

# 基于贝叶斯网络的不确定因果逻辑量化分析方法<sup>①</sup>

林 青<sup>1</sup>, 戴慧珺<sup>2</sup>, 任德旺<sup>2</sup>

<sup>1</sup>(西安培华学院, 西安 710125)

<sup>2</sup>(西安交通大学, 西安 710049)

**摘 要:** 在安全苛求系统中, 潜在风险会引发灾难事故, 研究分析潜在风险的影响至关重要. 风险到事故的因果逻辑关系包括两类: 确定性和非确定性的. 确定性因果关系可以用事件树、故障树等分析. 由于非确定性因果关系包含不确定性因素和数据不足, 贝叶斯网络成为最佳选择. 量化分析中, 条件概率的分配是一件不容易的工作, 本文提出一种基于模糊逻辑的分配方法, 结合建立的不确定性影响模型, 利用贝叶斯网络进行量化分析, 分析确定性因素的影响. 最后通过实例学习, 验证和评估方法的有效性.

**关键词:** 贝叶斯网络, 非确定因果逻辑, 模糊逻辑

## Quantitative Analysis Methodology of Non-Deterministic Causal Relationships Based on Bayesian Network

LIN Qing<sup>1</sup>, DAI Hui-Jun<sup>2</sup>, REN De-Wang<sup>2</sup>

<sup>1</sup>(Xi'an Peihua University, Xi'an 710125, China)

<sup>2</sup>(Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China)

**Abstract:** In the safety-critical systems, potential hazard may lead to catastrophic accidents, therefore it is greatly significant to analyze its influence. There are two causal logic relationships from risks to accidents that are deterministic and non-deterministic relationship. The former can be analyzed by event tree and fault tree. However, due to the latter's uncertainties and lack of data, Bayesian network could be applied as an appropriate tool. However, it is a difficult task to determine the conditional probability table. This paper proposes a new allocation method of conditional probability based on fuzzy logic. Combined with the risk model of influencing factors established, Bayesian network is used for quantitative analysis. Finally, the feasibility of proposed method is evaluated through case study.

**Key words:** Bayesian network; non-deterministic causal logic; fuzzy logic

安全苛求系统中, 导致事故发生的致因有“硬”因素和“软”因素之分, “硬”因素属于系统硬件方面, 由于与系统的设计和结构有关, 其失效模式和故障机理是明确的, 所以导致事故发生的因果逻辑关系被称为确定性因果逻辑关系; “软”因素属于系统的操作方面, 与系统架构没有直接联系, 由于其的复杂性和不确定性, 以及先验数据不足或缺失, 故称此类因果关系为非确定性因果关系.

“硬”因素的分析方法有事件树和故障树, 二者结合形成经典模型有“领结”模型<sup>[1,2]</sup>, 在地铁和工业中的

风险分析中取得很好的应用效果, 不仅识别风险致因, 而且量化评估风险的可接受水平. 导致事故发生的潜在致因有设备失效和人因组织失效, 为了全面综合评估海上工业中的风险, 一种基于混合因果逻辑的分析框架被提出<sup>[3]</sup>. 结合事件序列图、故障树和贝叶斯网络的混合因果逻辑方法也被应用到航空领域, 研究事故的失效致因模型<sup>[4]</sup>, 混合因果的方法也被应用到社科系统的概率风险评估和管理中, 识别风险、评估风险重要度、管理安全指标、分析事故致因<sup>[5]</sup>. Mosleh 利用方法分析组织因素在概率安全评估(PSA, Probability

<sup>①</sup> 基金项目:2015 陕西省教育厅科学研究基金项目资助项目(15JK2091)

收稿时间:2015-12-30;收到修改稿时间:2016-02-25 [doi:10.15888/j.cnki.csa.005329]

Safety Assessment)中的影响,对组织的结构方面和行为方面进行建模,识别和分析组织间交互影响<sup>[6]</sup>。

贝叶斯网络作为不确定性推理的有力工具,在风险分析的不确定性因果逻辑关系取得很好应用效果,比如在海洋钻井业中,将工作流程图转换为贝叶斯网络,分析水力因素、机械因素、人为因素、软件因素、硬件因素的影响<sup>[7]</sup>。在论文[8]中,首先用事件树和故障树建立潜在的事故场景,构建“领结”模型;构建面向对象的贝叶斯网络,并通过概率更新和序列学习分析风险。在配电维护管理中,将变量用贝叶斯网络表示,便于分析变量间的交互流程。首先通过描述风险问题,确定风险影响因子,识别关键失效模式,建立贝叶斯网络分析变量间的因果关系和交互流程<sup>[9]</sup>。为了量化分析不确定因果逻辑,并在一定程度上解决数据不足并多依赖主观判断的问题,把量化分析结果用概率的形式展示出来,所以本文提出一种量化分析不确定因果逻辑关系的方法,比如分析人因失效等,重要的优势是量化评估不确定因果逻辑的影响。

本文第二部分简要介绍贝叶斯网络、证据理论等相关理论;第三部分从建模和量化分析两个阶段详细阐述基于贝叶斯网络的不确定性量化分析方法;第四部分主要是实例学习,验证方法的可行性;第五部分得出结论。

### 1 贝叶斯理论

贝叶斯网络是利用有向无环图和条件概率表表示变量交互的概率模型,由节点和连接组成,节点表示变量而连接表示变量间的因果关系。节点和连接定义了网络的定性部分,而网络的定量部分由相关节点的条件概率组成。条件概率是给定父节点各状态组合的情况下,独立变量的概率。网络节点由根节点、中间节点、叶节点组成。给定根节点的概率和中间节点的条件概率,就可以计算叶节点的概率。边缘概率给出了事件 A 的概率是相互排斥事件 B<sub>1</sub>, B<sub>2</sub>, ..., B<sub>n</sub> 和 A 的联合概率之和<sup>[10]</sup>。

$$P(A) = \sum_i P(A_i^B) \quad (1)$$

根据乘法规则,式(1)可以写为条件概率,

$$P(A) = \sum_i P(A | B_i)P(B_i) \quad (2)$$

每个节点状态的概率通过边缘化其父节点状态计

算得来。当证据给定的情况下,后验概率可以通过贝叶斯理论得来,

$$P(A | B) = \frac{P(B | A)P(A)}{P(B)} \quad (3)$$

式(3)可以用边缘概率表示如下:

$$P(A | B) = \frac{\sum_C P(A, B, C)}{\sum_A \sum_C P(A, B, C)} \quad (4)$$

### 2 基于贝叶斯网络的不确定性影响分析方法

在安全苛求系统中,不确定因素的影响分为两种:直接交互影响和间接交互影响。为了建立不确定因素的影响图,并量化分析相互之间的因果关系,本文提出的方法有两个阶段:影响建模阶段和量化分析阶段。主要步骤如图 1 所示。在影响建模阶段,首先识别不确定性因素,并确定相互之间的直接或者间接因果关系,建立层次化的影响模型,确定贝叶斯网络结构;在量化分析阶段,首先给网络节点打分,其次确定网络参数,包括利用证据理论获取父节点的先验概率,利用模糊逻辑推理算法分配条件概率,最后参数导入 GeNIe 软件,利用贝叶斯理论推理后验概率。

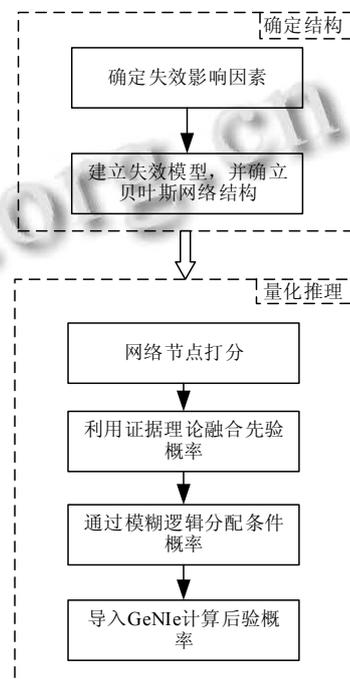


图 1 量化分析的主要步骤

#### 2.1 不确定性因果关系建模

影响因素与设备间的交互关系、影响因素之间的

交互关系，都是非确定性因果关系，主要指两方面：影响因素间的关系复杂，结构不确定；影响因素的变量值因情况不同而有变化。

“软”因素与设备之间的活动主要是运营活动和维修活动，对于人因组织，由于受到知识储备、学习交流、压力、情感等主观因素的影响，导致设备失效的概率随人因组织不同而不同，即产生的贡献值不同。

系统中的关键事件作为顶事件，建立顶事件和影响因素之间的层次影响图，影响图可以转换为贝叶斯网络进行推理分析。影响图生成流程图如图 2 所示。如果影响因素和顶事件存在直接关系，建立相互之间的链接；否则，该影响因素通过其他影响因素和顶事件存在间接关系，建立与其他影响因素之间的链接。

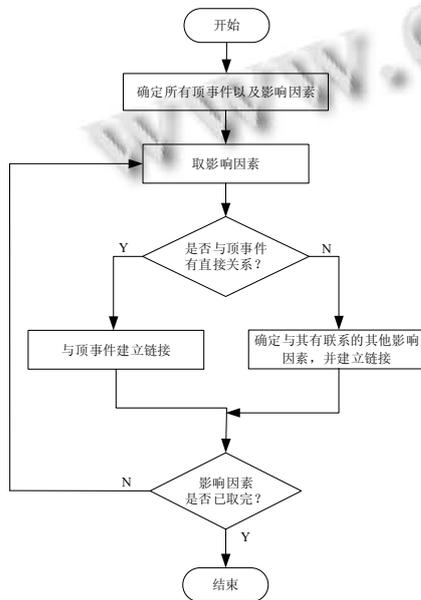


图 2 层次化影响图的生成流程图

按图 2 的搜索流程，建立顶事件与直接影响因素和间接影响因素之间层次影响图，如图 3 所示。层次影响图确定了影响因素之间的关系，并转换为贝叶斯网络，进行定量推理分析。

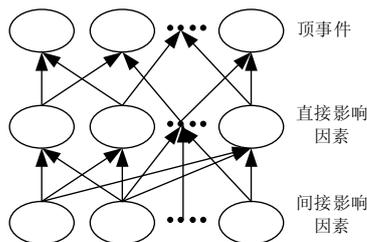


图 3 事件与影响因素之间的影响图

### 2.2 影响量化分析

人因失效模型是推理量化的基础。首先，根据实际情况，通过对影响因素打分量化，变量最大为 100，表示最期望的状态，最小值为 0，表示最不期望的状态，中间级别的取值以 10 为增量<sup>[11]</sup>。分值是整个量化的前提，单个专家确定节点先验概率可以参考分值，条件概率分配也是基于分值开始的。为了解释说明量化推理的原理与步骤，以图 4 中最简单的贝叶斯网络为例。

其中，变量 A 和 B 为父节点，变量 C 是子节点，假设每个变量有三种状态，A 的状态为高、中、低，B 的状态为多、中、少，C 的状态为好、中、差。通过每个变量的取值，分别获取先验概率、分配条件概率和推理后验概率。

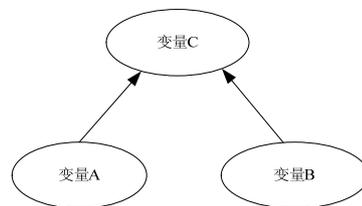


图 4 简单的贝叶斯网络模型

#### 2.2.1 基于证据理论的先验概率获取方法

贝叶斯网络量化分析中，父节点先验知识的获取是首要任务，但是在大多数情况下，由于先验知识缺失或者不足，故而多专家知识成为获取先验概率的重要手段，主要通过专家对父节点状态打分以获得每个状态的概率值。但是，由于多专家知识是基于主观意见的，并且分配的条件概率并不相同，甚至相互存在冲突，为了降低多专家知识间的分歧，获得一个可信的先验概率，引入证据理论融合多专家知识<sup>[12]</sup>。例如，对于图 4 中父节点 A，两位专家分配的条件概率分别为 {0.8,0.1,0.1} 和 {0.85,0.1,0.05}，获得最终先验概率的融合过程如表 1 所示，结果为 {0.97,0.01,0.01}。

#### 2.2.2 基于模糊逻辑的条件概率分配方法

在缺少先验知识的情况下，通过反复学习获得条件概率表成为不可能，大多通过主观判断和决策，缺点有两方面，其一主观色彩浓厚，盲目性大；其二即是父节点数组增加或者父节点状态增多时，父节点的状态组合会随指数增长，增加了条件概率分配的工作量。为了从一定程度上降低主观判断的不确定性，引入模糊逻辑，实现自动分配。为了阐述分配原理和步骤，以图 4 贝叶斯网络为例说明。

表 1 节点 A 的先验概率融合

	Expert 2	{High}	{Medium}	{Low}
Expert 1		0.85	0.1	0.05
{High}	0.8	{High}=0.68	{High}=0.08	{ $\varnothing$ }=0.04
{Medium}	0.1	{High}=0.085	{Medium}=0.01	{Low}=0.005
{Low}	0.1	{ $\varnothing$ }=0.085	{Low}=0.01	{Low}=0.005
	$k$	0.125		
		0.845	0.01	0.02
		0.845/0.875=0.97	0.01/0.875=0.01	0.02/0.875=0.02

2.2.2 基于模糊逻辑的条件概率分配方法

在缺少先验知识的情况下，通过反复学习获得条件概率表成为不可能，大多通过主观判断和决策，缺点有两方面，其一主观色彩浓厚，盲目性大；其二即是父节点数组增加或者父节点状态增多时，父节点的状态组合会随指数增长，增加了条件概率分配的工作量。为了从一定程度上降低主观判断的不确定性，引

入模糊逻辑，实现自动分配。为了阐述分配原理和步骤，以图 4 贝叶斯网络为例说明。

(1) 输入量变换

节点的分值作为输入量，0 表示最不理想的状态，100 表示最理想的状态。输入量均匀量化为 11 个等级，输出量也是分值，同理量化如表 2 所示的对应关系。

表 2 输入值和输出值的均匀量化

量化等级	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
实际取值	0	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100

(2) 输入和输出的模糊空间分割

模糊输入空间是由模糊控制规则中前件的语言变量构成，模糊输出空间是后件的语言变量。语言变量的取值是模糊语言名称，每个语言名称对应一个模糊集合。每个语言变量，其取值的模糊集合具有相同的论域。模糊分割是要确定对于每个语言变量取值的模糊语言名称的个数。

图 4 中，输入和输出数据的论域为[0,100]。输入输出的隶属度函数选用三角形函数，其宽度 50(定义三角形底边的一半为宽度)，隶属度函数曲线如图 5 所示。输入输出模糊空间根据节点 A、B、C 的状态划分，即 A 有高、中、低三个模糊等级，B 有有多、中、少三个模糊等级，C 有为好、中、差三个模糊等级。

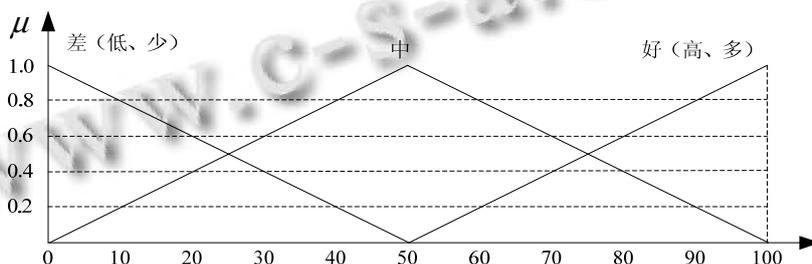


图 5 输入输出值的隶属度函数曲线

(3) 模糊规则生成

父节点的状态组合是确定条件概率表的重要依据，每一种组合都能确定在该组合下子节点的最佳状态，表 3 为图 4 中的子节点状态分配规则。

表 3 节点 C 的状态分配规则表

	节点 A	高			中			低		
	节点 B	多	中	少	多	中	少	多	中	少
节点 C	好	✓	✓		✓					
	中			✓		✓	✓	✓		
	差								✓	✓

这样，父节点状态组合确定子节点的状态，就形成一条模糊规则，父节点的每一种状态组合相当于一  
条模糊规则的前件，子节点相应的状态相当于对应模  
糊规则的后件。图 4 贝叶斯网络形成 9 条推理规则，

- $R_1$ : 如果 A 是高, B 是多, 则 C 是好;
- $R_2$ : 如果 A 是高, B 是中, 则 C 是好;
- $R_3$ : 如果 A 是高, B 是少, 则 C 是中;
- $R_4$ : 如果 A 是中, B 是多, 则 C 是中;
- $R_5$ : 如果 A 是中, B 是中, 则 C 是中;

- $R_6$ : 如果 A 是中, B 是少, 则 C 是中;
- $R_7$ : 如果 A 是低, B 是多, 则 C 是中;
- $R_8$ : 如果 A 是低, B 是中, 则 C 是差;
- $R_9$ : 如果 A 是低, B 是少, 则 C 是差。

(4) 条件概率表生成

假设节点 A 的打分为 80, 节点 B 的为 90, 将  
他们进行模糊化处理, 其语言变量分别为: {0.6、  
0.4、0} 和 {0.8、0.2、0}, 分别如图 6 中蓝线和红线  
所示。

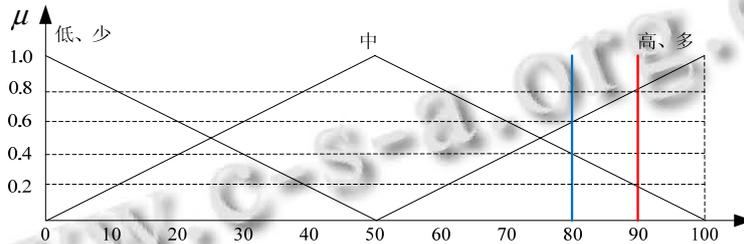


图 6 节点 A 和节点 B 语言变量模糊化

节点 A、B 模糊化后, 规则  $R_1 \sim R_9$  被激活, 通过  
模糊推理可推论出节点 C 的语言变量, 各条规则的置  
信度按取大运算, 如下所示。

- $R_1$ :  $\omega_1 = \max \{0.6, 0.8\} = 0.8$ ;
- $R_2$ :  $\omega_2 = \max \{0.6, 0.2\} = 0.6$ ;
- $R_3$ :  $\omega_3 = \max \{0.6, 0\} = 0.6$ ;
- $R_4$ :  $\omega_4 = \max \{0.4, 0.8\} = 0.8$ ;
- $R_5$ :  $\omega_5 = \max \{0.4, 0.2\} = 0.4$ ;
- $R_6$ :  $\omega_6 = \max \{0.4, 0\} = 0.4$ ;
- $R_7$ :  $\omega_7 = \max \{0, 0.8\} = 0.8$ ;
- $R_8$ :  $\omega_8 = \max \{0, 0.2\} = 0.2$ ;
- $R_9$ :  $\omega_9 = \max \{0, 0\} = 0$

为了使条件概率的分配表不依赖与输入变量, 及  
独立于先验知识, 定义分配条件概率的操作规则如下:

- 操作 1:  $P_{conG} = (O - V_{G1})/W_G$ ,  
 $P_{conB} = P_{conM} = (1 - P_{conG})/2$
- 操作 1':  $P_{conG} = (V_{G2} - O)/W_G$ ,  
 $P_{conB} = P_{conM} = (1 - P_{conG})/2$
- 操作 2:  $P_{conB} = (V_{B2} - O_1)/W_M$ ,  
 $P_{conG} = (O_2 - V_{B2})/W_M$ ,  
 $P_{conM} = 1 - P_{conB} - P_{conG}$
- 操作 2':  $P_{conB} = (O_1 - V_{B1})/W_M$ ,  
 $P_{conG} = (V_{G2} - O_2)/W_M$ ,  
 $P_{conM} = 1 - P_{conB} - P_{conG}$

- 操作 3:  $P_{conB} = (O - V_{B1})/W_B$ ,  
 $P_{conG} = P_{conM} = (1 - P_{conB})/2$
- 操作 3':  $P_{conB} = (V_{B2} - O)/W_B$ ,  
 $P_{conG} = P_{conM} = (1 - P_{conB})/2$

其中,  $P_{conG}$  是为最好状态分配的条件概率,  $P_{conB}$  为  
最差状态分配的条件概率,  $P_{conM}$  为中间状态分配的  
条件概率,  $O$  为模糊推理的输出,  $W_G$  为最好状态的  
隶属度函数的区间长度,  $V_{G1}$  和  $V_{G2}$  为对应区间的端  
点值,  $W_M$  为中间状态的隶属度函数的区间长度,  $W_B$   
为最差状态的隶属度函数的区间长度,  $V_{B1}$  和  $V_{B2}$  为  
区间的端点值。

条件概率的分配流程图如图 7 所示, 通过先后判  
断模糊规则的后件是否为最好的状态和置信度的大小,  
确定相应的分配操作。如此分配的条件概率, 对输入  
值的变化不敏感, 比较稳定。

同理, 通过基于模糊逻辑的分配算法, 图 4 中的  
贝叶斯网络的条件概率如表 4 所示。

表 4 由分配算法生成的条件概率表

A	高			中			低		
	多	中	少	多	中	少	多	中	少
好	.8	.6	.2	.1	.3	.3	.1	.1	0
C 中	.1	.2	.6	.8	.4	.4	.8	.1	0
差	.1	.2	.2	.1	.3	.3	.1	.8	1

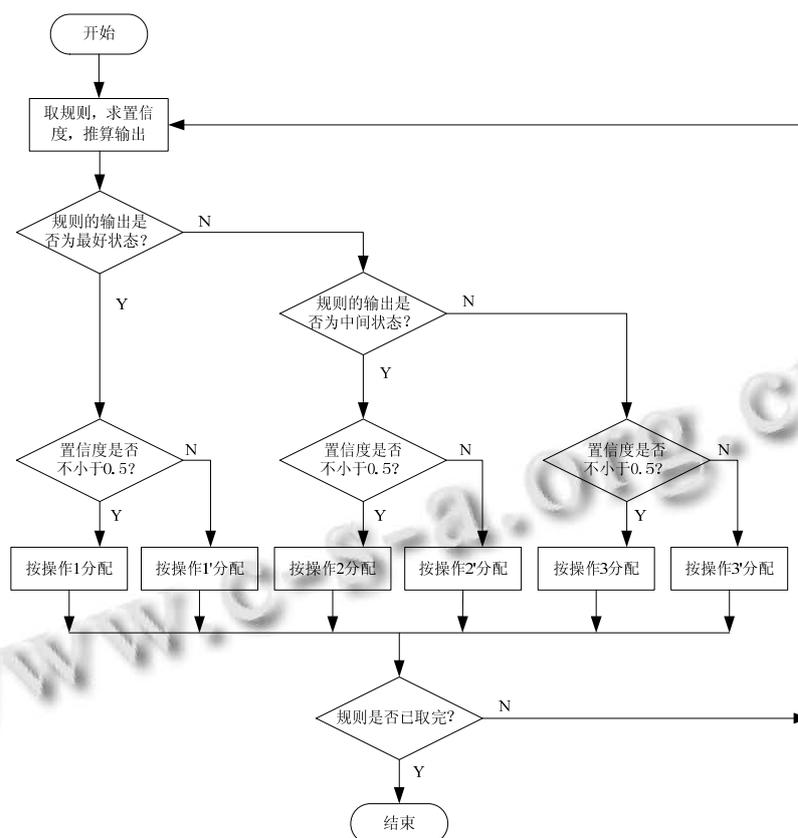


图 7 条件概率分配算法的流程图

### 2.2.3 基于 GeNIe 的后验概率推理方法

贝叶斯网络的结构确定之后, 贝叶斯网络推理的核心就是先验概率的获得和条件概率的分配. 由前可知, 父节点 A、B 的先验概率通过证据理论融合两位专家意见得来, 条件概率由基于模糊逻辑的方法得来, 分配结果如表 4 所示. 根据公式(2), 贝叶斯网络推理的输入是父节点的先验概率和中间节点的条件概率, 借助 GeNIe 软件, 最终的输出是子节点的后验概率, 如图 8 所示, 得到子节点 C 的后验概率为 {0.75,0.13,0.12}.

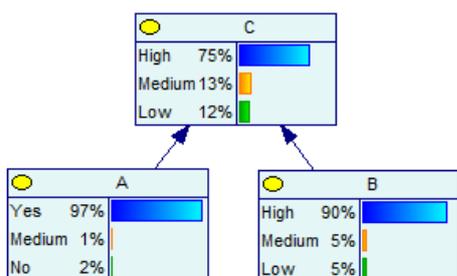


图 8 节点 C 的后验概率推理

## 3 基于贝叶斯网络的人因影响分析方法

### 3.1 人因失效模型建立

飞机驾驶是一项安全苛求的任务, 飞行员担当者弥足重要的角色, 一旦操作失误将造成不可弥补的灾难事故. 失误的致因存在不确定性, 未出现紧急情况的时候, 与人的情绪、知识储备、身体状况等有关, 在发生紧急情况下, 还与人的紧张度以及与处理紧急情况的决策能力有关. 在该风险场景中, 影响驾驶员操作的直接因素有: 知识储备, 处理问题的决策能力, 工作的集中度. 间接因素有自学情况、交流程度、培训经验、压力、注意力集中度、适勤度、焦虑. 图 9 为飞行员失误的影响模型.

### 3.2 人因影响分析

#### (1) 先验概率的证据融合

将飞行员失误模型转换为贝叶斯网络, 根节点的先验概率得来如前所述, 最后的融合结果如何 10 所示.

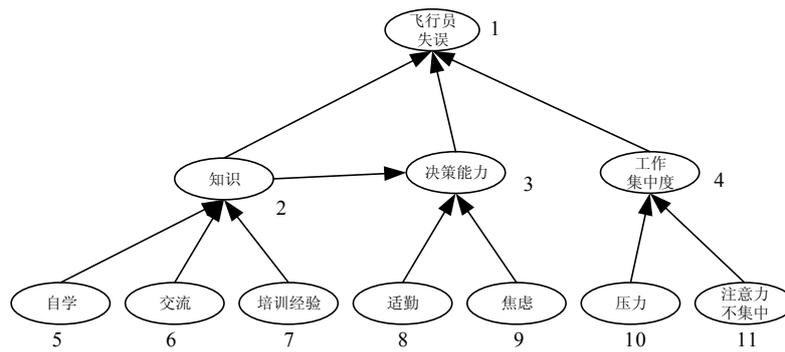


图 9 飞行员失误的影响模型

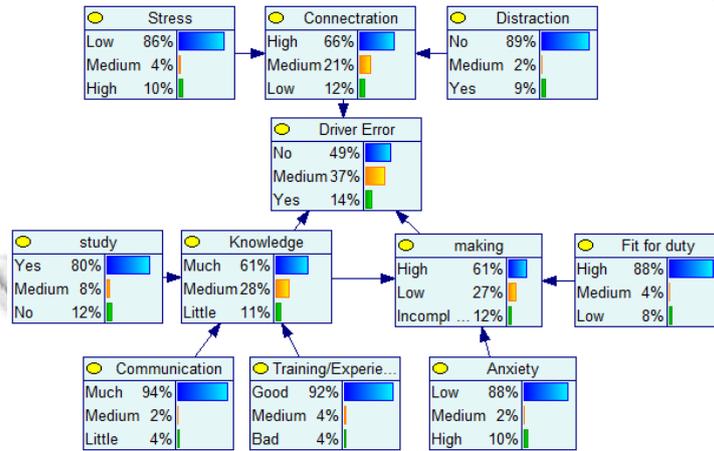


图 10 飞机驾驶员失误的后验概率推理

(2) 条件概率的模糊推理

在确定的风险场景中，确定每个节点的分值，为

分配条件概率表做准备，如果状态最佳，表示为 100，如果最差，则用 0 表示，分值如表 5 所示。

表 5 贝叶斯网络中节点的分数值

节点	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
分数	90	90	80	80	80	90	80	80	90	90	80

中间节点的条件概率分配起到关键的作用。隶属函数选用如图 5 所示的三角形隶属函数。“决策能力”，“工作集中度”，

“知识”以及子节点“司机失误”的条件概率表按前面的分配方法获得，中间节点“知识”的部分条件概率如表 6 所示。

表 6 中间节点“知识”的条件概率表

			知识		
自学	交流	培训或经验	Much	Medium	Little
Yes	Much	Good	0.8	0.1	0.1
		Medium	0.8	0.1	0.1
		Bad	0.1	0.8	0.1
	Medium	Good	0.2	0.6	0.2
		Medium	0.2	0.6	0.2
		Bad	0.2	0.6	0.2
Little	Good	0.2	0.6	0.2	
	Bad	0.3	0.3	0.4	

### (3) 后验概率的 GeNIe 估算

由上获得的父节点的先验概率以及中间节点的条件概率,借助 GeNIe 软件推理计算子节点“飞行员”的后验概率为 {0.49,0.37,0.14},表示飞行员操作失误的最低概率为 0.14.

### (4) 讨论分析

人因失效是一种不确定性因果逻辑关系,包含大量不确定影响因素,如主观判断、数据缺失、不确定性的传递等,是量化分析的瓶颈.为了最大程度的降低这种不确定带来的误差,采用融合的方法处理先验概率和新的概率分配方法,降低主观判断的盲目性和解决数据不足的困境.并且,贝叶斯网络是一种理想的推理预测的工具,也是推理不确定因果的最佳选择.

## 4 结语

本文提出基于贝叶斯网络的不确定因果逻辑关系量化分析方法,主要包括建模和量化分析两个阶段.在建模阶段,通过建立影响图,确立了贝叶斯网络的架构.在量化分析阶段,利用基于证据理论的处理方法获得贝叶斯网路根节点的先验知识,提出了基于模糊逻辑的分配算法分配中间节点条件概率的方法,并利用 GeNIe 软件推理计算人因失误的概率,在一定程度上解决了先验知识不足和分配盲目性的问题.最后,在人因影响分析中,以飞机驾驶员失误为研究对象,利用提出的方法,讨论和验证其可行性.

### 参考文献

- 1 Schutte J, Geisler M. ROSA-A computer based safety model for European railways. 12th International Conference on Computer System Design and Operation in Railways and Other Transit Systems. 2010.
- 2 Salvi O, Debray B. A global view on ARAMIS, a risk assessment methodology for industries in the framework of the SEVESO II directive. *Journal of Hazardous Materials*, 2006, 130(3): 187-199.
- 3 Røed W, Mosleh A, Vinnem JE, et al. On the use of the hybrid causal logic method in offshore risk analysis. *Reliability Engineering & System Safety*, 2009, 94(2): 445-455.
- 4 Ale BJM, Bellamy L, Cooke R, et al. Causal model for air transport safety. Final Report, July, 2008, 31.
- 5 Groth K, Wang C, Mosleh A. Hybrid causal methodology and software platform for probabilistic risk assessment and safety monitoring of socio-technical systems. *Reliability Engineering & System Safety*, 2010, 95(12): 1276-1285.
- 6 Mosleh A, Goldfeiz E, Shen S. The  $\omega$ -factor approach for modeling the influence of organizational factors in probabilistic safety assessment. Proc. of the 1997 IEEE Sixth Conference on Human Factors and Power Plants, 1997. *Global Perspectives of Human Factors in Power Generation*. IEEE. 1997. 9/18-9/23.
- 7 Cai B, Liu Y, Liu Z, et al. Application of Bayesian networks in quantitative risk assessment of subsea blowout preventer operations. *Risk Analysis*, 2013, 33(7): 1293-1311.
- 8 Khakzad N, Khan F, Amyotte P. Quantitative risk analysis of offshore drilling operations: A Bayesian approach. *Safety science*, 2013, 57: 108-117.
- 9 Nordgård DE, Sand K. Application of Bayesian networks for risk analysis of MV air insulated switch operation. *Reliability Engineering & System Safety*, 2010, 95(12): 1358-1366.
- 10 Musharraf M, Hassan J, Khan F, et al. Human reliability assessment during offshore emergency conditions. *Safety Science*, 2013, 59: 19-27.
- 11 Sentz K, Ferson S. *Combination of evidence in Dempster-Shafer theory*. Albuquerque, New Mexico: Sandia National Laboratories, 2002