

Research on site selection of maritime transit pilot platform based on PCA-relative entropy model

XU Xiao-feng, XIAO Ying-jie, ZHANG Xue-lai, XU Ya-wei

(College of Merchant Shipping, Shanghai Maritime University, Shanghai 201306, China)

Abstract: In view of the site selection problem of offshore transit platforms, a platform evaluation system is established, considering natural factors, water factors, economic factors, convenience factors, and other constraints. The same trend is normalized. Principal Component Analysis (PCA) is introduced to calculate the weight of the index by using the original index information and mathematical model. According to the projection of the original data in the multi-dimensional space, the original indicators are combined into a new set of linearly independent comprehensive indicators, and the weight is calculated according to the cumulative variance contribution rate of each principal component. The index weights calculated by mathematical models have strong objectivity, minimizing the impact of human subjective factors on site selection. The concept of relative entropy is used to sort the evaluation system and obtain the best scheme. Four more suitable addresses in the channel are selected as alternatives and substituted into the model for calculation. According to the experimental results, the fitting degree ranking result of the method presented in this paper is $T_2 > T_1 > T_3 > T_4$. As a result, scheme 2 is the best address of the offshore transit platform. The above evaluation model for offshore transit platform site selection is an objective evaluation method entirely based on index data of influencing factors. To verify the rationality of the selected method, five pilot station experts are invited to conduct on-site inspections on the offshore transit platform site selection based on experience. The subjective scores based on various considerations are 4.2, 4.7, 4.1, 3.5. That is, under expert judgment, scheme 2 is the best selection for the offshore transit platform. It is consistent with the calculation results of the site selection evaluation model, which verifies the rationality of the method used in this paper. It has opened up a new mode for ship pilotage work and has certain guiding significance for the development of pilotage work.

Key words: safety engineering; site selection; principal component analysis; relative entropy; maritime pilot-age transfer platform

CLC number: X951

Document code: A

Article ID: 1009-6094(2021)06-2438-06

文章编号: 1009-6094(2021)06-2443-09

基于改进的 FAHP - CRITIC 法与云理论的露天矿边坡危险性评估模型*

侯克鹏^{1,2}, 王黎蝶^{1,2}

(1 昆明理工大学国土资源工程学院, 昆明 650000;

2 云南省中-德蓝色矿山与特殊地下空间
开发利用重点实验室, 昆明 650000)

摘 要: 针对传统评估方法无法同时解决露天矿边坡危险性评估中存在的不确定性和模糊性问题, 提出了基于改进 FAHP - CRITIC 法博弈赋权与正态云模型的边坡危险性评估方法。选取地质、工程、水文条件等多方面因素构建综合评价指标体系, 首先采用改进 FAHP 法和 CRITIC 法分别确定主、客观权重; 进而通过博弈论模型确定最优综合权重; 然后结合云模型计算各指标的不同等级隶属度, 求出不同边坡隶属于不同危险等级的综合确定度, 由最大隶属度原则划分边坡的危险性等级。将该模型运用于某露天铜矿边坡危险性评估, 其评估结果与实际情况相符, 表明该方法是科学可行的, 并与其他方法的评估结果进行对比分析, 分析结果进一步证明了该评估模型的可靠性。

关键词: 安全工程; 改进的 FAHP 法; CRITIC 法; 博弈论; 云模型; 综合确定度

中图分类号: X936

文献标志码: A

DOI: 10.13637/j.issn.1009-6094.2020.1302

0 引言

多年来, 我国的露天矿边坡滑坡事故居高不下, 死亡率居安全总事故首位^[1]。因此, 对露天矿边坡进行危险性评估已是必不可少的环节。很多专家对此进行了深入的研究并提出多种理论来探讨边坡的危险性, 如混沌理论^[2]、模糊理论^[3]、随机理论^[4]、突变理论^[5]、灰色系统理论^[6]等。

造成边坡失稳的因素、评估标准和影响因子权重的模糊性使得对边坡危险性等级的划分蕴藏着各种不确定性^[7]。云模型由模糊集理论发展而来, 并于1995年由李德毅等^[8]首次提出, 综合了正态分布和钟形隶属函数, 能很好地进行定性描述到定量数值的不确定转换, 同时兼顾了模糊性和随机性, 具有

* 收稿日期: 2020-09-21

作者简介: 侯克鹏, 教授, 博士生导师, 从事边坡工程与岩石力学研究, 496172617@qq.com; 王黎蝶(通信作者), 博士研究生, 从事边坡工程研究, 601419470@qq.com。

基金项目: 国家自然科学基金项目(51964023)

一定的普适性,为边坡危险性评估提供了一种可行性方法。合理的指标权重是进行正确评估的前提,为解决单一赋权法过于偏主观或客观的问题,陈家良^[9]于 2003 第一次提出了博弈论组合赋权法,为最优综合权重的求取开辟了一条新途径。2009 年,周建国等^[10]首次构建了博弈改进云模型的综合评价法。方前程等^[11]在此基础上建立了基于博弈论和云模型的边坡稳定性分级方法,但其采用三标度的 AHP 法和熵权法分别确定主、客观权重,前者忽略了主观模糊性,且检测判断矩阵一致性标准($CR < 0.1$)的科学依据不充分,后者只考虑指标值的信息量而忽略了指标的相关性,因此也存在不足。

本文采用改进的 Fuzzy Analytic Hierarchy Process(简称 FAHP)法计算主观权重,专家们通过三值判断(最低可能值、最可能值、最高可能值)打分法来构造模糊判断矩阵,并引入三角模糊函数算法,模糊算法能根据人的心理特点建立模型,更符合人的思维,可以增加主观权重的准确性。采用 Criteria Importance Though Intercriteria Correlation(简称 CRITIC)法计算客观权重,其基于评价因素间的对比强度和冲突性来综合衡量指标权重,是一种比熵权法和标准离散法更好的客观赋权法。在此基础上,采用博弈论算法求出最优综合权重。最后建立基于博弈论和云模型的露天边坡危险性综合评估模型。

1 评估指标体系的构建

边坡的各种影响因素相互制约相互关联,使得其危险性评估成为一项复杂的系统工程,建立一个全面、系统、合理的评价指标体系是正确评估的基础,科学可行性、唯一性、主导性、目的性、综合性等是评价指标体系构建过程中必须遵循的原则。本文结合相关规范及参考文献^[11-16],经整理和总结,分别从地质环境特征、边坡几何条件、水文因素和工程

条件、人类活动四个方面,选取岩石质量指标 x_1 、岩体结构特征 x_2 、黏聚力 x_3 、内摩擦角 x_4 、地应力 x_5 、容重 x_6 、坡高 x_7 、坡度 x_8 、年平均降雨量 x_9 、地震烈度 x_{10} 、人类活动 x_{11} 来构建露天矿山边坡的危险性评估指标体系。参照露天矿边坡工程的相关规范^[17]和工程岩体的分级标准^[18],并借鉴相关学者对边坡稳定性或危险性评估指标的分类标准^[11-16,19],将边坡危险性划分为 I、II、III、IV、V 五个等级,各等级的危险性分别为极低、低、较高、高、极高。边坡危险性评估指标及其等级划分标准见表 1。

2 指标权重确定

2.1 基于改进 FAHP 法的主观赋权

20 世纪 70 年代, Saaty^[20]首次提出了 AHP 法,该方法简洁实用,是一种定性定量相结合的系统性决策方法。1965 年, Zadeh^[21]最先提出了 Dev 模糊集和三角模糊数的概念,可将不确定性语言转化为定量数值,为处理模糊性问题奠定了基础。后来相关研究者将模糊数用于 AHP 法中,不仅将模糊法和层次分析法的优势结合起来,还解决了传统 AHP 法需要对判断矩阵反复进行一致性检验的缺陷^[22-24]。本文选用改进的 FAHP 法确定主观权重,在建立判断矩阵时,为避免评判太绝对,专家们采用三值判断法来打分,得到模糊判断矩阵,并引入三角模糊函数进行计算,将模糊法与 AHP 法的优势结合起来。计算过程和处理方法如下。

如图 1 所示,三角模糊数 A 一般表示为 (l, m, u) 。在论域 U 中,如果存在 $\mu_A(x): U \rightarrow [0, 1]$, 则称 $\mu_A(x)$ 为 $x \in A$ 的隶属度。其中 m 为 A 的隶属度为 1 的中值,当 $x = m$ 时, x 完全属于 A ; l 和 u 分别为下界和上界,在 l, u 之外的完全不属于模糊数 A 。

2.1.1 模糊判断矩阵构造

1) 假设有 n 个评判专家对所有指标进行两两比

表 1 评价指标及其分级
Table 1 Evaluation indicators and their classification

危险性等级	地质环境特征						边坡几何条件		水文因素和工程条件		人类活动
	$x_1 /$ %	$x_2 /$ %	$x_3 /$ MPa	$x_4 /$ ($^{\circ}$)	$x_5 /$ MPa	$x_6 /$ ($\text{kN} \cdot \text{m}^{-3}$)	$x_7 /$ m	$x_8 /$ ($^{\circ}$)	$x_9 /$ mm	$x_{10} /$ 度	$x_{11} /$ %
I 级	[90, 100]	[90, 100]	[0.3, 0.5]	[35, 45]	[0, 2]	[35, 45]	[0, 30]	(0, 15)	[0, 300]	[0, 3]	[0, 20] (无)
II 级	[70, 90]	[70, 90]	[0.2, 0.3]	[27, 35]	[2, 8]	[27, 35]	[30, 45]	[15, 30]	[300, 500]	[3, 5]	[20, 40] (较弱)
III 级	[50, 70]	[50, 70]	[0.1, 0.2]	[18, 27]	[8, 14]	[19, 27]	[45, 60]	[30, 45]	[500, 800]	[5, 7]	[40, 60] (弱)
IV 级	[25, 50]	[30, 50]	[0.05, 0.1]	[12, 18]	[14, 20]	[13, 19]	[60, 80]	[45, 60]	[800, 1 000]	[7, 8]	[60, 80] (较强)
V 级	(0, 25)	(0, 30)	(0, 0.05)	(0, 12)	[20, 25]	(0, 13)	[80, 100]	[60, 90]	[1 000, 1 500]	[8, 12]	[80, 100] (很强)

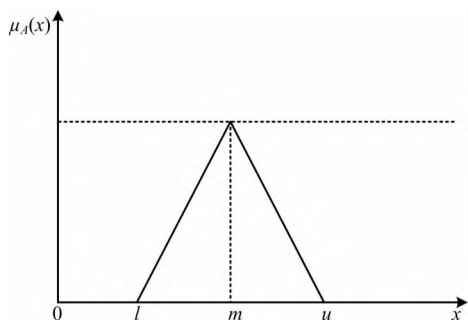


图 1 三角模糊数的几何模型

Fig. 1 Geometric model of triangular fuzzy numbers

较,则得到一系列模糊数,分别为 (l_1, m_1, u_1) , (l_2, m_2, u_2) , \dots , (l_n, m_n, u_n) 。

2) 由式(1)整合模糊数,使每两个指标比较后得到一个模糊数。并重复以上步骤,直到判断矩阵中任意两个指标比较后均为一个模糊数为止。

$$\left(\frac{l_1 + l_2 + \dots + l_n}{n}, \frac{m_1 + m_2 + \dots + m_n}{n}, \frac{u_1 + u_2 + \dots + u_n}{n} \right) \quad (1)$$

2.1.2 各指标的模糊三值权重确定

按式(2)~(4)处理 $A_1(l_1, m_1, u_1)$ 、 $A_2(l_2, m_2, u_2)$, 由式(5)计算指标的模糊三值权重。

$$A_1 + A_2 = (l_1 + l_2, m_1 + m_2, u_1 + u_2) \quad (2)$$

$$A_1 \otimes A_2 = (l_1 l_2, m_1 m_2, u_1 u_2) \quad (3)$$

$$\frac{1}{A} = \left(\frac{1}{l}, \frac{1}{m}, \frac{1}{u} \right) \quad (4)$$

$$Px_i = \sum_{j=1}^n a_{ij} \div \left(\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n a_{ij} \right) \quad i, j = 1, 2, \dots, n \quad (5)$$

式中 a_{ij} 表示第 i 个指标与第 j 个指标进行重要度比较所得的模糊数。

2.1.3 最终权重确定

1) $A_1(l_1, m_1, u_1)$ 、 $A_2(l_2, m_2, u_2)$ 是三角模糊数, $A_1 \geq A_2$ 的可能度用三角模糊函数定义为

$$v(A_1 \geq A_2) = \sup_{x \geq y} [\min(\mu_{A_1}(x), \mu_{A_2}(y))] \quad (6)$$

$$v(A_1 \geq A_2) = \begin{cases} 1 & m_1 \geq m_2 \\ \frac{l_2 - l_1}{(m_1 - u_1) - (m_2 - l_2)} & m_1 \leq m_2, u_1 \geq l_2 \\ 0 & \text{其他情况} \end{cases} \quad (7)$$

2) 一个模糊数大于其他 $(n-1)$ 个模糊数的可能度定义为

$$v(A \geq A_1, A_2, \dots, A_n) = \min(A \geq A_i) \quad i = 1, 2, \dots, n \quad (8)$$

在采用改进的 FAHP 法确定权重时,当某个指标的权重较小时,会出现权重为 0 的现象,虽不会影响最终的评估结果,但会导致主观权重的精确度降低,且与使用传统 AHP 法求得的主观权重差距过大。为解决这一问题,对式(8)进行修正,得到式(9),即将最小可能度(0 除外)作为这个模糊数的初始权重。

$$v(A \geq A_1, A_2, \dots, A_n) = \min(A \geq A_i \neq 0) \quad i = 1, 2, \dots, n \quad (9)$$

3) 标准化处理初始权重,得到最终权重。

2.2 基于 CRITIC 法的客观赋权

相比于熵权法只考虑指标值的信息量而忽略了指标间的相关性,CRITIC 法根据评价指标之间的对比强度和冲突性来综合确定指标权重,同时考虑了指标间的差异性和相关性,是一种更加科学的客观赋权方法^[7,25-26]。具体计算步骤如下。

1) 分别按式(10)和(11)对益稳型和逆稳型指标进行处理,得到标准化矩阵。

$$m_{ij} = \frac{x_{ij} - x_{i-\min}}{x_{i-\max} - x_{i-\min}} \quad (10)$$

$$m_{ij} = \frac{x_{i-\max} - x_{ij}}{x_{i-\max} - x_{i-\min}} \quad (11)$$

确定指标的标准差

$$\sigma_j = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (m_{ij} - \bar{m}_j)^2}{n-1}} \quad (12)$$

$$\bar{m}_j = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n m_{ij} \quad (13)$$

3) 确定指标冲突性。

$$R_j = \sum_{i=1}^n (1 - r_{ij}) \quad (14)$$

$$r_{ij} = \frac{\sum_{i,j=1}^n (m_i - \bar{m})(m_j - \bar{m})}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (m_i - \bar{m})^2 \sum_{j=1}^n (m_j - \bar{m})^2}} \quad (15)$$

4) 计算信息量。

$$c_j = \sigma_j R_j \quad (16)$$

5) 对 c_j 进行归一化处理,得客观权重。

2.3 基于博弈论最优综合权重的确定

基于博弈论组合赋权,同时考虑主、客观权重,通过各权重间的偏差最小化,使其相互竞争又协调

一致^[27]。具体计算步骤如下。

1) 建立基本权重向量集。若由 m 种方法确定 n 个指标的权重, 得到 m 组指标权重为 $w_i = (w_{i1}, w_{i2}, \dots, w_{in})$ ($i = 1, 2, \dots, m$), 由此得到一个权重集 $w = (w_{ij}, w_{2j}, \dots, w_{mj})^T$ ($j = 1, 2, \dots, n$)。

2) 确定最优综合权重。对 m 组权重向量进行任意线性组合为 $w = \sum_{i=1}^m \alpha_i w_i^T$ ($\alpha_i > 0$), 对 α_i 进行优化使 w 和 w_i 的离差极小化, 即 $\min \sum_{i=1}^m \alpha_i w_i^T - w_i$ ($i = 1, 2, \dots, m$), 由矩阵的微分性质导出该式的最优一阶导数为

$$\begin{pmatrix} w_1 w_1^T & w_1 w_2^T & \cdots & w_1 w_m^T \\ w_2 w_1^T & w_2 w_2^T & \cdots & w_2 w_m^T \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ w_m w_1^T & w_m w_2^T & \cdots & w_m w_m^T \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \alpha_1 \\ \alpha_2 \\ \vdots \\ \alpha_m \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} w_1 w_m^T \\ w_2 w_m^T \\ \vdots \\ w_m w_m^T \end{pmatrix} \quad (17)$$

由式(17)求得 $(\alpha_1, \alpha_2, \dots, \alpha_m)$, 归一化处理后得到权重最优分配比系数 α_i^* ; 通过式(18), 求得最优综合权重 w^* 。

$$w^* = \sum_{i=1}^m \alpha_i^* w_i^T \quad (18)$$

表 2 不同等级下各指标的云特征参数

Table 2 Cloud characteristic parameters of each index at different levels

指标	评估标准				
	I 级	II 级	III 级	IV 级	V 级
x_1	(95, 4.283, 0.01)	(80, 8.565, 0.01)	(60, 8.565, 0.01)	(37.5, 0.707, 0.01)	(12.5, 10.707, 0.01)
x_2	(95, 4.283, 0.01)	(80, 8.565, 0.01)	(60, 8.565, 0.01)	(40, 8.565, 0.01)	(15, 12.848, 0.01)
x_3	(0.4, 0.086, 0.01)	(0.25, 0.043, 0.01)	(0.15, 0.043, 0.01)	(0.075, 0.021, 0.01)	(0.025, 0.021, 0.01)
x_4	(40, 4.283, 0.01)	(31, 3.426, 0.01)	(22.5, 3.854, 0.01)	(15, 2.570, 0.01)	(6.5, 1.39, 0.01)
x_5	(1, 0.857, 0.01)	(5, 2.570, 0.01)	(11, 2.570, 0.01)	(17, 2.570, 0.01)	(22.5, 2.141, 0.01)
x_6	(40, 4.283, 0.01)	(31, 3.426, 0.01)	(23, 3.426, 0.01)	(16, 2.570, 0.01)	(6.5, 5.570, 0.01)
x_7	(15, 12.848, 0.01)	(37.5, 6.424, 0.01)	(52.5, 6.424, 0.01)	(70, 8.565, 0.01)	(90, 8.565, 0.01)
x_8	(7.5, 6.424, 0.01)	(62.5, 6.424, 0.01)	(37.5, 6.424, 0.01)	(52.5, 6.424, 0.01)	(75, 12.848, 0.01)
x_9	(150, 128.48, 0.01)	(400, 85.653, 0.01)	(650, 128.48, 0.01)	(900, 85.653, 0.01)	(1250, 214.133, 0.01)
x_{10}	(1.5, 1.285, 0.01)	(4, 0.857, 0.01)	(6, 0.857, 0.01)	(7.5, 0.428, 0.01)	(10, 1.713, 0.01)
x_{11}	(90, 8.565, 0.01)	(70, 8.565, 0.01)	(50, 8.565, 0.01)	(30, 8.565, 0.01)	(10, 8.565, 0.01)

3 基于改进 FAHP - CRITIC 法博弈赋权的云模型理论

3.1 云模型理论

云模型的概念常用 3 个云特征参数来表示, 即 Ex, En, He 。其中期望 Ex 代表论域的中心值; 熵 En 用来度量定性概念的不确定性, 概念模糊度随 En 增大而增大; 超熵 He 表示熵的不确定及云滴的凝聚程度, He 越大, 云层越厚^[7]。由正向云发生器生成的云滴来构建边坡危险性评价云模型的步骤如下。

1) 根据表 1 和式(19)^[16] 计算各指标不同等级下的云特征参数($Ex_{ij}, En_{ij}, He_{ij}$), 结果见表 2。

$$\begin{cases} Ex_{ij} = \frac{a_{ij}^1 + a_{ij}^2}{2} \\ En_{ij} = \frac{a_{ij}^1 - a_{ij}^2}{2.335} \\ He_{ij} = k \end{cases} \quad (19)$$

式中 a_{ij}^1, a_{ij}^2 分别为指标在相应等级标准的上下限值; k 为常数, 可根据评语模糊程度进行调整, 本文 k 取 0.01。

2) 借助 Matlab 软件, 由表 2 的云特征参数和边坡实测数据进行隶属度计算, 并生成指标云图, 具体算法见图 2^[28]。

3.2 综合确定度计算和边坡危险性等级判断

1) 根据已求得的最优综合权重 w_i^* 和各边坡各评价指标不同等级隶属度 $\mu(x_{ik})$, 由式(20) 计算边坡危险性等级的综合确定度 D_k 。

$$D_k = \sum_{i=1}^n \mu(x_{ik}) w_i^* \quad (20)$$

式中 n 为评价指标数, k 为评价等级, w_i^* 为各指标的最优综合权重, $\mu(x_{ik})$ 为第 i 个指标对第 k 个等级的隶属度。

2) 根据最大确定度, 判断边坡危险性等级 V 。

$$V = \max(D_k) \quad k = 1, 2, 3, 4, 5 \quad (21)$$

$$A = \begin{pmatrix} (1,1,1) & (1,2,3) & (1,2,3) & (3,4,5) & (1/3,1/2,1) & (1,2,3) & (1,2,3) & (3,4,5) & (3,4,5) & (2,3,4) & (2,3,4) \\ (1/3,1/2,1) & (1,1,1) & (1/2,1,1) & (2,3,4) & (1/4,1/3,1/2) & (1/2,1,1) & (1,1,2) & (2,3,4) & (2,3,4) & (1,2,3) & (1,2,3) \\ (1/3,1/2,1) & (1,1,2) & (1,1,1) & (2,3,4) & (1/4,1/3,1/2) & (1,1,2) & (1/2,1,1) & (2,3,4) & (2,3,4) & (1,2,3) & (1,2,3) \\ (1/5,1/4,1/3) & (1/4,1/3,1/2) & (1/4,1/3,1/2) & (1,1,1) & (1/7,1/6,1/5) & (1/4,1/3,1/2) & (1/4,1/3,1/2) & (1/2,1,1) & (1,1,2) & (1/3,1/2,1) & (1/3,1/2,1) \\ (1,2,3) & (2,3,4) & (2,3,4) & (5,6,7) & (1,1,1) & (2,3,4) & (2,3,4) & (5,6,7) & (5,6,7) & (4,5,6) & (1/3,1/2,1) \\ (1/3,1/2,1) & (1,1,2) & (1/2,1,1) & (2,3,4) & (1/4,1/3,1/2) & (1,1,1) & (1,1,2) & (2,3,4) & (2,3,4) & (1,2,3) & (1,2,3) \\ (1/3,1/2,1) & (1/2,1,1) & (1,1,2) & (2,3,4) & (1/4,1/3,1/2) & (1/2,1,1) & (1,1,1) & (2,3,4) & (2,3,4) & (1,2,3) & (1,2,3) \\ (1/5,1/4,1/3) & (1/4,1/3,1/2) & (1/4,1/3,1/2) & (1,1,2) & (1/7,1/6,1/5) & (1/4,1/3,1/2) & (1/4,1/3,1/2) & (1,1,1) & (1/2,1,1) & (1/3,1/2,1) & (1/3,1/2,1) \\ (1/5,1/4,1/3) & (1/4,1/3,1/2) & (1/4,1/3,1/2) & (1/2,1/2,1) & (1/7,1/6,1/5) & (1/4,1/3,1/2) & (1/4,1/3,1/2) & (1,1,2) & (1,1,1) & (1/3,1/2,1) & (1/3,1/2,1) \\ (1/4,1/3,1/2) & (1/3,1/2,1) & (1/3,1/2,1) & (1,2,3) & (1/6,1/5,1/4) & (1/3,1/2,1) & (1/3,1/2,1) & (1,2,3) & (1,2,3) & (1,1,1) & (1/2,1,1) \\ (1/4,1/3,1/2) & (1/3,1/2,1) & (1/3,1/2,1) & (1,2,3) & (1/6,1/5,1/4) & (1/3,1/2,1) & (1/3,1/2,1) & (1,2,3) & (1,2,3) & (1,1,2) & (1,1,1) \end{pmatrix}$$

2) 由式(2) ~ (5) 可得各指标的三值权重。

$$Px_1 = (0.076, 0.162, 0.294)$$

$$Px_2 = (0.065, 0.098, 0.195)$$

$$Px_3 = (0.049, 0.098, 0.203)$$

$$Px_4 = (0.018, 0.032, 0.068)$$

$$Px_5 = (0.133, 0.237, 0.679)$$

$$Px_6 = (0.049, 0.098, 0.203)$$

$$Px_7 = (0.047, 0.098, 0.195)$$

$$Px_8 = (0.018, 0.032, 0.068)$$

$$Px_9 = (0.018, 0.032, 0.068)$$

$$Px_{10} = (0.025, 0.058, 0.142)$$

$$Px_{11} = (0.027, 0.058, 0.133)$$

3) 对三值权重去模糊化, 由式(6) ~ (9) 可得初级权重为

$$w'_1 = (v_1, v_2, \dots, v_{11}) = (0.6848, 0.3092, 0.3353, 0.2240, 1.000, 0.3354, 0.3090, 0.2240, 0.2240, 0.0450, 0.3587)$$

4) 对初级权重进行标准化处理得最终权重为

$$w_1 = (0.1691, 0.0764, 0.0828, 0.0533, 0.2469, 0.0828, 0.0763, 0.0553, 0.0553,$$

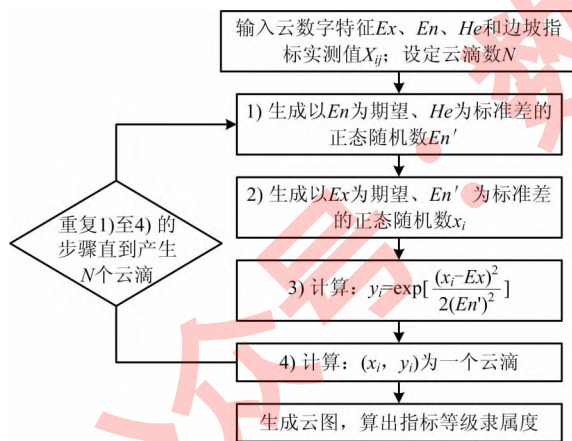


图2 正向云发生器流程

Fig. 2 Algorithm flow of forward cloud generator

表3 各边坡不同指标实测值

Table 3 Actual value of each index of each slope

边坡编号	$x_1/\%$	$x_2/\%$	x_3/MPa	$x_4/(\text{°})$	x_5/MPa	$x_6/(\text{kN} \cdot \text{m}^{-3})$	x_7/m	$x_8/(\text{°})$	x_9/mm	$x_{10}/\text{度}$	$x_{11}/\%$
S_1	82	80	0.045	48	2	26	70	25	1 000	6	80
S_2	61	70	0.025	25	10	19	100	30	1 100	7	60
S_3	40	40	0.020	16	25	20	95	29	1 200	7	60

0.0111, 0.0887)

4.1.2 基于 CRITIC 法的指标客观权重计算

1) 将表 3 中的 x_1 、 x_2 、 x_3 、 x_4 、 x_6 五个益稳指标和 x_5 、 x_7 、 x_8 、 x_9 、 x_{10} 、 x_{11} 六个逆稳指标分别按式 (10) 和 (11) 进行处理, 可得标准化矩阵 B 。

$$B = \begin{pmatrix} 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 \\ 0.5 & 0.725 & 0.2 & 0.2 & 0.652 & 0 & 0 & 0 & 0.5 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0.145 & 0.167 & 0.2 & 0 & 0 & 0 \end{pmatrix}$$

2) 根据式 (12) ~ (16), 并借助 Matlab 软件计算得出各指标的客观权重。

$$w_2 = (0.0209, 0.0495, 0.0565, 0.0390, 0.0351, 0.1682, 0.1766, 0.1899, 0.0209, 0.1217, 0.1217)$$

4.1.3 基于博弈论模型的指标最优综合权重确定

1) 由以上求得的 w_1 和 w_2 的权重集可计算出

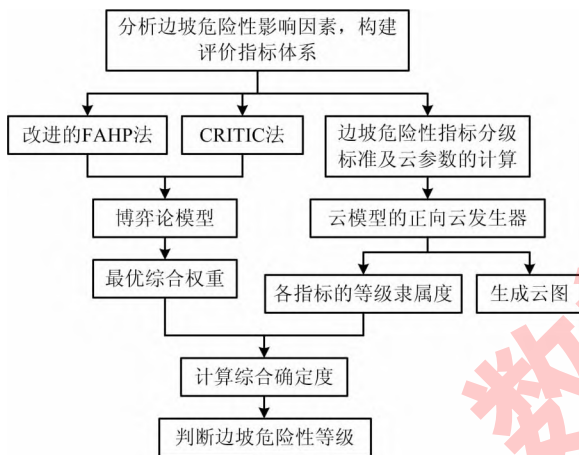


图 3 博弈论与云模型的计算流程图

Fig. 3 Calculation flow chart of game theory and cloud model

$$w_1 w_1^T = 0.13187272, w_1 w_2^T = w_2 w_1^T = 0.07394352, w_2 w_2^T = 0.13443172, \text{由式(17)可得}$$

$$\begin{pmatrix} 0.1319 & 0.0739 \\ 0.0739 & 0.1344 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \alpha_1 \\ \alpha_2 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0.1319 \\ 0.1344 \end{pmatrix}$$

解得 $\alpha_1 = 0.6364, \alpha_2 = 0.6485$, 归一化处理后得权重最优分配比系数: $\alpha_1^* = 0.4953, \alpha_2^* = 0.5047$ 。

由式 (18) 可得最优综合权重为

$$w^* = (0.0943, 0.0628, 0.0695, 0.0461, 0.1400, 0.1259, 0.1269, 0.1232, 0.0379, 0.0669, 0.1054)$$

4.2 云图的生成和指标等级隶属度的计算

根据云特征参数和各边坡指标的实测数据, 在 Matlab 环境下输入程序, 生成指标云图, 并计算各边坡各指标在不同等级的隶属度。由于篇幅限制, 只展示 3 个典型云图和边坡 S_1 的各指标不同等级隶属度, 分别见图 4 和表 4。

4.3 综合确定度的计算和各边坡危险性等级的判断

由式 (20) 可得各边坡在不同等级下的综合确定度 D_k 。根据式 (21) 可判断出 3 个待评估边坡的危险性等级, 结果见表 5。

由表 5 可知, 边坡 S_1 、 S_2 、 S_3 的危险性分别为低 (II 级)、较高 (III 级)、很高 (V 级), 与各边坡实际情况相符, 表明了该评估模型的科学性和可行性

4.4 评估模型的准确性验证和算法组合的必要性

1) 为了验证改进 FAHP - CRITIC 法博弈赋权的准确性, 在本文求得的最优综合权重的基础上, 分别采用未确知测度理论和模糊综合评价法进行综合性

表 4 边坡 S_1 的各指标等级隶属度

Table 4 Grade membership degree of each index of slope S_1

等级	x_1	x_2	x_3	x_4	x_5	x_6	x_7	x_8	x_9	x_{10}	x_{11}
I	0.009 8	0.002 2	0.000 8	0.174 3	0.512 8	0.004 7	0.000 1	0.024 2	0.000 0	0.002 3	0.505 2
II	0.973 1	1.000 0	0.000 0	0.000 0	0.506 0	0.347 2	0.000 0	0.927 1	0.000 0	0.073 0	0.505 5
III	0.369 4	0.006 6	0.013 6	0.000 0	0.002 1	0.681 4	0.024 1	0.150 5	0.024 5	1.000 0	0.002 2
IV	0.000 2	0.000 0	0.274 9	0.000 0	0.000 0	0.000 5	1.000 0	0.000 1	0.505 8	0.001 8	0.000 0
V	0.000 0	0.000 0	0.423 6	0.000 0	0.000 0	0.002 2	0.065 6	0.000 5	0.505 9	0.064 7	0.000 0

表 5 评估结果及对比

Table 5 Evaluation results and comparison

边坡编号	综合确定度					本文方法	实际情况	未确知测度	模糊综合评价	AHP-物元可拓模型
	$D(I)$	$D(II)$	$D(III)$	$D(IV)$	$D(V)$					
S_1	0.137 94	0.441 49	0.180 58	0.165 39	0.061 60	II	II	II	II	III
S_2	0.000 62	0.259 63	0.507 33	0.115 01	0.188 41	III	III	III	III	III
S_3	0.000 69	0.127 75	0.245 24	0.271 75	0.323 00	V	V	V	V	IV

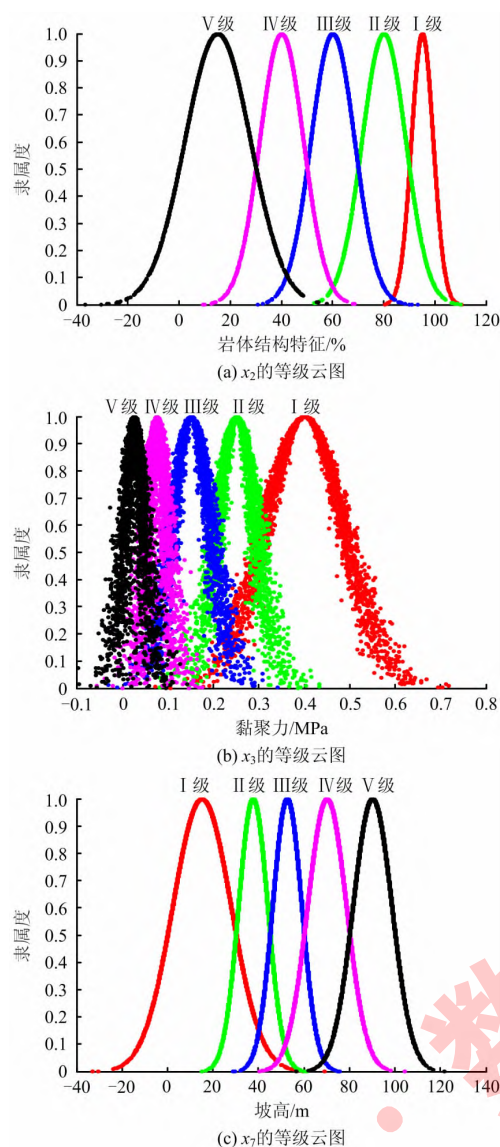


图 4 典型指标的等级云图

Fig. 4 Grade cloud chart of typical indicators

评估,结果见表 5。对比可得,3 种方法的评估结果一致,表明了本文所使用赋权方法的准确性和评估模型中算法组合的可靠性。

2) 为进一步证明本文评估模型中所使用算法组合的必要性,又采用 AHP-物元可拓模型进行评估,其评估结果分别为Ⅲ级、Ⅲ级、Ⅳ级,边坡 S_1 和 S_3 的评估结果与实际情况不一致。这一方面表明仅采用 AHP 法确定权重,会导致权重失衡,进而影响评估结果的准确性;另一方面,物元可拓模型的不确定性主要侧重于系统中是与非的转化,而云模型的不确定性主要表现在处理数据的模糊性和随机性,因此,对于模糊性问题,云模型的处理效果更好。这进一步证明了文中所构建的评估模型的科学可行性和算法组合的必要性。

5 结 论

1) 采用改进的 FAHP 法确定主观权重,专家利用三值判断法打分,可以避免判断结果太绝对,更符合人的思维;且该法中引入了模糊三角函数模型,模糊算法能根据人的心理特点建立模型,更符合人的思维,增加了主观权重的准确性。

2) 相比于熵权法,CRITIC 法兼顾了边坡实测数据的关联度及指标间的差异性和相关性,使求得的客观权重更可靠;引入博弈思想,在主、客观权重之间寻找一种平衡,得到最优综合权重,增加了评估结果的准确性。

3) 云模型可以将抽象的定性概念转换为具体的定量数值,且具有很强的普适性,对边坡危险性分级的随机性和模糊性具有很好的处理效果。

参考文献(References):

- [1] 秦宏楠. 紫金山金铜矿排土场滑坡诱发机理及监测预警技术研究[D]. 北京: 北京科技大学, 2016.
QIN H N. Study on waste dump landslide inducement mechanism and monitoring and early warning technology of Zijinshan gold and copper mine [D]. Beijing: University of Science and Technology Beijing, 2016.
- [2] 黄志全, 崔江利, 刘汉东. 边坡稳定性预测的混沌神经网络方法[J]. 岩石力学与工程学报, 2004, 23 (22): 3808-3812.
HUANG Z Q, CUI J L, LIU H D. Chaotic neural network method for slope stability prediction [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2004, 23 (22): 3808-3812.
- [3] 李云, 刘霖. 基于模糊集理论与 CSMR 的岩质边坡稳定性分析[J]. 中南大学学报(自然科学版), 2012, 43 (5): 1940-1946.
LI Y, LIU J. Assessment of rock slope stability using fuzzy set and CSMR [J]. Journal of Central South University (Science and Technology), 2012, 43 (5): 1940-1946.
- [4] MARK H J, WEST T R, WOO I. Probabilistic analysis of rock slope stability and random properties of discontinuity parameters, Interstate Highway 40, Western North Carolina, USA [J]. Engineering Geology, 2005, 79 (3/4): 230-250.
- [5] 张艺冰, 刘汉东, 杨继红, 等. 基于改进突变理论的水库边坡稳定性风险分析——以前坪水库右坝肩边坡为例[J]. 科学技术与工程, 2020, 20 (8): 3246-3251.
ZHANG Y B, LIU H D, YANG J H, et al. Slope stability

- ty risk analysis of reservoir based on improved catastrophe theory: a case study of right abutment slope of Qianping Reservoir [J]. Science Technology and Engineering, 2020, 20(8): 3246–3251.
- [6] 汪中杰. 基于灰色理论的土质边坡稳定性分析及应用 [D]. 成都: 西南交通大学, 2014.
WANG Z J. Analysis and application of soil stability based on grey theory [D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2014.
- [7] 王加闯, 黄明健, 过江. 基于 CRITIC-有限区间云模型的边坡稳定性评价 [J]. 中国安全生产科学技术, 2019, 15(6): 113–119.
WANG J C, HUANG M J, GUO J. Evaluation of slope stability based on CRITIC finite interval cloud model [J]. Journal of Safety Science and Technology, 2019, 15(6): 113–119.
- [8] 李德毅, 孟海军, 史雪梅. 隶属云和隶属云发生器 [J]. 计算机研究与发展, 1995, 32(6): 15–20.
LI D Y, MENG H J, SHI X M. Membership clouds and membership cloud generators [J]. Computer Research and Development, 1995, 32(6): 15–20.
- [9] 陈加良. 基于博弈论的组合赋权评价方法研究 [J]. 福建电脑, 2003(9): 15–16.
CHEN J L. Research on evaluation method of combination weighting based on game theory [J]. Journal of Fujian Computer, 2003(9): 15–16.
- [10] 周建国, 段三良. 烟气同时脱硫脱硝技术综合评价——基于博弈改进云模型 [J]. 技术经济, 2009, 28(8): 66–71, 114.
ZHOU J G, DUAN S L. Comprehensive evaluation on simultaneous removal of SO_2 and NO_x from flue gas: based on game theory and improving cloud model [J]. Technology Economics, 2009, 28(8): 66–71, 114.
- [11] 方前程, 商丽. 基于博弈论-云模型的露天矿岩质边坡稳定性分析 [J]. 安全与环境学报, 2019, 19(1): 8–13.
FANG Q C, SHANG L. Analysis of the rock slope stability for the open-pit mine based on the game theory and the cloud model [J]. Journal of Safety and Environment, 2019, 19(1): 8–13.
- [12] 方前程, 商丽. 基于变权重理论-正态云模型的边坡稳定性研究 [J]. 安全与环境学报, 2018, 18(5): 1681–1685.
FANG Q C, SHANG L. On the slope stability based on the variable weight theory normal cloud model [J]. Journal of Safety and Environment, 2018, 18(5): 1681–1685.
- [13] 陈昊, 张楚怡, 魏荣誉. 基于博弈论组合赋权与理想点法的边坡稳定性分级评价 [J]. 内蒙古科技与经济, 2020(10): 105–108.
CHEN H, ZHANG C Y, WEI R Y. Grading evaluation of slope stability based on combination weighting of game theory and ideal point method [J]. Inner Mongolia Science Technology & Economy, 2020(10): 105–108.
- [14] 赵军, 宋扬. 改进熵权-正态云模型在边坡稳定性评价中的应用 [J]. 水电能源科学, 2016, 34(4): 120–122, 165.
ZHAO J, SONG Y. Slope stability evaluation based on improved entropy weight-cloud model [J]. Water Resources and Power, 2016, 34(4): 120–122, 165.
- [15] 刘洋洋, 李永强, 郭增长, 等. 基于 AHP-Fuzzy 和激光点云数据的公路边坡危险性评估研究 [J]. 灾害学, 2018, 33(1): 206–212.
LIU Y Y, LI Y Q, GUO Z Z, et al. Research on risk evaluation of highway slope based on AHP-Fuzzy and laser point cloud data [J]. Journal of Catastrophology, 2018, 33(1): 206–212.
- [16] 汪伟, 罗周全, 熊立新, 等. 基于改进物元可拓模型的采空区稳定性评价 [J]. 安全与环境学报, 2015, 15(1): 21–25.
WANG W, LUO Z Q, XIONG L X, et al. Research of goaf stability evaluation based on improved matter-element extension model [J]. Journal of Safety and Environment, 2015, 15(1): 21–25.
- [17] 非煤露天矿边坡工程技术规范: GB 51016—2014 [S].
Technical code for non-coal open-pit mine slope engineering: GB 51016—2014 [S].
- [18] 工程岩体分级标准: GB/T 50218—2014 [S].
Standard for engineering classification of rock mass: GB/T 50218—2014 [S].
- [19] 刘洋洋, 郭增长, 李永强, 等. 基于熵权集对分析和车载激光扫描的公路边坡危险性评价模型 [J]. 岩土力学, 2018, 39(S2): 131–141.
LIU Y Y, GUO Z Z, LI Y Q, et al. Risk assessment model of highway slope based on entropy weight set pair analysis and vehicle laser scanning [J]. Rock and Soil Mechanics, 2018, 39(S2): 131–141.
- [20] SAATY T L. Applications of analytical hierarchies [J]. Mathematics and Computers in Simulation, 1979, 21(1): 1–20.
- [21] ZADEH L A. Fuzzy sets [J]. Information and Control, 1965, 8(3): 338–353.
- [22] AZADEH A, ZADEH S A. An integrated fuzzy analytic hierarchy process and fuzzy multiple-criteria decision-making simulation approach for maintenance policy selection [J]. Simulation, 2016, 92(1): 3–18.
- [23] 李强, 汪永超, 侯力, 等. 基于改进的 FAHP-CRIT-

- IC 和 VIKOR 法的专用机床优选方法 [J]. 组合机床与自动化加工技术, 2020(11): 135 - 138, 143.
- LI Q, WANG Y C, HOU L, et al. Optimization method of special machine tools based on improved FAHP - CRITIC and VIKOR methods [J]. Modular Machine Tool & Automatic Manufacturing Technique, 2020(11): 135 - 138, 143.
- [24] 陈卫卫, 李涛, 李志刚, 等. 基于模糊层次分析法的云服务评估方法 [J]. 解放军理工大学学报(自然科学版), 2016, 17(1): 25 - 30.
- CHEN W W, LI T, LI Z G, et al. Method of cloud service evaluation based on fuzzy analytic hierarchy process [J]. Journal of PLA University of Science and Technology (Natural Science Edition), 2016, 17(1): 25 - 30.
- [25] 万林, 章国宝, 陶杰. 基于 AHP - CRITIC 的电梯安全性评估 [J]. 安全与环境学报, 2017, 17(5): 1696 - 1700.
- WAN L, ZHANG G B, TAO J. On the safety evaluation of the elevator based on AHP - CRITIC criteria [J]. Journal of Safety and Environment, 2017, 17(5): 1696 - 1700.
- [26] DIAKOULAKI D, MAVROTAS G, PAPAYANNAKIS L. Determining objective weights in multiple criteria problems: the CRITIC method [J]. Computers & Operations Research, 1995, 22(7): 763 - 770.
- [27] 贾玉霞. 基于博弈论组合赋权和模糊评价的我国跨境电商物流模式研究 [D]. 杭州: 浙江工商大学, 2017.
- FEI Y X. Research on cross border ecommerce logistics model based on game theory and fuzzy comprehensive evaluation [D]. Hangzhou: Zhejiang Gongshang University, 2017.
- [28] LIU Y, ECKERT C M, EARL C. A review of fuzzy AHP methods for decision-making with subjective judgments [J]. Expert Systems with Applications, 2020, 161: 113738.

Risk assessment model of open-pit mine slope based on improved FAHP - CRITIC method and cloud theory

HOU Ke-peng^{1,2}, WANG Li-die^{1,2}

(1 Faculty of Land Resource Engineering, Kunming University of Science and Technology, Kunming 650000, China; 2 Key Laboratory of Sino-German Blue Mining and Utilization of Special Underground Space, Kunming 650000, China)

Abstract: Aiming at the uncertainty and fuzziness existing in the

slope risk assessment of open-pit mine, this paper constructs a weight determination method based on the Improved Fuzzy Analytic Hierarchy Process (FAHP) - the Criteria Importance Through InterCriteria Correlation (CRITIC) method, and then puts forward the slope risk assessment method based on the normal cloud theory. The selected 11 evaluation indexes are analyzed, including the rock quality, rock mass structure characteristic, cohesive force, internal friction angle, ground stress, high density, slope height, slope, average annual rainfall, earthquake intensity, and human activity. The above 11 evaluation indexes are chosen from five aspects in geological environmental characteristics, hydrological factors, engineering conditions, slope geometries. The risk grades of slope in the combination of the above indicators are divided into five levels: extremely low risk, low risk, higher risk, high risk, and very high risk. Firstly, we respectively adopt the improved FAHP method and the CRITIC method to determine the subjective and objective weights of each evaluation index, then employ the game theory to find a balance between the subjective and objective weights, determining the optimal comprehensive weights of each index. Meanwhile, the forward cloud generator of the cloud model is used to calculate the membership degree of each finger grade of each slope that needs to be evaluated according to the cloud digital characteristics calculated in the paper. Based on the optimal comprehensive weights and grade membership degree of each index obtained above, the comprehensive determination degree of each slope to be evaluated can be calculated. Finally, according to the maximum certainty principle, the risk grade of the slope is divided. The model is applied to assess the risk of three slopes of an open-pit copper mine. Fortunately, the assessment results are consistent with the reality, namely grade II, grade III, and grade V, indicating the accuracy and feasibility of the assessment model. Compared with the results of other methods, the analysis further proves that the evaluation model mentioned above is scientific and feasible, and can be applied to the slope risk assessment of open-pit mine.

Key words: safety engineering; improved FAHP method; CRITIC method; game theory; cloud model; comprehensive degree of certainty

CLC number: X936

Document code: A

Article ID: 1009-6094(2021)06-2443-09