

基于 GRA-AHP 联合极差分析复合算法的 边坡稳定性影响因素敏感性分析^①

赵黎¹, 李正国¹, 粟登峰¹, 陈帮洪¹, 田仁军²

(1.西南科技大学 环境与资源学院, 四川 绵阳 621000; 2.四川省职业安全健康协会, 四川 成都 610012)

摘要: 针对 AHP 和 GRA 单一算法应用过程中受主观影响导致评价结果与实际结果偏差较大的问题, 提出了 GRA-AHP 联合极差分析复合算法, 并以西南某磷矿 A 区边坡为例, 运用该算法分析了重度、内摩擦角、黏聚力、弹性模量和泊松比对边坡稳定性的敏感性。结果表明, A 区边坡稳定性影响因素敏感性从大到小顺序为: 内摩擦角、黏聚力、重度、弹性模量、泊松比, 分析结果与矿山实际情况相符。

关键词: 边坡稳定性; 影响因素; 敏感性; 正交试验法; 灰关联法; 层次分析法

中图分类号: TD327

文献标识码: A

doi: 10.3969/j.issn.0253-6099.2024.01.007

文章编号: 0253-6099(2024)01-0031-04

Sensitivity Analysis of Slope Stability Influencing Factors Based on GRA-AHP Combined Range Analysis Composite Algorithm

ZHAO Li¹, LI Zhengguo¹, SU Dengfeng¹, CHEN Banghong¹, TIAN Renjun²

(1. School of Environment and Resources, Southwest University of Science and Technology, Mianyang 621000, Sichuan, China; 2. Sichuan Occupational Safety and Health Association, Chengdu 610012, Sichuan, China)

Abstract: The single application of analytical hierarchy process (AHP) and grey relational analysis (GRA) algorithm is always affected by some subjective factors, leading to great deviation between the obtained evaluation result and the actual result. In view of this problem, a composite algorithm based on an integrated range analysis with GRA and AHP was proposed. Then, a phosphate mine in the southwest China was taken as an example, and this algorithm was adopted to analyze the sensitivity of factors, including gravity, internal friction angle, cohesive force, elastic modulus and Poisson's ratio, to the stability of slope in the Area A. The results show that the sensitivity of those influencing factors to the slope stability in Area A is in the following descending order: internal friction angle, cohesive force, gravity, elastic modulus, Poisson's ratio. It is found that the analysis result is consistent with the actual situation of the mine.

Key words: slope stability; influencing factors; sensitivity; orthogonal test method; grey relational analysis (GRA); analytic hierarchy process (AHP)

露天矿山边坡稳定是矿山生产的先决条件, 矿山边坡稳定性一直是国内外学者研究的重点。对于边坡稳定性影响因素敏感性分析, 过去往往使用单一的方法, 如层次分析法(AHP)、粗糙集和灰色关联分析法(GRA)等。采用 AHP 对边坡稳定性影响因素进行分析时, 其结果受主观影响较大^[1]; 采用 GRA 和熵权法两种客观方法组合, 又有较大的限制条件^[2]; 通过正

交试验法确定坡体安全系数影响大小, 也仅从单一角度进行分析, 难以考虑多因素对边坡的影响, 具有一定局限性^[3]。基于此, 本文提出 GRA-AHP 联合极差分析复合算法, 并以西南某磷矿为例, 在充分考虑边坡实际状态的前提下采用数值模拟方法并结合多个算法优缺点对边坡稳定性影响因素敏感性进行分析, 并对该算法的一致性和可行性进行了验证。

① 收稿日期: 2023-08-25

基金项目: 四川省自然科学基金(青年科学基金项目)(2022NSFSC1089); 西南科技大学博士基金(18zx7124)

作者简介: 赵黎(1998—), 男, 四川阆中人, 硕士研究生, 主要从事矿山安全技术研究。E-mail: wushuangwujia@163.com

通信作者: 粟登峰(1989—), 男, 四川内江人, 博士, 讲师, 主要从事采矿工程的教学与科研工作。E-mail: dengfengcqu@163.com

1 GRA-AHP 联合极差分析复合算法

针对单一分析方法存在的缺陷,提出了在数值模拟实验基础上的 GRA-AHP 联合极差分析复合算法。该方法克服了对边坡稳定性敏感因素分析时存在的主观影响较大、分析方法单一、结果有效性与可行性无法验证等缺点,能得到简洁明了的结果。

1.1 正交试验法

正交试验法是数理统计分析中的常用方法^[4-5]。露天矿山边坡稳定性受多种因素影响,可以采用正交试验法来判断各因素的影响大小。

1.2 灰色关联分析

灰色关联分析(GRA)是一种用于系统分析和决策制定的数学方法^[6]。该方法的流程是:首先确定系统中作为决策属性的主矩阵,即稳定性安全系数矩阵;其次确定影响决策的次矩阵^[7];选择主矩阵时需注意其与次矩阵是否存在内在联系,这种内在联系会对分析结果产生影响^[8]。

1.3 层次分析法

层次分析法(AHP)是定性定量结合的分析方法,是一种系统理论方法^[9]。采用 AHP 进行分析时,首先要将问题进行分级以确定稳定性影响因素集合,将问题分为不同层级以确定不同层级中的影响因素,将相同层级的因素组合在一起进行比较,进而确定目标层、准则层、指标层的结构关系,得出各层的评价矩阵,最终得出不同层级与同层级之间的权重关系^[10]。

1.4 GRA-AHP 联合极差分析复合算法分析流程

GRA-AHP 联合极差分析复合算法通过分析试验得到的原始岩体力学参数,确定正交试验法所需要的样本,设计正交试验方案,再给方案中的每一个样本建立对应的模型,进行数值模拟,计算每一个模型对应的临界状态安全系数;在得到安全系数的基础上,先进行极差分析,确定边坡稳定性影响因素,并运用 GRA 分析边坡稳定敏感性影响因素与边坡稳定性量化值安全系数之间的关系,再运用 AHP 分析边坡稳定性影响因素,得到分析结果。若 AHP 分析结果与 GRA 及极差分析结果存在差异,则重新进行 AHP 分析;极差分析、GRA 与 AHP 结果一致,则得出最终结论。分析流程如图 1 所示。

2 工程实例

2.1 矿山边坡工程地质概况

西南某磷矿位于四川盆地西南,开采矿石以脉石矿物及磷酸盐矿物为主,矿区内顺河谷断层经侵蚀成

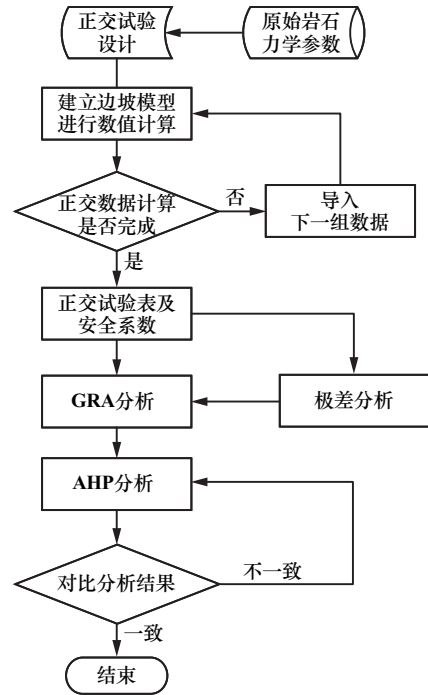


图 1 基于 GRA-AHP 联合极差分析复合算法分析流程

沟,两侧山峰耸立呈山谷地形,南、北两侧存在冲沟,地势较西部低。

矿区最高标高 2 090 m、最低开采标高 1 075 m,矿区内矿层出露最低标高 1 200 m、最高标高 1 550 m,相对高差 350 m。A 区边坡整体坡面角 24°,坡高 240 m,总体倾向 178°,代表性剖面为 I-I' 剖面。矿山生产现状平面图见图 2。

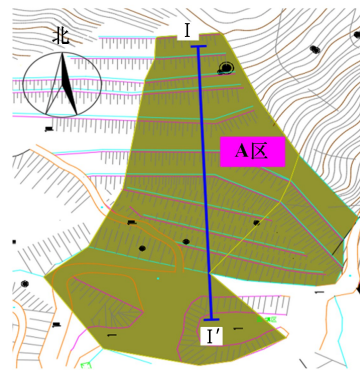


图 2 矿山生产现状平面图

2.2 边坡计算模型

为便于分析边坡实际情况,假设 A 区边坡为一均质边坡,根据采集到的数据和勘探结果,构建边坡模型如图 3 所示。

2.3 数值模拟

通过构建网格化单元,结合材料岩土特性选择本构模型、连续体的连续性、模型计算边界等,得出模型

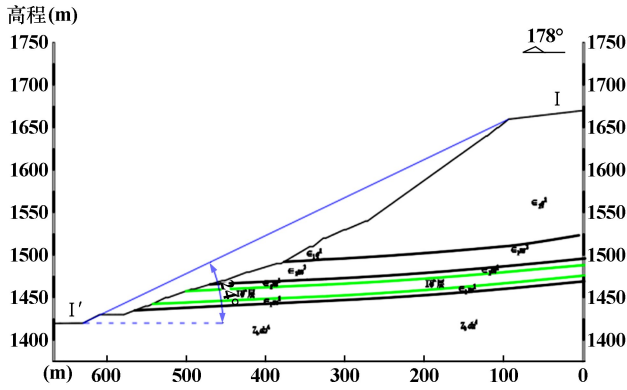


图 3 A 区边坡模型

在相应情况下的相应特征。本文首先通过犀牛软件构建网格,最大网格长度 5 m,选择 Griddle 模型中的四面体,对软弱夹层及坡面等重点关注部位加密后,对实体模型进行自动网格划分,其剖面网格模型如图 4 所示。

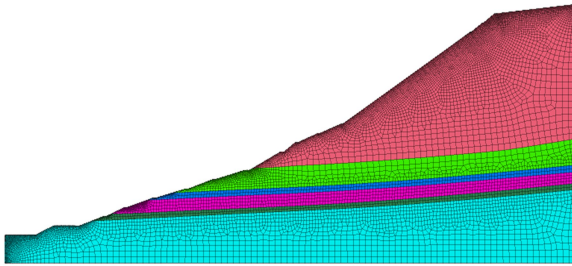


图 4 A 区边坡网格模型

将分析剖面导入 FLAC^{3D} 软件进行强度折减求解安全系数^[11],得到 A 区边坡在数值模拟试验编号 1 的试验模型及边坡稳定性安全系数如图 5 所示。

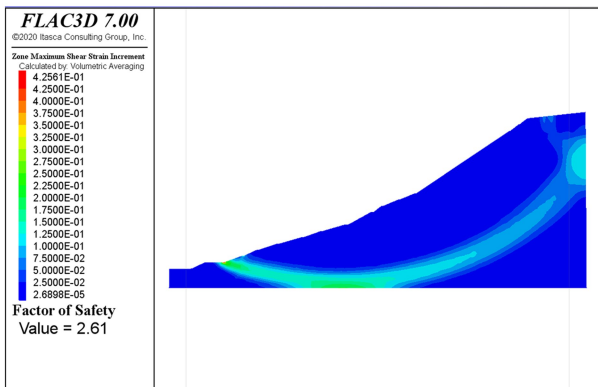


图 5 A 区边坡 1# 试验模型及相应的稳定性分析结果

3 边坡稳定影响因素敏感性分析

3.1 正交试验及极差分析

正交试验各因素取值及水平如表 1 所示。A 区边坡试验选用 L₁₆(4⁵) 正交表,各方案所对应的安全系数

见表 2,极差分析结果见表 3。从表 3 可知,相同条件下,极差值大小顺序为:内摩擦角最大、黏聚力与重度较大、弹性模量与泊松比较小,所以 A 区边坡稳定性影响程度从大到小顺序为:内摩擦角,黏聚力,重度,弹性模量,泊松比。

表 1 A 区边坡稳定性影响因素水平表

水平	重度 $\gamma/(\text{kN} \cdot \text{m}^{-3})$ (因素 A)	黏聚力 C/MPa (因素 B)	内摩擦角 $\varphi/(\text{°})$ (因素 C)	弹性模量 E/GPa (因素 D)	泊松比 μ (因素 E)
1	23.60	0.88	24.58	1.12	0.22
2	26.23	0.98	27.31	1.25	0.25
3	29.14	1.08	30.34	1.39	0.27
4	32.38	1.20	33.72	1.54	0.30

表 2 正交试验所对应的安全系数

试验编号	影响因素					安全系数
	A	B	C	D	E	
1	1	1	1	1	1	2.060
2	1	2	2	2	2	2.150
3	1	3	3	3	3	2.230
4	1	4	4	4	4	2.340
5	2	1	2	3	4	1.996
6	2	2	1	4	3	2.010
7	2	3	4	1	2	2.180
8	2	4	3	2	1	2.180
9	3	1	3	4	2	1.957
10	3	2	4	3	1	2.040
11	3	3	1	2	4	1.957
12	3	4	2	1	3	2.040
13	4	1	4	2	3	1.918
14	4	2	3	1	4	1.902
15	4	3	2	4	1	1.902
16	4	4	1	3	2	1.910

表 3 极差分析结果

极差分析项	A	B	C	D	E
k_1	3.11	2.70	2.60	2.89	2.89
k_2	2.96	2.82	2.78	2.90	2.89
k_3	2.82	2.96	2.99	2.89	2.89
k_4	2.70	3.11	3.23	2.91	2.91
R	0.41	0.42	0.63	0.02	0.01

3.2 GRA 分析

根据式(1)~(4)计算 r_{ij} ,取 r_{ij} 的平均值作为关联系数:

$$x'_{ij} = \frac{x_{ij} - \min x_{ij}}{\max x_{ij} - \min x_{ij}} \quad (1)$$

$$y'_{ij} = \frac{y_{ij} - \min y_{ij}}{\max y_{ij} - \min y_{ij}} \quad (2)$$

$$M_{ij} = |x'_{ij} - y'_{ij}| \quad (3)$$

$$r_{ij} = \frac{\min M_{ij} - \theta \max M_{ij}}{M_{ij} - \theta \max y_{ij}} \quad (4)$$

式中 x_{ij} 、 y_{ij} 分别为主矩阵和次矩阵元素； x'_{ij} 、 y'_{ij} 分别为无量纲化处理后的主、次矩阵元素； M_{ij} 为差异序列矩阵； θ 为分辨率系数^[12]，它可以增大数据之间的差异性，为便于对比， θ 值一般取 0.5。

经计算，得：

$$\bar{r}_{ij} = [0.543 \quad 0.545 \quad 0.597 \quad 0.473 \quad 0.456]$$

结果表明，各影响因素对边坡稳定性的影响敏感性从大到小顺序为：内摩擦角 > 黏聚力 > 重度 > 弹性模量 > 泊松比。

3.3 AHP 分析

对相关文献进行分析，结合本文研究对象，选择边坡安全系数为目标层，选择强度及其他参数为准则层，选择内摩擦角、黏聚力、重度、弹性模量、泊松比为指标层。评价层次如图 6 所示。对不同层级因素进行比较判断的依据见表 4。

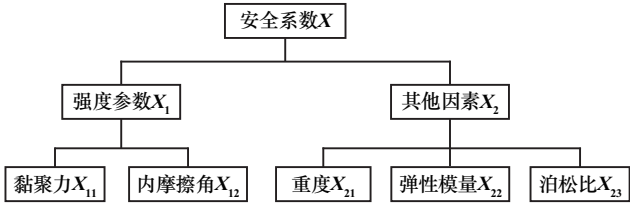


图 6 评价层次图

表 4 评价矩阵分值及其含义

分值	定义
1	i 因素与 j 因素同等风险程度
3	i 因素比 j 因素风险大
5	i 因素明显比 j 因素风险大
倒数	j 因素比 i 因素风险大的程度

构造评价矩阵 X 、 X_1 、 X_2 ：

$$X = \begin{bmatrix} 1 & 3 \\ \frac{1}{3} & 1 \end{bmatrix} \quad (5)$$

$$X_1 = \begin{bmatrix} 1 & \frac{1}{2} \\ 2 & 1 \end{bmatrix} \quad (6)$$

$$X_2 = \begin{bmatrix} 1 & 3 & 3 \\ \frac{1}{3} & 1 & 2 \\ \frac{1}{3} & \frac{1}{2} & 1 \end{bmatrix} \quad (7)$$

确定各因素权重，结果见表 5。

表 5 各影响因素权重

准则层	准则层权重	指标层	指标层权重	组合权重
强度参数 X_1	0.75	黏聚力 X_{11}	0.33	0.25
		内摩擦角 X_{12}	0.66	0.50
		重度 X_{21}	0.59	0.15
其他参数 X_2	0.25	弹性模量 X_{22}	0.25	0.06
		泊松比 X_{23}	0.16	0.04

3.4 结果讨论

将极差分析、GRA 分析和 AHP 分析结果汇总于表 6。结果表明，三种分析方法所得结果一致，A 区边坡稳定性影响因素敏感性由大至小顺序为：内摩擦角，黏聚力，重度，弹性模量，泊松比。由此可见，基于 GRA-AHP 联合极差分析复合算法的边坡稳定性影响因素敏感性分析方法具有一定可靠性。

表 6 A 区边坡各影响因素权重对比

分析方法	各影响因素权重				
	重度	黏聚力	内摩擦角	弹性模量	泊松比
极差分析	0.41	0.42	0.63	0.02	0.01
GRA	0.543	0.545	0.597	0.473	0.456
AHP	0.15	0.25	0.50	0.06	0.04

4 结 论

针对 AHP 和 GRA 单一算法在边坡稳定性影响因素敏感性分析应用过程中受主观影响导致评价结果与实际结果偏差较大的问题，提出了基于 GRA-AHP 联合极差分析复合算法，并以西南某磷矿为例，对边坡稳定性影响因素敏感性进行了分析，得到如下结论：

1) GRA-AHP 联合极差分析复合算法评价结果更科学合理，可为边坡稳定性分析研究与安全管理工作提供依据。

2) 西南某磷矿 A 区边坡稳定性影响因素敏感性由大至小依次为：内摩擦角，黏聚力，重度，弹性模量，泊松比。

参考文献：

[1] 周苏华,邢静康,张运强,等. 基于模糊层次分析法的预应力锚索加固顺层边坡稳定性评价[J]. 安全与环境学报, 2020,20(5): 1695-1704.

[2] 冯忠居,朱彦名,高雪池,等. 基于熵权-灰关联法的岩质开挖边坡安全评价模型[J]. 交通运输工程学报, 2020,20(2):55-65.

[3] 张俊荣,陈保国,易贤龙,等. 两侧水位变化时路堤渗流特征及稳定性分析[J]. 公路交通科技, 2017,34(2):35-41.

[4] 胡接枝. 知不拉铜矿露天边坡稳定性影响因素敏感性分析[J]. 中国安全生产科学技术, 2022,18(增刊1):73-78.

3.2 护顶矿柱涌水量预测

分别计算无混凝土防渗层和构筑 1.0 m 厚混凝土防渗层条件下护顶矿柱渗流量,结果表明,矿山在 50 年一遇强降雨条件下,采场内积水深度 5 m 时,无防渗措施条件下,露天坑底护顶矿柱的渗流量为 831.0 m³/d,渗流途径为通过断裂构造区域渗流(如图 8 所示),如果发生突水,不利于护顶矿柱和井下作业安全。

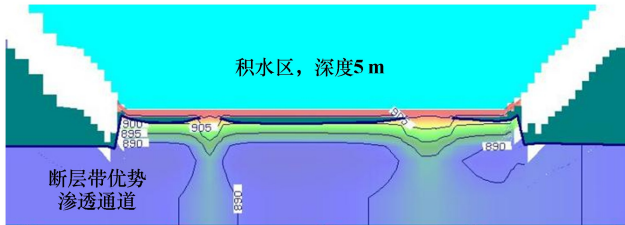


图 8 无防渗措施条件下 A-A 剖面渗流场云图

坑底铺设 1.0 m 厚混凝土防渗层后,采场积水渗流量急剧减少,采场内积水深度 5 m 时,采场内积水通过露天坑底护顶矿柱的渗流量为 42.0 m³/d,未发现集中渗流区域。因此,采用混凝土防渗是防止露天坑底断层渗漏突水的有效措施。

4 结 论

1) 护顶矿柱的隔水性能一方面受地层天然构造和渗透性影响,另一方面受采矿人为活动导致的岩体损伤影响。对于攀枝花铁矿,断裂构造是露天坑积水向井下采场渗漏的主要途径。

2) 在 50 年一遇暴雨条件下,采场贮排平衡分析结果表明,采场最大积水深度约 5 m,极限平衡分析结

果表明,护顶矿柱处于稳定状态,但应特别注意护顶矿柱的防渗性能,防止突水事故。

3) 无防渗措施时,护顶矿柱渗流量为 831.0 m³/d;露天坑底铺设 1.0 m 厚混凝土防渗层时,护顶矿柱渗流量仅 42.0 m³/d。针对护顶矿柱内断裂构造设置防渗层可有效提高护顶矿柱防渗性能。

参考文献:

- [1] 徐 帅,安 龙,李元辉,等. 基于多方法联合的露天转地下境界矿柱厚度优化[J]. 东北大学学报(自然科学版), 2018,39(8): 1181-1186.
- [2] 南世卿. 露天转地下开采境界顶柱稳定性分析及采矿技术研究[D]. 沈阳:东北大学, 2008.
- [3] 姜安民,董彦辰,江学良,等. 露天转地下开采引起露天采场边坡垮塌数值模拟研究[J]. 矿冶工程, 2022,42(3):14-17.
- [4] 李小双,罗 浪,王运敏,等. 露天转地下开采覆岩采动响应的坡角影响效应研究[J]. 矿冶工程, 2021,41(4):33-37.
- [5] Carter T G. An update on the scaled span concept for dimensioning surface crown pillars for new or abandoned mine workings[C]//4th North American Rock Mechanics Symposium. 2000:465-472.
- [6] Rocscience Inc. Crown Pillar Stability Analysis Theory Manual[R]. Canada: Rocscience Inc, 2019.
- [7] 四川省地质矿产勘查开发局一〇六地质队. 四川省攀枝花市东区攀枝花矿区钒钛磁铁矿延伸勘探报告[R]. 2019.
- [8] 中冶北方工程技术有限公司. 攀钢集团矿业有限公司攀枝花铁矿朱兰采场露天与地下协同开采关键技术研究[R]. 2022.
- [9] 任建平. 会泽铅锌矿采场爆破及临时支护技术应用研究[D]. 长沙:中南大学, 2010.
- [10] 孙鹏昌,卢文波,杨招伟,等. 白鹤滩坝肩边坡开挖爆破损伤预测研究[J]. 水力发电学报, 2022,41(10):30-41.

引用本文: 张良兵,冷建勇,张 妨,等. 露天转地下充填法开采护顶矿柱防渗性研究[J]. 矿冶工程, 2024,44(1):35-38.

(上接第 34 页)

- [5] 李广贺,杨晓旭,王 东,等. 基于正交试验的含弱层顺倾软岩边坡三维稳定性分析[J]. 安全与环境学报, 2022,22(3):1332-1338.
- [6] 郭 勇,阳富强. 基于博弈论组合赋权的硫化矿山炸药自爆危险性 GRA-TOPSIS 评价模型[J]. 矿冶工程, 2022,42(6):13-17.
- [7] 廖少波,肖华波,刘云鹏. 基于正交数值试验的倾倒地坡稳定性影响因素分析[J]. 地下空间与工程学报, 2019,15(增刊 2):1003-1008.
- [8] 王雪辉,刘 卫. 基于总位移指标的反倾岩质边坡倾倒地形影响因素敏感性分析[J]. 地质与勘探, 2019,55(5):1268-1275.
- [9] 刘 超,祁赞朴,宋章伦,等. 基于组合赋权法和响应面法的竖井

支护参数优化研究[J]. 矿冶工程, 2023,43(2):16-20.

- [10] 和大钊,胡 斌,姚文敏,等. 基于块体化程度和云模型的露天矿边坡稳定性分级评价方法[J]. 矿冶工程, 2017,37(4):6-10.
- [11] 方庆红,胡 斌,盛建龙,等. 含软弱夹层露天矿高边坡台阶宽度及台阶坡面角协同优化研究[J]. 矿冶工程, 2021,41(5):5-9.
- [12] 聂兵其,汤明高,邵 山,等. 基于灰色关联法的涉水边坡稳定性影响因素敏感性分析[J]. 长江科学院院报, 2019,36(1):123-126.

引用本文: 赵 黎,李正国,粟登峰,等. 基于 GRA-AHP 联合极差分析复合算法的边坡稳定性影响因素敏感性分析[J]. 矿冶工程, 2024,44(1): 31-34.