

基于 T-S 模糊故障树和贝叶斯网络的 隧道坍塌易发性评价

陈 舞^{1,2}, 王 浩¹, 张国华¹, 王成汤^{1,2}, 钟国强³

(1. 中国科学院武汉岩土力学研究所 岩土力学与工程国家重点实验室, 武汉 430071;
2. 中国科学院大学, 北京 100049; 3. 山东省交通规划设计院, 济南 250031)

摘 要: 坍塌是钻爆法隧道施工过程中常见的灾害事故之一. 为了有效预防坍塌事故, 为隧道施工安全风险分析和管理提供决策依据, 将 T-S 模糊故障树和贝叶斯网络进行互补融合, 提出了一种基于两者的钻爆法施工隧道坍塌可能性评价方法. 根据 T-S 模糊故障树向贝叶斯网络转化的方法来确定贝叶斯网络模型和条件概率表; 利用模糊数和模糊子集分别描述节点的故障状态和故障概率; 运用贝叶斯网络双向推理算法进行计算. 该方法可以利用根节点的故障概率模糊子集和施工中实际故障状态两种不同的正向推理方式计算隧道坍塌可能性, 并且可以依据根节点的重要度分析结果排查故障, 同时可以通过反向推理计算根节点的后验概率诊断故障. 两个工程实例的应用结果表明, 该方法能够科学、合理地评价隧道坍塌的可能性并确定关键致险因子, 可作为隧道施工安全保障和管理的决策工具.

关键词: 钻爆法施工隧道; 坍塌可能性; T-S 模糊故障树; 贝叶斯网络; 模糊数; 模糊子集; 重要度
中图分类号: U 458 **文献标志码:** A

Evaluation of Tunnel Collapse Susceptibility Based on T-S Fuzzy Fault Tree and Bayesian Network

CHEN Wu^{1,2}, WANG Hao¹, ZHANG Guohua¹, WANG Chengtang^{1,2}, ZHONG Guoqiang³

(1. State Key Laboratory of Geomechanics and Geotechnical Engineering, Institute of Rock and Soil Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Wuhan 430071, China; 2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China; 3. Shandong Provincial Communication Planning and Design Institute, Jinan 250031, China)

Abstract: Collapse is one of the common disasters in the process of drilling and blasting tunnel construction. In order to effectively prevent the collapse accident and provide decision-making basis for safety risk analysis and management of tunnel construction, the T-S fuzzy fault tree and Bayesian network were combined, and an evaluation method based on both of them was proposed to calculate tunnel collapse possibility. According to the transformation of T-S fuzzy fault tree to Bayesian network, the Bayesian network model and conditional probability table were determined. In addition, fuzzy number and fuzzy subset were used to describe the fault state and probability of nodes respectively, and the bidirectional reasoning algorithm of Bayesian network was used to calculate. This method can use two different forward

收稿日期:2019-01-14

基金项目:国家自然科学基金重点项目(41731284),国家自然科学基金面上项目(51579235, 41472288)

作者简介:陈 舞(1994-),男,江西省萍乡市人,博士生,现主要从事隧道安全风险评价方法方面的研究.

通信作者:王 浩,男,研究员,博士生导师,电话(Tel.):027-87197320;E-mail:hwang@whrsm.ac.cn.

inferences to calculate the possibility of tunnel collapse, including the fuzzy subset of root node fault probability and the actual fault state in construction. At the same time, it can check the fault according to the result of importance analysis of root nodes, and can calculate the posterior probability of fault diagnosis of root nodes by back inference. Finally, the application of two engineering examples shows that the method can scientifically evaluate the possibility of tunnel collapse and determine key risk factors. This method can be used as a decision-making tool for tunnel construction safety assurance and management.

Key words: construction tunnel by drilling and blasting; collapse possibility; T-S fuzzy fault tree; Bayesian network; fuzzy number; fuzzy subset; importance

近年来,随着公路、铁路建设工程的快速发展,隧道建设规模不断扩大,隧道施工过程中围岩稳定性问题日益突出,突发性的坍塌事故时有发生^[1-2],已成为影响人员安全和造成工期延误及经济损失的重大隐患。钻爆法是隧道工程常用的施工方法,但存在工序复杂、风险影响因素多、坍塌事故率高等问题。因此,对采用钻爆法施工的隧道进行坍塌可能性评价具有重大意义。

故障树分析法作为大型复杂系统可靠性和安全性分析的有效工具,在隧道坍塌可能性评价方面应用广泛^[3-6]。然而传统故障树中二态、概率和与或关系假设的不足严重限制了故障树分析法的进一步应用。宋华等^[7]提出了一种 T-S 模糊故障树分析方法,用 T-S 门代替与或门来描述事件之间的联系,引入了模糊集合理论,同时考虑了多种故障程度对系统的影响,解决了传统故障树存在的问题,同时降低了建树难度。姚成玉等^[8]则进一步证实了 T-S 模糊故障树分析方法的一般化和精确化。目前该方法已在隧道冻害方面^[9]得到应用。然而,利用 T-S 模糊故障树计算上级事件发生的概率时,只能按照故障树结构从底事件至顶事件逐层计算,计算量大,且不能反向推理,不利于实际工程的推广应用^[10]。

相比于 T-S 模糊故障树分析方法,贝叶斯网络在处理系统多态性和事件逻辑关系、计算分析能力和简便性等方面均具有优势,在隧道工程领域已有较多应用^[11-12]。Wilson 等^[13-14]对传统故障树向贝叶斯网络转化的过程和方法进行了研究;李盼等^[15-16]利用故障树转化得到的贝叶斯网络对井塌事故等进行了危险性分析。但是,以上研究中的贝叶斯网络分析方法均受限于传统故障树,在实际工程中无法进一步发展,贝叶斯网络模型的构造一直是工程应用中的瓶颈。此外,贝叶斯网络推理方法基于根节点精确故障概率进行计算,需要大量的故障数据,但多数系统存在故障数据获取困难、数据适用率低等问题。陆莹等^[17]将模糊集理论引入到贝叶斯网络分析中,

解决了过度依赖精确故障概率的问题,并成功应用在地铁火灾风险预测中,但该研究仅针对二态系统。Sun 等^[18-19]虽然考虑了多态系统的模糊贝叶斯网络,但是受多态和复杂层次结构的影响,贝叶斯网络的条件概率参数难以确定,且无法进行实时动态评估,不利于隧道安全施工和管理。

鉴于 T-S 模糊故障树和贝叶斯网络的优越性及互补性,本文提出一种基于 T-S 模糊故障树和贝叶斯网络的钻爆法施工隧道坍塌可能性评价方法。首先,按照风险分解结构的思路从内因和外因出发,建立了钻爆法施工隧道坍塌 T-S 模糊故障树;其次,通过 T-S 模糊故障树向贝叶斯网络转化的方法确定贝叶斯网络模型和节点条件概率表,利用模糊数和模糊子集分别描述节点的故障状态和故障概率,解决贝叶斯网络模型和节点条件概率表难以构造、过度依赖节点精确故障概率的问题;然后运用贝叶斯网络双向推理算法求解 T-S 模糊故障树,解决其计算复杂、不能进行反向推理的问题;最后,根据建立的钻爆法施工隧道坍塌可能性评估流程分别对厦沙高速三明段秀村隧道和成渝高速公路段缙云山隧道进行分析和计算。

1 基本理论和方法

1.1 基于 T-S 模糊故障树构造贝叶斯网络

T-S 模糊故障树模型如图 1 所示,其中 x_1 、 x_2 、 x_3 为底事件, y_1 为中间事件, y_2 为顶事件,a 和 b 为 T-S 模糊门。

贝叶斯网络是由有向无环图以及条件概率表组成的一个有向无循环网络^[20]。有向无环图由代表变量的节点和代表变量间关系的节点有向边组成,节点包括父节点和子节点,节点之间的连接强度由条件概率确定^[21]。贝叶斯网络中 V_i 和 V_k 表示节点变量,如果 V_i 到 V_k 有一条边,则称 V_i 为 V_k 的父节点,而 V_k 为 V_i 的子节点。简单结构如图 2 所示,没有父节点的节点称为根节点(V_1 、 V_2),没有子节点的节

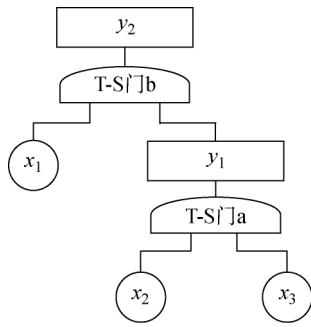


图 1 T-S 模糊故障树模型

Fig. 1 A model of T-S fuzzy fault tree

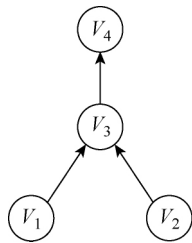


图 2 简单贝叶斯网络

Fig. 2 A simple Bayesian network

点称为叶节点(V_4),其余称为中间节点(V_3).

利用 T-S 模糊故障树构造贝叶斯网络主要过程分为两步:① 确定贝叶斯网络有向无环图;② 确定贝叶斯网络的条件概率参数. 首先将贝叶斯网络的根节点、中间节点和叶节点分别与 T-S 模糊故障树中的底事件、中间事件和顶事件一一对应,当 T-S 模糊故障树中存在多个相同的事件时,在贝叶斯网络中只需建立一个节点;然后根据 T-S 门连接相应的节点,即以输入事件作为父节点,输出事件为子节点,用有向边来连接贝叶斯网络中对应的节点. 将图 1 中 T-S 模糊故障树转化为贝叶斯网络有向无环图,如图 3 所示.

由于 T-S 门中的下一级输入事件与贝叶斯网络条件概率表中的父节点相似,上一级输出事件与子节点相似,同时 T-S 门规则满足条件概率以及独立性,所以利用 T-S 门规则对贝叶斯网络中对应节点的条件概率表进行赋值. 基于 T-S 模糊故障树构造贝叶斯网络具体流程如图 4 所示.

$$\mu(x_i^{a_i}) = \begin{cases} 0, & 0 \leq x < m_0 - s_1 - f_1 \\ \frac{x - (m_0 - s_1 - f_1)}{f_1}, & m_0 - s_1 - f_1 \leq x < m_0 - s_1 \\ 1, & m_0 - s_1 \leq x < m_0 + s_r \\ \frac{(m_0 + s_r + f_r) - x}{f_r}, & m_0 + s_r \leq x < m_0 + s_r + f_r \\ 0, & m_0 + s_r + f_r \leq x \leq 1 \end{cases} \quad (1)$$

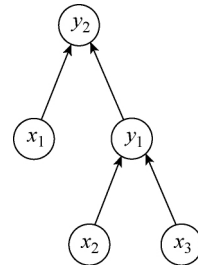


图 3 贝叶斯网络有向无环图

Fig. 3 Directed acyclic graph of Bayesian network

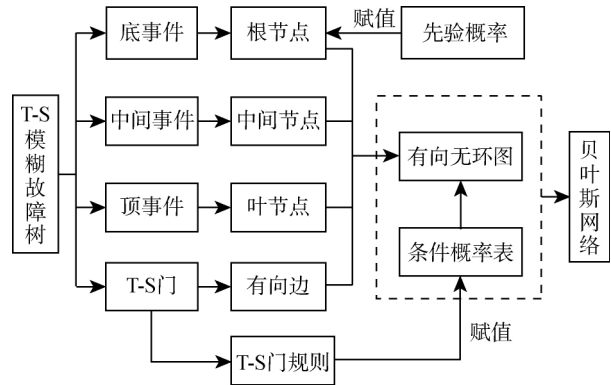


图 4 基于 T-S 模糊故障树构造贝叶斯网络流程图

Fig. 4 Flow chart of Bayesian network construction based on T-S fuzzy fault tree

1.2 节点描述

1.2.1 节点故障状态的模糊数描述 传统故障树系统中,节点仅考虑了“正常”和“故障”两种状态,而实际系统中,节点存在多种故障状态模式,因此本文用分布在 $[0,1]$ 上的模糊数来描述节点的多种故障状态.例如某节点故障程度为无故障、中等故障、严重故障,可分别用模糊数 0、0.5、1 来描述.

假设贝叶斯网络中根节点为 $x_i (i = 1, 2, \dots, n)$,中间节点为 $y_j (j = 1, 2, \dots, m)$,叶节点为 T ,根节点、中间节点和叶节点的故障状态所对应的模糊数分别为 $x_i^{a_i} (a_i = 1, 2, \dots, k_i)$ 、 $y_j^{b_j} (b_j = 1, 2, \dots, \eta_j)$ 、 $T_q (q = 1, 2, \dots, \xi)$,其中 k_i 、 η_j 、 ξ 分别为对应节点的故障状态个数.

选用图 5 所示的梯形隶属函数 $\mu(x_i^{a_i}) = (m_0, s_1, f_1, s_r, f_r)$ 作为根节点故障状态的隶属函数.

式中: m_0 为模糊数支撑集的中心; s_l 和 s_r 为左右支撑半径, 当 $s_l = s_r = 0$ 时, 隶属函数由梯形变为三角形; f_l 和 f_r 为左右模糊区, 当 $f_l = f_r = 0$ 时, 模糊数变为确定数.

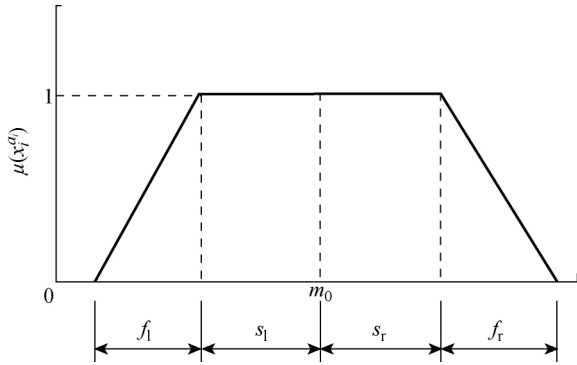


图 5 梯形隶属函数

Fig. 5 Trapezoid membership function

1.2.2 节点故障概率的模糊性描述 针对贝叶斯网络过度依赖节点精确故障概率的问题, 本文采用三角形隶属函数表示的模糊子集来描述节点的故障概率. 设 $x_i = x_i^{a_i}$ 时的故障概率模糊子集为

$$\tilde{P}(x_i^{a_i}) = \{p^m - \Delta p^l, p^m, p^m + \Delta p^r\} \quad (2)$$

式中: p^m 为模糊子集的中心; Δp^l 和 Δp^r 为左右模糊区, 两者取值越大则模糊化程度越高, 当 $\Delta p^l = \Delta p^r = 0$ 时, 模糊子集为精确值. $\tilde{P}(x_i^{a_i})$ 由三角形隶属函数表示如图 6 所示, 并定义为

$$\mu_{\tilde{P}(x_i^{a_i})}(p) = \begin{cases} \max\left\{0, 1 - \frac{p^m - p}{\Delta p^l}\right\}, & 0 \leq p \leq p^m \\ \max\left\{0, 1 - \frac{p - p^m}{\Delta p^r}\right\}, & p^m < p \leq 1 \end{cases} \quad (3)$$

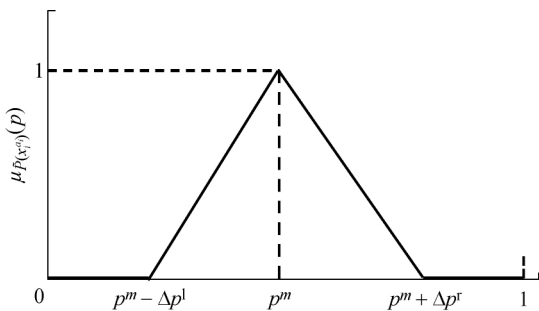


图 6 三角形隶属函数

Fig. 6 Triangular membership function

1.3 基于贝叶斯网络的 T-S 模糊故障树正向推理

若已知各根节点在各故障状态下的故障概率模糊子集分别为 $\tilde{P}(x_1^{a_1}), \tilde{P}(x_2^{a_2}), \dots, \tilde{P}(x_n^{a_n})$, 则应用

桶消元法^[22] 可以计算得到 $T = T_q$ 时的故障概率模糊子集:

$$\begin{aligned} \tilde{P}(T = T_q) &= \sum_{x_i; y_j} \tilde{P}(x_i; y_j; T = T_q) = \\ &= \sum_{\pi(T)} \tilde{P}(T = T_q | \pi(T)) \times \\ &= \sum_{\pi(y_1)} \tilde{P}(y_1 | \pi(y_1)) \times \\ &= \sum_{\pi(y_2)} \tilde{P}(y_2 | \pi(y_2)) \times \dots \times \\ &= \sum_{\pi(y_m)} \tilde{P}(y_m | \pi(y_m)) \times \\ &= \tilde{P}(x_1^{a_1}) \times \tilde{P}(x_2^{a_2}) \times \dots \times \tilde{P}(x_n^{a_n}) \end{aligned} \quad (4)$$

式中: $\pi(T)$ 为 T 的父节点集合; $\pi(y_j)$ 为 y_j 的父节点集合.

若已知各根节点的当前故障状态为 $x_i' = (x_1', x_2', \dots, x_n')$, 则同理可以计算得到 $T = T_q$ 时的发生概率:

$$\begin{aligned} P(T = T_q) &= \sum_{x_i; y_j} P(x_i'; y_j; T = T_q) = \\ &= \sum_{\pi(T)} P(T = T_q | \pi(T)) \times \\ &= \sum_{\pi(y_1)} P(y_1 | \pi(y_1)) \times \\ &= \sum_{\pi(y_2)} P(y_2 | \pi(y_2)) \times \dots \times \\ &= \sum_{\pi(y_m)} P(y_m | \pi(y_m)) \times \\ &= \mu_{x_1^{a_1}}(x_1') \times \mu_{x_2^{a_2}}(x_2') \times \dots \times \mu_{x_n^{a_n}}(x_n') \end{aligned} \quad (5)$$

式中: $\mu_{x_i^{a_i}}(x_i')$ 表示 x_i 在 x_i' 时隶属于贝叶斯网络条件概率表根节点故障状态的隶属度.

1.4 敏感性分析

1.4.1 根节点模糊重要度 根节点模糊重要度反映了根节点故障状态从 0 到 1 演变过程中对叶节点处于指定故障状态的平均影响程度, 表示为^[23]

$$I_{T_q}^{F_u}(x_i) = \frac{1}{k_i - 1} \sum_{a_i=1}^{k_i} E(A - B) \quad (6)$$

式中: $A = \tilde{P}(T = T_q | \tilde{P}(x_i = x_i^{a_i}) = 1)$, 表示 $x_i = x_i^{a_i}$ 在故障概率模糊子集为 1 时, $T = T_q$ 的模糊子集; $B = \tilde{P}(T = T_q | \tilde{P}(x_i = x_i^{a_i}) = 0)$, 表示 $x_i = x_i^{a_i}$ 在故障概率模糊子集为 0 时, $T = T_q$ 的模糊子集; $A - B$ 为 x_i 在故障状态为 $x_i^{a_i}$ 的单独条件下, $T = T_q$ 的模糊子集; $E(A - B)$ 为模糊子集的重心值, 为一精确值.

1.4.2 根节点状态重要度 在实际工程中根节点的当前故障状态是唯一的, 则根节点状态重要度为

$$I_{T_q}^D(x'_i) = \max\{(P(T = T_q | x_i = x'_i) - P(T = T_q, x_i = 0)), 0\} \quad (7)$$

式中： $P(T = T_q | x_i = x'_i)$ 为 $x_i = x'_i$ 时， $T = T_q$ 的发生概率； $P(T = T_q | x_i = 0)$ 为 x_i 当前故障状态为 0 时， $T = T_q$ 的发生概率。

1.5 基于贝叶斯网络的 T-S 模糊故障树反向推理

运用贝叶斯条件概率公式可以求得在 $T = T_q$ 时， $x_i = x_i^{a_i}$ 的后验概率^[23]：

$$P(x_i = x_i^{a_i} | T = T_q) = \frac{E\left(\frac{\tilde{P}(x_i = x_i^{a_i} | T = T_q)}{\tilde{P}(T = T_q)}\right)}{E\left(\frac{\tilde{P}(x_i = x_i^{a_i} | T = T_q)}{\tilde{P}(T = T_q)}\right)} \quad (8)$$

式中： $\tilde{P}(x_i = x_i^{a_i} | T = T_q)$ 为 $T = T_q$ 时， $x_i = x_i^{a_i}$ 的后验概率模糊子集； $E\left(\frac{\tilde{P}(x_i = x_i^{a_i} | T = T_q)}{\tilde{P}(T = T_q)}\right)$ 为模糊子集的重心值，为一精确值。

2 基于 T-S 模糊故障树和贝叶斯网络的隧道坍塌评估流程

采用钻爆法施工的隧道进行坍塌可能性评价技术线路如图 7 所示。具体实施步骤如下。

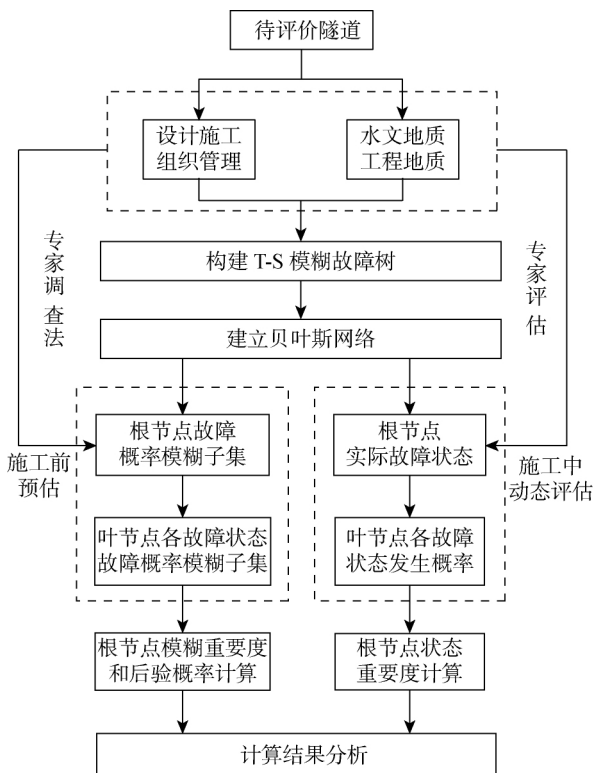


图 7 基于 T-S 模糊故障树和贝叶斯网络的隧道坍塌可能性评估流程

Fig. 7 Evaluation process of collapse possibility of construction tunnel based on T-S fuzzy fault tree and Bayesian network

(1) T-S 模糊故障树的建立. 按照风险分解结构的思路从内因(自然条件)和外因(人为因素,包括设计、施工和组织管理)出发, 建立用来分析隧道坍塌发生机理的钻爆法施工隧道坍塌 T-S 模糊故障树(见图 8), 其中隧道坍塌(T)为顶事件, $x_1 \sim x_{26}$ 为 26 个底事件, 其余为中间事件, 并由上往下按照 A、B、C、D 进行编号。

(2) 贝叶斯网络的建立. 首先根据图 4 所示方法将图 8 中的 T-S 模糊故障树转化为贝叶斯网络有向无环图(见图 9), 中间节点 $y_1 \sim y_{17}$ 对应的中间事件见表 1; 然后利用 T-S 门规则, 根据历史数据采用专家调查权重法对贝叶斯网络节点的条件概率表进行赋值, 确定节点的条件概率表, 完成贝叶斯网络的建立, 各专家的权重值同参考文献^[19]。

(3) 确定根节点的故障概率模糊子集. 通过专家调查权重法, 采用模糊子集来描述根节点故障概率, 具体过程如下: ① 施工前, 专家按照《Guidelines for tunnelling risk management》^[24] 中风险发生可能性等级标准(见表 2), 确定待评价隧道根节点发生的可能性等级; ② 专家通过结合个人经验或参考相关资料在选定等级内确定具体可能性数值; ③ 采用加权平均的方法对各专家的调查结果进行处理分析, 得到各根节点的 p^m ; ④ 汇总调查结果, 对 p^m 进行模糊化处理, 确定 Δp^l 和 Δp^r , 最终确定根节点的故障概率模糊子集。

(4) 预评估. 根据建立的贝叶斯网络, 结合根节点的故障概率模糊子集, 利用式(4)进行正向推理, 进行隧道施工前的预评估, 得到叶节点的故障概率模糊子集。

(5) 计算根节点模糊重要度和后验概率. 利用式(6)计算根节点的模糊重要度, 进行敏感性分析, 确定关键致险因子. 同时利用贝叶斯网络反向推理方法, 根据叶节点各故障条件计算根节点的后验概率。

(6) 施工中的动态评估. 具体过程如下: ① 专家对各根节点可能的故障状态进行预评估, 得到各根节点的当前故障状态; ② 利用式(1)确定各根节点故障状态对应的隶属度; ③ 利用式(5)计算得到叶节点各故障状态发生概率, 实现隧道施工过程中的实时动态评估。

(7) 计算根节点状态重要度. 根据各根节点的当前故障状态, 利用式(7)计算各根节点状态重要度. 在仅知根节点故障状态的情况下, 确定系统相对薄弱的环节, 便于隧道安全施工和管理。

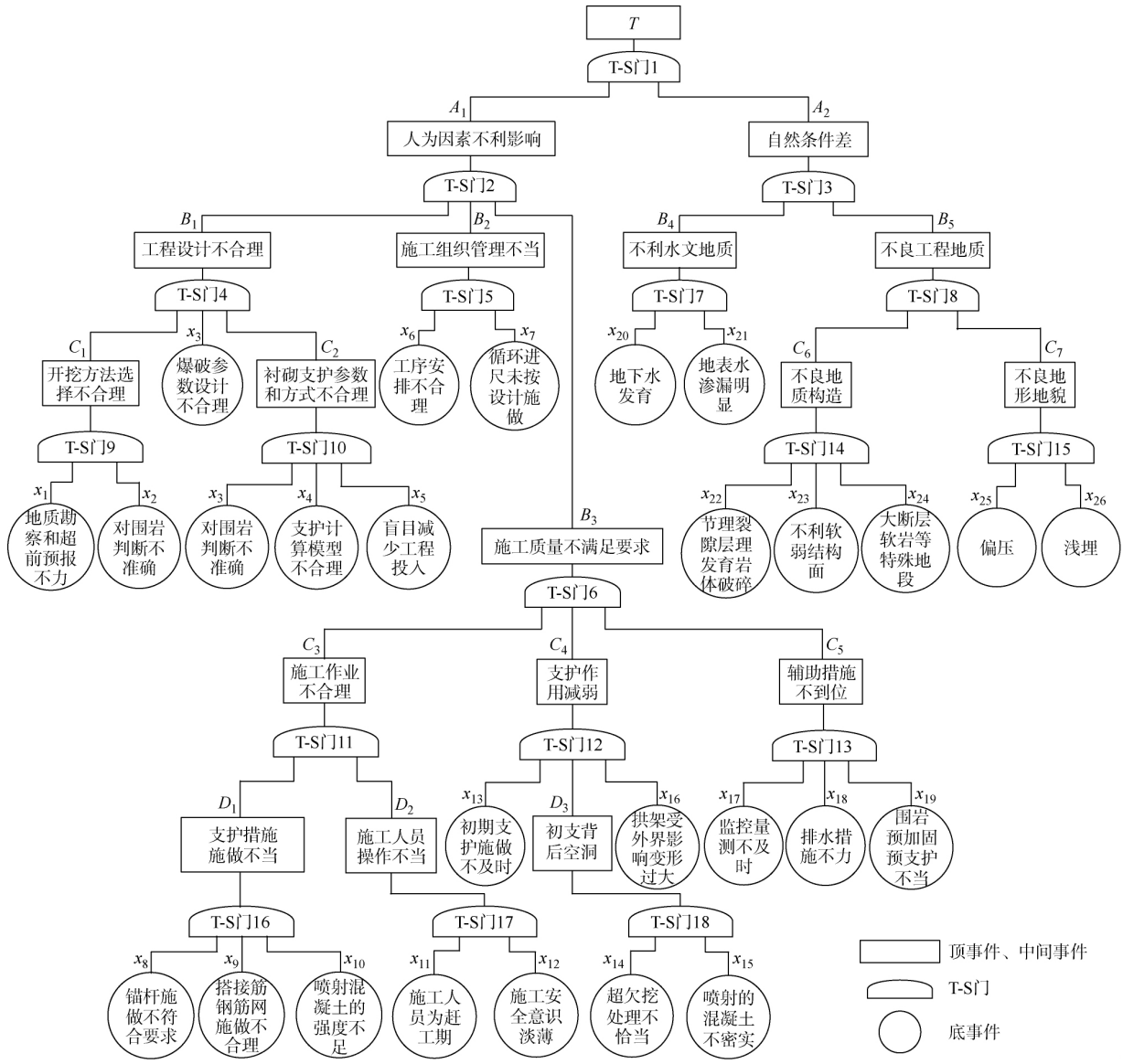


图 8 钻爆法施工隧道坍塌 T-S 模糊故障树

Fig. 8 T-S fuzzy fault tree for construction tunnel by drilling and blasting

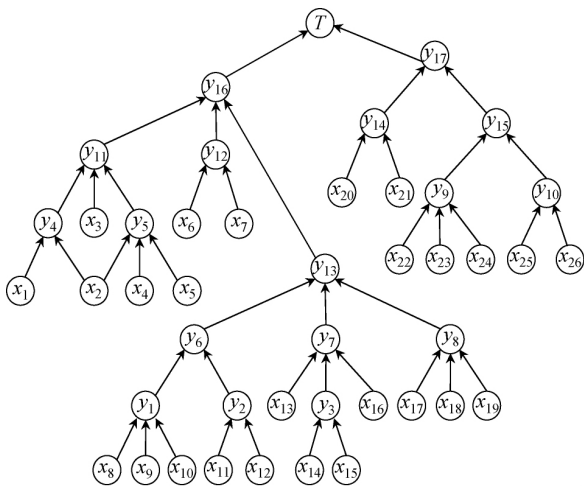


图 9 钻爆法施工隧道坍塌贝叶斯网络模型

Fig. 9 Bayesian network model for construction tunnel by drilling and blasting

表 1 中间节点对应的中间事件

Tab. 1 Intermediate events correspond to intermediate nodes

中间节点	中间事件名称	中间节点	中间事件名称
y1	支护措施不当	y10	不良地形地貌
y2	施工人员操作不当	y11	工程设计不合理
y3	初支背后空洞	y12	施工组织管理不当
y4	开挖方法选择不合理	y13	施工质量不满足要求
y5	衬砌支护参数和方式不合理	y14	不利水文地质
y6	施工作业不合理	y15	不良工程地质
y7	支护作用减弱	y16	人为因素不利影响
y8	辅助措施不到位	y17	自然条件差
y9	不良地质构造	—	—

表2 风险发生可能性等级标准^[24]
Tab. 2 Grade standard of risk possibility^[24]

等级	可能性	概率
I	频繁的	[0.1,1]
II	可能的	[0.01,0.1)
III	偶尔的	[0.001,0.01)
IV	罕见的	[0.0001,0.001)
V	不可能的	[0,0.0001)

3 工程应用

3.1 工程案例一

在建厦沙高速三明段秀村隧道为左、右分离双车道公路隧道,采用新奥法设计和施工,钻爆法开挖.对里程 K163+320 处 F18 断层的破碎带进行坍塌可能性评价,该段采用预留核心土的短台阶法开挖,初期支护采用钢拱架和锚杆挂钢筋网支护.该段出露在“U”型河谷的谷底,两侧发育有 I、II 级阶地,隧道轴线以大角度穿过 F18 断层带.通过地质勘察资料与现场调查研究,隧道埋深近 210 m, F18 断裂带长度大于 20 km,宽度约 40 m,风化程度较高;带内岩石为松散、破碎、较软的 V 级围岩,土石混合,完整性较差、自稳能力差;地下水丰富等.因此有必要对该段进行坍塌可能性评价.

假设根节点 x_{24} 、 x_{26} 故障状态表现为二态:无故障和严重故障,分别用模糊数 0、1 表示;其余节点故

障状态表现为多态:无故障、中等故障和严重故障,分别用模糊数 0、0.5、1 表示.结合秀村隧道的现场施工组织设计、拟采用的开挖工法和监控量测情况,结合相关文献资料^[3-6],得到各根节点故障状态为 1 的故障概率模糊子集 $\tilde{P}(x_i=1)$,如表 3 所示.其中中间元素为模糊子集中心,模糊化参数 $\Delta p^l = \Delta p^r = 0.15p^m$.为便于分析,本文假设根节点故障状态为 0.5 和 1 的故障概率模糊子集相同.

根据历史数据采用专家调查权重法得到贝叶斯网络节点的条件概率表,列出了贝叶斯网络中间节点 y_2 的条件概率表,如表 4 所示.其中,规则 1 表示在 x_{11} 为 0、 x_{12} 为 0 的条件下, y_2 为 0 的可能性为 1、为 0.5 和 1 的可能性为 0,其他规则可以此类推.

根据 x_{11} 、 x_{12} 的故障概率模糊子集和 y_2 的条件概率表,利用式(4)求得 y_2 在各种故障状态的故障概率模糊子集分别为

表3 根节点故障概率模糊子集
Tab. 3 Fault probability fuzzy subset of root nodes

根节点	$\tilde{P}(x_i=1)$	根节点	$\tilde{P}(x_i=1)$
x_1	{0.000 42, 0.000 50, 0.000 58}	x_{14}	{0.005 52, 0.006 50, 0.007 48}
x_2	{0.000 68, 0.000 80, 0.000 92}	x_{15}	{0.006 80, 0.008 00, 0.009 20}
x_3	{0.000 51, 0.000 60, 0.000 69}	x_{16}	{0.000 34, 0.000 40, 0.000 46}
x_4	{0.003 40, 0.004 00, 0.004 60}	x_{17}	{0.000 60, 0.000 70, 0.000 80}
x_5	{0.006 80, 0.008 00, 0.009 20}	x_{18}	{0.005 10, 0.006 00, 0.006 90}
x_6	{0.000 09, 0.000 10, 0.000 11}	x_{19}	{0.000 07, 0.000 08, 0.000 09}
x_7	{0.004 25, 0.005 00, 0.005 75}	x_{20}	{0.020 65, 0.024 30, 0.027 95}
x_8	{0.006 80, 0.008 00, 0.009 20}	x_{21}	{0.127 50, 0.150 00, 0.172 50}
x_9	{0.000 09, 0.000 10, 0.000 11}	x_{22}	{0.085 00, 0.100 00, 0.115 00}
x_{10}	{0.000 09, 0.000 10, 0.000 11}	x_{23}	{0.000 05, 0.000 06, 0.000 07}
x_{11}	{0.021 25, 0.025 00, 0.028 75}	x_{24}	{0.680 00, 0.800 00, 0.920 00}
x_{12}	{0.110 50, 0.130 00, 0.149 50}	x_{25}	{0.170 00, 0.200 00, 0.230 00}
x_{13}	{0.005 95, 0.007 00, 0.008 05}	x_{26}	{0.000 07, 0.000 08, 0.000 09}

表 4 中间节点 y_2 条件概率表

Tab. 4 Conditional probability of intermediate node y_2

规则	x_{11}	x_{12}	y_2		
			0	0.5	1
1	0	0	1	0	0
2	0	0.5	0.2	0.7	0.1
3	0	1	0	0.2	0.8
4	0.5	0	0.5	0.4	0.1
5	0.5	0.5	0.1	0.5	0.4
6	0.5	1	0	0	1
7	1	0	0	0.1	0.9
8	1	0.5	0	0	1
9	1	1	0	0	1

$$\begin{aligned} \tilde{P}(y_2 = 0) &= \sum_{x_{11}, x_{12}} \tilde{P}(x_{11}, x_{12}; y_2 = 0) = \\ &\sum_{x_{11}, x_{12}} \tilde{P}(y_2 = 0 | x_{11}, x_{12}) \times \tilde{P}(x_{11}) \times \tilde{P}(x_{12}) = \\ &\{0.775\ 57, 0.737\ 27, 0.699\ 38\} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \tilde{P}(y_2 = 0.5) &= \sum_{x_{11}, x_{12}} \tilde{P}(x_{11}, x_{12}; y_2 = 0.5) = \\ &\sum_{x_{11}, x_{12}} \tilde{P}(y_2 = 0.5 | x_{11}, x_{12}) \times \tilde{P}(x_{11}) \times \tilde{P}(x_{12}) = \\ &\{0.104\ 67, 0.122\ 03, 0.139\ 04\} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \tilde{P}(y_2 = 1) &= \sum_{x_{11}, x_{12}} \tilde{P}(x_{11}, x_{12}; y_2 = 1) = \\ &\sum_{x_{11}, x_{12}} \tilde{P}(y_2 = 1 | x_{11}, x_{12}) \times \tilde{P}(x_{11}) \times \tilde{P}(x_{12}) = \\ &\{0.119\ 76, 0.140\ 70, 0.161\ 58\} \end{aligned}$$

上述结果表明, y_2 出现中等和严重故障的概率很小,而无故障的概率很大,与实际情况相符.根据构建的贝叶斯网络,利用该方法并结合节点的条件概率表求得叶节点故障状态为 0、0.5、1 的故障概率模糊子集分别为

$$\tilde{P}(T = 0) = \{0.149\ 24, 0.087\ 36, 0.041\ 54\}$$

$$\tilde{P}(T = 0.5) = \{0.125\ 78, 0.119\ 53, 0.110\ 09\}$$

$$\tilde{P}(T = 1) = \{0.724\ 98, 0.793\ 11, 0.848\ 37\}$$

结果表明秀村隧道出现“严重”坍塌的概率很大,而出现“中等”和“无”坍塌的概率很小,与现场实际开挖结果相吻合:隧道开挖掌子面接近 F18 断层破碎带时,出现了数次围岩变形超警戒,局部初期支护结构发生大变形;当开挖面揭露断层破碎带时,发生了大规模坍塌.该案例验证了本文方法的可行性和准确性.

实际工程中,一般更加关注对隧道坍塌起重要作用的因素以及各致险因子的控制顺序.利用式(6)求得根节点对 T_q 分别为 0.5 和 1 时的模糊重要度

(见表 5).同时在仅考虑受人为因素不利影响的情况下,利用式(8)求得在已知 T 故障发生的条件下, $x_1 \sim x_{19}$ 的后验概率(见图 10).

表 5 根节点模糊重要度

Tab. 5 Fuzzy importance of root nodes

根节点	模糊重要度		根节点	模糊重要度	
	$I_{0.5}^{Fu}(x_i)$	$I_1^{Fu}(x_i)$		$I_{0.5}^{Fu}(x_i)$	$I_1^{Fu}(x_i)$
x_1	—	0.129 94	x_{14}	—	0.101 02
x_2	—	0.148 35	x_{15}	—	0.136 85
x_3	—	0.132 71	x_{16}	—	0.139 95
x_4	—	0.130 61	x_{17}	—	0.068 13
x_5	—	0.131 25	x_{18}	—	0.130 49
x_6	—	0.136 39	x_{19}	—	0.129 48
x_7	—	0.137 28	x_{20}	0.001 92	0.091 98
x_8	—	0.130 15	x_{21}	0.003 09	0.111 41
x_9	—	0.128 81	x_{22}	0.001 83	0.075 01
x_{10}	—	0.128 81	x_{23}	0.001 49	0.064 57
x_{11}	—	0.122 76	x_{24}	—	0.341 27
x_{12}	—	0.138 37	x_{25}	0.008 86	0.076 58
x_{13}	—	0.134 01	x_{26}	—	0.080 89

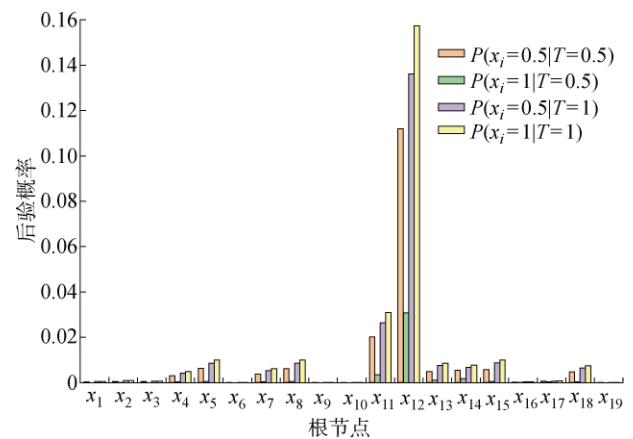


图 10 根节点 $x_1 \sim x_{19}$ 的后验概率

Fig. 10 Posterior probability of root nodes $x_1 \sim x_{19}$

由表 5 可知,在已知根节点故障概率模糊子集的情况下,仅考虑受人为因素不利影响的根节点中, x_2 的模糊重要度最大,因此在隧道实际开挖过程中,准确地判断出前方 F18 断层破碎带对预防隧道严重坍塌的效果最为明显,同时可以按照 $x_{16}x_{12}x_7x_{15}x_6x_{13}$ 的顺序进行故障排查.

由图 10 可知,当隧道发生“中等”坍塌事故时,若检测中等故障的根节点,应该按照 $x_{12}x_{11}x_5x_8x_{15}x_{14}x_{13}x_{18}x_7$ 的顺序,若检测严重故障的根节点,应该按照 $x_{12}x_{11}x_{14}x_{13}x_{15}x_5x_8x_{18}x_{17}$ 的顺序;当隧

道发生“严重”坍塌事故时,若检测中等故障的根节点,应该按照 $x_{12} x_{11} x_{15} x_5 x_8 x_{13} x_{14} x_{18} x_7$ 的顺序;若检测严重故障的根节点,应该按照 $x_{12} x_{11} x_5 x_8 x_{15} x_{13} x_{14} x_{18} x_7$ 的顺序. 综上可知,一旦隧道发生坍塌事故,应该优先排查“施工人员是否出现安全意识淡薄和赶工期的情况”,这一结论与实际情况相吻合.

3.2 工程案例二

缙云山隧道采用新奥法设计和施工,除出口端 840 m 左右采用台阶法(上部台阶高度为 5.5 m)施工外,其余均采用全断面开挖,支护以常规喷锚支护为主,在 V 级围岩设格栅钢支撑,间距 1.0 m,部分地段增设钢筋网. 经调查发现,该隧道在施工过程中先后发生了 5 次较大规模的坍塌事故,其中 4 号事故坍塌长 22 m,宽 10~14 m,坍塌高度 18~25 m,塌方数量达 4 000~5 000 m³. 经调查,事故原因是岩体破碎、节理发育和地下水作用导致喷射的混凝土不密实,断层破碎带影响以及施工时没有安设格栅,最终造成坍塌.

利用基于根节点实际故障状态的计算方法,根据构建的贝叶斯网络,对上述坍塌事故进行动态评估,参照文献[4]并利用式(1)可得各根节点当前故障状态的隶属度,如表 6 所示,其中左右支撑半径 $s_l = s_r = 0.1$,左右模糊区 $f_l = f_r = 0.3$.

表 6 根节点当前故障状态的隶属度

Tab. 6 Membership degree of current fault state of root node

根节点	当前故障状态	隶属度		
		$\mu_{\bar{x}_i}^{a_i}(x'_i)=0$	$\mu_{\bar{x}_i}^{a_i}(x'_i)=0.5$	$\mu_{\bar{x}_i}^{a_i}(x'_i)=1$
x_{11}	$x_{11}=0.15$	5/6	1/6	0
x_{12}	$x_{12}=0.13$	9/10	1/10	0
x_{15}	$x_{15}=0.20$	2/3	1/3	0
x_{19}	$x_{19}=0.20$	2/3	1/3	0
x_{20}	$x_{20}=0.20$	2/3	1/3	0
x_{22}	$x_{22}=0.50$	0	1	0
x_{23}	$x_{23}=0.50$	0	1	0
x_{24}	$x_{24}=0.32$	4/15	11/15	0
其他	0	1	0	0

根据表 4 和 6,利用式(5)可以得到 y_2 各种故障状态的发生概率:

$$P(y_2 = 0) = \sum_{x_{11}, x_{12}} P(x'_{11}, x'_{12}; y_2 = 0) = \sum_{x_{11}, x_{12}} P(y_2 = 0 | x_{11}, x_{12}) \times \mu_{\bar{x}_{11}}^{a_{11}}(x'_{11}) \times \mu_{\bar{x}_{12}}^{a_{12}}(x'_{12}) = 0.843\ 33$$

$$P(y_2 = 0.5) = \sum_{x_{11}, x_{12}} P(x'_{11}, x'_{12}; y_2 = 0.5) = \sum_{x_{11}, x_{12}} P(y_2 = 0.5 | x_{11}, x_{12}) \times \mu_{\bar{x}_{11}}^{a_{11}}(x'_{11}) \times \mu_{\bar{x}_{12}}^{a_{12}}(x'_{12}) = 0.126\ 67$$

$$P(y_2 = 1) = \sum_{x_{11}, x_{12}} P(x'_{11}, x'_{12}; y_2 = 1) = \sum_{x_{11}, x_{12}} P(y_2 = 1 | x_{11}, x_{12}) \times \mu_{\bar{x}_{11}}^{a_{11}}(x'_{11}) \times \mu_{\bar{x}_{12}}^{a_{12}}(x'_{12}) = 0.030\ 00$$

上述结果表明,当“施工人员出现轻度赶工”但“施工安全意识较强”时,发生“施工人员操作不当”的事故概率很小,该结果与实际情况相符. 同理求得叶节点各故障状态的发生概率:

$$P(T = 0) = 0.070\ 12$$

$$P(T = 0.5) = 0.136\ 98$$

$$P(T = 1) = 0.792\ 90$$

根据上述计算结果,缙云山隧道出现“严重”坍塌的可能性约为 0.8,极有可能发生严重坍塌事故,与文献[4]采用事故树分析方法计算结果相吻合.

利用式(7)计算各根节点对 T_q 分别为 0.5 和 1 时的状态重要度,如表 7 所示.

表 7 根节点状态重要度

Tab. 7 State importance of root nodes

根节点	状态重要度	
	$I_{0.5}^{D_e}(x'_i)$	$I_1^{D_e}(x'_i)$
x_{11}	0	0.007 67
x_{12}	0	0.006 44
x_{15}	0	0.025 59
x_{19}	0	0.021 13
x_{20}	0	0.024 65
x_{22}	0	0.278 41
x_{23}	0	0.278 41
x_{24}	0	0.255 54
其他	0	0

由表 7 可知,仅考虑受人为因素不利影响的根节点,当隧道发生“严重”坍塌事故时, x_{15} 为系统最薄弱的环节. 因此,当岩体破碎、节理发育、有地下水作用和断层破碎带影响时,施工方应该高度重视,在加强施工人员安全意识的同时,严格遵守施工组织管理规章制度,并及时进行初期支护以及做好围岩的预加固和预支护,防止隧道坍塌事故的发生. 案例二进一步验证了本文方法的可行性和准确性.

4 结论

- (1) 将 T-S 模糊故障树和贝叶斯网络进行互补

融合,不仅弥补了传统贝叶斯网络无法描述节点之间模糊逻辑关系的不足,而且解决了贝叶斯网络模型和节点条件概率表难以构造、过度依赖精确故障概率以及 T-S 故障树运算复杂、不能双向推理的问题,拓宽了故障树和贝叶斯网络分析方法的应用范围。

(2) 基于 T-S 模糊故障树和贝叶斯网络的隧道坍塌可能性评估方法,不仅实现了用根节点的先验故障概率模糊子集和施工中实际故障状态两种不同的正向推理方式计算隧道坍塌可能性,而且可以根据根节点重要度分析结果进行故障排查,同时可以通过反向推理计算根节点后验概率,对系统进行故障诊断,为隧道施工安全风险分析和管理的决策依据。

(3) 将所提方法分别应用于采用钻爆法施工的秀村隧道和缙云山隧道,得到的结果与实际情况相吻合,验证了该评价方法的可行性,可作为隧道施工安全保障和管理的决策工具。

参考文献:

- [1] 陈洁金,周峰,阳军生,等. 山岭隧道塌方风险模糊层次分析[J]. 岩土力学, 2009, 30(8): 2365-2370. CHEN Jiejing, ZHOU Feng, YANG Junsheng, *et al.* Fuzzy analytic hierarchy process for risk evaluation of collapse during construction of mountain tunnel[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2009, 30(8): 2365-2370.
- [2] 周峰. 山岭隧道塌方风险模糊层次评估研究[D]. 长沙: 中南大学, 2008. ZHOU Feng. Fuzzy level assessment of collapse risk in mountain tunnel[D]. Changsha: Central South University, 2008.
- [3] 王燕,黄宏伟,薛亚东. 钻爆法施工隧道塌方风险分析[J]. 沈阳建筑大学学报(自然科学版), 2009, 25(1): 23-27. WANG Yan, HUANG Hongwei, XUE Yadong. Risk analysis of tunnel collapse in drilling and blasting construction tunnel [J]. **Journal of Shenyang Jianzhu University (Natural Science)**, 2009, 25(1): 23-27.
- [4] 周建昆,吴坚. 岩石公路隧道塌方风险事故树分析[J]. 地下空间与工程学报, 2008, 4(6): 991-998. ZHOU Jiankun, WU Jian. Fault tree analysis of the collapse risk in rock highway tunnel [J]. **Chinese Journal of Underground Space and Engineering**, 2008, 4(6): 991-998.
- [5] 南宇宏,赵颂,羊正茂. 基于事故树的隧道塌方风险评估[J]. 筑路机械与施工机械化, 2017, 34(7): 106-110. NAN Yuhong, ZHAO Song, YANG Zhengmao. Risk assessment of tunnel collapse based on fault tree analysis[J]. **Road Machinery & Construction Mechanization**, 2017, 34(7): 106-110.
- [6] 李梓源,王海亮,张旭阳,等. 小径距浅埋隧道塌方成因事故树分析[J]. 安全与环境工程, 2017, 24(1): 158-161. LI Ziyuan, WANG Hailiang, ZHANG Xuyang, *et al.* FEA on the collapse cause of small-diameter and shallow-buried tunnels[J]. **Safety and Environmental Engineering**, 2017, 24(1): 158-161.
- [7] 宋华,张洪钺,王行仁. T-S 模糊故障树分析方法[J]. 控制与决策, 2005, 20(8): 854-859. SONG Hua, ZHANG Hongyue, WANG Xingren. Fuzzy fault tree analysis based on T-S model[J]. **Control and Decision**, 2005, 20(8): 854-859.
- [8] 姚成玉,张茨驿,王旭峰,等. T-S 模糊故障树重要度分析方法[J]. 中国机械工程, 2011, 22(11): 1261-1268. YAO Chengyu, ZHANG Yingyi, WANG Xufeng, *et al.* Importance analysis method of fuzzy fault tree based on T-S model[J]. **China Mechanical Engineering**, 2011, 22(11): 1261-1268.
- [9] 罗彦斌,陈建勋,王梦恕. 基于 T-S 模糊故障树理论的公路隧道冻害分析方法[J]. 北京交通大学学报, 2012, 36(4): 55-60. LUO Yanbin, CHEN Jianxun, WANG Mengshu. Method for analyzing the highway tunnel freeze injury based on the T-S fuzzy fault tree theory[J]. **Journal of Beijing Jiaotong University**, 2012, 36(4): 55-60.
- [10] 付大伟. 基于贝叶斯网络汽车起重机液压系统可靠性分析[D]. 太原: 太原科技大学, 2016. FU Dawei. Reliability analysis of hydraulic system of truck crane based on Bayesian network[D]. Taiyuan: Taiyuan University of Science and Technology, 2016.
- [11] SCHUBERT M, HØJ N P, RAGNØY A, *et al.* Risk assessment of road tunnels using bayesian networks[J]. **Procedia Social and Behavioral Sciences**, 2012, 48(2307): 2697-2706.
- [12] SOUSA R L, EINSTEIN H H. Risk analysis during tunnel construction using Bayesian networks; Porto Metro case study [J]. **Tunnelling and Underground Space Technology**, 2011, 27(1): 86-100.
- [13] WILSON A G, HUZURBAZAR A V. Bayesian networks for multilevel system reliability[J]. **Reliability Engineering & System Safety**, 2007, 92(10): 1413-1420.
- [14] KHAKZAD N, KHAN F, AMYOTTE P. Safety

- analysis in process facilities: Comparison of fault tree and Bayesian network approaches[J]. **Reliability Engineering & System Safety**, 2011, 96(8): 925-932.
- [15] 李盼, 樊建春, 刘书杰. 基于故障树与贝叶斯网络的钻井井塌事故的定量分析[J]. **中国安全生产科学技术**, 2014, 10(1): 143-149.
LI Pan, FAN Jianchun, LIU Shujie. Quantitative analysis of borehole collapse in drilling base on fault tree analysis and Bayesian networks[J]. **Journal of Safety Science and Technology**, 2014, 10(1): 143-149.
- [16] 侯本申. 浅埋隧道全封闭喷涂防水体系及其可靠性研究[D]. 成都: 西南交通大学, 2017.
HOU Benshen. Research on fuzzy enclosed spraying waterproof system and reability of shallowtunnel[D]. Chengdu: Southwest Jiao Tong University, 2017.
- [17] 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): 1110-1114.
LU Ying, LI Qiming, ZHOU Zhipeng. Safety risk prediction of subway operation based on fuzzy Bayesian network[J]. **Journal of Southeast University (Natural Science Edition)**, 2010, 40(5): 1110-1114.
- [18] SUN J, LIU B, CHU Z, *et al.* Tunnel collapse risk assessment based on multistate fuzzy Bayesian networks[J]. **Quality & Reliability Engineering International**, 2018, 34(8): 1646-1662.
- [19] ZHANG L, WU X, QIN Y, *et al.* Towards a fuzzy Bayesian network based approach for safety risk analysis of tunnel-induced pipeline damage[J]. **Risk Analysis**, 2015, 36(2): 278.
- [20] 戚珩, 李光, 姜晨, 等. 基于贝叶斯网络的复杂系统多态可靠性分析[J]. **现代制造工程**, 2014, 12(1): 92-96.
QI Heng, LI Guang, JIANG Chen, *et al.* Reliability analysis of multi-state system based on Bayesian networks[J]. **Modern Manufacturing Engineering**, 2014, 12(1): 92-96.
- [21] 何立华, 魏琪, 李奕睿. 基于故障树和贝叶斯网络的建筑施工火灾风险评价[J]. **工程管理学报**, 2017, 31(5): 107-111.
HE Lihua, WEI Qi, LI Yirui. Fire risk asseement of building construction based on fault tree and Bayesian network [J]. **Journal of Engineering Management**, 2017, 31(5): 107-111.
- [22] ROLLÓN E, LARROSA J. Bucket elimination for multiobjective optimization problems[J]. **Journal of Heuristics**, 2006, 12(4/5): 307-328.
- [23] 姚成玉, 陈东宁, 王斌. 基于 T-S 故障树和贝叶斯网络的模糊可靠性评估方法[J]. **机械工程学报**, 2014, 50(2): 193-201.
YAO Chengyu, CHEN Dongning, WANG Bin. Fuzzy reliability assessment method based on T-S fault tree and Bayesian network[J]. **Journal of Mechanical Engineering**, 2014, 50(2): 193-201.
- [24] ESKESEN S, TENGBORG P, KAMPMANN J, *et al.* Guidelines for tunnelling risk management: International Tunnelling Association, Working Group No. 2[J]. **Tunnelling and Underground Space Technology**, 2004, 19(3): 217-237.

(本文编辑:孙伟)