

基于模糊贝叶斯网络的 液氢储罐风险评估

邱滔^{1,2*}, 王先东¹, 吕新宇², 邢志祥¹

(1.常州大学安全科学与工程学院, 江苏常州 213164;

2.常州大学石油化工学院, 江苏常州 213164)

摘要:基于蝴蝶结模型(bow-tie, BT)的模糊贝叶斯网络(fuzzy bayesian network, FBN)分析方法,旨在建立液氢储罐泄漏定量风险评估模型。该方法通过BT模型确定液氢储罐泄漏发生的演变机制和关键风险因素,重点从储罐超压、材料失效、外部冲击等方面分析,并结合BN模型进行风险量化。最后利用GeNIe软件风险诊断技术,确定了泄漏的主要风险因素,为液氢储罐的事故预防和管理提供了科学意见。

关键词:液氢;模糊理论;GeNIe分析;贝叶斯网络

中图分类号:X931

文献标志码:A

文章编号:0253-4320(2026)01-0233-06

DOI:10.16606/j.cnki.issn0253-4320.2026.01.038

Risk assessment of liquid hydrogen storage tank based on fuzzy bayesian network

QIU Tao^{1,2*}, WANG Xian-dong¹, LV Xin-yu², XING Zhi-xiang¹

(1.School of Safety Science and Engineering, Changzhou University, Changzhou 213164, China;

2.School of Petrochemical Engineering, Changzhou University, Changzhou 213164, China)

Abstract:The analysis method of the Fuzzy Bayesian Network (FBN) based on the Bow-Tie (BT) model aims to establish a quantitative risk assessment model for the leakage of liquid hydrogen storage tanks. Through the BT model, this method determines the evolution mechanism and key risk factors for the occurrence of leakage in liquid hydrogen storage tanks, focusing on the analysis from aspects such as overpressure of the storage tank, material failure, and external impact, and combines with the BN model for risk quantification. Finally, by using the risk diagnosis technology of the GeNIe software, the main risk factors for leakage are determined, providing scientific suggestions for the accident prevention and management of liquid hydrogen storage tanks.

Key words:liquid hydrogen; fuzzy theory; genie analysis; bayesian network

氢能作为高效环保的替代能源,是推动我国能源生产和消费的革命,实现能源转型的关键力量^[1]。与高压气氢相比,液氢因超高能量密度,在储存运输上极具优势^[2],已广泛应用于航天领域、船舶和新能源汽车等领域^[3]。然而,液氢储罐一旦泄漏,极易引发蒸气云爆炸、液池、沸腾液体扩展蒸气云爆炸(boiling liquid expanding vapor explosion, BLEVE)等事故。因此,对液氢储罐风险辨识迫在眉睫。

在风险辨识领域,当前高压氢气研究已取得诸多成果。王振庭等^[4]结合故障树和模糊理论剖析储氢罐,分析腐蚀、疲劳裂纹的原因。杨太华等^[5]利用故障树和改进灰色关联分析定量评价加氢站安全风险。王春雷^[6]利用故障树和道化学指数法建

立了加氢站环境安全风险评价体系模型。Gye等^[7]通过深入研究发现加氢机和氢气管道拖车是主要风险因素。Aliabadi等^[8]结合故障树和事件树,建立贝叶斯网络模型,得出操作失误对氢气泄漏事件影响最大。Li等^[9]将静态贝叶斯网络模型优化为动态贝叶斯网络。Zarei等^[10]通过蝴蝶结模型与改进的D数论,对高压氢气储罐释放情景进行建模。Goswami等^[11]建立计算流体动力学模型,模拟氢气的泄漏规律。Ji等^[12]建立了高压气氢泄漏动态贝叶斯网络模型,确定维护不当和操作失误是氢气泄漏的主要因素。尽管上述研究在氢能领域取得了诸多进展,但在液氢储罐研究方面存在明显不足。Li等^[13]从危害的角度最先研究液氢储罐意外释放及其后果,得出液氢储存比70 MPa的气态储存可能

收稿日期:2025-04-22;修回日期:2025-10-21

基金项目:国家重点研发计划项目(2022YFB4002803)

作者简介:邱滔(1967-),男,博士,研究员,研究方向为危险化学品安全与控制技术研究,通讯联系人,qiutao@cczu.edu.cn。

更安全。Sakamoto 等^[14]首先利用 ANSYS 和 TRACE 软件评估火灾对液氢储罐安全性的影响。Wang 等^[15]和 Jiang 等^[16]进一步研究液氢储罐的热力学特性。此外, Tamburini 等^[17]基于贝叶斯网络分析了液氢加注的风险因素, 评估安全屏障性能。Liu 等^[18]专注于静电风险研究, 建立理论模型描述液氢储罐内电势分布。

上述研究大多聚焦于高压气氢泄漏, 在风险辨识领域, 针对液氢泄漏风险的系统性研究存在明显不足。针对上述空白, 本文中引入蝴蝶结模型与模糊贝叶斯网络构建液氢储罐泄漏综合评估框架, 融合模糊数学和 Leaky Noisy OR gate 模型处理系统中不确定性和模糊性, 为氢能储存管理提供了重要理论支持。

1 建立蝴蝶结和模糊贝叶斯网络风险模型

1.1 蝴蝶结模型转化贝叶斯网络

通过绘制蝴蝶结图来表示事故之间的关系, 并将事故的主要原因和后果整合到一个逻辑模型^[19]。通过故障树探究顶事件发生的原因, 根据事件树明确顶事件可能的潜在后果^[20]。由于 BT 模型需要大量的数据来支持风险因素的识别, 且假设风险因素之间是独立的。贝叶斯网络模型能有效处理事件之间的因果关系以及通过概率推理处理缺失数据, 因此, 将蝴蝶结模型转化为贝叶斯网络模型, 如图 1。

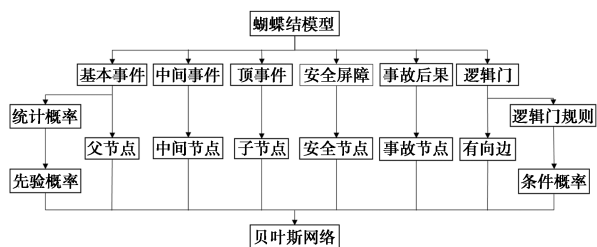


图 1 蝴蝶结模型-贝叶斯网络转换法则

1.2 贝叶斯网络

贝叶斯网络(bayesian network, BN)作为一种有效的概率推理工具, 利用有向无环图推理节点之间的因果关系, 通过条件概率表(conditional probability table, CPT)表示节点之间的概率关系^[21]。BN 可以将节点集合 $N = \{X_1, X_2, X_3 \dots X_N\}$ 上的联合概率分布 $P(X)$ 描述为:

$$P(X) = P(X_1, X_2, X_3 \dots X_n) \prod_{i=1}^n P[X_i | \text{Parents}(X_i)] \quad (1)$$

式中, $P(X)$ 为网络的联合概率分布, $\text{Parents}(X_i)$ 为 X 的父节点集合。

1.3 模糊贝叶斯网络

1.3.1 模糊集理论

本文中提出融合模糊数学理论的模糊贝叶斯网络框架, 核心在于能够将专家的语言描述转化为量化数学表征。该理论通过隶属函数实现模糊语言变量到 $[0, 1]$ 区间隶属度的映射。三角形隶属函数来表示语言术语, 在安全评估中引入三角形隶属函数非常有效^[22]。

1.3.2 Leaky Noisy OR 模型驱动的条件概率优化

Leaky Noisy OR gate 模型通过引入“泄漏概率”, 量化未在模型中明确定义的潜在影响因素, 有效缓解对观测变量的完全依赖^[23]。假设节点 Y 有父节点 X_L 和 X_{All} , X_{All} 表示其他因素的总和, 方程如下:

$$P(Y | X_1, X_2, X_3 \dots X_N) = 1 - \prod_{i: X_i \in X_P} (1 - P_i^*) \quad (2)$$

由式(2)可以推导出下式:

$$P_L = [P(Y | X_L) - P(Y | \bar{X}_L)] / [1 - P(Y | \bar{X}_L)] \quad (3)$$

根据式(3)可得到所有父节点的连接概率。以节点事件为例, 不确定因素 X_L , 即连接概率为 $P_{XL} = 0.01$ 。

2 基于贝叶斯网络模型的液氢储罐风险评估

2.1 构建液氢储罐泄漏蝴蝶结模型

以某液氢储罐为研究对象, 如图 2, 液氢储罐通过优化结构设计最大程度减小储存、转注时液氢的损失, 主要包括内外容器、注排液管路、泄压管路、自增压管路、安全泄放装置、液位计等。基于运用 BT 模型辨识储罐泄漏风险, 包括设施结构和人为操作失误等因素。

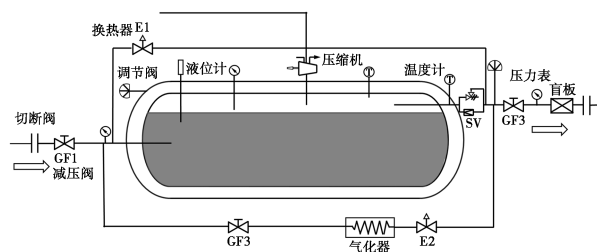


图 2 液氢储罐示意图

为确定液氢储罐泄漏事故原因, 采用蝴蝶结模型对液氢储罐超压、材料失效、外部冲击等方面进行研究分析, 并确定了液氢储罐在安全屏障失效的情况下, 最终事故后果包括蒸气云爆炸、闪火、池火以及 BLEVE 事故。列出液氢储罐泄漏的影响因素及 3 个安全屏障, 如表 1 所示。

表 1 液氢储罐泄漏风险因素及事故后果

符号	描述	符号	描述
M_1	储罐超压	X_{11}	压缩机故障
M_2	材料失效	X_{12}	酸雨腐蚀
M_3	外部冲击	X_{13}	湿度过高
M_4	液氢大量气化	X_{14}	疲劳裂纹
M_5	绝热保冷失效	X_{15}	焊接缺陷
M_6	操作和维护不当	X_{16}	质量缺陷
M_7	充装过量	X_{17}	材料选型不当
M_8	环境腐蚀	X_{18}	低温
M_9	低温脆化	X_{19}	氢脆
X_1	真空度下降	X_{20}	人为破坏
X_2	绝热材料损坏	X_{21}	闪电雷击
X_3	内外层支撑结构漏热	X_{22}	车辆撞击
X_4	充装过快	S_1	瞬时泄漏
X_5	排放过快	S_2	受限空间
X_6	操作规程不规范	S_3	立即点燃
X_7	液位计失效	C_1	蒸气云爆炸
X_8	人员操作错误	C_2	闪火
X_9	安全阀故障	C_3	BLEVE 火球
X_{10}	泄压管道堵塞	C_4	池火灾

2.2 构建液氢储罐事故的贝叶斯网络模型

通过整合 BT 模型与 BN 方法,利用转换法则构建相应的贝叶斯网络模型(图 3)。

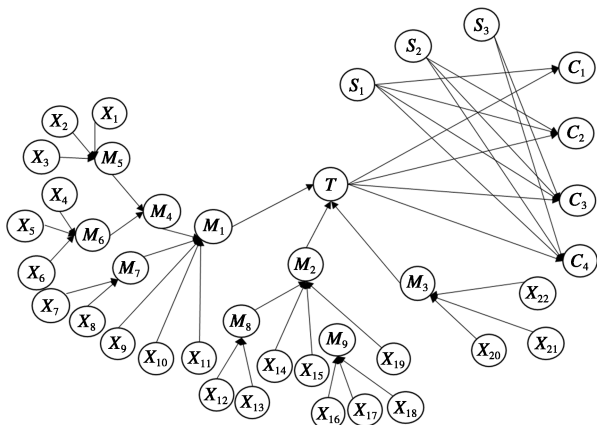


图 3 储罐泄漏风险的贝叶斯网络

2.3 根节点先验概率求解

为了保证研究结果的实用性,采用三角模糊函数作为液氢储罐泄漏事故风险概率评价的隶属函数,并选择了 7 个语言级别描述基本事件的可能性。模糊数的隶属函数及其语言概率表达式,

如表 2。

表 2 自然语言变量对应的模糊数

语言变量	三角模糊数
非常低(VL)	(0.0, 0.025, 0.05)
相对较低(RL)	(0.045, 0.125, 0.2)
低(L)	(0.15, 0.275, 0.4)
中等(M)	(0.35, 0.5, 0.65)
偏高(H)	(0.6, 0.725, 0.85)
高(RH)	(0.8, 0.875, 0.955)
非常高(VH)	(0.95, 0.975, 1)

在汇总数据时需要考虑专家的教育背景、专业、经验等方面的差异。本文中运用相似聚合方法,用于聚合不同专家群体的意见,核心步骤如下:设有 N 位专家接受访问,计算 N 位专家的平均一致度(AA):

$$AA(E_U) = [1/(N-1)] \sum_{(U \neq V)/(V=1)}^N [1 - 1/3 \sum_{i=1}^3 |\bar{A} - \bar{B}|] \quad (4)$$

式中, $\bar{A} = (a_1, a_2, a_3)$, $\bar{B} = (b_1, b_2, b_3)$ 分别表示 2 个专家的模糊数。

N 位专家的相对一致度 RA 由下式得:

$$RA(E_U) = [AA(E_U)] / [\sum_{i=1}^N AA(E_U)] \quad (5)$$

专家的共识系数度 CC 由下式计算:

$$CC(E_U) = \beta \cdot \omega(E_U) + (1 - \beta) \cdot RA(E_U) \quad (6)$$

式中, β 为松弛因子,通常取值为 0.5。要考虑专家的工龄、职称、教育程度等因素,判断专家的权重因子 $\omega(E_U)$,见表 3 所示。采用德尔菲法分配专家的权重系数,专家的得分结果及权重因子如表 4。

表 3 专家权重评判标准

项目	等级划分	分数	项目	等级划分	分数
教育水平	初中及以下	1	工龄	11~15	4
	高中	2		>15	5
	学士	3	职称	技术员	1
硕士	4	工程师		2	
博士	5	高级工程师		3	
工龄	<3	1	教授	4	
	3~5	2	院士	5	
	6~10	3			

综合模糊数 \bar{R}_{AG} 的计算:

$$\bar{R}_{AG} = CC(E_1) \times \bar{R}_1 + CC(E_2) \times \bar{R}_2 + \dots + CC(E_N) \times \bar{R}_N \quad (7)$$

表 4 专家组信息及权重

序号	教育水平	工龄	职称	得分	权重
1	博士	>15	教授	14	0.269
2	博士	6~10	教授	12	0.231
3	博士	3~5	高级工程师	10	0.192
4	硕士	6~10	工程师	9	0.173
5	学士	3~5	技术员	7	0.135

通过去模糊化处理得出先验概率分布,将模糊数转换为清晰分数作为模糊贝叶斯网络的输入。为了增强系统的可靠性,提出将基本事件的失效概率转化为模糊概率,如下式:

$$F_p = \begin{cases} 1/10^M & X \neq 0 \\ 0 & X = 0 \end{cases}$$

$$M = [(1-X)/X]^{1/3} \times 2.301 \quad (8)$$

本文中邀请 5 位相关领域专家,对液氢储罐泄漏表达看法,确定专家的权重分布 $\omega = (0.269, 0.231, 0.192, 0.173, 0.135)$,通过去模糊化法,转换专家的模糊性语言,得出先验概率如表 5。

表 5 根节点先验概率专家评估结果

事件	专家 1	专家 2	专家 3	专家 4	专家 5	模糊可能性	先验概率	后验概率
X ₁	H	RH	VH	VH	H	0.8686	0.05947	0.06976
X ₂	VH	H	RH	VH	H	0.8604	0.05561	0.06677
X ₃	VH	VH	VH	H	H	0.8887	0.07059	0.07998
X ₄	VH	H	VH	RH	M	0.8310	0.04435	0.04638
X ₅	VH	H	VH	M	VH	0.8434	0.04869	0.05134
X ₆	H	M	M	H	M	0.5951	0.00947	0.01044
X ₇	H	H	VH	VH	H	0.8184	0.04046	0.04052
X ₈	RH	RH	H	VH	VH	0.8833	0.06732	0.07987
X ₉	H	H	H	M	H	0.6864	0.01689	0.01745
X ₁₀	H	VH	H	M	VH	0.7818	0.03135	0.03231
X ₁₁	H	H	H	VH	H	0.7675	0.02848	0.03003
X ₁₂	M	M	VL	VL	L	0.2811	0.00071	0.00072
X ₁₃	L	M	M	VL	VL	0.2258	0.00034	0.00035
X ₁₄	L	L	M	L	L	0.3158	0.00105	0.00112
X ₁₅	H	M	M	H	M	0.5951	0.00947	0.00948
X ₁₆	L	L	M	L	M	0.3550	0.00156	0.00158
X ₁₇	L	M	M	M	M	0.4506	0.00348	0.00351
X ₁₈	H	H	H	H	VH	0.8636	0.05703	0.06669
X ₁₉	VH	H	VH	H	H	0.8306	0.04421	0.05283
X ₂₀	L	L	L	VL	M	0.2669	0.00060	0.00060
X ₂₁	L	L	L	VL	M	0.2536	0.00050	0.00050
X ₂₂	M	M	RL	L	L	0.3531	0.00153	0.00153
C ₁	VH	VH	VH	RH	VH	0.9573	0.15270	0.26867

C ₂	VH	H	VH	RH	M	0.8317	0.04442	0.06368
C ₃	VH	H	VH	M	VH	0.8437	0.04870	0.13687
C ₄	VH	RH	VH	RH	M	0.8672	0.05877	0.18475

2.4 基于 Leaky Noisy OR theory 的条件概率表

利用噪声或门推导出条件概率表。本文中以节点 M₃ 为例子,通过计算得到概率:

$$P(M_3 | X_9) = 0.01167; P(M_3 | X_{10}) = 0.02096;$$

$$P(M_3 | X_{11}) = 0.01941$$

$$P(M_3 | \bar{X}_9) = 0.001055; P(M_3 | \bar{X}_{10}) = 0.003959;$$

$$P(M_3 | \bar{X}_{11}) = 0.0002142$$

根据公式(3)计算可得其连接概率 P₁=0.01063, P₂=0.01707, P₃=0.01920。即可得到 A₃ 的条件概率表,见表 6。通过公式可计算出节点 M₃ 的联合概率为 0.01094,同理可以求出 M₁、M₂。最终可以得到最终液氢储罐泄漏顶层事件发生的概率为 0.02056,以及后果事件的发生概率。

表 6 节点 M₃ 的条件概率参数

X ₉	X ₁₀	X ₁₁	P(M ₃ =1)	P(M ₃ =0)
1	0	0	0.0205	0.9795
0	1	0	0.0267	0.9733
0	0	1	0.0290	0.9710
1	1	0	0.0372	0.9628
1	0	1	0.0393	0.9607
0	1	1	0.0456	0.9544
1	1	1	0.0557	0.9443
0	0	0	0.0100	0.9900

2.5 模糊贝叶斯逆向推理

为了更精准地识别储罐泄漏的关键因素,从而有针对性地制定预防措施。因此,基于 GeNIe 平台构建贝叶斯诊断推理系统,采用逆向传导机制进行致因推理,即由果至因的逆向推理分析(图 4),得出风险因素的后验概率。

3 敏感性分析

为了更科学地指导风险防控工作,识别出对顶事件发生影响程度较大的关键风险因素,进而合理分配资源、制定有效的管控措施,需要对根事件进行敏感性分析,以概率变化率(ROV)作为量化指标^[24]:

$$ROV(X_i) = [\pi(X_i) - \theta(X_i)] / \theta(X_i) \quad (9)$$

式中,π(X_i)为节点的后验概率;θ(X_i)为节点的先验概率。

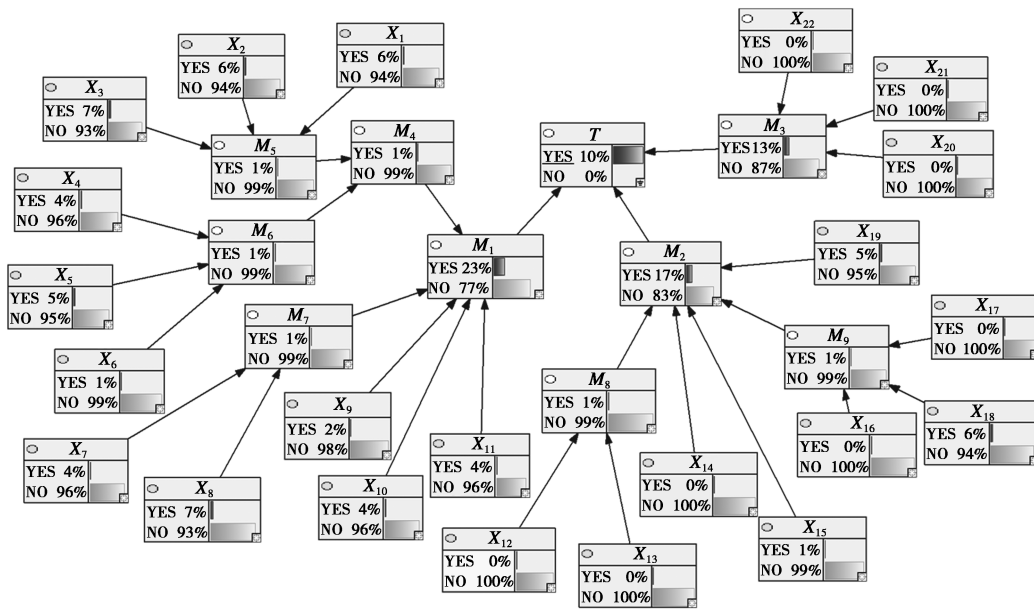


图 4 液氢储罐泄漏的逆向推理

通过液氢储罐泄漏事故的敏感性分析(表 7), 可发现对关键影响因素最大的前 6 个根节点是绝热材料损坏 X_2 、氢脆 X_{19} 、人员操作错误 X_8 、真空度下降 X_1 、低温 X_{18} 、内外层支撑结构漏热 X_3 。

表 7 概率变化率比较

事件	ROV	事件	ROV	事件	ROV
X_1	0.173	X_9	0.033	X_{17}	0.009
X_2	0.201	X_{10}	0.031	X_{18}	0.169
X_3	0.133	X_{11}	0.054	X_{19}	0.195
X_4	0.046	X_{12}	0.014	X_{20}	0
X_5	0.054	X_{13}	0.029	X_{21}	0
X_6	0.102	X_{14}	0.067	X_{22}	0
X_7	0.002	X_{15}	0.001		
X_8	0.186	X_{16}	0.013		

敏感性分析为液氢储罐泄漏风险的管理提供了科学依据。通过对关键敏感性因素的识别和控制, 可以有效降低泄漏风险的发生概率。结合实际场景, 采取针对性控制措施是提高储罐运行安全能力的关键。

4 风险控制优先级

针对不同基本事件所制定的风险措施在实施上的优先程度, 优先级高的措施应优先实施, 以最有效地降低整体风险。利用专家打分法确定 4 个维度的权重为 $\omega = (0.362, 0.330, 0.124, 0.184)$, 各维度分值情况见表 8。最后通过加权计算得分, 得分越高优先级越高, 优先管控措施, 实现资源优化配置。

表 8 评估指标分数

评估维度	分数赋值(1~5分)
风险降低效果	$\geq 25\%$; 5分
	15%~25%; 3分
	10%~15%; 1分
实施成本	低(<5万元); 5分
	中(5~15万元); 3分
	高(>15万元); 1分
实施周期	短期(≤ 1 个月); 5分
	中期(1~3个月); 3分
	长期(>3个月); 1分
措施可行性	高(现有技术直接应用); 5分
	中(需少量技术改进); 3分
	低(需全新技术研发); 1分

针对上述事件, 结合风险降低效果、实施成本、周期及可行性建立措施优先级映射表, 如表 9。

表 9 风险措施优先级映射表

基本事件	风险降低效果	成本	实施周期	措施可行性	综合得分	优先级
绝热材料损坏 X_2	$\geq 25\%$	中	中期	中	3.724	3
低温 X_{18}	$\geq 25\%$	高	长期	中	2.816	5
人员操作错误 X_8	$\geq 25\%$	低	中期	高	4.725	1
真空度下降 X_1	$\geq 25\%$	中	短期	高	4.340	2
氢脆 X_{19}	15%~25%	高	长期	中	2.096	6
内外层支撑结构漏热 X_3	$\geq 25\%$	中	中期	中	3.724	4

通过关键重要度与措施优先级之间的联系,明确措施优先级为管理决策提供了依据,使管理人员能够更有针对性地进行工作监督和安排,提高管理效率。

5 结论

(1) 本研究将蝴蝶结模型和贝叶斯网络相结合的方法成功应用于加氢站液氢储罐泄漏风险分析中,通过 GeNIe 软件计算得出的泄漏故障概率为 0.020 56 及各类事故后果的概率值。

(2) 基于贝叶斯网络的风险推理以及敏感性分析得出液氢储罐泄漏事故的关键原因是绝热材料损坏 X_2 、氢脆 X_{10} 、人员操作错误 X_8 、真空度下降 X_1 、低温 X_{18} 、内外层支撑结构漏热 X_3 等。这些关键因素的轻微变化可能导致泄漏风险及其后果的发生概率显著增加。

(3) 通过风险控制优先级,对关键影响因素进行优先级管控,可以有效降低液氢储罐泄漏的风险,提升系统的整体安全性。

参考文献

- [1] 凌文,刘玮,李育磊,等.中国氢能基础设施产业发展战略研究[J].中国工程科学,2019,21(3):76-83.
- [2] Friberg R.A photovoltaic solar-hydrogen power plant for rural electrification in India.Part 1:A general survey of technologies applicable within the solar-hydrogen concept[J].International Journal of Hydrogen Energy,1993,18(10):853-882.
- [3] 王晋桦,朴文学.国外航天用液氢的生产、贮存和运输[J].国外导弹与航天运载器,1990,(5):48-65.
- [4] 王振庭,林少芬,徐铁群.基于模糊故障树法的高压氢气储罐可靠性分析:2007年全国机械可靠性学术交流会议论文集[C].厦门:集美大学轮机工程学院,2007:27-29.
- [5] 杨太华,秦静,李志翔.基于故障树和改进灰色关联法的新能源汽车加氢站安全风险评价[J].现代电子技术,2021,44(2):115-121.
- [6] 王春雷.加氢站环境安全风险评价体系研究[D].上海:上海交通大学,2016.
- [7] Gye H R, Seo S K, Bach Q V, et al. Quantitative risk assessment of an urban hydrogen refueling station[J]. International Journal of Hydrogen Energy, 2019, 44(2): 1288-1298.
- [8] Aliabadi M M, Pourhasan A, Mohammadfam I. Risk modelling of a hydrogen gasholder using fuzzy Bayesian network (FBN)[J]. International Journal of Hydrogen Energy, 2020, 45(1): 1177-1186.
- [9] Li Y, Yu L, Jing Q. Dynamic risk assessment method for urban hydrogen refueling stations: A novel dynamic Bayesian networking incorporating multiple equipment states and accident cascade effects[J]. International Journal of Hydrogen Energy, 2024, 54: 1367-1385.
- [10] Zarei E, Khan F, Yazdi M. A dynamic risk model to analyze hydrogen infrastructure[J]. International Journal of Hydrogen Energy, 2021, 46(5): 4626-4643.
- [11] Goswami R, Sun B. Study on vapour dispersion and explosion from compressed hydrogen spill: Risk assessment on a hydrogen plant[J]. International Journal of Hydrogen Energy, 2022, 47(97): 41195-41207.
- [12] Ji X Z, Ming H S, Jian K, et al. Dynamic risk evaluation of hydrogen station leakage based on fuzzy dynamic Bayesian network[J]. International Journal of Hydrogen Energy, 2024, 50: 1131-1145.
- [13] Li Z, Pan X, Ma J, et al. Study on the harm effects of releases from liquid hydrogen tank by consequence modeling[J]. International Journal of Hydrogen Energy, 2012, 37(22): 17624-17629.
- [14] Sakamoto J, Nakayama J, Miyake A, et al. Effect of gasoline pool fire on liquid hydrogen storage tank in hybrid hydrogen-gasoline fueling station[J]. International Journal of Hydrogen Energy, 2016, 41(3): 2096-2104.
- [15] Wang H, Wang B, Gan Z, et al. Modeling and thermodynamic analysis of thermal performance in self-pressurized liquid hydrogen tanks[J]. International Journal of Hydrogen Energy, 2022, 47(71): 30530-30545.
- [16] Jiang Y, Yu Y, Wang Z, et al. CFD simulation of heat transfer and phase change characteristics of the cryogenic liquid hydrogen tank under microgravity conditions[J]. International Journal of Hydrogen Energy, 2023, 48(19): 7026-7037.
- [17] Tamburini F, Ustolin F, Cozzani V, et al. Performance assessment of safety barriers in liquid hydrogen bunkering operations using Bayesian network: Proceedings of the international conference on offshore mechanics and arctic engineering, Volume 2[C]. Singapore: American Society of Mechanical Engineers, 2024: 1-10.
- [18] Liu B, Li Y, Ma Y, et al. Electrostatic characteristics analysis and risk assessments of liquid hydrogen storage system[J]. International Journal of Hydrogen Energy, 2024, 55: 1322-1334.
- [19] Byron E, Wing H W. Learning causal Bayesian network structures from experimental data[J]. Journal of the American Statistical Association, 2008, 103(482): 778-789.
- [20] Shahriar A, Rehan S, Solomon T. Risk analysis for oil & gas pipelines: A sustainability assessment approach using fuzzy based bow-tie analysis[J]. Journal of Loss Prevention In The Process Industries, 2012, 25(3): 505-523.
- [21] Sankaran M, Ruoxue Z, Natasha S. Bayesian networks for system reliability reassessment[J]. Structural Safety, 2001, 23(3): 231-251.
- [22] Wen J W. New similarity measures on fuzzy sets and on elements[J]. Fuzzy Sets and Systems, 1997, 85(3): 305-309.
- [23] Jian X Y, Shi B W, Yang Y, et al. Process system failure evaluation method based on a noisy-or gate intuitionistic fuzzy Bayesian network in an uncertain environment[J]. Process Safety and Environmental Protection, 2021, 150: 281-297.
- [24] Zarei E, Azadeh A, Khakzad N, et al. Dynamic safety assessment of natural gas stations using Bayesian network[J]. Hazard Mater, 2017, 321: 830-840. ■