

大中型沼气工程安全评价方法研究现状及展望

于 月, 许开立*

(东北大学 资源与土木工程学院, 辽宁 沈阳 110891)

摘要: 沼气作为一种清洁能源,在解决国家能源紧张的同时,其运行过程中的安全问题也日益突出。为了更好地识别、分析、预测沼气工程中可能存在的风险,可利用各种安全评价方法分析事故发生原因,找出导致事故发生的薄弱环节,采取措施防止事故发生或降低事故后果,从而降低事故发生概率,减少事故损失。以大中型沼气工程为例,探讨了沼气事故数量与沼气站数量的关系,搜集了国内外关于沼气站的安全评价方法,分析其目的、优劣势,旨在为企业根据自身不同状况、不同目的,选择合适的安全评价方法提供依据,并提出了一种新的大中型沼气工程安全评价模型—基于博弈论组合赋权-云模型的沼气工程安全评价。

关键词: 大中型沼气站; 沼气事故; 事故预防; 安全评价模型

中图分类号: S216.4 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-1166(2023)05-0041-09

DOI:10.20022/j.cnki.1000-1166.2023050041

Safety Evaluation Methods of Large and Medium-sized Biogas Projects / YU Yue, XU Kaili* / (Department of Resources and Civil Engineering, Northeastern University, Shenyang 110891, China)

Abstract: As a kind of clean energy, while solving the national energy shortage and reducing environmental pollution, the safety problem in its operation process is also becoming increasingly prominent. In order to better identify, analyze and predict the possible safety risks in biogas projects, various safety evaluation methods can be used to analyze the causes of accidents, find out the weak links leading to accidents, and take measures to prevent accidents or reduce the consequences of accidents, so as to reduce the probability of accidents and reduce accident losses. This paper takes large and medium-sized biogas projects as an example, discusses the relationship between the number of biogas accidents and the number of biogas stations, collects the safety evaluation methods of biogas stations at home and abroad, analyzes its purpose, advantages and disadvantages, aiming to provide a basis for enterprises to choose appropriate safety evaluation methods according to their own different conditions and different purposes. A new safety evaluation model for large and medium-sized biogas engineering- biogas engineering safety evaluation based on game theory combination empowerment-cloud model is proposed.

Key words: large and medium-sized biogas stations; biogas accident; accident prevention; safety evaluation model

沼气是一种无色气体,由于它常含有微量的硫化氢气体,所以脱硫化氢前,有轻微的臭鸡蛋味。沼气最早发现于沼泽中,因此被称为沼气。沼气工程可应用于处理禽畜粪便、秸秆焚烧、工业有机废水等,是能源生产和工业废物优化领域的一个有吸引力的举措。不仅可以将生物质废弃物彻底利用、有效控制环境污染,而且还能缓解国家能源供应紧张的现状,但随之而来的安全问题也日益加剧。

沼气工程中发生伤亡事故的主要原因在于有限空间的沼气泄露,沼气泄露后根据不同事态发展路

径又分为中毒窒息、火灾爆炸、闪火、稳态燃烧四种事故类型。沼气由 50% ~ 80% 甲烷(CH_4)、20% ~ 40% 二氧化碳(CO_2)、0% ~ 5% 氮气(N_2)、小于 1% 的氢气(H_2)、小于 0.4% 的氧气(O_2)与 0.1% ~ 3% 硫化氢(H_2S)等气体组成。沼气特性与天然气相似。空气中含有 5% ~ 15% (按体积计)的甲烷时,就会形成爆炸性的混合气体。沼气中的硫化氢为剧毒气体,二氧化碳为有毒气体,若空气中的二氧化碳浓度大于 0.05% ~ 1.55% 时,短期内不会造成影响,但会影响人员长期作业;当达到 1.55% ~ 2%

收稿日期: 2022-09-23 修回日期: 2023-04-15

项目来源: 国家自然科学基金项目(52074066)

作者简介: 于月(1997-),女,汉族,辽宁省葫芦岛市人,主要从事安全工程与技术、风险分析研究等方面的工作, E-mail: 928342936@qq.com

通信作者: 许开立, E-mail: kaili_xu@aliyun.com

时,人员会出现头晕、气喘、行动迟缓等反应;当达到3%时,人员会出现呼吸困难的剧烈反应,无法爬出有限空间,甚至引起死亡。

为了降低沼气站事故概率,减少事故损失,可对沼气工程的运行、管理等方面开展安全评价,找出导致事故的薄弱环节,采取措施重点整改防护。现阶段,国内外对沼气工程的安全评价主要分为定性分析与定量计算两个方面,但评价模型优劣不一,企业无法根据自身实际合理选择合适的评价方法。为此,本文以大中型沼气工程为例,总结了国内外广泛应用的安全评价方法,分析其优缺点,旨在为企业根据自身需求,选择合理高效评价方法提供依据。

1 沼气站与沼气事故分析

有国外学者统计了2009年~2016年欧洲沼气站的数量发展情况(见图1)和2006年~2016年欧洲沼气站事故数量的发展情况(见图2)。由图中可以清晰地看出,2009年~2016年欧洲沼气站数量逐渐增多,2006年~2011年沼气站事故数量呈上升趋势,在2012年急剧减少,随后几年逐渐增加。这可能是因为沼气工程运行技术上的革新,也可能是沼气事故统计信息的缺失,但在2006~2016年间,欧洲沼气站事故总体上仍呈上升趋势。

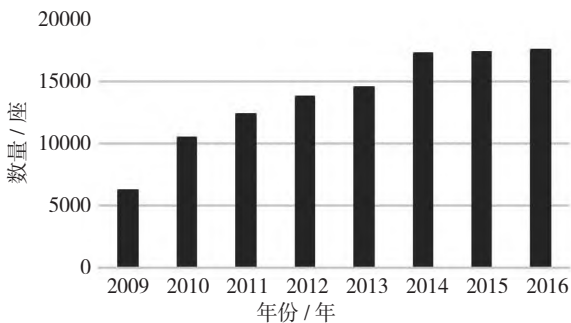


图1 2009~2016年欧洲沼气站数量发展

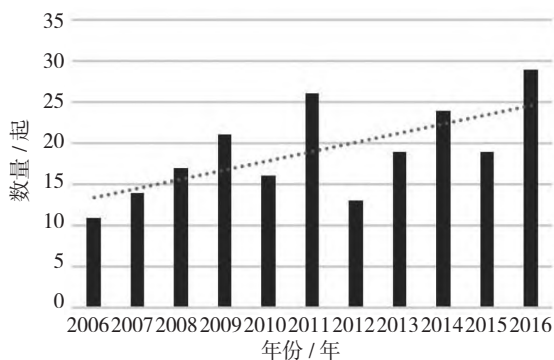


图2 2006~2016年欧洲沼气站事故数量的发展

在国家政策的扶持下,我国沼气站数量也愈来愈多。据有关部门不完全统计,截至2015年底,中小型沼气工程有103898处,大型沼气工程6737处,特大型沼气工程34处,以秸秆为主要原料的沼气工程有458处,以畜禽粪污为主要原料的沼气工程110517处^[6]。

2 沼气工程安全评价国内外研究现状

2.1 常用的安全评价方法

安全评价实际上是对系统危险性的评价,即评价系统的危险性是否可以被接受,因此往往又把安全评价称为危险性评价或风险评价。安全评价方法有定性评价方法和定量评价方法之分,定性安全评价时不对危险性进行量化处理而只做定性比较,而定量安全评价是在危险性量化的基础上进行的评价,能够比较精确的描述系统的危险状况。后来人们又开发了一些介于定性安全评价与定量安全评价之间的安全评价方法,即半定量安全评价。

定性的安全评价方法包括:安全检查表法、层次分析法、预先危险分析法、危险性与可操作性研究、故障类型和影响分析等;定量安全评价包括:事件树分析、故障树分析、概率危险性评价法、火灾爆炸指数法、伤害范围评价法、生产作业条件危险性评价法、模糊综合评价法等;半定量安全评价方法包括:防护层分析、功能安全评价等。

在众多安全评价方法中,每种安全评价方法都具有本身独特的属性,擅长的领域也不同,且在应用到实际案例中时每种评价方法都有一定的局限性,因此可将不同安全评价方法交叉联合使用,既可以使其优势互补,又可以提高评价质量。此外,学者们将一些数学模型也应用到安全评价技术当中来,如贝叶斯网络模型、云模型、神经网络模型等。

2.2 国内研究现状

刘广轩^[2]通过对故障树的定性与定量分析得到顶事件发生概率(见图3);又利用道化学火灾爆炸指数法,确定其火灾爆炸危险等级;通过事故树(FTA)分析沼气泄漏可能发生的事故类型,并计算出每种事故类型的安全半径和死亡半径。文中得到的数据可为沼气工程的安全设计、施工及日常管理提供参考。但是FTA方法将系统状态该简单的分为“正常”和“异常”两个状态,忽略多状态的分析,计算量大,针对较复杂系统的风险评价,仍具有一定局限性,又因为其有极端普遍性,因此很难单

独正确执行。

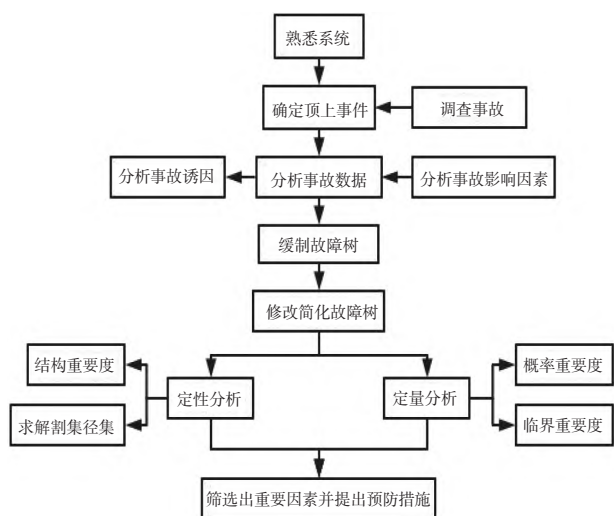


图3 故障树分析步骤

王燕妮^[7]等人认为沼气站是一个灰色系统,首次提出应用多层次灰色评价法对沼气站进行安全评价(见图4)。该方法首先针对生产工艺安全、场所环境、人员素质、安全管理、安全防护几方面建立了评价体系,运用层次分析法(AHP),两两比较得出各层指标之间相对权重,再将模糊综合评价引入其中,通过专家打分和权重分析,得出沼气站安全等级。基于层次分析法的模糊综合评价模型计算简单,原理通俗易懂,但过于依赖人的经验和主观判断,不具有普遍性。

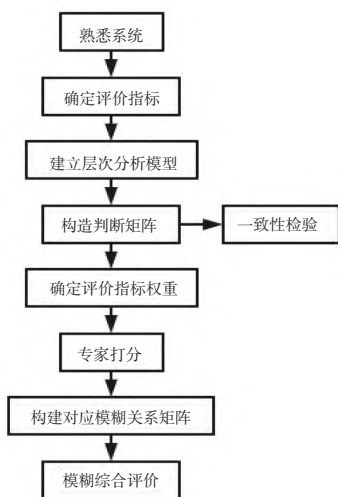


图4 多层次模糊综合评价步骤

王贝贝^[3]等首次将 RS-SPA-Markov chain 安全评价与预测模型引入到生物质气化站评价中,该方法应用模糊集理论确定指标权重,利用 SPA-Markov chain 计算预测生物质气化站的危险等级(见图5)。

现阶段,对生物质气化站的安全评价大多是静态评价,是对企业安全现状的评价,而 SPA-Markov chain 安全评价与预测模型是动态的评价,可有效预测企业未来一段时间内的安全水平。应用模糊集理论确定指标权重解决了由于专家打分法造成的主观意识过高的问题,而且此模型具有很强的兼容性,在利用本模型对其他生物质气化站进行安全评价时,只需进行专家打分,即可得到评价结果。

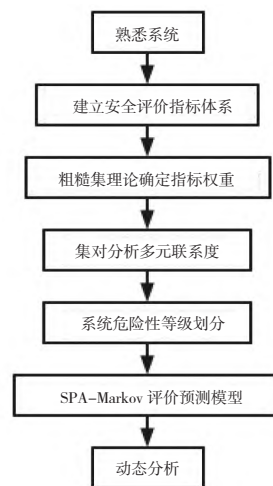


图5 RS-SPA-Markov chain 安全评价与预测步骤

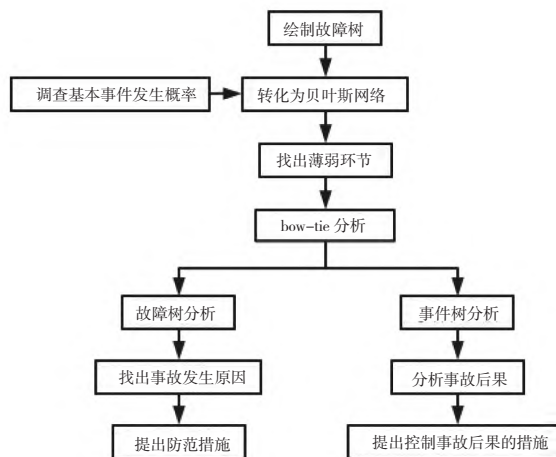


图6 贝叶斯网络-bow-tie 分析安全评价步骤

闫放^[4]针对生物质气化站火灾爆炸事故提出了一种将贝叶斯与 bow-tie 法相结合的风险评价模型(见图6)。该模型将故障树转化为贝叶斯网络,利用贝叶斯的双向推导功能计算基本事件后验概率及重要度,找出导致事故发生的节点,利用 bow-tie 分析导致事故发生的薄弱环节失效因素以及应该采取的防范措施,进而降低事故发生的概率。贝叶斯网络计算简单,弥补了故障树中计算复杂的缺点,

bow-tie 分析图可以将薄弱环节对应的失效原因、失效后果以及相应的预防措施、控制措施清晰地表示出来,该模型可有效降低生物质气化事故概率,值得推广。

白永强^[1]等通过事件树分析得到了沼气泄漏的事故类型,根据美国石油学会(American Petroleum Institute, API)提供的燃气泄漏后表现形式和发生概率,给出了事故中人员的死亡概率计算方法。根据我国在2014年颁布的个人可接受标准,判断事故后果是否在人们可接受范围内。如若不能,应采取适当的降低事故概率和减轻事故后果的措施。该方法可为沼气工程在风险管理、应急救援、土地使用、安全规划等方面提供分析依据,但该模型也存在一些不足,即文中数据大多来源于国外的研究,国内外事故发生率不一,计算结果往往会有一些偏差;并且事故的发生与企业的管理状况、人员操作技术水平等是相连的,因此实际的事故评估中应根据企业不同状况动态评估。

2.3 国外研究现状

Ada Saracino^[11]等将一种公司对职业健康和安全管理(OHSMS)进行自我评估的方法——实施和监测场所安全的方法(M. I. M. O. S.A.)应用到沼气行业,该方法是半定量的,可以帮助企业实现持续改善职业健康安全绩效,可以通过量化不同的关键要素来对现有的管理系统进行综合评价。

Petr Travník^[12]等收集了从2006年至2016年欧洲发生的208起沼气站事故。利用软件工具对这些数据进行了统计分析,文献详细分析了选定事故的事故频率,评估了与个别因素相关的类别的绝对频率、相对频率和置信区间,包括3个因素:事件类型、事件原因和事故发生的对象。随后分析了“致命伤”,“重伤”,“财物损失”这3种后果在总体事故中的占比以及发生原因等。这项工作的目的是找到关于“沼气厂事故的趋势是什么”,这将在未来促进在类似设施中的风险专家作出决策。

Valeria Casson Moreno^[10]等将一种传统的蝴蝶结分析方法(bow-tie)与危险源识别分析(HAZID)的创新技术DyPASI:非典型场景识别的动态程序相结合,来确定沼气站典型的具体事故情景和相应的原因。该方法处理的是系统的危险识别,而不是对单一设施进行具体分析(见图7、图8)。在本研究中,蝴蝶结是由重大事故危险的识别方法(MIMAH)分析得到,目的是对沼气设施进行更完整和更系统

的危害识别,从而提高过程安全知识。

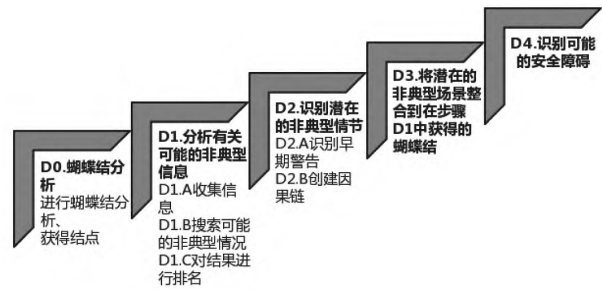


图7 DyPASI方法的改进步骤

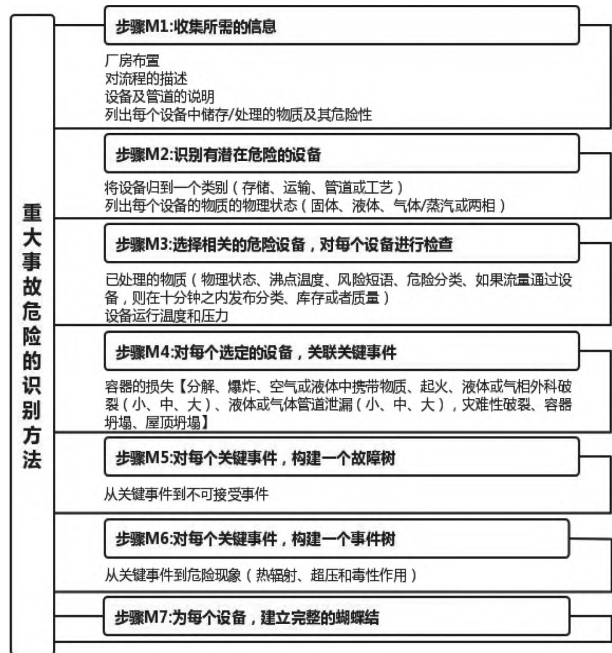


图8 重大事故危险的识别方法流程图

Marco Barozzi^[8]等结合了原因后果图递归可操作性分析(ROA-CCD)和失效模式与影响临界分析(FMECA)对沼气站进行风险评价(见图9)。ROA-CCD技术是一种类似于危险与可操作性研究(HAZOP)的方法,它以合乎逻辑的方式组织组件故障,并允许自动构造故障树(FTA),是原始递归可操作性分析的改进版本。该模型十分严

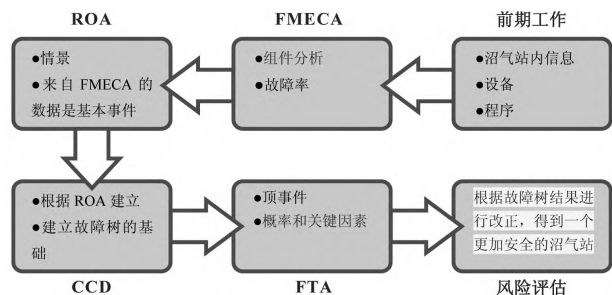


图9 FMECA-ROA-CCD风险分析方法主要步骤

谨,可对因程序错误和设备故障导致的偶然情景进行识别,也可对偶然情景进行量化。

3 基于博弈论组合赋权-云模型的沼气工程安全评价

以赤峰某沼气站为例,结合其特点,分析站内危险因素,并通过国内国外沼气站以往的事故调查分析,建立如表 1 所示的沼气站安全评价体系。

表 1 沼气站安全生产评价体系

指标层	
人员因素 M1	专业技能水平 M11
	应急决策能力 M12
	安全意识 M13
	身体和心理素质 M14
	责任心 M15
机械因素 M2	生产装置 M21
	自动报警系统 M22
	排风系统 M23
	监测系统 M24
环境因素 M3	噪音 M31
	有毒气体 M32
	照明 M33
	温度 M34
管理因素 M4	规章制度 M41
	日常维护检查 M42
	安全教育 M43
	防护装置配备 M44
	岗前技能培训 M45
应急效能 M5	应急组织人员 M51
	事故风险分析 M52
	现场处置方案 M53
	应急演练培训 M54

表 2 准则层打分结果

专家	序关系	γ_1	γ_2	γ_3	γ_4
1	$M_2 > M_4 > M_1 > M_3 > M_5$	1.3	1.4	1.4	1.2
2	$M_2 > M_4 > M_1 > M_3 > M_5$	1.4	1.4	1.3	1.3
3	$M_2 > M_4 > M_1 > M_3 > M_5$	1.3	1.3	1.4	1.1
4	$M_2 > M_4 > M_1 > M_3 > M_5$	1.4	1.5	1.4	1.2
5	$M_2 > M_4 > M_1 > M_3 > M_5$	1.4	1.3	1.4	1.1
6	$M_2 > M_4 > M_1 > M_3 > M_5$	1.4	1.4	1.3	1.2

通过上式计算得到准则层人员因素、机械因素、环境因素、管理因素、应急效能的权重分别为: 0.178、0.336、0.120、0.246、0.120。

3.2 熵权法

3.2.1 构建评价指标原始数据矩阵

设有 m 个待评价指标,邀请了 n 位专家对 m 个待评价指标进行赋值处理,构成评价指标的原始数

3.1 G1 法

序关系分析法又叫 G1 法,是我国的郭亚军教授提出的一种在 AHP 层次分析法的基础上进行合理改进的确定主观权重的方法。

序关系分析法确定主观权重的步骤如下:

(1) 确定序关系

根据序关系的定义:以准则层为例,评价指标 M_i 与评价指标 M_j 相比, M_i 的重要程度大于(或者不小于) M_j 时,则用 $M_i \geq M_j$ (或 $M_i > M_j$) 表示。并将该准则层下的所有评价指标 $M_1、M_2 \dots M_n$ 按照上述进行重要程度排序,具有关系式: $M_1^* \geq M_2^* \geq \dots \geq M_k^*$, 对应权重值 $\omega_1^*、\omega_2^*、\dots \omega_k^*$ 。

(2) 判断相邻评价指标间相对重要程度

根据序关系法的计算步骤规则,专家根据经验和以往事故原因分析相邻评价指标之间的相对重要程度,确定固定值 r_k 。

$$r_k = \frac{\omega_k^*}{\omega_{k-1}^*}$$

(3) 主观权重系数 ω_k^* 的计算

根据步骤(2)专家对指标间的重要程度赋值情况,计算主观权重系数 ω_k^* ,计算公式为:

$$\omega_k^* = (1 + \sum_{k=2}^n \prod_{i=k}^n \gamma_i)^{-1} (k = n, n-1 \dots 3, 2)$$

$$\omega_{k-1}^* = \omega_k^* \gamma_k (k = n, n-1 \dots 3, 2)$$

邀请 6 位专家对影响沼气工程风险水平的评价指标进行重要程度排序和打分(以准则层为例),准则层打分结果见表 2。

据矩阵 $R = (r_{ij})_{m \times n}$, r_{ij} 表示 j 专家对评价指标 i 的打分值。

$$R = (r_{ij})_{m \times n} = \begin{bmatrix} r_{11} & r_{12} & \dots & r_{1n} \\ r_{21} & r_{22} & \dots & r_{2n} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ r_{m1} & r_{m2} & r_{m3} & r_{mn} \end{bmatrix}$$

3.2.2 将各指标的数据进行标准化处理

对评价矩阵 R 进行标准化处理求得第 i 个指标在第 j 个评价对象或评价目标 r_{ij} 所占的比重 P_{ij} , 形成矩阵 P。

$$p_{ij} = \frac{r_{ij}}{\sum_{j=1}^m r_{ij}} \quad i = (1, 2, 3 \dots n); j = (1, 2, 3 \dots m)$$

3.2.3 计算第 i 项评价指标的信息熵 e_i

$$e_i = -k \sum_{j=1}^m p_{ij} \ln p_{ij} \quad (j = 1, 2, \dots, n)$$

其中: 满足 $k = \frac{1}{\ln m} \geq 0, e_i \geq 0$ 。

3.2.4 计算第 i 项评价指标的差异系数 g_i

$$g_i = 1 - e_i \quad (i = 1, 2, \dots, n)$$

3.2.5 计算第 i 项指标的熵权值

$$\omega_i = \frac{g_i}{\sum_{i=1}^n g_i}$$

以准则层为例, 根据专家打分, 得到原始数据矩阵

$$R = \begin{bmatrix} 6 & 8 & 5 & 4 & 7 & 5 \\ 8 & 4 & 5 & 7 & 7 & 4 \\ 3 & 4 & 4 & 5 & 5 & 4 \\ 4 & 5 & 4 & 6 & 6 & 3 \\ 3 & 4 & 3 & 4 & 4 & 3 \end{bmatrix}$$

通过上式计算得到准则层人员因素、机械因素、环境因素、管理因素、应急效能的权重分别为:

0.227、0.318、0.120、0.247、0.088。

3.3 博弈论组合权重

3.3.1 假设现采用 M 种方法对各评价指标进行权重计算, 可得其权重集为:

$$W_x = [W_{x1}, W_{x2}, \dots, W_{xn}] \quad (x = 1, 2, \dots, m)$$

由此形成 m 个权重向量的任意组合为:

$$W = \sum_{i=1}^m a_i W_i^T$$

式中: a_i 为线性组合系数, W 为权重的线性组合; W_i 为基本权重向量集的转置矩阵。

3.3.2 结合博弈论组合赋权的相关思想, 可得组合系数的优化对策模型为

$$\min \left\| \sum_{i=1}^m a_i W_i^T - W_j \right\|_2$$

式中: W_j 为第 j 种方法计算得到的基本权重集
根据矩阵微分性质, 求解最优组合系数, 将求得的最优组合系数经归一化处理后代入式即得评价指标组合权重。

$$\begin{pmatrix} W_1 W_1^T & \dots & W_1 W_m^T \\ \dots & \dots & \dots \\ W_m W_1^T & \dots & W_m W_m^T \end{pmatrix} \begin{pmatrix} a_1 \\ \dots \\ a_m \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} W_1 W_1^T \\ \dots \\ W_m W_m^T \end{pmatrix}$$

根据上述公式, 利用博弈论将通过 G1 法得到的主观权重和熵权法得到的客观权重进行组合赋权, 计算结果如表 3 所示。

表 3 博弈论组合赋权计算结果

指标层	G1 法权重	熵权法权重	博弈论综合权重
专业技能水平 M ₁₁	0.0614	0.0722	0.06924
应急决策能力 M ₁₂	0.0242	0.0310	0.02914
安全意识 M ₁₃	0.0424	0.0516	0.04908
身体和心理素质 M ₁₄	0.0242	0.0310	0.02914
责任心 M ₁₅	0.0258	0.0412	0.03699
生产装置 M ₂₁	0.1394	0.1244	0.12839
自动报警系统 M ₂₂	0.0591	0.0691	0.06644
排风系统 M ₂₃	0.0511	0.0415	0.04405
监测系统 M ₂₄	0.0864	0.0830	0.08390
噪音 M ₃₁	0.0247	0.0282	0.02646
有毒气体 M ₃₂	0.0446	0.0424	0.0435
照明 M ₃₃	0.0271	0.0282	0.02766
温度 M ₃₄	0.0235	0.0212	0.02238
规章制度 M ₄₁	0.0266	0.0329	0.02798
日常维护检查 M ₄₂	0.0423	0.0576	0.04565
安全教育 M ₄₃	0.0337	0.0412	0.03534

(续表 3)

指标层	G1 法权重	熵权法权重	博弈论综合权重
防护装置配备 M ₄₄	0.0630	0.0494	0.06002
岗前技能培训 M ₄₅	0.0804	0.0659	0.07723
应急组织人员 M ₅₁	0.0242	0.022	0.02313
事故风险分析 M ₅₂	0.0317	0.0275	0.02966
现场处置方案 M ₅₃	0.0377	0.022	0.03009
应急演练培训 M ₅₄	0.0264	0.0165	0.02160

3.4 云模型

根据沼气生产过程的涉及的危险以及结合相关的标准规范,将沼气工程危险等级分为以下五个等级(见表 4)。

表 4 危险性等级及其评语集

等级	评价值	云数字特征
危险极低	[0.9~1.0)	(0.95,0.017,0.005)
危险较低	[0.6,0.9)	(0.75,0.05,0.005)
危险中	[0.4,0.6)	(0.5,0.033,0.005)
危险较大	[0.2,0.4)	(0.3,0.033,0.005)
危险极大	[0,0.2)	(0.1,0.033,0.005)

云模型通过 E_x 、 E_n 、 H_e 反映数据的不确定性。其中: E_x 是期望,在论域空间中最能够集中体现这一定性概念的点; E_n 是熵,反映评价结果的可取范围和云滴的聚散程度,即它的不确定性和模糊性; H_e 是超熵,反映了云滴的离散程度。

$$E_x = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n X_i$$

$$E_n = \sqrt{\frac{\pi}{2}} \times \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |X_i - E_x|$$

$$H_e = \sqrt{\left| \frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (X_i - E_x)^2 - E_n^2 \right|}$$

根据得到的云模型数字特征利用正向云发生器生成正太随机数 $x, x \sim N(E_x, E_n^2)$ 。然后利用下式计算云滴隶属度,则 $(x, \mu(x))$ 为一个云滴。重复上述步骤,直到生成需要的云滴数为止。

$$\mu(x) = \exp\left[-\frac{(x - E_x)^2}{2(E'_n)^2}\right]$$

在确定指标层评价指标云特征值后,利用虚拟云中综合云的算法,算出准则层以及最终的危险性评价结果的云模型特征值,计算方法如下所示。

$$E_x = \frac{\sum_{j=1}^n E_{x_j} E_{n_j} W_j}{\sum_{i=1}^n E_{n_i} W_i}$$

$$E_n = \sum_{i=1}^n E_{n_i} W_i$$

$$H_e = \frac{\sum_{j=1}^n H_{e_j} E_{n_j} W_j}{\sum_{i=1}^n E_{n_i} W_i}$$

3.4.1 邀请 6 位专家根据表 4,对指标层中各评价因素的危险性进行打分,结果见表 5。

3.4.2 根据上述公式得到沼气工程风险云特征值如表 6。

表 5 专家打分结果

指标层	专家 1	专家 2	专家 3	专家 4	专家 5
专业技能水平 M ₁₁	0.85	0.80	0.80	0.70	0.75
应急决策能力 M ₁₂	0.80	0.85	0.75	0.75	0.80
安全意识 M ₁₃	0.85	0.90	0.75	0.80	0.85
身体和心理素质 M ₁₄	0.90	0.95	0.85	0.8	0.85
责任心 M ₁₅	0.90	0.95	0.90	0.85	0.90
生产装置 M ₂₁	0.90	0.80	0.80	0.7	0.90
自动报警系统 M ₂₂	0.70	0.85	0.75	0.70	0.85
排风系统 M ₂₃	0.80	0.85	0.80	0.80	0.90

(续表 5)

指标层	专家 1	专家 2	专家 3	专家 4	专家 5
监测系统 M ₂₄	0.90	0.95	0.95	0.80	0.85
噪音 M ₃₁	0.7	0.80	0.85	0.80	0.70
有毒气体 M ₃₂	0.60	0.55	0.50	0.70	0.80
照明 M ₃₃	0.75	0.08	0.85	0.80	0.70
温度 M ₃₄	0.70	0.75	0.8	0.60	0.70
规章制度 M ₄₁	0.09	0.75	0.70	0.80	0.70
日常维护检查 M ₄₂	0.80	0.90	0.70	0.70	0.75
安全教育 M ₄₃	0.80	0.60	0.70	0.55	0.75
防护装置配备 M ₄₄	0.80	0.70	0.80	0.70	0.80
岗前技能培训 M ₄₅	0.70	0.65	0.90	0.80	0.70
应急组织人员 M ₅₁	0.85	0.80	0.75	0.80	0.85
事故风险分析 M ₅₂	0.85	0.90	0.80	0.70	0.80
现场处置方案 M ₅₃	0.70	0.85	0.75	0.80	0.75
应急演练培训 M ₅₄	0.80	0.85	0.80	0.90	0.70

表 6 沼气工程风险云特征值

目标层云特征值	准则层云特征值	指标层云特征值
(0.776,0.07,0.016)	(0.818,0.048,0.015)	(0.78,0.055,0.015)
		(0.79,0.040,0.012)
		(0.83,0.055,0.015)
		(0.87,0.055,0.015)
		(0.90,0.025,0.025)
	(0.825,0.071,0.018)	(0.82,0.080,0.024)
		(0.77,0.080,0.025)
		(0.83,0.045,0.005)
		(0.89,0.065,0.005)
	(0.69,0.084,0.016)	(0.77,0.070,0.020)
		(0.63,0.120,0.010)
		(0.78,0.055,0.015)
		(0.71,0.065,0.036)
	(0.745,0.085,0.012)	(0.77,0.080,0.024)
		(0.77,0.080,0.024)
		(0.68,0.105,0.017)
		(0.76,0.060,0.024)
		(0.75,0.100,0)
	(0.801,0.057,0.026)	(0.81,0.040,0.012)
		(0.81,0.065,0.036)
		(0.77,0.055,0.015)
		(0.82,0.067,0.034)

3.4.3 最终综合评价云与标准评语云对比

最终综合评价与标准评语云对比图见图 10, 综合评价云的期望值为 0.776, 根据表 4 中危险等级划分可知, 该沼气站生产环节处于危险较低状态。分析结果表明: 准则层中环境因素危险性最高, 其指标层中危险最大的是有毒气体, 企业应加强有毒气体防护工作。

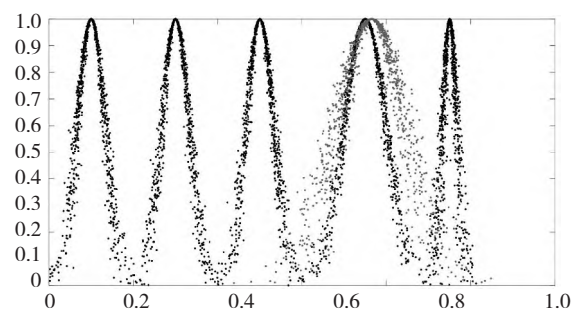


图 10 标准云与综合评价云对比图

4 结论

(1) 文中搜集的国内外沼气工程安全评价模型为企业进行沼气站安全评价与预测提供了有效途径, 也为管理者进行决策提供了更加可靠、客观的依据。

(2) 相比于国外, 国内缺乏对沼气事故的统计分析, 在应用某些方法对国内沼气工程进行评价时

要具体结合国内沼气工程具体情况。应完善国内沼气工程事故数量、事故类型、事故原因等方面的统计。

(3) 基于上述沼气工程安全评价方法的优缺点, 现提出一种新的方法: 基于博弈论组合赋权-云模型的沼气工程安全评价, 该方法首先运用 G1 法和 EWM 法分别确定主客观权重, 再采取博弈论方法对权重组合优化, 降低决策者的主观影响, 依据评估指标云模型特征参数确定沼气工程安全等级。

参考文献:

- [1] 白永强, 吕良海. 沼气工程火灾爆炸定量风险分析方法研究[J]. 安全, 2021, 42(09): 1-6.
- [2] 刘广轩. 沼气工程火灾爆炸危险性安全技术研究[D]. 沈阳: 东北大学, 2013.
- [3] 王贝贝, 孙家伟, 许开立, 等. 基于 RS-SPA-Markov chain 的生物质气化站安全评价与预测模型研究[J]. 工业安全与环保, 2016, 42(02): 59-62.
- [4] 闫放. 生物质气化事故风险分析与控制[D]. 沈阳: 东北大学, 2017.
- [5] 田晓东, 张典, 俞松林, 等. 沼气工程技术讲座(一) 沼气工程技术发展现状与展望[J]. 可再生能源, 2011, 29(01): 157-159.
- [6] 徐慧, 韩智勇, 吴进, 等. 中德沼气工程发展过程比较分析[J]. 中国沼气, 2018, 36(04): 101-108.
- [7] 王燕妮, 汪彤, 吕良海, 等. 多层次灰色评价法在沼气站安全评价中的应用[J]. 安全, 2016, 37(05): 29-33.
- [8] BAROZZI M, CONTINI S, RABONI M, et al. Integration of Recursive Operability Analysis, FMECA and FTA for the Quantitative Risk Assessment in biogas plants: Role of procedural errors and components failures [J]. Journal of Loss Prevention in the Process Industries, 2021, 71: 104468.
- [9] TRÁVNÍČEK P, KOTEK L, JUNGA P, et al. Quantitative analyses of biogas plant accidents in Europe [J]. Renewable energy, 2018, 122: 89-97.
- [10] MORENO V C, GUGLIELIMI D, COZZANI V. Identification of critical safety barriers in biogas facilities [J]. Reliability Engineering System Safety, 2018, 169: 81-94.
- [11] SARACINO A, MORENO V C, ANTONIONI G, et al. Application of a self-assessment methodology for occupational safety to biogas industry [J]. Chemical Engineering Transactions, 2016, 53: 247-252.
- [12] 冯国旺. 沼气工程安全预警分级研究[D]. 沈阳: 东北大学, 2015.
- [13] 李季硕, 许开立, 徐青伟, 等. 基于 ODIE 原则的 AHP-云模型的转炉炼钢风险评价[J]. 工业安全与环保, 2019, 45(10): 20-24.
- [14] 刘英杰, 李光辉, 马锐鑫. 基于组合赋权云模型的水利信息系统可靠性评价[J]. 人民长江, 2023, 54(02): 227-233.
- [15] 杨慎涛, 陈劲松, 袁林. 基于 G1 赋权法的配电网带电作业安全综合评估[J]. 四川电力技术, 2020, 43(02): 91-94.
- [16] 张慧, 熊欢欢, 刘越群. 基于 TOPSIS 熵权法的我国区块链产业生态系统绩效评价研究[J]. 科技管理研究, 2023, 43(05): 38-45.