

引用格式:贾进章,陈怡诺,柯丁琳.基于模糊集和改进 DS 证据理论的危化品道路运输体系贝叶斯网络风险分析[J].北京化工大学学报(自然科学版),2020,47(1):38-45.

JIA JinZhang, CHEN YiNuo, KE DingLin. Risk analysis of a Bayesian network for harmful chemicals road transportation systems based on fuzzy sets and improved Dempster/Shافر (DS) evidence theory[J]. Journal of Beijing University of Chemical Technology (Natural Science), 2020,47(1):38-45.

# 基于模糊集和改进 DS 证据理论的危化品道路运输体系贝叶斯网络风险分析

贾进章<sup>1,2,3</sup> 陈怡诺<sup>1,2,3</sup> 柯丁琳<sup>1,2,3</sup>

(辽宁工程技术大学 1. 安全科学与工程学院;2. 安全科学与工程研究院;3. 矿山热动力灾害与防治教育部重点实验室, 阜新 123000)

**摘 要:**针对危化品道路运输体系中影响因素信息的不确定性和专家知识推断贝叶斯网络中条件概率表时存在的主观性,提出了一种将模糊集和改进 Dempster/Shافر 证据理论(DS 证据理论)、贝叶斯网络结合在一起的危化品道路运输体系的风险评价方法。根据危化品道路运输体系的影响因素建立了相应的风险评价体系,确定各层级的评价指标。将专家对各评价指标的评价意见代入高斯型隶属度函数构造隶属度矩阵,进行改进 DS 证据理论数据融合,得到多位专家评价意见融合后的概率值分布。利用贝叶斯网络的推理功能,得出危化品道路运输体系的风险等级和其中各评价指标的概率值分布,找出体系薄弱环节并进行分析。以沈阳某危险货物托运有限公司为例进行研究,结果表明该公司中危化品道路运输体系的风险值为 0.6118,风险等级为较危险( $V_2$ ),其中人员因素概率(60%)和管理因素概率(52%)所占权重较大,需要公司重点关注并加强管理。

**关键词:**危化品道路运输体系;模糊集合理论;改进 DS 证据理论;贝叶斯网络;风险评价;安全工程

**中图分类号:** X93 **DOI:** 10.13543/j.bhxbzr.2020.01.007

## 引 言

危化品具有易燃、易爆、毒害人体和重度腐蚀等特性,其运输事故不同于一般事故,可能衍生出更为严重的二次事故,对人类健康、居住环境甚至公共安全产生灾难性的影响。根据资料显示,截止到 2017 年 6 月底,国内的危化品货物道路运输物流公司已超过 1 万家,运输车辆超过 21 万辆<sup>[1]</sup>,其中未监管车辆高达 90%。因此如何改善危化品运输条件和降低道路运输风险,使得危化品能够安全运输,逐渐成为社会各界关注的焦点。

在危化品道路运输风险研究方面,不少学者针对事故的影响因素识别、分析及风险评价方法

作了大量的工作。早在 1975 年,美国密西根州大学运输研究所构建了道路运输突发状况所引发的事故数据库<sup>[2]</sup>,为预防和减少运输事故提供了科学的依据。

Trépanier 等<sup>[3]</sup>利用多个危化品运输事故数据库分析了危化品运输事故的特征。Harwood 等<sup>[4]</sup>推算出危化品在不同范围内和不同等级的公路条件下发生道路运输泄漏的事故概率。任常兴等<sup>[5]</sup>基于“人-机-环”的闭环视角,提出了危化品运输中可能发生的各类风险因素。孙平等<sup>[6]</sup>从我国危化品道路运输事故的原因、影响因素等方面出发建立了我国危化品道路运输风险评价体系。

目前,学者们常用故障树(fault tree, FT)<sup>[7]</sup>、事件树(event tree analysis, ETA)<sup>[8]</sup>等基于树的方法来评价危化品运输体系风险。董菲菲等<sup>[9]</sup>在管道运输化学品过程危险性故障树基础上,对运输过程中可能存在的各种影响因素进行了分析,但这些因素都是具体的“危险”或“安全”二态,不包括因素的灰色地带,而危化品运输中大多影响因素都是不确定的。朱婷等<sup>[10]</sup>将故障树和贝叶斯网络相结合,

收稿日期:2019-04-11

基金项目:国家自然科学基金(51374121);辽宁省特聘教授资助项目(551710007007);辽宁省百万人才工程资助项目(2019-45-15);辽宁省自然科学基金(2019-MS-162)

第一作者:男,博士,教授

E-mail:jiajinzhang@163.com

基于贝叶斯网络能解决不确定性问题的特点,系统地揭示了各影响因素间的关联关系并进行推理,然而其评价结果又太过依赖相关领域专家的主观性判断。在以上工作的基础上,本文建立了危化品道路运输风险评价指标体系,利用模糊集合理论构建隶属度矩阵并代入改进的 DS 证据理论,得到了各指标的基本概率分布,减少了对专家的依赖,增强了评价的可靠性。与传统 DS 证据理论相比,本文可以得到相同的评价结果但计算更为简便。

# 1 危化品道路运输风险分析方法

为了量化危化品道路运输体系的风险评价结果,针对危化品道路运输体系中评价指标的不确定性和专家知识推断贝叶斯网络中条件概率表时存在主观性等问题,基于模糊集可解决指标中的不确定因素、DS 证据理论可减少评价时专家的主观判断的特点,提出一种将模糊集合理论和改进 DS 证据理论相结合的危化品道路运输体系贝叶斯网络风险分析方法。

## 1.1 模糊集和 DS 证据理论确定基本概率

### 1.1.1 模糊集

模糊集又称为模糊集合理论,是一种描述模糊现象的方法<sup>[11]</sup>。它把待考察的因素及反映因素不精确、不清楚的概念作为一定的模糊集合,建立适当的隶属度函数,描述待考察的因素在模糊概念中的模糊程度<sup>[12]</sup>,再通过模糊集合相关的运算和变换对模糊因素进行分析。本文采用高斯型隶属函数来表示危化品道路运输中相关影响因素的模糊程度,该函数为

$$y = e^{-\frac{(x-\mu)^2}{2\sigma^2}} \tag{1}$$

式中,  $\mu$  为函数的中心,  $\sigma$  为专家对自己提出的评价指标相应等级的不确定度。

### 1.1.2 DS 证据理论

DS 证据理论是一种不精确的推理理论<sup>[13-14]</sup>,具有处理不确定信息的能力,能直接表达“不确定”和“不知道”的信息。本文将 DS 证据理论应用于融合多个独立证据  $m_1, m_2, \dots, m_n$ , Dempster 合成法则融合结果为

$$m(A) = \begin{cases} 0, & A = \varnothing \\ \frac{\sum_{A_i \cap B_j \cap C_k \cap \dots = A} m_1(A_i) m_2(B_j) m_3(C_k) \dots}{1 - K}, & A \neq \varnothing \end{cases} \tag{2}$$

式中  $K = \sum_{A_i \cap B_j \cap C_k \cap \dots = \varnothing} m_1(A_i) m_2(B_j) m_3(C_k) \dots$  代表了多个独立证据  $m_1, m_2, \dots, m_n$  的冲突程度。

## 1.2 贝叶斯网络概率推理

贝叶斯网络能从不完整的明确信息中作出推测,具有强大的推理能力,适用于研究、解决不确定性问题<sup>[15]</sup>。它将拓扑结构和参数相结合,其中拓扑结构是一种有向无环图 (directed acyclic graph, DGA),用来描述变量之间的条件概率关系,结构中代表变量的节点间逻辑关系用有向弧表示;参数为代表变量之间关系的条件概率表 (conditional probability table, CPT)。假设贝叶斯网络中有两个具有逻辑关系的随机变量  $A = \{a_1, a_2, \dots, a_n\}$  和  $B = \{b_1, b_2, \dots, b_m\}$ ,从  $A$  画一条有向弧指向  $B$ ,称  $A$  为父节点,  $B$  为子节点。则  $A$  和  $B$  之间的条件概率矩阵为

$$p(B|A) = \begin{pmatrix} p(B=b_1|A=a_1) & \cdots & p(B=b_n|A=a_1) \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ p(B=b_1|A=a_n) & \cdots & p(B=b_n|A=a_n) \end{pmatrix} \tag{3}$$

为方便推理计算,本文采用 GENIE 软件,通过 [Chance]、[Deterministic]、[Arc]、[Node properties] 等功能构建出贝叶斯网络的拓扑结构,当条件概率明确时,利用 [Node properties]、[Definition]、[Update Beliefs] 等功能代入概率并更新贝叶斯网络,得到在特定逻辑关系和条件概率下的贝叶斯网络推理结果。

# 2 危险道路运输风险分析步骤

危险道路运输风险具体分析步骤如下。

1) 建立评价指标体系。根据中华人民共和国应急管理部、中国消防等相关部门的整理结果和权威媒体的报道,以收集到的 2011~2017 年发生的 270 余起危化品运输事故为数据基础,结合危化品运输中的常用相关标准,如 AQ 3003—2005《危险化学品汽车运输安全监控系统通用规范》、GB/T 21279—2007《危险化学品包装液压试验方法》、GB 13690—1992《常用危险化学品的分类及标志》、GA/T 970—2011《危险化学品泄漏事故处置行动要则》等,以及道路运输中的相关标准,如 GB 20300—2018《道路运输爆炸品和剧毒化学品车辆安全技术条件》、GB/T 8226—2008《道路运输术语》、GB 13392—2005《道路运输危险货物车辆标志》、GB 18565—2016《道路运输车辆综合性能要求和检验方法》、GB/T

18566—2011《道路运输车辆燃料消耗量检测评价方法》等,分别从人员、机械设备、环境、管理和危化品 5 个角度<sup>[16-18]</sup>构建一个能够全面覆盖该公司危化品道路运输的评价指标体系,如表 1 所示。

表 1 危化品道路运输体系评价指标  
Table 1 Evaluation indicators of hazardous chemicals road transport systems

准则层	一级指标	二级指标
危化品道路运输评价指标体系	人员因素 $P$	生理心理素质 $P_1$
		专业技术能力 $P_2$
		安全责任意识 $P_3$
		受训程度 $P_4$
	机械设备因素 $E$	车辆性能状况 $E_1$
		设备设施配备 $E_2$
	环境因素 $S$	天气条件 $S_1$
		交通状况 $S_2$
		道路状况 $S_3$
		沿途人员及财产密度 $S_4$
	管理因素 $M$	法律法规 $M_1$
		安全管理制度 $M_2$
		员工教育培训 $M_3$
		应急管理 $M_4$
	危化品因素 $H$	危化品性质 $H_1$
		危化品包装 $H_2$

本文采取危险、较危险、一般、较安全和安全 5 个等级的风险表达方式,从评价集  $V$  中获得最终风险评价结果。其中,危化品道路运输体系目标评价集如表 2 所示,二级指标评价集如表 3 所示。

表 2 危化品道路运输体系目标评价集  
Table 2 Target evaluation set of hazardous chemicals road transport systems

目标得分 (满分 1 分)	评价语	目标评价 等级	隶属 度	目标评价集
0.8~1	危险	$V_1$	0.9	$V=(V_1,V_2,V_3,V_4,V_5)$
0.6~0.8	较危险	$V_2$	0.7	
0.4~0.6	一般	$V_3$	0.5	
0.2~0.4	较安全	$V_4$	0.3	
0~0.2	安全	$V_5$	0.1	

表 3 二级指标评价子集  
Table 3 Secondary indicator evaluation subsets

目标得分(满分 1 分)	评价语	目标评价集
0.8~1	差	$V_0=(\text{差,较差,一般,较好,好})$
0.6~0.8	较差	
0.4~0.6	一般	
0.2~0.4	较好	
0~0.2	好	

2) 构建贝叶斯网络模型。根据建立的危化品道路运输风险评价指标体系,利用 GENIE 软件中 [Chance]、[Deterministic]、[Arc]、[Node properties] 等功能将各评价指标的内在影响关系转化为贝叶斯网络的拓扑结构,网络节点与指标体系各层级的指标因素一一对应,即目标子节点对应准则层危化品道路运输体系,中间节点对应准则层的 5 个一级指标,如人员因素、机械设备因素等,父节点对应准则层的 16 个二级指标,如生理心理素质、车辆性能状况、安全管理制度等,从而构建出危化品道路运输体系的贝叶斯网络模型。

3) 构造隶属度函数。由专家给出评价体系中二级指标的评价值和不确定度,根据高斯型隶属度函数,令 5 个不同风险等级对应的隶属函数的中心分别为 1、0.75、0.5、0.25、0,则危化品道路运输体系中风险等级隶属度函数分别为

$$y_{v_1}(x,\sigma)=e^{-\frac{(x-1)^2}{2\sigma^2}},y_{v_2}(x,\sigma)=e^{-\frac{(x-0.75)^2}{2\sigma^2}},y_{v_3}(x,\sigma)=e^{-\frac{(x-0.5)^2}{2\sigma^2}},y_{v_4}(x,\sigma)=e^{-\frac{(x-0.25)^2}{2\sigma^2}},y_{v_5}(x,\sigma)=e^{-\frac{x^2}{2\sigma^2}}$$

得到专家对评价体系中一级指标的隶属度矩阵,指标  $P$  的隶属度矩阵为

$$H_p=\begin{bmatrix}y_{v_1}(p_1,\sigma_{p_1})&y_{v_2}(p_1,\sigma_{p_1})&y_{v_3}(p_1,\sigma_{p_1})&y_{v_4}(p_1,\sigma_{p_1})&y_{v_5}(p_1,\sigma_{p_1})\\y_{v_1}(p_2,\sigma_{p_2})&y_{v_2}(p_2,\sigma_{p_2})&y_{v_3}(p_2,\sigma_{p_2})&y_{v_4}(p_2,\sigma_{p_2})&y_{v_5}(p_2,\sigma_{p_2})\\y_{v_1}(p_3,\sigma_{p_3})&y_{v_2}(p_3,\sigma_{p_3})&y_{v_3}(p_3,\sigma_{p_3})&y_{v_4}(p_3,\sigma_{p_3})&y_{v_5}(p_3,\sigma_{p_3})\\y_{v_1}(p_4,\sigma_{p_4})&y_{v_2}(p_4,\sigma_{p_4})&y_{v_3}(p_4,\sigma_{p_4})&y_{v_4}(p_4,\sigma_{p_4})&y_{v_5}(p_4,\sigma_{p_4})\end{bmatrix}\quad(4)$$

指标  $E$  的隶属度矩阵为

$$H_E=\begin{bmatrix}y_{v_1}(e_1,\sigma_{e_1})&y_{v_2}(e_1,\sigma_{e_1})&y_{v_3}(e_1,\sigma_{e_1})&y_{v_4}(e_1,\sigma_{e_1})&y_{v_5}(e_1,\sigma_{e_1})\\y_{v_1}(e_2,\sigma_{e_2})&y_{v_2}(e_2,\sigma_{e_2})&y_{v_3}(e_2,\sigma_{e_2})&y_{v_4}(e_2,\sigma_{e_2})&y_{v_5}(e_2,\sigma_{e_2})\end{bmatrix}\quad(5)$$

指标  $S$  的隶属度矩阵为

$$H_S=\begin{bmatrix}y_{v_1}(s_1,\sigma_{s_1})&y_{v_2}(s_1,\sigma_{s_1})&y_{v_3}(s_1,\sigma_{s_1})&y_{v_4}(s_1,\sigma_{s_1})&y_{v_5}(s_1,\sigma_{s_1})\\y_{v_1}(s_2,\sigma_{s_2})&y_{v_2}(s_2,\sigma_{s_2})&y_{v_3}(s_2,\sigma_{s_2})&y_{v_4}(s_2,\sigma_{s_2})&y_{v_5}(s_2,\sigma_{s_2})\\y_{v_1}(s_3,\sigma_{s_3})&y_{v_2}(s_3,\sigma_{s_3})&y_{v_3}(s_3,\sigma_{s_3})&y_{v_4}(s_3,\sigma_{s_3})&y_{v_5}(s_3,\sigma_{s_3})\\y_{v_1}(s_4,\sigma_{s_4})&y_{v_2}(s_4,\sigma_{s_4})&y_{v_3}(s_4,\sigma_{s_4})&y_{v_4}(s_4,\sigma_{s_4})&y_{v_5}(s_4,\sigma_{s_4})\end{bmatrix}\quad(6)$$

指标  $M$  的隶属度矩阵为

$$H_M = \begin{bmatrix} y_{v_1}(m_1, \sigma_{m_1}) & y_{v_2}(m_1, \sigma_{m_1}) & y_{v_3}(m_1, \sigma_{m_1}) & y_{v_4}(m_1, \sigma_{m_1}) & y_{v_5}(m_1, \sigma_{m_1}) \\ y_{v_1}(m_2, \sigma_{m_2}) & y_{v_2}(m_2, \sigma_{m_2}) & y_{v_3}(m_2, \sigma_{m_2}) & y_{v_4}(m_2, \sigma_{m_2}) & y_{v_5}(m_2, \sigma_{m_2}) \\ y_{v_1}(m_3, \sigma_{m_3}) & y_{v_2}(m_3, \sigma_{m_3}) & y_{v_3}(m_3, \sigma_{m_3}) & y_{v_4}(m_3, \sigma_{m_3}) & y_{v_5}(m_3, \sigma_{m_3}) \\ y_{v_1}(m_4, \sigma_{m_4}) & y_{v_2}(m_4, \sigma_{m_4}) & y_{v_3}(m_4, \sigma_{m_4}) & y_{v_4}(m_4, \sigma_{m_4}) & y_{v_5}(m_4, \sigma_{m_4}) \end{bmatrix} \quad (7)$$

指标  $H$  的隶属度矩阵为

$$H_H = \begin{bmatrix} y_{v_1}(h_1, \sigma_{h_1}) & y_{v_2}(h_1, \sigma_{h_1}) & y_{v_3}(h_1, \sigma_{h_1}) & y_{v_4}(h_1, \sigma_{h_1}) & y_{v_5}(h_1, \sigma_{h_1}) \\ y_{v_1}(h_2, \sigma_{h_2}) & y_{v_2}(h_2, \sigma_{h_2}) & y_{v_3}(h_2, \sigma_{h_2}) & y_{v_4}(h_2, \sigma_{h_2}) & y_{v_5}(h_2, \sigma_{h_2}) \end{bmatrix} \quad (8)$$

4) 基于矩阵分析进行改进 DS 证据理论的数据融合<sup>[19]</sup>。为了减少隶属度矩阵代入 DS 证据理论进行数据融合时产生计算量巨大的问题,本文通过矩阵分析,采用两个证据结合、递推计算的方式融合专家意见。假设有  $n$  位专家对指标体系进行评价,通过步骤 3) 中给出的危化品道路运输体系风险等级隶属度函数,确定  $n$  位专家的概率值分布为

$$M = \begin{bmatrix} M_1 \\ M_2 \\ \vdots \\ M_N \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} m_{11} & m_{12} & m_{13} & m_{14} & m_{15} \\ m_{21} & m_{22} & m_{23} & m_{24} & m_{25} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ m_{n1} & m_{n2} & m_{n3} & m_{n4} & m_{n5} \end{bmatrix} \quad (9)$$

式中,矩阵  $M$  中任意元素  $m_{ij}$  表示第  $i$  位专家评价为第  $j$  级风险的概率值,因此该矩阵每一行的和为 1。

用矩阵  $M$  任意一行  $M_i^T$  与另一行  $M_j$  相乘得到一个新矩阵  $A$

$$A = M_i^T \times M_j = \begin{pmatrix} m_{i1} \\ m_{i2} \\ m_{i3} \\ m_{i4} \\ m_{i5} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} m_{j1} & m_{j2} & m_{j3} & m_{j4} & m_{j5} \end{pmatrix} = \begin{bmatrix} m_{i1} \times m_{j1} & \cdots & m_{i1} \times m_{j5} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ m_{i5} \times m_{j1} & \cdots & m_{i5} \times m_{j5} \end{bmatrix} \quad (10)$$

式中,矩阵  $A$  中主对角线元素之和为合成法则式 (2) 的分子,所有非主对角线元素之和为融合后的冲突程度  $K$ ,即为  $n$  个证据之间的冲突程度。

用权值分配改进 DS 证据理论合成算法计算融合后 5 个风险等级的概率值。改进后的合成式为

$$m(A) = \begin{cases} 0, & A = \varnothing \\ \frac{\sum_{A_i \cap B_j \cap C_k \cap \cdots = A} m_1(A_i) m_2(B_j) m_3(C_k) \cdots}{1 - K} + f(A), & A \neq \varnothing \end{cases} \quad (11)$$

式中,  $f(A) = Kq(A)$  是证据冲突的概率分配函数,即把证据间的冲突程度  $K$  分配到矩阵中的每一元素,因此,此概率分配函数满足  $\sum_{A \subset \theta} f(A) = K$ ,令  $q(A) =$

$$\frac{\sum_{i=1}^n m_i(A)}{n}, \text{ 将 } K \text{ 按这一比例分配至 } A.$$

5) 贝叶斯网络推理。利用 GENIE 软件中的 [Node properties]、[Definition]、[Update Beliefs] 等功能将条件概率矩阵中的数据代入危化品道路运输体系贝叶斯网络模型中的各节点,求出更新贝叶斯网络模型,计算出整个危化品道路运输体系分别处于 5 个风险等级的概率值,并得到各评价指标的概率值分布。

### 3 实例计算

某危险货物托运有限公司是一家位于辽宁省沈阳市主要从事危化品道路运输的公司。假设该公司当月车辆日常检查合格且没有维修过,当年内车辆也没发生较大以上交通事故,其他安全设备齐全。选取 8 名领域专家对该公司的危化品道路运输体系进行风险评价与分析,其中两名专家是具有 5 年以上工作经验的危化品运输企业的管理人员,两名专家是危化品道路运输风险管理研究领域的管理人员和研究人员,其余 4 名分别是辽宁工程技术大学和东北大学安全工程专业教授。

#### 3.1 计算概率值分布

请 8 位专家根据建立的危化品道路运输体系评价指标,依次给出各评价指标所处的风险等级以及对此等级的不确定度,以专家 1 为例,结果如表 4 所示。

将表 4 中数据代入到评价体系中 5 个一级指标的隶属度矩阵(式(4) ~ (8)),矩阵行归一化后得到专家 1 对各评价指标的概率值分布数据如表 5 所示。



表 4 专家 1 评价结果  
Table 4 Evaluation results for expert 1

评价项	评价指标							
	$P_1$	$P_2$	$P_3$	$P_4$	$E_1$	$E_2$	$S_1$	$S_2$
评价等级	$V_3$	$V_2$	$V_2$	$V_1$	$V_2$	$V_1$	$V_3$	$V_4$
量化值	0.5	0.7	0.7	0.9	0.5	0.3	0.3	0.5
不确定度	0.1	0.1	0.15	0.2	0.1	0.1	0.05	0.15

评价项	评价指标							
	$S_3$	$S_4$	$M_1$	$M_2$	$M_3$	$M_4$	$H_1$	$H_2$
评价等级	$V_3$	$V_4$	$V_4$	$V_3$	$V_2$	$V_3$	$V_3$	$V_2$
量化值	0.5	0.3	0.3	0.5	0.7	0.5	0.5	0.7
不确定度	0.2	0.1	0.05	0.15	0.2	0.1	0.1	0.15

表 5 专家 1 的概率值分布  
Table 5 Probability distribution for expert 1

评价指标	概率值							
	$P_1$	$P_2$	$P_3$	$P_4$	$E_1$	$E_2$	$S_1$	$S_2$
差	0	0.0108	0.1193	0.4961	0.0108	0.4964	0	0
较差	0.0404	0.8573	0.5088	0.4249	0.8573	0.4246	0.0404	0
一般	0.919	0.1315	0.3621	0.0761	0.1315	0.0761	0.919	0.1315
较好	0.404	0.0004	0.0098	0.0029	0.0004	0.0029	0.404	0.8577
好	0	0	0	0	0	0	0	0.0108

评价指标	概率值							
	$S_3$	$S_4$	$M_1$	$M_2$	$M_3$	$M_4$	$H_1$	$H_2$
差	0	0	0	0.0026	0.1637	0	0	0.1193
较差	0.2340	0	0	0.1659	0.4889	0.0404	0.0404	0.5088
一般	0.5230	0.1315	0	0.6630	0.3060	0.919	0.919	0.3621
较好	0.2430	0.8577	1	0.1659	0.0402	0.404	0.404	0.0098
好	0	0.0108	0	0.0026	0.0011	0	0	0

根据上述步骤依次计算出剩余 7 位专家的概率值分布,利用基于矩阵分析的改进 DS 证据理论将 8

位专家的概率值进行数据融合,得到结果如表 6 所示。

表 6 数据融合后的概率值  
Table 6 Probability after data fusion

评价指标	概率值							
	$P_1$	$P_2$	$P_3$	$P_4$	$E_1$	$E_2$	$S_1$	$S_2$
差	0.6392	0.6014	0.8596	0.4931	0.2358	0.0813	0.2891	0.6958
较差	0.2086	0.1951	0.1365	0.2317	0.6392	0.5197	0.5014	0.1521
一般	0.1483	0.1528	0.0036	0.1221	0.1178	0.3182	0.1907	0.1521
较好	0.0036	0.0050	0.0003	0.1528	0.0036	0.0077	0.0188	0.0003
好	0.0003	0.0003	0	0.0003	0.0036	0.0036	0	0

评价指标	概率值							
	$S_3$	$S_4$	$M_1$	$M_2$	$M_3$	$M_4$	$H_1$	$H_2$
差	0.5274	0.5192	0.8596	0.8221	0.5967	0.6019	0.2413	0.5674
较差	0.3306	0.2089	0.1368	0.1528	0.2433	0.1983	0.4829	0.3638
一般	0.1414	0.1338	0.0036	0.0248	0.1528	0.1488	0.1091	0.0059
较好	0.0003	0.0819	0	0.0003	0.0036	0.0507	0.1665	0.0051
好	0.0003	0.0562	0	0	0.0036	0.0003	0.0011	0.0047

将表 6 中数据代入构建好的危化品道路运输体系的贝叶斯网络模型节点中,如图 1 所示。通过贝叶斯网络的推理功能得出被评价的该危险货物托运有限公司的危化品道路运输体系处于 5 个风险等级的概率  $P = (0.1665, 0.3767, 0.3464, 0.0699,$

$0.0405)$ ,利用加权平均法得到最终体系面临的风险大小为  $R = 0.9 \times 0.1665 + 0.7 \times 0.3767 + 0.5 \times 0.3464 + 0.3 \times 0.0699 + 0.1 \times 0.0405 = 0.6118$ ,可知体系风险等级为  $V_2$ ,处于较危险阶段。

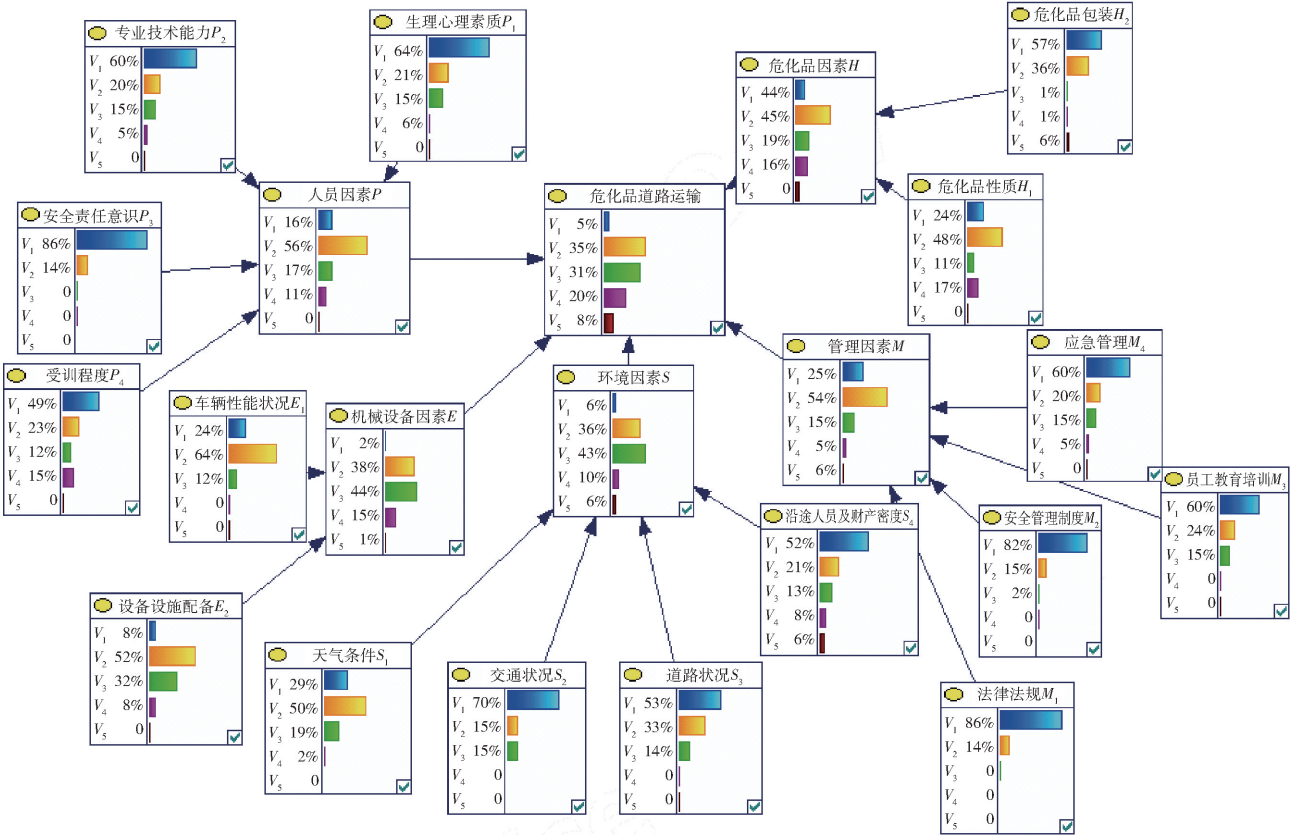


图 1 危化品道路运输体系的贝叶斯网络模型

Fig. 1 Bayesian network model of the hazardous chemicals road transport system

3.2 结果分析

由图 1 可知,准则层一级评价指标对该危险货物托运有限公司中危化品道路运输体系的影响大小次序依次为人员因素、管理因素、机械设备因素、环境因素和危化品因素。其中,人员因素和管理因素评价风险等级为危险 ( $V_1$ ),人员因素的概率为 60%,管理因素的概率为 52%。人员因素要明显大于其他因素,这说明即使危化品道路运输体系中其他一级指标全部安全合格,但因人员因素出现失误造成危化品道路运输事故的几率仍较大。在准则层二级评价指标中安全责任意识因素、生理心理素质因素、专业技术能力因素和受训程度因素在不同程度上影响人员因素,它们的评价风险等级都为危险 ( $V_1$ ),概率分别 86%、64%、60% 和 49%。管理因素是影响危化品道路运输体系的第二重要因素,它在准

则层二级评价指标中评价风险等级为危险 ( $V_1$ ) 的有法律法规因素 (概率 85%)、安全管理因素 (概率 82%)、应急管理 (概率 60%)、安全教育 (概率 59%)。针对上述关键影响因素,提出加强公司内运输从业人员的安全教育和提高安全管理水平的相关措施。加强道路运输教育培训体系,提升运输人员的遵纪守法意识和安全防范意识;确保道路运输中驾驶人员、危化品装卸管理和押运人员详细了解所运输危化品的危险特性以及一旦出现危险情况时的应急处置方法,并有针对性地开展不同条件下的专业培训。在危化品道路运输的安全管理方面,政府监督部门应建立健全相关法律法规,明确政府相关管理部门的职能,建立合理、统一、可行的行业标准体系并且将危化品道路运输风险防范落实在日常运营中。同时,要经常进行安全演练,提升从业人员的心

理素质,当面临高温、雨、雪、雷电天气和道路状况不良等未知因素时能冷静处理,减少环境因素的影响,选择合适的路线,降低每次道路运输的风险,提高公司整个危化品道路运输体系的安全性。

将本文的改进 DS 证据理论和传统 DS 证据理论分别进行数据融合,本文方法所得风险值为 0.6118,传统方法所得风险值为 0.6473,风险等级都为较危险( $V_2$ ),相较之下本文使用的改进算法较简单,融合结果更为合理、可靠。

## 4 结论

(1)根据相关的法律法规和行业标准识别影响因素,分别从人员、机械设备、环境、管理和危化品 5 个角度建立了一个全面的危化品道路运输体系。

(2)利用建立的危化品道路运输体系,通过 GENIE 软件构建相应的贝叶斯网络模型。通过基于模糊集合理论结合改进 DS 证据理论算法的方法减少专家主观性判断,综合专家对各评价指标的打分得到基本概率分布,更新了贝叶斯网络模型,进行推理得到各指标的概率值分布。

(3)以沈阳某危险货物托运有限公司为例,确定了该公司的危化品道路运输体系的风险等级为较危险( $V_2$ ),风险大小为 0.6118。根据风险评价结果,分析并提出了降低该公司危化品道路运输体系风险的对策:着重管理道路运输中的人员因素,加强公司内员工的安全、专业教育和安全演练,提高员工面对突发事件的解决能力,提高员工的心理素质,使员工遇到高温、雨、雪、雷电天气,交通堵塞及不同道路状态等间接不可控因素时能够沉着冷静应对;同时要时刻按要求检查机械设备性能和危化品性质,减少直接因素对危化品道路运输的影响。

## 参考文献:

- [1] 2017 年我国危化品各运输方式需求与供给规模分析[R/OL]. (2018-02-23). [http://www.zgsyb.com/html/content/2018-02/23/content\\_799236.shtml](http://www.zgsyb.com/html/content/2018-02/23/content_799236.shtml).  
Analysis of the demand and supply scale of various transportation modes of hazardous chemicals in China in 2017 [R/OL]. (2018-02-23). [http://www.zgsyb.com/html/content/2018-02/23/content\\_799236.shtml](http://www.zgsyb.com/html/content/2018-02/23/content_799236.shtml). (in Chinese)
- [2] SIVAK M. Human factors and road safety: overview of research at the University of Michigan Transportation Research Institute between 1977 and 1986[J]. Applied Ergonomics, 1987, 18(4): 289-296.
- [3] TRÉPANIÉ M, LEROUX M H, MARCELLIS-WARIN N D. Cross-analysis of hazmat road accidents using multiple databases[J]. Accident Analysis and Prevention, 2009, 41(6): 1192-1198.
- [4] HARWOOD D W, RUSSELL E R. Present practices of highway transportation of hazardous materials[R]. Washington D. C.: Federal Highway Administration Office of Safety Research and Development, 1989.
- [5] 任常兴, 吴宗之. 危险品道路运输风险分级指数法研究[J]. 安全与环境学报, 2006, 6(4): 126-129.  
REN C X, WU Z Z. Study on the risk rank indices of hazardous materials transportation[J]. Journal of Safety and Environment, 2006, 6(4): 126-129. (in Chinese)
- [6] 孙平, 王立, 肖丽妮. 危险化学品道路运输安全评价体系的建立[J]. 安全, 2008(2): 20-23.  
SUN P, WANG L, XIAO L N. Establishment of safety evaluation system for road transportation of hazardous chemicals[J]. Security, 2008(2): 20-23. (in Chinese)
- [7] 朱大奇, 于盛林. 基于故障树最小割集的故障诊断方法研究[J]. 数据采集与处理, 2002, 17(3): 341-344.  
ZHU D Q, YU S L. Diagnosis approach based on minimal cut sets of fault trees[J]. Journal of Data Acquisition & Processing, 2002, 17(3): 341-344. (in Chinese)
- [8] KENARANGUI R. Event-tree analysis by fuzzy probability[J]. IEEE Transactions on Reliability, 1991, 40(1): 120-124.
- [9] 董菲菲, 李娅. 故障树法在某化工园区危险化学品管道风险评价中的应用[J]. 化工管理, 2015(28): 116-117.  
DONG F F, LI Y. Application of fault tree method in risk assessment of hazardous chemicals pipeline in a chemical park[J]. Chemical Management, 2015(28): 116-117. (in Chinese)
- [10] 朱婷, 赵来军, 王旭磊. 基于贝叶斯网络的危险化学品道路运输事故分析[J]. 安全与环境学报, 2016, 16(2): 53-60.  
ZHU T, ZHAO L J, WANG X L. Analysis of the hazardous material transportation accidents based on the Bayesian network method[J]. Journal of Safety and Environment, 2016, 16(2): 53-60. (in Chinese)
- [11] ZADEH L A. Fuzzy sets[J]. Information and Control, 1965, 8: 338-353.
- [12] 张清华, 王进, 王国胤. 粗糙模糊集的近似表示[J]. 计算机学报, 2015, 38(7): 1484-1496.  
ZHANG Q H, WANG J, WANG G Y. The approximate representation of rough-fuzzy sets[J]. Chinese Journal of Computers, 2015, 38(7): 1484-1496. (in Chinese)

- [13] DENCEUX T. A  $k$ -nearest neighbor classification rule based on Dempster-Shafer theory[J]. IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics, 1995, 25(5): 804–813.
- [14] BEYNON M, CURRY B, MORGAN P. The Dempster–Shafer theory of evidence; an alternative approach to multicriteria decision modelling[J]. Omega, 2000, 28(1): 37–50.
- [15] 韩磊, 吴树芳, 王子贤. 贝叶斯网络[J]. 电脑知识与技术, 2009, 5(21): 5867–5872.  
HAN L, WU S F, WANG Z X. Bayesian network[J]. Computer Knowledge and Technology, 2009, 5(21): 5867–5872. (in Chinese)
- [16] 吴金中, 范文姬. 危险货物道路运输风险评价体系研究[J]. 公路交通科技, 2015, 32(12): 6–11.  
WU J Z, FAN W J. Risk evaluation system of dangerous goods transport[J]. Journal of Highway and Transportation Research and Development, 2015, 32(12): 6–11.
- (in Chinese)
- [17] 凡维, 倪东生. 危化品运输的风险因素分析及控制研究[J]. 科技视界, 2015(13): 149–155.  
FAN W, NI D S. Risk factor analysis and control of dangerous chemicals transportation[J]. Science & Technology Vision, 2015(13): 149–155. (in Chinese)
- [18] 王旭磊. 危化品道路运输事故影响因素分析和安全对策[J]. 公路交通科技, 2017, 34(10): 115–121.  
WANG X L. Analysis on influencing factors of hazardous chemical materials road transport accidents and safety measures[J]. Journal of Highway and Transportation Research and Development, 2017, 34(10): 115–121. (in Chinese)
- [19] 奚婷婷, 熊伟丽, 张林, 等. 基于矩阵分析的 DS 合成算法[J]. 计算机工程, 2009, 35(16): 264–266.  
XI T T, XIONG W L, ZHANG L, et al. DS compositive algorithm based on matrix analysis[J]. Computer Engineering, 2009, 35(16): 264–266. (in Chinese)

## Risk analysis of a Bayesian network for harmful chemicals road transportation systems based on fuzzy sets and improved Dempster/Shافر (DS) evidence theory

JIA JinZhang<sup>1,2,3</sup> CHEN YiNuo<sup>1,2,3</sup> KE DingLin<sup>1,2,3</sup>

(1. School of Safety Science and Engineering; 2. Institute of Safety Science and Engineering;

3. Key Laboratory of Mine Thermal Dynamics and Prevention, Ministry of Education, Liaoning Technical University, Fuxin 123000, China)

**Abstract:** There is considerable uncertainty about the factors influencing road transportation systems of hazardous chemicals and the conditional probability table inferred from expert knowledge in a Bayesian network is also highly subjective. This paper proposes a risk assessment method for road transportation systems of hazardous chemicals which combines fuzzy sets and improved Dempster/Shافر (DS) evidence theory to give a Bayesian network for combined risk assessment of hazardous chemicals road transport systems. For each of the factors influencing hazardous chemicals road transportation systems, the corresponding risk assessment system was established to determine the evaluation indicators of each level. Expert evaluation of each evaluation indicator was then substituted into the Gaussian membership function to construct the membership grade matrix, and the data fusion of the improved DS evidence theory algorithm was carried out to obtain the basic probability distribution of the evaluation opinions after the fusion of multiple experts. The resulting evaluation indicators allowed the weak links in the system to be identified and analyzed. Taking a hazardous goods consignment company in Shenyang as an example, the results show that the risk in transporting hazardous chemicals is relatively high ( $V_2$ ), with the probability of human factors being responsible of 60% and the probability of management factors being 52%. Both of these have a large weight, which requires the company to focus on strengthening its management structure.

**Key words:** hazardous chemicals road transport system; improved DS evidence theory algorithm; Bayesian network; risk assessment; safety engineering

(责任编辑: 吴万玲)