

DOI: 10.11779/CJGE201606012

基于组合赋权-未确知测度理论的围岩稳定性评价

穆成林, 黄润秋, 裴向军, 裴钻, 路军富

(成都理工大学地质灾害防治与地质环境保护国家重点实验室, 成都 610059)

摘要: 针对岩体围岩稳定性评价多指标性和不确定性的特点, 使用改进的层次分析法和熵值法确定各影响指标权重, 并在此基础上, 提出一种新的组合赋权规则, 得到相对客观准确的结果。依据岩体围岩稳定性影响指标和分级标准, 甄选了6个定性指标和8个定量指标, 采用组合赋权-未确知测度理论耦合评价模型, 构建了评价指标未确知测度函数、评价指标组合赋权值、置信度判别准则, 对研究评价12处围岩断面进行了稳定性评价, 获得了每个围岩断面稳定性等级, 并与现场评价和模糊理论评价结果对比, 评价结果基本符合实际情况。研究表明: 岩体围岩稳定性的组合赋权-未确知测度模型是一种科学合理的方法, 确保了评测对象信息的完整性和评测结果的客观性、准确性、可靠性, 为工程岩体围岩稳定性的评价分级提供了一种新思维, 具有工程实践指导意义。

关键词: 组合赋权; 未确知测度; 围岩稳定性; 置信度识别; 熵值法

中图分类号: TU457 文献标识码: A 文章编号: 1000-4548(2016)06-1057-07

作者简介: 穆成林(1985-), 男, 博士, 主要从事岩土工程等方面的科研工作。E-mail: 283390229@qq.com。

Evaluation of rock stability based on combined weighting-unascertained measurement theory

MU Cheng-lin, HUANG Run-qiu, PEI Xiang-jun, PEI Zuan, LU Jun-fu

(State Key Laboratory of Geohazard Prevention and Geoenvironment Protection, Chengdu University of Technology, Chengdu 610059, China)

Abstract: Owing to multi-objectivity and uncertainty in the evaluation of rock stability, the modified analytic hierarchy process (AHP) and the entropy method are used to calculate the weights of factors. On this basis, a new combination rule is proposed to determine the weight which can help us to get a relatively objective and accurate result. According to the influence factors and grading standards of the rock stability, six qualitative indices and eight quantitative indices are selected. Based on the combined weighting-unascertained measurement theory coupled valuation model, the stabilities of 12 surrounding rocks in the study area are assessed and analyzed by using the unascertained measurement function, combination weighting and confidence criterion. The stability of each surrounding rock is obtained. Compared with the results of field evaluation and fuzzy matter-element, the evaluated results are consistent with the actual situations. Therefore, the combination weighting- unascertained measurement theory evaluation model is scientifically reasonable for the rock stability. The integrality of assessment object information is ensured, and the accuracy, objectivity and reliability of the evaluated results are guaranteed. The proposed model can be applied to the actual projects.

Key words: combined weight; unascertained measurement; rock stability; credible degree recognition; entropy theory

0 引言

无论是交通隧道、地下工程, 还是采矿工程等, 岩体围岩稳定性的科学评价一直是研究的重点和难点, 其中怎么样科学地甄选和分析评价多而复杂的指标也是长期困扰学术界、工程界的难题之一。岩体围岩稳定性评价是一个复杂的系统, 涉及指标众多, 指标之间相互联系、相互制约, 而这些指标又是在地壳内外作用力下不断变化。同时, 指标权重及样本矩的确定, 难免受人为主观因素的影响。

科学有效地对岩体围岩稳定性评价, 不少学者对

此进行了较深入研究, 现行的围岩稳定性评价方法主要有工程地质判别法、理论解析解, 同时引进了概率论、随机理论、模糊理论为基础, 大量的数值分析与计算获得了围岩的应力、应变、位移、塑性区等指标^[1-2], 但这些评价方法由于其计算量大, 预设工况单一, 结果偏差大等缺点, 难以适应地下工程动态开采的要求。

本文采用对影响指标进行客观和主观权重组合分

基金项目: 国家自然科学基金项目(51208069); 四川省应用基础研究计划项目(2014JY0083)

收稿日期: 2015-05-27

析。影响指标权重的主观分析，常用的方法有层次分析法（AHP）、变异系数法、优序图法、优序图法、三角模糊数法、Delphi 法等，而客观权重分析常用的方法为熵值法、标准离差法、CRITIC 法等。

大量实践工作表明，以上各种权重的分析法单独使用，往往造成较大的差异性，不能很好地解决工程中多指标之间存在的模糊性、不可公度性和矛盾性问题；并且，在确定决策指标权重时，以上方法主要依于主观或者客观赋权方法，而由此得到的权重往往是不全面、不科学的^[3]。而目前经常使用的权重组合方法是根据主观实际经验判断分配系数，或者对不同权重或与权重对应的指标值之间的差异程度进行优化，从而求出不同权重的组合分配系数。

针对岩体围岩稳定性评价涉及的影响指标较多，且影响指标信息呈现不确定、未可知性，模糊性、随机性和非线性，如何科学合理地将不确定、未可知信息进行分析评价，是围岩稳定性研究的重点和难点。而鉴于此，未可知测度理论为解决这一问题提供较好的方法。未可知测度理论由王光远于1990年提出^[4]，是未可知数学理论重要成果，是一种能处理诸多指标不确定信息和可定量分析的新方法，避免了大部分文献中只考虑其中某一指标的影响指标，评价指标不够全面；另一方面，现有研究文献中的半定量和定量模型本身存在一些不足，如模糊评价法不符合“非负有界性、可加性、归一性”的测量准则等特征，其“取大取小”原则也存在一定的不足，尤其在确定权值时有时采用专家打分法有一定的主观性^[5]。目前该理论已被运用到多个领域，特别是在岩土工程、地质工程研究范围内，取得了良好的效果。

本文以主观、客观权重形成的组合权的形式对岩体围岩稳定性影响指标赋予权重，消除指标的差异性，使得符合真实情况；同时，以未可知测度理论为基础，建立置信度识别准则进行围岩稳定性判别评价，解决评价过程中信息不确定、未可知性。研究结果表明该方法较为科学合理和准确客观，为岩体围岩稳定性评价提供了一种新的思路。

1 组合赋权

1.1 粗糙集优化层次分析法

Saaty^[6]于20世纪70年代提出层次分析法（AHP），目前应用于各领域确定大系统中不同层次的各指标权重。该方法清晰简单，易于分析计算，但人为性和随机性太强，故计算结果偏差严重。为此，引入粗糙集理论对层次分析法进行改进，使得权重结果更符合实际，科学合理。

波兰学者 Pawlak^[7]在1982年提出粗糙集理论，该

理论的不可分辨关系和粗糙依赖度两个基本概念以新的角度对事物进行了定义。

将粗糙集理论引入层次分析法中，则指标相对重要性可表示为：假定属性集C中去掉指标A而对剩余指标产生B 的影响程度，该影响程度表示为^[8]

$$\sigma_{CB}(A) = r_C(B) - r_{C-A}(B) \quad (1)$$

式中 $\sigma_{CB}(A)$ 为属性集C中去掉属性A后对属性B 的影响程度； $r_C(B)$ 为属性B对属性集C的依赖度； $r_{C-A}(B)$ 为属性B对去掉了属性A后的属性集的依赖度。

将式（1）计算得到的各指标影响程度两两相除，即可得到相对的重要程度，表示为

$$\Delta\sigma_{ij} = \frac{\sigma_{CB}(A_i)}{\sigma_{CB}(A_j)} \quad (i, j=1, 2, 3, \dots, n) \quad (2)$$

根据层次分析法基本原理，由式（2）得到的指标相对重要程度构建判断矩阵，则可以求出粗糙集优化层次分析法的权重值。

1.2 熵值法

一个自然系统的无序程度及有效性的定量可以用信息熵表示。围岩稳定性系统具有开放性，因异地、异时而变，故很难用传统客观赋权表示影响指标规律。利用熵值法构建判断矩阵确定指标权重，尽量避免权重计算过程中人为影响，使得赋值结果更符合实际。

设 w_j 表示测量指标 X_j 与其它指标相比的要程度，要求 w_j 满足： $0 \leq w_j \leq 1$ ， 并且 $\sum_{j=1}^m w_j = 1$ ， 称 w_j 为 X_j 的权重，而其中 $w=(w_1, w_2, w_3, \dots, w_m)$ 为权向量。可以利用熵值法确定各指标权重，即

$$v_j = 1 + \frac{1}{\lg p} \sum_{i=1}^p u_{ji} \lg u_{ji} \quad , \quad (3)$$

$$w_j = v_j / \sum_{i=1}^n v_i \quad . \quad (4)$$

综上所述，单指标测度评价矩阵是已知的，故可采用上式（3）、（4）求出各指标权重。

1.3 组合赋权分析

层次分析法主要是根据评价者的主观经验而构建判断矩阵，而熵值法则是依据评价主题的数据规律，因此，将上述改进层次分析法计算的权重称为主观权重，熵值法计算的权重成为客观权重^[9]。

设粗糙集改进的层次分析法得到的权重为 w'_i ， 熵值法计算得到的权重为 w''_i ， 设两者的距离函数为 $d(w'_i, w''_i)$ ， 其表达式为

$$d(w'_i, w''_i) = \left[\frac{1}{2} \sum_{i=1}^n (w'_i - w''_i)^2 \right]^{\frac{1}{2}} \quad . \quad (5)$$

设组合权重为 w_i ， 则表达式为

$$w_z = \alpha w'_i + \beta w''_i , \quad (6)$$

式中 α, β 为分配系数, 其约束条件如下式:

$$d(w'_i, w''_i)^2 = (\alpha - \beta)^2 , \quad (7)$$

$$\alpha + \beta = 1 . \quad (8)$$

2 未确知测度计算理论

2.1 未确知测度理论

假设被评价的围岩段(面)有 n 个, 则待评价的围岩段(面)可以用空间向量集表示为: $R=\{R_1, R_2, R_3, \dots, R_n\}$ 。而对于每个待评价的围岩段 R_i ($i=1, 2, \dots, n$) 有 m 个单项评价指标空间: $X=\{X_1, X_2, X_3, \dots, X_n\}$, 如果 X_{ij} 代表围岩段 R_i 的第 j 个评价指标的测量值, 那么 $R_i=\{R_{i1}, R_{i2}, R_{i3}, \dots, R_{im}\}$ 。设每个指标 X_{ij} 都有 p 个评价等级, 即评价空间向量表示为: $U=\{C_1, C_2, C_3, \dots, C_p\}$, 并且设 C_k ($k=1, 2, \dots, p$) 为第 k 级评价等级, k 级比 $k+1$ 级的稳定性差, 记作 $C_k > C_{k+1}$, 若满足 $C_1 > C_2 > \dots > C_p$, 则称 $\{C_1, C_2, C_3, \dots, C_p\}$ 为评价空间的 U 的一个有序分割类^[10]。

2.2 单指标测度评价矩阵

设 $\mu_{ijk}=\mu(X_{ij} \in C_k)$ 表示测量值 X_{ij} 属于第 k 个评价等级 C_k 的程度, 若 μ 满足 $0 \leq \mu(X_{ij} \in C_k) \leq 1$, 且同时满足可加性和归一性准则, 则称 μ 为未确知测度, 简称测度。矩阵 $(\mu_{ijk})_{m \times p}$ 为单指标测度评价矩阵:

$$(\mu_{ijk})_{m \times p} = \begin{bmatrix} \mu_{i11} & \mu_{i12} & \cdots & \mu_{i1p} \\ \mu_{i21} & \mu_{i22} & \cdots & \mu_{i2p} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \mu_{im1} & \mu_{im2} & \cdots & \mu_{imp} \end{bmatrix} . \quad (9)$$

2.3 多指标综合测度评价矩阵

令 $\mu_{ik}=\mu(R_i \in C_k)$ 表示围岩段 R_i 属于第 k 个评价等级 C_k 的程度, 则

$$\mu_{ik} = \sum_{j=1}^m \mu_{ijk} w_j \quad (i=1, 2, \dots, n; k=1, 2, \dots, p), \quad (10)$$

式中, w_j 为评价指标 X_j 在体系中所占的权重。多指标综合测度评价矩阵可表述为

$$(\mu_{ik})_{n \times p} = \begin{bmatrix} \mu_{11} & \mu_{12} & \cdots & \mu_{1p} \\ \mu_{21} & \mu_{22} & \cdots & \mu_{2p} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \mu_{n1} & \mu_{n2} & \cdots & \mu_{np} \end{bmatrix} . \quad (11)$$

2.4 置信度识别准则分析

为了对待评价的围岩稳定性做出最终的评价等级结论, 采用置信度识别准则。若评价的空间 U 有序, 且 $C_1 > C_2 > C_3 > C_4 > C_5$, 设 λ 为置信度(常取 $\lambda \geq 0.5$), 则有 $k_0 = \min\{k : \sum_{i=1}^k \mu_{ik} \geq \lambda, k=1, 2, \dots, p\}$, 那

么, 可以确定围岩段 R_i 的稳定性属于第 k_0 个评价等级 C_{k_0} 。

2.5 排序

判定围岩段 R_i 的稳定等级后, 对 R_i 的稳定性进行排序, 以更好地认识围岩的区域的不同稳定性程度和规律。如果 $C_1 > C_2 > \dots > C_p$, 可令 C_k 的分值为 I_k , 则 $I_k > I_{k+1}$, 且有

$$q_{R_i} = \sum_{k=1}^p I_k \mu_{ik} , \quad (12)$$

式中, q_{R_i} 为评价指标 R_i 的未确知重要度, 则 $q=\{q_{R_1}, q_{R_2}, \dots, q_{R_n}\}$ 称为未确知重要度向量, 可按 q_{R_i} 的大小对 R_i 的稳定性程度排序。

3 围岩稳定性未确知测度模型

3.1 评价体系和等级划分

岩体围岩稳定性指标涉及广泛且复杂, 选取指标应遵循以下原则: ①科学性; ②目的性; ③实用性^[11]。

(1) 评价体系

根据岩体围岩的变形破坏模式以及机理的综合分析, 将岩体结构特征、围岩地质特征、人为指标作为影响巷道围岩稳定性的 3 个一级指标, 同时甄选 14 个二级指标(X_i)。具体评价指标体系如表 1 所示。

(2) 等级划分

对各评价指标进行分级及取值, 评价集为 $\{C_1, C_2, C_3, C_4, C_5\}$ 依次代表围岩的稳定性: (I 级) 极稳定、稳定 (II 级)、一般稳定 (III 级)、不稳定 (IV 级)、极不稳定 (V 级), 见表 1。

矿区处于小秦岭地带的五里村—安家瑶背斜的北翼之山前地带, 距背斜轴 800 m, 基本由一单斜组成, 矿区构造的显著特点为断裂构造发育, 基岩其富水性受构造发育程度控制, 极不均匀^[17]。巷道分为多级、多层次且多分支, 位于地下 250~560 m, 断面呈马蹄状, 高垮比不一, 主要是以机械掘进的方式开采。

根据表 1 确定的以河南某金矿地下工程为例, 根据现场调查及参考文献[18~22]等资料, 甄选了 12 个典型断面作为待评价对象, 具体指标参数或定性评价得分见表 2。

3.2 构建单指标测度函数

根据单指标测度函数的定义和表 1 构建单指标测度函数, 以便求得各评价指标的测度值。其各自的单指标测度函数见图 1。根据表 2 中各地下工程断面的指标的取值, 代入单指标测度函数, 得出断面的测度评价矩阵。以样本 G450 地下工程断面 D1 为例, 根据表 2 指标取值, 分别代入图 1 的单指标测度函数中, 计算单指标评价矩阵为

表 1 围岩稳定性影响指标和评价等级
Table 1 Influence indices of surrounding rock stability and grading standards

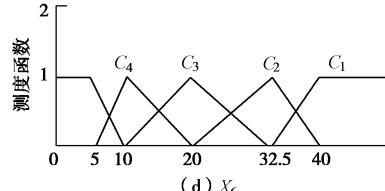
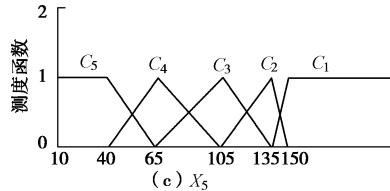
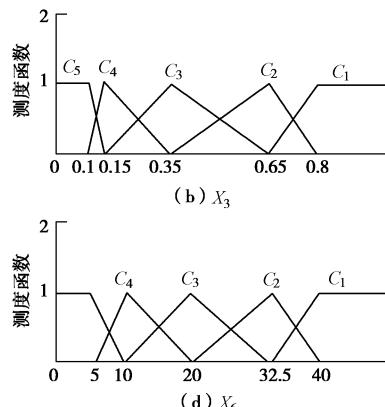
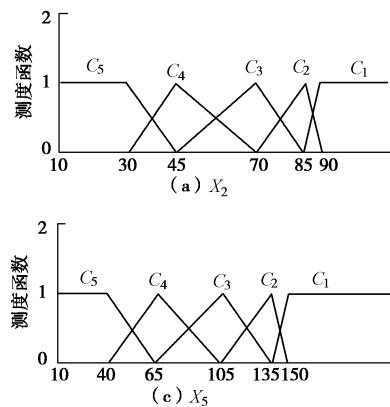
| 指 标 | | 稳定性等级 | | | | |
|--------------------------|----------------------------|---------------|----------------|-----------------|----------------|---------------|
| 一级 | 二级 | I 级 (C_1) | II 级 (C_2) | III 级 (C_3) | IV 级 (C_4) | V 级 (C_5) |
| 围 岩 岩 体 结 构 特 征 | 结构类型 | X_1 | 整体结构(5) | 整体块状(4) | 层状(3) | 破碎状(2) |
| | 岩体RQD/% | X_2 | 90~100 | 80~90 | 60~80 | 30~60 |
| | 结构面粗糙度(f) | X_3 | 0.8~1.2 | 0.5~0.8 | 0.2~0.5 | <0.1 |
| | 结构面张开性状 | X_4 | 闭合(5) | 微张填充(4) | 微张(3) | 张开填充(2) |
| | 岩体强度/MPa | X_5 | 150~200 | 120~150 | 90~120 | 40~90 |
| 围 岩 地 质 特 征 | 变形模量/GPa | X_6 | 40~60 | 25~40 | 15~25 | 5~15 |
| | 地下水/(L·min ⁻¹) | X_7 | <25 | 25~50 | 50~100 | 100~125 |
| | 走向夹角/(°) | X_8 | 75~90 | 60~75 | 45~60 | 30~45 |
| | 软弱夹层性质 | X_9 | 无夹层(5) | 软岩、岩块(4) | 岩屑(3) | 岩屑夹泥(2) |
| | 岩层倾角/(°) | X_{10} | <10 | 10~25 | 25~45 | 45~60 |
| 人 为 指 标 | 初始应力 | X_{11} | 极低(5) | 低(4) | 中(3) | 高(2) |
| | 施工围岩扰动 | X_{12} | 无扰动(5) | 微扰动(4) | 扰动(3) | 严重扰动(2) |
| | 设计高跨比 | X_{13} | <1.0 | 1.0~1.5 | 1.5~3.5 | 3.5~4.5 |
| | 支护方案及 措 施 效 果 | X_{14} | 效果优等(5) | 效果较好(4) | 施效果一般(3) | 效果较差(2) |

注释: 参考相应规范^[12~15]和文献[16]提出应力分级: {极高: $\delta < 2$; 高: $\delta = 2 \sim 4$; 中: $\delta = 4 \sim 6$; 低: $\delta = 6 \sim 8$; 极低: $\delta > 8$ }, 其中 δ 为岩石干燥单轴抗压强度 (UCS 干燥) 与实测最大主应力 (σ) 的强度应力比; 施工围岩扰动根据围岩岩体 (结构及地质) 特征变化定性判定: {无扰动: 围岩岩体特征无变化; 微扰动: 围岩岩体特征变化较小, 集中表现结构面张开度微扩大, 岩体强度降低不明显等; 扰动: 围岩岩体特征变化明显, 岩体RQD降低, 结构面张开变化明显, 岩体强度性状及地下水等变化明显; 严重扰动: 围岩岩体特征变化程度大, 岩体结构及其它特征存在显著差异; 破坏扰动: 围岩岩体特征失去原有结构及地质组合特征}。围岩初始应力及扰动目前国内外没有统一的分级划分方案, 故提出以上划分标准, 可在实际工程中参考应用。

表 2 围岩稳定性影响指标和评价

Table 2 Influence indices of surrounding rock stability and evaluation

| 工程 | 断面 | X_1 | X_2 | X_3 | X_4 | X_5 | X_6 | X_7 | X_8 | X_9 | X_{10} | X_{11} | X_{12} | X_{13} | X_{14} |
|------|-----|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|----------|----------|----------|----------|----------|
| G450 | D1 | 3 | 60 | 0.42 | 2 | 95 | 35 | 90 | 20 | 1 | 28 | 3 | 3 | 3.0 | 2 |
| | D2 | 3 | 66 | 0.38 | 2 | 142 | 41 | 48 | 29 | 1 | 32 | 3 | 5 | 2.0 | 3 |
| | D3 | 2 | 48 | 0.20 | 3 | 84 | 27 | 88 | 15 | 2 | 38 | 3 | 2 | 1.2 | 2 |
| G500 | D4 | 2 | 52 | 0.55 | 3 | 62 | 36 | 19 | 39 | 3 | 40 | 4 | 3 | 3.8 | 1 |
| | D5 | 3 | 94 | 0.22 | 4 | 103 | 50 | 45 | 48 | 2 | 38 | 3 | 3 | 2.5 | 3 |
| | D6 | 1 | 78 | 0.41 | 1 | 78 | 45 | 103 | 24 | 2 | 27 | 4 | 2 | 1.5 | 5 |
| G620 | D7 | 2 | 44 | 0.12 | 2 | 66 | 28 | 60 | 51 | 5 | 9 | 3 | 4 | 2.2 | 4 |
| | D8 | 3 | 66 | 0.23 | 1 | 83 | 39 | 38 | 22 | 2 | 48 | 3 | 4 | 1.9 | 5 |
| | D9 | 5 | 74 | 0.32 | 3 | 140 | 34 | 30 | 24 | 4 | 12 | 4 | 3 | 3.2 | 2 |
| G860 | D10 | 2 | 45 | 0.11 | 3 | 70 | 30 | 82 | 46 | 1 | 52 | 3 | 3 | 0.9 | 1 |
| | D11 | 2 | 52 | 0.08 | 2 | 68 | 23 | 66 | 38 | 3 | 58 | 3 | 2 | 3.0 | 5 |
| | D12 | 2 | 46 | 0.15 | 2 | 78 | 35 | 84 | 55 | 2 | 56 | 5 | 2 | 2.5 | 3 |



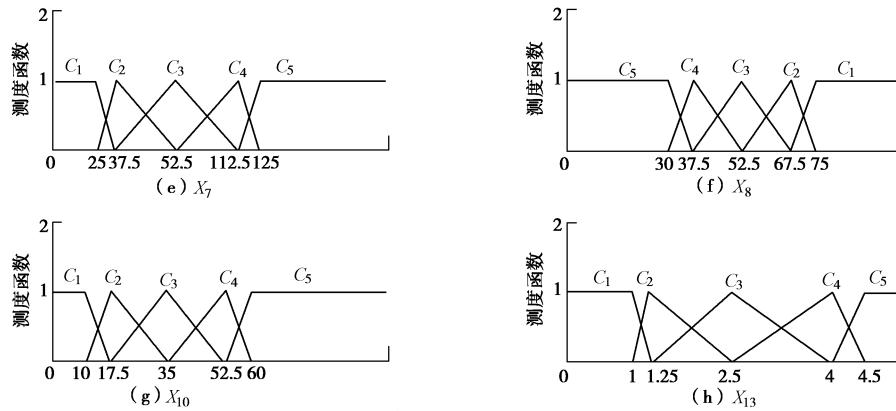


图1 定量指标测度函数

Fig. 1 Uncertainty measurement function of quantitative indices

$$(\mu_{ijk})_{14 \times 5} = \begin{pmatrix} 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0.6 & 0.4 & 0 \\ 0 & 0.23 & 0.77 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0.75 & 0.25 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0.67 & 0.33 \\ 0 & 0 & 0.6 & 0.4 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0.4 & 0.6 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0.67 & 0.33 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \end{pmatrix} \quad (13)$$

3.3 组合权重确定

以上述粗糙集层次分析法主观权重、熵值法客观权重分析理论为基础, 通过式(1)~(6), 计算D1断面指标的组合权重值结果见表3。

表3 影响指标组合赋权值

Table 3 Combined weights of influence indices

| X_i | w'_i | w''_i | α | β | w_i |
|----------|--------|---------|----------|---------|-------|
| X_1 | 0.101 | 0.088 | 0.4614 | 0.5386 | 0.093 |
| X_2 | 0.08 | 0.051 | 0.4614 | 0.5386 | 0.061 |
| X_3 | 0.048 | 0.059 | 0.4614 | 0.5386 | 0.056 |
| X_4 | 0.062 | 0.088 | 0.4614 | 0.5386 | 0.079 |
| X_5 | 0.063 | 0.058 | 0.4614 | 0.5386 | 0.059 |
| X_6 | 0.041 | 0.054 | 0.4614 | 0.5386 | 0.051 |
| X_7 | 0.081 | 0.051 | 0.4614 | 0.5386 | 0.062 |
| X_8 | 0.061 | 0.088 | 0.4614 | 0.5386 | 0.079 |
| X_9 | 0.081 | 0.088 | 0.4614 | 0.5386 | 0.083 |
| X_{10} | 0.08 | 0.051 | 0.4614 | 0.5386 | 0.063 |
| X_{11} | 0.055 | 0.088 | 0.4614 | 0.5386 | 0.076 |
| X_{12} | 0.094 | 0.088 | 0.4614 | 0.5386 | 0.091 |
| X_{13} | 0.071 | 0.054 | 0.4614 | 0.5386 | 0.061 |
| X_{14} | 0.082 | 0.088 | 0.4614 | 0.5386 | 0.086 |

故得到G450地下工程断面D1的指标组合权重权重为 $\{w_1, w_2, w_3, \dots, w_{14}\} = \{0.093, 0.061, 0.056, 0.079, 0.059, 0.051, 0.062, 0.079, 0.083, 0.063, 0.076, 0.091, 0.061, 0.086\}$ 。

3.4 计算多指标测度评价矩阵

根据求得G450地下工程断面D1的指标的组合权重, 结合上式单指标测度矩阵(13)及式(10), 可求得该断面多指标测度评价向量: $\{0, 0.03808, 0.49984, 0.28325, 0.17883\}$ 。同理, 可求得其余断面的指标测度评价向量, 见表4。

3.5 置信度识别

采用置信度准则对G450地下工程断面D1的围岩稳定性进行等级识别。取 $\lambda = 0.5$, 从大到小: $0+0.03808+0.49984=0.53972 > \lambda = 0.5$, 则判定该断面围岩稳定性等级为 C_3 ; 按从小到大: $0.17883+0.28325+0.49984=0.96192 > \lambda = 0.5$, 同样判定该断面围岩稳定性等级为 C_3 。两次判定结果一致, 证明G450地下工程断面D1围岩稳定性等级为 C_3 。

同理, 对其余不同地下工程不同断面的围岩稳定性进行等级, 具体结果, 见表4。并与专家现场评价结果以及模糊评价结果相比较。根据多种方法评价结果显示, 本文的评价结果与专家现场评价结果一致, 而与模糊评价也只存在G620地下工程断面D7差异。经多次反复现场调查, 评价后, 该断面稳定性以本文评价结果更符合实际情况。

综上所述, 本文评价结果符合现场事情情况, 准确度高, 科学合理, 具有较高的实际应用价值。

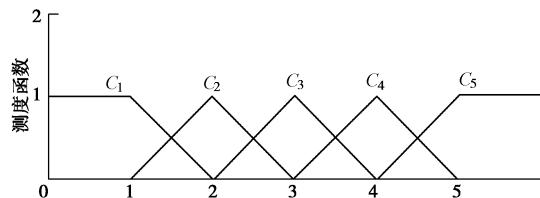
3.6 稳定性排序

根据排序公式(12), 有 $C_1 > C_2 > C_3 > C_4 > C_5$, 分值设为 $C_1=5, C_2=4, C_3=3, C_4=2, C_5=1$ 。故12个评价断面的计算重要程度依次为 $q=\{2.39717, 2.56383, 2.22238, 1.87033, 2.50734, 2.17595, 3.35643, 2.80437, 4.0613, 1.89952, 2.66116, 2.3745\}$, 由此可以得出评价断面的危险程度从小打到依次为 $D9 < D7 < D8 < D11 < D2 < D5 < D1 < D2 < D12 < D3 < D6 < D10 < D4$ 。稳定性排序为地下工程围岩稳定性变化规律提供了分析的基础, 也为断面支护的先后提供了科学合理依据。

表 4 围岩稳定性评价等级

Table 4 Grading standards of surrounding rock stability

| 地下工程 | 断面 | 围岩稳定性等级 | | | | | 本文评价 | 现场评价 | 模糊评价 |
|------|-----|---------|---------|---------|---------|---------|-------|------|------|
| | | C_1 | C_2 | C_3 | C_4 | C_5 | | | |
| G450 | D1 | 0 | 0.03808 | 0.49984 | 0.28325 | 0.17883 | C_3 | 一般稳定 | III级 |
| | D2 | 0.06854 | 0.08756 | 0.38419 | 0.25861 | 0.2011 | C_3 | 一般稳定 | III级 |
| | D3 | 0 | 0.13286 | 0.24528 | 0.33324 | 0.28862 | C_4 | 不稳定 | IV级 |
| G500 | D4 | 0 | 0.12215 | 0.14571 | 0.21246 | 0.51968 | C_5 | 极不稳定 | V级 |
| | D5 | 0.03465 | 0.11472 | 0.38693 | 0.25072 | 0.21298 | C_3 | 一般稳定 | III级 |
| | D6 | 0.09887 | 0.12438 | 0.13221 | 0.14291 | 0.50163 | C_5 | 极不稳定 | V级 |
| G620 | D7 | 0.22645 | 0.28656 | 0.22014 | 0.15067 | 0.11618 | C_2 | 稳定 | I级 |
| | D8 | 0.10374 | 0.21078 | 0.26513 | 0.22681 | 0.19354 | C_3 | 一般稳定 | III级 |
| | D9 | 0.50124 | 0.24171 | 0.12321 | 0.08479 | 0.04905 | C_1 | 极稳定 | I级 |
| G860 | D10 | 0.04846 | 0.10379 | 0.11324 | 0.16783 | 0.56668 | C_5 | 极不稳定 | V级 |
| | D11 | 0.09294 | 0.16744 | 0.26973 | 0.24762 | 0.22227 | C_3 | 一般稳定 | III级 |
| | D12 | 0.04128 | 0.15680 | 0.26984 | 0.27325 | 0.25883 | C_4 | 不稳定 | IV级 |

图 2 定性单指标测度函数 ($X_1, X_4, X_9, X_{11}, X_{12}, X_{14}$)Fig. 2 Uncertainty measurement function of qualitative indices ($X_1, X_4, X_9, X_{11}, X_{12}, X_{14}$)

4 结 论

(1) 岩体围岩稳定性评价是一个复杂的系统, 涉及指标众多, 指标之间相互联系、相互制约, 而这些指标又是在地壳内外作用力下不断变化。运用粗糙集层次分析法的主观权重和熵值法的客观权重进行非线性组合, 确定赋权值, 减少了主观权重人为的影响, 同时也避免了单一客观权重的差异。

(2) 本文甄选 14 个岩体围岩稳定性的影响指标, 其中包括了 6 个定性指标和 8 个定量指标, 建立单指标测度函数, 采用组合赋权值构建多指标测度矩阵, 并将围岩稳定性分为 5 个等级, 利用置信度对围岩断面进行识别, 建立了围岩稳定性分级的未确知测度的评价模型。

(3) 本文结合 3 处地下工程 12 个断面, 采用构建的评价模型进行实践验证, 并与现场调查评价、模糊评价等相比较, 结果表明: 该围岩稳定性评价模型科学合理, 准确度较高, 与实际情况一致, 且评价结果直观、计算过程相对简单易懂, 可以在实际生产中指导施工、支护等。

(4) 将未确知数学理论应用到岩体围岩稳定性的评价中, 构建围岩稳定性分级预测的未确知测度模型, 能够得出实际工程各样本围岩稳定性的类别, 这丰富了围岩稳定性分级的评价方法, 具有一定的应用意义。但是, 两点问题必须注意: ①评价的结果主要依据评

价指标的定性和定量的取值, 同时围岩失稳的形成机制及时效性也将是稳定性不可忽略的问题, 故需要构造更加广泛适用的未确知测度函数, 同时对于定性指标准确赋值才能科学评价。以上两点问题是下一步继续学习、研究的重点和难点。

参 考 文 献:

- [1] 郑颖人, 丛 宇. 隧道围岩稳定性分析及其判据[J]. 隧道建设, 2013, 33(7): 531 - 536. (ZHENG Ying-ren, CONG Yu. Analysis on and criteria of stability of surrounding rock of tunnel[J]. Tunnel Construction, 2013, 33(7): 531 - 536. (in Chinese))
- [2] 李 宁, 张承客, 刘乃飞. 围岩稳定性评判方法适用范围探讨[J]. 岩土工程学报, 2013, 32(5): 657 - 668. (LI Ning, ZHANG Cheng-ke, LIU Nai-fei. The applicability of tunnel stability criterion[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2013, 32(5): 657 - 668. (in Chinese))
- [3] 朱 珂, 吴凤平. 基于优化组合赋权的市政工程建设方案格序优选[J]. 土木工程与管理学报, 2015, 32(1): 82 - 87. (ZHU Wei, WU Feng-ping. Optimization for municipal engineering construction scheme based on lattice-order theory combined with optimal combination empowerment[J]. Journal of Civil Engineering and Management, 2015, 32(1): 82 - 87. (in Chinese))
- [4] 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 Guang-yuan. Uncertainty information and its mathematical treatment[J]. Journal of Harbin Architecture and Engineering Institute, 1990, 23(4): 52 - 58. (in Chinese))
- [5] 曹庆奎, 杨艳丽, 于瑞龙. 基于未确知集的煤矿安全评价

- [J]. 煤炭学报, 2007, **32**(2): 181 - 185. (CAO Qing-kui, YANG Yan-li, YU Rui-long. The coal mines safety appraisal based on unascertained set[J]. Journal of China Coal Society, 2007, **32**(2): 181 - 185. (in Chinese))
- [6] SAATY T L. Applications of analytical hierarchies[J]. Mathematics and Computers in Simulation, 1979, **21**(1): 1 - 20.
- [7] PAWLAK Z. Rough classification[J]. International Journal of Man-machine Studies, 1984, **20**(5): 469 - 483.
- [8] 王广月, 崔海丽, 李倩. 基于粗糙集理论的边坡稳定性评价中因素权重确定方法的研究[J]. 岩土力学, 2009, **30**(8): 2418 - 2422. (WANG Guang-yue, CUI Hai-li, LI Qian. Study on the weight determination of factors in the evaluation of slopes stability[J]. Rock and Soil Mechanics, 2009, **30**(8): 2418 - 2422. (in Chinese))
- [9] 张晨, 王清, 陈剑平, 等. 金沙江流域泥石流的组合赋权法危险度评价[J]. 岩土力学, 2011, **32**(3): 831 - 836. (ZHANG Chen, WANG Qing, CHEN Jian-ping, et al. Evaluation of debris flow risk in Jinsha River based on combined weight process[J]. Rock and Soil Mechanics, 2011, **32**(3): 831 - 836. (in Chinese))
- [10] 刘开第, 庞彦军, 孙光勇, 等. 城市环境质量的未确知测度评价[J]. 系统工程理论与实践, 1999, **19**(12): 52 - 58. (LIU Kai-di, PANG Yan-jun, SUN Guang-yong, et al. The unascertained measurement evaluation of a city's environmental quality[J]. Systems Engineering Theory and Practice, 1999, **19**(12): 52 - 58. (in Chinese))
- [11] 王建波, 葛娟, 赵辉. 绿色工程项目管理成效的多层次灰色评价[J]. 土木工程与管理学报, 2013(2): 85 - 89. (WANG Jian-bo, GE Juan, ZHAO Hui. Multilevel gray evaluation of green engineering project management effect[J]. Journal of Civil Engineering and Management, 2013(2): 85 - 89. (in Chinese))
- [12] GB 50021—2009 岩土工程勘察规范[S]. 2009. (GB 50021—2009 Code for investigation of geotechnical engineering[S]. 2009. (in Chinese))
- [13] GB 50487—2008 水利水电工程地质勘察规范[S]. 2008. (GB 50487—2008 Code for water resources and hydropower engineering geological investigation[S]. 2008. (in Chinese))
- [14] DL/T 5415—2009 水电水利工程地下建筑物工程地质勘查技术规程[S]. 2009. (DL/T 5415—2009 Technical code for underground project geological investigation of hydropower and water resources[S]. 2009. (in Chinese))
- [15] GB 50218—94 工程岩体分级标准[S]. 1995: 78. (GB 50218—94 Standard for engineering classification of rock masses[S]. 1994: 78. (in Chinese))
- [16] 陈菲, 何川, 邓建辉. 高地应力定义及其定性定量判据[J]. 岩土力学, 2015, **36**(4): 971 - 979. (CHEN Fei, HE Chuan, DENG Jian-hui. Concept of high geostress and its qualitative and quantitative definitions[J]. Rock and Soil Mechanics 2015, **36**(4): 971 - 979. (in Chinese))
- [17] 李宗彦, 刘树林, 王现国. 河南省灵宝市灵湖金矿区矿床水文地质调查评价报告[R]. 郑州: 河南省郑州地质工程勘察院, 2008. (LI Zong-yan, LIU Shu-lin, WANG Xian-guo. The survey and evaluation report of mining deposit hydrogeology of Linghu Gold Mine, Lingbao City, Henan Province[R]. Zhengzhou: Geological Engineering Investigation Institute of Zhengzhou City, 2008. (in Chinese))
- [18] 宫凤强, 李夕兵, 董陇军, 等. 基于未确知测度理论的采空区危险性评价研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2008, **27**(2): 321 - 330. (GONG Feng-qiang, LI Xi-bing, DONG Long-jun, et al. Underground goaf risk evaluation based on uncertainty measure theory[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2008, **27**(2): 321 - 330. (in Chinese))
- [19] 唐海, 万文, 刘金海, 等. 基于未确知测度理论的地下洞室岩体质量评价[J]. 岩岩土力学, 2011, **32**(4): 1181 - 1185. (TANG Hai, WAN Wen, LIU Jin-hai, et al. Evaluation of underground cavern rock quality based on uncertainty measure theory[J]. Rock and Soil Mechanics, 2011, **32**(4): 1181 - 1185. (in Chinese))
- [20] 何美丽, 刘霁, 刘浪, 等. 隧道坍方风险评价的未确知测度模型及工程应用[J]. 中南大学学报(自然科学版), 2012, **43**(9): 3665 - 3671. (HE Mei-li, LIU Ji, LIU Lang, et al. Unascertained measure model of assessment tunnel collapse risk and its application in engineering[J]. Journal of Central South University (Science and Technology), 2012, **43**(9): 3665 - 3671. (in Chinese))
- [21] 康志强, 冯夏庭, 周辉. 基于层次分析法的可拓学理论在地下洞室岩体质量评价中的应用[J]. 岩石力学与工程学报, 2006, **25**(增刊 2): 321 - 330. (KANG Zhi-qiang, FENG Xia-ting, ZHOU Hui. Application of extenics theory to evaluation of underground cavern rock quality based on stratification analysis method[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2006, **25**(S2): 321 - 330. (in Chinese))
- [22] 葛传峰. 影响隧道围岩稳定性的因素分析[J]. 公路, 2012(5): 330 - 334. (GE Chuan-feng. Analysis of factors affecting stability of tunnel surrounding rock[J]. Highway, 2012(5): 330 - 334. (in Chinese))