

基于模糊多态贝叶斯网络的地铁运营风险评估方法*

曾明华¹ 王 旭² 王转敏³ 王 敏⁴

(1. 华东交通大学交通运输与物流学院, 330013, 南昌; 2. 中国铁路兰州局集团有限公司兰州车务段, 730050, 兰州;
3. 兰州市轨道交通有限公司, 730030, 兰州; 4. 合肥城市轨道交通有限公司, 230001, 合肥//第一作者, 副教授)

摘 要 从安全管理、人、设备设施和环境等 4 个方面确定 18 个地铁运营安全影响因素。采用解释结构模型分析影响因素之间的关系, 构建结构模型, 并将其转换为多态贝叶斯网络结构。同时, 引入模糊集理论, 将专家给出的自然语言变量转化为概率信息, 输入到多态贝叶斯网络并进行风险评估。案例研究说明, 该风险评估方法应用于地铁运营安全分析中切实可行。

关键词 地铁运营; 风险评估; 模糊集理论; 解释结构模型; 贝叶斯网络

中图分类号 F530.7

DOI: 10.16037/j.1007-869x.2019.05.006

Risk Assessment of Subway Operation Safety Based on Fuzzy Polymorphic Bayesian Network

ZENG Minghua, WANG Xu, WANG Zhuanmin, WANG Min

Abstract Eighteen factors that influence subway operation safety are determined from four aspects, including management, human, equipment and environment. An interpretative structural model (ISM) is used to analyze the relationships between influencing factors and to form a structural model, which is then converted to the polymorphic Bayesian network structure. At the same time, fuzzy set theory is introduced to translate the natural language variables given by experts into probabilistic information and then input them into the polymorphic Bayesian network for risk assessment. Case studies show that the application of this risk assessment in the analysis of metro operation safety is feasible.

Key words subway operation; risk assessment; fuzzy set theory; ISM; Bayesian network

First-author's address School of Transportation and Logistics, East China Jiaotong University, 330013, Nanchang, China

地铁运行环境特殊, 系统设备复杂, 如果发生事故, 将会造成巨大的影响。通过科学有效的方法分析地铁运营安全状况, 预防及控制运营安全事故, 对保障地铁运营安全具有重要意义。

许多学者从不同的方面对我国地铁运营安全风险评估做了研究。如文献[1]对我国地铁运营安全评价现状做了系统性的分析, 并对今后的发展趋势做了展望。然而, 这些研究主要针对特定的安全事故或局部安全隐患, 如火灾事故^[2]、人为因素隐患^[3]等, 对地铁系统运营安全的研究较少。绝大多数对地铁系统运营安全的研究是将多种方法结合使用, 如层次分析法与集对分析原理结合的地铁运营安全评价^[4], 层次分析法与熵值法组合赋权的地铁安全评价^[5], 网络层次分析法与逼近理想排序法结合的地铁运营安全研究^[6]等。这些组合方法使评价结果更加客观, 但是适用性一般。多级可拓评估模型^[7]以各指标为出发点, 确定各指标风险等级。该方法适用性较好, 但是处理模糊性问题还有待提高。其他应用较少的方法有解释结构模型 (ISM)^[8]、数理统计方法等。ISM 能较好地处理因素间的关联性, 但定量分析较少。数理统计方法^[9]能够定量地分析和表达系统的安全性, 但需建立完善的历史数据库, 否则将会影响结果的正确性。

考虑到地铁运营安全子系统众多, 仅对局部风险因素进行分析, 不能完全反映地铁运营安全状况, 而大多数地铁运营安全的评价研究, 又很少同时考虑影响因素间的关联性与因素的多态不确定性。为此, 引入能较好地处理因素之间关联关系的 ISM 和善于表达多态不确定性事件的贝叶斯网络, 并综合利用 ISM 和贝叶斯网络的特征, 构建基于 ISM 和模糊多态贝叶斯网络的地铁运营安全风险评估方法。首先使用 ISM 分析影响因素间的关联

* 国家自然科学基金项目(51468020); 江西省自然科学基金项目(20142BAB207016, 2018BAB206044)

关系,建立结构模型并转换为模糊多态贝叶斯网络结构。然后利用模糊多态贝叶斯网络进行学习与推理计算,实现地铁运营安全风险预测。该方法既考虑了影响因素间的关联性和因素的多态不确定性,又实现了定性分析和定量分析,使计算分析结果更加科学客观。

1 地铁运营安全影响因素分析

影响地铁系统运营安全的因素众多,其中可能导致运营安全事故的因素是最关键的。为选取更加具有科学性、系统性、可操作性和独立性的影响因素,对国内外地铁运营安全事故进行统计分析,并参考《地铁运营安全评价标准》和相关文献^[10],将武汉地铁运营安全影响因素 T 分为安全管理因素 T_1 、运营组织及人员因素 T_2 、设备设施因素 T_3 和环境因素 T_4 等 4 大类,并细分为 18 个影响因素,具体如下:

1) T_1 是对一切安全生产活动的管理与控制,是保障地铁运营安全最基本、最主要的因素,主要包括安全管理机构 S_1 、应急救援体系 S_2 、安全培训教育 S_3 、生产投入与管理目标 S_4 等因素。

2) T_2 是保障地铁运营安全的关键因素,主要包括客运组织及人员 S_5 、行车组织及人员 S_6 、设备维护及操作人员 S_7 、外部人员 S_8 等因素。

3) T_3 为地铁运营安全提供最基本的硬件要求,是保证地铁运营安全的必要条件。依据武汉地铁设备维护部门设置,将 T_3 划分为车辆系统 S_9 、供电系统 S_{10} 、线路及轨道系统 S_{11} 、通信信号系统 S_{12} 、自动售检票系统 S_{13} 、土建系统 S_{14} 、电梯及屏蔽门 S_{15} 、机电自动化 S_{16} 等因素。

4) T_4 主要包括内部环境因素 S_{17} 和外部环境因素 S_{18} 。 S_{17} 会影响设备的正常使用、人员的心理变化以及员工对企业的认同感等。 S_{18} 可能会对地铁运营安全造成重大灾害,常见的有恐怖袭击、地震、暴雨等。

2 原理与算法

主要介绍 ISM、贝叶斯网络和模糊集理论,并重点讲述如何将上述方法相结合,构建基于 ISM 的模糊多态贝叶斯网络风险评估方法。

2.1 原理介绍

ISM 是美国 Warfield 教授在 1973 年开发的一种系统分析方法。ISM 把结构复杂、关系模糊的系

统分解为若干子系统,应用实践经验和领域知识,以及计算机的计算,最终构造出 1 个多级递阶关系的结构模型。它特别适用于要素众多、关系复杂而结构模糊的系统分析^[11]。

贝叶斯网络又称信度网络,是美国 Pearl^[12] 教授于 1986 年提出的。它是一种概率图模型,是在 Bayes 公式的基础上扩展出的一种不确定性知识表达和推理模型。贝叶斯网络是由网络节点 V 、表示节点间因果关系的有向边 E ,以及表示节点间依赖关系的条件概率分布 P 组成的有向非循环网络,表示为 $B = \langle G, P \rangle$ 。其中, $G = \langle V, E \rangle$ 为有向无环图。

贝叶斯网络具有以下优点:①是图论与概率论结合发展形成的图形化网络,所有网络节点均可见;②在部分数据缺失的情况下也可进行网络学习和推理计算;③具有很强的学习能力,可根据新输入的数据更新网络参数;④可以双向推理计算。

贝叶斯网络参数在无法获得精确概率值的情况下,可结合模糊集理论^[13] 构建模糊贝叶斯网络,从而较好地解决了网络节点的模糊性,而且模糊集合中各元素不只用 0 和 1 表达,还可以取 0~1 之间的任何实数,使表达更加丰富准确。选择常用的三角模糊数来表达网络参数的概率值,其中三角模糊数表示为 $\tilde{A} = (a, b, c)$,其隶属度函数为:

$$\tilde{A}(x) = \begin{cases} 0 & (x < a \text{ 或 } x > c) \\ \frac{x-a}{b-a} & (a \leq x \leq b) \\ \frac{c-x}{c-b} & (b < x \leq c) \end{cases} \quad (1)$$

三角模糊数 $\tilde{A}_1 = (a_1, b_1, c_1)$ 与 $\tilde{A}_2 = (a_2, b_2, c_2)$ 的“ \oplus ”运算表示为:

$$\tilde{A}_1 \oplus \tilde{A}_2 = (a_1 + a_2, b_1 + b_2, c_1 + c_2) \quad (2)$$

为方便领域专家给出客观的评判结果,引入自然语言变量:非常高、高、偏高、中等、偏低、低和非常低^[14]。将专家给出的评判结果转化为三角模糊概率。每个自然语言变量与三角模糊数的对应关系如表 1 所示。

2.2 分析步骤

首先,使用 ISM 分析影响因素之间的相互关系,构建结构模型,进而转换为多态贝叶斯网络结构。其次,进行专家评判,将专家给出的自然语言变量转化为三角模糊数并进行计算,获得先验概率和条件概率分布。再次,由模糊多态贝叶斯网络计

表 1 自然语言变量与对应的三角模糊数^[15]

自然语言变量	三角模糊数
非常低 (VL)	(0,0,0.1)
低 (L)	(0,0.1,0.3)
偏低 (FL)	(0.1,0.3,0.5)
中等 (M)	(0.3,0.5,0.7)
偏高 (FH)	(0.5,0.7,0.9)
高 (H)	(0.7,0.9,1.0)
非常高 (VH)	(0.9,1.0,1.0)

算,获得节点概率值。最后,利用最大隶属度准则确定各影响因素的风险概率等级。基于 ISM 的模糊多态贝叶斯网络风险评估方法具体分析步骤如下:

第 1 步:确定系统因素 S_1, S_2, \dots, S_{18} , 以及系统目标因素 T 。

第 2 步:确定因素关系,建立邻接矩阵 $X = [x_{ij}]_{18 \times 18}$, 其中

$$x_{ij} = \begin{cases} 1 & \text{表示 } S_i \text{ 和 } S_j \text{ 有关系} \\ 0 & \text{表示 } S_i \text{ 和 } S_j \text{ 没有关系} \end{cases} \quad (3)$$

第 3 步:邻接矩阵 X 通过布尔运算求出可达矩阵 $D = [m_{ij}]_{18 \times 18}$, 其中

$$m_{ij} = \begin{cases} 1 & \text{表示 } S_i \text{ 和 } S_j \text{ 有关系} \\ 0 & \text{表示 } S_i \text{ 和 } S_j \text{ 没有关系} \end{cases} \quad (4)$$

布尔运算式为:

$$D = (X + I)^{r+1} = (X + I)^r \neq (X + I)^{r-1} \neq \dots \neq (X + I) \quad (5)$$

其中, $r=1, 2, 3, \dots, I$ 是与 X 同阶次的单位矩阵。

第 4 步:将可达矩阵 $D = [m_{ij}]_{18 \times 18}$ 分解为可达集、前因集和最高集。

(1)可达集 $R(S_i)$:因素 S_i 可以到达其他因素的集合。即可达矩阵第 S_i 行中所有矩阵元素为 1 的列对应的要素集合。

$$R(S_i) = \{S_j \in N \mid m_{ij} = 1\} \quad (6)$$

其中, N 为因素集合。

(2)前因集 $Q(S_i)$:可以到达因素 S_i 的因素组成的集合。即可达矩阵第 S_i 列中所有矩阵元素为 1 的行对应的要素集合。

$$Q(S_i) = \{S_j \in N \mid m_{ij} = 1\} \quad (7)$$

(3)最高集 $T(S_i)$:可达集与前因集的交集仍是可达集的集合。

$$T(S_i) = \{S_j \in N \mid R(S_i) \cap Q(S_i) = R(S_i)\} \quad (8)$$

第 5 步:级间划分,建立结构模型。级间划分以可达矩阵为准则,利用最高集的定义确定本层级因

素,并删除可达矩阵中相应元素的行和列。以此类推,确定不同层级中的因素,用 L_n 表示。根据级间划分和可达矩阵关系,确定各层级因素间的关系,构建结构模型。

第 6 步:将结构模型转换为模糊多态贝叶斯网络结构。

(1)确定影响因素状态:假设各影响因素都具有 3 种风险等级状态,分别为 $j=0$ 可忽略, $j=1$ 可接受, $j=2$ 不可接受。

(2)贝叶斯网络节点转换:把结构模型中对应的影响因素转换为模糊多态贝叶斯网络节点集 V 。

(3)贝叶斯网络有向边转换:将结构模型中因素间的因果关系转换为模糊多态贝叶斯网络有向边 E 。

完成所有转换后,得到模糊多态贝叶斯网络结构。

第 7 步:计算模糊多态贝叶斯网络节点的先验概率和条件概率分布。通过先验知识和领域专家的帮助,使用模糊集理论,获得根节点(没有父节点)的先验概率和反映节点间依赖关系的概率分布表。

(1)自然语言变量转化为三角模糊概率。为获得节点概率信息,邀请多位专家分别对各节点不同风险等级状态给出评判意见,第 k 位专家对节点 S_i 处于风险等级状态 j 的评判意见通过三角模糊数转化,得到三角模糊概率为 $P_{ij,k} = (a_{ij,k}, b_{ij,k}, c_{ij,k})$ 。

(2)三角模糊概率均值化。为得到相对合理的模糊概率值,将各位专家给出的评判结果进行算术平均,得到模糊均值概率。表示为:

$$P_{ij,FA} = \frac{P_{ij,1} \oplus \dots \oplus P_{ij,k} \oplus \dots \oplus P_{ij,n}}{n} = (a_{ij}, b_{ij}, c_{ij}) \quad (9)$$

(3)解模糊。采用面积均值法将模糊均值概率转化为最能代表该模糊集合的概率值。表示为:

$$P_{ij,A} = \frac{a_{ij} + 2b_{ij} + c_{ij}}{4} \quad (10)$$

(4)归一化。将各节点在不同风险等级状态下的概率值归一化,使概率值满足和为 1,得到所需的先验概率和条件概率分布。表示为:

$$P_{ij} = \frac{P_{ij,A}}{\sum_{j=0}^2 P_{ij,A}} \quad (11)$$

第 8 步:模糊多态贝叶斯网络的学习和推理。

根据求得的先验概率和条件概率分布,利用模糊多态贝叶斯网络进行学习和推理计算:①通过贝叶斯网络学习计算,获得各节点不同风险等级状态下的概率值;②正向因果推理,根据已知根节点不同风险等级状态下的概率值,推导目标节点的概率信息;③反向诊断推理,根据已知目标节点不同风险等级状态下的概率值,推导其他节点的概率信息。

第9步:风险评估。依据最大隶属度准则^[16],在不同风险等级状态概率分布中,选取概率值最大对应的等级作为各因素风险概率等级。结合模糊多态贝叶斯网络反向诊断推理能力,进一步找出目标因素 T 发生事故时关键的影响因素。

3 案例分析

采用建立的风险评估方法对武汉地铁运营安全进行分析。利用 MATLAB 软件和 Netica 软件进行计算,验证该风险评估方法的正确性和科学性。

第1步:确定影响因素,见第1节所确定的影响因素。

第2步:经深入分析与实地调研,根据式(3)建立邻接矩阵 X 。

第3步:根据式(5)对邻接矩阵 X 进行布尔运算。经计算,当 $r=5$ 时, $D = (X + I)^6 = (X + I)^5 \neq (X + I)^4 \neq \dots \neq (X + I)$, 求出可达矩阵 $D = (X + I)^5$ 。其中:

$$X = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 0 & 1 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

$$D = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 & 0 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 0 & 1 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 0 & 1 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 0 & 1 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 0 & 1 & 1 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 0 & 1 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 0 & 0 & 1 & 1 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 0 & 0 & 1 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 0 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 0 & 1 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 0 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 0 & 1 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 0 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 0 & 1 & 1 & 1 & 0 & 1 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

第4步:由式(6)~(8)对可达矩阵 D 进行级间分解,确定可达集 $R(S_i)$ 、前因集 $Q(S_i)$ 和最高级 $T(S_i)$ 。

第5步:根据式(8)最高集定义确定1~6级影响因素集合,分别为 $L_1 = [S_5, S_6, S_{16}]$, $L_2 = [S_8, S_9, S_{12}]$, $L_3 = [S_{10}, S_{11}, S_{13}, S_{15}]$, $L_4 = [S_7, S_{14}]$, $L_5 = [S_2, S_3, S_{17}, S_{18}]$, $L_6 = [S_1, S_4]$ 。根据各层级影响因素和可达矩阵关系,建立武汉地铁运营安全结构模型(如图1所示)。该模型是具有7层的多级递阶结构,目标层为武汉地铁运营安全影响因素 T 。

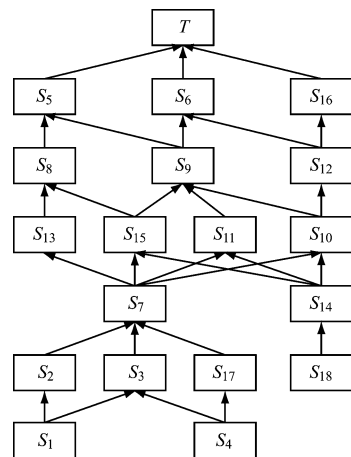


图1 武汉地铁运营安全结构模型

第6步:将武汉地铁运营安全结构模型转换为模糊多态贝叶斯网络结构,具体转换步骤见第2.2

节第 6 步。

第 7 步:邀请 4 位专家分别对武汉地铁运营安全的模糊多态贝叶斯网络根节点 S_1 、 S_4 、 S_{18} 的每种风险等级状态给出评判意见^[2]。专家意见如表 2 所示。

表 2 根节点各状态专家评判意见					
根节点	风险等级状态	专家 1	专家 2	专家 3	专家 4
S_1	0	M	M	M	M
	1	VH	H	VH	VH
	2	VL	VL	L	VL
S_4	0	M	FL	FH	FL
	1	VH	H	VH	H
	2	L	L	VL	VL
S_{18}	0	M	FH	M	FL
	1	VH	H	H	VH
	2	VL	L	L	VL

设各位专家权重值相同,由表 2 及式(9)~(11)计算出根节点的先验概率 $P(S_1) = (0.310, 0.655, 0.035)$, $P(S_4) = (0.310, 0.638, 0.052)$, $P(S_{18}) = (0.333, 0.617, 0.050)$ 。同理,可计算出其他节点的条件概率分布。

第 8 步:根据计算获得的先验概率和条件概率分布,利用 Netica 软件对模糊多态贝叶斯网络进行参数学习,得到各节点在不同风险等级状态下的概率值,以及反向推理计算目标节点 T 在风险等级状态为不可接受时其他节点的概率信息,如表 3 所示。

第 9 步:依据最大隶属度准则确定各因素的风险概率等级。由表 3 可知,武汉地铁各影响因素的风险概率等级均为可接受。当目标因素 T 的风险概率等级处于不可接受时,因素 S_6 、 S_9 和 S_{12} 的概率值发生较大变化,风险概率等级由可接受变为不可接受。

通过 ISM 得出的武汉地铁运营安全结构模型比较全面客观地反映出武汉地铁运营安全各影响因素之间的关联关系,将结构模型转为模糊多态贝叶斯网络结构,同样保留了影响因素间的关联关系,使贝叶斯网络结构更加客观。

由于篇幅所限,仅对反向推理计算进行分析。当目标节点 T 的风险概率等级为不可接受时, S_6 、 S_9 和 S_{12} 的风险概率等级由可接受变为不可接受,说明因素 S_6 、 S_9 、 S_{12} 对武汉地铁运营安全具有重要的影响,应加强对这些因素的管理,保障武汉地铁运营安全。同时,因素 S_{18} 和 $T_1(S_1 \sim S_4)$ 概率变化不明

表 3 模糊多态贝叶斯网络初始概率及反向推理概率						
影响因素	初始概率			反向推理概率		
	0	1	2	0	1	2
1	0.310	0.655	0.035	0.303	0.655	0.042
2	0.246	0.660	0.094	0.039	0.651	0.110
3	0.312	0.597	0.091	0.295	0.585	0.120
4	0.310	0.638	0.052	0.301	0.636	0.063
5	0.222	0.607	0.171	0.126	0.511	0.363
6	0.208	0.536	0.256	0.062	0.216	0.722
7	0.242	0.643	0.115	0.199	0.601	0.200
8	0.182	0.686	0.132	0.165	0.661	0.174
9	0.146	0.620	0.234	0.071	0.396	0.533
10	0.212	0.651	0.137	0.153	0.565	0.292
11	0.200	0.667	0.133	0.161	0.608	0.231
12	0.187	0.598	0.215	0.122	0.432	0.446
13	0.202	0.654	0.144	0.183	0.607	0.210
14	0.227	0.651	0.122	0.197	0.643	0.160
15	0.147	0.738	0.115	0.126	0.713	0.161
16	0.157	0.641	0.202	0.101	0.494	0.405
17	0.325	0.559	0.116	0.308	0.558	0.134
18	0.333	0.617	0.050	0.318	0.621	0.061
19	0.144	0.663	0.193	0	0	1.000

注:序号 19 代表目标因素 T ,即武汉地铁运营安全状况

显,说明目前武汉地铁运营安全管理状况良好。

此外,对武汉地铁 2016 年度 5 min 以上运营安全故障进行统计分析,结果如下:全年未发生人员伤亡及重大安全事故;发生 5 min 以上运营延误事故共 28 起,运营准点率达 99.95%;有效控制了雨水倒灌对地铁运营造成的影响。这说明武汉地铁运营安全管理状态良好,武汉地铁运营安全风险概率等级为可接受。

4 结语

安全是地铁运营企业的生命线,是实现企业经济效益和社会效益的保证。本文综合利用 ISM 和模糊多态贝叶斯网络对地铁运营安全进行风险评估。该风险评估方法在考虑地铁运营安全各影响因素相互关系的基础上,采用 ISM 建立模糊多态贝叶斯网络结构,并利用模糊多态贝叶斯网络进行风险概率计算,既降低了构建多态贝叶斯网络结构的复杂度,扩充了网络节点的状态,又充分利用模糊多态贝叶斯网络进行概率推理计算,使计算结果更加科学合理。同时,模糊多态贝叶斯网络能较好地处理多态不确定性问题,从而扩展了贝叶斯网络的使用范围。

通过实例分析得出:武汉地铁运营安全风险概率等级为可接受;当目标因素风险概率等级为不可接受状态时,关键性的影响因素为行车组织及人员

因素、车辆系统因素和通信信号系统因素。计算分析结果与实际情况相吻合,验证了该风险评估方法的正确性与实用性。预测和诊断结果可为地铁运营安全管理决策提供支持,有助于提高地铁运营安全,实现安全生产。该风险评估方法可推广至地铁运营安全任意子系统的风险分析及特定安全事故研究。

经典贝叶斯网络模型在节点的概率密度犹豫度较大时会得到相矛盾的结果,而直觉模糊理论在考虑节点确定性与不确定性信息的基础上增加犹豫度,能更细腻地描述节点属性。因此,将进一步结合直觉模糊理论和贝叶斯网络模型,建立更加准确可信的地铁运营安全评估方法,并开发智能监控系统,通过实时收集指标数据,实现对地铁运营安全的实时监控和预警。

参考文献

- [1] 孟亚东,贾崇强,韩宝明,等.城市轨道交通运营安全评价的现状与展望[J].都市快轨交通,2014,27(4):17.
- [2] 陆莹,李启明,周志鹏.基于模糊贝叶斯网络的地铁运营安全风险预测[J].东南大学学报(自然科学版),2010,40(5):1110.
- [3] 袁朋伟,宋守信,董晓庆.地铁检修人员安全行为与风险知觉、安全态度的关系研究[J].中国安全科学学报,2014,24(5):144.
- [4] 王娟,李丽琴,赵国敏,等.SPA方法在地铁运营基础安全现状评价中的应用[J].都市快轨交通,2014,27(3):1.
- [5] 王艳辉,黄雅坤,李曼.基于组合赋权方法的城轨线路运营

安全评价[J].同济大学学报(自然科学版),2013,41(8):1243.

- [6] 陈露,马骊.城市轨道交通网络运营安全问题的复杂多属性决策方法[J].中国安全科学学报,2013,23(4):146.
- [7] 潘科,王洪德,石剑云.多级可拓评价方法在地铁运营安全评价中的应用[J].铁道学报,2011,33(5):14.
- [8] 姜林林,左忠义.基于ISM方法的城市轨道交通系统运营安全分析[J].中国安全科学学报,2013,23(6):172.
- [9] 曾笑雨,刘苏,张奇.基于事故统计分析的城市轨道交通运营安全和可靠性研究[J].安全与环境工程,2012,19(1):90.
- [10] 徐田坤.城市轨道交通网络化运营安全风险理论评估理论与方法研究[D].北京:北京交通大学,2012.
- [11] 李乃文.基于ISM和AHP法的矿工习惯性违章行为影响因素研究[J].中国安全科学学报,2012,22(8):22.
- [12] PEARL J. Fusion, propagation, and structuring in belief networks[J]. Artificial Intelligence, 1986, 29(3): 241.
- [13] 朱云斌,黄晓明,常青.模糊故障树分析方法在机场环境安全中的应用[J].国防科技大学学报,2009,31(6):126.
- [14] WICKENS C D. Engineering psychology and human performance [M]. 2nd ed. New York: Harper Collins Publishers Inc, 1992:211.
- [15] 马德仲,周真,于晓洋,等.基于模糊概率的多状态贝叶斯网络可靠性分析[J].系统工程与电子技术,2012,34(12):2607.
- [16] WANG J, GUO L J, LI Y Q. Risk analysis of a subway tunnel shield based on a fuzzy synthetic approach [C]//International Conference on Economic, Education and Management. Hong Kong: Hong Kong Engineering Technology Press, 2011: 662.

(收稿日期:2017-09-08)

中国城市轨道交通创新创业大赛2019年赛季华东赛区上海站宣布启动

本刊讯 4月23日,中国城市轨道交通创新创业大赛2019年赛季华东赛区上海站宣布启动。在随后举办的新闻发布会上,来自同济大学、上海申通地铁集团有限公司、中国土木工程学会的领导们先后致辞,同济大学徐瑞华教授代表华东赛区发布了10个大赛命题。

本次大赛以“绿色建造,智慧运维”为主题,以城市轨道交通为载体,聚焦城市轨道交通“投资、建设、运营”全生命周期过程中的关键技术,继续面向全国范围内城市轨道交通及相关行业内的高校、企业征集优质创新项目。按组委会计划,4月17日到25日,大赛陆续在成都、南京、上海、北京四地举行启动仪式。启动仪式有上届获奖团队现身说法,也有业内的院士及专家教授参加的主题高层论谈;同时业主、高校师生及创新专家等参与的各类人才间的研讨会及交流互动活动也将展开,更有业主、高校团队及赞助商进行创新成果展示。

为促进“产、学、研、用”更好对接,本次大赛由城市轨道交通业主单位根据工作中的问题提出需求并发布命题。