

基于多源信息融合的隧道安全风险评估

李洪江

(中铁十四局集团第五工程有限公司, 272117, 济宁)

摘要 [目的] 为了有效感知和评估隧道施工过程中的安全风险, 提出一种基于多源信息融合的隧道安全风险评估方法。[方法] 介绍了隧道安全风险评估方法, 选取地质因素、设计因素、环境因素、施工管理因素四个分类中的 20 个隧道安全风险影响因素, 建立了隧道安全风险评估指标体系并划分了安全等级; 基于模糊物元法对安全风险评价指标的基本概率分配进行构造和计算; 基于 Dempster-Shafer 证据理论对多源数据进行融合计算, 并根据最大隶属度原则确定安全等级; 以重庆轨道交通 10 号线二期工程南坪站—后堡站区间为例, 验证所提方法在实际工程中的有效性。[结果及结论] 隧道施工安全风险等级从低至高可分为五级: 南坪站—后堡站区间隧道工程的地质风险等级为 II 级; 设计风险等级为 III 级; 环境风险等级为 IV 级; 施工管理风险等级为 II 级; 隧道工程总体风险等级为 II 级。隧道工程总体处于较低风险状态。通过实际项目验证可知, 隧道风险评估结果与现场实际风险情况一致。

关键词 地铁; 隧道; 安全风险评估; 多源信息融合

中图分类号 U456.3

DOI:10.16037/j.1007-869x.2024.07.011

Tunnel Safety Risk Assessment Based on Multi-source Information Fusion

LI Hongjiang

(China Railway Bureau 14th Group Fifth Project Co., Ltd., 272117, Jining, China)

Abstract [Objective] To effectively perceive and assess safety risks during tunnel construction process, a tunnel safety risk assessment method based on multi-source information fusion is proposed. [Method] A tunnel safety risk assessment method is introduced, with a total of 20 tunnel safety risk influencing factors selected from four categories: geology, design, environment, and construction management. Then a tunnel safety risk assessment index system is established, and safety levels are determined. The basic probability assignment of the safety risk assessment index is constructed and calculated based on fuzzy matter-element method. Fusion calculations of the multi-source data are performed based on Dempster-Shafer evidence theory, and the safety levels are classified according to the principle of maximum membership degrees. Taking Nan-

ping Sta.-Houba Sta. interval (Nan-Hou Interval) of Chongqing Rail Transit Line 10 Phase II project as example, the effectiveness of the proposed method in practical engineering is verified. [Result & Conclusion] Tunnel construction safety risk levels can be classified from low to high into five levels; the geological risk level of Nan-Hou Interval tunnel project is Level II; the design risk level is Level III; the environmental risk level is Level IV; the construction management risk level is Level II; the overall tunnel engineering risk level is Level II. The overall tunnel project is in a relatively low-risk state. Through verification in actual projects, it is found that the tunnel risk assessment results are consistent with the actual risk situation on-site.

Key words metro; tunnel; safety risk assessment; multi-source information fusion

作为地铁的重要组成部分, 近年来隧道工程的需求量、工程规模与不确定性越来越大^[1]。隧道施工是一项风险极高的工作, 随着工程规模和不确定性的增加, 地下隧道施工的风险也在增加。在复杂多变的工程地质条件及周围环境影响下, 非常容易发生安全事故, 这给隧道的安全施工带来了巨大的挑战。因此, 对隧道施工进行安全风险评估, 采取合理的措施来降低隧道施工的风险具有重要的现实意义。

目前, 已有许多专家和学者对隧道的安全风险评估做了大量的研究工作。文献[2-4]最早将安全风险引入地铁工程领域, 提出了隧道工程安全风险的基础理论。文献[5]讨论了地下工程风险的种类及来源, 并将风险分为四类, 分别为人员伤害风险、经济损失风险、成本风险和工期延误风险。文献[6]在实际隧道工程中运用定性和定量的方法进行隧道风险评估, 为隧道安全风险提出新的思路。文献[7]通过研究, 分析讨论了影响地铁的关键因素, 包括地质条件、水文条件、周边建筑物和管线、施工单位管理水平及施工工艺等。文献[8]首次将环境子系统引入地铁隧道安全风险, 建

立了人-机-环境三个子系统构成的评价体系,增强了隧道风险评估的全面性。文献[9-10]利用专家调查法,评价了实际工程的隧道风险水平。文献[11-12]针对隧道建立了风险预警指标和评价标准,将风险等级划分为四个等级,并在多方面对隧道进行分段风险评估。综上所述,虽然已有研究在施工安全评价理论及应用方面已经取得了较多的研究成果,但许多常规方法依赖专家水平和经验进行评判,需要较多的专家和技术人员参与,存在一定的主观性。此外,隧道施工是一个动态变化的过程,目前的方法没有随着项目施工的进度和监测数据及时更新风险等级,存在一定的局限性。

本文提出一种基于多源信息融合的安全风险评估方法。以重庆轨道交通 10 号线(以下简称“10 号线”)二期工程南坪站—后堡站区间(以下简称“南后区间”)为例,基于 D-S(Dempster-Shafer)证据理论,将地质勘察数据、设计数据、现场施工管理数据、环境数据进行集成和融合,从多方面评估隧道施工的安全风险,从而达到科学、精准评估的目的。本文研究可为类似工程提供借鉴和参考。

1 基本原理

1.1 模糊物元分析

模糊物元法是一种基于模糊集理论和物元分析理论的数据处理方法。模糊物元法可以较好地表达信息在表示、获取和推理中存在的模糊性和不相容信息,从而解决具有冲突问题的函数,使得多目标问题转化为单目标问题^[13],适用于多因素评价。实例研究证明,模糊物元法的评价结果具有可靠性^[14-15]。

物元由三个部分组成:物元(A)、物元特征(C)、特征值(X)。物元模型的定义为 $S = [A \ C \ X]$ 。评价对象 A 对应有 M 个特征指标,分别为 $\{C_1, C_2, \dots, C_M\}$,其对应的特征值为 $\{X_1, X_2, \dots, X_M\}$ 。假设评价对象的个数为 N ,将其与具有 M 维的物元组相结合,构成了 N 组对象的 M 维复合模糊物元,则有:

$$S_{NM} = \begin{matrix} & A_1 & A_2 & \cdots & A_N \\ \begin{matrix} C_1 \\ C_2 \\ \vdots \\ C_M \end{matrix} & \begin{bmatrix} f_{11}(X_1) & f_{12}(X_1) & \cdots & f_{1N}(X_1) \\ f_{21}(X_2) & f_{22}(X_2) & \cdots & f_{2N}(X_2) \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ f_{M1}(X_M) & f_{M2}(X_M) & \cdots & f_{MN}(X_M) \end{bmatrix} \end{matrix} \quad (1)$$

式中:

C_i ——物元的第 i 个特征(影响因素), $i=1,2,\dots,M$;

X_i ——评价对象的指标数据;

A_j ——第 j 个状态下的物元, $j=1,2,\dots,N$;

$f_{ij}(X_i)$ ——第 i 个特征值 X_i 在第 j 个状态下的物元模糊隶属度。

1.2 D-S 证据理论

D-S 证据理论是一种全新的不确定性推理方法,具有处理不确定信息的能力,因此可以用于处理主观判断和多种来源的信息及数据,在信息融合、专家系统、情报分析、多属性决策分析等领域均可适用。

假设 Θ 是一个识别框架,在识别框架 Θ 上的 BPA(基本概率分配)是一个满足 $2^\Theta \rightarrow [0,1]$ 的函数 m ,这个函数称为 mass 函数。函数 m 满足 $m(\phi) = 0$ 且 $\sum_{A \subseteq \Theta} m(A) = 1$ 。

对于 $\forall A \subseteq \Theta$,识别框架 Θ 上的两个 mass 函数 m_1, m_2 的 D-S 合成规则为:

$$m_{1,2}(A) = \begin{cases} \frac{1}{1 - K} \sum_{A_i \cap A_j = A \neq \emptyset} m_1(A_i) m_2(A_j), & \forall A \subseteq \Theta, \\ & A \neq \emptyset \\ 0, & A = \emptyset \end{cases} \quad (2)$$

$$K = \sum_{A_i \cap A_j = \emptyset} m_1(A_i) m_2(A_j) < 1 \quad (3)$$

式中:

K ——冲突系数,反映了证据之间冲突的程度;

$1/(1-K)$ ——量纲一化系数;

$m_{1,2}(A)$ —— A 的基本概率分配,反映了证据对评价对象 A 的支持程度。

基于经典 D-S 证据理论,改进 D-S 合成规则,对于 $\forall A \subseteq \Theta$,识别框架 Θ 上有限个 mass 函数 m_1, m_2, \dots, m_o 的 D-S 合成规则为:

$$m(A) = \begin{cases} \frac{1}{1 - K} \sum_{A_i \cap A_j \cdots \cap A_k = A} m_1(A_i) m_2(A_j) \cdots m_o(A_k) \\ m_o(A_k), & \forall A \subseteq \Theta, A \neq \emptyset \\ 0, & A = \emptyset \end{cases} \quad (4)$$

$$K = \sum_{A_i \cap A_j \cdots \cap A_k = \emptyset} m_1(A_i) m_2(A_j) \cdots m_o(A_k) < 1 \quad (5)$$

式中:

A_k ——第 k 个状态下的评价对象。

式(2)一式(3)主要适用于两个证据的合成,对

于两个以上证据的合成需要逐步进行。式(4)一式(5)适用于一次合成多个信息源。事实上,当信息来源相同时,式(2)一式(3)和式(4)一式(5)能够产生完全相同的结果。

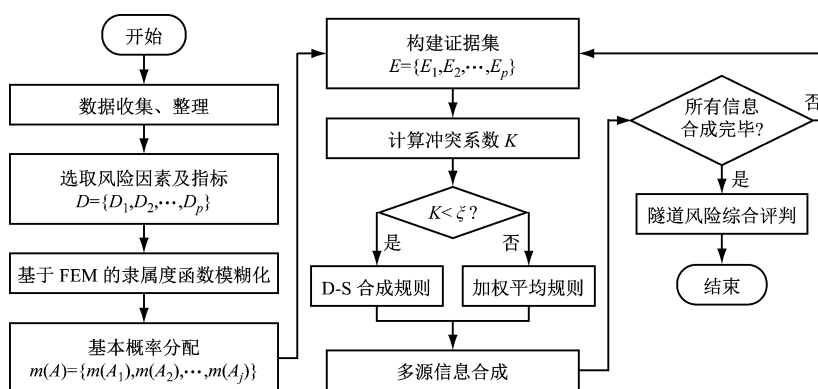
2 隧道安全风险评估方法

为了实现隧道工程施工安全风险的全面评估,提出一种基于多源信息融合的评估方法。所提评估方法能够利用改进的 D-S 证据理论融合多源数

据信息,从而对隧道施工安全风险进行综合评判。基于多源信息融合的隧道施工安全风险评估流程图如图1所示。

2.1 建立风险评价指标体系

针对隧道安全风险识别,首先确定评价风险等级的关键指标,并确定风险等级总数;然后,针对风险因素根据专家建议报告和项目技术文件确定区间得分值;最后,收集与风险因素相关的数据和资料信息。



注:FEM为模糊物元法; ξ 为冲突强度阈值,本文取为0.8。

图1 基于多源信息融合的隧道施工安全风险评估流程图

Fig. 1 Diagram of tunnel construction safety risk assessment process based on multi-source information fusion

在参考国内外相关研究成果的基础上,根据相关规范,结合项目资料,将隧道施工安全风险等级从低到高分五级:I级、II级、III级、IV级、V级,并构建隧道风险评价指标体系,如表1所示。

为了提高计算精度和求解速度,对多源信息数据进行融合时,需要对这些数据进行量纲一化处理,将这些数据变成无量纲的、可以进行比较的、可互相融合的数据,以实现无量纲化和可比性。量纲一化的隧道风险评价指标及其取值如表2所示。

2.2 基本概率分配计算

隧道施工过程涉及多个风险因素,各风险因素是离散的,对不同状态下的物元 A_j ($j=1, 2, \dots, M$)进行模糊化处理,使其转换为模糊集的隶属度。转换式可以表示为:

$$f_{ij} = \exp\left[-\left(\frac{x_i - a_{ij}}{b_{ij}}\right)^2\right] \quad (6)$$

式中:

x_i ——第 i 个指标的实测值;

a_{ij} 、 b_{ij} ——常数。

a_{ij} 、 b_{ij} 可以表示为:

$$a_{ij} = \frac{x_{ij,h} + x_{ij,b}}{2} \quad (7)$$

$$b_{ij} = \frac{x_{ij,h} - x_{ij,b}}{3} \quad (8)$$

式中:

$x_{ij,h}$ 、 $x_{ij,b}$ ——实测值 x 的上、下界,例如在表1中,假设 x 达标 D_1 ,其测量值为23 m,则在计算时,其上、下界分别为40 m和20 m。

通过上述计算,建立实测值 x_i 和物元 A_j 之间的联系,风险因素 D_i 的BPA可以表示为:

$$\begin{cases} m_i(A_j) = f_{ij}(x_{ij}) \\ m_i(\Theta) = 1 - \sum_{j=1}^N m_i(A_j) \end{cases} \quad (9)$$

式中:

$m_i(A_j)$ —— A_j 的基本概率分配值,即证据对评价对象 A 的支持程度;

$m_i(\Theta)$ ——风险因素 D_i 在不确定状态下的值。

2.3 数据融合及综合决策

根据D-S融合规则(式(2)一式(5))进行多源信息的融合计算,得出各隧道安全风险等级对应的BPA,并根据最大隶属度原则选择概率最大值所对应的安全等级作为最终综合决策的结果。

表 1 隧道风险评价指标及其取值
Tab.1 Tunnel risk assessment indexes and their values

风险因素	指标	不同安全风险等级下的各指标取值				
		I 级	II 级	III 级	IV 级	V 级
地质因素	地下水深度 D_1/m	>80 ~ 100	>60 ~ 80	>40 ~ 60	>20 ~ 40	>0 ~ 20
	压缩模量 D_2/MPa	>40 ~ 60	>20 ~ 40	>10 ~ 20	>5 ~ 10	>0 ~ 5
	黏聚力 D_3/kPa	>20 ~ 25	>15 ~ 20	>10 ~ 15	>5 ~ 10	>0 ~ 5
	内摩擦角 $D_4/(\text{°})$	>25 ~ 45	>15 ~ 25	>10 ~ 15	>5 ~ 10	>0 ~ 5
	泊松比 D_5	>0.4 ~ 0.5	>0.3 ~ 0.4	>0.2 ~ 0.3	>0.1 ~ 0.2	>0 ~ 0.1
设计	隧道埋深 D_6/m	>28 ~ 40	>18 ~ 28	>12 ~ 18	>6 ~ 12	>0 ~ 6
	覆跨比 D_7	>3.0 ~ 5.0	>2.0 ~ 3.0	>1.0 ~ 2.0	>0.5 ~ 1.0	>0 ~ 0.5
	断面面积 D_8/m^2	>0 ~ 3	>3 ~ 10	>10 ~ 50	>50 ~ 100	10 >0 ~ 300
	隧道长度 D_9/m	>0 ~ 500	>500 ~ 1 000	>1 000 ~ 3 000	>3 000 ~ 10 000	>10 000 ~ 50 000
环境	周边房屋影响 D_{10}	>80 ~ 100	>60 ~ 80	>40 ~ 60	>20 ~ 40	>0 ~ 20
	周边管线影响 D_{11}	>80 ~ 100	>60 ~ 80	>40 ~ 60	>20 ~ 40	>0 ~ 20
	周边交通影响 D_{12}	>80 ~ 100	>60 ~ 80	>40 ~ 60	>20 ~ 40	>0 ~ 20
施工管理	施工管理技术 D_{13}	>80 ~ 100	>60 ~ 80	>40 ~ 60	>20 ~ 40	>0 ~ 20
	管理人员经验 D_{14}	>15 ~ 20	>10 ~ 15	>5 ~ 10	>3 ~ 5	>0 ~ 3
	技术人员经验 D_{15}	>15 ~ 20	>10 ~ 15	>5 ~ 10	>3 ~ 5	>0 ~ 3
	施工人员经验 D_{16}	>15 ~ 20	>10 ~ 15	>5 ~ 10	>3 ~ 5	>0 ~ 3
	应急措施 D_{17}	>80 ~ 100	>60 ~ 80	>40 ~ 60	>20 ~ 40	>0 ~ 20
	安全培训及交底 D_{18}	>80 ~ 100	>60 ~ 80	>40 ~ 60	>20 ~ 40	>0 ~ 20
	施工方案选择 D_{19}	>80 ~ 100	>60 ~ 80	>40 ~ 60	>20 ~ 40	>0 ~ 20
	监控量测 D_{20}	>80 ~ 100	>60 ~ 80	>40 ~ 60	>20 ~ 40	>0 ~ 20

3 实例分析

3.1 工程概况

10 号线二期工程(兰花路站—鲤鱼池站区间)主要位于南岸区和渝中区,串联了南坪组团、渝中组团和观音桥组团。10 号线站点示意图如图 2 所示。线路总长约为 9.86 km,其中:地下段长度为 8.10 km;高架线长度为 1.76 km。

南后区间隧道工程位于南岸区,隧道线路自南坪站出发后向北布设,下穿洋河南滨花园小区、金鸣公司后接入南滨路站。隧道起点里程 $\text{YK}5 + 353.279$,终点里程 $\text{YK}6 + 350.598$,总长为 997.3 m。拱顶埋深 25 ~ 54 m,为深埋隧道;拱顶穿越的岩层主要有砂岩和砂质泥岩,围岩级别为 IV 级。隧道的形式为单洞单线型,按新奥法原理设计,采用复合式衬砌结构,钻爆法施工,开挖断面面积为 51 m^2 。

南后区间隧道工程位于主城区,人类活动频

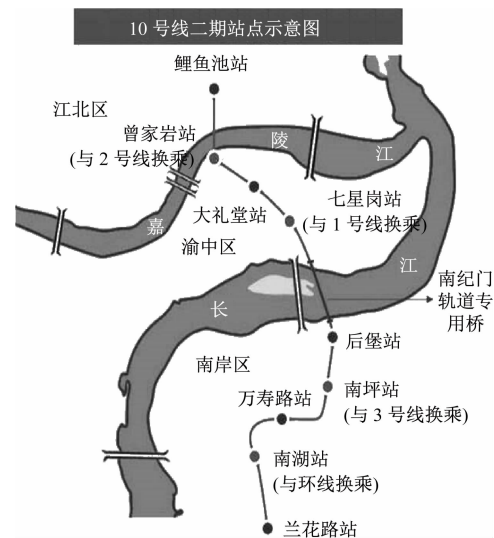


图 2 10 号线站点示意图

Fig.2 Diagram of Line 10 stations

繁,且沿线建(构)筑物密集,现有道路、地下管网分布较多。若发生隧道事故,将会造成不可估量的损失,因此对隧道开展风险评估具有重要的现实意义。

表 2 量纲一化的隧道风险评价指标及其取值

Tab. 2 Normalized tunnel risk assessment indexes and their values

风险因素	指标	不同安全风险等级下的各指标取值				
		I	II	III	IV	V
地质因素	D_1	>0 ~ 0.2	>0.2 ~ 0.4	>0.4 ~ 0.6	>0.6 ~ 0.8	>0.8 ~ 1.0
	D_2	>0 ~ 0.33	>0.33 ~ 0.66	>0.66 ~ 0.83	>0.83 ~ 0.92	>0.92 ~ 1.00
	D_3	>0 ~ 0.2	>0.2 ~ 0.4	>0.4 ~ 0.6	>0.6 ~ 0.8	>0.8 ~ 1.0
	D_4	>0 ~ 0.44	>0.44 ~ 0.67	>0.67 ~ 0.78	>0.78 ~ 0.89	>0.89 ~ 1.00
	D_5	>0 ~ 0.2	>0.2 ~ 0.4	>0.4 ~ 0.6	>0.6 ~ 0.8	>0.8 ~ 1.0
设计	D_6	>0 ~ 0.30	>0.30 ~ 0.55	>0.55 ~ 0.70	>0.70 ~ 0.85	>0.85 ~ 1.00
	D_7	>0 ~ 0.4	>0.4 ~ 0.6	>0.6 ~ 0.8	>0.8 ~ 0.9	>0.9 ~ 1.0
	D_8	>0 ~ 0.01	>0.01 ~ 0.03	>0.03 ~ 0.17	>0.17 ~ 0.33	>0.33 ~ 1.00
	D_9	>0 ~ 0.01	>0.01 ~ 0.02	>0.02 ~ 0.06	>0.06 ~ 0.20	>0.20 ~ 1.00
环境	D_{10}	>0 ~ 0.2	>0.2 ~ 0.4	>0.4 ~ 0.6	>0.6 ~ 0.8	>0.8 ~ 1.0
	D_{11}	>0 ~ 0.2	>0.2 ~ 0.4	>0.4 ~ 0.6	>0.6 ~ 0.8	>0.8 ~ 1.0
	D_{12}	>0 ~ 0.2	>0.2 ~ 0.4	>0.4 ~ 0.6	>0.6 ~ 0.8	>0.8 ~ 1.0
施工管理	D_{13}	>0 ~ 0.2	>0.2 ~ 0.4	>0.4 ~ 0.6	>0.6 ~ 0.8	>0.8 ~ 1.0
	D_{14}	>0 ~ 0.25	>0.25 ~ 0.50	>0.50 ~ 0.75	>0.75 ~ 0.85	>0.85 ~ 1.00
	D_{15}	>0 ~ 0.25	>0.25 ~ 0.50	>0.50 ~ 0.75	>0.75 ~ 0.85	>0.85 ~ 1.00
	D_{16}	>0 ~ 0.25	>0.25 ~ 0.50	>0.50 ~ 0.75	>0.75 ~ 0.85	>0.85 ~ 1.00
	D_{17}	>0 ~ 0.2	>0.2 ~ 0.4	>0.4 ~ 0.6	>0.6 ~ 0.8	>0.8 ~ 1.0
	D_{18}	>0 ~ 0.2	>0.2 ~ 0.4	>0.4 ~ 0.6	>0.6 ~ 0.8	>0.8 ~ 1.0
	D_{19}	>0 ~ 0.2	>0.2 ~ 0.4	>0.4 ~ 0.6	>0.6 ~ 0.8	>0.8 ~ 1.0
	D_{20}	>0 ~ 0.2	>0.2 ~ 0.4	>0.4 ~ 0.6	>0.6 ~ 0.8	>0.8 ~ 1.0

3.2 案例风险评估计算

收集和整理南后区间隧道工程的相关资料,获得的相关指标数据如表 3 所示。根据式(6)一式(9),BPA 计算结果如表 4 所示。

表 3 南后区间风险指标数据

Tab. 3 Risk indexes data of Nanping-Houbao Interval

指标	实测值	标准值	等级	指标	实测值	标准值	等级
D_1/m	76	0.24	II	D_{11}	38	0.62	IV
D_2/MPa	26.8	0.55	II	D_{12}	45	0.55	III
D_3/kPa	23.6	0.056	I	D_{13}	82	0.18	I
$D_4/(\text{^\circ})$	31.8	0.29	I	D_{14}	11	0.45	II
D_5	0.33	0.34	II	D_{15}	7	0.65	III
D_6/m	29	0.275	I	D_{16}	5	0.75	IV
D_7	1.26	0.748	III	D_{17}	82	0.18	I
D_8/m^2	51	0.17	IV	D_{18}	85	0.15	I
D_9/m	997	0.02	II	D_{19}	65	0.35	II
D_{10}	32	0.68	IV	D_{20}	72	0.28	II

注:表中部分数据为专家打分所得。

根据 D-S 合成规则,计算南后区间隧道工程的地质、设计、环境、施工管理风险等级。地质因素风

险等级计算结果如表 5 所示,设计因素风险等级计算结果如表 6 所示,环境因素风险等级计算结果如表 7 所示,施工管理因素风险等级计算结果如表 8 所示。通过融合计算获得的南后区间隧道工程总体风险等级计算结果如表 9 所示。

据安全风险 BPA 和最大隶属度原则,确定地质因素的风险等级为 II 级,设计因素的风险等级为 III 级,环境因素的风险等级为 IV 级,施工管理因素的风险等级为 II 级,南后区间隧道工程的总体安全风险等级为 II 级。在实际施工过程中,隧道内未发现异常变形、裂缝等情况。整个施工过程中,总体安全风险处于较低水平,未发生安全风险事故。

在实际隧道工程施工过程中,本文所提安全风险评估方法具有合理性和可操作性。本文所提方法能够随着隧道工程的施工进度,融入新的风险因子,以保证隧道工程的施工安全。当融入新的风险因子时,只需将新证据的相关参数与旧的评估结果进一步融合,即可完成新的风险评估,可操作性强,

具有较强的现实应用意义。

表 4 BPA 计算结果

Tab. 4 BPA calculation results

风险因素	指标	BPA 值					
		$m(A_1)$	$m(A_2)$	$m(A_3)$	$m(A_4)$	$m(A_5)$	$m(\Theta)$
地质因素	D_1	0.013	0.448	0	0	0	0.539
	D_2	0	0.779	0	0	0	0.221
	D_3	0.650	0	0	0	0	0.350
	D_4	0.797	0	0	0	0	0.203
	D_5	0	0.700	0.003	0	0	0.296
设计	D_6	0.210	0.038	0	0	0	0.752
	D_7	0	0	0.599	0	0	0.401
	D_8	0	0	0.106	0.102	0.007	0.785
	D_9	0	0.101	0.104	0.004	0.009	0.782
	D_{10}	0	0	0.001	0.915	0	0.084
环境	D_{11}	0	0	0.040	0.240	0	0.719
	D_{12}	0	0	0.573	0.007	0	0.420
施工管理	D_{13}	0.240	0.040	0	0	0	0.719
	D_{14}	0	0.445	0.012	0	0	0.543
	D_{15}	0	0	0.914	0	0	0.086
	D_{16}	0	0	0.105	0.101	0	0.794
	D_{17}	0.240	0.040	0	0	0	0.719
	D_{18}	0.573	0.007	0	0	0	0.420
	D_{19}	0	0.573	0.007	0	0	0.420
	D_{20}	0.001	0.915	0	0	0	0.084

表 5 地质因素 BPA 计算结果

Tab. 5 Calculation results for geological factors BPA

地质因素	BPA 值
$m(A_1)$	0.325
$m(A_2)$	0.651
$m(A_3)$	0
$m(A_4)$	0
$m(A_5)$	0
$m(\Theta)$	0.024

表 6 设计因素 BPA 计算结果

Tab. 6 Calculation results of design factors BPA

设计因素	BPA 值
$m(A_1)$	0.073
$m(A_2)$	0.049
$m(A_3)$	0.577
$m(A_4)$	0.035
$m(A_5)$	0.005
$m(\Theta)$	0.261

表 7 环境因素 BPA 计算结果

Tab. 7 Calculation results of environmental factors BPA

环境因素	BPA 值
$m(A_1)$	0
$m(A_2)$	0
$m(A_3)$	0.086
$m(A_4)$	0.857
$m(A_5)$	0.057
$m(\Theta)$	0.261

表 8 施工管理因素 BPA 计算结果

Tab. 8 Calculation results of construction management factors BPA

施工管理因素	BPA 值
$m(A_1)$	0.044
$m(A_2)$	0.769
$m(A_3)$	0.171
$m(A_4)$	0.002
$m(A_5)$	0
$m(\Theta)$	0.014

表 9 南后区间隧道工程总体 BPA 计算结果

Tab. 9 Calculation results of Nanping-Houbao Interval tunnel engineering overall BPA

总体风险	BPA 值
$m(A_1)$	0.037
$m(A_2)$	0.902
$m(A_3)$	0.051
$m(A_4)$	0.010
$m(A_5)$	0
$m(\Theta)$	0

4 结语

隧道工程是一项涉及众多复杂工序的综合性复杂工程,因此在风险评估过程中涉及到众多复杂的不确定性因素。本文在前人研究的基础上,提出一种基于多源信息融合的隧道安全风险评估方法。

1) 利用模糊物元和 D-S 证据理论将多指标信息进行融合,有效解决了当信息不完整时评价指标的不确定性造成的评估困难问题,使得评判结果降低了不确定性。同时,所提方法将多指标信息进行融合,从多维度、多方面综合评估风险,具有较强的科学性。

2) 所提方法已在 10 号线二期工程中进行了验

证研究。验证结果表明,该方法能够精确评估隧道安全风险,为隧道安全风险评估提供了新的方法和参考。

参考文献

- [1] WU X, LIU H, ZHANG L, et al. A dynamic Bayesian network based approach to safety decision support in tunnel construction [J]. *Reliability Engineering & System Safety*, 2015, 134: 157.
- [2] EINSTEIN H H, INDERMITTE C, SINFIELD J, et al. Decision aids for tunneling [J]. *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, 1999, 1656(1): 6.
- [3] EINSTEIN H H. Risk and risk analysis in rock engineering [J]. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 1996, 11(2): 141.
- [4] HAAS C, EINSTEIN H H. Updating the decision aids for tunneling [J]. *Journal of Construction Engineering and Management*, 2002, 128(1): 40.
- [5] REILLY J J. The management process for complex underground and tunneling projects [J]. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 2000, 15(1): 31.
- [6] KOLIC D. Risk analysis for design and construction aspects of Mala Kapela tunnel [M] // SAVEUR J. *Claiming the Underground Space*. London: Routledge, 2022: 513.
- [7] 刘万兰, 鞠丽艳, 高文杰. 软土地区基坑施工风险评估准则与方法研究 [J]. *岩土工程学报*, 2010, 32(增刊2): 590.
LIU Wanlan, JU Liyan, GAO Wenjie. Study on risk assessment criteria and methods of foundation pit construction in soft soil area [J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2010, 32(S2): 590.
- [8] 游鹏飞, 牟瑞芳. 基于联系数的地铁隧道施工塌方风险评价研究 [J]. *地下空间与工程学报*, 2013, 9(2): 403.
YOU Pengfei, MOU Ruifang. Research on landslide risk assessment about subway tunneling based on contact number [J]. *Chinese Journal of Underground Space and Engineering*, 2013, 9(2): 403.
- [9] 宫培松, 琚倩茜. 地铁施工安全风险与致险工程参数关联研究 [J]. *施工技术*, 2013, 42(13): 106.
GONG Peisong, JU Qianqian. A study on relationship of engineering parameters and safety risk on metro construction [J]. *Construction Technology*, 2013, 42(13): 106.
- [10] 宋浩然, 张顶立, 谭光宗. 大连湾海底隧道风险评估及对策研究 [J]. *北京交通大学学报*, 2013, 37(4): 1.
SONG Haoran, ZHANG Dingli, TAN Guangzong. Study on risk assessment and control of Dalian Bay subsea tunnel [J]. *Journal of Beijing Jiaotong University*, 2013, 37(4): 1.
- [11] 杨永强. 长大隧道施工风险评估与控制技术 [D]. 西安: 长安大学, 2015.
YANG Yongqiang. Long tunnels construction risk assessment and control technology [D]. Xi'an: Chang'an University, 2015.
- [12] 李广平, 杨绍战, 奚魏征. 高海拔寒冷地区雁口山隧道安全风险评价技术研究 [J]. *灾害学*, 2018, 33(增刊1): 69.
LI Guangping, YANG Shaozhan, XI Weizheng. Study on safety risk assessment technology of Yankoushan Tunnel in high altitude and cold area [J]. *Journal of Catastrophology*, 2018, 33(S1): 69.
- [13] YIN Y C, SUN L F, GUO C. A policy of conflict negotiation based on fuzzy matter element particle swarm optimization in distributed collaborative creative design [J]. *Computer-Aided Design*, 2008, 40(10/11): 1009.
- [14] 于维洋, 张颂嘉, 沈会涛, 等. 基于模糊物元法地表水质量评价 [J]. *统计与决策*, 2019, 35(1): 72.
YU Weiyang, ZHANG Songjia, SHEN Huitao, et al. Evaluation of surface water quality based on fuzzy matter-element method [J]. *Statistics & Decision*, 2019, 35(1): 72.
- [15] 高伟, 王栋. 模糊综合评价法在隧道施工空气质量评价中的应用 [J]. *山西建筑*, 2018, 44(21): 148.
GAO Wei, WANG Dong. Application of fuzzy comprehensive evaluation method in evaluation of air quality in tunnel construction [J]. *Shanxi Architecture*, 2018, 44(21): 148.

· 收稿日期:2022-01-20 修回日期:2022-03-14 出版日期:2024-07-10
Received:2022-01-20 Revised:2022-03-14 Published:2024-07-10
· 通信作者:李洪江,高级工程师,251336225@qq.com
· ©《城市轨道交通研究》杂志社,开放获取 CC BY-NC-ND 协议
© Urban Mass Transit Magazine Press. This is an open access article under the CC BY-NC-ND license

敬请关注《城市轨道交通研究》微信视频号

《城市轨道交通研究》微信视频号聚焦轨道交通行业内的热点问题、焦点问题,以及新技术、新成果,邀请相关专业领域内的专家学者及高级管理人员以视频方式阅读和评述,是您及时获知行业资讯、深度了解轨道交通各专业领域的最佳平台。您还可以通过该平台查阅往期论文、查询稿件进度、开具论文录用通知书。敬请关注。

