

文章编号:1008-1542(2023)04-0411-10

## 基于多态模糊贝叶斯网络的城市燃气管道事故风险预测与诊断研究

瞿英<sup>1,2</sup>, 王旭茗<sup>1,2</sup>, 王玉恒<sup>2</sup>, 张静怡<sup>3</sup>

(1. 河北科技大学数据科学与智能计算研究中心, 河北石家庄 050018; 2. 河北科技大学经济管理学院, 河北石家庄 050018; 3. 韩国牧园大学社会科学学院, 大田广域 340-934)

**摘要:** 为了评估城市燃气管道系统的风险程度, 给后续预防工作提供参考, 提出了基于多态模糊贝叶斯网络的燃气管道事故风险定量分析方法。首先, 基于对86份事故调查报告风险因素的梳理, 建立故障树模型, 寻求风险隐患和事故之间的映射, 并将其转换为贝叶斯网络结构; 其次, 引入模糊集理论与概率分配计算方法, 分别得出根节点的先验概率和中间节点的条件概率, 根据贝叶斯网络的证据推理原理预测事故发生概率, 分析风险重要程度, 并反向诊断关键致因要素; 最后, 将此方法应用于沈阳市“10·21”较大燃气管道事故风险分析。实验验证结果表明, 事故一定发生的先验概率为68.8%, 验证了风险体系的有效性, 且预测与诊断得出的重要风险集合与事故调查报告分析的直接原因一致。多态模糊贝叶斯网络能够准确评价燃气管道事故风险, 并确定关键致险因子, 可为城市燃气管道安全管理提供决策参考。

**关键词:** 风险评价与失效分析; 燃气管道系统; 模糊集理论; 多态模糊贝叶斯网络; 概率分配

中图分类号: X928.7 文献标识码: A DOI: 10.7535/hbkd.2023yx04010

## Risk prediction and diagnosis of urban gas pipeline accidents based on polymorphic fuzzy Bayesian network

QU Ying<sup>1,2</sup>, WANG Xuming<sup>1,2</sup>, WANG Yuheng<sup>2</sup>, ZHANG Jingyi<sup>3</sup>

(1. Data Science and Intelligent Computing Research Center, Hebei University of Science and Technology, Shijiazhuang, Hebei 050018, China; 2. School of Economics and Management, Hebei University of Science and Technology, Shijiazhuang, Hebei 050018, China; 3. School of Social Sciences, Mokwon University, Daejeon Gwangyeoks 340-934, Korea)

**Abstract:** In order to evaluate the risk level of the urban gas pipeline system, and provide the reference for follow-up

收稿日期: 2023-06-26; 修回日期: 2023-07-29; 责任编辑: 张士莹

基金项目: 河北省教育厅人文社科重大课题攻关项目(ZD202208); 河北省自然科学基金(G2021208004)

第一作者简介: 瞿英(1973—), 女, 江苏南通人, 教授, 博士, 主要从事大数据分析、挖掘、风险管理方面的研究。

通信作者: 王玉恒。E-mail: 493845095@qq.com

瞿英, 王旭茗, 王玉恒, 等. 基于多态模糊贝叶斯网络的城市燃气管道事故风险预测与诊断研究[J]. 河北科技大学学报, 2023, 44(4): 411-420.

QU Ying, WANG Xuming, WANG Yuheng, et al. Risk prediction and diagnosis of urban gas pipeline accidents based on polymorphic fuzzy Bayesian network[J]. Journal of Hebei University of Science and Technology, 2023, 44(4): 411-420.

prevention efforts, a quantitative analysis method of gas pipeline accident risk was proposed based on polymorphic fuzzy Bayesian network. Firstly, risk factors were sorted out from 86 accident investigation reports, so that the city gas pipeline risk element system was established. Subsequently, the fault tree model was built to seek the match between risk hazards and accidents, which can convert into the Bayesian network structure. After that, fuzzy set theory and probability distribution method were introduced to calculate the prior probability of the root node and the conditional probability of the intermediate nodes, evidence-based inference of Bayesian network was used to predict the probability of accidents, analyze the importance of risk elements, and reverse diagnose key causal factors. Finally, this method was applied to the risk analysis of the "10·21" large pipeline gas leakage accident in Shenyang. The results of the case validation show the a priori probability of the accident is 68.8%, which verifies the effectiveness of the risk system. Besides, important risk elements derived from prediction and backward diagnosis are consistent with the direct causes analyzed in the accident investigation report. The polymorphic fuzzy Bayesian network approach for gas pipeline system risk can evaluate gas pipeline accident risk accurately and identify key risk-causing factors, which provides some reference for decision making in the safety management of city gas pipelines.

**Keywords:** risk evaluation and failure analysis; gas piping system; fuzzy theory; polymorphic fuzzy Bayesian networks; probability distribution

燃气是城市能源和基础设施的重要组成部分,逐渐跃升为城市生命线<sup>[1]</sup>。根据《中国城乡建设统计年鉴》,2021年末中国燃气管道铺设总里程达到96万km<sup>[2]</sup>。由于燃气的易燃易爆特性,一旦发生燃气泄漏、火灾、爆炸事故,将严重威胁人民群众的生命财产安全。例如:2021-06-13发生在湖北省十堰市张湾区艳湖社区的爆炸事故,导致164人伤亡,直接经济损失约5395.41万元。因此,为了保障燃气管网的安全运行,减少事故发生概率,减轻事故造成的后果,研究城市燃气管道事故致因机理具有重要意义。

风险评估是燃气管网安全管理的重要基础,国外首次用评分法对管道风险进行量化评估<sup>[3]</sup>。随后,有学者给出了管道气风险体系的评分项目与权重确定,但方法过度依赖于专家的主观性评价<sup>[4]</sup>。有学者采用模糊层次分析法,将风险因素分为非常理想、理想、中等、不理想和非常不理想5个状态,提升了风险评估结果的有效性<sup>[5]</sup>。国内,翁永基<sup>[6]</sup>最先构建了危险性矩阵,将失效概率和后果严重性分别作为纵横坐标,划分燃气管道风险等级,然而按照失效可能性与后果重要性划分风险指标的方法存在主观性与片面性,无法表示燃气管网风险要素之间的耦合关系。对此,有学者运用故障树方法对城市燃气泄漏事件进行风险评价,分析顶事件起因,以及中间事件与基本事件之间的致因关系,估算事故可能发生的概率并提出事故或故障的预防措施,该方法量化了顶事件发生的可能性,但缺乏对底事件的定量分析<sup>[7]</sup>。有学者以燃气管网运行情况与环境作为风险评估指标,用K-means聚类及概率统计分析方法确定指标评分标准,计算管段相对风险值,实现了风险排序及风险分级<sup>[8]</sup>。

综上,目前已有燃气管道风险评估的研究存在以下缺陷:一是指标体系多集中在系统的技术运行层面,忽略了重要的组织管理因素;二是对大多是对风险的评价,缺乏体现事件多态性、不确定性的动态推理分析。而风险事件本身就是一种不确定的信息,比较适合用模糊数来表示<sup>[9]</sup>。基于此,本文提出了利用多态模糊贝叶斯网络集成不确定信息的方法。首先,建立燃气管道系统指标体系,利用故障树工具寻求风险隐患和事故之间的映射;其次,利用三角模糊数和概率分配方法计算根节点先验概率与中间节点的条件概率,运用模糊数表示各个根节点的失效状态,克服传统贝叶斯网络过度依赖精确概率以及不能考虑节点中间故障状态的问题;随后,基于贝叶斯网络进行风险评估,计算燃气管道事故最终发生的概率,辨识关键风险因子,反向诊断事故致因;最后,结合具体案例进行仿真,验证方法的合理性,并对预防燃气管道安全事故提出建议。

## 1 城市燃气管道事故故障树模型构建

### 1.1 城市燃气管道风险分析

根据傅贵等<sup>[10]</sup>提出的24model第6版理念,事故发生与组织内部活动是相关的。按照事故发生的过程,将组织内部事故的致因因素分为组织因素和个体因素2大类,如图1所示。组织因素即组织整体的行为,包含根据安全文化发出的指导行为和管理体系发出的运行行为;个体因素又分为个体层面的习惯性行为和一次性行为,习惯性行为涉及安全能力,一次性行为表示造成事件发生的动作<sup>[11]</sup>。事故的直接原因是个

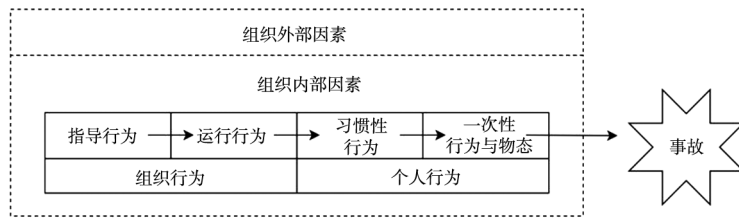


图 1 24model 结构框架图

Fig.1 Structural framework diagram of 24model

体的一次性行为与物的因素共同作用,结合燃气管道事故特征,物的因素包括燃气系统失效部位与点火源来源<sup>[12]</sup>。对于组织外部因素,还应考虑管理组织的外部监管环境<sup>[13]</sup>与事故发生的物理环境<sup>[14]</sup>。

从各省市政府官网、应急管理局共收集 86 份管道气事故调查报告,时间跨度为 2015—2022 年。详细分析调查报告,梳理风险事件作为三级指标,最后得出的燃气管道风险系统要素体系如表 1 所示。

表 1 燃气管道系统风险要素体系

Tab.1 Risk element system of city gas pipeline

一级指标	二级指标	三级指标
组织行为 $Y_1$	指导行为 $Y_5$	$X_1$ 安全主体责任缺失
		$X_2$ 安全培训要求疏忽
		$X_3$ 对合作单位安全管理疏忽
	运行行为 $Y_6$	$X_4$ 隐患排查工作不落实
		$X_5$ 燃气设施保护方案未落实
		$X_6$ 施工现场安全管理不到位
		$X_7$ 违法违规外包工程
		$X_8$ 员工安全培训与教育不足
		$X_9$ 安全意识薄弱
个人行为 $Y_2$	习惯性行为 $Y_7$	$X_{10}$ 对维修程序认识不足
		$X_{11}$ 对施工程序掌握不足
		$X_{12}$ 对防护措施重要性认识不足
	一次性违规行为 $Y_8$	$X_{13}$ 对环境风险认识不足
		$X_{14}$ 未关紧阀门
物的因素 $Y_3$	燃气系统失效部位 $Y_9$	$X_{15}$ 燃气工艺与设备选型不合理
		$X_{16}$ 违规维修
		$X_{17}$ 施工现场操作失误
	点火源来源 $Y_{10}$	$X_{18}$ 管道及其阀门
		$X_{19}$ 连接软管
		$X_{20}$ 燃气表及前后阀门
		$X_{21}$ 灶具阀门
环境因素 $Y_4$	组织环境 $Y_{11}$	$X_{22}$ 室外明火
		$X_{23}$ 厨房点火
	物理环境 $Y_{12}$	$X_{24}$ 其他电气设备
		$X_{25}$ 监理企业失职
		$X_{26}$ 行政部门监管不力
		$X_{27}$ 居民住宅
		$X_{28}$ 个体经营商铺
		$X_{29}$ 社区公共场所

### 1.2 城市燃气管道气故障树构建

通过构建树状结构描述事故风险因素之间的逻辑关系,故障树结构包括顶事件( $T$ )、中间事件( $Y_1—Y_{12}$ )和基本事件( $X_1—X_{29}$ )<sup>[15]</sup>。事件之间的逻辑关系有“与”和“或”。逻辑“与”门表示在输入事件都发生的前提下,输出发生;逻辑“或”门指的是有任意一个输入事件发生,则输出必然发生<sup>[16]</sup>。根据故障链传递特征,建立因素与层级之间的关联关系,分析事故风险要素的整体逻辑框架,构建燃气管道系统风险的故障树模型,如图 2 所示。

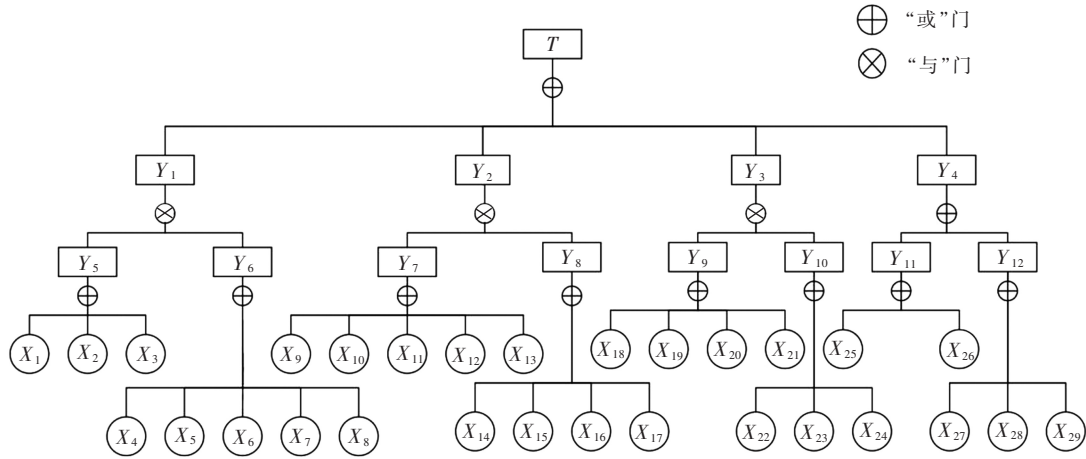


图2 燃气管道风险系统故障树模型  
Fig.2 Fault tree model of gas piping system

## 2 城市燃气管道气模糊多态贝叶斯网络模型构建

### 2.1 故障树向贝叶斯网络模型转化

基于已构建的燃气管道风险系统故障树,将故障树中的风险或事件转化为贝叶斯网络的节点,要素之间的逻辑关系转化为贝叶斯网络节点之间的有向弧,如图3所示。在贝叶斯网络中,箭尾是根节点,指向的是子节点。在燃气管道系统贝叶斯网络中, $X_1-X_{29}$  作为根节点, $Y_1-Y_{12}$  为中间节点, $T$  是叶节点。

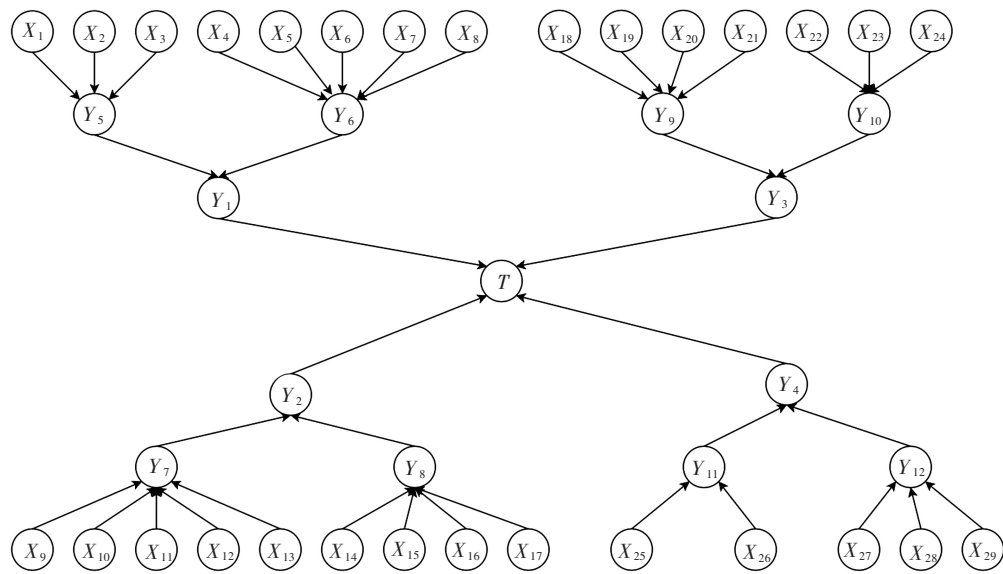


图3 燃气管道风险系统贝叶斯网络结构图  
Fig.3 Bayesian network structure diagram of gas pipeline system

### 2.2 根节点风险概率模糊性计算

多态模糊贝叶斯网络区别传统贝叶斯网络在于其风险节点具有多态性。采用模糊数  $0, 0.5, 1.0$  将风险节点失效程度描述为正常、轻度失效和完全失效<sup>[17]</sup>。根节点先验概率值可以用三角模糊数  $M=(l, r, m)$  来表示<sup>[18]</sup>,其隶属度函数如式(1)所示:

$$M = \begin{cases} 0, & x < l, \\ \frac{x-l}{r-l}, & l \leq x \leq r, \\ \frac{m-x}{m-r}, & r \leq x \leq m, \\ 0, & x > m. \end{cases} \quad (1)$$

三角模糊数  $M_1 = (l_1, r_1, m_1)$  与  $M_2 = (l_2, r_2, m_2)$  的运算表示为  $\oplus$ , 如式(2)所示:

$$M_1 \oplus M_2 = (l_2, r_1 + r_2, m_1 + m_2). \quad (2)$$

由于事件的不确定性和数据统计难度,因此根节点先验概率通过行业专家评价的模糊评价方法获得。

$P_{ij,k} = (l_{ij,k}, r_{ij,k}, m_{ij,k})$  表示第  $k$  位专家对因素  $X_i$  处于  $j$  状态评价的三角模糊率。为进一步提高模糊概率的合理性和科学性,对专家评判结果进行算数平均,一般情况下可通过加权计算方法来实现。假定各位专家权重相同,则模糊概率均值如式(3)所示:

$$P_{ij,FA} = \frac{P_{ij,1} \oplus \cdots \oplus P_{ij,k} \oplus \cdots \oplus P_{ij,n}}{n} = (l_{ij}, r_{ij}, m_{ij}). \quad (3)$$

采用面积均值法将得到的三角模糊概率进一步转换为明确的概率值,如式(4)所示:

$$P_{ij,A} = \frac{l_{ij} + 2r_{ij} + m_{ij}}{4}, \quad (4)$$

最后对贝叶斯网络中的根先验概率进行归一化处理,使根节点各状态概率和为 1。

### 2.3 中间节点条件概率的确定

本文采用概率分配方法确定节点条件概率<sup>[19]</sup>。具体计算步骤如下。

(1)根据不同根节点对子节点的影响程度,采用专家打分方法确定权重,进行归一化处理,如式(5)所示:

$$\sum_{i=1}^m W_i = 1, \quad W_i \in [0,1]. \quad (5)$$

式中:  $W_i$  为父节点对子节点的影响权重。

(2)按照式(6)计算子节点到父节点的加权平均状态距离:

$$D_s = \sum_i |P_s - C_s| \times W_i. \quad (6)$$

式中:  $P_s$  为根节点的状态取值;  $C_s$  为子节点的状态取值。

(3)采用概率分配的方法计算改进后的条件概率  $P_s$ , 如式(7)所示:

$$P_s = \frac{e^{-RD_s}}{\sum_{s_1}^{s_m} e^{-RD_{s_1}}}. \quad (7)$$

式中:  $s$  表示节点的状态;  $m$  为根据模糊理论确定的节点状态数量;  $R$  为专家给出的结果分布指标,表示父节点状态取值与子节点状态取值的相关度。

## 2.4 基于贝叶斯网络的风险评估预测与诊断推理

### 2.4.1 正向推理预测事故发生概率

运用模糊数  $x_i^{s_i} (s_i = 1, 2, \dots, k_i)$ ,  $y_j^{s_j} (s_j = 1, 2, \dots, k_j)$  和  $T_q (q = 1, 2, \dots, \delta)$  分别描述上述节点的故障状态。其中,  $k_i, k_j, \delta$  分别表示节点故障状态数量。假设通过统计方法得到根节点不同状态的概率为  $P(x_i^{a_i})$ , 则根据贝叶斯网络的联合概率分布和正向推理算法,可进一步求出叶节点  $T$  故障状态为  $T_q$  的发生概率,如式(8)所示:

$$P(T = T_q) = \sum_{x_1, x_2, \dots, x_n; y_1, y_2, \dots, y_m} P(x_1, x_2, \dots, x_n; y_1, y_2, \dots, y_m; T = T_q) = \sum_{\gamma(T)} P[T = T_q | \gamma(T)] \times \sum_{\gamma(y_1)} P[y_1 | \gamma(y_1)] \times \sum_{\gamma(y_2)} P[y_2 | \gamma(y_1)] \times \cdots \times \sum_{\gamma(y_m)} P[y_m | \gamma(y_m)] \times P(x_1^{a_1}) \times P(x_2^{a_2}) \times \cdots \times P(x_n^{a_n}). \quad (8)$$

2.4.2 风险节点重要度分析

风险节点重要度能够分析在已知情况下造成事故发生的最可能原因。重要度描述了某个风险因素“ $s=1$ ”的概率为 100% 时,通过贝叶斯网络传导,得出叶节点在该条件下的风险程度<sup>[20]</sup>。本文选用根节点与中间节点对叶节点的重要程度描述风险要素的影响程度。父节点  $w_i$  故障程度为  $w_i^{a_i}$  时,将子节点  $G$  故障状态为  $G_q$  的影响程度  $I_{T_q}^{C_r}(w_i=w_i^{a_i})$  定义为式(9):

$$I_{T_q}^{C_r}(w_i=w_i^{a_i}) = \frac{P(w_i=w_i^{a_i}) \cdot I_{G_q}^{P_r}(w_i=w_i^{a_i})}{P(G=G_q)} \quad (9)$$

式中,  $I_{G_q}^{P_r}(w_i=w_i^{a_i})$  为父节点  $w_i$  对子节点  $G$  的概率重要度。由于父节点不同失效状态时的重要度不同,因此需要计算出父节点  $w_i$  对叶节点  $G$  为  $G_q$  的重要度,可用式(10)表示:

$$I_{T_q}^{C_r}(w_i) = \frac{1}{k_i - 1} \sum_{a_i=1}^{k_i} I_{T_q}^{C_r}(x_i=x_i^{a_i}) \quad (10)$$

2.4.3 反向推理事故致因诊断

风险节点的反向诊断在于提高事前预防效率<sup>[21]</sup>。在贝叶斯网络中将叶节点“ $s=1$ ”的概率设置为 100% 后,分析根节点概率变化的程度,逆向识别哪些风险事件是事故发生的关键要害,对事故发生的可能性最为敏感,找出最为敏感的风险事件进行重点监管或治理,能够降低事件发生的概率。结合贝叶斯条件概率公式进行反向推理,求得根节点  $x_i$  的故障状态为  $x_i^{a_i}$  的后验概率,可用式(11)表示:

$$P(x_i=x_i^{a_i} | T=T_q) = \frac{P(x_i=x_i^{a_i}, T=T_q)}{P(T=T_q)} \quad (11)$$

式中,  $P(x_i=x_i^{a_i} | T=T_q)$  为根节点与叶节点同时发生的概率。

3 案例分析

2021-10-21,沈阳市和平区太原南街 222 号盛王二牛烧烤店发生了管道燃气泄漏事故,造成 5 人死亡、3 人重伤、49 人轻伤,直接经济损失约 4 425 万元。该事件的直接原因是盛王二牛烧烤店燃气并网施工过程中,施工人员打开进户引入管阀门入口法兰,完成并网施工焊接作业后,未将该法兰有效密封,且在通气后未对该法兰口进行严密性检查,导致燃气通过法兰口泄漏。复盘整个事件,通过系统信息分析和专业人士评价,本研究邀请 7 位安全领域专家进行评价打分,基于面积均值法将专家模糊评价转换得到三角模糊概率,随后进一步转换为明确的概率值,计算出相关根节点先验模糊故障概率,以根节点  $X_{25}$  和  $X_{26}$  为例进行计算,如表 2 所示。

表 2 根节点先验概率计算示例

Tab.2 Example of root node prior probability calculation

状态	不同专家评价的模糊三角概率							归一化
	$K_1$	$K_2$	$K_3$	$K_4$	$K_5$	$K_6$	$K_7$	
$X_{25}=0$	(0,0,0.1)	(0,0,0)	(0,0,0.1)	(0,0,0.1)	(0,0.1,0.1)	(0,0,0.1)	(0,0,0.1)	0.06
$X_{25}=0.5$	(0,0.1,0.2)	(0,0.1,0.2)	(0.2,0.3,0.3)	(0,0.1,0.1)	(0,0.1,0.1)	(0,0.1,0.1)	(0,0,0.1)	0.11
$X_{25}=1$	(0.5,0.7,0.9)	(0.4,0.6,0.9)	(0.6,0.7,0.9)	(0.7,0.8,0.9)	(0.5,0.8,0.8)	(0.5,0.6,0.8)	(0.4,0.7,0.8)	0.83
$X_{26}=0$	(0,0,0.1)	(0,0,0.1)	(0,0,0.1)	(0,0.1,0.1)	(0,0.1,0.1)	(0,0,0.1)	(0,0.1,0.1)	0.07
$X_{26}=0.5$	(0,0.1,0.2)	(0,0.1,0.2)	(0.2,0.3,0.3)	(0,0.1,0.1)	(0,0.1,0.1)	(0,0.1,0.1)	(0,0,0.1)	0.09
$X_{26}=1$	(0.5,0.7,0.9)	(0.6,0.8,0.9)	(0.5,0.7,0.9)	(0.7,0.8,0.9)	(0.6,0.7,0.8)	(0.6,0.7,0.8)	(0.7,0.7,0.8)	0.84

3.1 节点条件概率与状态分析

节点条件概率表是为了量化父节点对子节点的影响效果,即计算当父节点处于不同状态时,子节点状态的条件概率。由于缺少历史数据,本文采用专家调查法来推测节点的条件概率,即根据专家组给出的风险因素权重,按照式(5)一式(7)采用 Python 软件编程进行计算。以指导行为节点为例,子节点为  $Y_5$ ,父节点为  $X_1, X_2, X_3$ ,条件概率具体数值见表 3。

表 3 中间节点条件概率计算示例  
Tab.3 Example of intermediate node conditional probability calculation

$X_1$	$X_2$	$X_3$	$Y_5$		
			0	0.5	1
0	0	0	0.866 813 332	0.117 310 428	0.015 876 240
0	0	0.5	0.662 190 687	0.297 541 456	0.040 267 857
0	0	1	0.605 610 809	0.272 118 477	0.122 270 714
0	0.5	0	0.567 846 918	0.380 639 172	0.051 513 910
0	0.5	0.5	0.283 548 370	0.631 048 502	0.085 403 128
0	0.5	1	0.236 656 091	0.526 687 817	0.236 656 091
0	1	0	0.471 776 221	0.316 241 058	0.211 982 721
0	1	0.5	0.211 982 721	0.471 776 221	0.316 241 058
0	1	1	0.122 270 714	0.272 118 477	0.605 610 809
0.5	0	0	0.662 190 687	0.297 541 456	0.040 267 857
0.5	0	0.5	0.371 233 665	0.553 815 550	0.074 950 784
0.5	0	1	0.316 241 058	0.471 776 221	0.211 982 721
0.5	0.5	0	0.283 548 370	0.631 048 502	0.085 403 128
0.5	0.5	0.5	0.106 506 979	0.786 986 042	0.106 506 979
0.5	0.5	1	0.085 403 128	0.631 048 502	0.283 548 370
0.5	1	0	0.211 982 721	0.471 776 221	0.316 241 058
0.5	1	0.5	0.074 950 784	0.553 815 550	0.371 233 665
0.5	1	1	0.040 267 857	0.297 541 456	0.662 190 687
1	0	0	0.605 610 809	0.272 118 477	0.122 270 714
1	0	0.5	0.316 241 058	0.471 776 221	0.211 982 721
1	0	1	0.211 982 721	0.316 241 058	0.471 776 221
1	0.5	0	0.236 656 091	0.526 687 817	0.236 656 091
1	0.5	0.5	0.085 403 128	0.631 048 502	0.283 548 370
1	0.5	1	0.051 513 910	0.380 639 172	0.567 846 918
1	1	0	0.122 270 714	0.272 118 477	0.605 610 809
1	1	0.5	0.040 267 857	0.297 541 456	0.662 190 687
1	1	1	0.015 876 240	0.117 310 428	0.866 813 332

根据表 3 中根节点  $X_1, X_2, X_3$  的先验概率和中间节点  $Y_5$  的条件概率表,结合贝叶斯结构,导入到 Netica 中,可显示中间节点  $Y_5$  的各种故障状态概率如下:

$$P(Y_5 = 0) = 6.60\%,$$

$$P(Y_5 = 0.5) = 23.1\%,$$

$$P(Y_5 = 1) = 70.4\%.$$

结果表明,指导行为出现中度失效、完全失效的概率较大,分别为 23.1%和 70.4%。通过核查事故调查报告中的间接原因可知,大连建工公司对安全主体责任缺失,其允许个人以企业的名义承包工程;同时沈阳燃气有限公司对施工现场监督管理不到位,现场监督施工单位对法兰的严密性未进行检查,核查结果与计算结果吻合,验证了方法的有效性。

### 3.2 事故评估结果

根据三角模糊函数,计算  $X_1-X_{29}$  根节点的先验概率。根据分布概率的算法,运用 Python 软件计算  $Y_1-Y_{12}$  节点的条件概率表,全部导入到 Netica 软件进行模拟仿真,能够输出所有中间节点与子节点不同状态下的概率值。计算结果中节点状态 A,B,C 表示事件正常、轻度失效和完全失效 3 种故障状态,其后的数字表示 3 种节点状态的概率值,如图 4 所示。结果表明, $T=1$  的概率近似为 70%,极有可能发生燃气事故,与实际情况非常吻合。

$$P(T = 0) = 3.64\%,$$

$$P(T = 0.5) = 27.6\%,$$

$$P(T = 1) = 68.8\%.$$

### 3.3 节点重要度分析

根据贝叶斯网络风险节点重要度原理,分析各个风险节点概率变化对事故发生最终状态( $T=1$ )造成的影响。根据已经建立的贝叶斯网络,逐层调整中间节点、根节点的状态,将一定发生设置为 100%,对比子节点( $T$ )前后的概率变化,如表 4 所示。

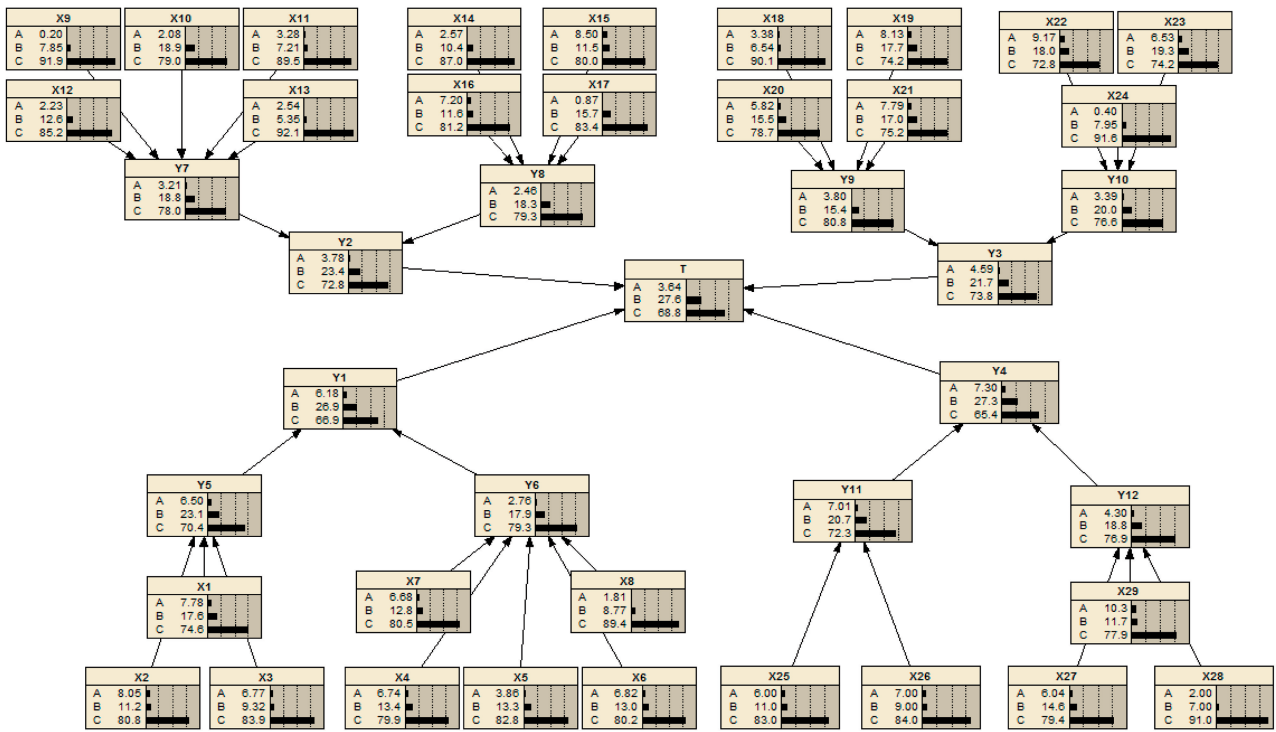


图 4 燃气管道系统风险因素模型与节点概率

Fig. 4 Risk factor model and node probabilities for gas pipeline systems

表 4 各中间节点(Y)与根节点(X)对叶节点(T)的影响度

Tab. 4 Intermediate node (Y) and root node's (X) influence on leaf node (T)

中间节点	T=1 的预测结果/%	根节点	T=1 的预测结果/%
Y <sub>1</sub> 组织因素	83.2	X <sub>6</sub> 施工现场安全管理不到位	70.0
Y <sub>2</sub> 人的因素	76.8	X <sub>18</sub> 管道及其阀门	69.8
Y <sub>3</sub> 物的因素	73.8	X <sub>17</sub> 施工现场操作失误	69.7
Y <sub>6</sub> 运行行为	73.3	X <sub>2</sub> 安全培训要求疏忽	69.6
Y <sub>5</sub> 指导行为	72.8	X <sub>3</sub> 对合作单位安全管理疏忽	69.6
Y <sub>8</sub> 一次性违规行为	72.3	X <sub>1</sub> 安全主体责任缺失	69.5
Y <sub>4</sub> 环境因素	71.9	X <sub>14</sub> 未关紧阀门	69.5
Y <sub>9</sub> 燃气系统失效部位	71.3	X <sub>5</sub> 燃气设施保护方案未落实	69.4
Y <sub>7</sub> 习惯性行为	70.9	X <sub>8</sub> 员工安全培训与教育不足	69.4
Y <sub>10</sub> 点火源来源	69.7	X <sub>16</sub> 违规维修	69.3
Y <sub>12</sub> 物理环境	69.6	X <sub>25</sub> 监理企业失职	69.2
Y <sub>11</sub> 组织环境	68.8	X <sub>7</sub> 违法违规外包工程	69.1
		X <sub>4</sub> 隐患排查工作不落实	69.1
		X <sub>10</sub> 对维修程序认识不足	69.1

由表 4 可知,中间节点中,个人与组织的行为失效最容易导致燃气事故的发生,且组织行为失效的影响程度最大,达到了 83.2%。在二级指标层(Y<sub>5</sub>—Y<sub>12</sub>)中,Y<sub>6</sub> 运行行为、Y<sub>5</sub> 指导行为、Y<sub>8</sub> 一次性违规行为、Y<sub>9</sub> 燃气系统失效部位的影响程度较高,分别为 73.3%,72.8%,72.3%,71.3%,其中运行行为与指导行为属于组织行为,一次性违规行为属于个人行为,与第 1 层级的分析结果一致,节点 Y<sub>9</sub> 属于物的因素,表明燃气系统中物的不安全状态也是导致事故发生的重要因素。根节点 X<sub>1</sub>—X<sub>29</sub> 中,选取直接原因层中影响最大的 14 个节点,当这些风险节点一定发生的概率为 100%时,燃气事故(T=1)发生的概率都提高到了 69%以上。其中,X<sub>6</sub> 施工现场安全管理不到位、X<sub>18</sub> 管道及其阀门、X<sub>17</sub> 施工现场操作失误为影响最大的前 3 种因素,影响值分别为 70.0%,69.8%,69.7%,揭示了本案例中发生的直接原因。

以上均是从单因素角度进行调整推理,预测分析单个节点概率变化对子节点造成的影响。当从多因素预测角度进行分析推理时,影响程度会更高。例如,选取一级指标层中个人因素与组织因素同时发生的组



合,顶事件发生概率为 90.6%。

### 3.4 事故致因反向诊断

以  $T$  为分析对象,设置一定发生的概率为 100%,得到  $X_1—X_{29}$  对应的节点后验概率、变化率如表 5 所示。

表 5 根节点  $T$  设为“1”后根节点的概率变化

Tab.5 Probability change of the root node after setting the root node  $T$  to "1"

根节点	后验概率 (调整前)/%	后验概率 (调整后)/%	变化率/%	根节点	后验概率 (调整前)/%	后验概率 (调整后)/%	变化率/%
$X_6$	80.5	82.0	1.86	$X_{11}$	89.5	89.8	0.34
$X_{18}$	90.1	91.4	1.44	$X_{28}$	91.0	91.3	0.33
$X_3$	74.6	75.6	1.34	$X_{24}$	91.6	91.9	0.33
$X_{17}$	83.4	84.5	1.32	$X_{19}$	74.2	74.4	0.27
$X_2$	83.9	84.9	1.19	$X_{21}$	75.2	75.4	0.27
$X_{14}$	87.0	87.9	1.03	$X_{29}$	77.9	78.1	0.26
$X_8$	89.4	90.3	1.01	$X_{20}$	78.7	78.9	0.25
$X_1$	80.8	81.6	0.99	$X_{26}$	84.0	84.2	0.24
$X_5$	82.8	83.6	0.97	$X_{12}$	85.2	85.4	0.23
$X_{16}$	81.2	81.8	0.74	$X_9$	91.9	92.1	0.22
$X_{25}$	83.0	83.5	0.60	$X_{13}$	92.1	92.3	0.22
$X_{10}$	79.0	79.4	0.51	$X_{22}$	72.8	72.9	0.14
$X_{20}$	79.9	80.3	0.50	$X_{23}$	74.2	74.3	0.13
$X_{23}$	80.2	80.6	0.50	$X_{27}$	79.4	79.4	0.00
$X_{15}$	80.0	80.3	0.37				

变化率最高的为  $X_6, X_{18}, X_3, X_{17}$  和  $X_2$ ,意味着这些节点显著影响着事故的发生。因此,加强施工现场管理、提升工作人员安全素养、规范与子公司合作单位的相关条例、加强对管道及其阀门的隐患排查工作,能够有效减少该类型事故的发生。 $X_{18}$  后验概率较高,表明管道及阀门是事件发生的重要隐患,也是应急处置的重点对象。 $X_{22}$  室外明火、 $X_{23}$  厨房点火、 $X_{27}$  居民住宅是敏感度较低的 3 个风险节点,在此事件中这 3 个风险节点因素对事故风险反应较为迟钝,事故的发生不受这些方面的影响。

## 4 结论

1) 基于多态模糊贝叶斯网络对城市燃气管道事故进行风险预测与诊断,克服了传统研究方法在风险要素多态性和系统动态性分析方面存在的局限性。采用三角模糊数的方法描述节点的风险状态,提升了复杂系统中多元要素风险评估的准确度;利用概率分配函数计算中间节点的条件概率,解决了传统贝叶斯网络不能考虑中间状态的问题。

2) 以城市燃气管道事故风险管理为背景,基于 24model 结构模型的行为分类系统,结合燃气管道事故调查报告,将个人行为、组织行为、物的因素和环境因素作为主要风险事件,梳理了燃气管道系统风险要素体系。利用贝叶斯网络对城市燃气管道事故进行双向推理,动态分析了事故关键致因集合,为风险防控提供了有效的决策支持。

3) 以个人行为与组织行为失效为切入点,对燃气管道事故进行了风险评估与失效分析。然而燃气管道系统中的环境因素影响个人行为与组织行为,仅利用故障树模型处理逻辑关系会对评估的准确度造成影响。后续研究将会从系统的角度出发,深入分析要素间的耦合关系,进一步提升风险预测与诊断的准确性。

## 参考文献/References:

- [1] 孟伟,何卫,李璐伶,等.城镇燃气行业发展现状与关键前沿技术[J].油气储运,2022,41(6):673-681.  
MENG Wei, HE Wei, LI Luling, et al. Current status and key advanced technologies of urban gas industry development[J]. Oil & Gas Storage and Transportation, 2022, 41(6): 673-681.
- [2] 中华人民共和国住房和城乡建设部.中国城乡建设统计年鉴:2021[M].北京:中国统计出版社,2022.
- [3] Battelle Columbus Division. Guidelines for Hazard Evaluation Procedures[M]. New York: American Institute of Chemical Engineers, 1985.
- [4] MUHLBAYER W K. 管道风险管理手册[M]. 杨嘉瑜,张德彦,李钦华,等.译.2版.北京:中国石化出版社,2005
- [5] JABBARI M, GHOLAMNIA R, ESMAEILI R, et al. Risk assessment of fire, explosion and release of toxic gas of Siri-Assalouyeh sour gas

- pipeline using fuzzy analytical hierarchy process[J]. *Heliyon*, 2021, 7(8): 7835-7839.
- [6] 翁永基. 腐蚀管道安全管理体系[J]. *油气储运*, 2003, 22(6): 1-13.  
WENG Yongji. Study on safety management system of corroded pipeline[J]. *Oil & Gas Storage and Transportation*, 2003, 22(6): 1-13.
- [7] 杨太华, 郑庆华. 基于故障树方法的项目安全风险分析[J]. *系统管理学报*, 2009, 18(5): 511-515.  
YANG Taihua, ZHENG Qinghua. Project safety risk analysis based on fault tree method[J]. *Journal of Systems & Management*, 2009, 18(5): 511-515.
- [8] 杜雨霁, 付明, 端木维可, 等. 基于FAHP-ICV的燃气管网风险评估方法[J]. *清华大学学报(自然科学版)*, 2023, 63(6): 941-950.  
DU Yuji, FU Ming, DUANMU Weike, et al. Risk assessment method of gas pipeline networks based on fuzzy analytic hierarchy process and improved coefficient of variation[J]. *Journal of Tsinghua University(Science and Technology)*, 2023, 63(6): 941-950.
- [9] 郑艳敏, 张金锋, 刘庆洲. 基于L-R型模糊数的原棉库火灾事故树分析[J]. *河北科技大学学报*, 2012, 33(4): 375-378.  
ZHENG Yanmin, ZHANG Jinfeng, LIU Qingzhou. Fault tree analysis of fire accident in cotton plant based on L-R fuzzy numerals[J]. *Journal of Hebei University of Science and Technology*, 2012, 33(4): 375-378.
- [10] 傅贵, 陈奕燃, 许素睿, 等. 事故致因“2-4”模型的内涵解析及第6版的研究[J]. *中国安全科学学报*, 2022, 32(1): 12-19.  
FU Gui, CHEN Yiran, XU Surui, et al. Detailed explanations of 24Model and development of its 6<sup>th</sup> version[J]. *China Safety Science Journal*, 2022, 32(1): 12-19.
- [11] 傅贵, 索晓, 王春雪. 24Model的系统特性研究[J]. *系统工程理论与实践*, 2018, 38(1): 263-272.  
FU Gui, SUO Xiao, WANG Chunxue. Study on the systematic characteristics of 24Model[J]. *Systems Engineering-Theory & Practice*, 2018, 38(1): 263-272.
- [12] 李聪, 徐子烜, 王雨情, 等. 城市燃气管网泄漏事故分析知识图谱构建及应用研究[J]. *中国安全生产科学技术*, 2022, 18(10): 5-12.  
LI Cong, XU Zixuan, WANG Yuqing, et al. Construction and application of knowledge graph for leakage accident analysis of urban gas pipeline network[J]. *Journal of Safety Science and Technology*, 2022, 18(10): 5-12.
- [13] 孙逸林, 王治, 刘险峰, 等. 基于24Model的燃气管道维修抢事故致因定量分析方法[J]. *油气储运*, 2022, 41(7): 795-801.  
SUN Yilin, WANG Ye, LIU Xianfeng, et al. Quantitative analysis method for causal factors of gas pipeline repair and rescue accidents based on 24Model[J]. *Oil & Gas Storage and Transportation*, 2022, 41(7): 795-801.
- [14] 徐后佳, 帅健, 杨敬东, 等. 城镇燃气管道事故动态贝叶斯网络情景推演及模拟[J]. *油气储运*, 2022, 41(8): 900-907.  
XU Houjia, SHUAI Jian, YANG Jingdong, et al. Deduction and simulation of DBN scenarios in urban gas pipeline accidents[J]. *Oil & Gas Storage and Transportation*, 2022, 41(8): 900-907.
- [15] 李玉龙, 侯相宇. 基于故障树和贝叶斯网络集成的重大工程弃渣场风险诊断与预测[J]. *系统管理学报*, 2022, 31(5): 861-874.  
LI Yulong, HOU Xiangyu. Risk diagnosis and prediction of mega-project waste dump based on fault tree and Bayesian network integration[J]. *Journal of Systems & Management*, 2022, 31(5): 861-874.
- [16] 史定华, 王松瑞. 故障树分析技术方法和理论[M]. 北京: 北京师范大学社, 1993.
- [17] 姚成玉, 张炎驿, 王旭峰, 等. T-S模糊故障树重要度分析方法[J]. *中国机械工程*, 2011, 22(11): 1261-1268.  
YAO Chengyu, ZHANG Yingyi, WANG Xufeng, et al. Importance analysis method of fuzzy fault tree based on T-S model[J]. *China Mechanical Engineering*, 2011, 22(11): 1261-1268.
- [18] 吴书强, 邵必林, 边根庆, 等. 基于多态模糊贝叶斯网络的高校宿舍火灾风险评价研究[J]. *灾害学*, 2023, 38(2): 31-36.  
WU Shuqiang, SHAO Bilin, BIAN Genqing, et al. Fire risk assessment of university dormitory based on polymorphic fuzzy Bayesian network[J]. *Journal of Catastrophology*, 2023, 38(2): 31-36.
- [19] ROED W, MOSLEH A, VINNEM J E, et al. On the use of the hybrid causal logic method in offshore risk analysis[J]. *Reliability Engineering & System Safety*, 2009, 94(2): 445-455.
- [20] 王金辉, 郝伟, 陶泽, 等. 基于模糊贝叶斯网络的塔吊作业安全风险评估[J]. *安全与环境工程*, 2021, 28(4): 15-20.  
WANG Jinhui, HAO Wei, TAO Ze, et al. Safety risk assessment of tower crane operation based on fuzzy Bayesian network[J]. *Safety and Environmental Engineering*, 2021, 28(4): 15-20.
- [21] 王成汤, 王浩, 覃卫民, 等. 基于多态模糊贝叶斯网络的地铁车站深基坑坍塌可能性评价[J]. *岩土力学*, 2020, 41(5): 1670-1679.  
WANG Chengtang, WANG Hao, QIN Weimin, et al. Evaluation of collapse possibility of deep foundation pits in metro stations based on multi-state fuzzy Bayesian networks[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2020, 41(5): 1670-1679.