

DOI:10.20035/j.issn.1671-2668.2023.06.011

基于模糊贝叶斯网络的危险货物道路运输风险评价*

王佳¹, 郑天玉¹, 王祎², 陈涛¹

(1.长沙理工大学 交通运输工程学院, 湖南 长沙 410114; 2.长沙理工大学 经济与管理学院, 湖南 长沙 410076)

摘要: 易燃易爆、有毒的危险货物具有不稳定性, 一旦发生运输事故容易引发二次灾害。为更好地从源头开展运输风险防控, 系统、准确地评价危险货物道路运输风险状态, 建立危险品道路运输风险指标体系, 运用决策试验与评价实验室(DEMATEL)分析方法和解释结构模型(ISM)建立危险货物道路运输风险因素的层次结构模型, 在此基础上采用模糊贝叶斯网络评价方法构建危险品道路运输风险评价模型; 以系统层次结构模型为基础, 将层次结构模型转化为贝叶斯网络结构模型, 采用模糊理论及依赖不确定性有序加权平均(DUOWA)算法计算贝叶斯网络节点参数, 并划分风险等级; 将节点参数导入贝叶斯网络软件(NETICA)进行风险计算, 通过贝叶斯网络推理, 获得危险品道路运输风险等级和各评价指标的概率值, 实现对系统整体风险概率、各因素对危险品运输风险影响程度的评估, 发现系统的薄弱环节。

关键词: 道路运输; 危险货物; 风险评价; 模糊贝叶斯网络; 解释结构模型(ISM); 决策试验与评价实验室(DEMATEL)

中图分类号: U492.336.3

文献标志码: A

文章编号: 1671-2668(2023)06-0052-07

危险货物是易燃、易爆、具有腐蚀性和毒性的物品, 如果在运输时发生意外, 容易引发爆炸, 严重污染周围环境, 并产生连锁效应。如何从全局角度系统分析、评价危险品运输风险, 确保危险品在运输过程中的安全尤为重要。

在事故影响因素分析方面, Trépanier M. 等利用多个危险化学品运输事故数据库的数据分析了危险品运输事故的特征^[1]; Ma C. X. 等采用有序 Logit 回归模型和有序多项式逻辑回归模型对 343 起危险品运输事故数据进行分析, 得到了 10 个与危险品运输事故密切相关的因素^[2]; 朱骏认为中国大部分危险化学品运输事故是由运输环节中的因素造成的, 与企业的溯源管理有关^[3]; 陈晓勇等对中国 2013—2014 年 562 起危险化学品运输事故进行分析, 发现由交通事故造成的危险品二次事故所占比例比非交通事故高^[4]; 罗丹等对中国 2013—2017 年 356 起危险化学品运输事故进行统计, 分析事故产生原因, 建议在危险品运输应急救援管理安全体系中运用互联网信息化平台来提高运输安全^[5]。

在事故风险评价方面, Conca A. 等分析了道路流量与事故发生频率之间的相互作用, 提出了综合评价危险货物运输路线风险的方法^[6]; Lower M. 等

提出将模糊理论与风险矩阵相结合的风险评估方法, 并用于航空运输事故的定量风险评估^[7]; Cordeiro F. G. 等构建了基于地理信息系统的危险货物运输环境风险评估模型^[8]; 马晓丽等根据有序 Logit 事故概率和菱形标签事故结果建立了城市道路危险货物运输风险评估模型^[9]; 黄文成等采用熵-TOPSIS-耦合协调方法评估了危险铁路运输系统的风险^[10]; 王铁铭将危险化学品道路运输风险范围细化为财产风险、人口风险、环境风险, 开发了风险测量模型^[11]; 李长龙等使用 Mamdani 模糊推理系统分析了道路运输中有害化学物质的安全性^[12]; 张宇等提出了一种结合层次分析和灰色聚类分析的有害化学物资道路运输安全评估方法^[13]; 李耀南等建立危险品物流企业安全评价指标体系, 根据影响因素的模糊程度构建了模糊综合评价矩阵^[14]。

现有关于危险品道路运输的研究多为静态研究, 且几乎没有将动、静态运行数据和统计数据相结合进行研究; 安全风险评价方法虽多, 但这些方法对危险品道路运输风险评价的适用性、匹配性较差; 危险品道路运输风险状态由多种因素共同决定, 而现有风险评价方法缺乏对评价指标之间关系的系统研究, 对运输事故演化过程缺乏直观的图解分析。为

* 基金项目: 湖南省交通运输厅科技进步与创新项目(201920; 202134)

此,本文构建危险货物道路运输风险评估指标体系,采用集成决策试验与评价实验室(Decision-Making Trial and Evaluation Laboratory,DEMATEL)和解释结构模型(Interpretative Structural Modeling,ISM)的方法建立危险货物道路运输风险因素层次结构模型,并基于层次结构模型构建贝叶斯网络拓扑结构模型,通过贝叶斯动态网络推理量化风险因素之间的相互关系,确定风险概率。

1 基于事故致因理论的风险指标体系构建

从事事故致因理论的角度确定危险货物道路运输风险评估指标体系构建流程(见图 1),通过分析危险货物道路运输事故历史数据,对比危险品运输行业标准,确定影响危险品道路运输安全的主要风险因素(见图 2、表 1)。

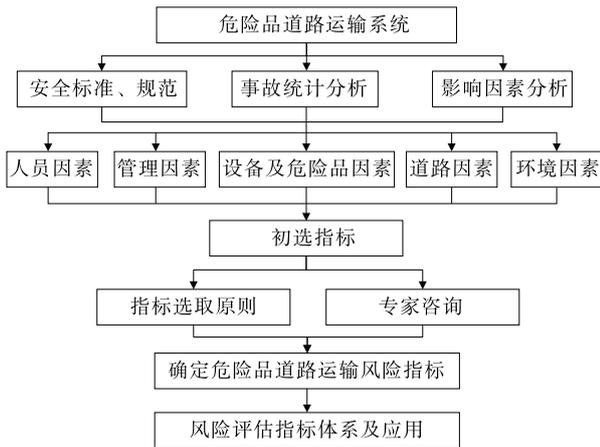


图 1 危险货物道路运输风险评估指标体系构建流程

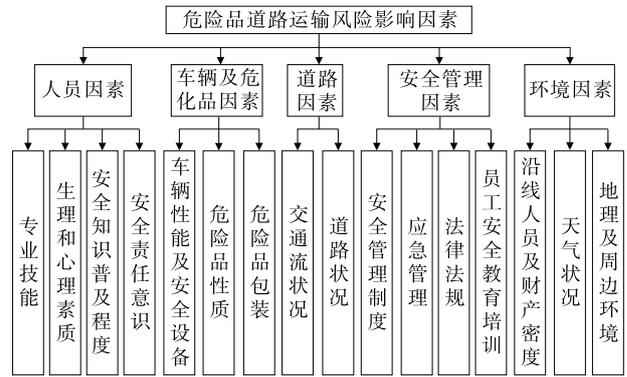


图 2 危险货物道路运输风险评价指标体系

2 基于 DEMATEL-ISM 的危险货物道路运输风险因素层次结构

2.1 DEMATEL-ISM 方法

2.1.1 DEMATEL 方法

DEMATEL 为一种结构建模技术,若影响因素相互独立,可采用因果图辨识系统元素间的相互作用关系。应用步骤如下:

(1) 建立直接影响矩阵。分析系统要素,进行因素间关系测度,并将比较范围设置为 4 个级别,分别为 0(无影响)、1(低影响)、2(中影响)、3(高影响)。然后依据因素之间的影响和作用方向对因素进行两两比较,得到直接影响矩阵 $A(n \times n$ 矩阵),用 a_{ij} 表示因素 i 对因素 j 的影响。

(2) 直接影响矩阵归一化。对直接影响矩阵 A 进行归一化处理,得到规范化的直接影响矩阵 G :

表 1 风险因素变量描述

风险因素	变量描述
专业技能 S_1	从业者对危险化学品的认识及专业技术能力的提高可降低人为因素造成事故的风险
生理和心理素质 S_2	驾驶员、安全人员、搬运人员等的生理和心理状况、情绪反应和适应能力可能直接或间接导致操作失误
安全知识普及程度 S_3	从业者对危险化学品运输专业知识的培训水平和接受程度将影响实际操作中的专业技能和素质
安全责任意识 S_4	风险行为受安全责任意识的影响,运输中产生风险可能是因为运输人员安全意识薄弱、责任心不强等
车辆性能及安全设备 S_5	合格的车辆运行保护设备和紧急救援设备是保证危险品运输安全、预防危险品运输事故的关键,有助于减小事故损失
危险品性质 S_6	危险品的易燃易爆性是导致运输过程中发生事故的主要因素
危险品包装 S_7	危险化学品的包装必须遵守国家标准
交通流状况 S_8	交通流随着时间及路段的不同具有波动性,导致危险化学品运输风险具有不确定性
道路状况 S_9	路况不好容易加剧车辆磨损,同时要求驾驶员具有非常强的专业技能,减小犯错的可能性,降低事故发生率
安全管理制度 S_{10}	运输企业完整的安全管理体系有助于加强运输风险管理,规范运输人员的操作;车辆、设备的定期维护和修理制度有利于减少安全隐患

续表1

风险因素	变量描述
应急管理 S_{11}	制定有效的应急预案,加强应急疏散训练,增加救援演习,是运输企业降低事故风险的重要措施
法律法规 S_{12}	完善危险化学品运输行业的法律法规及标准,提高风险预测警示性,能在一定程度上减小事故发生可能性
员工安全教育培训 S_{13}	运输企业加强员工教育培训,提高员工综合素质,包括专业技能、安全意识和应急响应能力等
沿线人员及财产密度 S_{14}	运输路线沿线人员及财产分布密集会增大运输难度,一旦发生事故将带来重大影响和损失
天气状况 S_{15}	恶劣天气影响车辆制动性能、降低道路能见度,雨天易造成轮胎打滑、模糊行车视线,增大运输风险
地理及周边环境 S_{16}	运输车辆途经自然保护区、居民区等,若发生事故损失会更大

$$G = k \times A \quad (1)$$

$$k = \frac{1}{\max_{1 \leq i \leq n, j=1} \sum_{j=1}^n a_{ij}} \quad (2)$$

$(i = 1, 2, \dots, n; j = 1, 2, \dots, n)$

(3) 确定综合影响矩阵 T :

$$T = G(I - G)^{-1} \quad (3)$$

式中: I 为单位矩阵,体现因素对自身的影响。

(4) 确定整体影响矩阵。综合影响矩阵和单位矩阵相加,得到整体影响矩阵 H :

$$H = T + I \quad (4)$$

2.1.2 ISM 模型

ISM 方法以定性分析为主,用于把复杂系统分解成多个子系统要素,找出要素两两之间的相互联系和作用,进而通过专家法构造要素结构矩阵,建立多级阶梯层次结构模型。步骤如下:

(1) 确定关键影响因素。通过专家法确定系统层次结构组成的重要影响因素,影响因素集表示为:

$$S = \{S_i | i = 1, 2, \dots, n\} \quad (5)$$

式中: S_i 表示集合中的第 i 个因素。

(2) 确定影响因素相关性。采用问卷调查或半结构访谈等形式确定影响因素相关性。

(3) 建立邻接矩阵。用数字“1”或“0”表示两个因素间是否存在相关性,并在邻接矩阵 $A(n \times n$ 阶)中进行表示:

$$A = (a_{ij})_{n \times n} \quad (6)$$

$$a_{ij} = \begin{cases} 1, & \text{因素 } S_i \text{ 对因素 } S_j \text{ 有影响} \\ 0, & \text{因素 } S_i \text{ 对因素 } S_j \text{ 无影响} \end{cases} \quad (7)$$

(4) 建立可达矩阵。通过专家调查获取初始可达矩阵,剔除阈值 λ 以下的矩阵元素,生成可达矩阵 M 。阈值 λ 用于消除影响程度不足的风险因素,其值可采用零值法、平均值法等确定,也可根据矩阵的特定情况和专家判断来确定。

(5) 层级划分。通过建立可达集、前因集和最高集将最终可达矩阵逐层分解,将分层结果作为系统结构模型。

2.1.3 集成 DEMATEL-ISM 模型

DEMATEL 和 ISM 方法相互结合的关键是将 DEMATEL 影响矩阵 H 与 ISM 邻接矩阵 A 进行关联,获得可达矩阵。以 i, j 表示 H 中的元素,以 m_{ij} 表示 M 中的元素,参考文献[15]将整体影响矩阵 H 与可达矩阵 M 转化为:

$$m_{ij} = \begin{cases} \{1 | h_{ij} \geq \lambda\} & (i = 1, 2, \dots, n; \\ & j = 1, 2, \dots, n) \\ \{0 | h_{ij} < \lambda\} & (i = 1, 2, \dots, n; \\ & j = 1, 2, \dots, n) \end{cases} \quad (8)$$

2.2 基于 DEMATEL-ISM 方法的层次结构模型

将可达矩阵 $M = [m_{ij}]_{16 \times 16}$ 分解为可达集、前因集、最高集。可达集 $R(S_i)$ 为要素 S_i 可以到达其他因素的集合,表示为:

$$R(S_i) = \{S_j \in N | m_{ij} = 1\} \quad (9)$$

式中: N 表示因素集合。

前因集 $Q(S_i)$ 为可以到达因素 S_i 的所有因素组成的集合,表示为:

$$Q(S_i) = \{S_j \in N | m_{ji} = 1\} \quad (10)$$

最高集 $T(S_i)$ 为可达集与前因集的交集仍是可达集的集合,表示为:

$$T(S_i) = \{S_j \in N | R(S_i) \cap Q(S_i) = R(S_i)\} \quad (11)$$

图 3 为某次危险品道路运输时,通过上述方法建立的危险品道路运输危险因素分层模型。该模型将 16 个风险因素分为 5 个层级: L_1 为层次结构模型的顶层,是形成危险品道路运输风险的最直接因素; $L_2 \sim L_4$ 为层次结构模型的中间层,是形成危险品道路运输风险的过渡层,具有承上启下的作用,中间层风险因素通过顶层风险因素影响整个运输过程

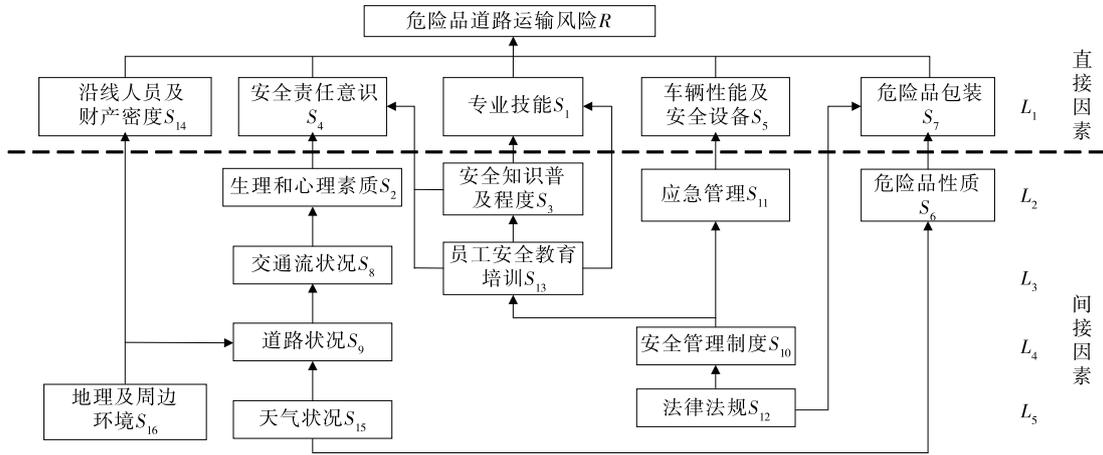


图3 危险品道路运输风险因素结构模型

的风险,同时还受底层因素的直接影响; L_5 为模型的最底层,是危险品道路运输风险的最基础性影响因素,通过各种方式影响中间层,从而对整个系统产生影响。

3 基于模糊贝叶斯网络的危险品道路运输风险评价模型

3.1 贝叶斯网络拓扑结构构建

根据图4所示过程,将系统层次结构模型转换为贝叶斯网络拓扑结构(见图5)。

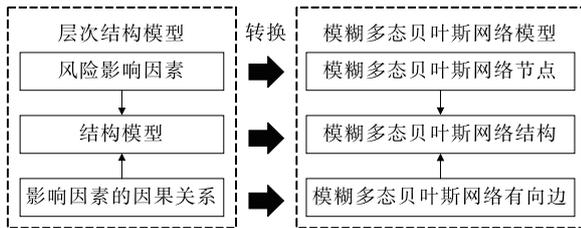


图4 层次结构模型转换为贝叶斯网络模型的过程

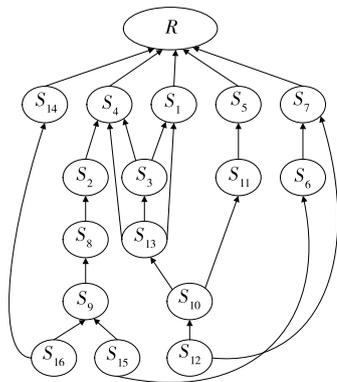


图5 模糊多态贝叶斯网络的结构

3.2 贝叶斯网络模型参数

在层次结构模型的基础上,利用贝叶斯网络推

理能力获取危险品道路运输风险因素的概率估计值,量化风险因素之间的相互影响关系,并运用NETICA软件完成对危险品道路运输风险评价。

3.2.1 模糊贝叶斯网络

模糊贝叶斯网络(Fuzzy Bayesian Network, FBN)是基于贝叶斯网络(BN)的已有特点,结合模糊理论相关概念,以模糊节点变量替代BN节点变量的一种应用,可以有效处理模糊、不确定性和多态性问题。设存在一组有限的节点集合 $X = \{x_1, x_2, \dots, x_n\}$, u_i 表示 x_i 的全部可能状态。若可将 $x_i \in X$ 模糊化为模糊随机变量 u_i ,并且 u_i 能够承接 x_i 的全部可能状态,则 x_i 的模糊集为 $u_i = \{u_{i1}, u_{i2}, \dots, u_{ik}\}$ (k 为 u_i 的模糊状态数),表示变量 x_i 隶属于 u_i 中第 k 个模糊状态 u_{ik} 的程度, $u_{ik} = \{x_i, \mu_{ik}(x) | x_i \in X\}$ 。若 $U = \{u_1, u_2, \dots, u_n\}$,使用有向线段 L 表示其中变量的因果关系,则 $L = \{(u_i, u_j) | i \neq j; i = 1, 2, \dots, n; j = 1, 2, \dots, n\} \subset U \times U$,节点间因果关系概率主要用条件概率表示,即 $P = \{P(u_i | \pi(u_i)) | i = 1, 2, \dots, n\}$ ($\pi(u_i)$ 表示模糊变量 u_i 的父节点集合),模糊贝叶斯网络可表示为 $N_{FBN} = \{U, L, P\}$ 。

3.2.2 基于模糊理论的节点概率

邀请多位专家评估危险化学品道路运输中的风险因素,考虑到专家评估受主观因素影响,采用依赖不确定性有序加权平均(Depended Uncertain Ordered Weighted Averaging, DUOWA)算法,结合模糊理论计算贝叶斯网络节点概率^[16-17],确保评估结果不受部分极端评价的影响。DUOWA算子集结计算公式为:

$$DUOWA(\tilde{U}_1, \tilde{U}_2, \dots, \tilde{U}_n) = \sum_{k=1}^n \omega_k \tilde{U}_k \quad (12)$$

式中： ω_k 为加权变量， $\omega_k \in [0, 1]$ ，且 $\sum_{j=1}^n \omega_k = 1$ 。

3.3 风险分级划分

通过贝叶斯网络因果推理得到危险品道路运输的后验概率，确定危险化学品公路运输的风险水平。参考文献[18]，将危险化学品运输中潜在的道路运输风险划分为5个级别，风险发生概率见表2。

表2 风险等级及风险发生概率

风险等级	概率区间	风险等级	概率区间
安全	[0.0, 0.2)	较危险	[0.6, 0.8)
较安全	[0.2, 0.4)	危险	[0.8, 1.0]
一般	[0.4, 0.6)		

4 实例分析

4.1 基本数据

2023年4月*日，某危险品运输企业承担了一次危险品运送任务，运输区域及运输路线见图6。运输起点为浏阳，终点为岳阳；运载的危险品为95号汽油(危险品中第3类易燃液体，具有液体燃烧性)；运输工具为油罐车，使用年限为3年，装载能力为15t；运输人员为1名驾驶员和1名押运员，工

龄分别为1年、3年，押运员只有押运员证，没有危险品运输车辆驾驶执照。道路特征：运输路线全长196.5 km，其中高速公路占80%，城区道路占17%；沿途共有5个人员密集区域，包括3座城市和2个农村区域；经过长度约为300 m的隧道。交通流状况：通过百度地图获取实时路况信息，包括实时拥堵评价和拥堵路段、拥堵距离、拥堵趋势等交通流状况。所经区域的天气状况为雨天。

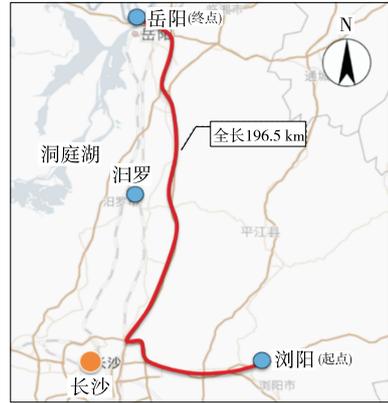


图6 运输所经区域及运输路线

4.2 贝叶斯网络模型构建

在NETICA软件中构建初始贝叶斯网络结构(见图7)，因未导入条件概率数据，显示的概率值为各节点初始概率，各占50%。以专业技能因素为

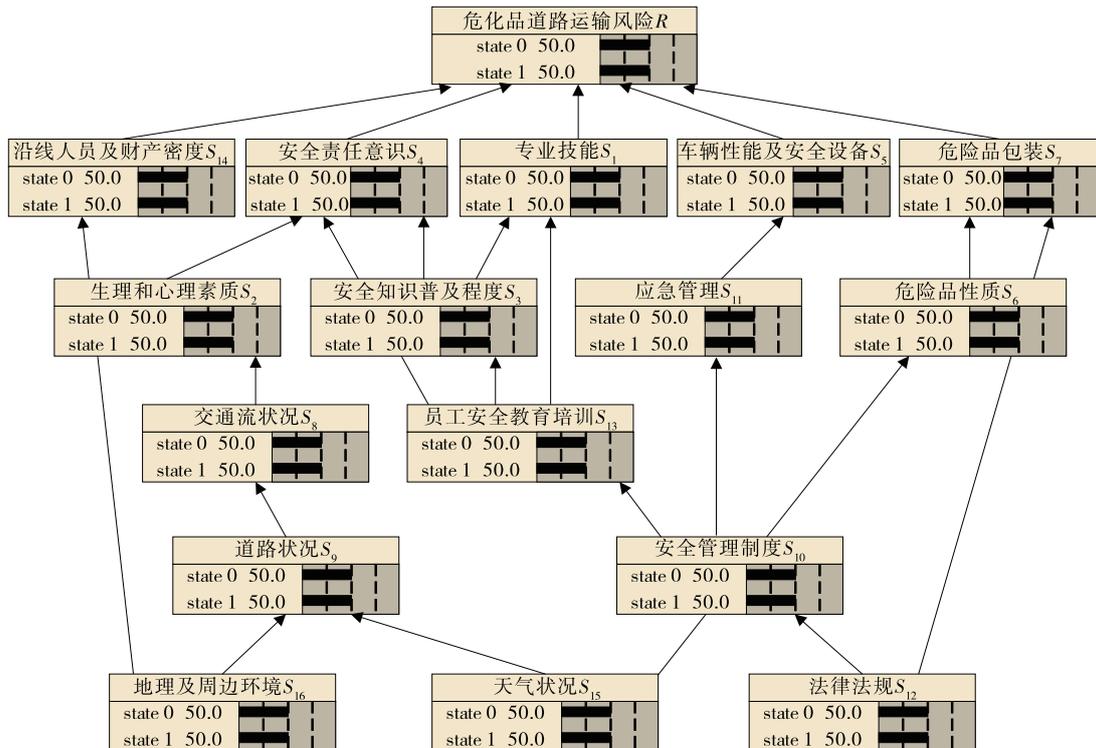


图7 危险品道路运输风险初始贝叶斯网络

例,“state 1”代表专业技能因素导致危险品运输事故发生的风险概率水平,“state 0”代表专业技能因素未导致运输事故发生的风险概率水平。

4.3 贝叶斯网络参数

收集该危险品运输企业的相关资料,并对基础

数据进行整理,以前述评价标准和危险品道路运输风险评估指标体系为依据,组织 4 位专家对模糊动态贝叶斯网络节点的每种风险状态进行评判,通过计算获得各节点的先验概率。表 3 为根节点的先验概率。

表 3 根节点的先验概率

节点	风险状态	4 位专家的三角模糊数				先验概率
		A	B	C	D	
S ₁₂	state 1	(0.7,0.9,1.0)	(0.3,0.5,0.7)	(0.7,0.9,1.0)	(0.3,0.5,0.7)	0.77
	state 0	(0.3,0.5,0.7)	(0.1,0.3,0.5)	(0.1,0.3,0.5)	(0.0,0.1,0.3)	0.23
S ₁₅	state 1	(0.5,0.7,0.9)	(0.7,0.9,1.0)	(0.7,0.9,1.0)	(0.5,0.7,0.9)	0.69
	state 0	(0.0,0.1,0.3)	(0.1,0.3,0.5)	(0.0,0.0,0.1)	(0.3,0.5,0.7)	0.31
S ₁₆	state 1	(0.5,0.7,0.9)	(0.7,0.9,1.0)	(0.3,0.5,0.7)	(0.3,0.5,0.7)	0.60
	state 0	(0.7,0.9,1.0)	(0.3,0.5,0.7)	(0.1,0.3,0.5)	(0.0,0.1,0.3)	0.40

4.4 风险评价

将贝叶斯网络模型参数即各节点的先验概率输

入 NETICA 软件中计算此次危险品道路运输的风险发生概率,结果见图 8。

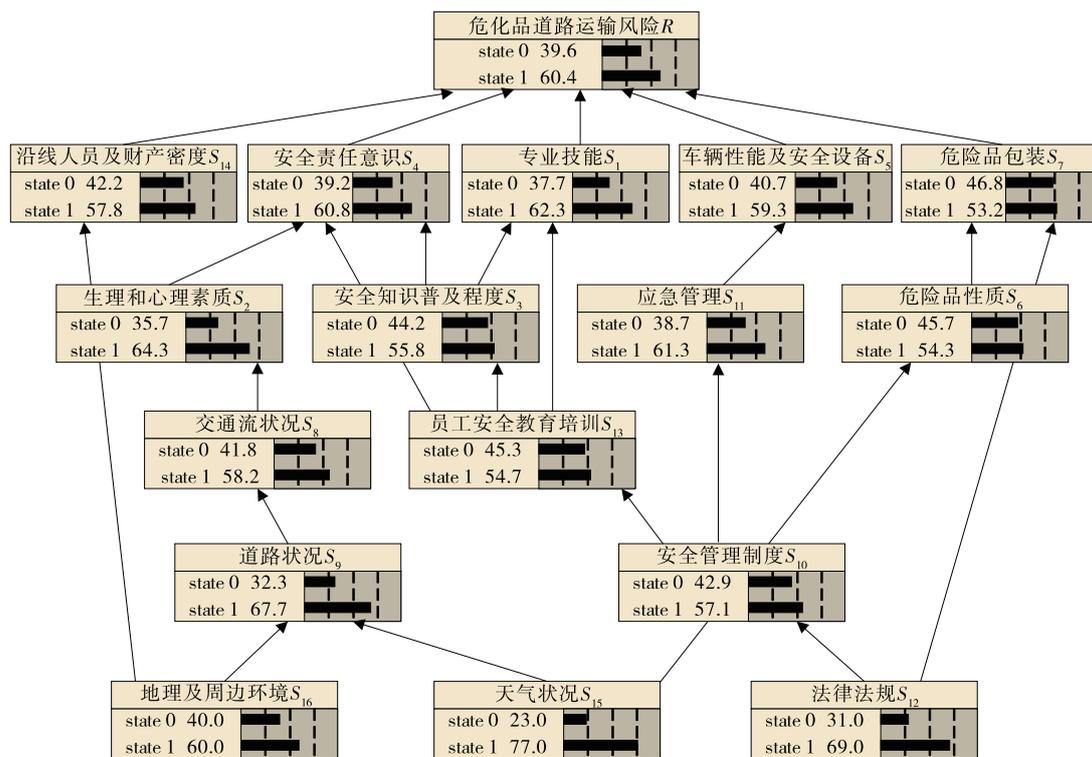


图 8 危险品道路运输的风险发生概率

由图 8 可知:此次危险品道路运输的风险发生概率为 60.4%,根据表 2,运输风险等级为较危险。运输过程中人员因素和管理因素非常重要,是导致危险化学品道路运输事故的关键因素,且人为因素的风险源头是管理和环境因素。此次危险品运输当

天为雨天,且沿途经过隧道,这些环境因素都会导致驾驶员生理及心理发生变化,其中隧道容易让驾驶员视线模糊,雨天容易使驾驶员操作失误而导致车辆发生侧翻等事故。而驾驶员的生理、心理变化程度取决于其对专业技能的掌握程度,包括是否接受

过专业的安全知识教育培训、是否熟悉法律法规及安全管理制度等。

5 结语

本文分析了危险品道路运输中五类风险影响因素,构建了危险品道路运输风险因素层次结构模型,并基于因果关系将层次结构模型转化为贝叶斯网络模型,然后采用贝叶斯网络理论与模糊理论相融合的方法得到风险概率等级。但评价模型只选取了16个宏观的关键风险指标,不够全面;DEMATEL-ISM层次结构模型中的打分值由专家根据经验给出,存在主观性。这些将是今后的研究方向。

参考文献:

[1] TRÉPANIÉ M, LEROUX M H, DE MARCELLIS-WARIN N. Cross-analysis of hazmat road accidents using multiple databases[J]. Accident Analysis & Prevention, 2009, 41(6): 1192-1198.

[2] MA C X, ZHOU J B, YANG D. Causation analysis of hazardous material road transportation accidents based on the ordered logit regression model[J]. International Journal of Environmental Research and Public Health, 2020, 17(4): 1259-1283.

[3] 朱俊. 危险化学品物流运输的泄漏事故预防[J]. 化学工业, 2012, 30(4): 8-12+16.

[4] 陈晓勇, 施式亮, 任竞舟, 等. 2013—2014年我国道路危险化学品运输事故统计分析及其对策[J]. 湖南科技大学学报(自然科学版), 2017, 32(3): 91-95.

[5] 罗丹, 廖婵娟, 余欣柔. 2013—2017年我国危险化学品运输事故统计分析及其预防对策[J]. 中国公共安全(学术版), 2019(1): 28-32.

[6] CONCA A, RIDELLA C, SAPORI E. A risk assessment for road transportation of dangerous goods: A routing solution[J]. Transportation Research Procedia, 2016, 14: 2890-2899.

(上接第26页)

数均通过回归分析得出,虽然增加了计算准确度,但计算过程较复杂。为此, HCM 开发了配套软件 HCS(Highway Capacity Software),大大减轻了计算工作量,值得学习借鉴。

参考文献:

[1] WASHBURN S, WATSON D, BIAN Z, et al. Improved

[7] LOWER M, MAGOTT J, SKORUPSKI J. Analysis of air traffic incidents using event trees with fuzzy probabilities[J]. Fuzzy Sets and Systems, 2016, 293: 50-79.

[8] CORDEIRO F G, BEZERRA B S, PEIXOTO A S P, et al. Methodological aspects for modeling the environmental risk of transporting hazardous materials by road[J]. Transportation Research Part D: Transport and Environment, 2016, 44: 105-121.

[9] 马晓丽, 刘禹杰, 陆键. 城市道路危险货物运输风险评估[J]. 中国安全科学学报, 2018, 28(5): 179-184.

[10] 黄文成, 帅斌, 孙妍, 等. 熵-TOPSIS-耦合协调法评价铁路危险品运输系统风险[J]. 中国安全科学学报, 2018, 28(2): 134-138.

[11] 王铁铭. 危险化学品道路运输安全管理现状及发展趋势研究[J]. 科学与信息化, 2019(25): 164+170.

[12] 李长龙, 刘伟, 周邵萍. 基于 Mamdani 模糊推理的槽罐车运输安全评价[J]. 华东理工大学学报(自然科学版), 2017, 43(4): 591-596.

[13] 张宇, 吕淑然, 王婉青. 基于 AHP 和灰色聚类的危化品道路运输安全评价[J]. 安全, 2020, 41(3): 54-60.

[14] 李耀南, 马国忠, 张东峰. 基于模糊层次分析法的危险品物流企业安全评价[J]. 公路与汽运, 2014(2): 98-102.

[15] 周德群, 章玲. 集成 DEMATEL/ISM 的复杂系统层次划分研究[J]. 管理科学学报, 2008, 11(2): 20-26.

[16] 陈露. 基于贝叶斯网络的桥梁挂篮施工安全风险动态评估研究[D]. 武汉: 华中科技大学, 2019.

[17] 杜建国, 王冰洁, 黄后庆. 基于拓展 OWA 算子的商业银行服务质量评价[J]. 统计与决策, 2011(22): 141-143.

[18] 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.

收稿日期: 2023-03-28

analysis of two-lane highway capacity and operational performance[M]. The National Academies Press, 2018.

[2] National Academies of Sciences, Engineering, and Medicine. Applications guide, highway capacity manual 7th Edition: A guide for multimodal mobility analysis[S]. The National Academies Press, 2022.

收稿日期: 2022-12-21