

基于 DBN 的地铁隧道施工坍塌事故情景推演与应急处置优化研究

胡佳佳¹, 陈玉斌²

(1.湖南省醴娄高速公路建设开发有限公司, 湖南 湘潭 411100;

2.长沙理工大学 交通运输工程学院, 湖南 长沙 410114)

摘要: 为充分利用历史事故的有效经验辅助应急决策, 结合当前认知水平和技术水平优化历史事故的应急处置, 提高决策的科学性和合理性, 提出一种基于动态贝叶斯网络(Dynamic Bayesian Network, DBN)的地铁隧道施工坍塌事故情景推演和应急处置优化方法。从情景分析角度出发, 基于情景元理论描述事故情景状态和趋势, 分析情景因素间的作用关系, 构建情景演化基本单元; 分析事故情景的演化规律和路径, 构建动态贝叶斯网络, 对事故情景进行推演, 探讨事故演化路径和发展趋势; 从最优路径、最劣路径、最可能路径和实际路径探讨应急处置的优化方法和实施建议; 应用该方法对某地铁隧道坍塌事故进行分析, 根据推演结果提出应急处置优化方法和实施建议。

关键词: 工程管理; 隧道; 坍塌事故; 应急处置; 情景推演; 动态贝叶斯网络(DBN)

中图分类号: U415.1

文献标志码: A

文章编号: 1671-2668(2022)02-0149-06

由于地下空间存在巨大的不确定性和风险, 地铁隧道施工中坍塌事故时有发生。事故发生后, 应急处置是挽救生命、财产安全的重要环节。由于管理者管理水平、经验和制度的差异及项目资料和应急预案完备性、针对性不足等, 有些事故应急处置效果不佳, 进而引起次生、衍生事故。针对地铁隧道施工坍塌事故的应急处置, 现有研究主要从实际状态考量决策和历史经验辅助决策两方面展开。在实际状态考量决策方面, 文献[2-4]主要通过事故机理分析、趋势预测分析和风险识别控制等设计应急机制或制订应急方案, 未能充分利用历史事故的应急处置经验。在历史经验辅助决策方面, 文献[5-6]引入知识图谱、本体、案例推理等对地铁施工坍塌事故应急知识匹配、应急处置经验检索等展开研究, 未能对历史事故应急处置的实施效果进行深入分析, 未对不当应急处置进行优化。随着认知水平的提高和技术的发展, 历史经验的可靠性和适用性亦存在一定局限。因此, 在利用历史事故经验辅助决策前, 需对历史事故的应急处置进行优化, 提高应急决策的科学性和合理性。对于突发事件的应急处置, 考虑当前的应急能力、资源条件、认知水平和技术水平, 通过分析既有历史事故的初期状态在不同应急干预活动下的发展趋势和实施效果, 可更高效、准确地抉择较优应急处置方案。文献[7-8]引入情景分

析法和贝叶斯网络(Bayesian Network, BN)进行突发事件情景状态预测和分析, 取得了显著成果。考虑到地铁隧道施工坍塌事故的动态性和不稳定性, 引入动态贝叶斯网络(Dynamic Bayesian Network, DBN)对事故的情景状态进行推演可获取多方向的应急处置路径, 结合路径发展概率分析较优应急处置方案, 从而实现应急处置的优化。该文采用情景分析法表示历史事故情景状态, 采用 DBN 对事故情景进行推演, 分析在不同干预活动和资源约束条件下应急处置过程中事故的动态发展趋势和干预活动的实施效果, 提出应急处置优化建议, 为地铁隧道施工坍塌事故应急处置提供参考。

1 地铁隧道施工坍塌事故情景表示

事故情景是事故在某个时空下所有关键要素的状态和关系共同构成的集合。文献[13]提出情景元 C 由灾情 D 、承灾体 B 、致灾因子 R 和孕灾环境 E 等 4 类因素组成。

在事故情景推演过程中, 灾情和孕灾环境是事故发展状态、环境状态的直观描述, 可作为事故应急处置决策的主要依据。致灾因子和承灾体是事故发生后调查分析的关键, 但无法直观反映事故状态和发展趋势。结合文献[14-16]的研究, 考虑到地铁隧道施工坍塌事故的演化是一个动态过程, 探讨其

演化过程需考虑事故所有客观实体和外部环境的变化和相互影响,同时需考虑应急处置对事故系统状态的干预。地铁隧道坍塌事故存在地下空间不确定,近邻基础设施、构筑物、建筑物繁多且事故发展过程不稳定等特性。因此,选取事故情景状态 S (事故发展的阶段性描述)、应急处置活动 A (事故发生后采取的应急救援活动和为控制事故危险源的干预活动)、外部环境 E (事故系统所处的自然环境状态)、应急资源 M (应急处置活动涉及的救援人员、装备、机械、设施、通道及其他救援条件) 作为基本情景因素。任一时空约束下第 i 个地铁隧道施工坍塌事故情景元 C_i 可表示为:

$$C_i = \{S_i, A_i, E_i, M_i\} \quad (1)$$

当 C_i 表示消失情景元时, A_i, E_i, M_i 为空集。

某一时空约束下第 k 个事故情景元 C_k 演化为另一时空约束下第 $k+1$ 个事故情景元 C_{k+1} 可表示为:

$$C_k \rightarrow C_{k+1}$$

$$\{S_k, A_k, E_k, M_k\} \rightarrow \{S_{k+1}, A_{k+1}, E_{k+1}, M_{k+1}\}$$

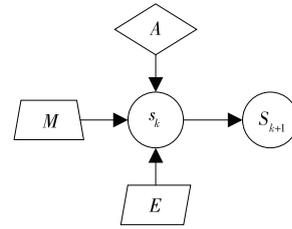
$$S_k, A_k, E_k, M_k \in C_k; S_{k+1}, A_{k+1}, E_{k+1}, M_{k+1} \in C_{k+1} \quad (2)$$

2 地铁隧道施工坍塌事故情景演化规律和路径分析

2.1 情景演化规律分析

地铁隧道施工坍塌事故情景演化表现为事故情

景状态 S 在应急处置活动 A 的作用、外部环境 E 的影响和应急资源 M 的约束下发生改变,其基本单元见图 1。



S_k 表示第 k 个事故情景状态

图 1 地铁隧道施工坍塌事故情景演化的基本单元

以事故状态变化的主要转折点作为关键节点,将事故动态发展过程以情景片段的形式进行划分,分析事故关键节点,假定各节点独立以简化分析过程,同时保留事故演变分析的动态性。将情景片段与时序一一对应展开分析。假设事故发生情景状态为 S_0 , 对应时间点为 t_0 ; 事故发展情景状态为 S_1, S_2, \dots, S_{n-1} , 对应时间点分别为 t_1, t_2, \dots, t_{n-1} ; 消失情景状态为 S_n , 对应时间点为 t_n 。 $n+1$ 个情景片段共同构成事故的演化过程(见图 2)。

2.2 情景演化路径分析

地铁隧道施工坍塌事故发展过程中,事故情景状态变化受到外部环境的持续影响。事故发生后,现场管理人员、相关责任主体及其他人员采取的应急处置活动可能是持续或间断的,目的是削弱或消灭事故的负面作用,挽救生命安全,降低财产损失。

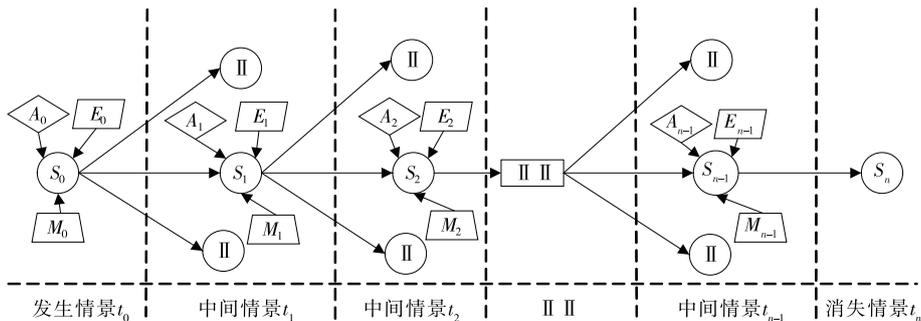


图 2 地铁隧道施工坍塌事故情景演化规律

应急处置活动的预期是对事故产生积极影响,但受到外部环境的影响和应急资源的约束,处置活动可能产生两种效果:一种是事故负面作用减弱或消失,即积极效果,在事故演化中定义为应急处置活动达到预期;另一种是事故负面作用不变或加强,即消极效果,在事故演化中定义为应急处置活动未达到预期。情景演化路径也形成乐观路径和悲观路径 2 个

方向(见图 3)。

在 S_1 情景状态下,若采取应急处置活动 A_1 达到预期,则演化至事故情景状态 S_2 ; 若采取应急处置活动 A_1 未达到预期,则演化至 S_0 情景。以此类推。图 3 向右的情景演化为 A 达到预期的乐观路径,向下的情景演化为 A 未达到预期的悲观路径。由于事故的复杂性和差异性,该情景演化路径网络

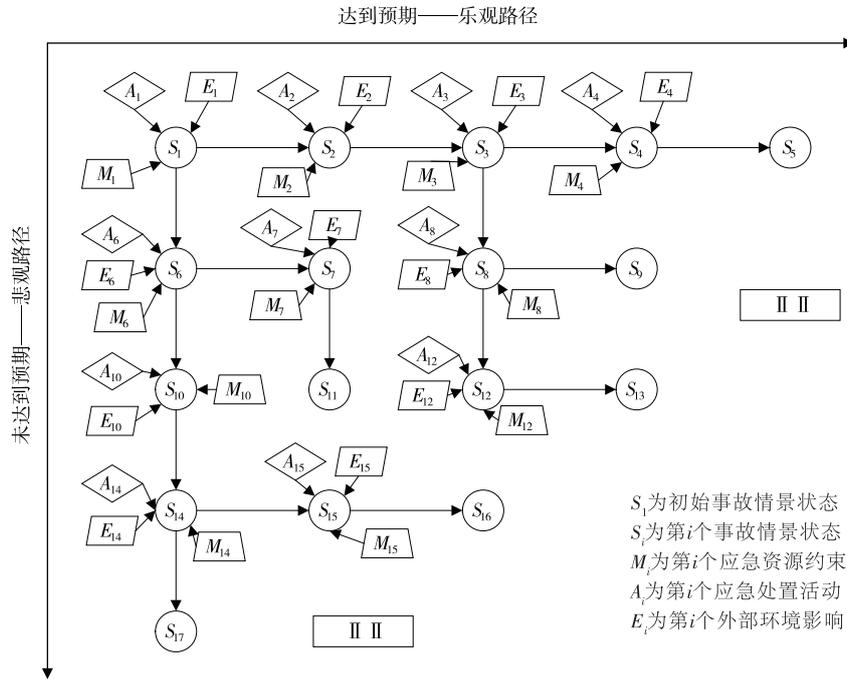


图 3 地铁隧道施工坍塌事故情景演化路径

具有唯一性。

但各情景演化节点均存在达到预期和未达到预期 2 个结果,则 n 个情景片段构成的事故演化路径网络共有 2^n 条路径。以图 3 为例,该演化路径网络共 17 个节点,代表 17 个情景,其中包含 1 个发生情景、10 个中间情景、6 个消失情景。 $S_1-S_2-S_3-S_4-S_5$ 路径为最乐观路径,该路径下一系列应急处置活动能产生最大正面效应; $S_1-S_6-S_{10}-S_{14}-S_{17}$ 路径为最悲观路径,该路径下一系列应急处置活动可能产生最大负面效应。

3 基于 DBN 的情景推演和应急处置优化

3.1 DBN 简介

BN 是一种有向链概率图模型,可有效解决信息不完全、表达不具体的问题。DBN 是 BN 在时间领域的拓展,可提高情景推演过程中在不同发展阶段演化概率的准确性,更符合地铁隧道施工坍塌事故动态发展过程和规律。

BN 采用有向无环图。在情景推演中,BN 的各节点代表不同的情景因素,节点间的有向键线代表情景因素间的影响关系。影响关系的强度由条件概率表示,概率值为节点状态转移概率。记 BN 中对其他节点产生影响的父节点为 $m_i (i=1,2,3,\dots)$,受到其他节点影响的子节点为 n 。根据贝叶斯公式,任一父节点 m_i 的概率为:

$$P(m_i | n) = \frac{P(m_i n)}{P(n)} = \frac{P(m_i)P(n | m_i)}{\sum_{j=1}^n P(m_j)P(n | m_j)} \quad (3)$$

对于任一 BN,记所有节点 x_i 形成的集合为 $X, X = \{x_i\} (i=1,2,3,\dots)$,定义 x_i 的父节点集合为 M_i ,则 BN 所有节点集的联合概率分布为:

$$P(X) = P(x_1 | x_2, x_3, \dots, x_n)P(x_2 | x_1, x_3, \dots, x_n) \cdots P(x_n | x_1, x_2, \dots, x_{n-1}) = \prod_{i=1}^n P(x_i | x_1, x_2, \dots, x_{i-1}) = \prod_{i=1}^n P(x_i | M_i) \quad (4)$$

在 DBN 中,引入时间指标 $t, t=1,2,\dots,T (T$ 为情景片段数量)。将节点 x_i 与 t 相关联,表示为 $x_i[t]$ 。定义一个先验网 B_0 为初始状态 $x_i[1]$ 上的联合概率分布、转移网 B_{\rightarrow} 为中间状态 $x_i[t]$ 转移到 $x_i[t+1]$ 上的转移概率 $P(x_i[t+1] | x_i[t])$,则任一 DBN 在 $x_i[1], x_i[2], \dots, x_i[t]$ 上的联合概率分布为:

$$P(x_i[1], x_i[2], \dots, x_i[t]) = P_{B_0}(x_i[1]) \prod_{i=1}^T P_{B_{\rightarrow}}(x_i[t+1] | x_i[t]) \quad (5)$$

定义 x_i^t 为第 i 个变量在 t 时刻的取值, $M(x_i^t)$

为其父节点的集合, N 表示有 N 个变量, 则 DBN 中任一节点的联合概率分布为:

$$P(x_1^1, \dots, x_1^N) = \prod_{i=1}^N P_{B_0}(x_1^i | M(x_1^i)) \times \prod_{t=2}^T \prod_{i=1}^N P_{B_{-t}}(x_t^i | M(x_t^i)) \quad (6)$$

3.2 DBN 构建

基于 DBN 的情景网络构建包括网络节点变量确定、变量因果关系确定和节点条件概率估计, 步骤如下:

(1) 确定网络节点变量。对于要分析的地铁隧道施工坍塌事故, 搜集事故调查报告及新闻报道等佐证材料和信息, 基于事故致因分析和专家经验对不同应急处置活动的正面影响或负面影响进行预设, 提取事故情景状态 S 、应急处置活动 A 、外部环境 E 和应急资源 M 等情景因素信息作为情景推演的基础。节点变量类型及取值见表 1。

表 1 节点变量类型及取值

变量名称	变量类型	变量取值
事故情景状态 S	布尔变量	T=真; F=假
应急处置活动 A	布尔变量	T=真; F=假
外部环境 E	顺序变量	P=积极; N=消极
应急资源 M	顺序变量	X=可满足; Y=不可满足

(2) 确定变量间的因果关系。对于已确定的网络节点变量, 根据情景演化基本单元和情景演化顺序判断所有网络节点的父节点, 用有向不循环箭线相连, 构建变量因果关系网络。该因果关系包括 A 、 E 、 M 对 S 的影响作用和 S 的演化关系。

(3) 估计各节点条件概率。为减少单一方法的误差和部分方法的主观性, 通过案例分析、专家打分、文献分析等多种方法, 根据情景因素的变量类型、数据来源、数据样本空间大小等选用不同方法, 综合确定节点与父节点间影响程度的条件概率, 从而计算各节点的条件概率。

3.3 DBN 计算和应急处置优化分析

利用构建的 DBN 计算不同发展路径的发生概率, 根据计算结果筛选最乐观路径、最悲观路径、最可能路径, 分析三者与实际应急处置路径的差异, 将 4 条路径应急处置过程作为相似事故应急处置的参考并提出优化建议。4 条路径的分析方法如下:

(1) 对于实际应急处置路径, 充分考虑其应急处置过程采取的应急处置活动对事故产生的正面影响和负面影响, 同时考虑即时环境状态和资源约束。

其实施效果已得到实际验证, 可作为应急处置的主要参考资料。

(2) 对于最乐观路径, 重点关注其应急处置活动对事故产生的负面作用, 判断最优应急处置过程的损失并力求进一步对应急处置对策选择和资源调配进行优化。

(3) 对于最悲观路径, 在相似事故应急处置过程中尽量避免选用该路径下应急处置对策和资源调配方案, 同时关注其应急处置活动对事故产生的正面效果, 以期在不得已的情况下能快速评估其损益进而进行决策。

(4) 对于最可能路径, 充分分析路径的实现过程并作为相似事故应急处置参考的主要资料, 从而在应急处置对策选择和资源调配上不断纠偏。

4 案例分析

4.1 事故情景元表示

2018 年 1 月, 某轨道交通线路施工过程中发生较大坍塌事故, 导致 3 人死亡, 直接经济损失 1 009 万元。根据事故调查报告和新闻报道梳理事故发生过程和应急处置情况, 界定分析范围为事故征兆事件发生至被困人员脱离被困环境的事故发展全过程。考虑专家意见和事故状态显著变化节点, 筛选 7 个关键发展情景 (S_1 、 S_2 、 S_3 、 S_4 、 S_5 、 S_6 、 S_7)。结合类似事件对事故良好干预和不当干预引起的其他可能的发展情景展开分析, 得到 4 个假设情景 (S_8 、 S_9 、 S_{10} 、 S_{11})。提取事故情景状态 S 、外部环境 E 、应急处置活动 A 和应急资源 M 信息, 结果见表 2。

4.2 DBN 构建与情景推演

假定情景演化中各情景因素变量对事故情景状态的影响是独立的。根据事故过程和事故应急救援过程的情景因果关系构建 DBN, 采用贝叶斯软件 GeNIe 进行计算, 其节点概率在考虑时间因素影响下由历史事故数据和相似工程评估资料确定。计算结果见图 4, 其中 S_{12} 、 S_{13} 、 S_{14} 、 S_{15} 、 S_{16} 为事故消失节点, 以被困人员脱离被困环境、损害事件基本结束或不再延续为划分依据, 事故消失节点不考虑其事故情景状态受到其他情景因素的影响。

4.3 结果分析和决策建议

根据情景推演结果, 结合事故实际处置效果, 可从如下方向对应急处置进行优化: 1) 事故最优演化路径为 S_1 — S_8 — S_{12} , 该路径应急处置关键点在于在不良事件发生后对事件采取强干预策略, 对不良

表 2 某轨道交通线路施工坍塌事故情景元信息

情景元号	事故情景状态	外部环境	应急处置活动	应急资源
C ₁	土仓排烟不良(S ₁)	即时环境(E ₁)	调试土仓排气管(A ₁)	维修工人(M ₁)
C ₂	土仓压力波动,排出黑灰烟、人员失联(S ₂)	即时环境(E ₂)	极速泄压、关闭电焊机电源(A ₂)	设备操作员、对讲机、手电筒(M ₂)
C ₃	人仓浓烟溢出(S ₃)	即时环境(E ₃)	打开进气阀、洒水降温(A ₃)	救援人员、水管(M ₃)
C ₄	掌子面坍塌(S ₄)	即时环境(E ₄)	打开土仓闸门(A ₄)	救援人员、扳手(M ₄)
C ₅	刀盘上部空洞、渗水、土块脱落(S ₅)	即时环境(E ₅)	撤出人员、关闭舱门(A ₅)	救援人员(M ₅)
C ₆	盾构机上方路面漏气(S ₆)	即时环境(E ₆)	封堵漏气点、加气保压(A ₆)	救援人员、临时围蔽设施(M ₆)
C ₇	无法侦测生命迹象(S ₇)	即时环境(E ₇)	刀盘冻结加固(A ₇)	液氮冻结人员、冻结设备、救援人员(M ₇)
C ₈	土仓排烟能力恢复(S ₈)	即时环境(E ₈)	关键点检查(A ₈)	检查人员(M ₈)
C ₉	掌子面变形(S ₉)	即时环境(E ₉)	人员撤出、掌子面加固(A ₉)	施工人员、加固设备(M ₉)
C ₁₀	二次坍塌(S ₁₀)	即时环境(E ₁₀)	人员撤出、持续保压救援(A ₁₀)	救援人员(M ₁₀)
C ₁₁	机械被掩埋(S ₁₁)	即时环境(E ₁₁)	清渣加固(A ₁₁)	施工人员(M ₁₁)

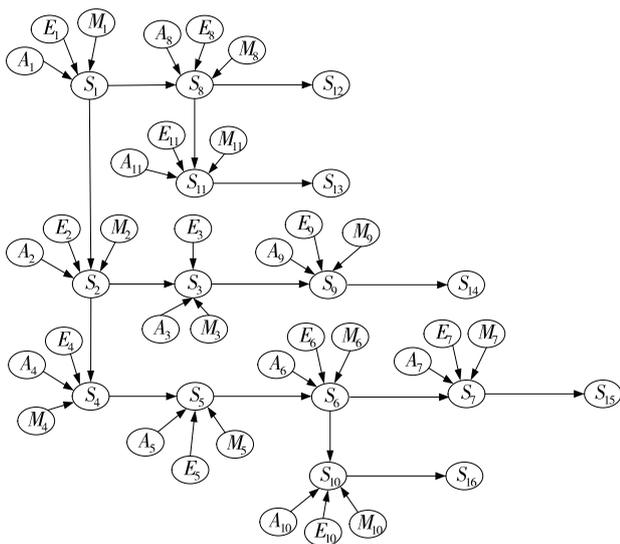


图 4 某轨道交通线路施工坍塌事故情景推演 GeNIe 实现

事件环境进行全面检查并加强现场监控量测。在应急处置时这些措施可最大程度降低损失,但会产生一定的管理成本和工期延误。2) 事故最劣演化路径为 S₁—S₂—S₄—S₅—S₆—S₁₀—S₁₆,它是在诸多不可抗力及不当处置手段综合影响下导致的事故负面影响最大化演化路径。由于应急处置效果未达到预期而导致衍生、次生事故,实际应急处置过程中应采取更严密的监控量测措施,更合理地选择应急处置手段,降低衍生、次生事故发生的可能性。3) 事故实际发展路径为 S₁—S₂—S₄—S₅—S₆—S₇,该路径应急处置过程前期错过了强干预应急处置关键点,但在后期事故应急处置中现场救援处置措施得当,未发生衍生、次生事故,对于相似事故应急决策

具有较好的参考价值。4) 事故最可能发展路径为 S₁—S₂—S₄—S₅—S₆—S₇,该路径与事故实际发展路径一致,说明事故实际应急处置符合事故实际发展规律要求,可为相似事故应急决策提供重要参考。

综上,该事故情景状态在不良事件前期采取强干预策略可有效降低事故不良发展的可能性,事故发生后迅速采取合理的应急处置措施可有效降低事故损失。在与该事故初始情景状态相似的事故决策过程中,借鉴该事故辅助应急决策的方式如下:1) 在事故事态发展前期加大对主要安全控制点的监控,及时检查故障点,判断排烟不良原因并及时采取处理措施;2) 在事态发展的不同阶段,充分考虑事故应急处置过程中 2 个方向的演化路径,结合参考事故在某一节点的发展概率,研判需采取的应急处置方法及强度,进而合理利用应急资源高效地应对事故;3) 在事故终止时,根据事故终止节点的发展概率判断次生、衍生事故发生的可能性,进而采取相应事故修复措施。

5 结语

该文基于情景元理论探讨地铁隧道施工坍塌事故情景元表示方法,提出由事故情景状态、外部环境、应急处置活动和应急资源 4 项情景因素组成的情景元,分析地铁隧道施工坍塌事故的情景演化规律和演化路径,为情景推演奠定基础,为情景理论的应用提供新的视角;引入 DBN 讨论情景推演和应

急处置优化方法,通过网络节点选取、关系分析和概率估计进行推演,结合推演结果对事故应急处置方案进行优化;从最优路径、最劣路径、最可能路径和实际路径分析应急处置优化方法,不同的演化路径对于事故应急处置有不同的指导意义,可为相似事故应急处置决策提供参考。在工程实践中,亦可将其应用于风险管理和应急管理全过程,为相关工作开展提供便利。地铁隧道施工中,对重点隐患事件采取强干预策略可有效控制风险演化为事故,对事故采取充分的处置措施可有效降低事故损失。需加强对关键风险的控制和隐患排查,建立健全的事故应对机制,并采取针对性的强干预策略和应急处置措施减少其负面影响,为生产安全提供保障。但在情景划分和情景推演节点概率确定的过程中主要依赖决策者经验,有待进一步改进,后续研究中可采取更客观的概率确定方法进一步提高决策的合理性。

参考文献:

- [1] 于海莹,彭玉林,张立艳,等.城市地铁施工期事故统计分析[J].地下空间与工程学报,2019,15(增刊2):852-860.
- [2] 夏润禾.基于事故机理和追责的地铁隧道坍塌事故分析与防范策略[J].隧道建设(中英文),2019,39(10):1601-1609.
- [3] DANIEL Alvear, ORLANDO Abreu, ARTURO Cuesta, et al. Decision support system for emergency management: Road tunnels[J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 2013, 34: 13-21.
- [4] 张书丰,朱玉权,沈晓伟.长江漫滩地区深基坑施工对盾构隧道影响及应急保护研究[J].隧道建设,2017,37(10):1246-1254.
- [5] 王莉.基于知识图谱的城市轨道交通建设安全管理智能知识支持研究[D].徐州:中国矿业大学,2019.
- [6] JIANG Xiaoyan, WANG Sai, WANG Jie, et al. A Decision method for construction safety risk management based on ontology and improved CBR: Example of a subway project [J]. International Journal of Environmental Research and Public Health, 2020, 17(11): 3928.
- [7] 李华,李琳倩,益朋.景区密集人群踩踏事故情景分析[J].中国安全科学学报,2020,30(4):108-113.
- [8] 宋英华,刘含笑,蒋新宇,等.基于知识元与贝叶斯网络的食品安全事故情景推演研究[J].情报学报,2018,37(7):712-720.
- [9] 王延章.模型管理的知识及其表示方法[J].系统工程学报,2011,26(6):850-856.
- [10] 王涛.突发公共事件元事件模型及事件演化研究[D].大连:大连理工大学,2011.
- [11] 陶钊希,夏登友,辛晶.基于情景元的重大灾害事故演变路径分析[J].消防科学与技术,2020,39(6):865-869.
- [12] 周志超,盖双双.国内知识元研究的缘起与发展脉络[J].情报科学,2019,38(10):158-163.
- [13] 夏登友,李丞曜,朱毅,等.基于情景元的案例推理及其在应急决策中的应用[J].安全与环境学报,2020,20(3):1028-1033.
- [14] 王宁,刘海园.基于知识元的突发事件情景演化混合推理模型[J].情报学报,2016,35(11):1197-1207.
- [15] 林栋,吕政权,王海峰,等.基于贝叶斯网络的电力安全突发事件情景推演方法研究[J].浙江电力,2019,38(7):86-91.
- [16] 张江石,冯娜娜.基于动态贝叶斯网络情景推演的危化品事故应急处置研究[J].安全与环境学报,2020,20(4):1420-1426.
- [17] CAI Baoping, LIU Hanlin, XIE Min. A real-time fault diagnosis methodology of complex systems using object-oriented Bayesian networks[J]. Mechanical Systems and Signal Processing, 2016, 80: 31-44.
- [18] 巩前胜.基于动态贝叶斯网络的突发事件情景推演模型研究[J].西安石油大学学报(自然科学版),2018,33(2):119-126.
- [19] 饶文利,罗年学.台风风暴潮情景构建与时空推演[J].地球信息科学学报,2020,22(2):187-197.
- [20] 薛亚东,黄宏伟,王永义,等.高速公路隧道工程安全风险理论评估与实践[M].北京:人民交通出版社股份有限公司,2018.
- [21] 李建旺.上伏采空区高速公路隧道开挖灾变演化机制及安全控制关键技术研究[D].北京:北京科技大学,2021.

收稿日期:2021-09-09

(上接第148页)

- 模式研究[D].西安:长安大学,2012.
- [7] 张焱.高速公路日常养护市场化运营状况分析[J].中国公路,2015(21):102-105.
- [8] 左梅玲.我国高速公路养护管理市场化研究[D].西安:长安大学,2013.
- [9] 胡立美.高速公路养护市场化效果评价研究[D].长沙:长沙理工大学,2013.
- [10] 樊娟.唐津高速公路日常养护管理模式分析[J].公路,2014(6):277-279.

收稿日期:2021-07-01