6	0.8	0.7	0.9	0.7	0.3499
安全附件C23	0.8	0.9	0.9	0.7	0.8	0.3906
储罐C24	0.5	0.7	0.8	0.6	0.7	0.1545

4.3 LNG储罐泄漏事故风险等级计算

构造指标权重集A,  $B_i (i=1, 2, \dots, 5)$ , 如下:

$$A = (0.0385 \quad 0.5205 \quad 0.2536 \quad 0.1157 \quad 0.0716)$$

$$B_1 = (0.7814 \quad 0.0413 \quad 0.1774)$$

$$B_2 = (0.1049 \quad 0.3499 \quad 0.3906 \quad 0.1545)$$

$$B_3 = (0.1231 \quad 0.1805 \quad 0.4028 \quad 0.2936)$$

$$B_4 = (0.1527 \quad 0.6901 \quad 0.1572)$$

$$B_5 = (0.6435 \quad 0.1189 \quad 0.2377)$$

根据专家打分结果构建LNG储罐泄漏事故二级要素的评估矩阵  $C_i (i=1, 2, \dots, 5)$ :

$$C_1 = \begin{pmatrix} 0 & \frac{1}{5} & \frac{3}{5} & \frac{1}{5} & 0 \\ 0 & \frac{1}{5} & \frac{3}{5} & \frac{1}{5} & 0 \\ 0 & 0 & \frac{3}{5} & \frac{2}{5} & 0 \end{pmatrix};$$

$$C_2 = \begin{pmatrix} 0 & 0 & 0 & \frac{4}{5} & \frac{1}{5} \\ 0 & 0 & 0 & \frac{3}{5} & \frac{2}{5} \\ 0 & 0 & 0 & \frac{1}{5} & \frac{4}{5} \\ 0 & 0 & 0 & \frac{4}{5} & \frac{1}{5} \end{pmatrix};$$

$$C_3 = \begin{pmatrix} 0 & 0 & 0 & \frac{4}{5} & \frac{1}{5} \\ 0 & 0 & 0 & \frac{4}{5} & \frac{1}{5} \\ 0 & 0 & 0 & \frac{3}{5} & \frac{2}{5} \\ 0 & 0 & 0 & \frac{4}{5} & \frac{1}{5} \end{pmatrix};$$

$$C_4 = \begin{pmatrix} 0 & 0 & 0 & \frac{4}{5} & \frac{1}{5} \\ 0 & 0 & 0 & \frac{3}{5} & \frac{2}{5} \\ 0 & 0 & \frac{1}{5} & \frac{4}{5} & 0 \end{pmatrix};$$

$$C_5 = \begin{pmatrix} 0 & 0 & \frac{2}{5} & \frac{3}{5} & 0 \\ 0 & \frac{1}{5} & \frac{4}{5} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \frac{4}{5} & \frac{1}{5} & 0 \end{pmatrix};$$

根据式(17)计算一级评估指标评估矩阵, 计算结果如下:

$$P_i = B_i * C_i = (0.7814 \quad 0.0413 \quad 0.1774) * \begin{pmatrix} \frac{1}{5} & \frac{3}{5} & \frac{1}{5} & 0 \\ 0 & \frac{1}{5} & \frac{3}{5} & \frac{1}{5} \\ 0 & 0 & \frac{3}{5} & \frac{2}{5} \end{pmatrix} = (0.1645 \quad 0.6001 \quad 0.2355 \quad 0)$$

$$P_2 = B_2 * C_2 = (0 \quad 0 \quad 0 \quad 0.4796 \quad 0.5043);$$

$$P_3 = B_3 * C_3 = (0 \quad 0 \quad 0 \quad 0.7194 \quad 0.2806);$$

$$P_4 = B_4 * C_4 = (0 \quad 0 \quad 0.0314 \quad 0.6620 \quad 0.3066);$$

$$P_5 = B_5 * C_5 = (0 \quad 0.0238 \quad 0.5427 \quad 0.4336 \quad 0);$$

$$P = (P_1 \quad P_2 \quad P_3 \quad P_4 \quad P_5)^T = \begin{pmatrix} 0 & 0.1645 & 0.6001 & 0.2355 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0.4956 & 0.5043 \\ 0 & 0 & 0 & 0.7194 & 0.2806 \\ 0 & 0 & 0.0314 & 0.6620 & 0.3066 \\ 0 & 0.0238 & 0.5427 & 0.4336 & 0 \end{pmatrix},$$

P即为一级指标的评价矩阵。

将评价矩阵P与一级指标权重A阵相乘得到综合评级隶属矩阵R:

$$S = A * P = (0.0385 \quad 0.5205 \quad 0.2536 \quad 0.1157 \quad 0.0716)^*$$

$$\begin{pmatrix} 0 & 0.1645 & 0.6001 & 0.2355 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0.4956 & 0.5043 \\ 0 & 0 & 0 & 0.7194 & 0.2806 \\ 0 & 0 & 0.0314 & 0.6620 & 0.3066 \\ 0 & 0.0238 & 0.5427 & 0.4336 & 0 \end{pmatrix}$$

$$= (0 \quad 0.0080 \quad 0.0656 \quad 0.5571 \quad 0.3691) = (S_1 \quad S_2 \quad S_3 \quad S_4 \quad S_5)$$

根据式(18)计算出的隶属度模糊矩阵S可知, LNG泄漏事故在IV级的隶属度最大为0.5571, 依据最大隶属度原则, 初步判断事故风险等级为“高风险”。

为了计算事故的模糊综合评价得分, 依据上文划分的风险等级, 假设风险等级矩阵为  $L = (E_{x1}, E_{x2}, E_{x3}, E_{x4}, E_{x5})^T$  本文利用式(19)计算LNG储罐泄漏事故的安全风险:

$$\text{计算得, } R = (S_1 \quad S_2 \quad S_3 \quad S_4 \quad S_5)^* (E_{x1} \quad E_{x2} \quad E_{x3} \quad E_{x4} \quad E_{x5})^T = 0.7221 \in [0.5, 0.8)$$

采用相同方法对所有一级指标进行模糊综合评价, 两个方法的评价结果如表5所示。

表5 LNG储罐泄漏风险评估结果

评价指标	模糊综合评价	模糊评价风险等级	综合权重 $\omega$
高风险场所 B1	0.4260	III级	0.0385
高风险设备 B2	0.7656	IV级	0.5205
高风险工艺 B3	0.7202	IV级	0.2536
高风险人员 B4	0.7188	IV级	0.1157
高风险物质 B5	0.5037	III级	0.0716

“高风险物质”的模糊综合评价结果为0.5037>0.5, 但是根据“最大隶属度原则”进行验证, 可知B5指标对III级的隶属度为0.5427, 对IV级的隶属度为0.4336, 且0.5427>0.4336, 故该指标风险等级属于III级。

从“五高”风险的角度来看, “高风险设备”的风险度和影响度最大, 且权重最高。这与以往研究认为“附属管道应力腐蚀、阀体与阀盖接触不良、外部超压冲击是导致LNG储罐泄漏的最主要的风险”的结论一致[杨]。同样, 这一结论也符合现实情况。

随着科技的进步,能源产业的发展向机械化和智能化靠拢,LNG储罐区逐渐减少人工的投入,向实现本质安全化努力。在这种趋势下,设备作为LNG储罐区体量最大的部分,其发生事故的可能性和后果的严重程度都大大增加。近年来更多LNG储罐泄漏爆炸事故是由于设备出现故障导致的。因此,储罐区设备的安全性尤为重要,企业应注重设备本身安全性能的定期审查和维修保养,现场安全管理人员应当加强对设备工作状态的监控。

从本质安全的角度考虑,企业应注重设备本身安全性能的定期审查和维修保养;注重作业人员的管理和考核,严格杜绝“三违”;优化资源配置和提高整个“人-机-环境”系统的安全性,实现本质安全化。

## 5 结论

(1)依据“五高”风险体系,构建了LNG储罐泄漏事故的风险评价指标体系,从多属性决策的角度出发,构建ANP-CRITIC权重模型,引入博弈论的思想计算组合权重,并根据FCEM模型定量分析各风险因素的风险等级。利用隶属度函数验证了此安全风险评估模型的准确性。研究表明,此工厂LNG储罐区泄漏风险等级为IV级,属于高风险。企业需要采取必要的控制措施、及时整改和全面复审,将风险降至可接受范围。在日常的生产工作中,应定期检测评估。

(2)采用ANP模型综合考虑指标间的相互关联和自关联,相较于以往的权重计算,更为全面,提高了评估模型的准确性;考虑风险要素的相关性和冲突性,利用CRITIC模型进行客观赋权,解决了ANP主观性过强的问题,进一步提升了耦合模型的准确。FCEM模型充分考虑指标要素的模糊性,利用数学计算实现了对定性概念的定量分析,直观、准确地预测出LNG储罐泄漏事故及各风险要素的风险等级,实现了LNG储罐泄漏风险的量化。

## [基金项目]

湖北省应急管理厅2021年安全生产专项资金项目(鄂应急发[2021]18号);中国石油和化学工业联合会2022年度责任关怀专项研究重点课题(2022CRCA001);2022年度湖北省名师工作室。

## [参考文献]

- [1]周守为,朱军龙,单彤文,等.中国天然气及LNG产业的发展现状及展望[J].中国海上油气,2022,34(01):1-8.
- [2]任正,王岱秋,全滢泽,等.双碳目标下关于LNG行业发展的探讨[J].山东化工,2022,51(09):101-103.
- [3]冯玉军.国际能源大变局下的中国能源安全[J].国际经济评论,2023,(01):38-52+4-5.
- [4]KIM H,KOH J S,KIM Y,et al.Risk Assessment of Membrane Type LNG Storage Tanks in Korea-Based on Fault Tree Analysis[J].Korean J.Chem.Eng.2005,22(1):1-8.
- [5]Oka, H., Ota, S. Evaluation of consequence assessment methods for pool fires on water involving large spills from liquefied natural gas carriers[J].Journal of Marine Science and Technology.2008,13(2):178-188.

[6]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(09):1322-1327.

[7]王文正,陈亮,贺辉宗,等.LNG储罐泄漏的三角模糊事故树定量分析研究[J].安全、健康和环境,2021,21(10):38-44.

[8]徐克,陈先锋.基于重特大事故预防的“五高”风险管控体系[J].武汉理工大学学报(信息与管理工程版),2017,39(6):649-653.

[9]李文,叶义成,王其虎,等.矿井坠罐事件高风险因素风险辨识评估模型[J].灾害学,2020,35(01):64-70.

[10]崔冬,王成志,沈凡.多属性决策模型研究及应用[J].科学决策,2010,(11):90-94.

[11]Razavi Toosi, S.L.; Samani, J.M.V. A New Integrated MADM Technique Combined with ANP, FTOPSIS and Fuzzy Max-Min Set Method for Evaluating Water Transfer Projects.Water Resources Management,2014,28,4257-4272.

[12]Qin, Y.;Qi, Q.;Shi, P.;Lou,S.;Scott, P.J.; Jiang, X. Multi-Attribute Decision-Making Methods in Additive Manufacturing: The State of the Art. Processes 2023,11,497.

[13]Wudhikarn,R.Improving the intellectual capital management approach using the hybrid decision method.J.Intelle ct.Cap.2018,19:670-691.

[14]张玉,魏华波.基于CRITIC的多属性决策组合赋权方法[J].统计与决策,2012,(16):75-77.

[15]赵洪山,李静璇,米增强.基于CRITIC和改进Grey-TOPSIS的电能质量分级评估方法[J].电力系统保护与控制,2022,50(03):1-8.

[16]Ci, I.;Turkan, Y.S. An ANP-based assessment model for lean enterprise transformation. Int J Adv Manuf Technol,2013, 64,1130.

[17]YuceIgazi,F.;Yitmen,I.An ANP Model for Risk Assessment in Large-Scale Transport Infrastructure Projects.Arab J Sci Eng,2019,44,4257.

[18]李占山,杨云凯,张家晨.基于熵权法的过滤式特征选择算法[J].东北大学学报(自然科学版),2022,43(07):921-929.

[19]芦磊,张斌,郑达.基于AHP-CRITIC的公路土质路堑边坡风险评估模型[J].人民长江,2023,54(01):133-139.

[20]Thomas L Saaty,Luis G Vargas. Decision Making with the Analytic Network Process[M].1st ed. Berlin, German: Springer Science, Business Media,2006.

[21]孙宏才,田平.网络层次分析法(ANP)浅析[C].西部开发与系统工程——中国系统工程学会第12届年会论文集.2002:454-459.

[22]甘磊,扈毅,郑龙志,等.基于改进ANP-TOPSIS的电力应急救援队伍能力综合评估[J/OL].中国安全生产科学技术:1-6.[2022-08-11].http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.5335.TB.20220128.1549.002.html.

- [23]范赵鹏,张金金,温玮,等.网络层次分析法(ANP)分析工具的设计与实现[J].计算机与数字工程,2020,48(01):46-50.
- [24]刘赢,关欣,李易城.基于综合犹豫模糊熵的多属性决策研究[J/OL].控制与决策:1-9[2023-07-30].
- [25]FAN L,ZHANG Y.Application of combination weighing and outranking relation method in evaluation of power quality [J].Journal of Information and Computational Science,2013,10(1):1-7.
- [26]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.
- [27]王淑云,黄芳,谭雄,等.熵权法在铀矿井下空气环境安全评价中的应用研究[J].安全与环境学报,2021,21(02):538-545.
- [28]葛如涛,陈陆望,王迎新等.基于改进AHP法和CRITIC法耦合赋权的松散承压含水层富水性评价[J].合肥工业大学学报(自然科学版),2023,46(04):519-528.
- [29]侯克鹏,王黎蝶.基于改进的FAHP-CRITIC法与云理论的露天矿边坡危险性评估模型[J].安全与环境学报,2021,21(06):2443-2451.
- [30]涂圣文,赵振华,邓梦雪.基于组合赋权-后悔理论的城市综合管廊运维总体风险评估[J].安全与环境工程,2020,27(06):160-167.
- [31]裴卉宁,温志强,黄雪芹.基于贝叶斯BWM与CRITIC权重组合的灰色H-凸关联模型[J/OL].计算机集成制造系统:1-22[2023-07-30].<http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.5946.TP.20220818.0906.002.html>.
- [32]蔡青,关志军,赵若言.基于灰色模糊综合评价法的网络防御作战效能评估[J].中国电子科学研究院学报,2022,17(10):991-996.
- [33]李银芳,龚子荣.基于灰色模糊综合评价法的基础设施BT项目回购风险研究[J].科学技术创新,2022,(35):33-36.
- [34]张琦,姜雪,张鸥等.基于灰色系统理论的电网工程绿色建造模糊综合评价模型[J/OL].沈阳工业大学学报:1-7[2023-07-30].<http://kns.cnki.net/kcms/detail/21.1189.T.20230704.1849.010.html>.
- [35]郭羽羽,罗福周,钟兴润.基于熵权-正态云模型的城市安全韧性评估研究[J].灾害学,2021,36(04):168-174.
- [36]景美波,李相环.LNG接收站安全生产风险分级管控体系建设研究[J].中国石油和化工标准与质量,2021,41(23):5-6.
- [37]朱贵华,孙续文.基于ANP-云模型的舰艇演训活动安全风险评估[J/OL].指挥控制与仿真:1-5.[2022-08-11].<http://kns.cnki.net/kcms/detail/32.1759.TJ.20220427.1028.006.html>.