doi:10. 3969/j. issn. 2095-1744. 2020. 10. 017

基于博弈论-云模型的隧道围岩稳定性分析模型研究

孙　晓[1],杨淑芳[2],武　磊[2],方前程[3]
(1. 驻马店职业技术学院,河南 驻马店 463000;
2. 驻马店市建设工程质量监督站,河南 驻马店,463000;
3. 黄淮学院 建筑工程学院,河南 驻马店,463000)

摘　要:为科学合理评估隧道围岩稳定性,考虑了隧道围岩安全具有随机性和模糊性的特点,引入云理论建立综合评价模型。首先,在分析和参考文献基础上,选取了 6 个影响因素,构建了隧道围岩稳定性综合评价指标体系。其次,基于三标度理论改进层次分析法确定指标主观权重,引入变异系数改进 CRITIC 法确定指标客观权重,采用博弈论确定指标组合权重;根据稳定性分级标准确定云的数字特征并生成了指标云图,分别计算各评估对象不同等级下的单指标隶属度和综合确定度,并基于最大隶属度原则确定等级。最后将模型应用到隧道围岩安全性评价中,并与可拓理论和属性识别评价模型对比。研究结果表明:所建立的评价模型评估结果准确可靠、切合实际,对隧道施工具有一定的指导意义,为隧道围岩稳定性评估提供了一条可量化的新思路。

关键词:隧道围岩;博弈论;组合赋权,改进 CRITIC 法;云模型
中图分类号:U451. 2　　**文献标志码:**A　　**文章编号:**2095-1744(2020)10-0112-08

Study on the Stability Analysis Model of Tunnel Surrounding Rock Based on the Combined Weighting Cloud Model of Game Theory

SUN Xiao[1], YANG Shufang[2], WU Lei[2], FANG Qiancheng[3]
(1. Zhumadian Vocational and Technical College, Zhumadian 463000, China;
2. Zhumadian Construction Project Quality Supervision Station, Zhumadian 463000, China;
3. Institute of Architecture and Engineering, Huanghuai University, Zhumadian 463000, China)

Abstract: In order to evaluate the stability of tunnel surrounding rock scientifically and reasonably, the cloud model theory is introduced to establish the evaluation system based on the cloud model. First of all, by analyzing the influencing factors of the stability of the surrounding rock of the tunnel, a comprehensive stability evaluation index system is established. Secondly, the subjective and objective weights of the indexes are determined by the improved AHP and the improved critic, the combined weights of the indexes are determined by the game theory, the digital characteristics of the cloud are determined according to the stability grading standard, the index cloud chart is generated, and the different grades of the evaluation objects are calculated. Based on the principle of maximum membership degree, the stability grade of surrounding rock is determined. Finally, the game theory combined weighting cloud model comprehensive evaluation model is applied to the tunnel stability evaluation, and compared with the extension theory

收稿日期:2020-03-24
基金项目:河南省科技攻关项目(172102310742);河南省高等学校重点科研项目(16A120015)
Fund: Key Scientific and Technological Projects in Henan Province(172102310742); Key Scientific Research Projects of Colleges and Universities in Henan Province(16A120015)
作者简介:孙　晓(1983—),女,硕士,讲师,研究方向:新型建筑材料及其结构性能研究。
通信作者:方前程(1982—),男,副教授,博士,从事土木工程及防减灾方面的研究。
引用格式:孙　晓,杨淑芳,武　磊,等. 基于博弈论-云模型的隧道围岩稳定性分析模型研究[J]. 有色金属工程,2020,10(10):112-119.
SUN Xiao, YANG Shufang, WU Lei, et al. Study on the Stability Analysis Model of Tunnel Surrounding Rock Based on the Combined Weighting Cloud Model of Game Theory[J]. Nonferrous Metals Engineering, 2020, 10(10): 112-119.

and improved entropy-attribute recognition evaluation model, the research results show that the evaluation results of the established evaluation model are accurate and reliable, practical, which has a certain guiding significance for tunnel construction, and provides a new quantifiable thinking for the tunnel surrounding rock stability evaluation.

Key words: tunnel surrounding rock; game theory; combination weighting, modified critical method; cloud model

隧道围岩稳定性直接决定着隧道施工方案及隧道施工质量与安全性,随着隧道建设的迅速发展,特别是在自然地质条件复杂的地段,因围岩自身稳固性差,在隧道施工过程中会发生塌方、涌水等地质灾害,给工人生命安全带来极大威胁[1-3]。因此,在设计规划阶段,对隧道围岩稳定性进行合理的评判,对防范施工风险、提高施工安全具有重大的现实意义。

众多专家基于强度折减法[4-5]、离散元[6]等理论对隧道围岩稳定性分析进行深入研究,取得了一些有益的成果。随着数学理论的发展与应用,越来越多的理论模型也逐渐应用到隧道围岩稳定性评价中,如采用逼近理想解(TOPSIS)[7]、可拓理论[8]、支持向量机(SVM)[9]、突变理论[10-11]等,一定程度上推动了隧道围岩稳定性评价工作的发展与进步。然而,隧道围岩稳定性影响因素之间相互交织,使围岩稳定性评估工作难度增加,采用常规的数学理论模型在计算过程中可能会产生误差而导致最终评价结果失效。云模型理论在处理具有随机性和模糊性问题方面具有显著优势,是一种相对有效、科学的数学评价模型,在数据挖掘、模型预测、风险评估等方面应用较多[12-13]。云模型在进行风险评估时,首先要建立待估对象综合评价指标体系,确定各指标的权重。权重计算方法分为主观和客观赋值法两种。研究表明,主观权重赋值法在确定指标权重时过于依赖评价者的主观经验而导致权重具有主观性,而客观权重赋值法过于强调数据客观性,容易忽略数据之间的相关性。

鉴于此,本文基于三标度理论改进层次分析法确定指标主观权重,引入变异系数改进 CRITIC 法确定指标客观权重,基于博弈论计算指标的综合权重,建立基于博弈论-云模型综合评价模型,并将该模型应用到某隧道围岩稳定性评价中,以验证该模型评价结果的有效性和合理性。

1　博弈论确定指标权重

1.1　改进层次分析法确定主观权重

层次分析法是目前多属性决策分析确定指标权重的常用方法。由于传统层次分析法采用 9 标度建立判断矩阵,在指标权重计算过程中,对于评估者主观认识和片面性影响,导致指标权重具有主观性。而基于三标度理论构建判断矩阵,只需要确定两因素之间的相对重要性,在权重计算过程中不需要多次重复调整以满足一致性检验的要求,具有计算简便、客观性强等优点。具体操作如下:

1.1.1　建立比较矩阵

基于 3 标度理论建立指标比较矩阵 $\boldsymbol{A}$:

$$\boldsymbol{A}=\begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} & \cdots & a_{1n} \\ a_{21} & a_{22} & \cdots & a_{2n} \\ \vdots & \vdots & \cdots & \vdots \\ a_{n1} & a_{n2} & \cdots & a_{nn} \end{bmatrix} \tag{1}$$

其中 a_{ij} 表示如下:

$$a_{ij}=\begin{cases} 1,\text{表示 } i \text{ 比 } j \text{ 重要} \\ 0,\text{表示 } i \text{ 与 } j \text{ 同等重要} \\ -1,\text{表示 } i \text{ 不如 } j \text{ 重要} \end{cases} \tag{2}$$

1.1.2　建立最优传递矩阵

最优传递矩阵 $\boldsymbol{R}$ 为:

$$\boldsymbol{R}=\begin{bmatrix} r_{11} & r_{12} & \cdots & r_{1j} \\ r_{21} & r_{22} & \cdots & r_{2j} \\ \vdots & \vdots & \cdots & \vdots \\ r_{i1} & r_{i2} & \cdots & r_{ij} \end{bmatrix} \tag{3}$$

其中 $r_{ij}=\frac{1}{n}\sum_{n=1}^{n}(a_{in}+a_{nj})$,则综合判断矩阵 $\boldsymbol{D}$ 为:

$$\boldsymbol{D}=\begin{bmatrix} d_{11} & d_{12} & \cdots & d_{1n} \\ d_{21} & d_{22} & \cdots & d_{2n} \\ \vdots & \vdots & \cdots & \vdots \\ d_{n1} & d_{n2} & \cdots & d_{nn} \end{bmatrix} \tag{4}$$

式中:$d_{in}=\exp(r_{in})$。

1.1.3　主观权值计算

采用乘积方根法来确定主观权值,具体计算过程如下:

$$\left.\begin{aligned} &w=[w_1,w_2,\cdots,w_n]^T \\ &w_i=\left(\prod_{n=1}^{n}d_{in}\right)^{\frac{1}{n}}\Big/\sum_{n=1}^{n}\left(\prod_{n=1}^{n}d_{in}\right)^{\frac{1}{n}} \end{aligned}\right\} \tag{5}$$

式中:$w=[w_1\quad w_2\quad\cdots\quad w_n]^T$ 为指标权值。

1.2　改进 CRITIC 确定指标客观权重

CRITIC 法是由 DIAKOULAKI 提出的,以指标对比强度和指标冲突性为依据进行指标权重大小

分配的客观赋值法。对比强度和冲突性以指标间的标准差和相关性系数来表示，即标准差越大，相关性系数越小，指标权重赋值越大；相反地，标准差越小，相关性系数越大，指标权重赋值越大。一般地，评估对象影响因素之间存在量级和量纲的差异，直接使用标准差确定指标权重会存在一定缺陷，导致权重确定不科学。引入变异系数，消除指标间差异化，对传统的 CRITIC 加以改进。主要计算步骤如下：

1.2.1 建立原始评价矩阵

假设有待评对象 m 个，每个对象有 n 个评价指标，建立原始评价指标矩阵 $\boldsymbol{X}$ 为：

$$\boldsymbol{X} = \begin{bmatrix} x_1(k_1) & x_2(k_1) & \cdots & x_n(k_1) \\ x_1(k_1) & x_2(k_2) & \cdots & x_n(k_2) \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ x_1(k_m) & x_2(k_m) & \cdots & x_n(k_m) \end{bmatrix} = (x_j(k_i))_{n\times m}, j = 1,2,\cdots,n; i = 1,2,\cdots,m。 \quad (6)$$

1.2.2 原始评估矩阵归一化处理

采用 Z-score 法对所建立的原始评估矩阵 $\boldsymbol{X}$ 进行归一化处理，计算方式为：

$$x_j^*(k_i) = \frac{x_j(k_i) - \overline{x}_j}{s_j} \quad (7)$$

式中：$\overline{x}_j$ 为同一指标的均值，s_j 为指标标准差。

1.2.3 差异系数

通过差异系数消除指标间差异化，其中差异系数计算方式为：

$$v_j = \frac{s_j}{\overline{x}_j} \quad (8)$$

式中：v_j 为第 j 个指标的差异系数。

1.2.4 确定独立性系数

由式(7)得到归一化处理后标准评估矩阵 $\boldsymbol{X}^*$，根据皮尔逊系数计算法得到相关系数矩阵，由相关系数矩阵确定各指标间的独立性系数：

$$\sum_{q=1}^{n}(1-\rho_{q1}), \sum_{q=1}^{n}(1-\rho_{q2}), \cdots, \sum_{q=1}^{n}(1-\rho_{qm}) \quad (9)$$

1.2.5 确定客观权重

综合系数表征了不同指标反映信息量大小，决定了指标权重的大小，综合性系数 h_j 计算公式为：

$$h_j = v_j \sum_{q=1}^{n}(1-\rho_{qm}) \quad (10)$$

式中：h_j 为第 j 个指标的综合性系数。

基于改进 CRITIC 法的客观权重计算方式为：

$$W_j = \frac{h_j}{\sum_{q=1}^{n} h_j} \quad (11)$$

式中：W_j 为第 j 个指标权重。

1.3 基于博弈论的指标综合权值确定

由 N 组权向量组成一个基本权重集 $\boldsymbol{W} = \{\boldsymbol{w}_1, \boldsymbol{w}_2, \cdots, \boldsymbol{w}_N\}$，任意组合后，有 $\boldsymbol{w} = \sum_{k=1}^{N} a_k \boldsymbol{w}_k^T$，基于最优策略，对 $\boldsymbol{w}$ 和 $\boldsymbol{w}_k$ 进行离差极小化处理，即 Min $\| \sum_{k=1}^{N} a_k \boldsymbol{w}_k^T - \boldsymbol{w}_j^T \|^2, j = (1,2,\cdots N)$，由矩阵的微分性质可知，最优化一阶导数条件满足下式：

$$\begin{bmatrix} \boldsymbol{w}_1\boldsymbol{w}_1^T & \cdots & \boldsymbol{w}_1\boldsymbol{w}_N^T \\ \vdots & \vdots & \\ \boldsymbol{w}_N\boldsymbol{w}_1^T & \cdots & \boldsymbol{w}_N\boldsymbol{w}_N^T \end{bmatrix} \begin{bmatrix} a_1 \\ \vdots \\ a_N \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \boldsymbol{w}_1\boldsymbol{w}_1^T \\ \vdots \\ \boldsymbol{w}_N\boldsymbol{w}_N^T \end{bmatrix} \quad (12)$$

对系数 $(a_1, a_2, \cdots\cdots a_N)$ 在 MATLAB 中进行归一化处理，得到最优权重系数后，则综合权重为：

$$\boldsymbol{w}^* = \sum_{k=1}^{N} a_k^* \boldsymbol{w}_k^T \quad (13)$$

2 博弈论-云模型评价模型

2.1 云理论模型

云模型是由李德毅院士针对此前数学理论处理具有随机性和模糊性问题时存在缺陷，基于随机理论和模糊学基础上提出并逐渐推广使用的。云模型依托云发生器，可以实现定性概念与定量指标之间的相互转化，在安全性评估、数据挖掘等方面越来越显示出巨大优势，为随机和模糊问题的解决提供了较为科学、便利的理论模型。

云模型采用三个数字特征 En、Ex、He 来表征一个定性概念，其中 Ex 为期望，是反映定性概念的中心点，代表定性概念的总体特征；En 为熵，可以体现定性概念模糊性与随机性及其关联性；He 为熵的熵，即超熵，表征隶属度的随机性。云发生器分为正向和逆向两种，本文中对于隧道围岩稳定性评价中可以选取正向云发生器。具体计算过程为：

1)根据云的三个数字特征生成以 En 为期望，He 为标准差的随机正态分布函数，$E'_n \sim N(E_n, H_e^2)$；

2)生成云滴；

3)计算确定度。确定度的计算公式为：

$$\mu(x) = \mathrm{e}^{-\frac{(x-Ex)^2}{2E_n'^2}} \quad (14)$$

2.2 综合确定度的计算

为确定隧道围岩稳定性评价等级，需要计算综合确定度，基于最大隶属度原则来判断最终评价等级。综合确定度的计算公式为：

$$U = \sum_{j=1}^{m} \mu(x) w \quad (15)$$

2.3　隧道围岩稳定性综合评价模型实现过程

本文将云模型引入到隧道围岩稳定性分析中,基于博弈论确定指标综合权重,通过计算综合确定度获得最终评价等级,该模型的实现过程如图 1 所示。

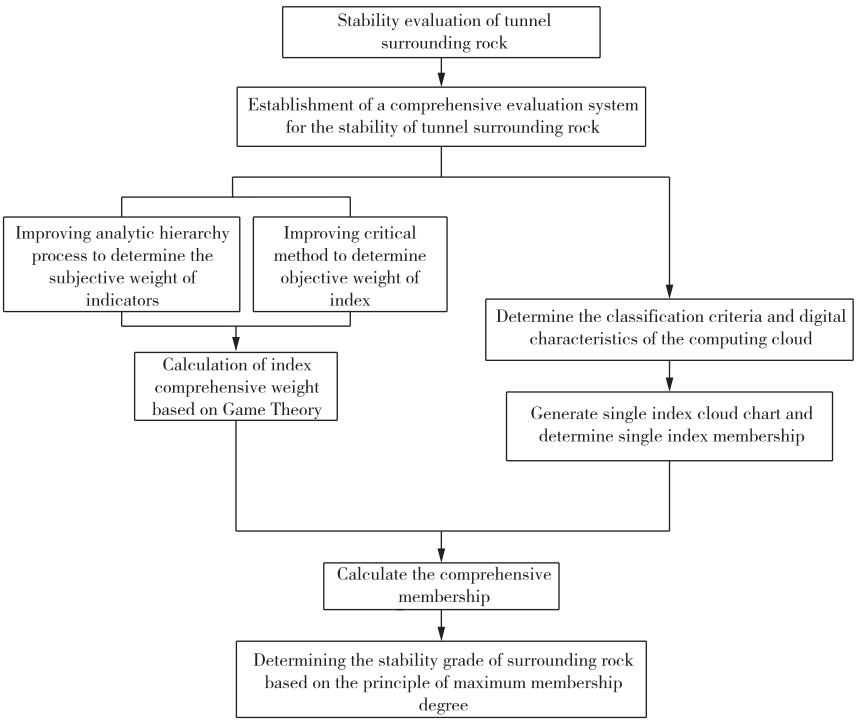

图 1　模型实现过程示意图

Fig. 1　Model implementation process diagram

3　模型的应用

3.1　隧道围岩稳定性分析综合评价指标体系的建立

总体来讲,隧道围岩稳定性影响因素多,且影响因素之间关系复杂,具有很大不确定性与随机性。本着选取的指标能反映隧道客观实际情况、指标易于测定和定性判定,又兼具代表性和可操作性原则,在参考文献[8]、[14]和咨询有关专家的基础上,考虑了岩体结构特征、岩体结构面性质、岩石的力学性质等因素,选取了 6 个指标建立隧道围岩稳定性评价指标体系:1)岩石的单轴饱和抗压强度 Rc。反映岩块的软硬程度及岩性特征;2)岩石质量指标 RQD。反映岩块大小及完整程度;3)节理间距 J_d。反映地质构造及岩体结构特征;4)结构面摩擦系数 f。反映结构面粗糙程度、蚀变及充填情况等特征;5)岩体钻进速度 T(以每钻进 10 cm 岩体所需时间来衡量)。在一定程度上反映工程岩体的强度特征;6)岩体声波速度 V。一定程度上反映岩体的刚度。并将上述指标划分Ⅰ～Ⅴ级 5 个等级,即稳定(Ⅰ级)、较稳定(Ⅱ级)、基本稳定(Ⅲ级)、不稳定(Ⅳ级)和极不稳定(Ⅴ级)等,具体等级标准见表 1。为更好验证本文所建立的基于博弈论-云模型综合评价模型,以石牌岭隧道为研究对象,各指标数据以文献[8]和[14]所列为依据。石牌岭隧道地层以太古界变质沉积岩为主,围岩以片麻岩、混合岩为主。待评价隧道围岩各指标参数取值情况见表 2。

表 1　隧道围岩稳定性等级划分标准

Table 1　Classification standard of tunnel surrounding rock stability grade

Level	Evaluation index of tunnel surrounding rock stability					
	Rc/MPa	RQD/%	J_d/m	f	T/(10 cm · min^{-1})	V/(m · s^{-1})
Ⅰ	200～300	90～100	0.8～2.0	0.8～1.2	12～15	5 000～7 500
Ⅱ	150～200	75～90	0.3～0.8	0.3～0.8	7～12	4 000～5 000
Ⅲ	100～150	50～75	0.2～0.3	0.2～0.3	5～7	2 500～4 000
Ⅳ	50～100	25～50	0.1～0.2	0.1～0.2	3～5	2 000～2 500
Ⅴ	0～50	0～25	0.01～0.1	0.01～0.1	1～3	0～2 000

表 2 各隧道段各指标参数取值情况

Table 2 Value of each index parameter of each tunnel segment

Sample	Value of each index					
	Rc/MPa	RQD/%	J_d/m	f	T/(10 cm·min^{-1})	V/(m·s^{-1})
S_1	82.24	53	0.43	0.57	5.2	3 200
S_2	83.78	26	0.4	0.5	3.2	2 300
S_3	79.67	57	0.29	0.41	7.3	3 600
S_4	65.87	25	0.45	0.27	5.8	2 100
S_5	79.88	57	0.3	0.48	6.6	3 500

3.2 单指标云图的生成

云模型采用三个数字特征来表征定性概念，通过计算云的数字特征，在 MATLAB 环境下，通过编写程序，可以生成各指标下的不同等级云图，根据单指标云图和式(12)确定隶属度。基于隧道围岩稳定性分级标准，云的数字特征计算公式如下：

$$Ex = (x_{ij}^1 + x_{ij}^2)/2 \tag{16}$$

式中：x_{ij}^1、x_{ij}^2 分别为各指标在相应等级标准下最大值与最小值。

根据原则：某一指标取得评价等级的最大值或最小值时，该指标应同时隶属相邻等级，故有：

$$\exp\left\{-\frac{(x_{ij}^1 - x_{ij}^2)^2}{8(E_n)^2}\right\} = 0.5 \tag{17}$$

化简为：

$$En = (x_{ij}^1 - x_{ij}^2)/2.355 \tag{18}$$

云模型的数字特征超熵 He 计算公式为：

$$He = k \tag{19}$$

式中：k 为常数，一般取 0.01。

根据式(16～19)，云的数字特征计算结果见表 3。生成的典型单指标云图如图 2 所示。

表 3 云的数字特征计算结果

Table 3 Cloud digital feature calculation results

Level	R_c/MPa			RQD/%			J_d/m		
	Ex	En	He	Ex	En	He	Ex	En	He
Ⅰ	250	42.463	0.01	95	4.246	0.01	1.4	0.510	0.01
Ⅱ	175	21.231	0.01	82.5	6.369	0.01	0.55	0.212	0.01
Ⅲ	125	21.231	0.01	62.5	10.616	0.01	0.25	0.042	0.01
Ⅳ	75	21.231	0.01	37.5	10.616	0.01	0.15	0.042	0.01
Ⅴ	50	21.231	0.01	12.5	10.616	0.01	0.055	0.038	0.01
Level	f			T/(10 cm·min^{-1})			V/(m·s^{-1})		
	Ex	En	He	Ex	En	He	Ex	En	He
Ⅰ	1	0.170	0.01	13.5	1.274	0.01	6250	1061.571	0.01
Ⅱ	0.55	0.212	0.01	9.5	2.123	0.01	4500	424.628	0.01
Ⅲ	0.25	0.042	0.01	6	0.849	0.01	3250	636.943	0.01
Ⅳ	0.15	0.042	0.01	4	0.849	0.01	2250	212.314	0.01
Ⅴ	0.055	0.038	0.01	2	0.849	0.01	1000	849.257	0.01

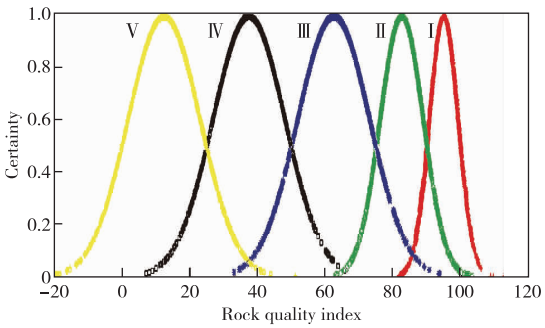

图 2 典型单指标云图

Fig. 2 Typical single indicator cloud diagram

3.3 指标权重的计算

1)改进层次分析法确定主观权重

本文采用改进层次分析法确定指标主观权重，根据式(1)可得比较矩阵为：

$$\boldsymbol{A} = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 1 & 1 & 1 & -1 \\ -1 & 0 & 1 & 1 & 1 & -1 \\ -1 & -1 & 0 & 1 & 1 & -1 \\ -1 & -1 & -1 & 0 & -1 & -1 \\ -1 & -1 & -1 & 1 & 0 & -1 \\ 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 0 \end{bmatrix}$$

根据式(3)计算最优传递矩阵 $\boldsymbol{R}$ 为：

$$\boldsymbol{R}=\begin{bmatrix} 0 & 0.333 & 0.667 & 1.333 & 1 & -0.333 \\ -0.333 & 0 & 0.333 & 1 & 0.667 & -0.667 \\ -0.667 & -0.333 & 0 & 0.667 & 0.333 & -1 \\ -1.333 & -1 & -0.667 & 0 & -0.333 & -1.667 \\ -1 & -0.667 & -0.333 & 0.333 & 0 & -1.333 \\ 0.333 & 0.667 & 1 & 1.667 & 1.333 & 0 \end{bmatrix}$$

根据式(5),可得主观权重为:

$w_1=[0.235\quad 0.168\quad 0.121\quad 0.062\quad 0.086\quad 0.328]$

2)改进 CRITIC 法确定指标客观权重

根据式(6),结合样本数据可得原始评估矩阵 $\boldsymbol{X}$ 为:

$$\boldsymbol{X}=\begin{bmatrix} 82.24 & 53 & 0.43 & 0.57 & 5.2 & 3\,200 \\ 83.78 & 26 & 0.4 & 0.5 & 3.2 & 2\,300 \\ 79.67 & 57 & 0.29 & 0.41 & 7.3 & 3\,600 \\ 65.87 & 25 & 0.45 & 0.27 & 5.8 & 2\,100 \\ 79.88 & 57 & 0.3 & 0.48 & 6.6 & 3\,500 \end{bmatrix}$$

根据式(7),可得标准化矩阵 $\boldsymbol{X}^*$ 为:

$$\boldsymbol{X}^*=\begin{bmatrix} 0.309 & 0.537 & 0.006 & 0.014 & -0.039 & 19.549 \\ 0.429 & -1.006 & 0.003 & 0.006 & -0.224 & -48.120 \\ 0.108 & 0.766 & -0.009 & -0.004 & 0.156 & 49.624 \\ -0.970 & -1.063 & 0.008 & -0.020 & 0.017 & -63.158 \\ 0.124 & 0.766 & -0.008 & 0.004 & 0.091 & 42.105 \end{bmatrix}$$

根据式(11),可得指标客观权重为:

$w_2=[0.057\quad 0.195\quad 0.248\quad 0.153\quad 0.224\quad 0.123]$

3)综合权重的计算

根据式(13),通过建立矩阵方程,在 MATLAB 中运算,并归一化处理后,得到 $a=0.429$,$b=0.571$,可得指标综合权重为:

$w=[0.133\quad 0.183\quad 0.194\quad 0.114\quad 0.165\quad 0.211]$

3.4　综合确定度的计算

根据式(15)确定综合权重,基于最大隶属度原则判断最终评价结果。具体计算结果见表 4。由表 4 可知,隧道段 S_1、S_3、S_5 的评价等级为Ⅲ级,即属于基本稳定状态,隧道段 S_2、S_4 隧道围岩等级标准为Ⅳ级,即属于不稳定状态,与现场调查情况基本一致。隧道段 S_2、S_4 围岩稳定性较差,在施工过程中容易发生冒落等情况,对施工安全存在极大的影响,往往需要注浆加固,才能维持隧道围岩的稳定性,以保证现场施工安全。

3.5　结果讨论

由表 4 可知,本文所建立的基于博弈论-云模型综合评价模型与文献[8]中隧道围岩稳定性评价结果完全一致,与可拓学理论比较,本文计算方法简便,可操作性强,更易于工程中推广与使用,适用性更强;与文献[14]对比发现,基于熵权-属性识别模型与本文及可拓学理论模型评估结果基本一致,当置信度取值较大时,三种评估结果完全一致,在实际运用基于熵权-属性识别模型中,因置信度把握不准,可能存在评估结果与实际情况不一致的情况,本文所建立的评估模型可靠性更好,评估结果可信度更高,与实际贴合度更高。

综上所述,将博弈论与云模型耦合,权重确定更加科学,评估结果更可靠。因此,基于博弈论-云模型的综合评价模型理论科学,能够为隧道围岩分级提供一种相对可靠、可量化的评估方法,同时,该方法也可以推广至其他风险评估中。

表4 综合确定度计算结果

Table 4 Calculation result of comprehensive certainty

Sample	Certainty					Evaluation results		
	U(Ⅰ)	U(Ⅱ)	U(Ⅲ)	U(Ⅳ)	U(Ⅴ)	GA-CM	Extension theory[8]	Entropy weight attribute recognition model[14]
S_1	0.036 6	0.307 1	0.460 3	0.247 4	0.102 1	Ⅲ	Ⅲ	0.827(Ⅲ)
S_2	0.027 9	0.263 0	0.090 5	0.541 1	0.292 2	Ⅳ	Ⅳ	0.848(Ⅳ)
S_3	0.016 2	0.318 3	0.514 1	0.182 2	0.103 5	Ⅲ	Ⅲ	0.963(Ⅲ)
S_4	0.035 9	0.274 4	0.301 8	0.388 8	0.304 1	Ⅳ	Ⅳ	0.896(Ⅳ)
S_5	0.012 0	0.282 7	0.568 0	0.165 4	0.102 5	Ⅲ	Ⅲ	0.964(Ⅲ)

4 结论

1)通过改进层次分析法和CRITIC法分别确定指标主观和客观权重,基于博弈论思想,通过计算指标综合权重,指标权重计算更加合理,可以使评估结果更可靠。

2)针对隧道围岩稳定性具有随机性和模糊性特点,将云模型引入到围岩稳定性分析中,通过验证与对比发现,基于云模型的隧道围岩稳定性评价模型准确、科学、实用性强,为隧道围岩稳定性评价提供了一个可量化的评估方法。

3)隧道围岩稳定性影响因素较多,在今后实际使用中,需进一步合理选取指标和划分分级标准,以获得更符合实际的评估结果。

参考文献:

[1] 方建勤,胡居义.岩溶地质对隧道施工稳定性的影响评价[J].矿业研究与开发,2010,30(1):40-41.
FANG Jianqin,HU Juyi. Evaluation of the influence of karst geology on tunnel construction stability[J]. Mining Research and Development, 2010, 30(1): 40-41.

[2] 郭乾.典型不良地质条件下隧道围岩稳定性分析及对策研究[D].重庆:重庆交通大学,2010.
GUO Qian. Stability analysis and counter measures of tunnel surrounding rock under typical unfavorable geological conditions [D]. Chongqing: Chongqing Jiaotong University,2010.

[3] 周冬军.岩溶隧道开挖稳定性评价及预测技术研究[D].成都:西南交通大学,2012.
ZHOU Dongjun. Stability evaluation and prediction technology of karst tunnel excavation[D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University,2012.

[4] 武亚遵,田方正,林云,等.基于强度折减法的软弱泥岩隧道围岩稳定性分析[J].中国地质灾害与防治学报,2018,29(5):65-71.
WU Yazun,TIAN Fangzheng,LIN Yun,et al. Stability analysis of surrounding rock of soft mudstone tunnel based on strength reduction method[J]. Chinese Journal of Geological Disasters and Prevention,2018,29(5):65-71.

[5] 苏永华,何新亮,罗正东.基于强度折减法的隧道围岩稳定性研究[J].水文地质工程地质,2014,41(1):48-53.
SU Yonghua,HE Xinliang,LUO Zhengdong. Study on stability of tunnel surrounding rock based on strength reduction method[J]. Hydrogeological Engineering Geology,2014,41(1):48-53.

[6] 郑余朝,张文胜,孙克国,等.基于离散元强度折减法的大跨隧道稳定性研究[J].现代隧道技术,2020,57(1):18-25.
ZHENG Yuchao, ZHANG Wensheng, SUN Keguo, et al. Study on stability of long-span tunnel based on strength reduction method of discrete element[J]. Modern Tunnel Technology,2020,57(1):18-25.

[7] 祁英弟,靳春玲,贡力.基于ANP-KL-TOPSIS法的铁路隧道围岩安全性评价[J].中国地质灾害与防治学报,2019,30(4):54-60.
QI Yingdi,JIN Chunling,GONG Li. Safety evaluation of surrounding rock of railway tunnel based on Anp-Kl-Topsis method[J]. Chinese Journal of Geological Disasters and Prevention,2019,30(4):54-60.

[8] 贾超,肖树芳,刘宁.可拓学理论在洞室岩体质量评价中的应用[J].岩石力学与工程学报,2003,22(5):751-756.
JIA Chao, XIAO Shufang, LIU Ning. Evaluation of rock mass quality of cavern by extension theory Application of price[J]. Journal of Rock Mechanics and Engineering,2003,22(5):751-756.

[9] 何新成.基于LIBSVM算法在隧道围岩分级上的应用[J].公路,2019,64(4):334-338.
HE Xincheng. Application of LIBSVM algorithm in classification of tunnel surrounding rock[J]. Highway, 2019,64(4):334-338.

[10] 胥杰洋.基于三种突变模型的隧道围岩稳定性研究[D].兰州:兰州大学,2018.

XU Jieyang. Study on stability of tunnel surrounding rock based on three catastrophe models[D]. Lanzhou: Lanzhou University,2018.

[11] 徐海清,陈亮,王炜,等.软岩隧道围岩塌方的尖点突变预测分析[J].铁道工程学报,2016,33(11):97-101.
XU Haiqing, CHEN Liang, WANG Wei, et al. Cusp catastrophe prediction analysis of surrounding rock collapse of soft rock tunnel[J]. Journal of Railway Engineering,2016,33(11):97-101.

[12] 刘振锐,谢全敏,徐善柱,等.隧道围岩大变形评价的改进云模型及其应用[J].水利水电技术,2019,50(9):108-113.
LIU Zhenrui, XIE Quanmin, XU Shanzhu, et al. Improved cloud model and its application in large deformation evaluation of tunnel surrounding rock[J]. Water Conservancy and Hydropower Technology, 2019,50(9):108-113.

[13] 周东良,邓红卫,秦秀合,等.基于组合赋权和有限区间云模型的岩爆预测二维评判[J].矿业研究与开发,2019,39(12):87-93.
ZHOU Dongliang, DENG Hongwei, QIN Xiuhe, et al. Two dimensional evaluation of rock burst prediction based on combination weighting and limited interval cloud model[J]. Mining Research and Development, 2019,39(12):87-93.

[14] 张龙云,李术才,杨尚阳.隧道围岩稳定性评价的改进熵权-属性识别模型[J].水电能源科学,2012,30(4):67-69.
ZHANG Longyun, LI Shucai, YANG Shangyang. Improved entropy weight attribute recognition model for tunnel surrounding rock stability evaluation[J]. Hydropower and Energy Science,2012,30(4):67-69.

(上接第 111 页,Continued from P111)

[12] STORN R, PRICE K. Differential evolution: A simple and efficient heuristic for global optimization over continuous spaces[J]. Journal of Global Optimization, 1997,11(4):341-359.

[13] PRICE K, STORN R M, LAMPINEN J A. Differential evolution: A practical approach to global optimization[M]. Berlin, Heidelberg: Springer, 2006.

[14] 陈颖,林盈,胡晓敏.多种群多策略的并行差分进化算法[J].计算机科学与探索,2014,8(12):1502-1510.
CHEN Ying, LIN Ying, HU Xiaomin. Parallel differential evolution with multi-population and multi-strategy[J]. Journal of Frontier of Computer Science and Technology,2014,8(12):1502-1510.

[15] 杨启文,蔡亮,薛云灿.差分进化算法综述[J].模式识别与人工智能,2008,21(4):506-513.
YANG Qiwen, CAI Liang, XUE Yuncan. A survey of differential evolution algorithms[J]. PR&AI, 2008, 21(4):506-513.

[16] CHAEL E. Spectral scaling of earthquakes in the miramichi region of new brunswick[J]. Bulletin of the Seismological Society of America, 1987, 77: 347-365.