

文章编号:1671-251X(2023)S1-0133-05

基于综合权重-TOPSIS 的露天矿边坡稳定性评价

冯占科¹, 钱旺², 彭建川³

(1. 国能数智科技开发(北京)有限公司, 北京 100010;

2. 国家能源集团总调度室, 北京 100011; 3. 中国神华能源股份有限公司, 北京 100011)

摘要:边坡稳定性的影响因素具有不确定性、模糊性和随机性,会影响评价的准确性,而且确定评价指标的权重易受到主观因素和外界因素的影响。目前的边坡稳定性评价方法在实际工程应用中具有局限性,不利于模糊性问题由定性向定量转化。针对上述问题,提出一种基于综合权重-逼近理想解排序(TOPSIS)的露天矿边坡稳定性评价方法。根据根据国家能源集团下属的露天矿边坡工程数据、研究成果及边坡工程实践经验,选取岩石质量指标、岩体完整指标、地应力、黏聚力、内摩擦角、边坡坡高和日最大降水量 7 个指标作为边坡稳定性的评价指标。利用 AHP 主观赋权法确定主观权重,利用 CIRTIC 客观赋权法确定客观权重,针对主观赋权法和客观赋权法都存在一定的局限性问题,采用主客观综合权重,以提高数据结果的准确性和科学性。结合 TOPSIS 模型对边坡稳定性进行评价分析。以某露天矿边坡为实例进行建模计算,验证该方法对于露天矿边坡的适用性与准确度。将该方法与集团边坡安全监测系统相结合,协助边坡安全预警处理,为露天矿边坡安全监测提供了一条新途径。

关键词:露天矿; 边坡稳定性; 层次分析法; CIRTIC; 综合权重; 逼近理想解排序

中图分类号:TD177 文献标志码:A

Slope stability evaluation based on comprehensive weight and TOPSIS

FENG Zhanke¹, QIAN Wang², PENG Jianchuan³

(1. CHN Energy Digital Intelligence Technology Development (Beijing) Co., Ltd.,

Beijing 100010, China; 2. CHN Energy General Dispatching Office, Beijing 100011, China;

3. China Shenhua Energy Co., Ltd., Beijing 100011, China)

0 引言

2023 年 2 月 22 日,内蒙古阿拉善盟阿拉善左旗新井煤业有限公司露天煤矿发生严重边坡坍塌事故。露天矿边坡,就是露天矿开采过程中在矿场的周边形成阶梯状的台阶,包括采场边坡、排土场边坡、工作帮、非工作帮、到界边坡等^[1]。露天矿边坡坍塌是一种人为地质灾害,其原因是自然条件与工程生产相互作用产生,影响因素复杂^[2-3]。因此,如何有效保障露天矿边坡安全成为当务之急。

目前大多采用模糊综合评价法分析边坡稳定性问题,学者们在此基础上提出了新的思路。例如,肖海平^[4]提出一种动态变权重基础上,构建了基于危险性动态评价模型的边坡稳定性评价方法,该模型经过实际应用取得了良好的经济效益;吴孟龙等^[5]利用 RAGA-PPA 云模型对边坡稳定性进行评价,

实践表明评价结果稳定可靠;李琪琪等^[6]通过单指标联系度与综合联系度,确定边坡安全等级,为边坡安全等级的确定提供了新的视角;宋啸等^[7]建立了基于等效数值 CRITIC 法的边坡稳定性评价模型,取得了良好的应用效果;袁爱平^[8]结合正向云模型和指标权重,计算待评估边坡的综合确定度,最终确定岩质边坡稳定性等级;姚建业等^[9]建立了集对云模型,通过云发生器绘制出边坡稳定性等级云图,从而判定出边坡稳定性等级。但是由于边坡稳定性的影响因素具有不确定性、模糊性和随机性,这些因素很大程度上都会影响评价的准确性,而且确定评价指标的权重易受到主观因素和外界因素的影响,上述方法在实际工程应用中具有局限性,不利于模糊性问题由定性向定量转化。因此,针对特定的露天矿边坡,需要有更加科学、客观的边坡稳定性评价方法。

收稿日期:2023-07-17;责任编辑:王晖。

作者简介:冯占科(1980—),男,河北新乐人,高级工程师,现主要从事智能矿山建设方面的工作,E-mail:fengzhanke@shenhua.cc。

本文通过逼近理想排序 (TOPSIS) 模型, 对露天矿边坡稳定性进行研究评价, 利用 TOPSIS 模型结果可信度高和适用于大量数据处理分析的特点, 可以增加评价结果精度。

1 露天矿边坡指标的确定

根据国家能源集团 (以下简称集团) 下属的露天矿边坡工程数据、研究成果及以往边坡工程实践经验, 综合考虑采用岩石质量指标 (RQD)、岩体完整指标、地应力、黏聚力、内摩擦角、边坡高度和日最大降水量这 7 个指标作为边坡稳定性评价指标, 如图 1 所示。

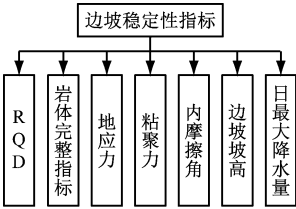


图 1 边坡稳定性评价指标

2 露天矿边坡指标权重的确定

在多指标综合评价中权重系数的确定方法共分为主观赋权法、客观赋权法、组合赋权法 3 大类, 其中常用的主观赋权法有层次分析法 (AHP)、专家法 (德尔菲法)、强制比较法、环比评分法、关联矩阵法、直接打分法、对比排序法等; 常用的客观赋权法有均方差法、变异系数法、独立性权重、主成分分析法、熵值法、CRITIC 法等; 现有的权重融合方法有基于最小二乘的线性组合法、乘法合成归一法和基于最大隶属度的权重组合法等^[10-12]。

虽然上述主客观方法各有其优点, 但是同时也有一定的局限性。主观权重法更加侧重于专家主观意识, 单纯依靠专家以往的经验 and 专业知识, 会导致赋权脱离实际数据的支撑, 仅凭主观判断导致评价逻辑性混乱和评价依据主观单一等问题。而客观权重法则又完全依赖于具体实测数据, 缺乏主观能动性, 屏蔽掉专家的经验与专业知识, 会使得评价结果缺乏灵活性, 不能客观反映出各评价指标的影响程度大小, 造成最终结果背离实际情况。所以将主客观权重相结合考虑会使权重的结果确定更具有说服力, 更加符合实际边坡情况。相融合的权重方法不仅具有专家的经验以及专业知识作为理论支撑, 而且还可以利用边坡的实际测量数据, 提高其可行性。

2.1 主观权重的确定

在众多的主观赋权法中, AHP 法不仅有将复杂问题层次化、定性分析的优点, 又可以选取合适的数学模型进行定量分析, 适合边坡稳定性影响因素权

重的确定, 因此, 选用 AHP 法确定指标权重。AHP 法通过构建不同层次的有关组成因素结构, 将专家的主观判断进行量化, 从而得到多层次因素权重^[13]。

2.2 客观权重的确定

CRITIC 法是一种能客观反映指标权重的客观赋权法, 基本思路是确定指标的客观权数, 以对比强度和评价指标间的冲突性 2 个基本概念为基础^[14], 考虑指标变异性大小的同时兼顾指标之间的相关性, 并非数字越大就说明越重要, 完全利用数据自身的客观属性进行科学评价。客观权重确定步骤如下。

1) 假设有 i 个待评价样本, j 项评价指标, 形成原始指标数据矩阵:

$$X = \begin{bmatrix} x_{11} & \cdots & x_{1j} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ x_{i1} & \cdots & x_{ij} \end{bmatrix} \tag{1}$$

式中 x_{ij} 表示第 i 个样本第 j 项评价指标的数值。

2) 为消除因量纲不同对评价结果的影响, 需要对各指标进行无量纲化处理。CRITIC 法一般采用正向化或逆向化处理, 不建议使用标准化处理, 原因是如果采用标准化处理, 标准差全部都变成数字 1, 即所有指标的标准差完全一致, 这就导致波动性指标没有意义。

若所用指标的值越大越好 (正向指标):

$$x'_{ij} = \frac{x_j - x_{\min}}{x_{\max} - x_{\min}} \tag{2}$$

式中: $x_{\max}$ 为样本中第 j 项评价指标质量大值; $x_{\min}$ 为样本中第 j 项评价指标的最小值。

若所用指标的值越小越好 (逆向指标):

$$x'_{ij} = \frac{x_{\max} - x_j}{x_{\max} - x_{\min}} \tag{3}$$

3) 进行指标变异性分析, 在 CRITIC 法中采用标准差来表示各指标的内取值的差异波动情况, 标准差越大表示该指标的数值差异越大, 越能反映出更多的信息, 该指标本身的评价强度也就越强, 应该给该指标分配更多的权重。

$$\begin{cases} \bar{x}_j = \frac{1}{k} \sum_{i=1}^k x_{ij} \\ S_j = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^k (x_{ij} - \bar{x}_j)^2}{k-1}} \end{cases} \tag{4}$$

式中: S_j 为第 j 个指标的标准差; k 为样本数量。

4) 进行指标冲突性分析, 使用相关系数来表示指标间的相关性, 与其他指标的相关性越强, 则该指标就与其他指标的冲突性越小, 反映出相同的信息越多, 所能体现的评价内容就越有重复之处, 一定程

度上也就削弱了该指标的评价强度,应该减少对该指标分配的权重。

$$R_j = \sum_{i=1}^p (1 - r_{ij})$$

(5)

式中: R_j 为第 j 个评价指标的冲突程度; p 为该指标的权重; r_{ij} 为评价指标 i 和 j 之间的相关系数。

5) 进行信息量分析。

$$C_j = S_j \sum_{i=1}^p (1 - r_{ij}) = S_j R_j$$

(6)

式中: C_j 为第 j 个评价指标的信息量。 C_j 越大,第 j 个评价指标在整个评价指标体系中的作用越大,就应该给其分配更多的权重。

6) 确定客观权重。第 j 个指标的客观权重 w_j 为

$$w_j = \frac{C_j}{\sum_{j=1}^p C_j}$$

(7)

2.3 综合权重的确定

综合权重为

$$a_j = \frac{\sqrt{w_j v_j}}{\sum_{j=1}^k \sqrt{w_j v_j}}$$

(8)

式中 v_j 为 AHP 法确定的第 j 个指标的主观权重。

3 TOPSIS 模型

3.1 基本原理

TOPSIS 法由 Hwang 和 Yoon 于 1981 年提出,TOPSIS 法是通过指标数据处理后建立的决策矩阵,列出其中的最优方案和最劣方案,通过计算评价对象与最优方案和最劣方案的加权欧氏距离进行排序,评价对象距离正理想解越近、离负理想解越远时为最优对象^[15]。其方法是对结果集进行排序,取其最优解,是对结果的评判方法。

3.2 具体步骤

1) 建立初始评价矩阵。假设有 m 个待评价单元, n 个评价指标,得到初始评价矩阵:

$$A = (a_{ij})_{m \times n} = \begin{bmatrix} a_{11} & \cdots & a_{1n} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ a_{m1} & \cdots & a_{nm} \end{bmatrix}$$

(9)

式中: a_{ij} 为第 m 个待评价单元的第 n 个评价指标(其中 $i=1,2,\cdots,m;j=1,2,\cdots,n$)。

2) 标准化决策矩阵。首先对初始评价矩阵 A 进行归一化,对越大越优的指标,有:

$$b_{ij} = \frac{a_{ij} - \min_j(a_{ij})}{\max_j(a_{ij}) - \min_j(a_{ij})}$$

(10)

对越小越优的指标,有:

$$b_{ij} = \frac{\min_j(a_{ij}) - a_{ij}}{\max_j(a_{ij}) - \min_j(a_{ij})}$$

(11)

得到标准化决策矩阵:

$$B = (b_{ij})_{m \times n}$$

(12)

3) 建立加权标准化决策矩阵。加权标准化决策矩阵 C 由标准化决策矩阵 B 与权重 W 相乘得到。

$$C = (c_{ij})_{m \times n} = BW$$

(13)

4) 计算贴近度。① 确定决策矩阵 C 的正、负理想解:

$$C^+ = [(\max(c_{ij}) | m \in J_1), (\min(c_{ij}) | m \in J_2)] = [c_1^+, c_2^+, \cdots, c_n^+]$$

(14)

$$C^- = [(\min(c_{ij}) | m \in J_1), (\max(c_{ij}) | m \in J_2)] = [c_1^-, c_2^-, \cdots, c_n^-]$$

(15)

式中: J_1 为越大越有型指标集; J_2 为越小越有型指标集。

② 计算评价目标与与正、负理想解的欧式距离:

$$\begin{cases} D_i^- = \sqrt{\sum_{j=1}^n (c_{ij} - c_{ij}^+)^2} \\ D_i^+ = \sqrt{\sum_{j=1}^n (c_{ij} - c_{ij}^-)^2} \end{cases}$$

(16)

③ 计算第 n 个评价目标的贴近度 F_η :

$$F_\eta = D_\eta^- / (D_\eta^- + D_\eta^+)$$

(17)

贴近度表示评价目标与正、负理想解的相对接近程度。

4 工程实例

4.1 数据的选取

边坡(E1)地处丘陵地带,为岩质边坡,岩体质量一般,节理裂隙不发育,该地区降水丰富。边坡(E2—E4)位于华北地区,被大断层破坏,使向斜形态变得不够完整,不同边坡等级相差较大,该地区的降水量大。各边坡的岩性及破坏情况的定性分析见表 1,具体指标数据见表 2。

表 1 边坡工程的定性分析

边坡	岩性	坡角/(°)	坡高/m	降雨情况	破坏情况
E1	上部砂岩 下部泥岩	64	46	降雨丰富,受季节影响明显	砂岩与泥岩结合性较差,存在软弱夹层,且软弱夹层的倾向与边坡倾向相同
E2—E4	变质岩系为主	平均 63.5	43~51	日最大降水量为 344.8 mm	矿床主体被大断层破坏的向斜构造。向斜北部仰起端及西翼受旋扭断层的破坏,使向斜形态变得不够完整

表 2 边坡工程实测值

边坡	RQD	岩体完整指标	地应力/MPa	黏聚力/MPa	内摩擦角/(°)	坡高/m	日最大降水量/mm
E1	72.00	15.00	0.44	0.02	12.00	46	120
E2	65.23	63.00	6.65	1.30	44.50	43	344
E3	87.21	82.00	6.77	0.22	46.00	51	344
E4	89.46	84.00	12.23	0.21	42.00	47	344

4.2 确定权重

4.2.1 AHP 法确定主观权重

利用 AHP 法确定主观权重,综合专家的意见和目前现有的研究成果和经验知识,根据图 1 的层次结构模型,确定指标权重值,并对所有底层指标权重进行总排序,最后进行一致性检验,确保判断矩阵的合理性。根据构造的判断矩阵求得最大特征值为 7.334 5,得到的一致性指标 CI 值为 0.056<0.1,满足一致性检验要求,在此基础上得出指标的特征向量。AHP 法分析结果见表 3。

表 3 AHP 法分析结果

指标	特征向量	权重值	最大特征根	CI 值
RQD	0.357 3	0.038		
岩体完整指标	3.173 3	0.340		
地应力/MPa	0.326 4	0.035		
黏聚力/MPa	1.350 7	0.145	7.334 5	0.056
内摩擦角/(°)	1.116 3	0.120		
坡高/m	0.823 1	0.088		
日最大降水量/mm	2.176 6	0.233		

4.2.2 CIRTIC 法确定客观权重

对各评价指标数据进行处理,确定其原始数据矩阵,并根据式(2)和式(3)对数据进行无量纲化处理,之后根据式(4)计算指标变异性数据,根据式(5)计算指标冲突性,根据式(6)计算指标信息量,根据式(7)计算指标权重。CIRTIC 法分析结果见表 4。

表 4 CIRTIC 法分析结果

指标	指标变异性	指标冲突性	信息量	权重
RQD	0.485	7.453	3.615	0.165
坡高/m	0.413	6.415	2.65	0.121
日最大降水量/mm	0.5	7.8	3.9	0.178
黏聚力/MPa	0.456	5.908	2.692	0.123
内摩擦角/(°)	0.476	6.195	2.946	0.135
岩体完整指标	0.465	6.472	3.01	0.138
地应力/MPa	0.409	7.46	3.049	0.139

4.2.3 综合权重的确定

利用式(8)确定综合权重,结果见表 5。

4.3 TOPSIS 模型评价

指标权重确定之后,基于上述边坡工程数据,利

表 5 综合权重结果

指标	权重		
	客观(w_j)	主观(v_j)	综合(a_j)
RQD	0.165	0.038 3	0.043 78
岩体完整指标	0.138	0.340 3	0.325 31
地应力/MPa	0.139	0.035 0	0.033 70
黏聚力/MPa	0.123	0.144 9	0.123 46
内摩擦角/(°)	0.135	0.119 7	0.111 94
坡高/m	0.121	0.088 3	0.074 01
日最大降水量/mm	0.178	0.233 4	0.287 79

用 TOPSIS 模型对露天矿边坡稳定性进行评价,找出最优和最劣矩阵向量,分别计算出评价对象与正理想解距离 D^+ 与负理想解距离 D^- ,根据其距离值计算出综合度得分值,并且进行排序。某边坡工程的稳定性评价结果见表 6。

表 6 边坡稳定性评价结果

索引值	正理想解 距离(D^+)	负理想解 距离(D^-)	综合得分 指数	排序
E1	0.573 52	0.543 93	0.486 76	2
E2	0.435 43	0.561 90	0.563 40	1
E3	0.554 96	0.451 21	0.448 45	3
E4	0.637 25	0.429 62	0.402 69	4

4.4 评价结果分析

根据表 6,可得综合得分指数排序为 $E2>E1>E3>E4$,其边坡稳定性排序为 $E4>E3>E1>E2$,边坡 E4 的稳定性最好,而边坡 E2 的稳定性最差,E2 边坡应该为重点关注对象。

将本文所得的边坡稳定性评价结果与其他评价模型所得的结果进行对比分析,其结果一致,说明综合权重-TOPSIS 评价模型在边坡稳定性评价中的准确性与可行性,进而为不同类型边坡的监测与支护方式提供依据,以保证边坡的安全性,避免滑坡而导致人员与财产损失。

5 集团边坡安全评价与监测

目前集团下属的露天矿边坡已建设适合自身矿山特点的边坡安全监测系统,对边坡的变形进行实时监测和分析,对重点关注的指标进行预警和预测,

避免发生边坡失稳事故,从而造成经济损失和人员伤亡的情况。

集团依托生产单位已建设的边坡监测系统,将原系统中的监测数据、报警数据和边坡地质数据按照集团统一数据传输标准上传到集团数据库。利用上述模型,根据专家经验与专业知识确定主观权重,根据边坡以往历史数据确定客观权重,形成适合该露天矿的指标权重,从而确定主客观综合权重,得到边坡稳定性等级,再结合 GNSS 边坡安全监测系统

进行边坡稳定性实时分析,通过对不同类型边坡的统一分类监测,确定出需要重点关注的等级边坡区域和非重点关注的等级边坡区域,将 GNSS 边坡安全监测系统的边坡布置点着重放置在边坡稳定性薄弱的区域进行监测,避免发生严重灾害事故造成巨大损失。

6 结语

通过主客观方法综合确定权重,不仅具有了层次分析法将复杂问题层次化和定性问题量化的优点,而且也具备了 CIRTIC 法的兼顾指标差异性和冲突性的优点,使得权重的确定更加准确,更适宜露天矿边坡稳定性的评价分析。同时利用 TOPSIS 模型求得各最优解,并进行排序分级,更加全面地反映各边坡方案的整体特征,更加直观地反映出边坡的稳定性等级,从而得到的结果可信度较高。最终利用该算法与集团露天矿边坡安全监测系统相结合使用,可有效提高煤矿工程的安全性及边坡监测预警工作效率。

参考文献:

[1] 王东,张禹,曹兰柱,等. 露天矿边坡稳定性的断面形态效应研究[J]. 中国安全科学学报,2018,28(1): 105-111.

[2] 冯巩,夏元友,王智德,等. 基于位移信息融合的露天

矿边坡动态预警方法[J]. 中国安全科学学报,2022, 32(3):116-122.

[3] 柯丽华,陈魁香,胡南燕,等. 基于 SNA 的露天矿爆破安全风险评估[J]. 中国安全科学学报,2022,32(10): 48-56.

[4] 肖海平. 中小型露天矿边坡稳定性动态评价方法及应用[D]. 徐州:中国矿业大学,2019.

[5] 吴孟龙,叶义成,胡南燕,等. RAGA-PPC 云模型在边坡稳定性评价中的应用[J]. 中国安全科学学报, 2019,29(9):57-63.

[6] 李琪琪,侯克鹏,孙华芬,等. 北厂-架崖山矿段露天采场边坡稳定性评价研究[J]. 有色金属(矿山部分), 2021,73(4):33-39.

[7] 宋啸,罗应杉,李晓辉,等. 基于等效数值-CRITIC 法的边坡稳定性评价[J]. 广东土木与建筑,2021,28 (9):59-62.

[8] 袁爱平. 基于层次分析法-正态云模型的岩质边坡稳定性预测[J]. 水电能源科学,2016,34(9):153-156.

[9] 姚建业,张珊,郝国强. 基于集对云模型的边坡稳定性评价[J]. 煤田地质与勘探,2019,47(1):162-167.

[10] 郭晓晶,何倩,张冬梅,等. 综合运用主客观方法确定科技评价指标权重[J]. 科技管理研究,2012,32(20): 64-67.

[11] 李晓倩,刘学录. 土地评价指标权重赋值方法的比较分析[J]. 甘肃农业大学学报,2012,47(5):129-133.

[12] 宋冬梅,刘春晓,沈晨,等. 基于主客观赋权法的多目标多属性决策方法[J]. 山东大学学报(工学版), 2015,45(4):1-9.

[13] 黄亚江,李书全,项思思. 基于 AHP-PSO 模糊组合赋权法的地铁火灾安全韧性评估[J]. 灾害学,2021, 36(3):15-20.

[14] 俞立平. 客观赋权法本质及在科技评价中的应用研究——以学术期刊为例[J]. 情报理论与实践,2021, 44(2):50-56.

[15] 杨春风,任雁飞,王可意. 基于惩罚-激励变权的 TOPSIS 法边坡安全评价模型[J]. 重庆交通大学学报(自然科学版),2019,38(2):59-64.

(上接第 59 页)

[4] LI Di, WANG Xianglong, CHEN Dongdong, et al. A precise ultra-wideband ranging method using pre-corrected strategy and particle swarm optimization algorithm [J/OL]. Measurement [2023-04-01]. <https://doi.org/10.1016/j.measurement.2022.110966>.

[5] 张旭辉,张超,樊红卫,等. 快速谱峭度结合阶次分析滚动轴承故障诊断[J]. 振动、测试与诊断,2021,41(6): 1090-1095.

[6] ISLAM M A, GAJPAL Y, ELMEKKAWY T Y. Hybrid particle swarm optimization algorithm for solving the clustered vehicle routing problem [J].

Applied Soft Computing, 2021(14):107655. DOI: 10. 1016/j.asoc. 2021. 107655.

[7] 王星河,王红军,刘国庆. 基于谱峭度的滚动轴承故障诊断方法[J]. 设备管理与维修,2021(9):151-153.

[8] SILVA F F D, TORRES-KNOOP A, COOPMANS T, et al. Optimizing entanglement generation and distribution using genetic algorithms [J]. Quantum Science and Technology, 2021, 6 (3). DOI: 10. 1088/ 2058-9565/abfc93.

[9] DEEPIKA G, SARITA D. RAP via hybrid genetic simulating annealing algorithm [J]. International Journal of System Assurance Engineering and Management,2021,12(3):419-425.