

# 基于未确知测度理论的特长隧道施工安全风险评价

刘敦文, 彭怀德

中南大学资源与安全工程学院, 长沙 410083

**摘要** 针对特长隧道施工风险评价中常存在诸多不确定性因素的问题, 本文提出一种基于未确知测度理论的特长隧道施工风险性评价新方法。根据特长隧道事故的特点及成因, 选取支护措施等 15 项未确知测度函数评价指标, 建立了特长隧道施工风险分级预测的未确知测度评价模型; 利用信息熵计算各评价指标的权重, 依照置信度识别准则进行等级判定, 得出特长隧道工程施工风险评价分级预测的评价结果; 并应用于某一特长铁路隧道工程实际, 成功评定出该隧道综合风险等级为 II 级。结果表明, 该方法不仅能给出特长隧道施工期间的风险等级, 并且能够更客观地反映特长隧道施工过程中危险源的情况, 为隧道工程施工风险性评价提供了一种新途径。

**关键词** 特长隧道; 风险评价; 未确知测度; 信息熵; 置信度

**中图分类号** X913

**文献标志码** A

**doi** 10.3981/j.issn.1000-7857.2013.15.004

## Security Risk Evaluation for Super Long Tunnel Construction Based on Uncertainty Measurement Theory

LIU Dunwen, PENG Huaide

School of Resources and Safety Engineering, Central South University, Changsha 410083, China

**Abstract** For various uncertainty problems in the super long tunnel construction risk evaluation, a new risk evaluation method based on the uncertainty measurement theory is proposed. Fifteen uncertainty measurement function evaluation indexes (e.g. the supporting measures) are chosen according to the characteristics and the causes of the safety accidents in the super long tunnel, and an uncertainty measurement evaluation model based on the uncertainty measurement theory is proposed for predicting the construction risk of the super long tunnel. The weight of each index is calculated by using the information entropy, and the risk grade is predicted in accordance with the confidence identify rules. A new super long railway tunnel is taken as an example, the comprehensive risk rating of the super long tunnel is predicated successfully and its risk level is shown to be the grade II. The risk evaluation for the super long tunnel construction not only includes the risk grade of the super long tunnel construction period but also reflects the dangerous sources during the super long tunnel construction.

**Keywords** super long tunnel; risk evaluation; uncertainty measurement; information entropy; confidence

### 0 引言

21 世纪前 20 年是中国开展大规模铁路建设的时期, 也是中国高速铁路快速发展的时期。按照《中长期铁路网规划》和《铁路十一五规划》, 近年中国已修建 3000km 以上的铁路隧道, 未来中国将修建更多的特长隧道和长隧道, 这些隧道不但总量大, 而且隧道断面尺寸也比以往的隧道断面尺寸大。这些隧道主要分布在中国西南、中南、东南沿海以及中西部地区, 所通过地区的地形和地质情况都较复杂。由于特长

铁路隧道具有开挖工程量巨大、施工周期较长, 引起的山体地下水资源损失量大, 建设技术难度也较大等特点, 而且限于目前技术水平, 人们对有些岩体和地质情况的认识也不是很全面, 这给隧道的建设和运营管理带来了挑战<sup>[1]</sup>。以往国内外学者对隧道的施工建设进行了大量研究, 引入了许多新理论、新方法, 主要有模糊故障树法<sup>[2]</sup>、模糊层次法<sup>[3]</sup>、层次分析法<sup>[4]</sup>、模糊综合评价法<sup>[5]</sup>等。本文将未确知测度理论<sup>[6-8]</sup>和信息熵理论<sup>[9]</sup>用于隧道施工风险评价中, 研究工期紧张度、支护措

收稿日期: 2012-10-25; 修回日期: 2013-03-08

基金项目: 湖南省自然科学基金项目 (06JJ3030); 中央高校基本科研业务费专项资金重大项目 (2010QZZD001)

作者简介: 刘敦文, 教授, 研究方向为岩土工程、安全工程等, 电子信箱: liudunwen@163.com

施较弱等主要 15 项评价指标对隧道施工的影响,以获取风险等级预测值。与以往的评价方法相比,一方面,将定性指标全部量化,使评价结果更加准确;另一方面,可以与以往的方法相互印证,充实隧道施工风险评价领域,为隧道施工建设作出正确决策提供有效依据。

### 1 未确知测度计算理论

设  $\Phi_1, \Phi_2, \dots, \Phi_n$  为需优化的  $n$  个对象,则其优化对象空间  $\Phi = \{\Phi_1, \Phi_2, \dots, \Phi_n\}$ 。对于每一个对象  $\Phi_i (i=1, 2, \dots, n)$  有  $m$  个单项评价指标,则其评价指标空间为  $X = \{x^1, x^2, \dots, x^m\}$ 。 $\Phi_i$  可表示为  $m$  维向量  $\Phi_i = \{x_i^1, x_i^2, \dots, x_i^m\}$ 。其中,  $x_i^j$  为研究对象  $\Phi_i$  关于评价指标  $x^j$  的测量值。对不同的  $x_i^j$ , 对其优化结果  $\Phi_i$  的贡献不同,  $x_i^j$  越大, 对优越度  $Q$  的贡献越大;  $x_i^j$  越小, 对优越度  $Q$  的贡献越小。对每一个子项  $x_i^j (i=1, 2, \dots, n; j=1, 2, \dots, m)$ , 假设有  $p$  个评价等级  $C_1, C_2, \dots, C_p$ 。评价空间记为  $U$ , 则  $U = \{C_1, C_2, \dots, C_p\}$ 。设  $C_k (k=1, 2, \dots, p)$  为第  $k$  级的评价等级, 且  $k$  级高于  $k+1$  级, 记作  $C_k > C_{k+1}$ 。若  $\{C_1, C_2, \dots, C_p\}$  满足  $C_1 > C_2 > C_3 > \dots > C_p$  或  $C_1 < C_2 < C_3 < \dots < C_p$ , 则称  $C_1, C_2, \dots, C_p$  为评价空间  $U$  的一个有序分割类。

#### 1.1 单指标测度

$\mu_k^i = \mu(x_i^j \in C_k)$  称作未确知测度表示测量值  $x_i^j$  属于第  $k$  个评价等级  $C_k$  的程度, 需满足:

$$0 \leq \mu(x_i^j \in C_k) \leq 1 \quad (1)$$

$$\mu(x_i^j \in U) = 1 \quad (2)$$

$$\mu \left[ x_i^j \in \bigcup_{l=1}^k C_l \right] = \sum_{l=1}^k \mu(x_i^j \in C_l) \quad k=1, 2, \dots, p \quad (3)$$

则, 式(1)称作“非负有界性”, 式(2)称作“归一性”, 式(3)称作“可加性”。满足式(1)~(3)的  $\mu$  为未确知测度。矩阵  $(\mu_{ijk})_{m \times p}$  为单指标测度评价矩阵, 并且有

$$(\mu_{ijk})_{m \times p} = \begin{bmatrix} \mu_{i11} & \dots & \mu_{i1p} \\ \vdots & \vdots & \vdots \\ \mu_{im1} & \dots & \mu_{imp} \end{bmatrix} \quad (4)$$

#### 1.2 指标权重的确定

设  $w_j$  表示测量指标  $X_j$  与其他指标相比具有的相对重要程度, 要求  $w_j$  满足:  $0 \leq w_j \leq 1$ , 称  $w_j$  为  $x_i$  的权重,  $w = (w_1, w_2, \dots, w_m)$  称作指标权重向量。则有

$$v_j = 1 + \frac{1}{\lg p} \sum_{k=1}^p \mu_{ik}^j \cdot \lg \mu_{ik}^j \quad (5)$$

$$w_j = v_j / \sum_{i=1}^m v_i \quad (6)$$

因为单指标测度评价矩阵是已知的, 因此可以通过式(5)和式(6)求得  $w_j$ 。

#### 1.3 多指标综合测度评价向量

令  $\mu_{ik} = \mu(\mu_i \in C_k)$  为优化对象  $R_i$  属于第  $k$  个评价类  $C_k$  的程度, 则  $\mu_{ik}$  称属于等级  $C_k$  的多指标综合未确知测度。有

$$\mu_{ik} = \sum_{j=1}^m w_j \mu_{ijk} \quad i=1, 2, \dots, n; k=1, 2, \dots, p \quad (7)$$

$$\text{由于 } 0 \leq \mu_{ik} \leq 1, \text{ 且 } \sum_{k=1}^p \mu_{ik} = \sum_{k=1}^p \sum_{j=1}^m w_j \mu_{ijk} = \sum_{j=1}^m \left( \sum_{k=1}^p \mu_{ijk} \right) w_j = 1,$$

所以  $\mu_{ik}$  是未确知测度, 并称  $(\mu_{i1}, \mu_{i2}, \dots, \mu_{ip})$  为样本  $\Phi_i$  的多指标综合测度评价向量。

#### 1.4 优化结果识别和排序

为了得到最优评价结果, 这里引入置信度评价准则, 设  $\lambda$  为置信度 ( $\lambda \geq 0.5$ )。若评价空间  $\{C_1, C_2, \dots, C_p\}$  是有序的, 且  $C_1 > C_2 > \dots > C_p$ , 令

$$k_0 = \min \left\{ k: \sum_{l=1}^k \mu_{il} \geq \lambda, (k=1, 2, \dots, p) \right\} \quad (8)$$

则认为优化对象  $R_i$  属于第  $k_0$  个评价类  $C_{k_0}$ 。

## 2 特长隧道施工风险评价指标体系的建立

根据有关研究的特长隧道施工风险指标的相关性分析, 删除具有较大相关性的风险指标, 选择具有代表性的风险指标, 最后形成了具有相互独立性的特长隧道风险指标体系, 如图 1 所示。指标共分为 4 大类, 即塌方、突泥涌水、地表失水和危岩落石。

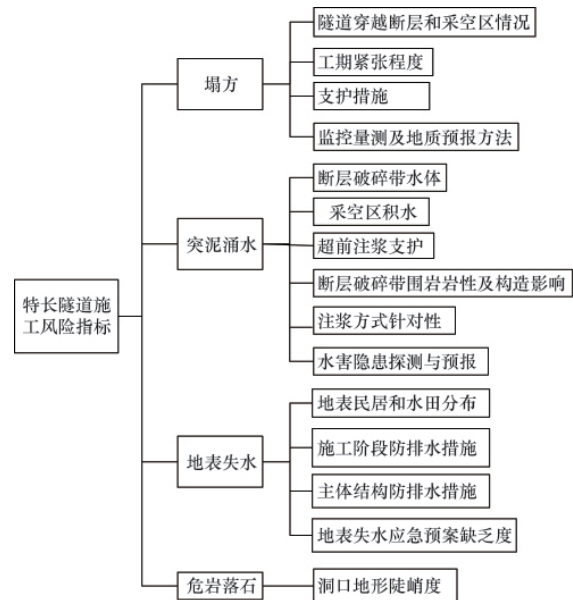


图 1 特长隧道施工风险指标体系

Fig. 1 Risk index system of super long tunnel construction

4 大类选取 15 项因素作为评价影响因子, 即隧道穿越断层和采空区情况、工期紧张程度、支护措施、监控量测及地质预报方法等(图 1), 分别用  $X_1, X_2, \dots, X_{15}$  表示。在评价过程中, 由于部分定性指标很难参与到计算过程中, 所以, 必须参考大量相关文献<sup>[10,11]</sup>和专家建议, 并结合工程实际情况, 通过赋值方法将其量化, 使其能参与到计算中, 以便得到准确的评价结果。运用分级标准化法将每个指标分为 4 级, 评判集为  $\{C_1, C_2, C_3, C_4\}$ , 即 I, II, III 和 IV 级, 分别表示风险性极高、风险性高度、风险性中度和风险性低度。每级都根据专家建议设置一个取值标准, 其分级标准及赋值情况见表 1。

表 1 特长隧道施工风险评判分级标准评定表

Table 1 Criterion table of super long tunnel construction risk judgment grades

评价指标	分级标准			
	I 级 (C <sub>1</sub> )	II 级 (C <sub>2</sub> )	III 级 (C <sub>3</sub> )	IV 级 (C <sub>4</sub> )
隧道穿越断层和采空区情况	>4	3~4	2~3	<2
工期紧张程度	>4	3~4	2~3	<2
支护措施	>4	3~4	2~3	<2
监控量测、地质预报方法	>4	3~4	2~3	<2
断层破碎带水体	>1.5	1.2~1.5	1~1.2	<1
采空区积水	>1.5	1.2~1.5	1~1.2	<1
超前注浆支护	>1.5	1.2~1.5	1~1.2	<1
断层破碎带围岩岩性及地质构造影响	>1.5	1.2~1.5	1~1.2	<1
注浆方式针对性	>1.5	1.2~1.5	1~1.2	<1
水害隐患探测与预报	>1.5	1.2~1.5	1~1.2	<1
地表民居和水田分布	>3	2~3	1~2	<1
施工阶段防排水措施	>3	2~3	1~2	<1
主体结构防排水措施	>3	2~3	1~2	<1
地表失水应急预案缺乏度	>3	2~3	1~2	<1
洞口地形陡峭度	>3	2~3	1~2	<1

### 3 工程实例应用

新建沪昆铁路客运专线长沙至昆明段的某一特长隧道位于云贵高原斜坡地带,区内地形总体西高东低。隧道洞身穿越区域以碳酸岩广泛分布为主要特征,具体构造剥蚀-溶蚀槽谷地貌特点。槽谷的发育与大型节理等构造走向一致,呈线状分布,山体两侧坡脚岩性较破碎,坡度自然,斜坡陡峻,坡脚 20°~40°,常为地下水的集中排泄和地表水冲沟源头。隧道全长 6269m,隧道进口端洞身 889.98m,位于半径为 9005m 的右偏曲线上,出口端洞身 251.65m,位于半径为 11000m 的左偏曲线上,其余地段为直线,线路纵坡为人字坡。隧道区基岩大多裸露,沟槽覆盖第四系坡洪积红黏土,缓坡上多为薄层坡残积红黏土所覆盖,下伏基岩为寒武系中统高台组地层。隧道进出口及缓坡地带带有少量覆土。隧区总体构造发育,构造线的展布方向主体为北方向,少部呈近东西向展布。隧区处于新华夏系燕山隔槽式褶皱带的带状向斜上,区内褶皱发育,褶皱呈宽缓状,洞身主要穿越赏郎向斜,隧道出口发育一性质不明断层。洞身穿越地段地层倾角较平缓,多波状起伏。不良地质现象为岩溶及岩溶水、顺层偏压及人工坑洞、围岩落石、特殊黏土为红黏土。隧道在可溶岩段遇溶洞、溶缝、溶隙可能发生突水、突泥、褶皱破碎带多为地下水富集区,易发生突水、突泥。

#### 3.1 建立评价指标调查统计表

根据相关规范和专家建议,并结合工程实际,对各评价指标进行赋值,见表 2。

表 2 特长隧道施工危险性指标调查统计表

Table 2 Statistics of super long tunnel construction risk indicators

风险模式	指标	评价赋值
塌方	隧道穿越断层和采空区情况	2.4
	工期紧张程度	3.2
	支护措施	4.5
	监控量测、地质预报方法	3
突泥涌水	断层破碎带水体	1.4
	采空区积水	1.3
	超前注浆支护	1.4
	断层破碎带围岩岩性及地质构造影响	1.4
	注浆方式针对性	1.3
地表失水	水害隐患探测与预报	1.5
	地表民居和水田分布	2.6
	施工阶段防排水措施	2.7
	主体结构防排水措施	1.8
危岩落石	地表失水应急预案缺乏度	1.2
	洞口地形陡峭度	1.3

#### 3.2 构建单指标测度函数

根据单指标测度函数的定义以及表 1 和表 2,构建单指标测度函数以便求得隧道施工各评价指标的测度,结果见图 2~4。

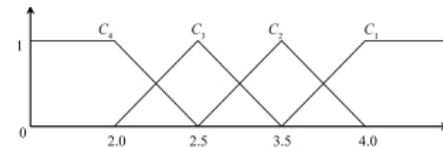


图 2 隧道穿越断层和采空区情况、工期紧张程度、支护措施和监控量测及地质预报方法的未确知测度函数

Fig. 2 Uncertainty measurement function of the tunnel passing through the faults and goafs, the level of pressure caused by the project deadline, the supporting measures, and the methods of monitoring measurements and the geological forecast

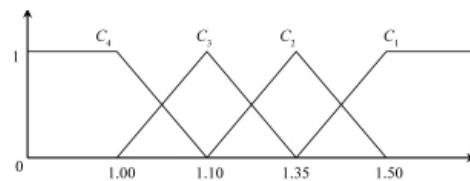


图 3 断层破碎带水体、采空区积水、超前注浆支护、断层破碎带围岩岩性及地质构造影响、注浆方式针对性和水害隐患探测与预报的未确知测度函数

Fig. 3 Uncertainty measurement function of water in the fault fracture zone, the goaf hydrops, the advanced grouting support, the surrounding rock lithology and the geological structure influence of the fault fracture zone, the pertinence of the grouting way, and the detection and the prediction of potential water damages

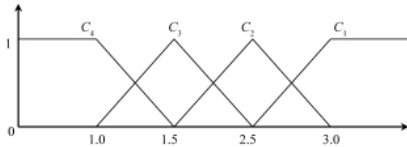


图4 地表民居和水田分布、施工阶段防排水措施、主体结构防排水措施、地表失水应急预案缺乏度和洞口地形陡峭度的未确知测度函数

Fig. 4 Uncertainty measurement function of surface dwellings and the paddy field distribution, the anti-drainage measures during the construction phase, the anti-drainage measures of the main structure, the lacks of surface dehydration emergency plan, and the terrain steep degree of the portal

将表2中影响因素的取值分别代入图2~图4中的单指标测度函数中,计算隧道施工的单指标评价矩阵,见式(9)。

$$(\mu_{ijk})_{15 \times 4} = \begin{pmatrix} 0 & 0 & 0.8 & 0.2 \\ 0 & 0.7 & 0.3 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0.5 & 0.5 & 0 \\ 0.33 & 0.67 & 0 & 0 \\ 0 & 0.8 & 0.2 & 0 \\ 0.33 & 0.67 & 0 & 0 \\ 0.33 & 0.67 & 0 & 0 \\ 0 & 0.8 & 0.2 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0.2 & 0.8 & 0 & 0 \\ 0.4 & 0.6 & 0 & 0 \\ 0 & 0.3 & 0.7 & 0 \\ 0 & 0 & 0.4 & 0.6 \\ 0 & 0 & 0.6 & 0.4 \end{pmatrix} \quad (9)$$

### 3.3 计算多指标测度评价矩阵

用式(1)~(6)确定各评价指标权重,该隧道危险性评价指标权重为:  $\{w_1, w_2, \dots, w_{15}\} = \{0.06838, 0.05985, 0.10700, 0.05350, 0.05805, 0.06838, 0.05805, 0.05805, 0.06838, 0.10700, 0.06838, 0.05505, 0.05985, 0.05505, 0.05505\}$ ,根据单指标测度矩阵和式(6),求得该隧道施工危险性的多指标综合测度评价向量为:  $\{0.30716, 0.40041, 0.22370, 0.06873\}$ 。

### 3.4 判别结果识别

由于评价等级  $\{C_1, C_2, \dots, C_p\}$  有序,建立置信度识别准则代替最大隶属度识别准则,因此减少了误判。

取置信度  $\lambda=0.7$ ,由多指标综合测度评价向量式(7)和置信度评价准则式(8),且  $k_0=0.71>\lambda$ ,即隧道施工危险性等级为II级,高度。

由该隧道的测度函数的评价矩阵可知,影响该隧道施工安全的主要是支护措施、地表民居和水田分布、断层破碎带、工期等。该隧道主要存在坍塌冒顶、突泥涌水、围岩落石等安全风险,为确保安全风险得到有效的控制和管理,应制定相应应急预案,通过有效措施将风险降至可接受范围内。

## 4 结论

(1) 针对特长隧道施工风险存在诸多的不确定性和隐蔽性等特点,提出一种基于未确知测度理论的特长隧道施工安全风险评价方法,并建立了特长隧道施工风险评价的未确知测度模型。

(2) 综合运用信息熵理论和未确知测度理论,客观地确定了各项影响因素的权重,使评价结果更加符合客观实际,为隧道相关风险评价提供了一种新思路。

(3) 结合某特长铁路隧道工程实际,运用基于未确知测度理论的特长隧道施工安全风险评价方法与模型,经计算,评定该隧道综合风险等级为II级,即高度风险,该方法为隧道工程安全施工提供指导。

### 参考文献 (References)

- 武赞. 关于铁路隧道风险评估方法的探讨 [J]. 铁路工程造价管理, 2007, 22(6): 8-11.  
Wu Zan. Railway Engineering Cost Management, 2007, 22(6): 8-11.
- 郑俊杰, 林池峰, 赵冬安, 等. 基于模糊故障树的盾构隧道施工成本风险评估[J]. 岩土工程学报, 2011, 33(4): 501-508.  
Zheng Junjie, Lin Chifeng, Zhao Dongan, et al. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2011, 33(4): 501-508.
- 蔡业华, 黄天一. 基于模糊层次法的地铁盾构隧道工程坍塌风险分析 [J]. 施工技术, 2011, 40(S1): 221-224.  
Cai Yehua, Huang Tianyi. Construction Technology, 2011, 40(S1): 221-224.
- 许振浩, 李术才, 李利平, 等. 基于层次分析法的岩溶隧道突水突泥风险评估[J]. 岩土力学, 2011, 32(6): 1757-1766.  
Xu Zhenhao, Li Shucai, Li Liping, et al. Rock and Soil Mechanics, 2011, 32(6): 1757-1766.
- 范玉祥, 何亚伯, 汪琴, 等. 隧道施工安全风险的模糊综合评判 [J]. 华中科技大学学报: 城市科学版, 2010, 27(1): 46-50.  
Fan Yuxiang, He Yabo, Wang Qin, et al. Journal of HUST: Urban Science Edition, 2010, 27(1): 46-50.
- 王飞跃. 基于不确定性理论的尾矿坝稳定性分析及综合评价研究[D]. 长沙: 中南大学, 2009.  
Wang Feiyue. Based on the un certainty theory of tailings dam stability analysis and comprehensive evaluation[D]. Changsha: Central South University, 2009.
- 王光远. 论未确知性信息及其数学处理[J]. 哈尔滨建筑工程学院学报, 1990, 23(4): 52-58.  
Wang Guangyuan. Journal of Harbin Architecture and Engineering Institute, 1990, 23(4): 52-58.
- Dong L J, Peng G J, Fu Y H, et al. Unascertained measurement classifying model of goaf collapse prediction [J]. Journal of Coal Science & Engineering: English Edition, 2008, 12(2): 221-224.
- 董晓军, 赵国彦, 宫凤强, 等. 尾矿坝地震稳定性分析的区间模型及应用[J]. 中南大学学报: 自然科学版, 2011, 42(1): 164-170.  
Dong Longjun, Zhao Guoyan, Gong Fengqiang, et al. Journal of Central South University: Science and Technology, 2011, 42(1): 164-170.
- 交通运输部工程质量监督局. 公路桥梁和隧道工程施工安全风险评价制度及指南解析[M]. 北京: 人民交通出版社, 2011.  
Engineering Quality Supervision Bureau of the Ministry of Transport. Roads bridges and tunnels construction safety risk assessment system and guide analysis [M]. Beijing: People's Communications Publishing House, 2011.
- 中华人民共和国铁道部. 铁路隧道风险评估与管理暂行规定[S]. 2007-12-29.  
The interim prorisions of the risk assessment and management of the railway tunnel[S]. Ministry of Railways of the People's Republic of China. 2007-12-29.

(责任编辑 岳臣)