

基于 DBN 的页岩气井带压作业泄漏动态风险研究

黎南芳 米红甫 廖慧倩 李 毅

重庆科技大学安全科学与工程学院, 重庆 401331

[摘要]针对页岩气井带压作业泄漏风险因素复杂且动态演化的问题, 提出基于动态贝叶斯网络的泄漏动态风险评估方法。利用蝴蝶结模型分析风险因素与事故后果, 引入时间维度构建 DBN 模型, 并采用 Leaky Noisy-or Gate 修正条件概率。以川渝某页岩气带压作业现场为例, 得到泄漏概率时序变化曲线、关键风险因素及事故后果概率。结果表明: 泄漏初始概率为 1.950×10^{-2} , 至第 10 个时间片升至 3.321×10^{-1} ; 冲蚀磨损、流体冲刷、管柱腐蚀等是关键致因; 喷射火概率较高。研究结果可为页岩气井带压作业的风险评估及日常维护提供理论支持。

[关键词]动态贝叶斯网络; 页岩气井; 带压作业; 泄漏风险

DOI: 10.33142/ect.v4i5.19779

中图分类号: TE931

文献标识码: A

Dynamic Risk Research on Leakage of Shale Gas Well Snubbing Operation Based on DBN

LI Nangfang, MI Hongfu, LIAO Huiqian, LI Yi

School of Safety Science and Engineering, Chongqing University of Science & Technology, Chongqing, 401331, China

Abstract: Aiming at the problem of complex and dynamically evolving leakage risk factors during snubbing operations in shale gas wells, a dynamic leakage risk assessment method based on Dynamic Bayesian Network (DBN) is proposed. The Bow-Tie model is used to analyze risk factors and accident consequences, the time dimension is introduced to construct the DBN model, and the Leaky Noisy-or Gate is adopted to modify conditional probabilities. Taking a shale gas snubbing operation site in Sichuan-Chongqing region as an example, the time-varying curve of leakage probability, key risk factors, and accident consequence probabilities are obtained. The results show that the initial leakage probability is 1.950×10^{-2} , and it rises to 3.321×10^{-1} by the 10th time slice; erosion wear, fluid scouring, tubular corrosion, etc., are the key causes; the probability of jet fire is relatively high. The findings can provide theoretical support for risk assessment and routine maintenance of snubbing operations in shale gas wells.

Keywords: Dynamic Bayesian Network; shale gas well; snubbing operation; leakage risk

引言

页岩气作为一种清洁、高效的能源资源, 在全球能源格局中占据着日益重要的地位^[1]。随着页岩气勘探开发工作的深入推进, 带压作业技术因能在保持井筒压力稳定的前提下实施作业, 有效减少储层伤害、提升单井产量与施工效率, 现已得到普遍应用^[2-3]。然而, 页岩气带压作业属高风险作业, 井口高压、环境复杂、设备可靠性要求高等因素, 易引发油气泄漏、设备故障及人员伤亡等事故, 不仅威胁作业人员安全, 还会造成严重的环境污染与经济损失^[4-5]。因此, 页岩气井带压作业泄漏失效风险分析越来越受到学者和行业专家的重视。

目前, 国内外学者与工程技术人员已围绕页岩气开采及带压作业技术开展了相关研究^[6]。胡旭光等^[7]通过对环空动密封装置组合的优化、管柱极限抗弯长度计算模型的

建立, 形成了页岩气带压作业的关键技术。卢云霄等^[8]对国内带压作业装置的发展现状进行了分析, 并简述了我国独立研发的 DYJ160/105 大载荷、高压独立式带压作业机的优势和核心特色。卢云霄等^[9]通过安全防喷器内的闸板式卡瓦卡住管柱, 并旋转转盘到指定位置的带压作业倒扣工艺成为有效解决气井带压作业设备在轻管柱状态下起管柱的困难。程自豪等^[10]对我国页岩气开采压裂技术进行了分析, 我国有直井连续油管分层压裂技术、水平井分段压裂技术和页岩气压裂液体系技术等。胡旭光^[11]系统地梳理了气井带压作业油管内密封工具的现状, 分析总结了不同类型下油管内密封工具选取的规格参数等。

在目前已开发使用的风险评估方法中, 动态贝叶斯网络 (Dynamic Bayesian Network, DBN) 扩展建模方法受到了广泛的关注^[12-13]。陈萌^[14]以海上钻井事故为研究对象,

采用了 BT 模型和贝叶斯网络结合的动态风险评估方法,预测分析了海上钻井事故的概率。Wang C 等^[15]通过构建针对双梯度钻井系统的不确定性动态贝叶斯网络模型,预测了钻井系统中各个风险事件的动态发生概率,并运用 Petri 网进行了模型验证。Wang 等^[16]将动态蝴蝶结分析方法和 DBN 结合,针对石化企业中的加热炉展开动态风险评估。晏伟^[17]在盾构隧道施工诱发地表变形的动态贝叶斯网络基础上,充分结合监测数据,不仅实现了对隧道施工地表变形程度的预测分析,还能够实现实时动态预警。郝武民等^[18]和施昊彤^[19]分别应用基于动态贝叶斯网络的动态风险评价方法,验证了该方法在地面储运设施中的适用性。

基于此,本文以页岩气井带压作业泄漏为研究对象,提出一种基于动态贝叶斯网络的带压作业泄漏动态风险评估方法。通过构建带压作业泄漏安全风险的动态演化模型,利用动态贝叶斯网络的诊断推理功能,得到页岩气井带压作业泄漏事故发生概率随时间的变化规律、不同事故后果的发生概率,识别页岩气井带压作业系统中的薄弱环节;实现对带压作业泄漏事故的快速诊断与动态预测,评估作业过程的动态风险,从而为制定针对性的风险防控措施提供科学依据。

1 基于 DBN 模型的页岩气井带压作业泄漏风险评估方法

页岩气井带压作业工况复杂,设备密封可靠性易受多种因素影响,泄漏失效风险高,易引发严重安全事故,因此风险分析尤为关键。传统安全分析方法难以处理系统动态变化与组件多状态问题,动态贝叶斯网络则可有效刻画系统状态演化与失效相关性,实现动态风险评估。

1.1 蝴蝶结模型和贝叶斯网络模型基本理论

蝴蝶结模型 (Bow-Tie, BT) 是一种直观反映事故发生的危害因素与事故后果的最佳图形方法之一。BT 模型以顶事件为中心,左边为事故树 (Fault Tree Analysis, FTA), 标识危险源, 可能导致顶事件发生的基本事件; 右边为事件树 (Event Tree Analysis, ETA), 根据安全屏障的失败或成功来显示危险事件演变可能产生的后果。

贝叶斯网络 (Bayesian Network, BN) 是一种融合图论与概率统计的数学模型, 专门用于解决不确定性问题中的因果关系表达与概率推理, 可以有效减小推理计算时的复杂程度。贝叶斯网络由一个有向无环图来描述, 由节点、有向弧线和先条件概率表 (Conditional Probability Table, CPT) 组成。在贝叶斯网络中, 各节点间的因果关系取决于条件概率函数, 而条件概率是通过贝叶斯定理计算得到

的, 见式 (1)。

$$P(Y|X) = \frac{P(Y)P(X|Y)}{P(X)} \quad (1)$$

式中, $P(Y|X)$ 为 Y 的后验概率, $P(Y)$ 为 Y 的先验概率, $P(X|Y)$ 为似然概率, $P(X)$ 为 X 的失效概率。

当 BN 有多个节点时可以用 $U=\{X_1, X_2, \dots, X_n\}$ 表示, 其中 X_i 表示节点, 根据链式法则, 联合分布:

$$P(U) = P(X_1, X_2, \dots, X_n) = \prod_{i=1}^n P(X_i | Pa_i) \quad (2)$$

式中, Pa_i 表示节点 X_i 的父节点集合。

1.2 动态贝叶斯网络模型基本理论

动态贝叶斯网络是一种将静态贝叶斯网络与马尔科夫模型结合的概率分布模型, 是在 BN 的基础上进行时域的扩展, 把时间信息和网络结构与模型相结合, 实现对数据的时序上的处理^[20-21]。

动态贝叶斯模型的构建包括两部分: 一是构建先验网络 B_0 , 对应着初始时刻的贝叶斯网络结构和概率分布 $P([X_1])$; 二是构建转移网络 B_{∞} 。图 1 表示 DBN 的常规结构, 其中 t 为当前时间片, $t+1$ 为下一时间片。在 DBN 中, 同一时间片利用片内弧体现 $X_i^t \rightarrow Y^t$ 里不同变量间的变化关系, 片间弧则体现相同变量在连续时间步 $X_i^t \rightarrow X_i^{t+1}$ 和 $Y^t \rightarrow Y^{t+1}$ 间的变化关系。DBN 的联合概率分布^[22]由式 (3) 表示:

$$P(X_{1:T}) = \prod_{t=1}^T \prod_{i=1}^N P[X_i^t | Pa(X_i^t)] \quad (3)$$

式中, X_i^t 表示第 t 时间片上的第 i 个节点, $Pa(X_i^t)$ 表示网络中的 X_i^t 的父节点。

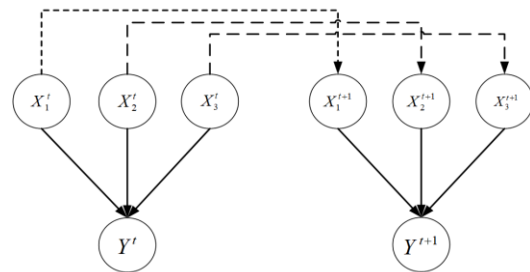


图 1 动态贝叶斯网络结构

1.3 Leak Noisy-or gate 模型

在实际情况下, 风险辨识中事故的发生不是绝对的“发生”或“不发生”, 因此需要对部分节点的 CPT 进行修正。基于此, Henrion^[23]提出了遗漏概率 (Leak Probability), 后续又提出了 Leaky Noisy-or Gate 模型。本文引入 Leaky Noisy-or Gate 模型, 来克服传统贝叶斯网络参数设置中的缺陷。在 Leaky Noisy-or Gate 模型中, 假设

Y 由两个父节点组成, 用 X_i 和 X_{all} 表示, 其对应的条件概率用 P_i 和 P_{all} 表示:

$$P_i = \frac{P(Y|X_i) - P(Y|\bar{X}_i)}{1 - P(Y|\bar{X}_i)} \quad (4)$$

由上式可以计算出节点 Y 的所有父节点的连接概率, 假设未知因素 X_L 的连接概率 $P_L=0.001^{[24]}$, 由此可以得出节点 Y 的条件概率为:

$$P(Y) = 1 - (1 - P_L) \prod_{i: X_i \in X_P} (1 - P_{X_i}) \quad (5)$$

式中, X_P 表示节点 Y 除了 X_L 外的所有父节点。

2 实例应用

2.1 页岩气井带压作业泄漏 BT 模型的建立

以川渝地区某页岩气井带压作业现场为例, 通过大量调研和文献整理分析导致页岩气井带压作业下装置泄漏的主要原因及可能导致的事故后果, 将页岩气井带压作业泄漏作为顶级事件, 建立该页岩气井带压作业泄漏事故的

BT 模型, 见图 2。

页岩气井带压作业泄漏事故的 BT 模型由两部分组成:

(1) 辨识导致页岩气井带压作业中页岩气泄漏发生的危险因素; (2) 事故发生后, 当安全屏障失效后可能导致的事故后果, 包括安全扩散、喷射火、燃爆、蒸气云爆炸、闪火和燃气聚集。其中安全屏障包括监测报警、应急响应、立即点火、延迟点火及受限空间。当系统的安全屏障连续失效时可能引发严重的后果^[25]。

其中, 监测报警为第一道安全屏障, 可实时感知工况异常并即时发出预警; 应急响应作为第二道安全屏障, 便于工作人员及时发现风险并采取处置措施。若两级安全屏障均失效, 页岩气泄漏时立即遇见火源将直接形成喷射火; 若泄漏气体未被立即引燃, 且在受限空间不断积聚, 会形成可燃蒸气云。蒸气云扩散达到临界范围后, 一旦接触延迟点火源, 极易引发蒸气云爆炸, 造成严重安全后果。

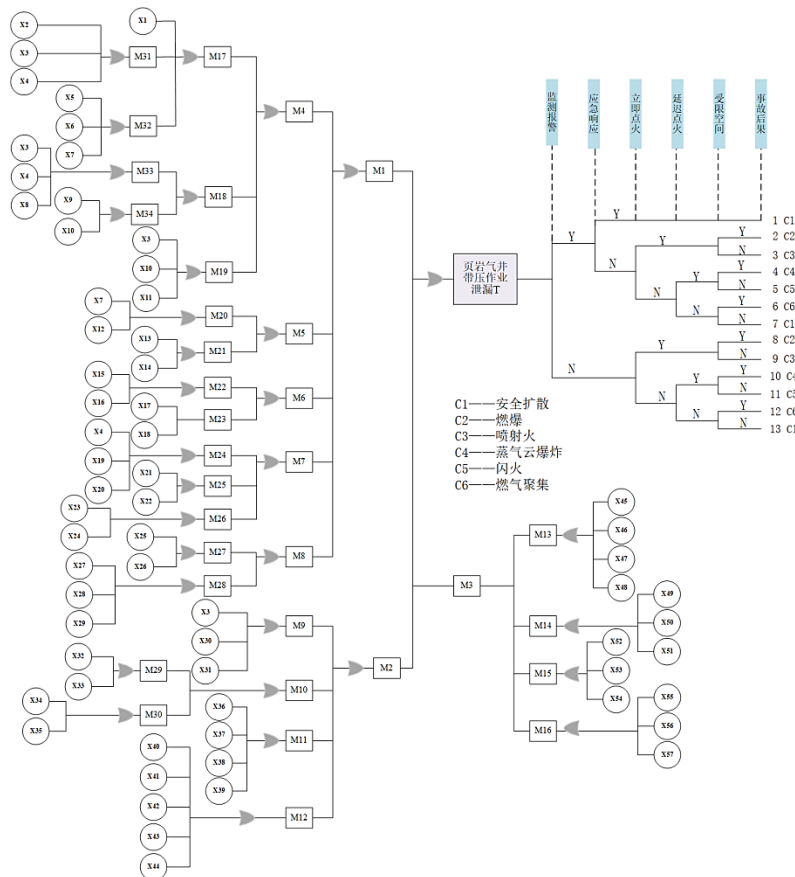


图 2 页岩气井带压作业泄漏 BT 模型

本文主要研究页岩气井带压作业的井口装置、管柱和井筒。图 2 中包括 34 个中间事件和 57 个基本事件, 各个中间事件和基本事件符号及描述见表 1 和表 2。通过专家

打分、文献调研等获得基本事件的先验概率。同理, 通过参考历史数据、专家打分等方式获得各安全屏障的失效概率, 见表 3。

表 1 中间事件符号描述

符号	描述	符号	描述	符号	描述
T	页岩气井带压作业泄漏失效	M ₁₂	堵塞器失效	M ₂₄	密封系统失效
M ₁	井口装置泄漏	M ₁₃	水泥环失效	M ₂₅	安装工艺缺陷
M ₂	管柱失效	M ₁₄	套管柱失效	M ₂₆	压力异常波动
M ₃	井筒失效	M ₁₅	井壁稳定性破坏	M ₂₇	环形防喷器失效
M ₄	采气树失效	M ₁₆	地层压力异常	M ₂₈	闸板防喷器失效
M ₅	油管头失效	M ₁₇	阀门泄漏	M ₂₉	螺纹接头失效
M ₆	套管头失效	M ₁₈	法兰泄漏	M ₃₀	密封件失效
M ₇	环空密封失效	M ₁₉	三通管件失效	M ₃₁	内漏
M ₈	防喷器组失效	M ₂₀	油管悬挂密封失效	M ₃₂	外漏
M ₉	管柱本体失效	M ₂₁	顶部连接部位失效	M ₃₃	密封不严
M ₁₀	连接密封失效	M ₂₂	套管悬挂器失效	M ₃₄	螺纹预紧失效
M ₁₁	封隔器失效	M ₂₃	密封环失效		

表 2 基本事件描述、先验概率及后验概率

符号	描述	先验概率	后验概率	符号	描述	先验概率	后验概率
X ₁	操作失误	1.230E-04	8.053E-04	X ₃₀	压裂砂冲蚀	6.730E-03	5.860E-02
X ₂	缓蚀剂失效	4.210E-04	1.503E-03	X ₃₁	落物撞击	1.230E-04	1.421E-03
X ₃	酸性气体腐蚀	3.008E-03	4.768E-02	X ₃₂	螺纹磨损	4.522E-04	2.248E-03
X ₄	冲蚀磨损	9.169E-03	9.104E-02	X ₃₃	上扣扭矩不足	2.032E-06	1.031E-05
X ₅	密封面缺陷	6.780E-06	2.435E-05	X ₃₄	橡胶密封圈老化	4.522E-04	2.831E-03
X ₆	阀门失效	1.230E-04	5.927E-04	X ₃₅	密封面划伤	1.264E-04	8.386E-04
X ₇	密封圈老化	4.522E-04	3.800E-03	X ₃₆	胶筒破裂	1.230E-04	1.177E-03
X ₈	垫片老化	4.522E-04	1.618E-03	X ₃₇	坐封力不足	1.230E-04	1.136E-03
X ₉	螺栓松动	1.230E-04	4.114E-04	X ₃₈	坐封位置偏移	7.244E-07	8.234E-06
X ₁₀	高温高压	3.008E-03	1.903E-02	X ₃₉	压差过大	1.197E-04	9.408E-04
X ₁₁	材料缺陷	7.244E-07	5.762E-06	X ₄₀	震动	5.000E-03	3.632E-02
X ₁₂	安装失误	2.032E-06	1.427E-05	X ₄₁	流体冲刷	6.795E-03	7.129E-02
X ₁₃	螺纹损伤	1.264E-04	7.712E-04	X ₄₂	压力变化	2.887E-03	2.781E-02
X ₁₄	拧紧力矩不足	2.032E-06	9.560E-06	X ₄₃	选型不合理	6.229E-04	3.976E-03
X ₁₅	悬挂器密封老化	4.522E-04	2.034E-03	X ₄₄	材质不对等	4.611E-05	2.411E-04
X ₁₆	悬挂器坐封力不足	1.230E-04	6.653E-04	X ₄₅	水泥胶结不良	4.443E-04	4.593E-03
X ₁₇	密封环变形	2.032E-06	1.144E-05	X ₄₆	微环隙形成	1.197E-04	8.820E-04
X ₁₈	电化学腐蚀	1.197E-04	8.113E-04	X ₄₇	抗压不足	7.244E-07	7.725E-06
X ₁₉	环空胶圈硬化	4.522E-04	2.118E-03	X ₄₈	地层蠕变剥离	1.717E-03	1.566E-02
X ₂₀	注脂压力不均	1.230E-04	7.385E-04	X ₄₉	管柱腐蚀破坏	6.422E-03	6.530E-02
X ₂₁	卡瓦安装错位	2.032E-06	9.794E-06	X ₅₀	热应力变形	1.197E-04	1.037E-03
X ₂₂	密封胶圈压缩不足	2.032E-06	1.164E-05	X ₅₁	丝扣密封失效	1.230E-04	1.093E-03
X ₂₃	环空压力超限	4.443E-04	1.810E-03	X ₅₂	井壁坍塌	1.717E-03	2.013E-02
X ₂₄	压力骤降冲击	1.197E-04	6.333E-04	X ₅₃	地层出砂	4.443E-04	4.255E-03
X ₂₅	胶芯老化	4.522E-04	2.805E-03	X ₅₄	套管-地层接触失效	7.244E-07	8.763E-06
X ₂₆	补偿液压不足	2.032E-06	1.188E-05	X ₅₅	地层流体窜流	1.356E-05	1.117E-04
X ₂₇	顶密封划伤	1.264E-04	8.206E-04	X ₅₆	异常高压	4.443E-04	3.143E-03
X ₂₈	闸板腔砂堵	3.538E-04	1.908E-03	X ₅₇	环空带压累积	1.197E-04	1.033E-03
X ₂₉	剪切力不足	7.244E-07	4.945E-06				

表 3 安全屏障的失效概率

符号	描述	失效概率
S ₁	监测报警	6.243E-03
S ₂	应急响应	8.224E-03
S ₃	立即点火	4.238E-02
S ₄	延迟点火	1.818E-02
S ₅	受限空间	2.887E-03

2.2 基于 DBN 的页岩气井带压作业泄漏风险评估模型

页岩气井带压作业的泄漏受多种因素的影响,通过传统逻辑门来确定条件概率的方法过于绝对,会导致较大的误差。本文引入 Leaky Noisy-or gate 模型对条件概率表进行修正,使结果更加合理准确。

在 BN 模型中以中间节点“内漏”(M₃₁)为例,其根节点为 X₂、X₃、X₄,展示专家经验和 Leaky Noisy-or gate 模型在条件概率计算中的具体应用。

例: P(M₃₁=1|X₂=1)=0.705,即专家认为在“缓蚀剂失效”的情况下发生“内漏”的概率为 70.5%。同理,

$$P(M_{31}=1|X_2=0)=0.234, P(M_{31}=1|X_3=1)=0.761,$$

$$P(M_{31}=1|X_3=0)=0.267, P(M_{31}=1|X_4=1)=0.735,$$

$$P(M_{31}=1|X_4=0)=0.199。$$

根据式(4)~(5)计算得到联合概率为: P(X₂)=0.379, P(X₃)=0.429, P(X₄)=0.425。本文设未知因素 P(X_L)=0.001,基于 Leaky Noisy-or gate 模型可以得到修正后中间节点 M₃₁的条件概率表,见表 4。利用 Genie 贝叶斯软件对该系统进行建模,根据 1.2 节中 DBN 的基本原理,将该页岩气井带压作业泄漏的蝴蝶结模型转化为 DBN,如图 3 所示。将先验概率、条件概率和转移概率等数值输入模型中,然后将页岩气井带压作业泄漏(T)设置为“证据节点”,时间片数量为 10,然后进行概率更新。

表 4 节点内漏(M₃₁)的条件概率表

X ₂	X ₃	X ₄	P(M ₃₁ =1)	P(M ₃₁ =0)
1	1	1	0.796	0.204
1	1	0	0.646	0.354
1	0	1	0.643	0.357
1	0	0	0.380	0.620
0	1	1	0.672	0.328
0	1	0	0.429	0.571
0	0	1	0.425	0.575
0	0	0	0.001	0.999

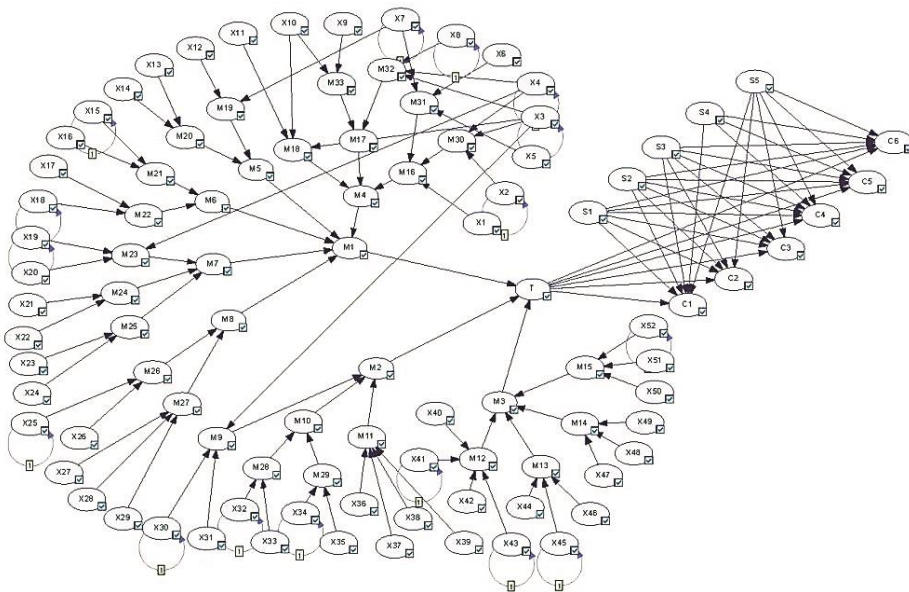


图 3 页岩气井带压作业泄漏失效 DBN 模型

3 结果分析

利用动态贝叶斯网络模型的逆向推理功能可以得到各基本事件的后验概率,见表 1,可以得到页岩气井带压作业泄漏的失效概率为 1.950×10^{-2} ,基本事件的后验概率排序前十从大到小为: X₄、X₄₁、X₄₉、X₃₀、X₃、X₄₀、X₄₂、X₅₂、X₁₀、X₄₈。其中 X₄(冲蚀磨损)、X₄₁(流体冲刷)、

X₄₉(管柱腐蚀破坏)、X₃₀(压裂砂冲蚀)、X₃(酸性气体腐蚀)等基本事件后验概率值较高,是造成页岩气井带压作业泄漏失效的关键风险因素,因此在对现场进行安全检查时要着重对 X₄(冲蚀磨损)、X₄₁(流体冲刷)、X₄₉(管柱腐蚀破坏)、X₃₀(压裂砂冲蚀)、X₃(酸性气体腐蚀)这五个风险因素进行检查。

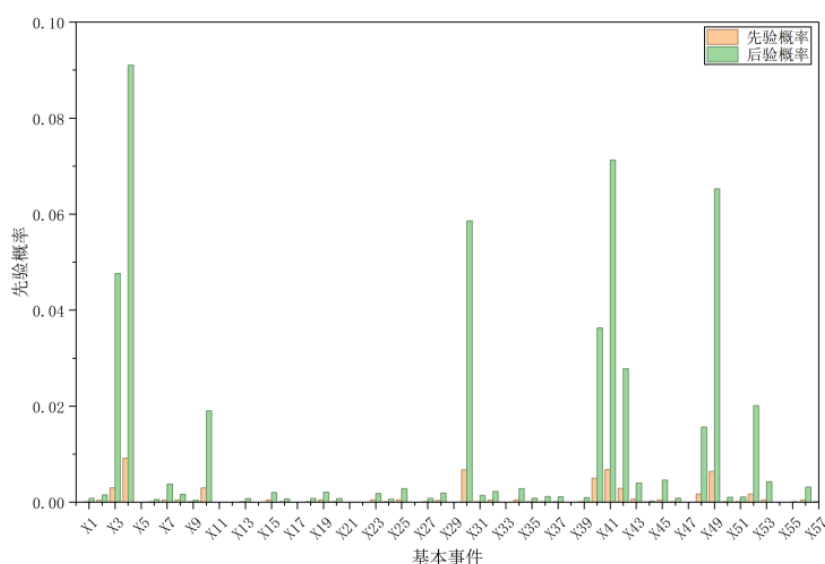


图 4 基本失效概率

将页岩气井带压作业泄漏事故设为证据节点,从初始时间开始,设置时间片为 10。顶事件页岩气井带压作业泄漏概率随时间变化的曲线如图 5 所示,页岩气井带压作业泄漏的初始概率为 1.950×10^{-2} ,若现场工作人员未加强

日常隐患排查、设备定期检查维修,随着时间的累积,泄漏概率将持续上升,到第 10 个时间片时,泄漏概率将达到 3.321×10^{-1} ,因此为保障页岩气井带压作业安全可靠运行,需要对其进行定期的隐患排查。

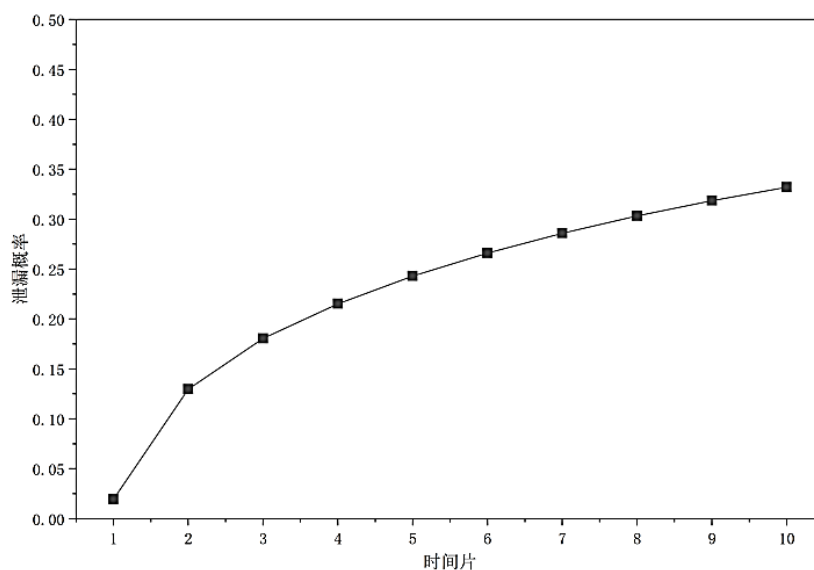
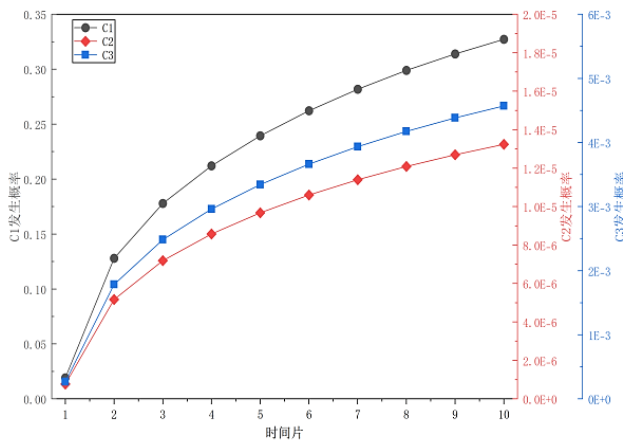


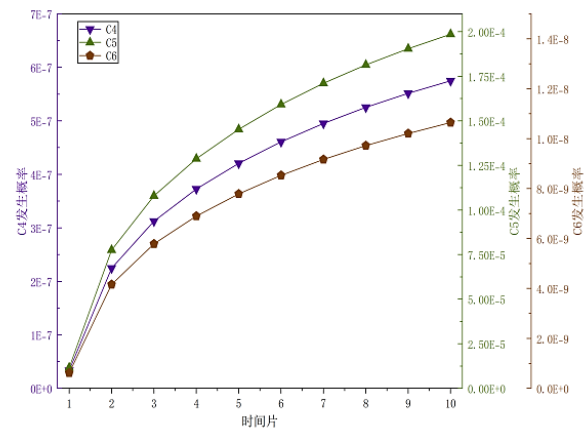
图 5 页岩气井带压作业泄漏动态概率变化

页岩气井带压作业的安全屏障失效后,会造成喷射火、闪火、燃爆、蒸气云爆炸等不同的事故后果,事故发生概率随时间的变化见图 6。通过图 6 可知,若未对设备进行

维护检修的情况下,在同一时间片内,不同事故后果的发生概率由高到低依次是: C_1 (安全扩散)、 C_3 (喷射火)、 C_5 (闪火)、 C_2 (燃爆)、 C_4 (蒸气云爆炸)、 C_6 (燃气聚集)。



(a) C1-C3 发生概率



(b) C4-C6 发生概率

图6 不同事故后果动态概率变化

根据页岩气井带压作业泄漏风险识别结果,并结合带压作业现场管理特点,可提出以下风险控制建议:(1)加强井口装置、管柱及井筒关键部位的日常巡检,重点排查冲蚀磨损、流体冲刷、压裂砂冲蚀和酸性气体腐蚀等高风险因素;(2)完善设备维护保养制度,对密封件、连接部位及易受冲刷腐蚀部位实施定期检测和预防性更换;(3)强化监测报警和应急处置能力,严格控制作业现场点火源,防止泄漏向喷射火、闪火和燃爆等严重后果演化;(4)建立完善的页岩气井带压作业泄漏预警和事故应急预案,加强对现场工作人员的安全教育培训。

4 结论

(1) 基于事故树、事件树和动态贝叶斯网络,构建了页岩气井带压作业泄漏失效动态风险分析模型,实现了对泄漏失效关键致因、顶事件概率及事故后果概率的综合分析。研究表明,该模型能够较好地描述页岩气井带压作业泄漏风险的动态演化过程,具有一定的工程适用性。

(2) 逆向推理结果表明,页岩气井带压作业泄漏的概率为 1.950×10^{-2} , X_4 、 X_{41} 、 X_{49} 、 X_{30} 、 X_3 等是主要风险因素,其中冲蚀磨损、流体冲刷、管柱腐蚀破坏、压裂砂冲蚀和酸性气体腐蚀对系统失效影响较大。因此,在现场安全管理中,应围绕高后验概率风险节点开展重点检查与针对性防控。

(3) 通过动态推理结果可知,随着时间推移,页岩气井带压作业泄漏概率持续升高,由初始时刻的 1.950×10^{-2} 增加至第 10 个时间片的 3.321×10^{-1} ; 不同事故后果概率也均呈上升趋势,其中危险后果中喷射火概率相对较高,应作为事故防控的重点关注对象。说明页岩气井带压

作业风险具有显著的时变特征,必须通过定期巡检、设备维护、点火源控制和应急响应优化等措施,降低事故发生及扩大的可能性。

基金项目: 重庆科技大学硕士研究生创新计划项目(YKJCX2420710)。

[参考文献]

- [1]王玉芳.我国非常规油气资源勘探开发前景广阔[J].石油知识,2021(6):14-15.
- [2]包书景,葛明娜,赵培荣,等.中国页岩气勘探开发现状、潜力与发展建议[J].石油与天然气地质,2025,46(2):348-364.
- [3]JUN C, HAIMEI W, XI C, et al. Study on main controlling factors of CO₂ huff-n-puff for enhanced oil recovery and storage in shale oil reservoirs[J]. Petroleum Reservoir Evaluation and Development,2025,15(4):537-544.
- [4]杨晓敏,胡攀峰,唐攀,等.页岩气钻井井控技术及现场安全应急管理措施[J].能源与环保,2023,45(9):55-60.
- [5]王怀杰,张玉涛,王志城,等.基于 AHP-模糊综合评价法的油气田企业应急能力评估[J].工业安全与环保,2020,46(6):26-29.
- [6]李建忠,董大忠,陈更生,等.中国页岩气资源前景与战略地位[J].天然气工业,2009(5):6.
- [7]胡旭光,徐勇军,罗卫华,等.页岩气井带压作业关键技术与应用评价[J].天然气技术与经济,2019,13(5):43-48.
- [8]卢云霄,范玉斌,叶庆峰,等.国内带压作业装置的发展现状与优势[J].石化技术,2019,26(12):320-322.
- [9]卢云霄,范玉斌.液控式卡瓦互锁装置的研制与应用[J].石油矿场机械,2020,49(1):78-81.

- [10]程自豪.页岩气开采压裂技术分析与思考[J].化工管理,2020(1):214-215.
- [11]胡旭光,罗园,刘贵义,等.气井带压作业油管内密封工具应用现状与发展趋势[J].天然气技术与经济,2022,16(5):32-37.
- [12]李昱捷,邢莉莎,肖昕雨,等.基于 Bow-tie 和贝叶斯模型的海底管道动态风险评估[J].江汉大学学报(自然科学版),2026(5):1-13.
- [13]程方明,蒋萌,苏畅,等.加氢站泄漏燃爆事故的动态贝叶斯风险分析[J].安全与环境学报,2024,24(9):3405-3417.
- [14]陈萌.海上钻井过程动态风险评估技术研究[D].北京:中国石油大学,2017.
- [15]WANG C, XIA Y, WANG D, et al. Dynamic risk assessment of deep-water dual gradient drilling with SMD system using an uncertain DBN-based comprehensive method[J]. Ocean Engineering,2021(2):55-56.
- [16]WANG ML, ZHANG MG. Dynamic risk assessment of oil and gas leakage in heating furnace: A DBT-DBN approach[J]. Journal of Physics: Conference Series,2021(1):11-13.
- [17]晏祎.基于动态贝叶斯网络的隧道盾构施工诱发变形分析[D].武汉:华中科技大学,2013.
- [18]郝武民,郑建国,张志鹏.LNG 气化站泄漏动态风险概率评估方法及应用[J].安全、健康和环境,2024,24(3):1-8.
- [19]施昊彤.基于蝴蝶结-贝叶斯网络的站场储罐动态风险评估[J].石油化工自动化,2024,60(1):56-61.
- [20]张继信,黄东阳,尤秋菊,等.基于动态贝叶斯网络的城市综合管廊燃气泄漏动态风险评价[J].安全与环境学报,2023,23(10):3455-3464.
- [21]李心悦.基于故障树和动态贝叶斯网络的新型列控系统可靠性评估方法[D].北京:北京交通大学,2024.
- [22]孙东亮,陈诗悦.基于动态贝叶斯模型的氢气管道泄漏风险研究[J].安全与环境学报,2022,22(2):901-909.
- [23]HENRION M. Practical Issues in Constructing a Bayes' Belief Network[J]. arXiv,2013(1):88-89.
- [24]程洁,许开立,陈守坤,等.基于 Fuzzy-DBN 的氨泄漏爆炸事故风险分析[J].安全与环境工程,2020,27(5):147-152.
- [25]LIU Z K, LIU Y H, CAI B P, et al. Dynamic Bayesian network modeling of reliability of subsea blowout preventer stack in presence of common cause failures.ScienceDirect[J]. Journal of Loss Prevention in the Process Industries,2015(38):58-66.
- 作者简介:黎南芳,重庆科技大学安全科学与工程学院硕士研究生,主要从事油气化工过程安全方面的研究。