

中文引用格式: 闫林君, 刘晶晶, 王亚妮, 等. 基于故障树和模糊 BN 的地铁工程技术接口施工风险评估[J]. 中国安全科学学报, 2025, 35(11): 24-31.

英文引用格式: YAN Linjun, LIU Jingjing, WANG Yani, et al. Construction risk assessment of metro engineering technical interface based on fault tree and fuzzy BN[J]. China Safety Science Journal, 2025, 35(11): 24-31.

基于故障树和模糊 BN 的地铁工程技术接口 施工风险评估*

闫林君^{1,2}副教授, 刘晶晶¹, 王亚妮¹, 陈慧鑫¹

(1 兰州交通大学 土木工程学院, 甘肃 兰州 730070;

2 甘肃交通职业技术学院, 甘肃 兰州 730207)

中图分类号: X948

文献标志码: A

DOI: 10.16265/j.cnki.issn1003-3033.2025.11.0964

【摘要】 为量化城市地铁工程技术接口施工风险并甄别关键风险因素, 提出一种基于故障树和模糊贝叶斯网络(BN)的地铁工程技术接口施工风险评估方法。首先, 从人员、材料设备、技术、环境、管理 5 个方面识别出地铁工程技术接口施工风险因素; 然后, 运用故障树模型梳理施工风险因素之间的逻辑关系, 构建地铁工程技术接口施工风险 BN 模型, 并基于模糊集理论和专家经验评估各施工风险因素发生概率; 最后, 以北京地铁 17 号线北段工程为例, 进行施工风险仿真评估, 验证文中所提风险评估方法的科学性和有效性。研究表明: 在地铁工程技术接口施工阶段, 风险发生的概率为 65%, 处于中风险等级, 且与工程技术接口实际施工的情况相匹配; 通过逆向诊断推理, 可快速识别出影响较大的风险因素组合, 提高技术接口施工风险事件的诊断效率; 通过敏感性分析得出, 技术接口施工人员安全意识薄弱、接口施工管理制度的落实情况差是导致工程技术接口施工风险发生的关键致险因素。通过构建故障树模型, 清晰梳理了风险因素间的逻辑关系, 再转化为模糊 BN 模型, 实现了对风险概率的计算与评估。

【关键词】 故障树; 模糊贝叶斯网络(BN); 地铁工程技术接口; 施工风险; 风险因素

Construction risk assessment of metro engineering technical interface based on fault tree and fuzzy BN

YAN Linjun^{1,2}, LIU Jingjing¹, WANG Yani¹, CHEN Huixin¹

(1 School of Civil Engineering, Lanzhou jiaotong University, Lanzhou Gansu 730070, China;

2 Gansu Vocational and Technical College of Communications, Lanzhou Gansu 730207, China)

Abstract: In order to quantify the construction risk of urban subway engineering technology interface and screen the key risk factors, a construction risk assessment method of subway engineering technology interface based on fault tree and fuzzy BN was proposed. Firstly, the construction risk factors of metro engineering technology interface were identified from five aspects: personnel, materials and equipment, technology, environment, and management. Secondly, the fault tree model was used to sort out the logical relationship between the construction risk factors, construct a Bayesian network model of the construction risk of metro engineering technology interface, and evaluate the probability of the occurrence of each construction risk factor based on the theory of fuzzy sets and the experience of the experts. Lastly, BN was

used to assess the construction risk of Beijing Metro Line 17, which was the largest and most important construction risk factor in China. Finally, BN was used to simulate and evaluate the construction risk of the northern section of Beijing Metro Line 17 as an example. The results show that the probability of risk occurrence in the construction phase of subway engineering technology interface is 65%, which is in the medium risk status level and matches the actual construction of the engineering technology interface. Through reverse diagnostic reasoning, the combination of risk factors with greater impact can be quickly identified, and the efficiency of the diagnosis of the construction risk events of the technical interface can be improved. Meanwhile, through the sensitivity analysis, it can be seen that the weak safety awareness of the technical interface construction personnel and the implementation of the interface construction management system are the key risk factors leading to the occurrence of engineering and technical interface construction risks. The assessment method can provide theoretical support for the prevention and management of metro engineering technology interface construction risk. By constructing a fault tree model to clearly sort out the logical relationships between risk factors, and then converting it into a fuzzy BN model, the accurate calculation and evaluation of risk probabilities are realized. This method has been verified in practical engineering cases, enabling the precise identification of key risk factors and providing a clear direction for risk management and control.

Keywords: fault tree; fuzzy Bayesian network (BN); metro engineering technology interface; construction risk assessment; risk factor

0 引言

地铁工程是一项庞大且施工周期长、施工工艺复杂、技术要求高、参建单位众多、涉及专业广泛、需多方配合推进的复杂系统工程^[1]。城市地铁在施工阶段,由于涉及众多参建单位且各专业交叉施工频繁,在时间、空间、物理、功能上形成诸多技术接口且接口类型复杂,使得整个地铁施工过程呈现诸多不确定性,进而产生资源冲突、成本增加、施工进度延迟等问题,影响地铁工程建设的顺利实施。因此,为保证地铁项目建设的施工进度,有必要评估城市地铁工程技术接口施工风险。

近年来,国内外学者针对接口管理作了大量研究。AL-HAMMAD 等^[2-4]从项目各参与方之间组织接口的角度出发,识别出 19 类接口问题并开展了针对性管理工作;SAMIN 等^[5]分析了在施工过程管理中产生的接口问题,并构建了项目接口管理方法;NILSEN 等^[6]系统分析了大型工程项目接口管理问题,发现接口管理不当会导致项目成本增加,并验证了接口管理的必要性;据倩茜等^[7]系统分析了城市轨道交通工程的接口节点,建立了基于灰色关联投影评价的接口节点重要度模型,进而识别出关键技术接口;任银龙等^[8]为提高技术接口管理水平,从技术、责任、空间、时间 4 方面,运用协同熵理论评估了技术接口信息交换水平;霍雨雨等^[9]构建了工序资源冲突影响指标体系,并运用决策实验室分析法-解释结构模

型(Decision-Making Trial and Evaluation Laboratory-Interpretative Structural Modeling, DEMATEL-ISM)识别出关键影响因素,为技术接口工序资源冲突防控提供理论支撑。现有接口管理研究主要侧重于接口管理方法、接口质量及工序资源冲突影响方面,而缺乏对工程技术接口施工阶段中不确定风险的研究,特别是鲜有涉及地铁工程技术接口施工阶段总体风险状态的评估。

鉴于此,笔者拟在识别地铁工程技术接口施工风险因素基础上,采用故障树梳理风险因素间的因果逻辑关系,构建贝叶斯网络(Bayesian Network, BN)风险评估模型,并基于模糊集理论和专家经验评估各施工风险因素发生概率,量化评估城市地铁技术接口施工过程中的风险因素,以期地铁工程技术接口施工风险预防和管理提供理论依据。

1 施工风险评估方法

1.1 故障树

故障树分析法是运用事件符号、逻辑门符号以及转移符号来系统描述各个风险事件间的逻辑关系^[10],故障树映射 BN 如图 1 所示。

1.2 BN

BN 是一种由网络节点变量、节点间因果关系有向边以及条件概率表构成的有向无环的网络结构拓扑图^[11-13]。一般地,设 BN 结构中包括 n 个风险

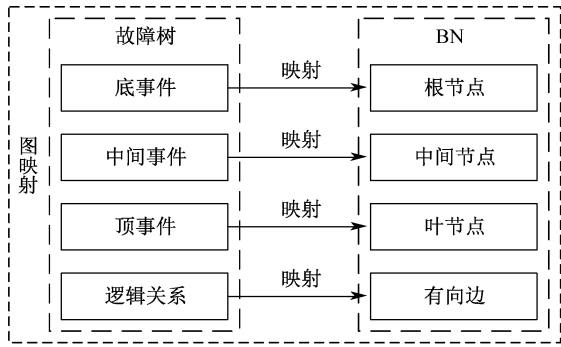


图1 故障树映射BN

Fig.1 Fault tree mapping to BN schematic diagram

因素节点,其中,网络结构中的技术接口施工风险因素变量设为 $X_1, X_2, \dots, X_n$, n 为风险因素变量个数,联合概率公式如下:

$$P(U) = P(X_1, X_2, \dots, X_n) = \prod_{i=1}^n P(X_i | \pi(X_i)) \quad (1)$$

式中: X_i 为风险因素; i 为风险因素个数; $\pi(X_i)$ 为施工风险因素 X_i 的所有父节点的结合。边缘概率如下:

$$P(X_i) = \sum_{1,2,\dots,i-1} P(U) \quad (2)$$

根 X_i 对应的 $P(X)$, U 为风险因素集,非根节点风险因素对应条件概率分布为 $P(X | \pi(X_i))$ 。若给定条件为 A ,则技术接口施工风险发生概率为:

$$P(U | A) = \frac{P(U, A)}{P(A)} = \frac{P(U, A)}{\sum_U P(U, A)} \quad (3)$$

2 基于故障树和模糊BN的技术接口施工风险分析

以城市地铁工程技术接口施工风险为研究对象,运用故障树确定风险因素之间的因果关系并映射到BN模型中,同时,基于三角模糊集理论^[14]评估地铁工程技术接口施工风险,风险分析过程如图2所示。

2.1 工程技术接口施工风险识别

为全面系统地识别出影响城市地铁工程技术接口施工冲突的风险因素,查阅文献^[15-17]、实地调研,并咨询地铁建设领域中设计单位、施工单位中10位具有高级职称的专家,采用4 M1E法(Man, Machine, Material, Method, Environments),并考虑施工管理方面的影响,从人员、材料设备、技术、环境、管理5个维度,归纳影响地铁工程技术接口施工的25个风险指标,构建地铁工程技术接口施工风险评

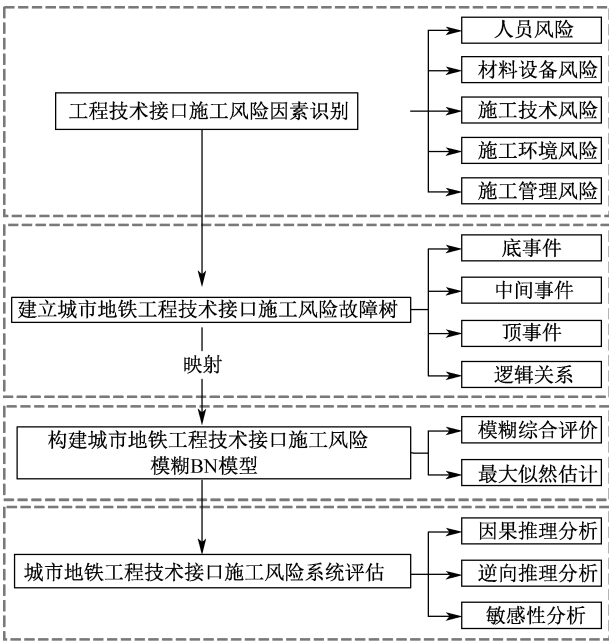


图2 地铁技术接口施工风险分析过程

Fig.2 Metro technical interface construction risk analysis process

估指标体系,如图3所示。

2.2 基于故障树的BN模型构建

2.2.1 结构确定

运用故障树模型分析施工风险之间的因果逻辑关系,将故障树中的底事件、中间事件、顶事件转化为BN的根节点、中间节点、叶节点,故障树模型中风险因素的逻辑关系转化为BN的有向边,完成技术接口施工风险故障树向BN模型的映射。同时采用最低合理性准则^[18]划分地铁工程技术接口施工风险的危险状态等级,将施工风险划分为可接受、合理、不可接受3部分。文中设地铁工程技术接口施工风险的危险等级为“高风险,不可接受”“中风险,可接受”“低风险,忽略”3种状态。

2.2.2 模糊BN参数学习

BN参数学习是在已知技术接口施工风险网络结构的条件下计算各节点的条件概率,但实际数据无法精确获得。因此,基于上述模糊集理论,邀请本领域的专家运用7级语言变量^[19-20]评估根节点模糊概率,语言变量与模糊集对应关系见表1。

表1 语言变量与其对应的三角模糊数

Table 1 Linguistic variables with their corresponding triangular fuzzy numbers

语言变量	模糊集
非常高(VH)	(0.85, 0.925, 1.0)
高(H)	(0.75, 0.8, 0.85)



图 3 地铁工程技术接口施工风险评估指标体系

Fig. 3 Metro engineering technical interface construction risk assessment indicator system

续表 1

语言变量	模糊集
偏高 (FH)	(0.55,0.65,0.75)
中等 (M)	(0.45,0.5,0.55)
偏低 (FL)	(0.25,0.35,0.45)
低 (L)	(0.05,0.15,0.25)
非常低 (VL)	(0,0.025,0.05)

1) 由于不同教育背景及不同从业年龄的地铁建设领域专家对施工风险评估的标准不同,应赋予不同教育背景和从业年龄专家相应的权重值,技术接口专家意见权重见表 2。进行加权计算,见下式:

$$\tilde{P}_{ij} = \sum_{k=1}^n \alpha_k \beta_k \tilde{P}_{ij}^k / \sum_{k=1}^n \alpha_k \beta_k \quad (4)$$

式中: $\tilde{P}_{ij}$ 为第 i 个技术接口节点在第 j 状态下的综合专家意见加权值; α_k 为第 k 位地铁工程技术接口专家的教育背景权重值; β_k 为第 k 位地铁工程技术接口专家的从业年龄权重值; $\tilde{P}_{ij}^k$ 为第 k 位地铁工程技术接口专家对第 i 个技术接口节点在第 j 状态下模糊概率值。

表 2 技术接口专家意见权重

Table 2 Weighting of expert opinion on technical interfaces

项目	类别	权重	项目	类别	权重
教育背景	博士	1	从业年龄	>15a	1
	硕士	0.9		10~15a	0.9
	本科	0.8		5~10a	0.8
	大专	0.7		<5a	0.7

2) 去模糊化,见下式:

$$P_i = \frac{(r_i - l_i) + (m_i - l_i)}{3} + l_i \quad (5)$$

式中 P_i 为三角形的中心。三角模糊数参数由 l_i 、 m_i 、 r_i 表示,其中, l_i 为最小可能的值、 m_i 为最可能的值、 r_i 为最大可能的值。

3) 归一化处理,见下式:

$$P_{ij} = \frac{P'_{ij}}{\sum_1^m P'_{ij}} \quad (6)$$

式中 P_{ij} 和 P'_{ij} 分别为技术接口风险因素节点归一化后和归一化前的概率值。

2.3 BN 风险推理分析

2.3.1 正向推理分析

在已知技术接口风险因素的状态下,运用 BN 正向推理方法,计算出技术接口施工风险发生的概率,计算公式见下:

$$M(T = S_t) = M(X_i = x_j) \times M(T = S_t | X_i = x_j) \quad (7)$$

式中: $M(T)$ 为技术接口施工风险事件发生概率; S_t 为技术接口施工风险事件的第 t 状态条件; $M(X_i = x_j)$ 为技术接口风险因素根节点的联合概率分布; $M(T = S_t | X_i = x_j)$ 为 BN 向前传导的风险因素条件概率表。

2.3.2 逆向推理分析

在已知技术接口施工风险发生状态下,运用 BN 的逆向推理计算出各个技术接口风险因素根节点的概率。

2.3.3 敏感性分析

借助风险促进值重要度 (Risk Achievement Worth, RAW)、风险降低值重要度 (Risk Reduction Worth, RRW)、变化衡量重要度 (Benefit Measure, BM) 3 个指标来衡量风险因素对工程技术接口施工

风险状态的影响程度^[20]。

3 施工风险评估案例分析

3.1 工程概况

以北京市轨道交通 17 号线北段工程为例,进行验证分析。该工程正线线路总长 26.3 km,共设 10 座车站,平均站间距 2.57 km。该工程均为地下线,且涉及到的接口专业众多、交叉施工频繁、施工

环境复杂多变,在施工过程中产生众多技术接口且接口类型复杂、综合性较强、管理难度大,影响整个工程施工进度的顺利实施。

3.2 BN 模型

采用故障树分析地铁工程技术接口施工风险间的因果逻辑关系,采用映射算法将事故树转化为 BN 模型,并输入到 GeNIe4.0 软件中,BN 中的施工风险节点与故障树模型中的事件一一对应,如图 4 所示。

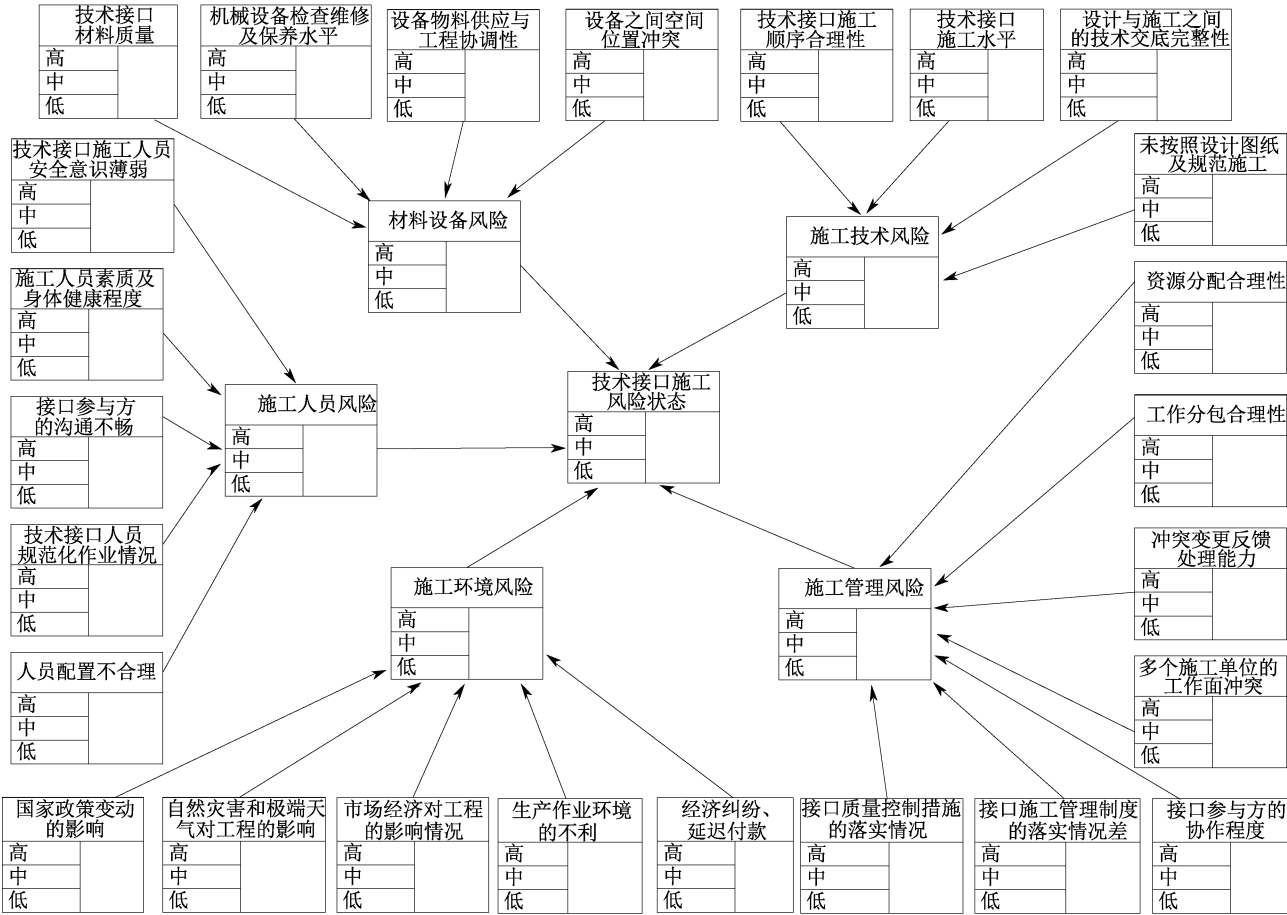


图 4 地铁工程技术接口施工风险 BN 模型

Fig. 4 BN modeling of construction risks for Metro Engineering technical interfaces

3.3 节点参数确定

邀请 4 位专家评估技术接口施工风险根节点的先验概率,并对专家赋予不同权重值,专家信息见表 3。以 R_{15} 为例,运用式(4)加权计算 4 位专家的评估概率得到 R_{15} 根节点的模糊概率,见表 4。

表 3 专家信息

Table 3 Specialist information

专家编号	教育背景	权重 α	从业年龄/a	权重 β
1	博士	1	>15	1
2	硕士	0.9	8	0.8
3	本科	0.8	11	0.9
4	硕士	0.9	12	0.9

同理,计算可得其他技术接口施工风险根节点加权计算后的模糊概率。为进行贝叶斯理论风险推理分析,运用式(5)、式(6)对根节点模糊概率进行

表 4 根节点 R_{15} 的模糊概率

Table 4 Fuzzy probability of the root node R_{15}

风险等级	高风险,不可接受	中风险,可接受	低风险,忽略
专家 1	(0.05,0.15,0.25)	(0.75,0.80,0.85)	(0.25,0.35,0.45)
专家 2	(0.05,0.15,0.25)	(0.75,0.80,0.85)	(0.25,0.35,0.45)
专家 3	(0.25,0.35,0.45)	(0.55,0.65,0.75)	(0.25,0.35,0.45)

续表 4

风险等级	高风险,不可接受	中风险,可接受	低风险,忽略
专家 4	(0.05,0.15,0.25)	(0.75,0.80,0.85)	(0.25,0.35,0.45)
$\bar{P}_{ij}$	(0.094,0.194,0.294)	(0.706,0.767,0.828)	(0.250,0.350,0.450)

模糊化处理和归一化处理,得到施工风险根节点的标准先验概率,见表 5。

表 5 根节点的标准先验概率集

Table 5 Standard prior probability set of the root node							
风险节点	高风险	中风险	低风险	风险节点	高风险	中风险	低风险
R_{11}	0.07	0.66	0.27	R_{41}	0.15	0.59	0.26
R_{12}	0.08	0.62	0.30	R_{42}	0.14	0.60	0.26
R_{13}	0.25	0.61	0.14	R_{43}	0.15	0.70	0.15
R_{14}	0.08	0.63	0.28	R_{44}	0.17	0.58	0.25
R_{15}	0.15	0.58	0.27	R_{45}	0.11	0.62	0.26
R_{21}	0.15	0.61	0.24	R_{51}	0.12	0.62	0.26
R_{22}	0.07	0.68	0.25	R_{52}	0.10	0.70	0.20
R_{23}	0.08	0.73	0.19	R_{53}	0.13	0.69	0.18
R_{24}	0.09	0.63	0.28	R_{54}	0.14	0.63	0.23
R_{31}	0.19	0.64	0.17	R_{55}	0.21	0.67	0.12
R_{32}	0.18	0.68	0.14	R_{56}	0.23	0.65	0.12
R_{33}	0.23	0.62	0.15	R_{57}	0.18	0.62	0.20
R_{34}	0.15	0.60	0.25				

3.4 推理分析

3.4.1 正向推理

根据专家对施工风险根节点评价结果可知: R_{13} 、 R_{33} 、 R_{55} 、 R_{56} 等 4 个风险因素的高风险状态等级的概率接近 30%,说明该城市地铁工程技术接口施工在人员、施工技术、施工管理等方面的风险因素相对突出。因此,有必要组织技术接口施工人员进行施工技术培训,制定有效的技术接口施工管理体系,加强技术接口各参与方的沟通组织协调能力,避免因风险管理缺陷引起的施工进度滞后。

选用 GeNIe4.0 软件进行地铁工程技术接口施工风险 BN 模型的推理分析,基于构建的地铁工程技术接口施工风险模糊 BN 拓扑结构,将计算得到的施工风险根节点的三角模糊概率值导入到 GeNIe4.0 软件中,采用最大似然估计法^[21] 计算参数,地铁工程技术接口施工风险状态如图 5 所示。综合考量工程安全标准与事故统计数据以及美国土木工程师协会在基础设施项目风险评估指南,将施工风险等级划分阈值为 25%,根据计算得到的地铁工程技术接口施工风险概率数值,该地铁工程技术接口施工风险的等级为中风险,但由于技术接口施工风险状态为高风险的概率为 26%,因此,要及时制定专项措施,解决该工程技术接口施工过程中的各类风险问题。

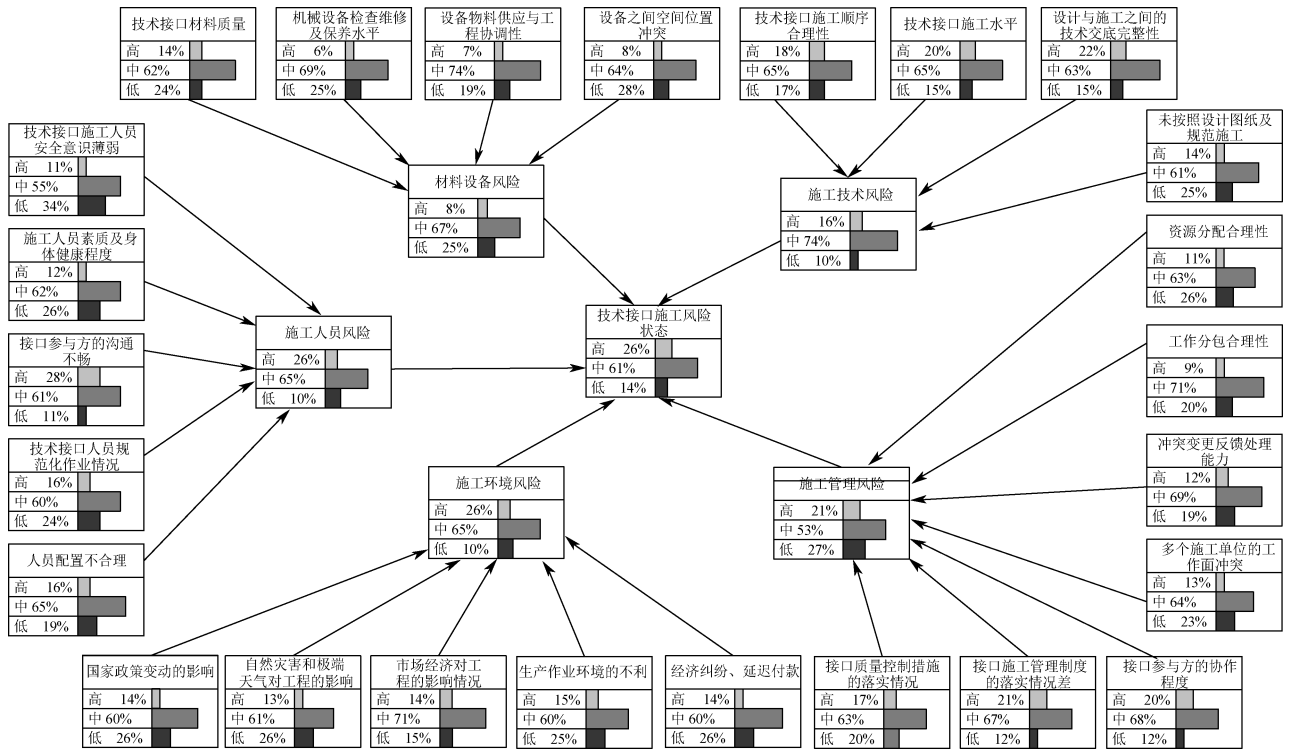


图 5 地铁工程技术接口施工风险正向推理分析

Fig. 5 Positive reasoning analysis of construction risks at Metro Engineering technical interfaces

3.4.2 逆向推理

将目标节点地铁工程技术接口施工风险高风险状

态设置为100%,运用BN的反向推理分析得到各技术接口风险因素根节点的后验概率,结果如图6所示。

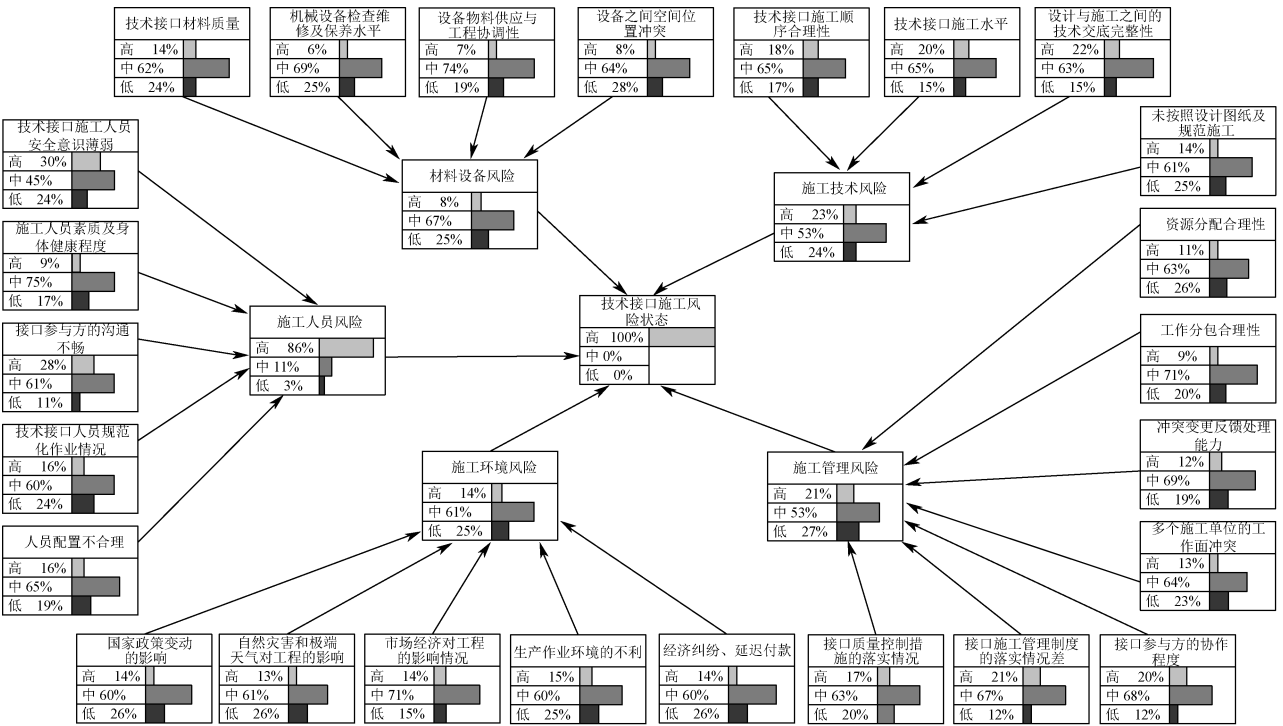


图6 地铁工程技术接口施工风险逆向推理分析

Fig. 6 Reverse reasoning analysis of construction risks of metro engineering technical interfaces

由逆向推理的结果可知:当技术接口施工风险已发生的情况下,后验概率较大的风险因素为 R_{11} 、 R_{13} 、 R_{36} 、 R_{55} 、 R_{32} 、 R_{33} ,这些风险因素的高风险状态的概率均超过20%,说明技术接口施工风险的发生往往由这6个风险因素引起。因此,要重点关注这6个风险因素,制定相应的管理明细和措施,降低此类风险因素发生概率。

3.4.3 敏感性分析

在已构建的地铁工程技术接口施工风险模糊BN模型中,以各施工风险节点的高风险状态为例,

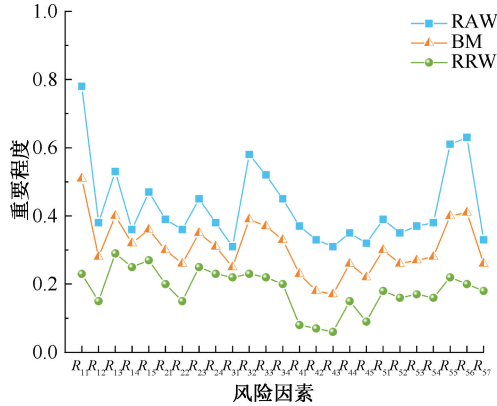


图7 风险因素重要程度

Fig. 7 Risk importance of each risk factor

参考文献[21]计算地铁工程技术接口施工风险BN中各风险因素的RAW、RRW、BM指标值,结果如图7所示。

由图7可知: R_{11} 、 R_{36} 、 R_{32} 、 R_{55} 这4个风险因素的重要度值较高,即这4个风险因素是导致地铁工程技术接口施工风险发生的关键风险因素。

4 结论

1) 通过构建故障树模型,梳理风险因素间的逻辑关系,再转化为模糊BN模型,计算与评估了风险概率。通过BN正向推理,得到该工程技术接口施工风险状态评价等级为中风险状态,这与地铁工程技术接口实际施工管理中呈现的情况相匹配,在一定程度上验证了本文方法的科学性、有效性。同时,在技术接口施工风险已发生的状态下,逆向诊断推理可快速识别出影响较大风险因素的组合,提高管理人员对技术接口施工风险事件诊断的效率。

2) 技术接口施工人员安全意识薄弱、接口施工管理制度的落实情况是导致工程技术接口施工风险发生的关键致险因素。

3) 文中模型仅考虑了单一风险因素间的直接因果关系,而忽视了不同种类风险因素(如人员因

素、技术因素、环境因素等)之间的多维交互作用, 系构建多维度风险因素交互模型,开展地铁工程及后续研究可针对不同种类风险因素间的相互作用关 其他类似项目工程施工风险研究。

参 考 文 献

- [1] 郭杰. 城市轨道交通工程接口管理研究[D]. 北京: 中国铁道科学研究院, 2012.
GUO Jie. Research on interface management in urban rail transit project[D]. Beijing: China Academy of Railway Science, 2012.
- [2] AL-HAMMAD A. Interface problems between owners and maintenance contractors in Saudi Arabia[J]. Journal of Performance of Constructed Facilities, 1995, 9(3): 194-205.
- [3] AL-HAMMAD A, AL-HAMMAD I. Interface problems between building owners and designers[J]. Journal of Performance of Constructed Facilities, 1996, 10(3): 123-126.
- [4] AL-HAMMAD A. Common interface problems among various construction parties[J]. Journal of Performance of Constructed Facilities, 2000, 14(2): 71-74.
- [5] SAMIN S, MAHDI S, CARL T, et al. Interface management model for megacapital projects[C]. Construction Research Congress 2012: Construction Challenges in a FlatWorld. West Lafayette: ASCE, 2012: 447-456.
- [6] NILSEN M A, FALK K, HAUGEN T A. Reducing project cost growth through early implementation of interface management[J]. INCOSE International Symposium, 2018, 28(1): 96-114.
- [7] 据倩茜, 姜红丙. 城市轨道交通工程关键接口识别方法研究[J]. 铁道科学与工程学报, 2020, 17(10): 2 672-2 679.
- JU Qianxi, JIANG Hongbing. Research on key interface points identification for metro projects[J]. Journal of Railway Science and Engineering, 2020, 17(10): 2 672-2 679.
- [8] 任银龙, 胡所亭, 班新林, 等. 艰险山区铁路桥梁与四电工程技术接口管理协同度评价研究[J]. 铁道建筑, 2021, 61(7): 46-53.
- REN Yinlong, HU Suoting, BAN Xinlin, et al. Evaluation of synergistic degree of interface management between railroad bridge and four electric engineering technology in difficult mountainous area[J]. Railway Construction, 2021, 61(7): 46-53.
- [9] 霍雨雨, 鲍学英, 李爱春, 等. 艰险山区铁路桥隧技术接口工序资源冲突研究[J]. 铁道科学与工程学报, 2022, 19(7): 2 107-2 116.
- HUO Yuyu, BAO Xueying, LI Aichun, et al. On resource conflict of technical interface process of railway bridge and tunnel in hard and dangerous mountainous area[J]. Journal of Railway Science and Engineering, 2022, 19(7): 2 107-2 116.
- [10] SCHRODER R J. Fault trees for reliability analysis[J]. Microelectronics Reliability, 1970, 9(6): 449-450.
- [11] ZHOU Qingji, WONG Y D, LOH H S, et al. A fuzzy and Bayesian network CREAM model for human reliability analysis: the case of tanker shipping[J]. Safety Science, 2018, 105: 149-157.
- [12] 陈雍君, 李晓健, 张丽, 等. 故障树和模糊贝叶斯网络在管廊运维风险评估中的应用研究[J]. 安全与环境学报, 2024, 24(3): 857-866.
- CHEN Yongjun, LI Xiaojian, ZHANG Li, et al. Application of fault tree and fuzzy Bayesian network in risk assessment of pipeline corridor operation and maintenance[J]. Journal of Safety and Environment, 2024, 24(3): 857-866.
- [13] 陈雍君, 李晓健, 吴光晔, 等. 基于故障树和贝叶斯网络的管廊运维风险评估[J]. 地下空间与工程学报, 2024, 20(3): 1 016-1 025, 1 050.
- CHEN Yongjun, LI Xiaojian, WU Guangye, et al. Operation and maintenance risk assessment of underground utility tunnels based on FTA and fuzzy BN[J]. Journal of Underground Space and Engineering, 2024, 20(3): 1 016-1 025, 1 050.
- [14] 王峰. 高速铁路工程系统接口技术研究[D]. 北京: 中国铁道科学研究院, 2013.
- WANG Feng. Research of system interface technology in high-speed railway engineering[D]. Beijing: China Academy of Railway Science, 2013.
- [15] ZADEH L A. Fuzzy sets[J]. Information and Control, 1965, 8(3): 338-353.
- [16] 吴贤国, 吴克宝, 沈梅芳, 等. 基于 N-K 模型的地铁施工安全风险耦合研究[J]. 中国安全科学学报, 2016, 26(4): 96-101.
- WU Xianguo, WU Kebao, SHEN Meifang, et al. Research on coupling of safety risks in metro construction based on N-K model[J]. Journal of Safety and Environment, 2016, 26(4): 96-101.
- [17] LI Xiao, ZHU Jianming. Research on graded management of construction risk factors of a subway station[M]. Amsterdam: IOS Press, 2021: 33-37.
- [18] TANG Yongjun. Civil engineering and surrounding environment risk analysis based on ALARP principle[J]. IOP Conference Series: Earth and Environmental Science, 2018, 170(3): DOI:10.1088/1755-1315/170/3/032143.
- [19] JENSEN F V. An Introduction to Bayesian networks[M]. London: UCL Press, 1996: 77-94.
- [20] 秦荣水, 石晨晨, 陈超, 等. 基于模糊贝叶斯网络的城市商业综合体火灾风险分析[J]. 中国安全科学学报, 2023, 33(12): 176-182.
- QIN Rongshui, SHI Chenchen, CHEN Chao, et al. Risk analysis on fire accident of urban commercial complex based on fuzzy Bayesian network[J]. Journal of Safety and Environment, 2023, 33(12): 176-182.
- [21] 李敏, 林志军, 鲁义, 等. 基于模糊贝叶斯网络的煤矿瓦斯爆炸风险评估[J]. 煤炭学报, 2023, 48(增 2): 626-637.
- LI Min, LIN Zhijun, LU Yi, et al. Risk assessment of gas explosion in coal mines based on fuzzy Bayesian network[J]. Coal Journal, 2023, 48(S2): 626-637.

作者简介: 闫林君 (1975—),男,山东高密人,博士,副教授,主要从事土木工程建设与管理等方面的研究。E-mail: 2843881181@qq.com。